

福島第一原子力発電所事故後の 電気エネルギーの円滑な供給に向けて

2011年9月18日

日本工学アカデミー
原発事故・エネルギー問題検討会

検討会委員

主査 古崎新太郎（東京大学名誉教授）
委員 北澤宏一（科学技術振興機構）
木下幹康（電力中央研究所）
小林敏雄（日本自動車研究所）
宅間正夫（日本原子力産業協会）
松井一秋（エネルギー総合工学研究所）
松方正彦（早稲田大学）
御園生誠（東京大学名誉教授）
向殿政男（明治大学）
山田興一（科学技術振興機構）
執筆協力 上野茂幸（日本学術会議事務局）
事務局 玖野峰也

要 旨

[背景]

2011年3月11日の東日本大震災による津波を契機として、福島第一原子力発電所の重大事故が発生し、放射能汚染を含め、いまだに終息に至っていない。事故の為に大量の放射性ヨウ素とセシウムが放出され、特にセシウム137は半減期が約30年と比較的長いので、福島県を中心として広範囲に住民生活、経済への影響が生じている。以上の背景から、日本の持続的発展の為にエネルギー資源の中長期的将来像を検討することは我が国における緊急の課題であることはいうまでもない。日本工学アカデミーは日本における工学分野における指導的役割を担っており、幅広い工学の立場からこの問題について検討した。

[提言]

原発事故の結果を踏まえた上で、エネルギー供給を安定化することは日本全体の経済および市民生活において最も重要な課題であるといえる。検討会においてはエネルギーの安定供給について中長期的な観点から詳細な検討を行った。その結果に基づいて以下の提言を行う。

(1) 原発の安全性の向上

原子力利用は安全であれば、日本にとって重要なエネルギー源であることは言を俟たない。しかしながら、いずれの技術においても安全に絶対ということはありません。これは学術の分野においては既に確立された概念である。今回の福島第一発電所の事故で明らかになったように、一旦事故が起きると制御不能になり、予測不能の甚大な被害を及ぼした点に注目する必要がある。従って、現存する原発を稼働させる際には安全に対する設備、操作基準の整備、保安訓練などに十分な資源（予算、人員）を投入する必要がある。またその対応策には際限はなくまた妥協は許されないことを認識すべきで、その為の組織、制度を十分に検討の上構築すべきである。従来の省庁縦割りを排して研究・技術開発から実用化まで、原子炉から放射線まで、一元化・一貫化された効率的な行政体制の構築が望ましい。特に安全に関しては、原子力分野以外の専門的な知見を活用すべく、有識者による第三者委員会を設けて広く意見を聴くことが必要である。

なお、今回の事故による放射能汚染については環境の回復に取り組むことは当然であるが、使用済み燃料の処理、高レベル廃棄物処理は避けられない課題であることを指摘したい。したがって、核燃料サイクルを含めこれらの研究は今後も続ける必要がある。ただし、ナトリウム冷却高速中性子型増殖炉「もんじゅ」については金属Naを用いることの安全性の問題も指摘されており、この時点で原子力および核燃料サイクル技術開発の再構築の中で廃止を含め再検討すべきである。

(2) 再生可能エネルギーの実用化

再生可能エネルギーは現状ではコストが高く、発電に利用した場合には電気料金の増加は15～20%といわれている。また、分散型のエネルギー源であり安定性にも問題があ

る。これらの解決にはスマートグリッドの利用が重要であり、その為には Na-S 蓄電池などの蓄電池のイノベーション、全体を最適化するエネルギーシステム工学の進展が必要で、この分野への研究助成、投資を増強することが是非とも必要と考える。また、風力（地上、洋上）、バイオマスの利用、小規模水力、地熱の利用、太陽電池など実用化できる技術については政策的に利用を図り、段階的な実用化を広めることが望ましい。その為にも、列島を縦断する直流超高压送電網の増強を図り、50 Hz と 60Hz に分かれている周波数の統一も長期的観点から段階的に進めるべきである。将来は再生可能エネルギーが信頼できる安全防護システムを備えた原子力と共にあるいは更に、原子力に変わるべく電気エネルギーの 30%程度の割合を供給できるように中長期的展望の下にエネルギー源のベストミックスによる実用化を進めることが必要である。

（3）省エネルギーの推進

3月11日の原発事故を契機として原発の安全に対する住民の不安が大きくなって、現在54基ある原発のうち停止しているものの割合が非常に高くなっている。従って、いわゆる電力不足が将来、夏冬の需要期に深刻になるおそれがある。原発の是非については国民的議論が必要であるが、省エネルギーを推進することはエネルギー需給を安定化する為にも、また事故を契機として電力を制限なく消費するということを転換する意味でも必要不可欠なステップである。産業界や一般家庭における節電による需要の削減の他に、電力消費の時間シフトを併用すると効果が更に向上する。また、空間的なシフトは需要の平準化に役立つ。試算によれば省エネルギー対策により東京電力管内で短期的には280万kW、また生産拠点の時間的・空間的シフトをすることにより615万kWの省エネルギーが可能である¹⁴⁾。

（4）今後のエネルギー供給のシナリオ

原発の寿命は材料の更新などにより60年が可能ということもいわれているが、一般的には40年と考えられている。当面は日本においては原子炉の新設はかなり難しいと考えられ、仮に新設がないとすると2038年には総ての原発が運転を停止する。日本の安定した経済、社会の維持を考えると、その時点よりもかなり前に代替エネルギーを実用化しなければならない。天然ガス資源にはまだ余地があるが、二酸化炭素排出の削減を考慮すると余りこれに頼ることはできない。従って、再生可能エネルギーの実用化を急ぐ必要がある。2020年に原発の寿命40年のものを全て停止するとしても、35.9GWの原子力エネルギーが依然稼働可能であり、不足分は太陽電池を利用するとして設備的に可能である。その場合、太陽エネルギーによる発電コストは約20円/kWh程度と推算される。また、2038年にすべての原発が停止しても、それを再生可能エネルギーのベストミックスでまかなう可能性があると考えられる。

目 次

1. 緒言
 2. エネルギー需給
 2. 1 エネルギー需給問題の概要
 2. 2. 当面のエネルギー需給安定策
 2. 3 エネルギー需給構造の在り方
 3. 原子力発電の安全性について
 3. 1 安全設計の思想
 3. 2 原子力発電の安全に関する問題点
 3. 3 原子力発電所の安全性向上への福島事故からの課題
 - 4 再生可能エネルギーの課題と可能性
 4. 1 再生可能エネルギーの概要と必要性
 4. 2 再生可能エネルギーを取り巻く世界の現状と日本
 4. 3 再生可能エネルギー普及のための方策「電力固定価格買取制度 (FIT)」
 4. 4 再生可能エネルギーと震災復興
 4. 5 再生可能エネルギーの課題 (系統安定)
 5. 省エネルギー
 6. 低炭素へ向けたエネルギーシステムに向けてのシナリオ
 6. 1 はじめに
 6. 2 太陽光発電システム
 6. 3 今後の電源構成と低炭素化
 6. 4 まとめ
 7. 提言
- 引用文献
- 付属資料
- (参考1) ストレステストの概要
 - (参考2) 福島第一原発事故初期の概要

1. 緒言

2011年3月11日の東日本大震災による津波を契機として、福島第一原子力発電所の重大事故が発生し、放射能による環境汚染を含め、いまだに終息に至っていない。事故の為に大量の放射性ヨウ素とセシウムが放出され、特にセシウム137は半減期が約30年と比較的長いので、福島県を中心として広範囲に住民生活、経済への影響が生じている。市民レベルにおける野菜の放射能汚染、食肉および乳製の汚染に対する懸念、人々の不安は払拭されていない。また、外国における日本の原材料に対する風評によって食品類その他の輸出にも影響が出ているといわれている。

このように、3月11日の原子力発電所（以下、原発）の事故により、国民の原子力の安全性に対する危惧が急速に高まり、現在も原発の稼働に対して厳しい目が向けられていることは周知のことである。このような状態では、原発の新規増設はほぼ不可能であり、既存の原発の再稼働も簡単には実施できず、国のエネルギー基本計画における原子力依存度の変更が迫られている。

以上の背景から、日本の持続的発展の為にエネルギー資源の中長期的将来像を検討することは我が国における緊急の課題であることはいうまでもない。日本工学アカデミーは日本における工学分野における指導的役割を担っており、幅広い工学の立場からこの問題についての意見を述べることはその責務であると考えられる。

日本工学アカデミーではこの問題を検討するに当たり、各分野の会員から成る検討会を設置し、下記のいくつかの事項について検討を重ねて来た。すなわち、(1) 既存の原発の安全性を確保すること、(2) 日本のエネルギー需給の問題、(3) 再生可能エネルギーの可能性、(4) 省エネルギーによる需給安定の確保、の4点である。上記の課題について検討を行った結果、日本の進むべきエネルギー政策について経時的なシナリオを作成した。それらの内容を次章以下に順次記すことにする。関係機関において真摯に検討されることを期待し、また国民各位のこの問題に対する意思の構築に何らかの寄与ができれば幸いである。

2. エネルギー需給

2. 1 エネルギー需給問題の概要

人類の文明の発展とエネルギーの利用には密接な関係がある。アンドレ・ヴァラニャック（仏哲学者）によると人類はこれまで7回のエネルギー革命を経験したとして、その第1次は約百万年前の火の利用の始まりである。薪炭の利用は鉄などの金属の精錬にも大量に使われるようになり、森林の荒廃が進んだ。代わって石炭の利用（5次）が始まり、産業革命が進んだ。しかし何と言っても電気と石油の利用開始（6次）が現代の世界を形作る。わが国の戦後の重化学工業をベースとする高度経済成長は安価な石油によって達成されたといっても過言ではない。しかしすでに安価な石油の時代の終わりが始まっていて、ありとあらゆる化石燃料、再生可能エネルギー及び原子力エネルギーの利用の拡大による経済的繁栄に向かって、特に成長著しい新興国を中心に邁進している今日の世界である。

わが国の最終エネルギー消費に産業部門が占める割合は42.8%（2009年度）でエネルギー利用効率向上、産業構造の変化などにより長期的には漸減している傾向がみられる。家庭は14.2%、業務（商業）は19.5%であり合わせて民生部門は全体の3分の1を占め、長期的にはこれまで増加傾向がみられていた。そのうち輸送は全体の4分の1を消費していて、人々の移動、貨物の輸送の形態の変化に応じている。2008、2009年のGDP及び産業部門の落ち込みはいわゆる世界経済不況によるもので、2010年から回復基調にあったと思われる。

それに対して供給はほとんど輸入されている化石燃料が82.9%、うち石油、石炭、天然ガスがそれぞれ、45.2、20.3、17.4%を占める。非化石エネルギー17.1%の主体は原子力で11.1%、水力が3%と続く。残りの3%のうち2.7%はごみ発電のような未活用エネルギーと称されるもので風力、太陽などは0.2%、地熱0.1%であった。以上は2009年の確定値であるが、前述のように2009年は特異点であるかも知れず、エネルギー消費量も炭酸ガス放出量（1,075Mt）も1990年代前半の姿（1,059Mt）とよく似ている。なおエネルギー利用の電力化も進んでいて、供給側電力化率（＝発電用エネルギー投入量／一次エネルギー国内供給量）は1990年の40.1%から43.4%に増加した¹⁾。

