EAJ 報告書 2026-03

「新たなニーズに応える
電力・エネルギー・社会システムへの提言
ー変革のポテンシャルを考えるー」

令和8年（2026年）8月

公益社団法人日本工学アカデミー
「社会、産業、人々の生活の変容を支える
電力システムの在り方」プロジェクト
（リーダー：荻本　和彦）

2026 年 8 月 27 日

公益社団法人日本工学アカデミー

日本工学アカデミーは、工学・科学技術全般の発展に寄与する目的で設立された産学官の指導的技術者を会員とする団体です。会員の豊かな経験や知識、幅広いネットワークを活用したプロジェクトチームを中心に、広く会員外からの協力も得て、調査提言活動を進めています。その成果をまとめ、社会が目指すべき方向性に関して、官公庁、立法府、産業界、学会、研究機関等に先導的、創造的な施策を提言し、社会実装を目指します。

電力システムは、発電、送配電、需要、データ、市場、制度といった複数の要素が相互に関係する複雑なシステムであり、これらを個別に最適化するだけでは全体最適は達成されません。本報告書**「新たなニーズに応える電力・エネルギー・社会システムへの提言　ー変革のポテンシャルを考えるー」**では、この社会課題を「技術不足」に加え「統合設計（Integrated System Design）の不足」の問題と捉え、原子力、火力、再生可能エネルギーといった個別電源の優劣や選択（What）を論じるのではなく、課題をエビデンスに基づき総合的に検討し、それら多様な電源および需要側リソースをいかに統合し、変化し続ける社会をどのような統合原理に基づいて設計し、継続的に改善していくか、に焦点を当て、その基本的な考え方と、中長期のアクションプラン、政策提言として整理しました。

今般、本報告書の原案がまとめられ、政策提言委員会での査読を受け、理事会での審査を経て、最終版を確定しましたので、日本工学アカデミーとしての発出を理事会で決めました。広くご活用いただくことを期待します。

本提言は、公益社団法人日本工学アカデミー『社会、産業、人々の生活の変容を支える電力システムの在り方』プロジェクトにおける検討の成果を公表するものである。

公益社団法人日本工学アカデミー
『新たなニーズに応える電力・エネルギー・社会システムへの提言
－変革のポテンシャルを考える－』プロジェクトのプロジェクト構成員

プロジェクトマネージャー

荻本　和彦	東京大学生産技術研究所　特任教授

討議・執筆委員

飯岡　大輔	中部大学　大学院工学研究科　教授
石井　英雄	早稲田大学 スマート社会技術融合研究機構　上級研究員（研究院教授）
岩船　由美子	東京大学　生産技術研究所　教授
江村　克己	福島国際研究教育機構（F-REI）　理事
大関　崇	産業技術総合研究所　太陽光システムチーム　研究チーム長
河辺　賢一	東京科学大学　工学院電気電子系　准教授
小宮山　涼一	東京大学　大学院工学系研究科　教授
紺谷　怜央	株式会社日立パワーソリューションズ　技師
杉山　昌広	東京大学　未来ビジョン研究センター　教授
辻　隆男	横浜国立大学　大学院工学研究院　教授
中島　達人	東京都市大学　理工学部　教授
馬場　旬平	東京大学　大学院新領域創成科学研究科　教授
原　亮一	北海道大学　情報科学研究院　准教授
山口　順之	東京理科大学　工学部　電気工学科　教授
山口　容平	大阪大学　大学院工学研究科　准教授
山本　敏之	関西電力送配電株式会社　企画部長（執筆当時。現、関西電力株式会社　イノベーション推進本部　副本部長）
芳澤　信哉	大阪大学大学院工学研究科　環境エネルギー工学専攻　准教授
渡邊　裕美子	株式会社 Looop　戦略本部 GX 推進部　部長

閲読委員

浅野　浩志	岐阜大学　高等研究院　地方創生エネルギーシステム研究センター特任教授／東京科学大学　総合研究院　ゼロカーボンエネルギー研究所　特任教授
五十嵐　仁一	ENEOS 総研株式会社　顧問
石亀　篤司	大阪公立大学　大学院工学研究科　教授
伊藤　一秀	九州大学　総合理工学研究院　教授
井上　俊雄	富山大学　工学部　北陸電力共研講座　客員教授

岡本　浩	東京電力ホールディングス株式会社　上席フェロー
加藤　丈佳	名古屋大学　未来材料・システム研究所　教授
北　裕幸	北海道大学　情報科学研究院　教授
下田　吉之	大阪大学　大学院工学研究科　教授
杉山　正和	東京大学　先端科学技術研究センター　所長
辻　健	東京大学　大学院工学系研究科　教授
戸田　直樹	東京電力ホールディングス株式会社　経営技術戦略研究所　経営戦略調査室チーフエコノミスト
中澤　治久	火力原子力発電技術協会　エンジニアリングアドバイザー
奈良　宏一	茨城大学　名誉教授／福島工業高等専門学校名誉教授（元校長）
林　泰弘	早稲田大学　理工学術院　　教授
藤井　康正	東京大学　大学院工学系研究科　教授
北條　昌秀	徳島大学　大学院社会産業理工学研究部　教授
本庄　暢之	株式会社ジェイウインドサービス　取締役　最高技術責任者
矢部　彰	新エネルギー・産業技術総合開発機構　TSC フェロー
山口　博	公益財団法人　東電記念財団理事長／公益社団法人　日本電気技術者協会会長（関電工　社友）
餘利野　直人	広島大学　副学長・大学院　先進理工系科学研究科長

顧問

蘆立　修一	公益財団法人　東電記念財団　常務理事
横山　明彦	東京大学　名誉教授

PO

中村　道治	公益社団法人　日本工学アカデミー　顧問／JST 名誉理事長

プロジェクト協力

鈴木　和夫	HSE 株式会社　技術顧問

事務局

城石　芳博	公益社団法人　日本工学アカデミー　代表理事・専務理事
中村　亮二	国立研究開発法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
鈴木　康史	国立研究開発法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
馬場　智義	国立研究開発法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
吉井　政之	国立研究開発法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
杉田　幸弘	国立研究開発法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

目次

目次 iii
コラム目次 vi
概要 1
序文 3
第 1 章　はじめに 4
　1.1　背景と目的 4
　1.2 プロジェクト運営と報告書作成 5
　1.3 本報告書の構成・読み方 5
第 2 章　電力・エネルギーを巡る構造変化 9
　2.1 技術の進展 9
　2.2 需要・供給の変化 11
　2.3 デジタル化の進展 14
　2.4 資源制約と地政学リスク 15
　2.5 社会システム化の進展 16
　本章のまとめ：不確実性と部門間の連動の時代への移行 19
　表1　キー技術 21
第 3 章　技術・システム技術の課題 29
　3.1 発電技術の進展と課題 29
　3.2 送配電技術の進展と制約 31
　3.3 需要側リソースとシステム運用 33
　3.4 デジタル技術とシステム解析 34
　本章のまとめ：個別の技術ではなく統合が課題 37
第 4 章　制度の構造的課題 38
　4.1 電力市場の変容と価格シグナルの歪み 38
　4.2 長期投資と短期市場の不整合 39
　4.3 分断を乗り越えた全体最適 41
　4.4 市場と政策の役割分担の再定義 43
　本章のまとめ：制度全体の本来の目的に立ち返った再設計 44
第 5 章　意思決定・データ・ガバナンスの課題 46
　5.1 意思決定構造の分断 46
　5.2 EBPM／EIPM の実装 46
　5.3 データ基盤の分散と未統合 47
　5.4 全体像の継続的議論と責任主体 48
　本章のまとめ：統合的な変革を支える設計の枠組みと人材育成 50
第 6 章　統合設計の視点 51
　6.1 Strategy：多元的ドライバーの統合 51

6.2 Integrity：多面的価値の統合と透明性の確保 53
6.3 Leadership：意思決定と司令塔機能 55
6.4 Knowledge：データ、ツール、現場知など知識基盤 56
本章のまとめ：統合設計としての S-I-L-K の意義 58
第 7 章　提言 60
7.1　提言：中長期のアクションプラン 60
7.2　提言の実施の枠組み 71
7.3　今後の課題 72

おわりに　― AI 時代の知の公共基盤に向けて　― 74

用語集 75
参考文献リスト 97
参考 1　活動記録：会合とシンポジウム 102
参考 2　議事録 103
第 1 回会合 103
クローズドワークショップ 105
第 2 回会合 106
第 3 回会合 107
第 4 回会合 108
第 5 回会合 109
第 6 回会合 111
第 7 回会合 112
第 8 回会合 114
第9回会合 115
第 10 回会合 116
参考 3　発言録要旨 118
第 1 回会合要旨 118
第 2 回会合要旨 121
第 3 回会合要旨 123
第 4 回会合要旨 127
第 5 回会合要旨 132
中間シンポジウム要旨 134
第 6 回会合要旨 137
第 7 回会合要旨 139
第 8 回会合要旨 143
第 9 回会合要旨 147
第 10 回会合要旨 151
後半シンポジウム要旨 160

提言シンポジウム要旨 163
参考 4 発言録 168
第 1 回会合 168
第 2 回会合 186
第 3 回会合 202
第 4 回会合 221
第 5 回会合 243
中間シンポジウム 261
第 6 回会合 302
第 7 回会合 318
第 8 回会合 337
第 9 回会合 352
第 10 回会合 370
後半シンポジウム 384
提言シンポジウム 416

コラム目次

コラム 2-1 電力システムの将来シナリオ － 何が不確実で、何が頑健か －..... 10
コラム 2-2 配電網の課題と可能性..... 11
コラム 2-3 従来電源の役割 13
コラム 2-4 小売りの役割の拡大の可能性..... 13
コラム 2-5 エネルギー自給率 100％を実現するエネルギーシステム..... 14
コラム 2-6 電力×〇〇 17
コラム 2-7 電力×〇〇: 社会インフラとしての電力システムの価値再考 18
コラム 2-8 再生可能エネルギー×次世代モビリティ連成..... 18
コラム 3-1 風力発電の制御機能の活用 30
コラム 3-2 送電網の運用・設備維持を含めた新技術 32
コラム 3-3 電力システムのセル化と選択的アイランディング 33
コラム 3-4 電力系統解析の体系と動向 35
コラム 3-5 電力系統安定運用のための事故発生時における過渡解析と AI 応用 36
コラム 4-1 IEA が指摘する電力市場の不備 40
コラム 4-2 分散型電源の出力制御機能を活用するための市場制度 42
コラム 4-3 同時市場における調整力確保と送電線混雑 42
コラム 5-1 EBPM と EIPM 47
コラム 5-2 データセンター（大規模需要）と分散型エネルギー資源の統合と送配電コスト
..... 49
コラム 6-1 風力発電事業における代理モデル活用の一例..... 52
コラム 6-2 電力×交通..... 53
コラム 6-3 時間で変化するノード別電力価格の近似..... 54
コラム 6-4 電力解析専門家の育成ステップ..... 57
コラム 7-1 分散型資源のみで電力システムを構築可能か 62
コラム 7-2 発電部門は競争領域のままでよいか..... 63
コラム 7-3 変質する物理的制約の理解が次世代の意思決定を支える..... 65
コラム 7-4 提言のつくり方と、受け止める側の能力..... 66
コラム 7-5 変わる電力システムを支える人材とその育成..... 68
コラム 7-6 知識学習循環、単なる蓄積・共有を超えた継続的な見直し..... 70

コラム執筆者（敬称略）

浅野　浩志
安東　弘泰
井上　俊雄
江村　克己
荻本　和彦
河辺　賢一
小宮山　涼一
紺谷　怜央
杉山　昌広
辻　健
戸田　直樹
奈良　宏一
藤井　康正
山口　博
山本　敏之
芳澤　信哉
渡邊　裕美子

概要

本プロジェクトは、地球環境問題への対応、GX（Green Transformation）、再生可能エネルギーの大量導入、経済安全保障、自然災害の激甚化などを背景として電力・エネルギーシステムの将来に向けた今後の取り組みについての提言の策定を目的に 2023 年11月に設置され、第 1 回から第 10 回会合、中間シンポジウム、後半シンポジウムを通じて、将来の電力・エネルギーシステムの在り方について議論を行い、2026 年 10 月に報告書をとりまとめた。

当初の議論は発電、送配電、需要、運用、市場など個別の技術と制度を中心に行われたが、議論を重ねる中で、電力システムを取り巻く前提条件そのものが大きく変化していることが明らかとなった。電力システム内でのインバータ連系設備の増加、需要側資源の拡大、データセンターなど大規模需要の増加、デジタル化の進展、地政学リスクや経済安全保障など、多様な構造変化が相互に影響し合い、従来の延長線上で電力システムを設計・運営することが難しい時代へ移行しつつある。

本プロジェクトでは、発電、送配電、需要、市場、制度、運用、データ、人材育成など多様な分野について議論を行った。その結果、多くの課題は個別技術や個別制度の問題ではなく、それらを接続し全体最適を実現する「統合設計（Integrated System Design）」の問題として現れていることが共有された。問題の本質は「技術不足」に加え、「統合設計不足」にあるとの認識が、本プロジェクトを通じて共有された。

さらに議論を進める中で、統合設計を支えるべき基盤にも課題があることが明らかとなった。我が国には高度な技術、運用ノウハウ、現場知が蓄積されている。一方、それらを分野横断して結び付け、継続的にレビューし改善・刷新しながら政策形成や社会実装へ反映する人材、知識基盤、意思決定プロセスは十分ではないとの認識が共有された。このため、本プロジェクトでは、「社会がどのように知識を形成・共有し、その知識を政策や制度へ反映していくか」という視点を重視した。

こうした議論を踏まえ、第 10 回会合では、電力・エネルギーシステムの統合設計の視点として、Strategy、Integrity、Leadership、Knowledge（S-I-L-K）を整理した。Strategy は多様な構造変化を俯瞰して将来像を描く視点、Integrity は S+3E[1]をはじめとする多面的価値を統合的に設計・評価する視点、Leadership は多様な主体が継続的に意思決定を行う仕組み、Knowledge はデータ・解析ツール・知識共有を支える知識基盤とそれを具現する人材を意味する。S-I-L-K は、個別分野を統合し、不確実性の高い時代において社会全体を設計・運営するための基本的な視点である。

[1] S+3E: Safety, Energy Security, Economy, Environment

本報告書では、この考え方に基づき、次の 6 つの中長期アクションプランを提言した。

（提言 1）　集中型資源と分散型資源が協調する需給構造への転換
（提言 2）　S+3E を実現する政策設計・市場設計・システム運用の継続的改革
（提言 3）　電力・エネルギーの枠を超えた社会インフラ移行の統合設計
（提言 4）　中長期視点での継続的意思決定プロセスの構築
（提言 5）　知識基盤を活用できる専門性と俯瞰性を備えた人材の育成
（提言 6）　知識基盤の整備と継続的進化

従来の議論は、再生可能エネルギーの出力変動性と出力制御、需給調整、送電制約といった個別技術課題に焦点が当てられてきた。しかし、新たな環境変化に対応するための技術的ポテンシャルは既に相当程度存在しており、それらの導入を阻害している主因は、技術不足に加え制度・市場・運用・意思決定構造の不整合や、それらを支える人材や知識基盤の不足にある。

すなわち、現在の課題の本質は「技術不足」に加え「統合設計とそれを支える人材、知識基盤の不足」にある。電力システムは、発電、送配電、需要、データ、市場、制度といった複数の要素が相互に関係する複雑なシステムであり、これらを個別に最適化するだけでは全体最適は達成されない。

本プロジェクトでは、この問題を「統合設計」と捉え、本報告書およびその提言では、原子力、火力、再生可能エネルギーといった個別電源の優劣や選択（What）を論じるのではなく、それら多様な電源および需要側リソースをいかに統合し、電力・エネルギーを超えたシステムとして最適に機能させるか（How）に焦点を当てた。

本プロジェクトが到達した結論は、「どの技術を導入するか」という個別最適の問題ではなく、「変化し続ける社会をどのような統合原理に基づいて設計し、継続的に改善していくか」という点にある。その実現には、技術、制度、市場の改革に加え、データ・解析ツール・知識共有から成る知識基盤、人材育成を整備することが重要である。

本報告書は、統合設計の実現に向けた出発点であり、その基本的な考え方と、中長期のアクションプランを提言するものである。

なお、本報告書が提示する視点、提言とその実施の枠組みは、特定のエネルギーミックスや個別の技術選択に依存しない。将来の電源構成に拘わらず、需給の統合、送配電網の整備、データ基盤の構築、運用の高度化、意思決定の高度化といった課題は共通して存在する。本報告書は、その共通課題に対する統合設計の視点と中長期のアクションプランとしての提言を組み合わせた長期 PDCA の枠組みを提示するものである。

序文

～問題は技術の不足に加えて統合設計の不足であり、その背景には意思決定の課題や知形成基盤の不足がある～

地球環境問題への対応、再生可能エネルギーの拡大、AI の急速な発展、データセンターなど大規模需要の増加、経済安全保障や災害への対応の必要性などにより、電力・エネルギーシステムを取り巻く環境は大きく変化している。これまでの電力システムは、大規模集中型発電と供給側主導を前提として発展してきた。しかし現在は、再生可能エネルギー、蓄電池、EV、大規模需要、AI などが相互に接続する、より複雑な社会システムへ移行しつつある。現在必要なのは、新たな個別技術の開発に加え、制度設計、系統運用、需要活用を一体として考える視点も不可欠となっている。既に存在する技術を含め、エネルギー、データ活用、制度、市場まで含めて統合的に設計し、時代の要請に応えることが必要である。

そこで EAJ では 2023 年 11 月から「社会、産業、人々の生活の変容を支える電力システムの在り方」プロジェクトを設置し、40 名を超える産学官の専門家が参加し、電力システムの将来像について議論を行った。その結果共有された最も重要な認識は、問題の本質が「技術不足」に加え、「統合設計の不足」であるという点でありその原因としては意思決定に必要な知識基盤と人材育成の課題が指摘された。

一方で、議論を進める中で、もう一つの課題が浮かび上がった。日本には、高度な技術力、運用力、現場知が存在する。しかし、それらを分野横断的に接続し、継続的にレビューし、改善・刷新しつつ、政策形成や社会実装へ結び付ける仕組みは十分とは言えない。電力・エネルギーを取り巻く環境が急速に変化する時代においては、固定的な最適解を一度示せば済むわけではない。不断に学び、検証し、改善・刷新する仕組みそのものが重要になる。

本プロジェクトでは、新たな計測、データ・モデルの共有、EIPM（Evidence Informed Policy Making）、継続的レビューなどについても議論が行われた。これらは一見すると個別論点に見えるが、実際には、「社会がどのように知識を積み重ねながら未来を設計するか」という、本質的な課題へつながる。今後必要となるのは、電力・エネルギーインフラの高度化にとどまらず、社会全体で知を共有し、学び、検証し、改善・刷新し続ける「知識基盤」とそこから育つ「人材」による意思決定に基づく社会インフラまでの統合設計である。

本報告書では、研究会で共有された知見を踏まえ、電力・エネルギーシステムの将来像と、その実現に向けた需給構造・制度・社会システムの統合設計、さらにそれを支える意思決定プロセス、知識基盤、人材育成について体系的に整理し、将来に向けた中長期アクションプランとして6つの提言を取りまとめた。

第 1 章　はじめに

1.1 背景と目的

電力・エネルギーは、国民生活、産業活動、さらには国家安全保障を支える最も基礎的な社会インフラである。その安定供給は長らく当然の前提とされてきたが、近年、この前提は大きく揺らぎつつある。地球環境問題への対応、再生可能エネルギーの導入拡大、電化の進展、AI の急速な発展、データセンター需要の急増、そして地政学的リスクの顕在化や自然災害の頻発など、複数の構造的変化の要因が同時に進行し、電力・エネルギーシステムは歴史的な転換期に直面している。

従来の電力システムは、集中型の大規模発電所を基盤とし供給側が需要に応じて出力を調整する、供給側が主導する需給構造であった。この構造は、電源が比較的安定し、需要が能動的ではなく、発電コストが総コストにおいて支配的な時代では合理的であった。しかし現在では、分散型電源の拡大、需要の柔軟化、デジタル技術の進展により、この前提は根本から変化している。

特に再生可能エネルギーの導入拡大は、電力システムに大きな影響を与えている。太陽光発電や風力発電は、環境負荷の低減に寄与する一方で、出力が自然条件に依存するため、従来のような供給側主導の需給調整が困難となる。また、これらの電源は地理的に分散しており、系統運用や送配電網の在り方にも影響を及ぼしている。このような変化に対し火力発電の大きな割合を前提とした自由化や市場制度は変更を迫られている。

一方で、需要の変化も進んでいる。電気自動車やヒートポンプ、蓄電池の普及により、需要は受け身の消費主体ではなく、能動的な調整力として機能し得る存在へと変化している。このような需要の変化は、電力システムの経済性や安定性の向上に寄与する可能性を持つが、その活用は十分に進んでいない。

さらに、デジタル化の進展により、電力システムはデータ駆動型の運用が可能となっている。スマートメーターや IoT 機器から得られるデータを活用することで、需給の可視化や予測、最適制御が可能となる。しかし、これらのデータは分散しており、統合的に活用するための制度や基盤は十分に整備されていない。

加えて、近年の国際情勢の変化により、エネルギー安全保障の重要性が再認識されている。化石燃料の供給不足や価格変動は、電力・エネルギーシステムに直接的な影響を及ぼす。また、再生可能エネルギー電源や蓄電池の製造に必要な資源についても、特定地域への依存が課題となっている。電力・エネルギーは国内問題にとどまらず、国際的なサプライチェーンや安全保障と密接に関連している。

本プロジェクトでは、このように取り巻く環境が大きく変化する中で、電力・エネルギーシステムの将来に向けた今後の取り組みについての提言の策定を目的として実施された。

1.2 プロジェクト運営と報告書作成

本プロジェクトでは、第 1 回から第 10 回会合、中間シンポジウムおよび後半シンポジウムを通じて、多様な専門分野の有識者による講演と討議を実施した。第 1 回から第 9 回の会合では、電力・エネルギー分野の多様な専門家が参加し、技術、制度、市場、社会、国際動向、人材育成といった観点から議論を重ね、第 10 回の会合では、それまでの議論を踏まえ、電力システム変革を駆動する要因（ドライバー）と戦略、意思決定の在り方を俯瞰的に整理し、統合的な視点である S-I-L-K を整理した。

会合、シンポジウムの企画・運営にあたっては、主査、委員、プロジェクト顧問、モデレータ等が連携しながら論点設定および登壇者選定を行い、各回で重点的に議論すべきテーマを整理した。また、発電、送配電、需要、運用、市場、政策、人材育成などの個別分野に加え、それらを横断する論点についても議論を行った。毎回の議論においては、「キー技術とキーシステム技術」と Nature Energy の報告書 [2]や JST-CRDS の報告書 [3]を含め参考文献も整理した。

本プロジェクトでは、電力・エネルギーシステムの将来像を議論するのみならず、AI 時代における知識の形成や共有の在り方についても試行的な取り組みを行った。報告書作成では、10 回の会合と各シンポジウムの発言録、講演資料等を基礎資料とし、発言録に基づく発言要旨作成および論点整理を実施した。その過程では、生成 AI を要旨作成、論点抽出、構造化整理のツールとして活用した。[4]その上で、報告書本体の構成・作成・最終確認はプロジェクトメンバーと事務局が実施した。

1.3 本報告書の構成・読み方

1.3.1 本報告書の構成

本報告書では、第 2 章から第 6 章に記載した第 1 回～第 10 回会合、中間シンポジウム、後半シンポジウム、提言報告シンポジウムにおける議論に基づき、中長期に成果を求めるアクションプランを提言する。本報告書は、本文、用語・概念集、参考文献リスト、議事録、発言録要旨及び発言録から構成され、議論の背景から提言に至る議論の経緯を理解できる構成としている。本文では第 2 章において構造変化の整理を行い、第 3 章から第 5 章で技術、制度、意思決定の課題を分析し、第 6 章において統合設計の視点を提示し、第 7 章において中長期のアクションプランとしての提言、その実施の枠組みと今後の課題について述べている。

第 2～5 章　　:10 回の会合と 2 回のシンポジウムの要旨に基づく知見

---

[2] Informed investments in clean energy technologies; https://www.nature.com/articles/s41560-025-01867-w

[3] CRDS-FY2025-RR-09「エネルギートランジション促進の先行政策事例と日本への適合に向けた方向性」（2026/01）; https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2025-RR-09.html

[4] 生成 AI による創作や過度な解釈の混入を避けるため、「発言録忠実化の原則」「暗黙因果補完の禁止」「発言へのトレーサビリティ確保」等の運用ルールを整備し、各会合、シンポジウムで実際に議論された内容との整合性を確保した。

第 6 章　　:知見の体系的整理と統合設計の視点 S-I-L-K

第 7 章　　:プロジェクトとしての提言

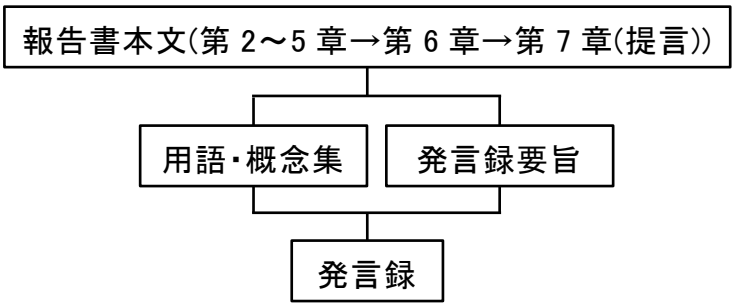
(付録)

参考 1 活動記録、参考 2 議事録

参考 3 発言録要旨　:発言録に基づく各回の議論の要旨

参考 4 発言録　:議論の一次情報としての各討議会、シンポジウムの発言録

用語・概念集



本報告書は、本文、提言、用語・概念集、発言録要旨及び発言録を相互に関連付けることで、10 回の討議会と 3 回のシンポジウムの議論の内容から提言までを段階的に示す構成とした。

1.3.2 本報告書の読み方

本報告書では、第 2 章から第 6 章までの分析を踏まえ、第 7 章において 6 つの提言を整理した。これらの提言は、社会、産業、人々の生活の変容を支える電力システムの在り方を示すとともに、電力・エネルギーの枠を超えた社会インフラの実現に向け、下記の提言を行った。

（提言 1） 集中型資源と分散型資源が協調する需給構造への転換

（提言 2） S+3E を実現する政策設計・市場設計・システム運用の継続的改革

（提言 3） 電力・エネルギーの枠を超えた社会インフラ移行の統合設計

（提言 4） 中長期視点での継続的意思決定プロセスの構築

（提言 5） 知識基盤を活用できる専門性と俯瞰性を備えた人材の育成

（提言 6） 知識基盤の整備と継続的進化

「6 つの提言」が目指す姿は、下図に示すように、社会全体で知を共有し、学び、検証し、改善・刷新しそれが意思決定に反映され、その意思決定の積み重ねにより電力・エネルギーシステム・社会の需給構造、制度（政策、市場、システム運用）、社会インフラの統合設計が進化し続ける実践的な中長期に継続的取り組みである。

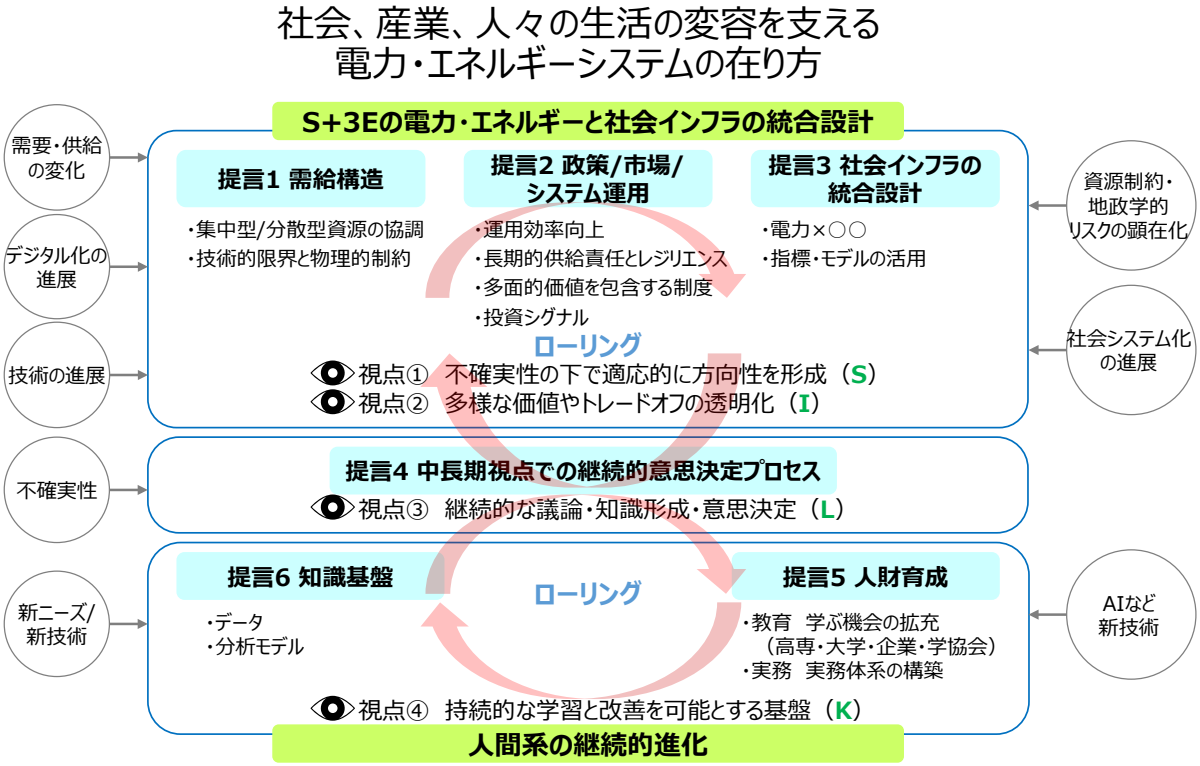


図 電力・エネルギー・社会インフラの統合設計と人材育成、知識基盤の整備・進化のための ロバスト長期 PDCA の二つの環

本報告書では、読者が関心のある事項や提言の根拠へ効率的に到達できるよう、各提言項目に対し、主要解説の節、代表用語、関連する各会合とシンポを Knowledge Navigation としてまとめた。

表　Knowledge Navigation

提言	主要解説	代表用語	関連する会合とシンポ
(提言 1)集中型資源と分散型資源が協調する需給構造への転換	3 章	集中電源/資源、分散資源、DER、DR、需給一体化、柔軟性	第 2 回、第 6 回、中間シンポ
(提言 2)S+3E を実現する政策設計・市場設計・システム運用の継続的改革	4 章	柔軟性、レジリエンス、市場設計、需給調整市場、リアルタイム市場	第 5 回、第 8 回、第 10 回
(提言 3)電力・エネルギーの枠を超えた社会インフラ移行の統合設計	5 章	EIPM、Knowledge Infrastructure、データ基盤、データ共有、AI	第 9 回、第 10 回、後半シンポ
(提言 4)中長期視点での継続的意思決定プロセスの構築	3 章・5 章横断	統合設計、社会システム、セクターカップリング、需給一体化	第 7 回、第 10 回、後半シンポ
(提言 5)知識基盤を活用できる専門性と俯瞰性を備えた人材の育成	6 章	人材育成、教育、分野横断、共創、Dialogue	中間シンポ、後半シンポ、第 10 回
(提言 6)知識基盤の整備と継続的進化	5 章横断	Leadership、意思決定、人材、ガバナンス、Knowledge Navigation	第 1 回、第 9 回、第 10 回

読者は、提言、報告書本文、用語・概念集及び発言録要旨を相互に関連付け、必要な知識へ効率的に到達できる。本報告書については、読者の関心や目的に応じて、以下の読み方を推奨する。

- 全体像を把握したい読者
  概要 → 本章 → 各章節 → 提言
- 特定テーマを深く理解したい読者
  用語・概念集 → 主要解説節 → 発言録要旨 → 発言録
- 提言の根拠を確認したい読者
  提言 → 関連章節 → 発言録要旨 → 発言録

第 2 章　電力・エネルギーを巡る構造変化

2.1 技術の進展

電力機器、電力システム運用・技術、IT、更には AI と、電力分野においては多様な技術の進展、革新が続き、今後もこの状況は継続するという認識が共有された。毎回の講演の資料として、キー技術、キーシステム技術を整理してきており、これは表 1 に示す通りである。

本プロジェクトを通じて繰り返し議論されたのは、電力システムを支えてきた技術的な前提条件が変化しつつあるという認識であった。

従来の電力システムは、大規模集中型電源である同期機を基盤として構築されてきた。同期機は発電機としてエネルギーを供給する役割に加え、周波数などの調整力、系統慣性、短絡容量、電圧維持機能などを自然に供給してきたため、系統運用や保護方式もこれらを前提条件として設計されていた。

しかし、第 1 回会合では、将来の電源構成を見据えた議論の中で、火力発電の稼働率低下や同期機比率低下に伴い、部分負荷運転や起動停止回数の増加を含め利用率の低下が課題となることが指摘された。また、同期機が担ってきた慣性や短絡容量を将来どのように維持するかが重要な論点となった。

第 2 回会合では、太陽光発電や風力発電の大量導入が進む中で、出力予測誤差や需給調整の課題、グリッドコード整備の必要性が議論された。特に風力発電については、変動出力の増加に伴い、電力システム運用への影響が段階的に大きくなることが紹介された。

第 3 回会合では、インバータの GFL（Grid Following）制御と GFM（Grid Forming）制御、位相同期制御（PLL：Phase Locked Loop）や、系統の電圧維持能力の強さの指標の一つである短絡容量比（SCR：Short Circuit Ratio）などが議論され、インバータ設備の増加による安定度確保が大きな課題として認識された。従来の同期機主体のシステムでは顕在化しなかった課題が、インバータ主体システムでは重要になる可能性が示された。

こうした議論を通じて、本プロジェクトでは再生可能エネルギー導入拡大を単なる電源構成の変化としてではなく、電力システムを支える技術基盤そのものの変化として捉える必要性とその変化の進展の不確実性が共有された。

第 10 回会合でも、同期機減少に伴う系統慣性の低下、電圧安定性維持、短絡容量確保などが重要課題として指摘された。また、GFM 型インバータの導入が進んだ場合には保護方式や接地方式を含む配電系統構造の見直しが必要になる可能性も議論された。

さらに、将来の系統状態を十分把握するためには PMU 等による送配電網の観測基盤の整備が重要であるとの認識が示され、欧米で進む大規模な観測・解析、さらには状態/

異常現象の発見、制御保護への活用などの基盤整備との比較も行われた。

コラム 2-1 電力システムの将来シナリオ － 何が不確実で、何が頑健か －

電力が今後数十年にわたってエネルギーシステムや社会の基盤の中核となっていくにあたって、その姿は一意に定まるのであろうか。答えは否である。本プロジェクトの初期段階で、特定の未来を前提とせず、需要の規模と集中型―分散型の二軸で定性的な将来シナリオを整理し、議論の参照点とした。需要については、脱炭素に伴う電化の進行、AI の台頭やデータセンターの電力需要の増加などに伴って電力がより一層中心になることは間違いないが、その規模（電化率など）は不確実性が大きい[1]。また供給側の不確実性も既往研究で明らかになってきている[2, 3]。

供給については、集中型の電源、例えばゼロエミッション火力や原子力発電所に依存するシナリオも考えられれば、バーチャルパワープラントや分散電源、また分散型の柔軟性やエネルギー貯蔵などに依存するようなシナリオも考えられる。大きな不確実性は、集中型になるか分散型になるかという違いである。どちらに重心を置く場合も、両者の協調のあり方が問われる（提言 1）。

蓄電池、電気自動車やヒートポンプ給湯機など分散型エネルギー資源（DER）の台頭によって様々なシステムが技術的には可能になってきている。しかし、どういった形のシステムが技術や経済の観点から、また社会的な信頼を含む社会政治の観点から最適になるか、想定した技術が実際に導入されるかは、不確実性が高い。

シナリオは未来予測ではなく、共通点と相違点を見極めるためのツールである。多くのシナリオで、変動性再生可能エネルギーが増加していくこと[4]、電力系統における柔軟性の必要性が高まること、データサイエンスや AI などを活用して系統をより柔軟にコントロールしていくことは、基本的な方向性として共通性が見られると言えよう。電力が変化に時間のかかるシステムである点もシナリオによらない共通の認識である。

参考文献

[1] Sakamoto, S., Nagai, Y., Sugiyama, M., Fujimori, S., Kato, E., Komiyama, R., Matsuo, Y., Oshiro, K. & Silva Herran, D. (2021) Demand-side decarbonization and electrification: EMF 35 JMIP study. Sustainability Science, 16(2), 395-410. https://doi.org/10.1007/s11625-021-00935-w

[2] Sugiyama, M., Fujimori, S., Wada, K., Oshiro, K., Kato, E., Komiyama, R., Silva Herran, D., Matsuo, Y., Shiraki, H. & Ju, Y. (2021) EMF 35 JMIP study for Japan’s long-term climate and energy policy: scenario designs and key findings. Sustainability Science, 16(2), 355-374. https://doi.org/10.1007/s11625-021-00913-2

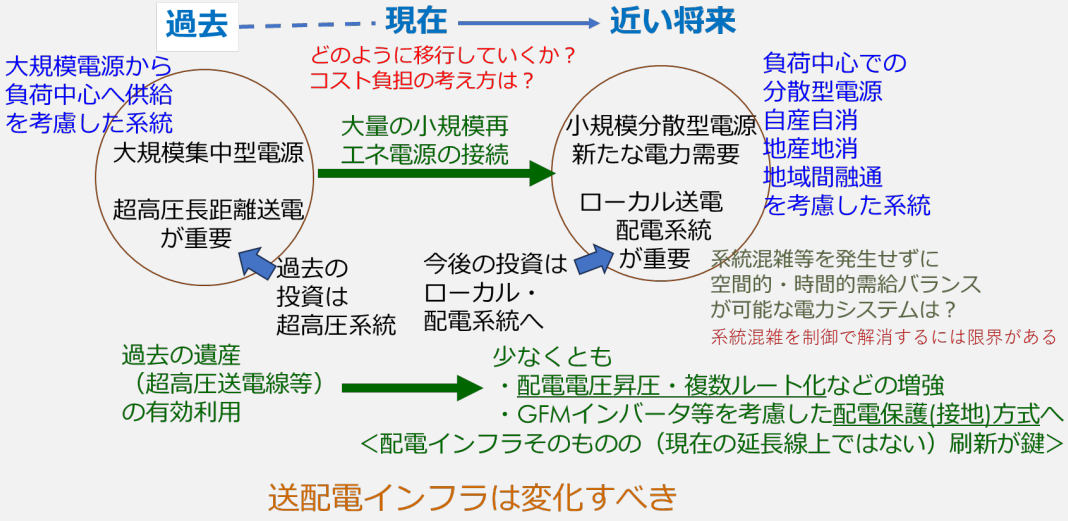
[3] Sugiyama, M., Shiraki, H., Fujimori, S., Wada, K., Cao, T., Frazer, E., Hamasaki, H., Kato, E., Matsuo, Y., Nishiura, O., Okubo, T., Oshiro, K., Otsuki, T., Sano, F. & Yoshida, H. (2025) JMIP 2 Part 1: Technology uncertainty and robustness in Japan’s net-zero pathways. Energy and Climate Change, 6, 100210. https://doi.org/10.1016/j.egycc.2025.100210

[4] Shiraki, H., Sugiyama, M., Matsuo, Y., Komiyama, R., Fujimori, S., Kato, E., Oshiro, K. & Silva Herran, D. (2021) The role of renewables in the Japanese power sector: implications from the EMF35 JMIP. Sustainability Science, 16(2), 375-392. https://doi.org/10.1007/s11625-021-00917-y

コラム 2-2 配電網の課題と可能性

2040 年の発電エネルギー(kWh)に占める太陽光発電の割合は 3 割程度、その設備利用率が 2 割以下で、その多くが配電系統に接続されることが想定される。この状況では、日中に kW 換算で現状の配電設備容量を大きく超える逆潮流の時間帯があることになり、発電電力が系統混雑を発生する場合には接続不可とするか発電制御(抑制)を行うため、kWh で 3 割の達成が困難になる。一方で、電気自動車用急速充電器の設置目標が 2030 年で 15 万基とすると、ガソリンスタンドが並ぶ国道添いの配電線に集中して設備され、同一の配電用変電所母線に太陽光発電が多い配電線と急速充電器が多い別の配電線が接続されると、配電線末端電圧が一方で上限、他方で下限を違反する可能性がある。さらに、インバータ電源の増加に伴う系統慣性力維持のため GFM(Grid-forming)インバータの配電線への接続には、単独運転防止(時限順送による事故区間判定)と FRT(Fault Ride Through)の両立のための技術開発の難度は高い。これらの問題には、世界との共通性も念頭に、配電電圧の昇圧と、配電線の接地方式や PMU(Phasor Measurement Unit)などの新技術を活用した保護方式を備えた新しい配電システムへの改変が有効と考えられる。

カーボンニュートラルを見据えた将来の配電システムについて、現状の延長線上ではない抜本的な改変が期待される。



2.2 需要・供給の変化

本プロジェクトでは、需要と供給の関係が変化しつつあることも重要な論点となった。従来の電力システムでは、需要は所与の条件として扱われ、供給側が需要変動へ追従して

需給バランスを確保することが基本であった。しかし、再生可能エネルギー比率の上昇に伴い、需要側も需給調整へ参加することが求められる。また、本プロジェクトでは需要の構造変化だけでなく、供給構造の変化についても繰り返し議論された。再生可能エネルギー導入拡大に伴い、火力発電には従来のベース供給機能に加えて調整力の供給源としての役割が求められ、同期機比率の低下や蓄電池・長時間エネルギー貯蔵の活用なども重要な論点となった。需要側・供給側双方の構造変化が同時に進行していることが、本プロジェクトを通じて共有された認識であった。

第 1 回会合では、デマンドレスポンス（DR）の活用可能性が議論され、電気温水器やエコキュートの運転シフトにより約 2,000 万 kW 規模の時間シフトを始めとする調整力が期待できることが紹介された。また、需要家・アグリゲータによる調整力提供や低圧リソース活用の課題についても議論が行われた。

第 6 回会合では、小売事業者の立場からデマンドレスポンスや需要家行動変容の可能性が紹介され、第 7 回会合では EV、ヒートポンプ給湯機、分散型需要機器などを活用した需給調整の可能性が議論された。

一方で、第 1 回から第 10 回を通じて繰り返し現れた論点の一つが、新たな需要の不確実性であった。電化の進展に加え、大規模需要（AI 学習・利用、データセンター需要などにより、将来の需要量や需要パターンを従来の延長線上で予測することが難しくなりつつあることが指摘された。

第 1 回会合では、EV や暖房電化による需要増加は一定程度予測可能である一方、AI・データセンターなど大規模需要については規模や立地、運用形態に関する情報が不足しており、将来予測の不確実性が極めて大きいことが指摘された。また、地方と都市では人口動態や再生可能エネルギー導入余地が異なるため、需要予測や設備形成を全国一律に考えることは難しいとの意見も示された。さらに第 10 回会合では、AI、ロボティクス、データセンターなど新たな大規模需要の登場が議論され、従来の需要予測を前提条件とした設備計画だけでは将来を十分見通せなくなりつつあるとの問題意識が共有された。

また、第 5 回および後半シンポジウムでは、建築、運輸、産業などの需要分野と電力システムとの連携が議論され、需要側も含めたエネルギーシステム全体の最適化の必要性が共有された。

このように、本プロジェクトでは需要を単なる電力の消費対象ではなく、電力システムの能動的な構成要素として捉える考え方への転換が進みつつあることが示され、需要の構造変化そのものが今後の電力システム設計に大きな影響を与えるとの認識が共有された。

コラム 2-3 従来電源の役割

従来の電源、特に火力、一般水力のうち貯水池式水力、揚水は、起動停止を含め運用の自由度が高く、容量、需給調整力からブラックスタートまでの多様なシステムサービスのニーズに柔軟に対応することができる。また、現在需給調整市場で取引される5つのプロダクツ、一次、二次①②、三次①②、そしてそれらのうち複数を供給する「複合約定」に対応することができる。また、燃料の貯蔵の制約の下で、長期の供給力となる。また、いずれの従来型電源も同期機であり、回転慣性により系統の周波数の変動を瞬時に抑えることができ、また交流電圧源であることから短絡容量により系統の保護に必要な事故電流を供給し、再エネやバッテリーで使われる従来型(GFM でない)インバータの安定な運転を支える。このように従来電源は、このように電力システムの安定運用に大きな貢献をしている。

しかし、それぞれの従来型発電機には最低運転電力があり、上記の機能を実現するためには、その分の出力が増え、一次エネルギーが必要となる。このため、今後は、太陽光発電、風力発電、蓄電池、需要側技術(ヒートポンプ給湯機や EV 充電)と、それぞれの技術の特性を活かした、最適な役割分担を進めることが望ましい。

コラム 2-4 小売りの役割の拡大の可能性

2016 年の電力小売全面自由化以降、他業種からの新規参入や多様な付加価値サービスの展開が急拡大し、小売電気事業の登録事業者は一時 700 社を超えた。しかし、2020 年以降の国際的な燃料価格高騰や卸電力市場価格の著しい乱高下により、新電力の撤退・倒産や新規受付停止が相次いだ。この経験は、単に安価な電力量を調達して転売するだけの小売電気事業モデルには構造的限界があることを浮き彫りにした。

2025 年の電力システム改革検証では、今後の小売電気事業者には、需要家のニーズに応える「エネルギーサービスプロバイダー」への転換が強く求められている。その役割の一つが、需要側資源を活用したデマンドレスポンス(DR)の推進である。再生可能エネルギーの大量導入に伴う各種課題に対して、需要家と接点を持つ小売電気事業者には需要側資源を集約・活用する役割が期待されている。需要側資源は、ダイナミックプライシングによる需要変容の促進、容量市場での供給力(kW)や需給調整市場での調整力(ΔkW)の供出、ローカル送配電網における混雑緩和や潮流改善など、電力システム全体を支えるアンシラリーサービスへの貢献が可能となる。

一方で、昨今のデジタル・トランスフォーメーションを背景として、外資系を含む大規模 IT 事業者、家電・モビリティメーカー、ベンチャー企業などが、AI・IoT 技術あるいはソーシャルネットワークを駆使し、機器・設備のコントロールサービスや、電力供給を含む生活系サービスを包括的に提供しようとしている。これらの動きが加速すると、電力政策が描いている、需要側資源を電力業界が電力システムのために活用するという社会全体からの理想像からは外れる可能性がある。今後の電力システムを、供給と需要の統合という観点に加え、異業種・異分野との統合として捉える必要性がある。

小売電気事業は単なる電気の契約窓口から、分散して存在する需要側資源と社会インフラ・サービスを統合する『ハブ』への進化を目指し、社会と需要家を結ぶ接点に立つ小売電気事業

者の役割拡大こそが、次世代電力システムの統合設計を実効化する鍵となる。

コラム 2-5 エネルギー自給率 100%を実現するエネルギーシステム

エネルギー需要を 100%電力化し、エネルギー供給を再生可能エネルギーや原子力といった脱炭素電源で 100%供給できれば、原理的には、エネルギー自給率 100%を実現できることになる。同時に脱炭素化(ネットゼロ)も実現できる。その中で、エネルギー需要では、電気自動車や電炉などの導入により、直接的に化石燃料から電力へ転換することが可能な分野がある一方、航空や船舶、原材料など、直接的に化石燃料から電力へ転換することが困難な分野では、電力により合成燃料(e-fuel)を製造して供給・転換する、いわゆる間接電化を通じて、電力へ転換することが可能になる。

そこで思考実験的に、数理モデル(以下、参考文献)を用いて、海外からの輸入燃料をゼロとした前提の下で、エネルギー自給率 100%を実現する日本のエネルギーシステムの可能性に関して分析した。その結果、直接電化や間接電化を通じて、日本の電力需要は最大 3 兆 kWh まで増加するポテンシャルがあるとの結果が示された。3 兆 kWh は現在の日本の電力需要の約 3 倍の規模に相当する。一方、エネルギー供給側では、原子力発電を 1 億 kW 導入可能と想定した場合でも(現状の原子力の約 3 倍の規模)、太陽光発電は 18 億 kW、風力発電は 2.8 億 kW もの大量の導入が必要になり、現実的には実現は容易ではないと考えられる。しかし、エネルギー自給率 100%を実現できなくても、可能な限り、エネルギー需要の直接電化や間接電化を進め、同時に脱炭素電源の導入を進めることで、脱炭素化と共に、エネルギー自給率は改善する方向に推移する。

今回のホルムズ海峡を巡る危機を踏まえ、電力化や脱炭素電源導入が、脱炭素化に加えて、エネルギー安全保障の強化にもつながることを認識することが大切であると考えられる。

参考文献

川上，小宮山，藤井，電気学会論文誌 B，138(5)，382-391(2018)，他

2.3 デジタル化の進展

本プロジェクトを通じて共有された認識は、電力システムを取り巻く前提条件が大きく変化しつつあり、その変化が同時多発的に進行しているという点であった。その中で、デジタル化は単なる効率化の手段ではなく、複雑化・分散化する電力システムの状態を把握し、分析し、制御するための基盤技術として位置付けられた。

再生可能エネルギー大量導入に伴う脱炭素化、分散型エネルギー資源（DER: Distributed Energy Resources、本章から第 6 章では以降 DER）や EV の普及による分散化、インバータ電源増加によるシステムの構造変化、需要側リソースの活用拡大、柔軟性価値の重要性増加、データ活用の高度化、さらには AI・モビリティ・通信などとの融合が同時進行しており、従来の需要は予測するもので設備計画の前提条件とする考え方だけで

は対応が難しくなりつつあるとの認識も共有された。

第 7 回会合では、スマートメーターや需要機器データの活用可能性が示された。また、OpenADR や ECHONET Lite など標準化活動の重要性も紹介された。討議では、これらの標準化が、需要側資源や送配電制御を実運用へ接続するための基盤であることが議論された。特に、国際標準に日本の要求事項を反映し続けること、若手人材が国際標準化活動へ参加すること、標準化と認証管理を含めたデータ利用ルールを整備することが重要との認識が示された。

本プロジェクトでは、このようなデジタル化の進展を単なる情報技術の進歩としてではなく、「電力システムを支えてきた前提条件の変化」と捉えるべきとの認識が共有された。重要なのは特定技術の優劣ではなく、不確実性に対応できる柔軟性、レジリエンス、データ活用能力、人材基盤をいかに構築するかという点である。

こうした構造変化は相互に関連しながら進行しており、技術、制度、市場、データ、ガバナンスを個別に最適化するだけでは対応できない段階に入りつつある。本プロジェクトでは、これらを統合的に把握し運営するための基盤としてデジタル技術の役割が今後一層重要になるとの認識が共有された。これらの変化への対応が、次章以降で述べる技術・システム、制度、市場、データ、ガバナンスの課題を生み出している。

2.4 資源制約と地政学リスク

本プロジェクトでは、電力システムを取り巻く外部環境の変化についても多くの議論が行われた。

第 2 回会合では、風力発電設備における国産化率や海外メーカー依存が紹介され、エネルギー転換を支える産業基盤の重要性が議論された。また、国内市場規模が技術開発や産業競争力に影響を与えることも指摘された。

第 10 回会合では、重要鉱物やエネルギー資源を含む資源制約、経済安全保障、デュアルユース、サイバー攻撃、サプライチェーン、地政学リスクなど、電力システムを取り巻く外部環境の変化が議論された。また、AI やデータセンター、半導体産業の動向、人口減少、土地利用、ライフスタイル変化なども、将来の電力需要や設備形成、システム運営に影響を与える要因として共有された。

特に、重要鉱物や部材の供給制約は、再生可能エネルギー設備、蓄電池、半導体等に必要でエネルギー転換や設備形成に影響を与える可能性があり、技術・経済性だけでなく供給網の強靭性や経済安全保障の観点からも検討する必要性が指摘された。

さらに、電力需給のレジリエンスについても単なる設備の強靭化に留まらず、自然災害、サイバー攻撃、地政学リスク、資源制約、社会構造変化等に対応しながら供給を維持する能力として捉えるべきとの認識が示された。

これらの議論を通じて、電力システムの課題はエネルギー分野の内部の問題にとどまらず、産業政策、安全保障政策、地域政策とも深く関係することが示された。また、将来の電力システムでは、従来の効率性を重視する設計思想から、不確実性への適応能力やレジリエンスをより重視する設計思想への転換が求められるとの認識が共有された。これは自然災害への対応だけでなく、資源制約、国際情勢変化、サイバー攻撃、サプライチェーンの途絶等を前提条件としてシステムを設計する必要性を意味している。

2.5 社会システム化の進展

プロジェクト後半において特に顕著になったのは、電力システム単独では将来像を描けなくなりつつあるという認識であった。

本プロジェクトで議論された「社会システム化」とは、電力システムが単独で最適化される対象ではなく、情報通信、モビリティ、産業活動、地域社会、エネルギー利用システム等と相互に連携しながら機能する社会基盤へと変化しつつあることを意味する。従来の電力システム中心の視点から、社会全体を構成する複数システムの統合という視点への転換が求められているとの認識が共有された。

第 5 回会合では、水素利用やエネルギーネットワーク全体の設計が議論され、第 7 回会合では需要機器や ICT との連携、第 8 回会合ではセクターカップリング、第 9 回会合では市場と政策、第 10 回会合では「電力×〇〇」という視点が繰り返し議論された。また、中間シンポジウムおよび後半シンポジウムでは、電力と AI、電力とモビリティ、電力と通信、電力と産業構造との関係が議論され、電力システムが社会インフラ全体の一部として位置付ける必要があることが示された。

こうした議論の背景には、電力システムが社会活動の基盤であると同時に、社会構造の変化から大きな影響を受ける存在になっているという認識がある。

本プロジェクトでは、近年の電力システムの変革はエネルギー分野単独の課題ではなく、社会システム全体の変化の一部として捉える必要があるとの認識が共有された。再生可能エネルギーの導入拡大や需要側資源の活用に加え、AI、通信、モビリティ、農業、上下水道など他分野との連携が進展しており、電力システムは社会インフラ全体の一部として再設計される段階に入りつつあるとの指摘がなされた。

第 10 回会合では、AI、ロボティクス、データセンター、人口減少、土地利用、ライフスタイル変化など、多様な社会的ドライバーが電力システムへ影響を与えることが議論された。また、コンパクトシティ化や地域構造変化に伴い、電力ネットワークの在り方も再検討が必要になることが指摘された。

後半シンポジウムでは、「電力×AI」「電力×モビリティ」「電力×農業」「電力×通信」など、従来は別々に議論されてきた分野の統合が重要な論点となった。特に、電力、デジタルインフラ、熱利用、農業・食料システムを相互に結び付ける構想を紹介し、社会全体を

統合的に設計する必要性が指摘された。また、電力とAI、データサイエンスを組み合わせた分野横断型研究・教育が重要であり、社会課題と技術課題を同時に扱う能力を持つ人材の必要性が議論された。さらに、需要側リソースの活用を進めるためには、個々の需要家へ負担を求めるだけではなく、制度やデータ基盤によって行動変容を支援する仕組みが必要であるとの指摘があった。

このように、本プロジェクトでは、今後の電力システムは単なる供給インフラではなく、AI、モビリティ、通信、産業活動、地域社会と相互接続した社会基盤として位置付ける必要があるとの認識が共有された。社会システム化の進展は、電力システムの設計対象が拡大しつつあり、分野横断的な統合設計が今後ますます重要になると考えられる。

コラム 2-6 電力×〇〇

電力は現代社会の基盤である。現代社会では病院や公共交通機関、高等教育、スポーツや何から何まで電力に依存していることは明らかである。さらに脱炭素のためのエネルギーシステムの需要側の一層の電化や、AIなどのデータセンターにより、電力は21世紀のエネルギーの中心となるといえる。

電力は社会や技術の様々なシステムと相互作用をするため、電力システム×〇〇（以下、電力×〇〇）などのかけ合わせ、分野横断型の視点が重要になる。電力を社会経済で活かすには、議論を電力で閉じていてはいけない。本プロジェクトの中間シンポジウムでも、移行を担う人材について、電力×デジタル、電力×国際、電力×女性エンジニア、電力×スタートアップが論じられた。

この電力×〇〇という活動が、日本では若干低調であるという印象を受けている。欧米や中国では、電力×AIといった気候テックの企業は多く立ち上げられてきているし、投資も近年の減速はあるものの長期的には拡大してきた。一方、日本は直近で減少もみられ、いまだに投資自体が少なく、盛り上がりに欠けている。実感としては、電力×AIに取り組む学生も少なく、女性エンジニアが少ないことと同じく、担い手の数が根本的な問題である。

日本ではこうした横断的な取り組みは弱いように思われ、部分的に科学的エビデンスも知られている科学技術・学術政策研究所（NISTEP）は日本の科学技術のベンチマーキングをしてきたが、分野横断的な領域や国際共同研究において日本は弱く、海外の動向から遅れかねないことが知られている[1]。再生可能エネルギー政策の分析能力も、日本は独米と比べて低い[2]。

こうしたことの打破のためには、電力システムに関わる者が他の分野や海外に出ていくことも必要であり、同時に他の分野の人に電力に興味を持ち、協創をしていくことが鍵になるであろう。そうした分野をまたいだ教育が必要になっていくであろう。

参考文献

[1] Sugiyama, M., Sakata, I., Shiroyama, H., Yoshikawa, H. & Taniguchi, T. (2016) Research management: Five years on from Fukushima. Nature, 531(7592), 29-30.

[2] Sugiyama, M. & Muto, J. (2024) Measuring policy analytical capacity in renewable energy

policy: Germany-Japan-US comparison. Review of Policy Research, 41(1), 184-209.

コラム 2-7 電力×〇〇: 社会インフラとしての電力システムの価値再考

電力業界の部外者という素人視点で電力ネットワークの価値について考える。

電力ネットワークは重要な社会インフラとして人々の生活や産業を支える巨大なシステムであるにもかかわらず、停電も起こさず日々安定に運用されていることは、とてつもなく凄いことである。一方で、当たり前に電気が来ることで、その貴重さが一般には体感されず、その魅力や価値を十分に訴求できていないことも事実である。これは将来電力ネットワークを担う人材を確保する上での障害にもなりかねない。

こういった中で、今後の展開の議論のなかでは、如何に電力ネットワークを無難に運用するかに意識が行き、論点の置き方も視野が狭くなっている可能性がある。新しい技術の取り込みにも、リスクを意識するあまり、腰が引けているとう印象が否めない。

不確実な世の中になってきている中で、社会インフラとしての価値はより大きくなっている。従来の発想を超え、前広に論点を設定することで、より多くのステークホルダーを巻き込んだ議論が行い、新しい展開につながることが期待されるのではないか。この可能性としては様々な切り口が考えられるが、例えば

① ホルムズ海峡の問題から我が国のエネルギー自給のあり方が議論になり、地球環境問題への対応の重要性も取り沙汰される中で、再生可能エネルギーの活用のあり方を再考する
② 産業競争力を左右する重要な要素のひとつに電力コストがある中での電力需給のあり方を考える(ワット・ビット連携やモビリティ連携などを事例として)
③ 巨大な複雑系である電力ネットワークの新たな展開を、AI や数理科学の知見を取り入れて考える
④ AI の時代における人の役割が問い直されるなかで、電力ネットワークというリアルな社会インフラを運用する価値と面白さとは何かを議論する　等

シンポジウムでは、電力×〇〇の観点で議論することが変革を進めるには必要との議論があった。変革には多大なエネルギーと支援が必要であり、より多くの人々を巻き込んで進めるためにも、電力×〇〇の〇〇を多面的にとらえ、仲間を増やしていくことで、電力ネットワークの価値への理解とその向上が進むと期待される。

コラム 2-8 再生可能エネルギー×次世代モビリティ連成

仙台市中心部の東北大学キャンパスでは、グリーン未来社会の実現に向けて、学内の再生可能エネルギーの利活用に着手している。具体的には、キャンパスに分散した太陽光発電や大学食堂から出る食品廃棄物によるバイオマス発電を、学内 EV などに利用して地産地消に取り組んでいる。一方で、分散した電源による地域社会のエネルギーの実用的なマイクログリッドの実現にはさまざまな課題がある。エネルギーを地域社会でつくって、ためて、つかうには、エネルギーの情報基盤の構築が必要となる。地域住民の日々の暮らしや防災に役立つ地域のエネルギー情報基盤の構築のために、AI および数理工学的アプローチで取り組むことに挑んでいる。具体的

には、東北大学キャンパス内での分散した太陽光発電データ、建物群の電力需要データ、人の移動の需要データ、EV 走行データを収集・分析して、太陽光発電等の再生可能エネルギーの余剰電力をエネルギーマネジメントし、同時に EV のフリートマネジメントを行うことで、省エネルギーと移動利便性向上の両観点から電力と移動の多目的最適化を実現することを目指している。

このほか、再生可能エネルギー×次世代モビリティの一例として、大学病院の大型ボイラーの排二酸化炭素を仮想的に回収して、再エネ電力によるグリーン水素と e-fuel を合成している。これを燃料として、大学病院の利用者のラストワンマイルモビリティとして提供している。

下表に、平常時には価値を創り非常時には社会を守る視点に基づく電力×〇〇の統合設計の例を示す。

表　統合設計による電力×〇〇の例

分野	平常時：価値を創る	非常時：社会を守る
電力×モビリティ	EV の充放電機能により、電力システムの柔軟性向上、充電コスト低減	EV による避難所等への電力供給、道路・電力の地域での健全性確認
電力×情報・通信	計算需要と電力需給の協調、データセンター立地最適化による運用・投資コスト低減	高速な相互調整による、運用の継続、早期復旧
電力×産業	生産活動と電力需給の協調によるコスト低減と安定運用	運用調整による電力、運用の継続、早期復旧
電力×地域	地域資源の活用、産業集積、新サービス	重要生産・生活機能の維持

本章のまとめ：不確実性と部門間の連動の時代への移行

本プロジェクトを通じて共有された認識は、電力システムを取り巻く前提条件が大きく変化しつつあり、その変化が相互に関連しながら高い不確実性を伴い同時進行しているということであった。

再生可能エネルギーの大量導入やインバータ主体のシステムへの移行に伴う供給構造の変化、AI・データセンターなどの大規模需要、EV、ヒートポンプ等の普及による需要の構造変化、DER や需要側リソース活用の拡大、データ活用やデジタル技術の進展は、電力システムの構造を変えつつある。また、AI・データセンターなどの大規模需要のように将来の導入規模を十分見通すことが難しい新たな需要も出現しており、従来の需要予測や設備計画を前提条件とした考え方だけでは対応が難しくなりつつあるとの認識も共有された。

さらに、重要鉱物やエネルギー資源を巡る資源制約、地政学リスク、サイバーセキュリテ

ィ、経済安全保障、人口減少、土地利用変化など、電力分野の外部要因が設備形成やシステム設計へ直接影響する状況が生じている。本プロジェクトでは、エネルギー転換を支える技術基盤、産業基盤、人材基盤についても長期的視点から検討する必要性が指摘された。

加えて、AI、通信、モビリティ、農業、上下水道等との連携が進展する中で、電力システムは社会インフラ全体の一部として再設計される段階に入りつつあるとの認識が共有された。電力システムの課題はエネルギー分野単独の課題ではなく、社会システム全体の変化の一部として捉える必要があることが示された。

本プロジェクトでは、このような状況を個別の技術進歩としてではなく、「電力システムを支えてきた前提条件の変化」と捉えるべきとの認識が共有された。重要なのは特定技術の優劣ではなく、不確実性に対応できる柔軟性、レジリエンス、データ・ツール整備、人材をいかに構築するかという点である。

こうした構造変化が、次章以降で述べる技術・システム、制度・市場、データ・知識基盤、ガバナンスの課題の背景となっている。

表1　キー技術

項目	需要	電源	PV	風力	HVDC	インバータ	送電網
討議担当	岩船由美子	原亮一	大関崇	紺谷怜央	中島達人	馬場旬平	山本敏之
閲読委員	下田吉之	中澤治久	加藤丈佳	本庄暢之	岡本浩	北條昌秀	山口博
1.分野イメージ		・従来型の水力・火力・原子力・その他同期機電源	・場所による分類（住宅、非住宅建物、地上低圧、地上高圧、地上特高、独立型。地上は水上、営農など） ・売電方式による分類（需要地近接：自家消費/オンサイトPPA、需要地遠隔：FIP/オフサイトPPA、アグリゲーション ・フェーズによる分類（事前評価 →EPC→O&M→リプレース/リパワリング/撤去、リサイクル）	・発電機による分類（陸上、洋上着床、洋上浮体、大型、小型、水平軸、垂直軸、カイト） ・売電方式による分類（FIT/FIP、PPA） ・フェーズによる分類（事前評価 →EPC→O&M→リプレース/撤去）	[適用分野] ・長距離送電（ケーブル 50km 以上，架空線 500km 以上） ・異周波系統連系（周波数変換） ・交流系統間ループカット [技術要素] ・システム化技術 ・変電技術 ・送電技術	[適用分野] ・再エネ連系 ・分散型需要・蓄電連系 ・水電気分解入力 ・FACTS 機器 ・機器ドライブ [技術] ・素子 ・回路方式 ・電流型/電圧型	送電線 ・架空、地中ケーブル、海底ケーブル ・電圧 変電所 ・機器 ・FACTS 機器 ・変換機 接続変更/事故復旧 長期の設備計画と建設 長亘長・多数の設備の保守
2.求められる姿、期待される役割	安定需給、電化、調整力	安定運用、調整力、燃料確保、ストレングス	a．低廉な発電コスト（出力抑制との関係） b．需給調整力の供給（kWh 価値のみで成り立たない場合。個別発電事業、系統全体での出力抑制量低減。PV+蓄電池、アグリゲーションなど）。 c．地域との共生：必要な導入規模で場所異なる。需要地近接(建物)から入れて不足すれば需要地遠隔（地上）。 シナリオで異なること。 ・需要変化によっては、出力抑制量がかわる？ ・他の電源の供給量次第で PV が必要な量が決まる。 － 設置場所が建物、需要地近接で足りる場合：オンサイトPPA/自家消費に必要な蓄電池量、小型システムが数体的に多い。アグリゲーション。 － 設置場所が建物、需要地近接で足りない場合：オフサイトPPA/市場統合。地域共生型地上システム（小規模～大規模） 需給調整機能付きの大規模システム and 小中規模アグリゲーション。送電門から自立した独立型システム	集中/需要変化大シナリオで特に重要： a．低廉な発電コスト b．需給調整力の供給 ※原発やカーボンフリー火力とシェア争い 分散/需要変化小シナリオで特に重要： c．地域との共生 ※PV+蓄電池に対する差別化	・再生可能エネルギーの大量導入を牽引 ・レジリエンス強化 ・広域電力取引への一層の活用 ・系統制御機能の一層の活用	・環境変化に対する分散型資源としての機能の適応 ・グリッドサービス提供 ・同期機の運用容量低下への対応 ・相互干渉の影響の低減	・電源、需要、配電網の接続 ・損失低減 ・品質維持（周波数、電圧） ・設備計画 ・安定な需給・系統運用 ・レジリエンス（耐自然災害など） ・新技術の電源・蓄電・需要制御への対応 ・システム管理者としての設備計画、運用計画 ⇒新規の接続への対応 ⇒IBR 増加、慣性低下など新たな課題への対応 ・多様なプレイヤーへの公平な役割・機会の提供 ・全国的な送電網と地域の配電網の協調統合（需給、混雑、市場カップリングなど）
3.段階的移行のためのキー技術	高効率、シフト・不足時対応、予測	最小負荷・負荷変化速度、起動/停止時間、新燃料/方式	需給調整機能（GFM、各需給調整市場商品）、多様な場所への設置、シームレスな予測誤差低減	長翼化・輸送、リモート点検、再エネ制御、防災電源化	・1GW 級自励式変換器と 525kV 級直流海底ケーブルは技術確立 ・多端子送電には 500kV 級直流遮断器の実用化必要	・大容量素子 ・GFM インバータ ・遠隔監視・更新 ・解析モデル ・PHIL 試験	・直流送電全般 ・変電機器（含ポスト SF6） ・調整機器（FACTS など） ・ホスティングキャパシティ管理 ・設備状態把握 ・設備管理・劣化判定 ・送電線、直列機器の運用容量拡大（DLR など） ・ドローン・AI ・ダイナミックレーティング ・インバーター電源の高機能化

4.段階的移行のためのキーシステム技術	需要側エネマネ、アグリゲーション、予測・推定	最小負荷、起動時間、短期～長期調整力、燃料貯蔵量	需給調整市場の再エネ向け商品、グリッドコードの具備、適用とマネタイズ方法(市場、義務)、低コスト調達、地域共生、土地利用の最適化	需給調整市場の再エネ向け商品、グリッドコード	・多端子制御保護は開発済み ・日本沿岸の露岩海域に向けたケーブルの防護・敷設技術は開発中	・各種安定化支援 ・システムサービス −P/f・V/Q 調整 −単独運転 −ブラックスタート ・EMT 等解析のモデルとプラットフォーム	・状態監視・推定の高度化(PMU など) ・シミュレーション技術 ・系統状況の指標化・閾値(アクセス断面、運用断面) ・混雑・安定性管理(含 DER、需給計画) ・運用容量管理(含 DLR) ・事故復旧/接続切り替え ・変換器接続増加への対応 ・最適保守計画(点検、修繕、更新) ・最適設備計画(増強、廃止) ・運用者向けツール・訓練 ・大規模需要立地点の自治体・送電系統との協調
5.キーデータ	需要家別需要・走行時系列、需要の属性(例:家庭の家族構成・機器構成)	運転範囲、インピーダンス、効率、制御特性、慣性、燃料貯蔵量、その他	電力需給解析による予見性確保、太陽光発電からの柔軟性拠出の価値評価、太陽光発電の最適な導入場所評価	電力需給解析による予見性確保、広域ならし効果、系統解析ツール	・直流送電設備の計画，設計，解析，建設，運用，保守に関する実際のデータ	・製品モデル ・調整力モデル ・配電網モデル	・設備・保守データ ・接続設備データ ・運用データ ・設備障害データ ・運用に影響する環境データ ・運用データ(潮流、周波数、電圧など)
6.議論・研鑽の分野別コミュニティ	電気学会、エネ資源学会、公共エネルギー政策学会、建築学会、空気調和・衛生工学会	電気学会、日本原子力学会、火力原子力発電協会、原子力産業協会、	電気学会、太陽エネルギー学会、太陽光発電学会、エネルギー・資源学会、気象学会、PVSEC、EUPVSEC、IEEE PVSC、太陽光発電協会、JEMA、PVTEC、REASP、各種保守点検関係団体、営農型関連団体、発電事業者団体、IEA PVPS、IEC TC 82	・国内(学):電気学会、エネルギー・資源学会、日本風力エネルギー学会 ・国内(産):日本風力発電協会、WIND EXPO ・国際:IEA Wind、GWEC、Wind Europe	・電気学会 ・CIGRE SC-B4 ・電気協同研究会 ・NEDO 事業 ・産業界 送配電事業者 電機メーカー ケーブルメーカー 送配電網協議会 ほか	・電気学会 ・CIGRE SC-C1,C6 他 ・電気協同研究会 ・IEEE ・NEDO 事業 ・産業界 送配電事業者 電機メーカー 送配電網協議会 ほか	〈学会関係〉 ・電気学会 ・電気設備学会 ・CIGRE ・IEEE ・電気協同研究会 ・JESC(各専門委員会) ・IEC、JIS、JEC 等の標準化委員会 〈産官学連携〉 ・NEDO 事業 〈関連団体・業界〉 JEMA、JPEA、JWPA、JEA、JET 電気事業連合会・送配電網協議会 電力中央研究所、グリッドスカイウェイ、送電線技術建設技術研究会、 スマレジ ほか
7.人材育成分野(教育・研究・産業など)	省エネ、家庭/業務/産業エネマネ、需要分析/予測	設計、運用解析	設計・施工者不足の懸念(FIT 前後の設計・施工知見の蓄積が不十分)電気主任技術者の不足、大学における太陽光発電の基礎講座	送電線人員、風車保守要員	NEDO 予算にて直流送電分野の若手人材育成の特別講座を開始。(東京都市大，徳島大,東工大)	電力系統工学とパワーエレクトロニクスの双方に精通した人材の不足	・電力系統工学とパワーエレクトロニクスの双方に精通した人材 ・データ分析・AI などデジタル人材 ・電工作業員の確保・育成
8.競争力へ直結するキーワード			サプライチェーンリスク、サーキュラーエコノミー;リサイクル、グリッドコード	苛酷な気象・海象への適合、メンテナンス性	・直流送電関連の企業数は限定的 ・国際競争力は，海外企業の買収や提携で入手 ・海外では系統運用者による他国コンサルも活発	・価格競争力のある製品の開発 ・国際規格への適合と提案	・新技術・再エネ・既存技術・NW 対策を統合した運用 ・電源・NW・需要への投資の全体最適 ・保全のデジタル化(少人化、効率化)
9.リスク			地域共生(事故)、サプライチェーンリスク、エネルギーストレージコスト	日本に適した機種がなくなるリスク、資源リスク、廃棄物リスク、原材料高騰、為替	・系統整備政策の一貫性 ・国際情勢不安によるエネルギーセキュリティリスク	・コモディティ化・競争力低下によるメーカーの撤退(デバイス、製品)	・作業員不足・サプライチェーンの不足によるにより投資停滞 ・高経年設備の故障多発 ・NW 設備の利用率低下による料金上昇 ・値上げできず投資回収困難により投資の停滞 ・供給力不足による需給ひっ迫や停電
10.提言先			各省庁、電力会社、都道府県	各省庁、電力会社、都道府県	各省庁，電力会社，メーカー	各省庁，電力会社，メーカー	各省庁、自治体、電力会社，メーカー、大学・高専・高校

項目	配電網	貯蔵	分野横断	運用	小売り	需要機器	IT 応用
討議担当	飯岡大補	江村克己、 荻本和彦	江村克己、 山口容平	河辺賢一	渡邊裕美子	芳澤信哉	石井英雄
閲読委員	林泰弘			餘利野直人	五十嵐仁一	石亀篤司	奈良宏一
1.分野イメージ	配電線 ・架空、ケーブル ・電圧, 高調波 調整機器 ・LRT, SVR, SVC, STATCOM 計測機器 ・センサ付開閉器, スマメ 接続変更/事故復旧 長期の設備計画 多数の設備の保守	揚水 蓄電池 圧縮空気貯蔵 液体空気貯蔵 キャパシタ 熱貯蔵:顕熱/潜熱、躯体蓄熱 燃料貯蔵:H2・化合物(アンモニアなど) その他		TSO,DSO (長期計画) ・送配電網管理 ・補修計画 ・系統接続計画 ・接続条件 ・アデカシー計画 ・電力品質計画 ・接続条件計画 ・供給計画 ・供給力・調整力の調達 ・年間作業停止計画 ・広域系統長期方針 ・系統混雑に関する中長期見通し ・無効電力の運用 ・系統安定化制御 (接続) ・接続管理 ・接続検討 (短期の需給/系統運用) ・需要予測 ・発電予測 ・調整力調達 ・GC 語運用 ・電源/系統事故対応 ・電力需給検証 ・kWh モニタリング ・kW モニタリング ・同時市場導入下での運用	特定卸供給事業者(アグリゲーター)としての事業も含む (事業) ・小売り料金設計 ・電源確保(相対契約、市場) ・需要管理 ・デマンドレスポンス ・蓄電 (バランシング) ・需要予測 ・発電予測 ・需給計画 ・電源の運用 ・インバランス管理 (その他取引) ・容量市場 ・需給調整 ・混雑解消の調整力 ・その他アンシラリーサービス	家庭・業務 分散型機器 DER ・電源:PV など ・能動化需要:HP 給湯機、EV 充電 ・エネルギー貯蔵:蓄電池、ケミカル 産業レベル ・電源:- ・能動化需要:データセンター・AI 学習、水電解 ・エネルギー貯蔵:LAES、フライホイール他 ユーティリティーレベル ・DAC(Direct Aiar Capture)、CCS(収集、輸送、貯蔵)	集中型設備の管理、制御、保護 分散型システムの管理・制御、保護 通信規格・データ・モデルの標準化(国内／国際) (導入・普及) ・機器の Drready の仕様標準化 ・IT インフラ整備 (運用) ・アグリゲーション ・エネルギー市場、需給調整・混雑管理市場の運用システムへの統合 IT インフラ ・スマートメータ ・需要側ゲートウェイ
2.求められる姿、期待される役割	・電源、需要、配電網の接続 ・損失低減 ・品質維持(電圧, 高調波, 停電) ・設備計画 ・安定な需給・系統運用 ・電気保安の確保 ・レジリエンス(耐自然災害など) ・システム管理者としての設備形成の合理化、運用管理の高度化 ⇒新規の接続への対応 ⇒人口減への対応 ⇒データセンターなど局所的な需要増 ⇒IBR 増加、正味需要の変動増など新たな課題への対応 ⇒効率的な設備形成	ユースケースとして整理を継続 電力 送配電 ・アービトラージ ・kW 確保 ・需給の一致 ・混雑管理 供給側 ・出力管理 需要側 ・停電回避 ・経済性改善 エネルギー P2G など		一般送配電事業者は、送電用及び配電用の電気工作物により、その供給区域において託送供給および発電量調整供給を行う。 出力が変動再エネの大量導入とデータセンターなど大規模需要への対応のため、送配電網の増強、混雑管理を含むシステム運用の高度化と電圧・周波数などの電力品質の維持、ブラックスタート能力の核の行動かが急務。 燃料確保、再エネの一週間を超える出力低下への対応なども求められている。	・発電事業者から電力を調達し、送配電事業者の送電網を利用して契約した需要に電気を届け、料金を受け取る ・需要家に対する、省エネ、電化、再エネ利用、需要柔軟化(デマンドレスポンス)等に関する情報提供、支援。また需要柔軟性の各種市場を通したマネタイズと需要家還元 ・PPA 契約等を通じた再エネ・蓄電池投資の安定化	従来、供給側が担ってきた電力システムの運用における各種のサービス(アンシラリーサービス、システムサービス)を適切な範囲で代替する。 需要側の本来の役割を可能な範囲で維持・向上する。 電力需給全体の 3E(経済性、安定性、環境性)に貢献する。 社会全体のシステムとの関わりにより、需要機器の価値をより向上し、社会全体の効用の向上に貢献する。	従来、電力システムにおいて、集中電源、送変電設備の運用段階でのモニタリング、制御・保護を担ってきた。 分散型システム DER が、多数、かつ多様に導入される段階では、それらを含めた運用の管理・制御、保護、設備管理に対象が広がる。 立場・目的の異なる多数の事業者と使用する情報システムが連係する必要があり、全体としてのシステムアーキテクチャ、システム・機器間の相互接続性、通信・データ授受の標準化が必須。 電力システムの運用・設備形成における 3E に貢献するとともに、サイバーセキュリティなど IT システム全般への要請を満たし、システムの安定性、効率性、安全性の維持・向上が求められる。

3.段階的移行のためのキー技術	・新配電方式(地域マイクログリッドなど) ・調整機器(LRT, SVR, TVR, SVC, STATCOM) ・ホスティングキャパシティ管理 ・設備管理・劣化判定 ・直列機器の容量管理・拡大(？)←配電分野の直列機器はSVRとかのこと？ ・インバータ電源の高機能化 ・ICTに関する機器(センサ付開閉器, スマメ, 通信網) ・電力設備の小型化	個別技術の特性・経済性改善 充放電・貯蔵放出のインターフェース技術、ユースケースに即したインフラ技術		(長期計画) ・需要予測 ・出力予測 (短期計画) ・需要予測 ・出力予測 (接続検討) ・高調波解析 ・電圧変動解析F ・潮流解析 ・短絡容量解析 ・供給力や調整力の必要量算出 ・高速調整力、慣性応答が可能な機器 ・SCUC・SCEDのための数理最適化手法	・需要管理・解析 ・ミクロな発電・需要予技術 ・需要把握・制御 ・スマメ機能	個別の機能向上(機能、効率、安定性ほか) 例)EV:走行特性、安全性、耐久性、充放電効率・アイドリング時損失、ソフトウェアの書き換え 電力システムを含む外部のシステムとの相互接続性の向上 例)Drready、特定計量機能 周波数・電圧の変動などを含めた、外部の擾乱要因に対する安定運転、運転継続、安全停止 例)DERの連鎖脱落DCの連鎖脱	(電力システムとの関係で) ゲートウェイ技術 次世代スマートメーターIoTルート機能 機器のモニタリング、制御、保護のための通信プロトコル、情報モデル サイバーセキュリティ確保 国際標準との整合性を満足しつつ、機器開発者や事業者が従うべきガイドラインの制定、認証
4.段階的移行のためのキーシステム技術	・状態把握・推定の高度化(センサー・スマメ・DER活用) ・シミュレーション技術 ・混雑/品質管理(含DER、DERMSなど) ・直列機器の過負荷管理(？)←配電分野の直列機器はSVRとかのこと？ ・事故復旧/接続切り替え ・DERの管理・運用 ・最適保守計画(点検、修繕、更新) ・最適設備計画(増強、廃止) ・ICTによる配電系統の見える化 ・絶縁監視	送配電レベルのマルチ価値の把握と最適運用 需要側でのマルチ価値把握と最適運用 エネルギ全体での合成燃料の利用体系にかかる技術		(長期計画) ・アデカシー ・混雑解析 ・安定性解析 (短期計画) ・SCUC ・ACOPF ・事故解析 (モニタリング) ・事故/接続 ・PMUデータ解析 (短期の運用) ・次期中給システム ・広域LFC ・監視・制御システム ・DERの統合運用システム	・需給ポートフォリオ分析 ・料金・サービス設計 ・卸市場価格予測 (毎日、長期) ・インバランス管理 (モニタリング) ・スマメデータ ・制御技術(EMSの相互接続性の拡大)	・ベースライン予測/計画 (前日、当日、その他の時間レンジ) −需要、電源・貯蔵 −個別 −アグリゲーション −システム全体 −調整可能範囲の予測(複数プロダクツ) −個別 −アグリゲーション −システム全体 ・市場参加のための計画・制御機能 −個別 −アグリゲーション ・社会システムとの連携 例)−EVと交通システムの連携 −災害時の電源としてのEV配置	エネルギー市場、需給調整市場の各種プロダクツへのDER/アグリゲータ参加を可能とするネットワーク仕様 アグリゲーションプラットフォーム アグリゲーションに対応したDERの管理(登録)、市場取引、計画・運用システム システム運用のためのモニタリングによる状態把握と緊急時の制御(含:AI・PMU利用技術) システム障害に対する耐性、復旧機 サイバーセキュリティ要件の定義とガイドライン等の制定、認証の仕組み ~~大規模~~データ処理技術
5.キーデータ	・設備・保守データ ・需要・接続設備データ ・運用データ ・発電、需要データ ・設備障害データ ・運用に影響する気象データ	・各技術の技術および経済性特性の現状と将来予測データ ・貯蔵必要量を分析するための需要・再エネの出力などのデータ		・電源・需要の新設/廃止の予想/見通し ・送配電網接続・Z ・需要、潮流実績 ・電圧・周波数実績 ・設備/系統事故 ・(PMUデータ)+L10 ・需要の予測値および実績値(ノード単位) ・再エネの予測値および実績値(ノード単位) ・送電線潮流の計画値および実績値(連系線および地内)	・需要実績(今後は機器別計量データも) ・発電実績 ・気象予測 ・行動予測 ・市場価格 ・市場価格分析用のデータ	機器の利用実績、仕様 機器の利用実績を分析できる関連データ ・需要属性、気象、系統状態、その他連鎖脱落など大きな事故を再現・分析できるデータ	ネットワークの運用特性 例)応答遅延時間Latency スループット ネットワークによる障害の発生を再現・分析できるデータ サイバーセキュリティ情報、インシデントと対策
6.議論・研鑽の分野別コミュニティ	〈学会関係〉 ・電気学会 ・電気設備学会 ・CIGRE ・IEEE ・電気協同研究会 ・JESC(各専門委員会) ・IEC、JIS、JEC等の標準化委員会 〈産官学連携〉 ・NEDO事業、SIP事業 〈関連団体・業界〉 JEMA、JPEA、JWPA、JEA、JET 電気事業連合会・送配電網協議会 電力中央研究所、グリッドスカイウェイ、送電線技術建設技術研究会、スマレジ ほか	〈学会関係〉 ・電気学会 ・CIGRE ・IEEE ・電気協同研究会 ・電気化学会電池討論会 ・化学工学会 ・水素エネルギー協会 ・日本エネルギー学会 ・IEC、JIS、JEC等の標準化委員会 〈産官学連携〉 ・NEDO事業, SIP事業 〈関連団体・業界〉 電力関係は送配電・インバータなどを参照		・電気学会 ・エネルギー・資源学会 ・CIGRE ・電気協同研究会 ・IEEE ・NEDO事業 ・産業界 送配電事業者 電機メーカー 送配電網協議会 ほか	＜学会関係＞ ・電気学会(B部門、C部門) ・エネルギー・資源学会 ・BECC(寄稿変動・省エネルギー行動会議) ※小売電気事業者やアグリゲータが標準的に集まる学会がない ＜関連団体・業界＞ ・電気事業連合会 ・電気事業低炭素社会協議会(ELCS) ・再エネ推進新電力協議会(REAP):地域新電力等 ・再生可能エネルギー長期安定電源推進協会(REASP):再エネ発電側も多いが小売側取組も有り	〈学会関係〉 ・電気学会(B部門, C部門) ・エネルギー・資源学会 ・CIGRE ・IEEE ・電気協同研究会 ・JESC(各専門委員会) ・IEC、JIS、JEC等の標準化委員会 〈産官学連携〉 ・NEDO事業, SIP事業 〈関連団体・業界〉 JEMA、JPEA、JWPA、JEA、JET 電気事業連合会・送配電網協議会 GDBL, Agoop等のデータ会社 自動車OEM, 充電インフラ会社	＜学会関係＞ ・電気学会(B部門、C部門、D部門) ・電子情報通信学会 ・IEEE ・CIGRE、情報処理学会、日本OR学会 ＜関連団体・業界＞ ・電気事業連合会 ・送配電網協議会 ・日本電機工業会 ・エネルギーリソースアグリゲーション事業協会 ・情報通信研究機構(NICT) ・情報処理推進機構(IPA)

7.人材育成分野（教育・研究・産業など）	・電力系統工学とパワーエレクトロニクスの双方に精通した人材 ・データ分析・AI などデジタル人材 ・電工作業員，電気主任技術者の確保・育成 ・配電事業ライセンス，地域マイクログリッドを活用できる人材	・蓄電池：蓄電池に加え電力系統工学、パワーエレクトロニクスのに精通した人材 ・水素等：化学工学、電力にケミカルの貯蔵・輸送・利用を含めたシステム工学などに精通した人材		・電力系統工学とパワーエレクトロニクスの双方に精通した人材 ・電力系統工学の基礎知識と、各種市場に関する知識、制度文書を読み解く力 ・データ分析・AI などデジタル人材 ・電力系統工学の基礎知識を持ち、数理最適化に精通した人材	・電力系統工学の基礎知識と、各種市場に関する知識、制度文書を読み解く力 ・データ分析・AI などデジタル人材	・エネルギー需要，電力系統工学，土木・交通に精通した人材 ・データ分析・AI などデジタル人材	・情報通信に関する基礎知識を有する人材 ・サイバーセキュリティの専門人材
8.競争力へ直結するキーワード	・新技術・再エネ・既存技術・NW 対策を統合した運用 ・再エネ導入量増大を考慮した効率的な設備形成 ・保全のデジタル化，スマート化（少人化、効率化） ・地域マイクログリッドによる産業活性化	・貯蔵の適用単位、地点などによる価値評価、制御設計に基づく運用 ・再エネ導入量増大に伴う役割と必要量の変化の定量想定 ・多数設備の運用最適化保全のデジタル化 ・電力以外のニーズとの組み合わせ		・新技術・再エネ・既存技術・NW 対策を統合した運用 ・電源・NW・需要への投資の全体最適 ・デジタル化・スマート化（少人化、効率化） ・電気事業以外の分野との協調	・他分野連携 WEB マーケティング、ゲーミフィケーション／金融工学／IoT 機器等／サイバーセキュリティ	・セクターカップリング・システム社会連携 ・デジタル化・スマート化 ・DER，DSR，DER フレキシビリティ ・DR・VPP，DR ready	・戦略的標準化（国内外）
9.リスク	・技術者不足（電力会社，メーカー，電工作業員，電気主任技術者など） ・技術のブラックボックス化（技術継承に関する問題） ・高経年設備の故障多発 ・再エネ導入量増大による設備形成コストの増大 ・材料の価格上昇	・ユースケースによる段階的な必要量・機能の見誤り ・ユースケースに関するその他の見誤り ・社会への大規模導入のインパクト		・電力品質の低下 ・電気料金の高騰 ・脱炭素の未完 ・人材不足	・サイバーセキュリティ ・他業種との融合・サービス化による需要の柔軟性の縮小	・サイバーセキュリティ ・データセキュリティ／プライバシー ・システム設計の複雑化	・サイバーアタック ・EMP ・AI シンギュラリティ
10.提言先	各省庁、自治体、電力会社，メーカー、大学・高専・高校	各省庁、自治体、電力会社，メーカー、大学・高専・高校、災害対応部署		各省庁、自治体、電力会社，メーカー、大学・高専・高校	各省庁，電力会社，メーカー	各省庁、自治体、電力会社，メーカー（電機メーカー、自動車）、大学・高専・高校	各省庁、電力関連事業者、メーカー、大学・高専

項目	解析 I;電力	解析 II:エネルギー	市場	政策
討議担当	辻隆男	小宮山涼一	山口順之	杉山昌広
閲読委員	井上俊雄、北裕幸	藤井康正	浅野浩志	戸田直樹
1.分野イメージ	現象の理解・課題解決のために計算機を含めたシミュレーション等を行い、判断材料を得ること。 目的 ・現象分析・評価 ・機器・システム設計 例)電磁界、インバータ設計、併設/系統用蓄電池、機器・システム保護 ・設備・投資計画 例)送配電網、連系解析 ・政策・制度・技術の検討・評価 例)3E、グリッドコード、DER 活用、発・蓄・送配・需要技術 ・運用計画、毎日の運用 例)システム運用、市場入札、機器運用、燃料調達 ・事故分析・対策評価 ・技術開発の分析・評価 例)蓄電技術 ・基準/標準策定 ・人材育成	エネルギーシステムの理解・課題解決のために計算機を含めたシミュレーション等を行い、判断材料を得ること。 目的 ・将来シナリオ策定・評価 例)2050CN シナリオ ・投資計画・評価 例)エネルギー・電力関連設備の投資計画や運用計画、エネルギーサプライチェーンの評価(生産、輸送、貯蔵、消費)、CCUS や蓄エネルギー技術の評価 ・政策・制度検討・技術評価 例)3E、省エネ、電化、合成燃料、炭素税、各エネルギー技術	地域により制度が異なるが、毎日の運用におけるエネルギー(kWh)とアンシラリーサービスの調達から始まった。 その後の環境変化の中で、以下の拡充が進行中 ・容量市場 ・アンシラリーサービスにおける各種ちう勢力、慣性、無効電力・電圧調整 ・分散型資源の市場参加 エネルギー(kWh)価格低下見通しの中での再設計の議論	国・地域の単位で、科学的エビデンス(証拠)に基づく政策形成の制度、仕組み、能力を高める必要性がある。
2.求められる姿、期待される役割	・模擬範囲:物理的、制御、制度 ・解析精度 ・効率性 ・指標のもとでの最適化 ・不確実性の扱い ・極端事象を含む多様な環境・条件の再現 例)同期機現象影響、 ・現象の可視化	技術・制度・環境を統合的に考慮し、精緻化と効率化を両立しつつ、不確実性にも対応できる分析基盤の構築 分析結果を多様な利害関係者に対して可視化し、意思決定に資する役割を果たすことを期待	市場取引を通した運用最適化による、毎日の電力システム運用の 3E の実現 設備投資に関する市場価格シグナルの発信 3E に向けた資源最大活用のための技術中立な仕組みの導入 技術を含む環境変化に伴う制度整備と連系した継続的な改善	長期的な取り組み(気候変動対応など)では、目標設定、資源配分、人材育成等、政策は不可欠かつ大きな役割を果たす。 他方、社会、技術が大きく変化する中で、長期の社会・設備の形成に関する政策においては、政策自体のリスク大きい。 政策本来の役割に加え、環境変化の中で、継続的に改善できることが重要。
3.段階的移行のためのキー技術	・定常状態の解析 例)潮流、最適潮流、DCOPF、ACOPF ・各時間領域の動的解析 例)周波数、電圧 ・大規模・高粒度解析 例)EMT、送配電網、DER ・モデル 例)GFM、火力発電、大規模需要、人間・社会の応答 ・モデル推定 例)需要特性、DER 群、日射・風速 ・データの収集・判別・推定 例)PMU	・地理的・時間的・技術的な解像度の向上 例)高解像度の気象・需要データ,都市・地域レベルの分散型資源量,詳細時間粒度での需給変動,多様なエネルギー供給・需要機器 ・モデル 例)エネルギーインフラに関する情報(電力・ガスなどの基幹インフラ) ・データの収集・判別・推定 例)国・地域別のエネルギー需給統計、電力市場データなど	多様な技術の特性の反映 ・集中型電源の起動停止、最低運転電力、負荷変化速度 ・再エネの出力および予測誤差の予測 ・分散電源のアグリゲーションを含む扱い ・蓄電池付帯電源、データセンターなど複合設備の扱い ・貯蔵、分散資源、複合設備など、最適化システムの効率的な解法	データ収集・分析を通して、社会・技術の動向に関して、社会・技術の動向に関する情報を適正に抽出する技術

4.段階的移行のためのキーシステム技術	・他の解析手法との連成 例)Hardware-in-the-loop(HIL)、アグリゲータ、燃料貯蔵 ・解析規模の拡大 例)EMT におけるエリアモデル、ローカル系統・配電網 ・他分野のシステムの連携・統合 例)エネルギー、ガスシステム、コミュニティ、交通、燃料	・他の解析手法との連成 例)電力需給解析、ガス・石油需給解析 ・他分野の解析との連携・統合 例)電力、石油、ガス、輸送交通	運営の改善 ・再エネ出力、極端気象、DR 導入など不確実性下のアデカシー確保 ・ゲートクローズのリアルタイムにより近い取、取引時間コマの短縮 ・市場取引外の費用(UPLIFT)の低減 市場運営インフラ ・取引の最適化ツール・手法 ・システム運用との連携 ・セキュリティ	エビデンスに基づく政策形成に向けたシステマティック・レビュー、システマティック・マッピングのツール(https://www.rayyan.ai, https://elicit.com/)
5.キーデータ	・需要:時系列、特性 ・機器:電源・送配電機器・DER の容量、運用範囲、制御系、建設費 ・運用データ:運用・管理方式、予備力・調整力必要量、連系線運用 ・事故・擾乱:想定事故条件 ・燃料:価格、制約、新燃料 ・再エネ出力変動データ ・設備最適化パラメータ:金利	・需要:電力、熱需要等の時系列プロファイル、需要の弾力性(価格弾力性、需要側調整可能量) ・技術・設備:エネルギー関連インフラの設備容量、コスト(将来コスト低減見通し等)、地理的配置(立地制約、土地利用、接続制約)、定検スケジュール、設備寿命、建設リードタイム、技術特性(変換効率、部分負荷効率) ・燃料:価格、輸送制約(パイプライン・LNG 受入能力など)、CO_2など排出係数(環境制約) ・設備最適化パラメータ:設備投資評価における割引率(社会的割引率、WACC)	過去の取引を含む実績データの蓄積と活用 将来の市場設計のための将来データ 再エネの出力予測のデータ ・出力予測 ・信頼区間 ・極端気象 気象・災害データの拡充 需要側データ収集の拡充	
6.議論・研鑽の分野別コミュニティ		・電気学会 ・エネルギー・資源学会 ・IEW ・IAEE ・官公庁 経産省、電力広域的運営推進機関、環境省 ・産業界 エネルギー事業者(電力、石油、ガス他) メーカー ほか	〈学会関係〉 ・電気学会 ・CIGRE ・IEEE 〈官公庁〉 経産省、電力広域的運営推進機関、環境省 〈産官学連携〉 ・NEDO 事業, SIP 事業 〈取引所〉 JEPX, EPRX, 東京商品取引所 〈関連団体・業界〉 JEMA、 JPEA、 JWPA 電気事業連合会・送配電網協議会 一般送配電事業者 エネルギーリソースアグリゲーション事業協会 銀行などの金融機関	エネルギー・資源学会 環境経済・政策学会 公益事業学会 研究・イノベーション学会 ただ、日本の知見不足のため、より広く国際的な研究コミュニティの関与が必須
7.人材育成分野(教育・研究・産業など)		・エネルギー分野全体に精通した人材 ・エネルギーの特性、システム、制度に関する知識 ・データ分析・AI などデジタル人材 ・エネルギーモデルに精通した人材	・電力系統工学の基礎知識と、各種市場に関する知識、制度文書を読み解く力 ・データ分析・AI などデジタル人材 ・予測やリスク評価に精通した人材 ・数理最適化に精通した人材 ・確率モデルに精通した人材	

8.競争力へ直結するキーワード		・最適化：生産・輸送・貯蔵・消費にわたるシステム全体コスト最小化。投資、運用、環境負荷低減の同時最適化。 ・柔軟性：需給変動に対応するための蓄エネ・需要制御(DR)等の統合的計画管理 ・レジリエンス：災害・地政学リスク・稀頻度事象に対する強靭性と回復力 ・低炭素化・脱炭素	リスク評価，データ分析，数理最適化，投資理論	
9.リスク		・分析結果の信頼度、不確実性 ・解像度不足：地理的・時間的・技術的な解像度 ・ブラックボックス化：最適化や AI モデルの解釈性 ・社会的受容性の評価：技術、インフラ	行政指導への依存 産業政策と市場設計の違いの混乱	
10.提言先		各省庁、自治体、エネルギー事業者，メーカー、大学・高専・高校	各省庁，電力会社，メーカー、大学・高専・高校	

第 3 章　技術・システム技術の課題

第 2 章で整理したように、電力・エネルギーシステムを取り巻く環境は大きく変化している。本プロジェクトでは、第 1 回から第 10 回までの会合および中間シンポジウム、後半シンポジウムを通じて、発電、送配電、需要、運用、情報通信、解析など多様な分野における技術的課題が議論された。

議論を通じて共有された認識は、個別技術の不足への対応に加え、複数の技術を統合して機能させることが今後の大きな課題になりつつあるという点であった。再生可能エネルギー、蓄電池、需要側資源、情報通信技術、解析技術などの導入が進む中で、従来の個別最適化型の技術開発だけでは不十分で、設備形成、運用制御、情報処理、市場運用を統合するシステム技術の重要性が高まっているとの認識が共有された。

また、本プロジェクトでは、将来の電力システムにおいては発電設備、送配電設備、需要側資源、情報システムを一体として設計・運用する必要があり、技術課題の本質は個別機器の性能向上に加え、それらを統合し継続的に運用する仕組みの構築にあることが繰り返し指摘された。

3.1 発電技術の進展と課題

発電分野では、脱炭素化の進展に伴い、再生可能エネルギーと従来型電源の役割変化が主要な論点となった。

第 1 回会合では、同期機電源が周波数維持、電圧維持、慣性供給、短絡容量供給など、電力システム運用において多面的な役割を担っていることが整理された。一方で、火力発電の稼働率低下が進む中、これらの機能を将来どのように維持するかが課題として指摘された。また、部分負荷運転や起動停止の増加は、設備利用率の低下や維持管理負担の増加をもたらし同期機電源の維持を難しくしつつあることも議論された。

討議では、再エネ大量導入下において火力発電の役割そのものが変化しつつあることが指摘された。従来はベース電源としての効率の高さの価値が重視されてきたが、今後は調整力、供給力、電圧維持、短絡容量供給など多面的な機能を提供する役割が重要になるとの認識が示された。一方で、こうした価値は現行市場では十分評価されておらず、今後は複数価値を組み合わせた事業性確保の仕組みが必要との意見が示された。

また、火力設備の新設や更新を適切に行うためには、将来の電源利用形態や運用シナリオを定量的に示すことが重要であるとの指摘もあった。最低出力の引下げや起動停止性能の向上など、将来の運用条件に応じた新たな設備設計が求められる一方、その前提条件となる長期的な利用見通しは十分明確ではないとの問題意識が共有された。

第 2 回会合では、太陽光発電および風力発電の大量導入が前提条件となる将来像が示された。再エネ電源については固有の発電コスト低減が進む一方、出力変動や予測誤

差への対応が必要となることが議論された。討議では、再エネ大量導入の制約が発電技術そのものから、事業モデル、地域受容性、グリッドコード、市場制度、人材・サプライチェーンへ広がっていることが議論された。

再生可能エネルギーの導入拡大のためには、太陽光は、モジュール価格低下に加えて、流通コスト、資金調達、売電先、出力制御後の収益確保が課題として指摘された。風力は、洋上風力のコスト低減、浮体式技術、日本独自仕様と国際競争力の両立、海外メーカー活用と国内技術基盤の維持が論点となった。特に風力発電については、需給調整力供給やグリッドコード対応が重要な課題として整理され、発電設備の国産化率やサプライチェーン確保も議論され、エネルギー転換を支える産業基盤の重要性が指摘された。

中間シンポジウムでは、VRE（Variable Renewable Energy）[5]の導入拡大に伴い、供給力確保のみならず柔軟性確保が重要になるとの認識が共有された。討議では、太陽光発電の大量導入により需要ピークの構造が変化しつつあることが指摘された。従来の夏季昼間ピークから冬季夕方や悪天候時の正味需要ピークへと供給不足が課題となる時点が移行しており、既存の数時間単位までの需給調整力だけでなく、より数日から季節間など、より長時間・長期間のエネルギー貯蔵 LDES[6]の重要性も議論された。

また、将来の電力システム像については、ゼロエミッション火力が調整力の中心を担う場合と、需要側資源が大きな役割を果たす場合とで、必要な設備構成が大きく異なる可能性も指摘された。そのため、本プロジェクトでは単一の将来像ではなく、複数シナリオを比較しながら検討することの重要性が共有された。

これらの議論を通じて、本プロジェクトでは発電技術の課題を個別電源の性能向上だけでなく、システム全体への統合の観点から捉える必要性が共有された。

コラム 3-1 風力発電の制御機能の活用

風力発電の出力は風任せと思われがちであるが、実際には電力系統の安定運用に役立つ様々な制御機能を有している。最大出力制御、出力変化率制御、周波数や電圧変動に応じた出力制御などが代表例である。

技術的な機能の実際の運用への定着は、その機能による便益を誰が享受できるかに大きく左右される。その好例が、強風時の縮退運転機能であるストームコントロールである。通常、風力発電機は一定以上の強風時には安全確保のため停止する。しかし、大規模な風力発電所が定格出力付近で運転している状態から一斉に停止すると、電力系統から見ると大きな擾乱となる。このためストームコントロールでは、強風時でも出力を徐々に低下させながら運転を継続し、系統への影響を緩和する。系統側は急激な出力変動を回避でき、事業者側は発電量を増やすことができる、すなわち系統側と発電事業者側の利害が一致しているため、機能の導入が自然に進みやすい。

[5] 太陽光発電や風力発電など、天気や時間で出力が変動する再生可能エネルギー発電
[6] 10 時間程度を超え季節間変動への対応を含め Long Duration Energy Storage（LDES）と呼ばれる。

一方、調整力供給を目的とした出力制御では、系統側と発電事業者側の利害が必ずしも一致しない。例えば下げ調整力を供給する場合、風力発電事業者は本来発電できる電力を抑制して系統運用に貢献することになる。逆に上げ調整力を供給する場合も、有事に出力を増加できるよう、平常時には本来より低い出力で運転する必要がある。いずれの場合も、事業者にとっては売電収入の減少につながる。

電力システム全体で見ると、再エネが調整力供給に参加することは、結果として再エネ導入拡大にも寄与する。例えば、出力抑制を一定程度受け入れることで、送電設備や発電設備は、常に最大出力に対応できるよう整備する必要がなくなる。太陽光発電所や風力発電所は広域に分散しており、すべての設備が同時に最大出力となることは稀である。それにもかかわらず、すべてのピーク出力を受け入れられる送電網をめざせば、過剰な設備投資につながる。または、電力系統では需要と供給を常に一致させるために、再エネの出力変動に対応するため、一定量の火力発電設備などを運転しておく必要がある。もし再エネ自身が調整力を供給できれば、この火力発電設備への依存を減らせ、火力発電の発電量を低減してその分だけ再エネの発電機会を増やすことができる。

3.2 送配電技術の進展と制約

送配電分野では、再生可能エネルギー大量導入と分散型電源増加への対応が中心的な論点となった。

第 3 回会合では、直流送電の可能性や新たな配電保護方式についても議論された。今後、交流系統と直流系統が併存する可能性も示された。

第 4 回会合では、送電系統において非同期電源増加に伴う System Strength の低下や系統混雑への対応が議論された。送電線の増強には長期間を要することから、設備形成と運用制御を一体的に考える必要性が指摘された。一方、配電分野では太陽光発電大量導入に伴う電圧上昇、不平衡、逆潮流などの課題が整理された。Volt-Var 制御などの遠隔、ガバナフリーなどの自律的な制御技術など、新たな制御技術への期待も示された。

中間シンポジウムでは、送電・配電の境界を超えた統合的視点の重要性が指摘された。また、DER が大量導入される将来においては、TSO と DSO の連携や、送配電設備と需要側資源を統合した送配電網の運用の必要性が議論された。

第 4 回会合の討議では、必要な供給力や柔軟性の確保（アデカシー）とセキュリティを区別しつつ統合的に評価する必要性が確認された。また、広域化する基幹系統と分散化する需要地系統を一体として考え、設備形成と運用制御を統合すること、DER や DR を活用したアクティブネットワークを構築することが論点となった。さらに、配電網については、常時開放ループ、非接地方式、GFM 導入などにより、地域条件に応じた多様なアーキテクチャが必要になる可能性も指摘された。

さらに、送配電設備を支える技術者不足や人材育成の課題も繰り返し指摘され、その詳細は第 5 章および第 6 章で述べる。

本プロジェクトでは、送配電技術の課題は設備の増強のみで解決できるものではなく、制御技術、運用技術、人材確保さらにはネットワークとしての基本構造の最適化を含む総合的な課題として認識された。

コラム 3-2 送電網の運用・設備維持を含めた新技術

送電網の新技術というと、HVDC や超電導ケーブルなどの大型設備を連想しがちだが、欧米で進む技術開発の射程はそれより広い。再生可能エネルギーや分散型エネルギー資源が増える一方、送電線の新設・増強には長い時間を要する。そこで、既設設備の能力を引き出し、その状態をデータで捉えて運用・保守する技術の開発も進められている。

既設設備を生かす技術として、高温・低弛度電線への張り替えにより、既存の鉄塔や送電ルートを利用して送電容量を増やす技術がある。DLR（動的送電容量）は、風速、気温、日射、電線温度などから、その時点で安全に送電できる容量を算定する。開閉器の操作で系統構成を変えるトポロジー最適化や、FACTS などの潮流制御装置を組み合わせ、混雑する送電線から余裕のある送電線へ電力を振り分ける試みも進む。

運用・保守では、センサーや PMU による広域監視、AI を用いた需要・再エネ出力予測や異常検知、運用者の意思決定支援、シミュレーションの高度化などが進められている。設備・環境情報の一元管理・解析や、実設備の状態を仮想空間に再現するデジタルツインも、設備の状態や故障リスクに応じた保守への活用が検討されている。

技術の担い手も広がっている。National Grid はグループの投資部門を通じ、送電線を非接触で監視するスタートアップ LineVision に出資し、自社系統で実証・導入してきた。同社を含む 3 社と DLR の展開を進め、安全性を保ちながら回線の送電容量を平均 8%高められるとしている。電力会社が資金・運用の知見・実証環境とスタートアップの技術を組み合わせ、双方の成果につなげながら実系統で導入を広げるオープンイノベーションの一例である。

一方、新技術の便益は広域的・長期的に現れるため投資評価が難しく、信頼性の検証、既存システムとの統合、運用者の訓練、サイバー対策、制度・規制面の整備も課題となる。送電技術の開発対象は、設備形成と運用制御を一体的に捉え、設備、ソフトウェア、データを組み合わせて送電網全体を使いこなす仕組みへと広がっている。

参考文献

[1] ENTSO-E, RDI Roadmap 2024-2034, July 2024.
[2] U.S. Department of Energy, Advanced Transmission Technologies, December 2020.
[3] U.S. Department of Energy, AI for Energy, April 2024.
[4] LineVision, “LineVision Secures $12.5 Million in Series B Financing to Scale Grid Enhancing Technology,” April 2021.
[5] National Grid, “National Grid rollout new technology to expand the capacity of existing

power lines,” April 30, 2026.

コラム 3-3 電力システムのセル化と選択的アイランディング

電力システムの物理的制約の変質を踏まえ、国際的には能動的配電網（ADN）のように、従来の「一体運転を守る方式」から、「必要に応じ系統を分割し地域単位で自律性を確保する方式」への移行研究が進む。注目されるのが、セル化（Cell-based Architecture）と選択的アイランディングである。

セル化は地域単位で周波数・電圧を自律形成し、上位系統から切り離されても一定時間運転を継続できる構造である。グリッドフォーミング（GFM）インバータと蓄電池を核に、異常を広域へ波及させず地域単位に閉じ込める“物理的防波堤”を形成する。

従来の事故波及防止リレーによる系統分離は、基幹系統を守るため停電を許容して負荷側を切り離す緊急措置であった。これに対し、選択的アイランディングは GFM インバータの自律制御を活かして分離する範囲を極小化し、分離された側は電力供給を継続できる。これは、物理的制約が変質した電力システムにおける合理的なフェイルセーフ策となり得る。

こうした新たな物理的フェイルセーフ策は、サイバー攻撃や誤操作が周波数逸脱や広域遮断へ進展する場合にも有効と考えられる。サイバー攻撃は完全な防御が難しいからこそ、サイバー防御と物理的フェイルセーフの組合せが必要となる。具体的な構成としては、①侵入を防ぐ防御層、②セル化と選択的アイランディングで異常を閉じ込める物理層、③セル単位で段階的に復旧する再連系層の三層を統合することで、次世代のサイバー・フィジカル・レジリエンスを構築し得る。

物理的な制約が変質する次世代の電力システムにおいては、従来の波及防止の延長線では安定を確保できない。未知の物理現象やサイバー攻撃を完全に予測することはできないとしても、異常が起きても全体が巻き込まれない構造を備えることはできる。その構造の前提となる物理的制約を正しく理解することが、次世代の意思決定の質を高め、強靭な電力システムへの道筋を切り開く基盤となる。

3.3 需要側リソースとシステム運用

第 1 回から第 7 回にかけて、需要側資源活用と系統運用の関係が繰り返し議論された。第 1 回会合では、デマンドレスポンスやアグリゲータ活用が紹介され、需要を調整力として活用する可能性が議論された。特に電気温水器やエコキュートの運転シフトによる大規模な調整力確保の可能性が示された。

第 6 回会合では、年間計画から実需給断面に至る運用全体像が整理された。再生可能エネルギー導入拡大に伴い、不確実性を前提条件とした運用の重要性が高まっていることが指摘された。また、小売事業者の立場からは、価格シグナルを活用した需要家行動変容による需給調整の可能性が紹介された。

第 7 回会合では、EV、ヒートポンプ給湯機などの需要機器を活用した需給調整が議論

された。さらに、流動人口データや走行データなど、多様なデータを活用した需要の把握・予測の可能性も紹介された。

後半シンポジウムでは、需要側リソースを活用した柔軟性確保の重要性が改めて確認された。

これらの議論を通じて、需要側リソースは従来の受動的な電力消費の主体から、系統運用を支える能動的資源へと位置付けが変化しつつあるとの認識が共有された。

また、第 5 回会合では、将来の電力システムにおいて、DR、EV、ヒートポンプ給湯機、蓄電池などを含む需要側資源を統合的に評価し、継続的に更新する「フレキシビリティ資源計画（Flexibility Resource Planning）」の必要性が提起された。従来の供給力計画に加え、需要側資源を含めた柔軟性確保の考え方が重要になりつつあり、欧州では継続的な評価と見直しが行われていることも紹介された。日本においても、需要側資源を含めた統合的な評価手法の確立が課題として認識された。

3.4 デジタル技術とシステム解析

デジタル技術は、本プロジェクトにおいて分野横断的な基盤技術としての議論が繰り返して行われた。

第 7 回会合では、ECHONET Lite、OpenADR などの標準化や情報通信技術の重要性が議論された。討議では、分散型電源や DER が大量導入される将来に向けて、SCUC、SCED、OPF 等を含む最適化技術、Contingency Control や混雑管理・制御、保護リレーや PMU を活用した監視・保護、上位制御ソフトウェアの重要性が議論された。また、従来の同期機中心システムを前提条件とした保護思想を見直し、分散型・非同期型電源が増える時代に「何を守るべきか」を再整理する必要性が指摘された。また、DR Ready 機器やスマートメーター活用など、DER 活用を支える情報基盤整備の必要性が指摘された。

第 8 回会合では、実効値解析と瞬時値（EMT: Electro Magnetic Transient）解析の双方の必要性が議論された。インバータ主体システムでは、従来の実効値解析のみでは不十分である可能性が示され、EMT 解析の重要性が指摘された。討議では、再エネ大量導入に伴い、従来の実効値解析では十分に評価できない現象が増加するとの認識が共有された。一方、全系統を EMT 解析で評価することは計算負荷が重くなるため、短絡容量などの指標によるスクリーニング、実効値解析による簡略評価、EMT 解析による詳細評価を組み合わせた段階的解析の枠組みを確立する必要性が指摘された。さらに、モデル縮約技術や解析ガイドライン整備の重要性も議論された。

また、エネルギー需給モデルやシナリオ分析、AI 応用なども紹介され、将来の設備形成や制度設計において解析技術が果たす役割の大きさが共有された。

さらに、地点別価格解析や AI・データセンターなどの大規模需要の分析など、解析結果を設備投資や需要立地の誘導へ活用する可能性も議論された。地点別価格は、送電

線の増強や需要立地の判断に重要な情報を与えるため、GX 産業やデータセンターの立地最適化への応用も期待されている。また、AI を活用した最適化やシナリオ選択、計算高速化の研究も進展しており、説明可能性を確保しながら意思決定へ活用していくことの重要性が指摘された。

第 10 回会合および後半シンポジウムでは、SCADA や PMU による系統状態データ、スマートメーターによる需要データ、再エネ出力データなど、多様なデータを活用することの重要性が議論された。

大きく変化する電力システムの状況、システム運用、市場運営等のすべての実績データを活用し、解析結果を、運用計画をはじめとする多様な分野に応用する仕組みの重要性も議論された。将来は、系統状態をリアルタイムに把握しながら、安定化制御パラメータや制御パラメータを動的に調整する運用も視野に入るとの認識が示された。一方で、モデル誤差や不確実性への対応も必要であり、解析と運用を連続的に結び付ける仕組みの構築が課題として指摘された。

さらに、データ共有、モデル共有、解析環境共有、人材育成を含むオープンな解析基盤の必要性も繰り返し指摘された。

また、交通、水素など電力以外のエネルギー、通信、データセンターなどとのセクターカップリングのシステム解析も重要な研究領域として挙げられた。従来の電力システム解析に加え、複数の社会インフラを統合的に評価するマルチセクター解析の必要性が認識されており、ワット・ビット連携やデータセンターのデマンドレスポンス評価など、新たな解析対象も広がりつつある。

討議では、解析技術が人材育成基盤としても重要であるとの認識が示された。シミュレーションを通じた市場運用や系統運用の疑似体験は、現象の理解や意思決定能力の向上に有効であると考えられている。一方で、解析結果は前提条件やモデル化に依存するため、その限界や不確実性を理解し、結果の因果関係を説明できる能力を育成することが重要であるとの指摘もあった。

本プロジェクトでは、デジタル技術を単なる補助技術ではなく、将来の電力システムの運営を支える中核技術として位置付けた。

コラム 3-4 電力系統解析の体系と動向

電力系統解析には、潮流計算、周波数解析、故障電流計算、動特性解析、固有値解析、瞬時値解析、年間のプロダクションコスト解析など多様な解析手法が含まれる。これらの解析は、送配電網・電源・需要の計画、設計、運用に幅広く使われる、電力システムの基本的な技術である。

近年は、全世界で太陽光発電、風力発電、蓄電池、各種の需要など、インバータ機器で送配電網に接続される機器・設備が増加し、従来の同期発電機の運転容量が減少する傾向にある。

このため、再生可能エネルギーの出力変動と同期機が供給してきた回転慣性の減少により、系統周波数の変動が増加し、事故時の周波数変動も大きくなっている。また、同期機が提供してき交流電圧の安定性が低下し、インバータ機器同士あるいはインバータ機器とその他の機器の間での制御系の干渉や共振現象が発生しやすくなり、一部の地域では不安定現象が増えている。

これらは、電力系統解析の新たなニーズとなり、例えば、インバータ機器を含む不安定現象の解析には送電網とそこに接続される複数の設備を含めた大規模な瞬時値解析モデルが構築され、使われ始めている。また、ブラックアウト（大規模停電）や多様な系統事故の解析、原因究明、対策策定では、PUM（時刻同期した送配電網の電圧計測）データに基づくモデルが構築され、電力系統解析が行われている。

コラム 3-5 電力系統安定運用のための事故発生時における過渡解析と AI 応用

電力系統の安定運用を実現するためには，短絡故障等の発生時にも各種制約条件（電力潮流，電圧安定性，同期安定性，周波数安定性）が満足されるように運用容量を算定し，送電線を流れる電力潮流を適切に管理する必要がある（N-1 基準）。従来より地域間連系線の運用容量の算定は統一的な方法に沿って行われてきたが，現在では今後の同時市場への移行も想定し，地内送電線も含めた運用容量の算定方法を統一する議論が進められている（広域機関：将来の運用容量等の在り方に関する作業会，など）。

太陽光発電等の普及に伴い潮流条件の不確実性が増す中，事故発生時の安定性を適切に判定するためには，電力系統解析技術の高度化は不可欠である。特にインバータ電源の増加により電力系統の短絡容量や慣性が減少することで，過渡的な時間領域における電圧安定性や同期安定性の確認は一層重要となりつつある（イベリア半島におけるブラックアウトは顕著な事例である）。さらに近年では，データセンターに代表されるような大規模な需要の系統連系も進展し，その挙動も含めた電力系統解析の深化やグリッドコードの策定など，系統解析のニーズは高まる一方と言えよう。

一般に電力系統の過渡解析は，同期発電機などの動的な挙動を表す微分方程式と，ネットワークの電圧や電流を解析するための代数方程式を組み合わせた DAE（Differential and Algebraic Equation）として定式化される。時定数の短い現象を含む挙動となるため解析の時間刻みを十分に短くとる必要があり，計算負荷の大きい「硬い」問題とよく表現される。大規模な DAE を高速に求解するために，これまでに並列計算技術の適用など様々な試みがなされてきたが，近年ではパワーエレクトロニクス機器を含む瞬時値解析の必要性も増加し，より膨大な計算負荷への対処が求められている。

AI 応用は電力系統解析の高速化に際しても有効であり，その活用手法が広く検討されている。例えば，機械学習を用いて系統条件に応じた各種安定性を判別する手法は従来から研究事例が多く見られるが，その精度は年々向上しているように感じられる。また，DAE に含まれる一部のコンポーネントを機械学習に基づくサロゲートモデルで代替することで，直接的に DAE を解くことなく，時系列波形を推論に基づいて再現する手法も提案されている。AI 応用は常に信頼性の確保が重要な課題となるが，説明可能性を付与する XAI（eXplainable AI）技術の応用も幅広く

議論されており，今後の更なる発展に期待したい。

本章のまとめ：個別の技術ではなく統合が課題

本プロジェクトで議論された技術課題は多岐にわたるが、共通していたのは、必要な要素技術が存在しないこと、新たな技術の導入と並行に加えて、個別の技術を統合して機能させることが難しくなっているという認識であった。

発電分野では同期機とインバータ電源の共存、送配電分野では設備形成と運用制御の統合、需要分野では需要家と系統運用の連携、デジタル分野では解析技術とシステム運用の接続が課題として現れている。また、従来は個別設備の性能向上が技術開発の中心であったが、再生可能エネルギーや DER の大量導入が進む中で、電源、系統、需要、情報を一体として設計・運用する必要性が高まっていることが繰り返し指摘された。

例えば、火力発電に求められる価値は発電量から調整力、更には電圧維持、短絡容量供給へと変化しつつあり、需要側資源についても受動的なエネルギー消費設備ではなく柔軟性を提供する運用資源として位置付けられ始めている。さらに、GFM インバータをはじめとする新技術の導入、解析技術や制御保護技術を含めた運用方式の見直し、PMU 等を活用した広域監視、状態/異常現象の発見、制御保護への活用、実効値解析と EMT 解析を組み合わせた分析など、今後の電力システムでは個別技術の高度化と導入にとどまらず連携した移行戦略の重要性が増していることが共有された。

人材については、技術課題は個別分野に閉じるのではなく、市場制度、データ基盤、人材育成、ガバナンスとも密接に関係していることが繰り返し指摘された。とりわけ、インバータ技術、系統技術、解析技術、情報技術を横断的に理解できる人材の育成は、将来の技術競争力や社会実装能力を左右する重要課題として認識された。

解析技術の役割も大きく変化しつつある。解析はもはや技術評価・設計のためだけの手段ではなく、運用、投資、制度設計、さらには需要立地や社会インフラ設計を支える基盤へと発展しつつある。地点別価格分析、リアルタイム状態評価、セクターカップリング解析などの議論は、その方向性を示すものであった。

こうした背景から、本プロジェクトでは、個別技術開発にとどまらず、システム統合、分野横断的人材育成、データ共有基盤整備を含めた総合的かつ中長期的な取り組みが必要であるとの認識が共有された。そして技術課題の本質は、個別技術の優劣ではなく、それらを社会システム全体の中でどのように統合し、継続的に進化させていくかにあるとの理解が形成された。

第 4 章　制度の構造的課題

第 3 章で整理したように、本プロジェクトでは発電、送配電、需要・供給、運用、情報通信などの各分野における技術的課題が議論された。

しかし、議論を進める中で繰り返し指摘されたのは、技術的に可能であっても、それを社会実装するための制度や市場が必ずしも十分に整備されていない点であった。特に、再生可能エネルギー大量導入、需要側リソース活用、DER 増加、データ活用拡大などの状況やニーズの変化に対し、既存制度は従来の電力システムを前提条件として設計されている部分が多く、新たな課題が顕在化しつつある。

本章では、本プロジェクトを通じて共有された制度面の構造的な課題を整理する。

4.1 電力市場の変容と価格シグナルの歪み

本プロジェクトでは、再生可能エネルギー導入拡大に伴い、市場が担う役割そのものが変化しつつあることが議論された。従来の電力市場は、主として発電電力量（kWh）の取引を中心として設計されてきた。しかし、再生可能エネルギー比率が高まる中では、単純な発電量だけでなく、柔軟性、調整力、供給信頼度などの価値が重要になりつつある。

第 1 回会合では、需要側資源を調整力として活用する議論が行われた。また、第 2 回会合では再生可能エネルギーが需給調整力を供給する可能性についても議論された。

価格シグナルの役割について、第 6 回会合では小売事業者の立場から、需要家の行動変容の可能性が紹介された。一方で、需要家に十分な情報やインセンティブが届いていないことも課題として指摘された。また第 7 回会合では、需要家機器を外部から直接制御するのではなく、価格情報を通じて需要家自身の判断を促す仕組みの重要性も議論された。一方で、系統運用側からは確実な応答も必要であるため、価格シグナルと契約型 DR を組み合わせたハイブリッド型の仕組みが現実的ではないかとの認識が示された。

地点別価格・市場情報について、第 9 回会合では、市場価格シグナル、地点別価格、需給状況の反映方法などについて議論が行われた。また第 8 回会合では、地点別価格解析を設備投資や需要立地の誘導に活用する可能性も議論された。特に、データセンター需要、GX 関連産業の立地を、価格情報を通じて地域誘導する問題提起がなされた。一方で、現在の市場制度では地内系統混雑やローカルな制約が十分反映されておらず、地点別価格と市場制度をどのように接続するかが課題として浮かび上がった。さらに、第 10 回会合では、価格を単なるコスト回収手段ではなく、需要家の支払意思や地点別価値を反映する情報として捉える必要性が議論された。地点別価格は、理論的には需要立地や DER 導入を誘導する有力な手段となり得る一方、現在の託送料金制度との整合には大きな制度的課題があることも指摘された。

一方、価格情報が十分に機能していないことが、エネルギーシステム全体を各分野が

協調するように設計する上での制約になっているとの問題が、第 5 回会合で提起された。将来の電力価格、水素価格、カーボン価格が不透明な状況では、各主体が独立して合理的な判断を行いにくく、技術導入や需要側行動の誘導にも限界が生じるとの認識が示された。また、限界費用ゼロに近い電源が増加する中で、市場価格だけで投資回収や供給力確保を実現することの難しさも指摘された。

後半シンポジウムでは、需要活用、市場統合、超分散型市場、自動入札などの将来市場の可能性について議論が行われた。

これらの議論を通じて、本プロジェクトでは従来の発電電力量（kWh）中心の市場設計だけではなく、柔軟性、供給力、その他の価値や課題を適切に評価する仕組みの重要性が共有された。また、こうした価値や課題を市場価格へ反映する方法については引き続き検討が必要であるとの認識も示された。

4.2 長期投資と短期市場の不整合

本プロジェクトでは、将来の電力システムにおいて必要な供給力や柔軟性をどのように確保するか、すなわちアデカシー（必要な供給力や柔軟性の確保）の問題についても繰り返し議論が行われた。特に、設備形成には送電線に代表されるように長期間を要する一方で、市場取引は短期化しており、長期投資と短期市場の間に存在するギャップをどのように埋めるかが重要な課題として認識され、将来の設備形成を支える投資インセンティブについても繰り返し議論が行われた。

第 4 回会合では、送電線増強には長期間を要する一方で、将来の需要や電源構成には大きな不確実性が存在することが指摘された。また、第 1 回会合では火力発電の稼働率低下、第 2 回会合では再エネ導入拡大、第 5 回会合では長期エネルギー貯蔵の必要性などが議論されている。こうした中で、設備投資判断と短期市場価格の関係が大きな課題として認識された。

第 9 回会合では、市場レビューや容量市場の役割が議論され、短期市場が効率的な需給調整に寄与する一方で、中長期的な供給力確保や新規投資を十分誘発できていないという問題が提起された。

第 10 回会合では、短期取引と長期投資の間に存在する「Tenor gap」も論点となった。発電所側は長期の投資回収を前提条件とする一方、需要家や購入側は長期契約を結びにくく、その間の長期リスクの担保が課題として指摘された。

また、既存火力については、現時点でも電力供給の大きな部分を担っていることから、カーボンニュートラルへの移行過程においてどのように活用し、どのように代替していくのかについて、十分な議論が必要であるとの問題意識が示された。討議では、将来の電力システムにおいて必要な供給力や柔軟性をどのように確保するかが重要な論点となった。特に、再生可能エネルギーや需要側資源の導入拡大に伴い、従来の発電設備中心の考

え方だけでは将来のアデカシーを十分評価できなくなる可能性が指摘された。そのため、長期的な供給力と柔軟性の必要量を将来について示すことや[7]、供給責任や柔軟性確保の在り方を、市場制度と政策の双方の観点から継続的に検討していく必要性が共有された。

後半シンポジウムでは、ネガティブプライスや市場ルール、価値取引の在り方も議論された。

本プロジェクトでは、短期的効率性と長期的供給力確保をどのように両立させるかが制度上の重要課題であるとの認識が共有された。

コラム 4-1 IEA が指摘する電力市場の不備

IEA は、2025 年末に公表した報告書“Electricity Market Design Building on strengths, addressing gaps”の中で、いくつかの国・地域における電力市場のパフォーマンスを評価している。IEA は市場を、価格シグナルを通じて、リアルタイムおよび短期的な需給運用を最適化することを目的とする短期市場と、中長期にわたって予測可能な価格・数量の契約の機会を提供し、投資家による電源投資を適切にサポートすることを目的とする中長期市場に分類した。その上で、短期市場による「運用の最適化」はおおむね期待どおりに機能しているとする一方、中長期市場による「投資の最適化」は期待に応えられていないと指摘している。

IEA はこの原因を、発電事業者（投資家）と小売事業者の間の契約期間のギャップ（Tenor gap）にあると指摘する。すなわち、発電事業者は、投資資金を円滑に回収するため、通常は 15 年程度以上の長期契約を望む一方で、小売事業者は、将来の需要の不確実性から概ね 3 年以内の短期の契約を好む。両者のギャップから、中長期市場の流動性は低く、発電事業者の投資判断をサポートできる市場たり得ていないと指摘する。



出所：IEAレポートP18の図を参考に作成

もっとも、「市場が投資の最適化を実現しないこと」には、より根源的な原因がある。世界各国の電力市場は、市場が発する価格シグナルが運用も投資も最適化する、という思想の下で進められてきたが、この思想がナイーブすぎたといえる。すなわち、市場が完全であれば（完全競争市場であれば）、「市場が発する価格シグナルが運用も投資も最適化する」が、電力市場は当然に完全ではない。一例をあげれば、電力システムは需給バランスが崩れれば最悪広域停電に至るため、

[7] 欧州 ENTSO-e では、2030 年代に向け、各国および欧州全体での調整力の必要量を分析、報告している。

需給の一致を停電の瀬戸際まで市場に委ねることはしない。そこに至る前に系統運用者が市場によらない措置（電圧低下、UFR 作動等）により介入するので、電力市場の価格は、必然的に電気の希少性（供給信頼度の価値）を反映するには不十分な水準にとどまる。したがって、発電部門への投資は過少となり、投資の最適化は実現しない。

参考文献

IEA(2025)” Electricity Market Design Building on strengths, addressing gaps”

4.3 分断を乗り越えた全体最適

本プロジェクトを通じて繰り返し現れた論点の一つが、制度や組織の分断であった。

第 10 回会合では、発電、小売、送配電が分断され、それぞれが異なる目的の下で行動する現在の制度による構造では、電力システム全体の将来像を描きにくくなっているとの指摘があった。特に、発送分離に伴い、電源側とネットワーク側の間で自由な議論や情報共有が難しくなっていることも指摘された。また、討議では、需要側資源を柔軟性資源として活用するためには、設備形成、市場制度、系統運用を横断的に評価する仕組みが必要であるとの指摘がなされた。フレキシビリティ資源計画の考え方は、こうした制度横断的な評価を行うための一つの枠組みとして紹介された。これは、制度や市場を個別に設計するのではなく、需要側資源を含めた全体最適の観点から継続的に見直す仕組みが必要であることを示している。

第 4 回会合では、基幹系統と需要地系統を一体として捉え、設備形成と運用制御を統合的に考える必要性が議論された。また、送電・配電・市場・運用を横断した全体最適の視点や、司令塔機能の必要性についても指摘された。

第 5 回会合では、水素、電力、熱利用を含めたエネルギーネットワーク全体の設計の重要性が提起された。

第 7 回会合以降では、需要機器、情報通信、標準化、データ活用など、従来は別々に議論されていた分野の連携が必要になっていることが繰り返し示された。

さらに第 10 回会合では、「電力×〇〇」という表現が用いられ、電力と AI、通信、モビリティ、産業などの連携が重要論点として整理された。

後半シンポジウムでも、分野横断教育、需要活用、市場統合、社会システムとの接続などが議論されている。

本プロジェクトでは、制度の課題解決にあたっては、個別の制度の最適化では十分ではなく、電力システム全体、さらには社会システム全体の観点から制度設計を見直す必要性が共有された。

第 6 回会合では、再エネ予測の不確実性が高まる中で、週間運用、同時市場、BG 制度、揚水・系統用蓄電池の運用が議論された。そこでは、市場における需給バランスと物理的な系統運用をどのように整合させるかが重要課題として確認され、需給運用、系統運用、市場設計を一体的に考える必要性が指摘された。また、バランシンググループ（BG）の役割や TSO との責任分担、揚水発電や系統用蓄電池を市場最適化の中でどのように活用するかも論点となり、市場と運用の統合設計の重要性が共有された。

第 2 回会合でも、再エネ大量導入を進めるためには、グリッドコード、制御技術、市場制度、将来設備への更新戦略を一体的に設計する視点や枠組みの必要性が指摘された。特に、再エネの調整力への活用については、義務として確保する機能と市場で調達する機能の整合性が重要であり、技術要件だけを整備しても、それを誰がどのように使い、どの価値として評価するかが明確にして進めるべきとの認識が示された。

コラム 4-2 分散型電源の出力制御機能を活用するための市場制度

分散型電源の出力制御を活用することで得られる便益は、電力システム全体に現れるものであり、個々の発電事業者からは直接見えにくい。発電事業者にとって出力抑制は売電収入の減少を意味するため、その貢献に対してどのように対価を支払うべきかが問題となる。ここに市場設計の重要性がある。

調整力の市場設計に際しては、品質の異なる調整力をどのように評価し活用するか、またそれぞれの技術の特性に応じた調整力の要件設定が論点となる。全ての調整力に同一の要件を求める必要があるとは限らない。調整力は単純な有無ではなく、その確実性や応動性能といった品質差を持つ。例えば、変動性再エネには、上げ・下げ双方の調整力を求めるのではなく、下げ調整を中心に担わせるなど、それぞれの資源特性に応じた要件設定も考えられる。電源種別ごとに得意な機能を組み合わせることで、調整力全体をより効率的に確保できる可能性がある。

これまでの電力システムでは、火力発電や水力発電、蓄電池、アセスメントを受けたデマンドレスポンスのように、高い確実性を有する調整力を中心に運用することが可能であった。しかし、再エネの導入量が限定的だった時代と異なり、再エネ大量導入が進むと、不確実性を伴うものの広く分散して存在する変動性再エネの調整力の活用が求められる可能性がある。重要なのは、不確実性を伴う調整力を採用するか排除するかではなく、確実性の高い調整力と比較できるように、その品質差を価格や参加要件に反映することである。

再エネ大量導入によって、これまで当たり前だった「高品質な調整力だけで運用する」という前提そのものが変わりつつある。こうした議論を定量的に行うためには、需給バランスだけでなく需給調整力バランスも考慮した電力需給解析により不確実性を伴う調整力の価値を評価し、関係者間で共有することが重要な役割を果たす。再エネ大量導入時代においては、技術開発と市場設計を両輪で進めることが求められている。

コラム 4-3 同時市場における調整力確保と送電線混雑

再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、需要や再エネ出力の予測誤差に対応するための調

整力（ΔkW）を効率的に確保することが一層重要になっている。現在検討されている同時市場では、電力量（kWh）と調整力（ΔkW）を一体的に扱い、系統制約を考慮した電源起動停止計画（SCUC）等によって、発電機の起動停止や出力を最適化する方向で検討が進められている。本プロジェクトにおける会合では、前日以降に SCUC を更新することで、再エネや需要予測の変化へ対応する考え方が紹介された。

一方、必要量の ΔkW を計画しても、それを実際に発動できるとは限らない。調整力を発動により送電線潮流が変化し送電線の運用容量に抵触し、一部の ΔkW を発動できない場合がある。これは「発動制限 ΔkW」と呼ばれ、同時市場における重要な検討課題の一つである。対応方策として、ΔkW を送電容量制約に直接考慮する方法、SCUC・SCED とは別に潮流解析を行って計画を補正する方法、送電容量の一部をあらかじめマージンとして確保する方法などが考えられる。

送電容量にマージンを確保する考え方は、すでに系統運用にも存在する。需要や発電機出力の変動に伴って実潮流は計画から変化する分を考慮した裕度を設けることが必要となる。ΔkW を十分活用するために送電容量に一定のフリンジを確保する必要があるが、これを大きくすると利用可能な送電容量が減少し、経済性が低下するというトレードオフがある。

再エネの導入量がさらに増加すると、再エネ予測誤差によって、計画時には想定していなかった送電線混雑が生じる可能性も高まる。このような不確実性に対しても、混雑が発生するリスクを定量的に評価し、その大きさに応じて SCUC における送電線潮流の上限にマージンを設定する考え方があり得る。例えば、過負荷発生確率や潮流超過量の期待値などを用い、混雑リスクの高い送電線には大きなマージンを、リスクの低い送電線には小さなマージンを設定する方法である。ただし、マージンを大きく設定するほど送電網を利用できる余地は小さくなり、より高コストな電源の起動・運転が必要となる可能性がある。

安定供給のためにリスクをどこまで低減するかと、それに要する運用コストとのバランスを考えることが重要である。将来の同時市場では、kWh と ΔkW を同時に最適化するだけでなく、再エネ予測誤差などの不確実性と送電線混雑をどのように運用計画へ織り込むかが、重要な課題になると考えられる。

4.4 市場と政策の役割分担の再定義

第 9 回会合では、市場制度と政策ツール（規制、補助金）の関係が主要論点として議論された。市場は効率的な資源配分を短期から長期に実現する重要な仕組みである一方で、供給信頼度確保、安全保障、レジリエンス、人材育成など、市場だけでは十分に解決できない課題も存在する。

第 10 回会合では、市場に何を任せ、市場に任せられないものをどう扱うか、政策、規制、市場の役割分担そのものが重要論点として示された。特に、アデカシー、供給責任、ラストリゾート供給、経済安全保障、レジリエンスなどは、価格シグナルだけでは十分に扱えない価値であり、政策ツールとの組み合わせが必要になるとの認識が共有された。

後半シンポジウムでは、需要活用の重要性が長年認識されてきたにもかかわらず、実装が十分進んでいない理由として、需要側資源の収益化の仕組みの未整備、設備台帳から運用データまでのデータ基盤不足が指摘された。これは、市場メカニズムのみでは需要側資源の社会実装が進みにくく、政策的な基盤整備や制度設計が不可欠であることを示している。

第 8 回会合では長期シナリオ分析の必要性が議論され、第 9 回会合では Evidence-Informed Policy Making（EIPM）[8]の考え方が紹介された。また、実効値解析、EMT 解析、地点別価格解析、セクターカップリング解析、AI 応用など、解析技術が高度化・多様化していることが議論された。解析技術は単なる技術評価のツールではなく、設備投資、需要立地、運用ルール、市場制度、政策を支える基盤になりつつある。したがって、市場と政策の役割分担を再定義する際には、どのような解析結果を根拠として制度設計や政策判断に反映するのかを明確にする必要があるとされた。

さらに、中間シンポジウムおよび後半シンポジウムでは、将来像を共有した上で制度設計を進める必要性や、不断の議論の場の重要性も指摘された。

本プロジェクトでは、市場原理を活用しつつも、長期的視点や社会的価値を反映する政策との適切な組み合わせが必要との認識が共有された。

本章のまとめ：制度全体の本来の目的に立ち返った再設計

本プロジェクトでは、個別制度の段階的な改善に加え、制度設計の前提条件を見直す必要性が繰り返し指摘された。

再生可能エネルギー大量導入、需要側資源活用、デジタル化、分散化、不確実性増大といった構造変化により、従来の制度設計の前提条件が大きく変化しつつある。その結果、価格形成、投資誘導、アデカシーや柔軟性の確保、需要側資源の活用など、多くの制度課題が相互に関連するようになっている。

さらに、第 8 回会合で議論されたように、制度設計を支える解析基盤の重要性も高まっている。地点別価格、長期シナリオ、セクターカップリング、AI 応用などの解析は、単なる技術評価にとどまらず、価格シグナル、投資判断、需要立地、政策形成を支える根拠となる。制度改革を実効的なものにするためには、解析結果をどのように社会的意思決定へ接続するかが重要な課題となる。

特に本プロジェクトで特徴的であったのは、制度課題が単なる市場ルールの修正にとどまらず、市場価格、投資判断、供給責任、需要側資源、データ基盤、計量制度、意思決定主体の問題と一体で議論された点である。柔軟性やレジリエンス、アデカシー、経済安全保障といった価値をどのように評価し、誰が責任を持ち、どの情報に基づいて判断する

[8] より広くは、Evidence Informed Decision Making と呼ばれる

のかが、制度設計上の中核課題として浮かび上がった。

本プロジェクトでは、個別制度の修正にとどまらず、柔軟性、アデカシー、レジリエンス、経済安全保障などの価値をどのように評価し、市場と政策の役割分担の中で中長期的に実現していくかという観点から、本来の目的に立ち返り、変革の妨げとならないよう、制度全体の再設計が早期に必要であるとの認識が共有された。また、こうした制度設計を支えるためには、データ活用、意思決定プロセス、ガバナンスの在り方も含めた検討が必要であることが明らかになった。

次章では、こうした制度課題の背景に存在する意思決定、データ、ガバナンスの課題について整理する。

第 5 章　意思決定・データ・ガバナンスの課題

第 2 章から第 4 章までで整理したように、本プロジェクトでは技術・制度・市場を巡る多くの課題が議論された。しかし、本プロジェクトを通じて繰り返し指摘されたのは、それぞれの課題が相互に関係しているにもかかわらず、それらを統合的に把握し意思決定へ反映する仕組みが十分ではないという点であった。

特に、第 8 回会合以降の解析分野、第 9 回会合の政策分野、第 10 回会合の横断議論では、データ、知識、意思決定、ガバナンスが重要な論点として浮上した。

本章では、技術や制度の背後に存在する構造的課題として、意思決定、データ、ガバナンスの問題を整理する。

5.1 意思決定構造の分断

本プロジェクトでは、電力システムを巡る意思決定が多層化・分散化していることが繰り返し指摘された。発電、送電、配電、小売、需要家、設備メーカー、規制当局など、多様な主体がそれぞれ異なる目的や制約条件の下で意思決定を行っている。

第 4 回会合では、設備形成と運用制御を一体的に考える必要性が議論された。また、司令塔機能や全体最適の視点の必要性も指摘された。

第 5 回会合では、水素、電力、需要側を含めたエネルギーシステム全体設計の必要性が議論された。

さらに第 10 回会合では、Leadership の議論として、意思決定の場そのものが論点となった。長期的視点と短期的視点、トップダウンとボトムアップ、政策と市場など、多様な意思決定に関わる主体をどのように結び付けるかが重要な課題として整理された。

本プロジェクトでは、個別主体による最適化だけでは全体最適に到達しない可能性があることが共有された。また、課題は単に意思決定に関わる主体が多いことではなく、将来像を継続的に議論し、必要に応じて修正していく場や仕組みが十分ではない点にあるとの認識が共有された。第 10 回会合では、司令塔組織の有無よりも、多様な主体が共通の情報や分析結果を基に議論し、長期的視点と短期的視点を接続しながら方向性を形成していく仕組みの重要性が指摘された。また、不確実性が大きい時代においては、固定的な計画ではなく、状況変化に応じて継続的に見直しを行うローリング型の意思決定の必要性も議論された。

5.2 EBPM／EIPM の実装

第 9 回会合では、Evidence-Based Policy Making（EBPM）に対する Evidence-Informed Policy Making（EIPM）の考え方が紹介された。電力システムを巡る議論では、将来の需要、技術進展、市場環境などに大きな不確実性が存在する。そのため、経験や直感にとどまらず、定量的分析やシナリオ分析に基づく政策形成が重要になることが指摘さ

れた。

第 8 回会合ではエネルギー需給モデルやシナリオ分析の活用が議論された。さらに、地点別価格解析、セクターカップリング解析、AI 活用、リアルタイム解析など、意思決定を支える解析技術の高度化も議論された。解析は単なる技術評価ではなく、設備投資、需要立地、市場制度設計、政策形成を支える基盤になりつつあるとの認識が共有された。

第 10 回会合では、統合的な議論を行うためには分析基盤や共通データ基盤が必要であることが共有された。一方で、分析結果が必ずしも制度設計や政策形成へ十分反映されていない可能性も指摘された。また、分析主体、データ保有主体、政策決定主体が分散しているため、知見の蓄積や活用が十分に進まない構造も課題として認識された。

本プロジェクトでは、EBPM や EIPM を実効的に機能させるための仕組みづくりが重要との認識が共有された。

コラム 5-1 EBPM と EIPM

EBPM と EIPM は、それぞれエビデンスに基づく政策決定、エビデンスを踏まえた政策決定である。などと訳される。EBPM はエビデンスあるいはデータに基づく分析から直接政策が形成されるという意味であるが、EIPM はエビデンスあるいはデータを踏まえてさらに取捨選択と判断を加えて政策を形成することを意味する。日本では EBPM の適用が政策的に推進されているが、海外ではさらに EIPM への移行が見られる。

データが整備されその結果から直接の判断ができる場合は EBPM の方が論理的ではあるが、実際の電力・エネルギー分野を含め、目指す方向性側に多様な価値観や社会制約があり、エビデンスやデータの側にも網羅性や精度などの限界がある場合、「エビデンスやデータを踏まえる」ことが実際的であると考えられている。他方、「踏まえる」ということには、「エビデンスやデータを使った」としながら、実はそうではない恣意的な判断になる可能性があり、この点は注意すべきであるとも考えられている。

5.3 データ基盤の分散と未統合

本プロジェクト全体を通じて最も頻繁に議論された横断テーマの一つがデータであった。

第 1 回会合では、配電網情報や需要データ活用の必要性が議論された。

第 7 回会合では、スマートメーターや需要機器データの活用可能性が示され、標準化と認証管理を含めたデータ利用ルールを整備することが重要との認識が示された。

第 8 回会合では、解析技術の高度化に伴い、多様なデータを利用可能にする必要性が議論された。

第 10 回会合では、Information を主要テーマとして、PMU データ、需要データ、再エネ

出力データ、系統データなどの共有の重要性が議論された。また、データ共有だけでなく、モデル共有、解析環境共有、人材育成を含めた知識基盤の必要性も指摘された。

さらに後半シンポジウムでは、需要側データ、PMU データ、AI 活用などが議論されている。また、需要側資源活用を進めるためには、EV、太陽光発電、蓄電池、ヒートポンプ機器など DER の所在や状態を把握する「ストック把握基盤」が必要であることも指摘された。加えて、日本ではスマートメーターデータの第三者利用が十分進んでいない一方、海外ではデータ共有基盤が整備されつつあることが紹介され、データ活用を支える制度や基盤整備の重要性が議論された。

一方で、データ活用には秘匿性や競争上の制約も存在する。本プロジェクトでは、秘匿と共有をどのように両立するかも重要な論点となった。

本プロジェクトでは、データそのものが社会インフラの一部になりつつあるとの認識が共有された。

5.4 全体像の継続的議論と責任主体

本プロジェクトでは、制度や市場を設計する主体だけでなく、その全体像を議論し継続的に見直していく仕組みについても議論が行われた。

第 4 回会合では司令塔機能の必要性が提起された。そして、司令塔組織を設けるだけでは不十分であり、政策の分析・評価能力を強化する必要性が指摘された。特に、シミュレーションや定量分析に基づいて政策の効果や副作用を評価し、多様な主体が分析結果を共有できる仕組みが重要であるとの認識が示された。

第 10 回会合では、Leadership の議論として、議論の場、司令塔、意思決定方法が重要論点として整理された。また、トップダウンとボトムアップの組み合わせの必要性も議論された。また、供給や長期投資、設備形成などの責任の所在についても議論が行われた。自由化や発送電分離の進展により、発電、送配電、小売の役割分担は明確になった一方で、将来の供給力確保や長期の設備形成に誰が責任を負うのかが見えにくくなっているとの指摘があった。特に、アデカシー確保や長期投資判断については、市場と政策の役割分担を含めた継続的な検討が必要であるとの認識が共有され、公共的観点からの継続的な検討が必要との認識が共有された。

本プロジェクトを通じて明らかになったのは、電力システムを巡る課題が複雑化する一方で、その全体像を継続的に議論し、方向性を示し、知見を蓄積する仕組みが必ずしも十分ではないという点であった。また、技術、制度、市場、データ、人材を横断的に議論できる場の必要性も繰り返し指摘された。

さらに、第 10 回会合および後半シンポジウムでは、AI、データセンター、モビリティ、通信、水素、地域社会など、電力分野の外部との接続領域が急速に拡大していることが指摘された。そのため、将来のガバナンスは電力システム単独ではなく、関連分野との相互

作用も含めて検討する必要があるとの認識が共有された。

本プロジェクトでは、ガバナンスを単なる組織運営や責任主体の問題ではなく、継続的な知識の形成と意思決定を支える仕組みとして捉える必要性が共有された。

本プロジェクトでは、将来の電力システムを支える人材についても繰り返し議論された。特に、インバータ技術、系統解析、制御・保護、HVDC、情報通信、市場制度など複数分野を横断的に理解し、システム全体を俯瞰できる人材の不足が課題として指摘された。また、国際標準化やルール形成に関与できる人材育成の重要性も認識されており、教育基盤や研究基盤の強化が将来の技術競争力や社会実装能力を左右するとの認識が共有された。

コラム 5-2 データセンター（大規模需要）と分散型エネルギー資源の統合と送配電コスト

米国ではハイパースケーラによる大規模データセンター(DC)による電力需要の急激な増加が系統接続する送配電会社のネットワーク費用増加を招き、家庭用などとりこ需要家（系統をバイパスできない）の負担増を避けるため、データセンターが接続の限界費用（増分変電設備など）を負担すべきとの議論がある。極端な議論では、既存系統の増分費用を招かないように、エネルギー集約的な素材産業と同様に自家発で賄うべきとの主張もある。

DC の電力負荷は、冷却・電源・ネットワーク等による 24/7 のベース負荷に加え、AI・GPU 計算処理の開始・終了や計算負荷の変化に伴う短時間の変動負荷、さらにジョブ単位の数時間ないしは数日スケールの負荷変動から構成される。ベース負荷は原子力のような定出力電源から供給し、変動負荷は家庭用蓄電池などの分散型エネルギー資源(DER)をアグリゲーションしたVPP と協調させるというスマートな統合もありうる。

実際、米国では大規模負荷(概ね 50MW 以上)が系統接続する際には系統の運用状態に応じてその需要を柔軟に調整する契約がある。大手電力サザンカンパニーとジョージア州の OpenAI の DC が 2028 年から 1GW のフレキシブルデマンドレスポンスプログラム（ピーク負荷抑制プログラム）を契約するとの報道がある。また、系統制約を緩和するため、DER プロバイダーと VPP(DER アグリゲーター)がハイパースケーラ DC による系統への影響を柔軟性ネットワーク容量により緩和するスキームもある[1]。UPS など DC に備えたエネルギー貯蔵容量を補完する形でネットワークに連系する DER の容量を VPP として活用する動きは、電力需要増によるコスト増（ひいては料金値上げ）を回避する手段となろう。

参考文献

[1] https://investors.sunrun.com/news-events/press-releases/detail/379/sunrun-to-supply-voltus-with-energy-capacity-for-ai（最終アクセス：2026 年 9 月 28 日）

本章のまとめ：統合的な変革を支える設計の枠組みと人材育成

本プロジェクトでは、技術、制度、市場に関する課題が数多く議論されたが、その背景には意思決定、データ、ガバナンスに関する共通課題が議論された。

特に、将来の不確実性が高まり分野を横断する課題が増える中で、単一主体による意思決定では対応が難しくなりつつある。また、必要なデータや知識が分散して存在し、それらを統合的に活用する仕組みも十分ではない。さらに、社会システム全体を見渡しながら継続的に学習し、方向性を修正していくガバナンスも重要な課題として認識された。

本プロジェクトでは、こうした課題を解決するためには、技術や制度を個別に改善することにとどまらず、意思決定、情報活用、知識形成を統合的に設計する視点が必要との認識が共有された。

また、本プロジェクトでは、将来の電力システムを巡る課題が、発電・送配電・需要といった従来の電力分野の範囲を超え、AI、データセンター、モビリティ、通信、水素、地域社会などとの連携を前提条件とする必要性の認識も共有された。そのため、意思決定やガバナンスにおいても、電力分野内部の最適化だけではなく、また、自由化や分散化の進展により、供給、長期投資、設備形成などの責任の所在が、従来より複雑化していることも明らかになった。そのため、今後のガバナンスには、個別の制度運営を超えて長期的な方向性を継続的に議論し修正できる仕組みが求められる。社会システム全体を対象とした統合的な視点が必要であることが繰り返し指摘された。

また、こうした仕組みを実効的なものとするためには、それを支える人材と知識基盤の拡充も不可欠であることが繰り返し指摘された。本プロジェクトでは、インバータ技術、系統解析、市場制度、情報通信などを横断的に理解し、システム全体を俯瞰できる人材の育成や、世代を超えた知識継承の重要性が議論された。さらに、データ共有、解析環境共有、不断の議論の場の整備は、単なる情報基盤にとどまらず社会全体の学習能力を支える知識基盤として位置付けられた。

第 2 章から第 5 章までの課題と問題意識を受けて、次の第 6 章では、第 10 回会合で議論された Strategy、Integrity、Leadership、Information という四つの視点から統合設計を考える視点を整理する。

第 6 章　統合設計の視点

第 2 章から第 5 章までで整理したように、本プロジェクトでは、再生可能エネルギー大量導入、需要の構造変化、デジタル化、分散化、安全保障環境の変化など、電力システムを取り巻く前提条件が変化していることが共有された。また、発電、送配電、需要、運用、解析などの個別技術・システム技術、市場、政策などの個別分野において多くの技術的・制度的課題が議論された。

しかし本プロジェクト後半になるにつれて明らかになったのは、これらの課題の多くが個別分野の内部問題ではなく、分野間の接続や全体最適化の問題として現れているという点であった。

第 10 回会合では、こうした議論を踏まえ、Strategy、Integrity、Leadership、Knowledge（S-I-L-K）の四つの統合設計を考える視点が提示された。

本章では、この S-I-L-K を本プロジェクトにおける統合設計の視点として整理する。

6.1 Strategy：多元的ドライバーの統合

本プロジェクトの初期段階では、再生可能エネルギー導入や GX が主要な議論の出発点であった。しかし、第 1 回から第 10 回までの議論を通じて、電力システム変革を駆動する要因（ドライバー）は極めて多様であることが明らかになった。

第 1 回会合では需要側資源の活用や AI・データセンターなどの大規模需要、第 2 回会合では再生可能エネルギー大量導入、第 5 回会合では水素利用やエネルギーネットワーク、第 7 回会合では EV や需要機器、第 9 回会合では政策と市場、第 10 回会合では AI、ロボティクス、デュアルユース、経済安全保障、人口減少、地域構造変化などが議論された。

しかし、これらは相互に独立した課題ではない。例えば、AI の進展は AI・データセンターなどの大規模需要を増加させる一方で、電力システム運用の高度化にも寄与する可能性がある。また、脱炭素化と経済安全保障は協調する場合もあれば競合する場合もある。

本プロジェクトでは、単一目標の最適化ではなく、多様なドライバーを同時に考慮できる戦略策定の必要性が共有された。また、将来の電力システムを取り巻く環境変化の速度や方向を事前に正確に予測することは困難であるとの認識も共有された。再生可能エネルギー導入の進展速度、AI・データセンターなどの大規模需要の拡大、需要側資源の普及状況、地政学環境の変化などによって、必要となる設備構成や制度設計は大きく変わり得る。そのため、単一の将来像を前提条件として最適解を求めるのではなく、複数の可能性を想定しながら継続的に見直しを行うことの重要性が指摘された。

討議では、将来の不確実性を理由として判断を先送りするのではなく、不確実性の存在を前提条件として柔軟性や適応能力を確保していくことが重要であるとの認識も共有さ

れた。設備形成、制度設計、人材育成、データ基盤整備についても、特定の将来シナリオへの最適化ではなく、複数の変化へ対応できる選択肢を維持する考え方の必要性が指摘された。このため、本プロジェクトでは、特定の将来像に固定的に依存するのではなく、ドライバーの変化を踏まえて方向性を継続的に見直していくことの重要性が共有された。

また、討議では、再エネ大量導入やインバータ連系設備の増加だけでなく、AI・データセンターなどの大規模需要の増加、AI・ロボティクスの進展、地政学リスク、経済安全保障、人口減少と土地利用変化、ライフスタイル変化、需要参加拡大など、多様な外生要因が指摘された。また、高経年設備の保守人員不足、設備更新がシステム変革の契機となる可能性や、農業・上下水道・モビリティなど他分野のスマート化が新たな電力需要となる可能性も議論された。

本プロジェクトでは、将来の電力システム戦略は特定技術の選択だけでなく、こうした複数のドライバー変化に柔軟に対応できる適応能力を重視すべきとの認識が共有された。その結果、第 10 回会合では、Strategy を単一目標の戦略策定ではなく、「複数の構造変化を統合的に把握し、不確実性の下で適応的に方向性を形成していく視点」として位置付ける考え方が示された。

コラム 6-1 風力発電事業における代理モデル活用の一例

従来の風力発電事業では、年間発電電力量による評価が中心であった。しかし近年では、ノンファーム型接続に伴う系統側の出力抑制や、騒音・荷重低減を目的としたセクターマネジメントなど、発電電力量以外の要因も考慮した評価が求められている。

セクターマネジメントは、風速・風向条件ごとに風車の運転モードを設定するものであり、発電電力量と疲労荷重（DEL）の両方に影響を与える。その設定は最終的には風車メーカーによる詳細解析に基づいて決定されるが、多数の条件を対象とした解析には大きな計算コストを要する。

一方、事業開発の初期段階では、風車配置や事業性を検討するために、多数のレイアウト案や運転条件を比較する必要がある。この段階で毎回詳細解析を実施することは現実的ではない。

そこで活用されるのが代理モデル（サロゲートモデル）である。例えばデンマーク EMD International 社が開発したソフトウェア WindPRO では、事前に計算した風況条件と発電量・疲労荷重（DEL）の関係を応答曲面として保持し、その近似結果を利用することで迅速な比較評価を実現している。

このような代理モデルは、風車メーカーによる高精度解析と事業者による事業計画立案の間をつなぐ役割を果たす。従来は詳細解析の結果を待たなければ考慮が難しかったセクターマネジメントについても、事業開発の初期段階から配置検討や事業性評価に織り込むことが可能となる。これにより、関係者の役割分担を維持したまま意思決定を前倒しできるとともに、より多くの選択肢を比較しながら事業計画を立案できる。風力発電事業において求められる評価項目が拡大する中、このような代理モデルは意思決定を支援する有効な手段の一つと考えられる。

6.2 Integrity：多面的価値の統合と透明性の確保

本プロジェクトを通じて繰り返し議論されたのは、「何を価値として評価し、何を目指すのか」という問題であった。第 10 回会合では、この問題を Integrity という概念で整理し、複数の評価軸における多様な価値を社会的に共有しながら価格を含む指標で統合的に評価していく必要性が議論された。

従来の電力システムでは、安定供給、経済性、環境性が主要な評価軸であった。しかし、再生可能エネルギー導入拡大や分散化、需要側資源活用の進展に伴い、従来の評価軸だけでは十分に捉えられない課題が顕在化していることが指摘された。第 1 回から第 5 回までの議論では、柔軟性、レジリエンス、システムストレングスなどが重要な価値として認識された。さらに、第 9 回会合および後半シンポジウムでは、柔軟性、供給信頼度、レジリエンス、地域価値など、市場価格だけでは評価できない価値の存在が議論された。第 10 回会合では、アデカシー、経済安全保障、供給責任、地域価値、レジリエンスなど、より多様な評価軸が提示された。

また、Integrity の議論では、電力システムを単独で評価するのではなく、モビリティ、通信、データセンター、水素、農業、地域社会などを含めた社会システム全体との整合性を考える必要性も指摘された。そのため、評価軸としては、発電コストや設備効率を中心とした経済性にとどまらず、アデカシー、レジリエンス、経済安全保障、CO_2削減効果、柔軟性価値、地域価値などを含めた多面的評価が必要との認識が共有された。

本プロジェクトでは、重要なのは単一あるいは複数の価値を選ぶことではなく、価値間のトレードオフを可視化し社会としてどの価値を重視するか、一貫性を持たせ透明に議論できるようにすることであるとの認識も共有された。また、ある価値を追求することで別の価値が損なわれる可能性も繰り返し指摘された。例えば、効率性と冗長性、市場競争と供給責任、コスト最小化と安全保障などは必ずしも一致しない。そのため、第 10 回会合では、多様な価値を可視化しながら透明性を持って評価する必要性が議論された。

Integrity は、本プロジェクトにおいて「何を目指すのか」を社会的に共有し、「電力×〇〇」と表現される電力・エネルギー以外の分野を含めて多面的価値を統合的に評価するための視点として整理された。

コラム 6-2 電力×交通

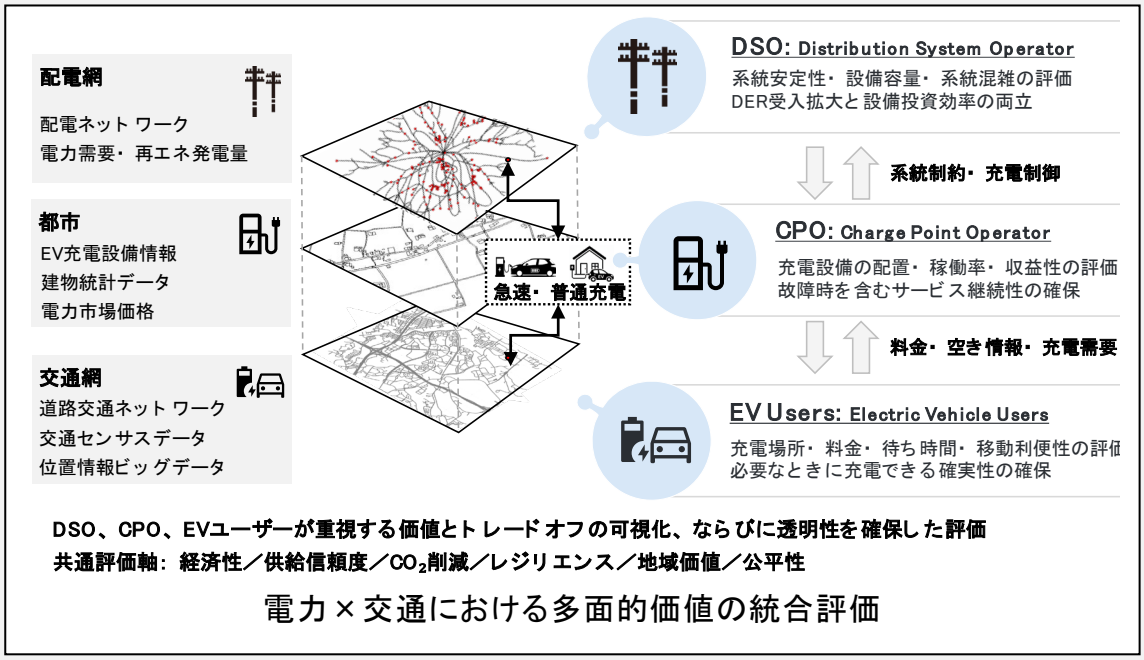
EV の普及は、交通分野の脱炭素化を進める一方で、電力システムに新たな需要を生み出す。これまで電力と交通は、それぞれ独立した分野として計画・運用されてきた。しかし、EV が大量に導入される社会では、人の移動や滞在が充電需要となり、配電設備の運用や増強計画に直接影響する。このため、電力と交通を一体のシステムとして捉える「セクターカップリング」の視点が必要となる。

EV が電力システムに与える影響は、導入台数だけでは評価できない。利用者がいつ、どこで充電するのか、価格によって充電行動がどう変わるのか、移動や滞在が需要の時間・空間分布

にどのような影響を与えるのかを捉える必要がある。電力需要、再生可能エネルギーの発電量、交通流、建物利用、充電行動などのデータを組み合わせることで、電力と交通の相互作用を具体的に分析できる。

ここで重要となるのが、異なる主体の観点による多面的な価値評価である。配電系統運用者（DSO）は、系統の安定性や設備容量、ピーク需要、設備投資の効率性を重視する。充電インフラ運営事業者（CPO）は、充電設備の稼働率や収益性、サービスの継続性を重視する。一方、EV ユーザーにとっては、充電場所へのアクセス、待ち時間、料金、必要なときに充電できる確実性が重要となる。

これらの価値の方向性は、必ずしも一致しない。充電設備の拡充は EV ユーザーの利便性を高める一方、充電が特定の時間や地域に集中すれば、DSO の設備負担や系統混雑を増加させる可能性がある。価格による充電時間の誘導や充電制御は、設備の効率的な利用や CPO の事業運営に役立つが、EV ユーザーの移動や生活上の制約にも配慮する必要がある。したがって、DSO、CPO、EV ユーザーそれぞれの評価軸を可視化し、価値間のトレードオフを共有しながら充電設備の拡充方策を検討することが重要である。



電力×交通における多面的価値の統合評価

コラム 6-3 時間で変化するノード別電力価格の近似

現状の電力システムが抱える課題の多くは、徹底しない自由化政策が原因となっている。現状の電力システムの改善余地の多くは、競争原理導入が遅れている小口需要家を中心とした最終需要領域にあり、競争原理導入が遅れている理由の一つに、電力計測・制御の技術的な難しさもその一因である。

電力システムの全体最適化を実現する数学モデルの観点から言えることは、電力価格は、需給バランスを表現する制約条件式の双対変数（潜在価格）の値として理論的には求められ、その

値は系統の時定数程度の時間で時々刻々と変化し、またそれは厳密には送配電網のノードごとに異なる。電力システムにおける電圧・電流と同様、電力の潜在価格も、時間的に変化し空間的に分布する。電気料金として季時別の変化はあったとしても、電力価格が時間的、空間的に一定とされる電力システムの現状は、数学モデルが描く姿からは大きく乖離している。現状の電力システムの将来を大きく変革させるためには、思い切って上述の数学モデルが描く理論的な姿を電力システムの究極的なイメージとして描きつつ、今の時代に利用可能な技術で、それを近似的に実現することが考えられる。

数学モデルが描く理論的な姿を具体化する方法としては、秒単位で電力の P2P 取引ができる高速取引市場を送配電網の各ノードに分散設置する案がある。この分散型の高速取引市場で観測される電力価格が数学モデルの双対変数（潜在価格）の近似値となり、この電力価格は市場参加者（分散型の各種リソースによる発電や節電など）の意思決定をするための最も重要な横断的な情報とすることができる。この市場設置の技術的な課題の一つは、需要家はたとえ瞬間であって予め市場で購入した電力しか利用できない電力制御を電力システムに作り込むにある。このような制御ができれば、電力需給の逼迫時には、供給不足による停電を丁度起こさない水準に需要を減退させるような電力価格が、分散型市場での高速取引の結果として形成され、この電力価格には、需要家側の支払い意思額や停電コストに係る暗黙的な経済情報が、需要家側の入札を介して反映される。

現状の電力システムでは、どこを観測・計測してもこの重要な需要家側の経済的な情報は得られない。過去25年以上、マイクログリッドの完成版が登場しないのも、この需要家側の経済的な情報をうまく取り込めていないからではないか。

6.3 Leadership：意思決定と司令塔機能

本プロジェクト後半において最も重要な論点の一つとなったのが、将来の電力システムに関する意思決定を誰がどのように担うのかという問題であった。

本プロジェクトでは、技術、制度、市場に関する個別課題だけでなく、それらを横断して全体像を描き、方向性を形成し、継続的に見直していく仕組みの必要性が繰り返し議論された。自由化や発送電分離の進展により、発電、送配電、小売などの役割分担は明確になった一方で、将来の供給力確保、設備形成、柔軟性確保、人材育成などを誰が全体最適の観点から議論し、方向付けるのかが見えにくくなっているとの問題意識が共有された。

また、第 2 章で整理したように、再生可能エネルギー大量導入、需要側資源活用、AI・データセンターなどの大規模需要の拡大、経済安全保障など、電力システムを取り巻く前提条件が変化している。そのため、従来のように固定的な計画を策定するだけでは不十分で、不確実性の下で継続的に学習しながら方向性を修正していく意思決定の仕組みが必要であるとの認識が共有された。

第 4 回会合では司令塔機能の必要性が提起され、第 5 回会合では全体システムを理解する人材の必要性が議論され、中間シンポジウムでは、分野横断的人材育成やシステ

ム全体を見渡せる人材の重要性が指摘された。

第 10 回会合では、議論の場、司令塔、意思決定方法そのものが主要論点となった。ここでは、単に司令塔の設置を求めるのではなく、将来像を継続的に議論し、定量的根拠に基づいて見直していく「場」の必要性が指摘された。エネルギー基本計画や需給見通しのような長期課題についても、単発になりがちな検討ではなく、ローリング方式でデータ、手法、前提条件などを継続的に修正・刷新する仕組みが重要であるとの認識が示された。

一方、本プロジェクトでは、中央集権型の意思決定の枠組みだけでは将来の複雑性へ対応できない可能性も議論された。需要家、DER、アグリゲータ、地域主体など、多様な主体が主体的に参加する時代においては、それぞれのステークホルダーが意思決定に直接/間接に参加できる仕組みが必要になる。本プロジェクトでは、こうした多様な主体が参加した意思決定を機能させるためには、単一の組織や個人に依存しない Distributed Leadership（多数参加によるリーダーシップ）の考え方が重要になるとの認識も共有された。特に、将来の電力システムでは、発電、送配電、需要側資源、情報通信、市場制度などを横断的に理解し、多様な主体をつなぐ役割を担う人材が重要になる。

中間シンポジウムおよび後半シンポジウムでは、分野横断的人材育成、システム全体を俯瞰できる人材、国際標準化やルール形成に関与できる人材の必要性が繰り返し指摘された。また、高専・大学・企業の連携による人材育成や、世代を超えた知識継承の重要性も議論された。また、後半シンポジウムでは、需要活用、市場統合、分野横断教育などを進めるためには、継続的な対話と学習の場が必要との認識が共有された。

本プロジェクトでは、Leadership は意思決定をする権限の所在ではなく、知識形成、人材育成、知識継承を支える社会的基盤として捉える必要があるとの認識が共有された。これにより、Leadership は単なる組織運営や司令塔機能ではなく、「多様な主体をつないで方向性を形成し、知識形成と人材育成を支える機能」として捉える考え方が示された。

6.4 Knowledge：データ、ツール、現場知など知識基盤

本プロジェクトを通じて最も一貫して現れた横断論点の一つが、データ、解析ツールで知識の形成を担う知識基盤の重要性であった。

第 1 回会合では配電網情報や需要データ、第 7 回会合ではスマートメーターや通信規格、第 8 回会合では解析モデル、第 9 回会合ではエビデンス形成、第 10 回会合では PMU データやモデルの共有が議論された。また、中間シンポジウムでは解析技術と人材育成、後半シンポジウムではデータ活用と解析環境整備が重要論点となった。

本プロジェクトで共有された認識は、今後の電力システムでは設備だけでなく、データや知識そのものが社会インフラになるということであった。再生可能エネルギー大量導入、需要側資源活用、AI 活用、分散化が進展する中では、設備を構築するだけでは不十分で、システムの状態を把握し、分析し、学習し続ける能力が重要になるとの認識が共有され

た。

さらに第 10 回会合では、データ、モデル、解析環境、知識の共有が繰り返し議論された。この議論では、データそのものよりも、データを共有し、解析し、知識へ変換し、不確実性が多い環境の下での意思決定へ反映する一連の仕組みの重要性が強調された。SCADA や PMU など送配電網の状態データ、スマートメーターなどによる需要データ、再エネ出力データ、系統モデルなどについては、単なる公開を超えて、解析モデルやシミュレーション環境も含めて共有することが重要との認識が示された。また、GitHub（プログラムのソースコードを保存・共有・バージョン管理できる世界で使われる開発プラットフォーム）等を活用したオープンな知識基盤、人材育成、そのためのコミュニティの形成の可能性も議論された。

また、データについては（プライバシーや競争のための）秘匿と（活用のための）共有を両立させながら知識形成を進める必要性も指摘された。

これらの議論の結果、Knowledge とは単なる情報管理ではなく、データ、解析、知識形成、学習を通じて Evidence-Informed Policy Making（EIPM）や継続的な意思決定プロセスの改善を支える知識基盤として位置付けられた。

コラム 6-4 電力解析専門家の育成ステップ

人材育成のうち電力系統解析専門家の育成ステップのイメージを、①～⑤に分けて示す。

ステップ①では、基礎となる「電力系統工学」の物理則と制御則、それらに加えて大量の系統データを扱うための「データサイエンス（AI、ICT、プログラミングなど）」を両軸で学習する。

②では、系統運用実務用の系統解析ツール（わが国の CPAT、海外の PSS/E など）を使用し、国内・海外の大規模停電事故の基本現象の再現、事故を防ぐ対策案の立案といった実践的なケーススタディにより実系統挙動を学習する。これら①、②の学習は電力業界の支援のもと高専・大学・大学院で遂行する。

③の卒業後の進路はここでは、一つは、現象の分析、解析モデルの開発や解析ツールの開発などを遂行できる高度な解析者への道、もう一つは、解析アルゴリズムやツールを実装できる国内屈指の開発エンジニアへの道としている。それぞれの道を進みながら専門分野で活躍しつつ、今後は系統解析や系統運用を支援する信頼性の高い AI を解析者や開発エンジニア（系統運用オペレータと連携）が自ら構築（AI 専門家と協議）して導入することが重要となる。AI 専門家と協議する上では①でのデータサイエンス（AI 他）の基礎学習が役立つ。

一方、専門分野での活躍だけでなく、他の分野（例えば、電力・エネルギー需給シナリオ策定している社会科学分野）の専門家と連携し、策定されたシナリオに系統技術面を裏付けて具体化し政策として提言すること（④）も極めて重要である。その提言が国や電力会社の意思決定に反映されることで専門家スキルのさらなるアップにつながる好循環（⑤）が形成できる。



本章のまとめ：統合設計としての S-I-L-K の意義

本プロジェクトを通じて最終的に共有された認識は、将来の電力システムの課題は、個別技術や個別制度の改善だけでは解決できないということであった。発電、送配電、需要、運用、市場、政策、データ、安全保障、地域社会など、多様な要素が相互に接続しながら同時に変化しており、その変化の方向や速度を事前に正確に予測することは容易ではない。その結果、本プロジェクトで繰り返し議論されたのは、特定技術や特定制度の優劣ではなく、不確実性の高い将来に対して社会としてどのように方向性を形成し、継続的に学習しながら適応していくかという問題であった。

第 10 回会合で整理された下記の S-I-L-K（Strategy、Integrity、Leadership、Knowledge）は、こうした課題に対する統合的な設計の視点として提示された。

- Strategy：変化をもたらす多様なドライバーによる構造変化を統合的に把握し、不確実性の下で適応的に方向性を形成する視点
- Integrity：何を価値として評価するのかを明確にし、社会インフラ全体を視野に入れた「電力×〇〇」における多様な価値やトレードオフを透明に扱う視点
- Leadership：多様な主体をつなぎ、不確実性のもとでの不断の議論・知識形成・意思決定を支える視点
- Knowledge：データ、解析、知識形成を支え、継続的な学習と改善を可能にする知

識基盤

さらに、本プロジェクトを通じて共有された認識は、これら四つの要素が独立して存在するのではなく、相互に依存しながら機能するという点であった。変化を把握しその影響や対策を評価するためにはデータやツールによる分析を行う知識基盤が必要である。また、方向性を形成し実行するためには、多様な主体が参加する不断の議論の場と人材が不可欠である。

電力・エネルギー分野において、不確実な将来に対して多様なドライバーの変化を継続的に把握し、分析結果を踏まえて方向性を修正していく考え方は、第 5 次エネルギー基本計画における「科学的レビューメカニズム」やシナリオプランニング等として従来から取り組まれてきた。こうした考え方は、本プロジェクトでいう Strategy と共通する問題意識を有している。一方、本プロジェクトで整理した S-I-L-K の特徴は、Strategy そのものに加え、それを実効的に機能させるための価値判断（Integrity）、意思決定（Leadership）、データ・ツールなどの知識基盤（Knowledge）を明示的に位置付けたことである。

S-I-L-K は個別課題を分類・分析するための視点ではない。不確実性の高い将来にむけて、技術、制度、市場、意思決定・ガバナンス、知識基盤、人材育成を統合的に捉え、継続的に学習しながら方向性を形成していくための取り組みの視点である。

本プロジェクトでは、このような統合設計の考え方こそが、今後の電力・エネルギーシステムを考える上で重要な基盤になるとの認識が共有された。なお、統合設計においては足元で適用する技術は十分にあるが、技術の限界と物理的制約を直視し、個別の技術開発とそれを支える基礎的な専門分野の学問の重要性は言うまでもない。

第 7 章　提言

7.1 提言：中長期のアクションプラン

本プロジェクトの約 2 年間の活動では、第 1 回から第 10 回の会合、中間シンポジウム、後半シンポジウムを通じて、電力システムを取り巻く環境が大きく変化しつつあることが共有された。再生可能エネルギーの大量導入、需要側リソースの活用拡大、インバータ電源の増加、デジタル化の進展、AI 利用の拡大、そして S+3E[9]（安定供給、経済性、環境性）という普遍的目標に関しても、レジリエンスや経済安全保障などの側面が注目され、従来の電力システム設計の前提そのものが変化しつつある。

また、発電、送配電、需要、運用、市場、政策、データ、人材育成などの各分野で多くの課題が確認されたが、それらは相互に深く関連しており、個別の技術や個別の制度の革新・改善のみでは解決が困難であることも明らかになった。第 10 回会合では、こうした課題を統合的に捉える視点として、Strategy、Integrity、Leadership、Knowledge（S-I-L-K）が整理された。

本章では、S-I-L-K の視点を踏まえ、プロジェクトで共有した第 6 章までの議論に基づく**中長期のアクションプラン**を6つの提言として整理する。

提言 1 から提言 3 は、第 2 章、第 3 章と第 4 章で整理した環境の変化、技術・システムおよび制度の課題を踏まえ、今後の電力・エネルギーシステム及び社会インフラが目指すべき方向性である。これらは、「何を実現すべきか」を示し、主として Strategy 及び Integrity の視点によるものである。

提言 4 から提言 6 は、第 5 章で整理した意思決定・データ・ガバナンスの課題及び第 6 章で整理した S-I-L-K の視点を踏まえ、提言 1～3 を継続的に実現・改善するための仕組みの中核である「意思決定」と、その意思決定を支える人材育成と知識基盤の継続的整備と進化であり、Leadership 及び Knowledge の視点によるものである。

さらに、S-I-L-K の視点に基づく中長期のアクションプランである 6 つの提言は、意思決定を接続点とする二つの改善サイクル（以下、二つの環）の枠組みに整理することができる。（以下の図参照）

[9] S+3E: Safety, Energy Security, Economy, Environment

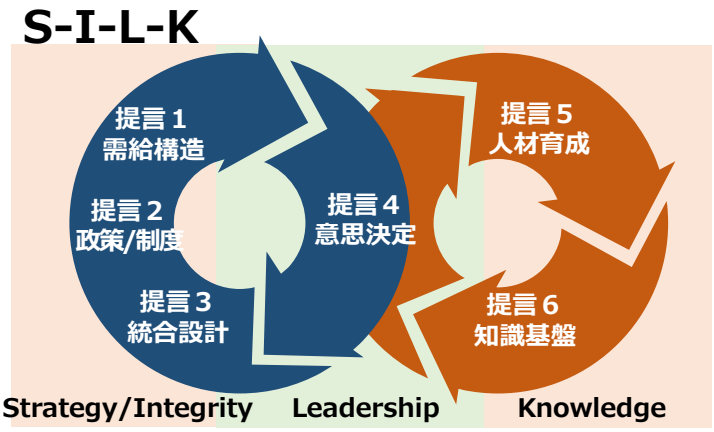


図　6つの提言と S-I-L-K に基づくロバスト長期 PDCA の二つの環

提言 1　集中型資源 [10]と分散型資源 [11]が協調する需給構造への転換

本プロジェクトでは、電気自動車、ヒートポンプ熱供給などの需要、蓄電池などのエネルギー貯蔵、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの分散型資源さらには大規模需要の導入拡大への対応が繰り返し議論され、集中型資源と分散型資源が、送配電網・燃料供給・情報通信網などの電力・エネルギーシステム全体の中で、それぞれの特性を活かして協調するシステム構築の重要性が共有された。

従来の電力システムは水力・火力・原子力・揚水発電など集中型資源を主とした構造であったが、今後は再生可能エネルギーの増加により、従来電力システムの需給バランスの調整を主に担ってきた火力発電の電源全体に対する運転の割合が低下し、調整に使える容量が低下する。これに対して、また、太陽光や風力などの再生可能エネルギー発電、需要側の HP 給湯、EV 充電、蓄電池などの合計の調整に使える容量が増加し、またさらに原子力、CCS 付火力、二酸化炭素直接回収など資本費がコストの大きな割合を占める設備が増加し、集中型の大型電源や需要の設備の資本効率を上げるために全体としての高い利用率が求められ、調整に使える容量には制約がある。

このため、集中型・分散型を対立概念として捉えるのではなく、需給調整力をはじめとする将来の多様なニーズの拡大のもと、多数の分散型資源が電力システムの運用に能動的に参加し、それぞれの多様な特性を活かして分散型資源と集中型資源が協調する需給構造への移行を進める必要がある。立地、社会受容性、運転特性、廃止・廃棄などに特徴を持つ電力システムを構成するすべての要素を、その特性に応じて社会が求める機能にもとづき選択し、多数の分散型資源が自律的に機能して集中型資源と協調する運用体系を確立することで、電力・エネルギーの新たな需給構造を実現することができる。

今後は、この移行を推進するために、発電事業者、小売事業者、市場参加者、送配電事業者、需要家、アグリゲータ、市場運営者、メーカー、規制機関などあらゆるステークホルダーが明確なルールのもとで競争・協調し、グリッドコード等の制度・政策を通じて予見

[10] 集中型資源：集中型電源などを言う。
[11] 分散型エネルギー資源　Distributed Energy Resources のこと。

可能な形で示される機能や価値のもとで、集中型資源、分散型資源、各種ネットワーク、管理制御技術を実装することが求められる。

なお、分散型資源の活用のためには、プライバシーや業務秘密の壁を超えたデータ活用のための環境の実現が必要である。(⇒提言 4)また、GFM[12]、PMU[13]、AI、デジタルツイン[14]などの新たな技術を積極的に活用して、分散制御と協調制御を組み合わせた管理・制御技術の実装による市場・システム運用の高度化を実現する必要がある。(⇒提言 2)

コラム 7-1 分散型資源のみで電力システムを構築可能か

従来の集中型の発電、エネルギー貯蔵(揚水発電)に対し、分散型の発電、エネルギー貯蔵(蓄電池など)が増加しており、分散型資源のみで電力システムを構築することの技術的可能性が見えてきている。将来の電力システムにおける分散資源と集中資源の組み合わせを考えてみる。

分散型の発電・エネルギー貯蔵は需要や、大規模電源と比べて建設期間が短いことが多く早期の導入が可能であり、また需要地に近いため災害時など地域の電源として活用し、災害に対するレジリエンスを強化することが期待される。また、温水、EV 充電、中間製品など電気ではなく最終需要あるいはそれに近い形で貯蔵すること貯蔵の損失を少なくし、これもレジリエンスの向上につながる。また、分散型資源の活用においては、賢い消費者であるプロシューマ、分散資源を束ねた新しい供給形態でする VPP(過小発電所)などのあらたなビジネスも誘引する。

これに対し、大規模発電は、原子力の装荷あるいは貯蔵された燃料、火力の輸入・貯蔵される燃料は、大きな供給力と発電電力量を高い発電効率で供給し、エネルギーを貯蔵する機能を持つ。また、回転する同期発電機が使われることから、これらの電源を運転することは、交流電力システムの電圧ひいては安定性の維持に貢献する。

現在、グリッドフォーミング型インバータの技術開発が進み、分散型の発電・蓄電池が交流システムの電圧や安定性の維持に貢献する可能性が進みつつある。一方では日射や風速の週間単位での低下などにより太陽光発電や風力発電の出力が長期に低下する可能性が指摘され長期のエネルギー貯蔵技術の必要性も高まっている。

このような状況において、当面は分散資源と集中型資源がそれぞれのメリットを出し合って協調することで電力システムを構成し、電化あるいは電力需要の増加に対応する姿が考えられる。その先の分散型資源と集中側資源の役割分担は、S+3E の多様な価値の実現方法から徐々変化していくと考えられる。

提言 2 S+3E を実現する政策設計・市場設計・システム運用の継続的改革

本プロジェクトでは、再生可能エネルギーを含む分散型資源の大量導入、技術開発や

[12] GFM (Grid Forming Inverter): 世界で技術開発が進むパワーエレクトロニクス分野のインバータ技術

[13] PMU (Phasor Measurement Unit): 米・欧など数千か所で設置される電圧と位相の測定器。送配電網の異常現象を含めた状態推定、事故後の現象解析、オンライン制御などへ適用が進む。

[14] デジタルツイン:現実のシステムの挙動を仮想空間上に「双子(ツイン)」を再現する技術で、リアルタイムのシミュレーションや未来予測を行い、結果を現実世界にフィードバックする。センサーからのリアルタイムのデータを収集し、業務効率化やトラブルの未然防止にも使われる。

運用条件などの不確実性の増大、大規模需要増加などを背景として、柔軟性、信頼性とレジリエンスの重要性が繰り返し議論された。これまでの政策・制度設計では、主として従来電源による経済性と最大需要に対する安定供給が重視されてきたが、今後は分散資源が集中型資源と協調して、低廉なエネルギー、アデカシー、安定運用、脱炭素、レジリエンス、経済安全保障などの多面的な価値を実現する必要がある。

そのためには、市場設計では、スポット市場、容量市場、需給調整市場など複数の市場で取引される価値が分断され全体としての安定供給と経済効率を追求しにくい状況を、市場参加者が参加しやすく、地域性や適時性を持つ多面的価値を適切に評価できる市場への再設計が必要である。また、政策設計では、自由な競争を実現する市場設計と並び、規制、補助金などの政策ツールを長期の目的に即した役割分担のもとで顕在化している長期的な供給責任やレジリエンス確保などの方向性と整合的なものにする必要がある。また将来に向けての大きな不確実性のもとでは技術の価値も不確定であり、技術中立な制度を取ることが必要である。

今後これらを実現するためには、短中期的には、市場が変革の制約とならないよう、海外で実績があるエネルギーと調整力の同時最適化市場とそれを支える管理・制御技術の早期導入が必要である。これにより毎日の電力システムの送電網運用の高度化と市場参加者の適応性とを確保し、その上で送電網と配電網の運用の連携、分散型資源の活用、慣性や電圧安定性の維持などの喫緊の課題に適宜柔軟に取り組むことができる。この市場とシステム運用の再設計による改善では、分散資源を含めた多様、多数の市場参加者に制度面の改善に関する長期的な見通しを与える必要がある。

中長期的に必要な設備投資の確保は、世界的に課題認識され各国で模索が続いている。発電部門は、これまでの市場改革の下でのこれまでの競争による効率化に対して、送配電部門と同様にアデカシーなど全体の価値の裨益をリソース全体で支える公共財的な性格が求められる傾向が強まっている。

外部環境および技術革新などの不確実性のもとでの政策としては、個別の技術導入に加え、市場、補助金、規制などそれぞれの効果・価値を定量的かつ技術中立的に評価して技術間の競争を確保し、それぞれの設計に反映することが不可欠である。

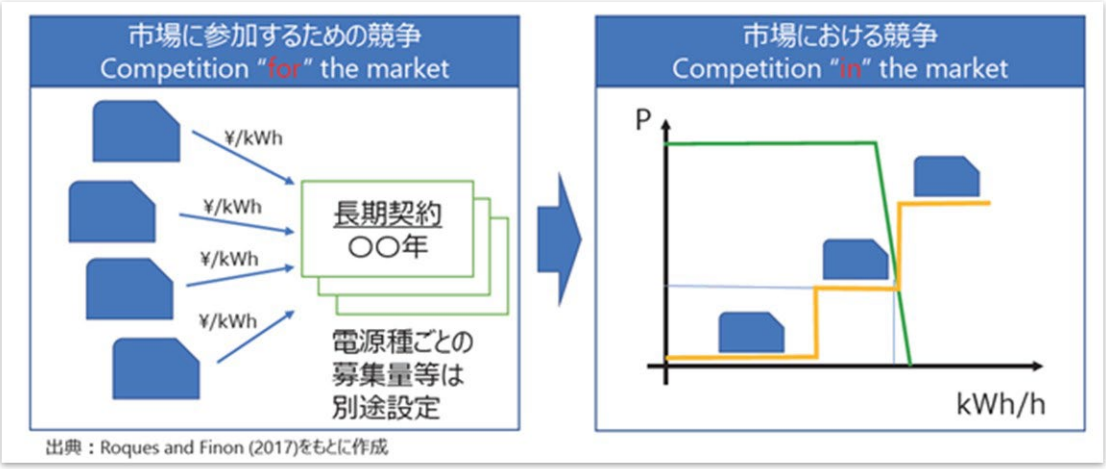
コラム 7-2 発電部門は競争領域のままでよいか

欧米日等で現在主流となっている、市場改革を実施した電力システムにおいては、発電部門は競争による効率化を期待する領域（競争領域）とされ、市場が発する価格シグナルが短期の設備運用だけでなく、中長期の設備投資も最適化するとの考えに立っている。

昨今これら諸国で、この考え方の限界が顕在化している。市場の価格シグナルだけに投資判断を依存すると市場の不完全性から過少投資を招来する（コラム 4-1）。これまでは、需要の低成長と地域独占時代の遺産である余剰設備の存在が、過少投資の問題を覆い隠していた。これら諸国は、ここへ来て電化・デジタル化の進展に伴う電力需要の増加の見通しと脱炭素政策により

数十年ぶりに大規模な投資ニーズに直面することとなり、過少投資の問題が顕在化した。日本でも、電力需要増加の見通しが言われながら、足元では経年火力の退出が進んでおり、市場改革の限界が顕在化している。

ここで、従来の市場改革モデルの対案として、ハイブリッド市場を紹介する。中長期的な投資決定を短期的な運用から切り離す概念であり、次の 2 段階の競争からなる（図参照）。



出所：服部(2022)

Competition for the market（市場に参加するための競争）：国などが必要と考える質・量の電源を、長期契約を通じて確保する市場。国などが競争入札を行うことが想定される。

Competition in the market（市場における競争）：Competition for the market で確保した電源を、短期の卸電力市場を通じて最適に運用する。

この場合、Competition for the market は、国などがアデカシーなど全体の価値を実現するために必要な質・量を定めて募集を行うことによりシステム全体が裨益する。そのため、そこで確保された電源は従来の競争領域ではなく、システム全体で支える協調領域となる。

中長期的に必要な設備投資の確保が、各国が直面する共通の課題となるに伴い、ハイブリッド市場の実装例がいくつか見られる。EU において、政府と発電事業者間の契約として新たに位置づけられた差額調整契約（CfD: Contract for Difference）、豪州で導入に向けて準備が進んでいる ESEM（Electricity Services Entry Mechanism）等である。日本で開始された長期脱炭素電源オークションも Competition for the market に該当すると考えられ、そこで落札された電源を協調領域と位置付ければ、ハイブリッド市場と呼ぶことができる。

ここで、コラムのタイトルの「発電部門は競争領域のままでよいか」に戻れば、中長期的に必要な投資を確保する観点から、協調領域に転換していくべきであると考える。そして、その動きは現実に各所で顕在化している。

参考文献

服部徹(2022)『カーボンニュートラル社会を見据えた電力システム改革のあり方』電中研研究報告会 2022 基調報告資料

戸田直樹（2024）『EU と日本で適用が始まるハイブリッド市場－転換期の認識を』

提言 3　電力・エネルギーを超えた社会インフラ移行の統合設計

本プロジェクトでは、電力システムを単独の閉じたインフラではなく、社会インフラ全体の一部として捉える必要性と、および電力システムと AI、ICT、モビリティ、水素、データセンターなど新たな技術との融合が繰り返し議論された。これらは単なる新たな需要の出現ではなく、電力・エネルギーを含めた社会インフラ構造そのものの変化を示している。また、サイバーセキュリティ、経済安全保障、災害や資源制約に対するレジリエンス、データ主権の重要性も高まりつつあることが繰り返し議論された。

これらに対する対応としては、経済効率性に加え、冗長性、多元性、回復力を備えた電力・エネルギーシステムを、社会インフラ移行の中に適切に位置づけ、その一部として統合設計することが重要である。このためには、「電力×〇〇」を基本理念とし、エネルギー、情報、モビリティ等を含めた社会インフラ全体を俯瞰し、情報、モビリティ、熱、燃料などのセクターカップリングを含めた統合的な社会インフラの将来像の検討を進める必要がある。例えば、エネルギーの中での統合では電力に天然ガスや化石資源の需給を組み合わせ、エネルギーの外との統合ではモビリティや地域との統合により社会の新しい姿を能動的に分析・評価する必要がある。なお、統合設計においては、複雑なシステムのモデル化が求められ、価格などの限られたパラメータでの連携、ソフトリンクなどの疎な結合に留意するとともに、技術の限界と物理的制約を直視することが重要である。

今後は、この取り組みを実現するため、産学官がそれぞれの分野を超えて継続的に議論する場を整備し、従来の電力・エネルギーの枠を超えた統合モデル、指標による価値の可視化による将来検討が必要となる。統合モデルでは、エージェントモデルや空間・時間の粒度の向上による電化や新燃料導入、デジタル技術を活用した住宅、業務、産業の各需要と都市・地域のスマート化など多様な側面が対象となる。価値としては電力・エネルギー分野での調整力・貯蔵などの新たな価値、需要・地域・社会全体の費用低減、供給側と需要側双方のレジリエンスが重要とされている。

コラム 7-3 変質する物理的制約の理解が次世代の意思決定を支える

急速に変化する電力システムの将来の方向性を形成するには継続的な学習と対話による意思決定の更新が不可欠であり、その質を支えるためには次世代の電力システムが依拠する物理的制約を正しく理解することが必要である。

再生可能エネルギーの大量導入とインバータ電源（IBR）の普及により、電力システムの物理的制約は、従来の同期機中心の前提とは異なる姿を見せ始めている。慣性力の低下、故障電流の変質、インバータ間の高速過渡応答による干渉など、電力システムの物理的緩衝機能が弱まり、僅かな乱れが広域振動や周波数逸脱に進展する事例が報告されている。これは電力システムが、従来の経験則では安定を確保できない段階に入ったことを意味する。

同期機が主体の電力システムでは広域一体運転が安定化運転に貢献し、故障個所を切り離す「波及事故防止」が合理的であった。大きな慣性と短絡容量を背景に、電力システムはつなが

りが大きくなるほど安定したためである。だが、インバータ電源比率が高い電力システムでは、インバータの高速応答や小さい故障電流、過渡応答の相互干渉により、広域一体運転が不安定化要因となり得る。同期機時代の「つながる方が安定」から、インバータ時代の「必要に応じ分ける方が安定」へと、物理的制約が変質し、この変質に対応した電力システムの計画、設計、運用、制御・保護が必要となる。

提言 4　中長期視点での意思決定プロセスの構築

本プロジェクトでは、電力・エネルギーシステムは再生可能エネルギー、AI、需要側資源、経済安全保障など、多様な要因が相互に影響する不確実な環境へ移行しており、単一の組織や分野で将来像を描き意思決定することは困難になっているとの認識が共有された。

また、「誰が・どのように意思決定するか」という Leadership については、多様なステークホルダーを結び付けて異なる専門知を統合して、中長期的な方向性を継続的に形成・修正していく司令塔機能が繰り返し議論された。

再生可能エネルギー大量導入、需要側資源活用、AI・データセンターなどの大規模需要、経済安全保障、レジリエンスなど、多様なドライバーが相互に影響しながら変化する社会インフラ移行の統合設計での意思決定には、多様な立場と価値観を持つ主体の参加により、広い視野を確保しつつ長期的な方向性を継続的に議論し、論拠を残して修正していく仕組みが必要である。

今後は、電力・エネルギー分野と社会インフラ移行の統合設計にかかる意思決定プロセスでは、中長期視点で制度や技術を分野横断で統合し、多様な主体の知識と判断を継続的に結び付けられる仕組みにするために、以下の条件の反映が必要である。

- 多様なステークホルダーが参加した不断の議論の場の形成
- あるべき姿を不断かつ定量的に議論するための指標体系の設定
- データ、解析・評価ツールを活用し再現性が高い EIPM[15]（エビデンスを踏まえた意思決定）の推進
- 設備計画、制度設計を継続的に見直す不確実性下の長期の PDCA の導入

本提言では、提言 1～3 の各分野についての継続的改善を導く意思決定プロセスが、提言 5 の人材育成と提言 6 の知識基盤の整備により不断に改善・刷新されることを目指している。

コラム 7-4 提言のつくり方と、受け止める側の能力

[15] EIPM/EIDM: Evidence-Informed Policy/Decision Making

政策提言にはさまざまな作り方がある。科学技術基本計画では「総合知」という言葉が使われてきているが、政策提言やこうした提言書をまとめるにあたっては、さまざまな学術分野の知見を動員することになる。また、用いられる知識は学術分野に限定されるものではない。学術分野のことを英語でディシプリン（discipline）と呼ぶが、電力システムのように非常に多岐にわたるトピックについては、複数の分野にまたがるマルチディシプリナリーな取り組みが基本であり、さらに学際的・分野横断的なインターディシプリナリーな考え方が重要になる。その次に、トランスディシプリナリーという考え方もある。さまざまな学術分野を超えて、実際の実践者、ビジネスや官公庁、市民団体などと共同して研究を進めていくという知的生産の方法である。

トランスディシプリナリーな政策提言のためには、報告書の目的、報告書の作り方、報告書の具体的な作成など全般にわたってステークホルダーの関与が必要になる。コープロダクションやコデザインと呼ばれる、こうした共同作業が極めて重要になる。

当然のことながら、今挙げた方法は高度になればなるほど時間がかかる。本報告書は、一定のインターディシプリナリーな内容にはなっており、部分的にトランスディシプリナリーの側面もあるが、完全に達成できたわけではない。

こうした報告書を受け取る側から考えると、受け取る側にも努力が必要であることがわかってくる。当然ではあるが、アドバイスを受ける側には、アドバイスを受けるという準備、またそれを受け止めるだけの心構えが必要である。経営学では、こうした概念を「知識の吸収能力（absorptive capacity）」という形で定式化している[1]。能力というと若干抽象的に聞こえるが、具体的な専門的知識を持った人々が官公庁や企業などさまざまなところに存在するか、そうした専門家とさまざまな人がネットワークを形成しているか、専門的なメディアが発達しているかということなど、多岐にわたる概念であり、決して個人の知識の度合いといった限られたことを指しているわけではない[2]。政策の世界でも、助言をどこから受け、どう取り込むかは政策助言システムの問題として論じられてきた[3]。日本では、トランスディシプリナリーな研究も、それを受け止める知識の吸収能力も、ともに弱いかもしれない。電力システムに限られない課題ではあるが、よりエビデンスに基づく政策形成（evidence-informed policy making）を進めるためには、こうした考え方が重要になるであろう。

参考文献

[1] Cohen, W. M. & Levinthal, D. A. (1990) Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. Administrative Science Quarterly, 35(1), 128-152.