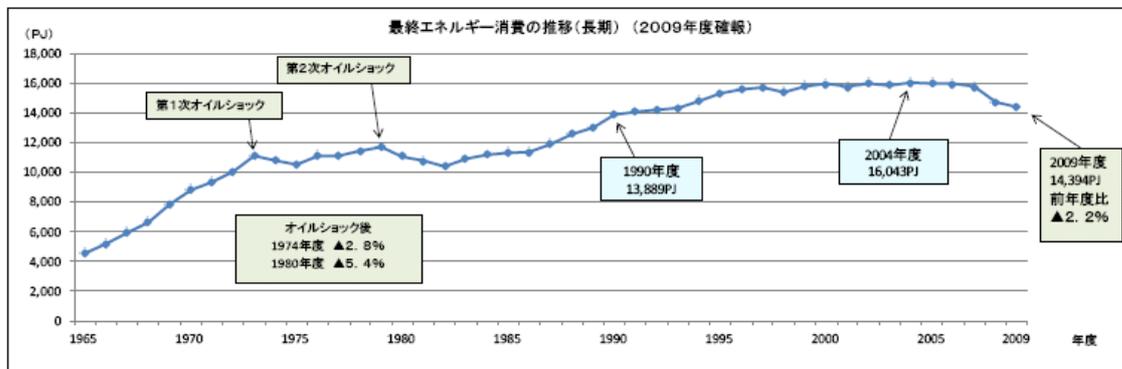


図 2.1 エネルギー消費の推移¹⁾

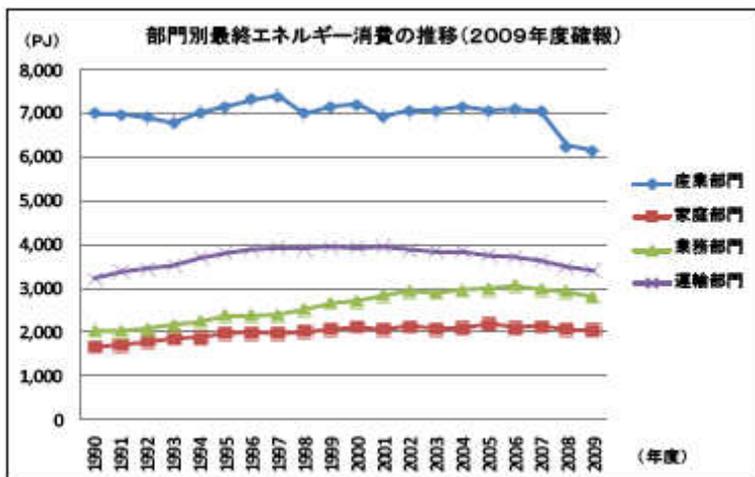


図 2.2 部門別エネルギー消費の推移¹⁾

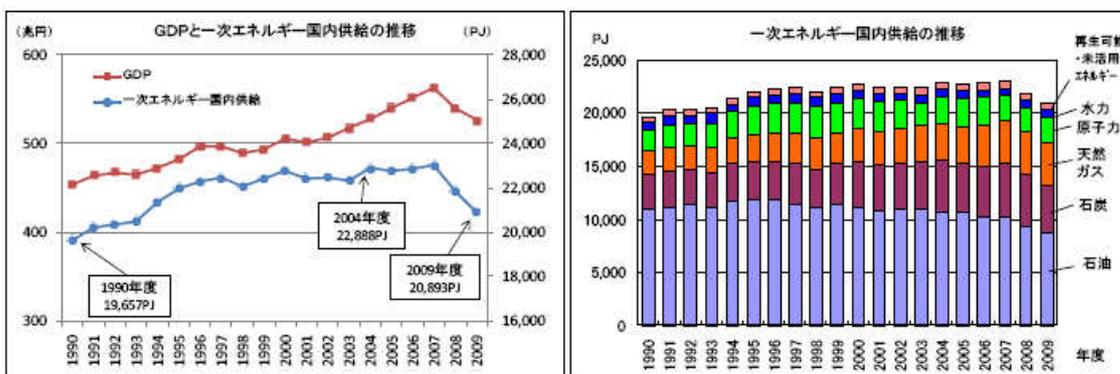


図 2.3 一次エネルギー供給の推移¹⁾

今後について、平成 22 年に経済産業省は以下の基本的視点に基づく今後の資源・エネルギー政策によるエネルギー基本計画²⁾を示した。

- ①. 総合的なエネルギー安全保障の強化
- ②. 地球温暖化対策の強化
- ③. エネルギーを基軸とした経済成長の実現
- ④. 安全の確保
- ⑤. 市場機能の活用等による効率性の確保
- ⑥. エネルギー産業構造の改革
- ⑦. 国民との相互理解

これにより、2030 年までの 90 年比 30%炭酸ガス削減と、新成長戦略を模索している。

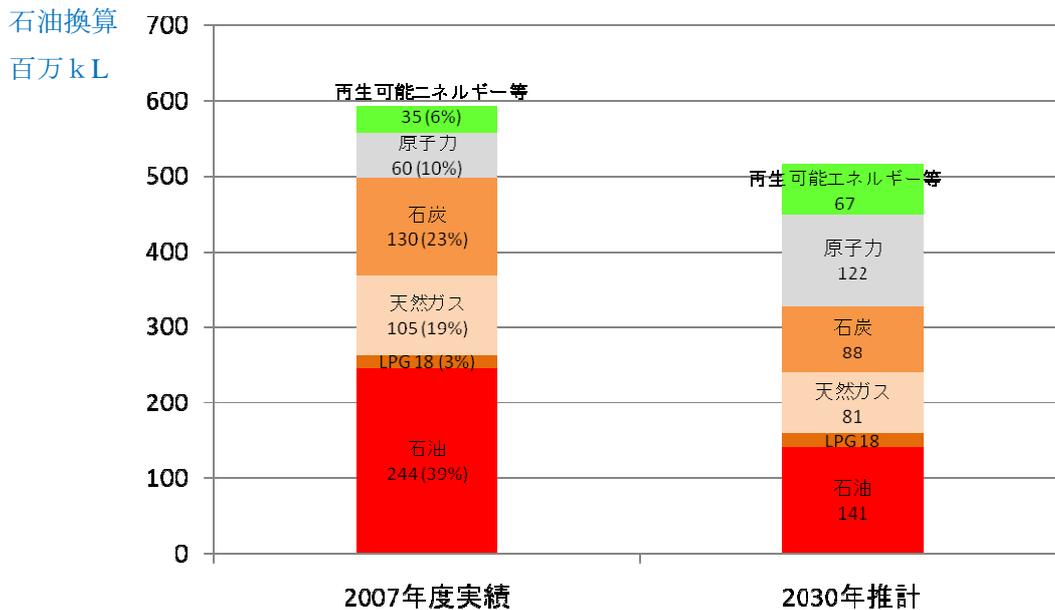


図 2.3 エネルギー基本計画 2010 による 1 次エネルギー供給の絵姿²⁾

(再生可能エネルギー 全量買取制度の実施
原子力新增設 14 基、設備利用率 90%)

上図が示すように、2010 年においては炭酸ガス排出削減の方策として、全体としてのエネルギー消費量の削減と、原子力と再生可能エネルギーの利用拡大を期待していたわけである。

2. 2. 当面のエネルギー需給安定策

平成 23 年 3 月 11 日の東日本大地震によって発生した巨大津波により東日本の太平洋岸は大災害に巻き込まれ、福島県にある東京電力福島第 1 発電所の 6 基の原子炉のうち 3 基が炉心溶融事故を起こした。福島第二の 4 基、東北電力女川の 3 基、東通りの 1 基の原子炉には重大な損傷はないものの稼働されずにおり、さらに定期点検で停止中であつた多くの原子力発電所の再起動もままならず、54 基のうち 15 基のみが運転中であるが (8 月 13 日現在)、これらも順次定期検査のため停止する予定である。そこで政府のエネルギー・環境会議は 7 月 29 日に、逼迫する電力需給についての「当面のエネルギー需給安定策」を決定した。定検入りした原子力発電所が再起動されない場合の電力不足への対応策である。副題に「エネルギー構造改革の先行実施」とあり、「エネルギー需要の合理化と供給力の拡大が持続的に実現する仕組みを作り上げ、経済活動と国民生活の安定、東日本復興を確かなものとするとともに、わが国のエネルギー構造改革を前倒して実現する。」としている³⁾。なお、8 月に入って暑い日が続く、電力需給が綱渡りとなっているが、東京電力管内では最大需要が 5 千万 kW 程度と節電努力が功を奏しているように見受けられる。

表 2.1 エネルギー・環境会議による電力需給動向（平成 23 年 7 月 27 日現在）³⁾

| | | | |
|--------------------|-------|-------|--------|
| 東日本（北海道、東北、 東京） | 今夏 | 今冬 | 来夏 |
| | ▲7.3% | ▲1.1% | ▲10.4% |
| 西日本（東日本以外） | 今夏 | 今冬 | 来夏 |
| | +1.0% | ▲0.4% | ▲8.3% |

表 2.1 によると、日本全体では、今夏 480 万 kW、今冬 110 万 kW、来夏は 1,660 万 kW のピーク電力不足とし、原子力を LNG と石油火力でカバーした場合の追加的な燃料費は約 3 兆円を超え、電気料金に転嫁すると約 2 割上がるとしている。これに対する対策としては、まずは需要構造の改革に重点を置くとして、省エネ製品導入の拡大、同製品の製造能力の拡大、住宅や工場・ビルの省エネ投資の促進、スマートメーターの活用を挙げている。供給の拡大として、固定価格制度の導入などにより再生可能エネルギーの拡大、自家発や I P P（独立発電事業）などの発電事業への参入環境整備など、さらにはピーク対応として自家発夜間電力を使って揚水への対応などが上がっている。3 番目の対策として、電力システムの改革を取り上げ、さらに最後に、安全性が確認された原子力発電所の再起動を進めるとしている。

対策の多くはすでに取り組みされているものも多くあるが、それなりに妥当なものと思われる。しかし短期的な対策としての即効性は原子力発電所の再稼働以外は、疑問があることと、エネルギー構造改革の先行実施と言いつつ 10 年先、20 年、さらには 30 年先といった中長期的なビジョンに欠けている点に問題がある。

2. 3 エネルギー需給構造の在り方

前出のエネルギー基本計画 2010 の基本的視点のうち、

- ①. 総合的なエネルギー安全保障の強化
- ②. 地球温暖化対策の強化
- ③. エネルギーを基軸とした経済成長の実現

は、今後のあるべき需給構造を定性的に示すものと考えられる。すなわち、エネルギー自給率の向上並びに、国内外の未開発エネルギー資源開発であり、次いで中でも地球環境保全についての国際的な協調という観点からも非炭素エネルギー利用の促進ということになる。これらに省、創エネルギー技術を含めた技術開発により新たな成長産業を作り上げていくことが目標と言える。

しかし、前提としての原子力の安全及びその規制に課題が残っているにしても、第一に原子力抜きでこれらの目標を達成できるのかということである。第二に、エネルギー基本計画でも、当面のエネルギー需給安定策で大きく依存している省エネルギーの課題がある。省エネルギー関連の技術開発は促進されるべきであるし、経済的な合理性はある。しかし効率の良い製品ができると、そのエネルギー消費量は少なくなるが、もたらすサービスあるいは材のコストが低下することになり、需要が増大する。すなわちマク

ロにみるとエネルギー消費量は減らないことが考えられる⁴⁾。エネルギー消費が減るのは、産業活動が落ち込んだり、家計の収入が少なくなったりした場合であると少なくとも統計からは判断される。換言すればエネルギー消費を落として国民が貧しくならないような政策が必要である。

第三には再生可能エネルギーの不安定性である。確かに経済性や専有面積に目をつぶれば、太陽光や風力によるエネルギーは量としては供給可能であるが、供給の不安定性を補う為に、系統全体としてあるいは個別の調整能力とバックアップのための電源が必要となる。どれだけの上記間歇性電源が導入可能かは、既存の調整能力とその増強の容易性に依存する。電気事業連合会は「風力発電は 500 万 kW 程度まで、太陽光発電も局所的な集中設置などの場合を除き 1,000 万 kW 程度まで、電力系統の安定度を失うことなく受け入れ可能（それ以上は対策要）」と表明している⁵⁾。対策とセットであれば更に多くの太陽光発電や風力発電を導入することが可能であるが、対策費用は、間歇性電源の容量に比例するのではなく指数関数的に増加すると予測されている⁶⁾。これは、対策費用を含めた発電コストは、累積導入量が増加するに従って上昇していくことを意味する。さらに、バックアップの機能を担うことになると考えられる火力発電は、間欠性電源が増えても設備容量は減らせず、一方で、部分負荷運転や低負荷で待機する時間が増えることによりコストが増加する。

このように間歇性電源は、累積導入量の増加に伴って関連費用が指数関数的に増加するので、対策費用または間歇性電源自体のコストが画期的に安くない限り、その導入量はある程度のレベルに抑えられ、基幹電源にはなり得ないと考えられる。

今夏（2011 年）の電力使用制限は産業の生産活動にどう影響を与えるのか、さらに原子力発電所の停止とそれを代替する重油、天然ガスの利用拡大、さらには再生可能エネルギーの導入による電力価格高騰の影響などについて冷静に見守っていく必要がある。

3. 原子力発電の安全性について

3. 1 安全設計の思想

3. 1. 1 安全の定義

原子力の安全のみならず、あらゆる分野の安全を考える場合 まず、安全とは何か、安全そのものの概念を明確にしておかなければならない。国際安全規格では、「受け入れ不可能なリスクが存在しないこと・・・受け入れることの出来ないリスクからの開放・・・」と定義されている。一般には、安全とは、「人への危害または損傷の危険性が、許容可能な水準に抑えられている状態」をいう。大事な点は、安全と言っても、そこには必ずある程度のリスク（危険性）が存在していることである。残されているリスクがどの程度のものであり、それが許される、すなわち許容される水準になっている時、安全であるというにすぎない。現実には絶対安全はあり得ない。なお、リスクとは、危害の発生する確率及び危害のひどさの組み合わせと定義されている。また、危害とは、一般には、人体の受ける物理的傷害や健康障害などをいう。例えば原子力の場合にがん発生による死亡を比較の対象とする場合が多いが、現実の危害はこれだけではない。危害として財産の受ける害を入れる場合もあれば、環境やシステムや情報の受ける害など、対象としている分野によって多様である。

どの程度のリスクならば許されるのかという問題は、一般には、リスクの大きさやリスクの様態（危害を受ける範囲は限定的か、未来にまで及ぶのか等）などに対して、それから受けるメリット（利便性、有益性）やリスクを下げるために必要なコスト等との兼ねいで決められる。これは分野により、条件により、社会や時代の価値観等により異なっていて、一律に決められない。安全といった場合、大事なことは残されているリスクが最悪のケースを考えてどのようなものであるかを事前に情報開示しておくことである。安全を合理的に、客観的に判断するためには必須のことである。例えば、確率がいかに低くとも、人類が滅亡する可能性のあるような危害を有するリスクは許されないだろう。民衆がパニックに陥るだろうからとか、理解できないだろうからという理由で、残留しているリスク情報を開示しないというのは正しくない。

3. 1. 2 安全の実現

安全の実現には、各分野独特の個別な手法や考え方があるが、一方で、多くの分野や場面で共通的な考え方や手法が存在する。その一部を以下に紹介する。基本的には、「機械設備はいつかは劣化等で故障をし、人間はいつかは間違えるものである」という事実を大前提として、安全は実現されなければならない。そのために、安全設計では、機械設備が故障しても安全側になるフェールセーフの構造や、人間が間違えても大事には至らないようなフルプールの構造が基本となる。また、信頼性を上げることで安全性を実現する方法も基本の一つであり、その典型が多重系、すなわちフォールトトレランスと呼ばれる考え方がある。ただし、本質的には、信頼性と安全性とは異なった概念である。信頼性は機能を維持し続けることを目的としているが、安全性は機能を失った後の状態も考慮している。安全性確保のために列車等を止めるのは信頼性を下げてでも安

全性を上げているのであって、このことを考えればこの違いは明らかである。原子力における多重防護の考え方は、基本的には多重系であるフォールトトレランスの一種と考えられる。多重系は信頼度を上げることが目的であるから独立性の概念が重要となる。施設設備で言えば、**common mode failure**（共通原因故障）がないように、機構的にも、配置的にも、材料的にも、エネルギー的にも、コンピュータのソフトウェア的にも多様性をもった独立性が要請される。このことは、監視やチェック等における組織や人間における独立性についても同様である。

安全の実現のためには、設計段階、運用段階、事故発生段階等の時間的な順序を考慮して対応する必要がある。設計の段階では、各危険源（ハザード）ごとにリスクを評価し、大きさに応じてリスク低減の方策を施しておくリスクアセスメント、すなわち未然防止の考え方が基本となる。なお、リスク低減方策にも順序があつて、まず本質的安全設計（はじめから危険源を無くす、あつてもエネルギー等を小さくして危害を小さくする、人間が近づかなくてよいように信頼性を高めて危害の発生確率を下げる等）を第一とし、残ったリスクに対して安全装置等の方策を施すことを第二とし、それでも残ったリスクについては使用上の情報として、残留リスクを表示して警告やリスク回避の手順等を利用者に伝えることを第三とする。この考え方はスリーステップメソッドと呼ばれている。運用の段階における安全確保は、保守点検等も含めて人間の操作、及び管理・組織等が重要となる。また、絶対安全がない以上、事故は起り得るとして事故が発生した時の体制と準備、特に事故拡大防止や再稼働の早期化等の方策を施しておかなければならない。

事故の未然防止が基本であるが、現実には事故から学んで安全は進歩して来た。事故情報やヒヤリハットの情報、事故調査の結果等からの再発防止対策が重要となる。分かった新しいリスクに対しては即座に対応しなければならない。安全の責任は、事前に分かっていることを何処まで対応したかの責任である。事故を起こす原因を危険源（ハザード）と呼ぶが、これには、自然災害、故障、人間のミス、悪意、等があるが、すべてを想定することは神ならぬ人間には出来ない。見過ごしはあり得る。いわゆる想定外は必ずあるとしなければならない。そのためには、特にリスクの大きなシステムに対しては過酷事故対策は必須と言える。

安全は、技術に限っても多くの分野を含む総合工学である。例えば、原子力安全で言えば、原子力技術だけでなく電気、電子、情報、機械、通信、化学、建築、土木、システム等々の技術と深く関連している。総合的な観点が必須であり、統一的に取り組まなければならない。従って、技術者は他の技術分野に対して閉鎖的であってはならず、他の分野を理解し、他の分野から学びつつ、共同で安全を実現するという姿勢が重要である。このことは技術や科学の側面のみではない。安全は技術や科学のみでは実現できないからである。安全は、物理・化学や技術等の自然科学と共に、管理、組織、社会制度、法律、標準等の社会科学、及び、教育・訓練、人間の認知、心理等の人文科学を含んだ総合的な分野であり、包括的に、統一的に取り組まなければならない。例えば、安全規制としての国の役割を一つ取ってみても、各省庁を越えて横割りの取り組みが必要があり、安全基本法のような統一的理念の下に、各分野の安全に関する規制行政は省庁に四つ縦割りを排除する方向が望ましい。今後、安全に関する学問を、安全学として確立

して行く必要がある。

3. 1. 3 リスクの大きなシステムの安全設計思想

特に大きなリスクを有するシステムを設計する場合には、安全を目的にフェールセーフ設計を第一とするのが基本である。その上でフェールセーフが働かなくて済むように高信頼を目的にフォールトトレランス技術を用いて信頼性高く構築する。システムを支えるこれらの基盤は利用者や運用者には意識しなくても、その上で安心を目的に人間にやさしく、間違えても柔軟に対処する構造という三層構造とすることが理想である（図 3.1 では、最上位の部分をつまらぬ情報処理を意味してファジィ技術とし、トリプル F システム (F³)と呼んでいる)。必ずしもすべてのシステムに対してフェールセーフ構造が実現できるわけではないが、リスクの大きなシステムに関しては、特にこの構造を基本とすべきである。

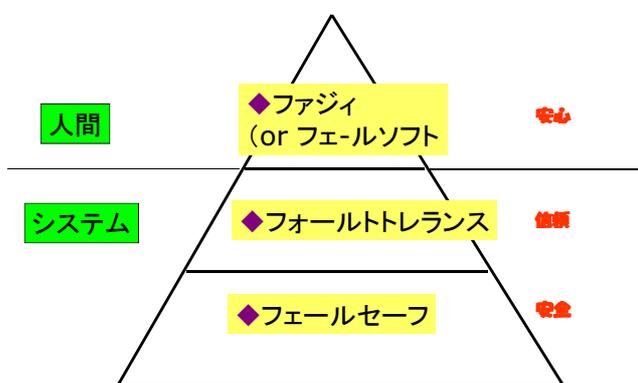


図 3. 1 F³システムの提案

原子力発電の場合には、全電源を喪失すると安全の制御ができなくなり、フェールセーフになっていない。このことは、使用済み核燃料や高レベル廃棄物の処理問題と共に、原子力発電での最大の問題である。フェールセーフが基本として構築されていない場合には、多重防護などのフォールトトレランス技術に頼っていくことになるが、いくら高信頼であると言ってもすべてが駄目になる可能性はゼロではない。