[2] Sugiyama, M. & Muto, J. (2024) Measuring policy analytical capacity in renewable energy policy: Germany-Japan-US

提言 5　知識基盤を活用できる専門性と俯瞰性を備えた人材の育成

本プロジェクトでは、人材育成を個別分野の専門教育にとどめず、発電、送配電、需要、情報通信、解析、市場、政策、社会実装を横断して俯瞰できる能力の育成と位置付けた。さらに、再生可能エネルギー大量導入、分散型資源活用、デジタル化、AI 活用、市場

制度改革などが進展する不確実性の高い環境の中では、その変化を予見するために電力・エネルギーシステムから社会インフラ全体を俯瞰することが必要である。

また、電力・エネルギーシステムを維持・変革していくためには、現場を支え、システムを運用・運営し、技術を計画・設計・開発し、データを使い、制度・標準化・国際連系などの環境をつくり、社会全体とつながるという異なる役割を担う人材をバランスよく持つ必要がある。

多様な専門家が協働し、それぞれの本来の活動から得られた知識を継続的に共有・継承できるコミュニティを形成することが今後の電力・エネルギーシステムを支える重要な人材育成の基盤となり、また、知識基盤を活用することでそれぞれの意思決定を支え、俯瞰できる能力を高め、その意思決定への参加を通して人材をより効果的に育成できるという認識が共有された。

以下に個別の分野例を挙げる、既存の教育体系に十分あてはまらない分野にも留意が必要であり、現場設備の物理挙動・制約や事故対応を理解し、系統状態やシステム運用のデータをツールによりモデル化・解析できる、「ハイブリッド人材」が育つことが望ましい。

- 設備の維持管理と運用を担う人材
- システム運用・市場の設計や運用を担う人材
- 先端技術を含め機器・設備の計画・設計を担う人材
- 国際標準化やルール形成に参画できる人材
- データ解析や解析ツールを活用できる人材
- 社会・制度的意思決定や社会実装を担う人材

今後の人材育成では、その活動を継続的に支える学習コミュニティと知識を維持し継承の仕組みの形成が重要である。本委員会では、(1)教育段階では高専・大学・企業・学協会が連携して、授業、セミナーなどの座学の体系を再確認することに加え、実データ、解析ツール、シミュレーション環境、実証フィールド等を活用して実践的に学ぶ機会を拡充すること、(2)実務段階ではそのそれぞれの意思決定にデータ・ツールを活用し、実践を通して複数分野の能力を高められる新しい実務体系を作ること、さらに、(3)世代を超えた知識継承や分野横断的な学習コミュニティを形成し、スキルの認定制度などと組み合わせて運用することの必要性が指摘された。

コラム 7-5 変わる電力システムを支える人材とその育成

電力自由化前のかつて垂直一貫体制では、電源・系統への投資から運用、安定供給責任まで、一つの主体である一般電気事業者の中で統合して取り組む考えることができた。自由化後の現在は、多様な主体の行動を制度・市場等を通じて方向づけながら、安定供給、経済性、CN、レ

ジリエンスをシステム全体として実現しなければならない。電力システムと社会の統合設計の難易度は高まっている。

だからこそ専門性が重要である。電力システムの技術領域が広がる中でも、電気工学・電力工学をはじめ、それぞれの分野を深く理解する専門家は欠かせない。電力システムを構成する技術が多様化し、リソースが分散する中、それらを接続する交流系統・電力系統そのものへの理解は、安定供給を維持する上で、むしろ重要性を増している。

一方で、専門を極める人だけでも足りない。規制と電力実業、市場と系統運用、送配電と発電・大規模需要など、異なる立場の論理や専門性を理解し、それらを踏まえて複眼的に解を考えられる人材を、電気力システム事業にかかわる各組織でその役割に応じて厚くしていく必要がある。

そのためには、専門分野ごとの教育に加え、企業・組織の境界を越えて異なる立場の人がともに考え、実際の課題を解く機会を増やすことが重要である。

加えて、変化の時代には新たな技術や未来をつくる人材の育成に目が行きがちであるが、労働人口が減る中、今日の当たり前は未来の当たり前ではなくなりつつある。現在の電力システムを支える施工・保守・運用・保安を担う人材を確保するとともに、現場を少ない人数で安全に支えられる技術・仕組みに変えていくことも求められる。その際、AI・デジタル技術を、現場知を継承するとともに人の判断や能力を拡張する道具として活用していく視点も重要となる。

このように電力分野システムにかかわる企業・機関システムには多様な役割を担う人材が必要であり、社会全体でこれらを人材ポートフォリオとして捉え、バランスよく育成・確保していくことが重要となる。

提言 6　知識基盤の整備と継続的進化

本プロジェクトでは、データ、分析モデル、解析環境を共有することの重要性が繰り返し議論された。政策形成や制度設計においても、不確実性に対応した議論を可能とするEIPM を支える知識基盤の整備と進化の必要性が指摘された。電力・エネルギー、ひいては社会全体での不確実な環境における意思決定においては、データとツールを利用可能とし、それによりシナリオや不確実性に対応して各種指標を分析・評価することでデータを知識へ変換し、人間が利用する知識基盤を継続的に整備・進化させることが重要である。

電力・エネルギー分野には、発送配電および需要の設備特性、需要・再エネ・気象の変動、市場・システム運用のコスト・調整力必要量、送配電網の運用ルール、設備計画にかかるコストなど多様なデータなどがある。社会インフラとの接点では自動車の走行、熱需要、人口、機器・車両、ネットワークと自治体の関係などより多様なデータが対象となる。ツールとしては、安定性、運用、制御・保護、設備計画など各分野の多様なニーズに応える解析ツール群がある。インバータ機器大量導入に関わる各種の安定度解析や、モビリティや地域など社会インフラの統合設計など、新たな解析ニーズの出現に対応した新たなデータとツールが必要となる。

今後は、需要機器、送配電網、発電の設備やシステム運用に関わる多様なデータと解析モデルを整備し、解析・分析能力を始めとする各分野の人材を育成できる環境の改善が必要である。その際には、データの利用可能性の向上のためには、秘匿性や競争性に配慮しつつ、データと知識の共有を促進することが必要である。また、スマートメーターデータなどすでに蓄積が始まったデータは、広く様々な用途に企業、大学、研究機関など様々な主体が経済的および手続き的に少ない負担で使用できることが必要であり、またPMU データなど新たな技術により新しいニーズに適用できるデータの収集・蓄積を開始し、それを活用できる技術を開発し、結果を反映できる実務プロセスをつくることが必要である。また、蓄積された多様なデータとツールにより、市場制度の検証を始めとして、技術・制度・統合設計に関する意思決定を継続的に評価することができる。データ・ツール・解析環境の共有を通じて形成された知識基盤を活用した EIPM による意思決定を通じて、需給構造、政策・制度の改善や統合設計が行われ、AI 時代の人間の新たな役割を実践することにつながる。

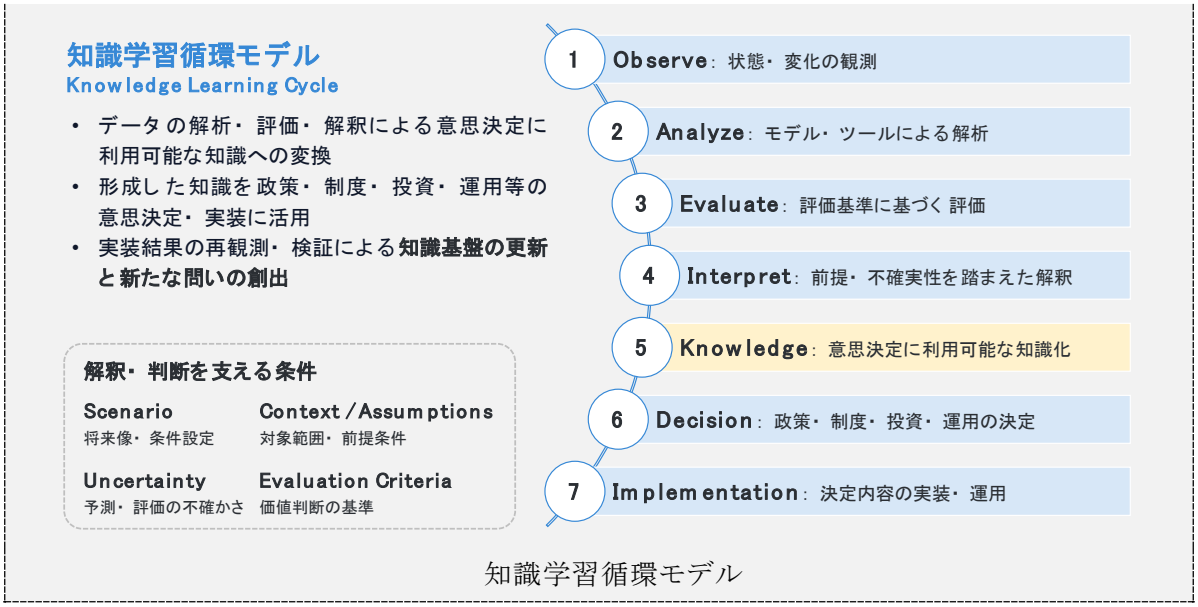
コラム 7-6 知識学習循環、単なる蓄積・共有を超えた継続的な見直し

再生可能エネルギーや分散型電源、蓄電池、EV、AI の普及により、電力・エネルギーシステムを取り巻く条件は絶えず変化している。人口や需要構造の変化、自然災害、地政学リスクも重なり、過去に形成した知識が、そのまま将来の意思決定に使えるとは限らない。こうした環境では、データや研究成果を蓄積・共有するだけでなく、その前提や適用範囲を継続的に見直す「知識学習循環」が重要になる。

この循環を支えるのが知識基盤である。知識基盤は、データ、モデル・ツール、分析環境、知識・エビデンス、さらに、それらを利用・検証する人・コミュニティなどの要素から構成される。観測したデータを分析し、その結果を前提、不確実性、評価基準とともに知識として残す。企業、大学、行政、地域の関係者がその知識を利用・検証し、意思決定や実装に生かすとともに、その結果から新たな問いを生み出す。これらの要素が連携することで、観測から分析、意思決定、実装、再検証へと続く循環が形成される。

知識学習循環を持続させるには、知識の出典と品質、適用条件、更新履歴を管理する必要がある。成功例だけでなく、失敗事例や想定外の事象も記録し、既存の知識が現在も有効かを定期的に確認することが重要である。さらに、未解決の課題や十分に分析できなかった範囲を明らかにし、次に検討すべき問いとして引き継ぐことも求められる。

知識基盤の役割は、完成した答えを保存・共有することにとどまらない。社会の変化に応じて問いを更新し、新しいデータや分析結果を取り込みながら、判断の根拠を継続的に見直すことにある。この知識学習循環が、長期的な不確実性の下でも、より良い意思決定と電力・エネルギーシステムの継続的な改善を支える。



知識学習循環モデル

7.2 提言の実施の枠組み

7.1 節で述べた 6 つの提言は中長期のアクションプランであり、かつ足元から実施可能である。電力・エネルギーシステムひいては社会のあるべき姿は Vision として描くことはできても、一度に完成形には到達できない。再生可能エネルギー、分散型資源、AI、自然災害、安全保障環境など電力・エネルギー分野と社会全体を取り巻く環境は、今後も変化し続ける中、固定的な技術構成、制度、計画手法を構築するのではなく、以下の図に示す、S-I-L-K の視点を反映し、上段の社会インフラの統合設計と下段の人材育成と知識基盤の整備と進化の「二つの環（ローリング）」が意思決定を通して接続する、それぞれの計画、実施、評価、改善の「ロバスト長期 PDCA[16]」の継続的実施により段階的なプロセスの改善を継続的に進めることが重要である。

[16] ここで述べる PDCA は、インフラ設備の形成と制度整備、人材育成、知識基盤の拡充を進める長期的な継続的改善である。技術開発、社会の価値観の変化を含め様々な不確実性、時代とともに変化する価値観のもとで進めるこの PDCA をここでは「ロバスト長期 PDCA」と呼ぶ。ロバスト長期 PDCA では、不確実性に対応するためにロバスト性ももとめられ、環境や条件の変化を能動的にチェックし、アクションに取り込むことが求められる。

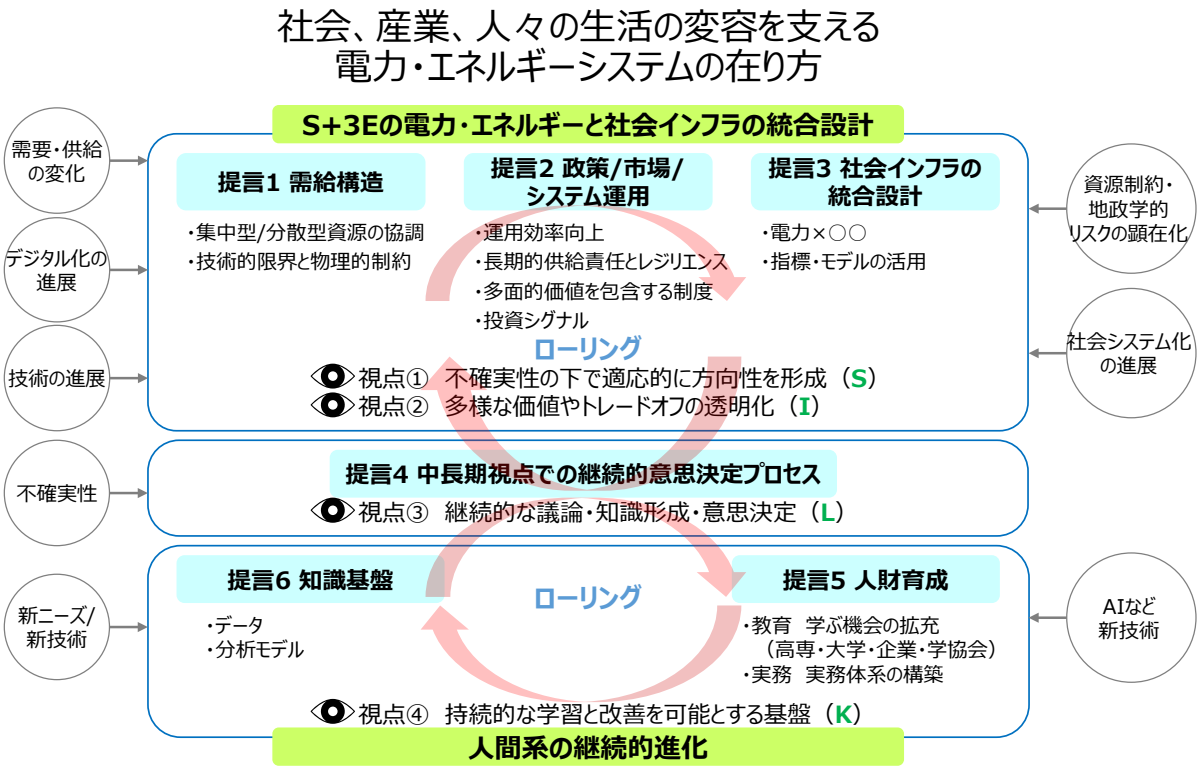


図　電力・エネルギー・社会インフラの統合設計と人材育成、知識基盤の整備・進化のための ロバスト長期 PDCA の二つの環

各分野、各段階の意思決定においては、エビデンスに基づく検討を着実かつ継続的に取り込み、新たなニーズに対応することが求められる。特に、様々な分野の取り組みの中では、提言 1～6 の、需給構造、政策・制度、統合設計、知識基盤の整備・進化、人材育成を一体として進めることが求められる。本提言の描く二つの環による長期 PDCA は、社会環境や技術の進展に応じて継続的にレビューし、その内容を改善・刷新していくことが望まれる。

本提言の実装にあたっては、以下を実施することが望ましい。

- 上記のプロセスを実践できる業務あるいは研究の実施の流れを、各組織・機関内、学協会、会議体で整備する
- データ共有・ツール整備、指標評価と継続的・段階的意思決定の有効性を、デジタルツインの環境など分野別に研究機関・学協会が率先して進めること
- 各組織・機関内、学協会、会議体のそれぞれの活動において、人材育成とコミュニティ形成を意識してそれぞれの取り組みを進めること。

7.3 今後の課題

本プロジェクトでは多くの重要な論点が整理されたが、なお検討を深めるべき課題がある。電力・エネルギー分野と社会インフラにかかる統合設計について、早期の実効性を持たせるために今後遅滞なく継続すべき検討課題を以下に挙げる。これらに関しては早急に

具体的取り組みを人材育成の観点を含めて実施することが望ましい。

- AI、データ活用、人間の新たな役割を含む新たな取り組みの電力・エネルギー分野への適用可能性の調査
- 電力・エネルギーから社会インフラ統合設計への調査・整理
  ・基礎データの利用価値（例：設備データ、運用データ）
  ・データ主権を確保した収集・蓄積・活用方針（例：エネルギー需要）
  ・データ主権を確保したデータ共有の考え方
- 意思決定における知識基盤の活用のユースケースの調査・整理
  ・指標体系
  ・解析モデルの体系
  ・技術・制度評価の具体化方策
- 技術選択や制度再設計の効果・価値を評価できるデジタルツイン技術の調査
- 不確実性下における適応的戦略形成と継続的レビューの方法論の調査
- 新たな需給構造・制度の中で新たに発生することが懸念される異常現象の早期発見のための、PMU をはじめとする新たなデータ収集・蓄積・活用の調査

おわりに　― AI 時代の知の公共基盤に向けて ―

本プロジェクトは、大きく変化する環境のもとでの電力・エネルギーシステムに向けた今後の取り組みについての提言の策定を目的として開始された。第 1 回から第 10 回の会合、中間シンポジウム、後半シンポジウムを通じて議論を重ねる中で、環境の変化には新たな要素が加わり、対象は発電、送配電、需要、運用、市場といった個別分野を超え、より広い社会システムの問題へと拡大していった。

本プロジェクトを通じて最終的に浮かび上がったのは、現在の電力・エネルギーの問題は、個別の技術や制度の積み上げではなく、社会全体の統合設計であり、それを支えるのは知識基盤とそれを使いこなす人材であるという認識であった。

これまでの電力・エネルギーシステムは、大規模集中型電源、中央からの最適運用、比較的予測可能な需要構造を前提として発展してきた。しかし現在は、再生可能エネルギー、分散型資源（DER）、AI、データセンター、サイバーセキュリティ、経済安全保障など、多様な要素が相互に影響してシステム全体の変化を加速し、電力・エネルギーシステムの在り方への要請を変化させている。

現在求められているのは、「変化し続ける社会をどう理解し、不断に学習し、設計・運営していくか」という課題への取り組み方法である。本プロジェクトで繰り返し議論された、司令塔,議論の場、継続レビュー、データやモデルの共有、EIPM といった個別の論点は、実は「知識や経験をどのように共有し、社会全体としての意思決定能力を維持・向上させるか」という共通の問題意識である。

本プロジェクトが整理した S-I-L-K は、複雑化する社会インフラ問題を統合的に扱うための思考の視点である。本会合を通じて共有された、第一の環が「需給構造、制度、社会システムの長期 PDCA」であるのに対し、第二の環である「データ共有、知識基盤の形成、継続レビューの長期 PDCA」は、今後の電力・エネルギー分野を超えて AI 時代における人間の役割に重要な示唆を与える。本報告書は完成形を提示するものではなく、今後の不断の議論の出発点として位置付けられるべきものである。

本プロジェクトで形成された議論の枠組みと人のつながりが、今後も不断に知識基盤の形成とその社会実装に貢献し、電力・エネルギー分野を超えた社会インフラの統合設計、さらには AI 時代における継続的な「知の公共基盤」の構築へつながることを期待する。[17]

[17] 本報告書は、研究会参加者による専門的知見と、生成 AI による整理支援を組み合わせながら作成された試行的成果とも言える。本会合を通じて得られた経験は、今後の電力・エネルギー分野における知識形成のみならず、複雑化する社会課題に対して人と AI が協調しながら知見を整理・共有する方法論を検討する上でも有益な示唆を与えるものと考えられる。

用語集

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
1	ACEEE	えーしーいーいーいー	ACEEE	American Council for an Energy-Efficient Economy	ACEEE	米国の非営利研究機関で、エネルギー効率の向上を通じてエネルギー浪費の削減、経済的便益、気候変動対策等を進めることを目的とし、研究、政策分析、教育・提言を通じて省エネルギー政策や制度形成に関与する。
2	ACOPF	えーしーおーぴーえふ	交流最適潮流計算	AC optimal power flow	ACOPF	線路インピーダンスに損失(r)を含む非線形の最適潮流計算手法。送電容量等の制約の下で、運用費用等の目的関数を最適化する。損失を含まない線形の直流最適潮流方程式に対し、計算時間が長く、解の特定も保障されない。送電網の損失、電圧・無効電力の分析のために必要。現在、SCUCでは計算時間の制約から通常DCOPFが使われるが、米国などではACOPFの活用の技術開発が行われ、実適用も始まっている。
3	ADAS	えーだす	先進運転支援システム	Advanced Driver Assistance Systems	ADAS	センサ・制御・情報処理等を用いて運転者の認知・判断・操作を支援する車両システム。
4	ADR	えーでぃあーる	自動需要反応	Automated Demand Response	ADR	需要家側または分散型エネルギー資源(DER)が外部の情報に基づき自動で反応する運転方式。自動でない場合は、人間の判断・操作にもとづく。
5	AEMO	いーも	AEMO	Australian Energy Market Operator	AEMO	豪州の電力・ガスのシステムおよび市場を運営する機関。National Electricity Market(NEM)等の運用を担い、需給運用、市場運営、予測・計画を行う。
6	AFC	えーえふしー	自動周波数制御	Automatic Frequency Control	AFC	電力システムの運用において、周波数を一定に保つため、中央から発電出力、需要、エネルギー貯蔵などの設備を制御する方式。負荷周波数制御(LFC)と同義。自由化後のアンシラリーサービスの市場化において、取引商品は細分化されている。日本では二次調整力①、欧州ではaFFRにあたる。
7	AGC	えーじーしー	AGC	Automatic Generation Control	AGC	自動発電制御(AGC)は、中央から発電出力を自動調整し、連系線の予定潮流と周波数バイアスを考慮した需給調整を行う制御。
8	AGI	えーじーあい	AGI	Artificial General Intelligence	AGI	特定用途に限定されず、幅広い知的課題を学習・理解・遂行できる汎用的な人工知能。本用語集では、AIの能力拡大が電力システムの予測・運用・意思決定や人間との役割分担に与える将来的影響を論じる際の概念として扱う。
9	AR	えーあーる	地域要求量	Area Requirement	AR	各エリアの負荷周波数制御(LFC)で必要となる指標。周波数偏差や連系線潮流偏差等から算出される制御必要量。広域LFCにおいて各エリアのARをネッティングし、調整力を広域的・経済的に活用する。
10	ATC	えーてぃしー	追加送電可能容量	Available Transfer Capability	ATC	各送電線について、既存の送電線潮流を考慮した上で、信頼度基準を満たしつつ追加で送電できる容量。
11	BEV	びーいーぶい(べぶ)	バッテリー式電気自動車	Battery Electric Vehicle	BEV	バッテリーに蓄えた電気とモーターだけで走る100%電気自動車。需要量や機器運転を調整し、需給調整、再エネ活用、系統運用等に需要側から柔軟性を提供することができる。
12	BG	びーじー	BG	Balancing Group	BG	BGは、電力系統の計画・運用・安定供給に関わる概念であり、契約上同時同量に責任を持つ単位。
13	CAISO	かいそ	カリフォルニア独立系統運用機関	California Independent System Operator	CAISO	米国カリフォルニア州の電力網の運用や卸売電力市場の管理を担う非営利の独立組織です。
14	CCA	しーしーえー	自治体主導の電力共同調達	community choice aggregation	CCA	地方政府等が地域の需要家の電力需要を集約して代替供給者から電力を調達する仕組み。
15	CCS	しーしーえす	CCS	Carbon Dioxide Capture and Storage	CCS	発電所や工場などから排出されるCO_2を分離・回収し、地下の地層に閉じ込める技術。
16	CCUS	しーしーゆーえす	CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage	CCUS	発電・産業プロセス等からCO_2を分離・回収し、利用または地中等へ恒久的に貯留する一連の技術・システム。本用語集では、排出削減が困難な分野や火力・産業設備の脱炭素化を支える選択肢として扱う。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
17	CEC	しーいーしー	カリフォルニア州エネルギ委員会	California Energy Commission	CEC	米国カリフォルニア州のエネルギー政策・計画を策定し、発電や省エネルギーに関する基準を定める州の機関
18	CIGRE	しぐれ	CIGRE	International Council on Large Electric Systems	CIGRE	フランス語の Conseil International des Grands Réseaux Électriques の略号で、日本語では「国際大電力システム会議」(または国際大規模電気システム評議会)と呼ばれる、電力システム分野の非営利・独立の国際的な会議体。
19	CIM	しーあいえむ	CIM	Common Information Model	CIM	電力事業で扱う設備・系統・計測等の主要オブジェクトとその関係を共通の意味体系で表現する情報モデル。IEC 61970-301が基礎モデルを定め、IEC 61968が配電分野へ拡張する。
20	CRDS	しーあーるでぃーえす	CRDS	Center for Research and Development Strategy	CRDS	科学技術振興機構(JST)の研究開発戦略センター(Center for Research and Development Strategy)。国内外の科学技術・イノベーション動向を俯瞰し、研究開発戦略や政策提言に資する調査・分析を行う。
21	CREST	くれすと	CREST	Core Research for Evolutional Science and Technology	CREST	日本科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業におけるチーム型研究制度。国が定める戦略目標の達成に向けた研究領域で研究を推進する。
22	CSTI	しすてぃー	総合科学技術・イノベーション会議	Council for Science, Technology and Innovation	CSTI	内閣府に置かれ、科学技術・イノベーション政策の重要事項を調査審議する会議。
23	CTL	しーてぃーえる	カスケード2レベルコンバータ	cascaded two-level converter	CTL	IEC 62747で定義されるモジュラーマルチレベルコンバータの一種で、各スイッチ位置に複数のIGBT・ダイオード対を直列接続する方式。
24	CVケーブル	しーぶいけーぶる	CVケーブル	cross-linked polyethylene insulated power cable	CV cable	架橋ポリエチレン(XLPE)を絶縁材料に用いる電力ケーブル。
25	DAC	だっく	DAC	Direct Air Capture	DAC	大気中のCO2を化学吸収・吸着等により直接分離・回収する技術。
26	DACCS	だっくす	DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage	DACCS	大気中からCO2を直接回収するDACと、回収CO2の地中貯留を組み合わせる二酸化炭素除去手法。
27	DCOPF	でぃーしーおーぴーえふ	直流最適潮流計算	DC optimal power flow	DCOPF	ACOPF参照。
28	DER	でぃーいーあーる	分散型資源(/電源)	distributed energy resources	DER	低圧または中圧ネットワークに接続される発電設備(補機、保護・接続設備を含む)および、蓄電システム等の発電モードを持つ負荷を含む分散型エネルギー資源をいう。
29	DERMS	だーむす	分散資源管理システム	Distributed Energy Resource Management System	DERMS	分散型電源、蓄電池、需要機器などの配電網に接続される分散エネルギー資源を監視・制御・最適化する管理システム。アグリゲーションやアクティブ配電網の基盤となる。導入にはデータ標準化、通信基盤、制度的役割分担の明確化が必要。
30	D-FES	でぃーふぇす	D-FES	D-FES	D-FES	カーボンニュートラルの実現に向け、配電線単位(数キロメートル四方、あるいは変電所・供給エリア単位)の極めて細かい地域粒度で、数十年の将来にわたる電力需要や分散型エネルギーリソース(DER)の導入量・電力潮流を予測・シミュレーションする手法およびそのシナリオ。
31	DLR	でぃーえるあーる	動的線路定格	dynamic line rating	DLR	送電線路の許容電流値を、送変電設備の運用状況や気象条件による電線温度等の諸元に基づいて動的に変化させる運用技術、方式。
32	DNE21	でぃーえぬいー21	DNE21	DNE21	DNE21	地球温暖化対策やエネルギー政策を定量的に評価・分析するために、地球環境産業技術研究機構(RITE)が開発した世界エネルギー・CO2対策評価モデル。
33	DOE	でぃーおーいー	DOE	Department of Energy	DOE	米国エネルギー省。
34	DR	でぃーあーる	需要応答/反応	Demand Response	DR	電力の供給条件に応じて、電力需要を管理した結果として生じる行動をいう。
35	DSR	でぃーえすあーる	需要側資源	Demand-side Resources	DSR	需要側に設置された需要、蓄エネ、発電設備で、具体的にはEV、ヒートポンプ給湯機、その他の制御可能負荷、蓄電池、太陽光発電など。DR(需要反応)に貢献する。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
36	DSS	でぃーえすえす	DSS	Daily Start and Stop	DSS	火力発電所が日単位で起動・停止を行う運用・機能。
37	EBPM	いーびーぴーえむ	証拠に基づく政策形成	Evidence-Based Policy Making	EBPM	多種・多様な証拠（エビデンス）に基づき政策を形成する意思決定をすること。本用語集では、EIPMと対で用いられる。
38	ECHONET Lite	えこーねっとらいと	ECHONET Lite	ECHONET Lite	—	家庭・建物内の機器を相互接続するための日本発の通信仕様であり、多様な下位通信媒体の上で機器オブジェクトを用いた通信を実現する。
39	EDC	いーでぃーしー	EDC	Economic Dispatch Control	EDC	電力システムのリアルタイムの運用において、運用費用を最小化する発電機の負荷配分などの制御方式。
40	EEX	いーいーえっくす	欧州エネルギー取引所	European Energy Exchange	EEX	ドイツのライプツィヒに本部を置くヨーロッパ最大のエネルギーおよびコモディティ（商品）取引所。電力、天然ガス、CO2排出量取引（EU ETSの共通オークション）、フレイト（海運・貨物）、農業関連などを扱う。
41	EIP	いーあいぴー	EIP	Evidence Informed Policy	EIP	Evidenceを考慮した政策
42	EIPM	いーあいぴーえむ	証拠を踏まえた政策形成	Evidence Informed Policy Making	EIPM	多種・多様な証拠（エビデンス）を踏まえ政策を形成する意思決定をすること。本用語集では、EIBMと対で用いられる。
43	EMC	いーえむしー	EMC	Electromagnetic Compatibility	EMC	機器・システムが電磁環境下で意図した機能を果たしつつ、他の機器等に許容できない電磁妨害を与えない能力。
44	EMS	いーえむえす	エネルギー管理システム	energy management system	EMS	エネルギーの管理一般。家一軒あるいは1つの発電プラントなどの分散型の場合も、中央給電指令所のような集中型の場合もある。
45	EMT解析	いーえむてぃーかいせき	EMT解析	Electromagnetic Transients	EMT	インバータ機器の増加に伴い、パワーエレクトロニクス素子のスイッチングなどを含めた解析手法
46	ENTSO-e	えんとそいー	ENTSO-e	European Network of Transmission System Operators for Electricity	ENTSO-E	EUのTSOの協議会。グリッドコードの基本的な考え方、送電網の将来計画などを策定する。
47	EPC	いーぴーしー	EPC	Engineering, Procurement and Construction	EPC	設備・プラント事業において設計、調達、建設を一括して担う事業・契約形態。
48	ERAB	いーらぶ	エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス	Energy Resource Aggregation Business	ERAB	VPPやDRを活用し、需要家側を含む分散型エネルギーリソースを束ねて、一般送配電事業者、小売電気事業者、需要家、再エネ発電事業者等に調整力、インバランス回避、電力料金削減、出力抑制回避等のサービスを提供するビジネス。日本にはこれを検討する検討会がある。
49	ESI	いーえすあい	ESI社会連携研究部門	Energy System Integration	ESI	東京大学生産技術研究所のエネルギー分野の社会連携研究部門
50	ETP	いーてぃーぴー	ETP	Energy Technology Perspectives	ETP	IEA国際エネルギー機関が、エネルギー技術の発展、導入、産業・政策課題等を分析する年刊の報告書。本用語集では、長期的な脱炭素技術・エネルギーシステム転換を検討する際の国際的な分析資料として扱う。
51	EV	いーぶい	電気自動車	Electric Vehicle	EV	電力を動力源として走行する車両であり、脱炭素化と電化を象徴する需要側資源。充電タイミングの制御により需給調整へ寄与でき、V2G等を通じて蓄電池としての機能も期待される。
52	FCV	えふしーぶい	燃料電池自動車	Fuel Cell Vehicle	FCV	水素等を燃料として燃料電池で発電し、電動機で走行する自動車。本用語集では、運輸部門の脱炭素化と、水素需要・エネルギーインフラとの連携を考える際のモビリティ技術として扱う。
53	FERC	ふぁーく	FERC	Federal Energy Regulatory Commission	FERC	米国の州を跨ぐ電力網に対する連邦規制機関。
54	FFR	えふえふあーる	FFR	Fast Frequency Response	FFR	系統周波数の変化を検出し、周波数変動の初期段階に電力を調整する制御で、従来のFCR/Primary Controlより高速な領域をいう。
55	FIP	ふぃっぷ	フィードインプレミアム制度	Feed-in Premium	FIP	再エネ発電事業者が発電電力を卸市場や相対取引で自ら販売し、市場売電収入に加えて、基準価格と市場価格等に基づく参照価格との差から算定するプレミアムを受け取る制度。固定価格買取制度(FIT)が市場価格に反応しない欠点を補う制度。日本では2022年度から導入された。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
56	FIT	ふぃっと	固定価格買い取り制度	Feed-in Tariff	FIT	日本を始め世界各国で、従来コストが高かった再生可能エネルギー発電の導入のため、発電電力を固定価格で買い取る制度。
57	FRT	えふあーるてぃー	事故時運転継続性能	fault ride-through	FRT	電力システムで、事故により電圧や周波数が変動しても接続された機器が運転を継続できる、あるいは一旦入出力を絞っても速やかに元の状態に復帰できる機能。
58	GaN	がりうむないとらいど	窒化ガリウム	gallium nitride	GaN	高耐圧・高速スイッチング・高周波動作にすぐれる半導体素子材料。GaNパワートランジスタは電力変換器の高効率化・高周波化・小型化を狙うデバイスとして用いられる。
59	GCT	じーしーてぃー	GCT	Gate-Commutated Thyristor	GCT	GTOを発展させ、ゲート駆動によりカソード電流を高速にゲートへ転流させてターンオフする大電力用サイリスタ系パワー半導体デバイス。
60	GF	ぐりーんふぁいなんす	グリーン金融	Green Finance	GF	環境配慮型の事業や投資を支援する金融手法。脱炭素投資を促進する重要な仕組みである。
61	GFL	ぐりっどふぉろーいんぐ	系統追従制御	Grid-following	GFL	系統の電圧・周波数を基準として同期運転を行う従来型インバータ制御方式である。太陽光発電や蓄電池などで広く用いられているが、同期機が少ない弱い系統では安定性確保が課題となる場合がある。新しいGFM制御との対比で使われる。
62	GFM	ぐりっどふぉーみんぐ	系統形成制御	Grid-forming	GFM	自らが電圧・周波数の基準を形成し、同期機と同様に系統形成へ寄与するインバータおよびその制御方式である。同期機が減少するなど弱い系統での安定運転や再生可能エネルギー大量導入への対応技術として期待されている。従来のGrid Following (GFL)制御との対比で使われる。
63	GI基金	じーあいききん	グリーンイノベーション基金	Green Innovation Fund	GI基金	2050年カーボンニュートラルに向け、政策効果が大きく長期継続支援が必要な重点分野で、研究開発から実証・社会実装までを継続的に支援するため国が設け、NEDOが運営する基金。
64	GPS	じーぴーえす	GPS	Global Positioning System	GPS	人工衛星からの信号を利用して時刻同期した位置情報を求める測位システム。
65	GPU	じーぴーゆー	GPU	Graphics Processing Unit	GPU	画像処理を起源とし、多数の演算を並列に実行することに適したプロセッサ。本用語集では、電力システムの大規模数値解析、AI、HPC等を高速化する並列計算資源。
66	GTAP	じーたっぷ	GTAP	Global Trade Analysis Project	GTAP	アメリカのパデュー大学を中心に進められている、世界経済や国際貿易の政策効果を定量的に分析するための国際的な研究ネットワークおよびプロジェクト
67	GX	じーえっくす	GX	Green Transformation	GX	産業革命以来の化石燃料中心の社会・経済構造を、太陽光や風力などのクリーンエネルギー中心へと移行させ、脱炭素と経済成長を同時に目指す取り組み。日本政府の政策目標の総省でもある。
68	HEMS	へむす	HEMS	Home Energy Management System	HEMS	家庭で使うエネルギーを節約・管理するためのシステム。
69	HPC	えいちぴーしー	HPC	High-Performance Computing	HPC	大規模・複雑なシミュレーション、ビッグデータ解析、AI・機械学習などを高速に実行するための高性能な計算基盤・計算技術。並列処理、専用ハードウェア、高速ネットワーク等を活用する。
70	HP給湯器	ひーとぽんぷきゅうとうき	HP給湯器	heat pump water heater	HP	空気等から熱をくみ上げ、投入した電力より大きな熱量を給湯に利用する電気給湯設備。本用語集では、電化による省エネに加え、貯湯槽を利用して運転時刻を移動できる需要側柔軟性資源として扱う。
71	HVDC	えいちぶいでぃーしー	高圧直流送電	High Voltage Direct Current	HVDC	通常使われる交流ではなく直流で大容量電力を送電する方式。長距離・海底ケーブル送電や異周波連系に適しており、再エネ立地偏在への対応、系統混雑緩和、広域融通の強化に有効である。
72	IAEA	あいえーいーえー	国際原子力機関	International Atomic Energy Agency	IAEA	原子力分野の国際協力の中心的機関。原子力科学・技術の安全・安心かつ平和的な利用を促進するとともに、保障措置等を通じて核物質・原子力活動が軍事目的に転用されないよう確認する役割を担う。
73	IBR	あいびーあーる	インバータ接続電源	Inverter-Based Resource	IBR	インバータにより送配電網に接続された設備・機器。
74	ICE	あいしーいー	ICE	Intercontinental Exchange	ICE	ICE（Intercontinental Exchange）は、エネルギー、金融商品等の取引市場・清算サービスを運営する取引所グループ。本用語集では、電力・エネルギー先物市場を論じる際の海外市場運営主体として扱う。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
75	ICT	あいしーてぃー	ICT	Information and Communication Technology	ICT	データの取得・共有・解析・管理、またはデジタル技術の活用に関わる概念である。電力・エネルギーシステムの可視化、予測、最適化、意思決定や継続的改善を支えるために用いられる。
76	IEA	あいいーえー	IEA	International Energy Agency	IEA	パリに本部を置くエネルギーに関する国際機関。
77	IEC	あいいーしー	IEC	International Electrotechnical Commission	IEC	IECは、電気・電力の規格の制定機関。
78	IEGT	あいいーじーてぃー	電子注入促進型トランジスタ	Injection Enhanced Gate Transistor	IEGT	MOSゲート駆動のパワー半導体デバイス。電子注入促進効果により高耐圧領域でも低いオン電圧と高速スイッチングの両立を図り、電力変換器や高圧インバータ等に用いられる。
79	IGBT	あいじーびーてぃー	絶縁ゲートバイポーラトランジスタ	insulated gate bipolar transistor	IGBT	ゲート端子と、エミッタおよびコレクタの二つの主端子を持ち、制御信号によりオン・オフ可能な半導体デバイスをいう。
80	IGCT	あいじーしーてぃー	IGCT	integrated gate-commutated thyristor	IGCT	GTOを発展させた大電力用の自己消弧形サイリスタ系パワー半導体。低インダクタンスのゲート駆動部を素子と一体化し、サイリスタの低導通損失と高速なターンオフ特性を両立させる。中・高電圧の大容量変換器等に用いられる。
81	IoT	あいおーてぃー	もののインターネット	Internet of Things	IoT	家電、自動車、産業機器、センサーなどの様々な「モノ」をネットワークにつなぐ技術や概念
82	IPCC	あいぴーしーしー	気候変動に関する政府間パネル	Intergovernmental Panel on Climate Change	IPCC	気候変動に関する科学を評価する国連の機関。気候変動の科学的基礎、影響・将来リスク、適応・緩和の選択肢について定期的な評価報告を提供し、各国の気候政策や国際交渉の科学的基盤となる。
83	IPP	あいぴーぴー	独立系発電事業者	independent power producer	IPP	発電した電力を需要家へ販売することを目的とする発電事業者。
84	IR	あいあーる	インフラ強靭化	Infrastructure Resilience	IR	インフラ設備の自然災害や事故などに対する耐性を高め、被害の発生や拡大を防ぐたこと。電力分野では設備の耐災害性向上、系統構造の改善、バックアップ体制の整備などが含まれる。
85	IRA	あいあーるえー	インフレ抑制法	Inflation Reduction Act of 2022	IRA	2022年に成立した米国連邦法。気候・エネルギー分野に大規模な投資・税制支援を導入し、クリーンエネルギー製造、再エネ、蓄電池、電動化等への投資を促進するとともに、国内サプライチェーン強化にも大きな影響を与えた。
86	IRENA	あいりーな	国際再生可能エネルギー機関	International Renewable Energy Agency	IRENA	再生可能エネルギーの世界的な普及促進を目的として設立された政府間国際機関。
87	IRP	あいあーるぴー	IRP	integrated resource plan	IRP	将来の一定期間の電力システムの、供給側、需要側、送配電設備の設備投資・運用計画。複数の選択肢を比較し、コスト、信頼度、リスク、不確実性等を考慮した長期的なロードマップ。
88	ISO	あいそ	国際標準化機構	International Organization for Standardization	ISO	各国の国家標準化機関からなる国際組織で、幅広い分野の国際規格を策定する。
89	JC-STAR	じぇいしーすたー	JC-STAR	Labeling Scheme based on Japan Cyber-Security Technical Assessment Requirements	JC-STAR	IoT製品のサイバーセキュリティ対策を共通基準で評価し、その適合性をラベルで可視化する日本の制度。
90	JEC-TR	じぇいいーしーてぃーあーる	JEC 技術報告書	JEC Technical Report	JEC-TR	JEC-TRは、電気学会 電気規格調査会（JEC）が発行するTechnical Report。電力・電気技術に関する標準化・技術整理を行う。
91	JEMA	じぇま	日本電機工業会	Japan Electrical Manufacturers' Association	JEMA	日本の電力・電気機器の基準、認証機関。
92	JEPX	じぇぺっくす	一般社団法人 日本卸電力取引所	Japan Electric Power Exchange	JEPX	日本において電力の卸市場を運営する機関。
93	JMIP	じぇいみっぷ	JMIP	Japan Model Intercomparison Project	JMIP	地球環境分野のモデルの相互比較評価を行うプロジェクト。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
94	LCOE	えるしーおーいー	LCOE	Levelized Cost of Electricity	LCOE	発電設備の建設・運転・燃料等のライフサイクル費用を均等化して、同期間の発電電力量で除した単位電力量当たりの電源コストの指標。発電技術間のコスト比較に用いられるが、柔軟性により変動する系統統合における価値は評価しない。
95	LFC	えるえふしー	負荷周波数制御	Load Frequency Control	LFC	電力システムの運用において、周波数を一定に保つため、発電出力、需要、エネルギー貯蔵などの設備を制御する方式。自動周波数制御（AFC）と同義。自由化後のアンシラリーサービスの市場化において、取引商品は細分化されている。日本では二次調整力①、欧州ではaFFRにあたる。
96	LFSM	えるえふえすえむ	LFSM	Limited Frequency Sensitive Mode	LFSM	電力系統の周波数が許容範囲（不感帯）を超えて異常に高くなったり低くなったりした際に、発電設備や蓄電池などの出力を自動的に抑制・増加させて周波数の安定化を図る運転モード
97	LMP	えるえむぴー	地点別限界価格	Locational Marginal Price	LMP	ある特定の場所（地点＝ノード）で、電力を1MWh追加で供給したときに発生する、電力系統全体の最小増分コストとして計算される、地点別の卸価格
98	LNG	えるえぬじー	LNG	Liquefied Natural Gas	LNG	天然ガスを低温で液化し体積を大幅に縮小して輸送・貯蔵しやすくした燃料。本用語集では、火力発電燃料。
99	Locational Pricing	ろけーしょなるぷらいしんぐ	地点別価格制度	locational pricing	―	電力の供給・需要地点によって異なる系統制約や損失等を価格に反映する市場設計の考え方。これによる場所別の価格は地点別価格、Nodal/Locational price。送電混雑等のネットワーク制約を価格シグナルとして表し、発電・需要・投資の立地点選択や系統利用の効率化に資する。
100	LP	えるぴー	線形計画法	Linear Programming	LP	目的関数と制約条件が線形で表現される最適化問題を解く問題。計算効率が高く、大規模な電力システム解析にも適用しやすいことから、発電計画やエネルギーシステム評価で広く利用される。一方で、非線形な物理特性を単純化して扱うことによる限界も存在する。
101	LRT	えるあーるてぃー	負荷時タップ切替変圧器	On-load tap-changing transformer	OLRT	通電した状態でタップを切り替え、二次側電圧を調整できる変圧器。
102	MARKALモデル	まーかるもでる	MARKALモデル	MARKAL model	MARKAL	複数のエネルギーキャリアを対象として、最適設備構成を解析できるエネルギーモデル。
103	MDMS	えむでぃーえむえす	メーターデータ管理システム	Meter Data Management System	MDMS	スマートメータ等から収集した大量の計量データを検証・保存・管理し、料金、系統運用、分析等の業務へ提供する情報システム。本用語集では、発電・蓄電・需要データを電力システム運用・サービスへ活用するデータ基盤。
104	MDPI	えむでぃーぴーあい	MDPI	Multidisciplinary Digital Publishing Institute	MDPI	バーゼルを拠点とするオープンアクセス学術出版機関。1996年から学術コミュニティを支援し、多分野のオープンアクセス学術誌を刊行して科学的知見の公開・共有を進めている。
105	MIDAS	まいだす	MIDAS	Market Informed Demand Automation Server	MIDAS	MIDAS（Market Informed Demand Automation Server）は、カリフォルニア州でダイナミック料金等の時系列情報を機械可読な形で提供するデータ基盤。小売料金・CO2等の時間変動シグナルをDR事業者や需要機器が参照し、需要の自動制御につなげる仕組み。
106	MIケーブル	えむあいけーぶる	MIケーブル	mineral insulated cable	MI cable	銅やステンレスなどの金属管（シース）の中に導線を通し、その隙間に酸化マグネシウムなどの無機絶縁物を高密度に詰めた、耐熱性・耐火性に極めて優れた特殊なケーブル。
107	MMC	えむえむしー	MMC	modular multi-level converter	MMC	電圧型変換器（VSC）のうち、バルブが直列接続され、ac側で複数のレベル電圧をsh通力する変換器。
108	MOS	もす	MOS	metal-oxide-semiconductor	MOS	金属・酸化膜・半導体からなる基本的なデバイス構造。
109	MOSFET	もすえふいーてぃー	MOSFET	metal-oxide-semiconductor field-effect transistor	MOSFET	MOSFETは、ゲート電極とチャネルの間の絶縁層に酸化物を用いる絶縁ゲート形電界効果トランジスタをいう。
110	MPPT	えむぴーぴーてぃー	最大電力点追従（制御）	Maximum Power Point Tracking	MPPT	太陽光発電等の出力特性が日射・温度等で変化する中、最大電力を得られる動作点を追従する制御。
111	N-1事故・故障	えぬまいなすいちじこ・こしょう	N-1事故・故障	N-1 contingency	N-1	N-1事故・故障は、電力系統を構成する発電機、送電線、変圧器等の単一要素が故障・停止した場合でも、残る系統で供給信頼度や運用限界を維持できるかを確認する考え方。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
112	NACS	なくす	北米充電規格	North American Charging Standard	NACS	Teslaが開発した、電気自動車（EV）向けの急速充電用の規格です。2022年にNACSとして仕様が公開され、現状：トヨタ、日産、ホンダ、GM、フォードなど、世界の主要な自動車メーカーが北米市場においてこの規格の採用を次々と発表しており、事実上の北米標準規格。
113	NEDO	ねど	NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization	NEDO	産業技術開発に係る日本の機関。
114	NEMS	ねむす	NEMS	National Energy Modeling System	NEMS	米国エネルギー省(DOE）傘下のエネルギー情報局（EIA）が開発・運用している、米国の包括的なエネルギー需給予測モデル
115	NERC	なーく	北米電力信頼度協議会	North American Electric Reliability Corporation	NERC	北米の広域電力系統（Bulk Power System）の信頼度・セキュリティに関するリスク低減を目標とする非営利の規制機関（米国、カナダ、メキシコが参加）。信頼度標準の策定・執行、系統監視、リスク評価、人材訓練等を担う。
116	NIST	にすと	米国国立標準技術研究所	National Institute of Standards and Technology	NIST	米国国立標準技術研究所）は、米国商務省に属する非規制の連邦機関。計測科学、標準、技術の高度化を通じて米国のイノベーションと産業競争力を促進することを使命とし、スマートグリッド、サイバーセキュリティ、AI等の標準・指針にも関与する。
117	NISTEP	ないすてっぷ	科学技術・学術政策研究所	National Institute of Science and Technology Policy	NISTEP	文部科学省直轄の国立試験研究機関。科学技術・イノベーション政策に関する調査研究を行い、EBPMに基づく政策形成、政策研究の発展、人材育成、研究成果の情報発信等に貢献する。
118	NRC	えぬあーるしー	米国原子力規制委員会	U.S. Nuclear Regulatory Commission	NRC	米国の独立規制機関。民生用原子力技術および放射性物質の安全・セキュリティを確保するため、原子炉、核物質、廃棄物等について許認可、監督、検査、規制・執行を行う。
119	NREL	えぬれる	NREL	National Renewable Energy Laboratory	NREL	米国の再生可能エネルギー分野の国立研究所。現在はNational Laboratory of the Rockiesに改称。
120	NW	ねっとわーく	Network	network	NW	networkの略記。
121	OBD2	おーびーでぃー2	OBD2	On-Board Diagnostics II	OBD2	自動車の電子制御系の故障診断情報等へアクセスする車載診断システム／インターフェース。
122	OCCTO	おくと	電力広域的運営推進機関	Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators, Japan	OCCTO	日本において電力系統の広域運用や需給調整を担う機関。
123	OCPP	おーしーぴーぴー	Open Charge Point Protocol	Open Charge Point Protocol	OCPP	EV充電ステーションと充電ステーション管理システム（CSMS）間の通信を標準化するオープンプロトコル。
124	OECD	おーいーしーでぃー	OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development	OECD	パリに本部を置く、日本を含めた西側先進国の経済協力に関する国際機関。
125	OFケーブル	おーえふけーぶる	油充填ケーブル	Oil-Filled	OF Cable	絶縁紙などを絶縁油で含浸し、ケーブル内部に油圧を維持して高い絶縁性能を確保する電力ケーブル。
126	OPF	おーぴーえふ	最適潮流計算	Optimal Power Flow	OPF	潮流制約を含めた最適負荷配分の計算手法。ACOPF、DCOPF参照。
127	PCS	ぴーしーえす	PCS	Power Conditioning System	PCS	太陽光発電などを送配電網に接続するインバータの別称。
128	PDCA	ぴーでぃーしーえー	PDCA	Plan-Do-Check-Act	PDCA	計画、実行、評価、改善を反復してプロセスを継続的に改善する管理サイクル。
129	PES	ぺす	IEEE 電力・エネルギー学会	Power & Energy Society	PES	世界最大の電気技術者・研究者組織であるIEEE（アイルランド・米国などに本部を置く電気電子学会）の下部組織（ソサエティ）の一つである、IEEE Power & Energy Society（電力・エネルギー学会）。
130	PHEV	ぴーへぶ	PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle	PHEV	ガソリンエンジンと電気モーターを搭載し、外部の電源（家庭用コンセントや充電スタンド）からバッテリーに直接充電できるハイブリッド車。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
131	PI制御	ぴーあいせいぎょ	比例積分制御	PI control	-	比例積分制御は、制御残に対し比例と積分によりフィードバックを行う制御方式。
132	PLL	ぴーえるえる	PLL	phase locked loop	PLL	インバーターの制御で電圧位相を検知する機構。
133	PMU	ぴーえむゆー	PMU	phasor measurement unit	PMU	電圧の大きさを多地点で時間同期して測定する手法。電圧や周波数の変動を伴う電力システムの状態監視、事故の事後解析などに使われる。
134	PPA	ぴーぴーえー	PPA	power purchase agreement	PPA	発電事業者等の売り手と需要家・電力購入者等の買い手との間で、特定の発電設備からの電力の取引の契約。
135	PSCAD	ぴーえすきゃど	PSCAD	Power Systems Computer Aided Design	PSCAD	カナダのManitoba Hydro International社が開発した電力系統の電磁界過渡（EMT）解析ソフトウェア。
136	PV	ぴーぶい	太陽光発電	Solar Photovoltaics	PV	日射エネルギーを直接電力に変換する発電方式である。導入コスト低下により分散型電源の中核となった一方、天候依存性と昼間偏在性を持つため、需給調整や系統混雑、出力制御の問題を引き起こしやすい。系統連系ルール、予測高度化、需要側活用と一体で議論されるべき電源である。
137	PWR	ぴーだぶりゅーあーる	加圧水型原子炉	Pressurized Water Reactor	PWR	一次冷却水を高圧に保って沸騰させず、蒸気発生器を介して二次系の蒸気を発生させタービンを駆動する軽水炉方式。
138	RCT	あーるしーてぃー	ランダム化比較試験	Randomized Controlled Trial	RCT	対象を無作為に介入群と対照群等へ割り付け、介入の因果効果を比較評価する実験手法。本用語集では、政策・行動変容施策の効果を検証する強いエビデンスを得る方法の代表例として紹介。
139	RE100	あーるいーひゃく	RE100	RE100	RE100	企業が事業活動で使用する電力を100%再生可能エネルギー電力で賄うことを約束する国際的な企業イニシアティブ。
140	RIETI	りえてぃー	独立行政法人経済産業研究所	Research Institute of Economy, Trade and Industry	RIETI	2001年設立の経済産業分野の政策シンクタンク。理論的・実証的研究と政策現場との連携を通じて、エビデンスに基づく政策提言を行い、経済・産業政策の企画立案に資する研究・発信を行う。
141	RITE	らいと	地球環境産業技術研究機構	Research Institute of Innovative Technology for the Earth	RITE	1990の経済産業省所感の公益財団法人。CO_2の分離・回収・利用・貯留（CCUS/CCS）や、バイオリファイナリー技術の開発、地球温暖化対策のシナリオ策定など。
142	RMSE	あーるえむえすいー	二乗平均平方根誤差	Root Mean Square Error	RMSE	予測値と実測値の誤差を二乗して平均し、その平方根を取った指標。本用語集では、需要・再エネ出力等の予測精度やモデル性能を評価する代表的な誤差指標。
143	RoCoF	ろこふ	RoCoF	rate of change of frequency	RoCoF	周波数変動率。電源や負荷の脱落によりシステムの周波数が増加あるいは低下する現象。同期機の退出による系統慣性の低下による影響として関心が高まった指標。
144	RPS	あーるぴーえす	再生可能エネルギー導入量割当制度	Renewables Portfolio Standard	RPS	電気事業者等に一定量・割合の再生可能エネルギー由来電力の利用を義務付ける制度。日本ではRPS法に基づき2003年から導入され、電力分野の再エネ導入拡大を進めた後、2012年7月から固定価格買取（FIT）制度へ移行した。
145	RTO	あーるてぃーおー	地域送電網運用機関	Regional Transmission Organization	RTO	米国の送電網運用機関。ISOは、州を跨ぐRTO。
146	SCADA	すきゃだ	SCADA	supervisory control and data acquisition	SCADA	大規模な施設・インフラの稼働状況を、ネットワークを通じて遠隔地から一元的に監視・制御するシステム。電力の送配電など広域設備の監視制御に用いられる。
147	SCED	えすしーいーでぃー	SCED	Security-Constrained Economic Dispatch	SCED	SCUCで計画された起動停止などを固定して、発電機、揚水・エネルギー貯蔵などの出力を最適化する計画・解析手法。
148	SCR	えすしーあーる	短絡容量比	short circuit ratio	SCR	送配電網の強さ（系統の堅牢さ）を表す指標の一つで、連系点の短絡容量をインバータ設備容量で割った比率。
149	SCUC	えすしーゆーしー	SCUC	Security-Constrained Unit Commitment	SCUC	電力システムの発電機の起動停止、出力設定を、送配電網の容量制約を考慮して運用の計画・解析をする手法。
150	SiC	しりこんかーばいど	炭化ケイ素	silicon carbide	SiC	パワーデバイス等でチャネルやドリフト領域などの能動半導体材料。耐電圧特性に優れ、電気自動車などに適用されている。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
151	SII	えすあいあい	環境共創イニシアチブ	Sustainable open Innovation Initiative	SII	エネルギー・環境分野等の事業や制度の実施を支える一般社団法人。各種補助事業等の執行を通じ、省エネルギー、脱炭素化、技術・社会システムの普及を支援する。
152	SIP	えすあいぴー	戦略的イノベーション創造プログラム	Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program	SIP	総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）が司令塔となり、府省や従来の分野の枠を越えて技術開発を行う日本の制度。
153	SNSP	えすえぬえすぴー	非同期供給割合	System Non-Synchronous Penetration	SNSP	系統需要と輸出入等を考慮した電力に対し、風力・太陽光等の非同期電源とHVDC輸入等が占める割合を表す運用指標。アイルランドが最初に導入した。
154	SOEC	えすおーいーしー	固体酸化物型電解セル	solid oxide electrolysis cell	SOEC	電解に使われる固体酸化物セル。
155	SOFC	えすおーえふしー	固体酸化物燃料電池	solid oxide fuel cell	SOFC	燃料電池として使われる固体酸化物セル。
156	SSO	えすえすおー	同期周波数以下振動	Sub-synchronous Oscillation	SSO	複数のインバータ、発電所機械・制御、送電網の調整機器などの間の共振不安定現象。
157	TOU	てぃーおーゆー	時間帯別電気料金	Time-of-Use Tariff	TOU	昼間・夜間など利用時間帯に応じて異なる単価を設定する電気料金。需要家にピークシフトを促し、需給バランス改善や設備投資抑制に寄与する。再エネ余剰時間帯の利用促進やEV充電管理と組み合わせることで、需給一体化を具体化する有効な手段となる。固定料金、市場連動料金などと対比して使われる。
158	TREES Model	とぅりーず・もでる	TREES Model	Total Residential End-use Energy Simulation Model	TREES	TREES Modelは、電力・エネルギーシステムおよびそれを取り巻く社会・制度を理解・設計・運用する際に用いられる概念である。本用語集では、Project Aの議論における意味範囲を踏まえて整理する。
159	TSO	てぃーえすおー	TSO	transmission system operator	TSO	送電網において、発電と需要の需給バランスを確保し、送電網の機器の保守点検と操作・制御を行う主体。
160	UPS	ゆーぴーえす	無停電電源装置	Uninterruptible Power System	UPS	入力電源の異常・停電時にも、蓄電装置等を用いて負荷へ所定の交流電力を継続供給する電源システム。本用語集では、データセンター等の重要負荷の供給信頼度を確保するとともに、蓄電資源としての電力システム連携可能性を考える設備。
161	V2G	ぶいつーじー	V2G	Vehicle-to-Grid	V2G	電気自動車（EV）やプラグインハイブリッド車（PHEV）の大容量バッテリーに蓄えた電気を、電力会社の送配電網（グリッド）へ双方向に供給・活用する仕組みや技術。
162	VOC	ぶいおーしー	仮想振動子制御	Virtual Oscillator Control	VOC	Grid-forming（GFM）インバータの制御方式の一つ。非線形自励振動子のダイナミクスを模擬してインバータの電圧波形・周波数を自律的に形成し、系統との同期と電力制御を実現する。
163	Volt-Var制御	ぼるとばーせいぎょ	電圧-無効電力制御	Volt-Var Control	VVC	自端の電圧に応じてインバータ等の無効電力出力・吸収量を変化させ、電圧を調整する制御方式。IEEE Std 1547-2018ではvoltage-reactive power mode（一般にvolt-var mode）として、DERの電圧・無効電力制御機能の一つ。
164	VPP	ぶいぴーぴー	仮想発電所	virtual power plant	VPP	複数あるいは多数の需要家側または分散型エネルギー資源（DER）を集約して一つの発電/需要設備としてみなすこと。本用語集では、市場参加あるいはその利用・制御に関わる概念。
165	VQ制御	ぶいきゅーせいぎょ	電圧・無効電力制御	Voltage–Reactive Power (V–Q) control	V–Q	Volt-Var制御と同義。電圧と無効電力を協調的に制御し、配電系統や送電系統の電圧を適正範囲に維持する制御手法。
166	VRE	ぶいあーるいー	変動性再エネ	Variable Renewable Energy	VRE	出力が変動する発電源として、太陽光発電や風力発電の総称。
167	VSG	ぶいえすじー	仮想同期発電機	Virtual Synchronous Generator	VSG	制御に同期発電機の慣性・減衰等の動特性を模擬させ、系統周波数・電圧の安定化に寄与させるGrid-forming型の電力変換器、またはその制御方式。再エネ・蓄電池、重要側設備など広い適用が考えられる。
168	WAMS	わむす	広域監視システム	Wide Area Monitoring System	WAMS	広域に配置したPMU等の時刻同期計測データを通信で集約し、電力系統の状態を広域・動的に把握する監視システム。系統擾乱、広域振動、電圧・角度等の監視や状態推定の高度化に利用される。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
169	WRF	だぶりゅーあーるえふ	WRF	Weather Research and Forecasting Model	WRF	アメリカ大気研究センター（NCAR）やアメリカ海洋大気庁（NOAA）などが中心となって共同開発した、次世代のメソスケール（数キロ～数百キロメートル規模）の数値気象予測・大気シミュレーションモデル
170	XAI	えっくすえーあい	説明可能AI	Explainable AI	XAI	AIの判断根拠を人間が理解できる形で提示する技術や手法。電力分野では運用判断や政策評価にAIを活用する際に、結果の透明性と信頼性を確保するために不可欠であり、ブラックボックス化の回避が重要な課題となる。
171	ZEH	ぜっち	ゼロエネルギー住宅	Net Zero Energy House	NZEH	外皮の高断熱化と高効率設備により省エネを進め、再エネ導入を組み合わせて、年間の一次エネルギー消費量の収支をゼロとすることを目指した住宅。
172	アクションプラン	あくしょんぷらん	アクションプラン	action plan	–	目標の達成のために、実施事項、主体、時期、手順等を具体化した行動計画。
173	アクティブゲートドライブ	あくてぃぶげーとどらいぶ	アクティブゲートドライブ	active gate drive	–	パワー半導体のゲート駆動の波形などの条件を動的に調整し、スイッチング損失、電圧・電流サージ、EMI等を制御する技術。本用語集では、パワーデバイスの高速化・高効率化と信頼性を両立する電力変換器の要素技術。
174	アクティブネットワーク	あくてぃぶねっとわーく	アクティブネットワーク	active network	–	分散型電源、蓄電、需要等を計測・通信・制御し、配電・地域系統を能動的に運用する考え方。本用語集では、DERの大量導入に対応して系統容量・電圧・潮流等を柔軟に管理するネットワークとして扱う。
175	アグリゲーション	あぐりげーしょん	アグリゲーション	Aggregation	–	分散する需要側資源や分散型電源を束ねて一つのまとまりとして管理・制御し、市場あるいは相対で取引する仕組み。小規模資源でも集約することでエネルギーや調整力の市場参加が可能となり、分散型電源時代の重要な考え方。
176	アグリゲータ	あぐりげーた	アグリゲータ	aggregator	–	複数の系統利用者と契約し、多数の小規模負荷や分散型エネルギー資源を束ね、デマンドレスポンスやアンシラリーサービス等に活用する主体。
177	アグリゲート	あぐりげーと	集約	aggregate	–	複数の需要、分散型電源、蓄電池等を一つのまとまりとして扱うこと。アグリゲータが多数の小規模DERを束ねて需給調整・市場取引・系統サービス等へ参加させるための行為。
178	アデカシー	あでかしー	アデカシー	adequacy (of an electric power system)	–	設備定格を超えず、母線電圧と系統周波数を許容範囲内に維持し、計画・計画外停止を考慮しつつ、需要家が必要とする総電力・電力量を供給できる電力系統の能力をいう。
179	アンサンブル予報	あんさんぶるよほう	アンサンブル予報	ensemble forecasting	–	初期値やモデル条件を少しずつ変えた多数の数値予報を実行し、そのばらつきから予報の不確実性や確率を評価する手法。本用語集では、風力・太陽光出力等の予測誤差を単一値ではなく分布として把握し、需給運用へ反映するための手法。
180	アンシラリー	あんしらりー	アンシラリー	(system) ancillary services	–	エネルギー市場で取引される時間コマ単位の電力量のほかに電力システムの運用に必要なサービス。周波数調整、無効電力調整、予備力、ブラックスタートなどが含まれる。
181	アンモニア	あんもにあ	アンモニア	ammonia	–	窒素と水素からなる化合物。本用語集では、燃焼時にCO_2を直接排出しないエネルギーキャリアとして、発電燃料、混焼・専焼、水素の輸送・貯蔵等の脱炭素化選択肢として扱う。
182	イシュードリブン	いしゅーどりぶん	イシュードリブン	issue-driven	–	電力・エネルギーシステムおよびそれを取り巻く社会・制度を理解・設計・運用する際に用いられる概念である。本用語集では、Project Aの議論における意味範囲を踏まえて整理する。
183	イノベーション	いのべーしょん	イノベーション	Innovation	–	新しい技術や社会の制度や仕組みにより新たな価値を創出すること。
184	イベリア大停電	いべりあだいていでん	イベリア大停電	28 April 2025 Iberian blackout	–	2025年4月28日にスペイン本土とポルトガルの電力系統で発生した大規模停電。ENTSO-Eの最終報告では、振動、電圧・無効電力制御の不足、電圧調整慣行の差、急速な出力低下、発電機の連鎖的脱落など複数要因が相互作用して発生した事象とされている。
185	インターオペラビリティ	いんたーおぺらびりてぃ	相互運用性	interoperability	–	異なるシステム、ネットワーク、機器、アプリケーション等が相互に情報を交換し、その情報を利用して協調できる機能。
186	インテグリティ	いんてぐりてぃ	インテグリティ	integrity	–	対象が完全性・一貫性を保ち、不正な変更や欠損がない状態を表す概念。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
187	インバータ	いんばーた	インバータ	inverter	–	直流電力を交流電力へ変換する電力変換装置である。太陽光発電、蓄電池等の系統連系に広く用いられ、制御方式によって電圧・周波数形成や系統安定性への寄与が異なるため、インバータ主体の電力システムを検討する上で重要な要素となる。
188	インバランス	いんばらんす	インバランス	Imbalance	–	計画された需給と実需給の差。市場参加者はこの差に対して精算を行う必要があり、運用の重要指標となる。
189	インピーダンス	いんぴーだんす	インピーダンス	impedance	Z	交流回路における電圧と電流の関係を表す複素量で、実部の抵抗 r と虚部のリアクタンス x 。送電線、ケーブルでは対地の漂遊容量・電源(y/2)も加わる。潮流、短絡容量、電圧変動、安定度などの解析に用いられる。
190	ウインドファーム	ういんどふぁーむ	ウインドファーム	wind farm	–	複数の風力発電機（風力タービン）をひとつの場所にまとめて設置し、全体をひとつの大きな発電所として運営する施設
191	ウェルカムマップ	うぇるかむまっぷ	ウェルカムマップ	welcome map	–	工場や大規模施設などを新たに建てる際、新しい送電線の建設が不要で、比較的早く・低コストで電力供給を受けられる地域（エリア）の地図上の表示。
192	エネルギーサービスプロバイダー	えねるぎーさーびすぷろばいだー	エネルギーサービスプロバイダー	energy service provider	–	需要家に対し、電力・熱等の供給だけでなく、省エネ、設備運用、需給最適化、DR等を組み合わせたエネルギーサービスを提供する主体。本用語集では、電力量販売中心から需要家価値・柔軟性提供へ事業を拡張する担い手。
193	エネルギーシステム	えねるぎーしすてむ	エネルギーシステム	energy system	–	電力、熱、燃料等のエネルギーの供給・変換・輸送・貯蔵・利用を相互に関連する仕組み。本プロジェクトでは、電力単独ではなく需要、水素、交通等を含む全体設計の対象として扱う。
194	エネルギーシフト	えねるぎーしふと	エネルギー変換/移行	energy transition	–	化石燃料中心のエネルギー供給・利用から、再エネ、電化、低炭素燃料等を中心とする構造へ移行すること。本用語集では、電源構成だけでなく、需要、インフラ、市場、産業構造を含むエネルギーシステム全体の転換として扱う。なお、エネルギーシフトは日本語的用語。
195	エネルギーネットワーク	えねるぎーねっとわーく	エネルギー統合ネットワーク	Integrated Energy Network	–	電力だけでなく熱、ガス、水素など複数のエネルギー媒体を連携させて供給・利用する統合的システム概念。地域分散型エネルギー構築やレジリエンス向上に有効であり、電力システム単独最適からエネルギー全体最適への転換を促す重要な視点である。
196	エネルギーマネジメント	えねるぎーまねじめんと	エネルギー管理システム	energy management system	EMS	エネルギー需給の運用と設備形成を管理すること。安定運用、省エネルギー、省費用、省排出、市場参加などが目的。住宅、建物、工場、地域などでの分散型エネルギー資源および負荷を監視、運用、制御、管理するシステムとしても注目されている。
197	エネルギーミックス	えねるぎーみっくす	電源構成	Energy Mix	–	エネルギー全体の一次エネルギー、電力供給における各電源の構成比。安定供給、コスト、環境、資源制約など複数要因を考慮して設計される。再エネ主力化の中で調整力の供給から系統適合性を重視した動的な構成へと転換する必要性が指摘されている。
198	エネルギーモデル	えねるぎーもでる	エネルギーモデル	energy model	–	エネルギーモデルは、電力を含むエネルギー全般の運用計画、設備計画のための分析モデル。
199	エネルギー解析	えねるぎーかいせき	エネルギーシステム解析	Energy System Analysis	–	電力のみならず熱、燃料、産業、輸送などを含む広義のエネルギーシステム全体を対象として、需要、供給、コスト、排出、資源制約を分析する手法である。将来シナリオ比較や政策評価の基盤となり、電力単独最適では捉えきれないセクター間連携や社会的影響を可視化する役割を持つ。
200	エネルギー基本計画	えねるぎーきほんけいかく	エネルギー基本計画	Basic Energy Plan	–	日本のエネルギー政策の方向性を示す中長期的な計画を指す。電源構成や政策目標を明確化する。
201	エビデンス	えびでんす	エビデンス	evidence	–	判断や政策形成の根拠となるデータ、分析結果、研究知見、実績等の情報を指す。本プロジェクトではEIPM (Evidence Informed Policy Making)の基盤として、政策・制度を経験や慣行だけでなく、検証可能な根拠に照らして設計・評価・改善するために用いる。
202	エリアプライス	えりあぷらいす	エリア価格	area price	–	日本の電力市場制度では、全国10のエリアのそれぞれの統一された卸市場価格。エリア間の連系線に混雑がなければ、それらのエリアでは同一の値となる。エリアの中で地点（ノード）別に市場価格が設定されるノード（ノーダル）価格と対比される場合もある。
203	カーボンキャプチャー	かーぼんきゃぷちゃー	カーボンキャプチャー	carbon capture	–	発電・産業設備等の排ガスやプロセスガスからCO2を分離・回収すること。本用語集では、CCS/CCUSを構成する回収段階として、排出削減が難しい火力・産業部門の脱炭素化技術として扱う。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
204	カーボンニュートラル	かーぼんにゅーとらる	カーボンニュートラル	Carbon Neutral	CN	温室効果ガスの排出量と吸収量を均衡させ、実質的な排出をゼロにする状態。
205	カーボンプライシング	かーぼんぷらいしんぐ	炭素価格付け	Carbon Pricing	–	温室効果ガス排出に価格を付けることで排出削減を促す政策手法。炭素税や排出量取引制度が代表例であり、市場メカニズムを活用して低炭素投資を誘導する。電力分野では発電構成や投資判断に大きな影響を与える重要政策である。
206	カーボンフリー	かーぼんふりー	カーボンフリー	carbon-free	–	活動・技術・エネルギー利用等に伴う二酸化炭素を排出しないこと。
207	カーボンフリーエナジー	かーぼんふりーえなじー	カーボンフリーエナジー	carbon-free energy	–	利用・発電段階でCO_2を排出しない、または実質的なCO_2排出を伴わないエネルギー。本用語集では、再エネ、原子力等の包括的な表現。
208	ガイドライン	がいどらいん	ガイドライン	Guidelines	–	制度や運用における基本的な指針やルールを示す文書。電力分野では技術導入やデータ利用の方向性を示す役割を持つ。
209	カットアウト	かっとあうと	カットアウト制御（風力発電）	cut-out control	–	風力発電機が強風時の機器保護等のため、所定の風速（カットアウト風速）に達すると発電を停止する制御。本用語集では、通常なら停止する風速域でも出力を段階的に低減して運転を継続し、系統への急激な出力変化を抑えるストーム制御との対比で扱う。
210	カップリング	かっぷりんぐ	カップリング	coupling	–	二つ以上のシステム・部門・現象が相互に結び付き、一方の変化が他方へ影響する関係。本用語集では、電力と熱・燃料・交通・情報等のセクター間連携や、複数システムを統合的に解析・運用する関係を表す。
211	ガバナフリー	がばなふりー	ガバナフリー	governor-free operation	–	発電機の調速機（governor）が系統周波数の変化に応じて出力を自律的に増減させる運転・制御。
212	クリーンテック	くりーんてっく	クリーンテック	cleantech	–	クリーンテック（cleantech）は、環境負荷や温室効果ガス排出を低減し、資源・エネルギー利用を効率化する技術・事業を広く指す呼称。本用語集では、再エネ、蓄電、電化、効率化、脱炭素技術等を横断する技術・産業領域として扱う。
213	グリッドコード	ぐりっどこーど	グリッドコード	grid code	–	電力系統の一定の領域に関与する当事者の権利と義務に関する規則の集合をいう。
214	ゲートウェイ	げーとうぇい	ゲートウェイ	gateway	–	異なるネットワーク、通信方式、システム等の間を接続し、データの中継・変換等を行う機器または機能。本用語集では、需要家機器・DER・電力情報基盤等を相互接続する構成要素。
215	ゲートクローズ	げーとくろーず	ゲートクローズ	gate closure	GC	電力の実需給に先立ち、市場参加者が入札する期限、その締め切り。締め切り後は実需給段階の運用へ移り、計画値と実績値の差はインバランス等として扱われる。
216	ゲーミフィケーション	げーみふぃけーしょん	ゲーミフィケーション	gamification	–	ゲームで用いられる目標、得点、競争、フィードバック等の仕組みをゲーム以外の活動に応用し、参加・行動変容を促す手法。本用語集では、需要家の省エネ・DR参加等を促進する需要側施策の一手法。
217	コージェネレーション	こーじぇねれーしょん	コージェネレーション	combined heat and power	CHP	化石燃料発電から電力と熱を同時に生産し、排熱も給湯・蒸気等に有効利用するエネルギー供給方式。需要地近傍の分散型電源として、省エネ、熱電一体利用、レジリエンス等の価値を持つ。
218	コネクトアンドマネージ	こねくとあんどまねーじ	コネクト＆マネージ	Connect and Manage	–	2010年にイギリス（英国）のエネルギー規制当局Ofgemが導入した制度を参考にして日本も導入した制度。Non-firm connectionも類義。接続する設備の容量一杯の送電、受電を約束しないことで、送配電網への接続を促進する。英国の制度に対し日本の制度では、増強は経済性に基づくこと、混雑管理による出力制御に対する補償がないことが特色。
219	コミュニティ	こみゅにてぃ	コミュニティ	community	–	地域、目的、関心、活動等を共有する人々・組織のまとまり。本用語集では、地域エネルギー、分散型資源、需要家参加等を考える際の、地域・利用者・関係主体からなる社会的単位として扱う。
220	コンバータ	こんばーた	変換器	(electronic) (power) converter	–	本用語集では、交流から直流、あるいはその逆の変換を行う設備。
221	コンバインドサイクル	こんばいんどさいくる	（ガスタービン）複合発電	combined cycle gas turbine	CCGT	ガスタービンの排熱を利用して蒸気を発生させ、蒸気タービンでも発電することで高効率化する複合発電方式。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
222	コンパクトシティ	こんぱくとしてぃ	コンパクトシティ	compact city	–	住宅や病院、商業施設、行政サービスなどの都市機能を一定の地域に集約し、郊外への無秩序な拡大を抑えた持続可能な都市構造。
223	サージ解析	さーじかいせき	サージ解析	surge analysis	–	落雷やスイッチの開閉などに伴って発生する「サージ（一瞬の過渡的な高電圧・大電流）」が、送電線、電気設備、あるいは電子回路にどのような影響を与えるかを予測・検証するためのシミュレーションおよび解析。
224	再エネ出力制御	さいえねしゅつりょくせいぎょ	再エネ出力制御	renewable energy output control	–	太陽光・風力等の再生可能エネルギー電源は、日射や風況から決まる変動する出力となるが、需給バランスや送電網混雑など電力システムの制約に併せて出力を低下させる出力抑制。広くは、出力抑制だけでなく、有効・無効電力制御や柔軟な運転を含め、再エネを系統運用へ能動的に統合する機能にも使われる。
225	サイバーアタック	さいばーあたっく	サイバーアタック	cyberattack	–	本用語集では、電力・エネルギー設備あるいはネットワークに対するサイバー攻撃。
226	サイバーセキュリティ	さいばーせきゅりてぃ	サイバーセキュリティ	Cyber Security	–	情報通信ネットワークや制御システムを不正アクセス、攻撃、破壊、情報漏えいから守る取組。電力インフラのデジタル化が進むほど重要性が高まり、単なるIT管理ではなく安定供給と安全保障の一部として位置付ける必要がある。
227	サイバーフィジカルシステム	さいばーふぃじかるしすてむ	サイバーフィジカルシステム	cyber-physical system	CPS	現実世界（フィジカル空間）の多様なデータをセンサーなどで収集し、仮想空間（サイバー空間）でAIやビッグデータ解析を用いて処理・分析した上で、その結果を現実世界へフィードバックして自動制御や最適化を行う仕組み。
228	サイリスタ	さいりすた	サイリスタ	thyristor	–	3個以上の接合を持つ双安定半導体デバイスで、オフ状態からオン状態に切り替えることができるもの。
229	システムコスト	しすてむこすと	システムコスト	System Cost	–	発電コストに加え、系統増強や調整力確保などシステム全体で必要となるコストを含めたもの。再エネ評価に重要。
230	システムサービス	しすてむさーびす	システムサービス	system services	–	電力系統を安定で効率的な運用に必要な、エネルギー供給以外の各種機能・サービスの総称。日本で需給調整市場で取引される5つのプロダクツのほか、予備力、電圧・無効電力制御、慣性・System Strength、ブラックスタート等を、提供主体を問わず機能価値などがあり、世界で市場化が拡大している。
231	システムストレングス	しすてむすとれんぐす	システムストレングス	system strength	–	系統が電圧波形・電圧安定性を維持し、擾乱やインバータ制御との相互作用に耐える能力に関わる概念である。同期機の減少とインバータ連系電源の増加に伴い、短絡容量等と併せて重要性が高まっている。
232	システム運用	しすてむうんよう	システム運用	power system operation	–	電力系統の需給バランス、周波数、電圧、潮流、設備状態等を監視・制御し、安定供給を維持する管理・制御。再エネ・DER・デジタル技術の拡大により、集中制御と分散・協調制御を組み合わせた運用が重要となる。
233	ステークホルダー	すてーくほるだー	利害関係者	Stakeholder	–	政策や事業に関与または影響を受ける関係者。合意形成に重要である。
234	スポット価格	すぽっとかかく	スポット価格	spot price	–	日本の電力の前日（スポット）市場の価格。
235	スポット市場	すぽっとしじょう	スポット市場	spot market	–	日本における前日の電力取引市場。海外ではDay-Ahead Market/Auctionと呼ばれる。
236	スマートグリッド	すまーとぐりっど	スマートグリッド	smart grid	–	情報交換・制御技術、分散コンピューティング、センサ・アクチュエータを利用し、系統利用者等の行動を統合しつつ、持続可能で経済的かつ安全な電力供給を効率的に実現する、通常は小規模の、電力システム。
237	スマートホーム	すまーとほーむ	スマートホーム	smart home	–	スマートホームは、住宅内の機器・設備を通信ネットワークで接続し、計測・自動制御・エネルギー管理、サービスの向上等を行う住宅。
238	スマートメーター	すまーとめーたー	スマートメーター	smart meter	–	電源あるいは需要の発電あるいは使用する電力量等をデジタル計測し、通信機能により計測値を遠隔で収集・提供できる電力量計。
239	セキュリティ	せきゅりてぃ	セキュリティ	security	–	エネルギーの安定供給あるいはデジタルシステムの安定運用に関わる概念。
240	セクターカップリング	せくたーかっぷりんぐ	部門統合	Sector Coupling	–	電力、熱、輸送、産業燃料など異なるエネルギー部門（セクター）を相互に連携させ、より効率的、安定、低コストなエネルギーシステムを構築する考え方。再エネ主力化の下で余剰電力活用や脱炭素の選択肢を広げるが、制度分断や価格体系の違いが障害となる。統合設計の観点から重要な上位概念である。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
241	ゼロエミッション	ぜろえみっしょん	ゼロエミッション	zero emission	–	対象とする活動・設備等から温室効果ガスや汚染物質を排出しない状態。
242	センサスデータ	せんさすでーた	センサスデータ	census data	–	一般には、政府機関が数年～10年ごとに実施する全国民を対象とした大規模な調査結果。日本では国勢調査の結果に対して使われる場合がある。
243	センシング	せんしんぐ	センシング	sensing	–	センサ等を用いて物理量、状態、環境等を検出・計測すること。本用語集では、分散型システムの大量導入のもとで、多数の発電・需要・蓄電・系統状態の計測として扱う。
244	ソーラーシェアリング	そーらーしぇありんぐ	ソーラーシェアリング	agrivoltaics	–	太陽光発電で、発電と農業で日射をシェアする形態。農地に支柱を立て上部空間に太陽光発電設備を設置し、農業生産を継続しながら発電を行う方式など。
245	ダイナミックプライシング	だいなみっくぷらいしんぐ	動的価格	dynamic pricing	–	時間帯や場所に応じて変化する料金体系。固定的な時間帯別料金よりも頻繁に価格が変動するリアルタイム料金やクリティカルピーク料金等を含む。
246	タイムスケール	たいむすけーる	タイムスケール	time scale	–	現象、制御、意思決定等が変化・作用する代表的な時間の長さ。本用語集では、瞬時の系統制御から需給運用、設備投資、政策形成まで、異なる時間軸の長さ。
247	タイムスタンプ	たいむすたんぷ	タイムスタンプ	timestamp	–	データや事象に時刻情報を付与し、その発生・記録・処理等の時間的位置を示す情報。
248	タイムレンジ	たいむれんじ	時間範囲	time range	–	分析・予測・制御・計画等が対象とする時間の範囲。本用語集では、瞬時・秒分から日・年・数十年まで異なる時間領域を区別し、電力システムの運用・投資・政策を整合させる際の整理軸。
249	ダイヤモンドデバイス	だいやもんどでばいす	ダイヤモンドデバイス	diamond power device	–	人工的に作られた高純度のダイヤモンドを基材（土台）として利用した半導体。圧倒的な耐熱性、耐電圧性、低損失が期待されている。
250	ダックカーブ	だっくかーぶ	ダックカーブ	duck curve	–	太陽光発電が大量導入された系統で、需要から太陽光発電出力を差し引いた正味需要が日中低下し、夕方に急増する形の一日の需要曲線。本用語集では、太陽光の大量導入が残余需要、火力等のランプ能力、蓄電・DR等の柔軟性需要に与える影響を示す概念。
251	ディープラーニング	でぃーぷらーにんぐ	深層学習	deep learning	DL	人間の脳の神経回路を模した「多層構造のニューラルネットワーク」を用いて、コンピューターがデータの特徴を自ら自動で抽出し学習する、機械学習の一分野。
252	ディスパッチャブル	でぃすぱっちゃぶる	ディスパッチャブル	dispatchable	–	系統運用者等の指令や需給条件に応じて、出力・消費を一定の範囲で調整できること。本用語集では、火力・水力だけでなく蓄電池やDR等も含め、変動再エネを補完して需給バランスを確保できる制御可能な資源の特性として扱う。
253	データ・ガバナンス	でーたがばなんす	データガバナンス	Data Governance	–	データの収集、管理、利用、共有に関するルールや責任体制を整備し、適正かつ効果的に運用する仕組。電力・エネルギー分野では、データの信頼性確保、プライバシー保護、公平性維持が重要であり、知的基盤の主要要素。
254	データセキュリティ	でーたせきゅりてぃ	データセキュリティ	Data Security	–	データを不正アクセスや漏えいから保護するための対策。電力インフラでは重要性が高い。
255	データセンタ	でーたせんた	データセンタ	data center	–	クラウド取引、AI学習、AI推論などを実施する大規模なデータ処理施設。
256	データプラットフォーム	でーたぷらっとふぉーむ	データ基盤	Data Platform	–	多様なデータを集約・管理し、分析や共有を可能にする基盤。本用語集では、電力分野の知的基盤の中核として、政策・運用・市場の高度化を支える。
257	データ基盤	でーたきばん	データ基盤	Data Infrastructure	–	発電、需要、系統、価格、設備、気象などのデータを収集、標準化、蓄積、共有し、活用可能な状態にするための基盤。電力システムの高度化では中核的役割を果たし、EBPMやEIPMの前提条件となる。技術だけでなくガバナンスとアクセスルールの整備が重要。
258	データ共有	でーたきょうゆう	データ共有	Data Sharing	–	複数の組織や主体が保有するデータを相互に利用可能とし、分析や運用改善、政策形成に活かす仕組み。電力分野では、保安、競争、公平性、プライバシーの観点から慎重な設計が必要だが、共有なしには統合設計も知的インフラも成立しない。
259	デジタルツイン	でじたるついん	デジタルツイン	Digital Twin	–	現実の設備やシステムをデジタル空間の中のモデルで再現し、状態把握、計画・設計のためのシミュレーションを行う技術。電力分野では設備保全や系統運用の高度化に活用される。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
260	テナーギャップ	てなーぎゃっぷ	テナーギャップ	tenor gap	–	再生可能エネルギー投資など）やインフラ金融の分野で使われる、契約・ローンの「期間（テナー）のミスマッチ（ギャップ）」を意味する経済・金融用語。
261	デマンドサイドマネジメント	でまんどさいどまねじめんと	デマンドサイドマネジメント	demand-side management	DSM	電気事業者等が需要側に働きかけて実施する計画・施策の総称。省エネルギー、負荷移行、ピーク抑制、需要応答等を含む需要側の管理を行う。
262	デュアルユース	でゅあるゆーす	デュアルユース	dual use	–	デュアルユース（dual use）は、一つの技術・研究成果が民生目的と安全保障・軍事目的の双方に利用され得る性質。本用語集では、電力・デジタル・AI等の基盤技術が複数目的へ転用され得ることに伴う技術政策・ガバナンス上の論点として扱う。
263	デュレーションカーブ	でゅれーしょんかーぶ	デュレーションカーブ	load duration curve	–	指定された期間について、データ大きい順に並べてある値以上となる持続時間の長さが分かる曲線。
264	統合システム設計	とうごうしすてむせっけい	統合システム設計	Integrated System Design	–	複数の異なるサブシステムやコンポーネント、モジュールを1つの調和のとれた統一的（インテグレーテッド）な枠組みとして構築・調整するアプローチ
265	ドライバー	どらいばー	ドライバー	driver	–	システムや社会の変化を引き起こす要因を指す。本プロジェクトでは、技術進展、需要構造、政策、経済、安全保障、人口・社会変化等を、将来の電力・エネルギーシステムの方向性を左右する多元的な変化要因として捉える。
266	トランジション	とらんじしょん	トランジション	transition	–	既存の状態・仕組みから新しい状態・仕組みへ段階的に移行する過程。本用語集では、脱炭素化・分散化・デジタル化を伴う電力システムと技術・制度・市場・人材を含む移行過程。
267	ニーズドリブン	にーずどりぶん	ニーズドリブン	needs-driven	–	ステークホルダーが抱えるニーズ（要望や課題）を起点にして、制度整備、商品開発、マーケティング戦略を進める手法
268	ニューラルネットワーク	にゅーらるねっとわーく	ニューラルネットワーク	neural network	NN	人間の脳の神経回路（ニューロンとシナプス）の仕組みを模倣して作られた、AI・機械学習の数理モデル
269	ネガティブプライス	ねがてぃぶぷらいす	ネガティブプライス	negative price	–	認めること。再エネ導入により電力の余剰が生じる場合、電力の市場価格に負の値を認めること、その値。
270	ネッティング	ねってぃんぐ	ネッティング	netting	–	複数の取引量・需給量・債権債務等を相殺し、差引量で処理すること。
271	ネットゼロシナリオ	ねっとぜろしなりお	ネットゼロシナリオ	Net Zero Emissions by 2050 Scenario	NZE	温室効果ガスまたはCO2の人為的排出と除去を均衡させ、正味排出量をゼロにする将来像を前提としたシナリオ。
272	ネットワーク	ねっとわーく	ネットワーク	network	–	複数の主体・設備・拠点等を相互に接続し、電力、エネルギー、情報等をやり取りする構造を指す。本プロジェクトでは、電力系統に加え、需要機器、ICT、他のエネルギーキャリアとの連携を含めて用いる。
273	ノーダルプライス	のーだるぷらいす	地点別価格	nodal pricing	–	送電網内の地点別に送電線の混雑などを反映して異なる電力価格。「Locational pricing」参照。
274	ノード価格	のーどかかく	ノード価格	nodal price	–	ノーダルプライスと同義
275	ノンファーム	のんふぁーむ	ノンファーム型接続	non-firm connection	–	系統混雑時などに発電出力を制御することを前提として、送変電設備を増強せずに新規電源を系統へ接続し、系統に空きがあるときに運転を認める接続方式。コネクト＆マネージ運用の前提。
276	バイオマス	ばいおます	バイオマス	biomass	–	生物由来の再生可能な有機性資源（化石資源を除く）。
277	バイナリー発電	ばいなりーはつでん	バイナリー発電	binary power generation	–	本用語集では、低沸点媒体等を介して熱源からの発電。
278	ハイパースケーラ	はいぱーすけーら	ハイパースケーラ	hyperscaler	–	大規模なクラウド・デジタルサービスを提供し、巨大なデータセンター群を運用する事業者。
279	パイプライン	ぱいぷらいん	パイプライン	pipeline	–	天然ガス、水素、CO2等の流体を連続的に輸送する管路・輸送網。または、設備投資プロジェクトの開始から終了までの一連のプロセス。
280	ハイブリッド	はいぶりっど	ハイブリッド	hybrid	–	異なる方式、技術、資源等を組み合わせて一体的に機能させること。本用語集では、複数の電源・蓄電・制御方式や、物理系とデジタル系等を組み合わせる構成を表す。
281	バランシング	ばらんしんぐ	バランシング	balancing	–	電力系統の需給調整を行うエリアの単位において、供給と需要を一致させること、そのための運用上の調整。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
282	パワーエレクトロニクス	ぱわーえれくとろにくす	電力電子技術	Power Electronics	–	半導体素子を用いて電力の変換・制御を高効率に行う技術分野。インバータ、コンバータ、EV充電器、再エネ連系装置など現代電力システムの基盤技術。分散型電源や需要機器の高度制御を可能にする一方、電力品質や制御安定性への新たな課題も生み出す。
283	パワーカーブ	ぱわーかーぶ	出力曲線	power curve	–	風速タービン等の入力条件と発電設備の出力との関係を示す特性曲線。本用語集では主として風力発電について、風速から発電出力を推定し、発電量予測・設備評価・系統解析等に用いる基本特性。
284	パワーグリッド	ぱわーぐりっど	パワーグリッド	power grid	–	送配電網の別称。
285	パワーコンディショナ	ぱわーこんでぃしょな	パワーコンディショナ	power conditioning system	PCS	太陽光発電や蓄電池等の直流電力を交流へ変換して交流送配電網に接続し、必要な制御・保護等を行う電力変換装置
286	パワーデバイス	ぱわーでばいす	パワーデバイス	power semiconductor device	–	大電力の変換・制御・スイッチングに用いる半導体デバイスの総称。Si、SiC、GaN等を用いるダイオード、MOSFET、IGBT等を含み、電力変換器の効率・周波数・小型化・高耐圧化を左右する基盤技術。
287	ピークカット	ぴーくかっと	最大需要削減	Peak Cutting	–	需要が最も高くなる時間帯の電力使用量そのものを削減する取組み。設備増強の回避や供給余力確保に効果があり、節電、需要応答、蓄電池活用などが代表的手段である。需給逼迫対策として短期的にも有効であり、制度設計上の重要論点となる。
288	ピークシフト	ぴーくしふと	需要時間移動	Peak Shifting	–	需要を減らすのではなく、使用の従来の時間帯から他の時間帯へ移すこと。出力が変動する再エネの出力を差し引いた残余需要の平準化することでシステム全体の費用の低減、安定度の向上などに有効。時間帯別あるいは市場連動型の料金で、蓄電池、EV充電制御、産業プロセス調整などにより実現される。
289	ヒートポンプ	ひーとぽんぷ	ヒートポンプ機器	Heat Pump	HP	外部の熱をくみ上げて移動させることで、化石燃焼の使用より少ない投入エネルギーで加熱・冷却を行う機器。電化と省エネを同時に進める代表技術であり、蓄熱機能と組み合わせることで需要側柔軟性を提供できる。住宅・業務・産業部門の脱炭素化において重要。
290	ビッグデータ	びっぐでーた	ビッグデータ	Big Data	–	大量かつ多様なデータを高速に処理・分析することで新たな価値を創出する考え方。電力分野ではスマートメーターやIoTデータの活用により、需給管理や設備保全の高度化が進んでいる。
291	フィードフォワード制御	ふぃーどふぉわーどせいぎょ	フィードフォワード制御	feedforward control	–	制御対象の出力誤差を元に制御するフィードバック制御と異なり、目標値や測定可能な外乱等の情報を用いてあらかじめ操作量を与える高速化が可能な制御方式。
292	フィルター	ふぃるたー	フィルター	filter	–	信号・電圧・電流等に含まれる特定の周波数成分を通過または減衰させる回路・処理。本用語集では、パワーエレクトロニクスや計測・制御において高調波・ノイズ等を抑制し、必要な成分を取り出す機能。
293	プライスキャップ	ぷらいすきゃっぷ	上限価格（制限制度）	price cap	–	電力市場の制度設計、運営において、電力の市場価格の最大値を制限する枠組みおよびその値。
294	プライスシグナル	ぷらいすしぐなる	プライスシグナル	price signal	–	電力市場から発信されるエネルギー価格あるいは調整力・システムサービス、容量の価格で、今後の市場取引、あるいは将来の設備投資の指標。
295	ブラックアウト	ぶらっくあうと	大規模停電	Blackout	–	広範囲にわたる停電である大規模停電。需給不均衡、設備事故、誤操作などに加え、最近では連鎖により発生し、社会・経済への影響が極めて大きい。回避には予備力、保護協調、広域運用、復旧計画など多層的対策が必要であり、政策・技術両面から重視される。
296	ブラックスタート	ぶらっくすたーと	自立起動	black start	BS	ブラックアウト後、内部のエネルギー資源を用いて電力系統を起動することをいう。
297	プラットフォーム	ぷらっとふぉーむ	プラットフォーム	platform	–	本プロジェクトでは、データの取得・共有・解析・管理、機器の制御、さらには電力取引の決済に使われるシステム。
298	フレキシビリティ	ふれきしびりてぃ	フレキシビリティ	flexibility	–	需給変動や系統状態の変化に応じて、発電・需要・蓄電・系統運用等を時間的・空間的に調整できる能力。変動性再エネの拡大に伴い、安定供給と効率的運用を支える重要なシステム価値となる。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
299	フレキシビリティリソース	ふれきしびりてぃりそーす	柔軟性資源	flexibility resource	–	需給や系統状態の変化に応じて、発電・消費・充放電等を時間的に調整できる資源。本用語集では、火力・水力、蓄電池、DR、EV、分散型資源等を、変動再エネの統合や混雑・需給調整に寄与する機能として横断的に捉える。
300	プレヒーティング	ぷれひーてぃんぐ	プレヒーティング	preheating	–	本来の使用時刻より前に加熱して熱を蓄えておく運用。本用語集では、建物・給湯等の熱需要を電力需給に応じて前倒しする、熱容量を利用して需要時刻を移動する需要側柔軟性の一例。
301	プロトコル	ぷろとこる	プロトコル	protocol	–	情報通信の分野では、同一レイヤ内に存在するプロセス群の間で通信を確保するために採用される、定められた手順。
302	ベースロード	べーすろーど	ベースロード	baseload	–	一定期間にわたり電力系統、地域または需要家に継続的に必要とされる最小水準の電力需要。または、その部分を継続的に供給する発電機、発電種別。
303	ベストミックス	べすとみっくす	ベストミックス	best mix	–	供給安定性、経済性、環境適合、安全性等の複数の条件のもとで最適となる電源・エネルギー源の組合せ。本用語集では、単一技術の優劣ではなく、各資源の特性とシステム全体の価値を踏まえて構成を検討する概念として扱う。
304	ペロブスカイト	ぺろぶすかいと	ペロブスカイト	perovskite	–	特殊な結晶構造を持つ「ペロブスカイト」を光を吸収する層（光吸収層）に用いた、次世代の太陽光発電技術。フィルム状に加工でき、薄く軽く曲げられるため、壁面、曲面、耐荷重の低い屋根などにも貼ることができ、印刷による大量生産で生産コストの低減がきたされる。また、日本にとっては原料のヨウ素の国内からの安定供給が可能。耐久性と寿命化、大面積化などが課題。
305	ポートフォリオ	ぽーとふぉりお	ポートフォリオ	portfolio	–	ポートフォリオ（portfolio）は、複数の資産、電源、契約、技術等を組み合わせた構成。本用語集では、電源・需要側資源・市場取引等を組み合わせ、費用、リスク、供給力、環境価値等を総合的に管理する考え方として扱う。
306	ホスティングキャパシティ	ほすてぃんぐきゃぱしてぃ	ホスティングキャパシティ	hosting capacity	–	運用の安全性と信頼性の確保を条件に、接続/受け入れることのできる設備容量
307	ホライズンヨーロッパ	ほらいずんよーろっぱ	Horizon Europe	Horizon Europe	–	EUの研究・イノベーション分野の主要な資金提供プログラム。気候変動やその他のグローバル課題への対応、国連SDGsへの貢献、EUの競争力・成長の強化を目的とし、国際的・分野横断的な研究協力と優れた知識・技術の創出・普及を支援する。
308	ボラティリティ	ぼらてぃりてぃ	価格変動性	Volatility	VOL	価格などの指標が時間とともに変動する度合い。電力市場では再エネ導入により市場価格の変動性が増大する傾向にある。
309	ホンズデール蓄電所	ほんずでーるちくでんしょ	ホンズデール蓄電所	Hornsdale Power Reserve	–	オーストラリア南オーストラリア州ジェームズタウン近郊にある、テスラ製の蓄電池システムを利用した世界最大級の系統用大規模リチウムイオン蓄電池（メガバッテリー）。フランスの再生可能エネルギー企業であるNeoenが所有・運営し、テスラ（Tesla）の蓄電池ユニットが導入されている。 • 当初：100MW / 129MWh（2017年11月完成） • 拡張後：150MW / 193.5MWh（2020年に50MW / 64.5MWhを拡張）
310	マイクロガスタービン	まいくろがすたーびん	マイクロガスタービン	micro gas turbine	–	小容量のガスタービンを用いる分散型発電設備。天然ガス等を燃料として発電し、排熱利用と組み合わせたコージェネレーションにも利用される。
311	マイクログリッド	まいくろぐりっど	マイクログリッド	microgrid	–	明確な電気的境界を持つ相互接続された負荷と分散型エネルギー資源から成り、単一の制御可能な主体として動作し、系統連系または自立運転が可能な局所電力システムをいう。
312	マスタープラン	ますたーぷらん	マスタープラン	master plan	–	マスタープラン（master plan）は、中長期の目標や将来像を示し、個別施策・投資・整備計画を整合的に位置付ける上位の計画。本用語集では、電力・エネルギーシステムの将来像と、それに向けた技術・制度・インフラ整備を統合する計画概念として扱う。
313	マップマッチング	まっぷまっちんぐ	マップマッチング	map matching	–	GPS等で得た位置系列を道路・地図ネットワーク上の適切な位置や経路に対応付ける処理。本用語集では、移動・交通データを空間情報と結び付け、EV等のモビリティ分析に利用する技術として扱う。
314	マルチレート解析	まるちれーとかいせき	マルチレート解析	multi-rate analysis	–	異なるサンプリング周波数（レート）や時間ステップを持つ信号やシステムを効率よく扱う解析手法
315	メガソーラー	めがそーらー	メガソーラー	utility-scale solar / mega-solar	–	日本で用いられる大規模太陽光発電設備の呼称。海外では「事業用規模」という意味でutility-scaleが使われる。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
316	メタネーション	めたねーしょん	メタネーション	methanation	–	CO2と水素からメタンを合成する技術。再エネ由来水素等と回収CO2を用いてメタンを合成し、既存のガスインフラや需要設備を活用するPower-to-Gas／カーボンリサイクルの選択肢となる。
317	モビリティ	もびりてぃ	モビリティ	mobility	–	人や物の移動、およびそれを実現する交通・移動サービスを含む概念。本用語集では、特にEV等の電動モビリティを、電力需要であると同時に蓄電・需給調整にも関与し得るエネルギー資源として捉える。
318	ユースケース	ゆーすけーす	ユースケース	use case	–	システムや技術を、誰が・どのような目的で・どのように利用するかを具体的な利用場面として記述したもの。本用語集では、電力データ、AI、分散型資源等の機能を実際の価値・運用へ結び付ける検討単位。
319	ライフサイクル	らいふさいくる	ライフサイクル	life cycle	–	製品・設備・技術等について、資源採取・製造から使用、保守、廃棄・リサイクルまでの一連の段階。
320	ラストリゾート	らすとりぞーと	ラストリゾート	provider of last resort / last resort supply	–	通常の市場・契約による供給が得られない場合、最終的な手段となる手段。本用語集では、競争的な小売市場において供給者不在等が生じた場合にも需要家への電力供給を継続するセーフティネット機能。
321	リアクタンス	りあくたんす	リアクタンス	reactance	X	交流回路のインピーダンスの虚部に相当し、インダクタンスまたはキャパシタンス。
322	リアクトル	りあくとる	リアクトル	reactor	–	インダクタンスを利用して交流回路の電流や無効電力、電圧等を調整する電力機器。
323	リアルタイム市場	りあるたいむしじょう	リアルタイム市場	Real-time Market	–	運用直前またはリアルタイムに近い時間軸で需給を調整する市場。短期的な需給変動や予測誤差への対応力を高めるが、市場参加者の対応力も要する。運用高度化に不可欠な仕組みであり、情報提供、ルール整備の精緻化などが必要。
324	リーダーシップ	りーだーしっぷ	リーダーシップ	Leadership	–	方向性を示し、多様な主体を統合して意思決定と実行を行う能力。電力・エネルギー分野では、複雑で不確実な状況下において安定運用、省エネルギー、省費用、省排出を目的に、技術、制度、市場、安全保障が必要となる。このため、単一の権限ではなく、分散した主体を束ねる戦略的リーダーシップが必要となる。
325	リードタイム	りーどたいむ	リードタイム	lead time	–	計画・発注・意思決定等の開始から、設備・製品・施策等が利用可能になるまでに要する時間。本用語集では、電源・系統設備・技術導入等の実現時期を左右する時間的制約。
326	リスクプレミアム	りすくぷれみあむ	リスクプレミアム	Risk Premium	–	リスクの高い投資に対して追加的に要求される収益。電力投資の不確実性評価に重要である。
327	リスクヘッジ	りすくへっじ	リスクヘッジ	Hedging	–	価格変動などのリスクを回避または低減するために行う取引や手法。電力市場では先物契約などが用いられる。
328	リチウムイオン電池	りちうむいおんでんち	リチウムイオン電池	lithium-ion battery	–	正極と負極の間をリチウムイオンが移動することで充放電する二次電池。
329	リテラシー	りてらしー	リテラシー	literacy	–	ある分野の情報・知識を理解し、適切に判断・活用するための基礎的能力。本用語集では、電力、データ、AI、制度等を関係者が理解し、分野横断的な意思決定や共創に参加するための能力。
330	リパワリング	りぱわりんぐ	リパワリング	repowering	–	既設の発電設備を更新・置換し、出力、効率、信頼性等を回復・向上させること。
331	ルーフトップソーラー	るーふとっぷそーらー	屋根置き太陽光発電	rooftop solar	–	住宅・商業施設・工場等の屋根に設置する太陽光発電。
332	レシプロカル	れしぷろかる	レシプロカル	reciprocal method	–	レシプロカル方式は、単相系統の周波数・位相検出において、電圧のゼロクロスまたはピーク間の時間間隔を測定し、その逆数から周波数を求める方式。本用語集では、PLL等と並ぶ系統同期・周波数検知手法の一例として扱う。
333	レジリエンス	れじりえんす	強靭性	Resilience	–	災害、事故、需給逼迫、サイバー攻撃などの外乱に対して、システムが被害を抑えつつ早期に回復する能力。単なる耐久性ではなく、復旧力や適応力を含む概念であり、近年の電力政策において安定供給と並ぶ重要な設計目標として位置付けられている。
334	レジリエント	れじりえんと	レジリエント	resilient	–	障害・災害・急激な変化等を受けても、重要な機能を維持し、適応し、回復できること、その特性。本用語集では、電力システムが事故・災害・サイバー事象等に対して供給機能を維持・復旧できる性質を表す。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
335	ローカルフレキシビリティ	ろーかるふれきしびりてぃ	ローカルフレキシビリティ	local flexibility	–	特定の配電・地域系統内で、需要、分散型電源、蓄電池等の出力・消費を調整し、局所的な混雑・電圧等の制約緩和に利用する柔軟性。本用語集では、DERを系統増強の補完・代替として活用する地域系統運用の機能として扱う。
336	ロードカーブ	ろーどかーぶ	ロードカーブ	load curve	–	電力需要・負荷の大きさが時間とともに変化する様子を表した曲線。需要の時間変動、ピーク、再エネ導入後のネット需要等を把握し、設備計画、需給運用、DR・蓄電の価値を評価する基本データとなる。
337	ロードマップ	ろーどまっぷ	実行計画	Roadmap	–	中長期目標を実現するために、時間軸に沿って必要な施策、投資、制度改正、実証、評価手順などを整理した実行計画を指す。電力・エネルギー政策では、不確実性の高さから固定的計画ではなく、進捗と環境変化を踏まえ見直し可能なロードマップを設計することが重要となる。
338	ワット・ビット	わっと・びっと	ワット・ビット	Watt-Bit	–	電力を運ぶワット、情報を運ぶビットを、それぞれの特性を生かして最適な設備形成、運用をめざすという考え方。
339	安定性解析	あんていせいかいせき	安定性解析	stability analysis	–	電力システムにおいて、何らかの振動現象が拡大あるいは持続するか、あるいは一定時間で減衰するかの解析。
340	意思決定	いしけってい	意思決定	decision-making	–	複数の選択肢から目的・制約・不確実性・利用可能な情報を踏まえて方針や行動を選択する過程である。本プロジェクトでは、電力・エネルギーシステムの長期的変化に対応し、多様な主体が継続的に判断・見直しを行う仕組みとして重視する。
341	一次調整力	いちじちょうせいりょく	一次調整力	primary frequency response	PFR	周波数偏差に対して発電機・負荷・その他の資源が自動的かつ即時に有効電力を増減し、周波数を安定化させること。ENTSO-eのFCR、NERCのPrimary Frequency Response（PFR）に対応する。
342	技術ニュートラル	ぎじゅつにゅーとらる	技術中立性	Technology Neutrality	–	市場設計や制度設計において特定の設備・技術を指定せず、必要な機能や性能を定義し、それを満たす多様な技術が公平に参入できるようにする考え方。
343	供給信頼度	きょうきゅうしんらいど	供給信頼度	security of the electricity supply	–	電力系統が、所定の供給継続性を確保し、供給点における既存規格および契約上の取り決めに沿った電力品質を持続的に維持しながら、最終需要家へ電力・電力量を供給する能力をいう。
344	供給力	きょうきゅうりょく	供給力	supply capacity	–	ある時点または期間に需要に対して供給可能な発電・蓄電・需要側資源等の能力を指す。電力の安定供給には、需要見通しや設備停止等を踏まえ、中長期・短期の双方で必要な供給力を確保することが求められる。
345	系統安定度	けいとうあんていど	電力系統安定度	System Stability	–	外乱発生後に電力系統が定常状態を維持または回復する能力。電圧安定、周波数安定、過渡安定など複数の側面があり、再エネ、インバータ接続機器の増加あるいは同期機の現象により新たな安定度は低下する傾向がある。
346	系統運用	けいとううんよう	電力系統運用	Power System Operation	–	発電・送電・配電設備を統合的に制御し、電力需給を安定的に維持するための運用活動。周波数や電圧の維持、需給調整、事故対応など。近年は再生可能エネルギーの増加により高度なリアルタイム制御が求められている。狭義には、電源・需要を対象とする需給運用に対し、送配電網を対象とする「系統運用」。
347	系統解析	けいとうかいせき	系統解析	power system analysis	–	電力系統に関わる、目的により年間から数秒までの様々な時間領域の解析。再エネの年間の出力変動に関しては従来の代表日、代表断面ではない8760時間の解析、インバータ・パワーエレクトロニクス機器の影響の分析では、従来の実効値解析から大規模な瞬時値（EMT）解析など、状況の変化により新たな手法が注目される。
348	系統計画	けいとうけいかく	送配電網計画	Grid Planning	–	将来の需要、電源立地、設備更新、政策目標を踏まえた送配電網の増強・更新の長期的な計画プロセス。再エネ大量導入時代には、不確実性の高い需要・供給条件を前提にしつつ、柔軟性と投資効率を両立した計画手法が必要であり、透明性と予見性の確保が重要。
349	系統制約	けいとうせいやく	電力系統制約	Grid Constraint	–	送電容量、電圧安定性、周波数維持、保護協調などの、発電機など個別プラントではなく送配電網など電力システム全体での制約。最近では、電力の流通や新規接続が制限される状態を含む。再エネ導入の最大ボトルネックの一つ。
350	市場設計	しじょうせっけい	市場設計	market design	–	市場で取引する商品・価値、参加要件、価格形成、精算、責任分担等のルールの設計。電力分野では、安定供給、効率性、脱炭素、投資回収等の目的と整合する価格シグナルと制度を形成することが重要となる。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
351	市場連動料金	しじょうれんどうりょうきん	市場連動料金（市場価格連動型料金）	market-indexed tariff	–	小売り電気料金の設定の一方式。市場価格に様々な時間粒度で連動するものがある。需要家にピークシフトを促し、需給バランス改善や設備投資抑制に寄与する。再エネ余剰時間帯の利用促進やEV充電管理と組み合わせることで、需給一体化を具体化する有効な手段となる。固定料金、時間帯別料金（TOU）などと対比して使われる。
352	時間前市場	じかんまえしじょう	時間前市場	hour-ahead market	–	前日までに決めた電力の需給計画と、当日の実際の需要や発電量にずれが生じた際、実需給の1時間前まで売買して調整するための卸電力市場。
353	自端制御	じたんせいぎょ	自端制御	local control	–	通信で遠方情報を取得することを前提とせず、機器が自端で計測できる電圧、周波数、電流等の情報に基づく自律的な制御。本用語集では、分散型電源・パワエレ機器等が局所情報から系統状態へ応答する制御方式として扱う。
354	自励式変換器	じれいしきへんかんき	自励式変換器	self-commutated converter	–	IGBTやIEGTなどの自己消弧形（じこしょうこがた）パワー半導体素子を使用し、外部の交流電源がなくても自らオン・オフを制御して交流と直流を変換できる電力変換器。
355	実効値解析	じっこうちかいせき	実効値解析	RMS-value analysis	–	電圧、電流に歪みのない正弦波系、理想的な交流を仮定して、潮流計算、潮流計算に基づく制御系を含む動的な解析。実効値解析に対し、理想的な正弦波系を前提とせず、パワー半導体のスイッチングなど、日制限波形を扱う解析を瞬時値（EMT）解析という。
356	需給調整市場	じゅきゅうちょうせいしじょう	需給調整市場	Balancing Market	BM	需給の不一致や周波数変動に対応するための調整力を取引する市場。発電機、蓄電池、需要応答など多様な資源が参加可能となることで、柔軟性確保の効率化が期待される。
357	需要側資源	じゅようがわしげん	需要側資源	Demand-side Resources	–	需要家が保有または利用する機器、設備、蓄電池、EV、制御可能負荷など、需給調整や市場参加に活用可能な資源全般。これまで受動的に扱われてきた需要を、システム運用に貢献する主体として再評価する概念であり、需給一体化を実現する基礎となる。
358	周波数制御	しゅうはすうせいぎょ	周波数制御	Frequency Control	–	電力系統の周波数を一定範囲に維持するために需給バランスを調整する運用機能。需給の不一致が生じると周波数が変動するため、発電出力調整や需要応答により制御される。再エネ導入拡大により制御難易度が高まり、新たな調整力確保が課題となっている。
359	出力制御	しゅつりょくせいぎょ	出力制御	output curtailment / output control	–	需給バランスや系統制約等の運用制約から、発電設備の出力を抑制・調整すること。再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、安定運用の手段である一方、発電機会や収益への影響も含めた制度・運用設計が課題となる。
360	出力予測	しゅつりょくよそく	再エネ出力予測	Renewable Output Forecast	–	太陽光や風力など変動電源の将来出力を、気象予報や観測データ、統計・機械学習手法を用いて予測・推定する技術。予測精度は予備力確保、需給調整市場、広域運用、出力制御回避に直結するため、再エネ大量導入時代の基盤技術として位置付けられる。
361	瞬時値解析	しゅんじちかいせき	瞬時値解析	Electromagnetic Transients Analysis	EMT	瞬時値解析は、EMT解析の別称。
362	政策評価	せいさくひょうか	政策評価	Policy Evaluation	–	実施された政策が目的に対してどの程度効果を発揮したかを定量的・定性的に検証するプロセス。電力分野では導入量、コスト、排出削減、供給信頼度など複数指標による評価が必要であり、事前・事後の継続的な評価とフィードバックが政策改善に不可欠である。
363	静的信頼度	せいてきしんらいど	静的信頼度	static reliability	–	静的信頼度は、ある時点の設備構成、潮流、供給力等を前提に、想定故障や設備停止後にも運用条件を満たせるかを静的に評価する考え方。本用語集では、時間変化や動特性を扱う「動的信頼度」と対比して、系統の設備余力・供給余力等を評価する概念。
364	総合的エネルギーマネジメント	そうごうてきえねるぎーまねじめんと	総合的エネルギーマネジメント	integrated energy management	–	電力・熱・燃料等の供給側と需要側を横断し、計測・予測・制御・市場情報等を用いてエネルギー利用全体を最適化する考え方。本用語集では、個別設備の効率化にとどまらず、需要、DER、系統、データを統合して運用する枠組みとして扱う。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
365	送電網	そうでんもう	送電ネットワーク	Transmission Network	–	発電所から変電所や大需要地へ超高圧・特別高圧で電力を輸送するネットワーク。再エネの立地偏在が進む中で、送電網は単なる輸送設備ではなく、システム全体の柔軟性と安定供給を支える基盤として位置付けられ、広域連系、混雑管理、長期投資の設計が重要な論点。
366	託送料金	たくそうりょうきん	託送料金	wheeling tariff	–	発電者や小売電気事業者が、一般送配電事業者が所有・運営する送配電網を利用するために支払う料金。
367	炭素価格	たんそかかく	炭素価格	Carbon Price	–	温室効果ガス排出に対して設定される価格。排出削減の経済的手段として重要である。
368	短期市場	たんきしじょう	短期電力市場	Short-term Power Market	–	前日、時間前、リアルタイムなど比較的短い時間軸で電力や調整力を取引する市場。需給調整や効率的配分に有効である一方、長期投資や公共的価値の確保には限界がある。電力政策では短期市場と長期制度をどう接続するかが重要な設計課題となる。
369	短時間過負荷容量	たんじかんかふかようりょう	短時間過負荷容量	short-time overload capability	–	変圧器、遮断機、送電線、ケーブルなど直列機器の許容電流、あるは祖応答する有効電力。
370	短絡容量	たんらくようりょう	短絡容量	Short Circuit Capacity	SCC	系統内のある地点で短絡事故が発生した際に流れ得る電流の大きさ、系統の電気的な強さであるSystem Strengthの指標の一つ。短絡容量が大きい系統は電圧安定性に優れ、インバータ電源の導入にも有利である。再エネ拡大によりこの値が低下することが重要な技術課題。
371	知識基盤	ちしききばん	知識基盤	Knowledge Base	–	蓄積された知識や情報を体系的に管理する基盤。
372	知的基盤	ちてききばん	知的基盤	Intellectual Infrastructure	–	本プロジェクトでは、データ基盤、解析モデル、可視化、意思決定支援、人材、制度を一体化した知識活用の基盤。電力・エネルギー分野では、変動性や不確実性が高まる中で、知的インフラが政策と運用の質を決定する。単なるIT導入ではなく、判断能力を支える社会基盤として捉える必要がある。
373	地政学リスク	ちせいがくりすく	地政学的リスク	Geopolitical Risk	–	国際政治、紛争、外交関係、地域対立などが資源供給、物流、価格、投資環境に影響を与えるリスク。エネルギー輸入依存度の高い日本では、地政学リスクが燃料価格や供給安定性に直接的影響を及ぼすため、電力・エネルギー政策において安全保障視点の統合が不可欠である。
374	潮流	ちょうりゅう	電力潮流	Power Flow	–	送配電網を流れる有効電力・無効電力の流れ。電源配置、需要分布、設備制約により決まり、送電・配電の計画と運用の基本である。再エネや分散資源の増加により従来の一方向潮流の前提が崩れ、双方向・動的潮流を前提とした解析と運用が必要になっている。
375	調整力	ちょうせいりょく	需給調整能力	Flexibility	–	需給変動やその予測に対応して発電出力や需要を変化させる能力。再生可能エネルギー導入拡大に伴いその重要性は増大しており、発電機だけでなく蓄電池や需要側資源も含めた多様な調整手段の確保が求められている。
376	超分散型市場	ちょうぶんさんがたしじょう	超分散型市場	highly decentralized market	–	一般家庭や企業の屋根上太陽光発電、蓄電池、電気自動車(EV)などの小規模な分散型エネルギーリソース(DER)が大量に存在し、それらを束ねて需給調整や取引を行う次世代の電力ネットワークおよび市場構造。
377	長期市場	ちょうきしじょう	長期電力市場	Long-term Power Market	–	数年から数十年の時間軸で供給力や契約価値を確保するための市場・契約枠組み。短期市場では表現しにくい投資回収や供給信頼度の価値を補完する役割を持つ。電力分野では容量市場や長期契約、規制的支援など多様な制度が長期市場機能を担い、短期市場との接続が重要となる。
378	長期投資	ちょうきとうし	長期投資	Long-term Investment	–	送配電網、電源、蓄電池、情報基盤などのインフラを含め、回収に長い期間を要する資本投資。
379	低圧リソース	ていあつりそーす	低圧リソース	low-voltage resources	–	低圧配電系統に接続される家庭・小規模需要家側の蓄電池、EV、ヒートポンプ給湯機、太陽光発電等の分散型資源。
380	電圧制御	でんあつせいぎょ	電圧制御	voltage control	–	電力ネットワークの電圧を所定の範囲内の値に調整することをいう。
381	電圧-無効電力制御	ぼるとばーせいぎょ	電圧・無効電力制御	Volt-Var Control	VVC	電圧と無効電力を協調的に制御し、配電系統や送電系統の電圧を適正範囲に維持する制御手法である。太陽光発電やインバータ機器の普及に伴い重要性が高まっている。

No.	用語	よみ	日本語表記	英語表記	略語	説明・意味
382	電力解析	でんりょくかいせき	電力システム解析	Power System Analysis	–	発電、送電、需要、運用制約を数理モデル化し、系統挙動や運用状態を評価する解析手法の総称。潮流計算、安定度解析、需給シミュレーションなどを含み、運用高度化や投資判断の基盤となる。再エネ導入拡大と分散資源増加により、従来以上に高精度かつ柔軟な解析基盤が求められる。
383	電力品質	でんりょくひんしつ	電力品質	power quality	PQ	電力系統の所定の点における電流、電圧および周波数の特性を、基準となる技術パラメータ群に照らして評価したものをいう。
384	統合設計	とうごうせっけい	統合システム設計	Integrated System Design	–	電源、系統、需要、制度、データを個別最適ではなく全体最適の観点から設計する考え方。電力システムの複雑化に伴い、複数要素の相互作用を踏まえ全体最適を高めた設計が不可欠。
385	動的信頼度	どうてきしんらいど	動的信頼度	dynamic reliability	–	動的信頼度は、電力系統の信頼度を固定的な設備状態だけでなく、時々刻々変化する潮流、発電・需要、気象、設備状態等を反映して評価する考え方。本用語集では、再エネ・DER増加下でリアルタイムに近い情報を用いて運用余裕やリスクを評価する方向性。
386	同時市場	どうじしじょう	同時市場	co-optimized market	–	電力市場において、エネルギー取引とシステムサービス取引を同時に最適化して落札を決めること。
387	配電網	はいでんもう	配電ネットワーク	Distribution Network	–	変電所から需要家へ電力を供給する末端のネットワーク。従来は一方向潮流を前提としていたが、太陽光、EV、蓄電池、需要応答の普及により双方向潮流と分散制御への対応が必要になっている。今後は能動的な配電網、すなわちアクティブ配電網への転換が重要なテーマとなる。
388	負荷周波数制御	ふかしゅうはすうせいぎょ	負荷周波数制御	load frequency control	LFC	負荷周波数制御は、電力系統の計画・運用・安定供給に関わる概念である。発電・送配電・需要を協調させ、周波数・電圧・需給バランス等を維持しながら電力システムを運用する文脈で用いられる。
389	分散制御	ぶんさんせいぎょ	分散制御	Distributed Control	–	中央からの集中制御ではなく、各機器や拠点が自律的に判断・制御を行うこと。分散型電源や蓄電池を含め、需要側資源の増加に伴い技術的可能性が高まり、将来はレジリエンスの向上も期待される。
390	無効電力制御	むこうでんりょくせいぎょ	無効電力制御	reactive power control	–	同期発電機、インバータ、調相設備等が、無効電力の供給・吸収を調整し、系統電圧、力率、電力潮流等を適切な範囲に保つ制御。
391	予備力	よびりょく	供給予備力	Reserve Capacity	–	需要急増や発電設備故障などの不測の事態に備えて、即時または一定時間内に追加可能な供給の余力。安定供給の要であり、容量市場でのkW、調整力市場でのΔkW、燃料不足に対応するkWhなど、予備力の範囲は拡大している。
392	容量市場	ようりょうしじょう	容量市場	Capacity Market	CM	将来必要となる供給力を確保するための「供給容量」を取引する市場制度。再エネ比率上昇と価格低下の予見のもとで、従来型電源・エネルギー貯蔵設備の投資回収の手段として導入される。供給信頼度の確保を目的とするが、評価方法、公平性、コスト負担の在り方が継続的な論点。

参考文献リスト

	発表者/機関	発表年	タイトル	発表場所	URL	推奨者
1	次世代系統懇話会 山口博	2023	「電力系統進化論」	日本電気協会新聞部 (2023/10/31)	ISBN-10：4910909095 ISBN-13：978-4910909097	横山明彦
2	電気学会	2021	B 部門 ビジョン 2030	–	https://www.iee.jp/pes/b-vision2030/	事務局
3	電気学会	2022	B 部門 ビジョン 2030 ビヨンド	–	https://www.iee.jp/pes/b-vision2030-beyond/	事務局
4	APET	2021	2050 年革新的超長期電力システムビジョン検討会報告書	–	http://www.apet.t.u-tokyo.ac.jp/apet2050_20211025	事務局
5	関西電力グループ	2021	ゼロカーボンビジョン 2050	–	https://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2021/pdf/0226_3j_01.pdf	事務局
6	荻本和彦	2009	低炭素社会における電力システム	電気学会誌 129 巻 1 号 p.16-19	https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejeiss/132/8/132_1376/_article/-char/ja/	荻本和彦
7	Koichi Nara	2022	"Next-generation power delivery system with resiliency and environmental affinity"	Global Energy Interconnection Vol.5, No.3 (2022) pp,274-280	ISSN 2096-5117 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096511722000585?via%3Dihub	奈良宏一
8	Y. Yamazaki R. Yokoyama 編	2022	特集論文（マイクログリッド・分散型電源連系関係）	Global Energy Interconnection Vol.5, No.3 (2022)	https://www.sciencedirect.com/journal/global-energy-interconnection/vol/5/issue/3	奈良宏一
9	奈良宏一		「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (FRIENDS)」	クリーンエネルギー, 2006.4 (2006)	–	奈良宏一
10	中澤治久	2021	火力発電に求められる役割とグリッドコード	令和 3 年電気学会全国大会 (講演番号 4-1)	–	中澤治久
11	岡本浩	2020	グリッドで理解する電力システム	日本電気協会新聞部 (2020/12/9)	–	岡本浩
12	岡本浩	2020	Utility 3.0: Japan’s Utility of the Future	CIGRE ELECTRA, No. 311, August 2020	https://electra.cigre.org/311-august-2020/global-connections/utility-30-japans-utility-of-the-future.html	岡本浩
13	岡本浩	2023	Challenges in Japan's Power Systems to Achieve Carbon Neutral and Resilient Communities	CIGRE ELECTRA, No. 327, April 2023	https://electra.cigre.org/327-april-2023/global-connections/challenges-in-japans-power-systems-to-achieve-carbon-neutral-and-resilient-communities.html	岡本浩
14	岡本浩	2023	The Fourth Industrial Revolution Empowered by End-to-End Electric Power System	CIGRE ELECTRA, No. 328, June, 2023	https://electra.cigre.org/328-june-2023/global-connections/the-fourth-industrial-revolution-empowered-by-end-to-end-electric-power-system.html	岡本浩
15	岡本浩	2023	Envisioning the future driven by the 4th Industrial Revolution: Electrification, Network Convergence, Vehicle to X and Utility 3.0	CIGRE ELECTRA, No. 330, October, 2023	https://electra.cigre.org/330-october-2023/global-connections/envisioning-the-future-driven-by-the-4th-industrial-revolution-electrification-network-convergence-vehicle-to-x-and-utility-30.html	岡本浩
16	岡本浩	2024	The Cambrian Explosion of Mobility X	CIGRE ELECTRA, No.333 , April 2024	https://electra.cigre.org/333-april-2024/global-connections/the-cambrian-explosion-of-mobility-x.html	岡本浩
17	岡本浩	2023	Future load management envisioned by TEPCO Power Grid	energycentral.com	https://energycentral.com/c/iu/future-load-management-envisioned-tepco-power-grid	岡本浩
18	岡本浩	2023	Agile Energy X, a subsidiary of TEPCO Power Grid, begins storing renewable energy in bitcoin	energycentral.com	https://energycentral.com/c/iu/agile-energy-x-subsidiary-tepco-power-grid-begins-storing-renewable-energy	岡本浩
19	岡本浩	2023	TEPCO Power Grid's initiative to homeostatic regulation of a cyber-physical social system: MESH to spread the Industrial Revolution like wildfire across the globe.	energycentral.com	https://energycentral.com/c/iu/tepco-power-grids-initiative-homeostatic-regulation-cyber-physical-social-system	岡本浩
20	岡本浩	2024	The Cambrian Explosion of Electro-Mobility X and Robots	energycentral.com	https://energycentral.com/c/iu/cambrian-explosion-electro-mobility-x-and-robots	岡本浩
21	岡本浩	2024	電脳モビリティ X のカンブリア爆発	電気学会誌 2024 年 7 月号コーヒーブレイク	–	岡本浩
22	岡本浩	2024	Society 5.0 実現に向けて電力システムを再定義する	一般社団法人システムイノベーションセンター（SIC)・ニュースレター 3 月号 Vol. 6 . 3 第 5 8 号	https://sysic.org/news/3882.html	岡本浩
23	岡本浩	2024	エネルギーの分散化により地域の産業革命をもたらすメッシュ構想：デジタルインフラと電力グリッドの融合	エネルギー・資源 Vol. 45 No. 2（2024）	–	岡本浩

24	東京電力パワーグリッド	2022	カーボンニュートラルかつレジリエントな豊かな地域の実現に向けて ～地域の分散エネルギーの有効活用策～	資源エネルギー庁第 1 回 次世代の分散型電力システムに関する検討会：東京電力パワーグリッド提出資料	https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/jisedai_bunsan/pdf/001_06_01.pdf	岡本浩
25	東京電力パワーグリッド	2023	エネルギー×情報基盤インフラの連携・協調の必要性について	デジタルインフラ（DC 等）整備に関する有識者会合 （第 5 回）:東京電力パワーグリッド提出資料	https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/digital_infrastructure/0005/08.pdf	岡本浩
26	東京電力パワーグリッド	2022	保有アセットの有効活用によるデジタル・インフラ普及への貢献	デジタル田園都市国家構想実現会議（第 4 回）東京電力パワーグリッド提出資料	https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/digital_denen/dai4/siryou3.pdf	岡本浩
27	東京電力パワーグリッド	2023	再生可能エネルギーを主力化するためのこれからのエネルギーマネジメント	東京都再エネ実装専門家ボード（第 3 回）東京電力パワーグリッド提出資料	https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/documents/d/kankyo/3nookamoto	岡本浩
28	東京電力パワーグリッド	2023	①当社の送配電事業の目指す姿 ②各ライフライン事業者様と当社で実現したいこと	第 2 回デジタルライフライン全国総合整備実現会議 東京電力パワーグリッド提出資料	https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/digital_architecture/lifeline_kaigi/dai2_0915/pre8_siryou_tpg.pdf	岡本浩
29	東京電力パワーグリッド	2023	インフラ視点でのモビリティについて	デジタル庁「モビリティ・ロードマップ」のありかたに関する研究会（第 4 回）東京電力パワーグリッド提出資料	https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/basic_page/field_ref_resources/d909bf77-e6d4-4c20-ab3c-f518a8613cd5/60d51465/20230712_meeting_mobility_roadmap_outline_05.pdf	岡本浩
30	古舘 恒介	2021	エネルギーをめぐる旅――文明の歴史と私たちの未来	英治出版（2021/08/24）	–	岡本浩
31	ジャン=マルク・ジャンコヴィシ 他著 古舘 恒介 監訳	2023	だれも教えてくれなかった エネルギー問題と気候変動の本当の話	河出書房新書（2023/12/04）	–	岡本浩
32	関口 美奈	2024	13 歳からのエネルギーを知る旅	KADOKAWA(2024/2/21)	–	岡本浩
33	竹内 純子	2021	プリンシプルのない日本の電力システム改革 ――電力安定供給と自由化を考える	三田評論オンライン	https://www.mita-hyoron.keio.ac.jp/speaking-hall/202105-1.html	岡本浩
34	竹内 純子	2022	電力崩壊 戦略なき国家のエネルギー敗戦	日本経済新聞出版(2022/12/23)	–	岡本浩
35	竹内 純子編著	2021	エネルギー産業 2030 への戦略 Utility3.0 を実装する	日本経済新聞出版; New 版(2021/11/20)	–	岡本浩
36	スマートレジリエンスネットワーク	–	コンセプト動画、取組概要動画	–	https://s-reji.com/	岡本浩
37	岡本 浩	2023	エネルギーの分散化が創出する地域の産業革命	–	https://s-reji.com/module/pdf/20230509.pdf	岡本浩
38	渡邊裕美子	2022	新電力の現状と将来展望	エネルギーレビュー = Energy review 42 (12), 19-23, 2022-12	https://cir.nii.ac.jp/crid/1520857446008602368	渡邊裕美子
39	大橋弘、 山本敏之	2022	需給調整メカニズムの現況と課題：欧米の比較を踏まえた 2024 年度以降に向けての考察と提言	東京大学公共政策大学院ディスカッションペーパー	https://www.pp.u-tokyo.ac.jp/wp-content/uploads/2016/09/GraSPP-DP-J-22-002.pdf	山本敏之
40	送配電網協議会	2023	2050 年カーボンニュートラルに向けて	送配電網協議会 HP	https://www.tdgc.jp/information/docs/press_210512_02_update_20230412.pdf	山本敏之
41	一般社団法人 電気協同研究会	2021	次世代を担う技術者の育成における諸課題と今後のアプローチ	(刊行物)電気協同研究 第 76 巻第 4 号 P59-67	https://www.etra.or.jp/publication/detail?id=347	山本敏之
42	一般社団法人 電気協同研究会	2019	2050 年における低炭素社会の展望と電力グリッドの役割	(刊行物)電気協同研究 第 75 巻第 4 号	https://www.etra.or.jp/publication/detail?id=343	山本敏之
43	一般社団法人 電気協同研究会	2022	電力系統を取り巻く環境変化がもたらす系統安定化システムの課題と対応	(刊行物)電気協同研究 第 77 巻第 1 号 P113-154	https://www.etra.or.jp/publication/detail?id=348	山本敏之
44	日立パワー	2018	技術的視点 2 ：風車の系統連系制御機能活用推進	日本風力エネルギー学会誌,42 巻 4 号,446-451	https://doi.org/10.11333/jwea.42.4_446	紺谷怜央
45	日立パワー	2021	風力発電システムの現状とエネルギーシステムインテグレーションへの寄与	第 1 回 ESI シンポジウム	https://www.esisyab.iis.u-tokyo.ac.jp/symposium/20180509/20180800509-08.pdf	紺谷怜央
46	JWPA	2021	風力発電の実力 – 風力発電の制御機能の特性と効果 –	第 3 回 ESI シンポジウム	https://www.esisyab.iis.u-tokyo.ac.jp/symposium/20180709/20180709-03_suzuki.pdf	紺谷怜央
47	日立パワー	2023	電力系統の混雑による出力抑制を考慮した陸上風力発電所の候補地選定	エネルギー・資源学会論文誌,44 巻 3 号,126-134	https://doi.org/10.24778/jjser.44.3_126	紺谷怜央
48	飯岡大輔	2020	太陽光発電からの大規模な逆潮流に起因する配電系統の電圧制御に関する課題と解決技術	電気学会論文誌 B, vol. 140, no. 6, pp. 441-444	https://doi.org/10.1541/ieejpes.140.441	飯岡大輔

49	飯岡大輔	2022	再生可能エネルギーの大量導入が配電系統に及ぼす影響と課題解決に向けた取組み	電気設備学会誌, vol. 42, no. 10, pp. 647-650	https://doi.org/10.14936/ieiej.42.647	飯岡大輔
50	戸田直樹	2024	EUと日本で適用が始まるハイブリッド市場ー転換期の認識を	U3 イノベーションズ Web	https://note.com/u3i_blog/n/n0c7b1943ca36	戸田直樹
51	Paul L. Joskow	2018	Challenges for wholesale electricity markets with intermittent renewable generation at scale: The U.S. Experience	MIT CEEPR Web	https://ceepr.mit.edu/wp-content/uploads/2021/09/2019-001.pdf	戸田直樹
52	Jan Horst Keppler 他	2022	Why the sustainable provision of low-carbon electricity needs hybrid markets	Energy Policy Volume 171	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142152200492X	戸田直樹
53	戸田直樹	2023	電力システム改革を再考する	エネルギーと動力 2023 秋季号（日本動力協会）	–	戸田直樹
54	服部徹	2022	カーボンニュートラル社会を見据えた電力システム改革のあり方	電中研研究報告会 2022 基調報告	https://criepi.denken.or.jp/intro/hokokukai/2022/pdf/keynote.pdf	戸田直樹
55	METI	2023	将来の電力需給シナリオに関する検討会 2024 年 3 月 5 日 第 4 回 作業会中間報告 2024 年 1 月 24 日 第 3 回 作業会の設置 2023 年 11 月 30 日 第 2 回 開催案内 配布資料 議事録 PDF(461KB) 2023 年 11 月 7 日 第 1 回 設置、進め方、方向性	OCCTO 検討会	https://www.occto.or.jp/iinkai/shorai_jukyu/	荻本和彦
56	METI	2024	次世代の分散型電力システムに関する検討会 2023.8.22 第 8 回 資料 4 海外の電気料金型 DR の取組事例について 資料 5 国内外における DR・電気料金メニューの調査 2024.3. 5 第 9 回 資料 3 次世代スマメを活用した分散型リソースの取引ルールに関して	METI 検討会	https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/jisedai_bunsan/index.html	荻本和彦
57	OCCTO	2023	調整力及び需給バランス評価等に関する委員会 2023 年 10 月 16 日 第 91 回 資料 3 中長期の調整力確保の在り方について(報告)	OCCTO 委員会	https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2023/chousei_jukyu_91_haifu.html	荻本和彦
58	IEA	2023	Managing Seasonal and Interannual Variability of Renewables	IEA Report	https://www.iea.org/reports/managing-seasonal-and-interannual-variability-of-renewables	荻本和彦
59	Google	2023	Google が世界初の技術を使った地熱発電所を稼働開始	Google Cloud	https://blog.google/outreach-initiatives/sustainability/google-fervo-geothermal-energy-partnership/	荻本和彦
60		2024	XFLEX Hydro（EU Horizon 2020 から funding）	ホームページ	https://www.xflexhydro.com/	荻本和彦
61	岡本浩	2024	エネルギーとデジタルのインフラ融合がエネルギー課題を解決に導く	–	https://www.telegraphic.jp/2024/05/642/	岡本浩
62	岡本浩	2024	Cybernetic Mobility X: The Cambrian Explosion of a New Era	–	https://energycentral.com/c/iu/cybernetic-mobility-x-cambrian-explosion-new-era-0	岡本浩
63	岡本浩	2024	ワットとビット：電力グリッドとクラウド・コンピューティングが電脳統合による「Utility 3.0」をいかに実現するか？	国際大電力システム会議 CIGRE の機関誌 ELECTRA 2024 年 8 月号	https://electra.cigre.org/335-august-2024/global-connections/watts-bits-how-power-grids-and-cloud-computing-are-working-together-to-implement-utility-30-through-electro-cyber-integration.html	岡本浩
64	岡本浩	2024	GX・DX の同時達成に向けた電力システムの役割と課題	第 2 回 GX リーダーズパネル	https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/gx2040/20240723/siryou5.pdf	岡本浩
65	亀澤宏規	2024	GX2040 リーダーズパネル説明資料	第 2 回 GX リーダーズパネル	https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/gx2040/20240723/siryou4.pdf	岡本浩
66	岡本浩	2024	Watts & Bits: How Power Grids and Cloud Computing Are Working Together to Implement “Utility 3.0” Through Electro-Cyber Integration	CIGRE ELECTRA 8 月号	https://electhttps://electra.cigre.org/335-august-2024/global-connections/watts-bits-how-power-grids-and-cloud-computing-are-working-together-to-implement-utility-30-through-electro-cyber-integration.html	岡本浩
67	高野雅晴	2024	エネルギーとデータセンターの未来 ～AI 時代の鍵となる電力インフラ～	-	https://www.youtube.com/watch?v=23nwrfN5PKY	岡本浩
68	Dr. Shivkumar Kalyanaraman	2024	The Future of 24/7 Clean Energy driven by AI	-	https://www.youtube.com/watch?v=AhbtFmbKAIA	岡本浩
69	高野雅晴	2024	糸島すてきなヴィレッジ！	-	https://youtu.be/tLbHKJ4RbnA?si=e-bo5aJJa-_xRxEq	岡本浩
70	岡本浩	2024	Realizing More from Less: Co-evolution of Supply and Demand in the Technologically Transformative Era	CIGRE ELECTRA 12 月号	https://www.cigre.org/article/realizing-more-from-less-co-evolution-of-supply-and-demand-in-the-technologically-transformative-era	岡本浩

71	杉山昌広	2024	High with low: Harnessing the power of demand-side solutions for high wellbeing with low energy and material demand	Joule 8, 1-6, January 17, 2024	https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.12.014	杉山昌広
72	岡本浩ら	2024	The New Role of Electric Power Systems in Society 5.0: Harnessing the future of the human-centered industrial revolution through electrification of the globe.	IEEE Electrification Magazine, vol. 12, no. 4, pp. 95-103, Dec. 2024	doi: 10.1109/MELE. 2024.3473408	岡本浩
73	米国 DOE	2024	Energy Storage Roadmap	DOE ホームページ	https://www.energy.gov/oe/draft-energy-storage-strategy-and-roadmap-stakeholder-comment	荻本和彦
74	ENTSO-e	2024	ENTSO-E Vision: A Power System for a Carbon Neutral Europe	ENTSO-e ホームページ	https://vision.entsoe.eu/	荻本和彦
75	IEA	2024	Energy Storage Roadmap	IEA ホームページ	https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-energy-storage	荻本和彦
76	米国 NREL	2024	Storage Futures Study: The Challenge of Defining Long-Duration Energy Storage	NREL ホームページ	https://research-hub.nlr.gov/en/publications/storage-futures-study-the-challenge-of-defining-long-duration-ene/	荻本和彦
77	米国 NREL	2024	Storage Futures Study: The Four Phases of Storage Deployment: A Framework for the Expanding Role of Storage in the U.S. Power System	NREL ホームページ	https://research-hub.nlr.gov/en/publications/storage-futures-study-the-four-phases-of-storage-deployment-a-fra/	荻本和彦
78	米国 NREL	2024	Beyond 4-Hour Li-Ion Batteries-Challenges and Opportunities	NREL ホームページ	https://research-hub.nlr.gov/en/publications/moving-beyond-4-hour-li-ion-batteries-challenges-and-opportunitie/	荻本和彦
79	岡本浩	2025	Unity 3.0：エネルギーと情報をつなぐ新文明論--システム思考とワット・ビット連携にもとづくイチゴ大福的宇宙仮説--	一般社団法人システムイノベーションセンター（SIC)・ニュースレター7月号	https://sysic.org/wp/wp-content/uploads/2025/07/SIC%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%82%B9%E3%83%AC%E3%82%BF%E3%83%BCVol.-7.7%EF%BC%8825.7.8%EF%BC%89.pdf	岡本浩
80	FERC	2021	FERC: FERC Order No. 2222 Explainer	FERC ホームページ	https://www.ferc.gov/ferc-order-no-2222-explainer-facilitating-participation-electricity-markets-distributed-energy	荻本和彦
81	ACER	2025	EU-ACER: Recommendation on reasoned proposal for the establishment of the Network Code on Demand Response	ACER ホームページ	https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Recommendations/ACER_Recommendation_01-2025_Demand_Response_Network_Code.pdf	荻本和彦
82	IEC/MSB	2018	Stable Grid Operation in a future of distributed electric power	IEC ホームページ	https://www.iec.ch/basecamp/stable-grid-operations-future-distributed-electric-power	石井英雄
83	METI	2025	エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネスに関するサイバーセキュリティガイドライン	METI ホームページ	https://www.meti.go.jp/press/2025/05/20250522001/20250522001.html	石井英雄
84	電気学会 D 部門調査専門委員会／SGTEC	2023	JEC−TR-59006 需要家電力資源のフレキシビリティのアグリゲーションによるエネルギーサービスに関する標準仕様	電気学会電気規格調査会	https://www.iee.or.jp/cfml/OA/front/NonAuthenticate/bookpur/fbo_BookDetail.cfm?objectID=67936C04-BE7A-4828-C8954A0D2405F5FE	石井英雄
85	石井英雄	2025	電力システムのトランジッションを背景とする国際標準化の動向と日本の取組み	エネルギー・資源 Vol.46, No.2	−	石井英雄
86	J. PEÇAS LOPES 他	2025	Electric Vehicles as Distributed Energy Resource (DER) Systems	CIGRE Technical Brochures, Reference: 954 - 2025.	https://www.e-cigre.org/publications/detail/954-electric-vehicles-as-distributed-energy-resource-der-systems.html	芳澤信哉
87	EPRI	2023	EPRI EVs2Scale2030	EPRI ホームページ	https://msites.epri.com/evs2scale2030	芳澤信哉
88	「EV×グリッド革命」編集委員会	2024	ＥＶ×グリッド革命	日本電気協会新聞部	https://www.denkishimbun.biz/SHOP/BT241200.html	芳澤信哉
89	ESIG	2025	Foundations of Integrated Planning: Defining a Framework for Comprehensive Energy System Planning Integrated Planning Guidebook: A Practical Coordination Framework for Electricity Planners Optimization for Integrated Electricity System Planning: Opportunities for Integrated Planning in Capacity Expansion Models	ESIG ホームページ	https://www.esig.energy/integrated-planning/	荻本和彦
90	小宮山涼一	2022	エネルギーモデルによるシナリオ分析の動向	電気学会論文誌 B,142 巻 7 号,pp.323-326,2022	https://doi.org/10.1541/ieejpes.142.323	小宮山涼一
91	杉山昌広ほか４名	2016	Research management: Five years on from Fukushima	Nature volume 531, pages29–30 (2016)	https://doi.org/10.1038/531029a	杉山昌広
92	Sugiyama et al.	2025	JMIP 2 Part 1: Technology uncertainty	Energy and	https://doi.org/10.1016/j.egycc.2025.1	杉山昌広

	（ほか 14 名）		and robustness in Japan's net-zero pathways	Climate Change (2025)	00210	
93	Sugiyama and Muto	2024	Measuring policy analytical capacity in renewable energy policy: Germany-Japan-US comparison	Review of Policy Research Volume 41, Issue 1 pp. 184-209 (2024)	https://doi.org/10.1111/ropr.12527	杉山昌広
94	フィリップ・アギヨン	2022	想像的破壊の力	東洋経済新報社 ISBN 978-4-492-39671-1	–	山口順之
95	公益事業学会政策研究会	2023	電力改革トランジション	日本電気協会新聞部 ISBN 978-4-910909-06-6	–	山口順之
96	長山浩章	2020	再生可能エネルギー主力電源化と電力システム改革の政治経済学	東洋経済新報社 ISBN 978-4-492-80089-8	–	山口順之
97	西村陽・戸田直樹・穴山悌三	2021	未来のための電力自由化史	日本電気協会新聞部 ISBN 978-4-905217-95-4	–	山口順之
98	F. C. Schweppe et al.	1988	Spot pricing of electricity	Kluwer Academic Publishers	https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1683-1	山口順之
99	OECD	2022	Competition in Energy Markets-OECD Competition Policy Roundtable Background Note		https://www.oecd.org/en/publications/competition-in-energy-markets_e2e1b9be-en.html	山口順之
100	岡本浩	2026	Sovereignty by Design Part 1: The "Feeder Sovereignty" — Governing Post-Singularity AI through Physical Layer Constraint	CIGRE ELECTRA(2026/4)	https://electra.cigre.org/345-april-2026/global-connections/sovereignty-by-design-part-1-the-feeder-sovereignty.html	岡本浩
101	馬場智義ら	2026	エネルギートランシジョン促進の先行政策事例（米国、EU、英国、中国、インド、オーストラリア）と日本への適合に向けた方向性 ～脱炭素電源の最大活用を支える既存リソースの有効活用～	調査報告書 ISBN 978-4-86829-047-6	https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2025-RR-09.html	事務局
102	Jessika E. Trancik et al.	2025	Informed investments in clean energy technologies	Nature Energy volume 10, pages1404–1411 (2025)	https://www.nature.com/articles/s41560-025-01867-w	杉山昌広
103	合原一幸	2018	複雑系数理モデル学で"読み解く"電力システム	OHM，第 105 巻，第 7 号，pp.44-47，2018 年 7 月号	–	合原一幸
104	浅野浩志編著	2020	スマートエネルギーシステムー再生可能エネルギー主力化を支える次世代エネルギーマネジメント技術—	エネルギー・資源学会、デジタルパブリッシングサービス、2020 年 9 月	–	浅野浩志
105	浅野浩志	2023	内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)におけるエネルギーイノベーション	エネルギー・資源、Vol.44,No.6，pp.3-7	–	浅野浩志
106	浅野浩志	2024	GX×DX によるエネルギー需給のイノベーション	省エネルギー、Vol.76,No.1,pp.42-45,2024 年 1 月	https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=202402237756363055	浅野浩志
107	浅野浩志	2026	モビリティとスマートエネルギーマネジメントー走行中無線給電とセクターカップリングー	高速道路と自動車、令和 8 年 8 月号	–	浅野浩志
108	浅野浩志	2025	e-mobility と再生可能エネルギー利用のセクターカップリング	堀洋一、畑勝裕、横井行雄監修、e モビリティ・テクノロジー、エヌ・ティー・エス、2025 年 12 月	–	浅野浩志
109	Wilson, C., Guivarch, C., Kriegler, E. ほか	2021	Evaluating process-based integrated assessment models of climate change mitigation	Climatic Change 166	https://doi.org/10.1007/s10584-021-03099-9	杉山昌広
110	Fujimori, S., Krey, V., Riahi, K., Sugiyama, M. ほか	2025	Towards an open model intercomparison platform for integrated assessment models scenarios	Nature Climate Change	https://doi.org/10.1038/s41558-025-02462-3	杉山昌広
111	HM Treasury	2026	The Green Book: Central Government Guidance on Appraisal and Evaluation	英国財務省	https://www.gov.uk/government/publications/the-green-book-appraisal-and-evaluation-in-central-governent	杉山昌広
112	山口博	2026	『インフラの維持と未来』「S+3E」達成に向け電力システムを再考する㋣～日本の電力システムが直面する構造的課題	電経新聞、コラム熱気球 15	–	山口博
113	山口博	2026	『インフラの維持と未来』「S+3E」達成に向け電力システムを再考する㋥～確固たる供給基盤と競争メカニズムの再構築～	電経新聞、コラム熱気球 16	–	山口博
114	山口博	2026	『インフラの維持と未来』「S+3E」達成に向け電力システムを再考する㋦～新たな枠組みを機能させる施策～	電経新聞、コラム熱気球 17	–	山口博

参考 1 活動記録：会合とシンポジウム

★:EAJ 会員、※:協力者

会合	時期	分野	氏名
キックオフ	2024/3/11	横断	—
第 1 回	2024/4/25	需要	岩船由美子
		電源	原亮一
クローズドワークショップ	2024/5/23	横断	杉山昌広 渡邊裕美子 白木裕斗※
第 2 回	2024/6/17	PV	大関崇
		風力	紺谷怜央
第 3 回	2024/9/9	HVDC	中島達人
		インバータ	馬場旬平
第 4 回	2024/11/8	送電	山本敏之
		配電	飯岡大輔
第 5 回	2025/1/20	分野横断	山口容平
			江村克己
中間シンポジウム	2025/4/15	—	—
第 6 回	2025/5/8	運用	河辺賢一
		小売	渡邊裕美子
第 7 回	2025/7/23	需要機器	芳澤信哉
		IT	石井英雄
第 8 回	2025/9/29	解析 I	辻隆男
		解析 II	小宮山涼一
第 9 回	2025/11/27	市場	山口順之
		政策	杉山昌広
第 10 回	2026/2/2	分野横断	—
後半シンポジウム	2026/4/23	—	—
提言シンポジウム	2026/9/8	—	—

参考 2 議事録

第 1 回会合

開催日時:2024 年 4 月 25 日(木) 9:00～11:00
開催場所:オンライン開催(発表者・事務局は JST 東京本部別館(K's 五番町)4 階会議室 H)
出席者:別紙参照

議事:
開会挨拶
発表1(原委員)
発表2(岩船委員)
全体討議
事務連絡

概要:

開催挨拶:荻本 PL より挨拶

発表1:原委員より電源分野について発表
- 第 6 次エネ基・需給見通し R3 での同期機電源
- 同期機電源に求められる役割
- 調整力
- 火力電源の稼働率低下
- 部分負荷運転
- 長期的な対応の必要性

発表2:岩船委員より需要分野について発表
- 今後必要になるエネルギーマネジメント
- 調整力の確保に向けたデマンドレスポンス
- 需要側リソースの活用に向けて
- 需要家・アグリゲータにおける DR 価値
- 日本の低圧リソース活用を取り巻く背景
- 低圧リソースの活用に向けて
- 需要を動かす価値はあるのか？
- 短期的な取り組み
- 電気温水器・エコキュート需要の昼間シフトは 2,000 万 kW の調整力に
- 再エネ出力抑制の緩和のための需要対策
- 九州電力における新しい料金メニュー
- Load Management Rulemaking
- DR の調整力としての活用
- 大量に再エネが導入された状況下での DR の役割
- 需要立地誘導・新規電力需要
- 需要想定

全体討議:主な内容は以下のとおり
- 火力の効率化については、議論が必要
- 同期機の電圧維持/調整機能
- ピークカットと火力必要容量]
- 原子力の出力変化の可能性
- 同期機の電圧維持/調整機能

- 配電網情報
- データセンター需要
- 地方/都市需要
- 電化と都市ガス
- 小売料金
- アグリゲータ育成
- 需要の変化と電源との関係
- エコキュート、EV による調整
- 貯蔵・原子力関する討議会の設定を検討

事務連絡：事務局より今後の予定について説明

以 上

クローズドワークショップ

開催日時:2024 年 5 月 23 日(木) 13:00～15:00
開催場所:オンライン開催(ファシリテーター:JST 東京本部別館(K's 五番町)4 階会議室 A)
出席者:別紙参照

議事:
開会挨拶
第 1 部 シナリオに関する話題提供と WS の目的・手順
第 2 部 本プロジェクトで想定するシナリオ、バウンダリについての議論
全体討議
事務連絡

概要:

開催挨拶:荻本 PL より挨拶

第 1 部:杉山委員よりシナリオに関する話題提供と WS の目的・手順について説明

第 2 部:分科会形式での議論(詳細は、「240523_EAJ 電力 PJ 分科会結果.pptx」参照)
第 1 分科会 ファシリテーター 杉山昌広、スライド編集 芳澤信哉
第 2 分科会 ファシリテーター 渡邊裕美子、スライド編集 原亮一
第 3 分科会 ファシリテーター 白木裕斗、スライド編集 河辺賢一

全体討議:各分科会からの報告(詳細上記 PPT ファイル)。その後の議論項目は以下のとおり。
- ・技術開発の確実性とシナリオの関係(信頼性)
- ・時間変動によるシナリオの変化
- ・2050 年、CN 実現の前提
- ・電力システム開発の合意形成
- ・国内企業の育成

事務連絡:事務局より今後の予定について説明

以 上

第 2 回会合

開催日時:2024 年 6 月 17 日(月) 10:00～12:00
開催場所:オンライン開催(発表者・事務局は JST 東京本部別館(K's 五番町)4 階会議室 H)
出席者:別紙参照

議事:
開会挨拶
クローズドワークショップの報告(杉山委員)
発表1(大関委員)
発表2(紺谷委員)
全体討議
事務連絡

概要:

開催挨拶:荻本 PL より挨拶

杉山委員よりクローズドワークショップの報告
- 今回のスライドは暫定版。今後必要に応じて修正してゆく
- 時間軸についてはスムーズな移行と破壊的・iterative な移行の両論あり
- 参加者の共通認識としては、アウトプットを書くときの視点・視座で簡素化はある

発表 1:大関委員より PV 分野について発表
- カーボンフリーな低廉エネルギー供給:コスト、排出量、導入余地
- フレキシビリティ:出力の上げ/下げ、オンライン化、需給調整市場、実証試験、義務と市場
- フレキシビリティ:グリッドフォーミング、蓄電池併設、出力予測
- レジリエンスと地域共生

発表 2:紺谷委員より風力分野について発表
- 風力発電の導入状況
- 発電コストの低減:長翼化・輸送、リモート点検、解析による予見性確保
- 需給調整力の供給:再エネ制御の活用、需給調整市場の再エネ向け商品、グリッドコード、データ解析
- 地域との共生

全体討議:主な討議の項目は以下のとおり
- 大量導入とコストの問題
- 導入可能量とグリッドコードの設定
- 需給調整の実施方法
- 技術開発にかかる国産化率

事務連絡:事務局より今後の予定について説明

以 上

第 3 回会合

開催日時:2024 年 9 月 9 日(月) 10:00～12:00
開催場所:オンライン開催(発表者・事務局は JST 東京本部別館(K's 五番町)4 階会議室 H)
出席者:別紙参照

議事:
開会挨拶
発表1(馬場委員)
発表2(中島委員)
全体討議
事務連絡

概要:

開催挨拶:荻本 PL より挨拶

発表 1:馬場委員よりインバータ分野について発表
- 対象とする系統連系インバータ
- 連系用インバータ導入量
- 重要技術:素子・回路
- 重要技術:周波数と位相の検知
- システム技術:Grid-forming と制御
- 短絡容量の低下と GFM
- 広域機関における検討
- シミュレーション技術とデータ
- コミュニティと規格

発表 2:中島委員より HVDC 分野について発表
- 適用分野:流送電の三つの目的
- OCCTO マスタープラン
- 技術要素
- 設備構成
- 求められる姿・期待される役割
- 段階的な移行のためのキー技術
- 段階的な移行のためのキーシステム技術
- 議論・研鑽のための分野別コミュニティ
- 人材育成
- 競争力へ直結するキーワード
- リスク

全体討議:主な討議の項目は以下のとおり
- GFM の計画的導入
- 人材育成
- 産業競争力
- 短時間過負荷容量
- 直流送電のコスト
- 新しい配電網保護方式
- 人材と技術力の維持
- 人材と技術力確保の取り組み

事務連絡:事務局より今後の予定について説明

以 上

第 4 回会合

開催日時:2024 年 11 月 8 日(金) 17:00～19:00
開催場所:オンライン開催(発表者・事務局は JST 東京本部別館(K's 五番町)4 階会議室 H)
出席者:別紙参照

議事:
開会挨拶
発表1(山本委員)
発表2(飯岡委員)
全体討議
事務連絡

概要:

開催挨拶:荻本 PL より挨拶

発表 1:山本委員より送電分野について発表
- 送変電設備の概要
- 送電系統の歴史
- 起こりつつある変化
- 需要動向の変化と供給力見通しの現状
- 再エネの増加
- 非制御性電源の増加と調整力
- 非同期電源の増加と system strength
- 送電線の増強
- 失われた 30 年
- 投資への理解
- まとめ

発表 2:飯岡委員より配電分野について発表
- 柱上変圧器の負荷推定
- 太陽光発電の大量導入により起こっていること
- 将来の配電系統:系統側の対策
- 従来の配電系統:太陽光側の対策
- できるかどうかわかりませんが・・・

全体討議:主な討議の項目は以下のとおり
- アデカシーとセキュリティ
- 設備形成と運用制御の一体化と基幹/需要地系統
- 火力の起動時間と統合的な運用
- 配電網の将来
- 分散資源の遠隔制御
- 将来の課題と足元の課題
- 司令塔と定量分析
- 司令塔と市場の役割

事務連絡:事務局より今後の予定について説明

以 上

第 5 回会合

開催日時:2025 年 1 月 20 日(月) 10:00～12:00
開催場所:オンライン開催(発表者・事務局は JST 東京本部別館(K's 五番町)4 階会議室 K)
出席者:別紙参照

議事:
開会挨拶
発表1(荻本 PL)
全体討議(江村委員、山口容平委員)
提言とりまとめの方向性と中間シンポジウム企画
事務連絡

概要:

開会挨拶:荻本 PL より挨拶

発表 1:荻本 PL よりエネルギー貯蔵分野について発表
- 概要とまとめ
- 米国 DOE
- IEA の Energy Technology Roadmap
- ENTSO-e の System Flexibility Needs for the Energy Transition
- NREL エネルギー貯蔵

江村委員より発表
- はじめに
- 福島国際研究教育機構(F-REI)の概要
- 水素活用の視点から見たエネルギーネットワーク
- 地産地消水素エネルギーシステム
- エネルギーネットワークの全体設計
- 本日の論点-総合的な観点から、人材確保の横串

山口容平委員より発表
- 排出量削減に向けた取り組み
- 電化の傾向
- TREES Model
- エネルギー需要は半減が可能
- 分野横断の視点:プロセス、方向性、デジタル応用、リード

全体討議:主な討議の項目は以下のとおり
- 全体システムを見られる人材、アクション
- コスト目標と達成手段
- 柔軟性統合計画の必要性と EAJ 提言
- センサー・計量器からの制約
- 水素の優先的な利用分野
- 計量の必要性
- 価格情報の欠落による分業の困難化、効率の過度な重要視は不要
- 長期の価格弾力性
- 長期エネルギー貯蔵の必要性

提言とりまとめの方向性と中間シンポジウム企画
- 4 月 15 日中間シンポ実施の決定
- シンポジウム参加のお願い
- 提言のとりまとめの方向性

・　方針の決定時期
・　提言の目的と位置づけ
・　オーディエンスと発表時期-2026 年 3-4 月
・　論点・悩み
・　構成・執筆

事務連絡：事務局より今後の予定について説明

以　上

第 6 回会合

開催日時:2025 年 5 月 8 日(木) 10:00～12:00
開催場所:オンライン開催(発表者・事務局は JST 東京本部別館(K's 五番町)4 階会議室 K)
出席者:別紙参照

議事:
開会挨拶
発表1(荻本 PL)
全体討議(江村委員、山口容平委員)
提言とりまとめの方向性と中間シンポジウム企画
事務連絡

概要:

開会挨拶:荻本 PL より挨拶

中間シンポ報告(速報):城石幹事より報告

プロジェクトの進め方:荻本 PL より説明

河辺委員より発表(運用)
- イントロ
- 中長期(1 年超)の運用
- 年間～月間の運用
- 週間の運用
- 日間(前日～当日)の運用
- 実需給断面(ゲートクローズ後)の運用
- 送電線の運用容量を決める系統制約
- フリンジを考慮した運用容量の設定
- 系統安定化制御
- 分散エネルギー資源の活用

渡邊委員より発表(小売り)
- 自己紹介
- 電力小売事業の背景
- 電力小売事業とデマンドレスポンス
- 電力小売事業の将来

全体討議:主な討議の項目は以下のとおり
- 週間運用
- 需要側のリソースの増加と容量拠出金抑制
- 安定運用と情報提供
- 安定運用への小売りの役割と BG 制度
- 火力を含めた週間計画
- 揚水運用
- 米国の同時市場との比較
- 揚水運用と系統蓄電池

事務連絡:事務局より今後の予定について説明

以 上

第 7 回会合

開催日時:2025 年 7 月 23 日(水) 13:30～15:30
開催場所:オンライン開催(発表者・事務局は JST 東京本部別館(K's 五番町)4 階会議室 G)
出席者:別紙参照

議事:
開会挨拶
プロジェクトの進め方(荻本 PL)
全体討議(芳澤委員、石井委員)
事務連絡

概要:

開会挨拶:荻本 PL より挨拶

プロジェクトの進め方:荻本 PL より説明

芳澤委員より発表(需要機器)
- 2050 年 CN 社会の実現に向けて
- 需要機器の変遷
- DR ready、フレキシビリティ活用
- 次世代の分散型電力システムの姿
- DR 普及期における課題と期待
- 詳細な走行データが得られる場合
- マップマッチング
- EV 電力消費推定
- 流動人口データを用いた EV 充電需要の推定
- 流動人口データの例
- 自動車の総走行距離の算出
- 大阪府の EV 充電需要の推計
- HP 給湯機の昼間稼働
- キー技術・キーシステム技術・課題等

石井委員より発表(IT)
- 電力システムにおける情報通信・IT 活用
- 東日本大震災とエネルギー政策の転換、スマートグリッドの標準化
- エネルギーマネジメントと Econet Lite, OPEN ADR
- 早稲田大学 EMS 新宿実証センター
- 2015 年夏頃の問題意識と経産省・関係個所への投げかけ
- ERAB 検討会と通信規格ベースアーキテクチャ
- Open ADR 国際標準化の"轍"
- 国内の国際標準化取り組み体制の構築
- 再エネ出力制御対策
- 次世代スマートメーターと低圧分散リソース活用
- DR ready と予算措置
- 実験環境整備と教育
- サイバーセキュリティ
- まとめ

全体討議:主な討議項目は以下のとおり
- 分散時代の系統制御・保護
- 国際標準化の動向と日本の取り組み

・　米国 IEEE での規格の取り組み
・　送電など高速通信領域の標準化
・　プライスシグナルの活用

以　上

第 8 回会合

開催日時:2025 年 9 月 29 日(月) 10:00～12:00
開催場所:オンライン開催(発表者・事務局は JST 東京本部別館(K's 五番町)4 階会議室 G)
出席者:別紙参照

議事:
開会挨拶
プロジェクトの進め方(荻本 PL)
全体討議(辻委員、小宮山委員)
事務連絡

概要:

開会挨拶:荻本 PL より挨拶

プロジェクトの進め方:荻本 PL より説明

辻委員より発表(解析Ⅰ　電力)
- 本日の内容
- 電力系統解析の概要
- 電力系統解析の事例
- 先進的解析手法の事例
- 人材育成

小宮山委員より発表(解析Ⅱ　エネルギー)
- エネルギーモデルの種類
- NEMS モデル(米国エネルギー省)
- 計量経済モデル(日本エネルギー経済研究所)
- 応用一般均衡モデル(CGE モデル)
- MARKAL/TIMES モデル(IEA)、部分均衡型、エネルギーシステム総コスト最小化モデル
- 最適化型エネルギー需給モデル(日本)
- 核燃料サイクル
- 電力需給の数値シミュレーション

全体討議:主な討議項目は以下のとおり
- 実効値解析と EMT 解析の連携
- 地点別価格の活用
- リアルタイムに近い解析
- 予防制御の解析と計算負荷低減
- セクターカップリングの解析
- AI 応用
- 人材育成
- AI による補完

事務連絡:事務局より次回会合の予定について連絡

以　上

第9回会合

開催日時:2025 年 11 月 27 日(木) 10:00～12:00
開催場所:オンライン開催(発表者・事務局は JST 東京本部別館(K's 五番町)4 階会議室 G)
出席者:別紙参照

議事:
開会挨拶
プロジェクトの進め方(荻本 PL)
全体討議(山口(順)委員、杉山(昌)委員)
事務連絡

概要:

開会挨拶:荻本 PL より挨拶

プロジェクトの進め方:荻本 PL より説明

山口(順)委員より発表(市場)
- 本日の内容
- 政府のこれまでの電力市場のレビューと将来像
- 電力市場の問題の根源は何か
- 電力市場の問題への対応アイテム
- 限界費用ゼロ時代の市場の在り方
- 電気学会調査専門委員会
- まとめ

杉山(昌)委員より発表(政策)
- はじめに
- 本日の主要なメッセージ
- エビデンスを踏まえた政策 EIP (evidence-informed policy)の必要性
- シナリオ研究と EIP
- 再エネ関連政策の政策分析能力
- 提言へのアイデア

全体討議:主な討議項目は以下のとおり
- 市場価格信号、ネットワーク情報、過去のレビュー、規制機関
- 需要曲線、市場価格のボラティリティ、市場のコスト便益分析
- データ活用
- 次回のテーマ

事務連絡:事務局より次回会合の予定について連絡

以 上

第 10 回会合

開催日時:2026 年 2 月 2 日(月) 13:00～15:00
開催場所:オンライン開催(発表者・事務局は JST 東京本部別館(K's 五番町)4 階会議室 G)
出席者:別紙参照

議事:
開会挨拶
プロジェクトの進め方(荻本 PL)
全体討議(横断的議論)
事務連絡

概要:

開会挨拶:荻本 PL より挨拶

プロジェクトの進め方:荻本 PL より説明

横断的議論
横断的議論の進め方

a. Strategy / Driver
- 需要構造、大規模需要、地政学、ガバナンス、社会学
- 需要の能動化、経年化リプレースが変革のきっかけに
- デュアルユース
- 農業・上下水道
- 分散型の需要とそこへの供給、情報技術、センシング、ロボティクス
- 指標としてのレジリエンス、サイバーアタック
- AI、フィジカル AI、ロボティクスによる運用の変化
- 人口減・土地利用:再エネ設置、系統規模、需要地近接
- 孤立、都市、農業・漁業
- 構造要因、ライフスタイル、ワークスタイル、交通体系
- インバータ、電圧安定性、配電方式、観測・PMU、短絡容量、解析
- 政策、海外からの学び、市場化の是非、政策と規制

b. Integrity(電力を超えて、指標)
- 指標、価格、ノード価格と託送料金制度
- 構造変化、エネルギー全体、電力×〇〇、IT との連携
- デュアルユース、輸出規制、情報管理
- 供給責任、スマートメーターによる品質別契約
- ラストリゾート、目標としての経済安全保障
- 電力×〇〇、総合的エネルギーマネジメント
- いつ、どのくらい、いくらで、データの利用可能性
- 同時市場、燃料確保
- 大規模需要の自家発、系統・電源の整備

c. リーダーシップ・司令塔・議論の場・意思決定方法
- トップダウンの議論・意思決定、データ活用
- 分野を超えた議論の場
- 継続的なあるべき姿の検討
- 統合的な計画、Integrated Resource Planning、アデカシー

d. データ
- データの意義と価値
- データ・情報を共有し使える仕組み

・　事業者の立ち位置、制度の複雑化、予見性、示されるべきデータ

事務連絡：事務局より次回会合の予定について連絡

以　上

参考 3 発言録要旨

第 1 回会合要旨

全体要約

第 1 回会合では、再生可能エネルギー大量導入を前提とした将来の電力システムにおいて、供給側・需要側双方の柔軟性をどのように確保するかについて議論が行われた。講演では、原亮一氏が同期機電源・火力発電の役割変化を中心に説明し、岩船由美子氏が需要側資源やデマンドレスポンス（DR）の活用可能性について論じた。また討議では、火力発電の価値評価、需要柔軟性の活用、データセンター需要への対応などについて幅広い意見交換が行われた。

原氏はまず、第 6 次エネルギー基本計画や需給見通しを踏まえ、脱炭素化が進展する中でも火力発電や原子力、水力などの同期機電源が引き続き重要な役割を果たすことを説明した。再エネ比率の上昇によって火力発電の発電電力量は減少するものの、ピーク需要時の供給力確保や長期的なエネルギー供給の観点から一定の設備容量維持が必要であり、発電量だけでは電源価値を評価できないとの問題意識を示した。

さらに、同期機電源は供給力だけでなく、需給変動に対応する調整力、回転慣性による周波数安定化機能、無効電力供給や電圧維持機能といった「ストレングス」を提供していると説明した。これらは従来当然の機能として扱われてきたが、再エネやインバータ連系電源（IBR）が増加する将来においては、その価値を定量的に評価し、電源構成や市場制度へ反映する必要があるとの考えを示した。

また、再エネ導入拡大によって火力発電の稼働率が低下する一方、必要容量は大きく減少しないという構造的課題についても説明した。稼働率低下は固定費回収の困難化や起動停止回数増加による設備負担増につながるため、部分負荷運転時の効率向上、最低出力引下げ、高速応答化などを実現する技術開発が重要になると指摘した。加えて、燃料の非化石化を進める際にも、単なる燃料転換ではなく、設備効率改善や運転柔軟性向上を一体的に進める長期的視点が必要であると述べた。

一方、岩船氏は、再エネ大量導入時代には供給側だけでなく需要側も積極的に需給調整へ参加する必要があると説明した。需要マネジメントの対象として、データセンターや半導体工場などの新規需要の立地誘導、時間的・空間的なデマンドレスポンス、電化の推進、系統用蓄電池の活用などを挙げた。

特に需要側資源のポテンシャルとして、EV1,000 万台で約 3,000 万 kW、ヒートポンプ給湯機 1,000 万台で約 1,000 万 kW、電気温水器・エコキュートの昼間シフトで約 2,000 万 kW 規模の調整力が期待できるとの試算を紹介した。こうした低圧リソースは将来の重要な調整力源となり得るが、その活用には通信基盤や制御技術だけでなく、アグリゲータ、料金制度、市場制度などの社会システム整備が不可欠であると指摘した。

また、系統用蓄電池については短周期の需給変動への対応に有効である一方、長期間のエネルギーシフトや季節間調整には限界があり、水素など他のエネルギー貯蔵手段との役割分担が必要になると説明した。さらに、データセンターについては将来の大規模需要としてだけでなく、需要柔軟性資源として活用できる可能性があることを紹介し、立地誘導や DR 実証の重要性を指摘した。

討議では、火力発電の価値を発電量だけで評価するのではなく、供給力、調整力、慣性、電圧維持機能を含めて評価すべきとの意見が共有された。また、DR や需要側資源の活用によってピーク需要削減や再エネ出力抑制緩和が期待できる一方、その効果を定量的に評価する必要性も指摘された。さらに、原子力の柔軟運転の可能性、ストレングス価値の市場評価、蓄電池・火力・DR の役割分担などについても議論が行われた。

需要側に関する討議では、配電網情報基盤の整備、アグリゲータ育成、料金制度改革、データセンター需要への対応、需要立地誘導などが主要論点となった。特に、再エネ適地と需要地が一致しない中で、送電網増強だけでなく需要立地そのものをエネルギー政策の対象として考える必要性が示された。また、需要柔軟性を活用するためには、需要家、アグリゲータ、小売事業者、送配電事業者がそれぞれ価値を得られる制度設計が重要であるとの認識が共有された。

会合全体を通じて、再エネ大量導入時代においては、供給側か需要側かという二項対立ではなく、同期機、火力発電、蓄電池、DR、低圧リソースなど多様な資源を組み合わせた統合的なシステム設計が必要であることが確認された。また、供給力・調整力・ストレングス・需要柔軟性といった機能価値を定量的に評価し、それを制度や市場へ反映していくことが、将来の電力システム構築に向けた重要な課題として認

識された。

留意ポイント（第 1 回会合）

1. 供給力と発電電力量を区別して議論する必要性

再エネ導入拡大によって火力発電の発電電力量は減少する一方で、ピーク需要時に必要となる設備容量は大きく減少しない可能性が示された。今後の電源評価では、発電電力量だけでなく供給力としての価値を区別して評価する必要がある。

2. 同期機が提供するストレングス価値の定量化

同期機は

- 慣性供給による周波数安定化
- 無効電力供給
- 電圧維持

などの機能を有している。

これらは従来当然のものとして利用されてきたが、再エネ・IBR 大量導入環境では重要性が高まるため、その価値を定量的に評価し、制度や市場へ反映することが重要である。

3. 火力発電の役割変化への対応

再エネ導入拡大に伴い火力発電は

- ベース電源
- 調整力電源
- ストレングス供給設備

へと役割が変化する可能性がある。

部分負荷運転、高頻度起動停止、最低出力引下げ、高速応答化など、新たな運用形態を前提とした技術開発が必要である。

4. 需要側資源の潜在力

講演では、

- EV1,000 万台 → 約 3,000 万 kW
- ヒートポンプ給湯機 1,000 万台 → 約 1,000 万 kW
- エコキュート・電気温水器昼間シフト → 約 2,000 万 kW

という調整力ポテンシャルが示された。

需要側資源は将来の需給調整の重要な構成要素となる可能性がある。

5. 需要柔軟性活用には制度設計が不可欠

需要柔軟性は技術だけでは実現しない。

- 料金制度
- DR 市場
- アグリゲータ制度
- 需要家インセンティブ

などを組み合わせた仕組みづくりが必要である。

6. データセンター需要への対応

AI 利用拡大等に伴いデータセンター需要の増加が見込まれる。

一方で、データセンターは

- 新規大口需要
- 需要柔軟性資源

という二面性を持つ可能性があり、立地誘導や DR 活用を含めた検討が必要である。

7. 配電網情報基盤整備の重要性

低圧リソース活用を進めるためには、

- 配電網状態把握
- 計測基盤整備
- 情報共有

が重要となる。
配電網情報の高度化は、DR や EV 制御の実効性向上にも直結する。

8. 広域運用と地産地消の両立

将来の電力システムでは、
- 広域運用による需給調整
- 地産地消によるレジリエンス向上

の双方が求められる。
両者を対立概念として捉えるのではなく、適切な役割分担を検討する必要がある。

9. 需要立地誘導という新たな視点

これまでの電力システムは需要発生後に供給設備や系統を整備する発想が中心であった。
しかし今後は、
- データセンター
- 半導体工場
- 水素製造設備

などの新規需要について、再エネ資源や系統余力を考慮した立地誘導も重要な政策手段となる可能性がある。

10. 長期視点による全体最適の必要性

電源設備は 30～40 年規模の寿命を持つ。
燃料転換だけでなく、
- 効率改善
- 運転範囲拡大
- 調整力強化
- ストレングス確保

などを一体的に検討し、長期的な全体最適を目指すことが重要である。

第 2 回会合要旨

全体要約

第 2 回会合では、太陽光発電および風力発電を対象として、再生可能エネルギー大量導入時代に求められる役割と課題について議論が行われた。また、会合冒頭ではクローズドワークショップの結果が共有され、2050 年を見据えた将来の電力システム像や、本プロジェクトの検討の枠組みについても議論がなされた。

クローズドワークショップの報告では、2050 年の電力システムを単一の将来像として固定するのではなく、複数のシナリオを想定しながら検討を進めるべきとの考え方が示された。議論では、「集中型－分散型」と「需要規模」などを軸として将来像を整理し、さらに工学的安全性だけでなく社会的受容や信頼性も評価軸として考慮する必要があるとの認識が共有された。また、電力システムのみならず、人材育成、データ基盤、科学技術政策との関係も重要な検討対象であり、将来シナリオは最終成果物ではなく、今後の議論や提言を行うための共通の思考基盤として位置付けられた。

太陽光発電に関する講演では、将来の役割として「カーボンフリーな低廉エネルギー供給」と「フレキシビリティの提供」の二つが提示された。まずカーボンフリーな電源としての価値について、設備価格の低下により発電コストは大きく低減しているものの、評価に当たっては設備費だけでなく、系統接続費用、出力変動対応費用、蓄電池併設費用などを含めたシステム全体コストで考える必要があることが指摘された。また、ライフサイクル全体での CO_2 排出量評価や、日本における導入余地についても議論が行われ、屋根設置や未利用地活用など一定の導入余地は残されているものの、社会受容性や系統制約への対応が重要になるとの認識が示された。

続いて、太陽光発電のフレキシビリティ機能について説明が行われた。従来の太陽光発電は発電量最大化を目的とした設備であったが、将来的には出力制御や需給調整市場への参加を通じて、調整力や系統安定化機能を提供することが期待されている。そのためには、設備のオンライン化、遠隔制御機能、出力予測技術の高度化が重要であり、さらにグリッドフォーミング技術や蓄電池併設によって、周波数維持や電圧維持への貢献も可能になるとの考え方が示された。一方で、これらを実現するためには技術開発だけでなく、グリッドコードや市場制度の整備も必要であると説明された。

風力発電に関する講演では、「発電コスト低減」「需給調整力供給」「地域との共生」の三つの観点から整理が行われた。発電コスト低減については、風車大型化による設備利用率向上、遠隔監視やデータ活用による保守効率化、需給解析による予測精度向上などが紹介された。また、風力発電も将来的には需給調整力を提供する主体となる可能性があり、再エネ制御、需給調整市場への参加、グリッドコード対応などを通じて系統運用へ貢献できるとの説明がなされた。

さらに、風力発電の大量導入には地域との共生が不可欠であり、景観、騒音、環境影響への配慮だけでなく、地域に利益が還元される仕組みづくりが重要であると指摘された。技術的ポテンシャルだけでは導入量は決まらず、地域社会による受容性が大きな制約条件になるとの認識が示された。

討議では、再エネ大量導入時代の課題が発電技術そのものよりも、制度設計や社会システム側へ移行していることが繰り返し指摘された。大関氏は、太陽光発電の大量導入においては設備価格よりも、出力制御後の収益確保やビジネスモデルが重要になると説明し、建物設置だけで約 400GW の導入余地がある一方で、将来的には地上設置や蓄電池利用を含めた事業モデルが必要になるとの考えを示した。

また、導入可能量とグリッドコードに関する議論では、餘利野氏が、再エネ大量導入を制約する要因は設備量ではなくグリッドコードや市場制度にあると指摘した。これに対し大関氏や紺谷氏は、既存設備と新規設備が混在する現実や、オンライン化義務の有無など制度運用上の課題を説明した。さらに荻本氏は、最低限の安全要件のみを規定して競争を促進する考え方と、機能を詳細に規定する考え方の双方があり、国際的にも制度設計には違いが存在すると補足した。

需給調整の実施方法については、アグリゲーション、価格シグナルによる自律制御、系統指令による集中制御など複数の方式が議論された。特に、誰が調整力を提供し、誰が費用を負担するのか、また義務として求める機能と市場で評価する機能をどのように整合させるのかが重要な論点として共有された。

技術開発・国産化率については、設備そのものだけでなく、制度設計、データ解析、需給予測、人材育成、送電インフラ整備なども重要な競争力要素であるとの認識が示された。また、全面的な国産化は容易ではないものの、供給源の多様化やエネルギー安全保障の観点からサプライチェーン戦略を考える必要があることも指摘された。

会合全体を通じて、太陽光発電・風力発電は単なる再生可能エネルギー電源ではなく、将来的には調

整力や系統安定化機能を提供する主体として位置付けられるべきであるとの認識が共有された。また、大量導入の成否を決める要因は発電技術そのものよりも、グリッドコード、市場制度、需給調整の仕組み、人材育成、地域との共生などを含めた社会システム設計へ移行していることが確認された。さらに、本プロジェクトにおいては 2050 年の将来像を固定せず、多様なシナリオを視野に入れながら、技術・制度・人材を統合した電力システムのあり方を検討していく必要性が共有された。

第 3 回会合要旨

全体要約

第 3 回会合では、再生可能エネルギー大量導入が進む将来の電力システムを支える基盤技術として、インバータ技術および直流送電（HVDC）技術について議論が行われた。再エネ電源の主力化によって電力システムの構造そのものが変化しつつある中で、従来の同期発電機が担ってきた機能をどのように維持・代替するか、また広域的な電力融通や再エネ導入拡大をどのような送電システムで支えるかが主要なテーマとなった。

講演 1 では、インバータ連系電源の拡大に伴う系統運用上の課題と技術的対応について説明が行われた。講演者は、太陽光発電や蓄電池、EV 充電器などに用いられる電圧型自励式変換器を対象とし、近年の太陽光発電導入量の増加によりインバータが電力システムの主要構成要素となりつつある現状を示した。日本では太陽光発電導入量が約 70GW に達しており、需要に占める太陽光発電比率が極めて高くなる時間帯も出現している。その結果、同期発電機の運転量が減少し、従来は同期機が自然に提供していた慣性、同期化力、短絡容量などの機能をどのように確保するかが重要な課題となっていることが示された。

技術面では、パワー半導体デバイスや変換回路技術の進展に加え、系統周波数や位相を検知する PLL 技術、事故時にも運転を継続する FRT（Fault Ride Through）機能などが重要技術として紹介された。特に再エネ大量導入時代に向けた中核技術として Grid Forming（GFM）が取り上げられた。従来の Grid Following（GFL）が既存系統へ追従する方式であるのに対し、GFM は自ら電圧や周波数を形成し、同期発電機に近い役割を担うことが期待されている。講演では、SCR（Short Circuit Ratio）の低下による系統安定度への影響や、GFM による安定化効果、RoCoF（周波数変化率）問題への対応などが説明され、将来のインバータ主体電力システムにおける重要技術であることが示された。

また、インバータ主体の電力システムでは、瞬時値解析や電磁過渡解析など高度なシミュレーション技術が必要になることも説明された。制御系モデルや回路パラメータを含むデータ整備の重要性が指摘されるとともに、電気学会、IEEE、IEC などを通じた規格整備や国際連携の必要性も示された。さらに、パワーエレクトロニクスと電力系統の双方を理解できる人材が不足しており、人材育成が重要課題であるとの認識が共有された。

講演 2 では、直流送電（HVDC）の技術動向と将来展望について説明が行われた。講演者は、直流送電の主要な適用分野として、長距離大容量送電、異周波数連系、ループ潮流制御の三つを挙げ、日本国内における既存連系設備や今後の整備計画を紹介した。特に OCCTO の地域間連系線整備マスタープランでは、北海道－東北－東京を結ぶ大規模な直流送電網整備が構想されており、再エネ導入拡大やレジリエンス強化の観点から重要な役割を担うと説明された。

技術要素としては、他励式と自励式の変換方式、単極・双極構成、多端子システムなどが整理された。自励式変換器では MMC（Modular Multilevel Converter）が主流となりつつあり、低 SCR 環境への適応やブラックスタート機能などが期待されている。また、多端子直流送電網実現の鍵となる直流遮断器については、依然として技術開発段階にあることが示された。

さらに講演では、直流送電に求められる役割として、再エネ大量導入支援、広域電力取引の高度化、系統制御機能の高度化が挙げられた。将来的には GFM 機能や周波数制御機能を変換器へ実装する可能性も示され、直流送電設備が単なる送電設備ではなく系統制御機能を持つシステムへ発展する可能性が示された。

討議では、GFM の導入戦略、人材育成、産業競争力、短時間過負荷容量などが議論された。特に GFM については、将来的な必要性は認識されているものの、GFL との共存期間が長期化することや技術成熟度の問題から、段階的な導入シナリオが重要であるとの認識が共有された。また、HVDC やパワーエレクトロニクス分野では専門人材不足が深刻であり、大学、企業、学会が連携した継続的な教育体制の必要性が指摘された。

討議後半では、直流送電のコスト評価、新しい保護方式、人材と技術力の維持について議論が行われた。直流送電については、設備投資額だけでなく、出力抑制削減や広域融通、レジリエンス向上などの社会的便益を含めて評価する必要があるとの認識が示された。また、インバータ主体の系統では従来の短絡電流依存型保護方式が成立しにくくなる可能性があり、通信利用保護やデジタル保護など新たな保護技術の必要性も議論された。

会合全体を通じて、再エネ大量導入時代の電力システムは、単に発電設備を導入するだけでは成立せず、インバータ技術、GFM、HVDC、保護技術、シミュレーション技術、人材育成、制度設計を統合的に発

展させる必要があるとの認識が共有された。特に、インバータ主体の電力システムへの移行と、広域直流送電網の整備は、日本の 2050 年電力システムを支える重要な技術的基盤として位置付けられた。

留意ポイント

1. インバータ主体電力システムへの移行を前提とした検討が必要

本会合では、太陽光発電や蓄電池等のインバータ連系電源が急速に増加し、従来の同期機中心の電力システムから大きく変化しつつあることが示された。

太陽光発電導入量は既に約 70GW 規模に達しており、需要の過半を太陽光が占める時間帯も発生している。このような状況では、

- 慣性
- 同期化力
- 短絡容量

など従来同期機が自然に提供していた機能が減少するため、インバータ側でこれらをどのように代替するかが重要な課題となる。

今後の電力システム検討では、発電設備の導入量だけでなく、系統安定化機能の確保を含めて議論する必要がある。

2. Grid Forming（GFM）は重要技術だが導入戦略が鍵

GFM は、

- 電圧形成
- 周波数形成
- 同期化力提供

を担う有力な技術として紹介された。

一方で、

- 技術方式が複数存在すること
- 実系統での運用実績がまだ限定的であること
- GFL との共存期間が長期に及ぶこと

などから、単純な技術導入ではなく段階的な移行戦略が必要であることが示された。

今後は、

- グリッドコード
- 系統運用
- 市場制度

も含めた総合的な導入計画が重要になる。

3. SCR 低下と系統安定度の確保が重要課題

再エネ大量導入に伴い、系統の短絡容量低下が課題となる。

講演では SCR（Short Circuit Ratio）が紹介され、

- SCR が高い＝強い系統
- SCR が低い＝弱い系統

という整理が示された。

特に弱い系統では、

- PLL 不安定化
- 出力振動
- 系統事故時の挙動悪化

などが発生する可能性がある。

今後は、

- GFM 活用
- 制御技術高度化
- 系統設計見直し

を組み合わせて安定度を確保する必要がある。

4. FRT・RoCoF・保護方式など新たな系統課題への対応が必要

インバータ大量導入に伴い、

・ FRT（Fault Ride Through）
・ RoCoF（Rate of Change of Frequency）
・ SSO（Sub-synchronous Oscillation）
・ 単独運転検出
・ 保護協調

などの新たな課題が顕在化していることが示された。

従来は同期機中心の考え方で成立していた保護・運用ルールも、今後は見直しが必要になる可能性がある。

特に保護方式については、

・ 通信利用保護
・ デジタル保護
・ 適応型保護

など新しい考え方の検討が求められる。

5. シミュレーション技術とデータ基盤が重要

インバータ主体の電力システムでは、

・ 制御系
・ 瞬時値現象
・ 電磁過渡現象

を扱う必要がある。

そのため、

・ PSCAD 等による解析
・ モデル縮約技術
・ リアルタイムシミュレーション

の重要性が増している。

また、

・ 制御モデル
・ 回路パラメータ

などのデータ整備も重要であり、将来的な解析基盤構築が必要である。

6. 直流送電は再エネ大量導入を支える基盤技術

直流送電は、

・ 長距離大容量送電
・ 異周波数連系
・ 潮流制御

を実現する重要技術として整理された。

特に、

・ 北海道－本州連系
・ 日本海ルート
・ 洋上風力連系

などで中心的役割を担うことが期待されている。

今後の再エネ大量導入や地域間融通拡大を考える上で、直流送電網整備は重要な検討課題である。

7. 直流送電の評価は社会便益を含めて行う必要がある

直流送電は数兆円規模の投資を伴う可能性がある。

しかし評価に当たっては、

・ 出力抑制削減
・ 広域融通拡大
・ レジリエンス向上
・ エネルギー安全保障

などの便益も考慮する必要がある。

単純な設備費比較ではなく、2050 年を見据えた長期的な社会的価値として評価する視点が重要である。

8. 多端子 HVDC と直流遮断器が今後の重要技術

技術的には、

- MMC
- 自励式変換器
- 525kV 級 CV ケーブル

などは実用段階にあるとの説明があった。

一方で、

- 多端子 HVDC
- 直流遮断器

については引き続き技術開発が必要とされている。

将来的な大規模直流ネットワーク形成に向けて重要な技術課題である。

9. 人材不足が共通課題として認識された

インバータ分野、HVDC 分野の双方で、

- パワーエレクトロニクス
- 電力系統

を横断的に理解できる人材不足が指摘された。

また、

- 大学
- メーカー
- 電力会社

のいずれにおいても専門家層が十分厚くないとの認識が共有された。

技術開発だけでなく、人材基盤の維持・強化が重要課題として認識された。

10. 人材育成と技術継承を長期戦略として位置付ける必要がある

講演では、

- NEDO 特別講座
- PSCAD 教育
- 海外交流
- 産学連携教育

などの取り組みが紹介された。

討議でも、技術開発の継続には

- 若手育成
- 実機経験
- 国際活動

が重要であるとの認識が共有された。

再エネ大量導入・HVDC 導入の成否は人材育成と技術継承の成否にも大きく左右されることが示された。

第 3 回留意ポイント総括

第 3 回では、インバータ技術と直流送電技術を中心に、再エネ大量導入時代の電力システム基盤について議論が行われた。特に、

- GFM による系統安定化
- SCR 低下への対応
- HVDC による広域連系強化
- シミュレーション・データ基盤整備
- 人材育成と技術継承

が重要課題として整理された。

全体を通じて、今後の電力システムは発電設備の導入だけではなく、制御技術・送電技術・制度設計・人材育成を含めた総合的なシステムとして検討する必要があることが示された。

第 4 回会合要旨

全体要約

第 4 回会合では、再生可能エネルギー大量導入時代における送電網・配電網の将来像と、それを支える運用・制御・制度設計について議論が行われた。講演 1 では送電システムの視点から、講演 2 では配電システムの視点から課題と方向性が示され、討議ではアデカシー、System Strength、分散資源制御、司令塔機能などが議論された。

講演 1 では、送電系統が発電所から需要家へ電力を届ける基盤インフラとして発展してきた経緯が説明された。日本の送電網は高度経済成長期の需要増加に対応して整備され、その後は信頼度向上や地域間連系強化を通じて現在の広域ネットワークへ発展してきた。一方で、近年は電力システムを取り巻く環境が大きく変化している。従来の大規模集中型・同期機主体のシステムから、分散型・非同期電源主体のシステムへの移行が進み、さらに全国市場を通じた広域運用や需要家側リソースの活用も進展していることが示された。

需要面では、AI 利用拡大やデータセンター建設による需要増加が見込まれる一方で、火力発電設備は減少傾向にあり、供給力確保が重要な課題となることが説明された。また、日本は太陽光発電導入量が世界的にも高い水準に達しており、春季昼間には出力制御が必要となる状況も発生している。こうした中で、再エネ大量導入に伴う自然変動性、非同期化、分散化が系統へ与える影響として、調整力不足、慣性低下、RoCoF 上昇、短絡容量低下、保護方式への影響などが整理された。

さらに、アイルランドやオーストラリアの事例を通じて、System Strength という概念が紹介された。非同期電源が大量導入された系統において、安定した電圧維持や運用を可能とする能力として位置付けられており、海外では運用ルールや評価指標の整備が進んでいることが説明された。一方、日本では個別課題への対応は進んでいるものの、将来像を見据えた統合的な議論はまだ十分ではないとの認識が示された。

また、送電線整備については、再エネ適地と需要地の地理的乖離に対応するため、広域連系線や HVDC 整備が重要になることが説明された。同時に、送電設備形成には長いリードタイムが必要であり、設備投資だけでなく運用改善や需要側対策も含めた総合的な対応が必要であると指摘された。さらに、日本では過去 30 年間にわたり設備投資や人材基盤が縮小してきたことから、送電設備を支える技術者や施工体制の維持も重要課題として提起された。

講演 2 では、再エネ大量導入時代の配電系統について説明が行われた。講演者は、自身が取り組んできた柱上変圧器負荷推定研究を紹介しながら、従来の経験則に基づく運用から、スマートメーターやセンサーによる大量データを活用した運用へ移行していることを示した。現在では LSTM などを用いた需要予測も実用化されつつあり、配電系統運用の前提そのものが変化していると説明された。

太陽光発電大量導入によって、従来想定されていなかった現象も発生していることが紹介された。例えば、一般に知られる電圧上昇だけでなく、条件によっては太陽光出力増加時に電圧が低下する現象や、配電線の相配列の違いによる電圧不平衡などが実測されている。また、フリッカ対策によって別の周波数帯域の問題が発生する事例も紹介され、多数のインバータが接続されることによる新たな課題が示された。

将来の配電系統対策としては、ホスティングキャパシティ拡大に関する研究成果が紹介された。配電線太線化、部分昇圧、無効電力制御装置などを組み合わせることで接続可能量を大幅に拡大できることが示された。一方で、損失増加や設備コストなどの副作用も存在するため、接続可能量だけでなくコストや損失を含めた総合評価が必要であると説明された。

また、PCS のボルトバール制御による接続可能量拡大の可能性も紹介された。全国推計では、対策なしの場合 76GW 程度であった配電系統への PV 導入可能量が、PCS 制御の活用によって 296GW 程度まで拡大する可能性が示された。ただし、これを実現するためには膨大な数の PCS 導入が必要であり、送電系統側の対策も含めたシステム全体の設計変更が必要になることが指摘された。

討議では、まずアデカシー（供給力確保）とセキュリティ（系統安定性）の両立が議論された。再エネ大量導入時代には、単に設備容量を確保するだけでなく、慣性や電圧安定性を含む安定供給機能そのものを評価対象とする必要があるとの認識が共有された。

また、設備形成と運用制御の一体化についても議論が行われた。従来は設備形成後に運用を考えることが一般的であったが、今後は送電設備、配電設備、蓄電池、デマンドレスポンスなどを一体として設計する必要があるとの意見が示された。火力発電についても、単独で柔軟性を確保するのではなく、蓄電池や需要側資源と組み合わせた統合運用が重要になるとの認識が共有された。

討議後半では、将来の配電網、分散資源の遠隔制御、司令塔機能と市場の役割について議論が行わ

れた。分散型エネルギー資源が大量導入された将来には、太陽光発電、蓄電池、EV などを、通信ネットワークを通じて協調制御する必要があり、そのためには通信基盤、標準化、サイバーセキュリティが重要になることが指摘された。

さらに、再エネ導入、送配電網整備、需要対策、市場設計などを総合的に評価するためには、シミュレーションやデータ分析に基づく定量評価が不可欠であり、その全体像を描く司令塔機能が必要ではないかとの議論が行われた。また、市場メカニズムは効率的な資源配分に有効である一方、送電網整備や人材育成のような長期課題については計画的な誘導も必要であり、市場と計画を適切に組み合わせる必要性が共有された。

会合全体を通じて、再エネ大量導入時代の課題は単なる設備増強ではなく、送電・配電・需要・市場・制御・人材を含む総合的なシステム設計の課題であることが示された。特に、System Strength、ホスティングキャパシティ、分散資源制御、司令塔機能といった新たな視点が提示され、2050 年に向けた電力システムの全体最適をどのように実現するかが重要な論点として整理された。

第 4 回 留意ポイント

1. 送電網は「電力輸送設備」から「システム統合基盤」へ役割が変化している

本会合では、従来の送電網が単に発電所から需要地へ電力を送る設備であったのに対し、今後は再エネ大量導入を支えるシステム統合基盤としての役割が強まることが示された。

特に、

- 地域間連系
- 再エネ導入拡大
- データセンター需要増加
- 広域市場運用

などに対応するため、送電網そのものの価値が大きく変化していることが指摘された。

2. 再エネ大量導入に伴い送電・配電双方で課題が顕在化している

再生可能エネルギーの導入拡大は送電系統だけの問題ではなく、配電系統にも大きな影響を与えていることが示された。

送電側では、

- 混雑
- 調整力不足
- System Strength 低下

が課題となる。

一方で配電側では、

- 電圧上昇
- 電圧不平衡
- フリッカ
- 逆潮流

などが現実の問題として発生している。

今後は送電・配電を分離して考えるのではなく、一体的な視点で検討する必要がある。

3. 非同期電源増加による System Strength 確保が重要課題

講演では、

- 慣性低下
- RoCoF 上昇
- 短絡容量低下

など、非同期電源増加に伴う課題が整理された。

特に海外では、

- System Strength

を重要指標として位置付け、

- グリッドコード
- 運用ルール
- 設備整備

を一体的に進めていることが紹介された。
日本でも将来的には System Strength を含めた系統評価の枠組みが必要になる可能性が示唆された。

4. 調整力は電源単体ではなくシステム全体で考える必要がある

再エネ大量導入時代には、
- 火力発電
- 蓄電池
- 揚水発電
- デマンドレスポンス

などを組み合わせた調整力確保が必要になる。
特に日本では、
- 汽力発電主体
- 起動時間が長い
- 最低出力制約が大きい

という特徴があり、欧米型の柔軟運用をそのまま適用できないことが示された。
今後は統合的な需給運用が重要になる。

5. 配電系統はデータ活用型システムへ移行している

講演では、
- スマートメーター
- センサー
- LSTM 予測

などが紹介された。
従来は経験則による設備設計が中心であったが、現在は大量の実測データを活用した運用・解析へ移行しつつある。
将来の配電系統では、
- 需要予測
- 発電予測
- 状態推定

などデータ活用が基盤技術になる可能性が示された。

6. ホスティングキャパシティ拡大は重要テーマである

太陽光発電大量導入時代には、既存設備を有効活用しながら接続可能量を拡大することが重要になる。
講演では、
- 配電線太線化
- 部分昇圧
- 無効電力制御
- PCS ボルトバール制御

などが紹介された。
また、対策効果を評価する際には、
- 接続可能量
- 設備コスト
- 損失増減

を総合的に評価する必要があることが示された。

7. 分散資源の遠隔制御が将来の重要技術となる

太陽光発電、蓄電池、EV などの分散型エネルギー資源が大量導入された場合、
個別最適ではなく、
系統全体としての最適制御が必要になる可能性が議論された。
そのためには、
- 通信基盤
- 標準化
- サイバーセキュリティ

も含めたシステム設計が必要になる。

8. 設備形成と運用制御の一体最適化が必要

従来は、設備形成⇒運用という順序で考えることが一般的であった。
しかし今後は、
- 送電設備
- 配電設備
- DER
- 蓄電池
- 市場

を一体として設計する必要があるとの認識が共有された。
設備投資と運用改善を別々に評価するのではなく、統合的に最適化する視点が重要になる。

9. 司令塔機能と定量分析の重要性

会合では繰り返し、「全体最適を誰が描くのか」という問題意識が示された。
今後の電力システムは、
- 再エネ
- 系統
- 市場
- 需要
- 蓄電池

など多くの要素が相互作用する。
そのため、
- シミュレーション
- データ分析
- 定量評価

に基づいて政策や投資を判断する仕組みが重要になる。

10. 市場と計画の適切な組み合わせが必要

討議では、市場メカニズムだけで将来の電力システムが構築できるのかという問題が提起された。
市場は効率的な資源配分に有効である一方、
- 送電網整備
- 人材育成
- 長期投資

などは市場だけでは十分に進まない可能性がある。
そのため、
- 市場による最適化
- 計画的な誘導

を適切に組み合わせる必要があるとの認識が共有された。

第 4 回留意ポイント総括

第 4 回では、
- 送電網の役割変化
- 配電網の高度化
- System Strength
- 調整力確保
- ホスティングキャパシティ
- 分散資源制御
- 定量分析と司令塔機能

が重要論点として整理された。
全体を通じて、再エネ大量導入時代の電力システムは、設備増強だけでは成立せず、
- データ
- 制御

・　通信
・　市場
・　人材
・　ガバナンス

を含めた総合システムとして設計する必要があることが示された。

また、送電・配電・需要側資源を統合的に捉え、長期的視点で全体最適を追求することの重要性が強調された。

第 5 回会合要旨

全体要約

第 5 回会合では、「エネルギー貯蔵」「エネルギーネットワーク再考」「分野横断議論」をテーマとして講演と討議が行われた。また、中間シンポジウム開催と最終提言の方向性についても議論が行われ、本プロジェクトが技術的検討段階から提言形成段階へ移行する節目の会合となった。

講演 1 では、荻本氏がエネルギー貯蔵に関する海外動向を紹介した。米国 DOE、IEA、ENTSO-e、NREL の報告書を取り上げ、再生可能エネルギー大量導入時代には柔軟性（Flexibility）の確保が重要課題になると説明した。エネルギー貯蔵は単なる蓄電池導入の問題ではなく、需給調整、系統運用、エネルギー安全保障を支える基盤技術として位置付けられていることが示された。また、欧州では柔軟性需要の定量評価が進められており、短時間の調整だけでなく、日単位、週単位、季節単位を含む長期エネルギー貯蔵の重要性が高まっていることが紹介された。さらに、NREL の研究を通じて、4 時間を超える長時間エネルギー貯蔵の必要性や、その制度的評価の課題についても説明が行われた。

講演 2 では、江村氏が福島国際研究教育機構（F-REI）の取り組みを紹介し、水素エネルギーネットワークの観点から問題提起を行った。福島では復興とカーボンニュートラルを両立させるため、水素を活用した地産地消型エネルギーネットワークの実現を目指していることが説明された。再生可能エネルギーによる発電、水素製造、貯蔵、利用を一体的に構成し、エネルギーシステム全体を設計する必要性が強調された。また、エネルギーシステムの評価では効率やコストだけでなく、エネルギー安全保障、レジリエンス、地域活性化なども考慮すべきであると指摘した。さらに、水素利用の実現には技術開発だけでなく、制度整備や社会受容、人材育成も重要であるとの認識が示された。

講演 3 では、山口氏が分野横断的視点からエネルギーシステムを論じた。カーボンニュートラル実現には、電源脱炭素化だけでなく、電化、需要構造変化、効率向上を組み合わせる必要があると説明した。EV やヒートポンプの普及により電化は進展するが、それは単なる需要増加ではなく、需要側柔軟性の拡大にもつながるとの認識が示された。また、TREES Model を用いたシステム全体評価の考え方が紹介され、エネルギー需要は技術進歩によって大幅に削減できる可能性があると説明した。さらに、将来のエネルギー転換では電力だけでなく、熱、燃料、ICT を含めた分野横断的な統合設計が重要であると述べた。

討議では、まず全体システムを俯瞰できる人材の重要性が議論された。発電、送配電、需要、水素、ICT など各分野の専門家は存在するが、それらを統合して全体最適を考えられる人材は不足しているとの認識が共有された。また、技術だけでなく制度や社会実装も含めて考えられる人材の育成が必要であると指摘された。

柔軟性の確保についても議論が行われた。再エネ大量導入時代には、火力発電、揚水発電、蓄電池、水素、デマンドレスポンスなどを組み合わせて柔軟性を確保する必要があり、その必要量を定量的に評価することが重要であるとの意見が示された。加えて、センサーやスマートメーターなど計測基盤の整備が、柔軟性運用やデータ活用の前提条件になるとの認識も共有された。

討議後半では、水素利用の適用分野について議論が行われた。水素は製造から利用までの過程でエネルギー損失を伴うため、電化が困難な分野や長期エネルギー貯蔵用途を中心に活用すべきとの意見が示された。また、価格情報や市場メカニズムの重要性について議論が行われる一方、効率だけを過度に重視すべきではなく、レジリエンスやエネルギー安全保障も評価すべきとの認識が共有された。さらに、長期無風期間や季節変動に対応するためには、蓄電池だけでなく水素や揚水発電などを活用した長期エネルギー貯蔵が必要であるとの意見が示された。

会合後半では、中間シンポジウムを 4 月 15 日に開催する方針が確認された。シンポジウムは、これまでの研究成果を社会へ発信し、外部有識者から意見を得る場として位置付けられた。また、最終提言については、個別技術ではなく電力システム全体を俯瞰した内容とし、柔軟性、人材育成、エネルギー貯蔵、分野横断的連携などの横断課題を重視する方向性が共有された。対象読者としては政策担当者、産業界、学術界のみならず一般社会も意識し、2026 年 3～4 月頃の取りまとめを目指して議論を進める方針が確認された。

第 5 回会合を通じて、再エネ大量導入時代の電力システムでは、柔軟性確保、長期エネルギー貯蔵、水素活用、システム統合、人材育成が重要な課題であることが改めて認識された。また、本プロジェクトの議論は個別技術の検討から、将来の電力・エネルギーシステム全体像と政策提言の形成へと発展しつつあることが明確に示された。

第 5 回 留意ポイント

会合全体を通じて浮かび上がった論点

第 5 回会合では、エネルギー貯蔵、水素エネルギーネットワーク、分野横断的エネルギーシステムの三つの講演を通じて、従来の電力システム中心の議論から、より広いエネルギーシステム全体へ視野を拡張する必要性が繰り返し指摘された。

特に、再生可能エネルギー大量導入を前提とした将来システムでは、発電設備だけでなく、エネルギー貯蔵・水素・需要側柔軟性・ネットワーク・データ活用を含めた統合的な検討が必要であるとの認識が共有された。

柔軟性（Flexibility）の重要性

講演 1 および討議を通じて、将来の電力システムにおける最大の課題の一つとして柔軟性（Flexibility）の確保が浮かび上がった。

柔軟性の供給源としては、火力発電・揚水発電・蓄電池・水素・デマンドレスポンス・系統連系などが存在するが、それらを個別に議論するのではなく、システム全体として必要量と役割分担を整理する必要があるとの認識が共有された。

また、欧州で進められている柔軟性需要の定量評価や統合計画は、日本においても参考になるとの意見が示された。

長期エネルギー貯蔵の必要性

エネルギー貯蔵に関する議論では、短時間の需給調整だけではなく、数日から季節単位に及ぶ長期エネルギー貯蔵の必要性が重要な論点として挙げられた。

特に、長期無風期間・長雨・季節変動などへの対応を考えると、蓄電池だけではなく、水素・合成燃料・揚水発電なども含めた検討が必要であるとの認識が共有された。

将来の電力システムでは短期柔軟性と長期柔軟性を区別して考える必要があるとの意見も示された。

水素の位置づけ

講演 2 および討議では、水素の役割について活発な議論が行われた。

水素は電化が難しい分野への適用や長期エネルギー貯蔵手段として期待される一方で、製造コスト・輸送コスト・変換効率などの課題も存在することが確認された。

そのため、水素をあらゆる用途に適用するのではなく、適材適所で活用する考え方が重要であるとの認識が共有された。

また、水素ネットワークは単なる技術課題ではなく、社会受容や制度設計を含めたシステム課題として捉える必要があるとの意見も示された。

全体システムを俯瞰できる人材

講演 2、講演 3 および討議を通じて、分野横断的人材の重要性が繰り返し指摘された。

現在は、発電・系統・配電・水素・ICT・需要など各分野の専門家は存在するものの、それらを統合して全体最適を考えられる人材は限られているとの認識が共有された。

また、今後のエネルギー転換では、技術・制度・社会受容・事業化を横断的に理解する能力が必要であり、人材育成は技術開発と同等に重要な課題であるとの意見が示された。

提言作成に向けた方向性

第 5 回会合は、技術的議論だけでなく、最終提言の方向性について初めて本格的な議論が行われた回でもあった。

その中で、

- 電源構成論に終始しないこと
- 電力システム全体を俯瞰すること
- 分野横断的視点を重視すること
- 柔軟性や人材育成を扱うこと

が重要であるとの認識が共有された。

また、政策担当者だけでなく、産業界、学術界、一般社会にも伝わる形で発信する必要性が指摘された。

中間シンポジウム要旨

開会挨拶

EAJ 専務理事 城石芳博会員の司会により開会した。冒頭、JST 名誉理事長・EAJ 顧問 中村道治氏より開会挨拶が行われた。中村氏は、電力システムを取り巻く環境が大きく変化する中、安全・安定供給・ゼロエミッションは我が国にとって最重要課題であり、未来社会に向けた持続的発展の道筋を構築することは、現世代に課された「世代間責任」であると指摘した。さらに、EAJ がこれまで政策提言活動を通じて社会課題解決に取り組んできた経緯に触れつつ、本プロジェクトについても、文理を超えた総合知により議論を深め、「未来社会を工学する」視点から新たな電力システム像を検討する重要性が強調された。