安全基準として構造を明確にする考え方は構造安全と言われ、故障する確率を与えられた数値以下にする考え方を確率安全と呼ぶ場合がある。フェールセーフは構造安全に、フォールトトレランスは確率安全の考え方に関連している。ただし、フェールセーフ構造にしてあれば絶対に安全かと言えば、必ずしもそうではない。現実には想定外で何が起るか分からないからである。想定外が起こっても、フェールセーフ構造の方が安全を実現している可能性はるかに高いことが期待される。危害が発生する確率は、構造が明確にならない限り評価できないので、現実には、安全を実現する構造を明確にして、その上で危害の発生する確率を評価するという、構造安全と確率安全の両方の考え方をを用いる必要がある。

3. 1. 4 安全と価値観

技術者、事業者、規制側等は、安全の実現を求めて懸命に努力をしている。一方で、一般民衆や消費者は、安心を求めている。安全は、客観的、合理的、科学的に実現することを目指している。一方で、安心は主観的なものであり、判断する主体の価値観に依存する。確かに、どこまでリスクを低減したら安全とするかという点においては、安全から主観を排除できない面も有しているが、残されたリスク、すなわち危害が起こる確率と共に、最悪の場合の危害がどのようなことになるかを明示して、許容可能性を合意するという面からは、安全には客観性を重視する姿勢が貫かれている。安全はどのようにしたら安心につながるのであろうか。安全を実現している組織や人間を信頼することを通して、初めて安全は安心につながると考えられる。単純化すると、(安心)=(安全)×(信頼)という式が成立すると考えられる。いくら安全を実現し、主張しても、主張している人間や組織が信頼されていなければ安心には繋がらない。信頼を得るには、良い情報はもちろんであるが悪い情報も含めた情報の公開性が、そして、正直に、即座に、そして情報を隠さないという点が最も重要である。安全が実現されている構造やプロセスの透明性、安全の決定への市民の主体的な参加、リスクコミュニケーション等も信頼の醸成には重要な働きをする。信頼は、一端失うと、取り返すのには多くの時間と労力とコストを必要となる。一方、我々民衆も、冷静にリスクを判断する科学リテラシーや安全文化を身につける必要がある。

安全と安心は明確に分けるべきである。すなわち、安心には価値観が関与しており、科学(安全)と価値観(安心)は分けて考えるべきである。特にリスクの高い影響の大きなシステムに関しては、安心を得られない場合には、いくら科学的に安全であっても、作らないという判断はあり得る。

3. 1. 5 原子力発電のあるべき姿

福島原発の重大事故を起こした現時点で、今後、原子力発電の継続は受け入れられるであろうか。確かに、今まで対応していなかった危険源やリスクが明確になり、それに対して対策を施していれば、これまで以上に安全性は高まることは明らかである。エネルギー問題の解決策、CO₂削減策としての原子力発電のメリット(有益性)を配慮しつつ、現在の構造や考え方をういて安全性を上げるという延長線上で原子力発電がこれからも認められるか否かということは、わが国や世界の民衆の価値観に依存する大きな今後の課題である。

その一つの解決策として、フェールセーフな原子炉の開発が考えられる。現在の能動安全(努力をしない限り安全は保てない)ではなく、受動安全(なにもできなくかつたら、安全側になる)の発想で、フェールセーフを基本とする原子力発電を開発することである。「止める」、「冷やす」。「閉じ込める」ではなく、「止まる」、「冷える」。「閉じ込まる」という考え方で、技術的に困難であろうとも、コストがかかろうとも、効率が悪かろうとも、小規模に留まろうとも、この方向を目指すのも一つの選択肢である。わが国の技術力をこの様な原子炉の開発に集中し、原子力発電の高度な安全性確保の技術と共に、わが国は安全立国として世界に貢献して行くという選択肢もあり得ると考えられる。

3. 2 原子力発電の安全に関する問題点

3. 2. 1 安全の評価

(1) 事故は必ず起きる (確率分布のロングテール)

福島の原子力災害は、「文明は事故を発明する」という言葉を強く実感させる。事故は必ず起きるものだと言われる。事実、航空機業界大手で墜落事故未経験の会社はない。原子力発電所でも、どのような手当をしようとも過酷事故は必ず起きる、と考える理由がある。それが近年「べき分布」、「ロングテール」と呼ばれる低確率巨大事故のメカニズムである。

既に津波、洪水、地震、材料破壊などは統計的に「べき分布」となることが 1950 年代から知られている (ナイル川の氾濫 : Hurst⁷⁾, Mandelbrot⁸⁾)。1980 年代以降、金融経済を中心に複雑系の数学的研究が進み、内的小および外的な非線形要因によって、有意な (一個人が一生の間に経験しうる頻度の) 確率が生じる機構が明らかになってきた。株式市場では、レバレッジ (梃子 : クレジット払い、担保借入、信用取引などの自己資本よりも大きな力で市場を左右できるメカニズム) を原因として「べき分布」が発生することが、エージェントモデルで確認されており⁹⁾、これがブラックマンデーやリーマン・ショック等を生んだと理解できる。

一方、原子力災害は、システムの安全性を支配している物理的小およびソフト的なコントロール階層を上から下へ、または逆に突き抜けるプロセスとして発生する。すなわち、「べき分布」ないし「ロングテール」での有意な低確率での事故発生は、時間進展のなかに埋めこまれた小さな逸脱 (ずれ) が大きく進展する相互作用機構 (クリフエッジ効果とも言う) が複数存在することによる。具体的には、駆動力として放射性物質の崩壊熱放出や冷却水の蒸発、現象として水素爆発や蒸気爆発などがある。これらも、金融の場合と似た「梃子」の機構であり、金融経済でのべき分布の原因とされるレバレッジと数理モデル上、同じ働きをする。

(2) 低確率巨大事故への不用意な言及

原子力での伝統的な安全性ないしリスク評価は、1970 年代、ラスムッセン MIT 教授のまとめた報告¹⁰⁾以降、事故発生に至るまでのフォールトツリー (FT) をもとにした確率的な安全 (リスク) 評価 (PRA/PSA) が主流となった。今日でもこれが唯一の「量的」評価法であり、事故シーケンスを可視化し、機器の信頼性、冗長性によって安全性を数値的に高めることができるため、プラント設計や事故発展解析で極めて有用とされている。

しかし、福島で経験した最大のネガティブな貢献は、専門家達がこの手法 (FT/ET、PSA/PRA) によって低確率事故に言及したことである。この言及が許されないことは、近年、例えば Nancy Leveson MIT 教授らが繰り返し警告していた¹¹⁾。即ち FT では、数学的に一次的 (リニアな) 時間軸に沿う因果連鎖だけでリスクを評価している。しかし、1970 年代に既に指摘されていたように、FT は共通原因 (Common Cause)、ないし共通モード (Common Mode) 事象、すなわち同時に複数の事象が並行して発生する場合、(協働故障、多重故障、同時多発故障、など) その後段で分岐していく「場合の数」の爆発を取り込めない。従って FT 手法だけに頼れば、現場での事象発生に対して“考

え落ち”を生む。実際、宇宙機器の失敗事例の4割近くが FT では再現されないことが経験上知られている¹¹⁾。

特に重要なのは、高信頼性のプラントが高安全性のプラントとは限らないという事実である¹¹⁾。原子力業界にはこの認識は無く、我が国ではその産業界の誇りである高品質・高信頼性から計算される極めて低い事故発生率をもとに、大事故は起きないと論じていた。その学会と産業界の責任は重い。実際に事故の現場を知る者達の間では、桁違いに低い PRA 絶対値の議論は、エンジニアリングではなく空想であるとまで言われている。

3. 2. 2 低確率巨大大事故リスクへの対応、取り組み方の提言

(1) 手順書のない世界＝(過酷事故発生後の緩和/制災オペレーション)

今回の福島事故への対応で、最大の問題は、炉心崩壊が開始してからの状況に対し、事象進展による被害を最小限に食い止める算段がなされていなかった事である。前段、すなわち過酷事故発生を事前に止める算段(レベル1)については、1979年のスリーマイル島(TMI)事故を契機に設計基準事象の実験と解析が丹念に行われ、手順書が成文化され、米国では異常時運転手順書(AOP: Abnormal Operation Procedure、緊急時運転手順書(EOP: Emergency Operating Procedure)として成文化されている。

これに反し今回のような状況(後段=レベル2)では予め事故対応手順(Procedure)を決め置くことはできない。すなわち過酷事故の開始すなわち炉心溶融、圧力容器貫通などのクリフエッジ現象の発生以後は、プロセスがカオス領域に入るので長い時間幅の予測は不可能になる。その結果、比較的短い時間(時、分、秒)の視野の中で、その場その場での迫り来る危機との戦いとなる。これはプロセスの「緩和/制災」段階である。福島原子力事故を経験した我が国原子力工学者がまず行うべきことは、この後段、緩和/制災の段階でのプラントふるまいの解明であり、備えに何が必要か、被害を制御できる条件は何か、を明らかにすることである。

この複合的な巨大大事故の緩和/制災には、前段と比して大きく拡張された概念が必要である。米国では、過酷事故時管理指針(SAMG: Sever Accident Management Guideline)と EDMG(Extensive Damage Management Guideline、NRC Section B5b)を用意している。前者は過酷事故に入った時点で、上記 EOP から切り替える指針(手順ではない)であり、後者は、3.11以降には過酷事故とは限らずハリケーンや洪水など非常緊急時にも発動される。両者とも指針(Guideline)であり、手順(Procedure)と違いその時点で何を実施するかは現場の状況判断に任される¹²⁾。

この後段が、前段に比して著しく異なる点は「通常では、絶対やらないことも、やらなければならないことになる」ことされている。これは大きな山火が発生した際、意図して野火を放つことに類される。ここには以下の問題点がある。(1) 過酷事故発生とみなす条件を決め、後段(緩和/制災フェーズ)への切り替えを自動化すること。(2) 事故確率の観点からは、オペレーショナルなリスクの発生である。前者は判断の遅れを防ぐため不可欠であり、米国では炉心状態を監視する特定の熱電対の読みで定められている。後者では、先述のように、通常は絶対やらないことも行わざるを得ない。そのような極限状況においては、超法規的な判断と行動をとることがあり、責任の所在と分担をも予め

決めておかなければならない。すなわち新たに制度設計が必要になる。米国と同様にすれば、国が責任をとる枠組みの中で、非常時センターが責任を引き受けることになる。また、この後段では、非線形過程の特徴として、信号系を用いた制御が事故シーケンスを混乱させることがある。福島一号機の間熱交換器の挙動はその実例と推定される。機器と人間のシステムに内在するインテリジェンスが悪さをする例である。したがって機器設計のための高度な固有安全の概念が必要となる。

(2) 低確率巨大事故の数学的な定量理論を開発する提案

低確率巨大事故については、その前段、後段を通じて、(1) ロングテールが生じるメカニズムを解明する理論が未発達、(2) 発生以後の被害の確率分布を与える手法が国内プラントに適用されていない。前者では、関数論的な答えとしての、べき分布、指数分布さえも得られていない。後者では、緩和／制災の準備段階を設計し、その良し悪しを定量評価する数学的理論ないし設計学が必要である。また、実作戦時に重要となるオペレーショナルなリスクについて評価手法が無く、さらに判断に対する責任分担の組み立ても含めた体制構築がなされていない。

我が国の原子力発電所に関わる人間に求められていることは、この後段（レベル2、レベル3）の指針、すなわち命令ではなくガイドラインを早急に確立することである。その際、最新の数学的分析にもとづくことが肝要である。

具体的には、(1)計算シミュレータによる過酷事故時プラント挙動のデータ收拾と解析、(2) OR 手法たとえばエージェントモデル等を用いた、非線形的自由度の評価、である。前者は、発電プラント個々の特徴に合わせ多様なシナリオを起点としたレベル2事象進展を、計算シミュレータを用いて、確率性、多様性（べき分布の視点）から、落ちなく数え上げておくことがかならず役に立つ。後者は、常識的な想定を外れた、出会いがしらの衝突に類する事象も含めた、オペレーショナルなリスク評価である。ここには社会システムの間系まで広げた解析も含まれる。たとえば、今回の災害の直接原因であるバックフィット欠如をもたらした社会構造はその例である。そこでは裁判等を支える成文法の骨組みとなる論理を重視する担当者の判断が、発電現場の技術者の論理判断に優先した。このような誤りを防ぐには、人間のふるまいを組み込んだ科学及び技術の発達が不可欠である。

日本は、この原子力災害を契機にこの過酷事故後段の緩和作戦についてポテンシャルを高めるべきである。それは国際的な立場で必ず役に立つときが来るであろう。この道の専門家は、公衆に、政府に、自治体に、企業に対してその説明を尽くすべきである。その公衆理解が進んで始めて、この福島の原子力災害を越えて原子力発電の再生の議論がスタートできると考える。

3. 3 原子力発電所の安全性向上への福島事故からの課題

福島事故の安全面に関する基本点は、設計基本事象に対して「止める・冷やす・閉じ込める」に万全を期した深層（多重）防護設計が、設計条件を超えた地震・津波によって「止める」には成功したものの「冷やす・閉じ込める」において破られ、さらに設計条件を超えた場合にも対応するための苛酷事故対策（アクシデント・マネジメント）で

対処すべき「全交流電源喪失・海水による最終熱除去機能の喪失の短時間復旧」が不可能になったことにより、「冷やす・閉じ込める」機能の喪失に到ったものである。

現時点でこの事故から読み取れる基本的な安全上の諸課題とそれに対する今後の対応について、未だ十分な事故報告書が出されていない中ではあるが、工学技術の面を主として挙げてみたい。

(1) 立地計画の課題

①集中立地について

わが国の用地取得事情からやむを得ない選択だったとはいえ、同一敷地に6基の原子力プラントが集中立地され、さらに各プラントに独立した送電線がすべて、約10キロ離れた同一の変電所に連係されていた。

各プラントは基本的にそれぞれ独立した安全設計がおこなわれていたが、非常用外部電源の発電所側受電設備は全号機共用であり、事故時の放射能放出にかかわる安全系である排気塔は2基共用となっていた。

②敷地標高について

福島1～4号機は標高35mの台地を掘削した標高10mの敷地に設置された。当初設計の頃は歴史記録などから津波高さを3.1メートル(1960、チリ津波)を考慮した。しかし非常用海水冷却施設(最終熱除去)は標高5メートルの取水口に置かれ、14～15メートルの津波によって海水による最終熱除去機能が失われた。数年前に想定津波を5.7メートルと修正したときに頑丈な水密建屋で覆うなどの対策が遅れていた。

③燃料の除熱冷却用水の処理について

複数プラント同時に必要とされた炉心及び使用済み燃料への長期注水に対して地震・津波の影響で淡水源確保と汚染水の敷地内貯蔵容量が不足した。

(2) 安全設計面での課題

①非常用内部電源(D/G)の設置場所について

安全系の耐震設計がなされた各プラント2台のD/Gが、共にこれより低い耐震設計レベルのタービン建屋の海側の地下一階に配置されていた。しかし地震には耐えて自動起動をしたが、標高10メートルの敷地を洗った津波により冠水、停止した。2台同時冠水しうる配置設計に問題があった。

②非常用外部電源について

送変電機器には一般的な耐震設計がなされているが、非常用外部送電系統でも原子炉安全系に見合った耐震設計はなされていない。このため地震による鉄塔倒壊などで外部電源の早期復旧が不可能な状態になり、また復旧時間の規定が無かった。津波襲来が予想されない高台などへの電源車や仮設配電設備・ケーブルなどの資機材の配備と訓練が望ましかった。

③非常用直流電源について

各プラント2台の蓄電池も1,2号機はタービン建屋の地下にあったため冠水した。3号機はタービン建屋の山側の制御室建屋にあったため冠水を免れたが、交流電源の

長時間喪失のため充電不能で機能喪失に陥った。

④水素ガス対策について

高温の水・ジルコニウム反応による水素発生に対して、格納容器内には可燃性ガス燃焼装置があったが電源喪失で作動できなかった。また原子炉建屋への水素の漏出を予想しなかったため、水素爆発に対する建屋設計や建屋内の水素対策がなかった。また3・4号共用排気塔から3号機の水素が、逆止弁が無かったために4号機に逆流して4号機も爆発したと推察される。

⑤自然事象に対する設計想定について

わが国の原子力ではスリーマイル島事故（1979）、チェルノブイリ事故（1986）を教訓として、原子力の技術システム・技術管理システムの内部に起因する事象により多く注目して対策を強化してきた。当初の設計想定を上回る自然事象の頻発にもかかわらず「バックフィット」としての安全強化策が、欧米と比べて必ずしも迅速に進められていなかった。

⑥防災計画と情報開示について

地震・津波や事故の影響による現場の状況把握や情報通信手段が十分に確保されなかったことに加えて、事故初期における関係機関のあいだの連絡・連係や役割分担が十分ではなく、意思疎通の不十分から指揮命令系統が混乱し、また迅速な情報開示とともに事態の進展の全体像をイメージできる情報開示が不十分であった（炉心溶融予測やSPEEDI（緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム）による予測など）。

⑦プラント状況の迅速・的確な把握について

地震・津波と事故の影響による停電と現場の高い放射線化により、中央制御室や現場への立ち入りが長期にわたって困難となり、事故対応・防災計画遂行の基本となるプラント状況の把握が困難となった。

（3）安全設計思想の課題

①深層（多重）防護設計について

原子力安全は、放射性物質の危険性を封じ込めるため、設計基本事象に対して技術を主とした「異常の発生防止・拡大防止・放出防止」の3レベルの深層防護設計を適用してきた。しかし、設計基本事象を超える事故に対して事業者の自主整備として「苛酷事故対策」を1992年に定めているが、わが国では1992年以降一度も改定されていない。また全交流電源喪失が設計基本事象に含まれないなど、確率的手法によって発生確率が低いとされると、現実の発生率の大きさにかかわらず“苛酷事故は現実には起こらない”が何時しか共通認識となって、マニュアル整備・運転員訓練などではなされているものの、実際的な資機材備蓄・作業員訓練などに本気度を欠いていた。

わが国の深層防護設計は、技術による3レベルの対策に加え広義の深層防護として「技術・離隔距離（立地で考慮）・防災計画」とされているが、IAEAなどでは5レベルの深層防護、すなわち「技術（異常の発生防止・拡大防止・放出防止（設計基本事象対策）」に加えて「（設計基本事象を超える）苛酷事故対策」および「防災対策」として、「苛酷事故対策」を深層防護に位置づけているという。

②安全目標について

原子力発電所のリスクについては、米国では定性的な安全の目標に加えて早くから確率的な評価手法を取り入れて重大事故の発生確率を評価し、「安全目標」を定めて国民と共有している。わが国でも「安全目標」の検討が進んでいるが、確率的手法によるリスク評価が未だに十分には使われず、国民に伝わっていない。これは他の社会的な事故との相対比較を可能とし、リスクの相場観を形成すると共に国民との対話の共通基盤ともなりうる。わが国もこのような国際的な動向と早急に整合を図っていくことが必要と考えられる。

③品質と安全にかかわる人間の関与について

発電所施設の品質向上のために、ヒューマンファクターを重視して計画から設計・製造・建設・運転・保守の各段階でそれぞれに適した方法で“品質”を作りこんでいる。これが一面、品質向上イコール安全向上と認識されて、これら各段階を一貫して総合判断し監視する「安全の網」となるべきシステムが有効ではなかったと思われる。品質は安全の必要条件であるが十分条件ではないであろう。

(4) 安全規制行政の課題

わが国の原子力安全規制体制は、「推進と規制」が同一行政体に共存している。しかしかねてからこれに対しては国民からの疑義があり、今回の事故を契機にこの点を改めないと安全規制に対する国民の信頼を得られない。米国の「エネルギー省」（推進）と「原子力安全委員会」（規制）に習って安全・保安院を経産省から独立させて、“国民の側に立った安全規制”にすべきである。安全規制の強化・効率化のために行政権限を有する米国原子力安全委員会に習うならば、わが国の安全委員会の3条委員会化（行政権限を持った委員会。従来は8条委員会で諮問委員会）も議論されて然るべきである。

(5) 原子力界の体質の課題（いわゆる「原子カムラ」）

短期間に急速に発展した原子力のような技術分野では、経験・知識が限られた人間・組織にいわば「属人化・属組織化」され、他の技術分野や社会に対して閉鎖的な専門技術集団化し、新規参入者や部外者の口出し・批判を阻み、独善的になっていった。特に原子力では産官学の人材が同じような場で短期間に学んできたため相当部分彼らの利害が一致し、仲間内の論理が優先して国民不在の専門集団になっていった。また過剰ともいえる自信は、いったん決まったことをトラブル経験などを取り入れて柔軟に見直す、といった継続的な安全向上活動を妨げる一因にもなったと思われる。

(6) 福島事故で明らかになったわが国の原子力開発の意義の再確認

福島事故で原子力が単なる電力供給の手段やエネルギー安全保障策に止まらず、国際社会の中での「国や国民の生存に係る安全保障問題」の一端であることが、事故の対応を巡る国内外の動きの中で明らかになってきた。

資源輸入国のわが国では再生可能エネルギーや化石エネルギーの動向から、数10年間は既存原子力の存続はやむを得ないが、既存原子力発電の一層の安全性向上、電源喪失に至らないよう主要電源設備の防水などの苛酷事故対策と周辺環境への放射性