プロジェクトリーダーである東京大学生産技術研究所特任教授 荻本和彦氏より、「新たな電力システムに向けて」と題する開会挨拶が行われた。荻本氏は、本プロジェクトが、新たな電力システムへの段階的移行を実現するための「姿勢」「視点」「方法論」に関する提言取りまとめを目的としていることを説明した。また、電力システムには需要、電源、送配電、市場、解析、人材など極めて多様な分野が関係していることを改めて認識していると述べた上で、第 1 回から第 5 回会合における前半フェーズの議論を踏まえ、今後は市場、システム全体、解析手法などの横断分野を含めた検討を進め、提言取りまとめへつなげていく方針が示された。さらに、将来システムへの移行には長期的視点が不可欠であり、それを支える新たな人材の参画と育成が重要な課題であるとの認識が共有された。

講演

講演では、需要、従来型電源、再生可能エネルギー、パワーエレクトロニクス、送配電の各分野について、将来の電力システム移行を支えるキー技術およびキーシステム技術が紹介された。

需要分野（東京大学　岩船由美子氏）

再生可能エネルギー大量導入時代においては、需要の柔軟性を活用するデマンドレスポンス（DR）が重要な役割を担うことが示された。特に、EV、ヒートポンプ給湯器、定置型蓄電池等の低圧リソースを活用することで、需給バランス維持、系統混雑回避、調整力確保などへの貢献が期待されることが説明された。また、需要家側の価値だけでなく、小売事業者、アグリゲータ、系統運用者など各主体における経済価値についても整理が行われた。さらに、料金型 DR とインセンティブ型 DR の特徴や、機器点計量、クラウド API 連携、DR 制御プラットフォーム、データベース整備など、今後必要となるシステム技術・制度面の課題についても議論された。

従来型電源分野（北海道大学　原亮一氏）

エネルギー基本計画において、火力発電については「kW を維持しつつ kWh を減らす」という方向性が示されていることが紹介され、安定供給や調整力、システムストレングス供出など、同期機電源が引き続き重要な役割を担うことが説明された。また、再エネ大量導入に伴う火力電源の稼働率低下や部分負荷運転増加により、経済性や設備運用の在り方が大きく変化すること、さらに、将来の電源ポートフォリオ検討においては、長期的視点と短期的な柔軟性を併せて考慮する必要があることが強調された。

再エネ電源分野（株式会社日立パワーソリューションズ　紺谷怜央氏）

風力発電を中心に、再エネ発電コスト低減、大型化・長翼化による効率向上、VRE（変動性再生可能エネルギー）大量導入を前提とした電力システム構築などについて議論が行われた。また、技術開発やサプライチェーンにおける国産化率向上の必要性についても言及され、エネルギー安全保障や産業競争力との関係性が示された。

パワーエレクトロニクス分野（東京大学　馬場旬平氏）

インバータベース電源（IBR）の大量導入に伴う系統安定性課題について説明が行われ、Grid Following（GFL）制御、Grid Forming（GFM）制御、SCR 低下時のシステム挙動、RoCoF 評価、FRT 要件、保護方式などについて詳細な議論が行われた。また、実効値解析と瞬時値解析の連携やシミュレーション技術高度化の必要性も示され、将来システムの工学的成立条件を支える解析・制御技術の重要性が共有された。

送配電分野（中部大学　飯岡大輔氏）

再エネ導入拡大、分散型電源増加、双方向潮流などに伴う送配電分野の変化と課題について整理が行われ、段階的移行を支えるための送配電技術、運用技術、システム技術の方向性が示された。

これらの講演を通じて、電力システム移行期においては、個別技術だけでなく、需要、電源、系統、制御、

市場、制度、人材などを横断的に捉える必要があることが共有された。また、再生可能エネルギー大量導入や分散型システム化が進展する中、工学的成立条件を踏まえたシステム設計の重要性が改めて認識された。

パネルディスカッション 1：電力システム移行期におけるキー技術、キーシステム技術

議論では、再生可能エネルギー大量導入時代における工学的成立条件について、多面的な議論が展開された。特に、インバータベース電源増加に伴う系統安定性課題、保護方式、グリッドコード、新たな評価指標の必要性などが共有され、従来の同期機中心システムからの移行においては、系統全体を俯瞰した工学的検討が必要であるとの認識が示された。また、データ公開や系統モデル共有の必要性、人材・知識共有基盤の重要性も指摘されたほか、「技術ニュートラル」の考え方や、コストベネフィットを踏まえた全体最適の必要性についても議論が行われた。さらに、オーストラリアにおける戸建 PV 大量導入事例など海外事例も紹介され、分散型システム時代における実運用上の課題と対応策について活発な意見交換が行われた。

議論を通じて、将来の電力システムでは、単なる個別技術導入ではなく、系統安定性、調整力、保護方式、市場制度、解析技術などを相互に関連付けながら、全体システムとして設計する必要性が共有された。

パネルディスカッション 2：電力システムの移行を担う人材の獲得と育成

議論では、電力システムの高度化・複雑化が進む一方、電力工学分野における人材不足や若手人材減少が深刻な課題となっている現状が共有された。特に、高専・大学・産業界が連携した教育の必要性や、「電力×〇〇」のような分野横断型人材育成の重要性が強調された。また、単なる専門分化ではなく、「システム全体を見られる人材」の必要性が繰り返し指摘され、電力工学のみならず、AI、データ、制度設計、市場設計、社会システム等を横断的に理解できる人材育成の重要性が共有された。さらに、若手世代に対して「ワクワク感」を持ってもらうこと、電力分野の社会的重要性や魅力を積極的に発信することの必要性についても議論が行われた。

閉会挨拶

東京大学生産技術研究所教授　鹿園直毅氏より閉会挨拶が行われた。シンポジウム全体を通じて、再生可能エネルギー大量導入、分散型システム化、デジタル化、安全保障、人材不足など、複数の構造変化が同時進行する中、将来の電力システムについては、個別技術のみならず、制度、市場、運用、人材を含めた統合的視点から議論を進める必要性が改めて共有された。

アンケートと総括

結果においても、「率直な本音の議論が有益であった」「幅広い知見が得られた」といった評価が寄せられた一方、制度設計や市場設計を含むより統合的な政策提言への期待も多く示された。

本シンポジウムを通じて、電力システム移行期においては、需要、電源、送配電、制御、市場、人材などを個別最適ではなく全体最適の視点から捉える必要があることが改めて認識された。また、将来システムを支える工学的成立条件を踏まえつつ、長期的かつ段階的に移行を進めるための視点と方法論の重要性が共有された。今後、本プロジェクトでは、今回の中間シンポジウムにおける議論を踏まえ、さらに検討を深化させながら、「社会、産業、人々の生活の変容を支える電力システムの在り方」に関する統合的政策提言として取りまとめていく予定である。

プログラム

12:50　開場
13:20 – 13:30 開会挨拶 「新たな電力システムに向けて」
　プロジェクトリーダー、東京大学生産研 特任教授　荻本和彦
13:30～13:50　需要分野のキー技術とキーシステム技術
　東京大学　東京大学生産技術研究所　教授　岩船由美子
13:50～14:10　従来型電源分野のキー技術とキーシステム技術
　北海道大学 情報科学研究院 准教授　原　亮一
14:10～14:30　再エネ電源分野のキー技術とキーシステム技術
　株式会社日立パワーソリューションズ 技師　紺谷怜央
14:30～14:50　パワーエレクトロニクス分野のキー技術とキーシステム技術
　東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授　馬場旬平
14:50～15:10　　送配電分野のキー技術とキーシステム技術

中部大学 工学部 電気電子システム工学科 教授　飯岡大輔

15:10～15:20　(休 憩)

15:20～16:20 パネルディスカッション 1「電力システム移行期のキー技術、キーシステム技術」

パネリスト 東京大学 東京大学生産技術研究所 教授　岩船由美子
北海道大学 情報科学研究院 教授　原 亮一
産業技術総合研究所 太陽光システムチーム 研究チーム長　大関 崇
東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授　馬場旬平
関西電力送配電株式会社 企画部長　山本敏之
茨城大学名誉教授、福島工業高等専門学校 名誉教授(元校長)　奈良宏一
モデレータ 公益財団法人東電記念財団 常務理事　蘆立修一
東京大学 東京大学生産技術研究所 特任教授　荻本和彦

16:20～17:20 パネルディスカッション 2「電力システムの移行を担う人材の獲得と育成」

パネリスト 早稲田大学 スマート社会技術融合研究機構 上級研究員(研究院教授)　石井英雄
東京大学 未来ビジョン研究センター 教授　杉山昌広
徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 教授　北條昌秀
関西電力送配電株式会社 企画部長　山本敏之
東京大学 名誉教授　横山明彦
呉工業高等専門学校 校長、広島大学 特任教授　餘利野直人
モデレータ 福島国際研究教育機構(F-REI) 理事　江村克己
東京大学 東京大学生産技術研究所 特任教授　荻本和彦

17:30 閉会挨拶　東京大学 生産技術研究所 教授　鹿園 直毅

17:40～19:30 意見交換会 An 棟 1 階レストラン「ape アーペ」

第 6 回会合要旨

全体要約

第 6 回会合では、「運用」と「小売」をテーマとして講演と討議が行われた。これまでの会合で議論されてきた需要、発電、再生可能エネルギー、パワーエレクトロニクス、送電、配電といった個別分野を、実際にどのように運用し、市場制度の中で機能させるかという観点から議論が深められた。

講演 1 では、河辺氏が電力システム運用について説明した。まず需給運用を時間軸ごとに整理し、中長期運用、年間・月間運用、週間運用、日間運用、実需給断面の運用へと段階的に説明した。中長期運用では供給力や系統設備のアデカシー確保が重要であり、容量市場や広域系統計画がその基盤を形成していることが示された。週間運用では火力発電や揚水発電、蓄電池などの運用計画が重要であり、再エネ導入拡大に伴って運用の複雑性が増していることが説明された。日間運用では市場取引や需給調整市場を通じた需給バランス確保が行われ、実需給断面では GF、LFC、EDC などの制御機能によって周波数維持が実現されていることが示された。また、再エネ大量導入に伴い、FFR やグリッドフォーミングコンバータなど新たな周波数安定化技術の重要性も高まると説明された。

講演後半では系統運用が取り上げられた。送電線運用容量は熱容量制約、電圧制約、同期安定性制約などによって規定されており、それらを総合的に管理する必要があることが示された。また、ダイナミックレーティングや潮流制御機器、系統用蓄電池などを活用した送電線利用率向上の可能性が紹介された。さらに、需給制御に伴う潮流変動（フリンジ）を考慮した運用容量設定の重要性や、低頻度事象に対応する系統安定化制御の役割も説明された。将来は DER を含む分散エネルギー資源を系統制約も考慮しながら活用することが重要であり、DERMS など海外で進む取り組みも紹介された。

講演 2 では、渡邊氏が小売事業者の立場から電力システムを説明した。小売事業者は需要家への電力販売だけでなく、市場からの調達や需給管理も担っており、自由化後の電力システムを支える重要な主体であることが示された。また、再エネ導入拡大や市場価格変動の増大により、需給管理の難易度が高まっていることが説明された。

さらに、デマンドレスポンス（DR）の重要性について議論された。小売事業者は需要家に最も近い立場にあるため、価格連動型料金、時間帯別料金、EV 充電制御、蓄電池制御などを通じて需要家行動を変化させることが可能であると説明された。再エネ出力が多い時間帯へ需要を誘導することで出力抑制を低減し、系統全体の効率向上にも貢献できる可能性が示された。将来的には、小売事業者は単なる電力販売主体ではなく、EV、蓄電池、太陽光発電などの需要家リソースを統合して運用する役割を担う可能性が高いとの見解が示された。

討議では、週間運用の重要性が改めて確認された。再エネ導入量の増加に伴い、週間レベルでの需給見通しや火力・揚水・蓄電池の運用計画が重要になるとの認識が共有された。また、EV や家庭用蓄電池など需要側リソースの増加により、需要家が柔軟性供給源として機能する可能性が高まっていることが議論された。需要側リソースの活用はピーク需要抑制や調整力供給を通じて容量拠出金抑制にも寄与する可能性があるとの意見が示された。

さらに、安定運用を実現するためには情報共有が重要であるとの議論が行われた。需給状況、予備率、市場価格、再エネ予測などの情報を適切に共有することが合理的な市場行動につながる一方、情報公開の方法は市場行動にも影響するため慎重な制度設計が必要であると指摘された。

討議後半では、小売事業者と BG 制度の役割について議論が行われた。自由化後の電力システムでは BG 制度が需給バランス確保の基盤となっているが、再エネや需要側リソースの普及に伴い、その役割や運用方法も変化する可能性があるとの認識が共有された。また、火力発電は今後も調整力供給源として重要であり、週間計画の中で適切に位置付ける必要があることが確認された。

揚水発電については、大容量・長時間のエネルギー貯蔵設備として重要な役割を担っており、再エネ大量導入時代にはその価値が高まるとの意見が示された。一方、系統用蓄電池は高速応答性や制御性に優れており、揚水発電と競合するのではなく補完関係にあるとの認識が共有された。また、米国の同時市場制度が紹介され、SCUC や SCED による系統制約を考慮した最適化運用の考え方が日本にとっても参考になるとの議論が行われた。

第 6 回会合を通じて、運用は電力システム全体を成立させる中核機能であり、設備形成だけでは安定供給は実現できないことが改めて認識された。また、市場設計と運用技術は不可分であり、再エネ大量導入時代には両者を統合的に考える必要があることが確認された。さらに、需要側リソースが柔軟性供給源として重要性を増し、データ活用や情報共有が高度な運用の基盤になることも共通認識として整理された。

第 4 回が送電・配電統合、第 5 回が電力システムからエネルギーシステム全体への転換であったのに対し、第 6 回は設備中心の議論から運用・市場・小売・需要家を含めた統合運用の議論への転換点として位置付けられる回となった。

留意ポイント

中間シンポジウム報告

会合冒頭では、中間シンポジウムの開催結果について報告が行われた。

報告では、これまでの研究会で蓄積してきた議論を外部へ発信し、多様な関係者との意見交換を行う機会となったことが共有された。また、電力システムの将来像に関する議論に対して一定の関心が寄せられたことが報告された。

さらに、中間シンポジウムで得られた意見や指摘事項については、今後の研究会議論および最終提言の検討に反映していく方針が示された。

運用が電力システム全体を支えていることの再認識

第 6 回では、これまで議論されてきた需要・従来電源・再エネ・パワーエレクトロニクス・送電・配電といった個別分野を、実際にどのように統合して動かしているかという「運用」の実態が示された。

講演を通じて、需給運用は中長期・年間/月間・週間・日間・実需給断面という多層的な計画と制御の積み重ねによって成り立っていることが整理された。

また、電力システムは単に設備を整備すれば成立するのではなく、運用によって初めて安定供給が実現されることが改めて認識された。

市場と運用の結合が重要論点として浮上

講演および討議では、市場制度と運用技術の関係が重要論点として浮かび上がった。

従来は、電力市場と系統運用が比較的独立して議論されることも多かったが、再エネ大量導入が進む中では両者を一体的に考える必要があるとの認識が共有された。

特に、同時市場・SCUC・SCED・BG 制度・などの議論を通じて、市場設計が実際の運用可能性に大きく影響することが示された。

また、将来の制度設計では市場効率だけでなく、安定供給や柔軟性確保も同時に考慮する必要があるとの意見が示された。

需要側リソースの位置付けの変化

第 6 回では、需要側リソースの役割についても重要な議論が行われた。

これまで需要は予測対象として扱われることが多かったが、EV・家庭用蓄電池・ヒートポンプ・DR などの普及により、需要側そのものが柔軟性供給源になる可能性が示された。

また、小売事業者やアグリゲータが需要家リソースを統合し、市場や需給調整へ参加させる役割を担うとの認識が共有された。

その結果、需要家は単なる消費者ではなく、将来の電力システム運用の一部を担う主体へ変化しつつあることが確認された。

短周期柔軟性と長周期柔軟性の整理

第 5 回では長期エネルギー貯蔵の必要性が議論されたが、第 6 回ではその考え方が運用論へ接続された。講演と討議では、FFR・GF・LFC・EDC・など秒から数十分単位の柔軟性確保技術が紹介された。

一方で、揚水発電・系統用蓄電池・火力運用・週間計画は時間単位から日単位の柔軟性確保手段とされた。これにより、柔軟性という概念を時間スケールごとに整理する必要性が見えてきた。

データと情報共有の重要性

講演・討議を通じて、将来の電力システム運用ではデータ活用が不可欠であるとの認識が共有された。

再エネ予測・需要予測、・市場情報・系統状態情報・DER 情報などを統合しなければ高度な運用は実現できないことが示された。

また、情報公開や情報共有の方法は市場行動にも影響するため、制度設計上も重要なテーマであることが確認された。

第 7 回会合要旨

全体要約

第 7 回会合では、「需要機器」と「IT・情報通信基盤」をテーマとして講演および討議が行われた。第 6 回で示された「需要が運用資源になる」という考え方を受け、その実現に必要となる需要機器、分散エネルギー資源（DER）、情報通信基盤、標準化、サイバーセキュリティなどについて議論が深められた。

講演 1 では、芳澤氏が 2050 年カーボンニュートラル社会を見据えた需要機器の役割について説明した。従来の需要機器は単なる電力消費設備であったが、今後は DR（Demand Response）や DSR（Demand Side Resource）として系統運用を支える役割を担うことが期待されると述べた。東日本大震災以降、スマートメーターや HEMS の普及、ECHONET Lite を活用した機器制御、ZEH 推進などが進展し、需要機器を系統運用へ活用するための基盤整備が進んできたことが説明された。また、DR ready の考え方やフレキシビリティ活用の重要性が紹介され、EV、蓄電池、ヒートポンプ給湯機などを活用した将来の分散型電力システム像が示された。

続いて、EV 充電需要推計に関する研究事例が紹介された。GPS データとマップマッチング技術を用いて走行経路を推定し、運動方程式モデルから EV の電力消費量を高精度で推定する手法が説明された。また、詳細走行データが十分に得られない場合には、流動人口データを用いて地域全体の EV 充電需要を推計する手法が紹介された。大阪府を対象とした分析では、帰宅後充電を前提とした需要分布や時間帯別需要を推定できることが示され、将来の充電インフラ整備や系統影響評価への活用可能性が示された。

さらに、ヒートポンプ給湯機を活用した DR についても説明が行われた。従来夜間運転されていた HP 給湯機を昼間へ移行することで、太陽光発電の余剰電力吸収や配電系統の電圧上昇抑制、出力抑制低減などの効果が期待できることが示された。講演では、DR ready、HEMS、EV 制御、DER 統合制御などが需要機器分野のキー技術として整理される一方、標準化、セキュリティ、データ活用、制度設計などが今後の重要課題として位置付けられた。

講演 2 では、石井氏が電力システムにおける情報通信技術と標準化の歴史および将来像について説明した。東日本大震災以降、スマートグリッドやエネルギーマネジメントへの関心が高まり、ECHONET Lite や OpenADR などの通信規格整備が進められてきたことが紹介された。ECHONET Lite は家庭内機器間通信を担い、OpenADR は DR 信号伝達を担う仕組みとして活用されており、両者を組み合わせることで上位システムから需要家機器までを接続するアーキテクチャが構築されていることが説明された。

また、早稲田大学 EMS 新宿実証センターでの実証活動や、ERAB 検討会を通じた標準化活動についても紹介された。DER や DR を実際に活用するためには、機器間相互接続性を確保する通信規格ベースのアーキテクチャが不可欠であり、標準化は単なる技術仕様策定ではなく社会実装や市場形成そのものに関わる重要な活動であるとの認識が示された。

講演後半では、再エネ出力制御対策、次世代スマートメーター、DR ready、実証環境整備、サイバーセキュリティが取り上げられた。再エネ大量導入に伴う出力制御への対応として、DR や EV 充電制御、蓄電池活用が重要になることが説明された。また、次世代スマートメーターは単なる検針装置ではなく、低圧分散リソースを活用するための情報基盤として位置付けられた。さらに、DR ready 普及には技術仕様整備だけでなく予算措置や制度整備も重要であることが示された。サイバーセキュリティについては、多数の機器がネットワーク接続される将来の分散型電力システムでは極めて重要な課題となることが指摘された。

討議では、分散型電力システムにおける系統制御・保護方式について議論が行われた。DER 大量導入により潮流方向の変化や保護協調への影響が生じる可能性があり、従来型の保護方式だけでは対応が難しくなるとの認識が共有された。また、DER を運用資源として活用するためには、通信・制御・保護を統合的に考える必要があるとの意見が示された。

国際標準化についても活発な議論が行われた。IEEE や NIST、OpenADR Alliance などによる米国の標準化活動が紹介され、標準化は市場形成や製品普及に直結する活動であるとの認識が共有された。また、日本においても国際標準化活動への継続的な参画と人材育成が重要であるとの意見が示された。

さらに、送電分野における高速通信や IEC61850、PMU 活用などの話題も取り上げられた。将来的には送電・配電・需要家側を含む広範な領域で通信技術が重要性を増し、リアルタイム性を持った情報連携が求められる可能性が指摘された。

プライスシグナルの活用についても議論が行われた。時間帯別料金やダイナミックプライシングなどを通じて需要家行動を変化させる可能性が紹介され、将来的には HEMS や需要機器が価格情報を受信して

自律的に最適制御を行う可能性が示された。一方で、利用者受容性や価格変動リスクへの配慮も必要であるとの意見が示された。

第 7 回会合を通じて、需要機器は単なる消費設備ではなく、将来の柔軟性供給源として活用される重要な資源であることが確認された。また、その実現には DR ready、HEMS、スマートメーター、OpenADR、ECHONET Lite などの情報通信基盤が不可欠であり、標準化やサイバーセキュリティも含めた総合的な取り組みが必要であることが示された。

第 4 回が送電・配電統合、第 5 回がエネルギーシステム統合、第 6 回が運用・市場統合であったのに対し、第 7 回は「DER・需要機器・ICT・標準化統合」の回として位置付けられる。

また、第 6 回で示された「需要が運用資源になる」という概念を実現するための具体的な技術基盤と制度基盤が初めて体系的に整理された回であり、本プロジェクトにおける重要な橋渡しの役割を果たした会合であった。

第 7 回 留意ポイント

提言報告書作成への接続

第 7 回では、個別技術の説明だけでなく、最終提言報告書へ向けた論点整理の重要性が共有された。

これまでの会合では、

- 需要
- 従来電源
- 再エネ
- パワーエレクトロニクス
- 送電
- 配電
- 運用
- 小売

と議論対象が順次拡大してきたが、第 7 回ではそれらを接続する情報通信基盤や標準化の重要性が明確になった。

特に DER や DR を実運用へ組み込むためには、個別技術の優劣だけではなく、機器・通信・制度・市場を接続する仕組みが必要であることが示された。

需要が運用資源になるための前提条件

第 6 回では、

「需要が運用資源になる」

という考え方が示された。

第 7 回では、その実現に必要な条件が具体的に整理された。

具体的には、

- DR ready
- HEMS
- ECHONET Lite
- OpenADR
- 次世代スマートメーター
- DER 統合制御

などがその基盤技術として位置付けられた。

つまり、

需要を制御する

↓

需要を運用資源化する

↓

需要を市場へ参加させる

という流れを実現するためには、情報通信基盤と標準化が不可欠であることが確認された。

DER 実装段階への移行

第 4 回では配電系統における DER 導入可能性が議論され、

第 6 回では DER を運用資源として活用する考え方が議論された。
第 7 回ではさらに一歩進み、
- EV
- HP 給湯機
- 蓄電池
- HEMS

など具体的な需要機器を対象として、
- どのように制御し、
- どのように評価し、
- どのように系統へ接続するか

が議論された。
このため第 7 回は、「DER 概念論から DER 実装論への転換回」として位置付けることができる。

標準化が技術課題ではなく戦略課題であることの認識

講演および討議を通じて、
標準化は単なる技術仕様策定ではなく、
- 社会実装
- 市場形成
- 産業競争力

に直結する課題であることが繰り返し強調された。
特に OpenADR や ECHONET Lite の事例から、標準化活動には
- 継続的な人材投入
- 実証環境
- 産学官連携

が必要であり、
技術開発と同等以上に重要であるとの認識が示された。

データ活用の重要性

講演 1 では、
- GPS データ
- 流動人口データ

を活用した EV 需要推計が紹介された。
また講演 2 では、
- スマートメーターデータ
- DER データ
- DR 信号

などの活用が議論された。
これらを通じて、
将来の電力システムでは設備よりもデータが運用を左右する場面が増えることが示唆された。
- データ取得、
- データ連携、
- データ活用能力

が、将来の系統運用や市場運営の重要基盤になるとの認識が共有された。

サイバーセキュリティの顕在化

第 1 回から第 6 回までは、
- 発電設備、
- 送配電設備、
- 市場、
- 運用

などが主な議論対象であった。
しかし第 7 回では、大量の機器がネットワーク接続される未来像が示されたことにより、サイバーセキュリティが独立した重要課題として顕在化した。

今後の電力システムでは、

- 通信
- データ
- 制御

が一体化するため、セキュリティは個別機器の問題ではなく、システム全体の信頼性を左右する要素として位置付けられることが確認された。

第 8 回会合要旨

全体要約

第 8 回会合では、「解析」を主題として、電力系統解析およびエネルギー解析について講演と討議が行われた。これまでの会合では需要、発電、再エネ、パワーエレクトロニクス、送配電、運用、市場、DER、ICT など個別技術やシステム構造が議論されてきたが、本会合ではそれらをどのように解析し、評価し、将来シナリオとして比較するかに焦点が当てられた。

講演 1 では、辻氏が電力系統解析の概要と最近の技術動向について説明した。電力系統解析は従来から運用計画や設備計画、安定度評価などに活用されてきたが、再エネ導入拡大やインバータ主体システムへの移行に伴い、解析対象や解析手法が大きく変化していると述べた。電力系統解析には動特性解析、安定性解析、SCUC など様々な解析が存在し、タイムスケールや目的に応じて使い分けられていることが説明された。

安定性解析については、近年のグリッドコード整備や運用容量算定の高度化との関係が紹介された。従来は同期安定性や電圧安定性などを個別に扱うことが多かったが、再エネ大量導入に伴い複合的な現象を統合的に評価する必要性が高まっていると説明した。また、北海道ブラックアウトやイベリア半島ブラックアウトの事例を通じて、周波数安定性、電圧安定性、システムストレングス、無効電力制御など複数要因を統合的に評価することの重要性が示された。さらに、LFSM（Limited Frequency Sensitive Mode）など再エネ設備に求められる系統貢献機能についても紹介され、グリッドコード整備と解析技術が密接に関係していることが説明された。

続いて、瞬時値解析（EMT 解析）について説明が行われた。再エネやパワーエレクトロニクス機器の大量導入に伴い、インバータ挙動を詳細に解析できる EMT 解析の重要性が高まっていることが紹介された。一方で、EMT 解析は計算負荷が極めて大きく、大規模系統へ適用する場合には並列計算などの工夫が必要であることが説明された。オーストラリアの事例では、系統を多数の部分系統へ分割し、並列計算によって計算時間短縮を実現していることが紹介された。

また、電力系統解析の今後の課題として人材育成についても言及された。再エネ大量導入やインバータ主体システムへの移行に伴い、実効値解析だけでなく EMT 解析、不確実性解析、グリッドコード、AI 活用などを理解できる人材が必要になると説明した。さらに、電力工学、制御工学、パワーエレクトロニクス、情報科学を横断的に理解する人材育成の必要性が示された。

講演 2 では、小宮山氏がエネルギー解析の代表的手法について説明した。まず、エネルギーモデルには様々な種類があり、分析目的に応じて使い分ける必要があることが紹介された。NEMS（National Energy Modeling System）は米国エネルギー省が活用する大規模需給モデルであり、発電、産業、民生、輸送など複数部門を統合して分析することができる。また、日本エネルギー経済研究所などで利用される計量経済モデルは、過去データに基づきエネルギー需要を推計する手法であることが説明された。

さらに、応用一般均衡モデル（CGE モデル）についても紹介された。CGE モデルは経済全体を対象として、炭素税や排出量取引制度などが経済へ与える影響を評価するために用いられる。エネルギー部門だけでなく産業構造や所得分配への影響も分析できることから、脱炭素政策の評価に活用されていることが説明された。

次に、MARKAL/TIMES モデルを代表とする最適化型エネルギーモデルについて紹介された。これらはエネルギーシステム全体の総コスト最小化を目的として、発電設備、蓄電池、水素、CCS など多様な技術オプションを比較評価するモデルである。日本でも電力、熱、水素、燃料などを統合的に扱う最適化モデルが開発されており、セクターカップリングやカーボンニュートラルシナリオ評価に活用されていることが説明された。

また、核燃料サイクル解析や電力需給シミュレーションについても紹介された。核燃料サイクル解析では、燃料供給から再処理までを含む長期的システム評価の重要性が示された。電力需給シミュレーションでは、太陽光発電や風力発電の出力変動、蓄電池、水素、DR などを考慮した時系列解析が行われていることが説明された。小宮山氏は、モデルは未来を予言するためのものではなく、異なる選択肢を比較し意思決定を支援するためのツールであることを強調した。

討議では、実効値解析と EMT 解析の役割分担について議論が行われた。インバータ主体システムでは EMT 解析が重要になる一方で、計算負荷の観点から全てを EMT 解析で行うことは現実的ではなく、対象現象に応じて両者を適切に使い分ける必要があるとの認識が共有された。

また、地点別価格（Locational Pricing）についても議論が行われた。地点別価格は送電制約や系統混

雑を価格へ反映する仕組みであり、設備投資や需要立地を誘導する可能性があると説明された。そのためには高精度な系統解析が必要であり、解析技術と市場制度が密接に関係していることが指摘された。

リアルタイムに近い解析能力についても議論が行われた。再エネ出力や需要変動が大きい環境では、PMU やスマートメーターなどから得られるデータを活用しながら継続的に状態評価を行う必要があるとの認識が示された。また、予防制御を実現するためには多数の運用ケースを評価する必要があり、並列計算や AI を活用した計算負荷低減の重要性が指摘された。

討議後半では、セクターカップリング解析について議論が行われた。電力、熱、水素、輸送などを統合的に扱うことの重要性が確認され、カーボンニュートラル社会の評価には不可欠な手法であるとの認識が共有された。

さらに、AI応用についても議論が行われた。需要予測、再エネ出力予測、状態推定、計算高速化などに AI を活用する可能性が示された一方で、AI は物理法則や運用経験を置き換えるものではなく、解析技術を補完する役割を担うべきであるとの考え方が共有された。

第 8 回会合を通じて、解析技術は単なる研究ツールではなく、将来の電力システムやエネルギーシステムを評価し、政策や投資判断を支える基盤技術であることが示された。また、実効値解析と EMT 解析の連携、グリッドコードとの関係、セクターカップリング評価、AI 活用、人材育成などが重要課題として整理された。

第 4 回が送配電統合、第 5 回がエネルギーシステム統合、第 6 回が運用・市場統合、第 7 回が DER・ICT・標準化統合であったのに対し、第 8 回は「解析・評価統合回」として位置付けられる。

また、本会合はこれまで議論されてきた技術や制度をどのような解析手法で定量的に評価し、将来シナリオとして比較検討するかを体系的に整理した回であり、最終提言形成に向けた解析基盤を提示した重要な会合であった。

第 8 回 留意ポイント

解析が主題となった初めての回

第 1 回から第 7 回までは、需要・従来電源・再エネ・パワーエレクトロニクス・送配電・運用・小売・DER・ICT といった個別技術やシステム構造そのものが主題であった。

これに対し第 8 回では、

「それらをどのように解析し、評価し、将来シナリオとして比較するか」

が主題となった。

その意味で本会合は、技術論から評価論・解析論へ移行した最初の回として位置付けられる。

実効値解析と EMT 解析の役割分担

講演および討議を通じて、

実効値解析・EMT 解析の役割の違いが整理された。

実効値解析は広域系統や長時間現象の評価に適している一方、

EMT 解析は

インバータ挙動

高速制御

パワーエレクトロニクス現象

を扱うために必要であることが示された。

また、

「EMT 解析が優れている」ではなく、

「対象現象に応じて両者を使い分けることが重要」

との考え方が繰り返し示された。

これは今後の GFM、DER、系統強度議論の基盤となる論点である。

グリッドコードと解析技術の関係

第 4 回ではグリッドコードの必要性が議論され、

第 8 回ではその技術的裏付けとして解析技術が議論された。

特に、

- LFSM
- 周波数応答

・　システムストレングス
・　インバータ安定性
などは、
解析によって初めて性能や影響を評価できることが示された。
つまり、
・　解析⇒グリッドコード⇒運用
が連続した体系として存在することが明確になった。

ブラックアウト解析の重要性

講演では、北海道ブラックアウト・イベリア半島ブラックアウトが紹介された。
これらは単なる事故紹介ではなく、
複雑化する電力システムにおいて、
・　電圧安定性
・　周波数安定性
・　システムストレングス
・　無効電力制御
など複数要因が相互作用することを示す事例として扱われた。
また、ブラックアウト解析が体系化され、定期的なリスク評価へ活用されていることも重要な論点として示された。

モデルは未来予測ではなく比較評価ツール

小宮山氏は繰り返し、
「モデルは未来を予言するものではなく、意思決定を支援するための比較評価ツールである」
との考え方を示した。
これは第 8 回全体を貫く重要なメッセージである。
例えば、
・　NEMS
・　CGE
・　MARKAL/TIMES
・　最適化モデル
はいずれも前提条件に依存して結果が変化する。
したがって、モデル結果だけを絶対視するのではなく、
前提条件や制約条件を理解しながら活用することが重要であることが示された。

セクターカップリング解析への拡張

第 5 回ではエネルギーシステム統合が議論された。
第 8 回ではその評価手法として、電力・熱・水素・輸送を統合して扱う
セクターカップリング解析が議論された。
これは従来の電力需給解析から一段拡張された考え方であり、
将来のカーボンニュートラル評価では不可欠な手法として位置付けられた。

AI は解析を代替するのではなく補完する

AI に関する議論も特徴的であった。
講演および討議では、AI は
・　需要予測
・　出力予測
・　状態推定
・　計算高速化
などに活用できる可能性が示された。
一方で、
・　物理法則
・　制約条件
・　運用経験

を AI だけで置き換えることはできないとの認識も共有された。
そのため、
AI は解析技術を代替するものではなく補完するものとして位置付けられた。

人材育成の対象が変化している

第 3 回、第 7 回でも人材育成は議論されたが、
第 8 回ではより具体的に

- 電力工学
- 制御工学
- パワーエレクトロニクス
- ICT
- AI

を横断的に理解する解析人材の必要性が示された。
また、
実効値解析だけでなく、
EMT 解析やデータ解析も扱える人材育成が重要であることが強調された。

第 9 回会合要旨

全体要約

第 9 回会合では、「市場」と「政策」を主題として、電力市場の役割と、エビデンスを踏まえた政策形成（EIP：Evidence-Informed Policy）について講演と討議が行われた。

これまでの会合では、需要・従来電源・再生可能エネルギー・パワーエレクトロニクス・送配電・運用・DER・ICT・解析などの技術的・システム的課題が議論されてきた。第 8 回では、それらを評価するための解析・モデル・シミュレーション手法が整理された。

これに対し第 9 回では、「解析結果をどのように市場制度や政策へ反映するか」が中心テーマとなった。

講演 1 では、山口順之氏が「電力市場は創造的破壊を生み出せるか」をテーマに講演を行った。山口氏は、この問いを通じて、市場制度を単なる価格形成の仕組みとしてではなく、新技術や新規参入を促す社会変革の仕組みとして捉える視点を提示した。

山口氏は、フィリップ・アギヨンの「創造的破壊」の考え方を引用し、市場は単なる価格決定メカニズムではなく、技術革新・新規参入・事業創出を促す仕組みとして機能すべきであるとの問題意識を示した。

まず、政府が実施した電力システム改革レビューを紹介し、安定供給・電気料金抑制・需要家選択肢拡大・事業機会拡大などが改革の目的として整理されていることを説明した。また、DX による需要増加・カーボンニュートラル対応・地政学的リスク・資源価格高騰など新たな環境変化も紹介された。山口氏は、改革評価を行う際には市場制度そのものの問題と、市場以外の要因を区別して考える必要があるとの認識を示した。

続いて、電力市場が抱える本質的課題について議論した。電力の特殊性として、常時同時同量・大規模設備産業・大量貯蔵困難・瞬時制御などが挙げられるが、特に規模の経済・市場支配力・不確実性が市場設計上の重要課題であると説明した。規模の経済が存在するため大規模事業者は競争上有利になり、市場支配力監視が不可欠であると述べた。また、不確実性は電力産業の本質的特徴であり、制度設計においてリスクプレミアムを適切に評価する必要があると指摘した。

これらの課題への対応策として、情報公開・市場監視・市場参加者増加・市場ルール・商品設計・リスクプレミアムを提示した。情報公開については、市場価格・系統情報・ネットワーク情報・などを利用しやすい形で提供する重要性を説明した。また、市場価格は単なる売買結果ではなく、社会が必要としている価値や需給状況を示す重要なシグナルであるとの考えを示した。さらに、DER（Distributed Energy Resources）の市場参加や、小売事業者による新たな商品開発など、市場がイノベーションを促進する役割を持つべきであると述べた。

講演後半では、「限界費用ゼロ時代」について議論した。

太陽光発電や風力発電の大量導入が進むと、限界費用に基づく従来型市場では価格がゼロ近傍へ収束しやすくなる。その結果、供給力・柔軟性・系統維持機能への投資インセンティブが不足する可能性があると指摘した。そのため、容量価値・柔軟性価値・系統価値をどのように市場で評価するかが重要になるとの認識を示した。また、電気学会調査専門委員会での議論を紹介し、再エネ大量導入時代には市場価格信号、ネットワーク情報、需要家行動などを統合的に考慮した市場設計が必要であると説明した。

講演 2 では、杉山昌広氏が EIP について講演した。

杉山氏は、脱炭素化やエネルギー転換が進む中で、エビデンスを踏まえた政策形成の重要性が高まっていると説明した。EIP とは、「エビデンスによって政策を決定する」のではなく、「エビデンスを踏まえて政策を形成する」考え方である。政策には、科学的知見・データ・モデル分析だけでなく、社会的価値判断・利害調整・政治的判断も含まれるため、エビデンスだけで政策の正解が決まるわけではないと述べた。一方で、エビデンスが十分活用されなければ、効果の不明な政策・非効率な投資・想定外の副作用が生じる可能性があるとも指摘した。また、エネルギー政策では長期的影響が大きいため、発電設備投資・送電網整備・再エネ導入・脱炭素政策などについてエビデンスに基づく検討が特に重要であると説明した。

続いて、シナリオ研究の役割について議論した。

シナリオ研究は未来予測ではなく、複数の可能性の整理と政策選択肢の比較を目的とすると説明した。また、前提条件・不確実性・代替シナリオを明示することが EIP において重要であると述べた。さらに、再エネ政策については、FIT・FIP・系統整備・市場制度などを総合的に評価する必要があると説明した。政策は、その導入だけでなく、効果検証・政策レビュー・改善を継続することが重要であり、データ整備・分析能力向上・人材育成の必要性を強調した。また、研究者と政策担当者の対話を強化し、研究成果が政策へ反映され、政策結果が再び研究へフィードバックされる循環を構築する必要があるとの認識を示した。

討議では、市場価格信号・ネットワーク情報・規制機関・需要曲線・市場価格ボラティリティ・コスト便益分析などについて議論が行われた。価格は需給状況や設備投資必要性を伝える情報であり、市場価格変動には重要な役割があるとの認識が共有された。また、市場制度を評価する際には、安定供給・経済効率性・脱炭素化・イノベーション促進を総合的に考慮する必要があるとの考え方が示された。さらに、系統データ・市場データ・需要データなどを活用するためのデータ基盤整備が重要であり、解析・評価と政策形成を結び付ける基盤として位置付けられた。

第 9 回会合を通じて、

① 市場は価格決定だけでなく技術革新や新規参入を促進する仕組みであること
② 限界費用ゼロ時代には容量価値・柔軟性価値・系統価値の評価が重要になること
③ EIP はエビデンスを踏まえた政策形成の考え方であること
④ シナリオ研究やモデル分析は政策選択肢比較のための手段であること
⑤ 政策形成には継続的な評価と改善が必要であること
⑥ 解析と政策を結ぶ基盤としてデータ整備が重要であること

が重要論点として整理された。

また、本会合では「電力市場は創造的破壊を生み出せるか」という問いを起点として、市場制度・政策形成・提言の在り方が議論された。

第 4 回:送配電統合
第 5 回:エネルギーシステム統合
第 6 回:運用・市場統合
第 7 回:DER・ICT・標準化統合
第 8 回:解析・評価統合

に続き、第 9 回は「市場・政策・提言形成統合回」として位置付けられる。

また本会合は、これまで議論されてきた技術・システム・解析の成果を、どのように市場制度や政策形成へ結び付けるかを体系的に整理した回であり、本プロジェクトの最終提言形成へ向けた重要な橋渡しとなる会合であった。

第 9 回 留意ポイント

市場設計そのものではなく市場の役割を問う回

第 9 回では、市場制度の個別設計よりも、「市場は何のために存在するのか」という根本的な問いが繰り返し議論された。

山口氏は、市場を単なる価格決定メカニズムとしてではなく、

- 技術革新
- 新規参入
- 事業創出

を促す仕組みとして捉えていた。

特に講演冒頭で提示された「創造的破壊」の視点は、第 9 回全体を貫く重要な問題意識であった。

価格は結果ではなく情報である

講演および討議を通じて、価格を単なる売買結果としてではなく、社会や電力システムの状態を伝える情報として捉える考え方が示された。

山口氏は、

- スポット価格
- 市場価格信号
- ネットワーク情報

の重要性を繰り返し説明した。

また討議では、価格変動そのものを抑えることが目的ではなく、価格が何を伝えているかを理解することが重要であるとの認識が共有された。

これは第 6 回の運用・市場議論とも連続する論点である。

限界費用ゼロ時代という新しい問題設定

第 9 回では、

「限界費用ゼロ時代」

という概念が重要なキーワードとして提示された。
従来市場は、「限界費用に基づく価格形成」を前提としていた。
しかし、太陽光・風力などの導入拡大により限界費用が極めて小さい電源が主流化すると、価格シグナルだけでは、投資・柔軟性確保・系統維持を十分支えられない可能性があることが示された。
その結果、
- 容量価値
- 柔軟性価値
- 系統価値

をどう評価するかが新たな課題として浮上した。

EIP は Evidence-Based Policy ではない

杉山氏の講演で最も重要な論点の一つは、EIP が Evidence-Based Policy ではなく
- Evidence-Informed Policy

であるという整理であった。
つまり、エビデンスだけで政策を決定するのではなく、
- 科学的知見
- データ
- モデル分析

を踏まえながら、
- 価値判断
- 利害調整
- 政治判断

も含めて政策形成を行うという考え方である。
これは第 9 回の中心概念であった。

第 8 回との強い連続性

第 8 回では、NEMS・CGE・MARKAL/TIMES などのモデルが紹介された。
第 9 回では、それらの解析結果をどのように政策へ活用するかが議論された。
そのため、
第 8 回が解析・評価統合回であるのに対し、
第 9 回は解析結果の政策活用回という位置付けを持つ。

モデルは意思決定支援ツールである

杉山氏は、シナリオ研究やモデル分析について、
未来予測ではなく、政策選択肢比較のためのツールであることを強調した。
これは第 8 回で小宮山氏が述べた
「モデルは未来予測ではなく比較評価ツール」という考え方と整合している。
第 8 回と第 9 回を通じて、モデル活用に関する共通認識が形成されたことは重要である。

政策分析能力そのものが課題

第 9 回では、再エネ政策を例として、政策分析能力そのものが重要な課題であることが示された。
特に、
- FIT
- FIP
- 系統整備
- 市場制度

などについて、導入するだけでなく、導入後に評価し改善する仕組みが必要であるとの考え方が示された。
これは PDCA に近い考え方であり、EIP の実践面を示している。

データが解析と政策を結ぶ

討議では、データ基盤の重要性も強調された。
第 8 回で議論された解析・シミュレーション・モデルと、
第 9 回で議論された市場・政策・EIP を接続する基盤として、

データ整備が位置付けられた。
これは今後の提言形成でも重要な論点になる。

第 10 回会合要旨

全体要約

第 10 回会合では、これまでの各回で議論されてきた内容を横断的に整理し、将来の電力システムに関する提言形成に向けた議論が行われた。

本会合では、Strategy / Driver、Integrity、Leadership/Intelligence の三つの観点から議論が進められた。

これは個別技術や制度を議論するのではなく、「何が変化を生み出すのか」、「何を目標としてシステムを構築するのか」、「誰がどのように意思決定するのか」という観点から、これまでの議論を統合的に整理することを目的としたものであった。

Strategy / Driver では、電力システムを取り巻く環境変化や外生的ドライバーの議論が行われた。

まず、データセンターなどの大規模需要増加、地政学的変化、ガバナンス、社会構造変化などが重要なドライバーとして挙げられた。

また、需要の能動化・設備高経年化とリプレース・分散型需要の拡大なども将来のシステム変革を促す要因として位置付けられた。

農業・上下水道・情報通信など、従来の電力分野の外の領域との連携も重要な視点として提示された。

IoT・センシング・ロボティクス・AI・フィジカル AI などの進展は、需要構造だけでなく電力システム運用そのものを変える可能性があるとの認識が示された。

また、人口減少・土地利用変化・都市と地方の構造変化も重要なドライバーとして議論され、人口減少社会においてどのような電力システムを構築すべきか、という問題提起が行われた。

技術面では、インバータ大量導入・電圧安定性・PMU による観測・短絡容量・系統解析など、第 4 回から第 8 回まで継続して議論されてきた課題が改めて整理された。

さらに、政策・規制・市場化・海外事例についても議論され、技術・運用・市場・政策を一体として考える必要性が確認された。

Integrity では、電力システムをどのような価値や指標で評価するかについて議論が行われた。

価格は単なる売買結果ではなく、需給状況・系統状況・投資必要性を示す情報であるとの認識が共有された。

ノード価格・託送料金制度の関係についても議論が行われ、将来の市場制度設計上の重要課題として位置付けられた。

さらに、「電力×〇〇」という考え方が提示され、電力×交通・電力×産業・電力×情報通信などの分野横断的連携の重要性が指摘された。

加えて、熱・燃料・水素・モビリティなどを含めた総合的エネルギーマネジメントの必要性も議論された。

また、デュアルユース・輸出規制・情報管理といった安全保障上の課題も取り上げられた。

討議では、品質別契約・スマートメーター・供給責任についても議論が行われ、将来は供給品質や価格を利用者が選択する仕組みも考えられるとの問題提起がなされた。

さらに、ラストリゾート・経済安全保障・レジリエンスなどの観点から、「電力システムは最終的に何を守るために存在するのか」という問いが提示された。

また、同時市場・燃料確保・大規模需要家の自家発などについても議論が行われ、電力市場だけではなく燃料供給や需要構造まで含めた統合的な視点の必要性が確認された。

Leadership/Intelligence では、電力システム全体を誰がどのように意思決定するのかについて議論が行われた。

討議では、「誰が全体最適を考えるのか」という問題意識が共有された。

技術的最適化や市場メカニズムだけでは十分ではなく、トップダウンの方向付け・ボトムアップの知見・データ活用を組み合わせた意思決定の必要性が指摘された。

また、発電・送配電・需要・市場・ICT・政策などの分野を超えた議論の場の必要性の認識が共有された。

さらに、将来像は固定的なものではなく、技術進歩・社会変化・国際情勢に応じて継続的に見直していくべきであるとの考え方が示された。

その中で、Integrated Resource Planning（IRP）が紹介された。IRP は、電源・系統・需要側資源・DER などを統合的に計画する考え方であり、今後の電力システム計画において重要な参考概念として位置付けられた。

また、Adequacy（アデカシー）についても議論が行われた。従来の供給力確保だけではなく、柔軟性・レジリエンス・需要側資源も含めて評価する必要性が指摘された。

さらに、共通データ基盤・データ共有・標準化・データガバナンスの重要性が強調され、第 8 回で議論された解析、第 9 回で議論された EIP、そして第 10 回で議論された意思決定を結び付ける基盤として位置付けられた。

第 10 回会合を通じて、

① 将来の電力システムを規定するドライバーとして、需要構造変化、AI、人口減少、地政学などを考慮する必要があること
② 電力を単独で考えるのではなく、交通・産業・情報通信などとの統合的な視点が必要であること
③ 経済安全保障、レジリエンス、供給責任などを含めた多面的な価値評価が必要であること
④ 電源・系統・需要・DER を統合的に考える IRP の考え方が重要であること
⑤ アデカシーを供給力だけでなく柔軟性や需要側資源も含めて評価する必要があること
⑥ データ共有基盤とデータガバナンスが将来の意思決定を支える重要な基盤となること
⑦ 技術・市場・政策を統合しながら、継続的に将来像を見直していく仕組みが必要であること

が主要な論点として整理された。

第 4 回:送配電、第 5 回:エネルギーシステム、第 6 回:運用・市場、第 7 回:DER・ICT・標準化、第 8 回:解析・評価、第 9 回:市場・政策・提言形成に続き、第 10 回は「意思決定・統合計画・提言形成」として位置付けられる。

また本会合は、「将来の電力システムを誰が、どのような情報に基づき、どのような仕組みで意思決定していくのか」という問いを中心に、第 1 回から第 9 回までの議論を提言形成へ接続する最終統合回として位置付けられるものであった。

開会

荻本氏より、資料 3「会合発言録」、資料 4「とりまとめ表」、資料 5「推奨資料リスト」について説明があった。これらは報告書の一部として使用する予定であり、累積版として改めて確認いただき、過不足があれば修正をお願いしたいと述べた。

資料 2 については主として CIGRE 資料を参照して整理したものであり、掲載漏れがあれば後日修正いただきたいとした。また、資料 6「後半シンポジウム次第案」は会合の最後に議論すること、資料 7「事務関連情報」については特段の変更はないことが説明された。

横断的議論の進め方

荻本氏より、本会合ではこれまでの各分野の議論を横断的に整理するため、Strategy / Driver、Integrity、Leadership、情報活用の観点から議論を行うことが説明された。

Strategy では、電力システムを取り巻く状況変化やドライバーを整理し、それらに対してどのような戦略や政策が必要となるかを議論することを目的とした。Integrity では、電力のみならずエネルギー全体や社会との関係を視野に入れ、異なるエネルギー媒体や分野をどのような指標で評価・比較するかを議論することが説明された。Leadership では、司令塔機能や意思決定の仕組み、Evidence-Informed Policy Making なども含め、方向性をどのように決定していくかを議論することが説明された。また、情報活用では重要なデータやそれを活用するためのツールについて議論する予定であり、本日は各項目について 30 分程度ずつ議論する方針が示された。

続いて Strategy / Driver の議論に入るにあたり、荻本氏より、電力システムを取り巻く状況変化の例として、CIGRE Technical Brochure 0954(2025 年 1 月)で示された分散型資源活用の重要性や、PMU を用いた電力システム状態監視、インバータ大量導入による系統慣性低下や電圧問題、不確実性増加による投資判断の難しさなどが紹介された。データセンター需要の将来予測もその不確実性の一例として挙げられた。これらはあくまで例示であり、本プロジェクトで議論してきた内容を踏まえながら、何がドライバーとなり、それに対してどのような戦略を提言に盛り込むべきかについて議論してほしいとの問題提起が行われた。

Strategy/Driver

需要構造、大規模需要、地政学、ガバナンス、社会学

浅野氏は、データセンターなどの大規模需要の増加や産業構造の変化は重要なドライバーであり、「需要構造」という観点を明示的に加えるべきではないかと指摘した。また、地政学的変化は現在のエネルギーシステムを取り巻く最も重要な外生要因の一つであり、エネルギーセキュリティへの影響も含めて整理する必要があると述べた。さらに、各国の政治体制や社会体制の変化、ガバナンスの変化も長期的なドライバーであり、社会科学的な視点も必要ではないかとの意見を示した。

荻本氏は、資料中に列挙した項目は議論のたたき台であり、必要に応じて修正・追加する、とした。

需要の能動化、経年化リプレースが変革のきっかけに

山本氏は、需要側が制御可能となる需要参加技術や需要の能動化についてもドライバーとして明示すべきではないかと述べた。また、設備の高経年化が進んでおり、今後必要となるリプレースはネットワーク構造やシステム構成を変革する契機となり得るとの考えを示した。設備更新を単なる更新として捉えるのではなく、システム変革の機会として活用できる可能性があると指摘した。

デュアルユース

中村氏は、原子力や核融合などの技術が今後ドライバーとしてどのような役割を果たすのかに関心があると述べた。特に、政治家や政策担当者が報告書を読む際にはこうした技術に注目する可能性が高く、本プロジェクトとしてどのように位置付けるべきかとの問題意識を示した。小型原子炉なども含めてどのような議論が行われてきたのか質問した。

これに対し荻本氏は、原子力や核融合を推進すべきという意味ではなく、将来利用可能な時期や現実性を冷静に評価する必要があるとの観点からドライバー候補として挙げたと説明した。核融合については、基礎研究は重要であるものの、短期的な実用化は期待できないことを理解することも重要との認識を示した。

農業・上下水道

戸田氏は、資料中に記載された「農業・上下水道」がどのような趣旨でドライバーとして挙げられているのか質問した。特に上下水道についてはスマートメーターとの関係を理解したが、農業についてはどのような問題意識に基づくものか確認した。

荻本氏は、農業についてはソーラーシェアリングを意図したものではなく、自動耕作や植物工場などのように、電力と他分野が結び付く事例を念頭に置いていたと説明した。また、上下水道についてはスマートメーターとの関係を想定していたが、ガスなども含めて考えることができるとの認識を示した。

戸田氏は、そうした趣旨であれば理解できると述べ、現在の記載だけではやや唐突に見えるとの印象を示した。

また荻本氏は、農業や上下水道を単独で扱うというよりも、電力システムと他分野との結び付きという文脈で考えるべきであるとの認識を示した。さらに、分散型需要の参加や蓄電池の活用が重要な課題であり、将来的に火力発電だけに依存することは難しくなる可能性があることから、バッテリーの役割も含めて考える必要があると述べた。

分散型の需要とそこへの供給、情報技術、センシング、ロボティクス

浅野氏は、農業に限らず、スマート農業に代表されるような IoT センサーや各種情報技術の普及によって、分散型の電力需要が増加していくことが重要なドライバーになるとの考えを示した。こうした需要に対してどのように電力を供給するかという観点は、本プロジェクト全体の議論とも関係すると述べた。

また、このような動きは農業に限られるものではなく、建築物や都市インフラなど様々な分野に共通する現象であり、IT 化やセンシング技術の進展によって電力需要の構造そのものが変化していく可能性があると指摘した。

さらに浅野氏は、電力・エネルギー技術そのものとは別に、情報技術・センシング技術・ロボティクスなどが外生的なドライバーとして作用し、それらがスマート化を支える基盤技術となり、これらの技術進展が社会全体の需要構造や電力利用形態を変えていく可能性があると述べた。

荻本氏は、その理解でよいと応じ、情報技術やセンシング技術の進展が重要なドライバーとなるとの認識を共有した。

指標としてのレジリエンス、サイバーアタック

石井氏は、今後の電力システムを考える上で「レジリエンス」が重要なキーワードになり、分散型資源の導入や需要家参加の拡大に加え、自然災害の激甚化も進んでいることから、システム全体の強靭性をどのように確保するかが重要な課題になるとの認識を示した。

これに対し浅野氏は、レジリエンスそのものはドライバーというよりも、気候変動や自然災害の激甚化といった外生要因に対して向上を目指すべき評価指標であるとした。つまり、
気候変動・自然災害の激甚化がドライバーであり、レジリエンスはその結果として向上を目指すべき指標であるとの考えを示した。さらに浅野氏は、レジリエンスの対象としては自然災害だけでなく、サイバーアタック・サイバーセキュリティ上の脅威も重要になっていると指摘した。今後の電力システムではデジタル化や

分散化が進展することから、サイバー攻撃への対応もレジリエンスの重要な要素になるとの認識を示した。
荻本氏はこれらの指摘に謝意を示し、レジリエンスやサイバーセキュリティの観点も重要な論点であるとの認識を共有した。

AI、フィジカル AI、ロボティクスによる運用の変化

浅野氏は、今後の社会変化を考える際には、AI の進展を重要なドライバーとして位置付ける必要があると述べた。特に近年は生成 AI だけでなく、実世界で動作するフィジカル AI やロボティクスの発展が注目されており、これらが産業構造や電力利用構造に大きな影響を与える可能性があるとの認識を示した。
また、こうした技術は単に新たな需要を生み出すだけでなく、電力システムそのものの運用方法を変える可能性があると指摘した。情報処理能力やセンシング能力の向上によって、従来は困難であった高度な分散制御や需給調整が可能になる可能性があり、運用の在り方そのものが変化する可能性があるとの考えを示した。
荻本氏も、AI やロボティクスは需要面だけでなくシステム運用面にも影響を与える可能性があるとの認識を示し、重要なドライバー候補として整理すべきとの考えを示した。

人口減・土地利用：再エネ設置、系統規模、需要地近接

浅野氏は、日本社会における人口減少も重要なドライバーであると指摘した。人口減少は単なる需要減少要因ではなく、社会構造やインフラ配置そのものを変化させる可能性があるとの認識を示した。
特に人口減少が進む地域では、土地利用の変化・再エネ設置可能性の変化・インフラ維持コストの変化などが発生し得ると述べた。これらは電力システムの構成や系統整備の考え方にも影響を与える可能性があるとの考えを示した。
また、将来的には人口分布の変化によって、系統規模をどの程度維持するのか・需要地近傍での供給をどの程度重視するのかといった問題も生じる可能性があると指摘した。人口減少社会における電力システムの姿そのものを考える必要があるとの問題提起を行った。
荻本氏は、この指摘は単なる需要予測の話ではなく、社会構造変化と電力システムの関係を考える重要な論点であるとの認識を示した。

孤立、都市、農業・漁業

議論の中では、人口減少や地域構造変化と関連して、地域社会の在り方についても意見が出された。
浅野氏は、人口減少が進む中では、都市への集約だけでなく、地域によっては孤立化が進む可能性もあると述べた。その場合、電力システムには従来とは異なる役割が求められる可能性があるとの考えを示した。
また、都市部・農業地域・漁業地域では求められる電力システムの形態が異なる可能性があり、全国一律の考え方だけでは十分ではないとの認識を示した。地域特性に応じたシステム構成や供給方式を考える必要があるのではないかとの問題提起を行った。
さらに、地域ごとの産業構造や生活様式の違いも電力需要やエネルギー利用の在り方に影響を与えるため、人口減少や地域構造変化を電力システム設計の前提条件として考える必要があるとの意見が示された。
荻本氏は、こうした議論は将来の電力システムを考える上で重要な視点であり、単なる技術論だけではなく社会との関係として整理する必要があるとの認識を示した。

構造要因、ライフスタイル、ワークスタイル、交通体系

浅野氏は、電力システムの将来を考える際には、技術だけではなく社会構造そのものの変化を重要なドライバーとして捉える必要があると述べた。人口減少や高齢化に加え、ライフスタイルやワークスタイルの変化も電力需要構造に影響を与える可能性があるとの認識を示した。
特に近年はテレワークの普及や働き方の多様化が進んでおり、従来とは異なる需要分布や需要パターンが生じる可能性があると指摘した。また、交通体系についても、EV の普及やモビリティサービスの変化が電力システムへ影響を与える可能性があるとの考えを示した。
さらに、こうした社会構造変化はエネルギー需要そのものを変化させる可能性があり、技術進歩だけでなく社会側の変化も戦略立案の前提条件として整理する必要があるとの意見が示された。

インバータ、電圧安定性、配電方式、観測・PMU、短絡容量、解析

荻本氏は、これまでの会合で議論されてきた技術課題も重要なドライバーとして整理すべきであると述べた。具体的には、インバータ電源の増加・電圧安定性・系統慣性の低下・短絡容量の変化などが挙げら

れると説明した。これらは再エネ大量導入に伴って顕在化している課題であり、今後のシステム構成を考える上で重要な論点であるとの認識を示した。

また、配電方式や系統構成についても将来的な見直しが必要になる可能性があり、これまで当然視されてきたシステム構造を再検討する必要があるとの考えを示した。

さらに、PMU による観測・データ取得・状態推定・解析技術なども重要な基盤技術であると指摘した。再エネや分散型資源の導入が進む中では、従来以上にシステム状態を把握する能力が求められるとの認識を示した。

討議では、これらの課題は個別技術の問題ではなく、電力システム全体の構造変化に伴って生じるものであり、解析技術や運用技術との連携が重要であるとの意見が共有された。

政策、海外からの学び、市場化の是非、政策と規制

浅野氏は、技術だけで将来の電力システムが決まるわけではなく、政策や規制も重要なドライバーであると述べた。各国がどのような制度設計を行っているかを学びながら、日本としてどのような方向性を選択するかを考える必要があるとの認識を示した。

また、市場化についても議論が行われた。市場を活用することで効率化や技術革新が期待できる一方、市場だけでは解決できない課題も存在するため、市場と規制の役割分担を考える必要があるとの意見が出された。

さらに、海外の制度や事例をそのまま導入するのではなく、日本の社会構造や電力システムの特徴を踏まえて適用を検討する必要があるとの認識が示された。海外事例から学ぶことは重要であるが、日本独自の条件も考慮しなければならないとの考えが共有された。

荻本氏は、これまでの会合で議論された技術や運用、市場の課題も、最終的には政策や規制と結び付けて考える必要があるとの認識を示した。

Integrity

指標、価格、ノード価格と託送料金制度

荻本氏は、Integrity の議論では、電力システム全体を評価する際にどのような指標を用いるべきかが重要な論点になると述べた。従来は供給信頼度や経済性などが重視されてきたが、再エネ大量導入や分散型資源活用が進む中では、より多面的な評価が必要になるとの認識を示した。

山口氏は、市場の観点からは価格が重要な情報であり、価格シグナルが社会や市場参加者へ何を伝えるかを考える必要があると述べた。価格は単なる取引結果ではなく、需給状況や設備投資の必要性を示す情報として機能するとの考えを改めて示した。

さらに議論はノード価格へ及んだ。参加者からは、将来的にノード価格を導入する場合には、託送料金制度との関係をどのように整理するのかが重要な課題になるとの指摘があった。現在の託送料金制度との役割分担や整合性を考慮しなければならないとの認識が示された。

また、ノード価格は系統制約や混雑状況を価格へ反映する仕組みとして期待される一方、制度が複雑化する可能性もあるため、導入目的や期待効果を明確にする必要があるとの意見が出された。

構造変化、エネルギー全体、電力×〇〇、IT との連携

討議では、電力だけを対象とするのではなく、エネルギーシステム全体との関係で考える必要性について議論が行われた。

浅野氏は、今後の構造変化を考える際には、電力・熱・燃料・モビリティなどを統合的に捉える必要があると述べた。電力だけで完結した議論ではなく、「電力×〇〇」という視点が重要になるとの認識を示した。

また、電力×交通・電力×産業・電力×情報通信など、多様な分野との接続が進む可能性があり、その結果として新しい価値創出や需要構造変化が生じる可能性があると指摘した。

さらに、IT との連携についても議論が行われた。情報技術の進展によって、データ収集・状態把握・制御

最適化が可能となり、従来とは異なるシステム運用が実現する可能性があるとの認識が示された。

荻本氏は、これまでの会合で議論されてきた DER、データ活用、市場設計なども、最終的にはこうした分野横断的な統合の中で位置付ける必要があるとの考えを示した。

デュアルユース、輸出規制、情報管理

議論では、電力システムを巡る国際環境の変化と安全保障上の課題について意見交換が行われた。

参加者からは、近年は技術のデュアルユース性が強く意識されるようになっており、電力システムに関連

する技術や情報についても安全保障上の観点を無視できなくなっているとの指摘があった。
また、輸出規制や技術管理の強化が進んでいることから、研究開発や技術協力の在り方にも影響が及ぶ可能性があるとの認識が示された。特に、どのような情報を公開し、どのような情報を管理するべきかについては今後さらに議論が必要になるとの意見が出された。
さらに、電力システム分野ではデータ活用の重要性が高まる一方で、情報管理との両立も必要になるとの指摘があった。データ共有を推進しながら、安全保障やサイバーセキュリティ上のリスクにも配慮する必要があるとの認識が共有された。
荻本氏は、こうした論点は従来の電力技術の議論だけでは扱い切れない領域であり、社会や国際環境の変化と併せて考える必要があるとの認識を示した。

供給責任、スマートメーターによる品質別契約

討議では、将来の電力供給責任の在り方についても議論が行われた。
参加者からは、再エネや分散型資源が増加する中で、従来の一律的な供給サービスだけでなく、利用者のニーズに応じた多様なサービス形態が考えられるのではないかとの意見が示された。
その例として、スマートメーターの活用により、品質・信頼度・価格などが異なる契約形態を提供できる可能性があるとの議論が行われた。利用者によって求めるサービス水準は異なるため、一律の供給品質だけを前提とする考え方を見直す可能性もあるとの問題提起がなされた。
また、そのような制度を導入する場合には、供給責任を誰が負うのか・品質保証をどのように行うのか・公平性をどう確保するのかといった課題も生じるとの指摘があった。
議論では、分散化やデジタル化が進展する中で、供給責任の考え方そのものを再検討する必要があるのではないかとの認識が示された。

ラストリゾート、目標としての経済安全保障

討議では、電力システムが最終的に何を守るべきかという観点から、「ラストリゾート」や「経済安全保障」についても議論が行われた。
参加者からは、どのような市場制度や技術構成を採用したとしても、最終的には社会や国民生活を支える仕組みとして機能しなければならないとの意見が示された。
また、エネルギー供給の安定性やレジリエンスを考える際には、経済安全保障の観点も重要になるとの認識が共有された。燃料供給、設備調達、サプライチェーンなどを含めて、社会全体としてどのような強靭性を確保するかを考える必要があるとの指摘があった。
さらに、市場効率性のみを追求するのではなく、安定供給・安全保障・社会的受容性なども考慮しながらシステム全体を設計する必要があるとの考え方が示された。
荻本氏は、こうした議論は電力システムの最終目的を考える上で重要な視点であり、今後の提言形成にも関わる論点であるとの認識を示した。

電力×〇〇、総合的エネルギーマネジメント

討議では、電力システムを単独で考えるのではなく、他分野との統合という観点から議論が行われた。
参加者からは、今後のエネルギーシステムでは「電力×〇〇」という視点がますます重要になるとの意見が示された。電力と交通、産業、情報通信などの連携が進むことで、新しい価値やサービスが創出される可能性があるとの認識が共有された。
また、電力だけでなく、熱・燃料・水素。モビリティなども含めた総合的なエネルギーマネジメントが重要になるとの指摘があった。個別最適ではなく、システム全体としてどのように資源を活用するかを考える必要があるとの考えが示された。
さらに、これまでの会合で議論された DER や需要側資源も、こうした総合的なエネルギーマネジメントの中で位置付ける必要があるとの認識が示された。

いつ、どのくらい、いくらで、データの利用可能性

討議では、統合的なエネルギーマネジメントを実現するためには、データ活用が不可欠であるとの意見が出された。
参加者からは、いつ・どの程度・いくらで利用するのかといった判断を行うためには、データが利用可能でなければならないとの指摘があった。
また、データが存在していても、アクセスできない・形式が異なる・利用条件が不明確といった状況では十分活用できないとの意見が示された。データの利用可能性そのものを重要な基盤条件として整理する

必要があるとの認識が共有された。

さらに、データ活用は市場運営や需給調整だけでなく、設備投資判断や政策評価にも関わる重要な要素であり、第8回で議論された解析技術や第9回で議論されたEIPとも密接に関係するとの指摘があった。

同時市場、燃料確保

討議では、市場制度と燃料確保の関係についても意見交換が行われた。

参加者からは、電力市場だけを見ていては十分ではなく、燃料市場や燃料調達の問題も含めて考える必要があるとの意見が示された。発電設備の運用や供給力確保は燃料調達とも密接に関係しており、電力市場だけでは解決できない課題が存在するとの認識が示された。

また、同時市場の考え方についても議論が行われた。供給力、調整力、エネルギーなどを統合的に評価する仕組みが重要になる可能性があり、市場制度全体をどのように設計するかが課題であるとの意見が出された。

さらに、燃料確保や供給力維持を市場だけに委ねることの限界についても議論が行われ、市場と政策の役割分担を考える必要性が指摘された。

大規模需要の自家発、系統・電源の整備

討議では、データセンターなどの大規模需要の増加に伴う課題についても議論が行われた。

参加者からは、大規模需要家が自家発電設備を保有する可能性や、それが系統運用や電源整備へ与える影響について考える必要があるとの意見が示された。

また、大規模需要の立地によっては、系統増強・電源整備・送電設備整備が必要となる可能性があり、その費用負担や計画手法も重要な論点になるとの指摘があった。

さらに、需要の変化に対応するためには、単に供給力を増やすだけでなく、
需要側対策・分散型資源活用・系統運用高度化なども含めて考える必要があるとの意見が示された。

荻本氏は、こうした議論は需要と供給を一体で考える重要性を示しており、今後の提言形成でも重要な論点になるとの認識を示した。

Leadership/Intelligence

トップダウンの議論・意思決定、データ活用

荻本氏は、これまでの議論を踏まえると、技術的課題や市場制度の課題だけではなく、それらを誰がどのように意思決定するのかという問題が重要になってくると述べた。個別技術の最適化だけでは全体最適は実現できず、システム全体を見渡した意思決定の仕組みが必要になるとの認識を示した。

参加者からは、エネルギー政策や電力システムの将来像を考える際には、一定のトップダウン的な方向付けが必要ではないかとの意見が出された。一方で、現場の知見や市場からの情報も重要であり、トップダウンとボトムアップをどのように組み合わせるかが課題になるとの指摘があった。

また、意思決定を支える基盤としてデータ活用の重要性も議論された。適切なデータがなければ、政策判断や投資判断、制度設計を合理的に行うことは難しいとの認識が示された。

さらに、データを単に収集するだけではなく、分析できること・共有できること・意思決定へ反映できること
が重要であるとの意見が出された。第8回で議論された解析技術や、第9回で議論されたEIPとも関係し、データを活用した意思決定能力そのものが重要になるとの認識が共有された。

分野を超えた議論の場

討議では、電力システムを巡る課題が複雑化する中で、分野横断的な議論の場の必要性について意見交換が行われた。

参加者からは、発電・送配電・需要・市場・情報通信・政策などの関係者が個別に議論するだけでは十分ではなく、相互に連携しながら議論する場が必要であるとの意見が示された。

また、近年では電力システムと交通・産業・情報通信・安全保障との関係も強くなっていることから、従来の電力分野の枠を超えた議論が求められるとの認識が示された。

さらに、異なる立場や専門分野の人々が共通認識を形成することが重要であり、そのためには共通のデータや分析結果を活用できる環境も必要になるとの指摘があった。

荻本氏は、本プロジェクト自体もそのような分野横断的議論の場として機能してきた面があるとの認識を示した。

継続的なあるべき姿の検討

討議では、将来の電力システムの「あるべき姿」を継続的に検討する仕組みの必要性についても議論が行われた。

参加者からは、技術進歩や社会環境の変化が速くなっているため、一度将来像を描けば終わりという考え方では対応できないとの意見が示された。

また、AI・再エネ・市場制度・国際情勢などは継続的に変化しており、それに応じて将来像や戦略も見直していく必要があるとの認識が共有された。

さらに、長期的な方向性を示しながらも、状況変化に応じて柔軟に修正できる仕組みが重要であるとの意見が出された。将来像そのものを固定的な計画として捉えるのではなく、継続的に更新されるものとして考える必要があるとの考え方が示された。

荻本氏は、これまでの会合で議論された技術・市場・政策の課題も、最終的にはそのような継続的な検討プロセスの中で位置付ける必要があるとの認識を示した。

統合的な計画、Integrated Resource Planning、アデカシー

討議では、将来の電力システムを考える際には、個別設備や個別制度の議論だけでなく、全体を見通した統合的な計画の必要性について議論が行われた。

参加者からは、電源、系統、需要側資源、市場制度などを個別に最適化するだけでは十分ではなく、それらを統合して考える枠組みが必要であるとの意見が示された。

その中で、Integrated Resource Planning（IRP）の考え方が紹介された。発電設備だけではなく、需要側資源・送配電設備・分散型資源なども含めて総合的に計画する考え方であり、将来の電力システムを考える上で参考になるとの認識が示された。

また、アデカシー（Adequacy）についても議論が行われた。単に設備容量を確保するだけではなく、需要変動や不確実性を考慮した上で、どの程度の供給力や柔軟性を確保するべきかを考える必要があるとの意見が出された。

さらに、再エネ大量導入や需要構造変化が進む中では、従来型の供給力評価だけでは不十分になる可能性があり、柔軟性・レジリエンス・需要側対応も含めた視点でアデカシーを考える必要があるとの認識が示された。

議論では、これまでの会合で扱われてきた需要・電源・送配電・DER・市場・解析などの論点を統合的に考える枠組みとして、IRP やアデカシーの考え方が重要になるとの意見が共有された。

データ・情報を共有し使える仕組み

討議では、統合的な計画や意思決定を支えるためには、データと情報を共有し活用できる仕組みが不可欠であるとの意見が示された。

参加者からは、必要なデータが存在していても、利用できない・アクセスできない・相互利用できない状態では、十分な分析や意思決定ができないとの指摘があった。

また、今後は発電設備や送配電設備だけでなく、DER・EV・蓄電池・需要家設備など、多様な主体がシステムへ参加するため、従来以上に情報共有の重要性が高まるとの認識が示された。

さらに、共通データ基盤・標準化・データガバナンスなどについても考える必要があるとの意見が出された。データを単に集めるだけではなく、誰がどのように利用するかという観点も重要であるとの認識が共有された。

議論では、第 8 回で扱われた解析技術、第 9 回で扱われた EIP、第 10 回で議論されている統合的意思決定を結び付ける基盤として、データ共有の仕組みが重要な位置付けを持つとの意見が示された。

荻本氏は、将来の電力システムではデータと情報が重要なインフラになる可能性があり、その活用方法も提言の重要な要素になるとの認識を示した。

今後の進め方・シンポジウム日程・閉会

今後の進め方

荻本氏より、本プロジェクトは第 10 回会合をもって定例会合としては一区切りとなり、今後はこれまでの議論を取りまとめる段階へ移行することが説明された。これまで各回で議論された内容を報告書として整理するとともに、後半シンポジウムにおいて広く議論を行う予定であることが示された。

また、これまで作成してきた発言録、取りまとめ表、推奨資料リストなどについても、必要に応じて修正や

追加を行いながら完成度を高めていく方針が説明された。参加者に対しては、内容確認や追加意見の提供が依頼された。

さらに、本プロジェクトの成果は単なる会合記録ではなく、将来の電力システムに関する提言形成へつなげていくことが重要であるとの認識が示された。これまでの技術的議論、市場・政策議論、横断的議論をどのように整理し提言へ結び付けるかが今後の課題であると述べられた。

シンポジウム日程

荻本氏より、後半シンポジウムの開催計画について説明が行われた。

シンポジウムでは、これまでの議論の整理・主要論点の共有・今後の方向性の議論を行う予定であることが説明された。

また、講演構成や討議の進め方についても説明が行われ、これまでの会合参加者だけでなく、より広い関係者との意見交換の場とすることが意図されていることが示された。

参加者からはシンポジウム構成や論点整理に関する意見が出され、今後必要に応じて調整していくことが確認された。

閉会

荻本氏は、本プロジェクトでは、需要・従来電源・再生可能エネルギー・パワーエレクトロニクス・送配電・運用・DER・ICT・解析・市場・政策など、多岐にわたるテーマについて議論を重ねてきたことを振り返った。

また、第 10 回ではそれらを横断的に整理し、Strategy / Driver、Integrity、Leadership/Intelligence の観点から統合的な議論を行ったことを確認した。

さらに、今後は報告書作成やシンポジウムを通じて成果を発信するとともに、将来の電力システムに関する提言へ結び付けていきたいとの考えを述べた。参加者への謝意を表するとともに、引き続き協力をお願いしたいとして閉会した。

後半シンポジウム要旨

2026 年 4 月 23 日（木）、東京大学 駒場リサーチキャンパス An 棟コンベンションホールにおいて、日本工学アカデミー（EAJ）プロジェクト「社会、産業、人々の生活の変容を支える電力システムの在り方」（略称：EAJ 電力プロジェクト）後半シンポジウム／ESI 第 26 回シンポジウムが開催された。本シンポジウムは対面とオンラインのハイブリッド形式で実施され、オンライン約 250 名、対面約 60 名の参加のもと、活発な議論が行われた。

開会挨拶

本シンポジウムは、EAJ 常務理事 林秀樹氏の司会により開始された。冒頭、EAJ 顧問 中村道治氏による開会挨拶が行われ、グリーントランスフォーメーションの実現に向けた未来世代への責任と、電力システムが社会・産業・国家安全保障を支える基盤であることが強調された。さらに、再生可能エネルギー導入の拡大、デジタル化の進展、地政学リスクの高まりを背景に、電力システムは歴史的転換点にあるとの認識が示され、レジリエンスと長期安定性を備えたシステム構築の重要性が指摘された。

続いて、プロジェクトリーダーである東京大学生産技術研究所特任教授 荻本和彦氏より、プロジェクトの進捗が報告された。すなわち、前半 1 年間に 5 回の討議会および中間シンポジウムを開催し、後半 1 年間に第 6 回から第 10 回までの討議会を重ねてきた経緯が示された。また、米国・イスラエル情勢の変化等を踏まえ、経済安全保障およびエネルギー安全保障の重要性が一層高まる中で、中長期的なアクションプランの策定を目指す方針が示された。

講演

第 6 回から第 10 回会合における後半フェーズの議論を踏まえ、システム運用、小売、需要機器、電力解析、市場制度の各分野について、「キー技術およびキーシステム技術」を軸に、具体的な実装の方向性が提示された。

システム運用分野（東京科学大学 河辺賢一氏）

同時市場の約定ロジックおよび次期中給システムを中核とする運用高度化の方向性が示された。需給バランス、調整力、送電容量など複数の制約条件を同時に満たす最適化計算の重要性が指摘され、Three-Part Offer に基づく統合的市場設計が中核技術として位置付けられた。また、2032 年度の本格運用を見据えた次期中給システムにおいては、広域的な需給調整や混雑管理の高度化、PMU 等を活用した状態推計および再エネ・需要予測の精緻化など、データ駆動型運用への転換が不可欠であるとの認識が示された。

小売分野（株式会社 Looop 渡邊裕美子氏）

電力自由化以降の市場環境の変化と今後の小売事業の方向性が示された。電力小売事業者は、従来の電力供給主体から、需要家のニーズに応じたエネルギーサービスプロバイダーへと役割転換が求められている。特にデマンドレスポンスを中核技術とし、価格連動型と機器制御型の組合せにより、需要の時間的・空間的最適化が可能となることが示された。

需要機器分野（大阪大学 山口容平氏）

カーボンニュートラル社会における電力需要構造の変化が提示された。2050 年に向けて電力需要は大きく増加する可能性があり、特にデータセンターや電動車の普及が主要因となることが示された。また、建築分野における省エネルギー規制やヒートポンプの普及など、需要側技術の進展が電力システム全体に与える影響についても言及された。

電力解析分野（横浜国立大学 辻隆男氏）

再生可能エネルギー大量導入下における解析技術の高度化が論じられた。不確実性の増大および解析対象の複雑化を背景として、実効値解析と瞬時値解析の連携の必要性が強調されたほか、機械学習の活用による計算効率と精度の両立の可能性が示された。一方で、計算負荷やモデル信頼性といった課題も併せて指摘された。

市場制度分野（東京理科大学 山口順之氏）

電力市場の高度化に向けた制度設計の方向性が提示された。情報公開の促進による競争環境整備、市場監視の効率化、DER の市場参加拡大に加え、長期投資を支えるリスク評価および取引メカニズムの構築の必要性が強調された。特に、短期市場と長期投資の間に存在する構造的ギャップへの対応が重要

な政策課題として提示された。

これらの講演を通じて、同時市場、デマンドレスポンス、分散型システム、データ基盤といった統合的システム像が多角的に提示され、電力システム移行に向けた実行設計に関する議論が深化した。特に、技術・制度・運用・需要が相互に連関する構造が明確化され、個別最適ではなく全体最適を志向する統合的アプローチの必要性が共有された。

パネルディスカッション 1 電力システム変革のキー技術、キーシステム技術

後半のパネルディスカッションでは、まず「電力システム変革のキー技術、キーシステム技術」をテーマとする議論が、公益財団法人東電記念財団 常務理事 蘆立修一氏および荻本和彦氏をモデレータとして行われた。パネリストには石井英雄氏、井上俊雄氏、小宮山涼一氏、戸田直樹氏、山本敏之氏が参加し、実務・制度・技術の観点から議論が展開された。

議論では、人材育成およびコミュニケーション基盤の重要性、系統モデルやデータ公開による知識共有の必要性が指摘された。また、再エネ主力化に伴う系統安定性の課題として、インバータ電源への対応や新たな評価指標の必要性が示された。加えて、制度面では中長期市場の不備やテナーギャップの問題が共有され、制度設計の見直しの必要性が確認された。

パネルディスカッション 2

続く「電力システム変革の取り組みの方向性」に関するパネルディスカッションでは、福島国際研究教育機構（F-REI）理事 江村克己氏および荻本和彦氏がモデレータを務め、杉山昌広氏、藤井康正氏、奈良宏一氏、岩船由美子氏、岡本浩氏、浅野浩志氏が参加した。

本パネルでは、需要側リソース活用に向けたデータ基盤整備、分散市場や地点別価格の導入、配電系統の役割強化など、実装段階における課題と対応策が具体的に議論された。また、電力とデジタルの融合や新たな産業モデルの可能性についても議論が展開され、人材育成や政策分析能力の強化の必要性が強調された。

閉会

東京大学生産技術研究所教授 岩船由美子氏により、供給側から需要側に至るまでの統合的議論の重要性が確認されるとともに、3E+S の実現に向けた継続的取組の必要性が強調された。

アンケートと総括

シンポジウム後のアンケートでは、「本音の議論が有益であった」「制度やデータ解析など幅広い知見を得られた」といった評価が寄せられた一方、「質疑時間の充実」を求める意見もあり、今後の運営改善の課題として共有された。

今後は、本シンポジウムの成果を踏まえ、「社会、産業、人々の生活の変容を支える電力システムの在り方」について検討を深化させ、統合的な政策提言として取りまとめていく予定である。

プログラム

12:50 開場
（開会挨拶）
13:20 – 13:30
開会挨拶 1　　JST 名誉理事長、EAJ 顧問　　中村道治
開会挨拶 2　　「新たな電力システムへの提言に向けて」
プロジェクトリーダー、東京大学生産研 特任教授　　荻本和彦
（講演）
13:30～13:50 システム運用分野のキー技術とキーシステム技術
東京科学大学 工学院 准教授　　河辺賢一
13:50～14:10 小売り分野のキー技術とキーシステム技術
株式会社 Looop 戦略本部 GX 推進部 部長　　渡邊裕美子
14:10～14:30 需要機器分野のキー技術とキーシステム技術
大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻 准教授　　山口容平
14:30～14:50 電力解析分野のキー技術とキーシステム技術
横浜国立大学 数物・電子情報系 理工学専攻 教授　　辻 隆男
14:50～15:10 電力市場分野のキー技術とキーシステム技術
東京理科大学 工学部 電気工学科 教授　　山口順之

15:10～15:20　(休 憩)
(パネルディスカッション)
15:20～16:20 パネルディスカッション 1「電力システム変革のキー技術、キーシステム技術」
パネリスト　早稲田大学 スマート社会技術融合研究機構上級研究員(研究院教授)　石井英雄
富山大学工学部北陸電力共研講座 客員教授　井上俊雄
東京大学 大学院工学系研究科 教授　小宮山涼一
東京電力ホールディングス株式会社 経営技術戦略研究所 経営戦略調査室 チーフエコノミスト　戸田直樹
関西電力送配電株式会社 企画部長　山本敏之
モデレータ 公益財団法人東電記念財団 常務理事　蘆立修一
東京大学生産技術研究所 特任教授　荻本和彦

16:20～17:20 パネルディスカッション 2「電力システム変革の取り組みの方向性」
パネリスト 東京大学 未来ビジョン研究センター 教授　杉山昌広
東京大学 工学系研究科 教授　藤井康正
茨城大学名誉教授、福島工業高等専門学校 名誉教授(元校長)　奈良宏一
東京大学生産技術研究所 教授　岩船由美子
東京電力ホールディングス 上席フェロー　岡本 浩
岐阜大学 地方創生エネルギーシステム研究センター 特任教授　浅野浩志
モデレータ 福島国際研究教育機構(F-REI) 理事　江村克己
東京大学生産技術研究所 特任教授　荻本和彦
17:30 閉会挨拶　東京大学 生産技術研究所 教授　岩船由美子

提言シンポジウム要旨

全体要約

提言シンポジウムでは、2030 年から 2050 年を見据えた新たな電力・エネルギーシステムへの段階的移行に向け、約 2 年半にわたるプロジェクトの検討成果と 6 つの提言案が示され、電力分野の専門家と他分野の有識者による討論が行われた。荻本氏は、個別技術の不足だけでなく「統合設計」が重要であり、変化する社会の中で不断に学び、検証し、改善・刷新する仕組みが必要であると説明した。報告書では、電力・エネルギーをめぐる構造変化、技術・システム技術、制度、意思決定・データ・ガバナンスを整理し、S-I-L-K（Strategy、Integrity、Leadership、Knowledge）を統合設計の枠組みとして提示した。6 つの提言は中長期のアクションプランとして位置付けられ、提言 1～3 を社会・電力・エネルギーシステムをより良くする環、提言 4～6 を人材と知識基盤を育て意思決定につなぐ環として実装する考えが示された。

開会挨拶で中村氏は、再生可能エネルギーの本格導入、原子力発電の復旧、自然災害への強靭性、経済安全保障などを踏まえ、2030 年から 2050 年を見据えた電力システムの展望を明らかにする重要性を述べた。また、議論が個別技術や制度にとどまらず、社会システムとしてどのように統合して運用するか、へ深まってきたとし、知識基盤の整備、それを共有・活用する人材の継続的育成、社会が知識を形成・共有・更新しながら未来を設計する仕組みの重要性を指摘した。政府、産業界、研究機関、学協会等が一体となって検討する場の必要性にも言及した。

提言 1 について馬場氏は、多数の分散型資源が電力システム運用に能動的に参加し、多様な特性を生かして集中型資源と協調する需給構造への移行を説明した。DER のみで大規模システムを構築することにはコストや停電リスクの課題があり、集中型資源と分散型資源の双方の利点を生かす必要があると述べた。DER の複雑な挙動に対応するためのデータ収集、PMU 等による観測、実効値・瞬時値解析を含むシミュレーション基盤、需要側を含むグリッドコード、ステークホルダー間の共通理解と対話、全体を統合的にデザインする体制の重要性を指摘した。

提言 2 について戸田氏は、「発電部門は競争領域のままでよいか」との問題提起から、安定供給には一定の冗長性と着実な投資が必要である一方、自由化後の競争モデルでは発電投資の確保が世界的な課題となっていると説明した。地域独占時代には投資リスクを社会全体で負担していたのに対し、競争環境では投資回収の予見性が低下し、過少投資を招き得ると述べた。市場と長期契約等を組み合わせるハイブリッドな仕組みや、発電部門を公共財的に捉える視点を示し、制度を技術や社会目的の変化に応じて見直す必要性を論じた。

提言 3 について小宮山氏は、「電力×〇〇」により電化が進み電力の社会的重要性が高まる中、供給力、調整力に加え、慣性力や同期化力などの価値をどのように考え、市場を更新するかが課題になると述べた。ホルムズ海峡危機を例に、輸入燃料依存のリスク低減、エネルギー自給率向上、安全保障強化の観点から電化と脱炭素電源導入を統合的に進める重要性を指摘した。一方、石油代替等まで電化を進める場合には非常に大きな電力量が必要となる試算を示し、電力供給力とフレキシビリティの安定確保が不可欠であると述べた。

提言 4 について杉山氏は、多様なステークホルダーが参加する継続的な議論の場、指標体系、EIPM（エビデンスを踏まえた意思決定）、長期的な見直しの必要性を取り上げた。エビデンスには質の違いがあり、生成・利用・統合には「能力」が必要であると説明した。日本では分野横断的研究や国際的な交流をさらに進める余地があるとし、国際社会で議論することが能力向上につながるとの考えを示した。また、組織上のリーダーだけでなく、専門的能力を備えたリーダーシップの重要性を述べ、シングルループ、ダブルループ、トリプルループ学習を例に、やり方だけでなく前提・ルール、さらに目的・価値観を問い直す視点を紹介した。

提言 5 について山本氏は、電源・需要・同期機から非同期機への変化、災害・気象、AI・デジタル、設備高経年化、人口減少等を踏まえ、電気工学・電力工学を核としつつ人材に求められる質も変化すると述べた。多様なプレイヤーが制度・市場の中で行動する現在は統合設計の難度が高まっており、専門性を深く極める人材、複数分野を理解して複眼的に問題を解決する人材、異なる主体をつなぐ人材をバランスよく育成する必要があると説明した。「未来をつくる人材」だけでなく「今を支える人材」の確保、熟練者の暗黙知のデータ化・言語化、AI・デジタルによる人の力の拡張、産学や異分野の人々が学び対話する場の重要性を指摘した。

提言 6 について芳澤氏は、知識基盤を二つの環を駆動し、より良い意思決定を支える基盤と捉え、単なるデータ蓄積ではないと説明した。データ、モデル・ツール、計算環境や共有モデル等を基礎として、観測、

解析、評価、前提条件や不確実性を踏まえた解釈、知識共有、意思決定、実装を循環させ、実装後の変化を再び観測して知識を更新する「知識学習循環モデル」を示した。新しい問いに応じてデータ、モデル、解析対象を拡張すること、データ品質、適用条件、不確実性、バージョン管理、知識の陳腐化への対応、成功・失敗・想定外事例や未解決課題を記録し、新しい問いにつなげることが知識基盤の継続的進化に必要であると述べた。

パネルディスカッション1「変革のポテンシャルを探る―電力の視点―」では、実行力のあるロードマップへの発展を念頭に、データ活用、事業領域の拡張、人材育成等が議論された。岩船氏は英国・デンマークの例を挙げ、配電系統データやスマートメーターデータを利用可能にする制度と、非公開側に説明責任を求める「公開をデフォルト」とする考えを紹介した。石井氏は、国のプロジェクトでデータ公開・活用を要件化すること、DER 台帳整備、ステークホルダーが情報を共有する場の重要性を述べた。紺谷氏は、風力事業における GIS、シミュレーション、AI 等の活用を紹介し、不確実性把握、説明可能性、個別評価から統合評価への展開を課題として挙げた。

渡邊氏は S-I-L-K の枠組みから電力小売事業者の役割を捉え、需要家との接点を生かしたダイナミックプライシング、需要側リソースの応答、データの社会還元、交通等のデータとの統合利用の可能性を述べた。井上氏は電力系統解析人材について、電力系統工学とデータサイエンス・AI・統計・プログラミングの学習、解析ツールを用いた事故現象の再現と対策立案、解析者・開発者・政策提言へつながる育成循環を示した。浅野氏は、国際エネルギー秩序や経済安全保障と政策を結びつけ、電力だけでなく情報通信、熱、水、資源循環等を含む「5 グリッド」の融合と、それを支えるガバナンス再設計の必要性を述べた。岡本氏は、エネルギー供給側と利用側の「共進化」を重視し、モビリティの電化・フィジカル AI 等とエネルギー側を結びつけてフレキシビリティを引き出す必要性を指摘した。

討論では、データを利用可能にする制度、PMU 等の実系統データの活用、需要側データ、事業性評価、人材育成、AI の信頼性・透明性・説明可能性が取り上げられた。また、ワット・ビット連携について、電力と通信を別々に扱わず協調させる考え、省庁横断・官民連携で進める意義が示された。合原氏からは、生体の血管・神経だけでなく内分泌・免疫等を含む複数ネットワークのアナロジーから、さらに広いシステム間連携を考える視点が示された。

パネルディスカッション2「変革のポテンシャルを探る―電力×〇〇の視点」では、電力分野外の有識者を交え、異分野との接続によってどのような新しい価値を生み出すかが議論された。江村氏は、「×」そのものではなく、そこからどのような価値を創造するかが重要であると問題提起した。合原氏は電力システムを複雑系として捉え、電力と通信など相互依存するネットワークでは連鎖障害の「影」も生じ得ること、複数ネットワークを統合して考える必要性を述べた。安東氏は電力とモビリティを統合インフラとして捉え、EV、再エネ、水素・e-Fuel 等のマルチエネルギーキャリア、交通安全や人の生体状態を含めた最適化の研究を紹介した。

須藤氏は SIP、ムーンショット、NEDO 等の国の研究開発事業を俯瞰し、エネルギー・電力関連や「電力×〇〇」に踏み込んだプロジェクトはまだ限られるとの認識を示した。高野氏はワット・ビット連携と MESH 構想を紹介し、再エネ出力制御時の余剰電力を計算資源に利用するワークロードシフト、データセンター立地と系統余力、分散データセンター等の取り組みを説明した。AI 向けデータセンターの電力需要増大を踏まえ、電力とデジタルの関係がさらに変化する可能性を指摘した。

討論では、電力×〇〇を個別の掛け合わせにとどめず、複数のネットワークとして捉えること、少数の観測データから高次元の状態を捉える数理的アプローチ、ネットワーク効果や閾値を含む社会実装の数理、企業・アカデミア・国の役割分担などが議論された。須藤氏は、提言を実装につなげるには、受け手となるキーパーソンを見極め、提言作成段階から対話し巻き込むことが一つの方法であると述べた。荻本氏は、様々な技術やアイデアを持つ人が活用できるよう、まずデータを使えるようにすることの重要性を強調した。

ワット・ビット連携について高野氏は、電源近傍にデータセンターを置き光ファイバーで結ぶことには社会全体として便益があり得る一方、通信、データセンター、電力等の各主体の利害を調整する課題があると述べた。会場からは、再エネ拡大に対応した全国の電力ネットワーク、蓄電池・調整力、市場と同時同量等について問題提起があり、荻本氏は需要調整、蓄電池、出力抑制等を組み合わせて答えをつくる必要があると述べた。江村氏は、電力市場の範囲だけでなく、日本のエネルギー自給等を含め、課題設定をどこに置くかが重要であると指摘した。

終盤では、高野氏が通信サービスと上位サービスの関係を例に、電力を含むサービスの価値設計や、電気を熱・水素・デジタル価値等へ変換する視点に言及した。須藤氏は、電力自体を大きなシステムとして捉え、センシングやセキュリティ等も含むシステム的な考え方の必要性を述べた。安東氏は電力市場とモビ

リティ市場を同時に扱うモデルを紹介し、掛け合わせる対象を増やすことで新たな解が見える可能性を示した。合原氏は公開データによって電力システムの新しい数理的特徴を分析できる例を示し、データ収集・公開の重要性を述べた。荻本氏は、日本が世界とつながる中で豊かな生活を維持するためにも、ルールを整えつつ多くの人がデータを活用できる方向へ進むことに価値があるとの考えを示した。

閉会挨拶で横山氏は、2030 年から 2050 年に向けた次世代電力システムのトランジションについて約 2 年半議論を重ね、報告書取りまとめの段階に至ったことを振り返った。より良い社会システムに向け、電力技術、「電力×〇〇」の技術、制度、人材育成、情報基盤をいかに統合するかという統合設計を大きな柱として提言する考えを述べた。また、多数のステークホルダーと多様なリーダーシップが集まり議論できる場への期待を示し、本シンポジウムで得られた気づきを報告書に反映してブラッシュアップしたいと述べた。

【プログラム】

12:50 開場
(開会挨拶)
13:00 - 13:10
開会挨拶 1　プロジェクトリーダー、東京大学生産研 特任教授　荻本和彦
開会挨拶 2　JST 名誉理事長、EAJ 顧問　中村道治
(講演)
13:10～13:40 「プロジェクトの実施と提言」
プロジェクトリーダー、東京大学生産技術研究所 特任教授　荻本和彦
13:40～13:55 提言 1（集中/分散の協調）に関する議論
東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授　馬場旬平
13:55～14:10 提言 2（制度）に関する議論
東京電力 HD㈱ 経営技術戦略研究所経営戦略調査室チーフエコノミスト　戸田直樹
14:10～14:25 提言 3（電力×〇〇と指標体系）に関する議論
東京大学 大学院工学系研究科 教授　小宮山涼一
14:25～14:40 提言 4（意思決定）に関する議論
東京大学 未来ビジョン研究センター 教授　杉山昌広
14:40～14:55 提言 5（人材育成）に関する議論
関西電力㈱ イノベーション推進本部 副本部長　山本敏之
14:55～15:10 提言 6（知識基盤）に関する議論
大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻 准教授　芳澤信哉
15:10～15:20 （休 憩）
(パネルディスカッション)
15:20～16:20 パネルディスカッション 1「変革のポテンシャルを探る-電力の視点-」
パネリスト　東京大学生産技術研究所 教授　岩船由美子
早稲田大学 スマート社会技術融合研究機構 上級研究員(研究院教授)　石井英雄
㈱日立パワーソリューションズ 技師　紺谷怜央
㈱Looop 戦略本部 GX 推進部 部長　渡邊裕美子
富山大学 工学部 北陸電力共研講座 客員教授　井上俊雄
岐阜大学 地方創生エネルギーシステム研究センター 特任教授　浅野浩志
東電 HD㈱ 上席フェロー、東大 GX 戦略推進センター客員教授　岡本浩(オンライン)
モデレータ 公益財団法人東電記念財団 常務理事　蘆立修一
東京大学生産技術研究所 特任教授　荻本和彦
16:20～16:30 （休 憩）
16:30～17:30 パネルディスカッション 2「変革のポテンシャルを探る-電力×〇〇の視点」
パネリスト 東京大学 特別教授　合原一幸
東北大学 材料科学高等研究所 教授　安東弘泰
日本工学会会長、元東芝 副社長　須藤亮
㈱ビットメディア 代表取締役社長/(株)MESH-X 代表取締役　高野雅晴
東京大学生産技術研究所 特任教授　荻本和彦
モデレータ 福島国際研究教育機構(F-REI) 理事　江村克己

17:30　閉会挨拶　東京大学　名誉教授（プロジェクト顧問）　　横山明彦
17:40～19:30　意見交換会　An 棟 1 階レストラン「ape アーペ」

留意ポイント

1. 電力・エネルギーをめぐる構造変化
- 電化とエネルギー安全保障・自給率
- 電力×モビリティ、情報通信、熱、水、資源循環
- 供給側と利用側の共進化

2. 技術・システム技術
- DER の能動的な系統運用参加
- 集中型資源と分散型資源の協調
- PMU 等によるデータ収集
- 実効値解析・瞬時値解析とシミュレーション基盤
- 需要側を含むグリッドコード
- 電力供給力・フレキシビリティ
- ワット・ビット連携

3. 制度・市場
- 発電投資の予見性と過少投資
- 競争市場と長期投資の整合
- ハイブリッド市場
- 発電部門の公共財的性格
- 制度目的の変化と制度見直し

4. 意思決定・データ・ガバナンス
- 多様なステークホルダーによる継続的議論の場
- EIPM とエビデンスの質
- エビデンスの生成・利用・統合能力
- 公開をデフォルトとするデータ利用環境
- PMU・スマートメーター・DER 等のデータ活用
- AI の信頼性・透明性・説明可能性
- 政策・規制・公益運用を含むガバナンス再設計
- 単なるデータ蓄積ではなく意思決定を支える基盤
- 観測→解析→評価→解釈→知識共有→意思決定→実装→再観測
- 新しい問いに応じたデータ・モデル・解析対象の拡張
- 品質、適用条件、不確実性、バージョン管理
- 成功・失敗・想定外事例と未解決課題の蓄積
- 継続的な知識更新と新しい問いの形成
- データを使える環境づくり

5. 統合設計
- 問題の本質としての統合設計
- 不断に学び、検証し、改善・刷新する仕組み
- S-I-L-K（Strategy、Integrity、Leadership、Knowledge）
- 提言 1～3 の社会・インフラ側の環と、提言 4～6 の意思決定能力側の環
- 中長期アクションプランとしての 6 提言
- ステークホルダー間の対話とグランドデザイン
- 5 グリッド融合
- 複数ネットワークと創発・相互依存リスク
- 実行力あるロードマップへの展開
- 企業・アカデミア・国の役割分担
- 提言の受け手を意識した早期からの対話

- 多数のステークホルダーと多様なリーダーシップが議論する場
- シンポジウムの議論を報告書へ反映し継続的に改善

6. 人材育成

- 専門性を深める人材
- 複数分野を理解し複眼的に問題を解く人材
- 異なる主体をつなぐ人材
- 「未来をつくる人材」と「今を支える人材」
- 電力工学とデータサイエンス・AI・統計・プログラミング
- 解析ツールを用いた実践教育
- 産学・国際・異分野間の学びと対話の場

参考 4 発言録

第 1 回会合

講演 1 電源（北海道大学・原）

第 6 次エネ基・需給見通し R3 での同期機電源

2 点目のところでは、同期電源周りが、今、第 6 次のエネルギー基本計画や官民投資等でどのように考えられているかの振り返りの意味でまとめたものです。いわゆる火力の電源につきましては、脱炭素を目指すという流れが、化石電源の比率を引き下げていくところが見据えられておりまして、また、燃料の脱炭化も述べられておりまして、水素やアンモニアという非化石由来の燃料への転換、この発電電力量の 1%程度を目指すというようなことが掲げられております。

一方で、従来型の化石燃料も全てなくす考え方もありますが、エネルギー安全保障の観点から石炭を中心に積極的に維持することが計画されています。

ということで、おおよその比としましては、NG が 20%、石炭が 29%、石油は最小限に抑えるものの 2%程度を目指しております。

ということで、すぐ火力発電がなくなるわけではありませんし、非化石化への転換も含めて、火力発電も少なからず使っていくことが目指されております。

一方で、水力発電につきましては、いわゆる大規模な水系につきましては、なかなか新規の開発の適地がない難しさがあり、容量としては大きな増減というのはないとされていますが、一方で、設備の老朽化等が進んできており、それらをどう更新あるいは維持するかが重要になると思っております。

中小水力につきましては、若干増は見込まれていますが、シェアとしては大きなものではない状況と思います。

揚水発電につきましては、新規開発は難しいと思っており、老朽化設備をどう維持していくかということと、あとは、次の話題提供で出ると思いますが、蓄電池を今後活用する流れもありますので、それらと、揚水発電の棲み分けあるいは機能分化も検討していく必要があると思っております。

原子力につきましては、安全性最優先のもと、2 割程度の比率に増加するとされています。

これが、一応振り返り、ということになります。

同期機電源に求められる役割

同期機電源に電力系統側から求められる役割は、安定した供給力を担保することです。

自然変動型の再エネが中心になると、出力の制御性が低下しますが、同期機電源では、キロワットの意味で一定の供給力を担保することができます。また、後に出てきます調整力の増化も必要です。この安定した供給力を維持するという役割が、同期機電源では今後増々必要になると思います。

あとは、燃料の備蓄が可能であるということで、ある意味、長期的な kWh を確保することになると思います。

これは、長い時間での供給力確保という観点もありますし、当然、国内での燃料措置は、難しくて、海外から輸入に頼っているというところは、燃料費の安定化ということも、早期に抑えていくということで書かれるのではないかと、期待しております。

調整力

需給の調整のために、出力を上げて、押していかないといけないということですが、同期機の場合には比較的制御性があり容易にできる、しかも、アベントを下げる、そういう方法が、できるということで、この後、岩船先生からは、需要では。下げはやりやすいけれど、上げは難しいとの説明があるかと思っています。同期機の調整力の場合、双方向に動くことは大きなメリットであると思っていいます。当然、特に上げの方はいろいろ配慮しなければいけない部分が、ありますが、それは課題としてのちのスライドで説明します。

あと調整力に関連して、そもそも電源として設備が用意されていて、それ自身が備えている能力であり、少ない追加費用で調整力を確保できる点が、大きなメリットと考えます。供給力として確保した電源がそのまま調整力として使えることが強みとしてあると思っております。

ストレングス

ストレングスは、2 つの意味で書きました。

1 つは、同期機の場合は回転体で、回転慣性の形でエネルギーを蓄えており、系統内に生じた急峻な

需給の変動に対して同期化力を通して慣性を使うことで周波数の安定化が図られます。
もう 1 つは、電圧維持能力、無効電力の調整も可能であり、系統電圧の安定性の維持という意味でも、重要な役割があるということです。
今回は、これらの特徴や優位点を形成的に並べているだけにとどまっていますが、これらの優位点を定量的に示して、ベストミックスの議論で考慮することが重要であると思っています。

火力電源の稼働率低下

単純なエネルギーのベストミックスの観点で、基本的な議論がなく、電源の要否が、決まってしまうことはまずいと思っています。基礎的な特徴を考慮してベストミックスの検討をすることが重要です。
ということで、こちらの、私が作った、スライドではなくて、下に書いてありますとおり、電学（電ガス？）基本政策小委員会で、使われていた資料から、そのまま、確認していただく、ようになっております。
火力の電源の稼働率の変化を表したスライドで、デュレーションカーブでは横軸が年間の日数で、縦軸は発電量です。赤の線は 2022 年、黄色の線は 2016 年ということで、デュレーションカーブが下がったわけですが、特徴としては左端の高さはほとんど変わっていない点です。ということで、在来容量として使う容量は変わらない。一方で、稼動率は下がることが示されています。
次のページも、同じ委員会からの資料です。横軸は年縦軸が燃料ごとの稼動率を表しており、燃料単価の変化に伴い若干の変化はありますが、全体的な状況としては全体的に右下がりのトレンドがあり、火力の発電電力量が再生可能エネルギーの導入量増加等により下がっていることを示しています。

火力の稼働率低下への対応

火力の稼動率低下に対応としてここでは二つの観点で書いています。一つは並列台数あるいは運転台数の減少です。動いていない電源も設備として固定費はかかるわけで、それが動かないということは発電収入がいくかあっても固定費分の回収がさらに難しくなり、また需給の状況に合わせて起動・停止の回数が今後増えると起動停止にかかる発電に直接関係しないコストが増加し、の発電設備としての採算性が低下します。資料では起動停止のコストと書いていますが、デジタルのコスト、頻繁な起動・停止による設備への負担増に対するメンテナンス費用増というものも考慮する必要があります。
2 つ目は、先ほど電源に求められる役割というところで述べたストレングスについてこれを提供する地点・設備数が減りまばらになるのでそのような状況で供給の安定性が維持できるのかという点で、注意が必要と思っております。IBR（Inverter Based Resources、インバータ連係リソース）との連系も必要であるということで、我々もこの視点の NED プロによる実証事業に参加しています。ストレングスが必要であり、それがうまく供給されてきたにもかかわらず、それをうまく市場メカニズムへの組み込みができると電源としてのストレングスとしての価値を強化する市場についても議論はされているようです。後日の話題に出てきますが制度面の検討に関連するかもしれません。
あとは運転台数を必要に応じて細かく維持するためには迅速な軌道停止を可能にする最小運転時間や最小停止時間などを緩和する技術開発が必要であると思っています。

部分負荷運転

稼働率低下においては、運転台数の低下減に加え動いている電源の出力レベルを下げるいわゆる部分負荷運転の機会が増えると思っています。そのためにはまず電源が運転できる範囲、出力の範囲を拡大すること、具体的には最低出力を引き下げて幅広い範囲で運転できるようにすることが重要です。右下の漫画絵は、横軸が電源出力、縦軸が燃料費です。実際にはこのようになだらかではないと思いますが、下に凸で右上がりのカーブになります。カーブ上の各運転点に対して原点から引いた線（図では点線）の傾きがいわゆる燃費です。円/kWh は平均燃料費で、低出力では傾きが即ち燃費大きく効率よりも悪いということになります。高出力になるにつれて傾きが低下してエネルギー効率が改善し効率が上がることになります。部分負荷運転によって傾きは定格時より上がり発電効率が低下する。これはエネルギーの効率という意味でもまたコストという意味で、効率的ではないことになります。
一方で部分負荷運転は、次のスライドに示すように、調整力の観点から必要になるため、技術開発の方向性としては、部分負荷運転でも効率が下がらない設計求められますが、この辺は私の知識がないところですので参加のご専門の方々からご意見いただきたいと思っています。災害効率。
話がちょっと変わりますが、太陽光発電の PCS（Power Conditioning System、インバータ）の開発では定格より少し低いところで効率が高くなる設計も議論され、開発もされているということを聞いています。同期電源においても重要になる可能性があるのではないかということで、それぞれについてお伺いします。

あとはこのスライドの調整力の話をまとめました。上げ調整力につきましては定格で運転しているとそれ以上の出力増はできないため、部分負荷運転が前提になると思いますが、前のスライドでご説明したとおり、稼働率の低下がコスト的に耐えられるかと、発電効率の低下が出てくるためそれを回避するような技術開発の可能性について書きました。下げの方は、どこまで下げられるかが問題であり、これは前のほうで出てきた話とリンクして、最低出力をいかに引き下げるかという方向の技術開発というのが重要だろうかと思います。またエネルギー台数が少なくなってしまった場合に調整力をある程度確保するためには一台あたりの能力の向上も必要になります。エネルギー応答の高速化というのも書いてありますが、迅速な出力の調整をさらに急速にできることが必要になり、できない部分は蓄電逆等でカバーすることになるのかもしれません。しかし電源側で対応できるのであれば、その方向性に基づく設備も必要であると考えています。

長期的な対応の必要性

電源設備は設置のリードタイルと設備の寿命も 30 年 40 年とともに長く、短期的な視点ではなくてやはり長期的な視点でかつ合理的な対応を取ることが政策的に必要だと思っていまして、もしくは燃料の非化石化が今後検討される中ではそれに合わせて単純に燃料を変える話ではなく、それとセットになる形で災害効率性の最適化、スチルコートの改善、運転範囲に引き下げなどの対策をセットで実施することが必要であり、それをやらないと何度も対策の更新が必要となり、いわゆる全体最適な方向には行きづらくなり、長期的な視点で対応することが必要ということで、最後まとめの形でお伝えしました。電源周りで気のつくところを解説しました。

（荻本 PL（以下 PL））

はいありがとうございました。簡単ではなくてちなみに本格的なご実験でのご説明いただいたと思いますどうもありがとうございました。

それでは続きまして岩船先生お願いします。

講演 2 需要（東京大学・岩船）

今後必要になるエネルギーマネジメント

最初に、需要としては、今後はエネルギーマネジメントが必要と思っております。供給側そして需要側とも管理していく必要がある。需要には非電力分と電力分があり、本日の話題は電力なので電力の需要がメインです。電力需要のマネジメントといった場合には、需要自体の立地誘導、最近話題のデータセンター・半導体構造など、需要をどこに誘導するか。そしてデマンドレスポンス。デマンドレスポンスも空間的なシフトや時間的なシフト、時間的なシフトには短期 1 日とかの時給バランス確保のためとか系統混雑回避のための短期の調整と長期の調整があります。再エネがどれだけたくさん入ったとしても、無風期間とか 1 週間とかお天気が悪いことかあり得るので、そういうときにどういう調整をするか、さらには季節間の調整もあります。空間のシフトという意味では、需要を別の場所に移す問題があると思います。あと、需要のマネジメントと直接には言えないのですけども、電化も今後重要な要素になってくる。電化すれば調整可能な需要も増えることになりますのでこれも重要な観点だと思っています。デマンドレスポンスに含まれるかもしれないですが、最近増えている系統用蓄電池を活用も重要と思っております。

調整力の確保に向けたデマンドレスポンス

さっきの長期・短期の話です。短期は基本的には ΔkW と ΔkWh の調整が主で、長期は基本的には ΔkWh の調整になると思います。短期の調整手段は蓄電池、私も研究していますが低圧リソースの EV が 1000 万台で一台 3kW として 30GW の電池に相当し、ヒートポンプ給湯機が 1000 万台で 10GW の需要調整が可能です。さらには空調など他の国、アメリカなどではありますが、日本はそこまで年中冷暖房をしていないので、これらはどのくらい使えるかという話はあります。あとは産業用の需要の調整によるデマンドレスポンスは大きいと思いますが、今後自家発がどういう形で残るか、自家発をやめて系統への供給事業をやるという話題も最近あります。電気は Δ1kWh ということで今は水素に期待していると思いますが、水素は自由度が高いと同時にコストも高く、水電解の装置のコストの低下、一定の稼働率確保する必要があります。かつ水素を作った後の利用方法として発電はありますが、効率の悪さを考えると適正な熱利用に使うことが重要と思います。あと水素は非常に軽いため、運び方も重要な視点になると思います。

需要側リソースの活用に向けて

以下は基本的には短期の電力の需要リソースという位置づけで設明していきます。今需要側リソースで

あるデマンドレスポンスへの注目度が高いわけです。大規模なデマンドレスポンスは、従来の延長で下げDR が必要で、これは既に容量市場に入っています。ここに低圧の小規模 DR が入るかが一つのポイントと思います。これらは一つ一つ小さいので提供するのは大変ですが、最初に言ったようにこれから台数が増えるとなるとかなりのポテンシャルになります。これらの活用には、需要家サイトの機器であるためきちんとした価値の評価とそのためのツールも必要です。需要家の効用を維持した制御価値の顕在化には、需要の構造を把握し可制御需要の制御価値を定量化し、制御に要する費用と比較する必要があると思います。PV、エコキュート、蓄電池などが今考えている低圧の DR リソースです。

需要家・アグリゲータにおける DR 価値

ここでは、低圧リソースのデマンドレスポンスの価値を整理しました。需要家においては小売り料金がある程度変動的であれば電気料金の削減に貢献する。PV とセットであれば PV 電力の自家消費拡大で環境価値も得られる。蓄電池の機能があればレジリデンス強化になり、それらのリソースをアグリケータに提供して対価も獲得できると考えられます。

小売事業者のメリットは裁定取引によるスポット市場からの調達費を削減、時間前市場取引による利益追加、インバランス調整による負担軽減、調整力提供による利益追加、2024 年から始まった容量負担金の軽減にもピーク時にしっかり利用しリソースを減らせればこのままのメリットになると思います。小売事業者・アグリケータにとってはメリットといろいろなものがあると考えられます。

系統側にとっては、実需給上の制約緩和でクリーンかつ安価な系統調整力の確保ができ、容量価値にもなり、上げ DR によって再エネ抑制量も低減する可能性がある。あと、ネットワーク側の制約緩和ということで、系統制約を受けるエリアにおいて潮流の改善効果、系統増強回避の効果が考えられる。

日本の低圧リソース活用を取り巻く背景

低圧リソースに関する最近の動きを整理したのがこちらです。需給調整市場は 2021 年に再エネの予測誤差に対応する三次調整力②からスタートし、三次調整力①が加わり、この 4 月からより速い調整力の取引も始まりました。ただ、今の制度上の制約として、低圧のリソースは需給調整市場に参加できない、EV 充電などの機器の個別計量が需給調整市場に適用できない制約があります。

インバランス制度はだいぶ前の変更で調整力に連動したインバランス価格へ変更され、この価格を参照してリソースを使うことも考えられる。

あと、スポット市場価格のボラティリティ増加、これはちょっと前の話で、最近、価格はかなり安定していますが、今後もいろんな形で発生する可能性はあり、低圧リソースを使う理由になると思います。需要側のリソースなので最も価値が高いのは、託送料金・燃料費・小売事業者の手間賃などが含まれ最もコストが高い需要家端が一番価値を出しやすくなります。そこで PV とセットで、特に電池があると、料金に時間別に差があることになると、自家消費を最大化が需要家にとって一番いい対応になると思います。低圧リソースの活用方法としては料金型とインセンティブ型があります。料金型の方が小さいリソースなのでそこは時間で制御してもらうことになり、やりやすい方向ではありますが、アグリゲータが遠隔での制御の確度も下がりマネタイズできないという問題があり、やりやすくカスタマイズしやすい方式です。もう一つのより確実なインセンティブ型アグリゲーションでは、遠隔制御する方式で、需給調整市場まで考えると必要になる方式です。

低圧リソースの活用に向けて

低圧リソースの活用に向けて今、電力市場への参加は認められていませんが経産省の「次世代分散型電力システムに関する検討会」においてルールが検討中で、2026 年度から低圧リソースの活用が認められる方向になっています。そこでは、これまで大規模 DR を前提としていた DR のルールである需要家リストとかパターンを全需要家に対して出すのに対し、たくさんの小さいリソースを集める場合にはそのルールが見直され、機器計量での参入が可能になるなど、低圧リソースが参加しやすいルールの変更が議論されているところです。需要家で受電点の下にある機器が受電点で計量されると他の需要が動いた影響も出てしまいます。そのため、機器点計量というのが重要な視点でしたが、もそこは機器点での計量が認められるかつ今の特定計量値いわゆるスマートメーカーで測る必要があるがその値段が結構高いのでもう少し簡易な計量値を認めるルールでこの辺りいろんな見直しがされているところです。

次世代の分散型電力システムに関する検討会における議論の進展

低圧リソースの市場産業に関する全体スケジュールを示します。

低圧リソース活用の課題

低圧リソース活用の課題は、そもそも絶対的に数が少ないこと。2022 年度時点でエコ給湯は 800 万台、

定置式バッテリーが 70 万台、EV が 40 万台です。最近 EV ちょっとまた人気になっていると言われており、エコ給湯 800 万台はいい数字ですが制御できるものは少なく、制御できる機器を増やすのが一番重要なことです。制御の費用対効果がある、先ほど説明した料金型では通信費用とか不要ですが、アグリゲータがマネタイズできず、リアルタイムの制御ができない。料金型には柔軟な料金メニューが必要であり、旧一電さんを中心に非常に安い時間帯別のメニューが出てきており、そういうメニューが広がると例えばエコ給湯など昼間に動かす仕組みがメーカーさんによって機器に備わり、今後これでゆったり需要をシフトすることが低圧リソース活用の十分な価値だと思います。けれども、きちんと制御したいとなるとインセンティブ型が必要で、需要を動かすだけの十分な対価と払いを市場からマネタイズするのは難しいと思っています。最近も電力ガス基本政策小委でオクトパスエナジーさんの話とか聞いたのですけれどもオクトパスエナジーは EV の充電を制御し市場でマネタイズできているという話があったので、それがどのくらいできているのかをもっと知りたいと思います。需要家にとっての価値を示す必要もあると思います。

需要を動かす価値はあるのか？

需要を動かす価値については、マネタイズできる市場メカニズムが必要となる。ここでは市場と書いてあるが、料金でもいいと思うのですけれども、市場と考えた場合には、まずは周波数制御の市場は、今後は再エネの増加により必要量も増加傾向にあり、速い調整力は一番値段が高いが、全体に占める必要な量も小さいことをセットで考える必要がある。周波数制御のみを狙っても面積というか値段かける量のかけ算である収益は大きくない場合もある。再エネ予測誤差対応の量も基本的にこれから再エネの増加とともに増加傾向でしょう。容量価値に関しては再エネが増えてもピークは減らないので下げ DR の価値はアンシラリーサービスよりは低いけれど DR の利益のためには最も効くところか。需要が減少局面ではニーズも減少するが、最近の見込みでは需要も増える方向であり、容量価値のニーズはこれからも増えてくる可能性がある。あとはエネルギーkWh 市場と呼ばれ、基本的に燃料費の差で決まるので価格インセンティブは低めである。しかし、もし託送料金も再エネの動きに合わせて変動すれば大きい値差はつく可能性もある。さらに私は賛成してはいないが海外で実施されているネガティブプライスが入ってくると、値差は一定程度確保できる可能性はある。

これらの値段については、海外の市場等を参照すると、今の足元の日本には合ってないかもしれないが、周波数制御の価値は 1 万円/kW・年、容量価値は今の容量市場の価値から考えると 5000～9000 円/kW、三次調整力②は昨年大きく下がったが、今足元では 4 月から跳ね上がっており、それらは週間調達で調整力の 1 次と 2 次の応札未達の分を三次調整力②の前日調達に併せて調達しているため、たくさんの三次調整力②を確保しようとしており、高値の札落札される状況が起きていて、平均で 100 円など恐ろしい状況になっていて、かなり不安定な市場です。今ここの制度もおそらく見直されるので昨年の 3 円まで下がらないにしても、100 円が続くことはないと思います。価格が読み切れない状況ですが、エネルギーの価値として燃料費の差、小売端で 10～30 円/kWh くらいと思われます。なお、調整力市場、容量市場に参加するには今のところ 1000kW の単位が必要で、大きい DR に混ぜてもらう必要があります。上げ DR は、だから系統の混雑回避や再エネ抑制回避に使えるが、基本的にベースラインの決定が難しいことから料金型で対応するしかないと思います。けれども系統混雑対応である決められたエリアの場合については、少し検討が始まっています。

短期的な取り組み

短期的な足元での取り組みとしては、需給ひっ迫時の節電に対しては、小売事業者を中心に節電のためのポイント還元などの仕組みができています。ただそのポイントはせいぜい 10 円/kWh 程度で、市場価格が高いときの需要抑制が主の目的なので、容量価値分拠出金の負担も減らせるぐらいであれば、一桁大きい 100 円/kWh ぐらい確実な需要の下げ DR に対して払える可能性はあります。あるかもしれないのですけれども今のところは値差が小さすぎてあまりワークしてない印象があります。ただここも容量価値も入って来ると考えられます。もう一つ低圧 DR の価値は再エネ抑制の回避と言われており、エコ給湯の昼間運転が今一番やりやすいと思います。

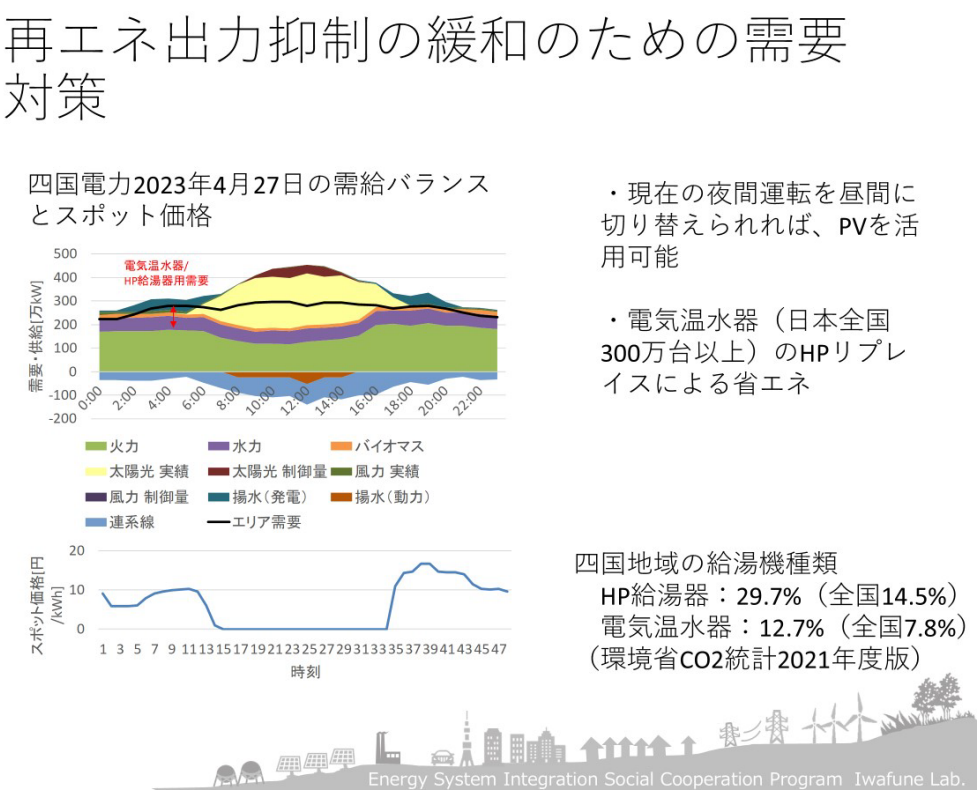
電気温水器・エコキュート需要の昼間シフトは 2,000 万 kW の調整力に

これは環境省の家庭 CO2 統計のエコ給湯と電気温水器のエリアごとの世帯普及率から計算したものです。実はエコ給湯だけではなくて電気温水器も大きな量が入っていて、エコ給湯 1kW、電気温水器 3kW として台数を掛けると 2000 万 kW の調整力になる。2000 万 kW ということは最大規模の発電所 20 基分であり、これを積極的に使えないかなと思っています。一番右側では、中国・四国・九州の 3 エリアについて、変動電動再エネ導入量から最低需要を引いた値です。例えば九州エリアでは、エコ給湯と電気温水器の消

費電力 323 万 kW に対して、変動再エネが余る最大量が 466kW であり、これがちゃんと昼間に動かせれば今の抑制が大きく低減できる可能性はあります。

再エネ出力抑制の緩和のための需要対策

これは去年の 4 月 27 日の四国エリアの需給バランスを示しています。黒い線がエリア需要、赤い線が電気温水器とヒーポンの需要を 3kW、1kW という想定に基づいて計算したものです。朝の 4〜5 時ぐらいに黒い線に山があり、この赤い線の部分がこの温水器需要だとして、昼間にこれをシフトできれば、黄色い PV 出力と茶色の PV 出力制御量を管理できるポテンシャルがあります。電気温水器がこんなにあるのだったらこれをヒーポンに取り換えればだいぶ省エネになる、これは調整力の視点からは残念なことではありますが、この省エネ要素というのもかなり大きいと思われます。このとき価格というのは下の絵にありますように昼間ベタっと 0 円になっているわけなのでやっぱりこの市場価格が小売価格に反映されるというのが重要だろうと思います。



九州電力における新しい料金メニュー

これは旧一般電気事業者の中で一番先に始められた九州電力の小売りメニューで、昼間の方が夜中よりも安いメニューです。これらがエコ給湯・EV・畜電池の有無にかかわらず適用されていれば昼間への需要シフトは進むと考えられます。ただこれは毎日一定なので毎日料金が変わるわけではなく、そこまでダイナミックなことはないと思うのですけども基本的に昼間に電気を使うのが正解であり、こういうメニューを用意することが重要ではないかと思います。

Load Management Rulemaking

その先にあるのがもっとフレキシブルな料金体系です。例えばカリフォルニアではここに示すようなデータベースの MIDAS という Market Informed Demand Automation Server というものを用意して、ここにカリフォルニア州内の 5 大電力会社に対して地域ごとの限界費用を反映し少なくとも 1 時間ごとに変化する小売料金の設定の義務付けを始め、その料金をここの MIDAS に登録し、その価格かつ CO2 も時間ごとになるのですけど、DR 事業者が参照してうまく制御するとか、需要家がどんな制御ができるかによって変わってくるわけですけど例えば黒い人は実際結構インセンティブ型で動くようなタイプの人だと思うのですけども、緑の人は断然そういうアンコネクティブなエンドユーザでもただその価格のデータベースさえリファーできれば何らかここで変化が起こる、これインターネット経歴ですね、というような仕組みが今考えられていて、これは 2026 年度から動き出すそうです。日本でもこういう動きも見慣れていく必要があると思います。もう小売りが自由化されている日本では難しいと思いますが、料金もダイナミックになることは今後重要な視点である

と思います。

DR の調整力としての活用

DR の調整力としての活用を考える場合に、これは私見ですが、料金連動でまずは自端で動く仕組みをしっかり入れていくことが必要です。次は調整力で、調整力は利用する TSO から見た場合と提供する DR アグリゲータから見た場合で、特に質と価格の問題で対立が起こります。みんなでうまくやっていけばいいのですけど、先ほど原先生が説明されたように発電所で調整力提供するのは簡単で出力目標値を伝えれば大きな制御単位で精度よく応動する。それに対して小規模 DR を使うのにはそうきれいにいかない可能性がある。

あと、価格は、それは TSO のような調達側から見ると国民負担もあり安いほうがいいのに対し、DR 事業者アグリゲータから見ると一定程度の値がつかないとマネタイズできず事業を継続できない問題がある。あとは入札価格の規律とか市場のボラティリティの許容度もだいぶ違うので、今は市場が新しい速い需給調整市場があまりうまくまだ回ってない状況であり、ここは少し待つべきだと思います。価格が大きくはねると上限価格をつけることばかりになってしまうのは、私は心配だと思っています。

大量に再エネが導入された状況下での DR の役割

これはちょっとだいぶ先の話ですが、DR の長期的に見た姿を考えたものです。

需要立地誘導・新規電力需要

ここからの話題ということで需要の立地誘導の話です。先ほどの低圧のリソースの話だけじゃなくて今後どうなるって話題を追加しました。今、新規電力需要についての最近の新聞記事とかいろいろ見ていると、だいぶ北海道で半導体工場とデータセンター九州でも半導体工場国内の DC、データセンターの需要がかなり増えるみたいな試算が出されている。これは OCCTO などで議論が始まっています。

需要想定

この絵は、結構あちこちで使われています。最近 OCCTO が出した需要想定です。2033 年までで、去年までは需要は減る見込みに対し、今年の青い線の需要想定では増加する、その理由が右側にあるデータセンターや半導体工場だということです。

系統用蓄電池

系統用蓄電池について、特に分断等が起こっている北海道と九州で多くの申し込みが来ています。実は蓄電池の値段もこなしてきているのかもしれないですけれども、どこに蓄電池が入ってくるかというところで、系統 WG でも議論がされています。

デマンドレスポンス（空間）

これから入ってくるのがデータセンターだとするとこれは Google の例なのですけれどもデータセンターの処理が空間的・時間的にシフトできるのではないか。それによって Google なんかはうまく再エネを使って 24 時間 365 日 CO2 排出量フリーの電力を使おうというような動きがあります。データセンターでこれまでは一定の需要と考えられているわけですけれども、AI の学習みたいなものには一定の時間遅れも許してくれるというような話もありますしあとはいろんなセキュリティの問題から空間的にもエリアによって少し余裕のあるようなデータセンターの建てられ方もできるのではないかということです。

DC のデマンドレスポンス実証（2023、日立・東電 PG）

日本でも 2023 年に日立東芝記事さんでこういうデータセンターのエリア A からエリア B の変更によって T シフトするというようなことが実証として行われたという話があります。

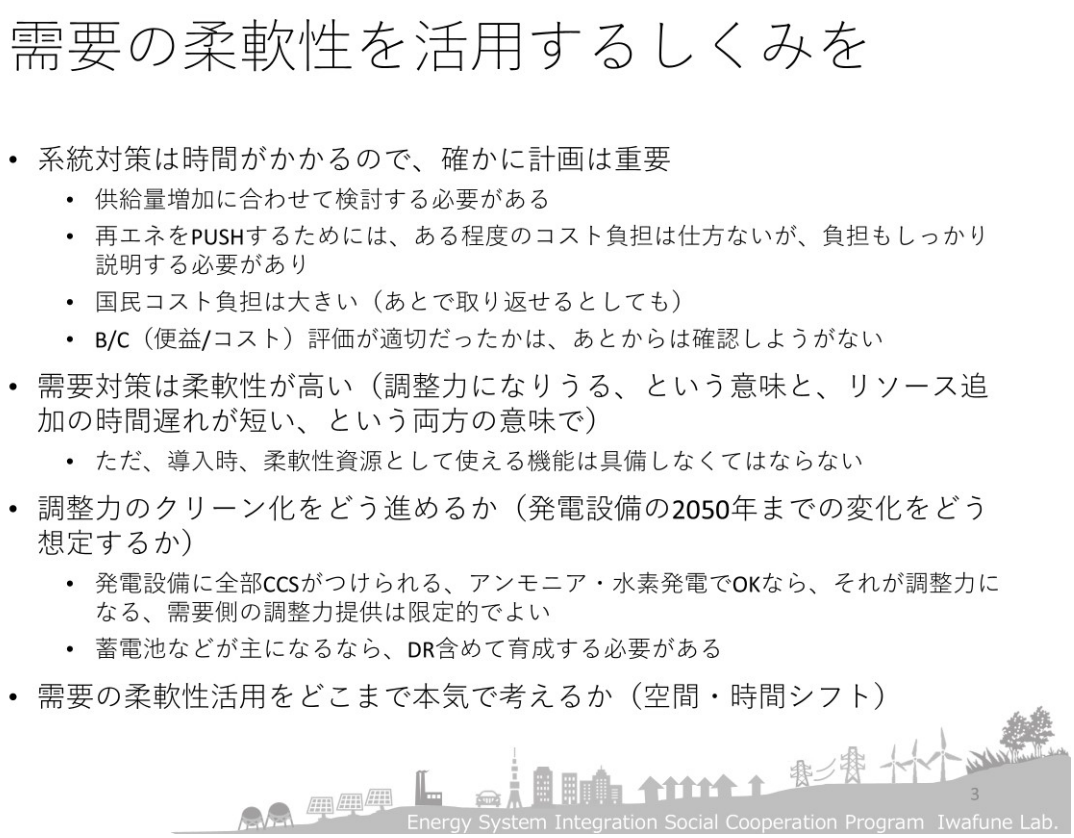
広域運用と地産地消

次お願いします。

需要の柔軟性を活用するしくみを

最後に行きます。私は需要と柔軟性をうまく活用する仕組みが必要と思っています。系統対策は時間がかかるので本当に便益ますかみたいな話もあります。これは一定 20 年、40 年かければ確かに国民のコスト負担というのはあまり目に見えないのでわからないかもしれませんが、このネットワークの増強にもこれからかなりのお金と時間がかかる。これに対して需要対策というのは柔軟性が高く調整力になるという意味と、リソース追加の時間繰りが短いという両方の意味で。ただ導入時に柔軟性資源として使える機能は具備しなくてはいけないので、調整力のクリーン化をどう進めるかという視点も今後重要になってきます。カーボンニ

ューとかにするなら調整力もクリーンになっていかなくてはいけないが、その時に発電設備側がどうなっているかというのも重要です。もし発電設備にみんな CCS をつけられてカーボンニュートラルとか CCS 発送も OK とかになりそれが調整力になるのであれば、需要側の調整力は期待する必要もなくて、せいぜい系統用蓄電池などでいいという気もしなくはない。ただもっと需要側のリソースを活用していこうという目標であれば今の目付けの方がいいのかなという気もします。今までずっと厳しくて DR を決めて育成していく必要があるのではないかと思います。なので、供給側の話に加えて需要側の柔軟性をどうまで本気で考えるかというのをやっぱりこれから議論していく必要があると思います。以上です。



全体討議

（PL）

それでは約 1 時間かけて 2 件のご説明をいただきました。ここから皆さんと今ごプレゼンいただいた両先生を含めて議論をしていただければと思っております。

それでは順番ですから最初は電源の放送ということで議論いただけないでしょうか。論点としてキックオフでお示ししたフォーマットを出します。ここにございますように左側 1 番の分野のイメージここはこの分野そのものですので 2 番より下が論点として使っていただけると思います。

それでは皆さんの方からご質問またはご意見いただきたいと思いますがいかがでしょうか人数が限られていますので混雑しない限りはもう自由にご発言いただければと思います。最初に所属とお名前を言っていただいてご意見ご質問をお願いしたいと思います。

火力の補足

（参加者１）

原先生のご説明では火力として言いたいことをほぼ言っていただきました。ありがとうございました。若干補足させていただきたい点がございます。

一つは稼働率の低下についてまさにその通りですけれども、以前も原子力がちゃんと動いていた時には稼働率が低かったという時期はございます。そういう意味では稼働率の低下というのは経験済みです。ただし当然のことですけれども原子力は出力が安定しているのに対して再エネは不安定というところは大きく違いますし、あと当時は総括原価の中でやっていましたが、今は市場の中でやっているところが大きく違います。その点が今後の論点になるかと思います。

二つ目としまして、火力の性能効率の再設計というお話がありました。技術的には可能ではありますが、これも当然のこととして発電所としては年間通した運用で最大効率になるようにしており、現在は定格点、フル運用の時に最高効率になるように設計をしています。これを変えることは可能ですが、そのためには年間の運用を想定することが設計する上で必要となります。けれども残念ながら今の状況では、電源側で運用を想定するのは難しいというのが実情です。

三点目は、下げ調整力の関係で最低出力を下げることにつきましては、現在系統ワーキング等で議論しているところであり、もう一点起動停止を速くすると電気が余ったときに止めて足りなくなったら起動できるので、この辺の性能向上の有効性を私どもから説明しています。このように最低出力の引下げと同時に起動停止のスピードアップについても併せて検討すべきだと思っております。あと、負荷変化率の向上についても長年取り組んでいます。最後になりますが、いろいろと原先生の方からも合わせ技で検討すべきだというお話がありました。火力につきましても設備の老朽化というのは大きな問題となっております。揚水の老朽化の話がありましたが、火力について、設備が老朽化し古くなって効率が低くなれば退出すればいいのかというと、退出すると電源が足りなくなります。このため脱炭素化電源を作るだけではなくて一定程度は既存の LNG 火力や石炭火力も設備更新をして後から脱炭素化を検討するということもあってもいいのではないかと考えております。以上でございます。

（PL）

ありがとうございます。

火力の使われ方の見える化

（参加者２）

本当に効率の最大化の話で、年間通じた運転の様子を抑えた上で設計が必要というのは、まさにその通りだと思っておりますし、それが国民経済的にも重要な観点だと思います。逆に言うと、将来の使われ方を電源側の方に見える形にしないといけないことについて、このプロジェクトなのかは分かりませんけれども、議論が必要なところだと思いますし、今その定量化というのは、要検討のところなのかという質問をいたしました。感想になりますけれども、ごコメントありがとうございます。

効率設計と設備維持

（参加者３）

火力の効率の話はある意味重要なのですけれども、ここまで来ると、火力が、ギリギリで動いているときは、再エネが余っている時期だとすると、正直、効率は求めなくていいという考えもあるかなと。効率が悪くても調整できることは価値が高いけれども、その分、何か追加的にコストがかかるとか、もし、うまく足られればいいと思うのですけれども、同じ部分、再エネを余って捨てているのだから、そのロスというのを考えると、システム全体が、あまり回復、要するに、そこの時間で動いている比率も小さくなるのであれば、そこまでギリギリ考えてやるのかなと思いました。そこはいかがですか。

（参加者２）

全体の比率で見ると、そこの効率向上や、積極化というのは、シェアとしては小さいかもしれないのですけれども、事業者にとっては結構深刻なところと思っています。少ないながらも、それを使って、何かストレングスなのか、エネルギーなのか、補充しているわけですので、そこの事業性という意味では、効率をそこに見せてターゲットしていくというのが、今、本当なのかなと思っております。全体のマクロ的なコストにあたる影響という関係と、事業者さんの目で、両方が一緒かなと思っております。

（参加者４）

今のケースについてよろしいですか。今、お伺いした岩船先生と原先生のお話しはごもっともで、効率の意味では、低い方が下がるのですけれども、燃料の使用量という意味では、当然、フル運転している方が使用量は多く、その影響割合が多いものですから、その辺も含めまして、年間の中で一番安くなる（CO_2 の排出量も少なくなる）ようにするという意味で発言させていただきました。ですから、そういう意味では、岩船先生の言っていることも、ごもっともだと思っております。そういうこともありますので、もちろん、出力が低い方も熱効率は高い方がいいのですけれども、そこはどこかで割り切る部分もあると考えております。以上です。

（PL）

ありがとうございます。

もしかすると、DR で、マルチ価値といっているのと似たような、合わせ技で、事業者の利益も確保する、ということなのかもしれません。

ほか、いかがでしょうか。どうぞ。

（参加者３）

結局、本当に、再エネに合わせて火力が運用されるというのは、すでに、経済性が成立しない範囲だと思うのです。そこは、正規脱炭素オークションではありませんが、絶対に何らか補填がない限り退出しなければいけないと、普通に考える。そこは、きちんと、効率低下で燃料費の効率悪化するのも含めて、きちんとバックアップがある、という前提ではないかと思います。ではないと、すでに、火力の普通の燃料費が、成立しなくなっていないかを含めて、私は思っています。以上です。ありがとうございます。

同期機の電圧維持/調整機能

（PL）

はい。ありがとうございました。ほか、いかがでしょうか。ぜひ、多くの方から、第 1 回目でもありますので、議論のやり方自体をお願いします。

（参加者５）

コメントなのですけれども、さっき、原先生からありました、同期電源のことです。一つ、いろいろ、慣性感性維持とか、いろいろ、話題になっていますけれども、非常に重要な価値として、系統の電圧を維持する電圧源としての役割というのは、非常に大きいと思います。そういう話で、電圧源としての価値を何らか評価して、それをアンシラリーサービスといいますか、そういう料金を回収できるようなシステム作りというのは、特に日本の場合は、電力系統がヨーロッパと違って割と放射状ということで、電圧維持ということは非常に大事だと思います。その点を何か進めていくのが必要というふうに常々思っているところということでコメントさせていただきました。

それからもう一つ、調整力あるいは出力・負荷変化速度として、火力は電圧源として必要だと思っています。将来的に、例えば、コンバインドであれば、現状の天然ガスから水素に、例えば専焼にした場合、負荷変化速度は現状と比べて良くなるのか悪くなるのか、水素であると単位体積あたりの発熱量は小さくたくさんの水素を送る必要があり、同じ発電しようとすると、あるいは燃焼の安定性も何かあるかと思います。脱炭素に向けて、出力・負荷変化速度がどう変わるのか、あるいは例えば現状と同じくらいを目指すとか、長めの視点になりますが、そういうことも大事であると思っています。以上コメントでした。

（参加者２）

最初の電圧の話について、それはまさに、その通りと思っております。その点、今日の説明スライドは、項目としては掲げたものの切り込んだ議論はできていませんでした。電圧維持のアンシラリーの部分をどう価値化するかは難しいと思っており、この点は制度設計の議論と絡むという気がしています。もう少し深掘りをしたいと思っています。調整力の能力について、燃料の非化石化・ガス炭素化において向上するか低下するかどっちに転ぶのか、私も燃焼系は詳しくないため皆様からご意見いただきながらまとめたいと思っています。この点でもしご参加の皆様から、アイデアや情報がもしありましたら、ご提供いただけますとは幸いです。

（PL）

電圧維持についての話題では、オーストラリアは、短絡容量を、毎年計算して公開しており、短絡容量が小さい地点に、インバータ連係の電源など、課題を発生するものを接続するときには追加料金を取る制度があります。少しずつ、海外の例を取り込むことが有効と思います。

ピークカットと火力必要容量

（参加者６）

今日は、いろいろありがとうございました。原先生の資料の、4 ページの負荷曲線が、非常にショッキングでした。我々需要側では、ピークカットを常に念頭に置いてやってきたのに、ピークが下がらずに、他のところで下がっている、ということで、それから、再エネ側で見ても、太陽光が増えているということは、夏季ピークだとしても非常に下がっている。夏季ピークだとしたらそこを削っているはずなのに、何でここだけ残るのかがよく分からなかったので教えていただきたい。またそうすると、ここを火力でという話になると、どうしても不経済な話になってしまうので、何か需要側で対処することがないかということを教えていただきたい。

（参加者２）

具体的に、この点が、年間のどこに対応しているかというところを再確認さていただきたいと思います。本当の需要のピークじゃないところでこのピークが起こっていて、既に PV が入っていて夏の発電のピーク以外で起こっているのだとすると、再エネの状況も踏まえて、岩船先生の需要の方も含めて、需要、本当の需要ではなくて、正味の需要のピークを下げていくことが重要であると話を伺って思いました。

（PL）

どなたか情報をお持ちですか。

（参加者３）

夏の昼よりも、冬の夕方、あと、夏の夕方で決まるのかと。

（参加者２）

ダックカーブ頭でのあたまのところで。

（参加者３）

日本は、今は、PV しかないので、そうなっているかなと思います。

（PL）

はい。ありがとうございます。

（参加者６）

夕方だとしたら、何かいろいろ低減の方法がありそうですね。

（参加者３）

ただ、天気が悪い日とかだとどうにもならなかったりするので、やっぱり、それは、日をまたぐ貯蔵が必要になると思います。

（参加者６）

そうですね。雨の日は、夏だとしたら需要も上がらないはずなので、それも含めて課題と捉えたいと思います。

調整力提供のシナリオ

（参加者７）

はい。ありがとうございます。原先生、岩船先生、ありがとうございます。大変勉強になりました。コメントですけれども、岩船先生の、最後の方のスライドの中で、発電設備に全部 CCS が付けられて、アンモニア・水素による発電、要はゼロエミッション火力が OK で、それらが調整力になれば、需要側の調整力の提供は限定的でよいというのは結構示唆察的で、いろんなやり方があると思いました。クローズドワークショップの、シナリオの準備のお手伝いをさせていただいております。この、どっちかは実際には経済的な競争もあると思いますが、会議プロジェクトにおいては、両方ともの可能性を睨んで、いろいろ検討するのだと思った次第です。以上、コメントでした。ありがとうございます。

（PL）

はい、ありがとうございました。次のクローズド、よろしくお願いいたします。

ほか、いかがでしょうか。もう少し電源、について皆さんの方から。

（参加者８）

先ほど話題になった、原先生の資料の4ページの負荷曲線について若干補足したいのですが、これは火力の日発電量のグラフで、これだと先ほどのご指摘の通り、ピークは変わっていないように見えてしまいます。ですが、時間ごとの、8760 時間のソーティングを見ますと、従来ピーク時間であった夏の暑い日の午後の需要は太陽光が貢献して下がり、太陽光が貢献できない冬の夕方が年間のピークになります。すなわち、左側のピークの値が下がる結果になっていることを補足させていただきました。

（参加者２）

はい、ありがとうございました。その通りかなと、今、改めて思いました。この図は日量ですので、時間の要素は消えています。ご指摘ありがとうございます。はい。

（参加者３）

多分、冬の天気悪い日っていうのは合っていると思います。

（PL）

ありがとうございます。ほか、いかがでしょうか。
火力以外で、もし、皆さんからあれば、お願いしたいと思います。

原子力の出力調整

（参加者３）

原子力の出力変化は話題にならない。荻本先生は要らないといわれますが。

（参加者２）

原子炉の反応の方を調整することは難しいかもしれませんが、蒸気の方をコントロールはできるようにするので、調整力を取る方向としては検討の価値はあると思います。なかなか安全面の範囲など、そういう方向からの難しさというのもあるのかなという気がします。

（PL）

私が思ったのは、そういう難しさがある一方、再エネは出力を下げるのは比較的容易なので、これっておそらくお金の問題になると思います。物理的にどう実現するかと、お金をどう始末するかを分けた方がやりやすいかなというのが、私の考えです。

（参加者３）

他の皆さんのご意見も聞きたいなと。私は強い意見はないです。

（PL）

原子力の話題になりましたけれども、皆さんからいかがでしょうか。どうぞ。

（参加者８）

原子力発電所の出力変化は、PWR は原子力潜水艦を動かす技術であるし、フランスなどで実際出力調整をやっているので、技術的にできないことは全くないのですけど、それ以外の障壁について、私も正確に分かっていないところがあるので、今後どなたか専門家からお話しを伺うのがいいかなと思いました。技術的には可能であるのは私も確信していますが、今言ったお金の問題以外に何かある可能性も否定できないので、そこはお考えいただいてもいいかなと思いました。

（PL）

分かりました。検討させていただきます。

（参加者５）

日本型の軽水炉で、30 年前ぐらいですかね、日間負荷追従、AFC、ガバナフリーの実証試験を実施したと思います。その中で、今の日本型の軽水炉での、そういう出力調整運転をするときの技術的な課題が、その当時示されていたと思います。併せて、フランスは制御棒としてグレーロッドということで、出力調整に特化した制御棒を具備していて、それは日本型というかアメリカ型にはないと。そんなところもありますので、先ほどご意見の通り、原子力の専門家の方々に技術的なあるいはそれ以外の話とかを講義していただくのも面白いかなと思っております。以上です。

配電網情報

（PL）

はい、ありがとうございました。だいぶ時間が来ましたので、後半の需要に関する議論をお願いしたいと思います。いかがでしょうか。

（参加者９）

今日は、本当にまとまったお話を聞かせていただきまして、大変勉強になりました。ありがとうございました。岩船先生のご説明の中で、需要の誘導とかですね、系統の状況に合わせて需要を調整することが、これから重要になると思っています。いろいろ例を挙げていただきましたが、今、中部電力がやられている、「将来の需要をかなりいろんな手法を使って予測をして、それで配電の系統の状況がどう変化するか」の検討の取り組みがあります。こういうものを共有していただくことが重要と思っています。例えば蓄電池や EV の充電器などが該当すると思いますが、それらがどこに導入されるとより効果を生むのか、いろんな形で情報共有されて議論が進むと、系統側の助けになると思っております。そんなことも報告などに加えていただくとよいと思いました。以上です。

（参加者３）

はい、おっしゃるとおりだと。配電系統の話って、我々もどう整理のやり方を考えたりするのですが、あまり

にもバリエーションが多く、どういう把握ができるだろうと。

（参加者９）

話が広すぎて、一般的に言うのは難しいですが、負荷と配電線の状況が分かると、いろんな形でシミュレーションすることで定量的な評価ができることになり、情報共有により実態が予測でき理解できることがまず重要だと思います。それに合わせて、どこで何が起きているのかということについてお話をさせていただきたいと思います。何が起こるか、どこがボトルネックになるのかが評価できると、対策も具体的に見えてきます。設備増強や、需要側のリソース活用の組み合わせや、それに関する議論ができるようになると思っています。

（PL）

はい、ありがとうございます。

（参加者 10）

今の点に関連して発言よろしいですか。先生がご指摘されたのは、中部 PG でやっている D-FES の話だと思います。これ、今ですね、来年度の事業計画を策定中で、実際に D-FES を中部エリアで適用して、2030 年から 2050 年に向けて DR の普及のシナリオを作り、エリアごとの変化に基づき、過負荷の運用や DR によるピークシフトを検討しています。必要に応じて、担当者を紹介できます。

（参加者９）

コメントありがとうございます。今後、そういう情報の公開・共有について、中部電力 PG の中で議論があるでしょうか。

（参加者 10）

今は社内の設備計画のためにやっていますが、いろんなところで使っていただきたい方向です。少なくとも、そのケーススタディを示すようなことは可能だと思いますので、聞いてみます。電気学会で発表する予定があるかどうかとか。

（参加者９）

はい、徐々に情報は出てきていると思っています。配電系統の予測が将来的にどうなるのかという、そのこと自体が、どんなふうに共有されるかなという話があります。

データセンター需要

（参加者 10）

そういう意味では、系統情報の公開の一環として、基幹系統レベルから配電レベルに下ろしていく方向で、さっきのデータセンターなどの話があって、我々はノーダルプライシングとかノーダルバリュと呼び、再エネが連系するウェルカムゾーンを作るように、需要に対しても同じことをやろうとしており、どこでもこの点は共通課題として認識されていると思います。ノーダルバリュに行くのであれば、そういう情報に基づいて価値が共有されることが重要だと思います。特に急速充電器とか、設置場所の指定や誘導など、今後何年かで大きな問題になると思います。

（参加者６）

２回目よろしいでしょうか。データセンターの面白い話、勉強になりました。データセンターってロードカーブ的に言うと原子力と親和性が良かったりして需給の関係が変わってくるのかなという気もしているのですけれども、増える量が予測によって全然違っていて、この読みがないと将来の電力需給の話はしにくいと思っています。多分民生とかは減っていくだけで、電気自動車の充電のロードカーブとですねこのデータセンターのロードカーブがどう加わるかがすごく大事なポイントになると思っています。以上です。

（参加者３）

ありがとうございます。私もその点興味があっていろんなところに聞いているのですけど、クリアな答えはどこからも出てきていません。かつどのくらいシフトできるかとかいうのは、また難しいかもしれません。そもそもの処理の状況とか詳細が、国内のデータセンターがみんな実は海外のもので情報公開が進まないことが OCCTO の資料にも記載されていました。日本でネットワークにつないで電気を使う以上、ある程度の情報は公開してほしいとか、処理がもう必要なんじゃないかと思いました。良い情報がありましたらシェアしたいと思います。ありがとうございます。

（参加者６）

はいありがとうございます。多分今どれだけ使っているかもエネルギー統計を見てもよくわからないところがあります。

（参加者 11）

先ほどの配電の負荷の話です。これからカーボンニュートラルに向かって電化が進むと、多分灯油例えば暖房などのかなりの量が電気に変わり、その負荷は相当大きくなると思います。それと今度は逆に東京都などでは新築住宅への PV 設置が義務付けられそうで、それによって負荷が減る分があるようです、その辺の推測は先ほどの参加者 10 のところでやっているのかもしれませんが、その辺のデータは日本にあるでしょうか。

（参加者３）

需要のデータさっきの中部電力 PG の検討は MRI と共同で需要を推計していると思うのですが、基本的には 1 件ずつの需要、今の需要の推計から将来の推計は我々とか参加者6のところとかでもやっており、大体の絵姿を描くことは可能と思っています。ちょっとその配電網によるところもあるのですけども。基本的には推計はできるし、正直言って暖房とか車でも全部が EV になっても電力需要 1 割ぐらいしか増えないみたいな数字があるじゃないですか暖房とか全部電化しても多分そこまで不連続には増えないと思います。大体今の他のエネルギーから見て考えると。データセンサとかがかなり不連続で、しかも見込みの幅があまりにも大きいところが悩ましい。EV に関してはこれから確かに戸建てでは増えると思うのでれども、なかなかそことのバランスだと思います。ただ新築も減っていて、基築の建物への搭載量を推定してシミュレーション上は可能です。し結構阪大の詳細なモデルでそういうシミュレーションができているかなと思うのでぜひそういう情報もシェアしていけたらいいなと思っています。

以上です。

地方/都市需要

（参加者 12）

今のところで我々もすごく簡単なモデルで似た検討をやっています。すごく定性的な言い方をすれば、山間部や田舎の方に行くと人口減少により需要シフトしてもそんなに増えないのかなと。それに対して都市部は人口がやっぱり田舎に比べれば減らず、PV も載せにくいとなると、両者の差が大きくなってくること計算しており、全体で考えるより地域・地域で事情が違い、そこはやっぱり細かく見られるようにしていかないと方向を間違うことを懸念しています。以上です。

電化と都市ガス

（参加者 12）

電化は基本的にそうなると思うのですけども、先ほど火力の議論でも一定海外のカーボンニュートラル燃料を使う方向に変わってくことがあるとすると、それを使ってメタネーションして都市ガスインフラ使う選択肢があるとすると、必ずしも民生でも、都市ガスが変わるのだったら電化しなくてもよいという話も出てくるような気もするのです。その辺のバランスも、地域によって違ってくると思います。その辺はどう考えたらいいでしょうか。

（参加者３）

そこはすごく難しいです。足元から言うと電化は人気ないですし、集合住宅では電化しきれないだろうという見方もあります。メタンの政治パワーはすごく強いので、電化だけ進める議論は国としてもやれない雰囲気があるようです。だから電化するシナリオには何段階回か置く必要がある気がしています。

（参加者 12）

ありがとうございます。

小売料金：カリフォルニア方式と日本

（参加者８）

先ほどご紹介いただいたカリフォルニア州の MIDAS は、初めて勉強させていただきました。「日本は全面自由化しているから難しいのではないか」とおっしゃったのですけど、全面自由化のシナリオに関わらずこれはやれるという気がします。カリフォルニアもおそらく Opt-out で、全部強制になっているわけじゃないと思うので、できないことはないというか、やるべき方向性だと思います。ただ、一番の制約になると思われるのが電力会社の顧客システムです。これが非常にレガシーなシステムで、1 時間ごとに変わる電気料金

を扱うシステムになっていません。そこが本当にクリアされるなら、今残っている規制料金ではなく、JEPX に連動した値段がデフォルトになることでもよいと思っています。以上です。

（参加者３）

ありがとうございます。私もこれはいいと思ったのですけど、ネットワーク問題でカリフォルニアに行って聞いたときも、複雑すぎるとも言われて、この仕組みって蓄電池や EV を持っている人であればこういうものに参加する動機もあり、そういう人が Opt-in するときのメニューがあればいいっていうくらい。あとはカリフォルニアでも昼安く夜高いメニューがデフォルトとしてやっと整備されたのですが、やっぱり値差が小さすぎるっていう話もあります。まずは TOU の昼安いメニューで比較的昼と夜の値差が高いやつがあって、その次に Opt-in として時間別くらいだろうというような話を聞いてきたので、今この辺頭の整理中です。またいろいろ教えてください。ありがとうございます。

（参加者 13）

ありがとうございます。今のこのスライドの件は、私も興味持って聞かせていただきました。今 5 社になっているから結構大変だと思いますが、例えば日本の場合一つ前のスライドで九州電力小売りの新しい料金メニューが出ていました。小さな企業で行うのもやっぱり難しいということでしょうか。先ほど参加者8からのご質問・コメントもあったと思うのですが、5 社って結構グループが大きくなるとどんどん複雑化していくと思うのですけれども小さい企業だと簡単だったりはしないのでしょうか。

（参加者３）

難しいかなと思ったのは今、小売事業者が 700 社もいて、例えば 700 社に絶対時間別変動の料金を作ってくださいっていうことをやらせるのが難しいのではないかと思ったことです。ただ Opt-in なのでお客様からやらなきゃいけないことにはならないし、仕組みもできると思うのですけど、審議会でも必ず「小さいとこはできない」という意見が出てくるので、そういう意味での難しさがあると思ったということです。

（参加者 13）

はい、ありがとうございます要するにそれを小さい規模にすることはやっぱりできないのですね。そういうことは私がよくわかってないのですけれども。

（参加者３）

カリフォルニアは小売りが自由化されてないので、大きい電力会社にこれを義務づけることが比較的やりやすいと思うのですが、日本は一応小売りも自由化されているので義務づけることが難しいのではないかという意味で申しました。先ほどの旧一電のメニューは義務づけられてやっているわけではなく、社会の要請に応えるために作りましたみたいな感じで、大手としての電力会社の責任みたいなところでできているわけです。だけど各社がそれを作りたいかっていうとそうではないので、それを義務化することは難しいです。あとは料金が多すぎるとマイナスで、MIDAS もどれを参照すればいいとか言うと結構難しいです。しかしそこはやりようで、システムさえできればとは思います。ありがとうございました。

（参加者 13）

非常に勉強して面白いと思いましたありがとうございます。

（参加者 10）

割り込みいいですかよろしいですか。5 大電力って PG&E とかは中部電力規模で、一方この CCA はアグリゲータですよね。自治体レベルの今の議論で言うと別に5台電力に限定しないで自治体レベルのCCAでも実行可能であるとCEC（California Energy Commission）は言っているので、700 社もあるから難しいという話はあんまり適合しないですよね。だから小規模だろうがある過渡期間はあるだろうけど 5 大電力と同等のシステムを運用するのですよね。

（参加者３）

そうですね。

（参加者 10）

了解しました。

（PL）

はいありがとうございます。ほかいかがでしょうか。それでは共通の時間を 10 分ほど取りたいと思います。2 つ分野の間で横串を差すのではなくて、視点としてすね人材育成や大きなリスクまたは不確実性についてご発言いただければと思います。

アグリゲータ育成

（参加者３）

今、人材育成と言ってないかもしれないけれど、アグリゲータービジネスが本当に成立するのかというところは、なかなか難しいと感じています。この点どのぐらい保護してあげるかみたいな話があります。カリフォルニアで低圧リソースを一定含めたデマンドレスポンスのための市場を作ったことがあり、実証ですけど日本でもある程度そういう場がない限り低圧リソースを一生懸命集める人はいないかもしれません。最初にそういうビジネスを育てるような視点がないと、アブリゲータのビジネスがうまくいくのは難しいと思っています。もちろん小売事業者が積極的に関わるのはあると思うのですけど、低圧育成っていう視点が特にこっちのほうに出したら必要になる気もします。実証もだいぶやってきましたけど。

（PL）

技術実証はやってきたけれど、ビジネスになってない、ということですね。ありがとうございます。今の話に関していかがでしょうか。

（参加者３）

先生、いかがでしょうか。

（参加者９）

なにか振られそうだなと思っていたのですが、二番目先生がおっしゃった通りで感覚的には同じように思っています。技術実証もやってきましたがある程度いくつかのエリアで参入しているところがあると思いますけど、小売りのサービスと一緒にするとかをやっていかないと、アグリゲータ単独では難しいというのが印象です。やはり先生がおっしゃったように最初に育成をするときに育成するっていう視点っていうのをある程度入れるのはもう少しやってもいいと思っているところです。けどどうやるかっていうところですね。すみませんあまりお答えになってないのですけど。

（PL）

ありがとうございます。ほかいかがでしょうか。

需要の変化と電源との関係

（参加者２）

はいまず人材育成の話とは離れますが、やはり先ほど岩船先生の前半でいろいろご意見があったように、今後の需要の変化をどう想定するのかというところは、需要側の設備という意味でも重要だと思いますし、それがリアルにどれくらい使えるかという評価も必要ですし私の方からご紹介した同期機の電源がどうあるべきかと密接に関係すると思っています。電源側がこうなるから需要の方のリアルはどこまで必要になるかという議論が最後に岩船先生から情報がありましたけれども、そちら向きもありますし需要がこう変わっていくので電源側に求められるものも変わっていって、効率線どうするのかという議論も連動すると思います。これは今日の 2 つのテーマ以外のところで今後話題提供に含めて、例えば参加者からメタメーションで本当にガスの方が脱炭素化できるのであれば電化はいらないじゃないかという議論があります。ベストミックスの議論と関係すると思っていまして、なかなか 1 つのテーマでは決め打ちできないから出せないのだろうなと思っていて、だからこそこのプロジェクトがあるのだろうなと思っています。けれどもそういった包括的な議論がプロジェクトを進めていく中では重要だろうと改めて思います。

（参加者８）

私が 10 年以上前に電中研にお世話になった頃に、当時流行っていたスマートグリッド、今も流行っているかもしれないけど、をやっていた時の感想を参考までに申し上げさせていただきます。アップデートされていない点があることはご容赦ください。今の低圧リソース活用の議論は十分ウォッチできていませんが、いろんなことが過度に複雑になっていく印象を持っています。あの頃よくやられていたのは自端で周波数を観測して、周波数は系統のどこでも測れるのでその変動に合わせた自端制御を実装していました。周波数だけをパラメータにして動くデバイスを組み込む極めてシンプルなやり方ですけど、そのくらいで十分役に立つと思った記憶が十数年前にあったので改めて申し上げます。

（PL）

日本ではあまり好まれてないですが、自端での自律的な制御・管理は、アメリカでは結構行っています。今言われているようなスイッチングの話もそうですしドループ制御も一部行われていると思います。ですから需要側がもう少し自律制御をやるチャンスがあってそこはもう何もその技術的な管理をしなくて指定品がち

やんとインストールされているのはそれでいいです電気力がありますというのはありだと思います。

低圧リソース

（参加者９）

今あったお話についてアメリカで昔どっちかっていうとヒートポンプ給湯器じゃなくて単なる温水器ですけど、系統から出ている LFC の信号を拾って動かす技術を商品化してそれに補助金付けることを取り組んでいた例がありました。信号を受けて動くってことは何て言うのでしょうか。自端と関係がどうなっているかというところがちょっとありますが、そんなのもやっていて、通信のシステムなども軽くしてやっている例がありました。

ということでは単純にやることは低圧リソースについては本当に必要なことだと思っています。岩船先生がおっしゃっていたところで、系統の状況に応じて動くことでもありますけど、料金に基づき自端で動くことをうまく使うことをまず考えるべきと思っているところです。以上です。

（参加者 14）

すみません、今後のエコキュートや電気温水機の自然体で市場に入っていくのかとか、そういうシナリオはこの業界ではどういうふうに考えられているのでしょうか。

（参加者３）

公開されているのは、今第 6 次エネ基では 2030 年の見通しの数字があるくらいと思います。マスタープランでは 2050 年まで見た想定はあると思いますが、数字としてはそのくらいで、あとは将来的にも基本戸建のみとするとして、せいぜい最大 2000～3000 万台とかただ業務用とかが入ってくる可能性はあります。いろんな可能性あると思うのですけど、タンクの設置スペースの制約からどうしても全てに置ききらないと思うので、そこまでかなという感じはします

（参加者 14）

それは結構現実的な数字っていうことなのか、結構頑張らないとダメですか？

（参加者３）

現実的と思います。ただフローでしか把握できていないので、さっきの CO2 統計の数字からすると比較的悪くない数字だと思います PV の増加よりは確度が高い気がします

（参加者 14）

なるほどわかりました

（参加者３）

今のところ、CO2 統計では 800 万 kW、大体 800 万台くらいになっているので少し足りない。2030 年 1600 万はこのままだとプッシュしないと難しいかもしれないですね

（参加者 14）

意外に自然体で増えていく予定で、調整力に使う・使わないに関係なく使えるリソースとしては増えるのは期待できると考えていいでしょうか？

（参加者３）

はい。数年前からは確実にエコネットライト付けのものが出ていて、制御する口はあるし、エコネットライト系じゃなくてもメーカーさんが IoT 経由で貯湯時間をずらすことはできる仕組みは用意されていて、それらを使えばこれから入るエコ給湯は間違いなく制御できます。

（参加者 14）

わかりました。海外の資料も結構取りに行かれたりしていますか？

（参加者３）

海外はこの間カリフォルニア行った時はまず暖房と給湯が一緒のセットでしかも効率もかなり悪そうなやつばかりで、なぜ日本のエコ給湯を入れないのかとか、結構わざわざパナソニックさんがカリフォルニアで実証していたので、言ったのですが、アメリカのメーカー製品を使わなきゃいけないいろんなバランスまで出して、驚くほどヒートポンプ給湯はカリフォルニアでは普及しなくて、カリフォルニアでは暖房も含めて千万台というすごい量のヒートポンプ入れる計画が策定中で、市場が広がる可能性があるかなと思います。ですが暖房だけのセットで日本の市場と違うので、そのまま広げられない難しさがあると思います。

（参加者 14）

分かりました。ありがとうございます。

（PL）

ありがとうございました。本日は時間になりましたので最後に事務局から連絡をさせていただきます。原先生、岩船先生、そして皆様どうもありがとうございました。

（事務局）

どうも今日はありがとうございました。後日今日の録音資料を今日欠席されている委員の先生もいらっしゃいますのでボックスにも上げさせていただきます。議事もまた展開させていただきます。よろしくお願いします。

今後の予定ですが、5 月の 23 日 13～15 時で、クローズドワークショップを開催させていただきますこれは前回のキックオフの時にどのようなコンセプトつまり話をしていく上で共通の認識というものを得ていた方がいいという意見がございましてそのためにクローズドでワークショップをさせていただきます。またご案内は後日させていただきます。

その以降の今回と同じ発表形式のものを 6 月 17 日の 10～12 時に、大関様と紺谷様にお願いしております。これは決定しております。

3 回目以降はまた随時調整させていただきますのでよろしくお願いしますよろしいでしょうか

以上です。

これで終了させていただきます本日はお時間いただきありがとうございました。

留意ポイント

- 火力の意義：参加者2、参加者4
- 貯蔵、原子力の討議会などの設定
- 実証試験にとどまらない、導入のための施策：参加者3
- プロジェクトを進めていく中での包括的議論の重要性：参加者2

第 2 回会合

開会

（荻本 PL（以下 PL））

時間になりましたので第 2 回会合を始めさせていただきます。本日は最初に 10 分程、先日実施させていただきましたはクローズドワークショップの報告を、東京大学の杉山昌弘先生にお願いをさせていただいております。それから発表 1 については産総研の大関先生、発表 2 については、日立パワーソリューションズの紺谷先生にお願いしております。11 時 15 分から 11 時 55 分、40 分間で全体討議を行い、最後に事務連絡をさせて頂きます。それでは杉山先生お願いできますでしょうか？

クローズドワークショップのとりまとめ

（杉山）

ACCESS 杉山から、5 月 23 日に実施しましたクローズドワークショップについて内容を報告いたします。

オンラインで 2 時間、非常にリッチなディスカッションをさせていただきました。キックオフの会合で、2050 年のシナリオとバウンダリについて問題提起があり、それらについて議論させて頂きました。具体定には私の方から簡単に話題を提供し、濃密な議論をさせて頂きました。スライドの編集やフィードバックをして頂いた先生方、参加の皆様にも感謝申し上げます。

最初の数枚の後は、当日の作業そのまま編集しないで載せていますので、適宜ご覧ください。ここでお話したいのは、このシナリオの分類という形です。EAJ のプロジェクトとしては、イノベーション政策、科学技術政策、人材、データなど、様々なトピックがある中で、特定の未来を前定にしないで 2050 年を踏まえて、幅広い状況に対応できる内容になったと思います。シナリオを当日の議論に基づきコンパクトにまとめました。

縦軸が電力事業です。横軸をかなりまとめております。供給のパフォーマンスとしては、信頼については工学的な安全と、そのほかに社会的信頼である安心の二者あると思います。集中型・分散 型の選択があり、集中型ではゼロエミッション火力の海外からの輸入、分散型では DR などアグリゲータで束ねることもあると思います。

全てが成立するわけではなく、需要側を犠牲にして分散型に全て依存することは難しいと思っています。またそれぞれの軸は多様な詳細情報が含まれこれ以上の次元縮小が難しいと思われます。

ベン図については簡単に整理をさせていただきました。本プロジェクトのアウトプットを科学技術政策と普及のいずれに重きを置くのか、日本全体の GX 政策まで議論を広げるのかなど、スコープの整理と取りまとめが必要です。趣意書などで荻本先生が以前からご指摘されているツールや人材育成などもスコープとしてあると思います。取りまとめ表についてはシナリオに共通するような場合とシナリオで分岐する場合を示す必要があるというご指摘をいただきました。

新しい視点としては、日本国内で人材育成を使うのか、それとも専門性的な知見や知識や人材を海外から人材を受入れるかによって、教育のやり方・受け入れ体制によりいろいろ変わってくると思います。本プロジェクトでどこまでスコープを広げるかは検討課題であると思います。雑駁な報告になりましたが中身あるか議論であったと思います。

（PL）

ありがとうございます。議論は今回・次回と続けていくわけですが、ただいまのご報告に関しましてご質問ご意見等あればお願いしたいと思います。

質疑

議論する時間はないので、問題提起というレベルでお願いいたします。

（杉山）

補足です。今回のスライドは暫定版で、その内容について議論を続けていくものだと思いますので、これからの議論を受けて必要に応じて修正していくと思います。今回の資料は今後考えるためのたたき台として使っていただければと思います。

（参加者１）

時間軸についてどう考えるかについて議論があったのかという点を教えてください。

（杉山）

時間軸はその移行の仕方によって変わるというのは当然ありました。事務局の案でも、スムーズに連続的・計画的な移行、あるいは破壊的・iterative な移行を示しています。特にデジタル分野ですと破壊的イノベーションというキーワードがあるかと思いますけれども、2050 年に仮に日本が脱炭素ネットゼロカーボンニュートラルを達成するとしても、破壊的に海外に全部持っていかれることもありえます。十分表現されていませんが、議論はありました。必要な点は 2030 年 40 年 50 年というふうに継続して追求していくのだと思います。

（参加者１）

認識合わせには大事な点と思いましたので、引き続き議論させていただきたいと思います。

（参加者２）

今回のクローズド WS の目的は、将来を考える上で関係者の間で共通認識を持つことだと思いますが、やっぱりやってみるといろいろ議論が広がっている状態だと思います。そこはどんなふうに考えるのでしょうか？

（杉山）

まだぼやっとしているというご指摘はその通りです。私の範囲でまとめています。今後はこのプロジェクト自体の方向性の議論を踏まえて、もう少し焦点を絞るというのはあるとは思います。ですがシナリオ自体は本プロジェクトの主要なアウトプットではなく、アウトプットを書くときの視点・視座を提供するのであり、そのためにはより簡素化することもあると思います。

（PL）

PL からも一言申し上げますと、前のページのシナリオ 2×3 の構造をしています。そういう状態に向かって先ほど指摘いただいた時間軸というのが入って、我々がものを考えるベースするというところまでは共有できたと思っています。横方向は従来型の集中的な供給と分散的な供給の組み合わせで三つにわかれていて、縦方向は需要の規模にわかれていますが、厳密にこれでいいのかという話は今からの議論の中で変わる余地があると思っています。

ただしこのイメージは、我々は今回共有したのだと思います。杉山先生、お忙しいところありがとうございました。

講演 1 太陽光発電（産総研・大関）

（PL）

それでは発表 1、発表 2 に進めてゆきます。発表 1 は、産総研の大関様に PV 分野ということでお願いしたいと思います。どうぞお願い致します。

（大関）

①カーボンフリーな低廉エネルギー供給

（S2-6）私の方から太陽光について、最終的な提言の取りまとめのポイントと、荻本先生から要望のあった観点を入れて発表します。

太陽光分野のイメージとしては、太陽光、導入場所と、あと予測、事業分野運営としては安全事業ですね、もう少し広げて小売りなどについてお話しします。

本来はこの 2 から 5 の項目に関連するトピックに分けて資料を作ってきました。

太陽光には大きく三つの役割が期待されると思っています。第一は、カーボンフリーの安価なエネルギーを提供すること。それをベースにしつつ第二には②のフレキシビリティの供給、第三には、ちょっと異なる観点ですが分散型電源としての役割であるレジリエンスの観点が考えられます。

個別の資料の説明は割愛しますが、最後のリスクとも関係するサプライチェーンが重要です。中国依存が相当ありますが世界的には相当伸びており 2023 年で 1.6TW の導入ということで、2020 年に初めて 1TW を越え 500GW 上乗せしています。日本の伸び率はそんなになくて右側の 2023 年の累積の連系容量が 91GW で、国単位では世界で 4 番目です。他方、中国は 2023 年の 1 年で 200GW と言っています。

①カーボンフリーな低廉エネルギー供給：コスト

（S9）コストに関しては LCOE でみてだいぶ世界の水準には近づいてきていると思います。

（S10）けれども、日本に関して事業用の kW 単価で見ると、例えばドイツに比べても 2 倍以上のコスト高が見られる。

この緑の電気・機械設備の施工費が大きい割合をしめており、この統計の分析には一部疑問があるものの、施工費が大きいことを示しています。ですが、3 ページに示すようにモジュールの流通コストにマージンがかなり乗っていて、それがコスト高の要因であることが今年度示されている。

①カーボンフリーな低廉エネルギー供給：排出量

（S11）CO2 排出量については、毎年 IEA Task 12 でレビューしており、右側の「エネルギーパック年」という生涯発生・排出量を何年の発電を回収できるかという指標では今 1 年程度と言われている。CO2 排出量に関しては、単結晶で 35 ～25 g/kWh 程度で、化石燃料の排出量との差分で排出量を削減しています。

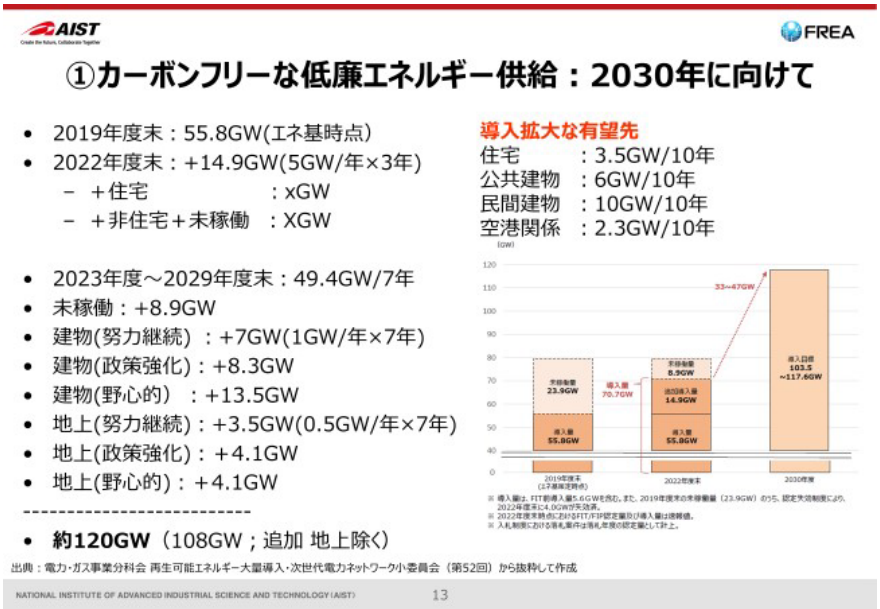
①カーボンフリーな低廉エネルギー供給：導入余地

（S12，13）2022 年における発電電電力量のシェアは 10%程度で、たくさん導入し供給しようとすると場所の問題が出てきます。現行の第 6 次エネ基では 100GW 程度となっています。地上設置でいろんな問題が起きたため、当面は建物をターゲットにしてきたが最近出た進捗ではちょっと芳しくない状況です。

（S14）2050 年の導入量を 100 GW から例えば 200 GW を 20 年ぐらいやるためには建物だけでは苦しいため、地上に戻ることも想定されます。

（S15）RITE の資料の中で、太陽光はピンクっぽい部分で、出力抑制を除いて大体 300 TWh、300 GW というところです。そのため第一には導入費用を安くする必要があるのですけど、施工費というよりは流通コストがどのぐらい安くなるかが問題です。

（S16）ランニングコストは 10 円/kWh のうち 3～4 円なので半分にしても大きく影響しないが少し課題かなと思います。どのぐらいまで本当に下げて 7 円とかの LCOE を目指すことについては資料があります。あとはシステムや制度の分野では、太陽光は 10kW 未満の住宅が 300 万件、低圧の 10～50 kW が 60 万件、特別高圧が 1000 件という構成で、多様なシステムが多数入っていて、プレイヤーが非常に多いことが特徴です。このため大きな容量を擁する発電事業者がいない現状で、それらを事業者とアセットをどう統合していくかは、制度上の課題です。また長期の課題としては、農地とか未利用地の活用があります。あとは、事業者・ポテンシャル・出力制御量の見通しなど、各種データがないという課題です。



②フレキシビリティ：出力の上げ/下げ

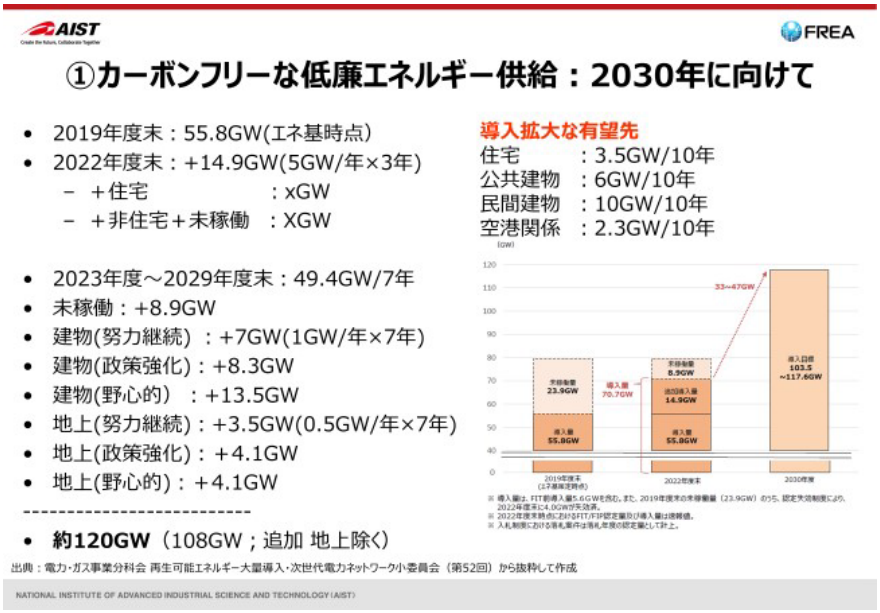
（S18）次に、ネットワークの関係では荻本先生から頂いたテーマについて現状と今後の取り組みを紹介します。

一つは外部からの起動停止が今後できるかどうかについては、特別高圧レベルの設備は専用線があり比較的早い対応ができます。それ以外は先ほどの通り何十万の設備が対象となり、基本的にはこの電力サーバーを PV からから読みにいってファイルを落とし、次は普通の制御となります。高圧にはいろいろなレベルがあります。

（S21）出力制御の出力を下げる側で何が起きているかというと、太陽光側の最大電流もとれる低圧側から少しずらして動かし、太陽光のエネルギーで発電できる分がうっすら熱に変わっているだけですので、何

か物理的に影響があるのは全くなく、高速制御ができることは一つの特徴です。パワコンまで来ると普通のパワーエレクトロニクスの制御ですので非常に高速です。上位系からの指令のスピードが問題であり、どのようなシステム構成するかが、何を対象に、どのような制御ができるかを決定します。

（S19）住宅・低圧は極めて多数で、高圧はいろんなレベルがありますけども 50kW～1MW まで 3 万件ぐらいです。容量としては、住宅で 1/4、低圧で大体 1/4 ぐらいですので、高圧・特別高圧が対応すれば容量の半分ぐらい可制御にできることになります。



②フレキシビリティ：オンライン化

（S20）足元での柔軟性の向上への対応としては、オンライン化をしっかりと進めることですが、現状はエリアによってばらつきがあることと、この数字が入ってないのは元々初期に入ったものは出力制御の対象外であったことで、例えば九州だと 11 GW のうち 4GW がそもそも出力制御の対象外です。

九州の場合は元々旧ルールで制御対象外の PV のオンライン化を進めており、半分ぐらいがオンラインになったところです。この解決のために一番下の制御対象外を対象とするよう制度を変える必要があり、パワコンを入れ替えるタイミングでどうするかの問題です。

②フレキシビリティ：需給調整市場

（S20）次が各種需給調整市場への対応になります。現状 1～3 次で、太陽光にとって一番厳しい条件は継続時間ですので、継続の必要時間が短ければ対応しやすく、当然そのまま出せることになります。応動時間は、先ほどの説明のとおり通信の問題です。もちろん専用線を引けば問題は解決します。応動時間に関しては大きな問題はないと思うのですが、持続時間と供給できるポテンシャルに関してはトレードオフの関係になります。3 時間継続の 3 次①は現状実施できなくはないと思いますが、相当量の出力を制御する必要性を考える必要があります。あと、最低入札量は、PV は小容量システムが多いため、容量が大きい特別高圧の 1000 件以外は、集約化しないと相当難しいと思います。

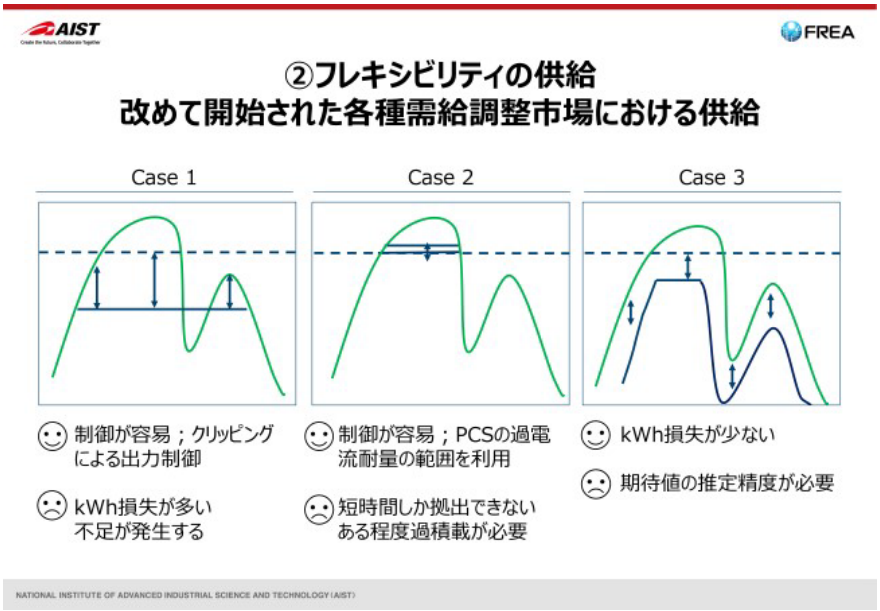
あと上げ下げで、下げ側は出力制御と一緒です。上げ側は出力制御を常時実施してないと難しいため、この制御をどういう時に行うかの整理が必要です。あとは細かいところで需給調整市場の出力上限値の高い方の値が日・時間によって変わることへの対応があり、さらに計画値のベースラインからの出力の上げ調整をどう設定するかは課題です。

（S24）一番の課題としては、前日のベースでいろんな調整力の提供の計画を入れると、どうしても保守的な計画になり、kWh を犠牲にして調整力市場に参加することが効率的な計画の作成が必要となる。下げ側はそれに限らず出力予測の誤差分を差し引いてどこまで下げられるかを考える必要がある。

（S25）太陽光については発電上限や安全計画のアセスメント I だけですが、太陽光の調整力供給に関する今後の検討課題です。

（S26）あとは上げ側については、図に示すようにクリッピング（上限）を適用し、それを下げれば余計に上

げられる考え方としている。真ん中の図は少し違いますが、後のスライドでお話しするグリッドフォーミングインバーターで、素子の許容電流の範囲であれば瞬間的に大きな電流を許容することで、太陽光の出力以内で上げ代を実現できる。この方法では無駄が多いのでその kW で制御する方法もある。いずれにしても重要なのは、今自分がどのぐらい下げて運転しているかを常に把握しておくことで、上げ代が分かるということで、そういった把握技術が必要となります。



②フレキシビリティ：実証試験

（S27）海外（米国）では、300MW、80 台のパワーコンディショナを使い実証試験を行い、CAISO からの AGC 信号に対し、またΔP/Δf に対する良好な応答が得られた。チリでは、下げ側の実証を行っている。

（S28,29）国内では産総研もこの分野の試験をやっており、250kW の設備に日射計を付けてリアルタイムで出力を把握しながら連系した。しかし、なかなか綺麗な日射データが取れないためフラットな出力を維持が課題であった。出力制御をしてから上げも課題だが、MPPT に戻す時間遅れの影響も考慮する必要がある。

ちなみに NREL の実証試験での期待値の推定多数台のパワーコンディショナのうち一部で最大出力を測定するという方法を使っている。

②フレキシビリティ：義務と市場

（S30,31）あとはフレキシビリティのところは、どのぐらい太陽光側で供給すべきか、という点で、仮に多くの太陽光が分担して供給することで、例えば火力の運転台数の低減、ひいては出力制御量を削減ができるのであれば、出力抑制を緩和する計算もあり、場合によってみんなが供給する世界もありうる。

フレキシビリティに関しては、義務的な方法と市場活用の二つの可能性が今もあると考えている。現実的な市場、民間の事業として政策を回していくときには発電事業者はどうしてもマネタイズする必要があり、義務的に入れられればそれは単純に装置をオンにするだけですが、その活用を需給調整市場でマネタイズできれば、場合によっては少し裨益すると考えられ、その方式は今後の課題と考えている。

義務的と市場活用のどちらが良いかについても検討の余地があると思います例えばグリッドコードが入れられているところは装置にオンするだけですが、需給調整市場で対応できれば状況は変わります。

②フレキシビリティ：グリッドフォーミング

（S32-36）グリッドフォーミングについては、別途発表があると聞いており、簡単に触れさせていただきます。現状普及しているインバータは基本的にはグリッドフォローイングでそのパワコンの基本的な動作は系統に依存していて、系統の電圧を見ながら電流を最大化する制御をしている。その方式でも電流の最大化はできないわけではありません。これに対し、グリッドフォーミングは自ら電圧を確立する方式であり、過渡的な電流を最大化する検討が行われていると認識しています。

②フレキシビリティ：蓄電池併設

（S37-39）グリッドフォーミング型インバータとして、基本的にはいろんな応答が求められておりパワーコンディショナ側の制御ロジックで模擬が行われている。しかし、太陽光の分野ではグリッドフォーミングのインバータの適用はできても、実際のプロジェクトでは太陽光＋蓄電池と、蓄電池のインバータのグリッドフォーミング化が想定されている。太陽光で押し出そうとして上限に達してそれ以上出せないという状況で、太陽光の出力変動で例えば減った場合、もっと出力を出したい場合、直流電圧が不安定にならないように対応を用意する必要がある。

けれども、そういったことが起きるので基本的には出力をリミッターで制御するか、MPPT 制御に切り替えが考えられている。一方でその出力リミッターにかかってしまうと、もしグリッドフォーミング付けたとしても、リミッターの場合はグリッドフォーミングの機能上限となりますので本来はこの青いラインにいるところが上限となり、周波数を持ち上げる効果は減ってくることになります。太陽光がそもそもどのぐらいの電圧レベルごとで導入されその機能を入れていくかによりますが、太陽光が今現状、リアルタイムにどのぐらい本当に出せるのかが、本来わかってないと効果を期待することが難しいので、例えば確率的にこの程度出せることが期待されるかが分かることが必要かもしれない。もちろん出力に確保量が与えられれば、その量を出すことができる。

②フレキシビリティ：蓄電池併設

あとはバッテリー併設については、送電網との接続の課題が十分分かっていなかったので、種類としてAC リンク、DC リンクがあり、事業用では AC リンクでは後で判断できるのに対し、DC リンクではインバータの容量で決まるため、PCS 容量で制約が起きる可能性がある。ルール上の問題ではあるが、連系点の電力制御が必要になるが、これが出力制御との関係で AC リンクには現状認められていないという理解で、基本的には DC リンクで出力制御はパワコンに与えられるものとなります。認められているとすると連系点の制御になりますので、簡単な通信でこの許容値を少し緩めにとることで、出力が出すぎる問題は回避できる。

（S38）これは九州電力 PG の資料で、現状では出力制御はパワコンごとに与えられていて、それらをバーチャルに合計値を抑えることは、制度上はできていないと思います。このため、そのあたりの自由度を持たせることも必要と思います。例えば配信事業者というシステムは一応ありますが、それは出力制御信号を送っているだけなので、例えばそれが間に入って、それがアグリゲートした量で配分してよければ、もう少し自由度が増えるかもしれない。あとはそれによって今設置している出力制御信号を受ける端末とアグリゲータが持つ通信端末が二重投資になる可能性もあるので、アグリゲータの責任をはっきりさせる必要がある。

（S39）ほとんど参考に近いですけども、欧州では住宅用 PV と蓄電池が、これは電気料金が高いという理由もありますが、新築で新しく太陽光を設置する場合は、8 割に蓄電池が導入されているようです。そういったことになってくるともう少し太陽光だけじゃない導入となります。

（S40～42）質疑応答の場をちょっと使わせていただいて、予測に関しては大はずれの誤差が今重要になりつつあり、その低減の取り組みを今いろいろ行っています。

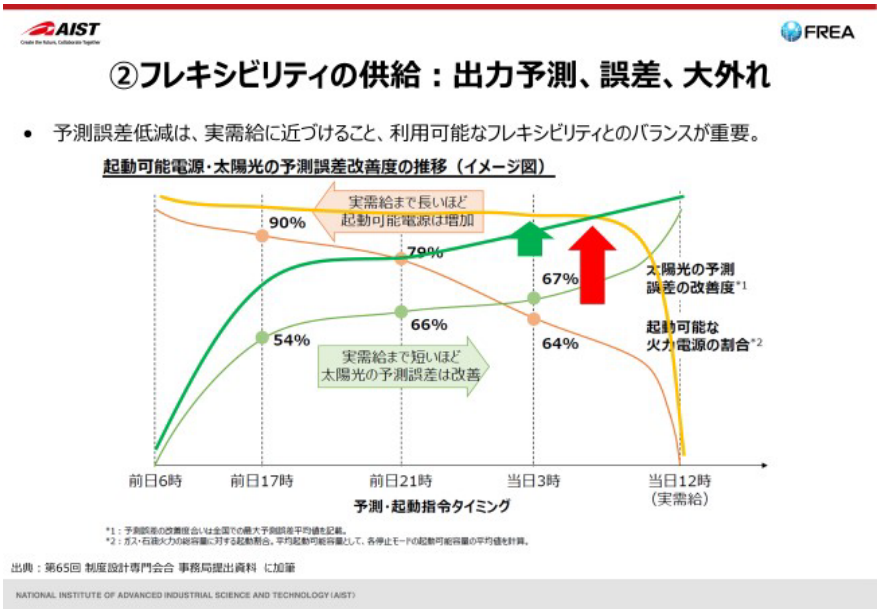
②フレキシビリティ：出力予測

2050 年までの予測の誤差の低減を 0.6 と仮定しているのですが、順調に下げることは難しく前日予測の誤差低減の実現性にはやや疑問がある。大外れに関しては、全球モデルとメソスケールモデルを、前日では気象モデルをベースにする必要があり、モデル改良も非常に難しいので、基本的には不確実性を複数のモデルを走らせてカバーするアプローチが今行われている。

また、我々と気象協会さんとの NEDO プロジェクトでは、前日予測の大外れを 10～20%下げる取り組みを行っている。

（S43）前日の運用計画は予測をベースに行われ、制約としては起動可能な火力の起動時間で、調整可能なものを現実に使っている。調整可能なリソースが増えて、より需給断面に近いところ時点で計画できれば、直近の予測が使える可能性がある。そのように考える理由は前日予測の大外れの低減は非常に難しいためです。

一方で当日のリソースは、いろいろな可能性があり、今衛星でいろいろ気象協会さんが実施しているのも気象モデルを直近のもので評価し、結果を計画に反映することの方が可能性は高いと考えます。



②フレキシビリティ：分散電源としての太陽光

あと分散電源としての太陽光は、レジリエンスというのは、送電網の削減の可能性も EV バッテリーをはじめとしていろいろあってよい。あとはどうしても人口減で未利用地を太陽光で使う土地利用の政策の段階では、オフグリッドとして独立できるのであれば、それは可能性としてある。これは本当に太陽光というよりバッテリーのコストでいくと相当依存する。そういった状況は太陽光としてはなかなか伝わりづらいと思います。

現在いろんなコンフリクトが起きており、ネイチャーポジティブとかの考え方もあるため、太陽光をどこにどのように導入するかは 2050 年についてはいろいろ考えなきゃいけないかなと思っています。需要家に近いところに入れることがベースと思いますけれども、それだけじゃ足りない場合には、あらたなことも必要と考えます。最後走りました。

（PL）

はい、ありがとうございました。あの時間通りということですけれども、質疑の時間が少し足りませんが、どうしてもということございましたらお願いしたいと思います短く、ご質問いただければと思いますが、いかがでしょうか？私から一つ いいですか。

建物への設置が最初に出てきましたけれども、建物に設置したときに kW は設置できると思うのですが、kWh はどういうことになるでしょうか？

（大関）

得られるエネルギーは二つあって、一つは屋根の設置では大きく変わらない。ポテンシャルの半分までにはいかないですが、もう少し大きなところで容量としては壁面も考えられ、kWh は通常の 8 割から 6 割ぐらいに下げて考える必要があります。

講演 2 風力発電（日立パワーソリューションズ・紺谷）

（PL）

はい、ありがとうございます。他いかがでしょうか？はい。それではまた後半の質疑の中で議論していただければと思います。それでは続きまして、日立パワーソリューションズの紺谷様に発表をお願いいたします。

風力発電の導入状況

日立パワーソリューションズの紺谷と申します。

発表内容

（S1）簡単に背景を説明します。左側に、日本の風力発電の累積導入量を示します。現状は 5GW、第 6 次エネルギー基本計画では 15GW をめざしています。右側に、風力に期待されている kWh を示します。

（S2）ここから先の説明は、前半に関しては、まとめて説明します。

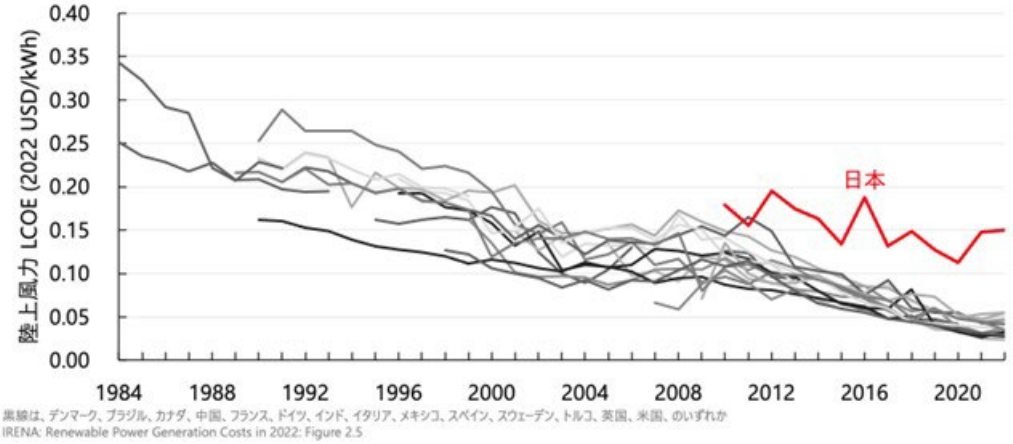
（S3）求められる姿・期待される役割と、キー技術に関する切り口で、それぞれまとめたものになります。求められる姿・期待される役割に関しては、太陽光のご発表と同様に、発電コストの低減、需給調整力の供給、地域との共生を挙げています。キー技術は、要素と、システムと、データに関する項目を挙げています。全部ではなく、それぞれ抜粋して発表いたします。

		②求められる姿・期待される役割		
		a.低廉な発電コスト	b.需給調整力の供給	c.地域との共生
段階的移行のためのキー技術	③要素	i. 長翼化・輸送 ii. リモート点検 iii. 浮体構造物	i. 再エネ制御の活用 ii. ダイナミックレーティングと風況解析	i. 防災電源化 ii. 環境影響評価DX
	④システム・制度	i. 規制合理化 ii. 高い導入目標 iii. 環境価値の活性化	i. 需給調整市場の再エネ向け商品 ii. グリッドコード	i. 促進区域・ポジティブゾーニング ii. 地元企業との連携
	⑤データ・解析	i. 電力需給解析による予見性確保 ii. 地点開発DX	i. 広域ならし効果 ii. 国際的な系統解析ツール	i. データベース拡充

a.発電コストの低減：長翼化・輸送

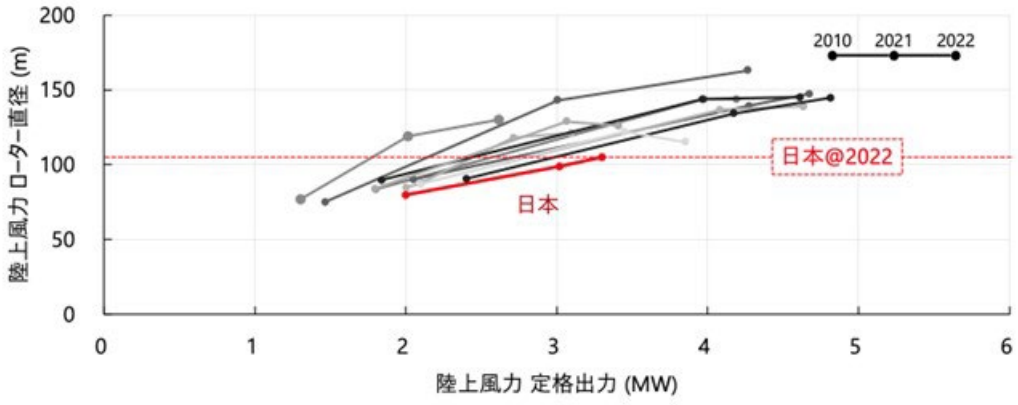
（S4）発電コストに関しては、赤枠で示している、発電機の長翼化・輸送性の向上、リモート点検、電力需給解析に関して説明します。

（S5）陸上風力の LCOE の推移を示したグラフです。赤色が日本で、それ以外の黒色が他国を示します。LCOE は年々下がっていますが、日本だけ非常に目立って高止まりの状況になっています。この理由として、日本に導入されている風力発電機は設備容量の小さいものが多いという状況が挙げられます。



（S6）こちらは IRENA の資料で、陸上風力の定格出力とローター直径の 2010～2022 の推移を示したグラフです。日本の 2022 年のローター直径と比較して、他国の方が大きい機種を導入しているのが分かります。

日本で小さい風力発電機が多い理由には、日本の風車適地は山岳地に多いという事情があります。他方、スライドに書いておりませんが、沿岸地の風車適地には既に建設してしまっています。このためなかなか大型化が進んでないというのが現状です。昨今では、ブレード（羽根）の長さを伸ばすために輸送を工夫する取り組みが行われています。



黒線は、ブラジル、カナダ、中国、フランス、ドイツ、インド、スウェーデン、トルコ、英国、米国のいずれか
IRENA: Renewable Power Generation Costs in 2022: Figure 2.2

（S7）例えば、ブレード（羽根）の分割や、タワーの分割、さらには中に入っている発電機を分割できるように設計することがあります。

今まで大型の風力発電機を建設する際は、1,200t クレーンなど日本に数台しかない非常に大きなクレーンを使っていましたが、近年では現地で施工できるタワークレーンを使う取り組みが行われています。クレーン関連では、建設するときだけではなくて、クレーンを持ってこなくても撤去できるような工法が考案されています。

写真にあるように、起立台車と呼ばれる、ブレードを傾けて運搬するトレーラーが最近使われております。山中で木に当たらないようにするためには伐採範囲が非常に大きくなります。少し傾けて木に当たらないようにしながら、山のふもとから山の上まで運ぶことができます。

a.発電コストの低減：リモート点検

（S8）リモート点検・省人化も、取り組まれている分野です。写真は弊社で取り組んでいるものですが、ドローンを使ってこの風車のタワーの部分を遠隔で監視に活かす取り組みをしています。

それ以外にもひずみセンサーを使ったボルトにかかる力のモニタリングや、ローカル5Gを使ったリアルタイム画像による分析もあります。SCADAのデータを使った故障前に点検に行くなどの予兆診断も何年も前から研究されておりますけれども、今後ますます重要になっていくと考えています。このように最近出てきた技術を使って保守点検費を下げ、故障を未然に防ぐことが、発電コストの低減では重要になると考えています。

a.発電コストの低減：電力需給解析による予見性確保）

（S9）データ解析に関しては、今まで発電事業の事業性評価にあたっては、発電所の風況解析をして、出力制御を考慮しない発電を前提にしていました。しかし、現在は系統の接続ルールが変わり、事業性評価では将来の出力抑制を考慮する必要があります。

新たな系統接続ルールであるノンファーム接続は、送電網の混雑時の出力制御を前提として接続を認めるというもので、2023 年度から本格的に進められています。出力制御には、需給バランスによる需給制御、送電容量制約による系統制御があり、送配電会社が公開する情報では、1 年目や 5 年目の過酷な断面のみが公開されています。

一方で、発電事業は 20 年以上の事業期間があり、あと発電量評価というのは 10 分値や最長 1 時間値程度で、それぞれの画面での kWh および時系列を評価するニーズがあります。このため、必要な個別の断面や時系列の評価には、事業者が独自に計算することが必要と考えています。

（S10）例えば電力需給解析のソフトウェアを使って出力制御の評価を行います。左側の北海道の風力発電の地点別導入量を使って解析した結果を右側に示します。2030 年の断面で、変電所単位の出力制御を示しています。この解析の結果から、道北の西名寄と呼ばれる場所で出力抑制が予想されるという解析結果です。

送電線容量を考慮すると、出力抑制が発生し、その大きさは地点毎に異なることがわかってきました。今回は自分たちで実施したのですが、銀行との協議を見据えると、客観性を保つために第三者評価ができるようになることが望ましいと考えています。

b.需給調整力の供給

（S11）需給調整力について、風力発電でどのような制御ができるかについて説明します。

b.需給調整力の供給：再エネ制御の活用

（S12）左側が、最大出力抑制の制御事例です。黒色の線が指令値で、赤色の線が実績の出力で、指令値に合わせて一次遅れぐらいで追随する結果が得られています。右側は出力変化率の制御で、これは 1 秒間あたりに変化できる kW を制御するもので、水色の線で示す制限値と赤色の線の実績の出力がほぼ同じくらいの値であり、制限値を超えない範囲で出力が増加することが示されています。

（S13）周波数調定率制御です。左は調定率の設定値で、周波数に基づく出力の関係を入力するものです。右側が実績値で、紫色で示す周波数が上がると出力が下がることが確認できます。

（S14）調定率制御とは少し違った観点で周波数を制御する方式として、イナーシャ制御があります。イナーシャ制御では、周波数が下がったときに、風車の回転エネルギーを電気エネルギーに変換して、出力を短期間（10 秒程度）だけ大幅に増加させる制御です。左は、イナーシャ制御が一般的な風速で行われた事例です。紫色の周波数が下がった時点で、赤色の出力が短時間増加しています。この時、緑色の風車の回転速度が出力の増加後に少し下がることがわかります。

（S15）ストーム制御という機能の事例です。左側の風車のパワーカーブでは、風速と出力の関係を表しています。風力発電所は、通常は風速 25m 程度でカットアウトと言って停止しますが、いきなり停止してしまうと出力が定格値からいきなり 0 になり、電力システムにも大きな影響があるため、本来であればカットアウトが働く風速に達しても出力を低減して発電を継続する機能です。

左側のパワーカーブにおいて水色がその制御特性を示しています。右側は実際に動作した場合のグラフで、青色の風速が本来であればカットアウトする値を超えても、赤色で示している通り出力はいきなりゼロにならず、出力を抑制しながら発電を継続しています。

b.需給調整力の供給：需給調整市場の再エネ向け商品

（S16） システムや制度の視点から、これらの出力制御機能の活用を考えています。

例えば、下げ調整不足で出力制御（抑制）が現実に行われていることから、再エネの下げ調整力も何らか使えるとよいと考えています。再エネの下げ調整力がなぜ実際に使われていないのかを調べてみました。需給調整市場で再エネの下げ調整力を商品として扱おうとするとどうなるか審議されています（S16 の注記 *3-5 を参照）。需給調整市場には、調整力ΔkW 市場と調整力 kWh 市場があります。調整力ΔkW 市場では、そもそも下げΔkW は対象にはなっておりません。また、調整力 kWh 市場では、他の契約形態でまかなえるため、下げ kWh は想定されていません。また、現状の制度ではネガティブプライスは認められていないので、仮に出力を下げたとしても報酬は得られません。そういった事情があって、需給調整市場で再エネ調整力を商品化するためには慎重な議論を要することが分かります。

（S17）需給調整市場の後に同時市場が検討されています。現在、同時市場に移行する便益が評価されているところです。同時市場では再エネ調整力がどのように扱われるかを調べてみると、こちらの方では市場メカニズムで下げΔkW を確保する議論があります。下に示しているのが委員会で提示された考え方です。左側にありますのが、需要が 100 で上げΔkW が 25、下げΔkW が 25 必要な断面で、応札のリソースが 50 出せるものが四つあったというタイミングです。右に示している通り、ユニット A とユニット B が 50 で、下げΔkW の 25 はユニット A に、上げΔkW の 25 はユニット C に配分することが示されています。注目したいのが、上げと下げを担当するユニットが違う点です。同じリソースが上げΔkW と下げΔkW を担当する場合は再エネ電源の調整力は活用しにくいのですが、上げΔkW と下げΔkW を別のリソースが担当できる市場であれば、再エネ電源の調整力も活用できると期待しています。

需給調整市場を変えるのか、同時市場導入のタイミングで再エネの調整力を活用するのかという選択はありますが、再エネの調整力を活用できる市場設計が今後進むとよいと考えています。

b.需給調整力の供給：グリッドコード

（S18-19）グリッドコードは系統に接続される電源が遵守すべき技術要件で、再エネの導入比率に応じて 4 段階で議論が進んでおります。現在は再エネ導入比率 36～38%を想定したフェーズ 2 の総合評価中の段階で、2025 年度に要件化される予定です。

グリッドコードの審議では、機能の具備と適用が混在して議論されている印象です。スライドの下段に示すように、現状の日本では 5 種類の法規が代表的で、グリッドコードはそのうち 4 番目の「系統連系技術要件」に記載されるものです。この系統連系技術要件は時間軸が考慮されておらず、改定されるとすぐに実運用に至ってしまいます。後付けでルールが変えられると、風力発電所の事業性に影響し、設計変更で工期が守れないなど、なかなか難しいところもあります。今後のグリッドコード検討では、機能の具備と適用を区別して議論頂けると、風力発電事業の観点からはやりやすくなると考えています。具体的には、具備に

関してはガイドライン等で事前に示していただいて先見性を確保していく、一方で適用に関しては最大の導入比率など状況に合わせて別途判断頂けるとよいと考えています。

b.需給調整力の供給：グリッドコードに関するデータ解析

（S20）グリッドコードに関連して、今度はデータ解析の関連で説明します。風力発電に関するグリッドコードで代表的な要件として「有効電力の増加速度の上限」が挙げられます。5 分で 10%程度の増加速度に制限してほしいという意見があって、2022 年度に要件化されて、現在適用について議論中です。風力以外は適用が見送られている段階です。

この要件の必要性について OCCTO のグリッドコード検討会で議論されています。必要性を議論するにあたって、大型機や洋上風力を考慮した定量評価ができるか、PV と同様に風力でも広域ならし効果が生じるか、制御による広域での 5 分 10%を担保できるか、との御指摘がありました。

（S21）例えば洋上風力では洋上風況マップ NeoWins というものを使っており、離岸距離が短いものでは 500m 格子、一方で離岸距離が遠いものでは 10km 格子と粗くなります。一般的に風力発電機の離隔距離は風向によって変わりますが、直径 D の風力発電機では主風向が 10D、それ以外が 3D とされています。例えば直径 250m の風車の場合は 750m 間隔で並ぶため、10km 格子のデータではならし効果をうまく表現できない。なるべく細かい格子を使うか、やや距離が離れている部分でも 500m 格子で風況データが得られれば評価しやすいかと考えています。

全球モデルからダウンスケーリングする手法として力学的な WRF が一般的です。近年では AI を活用した手法も研究されており、今後の技術発展により、広域ならし効果を確認しやすくなってくると期待しています。

（S22）あともう一つグリッドコード検討会で指摘されたのが、「制御によって連系点ではなく広域でこの 5 分 10%を担保できるのか」という点です。一般的に出力増加速度が問題になる暴風時です。定格出力が出ていて、カットアウトで急に 0 になり、再びカットインしてまた定格出力になるのは、停止と定格出力を繰り返すことになり、系統によろしくないというのがあります。このため、要件を緩和しても広域で 5 分 10%を担保できるか定量評価できるようになることが必要と考えています。

（S23）グリッドコードの関連では、系統解析ツールの議論もあります。フェーズ 2 で特別高圧の PV と風力の実効値解析が要件化され、このツールには送配電会社が今使っているツールのパラメータを提出することが決まりました。しかし懸念は日本独自のモデルになりつつある点です。風力発電機は基本的に輸入品であり、欧米の風車メーカーが対応できる内容になってほしいと考えております。

実効値解析の項目としては同期安定性と周波数が今回要件化されており、同時安定性のモデルは欧米と同じようなものを使うというものですけれども追加のパラメータが必要になってくる。周波数の方は、LFSM という日本独自のモデルでそのパラメータを提出する要件になっています。パラメータを秘匿したまま計算できる系統解析ソフトウェアが既に市販されているため、国際的に使われているツールも活用できる方向への移行も今後必要と考えています。

c.地域との共生

（S24）地域との共生に関しては、防災電源化について説明します。

（S25）こちらは、弊社が納めております蓄電池式風車の概念図です。風力発電と蓄電池を併設したもので、停電していないときは風力発電と蓄電池の合成する電力を供給し、停電した際は風車と蓄電池で自立系統を構築して重要な施設に電力を供給します。

このようなシステムを蓄電池単体で構成すると、蓄電池の残量をすぐに使い切ってしまいます。そこで、風車と蓄電池を組み合わせて重要施設に対して連続供給する構成にしています。今後も、防災電源化やレジリエンス向上という観点で検討していきたいと思います。

発表は以上です。

質疑

（PL）

はい、どうもありがとうございました。少し質疑の時間残していただきましたので、まずただいまの発表に関しまして風力についてご質問等あればお願いしたいと思います。

私から、最初の方で輸送の問題があって、山岳地が多いので日本ではコストが高くなるというお話がありました。今注目されているのは洋上では、着床式から使うということになるわけですけれど、コストの構造と低減策について、海外と比べて、何が期待できるでしょうか。

（紺谷）

弊社は洋上風力に取り組んでいないため、洋上風力の知見は少ないのですが、先週大きなニュースがありました。補足資料に、浮体構造物に関して載せています。

（S42）グリーンイノベーション基金の中で、洋上風力向けに 1000 億円規模の補助金があります。2030 年までに着床式のコスト低減と浮体式の低コスト化を図るという内容です。フェーズ 1 とフェーズ 2 で構成され、フェーズ 1 は個別の要素技術の開発、フェーズ 2 は大型機による実証実験で、浮体式の洋上風力の建設です。採択された事業は秋田と愛知の 2 案件でした。15MW クラスを 2030 年頃に建設する内容で、いずれもセミサブ型の浮体構造物が選ばれています。

（S43）セミサブ型が今まで使われてこなかったデメリットは、支柱がたくさんあって溶接が必要ということでした。近年では、部材をモジュール化して港湾で簡単に組み上げられるようにすることで、浮体構造物の原価低減を図ることが検討されています。三枚の写真のうち、左側は従来型の溶接タイプ、右側は組み上げタイプです。

（PL）

はい、ありがとうございました他にいかがでしょうか？

（参加者３）

最後のところでですね、これからグリッド構造を決めていく上で、海外メーカーの発電機が輸入品であるので、仕様を対応しやすい内容に合わせてほしいというご説明がありました。これは、時間の作業として増えるのか、システムを組み上げる上での難しいのかなどです。日本流にカスタマイズをすることにも意義があると思ったものですから。

（紺谷）

欧米メーカーの発電機を日本向けに改造して輸入しているのが現状です。欧米メーカーが全然考慮していない技術項目を許認可で要求されることを危惧しています。制度の方が勝手に先行して進んで行くと、欧米メーカーが日本向けの設計を拒む、あるいは日立 Gr.で試験用に発電機を購入して試験した後でやっと日本向けに使えるようになる、そういった大きな手間がかかることが考えられます。

海外では大型で効率のよい機種があるにも関わらず、日本では数世代前の古い機種を使うことになると、発表の冒頭で示した発電コストの差が縮まらない、むしろ悪化することが懸念されます。

（参加者３）

そういうときに例えば日本で例えば日立さんが製造しておられれば、そういう問題は回避できるのでしょうか？

（紺谷）

日立製作所は既に風力発電機の製造から撤退しており、再度参入する計画も聞いていません。

日本向けの風力発電機を設計しようとすると、まず日本向けに高品質な機種を設計して、次に他国向けにダウングレードする設計思想になってしまいます。日本向けに台風にも地震にも強くて非常に頑丈な風車を作ったとしても、海外でそれを建てる場所が少なければ、ただコストが高いだけの機種になってしまい、国際的な競争力もなく、日本でローカルに使うだけになってしまいます。

（参加者３）

ありがとうございますよくわかりました。

全体討議

（PL）

ここから全体の議論を始めます。再エネ分野では、代表格の太陽光と風力ですが、中身はだいぶ異なります。これどう議論していけばよいか難しいところはありますが、第一に導入可能量、第２番にシステムサービス的な領域、第 3 に技術開発を考えました。このそんな順番で議論いただければと思いますが、こういうところが重要だとお考えでしたら、その流れの中でご提案いただいてもよろしいかと思います。

それでは、太陽光と風力はいろいろなところにいろいろなスピードで導入されますが、大量導入の実現という点について質問あるいは意見をお願いします。

大量導入とコスト

（参加者４）

コスト・プライス面では、モジュールが世界的には相当安くなっているが、説明したように、流通の面からは年間一、二件しか作らない住宅用の設置事業者に体力をつけるためには、太陽電池の調達先により流通コストが乗る可能性がある。これに対して、1 ヶ所 50MW あるいは 200MW となれば状況は大きく異なる。このため、流通コストは結構残る可能性があって、その低減には共同調達をする話はある。しかし、どこまで下げなるのかという点では場所によって大きく異なり、また例えばオフテーカーが誰かにも依存する。

コストは、住宅用であれば 24 円/kWh などの目標価格があってそれぞれを見て引き下げる必要性を考えることになる。今住宅に入っているコストはある程度いいかもしれない。中間の建物になると 14 円とかもう 18 円なるのでそれを買ってくれるで、多分自家消費やオンサイト PPA であれば普通に入っていく。

大手以外は金銭面の課題で初期投資できないことがネックであって、その問題が解決すれば導入が進むと考えます。建物の制約は実態としては大きくなく、例えばペロブスカイトでなければ導入できない領域もある程度あるが、その制約は大きくないと考えている。ペロブスカイの効果はプラスアルファ程度と考えています。

建物では面積だけで言うと 400GW 程度ポテンシャルがあるが、全部には導入できない。そうすると地上への導入が必要となり、その場合、誰に売るか、または市場で売ろうとすると 7 円程度に下げる必要があり、その実現はハードルが高い。その場所が未利用地で更地になっていれば、金額でいけば成り立つが、造成とか全部込みの場合はで最近の入札では 7～8 円ぐらいになっている。ただこれが大量に導入できるかどうかは売り先次第だと思う。2050 になればモジュールは相当安いので、7 円などでできると思うが、出力制御で設備利用率が 18%とか 17%から 12%になったら 5%はどこに売るかあるいは蓄電池で貯めるかがポイントになる。太陽光のシステムの価格というよりどこでマネタイズするかにより、導入量が決まると思う。

地域との共生の面では、地上設置は今相当コンフリクトが起こっているが、2050 年までには解決できる課題だと思っており、当面は建物に導入しつつ 20 年ぐらいかけて地上設置をできるようになることが期待される。導入の是非は、システム価格よりどういうビジネスモデルになるかに大きく依存すると思う。

（PL）

はい、ありがとうございます。導入量について風力から追加でお話しがあるでしょうか。

（参加者５）

陸上のポテンシャルに関して、ポジティブゾーニングマップを環境省が推進中です。どこに設備を導入できるかを市町村が主体となって検討する制度的枠組みです。ただ、現状、日本にある約 1,700 市町村のうち、設定されているのが 32 市町村（2%）、うち風力に関して設定されているのは 4 市町村だけです。市町村のほうに、風車を積極的に受け入れる“気持ち”が育っていないのではないか、と気になっています。

風況や技術的な面であればポテンシャルは大きいと思いますが、（風況や技術以外の面も考慮すると）設置できる場所が限られるように思います。

（PL）

みなさまからいいかがでしょうか？

導入可能量：グリッドコード

（参加者３）

技術的な導入可能量とグリッドコードの設定が大きな課題と思います。例えば中期的にはよく議論されている。火力発電所の制約を考えて系統運用をリアルタイムに近づけて整備すれば、かなりの量を導入できることは、シミュレーションで確認できています。しかし実際には今の系統運用のやり方が市場を介して行われ、グリッドコードの検討が行われていが、シミュレーションの結果とはギャップがあると感じる。シミュレーションの結果を反映したグリッドコードにはいろいろな制約がある。特に太陽光に関して、過去に制定したグリッドコードが邪魔になって、過去に制定したグリッドコードと相反するグリッドコードを制定しづらくなると気になっている。例えば、需給調整に家庭レベルで参加できるシステムを作り、大型の太陽光発電に加えて家庭レベルの需給調整市場への参入を意識した PCS などの技術開発、上位からの信号や掲示板の情報によって運用し実績を清算するようなシステム開発を行えば将来に相当量の太陽光の導入が可能になると思います。

（PL）

ご提案ということでしたが、お二方から、その可能性などについて回答があるでしょうか。

（参加者４）

太陽光にはいろんなシステムがあり、確実に動くかという点を考えた実装が必要と考えます。例えば、住

宅用の 320 万件がちゃんと動くのか、また低圧とか高圧 100kW の設備が 1 台あるいは 10 台で構成されているなどの状況に対し、グリッドコードの規定や、それがうまく動かない場合の確実性の考慮などが課題であると思っている。おっしゃる通り多様な機能の活用はやっていくべきことと思うが、どのレベルの内容を目指すのかが課題です。時間やスピードなどが問題となる。太陽光は対象設備数が多く、アグリゲータを通した取引となる。そこでどこまでで期待できるかということです。

他方、自端でできることもあります。既存のものでフリッカや単独運転の対策に関するグリッドコードあり、LRT などとの協調をクリアするなど、時間軸では相当考える課題があると思います。ですが、おっしゃる点はグリッドコード検討会でも議論されていると思います。今後具体的な課題に落とし込んでゆく必要があと思います。

（参加者５）

過去に作ったルールが後になって邪魔になる事例として、オンライン化のルールが挙げられます。初期に導入された発電所はオンラインが義務ではなかったため、旧ルールや新ルールによりオンラインとオフラインが混在している状況です。これは、今まで作ってきたルールが邪魔をする例でしょう。また、運開後の改造は難しいため、将来必要となる技術要件の予見性を上げることが必要と考えています。必要となる機能の予見性を確保する議論と、必要な段階でその機能を使う議論の両輪が必要と考えます。

（参加者３）

例えば、太陽光で言われたいろいろな設備が混在することによる難しさは認識をしています。それで、今後導入される、例えばグリッドフォーミングなどの新しい技術に関するグリッドコードの設定の際は、その新しい機能を最大限に活用できるグリッドコードを、既成概念を超えて目指すように、将来の状況を想定してグリッドコードを作ることが必要と考えます。例えばシミュレーションではここまで導入が可能であるという前提で、それで古い設備は少しずついわゆる新設備に替わってゆくことを考えながら、新規の導入に関するコードを独立して考えていくことは可能であり、その方向に向かうのが一つのやり方かなと思います。

（PL）

技術をなるべく競争させるという意味では控えめの安全要件にしておくという作戦もある。グリッドフォーミングでは一定の範囲を追加で可能とするという内容も考えられます。オーストラリアでは競争に軸足があり、ヨーロッパは新しい機能を規定する方に軸足があると、考え方に差があると感じます。

需給調整の実施方法

（参加者３）

小容量の設備を集めるためのアグリゲーションという考え方は非常に重要だと思うのですが、一方で、そのアグリゲーションは EMS などコストが高く、実施のハードルが高まることがありえます。これに対して、家庭レベルに対しては、中央給電指令所から望ましい需給を想定・公開して、それに追随するシステムを考える余地がある。公開は 1 ヶ所だけでもよいし、地方レベルに落としていってもいい。地域ごとに実施することでそれをただやるだけでも相当ハードルが下がると思う。このような考え方を前提にコードを作っていくことはいかがでしょうか。

（PL）

議論は調整力などの機能からアグリゲーションに来ています。私からの追加のコメントとしては、日本で十分実施されていない分野は、まず価格変化に対する自律的な需要シフト、次に自律制御、要するにガバナフリー的な機能を有効電力、電圧制御について実施する余地があると思います。この分野は世界ではもう少し進んでいる感じです。エリア全体の視点では、ハワイはいろいろ課題をかかえながらも着実に進んでおり、その苦労のプロセスは日本にも参考になると思う。

（参加者４）

柔軟性の供給は何も考えなければ系統からの指示が一番安いと思うが、出力抑制とかアワーを減らす制約がなければ、発電事業者としてもコストとして成り立ち、パワコンの改良だけの問題になる。ですが、出力抑制が行われ kWh 即ち収益が落ちる段階では、そのコストを需給調整市場でマネタイズするのか、ただ義務的に求められると言われるとマネタイズもできず、システムコストの低減が必要となる。その可能性は、需給調整市場での競争でやる場合、その状況は太陽光だけではない。市場の中で、エネルギーネットワークを安定化させることに太陽光も何か貢献できなければ、出力抑制の分だけシステムコストを下げることになり大量導入のハードル高くなる。そのときに、応答が少し遅くてもよければ需給調整市場の参加は可能で、競争に参加して成り立つビジネスモデルとそれに関するルールを決めればそれでいいと思う。グリッド

フォーミングなど速い応答を市場で取引すする可能性があるが、それは結構議論になる。強制で全部に適用することの方が安定という考え方もある。グリッドコードについては先ほどの議論の通り、機能として全部備えておいて、具備と適用は別の話と整理しておけば、運用として誰がどう使うかは別の仕組みと思う。これらを社会システムで成立させる考え方は、まさに議論していくべき点と考えます。例えば先ほどの高圧と特別高圧が 3 分の 1 について、これらを全部調整に使う解もあると思う。今は代理制御として、遠隔で制御できない設備が実施できない分の出力制御を他の設備で補填するような極端例もある。今後はそこまでは考えられないので、今後は誰に責任を持たせるかということとのセットになる。このため、技術というより社会システムや制度の話であると思う。ですからグリッドコードは機能として長期間でのあるべき姿を理想形で規定しても良いが、収支との関係もあるため、機器開発や予見性の話でどのくらい押しきれるかということになる。

（参加者５）

大関さんの発表資料にあった、義務的に確保するのか市場で確保するのか、という切り口は、私も重要だと思います。特に、需給調整力を義務的に確保するのか市場で確保するのか整合性を担保する議論が必要と思います。市場の方で再エネの調整力が認められても、義務の方で足かせがあると、市場を活用しづらくなると考えています。義務と市場をうまく整合させることが必要と思っています。

技術開発・国産化率

（PL）

はい、ありがとうございました。技術開発の話題も少し出ていますが、そこについて何かご意見ご質問あればと思います。あとは、さっきあったような外国製品に対して日本流の解析モデルを求め点も、いかがでしょうか。最後 5 分ですけれども何かございましたらお願いいたします。

（参加者３）

グリッドコードは緩めておいて、調整力の必要量をリアルタイムで表示して、それにできるだけ合わせることでしっかりマネタイズするシステムは理想的と思います。それより技術がそこに合わせ進んでいく、将来の方向性を見た上でグリッドコードもマネタイズの仕方も提案をしてゆく形がよろしいと思いました。

（PL）

ビジネスモデルや調整力も含めて技術体系とインフラを作っていくのが重要。それで全部ではないということもありますが小容量で多数の資源の活用には共通の難しさがあるということでしょうか。

（参加者４）

技術開発はパワコンの開発が行われています。太陽電池側では効率が上がった設備でリパワリングして同じ面積でよりたくさんの kWh が得られるのですが、制度設計や市場の影響が大きいと思う。太陽光の発電事業者は数が非常に多いため、それら人たちをどうまとめられるかが重要です。

（PL）

PV あるいはソフトについて、どの程度の国産化率を目指すべきでしょうか？

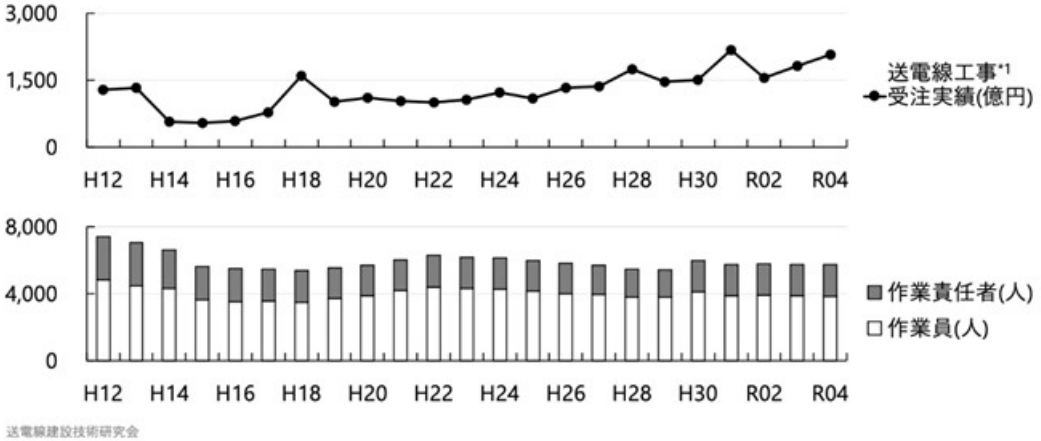
（参加者４）

この議論は両面あって、アメリカは IRA で国産化率を相当あげることを目標に米国内に太陽電池とパワコンの工場を作ろうとしています。米国には国内需要が 900GW ぐらいパイプラインとしてあって、そのぐらいあると彼らも投資できる状況です。欧州・インドも同じような政策を打っている。世界的に中国依存は下げたいのは共通の考えで、日本もそれを目指したが担い手がない状況。年間 10GW の市場では十分な大きさがないから外資だけでやる。サプライチェーン・エネルギーセキュリティの問題もあるが、中国以外の多様性が確保できれば 10 年ぐらいのスパンでそのモジュールの供給が止まっても、何か打つ手はあると考えると、非常にシビアな問題ではないと太陽電池側では思いました。パワーコンディショナについてよく言われるのは、一斉脱落などの障害が起こるため、中国製にセキュリティの問題があるけど、それは非常時のときのリスクの問題であり、米国もパワコン自体は中国製を拒否してない。国産化率は高い方がいいが、マストかについては相当多面的な議論が必要と思う。

（参加者５）

今日は風力発電だったので発電の観点で発表しました。一方で、発電事業では送電線との関わりもあります。風力自体の人材育成や保守要員の確保も大事ですが、送電線工事をできる作業員や会社も限られる状況と聞いています。今後送電線工事の人材不足で再エネ関連の工事が進まないようなことがあると、

発電所は建設できても売電できない状況もあり得ると考えています。



閉会

（PL）

はい、ありがとうございました。それでは、時間になりましたので、最後に事務局から連絡をさせていただきます。

（事務局）

事務局から連絡させていただきます。本日の会議を録音して文字起こしをしています。こちらの方も今日参加できていない先生方もいらっしゃいますのでお送りしましたボックスのアドレスにアップさせていただきます。

第 1 回会合の発言録と議事録を近日中にメールさせていただき、かつボックスにもアップさせていただきます。

それと第 3 回目の日程調整をまた近日中にさせていただきます。またよろしくお願いします以上です。

（PL）

はい、どうもありがとうございました。若干補足ですけれども、議事録は毎回整理していきます。発言録については、チェックをしていただく段階まではですねどなたの発言かをわかるようにして、必要な部分を修正いただきます。自由に発言していただくことを担保するため、発言録はそれぞれ自由に修正あるいは全部削除することも致します。そして最後まとまりましたら名前を全部削除して記録として残させていただき報告書の添付文書とするなどの扱いを考えています。

本日はこれで終了いたします。どうもありがとうございました。

第 3 回会合

開会

（荻本 PL（以下 PL））

時間になりましたので戦略プロジェクトの第 3 回会合を始めたいと思います。3 回目になりましたので、趣旨とかの説明は若干省略して時間を発表と全体討議に使ってまいりたいと思います。本日のご発表は東京都市大学の中島先生、それから東京大学の馬場先生にそれぞれ直流送電とインバータの話題提供をいただきます。

中身を考えて、発表 1 と発表 2 の順番を変えさせていただき、まず馬場先生からインバータに関する話題提供をお願いしたいと思います。続いて中島先生に直流送電にお願いします。それぞれ 30 分ずつお話しをいただきまして、その後 1 時間かけて議論をさせていただきたいと思います。

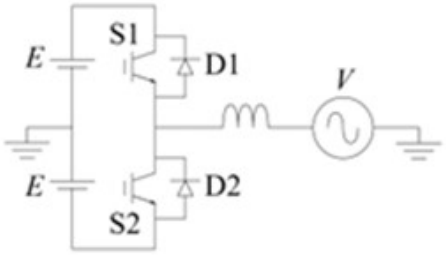
それでは、馬場先生、よろしくお願いいたします。

講演 1 インバータ（東京大学・馬場旬平）

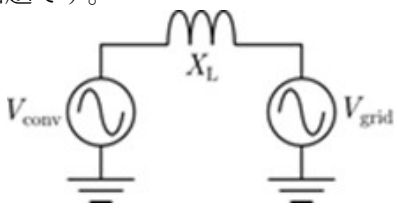
対象とする系統連系インバータ

ただいまご紹介にあずかりました馬場から、インバータに関する話題提供をさせていただきます。ただインバータに関する話題って非常に多岐にわたる話でございまして、ここではちょっと語り尽くせない話もあると思います。

本日ですけれども、対象としては、インバータ半導体電力変換装置のうち交流系統と連系する電圧型自励式変換器を扱わせていただきます。基本的な構造はご存知の方も多いかと思いますけども、直流側に電圧源がついていて、それをスイッチにより入り切りして、あたかも交流の電圧源のように見せる、そういった装置です。



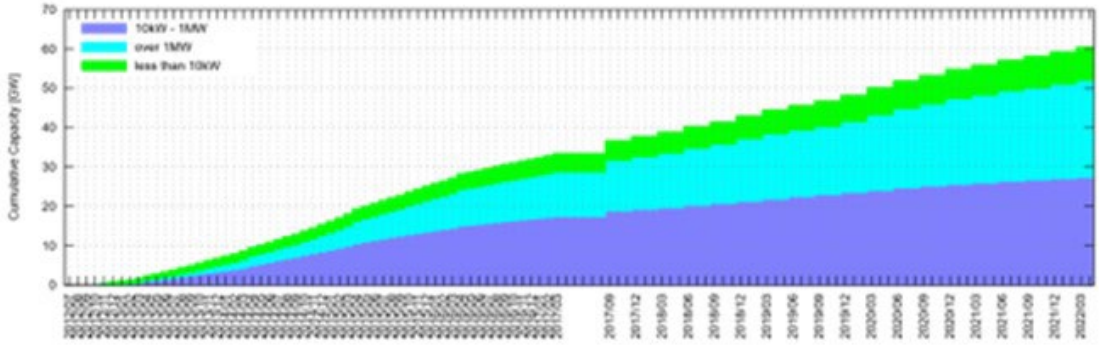
例えばこちら側に系統が繋がっていると、そのまま繋ぐことができなくて、大体リアクトルを入れて繋ぐということで、等価回路はスライドに示す感じになります。これが本日お話しするインバータのイメージで、こういったものをどううまく使うかが本日の話題です。



分野のイメージとして、これらのインバータが電力系統で使われる場所は、皆さんよくご存知の通り、太陽光発電、風力発電、それからバイナリー発電などで、発電、要するに電気エネルギーを変換して電力を供給する中で、発電源が直流あるいは可変速の交流の出力などのものを電力系統と繋ぐインターフェースというイメージと、それからエネルギー貯蔵デバイス、蓄電池や EV チャージャの連系、あとは需要側の整流回路などです。あと系統とは直接関係ないですけども非常に多く使われているのは電動機の制御などです。ここに載っていないその他の大型のものとしては STATCOM など無効電力調整装置などにも使われています。

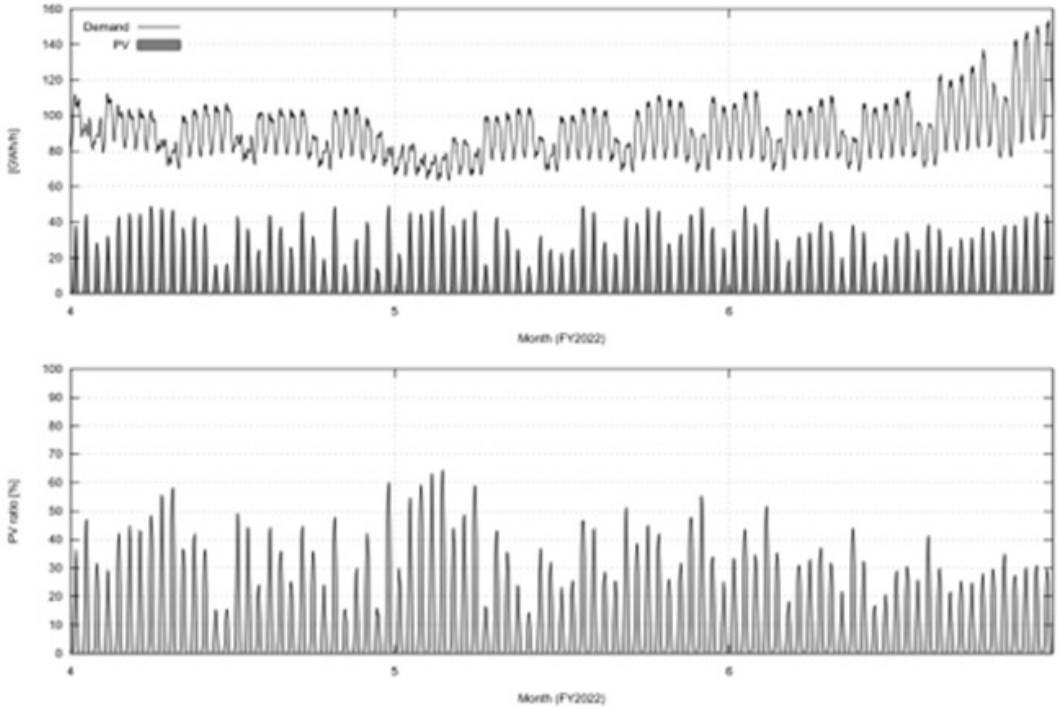
連系用インバータ導入量

連系用インバータの電力系統への導入量として、一つの例として太陽光発電に着目します。図は FIT 制度を利用した太陽光発電設備の導入量の累積値の変化を示しています。



我が国では 2012 年 7 月より FIT 制度が開始され、2012 年 7 月からちょっと古いですけども 2022 年 3 月ぐらいまでの同制度の元での太陽光発電の設備の導入量を示します。緑色が 10kW 未満の多くがルーフトップの家庭用 PV と、水色がメガソーラーと言われる 1MW 以上の結構大きめの太陽光発電の導入量です。あと 10kW から 1MW 未満という大体配電網に繋がる PV があります。この図からは、家庭用の屋根置きより、野建ての形で配電網に接続される PV が多く、より大きな容量の導入割合は半分未満で、全体では比較的小さな容量のものがたくさん導入されている状況で、それだけ多数のインバータが今電力系統の方に連系されていることが分かります。

今 FIT 非 FIT を合計して約 70GW 導入されており、日本の夏の昼間の最大需要が約 160 GW とすると、非常に大きな容量のインバータ連系による電力供給が行われている。さらに今後はどうなるかは正確にはわからないが、2030 年度には 100～120GW ていどの導入が計画されている。さらに、風力発電や蓄電池の導入が進むことで、大きな容量のインバータ連系が行われつつある。本図は 2022 年の 4 月から 7 月までの、この曲線は、揚水発電やエネルギー貯蔵除いた消費電力の量をしめしている。



下が日本全体の PV の発電電力量が時間ごとに示されており、5 月の連休では非常に需要が小さく昼間ピークでも 70～80 GW 程度であるのに対し、太陽光が日本全体で 50GW 程度発電をすし、シェアが 6 割を超える状況となっている。後でお話しするように、同期発電機の連系量がだいぶ減っていることが見て取れる。

今年よりも、去年の方がいろいろありまして、電気が余っていると思ったら、突然電気が足りないことで大騒ぎというようなことで、ここでは極端な例を示しています。

系統連系用インバータに求められる姿、期待される役割を考えると、先ほど説明した通り、同期発電機の運転している容量が減少する中、今までの電力システムは同期発電機が有する運用安定化に資する機能に依存してきた。例えば同期化力、慣性、事故検知のための短絡電流などの供給能力が、現在のインバ

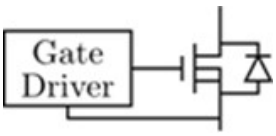
ータには通常具備されていない。同期機の代替がこれから求められる。更にブラックスタート機能、あまり考えたくはないのですが完全に停電した後の系統の立ち上げの機能がインバータ、あるいはシステムとして求められる。調整力提供の機能の実装では、同期発電機が持っていた調整力を制御などの中に組み込むことがこれからのインバータに求められると思う。それともう一つは、低廉化ということで、価格が下がることが求められていると思われる。よく日本のインバータは高いことが言われている。その他、効率の向上やロバスト性などいろいろあると思うが、系統連系を考えて、これらの諸点が重要と考える。

重要技術：素子・回路

さらには、最初に「スイッチを使って入り切りする」と表現したスイッチング素子・モジュールが一つ大きなキーテクノロジーと思う。

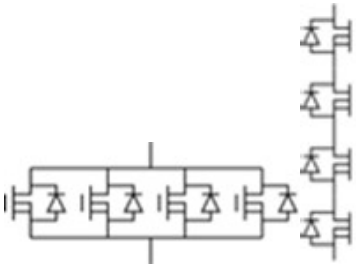
デバイスの大容量化、低損失化、高速化これは昔から求められ、今でも更なる高度化が検討されている。一つの方法は、素子の材料を変えることで、現在シリコンカーバイドやガリウムナイトライドなど、ワイドギャップ半導体と呼ばれるバンドギャップの広い材料をパワーデバイスへ適用することが進んでいる。次世代の材料として酸化ガリウムや、さらには究極のデバイスと言われているダイヤモンドなどの材料を変えることで、求められる機能の具現化が検討されている。これらについては非常にアクティブな開発が行われ、シリコンカーバイド、ガリウムナイトライドは実用化が進んでいる。材料を変えることに加えデバイスの構造の改良もあり、今あるものでは GCT それから IEGT それからクール MOS などがある。このうち GCT/IGCT は日本の三菱や ABB など、IEGT は東芝に競争力がある。平型パッケージは大容量・低損失のインバータに適したデバイスと言われるが、それ自体を製造することに加えプレスパックをする技術が重要で寡占状態である。

一方、スイッチを入り切りするためのゲート信号については、ここを工夫するアクティブドライブという技術もあり、これを工夫することによって損失や高調波を減らすことも検討されている。

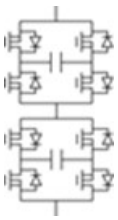


電力系統で使われる連系用インバータでは、容量の大きいため、デバイス単体の大容量化に加えた工夫が必要と考える。

そのためには素子の直並列接続も重要な技術となり、並列接続で電流容量を、直列接続で高い電圧に耐えられることを可能にする。



あと最近よく使われのが、モジュラーマルチレベルセル(MMC)、CTL などいろいろ名前があるが、単相のインバータや 2 象限チョッパなど縦に並べる技術も重要な技術と思う。



例えば、中国製の太陽光のインバータの例では、大容量のデバイスを使う替わりに比較的多く出回っていて安価な MOSFET をアクティブゲートドライブでうまく並列接続してコストを削減している例があり、デバイスに加えてある意味ソフト的工夫を組み合わることで価格を低廉化していることに感心した記憶がある。回路トポロジーもキーデバイスであると思うが、これは最近大きな変化はない状態と考える。

重要技術：周波数と位相の検知

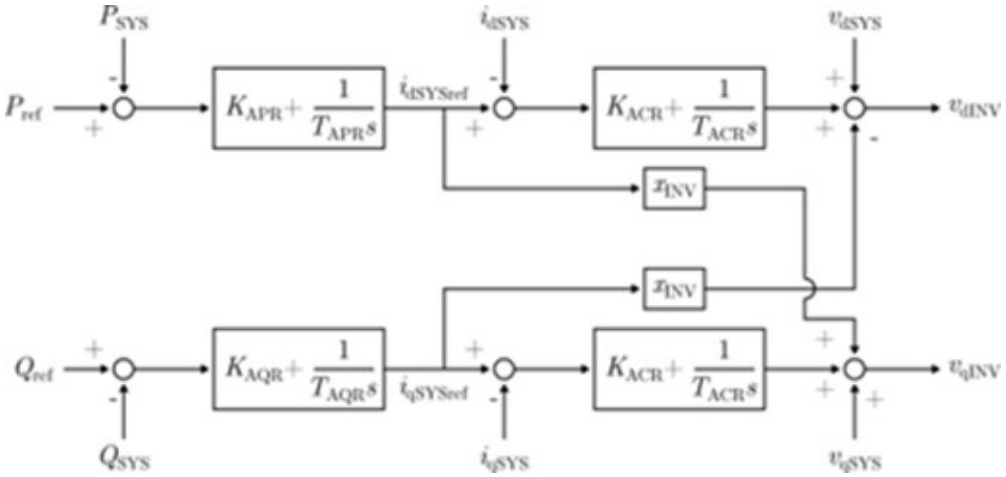
それから非システム技術ということで、キー技術とシステム技術の切り分けに悩むが、系統連系という適用では周波数と位相の検知が重要技術となる。これらは系統の電圧の周波に合わせて位相をどれだけずらして電流を出力するかが電力制御に必要になるため、これらが速く変動したとき、事故時を含めて精度高く検知することが必要となる。

これらに関連して事故時運転継続（FRT: フォールトライドスルー）も求められる。FRT とは、系統事故が除去された後にすぐに出力を復帰する機能であり重要な技術と考える。電力系統の容量に対して比較的に少ない容量のインバータ型が接続されている従来の段階では、系統に事故や異常があったときにはとにかく速く切れて悪いことをしないでほしいという発想であったのに対し、発電としてのシェアが増えてきた段階ではそれらが停止するとかえって大きな悪影響を与える。このため、系統の事故や異常時にも運転継続が強く求められるなど、要求が変わってきている。

システム技術：Grid-forming と制御

また、大容量の系統に小さな容量のインバータが接続されているという状況で、電圧は確立している前提でそれに合わせて電流を制御する Grid following (GFL)コンバータが今まで主流であった。これに対し、先に述べたように同期発電機の運転の減少に伴い、その前提が成立しにくくなり、今盛んに研究されているのが Grid forming (GFM)コンバータである。あとその他システムとしてはあの系統の安定化っていうことでVQ、電圧−無効電力制御、フリークエンシーワット f-W(周波数−電力制御)など系統の状態に応じて注入する有効・無効電力を制御する機能、あとは変換器の接続・あるいは同期機の運転の低減によるシステムの動揺・振動を抑制する機能は重要なシステム技術である。さらには、保安系それから多様なモデル化シミュレーション手法が重要技術である。

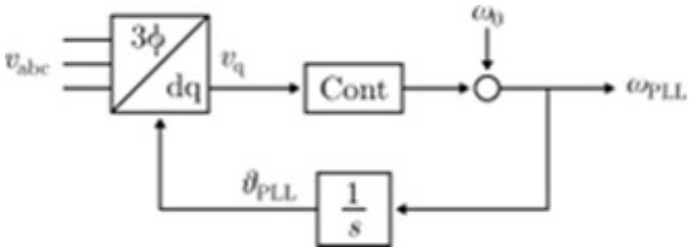
GFM コンバータが今盛んに検討され、先週の電気学会電力エネルギー部門大会でも GFM コンバータの結構大きなセッションがあり、皆さん非常によく研究している状況である。従来の IBR（インバータベースリソース）は、インバータを使って系統と連系する場合、その制御は系統が強固な電圧源であるという前提のもとで設計されている。これに対し、系統の状態に依らずに電力指令に追従させる方式が究極的に目指す機能かというと、そうとは限らないと思われる。B 部門大会で電中研が様々なインバータの電圧が変化した場合の応動を調べて、様々な応答例を発表していました。電力指令に応動させる方式では、電力変換器は出力の電流制御のみになり、電圧変えることできない。パワー制御は電流制御のみということになると系統側の電圧の振幅位相周波数を検出して所望の有効無効電力を出すように指令値を追求させるように制御させることになります。これが一般的な三相 GFL の制御系でよくシミュレーションなどで使われる制御系なのですけども 3 相電圧を計測してそれでまず周波数位相を検出すると、その結果を使って変換をして d 軸と q 軸の電流を制御する、この部分が電流制御系でこちら側が電力制御系になります。



電力制御系の方で指令値に追従するように、例えばここは PI 制御をしていますが、電流の指令値を出してその電流値になるように PI 制御と、あとこれ非干渉項です。ここの系統側の電圧を検出して所望の電流を流したときに、このリアクトルにかかる電圧が計算できるので、ここの電圧とリアクトルでのドロップ分を足し込んだものをインバータの出力電圧にする形の制御になると考えます。

要は、系統側で電圧が確立しないと使えない制御系です。フィードバックとフィードフォワードを使ったこ

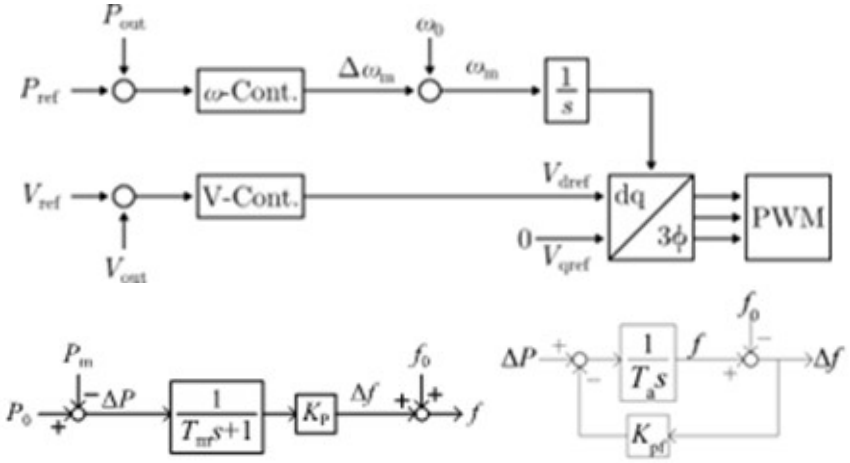
のような制御では、周波数や位相の検知には PLL（フェーズロックトループ）を用いており、様々な種類が提唱されています。代表的なものの一つはレシプロカル方式で、電圧のゼロクロスもしくはピークを検出して、それの間隔を測ってその逆数を取る。レシプロカルは逆数の意味で、この方式は単相の太陽光発電で使われています。ただ電圧に雑音があるとうまく測れないことがあり工夫が必要です。あと 3 相の場合だと d-q 変換を使う方式があり、電圧を d-q 変換したときに Vq は理想的には 0 になります。そうなるように位相と周波数をフィードバックして制御をする方式がよく使われます。これは基本の話でいろいろな工夫がされていて、各メーカーのノウハウになっていて、一言では語れない領域です。



短絡容量の低下と GFM

今までは強い系統に接続していることを仮定していましたが、そうでない場合について、研究室の卒論生のシミュレーションでは、SCR（Short Circuit Ratio）という、系統側の短絡容量のインバータ容量に対する比の指標があり、これが大いと系統が強いことを、小さいと系統が弱いことを表します。SCR が非常に小さいときに、PLL のゲインを変化させた場合の図がこちらです。赤はゲインが小さく、青はゲインが結構大きい場合です。赤のゲインが小さい場合はうまく何か追従できず、7 秒のところで指令値を 0 から 1PU に変化させると、ゲインが小さいとうまく追従しないし、ゲインが高いと発振してうまく出力制御ができない。特に SCR が小さくい場合は PLL のゲインに対し上手い調整が必要であることがよく言われています。一般的には SCR が 3 を切るとなかなか難しく、5 を切るとうまい調整が必要と経験則として言われている。徐々に SCR の低下の課題が顕在化しつつある。

そのような状況の中で、GFM（Grid Forming Converter）の導入が、今非常に盛んに検討されている。しかし、確たる定義がない状況で、大体皆さんが合意できる定義としては、「自ら発振器を有して交流の電圧を確立し電圧源的な出力特性を持たせた電力変換器」、要するに電圧を確立し、GFL が電流源的に働くのに対し、電圧源的に働く変換器と言えます。簡単に書くと 3 相のもののイメージですけども、有効電力の出力と指令値から、制御系を介して発振周波数を決める。電圧にはいろいろな制限あり、何とかいろいろ制御系が入る可能性があるかもしれません。ここの中身なのですけども、今研究の主流になっているのは、先週には VOC 方式の発表もありましたが、Droop 方式と VSG 方式になります。



GFM に期待される機能としては、一つは同期機が有している慣性を模擬して周波数変動を抑制することです。ただこの慣性応答についてもいろいろ議論のあるところで、GFL でも出せると言う議論もあります。あと、慣性応答があっても同期化力が強くないと効果が悪いことも言われます。

同期化力とは、位相角が小さな変化に対し、どれだけ早くあのパワーを応答させられるかという能力に近

いものです。同期化力が弱いと非常に遠くに慣性があるものが繋がっているように見えて、大量に導入しても効果が小さくなる。そういった意味での同期化力は非常に重要です。

三番目は電圧の確立で、同期機のように電圧源的に動作することです。電圧源的に動作し、電圧を支えてくれることに期待して、ドイツの北から南に引かれている送電線の途中に GFM を設置して、電圧を安定化させる話も出てきているようで、慣性以外の機能に対しても期待が広がっているようです。

広域機関における検討

広域機関 OCCTO での議論を紹介します。RoCoF（Rate of Change of Frequency）と呼ばれる「周波数変化率」に着目して、連鎖脱落の可能性を検討しています。連鎖脱落とは、電源における同期機の割合が減って、電源事故時に大きく、短時間に周波数が変動する可能性がある。今までの連系用の変換器は系統の周波数を検知して、それがあまりにも変に動くと自分の動作を止める、それが止まるとさらに発電機脱落量が増えて、連鎖的に発電システムが脱落することを言います。少し前にイギリスのロンドン周辺で非常に大規模な停電がありました。それも、連鎖脱落が原因ではないかと言われており、注意が必要と言われており、RoCoF に注目した検討が行われています。

日本全体での RoCoF の検討では、実効値計算を用い、慣性の感度係数と言う概念を用いています。図中のこのエリアで電源が落ちて電力が急激に不足すると、それに対し例えばずっと遠くの電源はすぐにパワー出すわけではなく、より近くのエリアにある電源の効果がいいということで、それを感度係数で表して検討している。ですが、発電機の脱落とそれから主幹系統のノードの検討が行われているのみの状況です。

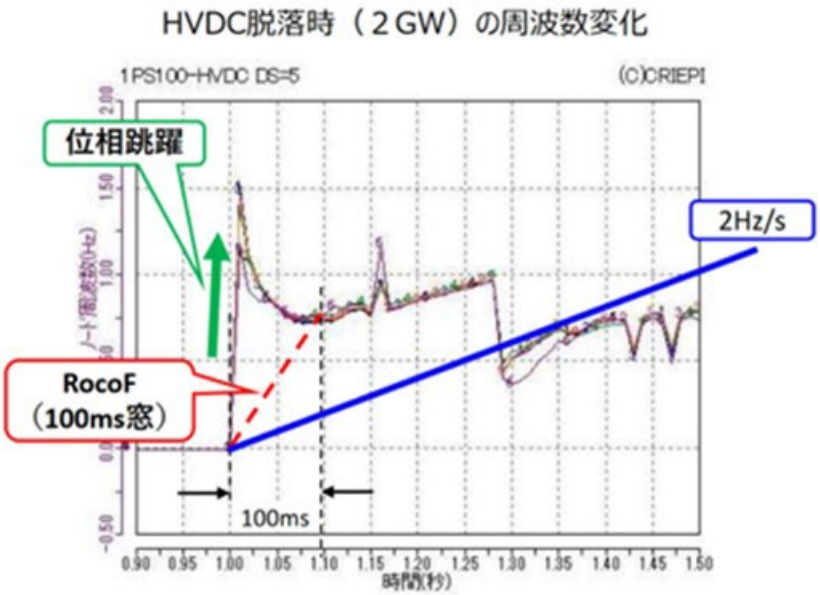
この検討をもっと細かくやるには、非常に手間がかかり、ケースが増えると実効的にどうこれを考えていくのかが今後の課題という状況です。GFM の導入が従来型の GFL にどう影響するかをうちの学生さんが計算しました。この例では、GFM の脇に GFM を並列に繋げたときに、さっきの PLL の感度を変えると安定に動くかどうかのシミュレーションの結果です。電圧を確立することで効果あるという意味では、GFM は連鎖脱落の防止にも役に立つかもしれないということです。

もう時間ですか。まきます。

IBR（Inverter Based Resources）制御に起因する「制御の干渉」が原因で、今まで教科書に書かれていた安定性を超えた領域の課題が発生しつつあり、SSO（Sub-synchronous Oscillation）と呼ばれています。

それらの防止の検討も重要となりつつあります。OCCTO で出された例は、LFSM（Limited Frequency Sensitive Mode）を PV や風力に導入すると、それらの制御遅れにより周波数振動が起こることです。それらの原因としては、制御系が結構複雑で次数が高くなり振動が起こりやすくなることで、対策などをどう考えて行くかは今後の課題です。それから FRT 要件（Fault Ride Through）は、電圧・周波数をそれぞれが変動した時の安定運転ですが、実際にはそれでは済まない気がしていて、特に連系先の動的な特性が全く考慮されていな要件であり、これ今後どう考えているかは課題だと思います。





先ほどの電源の一斉脱落の懸念ということでは北海道マスタープランで 2 ギガの直流送電を地内系統に繋げた場合、その 2GW のルート断が起こると RoCoF が大きく見えて、連鎖脱落は発生することが懸念されています。ただこの評価方法は十分議論ができてない現状です。そのため、インバータの離脱の条件を知ることは非常に重要と考えます。

あと保護関係では、短絡電流が減少する可能性があるため、これからの保護の考え方、それから単独運転の検知方法も非常に重要な課題であると思います。これは単独運転検出が悪影響を及ぼし SSO を起こした例で、様々な対策をして抑え込みにかかっているけれど収まっていない状況です。

シミュレーション技術とデータ

重要なのはシミュレーション技術を持っているかといいう点でございます。

理想的には全てを瞬時解析できればいいのですが、現実にはそれは困難である。ただ、オーストラリアあたりは PSCAD などで系統全体の大規模なモデルを作ってシミュレーションをすると言っています。ですが、制御系など多くのパラメータを含むモデルが本当に正しいのかについては別の議論があり、あと本当にすべての場合についてシミュレーションできるのかとか、大きな課題があると思います。場合によっては縮約などを通して、危険な状況を適切に把握する技術などを今後確立することが重要と思っています。

それから、キーデータは、シミュレーションなどのための制御系のモデルだとか回路パラメータであると思います。

コミュニティと規格

あとコミュニティとしては電気学会、JEMA、IEEE、あとは CIGRE、仕様を決め IEC とかです。あと人材育成では、パワエレの専門家は結構たくさんいるのですが、パワエレと電力系と両方理解し設計可能な人材が、少ないような気がしています。勉強が必要な分野が広がるため大変なのですが、領域横断的な人材が重要だということです。あと競争力強化のためには、必要十分な製品の開発が重要と考えます。日本の製品は高性能で高機能なのですが、そのような製品が本当にユーザーに求められているのかが重要です。特に太陽光発電はかなりコモディティ化しているため、この点をどう考えていくのかは課題なのかもしれないと最近思っているところです。私からの話題提供はこれぐらいにしたいと思います。ありがとうございました。

（荻本 PL）

はい、どうもありがとうございました。話題も多く急速に動いているエリアということで、豊富な話題を提供いただきありがとうございました。それでは続きまして、中島先生に直流送電の分野についてお願いいたします。

講演 2 直流送電（東京都市大学・中島）

東京都市大学の中島でございます。私の方からは直流送電について話題提供させていただきます。

今回は、荻本先生からの取りまとめフォーマットっていうふうで切り口をいくつかご教示いただき、この切り

口に沿って私の方から説明させていただきます。

適用分野：流送電の三つの目的

一つ目は、直流送電の分野のイメージということでお話をします。直流送電の適用分野は大きく分けると三つあります。一つは長距離大容量送電ということです。どれぐらいが長距離かって言いますと、海底ケーブル、地中ケーブルを使った場合には、およそ 50km 以上を直流送電の場合では長距離といいます。架空送電線を使った場合には、100km 以上、およそ直流成分の送電の場合には長距離と呼んでいます。こうした条件の大容量送電がどうして必要性としてはと、一番大きなところは遠隔に位置する電源からの大容量の送電を行うことや、あるいは日本のように島国の場合には、海底を横断して海峡の幅が 50km 以上というのが、直流送電の出番だということです。

日本における既設の直流送電としては、北海道方式の連系 600MW、紀伊半島と四国を結ぶ紀伊水道連系 1400MW が終わった。そして北本連系を太くするということで、新北本の連系が 300MW、そして現在新々北本連系ということで、さらに 300MW 規模で、こうした実情があります。

こうした遠隔での電源送電あるいは海底直流ケーブル送電が今までの直流送電の必要性の流れでしたが、今後は再エネの大量導入、特に洋上風力発電などを主眼にした直流送電が重要になっています。

また自然災害に強い電力供給を可能にするということで、レジリエンス強化も重要になりつつあります。後のページでお話をしますけれども、地域間連系線整備のマスタープランが政府から発表されています。

この中では北海道と東北と東京の間、この間に 2GW、800km という大規模な開発も考えられています。長期的にはデータセンターの需要などが北海道などで増加する可能性があり、電源線として計画されたものが、双方向の送電線となる可能性もあると考えられます。

二つ目が異周波数連系で、異周波の系統間の連系です。日本では東日本が 50Hz、西日本が 60Hz という特殊な事情がありますので、この 50Hz と 60Hz の系統の境界点にいくつかの周波数変換所があります。

特に東日本大震災後は、計画停電の反省を踏まえて、東西の連系強化のために合計 1.8GW の増強計画が打ち出されました。このうち既に飛騨信濃周波数変換設備は 0.9GW が運転を開始しており、現在新佐久間変換設備 0.3GW と東清水変換設備 0.6GW の増強の建設が進んでいます。

三つ目は交流系統間のループカットです。同一系統の同一の周波数の系統間を交流送電線で結ぶとループ潮流が流れます。その場合に通過潮流を高精度に制御できる直流送電で、そこの電力を制御してループ調理をカットするものです。

既設の設備としては北陸電力さんの南福光 0.3GW というのがありましたが、交流側で潮流制御が可能になってきたため、廃止の予定と聞いています。

OCCTO マスタープラン

先ほどお話しました地域間の連系線の整備のマスタープランの概要ということを、図に示します。

再生可能エネルギーの導入と、そしてレジリエンスの強化のために OCCTO（電力広域的運営推進機関）で、マスタープランが、2023 年の 3 月に公開されました。日本中で地域間連系線の増強が打ち出されていますが、特に注目したいのは北海道・東北・東京の間の連系線の強化です。

東北や北海道の近海のでは、洋上風力の適地がいろいろ考えられます。こうしたものを再生可能エネルギーの電力を東京の需要地に送電するためにここに直流送電を建設する構想になっています。

これだけでも第 1 期、第 2 期の構想があり、合計 6～8GW、それに対する投資は約 2.5～3.4 兆円と言われています。その他にも中地域あるいは九州と中国間の関門海峡の増設について、いろいろな構想があり、合計 6～7 兆円かかると言われています。

その中で、北海道本州間の連系設備、特にそのうちの日本海ルートについて説明します。日本海ルートとは、将来構想では、日本海側に加えて太平洋側も結ぶ構想がありますが、まずは日本海側のルートの方が先行して検討が始まっており、こちらの方のスライドで示します。

送電容量は 2 GW。そして北海道から東京の距離は約 800km の海底直流送電です。こちらの系統図スケッチでは、上が北海道系統、そして東北の系統そして東京の系統となっており、黒いところが交流系と、そして赤いところがこれから作ろうと考えている直流送電線です。

この直流送電線は、北海道の系統から出発し、海底を通り、そして東北で一旦変換所に入り中継をして、もう一つのルートで東北の系統から東京の系統に至ります。ということで、変換所変換器の数は、四つとなります。この北海道からの直流送電線は一旦ここの東北の系統で終端しますので、このところでは 2 端子、次のでも 2 端子ということで、2 端子×2 が現在の構想です。

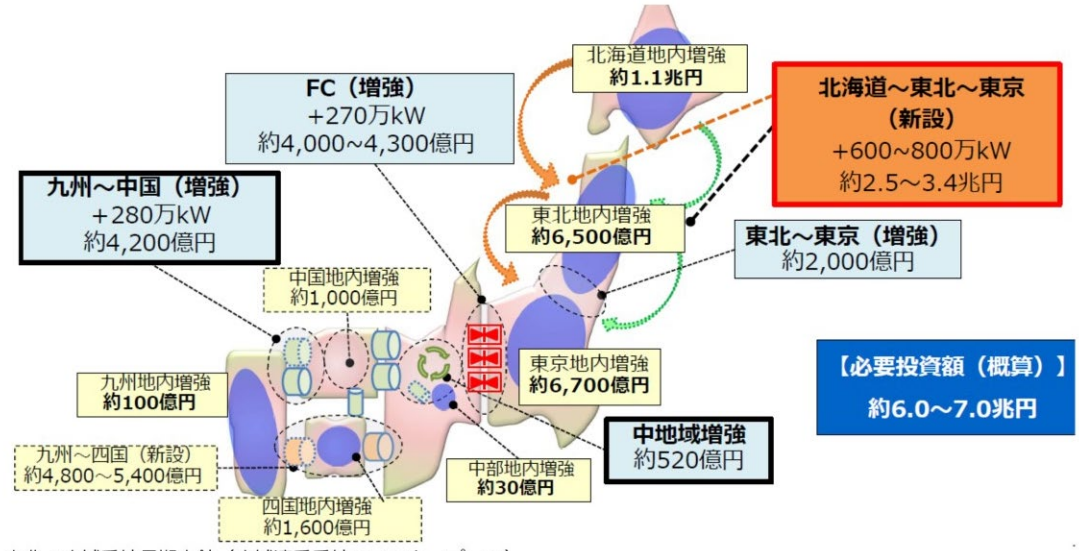
もちろんこれを 3 端子っていう形で、三つの端子が繋がっている構成も考えられますが、まだ技術的には

まだそれほど確立しているものではありません。

このため現在のマスタープランの構想としては、2 端子構成を基本としていますが、ゆくゆくは 3 端子構成も例えば、太平洋側のルートでは考える余地はありと考えられます。諸元としては、海底ケーブルの電圧は±525kV です。±と書いてあるのは、正負の双極構成で、プラスの本線とマイナスの本線、そして 0V の中性線っていうケーブルの三つによる構成になっています。

直流送電±2 本の線だけですと、ケーブルで例えば漁船の錨による損傷の場合に送電が途絶しますが、3 本の場合 50%の電力は送電を継続できることになり、この信頼度向上の観点から現在の計画では双極構成が考えられています。

スライドにはいろいろ細かいことが書いてありますので、後でご覧ください。直流送電を構成している技術要素をまとめてきました。まずはシステム構成の選択肢、つまり計画段階での構成について四つの切り口からお示ししています。



出典：広域系統長期方針（広域連系系統のマスタープラン）
（電力広域的運営推進機関2023年3月29日策定）のベースシナリオ

技術要素

マスタープランの絵でも書きましたように、変換所を 2 ヶ所作って、途中で寄り道しないで送電するのが 2 端子送電です。一方、途中で複数個所分岐する場合は、多端子送電と呼び。3 端子以上となります。

また供給信頼度を考えると、送電線あるいはケーブルの並行した本数で、単極と双極の構成があります。単極構成にもプラスとマイナスの両電位を持っているケーブルあるいは送電線を張る構成と、片方は 0V に接地されていてもう片方だけが電圧を持っている非対称の単極とする構成があります。

また、供給信頼度を考えて半分のパワーで送ることを可能とする場合として、双極の構成があります。また、送電方向を考えると、例えば中国のチベット高原とかモンゴル高原の風力発電のための電源線の場合には一方向送電であり、日本のように地域間連系を考える場合には、双方向の送電になります。

先ほど馬場先生から、インバータにはこうした IGBT を持って使う自励式があるという話がありましたが、運転実績が豊富な従来型の方式はサイリスタ素子を使う他励式です。超大容量を目指すのであれば、今でもサイリスタを用いた他励式ですが、低短絡容量比あるいは無電源の系統への接続やブラックスタート機能が必要な場合には、IGBT というパワーデバイスによる自励式が使われます。

設備構成

直流送電設備は大きく分けると変電設備と送電設備に分けられます。変電設備の方は交直変換器、そしてそれを制御・保護する制御保護装置です。主回路設備としては交流系統の高い電圧に昇圧するための変圧器が必要で、パワー半導体デバイスの内部抵抗による損失を冷やすための冷却装置、完璧なサインカーブの電圧電流を作るわけではないので高周波フィルターが必要になり、変換器を収容するための建屋も必要になります。

自励式変換器は現在ではもう、モジュラーマルチレベル変換器が主流です。ただしたれ意識変換器の場合には、こうした変換所の中に無効電力補償のための電力用コンデンサや分流リアクトル、直流側には直流リアクトルなどの付帯設備が必要になります。

こうして考えると自励式は構成要素が少なくていいと思われますが、複数の送電線が接続する自励式では送電線が全部電気的に繋がってしまうため、もし一つの変換所が故障した場合には、その故障した変換器ないしは変換所を切り離すための直流遮断機が必要になります。

直流遮断器は、半導体式、あるいは半導体と機械的要素を組み合わせたハイブリッド式でが、これについてはまだ技術開発の途上です。送電設備の方は、架空送電線、あるいは直流ケーブルがあります。直流ケーブルは OF ケーブル、そして紙の油浸の MI ケーブル、そして架橋ポリエチレンケーブル、CV ケーブルなどがあります。

真下または海底ケーブルの場合には、ケーブルが船の錨などで損傷しないように、ケーブルの外に鉄線を巻くか、あるいは保護管で覆う必要があります。また敷設船でケーブルを海底に敷設するためにはターンテーブルから押していくときに応力がかかるため、引張応力への対応も必要となります。

また、ケーブルの敷設船や接続船、埋設船といった船舶技術も海底ケーブルの場合には必要となります。求めない薄型期待される役割を角に示します。まずは先ほどもお話しましたように、再生可能エネルギーの大量導入を牽引しなければならないということがあります。

求められる姿・期待される役割

第一の役割は、カーボンニュートラル、再生可能エネルギーで特に遠隔地の洋上風力発電、洋上ウインドファームの大量導入を牽引させたることが私の思いです。この目的では、2050 年カーボンニュートラルの実現と、もう一つはレジリエンスの強化になります。

レジリエンスの強化には、地震あるいは台風などの大災害時の電力供給ということもありますし、最近の不安定さを増す世界情勢の中でのエネルギーセキュリティの確保という意味合いもあります。エネルギー輸入への依存度を削減し、エネルギーの国産化率を向上させたいと考えます。

第二の役割は広域電力取引への一層の活用です。直流送電は交流送電と異なり、指令値通りの電力を融通できる高精度な制御機能を有しています。また電力指令値を時々刻々例えば 5 分間隔とか 10 分間隔、変更することができる高速な制御機能を有している。これも、こうした広域の取引への活用の余地がまだまだあります。

第三の役割は系統制御機能の一層の活用で、馬場先生から先ほどお話がありました短絡容量比が非常に小さい場合に自律運転をさせるためのグリッドフォーミング機能を直流送電の変換器中に具備させることも可能です。ブラックスタート機能や、あるいは調速機能も付けることも可能ですし 2 GW など大容量の場合には、交流系統の周波数の変動を増やしてしまうため、系統周波数の制御や系統安定度の向上という機能も必要になると考えられます。

段階的な移行のためのキー技術

次に段階的な移行のためのキー技術についてお話します。この表は、年代と直流送電設備の導入計画・構想、3 番目の列が交直変換機器のキー技術、そして最後はケーブルを示しています。

2020 年代では、先ほどお話をしました東清水、新佐久間、新北本っていうところの運転開始が 2028 年ぐらいに決まっています。現在存在している田部井式サーミスタを使った直流連系設備は運用開始から 20～25 年が経過しており、昔の 32bit の制御法装置のマイコンはもうなく CPU がないため、64bit の CPU の電子基板に替えていく必要があります。制御方式や主回路を変えずに制御盤だけの更新が行われていくと考えられます。

東清水の東地域の日本海側ルートの運用開始はこれから 10 年かかるとすると 2034 年 4 年前後と考えられ、九州・本州間の新関門の直流連系もその後ぐらいと思います。

2040 年代は、東地域では第 2 期であります太平洋側ルートの運転開始と考えらえられます。交直変換機器の方でのいろいろな期日を鑑みてみると、1000MW 級の事例式変換器の技術は既に確立はされており、それに関しては研究開発が必須はないと思います。

一方で、多端子を実現するための 525 キロボルト級の直流遮断器は、実用化はこれからと考えられます。中国国家電網は開発済みと言っていますが、一つの論文も出ておらず中身が分からない状況です。西側の国々での直流遮断器の実用化に関しては、まだイノベーションが必要と思います。

パワー半導体デバイスは、例えばシリコンの次のシリコンカーバイト素子の適用が考えられていますが、回路方式としては MMC が既に開発され、実績を積んでいます。

この MMC とシリコン素子で効率 99%以上が既に達成されており、私は、シリコンカーバイド素子は必ずしも必要ではないと思っています。ケーブルについても 525kV 級の直流 CV ケーブルの技術が確立しています。

直流 CV ケーブルは、320kV や 125kV が世界のデファクトスタンダードで、これ以上の例えば 1000kV の CV ケーブルの開発は必須ではなく、これら二つの電圧に収斂して標準化されていくと考えています。

年代	直流送電設備の導入	交直変換設備	直流ケーブル
2024 2028	 東清水FCの増設分運開 新佐久間FCの運開 新北本HVDCの双極化 既設直流連系設備 の制御保護盤更新	1000MW級自励式変換器は技術確立済み 自励式変換器のシステム制御保護技術は確立済み(各メーカ) 525kV対応直流遮断器の実用化 ⇒多端子実用化	525kV級直流CVケーブルは技術確立済み 深海ケーブルの防護技術・敷設技術は開発中
2030年代 2034年前後	 東地域日本海ルート運開 新関門直流連系	SiC素子の適用 ※MMCとSi素子で効率99%以上のため, SiCは必須でない	直流CVケーブルは320kVと525kVが世界デファクトで, 更なる高電圧化考えにくい
2040年代	東地域太平洋ルートほか運開		

段階的な移行のためのキーシステム技術

次はシステム技術です。自励式変換器のシステムの制御の技術は既に確立されており、既に例えば新北本や、世界中にある充電式の直流送電で確立しています。

多端子の制御保護については、NEDO 事業で技術開発が行われています。ヨーロッパではベストパスあるいはプロモーション等の多端子の技術開発プロジェクトを行いましたが、多端子の制御保護装置を試作しリアルタイムシミュレータによる試験を行ったのは日本が先行しており、そういう意味ではこの分野に関して懸念はないと考えています。

直流ケーブルについては、ケーブル自体の開発は行いましたが、防音技術とか、あるいは敷設の技術に関しては、研究開発、技術開発の余地があり、現在 NEDO 事業が進行中です。いずれマスタープランのプロジェクトの受注の候補企業が発表されれば、この NEDO 事業の成果が実案件に引き継がれると考えています。

キーデータとしては、直流送電の計画から運転開始に至るまでに実施することに関してキーワードをまとめてみました。こうした不正性の項目に対して必要なデータがあり、それらを整備していくことが必要となります。

ただ、これらは実案件のエンジニアリング的なもので、全てをお話しできませんが、例えば今日ご出席の大学の先生方にも関連が深い分野では、シミュレーション技術があると思います。

解析のところでは、機器設計に必要な技術解析としてサージ解析、系統解析があります。システムの制御運用を考える系統解析だけではなくて、例えば変換器やケーブルの耐圧設計については、サージ解析が重要ですし、そのためのモデリングも重要になると思います。

その他、工場試験あるいは現地試験の段階では、多くの場合は IEC 規格に準拠すれば十分ですが、直流送電の場合は非常に大きなものを設計するため、ベンダーとユーザーが協議して、シミュレーションを行った結果として、スペックや工場試験の判定基準が決まるものが多々あります。これらに関しては、工場試験あるいは現地試験のところで、オフラインの例えば PSK のシミュレーションとか、あるいはリアルタイムシミュレータを用いた制御盤のシミュレーション試験が行われることが考えられます。

議論・研鑽のための分野別コミュニティ

機能と検査のための分野別のコミュニティでは、学協会、NEDO 事業、産業界について書いています。

学協会として考えられるのは、電気学会、CIGRE、そして電気共同研究会です。電気学会では、全国大会や電力エネルギー部門大会でたくさんの論文の発表、講演などがあり、調査専門委員会でも活発な活動が行われています。直流送電や系統の専門の企業の方々、あるいは大学の先生方が集まって、現状動

いているのは 3 年間の会議によって「準式交直変換器と電力系統の相互作用調査専門委員会」などが動いています。

こうした直流送電の調査専門委員会は、絶えることなく 30 年 40 年の長きにわたって活動しており、2025 年を過ぎると新しい調査専門委員会ができて、論議が継続されると思います。

CIGRE には SC-B4 という直流送電分野についての国内分科会が継続し、パーマネントの組織として存在し、また電気協同研究会では、「電力系統用パワーネットワーク設備の保全ガイドライン専門委員会」が今月までですが活動しています。既設設備の部分更新や、今後考えられるマスタープランの実施のときに自励式交直変換器の現地試験、工場試験をどう考えていくかについて、まもなく報告書が出版されます。

NEDO 事業では、直流送電関係では最近二つのプロジェクトが行われています。「次世代洋上直流送電システムの開発事業」は 2015 年からの 5 年間行われ、現在は「多様と多端子直流送電システムの基盤技術開発事業」が行われています。一つ目の満足度はシステムつまり電力系統工学の方でのものとして制御保護装置の製作とそしてリアルタイムでのシミュレーション試験が行われました。

ここで「マルチベンダー」とは、大規模な直流送電の場合には複数のメーカーの参入が想定されるため、東芝さん日立さん、そして三菱電機さんが制御盤を組み合わせて、動作試験がお行われました。

ケーブル分野では、100 kV 級の直流深海ケーブルの試作試験が行われ、現在ではそれを受けて防護管の開発や、敷設船の基本設計が商船三井さんや日本郵船さんにより行われています。産業界では、一般送配電事業者さん、大容量の電力機器のメーカーさん、あるいはケーブルメーカーさんになります。

こうしたメーカーさんは数としては限定されていて、東芝さん、日立製作所・日立エナジーさん、三菱電機さん、そして住友電工さんと古河電工となります。そして送配電網協議会あるいは OCCTO さんも関係します。

人材育成

人材育成についてお話をします。人材育成の必要性の背景は、先ほどの馬場先生のお話からもありましたが、こうした電力系統工学そして両方っていうところは、なかなかニッチな世界ではあります。一方で、先ほどあのロードマップを示しましたように、今後 10 年、20 年単位で直流送電設備の整備、建設が進められる見込みです。

電力会社では、例えば変圧器の専門家とか遮断機の専門家の数は多くても、直流送電の分野は非常にニッチな世界で、要員数が元々少ないです。そして直流送電や構築変化を担う部や課を持つ電力会社も少ない状態です。

また総論では、人口の減少、技術者の高齢化、青年層の特に強電分野の電気工学科離れが存在します。こうしたことが大変だって言われる中で、具体的な実践が一つ行われています。

先ほどお話をした直流送電技術事業を親事業として、直流送電と、系統パワエレ分野の人材育成に特化した特別講座が、NEDO の事業として活動しています。2022 年度から 2025 年度まで続きます。この実施の母体はですね、私東京都市大学と中島と、徳島大学の北條先生、そして同講座の佐野先生の 3 人です。この 3 人の教員と、それぞれの研究室の学生が運営母体となって、いろいろな新しい仕組み・企画を考えて、イベントを行っています。その中の目玉としては、2 ヶ月ごとに産学合同セミナーっていうものをオンラインで 2 時間行っています。ここでは産業界の方の講演を受けたり、あるいは学生が発表したり、あるいは産業界と学生がブレークアウトセッションで自由討論などを

会議の参加者数は学生が約 30 人、産業界の方が約 20 人ということでちょうどいい感じの交流があったと思っています。またこうした講演の様子は録画して YouTube で配信しています。YouTube で直流送電とか産学連系などのキーワードで検索していただきますと、私達のこの講演の様子が見えると思います。

また、海外の類例の人材育成のプロジェクトとの協業や、学生をショートステイで 2 週間派遣なども考えています。またシミュレーション技術は大変重要ですので、こうした直流送電に関する PSCAD のシミュレーションの勉強会をメーカーさんの尽力により、事業所の方で 1 週間行うことを考えています。これは 8 月の夏休み初めて実施しましたが、今後も続けたいと考えています。

こうした特別講座によって芽生えている反応としては、これはこの特別講座の件、関係している研究でのものですが、電力会社や強電電機メーカーに就職する大学院生には開示されおり、研究室への配属を希望する 3 年生が増えたり、大学院に進学する学生が増えたり、こうした活動を聞きつけて他の大学からの受験者の増加も考えています。

競争力へ直接するキーワードとして物ほど関連のことを書きました。直流送電に関与する企業数は、先ほどお話しましたように限定的であります。そして受注生産状況、長い工期を有するために関与するそうした組織としては非常に限定的です。

競争力へ直結するキーワード

国内市場では企業によって激しい競争関係というのがあるわけではありません。一方でメーカーさんの国際競争力を考えますと、こちらはメーカーさんそれぞれの自助努力によって案件を受注しているということです。

例えば、日立製作所さんは、ABB の送配電事業を買収することで国際競争力を獲得されています。日本向けの製品も旧ABBの標準設計と次第に一本化する方向と聞いています。海外の直流送電設備は現日立エナジーさんである ABB そしてシーメンスの 2 大メーカーさんでほぼ独占しています。と言っていますのは 90%以上を見据えたということです。

一方で、TSO あるいは国家機関での取り組みもあります。イギリスでは、グラスゴー近郊に国立の HVDC センターが開設されました。国内外の直流送電用の制御保護装置をリアルタイムシミュレータで試験し認証しています。フランスではリヨン近郊に RTE インターナショナルがリアルタイムラボ [18]を開設しました。こちらでは国内外からのコンサルタントの派遣やシミュレーションの受託などを行っています。

ヨーロッパでこうした取り組みが特に活発なのは、こちらの図に示すように、ヨーロッパでは直流送電の建設構想が山のようにあるからです。こちらの赤い線で示しているところが、今後計画、そして議論が行われている直流送電です。そして太字で書いてあるところは建設中・計画中のもので、数が非常にたくさんあり、マーケットが大きいわけです。そして今後の建設の見通しがはっきりしているので、これに対して投資を行いし、人材も供給するということであります。

リスク

最後、リスクとしては、三つ挙げたいと思います。一つは、系統整備政策の一貫性です。先ほど話をしましたが、地域間連系線の整備に関するマスタープランが昨年策定、公開されました。ただしここでは、2040 年代のマスタープランに沿った建設事業の実施は今のところ不透明です。そのため、メーカーさんが製造設備への投資の実施や投資回収できるかの判断が不透明になります。

このように産業界側に不透明性があれば、本当に僕らはそこに就職していいのかなということが、学生にとっても不安になりますし、若手の人材育成の義務も不透明になります。まずはこうした大事業でありますので、その一貫性がまずは必要であることが一つ目です。

二つ目はエネルギーのセキュリティです。ロシア国内の情勢あるいはイスラエル、パレスチナ情勢、東アジアでの中国の海洋進出など、世界の情勢も不透明性を増しています。カーボンニュートラルの 2050 年達成が目指されていますが、ひょっとするとエネルギーセキュリティの観点からエネルギーの国産化と、そして直流送電による長距離送電建設の前倒しも急務になる可能性も考えられます。

三つ目は、送電インフラ整備と再エネ発電事業の誘致の後先です。話が違うと動けたと記憶しますが、最近では生成 AI によってたくさんあのコンピュータを使ってしまうということで、データセンタ（DC）の電力需要が急増しています。こうしたケースでは、ウェルカムゾーン設定が送配電事業者さんによって多数設定され、まずは送配電の送変電のインフラが整備されて、そこにデータセンター業者が集まるという順番になっています。例としては公的な工業団地の土地を開発してそこに電気と水とガスを整備して皆さんいらっしゃい、こうしたことを同じです。

こういう状況では、直流送電設備も裕度を持った大電力仕様のインフラとして整備しないと、将来不足しようにしないといけない、というのが一つです。将来の災害復旧に対応できず、後付けで増設するのは非常に社会コストがかかります。そうした長期的なことを考えて、言わば 3 車線のあるハイウェイを作るには方がいいのではというのが三つ目の点です。

ちょっと時間オーバーしましたけど私からのプレゼンテーション以上となります。ありがとうございました。

質疑

（PL）

2 点目も大変内容の豊富な説明ありがとうございました。残り時間 40 分になっています。延長無し、この 40 分の流れで進めてまいりたいと思います。

インバータと直流送電の要素技術とシステム技術は、非常に大きなインパクトを持つ分野であり、新たな課題を含めて世界中で取り組みが行われている分野です。その中で、非常に動きが早い代表例が GFM

[18] https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.rte-international.com/wp-content/uploads/2022/03/QA-session-webinar-8-February-2022.pdf&ved=2ahUKEwiUptKksYyJAxU-dfUHHcslIuUQFnoECAgQAQ&usg=AOvVaw03rENsksH9R8Y-Nh96PS8A

の技術です。

中島先生のお話にもあったように、直流送電プロジェクトの機会が多いわけではないが重要な技術であり、この分野を日本が戦略的に進めることを念頭にご議論いただきたいと思います。

それでは皆様からご質問ご意見等、なるべく短い周期で回していきたいと思います。質問も短めで答えも短めでお願いしたいと思います。

GFM の計画的導入

（参加者１）

ありがとうございました。馬場先生に質問です。GFM が設置されれば SCR（短絡容量）が小さい場合も安定化できる結果を最初の結果ご紹介いただきました。非常に興味があります。それに関連して、既にインバータがたくさん入っている、しかも直流送電用の変換器ほど大規模ではないけれども配電系統にたくさんの PV が導入されている状況で、既設の設備に将来 GFM が必要で更新っていう問題を抱えてしまうということは大変な問題だと思います。先生の最新のご検討の結果からすると、もしかするとその系統の状況 SCR の状況変わっていくことがあるにしても、その系統の状況、例えばもう全停に近い状態や停電しても運転を継続すべきだとか、遠距離の事故なので継続すべきという系統の外乱事象に対応する場合、系統側と情報連携した GFM をこまめにいくつか配置することで実際には GFM はそんなに大きな容量はいらなくて、いわゆる旗振り役を担い、全体的には系統の維持ができるというシステム検討は面白いと思っています。それについて教えていただければと思います。

もう一点は、今回ご出席の方々から教えていただきたいのですが、日立のオリジンパークに先日見学行く機会がありすごい感銘を受けました。明治の時代に日本でできないから海外から買ってくるわけですが、その後国産化を強く志して、頑張ってきたと。日本の各メーカーがそういうことを実施してきて、当時、メディアは限られていて、若者に対してそれを発信できる方法はない時代だったと思うのですが、どうやって人材を確保してきたのかが気になりました。当時は人口が違うとかいうことよりも、いろんなところでいろんな人材を欲しがっていて、人材の取り合いが起こっていたと思うのですが、当時と今を比べて今何をすべきかについてのヒントになるかと。国の人材育成として、大学としてどのような役割があるのかなと。今振り返ってみると、メディアが高度に発達したので私自身は B 部門大会のシンポジウムでも、魅力を発信して若手をつかむことに努める必要性を感じました。一方で、国産、つまり日本でできないものは殆どなくなる中、他の国において低コストで作れるようになってきたことで、日本は外国へ行って生産する形になってしまったと思います。ということは、若手の日本で働きたい人にとっては、日本に住む魅力がなくなる危機感を思っています。低コストで買ってきて低コストの海外のものが手に入る状況で国内の問題を解決していくにはどうすればいいでしょうか。一つは自分で振り返ってみると、GFM で国内オリジナルの日本の今のニーズに適したものを研究開発するという答えが自分では思い浮かぶのですが、いやそうじゃなくてこういうところも力を入れるべきだといったご意見を皆様から頂ければと思います。

日本の技術力の高さは今評価されていると思いますし、ヨーロッパの案件でも日本の技術を組み込んでいく可能性も非常に高いと思う。日立さんと日立 ABB さんとの関係でそうなっていると思いますけども、日本の技術力が高いうちに、更なる次の段階でも日本の技術力を活かすために何をしないといけないのか。例えば信頼性が高いことの科学的諸説明かもしれません。どういうことを、将来に向けて、あの科学者をやっていかないといけないのかっていうことについてご意見をお聞かせ下さい。

（馬場）

はいありがとうございます。もしかしたら今まで主として導入されていた GFL にプラスして GFM を導入すると、レジリエンスと申しましょうか事故があったときに脱落しにくくなるかもしれません。その可能性はあるかもしれませんが、これから電池側は普及していくと思うので、それらにそういった機能を持たせるのは一つの手かもしれません。一方で、事故時に連系を維持するとなると、場合によっては結構大きな容量が必要となる。先ほどは GFM を導入すると GFL がまともに動く例を示しましたが、実は GFL と同じぐらいの容量の GFM 容量がないと実現できない。だから、もしかすると短時間定格などの考え方がもしかして必要になって、それをインバータで実現できるかは結構課題であると考えます。要は半導体なので普通、短時間定格はないですが、ジャンクション温度が定格を超えず、要するに容量を超えなければよいということで。そういった短時間定格設定する技術開発の可能性はあると思う。今は試験でやるのでとにかく短時間定格言っても多分同じだけの容量を積まないと実現できない状況のですが、パッケージングや冷却など実装の開発によっては少し考え方が変わる可能性はあります。

一方で、今はコスト削減のするために定格の考え方をギリギリまで詰めているので、短時間定格は殆どな

い状態になっているため、そのような機能が求められるとその分野の技術開発が進み、新たな機能をインバータの方に具備する可能性はあると思います。

人材育成

（PL）

ありがとうございます。2 番目は少し広い話題でしたけど、ご意見あればお願いします。

（参加者２）

はい、話題が非常に広かったのですが私が少し理解したのは、人材確保のための情報発信とはいかにあるべきか、ということでした。明治の頃に振り返って考えると、私個人的にはむしろ教育が重要と感じました。皆様のお知恵を借りたいところですけれども、当時、明治の頃は、産業を担うエンジニアや、エンジニアを供給する大学などはそんなに多くなかったはず。そして産業界にも企業の数が多くなかったわけで、おそらくは対面というか、今何が必要なのかが産学官で非常に距離が近かったと思います。だから自分はここに行かなければいけないという、国を背負う意気込みや使命感があったのだろうと思います。今、産・学・官の規模が大きくなり、ハートに訴えるところが少ないじゃないかと感じます。どうしたらいいかをすぐには言えないのですが、そんなところにも今の規模感と昔の規模感の違いがあると思いました。答えになっていますでしょうか？

（PL）

ありがとうございます。一つヒントは、15 年前、PV などの見本市に行くと、日本のインバータメーカーが軒を連ねて大きな展示をしていたのに対し、その後そのような日本企業は殆どなくなってしまいました。8 月の CIGRE の展示会では多様なメーカー、インバータメーカーが出展しており、日本以外の企業がなぜ出てこられたかがヒントになるような気はいたします。それはニーズをどう捉えるかというところにポイントがあったような気がします。皆さんの方からこの点についていかがでしょうか？ 人材に繋がる話ですが、どなたかいかがでしょうか？

（参加者３）

人材について、最近研究室とか学科とかでは中国からの留学生が非常に多いとを感じます。中国だと電力に勤めることがステータスであることが大きく、電力の分野に人気があり多数の人がその分野を目指していて、それでうちの大学に来ると感じます。中国の大学でもこれらの分野の雇用が非常に多く、優秀な学生さんがいっぱい来て、そういった人たちがたくさんファーウェイだとかサングローなどに行くことになる。うちの研究室にきた学生はとても優秀で、1 人で研究をガーッとやって、サングローに就職した。それだけの質と数の開発要員がいれば、開発のスピードも非常に速いところですよね。その辺の物量戦で今日本の太陽光などのメーカーは負けたのだろうという気がします。

（PL）

はい、ありがとうございます。他にいかがでしょうか？

（参加者４）

先ほどの議論の中で、日本はまさに岐路に立っている状況かなと感じます。技術面で先ほどご質問ありましたが、やはりここでどうするのか、ここで何かきちっとできないと競争力もなくなってしまう。そういう意味で今の直流送電のお話とかですね。非常に考えるところが多いと思いました。例えば、直流多端子の技術についても、信頼性が高くコストも下がることに繋がれば、上手くいくのだろうけれども、それをやると、もう本当にまたガラパゴスではないとしても、信頼性のリスクも一緒に抱えることに関して、どういう戦略でいくのかが非常に気になります。そこがうまくいけばその分野の企業が元気になって人材も集まってくるだろうと。日立さんが ABB を買収した話でも、下手をすると全部の技術を持ってかれてしまうこともあり得ると思います。いかがでしょうか？

産業競争力

（PL）

どうぞ。

（参加者２）

ありがとうございました。世界的な日立 ABB ができて、日本のシェアは図らずもすごい状況です。ただ、日立エナジーが日本企業か、どこの国かの企業かと考えるのはもう変なのかもしれないですね。全てがグローバル企業化するのであれば、国産化ではなく、世界でみんな同じような技術とか、あるいは実は非常

に先進的であればそれを採用するなど、国境を越えるのかもしれません。

そういう意味では、日本発の例えば新しい制御とか保護がうまくいくのだとすれば、それを日立エナジーさんあるいは他のメーカーさん経由でそのところのノウハウというか、物作りではなく無形のその知財的なものを日本から発信することが一つのやり方としてあるかもしれません。もの作りとか、そのコストを安くということまで考えてしまうと競争力がないと思うけれども、そうではない高付加価値なものを加え、パッケージを売るという戦略もあると思いました。

（PL）

ありがとうございます。だいぶこの話題意見いただいていますけど、この続きでも結構ですし、もし違う話題でも結構ですが、いかがでしょうか？

（参加者３）

グローバルでやっていくにあたっては、やっぱりヨーロッパの人たちは自分たちでルールを作ってそれに乗せていくことで世界を巻き込むなど、進め方がうまいですよね。それに対して日本ではルールや規格を戦略的に作れる人は少ないと感じます。かく言う私もよく分かっておらず私が言えることではないのだけれども、そういったルールや規格まで含めた形で技術を開発できる人材や戦略を立てる人を育てることが厳しい状況であるとも思います。

短時間過負荷容量

（参加者５）

二つ質問があります。まず参加者3に。先ほどの質疑応答でもあった、短時間定格あるいは短時間過負荷の問題が、回転機の代わりにインバータで系統を維持しようとする場合に、短時間の過負荷容量を上げることどのくらい重要なことかという点について、感触をお教えください。そのような物理的な制約があるのかというのが 1 点です。

あと参加者2には、コストの観点で、広域機関の HVDC の試算では 800 万 kW で 3 兆円超とか言うと、100 万キロ当たり 4000 億円くらいになり、そうなると原子力発電所の単純な容量あたりの建設費と同じぐらいになり、これに風力の建設費を加えると経済的には成立しないのではないでしょうか？

（参加者３）

短時間定格については、設計次第ということになると思います。どれだけの容量の GFL を 1 個の GFM で面倒見るのかという点にも依存することもあり、一概には答えにくいと思います。あと時間的には過渡安定性であれば第一波ぐらい時間に対応できればよい。ただ最近は GFL でも Fast Frequency Response（1 秒未満の応答速度）もできるので、最初の GFM で必要な容量を明らかにすることも大切だと思います。うちの研究室でも学生さんと議論しながら、慣性応答で必要な量を検討しています。もし FFR で維持できる部分があれば GFM の必要重量を低減できるかを考えている状況です。ただピークの必要容量は事故様相に結構依存するので、はっきりとした数値が言えない状況です。インバータだけでそれで慣性を維持できるのかということそのものも課題ですが、当面回転機が完全になくなるわけではないと思います。例えば水力発電ですとか揚水だなどは残ると僕は思っていて、100%がインバータになるのは、本当に遠い将来の話かなと。ですから、短絡容量ですとか、あとは地点別に GFM を配置する場合どれだけ必要なのか、最終的な答えとしては何とも言えないというのが答えかなと。もちろんインバータの容量を大きくできれば何とでもできるのですけれど、多分それは経済的にペイしません。経済性との兼ね合いになるという気はします。

（PL）

はい、ありがとうございました。PV の設置場所がローカル系統かまたは配電網かという話もあるかと思います。二つ目、

（参加者２）

はい。まず、参加者3のお話について私もコメントさせて下さい。

GFM が例えば事故時にも電気を流せる、あるいは同期発電機代わりに慣性を管理するためには同期発電機と同じように過渡的には 10 倍の電流を流す必要があります。同期発電機は、銅と鉄と紙でできるためこれにより強靭なものはなかなかないのですが、パワー半導体デバイスへのニーズをしっかり打ち出して、聞く人に聞かせる必要があると思います。

家電式のサイリスタの場合には常時の定格電流が 4 kA であっても、アーム単絡時の過渡的な電流容量は 40 kA を持ちます。現場には全て戻すのですよね。こうした自己消弧型の素子の場合はサイリスタと同じではないですが、例えば定格の 10 倍の電流を例えば 0.1 秒間は流すことができる、こうした半導体デバイ

ス作れないとインバータが人々の生命のかかるライフラインに使えない、生命を託せないとパワー半導体デバイスを作るエンジニアから買った人まで届くように何度も言った方がいいと思います。だからメーカーさんのシステムエンジニアじゃなくて、半導体の設計する人に届くように何度でも言った方がいいと思っていました。

直流送電のコスト

（参加者２）

二つ目の参加者5の質問ですが、直流送電にはいろいろな費用がかかります。先ほどの技術の要素でお話ししたように、特に海底直流送電の場合には、変電設備のコストと送電設備のコストは 1 対 9 とか 2 対 8 ぐらいで、変換所のコストは 20%ぐらいで、残り 80%は送電設備、ケーブルの設備と敷設の費用です。

例えば東地域の北海道から東京の場合には、距離が 800km とすごく長いため、ケーブルの材料と敷設のコストがほとんどかかっていることになります。だからコストが高いか安いかは、どれぐらい距離が長いか短いかにかなり依存していると思います。それからに二回目の敷設であれば、ケーブルの敷設のエンジニアリングは大分こなれてくるでしょうし、1 回作った敷設船も使い回せるのでその分のコストもいらなくなるので、kW 単価あるいは km 単価は下がると思います。ですが、コスト面でだんだんスケールメリットがあるというのは大きく期待できないと思います。

（PL）

他いかがでしょうか？お願いします。

新しい配電網保護方式

（参加者６）

今のお話で参加者5のご質問にも関係するのかもしれませんが、先ほどからですね GFM の大量導入時のいろいろな問題点を参加者3に挙げていただいてありがとうございます。問題の解決はなかなか難しくて、耐電流性能を 10 倍にするのはなかなかそう早くはできないと思います。そうすると保護の考え方を変えることが必要になります。GFM の導入は自由化の中では計画的にできるものではなくて、勝手に入ってくるのでしょうから、同期機と同じ動作を期待できず事故電流を流せないインバータは最初に落ちてしまうわけです。そうすると現状のシステムにおける、事故電流を流しておいて時限協調で焦点を絞って局所的に系統を切っていくやり方のままでは維持できなくなります。ですから、その保護の方法自体を変えていくことも考える必要があると思っています。これは FRT にも関係しますし、それから単独運転検出にも全部関係してくることで、保護方式を変えればそういう課題を全部含めて議論できるようになると私自身は思っています。今かなり速い高速センサーもあり高速の通信もあります。ミリ秒の単位で、必要な情報がみんな集まっていれば、故障点が特定でき局所的な除去も可能だと思います。これはすぐにできる話ではないですが、方針がきまれば今の状況からどう移行していくのがいいのか、そういう議論もあればよいとお聞きしながら感じていまました。以上でございます。

（参加者３）

保護の問題っていうのはもう今問題になってきていて、参加者6がおっしゃる通りであります。既にハワイなんかだと太陽光が増えすぎて短絡電流が小さくなりそれを検出できないので、センサーデバイスを付けて検出することをやっており、ヨーロッパでは WAMS など広域的なセンサー情報を使って事故点を検出する研究がずっと前から結構やられています。将来的にはおっしゃられる方向に変わっていくと思います。ただ、その状態に向かって過渡的にどう移行していくのかは結構難しい話があると思います。ある程度そういったものが増えてセンサーというかそういったものに対応したものが切れてくれると、外乱が大きくなるので勝手にパッシブに切れ欲しいということもあるかもしれないし、場合によるとそれでは検出できない盲点が出ていることもあるということです。将来的にはそういった形に持っていくのが一番いと思のですが、そこへの移行が大きな課題になると思いました。GFM に期待される役割としては短絡電流以外にもいろんなものもあるということなので、本当は計画的に入れられるがいいかなと。私の意見としては TSO の言うこと聞いて GFM か GFL かを指定できる形にする世界が描けると綺麗かなと思っております。以上です。

（PL）

はい、ありがとうございます。オーストラリアがちょっとだけそういうセンスのことを始めているっていうことだと思います。

はいお願いします。

人材と技術力の維持

（参加者７）

技術者の話がありましたので少しコメントです。私ども紀伊水道にHVDCを所有しているのですが、20年か30年前に作ったもので、当時いろいろとメーカーさんと研究しながら作って、今頑張って維持をしています。その維持をしている技術者の維持がなかなか難しいという課題があります。次また作り直す時期が来るわけですが、そのときにはもう開発した技術者がいなくなっています。そのため、新しいものの導入ではそれを開発する力、もしくはそれを入れていく力が必要となり、技術者の維持というのは、20 年、30 年経つともう導入時の人は卒業してしまうので、長い目で技術者の維持は考えていく必要があると電力会社としては感じています。実情をお伝えした次第です。以上です。

（PL）

どうもありがとうございます。では続けてお願いします。

（参加者８）

お 2 人のお話大変勉強になりました。系統の技術と変換機ですとかデバイスの方の技術の、両方のことをわかって将来いろいろな検討を進めていける人材が重要だというお話は、全くその通りと思います。しかし、現状の大学の教育の仕組みや研究が、そのような観点で十分行われているのか、まだ全然足りないので変えていく必要があるのか、それから大学から産業界に出ていった後にもいろいろ人材育成する、あるいは系統と変換器の協調などの取り組みをするこの必要性についてご意見を伺えないでしょうか。

（PL）

はい、ありがとうございます。まず参加者3、次に参加者2からお願いします。

（参加者３）

まず教育に関しては、多分学部の教育では不十分です。パワーエレクトロニクスは私が教えていますが半期は他励式でほとんど終わってしまい自励式の話が殆どできない状態です。電気だと電力以外にデバイスや情報などいろいろな分野があって授業の枠が不足し、パワエレですら教えきれてないのが現状です。大学電気教員協議会という日本全国の電気の教員が集まって教育に関する議論する場でも、パワエレ教育については時間が足りないと皆さんとおっしゃっていて、大きな課題です。もう学部教育だけでは無理で、大学院もしくは研究室の中で教育をすることしかできないという状態です。私自身は大学院で変換器の制御の講義はやってはいますが、大学院になってくると本当に興味を持ったのは研究室の関係者とかそれプラスアルファぐらいしかやっぱ受講しないので、広く教育ができているわけではないと思います。私としては他のところから受講いただくのは歓迎なのですが、そういったことにはなっていないのが現状ではないかと思っています。

（PL）

参加者2から。

（参加者２）

はい参加者3の今のコメント、非常に大賛成です。学校の授業では先ほどのレベルまでは行かないですね。大学院は実習する人が限られるので、まんべんなく電力とパワーエレクトロニクス技術を教えるチャンスはないです。あとは、例えば社会人を受け入れて系統、パワーに関してリスキリングをする、あるいは博士課程に入ってもらって学位を取るために専門的な技術を学び、社会、企業に戻りその人が企業の中を変えてゆく、間接的だけれどもだんだん親から子から孫と広げていくやり方があると思います。今日のスライドにもちょっと書いてきましたが、一つの企業で維持エンジニアリング、を維持できない場合には、お互いの一般送配電事業者さんの間で出向したり研修したりするとか、一般送配電事業者さんからメーカーさんに研修出向して学ぶ、あるいは産業界と大学の間で人事交流して学んだ人が企業に戻り次の人へと、いろいろな仕組みを試してみないとなかなか広がらないと思いました。以上です。

人材と技術力確保の取り組み

（PL）

ありがとうございます残り 4 分ということになってしまいましたが皆さんからいかがでしょうか？新しいものテーマでも、短くお願いできれば今の続きでも結構です。聞いていて思ったのは、シミュレーションにも多様な新しい技術が対象となり手間もかかるし、パラメータの設定も大変です。とても大学で教えきれる領域ではないことが、今世界中のリアルなニーズになっているということで、これについて日本の中で何かできるこ

とがあるでしょうか？瞬時値解析もやれ何もやれというそんな話に対して同取り組めばよいか？
参加者8の方から一言お願いします。

（参加者８）

先ほどの質問はその辺の背景もありまして、シミュレーション技術はインバータが大量に入ってくる世界で、大きく変わってきていると思います。これから先、参加者6から先ほど保護の考え方の提案もありましたけれども、そういうことをやっていくためにも、どうやったら何が起こり、それを保護するためにはどうしたら良いかを総合的に検討していかないといけないと思います。やはりベースになるのはシミュレーションだと思います。ということで例に関わる人材育成の枠組みの中で立ち上げようとしています。こ一旦時限的な形態で立ち上げてもその後継続的に進めることを考えていかなくてはならないと思います。これ関係者皆さんで議論を進めていきたいなというふうに思っております。でぜひよろしくお願いいたします。

（PL）

ありがとうございました。また別の機会にご紹介いただければと思います。最後にあと 2 分ですが何か皆さんの方から、何かございますでしょうか。一つちょっと気になるのはヨーロッパで HVDC の変換器にもグリッドフォーミングが義務付けられる、という検討がもうみるみる進んでいると、それと日本ってどういう関係になるかという点です。よしあしではなくて、日本はどうするのだっていうことですね。

（参加者１）

すいません。ありがとうございます。先ほどの人材育成の件は非常に参考になります。ありがとうございました。ちょっとこれ悪手かもしれないのですけども、最近の若い人、学生さんはコストパフォーマンスを重視することも言われていますし、事実だと思うのです。例えばシミュレーションの解析環境が日本は整っていて、そのブラックボックス化でもいいのですけども、実は詳細なモデルを持っていて、基礎検討ができるんですよ。でもメーカーのノウハウのところはブラックボックス化されて触れられないけれども勉強できる研究できる環境があることを、例えば日本の学生向けに伝えられないか。コストパフォーマンス高く勉強できて、研究者になれるというのを売りにしたらどうかと思いました。ヨーロッパの、あれ本当にできるか疑問はあるのですが、長期にわたってヨーロッパに HVDC を張り巡らす計画と、再エネの導入を後戻りしないという社会の風潮ができてきたら、仕事がたくさんあるので、例えば日本のその解析モデルを作ったときにここのモデルで検討したことはヨーロッパでも使える技術なので、あなたがヨーロッパの仕事に参加する、というかリーダーになる可能性もあるという匂いを感じることができれば、良い風も吹いてくるかな、という気がしました。ヨーロッパのことは他人事じゃないっていうのを自分の学生にも伝えていくことをまずはあの今日その仕事としてやっていったらいい方に向いていくかなというふうに思いました。

閉会

（PL）

ありがとうございました。事務局からの連絡ということで最後にもう少しだけ時間をください。

（事務局）

本日ありがとうございました。4 回目ですが先週の金曜日に締め切りまして、別途メールで連絡させていただきますけど、人数が最も多かった 11 月 8 日（金）17 時から 19 時です。第 2 回目の議事録等につきましては、ご意見なかったということで決定とさせていただきます。事務局からは以上です。

（PL）

本日も忙しいところは皆さんご参集いただきましてありがとうございます。次回 11 月もどうぞよろしくお願いいたします。本日はこれで終了とさせていただきます。

第 4 回会合

開会と今後の進め方
（荻本 PL（以下 PL））

時間になりましたので EAJ 電力プロジェクト第 4 回会合を始めさせていただきます。こちらの次第にありますように構成はいつも通りで、2 件の発表の後全体で議論するということになっています。

本日は少々アナウンスがありますので「進め方」の資料（資料 1）を説明させていただきます。まず「分野別の発表討議会」の項目について、第 5 回スケジュールの黄色塗の部分にありますように、分野横断の議論を 2 時間行うことで計画していました。しかし、過去の討議会で、「貯蔵」が明示的に入ってないということで、これを第 5 回で、30 分で発表、30 分議論し、その後、横断的議論を行うことに変更することを今回の資料で示しています。ここから先の進め方につきましては、顧問の横山先生と蘆立さんと事務局で相談し整理していきます。

「提言書の取りまとめ」についても、ここにありますように、以下 5 回で議論しましょうと。

まさに横断的議論の一部ですので今日は頭出しだけということで、どんな構成にするかということについては、言葉は前から出ていましたが、「横串の項目」ということで、「データの活用」、「人材育成」、「ツール」などの横串を、具体的なテーマは今後決めていきたいと思います。縦割りの技術項目については、各討議会の進め方に書いてあったことに対応しますが、「キー技術」、「キーシステム技術」を各節の発表者により文章化していただく。シナリオを意識して、最終案の構成とすることを、今回明示的にアナウンスして、次回議論するという位置付けです。

その他ということで、各発表資料、取りまとめ表、発言録の活用についても書いています。各発表資料の中に著作権に関わるものが入っていると自由に配布することはできなくなるため、それを外して公に使えるものを作るのか、それとも外さないで関係者内にとどめるのかなどの点はこれから相談させていただきます。せっかくの資料ですから、後に残るような形にしたいというところまでが今回のアナウンスです。これについても、第 5 回で皆さんにご意見をいただいて、決めていこうと考えています。

次が「中間シンポ」です。これについてもキックオフのときに一応全体の実施スケジュールとしてはお示ししておりました。本プロジェクトを 4 月に開始してあっという間に 11 月ということですから、中間シンポの日程、形式、構成、進め方について今回アナウンスをさせていただきます。

まず日程ですけれども、年度末を越えた 4 月早々が大学の先生方には都合がよかろうということで、4 月の前半で少し長い候補日を作って調整をしたいと思っています。

時間は、13 時 30 分から 17 時 30 分のイメージです。形式は、多数の参加が見込まれるハイブリッドで、対面の会場の状況がオンラインで視聴できるという形を目指したいと思います。ハイブリッドの場合会場設定はそれなりに手間もかかるので、日にちが決まったらスタッフと相談して実施が可能かどうかを判断しますので、現時点ではハイブリッドを目指すという書き方になっています。

構成は、これまで実施した各分野の討議委員や閲読委員、質疑で発言された方、それ以外の方を中心に構成します。第 5 回までの各分野の内容を 20 分×5 回で講演頂くことを考えると全てテーマを拾うと数が多すぎますので、両顧問と相談させて頂いて、「電源」、「需要」、「再エネ」、「パワエレ」、「送配電」という講演分野を考えています。

発表とパネルディスカッションの中に技術自体がありますので、各分野の方に二手に分かれていただき、ご参加頂くことを考えています。ただ、全員参加できるかどうかは、これから日程の調整となります。パネルディスカッションは、「技術」と「人材育成」で構成してはどうかと。仮ではありますが、一応今までの質疑で、エネルギーのこもった議論されたのが「人材育成」でしたので、これをテーマとすることを書いています。

今後、事務局で企画を進めて、登壇者、パネルディスカッションの登壇者を調整し、次回第 5 回で提案させていただく予定です。第 5 回は 1 月頃の予定で、その中で提案・議論し、実施に向かって具体的に進めたいと思っています。

第 5 回までに登壇者の調整を事務局から相談させていただきますので、よろしくお願いいたします。今日の段階ではこのシンポジウムも提言とりまとめ方式についても、第 5 回で議論させていただきます。何か直接の質問がありましたらお願いしたいと思いますが、いかがでしょうか。本質的な議論は第 5 回で 1 時間取った中でやりたいと思います。

それでは発表 1、関西電力送配電株式会社の山本様に送電分野のご発表をお願いいたします。

講演 1 送電（関西電力送配電・山本）

関西電力送配電の山本です。送電ということでお話しさせていただきます。

送変電設備の概要

最初に送電線設備の概要です。発電所から住宅までの、昔からの大きな発電所から送る電気の流れを示しており、大体超高圧で 50 万ボルトから 27 万ボルト、それから 15 万ボルト。負荷系に落としていくところで 7 万ボルトがあって、その次が 3 万ボルトから 2 万ボルト。ここから弊社では配電部門が担当し、配電用変電所を経た 6 千ボルトの高圧で送って、最後の家庭では 100 ボルトあるいは 200 ボルトで使うことになります。各社ともおよそこのぐらいの電圧ですが、少し違った電圧を採用されている会社もあります。

送変電と言われるところと、配電と言われるところ、舞台は二つあり、さらにこれらをコントロールする部署として系統運用部門があり、中央給電指令所、地方給電制御所が、需給の調整と系統のコントロールをしています。

こちら鉄塔の概要です。大きいものでは 100m 近いものもあり、見ていただいてわかるように、山の上を縫っていくような結構厳しいところに設置されているものも多く、ヨーロッパでは牧場というか平地の中をまっすぐ行くことも多いのですが、そういうところとはずいぶん状況が違います。

地中はこの絵のように掘って施工しています。変電所には断路器、遮断機、変圧器などがあり、負荷電流や事故電流が増えて定格を超えるものがあれば取り換えることもあります。

それから海底ケーブルということで、紀北と阿南、関西と四国の間にある弊社の設備例です。直流の碍子は少し特殊なものを使うなどいろいろと苦労があり、この OF ケーブルも当時の技術ではこれしかなかったのですが、最近はいろいろな種類のケーブルが海外では出てきていると聞いています。こういった建設してからずいぶん経つ設備は、建設した頃の技術者はいなくなり、廃止する頃に建設のノウハウを持った人をまた一から育てる必要があるという悩みが、こういう数が少ない設備にはあります。

それから、中央給電指令所は需給を、基幹系統給電所と地方の給電制御所は電気の流れをコントロールする系統を見ています。

送電系統の歴史

歴史と書いていますが、昭和の初期からたどりますと、関西では大阪、京都、神戸などの需要に対して電源を開発しに北陸東海の方まで行かせていただきました。

その後、高度成長で需要が伸びる中、この送電網がどんどん広がり、左下のように 50 万ボルト系統ができました。この右上のそれより昔の頃に、東海地方で送電線事故があり、その事故点の位置が悪かったため連鎖で送電線が止まり大停電に至ったという痛みがありました。そこで当社ではその後ずっと放射状の系統を採用していましたが、保護技術の進展もあり、右下のように今はループが多くある系統になり、中国電力、北陸電力、中部電力と繋がっている状況です。

皆様ご存知の通り、日本の系統は沖縄と、九つの送配電会社が地域間連系線で繋がっている構成です。海外との違いというふうに書いておりますが、日本は細長い島国でエリアが縦に繋がっていて、くし型とか言われる系統です。これに対して欧州はメッシュ型、網の目状ということで、アメリカも同様の形になっています。

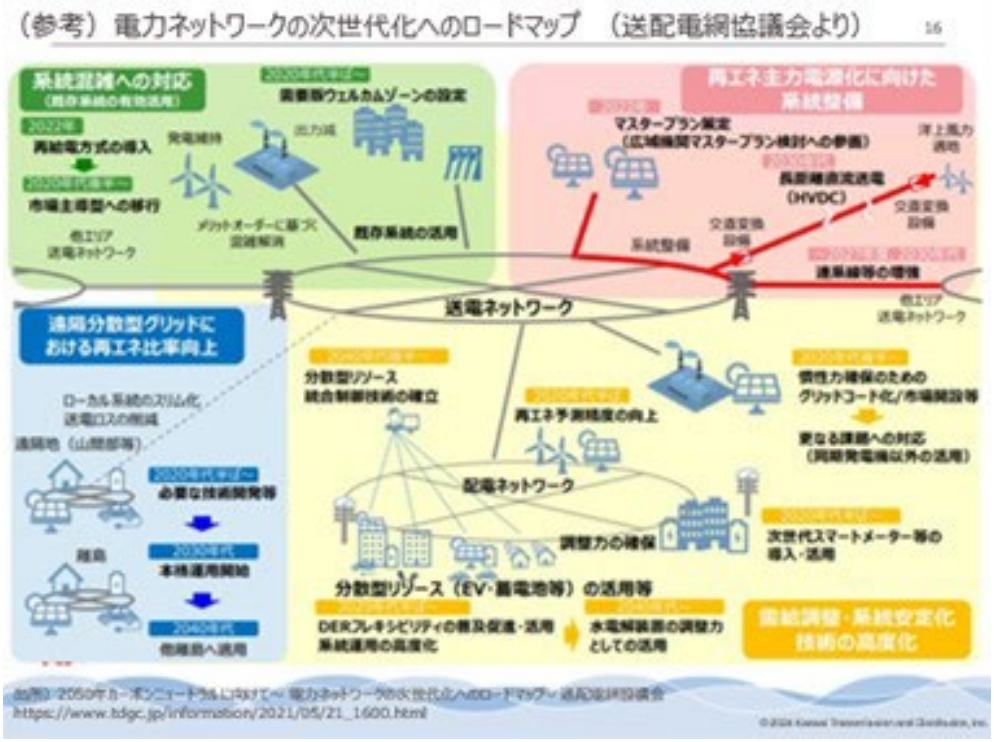
起こりつつある変化

起こりつつある変化についてキーワードを並べてみました。少数の大型電源からの発電は、今では分散電源という多数の小さな電源からの発電が増えつつあります。また、従来は出力をコントロールしやすかった電源が、自然変動する電源に変わり、同期機が中心だった電源が、非同期な電源が徐々に増えてきて、今は時間帯によってはかなりの割合を占めるようになってきているということです。



また、制御できる需要が出てきましたし、潮流も双方向になるなど、配電系と送電系統の潮流が変わってきています。また、昔は地域ごとに需給を一致させていたのに対し、今は卸市場、容量市場、それから需給調整市場も全国運用となり、全国で、それもマーケットで調整するということに変わっています。今後はローカル系統でも混雑が発生するということで、蓄電池の使い方も課題になってくると思っています。

16 ページは、送配電網協議会という一般送配電事業者の業界団体が出している、今後はこういった対策が必要であろう、というロードマップです。



需要動向の変化と供給力見通しの現状

それでは需要動向が変わっていくというところを供給力の見通しというとこで少しお話をさせていただきたいと思います。

最近、AI が爆発的に普及している中でデータセンターの建設が増えているという話で、東京電力管内の印西が有名ですけれども、関西の方でも同様になりつつあります。

全国、10 年で 550 万 kW ぐらい需要が増える [19]と言われていますけれども、民間の予想ではもっと爆発

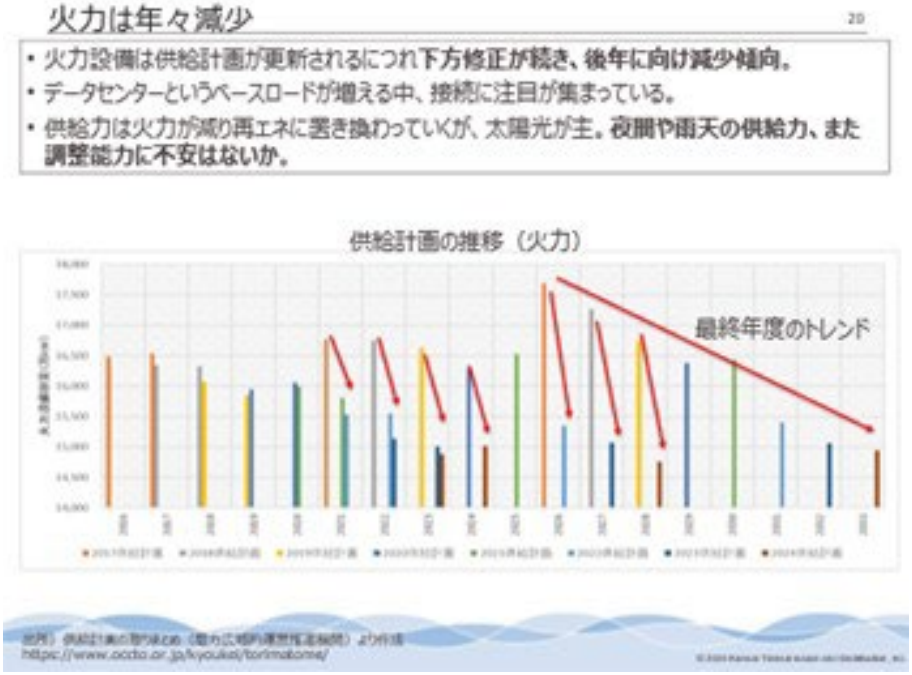
[19] 全国及び供給区域ごとの需要想定(2024 年度)(2024.1.24)P15、電力広域的運営推進機関、https://www.occto.or.jp/juyousoutei/2023/files/240124_juyousoutei.pdf

的に増えるという見立てもある[20]ということで、どこまで増加するかわからないですが、こういった需要増があります。

今増えている電源は再エネが多く、日本では太陽光が多い状況です。今後東北・北海道の方で風力の導入もという話はありますが、太陽光はまだまだ伸びていくと言われています。

一方で火力はというと、20 ページは供給計画の火力設備容量を 8 年分順番に並べた図で、毎年の供給計画で、今ある電源の容量が増えるか減るかを見た図です。

1 年目、2 年目それから 5 年目、10 年目しか記載しておりませんので、少し間隔が飛んで見にくいのですが、矢印が示す通り、同じ年度で見ると、供給計画が更新される都度火力発電の容量が下方修正に変わったことが見て取れ、最終年度として提出された値も右側にある通り、毎年下方修正されどんどん減少している状況です。



このことから、今見ている供給計画の 10 年目の数字は、もう 1 年たてば下がる可能性があります。先ほど今後の導入は太陽光中心と述べましたが、夜間や雨の日、曇っている日はどうするのか、もしくは調整能力に不安はないかなど考えていかなくてはなりません。

また、データセンターの話をするとき、系統アクセスが着目されますが、裏打ちとなる供給力が大丈夫かという点もよく見ないといけません。今は、小売事業者が卸市場で調達すると言えば、需要を契約することもできます。そのため、十分な電源があるかを見ておく必要があります。

再エネの増加

再エネが増加するという話では、先ほどと同じく太陽光を中心に伸びていくと思われます。

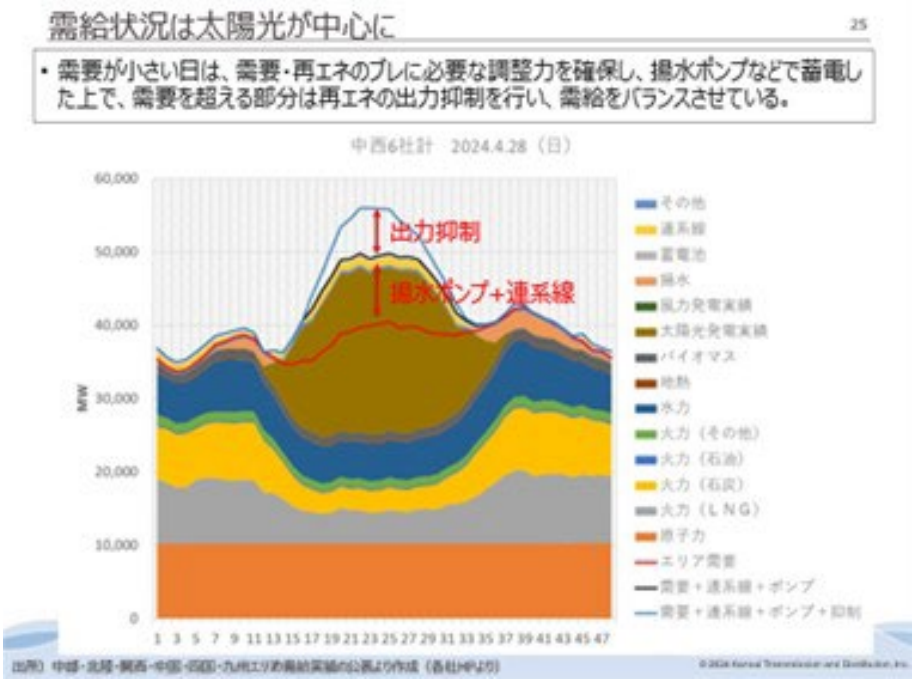
日本の再エネは国土面積あたりだと導入量は最大級[21]のようです。同じ太陽光でも、配電系統に入っているものが多いということで、小容量のものが高圧に接続された太陽光が日本は多いという状況です。

このことから、運用の状況としては、送電系統よりも配電系統の方が、実は厳しい可能性もあります。25 ページは中西の 60Hz エリアの 6 社の合計の 4 月 28 日の需給状況です。この日は一番厳しそうな端境期である春の日曜日です。茶色が太陽光で、一番下が原子力です。太陽光の出力がこれだけあるということで、揚水ポンプと 50Hz 向けに送電していたのですが、使い切れない部分は出力制御により需給調整していました。

---

[20] 情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響（Vol.4）－データセンター消費電力低減のための技術の可能性検討－（2020.2）国立研究開発法人 P23 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター
https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2021-pp-01.pdf

[21] 第 95 回　調達価格等算定委員会（2024.10.16）資源エネルギー庁　P7、
https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/095_01_00.pdf



太陽光の本来の出力としてはこの茶色部分に出力制御の分を加えた量があったのですが、それ以外の供給力は需要から太陽光を差し引いた部分を調整することとなり、いわゆるダックカーブになっています。

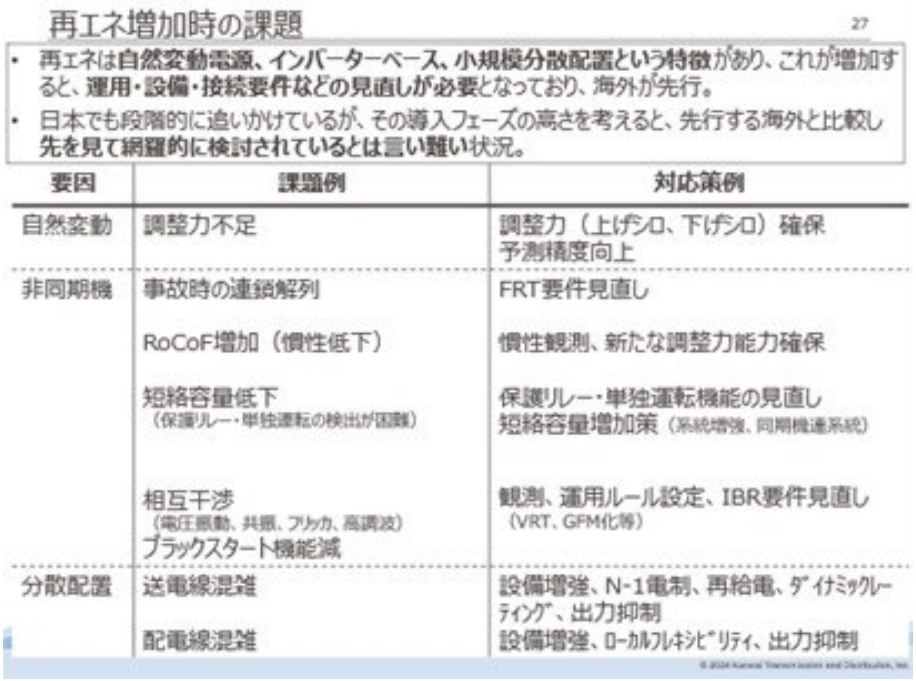
このように、需給運用は、再エネを中心にそれ以外の電源出力を合わせる運用に変わってきています。世界から見たときに、再エネの導入の水準がまだ足りないんじゃないかと言われますが、IEA で出しているこの 6 つのフェーズ[22]では、日本はフェーズ 3、九州はフェーズ 4 にあると言われています。フェーズ 5 はデンマークだけで、それ以上のフェーズ 6 はいないということですから、かなり上のところに入っているということです。このフェーズ 3 の意味するところは、ダックカーブが現われて再エネ中心に運用、他の供給力は合わせていく段階で、フェーズ 4 は出力制御が相当出てくる段階と定義されています。これは一つの目安かと思います。

再エネの増加による問題を改めて考えてみますと、出力が自然変動すること、インバータベースで非同期機であること、それと小規模で分散配置されていることです。

このように変わってくると、運用、設備、接続要件など様々な見直しをしていかないと、導入量が増えると課題がでてくるということになります。海外については後ほどご紹介しますが、日本はまだ部分部分しか対応してきていないという状況で、後ほど九州エリアと同じフェーズ 4 にいるアイルランドやオーストラリアの例を紹介しますが、この後再エネが増えてくると海外並みの対策が必要になるのはそう遠くないんじゃないかなと感じています。

27 ページの表に示すように、自然変動でその変動をどう調整するかという課題に対しては、予測精度を上げ、調整力を確保するということになりますし、非同期という点では事故時の連鎖脱落をどう止めるか、他にも慣性・RoCoF の問題、短絡容量の低下、事故電流が減少することに対して保護はどうするかという問題も出てきます。インバータ制御系を含めた相互干渉ということによる電圧振動、共振、フリッカ、高調波から、ブラックスタート能力の確保など、様々な問題が考えられます。最後に分散配置という点では今までと電気の流れ変わるため、送電線、配電線とも混雑する可能性があり、コネクト&マネージなど、いろいろな取り組みをやっているところです。

[22] IEA Six phases of Variable Renewables Integration https://www.iea.org/reports/integrating-solar-and-wind/infographic-six-phases-of-variable-renewables-integration



再エネ増加時の課題 27

- 再エネは自然変動電源、インバーターベース、小規模分散配置という特徴があり、これが増加すると、運用・設備・接続要件などの見直しが必要となっており、海外が先行。
- 日本でも段階的に追いかけているが、その導入フェーズの高さを考えると、先行する海外と比較し先を見て網羅的に検討されているとは言い難い状況。

要因	課題例	対応策例
自然変動	調整力不足	調整力（上げシロ、下げシロ）確保 予測精度向上
非同期機	事故時の連鎖解列	FRT要件見直し
	RoCoF増加（慣性低下）	慣性観測、新たな調整力能力確保
	短絡容量低下 （保護リレー・単独運転の検出が困難）	保護リレー・単独運転機能の見直し 短絡容量増加策（系統増強、同期機連系統）
	相互干渉 （電圧振動、共振、フリッカ、高調波） ブラックスタート機能減	観測、運用ルール設定、IBR要件見直し （VRT、GFM化等）
分散配置	送電線混雑	設備増強、N-1電制、再給電、ダイナミックレーティング、出力抑制
	配電線混雑	設備増強、ローカルフレキシビリティ、出力抑制

非制御性電源の増加と調整力

次に非制御性の電源の増加と調整力という点では、再エネの出力変動に対しても調整力が必要で、3次調整力②はその対応のための調整力です。今後、揚水ポンプのような蓄電技術、上げ DR、再エネ出力抑制も最後の調整力になると考えられます。

kW、kWh、ΔkW の市場、それから調整力の運用など、エリアで管理してたものが全国単位に変わってきており[23]、最近では計画停電も全国の予備率を見て考えるのではないかという議論にもなっています。

調整力の市場は、3 次②から 1 次ということで用意されていますが、今後はこれに加えて慣性や、無効電力も市場に出てくるかもしれません。

需給調整市場の状況を見ると、需給が逼迫してないにもかかわらず応札未達が多いという状況[24]で、これは入札すればほぼ全て落札されることになります。そのため、全国で取引をするのですが、市場競争というのはあまり起こっているとは言えず、市場で調達する仕組みという意味では、まだまだ発展途上、課題が多いということになります。

発電機の起動時間を見ると、欧米はガスパイプラインがあり、ガスタービンがあちこちにあると聞いてますが、そのガスタービンは 30 分ぐらいで起動できるので、普段待機していてランプ負荷変動などの発生時にはその時点で起動するようなことが行われているようですが、日本は汽力で起動時間が長いので並列しておくことが必要で、そうすると待機コストや最低出力の問題が発生し、費用が増えるという話になります。

非同期電源の増加と system strength

アイルランドは 2010 年頃に、2030 年には再エネ比率を 40%にするという長期目標を立てて、網羅的に対策を検討[25]したようです。再エネがどれだけのどの地点に入ってくるのか、需要はどう変わっていくのか、小さな島国ですので最後の調整弁としての国際連系線まで含めた上で、周波数、電圧がどうなるかなどシミュレーションをして、様々な視点からの対策を立て、その対策費用を含めた費用便益を見た上で意思決定をしており、全体を見て計画的に進めているようです。

順調に進んでいるようで、2030 年までに再エネ電力の比率を 80%にすると目標も上方修正をし、瞬間的な再エネ比率（SNSP）を 50%から 75%に引き上げるということで進められており、今は 95%までいくというとこ

---

[23] 第 25 回 電力・ガス基本政策小委員会 資料 6 今後の電力需給運用について（2020.6.11）資源エネルギー庁 P9
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/025_06_00.pdf

[24] 第 101 回調整力及び需給バランス評価等に関する委員会 資料4需給調整市場検討小委員会における検討状況について（2024 年度上期報告）（2024.9.30）電力広域的運営推進機関 P21
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/025_06_00.pdf

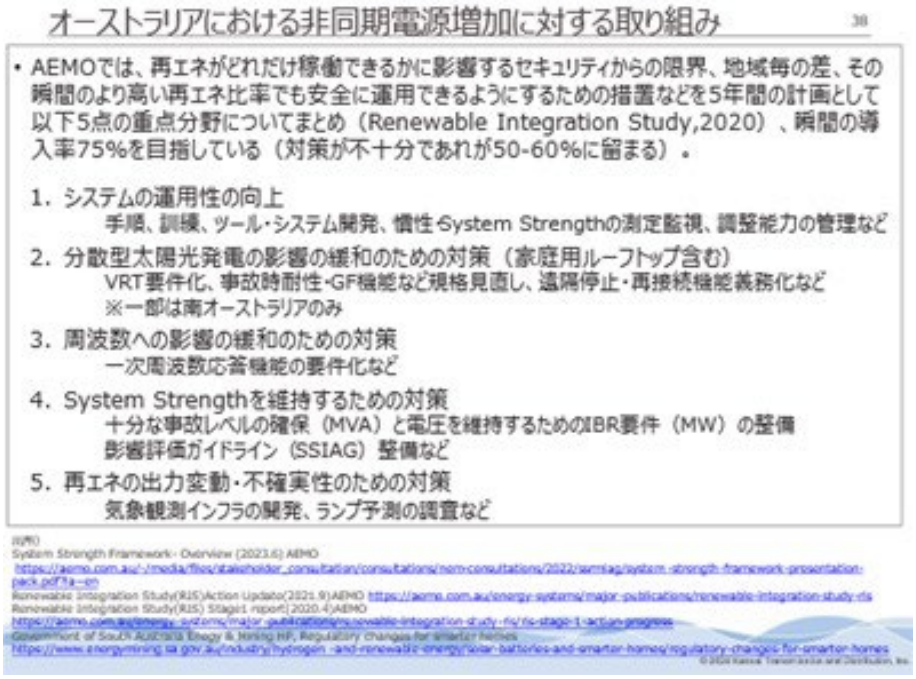
[25] Shaping Our Electricity Future Roadmap Ver1.1(Eirgrid and SONI)
https://cms.eirgrid.ie/sites/default/files/publications/Shaping-Our-Electricity-Future-Roadmap_Version-1.1_07.23.pdf

ろまで取り組まれている最中のようです。

やはり同期機が減る問題や、慣性の問題もありますので、廃止した石炭火力を同期調相機に改修することも行われています。

一方、オーストラリアですけれども、南オーストラリアでブラックアウトがあったということはご存知かと思います。竜巻で送電線がいくつか切れたときに電圧攪乱が発生し、風力が脱落して、連系線が切れ、最後は南オーストラリアがブラックアウトしたという事故[26]です。この原因ですが、電圧が揺らいで風力が脱落したとのことです。この対策を検討する中で、システムストレングスという言葉が出てきています。

38 ページはオーストラリアがどういったことに取り組んできたのかを示しています。運用性の向上、分散型の太陽光発電の影響の緩和のための対策、ここでは家庭用のコンバータまで制御対象に入れております。周波数への影響の緩和のための対策として一次調整力提供の要件化などがあります。システムストレングスは電圧を維持させるための力で、ガイドラインや指標を定め、出力変動や負荷変動をどう監視していくのかなど、かなり網羅的な取り組みをされています。



39 ページは、AEMO が公開するマップ[27]なのですが、左側は同期電源の各地域の密度、それから薄い青は再エネがどの辺に入ってくるかを示しています右側はシステムストレングスと言われる電圧揺らぎに対する強さですけれども、強いところは緑、弱いところは赤で示されています。同期電源の多い地域は緑や緑黄色が多く、離れていくと、赤が出る傾向が見て取れます。

同期電源の無効電力調整の効果は近傍に限られるため、遠くなれば弱くなります。この下ちょっと青で囲っている地域があります。図中の West Murray Zone[28]は、送電線事故がなくても電圧に 19Hz ぐらいの低周波の揺らぎが発生することがあるようです。この揺らぎは、30 秒ぐらいで終わる場合もあれば数分続く場合もあるそうです。インバータ同士が共振しているようで、インバータの並列台数を減らすと影響は減るが、並列台数を減らさずに出力を下げるだけでは変わらない、という観測もあります。原因は不明ですが、何等かの影響を与えているということになります。

---

[26] Black System South Australia 28 September 2016, AEMO(2017.3) https://www.aemo.com.au/-/media/Files/Electricity/NEM/Market_Notices_and_Events/Power_System_Incident_Reports/2017/Integrated-Final-Report-SA-Black-System-28-September-2016.pdf

[27] AEMO Maps https://www.aemo.com.au/aemo/apps/visualisations/map.html

[28] West Murray Zone Sub-Synchronous Oscillations (2022.10)AEMO https://aemo.com.au/-/media/files/electricity/nem/network_connections/west-murray/high-level-summary-of-wmz-subsynchronous-oscillations.pdf?la=en

41 ページでは、システムストレングスの定義について、オーストラリア[29]、イギリス[30]、アメリカ[31]などの例を示しています。いろいろな表現で書かれていますけども、基本はやはりインバータ電源の大量導入に際して、系統の安定運用をどう維持するかであり、慣性を含めている国もあれば、電圧に着目した定義とし慣性とは使い分けている国もあるようです。

先ほど申し上げたアイルランドですけれども、このオーストラリアの事例を重く見ているようで、テキサス、イギリス、オーストラリアの事例を出してシステムストレングス、電圧の問題をしっかり考えようと、システムストレングスについて何を監視するかを検討し始めている[32]とのことです。

このように、世界の再エネ導入が進んでいる国ではお互いの対応を見ながら出てきた問題に対し取り組みが行われているように見てとれます。また、いずれの国も、グリッドコードだけとか、調整力だけとかではなく、運用方法それから運転員のトレーニング、それから風力など再エネ側での対応など、網羅的な取り組みが行われているように見えます。

これに対して日本の状況は、「周波数の滞在率」は少しずつ下がっていて[33]、特に西日本で端境期の需要が低く再エネ比率が高い時間帯では、周波数滞在率の低下が実際起こっています。

45 ページでは、中部電力の碧南火力の送電線事故時に、太陽光が周波数低下に際して連鎖的に脱落したことで、想定以上に周波数が下がった事例[34]です。こちらでは FRT 要件を追加したりしています。

46 ページの図[35]では、広域機関のグリッドコード検討会で多くの項目について海外学びながら取り組んでいるものを示していますが、システムストレングスという視点ではこれからの検討のようです。慣性も第 3 フェーズに置かれています。グリッドコードは検討が続いていますが、運用をどうするのか、系統側で何か対策が必要かなど、将来とるべき対策の全体像が十分見通せていないという気がいたします。海外では全体像を先にイメージしてから取り組んでいるようで、取り組みの仕方が少し違うようです。

送電線の増強

送電線の増強については、今まで送電線は需要とともに電源を作って送電線もセットで作ることが行われてきました。しかし、電力会社が分社化されたことで、電源と送電線はそれぞれで判断されている状況です。

全国で潮流が変わるのは、最エネ適地と需要集中地域が大きく分かれていくことに起因します。マスタープランでは HVDC 建設の話もあります。50 ページは関西のローカルの例です。データセンターが集まる地域と再エネが増える地域は一致しないため、ローカルの中でも問題が出てきます。

52 ページは、送電線の建設にはリードタイムが必要という説明[36]で、海外でも送電線建設はなかなかうまくいってないとも聞きます。54 ページのウェルカムマップは、送電線の余力のあるところを示すもので、ここに土地が空いていれば接続適地となります。情報を出すなどこういう努力もしています。

---

[29] System Strength – System strength in the NEM explained, (2020) P5 https://www.aemo.com.au/-/media/files/electricity/nem/system-strength-explained.pdf

[30] System Operability Framework 2014 P8 https://www.neso.energy/document/63446/download

[31] Integrating InverterBased Resources into Low Short Circuit Strength Systems Reliability Guideline December 2017 P.vii https://www.nerc.com/globalassets/who-we-are/standing-committees/rstc/irpwg/item_4a._integrating-_inverter-based_resources_into_low_short_circuit_strength_systems_-_2017-11-08-final.pdf

[32] System Strength Requirements(2024.7.17)Eirgrid and SONI https://cms.eirgrid.ie/sites/default/files/publications/20240717_EirGrid_and_SONI_System_Strengh_Stakeholder_Presentation_0.pdf

[33] 系統 WG 資料 1「再生可能エネルギーの出力制御の抑制に向けた取組等について」(2024.3.11)資源エネルギー庁 P14 https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/050_01_00.pdf

[34] 系統 WG 資料 1「再生可能エネルギーの出力制御の抑制に向けた取組等について」(2024.3.11)資源エネルギー庁 P14 https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/050_01_00.pdf

[35] 第 16 回グリッドコード検討会 資料3(2024.3.22)P8 電力広域的運営推進機関 https://www.occto.or.jp/iinkai/gridcode/2023/files/gridcode_16_03.pdf

[36] 第 34 回料金審査専門会合 資料 5 (2018 年 12 月 12 日)電力・ガス取引監視等委員会 P37,38 https://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_electricity/pdf/034_05_00.pdf



55 ページは設備投資と運用による対応のバランスが大事と書いています。調整力に新しい技術が出てきます。これで負荷のピークをしのぐという考え方もあるのですがそれだけでは万能ではなくて、投資による設備増強が必要なところもあると思います。これらをどう組み合わせていくかが今後大事であると考えています。

57 ページは説明を割愛しますが、配電系統でもいろいろ課題あるということを書いています。

失われた 30 年

58 ページ以降は、「失われた 30 年」に話が変わります。59 ページ[37]は左が電気料金、右が消費者物価の推移で、日本はもう 30 年来電気料金の水準が変わっていないのに対し、海外は上がってきており、消費者物価も同様の傾向です。

そういった中で、日本の投資は、鉄塔と変圧器の例[38]を見ると、1975 年の高度成長期をピークに、投資が減ったままです。こういった状況下では、メーカーも作業員も、この投資規模にあわせてサプライチェーン全体が縮小していることになります。今後これらの大量の物量を更新し、再エネの移行のために増強するとき、メーカーの生産能力とか作業員の確保は非常に大きな課題になります。今でもなかなか足りていない状況です。

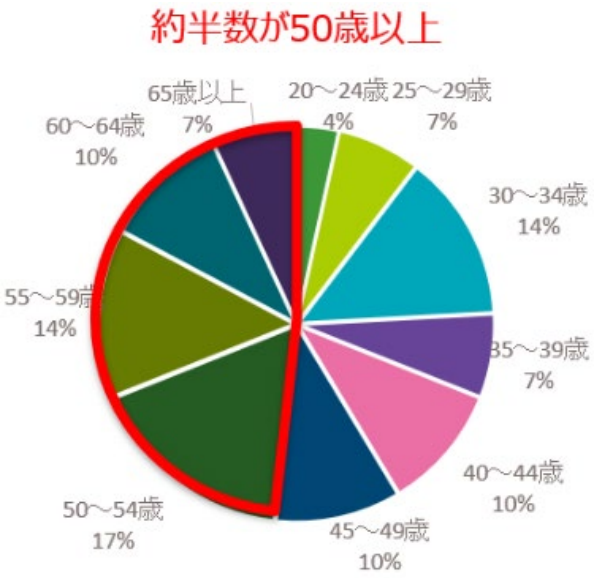
作業員については、過去 20 年ぐらいのデータ[39]を見ると、徐々に減ってきています。また、右の円グラフでは、2024 年断面では半数は 50 歳以上ということで、10 年後にこの人たちは 60 歳以上になります。送電線は山の中の厳しい作業が多くあります。この後継者をどう確保するか、そのためには他産業よりも条件を良くしないといけない。元々かなり厳しい現場仕事ですので作業員の確保は非常に大きな問題です。

---

[37] 家庭用電気料金の推移 「燃料価格の上昇と主要国の電気料金」電力中央研究所社会経済研究所コラム(2023.8.22) https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/column/column65.html 消費者物価の推移 出所）日本生命 HP 新社会人のための経済学コラム https://www.nissay.co.jp/enjoy/keizai/154.html

[38] 2024 年度供給計画の取りまとめ（2024.3）電力広域的運営推進機関 P39 https://www.occto.or.jp/kyoukei/torimatome/files/240329_kyokei_torimatome.pdf

[39] 送電線技術建設技術研究会 HP http://www.sou-ken.or.jp/01souken/souken_toukei.php



出所）総務省統計局e-stat 労働力調査
（電気・ガス・熱供給・水道業、2024.4）より作成

62 ページは、送電電圧の変化[40]です。やはり海外が上がると同時に日本も追いついて上がり、かつては同じスピードで技術開発をしてきましたが、この 30 年ぐらい新しい投資をしていないので、どうしても維持する技術に変わり、新しく開発する技術は電力会社の中でも失われつつある、あるいは失われてしまっている技術もあるかもしれません。

今、再エネ導入を始めとして海外の技術が伸びている中で、日本も体制を補強していくにあたってはこういったとこにも課題があると思っています。

日本の人口が減る中で少ない人数で工事をしていくために、ドローンを使用したり、アセットマネジメントということで高経年化設備をできるだけ平準化して必要なものに絞って計画するなどいろんなことに挑戦しています。

設備の高経年化に伴い、65 ページの左の図のような鉄塔の劣化に対しては、ドローンで写真を撮って劣化の進展を AI で判定するなどの技術、人材育成を実施しています。



[40] 送電電圧の上昇推移 タワーライン・ソリューション運営サイト https://www.k-tls.co.jp/overhead-tml/teigi.html

人材確保のための PR[41]も実施しています。なかなか厳しい送電現場ですので、電工さんのかっこいい姿を PR する、例えば実際の作業員のコメントも使ってどんな現場か知っていただいたり、鉄塔カードを作ったりとか、いろんな魅力を発信して若い人にアピールしています。

ここから先は写真が続きます。説明は割愛しますが、なかなか厳しい山の中での厳しい現場だということを分わかっていただけると思います。隣の現場に行くためには、山を降りてもう一度登らなくてはならないところもあります。

投資への理解

カーボンニュートラルへの移行では、送配電網に対する投資が必要になります。「化石燃料から太陽光などに変わることで電源側の燃料費が下がり、その移行のために送配電網の投資は増え、合計の費用が下がる」というのが、レベニューキャップ導入時の国のイメージ図 [42]にあります。ですが、実際国民がエネルギー転換に対する関心についてのアンケート [43]によれば、エネルギー転換に賛成という人は 74%いるけれど、負担までするという人は 48%しかいません。矛盾しているのですが、やってもいいけど、お金は払いたくないという人もいるということです。お金をかけてでもトランジットして、ゆくゆくはカーボンニュートラルの世界に行くんだという覚悟は、まだ国民的なコンセンサスになっていない状況と言えます。

この負担したくないという理由の中には、生活が厳しいといった声の方もいらっしゃります。日本も貧富の差は拡大していることが言われてますが、転換していくにあたり十分な国民の理解を得られなければ、増えていく負担に対してうまくお金が回らないことが懸念されます。

まとめ

電力システムにおける送電ということで今回テーマをいただきましたが、三相交流で電気を送るということは、周波数や電圧をどう維持するのか、これは平時のみならず事故時の過渡的な問題を含めて考える必要があり、今まで非同期電源は、多数いる同期電源の中で少数派だったので問題とならなかったのですが、今後はこの非同期電源が多数を占めていくことが想定されます。同期電源は事故時に、慣性で周波数を支え、無効電力を出して電圧を維持しています。

同期電源には「見えない効果」というか、一般の人にわかりにくい効果が多数あったわけですけれども、これを非同期電源に機能付加して代替していく作業がこれから必要で、海外のようにシステムストレングスとかいろんな定義を使いながら取り組んでいく必要があるということです。

そのため、系統への接続のみならず、電気の理論的なところに立ち戻る必要があります。サプライチェーンなどを強化していく必要もあり、人を集める問題、最終的には費用の問題もあります。

こういったいろいろな課題をクリアしながら、そして国民コンセンサスを得ながら進めていく必要があります。こういった対応は長期的視点で取り組む必要があって、何か一つのテーマを決めてそこばかり行うのではなく、設備運用、これらを支える人などいろんなテーマがあることを考えると、これらをどういう仕組みで繋げて考えていくのか、市場やルール等整備していくのか、先行する海外に学びながら、そこに日本の事情も入れて、どこか司令塔のような機能を作ってそこで全体を管理しながら実施するのも一案だと思います。10 年後、20 年後に、どういうふうに運用されてるんだろうな、という世界観をイメージしてやっていかないとなかなか厳しいんじゃないかというふうに思いますが、日本では国の議論の方も審議会がいろんな分野にわかれてますし、全体を統括して見ている司令塔的なものがないというのが問題ではないかなど、これは私の個人的感想ですけど、思ったりしています。

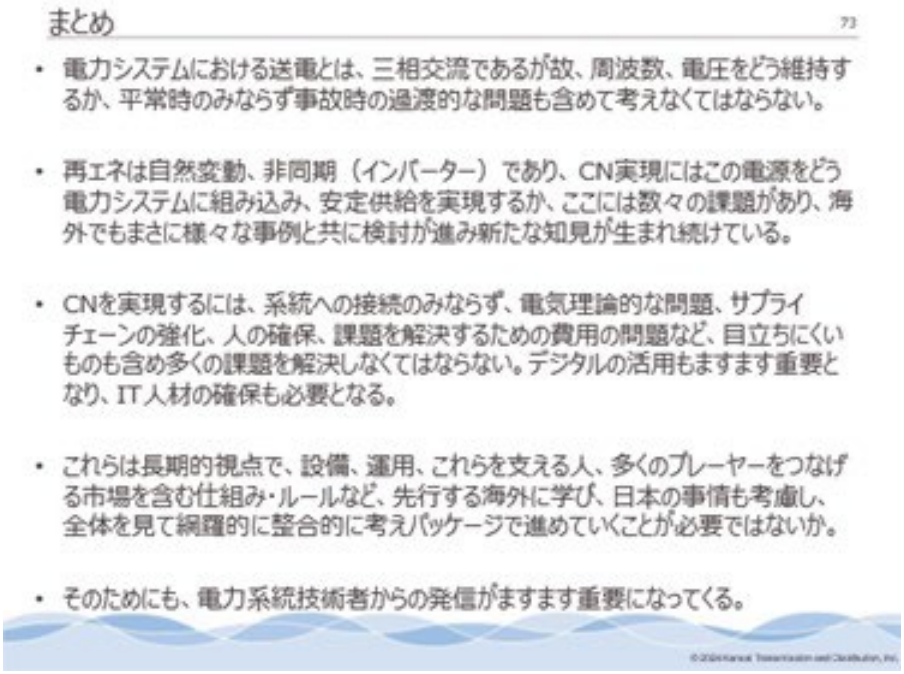
今後この同期電源を非同期電源にどう移行していくかについては、電力の系統技術や理論を含めた知識が改めて必要な時代になってきてます。今までの有効電力の足し算引き算を超えて、無効電力のように見えない世界、わかりにくい世界に入っていくことを発信する活動も今後ますます重要になってくるんじゃないか、というふうに思います。私から以上です。

---

41 ラインマン・ネットワーク
https://www.linemannetwork.jp/

42 「エネルギー政策の方向性」2019.8.26 資源エネルギー庁 P34
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/030/pdf/030_005.pdf

43 「アクセンチュア エネルギー消費者調査 2024 (日本版)」P13
https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/accenture-com/document-3/Accenture-NEC-survey-2024-Spotlight-Japan-JP.pdf#zoom=40



（PL）

大変広い分野のお話まとめていただきありがとうございます。私が最初 10 分使ってしまったので、早速次のご講演に行きたいと思います。それでは飯岡先生お願いいたします。

講演 2 配電（中部大学・飯岡）

中部大学の飯岡と申します。30 分ぐらい配電に関するお話をさせていただきます。

本日の構成

今日の話では未来の話をさせていただくんですけど、私、学部 4 年生の頃から配電の研究をしています。最初の研究テーマが柱上変圧器の負荷推定で、そこからまずお話します。その後で、配電系統の将来を考えると、太陽光発電の大量導入というのは避けて通れないところですので、今現状で起きている電圧変動の話について少しお話した後で、再エネ大量導入を見据えた将来の配電系統についてお話しようと思ってます。

ここで話す系統側の対策と太陽光発電側の対策については、これまでの NEDO 事業や SIP 事業などに参加して、そこで取り組んだ内容をご紹介します。最後の「マイクログリッド化が進んでいったらどうなるの」の話はそんなこと起きるかどうかわからないような内容ですが、そのような話をしたいと思いますので、よろしくお願いします。

柱上変圧器の負荷推定

まず私が学部 4 年生だったのが 1999 年で、そのときの研究テーマが柱上変圧器の負荷推定手法に関する検討でした。中部電力さんのエリアで約 1000 台の柱上変圧器の負荷実態調査を行い、柱上変圧器の容量決定を目的として、年間電流最大値の特性の統計的分析について取り組んでいました。

具体的には、柱上変圧器 1 台から複数のお客さんに電気を供給しているのですけど、その柱上変圧器の年間の電流の最大値を測りまして、あと複数の需要家の契約容量の総和はデータとして入手することができるので、その契約容量の総和と年間の最大値を統計的に分析することをやっておりました。

もう少し具体的な絵を描きますと、柱上変圧器 1 台から複数のお家にこう電気を送ってるんですけど、最大となる電流値をまず測定値から抽出します。複数のお客さんに電力を供給しているのですけど、契約電流の総和がわかりますので、負荷最大電流と契約電流の総和の関係を比率で算出します。これを測定した柱上変圧器ごとに行いまして、統計的に分析することをやっています。

この絵は横軸が柱上変圧器 1 台から供給する低圧需要家の個数を表しています。縦軸は、先ほど式で示しました契約電流の総和分の最大電流の関係を示しています。この絵から、一般的によく知られてるように、戸数が増えると最大電流の割合が減ることがわかります。これから最大電流の想定値がわかりますので、柱上変圧器の容量決定の参考になるということで、研究しておりました。

これをやっていたのが 1999 年からですけど、実はちょうど 25 年経ったのが 2024 年で今でして、今どんな環境になってるかといいますと、配電系統で入手可能な時系列データが増えています。

例えば配電線にはセンサー内蔵開閉器があり、低圧の需要家には多くの住宅にスマートメーターが設置されていて、30 分電力使用量を測定できます。これらの時系列データを活用すると需要をよりと細かく予測することができます。

具体的な私の例ですが、スマートメーターのデータを使い、LSTM という時系列に特化したディープラーニングを用いて 30 分先の負荷を 1 ヶ月分予測した結果を、右側のグラフに示します。

横軸は 30 分単位の時間で、青い線が実測値、オレンジ色の線が予測値です。両者が重なってるのが何となくわかると思います。ディープラーニングを使うことでこれぐらいの予測ができると意味では、25 年前とはだいぶ違う環境になっていると思ってます。ただ、スマートメーターデータはいろんな人が使える状態ではありません。例えば電力会社さんですと、先日の電気新聞にも、「中部電力パワーグリッドがスマートグリッドのスマートメーターを使った負荷予測で柱上変圧器の容量を決定する」記事が載っていましたが、こういう研究にスマートメーターのデータは、一般の人が使える環境にはないと思っています。

太陽光発電の大量導入により起こっていること

6 ページからは、太陽光発電が大量導入されたときに起きることに関する話になります。

「測定例 1: PV 導入量が増えると」の上の図は、左が九州電力さんの配電系統の絵で、配電変電所から 2.6km 離れたところに、4500kW の太陽光が接続された場合の測定例です。センサー内蔵開閉器で配変至近の電圧を、もう一つのセンサー内蔵開閉器で太陽光側の電圧を測定しています。右側はそのときの測定結果で、横軸は 1 日分 24 時間、縦軸は電圧です。黒い線が変電所の電圧で、赤い線が PV 側の電圧で、太陽光が大きく出力する昼間に電圧上昇し、これはよく言われている、「太陽光の逆潮流による電圧上昇」になります。

一方下の図は、別の約 5 キロの間に 8MW の PV が接続されている配電線です。ここも同じように黒い線が変電所の電圧、赤い線が PV 側の電圧で、晴れてる日の昼間に同じく逆潮流してるのですけど、PV 側の方は電圧が下がる現象が起きていることを示しています。

この原因を近似式で説明すると、RP と XQ の作用と思っています。R と X は配電線の抵抗とアクタンス、P とQは配電線の有効電力と無効電力です。

7 ページでは、変電所から電線を介して接続した PV から力率 1 で有効電力を逆潮流している場合を考えます。逆潮流する電力を P で表すと、P と配線の抵抗で RP の電圧上昇が発生すると近似的に示すことができます。一方、無効電力なんですけど PV 端は力率 1 としたのでここでは無効電力 0 になりますが電流が流れますので無効電力損失 Q が発生し、Qとリアクタンスで電圧低下が生じます。この電圧低下 XQ と先ほどの RP に関する電圧上昇の差で電圧が上がるか下がるかが決まります。先ほどの電圧低下が起きたところは、XQの電圧低下の影響が大きくなったためであると考えられます。

このような現象というのは、抵抗 R、リアクタンス X、P、と Q の関係で複雑に決まるのでややこしい現象ですが、大雑把に言うと連系量が増えてその対策として線路を大容量化する場合に電圧低下が起きやすいことが測定結果からもわかっています。

また別な、電圧に関する不具合として、不平衡が非常に大きい現象も測定されています。8 ページは別な配電線で 7km 離れたところに 7MW の PV が接続されています。右の図は逆潮流する電流を表していて、線が三つあり各相の線電流 Ia、Ib、Ic を表してます。線電流は大きさが少し違い、日中の部分にはこの a,b,c 相で少し差があり、不電圧不平衡の現象を見たときに、線電流の違いが原因なのかなと思ってたんですけど、そうではなくてっていう話でして、それも影響するんですけど、もっとちゃんと考えなきゃいけなくてって話になります。右下が電圧になります。実線と一点鎖線があるんですけど、実線が PV 側の電圧です。

緑色の相と赤と青の相があるんですけど、緑色の相が非常に大きくなって、赤と青に対して大きくなることがわかります。緑の相は 6 時から 9 時ぐらいまで上がり、9 時からは電圧低下の現象が起きてて下がり始めてます。一方、赤と青の相は 6 時ぐらいまで上がるのですが、その先は電圧が下がり始めてて、緑の相とだいぶ違う大きさになってしまってます。この現象の原因を調べました。最初は電流の不平衡分の影響かと思い、不平衡潮流計算などしたのですが計算が合わず、配電柱の腕金に a,b,c 相を水平あるいは垂直に配線するのを、その相順を区間ごとに正しく表現することでこのような電圧が出ることが、不平衡潮流計算の結果わかりました。具体的には、1-2、2-3、3-4、4-5 の区間に対して各相の順番がバラバラになっていますけど、こういう相順まで考えて潮流計算することでうまくいくことがわかりました。このことは、今後、太陽光の導入が増加したときに発生するいろいろな影響の原因を調べるためには、かなり複雑な詳細なモデルを作る必要があることを示唆していると思われます。

電圧フリッカについては自分自身ではあまりたくさんやってないので、ここでは OCCTO さんのグリッドコード検討会の資料載せています。最初、新型の能動的方式によって 6～7Hz ぐらいの周波数のフリッカが起きて、そこから対策をしたところ、今度それよりも小さい周波数、2Hz とか 3Hz のフリッカが起きて、それの対策をしたら、また違う周波数のフリッカが起きて、イタチごっこの感じになったということです。これもインバータ機器の増加が原因と思うのですが、これまで誰が作っても同じような同期発電機だったのが、いろんなメーカーさんがインバータを作ると制御特性の差からいろんな現象が起きてしまってると思っているところであります。ここまでが電圧に関する太陽光を大量導入したときの不具合の話です。

将来の配電系統：系統側の対策

10 ページからは、再エネ大量導入を見据えた将来の配電系統に関する話です。まず系統側の対策についてで、NEDO 事業で 2014 年から 18 年に、エネルギー総合工学研究所、電力中央研究所、東京大学、東京都市大学さんと共同で実施したものです。

検討の目的は次世代の配電制御システム、特に電圧制御の将来像を明らかにすることを目的に、2050 年頃までを視野に入れて検討しました。具体的には太陽光が増えていくと、従来の配電系統を何らかの形で拡張するために、どういう工事をし、どういう設備を付加するかを、対策コストも含めて検討ました。

ここでは電気的特性を中心にお話しするつもりですが、対策ごとに太陽光発電の接続可能量（これをポスティングキャパシティと呼びます）の形で定量化することで、それぞれの対策により太陽光発電の接続可能容量を増やすことができるのかを検討した例です。

下に示すように、従来系統に太陽光をたくさん接続するために最初に考えられる対策は太線化で、それでも足りない場合には無効電力制御装置をつけ、あと日本ではあまりはやられていないと思いますが、配電線昇圧も考えられると思っています。

具体的には、まずベースとなる配電系統モデルを作りました。これは電協研の農山村配電線モデルを参考に作ったものです。幹線亘長が約 17km で、末端に PV を集中配置します。この系統の場合電線の太さが非常に細いのでこの系統では電圧制約から 300kW の PV しか入りません。

PV の接続容量を増やすためにどういう対策をとればよいかを考えて、末端までの太線化、太線化しただけでは多分頭打ちになるので無効電力調整器の設置、あと昇圧について考えました。部分昇圧と言っていますが、先ほどの配電線の一部を切り離しまして、配電塔を置いて供給するタイプです。

これ関西電力送配電さんでも、結構こういうタイプの対策がたくさんあると思います。九州電力さんでも、太陽光が非常に多いところでは、こういう工事をされてると思います。こういう対策の導入による太陽光の導入量の検討です。

14 ページに示すように、PV 導入可能量は、PV の導入量を 0 から 100kW 単位で増加させて、電圧制約、電流制約、あと電圧の先ほどの低下現象が起きないような範囲で、最大の PV 導入量を計算しました。15 ページの図は横軸が PV 導入量で縦軸はそれぞれの系統の最大電圧を表してます。従来の無対策の系統では、末端に 100k ずつ PV の導入量を増やし、それぞれのノードの最大の電圧をプロットしています。そうすると 300kW を超えると 107 ボルトを超えてしまうので、ホスティングキャパシティは 300kW となります。これに対して、太線化すると 1000kW まで、このような検討をいろんな対策について実施しました。

16 ページには細かい数字が書かれていますが、無効電力制御装置を入れると、飛躍的にホスティングキャパシティが増え、部分昇圧っていうのは非常に効果が大きく、PV 導入量を大きく増やすことができること示すことができました。

配電損失についても、太陽光発電がホスティングキャパシティ分だけ入ったときの計算をしました。これ横軸が系統の違いを表していまして、左端が従来系統で、右端に部分昇圧、真ん中が無効電力制御装置を入れた場合を示しています。赤線が従来系統のときの配電損失、ピンクの線は部分昇圧したときの配電損失です。部分昇圧したとき太陽光は 5000kW まで入れてる状態の配電損失は、基本ケースの場合よりも小さくなり、太陽光発電を導入できて、かつ配電損失も小さいことを示すことができました。

一方、無効電力制御装置入れるとホスティングキャパシティ飛躍的に大きくなりますが、配電損失が非常に大きいことが分かります。

18 ページにはこれまでの結果をまとめています。

従来の配電系統：太陽光側の対策

次に系統側ではなくて太陽光側の対策を説明します。これ SIP という事業でやったもので 2020 から 2022 年度で行いました。九州工業大学さん、産業技術総合研究所さんと電力中央研究所さんと共同で実施したものです。

先ほどは配電系統モデルを使って検討したんですけど、今度は JST-CREST モデルという、早稲田大学と中 3 社で作られた配電線のモデルがありまして、全部で約 100 本の配電線で構成されているものです。これらの配電線は実際に使われている配電系統をモデルにしたもので、より詳細にこれを使って日本全国の PV 導入可能量の拡大推計に取り組みました。

配電線自体では全部で 35 ケース使っているので、日本全体を表すものではないのですが、各モデルの電力消費量と PV 導入可能量の比率を計算し、地域ごとの電力消費量は都道府県別の電力消費量などが統計データで示されているので、そこから電力消費量を算出して、日本全国で PV 導入可能量を推計しました。

SIP の参加事業者に日本エネルギー経済研究所があり、ここの方たちが 2050 年のエネルギー起源 CO_2 を正味ゼロとする制約条件のもとで、PV 導入量は 364GW というお話をされていましたが、こういう数値の現実性を、1 配電系統への導入可能量から拡大推計したというのがこの検討の背景です。

具体的には、JST-CREST モデルの配電線モデルで計算しています。これは配電系統モデルで、この黄色や赤の丸があり、黄色の丸のところには左下に示す低圧系統がぶら下がっていて、赤の丸には高圧負荷が付いてます。それぞれの負荷にはロードカードが設定されています。

導入する PV 全部にボルトバール制御を適用して、PV の導入量を検討しました。ボルトボール制御は電圧の大きさに応じて PCS から無効電力を出し入れする制御で、低圧用では左側、高圧用では右側のようにボルトバール制御を設定して検討を行いました。

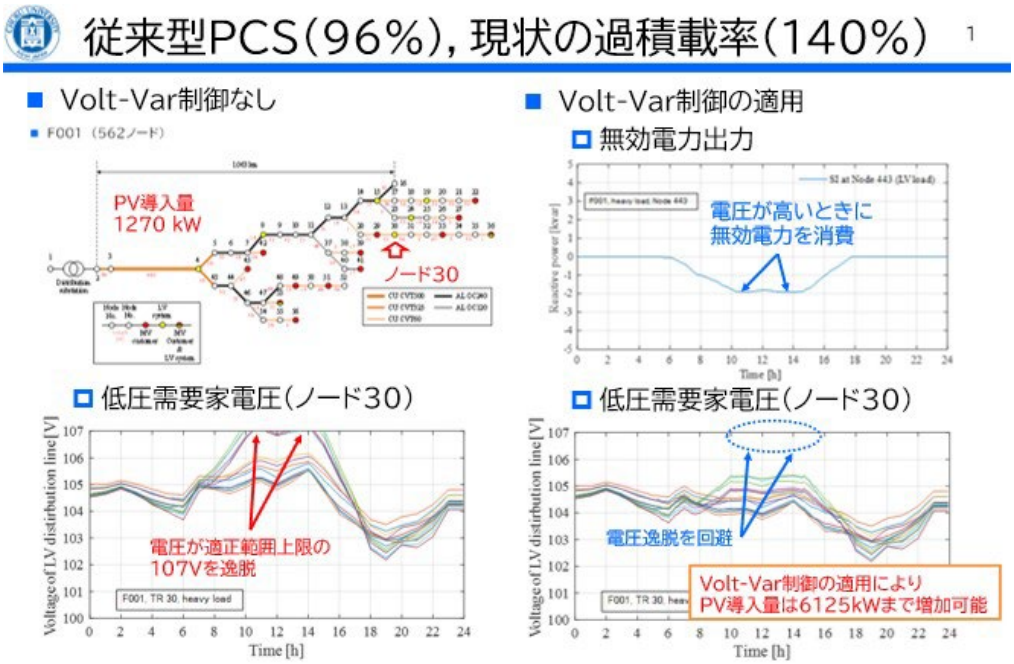
この SIP の事業では、ガリウム系の素子を使った次世代パワー素子の効果として、インバータ効率が従来型の SIC の 96%ぐらいから、次世代型として 99%になった場合について検討しています。

また、過積載については現状の 140%から、将来的に増加して頭打ちになった状態として 180%になった場合を想定したケースを検討しています。ボルトバール制御がないときは左下の図はあるノードの低圧需要家の電圧の時間変化を表しています。配電線全体で 1270kW の PV が入ったときには 107 ボルトを逸脱した電圧上昇となりますが、ボルトバール制御を PV 全部適用すると電圧が下がり、この場合 PV 導入量は 6125kW まで増加できることがわかりました。このような検討を 35 フィーダー分のモデルを使って検討し、負荷電力量の合計値とあと PV 導入可能量をそれぞれ計算して拡大推計した結果が 25 ページになります。ここでは結果だけ載せています。全国の配電系統における導入可能量は、対策なしの場合は 76GW であったのに対し、ボルトバール制御だけの適用で 296GW まで増加しうる結果になりました。

この 296GW の規模感は、PCS の出荷台数で言うと低圧 5kW で高圧 500kW として換算すると、大体 1500 万台（5kWx11420 万台，500kWx45 万台）になります。これを 2050 年までに位置づけしようと思うと、月当たり約 4 万台の PCS を出荷することになり、なかなかのインパクトがある話です。

26 ページの、次世代型 PCS は効率が 99%になったと想定し、これと過積載率を変えた場合の右下の図では、横軸が時間で縦軸が有効電力、青い線が配電線全体の負荷需要で、オレンジ色の線が全PVの出力を表しています。非常に大きな電力が逆潮流し、これにより配電系統だけではなくてエネルギーシステム全体の再エネ電源構成比率の向上に貢献する結果になっています。27 ページに示すように、対策なしでは配電線全体の年間受電電力量が 64.8GWh であるの対し、ボルトバール制御を適用し導入容量を上げるだけで年間受電電力量が約 30%減少します。また PCS の効率が向上するとさらに減少し、過積載がさらに向上すると受電電力量がさらに減少する結果となりました。

以上が太陽光側の対策の話で、ボルトバール制御の適用で、太陽光発電がたくさん導入される計算結果にはなっていますが、いろんな問題があると思います。送電系統側からたくさん電力を受け入れなければならないとか、逆潮流が大きくなるとか、いろんな設備構成の変化が必要だと思うので、ここで言ってることは簡単にはいかないとも思っています。



できるかどうかわかりませんが・・・

最後できるかどうかわかりませんがという話で、最近私が読んだ本で劉 慈欣さんという中国の作家なんですけど長編の SF 小説です。全部で 5 冊の連続もので、その 3 巻の下、下側に 173 ページにある文章を引用します。「宇宙艇は平らな場所であればどこからでも離昇できる。しかし、核融合ドライブから噴射される超高温プラズマが・・・・・」、とのくだりがあるのですが、これは 2280 年のあたりの話をしていまして、先過ぎちゃって現実感がないのですが、2280 年には既に核融合エンジンを搭載した宇宙船が広く普及していて、これ 1 台とかじゃなくてもう何十台もあっても、民間でいろんな人がこの宇宙船を乗っているような、書いてあるような小説でした。

そういう意味で言うと、遠い未来には、小型の核融合発電が各家庭に普及してることもあるかなと。その場合、電力系統は全く不要な世界になるかもしれない。電話と電力系統は違う話なんで、一概には言えないと思うんですけど、かつて一家に 1 台もなかった固定電話も今はあまり使われてないですけど、一家に 1 台あるのが当たり前の時代を飛び越えて、今は個人に携帯電話 1 台が当たり前の時代になり、固定電話の契約数はどんどんどんどん減少しています。このことを考えると、昔考えてもいなかったことが将来起こることもあるというのがこの小説読んで思いました。すごい世界観を書いていて、こんなことなかなか実現しないと思うのですが、そういうことはちゃんと夢見ていろんなこと考える必要があると思いながら、この本読んでました。

電力も一家に 1 台が当たり前みたいな絵は、29 ページの極端な絵になってしまい、現在は配電線を介してみんなのうちに電気を送っているのですが、小型の核融合発電装置が一家に 1 台あるとみんな独立して何も繋がらない状態になってしまい、再エネも不要になる。ただ電力系統については先ほど昇圧の話をしましたように、変遷の過程が大切と思い、独立した状態に行き着くにしてもいろんな過程があると思ったのが最後の 30 ページです。

左上は僕が言う最終形態ですけど、ここに行く前に、例えば大容量の小型蓄電池が普及して配電線はなくてもいい状態があるかなと。その代わり、とても大容量で何日分も電気を貯めることができて、再エネも多分使わなきゃいけないような世界です。ただ大容量の小型蓄電池はそんなにすぐはできないと思うんで、小型の蓄電池は今後普及していくことを考えると、それぞれの家が小型の蓄電池持ってるんだけど、足りないときには隣の家からもらったり、足りないときはもっと大型の蓄電池設備を設けてあり、そこからもらったりしている。そういうときには多分配電線が必要でそこで電力のやり取りが必要かと。

その前が今あるような系統だと思うのですが、蓄電池の普及が進む段階では、変電所があって大型の電源から電気を遠くから持ってきて配電しなければいけないため、こういう変遷を考えてたときに、送配電系統の規模が縮小化していくっていうことを考えると、設備構成ごとに PV 導入可能量はきっと変わっていくだろうと。そんなときに電圧の数の変化の仕方も多分様々だと思いますし、電圧制御も必要ですが、あの統合制御システムも多分いろいろ変わっていかなければいけない。先ほど昇圧の話をしましたけど多分 2 万

の系統って確か抵抗接地だったと思うのですが、抵抗接地の場合と配電線今 6.6kV 系は非接地のため、それらが混在していくことにもいろんな対策を打たなければいけない。マイクログリッド化されて電源から引き離されたときに、単独運転の考え方も変える必要があり、コストの観点から設備の維持が難しくなってくるとこの絵を書いて思いました。

最後ちょっとまとまりがなく終わりますが以上で終わります。ありがとうございました。

質疑

アデカシーとセキュリティ

（参加者１）

一点目は、山本さんのご説明にあった「失われた 30 年」について補足させていただきます。30 年のうちの至近 10 年間で直面したことは、安定供給の脆弱化だと思っています。ご案内の通り、安定供給・供給信頼度の評価指標には、アデカシ（静的信頼度）と系統セキュリティ（動的信頼度）の二つがあります。

山本さんのご指摘の通り、アデカシーのリスクは既に顕在化しています。例えば、今日お話がありませんでしたけど、2022 年の 3 月、また 6 月から 7 月にかけて、需給逼迫が繰り返し発生した事実がありますし、今日のお話にあった通り、火力電源が市場競争の結果として大幅に撤退して、電源が不足気味になっていることがその証左と思います。

系統セキュリティのリスクは、お話のようにまだ潜在的ですが、遠くない将来、これも顕在化する恐れがあります。安定供給は、この二つの要件が成立するように、今後の将来像の検討では、解決の道筋を示すのかが大事ではないかと思います。

アデカシーに関しては、まずは長期的な視点に立った供給力の確保と電源投資の確保に課題があります。特に、AI関連需要は高負荷率ですから、ベース供給力確保が課題です。また、お話にあったように、再エネ出力変動のバランシングの困難性が増していく中で、柔軟でかつ効率的な需給運用のメカニズム、つまり電源の最適運用のメカニズムをどう再構築するかという課題があると思います。この課題では、配電の話にも関わりますが、いわゆる分散型エネルギー資源が普及していく際に、それをどう活用して需給調整やグリッド形成を効率化するかという課題にも関わってきます。

セキュリティに関しては、山本さんがご指摘された通りで、非同期電源が増加することによる系統安定性の低下という大きい問題があります。加えて、日本では自然災害が激甚化・広域化しているという足元の問題がある中で、この自然災害リスクに対して、電力システムのレジリエンスをどう強化していくべきかという課題があること、また、送変配電設備自体の高経年化が進行していることが系統のセキュリティを脅かす要素になるということです。

将来像を考える中で、このような課題の解決の糸口を示していくことが必要だと思います。特に需給運用のメカニズムの問題は市場の制度設計に関わるところであり、日本の需給の特徴を踏まえて最良の制度のあり方をよく議論して打ち出すべきであると思います。

山本さんのお話もありましたけど、現在の電力システムでは供給責任の分散化に大きな問題があると思います。この意味で、電力システム全体の最適化を図る「司令塔機能」について、どういう形態がいいのか考えていくべき課題と思います。

設備形成と運用制御の一体化と基幹/需要地系統

二点目です。山本さんのお話には、今後の電力システムを考えていくアーキテクチャに関わる示唆が多く含まれていたと思います。

一つは、設備形成と運用制御、このバランスをとるというお話がありましたが、これからは設備の形成と運用制御を一対のものとして捉え電力システムの形成・運用を考えていく必要があると思います。従来は、運用のしやすさを考慮して設備を形成することが基本的な考え方でしたが、これからは DER（分散型エネルギー資源）の普及やこれを活用した DR の普及が見込まれており、これらをいかに運用制御して設備形成と運用の最適化に結びつけるかが求められると思います。既に海外では一部でアクティブネットワーク化が行われています。DER を活用することで合理的な電力システムを形成し最適に運用していくことが、エネルギー基本計画の基本理念「3E」のバランスをとることに繋がると思います。需給を一体にして電力システムを最適化にするということは従来からある考え方ですが、手段がなかなかなく、需要のピークカット、ピークシフトを料金で誘導する、あるいはエコキュートのような電化ツールで実現させることに留まっていましたが、IT 技術が進み、DER をうまく制御するなど需要の能動化が実現可能になってきているので、ネットワークの

作り方を変え、より合理的な形にできるようになると思います。

もう一点ですが、分散型システムへの移行に関しては、どのぐらいの先を考えるかにもよりますが、少なくとも 2050 年ぐらいまでの間というのは、グリーンな集中型の電源と分散型の電源とが混在する、あるいは統合されたシステムになると思っています。

今日は送電・配電で区分されていますが、電力系統は基幹系統と地域供給系統と配電系統で構成されていますが、今後向かう方向の違いを考えると、基幹系統は広域化、広域運用する方向へ、つまり「広域化する基幹系統」と表現していいと思います。これに対して、地方系統と配電系統を併せた需要地系統は、「分散化する需要地系統」と表現できる方向に動いており、これから先 DR がさらに普及していくと基幹系統と需要地系統の向う方向の違いが鮮明になると思います。しかし、系統は一つですから、広域化される基幹系統と分散化される需要地系統をいかに協調させていくかという課題が浮上します。例えば、同じ DR を系統全体でうまく使うこと、つまり周波数調整へのフレキシビリティとしての活用と、ローカルな系統混雑の解消に使うことが相反する関係となりこれをどう最適化するかという難しい問題も出てきます。基幹系統と需要地系統の次世代像の違いが鮮明になるなかで、今後この全体最適をどう図っていくか議論する必要があると思っています。本日発表されたお 2 人の話にはそういう示唆が含まれていたと感じましたので、コメントさせていただきました。

（PL）

続きましてお願いします。

火力の起動時間と統合的な運用

（参加者２）

山本さんの資料に関してちょっとコメントがあるのですが、33 ページの火力の起動時間について、これはコールドスタート、冷めた状態からの起動時間だと思います。今日本の火力発電所はほぼ全て 1 日の中で起動停止ができる DSS 機能を持っています。その場合、今般コンバインドサイクル発電機ですと 4 時間ではなく 1 時間でフルが取れます（設備が冷えていないため：ホットスタート）。アメリカで多いシンプルサイクルのガスタービンでは起動時間が短いのは確かですが、その代わり熱効率が低くなり CO_2 排出量が多くなるとか、燃料費が嵩むということもありますので、これは国々の状況に合わせた設備の使い方により得失が決まります。またアメリカでは、待機していることに対してちゃんとアンシラリーサービス料金が支払われるようなことも整備されていると聞いています。

日本の場合もこれから火力に対する調整力の期待が高まれば、もっと短い時間で起動するなど調整力の性能を向上することは可能ですし、さらにコンバインドサイクル発電機というのは、ガスタービンと蒸気タービンが組み合わせた構成となっていますが、起動時に蒸気タービンをクラッチで切り離すことでシンプルガスタービンと同じような起動時間とするという研究開発も進んでいます。その辺のことをご理解いただければと思います。

あとお話を聞いてちょっと一つコメントなのですが、山本様からの「グリッドコードだけでなく、運用や系統側の対策など全体像を見るべき」という話ありましたが、実は昨日のグリッドコード検討会ではそのようなことを私も発言して、委員の先生からも賛同を得られましたので報告させていただきます。

（山本）

はい 33 ページ、少し古いということです失礼いたしました。私が需給を見ていた 10 年少しぐらい前ではこれぐらいという感覚でしたが、今技術が変わってきて、もう少し速い設備も技術もあるとのご指摘ありがとうございます。今後はこの辺気をつけて扱いたいと思います。

配電網の将来

（参加者３）

参加者2とはまたちょっと違う観点からお話したいと思います。お 2 人のご講演ありがとうございました。私も本当に大賛成で、ほとんど私の言いたいこと言っていただいたのですが、話になかった分だけコメントできればと思います。まず、配電については飯岡先生からの大変詳しいお話の通りだと思うんですが、説明資料の図にスイッチが入っていたのですが、現在の日本の配電系統はこれらのスイッチを使って常時開放型ループ配電系統という形態をとっています。この形態は配電側に電源のないときには非常に良いシステムなのですが、分散型電源が入ってくるといろいろうまくいかないことがあり、分散型電源の単独運転防止のために事故時に（無電圧にするために）分散型電源を落とさねばならないことがまた今問題になってます。大量の分散型電源が配電系統に入ってくるときに、現状の配電システムの考え方そのものの良しあしを考

え直す必要があると思います。

最後で飯岡先生も将来の配電システムへの移行について話されたのですが、そのときに、これから先インフラとして 50 年、100 年使える配電システムのあるべき姿を考えなければいけないと思うんです。分散型電源が大量に入っても大丈夫なシステムで、特に、前回もお話したように、GFM インバータって入ってくると事故時の単独運転検出が難しくなるので、保護システムそのものも変えることになろうと思います。

ですから、日本の配電系統の歴史的背景から今は非接地系ですが GFM が入ってくると接地系も考える必要があり、そういうことを総合的に考えたときの配電システムはどうあるべきかということを、ぜひ考えていただきたいと思います。

先ほどお話がちょっとありましたが主導的なところ、いわゆる司令塔がないとやっぱり上手い議論ができないと思います。ですから「司令塔が必要」というご指摘はもっともだと思いますし、それをどこでどう作るかを考える必要があると思った次第です。私からのコメントです。

（飯岡）

どうもありがとうございました。今いただいた、長期間の使用、分散型電源の大量導入、あと GFM の今後の導入、そういうものを考えて設備形成を考えることは、私も非常に重要だと思っていて、一方で非常に難しい問題であると思いながら勉強しているところです。

1 つの方法でうまくいけばいいのですが、日本の場合は地域的に市街地であるとか、あとちょっと田舎の方であるとか、人口密度などで様々な違いがあると思うので、これまでも配電系統での電圧制御の対策をエリア別に考え方を変え、負荷想定の仕方をいろいろ変えたりとかして、電力さんは皆様そうやって対策されてきたと思うので、何か一つというよりはいろんな方法があって、こういうオプションの中でここだったらこれがうまくいくと言えばいいかなと僕は思っています。ただこの方法は、レパートリーが増え、つくらなければいけない装置の種類が増えてメーカーさんが疲れてしまうと思います。ですので、僕は研究者なので、それぞれの方法ではこんなことになってしまう、こんな方向になるというような話をいろんなところで考えていろんな学会で発表することが重要と思ってます。

（山本）

配電系統、非接地系は、今もフリッカの問題とかいろいろ発生しています。グリッドフォーミングを考える一方で、保護システムをどう変えるか、事故電流の通信線への誘導をどう考えるかとかいろいろと課題はあると思います。ただ、50、60Hz の統合よりは、難易度は低いかもしれませんし、場所とか地域によって変えていくというのもあるのかもしれません。接地系にしないと無理という声もありますが、現実的にはなかなか難しいかなと思う狭間で揺れています。

分散資源の遠隔制御

（参加者４）

先ほどのコメントに私は 100%同感します。今の流れで GFM インバータを配電系に導入するには限界があり課題が解決することはないと思います。最低限今の保護方式との協調や、単独運転検出とか、今まで直近の課題解決のためにいろいろな対策を講じてきて、それがゆえに次の手が打てなくなるというのは、矛盾が生じている、あるいは技術とは別のところの問題が生じている気がしています。将来、例えば遠隔遮断を低圧系で使うとか、やろうと思えばできる効果的な技術があると思います。技術的にできてそれほど高コストにならずできる新しいやり方があるのではないかということで、そこにメスを入れる提言もいいのかなと思いました。

（山本）

今の点、オーストラリアではルーフトップにも遠隔遮断の機能も入れるという話がありますから、そういうのも海外に学ぶこともできると思いました。

（参加者４）

その考え方が浸透していくと、日本でも考え方や流れが変わる契機になると思いました。皆様どうもありがとうございました。

（PL）

ありがとうございます。一つ情報ですが、ドイツでですね 1 月か 4 月から、需要のローファーム接続が法律の中に位置づけられたと。日本ではあの電源のノウハウという話題になってますけれども、需要側のノウハウが位置づけられたという話を先週、海外で聞きました。ちょっと確認をしないといけないですけど、結構波及は大きいかなと。そういうことを、先んじて手を打つというのはなかなかかなと思いました。

将来の課題と足元の課題

（山本）

最初のコメントから多くの指摘、示唆をいただきました。おっしゃってる通りだと思ってまして、私も今の国の制度の議論では有効電力の足し算や引き算のわかりやすい領域に着目されていて、それでもアデカシーの問題が出てきており、供給力が減って需給逼迫も毎年のように起こっているという状況です。

今後はセキュリティと言いますか、電圧や慣性など見えない領域の話になると思ってます。ご指摘のあった「広域化する基幹系」と「分散化する需要地系」で協調する仕組みを作るのも難しい問題ですが、やっていく必要があると思ってます。

一方で、その手前にEVの急速充電という大きな負荷とも大きな電源ともとれる需要も入ってきています。例えばアグリゲータが管理して系統全体のインバランスの対応ために動かすと配電系統に一気に負担がかかるとか、そういった問題も発生し得ると思います。今のマーケットは広域で最適化されたもののみですので、そこで分散電源が一斉に動かされると配電系統に問題が出るとか、そういう問題も出てくる可能性はあるのではと思っています。分散系統側の課題は早い段階からある程度コントロールできるようにしていくなどの対応を進めないと、不具合が起こる可能性はあると思っています。ただ、今はそれらを監視するすべもない状態ですので悩みではあります。いろいろ大変重要な示唆をいただき、本当におっしゃってる通りだと思います。

（PL）

はい、ありがとうございます。私も思い出すのは、太陽光発電を 10 年ぐらいで大量導入する過程で、遠隔制御がルール化されるのにかなりの時間を要しましたし、今でもたくさんの問題を抱えている状態からの学びは、今後に活かしていく必要があると思います。

司令塔と定量分析

（参加者５）

技術の話が続いてきたかと思いますが、発言のありました「司令塔」について政策をかじってるものとして、私は別に行政学の人間でもないんですが、連携が必要というのはその通りと思います。しかし、司令塔を作るっていうのはその解決策の一つであるため、それがいいのかどうかは自明ではないんだと思うんです。連携やコーディネーションが必要だとして、私は正直あんまり、ちょっと問題発言ですかね、ちょっと科学技術政策とか見ても、司令塔を作ることが効果的かについては自明ではないと思っています。繰り返しますが、コーディネーション連携が必要だということに対して、様々な方法があるので、司令塔というのは響きが良くて、最終報告書にも残るかなと思いまして、それはおそらく、行政学の人とかに確認しなければいけませんが、私が各国の政策とか見ても一つのソリューションであると思っています。例えば「連携の枠組みを強化する」とかいろんな方法がありますので、そういうふうに表現することの方が政策としては正しいのであろうと思います。

「過去の政策が現在悪さをする」というのはよくあることです。これは極めて一般的で抽象的であんまり響かない表現でありますが、政策評価が日本は弱いです。この点は、環境、エネルギー、電力とかに限らない状況です。極めて一般的なことで付加価値が低い情報ではありますが、政策評価の強化の必要性は指摘せざるを得ないのかなと思います。以上、コメントです。

（PL）

ありがとうございます。「司令塔」と「政策決定」についてPLが今イメージするのは、定量的な分析の裏付けがないまま政策的にこれを進めるということが短期間に議論されて決まっていくプロセスが多すぎるということです。長期のことも考えないといけない、そのためには定量的な分析に基づき意見を闘わせる場を整備することが考えられます。日本で電力・エネルギーのシミュレーションの技術が世界的に遅れた理由としては、市場化が遅れたという背景はありますが、もう一つは、その政策決定の場に定量解析のツールが使われていない、または使われていても限られた機関による解析が多く多様性が不足しているというのはあるかなと思います。「司令塔」などに関するコメントした。

（参加者５）

追加でよろしいでしょうか。これは私 1 本論文があるんですけれども、政策科学に政策分析能力という概念があり、ある国の政策のある政策のトピックについて、きちんと分析できていることを概念化して、それを計測しようという試みです。私自身は再生可能エネルギーについて、アメリカ、アメリカは州によって全然違いますのでカリフォルニアを例として、日本と比較して政策分析能力が低いという暫定的な結果を得ました。

それについては、私の名前を検索していただいてですね、ポリシー、アナティカル、キャパシティ、政策分析能力などで検索してください[44]。今の PL のコメントで思ったのはですね、そういった定量的な分析をする人材が日本は少ないのではないかという考えが頭をよぎった次第です。

まず、いろんな側面からいろいろな定量的な分析しないといい政策はできないですし、それは政治のレベルに上る前に実施が必要なので、エネ庁とか経済産業省が焦って頑張っても限界があるかなと思います。エンジニアリング的な技術分析から徐々に経済学や政策とかになると思うのですが、だから人材に対するお金が少ないと常々思います。GI 基金や GX 投資とかも 0.0 何%でもいいと思うのですが、政策評価とか、今荻本先生がおっしゃったところに、お金が回すことで先取りをした定量的な分析ができるようになるんではないかと日頃思っているところです。すいません雑駁な意見で、以上です。

（参加者４）

今コメントを参加者5と PL から頂いて、ご指摘の点は難しい重要な課題であると、皆さんも感じられるところがあるかと思いました。例えば本当にそういう政策分析手段があるなら、我々自身では能力的にできない領域と思ってるので、期待したいと思います。肌で感じるような部分、例えば今回の自由化について、政策の流れの中で電力産業が衰退したなどの大きな流れもあるのではないかと。それから先ほど私が申し上げた細かい部分で、配電系統のいわゆる単独運転検出について、ある政策や方針で開発された技術が、今存在するインバータに適用されて、それが系統に悪影響を及ぼしていろいろな不安定現象を産んでいるということも含めて、大きなところから小さい細かいところまでたくさんあると思います。定量的な分析の方法論を持たれてる先生が参加されてるということであれば、是非ともいろいろな視点で少しでも何か出していただけると、本当にありがたい。そのようなきっかけになる議論ができれば、本当に意味があると思いました。

（PL）

はい。どうもありがとうございます。関連する事例として、アメリカには NERC という組織があって、不具合が起こると、必要なものに関してはその分析を実施して現象を再現します。役所的な機関ですから、すべてを自分でやるわけではなくいろんなところに頼んでやるということですが、それがルーティンとして行われているというのは、なかなかよい取り組みと思いました。

司令塔と市場の役割

（参加者６）

先ほど来出てる「司令塔」について考えました。「司令塔を作ってもうまくいくわけではない」というのは、先生がおっしゃった通りで、そういうものは官僚的、非効率になりやすいというのは、行政学の世界でも言われてることと思います。ですが、今の制度の組み立ては、基本的には市場を司令塔としてやってきて、前提としてたのは、「経済成長も投資のニーズも大きくなく、市場に従っていけば何とかなるだろう」、という考え方があると思ってます。

数十年かぶりに、「カーボンニュートラルだ」ということで、大規模な投資が必要な時代が来たものだから、どうしようかと世界中で思ってると私は理解してます。先ほど先生が言われたいろいろな分析からいろんな提言をすることはもちろん良いことですが、結局それに基づいて、誰が投資をするかに関して言うと、民間であれ何であれ、不確実性が高いので、価格のインセンティブだけで投資を実現することはできない世界になってきていると思っています。その場合、大胆に考えると、競争市場というか送配電にしても、競争市場に対して依存することを、そもそもそういう世界を諦めたのではないかと思わぬところもなく感じている次第です。私は民間企業の人間なので、市場の中でいろいろ判断してやっていけることはもちろん好きなのですけが、それでカバーできる状況ではなくなってきていると思っています。先生のご発言に対し、そのようななこと思ったことをお伝えさせていただきました。

（PL）

はい、ありがとうございます。カーボンニュートラルに近づいて再エネが増えて、原子力が残ると、可変費ゼロの世界ではマーケットはどうすればよいかなど、もういろんなものが海外ではおおらかに議論されています。

（参加者５）

レスポンスです。おっしゃる通りで、多分、政策目的が二つあって、何かがごっちゃになっているのだと思います。ティンバーゲンの定理とかありますが、二つ目標があったら二つ政策が必要で、さらにどちらが重

[44] https://doi.org/10.1111/ropr.12527

要かというのもあるので、二つ整備をしなくてはいけないと思います。私は政治的なポジションは別にありますが、分析的に考えると脱炭素と電力は違うものであり、それを一緒にするかどうかはまた大きな議論だと思います。1 点だけ指摘させていただきました。

（参加者６）

ちょっと誤解されたかもしれません。今の現実問題として、電力システムは、脱炭素化を実現しようと思うにしても、あくまで市場で判断させる、そのために何かしら後押しをするなど。今の流れが来ているため、それを前提にお話させていただきました。そこがややかみ合ってなかったなと感じたので、一応補足させていただきます。

閉会と事務連絡

（PL）

とても活発な議論いただき感謝します。事務局から何か連絡ありますでしょうか？

（事務局）

はい議事の方にも書いてあるんですが、PL から冒頭ご説明あったかと思うんですが、次の第 5 回、分野横断の会議では貯蔵の議論をするということになりました。今人選中のため、後日日程調整をさせていただきますのでよろしくお願いします。

以上

第 5 回会合

開会

（荻本 PL（以下 PL））

第 5 回の電力プロジェクトの会議を始めたいと思います。本日は 1 月 20 日ということで、新しい年になりました。 新しい事務局のメンバーもおりますので、対面参加側は名前程度ですけど自己紹介させていただいて始めたいと思います。お願いします。

（中村）

会場の方におります JST CRDS の中村と申します。今年も引き続き、よろしくお願いいたします。

（馬場）

同じく CRDS の馬場でございます。今回から参加させていただきます。どうぞよろしくお願いいたします。

（城石）

工学アカデミーの城石と申します。

（矢部）

福島国際研究教育機構のエネルギー分野長をしている矢部でございます。よろしくお願いいたします。

（江村）

同じ福島国際研究教育機構の江村です。今日話題提供させていただきます。よろしくお願いします。

（山口容平）

大阪大学工学研究科准教授の山口です。本日、建築分野の経験から話題提供ということで報告をさせて頂きます。よろしくお願いします。

（PL）

ありがとうございました。最後になりましたが東大生産研の荻本です。今年もどうぞよろしくお願いします。本日の進め方として、議事の 1 から 5 まで書いてございます。この後、発表 1 エネルギー貯蔵ということで私から話題提供をさせていただきます。続いて 江村様からは F-REI の全体概要とエネルギー貯蔵、それから山口様には横断の議論として電気に限らない民生部門のエネルギー需要のご説明をお願いしています。

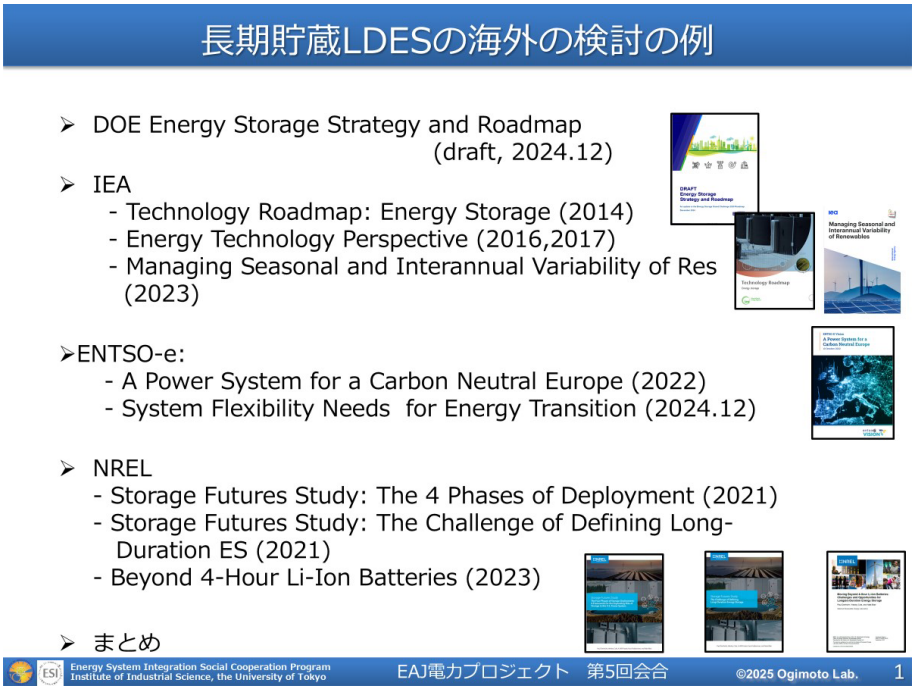
年末から中身を考えていくと、エネルギー貯蔵はその応用の段階で分野横断だということが自分でも分かってきましたし、そのように聞いて頂けると思います。 またエネルギー需要が電気に限らないことも分野横断の視点になると思います。

講演 1 エネルギー貯蔵（東京大学・荻本）

概要とまとめ

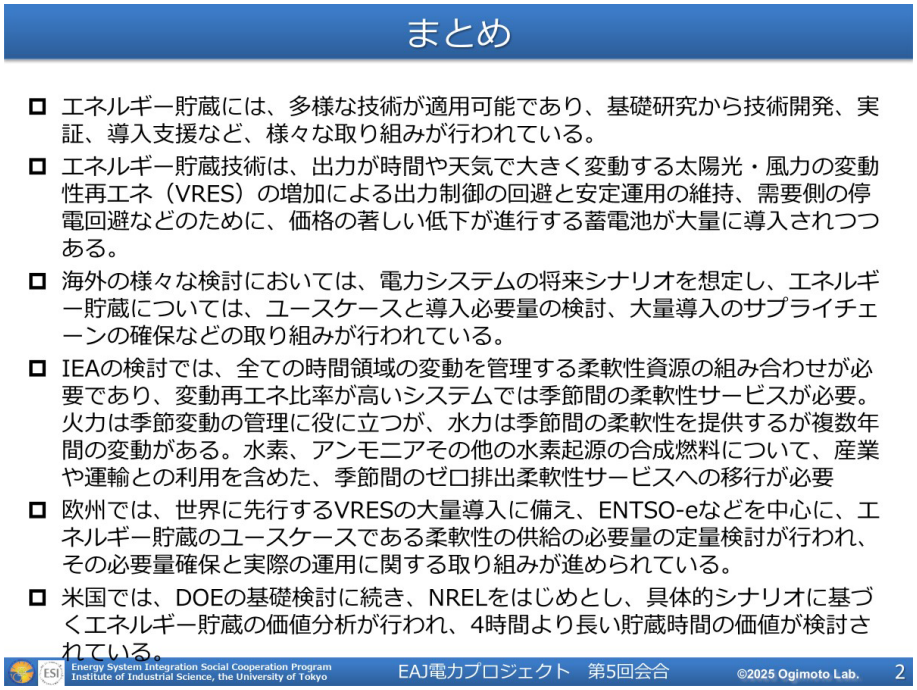
スライド 2 では、まず、国内の事業状況を眺めてみました。

スライド 3 は、本日紹介する海外の資料の一覧です。 エネルギー貯蔵については資料が山ほどあり、個別の論文は無限にあるという状態です。私からは、ここにあるように、アメリカの DOE、それから国際エネルギー機関 IEA、それから日本の OCCTO と似た立場の欧州の ENTSO-e、それから米国の再生可能エネルギー研究所 NREL の資料を紹介します。



スライド 4 は「まとめ」を示しています。

- エネルギー貯蔵には、多様な技術が適用可能であり、基礎研究から技術開発、実証、導入支援など、様々な取り組みが行われている。
- エネルギー貯蔵技術は、出力が時間や天気で大きく変動する太陽光・風力の変動性再エネ（VRES）の増加による出力制御の回避と安定運用の維持、需要側の停電回避などのために、著しい価格低下が進行する蓄電池が大量に導入されつつある。
- IEA をはじめとする様々な検討においては、電力システムの将来シナリオを想定し、エネルギー貯蔵については、ユースケースと導入必要量の検討、大量導入のサプライチェーンの確保などの取り組みが行われている。
- 欧州では、世界に先行する VRES の大量導入に備え、ENTSO-e などを中心に、エネルギー貯蔵のユースケースである柔軟性の供給の必要量の定量検討が行われ、その必要量確保と実際の運用に関する取り組みが進められている。
- 米国では、NREL を始めとし、具体的シナリオに基づくエネルギー貯蔵の価値分析が行われ、4 時間より長い貯蔵時間の価値が検討されている。



ここからは、各国で行われている蓄電池の検討を簡単にご紹介します。資料にあるリンク等でフルのペーパーまたはレポートが出てきますので、参考にしてください。

米国 DOE

（スライド 5）DOE の資料は、昨年 12 月に発表された技術研究開発に関するストラテジーとロードマップです。たくさんの分野について導入に向けた 4 段階で技術開発が行われていること、4 つの段階に関して各プレイヤーの役割と、 ユースケースの明確化が重要と述べています。

（スライド 10）ENTSO-e のビジョンです。これは 22 年に 10 月に ENTSO-e が、カーボンニュートラルの 2050 年までに、電力システムの段階的な変化のビジョンです。短長期と短期の調整力の重要性と、調整力の供給可能性について述べています。スライド 11 の左側に示されているように、送配電網、燃料の流通とか、貯蔵、需要、発電などあらゆるところで調整力は供給でき、長期貯蔵の役割も大きいことが述べられています。

IEA の Energy Technology Roadmap

（スライド 13)次は国際エネルギー機関 IEA のテクノロジーのロードマップです。2014 年のレポートで古くなりましたが、貯蔵技術の熟度が、R&D から商用化までの段階で示され、これを最新の情報で見直すことに一定の意味があると思います。

（スライド 16)続いて、IEA の 2014、16、17 の ETP、Energy Technology Perspective は、貯蔵技術が詳しく書かれていた時期です。2014、16、17 の段階のコストや技術特性が出ていますので、最新の他のレポートや論文を参考にしてアップデートする必要があり、特に蓄電池のコストは大きく低下しています。エネルギー貯蔵の用途別の特徴や用途による価値、適用技術と適用分野の図、それから貯蔵技術の技術的な特性、費用が述べられています。 適用分野により、貯蔵技術は、火力発電や送配電網やデマンドレスポンスと共調して調整力を供給することが述べられています。この ETP では、住宅の電気温水器、顕熱、潜熱、相変化による熱エネルギー貯蔵にも触れています。

ENTSO-e の System Flexibility Needs for the Energy Transition

（スライド 31)次は欧州 ENTSO-e の System Flexibility Needs for the Energy Transition です。このレポートは、昨年秋に出され、ヨーロッパ各国または全体での調整力の必要量を定量的に紹介しています。欧州の調整力の必要性が 2025 年から 33 年に向かって、デイリー、ウィークリー、アニュアルの別で、定量的に示されています。実際には不確実性があり、最大必要量もあるし最低このぐらいという値もあり、こういう中から調整力を確保する必要がある。出力の予測誤差に対応するための調整力も必要。これは各国別ですね。例えばスペインは、風力の予測誤差に対応する調整力の必要量が大きいなど、再生可能エネルギーの導入の状況により、国によって特色があります。

あとは各国の下げ調整力の必要量。これは再エネの増加による出力制御が増加したため、下げのニーズが増えたのだと思います。これは日本が既に経験している領域に関するものと言えます。

NREL エネルギー貯蔵

最後は、NREL によるエネルギー貯蔵の検討として、三つ挙げています。

第一番目は 2021 年の Storage Futures Study: The Four Phases of Storage Deployment で、エネルギー貯蔵の導入には四つの段階があるという内容です。

第二番目は 2021 年の Storage Futures Study: The Challenge of Defining Long-Duration Energy Storage で、長期の貯蔵の必要量をどう捉えるのかについて述べています。

最後は、2023 年の Beyond 4-Hour Li-Ion Batteries で、4 時間を超える貯蔵容量のリチウムイオンバッテリーの必要性についてです。必要性は高まりつつあるが、アメリカでは容量サービの買い取り基準が 4 時間連続出力になってるため、4 時間以上の容量がマネタイズできないことが述べられています。

今日本では、3 時間容量のバッテリーが多数導入されている状況です。けれども、3 時間でいいのか、より長い貯蔵容量が必要という議論が、実際には国内の委員会などで行われており、NREL の検討はこの議論につながると思います。

以上、私からは、調整再エネが拡大し火力の発電電力量がだんだん少なくなると、調整力の新たな供給源が求められ、エネルギー貯蔵を大きな選択肢として、導入と、応用の検討、または将来の必要性の検討が行われていることを紹介しました。私からの紹介は以上です。

講演 2 エネルギーネットワーク再考～福島の復興を検討している立場からの問いかけ～（F-REI・江村）

はじめに

私達は略称 F-REI です。 本日は F-REI で検討している水素エネルギーネットワークの事例を本日の分野横断、総合的な観点のトリガになるように紹介します。ここは電力エネルギーっていうふうになってるんですが、アンチテーゼ的な意味で、話題を提供したいと思います。分野横断や連携といった観点から、課題となるようなことについて議論ができればと思います。

私は元々NEC で仕事をしており、ICT の専門家ですから、電力については素人です。

後で説明するように F-REI の研究分野の一つはエネルギーです。そこで研究やその成果を活かした事業化を進める上ためにエネルギーに関する勉強をするために本プロジェクトに参加しました。毎回議論を聞いて勉強し思うところもありますので、そういう提案を含めてお話を差し上げます。

F-REI では水素エネルギーネットワークの研究を進めることを考えています。水素がエネルギーシステム全体に変革をもたらすと考えており、そういう議論が電力にどういう影響があるか、イノベーションの問題に触れつつ発表します。

福島国際研究教育機構（F-REI）の概要

（スライド 4）これが福島国際研究教育機構の概要です。時間がないので詳しくは説明しないのですけど、福島の復興のために国が作った機構です。 研究開発と産業化と人材育成と福島に出てきた機関を連携させるという意味での司令塔機能を担うことになっております。取り組む分野はロボット、農林水産、エネルギー、放射線科学、原子力災害に関する知見の集積と発信で、一見バラバラですが、分野連携により福島の課題を解いて、その成果を地元に活かすことを目差しています。

（スライド 5）F-REI は浪江町にあり、本施設予定地に仮事務所を作って立ち上がっています。現在の第一期中期計画期間は 2023 年からの 7 年間で、この期間が終わる頃に施設ができる状況です。

震災から 14 年経って復興は進んでいると皆さん思っていると思いますが、それは岩手や宮城です。福島は原発事故の影響が残り、復興は途半ばです。浪江町は元々2 万 1000 人の人が住んでいたのですが、今 2250 人で 10 数%しか戻ってきていない。この地域の復興はこれからです。

（スライド 7）そんな浪江には、福島水素エネルギー研究フィールド、通称 FH2R という大規模な水素の実証施設があります。

浪江町では他にもいろんな水素の取り組みをしています。充填の実験設備もあります。水素ステーションが街中に2箇所あり、再生可能エネルギーの活用や柱上パイプラインの実証など町として様々な取り組みをしています。

なみえ水素タウン構想では、FH2R 産の水素を積極的に利用して、新しい販路、町作りを構想しており、

そこに F-REI が協力することも含め、水素活用のあり方を検討しているところです。

（スライド 10）浪江町の 2030 年の将来像にあるように、次の社会のビジョンをどう描き実現するかが、非常に大きなポイントであると思っています。

（スライド 11）F-REI のミッションは先ほどご説明したとおり、創造的復興の中核拠点となることです。エネルギーを含めた各分野で、研究開発と産業化を両輪にしており、研究成果をどうやって実装するかが重要になります。水素については水素エネルギーネットワークを構成することに早い時期からトライしようとしています。F-REI の特徴は、先に申し上げた通り、異なる技術を連携して新しい価値を出すことで、この点で他に例のない研究所と思っています。

（スライド 12）例えば、近くの阿武隈山地は、原発からのセシウムで汚染されていて、人がまだ入れない状況です。でも森林の伐採をしなければならないので、全自動で森林伐採できるロボットを開発し、切り出した木のセシウムの処理した上で、バイオマスエネルギーとして活用することが考えられます。5 つの分野の知見を全部活用するということです。 ロボット分野では、福島第 1 原発の廃炉の問題に対応する人材育成をテーマの一つにしようと考えています。しかし、言うのは簡単ですが、これからの若い人たちをどう引き込んでいくかが重要な課題となります。今はやりの分野に人が移ってゆき、エネルギーはみんなが興味を持つ分野では必ずしもない。人材確保の進め方はしっかり考えなければならない。

（スライド 13,14）我々が研究を進める上で、分野ごとに骨太の方針を定めています。エネルギー分野は、この分野の分野長をお願いしている矢部さんに、専門的なことは聞いて頂くのがいいと思っていますが、まず私が可能な範囲でお答えしようと思っています。エネルギー分野の方針は、福島を日本のカーボンニュートラルの先駆けの地とするために、再生可能エネルギーを中心に、エネルギー製造、貯蔵および輸送、利用に関わる研究開発と、それらの社会実装を目差したリスク評価、法規制、技術基準策定なども課題にしています。その水素との関わりでは、今日の論点の貯蔵の問題、社会実装を目指したときのリスクの問題、法規制などが論点になります。