物質放出防止など、国民の信頼獲得に向けて以下の点に今後留意する必要がある。

- ① 国内の原子力への取り組み体制を抜本的に改革して、情報開示・透明性・市民参加と対話などを通じて、他の技術分野および社会・国民に開かれた原子力界になるよう関係者すべてが努力していくべきである。
- ② 福島事故にもかかわらず、少なからぬ国々が意欲的に「平和のための原子力」発電開発に取り組もうとしている。非核保有国で兵器利用とは厳に一線を画して原子力平和利用を進めてきたわが国には、核軍縮への主体的な活動と共に、これらの国々を支援する歴史的な使命がある。福島事故を教訓として、わが国の工学界が一致協力して、技術的・制度的に優れた原子力建設・運営モデルを築き上げて世界に発信していくことが必要であり、新興原子力発電国の期待も大きい。またこのような国際視野に立ったとき、自国のみの視点で進めてきたわが国の再処理（軽水炉及び高速炉へのプルトニウムリサイクルと高レベル廃棄物処理目的）の意義について改めて議論が必要であろう。
- ③ 既設原子力施設の維持及び国際貢献のために今後数10年間高度な原子力技術の維持が必要であるならば、まずは今回の事故の反省と教訓を踏まえて、ストレステストなどによる安全レベルの再確認と継続の適否の判別を行うことが必要である。さらに新規エネルギー開発の技術動向や世界的な資源動向を観つつ、中期的視野に立って、前述のようにテロを含む苛酷事故も設計基本条件に取り入れた五重の深層防護設計がなされた炉の開発を進める。さらに長期的には、社会受容性を一層重視して従来の巨大・複雑・ブラックボックスの大型炉に代わりうる、現在世界的に開発が進められているフェイルセーフ設計を基本とした本質安全の原子炉（防災計画が不要・炉心溶融が起こらない・受動安全を主とする自己終息可能など）など次世代原子炉の開発に向けて、国際協力の下に注力する必要がある。更には、現在原子力委員会で検討中であるが、“もんじゅ”を含め高速炉の技術開発のあり方、その他の核エネルギー平和利用の可能性についても、基本に立ち返って改めて議論が必要である。
- ④ このような目的のために、わが国には原子力技術維持・向上をめざす原子力行政機関の新たな編成が必要である。従来の省庁縦割りを排して研究・技術開発から実用化まで、原子炉から放射線まで、一元化・一貫化された効率的な行政体制の構築が望ましい。更に、第三者によるチェック機能を加えることも重要である。米国エネルギー省が手本となろう。
- ⑤ 再生可能エネルギーと化石エネルギーと原子力との安定的効率的な並存のため、最適な電力供給構造と電力系統構成の検討が必要である。
- ⑥ 技術リテラシーとリスク教育の問題

日本人は一般的にリスク感覚に乏しいといわれる。放射線をはじめとして、科学技術と共存・依存せざるをえない現代社会では、技術リテラシーとリスクに対する知識と感覚向上のため初等中等教育などに期待したい。

4 再生可能エネルギーの課題と可能性

4. 1 再生可能エネルギーの概要と必要性

再生可能エネルギーとは、国際エネルギー機関（IEA）によると、「絶えず補充される自然のプロセス由来のエネルギーであり、太陽、風力、バイオマス、地熱、水力、海洋資源から生成されるエネルギー、再生可能起源の水素が含まれる」とされる。我が国でも、2009年に成立した「エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律」により、再生可能エネルギー源は、「エネルギー源として持続的に利用することができる」と認められるものとして、太陽光、風力、水力、地熱、太陽熱、大気中の熱その他の自然界に存在する熱、およびバイオマスが規定されている。

再生可能エネルギーは、エネルギー源の多様化による輸入依存度の低減（日本の化石燃料の輸入額は近年20兆円規模）や利用時の環境負荷が小さいなどの利点があり、特に我が国は、2020年に温室効果ガスの排出を1990年比25%削減することを国際約束として明言していることから、その達成のためには温室効果ガスを排出しない発電（ゼロエミッション電源）を50%以上導入しなければならない（2010年エネルギー基本計画）。また、2030年には、ゼロエミッション電源による発電を70%にまで引き上げるとされている。現在の我が国のゼロエミッション電源は、原子力発電と水力、僅かな再生可能エネルギーを合わせた34%であり、今後原子力発電の新增設を前提としたエネルギー基本計画を見直すとした場合、再生可能エネルギーへの多額の投資を開始し、大幅な導入を図らなければ、温室効果ガス削減目標を達成することは極めて困難な状況となる。原子力発電なしで国際約束を果たすためには、年間5兆円規模の再生可能エネルギーへの速やかな投資が必要と試算されている¹³⁾。

4. 2 再生可能エネルギーを取り巻く世界の現状と日本

再生可能エネルギーへの世界の投資額は、2010年に20兆円に達するなど急激な伸びを示している（2004年は2兆円）。また、2009年には、世界の再生可能エネルギーの発電設備容量が原子力発電を超えている。その投資額は、中国を筆頭にドイツ、アメリカ、イタリアと続いており、日本は10位にも入らず大きく出遅れているのが現状である。

再生可能エネルギー導入で急激な伸びを見せているドイツは、この分野への投資が年4兆円（国民一人当たり5万円）にまで拡大している。この背景には、電力固定価格買取制度（FIT）の導入がある。この制度の導入により、ドイツでは大規模な再生可能エネルギーへの投資が始まり、産業として30万人以上の新たな雇用を創出し、間接雇用を含めると100万人もの雇用を生み出している。現在同定度の産業規模を持つ我が国の原子力発電の雇用者が直接で6万人、間接を含めて8万人の雇用とされるのと比較して数倍の大きさであることが分かる。ドイツは現在東西統合後最高のGDP増加を達成し、経済も好調である。

一方で、我が国における再生可能エネルギーへの投資は、国民一人当たり2千円で、中国の3千円よりも少なく、世界全体の1~2%でしかない状況となっている。

以下に、主な再生可能エネルギーとその現状を示す。

(1) 太陽光発電

再生可能エネルギーの中でも現時点で最も発電コストが高く、余剰電力買取制度における買取価格は、42円/kWhとなっている。しかしながら、市場導入が拡大することによる量産効果と技術開発により、大幅な価格低下が生じつつある。また、住戸や事務所の屋根に設置することも可能であるなど、個人や企業の意志で比較的導入しやすい発電方法である。しかし、天候に左右され、夜間は発電ができないという特徴があるため、日本では稼働率は12%程度で、大規模導入した際には、電力系統安定のための対策が必要である。

太陽電池には、単結晶シリコン、多結晶シリコン、薄膜系シリコン、 dendroライト結晶を活用したものなどのシリコン系と、CIGS（銅、インジウム、ガリウム、セレン）などの化合物系、色素増感や有機薄膜などの有機系のものがある。有機系は、塗布変換型のものが実用化の目処が付くなど我が国の技術がリードしている。現在、技術開発段階では1kWh当たりの価格10円を目指した量産化技術開発競争が繰り広げられている。

環境省の「再生可能エネルギーポテンシャル調査（以下「ポテンシャル調査」という。）」によれば、175GW容量の導入が可能とされるが、一定規模の電力を賄うためには非常に多くの面積を必要とする（原発1基分の発電に58 km²必要）。したがって、仮に太陽光発電だけで、将来の日本の総エネルギー（2030年原油換算348百万kL（電力換算3760 TWh = 13500 PJ）国立環境研究所）を賄うとすると、現在の変換効率では国土の6-7%程度を覆う必要がある。ちなみに原子力発電では現在54基の原子炉を500基以上国内に作る必要がある（稼働率80%を想定）。

ただし、太陽光発電は他の再生可能エネルギーとの併用や効率向上、また、今後の省エネルギー目標（5割程度）を考慮すると、最終的な必要面積はその数分の一になると予測され、この点は考察の視点となる。

(2) 風力発電

再生可能エネルギーの中では、世界的に発電容量が最も大きい発電方法であり、世界各国の投資総額でもトップとなっている。また、日本における発電コストも12円/kWh程度で行えるとする報告もあるなど、太陽光発電に比べ低コストのエネルギー源である。しかし、一定規模の電力を賄うためには太陽光発電の3倍以上の面積を必要とする（原発1基分の発電に200km²必要）ため、土地の活用が進んでいない地域や、洋上発電の開発が世界的に志向される。また、風力は天候に左右されるという特徴があり、定格容量に対する稼働率は20%程度となっている。大規模に導入した際には、太陽光発電同様、電力系統安定化のための対策が必要である。ポテンシャル調査によれば、1500GW容量の導入が可能である。

一方で、騒音問題（低周波問題）や景観問題なども顕在化しており、対策が必要である。

(3) 地熱発電

再生可能エネルギーの中では、24時間安定的な発電が可能で、ベース電源として期待される。我が国は、世界有数の火山国であり世界第3位の地熱資源量を有しており、ポテンシャル調査では、賦存量は150℃以上で24 GW、53～150℃では9.6 GW程度と試算され、これは原発33基分に相当する。しかしながら、地熱資源の85%以上が国立公園などに存在していることや、温泉事業者との調整が問題となり、海外では5年程度で設置できるところを10～20年もの歳月がかかるという現状から、この10年は日本では新規設置がなく、設備容量では世界第8位に留まっている。今後の導入を促進していくためには法的な措置や規制緩和が必要である。発電設備には、10万kW級のプラントで50億円程度の初期費用が必要となるが、長期にわたり発電が可能であることも多く、発電コストは10円/kWh以下となっている例もある。

(4) 中小水力発電

今後の水力発電として、大規模なダムの建設は日本では計画されていないが、設備容量3万kW未満の中小規模の水力発電の活用が期待されている。一般的に水を貯めることなく、河川や農業用水路等の水流をそのまま利用する発電方式である。

小規模な河川に設置でき、地形や水量により様々な発電方法があるため、発電コストは10～35円/kWhと幅があるものの、ポテンシャル調査では、14GW程度が現状下でも設置可能とされている。水利権等の諸規制に伴う行政手続きの明確化が課題である。

(5) バイオマス発電

廃棄物や未利用物、資源作物をエネルギーとして用いるもので、バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議（2007年2月）によると未利用のエネルギーポテンシャルは、原油換算で1400万kL（電力換算151 TWh）と試算されているが、日本では特に運搬コストの点から大規模な導入には至っていない。廃棄物や未利用物の活用の場合、回収システムや安定供給のための大量生産方法が確立していないことが課題である。一方、資源作物を利用する場合には大農場経営をしなければならず、食料生産と競合するという問題がある。現在のバイオマス発電は、市町村等の一般廃棄物を焼却する際の熱発電が全体の58%を占めている。セルロースや藻類を原料とするバイオエタノール、バイオディーゼルの研究は盛んに行われているが、これらは内燃機関向けのエネルギー源であり、電力には向かない。

4. 3 再生可能エネルギー普及のための方策「電力固定価格買取制度 (FIT)」

電力固定価格買取制度 (FIT) は、再生可能エネルギーで発電した電力を電力会社が一定期間、一定の価格で買い取ることを義務づける制度で、買取価格は発電設備の価格低下に応じて見直され、徐々に低減される仕組みとなっている。

現在のFITは、一般家庭や事業者などが再生可能エネルギーで発電した際、自らが使用した後の余った電力のみの買取制度となっているため、一般家庭への導入は期待できるが、発電を事業として行うことが極めて困難で大規模な投資を促す制度とはなっ