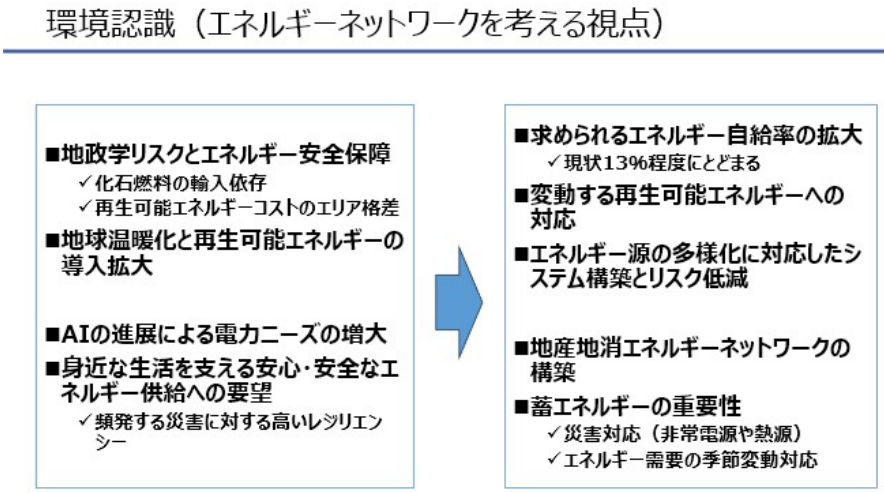
（スライド 14,15）福島をカーボンニュートラルの先駆けの地とするという意味では、ネガティブエミッションに関係するブルーカーボンなどを検討していますが、もう一つの大きな分野は、「再生可能エネルギー活用水素エネルギーシステム」の構築であり、これが大きな狙いです。 次に、ここで検討している内容を紹介し、電力ネットワーク、電力エネルギーの関係についてぜひ皆さんからご意見を頂きたいと思っています。

水素活用の視点から見たエネルギーネットワーク

（スライド 16）F-RE で私達は水素を検討しているのですが、そこから見たときの投げかけということで、「EAJ 電力プロジェクトへの投げかけ」という副題をつけました。

（スライド 17)エネルギーネットワークを考える視点を示しています。まずは、地政学リスクの高まりにより、日本のエネルギー自給率は現状の 13%程度で大丈夫かという点です。再生可能エネルギーについては、それ自身に地域差言い換えると価格差があるため、水素に変換してオーストラリアから輸入する構想はあっても、海外からの供給についてよくよく考えていく必要があると思います。気候変動問題の解決のために再生可能エネルギーの導入が進む中で、エンジニアリングから言うと、再生可能エネルギーも含めてエネルギー源が多様になり、そのためのシステム構築が必要になります。電力分野では、今後の AI・データセンターなどにより電力需要が増加するため、電力供給は課題だと考えています。

エネルギーは毎日の生活を支えるのに必須であり、日本は災害の頻発の中で、地産地消エネルギーネットワークや、蓄エネルギーを考える必要があると考えています。



（スライド 18）これは矢部さんからお借りした「NEDO による「世界の温暖化ガス排出フロー(CO2 排出の観点からの方向性)」という資料です。非化石エネルギーである再生可能エネルギーの導入が進むことが一つのポイントです。緑で書かれてるのは、ほぼ CO2 排出ゼロを実現できる領域です。カーボンニュートラルをエネルギー全体で、またその中で、電力エネルギーをどう考えるかが問題です。

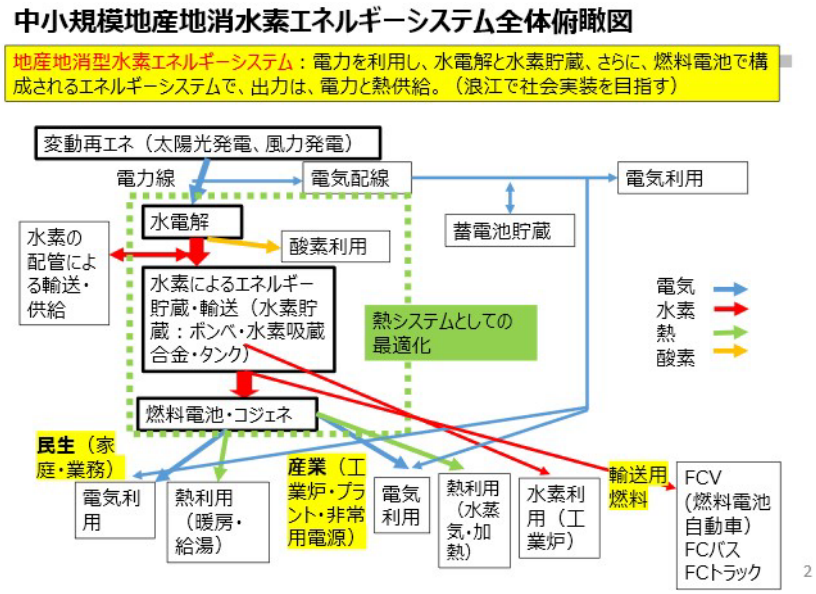
（スライド 19）再生可能エネルギーはある意味無尽蔵のエネルギー源ですが、コストも重要な問題になります。それから、電力が中心の中で水素や熱など他の二次エネルギーをどう使っていくかは重要です。それから必ずしもコストだけじゃなく、カーボンニュートラルとか、さらには、地域の特性を含めて尺度も多様化する必要があるとお伝えするようにしています。

地産地消水素エネルギーシステム

（スライド 20）浪江の水素化構想です。F-REI としては小規模の地産地消の水素エネルギーネットワークの実証をまず実施したいと考えており、そのためには、住民の受け入れが不可欠です。安全とコストが重要になりますが、確かに大丈夫だということで、現行からの移行を進めることを考えています。最大の焦点はコストであり、そこに対して研究開発によるブレークスルーが必要で、新しい技術の導入にあたっては、やはり地元の受容性を検討しています。

（スライド 21,22）これが現在実証を目指している「中小規模地産地消水素エネルギーシステム」の全体俯瞰図です。地産地消のシステムでは、再エネを入れて電気に注力するわけですけど、並行して水電解をして、水素を貯蔵し、その水素を活用する部分が水素システムで、この中で熱システムとしての最適化を考えています。

具体的には、浜通りの太陽光発電からの豊富な電力を使い、この地域で水電解、水素貯蔵と燃料電池を組み合わせて、電力効率を 50%、熱を含めた総合効率を 80%以上にして、地産地消型の小型水素エネルギーシステムを目指しています。繰り返しになりますが、技術的には相当チャレンジングで、地域の受容を得ることが必要となります。



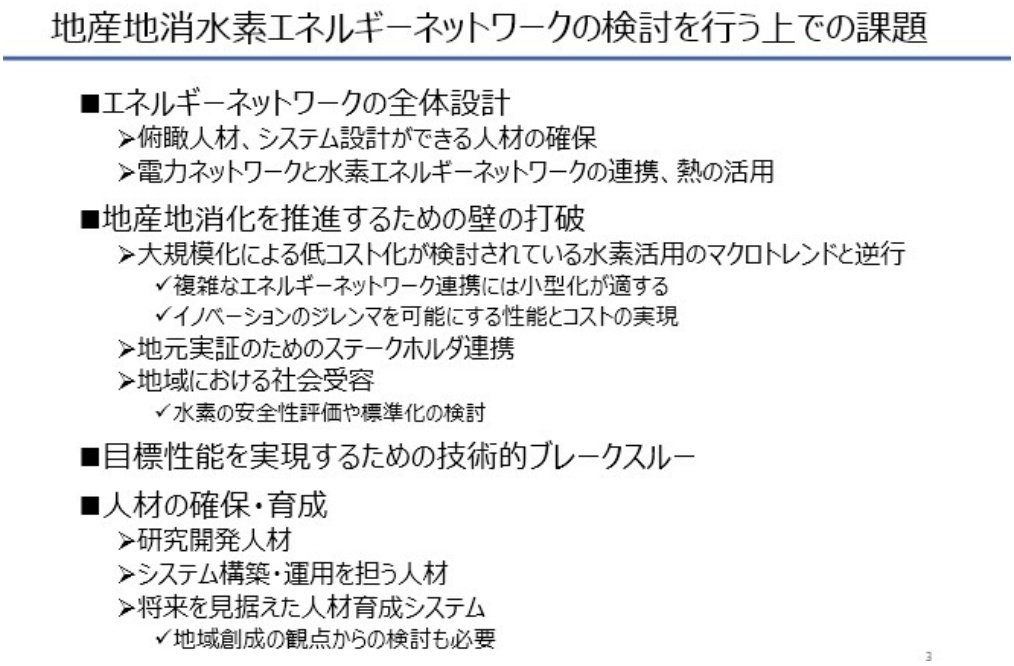
（スライド 23,24）高砂熱学が 20 年ほど前に検討した目指す姿です。この目標値が達成されれば電力効率 43%、全体で 89%という数字が出ます。しかし、現状は、いいところで電力効率 30%を 50%にすることを目差しています。固体酸化物型電解(SOEC)と固体酸化物型燃料電池(SOFC)の二つの組み合わせで、熱も含めて全体での効率最大化を目指しています。

（スライド 24）蓄エネルギーの貯蔵時間とシステム規模で表した蓄エネルギー技術の適用の図です。先ほどの荻本先生の資料にも似た議論があり、そこでの貯蔵時間 4 時間は再エネの変動吸収とか、余剰電力を活用に必要なものと思います。一方、エネルギー需要そのものに大きな季節変動があって、夏と冬に需要が拡大し、春と秋に余剰するような季節変動の問題、それから災害や事故時に市民生活を維持する観点では、図の横軸の比較的時間の長いところの蓄エネルギーも意識していくことが必要と思っています。水素の導入により、その領域をカバーし、電池とも組み合わせることを議論しています。

エネルギーネットワークの全体設計

（スライド 25）F-REI で水素エネルギーネットワークの全体設計するために、いろんな人に照会しているのですが、それを担う人材がなかなか見つからない。水素だけでなく、エネルギー全部です。これから大量のエネルギーを活用した全体システム、システムオブシステムズを考えることが重要になります。もう一つは、デジタル化が進む中で、センサーと AI っていうのを使って、 新しい未来の設計をすることが大きな課題です。

（スライド 26）地産地消型の水素エネルギーシステムの研究では、今申し上げた全体設計が必要で、人材と、それから電力、水素分野の解析ツールが必要となります。それから地産地消化を実際に進めようと思うとなかなか壁は厚い。 最大の壁はコストです。水素も含めて、低コスト化の手段が通常は大規模化というのが大きなフレームですが、複雑なネットワーク連携には小型が適するという面があります。小規模な地産地消に取り組むというのは、ある意味でのイノベーションのジレンマにチャレンジすることになります。それから地元で導入する上では、研究開発だけではなくて地元の人たちが重要になります。社会の受容性という点で安全性評価とか標準化が必要となる。技術的なチャレンジではもちろんとして、先ほど申し上げた人材の確保・育成が重要となります。



本日の論点−総合的な観点から、人材確保の横串

（スライド 27）今日は分野横断を含めた議論で、メインは水素の観点から説明しました。ほぼほぼ同じことを言っているのですが、将来社会を考えることが必要で、将来の日本のエネルギーネットワークの議論をどこかでちゃんとやる必要があると考えます。そういう中で電力エネルギーネットワークと水素や熱など他のエネルギーネットワークの連携を考えていかないといけないと思います。これは言うは易く行うは難しで、難しい分野横断が必要であり、ともすると縦割りになりがちなところをどうやって横串を刺すかがチャレンジだと思います。全体で言うと災害が多発する中で、レジリエンスの議論も前面に出していく必要があると思います。

それから、人文社会とか社会技術と書いたのは、電力・エネルギーシステムを新しい形に変えていくときに、社会の受容の問題、それから経済性とか環境負荷の指標をどうするか、それから安全性評価など、要は全体系をもう一度考える必要があると考えます。

技術的チャレンジには、エネルギーシステム全体での高効率化があります。先に述べたように、デジタル化という新しいイノベーションも必要になる。人材の確保は、全体システムの俯瞰設計、特に AI など新しいことをしている人たちがこの領域に入ってきて、新しい技術を進んで活用していく動きを作ることが必要と思います。

これからも深刻になるのが人口減少です。エネルギー領域に将来取り組むためには、研究開発、技術開発から始まるけれど、運用・保守にも人材が必要です。AI とかロボットが一部は代替するとしても、この業界の魅力をどう発信して、特に若い人たちにアピールしていくことを EAJ のプロジェクトの横串として取り上げることがよいと書かせていただきました。以上です。

講演 3 分野横断議論：民生部門を対象とする需要推計に基づいて（大阪大学・山口容平）

排出量削減に向けた取り組み

大阪大学の山口です。私は民生部門を対象にエネルギー需要側を研究してきた経験から、分野横断のお話をさせていただきます。

（スライド 2）まず建築分野ですが、2003 年 2040 年の CO2 排出の削減目標が決まっています。政策としては、ストック全体の性能を上げていくための手段がとられています。建築物省エネ法の制定で床面積当たりの一次エネルギー消費量を基準とする規制措置ができて、近年ではその基準の強化や適用範囲の拡大が行われています。またインセンティブになるように誘導基準を設け、それを強化するなどの対応がとられています。 あと可視化、見える化で、実際に関わる人たちへの意思決定の支援や、ロードマップの作成が行われています。右図は新築や既築の住宅建築物のエネルギー効率の向上の分布で、エネルギー効

率が上がっていくことを示しています。

（スライド 3,4)これまで需要推計の取り組みは電力分野でも行われていますが、民生部門では包括的にどう変わっていくのかが分かっていない分野で、例えば過去の実績から何%減少するといった、実績値を伸ばす手法が行われてきましたす。課題としては、既存の政策やメーカーの努力によって実現される削減が定量化されないこと、そのため将来の変化が過去の実績に基づく実績値の変化に基づくものに限定されることです。

電化の傾向

（スライド 5）まず前提として電力システムの関係で電化の傾向を紹介します。家庭部門では、CO2 統計データを分析すると、緩やかに電化の傾向が見えます。これ左が給湯器では、2000 年代、2010 年代に建てられた住宅では青色の電気の割合が増えています。空調でも同様に電化が緩やかに進んでいることがわかります。給湯の方式を地域別に示したのが下の図で、地域的な特徴があることが分かります。

（スライド 6）業務部門の電化について。業務施設では中央熱源と個別熱源の二つの方式があります。中央熱源とは、一つの建物で一つの熱源があるシステムで、大きい建物で多い方式ですが、最近では個別熱源の使用が建物の床面積の大きい側にシフトしており、個別化が進んでいます。その結果として緩やかに電化が進んでいるのが全体的な傾向です。

TREES Model

（スライド 7～9）研究室では、家庭部門と業務部門のモデルを開発しています。家庭部門の場合、居住者の生活を模擬して、生活に伴うエネルギー需要を機器の構成から稼働からまで、積み上げ形で算出するアプローチを採用しています。精度検証も行い、それなりに良い結果が出ていることを確認しています。

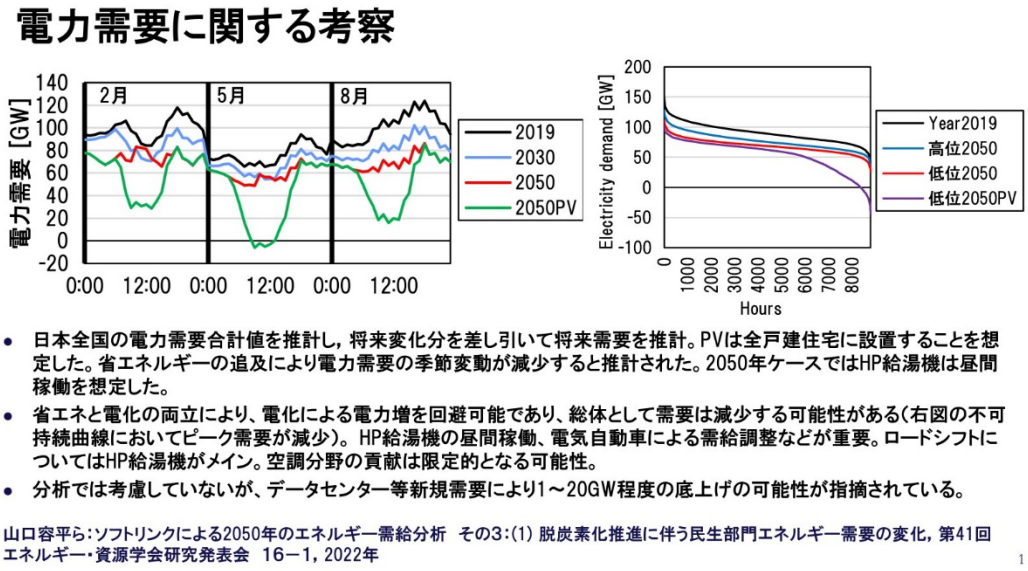
（スライド 11）業務部門も同様の考え方を用いており、ストックの類型化を行いグループ別に代表モデルを作り、技術導入のシナリオを考慮して物理シミュレーションベースで需要推計を行います。

部門全体では燃料が若干過小推計になることは確認していますが、建築分野で用いられている一般的な技術は表現できるモデルになっており、総合エネルギー統計の経年変化がある程度精度よく推定できています。

エネルギー需要は半減が可能

（スライド 14）ここから結果の 2030 年、50 年の推計です。高位シナリオでは、電化が進むが、業務施設は床面積が増えて、省エネ普及は限定的です。低位シナリオでは、人口減少に合わせて床面積が減少し、技術ポテンシャルまで性能が向上することを考慮しています。ここで分かるのは、省エネルギー技術の普及と電化により、大幅なエネルギー消費の削減が可能ということです。ただし、低位シナリオで考慮した技術ポテンシャルを実現するためにはかなり大幅な変化が必要になります。なお、この検討ではデータセンターは考慮していません。

（スライド 15）日本全国の電力需要の 2019 年の実績値から将来の減少分を差し引いて将来需要を推計しました。左図は 2 月、5 月、8 月の平均値で 2019 年から 2030 年、2050 年、の低位のシナリオです。省エネルギーの追及により電力需要の季節変動が減少し、省エネと電化の両立により、電化による電力増を回避可能であることを確認しました。ヒートポンプ給湯機、貯蔵も一つのテーマで、昼間の稼働によって、昼間の電力需要を増加させることが可能です。日本全国の住宅にヒートポンプ給湯機が普及した場合の各月の電力需要平均値では、赤い部分が給湯器で 10GW から 20GW がピークに出るような需要になるという推計結果となりました。さらに PV を全戸に設置するとこの緑の線になります。建築分野からの貢献としては、省エネと電化の両立で電力増を回避でき、総体としてはエネルギー需要を減少させることができます。緑の線の低下からわかるように、貯蔵は大事であり、需要の時間シフトに関しては、建築部門ではヒートポンプ給湯機がメインで、 空調分野の貢献はある程度あるとは思いますが、長時間のシフトは限定的で、24 時間稼働になることもあると思います。その他 IoT 機器についてのポテンシャルは今後検討すべきと思っています。



（スライド 16）これまで説明しましたように、家庭部門・業務部門ではエネルギー需要の半減は技術的に可能で、効率改善と電化の組み合わせで需要の増は回避できる。ただし今のなりゆき、今の制度ではポテンシャルで考慮した大幅削減は実現されないし、エネルギー性能が低い状況で電化をすると、局所的には需要が増加するような状況も起こると思います。建築分野では原則として寿命による更新が進むということが想定され、そうすると機器、設備、住宅、建築物の更新速度が全体の変化の速度を規定することになります。

分野横断の視点：プロセス、方向性、デジタル応用、リード

分野横断の視点としては、建築分野のストック管理が重要で、建築物に価値がなければ投資されないので、維持管理が大事です。また、プロセスが複雑化すると誰もやってくれないので、オーナーが希望したら即システム変化につなげる仕組みが必要です。全体では大幅削減やピーク需要の形成回避ができると説明しましたが、ローカルには必ずしもそうならない状況があると思います。

そのため、私的な費用を下げたうえで全体コストを抑えるような取り組みも必要と思います。技術を普及させる建築物は非常にたくさんありますので、進むべき方向性を示すことが必要で、都市計画やシステム変化を広い範囲で誘導するトップランナー形成や、それを波及させていく仕組みが必要です。 例えばプレハブ建築協会に所属するハウスメーカーの住宅では先進的な技術が使われている実績があります。 最後はデジタル化、小型化などにより、普及可能な形の技術を形成して拡大するなど（Granular Technology と呼ばれる）、普及できる形を模索するというのが大事だと考えます。

（追加スライド）最後に追加しました。需要側での削減をどれくらい追求すべきか、あと供給側とどう連携すべきかについて我々としては分かっていません。地域脱炭素という動きもありますが、それで共通認識を持って取り組むことができるのか。先ほど江村先生のお話にもありましたが、建築分野でも同様で、全体を見て働きかけてリードする人の存在が重要だと思います。以上です。

全体討議

（PL）

ありがとうございました。ここから 40 分程度の全体の討議に入りたいと思います。それでは、貯蔵技術の話、民生分野から見たエネルギー全体の順でお願いします。お二方のご説明の中では、全体システムを見られる人というのが共通のキーワードであったと思います。それでは皆さんの方からご発言をどなたからでもお願いします。

全体システムを見られる人材、アクション

（参加者１）

全体システムを見られる方が重要なのは、皆さん把握されてるとは思うのですが、そういう役割を担うのはどういう機関や人物なのか、ご意見ございましたら教えていただけるとありがたいです。

（江村）

私の経験で言うと、全体システムを見るためには、まずたくさんの経験をした人が必要と思います。企業では、いろんな分野を経験する人が多いです。ですから、人材の流動性を上げ、ある程度の知見を持った人が、あるタイミングでプロジェクトマネジメントなどのポジションに就いて力を発揮するのが望ましいと思います。ですが、そういう意味で、簡単な取り組みでそのような人材をつくるのはなかなか難しいかなと思っています。 大学では、システム工学的な分野が、日本はあまり強くないのが課題と思います。分野で見ると、宇宙分野では全体を俯瞰している人材がいると思うので、事例をいろいろ並べてみて、どんなことができるのかについては一つの解はないので、みんなで何ができるのかを議論する必要があるというのが私の感じです。

（山口容平）

あまり詳しくないのですが、アメリカの ACEEE という国際会議で聞いた話だと、アメリカではたくさんそういう人たちがいて、中間でいろんな人を繋ぎながら仕事をすると。収入の何%かを省エネ投資に回すとかそういう仕組みもあるということも聞きまして、そういう人たちにお金が流れる仕組みがあって、動かすということをやっているようです。

（参加者１）

ありがとうございます。企業も大学もそうですが、自分のやってることを中心に考えてしまい、公平に見ることが難しいことがあると思います。特にエネルギーは非常に難しく、トータルシステムで考えるのが重要ですが、なかなかそれができる人が少ないと思います。議論があっても、結局よく分からないまま終わることも多いと思います。何か具体的なアクションあるいは方向性があればいいと思っています。ただ僕の方にもアイデアがあるわけではありません。アメリカとかでは、DOE とかに研究者のコミュニティや委員会が積極的に関与していくところは日本と違っていると思いますが、何かよいスキームができればなと思いました。

（PL）

ありがとうございます。ある程度確立したものを上手くシステム思考で適用する場合と、現在はそれに加えて長期のイノベーションが期待されているので、技術自体が変わることを入れることが必要で、さらに難しい状態なのかなと思います。

（参加者２）

いろんなエネルギー技術があって、それをまとめた 2 次エネルギーシステムみたいなシステム的なサイバー空間でかなり議論をして、さらにそれを全部まとめてカーボンニュートラルにするという大きなシステム的な制限がつくという意味では、ものすごく大きなシステムを全部考えることが必要です。そういう意味で、カーボンニュートラルはみんなで取り組みながらシステム的な検討を深めていくことが、とても必要だと思っています。日本は元々複雑なシステムはあまり強くないと言われていますが、そこにちゃんと取り組み、その取り組みをみんなで盛り立てて、評価する必要性を感じています。

（PL）

ありがとうございます。日本人もエンジニアリングとして化学プラントを設計・建設することは高い技術力と思ったことがありましたが、現在の問題はそこに技術的な長期の不確実性が入るという難しさが加わっていると思いまる。

コスト目標と達成手段

（参加者３）

全体を仕切って大きく変えていくことについて、技術的には、あるいは行動変容があれば、実現できるのではという話はありますが、その際にコストをどう考えるかを最初に決めておくことが必要と思います。いくらコストが掛かってもいいという話でもないし、現在の価格水準を維持しながら変えていくことも結構重要なポイントと思います。のちのち結果としてお金が掛かることが分かると進まなくなることもあります。日本の電力システムの政策見ていると、コストの議論を十分せずに議論が進み、後でお金の話が出るとコストが高くて進まない場合も出てきています。海外や他の業界の状況の知見がありましたらお願いします。

（江村）

おっしゃる通りです。でも、コストが見合ってからやるのでは、決してことは起きないとも思っていて、そういう意味では今日ご紹介したように、浪江町も含めて水素を推進しようとしており、実証を小規模でもいいので早くやることを F-REI の目標としました。この段階では多分見合わないほどのコストを掛けないと、使え

る性能にならないと思います。先ほど説明した電力 50%は相当なチャレンジですが、研究チームはその目標を置いて、燃料電池などのプロジェクトを始めています。「幸い」とは言えませんが、小エリアで実施するのである程度のことはできると思っています。その先はまた大きなチャレンジですが、イノベーションのジレンマではないですが、大量に導入すればコストは下がることが期待されます。ですから、いろんな人の合意のもとで、方針を立てる必要があると考えます。特にカーボンニュートラルの議論がどこまで進むか、新しい大統領の就任で変わる可能性はあっても、そのコスト以外の尺度も出しながら取り組まないと、導入は難しいと感じているところです。

（参加者２）

エネルギーの分野では、今あるエネルギーを代替することから、現状のエネルギーコストが判断の基準になります。そういう意味でそれを反映した開発目標はなかなか出てこないのですが、今は水素に関しては、20 円/Nm^3 が LNG 火力の代替という意味でコスト目標とされています。水素はいろいろなとこで使われてますが、例えば鉄鋼だったら7円など、今の水準を基準とした目標コストが出てきています。それに対して議論することがすごく大事だと思います。

グローバルには水素は 20 円/Nm^3 という目標があるので、例えばアンモニアだとどうなるかとか、今水素価格は実際には 100 円超えてるとかという議論がしっかりできるだろうと思います。今使っているものを基準にして、エネルギーのコストについてどこまでを目指すかという視点をいつも持つことが必要と思いますので、それが目標値となると思います。

（山口容平）

一つ目は、ソフト的なものをデジタル化してソフトにより解決する手段があると思います。例えば自治体の公用車の数を減らして稼働率を上げて全体のコストを下げるそういうソリューションをやっている自治体はあります。もう一つは、大きく考えすぎるとハードル高くなるので、小さいスケールで限定条件付きでも成立させて普及できる形に整えていく方向性があります。特に、技術的側面だけを学習するのではなく、普及させるための学習をするというのがシステムイノベーションとかの分野と言われてると理解しております。

（PL）

ありがとうございます。参加者3のご指摘で私が思い出すのは、連系線の増強の建設費が当初よりどんどん増えています。本当にできるのかという議論もあるし、また西の方に連系線は有用なのかという議論もあると思います。この種の議論は、電力の将来の需給という、より広い分野を理解・構想して行うという難しさがあると思いました。

柔軟性統合計画の必要性と EAJ 提言

（参加者４）

PL のエネルギー貯蔵と山口先生の需要に関しての、質問と半分提言です。調整力あるいはシステムフレキシビリティについて、電源だと、米国で統合資源計画 Integrated Resource Planning という考え方があって、次はフレキシビリティリソースプランニングが必要と思います。さっき荻本先生のプレゼンでは ENTSO-e のフレキシビリティのニーズを出してることが説明されましたが、そのニーズを満たすリソースのポートフォリオについて情報は出ているでしょうか。

今の調整力の供給源は、揚水とか火力がほとんどで、少しずつ電力貯蔵が入ってきている状況ですが、将来 DR Ready の機器が普及すれば、需要側リソースも入ってくると思います。需要側リソースについては、山口先生の話で、結局 EV とかエコキュートがどのぐらい揚水とか火力を代替して、フレキシビリティ資源になるかという検討を、ENTSO-e や DOE で、もう具体的に何らかの手法とデータで計算しているかが、PL に対する質問です。仮になければ、フレキシビリティ資源計画に関してこの EAJ の提言として日本に合ったフレキシビリティ資源計画の考え方を長期的に出すのが一つの提言で、今日の話でまさに分野横断的な話になると思いました。

（PL）

先ほどご紹介した報告書を読み進めると、資源のキャパシティが足りるかどうかの検討があります。具体的には、先ほどご紹介した必要量というのが、これから 10 年 20 年の送電網の検討の一部として出されていることになっています。ヨーロッパはそういう計算を公的に行っています。

（参加者４）

レポートの中にもうポートフォリオが示されてるんですよね。

（PL）

本日紹介したレポート自体は、フレキシビリティの必要量に関するもので、それを含む別の定期的なレポートがあります。私はそれらの検討が立派だと思うのは、必要に応じて委員会などを設置して作成するレポートではなくて、何年か毎に繰り返して作成されるレポートだというところです。ですから、新しい技術が出てくればそれを含めて検討する業務フローができています。

（参加者４）

先ほどの説明では、前提とするコストなど古いのしかなく、時点も分からないんですが、例えば 2033 年におけるフレキシビリティのニーズの数字がありましたけど、2033 年時点で既存のリソースに対して水素やバッテリーの導入想定はちゃんとされてるんですか。

（PL）

一つのレポートがあって、それを使えばいいというような便利なものはないと思います。ですが、個別の分野は間違いなくあります。 EV の値段の見通しとかロードマップはおそらく個別に見つける必要があると思います。

（山口容平）

私が知ってるのは、研究論文はたくさんあるということです。 ただ、統合ってなると解像度が落ちてちょっとリアリティが欠けてくるのが問題で、全体を俯瞰していろんな分野を含めて、なおかつ解像度を備えた計画はまだないと思ってます。アドバイスをいただきながら、いろんな分野で、総合的にフレキシビリティリソースを定量化することは非常に魅力的だと思います。研究としても取り組むべきと思います。

（参加者４）

ありがとうございます。第 7 次エネルギー基本計画は来月の閣議決定まで準備中で、例えば、本体計画で「脱炭素に伴う社会コストを最小化する」と言う割には、まだ今言ったようなリソースが入ってなかったりします。 ですから、国のプランニングでさえこの分野は日本では十分扱われてない気がします。山口先生が分析したようなヒートポンプ給湯器や EV の普及が入った分析があるといいと思ってます。

（PL）

ありますとは言えないんですが、12 月に私と松尾先生で報告させていただいた LCOE*「統合コストを含めた発電コスト」の検討には、DR を適用した場合とバッテリー併設の PV・風力のコストが出ている。その結果がよいと言いたいわけではなくて、3 年前にはそんなものはなかったのですが、今年は一応出されている。ですが、再生可能エネルギー、PV や風力は強力な調整力を出すリソースになるのですが、これについては役所の中で十分議論が詰まってないので、対象に入っていない状況です。日本の実態は、ご指摘の分析は少しあるけれども、だいぶ足りないという状況だと思います。参加者4の提言への提案については検討に含めさせて頂きます。

現在は補助金があることで蓄電池の導入あるいは接続待ちが増えています。蓄電池より早く実施すべきものがいっぱいあるのですが、うまく活用しにくい機能が不足したバッテリーが大量に入ってくるのは残念な状況です。

センサー・計量器からの制約

（参加者５）

細かいかもしれませんが、江村先生のプレゼンのスライド 25 での、センサーとかデジタルデータを活用したエリアの全体最適化のお話に関連して、センサーとか計量器は、システム導入にあたってどの程度制約になっているかは、はっきり定義しておく必要があると思います。というのは、何年か前に IEA のこの種類のレポートで、PV や蓄電池の値段も下がっているのですが、最も下がったのはセンサー類だという記載を見たことがあります。ただそれを使って、一つの主体で閉じたシステムとして例えば化学プラントとかの中で最適化するにはいいのですが、第三者が入って商売としてサービスを提供する場合はその計量値のオーソライズの話があって、現行の計量法ではおそらく対応できないので、この点も課題だと思っています。今ここで答えが出るとは思わないのですが、この視点が要ると思ったのが一つです。

もう一つはこの手のシステムの実装を推進するツールとして、炭素価格が重要と思っています。炭素価格は、日本では長らく経産省と環境省の教条的な対立軸であったために、冷静な議論ができない不幸な状況であったと思っています。今回 GX 会議で成長志向型カーボンプライシングという概念がうち出されましたが、この仕組みを見ると、エネルギーコストを上げないという縛りでソフトランディングしようとするあまり、

おかしなことになっていると感じています。具体的に一番感じるのは発電部門において、強制的な排出量取引の対象になるのですが、他の化石燃料はその対象にならず一律の賦課金がかかるだけという流れになっています。このため、本来こういうものは等価でないといけないと思っているのですが、政策の方向性がエネルギーの中で電気のみに高い水準の炭素価格がかかることになっていることを危惧しています。関連した意見として、申し上げさせて頂きました。

（PL）

ありがとうございます。取引に関わる計量は、どういう状態にあるかという質問と炭素価格、これは難しい。F-REI ではいかがでしょうか。

（参加者６）

研究開発では水素に絡んで、計量技術の検討は行われていると認識しています。だから、今、何が問題でどう解決すべきかについては、日本ではあまり議論の俎上に乗っていないと思います。ただし、今言われた「例えば、水素に絡んでも、センシングを含めて、どこが大事か、どのくらい大事かを見極めて研究しましょう」という議論は、本プロジェクトの中でも取り上げるのは大事だと思います。

（江村）

やはり政策ですよね。様々な技術の導入を加速するツールとして政策を使おうという構造になっている感じがなく、FIT もだいぶ遅れて日本に導入されましたが、水素などの導入において、何をどう解釈するための仕組みとして、センサーやデジタル化を導入するかっていうのが重要で、その視点から議論を始めた方がいいといったことがあると思うんですけど。なかなかそこは難しいかなっていうところですね。 センサーとかの議論は F-REI でも十分できてないのですが、メタな言い方をするとデジタルツイン化などが進んで広くAIを活用できるようにサイバーな世界に実世界を復元するようになると思います。そのときに電力はこうやって、水素はこうやってなど縦割りのままだと、全体最適にならず、そこの全体の設計ができない。サイバーフィジカルシステムということで、見える化して解析して、アクションするとして、そのアクションで動かせるものがセットにならないと実施できません。こういった動かす側にどれだけ、どういうポテンシャルがあるのかについての議論が本来必要と思っています。エネルギーの分野については、まだ勉強不足のところがありますけど、分散してアクションすることで何がどう変わるかについて議論できると良いと思います。

水素の優先的な利用分野

（PL）

ありがとうございます。今の議論の炭素価格にはいけないのですが、水素の導入に関しては、一番高く買ってくれるところに売らないといけないと思います。水素を当面一番高く一定量買ってくれるのはモビリティだろうと思っています。最近の報道で、水素エネルギーも、PVも、バッテリーも、日本が得意な技術だったが次々と中国に取られているという記事がありました。水素のモビリティ利用であるバス・トラックなどの自動車も中国に丸のみされるのではないかという記事がありました。水素の利用について、今 F-REI ではどのように考えているでしょうか？

（江村）

F-REI というより浪江町の FH2R では、水素を製造するのですけど、供給先がない状況です。

2000 人の浪江町に FCV が 80 台あって、ありたい姿として水素ステーションが複数あります。ですが、町の外に出るとそういうインフラがないので、クラウンの FCV で 600km 走ると思いますが、東京往復で何もせずにそのまま帰るなら使えるという状況です。ユーザーという意味では、普通の乗用車は需要が少ないので、矢部さんも言われたように、バスなどの側にシフトするのがいいんじゃないかと思います。バスだと動く範囲が決まるのでそれに合わせて水素ステーションを作れるなど、戦略的に進められるという感覚です。東京のイメージとは違って、浪江町や周辺の地区はプロパンガスで生活していて、プロパンガスを水素に代替することは、結構実現可能性があると思います。プロパンのボンベが水素ボンベに代わる。そのためには安全性が重要で、いろんなことへの対応が必要になります。ネットでちょっとフォローしていただければ助かります。

（参加者６）

今 F-REI のある福島の浜通りには水素をそのまま使う需要はほとんどありません。住宅やビルの電力を中心にした事業なので、そこに対して安全性の部分も作っていく必要があり、それがまた世界に通用する技術になると考えています。効率が良くて安い水素利用を目指しています。

一方で、福島県全体で水素を使う工業があれば、それを浜通りに立地できないかとか、あるいは現在工

業炉の水素化、アンモニア化を研究開発しており、街中で水素やアンモニアの利用はなかなか難しいとしたら、工業団地などに持ってくるような、あるいは、荻本先生が言われたような水素の需要を開拓して、高く買ってくれるところを目指すことをもう一つの次のステップとして考えています。

計量の必要性

（参加者５）

さきほどの補足です。この場で申し上げたのはあまり良くなかったと反省しているのですが、計量の話は水素に限ったつもりはありません。需要側のイノベーションを今後志向するなら、その基盤として計量の課題の解決が必要と言わざるを得ないと思っています。計量すること自体は多分できますが、コスト面あるいは制度面で論点はあると思ってます。

電気については、かつては一需要場所一計量で、かつ特定の団体が 10 年 1 回検定したメーターでないと取引に活用できないという制度になっていて、様々な新技術の活用に関して制約になっているという認識があったものですから、水素についてもコメントした次第です。

（PL）

少しコメントすると、計量法自体が長年変わっておらず今後大きく変わる必要があるという話と、何でも測らなくてもいい場合は少なくないと思います。民生用の場合。中国では測ってない、イギリスは昔、毎月は測っていないなど、いろいろな状況があります。計るためにどうするかに加えて、計らずに済ますところも視野に入っていいのではないかと思います。今だと測りましょうという方になるっていうのは何となく傾向としてあると思うんですけど。

価格情報の欠落による分業の困難化、効率の過度な重要視は不要

（参加者７）

何点かあります。まずエネルギーシステム全体を見ることについて、それは非常に難しい話だと思います。それを部分的に分業しているはずなのですが、本当は分業でなくてはいけないところが、全体を見る必要が出てくる理由は、部分を分業する人同士のインターフェースができていないからだと思います。重要な情報が多分価格だと思います。 価格情報がないところで一体どうするかということになり、分業ができないことになるのではないかと思います

水素の価格も、電気の価格も、今後どうなるか分からないのですが、また、再エネの変動のため電気が余る時期、時間帯が発生し、消費者の電気料金もほぼゼロになる状況になる可能性がある。そうなっていくとしたら、今度は山口先生のところでの電力需要の話とか、価格が現状とはかなり変わる状況では、需要の予測は今後難しくなると思います。価格の情報が不足し、カーボン価格もないということが今の問題だと思います。本当は 2050 年カーボンニュートラルの段階では RITE の研究からは CO2 排出の限界削減費用は 5 万円/ton-CO2 以上となるのですが、それには全然届かないカーボン価格が今想定されていると感じます。そういった価格情報が共有されない状況では、分業ができないのだと思います。

もう一点、水素のところで効率目標がありましたが、太陽光や風力が元であれば効率はあまり心配しなくていいのではないかと思います。元は太陽光や風であれば、コストは気にしても、効率自体はどうでもいいと思います。ただ水力とかバイオマスだと資源が限られているので効率は重要になると思いますが、太陽光、風力の効率は気にすべきではないと思いました。効率に関する話と、価格に関する話の 2 点でした。

長期の価格弾力性

（参加者４）

私が先ほど言い忘れたことを参加者7が言ってくれました。例えば山口先生のエンドユースのモデルを使うと、例えば機器を導入するときの長期の価格弾力性が推定できるのでしょうか？エネルギー価格、例えばガス価格と電力価格が分かっていて、ヒートポンプが選ばれたのがどれぐらいであるかというところから、少なくとも長期の代替の弾力性は推定できそうです。需要関数を作れば、価格弾力性が分かると、今の藤井先生の議論に乗って来ると思います。長期の価格弾力性が推定できるかどうかが重要と考えます。

（山口容平）

私やったことないんですけどぜひやってみたいと思います。

（PL）

そうですね。例としては給湯とか、EV のチャージとか、貯められるものがあれば割ともう価格で決まるっていう計算は可能だと思います。暖房とか冷房については人間の感覚がはいるので難しいかもしれないです。

他いかがでしょうか？

（参加者５）

長期の価格弾力性を引き出すのは、今のシステムでもできますが、リアルタイムの市場価格の変化を電気料金に反映することはできていません。一部の新電力さんがそのような料金を扱っている可能性はありますが、システム上の制約から旧一般電気事業者の小売りができるのは前の月の市場価格の平均を翌月の電気料金に反映するくらいです。一応課題として認識いただければと思った次第です。

（PL）

ありがとうございます。業務用のシステムには常に課題があるということですね。最後にもう一つだけ発言をお受けしますがいかがでしょうか？

長期エネルギー貯蔵の必要性

（参加者６）

長期のエネルギー貯蔵が、変動再エネの割合が大きくなってくると重要な話題になってくると思います。先ほど貯蔵時間容量で 4 時間の話があり、フレキシビリティに対する貯蔵の課題ということでしたが、もう一方で頻発する災害に対し非常用電力も課題と思いますし、風力は 2 週間ぐらい風が吹かず使えないといったリスクの問題も出てくると思います。

（PL）

ありがとうございます。海外はそういうものも含めて、フレキシビリティと、年単位のフレキシビリティとか複数年の間の変動に対するフレキシビリティも議論には入っていると思います。

中間シンポジウム企画

（PL）

次の議事は「資料 7_240415EAJ 中間シンポ案」についてです。

前回、構想をご説明し、12 月から今月にかけて登壇者の方々と個別にご相談させていただき、ほぼご登壇いただける開催日は 4 月 15 日というところまで来ました。 この場で皆様にご異論なければ、その実施について決定したいと思います。プログラムについては十分詰まっていないところはありますが、本シンポジウムの実施につきましてご意見をいただきたいのですがいかがでしょうか？

4 月 15 日中間シンポ実施の決定

では実施に向けて進めさせて頂きます。本シンポジウムは対面とオンラインのハイブリッドで開催予定です。

シンポジウム参加のお願い

登壇者以外の方も可能な方はぜひ対面で参加いただいて、パネルディスカッションの空気、またはその講演に対する皆さんの反応の空気というものも感じていただきたいと思います。

提言とりまとめの方向性

次は、「資料 6_提言とりまとめに向けたメモ」についてご相談をさせていただきます。 今日は決め事まではいきませんが、資料に示すイメージで考えていることについて皆様のご意見をいただきたいと思います。

方針の決定時期

4 月 15 日の中間シンポジウムが終わった段階で方針を決定したいと思っています。

提言の目的と位置づけ

まず提言の位置付けと目的がメモに書いてございます。これは EAJ さんのホームページから引用させていただいた内容です。今パブコメ中の三つの計画（GX 計画、エネ基、温暖化対策計画）を含めて、電力・エネルギー分野をリードできるような提言にしたいと思ってます。

オーディエンスと発表時期−2026 年 3−4 月

誰に向かっての提言かについては、メディアというところもキーワードとしてあって、技術を実装するという意味では市民も対象で、また人材育成という意味では、学生さんも対象になると考えております。

公表の時期は 2 年間スケジュールが終わった今から 1 年後の春ということで、2026 年の 3 月中か 4 月と考えています。

論点・悩み

提言の内容としては、電力プロジェクトということになってますが、エネルギー全体の視点も必要であり、全体像が重要であり、横串、分野に共通した、例えば人材とかデータ・ツールもあるというのが論点と思っています。それをどう料理するかまだわからないのですが、EAJ としての特徴である工学エンジニアリングのシステムという視点を出す点は、今から考えていかないといけない。それから、役所の会議ということだとどうしても予算絡みになるので中期的な近い将来の内容が多いですけれども、長期的な「あるべき論」をどこまで何か出せるかというようなことを考えています。これについては、去年の 5 月に杉山先生のリードでシナリオを 2×2 ということで整理してます。これ自体は社会や電力・エネルギー全体が向かう方向としてどれがいいかという議論をするわけではないですが、そういうシナリオを意識したものにしたいと思ってます。

それから、集中的な討議による議論の深堀が必要ということ、それは今たまたまこの場で発言いただきましたが、夏合宿して飲み会付きで議論を深められるのではないかという可能性もあります。

実施はなかなか難しいと思いつつ、別のボランタリーなスケジュールでオンラインでの実施もあっていいかなとか思っています。

先ほどの価格情報が足らないということに関係しますが、個別の分野のそのロードマップという情報が足らないというのは実感です。10 年ぐらい前に日本が先駆けになり、その後世界的にロードマップが作られた時期がありました。ですから例えば蓄電池に関しては 2014 年のロードマップとかありますが、技術的または制度的ロードマップは、現在はあまり流行っておらず十分アップデートされてない情報があります。先ほどのご指摘に繋がるところかなと思います。そのようなロードマップが必要と言えばそこまでかもしれませんけれども、そういうものが不足している中で何が書けるかなと思っております。

構成・執筆

次に構成案です。序、本文の中にはキー技術、キーシステム技術、それから横串の議論、まとめというシンプルな構成にしたいと思っています。

あと、各回で順番に作成いただいているキー技術、キーシステム技術などをまとめている Excel を添付としたいと思っております。

付録では、毎回作成している議事録、発表資料、発言録を候補に挙げています。発言録は作っています。発表資料を付録として載せるためには、皆さんから説明資料について、著作権の確認が必要で、また作られたご本人の意思についてご相談・確認と思いますが、発表資料は付録に載せたいと思っております。

メモでは参考として、今までの討議の内容をまとめています。いつ実施した、そして各回で何を議論したかを、発言録の見出しを並べて書いてあります。例えば、第 4 回の送電配電では、セキュリティから始まって司令塔の議論が出たというようなことを思い出していただけると思います。

元に戻ります。本文の中のキー技術、きーキーシステム技術については、シナリオによらず重要というロバストなキー技術もあるでしょうし、特別な場合にはどうしても必要になる技術もある。こういう視点でまとめたいと考えています。この点は、先ほどのエクセルをもう 1 回見直してそこから選んで、すんなり何が重要と書いていけるエクセル表にしていきたいと思っています。この部分は分量が多くなると誰も読んでくれないと私は思いますので、詳しい内容は表に書いてあるということにしたいと思います。こんな感じでそれぞれの分野で書いていただきたいというひな形を事務局でお示しして、各回の討議執筆委員に仕上げていただくことを目指します。

「横串」については、例えばということでツール整備とデータ人材育成と人材不足の対策とか今まで出たようなものを拾ってまいります。数多くは書けないので、数点ということになると思います。横串については、各回の全体討議に基づき事務局で原案を作成して、討議執筆委員と閲読委員全員に見ていただくということにしたいと思っています。

「まとめ」については、事務局と両顧問で、概要を作成します。しかし、提言として、いろんな分野の方に「ぜひこのページだけは読んでほしい」という部分になると思いますので、概要を作った上で、可能な閲読委員に執筆というのは強い方言ですが、加筆修正を積極的にやっていただいてより良いものに仕上げたいと思っております。

ということで、毎回実施したことを積み上げて、最後の提言にたどりつく構成案を考えています。 この点について、これは危ないとか、これが抜けてるなどの意見ありましたら今日いただいて、また次回、この構成については、ご相談させていただきたいと思いますがいかがでしょうか？

「まとめ必要なので、ご協力をお願いしたい」というところまでが本日の趣旨です。この場でなくてもメール等でいただいても結構ですので、どんな連絡であれいただければ、少しずつ取り組んでゆきます。

それでは今の段階ではご意見なかったということで、継続して本件については議論させていただきます。

事務局連絡

本日も長時間の議論ありがとうございました。今日の内容についての発言録の取りまとめ、および議事録の取りまとめについては、毎回と同様の手順で、今後、一、二ヶ月ぐらいの期間で進めさせて頂きます。本日ご講演並びにご発言いただいた方には個別に確認をお願いしますのでよろしくお願いいたします。

中間シンポジウムは日程を決めさせていただきましたので、詳細の連絡等については順次送らせていただきます。

最後 3 点目は、中間シンポジウム後の第 6 回ですね、第 6 回会合の日程調整は来週以降に始めさせていただきます。まずはご講演をお願いする先生方のご都合を伺いから始めてという手順で、これも毎回の進め方でやらせていただきますので、そちらもご協力をお願いいたします。

以上

中間シンポジウム

開会

（城石（以下司会））

本日は、遠路お集まりいただき誠にありがとうございます。本日は、対面で 80 名のお申し込みをいただき、Web では 300 名強ということで、コロナ禍を過ぎて、大勢の素晴らしい方々にお集まりいただけたことをありがたく思います。意見交換会では 55 名の参加を予定しており、素晴らしい会になると思います。

今日は、電力システム移行期におけるキー技術と人材を考える、こちらのプログラムになります。閉会が 17 時 40 分の長丁場でございますけれども、非常に内容の濃い会となりますので、ぜひお楽しみいただければと思います。その後意見交換会もございますので、ぜひお時間のある方はご参加いただければと思います。

最初にお願い事項ということで、録画、録音はご遠慮下さい。なお、事務局の内部で利用させていただくために、大変申し訳ございませんが、録画、録音をさせていただきますのでご了承いただければと思います。それから資料につきましは、ご案内させていただいております通り、サイトからダウンロードできます。シンポジウム終了後は、資料のダウンロードができなくなりますので、ご了承ください。それから Zoom でご参加の方は、表示名を所属、氏名にしていただくようお願いします。

それから、講演は一件 20 分ですので質疑はできませんのでご了ください。パネルディスカッションでの質問は、Zoom の Q&A をお使い下さい。最初に、質問される方の所属、氏名をお書きください。可能な限りのお答えをさせていただきますご了承ください。

会場におられる方には、アンケート用紙をお配りさせていただいています。最後、お帰りになるときにアンケート用紙を箱に入れていただくようお願いします。

（司会）

では最初に、JST 名誉理事長で EAJ の顧問の中村道治様から開会のご挨拶をお願いいたします。

挨拶 1（JST／EAJ・中村）

本日は EAJ プロジェクト“社会、産業、人々の生活の変容を支える電力システムのあり方”中間シンポジウム、並びに ESI 第 23 回シンポジウムに多数ご参加いただき誠にありがとうございます。本日のシンポジウムは、プロジェクトを開始後、1 年の中間段階において、技術的な知見や議論の状況など、これまでの検討状況を紹介し、それに基づく電力システムの移行期におけるキー技術とキーシステム技術、および人材の獲得と育成についての二つのパネルディスカッションを行い、本プロジェクト後半を進めるための議論を行っていただきます。

これまでプロジェクトを強力にリードしていただきました荻本和彦先生、プロジェクト顧問の横山明彦先生、蘆立修一先生、また議論・調査・執筆および成果物を閲読するメンバーとしてプロジェクトをこれまで熱心に推進してくださった委員の先生方、さらには、本日ご講演、パネルディスカッションいただく先生方に、厚くお礼を申し上げます。

EAJ は、社会の重要な課題に関して政策提言を戦略的に行ってまいりました。本プロジェクトは、EAJ の大先輩である元東京電力副社長の種市健顧問から「レジリアントな電力システムネットワーク」に関する検討を行い、政策提言ができないかというお話をいただきました。

長年構想を温めてきたテーマで、2023 年 5 月に荻本先生とプロジェクト構想をまとめ、プロジェクト発足に至ったものでございます。2024 年 3 月にプロジェクトのキックオフを行い、これまで 5 回のプロジェクト会議、1 回のクローズドワークショップを開催して、産学官所属の多様な委員が文理を超えた総合知で議論を深めていただきました。

私から申し上げるまでもございませんが、安全、安定供給、ゼロエミッションは我が国にとっても、最重要のテーマであり、官民挙げてこれに取り組んでいるところでございます。私達は未来社会に向けた持続的発展の道筋を作るという意味で、世代間責任を果たすことが求められています。

今の私達は未来の人々の立場に立って、行動しなければならないと考える次第です。本日のシンポジウムにご参加いただきました皆様方には、これを機にぜひ未来社会を工学する活動未来志向の多様な人材の育成を一層リードしていただきたいと思います。

どうかよろしくお願いします。簡単ですが、開会にあたって、私からの挨拶とさせていただきます。

（司会）

中村様どうもありがとうございました。続きまして開会挨拶2、“新たな電力システムに向けて”と題しましてプロジェクトリーダーであります東京大学生産技術研究所特任教授の荻本和彦先生にお話をいただきたいと思います。よろしくお願いいたします。

挨拶 2（プロジェクトリーダー・荻本（以下 PL））

それでは私の方から、もう少し説明をさせていただきます。私がプロジェクトリーダーを務める「電力プロジェクト」では、新たな電力システムへの段階的な移行を実現するという姿勢視点方法論についての提言の取りまとめを目的としております。

趣旨を文章で書くのは難しくはなかったのですが、電力にはあまりにも多様な技術、多様なシステム技術も含まれていることを再認識しつつあります。

今日は、技術的な知見や議論の状況など、これまでの検討状況を紹介させていただき、それに基づいて、キー技術・システム技術、それから人材の獲得と育成の二つのパネルディスカッションを行います。

どんな技術があるかは議論の全てのベースになりますが、そこから将来に向かってのキーは何かと、それを支えるのは人材であると考えます。我々の新しい電力システムへの移行には長い時間がかかるので、新しい人方々に参加していただきたいという気持ちを、今回は表しているつもりでございます。

次こちらのスライドでは、左側にこれまで議論してきた分野を示しています。これまで需要と電源から始まりまして、5 回の討議会をやってまいりました。

右側は、プロジェクトの体制で、執筆委員と閲読委員の二重構造になっており、執筆委員は、都度の議論において話題を提供いただくこと、それからそれが終わりましたら、そこから得られた知見をある程度提言に向けてまとめていただくというようなことをお願いしています。閲読委員は、それを読んで修正またはコメントをいただくという構造です。次のスライドは、残った後 1 年の分野を示しています。

後半 1 年では、電力システム全体、市場、解析手法など、横串を刺す分野となります。こういう分野の議論を通して何とか 1 年後にはそれまでの知見をまとめ、今日のこの場での議論も反映し、提言の取りまとめに向かって進んでいきたいと思っております。

本日はそのような趣旨で開催させていただきます。本日はどうぞよろしくお願いいたします。ありがとうございました。

（城石）

荻本先生ありがとうございました。続きまして、講演の部に移らせていただきます。最初のご講演は、需要分野のキー技術とキーシステム技術と題して、東京大学生産技術研究所　教授の岩船由美子先生からお話をお伺いしたいと思います。岩船先生よろしくお願いいたします。

講演 1 需要分野のキー技術とキーシステム技術（東京大学・岩船）

電力需要のマネジメント

皆さんこんにちは。東京大学生産技術研究所の岩船でございます。需要分野のキー技術とキーシステム技術というタイトルで、需要に関して私の方からご説明させていただきます。まず、少し大きめに考えますと、電力需要のマネジメントという意味では、広く、デマンドレスポンス（DR）、また電化時需要自由度というような時間と空間に応じた調整があると思っています。

需要のマネジメントには、今日メインでお話する短期の DR 以外にも、長期の調整、例えば再エネが 1 週間あまり利用できない、風も吹かないという無風期間に対する調整ですとか、季節感の調整などもいずれ再エネが多くなるにつれて必要になってくるだろう。またネットワークの増強回避も、DR の一つの重要な役割になってくる可能性がある。電化に関してはこれから EV や熱の電化が進むことで調整可能な需要自体が増えてくる。これらの需要に対してはそれを供給するという面もありますが、調整に使える需要も増える可能性があるだろう。さらは、需要の立地誘導は、これから増えると言われているデータセンター・半導体工場の需要を、適地に誘導する、大きな意味での需要のマネジメントもあると思います。

調整力の確保に向けたデマンドレスポンス

今日お話の DR を短期と長期に分けて整理してみました。短期に関しては、ΔkW とΔkWh の調整に分けられ、その目的は、再エネを活用するためには需給バランスの確保と系統混雑の回避、手段としては蓄電池、EV、ヒートポンプ給湯器などがあると思います。3000 万台の EV は約 30GW の調整価値になる、

1000 万台でも 10GW になるということですので、これだけの調整できる能力が増える可能性があると言えるわけです。日本ではあまりやられていないのですが、空調によるピーク削減みたいな意味では、プレヒーティング、プレクーリングなどの手段もありうると思います。あとは大口の需要ということで産業用需要の調整があると思います。ただ産業の需要調整の多くは自家発が含まれるので、今後自家発がどういう形で残っていくのか、クリーンな調整力という意味で活用しにくくなる可能性もあると思っています。

長期の調整の方は、先ほどの無風期間や季節間の調整ということで言うと、ΔkWh の調整が主になり、ここで一番注目されるのは水素でして、水素ができれば一番いいわけですが、水素は、自由度は高いがコストも高く、水電解装置などのコストの低下が必要ですし、一定の稼働率が見込めなければコスト高に繋がる問題があります。かつ水素には利用の課題があって、また発電に使うだけでは非常に効率が悪くなります。熱利用など発電以外の用途を確保し、さらにはそこへの配送という大きな問題があります。水素は非常に軽くエネルギー密度が低いので、配送にも多大なコストがかかる問題をクリアする必要があると思います。以上が、これが短期と長期のエネルギーマネジメントの整理です。今日は特に短期の DR の中でも（需要側リソースの活用に向けて）再エネ大量導入に伴う柔軟性向上、クリーンな調整力の確保のための短期の DR を考えたい。特に、一番まだ活用が進んでいない低圧接続の DR である EV ヒートポンプ給湯器定置式蓄電池を基に考えてみたいと思います。

需要家・アグリゲータにおける DR 価値

需要側リソースにどんな価値があるだろうかを整理してみました。もちろん需要家側に入るものですので需要家にとってメリットがなくてはいけないわけで、一番は電気料金の削減になる。PV が屋根にあれば自家消費の拡大で、それは環境価値も取れるだろう。

さらに蓄電池機能があれば、レジリエンスの強化にも繋がる。さらにそのそれぞれの自分のリソースをアグリゲータ提供することによって対価を獲得できる可能性がある。これらが需要家メリットです。 事業者あるいはアグリゲータ側のメリットとしては裁定取引によるスポット市場の調達費用の削減、時間前市場取引による利益追加、インバランス調整とは調整力提供による利益で、さらには小売事業者においては容量市場への容量拠出金の軽減があり、さらに系統側で需給上の制約緩和では、これはクリーンかつ安価な系統調整力の確保に繋がり、あとはその容量価値、上げ DR による再エネの抑制量の削減などのメリットがあります。ネットワーク上の制約緩和では、最近では東京電力管内の系統制約で PV 出力が抑制も起こっていますので、DR をうまく使えれば潮流改善の効果に繋がり、長期的にはきちんとした上げ DR として期待できれば、系統増強の回避の効果も期待できより大きな経済的価値が得られることになります。

容量市場における発動指令電源（DR 含む）活用

DR にはいろんな使われ方はあると思うのですが、基本的にはマーケットという意味では容量市場における発動指令電源として活用されています。図は発動指令電源の応札容量です。現在、2024 年から 2028 年までの容量市場の取引が終わったところで、発動指令電源の比率は全応札容量の 3.7%まで来ました。これには、皆さんご承知だと思うのですが、先ほど述べた EV とかエコ給湯などの小さいものはなく、産業の大規模 DR が入っている分野になります。ここには自家発も含まれているのですが、容量市場の資料には実際の DR の割合はデータとして出ていません。ただ過去の資料を見ますと、容量市場が始まる前の 2023 年度向けの電源 1′の公募において DR が 220-230 万 kW ぐらいで、そのうちの自家発の比率が 24%っていう数字がありましたので、だから 4 分の 1 ぐらいが自家発だったとして、思ったよりも DR も多い。特に産業用大口の DR が含まれている状況だと思います。

ただこの絵を見てからわかるように、2026 年ぐらいからその応札容量は横ばい気味になっており、産業用だけだと降圧するとこだけだと量が限られてくる印象はあります。

低圧リソース活用の課題

ですので、ぜひここに低圧のリソースも加えていけないかが考えられます。ただ低圧リソースの活用の課題は、そもそも数が少ない。2023 年度の時点でエコキュート 900 万台、これ 1000 万台もう突破しましたっていう数字も最近出ていますが、そのぐらいで、定置式の蓄電池が 80 万台、BEV が 30 万台、PHEV が 25 万台と言われています。特にこの EV が増えてない。この辺りでそもそも数を増やさなきゃいけない。そして、1 個ずつ数 kW と小容量ですので、費用対効果はどうしても悪いという問題があります。

リソース活用の方法としては、料金型によって自分の制御をしてもらうことで誘導するパターンと、インセンティブ型アグリゲータや交流による生業と両方あり、やりやすいのはこの料金型の自端制御で。しかし、自端制御では、通信費用も不要ですが、期待する調整量が得られるとは限らないですし、アグリゲートはマ

ネタイズできないし、リアルタイム制御ができない。

かつこれを料金型で実施するためには何より柔軟な料金メニューが必要なのですけれども、国からそのメニュー作成っていうのを小売事業者に強要できないという問題があります。今はもう小売り事業者 700 社もあり、なかなか難しい。ただこういうことをやっていかないと、やっぱり料金型はあまり普及していかないと思っております。

難しい方のインセンティブ型は、需要を動かすだけの十分な対価が払えるかがポイントになると思います。

日本の低圧リソース活用を取り巻く背景

最近の日本の低圧リソース活用を取り巻く背景がこんな感じで整理できておりまして 2026 年からは低圧リソースも需給調整市場に入れるようになります。

機器の個別計量も開始されます。今までは受電点で例えば家全体の需要に関する取引しか認められてなかったのですが、新たに特例計量器を入れることで、機器別の計測値で市場に参加できるようになります。DRD 制度の議論も、エコキュートが一段落し、今蓄電池のレベルに来ていると思います。

それ以外の環境変化としては、再エネがどんどん増加して特に九州とか西日本が多いのですが、スポット価格が 0.01 円になる時間がどんどん増えています。小売価格の上昇は、全体に上がるというよりは、例えば今まで安かった深夜電力の料金などがじわじわと上がる状況にあります。なので、今までは夜エコキュートを沸かすのが一番良かったわけですけれども、だんだんそうでもなくなってきつつあるっていうことです。今卒 FIT の電源の電気は、買ってくれても 8 円から 10 円とかぐらいでしか売れないので PV 設置世帯では自家消費を最大化するのがベストな選択肢になります。ただここにきて少し変わったことが、PV の FIT の買取価格のルールが若干変わります。家庭用の PV に関しては、これまで買い取り価格は 15 円まで下がってきたのですが、2025 年度、この 10 月からは 24 円に上げて、そのかわり従来の 10 年ではなく 4 年で短期回収するルールに今変更されることが調達価格算定委員会で決まりました。これは何故かと言うと 4 年で回収できれば、より戸建てに入ることを期待して、こういう制度が設けられました。ただ、回収期間が短くなるのはいいのですけど、今夜間電力が 24 円より安いエリアは結構あるので結局それで逆転が起こり、せっかく昼間に PV 使ってほしいのに、やっぱり今まで通りエコキュートつけるうちが夜に使うみたいな残念なことが起こることを心配しています。

料金メニューに関しては 700 社もいる小売りさんの中でも、じわじわと市場連動料金メニューの提供は逓増をしていると思います。ただ、低圧の部門では、料金の変動リスクを取りたくないお客さんが多いので、あまりその受容性は高くない状況です。ちょっと時間が大丈夫しょうか。

需要を動かす価値はあるのか？

次に需要を動かす価値があるのかということで、市場をうまく使っていくことが重要で、市場もいろんなレベルがあって一次調整力から、特に再エネの予測誤差対応の 3 次調整力②、また容量市場での容量価値、スポット市場といろいろあります。それぞれここに大体の数を私がざっくりと出したのですが、どれか単独でマネタイズできるほどのところまではいかないというのが難しいところで、こういった複数の価値をうまく組み合わせていることを、アグリゲータさんも考えていく必要があるだろうということです。

調整力市場や容量市場でマネタイズするににあったってのもう 1 つの重要な要件は、一定の入札の規模が必要ということです。入札単位が 1000kW なので、これを小さいリソースだけで作るのはかなり難しい。したがって大規模な DR とうまく組み合わせていかなきゃいけない。私は知らなかったのですが、系統用蓄電池との組み合わせっていうのは駄目だということなので、本当はそのあたりも見直していく必要があると思います。

それかアメリカみたいに 100kW の入札単位認めるとか、まだ制度的にやる余地があると思います。上げ DR の難しさはベースラインを決めるとこだと思うのですが、ここは料金で対応するしかないかなと私は思っています。

ただ、系統混雑対応で PV 出力が大きいときに上げ DR してほしいというニーズは高くなっているので、もし今 NEDO プロジェクトで検討しているフレックス DR のようなマーケットができれば、追加的な価値が生じる可能性はあります。

低圧リソースの活用に向けて

繰り返しになりますが、DR には料金型とインセンティブ型があり、インセンティブ型は経済 DR からインバランス回避、需給調整市場と、様々なところでマネタイズしていくわけですけれども、ポイントになるのは、応答時間反応速度、継続時間、可用性、確実性です。機器点計量には特例計量器が必要で、それは特例計ある程度簡略された一定の精度を持った計量器です。

キーとなる技術、システム技術、制度

今回のお題がキー技術、システム技術でしたので低圧リソースの活用に向けて必要なことを整理してみました。キー技術は通信機能付きの機器とセキュリティの適合性評価制度、今この J.C.STAR の対応機器であることというルールができたのですが、まだこれ製品が少ない状況のようです。

機器点軽量のための特例計量器がキー技術かなと思います。さらにキーシステム技術としては、うまくシステム化して DR を導入するために、クラウドの API 制御システム、群制御のシステム、DR の制御プラットフォーム、あとは料金や CO2 原単位のデータベースなどの整備も必要だと思います。

あとはデータセンターを PR していく仕組みとか、あとは技術じゃないのですけど、この分野、政策も非常に重要で、市場連動料金とか、エネルギーと需給調整の同時市場、地点別料金、そういうものを実現可能とするシステムも必要と思っています。

DR の制御方式に関しては、これまでゲートウェイ方式が主流でしたが、機器メーカー系のサーバー経由でダイレクトに制御する方式が一番経済的になるのではないかと思います。ここが今後どう伸びるかが技術的なポイントと思います。

Octopus Energy による DER 制御

イギリスのオクトパスエナジーでは既にメーカークラウドと自社プラットフォームを API 連携した制御を実現していて、12 万台のデバイスも管理しているというような実績もございます。こういったものは日本でも必要と思います。

Load Management Standards, MIDAS

もう一つが料金のデータベースを作ることで、カリフォルニアでは MIDAS というデータベースが今整備されつつあり、州の 5 大電力会社は市場連動、ダイナミックな料金を作り、その料金を、MIDAS に登録するというルールができています。

こういったものを日本でも小売事業者は 700 社もあるぐらいですから、料金はここに登録する、その料金をシグナルにして機器制御する、そういう仕組みが必要ではないかと思います。MIDAS には、料金だけではなくて時刻別の使用と発電も登録される仕組みです。

DC のデマンドレスポンス実証

これはデータセンターの DR の実証の話です。こういう DR も、これからは考えていく必要がある。

需要の柔軟性を活用するしくみを

最後になります。これから重要なのは需要の柔軟性を活用する仕組みだと思っています。系統対策は時間がかかります。それに対して需要対策は柔軟性が高い。それは調整力になるという意味もあれば、リソース追加の時間遅れが小さいという両方の意味があります。ただ、導入時、柔軟性資源として使える機能を具備していることが必須の条件となります。調整力のクリーン化をどう進めるかは大きな問題で、それは国の政策で環境対策をどこまで考えるかということだと思います。

発電設備に全部 CCS がつけられるとか、アンモニアや水素発電で全部行くということであれば、わざわざ調整力に今日お話ししたちびっこリソースを使う必要はないのですが、もし蓄電池等を主力にするのであれば、やはり DR 含めて育成する必要があると思います。この柔軟性活用をどこまで本気で考えるか、空間的に主観的にこのあたりに議論の余地があると思っております。

はい。早口でしたが、以上です。ありがとうございました。

（司会）

岩船先生どうも非常に興味深いお話ありがとうございました。

講演 2 従来型電源分野のキー技術とキーシステム技術（北海道大学・原）

（司会）

続きまして、北海道大学情報科学研究院準教授の原亮一先生に、従来型電源分野のキー技術とキーシステム技術とについてご講演をいただきたいと思います。原先生よろしくお願いいたします。

（原）

今ご紹介いただきました原です。

カーボンニュートラルとは

私の方からは、同期機電源と、ちょっとタイトル違うのですが中身は変わっておりません。従来型の電源、こういったものが、これから目指すべきカーボンニュートラルの社会に向けてどういった役割を担っていくのかということでお話をさせていただきます。

それで中身に入る前に、カーボンニュートラルについて私が学生向けあるいは専門家じゃない方に話をすると、皆さんは、再エネを中心とした社会をイメージしがちかなと思います。すなわちカーボンニュートラルイコール RE100 みたいなイメージです。とかく専門家じゃない方が結構多いと思っておりますが、目指すべきは RE100 ではなく、やはりカーボンニュートラルの達成だと思いますので、その目的の中で従来型の電源がどんな役割を担っていくのか、特に今後徐々にカーボンニュートラルに向けて電力システムが変わっていく中で、どういった役割を担っていくべきなのかという観点でお話をさせていただきます。

第 7 次エネ基での同期電源@2040

第 7 次エネルギー基本計画が出て、その中でいわゆる同期電源に関する内容の説明がこちらのスライドです。火力発電について重要なポイントは、kW を維持しつつ、kWh を減らすという話になっています。発電電力量では 3 割から 4 割ぐらいまで減らすというようなことが 2040 年断面で目標にされています。

この kW を維持するというところが一つキーワードであると思っています。その中のポートフォリオとしては、非効率な石炭火力はフェードアウトを目指していくことと、LNG については脱炭素化に向けたトランジションの過程において、これが一つ言うが重要な役割を担っていくポジションであると整理されています。

燃料の脱炭素化ということで、アンモニアの活用あるいはカーボンキャプチャーも使っていくことが言われています。

また、水力発電につきましては大規模な新規の開発は条件的に難しいため 8～10%程度と想定されています。ただし大きな水力については建設からかなり年数の経つものもあるため、そういった老朽化設備をどのようにリプレースし維持していくのかが問題になると思っています。中小規模の水力についても期待が集まっています。

揚水についても、老朽化設備をどう維持していくのか、これは揚水運転と発電運転でエネルギーストレージになるわけですから、系統の安定化並びに効率的な運用と両面では必要であるため、これをどう今後維持していくのかがポイントになると思います。

原子力発電につきましても、社会的な嫌悪感も大きいと思いますが、安全を優先しつつ今後も使っていくと整理されていることが皆様ご承知のとおりです。

同期電源に求められる役割

いわゆる RE100 にせずに、こうした同期機を使ういわゆる在来型の電源を今後も使っていかなければいけないのかという理由は、多くの方がイメージされる通り、安定した供給力を提供という点が何より大きいと思います。

一つは出力が制御できるということで、太陽光や風力のような自然変動電源とは異なり、その出力を需要に合わせて発電していくことができることが非常に大きなポイント、アドバンテージになりますので、こういった電源をちゃんと今後も使っていくということが、系統の安定性を保つ意味で非常に重要と言えるのではないかと思います。

また、化石燃料ではありますが、燃料が貯蔵できるということで、ある程度の kWh を国内に確保しておくことができる。いろんな燃料を海外から輸入してくることになるため、中長期的な意味で安定化は地勢リスクも含めて考えなければいけないところではありますが、既に国内に持ってきた分については、ある程度 kWh のバッファーとして機能するという意味で、様々な地勢学的なリスクに起因する、価格変動等のリスクをある程度吸収できる側面があると思っています。

また、出力の制御と関係しますが、いわゆる調整力、電力系統の中の需要と供給のバランスを取る能力にも、これまで主力として寄与してきた経緯があります。特に、出力を上げる方も減らす方も、両方とも対応できることで、自然変動電源は最大電力で発電しておいてそれを下げることはできるけれども、本来発電できる能力以上に発電することはできないわけですから、通常は片側ということになります。

一定程度出力を下げておいて上げ代を用意しておくやり方もできますが、その場合はせっかく入れた設備の利用率が下がることから実際の運用は難しいと考えられますので、そういうところを補う形でこの同期電源さらに必要になってくると思っています。

またこうした調整力には、高速に動けるかという条件があり、既設の電源では既に持っている能力になっていて、この調整力を供出するためは電源自体を何かグレードアップすることは特に必要ないことから、少

ない追加費用でこの調整力を供出できるリソースであることを認識する必要があるかと思っています。

あと、最近特に注目が集まっているシステムストレングスという話がございます。すなわち、電力系統の安定性を担保する能力のことで、これには様々なメトリックス（指標）があって、そこに同機器がどのように寄与しているかを考える必要があります。

同期機によりストレングスの供出が求められる点は、一つは物理的に保有している慣性力ということで、その同期機自体が回っていることでそこにエネルギーが溜まっており、それによって系統の中で生じた擾乱による変動を吸収することができるという話、並びに電圧の維持能力の話、この 2 点です。

これらは他のリソースに比べて同期機としては優れている特徴です。これらの特性を定量的に把握するとともにその他リソースと組み合わせて、ベストミックスの議論で考慮していくことが、将来の電力システムのビジョンを定める上では非常に重要になると考えています。

火力電源の稼働率低下

こちらは私が作った資料ではなくて引用してきた資料ですが、火力電源の置かれている状況です。ちょっと古い資料ですが、横軸が 1 年の中の日にちで、縦軸が各日で火力がどれぐらい発電したかを表しており、さらにそれの発電量の多い順に並べた「デュレーションカーブ」になっています。ご覧いただくポイントは、この左端の最大発電電力量、ここで言うと最大値、はあまり変わっていないことです。黄色の線は 2016 年、オレンジ色は 2022 年、6 年後を表しています。状況の変化によって、このカーブは下側に推移していることから、火力発電の発電電力量が減ってきていることがわかるわけですけれども、左端の最大値は変わっていない点で、再エネが不調な日では、火力が補わなければいけないことを意味します。冒頭の「kW を維持しつつ」というところは、まさにここに関係すると思っています。

他方、カーブ自体が下がっていることから、火力発電、火力発電の設備単位で見るとそその稼働率が下がっているため、「kW を維持するためには」そこで生じる経済性の低下をどうカバーしていくのかを考えなければいけないということでます。

これも私の資料ではなく引用した資料ですが、横軸年に対しまして、燃料種別の火力電源の稼働率を示しています。右下がりの傾向にあることから、前のページの議論と同様、電源の稼働率が下がることによって生じる経済性の低下をどのようにカバーしていくかを考えなければならないと捉えています。

また、火力発電の運転台数が減っていくということは、採算性を担保することを考えなければならないということです。いわゆる固定費をどう回収するか、あるいは発電機の起動停止の回数が増えるのであれば、それに伴う費用の増分も考えなければいけないということで、こういった採算性の低下をどのようにカバーしていくか考えなければいけないという点です。

火力電源の稼働率低下：ストレングス供出点の偏在化

もう一つは、同期機は、いわゆるストレングスの供出を支えるポイントになっているというお話を先ほどしましたが、そういった同期機の台数が減ってことによって、系統として持っているべきストレングスが担保できるのかということや、さらに並列して動いている同期機の場所がまばらになってきて、系統の中でスカスカになってくるとやはり地点と紐づいて評価されるストレングスは地点により問題が出てくるだろうと考えます。ここで IBR とはインバータ電源、このあたりの話はこの後、馬場先生の方からも話があると思いますが、インバータからどのようにこのストレングスを供出できるかと連携した形で進めていくことが必要だと思います。あるいは、上で述べた経済性の低下に対して、ストレングスの供出に寄与している同期電源に対してどういう形で経済性の低下をカバーするのか、何か市場メカニズムを新たに入れるのかといった議論も今後必要になるかもしれません。

火力電源の稼働率低下：部分負荷運転

最後の論点です。いわゆる部分負荷で運転することがこれまで以上に増えてくることが想像されます。すなわち、先ほどは調整力で上げ代という話がありましたけれども、出力を増やすことができるようにしておくためには、常時その分定格よりも低いところで運転しておかなければいけない。このとき、これまでは定格で運転することを想定してそこに最大の発電効率点が来るようプラントの設計をされてきたのが、部分負荷で動かすことが多くなり、そこに最適な効率点を持ってくる設計思想が多分必要になると思っています。

例えば、50 万 kW の発電機が、50 万 kW で動くことがほぼなくて 40 万 kW とか 30 万 kW で動くことが多くなれば、そこに最適な効率を持ってくるプラント設計をしないと、せっかくのリソースを非効率な形で使うことになると思います。そのため、リプレース等のタイミングに応じてそういった新たな設計思想で電源を組むこともあわせて考える必要があると思っています。

火力電源の調整力

先ほどの話とかぶりますが、上げ調整力の話です。これを担保するためには部分負荷運転が必要になることで前のページの話と絡んでまいります。下げの方につきましては、これ最低出力を充分に引き下げられるようにすることが必要で、運転できる範囲を今までよりも広く取れるようにすることが調整力として使える幅を広げるということになり、これは非常に重要な観点だと思っております。

また出力応答そのものの高速化もあわせて検討していく必要があるだろうと。今まで 3 台で供出していた調整力を 2 台で供出することになると、1 台あたりは 1.5 倍のスピードにも耐えられる形でアップグレードすることも検討しなければならないと考えています。

長期的な対応の必要性

やはりこの同期電源につきましては、建設のリードタイムが長く、また寿命も長いということもありため、非常にロングレンジでどのようなポートフォリオを組んでいくことを考えなければいけないと。他方、世界、社会の動きは非常に早いですし、再エネと競争しているわけではないですが、再エネ電源などは比較的リードタイムが短く、これ、ものすごいスピードで増やすことができ、1 基当たりのユニット容量も小さいということもあり増やしやすいっていう側面がありまる。ロングレンジで考えなければいけないものと、比較的早い瞬発力を持って構築できる可能性のある再生可能エネルギーをどのように組み合わせていくかについては、二つのタイムレンジを一緒にポートフォリオを考えてなければいけない。

そのときには、単純にそのタイムレンジの違いだけではなくて、本日これまでに説明してきた火力機ならではの特徴も踏まえながら、包括的に元のポートフォリオを今後考えたい、考えていかなければいけないですし、いかに kW を確保しながら kWh の依存度を減らすのかということを、システム技術として我々考えていかなければいけないポイントだと思っています。

以上でございます。本日はどうもありがとうございました。

講演 3 再エネ電源分野のキー技術とキーシステム技術（日立パワーソリューションズ・紺谷）

（司会）

原先生ありがとうございます。今従来型の電源技術ということでお話をいただきましたが、次は再エネ電源分野のキー技術とキーシステム技術ということで、株式会社日立パワーソリューションズの技師であられます紺谷怜央先生にお願いいたします。

（紺谷）

日立パワーソリューションズの紺谷と申します。今回再エネ電源分野について、私の所属が風力なので、特に陸上風力の分野におけるキー技術とキーシステム技術について発表いたします。

今回は、再エネ発電コストの低減、VRE 変動性再生可能エネルギーを前提とした電力システム、技術開発における国産化率の 3 点について発表したいと思います。まず 1 点目の再エネ発電コストの低減に関してです。

（事務局）

事務局です。現在オンラインでの配信でスライドの上が切れてしまっております。通常スクリーンモードで進行をしていただけますと幸いです。

再エネ発電コストの低減

では、この状態で発表いたします。再エネ発電コストの低減に関しての説明ですと、この図は陸上風力発電の LCOE の推移を示しております。赤い色の線が日本でそれ以外のグレーあるいは黒の線は他の国を表しています。

LCOE が年々下がっている傾向はどの国も一緒ですが、日本を見てみますと結構高いところに留まってしまっている傾向があります。設備費の低減が今後必要になることが示されています。

設備費の低減：長翼機や大型機の採用

先ほどは LCOE の推移でしたけれども、風力発電に関してはこちらの風力発電の短期容量の推移を表しており、図では抜けておりますが、2010 年から 2023 年の変化を表しています。横軸が定格出力で、風力発電大体このぐらいの大きさですけれども、あと縦軸は風力発電のローターの直径を表しています。

色は先ほどと同じで、日本が赤色のもので、ほかの国はグレーの線です。日本は小さい方に入ってしまっています。今後の技術としては、青枠で囲んでいる他の国と同じぐらい翼の長い機種の採用とか、あるい

はこの緑枠で囲んでいる、これ海外ではプロトタイプが出来上がっているさらに大容量の機種の採用が、技術として考えられます。

長翼化について説明しましたが、日本はご存知の通り非常に山が多い地域のため、大きいだけでは駄目で、輸送技術や工事技術の工夫が必要になります。具体的にはここに挙げているように、分割を前提とした設計や、タワーあるいは発電機そのものを分割して運ぶように設計する、あと大型のクレーンなくても工事できるようにクレーンの方を工夫するとか、あとはこれ写真で写しているのはブレードを寝かせて運ぶのではなくブレードを立てた状態で運ぶことによって、山岳地であっても木にぶつからずに山頂まで持っていくことができるなどの工夫があり、そういった工事や輸送の技術を合わせて進化させていく必要があるのを示しております。

O&M 費の低減：リモート点検(遠隔監視)・省人化・無人化

発電コストに関しては設備費だけではなくて保守点検の費用も重要です。現在、リモート点検、省人化・無人化による保守点検などのコストの削減も行われています。ドローンを使った点検、ひずみセンサーやローカル 5G を使ったモニタリング、あとスキャナーはデータ収集システムですけれども、これを使ったデータ分析や予兆診断も行われています。

写真で写しているのはドローンを使ったメンテナンスの様子で、左側はドローンを使ったブレードやタワーを見ています。右側はタワーの溶接部分を映しています。これらによって高所に行かず効率よく作業できることを示しています。

VRE を前提とした電力システム

IEA は VRE が電力システム運用パターンに与える影響を6段階に分類

続きまして、IEA が公表している「リニューアブルズ」から取ってきた図です。VRE が電力システム運用パターンに与える影響を 6 段階で示しています。左上から順番に 1、2、3、4、5、6 とあり、フェーズ 1 の一番左上では本来需要と NET 需要が同じで、この状態では再エネは電力システムに対してほとんど影響がない。PV・風力の導入の増加とともにこの元需要と NET 需要が離れていって、フェーズ 3 の段階になっていわゆるダックカーが見えてくると。昼間から夕方にかけて太陽光発電の出力の低下医に伴い急激に供給が必要になるといった急峻なカーブが見えてくる。さらに左下のフェーズ 4 では、先ほど説明したデュレーションカーブで描かれており、縦軸の需要に対する再エネのシェアが 100%をこえているように、需要のほぼ全てを賄う時間帯が現れてくる段階です。フェーズ6は年間を通じて結構な量の出力抑制が必要になる最終形態で、この再エネと蓄電池と後で出てくるディスパッチャブル（負荷配分可能）な電源と組み合わせて、安定な供給を実現する段階です。

VRE 増に伴い、電力システム運用に与える影響が大きくなりつつある

この図は、6 つのフェーズを横軸、縦軸に各国の VRE のシェアを取ったものです。横軸は、再エネが電力システムに与える影響を表しています。各国の 2023 年から 2030 年の予測で、どの国もフェーズは上がることが描かれています。日本の位置はこれまた外れていて、右側の黄色で、赤枠で強調しています。日本は PV の比率が他の国よりも多く、最エネのシェアの割にフェーズがより上がる、すなわち電力システムに与える影響が大きい状況になっています。

グリッドコード：新規に系統に接続される電源が遵守すべき技術要件

日本では再エネの電力システムに与える影響が大きい中で、現在の国の委員会で議論されているがグリッドコードです。グリッドコードとは、新規に系統に接続される電源が遵守すべき技術要件という定義で、特に現在議論されておりませんが、2030 年を待たずに要件化するフェーズ 2‘、2030 年前後に要件化するフェーズ 3、継続的に議論をしていくフェーズ 4 が議論されています。

グリッドコード：制定された後も、定量評価を通じた検証に期待

このグリッドコードに関して、左側が風力発電に関するグリッドコードの一例です。これは、出力の変化速度の上限を示したグリッドコードで、5 分で 10%以内を規定しています。風力発電機はこのための機能は既に具備されていますがそれを適用しようじゃないかというようなグリッドコードがあの議論されておりましたと。現在はグリッドコードを作る議論がありますが、例えば制定された後も何かデータ分析を通じて定量評価をして検証していくことも今後議論できたらよいと考えています。ライドの右側の箇条書きは、このグリッドコード検討会の委員の先生方からのご指摘で、例えば大型化を考慮したデータ収集や定量評価、広域慣らし効果、再生可能エネルギーはたくさんの箇所の変動が相殺しあう慣らし効果があり、それぞれの連携点で

はなく広域の合計で出力変化速度を守れるかなどの切り口をご提案いただいています、17 のこういった指摘がもし解消できるのであれば、既存のグリッドコードも見直していく、そういったデータを通じて検証する仕組も今後あるべきと考えています。

実需給までの時間に対して、起動可能電源と予測誤差はトレードオフ

話は変わりまして、需給調整力の必要量について、この図は実需給までの時間を横軸にとって、起動可能電源と予測誤差を払わしたものです。緑色の線が予測精度、オレンジ色が起動可能電源で、右に行って需給に近づくにつれて、気象予報の精度が上り、起動可能電源が下がることが示されています。この需給調整力の必要量がどう削減できるかの観点があります。スライドの上の半分が、需給調整の必要量の削減する観点で、気象予報が重要になること、気象予報の不確実性を考慮しつつ需給調整力の必要量を計算できないかを示しています。

需給調整力の必要量削減：気象予報の不確実性を考慮

この図は、アンサンブル予報と言われる初期値に揺らぎを与えて複数の気象の予測データを作成しそれを統計処理して予測の信頼度を評価し、さらにこの信頼度に基づき需給調整力の必要量を算出することで、あの歳入の予測誤差に対応した調達量を低減する取り組みを表しています。気象予報の高精度化による需給調整力の必要量の低減を図るもので、電気学会などでも時折発表ありますが、例えば衛星画像や IoT デバイスを使って、気象予報の精度を上げるものが発表されています。

需給調整力の必要量削減：供給と需要を合わせる動機付け

別の切り口での需給調整力の必要量削減として、私今回供給側で発表しているのは、供給と需要を合わせる動機付けができれば、需給調整力の必要量を低減できる可能性があると考えています。

上側の供給側では、現在のフィードインプレミアム（FIP）制度では、昼の出力制御により市場価格が 0.01 円になった時間コマでは、プレミアムがもらえずに他のコマにプレミアムが配分されます。このため昼に充電して昼以外で放電する蓄電池が現在導入されています。

下半分の箇条書きでは、供給と需要を合わせ仕組みで、例えば供給と需要の時間帯ごとに CO2 の排出量を可視化することで、供給と需要の時間帯を変えればそれだけでも CO2 削減できることが分かり行動変容を促す効果があります。

あと大手の IT の企業取り組みとして、1 時間ごとにゼロカーボン電力で 100%供給する、24/7 カーボンフリーエナジーと呼ばれるものに取り組んでいる IT 企業もあります。こういった供給と情報を合わせた動機づけにより、需給調整力の必要量は低減できると考えています。

再エネの需給調整力を活用できる市場設計へ

これまで既存の取り組みを挙げてきましたが、現在議論されているのが市場制度を変えて、再エネの需給調整力を活用する考え方です。現在の需給調整市場では、再エネの調整力と相性の悪い設計になっています。需給調整市場には調整力ΔkW と調整力 kWh 市場があり、前者のΔkW 市場に関しては、下げΔ市場は非対称、あと調整力希望あった市場に関しては、別の契約の枠組みで下げの kW アワーは確保できるので、再エネの対応の必要はないなどの議論がありました。

スライドの下段は同時市場に関する議論の概念図です。これは 100 の需要に対し、50 ずつ出せる電源があると、単価が安い電源が落札する。そのときの上げ 25 と下げ 25 の調整力は、単価が安く発電しているAとB のうち単価が安い方の A が下げΔkW、発電していない C と D の地単価が安い C が上げΔkW を供給するイラストが描かれています。図の良い点は、ΔkW を担う電源が A と C とで異なることで、もしこれが可能であれば、再エネが下げのΔkW を担う取引ができることになると期待しています。

技術開発にかかる国産化率

直近で採用された風力発電機は全て輸入品

論点三つ目の国産化率について説明します。円グラフは、日本で昨年に導入された陸上風力の新規の導入量のシェアを表しています。シーメンス、GE、Vestas, Enercon の欧米のメーカーと、あとゴールドウィン中国の Gold Wind です。重要なのは、この直近で採用されている風力発電機は全て輸入品であることです。

国内メーカーも存在するが、現状は小規模の機種のみ

国内のメーカーは、ホームページ上で調べました。国内のメーカー各社が開発されている発電出力をグラフすると、確かに風力発電機を作ろうとしているメーカーがありますが、その出力は、現在国内で平均的

に使われているのが 3MW～4MW 機を使っているのに対し、開発中のものですら 1MW 機から 2MW 機で、やや小ぶりの機種を開発していることがわかります。これが現在の風力発電機の国内生産の現状です。

規模に応じた取組が必要

こうした中で今後どんな取り組み必要かをまとめました。上側は大型の 3MW 機から4機と現在商用で使われてる機種、下側はより小規模な機種に対する取り組みです。上側の大型の機種では、特に海外のメーカーに向けて、魅力的な市場規模を示すことが必要です。日本は非常に風が強く、地震あるいは雷などの特殊事情があるため、日本向けに改造している状況ですので、魅力的な市場規模を示して海外のメーカーを誘っていくことが重要です。国内メーカーに関して、基幹部品や施工方法を開発することが挙げられます。さらにトップダウン的には、入札や補助金の場合は現地調達計画を出させる取り組みもあってもよいと書いています。

下側の小型機種では、欧米のメーカーは既に作っていないので、国内のメーカーに期待したいと考えています。

海外メーカーを誘引するためには、魅力的な市場規模を示す必要あり

先ほど魅力的な市場規模を示すといいました。見ていただきたいのは右側の円グラフで、2024 年時点の風力の地域別の設備容量を示したグラフです。アジア、ヨーロッパ、アメリカといて、日本はどこかなと見てみると赤色で示している 0.5%と非常に小さなシェアであることが分かります。

このシェアのためだけに風力発電機をわざわざ改造するのは難しい状況になっているので、そういった意味でも海外のメーカーを引き寄せるためには、大きな市場規模を示すことが必要と考えているところです。

以上で終了いたします。ご清聴ありがとうございました。

（司会）

紺谷先生ありがとうございました。今の紺谷先生からは、再エネ電源分野のキー技術ときシステム技術についてご講演いただきました。

講演 4 パワーエレクトロニクス分野のキー技術とキーシステム技術 （東京大学・馬場）

（司会）

続きまして、東京大学大学院新領域創成科学研究科教授の馬場旬平先生に、パワーエレクトロニクス分野のキー技術とキーシステム技術についてご講演いただきます。馬場先生よろしくお願いいたします。

本発表での対象

（馬場）

はい、紹介いただきありがとうございました。私からはパワーエレクトロニクス技術のキー技術とキーシステム技術というタイトルでお話させていただきます。パワーエレクトロニクスという言葉自身は非常に広い範囲の技術分野を示す言葉で、今回のメインの話は、俗に言うインバータ半導体電力変換装置として、交流系統と連系する電圧型の自励式変換器についてお話します。

インバータの中身まで知っている方はあまり多くないかもしれませんので、簡単に説明します。電圧型の電力自励式変換機は、直流側に電圧源があり、電池みたいなもので、それに対してスイッチを使って、上をつけたり下をつけたりする装置になっています。そのスイッチに半導体を使い、高速にスイッチを入り切りすることで、半導体電力変換装置は動作します。今我々が使っている交流系統と連携するときには、直流側が直流の電圧源なのに対して、交流系統の方も電圧源であると。インバータの交流側と交流の電圧は一般的には同じではないため、急速に大きな電流が流れないように途中にリアクトルが入っています。等価回路で書くと、右側が系統で左側が電力変換機で、それをリアクトルで繋いでいる構成になります。

そうすると、どういったところに技術的な課題があるのかというと、まずスイッチの部分、このスイッチがいいものがあるのかないのか、それから、回路の中でスイッチをどこに入れるかという回路トポロジーの問題、そしてスイッチをどう効率的に入り切りするのかという制御の問題、大まかに分けて三つの技術要素が入っています。

分野イメージ 太陽光発電

こういった電力変換器が使われているのは、先ほど来いろいろ話が出ております再生可能エネルギー電源で多く非常に使われてる。特に太陽光発電ですとか風力発電で使われていますし、将来的にはバイナリ

一発電などそのようなところでも使われています。

また、蓄電池や EV チャージャなどのエネルギー貯蔵デバイスにも使われていますし、自励式の変換回路が使われるのはあまり多くないのですが、需要側の整流回路などにパワエレが使われています。さらに送電分野では、直流送電ですとか周波数変換所、無効電力補償などで、これから新たな電力系統を築いていくところには全てこの技術が入ってきています。原先生の講演の中でも「IBR が増えて同期機が減っている」というお話がありましたが、そういう状況も分かっていただけると思います。

求められる姿、期待される役割

系統に連系されるインバータに求められる姿、期待される役割について考えます。一つの考え方としては全く新しい電力システムを作り、IBR 機器に適したものにするともあるかもしれません。しかし、実際にはそんなことはなかなか難しくて、今、同期発電機がメインの電力系統から徐々にトランジションしていく、そういった遷移をしていくことであり、そういった意味ではどう遷移していくかというと、同期発電機が有している原先生の方からご説明のあった系統運用の安定化に資する能力や機能を、パワエレでも具現化していく必要があると思います。その辺りについては原先生の方からお話があったのでここでは割愛させていただきます。

一方で、こういった機能を有するために、あまりにも価格が上がってしまうとなかなか普及もしないの、どうやって低廉なシステムを作っていくのか、これも大きく期待されている部分だと思います。

キー技術

そういった中でのキー技術とは、先ほど概略のところでお話した、スイッチング半導体、その配置、その制御という分野になります。まずデバイスとしては大容量化、低損失化、高速化が目指す姿です。そのための手段の一つはデバイスの構造の改良で、これは我が国が得意な分野であり、IGCT ですとか EGT などが出てきていますし、MOSFET については Cool MOS などの構造が考案されて実用化に至っています。

一方デバイスの構造の改造だけでなく、材質の方も非常に大きな変革のときを迎えていて、シリコンカーバイドも最近は非常によく使われていて、その辺を走っている電車のインバータを使っていますし、それからガリウムナイトライドこれも結構使われており、小型の UPS の電源に使われています。将来は、酸化ガリウムやダイヤモンドデバイスなども期待されており、鋭意研究開発が進んでいる状況です。

またスイッチについては、単に電気信号を加えて入り切りすればいいわけではなく、このゲートドライバーと書いてあるスイッチを入り切りの仕方の工夫も重要で、アクティブゲートドライブなどの技術もいろいろ考案されています。また、大容量化に向けては、一つのデバイスを大きくすることではなくて、直並列接続が昔からよく言われていて、最近は図にあるようなモジュラーマルチレベルセル（MMC）が主流になってきて、ある程度の容量にするためセルを縦に横に積んでいく技術も使われるようになってきたところです。

はい。そういったようなところで、こういったようなところっていうのも進んで開発が進んでいるわけですが、さらにどんないいものが出てくるのかっていうようなことも期待はしたいなというふうに思います。

キーシステム技術

システム技術としては、スイッチを役に立たてるための制御というところで重要となるのが、まず一つ目が周波数と位相の検知です。

電力系統と連系するっていうことは非常に良いと、大きなシステムに小さい設備が接続されている場合、小さい方が頑張っても大きな系統に影響を与えることはない。系統の状況に合わせて出力を変えるために、相手方の状態を検知するのは非常に重要な技術になります。

また、系統の方に大きな外乱があったときにも適切に動くことが最近求められ、フォールト ライド スルー（Fault Ride-through）と呼ばれます。また原先生の講演の中でもありました慣性力もあります。それらの解決策として、最近ですとグリッドフォーミングコンバータの研究、またそうでなくても、安定化に資するような制御が検討されています。また、安全に使うための保護保安系の分野にもキーシステム技術があります。そういった中で、ある技術を入れたときにどんな効果があるのか、もしくはどんな影響が出のかということを考えると、機器のモデル化とシミュレーションの手法をこれからどんどん開発をしていく必要がある。というのは、パワエレ技術を使っている電源は同期機技術を使うものと比べて小規模でそれが多数入ってきたときに、それをどうモデル化してシミュレーションして評価するかが重要です。力ずくで小容量の変換器をシミュレーション・シミュレーターの中に入れて計算することもあるのかもしれません。しかし最近計算機のリソースが良くなくても、従来に比べて大変なことと思います。そういう状況でそのシミュレーションを評価していくことも非常に大きな課題であると考えています。

従来の IBR-Inverter Based Resources の出力制御

それで従来の IBR の制御を少し振り返ってみます。今までのインバータは系統側が強固な電圧源、すなわちインバータ側がどんなに出力を変化させても相手方はびくともしないという前提で作られている状況です。今でも大多数の系統連系インバータは、この考え方に基づき制御されています。 この場合相手方が電圧源なの自分の電圧を変えるのですが、電圧そのものを制御するのではなく、どちらかというと連系しているリアクトルに流れる電流を制御する。例えば電力を考えると電圧×電流、さらには交流の場合力率があるので、電圧を変えられないときは電流を変える、そういった意味で電流制御をすることであたかも電流源のように見せかける制御になっています。

一般的な GFL 制御系

実際の実現としては、あまりにも細かいので専門家でなければ興味のないところかと思いますが、少し複雑な制御系が使われることが多いです。しかし、いずれにしても、三相交流側の電圧を計測して、それで周波数と位相を検知して制御することが多く使われ、指令値通りの電流が通電するように、フィードフォワード制御とフィードバック制御が行われるのが一般的な制御系になっています。 図を見るとわかる通り、積分項とかが入ってきて次数の高い制御になっていて、下手なことをやると不安定化してしまいます。本当はさらに先にフィルターが入っていて、そのフィルター部分まで含めたマルチループ系が使わることがあり、結構動作が複雑だと言われています。

Phase Locked Loop

さらには、電圧の振幅はいいとして周波数を検知するためにフェーズ ロックト ループ（PLL）技術が使われていて、これにもいろんな方式があって、単相でよく使われるレシプロカル方式、三相でよく使われる d-q 変換を使う方式があります。これらの応動の動的な特を実際にはよく考える必要があります。例えば、d-q 変換使う方式はフィードバック系が入る方式で、応答を早くするためにゲインを高めると不安定になりやすい特性です。

SCR が小さい系統でのシミュレーション例

これはうちの学生さんにシミュレーションしてもらった結果ですが、一機無限大系で非常にリアクトル成分が大きい場合で、わかりにくい図ですが不安定な状況が再現されていることがわかっていただけると思います。これは、PLL のゲインを大きくしたり小さくしたりして、PLL のゲインが大きい場合、例えばこの赤のところ、パワーを変化させたときに、それに追従するんですけど、その後発振してしまう。これは自分が出した電流で電圧の位相が変わり、それを過敏に検知しておかしくなる。それからゲインを小さくすると今度は追従できなくてよくわからない出力が出てくるというようなことです。特に同期器が減る、あるいは同期機から非常に遠いところだと PLL のゲインの調整だけでも結構難しくなる可能性があります。実はパワエレ機器も安定に動かすことが難しくなる可能性もあるということです。

GFM と期待される機能

そういった中で先ほど申し上げたグリッドフォーミング（GFM）コンバータ技術の導入が考えられ、現在 NEDO プロジェクトや世界的にもいろいろな研究が進められています。GFM については確たる定義はない状況ですが、先ほど電流源的に普通のインバータは動くと説明しましたが、GFM は交流の電圧源的に動く方式です。

そうすることによって同期器が有している機能をパワエレ機器にも具備させることができると期待されています。我が国では慣性に注目が集まっていますが、実はそれ以外の同期機の機能がいろいろあることは分かっていて、そのため GFM をどううまく導入していくのかが一つの課題かと思います。一方、こういったパワエレ機器が系統にたくさん導入されてきたときに本当に大丈夫なのかということが課題です。一つはパワエレ機器がたくさん入ってきた状況で、何か事故が起り連鎖的にパワエレ機器っていうのが脱落することが懸念されています。

OCCTO の慣性に関する検討、RoCoF 検証

そういった意味で、OCCTO（電力広域的運営推進機関）でいろいろ議論されています。メーカーの方から非常に異論があると言われたのですが、この OCCTO の議論は主としてこれ RoCoF（Rate of Change of frequency）に着目して連鎖脱落の可能性を検討しています。ただ、RoCoF という周波数変化率に着目する理由は、日本では使われてないけど、ヨーロッパでは RoCoF リレーがあり、系統の周波数の低下率がある値を超えると需要を切ることが問題にされている。日本ではそのリレーが使われておらず、どちらかというと

周波数が大きく変動することによって内部の位相外れて同期ハズレか何かが起こり、それに起因する異常検知による脱落の可能性が否定できないという理由で、RoCoF や周波数の変化の議論が進んでいる状況です。

ただ、本当にそれでいいのかについてはよく分わからないところはありますが、今のところまだ検討が進みきってないため、例えば実効値の計算に基づき慣性の感度係数を使って系統の慣性を算出しているということですが、ここは私自身まだまだ検討の余地ある分野だと思っています。

SCR が小さい系統でのシミュレーション例

ちなみに先ほどのシミュレーションで生じた発振現象が、GFM があることで従来型の変換器の安定に動かすことができます。結局、慣性ということではなく、そういった意味で電力系統の短絡容量の小さいところで、従来型の変換器を安定に動かす効果もあるかもしれないということもあって、GFM でいろいろ面白いことができるのではないかと思っています。

IBR 制御に起因する安定性の課題

はいその他、パワエレ機器が系統に入ってきたときに本当に大丈夫なのかっていう話はいろいろありまして。例えば少し前に、これ IEEE の PES のタスクフォースによって電力系統の安定性が再度整理され、その中で Converter Driven Stability（コンバータ駆動安定性）が追加されました。これは系統の制御系とそれから系統の間相互干渉です。

Converter Driven Stability には、Sub Synchronous Oscillation（SSO）、Sub Synchronous Control Interaction （SSCI）、Flicker とか、いろいろありますが、それらはもう実際に世界的に起こっていて、それをどう対処していくのかは大きな課題だと思います。

FRT 要件、分散電源一斉脱落の懸念、インバータ離脱条件

それから、先ほど申し上げた通り、事故が起こっても今までだったらインバータの接続の合計の容量が小さかく、ただ切れてくれればいいという話が、いやいやいや、事故が起こって大量にパエレ機器切れれば電源がなくなってしまいそれは困るということで、事故が起こっても、ちゃんと残って継続運転してくれるFRP要件が必要となり、その検討が行われています。

保護関係の課題、能動的単独運転検出手法に起因する電圧フリッカ

その他、いろいろな保護関係の課題もあり、急速に普及が進んでいるインバータには多くの課題があると考えます。

シミュレーション技術・モデル化

時間がなくなってきました。最後シミュレーション技術について、これ全て現象を瞬時値シミュレーションで解析すべきか、すなわち非常に細かい時間刻みのシミュレーションコードを書いて実施すべきかについては、現状では困難も多いと考えます。

瞬時値解析はもちろんそれができれば一番いいと思いますが、パラメータとかそれから制御系も含めて正しいモデルの作成が本当に可能なのかは大きな課題です。そういった状況で、縮約などを通して危険な状況を適切に把握する技術は非常に重要になります。本来は図に示す必要十分な条件に持っていきたいのですが、今のところは安全性を考えて十分すぎる安定な条件で運用していく。でもそれをなるべくこの黄色い十分安定な条件を赤の必要条件に近づけていく継続的な改善が必要と思います。

まとめ

最後のまとめです。回転機が持っていた強固な系統から IBR が主体となる系統の移行が進展しており、回転系が有していた機能をいかに効率よく具現化するか、安定運用をいかに確保するのかが課題でだと思います。

あと人材育成という意味では、系統もわかるパワエレ技術者、もしくはパワエレもわかる系統の技術者、こういう技術者の育成がこれから非常に重要になると思います。現状ではこういった点は弱いと思っており、今後どうしていくのか、私も教育機関にいる者として考えていきたいと思っています。

以上で私からの講演を終わりにしたいと思います。どうもありがとうございました。

（司会）

馬場先生、非常に幅広いお話をいただきまして誠にありがとうございました。

講演 5 送配電分野のキー技術とキーシステム技術（中部大学　飯岡）

（司会）

続きまして、送配電分野のキー技術とキーシステム技術ということで、中部大学工学部電気電子システム工学科教授の飯岡大輔先生にご講演をいただきたいと思います。飯岡先生よろしくお願いいたします。

（飯岡）

ありがとうございます。中部大学の飯岡と申します。送配電分野のキー技術とキーシステム技術というタイトルで報告させていただきます。本日の講演内容はここに示すような内容で行います。

送配電分野の起こりつつある変化

送配分野の変化についてまずこのスライドを示しております。左側が従来の送配電分野で、右側が変化後の送配電分野を表しています。例えば、従来は少数の大型電源で電力を供給していましたが、変化後は太陽光発電など、多数の分散型電源で電力を供給する形にシフトしていると思います。

また、大型電源は、馬場先生や原先生からもお話がありましたように、同期発電機だったのに対し、自然変動電源はインバータ電源になり、同期化力や慣性力が減少しつつあります。一方、需要は制御できないことが一般的だったのですが、先ほど岩船先生からもありましたように、デマンドレスポンスなど、制御できる需要が増えつつあります。

需給についても地域ごとで一致させていたものが、全国で一致するように市場で配分したり、蓄電池を活用したり、送電線に混雑が発生したりと、大きな変化を遂げている最中であると思います。

変化により生じる課題

送電系統

送配電分野の変化に伴う課題をいくつか述べたいと思います。まず太陽光発電について、この図は横軸が時間、縦軸が電力です。赤い線が需要を表し、昼間に太陽光がたくさん発電している絵になっています。結果として発電が需要を上回る時間がたくさん出てきて、このような場合は火力発電の出力を絞ったりあるいは停止させたり、揚水発電のポンプアップを活用したりという、電源による調整の活用が必要となります。

また、全国大の市場を介して余剰電力を有効活用することもできます。その場合は他のエリアに供給できる電力を送ることになりますが、発電電力の方向が一方向ではなくなるため送電線の混雑が発生する場合が考えられます。

右の図は、余剰電力を他の需要地へ供給することで送電容量を超過するケースが現れることを示しています。火力の出力制限だけでは対応できない場合は、太陽光の出力制限も必要となり、近年は再給電方式で同量の下げ、上げを行うことで混雑を解消する運用が実施されていると思います。

配電網での再エネ電源の導入可能量

配電網での再エネ電源の導入可能量も問題となります。検討例として実配電線データに基づくクレスト 126 配電線モデルを用いて、導入可能な太陽光発電の量を、PV 導入率を変えて、24 時間分の潮流計算を行いました。

電圧や電流の違反が発生しない最大の導入率をホスティングキャパシティと定義して計算したところ、左の配電線モデルの場合は対策無しでは太陽光発電の 1270kW の導入で電圧違反が発生することがわかりました。このような配電線だけに限らず、電圧や電流の対策をとらなければ、配電系統に大量の太陽光発電を導入することができない事例が出てくることを示しています。

逆潮流と電圧変動

このスライドでは太陽光発電からの逆潮流が著しくなると、配電系統の電圧の変化が様変わりする様子を示しています。これは実際の発配電系統で測定した事例です。上の配電線は太陽光発電が 4500kW 導入されていて、太陽光側と配電用変電所側にセンサー内蔵開閉器を設置して、電圧を測定した結果を示しています。

右の図が測定結果で、横軸が時間、縦軸が電圧で、黒い線が変電所側の電圧、赤い線が太陽光側の電圧です。昼間にたくさん逆潮流しますがその時間帯で太陽光側の電圧が上がることが分かります。これは一般的に逆潮流によって電圧が上昇すると言われている現象になります。

一方で、下の別の配電線では、太陽光発電が合計で 8000kW 入っていて、同じようにセンサー内臓開閉器で測定した結果が右の図です。黒い線の変電所側の電圧よりも逆潮流が発生する昼間に、赤い線の

太陽光側の電圧が低下していることがわかります。

このような電圧低下は、逆潮流が著しい場合に配電線の無効電力損失に起因して起こる現象であることが知られています。逆潮流の大きさによっては、電圧が上がったり下がったりすることを示しており、電圧変化が複雑になることを示しています。

電圧不平衡の拡大

電圧不平衡の問題も起きてきます。これも、太陽光発電が 7000kW 入った配電線で実際に測定した結果です。右の上の図は各相で線電流を測った結果です。昼間にたくさん逆潮流をしていて、各相の線電流が少しだけ異なっていることがわかります。下の図は、このときの電圧を測った結果で、緑の線、緑の相と赤と青の相があるんですが、ここの差が高圧の線間で 200 ボルト以上の不平衡になっていることがわかります。このような現象を詳しく分析するために配電系統の計算機シミュレーションを行ったところ、このような現象を再現するためには、現場の配電線の相順を正しく模擬することでこのような不平衡を模擬できることがわかりました。すなわち配電系統レベルであっても相管理をしないと、電圧管理に影響を及ぼす可能性があることを示していると思います。

技術者不足

送配電分野の変化に伴って技術者不足も問題になっていると思います。例えば、電気保安人材は将来的に不足することが指摘されています。

再エネ発電設備の増加、また現在従事されている電気主任技術者の高齢化に伴うもので、2030 年度断面で第 2 種および第 3 種電気主任技術者がそれぞれ 1000 人前後不足すると言われています。電気保安分野だけではなく電力業界全体でも技術者が不足する恐れがいろいろなところで懸念されていると思います。

私、大学に所属していますので、学生に目を向けますと、現在の就活は非常に学生が売り手市場になっていて、いろんなところに就職できる状態になっています。しかし、離職率が高いとか、あと大学入学の時点では電気系の人気がなくて、私もちゃんと頑張らなければいけないと思っているのですが、将来的に電力業界に携わる人間が減ってしまうことを何とかしなければいけない状態だと思います。

次世代型電力 NW の絵姿（送配電網協議会）

以上に示すように、送配電分野では様々な変化が生じていて、それに対応するために送配電分野の次世代化が様々な機関で検討されています。このスライドは送配電網協議会さんが書かれたロードマップを示しています。大きく分けて再エネ主力電源化に向けた系統整備、需給調整・系統安定化技術の高度化、系統混雑への対応、遠隔分散型グリッドにおける再エネ比率向上の 4 分野について書かれていて、それぞれの課題に対して具体的なロードマップが示されています。

大切なのは、一気に全部新しいものに変えることができない、変わるときには部分的に、段階的に変わっていかなければいけないことだと思います。

段階的移行のためのキー技術・キーシステム技術

この EAJ のプロジェクトにおきましても、送配電分野の段階的な移行のためのキー技術、キーシステム技術を取りまとめようとしています。

キー技術として、いくつかいろいろ書いてありますが、例えば直流送電や送電線の運用量拡大であるとか、キーシステム技術に関しては状態監視推定の高度化、シミュレーション技術などいろいろ挙げています。一つ一つの内容については時間の関係上ここでは触れませんが、NEDO などの国プロジェクトや様々な研究機関での研究開発が進んでいる内容だと思います。これらの中からいくつか例についてお話したいと思います。

系統整備

まず、系統整備の内容です。広域連携系統のマスタープランは、2050 年カーボンニュートラル実現を見据えて、将来の広域連系系統の具体的な絵姿を示す長期展望と、あとこれを具体化する取り組みをまとめたものとして示されています。再エネ電源の増加を想定して将来の潮流を分析して、混雑系統を抽出して地内と連携線の増強案を提案していると思います。

また大規模蓄電所の設置も系統整備の一つと考えることができるのではないかと思います。この写真は南オーストラリア州のホンズデールに導入された大規模蓄電所でして、出力が 150MW です。これは電気新聞などで読んだ話なので詳細については把握してないのですけど、グリットフォーミングインバーターであるということと、あとオーストラリアの電力市場を運営する機関によって慣性力を提供できることを認定され

たというふうに書かれていました。
将来的には日本でもこのような設備が導入されることが考えられていくのではないかなと思います。

混雑への対応

次は送電線混雑解消の話になります。先に述べた送配電分野の変化のところで送電線の混雑が発生するというお話をしましたが、日本では 2023 年の 12 月に再給電方式を導入しました。これが全国で初めて東京電力パワーグリッドさんのエリアで 2025 年の 1 月 6 日に実施されたそうです。
1 月は冬だから寒いはずなのですけど気温が 17 度超えたようでして、暖房需要があまり伸びなかったようです。変電所に繋がる火力発電所が計画通りに稼働した結果変電所に潮流が集中したため混雑処理を行ったと書かれていました。
このときは火力発電所の出力を下げて、他地点の電源を上げる調整をして需給バランスを確保したと電気新聞などに記載がありました。このような混雑解消は今後も様々なところで起こると思います。

配電系統の設備形成

次は配電系統の設備形成に関する話です。太陽光発電の導入可能量を増大させるためには、配電網では線の太線化や、無効電力制御装置の導入などが考えられます。一般的に配電線は末端にいくほど線が細くなりますので、これを太線化することで太陽光発電の導入量拡大を図ることができるのですが、必ず配電線工事が必要になります。
無効電力制御装置で定電圧制御することで導入を拡大することが考えられると思うのですが、これも STATCOM などの設備導入が必要になり、ある程度コストがかかります。
さらに太陽光発電の導入可能量を増やすための方法として、配電線の部分的な昇圧が考えられると思います。この絵では配電用変電所の 2 次側と配電線の幹線を 20kV、あるいは 30kV に昇圧して配電塔を介して 6.6kV で電力を供給する絵を描いています。この供給形式自体は九州電力さんとか関西電力さんのエリアで使われている供給方式だと思うのですが、太陽光発電の大量導入を目的として昇圧するという考え方になります。

ホスティングキャパシティと配電損失

これらの対策をとった場合にどれぐらい太陽光発電の導入が増えるのかを 10 年前ぐらいに計算しました。横軸方向に太陽光発電導入拡大のための工事方法をいろいろ書いています。縦軸方向にホスティングキャパシティとあと配電損失を記載しています。右端に部分昇圧したときの結果があり、部分昇圧によってホスティングキャパシティは大幅に増加しますが、損失はそんなに増加しないので、電気的には非常にいいところがいっぱいありそうです。ですが、10 年前の学会で喋ったときに、すごくコストがかかるんじゃないかとか、なんで 20kV に電圧上げなきゃいけないんだとか、いろんな人に言われて、そういう問題もあるのではないかと思っています。

系統制御の高度化

無効電力制御装置もホスティングキャパシティの増加に貢献しますが、計算するとやはり損失が非常に大きくなる結果が得られています。ですので、配電設備側だけでの対策ではどうしてもコストがかかってしまうので、インバータ側の対策も併用するのが良いと考えています。
ここではインバータ側の対策として太陽光発電用の PCS に Volt-Var 制御を適用して配電系統のホスティングキャパシティの増加を計算した結果を示します。Volt-Var 制御を低圧の PCS と高圧の PCS に適用して、電圧上昇時に電圧を低下させるように無効電力を制御することで電圧の違反を解消し、どれぐらい太陽光発電の導入量を増やすことができるかという計算をしてみました。

Volt-Var 制御の適用

ここでもクレスト 126 配電性モデルを使って検討しました。ここに示す配電線で計算すると、Volt-Var 制御無しではホスティングキャパシティは 1270kW だったのに対し、Volt-Var 制御を全ての PCS に適用することで 6125kW まで増やすことができる計算結果が得られました。
同じような検討を、この配電線以外の 35 個の配電線モデルに適用して、少し乱暴な計算ですが、配電系統モデルの電力需要と、あと都道府県別電力消費量の需要などから、全国の配電系統に導入可能な太陽光発電の容量を拡大推計してみました。その結果、Volt-Var 制御無しでは 76GW であるのに対し、Volt-Var 制御を適用するだけで 96GW に増やせるという計算結果が得られました。このように太陽光発電に Volt-Var 制御を適用するだけで、太陽光発電の導入容量を飛躍的に増加できるのですが、このことは逆潮流する電力量が増えることも意味しています。

Volt-Var 制御／デマンドレスポンスの適用

この絵は配電線の負荷需要と全PV出力のカーブを書いた結果です。昼間にたくさん逆潮流をするので配電系統から上位系統に電力を供給することになります。結果としてエネルギーシステム全体の再エネ電源構成比向上に貢献できるというふうに考えられるかなと思います。

実際は配電系統だけでいろんなことをしようと思うと、多分難しい問題があって上の系統でどういうふうに需給を合わせるかまで考えなければいけないと思いますが、こういう効果があるのではないかなというふうに考えます。

マイクログリッド化

地域マイクログリッドも送配電分野の次世代化の姿の一つと思います。地域マイクログリッドは、大規模な災害などが発生したときに停電してしまったときに、独立系統化して自律的に運用することで、限定的なエリアになるかもしれないですけど、電力を供給することができるシステムです。

エネルギーマネジメント、インバータのブラックスタート、短絡、地絡の検出など様々な課題があると思いますが、これらはNEDOの事業であるとか様々な研究機関で研究開発が進められていると思います。

日本はマイクログリッドの研究がとても進んでいると思いますが、マイクログリッドが実際に発動した事例も報告されています。宮古島の来間島で昨年の4月に訓練ではなくて実際の停電が発生して、そのときにマイクログリッドを発動させることで早期の仮復旧が実現しました。

スマート保安

人材不足に対応するための保安のスマート化というものも、次世代の送配電分野の姿の一つと思います。課題のところで述べましたが、設備の高経年化、再エネ発電設備の増加あと電気保安人材の高齢化、電気保安分野への入職者の減少、これらの課題を解決するために、今IoTとかAIドローンなどを活用して、電気の保安力維持向上、すなわち電気保安のスマート化というものが図られています。

ただAIというのはとても便利なのですけど、全てをAIに置き換えていくと、置き換えた後に保安力が低下してしまう状況が起きてしまうと全く意味がありません。現在の保安力を維持することをどのように評価するのかが一つのポイントであると思っています。

以上でこの講演は終わりになりますが、少し散らかった内容になってしまったかなと私自身まとめて思っております。ただ、送配電の分野はとても広くて、やれることも多岐に渡ると思います。ですので、未来に向けて夢を持てるような技術を作っていけるように、頑張らなければいけないと思いまして、自分を戒めて、これで終わりたいと思います。どうもありがとうございました。

（城石）

飯岡先生ありがとうございました。次のパネル討論にうまく繋がるように幅広いご講演を頂きました。これで前半のご講演を終了させていただき、後半のパネル討論に向けて10分休憩させていただきます。

本日のパネル討論では、熱い想いの中村先生の開会のご挨拶と、荻本先生の非常に深い知見を込めたプロジェクトの進め方ということで、電力システム移行期におけますキー技術、キーシステム技術、それから今のお話にもございました人材の獲得と育成という問題についても、幅広く議論していただけたらというふうに思います。

パネル討論1 キー技術とキーシステム技術

（荻本PL（以下PL））

後半は二つパネル討論を行います。では早速、第一のパネル討論のモデレータの蘆立さんにお願いいたします。

進め方

（蘆立（以下モデレータ１））

それではこのパネルディスカッションその 1 をスタートしたいと思います。最初に三つの論点です。事前に今日ご登壇いただく先生方には、三つの論点ということでお示ししています。先ほどご登壇いただいた先生方には既にご発表いただきましたが、一つ目はこれからの電力システムのキー技術とは、二つ目はこれからの電力システムに不可欠なシステム技術とは、それから三つ目は、段階的な移行期の中でキー技術とシステム技術をどのように電力システムに組み入れていけば良いのかという点です。結構難しい課題ですが、今日はこれについて思いの丈をお話しいただきたいと思っております。

それでは私の左側の参加者1から、3 分ほどでご披露いただければと思いますよろしくお願いします。

需要

（参加者１）

はい。先ほどもお話しましたように需要側ということで大規模な DR は、基本的には下げ方向だと思うのですが、だいぶ現実的に入ってきたと思います。ただ、今後は、蓄電池のようなものがどのぐらい増えるかが一つ大きな鍵だと思いますし、それをうまく運用できることが重要な技術だと思います。それに加えて先ほど申しましたこれから需要側で増えてくるヒートポンプ給湯器、電気自動車、できればここをしっかり、特に EV に関しては充放電まで含めて何とか系統に入れていけるようにしていくことが、将来的な再生可能エネルギー増加に向けて非常に私は重要だと思っています。

そういう意味で、DR レディ、あらかじめ機器に柔軟性を活用できるよう外部からの制御を可能とするような仕組みを入れていくことで、機器が増えることで段階的に調整できる機器も増えていくことが、段階的な移行という意味でも重要だと思いますし、今のアメリカの動向もあって特にその環境の面で3E のうちの Environment に関して少し後ろ向きといいますか、以前ほど前向き、イケイケになっていない感じもします。

となると、どの技術オプションを取るのがいいかが分からなくなっていると思います。これから再生可能エネルギーが 50%、60%入ることを前提にできるのであれば、他の対策もどんどん進めていけるかもしれないですが、実際そんなに進まない可能性もあるわけです。考えますと、例えば大きな送電線をたくさん張り巡らすなどコストのかかるものよりは、だんだん増えていく需要をうまく使っていくことが、マネジメントという意味でも、後悔のないオプションではないかと私は思います。それで、需要に合わせてマネジメントも一緒にしていく方向が、トランジションという意味でも費用対効果を考えると望ましいのではないかと思っております。以上です。

従来電源

（もデーレータ１）

ありがとうございました。続きまして参加者2お願いします。

（参加者２）

キー技術とキーシステム技術ということで先ほど少しスライドでも講演の際に触れましたが、まずはカーボンニュートラルの達成に向けて、燃料を脱炭素化していく根本的な技術開発はまず必要で、この辺が一つのキー技術になると思っています。この分野は、技術的には可能でも経済性が成立するはまた課題であると思いますし、低コスト化効率化は絶えることのない多分必要なキー技術であると思っております。

また発電機自体の能力拡大ということで、先ほど調整力のコンテキストでお話をしましたが、出力調整の幅をさらにどのくらい拡大できるのについては、主に最低出力の引き下げがポイントになると思います。あとは能力の速度の面など、こういったところをいかに改善していくかがキー技術としてあるものの、これらのポイントは、カーボンニュートラル云々っていう話が話題に上がる前から、メーカーさんを含め切磋琢磨して技術開発を進められてきた結果として、現状があると思っていて、これらを大きく変えられるような動きが出てくればもちろんいいのですが、なかなかそれは難しいと素直なところとして思っています。

あとはシステム技術という観点で、何が当たるかと考えていたのですが、トランジションも含め、もし在来型の電源というものが採算性の確保も含めて今後難しいということであるならば、そこを今動いている市場の中でどのように使えるような形で制度を組んでいくのか、あるいは今日“暴れてもいい”という話だったので、変な話、市場の制度から従来電源を外すことも含めて、総論で議論しておかないと、系統の安定性を効率的に担保することができないかもしれないとも思っております。

その辺を含めて広く議論することが必要であろうと思っています。以上でございます。

太陽光発

（モデレータ１）

はい、ありがとうございました。

続きまして参加者3、自己紹介含めてよろしくお願いします。

（参加者３）

はい。私の専門は太陽光発電ですので、さっき紺谷さんからは風力の方を中心に一部太陽光にも関係するところをお話いただきましたけど、私からも太陽光を中心にお話したいと思います。スライドをお願いします。

CN に向けた電力システムに求められるもの

太陽光の役割としてはkWhをいかに安く提供できるかとところが第一番の前提になると思っています。それはまずはシステムの統合コストを無視したところで資本費をいかに下げるかをまずは目指さなければいけないと。その次にフレキシビリティをいかに供給できるかは、段階的にはなると思います。例えば大量に余るよりも少し手前の段階からやっていく必要があると思っています。

あと3番目は先ほど原先生でしたか、最エネは比較的短期に導入できるという話もありました。そういった分散電源として部分的に入れていくこともできると思いますし、場合によっては人口減でどっか配電を撤退しなくてはならないことも出てくると思いますので、そういったことで機動力のある分散電源としての役割、もちろんレジリエンスの話も十分あると思いますが、そういった観点を考えているということです。

CN な低廉エネルギー供給

次お願いします。それで冒頭ですので簡単にだけ考えていることは、一つはどうやって安く入れるかで、今の段階で言うと、太陽光を日本はどこに入れるかが一番重要と思っています。まずは建物を中心に入れてくことですが、それで本当に足りるのか。ポテンシャル的には 400GW とかありますので、場合によっては非住宅だけでも、住宅だけでいけるのかもしれません。しかし、十分でなければ再び地域共生の中で土地を開発しながら導入しなくてはならない。それにもう行っている使用料が安くできるのか、O&M とか人材不足の中でできるのかなどを、太陽光としてはちゃんとやらなきゃいけないと思っています。

段階的に入れるというのはまさにどこに入れるかですので、場合によってはその土地の利用政策をどんどん余ってくる土地を太陽光に変えていって、今の段階で、この瞬間、口が裂けても言えないような地域の状況ですけれども、将来的には本来はそういったことも考えて、このエリアは太陽光だけとか、そういったことも考えていく必要があり、それによってコストも下げられる可能性があるということです。

フレキシビリティの供給

フレキシビリティに関しては、太陽光に関しては基本的に出しっぱなしになるので、いかに予測できるかがキーになると思っています。残念ながら前日の予測としてメインで運用に使われている予測手法では、なかなか予測誤差下げられない状況です。先ほど紺谷さんからもありましたように、もうちょっと直近でフレキシビリティ、太陽光じゃなくて他のものも瞬間的にできて十分短時間の予測であれば、ある程度の確実性でできると。そういったことも期待できるしやらなきゃいけない。これは太陽光全体やらなきゃいけない事だと思っています。

あとは先ほどありました GFM とかです。また太陽光オンリーでどこまでやるかはありますが、事前に出力を下げて上げ調整力を出すこと、先ほどの kWh をしっかりと出すことと若干トレードオフはありますが、それらの技術も必要と思っています。

あとは慣らし効果っていうか、多数をどう群として管理するかは、変動の話も、先ほどの O&Mも、ちっちゃいものを 1 台毎に誰かが管理するのは効率的ではないと思います。フレキシビリティと先ほどいわゆるLEOE を下げる段階では群として扱う必要があると思っています。

あとは、グリッドコードは早くやっぱりやってほしい。太陽光どんどん入れて、場合によってはファームウェアで書き換えできるかもしれませんが、一旦入ったものをレトロフィットするのは非常に大変で、既に結構入っています。このため、機能はしっかり実装してそれをどうマネタイズするかについて、ルールは段階的に整備していただくのがよいと思っています。

分散電源としての役割

次お願いいたします。あとは分散電源の話です。これは太陽光だけでやるのは非常に難しいですので、エネルギーストレージ、これ何でもいいわけですが、そこに期待するしかないかなと思います。

特定事業とのセットで自立していく、これは完全に自立するパターンとマイクログリッド的に段階的にやるパターンはあるますが、そういったこともあると思いますし、場合によってはユニバーサルサービスの中で、分散電源システムを部分的にやって、その場合はそこにお金の価値をつけるのは難しいので、ルールとのセットでやっていかなきゃいけないと思っています。2030 で 100GW はグリッドに連系すると思うのですが、2040、例えば 400GW とか 300GW 導入すると、連系はどうしても厳しくなと思います。そういったところと、あとは一番太陽光で考える必要があるのは事業者がものすごいいっぱいいるので、それを自由経済の中で入れてくのかは非常に議論があると思います。そういったことが議論できるといいかなと。ちょっと長くなりました。

パワエレ

（モデレータ１）

ありがとうございました。続きまして、東京大学馬場先生お願いいたします。

（参加者４）

はい、ありがとうございます私はちょっと先ほどキー技術とかその辺は話をさせていただきましたので、ちょっとパネルディッシュディスカッション向けの議論の形で考えてみたことをお話しします。

コモディティ化のもとでの協調

まずパワエレ機器による連系はこれからも進むということで、パワエレ機器のコモディティ化、もう現在でも太陽光の連系インバータは既にコモディティ化していて、価格競争の状態になったということであります。そういった意味で、低価格化重要であると思います。

あと系統運用との協調はこれからよく考えていかないと多分大変だということは先ほどお話させていただきました。今までの考え方は、系統側で何かあったらインバータは切れてくれということでしたが、最近だと何かあっても可能な限り運転を継続してほしいということで、求められるファンクションが変わってきつつあるということです。そういったところで FRT ですとか GFM、それから Volt-Var 制御、F-Watt 制御などいろんなものが入ってくる状況です。ですが、そういった機能を具現化するためには、今までですと過電流なんか流さない、俺の持っている能力だけで勝負するという考え方に対し、場合によっては同期器が持っている、ちょっとした過電流耐量も入れてもらえるといいと思っていますし、その過電流対応をどう考えるのかも最近議論になっていることであります。

もちろん元々の容量をでかく作れば過負荷耐量にはなりますが、それでは経済性が成り立たないので、どう低価格化するかも一つ課題ではないかということです。

それから 3 点目です。これ系統への評価、影響をどう評価し、対策を講じるのか、これも先ほどお話させていただきました。モデルやシミュレーション手法をどう考えていくのかは、非常に大きな問題であるということです。ただ、これはどちらかというと、TSO など系統を運用していく側の視点ですが、もう一方でパワエレ機器を作る方の視点もあるかなということで、そういったような方に対してこう作ってくれ、ここではこういうような形でやってくれっていうことは、多分先ほどのコモディティ化のもとではなかなか難しい。そうなってくると。型式認証の形になってくるわけで、そうすると、どう試験をして規定を作り、認証するのか、そういったところが問題になってくると思います。

詳細シミュレーションと妥協

次のスライドお願いします。ここは“暴れてもいい”ということで、ちょっと暴言吐かせていただきますが、全ての変換機をモデル化した詳細シミュレーションによって安定性の判定とパラメータを調整するのはなかなか難しいということで、エンジニアリングの視点からはどこかで妥協が必要だということも、最近思っていることです。

私なんかもアカデミアの人間ということで、100%安定となる条件を出したいと思うのですが、現実問題を考えると、それを実現するのを社会全体に求め、社会に実装するのは難しいのかなということです。

どうやって妥協するのかということなのですけど、昔から変換器と系統側のそのインタラクションで課題になっていたのが高調波の問題です。高調波の場合は EMC という電磁両立性という考え方で、それは系統側と高調波源の側で守るべき規定を制定して 100%は無理だけども問題を解決していこうという、ある意味妥協の産物の形で今では決まっているルールです。

ただ高調波規制も、最近インバータが増えてきて、このやり方が成り立つのかは疑問があるところであって、規定を満たしていても実は問題が発生していて、そのためにリバイスを繰り返しているということなのですけれども、もしかしたら同様な考え方をこの変換器の安定性の分野でも適用していかなくちゃいけないのかということで、その中で一つ最近話題になっているシステムストレングスの概念が、もしかしたら系統側ではシステムストレングスがこれぐらいと言ったときに、変換機側が変化しへんてこりんな動きをしないようにすることを決めるやり方があるのかもしれません。この辺のところはまた議論と、それから研究を進めていくのだと思っているところです。以上です。

送配電

（モデレータ１）

ありがとうございました。続きまして、関西電力送配電株式会社山本様、よろしくお願いします

（参加者 5）

はい。私、系統運用の出身でございまして、系統保護、それから監視制御いった分野を経験しており、東日本震災以降、需給対策や新しい需給調整市場などを担当しています。また、広域機関におきましても需給調整市場の制度設計とかを担当した者です。スライドを進めてください。

起こりつつある変化

1 ページの「世界観が変わっていく」というのはよく言われている話ですので、説明は割愛して 2 ページをお願いします。先ほど飯岡先生のプレゼンでもありましたが、インバータ電源が増え、需要も制御できるようになり、電力が双方向のやり取りになり、運用というよりは市場で役割が決まるということで、蓄電もできて、タイムシフトができるようになる。それから混雑もローカルでも発生していくということで、マクロで管理していたものからマーケットベースでミクロに管理してく。送配電はこんな世界に変わっていくということでございます。

第 7 次エネ基を受けて

次のスライドお願いします。エネ基で再エネ比率、カーボンニュートラル比率が 4～5 割と言われていますけれども、右の図は、南オーストラリアの需給シミュレーションを表しており、黄色が太陽光、緑が風力で、真中の辺り見ていただくと 1 日中カーボンニュートラル電源だけで賄っている日があるということです。オーストラリアは太陽光、ルーフトップも多いところで、日本に似ていると思うのですが、これで年間のシェアは 4 割ないぐらいということです。

ということは、我々どういう世界の運用を目指していくのかということで、先ほどのページの右か左かという話もかなり右にいかざるを得ない、そうじゃないと運用もままならないというところです。非常に大きなチャレンジだと思っています。

作業員の減

次のページお願いします。2050 年には日本の労働人口は 3 分の 2 に減ると言われております。高度成長期から我々も設備投資が減り、労働人口も減っていて、今やもう現場で働いていただいている方も 50 歳以上が半分以上の状況で、新しい人が入ってきていないことになります。ここに人をどう入れて、このベースの仕事をどう回していくのかは、大きな課題だと思っています。

システムストレングスと状態推定

次のページお願いします。もう 1 ページお願いします。一番上が先ほどのプレゼンでもありました再エネ、蓄電池、DR、それから分散電源から直流変換器にも制御系があると思っています。こういった中で同期機が減り、調相器などを入れる必要があるかもしれませんが、今言えるのはインバータ電源が増えていくという世界です。これを図の真ん中のネットワークは交流で繋いでいくので何か事故があったときに、電圧・周波数を維持していくことを考えると、馬場先生のプレゼンにもあったグリッドフォーミング技術とかいろんな技術が必要となるわけです。しかし、元々強い系統を前提に考えられていたのですが、どこに境目があるのか、その強さの度合いをどう測っていくのかは、まだまだこれからだと思います。どこか境目を超えつつあるということから、海外は先に進んでいるだろうと思っています。

こういったところをどう観測していくのかは技術的に課題かなと思っていますし、インバータ電源を交流系統の中でどう使い、我々送配電としましては、いろんな電源が集まる中で全体をどう繋ぎ、全体をどううまく運用していけるのかに大きなチャレンジがあると思っています。

送配電分野のデータと分析

それから、先ほど労働人口が減るという話に関連して、図の一番下の人のところに書いてあるように、人口が減る中で従来の設備を維持し、それからシステムを作り維持するためには、ロボットや AI などの現場を支える技術も必要になると思います。それからシステムという意味では、どのフェーズもそうですが運用のデータ、市場価格のデータ、設備保全のデータなど非常に大きなデータを今後は処理していくことになると思います。これらのデータを集めて、分析・解析をし、そこからより効率的なもの、もしくはマーケットに対するシグナルを出していくとか、こういうシステムでは、IT と OT の境目がだんだんなくなり、人をロボット・AI が支えながら、もしくはこういったシステムを介して、いろんなプレイヤーが繋がっていくという世界になっていくと思っています。

そういった世界に移っていくにあたっては、今まで私ども送配電は、どうしても電力設備、ハードの技術者が多かったんですけれども、それに加えて、やっぱりソフト、分析などができる技術者が必要になってくる

と思っています。
最後に、こういった技術の導入にあたっては、どうしてもファイナンスが大事だと思っています。再エネを入れていくに当たっては海外では系統の投資が増えて、一方燃料費が減り、合計の費用は減るというシミュレーションによるコンセンサスがあって進めているということですが、送配電投資は、カーボンニュートラルに向かうにあたって、本当に増えてもいいのか、そこまで合意がないと、なかなか設備投資に踏み切っていけないところもあります。実際、参入されるいろんなプレイヤーの方も、そこに自信がなければなかなか投資も進まないと思います。お金がきちっと回る制度設計ができることが、非常に重要と思っています。
以上でございます。

配電

（モデレータ１）

はい、ありがとうございました。それでは茨参加者6、よろしくお願いいたします。

（参加者６）

略歴

はい皆さんこんにちは。スライドの次のページをお願いします。自己紹介をということでしたので、略歴も作りました。茨城大学を退職しても既に 18 年なります。
こんな老人がここで喋らなくても若い方がいいのではないかと思って PL にご相談したら、このプロジェクトの会合がこれまで何回かあり、そこで喋っているようなことを喋ってほしいということで、今回出てきている次第です。私のお話ししたいことは、既に先ほど飯岡先生と馬場先生が大体話されていたました。

エネルギー需給の見通し

同じことになるかもしれませんが、復習のため、次のページお願いします。これは、経産省のエネルギー需給見通しのデータで、2040 年に全電気エネルギーの 4 割から 5 割が再エネであることを示しています。
利用率、設備の利用率考えて、kW の方に直すと、250GW ぐらいでしょうか、ピーク需要の 2 倍ぐらいになります。そうすると、多分配電の熱容量を超えるだろうというのが私の予想です。

新しい送配電システムへの移行

時間がないので飛ばしまして、その次お願いします。
この図は、いつも私の説明に使っているので、またこの数かと思われる方もいらっしゃるかもしれません。現在の送電系統は遠方にある大型の発電設備から需要地まで電力を持ってくるために、長距離大容量の送電線にお金かけているのですが、2040 年になると、再エネそれも分散型電源で地産地消に近くなり、その余った分を、実は配電線を逆潮流する形になると予想されます。もう一つ、配電線の容量に影響を与えそうなのが EV の充電で、例えば国道沿いに配電線が走っていると、そこに EV の急速充電所が順番に並んでいたら、その配線線は持つのか、ということもあります。配電線の容量が逆潮流で不足し、負荷でも不足することも考えられる、ということです。それでローカル系統に多分お金かけていく必要があると思いますが、右下に書いているように一番簡単なのは昇圧です。22kV にすれば 3 倍ぐらい流せますので、ほとんど問題はなくなるのですが、お金かかります。
どうせ昇圧するために配電線を変えるのなら、先ほど GFM インバータのお話であったように単独運転検出とは相性が悪い装置ですので、保護方式そのものも変えるのがいいのではないかと。
今の配電線は、通信障害のために非接地になっているのですが、もうちょっと早く禁止するためには、抵抗接地とか接地系も見直して、保護方式そのものを丸ごと変えることもありえますよね。
今の配電系統はもう 50 年以上経っていますから、新しい配電系統に見直していくのも一つの考え方かなということです。以上ですが、次の終わりのスライドを出して下さい。これ、私、絵を描けないので Microsoft の Copilot に絵を描かせたもので、2040 年の配電線は道路で言えば自動車があふれるぐらい、電気がもうこれ以上通ないというところに来ているだろうということです。これを、「未来の混雑の無い道路を描いてください」と言って描いてくれたのが右下です。私はこんな絵ではなくて、配電線は地中化した方がいいと思っているのですが、こうするためにいろいろ考えていかなきゃいけない。
先ほどの保護もそうですし、それから、これいっぺんにやるのもお金かかりますので、どういう手順で何からどうしていくのか、というところが非常に問題だと思いますので、その辺の議論は必要ではないかと思っております。
以上でございます。どうも、ありがとうございました。

進め方

（モデレータ１）

はい。ありがとうございました。

それではこれからパネル討論です。事前に打ち合わせは何もしていませんので、これからのそれぞれ思いの丈をお話しいただきたいと思います。

私の方から、ちょっと抽象的な話で申し訳ありませんが、ご覧の通りカーボンニュートラルの実現が最終ゴールとなっています。となると、よく議論が出るのですが、電気事業の公益の範囲はどこまでかという議論も結構重要と思っています。よく公益の最大化といえば安定供給の堅持と脱炭素のコスト増の要因のある中で、できる限りコストを抑制して、需要家にとってメリットのあるサービスを創出できる環境を整備すること、そのように言われています。これはこれでご尤もですが、トランジションの時期であるので、やはり通常とは違う。トランジションをどう考えるかもまた大事なところと思っています。

そのためには、この後の話にも出るかもしれませんが、明確なビジョンが必要かなと。一応電源の構成などが出ていますが、やはりビジョンが必要と思います。それから技術的根拠に基づく現実的な目標をそれに基づいて落とし込む。そのためには経済基盤、業界構造、技術の進展、あと国民負担とかを考えていく必要がある。系統という話が出ましたが、これを組み替えるとお金かかります。ここをどう考えるかという話になります。ご案内の通り、過度な国の支援、それから過度な国民負担は経済的に自立できなくてサステナブルではなくなるのでここが難しいところと思っています。その上でコストですよね。それから安定供給を実現して、それから、ロードマップがやっぱり必要という話が、この EAJ の議論の中でも出ています。外国では結構ロードマップを作成し、アップデートされているようです。PL からもあとお話あるかもしれませんけど、その辺を日本でもしっかりやっていく必要があると思っています。

技術の組み入れにあたっては、特に本プロジェクトの方針では、技術的根拠に基づく実現可能なものを対象とすると言い切っていいと思います。技術ニュートラルにより、導入技術の包摂性を担保してはどうかというのがこのプロジェクトの意味合いです。

その上でルール化、国際標準化とかグリッドコード、システム運用などを考えていくと、計画的に導入を進めて世界を巻き込むとか、あるいは技術の一早い社会実装、これは実証試験ではなくて実装を。それをオールジャパンでという話はよくありますが、なかなかこれは難しいのかなと思っております。

今日の話をどうもお聞きしますと、コストに入いると話しが終わってしまうような気がしますので、系統の話が重要と思いました。ストレングス、強い系統の話だとか、いくつかのキーワードがありました。それに伴って、データが必要な話も出てきました。どの辺からお話をしようかなと思いますが、まず先ほど保護方式の話が奈良先生からお話しがありました。もう少しそれについて詳しく説明いただいてもよろしいでしょうか？

保護方式

（参加者６）

はい。今の配電系統は、常時開放型ループ配電系ということは、皆さんご存知だと思います。配電系統で事故があったら順送方式で事故点を検出して、復旧していく方式です。これは配電系に電源がなければとても良い方式で、私も最初素晴らしいなと思いこのテーマで私もだいぶ論文を書かせていただき、いろんなことを考えることができていいなと思っていましたが、電源が入ってくると非常に厄介になってきます。

それで事故後は一旦電源を全部落とすために、単独運転検出を全電源に入れることになりました。ただ、電圧型の電源ではこれはなかなか難しい。今は逆潮が配電系の場合許されてない。高圧になるといいのかもしれませんが、低圧の場合許されてないのだと思いますが、そういうことです。非常に保護が難しいのです。これから先、従来の GFL 型と呼ばれる今の電流型のインバータだけではうまく運転できないことがあるということで、GFM 型の電圧型のインバータがたくさん入っている。そうすると、配電線の保護、ひいては配電性能を全面的に見直す必要があるということで申し上げた次第です。こんなことでよろしいでしょうか？

（モデレータ１）

はい。ありがとうございます。全面的に見直すとなると、設備形成の立場から言うと、参加者5、どうなりますでしょうか？

（参加者５）

はい、参加者6のおっしゃっていることはまさにその通りです。元々電源が少数派のときには何とかしのいでいたのですが、カーボンニュートラルにぐっと舵を切り、電源が増えてきたときに行き詰まっているのは、まさにその通りです。保護方式を変えるというのも、変電所側だけではなくて、お客様側のリレーも対象で、

通信線への誘導電流もまだ残っていますのでその対策も必要です。かなり大がかりな投資が同時に必要ということで、50Hz、60Hz の統一まではいかないかもしれませんが、結構大きな投資になることは非常に悩ましいと思っています。そういった中、通信技術も発達しているので、例えば遠隔制御をする方法もあるかもしれません。何か模索は必要と思っていますが、方式をガラッと変えるのも、段階的に変えるのもなかなか難しいため、非常に難しい問題だと思っています。分散電源の導入を受け止めながら、設備の維持をしっかりやっていくのは非常に難しい問題だと思っておいます。すいません、あまり明確な答えにはなってないですけど。

（モデレータ１）

すいません。お聞きにくいところです。とは言うものの例えばこの地域だけそれを導入せよという国からの指示があれば対応できるものでしょうか？

（参加者５）

レジリエンスとも言われています。系統の配電系統の末端では隣の系統と繋がっていることで停電時間を回避している面がありますので、そういったところを考えるとなかなか難しいのですが、郡部の方から変えていくことはできるかもしれません。マイクログリッドになっているような小さいところは変えられるかもしれませんし、少しずつでも新しいところは新しい方式に変えていくのも一つの方法としてはあるかもしれません。技術的な抜け漏れはあるかもしれませんけれども。

（モデレータ１）

ありがとうございます。となると、参加者4、いかがでしょうか？

（参加者４）

はい、ありがとうございます。電力変換器による電力供給が増えてくると保護が結構いろいろ課題になってきます。分散型電源一般でもそうですし、先ほど来申し上げている通り現在の変換機の制御は GFL、電流限的な動きをすることで、実は事故が起こっても短絡電流が多分増えないことになっていて、事故検出がかなり難しくなるだろうと言われています。そのため、GFM を入れると電圧源的に動くからうまくいくのではないかという話もありますが、これもまた先ほど申し上げた通り変換器は自分を守るために何か起こって過電流が流れようとするとそれを抑え込む制御系が必ず入っています。このため、事故が起こったときの電流も増えないため、検出がかなり難しくなっていて、今は NEDO プロでもただ単に電流増加を見るのではなく、電圧を含めるなどの何か新たな検出手法を使ってマイクログリッドの中で事故を捉えることが試みられています。

そういった中で、変換器そのものでの対処だけではこの問題って解決できないだろうということで、システム的な対応が絶対これ必要になってきます。一つは、これからは通信線とかで繋がるので、そこから信号を受けて先ほどお話ありました転送遮断する話も入ってくると思いますが、そのコストをどう考えるかはなかなか難しいところで、どう解決したらいいのかはなかなかわからない。そんな中で変換器の方にも少しだけ頑張って少しだけでもいいから事故電流を出してほしいという話もあって、先ほど申し上げた過電流対応の話もさせていただきましたが、これまたどうすればいいのか難しいところです。またコストの話になるのであまり言いませんが、技術的にもかなり難しい面があると認識しています。

グリッドコード

（モデレータ１）

この話に続けて、そうするとグリッドコードについては今度、参加者3、いかがでしょうか。

（参加者３）

ありがとうございます、今は配電の話だったので、例えば太陽光は住宅用だけで 10GW ぐらい入っていて、ポテンシャルは 200GW ぐらいあって、どこまで入れるかというのは住宅用に関してはあり、他方、住宅用の方が多分経済的には入れやすい領域にある。例えば東京都が義務化している話で、今の段階の読みとしてはその分野から入れたくなっていて、そうすると配電には頑張ってもらう必要がでてくると思っています。

実際問題、保護の話もありますが、電圧上昇で導入が抑制されている状況が知らないうちに結構は発生していると思いますし、その辺が本来気づいてないけど LCOE も下げていて、ただ住宅はあんまり気付かないということが起きていて、そういうのが本当に 200 万、たぶん 200 万入れることはきっとないと思うんですが、さっきの飯岡先生の話でホスティングキャパシティを倍にすることが本当に必要であれば、対策を段階的、計画的にやる必要があると思います。そのときに住宅用にグリッドコgードが必要なら、今既存のもので

ほぼ対応できていると思っているので、GFMをどこまで入れるかは住宅用についてはあると思いますが、その必要がなければ多分今のものでいいし、そこの保護協調に合わせて単独運転の業務も長くてもいいよ、との話が多少あればもう少し違う話もあると思うのですが、住宅用とか配電のレベルで言えば技術はそれなりに揃っているという気がします。

（モデレータ１）

はい、ありがとうございます。強い系統という話がありましたが、設備形成にお金かかるということになると、今度は参加者1がおっしゃったように、需要の柔軟性を求める話をさっきは最後されていましたが、あとは具体的にこれを進めていくうちに、例えばデータの不足など何か困られていることとか、こういうものがもう少し充実すればより導入が進むなど、何かご意見がありますでしょうか？

オーストラリアの戸建て PV

（参加者１）

ありがとうございます。今の話の前の話ですが、昨日調べたときにもうオーストラリアでは戸建ての 4 割に PV がついているという話で、そういうところでは一体どうやっているのか、配電網でもどうしているのかとか知りたいと思いまして、ご存知の方いらしたら教えていただきたいと思います。

やはり住宅が多分一番入れやすくて、確かにオーストラリアでも PV が安くなっているのと合わせて家庭用の蓄電池も増えているということなので、そこをセットにすることで比較的早く入るのかなと思っています。

ただ蓄電池は日本ではまだまだ高いので、おそらく PV は FIT もあるので一定程度進むが、日本の場合は新築にしか入っておらず既築への導入がやっぱり難しい。だからオーストラリアでこんなに普及しているのは、既築の上に乗せやすいなど構造も違うからだと思います。そういう違いもありながらも、日本でも既築にも今後入れてかないと PV も増えないし、おそらく他のリソースもなかなか増えていかないという気がしています。そこで、まず一番は物を増やすことだと私も思っていますが、そこは個人の方のご判断で、特にEVなどは嗜好性もあり、状況を大きく変えることは難しいと思います。

その中で、政府としてもいろんな補助金等を出して数を増やそうとしているとは思うのですが、ここをどれだけ加速させられるかがポイントと思っています。そもそも数が少ない。かつそれを制御して、ある程度何らか増分の費用に見合うものでなくてはいけないわけで、アグリゲータさんにとって今低圧リソースとして最初に 2026 年から立ち上がりそうなのは、家庭用の蓄電池かなという気がしています。

それ以外のリソースを束ねて市場取引というのはまだ考えにくい印象なので、第一歩としてその家庭用の蓄電池の活用がどのぐらい上手くいくか、ただ家庭用の蓄電池って大抵 PV とセットで入っていて、FIT のときは別として、もうその家のために、フル活用されていると、PV の余剰が出たらすぐ貯めて基本的に夕方放電する運用が自然と行われているので、その上で市場に供出できる部分がどのぐらいあるかはわからないという印象です。

ただ、そういうケースが出てくれば、また少しずつ導入は進むと思います。もう既に家庭用の蓄電池で先ほどの特例計量器で機能をつけた製品が販売され始めたということなので、そういうところから市場活用は進むだろうと思います。もう一つは、私は料金だと思っていて、基本的にはエコキュートがなるべくお日様の出ているときに動いてほしいということで、晴れた日に安い小売り料金が出てこない限りは、なかなかうまく回らないだろうと思いますので、技術というよりはルールが重要だと思います。ただ外から制御できる仕組みをきちんと入れていくっていうことと両輪だと思います。同じようなことですけど、以上です。

（モデレータ１）

はい。今参加者1からお話出ましたけど、オーストラリアのその状況っていうのを、もう少し何か状況わかりますでしょうか？

（PL）

あの一言で言うと、たくさん入って困っていますっていう状況です。それに気がついて、それに対して、公に対策を打たないといけないと言い出したのが数年前ということです。ただし、入ってしまった PV の問題は非常に大きくて、今後どういうものを求めるかを住宅用に決めるのもやはりそれなりに難しくて、大きな船が方向転換するのには時間かかっているというのが2、3 年前の私の知っていることです。

（参加者５）

オーストラリアについて少し調べたことがありますが、私も配電系統をどうしているかまでは把握をしていません。家庭用の変換機につきましても、遠隔で切ったり入れたりできる機能をグリッドコード化するルールを、結構速やかに、問題が出始めたときにしています。これによって、本当にもう危ないときには、系統の危

さ、系統全体の危さもあると思いますが、切ることができ、必要なときには戻すこともできるというルール化もしていると聞いています。

オーストラリアは海沿いに細長い系統で、需要も大都市に偏っていますし、一方で分散電源も地方に偏っているので、系統の強さも地点ごとにずいぶん違うようです。そういう状況を見える化することで、本当に弱いところには同期調相機を設置して接続していただく、もしくはその費用を負担して接続していただくというように、合計のコストを一番安くするように、立地誘導するとかいろんな工夫が送電レベルではされていると聞いています。

太陽光の多い日本はオーストラリアから学ぶことが多いのでは、と思っています。

ビジョン

（PL）

はいありがとうございます。私からちょっと一つ皆さんに質問させていただきたいのですが、ビジョンというキーワードが出たのだと思います。私自身も、なかなかこの国にはビジョンがないことを痛感しています。ビジョンとは何かっというと、あってほしい姿というところまでいいのですが、この国のビジョンは裏打ちがなくて、いろんな人があって欲しいものがたくさん出てくると感じます。そうではなくて、何だったらできるのかというところから選ぶことが重要だと思うのですが、そういうビジョンを作っていくためには、どういう作り方があるでしょうか。とっても難しいかもしれないですけど、お伺いしたいのですけど、いかがでしょうか。どなたからでも。参加者6、お願いします。

（参加者６）

難しいのはみんなこちらに来ますね。例えば私も学者の端くれですが、いろんな人がいろんな提案、やっぱり学者なりの提案、それから、その他の例えば実際に運用されている方の提案、とにかくいろんな提案です。大体学者のする提案はお金考えていませんので、結構高い提案がある。それらをどこかできちっと審議をして、これはこうだ、ここのところは取り入れられる、ここは取り入れられない、というところの交通整理をどっかでしながら、こういう形ならここのところで入れられるんじゃないか、というようなことを検討する場所が必要だと思います。それは多分、どこかの学者のグループでも駄目でしょうし、どういうグループがいいのかよく分からない。ただ、そこにはある程度のお金の裏付けが必要なので、どこからお金出るかによりますが、国から出るなら、政府の機関が入ってなきゃいけないと思います。それから、民間のグループで出すのであれば、民間のそういうグループの何かがなきゃいけないと思います。そういうところで交通整理が必要な気がするのですがいかがでしょうか？

（PL）

はい全然悪くはないと思うのですけど、できるかなっていうとこですけど。ビジョンの作り方どなたか他にいらっしゃいませんか？

（参加者２）

明確な回答を持ち合わせていないのが実態なのですけれども、特にこういうところに関心を持っている技術者の方は、それぞれ自分の中でぼんやりながらも、多分ビジョンって持っていても、それに対する裏づけができないとか、発言しにくい日本社会的な風土があって、なかなか表にアイデアが出てこないということが、多分にあると思っています。

学会で発表してあんまり質問が来ないというのも、何かそこに通ずるものがあるという気がしていまして。そこは我々の考え方を少し変えて、失敗を恐れずに意見をうまく出せる雰囲気作りが必要だと思います。これは多分我々の分野に限った話ではないと思うのですが、こういうビジョンの策定に向けていろんなアイデアを闘わせることが日本人的にやりにくいんじゃないかなという気がしていて、そこが大きな障壁になっているという気がしています。しかしそこをどうクリアできるのかは、なかなか難しいかなと感じます。

他方、インターネットとか SNS の匿名性が高いと辛辣な発言が結構出てくるのもあるので、悪い活用されない形でうまく使っていくことで、発言しやすくするだとか、何かそういう環境作りがまず必要という気がしています。

技術ニュートラル

（PL）

ありがとうございます。良いデータがあって、良い道具があって、人間の力をレベルアップしてくれれば、そのようなやり方でうまくいくのじゃないかなと思います。あともう一つ、「技術ニュートラル」という言葉があり

ます。これは、今はとても大きく、速く変わろうとしています。それで、どう変わるかということに関しては、私はビジョンをどうしても英知を結集して何らかのやり方で作っていかないといけない、これ一つの回答だと思います。なんですけれども、近未来または中期的にいろんな技術が出てきたとき、制度も含めて選択肢が出てきたときに、どれを選ぶのかというときに、人間が選ぶのはそこそこ危ないかなと思います。どうしても知識に偏りがあることがその理由です。技術ニュートラルという言葉は海外で結構流行っている言葉で、何でもいいからイーブンな条件設定するので戦ってくださいというのが技術ニュートラルの意味です。これをもう少し日本で実施できたらいいかなと思わないでもないのですけど、これについてはいかがでしょうか？つまりバッテリーならバッテリーの補助金のもとでバッテリーしか入ってこないということではなくて、と言う意味です。

（参加者１）

理念としては技術ニュートラルであるべきだと思いますし、そう言うべきだと思うのですが、ただ何か今の日本のも何か手札を見ても、十分じゃない気がします。全部やったところで足りないみたいなレベルではないかと思っていて、そもそもだから選び取れるほど選択肢があるのかというところが、私は正直言って疑問なのです。

もちろん、当然発電側の技術があり、需要側の技術があり、それで例えば費用対効果が綺麗に計算できれば、オプションとして、どの順番でやっていこうというみたいな話はありうると思いますが、ゴールがカーボンニュートラルというものであるから難しいのですけど。今、例えば PV の目標を作ったところで、全然目標通りには入りそうにない状況の中で、一体我々にどんなオプションがあるのだろうと正直いって思います。だから技術ニュートラルにより進めるのは賛成ですが、正直そんなにオプションがないかなっていう気がしています。すいません悲観的な話で。以上です。

（PL）

今日の例で言うと、紺谷様のプレゼンに合ったように、風力は出力を上げるためには下げておく必要があり勿体なさ過ぎる。下げろと言われればいつでも下げられるが、下げだけが売れない。とすれば、作業分担する。他の発電の上げあるいは需要の下げが発電の上げを分担する。運用上はとてもやりにくくなると思うのですけれども、それぞれのリソースの長所を使うことができる、これが一つの形かなと。これ例に過ぎません。なにか見つからないかな。そうやって見つけていかないと、人間の恣意的な選択により順番に何か良くないことが起こるような気がしています。

まとめ

（モデレータ１）

時間ももうギリギリですが、どなたかいらっしゃればお願いします。

すいません。今回はまとまらないというのが、一つのまとめですが。もう一つはさっきの話ですけどビジョンは、あの Bit Watt 構想みたいのがこの間出しましたが、やっぱり異業種との連携ってですかね。

仲間を増やして、先ほどもお話ありました電力村って話もちょっとさっきの話ありましたが、そうならないものを作るといろいろビジョンが広がるという気もいたしました。会場からもしご質問があれば、お受けしたいと思いますが、どなたかいらっしゃいますでしょうか。

1 名、すいません、マイクを回していただいてよろしいでしょうか？

フロア質問：システム全体が見える人

（参加者７）

ビジョンの話がありましたが、司令塔が誰だろうっていうところがあって。結局まだビジョンもなくて、どこに向かうか分からないけれど、ミクロを主とした新しい系統安定性を求められると。ミクロだとグリッドコードに任せればそれでいいのか、本当に北海道レベルのブラックアウトが起こったときに、誰が責任もって復旧できるのかとか、新しい系統の中でどうマネジメントするなど、システム全体が見えている人は誰だろうっていう質問です。お願いします。

（モデレータ１）

どうもありがとうございます。この EAJ のプロジェクトでもその話は出ていまして、その役割が必要だということは皆さんに認識しているのですが、誰が担うかっていうのは、なかなかまだ議論が出ていません。ご指摘のご意見ありがとうございます。

（参加者１）

基本的にはエネ庁が考えるのが自然だと思う。国が考え一応ビジョンとして考える。ただ、そのときの議論があまりにも偏って限られた人でされているような気が私もすごくしています。私も散々いろんな委員会に出ていてこんなこと言える立場ではないのですけれども、しかも役割が OCCTO さんあり電力取引委員会ありで、なかなか役割が分散している中で、意思決定する場にきちんと技術のわかる人、もちろん電力会社さんも含めてだと思うのですが、何となれば電力以外の分野の議論も含めて。ただ、そうなるとどうしても自分の業界の意思を反映させたいこととの判断も難しい気がするのですが。ただ、私は、電力に関しては特に、例えば電中研さんとかエネ研さんとか、テクニカルなことがしっかり分かる人がもっと議論の場に加われるといいなと思っています。私は電力のビジョンは国が基本的には考えることだと思いますし、先ほど参加者6がご指摘になったような点を含めた意思決定に資する知識を出せるシンクタンク的なところがもう少し増えるといいと思っております。以上です。はい。

（モデレータ１）

あの心強い発言ありがとうございました。あとわずか時間ですけど、ご質問・ご意見ないでしょうか

フロア質問：コストベネフィット

（参加者８）

シミュレーションの話がいろいろ出ましたが、最終的にはそういうものが社会的コストを含めた全体的な経済便益に反映されなければ最終的な意思決定には繋がらないのじゃないかと考えています。技術的検討は重要で、需要家の損失とか、供給者の損失とかいろいろあると思うのですが、それらをトータルに見てどれぐらい損失があって、大規模な影響をどうやって削減して、対策とコストベネフィットの関係がどうなっているのかが最終的には一番大事なポイントだと思いました。コメントですありがとうございます。

（モデレータ１）

ありがとうございました。先ほどの参加者1の発言と重複するところあると思います。幅広いところで、かつ専門家も入ってきちんと議論するということかなと思いました。どうもコメントありがとうございました。

それでは時間になりましたので、パネルディスカッション 1 を終了したいと思います。先生方、皆様どうもありがとうございました。

パネル討論 2 移行を担う人材の獲得と育成

進め方

（PL）

それではあまり間を置かず、パネルディスカッションの 2 を始めたいと思います。

登壇いただける方々はおすすみいただくようお願いします。モデレータは、福島国際研究教育機構の江村様にお願いをしております。それからパネリストとしては、今登壇いただいています東京大学未来ビジョン研究センターの杉山様それから早稲田大学スマート社会技術融合研究機構の石井様それから、徳島大学大学院の北條先生、それから、連投になりますけれども、関西電力山本様、東京大学横山先生、呉工業高等専門学校校長の餘利野先生、どうぞよろしくお願いいたします。

（江村（以下モデレータ２））

それでは、モデレータ務めます福島国際研究教育機構、FREI の理事をやっています江村です。少し自己紹介をさせていただきます。先ほど事前の打ち合わせがあって私は部外者です、皆さんちょっと電力村じゃないですかというような話をしました。福島国際研究教育機構は、福島第 1 原発の事故の影響がまだ福島の浜通りでは深刻な状態で、その復興を目的に国が 2 年前に作った研究機構です。その一つの研究分野にエネルギー一分野があり、福島をカーボンニュートラルの先駆けの地にするべくエネルギーの研究をしており、水素の活用を考えることを今議論しています。

その中で私は EAJ のメンバーで、このプロジェクトが始まるにあたり、電力のことを学びながら次の展開について考えるために参画しています。そういう中でちょっと違う視点で、今回のパネル討議のテーマにも関係しますが、技術の話もあるけど、いろんなことを実現していく上では究極は人材の問題になるということで、その議論をするために参画しており、ちょうどいいからモデレータもやれということで、議論の中でも分野横断という分野で私は意見を言わせていただいていることから、そういう観点で議論を進めたいと思います。

パネリストの方には皆さん暴れていただくことで進めたいと思いますのでよろしくお願いします。パネルディスカッション2のタイトルは「電力システムの移行を担う人材の獲得と育成」です。電力システムの移行につ

いては、今日の議論でずっと伺っているとカーボンニュートラルということで再生可能エネルギーの導入っていうことを意識した移行っていうことで皆さん議論されているというふうに思います。しかし、さっきWatt Bit連携に関する話も出ていましたが、カーボンニュートラルという視点だけで電力システム移行っていうことを議論していいのか、という点も少しバックグラウンドにあります。

論点

そういう意味で、ここで議論する内容として、次の次のページかな。この 3 点を論点に挙げたいと思っています。

論点の 1 では、先ほど技術の観点からいろいろ議論があって、ビジョンは何かと議論まで行きましたが、これからの電力システムを議論していく上で、意識しないといけないことは何があるのかを、まずパネリストの皆さんから、いろんな観点からお話しいただきたいと思います。

論点の 2 では、そうしたときに次はどんな人材を集めなきゃいけないかと。人材の育成の問題もあると思うのですけ、先ほどの今日のプレゼンテーションの中では保安人材とか技術者という話もありましたが、ICTや AI の活用の時代になってきたときに、次の電力システムを実現する上でどんな人材が必要かを考えたいと思います。

論点の 3 では、そういう人は必要だよねっていう中で、今日もずっと出ていましたように人口減少、労働力減少の中で、電力システムを担う人に入てもらう、あるいは保安人材とか足りないって話もありましたけど、そういう人たちをちゃんと次の世代の人たちも入ってきていただくために、これから作る電力システムは、どんな役割があって、こんな重要なことやってます、こんな魅力がありますということをアピールしないといけないんじゃないかなと思っています。そういう意味で、その電力システムに取り組む魅力っていうのは何かをお題としてお願いしています。

別にこれにだけにこだわって進めるつもりはなくて、先生方のご意見をいただいて、その中でこの点も議論してみたいというところも含めて議論を進めたいと思います。よろしくお願いします。

それでは順番に従って、まずポジショントークをお願いします。

まず参加者9、よろしくお願いします。

NEDO 特別講座など

（参加者９）

背景

はい。よろしくお願いいたします。趣旨をご説明いただきましたが、それからすると、全く電力村の話をする感じになるのですが。まず一応人材育成ということで、私も電力分野はもう一つその人気がなくなったのではないかっと思っています。もう 10 年以上でしょうか。

ずっと人材育成に関わってまいりました。表紙にありますように、パワーアカデミーでチーフプロデューサーやっていまして、何とか電気工学分野を中心にいろいろ盛り上げることをやってまいりました。最近ちょっとやっていることを 2 点、まずご紹介して後の議論としたいと思います。

NEDO 特別講座「将来の電力システムの計画・運用を支える人材育成」

最初のページお願いします。まずはNEDOに特別講座というのがありまして、後で参加者10もお話になるかもしれませんが、将来の電力システムの計画・運用を支える人材育成が必要であると思って活動をしています。

先ほどのパネル 1 でまさに電力システムは今変遷期にある、変化が非常に大きくなっていくと考えられます。同期機が減り、分散リソースが増え、需要のいろんな特性が変わっていくということで、今までの常識がもう通じなくなる。たぶん、将来安定に運用するために、どう計画し、何をやる必要があるかについて、今までと考え方が大きく変わってくると思っています。

特別講座設立の背景

次のページお願いします。人材の基盤を見てみますと、ベテラン層が引退時期に来ていて、特に元々電気工学と言っていた根幹となった分野のところで大学での取り組みも細ってきている、あるいはベテランが引退して企業等でも従来の電力システムを学んでこられた方が非常に少ない状況。これから新しい世界と融合していくにあたり、そういう方向をどう持ってゆくのがよいか。欧米に比べると、日本には体系的な取り組みが欠如しているのではないか、あるいは先ほど司令塔というお話も出ていましたが、リーダー、司令塔は一体どこなのかがはっきりしていない。やりたいことは将来を見渡したときに新しい世界で何をやっていく

必要があるのか、日本全体で見たら、今どこまでできているのかがわかってないためそのギャップを埋めることです。ここをちゃんとやっていくことが、結果として人材育成に繋がると考えて、この分野を少し盛り上げていき、いろんな形で、直接的には研究活動などを増やすことだと思いますが、そういうことで次の時代を担う人材を育成する取り組みを始めたということです。

特別講座の体制

次のページは一応体制で、先ほど登壇された原先生、馬場先生、広島大学のチームに入っていただいて、産総研などとも連携して進めています。特別講座始まったばかりで、また別途皆さんにぜひいろんな形で参加していただきたいと思っています。

国際標準化活動における人材創出・継承

次のページお願いします。私の仕事の一つに国際標準化の活動があります。こちらは若手の方になっていただくのは難しいけれども、やはり将来見ると若い人が必要だということで、若いうちからいろいろ経験していただくことをやる必要があるということで、IEC の TC8という委員会は、今日いらっしゃる横山先生に長く国内委員長を務めていただきました。そろそろ委員の若返りが必要という話を中でもしています。まずは国際標準に若いうちに携わる機会を増やすために、やっているベテラン層が意識して次の人たちを連れてきて経験してもらうということに尽きると思っています。それをやってよかったと思ってもらう枠組みをうまく作って進めてゆきたいと思っています。それで、いろいろ共同の機会とかを提供することをセットで考えたいなと思っています。

最近人材育成についてはこの辺りに取り組んでいます。最初私から以上でございます。

電力の魅力、電力×〇〇

（モデレータ２）

はい。ありがとうございました。次に参加者 11、お願いします

（参加者 11）

はい。私も外側の人間といいますか、専門は環境政策、気候政策、シナリオの研究などをやってきており、IPCC の第 6 次評価報告書のワーキンググループ 3 の執筆も担当しました。人材ということですと、東大には公式の学生団体として、「グリーントランスフォーメーション、GX、学生ネットワーク」があり、そちらのお世話係もしております。

3 つの論点をいただきましたけど、順番変えて申し上げます。電力システムに取り組む魅力とは何かっていうと、それはど真ん中だからだと思うのですよね、需要側も電化をしますしクリーンな電力は脱炭素、カーボンニュートラル進めるには決定的に重要で、中心の要素であります。もちろん熱もありますけれども、電力システムは要です。ですから、その中心になる電力システムには何が必要かというと、他と繋がること、多様な視点を取り込むことが必要だと思います。どういう人材が必要かということでいいますと、「電力システム×〇〇」だと思うのですよね。電力システムで閉じていては駄目なのだと思うのです。そこから広げてあげなくちゃいけないと。

〇〇に入るのは、若干使い古された言葉ですが、例えば「デジタル」とか「国際」とか、「女性」とか、ここは工学アカデミーということで、女性エンジニアってのすごい少ないと思います。あとは電力システム×スタートアップです。スタートアップについてもう少し詳細に申し上げますと、例えば先ほど岩船先生が DR、需要側の話をされていて、クラーケンというサービスがありオクトパスエナジーが提供しているというお話がありましたが、あれもスタートアップですよね。世界のスタートアップのうち、環境エネルギー、クリーンテック、気候テックの領域で有望な 100 社を作ったリストが 2009 年ぐらいからあり、10 年以上つづいていますから 1000 社以上が選ばれたわけですが、日本の会社は去年まで一社もなかったということです。気候テックとか、クリーンテックとかの領域はとても少なくて、こういった外に出ていくとか、電力という垣根も不明ですが、とりあえず取り込んで、飛び込むというような人材が必要だと思います。どうやって育てるか、獲得するかが本題だと思うのですが、それは非常に難しくて、問題だけ提示して逃げてしまう感じになってしまうかもしれませんが、一つだけ構造的問題は非常に大きいと思います。もちろんディープテックとか、そういったところに飛び込んで学生はいるのですけど、やはりいかんせん数が少ないと。なんで、東京大学ではアントレプレーナシップ、起業家精神教育をすごい今やっているのですが、東京東大だけ伸びても仕方がないですし、日本全体で見るとやはり少ないというのがあって、それは構造的問題があると思います。2 回目の発言があれば少し掘り下げたいと思いますが、最初のインタビューセッションは以上です。ありがとうございます。

（モデレータ２）

はい、ありがとうございました。では続いて参加者 10、お願いします。

NEDO 特別講座、産学合同セミナー

（参加者 10）

NEDO 特別講座

はい。私の専門は電力系統へのパワーエレクトロニクス応用としています。まずスライドで現在行っている人材活用・育成活動についてご紹介したいと思います。先ほど参加者9からもご紹介ありましたが、NEDO特別講座で我々も活動していまして、本日の提言プロジェクトのメンバーでもある東京都市大学の中島先生と私と東京科学大学の佐野先生の 3 名で特別講座のプロジェクトを進めています。

次のスライドお願いします。実はこの講座には親事業があります。ご承知の通りカーボンニュートラルを目指して洋上風力発電の取り組みがあり、ただ洋上風力発電は大容量になりますので、高信頼で大容量の電力を長距離送電する必要があります。この高圧直流送電技術の NEDO 事業が横山明彦先生、馬場順平先生とお世話になりながら、もう各社さんと一緒に進めてきた事業いますが、これが親事業です。

ただ、ご承知の通り我が国における直流送電システムは限定された実績にとどまっており、関連人材が不足しています。長期にわたって建設して次の建設までしばらく間が空くため、若年労働層の減少ということを考えると、非常に深刻な状況になるかもしれないという課題として事業を進めています。

先に次のスライドを全部説明したあとここに戻ってこさせていただきたいと思います。普通は 3 つの研究室ではそれぞれが研究活動をするですが、本事業の中ではバーチャル研究室ということで、横で連携・横断して機能を強化するということで、例えばハードウェア実験装置をお互い見学する、ソフトウェアを共有する、研究室に毎年加わる新しい学生に対して学習を一緒にして問題を共有して解決を早めるなどの交流を強力に進めています。

産学合同セミナー

次のスライドお願いします。単に交流するだけではなくて、合同セミナーというのを開催して、特に特別講演というところでは、基礎的な技術知識の習得を目的として、研究室の入ったばっかりの研究室の学生に加え、外部から聴講にも参加いただいて、オンラインで開催することで、「直流送電に興味あるけどどんな感じだろう」という方を対象にしています。基礎的なところからの講演に続いて、実際参加している方からの特に技術面での紹介や研究の紹介を通して技術を披露していただき、意見交換をしています。次のスライドお願いします。

直流送電に興味があれば全ての方が対象になりますので、これは写真撮ってもかまいませんし、スキャンしても構いませんので、よろしければ皆さんが産学合同セミナーを一度覗いてみてください。参加費無料です。オンライン接続できます。次のスライドお願いします。

2025 年度は 2 ヶ月に 1 回ずつ公開することにしていまして次 4 月 24 日、来週開催する予定です。

シミュレータの共同利用

戻っていただいて、ここで一番ご紹介したいのは、大規模実証設備である高度のアナログシミュレータです。これは電力さん、電中研さん、産総研さんなどいろいろな機関がお持ちだと思いますが、大学で持つことはなかなか難しいです。PL からもお話もありましたように、データが広く公開されてないため、学生がなぜこれができないのかとか、難しい点があるって言っていたけど、それは自分のアイデアで何とかならないのか、それらを試そうと思っても試す方法がないということでした。

かなり値段が高いのですが、リアルタイムシミュレータを手に入れれば、自分の好きな、得意なところでまずは若い人が入口としての研究ができる体制、教育・人材育成という意味では、小学生・中学生・高校生・大学生・大学院生・社会人など、対象によって答えが全部違ってくると思うのですが、いま私が紹介しているのは大学院生あるいは大学卒研生程度になります。そういう人たちが自分の腕を試したいときに、試す環境、例えばパワーの変換器を作れる人は変換器を作り、系統側はシミュレータで再現する電源で模擬することによって、予想外、例えば理想正弦波電源ではない動きをする電源に対して自分の変換器が機能しない。機能しないのであればどうすればいいのか、何が問題なのかっていうのを片っ端から試すことができるっていう環境を作りたい。それで学生がその分野を目指してくれれば、大正解ということになると思います。こちらの方で私の活動をちょっと紹介させていただきました。

いただいた三つの論点のうちの「電力システムの魅力」について、私も改めて何が好きなのかを考えました。今日のお話もそうですけれども、電気工学だけでなくて土木ですとか機械とか、あらゆる工学の集大成

になっていて、いくら学んでいくら研究しても新しいテーマが未知なテーマが出てくる。なぜという疑問が増えるのですが、それがわかって説明できるようになるとドヤ顔ができるところは、電力システムが確かに多様な技術の集大成であるところから来ていると思います。

今の経済面でも議論になってくるということなので、電気工学ならではというところがあると思います。考えていくと、電気工学を体系的に学ぶ必要性が今日のシンポジウムでもひしひしと感じており、電気工学というジャンルを潰すわけにはいかないと感じている次第です。

先生方のご講演の節々で、理解にお時間を要する電気技術の存在があったという。例えば 3 相不平衡であるとか、高調波とか、これを今の学生に説明しようと思うと、あの授業を受けて、この授業を受けて、あの授業を受けて、電磁気学を受けたと言って単位を落としてもいいからとりあえず勉強してこないと、そう簡単には話せないということがたくさんありました。何かをやろうとしたときにそこで引っかかりそうな気がします。馬場先生のご講演で系統がわかるパワーエレクトロニクス技術者というメッセージがありましたが、実はこれが先ほどのリアルタイムシミュレータで系統を再現してパワエレの実験をする、パワエレがどうモデル化されるかを系統側の技術者に渡して系統側の技術者にパワエレはこんな動きするけどどうだということで系統の挙動を見てもらうという、お互い育てる環境に自分も貢献していきたいと思うし、そういうところの真ん中にいるのが、先ほどおっしゃったように、真ん中にいるのが電力システム技術者であったらいいと思っています。

送配電

（モデレータ２）

続いて、先ほどのパネルに続いてのご登場になります参加者5、お願いします。

（参加者５）

参加者5です。

いま起こりつつある電力システムの構造変化

1 ページ目お願いいたします。こちらの左から右の世界に変わっていくということで、今まで大きな電源が一方通行で需要家に行っていたのが、太陽光・風力、分散電源、それから需要の参加により、電気の流れは双方向になり、参加者も著しく増えるということです。

そうしますと、今までハードで送変電設備を建設して、それを補守・維持できる人が必要で、お付き合いするのも重電メーカーや鉄塔材料を作っている会社さんでしたが、これから非常にプレイヤーも増えるということで、計算機でデータを処理する力も上げていくということですから、設備をソフトで繋いで動かしていく。何でも設備を作るのじゃなくて物理的な制約を運用で解決するためにはデジタル技術が必要となり、私どもお付き合いする会社も IT 企業とかベンチャーとかが加わってくる可能性があります。新しい技術をどんどん開発して、ネットワーク需要家も多い中、これをどう最適に繋いでいくのか、活躍いただくのかという世界に変わっていくことですので、お付き合いする方も、左の世界に加えて右の世界で増えていくところです。ですので、電気の運用の世界が変わっていくということは、それだけいろんな方々にご参加いただける、そういった事業分野になってきていると思っています。

第 7 次エネ基を受けて

2 ページは割愛しまして、3 ページ、お願いいたします。先ほどは右の図を説明しましたが、今度は左の図を見ていただきます。左の高い方のグラフが日本の総エネルギー需要で、そのうち電力は下の青い部分で、全体の 3～4 割ですけれども、これからカーボンニュートラルを目差し、電気もどんどんカーボンニュートラルに変わっていくと、上のオレンジの部分の需要が燃料転換で電気に変わっていく可能性だってあるという意味では、このオレンジのところの消費者とも対話をしながら電化していくことでカーボンニュートラルに資するポテンシャルとしてあると思います。これが一つは立地の話かもしれませんけど、Watt-Bit にも繋がるということで、今までお付き合いしていた需要家などだけではなく、カーボンニュートラルを機にいろいろお付き合いを広げていけるところが電力分野の魅力ではないかと思っています。

作業員の減

4 ページお願いいたします。こちらの現場で働いている方々がずいぶん減って高齢化も進んでいるということです。一方、少し暗い話で言いますと、現実問題として、現場で設備を維持していただく方々が本当にいないということです。なかなか入っていただけないし、入っても本当に離職が多い状況です。私どもの協力会社の中でも半分離職している、新入社員で採用しても半分は辞めていくという話もあります。それはもう鉄塔の現場とか見たことないかもしれませんが、日本は山が多く、非常にきつい職場でもございます。

サプライチェーン

そういったことを考えますと、5 ページではなく 7 ページをお願いしたいんですけれども、この一番下の人に書いている通り、ロボットとか AI とかを使って現場の負担を減らしていくことも併せて行うことで、新しい設備を入れていくところに人を回すことができるようになる。日本の人口が減っていきますから、新しい技術を使って少ない人数で回していくことも必要になりますし、そういったところに新しい開発や技術入れる余地があり、もちろんベンチャーさんなどの智恵を入れる必要があると思っています。

それから少し技術的な話では、前半の議論でもありましたインバータを交流系統で繋ぐためには、パワエレと系統の両方知っている人も、改めて必要だと思います。系統工学の分野は大学でもだいぶ研究室が減っていると聞いていますが、今一度、そのパワエレを交流系と繋ぐためにはそういった技術がやはり必要になってきて、いま一度それを振り返る時期であろうとも思っております。

そして下の段、2 段目にサプライチェーンと書いています。人を維持するためには、電力会社の研究だけじゃなくて、メーカーから研究者、設備を運用する私ども、それから、工事事業者、こういったサプライチェーン全体の人をどう集めていくかっていうところがございます。

そのためにはしっかり投資が回っていく中で、今申し上げた他のいろんなベンチャーとかの新しい技術も入れながら、もしくは他の燃料が熱源になっているところからも新しく需要を取りながら発展していく姿を見せていく必要もあると思っています。以上でございます。

電力工学に関係する諸分野

（モデレータ２）

はい、ありがとうございます。それでは次に参加者 12、お願いします。

（横山）

はい、私はこのスライド 1 枚だけです。昨夜作った資料でいい加減なところがあるのですが。私の自己紹介は 38 年間東大で電力システム工学の教育と研究に従事して、3 年前に定年退職した年金生活者です。電力システムって何っていうのを若い頃からいろいろ教育研究に携わってきて思いますと、ここにありますように、先ほど参加者 10 もおっしゃられたように、いろんなことを勉強してないと電力システムってわからない学問分野なのだなということです。ここにあるように、発電から始まり送配電、そしてその電力、電気工学、ここで参加者4と参加者 10 の専門のパワエレ工学が抜けています。それから制御工学、数理工学とは最適化の数字的な技法、システム工学、左に行きますと、高電圧工学、これ機器工学にも一つ当てはまるかもしれませんが、そして材料工学、電力応用、事業化の技術があります。それに加えて、昨今は経済学、そして社会の制度論も身につけていないと実際に電力システムを理解して、その研究開発を進めていくのは難しいと思います。電力システム工学ではコストを目的関数、社会コスト最小化とかとして、送配電費用最小化、燃料費最小化という最適化問題で解き、電力システムを勉強・研究する人はこの経済学的な関連は昔からありました。しかし、最近の電力自由化、電力システム改革という面で、やっぱり社会この制度論も頭の中に入れて電力システムを扱っていくことが大事であると思います。

それで、どういう人材が必要かということを考えると、非常に高尚で立派な人を考えると、先ほどの幅広い、技術、経済、社会、制度などをよく理解した上で、先ほどキーテクノロジーと言われたいろんな最先端技術の研究開発ができる、そして社会実装含めてリードできる、理想的にはこういう方をたくさん輩出していくのが日本の将来の電力システム、カーボンニュートラルに向けた電力システム改革、次世代の電力システムを作っていく上で、非常に必要な人材であろうと思います。

このように工学、電力システムを取り巻くあの学問は大変だろうと思うのですが、その魅力というのは、これからのカーボンニュートラルに向け電力システムはエネルギーシステムの中の中心になります。先ほど参加者 11 もおっしゃいました、電力エネルギー×X そういう分野であって、ここに例えば X に ICT が入りますと Watt-Bit 構想になりますし、交通が入るかもしれない、いろんな X が入ってくると思いますが、そういう電力から外に向かって様々な新しい分野またはビジネスが出てくるというところに将来魅力あると思っており、そういうところを皆さん若い方にぜひアピールしていければなと思いました。以上でございます。

高専と大学、必要な人材

（モデレータ２）

ありがとうございます。それでは、最後になりましたけれども、お願いします。

（参加者 13）

自己紹介

はい今呉高専の校長 4 年目になりました。広島大学を定年になり、呉高専に行き、今特任教授という形でどちらでも仕事をしております。それから、中国電力の関連会社の中電工の社外取締役も 5 年目になりました。元々基本的には研究ということでこれまで 40 年間ぐらい電力システム工学をやり、安定性、信頼性、最適化それからここ 10 年インバータ設計、GFM インバータ設計などをやっていまして、新しい事をやるのが非常に好きだということで、いろんなところに手を出してやっています。

これからの電力システムのために必要なこと

本題に入って、これからの電力システムのために必要なことっていうことでここへ書かせていただいたのが、電力事業の維持のための環境整備です。このように書かせていただいてのですが、日本にはかつては世界一の電力技術があり、私らが若い頃は本当にそういう状態でした。これは電力会社さんの設備投資に支えられていたわけで、これが現状なくなったことで、技術というか事業から撤退するところが出てきて、人がいなくなり、それで今の状況になっているという認識をしています。

基本的には企業は収益がないと事業を維持していけないということで、そこが今の一番の問題であると思っています。先ほど打ち合わせの席で発言をさせていただいたのですが、日本全体としてのビジョンがはっきりしてないっていうのが最大の問題じゃないかと。ここがはっきりすることで、企業は安心して方向性を打ち出して、また新しい分野に参入できるとか、新しい技術開発もできると。基本的にはそれがないと技術継承もできないし、技術開発もできないというのが、私が今感じているところです。

それと、人材育成のための環境整備ということで、この後ちょっと今やっていることを説明させていただきます。次に安心・安全社会のための電気エネルギーセキュリティ特別調査専門委員会と書いています。これは昔危機感持って、電気学会でいろいろ議論させていただいて。この名前でネット検索していただければ報告書も見られるようになっています。

将来に向けどんな人材が必要か

次に、将来に向けてどんな人材が必要かです。これは我々やっている分野だと思うのですが、どんな将来が描けるかが今本当にわからない状況で、電力システムは、インフラですから必ず維持していく必要があると言ったところですから、やはり必要な人材は電力システム工学技術者になると思います。今本当に不安定になってことから安定性の話、信頼性の話、先ほどストレングスシステムストレングスとかいろいろな話が出てきましたけれどもそういう話、それから最適性の話、これも非常に重要な話で、コストの話も含めた最適性、それから DX、GX こういったところは全部含め、先ほどの横浜先生の話じゃないですけれども、結局は包括的に全体が見られる人が必要です。それから電力システム技術者としては国際性、コミュニケーション能力を有して海外の技術者と渡り合うことが絶対に必要だと思います。

電力システムに取り組む魅力はまた後ほど議論させていただきたいと思います。次のページに行っていただければと思います。今我々が人材育成でやっている部分で、広島大学と呉高専の両方に私は携わっています。両校で連携して、高専の学生が大学院に進学する制度を作りました。ここ 4 年の間で今年成果が初めて出て、大学院生 3 人が呉高専から進学しました。このコンセプトは、黄色で書いてある部分、ここが大学の研究室です。この研究室の中に大学の先生がいて、高専にも先生がいて、両者の間で共同研究契約を結びます。その間に学生が入ってその学生が共同研究に参画し、大学と高専の両方で面倒を見る。それで大学側で学生についていいなということになれば、大学院に行くという制度です。

課題としては高専に電力システムの先生がいないので、そこも含めて一緒にやっていくということで、研究室単位では重要な分野を育てていく考えです。これは大学の先生だけではなくて、高専の先生、それから高専の学生、その高専の学生がまた将来大学で活躍して、また研究者になるとか、そういう形で電力システム工学を支えていくビジョンです。今本科に、本科っていうのは 5 年までですけれども、そこに大学院生が教えに行くことを今年からやろうとしております。以上でございます。

（モデレータ２）

はい、ありがとうございました。いろいろな取り組みをされていることとか、必要な人材、こういう人たちが必要であるところはいろいろお話しいただいたと思いますが、実際に必要な人を揃えて、本当に全体を見られる人を作っていくっていう観点で言うと、ありたいところは先生方おっしゃったのだけど、そこまでいくステップは、やっぱりなかなかクリアになってないなっていうような印象をちょっと持ちました。せっかくの機会なのでちょっと視点を変えて、まずご意見があったらいただきたいと思うのですけど、参加者 11 がおっしゃった「電力×〇〇」ということは、今まで電力に触れてない人たちとコミュニケーションしないといけない。

それから私今日伺っていて、大学の仕組みはずいぶん取り組まれていると思うのですが、そもそも電力、あるいは電気工学科に入る学生さんが減っているという論点になると、若い世代に魅力を伝えることが必要になるのではないかと思いながら聞いていました。それでビジョンの議論があって、その議論はなかなか難しいのですが、少なくとも先生方がおっしゃったような、総合的に智の集大成であったり、ライフラインを支えたりというようなことも含め、この電力システムの魅力を違う分野の人、あるいは若い人に発信する取り組みはやられているのかについて伺いたいと思ったのですけど、どなたか何かありますでしょうか？

若い人への発信

（参加者９）

これ、電気の分野に人持ってこようと思ったときに、その前の段階の人にリーチする必要があるのは全くその通りで、長年議論していてそこを何とかしなければならないという話がございます。

電事連にパワーアカデミーという取り組みがあり、そこではまずはホームページなどでしっかり魅力を伝えることをやった上で、非常にスポット的になる部分もありますが、ロボコンなどとタッグを組んで、コンテスト的なことをやるとか、少し小学生とか中学生とか見るようなところに記事を出してみるというようなことは、試みとしてやってきています。これがどれだけ効果が上がったのかを計測するのは難しいのですが、そういう努力をしてきています。

最近では YouTube とかで配信できるようになったこともあり、一部の方が電力システムにこんなことがあって、こんなところがすごく面白いというようなことを紹介する電気系 YouTuber なんていう方がいらっしゃったりして、そういう方々ともコラボしてゆくことも必要だと思っています。

構造的問題

（モデレータ２）

はい、ありがとうございます。他にはいかがでしょうか。

参加者 11、“×〇〇”について、他の分野へのアプローチという意味で何かコメントとかありますか。

（参加者 11）

ご質問、ありがとうございます。私は悲観的な人間なので、ちょっと悲観論をまた展開したいと思います。やはり構造的問題を直視すべきだと思います。電力システムだけではないと思うのですが、ディープテックの先ほどの話にも関連すると思うのですが、日本人の間で、公共心というか、公のために何かやるという意識が減っていると思います。無くなっていると言っているのではなく、減っていると言っているのです。文系、理系、今少し区分けがいい加減になってきますけど、東京大学法学部を出て一番優秀な人はまだ財務省に行っているかもしれませんが数は減っています。明らかに公務員になる人は減っています。資源エネルギー庁や経産省に行く人も減っていると思います。それって大問題です。理系も同じ状況で、例えば工学部だったら工学で社会問題を解決したいという人よりは、自分でスタートアップして AI で儲けたいという人が多くなっていると思います。

繰り返しますがそういう人がいないわけではありません。数が大事なので、イノベーションとか新しい技術が社会を変えるのは数の問題です。民主主義ですから、数も大丈夫、マーケットも何%普及するか、どれぐらいこういう技術を出すかという話で、やっぱり公共心が減っていて、電力、どなたかがおっしゃられているのですがインフラでもありますし、やっぱり公共サービスなのですかね、ぜひ安定供給が必要というのはまさにそうですよね。それを実現ための社会制度はありますが、最初に若者の心に公共心があるか、多分減っているのだと思います。大問題です。回答はしません。

若い人への発信

（モデレータ２）

わかりました。はい、どうぞ。

（参加者 13）

私の経験では、大学で電力に興味を持たせるのは、例えば、面白い授業をやる機会があるのですが、例えば高専の学生に電力の話をしても全く伝わりません。私が先ほどの制度を始めてもう 4 年目になります。4 年経ってやっと 1 人だけ電力の学生を拾えたということです。結局のところ、高専に先生がいない、基本的には先生がいないと魅力が伝わらないのです。先生も電力の授業やりますが、本当の意味で電力が好きでやっているわけではないし、研究をやっているわけでもない、やっぱりそういう人なのです。やっぱり人だなと思います。ですからこの制度も今上手く行きかけてきましたが、まだ完全にうまくいっているというわ

けではなくて、これからいろんなことをやりながら、学生に興味を持ってもらうことをずっと続けていくことかと思っています。

（モデレータ２）

私が口を挟むのはよくないのですが、雑談的になりますが、私は東大の生研と一緒にスティーム教育というのをだいぶ前からやっていまして、それをやり始めた原点はやはり理系に行く人材がすごく減っているという、さっき先生がおっしゃった話です。そのときに、日本の場合はシステム上、高1のときに理系・文系がわかれてしまうので、その前に動機付け必要ということで始めたのですが、ある学校に行ったときに高校 1 年生の女子生徒が、英語の医学の原著論文を読んでいました。どうしてって聞いたら、この前病院に行って病院の先生の話を聞いて私は将来絶対基礎医学をやりたいと思い、それでそう思ったから英語もやるし、化学も生物も一生懸命勉強していると。これが動機付けなんじゃないかなと思っていて、そう思ったときに、電力の魅力を中学とか高校生に見せるということが結構重要で、これは大学の役割ではなくてもっと産業界とか現場のことを知ってもらったときにその魅力を伝えることが重要じゃないかということを、その経験から私はすごく思っています。無茶ぶりですが、参加者5、いかがでしょう、産業界から。

産業界、これまでの取り組み

（参加者５）

ご指名ありがとうございます。今いろいろなお話を伺って、いろいろ考える・させられるところがあるのですが、私が小さな頃と比べると今停電はすごく減っています。私が子供の頃は家にろうそくがあって、雷が来たらろうそくで明かりをつけて、電気ついたねという電気のありがたみを感じる機会がありました。ところが、今はもう停電がほとんどない。そうすると電気って、あって当たり前で、どこの会社から電気を買っても質は変わらないので、電気のありがたみや価値を感じる機会が相当減っていると思っています。私どもの会社、ちょうど 30 年前も阪神大震災があり、あのときは神戸中が停電をして、その復旧を 1 週間ぐらいで行ったことがありました。そのときの若い世代、小学校、中学校、高校にいた人は、その思い出を元に、私どもだけではなくて協力会社も含めて入ってきてくれています。

電気というものに触れる機会というか感じる機会がずいぶん減っていて、それは質が上がったことの裏返しであるところが非常に難しいところですが、電気のありがたみをどう感じてもらえるか、どう伝えられるかをもっと考えていく必要があると思いました。例えば台風で停電したときそこを復旧すると、「やっぱりこんなに努力をしている会社があるのだね」と言っていただけます。

そのようなところをうまく X とか YouTube 使って発信するとか、触れる機会を増やしていかなくてはいけないなと思っています。質が上がると価値を感じていただけなくなるのは、難しい世界だなと改めて思っています。

（モデレータ２）

そうだと思います。当たり前になったっていうことが、他に何かご意見ありますか。

（参加者 12）

私は、参加者 11 ほど悲観論者ではないのだけど、冷静に話をしますと、東大で電気電子工学科の中で電力工学を勉強する人って元々少ないのです。昔は80 人いたのですけど、もうかなり少なくなっています。昔と言っても私がまだ学生よりもっと前の話です。私の恩師がまだ若い頃からの話ですが、電気の中の情報とか当時も情報通信、半導体もあったと思いますが、電力分野に枠を作って 20 人いるということまでしないといけないほど、昔から人気がない分野でした。それでその頃から皆さんやっぱり人気をあげるために様々な方策をとっていました。

電力自由化でますます志望者が少なくなったということで、政府、エネ庁と産学官で人材育成について委員会も作って議論もしました。その後、産業界も取り組んでいただいて、先ほど参加者9がおっしゃったパワーアカデミーも作り、産学で魅力を向上して人材を増やす取り組みが現在も続いています。現状、電力自由化もそろそろ収まり、そして再生可能エネルギーの問題で、新しいカーボンニュートラルに向けて電力システムを次世代化していかなきゃいけないというこの時期が、また何回目のトライかわかりませんが、ちょうどいい機会だと私は思っています。

（モデレータ２）

ありがとうございます。先ほど Watt-Bit 連携みたいな話があって、私はどちらかという通信とかをやってきたのでその観点から言うと、いわゆる ICT とか AI ことに興味を持っている人は今すごくたくさんいて、その能力を実際に展開する場として、電力ネットワークほどチャレンジングなところはなくて、面白いのじゃない

かと思います。

でもそういう人たちが、その電力システムに目を向ける構造になってないのではないかと。だから電力をやりたい人たちが減って、その人たちのためのプログラムは作っているのだけど、まさに参加者 11 がおっしゃった話の通りだと思うのだけど、あの他の人たちがここに興味を持つ、だって場としてはすごくチャレンジングなところなので、そういうことを何かやれないのかと思ったりして、聞いていました。

そういう意味で NEDO プロをやられている参加者 10 とか参加者9とかに、現状の範囲とそれをもう少し広げる観点について、何かご意見ないでしょうか。

より広い発信

（参加者 10）

はい、ありがとうございます。今のテーマについて少し気になっていることを申し上げたいと思います。初等中等教育のときに、エネルギーとか電力システムに興味を向けてもらうかも、私は大事だと思っていて、地域のエネルギー活動にも私はお手伝いをしているのですが、今ご提案いただいた NEDO 事業はあまり専門の方に寄っているので、それを中学校に持っていくわけにはいかないのですが、そこのリンクは考えています。成功例としては、大学として夏休み理科教室を、愛媛大学さんもそうですが、四国内でずっとやっていて 20 年近くにもなりました。実はそのときに来た人がずっと意欲を持ち続けたかどうかはわからないですが、徳島大学の理工学部に来てくれたという実績も出てきました。そういう小中学生を見ていると、女性も多くて、エネルギーに興味持つ壁新聞とかもたくさん書いてくれるのです。この子たちが高等教育でどこいったのだろうというのはずっと思っています。そこに対するアクセスっていうのはすごい大事だと思うので。オープンキャンパスとか高校生対象にいろいろ大学頑張るのですけど、中学生にも出前授業なんかを連携できたら覗きに行きたいなって、1 個だけ教えることをしたいなというふうに思っています。

ただ中学校の中で、エネルギーで一つ進歩があったのは、多分私だけが知らないじゃないと思うのですが、エネルギーのベストミックスを教えるようになってきていて、これ非常にチャンスだと思っています。そういうところで話ができると面白いと思う一方で、技術家庭の中で扱うということで時間数が少ないのと、エネルギーを考えたらやっぱり省エネ大事になって、そのためには家庭科に走っていってしまう。女性というわけではないのですが、他の科目にも関わっているということがエネルギー問題の非常にいいところであり、若い人を逃してしまいやすいところかもしれません。社会とか理科とかそっちに興味が向いていって電力に興味を持ち続ける人が少ないので、小さいときに成功経験、壁新聞とかで成功した人に、あの電力っていうのの面白さっていうのが伝わるような活動を何かできればと思っています。

（参加者９）

はい。参加者 10 がおっしゃられた話も全く同感でございまして、ちょっと別の観点からです。分野間の対話をしっかりするっていうことが、大事だろうと思っています。それで何か小規模の実証であっても成功例を作るこれができるとこんないいことがあることを示すことは非常に重要で、それと若年層からのいろんな訴えかけとか、問いかけを並行してやっていくことが大事だと思います。EV が電力システムと大いに関わりがあり、EV と電力で、最近 EV グリッドと言う取り組みが行われていますが、業界間で対話をするとずいぶん考え方が違うことが改めてわかって。逆にそこからスタートをして求める価値を両方で認め合うプロセスが重要だということを、私自身が参加しているわけではないのですが、そういうふうに思います。

Watt-Bit の話についても単純に言うと、データセンターで大量の計算が行わるわけですが、それがいつ、どこで、どんなふうに行われているのかってよくわかっていません。やはり電力システムを作ってこれから運用していく立場の人と、データセンターを作っていくところの両者が対話して組むことで新しい価値ができるのかをはっきりさせ、例を作っていくことが重要だと思います。

（モデレータ２）

私の聞きかじりの範囲ですが、AI ですごく電力使って、AI の学習は時間をずらして学習できるので、電力が余っているところで AI の学習をさせると、DR 的な部分も入れながら、今の時代と電力の組み合わせになり、相当違う世界が見えてくると思います。でもそれにはそういう人たちと連携した議論が必須で、データがないという議論もありましたが、そこをどう打ち破ることで次の展開が見いだせると思いますし、この領域に興味を持つ人もぐんと増えると思います。

システム全体を見られる人材

（モデレータ２）

そろそろ時間です。あと 10 分、もう一度議論したいことがありまして、電力システムは技術や科学の集大

成だという話があって、それを全体見られる人が必要ということなのですが、そんな簡単には人はできなくて、でもいろんなプロジェクトマネジメントをやる人はいろんな業務をやりながら全体を見られるレベルに上がってくという形でしか人はできないだろうと思っています。そう思ったときに、今の Watt-Bit もそうかもしれませんけど、本当にシステム全体を見られる人を作るためのキャリアパスの議論ができてないと、ありたい人について言っているだけになってしまうとすこし思ったりするのですが、参加者 12 いかがでしょうか？

（参加者 12）

そういう人材を作っていくためには、企業、例えば電力会社とかメーカーさんとか、そういうところはシステマティックに教育していっていると思います。問題はアカデミックな世界においては、そういうことが難しいということで、例えば東大では参加者 11 とこのビジョンセンターとか、それから経済学部でも電力システムの自由化に関する経済学的、社会学的な講義もある。ということで、そういうところと連携をしながら、トータルとして電力システム全体を見渡す若い人の基礎的な力を養うというのも一つのやり方であると思います。

だから、一つの大学でできない場合には、いろいろな大学が集まって補っていくとか、またはパワーアカデミーがそういうところを担うとか、先ほど参加者9のやられている NEDO の特別講座でもそういう一翼を担っていただくとか、全体で協力しながら基礎的な教育人材育成をして、そして企業に入ってからは、企業は企業で、きちっとしたシステマティックなラインに乗せて、上に上がっていくというふうなことと思っています。

（参加者５）

企業に入ってからという話もあり、少しだけお話させていただきます。今までは終身雇用、一度会社に入ったら最後まで勤めていただけることを前提に物事を考えていたので、社内のジョブローテーションの中でいろんな技能を持った人、マルチな人を育ててきました。しかし、今は長く時間かけたらいろいろ経験できるというもやっとした育て方では、若い方は満足しないといいますか、仕事を変えてマルチな能力を身につけていくことを期待して転職する方が増えてきている印象を持っています。そういう意味では、これはまだできてなくてこれからの課題ですが、私どもも社内でどういうジョブローテーションがあるのかを、仕事をジョブ化して表現していくとか、どういう経験を得られるという姿をどう描いていけるのかを見せていくことも考えていかないと、若い人、仕事を変えることによってその経験を得ようとする人を、どう引き留めるではないですが、会社の中でもいろいろできることを見せていくことも考える必要がある。昨今の事情を見ながら思っているところです。

（モデレータ２）

ありがとうございます。どうぞはい。

（参加者 11）

参加者5がおっしゃられたことはその通りだと思いました。やっぱりそうなのですかね。いくつか教育プログラムの話がありましたが、例えば、35 才でこれまで IT 畑でやってきて、いきなり温暖化の現実を直視して、大船渡の森林火災を見てやっぱり電力だと思った人を受け入れる体制が大学にありますかとか、そういう話だと思うのです。

そこら辺は大学側の問題もありまして、社会が終身雇用型システムからジョブ型雇用に変わる大きな流れで言えばそういうことだと思うのですが、それはまだまだ私の周りを見ても課題があると思います。

（モデレータ２）

ありがとうございます。それではフロアから何か質問。どうぞ。

フロア質問：ワクワク感

（参加者７）

大変興味深く、共感を持ちながら聞いていました。ですが、一方で、人材育成に対する考えが古いという感じも持っています。

一つは、若手は育成されるよりも活躍したいところがあるので、そういう人たちは工学部に入って、大企業に入って育てられるという、もうそういうルートではないのですよね。なので学生にとって儲かる、わくわくするっていうのは、多分違う世界の話だと思いました。

もう一つはその電力工学の人じゃなくて、電力システムに興味を持つ人を増やすべきだと思っています。結局その工学に行きたいっていう人って結構難しいですよ。昔は、要は工学に行っておけば就職先があると言われていたのですよね。だけど多分違うのじゃないかなと思います。電力システムに関係する人をたくさん集めると考えると、今の電力工学以外の、さっきの×の話の人たちで、そのフィールドを作ってそこで人材育成だと思います。そのときのその世界観はどんなになるかというのと。すいません。

もう一点は、学生だけではなくて、企業の若手も育てる必要があると思うので、そういう世界観の人材育成についてのコメントを一つ聞きたいです。お願いします。

（モデレータ２）

ありがとうございます。逆に質問させていただくと、その若手がわくわくするならば、電力っていうイメージで何か具体的なものがあります

（参加者７）

儲かることと、最先端であることだと思います。だから、電力工学って言われるとわくわくしないけど、Watt-Bit だとわくわくするとか。これが最先端ですと先生たちが自信を持って言って、それが自分 1 人ではなくてこんなにたくさん仲間いるとか、国際世界の中の最先端でこんなに戦っているのですとか、何かそういうわくわくがすごく伝わるので、そういうふうに学生にも共感を伝えるところと、儲かりますっていう話だと思いました。

（モデレータ２）

はい。どなたか先生方から、お答えをいただけますか。

（参加者 13）

私もいろんな学生も見ていますし、企業の中に入った方々が辞められるっていう現実も、いつもいろいろ議論しています。けれども、企業の場合は今のいわゆる採用スタイルは既に変えてきていて、先ほどから言っている終身雇用とかはもうほとんどなく、それでももちろんありますよ、ありますけれども、例えば入ってすぐに辞める人も多いですよね。今ね。

それから 3 年とか 5 年ぐらいしてそこで辞める人もいる。そこで辞めた人は、実は外を回ってきて、前の会社がよかったと言ってまた戻ってくる人もいて、そういう人もまた採用するように今はしています。あと、うちの学生とか大学生もそうですが、高専の学生とかも人によって様々です。

今言われたような人もいるし、まだ全然違う人もいるし、終身雇用的な安定性を求める人もいるし。ケースバイケースで。いろんな学生を結局は受け入れて育てていくというスタイルかなと思っています。はい。

（モデレータ２）

はい。どうぞ、はい。

（参加者５）

私どもも募集をすると、国際、新規事業、イノベーション、こういったところはすごく人気がある。ところが、企業の立場でいきますと、やはり私どもはベース業務をやっていく必要があり、そういうキラキラした世界じゃない人も必要であり、全員を同じ言葉では集められないのですが、今おっしゃったような魅力のある分野ももちろん集めるし、それだけではなくて、やはりベースのところも集めていかなければいけない。そうじゃないと、先輩方はベースをやるけど、若い子ばかりキラキラした分野ばかりに行く。そういうわけにもなかなかいかないという、バランスの中でどう人を集めていくかというところが、非常に悩みであるということです。

（モデレータ２）

はい、ありがとうございます。きっとそのベースの人たちに対してもどういう魅力を伝えるかはやはり重要かなと。このパネルでは魅力をどう伝えるかっていう全体を通しての議論だったので、今いただいたことに今日の段階では答えはないと思うんですけど、どういう提示の仕方をするか、場を作るか、みたいのは、多分後半の 1 年で PL が議論されると思います。他にご質問ありますか。ネットの方は大丈夫でしょうか？それではそろそろ時間なので、無茶ぶりで PL にまとめていただこうと思います。

まとめ

（PL）

もう来ないと思っていたのですけど。基本的には「後半頑張ります」これで一応許していただけないかなと思います。あと今いろいろ材料を聞かしていただきました。手元にメモ書いたのでちょっとご紹介したいと思います。まずこの場にふさわしくないかもしれないですけど、一つだけまず言いたいことは、この 10 年くらい電力があまりにも悪者になっているのじゃないかと思います。そこに本当に事実があるのであれば話は別ですが、ずいぶんなことをやっている業界に対して、世の中の扱いがちょっと不当かなというところがあります。これは真摯に改めないと、理屈以前の話になってしまう。

その上で、電力側にも悪いことがあるとすると、私が一番感じているのは、まずいことを教えてくれないことです。世の中に全部うまくいっていますと言わないと、世の中が安定しないとか配慮がある、またはやっぱ

りその規制をしてちょっと問題があったらまずいと言われて、問題があると素直に言えないところです。

今日の議論を聞いていて思ったのは、その問題がありますということは、実際にはそれを解決してくれる人を求めているということに繋がるはずなのだけれども、問題がないって言ったのだったら、仕事ないと思われるような気がします。

この二つが一番の基本的に感じたことです。あとは、私の分野からいくと、日本はソフトウェアとデータのハンドリング、これが海外と比べて日本の電力の世界では落ちていると思うのです。いろんな課題が現実に起こっているので、いろんなソフトウェアの活用が伸びて、データの整備がフォーマット的にも進む、ということが起こっているのだけど、日本だけ別の世界になっている。なので言葉もなかなか通じない。これは一部のローカルな話ですけが、いくつか脱皮しないといけないところがあると思いました。

とても言い切れない話ですので、頑張りますということで締めさせてください。

（モデレータ２）

いいえ、あのどうもありがとうございます。今もあったようにこのプロジェクト、今中間なので、今日はインプットということで、またみんなで頑張りたいと思います。

それではこれでパネルの 2 を終わりたいと思います。パネルパネリストの皆さん、感謝を込めて、皆さん拍手をお願いします。どうもありがとうございました。

閉会

（PL）

はい。少し時間が押していますけれども、無事にスケジュールが来ております。それでは最後に閉会の挨拶を、生産技術研究所 ESI チームの鹿園先生にお願いいたします。

（鹿園）

鹿園でございます。今日は 300 人を超える多くの方に集まっていただき、本当にありがとうございます。ご登壇いただきました先生方そして、ご準備いただいた事務局の方々本当に感謝申しあげます。

今日は電力システムの移行ということで、カーボンニュートラルが念頭にあろうかと思いますが、いろんな紛争とか、トランプさんの話とか、ますます混迷を深めている中で、難題がより難題になってきているとは思いますが、でも今日、人と企業をどう巻き込んで、それを解決していく、そのときに、ビジョンとか、それを裏付けるデータなりシミュレーションなり、そういったことの重要性が改めて浮き彫りになったと思います。

そして人材育成に関しても、ここは電力システムに限らず、日本全体の大学も含めてだと思いますが、東大の工学研究科は来年度から講義は全部英語になります。留学生を集めるためです。もう留学生なしでは研究できないのが実情であります。ですから、特にこの電力の場合は、安全保障の問題とかいろいろ考えないといけないと思うのですが、優秀な外国人の方々に活躍してもらうことが必要です。今日の議論がそういう人たちに魅力を持ってもらえるようなところまで広がって、日本全体の活力に繋がってほしいと思います。

電力でできないと、他の分野はもっと小さいし、人も少ない。電力システムがトランジションのシナリオをうまく描いていくことが、他の分野の人たちにとっても先鞭になって、非常に参考になると思いますので、ぜひ残り 1 年でいい成果といいますか取りまとめをしていただきたいと思いますし、ぜひお願いしたいと思います。

（PL）

本日はご参加いただきありがとうございました。

これで全てのプログラムを終了いたしました。本当にありがとうございました。意見交換会に出ていただける方は、この建物の 1 階のレストラン アーベです。

あと対面の方は紙でお配りしたアンケートにつきまして、ぜひ 3 分で書いていただいてお進みいただければと思います。どうもありがとうございました。

以上

第 6 回会合

開会

（荻本 PL（以下 PL））

はい。それでは時間になりましたので第 6 回ということで始めさせていただきます。本日もお忙しいところたくさんの方にご参加いただきまして、どうもありがとうございます。荻本でございます。こちらの方、一応自己紹介しているのですよね。 それでは講演者の方からお願いします。

（河辺）

東京科学大学の河辺と申します。本日運用のトピックで、お話させていただきたいと思います。私の専門は電力システム工学でして、博士は、今ご参加いただいた横山明彦先生のところで取らせていただきました。 本日は専門に近いところということで、運用に関してお話させていただきます。よろしくお願いいたします。

（PL）

渡邊様、おねがいします。

（渡邊）

株式会社 Looop の渡邊と申します。 本日は電力小売り事業というところで話題提供させていただきます。私自身はもう研究というよりももう最近は電力小売り事業そのものところで、お話する内容も釈迦に説法ということも多いように思いますが、今話題提供できればと思いますので、よろしくお願いいたします。

（馬場）

JST CRDS の馬場でございます。幹事をやらせていただいています。どうぞよろしくお願いいたします。

（幡野）

はい。4 月より中村に代わって着任いたしました、同じく幹事の幡野と申しますよろしくお願いいたします。

（城石）

工学アカデミー城石と申します。この度は大変お世話になっています。ぜひまた良い議論をお願いしたいとおもいます。ありがとうございます。

中間シンポジウム報告

（PL）

ありがとうございました。それでは始めてまいります。4 月 15 日の中間シンポジウムでは大変すばらしいお話をいただいてありがとうございました。本日はそのときも出でました、後半の第一回です。お送りした議事に従って進めて参ります。まず中間シンポの報告を城石さんからお願いします。

（城石）

ありがとうございます。城石の方から簡単にご報告させていただきます。2 枚目のプログラムをご覧ください。当日ご登壇・参加してくださった方もたくさんいらっしゃると思うので細かくは申し上げません。

シンポジウムでは、最初の中村様、荻本先生のご挨拶に続き岩船先生、原先生、紺谷先生、馬場先生、飯岡先生のご講演を頂きました。それか、パネルディスカッション 1 では、蘆立先生、荻本先生のモデレートによりまして、岩船先生、原先生、大関先生、馬場先生、山本先生、奈良先生によるパネルディスカッションがありまして、続いてパネルディスカッションの 2 では、江村先生と荻本先生のモデレート、石井先生、杉山先生、北條先生、山本先生、横山先生、餘利野先生によりまして、非常に活発な議論が行われました。ご講演、パネルディスカッションにご参加くださり、あるいは現場・オンラインでご参加くださった方々に厚く御礼申し上げます。次のページご登壇くださった方々のお写真が出ています。内容につきましても簡単に書かせて頂いています。次のページはアンケートの結果です。シンポジウムの後に現地で 33 名の方からアンケートをいただきました。濃い緑が非常に満足、薄い緑のところが満足との結果でした。不満足、もう少し満足度を上げて欲しいというご意見も少数頂きましたが、これはもう少し時間をかけて欲しいテーマもあったということで、総じて非常に好評だったと思います。下の方にコメントが書いてございます。

総じて非常に好意的なコメントをたくさんいただきました。特に荻本先生が、「ちょっと暴れてください」と言ってくださったためだと思いますが、感想、アンケートの結果でも、皆さんから、「本音でいろんな議論をしていただき、自由闊達にいろんな意見が出て本質に迫れたシンポジウであった」、というふうに言ってくだ

さっています。荻本先生の最後のまとめに感動した」というご意見もあったくらい、皆さん好意的に受け止めてくださった内容で、いい議論ができて、後半の議論が楽しみということですが、逆に後半どうやってまとめようかっていうのは大変になったと思っています。

今日は、アンケートの要望にもありました、小売や運用について、後半の第 1 回として、いいお話がいただけると考えています。申し忘れましたが、シンポジウムの最後の鹿園先生からご挨拶では、「これから東大がグローバルにやっていく」というお話を伺いました。この会も、皆様にどんどん暴れた議論をいただき、さらにグローバルに日本がさらに良くなる道筋を見つけてゆきたいと思いました。荻本先生・山本様からはオーストラリアの話をいただき、が、そういったお話が非常によかったということもアンケートのコメントに入っておりまして、これから国内にとらわれず世界を見て、ぜひ発展的にこのプロジェクトがすすめられればよいと思いました。簡単ですが、以上ご報告です。

（PL）

ありがとうございました。本プロジェクトは 1 年後のとりまとめを目指していくわけですが、このシンポに関しましては、講演者・パネリストの方々にお願いしていたように、ンポジウムの発言録の公開を目指します。今後文字起こしのデータを修正いただくプロセスを踏んでいきますので、よろしくお願いします。それから、その提言の取りまとめの意味でも、パネルディスカッションでいい意見がとても出ましたし、講演の方もフォーカスした内容になっていたと感じました。ということで、講演の方は技術の説明の部分に使っていきたいと思っています。また、キー技術、キーシステム技術、それから人材育成のパネルディスカッションでは、横串の議論が行われキーワードをたくさんいただきましたので、提言に織り込んでいきたいと思っています。音声から起こした文字はなかなか処理が難しくて、事務局で複数回修正しているのですが、その過程で内容がずれている可能性があります。ぜひご発言者の方で、修正していただければ助かります。

それでは、続いて、進め方のところに行きます。進め方の資料には修正点を見え消しで示しています。ずっと下の方へ行っていただきますと、修正点が数点出ています。後半 1 年の予定が書いてあります。このように進めていくことを今日は再度確認していただきたいと思います。スケジュールの最後にはシンポジウムがあります。このシンポジウムは、4 月と同様の構成のシンポを 1 回やって中身を深めたいと考えているのですが、当初は 1 回では提言の報告に行きつくのがむずかしいので、2 回に分けるなど皆さんのご意見もいただきながら進めていきたいと思っています。私の方からは以上です。

講演 1 運用（東京科学大学・河辺）

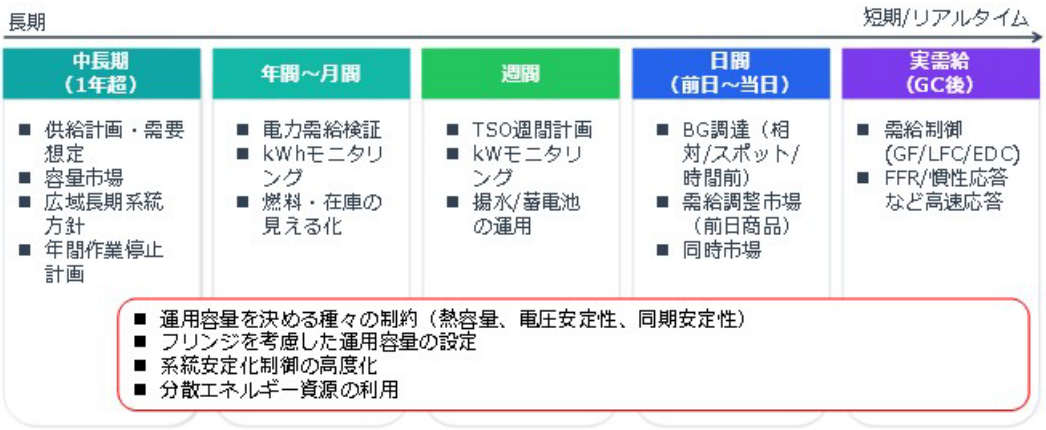
（PL）

それでは本日の話題提供に進みたいと思います。それでは運用について、河辺先生からお願いいたします。

イントロ

では改めまして河辺です。よろしくお願いいたします。私からは運用に関する話題提供をさせていただきます。こちらが本日の内容です。今回資料を作って、改めて運用にはいろいろなお話があると感じましたし、まだまだ勉強することがたくさんあると改めて思ったところです。本日至らぬ点が多々あるかと思いますが、そういった部分は後半のディスカッションのところでご指摘等いただければと思っています。

一般に「運用」といったときに、どの事業者さんも認識されている部分は、主に需給運用の話題になると思います。前半はこの需給運用について、前半の中長期から、日間そして実需給といったスケールで、順にお話させていただきます。そして後半では、運用の重要な要素である系統運用について、昨今のおさらいと将来に向けての話題を含めお話させていただきます。



中長期（1 年超）の運用

まず需給運用の部分から始めます。最初の中長期の運用についてまとめました。中長期の運用は、どちらかというと計画の側面の方が強くなりますが、計画に際しても運用を意識して計画を立てるということは重要だと思います。該当するのは、供給計画、需要想定それから容量市場、それから広域、これらが電源のアデカシーを確保する観点になります。後半二つは、広域系統長期方針と年間作業・停止計画で、これらは流通設備のアデカシーを確認するプロセスと考えています。

この中長期の部分では、例えば容量市場のように、kW の確保状況を確認・調達する仕組みがある一方で、kWh や ΔkW という観点では同じような仕組みが不十分かもしれないと思ったところです。例えば kWh の観点では、発電事業者さんの燃料の確保状況の確認手段、そして調達にあたっての予見性の提供が重要と思いますし、ΔkW という観点でも、調整力が中長期にわたって確保できているか、できていない場合には中長期的に調達する手段が必要ということです。それから流通設備の計画では、マスタープランなどでは、費用便益評価に基づき系統増強方策が検討されていますが、運用制御を意識した技術的な検証はさらに深めていく余地があると書いています。

年間～月間の運用

続いては年間から月間の運用で、これに該当するのは OCCTO さんによる需給検証や、kWh モニタリングが挙げられます。例えば需給検証では、猛暑、厳寒という、供給計画よりも高需要となる状況においても、kW の観点で安定供給が可能な状況かどうかを確認します。一方 kWh モニタリングにおきましては、こちら一般に 2 ヶ月前が燃料調達契約の期限というふうに言われているため、これを目処に 2 ヶ月程度先までの kWh の在庫状況を確認するモニタリングが行われます。

週間の運用

次に週間の運用です。週間の運用、週間の運用計画は、1 日以上の起動時間がかかる電源がある、それから揚水、蓄電池等、貯蔵量を考慮した効率的な運用という観点から重要です。現状では一般送配電事業者（TSO）さんはバランシンググループの週間計画、それから需給調整市場における週間商品の取引結果に基づいて、こちらの図に示すように前週の木曜日の段階で週間計画を策定しています。 ここでの TSO さんからの問題提起としては、現状の週間計画では、BG の週間計画の部分で、最大需要と最小予備率の発生時の 2 点の時刻における情報しかなく、さらに週間計画を立てる段階ではスポット市場も約定前という段階で、この揚水の供給力が水位を考慮して十分かとかの想定が難しいことが課題とされています。それから OCCTO さんの方では、この週間という観点では、kW モニタリングによって 1 週間先までの想定需要に対する供給力の予備率を算定されています。あと週間の運用で、一つの重要な論点は、大規模揚水、それから今後ますます導入量が増えていくと予想される系統用蓄電池のその運用方法です。現在、将来に向けて、卸電力市場と需給調整市場を統合した同時市場の設計が進められていますが、その中でも、この揚水の運用をその所有者自身に任せるという選択肢もある一方で、同時市場の中で行われる最適化計算の中に変数として組み込んで、運用を行うということも選択肢として挙げられています。ただこれを実現する上では、同時市場の中で行わなければいけないその系統制約付きの発電機 起動停止計画 SCUC と呼ばれるものですが、こちらの最適計算の計算規模をこの揚水を含めることによって、特に週間の場合は計算規模を大きくするもございますので、実現性の観点も踏まえて検討を進めていくことが重要であると考えています。

日間（前日～当日）の運用

次に日間の運用の話に移ります。ここで日間の運用とは、前日から当日にかけての運用、特にゲートクローズまでを指します。ゲートクローズまでは、バランシンググループが相対取引、スポット市場、時間前市場等に基づいて kWh を調達します。TSO は需給調整市場から前日商品を調達してゲートクローズまでの再エネの予測誤差に備えます。需給調整市場における調達が、募集量を全て調達できないいわゆる未達の場合は、余力活用契約により予備力を発動する仕組みになっています。この後お話するゲートクローズ以降は、TSO が周波数維持義務に基づいて調整力を使う運用になります。ゲートクローズまでの現状の日間運用の特徴をまとめました。需給調整市場では各 BG が各自の計画に基づいて、ΔkW を供出するので、ここで約定したΔkW により一部の発電機群の並解列の計画が決まります。

我が国の FIT 制度において、FIT 特例の①に該当する前日時点の値の予測値の前日以降の変化については、BG は計画に反映しなくてよいことになっていて、これに対しては BG 側の並解列計画は柔軟に修正されません。それから、先ほど余力活用契約のお話しをしましたが、この契約では TSO が柔軟に余力を活用できるもののそれは需給逼迫時などの緊急時に限られることになっています。このため、経済効率性の追求に向けては、この部分はまだ検討の余地があると思います。

それからゲートクローズに向けての日間の運用においては、エネルギーと調整力を同時に最適化する同時市場の話を考える必要があると思います。同時市場においては、スリーパートオファに基づく最適化、いわゆる SCUC と呼ばれる最適化計算によって、発電機の起動停止計画が立てられます。その場合、発電事業者さんと小売事業者さんはその約定結果を踏まえて発電販売計画と需要調達計画を策定・修正することが想定されます。 制度設計の議論のもとでは、前日の段階で一度 SCUC を行いまして、そのあと、ゲートクローズまで時間帯にかけて、予測値の変更に合わせて都度 SCUC をやり直すことにより、再エネや需要の予測値の変化に対応することが期待されます。ただ、この SCUC による前日の最適化は、小売の入札需要を用いた市場約定、価格算定のための最適化計算であるため、その実際の電源の起動停止計画は、別途 TSO による想定需要を用いた最適化計算で決定されると今のところ整理されていて、価格決めの SCUC と実際の運用のための SCUC の連携は今後の課題です。ここの点は、系統運用のやり方に影響してくると思っています。

実需給断面（ゲートクローズ後）の運用

最後は需給制約の観点の話で、実需給断面(ゲートクローズ後)での運用の話です。ゲートクローズ後の、需要変動、再エネ変動に対しては、階層的な制御システムで需給バランスが維持されます。階層的な制御システムは、従来の電力系統工学の教科書で書かれている発電機のガバナフリー（GF）制御、負荷周波数制御制御（LFC）、経済負荷配分（EDC）などが該当します。これ以外にも、制御ではなくて物理特性である同期発電機の慣性応答や、同じく物理特性である負荷の自己制御性などにより周波数変動は抑制されます。 この階層的な制御システムにおいては、まず EDC では今後どういう変化があるかがこちらのスライドに挙げられています。

需給運用のシステムとしては、各エリアの需給システムの仕様統一を目指し、次期中給システムの開発が進められています。その次期中給システムにおいては EDC の機能も新しい仕様となり、ここに書いていますように、上位2電圧階級を対象として、全国大での需給制御および混雑処理が可能になることが期待されています。ここで特徴的なのは、今までも連系線のその混雑処理は再給電システムにより行われていますが、将来は、エリアの中の地内送電線の混雑もこのシステムの中で自動的に処理できるようになることが大きな変化としてあります。

続いて LFC 制御です。LFC 制御でも、やはり次期中給システムの構築に際して機能が更新される予定です。 広域 LFC と呼ばれる新しい LFC のもとでは、各エリアでの需給のアンバランスに相当する AR を、エリア間でネッティングする機能が導入され、それから従来は出力変化速度を考慮して各発電機の出力を変化させる指令を与えていたのに関して、新たに発電単価も考慮するロジックも実装が検討されています。また連系線の広域の LFC では、連系線の運用容量をきちんと考慮して、これを制約に入れて指令を与えるということ、周波数変換所等におけるその交直変換装置の電力制御機能を有効に活用することが検討されています。次に短周期の変動の対策、従来 GF 制御が用いられてきた領域においては、再エネの速い出力変動に対応するため、海外ですでに一部導入されている Fast Frequency Response (FFR)と呼ばれる従来のガバナーよりも速い応答速度が求められる調整力の必要性が国内でも認識されています。

さらに最近では、同期発電機の並列台数の減少によってますます重要になってくる、同期発電機以外での慣性応答（IR: Inertial Response）の実現がますます大事になることが話題となっています。 まず FFR

については、各国とも蓄電池の導入が対策の一つとして挙げられてきました。下の図は、今述べました GF に相当する Primary Frequency Response と、FFR、慣性応答の包含関係を示しています。さらにこちらの図ではそれぞれの調整力を、どんな機器が供給できるかを示しています。 FFR の確保には蓄電池の導入が、検討されていますが、従来の制御ではFFR は提供できても、IR は提供できないため、それをグリッドフォーミングコンバータの開発によりさらに補うというのが最近の動向です。また、IR については同期調相機も対策機器の一つに挙げられています。

送電線の運用容量を決める系統制約

以上が需給運用の話題で、後半残り 10 分で系統制約の話もさせていただきます。

系統制約は、送電線の運用容量から決まる重要な制約条件です。皆さんご存知とは思いますが、おさらいということで、系統制約としては電圧安定性の制約、同期安定性の制約、それから熱容量の制約が挙げられます。それと周波数制約と書かれている先ほどのその需給面での制約、こういった制約条件が最終的に送電線の運用容量を決めています。発電機の並列の状態は時々刻々変化し、その状態によって、どの制約でその運用容量が決まるかが図に示されています。ただ一般送配電事業者さんはこの辺りを全てチェックしながら日々運用を行っているというふうに考えています。ちょっと順番にお話させていただきますが、熱容量制約は、こちらの図に次に示しますように、その電線の熱のバランスによって決まります。 従来の送電線に流すことのできる許容電流は、過去の気象条件に基づき保守的な値に設定されてきたのですが、今後は再エネの導入拡大をより早く進めるため、送変電設備の増強に加え、よりクイックな対策として、ここに挙げている対策が考えられます。既に導入されている連系線の運用管理の高度化もありますし、今後は、送電線のダイナミックレーティングの導入、潮流制御機器の活用、それから系統用蓄電池による送電線潮流の制御、こういった対策の積極的な活用が考えられます。ただ、いずれの対策も基本的に送電線の利用率を高めるための方策ですので、これらを実現にはより高度な系統運用技術が求められると思います。

次は電圧の制約です。電圧は、需要家機器や発電設備への悪影響を避けるという観点で、適正な範囲に維持することが重要です。また、電圧に関しても安定性の問題があり、これが崩れないように運用するということが重要です。電圧の制約を維持するという観点は、主に無効電力の調整が行われます。 前半お話した需給運用では、有効電力の需給バランスがターゲットであるのに対して、あまり知られてないのがこの無効電力の調整です。無効電力は、ここに書きましたようにその電圧制御のためにとても重要な電力成分で、この役割を様々な要素によって今後も担ってもらえるように、いろいろな制度設計が大事であると思っています。 最近では中部エリアで太陽光発電の導入拡大により基幹系統の電圧管理も難しくなっている話も聞いています。それから、研究レベルではありますが、その再エネがたくさんローカル系統やら配電系統に入ってきたときに、地絡事故などの系統事故により一斉に解列することが懸念されます。再エネの一斉解列は、周波数に悪影響を与えるということが広く知られていますが、同時に電圧を大きく落とすことにもなり、特に負荷の特性として誘導電動機の割合が高いような状況では、この電動機運転の不安定化が誘引され、電圧崩壊が起こるという恐れがあります。この点は、国内でも認識はされているのですが、海外では負荷のモデルとしてはこのモーター負荷をモデリングにおいてちゃんと考慮することが一般的になっていると思います。

最後、系統制約の一つとして、同期安定性のお話があります。同期安定性は、同期発電機群が同じ周波数で運転を継続できるかどうかという安定性になります。これが不十分な場合は早ければ数百ミリ秒オーダで一部の発電機が解列されるという事象に繋がってしまいます。よく使われる同期安定性のイメージ図が下に示されています。この図に示すように、送電距離にあたる円盤同士を結ぶ紐の長さが長くなればなるほど、全ての発電機を同じ周波数で回転させる状態を維持しづらくなるという特徴があります。それから送る電力にあたる重りが重くなるほど、やはり安定性の維持が難しくなることがこの同期安定性の特徴です。そのため、今後再エネが、例えば我が国の場合だと、北海道エリア、東北エリアにたくさん風力発電が入ってきて発電電力を東京エリアに送る状況を想定すると、同期安定性が厳しくなって、送電可能な電力が制限される状況が懸念されます。

また、同期安定性に対しては、電圧の維持能力すなわち先ほど出てきた無効電力の供給能力も強く関係しています。この意味でも同期発電機の並列容量の減少は同期安定性の悪化にも繋がりうると思います。

フリンジを考慮した運用容量の設定

あと 3 分ほどなのですが、フリンジのお話です。フリンジは、需要再エネ変動に対する需給制御の結果として生じる潮流変動です。 先ほど説明した EDC、LFC、GF によって発電機出力の変化が起こり、その結果送電線の潮流もこちらの図に示すように、変動します。このことを考えますと、需給計画を立てる段階で

は、このフリンジ分っていうのをあらかじめ確保しておかないと、調達した調整力を最大限活用できない恐れがあることが最近指摘されています。

例えば、先ほど次期中給システムの EDC では地内送電線の熱容量制約等も考慮して指令が行われます。このためフリンジを考慮しないでその計画を立てると、送電線の地内送電線の容量がないため、安い発電機に EDC の指令を与えることができない、いわゆるΔkW の発動制限が起こってしまいます。このため、このフリンジを確保した運用が必要であることが、今言われており、どれだけフリンジ量を確保するのかが、今後の難しい課題になると思っています。

当然ながら、このフリンジを大きく確保すればするほど、経済合理性は悪化します。あと過去の統計データに基づいてフリンジを設定するとしても、地内送電線にはそもそも計画潮流がないので、こういった部分のデータが未整備であるということもあります。 あと、ここでは実需給断面、ゲートクローズ後の話が国内では議論されていますが、ゲートクローズ前の予備力の発動でも同じような課題がありうると考えています。

系統安定化制御

少しスライド飛ばします。最後に系統安定化制御の話と、DER の話の、二つが残っていますが、他にも重要なところとしては、系統安定化制御、これは運用とは切り離せない部分だと思っています。 基本的にはあの設備形成の段階、それから系統運用の段階で供給支障が起こらないような工夫をするわけですが、あまりにその非経済にならないように、頻度の低い事象に対しては系統安定化制御による対応が、従来からなされています。今後は再エネの拡大に伴って不確実性も増えるため、この系統安定化制御の役割はますます高まっていくと思います。系統安定化制御は設計次第では様々な事象に対応することができ、この役割は拡大でき、その意義はさらに高くなり、次のスライドに示すように、今後ますますその高度化が期待されると思います。

分散エネルギー資源の活用

あと次の小売のお話とも絡むところとして、分散エネルギー資源の活用があります。今後、大規模電源が減少傾向にあることを踏まえると、この点はますます重要になると思います。市場の整備が一つ重要な観点であると同時に、やはり電力システム工学の観点からは、ローカル系統と配電系統にある系統制約を、需給制約に加えて、きちんと考慮し、DER の活用をしていく必要があると思います。この分野のコンセプト自体は、海外でももう 10 年以上前からあり、能動的配電網、DERMS などの言葉で知られています。最近でも、アメリカの NREL では系統制約を考慮した DER の活用を行うプロジェクトもあるということで、最後紹介させていただきます。最後求められる姿、それから期待される役割ということで、これをまとめのスライドに替えて説明を終わらせていただきます。ありがとうございました。

講演 2 小売（Looop・渡邊）

（PL）

どうもありがとうございました。いや、大変ひろい分野について分かりやすく説明頂きもありがとうございました。続きまして、Looop 渡邊様に、小売の分野についてお願いします。

自己紹介

株式会社 Looop の渡邊です。電力小売り事業から見た話題提供ということでお話をさせていただきます。まず簡単に自己紹介をさせていただきます。私自身は、電気工学で修士を取り、その後三菱総合研究所でしばらく電力エネルギー分野の政策周りの研究などしておりました。その間、博士課程におり、このときには今回もご参加されている岩船先生にお世話になりました。その際には同じく参加されている藤井先生にもお世話になっていました。その後 2018 年から株式会社 Looop に移りました。こちらの会社の紹介です。Looop はいわゆる新電力で、2016 年の電力全面小売り自由化から電力小売り事業を始めました。私もその電力小売り事業に携わってまいりました。Looop は新電力がメインの会社で、設立は 2011 年、震災直後、現在 300 名ほどの社員がおり、会社としては新電力の部分、ここの売り上げが大きいですが、それ以外に元々は再生可能エネルギー事業という、FIT 制度を活かして電源を作る会社でした。今は、電力小売り事業の売上は大体年間 460 億、需要家の数でいうと 30 万と 40 万の間、主に家庭で、一般の低圧のお客様が中心です。こういった新電力の立場からの話ということで、釈迦に説法のところも多いと思いますが、本日お話をさせていただきます。

電力小売事業の背景

電力小売りの自由化

電力小売事業の歴史からお話をさせていただきます。電気事業はかつて規制産業でしたが、規制を緩和する電力自由化が進んできました。 電力の小売では、2000 年に大規模の工場と商業ビル向けの特別高圧、2004 年には中規模工場や商業向けのいわゆる高圧と、自由化が進んできました。さらに 2013 年の電力システム改革に関する改革方針の中で、安定供給の確保と、電力料金の最大限の抑制と需要家の選択肢や事業者の事業機会の拡大の方針が挙げられ、2016 年に、低圧を含めた全面自由化されたのが、日本における電力小売り自由化の歴史です。

小売事業への新規参入

全面自由化により低圧の一般消費者に対しても電力小売りができるようになり、他業種からの参入が一気に拡大しました。左下のグラフは、資源エネルギー庁による小売電気事業者数の推移で、横軸のスタートは全面自由化の 2016 年から 2024 年度までです。事業者数はずっと増えてきましたが、2020 年ごろからは頭打ちになりました。図では供給実績のありとなしで色が分かれています。「実績なし」とは、小売電気事業者として登録はしているが、実際に小売り事業をやっていない、供給実績がない事業者です。「供給実績あり」の事業者数を見ると、2021 年度あたりを境に、減る状況になっています。この事業者数の減少の背景については後ほどお話をいたします。事業者数が増えてきた点については、どのような事業者が含まれるかを見てゆきます。ガス、通信会社系でセット割引などのサービスを提供する事業者、元々再生可能エネルギーの発電事業者が参入して太陽光発電パネル導入とセットで家庭向けの小売りサービスや再エネ比率の高い電力の供給を行っている事業者など、多様な形態があります。ハウスメーカー、自治体、地元企業によるいわゆる地域新電力の参入も増えていました。あるいは流通関連では元 IT 企業やシステム企業の管理というところで、電力のサービスだけではなくて、例えばその賃貸住宅の空室の管理サービスをやっているところに電気供給も組み合わせるなど、サービス展開に電力小売りを組み合わせる企業が増えてきました。一方で、先ほどの電力小売り事業者の数が頭打ちあるいは減少しているのは、大きな背景が電気の調達原価の高騰です。

電気調達原価の高騰と電気料金値上げ

2020 年頃に、まず国内の発電事業者における LNG の調達不足などによる需給逼迫、その後のロシア・ウクライナ問題による国際的な燃料価格の上昇によって、電力小売原価の大幅な上昇が続きました。電力小売事業の多くは電力を何らかの形で仕入れて売る事業をやる会社ですから、この仕入れの原価が想定外に上昇すると、そのままでは事業が続けられず撤退する、あるいはサービスを停止する、そこまででなくても、旧一般電気事業者の小売部門も含めて新規契約の受け付けの停止などが 2020 年から数年急増した状況でした。 いろいろな電力小売り事業でも原価上昇を吸収するための料金制度の変更があったのが、ここ数年の電力小売り事業の状況です。

対策の一つは単純に値上げをすることですが、よく行われたのが燃料費調整額制度の変更です。 電力小売の料金には、燃料費調整額制度、いわばサーチャージとして、輸入燃料費の変化を電気料金に転嫁をする仕組みが入っていたのですが、その仕組みだけでは到底追いつけないということで、いわゆる「独自燃調」とも呼ばれる新たな燃料費調整額制度が導入をされたもこの時期です。

一部の新電力などでは市場連動型料金への移行もこれを機に進みました。こちらではスポット市場の価格を料金単価に直接反映をするメニューもありましたし、燃料費調整の一環として市場価格の変更を反映できるようにする制度を導入した事業者もありました。

電力システム改革の検証と今後

これらの変化の結果として、この左側のグラフは、資源エネルギー庁の電力システム改革検証の 2025 年のレポートからの「家庭用電気料金月別単価の推移」のグラフです。この図は横軸が先ほどと同じ 2016 年の電力小売り事業の全面自由化の年から始まって右端 2024 年までの、電気料金単価（円/kWh）の変化を示しているグラフです。最初はその規制料金、すなわち従来の料金に比べると自由化された結果としての自由料金が安価な水準で推移していました。一方で、先ほどの 2021 年、2022 年ぐらいから料金制度の変化を反映して自由料金の方が上回る水準になり、その後は規制料金側でも制度変更などもあり、規制料金と自由料金があまり変わらない水準になっています。こうしますと、電力システム改革の方針として 2013 年度に挙げた目的の中では、電気料金の抑制があったのですが、結果としてはそのような抑制が行われたとは言い難いという結果です。さらに、料金が上がったのは 2022 年ごろですが、その前の 2020 年、2021 年には、事業者の撤退が相次ぎ、需要家に混乱を与えたというのが、過去振り返ったときの電力小売り事業

の実態でした。今後の電力システムを考えると、小売り事業者は、電気料金の抑制というそれまでの期待とは異なり、需要家のニーズに応えるエネルギーサービスプロバイダーという役割として引き続き重要な役割を果たすべきであるとされています。エネルギーサービスプロバイダーと呼ばれる事業の内容としては、例えば再エネの地産地消、デマンドレスポンスを通じた事業への貢献、あるいは省エネやエネルギーマネジメント等も例には挙げられます。

電力小売り事業は今後そのような内容を含め引き続き役割を果たしていく、あるいは今の役割を変えていく必要があると考えます。

電力小売事業とデマンドレスポンス

特にデマンドレスポンスのお話を続けたいと思っています。先ほどの河辺先生からのご説明でも、「分散型エネルギーリソースが増える方向で変化しているとの説明がありました。

市場連動型料金とデマンドレスポンス

デマンドレスポンスには、二つの型に大別されると言われています。一つが電気料金型のデマンドレスポンスです。 こちらは電気料金の変化をインセンティブとして反応することで、間接的に電気の需要量が変わることを期待したデマンドレスポンスです。もう一つはインセンティブ型のデマンドレスポンスと呼ばれていまして、直接的に特定の時間にインセンティブを与え、電力の需要を上げ・下げを求め需要量の調整をするものです。さらにはこういったその価格とかインセンティブにより間接的に実施するもの以外に、何らかの契約に基づいて直接その量を制御する方式も考えられます。

市場連動型料金の位置づけ

こういったデマンドレスポンスですが、電気料金型デマンドレスポンスを先ほどもご紹介したように、市場連動型料金により自然にデマンドレスポンスが起きる可能性もあります。市場連動型料金は卸電力市場の価格に連動して電気料金が時々刻々変わる料金プランで、先ほど申し上げたように原価高騰への対応として止むを得ず新電力などが導入したのですが、結果としては電気料金型デマンドレスポンスの社会実装でもあったと言えます。電気料金型のデマンドレスポンスの良い点・便利な点としては、インセンティブを別途払う必要はないことです。電気料金の高低を示すことで需要の変化を誘導するので、それに従うことで需要家にとっては料金引き下げのメリットが出てくるので、これに対して特別な対価を支払う必要がないというメリットがあります。一方でその変化量を読むのが難しい問題があります。その特定の時間の需要変化を起こすために電気料金自体をもう少し柔軟に変えることで、インセンティブ型 DR と組み合わせたようなものもできるのかもしれませんが、なかなかその需要の変化とインセンティブが対応しづらいといったような型もあります。

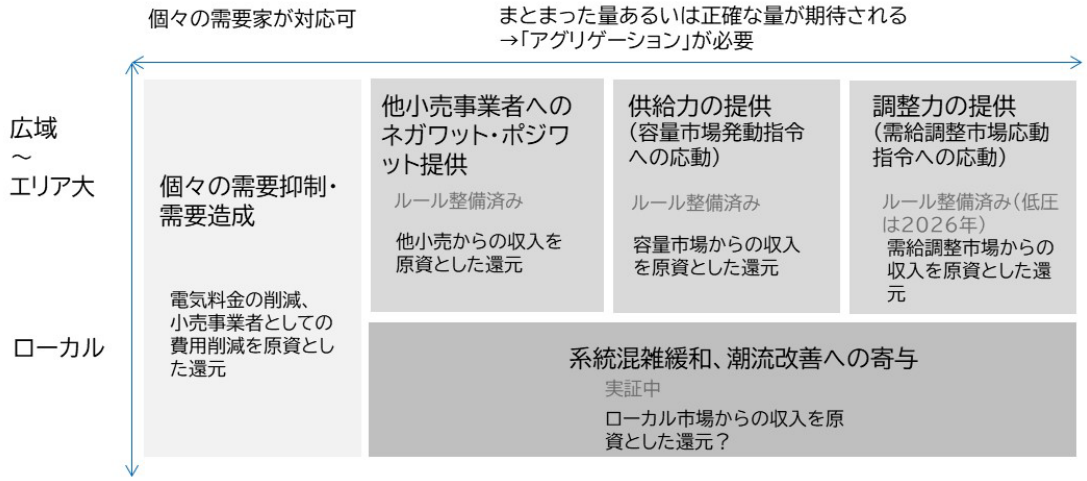
DR による需給調整への貢献

実は、弊社自体が、先ほども申し上げた市場連動型電気料金を導入した電力会社で、その結果として今 30 万から 40 万のお客様がこの卸電力市場に連動した電気料金を使っている状態になっています。左の絵は、電気料金が時々刻々変わるという当社のプランにおいて、電気料金が今の時間でいくらなのかということを示さなければならないということで、このようなスマートフォンアプリを使って電気料金を知らせることもやっていますし、どの時間が安いか高いかをスマホで見られるようになっています。 電気料金の変化がどれぐらいの需要の変化につながったかの分析をやっています。説明は省略いたしますが、右側の図は、電気料金の変化がどれたけの電気の需要の変化をもたらしたか、いわゆる価格弾力値を計測するための回帰分析の結果です。そのケースが並んでいる表で、アプリを毎日見て料金の変化を知っている需要家は電気料金が高くなったときにはある程度変化に追従しようとする行動が見られます。

ただ、需要家、これは家庭、低圧の需要をイメージしているものですが、電気料金に関心を持っている人はそんなに多くはなく、電気料金を知ってもできることは多くはないということでもあります。需要家に電気料金が変わることに何らか関心を持ってもらうは第 1 ステップで、将来的には、需要の柔軟性をもたらす機器、例えば蓄電池などを導入してもらうこと、プラス、それを自動で制御する形が分散リソースの活用に必要なことだと考えています。

デマンドレスポンスの ポテンシャルは様々にあります。まずその個々の需要が料金に対応するだけではなく、ある程度量がまとまって平均的にある程度期待できるようになれば、その量を持って、いわゆるバーチャルパワープラントのように、供給力として提供できるとか、その調整を需給調整市場に出していく可能性、あるいはローカルな場所に何らか貢献する可能性もあると考えます。これらを踏まえて、電力小売り事業は、過去の電力システム改革では様々なサービスをやり電気料金を抑える可能性に向けて小売りが全面自由化されたのですが、今後の役割としては、需要家との接点を活かして、デマンドレスポンス分散型エネルギ

一資源をより活用するサービスをする役割を持っていると思っています。



電力小売事業の将来

電力需要の増加

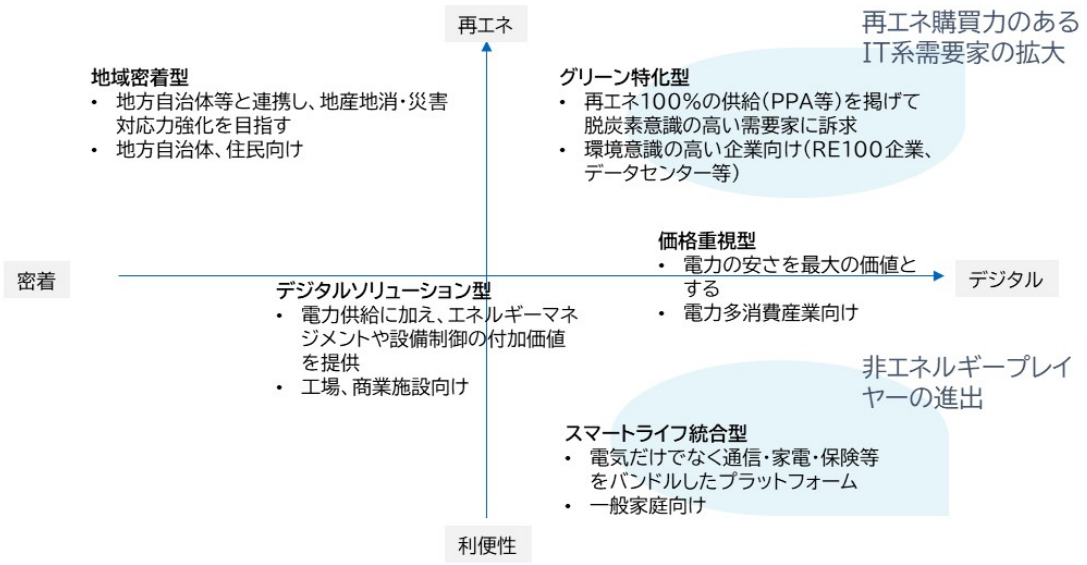
最後に数枚ご説明をしたいと思います。電力需要は 2011 年震災前後の頃から省エネが進み最終消費がずっと下がってきたのですが、今回出された第 7 次エネルギー基本計画では 2040 年に向けてまだ電力需要が増えるという見方が、いくつかのシナリオベースでは出てきています。その理由としては DX（デジタルトランスフォーメーション）の進展で、電力需要が増える可能性が、不確実性が大きい中で示されています。 そうすると、電力需要の柔軟性、デマンドレスポンスを考えたときに、家庭、産業というこれまでの使用だけではなくて、この増分として増えるデータセンターなどによってもそういった電力需要の調整というものも量としては期待されるというところです。一方で、こういったデジタル・トランスフォーメーションの進展で、電力小売り事業の将来を考えたときに、私自身は電気工学の出身でもあるので、電力システムの視点で小売り事業の役割を見ている方かなと思いますが、従来の電力システム政策のステークホルダーではなかった主体がぐっと増えてきて、こういうところが需要家の接点を全部奪ってしまうことも少し考えているところです。

業界で少しだけ話題になった「カブアンド」というサービスお聞きになった方もいるかもしれません。これが流行るかどうかは全く別にして、株がもらえる電気ということで、ZOZO の創業者の方が新しく始めたサービスで、「電気や携帯だとかいろんなエネルギーサービスをやることで株がもらえます」ということを前面に押し出しています。このように 電力やエネルギーのプレイヤーではないところが、電力需要のうち特に家庭の需要家の接点を拡大してくる可能性もあるとも思っています。あるいはグリーン特化型の小売り事業者やその再エネを使う需要家が増えること自体は良いのですが、小売りを通さずに再エネを併設したデータセンターが増えてくると、これは小売りの問題だけではありません。例えば、状況を紹介した電気新聞のサイトを貼っていますが、米国では併設負荷を巡って発電と送電が対立する状況も出てきています [45]。このようなところが出てくると、小売りあるいは送電の役割も今後変わる可能性があります。これまで電力政策的に見たときに需要の役割は、図の左側の方、どちらかというと事業活動の接点で密着して電力供給とエネルギーマネジメントもやり、省エネなどもやるプレイヤーをイメージしていたと思いますが、しかしそうではないプレイヤーが増えるのではないかと最近考えています。

最後、ちょっとこれ本当におまけでもありますが、電力小売事業ってどういったようなプレイヤーの人、専門を持った人がやっているのかという点です。図の割合は ChatGPT が作成したものですが、今の電力小売り事業ではその多くをマーケティングが占め、電力小売り事業の肝というか花形になっています。 それ以外に運用業務をやっていく人たちですとか、あとはマーケティングなども含めてシステム開発等をとやっていく人で、いわゆる電力需給の管理、バランシンググループでどうやっていくのか、どう調達をしていくのか、電力需要をどう予測していくのかという「専門性を持っている社員」はこれぐらいの割合であるが実態です。 そうしていくと、今までの電力業界で「小売り事業者」といったときに、需給側の知識を持つ人たちがアグリゲーションや、その他の市場の活用などをやっていって、電力システムの安定化にも寄与していくだろうと思っていても、なかなか小売事業全体から見るとそういうことを考える人は多くない状況です。

[45] https://www.denkishimbun.com/archives/386013

そうしていきますと、元々のお題としていただいていたこのエクセル表については、人材の分野だとかその競争力を考えるときに、前回のシンポジウムでもありました“電力×何か”という「何か」のところをきちんと取り込んでいき、かつその「何か」だけでどんどん走っていってしまう可能性が電力小売業にもあるので、電力側としても世の中の金融広告、IoT、マーケティングなどの状況にも歩みよってその情報を取っていく必要があると思っているところです。実際電気学会などを見ていても、電力小売業あるいはその市場価格の分析などであっても、電気学会の B 部門で見かけることは少ない状況だと思っています。こういった電力小売側、あるいはアグリゲータと呼ばれる人たち側と何らかの情報連携を取っていきつつ、本来、国全体で目指す電力システムに対して貢献し、少なくとも何らか歩調を合わせて進んでいく状態が必要だと思います。最後はだいぶ雑談なども入っていましたが、そのように考えているというところで、話を締めさせていただきます。 ありがとうございます。



質疑

（PL）

どうもありがとうございました。 私も自分の考えていた小売りのイメージがだいぶ違うのかなと、最後のところを聞かせていただきました。

それでは残り 50 分です。 最初に申し上げましたように、二つの話題提供で、一番目の領域から始めたいと思います。それでは皆さんの方からご発言をお願いします。 いかがでしょうか。参加者1、お願いします。

週間運用

（参加者１）

大変勉強になりました。まず河辺先生の方に関しまして、全体把握しきれてないところもあるのですが、週間運用の役割というのが、この PV がたくさん入ってくる中で、どこまで今後も必要なのかという疑問があります。例えば揚水も基本毎日運用されます。 だから週間運用の必要性自体が前から疑問で、そのあたりご見解を教え下さい。

もう 1 件、渡邊様の小売りの話も、非常におもしろく 聞かせていただきました。普段と違う視点で考えさせていただく機会になったと思います。 特にその Looop さんは家庭用でしかも市場連動料金という面白い取り組みをやってらっしゃる過程で、そもそもリソースが増えない、増やさなきゃいけないというところがあると思います。みんな期待する割にはリソースがあまり増えていない現状の認識もあり、そのためには、市場連動料金を選んでいる Looop さんのお客さんならそういうリソースを積極的に入れる傾向があるのか、そして、これからそのリソース増加の可能性についてお伺いしたいと思います。 2 点目は、ミクロの話で恐縮ですが、小売りさんは容量市場がスタートして容量拠出金を抑えるためにピークを下げるニーズが結構あると思います。それに向けたお客さんへの働きかけや具体的なメニューは Looop さんでは用意されているでしょうか。この 2 点、よろしくお願いします。

（河辺）

ご指摘のように、1 週間分計画を立てたところで、再エネの予測が大きく外れると無駄になってしまう。特に 5 日後 6 日後つと計画を立てた意味が薄れていくことは、ご指摘の通りと思っています。　実際、同時市場の議論の中で週間計画の話があり、事前にお配りした資料の 7 ページに週間計画作成のタイムチャートおよび粒度という図があり、週間計画を立てるにあたって、その直近の数日は 30 分ぐらいの時間粒度で詳細な計画を立て、そこから先の 3 日目あるいは 4 日目などどこで区切るかは決まっていませんが、後半では計画を立てる時間の粒度を 3 時間 4 時間というふうに荒くしたおおよその計画でいいという検討が行われています。1 週間の計画を立てる元々の意義としては、平日と週末の需要の変化が違うため 1 週間だったのですが、再エネ入ってくると正味の需要が 1 週間の周期かというところはそうでもないという認識で私もいます。

需要側のリソースの増加と容量拠出金抑制

（渡邊）

ご質問ありがとうございます。まず 1 点目、家庭のリソースを増やす方法、難しい質問です。家庭のリソースで大きい容量が期待されるものとしては、家庭用の蓄電池、ヒートポンプ給湯、電気自動車などと思いますが、前の 2 者については、ハウスメーカーさんの方が接点は強く、新築のときが導入の大部分だと思っています。一方で、そういう環境を意識したハウスメーカー様のところでは、新築では太陽光発電の搭載率100%、蓄電池も7、8、9 割入っていると聞くところですので、新築時の働きかけを期待するのが現実的と思っています。電気自動車については、数は自動車メーカーさんなどの戦略次第とは思います。電力小売りとしても、お客様との接点を考えているところではありますが、難しいところです。

容量拠出金の抑制には、おっしゃる通りで大変な工夫の余地があると思っています。Looop としては、具体的には容量拠出金の対象の時間帯が分かれば、そこに向けて節電のキャンペーン、これは市場連動型料金とは別枠で特定の時間だけ何らか節電のお願いをする形でのキャンペーンにしたいと考えています。必要なこととしては、容量拠出金の対象となる時間がいつかという予測です。ただ制度上難しいのは、今の容量拠出制度は、詳しい方もいらっしゃるかと思いますが、例えば夏については 7 月、8 月、9 月の各月の中での最大需要の時刻、この時刻に需要家の人が電気を使った量に対して課金をされるという制度です。しかし、この 9 月の中での最大需要の発生時刻の予測は結構難しいと思います。夏季最大 3 日の需要だったらまだ分かりやすいのですが、9 月の中でいつが最大になるのか。9 月は暑いと言ってもそこまで暑くない日の可能性もあり、最大需要の時刻が太陽光発電もたくさん発電している時刻で市場価格は安い時刻だったりするということも多分にあり、予測はなかなか難しい。制度上の課題もあるだというふうに、容量拠出金対応については考えているところです。

（PL）

ありがとうございました。

はいそれでは参加者2、お願いします。

安定運用と情報提供

（参加者２）

河辺先生への質問です。電力システムの多岐にわたるお話をいただきました。我々も調査専門委員会を立ち上げまして、それが 3 月に終わりました。電力系統の安定供給を支える電力流通設備計画と運用技術という調査専門委員会では、自由化前に 1 回同じような委員会を立ち上げて電力系統技術をまとめていましたが、その後どう変遷したかということで今回まとめました。印象としては、今日先生がプレゼンされたように、非常に複雑化し、その上で、いろいろなチェック項目を設けて運用されている現状です。そういうことで、今日先生が説明された多岐にわたる安定性や、制約などいろいろな話が出てきていて、なかなかすっきり理解できるような状況になっておらず、うまく管理できているのかどうかを非常に疑問に思っています。印象としては、当時に比べると相当信頼性も落ちています。再エネが相当入り不確定性もかなり大きくなっているので、信頼性を維持した系統運用は既にかなり危ない状況になっているのではないかと感じます。要するに、大停電が近々起きても不思議ではないという印象を持っています。河辺先生どんなふうにお考えになられ、どんな感覚を持たれているかをお聞きします。いかがでしょうか

（河辺）

私も同じように思うところはありまして、市場に関係する情報は表に出ているとは思うのですが、その裏で一般送配電事業者さんがどういう努力しどう苦労しているは、あまり表に出てきてない。私が知っているというわけではなく、表に出ないのでわからないのが正直なところです。今回このプレゼンの用意で勉強させて

したんですが、送配電網協議会さんからのプレゼン資料などの中で、「こういうところに苦労がある」などの話はちらほら出てきていますが、もっと細かい話が実際にはたくさんあり、どのように状況にあるのかが、そもそも情報として入らない、表に出てきてないというのが、今のご質問に対しては思っているところです。

（参加者２）

まさに先生おっしゃる通りに私も感じています。体系的な説明がしにくい運用になってきているという状況があり、先ほど先生が言われた市場の最適化計算の部分と、安定性の確保という部分を整合的にやっていくことが必要になると思います。あと、効率性については、先ほどの質問に対し先生のコメントもあったように、市場の最適化計算のこれから先のことを考えたときに、リアルタイムでしっかり回していける形のものを作っていかないと、安定性の裕度を保った運用ができないと感じています。これをどのように整合させるのかが課題と個人的には思っております。ありがとうございました。

（PL）

はい、ありがとうございます。他、いかがでしょうか？

安定運用への小売りの役割と BG 制度

（参加者３）

さらに、運用方法の面から見て、小売り事業者、特に小売り BG、に対して今後何を求めることになるでしょうか。

（河辺）

ありがとうございます。この議論には観点をまず定める必要があります。系統運用や需給運用という電気工学的な観点では、需給バランスの維持についてこれまで努力していただいている状況かと思いますが、BG 制のもとでは、需給バランスを保つことを、物理的なシステムの中の需給バランスと、あと生産という観点での需給バランスと価格の部分、その二つがあると思っています。 事業をする上で、価格面で市場の中での需給バランスを維持すことは当然重要だと思いますが、物理的にバランスを取ることに対しては、必ずしも BG さんごとにやる必要があるのかについては、私もわかっていないところです。実際の運用費用をより効率的にすることに寄与するのであれば、もっと柔軟に考えて、BG 制は市場の中での需給バランスに特化して、物理システムとしての需給バランスの運用は、例えば TSO さんが一括して実施しより効率性を追求してもらう。将来的にこの同時市場という枠の中での実現性は十分に分かってはいませんし、検討もこれからだと思うのですが、柔軟性についてはそういう議論もできるといいと思っています。BG 制と今の同時市場の議論のところで、思っているところです。

火力を含めた週間計画

（PL）

はい、ありがとうございました。それでは参加者4、お願いします。

（参加者４）

はい。先ほどの再エネの予測が 1 週間単位で当てることができず週間計画の意義が低下するというのはもっともだと思うのですが、一方でその結果なのですが、電源側から言うと、実際には日々の運用だけではなくて、週間ぐらいの期間で準備をするという状況があります。 揚水についても厳しいときに使いすぎて、池の水が足りなくなったということが起こったと聞いていますし、我々火力につきましても、多くは DSS で毎日起動・停止ができる機能を持っていますが、点検を伴う場合等には数日停める運用を考える必要があり、週間計画がずれていく中での火力の対応は徐々に厳しくなっていることへの考慮を今後お願いしたいと思っています。以上です。

（河辺）

おっしゃる通りだと思います。ご指摘いただきましてありがとうございます。

揚水運用

（PL）

はい。他いかがでしょうか？

なかなか体系的に議論するのは難しいところはあると思いますが、そこは多様性で勝負ということで皆さんからどうぞ。

参加者5、お願いします。

（参加者５）

さっき参加者2と河辺先生のやり取りに関してちょっと補足のコメントなのですけど。需給調整市場の特に3 次②で調達すべきリソースの確保に関して、河辺先生の説明の中では余力活用のお話がありましたが、中部電力パワーグリッドはさらにミライズと揚水発電の運用権の随意契約を結んで調達コストを削減しています。 こういうところがまだ全ての TSO で共通になってない事例の一つだと思いコメントします。 揚水の運用については、固定費を一部負担している TSO が小売事業者とうまく連携することが、社会コストの低減に繋がっていると思います。

（PL）

ミライズは揚水を運用している会社ですか。

（参加者５）

バランシンググループとして揚水をミライズが契約しているのですが、さっき言った貯水池の制約があり、事前にどれだけ出していいかっていうのが発電事業者としては不安なので、そこからちゃんと保証する形で運用系の一部を TSO と契約するというもの。 これは国の審議会にも報告されていると思います。

（PL）

はい。揚水を送配電設備として運用するっていう話、一旦揚水は発電だと決まったような話になっていましたが、この頃ちょっとよりが戻っているということでしょうか。

（参加者５）

そう。それは PL と以前話したのですけど、私は正しい方向に戻していると思うのですけど。

将来は、系統用蓄電池も制御対象にするかどうかも、議論した方がいいと思っています。

米国の同時市場との比較

（PL）

その通りです。他、いかがでしょうか？

では、私からちょっと質問なのですけども、海外でいろんな運用がされていて、それは日本から見るとどう見えるんだっていうのは何かありますか。 例えば、揚水を送電設備として運用にすることはアメリカではルール化されています。一般論として海外で同時市場も運用されているし、それが全般的に日本からどう見えるのか、

（河辺）

ありがとうございます。荻本先生の方がお詳しいのではないかなと思いながら、ちょっと答えづらいですが。海外ということで例えば同時市場の議論で参考にしているであろうというアメリカの例では、今国内だと同時市場で前日の段階で 1 回 SCUC をやって、その後時々刻々と変化する再エネや需要の予測の変化に合わせて SCUC をやり直し、その都度 BG さんの約定などもするという設計がされています。アメリカの場合だと前日市場とリアルタイム市場っていう形をとっていて、ある意味ゲートクローズが前日の段階で、それ以降は ISO、RTO がリアルタイム市場でいろんな電源の起動停止計画を前日市場で決まった結果から変えていく、そういうイメージなのかなと私は理解しています。

そういう意味で、系統運用の観点ではすごく効率的なやり方だと私は見ているが一つです。あと、その運用の話で言うと、運用容量の話として今日の後半でさせて頂いたフリンジについて、そのフリンジを確保して計画を前日段階でも立てる SCUC の熱容量制約を設定するときに、そのフリンジ分を控除した値を熱容量の制約に設定した方がいいではないかと国内ではされています。ですが、アメリカではそのような考慮はしてないという話のようです。送電系統の構成が、日本よりもアメリカの方がよりループがたくさんあるメッシュ系統になっているので、潮流が勝手に回り込むので必要ないという話もあるようです。ですから、リアルタイム市場のようにすごく効率的だと思うところもあるし、系統の特性が違うので必ずしも鵜呑みにしてもいけないと思うところもあり、両方の側面で見ています。

あと他にも、発電機の起動にかかる時間とかも SCUC をやり直すという話のときも、発電機の火力の起動時間を考慮して考える必要があると思いますが、アメリカだとその点はあまり議論になっていない印象を持っています。それは、アメリカではガスタービンのように起動の速い電源が多く再エネの変動に対応しやすいなどの違いがあるのかもしれないなと思います。環境の違いがあるのは一つあるんじゃないかなとか思っていて、だから参考にする部分と、違いとしてちゃんと見る部分と、両方の側面を考える必要があるという視点で見ています。

（PL）

はい、ありがとうございました。岩船先生、お願いします。

揚水運用と系統蓄電池

（参加者１）

揚水やこれからの系統蓄電池の話です。先ほどご河辺先生ご説明の中で、SGUC ではやはり一緒に考慮していくべきだと思います。ただ実際は、BG 制度のせいで、セルフスケジュールなどで決まってしまうところが多いという整理なのか、今後どうなっていきそうかなど教えていただけないでしょうか。

（河辺）

ありがとうございます。今は基本的に揚水の所有者の自由選択というのが、議論としては一番強く出ているような気がします。ただ自由選択だけどもう SCUC に任せてしまった方がその揚水の事業者さんにとっても利益が最大化されるのではないかという考え方で、結果的には、皆さん、系統用蓄電池も含め SCUC に任せることになるかもしれないです。そこはわからないというのが私の正直なところです。そういうふうに捉えています。

（参加者１）

ありがとうございます。市場って、貯蔵設備は、期待通りの運用が市場を介して実現できるのかっていうのがポイントだと思いますので、やっぱり揚水だけならまだ発電事業者、発電の人たちにガバナンスが効きそうですが、系統蓄電池となると数が多くて大変で、そのあたりがキーだと思いました。 以上です。

（PL）

はい、ありがとうございました。 それでは東京電力戸田さんお願いします。

（参加者６）

先ほどの河辺先生と渡邊さんのやり取りについてコメントします。河辺先生おっしゃったのは、BG の役割としては物理的な需給運用ではなく、むしろ金融的なリスクヘッジだとおっしゃったと理解しました。私も同感でして、どこまでいっても TSO と比べると BG は情報の制約が大きいので、BG に物理的な需給均衡を期待しすぎると、どこかで無理がでると思っています。もう一点、先ほど渡邊さんのプレゼンの最後の方に出てきたアメリカの電源併設負荷の話は昨日の電気新聞も報じていました。向こうですごくもめていることは前々から聞いていますが、日本でこういうニーズが発生したらどうなるかと想像すると、データセンターが同一構内に自家発を併設したいと言えばどうぞと言うしかないし、仮に同一構内でないとしても近くに発電所があって、そこから電気を自営線で持ってくるのも制度上ストップする理屈はないと思います。データセンターの需要がどんどん増えてくのに対して、ネットワークがそれに追いつかないとすれば、揉めていると言いながらそのやり方でやってもらうしかないのではないかと思ってしまいます。ただ、系統と繋がった結果、kWh の需給はバランスしているにしても、周波数が安定するなどの価値があるなら、その分の料金を払うのは日本でもやっていました。アメリアの電源併設負荷がこのコストすら負担したくないということでしたら、それは確かにもめるだろうと思います。以上です。

（PL）

はい、ありとうございます。渡邊さん何かありますか。はい。

PL からはコメントは、データセンターに関しては、連鎖脱落で合計 150 万キロ落ちたことについて 1 月に NERC からレポート出して、その再発防止が議論になっているようです。供給が足らないから何とかしないといけないということと、反対にそれ自体が安定性の問題を起こしている状況とだと思います。

皆さんの方から。参加者7、どうぞ。

（参加者７）

ありがとうございます。2 件あります。まず河辺先生のお話聞いて現状でもかなり大変だというのはわかるんですが。今後 2040 年、2050 年カーボンニュートラルに向けて再エネがこれからまだ増えていくことになっています。それに向けて今の努力をしていればいいのか、抜本的に何か系統を組み替えるなど、新しい発想でやり直さす必要があるのかについての感触をお伺いしたいと思いました。

あと渡邊さんのところで「市場に連動した価格で」ということで面白いと思ったんですが、人間が反応する・させることを前提にするとやっぱり無理があるので、スライドの中にあった自動DRというか、今こそHEMSの出番で価格差があればあるからこそ努力をして何かベネフィットを得られるので、踏み込んだ何かサービスを提供することはないでしょうか。以上 2 点です。

（PL）

はい、ありがとうございます。河辺先生。

（河辺）

ご質問ありがとうございます。今の努力をしていけばいいのかという点について、今の時点で各事業者さんや大学などもそれぞれ精一杯御努力をしている状況だと思っていて、それ以上にできる努力があったらそれもしていると思います。その上で思うところとしては、まず電源のアデカシー、必要量の確保でいうと、今長期脱炭素電源オプションが新しく作られて、長期で電源の十分な容量を確保していこうとしています。そこでその募集量の設定については十分な検討ができておらず、やり方がまだわかってない状況にあり、電源の計画という意味では将来どういう種類の電源がどれだけ必要なのかの検討を反映させて、制度設計しり必要があると思います。そこではまさに藤井先生のところでやられている将来の最適な電源計画などのご知見を反映させていくと思っています。これが一つ課題だと思っています。あと流通設備のその長期的な計画では、マスタープランがそれに当たるかと思いますが、例えば日本海ルートに大きな HVDC を作る計画が今進んでいますが、HVDC の電力変換器をもっと高機能化したら、例えばそこまでの容量は必要なくなるとか、あと既に十分に今検討が進んでいると思うのですが、再エネ自身に系統安定化機能を持たせられれば、そこまでお金かけなくてもすぐ済むとか考える余地があるのではないか。今日の資料は「もっと技術的な検証を深めることができる」と書かせてもらったのですが、シミュレーションによる分析とかが十分にやられてない中で、マスタープランが何か一旦決まってしまっているような気は個人的にはしていて、大学を初め既存の研究者の知見をもっと生かせるところはあるのではないかと思っています。お答えになったかわかんないですけど、

（参加者７）

ありがとうございました。

（PL）

ありがとうございました。それでは渡邊さん。

（渡邊）

おっしゃる通り、デマンドレスポンスの自動化が次にやるべきところだと思っています。　これまでも機器別、例えば蓄電池だけだとかそういったものも検討していましたが、やはりどうしてもそのピークのデマンドのところもコントロールが必要ということで、HEMS などの活用を考える必要があると思っているところです。

閉会

（PL）

ありがとうございました。

それでは、一つだけ私からコメントです。今回の議論は、運用、小売でした。これから解析 1 回、解析2、市場など横断的に見るテーマが続きます。今日の議論と関係した議論が出てきますし、それらの議論から今日の議論に戻ってくる可能性もあると思っています。皆さんどうぞよろしくお願いします。一つだけ今日出なかったなと思ったのは、状態監視やモニタリングの実施と、日本はなかなかデータの出てこない国だということです。アメリカやヨーロッパはいろいろ取っていてそれ自体が出てくる国だと感じます。データ使えるとまた議論が発展するところもあると思っていて、これからの議論ではそういう話題もでれば良いかなと思いました。

最後、事務局からの連絡です。

（事務局）

本日はどうもありがとうございました。

事務局関連の情報といたしましては従来通りですが、担当者が変わっています。前前回より参加させていただいています馬場と、先ほどご挨拶させていただきました幡野の方がプロジェクトの幹事を務めさせていただいています。

もう一点が次回の話になります。またこちらもちょっと共有いたします。最後次回今後の予定としまして、次回第 7 回の会合は 6 月の末もしくは 7 月の頭ということで考えてございます。つきましては、この講師の先生方との日程調整の上、会員の皆様方に一度調整させていただきますので、どうぞご協力のほどよろしくお願いいたします。次回の講師の先生は吉沢先生と石井先生のお 2 人を予定しています。私の方からは

以上です。

（PL）

はい、本日もどうもありがとうございました。これで終了させていただきます。

以上

第 7 回会合

開会

（荻本 PL（以下 PL））

時間になりました。本日第 7 回を始めさせていただきたいと思います。

本日は、需要技術で大阪大学芳澤先生、IT で早稲田大学石井先生に話題提供をお願いしています。

進め方と提言の報告書

今年の 1 月に「進め方」それから「提言の報告書の構成についてのメモ」を示して皆様のご意見を頂きました。それに続けて、中間シンポを行い、それら二つについて現段階で考えていることを再度ご説明し、皆さんのご意見いただきたいと思います。

「プロジェクトの進め方」をまずお示しします。ボックスの中の資料と同じものです。中間シンポでは、二つのパネルディスカッションを含めて実施した内容に書き換えてました。今後の進め方のポイントとしては、従来終了時のシンポは 1 回計画をしていましたが、中間シンポの状況を反映し、ここにありますように、中間のシンポと同様、後半の締めとしての趣旨で後半のシンポを 26 年の 3～4 月に実施し、その 3 ヶ月後ぐらいのイメージですが、とりまとめた提言を発表するシンポを 2026 年の X 月、イメージでは 7 月ぐらいを目指したいと考えています。

一番後ろのこのスケジュール表で、一つのシンポだったのが二つになったということです。あと後半では、第 10 回というのが分野横断の議論となっており、ここで分野横断の議論を実施したいと思います。

次に、提言の構成です。これも 1 月に皆さんにお示ししました版の修正版です。公表の時期は春から夏というふうにしました。左側にワードのアウトラインレベルを表示すると出てくるように、全体の構成は総論、キー技術・キーシステム技術、横串、マップと付録です。「マップ」はエクセルによる、毎回少しずつ進めているこの取りまとめ表、参考文献はあの表ですね。付録は、毎回事務局で作製している発言録です。

総論では、今の段階ではイメージとお考えいただきたいと思いますが、日本の特性、これ最初にないといけないというご意見もあり、「同じ」ところも重要だと思いますし、「違う」ところがあればそれも重要かと。それから「電気と電気によるサービスの重要性」と、「実現への課題」それから「ビジョン」、そういうのを背景にして、「目指す姿」、それからニーズと技術が変化する中のキーワードについての記述、約 1 年前のクローズドのワークショップで取りまとめたワードを示しています。

「集中型の電源なら電源と、分散型の需要とか電源が協調」している、そういう姿であろうということを、この場でもディスカッションさせていただいたので、この辺りを目指す話。それから「電力村批判」はあるけれども、「運用の重要性」や「停電したら大変なことになる」ことを伝えたい。片や、「コモディティ化する電力」では、多様な側面と組み合わせる「電力×〇〇」というところを説明する。「変革のマネジメント」をどうしないといけないのか、人材育成など「横串の視点」もある。

以上が、中間シンポジウムの議論も含めて今総論の中でイメージしている内容です。これは、「これで決まり」ということではなく、こういうイメージでここから進めていきたいという内容です。

作業としては、「総論」は事務局で少しずつ作成し、皆さんに見ていただいて意見をいただくことになると思います。「キー技術・キーシステム技術」では、シナリオによらず重要なロバストな視点（とその逆に、特定のシナリオで重要な視点）をまとめるために、各回の討議・執筆委員の討議をベースにしてたたき台は事務局が作り、各回の担当の先生方仕上げて頂きくことで考えています。後でサンプルを見ていただきます。横串は中間シンポで人材の議論をしましたが、それらの議論をまとめていきます。これは事務局が原案を作成して全員に見ていただくことを考えています。まとめは、誰がオーディエンスなのかをポイントに書きたいと思っています。

最後に、今までのご発言などをベースに、キー技術・キーシステム技術を書こうとすると、どうなってしまうのかというのを少し私手元で作業してみました。資料にはありませんが、お示ししているのは、中間シンポの岩船先生の発言をベースにしてそれを少し文章っぽく書いた状況です。これはたたき台で、たたき台はいかように修正いただいてもいいのですが、こういうものを用意させていただくので、ぜひもう叩いていただきたいというイメージです。この後は原先生の「従来電源」とかが続くわけですが、元になったご発言の構成や量がパートによりだいぶ違い、たたき台もそれに引っ張られるため、現状は作成した結果が異なるのはやむなしということで見ていただきたいと思っています。こういうたたき台は事務局で作り、皆さんにいかようにも叩いていただくことにさせていただきたいと思います。

以上です。いかがでしょうか？

事務局からは、たたき台を少しずつ出させていただきます。

あと、第 1 回から第 6 回までの発言録について、まとめて見られるように一つのワードにしたものもあの事務局では作成しております。これまでの議論を俯瞰していただくこと、付録のイメージとして後日お送りしたいと思います。

講演 1 需要機器（大阪大学・芳澤）

（PL）

最初の話題は、大阪大学芳澤先生による需要機器技術です。どうぞよろしくお願いいたします。

（芳澤）

初めまして。大阪大学芳澤です。本日は需要機器に関する話題提供させていただきます。私は出身が早稲田大学の林研究室で、元々の研究テーマは配電系統解析に近いところでしたが、大阪大学に移ってからは電気自動車に関する需要推計や交通と電力のセクターカップリングに取り組んでおり、上記に関する話題提供としたいと思っています。よろしくお願いいたします。

本日の内容

（S2）最初に背景として、2050 年カーボンニュートラル社会に向けて、需要機器がどういうふうに変わってきて今後変わるであろうかについて、簡単に触れさせていただきます。次に、配電系統における DR フレキシビリティや電気自動車の充電需要推計等の取り組みについてご紹介させていただきます。

その後、キー技術・キーシステム技術の課題等、今後の課題について説明する予定です。

2050 年 CN 社会の実現に向けて

（S3）2050 年のカーボンニュートラル実現の目的のもとでは、現状脱炭素電源への置き換え、再生可能エネルギーの導入、電力部門以外における電化等を中心とした取り組みが行われています。

2050 年のカーボンニュートラルの実現には、エネルギーシステム全体の抜本的な改革が不可欠であるとともに、基本は電化社会というものが前提になると考えられ、エネルギーの使われ方や需要機器のあり方も大きく変わると想定されています。昔は電気機器、需要機器は電気を使うものという概念でしたが、今後は、電力の運用、系統運用者を支える存在になることが予想されています。ここに書いているように、DR（Demand Response）や DSR（Demand Side Resource）として系統用に活用されるのが将来のあるべき姿と思っています。

一方、非電力では電化を中心とすると申し上げましたが、電化できない熱需要など需要が結構あり、熱量に関しては基本的には水素化を進める、あるいは出してしまう CO2 を回収する CCUS や DAC などの技術開発が重要になると考えています。需要機器の変遷というところで主に家庭部門と業務部門を挙げていますが、イメージとしては家庭の方がわかりやすいかなということで家庭の図になっています。

需要機器の変遷

（S4）私が感じるところでは、エネルギーマネジメント、HEMS と言われるものは 2000 年代前半ぐらいからあったと思いますが、大きく意識的に変わったのは東日本大震災以降になると考えています。大震災が起こり、皆様の節電や、電力需給バランス、電力不足への関心が高まったということと、エネルギー需要を見える化するスマートメーターもそうですし、リアルタイムで今どれだけ自分が使っているのかの電力量を表示するところが第一歩と考えています。その後、ECONET Lite 等による通信制御や HEMS 重点 8 機器が定義されて、HEMS により家電等の自動制御を行う世の中が始まってきています。その後、経産省などの補助があり、ゼロエミッションハウスの義務化や実施による住宅ローンの補助などで設置が拡大し、断熱性能の向上や最近では東京都の太陽光を義務化があり、そういった部分と制御技術を統合するシステムや需要を作る段階になってきている。

今後は、これらを電力システム全体と連携をするデマンドレスポンス VPP、この後紹介します DR ready と DR フレキシビリティ、あとはレジリエンスの確保などが重要になると思っています。

一方で、家庭レベルでは AI や IoT との融合が進んでいます。後半の石井先生が話される規格の分野ですが、アマゾンや Google の共通プラットフォームを提案しており、それらの規格と ECONET Lite がゲートウェイを作り、スマートホームとして家で動かし、予測にもとづき経済性を向上するなど横断的な連携ができるようになり、高度な需要機器制御ができる世の中になってくると考えています。

DR ready、フレキシビリティ活用

（S5） DR ready に関しましては今まさに需要家リソースソース（DSR）で対応を進めているところで、ヒート

ポンプ給湯器や家庭用蓄電池等の DR ready 要件が検討されています。このあたりにつきましては基本的には DR ready ということで、電力の需給調整等の安定化に貢献するシステムとして、需要機器も変わっていくことが今議論されていて、そういった議論において、何を技術要件にして、昨今サイバーセキュリティも問題のためセキュリティガイドラインをどうするのかが、まさに今ワーキング等で検討が進められています。こういった中で、Behind the meter の太陽光で、蓄電池、燃料電池、EV 充放電器など、先ほど記載させていただいた HEMS、充電器に関するところの DR 利用方法が今議論されているのかなといます。今後は、これらが市場等といかに連携をしていくのか、どういった将来を目指して進めていくのかが、今議論されておりまして、注目すべき点と思っております。

(S6) もう一つのテーマとしては、「DR のフレキシビリティ活用」があります。こちらは基本的に系統全体の需給調整から配電系統の混雑回避までの DR の活用が検討されている状況と理解をしています。

こちらに関しましても経産省の「次世代分散型電力システムにおける検討会」が行われていて、基幹系統における需給調整、周波数調整への DR 貢献がもともと期待をされていたのですが、さらにローカル系統や配電系統における混雑回避にも使えるのか、使うためにはどのような技術開発やシステムが必要なのかが、今、まさに検討されています。配電系統等の混雑回避等に関しましては、NEDO の DR フレキシビリティ実証が行われており、多分石井先生がやられてるかなと思うのですが、どのようなプラットフォームを作るべきか、システムの仕様統一をどう図るのかなどが重要なテーマになっています。こちらは各 TSO・企業・大学が参加する実証が行われています。

次世代の分散型電力システムの姿

(S7) こういった背景を踏まえると、次世代の分散型電力システムの姿としては、需給調整市場において機器の個別計測を活用した調整力をいかに出すのか、創出するのか。これに向けて、先ほど申し上げたように、配電系統の運用や系統混雑管理に DR を使うためのプラットフォーム開発、あとは低圧側リソースの有効活用ための群制御の活用が議論されています。

これらの実施には、先ほど述べたように DR ready の要件の定義が必要ですし、DR フレキシビリティの活用の価値の算出も必要です。また、EV が普及するためには、EV が連系することによる問題と同時に EV を動く蓄電池と考えた貢献量の算出も重要と考えています。

このような背景のもとで、この左下の赤枠に書いてあるように、DR フレキシビリティの量と、EV による系統貢献ができるのか、そもそも EV が系統にどんな影響を与えるのかを今まさに評価をしているので、この後一部紹介します。

DR 普及期における課題と期待

(S8) 今後の配電系統では、脱炭素電源の普及という意味で再エネは今後も普及すると言われており、第 7 次のエネルギー基本計画においては 40%から 50%ぐらいの電源構成になるとされています。

その中で太陽光等は主力電源として期待されており、配電系統に大量に導入されることが想定されます。それらの再エネが増加したときの課題としては、系統混雑、電圧上昇などが考えられており、それらいかに DR を使って解決できるのかを議論する必要があり、また、昨今のレジリエンスへの期待に応えるため、災害時に再エネや蓄電池などのデバイスを使うことで、いかにレジリエンスを向上・確保できるのかを今後は考えていく必要があると考えます。

以下では、DR のフレキシビリティ活用に向けて、EV の充電需要の算出方法スや、フレキシビリティによる系統への影響評価等を紹介します。

実走行データに基づく EV 電力消費量の推定モデル

(S9) EV の充電需要の推計について、二つ紹介します。

詳細な走行データが得られる場合

(S10) 一つ目は実走行データに基づく EV 電力消費量の推計です。スマートフォンによる計測データとして詳細な人の動きのデータがある場合には、EV の電力消費量が精度よく推定できるという技術開発の結果です。具体的には、GPS 測位によって緯度経度が一定間隔で得られるデータがある場合、電動車両では車速や加速度等のデータを使うことで、「動力学モデル」と書いてある運動方程式モデルにより、走行電力の消費量がかなり精度よく推定されることがわかってきています。

具体的な流れとしては、EV に関する車種や車両の重量等を入力とし、スマートフォンで得られる GPS のデータでどこを走ってるのかといった都市とか市町村のデータ、それに紐づくような走行履歴から、どこを走ったのかという走行経路や、ADAS 等の標高情報などの情報と紐付けることによって、どこをどれだけの電

力を使って走っているのかがわかるようになってきています。運動方程式に基づく電力推定は、簡易的に書いていますが、基本的には速度に比例する形の運動方程式として得られます。この Θが道路の勾配で標高差から求められ、走行抵抗分として、路面抵抗に関する部分と、空気抵抗に関する部分、ma_t が力の部分で、あと補機や空調の電力を足し合わせて簡易に推定できる方程式です。

マップマッチング

（S11）このマップマッチング技術にはいろいろな手法が開発されていて、我々の研究では、ゼンリンデータコムさんが提供している WebAPI を使ってマップマッチングを実施し、どこの道路をどれだけどう走ったかがわかるようになっています。

大阪大学を出発してこのような周回コースで走る場合、GPS のデータが赤の点で測定され、これを入力として道路情報を推計することで、どこを走ったのか走行経路を特定した結果が青線で得られます。このように、走行経路がわかることで、右側にあるように道路の標高がわかりますので、この高さと距離から道路の勾配も算出できます。大阪大学に来たことがある方はわかると思いますが、緯度経度の 2 次元の図では平面に見えますが、阪大の周りはかなりアップダウンが激しく、標高差ですとか勾配もかなりきつい坂が多い状況です。これらの情報を基に電力需要推計をしています。マップマッチングの結果例として、先ほどの走行経路が短い場合と、長距離走った場合について、マップマッチングの精度を評価しました。その結果、どちらも走行経路がある程度特定ができ、マップマッチング等の精度も高いということがわかっています。

EV 電力消費推定

（S12）このような情報を用いて先ほどの運動方程式に基づき EV の電力需要を推計しました。左側が通勤利用で移動距離が短い場合です。右側の「中距離移動」は、一部高速道路を使っていて走行の距離が長く速度が速い場合です。赤の波形は、EV は日産リーフですけれど、実測、先ほどの運動方程式に基づく値が青の波形です。推定電力では実測波形の形状がよく再現できており、一部、瞬間に発生する誤差はありますが、見た感じの推定精度は非常に高いことがわかります。

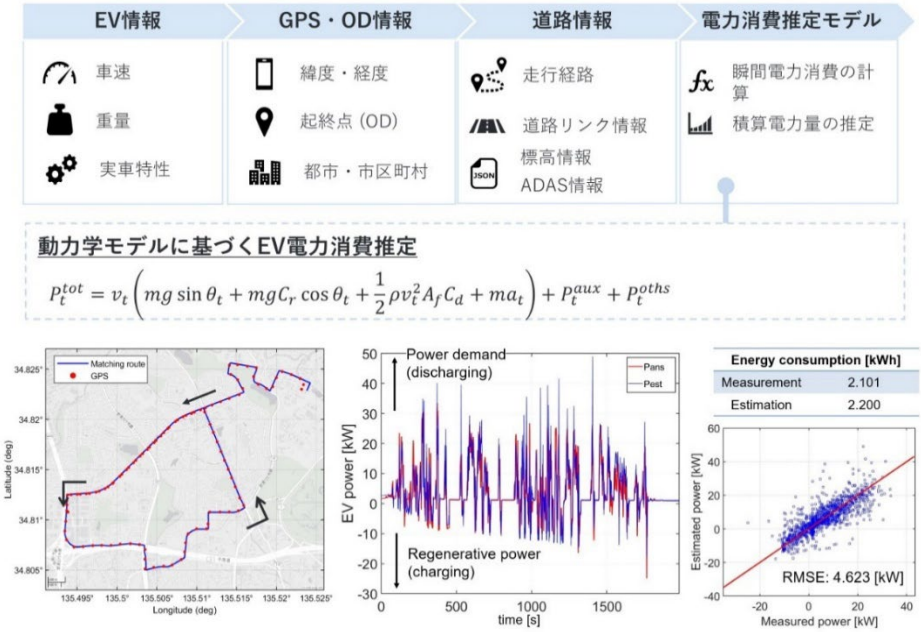
一方で EV に関しては重要な点として、力行・回生の特性があります。力行はアクセルを踏んだ際に使う電気の量で、回生はアクセルを離した際や、下り坂でブレーキをかけた際の充電の量です。これら力行電力・回生電力についても精度よく表現できていることがわかります。基本的には、通勤利用等は街中の利用ですので、速度が比較的遅く、回生電力も非常に高くなる傾向があります。一方で、中距離など、高速道路等を走る場合は、100km/h や 80km/h で走る時間帯が多いため、基本的には回生電力はなかなか得られず、電力消費が多い時間帯が多い傾向がありました。

（S13） これまではあくまでも瞬間瞬間の電力値で、通勤利用の場合について、詳細な結果を追加しております。グラフの横軸が実測値、縦軸が推定値になります。右肩上がりの直線が実測値と推定値が一致している直線になりますが、基本的には誤差は小さく、瞬間瞬間でも 4kW ぐらい程度の誤差ですんでいるということになります。

（S14）一方で、電力需要として考える場合には積算の電力消費量 kWh が重要になります。今回のこの通勤利用に関しては、0.1kWh ぐらいの誤差で、かなり精度が高いこともわかっています。

（S15）実際に走らないとデータが取れないため、73 パターンの走行データしか今はないのですが、瞬間的な電力消費量の誤差や、積算電力量の誤差を評価しました。二つ箱ひげ図があって、それぞれの中の左側が走行距離の短い通勤利用、右側が中距離 100km 以上走る場合の結果です。瞬時の突発的な誤差はRMSEで最大で6kWの誤差が出てますが、kWh換算をしますと実測引く推定値との誤差が最大0.5kWh程度の推定誤差で納まる結果になっています。

評価ケース数は多くはないですが、これだけ見ても推定精度が十分高くなることが分かります。こういったデータを使うことで到着時にどれだけの充電電力量を要する車が家に帰って来るとか、充電ステーションに行くかを把握する計算ができて、どれだけの充電が必要かとか、何 kW の充電需要になるかを予測できます。



流動人口データを用いた EV 充電需要の推定

（S17）二つ目は、先ほどはスマートフォンで 1 秒刻みあるいは 10 秒刻みである程度精度よく得られている場合であるのに対し、何百台とか何千何万台という多数の車を対象とする場合には、ある程度簡素化した技術が必要だということで、流動人口データを使った EV 充電需要の推計です。

流動人口データとして、大阪大学では Agoop 社のポイント型流動人口データを使っています。電気自動車の充電需要の推計等には基本的には道路交通センサスデータが多く使われてきたと感じています。道路交通センサスデータは、データが必ず自動車の利用であることが確実ですが、得られるデータ数が調査日に限られ、データとしては OD 表になっていて、平日と休日の各 1 日にデータが限られる課題があります。

これに対し、昨今得られるビッグデータである流動人口データは人の移動で自動車以外のデータも含みますが、先ほど申し上げた通り GPS の測位によって緯度経度の点列が得られ、日付などを指定することにより春夏秋冬の季節性や、コロナ前とコロナ後での人流など、多様なデータ活用できるメリットがあります。デメリットは有償となる部分で、交通センサスは無償で使えます。データの数や期間を増やすことで、スマートフォンの GPS データとは異なり、値段が張ってしまいます。

流動人口データの例

（S18）流動人口データとして、GPS の軌跡データがあります。例えば、これは 10 月 25 日の朝 0 時から 23 時 59 分までの移動経路データです。その日の起点と終点や、どの緯度経度で移動してるのかがある程度わかるデータになっています。また、その人のスマートフォンの計測 GPS や加速度センサー等で得られる速度、移動方向や移動方法のデータが得られています。ただ、iOS と Android 等の OS によるデバイスの精度が影響し、必ず正しいわけではありません。しかし、このようなデータを使うことにより、時間帯別に OD データをつくるなど、交通センサスに近いデータを、この流動人口データをベースに作ることができます。

（S19）今回は、流動人口データとして緯度経度の他にあるメッシュ ID を使うことで、その人がどういう行動をしたかをある程度推定しました。具体的には、同一メッシュ内に例えば 20 分以上とどまっていればこの人はここに滞在をしていて、それ以外を移動と判断し、1 日の人の流れを追いかけてどこを出発して、どこを経由してどこに向かってどう帰ってきたのかが、ある程度わかります。ただし、計測の仕方が先ほど言ったように OS によって変わるため、例えば Android の携帯ではある程度一定のタイムスタンプで得られるものが多いのに対し、iOS では停止とか移動とかのタイミングで得られるなど、タイミングが異なります。このため、一概にこの方法でうまくいくわけではないのですが、このような方法で移動・滞在の判別をしております。こういうものをもとに先ほどマップマッチングで使った WebAPI を活用することで、自動車でどういう経路でその人が移動したかを算出します。

イメージとしては、皆さんが自動車を運転する時にナビに入力するのと一緒で、どこから出発してどこに向かってどうやって帰るかのルートを、この API で出すことができます。

イメージは皆さんが自動車を運転する時にナビに入力するのと一緒で、どこから出発してどこに向かってどうやって帰るかのルートを、この API で出すことができます。

自動車の総走行距離の算出

(S20) 例としまして、関東圏の茨城、この左下の地点を出発(青点)し、滞在と判定された地点(右上, 黒点)を経由して、赤点に帰ってくるルートを算出したのが、この結果です。この結果から、この人が車で移動した際の走行距離を出すことができます。この走行距離が、電気自動車を仮定した際に、例えば日産リーフであれば 62kWh の電池容量で電費用を 6.5kWh/km とすると、1 日の距離が 400km 以下であれば電動化できると判断できます。左の表に示すように、関西 2 府 4 県において、例えば得られてる流動人口のデータの数(vehicles)において、それぞれの全てのユーザーに対して走行距離を出すと 99%ぐらいの人は 1 日 400 キロ以下になるので、電動化はできると判断できます。

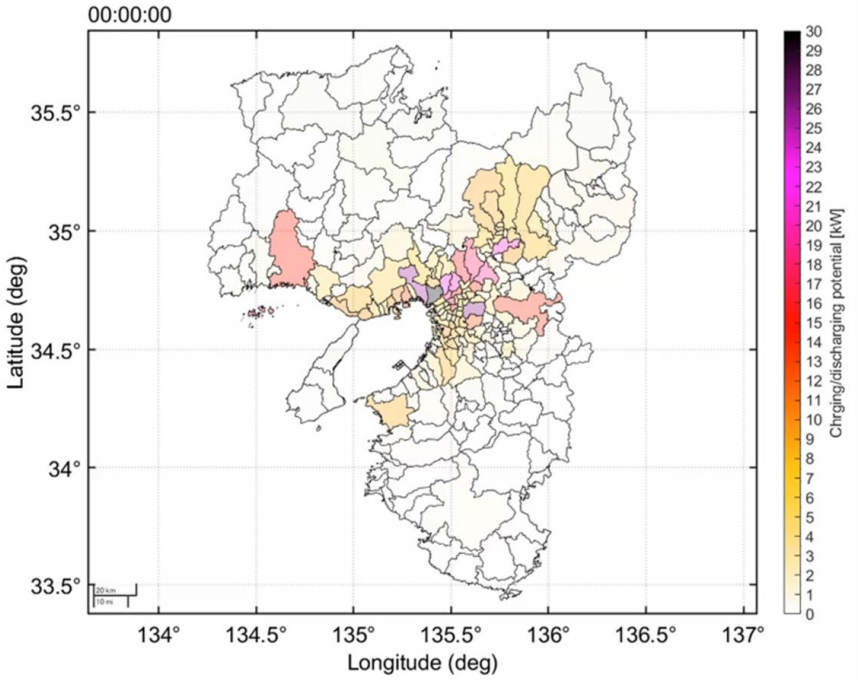
大阪府の EV 充電需要の推計

(S21) 1 日の走行距離の確率密度関数で表すことで、出発時間と到着時間の分布を出すことができます。例えば大阪ですと、これはもう当たり前だと思うのですけれど朝 7〜8 時に出発する人が多く、夜 8 時以降に帰ってくる人が多いことが、流動人口データを解析した結果として得られています。一方で、1 日の移動距離は 1 日平均で 20 キロぐらいが多いということで、過去の全国統計の交通センサス等のデータ等との整合性もあると思います。例えば、走行距離分布では、全く走らない人もいますが、大阪府全体では最大 399.5 キロ走る人がいて、中央値と平均値は 42km、31km というデータも得られます。

(S22) このデータに基づき、基礎充電として、帰宅後に充電を行う「充電マップ」を作成すると図に示すようになります。0時から始まるのが問題で、あと流動人口データの一つのデメリットとしては、人口が多ければ多いほどデータが得られる傾向になるため、データ数が少ないエリアが顕著に出て、図の表示が必ずしも合ってるわけではありません。ですが、近畿 2 府 4 県のどの地域で EV の充電が生まれ、どのタイミングで充電のピークになるかが解析できるツールを作ることができます。

例えば、夜中の時間帯でも、姫路市や大阪府の梅田とか北区でそもそも人が多くデバイスも多いため、流動人口データのデータ数も多くなり、EV 化することで充電需要が生まれています。また、この充電マップから、例えば 10 時以降になるとどこに充電中が多くなるかを算出することができます。

この結果は EV の基礎充電のマップですが、例えば急速充電や目的地充電ではどうなるのかを算出することができます。これらのデータを基に充電インフラの設置場所の検討に有用であり、こういった研究も行っています。



配電系統運用に向けた DER 活用:HP 給湯器の昼間稼動効果

(S24) 最後に、配電系統運用に向けた DR活用として、DR フレキシビリティの推計結果について紹介し

ます。ここではヒートポンプ給湯器の昼間稼働による効果を算出しています。まず、電力需要を実際に算出しています。これは電力会社様との共同研究の一環として実施したもので、一部の紹介になりますが、基本的には配電線では、例えば配電用変電所の支端の電力計測のデータしかないため、まず、配電線に繋がっている電力需要を推計しています。

この配電系統に繋がっている太陽光発電の容量と、低圧/高圧の需要家の電力需要を推計しています。基本的に配電線を流れる電力は、需要家の電力需要と PV 等の発電の合計になるという仮定で、この誤差が最小となるように、需要家・PV の組み合わせを決めます。配電線においてはこのような需要家の組み合わせになっているのではないか、を算出しているということです。

(S25) 具体的には、国勢調査、衛星ひまわりのデータ、SII 等のデータベースを入力とし、第 5 回の本電力プロジェクトでの山口先生で発表された需要推計等の方法を踏襲し、一部論文を書いていますが、低圧需要に関しては TREES(大阪大学 下田研究室開発の需要推定ツール)を利用した需要推計モデルを作り、DER がどのように普及するかというシナリオ作成することによって、将来断面における需要推計モデルを作りました。

(S27) DR の普及シナリオを、例えば太陽光発電に関しましては JPEA シナリオをベースに 2030 年には現行比の 1.7 倍、2050 年には 4 倍などと想定し、先ほどのツールを使って配電線電力を算出します。ヒートポンプ給湯器に関しましても普及台数のシナリオ、蓄電池や EV に関しても普及率のシナリオ作り、これらを基に配電線電力の変化を算出しています。

(S28) ここでは、配電系統において、例えば低圧電力需要の変化を 2030 年、2040 年 2050 年について示しています。基本的には朝方にヒートポンプ給湯器と空調の負荷が重なり、配電線電力が朝方にピークを迎える可能性があるというのが、この系統の特徴でした。低圧需要に関しては、TREES モデルにて1軒平均の電力需要を作成した後に、需要家軒数に応じて定数倍することで算出しているため、慣らし効果がなくなり正確ではないのですが、この需要推計結果からは 3.8MW ぐらいの電力需要になる可能性があるというのが今回の結果です。これは、2050 年に対象の配電線電力がどう変わるのかを示したグラフになっていて、この配電線では DER 普及率が高い設定にしていますので、一家に 1 台、何かしらの DR が入っている世の中を想定しております。

(S29) 結果のデュレーションカーブでは、2030 年や 2050 年にかけて再エネが普及し、逆潮流が増える断面は増えることがわかりますが、容量超過は起こっておらず、一方で順調流の過負荷が起こる可能性がある配電線であることがわかりました。この段階では配電線のロスや電圧の変化等を考えず、需要を積み上げた結果です。そういった要素を加味しましても、おそらくこの配電線では、順潮流の過負荷が先に起こる可能性があることが今回の検討でわかったことです。配電線電力の需要の内訳では、グレーは低圧と高圧の電力需要を積み上げたもので、この他に、例えば太陽光発電の発電量、一家に 1 台ではありませんが、蓄電池による自家消費運用結果として余剰電力の蓄電池への充電、EV については帰宅後に充電需要(夜からの黄色の部分)など、電力需要を積み上げで推計をすることができます。

(HP 給湯機の昼間稼働

(S30) 先ほどの例では変圧器の過負荷はまだ起こっていないのですが、基本的には空き容量(余裕量)が小さいため、フレキシビリティの活用の一例を検討しました。ヒートポンプ給湯器を昼間稼働させることで、この太陽光発電をどれだけ吸収できそうか、ピーク電力の削減効果を算出しています。例えば、下側のグラフでは、朝方に 3.86MW あった電力需要のピークが、黄色のヒートポンプの昼間稼働だけで 1MW ぐらい削減でき、ピークの削減に寄与することがわかります。また、昼間分の電力需要は、大体 2MW ぐらいの増加になることがわかります。

(S20) このような DER のフレキシビリティを活用して、先ほど言ったデュレーションカーブの変化を見てみます。例えば 2050 年断面において制御なしの場合は大体 80kW ぐらいの余裕しかなく結構ギリギリですが、昼間稼働によって 700kW ぐらいの余裕になることがわかります。先ほど申し上げたように、ヒートポンプの昼間稼働は、今の DR Ready 要件で想定されていると思いますが、逆潮流の吸収にも大きく寄与すると考えられます。

今回はヒートポンプ給湯器と空調の需要が重なることからヒートポンプ需要を動かしたのですが、実際には蓄電池や EV の放電も有用な手段と考えられ、今後検討を行うことを考えています。

キー技術・キーシステム技術・課題等

最後は、課題、キー技術とかキーシステム技術について説明します。背景で述べた通り、将来は次世代の分散型電力システムになると思うのですが、いろいろな面で課題があると思っています。

一つは情報公開に関してです。昨今利用実績データが取れ、系統データ等も情報公開がマストになると思います。一方で、電力が自由化されたことにより、配電事業者、小売りなどとの関係、行為規制などいろんな規制が出てきています。それらの規制を考慮しながら、いかに情報を公開し、誰もが使えるようなデータプラットフォームを作っていくのかが一つの課題と思っています。一方で、「社会システム連携」と書きましたが、これまでは電気は電気、交通は交通と考えられているものが、セクターカップリングとして交通と電力のように異なる部門を同時に考える必要が出てきており、こういった技術開発は今進めなければいけないと思っています。

また、こういった社会連携や情報公開では、サイバーセキュリティやプライバシー問題が多分出てきます。これらを詰めなければいけないですし、フレキシビリティを活用して系統を運用するためにどういう市場設計をするのか、制度面の整備も必要です。例えばベースラインの予測と計画も課題になると思っています。一方で DR ready に関しては多様な機種で要件を定義するとともに、計量については特定計量が認められていますが、例えばそういった機能をどこまで拡充さるかも考える必要があると思っています。

その他、市場設計とは関係ないのですが、例えば EV の急速充電の通信プロトコルである OCCP を使って、充電だけでいいのか放電まで考えたものにするのか、充電規格自体は現在 CHAdeMO ですが、よりグローバルに見るとNACS（北米充電規格）になる可能性もあると思うので、そういったところの整合性をどう取っていくのかも課題として挙げられると思っています。

情報公開に関しましては、分散型電力システム検討会において関西電力様が作った資料がわかりやすいかなと思ったのですが、ネットワークでどこに DER があって、どういう系統トポロジーでどこに系統混雑が起こるは、情報公開しなければわかり得ないと思います。一方でそれらの情報の公開にあたっては、先ほど申し上げたように行為規制やセキュリティ上の問題があり、ますそういったところを加味したデータの種類や情報プラットフォームを作らなければいけないところが、フレキシビリティを活用する上で重要なところと思っています。

最後はここに経産省様の資料を提示させていただいておりますが、制度設計においては様々な面で、技術面や制度面での検討が必要になります。特定計量、リソースのベースラインに関する部分等、検討が必要です。EV に関しては、メーカー等、自動車 OEM 等との連携をして、彼らが所有するデータを利用できればよいのですが、そのためには何のためにデータが必要か、利用する側からデータを出すことについて議論が必要です。そういったルール整備、データ仕様統一の検討、低コストでの実現、そういった部分を考えていかなければいけないと思っています。

現状の大阪大学の取り組みを中心に説明させていただきました。需要機器というのは電気を使うものから電力系統運用を支えるものに変わっていくと思います。このため、そういった世の中を想定して今から制度設計、技術要件の検討、データプラットフォームの構築などを進めていかなければいけないと思います。

以上です。ありがとうございました。

質疑

（PL）

少し時間押していますが、直接のご指摘ご質問ありますでしょうか？

（参加者１）

最初の方聞き漏らしてしまったかもしれないんですが、走っている車の電力消費量は、計測できるでしょうか。何が正解データなのかなっていうのが少しわからなくて。よろしくお願いします失礼します。

（芳澤）

ありがとうございます。今回のケースにおきましては、太田先生が OBD2 で取れる計測器を持っていて、蓄電池の電圧と電流の値を実際に計測し、電力値を算出しています。ですので、この赤色の波形は、ほぼほぼ正解値になっています。

（参加者１）

わかりました。そうですね。そうじゃないとここのデータはなかなか取れないなと思って。

なかなかそれはたくさんの車に載せるのはなかなか難しいでしょうか？

（芳澤）

難しいと思っています。ただ車検とかも OBD2 でできるようにする方向に移っていると思いますので、そういったものを手軽に使えるものに変えてくれば、こういった実測値は多分取れるようになります。実測値が取れれば推定が必要なくなりますが、現状では、こういった推定技術が有用です。

（参加者１）

リーフは OK でしょうが、違う車でもこの推定式で行けるっていうことなんですか。

（芳澤）

今はリーフの結果をお見せしますが、基本的には問題ありません。ちょっと今回お見せはしてないですけども、電気学会の D 部門誌で、私は著者ではありませんが、同じ阪大の先生が電動バスでの推定結果を掲載しております。大阪大学は吹田キャンパスから他のキャンパスへの移動に阪急バス（普通の市バスと同じもの）を使利用しており、それを電気バスにして走行させております。実証において，電気バスの実測データを取る実験をしまして、その場合においても精度よく推定できることを確認しています。ですので、乗用車の中でも他の車種にも適用できますし、商用車にも行けるだろうという式になっています。パラメータはほぼ同じで、違いがあるとすれば、例えばバスでは積載量が変わることが問題になるのと、あと空調の電力が大きく変わるっていうところが違ってきています。その論文集においては一応空調電力に関しても最高気温や最低気温等から推計式を出していまして、そのモデルである kWh 値は 10%から 20%の推定誤差で精度を確保できることが一応確認をされています。

（参加者１）

それはなかなか素晴らしいですね。ありがとうございました。

講演 2 IT（早稲田大学・石井）

（PL）

二つ目の話題提供に移ります。早稲田大学石井先生よろしくお願いいたします。

（石井）

早稲田大学石井です。「IT 応用」のお題をいただいています。今日は今まで取り組んできたシステム間やデバイスも含めた相互運用性についてお話します。

相互運用性「インターオペラビリティ」について、どういうことをやってきて、今どんなことやってるかっていうお話と、それから芳澤先生のお話とちょっと関係するところがありますけれども、これから大きな柱になると思っている DR ready と、それに関係する次世代スマートメーターのお話をします。

前段はインターオペラビリティ、後半にスマートメーターと DR レディ、それからやはりこれらと関係して重要となるサイバーセキュリティの動きについてお話します。

電力システムにおける情報通信・IT 活用（S3）

電力システムの情報通信や IoT 活用は、いろいろな設備の監視や、発電機含めたいろいろな機器の制御に、これまで使われてきました。大きく変わったのは、スマートグリッドで「電力システムと情報通信システムの融合」と言われた時からです。IT を使って供給側や需要側の間で双方向の通信を行い効率的な電力供給を実現するのがスマートグリッドです。ここからシステム間を情報通信で広く接続する必要が生じました。

東日本大震災とエネルギー政策の転換、スマートグリッドの標準化（S4）

東日本大震災直後に、国家戦略室で戦略が決められ、基本的に分散化に向かうというお話でした。ここではいろいろなレベル、家、ビルあるいは地域に、エネルギーマネジメントで需給をローカルに制御して最適化をすることと、これらを全体のシステムを繋いでいく考え方が主流になりました。

その後の電力システム改革の中で、電力事業が多様な事業者によって行われる形になり、いろいろな電力の価値を各種の市場で取引する体制になりました。電力の価値は kWh だけだったものが kW や ΔkW の価値がでてきて、芳澤先生からもお話ありました需要側の資源がこれらの提供主体になっていく方向性が志向されています。

スマートグリッドでは、元々国際標準化に視点を置いた活動をやるべきという議論が 2010 年ぐらいからスタートし、経産省では国際標準化の観点で重要なアイテムとして、最終的に 18 の注力すべき領域を 2016 年に抽出し、この中で国際標準化に力を入れる分野が合意されました。2016 年の報告で示された注力すべき 18 領域のうち、特に右上にあります各種の EMS、これをデマンドレスポンスですとかデマンドレスポンスのアグリゲーションにより、これを系統のフレキシビリティの供給源として使っていくことが標準化という意味でも重要な領域とされました。

エネルギーマネジメントと ECONET Lite, Open ADR

（S9）エネルギーマネジメントは右側です。この中でいろいろな機器が HEMS の下で監視され、必要に応じてこれをコントロールすることができるというようなことでスマートハウスというものが考えられました。スマー

トハウスということで閉じればこれだけですが、デマンドレスポンスや外部のいろいろな事業者と連携することがスマートグリッドの中で議論されたわけです。デマンドレスポンスが典型的な例ですが、左側に外部のアクターがいて、電気事業者、サービス提供する事業者、アグリゲータなどですが、こういうところとこの家が相互に情報やり取りをして、左側からの指令により右側が動く、そういう体制を作ることがスマートグリッドの文脈の中で考えられたことです。

（S10）この標準化の取り組みの考え方はこのページの通りになっています。最初「スマートハウス・ビル標準・事業促進検討会」が組織され、家の中は ECONET Lite を推奨することになったのは、皆さんご承知の通りです。一方で、電気事業者とアグリゲータの間がどう繋がったか。先ほどの絵で言いますと、家で閉じれば ECONET Lite の世界で良かったわけですが、外部と繋がないといけない。外部と繋ぐときには、米国で開発された OpenADR 2.0b を国内の推奨規格にすることになりました。ビルとか工場は既にスマート化が進んでいて、スマートなシステムの導入が始まっていたこともあって、ここは基本的には手をつける必要はなかろうと定義をしました。2016 年以降は「エネルギーリソースアグリゲーションビジネス検討会」という通称「ERAB」と言ってきた枠組みの中に体制が移り、この下でバーチャルパワープラントを実現するために、様々なユースケースを考えながら、同時に通信規格は標準をしっかり規定していく必要があるということで、これは前段のスマートハウス・ビルの枠組みで決めた通り ECONET Lite と OpenADR 2.0b をコアにして、それぞれワーキンググループを設置して、足りない内容については、既存の規格の中でちょっとした定義の問題なのか、抜本的に変えなきゃいけないのか、そういうことも含めて検討し、国内標準の整備を進めることにしました。公知の規格である OpenADR 2.0b で一般送配電事業者が簡易指令システムを開発・運用するところに繋がっていったのが、2016 年までの流れと思っています。

（S11）スタートにこんな絵を描きました。右側が 18 の技術で、左側にエネルギー事業者がいます。需要家の中には EMS があって、EMS の中でこのシステムの間で通信が行われ、監視制御ができます。家の中は ECONET Lite ということでやることを決めた。これは元々ECONET Lite はホームオートメーションのための規格でしたが、これをエネルギーに拡張することを一生懸命やってきた流れです。左側に OpenADR 2.0b を推奨することになりました。

早稲田大学 EMS 新宿実証センター

（S12）早稲田大学では、これらを実装して、システム間での通信や機器の動作をするために大学に「新宿実証センター」を設置しました。この中で関連機器に OPEN ADR 2.0b や ECONET Lite を実装した実験場にして、例えば何か開発したときにここに持ち込んで、相互の接続をテストできる場として、様々な方々と連携して国内で決めてきた標準を浸透させることをやってきました。

（S13）4 地域実証などでも、大学との接続で OpenADR 2.0b を使うことを決め、実際に大学から信号を送ってアグリゲータとリソースの間でちゃんと動くかどうかを数年にわたって実証を進めてきた流れです。

2015 年夏頃の問題意識と経産省・関係個所への投げかけ

（S14）2015 年の夏ぐらい、いろんなものがバラバラに動いてる感じがあったので、統一して動いた方がいいという投げかけを経産省の各所に行いました。

上段では、先ほど来の震災以降の分散化の流れで、再エネの導入が急速に進められ、電力事業の形態が変わった。中段では、需給バランスの確保へのアグリゲーションの役割はこの頃からはっきり拡大してきた。最近は再エネの導入拡大に伴いフレキシビリティがどんどん必要になって、この必要性はさらに拡大しているという認識です。このときから将来のために需要側のリソースを適用できる仕組み、それは系統の運用者と連携して使えるようにすることが必要であると考えていました。

そこでは、1 個 1 個の要素が非常に小さいのでアグリケーションする必要があること、需要家は EMS を持っており、自分の機器の使い方の最適化は自分でやりたいので、上から直に動かされるのは基本的には嫌われ、住宅の場合はそうでない部分が多いですが、工場やビルでは外から自分の蓄電池を制御することを許容するのはほぼほぼ不可能であるという認識がありました。従って、需要側に受け側のシステムがあって、そこにこんなふうに動いてほしいという指令が飛んで、需要家はその指令に基づいてそれを実現するために個別の機器を動かす、そのために間に EMS を置き、そこで役割を分けるということは極めてリーズナブルだということになります。こういう意味で最初のアーキテクチャは非常に重要な出発点だったと思っています。

この中で、プロトコル、会話をするための言語が違うのは敬意を踏まえれば自然なことで、元々需要家の中で最適化を行い、それを外と繋ぐには何かシステムを置いて、言語を変換して繋いでいくという方式は意味があると考えていました。太陽光の出力抑制が急速に必要になってきたこともあり、その対応は先行しま

したが、本来は独立ではなく一緒にやった方がいいということを提言していたわけです。

（S15）この階層図では一番下にユースケースがあります。何をどうやりたいのかを情報で繋いでいろんなものが連携して動くようにするために一番重要なのは情報モデルです。この情報モデルの上に通信のルールに相当するプロトコルが来ます。最終的にリソースが系統に繋がるためには系統運用者を中心に決める系統連系規定があり、最後は連系規定が守られているかの認証が必要です。この構造を下から上まで連携して作っていくことが大事です。特に、今まで、事業側のリソースを系統の運用に使うことは考えられておらず、それを新しく考える上では縦方向を整合する形で作っていくのが非常に重要だという認識でいました。

ERAB 検討会と通信規格ベースアーキテクチャ

（S16）それでできたのが ERAB 検討会で、この下に OpenADR 2.0b とか ECONET Lite とかの使用をユースケースに基づいてできるようにする取り組みがスタートしました。

（S17）通信規格のベースアーキテクチャでは、先ほどのものをもう少し詳しく書いており、上位に送配電事業者や小売事業者間にアグリゲータがいてこの間を OpenADR で繋ぐ。需要家の中はいろいろな通信規格で機器をコントロールするという形態を考えました。

アグリゲータと需要家の間ですが、ここは競争領域と定義しました。その理由は、このアグリゲータに相当するビルのサービス会社は、既にサービスに独自の通信規格を使っていました。後で決めた規格に従いなさいとはできなかったためです。ですが、新しく始める場合は、通信規格は標準で決めたものを拡張あるいはそれをそのまま使うことを推奨することになりました。

（S18）OpenADR 2.0b のワーキングでは、私が座長を務め、ユースケースを集めてそれに基づいて OpenADR 2.0b の規格で本当に全部対応できるかどうかを徹底的に検証しました。

OpenADR 国際標準化の“轍”（S19-25）

OpenADR 2.0b の国際標準化で大変苦労したことを共有させていただきます。

（S19）OpenADR はアメリカで作られたもので、ヨーロッパ勢には何となく異文化の言語で、受け入れたくない。IEC の規格は世界的には大きな意味があり、経産省が国内の事業者に対して「推奨する」と言うためには、IEC あるいは ISO の国際標準になっていることが必須と経産省から言われ、OpenADR の国際標準化を目指しましたが、実は大変苦戦しました。

ヨーロッパの大反対にあって、CDV（投票用文書）の段階で 2 回も否決をされました。その理由は、ヨーロッパが IEC で進めているコモンインフォメーションモデル（CIM）という一群の規格があり、この中の情報モデル、あるいは IEC の 61850 の中で使われている情報の体系と OpenADR 2.0b の情報の体系が根本的に違っていたためです。欧州勢はみんなして反対してくる、こっちから見ると各国の反対コメントがコピペにみえる感じでした。CIM や IEC 61850 を扱う TC57 で反対されていて、そこの議長と PC118 という OpenADR 2.0b を推す側の議長が犬猿の仲で、ついでに米国側の OpenADR 側の代表の一人が欧州勢に嫌われていたなどの状況で、結構大変でした。

（S20）実際コミュニケーションのスタンダードが多数あり、右上に示す白書 [46]を作りました。この話の後で出てきますが、この中に書かれている通信規格には上位の送電からデバイスのレベルまで、図では代表的なものを挙げています。グリーンの IEC のスタンダードには CIM と IEC の 61850 があり、グレーの OpenADR 2.0b は IEC のスタンダードではないという意味です。国や団体がそれぞれ自分の目的で作る様々な通信規格があり、それらを後で繋ぐこと、ハーモナイゼーションが必要なのですが、ここを統一しようとすると本当に揉める元になります。

(S21)先ほどの白書では、東京電力がリードして、エディターとしてアメリカのコンサルタントを雇って執筆しました。私もこのメンバーでしたが、この米国コンサルタントが、「CIM は私のもう生活そのものです」という人で、OpenADR 2.0b が大嫌いだったのです。この人に OpenADR 2.0b を認めさせるということは大変でしたが、この白書の中の通信規格の部分に関しては「私が執筆すると」言って書かせてもらいました。そこでは、世界にはいろいろな規格があり、後から来た規格に従えというのは横暴であり、そうではなくて、異なる規格間の協調や橋渡しをやるべきであり、橋渡しとして変換すればいいということを主張しました。「IEC は世界中で使われるもので、進んだものを取り込んで世界の標準を作っていくことが仕事だ」ということを述べ、最後はですねこのコンサルタントと San Diego 空港のラウンジで 2 時間ぐらい話をして和解した感じになり、この話を白書に書きました。

（S22）OpenADR の流れと CIM の流れはアダプターを通じて変換をすることで繋ぐという体系を作ること

[46] https://www.iec.ch/basecamp/stable-grid-operations-future-distributed-electric-power

で、(S23) 2018 年に OpenADR が IEC の標準になり私も安堵しました。OpenADR がうまく通らないで 3 度目の否決を食らえば、国内で監視システムが OpenADR で実装されているものを、国の標準として経産省が推奨できなくなります。これは本当に通って良かったと思います。投票では、欧州側はドイツやフランスが賛成に回ってくれ、また大多数の人は反対ではなく棄権に回ってくれて、必ずしも歓迎ではないという形ではありますが、欧州勢から一応通してもらい、なんとか IEC の規格になりました。

(S24) これで一般送配電事業者が OpenADR 2.0b で動く簡易指冷システムを使って、需要側のリソースを系統運用に組み込んでいくことが実現できたことになります。

(S25) これは参考ですが、IEC の CIM の規格やその他関係するものも本当にいっぱいあって大変複雑です。本当は説明したいところですが、今日はちょっと時間の関係によりここで終わらせていただきます。

国内の国際標準化取り組み体制の構築

(S26) 国内では、国際標準化の取り組みというのはここ 10 年ぐらいずっと続けています。

(S27) 電気学会の D 部門に調査専門委員会を作り、国内でやりたいことが IEC の規格で記述できるかをチェックしています。日本でやりたいことが IEC の規格でもし記述できないならば、その部分をきちんと提案をして記述できるようにすることをずっとやっています。この取り組みは今も続いていて、日本でやろうと思っていることが必ず IEC の規格で書けるようにしておくことが必要であると考えています。実際には IEC の規格を使うかどうかは状況やコストの判断、あるいは実装しやすさで決まります。ただ少なくとも IEC の規格で書けるようにしておくことは重要だと考えます。そういう取り組みをやり、テクニカルレポートをシリーズでずっと書いてます。まずは蓄熱システムとか蓄電システムという個別のリソースから始まって、アグリゲーション全体の話をまとめたような JEC-TR の 5900 シリーズで具体的な実装方法を詳しく記載していますので、関心ある方はぜひ見ていただければと思います。

日本では OpenADR 2.0b を使っていますから、IEC の 61850 を中心とする IEC の規格とともに、OpenADR 2.0b での記述の仕方についても具体的にこの中で示しています。

再エネ出力制御対策

(S28) 再エネの出力抑制が、出力制御量の増加に伴い、非常に問題になってます。基本的にはこの制御をしないといけない。実際には抑制の制御ですけど、この抑制を抑制する、そういう取り組みが必要だと議論されているわけです。いろいろな対策、系統増強とかありますが、需要サイドの多くのリソースを使って対応していくことが期待されています。、先ほど芳澤先生からもありました通り、余剰があるなら吸収しようということです。

次世代スマートメーターと低圧分散リソース活用(S29-32)

(S29) 鍵になるのは次世代スマートメーターで、今度、今まで 30 分の kWh 値だけだったのに対して、電圧や無効電力も計れるメーターに進化し、今年の終わりから来年にかけて実際に入ってきます。その他 5 分値も活用できることが盛り込まれていますが、一番大きい変化は IoT ルートです。

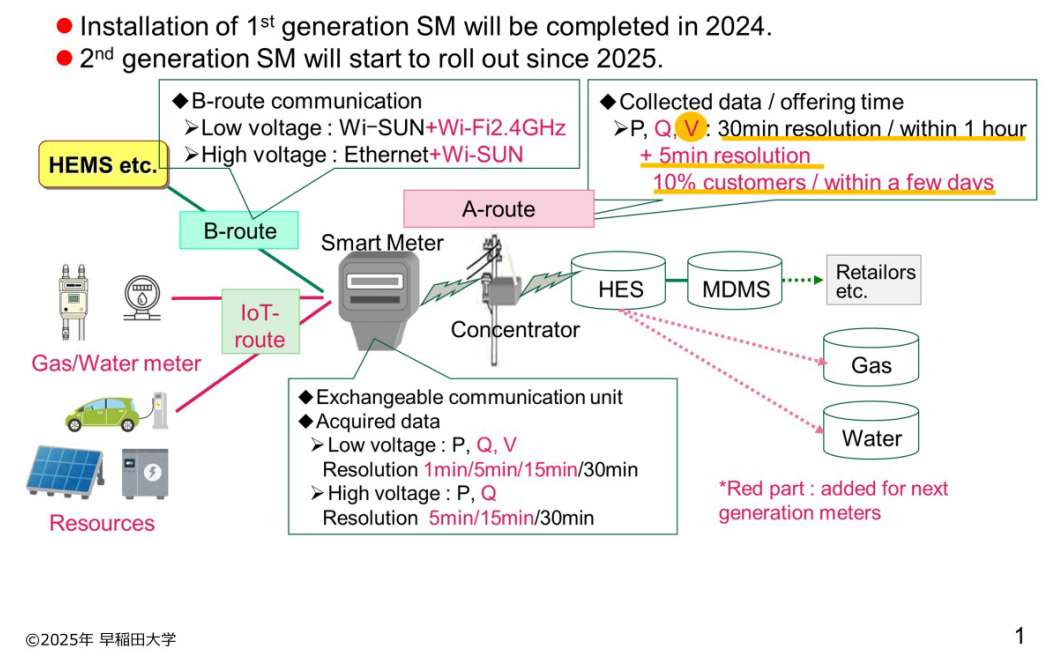
(S30) IoT ルートは元々共同検針、ガスや水道のメーターも電力のメーターと通信で結んで、このルートを使って MDMS というデータ管理システムの中にガスとか水道のデータも集められ、それぞれのユーティリティさんに送れるようにして、通信ルートを一つにするという目的で考えられました。この IoT ルート、実は革新的で、今までと何が違うかというと、A ルート側からメーターを通じて住宅や需要家の中にある機器に通信できる仕様になるということです。

今まで「B ルート」というのがあり、メーターと需要家の中がコミュニケーションできていました。ですが、この B と A は完全に分離されていました。それが、新仕様では A ルートから末端の機器までメーターを通じて通信できることが IoT ルートの画期的なところで、これで全くこれまでと話が違ってくることになります。

(S30)第 7 次エネルギー基本計画でも、スマートメーターの IoT ルートを活用して DR の活用とか DR ready の検討を進めていくことが具体的に書かれています。

(S31) 芳澤先生の話にありましたように、DR ready の要件を、給湯器から始めて、EV 充電器などに拡張する検討が進んでいます。給湯器については概ね仕様が決まり、実証を進めることになります。

(S32) 低圧リソースは、2026 年度から需給調整市場に参加できるようになります。一つは特例計量器というサブメーターによる機器個別の計量も取引に使えることになり、これによって DR が格段にやりやすくなります。このデータも IoT ルートを使って 30 分の kWh 値をはじめ他のデータと一緒に管理していく方向になっています。また、非常に小さい機器が多数ある形なので、群で管理する考え方を入れてやりやすくし、IoT ルートを使い DR ready を実現することが考えられている。



DR ready と予算措置

残りの枚数も多く時間も押してるので、ちょっと急ぎます。

（S33～）IoT ルートは、常時はこの DR ready をうまくやるために、機器の状態等も把握をしつつこれを活用することに、アグリゲータやいろんな事業者が使うということです。しかし、一般送配電事業者が、例えば何か緊急で、太陽光を急に抑制する必要がある場合、このルートを使って需要家の中にある太陽光の抑制ができるツールが用意されることになります。具体的にはルールややり方を定める必要がありますが、実際にはそれができるようになると、例えばローカルフレキシビリティという話がありましたが、そこでのリソースの募集要件をずっと緩和できると考えています。

（S35）今年度から実証することになり、DR ready の予算が取られています。早稲田大学もこれを受託して、一般送配電事業者と連携して、この DR ready の仕組みの作り込みに取り組んでいます。

（S36）取り組みは A 事業と B 事業に別れており、A 事業は一般送配電事業者が中心に DR ready の仕組みの上位の部分を作る。B 事業は大学が中心になり DR ready の機器、IoT ルートを搭載した次世代スマートメーターを実験室に備えて、動作やサイバーセキュリティの検討の検討を行います。

（S37～）太陽光の抑制は逸失利益になるため、これを使えるようにする仕組みをつくりたいというのが背景にあります。先ほどの説明と少し重なりますが、経産省の実証事業と、制度的には DR ready 勉強会で、DR ready 機器の仕様や満たすべき要件などが策定されています。機器は外部から制御指令を受けて、それに基づいて動かせるようになることが DR ready の基本的な要件です。

（S39～）例ですけどアグリゲータが頭に書いてあります。一般送配電事業者の可能性もあります。「DR サーバー」が「DR ready インターフェース」に DR の要求を出し、IoT ルートを通じて住宅・需要家の中にある DR ready 機器をコントロールできるようになるということです。既に別のルートで、例えば自分のクラウドを使うサービスも存在するので、いくつかのパターンを書いてます。DR サービスをする方事業者が直接ゲートウェイ等を通じてコントロールするもの、あるいはクラウドの中にあるシステムから需要家の機器をコントロールするなど、いろんな形態が既に存在していますが、これらは併存していくと考えています。サービスの提供者が判断し選択することになります。

実験環境整備と教育

（S41）大学の方では、実験環境を学生の教育に使うことを考えていて、DR ready でいろいろな実験設備

も少し入れてやります。芳澤先生から「Matter[47]」という話もありました。Matter は元々IoT という文脈で出てきましたが、エネルギー分野に拡張されてきていて、これを ECONET Lite とブリッジングする取り組みも始まっています。日本としては ECONET Lite は生かしながらうまく使っていく方針を取ることになります。そういうことを含めて学生に体験してもらうということを事業の一環でやろうとしています。

サイバーセキュリティ

（S42～）最後にサイバーセキュリティです。これは非常に重要です。今までは A ルートと B ルートは分離されていましたが、今度は末端の機器と A ルートとが繋がります。このため、サイバーセキュリティは最近のトレンドを押さえてしっかり対応しなければならない。先ほどご紹介しました物理的なゲートウェイを介さないサービスが出てくるわけです。その他需要側の機器としては、指令元が複数存在する状況が出てきます。あと末端の IoT 機器そのものが脆弱だとまずい。それからアグリゲータが機器から取得する情報に起因するリスクとかあります。

新たな状況の変化に応じてリスク特定をして、サイバーセキュリティのガイドライン、元々ERAB のサイバーセキュリティガイドラインというのがあるのですが、今回その改定を行いました。主な改訂は、ゲートウェイを介さないで直接来る通信路の追加です。それまでインターフェースごとに満たすべきサイバーセキュリティ要件を決めてきましたので、新しく追加した点を含めてサイバーセキュリティのガイドラインを見直しました。

（S45～）その中で、ERAB 制御対象のエネルギー機器やゲートウェイについては、セキュリティ要件適合評価および JC スターというラベリング制度、これは IoT 機器全般のより大きな取り組みです、この枠組みの中で決められてきたセキュリティ要件に準拠することという流れができています。JC スターは、1 から 4 のレベルで考えられており、現在レベル 1 がスタートしたところです。一番基本的な要件に該当し、まずこれを満たすことを必須にします。レベル 2 が策定されたときには、「それを満たすことが望ましい」というのが現状の表現になっており、これがサイバーセキュリティガイドラインの主要な変更点の一つです。同じような考え方でその他複数のインターフェースについて新しい記述がサイバーセキュリティガイドラインの中に盛り込まれた形になっています。関連の事業者の方々はこれを参照し、これに従って行っていただく必要があります。あとは参考とさせていただきます。

まとめ

（S49）駆け足で大変恐縮だったんですけれども、最後まとめです。

まず通信規格ではそのデータモデルを標準とすることは非常に重要で、日本はとてもちゃんとやってきました。これから途上国などに行くとき、この姿勢はベースとして非常に重要です。

系統への貢献と事業家内の最適化では制御の刻的・内容が一般に異なります。そのため、個別のリソースのコントロールを決定するシステムを境に、上流は包括的な定義をする通信が望ましく、末端はより詳細に機器をコントロールすることになる。そのようなアーキテクチャを組むことに理があると考えています。

あと、国内の標準が IEC/ISO の標準に含まれることを担保することが非常に重要ですので、これはずっと続けていく必要があります。

本質的に部分部分から標準化がなされるので、それを統合するときに、どちらかがどちらかに従うことはもう絶対無理なので、ハーモナイゼーションという意味で変換して使うことが必要です。社会全体でデータ活用の重要性が高まっていますから、他の情報システムデータベースとの相互接続性が非常に重要です。芳澤先生も指摘されてましたけど、交通など他の分野のデータベースと連携することも必要です。

サイバーセキュリティについては、社会全体での整合性の向上が必要で、一部だけ突出してもしょうがないので、全体がユニフォームになるように協力しながら進めていく必要があります。

あと、関係するステークホルダーが標準化の意識のもと協力する場が重要で、特に国際標準化を担う人材、若手の研究者・技術者が国際標準化活動に参加してくれる仕組みを作ることが非常に重要であることを、各所で議論させていただいています。

私からは以上でございます。ご清聴ありがとうございました。

討議

（PL）

はい、ありがとうございました。残りが 30 分ちょっと切ったところになります。2 時間のお約束ですのでな

[47] https://home.google.com/intl/ja_jp/get-inspired/matter-and-thread/

んとかこの時間の中で議論を進めていきたいと思います。

芳澤先生からはどちらかというと物から、また使い道、車だとどう走るんだというような角度から入ってきていただいて、石井先生の方は、あのプロトコルと情報標準化から始まり入ってきて、議論を進めて頂きました。

皆さんからご自由にご意見、ご質問をお願いしたいと思います。時間が限られているので、なるべく短く質問をお願いします。

分散時代の系統制御・保護

（参加者２）

IoT や次世代スマートメーターと標準化のことについてよくわかりました。私の方から、コメントに近いお話しです。IT というからには EMS も含め、多分最適化とかがいろいろ絡んできてソフトウェアの話がここに入ると思います。電力システムを制御する上で、送配電システムに関連するところでは最適化が入ると思っています。例えば Contingency Control や Congestion Control があり、これもやはり最適化の一部です。まず予防制御をして、いよいよ例えば混雑が発生するようであれば制御するということになり、PL などが今取り組んでいる SCED、SCUC、OPF などもこの領域に入ってくると思います。ということでその辺の観点からの議論も必要ではないかいというのが第一点です。二つ目は、保護関係もこの情報通信に関連するのではないかと。例えば、GFM インバータが配電システムに入ってくると、保護がかなり難しくなる。そうすると、PMU や波形解析などが必要になるのではないか。保護リレーの元々の考え方はパターン認識ですので、ここに波形解析も含めたパターン認識が入ってくる可能性もあるのではないか。三つ目は、話はガラッと変わるのですが、分散型電源が入ってくると、スマートメーターで、peer to peer のエネルギーの取引、今の流行りの言葉で言えばシェアリングエコノミーの制御も対象に入ってくるのか。これらがみんなソフトウェアで入ってきて、さらに、それを制御する何か上の仕組みが要るのかなというふうに思った次第です。今日いただいたお話に対する追加になりますかね。以上でございます。

（PL）

ありがとうございます。大きく分けると、計画と運用までは、前回の河辺先生や、私の名前を出していただいた通りです。それから反対側ですね、次回の解析の領域にある程度含まれると思います。

今おっしゃった中でどこにも入ってない少なくとも一つは保護ですが、石井先生このあたりどうでしょうか？

（石井）

はい。保護の話もすごく重要ですが、どういう枠組みで議論するかですよね。今まで保護は、ある意味従来の電力システムを前提に、その中で何を守るかを積み重ねて出来上がってきました。これからまず分散リソースが非常に増えて同期機が減り、分散非同期連携の電源が増えると、今までの前提が変わる部分がいっぱい出てくると思います。そこはちゃんとその研究をし、何をどう守るのかに基づいて、実際にシステムで検知したりシステムを動かしたりするためには、ソフトウェアを作ることも新たに必要になると思います。ご指摘は大変広い話であり、今後その視点は間違いなく重要なことだと思います。

特に保護については、4 月にイベリアの停電では電圧がかなり上昇したことへの対応がこれから検証もされていくと思います。それは、今までの保護の考え方で同じようにやっていって本当にいいのかどうかとか、そういうことも議論の対象になるのかなということで、まさに保護というのは非常に大きなテーマだと思います。

（PL）

ありがとうございます。あとはキーワードで言うと、PMU などでモニタリングをして事前に把握することもご指摘にあった話かなと思いました。芳澤先生から何か追加でコメントでしょうか。お願いします。

（芳澤）

保護に関しては、GFM インバータ等に関しても実証で今まさに議論・整理されていると思います。マイクログリッドになるのか、常時の系統のままで考えるのかで結果は変わると思いますが、現状としてはデバイスが発電機にもなる電池なのか、単純に需要機器として使うだけなのかで変わると思います。私は保護に関しては詳しくはないのですが、現行の連系規定で対応可能という結論になりそうな気がしております。GFM インバータ等が増えたときには保護リレーの整定とかに影響が出てくる、単独マイクログリッドした場合とかは影響が出る、といったことは言えそうですが、それ以外は連系規定に含まれる形で議論されるだろうと思います。

（PL）

個人的な意見にすぎませんけれども、先ほど石井先生が言われたように、保護の考え方は積み重ねでできてきましたが、変化が早すぎて何が起こるか分からないときには、違ったアプローチが必要かもしれないなと思っています。はい。それはさっき申し上げたようなモニタリングで見ていることの重要性につながると。

（石井）

PL が言われた通り、いろいろデータに基づいた検証、いろいろなシミュレーション、個別の機器の試験が必要だと思います。最終的には芳澤先生が言われた通り、グリッドコードといいますか、その連系要件が定義をすべきことですが、どう決めるかに至るまでにやるべきことがものすごくたくさんあると思います。

（PL）

グリッドコードは、設備形成のためにグリッド側が先出ししないといけないんですよね。

他はいかがでしょうか？

国際標準化の動向と日本の取り組み

（参加者１）

標準化という意味で EV の充電方式で、NACS が出て、日本 CHAdeMO の基準が国際標準に合わなくなる雰囲気もあります。OpenADR 2.0b などに関しては日本の国際標準の取り組み的でずれてることはないでしょうか。基本的には日本は今、既にあるものは大きく変わってなくてそこをフォローする感じでいいのか。標準化の国際的な流れと日本の取り組みの状況について教えてください。

（石井）

ご質問ありがとうございます。まず国際的に見て各国の国内での取り組みは、日本で統一して作るやり方は日本だけ、ヨーロッパは全く違いますし、アメリカは全体が統一されて動いてなくて、みんな事業者ごとに何となくバラバラにやってるみたいな状況で、国全体で調整することはやっぱりない。日本の最大の特徴は日本で統一してやっていて、これは世界的にも稀で強みになると思います。実際にタイに日本の DR のやり方を教え、そのまま採用してもらう方向になりました。ただ遅すぎて全然スタートしないんですけど。

ただ、世界から見てどうなのかっていうと、通信の規格とかいう意味では多数のやり方ではありません。ただなってなくても、問題はないと思います。

大事なことは OpenADR、ECONET Lite は IEC の規格ですから、新しく途上国に持っていくときにこれは IEC 規格、国際標準だと言える。国際標準であることはまず必要条件として重要で、そこが担保できているという意味では現状は問題ないと思っています。外から入ってくるときは、逆に言うと、日本でやっていることでそれに従ってもらうことに。だから特に電池などよく JET 認証を取るときに ECONET Lite のところがハードルになるようですが、皆それに従って入ってくることで動いていますので、これは全く問題なかろうと。

先行きとしては、今はそれぞれ発展してきたものを繋ぎながら使っていくべきだし当然そうなのですが、いずれは何かに統一されていくかもしれません。そのときは、IEC で決めてることが結構コアになりそうで、今例えば次世代の中給など建設が進んでいるところでは、既に IEC の規格ベースで動いていく話になっていくと認識しています。

だとすると、いずれそういう方向に向かっていくことがあるだろうと。基本的には本当に合理的か、コストはどうかなどをトータルで考えての判断ですが、いずれなる可能性もあることは想定をしてはいます。IEC の規格できちんと日本がやろうと思っていることをできるようにしておくことが、常に重要と思います。お答えになってますでしょう。

（参加者１）

ありがとうございます。そういう観点で、石井先生にももちろん今お願いしてるのですが、これからもっと若手の方もその標準化の議論にコミットしていってほしいというメッセージですね。

（石井）

はい。特に国際標準化の仕事は流儀があり、若いうちから軽いところから経験していただいて、いずれは日本で規格を通したい断面になったときに先頭に立つ人が必要だと思いますし、そういう意味ではある期間国際標準に取り組んでいる一団の人たちが必要だと思います。

ということで私も芳澤先生にも声をかけており、標準化の仕事に若いうちから少しずつ慣れ親しんでいただき、いずれ何かの委員長や議長をやるなど背負っていただきたいと思っています。

（参加者１）

すごくいいメッセージだと思いました。ありがとうございました。

米国 IEEE での規格の取り組み

（PL）

ありがとうございます。ワンポイント、アメリカの人たち、エンジニアって IEEE で繋がってるような気がするんですけどそれはどうでしょうか。

（石井）

例えばインバータの規格で IEEE1547、それから最近ではやっぱり話題のグリッドフォーミングインバーターの IEEE2800 などの規格があり、定めるべきものは定めてたと思います。ただそれはインバータとかの機器の規格だという認識で、例えば DR 全般、アグリゲーションするためのシステムとしての規格はあまり統一されていないと思っています。特にカリフォルニアでは、インバータ規格を強めに出して 1547 の実装を義務化しました。太陽光や電池には規格を結構当てはめてますが、その他の全部か何かを IEEE の規格にする感じにはなっていないと思います。

DR 全般では、他は全然別で、例えばカリフォルニアのビルは必ず OpenADR 2.0b でのコミュニケーションが義務になっていて、規格の適用の仕方は領域ごとに様々ですが、IEEE 規格は機器が中心になっているのはその通りだと思います。

送電など高速通信領域の標準化

（PL）

ありがとうございます。残りが 10 分ぐらいです。どなたからでもお願いします。

（参加者２）

もう一点よろしいですか。石井先生、アグリゲータあたりのところまでの通信の標準化はわかったのですが、もっと上のレベルのもう少し高速の通信が必要になる領域の議論はあるでしょうか？

（石井）

電力システムの中の例えば従来から遮断機などの機器の制御は、私の理解では国内はそれぞれ電力会社が作ってきた方式で運用されていますが、変電所を起点に徐々に IEC 規格に移行していると理解しています。

特に 61850 は、瞬時に通信するための制御プロトコル、情報モデル通信規格として整備されてきているという認識なのでそうなのですが、日本では一部独自方式が残っていると思いますけれど、徐々に IEC に移行していくと理解をしています。

（参加者２）

ありがとうございました。今後その高速通信でいろんなことをすることになりそうな気がして、そこに日本がまた遅れたら困るのかなと思い聞きました。ありがとうございました。

プライスシグナルの活用

（PL）

はい、ありがとうございます。それでは参加者3、お願いします。

（参加者３）

はい、ありがとうございます。15 分全体の話を伺っておらずちょっと的外れかもしれないですが、お伺いしているやり方が需要側に電力系統を制御するパラダイムをそのまま持ち込んでるような感じがします。

需要家の個々の機器まで外部から制御することのようですが、それは需要家としては受け入れがたいところもあると思ってます。

需要家が、積極的に自らの意思で DR あるいは全体の需給調整に協力しようという形の仕組みが良いのではないのかなと。それに当てはまるのは多分価格をもちいた仕組みです。電力価格は共通情報であり、電力が需給逼迫しているのが分かるので、価格情報に応じて需要家が反応するのが自然に思えます。価格を使う考え方はないのかなと思いました。報奨を与える感じでの仕組みは、昔のデマンドサイドマネジメントの延長という形になり、これは電力会社側の考え方と思います。今必要となっているのは、そうではなくて、電力市場へ直接各家庭が参加して入札をするような仕組みで、しかも入札は 30 分同時同量じゃなくてもうちょっと時間解像度を高めて、各需要家が自分の損得で判断して自分の需要を調整すればいいと思いますがどうでしょうか。漠然とした質問ですけども、よろしくお願いします。

（石井）

ありがとうございます。石井です。おっしゃる通り、需要家に自由度がないのは、これは大変良くないですということで。お話の中では、基本はやっぱり上位からっていうのは、プラスシグナルも含めて将来的に考えるべきだと思います。EMS を使って需要家が判断して何をどうするかっていうことは自分で決めるのがベースだと思ってます。

DR ready の話は、外からの直接制御の色が濃く聞こえてしまったかもしません。しかし、これも基本的には外からサービスをする人、例えばアグリゲータとかが需要家と合意して行うことで、そのプロセスは必ず必要であり、需要家の意思やニーズを取り込んで、前段で行われるべきことというふうに思います。

プライスシグナル、プライシングについては、NEDO の実証とかでやっていて、その中で社会的にどういうものがどれぐらいの反応度があるかを検証しています。ただプライスの場合の課題は系統運用の面から見ると、需要と供給のバランス取るために確実に動いてほしいというところがあります。プライスシグナルだけでいくかどうかについてはいろいろと議論になると思いますが、取り込んでいくべきという点はその通りだと思います。今後 NEDO 事業の結果などを見つつ、プライスシグナルなどでやる部分とか事前のプロキュアアメントや契約でやるのかをハイブリッドにして考え、リアルタイム性が高めるためには先ほどの DR ready でコントロールできれば、プライスとかでの動きにずれが生じても合わせられることで、もっとプライス側に寄れることになると思っています。

（PL）

芳澤先生いかがですか。

（芳澤）

電気自動車ではダイナミックプライシングの実証事業が行われており、価格ベースで日中の充電を促す実証は取り組まれています。ただ石井先生もいわれるように、確実性がないので市場調整力とするかどうか、そういう考えがネックになる部分なのかなと思っております。一方で EV では、太陽光を使うためにダイナミックプライシング等で誘導することは、それをやることによって交通側での混雑が、交通渋滞や道路の混雑が出ることが多分出てくるので、そういうところとの兼ね合いで今後進める必要があると感じています。要は電力だけではなくて他の分野の影響も加味して考えないといけない部分が、結構難しいところだと感じます。

（PL）

はい、ありがとうございました。参加者3、いかがでしょうか？

（参加者３）

そのプライスシグナルのプライスをどう作るのかが問題だと思います。

高くないとあまり反応してくれず節電にならないので、市場で決まる仕組みにすると「200～300 円/kWh になっても市場で決まったんだからしょうがない」という諦めがつきますが、電力会社が 200～300 円/kWh に上げると言うと、「それは違うんじゃないの」と批判がでます。プライスをどうやって決めるのかが重要だと思っています。どういう理屈でプライスを決めるのかが疑問なのですが、もしお答えがあればお願いします。

（芳澤）

EV 充電のダイナミックプライシングに関しては、事業者さんが決める形になっていて、そこは実証としては EV 充電を誘導したい人が決めれると思います。ただ、市場価格に連動させる、あるいは自社の理論に従って決めているものもあるという感じで、アカデミックの観点で言うと、例えばそういうところに強化学習やマシンラーニング、ゲーム理論などを使う論文は各国で多々発表されており、今の主流だと思ってます。

ただ現実問題、先ほどの不確実性を担保しようとすると、価格は大きく変動させないといけないなど、極端な話になりかねないかなと思ってるので、私自身は結論付けではなのですが、ブームとしては機械学習などを使うのかなと思っています。

（PL）

送配電側ではコストに基づき価格は計算できる。けれどもそれを需要側に適用するかどうかは、間の人次第であり、もう一つは価格が高いのは政治が嫌うという話など、いくつか妥協すべき点もあると思います。

はい。それでは、29 分ということで時間になってしまいました。追加の質問があれば、後チャットに入れていただければ、こちらでは 1 時間程度復習をする中でお答えさせていただきます。すぐでなくても結構ですから入れていただければと思います。

閉会

本日はどうもありがとうございました。これで終了いたします。

第 8 回会合

開会

（荻本 PL（以下 PL））

今回第 8 回は、解析 I 電力解析、解析 II エネルギーについて、横浜国立大学の辻先生、それから東京大学の小宮山先生に1時間で 2 件について話題を提供していただき、その後議論を行う回です。

最初に、前回までに確認させていただいた内容として、「資料 1 プロジェクトの進め方」を確認させていただきます。2 ページ目の全体スケジュールにあるように、第 10 回の後に後半シンポジウム、それから提言シンポジウムと書いています。最初、後半はシンポジウム 1 回としていましたが、4 月の中間シンポの後シンポジウム1回だけで提言まで持ってゆくのは難しいと考え、後半2回のシンポジウムとしています。ご確認下さい。

次に「資料 6 提言とりまとめに向けたメモ_第 7 回分追記など」では、提言をどうまとめていくのかということについて、皆さんからご意見をいただき、いろいろ修正履歴や色塗りで修正点が示してあります。基本的には議論した内容を、整理させていただいた内容ですので、こちらもご確認ください。

講演 1 解析 I 電力解析（横浜国立大学・辻隆男）

（PL）

本題に入ります。それでは一番目として、解析 I 電力解析について辻先生どうぞよろしくお願いいたします。

本日の内容

（辻隆男）

おはようございます。横浜国立大学の辻です。 本日お話する機会をいただきありがとうございます。 解析 1 電力解析ということで話題提供させていただきます。 今日お話させていただく、おおよその内容です。従来から諸現象の分析評価、運用制御計画、いろんな意味で幅広く電力系統解析が行われてきました。その最近の話題や、これからの解析技術の必要性について広く浅く話題を挙げさせていただきます。

系統解析は非常に幅広く、安定性の解析のような動特性というか、EMT 解析のような話と、もう少し広い意味では、同時市場で今後期待されている SCUC とか、タイムスケール的に幅広い範囲のものが混在しています。

目次としては、最初に電力系統解析の概要ということで少し教科書的な話をおさらいしまして、その後最近の話題から、先進的な話に少し手を伸ばしてお話しできればと思っています。

1. 電力系統解析の概要

最初に電力系統解析の概要です。教科書的な内容で恐縮ですが、ここに挙げた目的で電力系統の解析が幅広く行われていると思っています。 下の方は、TEPCO システムズさんのウェブサイトからお借りしたよく出てくる図で、特に動特性に着目し解析では、ミリ秒などの速い現象から、よりゆっくりした現象まで、幅広い現象が電力系統の解析の対象に含まれます。目的に合わせて、どういうツール、データで分析するかを工夫しながらいろいろな検討を進めてきた歴史があると思っています。 次のページはご参考で、似たような絵で IEEE での安定性の整理で、数年前に安定性解析の定義が修正されたときに出てきた図です。この図にあるように、インバータの応答を含めた解析が重要になってきています。 この辺りは、以前のパワエレに関する討議の中で中島先生などからいろいろお話があったところですが、解析に求められる内容も時代とともに変わってきていると言えます。

認識合わせのために、過渡的な解析に焦点を当てたときの一般的な解析のアルゴリズムを、これも教科書的な話ですが、参考につけています。何らかの擾乱が発生した後の系統の過渡的な動きを、一般的には電力系統の同期機やインバータ電源の挙動は微分方程式、ネットワークは代数方程式で表現し、これらをうまく組み合わせて解いていくのが従来の実効値寄りの説明になると思います。 様々な時定数の現象が混在するというのが一般的な特徴で割と解きづらく、一般的に計算負荷が大きい問題と従来から考えられてきたと思っています。最近では CPU の性能の向上と同時に系統の不確実性が増大する部分もあり、計算は高速化する一方で、解くべき相手も手強くなり、計算負荷の大きな問題であると思っています。

2. 電力系統解析の事例

(1) 最近の変化

電力系統解析における最近の変化をいくつか挙げました。まず、複数の現象の考慮です。同期安定性や電圧安定性などいろいろな安定性の解析が電力系統の運用・制御で重要です。これまでは現象ごとに独立した解析を行うイメージが強かったのが、だんだん複合的な現象を横断的に見る必要が出てきたことにより、より高度な系統解析が求められています。二番目は解析対象範囲の拡大です。必ずしも最近の話題ではないですけれども、基幹系統、地域系統、配電系統と、様々な電圧階級のネットワークを統合的に解析することが求められるようになってきていると思っています。三番目は、不確実性の増大です。再エネの出力変動、小規模分散型のリソースの増加で系統の状態監視が直接できないものが多くなるとともに、再エネの出力変動に起因した不確実性が増加しています。それで系統解析では確率論的な考え方を導入することが一層重要になってきていると思います。最後は、解く側の工夫としては多様な技術が進んでいますが、最近では AI というか機械学習の応用の技術が進展していて、いろいろな系統解析の考え方がこれから新しくなっていくと思います。

最近の話題

ここから最近の話題をいくつか上げさせていただきます。系統解析関連ということで最初 2 点は、平常時と非常時に分けて、系統運用に関わる運用容量の考え方、あとは非常時にブラックアウトを起こさないようにする分析の体系化です。

(2) 安定性解析（平常時）

まず一点目は平常時の話です。一般に、電力系統の経済負荷配分を決めるときの制約条件として、一般的にこの絵にあるように、様々な安定性の限度の中で一番弱いところで運用容量を決めるのが以前からの考え方で、かつてはエリアごとに TSO が独自の考え方でその分析していたと思います。近年では同時市場の導入検討が大きな契機となり、エリアごとに異なる取り扱いを横並びで体系化する取り組みが進んでいます。このスライドの引用にあるように、将来の運用容量等の在り方に関する作業会というところで議論していましたが、どういう考え方で、各種要因により決まる運用限度を計算するのか、解析の前提条件の考え方や、使用するデータの統一などの体系化が進んでいます。 特にこの（電圧安定性等の限界潮流の）フリンジ分に対しする取り扱いなど、今までエリアごとに異なっていたところの統一の議論がだいぶ進んでいます。

系統解析で少し計算負荷が重い計算で同期安定性の解析があり、以前からからのテーマである中西 θ（東西の位相差）が開きすぎると不安定化するという問題があります。これは当研究室で実施した計算結果の例で、西日本の東西の位相差が小さいときは送電線に事故が起きても安安定状態に復帰できるが、位相差が大きいときには事故が起きると発散する現象が、以前からよく知られています。この現象では同期安定性という意味での広域的な限度が決まります。これらを体系的に決めて、その中でどこまで送電できるかを決める議論を進めています。この議論で難しいのは、西から東への潮流がどこまで大丈夫かはだけでなく、電源の起動停止の内訳等によっても安定性が影響を受けて変わりますので、その前提条件の決定方法などの体系化が必要なことです。

(2a) 北海道ブラックアウト

あと非常時については、北海道のブラックアウトを契機に全力で GS ワーキングが検討を進めたように、北海道だけでなく全エリア通じて過酷な事故を想定してブラックアウト発生の可能性をシミュレーションする考え方の体系化が進みつつあります。特に、定期的にそのリスクを確認するプロセスが構築されたというのが、最近の変化としてあります。私もこのブラックアウトの件に関わったときに感じたことは、系統解析の準備や体制が必ずしも全エリアで十分できているわけではないという印象もあり、そういうところが最近進んでいると思っています。

この辺は参考資料ということでその確認プロセスのあの資料です。 あとは、シミュレーションの体制を全エリア通じてしっかり作る取り組みの中で、これらの現象の再現ができるようになっています。

(2b) イベリア半島ブラックアウト

今年の 4 月に発生したイベリア半島のブラックアウトの資料です。次のページ以降に具体的なデータなどをつけていますが、そちらは皆さんもよくご存知と思いますので説明は省略します。北海道のブラックアウトの事例では、再エネの占める影響はあまりない状況だったのに比べ、こちらは非常に再エネの影響が高

い状況です。再エネの比率が高い中で、同期電源が停止し、系統のシステムストレングスが下がり、その無効電力制御機能が不足して広域的な電源脱落に至ったという状況です。これについては、電圧安定性・周波数とか、複数の要因を考慮した統合的な解析が必要になるという教訓が得られます。また、再エネ比率が高まると、同期電源だけではなく、再エネが系統貢献することの重要性が高くなるということで、グリッドコードの整備が重要になる。そういったところが非常に大切と思っています。

3. 安定性解析（グリッドコード）

そういった面から、国内ではグリッドコードの検討が、広域機関の検討会等で進められています。 将来、慣性力や短絡容量が低下する中で、再エネ分散電源等に求められる機能について検討されており、こういった中でも系統解析がふんだんに活用されています。例えば、分散電源の LFSM（Limited Frequency-sensitive mode）は、周波数低下時にドループのような形で貢献する機能で、大きな関心事になっています。しかし、これもしっかりデザインしないと、この図にあるように事故後の周波数下を防止するという部分では貢献するものの、デザインが悪いと振動現象を引き起こす可能性があります。電力系統は非常に大きいので、自端の情報だけ見て動く要素が増えると、うまくデザインするためには、丁寧な分析が必要になります。どういう条件であればより安定な系統を実現できるかを丁寧に解析する必要があると思っています。難しいのは、各機能を備えた電源がどれだけあって、その電源がいつどれだけ発電しているかの想定です。この想定はかなり自由にできてしまうので、より確からしい将来の姿をいかにしてモデル化するかが重要になり、そういった中で、確定的なモデルを組むことが難しい場合、不確実な要因をそのまま確率的に捉えて解析する技術が求められると思っています。こういった技術として蓄電池や電気自動車も貢献するなど色々な可能性を考えると、無数のどういうリソースがどれだけ貢献するかの組み合わせも想定できてしまう。どういう将来像を考えるかが非常に重要だと思っています。

4. 瞬時値解析

あとは、先ほども述べたように、変換器の大量導入で系統の安定性が低下する中で、IEEE でも安定性の定義に、変換器起因が追加されたのは皆さんよくご存知と思います。この変換器起因の安定性を分析するために、瞬時値解析の重要性が高まってきています。 電磁界解析のシミュレーション、ここでは EMT 解析と書いていますが、一般的にはパワエレ機器の開発では必ず行う解析です。系統側の解析では、従来のそこまで考えなくてもいいときにはモデル化されてこなかったような領域ですが、ここがだんだん無視できなくなっています。 瞬時値解析は精緻な計算ができますが、一方で、計算時間が非常に長くなるので、高速化の工夫が不可欠になります。 あとは精緻な計算が期待できる一方で、大規模なモデルに瞬時値解析を適用すると、一つ一つのモデルが本当に正しくできているのかが、速い現象になるほど難しいと思います。また、適切な初期値を与えることが非常に難しいという点もあります。このため、現象によっては必ずしも精度の高いシミュレーションにならないという指摘もあります。どういう現象の解析のために瞬時値解析が必要で、どこまでの範囲をモデル化するかを見極めることが大事だと思っています。これは最近の IEEE の Power & Energy Magazine の記事ですが、一機無限大母線系統モデルで機器だけに注目したときの瞬時値解析の結果であるオレンジに対し、系統側もモデル化した場合答えが変わってくるため、このような解析が一定程度必要だという議論が進展しています。 こちらはオーストラリアの 2016 年のブラックアウトの現象の再現を試みた場合の例です。こちらも、実効値ベースの解析と瞬時値解析では答えが違います。風力のサイトの応動を比較すると、オレンジが実効値、茶色が瞬時値の結果で、黄色の破線が実測データで、瞬時値解析の方が精度は上がる部分はあろうということです。どこまでやるべきなのかという議論が一層重要だと思います。一方で、30 秒のシミュレーションに 1 日以上かかる事例が同じ文献でも紹介されています。並列計算により、例えば先ほどのオーストラリアの場合、系統全体 240 ぐらいの部分系統に分割して計算することで、30 秒のシミュレーションをするのにかかる時間が 3 時間、これも非常に長いのですが、こういう工夫をしつつ必要に応じて適用することだと思っています。 並列計算の考え方はいろいろありますが、その内の典型的なやり方は、複数の部分系統に分割してそれぞれで別々の CPU で波形を計算し、インターフェースのところの波形が一致するようにその情報を交換して収束計算し、最終的に誤差のない波形にたどり着くとこういう仕組みです。

5. 先進的解析手法の事例

(1) セキュリティ制約付発電機起動停止計画（SCUC）

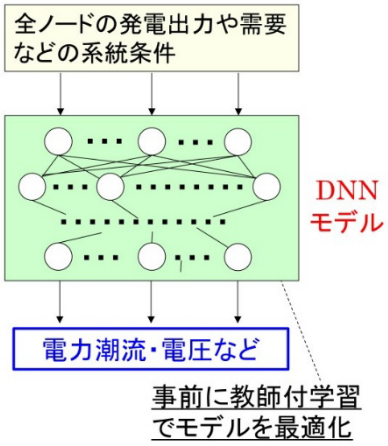
ここからあと残りもう少しですが、将来の系統解析として私の研究室で取り組んでいる話を二つ簡単に紹介します。一つは、先ほど話題が出た同時市場について、最適化計算により最適な系統運用をするための

SCUC が重要になります。その中で、セキュリティに関する制約条件が重要になります。系統の不確実性を扱うために確率論を入れた SCUC の検討を行っています。 確率論を入れることで、過度に保守的な解を避けられる、不確実性を網羅的に考慮できて信頼性が上がるという部分で良さがある一方、計算時間の増大、不確実性のモデル化などの課題もあると思っています。ここでは SCUC の定式化の簡単なイメージとして、様々なシナリオの中で、コストとしては期待値の最小化が基本になると思っています。 この検討でしっかり考えないといけない点としては、SCUC は実需給の断面に向けて繰り返し解くことが想定されて、例えば確保すべき調整力、予備力も、実需給の断面が近づくと多く取りすぎる必要はないというような、動的な調整力の確保を取り込むことだと思います。実需給に近づいて予測の精度が高まるためで、多く取りすぎるには非効率ということです。これらを踏まえると、例えば太陽光の出力シナリオが複数あるようなときに、実需給断面が近づくにつれて起動停止パターンを修正できることを考慮して SCUC 決めることで、リスクを下げながらコストの期待値の改善も期待できると思っています。これには膨大なシミュレーションが必要になるため、分散的に解くなどの工夫を検討しています。例えばいろんな事故ケースをサブ問題と捉えて並列計算で評価し、問題があるような事故ケースがあればそれを考慮に入れた上で問題を再度解くという組み合わせにより、計算を効率化することを検討しています。

具体的な計算例として、この IEEE の 39 Bus System Model を使って、PV の導入容量が増えて出力変動の不確実性が増加したときに提案手法を使うと、従来の手法と比べてコストが少し下げられることを評価しています。これは NEDO プロで進めていて、今ご参加の皆様の中でも多くの皆様にご指導いただいているものです。

(2) 機械学習の応用

現在、AI、機械学習の応用に大きな期待があります。よくある研究ですが、例えば先ほどの同時市場の事例は DC ベースしたがこれを AC ベースにするためには非線形の潮流計算を多数解くことが必要となり、計算負荷が大きくなります。このため、SCUC の潮流計算をニューラルネットワークで代替する考え方があります。研究の事例はたくさんありますが、非線形性が強い場合に推定できるかとか、ネットワークの切り替えに追随できるかなどが課題となります。この分野について私の研究室で実施している事例としては、学習に与えるデータの前処理とか後処理をチューニングすることで、従来に比べて 4%ぐらいの計算時間でかなり高い精度の答が出るという内容です。今年の IEEE の PowerTech で発表した内容で詳細は下の文献をご参照いただければと思います。このように機械学習による系統解析が実用レベルになってきているという印象を持っています。



6．人材育成

系統解析の課題は、今後一層、解析対象が大規模複雑になる中で、全てを詳細に模擬したくなるけれど、それには限度がある点だと思います。真に詳細なモデル化がどこまでなのかを見極めるためには、電力系統の諸現象の物理的な理解がしっかりした人が必要です。 そして系統解析する時にどういう条件とデータで分析するかをしっかりと想定できる、そういう将来像を自ら考えられる人の育成を大学の視点も含めて期待したいと思っています。私から以上です。

講演 2 解析 II エネルギー解析（東京大学・小宮山）

（PL）

ありがとうございました。続きまして解析 II のエネルギー解析について、小宮山先生お願いします。

（小宮山）

エネルギーモデルの種類

エネルギー全体ということで、昨今、カーボンニュートラル、脱炭素が社会的にも大切な目標になる中で、エネルギー全体をどのようにカーボンニュートラルに移行していくかについてのモデル分析が世界的に行われています。私からはそうした点を含めながら、エネルギー全体のモデル解析の方向性について報告させていただきます。まずエネルギー全体のエネルギー需給分析するツールについて紹介した後に、再生可能エネルギーの普及拡大というのが世界的にも進む中、エネルギー・電力をどのようにモデリングすることが今後大切になると認識しており、特に地理的な観点、時間的な観点、技術的な観点、それから電力部門と非電力部門の連携の観点、その四つの観点についてお話をさせていただければと思います。まずエネルギーの分析で使われるモデルの類型で、大きく分けると計量経済型のモデル、応用一般均衡モデル、シミュレーション型のモデル、それから最適化型のモデルの四つの類型に分類できます。場合によってはこの四つのうちの二つを組み合わせる、例えば、計量経済モデルと最適化型モデルを組み合わせ、場合によっては応用一般均衡モデル等と計量経済モデルを複合的に利用するケースも見られます。計量経済モデルは、過去の実績データで決定した定量的な因果関係の回帰分析から外装して、将来のエネルギー需給を解析する手法です。

一般均衡モデルは、経済全体を扱うモデルで、エネルギー、電力、石油、ガスは経済セクターの一つという位置づけで、経済全体を分析します。一番簡単なものでは、費用最小化と効用最大化で企業と家計が行動するという評価基準のもとで、財やサービスの需給を決定しその価格が出ます。例えば 30 種類ぐらいの財を想定するとその 30 の財について、経済の活動量や価格を決定します。シミュレーションモデルは、先生方のご案内の通り、システムダイナミクスを扱うモデルです。

基本的には関係式、演繹的、地球的にシステムの挙動を逐次導出するようなモデルです。それから最適化型モデルは、例えばコスト最小化、利益最大化そうした数理計画法によって最適な解を導出するモデルです。 これらのモデルがエネルギーの分野で主に使われています。最初の二つは技術的、工学的な要素はあまり考慮しておらず「トップダウン型」、下の二つは技術特性、例えば起動停止など技術の特性を詳細に考慮するということで「ボトムアップ型」とも分類でされます。

NEMS モデル(米国エネルギー省)

最近世界でよく参照・利用されているモデルとして、アメリカのエネルギー省が毎年 2050 年までの国内のエネルギー需給を公表するのに使われているモデルがあります。これは古くから有名なモデルで、NEMS モデルと呼ばれていて、先ほどのモデルを複数使用して 2050 年までの米国内のエネルギー需給を決定するモデルです。 基本的には計量経済型のモデルをコアにして電力部門ですと最適化型の電源構成モデルを利用して 2050 年まで予測シナリオを示すモデルです。昨年この NEMS モデルは、CCUS 部門の二酸化炭素の回収貯留利用、あと水素についてかなり拡充を図り、モデルが大幅にアップグレードされたと聞きいています。

これが最新の見通しで、2050 年までの米国の二酸化炭素の排出量です。複数シナリオ、経済が上振れしたとき、下振れしたとき、もしくはテクノロジーが進んだ場合、進まない場合、そうした第三者が見て透明性の高いシナリオを置いて分析が毎年行われています。 またこのモデルでは、計量経済型のモデルがコアになっていますがも電力部門はコスト最小化型の最適化のモデルが使われています。 基本的には 1 時間値ですが 8,760 時間は考慮されておらず、この分野でよく行わる代表日の負荷パターンとして、冬と夏と中間期で、それぞれ需要が基準となる場合、高めの場合、それから低めの場合の 3 掛ける 3 で九つの代表日の負荷カーブを想定して、2050 年まで最適化しています。

計量経済モデル(日本エネルギー経済研究所)

日本では、日本エネルギー経済研究所のモデルは、アメリカの NEMS モデルにかなり近い発想で、計量経済型のモデルをコアにして、電力は LP による最適電源構成モデルで、シミュレーションで各機器の効率、例えば自動車は新車販売等で燃費も毎年変わるなど、そういう逐次的な変化も考慮に入れて、それらを計量経済型のモデルに取り込んで、2050 年までや、2030 年 40 日長期のシナリオを導出するという、そういうようなモデルが日本で構築されています。

応用一般均衡モデル(CGE モデル)

一般均衡モデルは、電力、石油、ガスは経済の 1 セクターとして扱い、例えば電力価格が上がれば他の

経済分野である電力多消費産業の活動量が低下するなど、経済全体を対象にしたモデルです。 パデュー大学の GTAP モデルがよく使われています。世界をアメリカや日本などの主要国、20 個ぐらいの財でモデリングし、企業、家計、政府の三者の最適化行動、政府は中立的な行動を仮定し、生産者である企業の費用最小化、家計の効用最大化のもとで全ての財、世界貿易含めて価格と活動量を決定するモデルです。

MARKAL/TIMES モデル(IEA)、部分均衡型、エネルギーシステム総コスト最小化モデル

毎年よく参照されるモデルが、国際エネルギー機関 IAEA の MARKAL/TIMES モデルです。

以前はですね先ほどの NEMS モデルや日本エネルギー経済研究所のモデルなど、以前は計量経済型のモデルを使って割とバランスよく各セクターシナリオ推定を算定していたのですが、こちらは完全に最適化モデルになってしまっています。2050 年カーボンニュートラルなどの所要の条件を与えて最適化し、バックキャスト的にあるべきエネルギーミックスを求めるモデルです。

MARKAL/TIMES モデルは開発依頼数十年以上アップデート等を繰り返しています。このエネルギーに特化したコスト最小化型のモデルを使って、最近 IEA はシナリオ導出していて、世界を 29 地域ぐらい分割し、世界のエネルギー全体を最適化するモデルが使われています。こちらは最新の WorldEnergyOutlook2024 の結果で、公表政策シナリオ、表明公約シナリオ、ネットゼロシナリオの三つのシナリオの電源構成のグラフです。ネットゼロシナリオでは、風力、太陽光の発電電力量が半分以上を占めていて、これが本当に実現可能かどうかについては別途検討の余地はあると思いますが、最適化によるこうした結果を世界で公表しています。

最適化型エネルギー需給モデル(日本)

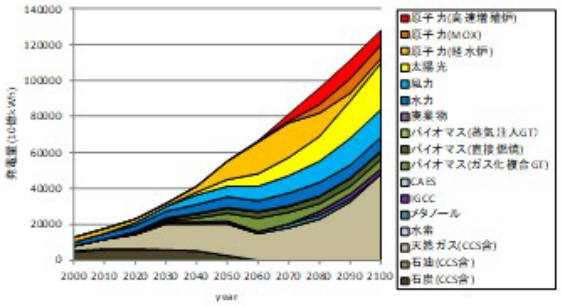
ここからは、私どもの藤井・小宮山研究室で開発しているモデルを簡単にご紹介させていただきます。再エネが普及拡大すると出力変動の影響というのが非常に意思決定に影響すると考え、日本のエネルギーセクター全体の中の電力部門の詳細化、8,760 時間 1 時間値で 2050 年までを決定できるモデルです。 モデルの時間解像度を上げることで、再エネの出力変動や EV の充電に例えば昼間 0 円の電力を利用することも考慮して、EV 充電、蓄電池、蓄熱発電、水電解それから大気中 CO2 直接回収などの 1 時間毎の挙動を含め、2050 年ネットゼロという制約を与えた上で、日本のエネルギーミックスを最適化します。現在 300 種類以上の技術を考慮し、今あまり普及してない技術も含めて最適化した結果がこちらです。エネルギー全体のモデルを利用することで、セクターカップリングの評価に大変有益です。 例えば、昼間の安い電力を使って、水素を製造し電化の難しいセクターの脱炭素を行う、EV 充電、ヒートポンプ、DER などの活用、それから大気中の CO2 回収、Methanation などによる合成燃料製造を行うなど、よりリアルな電力価格の変動も考慮することができます。例えば 2050 年までの最適化で、どういった技術が経済合理性を持って導入されるかというような分析をこれまで行います。 こちらは、今のモデルで複数シナリオを想定して、最近世界的によく提案分析される再エネ 100%シナリオでは、エネルギーシステム全体で、再エネの出力変動の影響は曇や晴れの日で大きく異なります。電力セクターは可能な限り詳細にモデリングすることが、本当にそれが信頼度を持ったシナリオなのかどうかを判断することに、非常に大事な観点であると認識しています。

世界エネルギーモデル(DNE21)

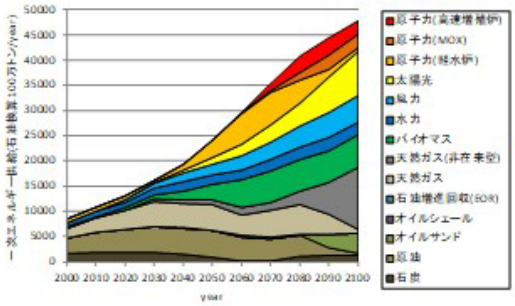
こちらは本検討会委員の藤井先生が元々開発された DNE21 モデルという世界モデルです。 世界全体のシステム総コストが最小化となるエネルギーミックスを求めるモデルで、世界を 82 地域に分割し、各地域のエネルギーの海上および陸上貿易、化石燃料、CO2、合成燃料などの国際貿易も考慮しています。このモデルでは世界を扱っているため、8,760 時間ではなく 1 日 6 時間帯、4 季節の代表日として太陽光の影響を考慮して晴と曇の 4 掛ける 2 ですから 8 パターンを扱うモデルです。これのモデルについては、研究室でも様々な分析に使っていいますが、最近では RITE も本モデルを改造して使用していただいています。

こちらが一例で、二酸化炭素制約を課さない場合の 2050 年の分析結果です。4 時間幅の 6 時間帯で計算しているため風力や太陽光等の出力変動がある程度ならされてしまうことに十分注意する必要があります。今後の方向性としては、時間解像度の詳細化があり、研究室では部分的に、ヨーロッパの場合は再エネの普及が国によって非常に大きいので、学生が、例えばヨーロッパだけ 8,760 時間で分析してこの世界モデルで評価するといった分析等も別途行っています。 それから最近世界でよく行われているのが、世界全体の 1.5 度目標の制約のもとでの最適なエネルギーミックスの分析です。一例ですが、2070 年頃世界でカーボンニュートラルそれ以降ネガティブの場合、CCS 技術としてどういったものが活用されるかについて、いろんな結果が世界であると思うのですが、例えば枯渇ガス田、枯渇炭田、帯水層に CO2 を貯留すること、回収は例えば化学プロセスや火力発電に加え大気から直接 CO2 を回収する DACCS など、さらには負の排出量になるバイオマス CCS も入っています。

電源構成(発電量、世界)



一次エネルギー供給(世界)



核燃料サイクル

それから技術としては原子力が重要ですが、これは長期的な視点で最適化しないと評価されにくい技術です。例えばフロントエンドに加えてバックエンドの核燃料サイクルまでを入れて、今日本で進めているプルサーマルで利用しても 1%のウランの資源の利用効率を 100%近くに引き上げる場合の原子力を分析することができます。例えば 1.5 度目標での世界の電源構成と 1 次エネルギー供給について、世界的に今原子力が世界でも再評価され始めています。このため、世界で原子力が一斉に活用され始めると、ウラン資源が枯渇し始めるため、プルトニウムをしっかり利活用することが必要です。日本では核燃料サイクルを進めないと、例えば 2100 年、2200 年、2300 年、そういうした時点ではもう原子力利活用が物理的にできなくなる可能性もあります。ということで高速炉、核燃料サイクルが徐々に入り始めると同時に、再エネの最大限の活用、それから CCS 利用した火力の活用など、複合的な対策が必要と考えられます。こちらの分析は先ほど述べたように 4 時間値で再エネの出力変動が少し緩和した状態ですので、その点も十分留意する必要があります。

今後のエネルギーモデルに組み込む電力のモデリングの方向性として、地理的、時間的な解像度と技術的な解像度と、それから非電力分野との連携の観点からお話させていただきました。

電力需給の数値シミュレーション

今研究室で開発している電力のモデルです。最初 9 地点で、時間解像度をかなり細かめで 10 分とすると年間 52,560 時点で、地域間の連携線 9 地点だけを考慮して分析を始め、135 地点、送電線 166 本、10 分値、52,560 時点、352 地点、送電線 441 本、8,760 地点と順にモデルを拡大し、現在系統の規模で一番大きいのが 1,161 地点、送電線 1,349 本、8,760 時間で、何とか線形で最適化できるモデルを開発しています。

時間は、年のみならずやはり長期的な、特に電力の部分は投資が大切になりますので、やはり年単位で長期も同時にやはり考える必要がある。今までの経験では、1 地点でやはり 10 分値、52,560 地点で 2050 年まで 4 期間、それから 9 地点、52,560 時点で 2050 年まで 4 期間までは比較的最適解も解きやすいということで、分析の方進めました。これさらに地点数を増やすと、計算機の負荷が過大でうまく導出きれないということで、今研究室の中では分解による解法を利用してより規模の大きいモデルも効率的に品質を維持して解くことについて分析しています。 技術的な解像度の観点からでは、電力の特に最適化の分野では、先ほど辻先生からもお話あった、起動停止、やはりしっかり 3 Part Offer であったり、そういうものをしっかり混合整数計画で技術的な解像度を上げて最適化するのが本来あるべき姿だと認識しています。こちら今、この今経産省とOCCTO 様の同時市場の検討会でも、電中研さん主体で分析が行われておお、当研究室のモデルでほぼ同じ前提条件で分析しているところを少しだけ紹介させていただきます。起動停止計画問題を市場に応用するというのがアメリカの方で既に実装されていますが、日本特有の問題で何かボトルネックがあるかないかをいろいろ計算している最中で、日本は季節性が大きく、端境期や高負荷期や軽負荷期に計算の難度が上がる結果です。こちらの図では軽負荷期の 4 月 27 日では、太陽光増えると系統制約も全部考えて 1,300 本の送電線のもとで考えて、やはり端境期、どの電源、特に火力発電、起動停止することが最適か、おそらく計算機的に見ると非常に難易度の高い問題なのだろうと認識しています。そういうような日本でこうしたモデルを電力の系統運用に使う場合もあるかもしれないという報告もしています。それからあとこちらのモデルで別途 357 のノード、送電線 462 本の起動停止計画問題で、年間 1 時間値でメタメネーション、合成ガスを製造するような都市ガス分野を、脱炭素、カーボンニュートラルにする場合の分析等も行いました。こちらでは 1 時間値で水電解装置それから液化水素タンク貯蔵、圧縮水素貯蔵関係、それからダイレクトエアキャプチャー(DAC)、それから合成メタン製造、蓄電、蓄熱の 1 時間値の挙動も考慮して

最適化することで、メタネーションはなかなか入りにくい。やはり特に太陽光発電では年間のプラントの稼働率が低く、例えば液化水素とか圧縮水素のタンクでは経済合理性が出ない。事業性を高めるためには稼働率を上げないといけないと。そうした間欠性の電源で、こういう非常に高価な設備の稼働率確保がしにくいということからも、例えば炭素税 10 万円/ton ぐらいかけないと合成メタンは入りにくいという結果になります。電力部門を詳細に考慮することで、こういう技術の本当の経済性が見えてくるという印象も持っています。 それから地理的な解像度では、これも先ほどの 1,161 地点で 1,300 本の送電線で分析する計算で、仮に今の日本の 2050 年目標、国の約 6 割の比率から推定して陸上風力 2,500 万 kW、洋上風力 1,300 万 kW、太陽光 2.7 億 kW を仮定して LMP を計算した結果です。電力価格の地域的な偏差が大きくなることが分かります。東北、北海道、九州、あと四国そうしたところと、やはりあの中 3 社でやはり電力価格の差がだいぶ出てくる。そうした場合に、どこで例えば水電解で水素を作ればいいか。やはり確率的に見ると、インフラの投資などを考える地理的な解像度も一定程度やはり考慮をしないとリアリティのある脱炭素化のシナリオも提示できないのではないかと認識しています。

次に時間解像度です。横軸で 10 分から 2 時間、240 分まで時間解像度を変えると、例えば天然ガス、複合火力、それからガス電池、リチウムイオン電池の評価にどういう影響を及ぼすかという試算です。時間解像度荒くすると、調整力として使われるリチウムイオン電池の導入量が一気に少なくなります。時間解像度を荒くすることで出力変動が均されてしまいリチウムイオン電池の優れた機能がモデルで評価されなくなってしまいます。このため、時間解像度も一定程度詳細に考慮する視点は、エネルギー解析の分野でも非常に大切であると認識しています。

最後、不確実性です。再エネの出力は不確実性が大きいということで、逐次的に不確実性を解く確率動的計画法があり、また確率動的計画法自体の課題として、状態数、状態変数の増加で次元の呪いと呼ばれる、最適化の問題の規模が一挙に大きくなり解けなくなることがあります。これを克服するために、価値関数を近似的に切除平面で近似して、最適解をなるべく品質の良い近似解から見出すモデリングの手法があります。これを、例えば太陽光の予測誤差が発生した場合を考慮に入れたて、揚水どういうふうに運用すべきかを考えることができます。 揚水は、太陽光が予測より大きな発電をした場合の下げ代不足に備えて、充電量を控えめにするといった挙動も見えてきます。不確実性の考慮も本来大切なアプローチであると考えます。

こちらは、コージェネレーションを対象に災害リスク、停電のリスク等も考えた上でこれ最適化したこれ事例でして、不確実性を考慮に入れると、バッファーの貯湯タンクが利活用されるなど、バッファーの利活用という観点から不確実性の考慮というのも大切なのだろうと考えます。

長くなりましたが、今後のこのエネルギー需給分析、電力需給を考える上で、やはり地理的解像度、時間的解像度と、それから技術的解像度と、それから非電力分野とどの程度連携の強度を考えるか、そういう四つの視点が大切ではないかなというふうに認識しております。私からは以上でございます。

質疑

（PL）

はい、ありがとうございました２件で約１時間、説明していただきました。どうもありがとうございました。 解析の話題はいろいろなものを対象に解析しているので、どんどん話が広がっていくのは避けられない話かなと思いますが、今日の場がその解析の手法という点に議論が戻ってくるように、また、常にツールとしての解析またはそのデータにどんなものが必要なのか、そういうところを視点にご議論をいただきたいと思います。

（PL）

あとは私が聞いてと思ったのは電力、エネルギーシステムが、再エネが大量導入され、システムが分散型になることで大きく変わりつつある状況です。この状況が解析に新たなニーズを与えていますし、同時市場ということが実現するとオンラインでデータが手に入るようになるので、直前に解析評価する、またはそのPMU のようなデータが手に入るので、どんどんオンラインで解析していく面もあると思っています。ここから約 1 時間ご議論をいただきたいと思います。 それでは、どなたからでもお願いします。 手が挙がっています参加者1、お願いします。

実効値解析と EMT 解析の連携

（参加者１）

辻先生のご発表に関連してコメントをしたいと思います。ご発表の中で瞬時値解析の重要性が増している点に関連して、系統安定性の解析実務の面からは、実効値解析と瞬時値解析の連携手順あるいはガイドラインを示すことが、今後重要になると思っています。

例えば、再エネの導入拡大が進む中、メガソーラーを或るエリアに系統連系する場合の技術的な検討においては、近年、世界のあちこちで起こっている振動現象などが起きないよう事前に解析する必要があると思います。 間題が発生しそうなエリアあるいは地域を絞り込んで解析する場合も、絞り込みの一番粗い段階は、これまでの実効値解析の静的な解析、短絡容量とか、最近は短絡容量ベースでもう少し進んだ指標も出ていて、それを使ってまず怪しいところを選択し、選択されたそれらについては次に実効値解析の動特性、最近ではインバータの振動現象をある程度表現できる実効値解析のモデルも登場しておりますので、それらを使って実効値解析をやってみて、いよいよ怪しいとなれば最後に瞬時値解析で詳細に詰めていくことになろうかと思います。ただその瞬時値解析では、着目するエリアのみを表現するモデリングをすることとし、その他の部分は瞬時値解析においても系統縮約をすることが必要と思います。 一つの例ですが、実効値解析と瞬時値解析の連携のガイドラインを示すことが重要と思っています。

（辻隆男）

辻です。 ありがとうございます。ご意見いただいたように、瞬時値解析と実効値解析等の組み合わせに、ガイドラインをまとめていくのは非常に大事だと思っています。 ご指摘いただいたように、瞬時値解析で詳細検討できるものの、プレゼンの中で申し上げたように、瞬時解析モデルは非常に長時間かかって現実的でない部分ありますので、どの範囲までを詳細にモデル化して残りをどう縮約するかという考え方の整理が大事だと思っています。 その意味で、実効値ベースでスクリーニンするために指標があるはずというのもその通りだと思っています。どういう現象着目するかで指標が違うことがあります。いろんな研究で様々な指標が提案されていると思うのですが、これからの時代に合わせてどういう指標が必要かというところから体系化することが重要と思います。先生のご指摘の点私もよくわかりました。 ありがとうございました。

（PL）

それでは他いかがでしょうか？参加者2、お願いします

地点別価格の活用

（参加者２）

小宮山先生に質問です。次回の話題が電力市場なのでそれともリンクしますが、世界の代表都市別の需給解析の図を出していただいていますが。まず日本の 24 枚目の地点別価格の図は何年時点のものでしょうか。太陽光が 2.7 億 kW で 2050 年ぐらいでしょうか。 また、計算時間はどのくらいでしょうか。

（小宮山）

小宮山です。こちら先生のおっしゃる通り、2050 年です。計算時間は大体 2 日間、48 時間です。

（参加者２）

わかりましたそう。なので、こういう情報はあくまでも、供給側の計画に与えるということですよね。だから運用にはさすがに難しくて、リアルタイムで提供はできないということですよね。

（小宮山）

48 時間という計算時間は年間 8,760 時間でということなので、おそらく実運用では多分 1 日ぐらいで計算すれば十分とすると計算時間も短くなります。それでも一、二時間とか多分それぞれかかるというイメージになります。

（参加者２）

今世間では、ワット・ビット連携とか、GX 産業立地とか、いろいろ言っていますが、データセンターの AI の学習の負荷を空間的に移動させるのには、この地点別価格を見ると明らかに東京や関西が高いので、北海道や九州に移動するとか、もう一つ実際問題、ハイパースケーラは別に日本で計算しなくても他のもっと電力価格の安い海外で計算すればいい。そういうところにまで計算負荷のシフトで、課題となるのは計算時間で、将来は地点別の燃料価格を出せるようになると思っていいでしょうか。

（小宮山）

そうですね。 地点別価格を出すと、多分いろんな利害が絡んでくるのだと思います。特に今、洋上風力で地点別価格を適用すると風力の事業性が悪化する可能性があり、別途補助を出すような話になると思います。しかし、地点別価格を出すことで、ここには接続してもほとんど事業性はないとか、需要の観点からは

北海道とか、やはり東北、九州、四国に工場作ってくださいとか、電源の観点からはもう少し電力の価格の高い、この事例ですと中3社かそこに近いところに電源立地してくださいという、そういうメッセージが得られると思います。今のスポット市場は地域間の連系線のみ考慮して、地内線の混雑を一切考えない値づけになっています。先生のおっしゃるように、データセンターなどの最適な接続とか、ハイパースケーラとかそういう観点からも、もう少し地理的に少し詳細な価格設定が今後求められると考えています。

（参加者２）

その通りですね。全国ベースの話と、あとローカルな TSO レベルの話とか、今おっしゃったような売れる化ゾーン、そうですねそれから需要の誘導に関する活用の場面が多いと期待しています。以上です。

リアルタイムに近い解析

（PL）

ありがとうございました。私の方からも。どれだけ丹念に計画しても悪いことは必ず起こる。 データがリアルタイムでどんどん入ってくる時代では、例えばPMU で直前に見つける。 または前日の計画と、当日の計画を修正時に見つけるとか。 解析が計画で行われていたのに対してリアルタイムに近い断面で処理して対応をすることが新しくできるようになる。インバータ連系設備の大量導入で様々な不安定現象がでる現在、従来長期の計画段階で行われていた解析をよりリアルタイムに近い断面で行う必要性も出てくる面があると思います。この辺り辻先生、小宮山先生いかがでしょうか。

（辻隆男）

はい。ご指摘のように、先ほどの SCUC のイメージで言えば、SCED に近い位置付けにもなるかもしれませんけれども、系統の状態が実需給に近い断面で確度高く予見できたときに計画の修正が迫られるということかと。それも実需給にどれだけ近いかによってレベル感があると思いますが、PMU であればよりリアルタイムに近いレベルまでいけば、非常にクリティカルなことが起きれば、いわゆる安定化制御のようなイメージで、様々なリソースがうまく連動して動くことが求められ、事前に作り込んだその安定化対策が動くということだと思うのですけれども、そのパラメータを随時オンラインで調整していくことができるのではと思います。その辺のイメージを膨らませていくと、将来、系統にフレキシビリティを与えるいろんなリソースがあって、制御のためのパラメータが動的に調整される世界観もあると思います。 今はいわゆる DR Ready とかの話がありますが、それらの通信を活用して、制御パラメータをそのときのリソースの様子に応じて動的に変えていくことが連携してできることが考えられます。今日私が話した分散電源のグループ制御がうまく設定できないと振動的になるとか、そういう状況をフレキシブルにかわすこともできると思います。 そういう情報を集めてブロードキャストするという、そこのサイクルがどのぐらい高速に回るのかに応じて、できることがだいぶ変わってくるなど、いろんなイメージを膨らませて考えてみたいと思います。 ありがとうございます。

（PL）

技術的にはわくわくするような話ですが、他方、危ない世界に足を踏み入れている可能性もありますけど。

（小宮山）

ありがとうございます。例えば今の電力市場で、前日市場では不確実性がある程度許容されている。 1 日前に一通り 1 日を最適化することは多分万国共通で行われていて、そこでは 1 日前の不確実性はある程度許容されている。それ以降、実需給に向けての不確実性がどう受け入れるかが大切な課題だと認識しております。

今日本ですとザラ場のような感じでギリギリまで市場間、プレイヤー間でずれないように 30 分コマの同時同量を行っていて、時間前にも最適化することも提案されていますが、それで不確実性を全て解消できるのかということを思ったりもします。そこまで最適化することでより不確実性を低減できるそういう枠組みになるのかどうか。PL もよくご存知だと思うのですが、例えば交流法や直流法でも系統はある程度模擬しているだけで、実態は違う場所にあると思うんですよね。 そういう観点で、辻先生の話された系統の例えば短絡容量も接続されてる電源は、その運用で時々刻々変わると思います。そこを何らかモデリングするということは、ある程度モデルと真実の誤差を許容した上で最適化しているので、より良いと本当に言えるのかどうか、もう少し物理的な観点も踏まえて検討する場が必要だろうと思っています。以上です

（PL）

ありがとうございます。おそらく、最適化の目標が費用低減ではなくなっているはずです。リアルタイムに近いところでは、それに応じて解析手法や指標が変わるのだろうと思います。ありがとうございました。

他、皆さんの方からいかがでしょう。電気的な領域から同時市場のような領域、さらにはエネルギー全体

を 100 年分解説する領域まで、話が広過ぎるかもしれませんが、ぜひご議論いただければと思います。

予防制御の解析と計算負荷低減

（参加者３）

今お話をお聞きしていて、非常にわかりやすくまとめていただいて、今後非常に大規模な計算が必要なことがわかるのですが、昔予防制御という話があって、いろんな想定事故を考えてそれが起こっても大丈夫なように系統を安定運用するためにはどういう対策、制御対策が必要かということでした。ずいぶん前から世界的に検討されていて、その中で今、起動停止計画にも予防制御的な制約を入れることも今後必要になると思っています。そうすると、想定事故の数も非常に多くなり解析しなくてはならない事象も多くなる。単純な潮流の容量制約だけではなくて、安定性だとか周波数も含めて系統を安定に運用できるように、最適な起動停止計画を立てることになります。 そうなるとその計算の規模がものすごく大きくなって、どう計算したらいいのかを今後考える話になりますし、さらにそこに確率的な話が入ると、とんでもないような計算負担になると思います。そういう意味でも、計算の高速化、分散化、並列化などを、今後解析ツールの分野でいかに努めていくかを考えていく必要があると思っています。その辺のことで、将来的にこうすれば、計算が遅くなることを解決よっていうのは何かそういうものがもしあれば、辻先生から教えていただきたいと思います。それがまず 1 点です。

もう一点は、小宮山先生のお話の中でのセクターカップリングについて、電力だけじゃなくて、他のエネルギーも全部含めた解析が今後必要になる可能性をお示しいただいたと思っています。 セクターカップリングではエネルギーだけではなくて、電気自動車あるいはシェアモビリティの最適スケジューリングなど、場所を移動することを考えると、時間的な解析に加えて空間的な変化も含めた解析が必要になる。あるいは交通だけではなくて他の事業、例えば水道事業ですとか、ワット・ビット連携のような通信事業との連携ということになり、それらも含めて全体を解析しようとすると相当な規模になると思っています。そういう全体を取りまとめた解析技術の動向について教えていただけないでしょうか。

（辻隆男）

辻です。 ご質問ありがとうございました。 ご指摘の通りだと思っておりまして、系統で発生するいろいろな事故というか故障に対して様々な予防制御、安定化対策を用意するために、その全ての事象に対して詳細な計算をして運用を決めることができればベストではあります。しかし、おっしゃるように計算負荷は大きくなることについて、当方で取り組んでいる事例としては、事故ケースごとにその後何が起きるかは考えずに、事故が起きないベストな運用を先に一度計算して、その運用に対して全ての事故ケースが起きた場合大丈夫かを並列計算で検証するという考え方があります。そこは独立した解析を一斉に並列にやるイメージですが、その結果、特定の事故に対して今の運用が駄目だというのが見えれば、それをくっつけてもう 1 回問題を解き直す。そういう工夫で初めから解くべき問題が大規模にならないように工夫することを意図していたというのがあります。とはいえ、その動的な問題に制約条件を考慮していくと、今申し上げたやり方でも計算負荷は高くなると思います。それで現状の方法では、事前にオフラインで計算した運用容量に安定性の問題を潜り込ませておくことだと思うのですが、それだとやや保守的になり過ぎると思います。今の熱容量で言えばダイナミックレーティング（従来一定と考えて計画していた送電線の運用容量を、気象条件などを反映して変化させること）などの形で、その制約条件を動的に変更することが検討されていると思います。そういったものにもう少し近づけていけるような工夫ができることが望ましいと思います。 ただ、計算負荷をどこまで軽減できるかは難しい課題で、いろいろ検討しています。

セクターカップリングの解析

（PL）

ありがとうございます。小宮山先生、おねがいします。

（小宮山）

はい。参加者3、ありがとうございます。セクターカップリングの最近の動向で、先生が言及された電気自動車の分野は、地理的な広がり、交通流によって EV の充電容量が変わるため、内外で今割と流行っていて、よく見られるのは、交通流のシミュレータと連成させた分析がトレンドの一つとしてあると思っております。交通分野の交通シミュレータでは、例えば各自動車のトリップ長、それから信号機とか、あらゆる交通の要素を全て取り込でシミュレーションするような取り組みもあの世界で今行われています。そうした交通シミュレータと電気自動車のシミュレーションと、系統のネットワークの解析を融合させることで、EV の充電をうまく電力系統に活用するシミュレーションが今論文でも出ていますので、今後も引き続いて注目される分野だと

思っています。

それから、参加者3からご指摘いただいたワット・ビット連携関係では、データセンターのデマンドレスポンスが非常に関心を持たれている領域だと思っています。 データセンターを例えばフルに運転すると系統に混雑が発生する可能性がある一方で、少し計算量を落とすことで混雑を緩和させられる可能性があります。データセンターのデマンドレスポンスの可能性も考慮に入れて再エネの利活用と絡めた分析が考えられます。それが本当に実現できるかどうかは、別途のデータセンター側の事業性の観点などがあると思いますが、今世界でも少しずつ論文が伸び始めていると認識しています。

（PL）

ありがとうございました。

（参加者３）

どうもありがとうございました。非常にわかりやすく説明していただきまして、ありがとうございます。本当に今の時代の解析は、昔に比べて規模が大きくなって、それが計算できる環境になり、それによって非常に研究も進んで広がりが出てくると思っていますので、ぜひ今後もこの解析分野の検討を続けていただければと思います。どうもありがとうございました。

（PL）

ありがとうございます。 セクターカップリングについては、アメリカでは 10 年ぐらい前、極渦、ポーラーボルテックスで厳寒状態になった時に発電用の天然ガスが不足し電力不足になったということで、その後ガスシステムと電力システムを起動停止計画の世界で連携運用するのが大きな実施例です。そういう規模の大きなセクターカップリングが広がる可能性があるというところでしょうか。

他いかがでしょうか？

AI 応用

（参加者４）

先生方のお話大変興味深くお聞きいていました。私の方からお聞きしたいこととして、最近特に最適化関連のモデル、かつデータ量が少ないものについては完全に定式化して最適化で解くよりも、AI に任せた方が早いのではないかという話を聞くことがあって、この点について問題のサイズですとか、AI と一言で言っても本当にいろいろなので、何かご意見や最近の研究の動向など教えていただければと思いました。

（辻隆男）

辻です。ご質問ありがとうございます。これらの問題を解くときの AI の活用はトレンドの一つだと思っています。 最適化の答えを直接 AI 得るものもあれば、私が先ほど申し上げた確率論的な最適化問題であれば、クリティカルなシナリオを AI で選択して解くとか、あと先ほど申し上げたのはその最適化問題の中の一環としてネットワークの計算の部分を AI に置き換えるとか、いろいろな適用があり、いろんな観点からの AI の利用の研究が進んでいます。

最適化問題の目的により取り扱いが異なると思いますが、例えば市場の運営に AI 使う場合、説明責任が出てくると思っていまして、そういった意味で AI がブラックボックスだと、出てきた答えの透明性が確保できず問題になると思います。AI が根拠を持たせた形で答えを出すといったところまで進むと、AI を利用できる幅が広がると思っており、XAI ベースで、市場の運用に活用する研究も盛んになると認識しています。ただ、私の自身の研究はそこまで進んでないので、細かいところまではよくわかっていない状況です。

（参加者４）

ありがとうございます。

人材育成

（PL）

今のことに関して何かご出席の方からコメントあればお願いしたいのですがよろしいですか。はい。

あと私の方から、解析は現実に向かって使うことに加えて、そう簡単には経験できないことを疑似的に経験する、人材育成に使う側面もあると思います。その側面について、大学あるいは企業はどういう可能性があるか。例えば、同時市場を体験するために、ユニットコミットメントを企業の中で、今はおそらく全然使われないと思うのですが、経験して、その中でどういう機能を持った同時市場運営ツールを作ればいいのかを体験できると思います。こうなることで解析の付加価値が上がると思いますがいかがでしょうか？

（辻隆男）

そうですね。大学でこういった系統解析を人材育成でどう活用していくかという趣旨の質問だと思いますが、解析の種類にもよると思いますが、学生に対して直接響きやすいものとしては目の前にある何かのハードウェアの実験に対して解析がうまく符合することが一つあると思います。ですが、電力システムの系統の分野だと、そういう形でのシミュレーションの活用が十分にできないところもあると思います。今指摘されたように起動停止問題やエリア内での現象を自分で再現することを通して実際の系統で特異な現象が起こりうるのかを現象論として把握する経験が積めればいいと思います。

その一方で、系統解析は前提条件の設定やモデル化の誤差によって結果が大きく影響を受ける危うさを持っているため、想定条件が一つ変わるとあっさり答えが大きく変わってしまいます。 特に線形計画にも多いと思いますが、過渡解析にしても最適化にしても使うデータの答えに対する感度もしっかり体験してもらいたいと思います。シミュレーションが、何か自由に現象を再現できて利便性高いように見えるけれども、相当丁寧にやらないと現実をしっかり捉えることができない、そういった難しさを人材育成の中で伝える必要あると思っています。大学の教育課程の中では最初に楽しい体験してもらう方に重きがあっていいと思うのですが、同時に今お話したようなことを忘れないようにしないといけないと感じています。

（小宮山）

当方の研究室で主に数理計画を使って研究する観点からは、同時市場はとてもいい題材であるというふうに、人材育成の観点からもよいテーマであると思っています。エネルギー全体のモデルもいろいろ開発していますが、いずれもかなり大規模になりがちで、モデルによっては線形でも一つの解を出すのに 1 週間ぐらいかかるモデルもあります。同時市場の場合もケースによっては大変計算時間長い。すぐ計算結果がでても実用に供さないようなケースも多々見られます。教育・人材育成の観点からは、辻先生もいわれたと思いますが、与えた前提条件と解法の特性からなぜそういう解が得られたのか、それは数理計画法であれば合理的に説明がつく場合が多数ありますので、そこを考える力を養うことが特に最適化の場合は大切だと思います。一つ懸念するのはそういう最適化も踏まえずに AI を使ってしまうと、もう完全にブラックボックス化してなぜそういう解が出たのかという、因果関係の考察力が養えるのかが疑問に思うところです。前の質問で渡辺さんから質問あった AI の最適化分野への適用、トライされている方がおられ、私がスライドで紹介した確率動的計画、近似動的計画法で価値関数をいかに推計するかで全然スピードが変わってくるので、価値関数の推計に機械学習とか AI を適用できないかっていう、そういうご研究されている方、電力ではなくて本当にあの数理工学の分野でおられますが、かえって時間がかる場合があります。AI 使っていい場合とあまり望ましくない場合を目利きする上でも、原理原則に則って考える力が何より AI の時代でも大切だと思っており、そこが人材育成の上では大切なところだと思っています。

（PL）

ありがとうございます。人材というキーワードについて参加者5、いかがでしょうか？

（参加者５）

はい。ありがとうございます。 今先生方が言われたとおりだと私も本当に思っています。 私その昔レーザーの研究に携わっていましたが、先生方が言われたとおり、因果関係を考えることは非常に大切です。また、そもそも学生さんが関心を持っていただけなければ、エネルギー関連に関わる職業に就職していただけません。学生が将来、どの産業に関わるにしてもシミュレーションは非常に大事ですし、特に電力・エネルギーに関わるコンサルティングに関わる方々にとっても様々なツールをきちんと使いこなすことは非常に大事です。今日のご講演は私にとって非常に有意義なものでした。

（PL）

ありがとうございました。それでは人材育成の分野を離れて、ご指摘、ご質問等をお願いしたいと思います。

参加者6、いかがでしょうか？ちょっとオンラインの調子悪いでしょうか。それでは他の方いかがでしょうか？

AI による補完

（参加者７）

先ほどから議論で、「（解析が大規模なので計算）時間が大変だ」という話があるのですが、（その範疇で）参加者3から予防制御のお話が出てきました。私、三、四十年前にその分野を研究していたことがあります。（予防的）事故解析では、これからどんな事故事象が起こるかを予測して、そういうことが起こるから(あらかじめ)こういう対応策をとらなきゃいけないということを計算するのですが、その前に、どの事故が厳しいかを先

にチェックしていました。(オンライン計算を可能にするために)コンティンジェンシーアナリシスより前に厳しい事故の選択をするわけです。 その選択したものについてだけ詳しい解析をして対応策を決めるということをやっているのだと思います。 その選択にひょっとすると AI が使えるかもしれない。その意味は、昨日も私昼に NHK の囲碁を見ていたのですが、囲碁で AI が推奨手を出してくるのですね。 推奨手に対して、棋士がその通り打つこともあるし、全然違うところを打つこともあります。そうすると AI が示す勝率が上がったり下がったりするわけです。 解説者がその理由を解説してくれるのですが、要は、人間が気付いてないところを AI が示してくれることもあるわけです。ですから、数理計画的にいわゆる感度でこういうところが危なそうだという選択をやる以外に、AI は速いですから、AI のお奨めもまた調べてみて、実際のコンティンジェンシーアナリシスに使うというような使い方ができるので、これをオンラインで(予防制御に)使うときのアイデアとするなどが、AI の使い方の参考になるのではないかと思いながら議論を聞いていた次第です。

(PL)

ありがとうございました。はい。何か二方から、あるいは皆さんから関連してあればお願いします。

(辻隆男)

ご指摘いただいたように、こういう解析では、過酷な事象のスクリーニングを元々やっておいて、それで考慮すべき事象を抽出することが従来の考え方としてあると思います。ですが、潮流条件が不確実に揺らぐ中で、どこが一番過酷な事故かという条件自体がある振れ幅を持って不確実に動くというのが、これから一層起こってくると思っています。そういう中でご指摘の AI の活用は非常に強力なツールの一になると思っています。ですので、現象から考えて厳しいという条件では拾いきれなかったところをうまくフォローしてもらうというイメージで使うのが有用と私も思っています。ありがとうございました。

(PL)

今、電力システムまたはエネルギーシステム全体が大きく状態が変わりつつある状況で、思ってもみないことが起こる可能性が非常に高い。もう一つは、分散型の資源が導入されるに伴い、従来は例えば 1000 ヶ所の発電所であれば横断的な対策が 3 年ぐらいで打てたのが、1000 万台の自動車相手だと永久に終わらないほど時間がかかり、そのため思ってもみないことが起こるかもしれないことが考えられます。それまでこれらの思ってもみないことを予想・予測する考え方あるいは技術が、何かあるとは思っています。

他いかがでしょうか？参加者8、お願いします。

(参加者８)

今日のいろいろ議論、すごく納得しています。参加者4からご質問があった AI の活用について、私もちょっと気になっていて、同じような感想を持っていたところです。辻先生からもコメントあった通り、それだけに頼るのではなくてそれを補完的に使いながら、これまでのものもうまく活用するというのが、多分あるべき姿だと思って伺っていた次第です。

(PL)

ありがとうございました。 私の感想ですけれども、毎回作っている発言録、AI でできないかという考えが頭の中をよぎるのですが、AI がもし間違うと長いメモの中からそれを見つけることはもう永久にできないだろうと思って、私は手元でやり続けています。そのかわりそれができればもう1回私は全部を勉強することができるという状態です。残り時間少なくなりました。何か、どんなことでもあればお願いします。

(参加者８)

今の PL からの発言録の関連でコメントいただいたことに絡んで、AI は ChatGPT のほか Google だとかいろんなところから出ているので、それぞれ得意な領域があると思っています。ですので、それらの違うタイプの AI を並列で走らせて出てきた答えを突き合わせるとか、発言録に限らず電力システム等の AI 活用という点においても、複数の AI を並列して走らせて、あの答え合わせを互いにやることで、再エネの出力不足のアンサンブル予測に使えるのではないか、アンサンブル的な使い方で少し精度が上がるのではないかと思いました。

閉会

(PL)

ありがとうございました。AI を使いこなせていない私ですが、議事メモは頑張ります。

それではほぼ時間になりました。最後に事務局から次回以降の連絡をさせていただきます。

（事務局）

次回以降この後第 9 回がございます。第 9 回は 11 月を目途として、日程調整をさせていただきます。次回は、市場について山口先生、政策について杉山昌広先生に、講師、話題提供をお願いしております。よろしくお願いいたします。

（PL）

それでは時間になりましたので、本日の討議を終了させていただきます。どうもありがとうございました。

第 9 回会合

開会

（荻本 PL（以下 PL））

本プロジェクトの第 9 回会合を始めます。本日は、市場については東京理科大学の山口先生、政策については、5 月スペシャルセッションをお願いした東京大学の杉山先生にお願いしています。いつもの通り 30 分ずつ話をいただいて、その後 1 時間討議を行います。

いよいよ本プロジェクトも最後の段階で、次回第 10 回会合　横断的議論です。本日の最後に、今まで出た横断的な視点の候補を事務局で挙げて、新たな視点を含め皆様からご意見をいただいて次回のテーマとします。

さらにその次が、今年の 4 月の前半の締めくくりのシンポと同様に、後半しめくくりのシンポを来年の 4 月に、横断的議論の内容、そして半年の各テーマの議論を反映して行います。シンポジウムの構成についても今後ご意見いただき反映して構成します。この前修正したスケジュールの通り、次の夏までには提言を出すところにたどり着きたいと思っています。どうぞよろしくお願いを致します。

はい。それでは早速ですが、市場につきまして、東京理科大学の山口先生、お願いします。

講演 1 市場（東京理科大学・山口順之）

本日の内容

山口です。それでは私からは、「電力市場は創造的破壊を生み出せるか」というタイトルで発表します。2025 年のノーベル経済学賞のフィリップ・アギヨン先生は、「創造的破壊による持続的成長の理論」という内容で賞を取られました。今年も終わりですのでこの言葉をタイトルに入れてみました。 このプロジェクトでは、社会、産業、人々の生活の変容を支えるためにはこれまでの延長では良くないのではないかを考えていると思います。イノベーションの余地を考えながら、いろいろ話題提供を考えました。 また、市場のテーマの閲読委員の浅野先生には今日の私の話は全く相談していないので、ここで述べる内容は私の責任です。

最初の内容は、政府が出している市場のレビューと将来像で、政府の資料を使っていますが、皆さんご案内のことかと思いますので手短にいきます。次からは私の意見です。電力市場の問題の根源として、私が言うのははばかられるような気もしますが、空気も日本語も英語も読めないので気にせずにいきます。あとは個別のいくつかのテーマについて少し掘り起こしてみたいと思っています。

政府のこれまでの電力市場のレビューと将来像

まずこちらにあるように、現在の我が国の電力市場は、概ねこのように整理されています。縦が時間軸で、4 年前から実需給の時間まで、長期つまり期先、現在までのタイムラインがあり、それぞれの時点で設備あるいは容量を確保して、その後運用をする流れです。あと、政府資料では固有名詞では書いてないのですが、東京商品取引所、ICE、EEX などの先物取引があります。

電力システム改革の評価

電力システム改革の検証は令和 5～6 年にかけて行われ、この 3 月に結果がまとめられました。これは 3 月の資料ですので、読み上げは省略しますが、目的は、安定供給と料金の最大限の抑制、あとは需要家の選択肢と事業者の事業機会の拡大です。

電力システムの課題と目指すべき方向性

この検証の結果、課題がいろいろ示されて、状況の変化、例えば DX による需要の増加、カーボンニュートラルへの対応の加速、地政学的なリスクの増加による資源価格や物価の上昇とされています。 そして今後、電力市場として目指すべき方向性というのが示されました。

【参考】振り返るためのデータ

この検証では、多様なデータがかなり精緻に議論されてきました。量が多くて読み取りが大変だと思いますが、その中で電力市場の設計の問題なのか、それともそうじゃない問題なのかについては、よくわからないところもありますが、電力システム改革全体の中での市場取引は電力全体の一部ですので、市場が全部の責任を負うものでもないと思います。