ていなかった。

ドイツやスペインなど再生可能エネルギーの導入が熱心な国では全量制のFITを導入し、事業としての再生可能エネルギーの導入が進んでいる。この制度により、再生可能エネルギーの設置費用を早期に確実に回収することが可能となり、事業者が発電設備を導入する大きな誘因となった。これにより投資を促進し、大量生産によるコスト引き下げや技術革新が期待され、また、国の補助金などを必要とせずに民間の投資のみによって導入促進を図ることが可能となる。ドイツでは、2004年に改正されたこの制度により、累積導入量が2005年に世界第1位となっている。

一方で、高い価格で買い取った経費は、電力料金に上乗せされることになるため、日本の産業界は慎重な姿勢を示している。一部の産業や低所得層などの電力料金に関しては配慮が必要という意見もあり、問題がないわけではない。

4. 4 再生可能エネルギーと震災復興

東北地方は、風力発電に適した日本有数の地域となっており、陸上及び洋上に大きなポテンシャルを有している。東日本大震災の被災地域の復興プランを考えた場合、再生可能エネルギーの普及を組み入れることで、雇用の確保や土地の有効活用、売電による収入確保などが期待できる。

例えば、海岸付近や洋上に風力発電、沿岸の低地に太陽光発電を設置するなど発電ゾーンを設け、高台の住宅地ゾーンとの間を送電網で結び、再生可能エネルギーを地産地消のエネルギー源の柱として地域一帯で管理するスマートコミュニティとして発展させていくことも考えられる。

4. 5 再生可能エネルギーの課題

再生可能エネルギーの中でも今後の主力とされる太陽光発電と風力発電には、電力の系統安定という課題がある。系統安定とは、発電と消費の同時性が要求されるために発生する問題である。

この対応として、二つの方法がある。一つは、風況の変化や雲の影響など短時間の変動に伴う対応で、広域で電力融通することで解決する方法である。短期的には現状の交流送電網の増強、長期的には例えば北海道から九州までを直流超高压送電線を敷設することで、天候による発電量の変化を多数の発電機の間で平均化効果により減少させることが可能となる(50Hz/60Hz問題もこの直流高压送電線の敷設で解決可能)。もう一つは、昼夜など比較的長時間の変動への対応であり、これに対しては、スマートグリッドの導入による解決が考えられる。これは発電量と消費量を調整するため、機器のオンオフの操作を電力供給者側が行ったり、電力が不足する時間の電力料金を電力供給者側が高く設定し、消費者側は電力料金が高くなったら機器の電力を切る設定をあらかじめしておくなど、需給のバランスをシステム全体で調整することを可能とするものである。電力供給にはまだまだ越えなければならない課題も多いが、上記の手段についての今後の展開を期待したい。

なお、当面は火力発電を温存しておくことにより、電力が不足する際には火力発電で補うことで対応することが可能である。欧州では、風力発電や太陽光発電が全電力

の20%程度であれば、火力発電とダム式水力発電で変動を即時補うことで対応可能であることがすでに実証されている。風力発電や太陽光発電が電力の20%を超え主力になってくると、二次電池導入やスマートグリッドの導入を推進し、街全体のエネルギーを効率的に運用するスマートシティや電気分解によるエネルギーの貯蔵その他の電力供給の安定策も長期的な課題として検討すべきである。

エネルギーに費やすコストは小さくない。化石燃料の輸入額は、近年 20 兆円のレベルに達し (GDP の 4%)、世界の化石燃料の消費量が増えるとともにその価格は上昇する傾向にある。今後も時間的な遡増傾向と、限られる産出国の政治的・軍事的状況により、価格の乱高下の可能性を抱え、安定的な確保が問題とならざるを得ない。このような輸入に頼らざるを得ない資源には、安定的に確保し消費者まで届けるというエネルギー安全保障としての課題がある。

一方で、再生可能エネルギーは、エネルギーの自給率の向上やエネルギー源の多様化など、エネルギー安全保障の点で有利なこともある。再生可能エネルギーの課題となる発電コストの問題は、本年 2 種類の新型太陽電池が日本のメーカー (三菱化学及び昭和シェル石油) から市場に出されるなど量産技術も開発が進み、技術開発の現場では、現在のコストを大幅に下げた目標設定もなされるようになってきており、解決が期待される。

我が国の再生可能エネルギー市場は、導入のための制度整備が遅れ、中米欧に比較して非常に遅れたものとなっている。放射能のリスク回避、エネルギー供給上の安全保障対策、温室効果ガス削減、世界の動向など総合的に勘案すると、エネルギー政策を考える上で再生可能エネルギーの導入拡大は不可欠である。今後、その市場を育て、技術開発を促進し、この分野へ投資を行う環境を整えることにより、世界に参入し、さらに世界をリードしていくよう、積極的な行動が期待される。

5. 省エネルギー¹⁴⁾

5.1 はじめに

震災発生以前は、特に電力については、必要な時に必要な量を、あたかも空気のように供給されるものと考えられてきた。震災後の電力供給力のひっ迫は、この誤った認識を改めるきっかけとなった。震災後の新しい社会システムを構築するに当たっては、経済活動を停滞させたり、経済的・身体的弱者に対して過度の忍耐を強いることなく、電力のピーク需要の削減を通じて震災後の社会システム作りに貢献することができる方をまとめておくことは、今後の技術開発課題の掘り起こしと順位付け、安全安心が担保され地域共生型の社会の構築のためには重要と思われる。

ここでは、省エネルギー策について電力需要の削減、電力需要の時間的・空間的シフトの2つの方策に分けて述べる。なお、電力需要削減量の試算結果は、東京電力管内を対象としたものであることに注意されたい。

5.2 電力需要の削減

社会的・経済的活動を損なうことなく電力需要を削減できる方策として、省エネ機器の購入やライフスタイルの変化がある。機器による電力需要の削減によって170万kW程度、ライフスタイルの変化によって110万kW程度、合わせて280万kW程度のピーク電力需要の削減が期待できる。

(1) 機器による電力需要の削減

① 冷蔵庫（買い替え促進、節電協力）

冷蔵庫は旧式の機器では定常的に100W程度の電力を消費しているが、最新機では3分の1程度に省エネとなる製品がある。また、液晶テレビなどと異なり、冷蔵庫は容量の大きなものの方が消費電力は小さく、買い替えに伴う大容量化は電力需要削減にとって好ましく、エコポイントなどの施策は有効である。また、ピーク時間帯は冷蔵を弱にする、長期帰省の世帯は庫内を空にし、電源を切るなどの努力と合わせ、各家庭で平均30Wの節電が実現されれば東京電力管内で60万kW程度の需要削減が可能と期待される。また、小売店の冷蔵・冷凍コーナーの更新やカバー設置、オフィスや公的機関における冷蔵庫の更新や節電も有効である。

② 照明（買い替え促進、消灯）

白熱電球・クリプトン球など低効率の照明を、LED電球や電球式蛍光灯など高効率の照明で代替する。オフィス・個別家庭以外に、アパート・マンションの共用部、工場の水銀灯の高効率電灯化や、電球式信号機をLED式に置き換えるなどの効果も大きい。また、昼の時間帯の消灯も有効であるが、太陽光を直接窓から取り入れると空調負荷を増やすため、注意が必要である。20万kW程度の需要削減は可能と期待される。

③ エアコン（買い替え促進、フィルタ掃除、節電）

新型のエアコンへの代替を促進するとともに、エアコンフィルタ掃除を推奨すること、設定温度を高くすること、リビングなど皆で同じ空間で過ごすことなどが有効である。東電管内では空調需要が500-1000万kWと言われており、10%の改善で50-100万kW程度の需要削減が可能と期待される。なお、他項で挙げられる室

内で使用する家電製品や電気機器の効率化や省エネ行動に伴って、室内の熱発生量が減少し冷房負荷自体も減少するため、複数対策による相乗効果が期待できる。扇風機などをうまく活用することも有効である。窓からの入熱を遮蔽することは有効で、遮光フィルム、よしず、グリーンカーテンは十分に効果が期待できる。

④ 電気ヒートポンプのガス化（オフィス・家庭）

現在、電気により行っている空調をガスヒートポンプによる空調に置き換えることで、電力需要を削減することが可能であり、新設・代替時に政策的インセンティブの付与が有効と期待される。政策的誘導により 40 万 kW 以上の需要削減が可能と期待される。

（2）行動・ライフスタイルの変化

① 自動販売機（自販機）の夏季期間またはピーク時間帯停止

日本自動販売機工業会によると、夏場のピーク時間帯（13-16 時）は省エネ運転をしており、1 台当たり 17W の電力消費である。全国で約 400 万台であることから東電管内で約 130 万台の自販機があると想定される。3 月より行っている自販機照明消灯や不要不急の自販機停止と合わせて 2 万 kW 程度の需要削減が可能であると概算される。なお、緊急の電力のひっ迫時に稼働停止を可能とすれば、年間の電力使用量から 25 万 kW 程度の需要削減が期待できる。

② オフィス・家庭のパソコン利用の工夫

デスクトップパソコンはディスプレイと合わせ 150W 程度の電力を消費しており、電力需要の削減のポテンシャルが大きい。例えば電力ピーク時間帯にはデスクトップパソコンをシャットダウンし、ノートパソコンを電源に繋げずバッテリー駆動させることで、電力需要の削減に貢献できる。また、ディスプレイの使用台数の削減、小まめな電源 OFF などの省エネ行動が有効である。新規導入の際には省電力のノートパソコンを導入することも有効である。東電管内 4000-4400 万人中のうち、これらの行動に 100 万人が協力すると 15 万 kW 程度の需要削減が期待される。

③ 電力ピーク時の電車の間引き運行

夏季の電力ピーク時間帯の本数を間引くことで 20 万 kW の電力需要削減が可能と期待される。必要に応じてバス等の増便の必要性も考えられるが、電力ピークは通勤・通学のピークと重複しないので、社会的にマイナスとなるような直接的影響は少ないと考えられる。

④ 待機電力の削減

待機電力の大きな家電や電子機器の電源コンセントを抜くことや便利な機能をオフにすることは有効である。最近では、例えば DVD やブルーレイレコーダーの起動時間を速くするモードでの待機電力は 10~20W であり、それらモードの解除やコンセントを抜くことで 10 万 kW 程度の需要削減が可能と概算される。また、保温するのではなく食べる分だけ炊飯したり、冷まして保存し再加熱したりすることで電力ピーク時間帯における需要を削減できる。

⑤ テレビ視聴の停止

省電力型のテレビが十分に普及したとは言え、テレビは 100W 程度の電力を消費

する。総視聴率から昼間の時間帯でも5世帯に2世帯はテレビを視聴していると概算され、そのうちの1世帯が電力需要の緊急時に電源OFFに協力すると40万kWの需要削減が可能と概算される。また、消音モードで音声のみ聞くことも消費電力を半減する効果があり有効な対策となる。