政府の示す将来の在り方と「見どころ」

政府は「将来の電力システムのあり方」を図で示していて、それを見て市場が関係しそうなところについ

て、とこの黄色い私が書いた吹き出しにあるように、市場の仕組みに何か少し手を入れたら全体が変わるのかであると思います。例えばこの「役割と責任」を果たすために必要な取り組みが六つ書いてあり、例えば「電力産業を支える人材やサプライチェーンの確保が必要です」ということですが、人手不足は電力産業だけではないので、このように振りかぶっても具体的な打ち手が本当にあるかは気になります。 あるとしたら、市場っぽい言葉で言うと、超過利潤がもらえるような取引で勝って儲けるとかで、勝つということは単に他人を出し抜いて財産を奪うのではなく、何か良いビジネスや技術開発で儲けることで、そういう余地が多ければ新規の参入があると思います。あとは、電力システム改革の歴史は長く、電源の IPP 入札は 1995 年でした。すごく昔からありますが、震災の後はデマンドレスポンスが非常に注目され、当時言われていたことのうち、技術の進展によって今はできることがたくさんあると思います。そういう新しい要素を呼び込むのも市場の仕事だと思います。

これらの取り組み以前の環境整備としては、上げ足取りのようですが、「安定的な価格水準で供給できる環境整備」と書いてありますが、そもそもの現資産、電力あるいはエネルギーかもしれないけども、現資産の価格が不安定であったとしても、それが本当に不安定であれば、それは反映された方がいいと思います。これは、台風が来て欲しくない、日照がない方がいいとか、それはそうですが、実際台風は来るし、日照りや大雨が来るわけです。そのときにでも安定に供給できるというのは、何かどこかで無理をしていて誰かが本当は困っているからだとすると、価格は実態を表しているのがまずベースで、それを回避するためにいろんな人たちがどうリスクをヘッジするのかが大切だと思います。そういうことを思いながらこの資料を見ていました。

スポット市場価格の推移

スポット市場価格の推移を見ると、いろんな価格が動いていて、250 円になったり、80 円だったり、100 円超えたりして、小売事業者も大変苦しんだし、陳情書を出したりしたとも聞いていて、安い 0 円もたくさんあり、そこは本当儲かっていたんじゃないのかと思ったりもします。ということで、良し悪しは別として、250 円や 100 円は多分発電原価より高いのかもしれないが、これは売り切れてると考えれば原価は計算できないので、売り切れの需要曲線と供給曲線が書けないところは市場メカニズムの外なんだということがここに表れています。だから、250 円を入札した人が悪人だとかいう前に、そんなこと言っても買った人がいるのだからその買った人の気持ちを思うと、価格の変動がいいことなのか悪いことなのか、市場設計の面からよく考えた方がいいと思いました。

将来の取引市場

国の方は取引価格が今「沈静化してよかった」という感じで終わっていて、将来はどうするかに頭を使おうとしています。供給力を確保し、確保した供給力を最適運用するための市場取引について、長期の市場と呼ばれる容量市場と長期電源オークションがあり、短期の方は今話題の同時市場が、それぞれで活発に議論されているところです。

電力市場の問題の根源は何か

いろいろ制度がありますが、この 20 年を振り返って、根源は何かということを考えてみます。よくいわれるのは、電力という商品は特殊だということです。自然発生的に電気の取引所はできません。それはその通りですが、どういうふうに特殊かと聞かれるとちょっとドキドキしてきます。例えば電力需給は常にバランスさせなければならない、どこか 1 ヶ所が欠けても全を体維持できず大停電が起こる、などと言われています。 また、電力ネットワークでその物理的な制約は結構強い。公共性があって経済生産活動を支え人々の生活あるいは人命に関わるような財でもある。環境適合はよく知られたことがあります。あとは巨大な設備産業で、規模の経済が働き、大量に溜めることができない、瞬時の制御が必要などと言われています。電力以外のいろんな商品でも需給にミスマッチが起きると困ります。お米だってそうですが、でも米は公共的でしょうか。考えてみると電気はもちろん特殊ですが、他の物品だって流通ネットワークはあります。公共性についてもお互いの信用なければ商取引ができず、社会的な分業ができず、社会は崩壊してしまいます。環境問題、エネルギー多消費産業は電力という商品が特殊だという点で重要だとは思います。ですが電力では太字のあとの二つ、「巨大で瞬時の制御が必要で、大量に溜められない」ところが本当は問題で難しいところだろうと思っています。

電力市場の問題への対応アイテム

1995 年頃、電力自由化が輸入されてきたころ、「規模の経済が失われた」といってマイクロガスタービンが注目されました。私は実機を触ったことがなく電気工学の先生をしていますが、マイクロガスタービンを売った人たちに聞きたいところですが、やはり規模の経済があります。電源だけではなくて会社は、コーポレ

ートファイナンスなど、リスクを取るときに大きい会社は大きいリスクが取れ、競争に有利なことは間違いありません。そうすると、市場化は自由化とセットですから、大きく強い支配的な市場参加者、潜在的な支配的な市場参加者を監視する、市場支配力の抑止が必要です。ですから自由化で旧一般電気事業者を反対勢力とする見方があるのですが、別にそんなこと言わなくたって、私有化したって大きく強いプレイヤーであることは変わりないので絶対監視が必要だと思うのは当然と思います。とにかく今はこういう状況になっていると思います。あと、不確実性も大事で、大きい産業で失敗するととても困るのでビジネスとしてとても大変です。不確実性に対応できれば価値があるので、これをリスクプレミアムとして評価して、それを資本市場で流通させて競争するか、あるいは、国に任せたって言って、もうなかったことかのようにおまかせいただく、ということが良いと思う方もいるかもしれないですね。先送りする、という表現は違いますが、不確実性が存在しないふうにして何かを進めるということをするということになると思います。 そういうようなことが私は電力市場の根源だと思いますが、いろんなご意見があると思いますので、ご指導いただければと思います。

次に、電力市場への対応アイテムをいくつか挙げます。 私は規模の経済も不確実性も消し去ることはできないと思います。大きい会社を都道府県別の小さい会社に分解して日本に 50 社電力会社を作るようなことはあり得ないと思います。でもそうなれば、市場の集中度は下がりますよね。

不確実性も、台風来るなって祈ってもその実現は難しく、燃料価格も変わるので、不確実性を消し去ることはできず、対応アイテムが必要になります。しかし、国の委員会の議論を見ていると、大きな市場参加者がいて，不確実性へは特段の対応をしないという問題のフレームができてしまった後での対応の議論をしており、そういうふうに問題のフレームが決まっていたらそのような解決方法しかないよな、みたいなことが多いと私は感じます。ですから、枠組み自体を変えるとか、全然新しいことに挑戦するなどが必要で、継続的に実施する必要があると思っていて、イノベーションが求められると思います。ただ、そのアイテムにはすぐできることと、時間がかかることがあります。 ここに示す「情報公開、市場監視、市場参加者の増加、市場ルール・商品設計、リスクプレミアム」、すぐできそうなことからなかなか大変なことと私が思う順に並べています。一応のイメージとしては、情報公開をしっかりすることと、市場が監視していて審判がいるところでゲームをするということです。審判は警察ではなく、市場参加者を初めから悪人だという目で取り締まるのではなく、審判がいるからみんな自由にプレーできるのだと思います。そこがちゃんとできないと、参加者を増やすとか、ルールを作るとか、リスクを流通させることもできない。審判がいないサッカーのワールドカップはあり得ないので、情報公開などが先に来ると私は考えています。本当に正しいかどうかはわかりません。

情報公開

まず情報公開です。何の情報を公開して誰が使うかを想定するのは難しいと思いますが、電気工学の先生をしているので、商取引の先生ではないのですが、家族や親戚に「どの電力会社を選べばよいか」を聞かれます。ついでに家のスイッチを交換してほしいとも言われます。電気工事士 2 種を取ったので工事を違法ではなくでき、何でもやらされます。電力会社の選択については、比較サイトも充実しているのですが、何ヶ月バーゲンなどが結構あって、なんだかよくわからないです。情報が多すぎて、横並びにすると、バーゲン期間、固定価格と従量価格などがみんな違って、標準的に理解するのは難しい。標準家庭を設定した料金の比較は結構あって充実していると思います。しかし私が気になるのは、例えば、東京都だと断熱工事、PV、蓄電池、EV とかの補助もあり、そうした場合の消費者の選択に対して見積もりを出してくれるような比較サイトがあればいいと思います。他にもいろいろなデータ分析したらもっとわかると思いますし、工夫のしどころだろうと思います。このためには情報公開、情報どう流通させるかが重要だと思います。

二つ目はネットワーク情報です。今、一般送配電事業者のウェブサイトでは、ネットワーク情報としてインピーダンスなどもある程度出ています。学生にこれを使って潮流計算をやるように言ってみました。ノードの接続について、字で書いてあっても、変電所があるノードはいいが、分岐点で名前がついてない場合は名前どうつけるかから始まり、発電事業者さんや大口の需要家さんの秘密保持の関係でデータに欠落があり、計算するのは相当大変です。こういう計算ができない人は諦めるのが一つですが、データを公開する側でもう少し工夫があってもいいと思います。電力会社さんも新人にあのデータを渡して潮流計算ができるかを確認すれば、何を公開すべきか分かると思います。

三つ目は市場の情報です。これはいろんな意見あった点で、取引価格が高くなったらおかしいなどいろいろありますが、私は価格というものは世の中が何を求めているかを示すものだと思うしかないもので公開した方がいい。公開した方が良いものはまだまだあると思いますので、それらの公開はぜひお願いしたいと思います。

最後は価格指標です。価格指標はセクターカップリングを促します。例えば EV だったらいくらになるから充電しよう、水素だったらいくらになるからやってもしょうがないとか。価格指標を使うことで他のいろんな

産業や活動と比較して繋げたり外したりすることができるとういうことから、価格指標は重要だと思います。

市場監視

第二のアイテムは市場監視です。市場監視は重要ですが、監視の段階ではルールが決まっていてやれること少ないので、第一には市場ルールや商品の設計を丁寧にやって欲しいと思います。あとは情報公開を増やして市場監視機関の負担を減らしていく必要がある。無限にガイドラインを作り続けても、そのガイドラインを全部暗記してる人は誰もいないということでは，より大変になるので、何か変えないといけないと思います。第二に、市場の意味がわかるように市場を設計して情報公開して欲しい。これ読み取れないねって形の情報が公開されています。ブラインドオークションで入札をして最後にシングルプライスが決まれば普通に理解できます。でも、最後マルチプライスになっていて、価格が平均値で公表される商品があって、売り切れなのかそうじゃないかが分からないし、価格を見てこの商品は今買ってくれる人がいるか、だぶついて売れないのかが全く分からない情報公開があって、監視委員会の資料にもないというところは改善すべきだと思います。

市場参加者の増加

第三のアイテムが市場参加者の増加です。市場参加者は増やすべきで、分散型資源を新しい市場参加者と期待する場合、市場への組み込みっていうのはこれから重要と思います。分散型資源は容量の大きさ、技術が様々です。 本当の需要から貯蔵、省エネ、発電など種類もいろいろあります。ここはスマートグリッド技術の力の見せ所で、技術開発を促進する市場になってほしいと思いますが、やっぱり最終的に魅力を感じられる商品設計を小売事業者がするなど、商品設計の面でもイノベーションが必要だと思います。これらが電力システム改革の三つの目的の三つ目で、これがまさに期待されているところです。

市場ルール・商品設計

第四のアイテムが市場ルールです。電力にはたくさんの市場があります。なぜたくさんあるかというと、電源等の価値の種類がたくさんあるからです。 しかし、市場は自然発生ではないので、ルールもいろいろ直していく必要があります。状況変化、DER への期待、供給力確保、社会的に認知・着目される情勢の変化に対応するなどの要因で、改良が継続します。市場のルールを情勢にあわせて変えると，今までの価格の実績データが役に立たないとか、これまでの取引価格で投資を考えていたのにルールが変わったら投資の見通しが立たなくなる，というように，ルールを変えることそのものもリスクです。しかし，今の取引ルールもそれなりに変化してきたという評価もできると考えれば、恐れずにどんどん変えていかないと誰からも相手にされない、ガイドラインが多くて参加しづらい取引所になることが懸念されます。

電源等の価値の取引問題

それぞれに価値を取り引きするために取引所ができますが、価格がつくと設計の目的から外れた取引をしているからガイドラインを作る、価格が高くなるのでプライスキャップを作るなど、いろいろ対応し続けることには限界が来ると私は言っています。対応としては、一つは需要側の曲線をちゃんと作ることを恐れないことだと思います。容量市場では需要曲線があって、それには賛否あるのですが、必要な設備はどんな値段でも買うわけではなく、価格弾性がない商品では価格がつり上がるのは当たり前です。この価格以上ではもう買えないと言わなきゃいけないのですが、市場参加者もそんなことは言えないような状況だと思います。これ誰かが言わないといけないと思います。

あと個別のことです。従来型の火力発電、再エネ、蓄電池、DER、データセンター、需要家など、市場に参加する技術は多様です。例えば、従来型の電源は、需給調整、電圧無効電力制御、慣性の提供など、系統運用上重要な役割を果たしていますが、ネガティブプライスになってもそのコマだけ電源止めることはできないなどいろいろ困ることがあるとよく言われます。再エネは CO_2 を出さないが、システム統合の費用は概念としてはみんなわかっていても、その額の算出や負担の仕方はわからない。蓄電池は、1 日の需給に加え需給調整にも貢献するが、儲けすぎではないか、エネルギーではロスがあるので消費する側で、これをどう扱うか、デマンドレスポンスなどは小さすぎる、データセンターの競争力をつけて支援したいなと思っても審査が大変、流通設備を計画したがデータセンターがなくなったとか。あのデータセンターがなくなったというのは不誠実なデータセンター事業者ということではなく、技術の進展により例えば大きいデータセンターでの処理が進むなど、誰のせいでもなくて技術競争で決まることで変化する。その状況での流通設備への投資は難しい問題だと思います。需要家はいろんな選好がある中での小売事業者選びなど、いろんなことをすればいいと思います。

取引を組み合わせて問題解決

取引の課題のいくつかは、複数の取引を組み合わせることで問題を解決できるのではないかと考えます。

特にネガティブプライス、システム統合費用にはそれぞれスポット市場と需給調整市場があり、スポット市場のネガティブプライスでは損しても需給調整市場において高値で取り返すなど、それぞれの市場での価値が評価できれば、勝ち負けが決まるので、それでもいいだろうと。逆に、需給調整市場の高値はおかしいと言ってプライスキャップ付ければ、ネガティブプライスだけ残れば損するし、プライスキャップを付けないでネガティブプライスをやらず、高値がつくのは良くないなと思います。そういったバランスがあり、価格が納得できるものであれば、それらを組み合わせられることでどうにかなるのではないかという考え方もあるはずだと思います。

蓄電池が需給調整市場で儲け過ぎというのであれば、市場参加の要件に「安定的な電力供給を支えるためにこの市場があり、そのために会員になってもらって取引をしてもらいます」と書いてあるので、高いときだけ電気って何か事業環境が悪くなったら撤退するというのは初めから安定供給に貢献する気はないだろうと、初めから仲間に入れないという対応をしても良いのではないでしょうか。むしろ、設備投資に回しているかどうかを監視した方が、供給力が高まっていいと思います。需給調整市場で儲けてもっと電池を買ってもっと儲けるのであれば、供給力が上がると思います。あとはちょっと省略します。

限界費用ゼロ時代の市場の在り方

電源等の価値として現在用意されているメニューで不足していると考える点として、スポット市場は 1 日のスケジューリングで取引していますが、商品としては kW を取引しています。しかし、スケジューリングそのものという商品を考案すればよいのではないでしょうか。現状、電池を市場価格で運用することは商品定義が難しすぎてできないのですが、電池の充放電スケジューリングに価値があるように、何か定義できていない価値がとあるのではないか、どうにかイノベーティブなことをする必要があるということだと思います。

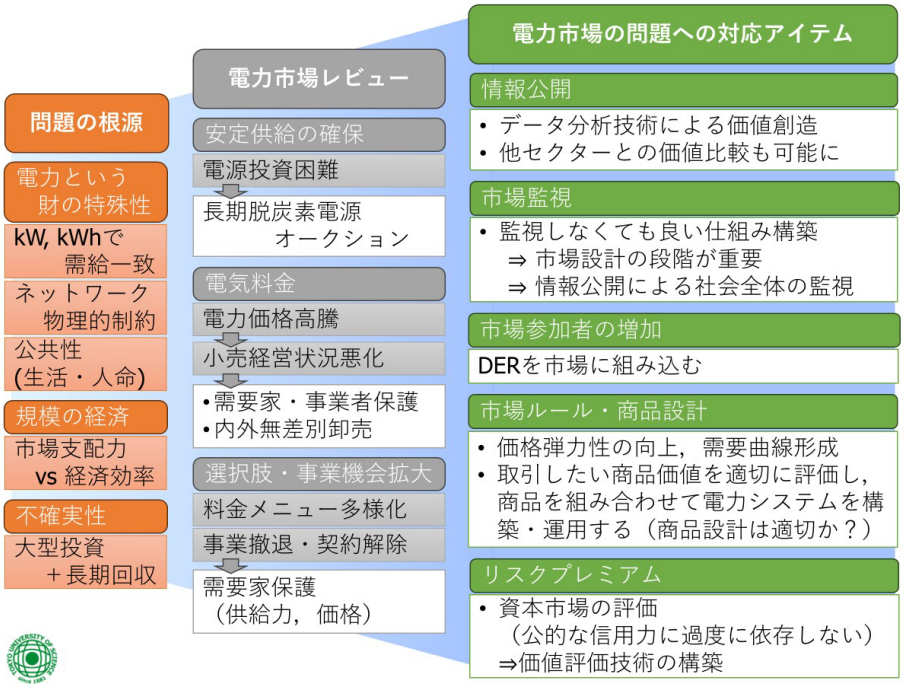
カーボンニュートラル社会になると、限界費用がそもそもゼロになり、経済負荷配分、ネガティブライス、そして運用の短期の市場取引には意味がなくなってくると思っています。これ間違えていたら誰か教えていただきたいのですが、そうすると設備投資に関する市場の取引の活性化が重要になってくると思います。容量市場なのかもしれないし、そうじゃないかもしれないですけども。電力システム改革をしても旧一般電気事業者という大きな事業者が残っていて、そこが市場支配力を行使するかもしれないので、市場監視をしましょう、値段が原価に基づいているかを査定しましょうと言って、収支がギリギリでは新しいことに挑戦できない。そもそも原価計算は難しいのでそういうことをやっても設備投資の取引活性化には至らない。そういう形ではなく、リスクプレミアムっていうのがあることを認識して、無限にリスクプレミアムを乗せるわけではなくて、市場のリスクからそれぞれ計算することができると思いますし、それも市場で評価する仕組みを作っていかないといけない。これは今までいろんなビジネスで銀行や金融により行われている手法なので、彼らに働いてもらうためには情報を公開してリスク計算ができるようにする。もちろん公的な信用力も大事ですが、それに過度に依存せずに、世の中全体としてリスクを取りたい人が取る形ができると思っています。だから公的な新エネについても、「政府も制御ができない不確実性が相当あるが政府だから何でも大丈夫」だということはないので、政府に依存しない仕組みをつくることは重要だと思います。このあたりも、意見の分かれるところだと思いますので、ぜひいろいろご指導いただきたいと思っております。

電気学会調査専門委員会

電力エネルギーシステム確率モデル最適化に関する調査委員会を設置し、今年度、来年度 2 年間で調査をします。3 月の電気学会全国大会ではシンポジウムをやりますのでご興味ある方はご参加ください。

まとめ

時間も押していますので読み上げは省略しますけれども、現在からちょっとジャンプがある、私の思いを込含めた内容でお話しさせて頂きました。私からは以上です。どうもありがとうございました。



（PL）

どうもありがとうございました。

それでは続きまして、政策ということで東京大学の杉山先生にお願いします。

講演 2 政策（東京大学・杉山昌広）

電力システム分野における EIP に向けて

東京大学未来ビジョン研究センターの杉山昌広です。 最近ですね英語で MASA SUGIYAMA なのですが、略すと MASA は正和先生と全く同じになると気がついて、「昌広」とフルネームで言っております。今日はエビデンスを踏まえた政策についてお話しします。

はじめに

冒頭に言い訳めいたことを申し上げますと、本日のお話は相当視点が抽象的でメタなものになっていますことご了承ください。山口先生がご謙遜されて今までを超えたって話ではないですが、私の話は多分超え過ぎているので「こいつ何言っているのだろう」と思われるかもしれませんが、具体的な事例も説明できると思いますので、ご質問いただくようお願いします。閲読委員として、戸田様の名前がありますが、事前に相談はしていませんので、報告書の作成にあたってコメントいただければ大変嬉しく思います。

今日のタイトルは「Evidence-Informed Policy」、日本語では「エビデンスを踏まえた政策」です。政府でも RIETI さんとか総務省では「エビデンスに基づく政策形成」、「エビデンスに基づく政策」が言われていますが、私の方は EIP エビデンスインフォームドポリシーについてお話しします。とりまとめの表というのが、今日大きなエクセルシートの作成が進められますが、その左上の方から取ってきてですね、提言の目的、目標とは何かというと「科学的な根拠に基づき」が最初に入ります。そもそも科学的な根拠とは何か、そして科学的な根拠はどうやったら盛り込めるのかということについてお話をさせていただきます。ですから、抽象的というか上から目線って言えば、そういう形になっています。

本日の主要なメッセージ

本日の主要なメッセージとして、日本は一流国家から 1.5 流になっていて、その理由としては日本人に弱いところが明確にあると思うからです。全ての分野でもそうですが、電力システムにおいても強いところは自信を持ってやり、弱いところは謙虚に認識すべきと思います。先ほどの電力システム改革の検証レポートがありましたが、ヒアリングは日本人だけだったですよね。時々審議会でも最後の方で海外の方を呼んできますが、ほとんど全て箔付けのみになっていて、大事なのは、本当はワーキングレベルで現場の情報を持ってきて、なおかつそれに引きずられないことだと思います。よく「欧米では」と“ではのかみ”みたいなのがありますが、そうではなくて日本の文脈に落とし込む作業が必要で、それは多分明治時代にはできていた

と思いますし、ラグビーなどスポーツではそういうのが広く行われていて、そうことはもっとやる必要があると思います。「弱み」として私が思うのは、EIP や EBPM など、呼び方はいろいろあっていいのですが、それ自体が弱いと思っています。逆に言えばエネルギーシステム分析とかモデリングとか、私がわかる分野では日本は一定の強みを未だに持っていて、国際的にも関心があると思っています。どこが強いか弱いかを明確に認識をする必要がありますし、ない場合はもしかしたら提言で我々が今日、今までずっと議論していたことに、誰も専門家がいないこともあり得ると思います。ちょっと極端なこと言いましたが、「層の厚さ」が問題で、例えば素晴らしい人が日本に 1 人いてもしょうがないという現実があります。大谷翔平さんが 1 人いても野球は 9 人なので、試合が成立しないっていうのがあり、8 人でも駄目で、9 人必要です。「日本が弱い」というのは別に誰もいないということではなくて、厚みとして十分でないことを言っています。別に個人攻撃をするわけではなく、提言にももり込める内容です。

提言の報告書の作成にあたっては、短期的には、科学にはピアレビューが基本ですと思いますので、全部やると時間が間に合わないので、一部でもレビューすることは大いにあると思います。長期的な対応としては、Horizon ヨーロッパへの参加です。知っている方も初耳の方もいると思いますが後で説明します、Horizon ヨーロッパの強みとしては、明確に私の中には理由が一つあります。

エビデンスを踏まえた政策 EIP (evidence-informed policy)の必要性

政策の広さは膨大

EIP の説明の必要性、なぜ本日このトピックを選んだかの説明です。政策の広さは膨大で、既に、山口先生のお話もそうでしたし、いままでの先生方のエクセルとかスライドでも、「政策」のキーワードが散りばめられています。当然だと思いますが、エネルギー白書でも、電力を中心にとらえているわけではないですが、電力に関係するものは膨大にあって、これを 30 分で話すのは無理ですし、私が個々のトピックについて詳しいわけではないため、メタな抽象化した視点でお話をします。

知識が膨大になっている（上：論文全体、下：気候変動）

釈迦に説法ですが、小宮山宏元東大総長も言っていますし、いろんな人がいろんなところと言っていることとして、私たちの知識は膨大になっています。上側が論文全体で、左が論文の数で、右が論文に出てくる独立、ユニークなキーワードの数ですね。論文数は指数関数的に、キーワードは線形に増えている。下の気候変動だけの論文数は指数関数的に増えています。 これは本当に知識なので、多少ゴミが入っているとは思いますが、増えていることは間違いありません。

エビデンスを系統的に扱う制度・仕組みの必要性

ずっと前からわかっていることでありますが、アリストテレスの像の写真を入れましたけども、数世紀前までには当時の全ての知識を大体理解してる天才と言われる人がいました。現代社会ではこれはもう無理でして、冷戦終了後は欧州統合もありますし、それからグローバル化で中国もインドも論文書きまくっていますし、それは先ほどの学術論文だけでなく、特許は見たことないですけどその数とかも多分鰻のぼりですし、あと法令の量も増えてます。山口先生の話では、いわゆる規制の全部、市場っていうのは法令があってガイドラインの分量は半端なく増えてきているという形です。これは個人の理解も超えていて地頭で戦えない状況です。日本は基本的に地頭好きだと思うので、かなりの制度が地頭で戦う制度・仕組みになってると思いますが、それはもう破綻しています。

Evidence-based から evidence-informed へ日本政府も EBPM を推進

ですから、意図的に「科学的なエビデンス」を踏まえて政策に取り組む仕組みの必要性があるのですが、言葉についてですが、私としてはちょっと「エビデンスベースト」より「エビデンスインフォームド」の方がいいと思っています。というのも、エビデンスベースでは使われるエビデンスが結構限られる傾向にあります。元々ですね経済学、薬学、健康の分野から来ていますので、ランダム化対象実験、RCT、もしくはビッグデータを分析して、こういう政策をやったらこれだけ進学率が増える、みんなの所得が増える、成績が上がりますといったことをやってきています。けれども、そこでは「それではない分析」が極めて重要になりますし、N が 1 っていうことだって、例えば日本のあのカーボンニュートラルもそうだすが、それはいっぱいあると思います。それがまず一点目。

二つ目は価値観や政治的な制約の反映が必須になります。原子力や最近のメガソーラー論争は、科学的、経済学的なデータだけでは完全に詰めることはできないと思いますので、エビデンスインフォームドがより中立ではないかと私は思っていて、EIP というのを推したいと思っています。OECD などもそちらに切り替えているようです。元々EIP や EBPM、そして全てのツールとかにはなんらかの限界があり、緊急事態に

は無理です。エビデンスをつくるというのは非常に時間がかかるプロセスで、学術論文とかですね、あと特許、私が関わったことないですけど申請から承認まで長い時間がかかると思いますので、緊急事態などは無理ですし、緊急時でなくても急いで意思決定あるいは政策的に解決しなくてはいけない課題はたくさんありますので、そういうときにはエビデンスに時間をかけて作るのは無理です。そのときはそれで別のやり方が必要だと思います。別に全部論文書いて全部査読付きでということを言うのではないとご理解ください。時間があったら、リソースがあったらこれが望ましいのではないかなと思います。

日本政府も EBPM を推進

エビデンスの強さ(1)

もうちょっとエビデンスベーストポリシーとエビデンスフォームドポリシの違いで、やっぱりメキシコのこのコンディショナルキャッシュトランスファー、子供がちゃんと学校に行ったらお金をもらえる仕組みで、ランダム化実験をしてそのランダム化実験も 1 個だけじゃなくて、それを複数集めてメタ分析して、それで初めて効果がわかるということで、一番我々にとって近しい例は多分コロナのワクチンの治験だと思うんです。かなり込み入ったことやってるんだと思いますけれども、やっぱりワクチンとかですね薬の場合は、プラセボ、偽薬を与えられるグループ、本物の薬が与えられるグループがあってその差で本当に効果あるかを調べて、それでようやく確かめられて日本とか全体でこうやるという形になっています。そういうランダム化実験はゴールドスタンダードですが、エネルギーや電力システムの分野ではとてもそうでないのがいっぱいあります。その中でもエビデンスの強さがいろいろあると思うのですが、なるべく強いエビデンスをなるべく使いましょうということです。　エビデンスの強さは医療とか健康の分野では RCT やメタ分析が一番上で、一番下に権威の意見やがあります。言い換えれば、今日私があだこうだ言ってることは一番レベルが低いということです。それはもちろん学術的な懐疑主義的に皆さん大元のデータに戻っていただいて、杉山が言っていうのが 90%ぐらい正しいのか 10%ぐらいしか正しくないのか皆さんご判断いただくしかありません。基本的にはある人が言ったある一例と扱うのが一番エビデンスとしては弱いということです。ランダム化比較実験は、対象のものをやった場合と、介入やトリートメントと言いますが、そうでないものの比較になります。それを一つではなくて複数に行って分析するのがメタ分析です。エビデンスは分野によって違いますが 1 番大事なのは実験した方がいいということと、もっと大事なのは 1 人の意見ではなくて社会に問うとかデータを集めた方がいいということです。次にもう一つは、複数のデータを見た方がいいという形になると思います。一個のデータだけとかそもそもデータを取ってないとか、あとデータを集めたが分析はしてないということもあると思いますので、エビデンスの強さというのは気をつけないといけない。

エビデンスの強さ(2)

若干敵を作るような発言かと思いますが、まあ当てはまると思いますので申し上げますが、論文でも全然エビデンスの強さは違うと思っています。 それはネイチャーサイエンス PNAS や IEEE、日本の中にもジャーナルがあると思いますが、学部生が思いつきでネイチャーに書くのは無理ですよね。ネイチャーとかでは査読が 5 人ぐらいから外が来る場合もありますし、あとよく理解されてないと思うのは、英文の査読付き学術書って査読があるってことです。

日本の文系と全然違って、私の部屋の隣で向山さんという政治学者がいるのですが、その人は英文で法学術書だして、査読を受けて大変だったというエッセイわざわざ書いているのですが全然違ってですね、やはり英文より日本語の方がレベルは落ちる理由として、研究者の量と層の厚みの違いだと思います。日本人は 1 億人ですので、どんなに研究者多くても限界があって、アメリカとヨーロッパ足してみんな英語できたとしたら 6 億人です。6 億人からの科学者から査読を受けるのと、1 億人からの科学者から査読を受けるのでは、深みが違うと思います。

一般書は結構難しくて、人によっては最先端の科学のことを淡々と説明している場所もあります。各サイエンスコミュニケーターのよくあるパターンですけど、その分野の人でも結構丁寧に説明していてもそれは孫引きです。基本的には科学的内容を日本語にしてわかりやすくすることはエビデンスが高いと思うのですが、ただ本当に参考文献から来てるのかについては確認作業が必要だと思います。学術一般書のレベルが低いとは必ずしも言い切れないので、なかなか難しいです。また、あとあの MDPI の関係者がいたら申し訳ないですけど、査読があればいいわけではなくて、かなり怪しいところもあると思います。

気候変動における EIP

気候変動における EIP に関して、気候変動の政策などやってますので、私が一章書いた IPCC について説明させてください。一言で言うと IPCC はものすごい数の査読と改定を続けているということです。それから複数の異なる証拠を集めます。厳格なレビューなのでもちろん最終的にはですね政府からコメントが

入って、サウジアラビアもアメリカもロシアも納得しないとIPCC の要約としては認められないので、最終的には完全に政治文書なのですが、その手前はかなりネチネチとやり、これぐらいやって初めていいものできると思います。これにはとても長い時間と人がかかるので、全ての報告書、例えば EAJ さんの本プロジェクトの報告書でこれができるかというと、予算や資源とかから逆算しなくちゃいけない。資源を投入してるからこそできるので、全部同様にできるとは言わないのですが、IPCCは一つの例になると思います。僭越ですが、人によっては AI 版あるいはケミカル版 IPCC 報告書が必要だとか、あと生物多様性の IPBES というのができましたが、そういうのが必要で、相当の資源とキャパシティが必要ということです。

EIP には「能力」が必要

私の自身の研究の話にちょっと移っていきたいんですけれども、EIP とかですね EBPM には能力とか資源が必要です。この表は OECD の報告書から、昨日見つけてもってきたものです。キャパシティの話は以前からされていて、OECD でも認識されてるということです。ここでいう「能力」は政策能力っていう概念があって、これ個人の能力ではなく、システムの能力、会社の能力、国家の能力とかになってきます。もちろん個人レベルに落とせば人材になりますし、制度、仕組みそれから財源とかもあり、データとかツールとかもあると思います。あとそれから政策のその当事者、霞が関だけではなくて、シンクタンク、それから科学と政策の結合とかもあります。概念化としても単純ですけれども綺麗になっていて、そのレベルがいくつかあります。個人、組織、これは当然政府もそうですし、政府以外にもそれを取り巻くシンクタンクとかのレベル、それからシステムがあります。 Individual の能力で一つわかりやすいのは、どれだけの人が博士号を取っているかということだと思います。ご存知の通り、博士号取得者は低下傾向にある日本はかなり大変とう思いますが、スキルもいろいろあって、分析、実行能力、それからポリティクスって書いてありますが、これは意思決定のためにステークホルダーとか大事な一と話がついているか、古典的日本語で言うと、根回しということです。日本は実行が結構強いと思っているのですが、分析は弱いんと思ってます。政治・意思決定は他の国とあんまり変わらないのかなというふうに人によっては意見が違うかと思いますけれども、ちょっとここが一番ですね多分価値的にいろんな意思決定の仕方がありますので、民主主義とは何かみたいな形にだんだんなってきますので、なかなか難しいちょっと人によって意見が違うと思うんですけど、これとこれは多分良いとされる方向性があって日本の分析のレベルは先ほど言いましたように例えば霞が関の Ph.D. を持つ人の数とか、霞が関で博士号がどれぐらい尊重されるかを見ると、心許ないと思います。

シナリオ研究と EIP

第 7 次エネルギー基本計画におけるシナリオ

だいぶ時間がなくなってきました。かなり上から目線だったので、私自身もたくさん失敗をした話の一例です。シナリオ研究と EIP ということで、エネルギー基本計画にはシナリオが大事だということは皆さんご存知だと思います。これは一つの結果を持ってきただけですが、RITE さんが中心ですが、複数の研究機関で再エネ、原子力、火力の割合とか幅があることを比較しています。

海外のベスト・プラクティス

海外のベストプラクティスについては私自身書き下したことはなく、査読付きではなくてエネルギー資源学会で書いたことはあります。あまり論文とかでも見たことないですが、実際はこうなっているという私の理解です。間接的な文献は膨大にありチェックはできると思いますが、最終的に政策に接続した分析はこういう形でやってないのが普通で、その理由は時間かかって大変だからです。丁寧な分析には時間かかるので、数ヶ月前ぐらいに分析を依頼されて、計算して、それが正しいかどうかは少し心もとないです。普通はそういうものではないと思うので。これ言うと関係者は不思議だという顔されるんですけど、実際、各国の政策にかかわる最終的な分析は基本的には単一モデルでやるんだと思います。並行して、政策担当者が関与する多数のモデルの相互比較が行われるのだと思います。欧州と米国の例については時間の関係で省きます。

JMIP : Japan Model Intercomparison Project

私自身も日本のモデル比較研究を「JAPAN モデルインターコンパリソンプロジェクト（JMIP）ではエネルギー分野でよく言われるモデルのモデル総合比較を JMIP 日本のここに出ているモデルは、エネルギー基本計画の議論に出てくるモデルとずいぶん違います。環境派と経済派というラベルは良くないかもしれませんが、その両グループから参加している形です。一つ明確なのは、水素系についてはモデルによって結果が大きく違います。場合によっては導入量が 0 のモデルもあるぐらいですので、かなり強烈ではありますがそういう差があり、これを政策にうまく繋げるのは難しいと思います。

数値ではなく洞察のためのモデリング

JMIP 論文として出版してデータを公開していて、第 6 次エネルギー基本計画の議論ときに、電中研の坂本さんが採用してちょっと審議会にインプットしてくださったっていうのはあります。こうした研究と政策との接合はそれぐらいでいいんだと思うんですけど、第 7 次のときには我々のスピードが遅く直接関係はなかったですが、エネ庁の担当課長さんとお話をする機会はあり間接的にはインプットしてると思いますが、欧米は向こうのエネ庁に相当する人がこういう検討して一番大事なところを自分で理解した上で政策作っているようです。それと人や組織が違うので、インプットの量が弱いと感じています。

再エネ関連政策の政策分析能力

日本の政策研究・政策分析・政策評価の一般論

日本の問題には触れましたが、少しだけ定量的に話して終わりにしたいと思います。ちょっとスライドを飛ばします。これ大事な基本ですから、皆さんご存知かと思いますが再度確認をさせてください。日本の政策もしくは政策管理の分析に対する要求度が非常に弱く、実際の供給も弱いと思います。あの費用便益分析は全然義務ではないと思いますし、政策評価は総務省の行政レビューぐらいしかなく、これも弱いと思います。例えば先ほどの電力システムの検証では費用便益分析とかやってないですね。カウンターファクチュアルでどれぐらい効果があったとか、いわゆる経済学的な分析が行われていません。だから経済分析としては失格ぐらいの勢いだと思います。カウンターファクチャルを立てないでは何も分析できないと思います。同様にテクノロジー評価も非常に弱いです。残念なのは、これについて一時期学者が言っても、メディアの人のローテーションが速く皆さんすぐに忘れてしまいます。メディアの報告も能力であり、それは足し算や掛け算ができないのと同じようなもので、やっぱ足し算ができなく人に掛け算の話をしてもできないと思います。人材能力が構造的に低くて、ジョブ型雇用の話がいっぱいあり公務員とメディアこそが最大の問題だと思いますが、ローテーションが 1〜3 年と非常に速く、本当に問題だと思います。いわゆるシンクタンクは少なく力は弱く、政策科学も公共政策大学院ができたのは日本ではかなり遅れてからです。

国会の科学的助言も弱い

学術会議法人化の改革で予算を増やすということですが、グラフは 2013 年ぐらいで、その後 2025 年まで予算は下がっていますから、それから上がっても大勢は変わらないと思います。これは GDP と人口では説明できません。ですから子供と大人みたいな世界で、この状況では勝てないことはわかっています。私自身もそれを体感したことがあり、アメリカの NRC の会議に参加の折そこで働く人と話をすると、全然違う世界だと感じました。

日本は分野横断型研究も少なく国際共同研究も少ない→海外の動向から遅れる

この内容はネイチャーに書いて査読なしですけども、日本はですね、国際協調とこちらの方がわかりやすいですが、国際協調が少ないです。国際的な話題でどこかの方が話していたと思いますが、規格の策定などは最初から一緒にやっていた方がいいに決まっているわけです。それは海外のことを礼賛するのではなくて、日本のことを早めから売り込むようなことが少ないと(これは別に私が作った図ではなくて NISTEP さんが作った図を持ってきただけだと思います)、以前から言われているということですし、海外からの動向からも遅れると思います。

再生可能エネルギー政策関連の論文は少ない

再生可能エネルギー政策関連の論文は少ないです。キーワードを変えるといろんなことが言えるのですが、この図は GDP で規格化しています。GDP 規格化前の実数だとアメリカがすごい量になりますが、ドイツは規格化すればこれぐらいあり、あの GDP で割って日本はアメリカより少ない状況です。ですが、これキーワードを変えると、多分大きく変わってきます。例えばモデリングや太陽ペロブスカイトとかっていうと全くバラバラで、1.5 流と申し上げましたが、日本は強いところは強く、弱いところは弱くて、層が非常に薄いところもあるんだと思うんです。電力システムで再生可能エネルギーの政策関連は少ないと思います。

FIT と RPS のどちらが良かいかという議論はたくさんありました。日本の 2003 年の頃は海外のジャーナルほとんど出されていませんでんした。皆さんいろんな意見を FIT と RPS に対してお持ちだと思いますが、蓋を開けたらカリフォルニアは RPS ずっと続けており、ヨーロッパもオークションに移ってきており、FIT 以外では再エネが入らないと言っていた人はどこに行ったのかと思います。しかし、学術誌に書いておらずそのことも批判されないので、検証されず言いっ放しで終わっているようです。環境派のことを悪者にしましたけど、逆側の方も同じです。論文がなく言いっ放しでは、忘れて学習せず、何も良くならないと思います。

政府、シンクタンクの報告書：日本は分析的な報告書の数が少ない（分析←→ニュース）

学術論文は特別と思われるかもしれませんが、これは政府とシンクタンクの報告書をいっぱいダウンロードして、補助員に分析的か否かを分類してもらった結果です。私の出身である電中研は分析的な報告書が非常に多いのですが、エネ研さんなど他の機関ではニュース的なものが多かったりします。悪いということではないんですけど、実態として海外の短報を沢山出しています。NGO も同様で、ヨーロッパではこうなっている、世界ではこうやっているというのが多く、日本に置き換えたらどうなるかなど少しでも掘り下げたものは結構少ない状況です。

提言へのアイデア

報告書に盛り込めそうな内容

まとめです。この EAJ、日本工学アカデミーの PL のこのプロジェクトでの短期的な対応としては、今までの取り組みを振り返って議論してまとめることは素晴らしいと思います。こういうことを今後も強化しなくてはいけないと思います。長期的にはこういうことを Horizon ヨーロッパとかに取り込んでいく可能性もあるかと思います。長期的な対応としては、ローテーションを長くすることが極めて大事です。この報告書を出しても、多分メディアの人はなんかポカンとして記事として扱ってくれないと思いますが、例えば朝日新聞とか日経さんとかですね、科学部と人とか来て「勉強になったな」ぐらいのことで帰ってもらう。掲載が期待できるのは電気新聞とかエネルギーフォーラムとかだと思います。一般紙でも少しわかってもらう程度はあるとしても、多分彼らも忙しくてローテーションでどんどん変わるため、作っても広がりようがない感じです。そういう状況があるので、ローテーション長くというのは大きいと思います。

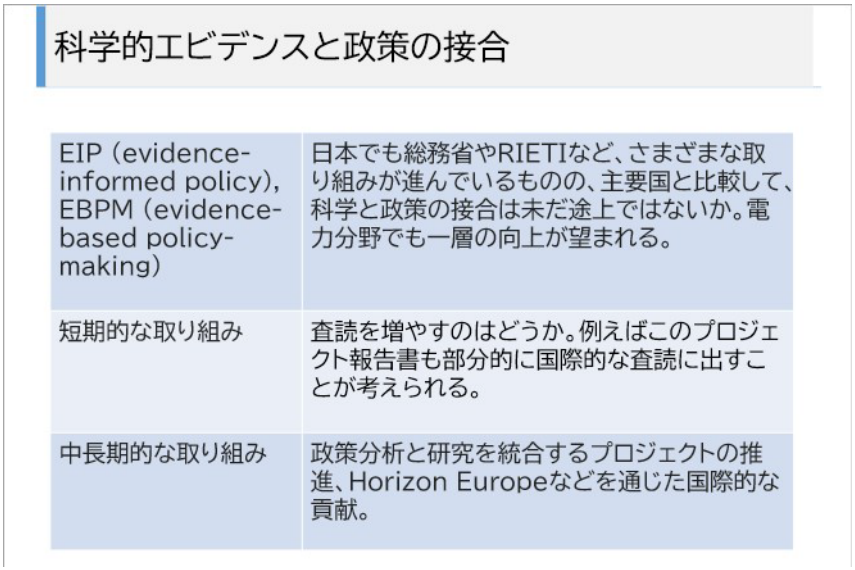
本プロジェクトのエグゼクティブサマリーができたら英語版を海外の方にレビューしてもらうのもあると思います。機械翻訳は大変進んでいるので、細かいとこはわからないと思うけどフィードバックがもらえる機会になると思います。あと、山口先生の市場監視で審査の話が面白くて、審査員というか審判も間違うわけで、審判も複数いて査読では査読者が偉いわけではない。査読者も人間ですから間違うことがあり、しっかりしたジャーナルではエディターが「この査読は間違っている」ということを言うことがあります。そういう仕組みがあることを、何でも海外に出せばいいのではなくて、そこから学ぶことができる。査読者のコメントも 60%ぐらい正しくて 40%ぐらい間違っているかもしれないので、それをエディターに整理してもらう。日本で漏れているところ、弱いところを吸収する枠組みになると思います。

Horizon Europe

最後ちょっと Horizon のことを話して終わりにします。Horizon ヨーロッパは、ご存知の方も多いと思いますが、ヨーロッパの大型の研究戦略的な研究開発プロジェクトを色々な分野で実施しています。バイオロジー、AI とかもそうですし、新たなテーマもいろいろやっています。この話をする理由は、IPCC などに向けたシナリオ研究を Horizon では大量にやっているので、その関係でちょっと知ったといいうことです。非常にいいと思う点は、まず競争が激しくそう簡単には採択されません。綺麗に申請書を書き、国際連携が必須であることは良くて、これは欧州の科学で大きく成功していると思います。ドイツやイギリスが、例えばギリシャとかを大きく底上げしたと思います。それに加えて、政策対応も多数入れる必要性があり、政策との綿密な連携がないとできないところがあります。これ最初ですね。韓国は既に加わっており、日本も入る方向で協議が済んでいると認識しています。カーボンニュートラルの宣言は中国、日本、韓国って順番でしたから、面白いと思います。ちょっと皮肉です。

電力システムと政策の教育

それから電力システムの政策の教育で。時間切れですから、次の話題で最後かもしれませんが、やっぱ教える側もデュアルディグリーや分野転向などをしないと教えられないことは非常に厳しいと思います。



本日の主要なメッセージ

冒頭に申し上げたことなので読み上げはしませんが、私から抽象的なメタな視点でお話しました。ご清聴ありがとうございました。

質疑

（PL）

ありがとうございました。 11 時 14 分で、最後 5 分いただきたいので、40 分というところで皆さんからご議論いただければいいかなと思っています。 市場、それから政策、二つテーマがございますが、二つ通してご議論いただければと思います。 どうぞお願いいたします。

市場価格信号、ネットワーク情報、過去のレビュー、規制機関

（参加者１）

よろしいですか。

（PL）

閲読委員に一言ずつ最初に話していただくということで参加者1、お願いします

（参加者１）

今から移動するので言い放しで申し訳ないのですけど。アドバイザーとして、山口先生のプレゼンに対してコメントします。この EAJ の目的に即して、電力システムのあり方、特に変革のあり方についてとても包括的な視点でプレゼンいただき、提言にもいろいろ盛り込めると思います。

細かい論点として 6 ページの価格は、電力システムのあり方を考えるときに次世代の投資を促し、変革していくためには必要な投資を示す考え方がとても大事です。必要な投資を促す方法として、市場に依存して事業の持続性を確保できる部分、脱炭素オプションのような計画ベース、規制ベースでやるポリシーミックスがあります。ヨーロッパは規制ベースが強く、アメリカは市場ベースが強いエリアもあります。そのポリシーミックスについていろいろと問題を提起していただいた中で、例えば 6 ページの価格変動要因の短期的な分析とか長期的な分析をした上で、今言ったような長期計画へのポジティブな影響とネガティブな影響を深掘りするよいと思ったのが一点です。あと 12 枚目でネットワーク情報の公開について、今ようやく TSO で進めつつあり、ワット・ビットなど、いろいろなロケーションのネットワーク情報を出す方向が進められていますが、TSO が悩んでいるのは現状の設備の情報を出せても、本当に欲しいのは将来です。5 年後とか 10 年後、どれだけ ATC（Available Transfer Capability：追加送電可能容量）があって接続できるかはいろいろな条件に依存しており、それが崩れると不確実性になるので、TSO としては将来の情報の提供についてはとても保守的になっている。ネットワークの情報は「こういう分布の情報だ」ということを理解して使ってもらえるような情報の出し方がとても重要だと思います。 EAJ のテーマ、電力システムのあり方なので、当然この市場での設計の話と、あとやっぱり系統運用との統合ですね。以前そういう会議もあったと思いますが、そこを意識して、例えば私唯一解とは思ってないですけど、今まで日本は 95 年からちょうど 30 年間規制緩和をやってきました。例えば、2030 年頃に同時市場を目指していますので、今までの経験、先ほど杉山先

生が過去のレビューが弱い点について、過去の実績を分析して、市場設計を統合する方向、同時市場に行く方向に役立つ経験の論点をまとめるのはとても大事と思います。今日参加者2からメールがあったように、IEA がちょうど今市場設計のレポートを出したところです。私は市場設計 1.0 の時代の人間なので最先端の状況をよく把握してないかもしれませんが、海外市場制度との比較ですね。残念ながら日本の国内では実験できません。杉山さんの話じゃないけど。アメリカは 50 の州ごとにルールが違えば実験できるのですけど。そういう中で実証、分析すること自体が一つの課題になると思います。山口先生が大きく取り上げなかったところでは、日本の規制機関、広域機関の役割を含めてダイレクトに攻めていくのもこの提言の中で必要だと思ってます。アメリカは今 DOE と FERC の関係が崩れていますけど、日本でもエネ庁と広域の関係だとか、 やっぱり制度設計のケイパビリティ、能力が不足して難しいという印象を持ちました。 まとまりのないコメントですけど、山口先生が挙げた論点で重要なものは深掘りして提言に反映できるといいと思いました。以上です。

（PL）

はい、ありがとうございます。山口先生いかがでしょうか

（山口順之）

ご指摘の通りと思います。ご指摘いただいた次世代投資、ネットワーク情報の将来に向けて、自由化のレビュー、規制機関のあり方について、まとめていきたいと思います。ありがとうございます。

（PL）

参加者2、続けていかがでしょうか？

需要曲線、市場価格のボラティリティ、市場のコスト便益分析

（参加者２）

杉山先生の政策の閲読委員ですが、杉山先生の普段やってらっしゃることを聞いて自分にどのようなにコメントができるのだろうと悩んでいました。そのことは置いておいて、山口先生のプレゼンについて、若干細かいことを含めて個別に思ったことを発言します。参加者1が市場ベース、規制ベースで将来の投資に関して動きがあるというお話をされましたが、私の目からみると自由化という世界的に市場ベース中心で進んだ動きが行き詰まりをみせていて、どこの国も規制ベースを入れてきてるという認識ですという話が一つです。

私から紹介させていただいた IEA のレポートも多分そういった内容で書かれているだろうなというのが一つ。それと、もう一つは「需要曲線を描くことを恐れない」というコメントでしたがこれ多分正しくて、実際それができるためには個々のお客さんが電気を使えなくなったときの機会損失でいくらかを認識しないといけないのですが、そんなことを認識しているお客さんはほとんどいないのが実態としてあるのがハードルになると思っています。これは、本来、市場ベースを強く主張してきた方々が対策を講じるべきことでした。これができているのは世界中で北欧の産業のお客様だけだと個人的には思っています。

もう一点は、市場価格の不安定さ、ボラティリティは、むしろ忠実に反映された方が良いという点は私もまさに同じ感覚です。リスクヘッジは電気事業者でなくても、機関投資家がポートフォリオの中に原油、大豆、トウモロコシと同じ感じで先物を組み込んでリスクヘッジをすればいいという妄想を持っています。市場中心でいくのは、それはそれで大まかには正しくて、ただ電気の場合最終的に行き着くリスクとして、需給がバランスせず全部止まってしまうという災害的な状況に至ります。そういう部分は、例えば地震保険のように最終的に全部国が引き受けてる保険のようなものが必要となる局面があると思いました。市場については以上です。

杉山先生の分野については、質問ですが、コスト便益分析が必要だというのはその通りで、日本の自由化の議論でそれが十分行われていないこともその通りだと思っています。海外で例えば FIT と RPS を比較した論文は私もいくつか見たことありますが、電力市場についてのコストベネフィット分析は見た記憶がありません。杉山先生から後日でも推薦があれば勉強してみたいと思いました。以上です。

（杉山昌広）

個人的にはですね。なんだっけ、MIT の Joskow さんでしたっけ、

そうですね。やっぱりエナジージャーナルとか、非常に短くまとめた論文とかを出してきているような気がするので。しかもそれが査読付きということなので、やっぱりなんか、いわゆる何ですかね、コストベネフィットだけじゃないかもしれませんけれども、評価を書いています。査読がついているので、ポールジァスコーさんも自分で好きなこと書けるわけじゃないとは思います。

（参加者２）

Joskow は私もいくつか読んではいますが、アカデミアの人間ではないので、査読付がどうか定かではありません。査読付きでご推薦のものがあれば教えていただければありがたいです。

（PL）

どうもありがとうございます。 このお話に関わる関係として、市場と EIP(Evidence-Informed Policy)を繋ぐものとして、アメリカの ISO の市場では、新しい制度を入れるときには蓄積したデータでシミュレーションする、市場で変なことが起こったらそれも再解析するとかが行われていると私は思っています。

今閲読の委員の方に発言いただきました。皆様の方からいかがでしょうか？

（杉山昌広）

次回の話題に移ってもいいでしょうか？

（PL）

もう少しお待ち下さい。自然に行っちゃうかもしれないですが。

（杉山昌広）

はい。

データ活用

（PL）

電力市場の今後と杉山先生のお話しを組み合わせると、市場というのを見てどんな政策が必要かという観点では、この一、二年で起こってるのは「エネルギー市場に任せておくのは無理だな」というような話、それから、需給調整市場（アンシラリー市場）もとても複雑になり個別の市場として作りきらないし管理できないと話で、それの延長上で今までの容量市場では、火力を kW 買ってくればすべての調整力が付録でついてきたので別に仕様を指定する必要なかったのが、容量として蓄電池やデマンドレスポンスを対象とすると、提供できる調整力に限りがあり特性が全く異なるので、容量市場で kW だけで買うこと自体が難しくなった。そういう議論が IEA でも行われてきましたし、割と先進的な電力市場の議論の場では出てきていると思います。そこにどうやって政策インプットすればいいのかということについて、各国政府もとても悩んでいるのが今の状態だと思っています。IEA のレポート気がついてなかったですけど、開けてみるようにはします。

そういう状況で、だからそれ何とか変えていかないといけない。限界があることは皆分かっているのだけれども、それに対してどうアクションするかをとても悩んでいると思います。そのときに、先ほど申し上げたデータを使ってシミュレーションできれば実験ができる。ですがデータがなくて複雑なルールで構成されている日本のような場合は毎日の市場運営を実験できずなかなか運営自体も難しいのだと思います。

（PL）

はい、どうぞ。

（杉山昌広）

一般的に皆様の方が詳しいと思うのですが、データについて出せないいろいろな理由があって少なめだというのは分かります。ですが、世の中には NDA とかいろいろ技があって、確かになにかいろいろ出てきちゃうかもしれない政治的な話でも、相当時間かけてデータを見て分析しないと正しい理解は得られないと思います。最終的なデータの使い方の意思決定はもう政治になりますから、少なくとも政府でいいのでデータを分析しないと、実際に何もわからないまま突っ走るような世界になってしまいます。多分データはどこかにたまっているのだと思うのです。一方で知財とかいろいろな条件があるので、別に世の中にさらけ出すことではないわけです。でも、多分分析していないだろうというのが私の仮説です。それはどうにかできないでしょうか。もしかしたら、後ろで分析していてちゃんとわかっているというのがあるのであればいいのですけど。例えば電力システム改革の評価も、裏ではかなりエコノメ（econometrics）などかなり細かな分析もしていて、それを出すといろいろややこしいことになるから出さないというのはわかるのですが、そもそも分析してるということです。

（PL）

今日の話題とは違いますが、第 1 回で需要の領域であったスマートメーターデータは、非常に貴重なデータが全国的にたまりつつあります。ですが、使い方に制約があっていろいろな人が使えないと。匿名化するなどいろいろなアイデアがあるのですが、それをやること自体に運営上の課題もあるようです。結果として、あの貴重なデータが十分使われてる状況にはないようです。

（杉山昌広）

政策や市場の話をたくさんしましたが、データ分析は政策科学的、経済学的には基本です。特に最近の経済学では基本です。必ずしも欧米流にやらなくてもいいと思います。大局的に全部確認して、誰かがちゃんとクオリファイして、ちゃんと経験のある人がちゃんとみる。ただ時間やお金をかければいいということではなく。コンサルに頼んでも何でもいいですが、かなりしっかり分析しないと分からないことがいっぱいあって、メディアにも回っていないことがあって、必ず先ほど言ったケイパビリティの話とかキャパシティの問題で、最後はお金に紐づくのは事実でそれが必要でもあると思います。

（PL）

今日の直接のテーマではありませんが、「データ」もキーワードの一つだと思ってます。この点についていかがでしょうか？ちょっと広げてデータという話にもなりましたけれども、参加者3、いかがでしょうか。

（参加者３）

コメント難しいのですが、例えばスマメのデータですけれど、確かに使おうとするとお金も大量にかかるし、その割にあまり個々のデータが得られない状況で、データを手元に置けないなどの制約があって使いにくくなっています。ですが、私が今関わっているプロジェクトで知ったのは、ある国研では実はものすごいデータを持たれているということです。それは共同研究でハウスメーカーに情報を提供してもらう形なのだそうです。スマメデータについては、一番ネックになっているのは個人情報保護法との関係だと思うのですが、要は需要家の方々が使用を承認すれば使えるわけで、何らかの形で承認してもらった形をとれれば使えるようになります。オール電化住宅のデータというのを相当詳細にとられていて、毎年何万件も増えていく形でデータを蓄積する形で。こういうのがあるとものすごい分析がきると思います。例えば、そういうデータに基づいて、これからその価格シグナルでどれぐらいデマンドレスポンスができるかとか、何かいろいろなことに結びつけていく取り組みがあれば、いろいろとやられてる民間といろいろな協働をすることで打開できるところもあると思います。 もう少し全体の話をすると、先ほど荻本先生が整理し、皆さんが言われた通りで、やはりデータを解析・分析して今までをちゃんと検証して初めて次をどう考えるかができるようになると思います。この点は非常に重要で、それを皆さんがどれだけやれるかという努力をしていく必要があるというのが提言になると思います。

（PL）

ありがとうございました。まさにその通りだと思います。先ほどのデータ出していいよという話についてはカリフォルニア州にはかなり前からですねスマートメーターデータを出していいというのを、確かボタン一つで意思表明して、それで自動的に処理される仕組みがあります。あれを日本も入れられればいいと思っていますが、まだできていないっていう話ですね。はい。

（杉山昌広）

ブレインストーミングを始めてしまったのですが、許諾を得る方法にだんだん RCT してもいいんですよね。ランダマイズ コントロール トライアルっていうのは、PayPay のクーポンを 1000 円くれるのであれば押して許諾してくれるのかどうかわからないですけど、いろいろなやり方があると思いました。Opower の省エネルギーは、情報を流したらそれだけ省エネしてくれるかという話だったと思いますけど、そうではなくて例えば事前に許諾について法律的に必要なことを審査した上でそういう実験をしてもいいと思います。

（PL）

そうですね。だから、そのボタンを押すときに、どういう処理がされてそれがどう問題ないかっていうことを先に表明できると、ワークするようになるような気がいたします。はい。

（参加者４）

山口です。私は Google 使っていて、Google アカウントでたくさんのサイトのパスワードを保存しています。面倒くさいからそうしています。これは承認メカニズムが他社と連携できるようになっていて、一応契約書が小さい字で出てきてスクロールさせて OK としないと先に進まないのでやるのですが、それでいろいろな人が使っているわけです。クレジットカードのデータとかもすべて他社が持っています。しかし，なぜか電力の需要データだけが、データ活用に対して厳重なのでしょうか。マイナンバーカードを持って病院に行けば自分の病歴とか薬の記録が全部繋がっています。需要データだけそんな厳しくて、使用に当たってはものすごくお金払う必要があり、限られた人しか使えないのは、データ活用をさせないための方便のように聞こえます。引っ越しする際の電力契約のときにチェック入れるなど、いくらでもやり方はあると思います。 そういうことをやらないで、個人情報だからとか言って本当にそんな扱いでいいのかとか思います。あと、法人

は個人情報保護法で守られてるのかよくわからないですけれども、法人だってエネルギーたくさん使ってるのだから、法人データの活用も進めていけばよいのでないか。 今日杉山先生から裾野が広い、層の厚みの大切さなど話をしていただき、学術は 1 人の天才が全部やれればいいということではない、査読しなきゃいけないと思いました。たくさんの人が一緒にやることで人には負けたくないと思って下の人も上の人も頑張り、その結果、層が厚くなっていろいろな分析が進んでいくと思います。いつまでも勝者が 1 人勝ち、1 人総取りを許す政策をやっていると、みんないなくなることにもなりかねません。今日ノーベル経済学賞のイノベーションの話もしましたが、追いつかないと感じるとみんな諦めていってしまって、経済の中層、ミドルの人たちがどんどん脱落して上下の差が開く傾向であり、日本は、私は歴史を詳しくないかわからないのですけども、中堅の人たちが人口増加の中で日本を支えていたのであって、1 人の天才が日本を引っ張っていたというストーリーほとんど感じられません。ですから、そういう真ん中の人たちにあまり酷いことはしない方がいいだろうと私は思います。

（PL）

そういう意味では、考える材料がたくさん与えられるその象徴がデータだと思います。 例えば論文書くためにPVや風力の出力変動のデータが欲しいと思うのですが、これは実はほとんどありません。送配電会社さんが出す 8,760 時間の時間別の合計値はありますが、例えば秋田地方の合計値もなければ、一か所の発電所の出力もないと。データがあればいろんな人がいろいろな視点で検討・研究に入ってくることができるはずですが、データがないと、データを作るということ自体が論文になってしまうという、なかなか難しい状態かなと感じます。

次回のテーマ

（PL）

残り 15 分ぐらいになりましたので、次回の横断的議論の方のテーマに関する意見交換に移ります。私からは、資料の 6 の最後に、過去の我々の議論の発言録の中タイトルからのテーマ候補をつけています。これらの候補は中タイトルから選んだもので、次回のテーマはでこれに制約される必要は全然ありません。今日たくさん議論もしてもらいましたし、貴重なお二方からの提言もあったということで、もうちょっと拡大していただいていいですかね。次回、第 10 回での議論のテーマについての意見交換に時間を使いたいと思います。

私の記憶では、去年の後半 1 年ぐらい前から春にかけて一番盛り上がったのが司令塔という話題でした。司令塔というのは、今後、誰が何をどのようにしていくかをのものが司令塔でそれがどうしても必要だという議論でした。逆に、今日の議論は、特定の誰かがではなくて、沢山の関係者がどう合理的に取り組むかであったと思います。

それでは、ここで挙げたテーマも参考にしていただいて、第 10 回でどんな横断的議論をするかについてご意見いただければと思います。

データ活用

（参加者５）

ある計量の必要っていうのはデータも含めた計量でしょうか。

（PL）

計量器そのものです。データを加えます。

司令塔からリーダーシップ

（参加者５）

個人的に私は司令という言葉は好きではないのですが、ただ言いかえれば何らかの形のリーダーシップだと思います。MIT では Distributed Leadership、分散型リーダーシップを提唱していて、私はそちらの方が好きなのですが、リーダーシップにはいろいろな形があると思います。でも誰かがそのリードを取らなくてはならないかもしれないし、それは、アイデア、政策、技術などいろいろな形でやる人もいると思います。でも、それが強く出てこないと物が進まないよっていうことだとも思います。いい言葉が思いついたらまた提案いたします。現在は何らかの形のリーダーシップってちょっとかなり抽象的ですけどそういう言葉が私は好きかなと思います。

（PL）

ありがとうございます。おそらくリーダーシップ、司令塔は、個人あるいは一つの機関に近い場合もあるで

しょうし、私自身はそれを議論する「場」という解釈もあると思います。とりあえず、キーワードとしては司令塔でいかがでしょうか。

（参加者５）

司令塔は、政府の用語になっている気がしします。例えばJSTさんで近いところでCSTIとかが科学技術イノベーション政策の司令塔と決まっていることを想起させてしまうので、司令塔という言葉は避けたいのが私の思いです。ただ機能としての必要性はその通りで、それを場、人、機関が必要というのはおっしゃる通りで、それについては賛同します。

（PL）

ありがとうございます。皆さんの方からいかがですか。司令塔でも結構ですし、他でも結構です。次回は片手ぐらい議論できると思います。複数の五つ以上のキーワードを決めていただければそれ議論したいと思います。当日は議論の流れでそのテーマから脱線するのもありです。次回の横断的議論を経て、後半シンポ開催し、取りまとめの方向に持っていくことを意識していただければと思います。

市場・政策・ポリシーミックス

（参加者４）

政策とか市場の話に引きずられてしまうのですが、私の方からすると、今日の参加者2からあった、「世界の潮流としては市場から規制というのが大きな流れだ」ということで、そうなのかなと思いました。

世界の流れという意味では国が多い欧州で考えると、欧州は元々国営の電力会社を自由化した結果、やっぱり駄目だったという地点にいると思います。国と民間の信任の問題なのかもしんないなと思ったんですけど、日本の場合は成り立ちが違い，自由化といっても民間事業に対する規制を変えていくことしかできないし，国有の電気事業を体験したこともありません。今の状態から規制と度合を強めていくとどうハッピーなのか。規制が規制行政だとすると、行政も失敗するので、それについてどう受け止めていくのかも十分に議論されてないと思います。市場もうまくいってないことも分かったけれど、元に戻していいのかということも考えます。実験や思考実験でもいいのでそれについて議論されてもいいと思いました。市場は 20 年、30年やってうまくいかないから駄目だよねって言う簡単な話ではないと私は思いました。そういう意見も聞き知りたいです。

（PL）

ありがとうございます。はい。

（参加者５）

政策ミックスっていうのは、どの政策にも落ちがあるのでそれをどう適切組み合わせるかっていうことだと思います。その中で配分が変わるというのは、時間によって変わると思うのですが、これはあるものが駄目だから完全に反対側に飛ぶということは、現代社会ではありえないと思えます。

（PL）

はい。ありがとうございます。残り全部で 9 分ですけれども。

（参加者2）

市場から規制という流れをざっくり言い過ぎたと反省したので、もう少し俯瞰的に言います。電力事業における計画とその最適化には、今ある設備を前提とした運用の最適化と、将来に向けた投資の最適化っていうのと二つあって、前者は旧来強い地域独占のときでも電力会社が内部で実施してきたことの外部化で、それは機能すると思っています。一方、設備投資の判断をあの市場だけでやることに関しては、どこの国も無理が出てきたと感じます。要するに、ヨーロッパは典型的と思うのですけど、独占でやってきたときにだぶついた贅肉がいっぱいあってそれを食いつぶしていればよかった。しかし、住んでいる世界が最近変わってきたっていうのが多分大きいと思うのですが、そういう話での切り分けとしては、投資の最適化と運用の最適化が多分あって、投資の差異化は市場一辺倒では難しいというのが今の流れだと思っています。補足までです。

（PL）

そのような感じだと思います。皆さんの方からいかがでしょうか。

次回の進め方：割り振り

（参加者５）

ちょっと次回の進め方について発言させていただいてよろしいですか。時間は 2 時間でテーマも絞られるかなと思いますが、何か割り振ったらどうでしょうか。自分の発表と違うテーマを意図的に割り振って、コメントでもいいですけど質問もウェルカムという形で、ちょっとだけ2、3 分でもいいから発言する形になると議論が盛り上がるではないかと思います。皆さん、最初の問いかけがあると喋り出す方が多いと思いますが、重いテーマもありますので、事前に用意して 3 分ぐらい喋って質問 OK ということがいいのだと思います。これ中の議論ですからその質問したらそれについて調べて報告書に反映すればいいので、そうすることでリッチないい議論になると思った次第です。

（PL）

そこまで議論していただくと嬉しいです。

皆さんの方からいかがでしょうか？・・・・参加者6、いかがでしょうか？

司令塔からリーダーシップ

（参加者６）

司令塔というキーワードについては私の発表のときに出たと思うのですが、先ほどリーダーシップっていう話がありその言葉がしっくりくるなと思っていました。いろいろな立場の方がいろいろな政策について発言しています。政策や制度については、牽引する場所はどこかというと、最後は政策のところ、国の審議会で答えが決まっていくのですが、その手前でアカデミックあるいは技術的な内容がうまく取り込めてないところがあるという気がします。そういう意味でもいろいろな分野の方が、今のこの場もそうですが、このようにいろいろ議論して何か答えを導き出していくリーダーシップのあるしくみがあるといいと思っています。言葉としてはリーダーシップがしっくりくるなと思います。

（PL）

はい。どうもありがとうございます。市場・政策から外れて、参加者7、いかがでしょうか？

研究の領域の電力需給解析っていうのはツールというふうに見ると、データがあればいろいろな解析できる。 それをうまく組み込むというような視点もあるかなとは思っていますが、いかがでしょうか。

共通/独自ツール

（参加者７）

解析ツールに関しては、日本では独自のツール使っているのに対して世界では共通のツールを使っているという状況の違いがあって、そのギャップをどう埋めていくかが課題です。日本の電力系統は島国で非常に脆弱、といったら怒られてしまいますけども脆弱です。そのため、海外ツールを使いつつも、我々日本人が納得できるような自前のツールはやっぱり欲しいので、二刀流じゃないですけど、海外に発信するときは海外のツールということもありますし、あるいはその海外のツールでは日本の実情にあてはめると解析機能が弱いねとか、そんな発信ができればいいとは強く思っています。

（PL）

ありがとうございます。データを使う分析は電力需給解析に限るわけではなく、いろいろなツール群が対象であるところが、とても重要だと思っています。海外では各分野で有力なツールが寡占的にいくつか決まっていてそれに放り込むデータのフォーマットは共通で決まりつつあるという状況です。ですから日本独自のツールもそれに合わせないとですねと、ついて行けないという事情もあります。ツールを開発できる能力自体をより大切にする必要があることは私も感じております。ありがとうございます。

時間ですのでここで終了をさせていただきます。

閉会

今日いただいた議論を含めてですね、第 10 回のテーマを考えまして、おそらく時間ありますので、テーマ自体を皆さんとご相談して、また修正するプロセスで進めたいと思います。 また参加者5からもやり方についてご提案ありましたので、それについても検討して 2 時間という制約の中で可能な進め方も入れ込んでいきたいと思います。

本日もどうもありがとうございました。これで終了します。

第 10 回会合

開会

（荻本 PL（以下 PL））

「資料 3 会合発言録」は、報告書の一部として使うために、累積版を改めて皆さんに改めて確認いただいて、過不足があれば修正いただきたいと思っています。「資料 4 とりまとめ表」と「資料 5 推奨資料リスト」も同様です。資料 2 では主に CIGRE を参照しており私の方で記入し、その後皆さんの方でもしリストに載せ忘れがあれば、後日の展開のときに修正いただくようお願いします。

それから「資料6 後半のシンポの次第案」については、本日の最後に議論をさせていただきます。「資料 7 事務関連情報」は特に変更なしです。

横断的議論の進め方

それでは横断的議論を始めます。まず私の方から資料 2 で説明させて頂きます。まず a. ストラテジーでは、どっちの方向が重要かという議論ということで、ここにございますように、抜本的な変化の可能性と戦略と政策ということについて議論させていただきたい。b.インテグリティでは、電力以外の分野、例えばエネルギーセンター、モビリティなどを扱います。領域が広がっていくと、議論が難しくなります。例えば電力が足りているということは、どういう指標で見るのか、または二つのエネルギーの媒体を比較する時に何で比較するのか、そういうところにも考えて電力を含むエネルギー全体、さらには社会までを議論したいというのが b. です。c の リーダーシップは 1 年前議論に上がりましたが、前半シンポのテーマには早いと思い、今回の議論に挙げました。司令塔ということがリーダーシップであるとか、議論の場であるとか、またはそこでですね、いろんな意思決定をするときに何どういうやり方があるのかということで、エビデンスインフォームドポリシーメイキングなどを含めた議論が c.の項目です。

最後が d.情報活用、情報を活用するということ自体が戦略で、もう a.で議論が出てしまうかもしれませんが、あえて分けてd.を議論の項目としました。 ここでは、どんなデータが重要なのか。 またそのデータを加工するためのツールは何かについて議論したいと思っています。今日はこれらについて 30 分弱ずつ、それぞれ議論をしたいと思っています。

a. Strategy / Driver

ストラテジーを考えるために、どんな状況の変化があるのかということを私の資料では列挙しました。私の思いつく限りということですが、これらがドライバーとなり、我々がどういう状況の変化に我々対応していかないといけないのか、そういう状況があるとすればどういう戦略が重要なのかについて議論をしていきたいと思います。 一応その材料としては、次のページから CIGRE から 2025 年 1 月に出た TB0954 報告書では、分散型の資源がたくさん入ってきてこれを使いこなすのが重要であることを述べています。次のページは CIGRE の 2025 年 11 月に出た PMU いう変電所とか発電所のロードにおける電圧の大きさと位相を計測できれば、人間でいうと血圧を測って体調管理をするようなものだということで、電力システムの様々な部分の情報を収集・分析することが欧とか米では数千ヶ所で行われていて、応用されていることが述べられています。次はですね、インバータの大量導入により、系統慣性が低下し電圧乱れることが述べられています。次のスライド 6 では不確実性の増加、いろんなレベルの不確実性があるわけですがこの CIGRE のレポートでは投資の意思決定がとても難しいと述べています。最近の話題では、データセンターの需要が本当に入ってくるのかどうかもその例です。OCCTO でも 1 月に長期の需要の伸びを少し減らした予測を出たということもあるようです。

この四つのページは例でしかありませんので、戦略というところの議論を皆さんでいただければと思っております。 最初は議論もとっつきにくいと思いますが、我々ですねこの 2 年間の議論の結果として、具体的に何がドライバーで、それらのドライバーがあるとすれば、どういうその戦略を提言の中に盛り込むかについて議論をお願いします。

需要構造、大規模需要、地政学、ガバナンス、社会学

（参加者１）

基本的なことなのですけど、ドライバーの中に今 PL が言われた大規模需要が直接、明示的には見えないのですけど、データセンターなど産業構造の変化が、ドライバーの中に需要構造は入らないでしょうか。

（PL）

書いてあることは多分参考にしていただいて、使えるとこだけ使ってください。

（参加者１）

社会の次ぐらいに需要構造っていうドライバーがあるのかなと思いました。

あと、そもそもこのスモール a，b，c，d の順番はどうでしょうか。例えばインテグリティとそれから情報活用って近い方がいい気がしますが、場所として電力し、エネルギーシステム全体の設計とか指標と、当然データ活用とリンクした話ではないでしょうか。

ドライバーで、エネルギーとか電力を取り巻く環境の中で一番今懸念されているのは、地政学的な変化ですけど。そういう直接エネルギーセキュリティに関するようなドライバーっていうのは、これだとどこに入ってくるのでしょうか。資源に入ってくるでしょうか。

地政学と関係すると、ガバナンスと言うか、いろんな国の政治体制とか社会体制がすごく変化していて、それらとも長期的な変化の中では影響しますよね。最近の米国の動きは問題でコントロールもできず、大きなドライバーだと思います。

その辺、社会科学系の先生に言ってもらった方がいいかもしれませんがここには社会科学の先生はいない。

（PL）

他いかがでしょうか。どなたからでも、参加者1に続きでも。

需要の能動化、経年化リプレースが変革のきっかけに

（参加者２）

ここに入れるのがいいかはあるのですけど、需要参加というか、需要が制御できる技術についても明示してもいいのではと思ったことが一点です。もう一つは設備の高経年化が進んでいて、リプレースが必要であり、このリプレースが何かネットワークを変えていく一つのチャンスやきっかけにできると考えます。ここに入れるのがふさわしいかどうかは、あると思いますけれども。

（PL）

ありがとうございます。 他、どなたからでもお願いします。こんなやり方で議論が行き着くのかというのはありますが、とりあえず少しずつヒートアップしたいと思います。いかがでしょうか。

デュアルユース

（参加者３）

専門的なことはこの分野全くわからないのですが、この最初の技術の原子力核融合について、ドライバーのとしてどう働くかに興味があります。というのはこの報告書を政治家の先生などが読むと目につくと思います。何を書いているか、今までここら辺は議論していただいたでしょうか。原子力は新しい小型原子炉とかの話になるのでしょうか？

（PL）

ドライバーの候補として挙げただけで、あえて言えばちゃんといつ使えるかを考えるべきという意図です。個人的な感覚では、核融合の基礎研究は自由だけど、すぐには使えないとことがわかるのが重要かなと思います。

（参加者３）

そうですよね。国のプロジェクトを作る人たちから見ると、割と作りやすいテーマですよね、こういうのがね。そのような先生方の見識でまとめていただくのがよいと思います。

（PL）

ありがとうございます。どなたからでもけども、何でも大丈夫です。このページは割と電力にフォーカスした内容になっていますけど、次のインテグリティのところは「電力×〇〇」に発展した話をしたいと思います。

農業・上下水道

（参加者４）

説明を聞き漏らしたかもしれないのですが、社会のところ、最後に農業、上下水道とある趣旨をご説明ください

（PL）

今までには取り上げてはいません。上下水道がここにあるのは、スマートメーター的な話です。

（参加者４）

では、農業はどういう趣旨でしょうか。ソーラーシェアリング、農地に太陽光パネル設置するような話ですか。

（PL）

いやごめんなさいだからこれ、あの次のインテグリティのところに入れないといけないのですけど。

自動耕作や野菜工場とか。

（参加者４）

わかりました。そうするとスマートメーターが上下水道とするとガスも入るのでしょうか。唐突に見えたので確認させていただきました。

（PL）

大切なご意見いただきましてありがとうございます。他いかがでしょうか？　あの、何もここを承認していただく必要は全然ないので、こんなドライバーあるだろうとか、そういうドライバーがあるとすると、この電力、エネルギーの設備形成と運用の効率化を目指すためにはどんな戦略があるかということをご意見いただければと思います。 先ほどの分散型の需要の参加というのがあるでしょうというのは、ご指摘いただいた通りです。 はい。 私もこれもとても重要で、火力だけに頼るのは将来限界があり、この頃、たくさん導入されるバッテリーどう考えればいいのかは難しいと思っています。

分散型の需要とそこへの供給、情報技術、センシング、ロボティクス

（参加者１）

農業に限らないと思うのですけど。例えばそのスマート農業とかっていう話になると、IoT センサーとかで、何て言いますかね、分散型の電力需要が増えていく、その電力供給をどうするかっていうようなことだったら、全体のテーマと結びつくと思うのですけど。そういう意図ではないのですか。それって別に農業に限らず建物だってみんなそうそうですよね。IT 化やいろんなセンシングが付けられていく話があります。

だから何かドライバーの中にそういう情報技術とかセンシングとか、そういうそこは技術に入るのか。技術の中に、ここはもっぱら電力エネルギー技術の話をしていますが、外生要因としてはやっぱりスマート化の背景となる技術っていうのはたくさん出てくると思います。 ロボティックスだとかいろいろあります。

そういう理解でよろしいですか。

（PL）

はい。いわれる通りと思います。

指標としてのレジリエンス、サイバーアタック

（参加者５）

レジリエンスンスっていう話も、どこかに入れたらと思いますが、どこかありますかね。これから先ほどの分散とかですね需要家も参加するというような意味合いからも、それとやはり最近災害に伴う影響も激甚化しているので、レジリエンスっていうのが一つキーワードになるのかなと思います。

（参加者１）

ドライバーとしてはそれをだから、気候変動と自然災害の激甚化がドライバーでレジリエンスはむしろここ向上すべき評価指標ですよね。

あとはそ、そういう意味ではサイバーアタックもなんていうか、レジリエンスのあの対象として、今とても大事になっています。

（PL）

ありがとうございます。

AI、フィジカル AI、ロボティクスによる運用の変化

（参加者２）

AI に関する技術、フィジカル AI、ロボティクスに近いかもしれないですが、これらの技術が進んでいるので、それが運用を変えていくという意味で、ドライバーになると思いました。

（PL）

ありがとうございます。 他いかがでしょうか。何かお気づきの点があればご意見お願いします。

人口減・土地利用：再エネ設置、系統規模、需要地近接

（参加者６）

キーワードが幅広く並んでいて、ちょっと消化不良気味なのですが、ランドユース、土地利用についての議論はドライバーだろうと思います。 コンパクトシティみたいな人口が減る中での都市のありかたもあります。最近の例では、太陽光の導入が自然を破壊しているという指摘もあるでしょうし、人口減の中で系統を広く大きくしていけばいいわけではなくて、系統や流通設備にもまとめていかないといけないとかがあります。あとは、需要地近接というか、発電する場所と需要地域の近接化など土地の利用が関心を集めていろいろ議論されることになると思います。

そういった議論に今後慣れていくことで、人口減少に対する効率的な設備形成を考える必要があると思いました。

（PL）

ありがとうございます。そのときに、配電線を廃止して孤立するところには、独立したシステムが入ってくるっていうストラテジーでいいでしょうか。海外ではそのような取り組みがあります。

孤立、都市、農業・漁業

（参加者６）

電気だけで見ればそうかもしれないですが、そもそも孤立した都市ではエネルギーに加え流通、教育、福祉なども孤立してしまい、災害時も対応できなくなってしまいます。ですから、そもそもそういう孤立したものを維持していくのかということも、考える必要があると思います。一方で、1 次産業である農業とか漁業、そういう自然が豊かなところでは生産ができて人は少なく、そういうようなところも世の中には必要なであることも考えられます。

（PL）

ありがとうございます。過疎化では、配電線より早くガソリンスタンドがなくなってしまう話にも関係するということですね。

構造要因、ライフスタイル、ワークスタイル、交通体系

（参加者１）

今の土地利用とかの話で、構造的要因としては社会構造があります。人がどこに住んでどこで働くかという、ライフスタイルとワークスタイルが社会構造を決めて、それが土地利用に影響するという流れですよね。だから土地利用とセットに、社会構造の変化もあるわけですよね。 ライフスタイルやワークスタイルに依存して交通体系も変わるわけですよね。

公共交通への依存度だとか、モビリティで何を使うかという交通選択はライフスタイルそのものだと思います。特にその辺はコロナで大きく変わったので。

インバータ、電圧安定性、配電方式、観測・PMU、短絡容量、解析

（PL）

ありがとうございます。次のテーマである Integrity の話題がどんどん出ています。逆に出てない分野としては、私が心配だなと思っているのはインバータの増加と同期機の減少での電圧の安定性は持つかどうかなどについてはいかがでしょうか。以前ご指摘あったような、新しい GFM インバータの導入に当たっては、今の配電網には保護とか接地方式の制約があって、導入が難しい可能性があるという話題は過去には出ています。どなたからでも。

（参加者２）

ご指摘の電圧の点については、インバータが大量に導入されると、電圧が維持できるのか、系統の中で電圧が弱い場所はどこなのかとか、そこがまだ見えておらずそういう問題が顕在化しにくい状況です。他方、海外ではそういった事例が出始めており、心配は持っています。ただ、定量的なデータが PMU なども不十分なのか、送配電の運用者も十分観測もできていない状況で、証明することはできないのですが、将来の課題であるとは思っています。

（PL）

ありがとうございます。電圧安定性の指標として使われる短絡容量であれば、各時間断面の起動停止計画（Unit Commitment）の結果から、DCOPF、より正確には ACOPF で送配電網の潮流を解くことで、電圧

不安定性を直接は予測にはならなくても、一定の指標にはなるとは思っています。

どなたからでもお願いします。 すいません。あとはこの後半 1 年では、システム運用・解析・市場・制度などを議論してきましたが、その辺はいかがでしょうか？世界の市場と比べて日本はユニークな市場構造になってきて、1 週間以内の短期の運用も、長期の設備投資も改善していかないといけないなと思いますが、何か意見があればお願いします。

政策、海外からの学び、市場化の是非、政策と規制

（参加者１）

それはドライバーとしては政策変更ですよね。市場運営は技術に入っていますが、技術と並ぶのはポリシーです。ポリシーを制御変数にしたいのでしょうか。ドライバーは外生変数で、市場設計を変えることを内生化することになってしまい、外から与えられるものであればポリシーと書くべきと思いますが、どちらでしょうか。政策変更も考えるわけですよね。

（PL）

市場制度は政策というほど高邁な話ではなくて、海外が成功しているものをどうやったら導入できるかというくらいでいいと思います。

（参加者１）

制度設計のチューニングまで含めて政策変更だと思います。それは今後の分散型の資源の活用にも必須です。ただ、そんなこと言ったら価値の中に CO2 価格が入っていますがそれも政策次第です。

（参加者６）

参加者1の言い換えですが、市場に何を任せて、市場には何が任せられないのかが、電気事業の人と電気技術の専門家の外で決まるようなところがあると思っています。海外の市場化された先行事例が輝かしく見えると日本でもやろうとか言うし、海外でおかしくなると海外ではそういうことできないのですと、都合のいいように海外事例を持ってきているのか、海外事例に振り回されているように見えます。何を市場に任せるのかは政策というドライバーで、外で決まるものだと思いました。何でも市場ができるわけでもないのですが、市場化しなければ不公平になったり非効率になったりすることもあると思います。会社の経営でも、大きい会社だと、大きすぎて潰せない会社っていうのもあってし、そういったものはもう市場の外で扱うことになると思います。逆に、分散型資源みたいなものは、中央計画的に扱うには数が多すぎるので、市場メカニズムを使って資源をうまく活用することがあり、何でも市場だからいいというのではなくて、市場に何を任せるかの議論が深まるといいと思いました。

（PL）

ありがとうございます。

（参加者１）

そういう意味では、ポリシーを政策と規制に置き換えた方がいいかも知れない。

（PL）

だからもう少し規制がしっかりしないといけないと思うのですけど。擾乱の一つではなく。

（参加者１）

私は完全に外生変数じゃないと思いますけど。ドライバーの一つではあるけど、擾乱にならないように本来はコントロールすべき点ですよね。はい。

b. Integrity(電力を超えて、指標)

（PL）

うん。だからもっと規制は周到に考えるべきというのが一つですね。みんな市場に持っていくから複雑になるというのが私の意見です。はい。他はいかがでしょうか？

30 分経ちましたので、土俵を変えたいと思います。ただ、1 番目の話題は電力中心に議論していただきたかった感じだったのですが議論は2番目の話題に入っていいます。2 番目の話題である Integrity では、電力を超えて枠を広げまること、枠を広げた以上どんな指標で見ないといけないのかという点です。一つは、参加者7からの価格情報、または費用の情報を大切にして、電力と他の分野をいわゆる総合的に考えることが重要というご指摘に関するものです。参加者7、いらっしゃれば、どういうことを指標にすればいいかということについて、いくつか例を挙げていただけませんか。

指標、価格、ノード価格と託送料金制度

（参加者７）

指標としては価格だと思います。価格は供給者と消費者で折り合いをつけて決まるもので、そうかそういう意味では、現状の電気料金は総括原価という供給費用から決まることが今まで常識だした。ですが世の中のほとんどのものは消費者がそれを使うためにいくら払いたいかで決まると思います。そうすると、電気の価値っていうのも、もうちょっと消費者側からの価値づけができると普通の商品に近づき、そうすると値段は上がっていく方向になると思います。電気料金を上げることに政治家は乗り気ではないのは当然ですが、市場価格になれば電力会社が上げるとか一部の人の意思で値段を上げるというのではなくて需給で決まります。これは社会で決まったものだということで、ある意味上げやすいのかなというふうに。

もう少し適正な価格には上げることで、省エネや、末端での分散電源の普及も進むということがあると思います。価格というのは安ければ安いほどいいのではなくて適正な水準があるはずです。一般均衡の理論で見ると、価格は連立方程式の解として決まるべきもので、何か値が小さければいいというものではありません。そういう適正な電力の価格水準を探らなければいけない、そうするには市場原理で全部をやると大変でしょうが、もう少し需給均衡で電気の価値づける仕組みにする方がいいと思っています。

（PL）

はい。そういう意味ではノーダルプライス（送電網上の地点ごとに算出される電力の卸売価格）は必然でしょうか。

（参加者７）

ノーダルプライスもそうだと思います。ただ今の電気事業の制度では託送料金をとってそれで送配電網を整備するという枠組みであり、地点ごとに価格が変わるのはある意味あっってはけない、地点ごとに値段が変わらないように、送配電網を整備するのが多分建前になっていると思うので、かなり抜本的なあの制度の変更がいるのかなとちょっと思います。

ただどこかで移らなければいけないのかもしれない。非常に大きな問題なのでノーダルプライスと託送料金とをミックスするっていうのはできないのかなと。例えば東京電力と東北電力の間では価格が変わってもいいという意味で、東京電力のエリアプライス、東北電力のエリアプライスっていうのはあってもいいと思いますが、それぞれのエリアの中の系統は託送料金で整備するのであれば、同じエリア内であれば価格差が出てはいけないと考えられ、託送料金で送配電網を整備している限りノーダルプライスはあり得ないことにもなると思います。

（PL）

ありがとうございます。そういうことを考える必要があると思います。あと、ここに書きましたように、どれだけ設備必要かかという点もあります。昔の感覚では、出力が保障できる発電所が需要よりたくさんないといけないという考え方だったのですが、この頃になってですね、充電電力量が変動する蓄電池やまたは何時間継続できるかわからないデマンドレスポンス、そういう分散型の資源を活用して安定供給、アデカシー（電力の安定供給能力）を確保する時代になり、それはなかなか難しいという話が一つ。そして必要だとして誰も投資してくれないという話があるということ。私自身はやっぱり足りるのか足りないのかをより正確に世の中に示す事でなくては、それに必要なお金取れないという意味でここに書かせていただきました。設備が足りるかどうかがアデカシーなのですが、実際には効率的に使うためにその次の運用・市場の制度も整備されていかないといけないという意味で。これは電力の中で、それが足りるか足りないかということに過ぎませんけれども、これを広く考えると、燃料が足りるのか足りないのかも入ります。 そうなってくると、ガスとか石油とかとどういう関係にあるのかっていうことにもなってきます。より広い範囲で考えるためには、指標がないとなかなか難しい状態というところを書かせていただいております。

次のページからの例としては、CIGRE の昨年 11 月の Energy Sectors Integration and Impact on Power Grids というレポートを挙げさせていただきました。図にあるように、ディストリクトレベルでも多様なネットワークが必要になることが書いてあります。それから次の CIGRE のレポートは大きな大都市に関してはですね、いろんなエネルギー供給の手段がインテグレートされた将来があるだろうと考えて書かれています。電力を含むエネルギー全体のシステムについてご意見をお願いしたいと思います。

構造変化、エネルギー全体、電力×〇〇、IT との連携

（参加者８）

すいません。電力の専門家ではありませんが、前の電力の需要がどう変わるのかという議論では、一番

大きいのが、AI の活用と、データセンター等の導入が進んでいるということ、もう一つがフィジカル AI っていうのがありました。ロボットやドローンがこれから増えてくのですが、動作時間は全然足らず、30 分ぐらいしか動かない状況です。人口減少などを考えると、ロボットも含めていろんなスマート化が進むと、それに伴って電力がより必要になる構造になってきていると思います。需要が大きく変わるときに、エネルギーシステムって言ったときに同じ議論をずっとしていて大丈夫なのかという点は重要なポイントだろうと思っています。日本で起きるかどうかはわからないですけど、海外ではデータセンターを動かすビッグテックが自分で発電所を作るという構造にもう変わってきています。そうすると、自分の発電所を作り、再生可能エネルギーなどローカルにいろんなエネルギーソースを使う、そういったトレンドを考えたときに、従来と同じ議論していて大丈夫なのかということを、私は問いかけたくなりました。それは先ほどのエネルギーシステム全体で他のエネルギーを含めてどう議論するのか、それから前回のシンポジウムで議論された「電力×〇〇」の中で、IT 系と電力がもっと連携する必要があるという指摘があったと思います。その辺の議論がちょっと足りなくないかという問題提起です。

（PL）

ありがとうございます。 前半のご指摘については、そこまで最新の話ではないのですが、電源＋蓄電池、PV＋蓄電池で、僻地電化だから配電線やめてローカルにはそれで供給しますというようなものがあって、ネットワークと自立型がそれぞれどこまでカバーするのかという視点はあるかなと思います。ただ、電気は足りなくなると、他から欲しくなるものなので、社会全体としてネットワークを維持していくのが必要なのかなと。そこはとても大きな分かれ目だと思います。お金持ちのデータセンターは地点で自立して原子力を持つこともあると思います。けれども、やっぱり面的なネットワークの役割もあると思います。そのときには、農業の耕作機械は、どこで充電するのかという話が出てくると思います。

デュアルユース、輸出規制、情報管理

（参加者９）

インテグリティでは安定性、効率性、環境性というキーワードが挙げられていますが、ふと思ったのはデュアルユースですね。電力システムやそれを構成するいろいろな技術がこれからデュアルユース性を持つと思うのですが、そういうものの今時点の状況や、今後どこに気をつける必要があるのではないでしょうか。

例えば、ウラン濃縮では遠心分離機の技術がありました。例えばドローンは完全にデュアルユース性があり、ロボットはむしろ軍事の方が先行しています。先ほどの「a.ストラテジー」の場でもいろんな技術が出てきましたが、それらのデュアルユース性、輸出規制、情報管理などが深刻になると思います。このプロジェクトは関係ないでしょうか。

（PL）

産業側ではありそうな気はしますが、どうでしょうね。 うん。 今の話聞いて日本の海軍は、日露戦争の艦隊決戦での成功体験を第二次世界大戦まで引きずった結果、戦略を間違ったというのを思い出しました。電力だけで考えるのでは足らないというのはご指摘の通りと思います。それの切り口がドローンやロボットであるかもしれません。

他いかがでしょうか？

供給責任、スマートメーターによる品質別契約

（参加者 10）

視点がずれるかもしれませんが、皆さんの話をお聞きしていると、供給責任を誰が持つのかという本質的な課題が浮き彫りになりました。そこが明確にならないと事業者は将来の投資判断が難しくなります。総括原価主義の時代であれば明確でしたが、大きく変わってきていると思います。

（PL）

火力発電の競争で電力が安くなる時代はありましたが、今は変わりました。エネルギー市場の競争の意義は低下します。私もうそういう時代が来つつあると思います。可変費ゼロの電源の割合が増加し、調整力を火力が供給する世界になると、電気料金をどう設定するかという話にも関係します。参加者7のご指摘にも関係すると思います。

（参加者６）

全然違う視点でというと、供給責任が「サービスレベルアグリーメント」である程度までの水準を維持するというような契約に変わるというふうに意識が変わっていくと、誰が責任を持つかについて違う視点で議論

できると思います。電池も増え、今はスマートメーターがあるので、いざとなれば必要な量を、対象を選んで遮断できるので、そうすると品質別の電力供給ができるようになります。 そんなことはそもそも駄目だって言われたらもうおしまいですが、この場が将来どういうことが起こりうるのかとか、それに対して技術がどう貢献するのかを考えるのであれば、こういうことも議論のテーマの一つになると思いました。

（PL）

それを聞いていて思ったのは、電気ではなくサービス自体を供給するビジネスもあると。 だから熱を供給するとか、需要家が電気自体を買う時代も、これだけ制御性が上がってくると、もう変わる可能性はあると思います。ガス会社さんがやられている熱や電力などの供給もその例です。

ラストリゾート、目標としての経済安全保障

（参加者１）

今回の提言とは違うレベルかもしれませんが、供給責任に関して言うと、今一般送配電会社がラストリゾートを提供することになっています。しかし、これをいつまで継続すべきかが、私は課題だと思っています。さっきの規制とデュアルユースに関しては、本当はさっきのドライバーのところで言及すべきだったのですが、今は経済安全保障が重視されていて、いろんなシステムとか機器の外国依存度を下げることを目指しています。電力ではパワー半導体とか通信制御は、まさにデュアルユースの対象で、避けて通れない話題だと思います。 デュアルユースっていうよりは、経済安全保障の強化が課題だと思います。

だから今も既に影響あると思うのだけど、調達の問題です。いろんな電力システムを構成する機器とかシステムがセキュリティにも結びつきます。通信制御系では日本は海外依存度が高いのが問題です

でもそれがないと経済性を保てないとか、安定性を保てないのであればそれは大問題です。

（PL）

経済安全保障がドライバーといより、そもそも目指すべき目標ということでしょうか。

（参加者１）

そうです。ドライバーっていうよりは、本当はナショナルセキュリティのために必要なことです。

（PL）

電圧問題と経済安全保障が挙っています。技術的な問題と両方重要とうことですね。

電力×〇〇、総合的エネルギーマネジメント

（参加者 11）

このインテグリティ、統合化、電力を含むエネルギー全体システムについて、指標のところでデータセンターとかフィジカルエリアの話も入ました。電力×〇〇では、電力×モビリティ×農業、水素社会とか、いろいろ対象があると思いますがそういうものを含めて何か最適化をしていくという、「統合的エネルギーマネジメントシステム」が、指標ではなく目的として入るような気がします。いかがでしょうか？

（PL）

はい。 既にそうなっているような気がします。安定性とか言っていたはずが、原子力発電所を使おうとしているのは最たるものだと思います。だから最適化ではないだけれども、「総合的エネルギーマネジメント」を世の中が求めていることは、もう進行中だと思います。これは提言で何かこうあって欲しい、こうすべきだっていうことに繋げられるでしょうか。シミュレーションによる検討はありそうな気がします。

（参加者１）

目的の前に今のシステムのバウンダリを定義する必要があります。電力システムの範囲を拡張することはその通りだと思います。参考のスライドにある「セクターカップリング」ですよね。 セクターカップリングを阻んでいる障害があればそれを減らして電力システムが水素システムの柔軟性を使いやすい環境を整備するとか、いろいろ提言する方向性はあると思います。

（PL）

ありがとうございます。水素の柔軟性を活用するっていうのは審議会の資料に昔から出てくるのですけど、より早く解決すべき課題も多くあります。

いつ、どのくらい、いくらで、データの利用可能性

（参加者１）

研究者は、いつ頃、どのぐらいのボリュームで、いくらぐらいのコストで使えるかまで言う必要があると思います。その技術の CO2 削減費用が 2030 年とか 40 年には何ドル/CO2 になることと、排出量を減らせることと、ミックスで提言する必要があると思う。もちろん分析できるわけではないので、事務局の最後の提言にあるように、そのためのデータの利用可能性があって初めて定量分析ができるようになります。今はその途上なので、提言では、いつどれだけというのを含める必要があります。

（PL）

ありがとうございます。今の文脈では、より多くの方からご発言いただきたいと思います。参加者 11、いかがでしょうか？

同時市場、燃料確保

（参加者 11）

ありがとうございます。概ね今までの議論で、また既にある資料で全てもう網羅はされていると思います。先ほどの、市場の運営や制度では、今の市場の制度の方向性が今の電気の本質的な運用から見てどう見えるかについてです。今 kW と kWh を分割してそれぞれの市場で取引する制度を海外から日本に持ってきました。しかし、本当にそれが日本に適しているのかについてもう少し深い議論が必要という気がしています。例えば、パイプラインでいつでも燃料を調達できる国・地域の制度を日本に適用するのが適切なのかとか、より本質的な点があると思います。

（PL）

ありがとうございます。今のご発言は、アメリカは掘れば何でも出てくる、というような国の制度があって、掘っても何も出てこない日本やヨーロッパは似ているのかという話もあると思います。そういう話でしょうか。問題提起ありがとうございます。

大規模需要の自家発、系統・電源の整備

（参加者４）

まだ定見を持つまで至っていない話ですが、データセンターなど大規模需要への対応について。データセンターが発電所を併設する動きがアメリカで顕著にみられます。 これは、自分には、これまでも産業需要家が自家発を作ってきていまして、これとあまり違わないように思われます。すなわち、時間やコストの問題で、自家発設置の方がネットワークからの供給を受けるよりも早く電力が手に入るのであれば、それを選ぶことがこれまでも行われてきた普通の経営判断と思われまして、今後もその議論でよろしいのではないかと。対して、ネットワークは今までの電力システムでは、コモンキャリアであってみんなで使うみんなで支える設備、例えれば道路みたいな位置づけでした。それが、特定の事業家のために太い道路を作るような話が起きており、それは今までのようにみんなで支える公道の位置づけでよいかと問われていて、それもまた不公平だから、その特定のお客さんに負担させたいというのが最近の動きであって、そのような意見が出るのもわかります。つまり、今までと前提が違う需要が出てきたと考えられます。あるいは、高度経済成長時代に旺盛な需要の伸びに追いつくために一生懸命電力に投資していた時代と実はそんなに変わらないのかもしれないという考えも頭の片隅にはあって、ここは今のところ定見を持つまでに至っていません。

c. リーダーシップ、司令塔、議論の場、意思決定方法

（PL）

次のデータの話は私もデータをちゃんと使わないといけないという議論をしようと思ったのですが、消化する時間があれば最後にやります。先に「リーダーシップ、議論の場、意思決定の方法」について、3 番目に皆さんにご議論いただきたいと思います。私なんかなぜ世の中はうまく進まないのだろうかと勝手に残念に思っている意識がここに出ています。どのように大きな取り組み方針を合意していくのか、研究や技術開発や社会のインフラの形成の方向性について、いろんな意思決定をどういう場で進められるのかということについて、皆さんのご意見をいただければと思いますし、その方法としてはですね、ここにございますように、前回ですか発表でも、杉山先生から、こういうやり方もあるよということは、プレゼンをいただいたというところがございます。はい。 それではどなたからでもお願いしたいと思いますが、いかがでしょうか？

トップダウンの議論・意思決定、データ活用

（参加者 11）

私二つ目のポチですね。 今、電気事業を発電部門と小売部門と送配電部門に分離して、その意思決定が分散化、バラバラになり、二つ目のポチのような将来のビジョンを考えるときでも、送配電はそんなことしませんが、発電と小売がそれぞれの利益最大化を目指すことから、最適なイメージ・ビジョンを作るのが非常に難しい状況になっていると理解をしています。 データについては後で議論するといわれましたが、いろいろなデータ、経済的、系統のデータなどのデータを使って将来の電気事業システムについて制度まで含めたシミュレーションして、将来のビジョンをみんなで議論する、そういう場が将来のため必要と思っています。そのようなシミュレーションができる場があれば、研究者はいろんな研究テーマが見つけられると思いました。

（PL）

ありがとうございます。まさに議論の場、意思決定の方向に繋がる話だと思います。 はい。 エネルギー基本計画に至る道のりも何となく議論が不足で 2040 年を定量的により考える余地はあったと思います。そもそもで、このような検討は 3 年に一回の半年や 1 年でできるものではないと思います。皆さんの方からいかがでしょうか？

（）参加者 12

司令塔をどうするかについて、私の資料が資料の最後についています。これは今回の議論と関係なく、私が去年の末にマイクログリッドの研究会で、将来の配電系統のあるべき姿の検討の一部として話したときの資料です。内容は配電の話に限っていますが、一枚目の図では配電・送電について国が考えていることが示されています。2 枚目では、電気学会で出版された「いでよ、電力イノベーター」という本を参考にしています。この本の最後には次のことが書いてありヒントになりました。

夢を提案できるのは、政治家、科学者、研究者である。 それを実現するのは、行政官、技術者であって、そのための資金は経営者、金融が提供する。これを次世代の配電系にあてはめると、まず基本的な方針を政治・行政と電力経営者・技術者・研究者がトップダウンで決める必要があり、トップダウンで意思決定ができれば、ボトムアップでいろんなことが進んでいきます。 今ないのがこのトップダウンの部分で議論する場がありません。トップダウンで意思決定するのは今の話で政治、行政がすることになっていますが、政治、行政だけでは技術的な話できません。それで電力関係の経営者ですとか技術者、研究者が入っている形で、お互いに意見交換して将来の枠組み、すなわち、国の基本方針、法的な枠組み、それにかかる資金の裏付けを考えなきゃいけない。ということで、この辺をやはりトップダウンで議論する場が必要であろうと書いています。これができれば、2枚目の図の下の段の具体的な検討は全部でき、話が進む。今、送電の方は OCCTO があり、そこからのトップダウンの方針が来る形なのかもしれませんが、配電の方はこういう場が全くない状態です。 こういう議論をする場が必要だろうと考えています。

（PL）

ありがとうございました。皆さんの方からいかがでしょうか？今までご発言いただいてない方、原先生いかがでしょうか？

分野を超えた議論の場

（参加者 13）

はい。議論する場は非常に重要だと思っていて、それがなかなか実現しないだろうと考えていました。私も含め今日のこの場も割と平場で意見を言いやすい場ですが、アイデアや発言がなかなか出てこない原因について頭の中で考えていますが、まだ整理できていない状況です。専門的なところに知識と議論、ターゲットが集まり過ぎていて、俯瞰して議論できる場が必要だろうと思って聞いていました。そういう意味では今回電力エネルギー関係の専門家が集まっていますが、それ以外の方も含めた平場で話し合うような場、そういうコミュニケーションする場があると、いろんな幅が広がっていいのではないか。今日もいろいろな方がいろいろな立場から意見を出されていて、考え方として参考になりましたし、こういったことがもうより広い範囲でできれば、電力・エネルギー側が他の分野の考え方を吸収するのと同時に、この分野の専門家の考え方を社会に発信する場にもなると思います。

（PL）

ありがとうございます。他はいかがでしょうか？参加者 14、いかがでしょうか？

継続的なあるべき姿の検討

（参加者 14）

はい。エネルギー基本計画みたいなのはエネ庁が主導でやっていて、議論してないかっていうと、例えば審議会があって、分科会があって、それ以外にも各分野に分科会があって、多くの先生方も参加していて、いろんなステークホルダーの中で議論はしていると思っています。どういう議論が足りてないかっていうところで、専門的なところ、みんなが統一か、それともマジョリティーじゃないのを拾うことか、足りてない点によって違い、どこで議論するかも変わると思っています、例えば専門性を高めるのであれば学会の役割は強く、学会とかで議論する場を作っていくのだと思っています。分野を広げ学会をまたぐ議論が難しくのであれば、そういう場を用意していくのだろうと思います。より広い範囲でいうと、かなり広い分野の人たちになってしまい、そういう意味では審議会のようなステークホルダーが入ってくることになるのですが、その人たちが団体を代表した議論を拾ってきて、代表して発言することに必ずしもなってないとうのが確かにありました。 ただそれは階層をかなり深くしていくことなので技術的にできるのかという疑問はありますが、そのあたりをどう考えるかは悩みです。一方でいろんなところで材料があってそれをエネ庁や政治家が拾うのはあるので、そういう材料を常に用意しておくことが各専門分野であるべきと思う。例えば電気学会でもいいし、電力に関わるあるべき姿で少なくとも専門家同士で合意とれたものがあるといい。各分野で議論できる場は、継続的に必要だと思いました。

（PL）

ありがとうございます。継続的というのがポイントだと思います。日本は必要になったときだけ考えることが多く、ローリングが少ない。海外は継続するのが多いような気がします。どなたからでも、この辺りは「言ったもん勝ち」ではなく、多くの方の意見があるのがいいのですが。参加者4、いかがですか。

統合的な計画、Integrated Resource Planning、アデカシー

（参加者４）

私自身司令塔っていう言葉を話した記憶はありますが、あまり複雑なことは考えていません。供給力がどれだけ必要かを市場原理の中で決めるということが、もはや成り立たなくなってきています。先日 OCCTO が将来の電力需給シナリオを公表しました。アメリカでは Integrated resource planning というものが昔からあって、州の公益事業委員会が設備計画の方針を決めています。すなわち、それを称して司令塔と申し上げ、そういうところに戻っていかざるをえない、市場原理の中で投資判断することがアカデミックに理想的ということはわかっているつもりだが、それだと現実がついていかないっていう認識から申し上げました。

（PL）

はい。ありがとうございます。私それ聞かせていただいて、いいかえると、理屈ではわかることは、理屈でやってやればよくて、その斬新なアイデアとかは関係者が議論する形を設けると聞こえましたが、そういうことでしょうか。

（参加者４）

斬新なアイデアかどうかはよくわかりませんが、ベースとする十分な供給（アデカシー）が確保されないと、災害級の事態に陥るのが電気の特徴です。少なくともそうならないような担保はする必要があると。その上で競争はすればいいと思いました。

（PL）

ありがとうございます。そうですよね。 ローリングがちゃんとできて、実は理屈で基本を押さえること。これができれば新しいところに集中した議論するチャンスがあると思います。「ある制度の一部分が問題だからどう対応するか」というのに 2 時間の審議会の時間で 1 時間半かかるのでは、将来の姿を考えるのは難しい。他、いかがでしょうか？日立パワーソリューションズの紺谷さんいかがでしょうか。

（参加者 15）

はい。そうですね。今いただいたキーワードで言うと、（論点cの）リーダーシップは、責任との表裏一体という側面もあるのかなと思っています。議論を蒸し返すようですが、短期的な取引は市場に任せてもいいけれども、長期的な取引は責任を取れる人がいないという事情が考えられます。例えば発電所は PPA（電力購入契約）を結びます。（電力を購入する側からすると）短期的な契約であれば割と結びやすいと思われますが、10～20 年のような契約になると、想定が難しいので、契約しづらいと思われます。一方で発電所を計画する側からすると、20 年程度の期間で契約してもらわないと計画しづらいです。 そこで話がこじれてい

る（Tenor gap がある）と伺います。そのような、誰も取れないようなタイプの責任をどのように扱うのか、という時間軸を含めた議論がされるとよいと思っています。

（PL）

ありがとうございます。でもきっとそういうことですよね。他はいかがでしょうか？参加者 16、いかがですか。

（参加者 16）

はい。 いろんな意見聞かせてもらって、どれもその通りだと思っていますが、あえて火力の立場で私の感じるところをお話しします。この手の議論では、どうしてもカーボンニュートラルの話もあるためか、既存の火力についてあまり議論をしていないというか、当事者もしたがらないという傾向が強いと感じます。一方、現状の電力供給の 7 割が火力ですから、そういう意味ではその部分の議論は必須です。でも、国も事業者もその話に触れられたくないところがあって、この点に目を向けていかなければならないことを促していくことが必要だと考えました。感想を述べさせていただきました。

（PL）

促していくというのはどういう意味でしょうか？

（参加者 16）

既存の火力をどうするのか、仮にフェードアウトでもいいのですが、ではその分を何で代替するのか、また、変動電源への対応をどうするのかという話について議論する必要があります。将来 CCS や水素・アンモニア使えれば有力な選択肢となりますが、それまでのトランジションの途中では既存の火力の利用やリプレースが必要だと思うのですが、そういう議論が大きく抜けてしまっている気がします。

（PL）

ありがとうございます。2030 年はもうほとんど変えようのない 2030 年で、2050 年は全くわからない、2040 年は今いわれた課題に対応していかない。OCCTO は火力の新設・リプレースがたくさん必要になるという計算例を出された。今後どこで誰がその検討をやってゆくのか、言いっぱなしなのか、それは示されていない気がします。この計算例では、計算のやり方や前提がもうちょっと公開さるといいのですが、発表資料は 100 ページ超あるのですが、基本的なデータが足らず、基本的な再現ができない気がします。 議論を深めるためには、最初言われたように、専門的な議論は、専門的にしないといけないというところに来るのでしょうか。

（参加者 16）

OCCTO ではいろいろ検討が行われるのですが、OCCTO は成り立ち上系統からの人が多く、電源からの人が少ない気がします。最近になっていろんな委員会では、発送を分離したのだけれども、電源側とネットワーク側でよりコミュニケーションをしてはどうかという話もあります。ですが、現実には発送分離という規制は重くて、うっかり話をすると規制に抵触するのではないかという、恐怖感というのは言い過ぎかもしれませんけど、そういうネガティブな思いが、おそらくネットワーク側にも電源側にもあるだろうと推察しています。それらを乗り越えていかないと、議論を深めた方がいいと言っても、実は深まらないのではないかなと気になっています。

（PL）

ありがとうございます。 秘密情報なので、そういう規制があるので、パブリックにしてしまうような秘密も何もなくなるような気はしていて、そこから攻めるのはありかなと思います。何でも話せばいいという話ではないと思いますが。もうちょっとパブリックに情報公開していくと議論がしやすくなることあると思っています。

d. データ

（PL）

最後のデータのところに関しては、今まで出た議論の中から拾うことはできます。私がこの資料を用意した思いは、さき程 PMU の例が出しましたが、皆が共有することによって、いろんな人が考える材料になる、そういうデータはたくさんあるはずだということです。けれども例えばスマートメーターデータの個人情報の扱いのように、データはあってもなかなか自由に使えない難しい状況に日本はあって、おそらくその難しさの程度はアメリカとかヨーロッパより日本が不自由な状態になっているような気がします。それは、誰かが悪いというよりも、長い歴史の中でデータが囲い込まれてきて、例えば、再エネの発電所出力の時系列データが公表されず、FIT で買いとりしたものでも公表されてないという現実は残念だと思います。一方、価値の

あるデータとしてはいろんなものがあるはずです。これらににについて、今までの議論もちゃんとサポートするために列挙してゆきたいと思っています。 ツールについてはたくさんの分野の山ほどの例がありますので、ここで挙げたのは、瞬時値解析と AI です。何か具体的に触れた方がいいかなというのがここの最後の四つ目に関係する話です。ここについてはどういうツールが重要ですかとかどういうデータが重要ですかっていう話を別途メールで聞かせていただきますので、一つ一つはぜひそこでお答えいただければと思います。その上でこの場でこれだけは言っておかないといけないというような点があればお願いします。いかがでしょうか？ 分散型に近いという意味で、早稲田の参加者5と参加者 17、コメントもしあればお願いします。まず石井先生いかがでしょうか？

データ・情報を共有し使える仕組み

（参加者５）

データについては PL がいわれた通りですが、まず共有をする仕組を作ることが大切だと思います。PMU は私の理解では近々一般送配電事業者の方々が整備されると認識していて、こういうデータがいろいろな検討に使えるようになることが重要だと思っています。その上、先ほど司令塔のところの議論で、専門家が専門の議論をするためには、いろんなデータを使って、根拠となる解析やら解釈をすることを広げる必要があると思います。これが資料にある evidenced informed policy making として、それがベースになると思います。私が最近始めた取り組みは、既に世界では広く使われている GitHub などのデータ共有やコミュニケーションプラットフォームなどで、各人が検討した結果とかが議論されていくというような活性化がなされるといいと思っています。これは自分が使ったデータやモデル系統やシミュレーションモデルを積極的に共有していこうという姿勢です。こういうことが継続的に行われて、そこでその専門家の議論が醸成されていくというやり方もあると思います。先ほどの司令塔の議論で、国の審議会やら何やらいろいろある上に立った司令塔が果たしてあり得るのかと思うわけですが、エビデンスや定量的な結果に基づいて何が正しい方法かとかいうことのベースを作っていくことが司令塔の議論を進めるのに重要だと思っています。それには、データが広く使えることが、根拠としても重要だと思われます。これを進めていくことは一つ方向性としては強く打ち出す必要があると感じています。

（PL）

そうですね。 GitHub、何か恐ろしいほどあそこはたくさんデータっていうか考え方が入っているっていう気がします。

（参加者５）

はい。 こういうので活性化につながれば、人材育成とかにもなるし入口の人がいろんなものを参照できるという点で、さらにはそこで今回やられているようなコミュニティが作れれば今風のやり方としていいのではないかと思います。

（PL）

ありがとうございます。参加者 17、いかがでしょうか？

データの秘匿と協力、学会

（参加者 17）

私は、例えばマルチベンダーっていう環境の中でプロジェクトを進めるときに、うまくいかなかった例と、うまくいった例があった話を聞いたことがあります。今どうすればお互いが協力しあって、データで秘匿すべきところは秘匿しつつ協力関係を作れるのかは、解は頭の中で整理はできてないのですが、成功例もあると聞いているので、こういう成功例を参考に何か議論できる場があればいいと思います。ツールは共通化する必要がありますが公開できる情報と隠す情報がある中で、できることはきっとあると思います。学会に参加している立場からは、最近は学会の参加者も少なく、会員も少ないというのと矛盾しているような気がしていますが、やはり学会に専門家が集まるのは間違いなくて、一部専門家以外にも公開するセッション、シンポジウムというか座談会で、皆が同じ高さの目線で議論を交わせると思います。その後チームを作ることもできると思います。ですから学会という舞台を皆が積極的に活用しないといけないし活性化する必要があると感じました。

（PL）

ありがとうございます。もうひと方、参加者 18、何かコメント頂けませんか

事業者の立ち位置、制度の複雑化、予見性

（参加者 18）

私の立場としましては、先ほどの司令塔については、どちらかというと事業者側は示されたシグナルなどに対して反応していく側であると思っています。その立場からみると、平素のデータもそうですが将来に向けた予見可能性を高めるところ、特に指令あるいはルールが将来どうなるのかについて参考になるものがあれば、一度出た指令に対して事業者として動きやすいだろうと思います。例えば、今は容量市場、需給調整市場、同時市場などいろいろな市場があり、そういった市場で何らかその効率的にできるという今の大きな考え方自体が、もう既に起きるというのがその事業者側としてはついて行けない状態になっていると思うところもあります。特にあの小さなことだとあるのかなと思っていたりしまして。そういったようなあるべきことと、あとその実際にできることは先ほども他の先生も指摘されていましたが、そういったそのバランスを含めた上での何かあるべき形、あるべき示されるべきデータ、司令なりそういったようなところの議論ができるのがいいと思いました。 ちょっと取りとめもない発言になりましたけれども、以上です。

今後の進め方・シンポジウム日程・閉会

（PL）

ありがとうございます。これで横断的議論は終わりにさせていただきます。今日の議論についてはいつも通り発言録でも、皆さんにお回しします。 それに基づいてですね、今からご説明します 4 月のシンポジウムを実施したいと思います。

シンポの構成は、前半のシンポに似た構成になっています。各技術分野の発表に続きパネルディスカッションが二つあります。パネルディスカッション 1,2 のテーマは現時点では「システム変革のキー技術とキーシステム技術」、「電力システムの変革の取り組みの方向性」です。これ前半と似た構成ですが、対象がガラッと変わりますのでそれについて議論をさせていただきたい。 それから、パネルディスカッション 2 の「電力システム変革の取り組みの方向性」では、今日の議論も踏まえると電力×〇〇を意識し、技術オリエンテッドの話ではなく、本日の議論を踏まえた議論とさせていただこうと思っています。 中身についてはこれからまたお知らせし、登壇者とのご相談はさせていただきますが、このような構成で 4 月 23 日と 4 月 30 日が候補日と成っております。今、23 日の方は、ここでお示ししている各登壇者の全員の参加が確認された段階ではありません。どちらかというと、1 名とか 2 名、僅差ですが 30 日の方が登壇者のご都合がいい状況ですが、30 日だとゴールデンウィークの狭間になり、事務局としては 23 日に後半のシンポジウムを行う方針で、再度、登壇者を確定して構成を最終的に決めたいと思っております。この点についてご意見あれば伺いたいと思いますが、いかがでしょうか？ または既に登壇予定、こちらからのリクエストで登壇になっているけれども、23 日は都合が悪い方がおられれば、この場を含めてお知らせください。

（参加者７）

23 日は曜日が火曜ですが木曜ですか。

（PL）

失礼しました。木曜です。よろしいでしょうか？はい。ご意見がないので、相談後ご都合が悪くなってしまう方には本当に申し訳ありませんが、もうデッドラインですのでこの場で 23 日だというところまでは決めさしていただいて、今の案について事務局から再度ご確認させていただいて、ご相談いただく方を決めていきたいと思います。どうしてもという場合には、前半の各技術テーマの講演に関してはオンラインもありと思っています。 パネルディスカッションについては進行をうまくやるために基本対面とします。シンポジウムは前回と同じようにハイブリッドで、ンラインの聴講可能ですが、対面出席でぜひその後の意見交換会を含めて議論を深めたいと思っています。皆さんのご参加をお待ちしています。シンポジウムの議論を受けて提言の策定に進みたいと思っております。

それでは時間になりましたので、本日はこれで終了したいと思います。 長時間ありがとうございました。

後半シンポジウム

開会

（林（以下司会））

定刻になりましたので、日本工学アカデミーのプロジェクト、「社会産業人々の生活の変容を支える電力システムのあり方（略称電力プロジェクト）の後半シンポジウムを開始したいと思います。このシンポジウムの今日のテーマは「電力システム移行期におけるキー技術と取り組みの方向性を考える」です。

私はこのシンポジウムの前半の司会を務めます EAJ の林と申します。よろしくお願いします。それでは講演に先立ちまして、お 2 人の方にご挨拶をお願いします。まずは、このプロジェクトの生みの親であります中村道治さん、皆さんよくご存知だと思いますが、今は日本工学アカデミーの顧問をしていただいております。中村さんよろしくお願いします。

開会挨拶 1

（中村）

ただいまご紹介いただきました EAJ 顧問の中村です。本日は大変お忙しいところ、EAJ の電力プロジェクト、後半シンポジウム、それから ESI の第 26 回シンポジウム。また本プロジェクトを力強く牽引していただきました荻本和彦先生、プロジェクト顧問の横山明彦先生また蘆立修一先生始め、議論、調査、執筆等にご尽力いただいてきました委員の先生方、さらには今日ご登壇いただきます先生方に、心からお礼を申し上げたいと思います。複雑で不確実、そしてたいそう変化するこの時代において、我々のグリーントランスフォーメーションをいかに実行力ある形で実現するかということが非常に重要であり、未来世代への責任、よく未来倫理だとか世代間倫理と申しますが、未来世代の責任は、非常に大きいと考えています。次世代の社会、産業、暮らしの姿を、科学的エビデンスに基づいてどのように描き、どのように実現していくのか、その大きな問いに答えることは単なる技術論ではなく、未来の国作り、社会作りに直結する私達の課題です。言うまでもなく、電力エネルギーは、私達の生活、産業そして国家の安全保障を支える最も根源的な基盤であります。現在再生エネルギーの大量導入であるとか、デジタル化の不足であるとか、地政学的リスクの高まりがある中で、電力システムは歴史的な転換点を迎えていると考えます。災害に強く、長期の安定稼働、これは 3.11 の災害や北海道の大規模なブラックアウトとかいうことを当時考えました。こういう安定稼働を可能にするレジリエントな電力ネットワークシステムを、環境整合性および経済合理性を備えた形で実現することが重要と考えています。しかし、私が思いますに、電力は安定供給されて当たり前という認識が長年この社会には蔓延していて、またステークホルダーが多様なことも相まって、自分たちの問題として、人々の現状理解が追いついていないのではないかということを懸念しています。本プロジェクトは、答えを一つに収束させる場としてではなく、むしろ判断に必要な論点で選択肢を可視化し、社会が対話を続けるための共通基盤をつくることに努めていただきました。2023 年に荻村先生他とご相談しましたのはもう 3 年前ですが、多様な専門家が議論を重ね、学会レベルでも政策レベルでも大きな成果が生まれつつ、あると思っています。これらが電力エネルギーの将来像について、政策と社会の間に持続的な会話を生み出すそういう一助になることを強く期待している次第でございます。最後になりますが、最終報告書をタイミングよくまとめていただくことを、EAJ としてお願いしたいと思います。簡単ですが私の開会のご挨拶をさせていただきます。よろしくお願いします。

（司会）

中村様ありがとうございました。続きまして、東京大学の荻本先生お願いします。

開会挨拶 2

（荻本 PL（以下 PL））

はい。ご紹介いただきましたプロジェクトに参加させていただいています荻本でます。本日は「後半のシンポジウム」というタイトルです。変わったタイトルですが、1 年前に、本プロジェクトが始まって 1 年たった段階で中間シンポジウムを開催させていただきました。本日は後半が終わりまして、後半シンポジウムの開催に至り、今もプレッシャーもいただきましたが、インプットが本日でオフィシャルには終わる段階で、ここから先は提言の報告書の策定に移る段階です。1 年目は、2 年前からこちらに示す分野の発表と討議を 5 回実施した段階で中間のシンポジウムを開催しました。それから、1 年前から第 6 回から第 10 回までの討議会

を実施し、本日の後半シンポジウムに至っています。提言がしっかりできれば、そのお披露目の場を、今のところ X 月ということになっていますが、夏ごろを目指しています。

このスライドは 1 年前のこの挨拶用に作ったものに、それからの変化に色をつけて書き加えたものです。米国イスラエルのイラン攻撃の 1 行が加わり、そのあおりでその前からあったはずの経済安全保障、またエネルギー安全保障、これらが非常に声高に言われるような時代になり、この 1 年でも大きく変わってきたと思います。

私自身の思いは、思いに過ぎませんが、これって、3E の中に確か入っていたはずなのです。ですけれども、理屈では入っているのですが、人間の捉え方はその時々の一番喫緊の話題、そういうものに引っ張られて、3E の中のどれかがより強調されることを歴史的に繰り返していると思うわけです。我々の未来に向かっての提言、提言って何なのかという話も先ほど打ち合わせていたのですが、私が今思っているのは「中長期的なアクションプラン」、これを今からまとめられればベストだと思っているところです。

ということで今日、今日が我々のオフィシャルの会合の最終段階ということで、中長期のアクションプランに繋がる議論をしていきたいと思っています。講演、そして二つのパネルディスカッションが非常に興味深いものになりますように、お願いいたしますし、フロアの方々からも、時間の限りはありますがご意見をいただいて、パネルディスカッションが進められると思っています。ありがとうございました。

（司会）

ありがとうございました。それではご講演の部に入りたいと思います。5 件の講演があり、それぞれ 20 分です。それで多分皆さんいろいろご質問があると思いますが、それは時間の関係で、あの後半のパネルディスカッションあるいは意見交換会のときにいろいろ議論していただければと思います。

それでは最初に東京科学大学工学院の河辺先生から、システム運用分野のキー技術とキーシステム技術ということでご講演いただきます。河辺先生お願いします。

講演 1 電力システム運用（東京科学大学・河辺）

本日の内容

はい。東京科学大学の河辺です。私の方からは、運用分野のキー技術ときシステム技術ということでお話させていただきます。まずこちらのスライドがあの本プロジェクトで議論しました運用に関する話題を、中長期の断面から実需給の断面に向けて並べたものです。この中で、中長期の部分はどちらかというと計画の側面が強いと思うのですが、こちらも運用を意識して計画を立てることは非常に重要で、切っても切り離せない関係であり、こういったものも含めると運用に関するトピックはとても多いと言えます。その中で、今日は限られた時間ですので、週間から実需給にかけての部分のキー技術、キーシステム技術に焦点を絞ってお話させていただきます。どちらかというと技術的なお話に寄った内容ですが、20 分間お付き合いいただきたいと思います。

現在のシステム運用

最初に現在の状況についてのおさらいということで、週間から実需給にかけての流れを順番にお話します。実需給の前週の断面から見ていくと、前週の断面でも 1 日以上の起動時間がかかる電源を有効に活用するため、揚水・蓄電池のように池の水位や SoC の計画が必要なリソースを効率的に運用する観点から、週間レベルの計画を立てることが重要になります。そのため、TSO は BG の週間計画に基づき週間計画を作成しています。前日になると、BG は相対取引に加え、スポット市場、時間前市場を活用して kWh をゲートクローズにかけて調達します。他方、TSO は、エリアによっては揚水の随契も考慮し、需給調整市場から予備力、調整力を調達し、さらに必要量に対する未達分は余力活用で対応している状況です。実需給断面、これはゲートクローズ後の時間を指しますが、ここからは TSO が周波数維持義務を負っていて、下の図に示す変動周期に合わせて、階層的な制御システムで需給をバランスさせています。変動周期の短いものから、発電機のガバナフリー、中央給電指令所で行う LFC[48]、経済付加配分 EDC[49]の順で制御システム含まれています。これらに加えて、同期発電機の慣性応答や負荷の実効制御性、これらは機器や交流電気回路の物理特性によるものですが、これらが電力システムの周波数変動の抑制に寄与しています。

こうした中で今後キーシステム技術として挙げられるものの一つが、「同時市場の約定ロジック」です。同時市場は、こちらの表に示しているように、前日からゲートクローズまでを主な対象とし、場合によっては週間断面からの計画もこの同時市場の中で扱うこともありますが、このゲートクローズまでを対象にした電力市

[48]負荷周波数制御、Load Frequency Control
[49]経済負荷配分、Economic Load Dispatch

場です。ここでは、現在の卸電力市場と調整力市場を統合して Three-Part Offer に基づく最適化計算を行います。市場の約定は、需給バランスや調整力、送電線の運用容量といった安定供給上の制約条件を満たしながら最適な電源態勢を決めることを目指して今議論が進んでいます。もう一つ重要なところは、将来再エネの大量導入により、その予測値の変化に柔軟に対応しながら電源態勢を決めるために、前日の昼間に一度、同時市場を開いた後も、ゲートクローズにかけて何度かこの SCUC を実施することも検討されています。この同時市場の役割としては、主には kWh とΔkW に対する価格を算出するところにあると理解していますが、現在の整理ではこの同時市場での約定結果をできるだけ実際の運用にも反映することを目指しています。これを本当に運用に活かすと、そのまま、そのままというのは難しいかもしれないですが、できるだけその運用に反映すると、ここに並べている様々な制約を考慮して、この SCUC のロジックを構築する課題があると思っています。その中で、予備力・調整力の制約の考慮では機器の応答速度や、どこで予備力・調整力を調達するかという地点性も考慮する必要があり、週間の計画もここで扱うということであると、ますますこのロジックの複雑化が懸念されます。今のこの同時市場のそのロジックは、ゲートクローズまでが守備範囲となり、ゲートクローズ後は一般送配電事業者さんの中給システムによって実運用を行う流れになると理解しています。現在その中給につきましては、2032 年度の本格運用開始を目指して、次期システムが開発されている状況です。現在、詳細設計が始まった段階で、現在公表されているところでは、EDC でもエリアをまたいだ混雑管理等の最適化計算が行われ、LFC 制御もメリットオーダーも考慮した広域的な設計が行われているということです。 他にも、安定度等のセキュリティ評価機能の高度化やそのために必要な状態推定の技術、ここでは将来的には PMU と呼ばれる時刻同期機能を持った計測装置の活用も検討されているということです。また、需要や再エネの予測機能も非常に重要で、ここでも機械学習モデルを新たに適用するといった、新技術の適用が検討されています。その他、需給バランスの維持という観点では、将来的には高速周波数応答や慣性応答が可能な機器を確保していくことも重要であると考えています。

こちらの図は電源脱落時の周波数変化のイメージを表しており、これまでの回転機主体の電力システムを基準に考えると、今後インバータで連系される再エネが増えてくると、電源脱落事故が起きたときの周波数の変化、この場合だと低下する速度と周波数の低下幅の最大値が従来よりも悪化することが指摘されていて、一般に周波数の低下に対しては、PFR[50]と呼ばれる火力や水力などのガバナフリー制御により周波数低下を抑えていますが、これまで以上に周波数の低下のスピードが速まることを考えると、さらに高速なその調整力をインバータで連系されるリソース等からも調達する必要があると言われています。機器としては蓄電池や再エネのインバータ等がそれに相当しますが、現行の蓄電池の制御システムでは慣性応答という機能は持っておらずで、こちらの中間シンポジウムでも話題として挙がっていた GFM 型のインバータの開発で慣性応答ができるリソースを確保する観点で、キー技術の一つであると思います。

ここまでは需給バランス維持の観点からのキー技術、キーシステム技術でしたが、実際の電力システムの運用では、系統統制約と呼ばれる送電線の運用容量を考慮した運用を行う必要があります。送電線の運用容量というのは、ここに書いておりますように、流通設備の熱的な制約の他にも、先ほど述べた周波数、それから電圧や同期発電機の安定性これは同期安定性と呼びますが、こういった物理的な制約により決定されます。これらの制約条件は、一般に系統故障が起こった条件で最も厳しくなるという傾向がありますので、想定される N-1 故障、場合によっては N-2故障が生じた場合でも、供給支障それから発電支障が生じないように運用を行う必要があります。ということで、ここからは、これらの各種制約を近年難しくしている要因や、それに向けた対策という観点でお話を進めます。

熱容量対策

まず熱容量制約に対するキー技術、キーシステム技術です。近年、もしくは今後という観点で、この熱容量制約を満たすことを難しくする要因としては、一つは再エネの急速な導入の拡大と、局地的な需要の増加、そして最後は変動性再エネの導入拡大に伴う潮流パターンの多様化と不確実性が挙げられます。熱容量の制約を満たすためには、基本的には該当する送電線の増強が大事になりますが、この増強に要する期間を考えると、再エネや需要の急速な導入拡大への対応が難しくなり、こういう傾向は近年も見受けられます。そこで、運用制御技術の更なる高度化が今後も求められ、近年導入されている日本版コネクトアンドマネージも、需要や蓄電池の充放電へのノンファーム運用の適用やコネクトアンドマネージの考え方を応用などの議論も最近始まっていす。他にもダイナミックレーティングや、潮流制御機器の活用も今後のキー技術になっていくと思います。系統用蓄電池は、現在は一次調整力への活用が進んでいる状況ですが、

[50] Power Frequency Response

今後は混雑の緩和などにますます役割の拡大が見込まれる時期だと考えています。

同期安定性、電圧安定性

続いて同期安定性、電圧安定性の話です。まとめてお話ししますが、これらの制約の維持を難しくする要因としては、こちらのイメージ図に書いていますように、第一には再エネの導入適地が電力の大需要地から離れているためこれまで以上に長距離送電が求められる場面が増えてくるということが挙げられます。一般に同期安定性、電圧安定性のどちらも、送電距離が長くなるほどその安定性の維持が難しくなる特徴があるためです。さらにこの再エネの不確実性により不安定現象を事前に想定することも難しくなると思います。それから、前回のシンポジウムでもお話ありましたが、同期発電機の並列数の減少による電圧維持能力の低下や、再エネの増加によりエリアによっては基幹の送電線に流れる潮流が減少して電圧の上限側の制約が厳しくなる現象も起こっています。あと再エネは多くがインバータで連系される特徴があり、系統事故が起こったときにそれらの機器が瞬間的に停止することも懸念されます。こちらは研究レベルでの話ではありますが、誘導機の負荷が多い地域では、この再エネの瞬間的な停止が電圧崩壊を招くこともわかっています。ということで、これらの懸念事項に対応する観点では、FRT 機能、これはインバータが運転継続といった機能の強化が必要です。

電圧、HVDC、系統安定化、管理・制御

あと市場の世界ではあまり出てこない無効電力の話です。無効電力を制御する機器を確保していく必要があります。あとは日本海ルートに見られる HVDC 送電の導入や、系統安定化制御の導入といったことも挙げられます。系統安定化制御については 1 枚深掘りしたスライドを用意しました。頻度の高くない系統故障に対して不経済な設備形成や不経済な系統運用を避ける目的でこれまでも導入されてきている系統安定化制御は、設計次第で様々な不安定現象に対応できるように作ることができ、場合によっては想定外の不安定現象に対してもリアルタイムの制御で対応することができるようになりうるので、不確実性への対策としても有効になっていくと考えています。

不確実性への対応

こちら最後のスライドになります。不確実性への対応が運用の分野では重要になるためそれに対応するキー技術、キーシステム技術を並べています。その中では、先ほどのキーである系統安定化制御、他に最近注目しているものとして予備力の発動制限を予測する技術開発も必要になると思います。「予備力の発動制限」の予測とは、再エネのその予測外れに対して予備力が熱容量、運用容量の範囲内できちんと発動できるかどうかを予測する技術ですが、現在の整理ではこの発動制限を避けるために、送電線の運用容量にフリンジと今呼んでいるマージンを設けて運用することが考えられています。ただ場合も、このマージンは、確保すればするほど非経済な運用となるため、これを適切な値に設定することが課題になると思います。そのためには予測技術を向上していくことに加えて、この予測はある程度外れるという前提のもとで、外れ方のデータをエリア単位だけではなくてノード単位でも収集していくことが重要になると思っています。

時間の関係で話せませんが、DER の活用は大規模集中型の電源が減る中で、今後有効に活用していくことが非常に重要だと思っていまして、それに付随する技術が今後ますます求められると思います。以上、運用に関するキー技術それからキーシステムの技術ということでお話させていただきました。ありがとうございます。

講演 2 小売事業（㈱Looop・渡邊）

（司会）

河辺先生どうもありがとうございました。続きまして、小売分野のキー技術とキーシステム技術ということで、株式会社 Looop 戦略本部 GX 推進部の渡邊裕美子さん、よろしくお願いします。

（渡邊）

電力の小売り分野のキー技術とキーシステム技術について、株式会社 Looop の渡邊からお話させていただきます。まず電力小売事業そのものの背景の話と、その中でキー技術、キーシステム技術として最も重要と思われるデマンドレスポンスを取り上げ、最後に電力事業の今後ということを考えつつまとめたキー技術、キーシステム技術について私見ですがお話させて頂きます。最初に私が所属する株式会社 Looop のご紹介をさせていただきます。と、Looop はいわゆる新電力で、電力小売事業に 2016 年頃に参入し、あと太陽光発電の EPC などをやっている会社です。ですので、私自身はアカデミックや研究をしているというよりも、むしろ実際に近いところで実証などを担当している部署にいるので、そういった観点から小売事業のお話させていただきます。

背景：自由化

電力小売事業のバックグラウンド、特に自由化については、皆様ご存知のことと思いますが、復習としてお話をさせていただきます。電気事業全体は、地域ごとの電力会社が発電・送配電・小売を一貫してやっているという産業でしたが、規制緩和、電力自由化が 1990 年の後半から進み、電力の小売は 2000 年に特別高圧、2004 年に高圧が、そして 2013 年の電力システムに関する改革方針においてその目的として電力の安定供給の確保、電気料金の最大限の抑制、需要家の選択肢や事業者の事業機会の拡大が挙げられ、そのための手段の一つとして電力小売の全面自由化が掲げられ、2016 年に低圧小規模商店や家庭も自由化されたという流れです。この全面自由化の後に、電力の小売事業への新規参入者が大幅に増加しました。弊社もその 1 社で、一般消費者に対して電力サービスを届けることができるようになり、これまでの電気に加えて様々な付加価値を伴うサービスも可能となり、様々な業界からの事業拡大あるいは新規事業としての参入が一気に拡大しました。2016 年の 4 月時点で、電力小売事業者は日本に 291 件、これも多い数でしたが、2022 年の初めには 700 件を超す伸びがありました。新電力の、電気以外のものとの組み合わせなどの様々なサービスを簡単に右側で挙げています。まずガスや通信とのセット割引あるいは再生可能エネルギーの発電等の組み合わせ、また住宅メーカーですとか、IT システム、自治体、地元企業などが電力の小売事業に参入してきました。

一方で、2020 年ぐらいから電力の小売原価の大幅な上昇が一度ならず続きました。需給の逼迫や、ロシア・ウクライナ問題による国際的な燃料価格の上昇等が起きました。それを受けて 2022 年ぐらいから新電力として参入してきた会社の倒産、小売事業からの撤退やサービス停止、新規契約受付の停止などが急増し、かつ、原価上昇を吸収するために売値の方を変える様々な変更というのが相次いだのが 2022 年の状況でした。一方で、今もイラン情勢のため原油・LNG の価格上昇がまさに起こり、5 年に一度ぐらいはこのような状況が起こるという理解です。直近でも、高圧と特別高圧の需要が中心ですが、新規の契約受付を停止する電力会社も出てきていています。

システム改革の検証と小売事業

昨年度に、先ほど述べた 2013 年に方針が出されて実施された電力システム改革の検証が行われました。先に紹介したように、電力システム改革の目的の一つには電気料金の最大限の抑制が挙げられてきたわけですが、結果的にはこれが実現したとは言い難いことですし、小売事業者が撤退して需要家に困難や負担をもたらしたとも指摘されました。このシステム改革の検証の報告書では、今後電力小売事業者に求められることとして、需要家のニーズに応えるエネルギーサービスプロバイダー、この例として、再生可能エネルギーの地産地消やデマンドレスポンスを通じた需給運用への貢献、あるいは省エネやエネルギーマネジメントなどを提供する役割が求められるとされています。

下の図は、先ほどの電気料金が下がったとは言い難い電気料金の推移、右側の図では、今後の事業者に期待される役割として需要家のニーズに応えるエネルギーサービスプロバイダーを挙げています。

デマンドレスポンス

そういった状況で今後の電力小売事業のあり方の一つが先ほど述べたデマンドレスポンスです。デマンドレスポンスとは、電力の需給バランスをとるために、供給側だけではなくて、需要側を最大限活用するというところの概念です。下の図では、このデマンドレスポンスについては、時間的にも空間的にも様々な期待がある状況を示しています。まず一番小さな範囲では、1 人 1 人の需要家それぞれが何かをすることが電気の需要パターンを変えることができます。例えば既に行われている夏や冬の需給逼迫時に節電をするのもデマンドレスポンスです。最近では、昼間の太陽光発電が余る時間帯があるため、この昼間に電力の需要を上げてもらうというところも電力の小売としては注目されている分野になっています。個々の需要家が対応するだけではなく、ある程度の数の需要をまとめ、需要の変更を約束できるならデマンドレスポンスの用途はさらに広がります。例えば供給力として発電所を増やす代わりデマンドレスポンスで対応する、あるいは調整力としてより細かい変動を吸収するなど、デマンドレスポンスの適用が検討されています。あるいは、広いエリアの話だけではなく、ローカル系統での混雑の場合でも、デマンドレスポンスを使えるのではないかという期待もあります。

デマンドレスポンスの分類

こういったデマンドレスポンスを実現する手段としては、下の表のように資源エネルギー庁が整理しています。まず縦軸はデマンドレスポンスの実施に対する報酬が需要家にどう払われているかで、「電気料金型」と「インセンティブ型」の分類、横軸はデマンドレスポンスを発動するときに誰がそれを意思決定するのかで、需要家自らによる「行動変容型」と需要家に代わってサービス提供者あるいは電気事業者が機器を直接制

御により需要を変える「機器制御型」の分類です。それぞれ二つの軸の組み合わせで、デマンドレスポンスが整理されています。この中では、特に電力小売事業者にしかできない役割としては、需要家の方々に対して電気料金を提供しているため、これによってより広い人にデマンドレスポンスへの参加を促すことができると思っています。下の図で言うと、電気料金型に相当します。この行動変容型での実現には、例えば需給逼迫時には電気料金が高い状態で、あるいはその太陽光発電有効活用のためには昼間電気料金が低い状態、このような電気料金を提供することで需要家の方が自主的に行動を変え、需要を調整する可能性があります。また機器制御型としては、電気料金を設定しておくことによって機器の方が自動的に動く、あるいは機器を料金に合うように遠隔制御するなどが考えられます。

小売分野のキー技術、キーシステム技術

これらを踏まえて小売分野のキー技術とキーシステム技術をまとめてみました。まず電力の小売自由化直後に求められていた電力小売事業への期待では、事業者が競争することで電気料金自体を下げる、あるいは電気料金とサービスとの組み合わせにより需要家に選択肢を与えることに焦点があたっていましたが、今から求められる電気小売事業の姿は、省エネ、電化、再エネ利用など需要家に働きかけていく接点があることから、機器の導入あるいは先ほどのようなデマンドレスポンスを進めていくことです。そのためには、需要家への選択肢に関する情報提供や支援、あるいは料金自体の設定があると思っています。その他にも、再生可能エネルギーの発電所などと直接契約を進めていくことなどにより、発電所・系統用蓄電池などへの投資を安定させることも考えられます。これを踏まえたそのキー技術としては、まず予測技術により自社の需要を予測・把握するのが重要な部分であると考えています。その中でも今後デマンドレスポンスの実施に向けては、デマンドレスポンスのポテンシャル、発動時の応動量の推定・把握が重要で、国の方でもいろいろ把握しようという動きがありますが、サービスを実施する小売事業者それぞれが技術を持つことが必要になると考えています。あとは原価の方のリスクや不確実性の評価も重要です。それらを踏まえた電力需給のポートフォリオ、電気料金とサービスの設計、あるいは電気の需要を把握し制御する技術が重要になってくると考えています。これらの技術は電気工学だけでは達成できず、例えば特に低圧、家庭などのお客様の反応、むしろ行動科学あるいはビジネス寄りの表現では、マーケティングやゲーミフィケーションなどの問題になると思っていますし、実際に機器を遠隔制御するためには情報工学、特に最近だとサイバーセキュリティも問題になると思っています。

AI の進化による未来

最後に、より私見というところでは、電力システムの政策立案者は、政策側でデマンドレスポンスが重要だと示すことで、いろいろな事業者がそれに従ってデマンドレスポンスに対応したなメニューを作るイメージを考えていると思います。しかし、最近 AI の技術の進化を踏まえると、もしかすると今後 AI が自動的に電気料金を選ぶとか、あるいはスマート家電が一気に入ってきて、電力の需要、デマンドレスポンスのための機器制御ではなく、全く違うルートから単に利便性、快適性のためだけの色々な機器の自動制御が普及する可能性があるのではないかと思っています。そうすると、これまで電力の小売事業で政策側が実現したいと思っていたことと違う未来が、先にDX、あるいはAIの普及で入ってくるのかもしれないと考えていますし、逆にここに係る主体を積極的に巻き込むことによって、より在るべき電力システム、需要側のシステムへの貢献が実現できるのではないかと考えています。以上です。

講演 3 需要/需要機器（大阪大学・山口容平）

（司会）

ありがとうございました。続きまして需要機器分野のキー技術とキーシステム技術ということで、大阪大学大学院工学研究科の山口容平先生お願いします。

（山口容平）

大阪大学の山口です。私は建築分野の専門で電力分野に詳しくはないのですが、需要の専門家ということで発表させていただきます。スライドは大阪大学の芳澤先生と一緒に作ったもので、後半は芳澤先生のパートになっています。

渡邉さんの方から小売、需要についてのお話がありましたが、需要をより広く、長期的に考えると、カーボンニュートラルによって電力需要がどう変わるかが重要な観点になると思います。需要分野では省エネ、電化、燃料転換が進み、電力需要は過去 10 年減少トレンドでしたが、現在それが増加に転じることも考え

られています。特にデータセンターや CO2 回収も新規の需要として発生することが長期的には考えられていて、カーボンニュートラル社会に向けたより長期的な変化を見通すということが重要であると考えています。もう一つの観点としては、需要側の調整力を活用して需要側と供給側の協調的な運用をする中で、役割が負荷という立場から調整力を提供する存在へ変わる中で、変化を見ていくことになると思います。

OCCTO の需要シナリオ

まず一つ目のトピックですが需要を総体として見るということです。OCCTO が検討会を立ち上げて電力需給のシナリオに関する検討を行っています。ここでは、電力中央研究所、RITE、デロイトトーマツコンサルティングの 3 社が需要に関する低位、中位、高位シナリオを出して、その上で 2040 年に関しては 2 ケース、2050 年 4 ケースの需要のシナリオが報告されました。2019 年の 8800 億 kWh の需要が、2040 年、50 年でどうなるかをシナリオで書いています。その検討で特に重要な需要の変化として考えられて要素を左側に挙げています。まずは民生部門の需要の変化は、人口減少と省エネによって過去は減少トレンドでしたが、さらに減ると考えられています。業務部門に関しましては床面積が増加するケースと、人口減少に伴って減少するケースがあります。特に低温のお湯、あるいは暖房用の熱供給にヒートポンプ技術による電化が進むことが非常に重要と想定されています。運輸部門は電気自動車、産業・業務では、データセンターがこれから新設され、右側の図の通り年約 600MW 増加することが OCCTO の資料で示されています。特にこれは水需要を底上げする。というような形の変化になると考えられますが、当然空調動力が必要になりますのでこれも、外気温とかに連動して変化をしていくことになります。産業部門に関しましては、省エネ、電化どう進むかということですが、増加の要因を作るのは加熱のプロセスの電化だと思います。

その他 CO2 を回収して使うあるいは貯留する技術、そして水素還元製鉄のプロセスに使用する電力需要の増加が見込まれています。その他脱炭素のための技術的変化としては水素の製造ですが、これは国内外の比率が不確実であることが書かれています。その他 CO2 の回収貯留のための電力需要の増加が考えられています。それら定量的に図で示しています。二つケースを示しておりますが 2050 年の需要が最も小さいケースと大きいケースを示しています。2019 年、2040 年、2050 年の間に示されたデータは、各部門で想定される変化です。まず 2019 年の 8800 億 kWh の電力量は 2050 年で低位で 9500 億、高位だと 1 兆 2500 億になっていて、両者には大きい幅があり不確実というのが一つ目のポイントです。二つ目は、2012 年から 19 年が年間 1%減くらいできたのですが、右側のケースになると、1.4%増の増加に転じるということで、非常に大きい変化が想定されていることになります。過去の変化と比較して非常に大きい変化であるということです。内訳は、民生部門は省エネの進展と人口減少により減少方向で、産業部門は減少のケースと増加のケースが想定されています。データセンターの需要は確実に増え、EV 化自動車系が増えるということであとは脱炭素のための鉄鋼業ですとか水素製造、DAC というので、その程度は大きな不確実性を持つ推計です。負荷持続曲線で見る、基本的には底上げされるのが特徴です。特にデータセンターが底上げをする変化が想定されています。

建築分野の分析

私は建築分野の専門家なので、建築分野の分析について紹介します。OCTTO の分析では、過去のエネルギー性能の変化をベースラインとしてこれからの変化を考えるのですが、建築分野ではより不連続な変化が考えられています。今、建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律（建築物省エネルギー法）が出ていて、建築物の最低エネルギー効率を定めて、その効率よりも高い建築物を作ることが義務化されました。これが実現されていくと、省エネルギーはどんどん良くなっていきます。これはストックの変化で見るとペースは遅いのですが、確実にエネルギー消費は減ることが考えられます。あと、省エネルギー法の中でトッププランナー基準が用意されていて、それも機器別の性能を上げることになります。ですので、民生部門では、放っておいたとしてもエネルギー性能は上がることになります。熱分野では例えば家庭用のヒートポンプ給湯機の採用率を最近のデータを見ると、4 割ぐらいで家庭用 CO2 ヒートポンプが使われていることがデータ分析から見えてきます。

私どもの研究室で開発しているモデルを使って、将来の電力需要にどう影響を及ぼすかを PL と一緒に分析したことがあります。左の図が 2019 年の日本全体の電力需要（黒線）で、2 月、5 月、8 月の平均値、それに対して2030年までの需要の変化を推計して2019年と2030年差分をそこから引いたものが青線で、さらに最大限省エネと電化が進んだ場合が赤線になります。右側にその負荷持続曲線を書いています。ここからわかることは、省エネルギーの追求により電力需要の季節変動は減少するだろうということです。ですから、夏季のピーク、冬季のピークは下がる方向になり、これは住宅の断熱と空調機の効率が良くなるためです。ですから、電化を推進しても、電力需要の減少は可能だということが示されます。ヒートポンプ給湯

器の昼間稼働も赤の 2050 年ケースでは考慮しており、こういうことで需要は、年間値で見ると季節変動は減る方向でシフトするだろうというのが需要家側の分析です。

このように過去のトレンドから推定される将来だけではなく各需要分野でいろいろな検討がされていて不連続な変化を起こそうとしているので、そういう変化をうまく取り入れて将来の見通しを立てるのは非常に重要だと考えています。

運輸分野の分析

運輸についても同じような検討を行っています。これは携帯電話の位置情報を使って 100%EV になった場合の電力需要を計算した結果です。単に家に着いてすぐ充電では 10GW、20GW の需要が集中することになりますが、これも将来的には調整ができることを示しています。これで何が言いたいかというと、電力需要の総体としては左に挙げた要素が重要な変化として考えられますが、各分野でいろいろな取り組みが行われておりそれをうまく取り込んで、電力システムにメリットのある形で情報を提供してもらうというのが非常に重要だと考えています。需要側をブラックボックスにしておくのではなくて、解像度を上げ需要側のポテンシャルをより深め、より広い範囲で見て計画に含める努力が必要と考えています。

電力分野と各需要分野の協力

私は建築分野ですが、電力分野の人からニーズをリクエストは多くありません。そういうリクエストをいただいて建築分野など各分野の専門家に分析をしてもらうことが重要だと思っています。例えばこれから温暖化が進むことを考えると、局所的に電力需要がこの夏季のピーク日だけどうなるかがとても重要な情報になると思うのです。そういう、いつどこでどんな規模で変化が起こるのかを明らかにて移行過程をうまく設計することが重要だと考えています。

需要側リソースの活用

二つ目のトピックです。需要家側のリソース、DSR あるいは DER（Distributed Energy Resources）と呼ばれていると思いますが、これをうまく活用することです。渡邉さんのお話の中でもその活用が書かれていました。活用の観点で見ると、まずは需要家側の機器が DR Ready になる必要があり、右側に挙げた各種の機器が外部に接続されてそれがセキュリティの保たれた状態で事業者がこれをリソースとして遠隔制御に使えるようになり、そのためのアグリゲータが多数存在することが要件だと整理されています。市場がそれを有効活用するためのプラットフォームとして機能するということです。電力システムの中で今低圧に接続されている調整力の話をしましたが、それをいかに活用していくか、全体を見通すことが非常に重要だと考えられています。上位の系統では需給バランスに貢献することなり、下位の配電系統では混雑緩和などの物理制約を回避するための運用になると思いますが、これらを階層的にうまくコントロールしる技術が重要になると考えられます。こちらが次世代分散電力システムに関する検討会の中間取りまとめに掲載されていた図です。下の方に調整力のリソースが配置されていて、それが電力システムに接続されている図になっています。この中からキー技術を芳澤先生がリストアップしています。低圧リソースの右下の方から、個々の機器設備における調整力を実際に計量してそれを使える状態にするということで、特例計量の機能や、DR Ready の要件でそれを揃えていくこと、さらにそのリソースをアグリゲートするためにはベースラインを予測・管理・計画する、そして調整力として使っていくとことが重要になりますし、市場の設計・制度整備も課題になります。サイバーセキュリティが必要条件になると思いますし、需要の情報を管理・公開して使っていくことが重要で、社会システム連携と書きましたようにいろんな分野でカップリングを具体的に進めていく必要があると思います。

電力側と各種需要側の協力

最後になりますが、長期的には需要が大きく変化しますが、不確実性が高いのでそれにいかに対応するのかが重要な課題になると思います。個々の技術分野において検討が進められると思いますので、電力システムの専門家だけで対応しようとせずにいろいろな分野を巻き込むことがいいと思います。需要側と供給側の協調が重要で、電力システムでの付加価値をうまくつけて市場を形成することが大事で、さらにシステム移行の段階を見て変化に対応していくことが求められると思います。特に需要側は、急速に変化するものと、非常にゆっくり変化するものがあり、それぞれの段階で見るべきものが違うのが特徴ですので、それをうまく取り込むことが課題になると思っています。以上で終わります。

講演 4 解析 I 電力（横浜国立大学・辻隆男）

（林）

ありがとうございました。続きまして、電力解析分野のキー技術とキーシステム技術ということで、横浜国大の大学院工学研究院の辻先生です。よろしくお願いします。

（辻隆男）

電力解析の全体像

横浜国立大学の辻です。電力解析の分野のお話をさせていただきます。まず、今回のテーマの電力系統解析には様々な種類の解析が含まれます。目的の観点では、例えば運用・制御を決定するための解析、設備投資計画のための解析、新規電源の連系に対する影響評価、安定化対策など、様々なものがあります。また個別の機器・リソースの観点では設計に生かすための解析や、政策・制度、技術開発などに幅広い解析が用いられているのが現状です。目的に応じて解析の対象となる時間領域も大きく変わるので、冒頭河辺先生からありましたように、SCUC であれば日間、週間こういう長いスコープになり、事故発生後の現象については過渡的な短時間の領域での解析が必要になるということで、様々な目的に応じていろいろな解析技術の組み合わせと適切な選択が必要であると思っています。

過渡解析の概要と最近の変化

そういう様々なテーマがある中で、今回は電力系統の過渡解析ということで、事故の発生後に電力系統の安定な運用を維持できるかどうかに主眼を置いてお話をさせていただきます。このスライドは教科書的な解析のフローの大枠イメージで、事故が起こったかどうか、事故が起これば、それを反映して計算の条件を変えて、その後、ごく短時間のうちに何が起こるかを、電圧電流などの代数方程式解く計算と、様々なダイナミクスを持って動く要素を微分方程式により丁寧に解くことを組み合わせて精緻な解析を行うイメージになります。そのときに様々な時定数で動く要素が混在するので、一般的にはかなり短い時間刻みの計算が必要で、硬い問題の求解になることが、計算負荷の観点からよく問題になります。この電力系統の過渡解析には最近いろんな変化があると感じています。一点目としては、複数の現象の考慮で、同期安定性、電圧安定性、周波数安定性など、系統安定性に関わる様々な制約条件が複合的に組み合わさった事象が増加してきています。特に再エネ電源の導入によって様々な意味で安定性が低下すると複数の事象が要因として絡んだ現象が増え、求められる解析の範囲も非常に広くなると思っています。そして二点目として，解析対象となる系統のモデル化の範囲も広がっているのを感じています。例えば，特定のエリアのみではなく複数のエリアを通じた分析や、配電系統の模擬も含めた基幹系統の解析などが挙げられます。そして再エネの出力の変動などによる不確実性の増大で、検討対象とすべき潮流断面の数がすごく増えています。以上のように、解析に必要な計算負荷が一層重くなっています。その一方で、解析する側も、機械学習の応用など使える手法も増えているという変化があります。

北海道・イベリアブラックアウト：事前解析

具体的な解析事例を挙げると、例えば 2018 年の北海道のブラックアウトでは、N-7 故障ということで、電源と送電線のトリップが重なり周波数低下が主要因でした。この事象については事後に、その周波数解析のシミュレーションが丁寧に検証委員会等で行われ、この下の例にあるように、条件をうまく合わせることで挙動がうまく再現できることが示されました。その上で、レジリエンスワーキングなどで今後同じブラックアウトを起こさないように、シミュレーションを通じて定期的に安定性を確認する体制の構築が進みました。一方で、最近の事例では、イベリア半島のブラックアウトが昨年でしたが、この事象では電圧の浮き上がりが非常に重要な現象とされました。短絡容量の低下を背景に電圧が上がりやすくなり、無効電力の制御能力の不足から電圧上昇の連鎖的な事象が発生して、フランスとの連系が切れて、最終的に周波数が低下するというように、様々な現象が絡んだ事象だと思っています。また、こういった現象を今後回避する方法として、例えば分散電源側に無効電力制御への系統貢献をより求めていくといったグリッドコードの整備の観点からの検討の重要性が強く見えてきた事象とも思っています。特にこの事象では電圧の浮き上がりがトリガになったブラックアウトで、今までなかった新しいケースだと言われていました。ですから、こういった現象について、あらかじめリスクを察知して適切に事前に対策を打つこと考えると、事前にどういう解析の体系を作っていればこれを事前に予見できたかというのは、一口には言い難いと思っています。それには、系統現象に対する深い理解がまず必要と感じる次第です。

グリッドコードと解析

先程お話ししたグリッドコードの関係での話題を付けています。こちらは広域機関のグリッドコード検討会

の資料で、風力発電がその周波数の安定化に貢献する例です。風力発電が周波数制御に貢献するためにはドループ制御の適用が考えられますが、そのパラメータを適切に決定する必要があります。同検討会ではパラメータの設定に応じた周波数最下点の改善と周波数振動の悪化を比較検討したシミュレーション結果が示されています。このように、一つの新しい対策を考える上でも非常に丁寧なシミュレーションが必要です。そしてシミュレーションに求められる解析の詳細もだいぶ質が変わってきていると思います。特にインバータ連系機器が増加する状況で、その変換器に起因した安定性の課題が一層重要な問題になると思います。先ほどのイベリア半島のブラックアウトでも高い周波数の振動の発生が前段にあったわけですが、このようにインバータ連系機器が増加すると思わぬ現象が生じる懸念があります。この問題を丁寧に解くためには究極的には瞬時値解析まで必要だと思いますが、一方で瞬時値解析の計算負荷はさらに高いため、瞬時値解析まで含めた詳細モデルで様々な系統現象について、不確実性を考えた様々な検討断面に対して計算するのは現実的かという課題もあります。

瞬時値解析

こちらは、瞬時値解析のもう少し細かいところを書いたページです。パワエレ機器の開発、またそのパワエレ機器を取り込んだ系統大のシミュレーションの重要性が高まっています。計算時間が課題で、高速化の様々な工夫についても同時に検討は進んでいますが、モデルが大規模でかつ詳細になると適切な初期値を与えることが困難になるという部分もあります。パラメータ初期値の決定手法が見えないまま進めていくと、却って現実から離れたシミュレーション結果になるリスクもあると理解しており、本当に瞬時値解析が必要な状況あるいはケースを事前に絞り込むことがとても大事だと感じています。

瞬時値解析と実効値解析の比較

こちらは 2016 年のオーストラリアのブラックアウト発生時の波形を例に、瞬時値解析と実効値解析の比較の事例を示したものです。このブラックアウトのときは非常に気象条件が悪く、雷が頻発して、繰り返しの落雷でだんだん風力発電の出力が低下しました。落雷による瞬時電圧低下に引きずられて無効電力の応答がどう変わるか示したグラフでは、1 個 1 個の応答が実効値解析では高く出るのに対し、瞬時値解析ではもう少し低い応答になります。精度という意味ではだいぶ差があるのだけれど、どういう現象に対してどこまでやればいいのかの判断は非常に難しいと思います。

瞬時値解析の並列計算による高速化

次の事例は、瞬時値解析による系統のシミュレーションの計算時間です。下の表はいろんな国の系統での解析の例を並べており、例えばその実世界での 30 秒間の現象のシミュレーションに 1 時間半から 3 時間 15 分の計算時間かかるということで、しっかり作り込むと大変な計算になる事例です。計算の高速化を図るために、並列計算が適用されています。系統規模に応じて並列数もまちまちですが、並列計算でうまく処理すると計算はだいぶ速くなるのですが、その上でこういう計算時間であるということです。次は参考ということで並列計算による高速化のテクニックの一つです。関心ある方は、個別にお知らせください。

機械学習/AI の潮流計算への応用

こういった解析の難しさが増す一方で、機械学習の活用により計算を高速化する事例も最近数多くあります。こちらは私どもの研究の機械学習による確率的潮流計算の事例です。普通の潮流計算では非線形方程式を繰り返し計算で解くことが必要で、大規模な系統モデルになると計算時間がかかってくるわけですが、それを機械学習でモデルを作り込むと、作るときに時間はかかりますが、1 回作ればその後は非常に速やかに答えが出ます。左下の計算時間や精度の比較のグラフでは、4%ぐらいの計算時間でほとんど同じ精度の答えが出ることを示しています。系統構成が変わると、新しくモデル作成が必要なケースもありますが、そういった系統切り替えに対してもロバストな手法が進化していますので、潮流計算はこの AI の応用で完全に代替できるようにこれから変わっていくと期待します。また系統の様々な安定性を判断するときに、例えば実際の系統運用においてある送電線にどれだけ電力を流していいかという、冒頭河辺先生お話されていたのと同じですが、そういう運用容量を計算するときには、ある送電線での事故時の安定性を計算する必要があります。その中で特に同期安定性はだいぶ時間がかかる計算でしたが、最近ではうまくスクリーニングすることで、高い精度で安定に送れる限度の答えが見えてくるという研究事例が増えています。特に、explainable AI の適用により、安定か不安定かの要因分析も結果に付与できる手法が進化していると感じています。理由付きの安定判別が機械学習でできるようになると、説明責任を果たせる分析となり、系統の実運用や市場の設計など、様々な応用が可能になると感じています。

人材育成

ざっくりと系統解析のお話をさせていただきましたが、私の思うこととしては、解析対象が大規模かつ複雑になり、真剣にやろうとすると、いかに解析技術が高まっても限度があると思います。古くから言っていることと同じことを言って大変恐縮ですが、これからの系統解析をしっかり進めていくためには、電力系統からパワエレという幅広い知識を持ち、ある現象にどういうモデルや解析手法が必要なのかを見極められる人材が必要で、その育成をしっかりやる必要があると思います。あとは、進展の速い機械学習については、実運用や市場設計の分析の中に取り込んでいく必要があると思っています。私からは以上です。ありがとうございました。

講演 5 電力市場（東京理科大学・山口順之）

（司会）

辻先生、ありがとうございました。それでは講演の部の最後になりますが、最後のご講演は、電力市場分野のキー技術とキーシステム技術ということで、東京理科大学の電気工学科の山口順之先生です。山口先生お願いします。

（山口順之）

本日の内容

はい。皆さんこんにちは。前半の最後の講演になります。私は東京理科大学で大学の教員をしております、名前は「やまぐちのぶゆき」と読み、研究分野は電力システム工学です。水素、オフィスビルのエネルギーマネジメント、電力市場、デマンドレスポンスなど、気の散ったまとまらない研究、ではなく幅広い研究をしています。

私の今回のテーマは、電力市場の分野での技術ということですが、IT システムなどの工学的な技術ではなく、もう少し幅広く、本シンポジウム、本プロジェクトの大きなテーマである社会や需要家の変容の方向性についてお話します。

3E と 5 つの項目

スライドの上の部分は国の委員会の資料から持ってきた「これからの電力システムが目指すべき方向性」で、安定供給、脱炭素化、それから価格の維持というか安定的な価格水準で電力を供給するということで 3E の方向性は変わらないということです。それを踏まえて私の本講演での意見も、初めに言ってしまいましたが、工学的な集まりだと思いますので、技術の進展によって達の先輩の先生方や研究者が達成できなかったことが、私のような不肖な弟子でもどうにかなる世の中になるということで、お話したい五つの項目を挙げました。これは私の本当に単なる意見です。まずは、情報公開をちゃんとするということです。情報公開をすると何がいいのかというと、市場参加者が増えて良くなるということです。もう一つは市場の関心も、今の市場はとても複雑ですが、話をしなくても良くなる、しなくても良いということはないと思うのですが、負担が減るのではないかということです。

また、市場参加者が増えれば、市場の寡占率が下がり、競争も進んで安定な価格水準での電力供給も達成できる。また市場のルールとか制度設計については、監視も重要ですが、そもそも市場をちゃんと作ることも重要なことです。皆さんご案内の通り、海外では早くから電力を自由化し、市場も作っています。日本でも 2005 年に JEPX できてから 20 年経っていますが、これでもう満足な市場で、もう直す必要もないのかというと、今まさにそうではなくて、エネルギー問題がどんどん変容していますので、それに対応していかなければならないと思います。このような情報公開が進んで、市場監視もちゃんとできるようになって、市場参加者も増えて市場のルールも適切に更新されて改正されていくと、長期的な設備投資もやりやすくなるのかも知れないのですが、やはり不確実性が残っていって、それで困りましたねとか、誰か偉い人が何か決めてくださいということではなくて、リスクを定量化して、そのリスクのプレミアムをちゃんと評価して取引する仕組みを作って、長期的な電源設備の形成とうか、設備投資をして、安定供給ができればいいというのが私の意見です。

一つ目：情報公開

ここまで言うと私の言いたいことは基本的には終わりですが、1 項目ずつお話します。まず情報公開です。私も普段小売事業者をどう選ぶか、家内やいろんな人に聞かれますが、「わかりません」と言っています。料金メニューも構造が異なり仕組みの比較が難く、頑張ればわかるかもしれませんが簡単ではありません。電気は目に見えないので、電気そのものを欲しがる人はいませんし，電力契約をして額に入れて壁に飾る

人はほとんどいません。電気を使って様々な機器を動かすために電気が必要なのです。そういう意味で電気そのものの価値が良くわからず，契約は難しいと思います。あとバーゲン期間があると難しい。あとは自分の需要の要因分析というか、「こういう行動を変えると電気料金を節約できますよ」ということは一般論ではわかるのですけども、自分の家どうかはわかりません。山口先生に聞きに行けばいいのでしょうか？自分の需要は全体とは違います。それで、情報を判断する能力を高める必要があり、こういったことはデータ分析でわかるようになります。ループさんも、新しいメニューをお客さんにもいいとわかってもらい契約するためには、お客さんにもわかりやすくまともな分析を提供する必要がある。そこが、情報公開によって進むと思います。ネットワーク情報は、送電混雑とかでいろんな価格に影響するので、知りたいと思うのですが、今一般送配電事業者様の Web サイトでネットワーク情報はかなり公開されていますが、ビッグデータとは少しと違うのかもしれませんが、膨大なデータで内容もあるものですので、数値にはそれぞれ意味があるのでそれをちゃんと理解して、例えば潮流計算など辻先生のツールをつかって分析しようと思っても簡単ではありません。今、取引所はいろいろなデータかなり公開しています。JDX では需要曲線や供給曲線も出ていて、私が若い頃はこれらの値がわからない状況でしたが、今は変わってきています。でも全てではないので公開すると取引が進むと思います。あとは、価格がわかると、セクターカップリングとして他の技術との比較ができ、例えば EV の充電や V2G をどう運用するかも、運用や設備投資に影響を与え、水素の使用の判断の材料になるなど、価格わかれば設備投資が見えてくると考えています。

二つ目：市場監視

二つ目の市場監視です。市場がとても複雑になります。相対取引、スポット市場、時間前市場、インバランス市場、需給調整市場、ベースロード市場、先渡し市場、長期脱炭素電源オークション、容量市場などがあり、全部揃えてオリエンテーションを聞かなければ、全部揃えればいいのか何なのか、難しい状況です。その他にも先物取引があります。東京証券商品取引所、ICE、EEX などがありますね。先ほどの公開の資料はありますが、相互の市場取引には為替を始めとしていろいろな要素が相互に影響しており、電力の分野でも解釈が難しく、最適な価格を考えて最適化することも難しい。最適とは何なのかという議論も難しいのですが、それを決めたとしても最適化が難しい。

議論されている同時市場もちゃんと作られるのでしょうが、私のような素人には理屈は分かるけれども実際に作るのは大変だろうと思います。電力系統の運用・制御に必要な商品が用意されないと取引できず，運用・制御に必要な制御量は調達できません。こういう複雑な市場の監視はもっと複雑ですので、技術革新が起きて監視しなくてもいいようになれば、市場参加者が悪者と疑われるようなことがなくなって良いのではないかと思います。市場監視は悪者を見つけるためではなくて、フェアプレーを行うための土台で、スポーツの審判と一緒です。情報公開が進み、分析・解析ツールがすぐに用意され、みんなが市場を見るようになれば、監視の負担も減ることが期待され、希望します。それに重要なのは市場のルールや商品を丁寧に設計して、対応が難しいガイドラインを作ってしまうと、監視も難しくなると思います。情報公開による市場監視ができるといいと思います。

三つ目：スマートグリッドビジネス、品質別供給

三つ目です。何といっても、分散型の資源をこれから活用し、市場参加者を増やすことです。経済主体というか、人や会社を増やすこともそうなのですが、そもそものリソースを増やさないと、全体で効率的に資源を活用したいと思います。技術を実現することを「スマートグリッドビジネス」と少し乱暴にまとめましたが、通信、電力需給、ネットワークなどをうまく管理して使っていくのが技術の見せどころだと思います。あと需要家側も技術をどんどん投入していって、自分のエネルギー調達のコストを下げ、いろいろな使い方をしてメリットを上げていくのですが、そうすることで需要家側が選択肢を持ち、さらにスマートメーターのスイッチング機能で契約口別の入り切りできるようになれば、品質別の電力供給ができるようなります。電源との契約がない需要は切ってしまうということです。電気は普段の生活で使う公共的なもので、人命に関わることですので、その供給がなくなるのはとんでもないことですが、必要な設備は需要家側で設備投資をして賄うか、契約で送られてくるもので賄うかの判断ができるようになります。元々今時点でも非常用電源があります。そのイメージで考えて、需要家側に選択肢があれば、品質別電力供給も現実的に考えられ、小売事業者さんも単なる価格競争ではなく魅力ある商品を作ることができます。例えば、デマンドエスポンスのメニューをわかりやすく使いやすくするとかいろいろあって、これらがイノベーションであるということが言えると思います。

四つ目：市場ルールと商品設計

四つ目です。市場のルールや商品の設計です。電力は、貯蔵など流通における物理的制約が厳しく難

しいので、様々な複雑な市場のルールや商品が必要になります。今、電源の価値に対応した市場が設置され、卸電力市場では、電力量はスポット市場、kW 価値は容量市場、調整力、ΔkW は需給調整市場で取引されます。環境価値の非化石価値取引市場は飛ばします。一旦市場作ると、いろいろな取引のルールの深読み、ルールの裏をかくことが発生し、ルールの見直や、ガイドラインをどんどん分厚くすることになってしまいます。ただ必要なものは取引する必要があり、ルールを作り変更するのも必要です。ルール変更すると市場参加者はそれに振り回されて大変ですが、変なルールでみんなが我慢して使いづらい市場で取引が活性化されないことはよろしくないと思います。大幅な変更や微調整を継続することは必要だと思います。

五つ目:価値と取引の組み合わせ

今、電源等の価値の市場取引にはいろいろな問題がありますが、問題は裏を返せばニーズですので、価値をちゃんと取引できるようになれば、問題は解決すると思います。例えば、1 つ目の価値では、従来型の火力発電所は化石燃料を燃やして CO2 が出ますが各種の調整能力を持っており、需給調整、電圧・無効電力制御、慣性の提供など重要な役割を担っています。ですが、今の市場ではそれらに関係なくエネルギー(kWh)を取引していることになっており、これらが十分評価されていません。それを差し引いても、例えばネガティブプライスとは困るのでエネルギー取引だけでも価格の底で決めて欲しいとか、最小の起動時間や運転継続時間の制約など技術的な制約の考慮も必要だと言われています。再エネは、運用時には CO2 を出さないけれども、システム統合の費用はどう考えるか。電池はですね、あの需給調整容量に貢献するけれども、今の需給調整市場の価格は適正なのか。そういったいろいろな問題があるわけです。

これらの問題に対して、次のスライドにあるように、いろんな市場を組み合わせて解決することもできるのではないか。市場の組み合わせ以外も書いていますが、極端な価格を作ってもそれがその商品の最終的な価値なのでそれでいいのではないかと考えます。例えば、スポット市場がネガティブプライスになって損しても、需給調整市場での高値で取り返したらトータルで価値評価したことになるのではないかとかです。あと市場の組み合わせと関係ないことも書いてありますが、解決できることも多いと思います。

限界費用ゼロ時代の市場と電源確保

今後は再エネが増えてくると燃料費がなく限界費用がゼロになり、短期市場の価格が 0 になり、今後重要になるのが設備投資の市場だと思います。原価を査定して国が認める形から、リスクプレミアムを資本市場で評価する仕組みを作ることが必要だと思います。政府にも制御できない不確実性はあり、IEA の電力市場設計という報告書でも出たように、資本市場のテナーギャップ、歌を歌うときの高い声のテノールではなくて、満期とかの金融の期間のことを言うらしいのですが、それを市場では数年先までしか取引できないのに対し電源は 40 年使うものでそこにギャップがあるということで。このため、資本市場では数年以上に長い価値を扱うのは難しく、取引できず、流動性が下がることを表しています。それは国が長期の投資をしようと言っても、国だって失敗するかもしれないので、それをどう解釈することなかなか難しいと思います。今後再エネも入ってきて、人口は減るけれど、データセンターとか新しい技術ができて、需要が伸びる可能性があり、需要の増減の方向性がわからない状況で、電源投資は難しくなると思います。

ということで、時間になりましたので、私はこの 5 項目を主張して終わりたいと思います。ありがとうございました。

(司会)

山口順之先生ありがとうございました。ご講演の皆様が時間を守っていただいたのでオンスケジュールで来ております。後半のパネルディスカッションは予定通り 15:20 に開始します。

それから、受付にアンケートの用紙がありますので書いていただければと思います。また、今日共同開催の日本工学アカデミーのパンフレットも置いておりますので、参加してみようという方はぜひご連絡いただくようお願いします。また、意見交換会に参加の返事をしていただいた方で、参加費を払っておられない方は、受付の方までお願いします。

パネル討論 1 キー技術とキーシステム技術

進め方

(廬立(以下モデレータ1))

パネルディスカッション 1 を開始します。お話ありましたように、去年 4 月 15 日にシンポジウムを開催しました。 そのときに皆様からたくさんのご意見、コメントいただきありがとうございました。 前回は、「興味深い

内容であった」、あるいは「技術がよく理解できた」など、非常によかったという意見頂戴しましたが、「新しい発想も聞きたかった」、あるいは「電力あるいは小売やその他の産業、ガスを加えたエネルギー全体をトータルで管理するシステムのお話を聞きたい」とか、「社会システム、制度側への提言具を聞きたい」というお話もございました。 冒頭荻本先生からありましたけども、政策提言につきましては次回のシンポジウムで報告する予定ですのでそちらに譲るとして、今日は政策提言に繋がるネタの深掘りについて、各先生方からお話いただきたいと思っています。テーマは「移行的」となっていますが、移行の先にある変革をもたらす技術、あるいは社会システム論からの提言、あるいはそれを実現するために何が必要かについて深掘りするお話をいただくことを先生方にはお願いしました。電力系統あるいはエネルギーシステムのご専門の先生方から、抜本的な変化の可能性を捉えた技術とか制度について、無茶ぶりしているところもありますが、1人 3 分でお願いします。

人材育成

（参加者１）

私からは、すでに始めた取り組みについてお話させていただきます。先ほど辻先生が大変素晴らしいお話をしていただき、電力系統の姿を適切に想定できる人材の育成、コミュニケーションが大事であり、必要なコミュニケーションが十分とれてないのが現状だと感じています。そこで、NEDO のプロジェクトの中で「SHIN 系統」というロゴを作って、ある意味サークル活動を始めたところです。基本的には、将来の電力システムの計画・運用を支える人材、その根幹にあるのは系統解析技術だと思っています。では次に何をやるかですが、まず将来の姿を想定して、何が必要なのかについて共通認識を作ろうと思います。今電力分野に入る若手がだんだん減ってきているという話があります。同期機に基づく電力システムを牽引してきた研究者、技術者の方々がおられる間に若手をどんどんと入れ、考え方を伝承していくという趣旨で始めました。電力システムの将来をきちんと想定して、現状色々な取り組みがありますが、何ができてないのかを見出してギャップを埋める取り組みが必要と考えました。現在 300 人強の活動になっています。この方々といろいろコミュニケーション取りながら、やるべきこととできていないことを軸に、セミナーの開催や、オンライン配信の動画作成と公開などに取り組んでいます。特に電力システムの研究には、系統のモデルが必要で、それに関わるデータがあれば研究がやりやすいという声があります。いろいろ作って公開し、皆さんに自由に使っていただき、その結果を公開してもらう形で、コミュニケーションが進む取り組みを作っていきたいと思っています。

後のスライドはおまけですが、将来何が必要かを特定するために、「コンパス」、「曼荼羅」の形でまとめたものです。今日先生方が話されたことは大体入っていると思っています。上部の送電、下部の配電が対象領域、左側が技術の領域で、右側が制度の領域です。 制度をちゃんと作り、いろんな道具を使ってシミュレーションすること、そのためのモデルが必要であるなど記載している一つ一つが重要であることをまとめています。 ホームページをつくり情報発信し、さらに、解析検討などいろいろやったことを GitHub 上に公開をしています。こうした取り組みよってこれから新しく始める人のハードルを下げるとか、コミュニケーションを推進し、ベクトルを合わせモーメンタムを大きくしていきたいと考えています。

（モデレータ１）

ありがとうございました。では続きまして参加者2、よろしくお願いします。

実効値/瞬時値解析

（参加者２）

私の方からは技術的には非常に狭い範囲になりますが、再エネの主力電源化に向けて、電力系統の電気回路としての物理的な安定性の解析分野において重要なキー技術である実効値解析と瞬時値解析の連携は早々に取り組むべき分野であると思っています。 その中でこの第一歩としてインバータ電源の系統接続計画という、計画段階の取り組みに取りかかるのがいいと思っています。 まずは接続安定性の指標、静的と動的を組み合わせて拡張するのがいいと思っています。静的指標は下の表のとおりこれまでの一般的な短絡容量ベースの指標になります。それに追加して動的指標は、接続を計画するインバータの制御と系統の相互作用を考慮しています。

海外では Sub Synchronous Oscillation (SSO)が起きており、それらに特化した指標の追加になります。これらについては表の中に「特徴」がありますが、最近は実効値解析においても安定性が表現できるモデルが登場しています。 次のスライドをお願いします。指標の活用としては、静的指標が弱い地点については

動的指標を評価して瞬時値解析が必要かどうかを判断する。この図の左側は静的指標が強く（短絡容量が大きい）右側は弱い状況において、ここで示しているのはこの動的指標として右側の図の中の波形「マゼンダ色の REGGC」が非常に不安定な様相で、この条件では瞬時値解析の結果の波形「EMT」も不安定ではないがかなり振動的になっていて、制御パラメータの調整の必要性が示されている例です。

次は、瞬時値解析から実効値解析へのフィードバックです。瞬時値解析で結構不安定な状況を、制御パラメータを適切に調整して良好な応答を実現したとします。今度は、その設定を実効値解析のモデルに戻すことによって、瞬時値解析では扱えないより大規模で広い範囲を対象とする安定性解析に使えると思っています。 下の図はその事例で、これはかなり故障継続時間が長い三相故障発生時の状態で、実効値と瞬時値の二つの解析の結果は完全に一致していませんが、大まかな傾向を掴んでいます。このように、瞬時解析と実効値解析の連携が行われ新たな安定性の検討が一巡すると思っています。以上です。

エネルギー需給シナリオ

（モデレータ１）

ありがとうございました。続きまして、参加者3、よろしくお願いいたします。

（参加者３）

私からは、冒頭の無茶ぶりへの話題提供として、エネルギーシステムの将来像を紹介させていただきます。現在、中東情勢の不確実性が大変高まり、原油がほとんど入ってこない状況を踏まえ、エネルギー自給率 100%を実現するエネルギーシステムを、東京大学藤井・小宮山研究室で開発している最適化型エネルギー技術選択モデルでシミュレーションを行い、その中での電力の役割を分析しました。 前提条件としては、化石燃料、いわゆるブルー水素やグリーン水素アンモニアの海外からの輸入をゼロとして、国産エネルギーである再生可能エネルギーと原子力で供給した場合のエネルギーの構成の将来像をシミュレーションしました。

この前提条件を置くと、中央の日本の電力需要は今日の 1 兆 kWh に対し 3 兆 kWh まで拡大し、左側の最終エネルギー消費は黄色の電力需要が大体 1.6 兆 kWh、残りの 1.4 兆 kWh が合成石油それからメタネーションと呼ばれる合成ガスの生産、そして合成燃料を製造するため必要な炭素を大気中から回収するダイレクトエアキャプチャー(DAC)に使われる。そうすれば日本全体でエネルギー自給率 100%実現できるという結果です。 ですので、新たな見方としては電化を通じてエネルギー安全保障を強化する方向性もあり、そういう解釈もあり得るのではないかと。これはあくまで極端なシミュレーションですが、徐々に電力化率を引き上げ、原子力や再生可能エネルギーの供給も引き上げて、日本のエネルギー安全保障を強化する視点も必要であると認識しています。この数字を見ると、原子力の必要容量は、純粋に最適化すると 3 億 kW となり、現在の世界全体の原子力は 4 億 kW に対し、大変大量の原子炉が必要になります。仮にアメリカ並みの原子力設備容量 1 億 kW を上限として最適化すると、代わりに太陽光は現在の大体 1 億 kW に対し、18 億 kW が必要となり、これが実現可能かどうかはいろいろ議論があると思いますが、シミュレーションではこれぐらいのボリューム感です。 これはもう化石燃料を利用しませんので、CO2 排出量ゼロ、エネルギー自給率も 100%、一つの理想像のシナリオと認識しております。以上です

電力市場

（モデレータ１）

ありがとうございました。それでは参加者4、お願いいたします。

（参加者４）

私からは、電気事業に市場原理を導入する規制改革を継続的に見てきた視点での気づきを共有させて頂きます。その取り組みが今転機に直面していると思っています。その背景は、エネルギー基本計画にも書かれている GX/DX の進展に伴う電力需要の増加の見通しです。 電力需要はかつて右肩上がりで伸びた時代があり、この時代は特定の事業者に供給責任を課して、加えて法的独占あるいは総括原価と呼ぶ制度の裏打ちにより投資回収の予見性を確保していました。これに対し 2000 年に小売の部分自由化が始まり、それ以降は、供給責任は基本的に誰も持たず、市場のシグナルに基づく投資判断で必要な設備は維持されるという物語でした。ですがその後の状況を見ると、電力需給がタイトになり、結果的に、言い方は悪いのですが、遺産を食いつぶしただけになったのが実態です。その中で電力需要が伸びる可能性があるという話になり、さてどうしようかというのが今の状況だと思っています。これは日本だけではなく、欧米

も同じ状況になっていると理解しています。その中で国はエネルギー需給について、力強くとにかく万全を期す、電力が不足することで成長機会を失ってはいけないとしています。

昨年末に IEA が公表した「電力市場設計」報告書で的確に表現されていますが、電力市場には 2 種類あり、一つは短期市場で、時事刻々値段が変わり、市場価格を通じてリアルタイムに電力システム運用を最適化します。もう一つは中長期市場で、短期市場の変動リスクをヘッジし、それを通じて投資家の資金調達を支えるというか投資回収の指標となるとされています。報告書で IEA が認識している現在地は、短期の市場は、変動性再エネが増えることによる課題はあるものの概ね期待したとおり機能しているが、中長期市場は期待外れで、過小投資というか投資がしにくい状況になってしまっていることが指摘されています。 3 枚目のスライドで、その理由とそれに対して何をすればいいかを書いていますが、時間も超えていると思うので、あとで戻りたいと思っています。私はとりあえずここまでにさせてください。

送配電の課題と人材確保

（モデレータ１）

ありがとうございました。それでは参加者5、よろしくお願します。

（参加者５）

先ほどの講演にもありました通り、現在いろんな変化が起こっています。分散+自然変動電源の増加により非同期機による電源がより増えるなど、電源リソースが変わることで、電気の流れも一方向から双方向に変わり、元々前提としていない潮流が流れるために、送配電網の容量が不足する「混雑」も発生するということです。需給についても、中央監視による方法から市場による調整へ、エリアから全国、蓄電によるタイムシフトみたいな技術も含めていくということです。

エネルギー基本計画では 2040 年に原子力 2 割で再エネが 4～5 割とされています。この状況を理解するため、再エネ 4 割の例として南オーストラリアの実際の需給カーブをお示しします。オレンジの太陽光は、瞬間的には 90%を超えていて、最大需要が 450 万 kW の系統規模に対し、残余需要が 38 万 kW となるこの状況の日があって、これで再エネ比率がようやく年間 4 割ぐらいとなります。日本の場合は、これに原子力が 2 割ベースで入りさらに再エネ比率を高めるのに厳しい状況で日々運用することになります。

講演でもいろいろありましたように、再エネが増える、インバータ電源が増えると、いろんな問題が起こってきます。スライドには課題をいろいろ書いておりますが、海外では 2016 年の南オーストラリアの大停電、2025 年のイベリアの停電が発生しました。中ほどに書いてある相互干渉、電圧異常、電圧振動、共振フリッカなど、今まで有効電力を中心とした系統慣性を含めた課題に対し、電圧・無効電力についてもしっかりと考え、シミュレーションをして、対策を立て、指標を決め常時監視するなどの対策が、今後必要になってくると思っております。

調整力の供給についても、同期発電機の稼働が今より少なくなるため、分散電源や需要を含めて系統の全体の情報を合わせて双方向でデータをやり取りし全体最適の活用をし、需給一致と電圧維持などを行う必要がある、そのためには、双方向で情報をやり取りする環境、基盤、基準を作るなど、いろいろなことが必要になると思っています。

少し話が変わり、一方で日本では労働者が減る状況です。今申し上げた新しい技術がますます入ってくるわけですが、今ある送配電インフラを維持し続けるにあたり、今現場で働いておられる方も、半分は 50 歳以上という状況で、後継者を早急に育成し確保し続けることが必要です。

この分野では、山に登って鉄塔に登るとか非常にきつい仕事も現在多くあります。データを使って設備の維持コストや人間の負担を下げていく、それからロボットやドローンなどを使い、労働環境を改善し、少ない人でも仕事ができるようにしてゆく技術開発も必要になると思っております。以上です。

大停電・解析とデータ

（モデレータ１）

短い 3 分の中で皆様から課題を提起いただき、ありがとうございました。 最初に制度の話をしてしまうと、多分それで終わってしまうので、最初は技術の辺りから議論させていただきます。前回のシンポでは、荻本先生から南オーストラリアの大停電の事例を紹介いただき会場からはもう少し詳しい話を聞きたいと要望がありました。そこから得られる示唆などあればまずお願いたいと思います

（参加者５）

先ほど 2 ページで少しお見せしましたけれども、オーストラリアは大陸ですが真ん中砂漠ですから、海沿いに細長い電力系統になっていて太陽光が集中しているところと風力が集中しているところがあり、日本の系統と少し似ているところがあります。 ここでは電圧振動などいろいろな問題が発生しており、蓄電池をかなり導入し、ルーフトップの太陽光までも出力を抑制し、それらのためにグリッドコードを整備し、解析面、日常の監視など、いろいろな対策を入れていて、本当に多くの対策を計画的に進めているところがあります。

（モデレータ１）

ありがとうございます。その辺で知見がお持ちであれば。参加者2、いかがでしょうか？

（参加者２）

オーストラリアエリアでいうと、先ほど出てきました南オーストラリアでは風力が結構メインで、大きなウインドファームに蓄電池をつけて、そのインバータにはグリッドフォーミング型もあり、電気料金の差額でさらには周波数制御のアンシラリーサービスから定常的な収入があります。何といってもウインドファームの発電事業者が蓄電池持っていて事業者は結構儲かるところが日本とは違い、そういうところもきちんと見ていく必要があると思っています。

（参加者５）

システムストレングス、システムの電気的な強さをしっかり管理・監視して、それが弱いところへの連系する事業者には電圧補償対策もしくはその費用負担を義務付けるといったことを始めています。日本もいずれそういう時代に入ってきますから、それらを実施する準備を進めることも大事だと思っています。

（モデレータ１）

PL から、他に米国の事例とか、課題先進国の事例があれば、ご紹介をお願いできますでしょうか。

（PL）

今ここで言うとすると、オーストラリアではなくて、去年のイベリア停電があります。一応最終報告書が出て電圧が問題だということになっていますが、何が順番に起こってきたかはよくわかったのだけれど何が根本原因なのかがよくわからない、いろいろ重なって発生したのだろうとされています。これから我々が学べることは、ヨーロッパ今回の事故の分析を実施できたような分析ができるデータが取れるのかという点だと思います。いろいろ机上で計画しても落ちはあります。やはりデータが基になります。一つは PMU、送電網の多数地点の電圧の大きさと移送を測るシステムが海外では導入が進んでいます。日本も導入は考えられていると思いますが、ポイントは、そこから非常に大量のデータが提供されるので、いろんな人がいろんな視点でいろんなそのスキルでチャレンジできるように、そのデータが蓄積されて公開されるのは一体いつになるのかと、私は強く感じています。 人材育成、技術開発に関係するし、設備計画や毎日の運用にも関係するデータにいろんな人がチャレンジできる環境を完成するが、今必要になることだと思います。

（モデレータ１）

国家安全保障データの解析の視点から問題となることはありますでしょうか？

（PL）

公開されたデータによる問題を言うともう何でもそうなってしまいますが、知らないうちに技術的な課題が悪化して大きな事象が発生することをどう対策するかの選択だと思います。安全保障という言葉が出るとちょっと難しい響きがあっていろんなことを頭の中で想像しがちですが、データを持たず・活用せず、設備形成に 10 年 20 年かかる電力分野で知らないうちに 20 年遅れたときのダメージはかなり大きいのだと思います。

分野間のコミュニケーション

（モデレータ１）

はい。どうもありがとうございます。 先ほど参加者2から二つの解析手法の連携が必要とのことでしたが、これを進める中で、障壁など何か課題はあるでしょうか？

（参加者２）

実効値解析をやっている人間と、瞬時値解析を使ってインバータを設計する人たちとのコミュニケーションが取れていない点だと思います。 系統解析としては「ここら辺とか知りたいのだけどどうなのか」という話

ですし、瞬時値解析がちゃんとハードウェアの特性をしっかり模擬しているという話がないと実効値解析にフィードバックできません。そのため瞬時値が本物に近い現象を模擬できていることを担保できるように、コミュニケーションできる場をつくる必要性をつくづく感じています。

瞬時値解析の活用の難しさをもう少しアピールしていくことになりますし、系統はスタビリティを担保しておかないとやっぱり、今の市場とか制度とかその設計に物理現象をちゃんと押さえて来れない、とかありますよね。そういう意味では、「縁の下の力持ち」という表現がありますが、解析ができる職人的な人を継続的に育てることが必要だと思っています。

（モデレータ１）

その瞬時値解析できる先生は世の中結構いるでしょうか。

（参加者２）

いると思います。ただその瞬時値解析やる方とその実効値解析をやる方の間に距離があります。もちろん時間領域、分解能、扱う物理現象などいろいろ異なる点もあるかもしれないですけど、そんなところをどうやって埋めていくかだと思います。

（モデレータ１）

ありがとうございます。技術に関しまして先ほど参加者1から網羅的なマップも出ましたが？

データの重要性とコミュニケーション

（参加者１）

瞬時値解析と実効値解析については辻先生もいろいろとお話されていました。ああいう解析手法を問題によって使い分けていくためには、両者のコラボが必要になると思いますので、距離感があるのなら何故か、どう埋めていけるかが大事です。それと PL がご指摘されたデータがやはり大事だと思います。例えばこの分野の議論が欧州やオーストラリアとかで進んでいるのは、データがあって、解析する人がそれを使えるから進むのか、それとも何か別の要因があるのか。日本ではまだデータは十分でないと本当に感じます。ある事象があったときに、それを解決すべきというメッセージを全体で共有することが必要だと思います。そういう意味で、コミュニケーションを進め、できてないことについてはテーマ化する。特に具体的な事象についてどの辺りがポイントなのかを含めて、個別のテーマに落とし、みんなでできる環境ができるといいと思っていて、その実現を目指して取り組んでおります。

制度についても議論をしますが、制度については決めるところがありますから、こういう活動でやるべきことは、エビデンスをきちんと作ることだと思います。定量的な解析に基づき効果を見極めて、制度を作る場に伝えることが様々な形、チャンネルでできるようになるといいと思います。

（モデレータ１）

ここで活動される先生方はどのような先生方なのでしょうか？

（参加者１）

実は皆さんに関与をしていただきたいわけです。例えば辻先生にはこれに関わるお話をすごく詳しくしていただいたのですが、この取り組みには辻先生は現状参加しておられません。

それは何でだっていう話になりますが、やはり皆忙しすぎ。本当に皆さんご多忙でいくつかの大学にもこれ関わっていただいているのですが、本当に皆さん時間がなくて、このような活動をやるのは大変です。なので、こういう私は「サークル活動」と言いましたが、まず皆さん本業がある中で、時間をどこかで割いて参加していただいているのが実情です。関係のある方々でベクトルをしっかり作ってそれを太くして、人材が持続的に生まれてくるようなコミュニティを形成したいのです。 だから皆さん関わる方に入っていただきたいのですが、それが十分にまだできておらず、すぐに改善するべきことと思っています。

中長期のアクションプラン

（モデレータ１）

電力系統、エネルギーシステム全般に関わるとすると、例えば経済学者などにも入ってもらうと、冒頭で PL が言われた中長期のアクションプランへの落とし込みにも繋がると思いますが、いかがでしょうか？

（参加者１）

全くそう思います。 本当に問題は広くて、系統がインバータ接続電源の増加の中で変わり新しい安定性など未解決の問題が出てきたところを踏まえて、小宮山先生が話された将来のそのエネルギーとか、あ

と山口先生も話された将来の電力需給のシナリオを作り、そのシナリオの断面で分析をする、そういうことを統合的に行う必要があります。活動状況はホームページで公開していますので、ご覧いただきたいと思います。

（モデレータ１）

ありがとうございます。技術からだいぶ外れてきました。この後、参加者4の話題、最後に会場からのご質問にもお答えできる時間をとりたいと思います。

短期/中長期のテナーギャップとスワップ契約

（参加者４）

先ほど理科大の山口先生が話された「テナーギャップ」を膨らませたいと思います。

中長期市場と短期市場の話をしていて、今の規制改革の枠組みは、「短期市場のリスクヘッジが中長期市場になり、それぞれ裁定が働く」前提になっています。しかしそれでは過小投資になる三つの理由があります。一つ目は「卸市場価格には政治的に上限が課される」こと、二つ目は「短期市場に停電の瀬戸際まで頼ることは物理的に担保しておらず短期市場の価格は十分に上がらない」こと、あと三つ目は「投資家の立場に立つと、過小投資と過大投資では過大投資がはるかに怖いので皆過小投資を選択する」ということです。したがって、短期市場と裁定が働く前提で中長期市場を作ると過小投資になることは、論理的に言えると思っています。

ではどうすればいいかについては PD2 の政策提言側の内容だと思うので、ここでは識者の発言で寸止めしておきます。ポール・ジョスコーというMITの先生で、公共経済学の分野でビッグネームの方によれば、「それぞれ裁定が働く短期市場、中長期市場の枠組みはもはや駄目で、それぞれ別にすべき」と言っています。ここで言っているところの統合資源ポートフォリオが、この方の政策提言になります。テナーギャップは、「小売り事業者はせいぜい 3 年後ぐらいまでの契約とかリスクヘッジをしたい」のに対し、「発電事業者は 15 年とかそれ以上の長期の契約を結んで欲しいと思っている」ギャップをどうするかという話です。 IEA のレポートでは、「原油市場などは、投機筋が参入することによって市場に厚みが確保されている」と言っています。確かに原油市場は厚いのですが、5 年先を超える取引になると全然厚みがないのが実態で、電力市場の場合は、投機筋に期待しても解決策にならないわけです。IEA のレポートの政策提言でも「テナーギャップの対策を検討する」としか記載がなく、何も答えていません。それでも答えになりうるかなと思ったのが、オーストラリアの取り組みです。発電市場を発電事業者と小売事業者の間に別の契約主体を介在させ、発電事業者と15年契約を締結する一方で、その締結した契約を例えば3年ごとの短期契約に分解した上で小売事業者と契約するというものです。すなわちその間に入る主体は、長期契約と短期契約のスワップをしています。そのスワップリスクは、先ほどの原油市場の例でいうと民間では手に負えないのでこの契約主体は公的な存在にならざるを得ないと思います。もちろん民間にできることは民間で、が望ましいのですが、現実がついていかないことを重く見た方がいいと思っています。IEA も同じ認識であろうと思います。以上であります。

ネガティブプライス

（モデレータ１）

ありがとうございます。今のご発言に関連して、先ほど火力について、裁定運転にしたいとかネガティブプライスの話がありましたけども、これらは国が決めて、それを市場で任せるイメージになるのでしょうか。

（参加者４）

私自身はネガティブプライスは嫌いです。それはさて置いて好きか嫌いかではない意見を言いますと、効用がゼロあるいはマイナスの電力需要とは何かという話で、経済学の世界で言えば効用がマイナスの需要は基本的にシステム全体の効率を損なうものです。例外は、捨てるのにお金がかかる財の場合ですが、太陽光発電の電気は遠隔操作すればただで捨てることができるので、あてはまりません。マイナスの値段までつけて、電気を捨てないように経済学者が主張するのはおかしいと私は思っています。さらに、現実的な話として発電事業者の経営にネガティブな影響が大きいという問題があります。発電事業者がこうしたリスクから切り離されるなら、デマンドレスポンスなど需要側の応答を促進するためにネガティブプライスを導入するのはあってもよいかと思います。ということで、ネガティブプライスはあまり好きではないが、導入する可能性もあると思っています。

（モデレータ１）

パネルの 2 で長期投資の話が出てきますので、そこに関連すると思って伺いました。ありがとうございま

す。

ここからは持論もあって、以前電気学会でもお話したのですが、経済性、安定供給、脱炭素の 3 つの E のバランスのとり方は、多分環境によって大きく変わってきています。日本はどちらかというと、すぐ片方に寄ってしまうところもあって、また元に戻すのに時間かかる事情があります。

参加者4さんにお伺いするのがいいと思いますが、「公益」のあり方、私はいま公益財団にいますけども、市場と政策の役割分担の話などは、電気という商品の特性を考えると、公益の視点の軸で整理する必要もあると思います。 例えば医療と同じで、電気はなくせない、絶対欠品ができないものです。例えば、首都圏直下地震など大きな災害起きたときに電力はすぐ復旧しなければならないのですが、電力の復旧が早期に復旧できたときの経済損失の減額の費用が算出できるのであれば、その費用で、例えば電力システムをより強靭にしておけば、より早く復旧できます。国は将来の投資として、核融合には多くの予算をつけたようですけども、公益の視点から電力システムに国が予算を支援してもよいのではないかと思うのですが、いかがですか。

（参加者４）

公益事業とは、公共の利益に致命的に影響する事業のことで、電気は当然公益事業に入ります。その上で、PD2 の範囲に少し踏み込みます。現在の電力システムは、ネットワークは規模の経済があるからみんなで仲良く使う、発電についてはみんなそれぞれ自由に参入して競争するという制度になっています。しかし、先行き見えない中で皆が発電投資に尻込みしている今の状況を考えると、もはや発電事業者も競争領域でない方がいいのではないかと思っています。すなわち、ここに書いてある「統合資源ポートフォリオに沿った投資を誘引する長期契約向けの独立市場」を政府が主催することになります。現実的な判断として、民間金融が市場原理で判断して投資をして公益にかなうシステムを構築することは、もうはや難しい時代になったと思います。もちろん民間主体を理想とすることを全く否定はしないのですが、今はあまりにも不確実性が大きいと思っています。

AI 適用への期待

（モデレータ１）

もう少し議論したいのですが、時間もありますので、ありがとうございました。最後に参加者3には先ほどのシミュレーションのところをお伺いますが、その前に参加者5に、生成 AI が進んできて電力でも入ってくると思っています。 フィジカル AI などはロボットの現場作業の適用により、イノベーションが起きて若い学生さんなどが電力会社に入社することも期待されるのではないかと思うのですが、電力系統やエネルギーシステムに対して、企業から見て、生成 AI に何が期待され、何が期待できないか私見でも構いませんのでご意見をいただきたいと思います。

（参加者５）

はい、ありがとうございます。生成 AI も機械学習を使った分析モデルもそうなのですが、これを電力システムのシステム運用に使うポテンシャルは大きいと思っていますが、一方で現場の人はすごく抵抗を感じるのでは、と思っています。それは、間違えたときに停電が発生することは絶対許されない考え方で仕事をしていて、医療の生成 AI 適用に似たところあると思います。一方で、例えば予測するモデルなどに説明性のあるモデルを採用していくという方法もありますし、AI が例えば事故時の復旧手順を支援として提示して人間が判断するなどの使い方もあり、最初はそういった分野から使われていくのではないかと思いますし、先ほどは高齢化の話をしましたが、ベテランがどんどん抜けていく中でベテランのノウハウというか、暗黙知がなくなっていく時代です。事故が起こったときの対応をベテランがどの順番でものを考えているのか、画面のどこから見て復旧しているのかとか、そういったことを学習させることができれば、ベテランの知を AI に置き換えることもできますので、このベテランがいなくなるこのタイミングで AI を入れていく、その中で暗黙知を明示化することは、意味があると私は思っています。ただその実現はまさにこれからです。

（モデレータ１）

ありがとうございます。将来、汎用人工知能、すなわち AGI が活躍することも期待されますが、電力会社における生成 AI は例えば電力系統の運用ではノウハウの関係もあり、会社の中で閉じてしまい、アカデミアの先生が活躍できる場は少ないのではないかと思いますが、いかがでしょうか。

（参加者５）

AI に学習されていってしまうというリスクをどう考えるか、例えば非公開情報をどこまで扱えるか、そういった情報の管理の視点があります。AI の適用による利便性と情報管理リスクとの兼ね合いの中で見出してい

くのだと思っています。

（モデレータ１）

そうですよね。先ほど PL から PMU の話もありましたけども、生成 AI の活用にあたっては入力するデータの整備が遅れているかもしれません。

（参加者５）

今電力会社にはいくつか大きなシステムがあるわけですが、昔の古い言語で書かれて独特なデータベースになっていて分断されています。 これらを集めて統合する基盤を作り、そうすることで初めて学習の俎上ができます。タイムスタンプのつけ方から合わせて初めて突き合わせができますし、そういうデータを整理するところから始める必要があります。長い道のりですが、コツコツやっていかないと変わらないので、そういう投資も考えていきたいと思っています。

将来の需給シミュレーション

（モデレータ１）

ありがとうございます。参加者3、先ほどプレゼンテーションありがとうございました。非常に思い切った前提条件でのシミュレーションで面白いと思ったのですが、今後どこまで進められる予定なのか、ご説明いただけますでしょうか？

（参加者３）

技術を積み上げてシミュレーションするシミュレータを使いましたが、実際は経済への影響もしっかり見ていかないといけない。例えば、エネルギーの供給は全て原子力と再生可能エネルギーということで、そのコストに関心があると思いますが、先ほどのシミュレータの結果でも、いわゆるカーボンニュートラルと大体同程度のコスト、カーボンプライシングでいうと 1tCO2 を減らすのにやっぱり 10 万円近くの負担感になります。このため経済への影響はそれ相応に大きい。 一方で、例えば原子力の場合はもう全て国産技術ですので投資は国内で資金が回るので、経済的な負荷の観点からは海外から技術を輸入するよりは一定程度軽減され、投資ですので GDP の底上げにも繋がります。例えば先ほど原子力に条件を付けた場合は太陽光発電 18 億 kW と出ていて、今は海外からの輸入にほぼ依存しているわけですが、今注目されているペロブスカイト、また洋上風力も注目されていて、国内でサプライチェーンを作りながら着実に育てていく道筋が描ければ、負担は一定程度軽減される可能性もあると思います。経済の観点から分析することが大事だと認識しています。

（モデレータ１）

そうですね、経済の指標の観点は非常に重要と思っています。太陽光発電の平地での設置は、日本は既に世界一の導入率ですので、実際あり得る制約条件を今後詰めることで、より現実的なシナリオになると思います。

（参加者３）

日本の中でも四国に全て太陽光発電を敷き詰めれば日本今 1 兆 kWh 程度はおそらく賄えると思うのですが、3 兆 kWh 必要だとすれば、実際起きる可能性もあると思います。ですが、太陽光発電に土地が占有されることで、土地の価格上昇、それは住宅価格など土地利用が経済に与える影響とか、その点をしっかり客観的に分析する視点は大切で、今後の課題と認識しています。

（モデレータ１）

パネリストの中で、参加者3に何かご質問などいかがでしょうか？

（参加者１）

この分析の中で、同期機がどれぐらいあるかの観点で検討されたことはありますか。

（参加者３）

こちらではあくまで、もう全て技術的に、例えば先ほどもあったグリッドフォーミングなどの技術開発がうまく普及したと仮定して、それらの技術的な制約条件は入れずにシミュレーションをしています。過去の検討では SNSP[51]のような一定程度は慣性力を確保する制約条件を考慮した場合では、一定の原子力や火力の同期機は動かす必要があるため、そのような場合は例えば太陽光の発電の出力を抑制するという考慮の仕方もあるとは思いますが、ここでは将来的にそうした技術的な課題も克服された前提条件で流してい

[51] Ireland が実施している変動再エネの率を一定以下に制限する運用制約

ます。しかしそうした視点も興味深い点であると認識しています。

（モデレータ１）

ありがとうございます。PL、何かございますか。

（PL）

はい。おそらく先ほど見たくらい原子力があれば、あの系統慣性の分は面倒を見ることができると思います。ピーク時に何兆 kW 出力できるかは、少し出力抑制されるかもしれないですけど、多くの時間帯は出力できると思います。このような課題を一つずつ議論して潰していくことでと、興味のある議論ができ、人も育ち、技術も育っていくと思います。 はい。 今いろいろ聞いていて、極端なことを考えて、次もどちらの方向に行けばいいかを複数考えられる、それがとてもよかったなと思いました。

（モデレータ１）

ありがとうございます。会場から何かご質問あれば、よろしくお願いします。手を挙げてらっしゃいます。マイクお持ちします。

フロア質問

（参加者６）

ご発表ありがとうございました。最後の同期機の話も含めて、今オーストラリアの図を見ると同期機の割合が 1 時間あたりのところで 10%ぐらいに見えました。日本でも今の技術でそれぐらい 10%とか、そういうオーダ感で考えていいのか、かなり難しいのか、その辺を教えてください。

（PL）

今の日本で 10%とその瞬間は調整することはできるかもしれませんが、そこで事故があったときに電圧や安定度が保たれているかどうかは別の話で、おそらく耐えられない状態だと思います。

（参加者６）

2030 や 2050 年ぐらいだとどうでしょうか。

（PL）

未来の話では、原子力が 20%だとすれば、オーストラリアでは違いますがやはり電圧の対策とかについて観測や指標もない状態で、送配電網のどこが強くてどこが弱いか、どこに何を入れる必要があるかと準備もできていない状態だと思います。そこを今から一生懸命対応していけば、間に合うかもしれませんし、間に合わないかもしれない状況です。何もせずこのまま再エネ比率だけが上がっていくともたないとので、そのためには何をしる必要があるかを海外に学びながら網羅的な対策を計画的に入れていくことが必要であろうと思っています。

（参加者６）

ありがとうございます。

（モデレータ１）

時間になりましたので会場からのご質問はここで終了します。本日はお忙しい中パネリストの先生方ありがとうございました。

パネル討論 2 電力システム変革の取り組みの方向性

進め方

（江村（以下モデレータ２））

パネルディスカッション 2 を始めたいと思います。よろしくお願いいたします。

このパネルディスカッションでは、電力システム変革の取り組みの方向性の議論を行います。最初のご発言は、座っている順ではなくて、皆様非常に多様な領域の方々ですので、専門の分野を考慮した順番で話していただきます。 ここで議論するポイントをまず説明します。最初に PL からもありましたけど電力システムに再生可能エネルギーが大量に導入されて次の世代の形に変える必要があり、その取り組みが始まったところなのですが、昨今の変化にはものすごいものがあって、AI がすごく進展してデータセンターがたくさんできて電力需要も変わってきていること、もう一つ米国のイラン攻撃により、先ほどは需給 100%にする議論がありましたが、地政学リスクが高まりエネルギーコストそのものが上昇し、国の産業競争力そのものに非常に影響を与えると状況になっています。そういう環境を考えたときに、電力システムの変革を今後どう

いう視点で考えていったらいいかを議論したいと思っています。

そういう意味で、電力・エネルギーシステムが意識すべき新しい世界、これは前回のシンポジウムのときも「電力×〇〇を意識しないといけない、だから電力の人だけが議論していて大丈夫でしょうか」と、私は分野外なのでそういう話をしました。その辺りの意識をどこまで持ってけるかを、ぜひ議論させて頂きたいと思っています。 今までの議論を聞いていると、やっぱり皆さん、自分たちの電力業界の中で議論しているという印象は相変わらず持っているので、その辺のところ、それからそういう電力の議論をするのはいいのですが、「なかなかことが起きないときに、誰がそれをやっていくのか」という主語である「リーダーシップ」、それから変革を実現するために押すべき「ボタン」、政策とか投資とか、先ほども人材の話ありましたけど、何を考えていかなきゃいけないのか。 それでもう一点が、PL がアクションプランということを言われました。要はどういう時間軸でやっていくのかを、ある程度皆さんで意識合わせしておかないと、政策提言しましたと言っても、数多くの政策提言が過去からずっと積まれているわけですが、結果としての変化があまり起きてないことに対してどうするのかとい点を、私としてはぜひ議論したいと思っています。パネリストの先生方には、最初 3 分間で自由に話して頂くようお願いしています。一通りお話を伺った後でどんな議論するかを考えたいと思います。

それでは最初に参加者7、お願いします。

需要の活用

（参加者７）

先ほどの論点を一応意識したつもりでしたが、資料作ったらあまり関係ない話になってしまったかなという気もしています。すみません。ただ、私は、今日のお話にもたくさんありました「需要を活用すべき」とずっとずっと言われているのですが、私も生産研に来て、実は PL と同じときからなので、18 年間ずっと需要の活用の研究をしてきましたが、進まない状態です。それで、一年前のシンポではここに示す論点でお話をさせていただきました。ただ、進まない理由としては、そもそも対象とする物がないこと、あとはそれをマネタイズ・管理することが十分なお金にならないこと、この二つが大きいと思います。お金にならない方は、市場とか、価格に値差がないとか言いたいことはたくさんあるのですが、技術的な基盤が必要であることを提案したいと思いました。一つ目は、機器制御の基盤ということで、今タイミングがいいのは、途中にもお話がありました DR Ready の機器が出てきていること、また機器を遠隔制御する API の仕組みがずいぶんこなれてきたので、それらをうまく使えばチビッ子で無数のリソースをうまく制御できる可能性が出てきたことです。そういう意味で、この 01 機器制御基盤が必要ではないか、それは価格や時刻別の CO2 などのシグナルを配信する仕組み、API 制御、DR Ready の三位一体で、機器が料金、系統側から来るインセンティブ、CO2 に自動反応する仕組みがまずは共通の基盤として作る必要があるのではないかということです。あと二つ目が、ストック把握基盤と書いたのですが、そもそも日本は、EV も PV すら、どこにあるのかが分からない。これらのリソースの台帳を作るべきですと結構国にも話してきたつもりなのですが、なかなかこれが進まない問題があります。最近やっと出てきたのが「経済 DR を把握しましょう」という話になって、「いや私そんなこと言ってないです」という話もしたばかりです。まずは制御するときに、どこに何があって、今どう動いているかの情報がまずないのではないか、こういうことをきちんと基盤として作る必要があると思います。こういう基盤作りについて、この一、二年できちんと方向性を決める必要があると思っています。三つ目は、日本ではスマートメーターのアクセスが大変です。使用料も高いし、使い勝手も悪い状態です。例えばアメリカでは、お客さんのデータをお客さんの許可さえもらえれば第三者もうまく使える仕組みが既にできています。そういうものをもう少し開放していかないと、せっかく日本の全部の住宅が持っているスマートメーターデータもうまく使えないと思います。スマートメーターのデータさえ見れば、住宅が持っている大きな需要技術はわかるわけです。だけど、そういう分析すら全然できないと、TSO さんもデータの紐付けが大変という話も先程ありましたが、スマートメーターデータをうまく使って、ストック把握基盤に繋げていくこともあると思います。データセンターの話はちょっと私のメインではないので置いておいて、既にデータセンターがこれから増えます、系統もこれから増強しますといった話が動いているのに、需要の活用の方向性が全然決まらず次の 10 年もまた需要はおまけのままで終わってしまうのではないかと思っています。以上です。

規制と市場、市場統合

（モデレータ２）

はい、ありがとうございました。続いて参加者8、おねがいします。

（参加者８）

はい。私からは、パネル 1 でも議論になった規制、長期的な投資の視点と、短期市場の市場統合の話をしたいと思います。まず長期的投資の視点として、ネットワークが担うべき役割と機能と手段をまとめてきました。役割は先ほど出たように安定供給・レジリエンス、脱炭素ですけが、これから必要なのは託送コストの効率化とデータの価値向上が必要だと思っています。 機能はもちろんこれらに繋げることが大事なのです、あと再エネをたくさん統合するために柔軟性を確保することです。

先ほどは見方が狭いという指摘もありましたが、長期のエネルギー貯蔵、セクターカップリング、通信が入っています。足りないのは、次世代スマートメーターとか点検データによる多様なビッグデータの活用がまだ全然足りないので、これらからの価値提供を具体化して、これを実現する手段はいろいろな法制度です。今年度から CO2 を削減するためのカーボンプライシング本格的に始まっていますが、実際に CO2 がどれだけ減らせるかをダイナミックに評価して、頑張った人が報われるメカニズムを高精度に入れてほしいいと思っています。

もう一点は短期的な市場統合の観点です。ここでは少し時間軸を入れたいと思います。需要の活用（DR）の話は今の参加者7が話された通りですが、もちろん低圧のリソースも大事ですが、圧倒的に効くのは大規模なフレキシブルな需要であり、これの統合を促すインセンティブとして、最初に市場価格に連動的な小売価格メニューを入れて誘導する、次に地点別価格で脱炭素電源と近いところに需要を誘導するということです。具体的に今から開発するのは、データセンターに柔軟性サービスを適用するための開発が必要で、時間軸の話をするとパネルの1でもあったように、同時市場とそれから次期中給です。次期中給は我々も相当前から取り組んでいますが、うまくいっても 2032 年で、実際に入るのは 2030 年代半ばぐらいになると思います。この段階では、いろいろなリソースも普及しているし、今 NEDO プロジェクトで取り組んでいる DER Flex などの結果、さっき DR がどこにあるか分からないという話もありましたが、今開発している DERMS が完成して 2030 年代の後半から本格的に需要をインテグレーションができる市場と規制ができるべきだと思います。

最後に参照するためにアメリカは起きていることは、残念ながらデータセンターの近くに原子力と再エネがあるけれど、実際にたくさん使われているのは火力、特にディーゼルとガスタービンであるのが現実です。アメリカは進んでいる点もあるけど、まずい点もたくさんあることを勉強してほしいと思います。これで多分 3 分使ってしまったので、次お願いします。もしも後で時間があれば、今まであまり議論になってない点について触れてみたいと思っています。以上です。

（モデレータ２）

はい、ありがとうございました。続いて参加者9、お願いします。

（参加者９）

私の専門は電力システム工学で、電力村を出られていないかもしれません。スライドの 1 枚目では、2040～50 年に電力システムのどこに注目すべきかを示すための図として現状の系統の超高圧から配電までを表す図として送配電協議会の図を使わせてもらっていて、それに追記しています。ここで注目すべきは、右の方の大きい丸で囲んである配電系統です。カーボンニュートラル実現のための再エネ電源としては、風力が十分入らないことで太陽光が非常に多く入ってきます。太陽光はほとんどが電圧の低いところに入ってくるため、注目すべきは配電系統だろうと思います。配電系統に大量の電源が入って問題が生じたときに、今はどうしているかというと、制御で逃げようとしていろいろな検討がなされています。 ただ、2040 年で 40%が再エネだとすると、負荷の大きさを遥かに超えた容量の太陽光が必要ですので、日中に太陽が出ると出力が負荷の大きさを超過してその分を何とか制御する必要があるが、制御でだけでは（再エネ電力量での 40％達成が）無理だろうということで何らかの系統増強が必要かと思っています。超高圧系統の方は TSO と OCCTO が検討することになっているので（客観的に）技術的な検討もできると思います。しかし、ローカル系統とか配電系統は TSO で考えることになっていて、先ほどから議論ありますが、ここにはいろんな問題があります。一つは GFM インバータが入ったときに、いまの配電方式では単独運転の防止ができないため、保護方式を見直す必要がある。 それから配電網増強で一番簡単なのは昇圧ですが、昇圧するためには今接続しているいろいろな分散型電源などに対して長い年月をかけて対応していく（「10 年後からこうします」などと言って）ことになり、そうすると非常に時間のかかる問題になる。さらにそのためのコストが必要となり、スライドの右の方に書いていますが、コスト負担はどうするのかという問題が生じます。最終的に基本的な部分を全国同じ仕様で事業化していくにしろ多分 50 年ぐらいかけて投資を回収することになるため、そこに誰が投資するのかを考える必要があり、政策的に考えることになると思っています。 図の下の方に書いたセクターカップリングでうまく投資を呼び込む話もあると思いますが、そういうことも含めて何か考えなきゃいけない。制限時間がきましたのであとは簡単にいきますと、電気学会から「出でよ電力イノベータ

ー」という本が出版されていて、その最後のところで、スライド2枚目の上の方に書いてあるように「夢を提案する人は誰で、実現する人は誰で、資金は誰が提供するのか」が書かれています。これを踏まえると、将来の配電系統の議論では、(政治・行政が)トップダウンで決めねばならないことと、(電力経理者・技術者が)ボトムアップで技術的に決められることがあると思います。ボトムアップで決められる技術については現場でいろいろな議論ができるのですが、トップダウンの方を実現する手段がないのではないか。政府の会議はありますが、そこに技術的な観点を含めて様々な検討をいろいろな方向から加える必要があるわけですから、それを実現する仕組みを作る必要があると思っています。時間があればまた後ほど詳しくお話したいと思います。以上でございます。

（モデレータ２）

はい、ありがとうございます。それでは参加者 10、お願いします。

理想の超分散高速市場の近似

（参加者 10）

ありがとうございます。私は、全体最適化の実現と先端技術による市場制度の簡素化について述べさせいただきます。まず、全体最適化のためには消費者効用の把握が重要です。全体最適化による社会厚生最大化を考えるためには、目的関数には消費者効用が入ってきます。供給者が設定した電気料金・料金メニューと、本当の消費者の支払意思額は同一ではなく混同してはいけません。その例として、停電コストは非常に高く、今の電気料金は 1kWh あたり 30 円程度ですが、いざ停電すると数千円とか数万円に電気の価値が上がることから分かります。消費者の支払意思額は、料金メニューの数字ではなくて消費者自身に市場に入札してもらって初めて分かるものです。そういう意味では、家庭等の小口需要家も参加できるローカルな分散市場を整備することが、消費者効用を把握するために重要です。

次が需要機器の管理制御で、参加者7とは少し違うあるいは逆になるかもしれませんが、系統からの集中管理制御っていうのは非現実的だと考えます。その場合、場所の把握とかも不要と私は思っています。それは、機器数が膨大になる、プライバシー保護、あるいは機器を制御された消費者効用の変化を考えられないためです。 そう考えると家計を同一にする需要家単位での機器の制御はあり得て、その家庭で冷蔵庫をどうするかは家庭で判断するのがよいことになります。この意味では HEMS がこれから重要になり、HEMS 等からローカルな分散市場に入札して系統全体との整合性を取ることが望ましいと思います。この場合、入札は人間ではなく AI を使った入札戦略を取り、そういったローカルな分散市場といったものがキーになる可能性があります。分散市場は、現状の柱上変圧器と同程度の密度で配置するイメージで、日本でいうと数百万の分散市場があり、物理的にも厳格に非落札取引は遮断し、落札してない電気は使えないことを厳格に実施することが重要だと思います。そうすると落札できなかった家庭は停電するため、その間耐えられるバッファーが必要なります。30 分同時同量なんていうぬるい需給調整に代わり毎秒毎秒均衡する高速な取引ができれば、kW 市場とかΔkW 市場もこの kWh 市場に統合され簡素化できます。 こういった分散市場を 100 万個ぐらい置いて市場間で値差が出てきたとすれば、その値差は分散市場間を結ぶ配電線の重要度を示すことになり、配電線も自然に経済原理で拡張できます。まとめると、電力システムの全体最適化を数学モデルで考えて、最適化問題として定式化したときに、制約条件、時々刻々の需給バランスを制約条件とし、あと地点間を結ぶネットワークがあれば地点別にも制約条件を置くのは当然です。そこのシャドウプライスあるいは双対変数の値を価格にすると、電気の価格は場所、時刻で全部違い、その異なる価格につながる電気の生産者と消費者が最適化の原理で行動し、それで初めて全体最適化が実現されるということです。このように接続点ごと、時刻ごとに毎秒毎秒、あるいは電気回路で分岐するところに市場を置くのが理想的なシステムであると思います。 ただ、これは現状の技術では実現できないので、それを近似するシステムを作ることが重要になると思っています。

Watt Bit コージェネレーション

（モデレータ２）

ありがとうございました。では続いて参加者 11 お願いします。

（参加者 11）

はいありがとうございます。最初にモデレータ2がおっしゃった「電力供給サイドに何か閉じがち」というのは、私のお話したいのはまさにそのことです。むしろ需要と供給も一体で考えた方がいいと思っています。その理由は、例えば人体を考えると何が供給で何が需要かは実はよくわからない、それぞれが相互補完の関係を持っています。 血管が我々の電力システムの役割に一番全体では近いと思っていて、神経がイ

ンターネット、デジタルインフラ、あるいは AI であると考えることができます。これらには非常に強い相互補完関係があることがわかっていて、酸素を供給する血管側に対して、神経は供給される側で需要なのだけど、血管をコントロールしているのは神経で、神経から見ると神経の需要は血管になります。さらに、相互に依存しているということ、例えば脳神経はエネルギーとか酸素を全体の 20%から 25%使うと言われていますが、脳の体重に占める率はわずか 2%です。神経で大量のエネルギー使った結果として熱が出ますが、実は脳の発熱は、そのまま血管を伝わって体全体を循環して、熱も含めた融合していることになります。あと例えば、筋肉については、血管と神経が繋がって筋肉が動いていると関係にあるためこれらを一体として捉えることが必要で、社会システムもそのように捉える必要があると思います。電力のネットワークは体の中の血管系にあたり、それを考えることは循環器病の先生に似た役割ですが、そこで閉じてしまうと人体、患者さんが見えなくなります。

今は熱の話をしましたが、我々ですね。 新しい技術開発に成功し、「Watt Bit コージェネレーション」という名前をつけました。我々は、「ワット・ビット連携」を政府にも提言し、政策のアジェンダにも入ったところです。「ワット・ビット連携は、送配電網の余裕のある地点にデータセンターを置くことを意味する」と言う方が多いのですが、もちろんそれも一つの形態ですが、本来の意味は、神経と血管のように、デジタルインフラと電力グリッドの間で強い相互関係が必要であることを言っています。ですから Watt と Bit の協同運用については、実はその Watt Bit のコージェネレーションの概念が成り立つと考えます。話は少し変わりますが、熱の流れも単位は Watt です。何言っているかというと、例えば地域の分散型電源を使って左側のフィジカルな世界を電化していきます。右側のサイバースペースには GPU があって AI が動くのですけど、そこで使われる電力は全部熱に化わります。Wat Bit コージェネレーションとは、この熱を使う技術で、次世代 GPU の大体 110℃から 120℃まで上がる熱から、約 90℃の熱を引き出す技術の開発に成功しました。この 90 度の蒸気を使うと温熱と冷熱が両方提供できるので、この AI は自動化や最適化の提供に加えて、お客様に温熱と冷熱の供給もできることになります。これを実施することで、熱の供給もこれからヒートポンプに変わって効率が良くなりますが、それが AI 側から出てきて、熱でさらに補完されてもっと省エネになります。こう考えると、これらを全部まとめて考えないと駄目だということになります。この技術は、Watt Bit Cogeneration の頭文字をとって WaBiCo と名づけました。

例で考えてみます。Power to Gas、Power to X という言葉がありますが、今のパターンで考えると Power to Meal です。北関東にはですね太陽光の電気が余ってきています。一方でデータセンターは今都心から 50 キロに集中しているので、東電パワーグリッドは北関東にデータセンターを誘致しています。それはもちろんやるのですが、データセンター以外の電力の用途としては農業の電化があり、農業には営農型太陽光の可能性があります。そこで、電化した農業、陸上養殖、あるいは酪農や畜産で電気を使ってフィジカル AI が動かすのだけれど、そのときに同時に供給される熱と冷熱で食品の加工や保存もできるようになります。これをまとめて考えると、地域が電化しながら、AI により自動で動かし、品質の高い日本食を生産して海外に輸出することで、わざわざ系統の増強を 10～20 何年もかけてやって、電気を首都圏に運んでくるよりは、海外に高い品質の日本食品で売った方が遥かに金になるのではないかということです。こういうことをこれからはもう考える必要があり、電力システムを社会の循環器系としてデザインしていく必要があると思っています。

分野横断型教育/研究と分析能力

（モデレータ２）

ありがとうございました。では最後に参加者 12、お願いします。

（参加者 12）

人材育成とそのための科学的エビデンスと、少しひねってお話させていただきます。繰り返しになりますが電化やデータセンター、AI などで電力は、今でも電力なしには現代社会は成立しませんが、より一層エネルギーの中心になることは間違いがないわけで、繰り返しになりますが電力×〇〇といった分野横断型教育の必要性があると思っています。しかし、翻って日本をよく見てみると、例えば日本では基礎となる分野横断型研究が少ないといろんなところで言われていて、これは事実です。何回かパネルディスカッションでも出てきたと思いますけれども、エビデンスでは質が大事だと思います。「エビデンスという言葉が氾濫している」という日本経済新聞の最近報道がありますし、本質の担保は不十分ではないかということで、政策分析能力を言葉で聞くと、日本の知的レベルが足りてないというように聞こえますが、そういう意味ではなくて、後で時間あれば説明しますが、エビデンスに関連して再生可能エネルギー分野の政策分析能力が日

本では不十分であるという懸念について論文を書いたことがあります[52]。今後の政策提言に繋げるときの段階での提案ではありますけれど、この視点は、本 EAJ プロジェクトで皆さんかなり共通して言っていると同時に、意見が割れているところがあると思います。先ほど電力市場の話で参加者4と講演者で少し意見が違うとか、需要の管理・制御の話で参加者 10 と参加者7で意見が違うとかありました。しかし、皆さんが共通して「電力は変化するのに時間がかかるシステムである」という点は間違いなく、早く動か必要があるのは当たり前として、そういうことをちゃんと言ってくっていうことがあると思いますし、成果がまとまったら国際的に部分的に英文にして査読に回しても十分耐えるものになると思います。逆にそれで突っ込まれて「あれっ」と言うことになったら微妙な提言になってしまうかもしれませんので、最終的に出すときにはエビデンスの質を一定にコントロールする必要性があると思います。 モデレータ2が挙げていただいたリーダーシップとかも考えたのですが、それはまた次のターンでお話させていただきます。以上です。

Europe Horizon 研究プログラム

（モデレータ２）

はい。ありがとうございました。一通りプレゼンいただきました。この段階でご発言ある先生いますか。

（参加者７）

スライドにあったホライズンヨーロッパについて教えて下さい。

（参加者 12）

ホライズンヨーロッパは、ヨーロッパがやっている国際的な共同研究プログラムです。ヨーロッパ統合で EU ができて、ヨーロッパの研究統合プログラムが始まってからヨーロッパの研究水準は圧倒的に上がりました。 例えば、元々強かったイギリス、ドイツ、フランスに限らず例えばギリシャやトルコがこの共同研究プロジェクトに参加して、そこに日本も今度参加する方向です。正式な状況は忘れましたが、例えば私の記憶にあるのは再生可能エネルギーのオークションについてのプロジェクトとかを大規模にやっています。曖昧ですみません。ここへの参加は非常にコンペティティブです。1 回目だったらまず落ちます。でもエビデンスの高いハイクオリティの研究をやることは簡単ではありません。私も何回も失敗していますので、そういうとこにチャレンジしてエビデンスの質を上げていくのは学者の仕事だろうと日々思っているところです。

（モデレータ２）

私が知っている範囲で言うと、ヨーロッパは社会課題をみんなで共通に定義して、その中で研究プロジェクトを創生して、その課題を解くために、最適な研究エコシステム、すなわちチーム編成ができたところが採択される構造になっていて、まさに課題と政策と研究がリンクする仕組みになっていると思います。これに対して日本の場合は、「研究は研究で政策は誰に提言するのか」という状態になってしまっているので、仕組み自体も学ぶことがあると私自身も感じています。

（参加者８）

一言だけ。私は参加者7に伝えなかったのですが、内閣府からですね SIP プロジェクトで Horizon ヨーロッパに参画すようにという要請があったのですが、私が十分準備してなかので、次回機会があったら必ずエントリーしてください。よろしくお願いします。

（モデレータ２）

何か発言ある先生いらっしゃいますか。皆さんおっしゃっていることを振り返ると、電力システムはとても大きいシステムの議論になっていて、参加者 11 の考えはそれを超えているのですが、私が問いかけたいことは、どうしても主語がわからない点です。あることがやれたらいいという話になるけれど、誰が主体でそれを実現するのかがよく見えず、そこが、議論が各論になってしまう一つの要因ではないかと素人的には思います。それに対するご意見をまずいただきたいと思います。まず参加者 11 の電力・通信・熱も含めた構想の具体化については、どういうアプローチがあるでしょうか？

ニーズ/イシュードリブン、ひっくり返して考える

（参加者 11）

ありがとうございます。なかなかそれが見つかってないのが本当のことです。ただ、先ほど来お話ありましたように、社会課題といった課題の設定の仕方が大事だと思っています。私はずっと電力に携わってきて思うのですが、電力システム改革とか電力システム（の変革）に主語を付けようとすると、それで何をしたい

[52]https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ropr.12527

のかが全部抜けていることが分かります。カーボンニュートラルは実際には需要側と一緒にやらないとできない話なのに、供給側だけでやろうとして非常に変になってきています。今起きているのはまさにそういうことで、だから社会課題、特に日本の場合は高齢化が進んで人口が減っていく大きな課題があって、地方が成り立たなくなっていきます。例えば大きな課題に対してどういうアプローチがあるがあって、最後にエネルギーの話が出てくることになります。これいつも難しいのですが、いろいろやるべきことが生活や産業があるのですが、その中でエネルギーが使われることが最後に出てきます。ですから、逆にそのエネルギーから先に考えると何も出てこないことになります。やはりニーズドリブンとか、イシュードリブンとか、あるいはユーザー起点でひっくり返して考えることが必要です。電力側の話から入るとどうしても発展性が少なくなるいと私は感じています。

需要側のデータ整備と需要家行動

（モデレータ２）

ありがとうございます。私も似たように考えます。需要の話では、例えば参加者7が需要家側でお話されていますが、本当の需要家の人たちがもっとこういう場に参画するところまで行ききれてないのではないかと感じますが、その辺いかがですか。

（参加者７）

ありがとうございます。いろいろな階層の話があると思いますが、私が「基盤をつくるべきとかデータを収集すべき」を誰に向かって言っているかというと、国がやるべきことだと思って言っています。それは需要側の資源を活用することは、やっぱり今のままではお金にならないので事業者もやりづらい状況です。だけど、時間軸を考えると、長期的には絶対大事なものなので何とか現実にしなければならないと考えると、それらは国が実施し、お金を使うことが大事だと思ますので、私は、主語は国だと思っています。ただ、「電気やガスの補助金を出すのではなく、お金を使う場所は別にありますよね」ということが、私が一番言いたいところです。需要家もぜひ参加してというのはもちろんありまして、DR 自体も知らない人も多いので、そういうところでリテラシーの醸成から始めるステップであるのも事実です。一般の家庭の方ってそれほど電気のことを考えていません。はっきり言って、電気は来ればいいわけで、「最近はもう暑くて毎日エアコンつけています。その中で電気代が高くないといい。」というくらいしかリソースを割かないのが現実で、ただ、機器を買うときの選択の段階で働きかける、そこで少し行動変容をしてもらうことが、私は正直言って期待できる限界だと感じます。もちろんそのリテラシーを上げていくことは大事だけれども、そこにあまり期待するとやはりうまくいかないと思います。なので、私は制御することについても、例えば、その制御に参加するとポイントもらえます、 得しますということを、ある程度きちんと理解してもらい機器選択に考慮してもらうぐらいが、需要家として関われる限界だろう感じています。

支払意思額、超分散型の自動入札

（モデレータ２）

わかりました。参加者 10 にお伺いしたいのですが、先生の分散型っていうのはもっと「需要家が自分たちで意識して」といわれた気もします。今のお話に対していかがでしょう。

（参加者 10）

分散市場を思い始めた理由ですが、電気の価値は多分電気料金で 1kWh3000 円とかで、一般に言われるより消費者は高く見ているはずだということです。それが表れてないのは、世の中の製品というか流通しているモノのほとんどが、消費者が何円払ったらこれ欲しいっていう均衡した状況で買っているのですが、電気だけ変な状況に置かれているからです。これまでの電気料金は総括原価主義で値段がつけられてきたので生産費でほぼ価格が決まっています。実は消費者はもっと価値があると思っているので、それをもう少し引き出せないかなと思います。そうすると電気代が上がる傾向になってしまうかもしれないのですが、そちらの方が多分社会全体としての均衡、経済全体の一般均衡を考えると、あるモノの値段は安い方がいいということはなくて、ちょうどいい値段があるはずなので、そこに持っていくことで社会全体としての効率が上がります。そういったこともできると思って、分散市場を提案していました。 あと分散市場を導入しようとする変革のドライブあるいはきっかけになる事項としては、今後ルーフトップの太陽光発電がどんどん導入されると家庭で電気が余り始めて、電力会社ももう引き取らないって状況になって来ています。そうすると、隣の家や近所に売りたいということがだんだん出てきて、それを実現する仕組み今の電気事業ではないのですが、分散市場にすればそれも容易にできるだろうと思っています。

（モデレータ２）

ありがとうございます。ここまでの議論で、何か他の先生、ご発言あれば

（参加者 12）

参加者 10 にもう少しお伺いしたいのですが、そのときデジタル技術の進化によりいろんなものが本当にピュアマーケットに近づくことはあると思います。広告とか一つの例かもしれません。その場合は機械がどれぐらい、人がどれぐらいやるのでしょうか。P to P の取引は、参加者7が言われたように機械がやるイメージでしょうか。それとも結構個人が主体的に出るものでしょうか？

（参加者 10）

機械というか家庭から分散市場に向かっては多分 AI がやると思います。人がやっても一日頑張っても 100 円儲かるかどうかなので、人件費を考えると全部機械にやらせるしかない。年間で 3 万円利得があるぐらいだと思います。ただ、各家庭の中での需給バランスどう実現するかというと、人が関与しないといけないと思います。HEMS の設定とかで、電気が足りなくなったときにどの優先順位で家電機器を止めるかの選択は、各家庭、各個人の好みによって決めて、一旦設定すれば、自動で実行することになると思っています。

（参加者 12）

ありがとうございます。

（モデレータ２）

どうぞ。

産業の電力リテラシーと生産シフト

（参加者 11）

お客様をどう巻き込むかは、我々電力会社は一生懸命考える必要があると思っていますが、今、参加者 10 からお話があったのですが、お客様は分けて考える必要があります。例えば自分自身が消費者の 1 人ですが、デイトレーダーみたいに電気を取引しようとはしないわけです。要するに、普通に使っていたいことが基本で、ある人は「実は私はこういうふうに生活したい」とか、「こういう希望は当然あるのであとは AI にやって欲しい」というふうになると思います。そうするとエンドユーザにそのサービスを提供するのは企業であり、あるいはいろいろなプロダクトを作るのは産業界ですので、産業界の方にこの電力の話をもっとアピールする必要があると思っています。 例えば、非常に乱暴な物言いですが、例えば昨日もある重工業の会社さんとの議論で、電気は春と秋に余り夏と冬に電気足りませんが、工場は平準生産をして在庫を少なくしています。私、今は経営者ではないのでかなり自由に発言しますが、料金が、夏と冬が高くて、春と秋が安かったら、本当に皆さん平準生産を続けますか、平準生産を夏と冬は少し減らして、春と秋に生産をシフトして、その分在庫を増やした方がいいのではないですかと。

このように電気使用量を変えれば、バッテリー増やすより遥かに安くなります。だから貯蔵にはフィジカル空間にある倉庫を使った方が安い場合があり、ただそれは強制的にやるものでは全くなく、そこに市場メカニズムというか、どの程度の料金差までだったら平準化するけれど、どのぐらいだったら生産シフトと在庫を許容するかは、いろいろな産業界ごとに違い、価格が変わることと相まって世の中全体として最適な方に向かっていくことを考えないといけない。再生可能エネルギーは自分の意思ではなく自然条件で発電するため、使う側が発電と関係なく平準化の状態で使うのは合理的ではない。このような事情を産業界のお客様には理解していただくことを、電力会社は今まで全く言っていなかったと反省しています。あと、ですから B to C の会社さんもカスタマーに対して非常に重要になっています。そういうビジネスの方々がいろいろなことのもっと頭を使ってお客様により素敵な生活を提案するときに、電力需給のことをよく理解してつくった AI によるサービスを使っていただくのがいいと思っていますし、個人のお客様に細かく動くことを期待するのは難しいと思っています。

（モデレータ２）

はい。ありがとうございます。まさにホルムズ海峡の問題があって国が補助している状況ですが、電力料金は放っておくと上がってしまうと産業界にとっては相当な痛手になるので、電気の使用と料金の議論をするステークホルダーがもっと広がっていって自分たちも負担するという話になり、全体の競争力の議論ができるようになるという思いは私自身にもあります。そうするとこの場に参加している人が限らすぎているというのが、最初に申し上げた話です。それで言うと、提言は誰に向かって提言するのかという疑問があり、政策提言っていうのは一つあると思うのですけど、提言ではないかもしれませんが、先ほどから出ている一般の方の電力へのリテラシーを上げる、あるいは産業界に協力を求めることが、実は具体のアクションとしてより現実的な次のステップに繋がるのではないかと思っています。ここで無茶ぶりですが PL いかがでしょうか。

（PL）

ちょっと待って。うまくまとめていただいたような気がいたします。

（参加者８）

PL に考える時間を差し上げるために、今の話は実は私の専門のところで、需給マネジメントというのですが、昔の需給調整契約では（電力不足時に需要を下げることを条件に）工場に割引料金を適用することを過去何十年もやってきましたが、今求められているのは例えば低炭素のエネルギーを使いたいのだけど、自分の事業所の操業計画の中ではこれだけしかプラスマイナスに振らせることができない制約があった場合、工場間あるいは企業間で生産計画の再調整をして低炭素電気がたくさん使えるかを提案する情報システムを、今私がやっている内閣府の SIP で開発していて、それの出口はですね、さっきから誰がやるのかという話があったと思いますがまずプロトタイプを作って工場で実証して、次に業界団体に持っていって、どういう情報モデルであればプライベートの情報を出さなくてもうまく融通ができ、しかもそのトラスト通信を使うことを業界で考えて、次の段階では参加者 11 がボードメンバーである IEC などの国際標準に持ってゆくパスを考えています。出口戦略まで含めて、この EAJ の提言では、そういう出口戦略まで含めてまとめていただきたいと思っています。はいもう 1 回 PL にお返しします。

PUM など多様なデータ、活用、テック

（PL）

前半で私は PMU の例を出しました。PMU はリアルタイムのデータを集めることで、疲れをしらず律儀に働く AI を組み合わせると、電力システムの安定運用にいろいろな課題が起ころうとすることを、もしかすると 10 年前、1 週間前、1 時間前に検出することができるようになる可能性があります。後半のパネルディスカッションは技術ではないのですが、今までの議論にあるように、その情報を生かして選択をする、意思決定をする、何々をするということにどれも繋がっていると思いました。

もう一つは、それやるときに、我々どうしてもできそうなところから考えるのですが、今情報技術のおかげで時間粒度も地理的粒度、全ての粒度を上げられる可能性を我々持っていると思います。日本はこの領域とても弱いので、アメリカの企業にたくさん攻め込まれているのが現実です。ですから、このような情報を意思決定に活用する分野、イーブンになるくらい頑張ったらいいのではないか、たくさんの可能性がある、それをアクションプランにできれば提言になるかもしれないなと感じました。

（モデレータ２）

ありがとうございます。データの話は前半のパネルディスカッションもそうですし、このパネルでも皆さん言われていて、今のまさに PL がおっしゃった通りですが、今の世の中の動きからいくと、相当意識してスピードアップしてやらない限り、また遅れてしまうと思います。データさえあればそれを使っていろんなことに知恵を出す AI 科学者みたいな方はいっぱいいるので、そういう人たちがこの分野にどんどん入ってくる素地を作らないといけなくて、データがバラバラにあるのでは駄目で、そこをどうやっていくかは結構難しいとこだと思います。何かご意見ある方いらっしゃいますか。 データに関して。

（参加者 12）

私の勝手な私見ですが、データ/AI×〇〇は非常に重要です。世の中では「気候テック」など「テック」と呼ばれるスタートアップの分類やセグメントがあって、最近グローバルに投資が集中していますが、私の感覚だと少なくとも東京大学においてはそういう学生さんは少ないと感じます。問題はデータの利用可能性とかではいと思います。熱心に AI・データサイエンス・環境とか、エネルギー・電力とかに取り組む方はいるのですが、人数が少ないのが危機だと思います。正直答えが見つかっていません。これは、東京大学に女子学生が少ないこととかなり似通った根本的な問題だと思います。AI×電力・エネルギーは素晴らしい領域だと思い、それでバンバン論文を書けるかもしれないし、研究成果もあるかもしれませんが、いかんせん学生の数が少ないというのが私の印象です。

（モデレータ２）

はい。フロアから何かご意見とかご質問とかありますか。

生産シフトと水素・アンモニアサプライチェーン検討

（参加者 13）

貴重な議論ありがとうございました。参加者8の言われた生産のシフトについて、ご案内の通り自動車業界の完成車メーカーさんからのサプライチェーンでは、トヨタさんのジャストインタイムなどかなり綿密に生産

が繋がっています。その場合、完成車メーカーさんがどうシフトするかが重要で、その下の各社は自由には決められない。誰が意思決定できるかをしっかり踏まえて議論するのが大事だと思います。コメントさせていただきました。

（参加者８）

ありがとうございます。中部圏水素・アンモニア社会実装推進会議[53]というのがあって、全てのステークホルダー、モビリティ、エネルギー会社、行政府も参加していて、どういう順番で部品工場を通じて生産をして、アンモニアをどれだけ使か、分散と集中と両方が必要だと思っていて、マクロな情報はある程度集中して出して、あと実際にミクロな判断は各工場なりでやる、そのシステムが必ずできるはずだと思っています。それは電気事業も全く同じで、単独ではなく、自動車や物流と一緒に動くことが絶対求められますし、今の IT でようやくできるようになったと思います。

（モデレータ２）

はい。他にいかがですか。そろそろ時間なので、まだ先生方でいい残したことがある人は、参加者9。

社会の血管系・心臓の維持と拡張

（参加者９）

今のデータの話です。データは、人間で言えば脳で処理します。先ほどの参加者 11 の考え方でいくとそうなのですが、脳で処理して例えば手に血を送りたいとき、そこの血管が細ければそう思ってもできない。ですから制御で何かしようと思って、それで可能な範囲ではいけれども、制御では逃げられなくなることもあります。 それが先ほど私が申し上げたことです。血管を何とかしなくてはいけなくなるとお金がかかります。そこをどうするかはどうしても考えなければならないところだと思っています。

もう一つ、電力料金（が必要なら多少高くても良いのではないかという議論）について、英語ではアフォーダビリティと言っていますが、社会に受け入れられるコストでないと電力は供給できない。 供給側としては、社会が受け入れてくれる価格で安定して供給することを考えなければいけない。そこがエンジニアとして考えるべき、そしてやるべき方向性だと思います。水（上下水道）と同じに必要なものですから。前のパネルでも議論がありましたけれど、電力供給はある程度公共事業として考える必要があると思います。

（モデレータ２）

はい。ありがとうございます。

（参加者 11）

今の参加者9のお話にちょっと重ねる形で申し上げたいのですが、エネルギーあるいは送配電網はまさに社会の血管系みたいなもので、大事で太くあるべきと言うときもあります。しかしそれ以前の問題として、年を取って、細くはなってないのですが、経年でだんだんボロボロになってきていて、このままいくと社会が死ぬ恐れがある状態です。そういうインフラを維持するのは本当に大事なことで、もちろん増強は必要ですが、必要なところをしっかり維持することが必要で、そのためにお金が回る制度になっていなければならない。その場合、どこは残して、どこは思い切ってやめにするかを、すべて全部データドリブンで判断すべきだと思っています。一方で心臓に当たるのが火力発電所だと思うと、こちらも古くなってきてどんどん廃止に向かっています。これでは社会が死んでしまうと思います。これは非常に難しい問題で、欧州はもう失敗したと思っていますが、カーボンニュートラルとかエナジートランジションって、そこに向かうのはいいとして、だからといって先に石炭火力やめるかという問題があります。送電線も再生可能エネルギーも今は十分じゃないのです。欧州は、石炭火力を先にやめてしまって死んでしまうおそれがあり、まさにそれが実際に起きていて、結局は今その揺り戻しになっています。血管系や心臓が古くなっていたら社会が止まっていくのですけど、必要な金が回って（治療が）できるようにしないといけません。それもちゃんとデータドリブンに必要に必要なところに必要なものを維持する、作ることをやっていく必要があると思いました。

（参加者 12）

参加者 11 の、火力のアナロジーは納得しますが、石炭については議論があると思います。以上です。

まとめ：アクションプランへ

（モデレータ２）

ありがとうございます。今日は、政策提言に向けて、ある程度発散していること自体が次へのヒントになっ

[53] https://ch2a.jp/

たと思います。今回議論しきれなかったのは、分野横断・分野融合、トップダウン的な議論で、それぞれ結構難しいテーマです。しかし、例えばさっきの Watt Bit コージェネレーションは、通信・電力・熱の業界の人たちが具体的な話ができるので、そういう点を視野に入れて議論が進められると思います。最初に申し上げてしつこいのですが、提言は何か積んで置かれるのでは駄目で、アクションに繋がるものが重要と思っています。その辺を含め PL がリードして取り組んでいただけると思っております。時間になりましたので、パネルディスカッション 2 はこれで終わりたいと思います。 パネリストの方々、どうもありがとうございました。

閉会挨拶

（岩船）

最後に、本シンポジウムは、EAJ と東京大学 ESI エネルギーシステムインテグレーション社会連携研究部門との共同開催でしたので、ESI としての私の方から、閉会の挨拶をさせていただきます。

さっき言い忘れた点で、電力×〇〇というお話でいうと、Looop の渡邊さんがお話になった、保険業界や通信業界もそうですが、他の業界と連携して新しいサービスが出てくるところがとてもいいと思っています。私からは俯瞰的な視点で需要の話しをしましたが、ボトムアップ的にいろんなサービスと絡んで、電力の話に遠い人たちにもいろんなことを分かっていただき、「再エネがたくさん発電しているとき電気は安く使える」といった情報をもっと共有しながら需要が変わっていくことは十分あり得ると感じましたし、そういう活動がもっと盛んになったらいいと思いました。それをぜひ提言にも入れていただけたらいいと思いました。

今日は、電力の供給側から需要側まで、これだけの先生方にお集まりいただいてお話しいただいたことは、非常に貴重な機会だったと思います。 課題はたくさんありますが、これだけの皆さんが知恵出されて、いい提言をまとめられると思います。 PL がきっと頑張ってくださると思います。生成 AI の力も借りて本当にこの 1 年ぐらいで AI の成長度合いすごくって、1 年前に話したことがちょっと違うような印象があります。私も頑張って使っていますが、そういう中での根本的に大事なことは 3E+S だと思うのですが、都度重要な視点は、三つの中で少しこっちに寄ったりあっちに行ったりはすると思うのですが、究極的にはその三つをクリアすることに向かって、皆さんのお力を借りて良い社会にしていきたい。3E+S の実現に向かって、ぜひ皆さんと協力してこれからも研究、実業、そして政策を提言していきたいと思いますので、よろしくお願いいたします。 今日は長時間のご参加ありがとうございました。 これにて閉会です。

提言シンポジウム

開会

（城石（以下司会））

最初にプロジェクトリーダーで東京大学生産技術研究所特任教授荻本和彦様から、開会のご挨拶を賜りたいと思います。荻本先生、よろしくお願いいたします。

開会挨拶 1

（荻本（以下 PL））

はい。ご紹介いただきました生産技術研究所荻本でございます。

本プロジェクトの一応リーダーということをやらせていただきましたので、最初にご挨拶ということで、どういう経緯で、経緯というか、どういう実施をしてきたかということを最初にご説明をさせていただきます。

本プロジェクトは 2030 年から 2050 年、今から我々が進んでいく道ということを視野に入れて新たな電力システム、または電力エネルギーシステムの段階的移行に向けた提言を取りまとめるということで、プロジェクトの実施をしてまいりました。

このプロジェクトではたくさんの方々、討議委員、カッコしてより若い世代という風に書かせていただきましたが、中心になって毎回30分で2つずつ、話題を提供していただく。閲読委員、より経験の豊富な世代というふうに控えめに表現しますが、を加えて1時間議論するということを二年間やってまいりました。

こちらがそのメンバーということになっております。よく見ていただきますと、委員が上に二つ並んでいますけども、その下に顧問ということで、蘆立さん、横山先生、それからその他、ちょっと失礼ですが、次にご挨拶いただく EAJ 中村さんの名前が出ております。それから事務局として城石さん、中村さん、鈴木さん、馬場さん、吉井さん、杉田さんと、こういうメンバーで二年間議論をやり、少しずつ取りまとめをしてきたということでございます。

こちらがその箇条書きとなります。2024年の4月から10回の会合をやりました。2025年4月に前半のシンポジウムをやらさせていただきました。2026年4月に後半のシンポジウムをやらさせていただきました。そして本日が提言シンポジウムでございます。

提言の報告書というのを、このシンポジウムの議論も含めて10月早々ということで予定をしているところでございます。

こちらが前回と2回のシンポジウムの一覧表になります。第1回、第2回と書いてございまして、その右に分野というのが書いてあって、需要電源、PV、風力というふうに進めてきたというところが書いてございます。

こちらが第6回から第10回、それから後半のシンポジウム、そして本日のシンポジウムということになります。後半は分野のところを見ていただきますと、小売り、需要機器、IT 解析1、解析2、どちらかというと横に広がりのあるテーマを選んで今日に至ったということでございます。

こちらが1年半前のシンポジウム、中間のシンポジウムの状況をお知らせしております。

こちらが4月の後半のシンポジウムでございます。このように2年間会合をやって議論をやり、そして中間で中間シンポジウムをやって、4月に後半シンポジウムをやったということで今日に至ったということでございます。

この一般には報告書というのはまだ公開しておりませんけれども、今メンバーの中で報告書の案というものを共有いたしまして、今日その状況をお知らせする、またはそれをベースにして議論をする、というのが本日のミッションということになっておりますので、どうぞよろしくお願いをいたします。以上です。

（司会）

荻本先生、ありがとうございました。

開会挨拶 2

（司会）

続きまして JST 名誉理事長、EAJ 顧問の中村道治様に開会ご挨拶2をお願いしたいと思います。中村様、よろしくお願いいたします。

（中村）

中村でございます。本日、この EAJ、それから東京大学生産技術研究所エネルギーシステムインテグレーション社会連携研究部門が共同主催いたします EAJ 電力プロジェクト提言シンポジウム、ESI 第 27 回シンポジウムに多数ご参加いただきまして、誠にありがとうございます。

EAJ は、人類の安寧とより良き生存、Human Security and Well-Being に向けて未来社会を工学する ENGINEERING FOR THE FUTURE ことを理念として、社会の変革を目指すための政策提言活動や国際活動、人材育成活動に取り組んでいるところでございます。

我が国は S+3E を電力システムの根幹に位置づけてきましたけれども、今日、再生可能エネルギーの本格導入であるとか、原子力発電の復旧、増加する自然災害への強靭性の向上、あるいは経済安全保障など、様々な課題を抱える電力システムのあり方を検討して、2030 年から 2050 年を見据えて、その展望を明らかにすることが非常に重要な課題と我々考えております。

そこで、先ほど荻本先生からもご紹介ありましたように、幅広い専門家の知恵を結集して課題を解きほぐし、将来のアクションプランを示すために、2023 年にこのプロジェクトが企画されまして、同年 11 月に発足したわけでございますが、2024 年 3 月のキックオフ以降、比較的若い世代を中心とした政策提言に向けた議論、執筆活動が行われました。さらに、経験豊かな皆さん方による閲読委員としての議論を通じて検討を深めていただきました。このようなプロジェクトの進め方自体が、実は EAJ にとっても大変参考になるところで、他のプロジェクトにも活かしていきたいと思います。

これまでの10回の会合とか、あるいはワークショップ、2度のシンポジウムを重ねて、本日ご議論いただきますようなところまでまいりました。このプロジェクトを強力にリードしてくださいました荻本先生、また顧問の横山先生、蘆立先生他に、それから委員、講演者、関係者の皆様に厚くお礼を申し上げます。

今回のプロジェクトを通じて、議論が個別の電力技術や制度にとどまらず、これを社会システムとして捉えて、どのように統合して運用していくかという問題に議論が深まってきたというふうに強く感じておるところです。その過程で、知識基盤の強化整備や、それらを共有し、使いこなす人材を、変化する状況の中で継続的に育て、意思決定していくかということが、これからの挑戦課題であります。

これは電力エネルギーシステムに限った問題ではないと思いますが、変化のスピードが速く、将来の不確実性が高まる中で、社会が知識をどのように形成し、共有し、更新しながら未来を設計していくのかというような広い課題にもつながっています。とりわけ、電力システムはあらゆる社会的経済的な活動と直結するものであり、明続な指針の下に取り組むことが望まれており、そのためには政府、産業界、研究機関、学協会など一体となって検討する場が、我が国にとって非常に重要ではないかというふうに考えております。

本日、この後、いろいろな提言についてのご説明やパネル討論がありますが、さらに議論を深めていただければありがたいというふうに思いますし、また、この結果を政府機関あるいは関係関連部門とのこれからの議論につなげていただければ幸いです。

本日の議論が報告書の取りまとめにとどまらず、政策、産業、研究、そして社会との継続的な対話につながり、将来の電力エネルギーシステムを考える一助になることを期待しまして、開催会見のご挨拶といたします。

（司会）

ありがとうございます。中村様、ありがとうございました。

講演

（司会）

これから講演の部に移らせていただきたいと思います。最初にお断りさせていただきたいと思うのですけれども、時間の関係で、先ほど申しましたように、いろいろなご質問があると思いますが、非常にタイトでございますので、皆様のご質問等ございましたらパネルディスカッションや意見交換会の時にご議論いただければというように思います。よろしくご理解いただければと思います。

まず最初に、プロジェクトの全体像につきまして、プロジェクトリーダー東京大学生産技術研究所特任教授の荻本和彦様にご発表をお願いしたいと思います。よろしくお願いいたします。

講演 「プロジェクトの実施と提言」

（PL）

それではご説明をさせていただきます。私の方からは現在ドラフトで用意しております報告書の構成ということをご説明させていただきます。

これまでの活動・参加メンバー

参加メンバー、それからこれまでの活動ということですが、背景ということを1枚でご説明したいと思っております。もう皆さんとてもとてもよくご存知の通り、環境問題があって、エネルギー問題があって、いろんな課題が山積する中で、電力もエネルギーも変わらないといけないという時代にやってきているということでござ

います。このページで一番下に赤字で書いてございますように、そういうものに加えて、この数年、世界規模で蓄電池の大規模な導入が進んでいる、または大規模事業、データセンターとかですけれども、そういうものも進んでいる。それが言葉で語るのは簡単なのですけども、何千万キロワットという需要が実際にアメリカで増えている。これらは非常に大きなインパクトを今現在の世界に与えている。これは電力そしてエネルギーシステムが大きく変わらないといけないということをさらに加速している、というような状態だということです。これを背景にして、我々議論をして、この報告書を取りまとめたということでございます。

まず序文のところなのですけれども、問題の本質というのが後で分かってくることですけれども、統合設計というのをもう一回やらないといけないな、ということが、我々気がついたことの第一点であったと。先ほどのご挨拶に出てきたように、不断に学んで検証して改善刷新をする仕組みも作らないといけない。これも我々が気づいたことであったと。社会がどのように知識を積み重ねながら未来を設計するかということを、電力から話は始まったのですけれども、そういうところに思いが至ったということでございます。そういうことで、一番下にございますように、6の提言と、それからそれを実施する方法ということを、この報告書で取りまとめたということでございます。

報告書の構成

この報告書は以下の構成でありますということで、箇条書きで書いてございます。報告書本体は 3～40ページということなのですが、それでも時間が限られた方もいらっしゃるということで、何種類かの読み方も勝手ですが、提案をしているようなことが書いてございます。

ここからが本文ということになります。第2章が電力エネルギーをめぐる構造の変化ということを、我々がどう捉えたかということがまとめてございます。これは一言でいうと、とてもとても不確実な時代、元から未来は不確実なものだということなのですけれども、我々この過去の十年と比べて、ここから先、ものすごく不確実性が増えた、ということを2章ではまとめてございます。

この議論をする過程で、次のページで見ていただきますけれども、キー技術またはキーシステム技術ということを表の形でまとめてきました。それはそれでとても細かい表ですけれども、役には立つ表だということだと信じておりますので、見られるようにしております。第3章では技術システム技術の課題ということで、ここからのメッセージというのは、個別技術が重要だ、または不足しているということに加えて、統合設計が重要というようなまとめが出てきております。

これ、先ほどのキー技術・キーシステム技術というのが、左側から先ほど会合を一回、二回、三回とやった時に、需要電源、それから再生可能エネルギー、PV、風力というふうに申し上げましたが、その方向の並びにどんなキー技術・キーシステム技術が関係しているかということをまとめた表でございます。もう技術のことに関して書き始めると無限に書かないといけないので、もうここはテーマ、技術名というようなものでまとめたということでございます。それから報告書の続きに参ります。

第4章、制度の構造的な課題という章でございます。ここに関しましては、制度問題。制度というのは市場制度というようなものもあります。それから補助金という制度もございます。さらに言うと、規制という、これも非常に重要な制度がございます。こういうものを全体が技術と相まって効果を発揮するものだということなのですけれども、この制度ということに関しては、なかなか制度というのは一旦作ると変えにくいという本来の性質があるということですから、これだけ変わる時代になってくると、制度全体の本来の目的に立ち返った再設計が必要なのではないかということにまとめられる、そのような内容を書かせていただいております。

それから第5章、意思決定・データガバナンスの課題というところです。なかなか日本の意思決定というのは、海外の意思決定と比べると、とてもマイルドで、なかなかどう決まったかよくわからない、というところが特徴なのかなと思います。これはいいところも悪いところもあるわけなのですけれども、非常に変化が激しく、そして不確実性の中で、適切な意思決定をするためには何が重要なのか、ということを考えたという章でございます。ここで言葉では統合設計のための意思決定はできないといけない。それの基になるのが知識基盤とか人材であるというようなことをメッセージとして書かせていただきました。

それから第6章です。統合設計の枠組み。S-I-L-K シルクということです。これは6.1から6.4にございます。ストラテジー、インテグリティ、リーダーシップ、ナレッジ、こういうキーワードで考えたらいいのではないかということで、会合第10回で皆で議論させていただいたというところです。これは、どういう視点で、ものを現在我々が考えると良いか、というようなことをまとめたということになります。ここまでの章の展開、第六章までのことをベースにしまして、6つの提言をしたということです。

提言

提言というのは、ここにありますように、中長期で実施していかないといけないアクションプランだというつ

もりでやっております。中長期のアクションプランをここにございますように、6つの提言として整理をしたと。提言の1から3というのは、実際にその電力、エネルギー、または社会システムを統合設計するというところに当たります。提言の4から6というのは、知識基盤または人材育成、または意思決定そのものとのやり方というところに関係をいたします。ここの図にございますように、この左側のこの回転をしているというのが、電力、エネルギー、または社会システムを、どう、より良いものに変えていくかということの回転、輪というふうに呼んでおります。こちらは人材、そして知識基盤、このようなものをベースにして良い適切な意思決定ができるかという、これはどちらかというと人間系の和だということで書いてございます。

提言 1

まず、提言の1から6のうちの提言の1です。これは先ほどちょっと言葉が出ました。集中型分散型の資源が協調する需給構造への転換ということが必要です、または重要です、という提言でございます。これは従来の電力システムまたはエネルギーシステムは非常に大きなプラントで、電気または燃料、いろいろなものを生産して、それを配分して使ってきたということになるわけですけれども、屋根の上の太陽光発電またはそのバッテリー、そういうものが新たに加わってきた、それも非常にたくさんの数で加わってきて、量としてはどっこいどっこい集中型のものと似たようなレベルに今なりつつある。なりつつある以上はこの 2 つのもののいいところを出し合って、または悪いところを制御するということで進んでいかないといけない。需要は勝手に使っていいですよとか、分散型の電源は流しっぱなしで大丈夫ですよということにすると、非常に社会全体としてコストがかかる、信頼性が落ちるというようなことが起こりますので、協調するということが非常に重要です、ということを語っているという部分になります。

提言 2

提言2でございます。これは政策市場の設計というところになります。ここは非常に論点が多くて難しいところです。一つ、この一番上で申し上げているのは、何のためにその制度があるのかということ自体が変わりつつあるという中で、レジリエンスとか災害とか、新しいその目的に当たる部分を包含するようなものになっていかないといけないということがあります。あとは、これは電力システムの中で短期的に見ると、市場がやっぱりちょっと日本は発達が遅れている。これは端的に申し上げますと、太陽光発電や風力発電がたくさん入ってくると、明日の天気予報が外れると、計画を大きく変更しないといけない。変更できなければ若干危ないところもある。これをうまくやるためにソフトウェアというものがちゃんと導入されているか、ということについては改善の余地があるかなということがありますし、まだ解決が十分見えてないというところでは、中長期的に発電所をどうやったら確保できるのかということに関して、技術ではなくて、ファイナンスであるとか規制であるとか、そういう制度側の努力も求められるというようなことを書いてございます。いずれにしても、こちらも同じことは、不確実な中でどううまく立ち回るかというところが非常に重要であって、一つのキーワードとしては、技術になるべく中立な制度というものが作れれば、期待値としては上がるのではないかというふうにまとめております。

提言 3

提言の3です。社会インフラ移行への統合設計への貢献ということです。これは実際の議論の中で出てくると思いますが、電力×○○ということで、今までは電力を使うでしょうということで、電力をただ供給してきたわけなのですけれども、社会自体が変わってきて、電力の使い方も変わってくるし、電力から新たな価値が出ることもあるし、社会から電力への要請が出ることもあるということなので、電力×○○。電力が先に書いてあるのがちょっと僭越かもしれませんけれども、電力をやる側、エネルギーを考える側も、社会に向かって開いていかないといけないということを提言しているということになります。

提言 4

それから、意思決定の提言4ですけれども、こちらは中長期視点で意思決定がしっかりできるプロセスが必要です、ということになります。ここで申し上げたいのは、なかなかオールマイティーの人、または組織があって、全部を見通して意思決定をするっていうのはなかなか難しいだろうということだろうと思います。そういうことになると、誰が何をどのように意思決定をするかということも若干考えていかないといけない。統合設計をするというために意思決定をするとすれば、多様な立場、多様な価値観を持つ主体がまず参加することが必要。これに加えて言いっぱなしにならないように論拠を残しつつ修正をして、今年はここまで、来年はここまで議論を一つずつ積み上げていくと。積み上げていく過程で論拠を残しておけばこの部分が変わったので、こう変わらないといけないという議論がおそらくしやすくなるであろうというようなことを考えたわけです。

提言 5

次が提言5です。そのような意思決定をするために必要なものとして、まずはその人の存在があるだろうということになります。当然その人というものは、会社またはお役所、または大学、いろんなところでいろんな役割を果たしているわけなのですが、必ず何らかの専門的知識またはスキルというものを持っているわけです。なんですけれども、大きな変化が起こっているという中で、その変化を捉えるというためには、その専門的な分野に留めないで、分野を横断して周りを俯瞰できる、そういう能力が重要だというふうに考えました。特にそれは繰り返しになりますけれども、不確実性の高い環境の中では、変化を予見するというようなことまで必要になるということだろうと思っております。とはいうものの、今度は電力にもう一回立ち返りますと、自然災害とかいろんなトラブルが起こる中で、安定した電気を届けないといけない、または安定したエネルギーを届けないといけないという意味ではまさにその届けるということを持続的にするような人材も必ず必要であるということも言えます。まあ次にございますように、多様な専門家が協調して知識を継続的に共有継承できる人の集まりが重要であって、かつその知識基盤、人間の記憶というのがある程度限界がありますので、それを今の技術も使って共有していくということが重要ですし、それぞれによって一人の人間が俯瞰できる範囲も広がっていくだろうというふうに考えたわけです。こういうことをすることで、人間が育っていくのではないかということを考えました。忘れてはいけないのは、教育というのはとても重要なのですが、その教育自体にも既存の教育体系に十分当てはまらないようなスキルというものもある。それはどうやって伝えていくか、というところも重要か、というふうに思った次第でございます。

提言 6

最後になります。提言の6です。知識基盤の整備と継続的な進化というところでございます。何度も繰り返しになってしまいますけれども、不確実だと。その中で意思決定しないといけない。人間も育てないといけないということを前提にしますと、新たな、ここでは解析という言葉になってしまっていますが、新たなニーズに対応した新たなデータとツールが必要になる。データとツールも必要になるということだろうと思います。多様なデータとモデルを整備して、解析・分析能力をはじめとする各分野の人材を育成できる環境を高めることがとても重要だろうというふうに考えたわけです。日本の事情をちょっと考えますと、秘匿性とか競争性というのに非常に配慮がされています。逆に言うと、その配慮があるために、なかなかデータが使いにくいというような実態もございます。こういうところにも光を当てて必要なデータがそのプライバシーとかリスクというものを作らない範囲で活用できるものにしていかないといけない、というのは大きな条件になるだろうというふうに考えております。そういうことをやることによって、こちらにございますように、制度であったり、技術的な設計であったり、いろんなものを事後で評価することができるようになる。それをまた貯めるということで、知識の基盤が充実していくということであろうというふうに思っておりますし、最終的には人間が行う意思決定の材料になっていくというふうに考えたわけでございます。

提言の実装

提言の実装というところですけど、ここにございますように提言1から3が並んでいる上の輪というふうにここでは呼んでいますけれども、社会インフラ、電力、エネルギーのインフラ、社会インフラ、制度をより良いものにしていく、その一つの輪と、先ほど申し上げました、人材と知識基盤を育てて意思決定につないでいくというもう一つの別の輪があるということを意識して、実装していくと良いかなというふうに思っております。

今後の課題

今後の課題としてはここにいくつか挙げましたけれども、アドホックにボランタリーで集まった人間がいろいろ考えたものであります。少し腰を落ち着けて調査をしたり整理をするということは今後必要になるだろうということをまとめさせていただいております。

最後に AI 時代の知の公共基盤に向けてというところですが、ここは司会をやっておられる城石さんが力を入れて書いたところなのですけれども、ここにございますように、結局そのいろいろなことを話してきたのですけれども、ある共通問題、問題意識にたどり着きましたというところでございます。それは何かというと、第二の輪のところをどう我々がその電力やエネルギーに限らず進めていけるか、というところに、これからの大きな考えるニーズがあるかなというふうに思っております。

ということで、全体を申し上げました。あとここにこの報告書は発言録要旨が52ページ、それから発言録が約300ページ付いて、全体で500ページ弱のものになっております。この発言録は10回の会合と2回のシンポジウムの発言の記録でございます。具体的には、今申し上げたような、ほわっとした話ばかりではなく、もっと具体的な話がたくさん出た、それもお伝えしたいと。実際には、そこからなるべく情報を上げて報告書を作ったということでございますので、報告書の段階で発言録というのも名前は削るということになりますけ

れども、公開するということで、本当の議論がどうだったであったかというのをお伝えしたいと思っております。
私から以上です。

（城石）

ありがとうございました。補足してお話しさせていただきますと、PL の企画がとにかく非常に素晴らしくて、AI を使っていろいろと発言録とか議事録とか、そういうのをまとめさせていただいているんですけれども、これについては非常に厳密に Evidence ベースでやっております。AI は結構適当なことを言いかねない性格があるので、それを厳密に人間の方でチェックして、発言や議論に忠実に内容をまとめてくださったということで、裏話ということでさせていただきます。特に報告書につきましては、提言も含めて全部、PL、あるいは委員の先生方が厳密にチェックされておりますので、最終的には人間が責任を持って作った報告書になった、ということをご報告させていただければというように思います。

PL から全体報告書の全体像と提言の概要についてご説明させていただきましたけれども、今のお話にございました6つの提言そのものにつきまして、もう少し詳細にこれから提言1から提言6まで、それぞれの先生方にお話しいただければというように思います。

提言 1（集中/分散の協調）に関する議論

（司会）

最初に提言 1「集中分散の協調に関する議論について」と題しまして、東京大学の大学院新領域創成科学研究科教授の馬場旬平様にご発表をお願いしたいと思います。よろしくお願いいたします。

（馬場）

ご紹介いただき、どうもありがとうございました。それでは提言1「集中型/分散型資源が協調する需給構造への転換に関する議論」ということで、私、馬場の方から話をさせていただければなというふうに思います。

集中型/分散型資源協調への転換

私自身はこのプロジェクトの中で、先ほどリストの中にもありました通り、パワーエレクトロニクス、インバータの技術についてお話をさせていただき、そのことからも分かる通り、私はどちらかというと分散型の資源をどううまく使っていくかを研究している人間です。そのため、タイトルに集中/分散と書いてありますが、どちらかというと分散型の方に偏ってお話することになります。今まで分散型の資源は脇役で、とにかく「システム全体を邪魔しないでくれ」といわれる立場であったものが、今や主役に躍り出つつあることでありまして、非常に今構造転換が必要な次期になってきていることからも、主として分散型の資源がどう協調する形の絵姿が描けるのかについてお話したいと思っています。

提言 1 は、先ほど PL の方からの説明の通りと思いますが、多数の分散型の資源が電力システムの運用に能動的に参加する、うまく参加させることだと思います。また、分散型の資源にはいろいろなものがありますので、その多様な特性を生かして、集中型の資源と協調する需給構造へ移行する将来になることだと思います。また、全ての要素をその特性に応じて社会が求める機能に基づいて選択をして、多数の分散型の資源が自律的に機能する、そういった運用の体系をどう使っていくのかについても、システムとしてよく考える必要があるというのが、提言 1 です。提言 1 の説明だけだとこれでおしまいですが、少しお話をさせていただきます。

分散エネルギー資源(DER)の普及

最初に、復習として、分散エネルギー資源の普及状況について、先ほど荻本先生の講演の中にもありました通り、例えば日本だと PV に代表される変動性再生可能エネルギー、それから最近ですと、バッテリーエナジーストレージシステム（BESS）と呼ばれる電池、それからずっと前から普及いるヒートポンプ給湯器、これからの EV やデータセンターが増えてくるだろうと。現状の我が国では、昼間のピークの需要が、中間期で 80 ギガワット、ピーク期で 160GW と言われているのに対し、太陽光はもう 70GW ぐらいの容量が導入されている。さらに、エネルギー貯蔵装置が接続検討として 190GW ぐらいの申し込みがあり、昔から普及が進められているヒートポンプ給湯器が 1000 万台を超えた状況で、分散型のエネルギー資源、資源になっているのかというはありますが、それらが普及してきています。これらが能動的に系統運用に活用されているかとうとそうではなくて、受動的な感じですが、実はポテンシャルとしては能動的に動かす能力があり、うまく使っていこうというようなことになっています。

もちろん、下に書いてある通り、DER が電力系統に与える影響は無視できなくなりつつあり、最初から言及されております需給が非常に困難になりつつあり、その他いろいろな課題が顕在化しつつあります。この

状態の中で、分散型エネルギー資源が単に系統に接続しているだけの状態では対応が困難であるため、この活用を図る必要があるということです。

DER 電力システム構築の可能性と課題

一方で、極端な議論として、DER だけで電力システムを構築可能なのかという質問をよく受けます。技術的には可能であると思います。例えば離島では、DER だけでシステムを組んでいる例はありますが、規模の大きなシステムではコストや停電のリスク考えると、社会的に重要性のあるシステム DER だけで構築するのはまだまだ難しいと思います。そうだとすると、既存の集中型の大型の電源と分散型の電源が共存して、両方のいいところを生かしたシステムを作る必要があるということになります。ただし、そのようなシステムの構築は、投資の予見性がないと持続不可能であるということです。

この投資の予見性は非常にいろんなところで言われていて、最近では大型電源の維持が非常に難しく、10 年後、20 年後に維持できているのかが大きな議論になっていますし、一方で分散型の電源の資源の普及についても、投資の予見性がなく難しく、いろんな議論がされています。一方、大型電源と DER の間に入ってくる送配電系統についても議論を深める必要があると思っています。

「データ」収集の重要性

そういった中で、必要になるものとして、提言6で出てくるデータの収集が非常に重要になると思っています。非常に能動的な DER の普及のもとでは、それらの挙動が非常に複雑化し、これらの複雑な挙動への対応のために、今でも盛んにシミュレーションを使った検討が行われています。そこで重要になってくるのが、系統や分散電源の制御系の情報で、これらをどう集めていくのか、それから実際にどういうことが起こっているのかについて、最近の流行りですが PMU（Phasor Measurement Unit）を使った計測が非常に重要になってきます。2024 年に発生したイベリア半島の大規模停電では、事後の現象把握にこの PMU の計測データが活用され、迅速に分析に活用され、そういった意味でデータの収集が非常に重要であると考えます。

もう一つ分散資源ということでいうと、Behind The Meter の情報、電力の計量メーターの背後の需要側のデータを、先ほどの投資予見性の話じゃないですけれど、低コストで集めていくのかが課題であると思います。

系統シミュレーション基盤構築

先ほど申し上げたとおり、系統のシミュレーションも非常に重要であり、これは世界的にもよく言われていることです。従来の実効値解析（Phasor Domain Transient Simulation）に加えて、瞬時値解析（Electromagnetic Transient Simulation）が非常に強力なツールだということで、非常に大規模な系統についても EMT シミュレーションできるようにしようという取り組みが世界で出てきています。その時には系統情報を統一的に扱えるデータセットや、DR の情報をいかに受け渡すかが非常に課題になってきていると思います。

最近では、電源だけでなく、PEIL と読むのでしょうか、Power Electronic Interface Load というものについても、データセンターをはじめとして、それらの能動的なきも、ちゃんと把握する必要があると思います。その中で、最近 Grid Forming Inverter が需要なキーワードになっていて、これ私のインバータ技術の討議会でもお話したのですが、それらの導入が今後必要という話があります。これについては 8 月の CIGRE パリ大会でどなたかの発言で「GFM is not a silver bullet」言ったように、ドラキュラを倒す一発の銀の弾丸、そういった必殺技ではなく、つまり GFM の導入が最終的な解決手段ではないということです。GFM は有効な手段ですが、設計と外部の条件に依存するため、どううまく使っていくかをちゃんと考えていこうということです。重要だけど万能薬ではない GFM を生かすためにはデータの収集と分析が重要だと考えます。

グリッドコード

グリッドコードという話が先ほども出てきました。今までグリッドコードは分散型のエネルギー資源の中でも発電側にしかなかったのですが、最近のアイルランドでは系統の需要に占めるデータセンターの割合が非常に増加して、ちょっとした電圧の上昇で、データセンターの 無停電電源装置（UPS）の停止によりし需要が脱落して、電力システムの周波数が急に上がる現象がもう発生しています。

そういった意味では、需要家側にどういうような機能を持たせるのかをあまり明確に言われてなかったのですが、分散リソースをうまく統合、統合するためには、ちゃんとしたルールが必要で、シミュレーションなどによりいろいろ条件によって変わる必要な機能の選定が重要になってきます。ただ、この必要な機能の選

定は非常に難しくて、公平性からは全ての機器に同じ機能が必要になるわけですが、場所によっては必要な機能もあり、そういったようなものについても、ちゃんと入れて、必要なところで必要なものを使える高度体験にしていかないと、今後難しいだろうと思っているころです。

ステークホルダー間の対話

最後に、ステークホルダー間の対話が非常に重要です。ここにありますように、グランドデザインを描ける体制と統合設計を作ることが非常に重要だと思っています。今、発電、送配電、需要が切り分けられている中で、それぞれのセクターの中で個別の最適化をしてしまい、全体として効率的なものができていません。それをどう統合的にデザインしていくのかが重要だと思います。その中で、ステークホルダー間のコモンセンス、共通の理解として、電力システムでは何を目的として、その実現のために何をしなくてはならないのかを共有して、ある一つの目標に対して進めていく体制を作ることが重要だと思います。

最後に、「Ask not what your country can do for you. Ask what you can do for your country.」、これはジョン・F・ケネディが大統領に就任をした時の有名な演説の一節で、私は中学の英語の授業か何かで出てきたものです。何となく頭の中に残っていた言葉ですが、結局これが何かというと、自由主義の体制を維持するためには、国家に期待するのではなく、一人一人が自発的に何ができるかを考えて行動することが必要だと。これと全く同じように考えて、電力システム、より大きなシステムのことを考えてもいいと思いますが、全体として何を目指していて、それに対してどういう貢献ができるのかを考えて各ステークホルダーが動いていく、そうすることによって、分散エネルギー資源、集中電源、系統、小売りなど、そういったような人たちがそういった意識の下でやって今後のことを考えていく、これが非常に重要ではないかなと思っています。

以上で終わりにしたいと思います。ご清聴ありがとうございました。

（司会）

馬場先生、どうもありがとうございました。

提言 2（制度）に関する議論

（司会）

続きまして「提言 2 制度に関する議論について」と題しまして、東京電力ホールディングス株式会社経営技術戦略研究所経営戦略調査室チーフエコノミストの戸田直樹様にご発表をお願いしたいと思います。

（戸田）

ご紹介ありがとうございます。東京電力ホールディングスの戸田です。

制度と一言で言っても、ほんとうにいろいろな局面に関係してくるので、ここでは包括的なお話しをすることは諦めて、ピンポイントの話として、今回「発電部門は競争領域のままでよいか」という少し挑戦的なタイトルをつけさせていただきました。

それで、提言 2 を本当にざっくりまとめると、こういうことかと理解していますが（当日スライド 2、以下同様）、マーカーを付した中長期的な課題のところを取り上げます。

電力システム(電気事業)の特徴と投資モデル

「発電部門における投資の確保」が世界的な課題となっています。先ほど PL の説明の通り、これといった解がないという状況であり、各国でそれぞれの取り組みがいろいろ行われているのですが、観察していると、投資が確保されれば全体が裨益するため、発電部門は全体で支える公共財的なものに変化してきていると感じており、そこにピンポイントしてお話しします。

改めて電力システムとか電気事業の特徴を書いています。ざっくり言うと、需給バランスが崩れると影響が甚大なので、安定供給が非常に重要で、そのためには一定の冗長性を持って設備が確保されることが必要で、ひいては必要な投資が着実になされることが必要なシステムと言えると思っています。

事業としての特徴は、ここに列挙したようにいろいろあるのですが、本日の文脈で重要なのは費用低減産業であるというところです。これは規模の経済性とか自然独占性という言葉でも表現されるのですが、これを根拠として長らく地域独占の事業モデルを採用してきた経緯があります。

先ほどのべた投資が滞るという課題について、今まで投資がどのように確保されてきたか、あるいは確保されると言われてきたかについて簡単に説明します。地域独占のモデルの場合は、供給義務を課された事業者が一社いて、その事業者が必要な投資を判断し、行われた投資は規制された電気料金を通じて皆さんが負担するという、言ってみれば投資のリスクを社会全体で引き受けていました。今風に言うと協調領域になると思っています。いわゆる自由化が始まった時は、送配電網は規模の経済が残るけれども、発電分

野は規模の経済がなくなったという話で始まり、発電に競争が導入されました。供給義務は基本的になくなり、市場の価格シグナルで各事業者が投資を判断してその責任も負う、他方送配電については、引き続き規模の経済性があり、総括原価の要素が残る、そういう制度になったということであります。スライド 4 であえて「古い競争モデル」としているのは、このモデルに限界が来ていると思っているのでこの呼び方をしているわけですが、その考え方は完全競争を理想とする発電市場が価格シグナルを出して、これにより短期の電源運用も長期の電源投資も最適化されるとする考え方です。

これに基づいて完全競争市場を目指す施策が日本でも盛んに行われてきて、その代表的な手法が大手発電事業者に限界費用による市場投入を求めることでした。これは、ここ(スライド 5)に記した完全競争市場が成立する条件の(1)を実現しようとしたと理解できます。今は無数の消費者はすでに存在するが、無数の生産者は存在しない、でも、本当に無数にはできないので、大手事業者の行動を束縛して無数の事業者がいるかのように振る舞うことを求めるのが限界費用による入札です。つまり、「限界費用で市場に投入することは、誰も市場支配ができなくて、市場価格を受け入れるしかない時に利益を最大化する合理的な行動」ということが経済学の教科書に書いてあるので、これを実践したということです。

その結果どうなったかというと、実際の発電市場は、情報が完全ではなく、市場への参入と退出は自由ではなく、コストも時間も手間もかかります。つまり、完全競争市場とは言えないのに、教科書に載っている合理的な行動を強制した結果、過少投資を招く結果になったのが実態だった思っています。そのメカニズムは、電気事業の実態に即した形でもう少し説明できると思っていて、次のスライド 6 の「古い競争モデルが過少投資を招来する理由」に示しました。本日は説明を省かせていただきます。

古い競争モデルの限界:ハイブリッド市場

これまで、日本を含む多くの先進国は、私が「古い競争モデル」と呼んでいるモデルを採用してきました。振り返ってみると、電力需要が低成長で投資ニーズも小さく、地域独占時代の遺産がある状況で当初はなんとか乗り切ったものの、今は遺産を食いつぶしてしまっている、加えて、電力需要は反転して増加すると言われており、更に脱炭素政策もあり、新たな大量投資のニーズが生じている状況です。これにどう対処しましょうかという話なのですが、今までのモデルの延長線では難しいだろうと思っています。

ここで書いている「ハイブリッド市場」モデルは、Paul JOSKOW(MIT)、Jan Horst KEPPLER (パリ・ドフィーヌ大学)らが提唱しています。古い競争モデルでは、長期的な投資決定と短期的な運用は同時に最適化されるという話だったのですが、これらを切り離すということです。2 つの段階の競争があって、一つは Competition for the market 、市場に参加するための競争で、これには性格上、国などの役割が必要で、必要な量の電源をあらかじめ長期契約などで確保する。その方法論としては競争入札がまず考えられます。落札した電源は、必然とまでは言い切れませんがシステム全体で支える協調領域に位置づけられるのが自然であろうと思っています。ここで確保された電源が、「Competition in the market (市場における競争)」の中で競争して、それは短期の卸電力市場になることが多いと思いますが、最適運用が成立すると思っています。世界を見てみると、この考え方の実装例がいくつか見られてきています。ここでは、EU とオーストラリアの例を紹介したいと思います。

EU の例:CfD

まず EU の例です。差額調整契約(CfD: Contract for Difference)と言われるもので、物理的な電気のやりとりはスポット市場で行う一方で、売り手と買い手の間であらかじめ基準価格というものを合意し、事後的にお金の清算をする契約です。市場価格が基準価格よりも安ければ、買い手は売り手に差額を支払い、市場価格が高騰した時は売り手から買い手に基準価格との差額が返金される仕組みです。これは従来から事業者間、あるいは事業者と大口事業者の間のリスクヘッジのための契約として存在していたものですが、EU はこれに発電事業者と政府の契約という新たな位置づけを与えています。

発電事業者と政府の間の CfD は、政府が発電会社に対して基準価格による売電収入を保証していることと同義です。対象となる電源種をスライド 9 に記しましたが、いずれも限界費用がゼロあるいはゼロに近いもので、これらが増えると平均的な市場価格は下がります、その代わりにプライススパイクはより先鋭化し、必然的にリスクは高まるのですが、CfD の基準価格を平均費用プラスアルファに設定しておくことで、投資回収の予見性が高まるというものです。

ただ、CfD は、政府が無制限に適用してよいわけではなく、量的な枠を決めて対象となる電源を選定するプロセスが必ずあり、この選定の過程が Competition for the market であり、それによって選ばれた電源が Competition in the market で運用されるということです。この Competition in the market が出す価格シグ

ナルは、電源の投資回収には影響しませんが、需要サイドに経済合理的な行動を促すものになると思っています。

テナーギャップとオーストラリアの例

次にオーストラリアの例です。まず、契約期間のギャップ、テナーギャップという言葉を説明します。発電事業者は投資家として長期の投資を行うため、通常は 15 年以上の長期契約を希望しますが、一方、電気を買う側の小売り事業者は将来の需要が不確実なので短期の契約を好み、3 年を超える契約は難しい状況です。このギャップをテナーギャップと呼び、このギャップのため現在の市場では発電事業者の投資判断が難しいことになります。

通常、他のエネルギー市場では、金融プレイヤーとか、いわゆる投機筋が入ってきて間をつなぎ、それによって石油市場、ガス市場はとても厚みがあるのですが、それでも実態は 5 年以上の先の取引はとても薄いのが実態で、彼らも電力市場ではあまり役立たないのが実態だと思っています。

テナーギャップという言葉は、昨年の末に IEA が公表した報告書で使われ、私はそこで初めて見たのですが、今の日本で行われている小売電気事業者の安定供給への貢献に関する議論の中でも、このことが意識されていると理解しています。ただ、日本の場合、小売電気事業者は契約期間を長くすることにさらに慎重で、3 年を超える契約が難しいのではなく、3 年契約を一定量に義務付けようとしているところで揉めている状況です。

それでオーストラリアは何をしたか、しようとしているかです。ESEM（Electricity Services Entry Mechanism）という制度の設計が行われていると聞いています。ESEM では、発電事業者が 15 年の契約を求めるとして、電源のライフサイクルの初期の 3 年間については小売り事業者がリスクを取れるので短期の契約を結び、4 年目以降については、ESEM 管理者が契約を結びます。そして、ESEM 管理者は、自分が結んだ長期の契約を、今度は順次短期の契約に置き換えて小売り事業者に売るという仕組みです。ここでその短期の契約と長期の契約のスワッピング（組み替え）が行われ、これに伴うリスクが存在します。これはテナーギャップという言葉がある通り民間の市場取引の中では誰も取れないリスクであるため、ESEM 管理者は公の存在にならざるを得ないことになります。オーストラリアはこのような制度を実施しようとしているのであります。

スライド 12 は、10 年前に亡くなった澤昭裕さん、私お世話になった方ですが、彼が 2012 年に書かれた論考を紹介しています。当時はなかった言葉ですが、彼もハイブリッド市場を提案していたと言えます。

その他の問題意識

最後に、自分が持っているその他の問題意識を 2 点ほどお話しします。

送配電部門は、今までなかった規模の大規模需要が出てきて、送電系統の増強に大きなコストがかかる状況になっています。広く利用者が負担し被益する設備だからみんなが等しく費用を負担するという今までの理屈では、対応が難しくなりつつあることを皆さんは感じていると思います。そのためにどうするのかについては、私も定見がないところですが、問題意識は当然あります。

もう一点、提言では技術中立という言葉が出てきています。技術中立性ではない例として今思いつくものに炭素価格があります。今日本で導入しようとしている制度では、おそらくは電気の方が石油ガスより炭素価格の負担が重くなっていて、この最大の弊害は合理的なエネルギー選択が阻害されることです。

以上であります。ご清聴ありがとうございました。

（城石）

戸田先生、どうもありがとうございました。

提言 3（電力×○○と指標体系）に関する議論

（城石）

続きまして提言 3、電力×○○と指標体系に関する議論ということで、東京大学大学院工学系研究科教授小宮山涼一様にご発表をお願いします。

（小宮山）

ただ今ご紹介に預かりました小宮山と申します。

私からは提言 3 に関する、電力×○○と指標体系に関する議論ということで、私ぐらいの世代になると「電力×○○」ってあまりなじみのない表現ですけれど、最近よく学生さんと打ち合わせの中の発表ではよくこの「×」を使って、電力を他のものとコラボするような表現を見ますし、流行っているという気もしています。

簡単に言うと、おそらく様々なものを電力化して、電力の社会で重要性が非常に高まっていくという議論の中で、何が必要か、何を対策として今後強化すべきか、そうした内容です。

ホルムズ海峡危機と電力×〇〇

最近ではホルムズ海峡を巡るエネルギーセキュリティの観点から、電化を進めること、それと同時に脱炭素電源である再生可能エネルギーや原子力の比率を高めることで、エネルギーの自給率を引き上げていく、そうしたことが国際的にも注目されて、今後加速すると思われます。また、昨年の IEA の報告書で指摘された THE AGE OF ELECTRICITY でも、こうした電化が述べられ、脱炭素電源の導入を進め、エネルギー全体のセキュリティを高めることも考えられます。電力の時代ということでも、国際的にもこの電力×〇〇、そうした潮流が、今後もおそらく、そのテンポは、不確実性はあるにせよ、大きなベクトルとして進むという印象を個人としても思っています。

こうした電力が社会で重みを増す中で、電力を支えるためにはサプライチェーンとしての様々な価値が必要になり、供給力（キロワット、キロワットアワー）、そして調整力は特に自然変動電源の大量普及には欠かせない要素だと思います。加えて、イギリス等では価値づけが実際行われ指標化されていますが、日本ではまだ市場化、価値の取引が行われていない慣性力や同期化力などの価値が、今後一層高まっていく中で、これらをどう考えどう市場をアップグレードしていくか、そうした議論が必要になるかと思います。

その上で、電力×〇〇は、電力化が進展することで私たちはリスクとして何を考えなければいけないか、それは今回の 2026 年のホルムズ海峡危機にあると思っています。あらゆるエネルギー源、電力はもとより、ガス、石油、液体燃料もそうだと思いますが、レジリエンス、セキュリティ、保安、安全など、こうした要素がなければ、エネルギーの利活用というのはなされないと思います。特にホルムズ海峡危機を振り返ると、中東からの原油の輸出・輸送が大幅に停滞し、このチョークポイント、ホルムズ海峡が大変重要であることが、社会でも大いに再認識がなされました。日本の場合は、原油の9割超をこれまで中東に、より正確には単一のチョークポイントに依存してきたことになります。

中東原油は、平時は大量に安定した価格で調達できるということで、合理的な調達先ではありますが、今回のように想定外とも言えないと感じますが、危機発生時には急速に供給途絶リスクが顕在化するため、危機発生時のエネルギー供給機能の維持・継続は避けて通れない問題かと思います。特に電力×〇〇による電力化の浸透のもとでは、レジリエンスは避けて通れない課題かと思います。

今後、ホルムズ海峡の問題を踏まえ、石油では短期的には備蓄をより増強して緊急時対応をより強化する、また調達先および輸送ルートを多角化していくことが必要です。足元の最新の統計を見ますと、すでに米国の原油が 3 割を占め、中東原油の比率は 6 割台まで低下していると思います。また、ホルムズ海峡以外の、ヤンブーやフジャイラからの中東原油の輸出もかなり堅調に進んでいると思います。

おそらくここで電力化、電力×〇〇というオプションが、特に中長期的に有益な方策として国際的にも注目されると思います。海外からの輸入燃料依存、化石燃料依存のリスクを低減することを、電力化を一つのオプションとして進めていくことが、エネルギーの自給率の向上、安全保障の強化に向けてしっかり進めていくことが大切になると思っています。

我が国のエネルギー自給率と電力化率

ご案内のとおり、日本のエネルギー自給率は諸外国に比べて極めて低く、その状況は半世紀前からあまり変わっていません。今回のホルムズ海峡危機を大きな教訓として、エネルギー自給率を積極的に向上する抜本的な取り組みが大切です。その中での電力化率の日本の立ち位置は、今後の電力化を進める上で、諸外国に比べて電力化がすでに高く、他の国よりもすでに優位なポジションにあるということは認識する必要があると思っています。日本は、すでに諸外国に比べて電力化率が高い水準にありますので、これを土台にさらに高めていく。その中でやはりレジリエンスを、どういうふうに考えていくか。やはり様々な産業分野の方とも協力しながら、日本独自のシステムを世界に発信するという方向性があると考えます。

アジア諸国の中でも、中国、それからベトナム等の電力化率は、産業分野の電化、EV の普及などで、日本に追いつきつつありますけれども、まだ、特に欧州、米国、イギリス、ドイツは世界平均ぐらいの 20%ぐらいです。フランスは原子力が電力の約 7 割を占めますが、電力化率は 25%ぐらいの少し高い水準にあります。電力化を進めていく中で、レジリエンスも強化しながら、うまく自給率ひいてはエネルギーセキュリティの向上を図ることが大切であると受け止めています。

電力需要の増大と自給率 100%に向けて

試算としても、エネルギーモデルにより、二酸化炭素のネットゼロを制約条件として最適化すると、かなり急速に電力需要が伸びていきます。その中で脱炭素電源も普及拡大していくことで、ネットゼロ、脱炭素化を実現し、こうした電力化による電力×〇〇、それから脱炭素電源の導入強化を統合的に進めることで、エネルギーセキュリティ、それから脱炭素を両立しながら進めることが、国際的にも大切な視点になっているというふうに受け止めています。

ただし、電化のポテンシャルとして、例えば今、国の方でも検討されている電力需要の見通しと、それから現実的に、例えば電力を使って水素を製造して石油を代替する、それからイーメタン(e-methane)、SOEC 共電解は効率最大九十パーセントぐらいの技術、またサバティエ反応はだいたいおよそ効率六十パーセントぐらいの技術ですが、これらで今、現状の日本の石油の 10%、30%、50%、100%の代替に必要な電力消費量は、換算すると、相当な電力量になります。仮に水電解水素で日本の今の石油の消費量の 1 割を代替するだけで、約 2000 億 kWh ぐらい、近畿圏や中部圏の電力消費量と同規模の電力量が必要になるということで、やはりこうした電化電力×〇〇を考える上では、電力の供給力の安定確保が不可欠な問題であることを認識する必要があると思っています。

最後に、前回のこちらの EAJ のプロジェクトの後半シンポジウムでは、日本の今後の究極的な姿として、エネルギー自給率 100%を実現する場合の日本の電力需要の伸びの試算をご報告しました。その結果、おそらく電力需要は 3 兆 kWh、日本の現在の電力需要を 1 兆 kWh とすると、約 3 倍増加する試算を紹介しました。各部門の最終消費部門の直接の電化と、それから e フューエル生産による間接電化で大体合わせて 3 兆 kWh です。ここで問題になるのは、変動性再エネが主力とならざるを得ず、原子力 100GW 想定しても、太陽光の場合は 1,800GW、風力の場合は 280GW と相当量の変動性再エネが必要になります。その中でフレキシビリティの確保が安定供給上必要であり、エネルギーセキュリティや脱炭素化の文脈からも柔軟性の確保の役割がますます大切になると思われます。こちらも 100%電化の世界では、電力供給と電力需要と書いてあるものも、ほとんど一次エネルギー供給と最終エネルギー需要全体の時間変動に相当するため、調整力やフレキシビリティの確保がより重みを増すと受け止めています。

最後に、電化率の上昇は、電力の社会的な重要性の高まりを意味しますので、電力の安定供給は、エネルギー全体の安定供給の重要な要因になることをしっかり認識することが大切であることを述べて、結びとさせていただきます。

ご清聴ありがとうございました。

（司会）

小宮山先生、ありがとうございました。

提言 4（意思決定）に関する議論

（司会）

それでは続きまして、提言 4 意思決定に関する議論につきまして、東京大学未来ビジョン研究センター教授杉山昌広様にご発表をお願いいたします。杉山先生、よろしくお願いいたします。

（杉山）

杉山です。どうぞよろしくお願いいたします。

少し毛色が違う話になると思いますが、意思決定についてお題をいただきましたのでお話をさせていただきます。私は、最近は環境政策、長期気候政策を研究しておりますので、その観点からお話しします。

中長期視点での継続的意思決定プロセス

提言 4 では、PL が既にお話になられておりましたが、多様なステークホルダーが参加した継続的な議論の場の形成と、その議論を継続的かつ定期的に行うための指標体系の設定、それから一般的には EBPM と言われることが多い意思決定の方法論としての EIPM、エビデンスに基づく/踏まえた意思決定を進める必要があることと、長期計画とか、荻本先生のスライドにも既にありました長期的な PDCA の二つの輪での見直しの必要性について述べられています。

私の方でいただいたのは、 S-I-L-K の L（Leadership）に関連する論点を提示する役目と思っています。具体的に掘り下げると、リーダーシップの能力をどう高めるか、意思決定の能力について考えたいですし、それからエビデンスデータを統合するための能力をどう高めるかについての論点提示をしたいと思います。

用語について簡単に整理します。「意思決定」は本当に一般的な言葉で、個人が意思決定することもで

きれば、組織もできますし、社会政治で意思決定することも可能です。しかし、この場で話しているのは、電力システムの方向性を決める専門的な意思決定で、審議会や、国の R&D や、OCCTO や、政策の方向性などだと思います。政治社会なども当然に相互作用しますが、ここは立ち入らないで議論させていただきます。これを開けてしまいますと、もう政治学のメインの議論になりますので、そこは避けたいと思います。

それから、リーダーシップっていう言葉を使っています。これはリーダーではなくて、リーダーシップ。リーダーがいても、リーダーシップが発揮されないということは、世の中に様々な事例がありますし、部下に寝返られてしまうリーダーというのもいっぱいいます。また、リーダーが失敗しても部下の能力が足りなかったらあまり効かないとか、そういう場面もたくさんあります。このため、専門的な意思決定のリーダーシップは、組織図上のリーダー以外も推進し得るということは心に留めておきたいと思います。

指標体系の設定：能力

それでは指標の話という話がありましたので、能力という概念を考えていきたいと思います。少し前のものになりますが私が書いた論文がありますので、それに触れながら議論させていただきます。能力、エビデンスとかそういう話を言いますが、まずエビデンスは平等ではありません。強いエビデンスもあれば弱いエビデンスもあり、弱いエビデンスに基づく意思決定はあまりよろしくないかと思います。

これは医療・健康の分野ですが、メタアナリシスとかシステマティック・レビューとか、RCT（randomized controlled trial）とか言うのですが、一番エビデンスのクオリティが低いものは、今私がまさに言っているようなことで、権威というか個人の研究者が言っていることが、一番エビデンスとしてはレベルが弱いと言われています。ですからクオリティを上げていきたいということです。この図は健康・医療の分野の場合で、気候変動の分野ではまた違う分け方がありますが、今回の荻本先生のこの EAJ のプロジェクトのように、複数の専門家で意見やエビデンスを持ち寄って議論すると、エビデンス高くなってきますし、単純な限られた分野ではなく、広い分野の先生を集めて議論する方法があります。

「能力（キャパシティ）」という見方

では、エビデンスを生成して使うことは簡単にできるかというとそうでもありません。能力は、エビデンスの生成にもありますが、エビデンスを使うということもあり、エビデンスを統合していくことにも能力があります。なぜ「能力」という言葉を使うかというと、私はこの能力は最近能力概念として非常に有効かなと思っており、大体測れるが、正確に測ることは非常に難しいと考えます。それから、日本が弱いところがあったとしても、長期的には伸ばすことができます。

私、サッカーは全く疎いですけれども、今年話題になった、サッカーをずっと子供の頃から追っかけてる方は、日本サッカーは強くなったなと思う方多いと思います。それは一日で起きたことではなく、J リーグができて、みんなヨーロッパに行って研鑽を積んで、そういった積み重ねがあって、日本のサッカーの能力、実力というのは明らかに向上したと思うわけです。ですから、能力という言葉を考えていきたいと思いますし、弱い部分があっても諦める必要はありません。学んで、それから伸ばすことができるので、能力っていうものを考えて考えればいいかなと思います。厳密に測ろうとすると逆にいろいろバックファイヤすると思います。

Evidence Informed Policy

これは政策の分野になりますけれども、エビデンスインフォームドポリシーEIP には能力が必要という形で、マイケルハウリーというその共著者が作った考え方です。一番右は政治とありますが、これは政策の直球で作られた、政策を念頭に置いて作られたものなので、「意思決定」ぐらいに読み替えていただきたいのですが、「分析」があり、分析をもとに「オペレーションしていく、実施していく」というのがあり、それから意思決定、それからさらに拡張して、一回だけではなくて、二回目のラーニングとか学習ということにも拡張することができると私は思っています。

日本の分野横断的な研究

この概念を使っていろいろ研究しているので、少し前の私自身の話に戻ります。日本の分野横断的研究は少なくて、電力×〇〇という話を、荻山先生も、私の前の登壇者である小宮山先生も話されましたが、やはり分野横断的な研究とか分野横断的な考え方は非常に重要だと思います。これは日本が弱いと伝統的によく言われていて、もう十年前の話でしかも私自身のデータでもありませんが、ここに示すように少ないと感じます。この状況は、最近でも似たようなものだと思いますし、先ほどは AI を使って確認をしていましたが、そういうことだと思います。

日本の再生可能エネルギー政策関連の論文

それから、再生可能エネルギー、このプロジェクトで変動性の再生可能エネルギーや分散型資源 DER の話題が多くありました。再生可能エネルギーには適切な政策が必要で、それから戸田様のお話にあったように適切な政策でないと電力システム自体に問題が起きてしまうと思います。しかし、再生可能エネルギー政策関連の論文は日本では少ないです。ここでは英文のピアレビューを受けた論文を「論文」としています。これは現状でもおおよそ変わってないと思います。

国際性

再生可能エネルギーとか特殊な分野化だけかなとは思わないでいただきたいです。東京大学、残念ながら QS の世界大学ランキングがまた下がりましたし、それは 1 分野に限らずかなりの分野で広く見られる現象であると思います。なぜそうかというと、日本の GDP は三倍のアメリカに比べて人口は三分の 1 ぐらいで、いずれの分野でも一国でカバーするのは無理なんです。ですから当然、東京大学、京都大学、大阪大学、いろんな大学の教授がピカピカでノーベル賞を取る人であっても、国自体がさすがに欧州 EU 、米国、中国と比べれば小さいので、どうしても抜けが出てくると思います。ですから、この状況については驚く必要性はなのですが、ではどうするかということを謙虚に考える必要があると思います。

国際性については、抜けがあるなら、別に自分でやらなくても、いろんな国で AI もあって翻訳も簡単で、いろんな国に助けてもらえばよくて、実はアメリカとかの方が実はオープンなところもあります。私の一つの研究トピックのジオエンジニアリング気候工学では、全米科学アカデミーの報告書なのに、結構外国人が含まれている例もよく見られます。

気になったので、電力を AI で検索したところ、電力系統などの報告書で海外の人が査読者や委員になっている例はアメリカですら多く見られているというところです。なぜ日本でやらないのかというのは、私がいつも疑問に思うところです。

国際社会で「能力」を磨く機会

日本工学アカデミーは国際工学アカデミー連合のメンバーであり、本プロジェクトの報告書にフィードバックをもらうのもいいですし、発表前に意見をもらうのは時間的に難しいかもしれません。ですが、今回のプロジェクトは難しいかもしれませんが、今回の報告書で全てが完結するわけではないので、今後機会があるかもしれませんし、長期的には、先ほど再生可能エネルギーの政策という話をしましたが、こういうところは Horizon Europe という大型研究プロジェクトで資金を獲得して論文を書き、しかも政策担当者と密接に連絡を取りながらというのは欧州ではよく見られることです。ですから、そういったことを日本でやるということも考えられるのではないかと思います。

サッカーでは、みんなヨーロッパに行くじゃないですか。こういう政策分野でもどんどん海外と交流することがいいと思います。それは別にヨーロッパ人が言うこと、あるいはアメリカ人が言うことが正しいということではないですし、日本には国際連系がないので独自の状況はあっても、海外と議論すると能力が磨かれると思います。

リーダーシップ発揮のための「能力」

もう一つ能力の話をします。個々人の能力あるいは分散したアクターの能力というのも重要になります。政府の議論、このプロジェクトでも司令塔という言葉がよく使われますが、私自身は色々と違和感を覚えるところがあります。というのも、日本の文化的に、ディシジョンメーカーが責任を取らないのが結構あります。また、本人が責任を取りたくても周りが忖度しているのか、それができないという状況があります。しれで、もう一回新しい司令塔を作っても、それが責任を取る主体になるのかは疑問に思うところです。

現代社会は高度に複雑化し、大きな不確実性があります。そのため、もちろん政治家、ディシジョンメーカー、様々なリーダーは必要ですが、リーダーシップこそが重要であると思いますし、リーダーシップには、高度に複雑化してさらに不確実性が高い現代社会においては、専門的な能力が必要ではないかと思います。

個の能力

後半では DX や AI の話などがもっと増えてくると思いますので、NETFLIX、西山慶太さんの本を引用して、非常にこう凄まじいレベルの社員とか役員とか、そういうレベルだと思いますけど、ということだそうです。

本当に何ですかね、ちょっと当時ですけど、CEO のヘイスティングに対して、彼のプレゼンや社内会議

の振る舞いに改善するべき点があると思えば、それをフィードバックすることが奨励されているのだろうということと、あと本当に全然管理されず任されている。トップの方だけですが、統率が非常に弱いそうで、それなのにあれだけの勢いで業績が伸びたのは、専門性と能力が、複雑な社会での一つのオーガナイジングプリンシプルになるのではないかと思います。

シングル/ダブル/トリプルループ学習

最後にちょっとだけ時間がありますのでもう一点お話しします。PL がされた長期の PDCA について、いろんなループがあると思います。経営学とか組織学習とかで言われていますが、シングルループではやり方を直す。ダブルループでは前提やルールを疑う、トリプルループでは目的や価値観を問い直す。最後のトリプルループは政治にかなり近いので、難しいと思いますが、このようにメタに見ることは、第五次エネルギー基本計画でしたか不確実性の大きな時代の「科学的レビューメカニズム」とかありましたが、それらに繋がってくるのだと思います。

駆け足ですが、私の発表は以上です。ご静聴ありがとうございました。

（司会）

杉山先生、ありがとうございました。

提言 5（人材育成）に関する議論

（司会）

それでは続きまして、提言 5、人材育成に関する議論というテーマで、関西電力株式会社イノベーション推進本部副本部長山本敏之様にご発表をお願いいたします。よろしくお願いいたします。

（山本）

はい。関西電力の山本でございます。

私からは、提言 5 の人材育成についてです。先ほど話がありましたように、電力システムが変わりゆく中で、これを支える人材育成について、方法論というよりは、必要となる人物像、資質という視点からお話しさせていただきます。

変わり続ける電力システム

こちらは変わり続ける電力システムということで、すでに先の先生方からお話のあったところですのであまり繰り返しませんが、電力システムの電源、需要参加、同期機から非同期機への変化など技術的な側面が大きく変わるところです。また求められることも、災害・気象の激甚化への対応、デジタル・AI 技術の進展など、課題とポジティブな面が混在した変化です。また、設備の高経年化、人口減少や高齢化の進展、さらには電力システムと社会システムが、先ほど掛け算の話がありましたように接続し大きく変わっていくということで、電力システムの問題は、エネルギーミックスを変えることを超えて、人材、組織、社会システムの大きな課題であると考えています。

再エネ

電源構成としては、再エネ比率はさらに増加し、先ほど小宮山先生のシミュレーション結果にありましたが、こちらで示すのは西オーストラリアの例で、年間電力量の約 4 割の再エネ比率ですが、瞬間的な再エネ比率はすでに 91%という状況で需給を何とか調整しているということです。

日本はエネルギー基本計画の 2040 年の需給の姿によると再エネの電力量比率が 4～5 割で、原子力が 2 割と、オーストラリアの姿にさらに原子力が 2 割ベースに入る状況で、どう瞬間瞬間の需給を調整するかが課題であり、非常に大きなチャレンジがあると思っております。

次に 3 ページでは、先ほど馬場先生説明があった、再エネの増加に伴う同期化力や慣性力の課題を示しています。海外では 2016 年の南オーストラリアの停電、2025 年のイベリアの停電など、いろいろな課題のある事例が出てきて、海外で多様な対策を取っているところですが、それでも時より発生する状況です。これらの問題を解決しながら将来を目指すためには、技術的課題はまだ多いと思っています。

需要

4 ページでは、需要側について触れています。

これはデータセンターの例ですが、先ほどの講演でアイルランドでの障害の事例が示されていましたが、

アメリカでも系統事故を起因としてデータセンターが系統から解列する事例がありました。データセンターは非常に重要な負荷であり、系統で異常があるとバッテリーや自家発の供給に切り替えるため、系統の異常時には早めに系統から解列していくという、これは系統から見れば大規模な需要の脱落が発生することになります。

その需要が減り、周波数があがり、さらに次の需要が解列したため、4GW（400 万 kW）ぐらいの需要が系統から切り離れたという事例で、この対策は今米国でも検討されていると聞いておりますが、需要についてもその特性が大きく変わったものがでてきており、こういった需要の事業者とも対話をしながら、どう系統の中で対応していくのかも一つの課題であると思っております。

電気工学を核とする電力システムでの人材育成

5 ページに示すように、電気工学を核にして、今までの「同期機を三相交流でつないで電気を送り届ける」という形態は続きますが、パワエレ、制御、通信、系統解析を始め、電力にかかわる技術分野は増えています。真ん中に示す電気工学、電力工学はもう少し古い学問であるという声も聞くこともありますが、電力システムが変わりゆく中、いろんな技術を三相交流で繋いで運用していくことになりますので、電気工学、電力工学はますます重要になると考えています。6 ページでは、先ほども出ました S-I-L-K の絵で、先にいろいろご講演もありましたとおり、それらを支えていくのはやはり人であるというふうに考えています。

しかし、人に求められる質も変わっていくと考えています。

多様な主体の時代

話は変わりますが、かつての高度成長期では、経済の発展に対して電源を作り、系統接続していく時期では先輩方の大きなチャレンジがありました。この時代では、各エリアにおいて垂直一貫体制の電力会社が需要想定、電源投資、燃料確保、系統の投資などを一貫して行っており、一つの主体に責任と実行と全部が集約・統合されていました。

これに対して今は、プレイヤーの種類も数も増えて、発電、再エネ、蓄電池、DER、需要、大規模需要と等々書いてあるように、色々な参加者が制度と市場という仕組みの中で動機づけられて行動し、その結果として安定供給やシステムの経済性を維持していく、ということで、非常に統合設計の難度が高い時代に来たと思っています。昔が良かったという話では決してなくて、今のこの仕組みで難度の上がった中で、電力システムをどう変えていくのかを考えていく、そういう人材が求められるということです。

「役割」で捉えた人材ポートフォリオの時代

先ほど、「色々なプレイヤーがいる」という話をしましたが、プレイヤーでごとに考えるというよりは、電力システムを支える役割で考えました。①現場を支える、②システムで動かす、③技術を作る、④データを使う、⑤社会をつなぐ、⑥電力システム支える環境を作る、という、大きく 6 つの役割があると思っています。こういった役割をそれぞれ必要な人数をバランスよく確保する必要があり、人材をポートフォリオで揃えていく必要があると思います。

そういった中で、これからどういった人が必要かを改めて考えると、市場化されて多様なプレイヤーが出てくると、それぞれが与えられた環境の中で最適解を求める行動に変わってきています。

一つの分野で専門を深く極める人材は本当に大事だと思っておりますし、一方、一番右に挙げた専門性は高くないけれどいろんなプレイヤーを調整してつないでいく、そういった人材というのも必要だと思います。さらには、真ん中に書いたように、いろんな立場が・役割があってシステム自体も変わっていく必要があるということですから、複数の分野を理解し複眼的に問題を解決できる人材を、今後は増やしていく必要があると思っています。

分野横断人材育成の重要性

9 ページでは、例として。細かく小さな字で「規制×電力の実業」、「市場×系統運用」など書いていますが、今はどちらかというとこの「×」という掛け算ではなく、「versus」というか戦い合っている、そういった関係になっている気がします。それではみんなそれぞれの主張をするだけでなかなか前に進まないことになります。複眼的に全体最適に問題を解いていける、そういった人材を増やしていく必要があると思っています。

「未来をつくる人材」と「今を支える人材」

10 ページでは、もう一つ述べておきたいことがあります。いろんな仕組みが変わり、新しい技術が入るということで、「未来を作る人材」の方にはすごく注目が集まりますが、一方、今後ますます労働人口が減り設

備も古くなるという中、今の設備をしっかりと維持していく「今を支える」人材も忘れてはならないと思っています。今できているものは明日もできると思いがちですが、労働人口が本当に減っていく中で、今日の当たり前は明日の当たり前ではないため、「今を支える」方もしっかりと人材を集めて、技術を継承することが必要だと思っています。

技術継承とAI・データ活用

そういった中で、11 ページでは、AI とかデジタルとか、そういった技術が出てきていることは、大きなチャンスであろうと思っています。適用分野の第一は「現場の知を残す」と書いています。今、ベテランの 60 代の方などの退職がどんどん増えて、入社してくる人よりも退職の方が増えているという状況です。これは現場を担っている電工さんとかでも同様です。そういった熟練者の暗黙知をできるだけデータ化、言語化して、それを新たな人員の教育につなげていく、デジタルの力がその技術継承に活きると考えます。先輩の背中を見て育っていく時間はもうありません。デジタルの力を技術継承に使っていける可能性があると同時に、現場の知と物理原理とデータを掛け合わせて機械学習をすることで、判断を高度化し、全体を効率化ができると思います。AI・データ活用技術は、現場の人の仕事を奪う脅威と捉えるのではなく、技術を継承して、その知を生かして人の能力を拡張していくツールとしてしっかりと使っていくことが大事であると思っています。

12～14 ページは、国の方でも、「現場ファースト運動」を立ち上げ、電力に限らずインフラ人材がいなくなっていくということに対処する運動をしているという、これはご紹介です。人が今やっている現場の仕事は残ります。そこにしっかりと人を集めて支えていく、そこでは同じ仕事を少しでも少ない人で効率的にできるようにデジタルの力を使っていく、こういった考え方がこの絵に描かれています。

人が育つ場をつくる

最後に、15 ページでは、人材を集め、育て、つなぐことを説明しています。今まで説明した人材をどう確保していくのか、どう維持していくのかについてです。まず「集める」という点については、電力は少し古い分野で、送電鉄塔を見ていても技術革新もないように見られてしまい、就職での人気が減っている分野です。しかし、本日説明したように、社会基盤を支え、災害から社会を守り、カーボンニュートラルを実現するという、社会全体に関わる巨大なシステムであり、社会を変えていく領域です。こういった前向きな分野であるというメッセージを出していくことが必要だと思っております。

「育てる」点については、産学官で経験を積むということで、現場のフィールドの話と新しい技術の話と、ここを行き来するということも必要ですし、つなぐと書いておりますけれども、電力、それから IT 企業、メーカー、ベンチャー、行政、規制機関、投資家、いろんな分野の人がお互いを理解していくということ、それぞれの主張をぶつけ合って戦うのではなくて、一緒に社会をよくするために考えていけるような、そういった場が必要なんじゃないかなというふうに思っております。

まとめ

最後にまとめです。専門性を深める、分野をまたいで考える、ポートフォリオで育てる、学び・対話・連携の場を作る、デジタルの力で人の力を拡張する、こういったことにより変わりゆく電力システムを支えていく人材を確保・育成していくことが大事だと考えています。

ご清聴ありがとうございました。

（司会）

山本先生、ありがとうございました。

提言 6（知識基盤）に関する議論

（司会）

それでは続きまして、今日の講演の最後の部になります。提言 6 知識基盤に関する議論につきまして、大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻准教授 芳澤信哉様に、ご発表をお願いいたします。よろしくお願いいたします。

（芳澤）

ご紹介ありがとうございます。大阪大学の芳澤です。

私の方からは、提言 6 知識基盤に関する議論というところで、知識基盤をとは何なのかと、それらを継続

的に進化するために何を考えておかないといけないのかについて説明させていただきます。

二つの環と知識基盤

まずこちらのスライドは、荻本先生等から示されている二つの環です。この提言 6 の議論をするにあたり、自分なりにもう一度考えてみますと、提言 1 から 3 を含む上の環は社会システム自体を変える環で、何を実現して電力システム等の将来像や変革の方向性を目指すものだと思います。一方、下の環は、意思決定能力そのものを高める環で、それをどう実現して改善をし続けるものかがこの輪で決まると理解しています。

では、知識とは何なのかですが、知識基盤、私の中での理解は、この二つの輪を回していく、駆動させるために必要な基盤になるというものになっています。単なるデータの蓄積ではなくて、より良い意思決定を支えるために必要となる基盤が知識基盤であろうと理解しています。ではなぜ知識基盤が必要なのかですが、皆さんご存知のように、昨今はいろんな情勢が変わってきています。例えば技術の変化であれば、再エネの普及や、DER、EV 等の普及、それに加えて、デジタル化、DX 化の進展、AI 等の技術も普及しています。一方で、社会の変化も同時に起こっていて、少子高齢化等による人口や地域の構造の変化、データセンターの建設といった変化が起こるとともに、外部環境では自然災害、日本特有な問題かもしれませんがエネルギーの安全保障の問題、地政学的なリスクなどが同時多発的に起こっているのが現状です。

これまでの講演の中で各先生方が言われているように、現状の課題は電力×〇〇に限らないとは思いますが、技術×制度ですとか、電力×交通、電力×地域、データ×意思決定などに、様々な分野間の接続が必然になっている状況で、これらを統合設計する必要がある状況で、複合的な横断の設計が必要不可欠になっています。現状の課題は、この個々の最適化ですとか、個別の技術の不足ではなく、変わりゆく社会を継続的に理解して、市場、運用、制度、技術などを統合的に設計するための知識基盤が重要になることで、そのための知識が非常に重要になるという理解でいます。

では知識基盤は何かを改めて考えてみると、5 ページに示す五つの要素が重要だと思っています。下から上へ、一つ目はデータです。電力・エネルギーの需要、再エネ発電、気象、交通、建物、人口等に代表されるようなデータがまず大前提になります。その上で、様々な現象を理解するためのモデルやツールが必要で、この部分では系統安定度、市場運営、最適化、AI 統合解析などの技術が含まれます。これを踏まえて解析を知識にするためには、計算環境、ベンチマーク、共有モデルなどが必要になり、アナリストエンバイロメント、環境が重要です。そういった環境結果を踏まえて知識にすることができるということで、知識、エビデンス、証拠という形で残すことになるということにいます。この段階では解析をした結果を再利用可能にすることが非常に重要だと思っていまして、今までの成功体験に加えていろんな失敗の事例、どう運用をしてきたのか、どんな履歴があるのかも全て知識として残すことが非常に重要だと考えています。最後、その知識を社会実装するためには人材やコミュニティが非常に重要になり、これは我々が所属する大学も含めて、企業、自治体、行政等が連携していかなければいけないと考えています。

知識学習循環モデルと問い・解析対象の拡張

6 ページは、こういった知識基盤ですが、これをどうやって構成するのか、実際にはどういうプロセスをたどるのかということを考えた結果を表しています。これは、「知識学習循環モデル」と書いており、いくつかのステップを繰り返し行うことによって知識が更新されることを示しています。

一つは、やはりデータというものは観測して初めてわかるということで、状態の変化等の観測が最初に来ます。その次にそれを解析して、ある基準に基づいて評価します。その評価の上で、前提条件やその不確実性を踏まえて結果を解釈することにより、意思決定に利用可能な知識として共有することができます。知識化することができたら、制度、投資、運用についての決定をするということで、DECISION と示した意思決定のフェーズに進み、その後、最終的には実装、社会実装、運用されるというものです。

重要なことは、この社会実装や運用されて終わりではなく、また新しい変化が起きますので、また 1 番目のフェーズに戻ってデータの収集から繰り返されることによって知識が随時アップデートされる点です。また解析結果を単純に知識にするだけではなく、左下に示すように、条件設定のシナリオや、それらの不確実性、評価基準の選択なども共有する必要があります。同じような解析結果であっても、条件次第では解釈の仕方が異なることは多々あり、それらの解釈条件等を踏まえて知識として共有更新していくことが非常に重要と考えています。

このプロセスを経ることで、今まで考えてこなかった新しい課題が見つかり、これが新たな問いに変わるということです。具体的に、わかりやすい例を自分の研究エリアについて考えてみました。例えば、昔から言われているように、太陽光や電気自動車が入ってきた時にどんな問題が起こり、配電設備をどのように増強

すべきかという最初の問いに対して、従来は配電系統を単独で解析をしましょうと。電力需要や、EV とか PV の導入量を前提として潮流解析をして、電圧や潮流の過負荷等の解析を行ってきました。しかし、この時に少し考え直してみると、そもそも EV の充電需要はそもそも外生で扱っていいのかということが新しい課題として生まれてきます。具体的には充電する場所や時間は人によって変わり、価格が変われればその行動も変わるかもしれない。そうなってくると、系統の設備増強が不要になる可能性があり、今まで考えてこなかったスコープの対象外だったものが新しい問いとして生まれてきます。今述べたとおり、問いの拡張のところで、「EV はどこで充電するんですか？」、「価格で充電行動は変わりますか？」、「充電行動で系統の負担を軽減できるか？」、さらには「設備増強を回避できますか？」も新しいクエスチョンとして現れます。

これらの新しい問いのに関する解析には、新しいデータが必要で、解析対象が拡大します。例えば、配電系統を単体で考えていたものを、都市とか建物、交通、人流まで拡大をする。例えば需要データだけを考えてきたものを、人の移動や滞在データ、市場価格等のデータも反映した解析が必要になる。モデルに関しても、都市交通と連成や、最適化も必要になり、これらによって新しい研究開発が進みます。

ですから、知識の基盤に関しては、データの量を増やすのはなく、新たな新しい問いに応じて解析の対象や範囲そのものを拡張することが非常に重要です。実際に研究を行っていくと、「こういうデータがあるからこういう解析ができる」ということもあるのですが、知識基盤と考える上では、新しい問いがあって、それに対してデータやモデルが決まると思っています。

知識基盤の継続的進化に向けて

知識基盤のプロセス等を説明しましたが、課題はあると思っていまして、継続的な知識基盤を維持や進化を行うために考えておかないといけないことが、この最後のスライドでます。

一つは品質の管理です。先ほどから解析条件や構成についての議論がありました。そもそもデータの品質が十分かということも品質管理として必要です。適用条件の明示というところでは、対象地域、期間をはっきりさせ、条件の不確実性の定量化も重要です。また、やはり知識は時間とともに陳腐化するする、バージョン管理や更新も重要かつ必要です。

先ほども申し上げたとおり、社会の情勢は時々刻々と変わっていて、過去の知識が今使えるか、今の知識が将来使えるかには、わからない部分もあります。知識自体の定期的な見直し、過去の知識の有効性の確認も、更新化の中に含まれております。

二点目で重要なのが、新しい問いや課題を蓄積することも非常に重要と考えています。今解決できていない課題に加え、例えば成功事例の他に予想外、想定外の事例、こういう問題が起きたということを記録しておくことで、何が原因でそういうことが起こったのかという課題の解決のための問いに変わり、失敗事例と成功事例の比較でギャップを考えることで、知識を更新していけるし、更新していかなければならないと考えています。

まとめますと、知識の前提ですとか、適用範囲、信頼性、課題、問いというものは常に更新していかなければならず、更新し続けることにより新しい問いにつながり、何を知っていてまた何を問うべきかを継続的に見直すことにより、知識基盤自体が更新され、進化していくだろうと考えます。

以上になります。ご清聴ありがとうございました。

（司会）

非常に面白いご発表で、ありがとうございました。各提言に関して、幅広い視点から多様なご講演を賜りました。後半のパネルディスカッションにつながる多くの論点をご提示いただいたと思います。ありがとうございました。

休憩 1

（司会）

これで前半の講演の部を終了し、15 時 20 分まで休憩させて頂きます。最初にお願いしましたように、アンケート用紙がございますので、ご記入いただくようお願いします。また、共同開催の日本工学アカデミーのパンフレットも受付に置いてありますので、ご興味のある方はご覧いただくようお願いします。あと、今日は意見交換会を予定しており、参加費のお支払がまだの方は、受付でよろしくお願いします。

次はパネルディスカッションで活発な討論の時間もありますので、よろしくお願いしたいと思います。

パネルディスカッション導入

（司会）

それでは、パネルディスカッションの時間となりました。登壇者の先生方は壇上にお進みいただくようお願いいたします。

それでは、ちょうど時間となりましたので、後半のプログラムに移らせていただきたいと思います。

パネルディスカッション 1「変革のポテンシャルを探る−電力の視点−」

（司会）

パネルディスカッション 1 では、「変革のポテンシャルを探る−電力の視点−」というテーマで、今ご登壇いただいている電力技術・システムの研究、技術・事業に携わる専門家の視点から、変革のポテンシャルにつきまして 1 時間幅広くまた掘り下げて議論していただきます。

モデレータは、東電記念財団常務理事蘆立修一様、東京大学生産技術研究所特任教授荻本和彦様にお願いします。

パネルの進め方

（蘆立（以下モデレータ１）

それでは、パネルディスカッション 1 を進めます。テーマは「変革のポテンシャル、電力の視点から」です。冒頭の PL の開会挨拶では、変化し続ける社会をどのような統合原理に基づいて設計し、改善していくかが述べられました。ご案内のように、慣性力の低下に伴う GFM の相互干渉や、数週間、数ヶ月にわたる長期貯蔵などの物理的、基礎技術的な未解決領域があり、ブレークスルーのためには個別技術の開発と、それを支える基礎的な専門分野が重要であるとことは言うまでもありません。

本報告書では、先ほども述べられましたように、これは新たな出発点と位置づけられており、これを進めていく視点について 6 名の先生方からご講演いただきました。非常に示唆に富む内容でした。今後、本報告書を実行力のあるロードマップへと発展させるためには、具体的な取り組みが必要です。今回、パネリストの先生方の専門分野が皆さま異なるので、全てについて掘り下げるのは難しいですが、ここでは、広く先生方からご意見をいただくことで進めて参ります。

それでは、ご登壇者は7名で進めます。

電力分野での変革に向けて

各先生には、具体的にどこから手掛けるのかを 3 分以内でお話しいただくよう事前にお願いしています。ご紹介した順番に、お話しください。参加者1からどうぞよろしくお願いいたします。

公開データが意思決定を支えている二つの例

（参加者１）

私はデータ活用という視点で海外の事例を引いて、日本で実現すべきことを紹介します。

まず左側が英国の話で、英国の配電系統の実測データの公開例です。日本の配電に相当する変電所の変圧器ごとの潮流の 30 分値を 2021 年から公開しています。ここでは、低圧フィーダの変圧器単位まで事業者共通のフォーマットで公開されていて、これにより変電所ごとのこの受け入れ余力が分かることで、需要側、新規需要ですとか再エネ等の接続の可否を事前に需要家や事業者が判断することができます。これはデータ公開が進んでいるということだけではなく、規制機関である Ofgem がライセンスの条件で原則公開を義務化している、つまりデフォルトは公開で、保有データの目録を公開して、非公開する場合には相応の理由を説明しなくてはいけない、データを出さない側に説明責任があるというところが特徴的です。

これに対して日本は今、配電以下の潮流は、私も分析していますが、東京エリア以外は非公開の状況です。

もう一つ、右側は、スマートメーターの個票の例です。デンマークでは個票が行政登録データに接続されて、統計局経由で研究者に開放されています。デンマーク中央銀行が約 25000 世帯の時間別データです。デンマークはダイナミックプライシングがかなり進んでますので、このデータで価格弾力性を推定し、価格上昇時に有意に消費を減らすのが 1/3 だというような、他にもいろいろあるんですけれども、こんな分析がされています。

日本はスマートメーターの個票、それ以外に関して、研究目的の利用枠はなく、このような分析はできません。使うためにはかなり高額な費用、小票を扱うには登録が必要で、API 連携のシステムを自分で組むことはものすごく負荷が大きく、研究室でできるレベルではありません。特に系統側、事業者側のデータは、まずは何があるかの目録と出さない理由を求めるような仕組みを日本でも作ってはどうか。需要家側の個別のデータの使用には同意はもちろん必要ですが、同意が取れれば使いやすい仕組みをつくる必要があ

ります。
ただ、データを出す便益は社会にはすごく広くて薄くて、手間とリスクはデータを持ってる側に集中するので、出さないことが一番コストが低いので、みんな出さないのがこの日本の状況だと思います。ですから、データを出すこと自体をまずはデフォルトにして、なぜ出せないのかという視点で考えていくような切り替えが重要だと思います。以上です。

（モデレータ１）

ありがとうございました。ダブルループで PDCA を回す中で、データ開示が海外では行われている事例をご紹介いただきました。
次は、参加者2、よろしくお願いいたします。

Data 活用と情報の統合

（参加者２）

参加者1のお話とだいぶ被る感じですが。前回、私も系統分野の研究を盛り立てるためあるコミュニティを作って活動しています。その中で、この活動をどう進めるのかを議論をすると、「いろいろな分析をしたいけれども、データがない」、「広くオープンに議論できる場がない」と言われる方が非常に多い状況でした。この二点についてお話しします。
最初のページでは、まずは必要なデータを活用できるようにすることを述べています。本日も、エビデンスに基づいて判断することが必要であれば、バックで定量的な評価が必要になります。その評価のためには正確な、実態を表したデータが必要になります。では今までデータがどうだったかというと、なかなかデータは揃わないし、公開されない、共有されないということがあります。ただ、使えていた例というのがあり、それはどうしてできたのかを今後のヒントにしたいということが １つ目です。まず国のプロジェクト、NEDO 等の事業では、データの公開や活用を要件、前提にするということです。これは必ずしも徹底されていないと思いますが、これをやると後々使いやすくなると思います。
例えば、かなり前ですが、PV300 というプロジェクトがあって、全国の日射のデータがあって、今皆さんが活用できる形で公開をされています。このデータは非常に時間粒度が細かく、太陽光発電の評価とかの元になるもので、非常に重要です。我々も研究に使っています。
それから、経産省の BEMS アグリーデータ事業では、業務用ビルの電力需要データが、原則公開を事業の要件化したことで、これも使えるような形で公開されているという例です。
NEDO の太田の実証は、500 軒を超える住宅の電力消費量や太陽光の発電量について、これ 1 分値あるいいは実際にはもっと細かい粒度のデータ、秒単位のデータまでが活用できる、非常に貴重なデータが得られる国のプロジェクトです。ということで、国プロのデータは原則公開を前提にするのが一つ方法としては重要だと考えています。
それから参加者1のお話にもあった電力消費のデータです。スマートメーターの公表のデータは事実上使えないということですが、これご本人の使用許可があれば OK というところがあります。ですので、契約の一環でデータの使用許可を取っておくと、このデータが使いやすくなります。実際に書いていませんが、例がありまして、ある国の研究所が住宅メーカーと協働して、数万件におよびオール電化住宅のデータを非常に細かく取って、これをいろんな検討に使っているという例があります。ですので、こういうチャンネルが一つあるのではないかということです。
それからオーストラリア、英国、ドイツで今分散型資源の台帳を整備するプロジェクトが動いています。実際には系統接続の申請の時にこのデータを共有するってことは一体化してそのまま使えるようにする。それから市場参加の要件にして皆さんにデータを出してもらうと。さらには法律で規定するなどのやり方があります。日本でもこれから DER の台帳を作る議論が今進んでいますが、これをどんなやり方でやるかというところが一つヒントになると思っています。
もう一つ、次のページでは、情報の統合ということで、ステークホルダーのコミュニケーションが重要であることを述べています。現在はいろんなステークホルダー、様々な事業形態、立場の方々がこの分野に入っています。一つの例で、スマートレジリエンスネットワークというのがあります。私のほか、ここに参加されている関係者の方々のたくさんおられると思いますが、脱炭素レジリエントの社会を共創するために誰でも入ることができる場です。DER を普及し、その活用を促進し、価値を向上する。それでレジリエントにも結びつけていこうと。多様なステークホルダーとしては、一般送配電事業者がリードする形で、小売り事業者、アグリゲータ、メーカー、サービス利用者、有識者、場合によっては自治体など、色々なところとのチャンネルも使って議論を進めています。この場、非常に議論が活発で、皆さんが様々な情報をお互いに出し合う雰囲

気が非常によく作られていて、ここの活動を支えています。関西送配電と東京電力パワーグリッドからの事務局の皆さんが、ある意味リーダーシップを発揮して運営している場です。その他、NHK 等とも連携があって、EV のグリッドワーキングはエネ庁との関係でもやっています。それから NEDO の事業のコネマネ 2.0 というプロジェクトがありますが、その中では先ほどの DER の台帳の整備について議論をしています。様々なステークホルダーの皆さんから意見をもらい、NEDO 事業にフィードバックしている点も大きな特徴です。その他、脱炭素先行地域の地域事例等との連携、そこでの事例等を皆で共有して、好事例等の展開を議論するために、毎回ワーキンググループには百人ぐらいの人が参加して活発な議論が行われていることを紹介させていただきます。今後はこういう場が皆さんに求められているのでないかと考えています。以上です。

（モデレータ１）

ありがとうございました。スマートレジリエンスネットワークでは、非常に多くの会員の方が参画されており、情報開示の動きが動き出しているようです。後ほどまたお話をお伺います。

続きまして、参加者3、よろしくお願いします。

風力発電事業における変革のポテンシャル

（参加者３）

私は、風力発電事業に関する部署に所属しているので、こちらのタイトルで発表いたします。

本日、データ活用やデジタル化に関していろんな技術紹介がありましたが、風力や再エネの分野でも様々なデジタル技術が活用されています。

スライドの左に示すのは、多様な情報の統合と、発電所の場所を決める際の判断材料です。（スライドに示すような）これらの分析が散らばっていると、検討が非常に難しくなります。そこで GIS を使って情報を「重ねる」ことで判断しています。背景の地図に、風況のポテンシャル、許認可環境などの要因を色々重ねていって、最終的に（風力発電所として）使える場所を抽出する、という考え方を表しています。

一方で、（スライドの）右に示すのは、シミュレーションです。発電量計算では、風況解析や電力需給解析が行われます。風況解析では、地形による影響と、風車間の相互作用を表すウェイクなどを評価します。電力需給解析では、全国の発電所や送電線をモデル化して、需給バランスや送電線の容量に起因する出力抑制を評価します。これらによって、変動性再エネの事業性評価は、出なりでどれだけ発電できるかの評価から、出力抑制を考慮して事業期間中にどれだけ売電できるかといった評価に変わっている状況です。

次のスライドは、今後の推移を少し期待感も込めてまとめた表です。

三つ記載していて、1 点目が不確実性の把握です。前のページで示したような計算（風況解析や電力需給解析）は、計算コストが高く、ケース数が限られてしまいます。それらを模擬したモデルや、あるいは代理したモデル（サロゲートモデル）を作れれば、より多くのケースを計算でき、それによって計算の不確実性や揺らぎを評価できると期待しています。

2 点目は、説明可能性です。発電所や送電線はインフラ設備で、投資額が非常に大きく、事業期間も 10～20 年以上の非常に長いものになります。「AI がそう言った」「AI に入力したらこのような結果になった」だけでは（投融資につながる）議論ができず、より踏み込んだ評価が必要になります。このため、解析条件を（AI 自身に）説明させる、あるいはどの変数が答えに影響するか評価する技術（explainable AI）を確立することが、納得感のある意思決定につながると考えています。

3 点目は、個別評価から統合評価へ、です。調べてみると、個別の分野では、（その分野に特化した）機能が揃っているソフトウェアやツールがあります。一方で統合評価、例えば日本全国で風車の立地候補を探すこと、を行う際は、個別分野を大雑把に評価しがちです。これをどうしていけばいいか（個別分野をなるべく捨象せずに統合評価するにはどうすればいいか）と考えると、一人の人間が様々な専用ソフトウェアに習熟するのは現実的には難しいので、AI やモデル統合基盤（MCP）を接着剤（注:プログラミングの分野では複数のソフトウェアやコンポーネントを組み合わせる役割を担う言語をグルー言語と総称する）のように使うことで、個別の専門的な知識を維持したまま統合評価ができるのではないかと期待しています。

以上です。

（モデレータ１）

ありがとうございました。意思決定を定量的に行い、改善することの実践として、この風力事業を例にご紹介いただきました。経営、データ活用、それから AI について、キーワードはありますでしょうか。

（参加者３）

人材育成などでしょうか。

（モデレータ１）

人材育成にもつながりますし、何と言っても経営への貢献という点では、事業採算性などにも貢献してるということで大きな成果をあげられていることが理解できました。ご発表ありがとうございました。続きまして、参加者4よりよろしくお願いします。

S-I-L-K から見直す電力小売事業者の役割

（参加者４）

弊社は電力小売り事業、いわゆる新電力で、今回の報告書で挙げられた S-I-L-K、これの枠組みに基づいて、電力小売り事業者にどのような役割があるのかというのを見直してみたということで、このお話させていただければと思います。

S-I-L-K は、ストラテジーとインテグリティが戦略統合して、実行としてそのリーダーシップがあって、そこからナレッジを溜めていく枠組みです。それをまず電力の分野に当てはめて考えてみると、電力系統の様々な状態や価値が、今後、ストラテジーとインテグリティの結果としての価格シグナルとして現れてくる部分が大きくなってくると思っています。

電力小売り事業の特徴は、電力システムの中でもやはり需要側との接点であることです。特に分散型の需要側リソースという比較的小さいものに対しての接点、これは他の電力システムの要素からはつながりにくいところです。そこの細かいリソース、需要側リソースに対して、価格シグナルに応じた料金などを提示するいわゆるダイナミックプライシングにより需要の応答を誘発し、中長期的にはそれらのリソースを普及させていくことができる立場であり、リーダーシップを発揮していかなければならない立場であろうと思っています。

かつ、そこから得られたそのナレッジ、特にデータについても社会に還元をしていく必要があり、この需要の応答などをその機器の制御などでやることで、その機器の状態や実際の需要応答の状況のデータを還元することによって、機器側およびシグナルの発信の仕方の改善に活用してゆくことに使われると思います。

さらに、「電力×○○」というふうに異分野との連携をもう少し広く考えると、需要家接点があることをさらに生かして、電力の系統状態の改善のためにその他の情報を様々に活用する、あるいは電力だけではなくて、需要側の様々なデータを統合利用していくことが考えられます。例えば交通のデータを用いて EV を誘導して充放電を行うことなどです。また、先ほど参加者1、参加者2の方からもデータ収集に関するお話がありましたように、需要家接点であることを生かすと、一般の消費者の方々は魅力的なサービスを受けられるからこそ明示的に同意をしてデータを提供していくことから、そのようなデータ収集を行うにあたっても、魅力あるサービスをどう提供していくのか、こういった工夫の余地が電力小売り事業者としてはあると考えております。以上です。

（モデレータ１）

ありがとうございますか。S-I-L-K から、需給統合、それからインフラ最適への貢献、電力小売り事業者として何ができるかを整理いただきました。今回の提言を踏まえて、それらが徐々に実現していくと、電力小売り事業者が収入を得る、あるいは活躍する場が変わる可能性があることがわかりました。後ほどまたお話を伺います。ありがとうございました。続きまして、参加者5、お願いいたします。

電力系統解析専門家の育成ステップ

（参加者５）

私からは、人材育成の中の部分集合といいますか、電力系統解析専門家の育成ステップについてお話しします。私のイメージをポンチ絵にしてみました。

私がこれまで従事してきました、私の背番号でもある電力系統解析分野からのイメージです。育成ステップということで、非常にビジーなスライドで申し訳ないのですが、①から⑤になります。

まず左上の①と②、これは学生時代の学習です。まず①では基礎となる学習として、電力系統工学に加えて，大量の系統データを扱うためのデータサイエンス、つまり、AI とか、統計、そしてプログラミングを両軸で学習することをイメージしています。次の②では、系統運用などの実務で使っている解析ツール、例えば我が国であれば CPAT、海外であれば PSS/E を使って、国内外の大規模停電事故の基本現象を再現し、また事故を防ぐ対策の立案といった実践的なケース検討を実施することを通して学習していくことを考えています。この②についてはや産業界の支援のもとで進めたいと思いますが、いずれにしても、高専、大学、

大学院での学習をイメージしています。

右側の③では、いろいろある卒業後の進路として、ここでは二つを示しています。一つは現象の分析、解析モデル・ツール開発などを遂行できる高度な解析者への道です。もう一つは、その解析モデルやツールを実装できる開発エンジニアリングの道としています。これらの専門分野で活躍することになりますが、それだけではなくて、その下側に行きますけども、他の分野での検討により策定されたシナリオに対して系統技術面でその裏付けを行うことにより，他分野と連携し政策として具体化する場④も非常に重要だと思います。政策として具体化したものを国や電力会社へ提言しその提言が意思決定等へ反映されることで、それがフィードバックされて専門家のさらなるスキルアップに繋がるというポジティブな循環⑤が生まれると思っています。

私がイメージイメージしているものは以上になります。

（モデレータ１）

ありがとうございました。参加者5から人材育成についてお話いただきました。ここも広く議論する余地があると思います。続きまして、参加者6からご講演いただきたいと思います。

5グリッド融合型インフラの構築

（参加者６）

二点の論点を提起したいと思います。

提言 4 の意思決定プロセスに関して、第一点です。「定量的根拠に基づいて見直していく場」の必要性が提言に書かれてますが、激変する国際エネルギー秩序をどう捉えて、脱中東のエネルギー安全保障や脱中国の経済安全保障とかの政策とカップリングさせる必要があると思います。もう一つの視点は、社会的な最適化のためには、計画のスコープを広げて、サイロ化しないガバナンスが必要だという、これらの二つの論点を提起したいと思います。具体的にそのシステムのスコープを広げるためには、例えば統合エネルギー資源計画という考え方があり、電力の分野では昔から統合資源計画があるのですが、ここではサプライチェーン全体を扱っているかどうかが重要です。特に経済安全保障では部材から考える必要があります。あと、今までは電力の供給計画を作っていますが、これを電力とそれ以外のエネルギーインフラと統合して、統合エネルギー資源計画にするなどの拡張が必要だと思ってます。その実施にあたっては、事業自身のガバナンスと同時に、規制側のガバナンスをこの統合設計の中で見直す必要があると思います。現状、政策と規制と広域運用は分離したガバナンスになっていますが、これを再統合する必要があるのかどうかが論点になります。

第二点は、モデレータからいただいた「事業領域の拡張」です、これはあくまでも例示で、多分参加者7が電力グリッドと情報通信グリッドの話をされると思いますが、この提言の中で一番上の電力をグリッドでは左側の再エネの統合と右側の需要資源の統合は謳われています。この特に需要側の資源の統合は、例えば右側の熱のグリッド、そのあと農業や食品のコールドチェーンの熱マネジメントにつながり、右下の経済安全保障でサーキュラーエコノミー、レアアースや重要鉱物をリサイクルして自立度を上げていくことにつながります。左側の情報通信グリッドに関しては、これは言うまでもなくて、ワークロードシフトとかありますでしょうし。あと、忘れてはいけないのは水グリッドで、よく「エナジーウォーターネクサス」と言われますが、水の流通に関しては DR の可能性があります。

次のページをお願いします。今の図はポンチ絵でしたが、事業領域の拡大によって AI と通信とモビリティと農業、上下水と連携する中で、報告書の「2.5 社会システム化の進展」に書いている電力システムのその社会全体のインフラの一部として再設計される例として、前のページの「5グリッド」があります。5グリッドの協調によって、得られるベネフィットはクリーン化と強靭化とそれから地域の社会価値の最大化であり、最後の最大の論点は、これを将来実現するために、関係者間でどのように合意形成をするかが大きな宿題になります。

以上です。

（モデレータ１）

ありがとうございました。意思決定の非常に大きな課題について、具体的な事例も示しながらのご説明、ありがとうございました。続いてオンラインでご参加の参加者7、よろしくお願いします。

エネルギー利用・供給共進化による価値創造

（参加者７）

私からは、参加者6からあったお話を、私なりに言い換えて、基本的には同じことをお話ししたいと思いま

す。私からお話ししたいのは、エネルギーを考える上での統合の重要性は今回のテーマだと思っていますが、統合を考えるためには、エネルギー生み出して届けるかにとどまらず、逆にその利用側の革新を取り込む必要がある、需要側と供給側のまあ共進化、共に進化するプロセスを取り込む必要があるとまず思います。

例えば、1900 年代の初頭には工場の中での電化が進み、電化によって大量生産が可能になり、それによって自動車が発達し大量に普及して、発電と自動車で石油が使われるようになり、石炭から石油へのエネルギーの転換が行われました。ですからエネルギーが側だけで、「じゃあ再生可能エネルギーにしましょう」と言って転換する話ではなくて、必ず需要側に引きずられるようにエネルギーは転換してきました。

今回も同じことが起きると思っていています。つまり、工場の中の蒸気機関が分散するモーターに置き換わり、生産設備のレイアウトがものすごく自由になったのですが、同じことがモビリティの中でも起きて、ちょっとこの絵がへんてこですが、今そのモビリティに一つついている内燃機関あるいはモーターが、これから多数のモーターに置き換わり、そこに AI が神経としてついていき、そこに視覚がついていくと、これがモビリティを電化する本来の意味なので、これにより車ではなくフィジカル AI になっていくというのが私の見立てです。

これはかつてのカンブリア爆発のような、ものすごい形状の多様化をモビリティにもたらすと思っていて、同時にこれらとエネルギー側の再生可能エネルギーや原子力をいかにマッチングさせ、このフィジカル AI からいかにエネルギーのフレキシビリティを引き出すかが本来の目標であり、今までの壁で隔てられて考えていてはこういう話にならないというのが言いたいことです。

次のページをお願いします。十年近く前にユーティリティ 3.0 を仲間と共に発表し、そこでは 5 つの D を定義しました。上に書いてある5つの D を、エネルギー産業を取り巻く不可逆的な予見でとして示していましたが、10 年近く経って改めて見直すと、分散化とデジタル化は必然であり、これらはまさに進める段階に来ているということです。発表当時、規制緩和と言ってましたが、今ではエネルギーの分散化ではなく「民主化、デモクラタイゼーション」が進むと言うべきだったというのが今の振り返りです。

ここが多くの人と話が食い違う可能性があるのですが、脱炭素化を所与の予見と思っていましたが、そうではなくて、社会の生産性革命と捉えるかだと思います。More from less とマサチューセッツ工科大学の Andrew McAfee が言っているように、できるだけ少ないリソースあるいは人口・労働力でより多くの価値を生み出すことを完遂すればCO2排出は減るので、脱炭素化は目的ではなく手段になると捉えています。CO2 をその指標として使えるのではないかと思っています。

あと、人口減少だけは予見だと思っています。目標は、フィジカル AI やハイパフォーマンスコンピューティングで日本の持っている「ものづくり」や「おもてなし」の力をレバレッジして、人口が減少しても創出価値は逆に増加させて世界に貢献できる姿をつくることだと思っています。この中でエネルギーの利用と供給を、共進化というプロセスとしてデザインすることが一番大事であろうと考えています。以上でございます。

討論

（モデレータ１）

ありがとうございました。ユーティリティ 3.0、随分昔の話かと思いましたが、進化して今に至っていています。また脱炭素化は目的でなく、手段であり、CO2 はその指標とするお話は斬新でした。

7 名の先生方にお話しいただきました。残りあと 30 分三十分もない中で、これを個別に議論するのは非常に難しいので、3 点にまとめて議論を進めます。

問題提起

（モデレータ１）

一つは、「意思決定の中の場の設定」です。意思決定の中でのデータ活用、ここは参加者1、参加者2、それから参加者3が該当します。二つ目が、参加者6と参加者7からありましたが、「事業領域の拡大」です。収益事業が拡大してする必要があるという視点では、参加者3と参加者4も触れられています。最後は、「人材育成」です。ご登壇者全員に関わりますが参加者5を中心に議論できればと思っております。

まず参加者7にご質問です。パネルディスカッション 2 にはご出席いただけないので、是非お聞きしたいことが一点あります。次の議論にもつながるのですが、先ほど参加者6からもありました情報通信の連携についてはすでに始まっていて、参加者7は「ワット・ビット連携」を提唱されています。国家戦略の一つになり、東京大学との実証も進められています。これは非常に好事例の一つと思っていまして、これが今うまくいってる理由や実際苦労されてる点、新たな課題などがありましたら紹介いただけないでしょうか。

生態模倣・バイオミミクリ

（参加者７）

今のモデレータ1からの質問に、できるだけ手短にお答えします。先ほど出した絵を出しますが、実は私たちがワット・ビット連携と言ってるのは、まあ生体模倣、biomimicry です、右上の絵に示すように動物や人間の体は、神経と血管が両方入って筋肉を動かしていることと同じことがモビリティでも起きるということです。神経と血管が一緒に働くことで細胞を動かしているので、どっちか欠けても成り立たないことが分かっています、この両者が実際密着して協調していることが、体の中で起きていることですので、社会も全く同じようにやればいいし、バラバラに考えてはうまくいかないということです。

例えばこのモビリティの中にも、神経系統と血管である電力が両方入っていて、ワット・ビット連携の最小単位になると思っています。これがたくさん集まり、あるいは静止型のものもありますけど、ある種フラクタルのように階層型に積み上がっていく社会が、まあ私が描いている将来の姿です。ワット・ビット連携が比較的うまくいっていることの要因の一つは、すでにその我々が進化の過程で獲得してきているものを社会に当てはめるということで、無理がないのではないかというのが一つです。

もう 1 つは、この提案を政府がきちんと受け止めていただき、省庁間の縦割りではなく、例えば総務省、経産省、デジタル庁といった省庁が一緒に進め、そこに民間の通信と電力、あるいはその他の事業者が一緒に取り組んでいく土壌ができていることが大きいと考えています。以上でございます。

別視点からの推進

（モデレータ１）

視点が異なる質問でしたが、有意義なコメント、ありがとうございました。これに関連して参加者6から、先ほど 5 分野統合などのお話しをいただきましたが、今参加者7が言われたような、少し違う視点で進めていくことが必要でしょうか。

（参加者６）

はい。さき程のインフラの融合を進めるためには、今参加者7さんが話をされたように、規制側がいろんな省庁に分かれているので、私今内閣府の仕事をしていますが、エネルギーは経産省がリードして、社会インフラや水は国交省です。そのため、情報を共有して、それぞれのグリッドの変革を進めることがとても大事です。

また、最初の話に戻すと、参加者2や参加者1がいわれたように、需要と供給を結びつけるところが重要です。だからウェルカムゾーン（Welcome zone）なども大事なので、データが連携の結節点になり、かつ、参加者8が言われた「制度設計のガバナンスについても日本は分断されているので再設計が必要だ」という点を提言の意思決定プロセスに入れた方がいいと思いました。以上です。

我が国におけるデータ連携の課題

（モデレータ１）

ありがとうございます。

データの連携については、参加者1からの海外の事例について、なぜうまくいってるか、ご存知であればお聞かせいただきたいと思います。

（参加者１）

正直そこまで調べてないのですが、先ほどもお話ししたように、公開がデフォルトっていう立て付けからスタートする姿勢がまず大事なだと思います。データ開示に関しては、現在もいろんな省の方にご相談しては跳ね返されている日々なので、もう少し上位の考え方からそういう姿勢を作らない限り、日本はなかなか変わらないという印象があります。

例えばスマートメーターのデータについては、使う人が多額のお金を払うことが必要な形では、データ活用も進まないと思っていて、例えば海外では託送料金で回収するようなことがではできているけれども、日本ではできない。その原因としてはプライバシーへの配慮もあるのですが、なかなかそこから議論が進まず、「データの入手に補助金出すのでデータ活用によるいい結果出してください」として、その上で考えるという議論の状況です。

過去に使えたデータでは、秘匿が多くあまり使えないと、やっぱりダメだったで終わってしまいます。しかし、いろんな人がデータ活用することでいろんなチャンスが生まれると思います。その辺もう少し間口広げ

て、まずはデータを使うことを前提にこれから制度を組んでゆくことが必要です。人も減ってくる中で、データを活用していろんな効率化を行うことしか、私は日本には目がないと思っています。そのため、データ活用を進めるためにもう少し上位の部署、内閣府でもいいのですけども、そこからデータ活用の障壁を除いてもらえないかと常々思っています。

以上です。

データを共有することの価値

（モデレータ１）

ありがとうございます。今の内容に関連して、7月の熊本地震の時は、自動車の走行データを使って通行止めの箇所を共有することを、自動車メーカーさんが個別に取られたデータを世の中に示しして、その地域のお住まいの方が大きなベネフィットを得られたようです。電気は目に見えないし、電力会社のご尽力により早く復旧するので、なかなか電気のありがたみが分からないのですが、データが活用できる仕組みは日本でも構築したいですね。

今、参加者2が取り組んでいるプロジェクトがもう一歩先に進むことで、後半の議論でも出てくるかもしれませんが、PMU データの共有などに繋がる可能性もあるとは思いますが、いかがでしょうか。

（参加者２）

はい。エビデンスで根拠をつけることは非常に重要だと思っています。過去の事例で申し上げると、スマートメーター、次世代のメーターが今入り始めていますが、5 分値を計測する機能が入ってることを皆さんご存知でしょうか。これは全部をリアルタイムで使うのではなく、 5 分値を保存して後で活用する仕様で取ることになっており、これに関してはシミュレーションをいろいろとやって、 5 分値を使ってできることを定量的に示して、ステークホルダー検討会の中でこういう機能が入ることで社会的な便益を生むストーリーを作りました。これはシミュレーションをする、実際のデータに基づいてやってみることで、説得力のある材料を用意することが重要だと思います。

あと、PMU、今出していただいた件については非常に重要だと思っていまして、これからやはりずっと不確実性がすごく増大する。それからやっぱり再生可能エネルギー、馬場先生のお話にあったコンバータの接続の電源が増えていくという中では、系統の安定性みたいなところでは、今までにない安定性も考えなければいけないっていう話が出てまいりました。そういったことで、やはりデータをちゃんと取って、その兆候やそれがどういうふうに生じてるのかということを根源まで遡って分析するってこと必要だと思います。それはやはり PMU というのがこれから大きな価値を生むと。

私の理解ではPMUは、一般送配電事業者が2030年代前半ぐらいまでに設置をされると聞いています。これをどう活用するかについては、全てを公開することではないと思いますが、例えばそのデータをいろいろな解析や分析に使うために提供するスキームを今から考えることは重要だと思ってます。これやはり新しい現象ということになりますので、本当に根幹的なデータになると考えています。

小売事業者としての期待と要望

（モデレータ１）

貴重なご意見ありがとうございました。時間もだいぶ迫ってきましたので、次のテーマに移ります。今回の提言が実現したとして、電力の小売事業者さんやメーカーさんなどは、事業として成立していかないと厳しいと思います。電力の小売事業者が新たな料金メニューやタイアップとか苦労されている中で、参加者4の小売事業者さんは先進的に取り組まれると思います。今後、小売事業者さんとしての期待や要望などありますでしょうか。

（参加者４）

自社の話になりますが、弊社の電力の小売り料金のメニューは電力の卸市場価格の連動で、30 分ごとに変わる単価をお客様にお示しして、お客様がその変動する単価を見て、電気の使い方を工夫していただくということをやっています。これを事業として考えた時、市場連動で単価が変わることに対して、一番リスクを減らすための仕入れの方法は、市場で調達することです。その市場で調達することだけを見てしまうと、中長期的な日本の電力供給の安定性に対しては何も寄与していない状態になっているように見えます。

そうすると、電力の小売り事業者としては、電力の中長期的な供給側へも貢献をしていきたい、そこに対する制度的な要請に対応していきたいということと、短期的な視点ではその運用をダイナミックプライシング

などで動かすことで貢献していきたいという、様々な時間軸別の価値がある中で、価格シグナルでの一本化だけでうまく需要家に動いてもらえれば一番良いのですが、そういった方法が本当にいいのか、かつそれが事業として成り立つようなバランスになるのか、そういった点を引き続き考えていく必要があるとは思っていました。

（モデレータ１）

ありがとうございます。先ほどのスライドの中で、家庭に置くような小さい電気機器の使用にも貢献できる可能性もあるとありました。例えば、エコキュートを使った商売などを手掛けておられるようですが、そちらの可能性はいかがでしょうか。

（参加者４）

エコキュートの制御などを手掛けようとしています。先ほどの参加者7からのプレゼンを見ていて思ったのですが、人間の体も随意的に全てを動かしているわけではなく自律分散なんだろうと思った時に、小売り事業者あるいはアグリゲータが全てを制御するよりも、一つ一つの機器が自律的に動くような組み合わせのシステムが世の中に増えていく方が、システムとしても安定すると思ったりもします。

使えるデータ品揃えへの期待

（モデレータ１）

非常に大きな話になりましたが、ありがとうございます。参加者3からは、風力事業を例に、意思決定について日立グループは非常に進んでいる状況のお話をいただきました。データ利活用について要望などありますでしょうか。

（参加者３）

前半の講演で戸田委員からご発表があった、民間事業者が取りづらいリスクが今後出てくるというお話は、非常に共感するところがあります。

再エネ事業は、少し前まで固定価格買い取り制度（FIT）という非常に守られた環境で発電設備が建設されていましたが、現在は自立が促されている状況です。そういった中でどう戦っていくかというと、やはり事業性評価を高精度化し、（評価できる項目の）幅を広げていくことが必要と考えています。そうなると、（パネルディスカッション1前半の）話に戻りますが、使えるデータが揃っていることが重要になってきます。事業性評価をする上でも色々なデータが欲しいと考えています。

（モデレータ１）

日立グループは海外にも進出されているので、日本と海外との違いも感じるところもあると思います。日本でもデータの利活用が広がると、海外での経験を日本に生かすことも考えられますが、いかがでしょうか。

（参加者３）

たしか日立グループ全体で半数以上が外国籍の方です。海外の先進的な事例を取り入れ、参考にしながら進めていくのも重要と考えています。

人材育成

（モデレータ１）

ありがとうございます。

残りもうあと 5 分になってしまいましたが、最後に人材育成について参加者5からお話しを頂きたいと思います。

先ほどのお話の中でご紹介があったようにご専門の高度な系統運用のシステムとか、様々な解析ツールを使いこなすのも重要ですが、一方で現場設備の物理挙動や事故対応など、これらを五感で体得することも必要で、また先ほど荻本先生からもありましたように、いわゆるハイブリッド人材の育成も必要です。こういったところに取り組むことについて先ほど関西電力さんからも育成の話しがありました。学の立場から、具体的な取り組みとして何が考えられるか、知見がありましたらご披露いただければと思います。

（参加者５）

なかなか難しいことだと思います。先ほど関西電力さんからそして参加者7からもありましたが、電力系統解析については、実系統で実験することは難しいため、先ほどのそのステップでいうと②のところで解析ツールを使って過去の電力系統の事故の基本的な現象を再現し，その次は、そういう事故が起きないように、

それぞれでいろいろ考えて、対策を立案して試していくことが考えられます。このようなインターアクション入れていくのが一つで非常に重要かなと思っています。

この間、電気学会 C 部門で紹介がありましたが、半導体集積回路、LSI のについて、高専さんと企業さんの連携で、教育コースを作っています。その中で、集積回路の設計のコンテストをすると、それぞれ与えられた課題に対して、それぞれの学校単位やグループ単位で設計をして、そこで合格したらそれを協賛企業に実際に作ってもらいそこでまた実験をします。当然ですがそう簡単に与えられた課題であるスペックを満たすものはなかなか出てこないことになりますが、この過程でインターアクション出て来るのでなかなかいい取り組みかなと思っています。それを電力系統解析でも同様のやり方に取り組めないかと考えています。要は学生時代に、いかに興味を持ってもらうかということになりますので、高専、大学、大学院、高専ですかね、そこからスタートしてもらうのがいいと思っています。十分なお答えになってないかもしれないです。以上です。

（モデレータ１）

ありがとうございます。福島の廃炉サイトでも、高専の方々に集まっていただいて毎年ロボットコンテストをやっています。非常にレベルが高く、現場でも使えるレベルにあると思いましたが、電力系統解析の分野でも、企業さんと電力会社さんとのインタラクションがあるといいですね。

特に今の若い世代の方々は AI を使うのは慣れています。AI にどっぷり使った方々、あるいは電力とは異なる切り口で興味を持っている方々をこの電気事業に引き込んでいく必要がある時代に入りつつあると思いました。それついて何かご意見はございますか。

（参加者５）

AI は強力なツールになり得るということで、目的に応じて使い分けることになると思います。それで、系統解析とか先ほどの PMU を使ったその系統の状態監視など当日の運用に近い適用になると、系統オペレーター自らその AI を構築することが重要であり、AI の専門家と協働するわけですが、そこで大事なのは信頼できる AI です。要するにほぼ自分と同じことを AI ができることと、あとは AI が提示した内容に対して、きちんと透明性や説明性を担保できることが非常に大事になると思っています。

会場からの質問

（モデレータ１）

時間となりましたが、会場からコメント等あればいただきたいと思いますが、いかがでしょうか。

参加者9、お願いします。

（参加者９）

参加者7が言われたワット・ビット連携と血液血管神経のアナロジーはすごく大事な話しだと思っています。次のパネルの自己紹介で話そうと思っていたのですけど、お話しさせて頂きます、ちょうどいい機会なので。

我々は今内閣府／JST のムーンショットプロジェクトで臓器ネットワークの研究をしています。医学的な研究です。ここでは、血管と神経はもちろん重要なのですが、生体の制御はあと内分泌系と免疫系もあって、浅野先生が言ったファイブグリッドにより近い構造です。この点をもう少し深めると、ワット・ビットだけではなくて多分様々な臓器も入ってくるので、電力で言えば分散電源とか、違う種類の電源の話になると思うんですけども、そこのアナロジーで議論するとより面白くなるという感じがしました。

（モデレータ１）

ちなみにそこは電力の関係者は入ってらっしゃる？

（参加者９）

いえ、医学と数理です。

（モデレータ１）

残何ながら、入っておられないのですね。今後の発展が非常に期待されますね。

（モデレータ１）

参加者7も多分この点ご関心あると思います。他よろしいでしょうか。

はい。それではパネル討論ご登壇の皆様どうもありがとうございました。また会場からもご質問いただき、ありがとうございました。以上でございます。

（司会）

パネル討論ありがとうございました。あっという間の一時間でしたが、会場からも質問いただきありがとうございました。

休憩 2

（司会）

それでは、パネルディスカッション 2 は 16 時 30 分からですので、それまで休憩とさせていただきます。

よろしくお願いいたします。

パネルディスカッション 2「変革のポテンシャルを探る －電力×〇〇の視点」

（司会）

それでは短い休憩時間でしたが、ご登壇の先生方は前の方にお進みください。よろしくお願いいたします。

それでは 1、2 分早いですが、多分色々とご質問などおありだと思いますので、少し早めにパネルディスカッション 2 を始めさせていただきます。この第二のパネルでは、電力分野と異なる分野の有識者の中心に参加いただいています。「変革のポテンシャルを探る電力×〇〇の視点」というテーマで、電力と他分野の接点による新たな可能性について幅広くご議論していただくこととなっています。モデレータは福島国際研究教育機構、F-REI 理事の江村克実様にお務めいただきます。江村様、よろしくお願いいたします。

パネルの進め方

（江村（以下モデレータ２））

それではパネル 2 を始めます。今、紹介頂いた通りですが、趣旨をもう一度お話をさせていただきます。次のページを一旦見せてください。

このシンポジウムも三回目になり、毎回私は電力の部外者ですと言っていまして、今日もいつもと同じことを感じました。電力の皆様方は、非常に重要な社会インフラを運営されていて、非常に大変なお仕事をされていることは理解してるのですけが、やはり発想が固定化していないかと強く毎回感じています。ですから、課題の設定も、基本的には前のパネルの参加者6と参加者7はこの電力×〇〇の視点に触れていただいて大変ありがたかったのですが、他の議論は、個別課題が主になっている気がしています。

そういうこともあって、このパネルでは、意図的にプロジェクトメンバー以外からパネリストをお呼びしました。実は隣にいる参加者9も学生の頃は電力コースだったと先ほど聞いたので全く接点がないわけではありませんが、現状では電力とは直接関係がない方から新しい視点をいただこうと考えています。でもそれだけではいけないので、プロジェクトの代表として荻本先生を受け止め側のパネリストとして参加していただく構造にしており、この構成で議論したいと思っています。電力×〇〇の視点では、先ほど参加者6のお話にもありましたように、「×」ことが重要ではなくて、その中でどういう価値を作っていのかが重要です。新しい価値を創造していくことが変革のポテンシャルであろうと思っていますので、その辺りを主に議論したと思っています。

では、前のページに戻っていただいて、パネリストのポジショントークをいただきます。内容は様々だと思いますがそれも意図のうちなので、それぞれ三分程度でお願いします。

電力×〇〇分野での価値創造に向けて

（モデレータ２）

まず、参加者9、お願いします。

複雑系数理情報学とニューロインテリジェンスから見る電力システム

（参加者９）

ありがとうございます。最初のスライドお願いします。僕は複雑系数理情報学とニューロインテリジェンスの観点から考えてみたいと思います。次お願いします。

僕、数理の人間と思われてるんですけども、実は学部は電気系で、それも強電です。今日ご参加いただいてる秋田君とは同級生で、いまだに毎年飲んでいます。卒論は、じゃんけんで負けて静電気工学に行ったのですが、そこでお会いした増田先生が素晴らしい先生で、いまだに僕の研究はその時に増田先生に教えていただいたスタンスでやっている感じがします。

その後数理の分野に行き、東大の計数工学科には数理工学コースというのがあり、僕の先生は甘利俊

一先生といって、今の AI の深層学習の元を作った先生で、文化勲章も受賞されました。その甘利先生から数理第一講座という名門の講座を引き継いで、そこはすごく優秀な学生がいっぱい来ます。参加者 10 も僕の生徒で、やはりかなり優秀です。生研だと、河野崇教授や小林徹也教授は僕の教え子です。

数理にのめり込んで電気から離れたのですが、生研では第三部が電気電子系です。僕の先輩がいっぱいいて、その先輩に「お前は本郷よりも生研の方が合っている」とお誘いいただいて、2003 年に生研に本郷から移りました。その関係で 2008 年からは電気系の大学院も兼任させていただき、電気の学生も指導できるようになり非常に楽しかったです。

次お願いします。今日はあまり時間がないので話しませんが、電力システムは複雑系の典型例です。さっきデータの話がありましたけれども、最近は電力のデータがいろいろ手に入るようになったので、かなり早い時期にヨーロッパの数学者と共同で、右上のペーパー、これは結構面白い論文なのでもしよろしければぜひ見てください。その下がそれを日本語で簡単に解説したものです。複雑系の典型例であるというのが電力システムの一つの特徴です。

次お願いします。それから先ほどちょっと議論しましたが、このパネルでもワット・ビット連携の話が出てくると思いますが、実際の臓器ネットワークを研究している立場から言うと、もう少し生体ネットワークを詳しく見ると本質が見えてきます。だから、血管と神経だけではなくて、さっきお話しましたように、免疫系、内分泌系、それから臓器の違いをきちんと捉えることが、少なくとも疾患の発病に関しては本質的に重要で。だから多分同じことが電力システムを捉える上でも重要だと思います。

最後に、このような複雑ネットワークには光と影の部分があって、左上の図がそうなんですけども、2003 年のイタリアの大停電、これはある意味ワット・ビット連携のせいで起きました。どういう話かというと、まずある発電所が落ち、そこから電力を受けていた通信ネットワークが落ち、その落ちた通信ネットワークが他の発電所の制御にも関わっていたせいでその発電所も落ちました。で、それが落ちるとそこから電力を受けている通信ネットワークも落ちるという連鎖が起きて、2 種類のネットワークの連鎖でブラックアウトが起きたということです。

これはネットワーク科学にとっても非常に新しい現象で、インターディペンデントネットワークという名前がついて詳しく研究されて、ネイチャーに論文が載っています。出典を書きましたので、よろしければ見てください。とりあえずここまでにしておきたいと思います。

（モデレータ２）

ありがとうございます。たくさん論点がありそうですね。それでは参加者 10、お願いします。

電力とモビリティの統合インフラ化

（参加者 10）

今日のお話は電力×〇〇ということで、モビリティに関してお話しさせていただきます。まず私自身が電力関係とは全く別の分野で、今こちらにいらっしゃる参加者9のもとで数理工学を研究して、特にカオスに関して研究しました。先ほどいわれたように、それほど優秀ではなかったので紆余曲折ありましたが、民間の、例えば高速道路会社さんとか自動車会社さんとの共同研究を 10 年ぐらい前から始め、モビリティに非常に興味を持つようになりました。

今真ん中に書いてあるように、内閣府の SIP プロジェクトでエネルギー、これ参加者6がやられているスマートエネルギーマネジメントシステムの構築というところと、あとスマートモビリティプラットフォームという全国の道と街という形でやられているのですけれども、ここに携わる形で今プロジェクトを進めています。SIP は社会課題を解決するということで、特に地域の社会課題というところで、実はエネルギーとモビリティの両方とも関連してきます。しかも先ほど参加者9からもお話あったように、これは実は多重のネットワークになっていると言うことができます。

次のページをお願いします。その統合インフラという言葉も捉え直して偉そうに書いてしまいましたが、すでに先ほどからお話出ているように、EV は、電力の充電需要である EV、電力の消費体からの脱却ということで特に地域社会は人口減少による交通空白とか逆に FIT による再エネの余剰という問題が同時に起きています。これらを解決するのに我々は数理が使えるのではないかということで、取り組んでいます。

あともう一つは、先ほどもお話出ていましたが、電力をそのまま貯蔵するっということもありますが、いわゆるグリーン水素とかあるいは特に注目しているのが回収した二酸化炭素を使って炭素を循環するという意味での e-Fuel をマルチエネルギーキャリアとして多様化する取り組みを考えて、これらを統合してインフラ化する研究を今行っているところです。以上になります。あとで事例紹介します。

（モデレータ２）

ありがとうございます。また後ほど具体事例をお話しいただきたいと思います。続きまして、参加者 11、お願いします。

国の取り組み

（参加者 11）

よろしくお願いします。私はここに出てますように、モデレータ2から先ほど電力畑ではない人を集めたと言われたのですが、ずっと原子力関係の材料を研究したり、電力産業システムのセンター長をやったりしまして、目一杯電力畑出身でちょっと困ったなと思ったのですが、今日は後半の全社の技術開発全体を見たり、経団連とか COCN でいろいろ見ていたことを含めて、先ほどから話題になってます、国のいろんなプロジェクト、今絡ませていただいてまして、内閣府の SIP のプログラム統括を去年まで六年間やってきましたので、この話を少し入れて話したいと思います。

次お願いします。これは普通のエネルギー関係のまとめで、私は今 NEDO のフェローをやっており、NEDO でまとめたエネルギー関係の作る、溜める、使う、それから整えると分類できるんではないかということで、今中身の詳細を詰めているところです。次お願いします。

内閣府で今進めてますのが、先ほどから出てます SIP と、それから PRISM、BRIDGE という、SIP から派生したプログラムがあり、それからもう一つはムーンショットという、ご存知だと思いますけど、これは各府省連携で今進めています。次お願いします。

SIP の中身で第二期の方のテーマが書いてあります。いろんな領域をやってるのですが、今日の話題と関係するところは、例えば 4 番の自動走行、8 番のエネルギー環境で、IOT 社会のエネルギーシステム、残念ながらエネルギー・電力に関係するテーマはこの程度です。今第 3 期を進めているところで、赤字で書いた、先ほど参加者 10 から話が出ましたスマートエネルギーマネジメント、スマートモビリティなどが、エネルギーに関係するプロジェクトで、先ほどの参加者6が PD をやっていただいているテーマもここなのですが、エネルギーと電力と関係するテーマはタイトルだけ見るとあまりないのが現状です。次お願いします。

それではムーンショットはどうか。ちょっと変な写真があるのであれですけども、参加者9が先ほど話題にしたのが目標 2 ですが、これはあまり電力とは関係ないので、目標 4 の山路先生がやっているエネルギー関係の直接 CO2 回収とか先進的なテーマをやいて、この内閣府が府省連携でやっているテーマを見ると、エネルギー・電力関係が少ないし、かつ電力×〇〇なんていうテーマはあまり入ってない気がします。参加者6がやっているテーマは、多少電力×〇〇が入ってると思いますが、残念ながらそこまで行っていないのが現状だと思います。次お願いします。

これは実は NEDO の方で、今、NEDO 版ムーンショットプロジェクトをやろうということで、フロンティア領域で失敗を覚悟したプロジェクトをやろうということで、横軸、縦軸で区分けをしてテーマを探していて、一部天然水素がスタートしています。これを見ていただくと、少し電力×〇〇という発想が少し出てきています。

ということで、次最後の図ですけど、今言ったように、今日のテーマである電力×〇〇は、一部スマートレジリエンスとか先ほどから話題になっているワット・ビット連携など、国の方でも少しずつ動いてきているのですが、まだ電力は電力、〇〇は〇〇というやり方をしていて、両方がうまく重なったプロジェクトがまだ少ない感じがしています。これは国でやるべきなのか、本来こういうことはもう各会社、産業界がどんどん進んでやるべきなのか、議論があるところだと思いますが、現状の国のプロジェクトとしては電力×〇〇に踏み込む状況にはなっていない気がします。

以上です。

（モデレータ２）

ありがとうございます。前半でも日本は連携が弱いという話があり、国のプロジェクトもそれでいいのかというのは問いかける必要があると私は思いますが、今回の提言がそういう観点でも一石を投じるものにするという意識はありそうだと感じました。時間があればまた参加者 11 とも議論したいと思います。では次、参加者 12、お願いします。

ワット・ビット連携-MESH 構想

（参加者 12）

株式会社ビットメディアアンド MeshX、このネタバレは後でやりますが、簡単に自己紹介とポジショントークをさせていただきます。次お願いいたします。

資料は配布されているとのことなので後で見ていただければと思いますが、芸歴は長いのですが、まあデジタルクラウドを使っていろいろなサービスを作る、今 NHK One という配信もやってますし、あと資源循環の五つのグリッドがありましたが、エコ化でペットボトルのリサイクル基盤もやっています。

それとエネマネをやっていて、この辺が派生してワット・ビット連携につながってきました。それで MeshX という会社を作りまして。次お願いします。

右下に生成 AI エネルギー論で去年の 4 月に出した本で、これ参加者7と共著で、ちょうどこの頃、国でワット・ビット連携官民懇談会というのが走っていて、執筆は一年ぐらい前にやっていました。デジタルをやっていますと言いましたが、自律分散技術をやっています。それが、ある社会課題、先ほど出力制御っていうのがありましたが、2018 年には九州で 4 日間出力制御が発生したというので覚醒して、電気を捨てるのはもったいないから計算すればいいのではないかというところから、ワークロードシフトって最近言っているのですが、データセンターに調整力を持たせる開発を趣味でやりまして、私から見るとそれが一つワット・ビット連携という形になったという感じです。次お願いいたします。

これはその 2024 年、まだワット・ビット連携が国策になる前の岸田政権の時、参加者7が岸田政権下での GX2040 リーダーズパネルで話をした時の一枚ものです。まさにこの中にワット・ビット連携という、上にワット、下にビットの図があり、この中にはモビリティや熱も入っていて、資源循環はないのですが、先ほどの 5 グリッド的な話があり、この中にビットとワットが寄り添ってるところが神経系と血管系の話になっていたと理解しました。そこにメッシュ構想というのがあり、この名前を戴してマシンラーニング、エナジーシステム、ホリスティックで MeshX という形になりました。次お願いします。

これが去年 6 月にワット・ビット連携取りまとめ 1.0 として、経産省、エネ庁、総務省も入れてできた取りまとめをみんな大好きな Google ノートブック LM にポーンと突っ込んで、それでインフォグラフィックを書けといって出てきたものです。もう半年以上前ですから、その後 AI も進化しましたが。ということで、端的に言うとウェルカムゾーンも出てましたが、足元の DC10A の対応は、電気があるところ、系統に余力があるところに持っていく、それから今、いわゆるギガワット級の集積地の候補エリアが今絞られてて、最後決まろうとしているというのがあり、もう一つ三つ目が地域に分散する、あるいはネットワークでつなぐために WLS、いわゆる調整力の技術を使った運用の高度化し地方へ展開することで、それが地域との共生を取りまとめとして出ています。次お願いします。

それを踏まえて、今年度、総務省では、ちょっと小さくて恐縮です。ワット・ビット関係の実証プロジェクトが 7 月に総務省のプロジェクトに採択されました。上から二つ目です。九州電力が構成機関になっていて、ここにビットメディアも入ってます。それからだいぶ下に行きまして、下から二番目、Jパワー、電源開発が構成機関のプロジェクトもビットメディアがいて、さらに最後の東京電力ホールディングスとパワーグリッド、ソフトバンク、KDDI、富士通、東大、九大、北大いて、その代表機関が MeshX です。こんなことで、岡本さんの先ほどの話もありましたが、いわゆるワット・ビット連携をいろんな企業と取り組んでいます。

ポジショントークはここまでとしますが、この一年、このワット・ビット連携は国策になって進んでいる認識はあるものの、アメリカはもう完全に追い越してる感もありいろんな動きがあります。この辺も後半お話ができればと思います。以上です。

（モデレータ２）

ありがとうございます。それでは PL、パネルに参加するにあたって意思表明を。

エネルギーマネジメント

（PL）

ありがとうございます。2008 年に、今名前が出た J パワーに 30 年勤めた後に東大に来ました。こちら来てからは、再エネの大量導入のもとで、集中型、従来型の電源の中心の世界は大きく変わり、需要側資源を使い尽くすことが重要と考え、その分野の研究を参加者1と一緒にやってきました。

そのきっかけになったのが、2008 頃にエネ庁さんが出した技術ロードマップの策定に参加したことです。これ 2 年ほど議論して、エネ総研の担当者の人がとてもとても努力して当時としてはビジュアルに作られたのですが、最終段になって議論の一つが、私が提案して入れてもらった「エネルギーマネジメント技術」をこのロードマップの中に入れるかどうかでした。誰も知らないのでダメだと言われる中、最後は、「これだけ私

も尽力してきたので、入れてほしい」というような言い方をして入れていただきました。英語の世界ではエネルギーマネジメントっていう言葉は普通に使われているし、産業でもどこでもあり、電力では自由に使っていいよという時代が続いたので、少なくとも需要側にはあまりその言葉はなかったかもしれません。供給側では当然需給はマネジメントが必要なので、エネルギーマネジメントの概念は当然ありました。そう役所の文章の中に需要側のエネルギーマネジメントというのが出てきたところに関与し、それを議論してた委員会で東大の先生と出会ったというのがここにいることのきっかけでした。はい、ポジショントークでございます。ありがとうございました。

電力×〇〇事例紹介

（モデレータ２）

ありがとうございました。電力×〇〇の言葉はずっと出てきていますが、もう少し具体的な事例紹介をいただいた上で議論したいと思います、電力×モビリティについて、まず参加者 10 から事例紹介をお願いします。

電力×モビリティ

（参加者 10）

今、SIP プロジェクトに参加している中で、モビリティに関わるところをご紹介します。車両には OBD[54]規格があり、データを取得することができ、車両の走行のデータを解析しています。電気自動車は、ゆっくり走れば燃費が良くなるということがわかるのですが、実はここ 2 つに分岐して、低速でも燃費が悪い時と良い時があり、よく見ると加減速の大小が影響しており、その走行の仕方に重要なポイントがあることが分かってきたというのが 1 つ目の話題です。私は交通安全の観点を投げかけたいと思っています。次のスライドをお願いします。

その時に、先ほどの生体データ等に関わるところなのですが、職業ドライバーの生体データを計測していて、これが安全な交通に関わり、右にあるように、ドライバーの胸にパッチ式の心電計をつけてデータを取ります。お客さんを乗せている時、職業ドライバーなのでライドシェアにあたります、その生体状態が交感神経優位になり、適切に集中して運転していることがデータからも分かりました。あと、心拍数と走行速度に一定のとの相関がり、こういったことから、最後、交通と人通り、最適な安全走行には、低速で低加減速であること、それで適度な交感神経維持が重要であることが分かりました。次お願いします。

既にお話があったので簡単に説明しますが、EV には、短期的な系統のフレキシビリティの供給と、長期貯蔵という意味では水素あるいは e−Fuel の利用があります。排出二酸化炭素を回収してそれを燃料にするという炭素循環によるカーボンニュートラルに取り組んでいて、実際に車両を大学で用意して、電気自動車、今 FCV ではないのですが、e-Methan やバイオディーゼルで走る車のデータを取ってます。次のページお願いします。

この安全運転支援、安全に走行するということとエネマネがどうつながるのは、先ほどお話しした、エネルギー消費が、滑らかになります。安全な走行すると数理モデルで予測がしやすくなります。さらにこれを系統レベルまで増やすと、EV が 1 台ではなくて群でという今より普及した場合に、それの走行パターンがある程度ネットワークでわかるので、これをうまく使えば例えば系統負荷がどれぐらい変わるかがわかってきます。さらには、再エネの余剰電力を無駄なく使うためにモビリティに連携していくというマッチングがとても重要です。予測とマッチングが必要であり、安全運転支援システムそのものがエネマネやカーボンニュートラルに向けた最適制御になるというロジックです。最後のページお願いします。

先ほどからお話あった需要サイドの EV について、安全運転支援という観点を入れることで、新しい一つの Demand Response になるのではないかが一つと、再エネとエネルギーのマルチキャリアの最適化にマルチモビリティを組み合わせ、多様なエネルギーと多様なモビリティのマッチングについての数理の適用の研究をしています。交通安全とエネルギーの効率、そしてドライバーの低ストレスとを同時に達成する三位一体の最適解を目指していることの紹介でした。以上です。

（モデレータ２）

ありがとうございました。一つの論点は電力と他のものを掛け合わせた時に作り出す価値は何かという議論があると思います。電力の安定供給を超えて、新しい付加価値として何を出せるのかが、今日電力×〇

[54] 車両のデータ取得規格。 OBD: On-Board Diagnostics/車載式故障診断装置。

○の中で議論したいポイントの一つと思います。続きまして、参加者 12、お願いします。

電力×AI

（参加者 12）

先ほど海外もということでお話をしましたので、資料は特にないので口頭でお話しさせていただきますと、ワット・ビットは電力×ビットであり、今回の場合、AI ということだと思います。

このワット・ビットの中で初期から今で大きく変わっているのは、皆さんご案内の通り、NVIDIA の GPU のシェアがどんどん上がり、一部循環取引だとも言われてますが、技術的なロードマップを見ると、データセンターのラックあたりの電力が急峻に上がっていて、通常の CPU サーバーではせいぜい数 kW/ラックのレベルであるのに対し、最新の Rubin では 200-400kW/ラック、次の 2018 年に登場すると言われている Feynman は 1MW/ラックです。そういう世界線になると、その電力はどこから取るのかということで、ウェルカムゾーンが出てきます。NVIDIA、OPEN AI、孫さんのスターゲートとかいろいろありますが、電力があるところに作ることもありますが、ご案内の通り、スリーマイル島のコンステレーションエナジーの発電所のそばにマイクロソフトが行く考え方もあります。一番極端なのがイーロン・マスクで、地球上の電力では足りないから衛星データセンターにして、陽が陰らないところを周回させて、太陽光で GW 規模の発電を行う。基礎技術は、衛星コンステレーション、スターリンクで実証済み。そんな話にもなってまる。また別の言い方をすると、例えば、少し昔の例になりますが、そもそもクラウドは Amazon が始めた AWS です。Amazon は、自分でデータセンターを持って EC サイトを運営しました。お客を逃がさないように、ブラックフライデーにお客さんが来れるだけの設備を持ちましたが、そうすると 2 月とかはガラガラに空いてしまう、これは他人に貸そうということで AWS が始まり、クラウドになりました。

同じことが起こりかねないのが、今のアメリカのビッグテックです。クラウドは自分で発電する方向に行き、昔はカーボンニュートラルのためにと言っていましたが、もはや自分で使うためには電源が必須で、系統でつないでどこかから買ってくるより、自分で電力供給をやりますと。そうするとさっきのアナロジーで、電気が余った分は供給するとようになると、AI が使うのがメインで、余った電気を人間に供給する電力会社が登場する報告にワット・ビットが進む可能性があります。日本はこの状態でどうしたらよいか、日々いろいろモヤモヤしています。

（モデレータ２）

ありがとうございます。だいぶ刺激的な話ですが、2040 年ぐらいを意識した時に、何を考えておく必要があるかがポイントだと思います。二つの事例を紹介いただきましたが、そのお話を聞いた上で、まず参加者 9からコメントお願いします。電力系だけでも超複雑系だと言う中で、他のネットワークもつなぐことも含めて、お話しください。

AI の電力

（参加者９）

言いたいことはいっぱいありますが、まず今の AI の電力の話です。今の AI もデータセンターも電力を使いすぎています。だからそれはなんとかしなくてはいけないと思っていて、今 NEDO でプロジェクトやっています。それは、2040 年の AI の電力の使用量を大幅に削減するというプロジェクトです。頑張ってやればできないことはないんです。まず、今の AI はディープニューラルネットワークで入力から出力に向かってフィードフォワードに信号が伝わり、その層が 100 とか 1,000 とかになってきています。かつ、バックプロパゲーション [55]で全てのシナプスを学習するので、学習には大きな電力と時間がかかります。ところが、実際の脳を見ると、リカレント結合、すなわちフィードバック結合があちこちにあります。一番有名なのは記憶に関与している海馬の CA3 が典型的ですが、このリカレント結合を使ってネットワークを作れば、実は 1 層でディープニューラルネットワークと同じことができます。それをやるのがリザバーという技術で、リザバーを使うことで電力が/10 から 1/100 分の 1 になるだろうと。これは NEDO の見立てです。そうやってリザバーを作っても、ニューロンモデルは基本的に今と同です。そこで次に、ニューロンモデルを脳の実際のニューロンのようにスパイクを出すニューロンモデルに変えれば、電力がさらに 1/1,000 なる可能性があります。そうすると計算上は 1/10000 から 1/100000 になります。実際、皆さんの脳は 1,000 億のニューロンからできています

[55]ニューラルネットワークの学習で出力結果の「間違い（誤差）」を後ろから順に伝播させ、パラメータ（重みとバイアス）を調整する機械学習アルゴリズムです

が、20Watt で動いています。で、一生懸命計算している時はむしろ電力減ってるくらいです。別に増えないのです。人の脳と同じサイズの人工ニューラルネットワークを作ってスーパーコンピューターでシミュレーションすることは出来ますが、それだと 7.9MW の電力が必要になります。もし 10 万分の 1 にできれば 79 ワットになりますので、まあまあいいところまでいくと思います。

それで最初のご質問ですけども、電力×〇〇という発想はすごくいいと思っています。電力＋〇〇ではなく掛け算なので非線形性があります。今日のお話で、電気工学が何か核になっているのだとご指摘がありました。僕は学部では電気をやったので、すごく嬉しかったのですが、その電力×〇〇として色々なものを考えていくのはすごく重要で、たくさんの非線形効果が出てくると思います。

ただそれだけではダメで、それぞれを足し合わせれば、また単なる足し算になってしまいます。それをどうやってネットワークにするかっていう、多分そこがポイントです。複雑系で重要なコンセプトにエマージェンスという考え方があります。これは要素の性質や単純な要素の組み合わせだけでは事前に想定できないような全体的な振る舞いが複雑系で出てくるという。脳はまさにそうで、我々は一個一個の神経細胞はすごくよく知っていて、ノーベル賞をもらった数理モデルも、要素としてはわかっています。ところがそれが 1,000 億集まると、なぜかそこに意識と心が生まれると。だからまさに意識と心が創発してきてるんですね。参加者 10 はもともと卒論で「意識の数理」をやりたいって言って入ってきました。でもやっぱりなかなか難しいんですよね。でも確かに創発してるわけです。従って、電力×〇〇をいろんな要素を考えた上で、それをうまくその複雑系としてネットワーク構成にして、そこから何かの創発が生まれるのではないかという、そこが一番期待しているところです。

（モデレータ２）

ありがとうございます。議論したいポイントがまた出てきたのですが、他の議論もしたい。何かというと、前半でデータ活用の議論がありました。でもデータは使いたいっていう話だけで、そのデータをどう使うかって言った時に、今みたいな複雑系の視点でデータ活用するときに、「こういう新しいやり方があるよ」といったアイデアがあれば、その辺りに活路が見いだせるのではないかと感覚的に思ったんですけど。一言二言お二人からあれば。

（参加者９）

一言だけ。力学系理論と微分幾何学の「ターケンスの埋め込み定理」というのがあって、1981 年に証明されています。実際に複雑系というのはたくさんの変数を持っています。ただし、その全ての変数を我々は見れるわけではありません。最低の仮定として、そこから 何らかのセンサーを突っ込んで 1 変数の時系列が取れたとすると、その 1 変数の時系列から元の高次元の状態空間の軌道と同じものが再構成出来るという、そのための条件がわかっていて、従って少ない変数の時系列しか計測出来なかったからといって諦める必要はなくて、この定理を使うと本来の全体の状態空間と同じ情報を取り出すことができます。

複雑系でのデータ活用

（モデレータ２）

参加者 10、何かあります？データ活用。

（参加者 10）

今まさに参加者9もおっしゃったように、データをいかに活用するかっていうところ、あとそのいかにこのクロスセクターで活用して、社会実装に近づけるかという点があると思います。今、数理的な意味ですごく重要な閾値関数というのがあります。これは神経細胞でもそうなのですが、あるところまでは普及しないのですが、突然こう急峻に上がる関数で、これが私は社会実装の背景にある数理モデルじゃないかと思っています。

例えばネットワーク効果という考え方が経済学の分野でもあります。参加すればするほど参加者の効用が上がるという効果で、これもおそらくは閾値的な効果だと思います。そういった観点を数理的に考えていくと、実は社会実装もある程度数理的にできるのではないかと今は考えているところです。はい、以上です。

（モデレータ２）

はい、ありがとうございます。電力の皆さんも、数理の先生方を人ぐらい入れると、議論が仕方変わるかもしれないなと思いました。今の議論と関係して、参加者 11 の自己紹介で、「電力×〇〇は企業とかがやるべきではないか」といったことを言われて、一方でその参加者9がやろうとしている最先端のニューラルネットワークでは、「そういうのは基礎研究で、国が投資してやるべきだ」と思った時に、役割分担として、誰が何

を担うかという点りについてコメントいただけませんか。参加者 11、いかがでしょうか。

電力×〇〇に向けた課題

（参加者 11）

電力×〇〇を考えた時に、やっぱり企業の立場だと、もうどんどんやってしまいます。できることは何でもやろうという感じで、多分いろんな企業はもう相当自分の中で進めて、事業にしているところもあると思います。ただ、今モデレータ2が言われたように、基礎のところは企業だとなかなか難しいので、アカデミアと企業が連携して進めると速いという気がします。

それでは国はどうするのか。もしかしたら国は飛ばしてもいいという気もしますが、日本としてきちんとした技術を蓄積する上では、そこに国がきちんと絡んでやるべきだと思います。NEDO なり JST なり、まあ経産省、文科省、総務省もあると思いますので、それらがどの領域をやるか、もう少し連携してここをしっかりやろうと決めるべきだと思います。企業は放っておくと勝手にどんどん進みます。はい。

（モデレータ２）

具体論なかなかできないんですけど、実は提言で 6 つの提言がありますが、それを誰に提言して実際にボタンが押されるかが結構重要だよねっていう議論をしています。

そうでないと、今までもこういう提言類はいっぱい出てるのだけど、机の上に積まれて終わると良くないという時に、そのボタンの押し方とか、誰にアクセスしたらいいかといったところは、参加者 11 に一個一個教えて頂きたい内容だと思ってお呼びしました、各論はなかなかできないんですけど、一般論でもいいのですが、提言を作った時の進め方についてお願いします。

（参加者 11）

この場で答えるのはなかなか難しいのですけが、あくまで私の知ってる範囲ですが、提言を受け取るキーパーソンがいますよね。霞が関なり NEDO なり JST なりにいるので、その人をきちんと見極めて、タイムリーに持っていく。当然作る時から巻き込むのがいいと思いますが、「こんな提言したいんで、どう思うか」ということを頻繁に face-to-face でやっていくやり方が比較的近いと思います。提言をまとめる時も、読んでもらう人を想定して、ある程度最初から巻き込んで一緒に進めていくやり方が一つあると思います。

（モデレータ２）

ありがとうございます。それでは、提言をメインに作られた PL から、今までの議論で何かあればお願いします。

（PL）

難しいですね。うーん、データの話からいうと、今私自身はいろんな技術が発展することで、いろんなデータが取れるようになった。これってもう今までとは全然違う世界に入ってると思います。

私が参加者9とお会いした場所は、風力発電の出力予測をする NEDO プロジェクトでご一緒させていただきました。私自身は、再生可能エネルギーが入ってきて、出力が変動して、それを需給全体でどう調整するかをやるのですけれども、それをどう変動するかを予測する数理技術として参加者9にご参加いただいて、一緒に仕事をさせていただきました。

言いたいことは、いろんな方がいろんな技術とアイデアを持っているのが今の時代だと思います。ですから、まずデータはとにかく使えるようにする。これが国の役目だと思います。プライバシーがある、秘匿しないといけない事情がある、いろんなデータがあるんだけれども、国が国家権力を持ってやればできること以上のことは個人ではできないので、そこをガシッとやっていただくと良いのかなと思います。

例えば、私も政府の委員会に出たりしてきましたが、やっぱり悔しい思いをするのは、海外では半分できていますが、日本で全くできていないのは再生可能エネルギー発電の出力データを収集して活用することが、事業者は当然自分のものでできてるのですが、それが FIT で税金を使って導入した設備についても共有されない。電力の中の人だけではなく、いろんな人が再エネの出力には興味を持っているはずなので、これ公開できれば非常に大きなインパクトがあるかなと思います。一つはデータの公開というだろうと思ってます。とりあえずここまでで。

（モデレータ２）

ありがとうございました。

少し論点を変えた話をしたいと思います。先ほどから参加者7の話もあり、ワット・ビット連携は電力好事例だという話になっています。ですが、実体はやっぱりそういう議論をする中での苦労や、理想のようには

いってないところがあると思っていて、そういうことの理解が本当は次の×○○の議論には重要かなと思うんですけど、お話しできることがあれば、参加者 12、お願いします。

（参加者 12）

そうですね、まさにその真っただ中にいるので、話せないことはあることはお察しください。総論としていい話ですし、電力システムの投資は抑制しつつ電力の需要を作れる可能性があるという見方もあり、いわゆる計算資源が欲しい人に対して早くそのデータセンターを作ることができることはいいことです。

それをやるためにワット・ビットでよく言うのは、送電線を引っ張るのにかかる投資に比べて、光ファイバーは 100 分の 1 のコストでできる。言ってみると、エレクトロンよりフォトンの方が軽いということになるわけです。ということは、実は分散データセンターっていう、つまり田舎に持っていくとしても、都会にデータセンターを作って田舎から電力を送るより、電源に近いところにデータセンターを作って光ファイバー引けば良い。それはコストが安いから、社会便益上、今日もそういうキーワード出てましたが、三方よしになるのでそれはそれで素晴らしいです。ところが、回線を引く事業者、データセンターそのものを使いたい人、電力会社などそれぞれの立場で小さく区切ると、より高く光ファイバーが売れるのかなどギラギラした思いが出てきます。電力システムへ投資しないとそのベンダーさんは仕事にならないとか、個別の話としては、ビジネスの中での部分最適と全体最適の組み合わせが難しいです。ここをどのように協調して突破するかが、今切実に感じている課題です。

（モデレータ２）

はい、ありがとうございます。どこにでもある縦割りの打破っていうやつですね。

ありがとうございます。だんだん時間がなくなってきました。せっかくの機会ですので、フロアからこういう議論をしてほしいとか、ご意見とかあればお伺いをしてみたいと思いますが、誰かいらっしゃいますでしょうか。

会場からの質問

（会場参加者）

一般市民で素人の質です。素人として心配してるのは、そのいくら再エネ、洋上風力を作っても、その系統接続できなければ役に立たないわけで。系統接続をするためには、その現状の電力需給チャートを見て、調整力をここで使って、ここに蓄電池を設置するとか、そういうことを考えて、日本全体の電力のネットワークをどうするかを考えていただきたいっていうのが一点です。

もう一点は、現在その、アワリーマッチングだとか、環境価値とか、その今の環境価値は同時同量考えていませんが、その同時同量考えたアワリーマッチングをするために、系統別に一時間ごとの市場をコンピュータ上では作れるかもしれないけれども、市場の需給調整能力で同時同量が実現できるのか。特に再エネは、価格シグナルに対して供給量を調整できないし、電力は大量に安く蓄積できないので、出力が不足したり余ったりすると、需要曲線と供給曲線が交わらなくなって、価格は無限大になったり、マイナス無限大になったりします。そういった中で、じゃあどう市場を作ったらいいのか、どこまで計画性を持って同時同量のバランスや同時市場などの新しい運用を本当に実現できるのかなとか、そういう市場と電力との関係っていうのをもっと討論していただきたいなと。その二点です。以上でございます。

（モデレータ２）

はい、ありがとうございます。先ほどから申し上げているように、電力の専門家じゃない人が座ってるので、今のご質問、ご意見に対しては、PL にお答えいただくしかないかなと。

（PL）

エネルギーを貯蔵する技術はあります。簡単に言うとバッテリー。これがまあ光回線で結ばれていれば、同時同量に貢献するというのがとても簡単な解決の例になります。ですが、まあバッテリーはバッテリー代を払う必要があり出し入れの損失もあります。ですから「バッテリーがあるから解決になる」というのは解決にまだなってないと。ですから、需要が調整できたらどこまでできる、それでも調整できない部分はバッテリーいるかもしれない、余ったら捨てればいい、いろんなものを組み合わせて答えにするというのが、まず電力の中での答えかだと思います。で、電力の外の答えもあると思いますから、それはこのどなたかから。

（モデレータ２）

私は答える立場になのですが、もう時間がないので、議論したかったポイントのもう一つは、市場っておっしゃってるんだけど、それ電力市場を言われてますと。今日の前半でも出てましたけど、ホルムズの問題みたいのがあった時に、日本のエネルギー自給が世界でかなり低いという問題をみんなで解いていく議論

をベースとしてはどうか。だから、価値の議論はどこに置くのか、もう一歩上げた議論をするために、私いつも言ってるここに来ると思います。皆さんいつも同じ範疇で議論してますねって問いかけてる一つです。

そこまではちょっと今日時間がなくて議論しきれないのですが、やはり我々として課題設定をどこに置くのかっていうのは結構重要なポイントだと思っています。

残り5分なので、パネリストの方から、自由にご発言をいただいて終わりにしたいと思います。特に電力システムの在り方や今後について刺激を与えていただくために皆さんをお呼びしているので、そういう観点で自由にご発言いただきたいと思います。最後にPLに受け止めを伺って、まとめにしたいと思っています。じゃあ参加者12から行きますか。

（参加者12）

先ほどAWSの話をしましたので、似たような話をします。通信の話も似ているところがあると思います。通信サービスとして商売をするか、それをバンドルして上のレイヤーで商売するのか。当初キンドルは、通信料金はどうせ本を買うからっていうので通信サービスはタダでは使えないのですがインクルードされていて、電力に例えるなら電気料金込みのサービスを提示しました。

あと、先ほどのPLのお話とか、バッテリーという意味で、電気を電気で貯める以外に、当然エネルギーの世界では熱や水素にして貯めるのがありますが、デジタルの価値に一旦変えといて、それが時間的に後でもう一度マネーに戻せれば、まあ言ってみればデジタルに変えるっていうことも入りますし、最近ですとAIの世界ではトークン経済っていう言い方をしています。はい、以上です。

（参加者11）

今日は電力×〇〇っていう話でしたが、電力の中でやることがいっぱいあるという気がしてます。電力自身大きなシステムなので、今日話題になかった、例えばセンシングの技術とか、皆さん考えているセキュリティの話とか、もっとトータルのシステムとして電力を考えると、自然とそこに電力×〇〇が出てくる気もします。だからやっぱりもっとシステム的な考え方を電力の中に入れていかないと、これからついていけないという気がします。

（モデレータ2）

はい、ありがとうございます。参加者10。

（参加者10）

先ほどは市場のお話をいただきましたが、我々は電力市場と移動の市場であるモビリティ市場を同時に考える経済学モデルを検討しています。基本的に電力の需要と移動の需要っていうのは異なりますが、それをいかにマッチングさせるかっていうのを価格調整のアルゴリズムを使ってやっています。今お話にあったように、電力とモビリティ、さらに掛け算をするものが増えることで、要は数学的には次元を上げると言うのですが、そうすることによって低次元では見えなかった解が出てくると考えている次第です。はい、以上です。

（モデレータ2）

では、参加者9。

（参加者9）

僕はやっぱりデータの重要性ですかね。パネル1でも議論がありましたように、また先ほどのご質問にも関係するんですが、周波数がどれくらい揺れているかをきちんと見たいとずっと思っていました。系統の周波数は、昔はあまり公表されてなかったような気がしますが、最近はOCCTOでデータが見られますし、ヨーロッパでも公開されて、それでさっき紹介したNature Energyの論文を書きました。これで面白かったのは、揺らぎが正規分布じゃないんです。正規分布では起こりえないような大きな揺らぎが、実は電力システムでは結構起きています。これファットテールとかロングテールと言います。これが見えると我々数理的には非常に面白いわけで、それの数理モデル化に成功したという論文です。そういう意味で、データが公開されるようになったのはいいと思っています。

ただ、さっきのPLの話と関係しますが、そのようなデータ公開が他の電力分野で進むことを期待したいですね。我々もムーンショットで苦労しているのは、実験系の研究者がなかなかデータを出したがらないことです。もちろん実験が大変というのもあるとは思います。今我々がやっているのはデータベースを作って、そもそも我々は未病の研究をしているので、未病のデータベースは世界にありません。東洋の発想なので。未病のデータを今徹底的に集めていて、かなりいいデータが集まってきています。これは結構大きな、国にとっても大きな財産になると思います。データがあれば、それを使って数理的にやれることはたくさんある

ので、データを集めることが重要だと思います。ただですね、その時に医学の分野だと ELSI[56]の問題が入ってきてそこからすごく厄介な問題になり、僕のムーンショットでは、ELSI の専門家の PI に 5 人入っていただいています。それくらいのメンバーがいないときちんとした解決ができなくて。電力はその問題はあんまりないんですよね、きっと。個人のデータまで見られるとまずいでしょうけれども。だからこの点は電力の方が少し楽なのかなという気はしています。

（モデレータ２）

はい、ありがとうございます。それでは PL、お願いします。

（PL）

これだけの話題に答えるのは不可能なので、勝手なことを言わせていただきますと、大規模なデータセンター、ワット・ビットという話題があって、それは何等か有利なところにできればいいという話でしたが、その話を突き詰めると、日本にはハイパースケールのものはきっとできない事情があります。なぜかというと電気代が高い。だからワット・ビットの行きつく先は海外で処理して日本に送る方が楽だという話がすぐ出てくると思います。

だから我々、日本の中である程度の話をするのですが、日本はもう世界とつながってしまっていて、非常にある意味危ない。日本はどうやってここからお金をちゃんと稼いで、今実現しているような豊かな生活を維持するのかを真剣に考えないといけないと思うのですね。その時に一つのきっかけになるのはデータの話。

データがあれば、日本人もやる気のある人間が非常にたくさんいて、電力の中だけに限らなければ、もっとたくさんの人間がいろいろ活用したいと思っているはずなので。電力のデータって、もしかすると生活の情報などの情報、全てを含んでいるわけです。だから危ないといえば危ないんですけれども、そこにうまくルールを作ってたくさんの人を巻き込めば。でも公開すると外国の人も日本のデータを分析するので、だんだんわけわかんなくなってきますが。でもどうせそうなるんだったら、どっちかというと先にその世界に行かないといけない。こう隠しているとどこかでバレる話もあるので、少し攻めのところをやっていくところに何か価値があるんじゃないかなと思いました。で、先ほど出た誰にもありません。はい、以上です。

（モデレータ２）

ありがとうございます。PL の思いが聞けて、このパネルやってよかったなと思いました。あんまりまとまりのないパネルでしたが、皆さんにとって普段聞けないような視点が少しでもインプットできたらよかったかなと思います。

これでパネル2を終わります。パネリストの皆さんに感謝の意を込めて拍手をお願いいたします。

閉会挨拶

（司会）

ありがとうございました。非常に難しい議論でした。それではですね、最後に、プロジェクト顧問で東京大学名誉教授横山明彦様からですね、閉会のご挨拶をいただきたいと思います。横山様よろしくお願いいたします。

（横山）

「東京大学の」と言いましても定年退職しまして 5 年になります。このプロジェクトの顧問を仰せつかっております横山でございます。本日はですね、講師の皆様、それからパネリストで今日パネルディスカッションしていただきました皆様、本当に貴重なですね、ご講演とディスカッションしていただきまして、本当にありがとうございました。また、今日ご参列、ご参加のですね、皆様も本当に web でもたくさんの方が参加していただきまして、本当にありがとうございました。

最初に PL からこのプロジェクトの概要をご説明いただきましたが、2030 年からですね、2050 年に向けての次世代の電力システムのトランジションをいかに進めていくかということについて、この 2 年半、電力システムの専門の若い中堅からシニア先生方と企業の皆さんに参加していただき、ディスカッションを重ねて今回報告書をまとめる段階に至りました。

先ほどもご説明もありましたが、より良い社会システムとして、Well-being っという言葉も流行ってますが、そういう社会システムとして様々な電力技術や先ほどの電力×〇〇の、〇〇の技術、それから制度、人材育成、情報基盤を構築し、いかに統合していくかという、統合設計の考え方を大きな柱として提言しようと考

[56] ELSI は、「倫理的・法的・社会的課題（Ethical, Legal and Social Issues / Implications）」の頭文字。

えています。

そのような意味で、私が非常に興味あるのは、多数のステークホルダーの皆さんが参加をして、リーダーシップ、先ほど参加者8の言葉を借りると、多数のリーダーシップを統合し、集まって、議論ができる場が将来できて、より良い電力システムを作る議論のできる場となり、より良い電力システムを構築できるようになればいいと願っているところです。

報告書でもなかなか具体的な議論というのはなかなか難しくて、今日のパネルディスカッションでもいろいろなお話があり、いろいろな気づきも私も得ることができました。大変参考になりました。

そういう意味で、この今日の議論を報告書にも取り入れながら、10 月の公開に向けてまた報告書をブラッシュアップしていきたいと思います。皆さんのご協力もぜひお願いをして、今日のこの長いシンポジウム、本当に実のあるものになりまして、大変感謝しております。ありがとうございました。

（司会）

ありがとうございました。今、横山先生の方からご案内いただきましたように、本当に長時間にわたりましてご参加賜り、また非常に熱心にご議論をいただきまして誠にありがとうございました。

EAJ で、これほど本音の議論が、多くのステークホルダーの方から出る会議はなかなか珍しいということで、皆様のお陰です。厚く御礼申し上げます。

これで、全てのプログラムを終了いたしました。本当にありがとうございました。

またお願いで恐縮でございますが、紙でお配りさせていただいておりますアンケートについては、できるだけプロジェクトなどをより良くするためにもメッセージを書いていただくようお願いします。

また意見交換会に出席の方は、この建物の一階のレストランの Ape ですので、よろしくお願いいたします。本日は本当にどうもありがとうございました。

以上

本資料の内容の転載を希望される場合は、
（公社）日本工学アカデミー事務局までご相談ください。

2026 年 11 月 9 日

編集発行
（公社）日本工学アカデミー
〒101-0064
東京都千代田区神田猿楽町二丁目 7 番 3 号 HK パークビルⅢ 2F
Tel：03-6811-0586　Fax：03-6811-0587
E-mail： desk@eaj.or.jp
URL： https://www.eaj.or.jp/