5.3 電力需要の時間的・空間的シフト

以下にあげる対策はいずれも、夜間や休日といった平日昼間と比べ電力需要が相対的に小さい時間、もしくは、電力供給に相対的余力がある地域へと電力需要をシフトさせるものである。万が一その方策が総使用量を増やすものだとしても、電力供給余力のある時間や地域へ、電力需要をシフトさせることを真剣に考慮すべきと考える。以下の対策を実施することで、時間的シフトにより520万kW、空間的シフトにより95万kW、合わせて時空間シフトにより615万kWのピーク電力需要を削減可能と期待できる。

(1) 電力需要の時間的シフト

① 休日のシフト

平日と比較して週末は電力供給能力に相対的余力があるので、少なくとも各業界ごとの協力・連携のもと通常土日の休日を平日にシフトすることで270～320万kW程度の削減効果が期待できる。

② 勤務時間のシフト

現在交替制ではなく昼間のみ稼働させている工場・研究所等を夜間運転・夜勤に切り替える。東電管内4000-4400万人中のうち、例えば、大学での深夜研究・夜間授業などの検討も含め、200万人相当の勤務時間シフトにより150万kWの削減効果が期待できる。深夜勤務手当に相当する補助や減税などの施策、電車等公共交通機関の深夜(24時間)運行の検討が求められる。

③ 昼休み長時間化・在宅勤務・フレックスタイム制の推奨

勤務時間を大きくシフトすることが困難な業種にあつては、昼休み時間帯を2～3時間と長時間化したりピーク時間帯に昼休み時間帯を取ったりする勤務シフトを組み合わせることで100万kW程度の需要削減が期待できる。在宅勤務(テレワーク)やノマドワークによる勤務時間の裁量を増やすことや、フレックスタイム制も有効である。

(2) 電力需要の空間的シフト

この節では電力需要の空間的シフトについて述べる。但し、これは東電管内に対する対策であつて、日本全体を考えると地域の電力消費の平準化の視点が重要であるということの意味する。

① サーバー類を西日本や北海道へ移設

通信やデータサーバー等はユーザーにとって設置場所は問わない。サーバーを電力供給に余裕のある地域、特に北海道など寒冷地に移設することで10-30万kW程度の需要削減が期待される。

② 居住地変更

産業界では経済活動を停滞させないために、電力供給に不安のない地域に生産を移すこと、あるいは分散させることも検討課題である。その際、エネルギー需要削

減の観点からは、単身赴任ではなく、家族全員が引っ越すことも重要である。現在の東電管内からの単身赴任家庭および今後の勤務地変更がある労働者に家族ごと居住地を変更するインセンティブをつけることで、仮に 50 万人が居住地を変更するとすれば最大 50 万 kW、100 万人であれば最大 100 万 kW の需要削減が見込まれる。

③ 高等教育における国内・海外留学・インターンの促進

大学・大学院などの学生を中心に、電力供給に余裕がある国内の他大学との研究交流や、海外留学、国内・海外企業でのインターンなどを積極的に奨励することで、居住地域の電力需要の削減が可能である。休暇中の帰省の奨励なども含め、通常よりも 10 万人程が余分に管外に移動すれば最大 10 万 kW の需要削減が見込まれる。

④ 他地域への観光誘導

夏季における長期休暇の取得を奨励するとともに、他地域への観光を誘導することは需要削減につながり、地域振興などと連携した施策となりうる。このことによる定常的に 5 万人分の旅行者増があったとすると最大 5 万 kW の需要削減が見込まれる。暑い日は涼しい地域への観光や少電力消費型の娯楽施設を安くするなどの施策も有効である。

5. 4 まとめ

上記の議論において、主たる課題はピーク電力需要 (kW) の削減であり、平均的な電力使用量 (kWh) の削減では事態の大きな改善が必ずしも期待できないことに注意する必要がある。省エネルギー策として電力需要の削減、電力需要の時間的・空間的シフトを提案し、東京電力管内においてそれぞれのピーク電力需要に対する効果を約 280 万 kW、615 万 kW と概算した¹⁴⁾。

計画停電をもたらすような大規模な電力供給力不足を回避するためには、需要削減と電力需要の時間的・空間的シフトが不可避である。電力需要の時間的・空間的シフトを無理なく実施するには幅広い関係者の協調的な行動が不可欠であり、産官民を挙げての協力・仕組みづくりに取り組む必要がある。

6. 低炭素へ向けたエネルギーシステムに向けてのシナリオ

6.1 はじめに

低炭素社会構築に向けて世界が進んでいる中で、日本は先頭集団を引っ張っていかうとしているときに東日本大震災に見舞われた。この大震災は温暖化対策の大きな柱の一つと考えられていた原子力発電に対する世の中の考え方に大きな衝撃を与えている。

従来、日本は世界に先駆けて訪れる超高齢化社会と両立させた低炭素社会を考えていた。この二つに大震災復旧・復興という大きな課題が加わった。このような状況下で2020-2030年までの低炭素化に向けた対応に変化はあるであろうが、2050-2100年の時間スケールで考えれば、従来の対応の方向とそれほど大きな違いはないと思われる。

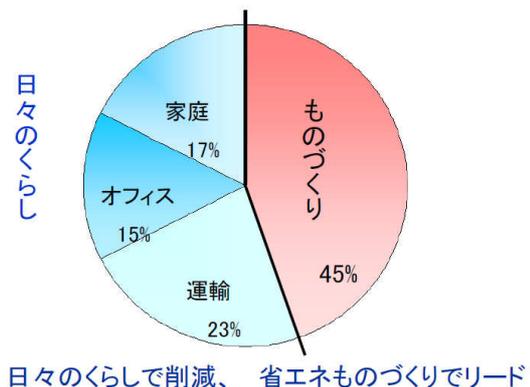
2009年に日本は2020年までに1990年比で25%の温室効果ガス（GHG）の排出削減目標を公表した。この中身、数値、排出権の定義などの見直しが必要であろう。例えば25%削減目標値達成年が当初計画より10年かそれ以上延長せねばならないのかどうかであろう。しかし、計画を単に延長しても絵に描いた餅に終わってしまう。

高度成長期を終え、停滞期に入った後もそれまでの方法で政策が進められたため、現在の困難な国家財政状況に陥ってしまった。それに今回の大震災が加わったなかでの低炭素化を進めるには、経済を活性化する新しい需要創造が必要である。そのためには日々の暮らしと低炭素化をどう結びつけるかが重要な視点になる。例えば、安心して快適な日々の暮らしを支える居住環境設計や高齢者の社会参加、医療などCO₂排出量が少ないが大きな需要があるサービス産業などを取り込んでいくことを考える必要がある。

温室効果ガス（GHG）の主要な気体である二酸化炭素（CO₂）は「日々の暮らし」と「ものづくり」の2分野から排出されている。前者からの排出量は全CO₂排出量の55%にもなり、この中からのCO₂削減ポテンシャルは「ものづくり」からのそれより大きい（図6.1）。この削減可能性を追求することにより新しい需要も創出される。

このように「日々の暮らし」からの低炭素化を進めることと並行してエネルギー供給側での低炭素化を実現せねばならない。

ここではエネルギーシステムについて①将来電源として期待されている太陽光発電（PV）システムがどのように使われていくのか、②原子力発電計画が従来の計画と大きく変わろうとしている中で低炭素化をどう進めるのか、について述べる。



日々の暮らしで削減、省エネものづくりでリード

2007年消費量:363Mtoe, CO₂排出量:1098Mt, エネルギー・経済統計要覧2009年版より

6.2 太陽光発電システム

PVのコストは電源構成を考える上で大きな要因となる。再生可能エネルギーとしては風力、中小水力、地熱などがあり、現在はコストでもPVに遜色はなく、条件によっては優れている場合もある。しかし今後の技術発展、それによるコスト低減ポテンシャルはPVが抜きん出ている。また、この開発技術の基礎となるナノテクノロジー、材料合成技術などの他分野への波及効果が大き

大きく、新産業創出も期待できるため、ここでは PV を再生可能エネルギーの代表例としてとり挙げる。

6. 2. 1 経済性

Si 太陽電池を中心に発展してきた PV システムは性能が向上し、生産技術の水準も高まっている。生産規模は一つのプラントで年産 1 GW（家庭用 3 kW システム 33 万台に相当）と大きくなっており、これ以上の規模になってもスケールメリットによりコストが急激に下がることはない。それは単一製造設備の大型化が困難なことから太陽光を電気に変換する電池部材を保護、保持するガラス板やアルミ枠などのモジュール基礎部材のコスト割合が高いためである。電池発電効率を高くすると、それに反比例してそれら基礎部材のコストは下がるため、高効率化を進めることがモジュールコストのみならず架台、インバータなどその他部分（BOS）のコスト低減に有効である。

現在、太陽電池の主流は結晶型 Si であるが、それと同等の発電効率（13%）を持つ薄膜型銅-インジウムガリウム-セレン（CIGS）系の太陽電池も大量生産され始めた。電池材料単位重量当たりの価格は高いが薄膜であるため、電池部材としては原膜型の Si 電池部材より安く、また製膜プロセスも合理化されやすいため、開発費、管理費などを含まないモジュール製造原価は低い。表 6. 1 に示すように、現在でもその設備コストはほぼ 100 円/W と計算される。今後はこの系の発電効率の向上も可能であり、効率が 18% になれば、さらにコストは 75 円/W 程度に低減するであろう。Si 系太陽電池も効率向上、プロセス合理化が進み、コストは低減するであろうが、これまでの延長線上での上記 CIGS を含めて、モジュールコストで 50 円/W にすることは困難である。このコスト水準にするためには、他材料と組み合わせたタンデム化により発電効率を 30% にはせねばならない。

近年、化合物半導体をタンデム化した 35% を超える高効率の太陽電池がシャープなどで開発されている。しかし、この製造プロセスは経済的な大量生産にはなっていないため、先に述べたような市販品とは未だコスト競争する段階とはほど遠い。

これら開発状況を鑑みて作った 2030 年までのコストシナリオを表 6. 2 に示す。これによると 2020 年に PV システムをコスト 200 円/W の 1.3 倍の価格で家庭が購入しても、PV 電気代は 20 円/kWh 以下であり、現在の電力会社からの買価 23 円/kWh より安くなる。ここで、PV 年間発電量は 1 kWh/(W・y) とし、家庭での PV 電気代は全年間経費率を 7% として計算した（200 円/W × 1.3 × 0.07/y × 1W・y/1kWh = 18.2 円/kWh）。

表 6. 1 CIGS 太陽電池モジュールのコスト

| | 現状 | 改良 | 将来タンデム |
|-----------|--------|--------|--------|
| | CIGS-1 | CIGS-2 | CIGS-T |
| 効率 | 13% | 18% | 30% |
| コスト(円/W) | | | |
| 年間費用 | 12 | 9 | 7 |
| 人件費 | 3 | 2 | 2 |
| ユーティリティ費用 | 4 | 3 | 2 |
| セル 材料費 | 15 | 11 | 13 |
| モジュール 材料費 | 70 | 50 | 33 |
| 合計 | 104 | 75 | 56 |

このように、表6. 2に示した2030年までのコストシナリオに沿ってPVシステムが進化すれば、家庭用では経済的に成り立つことになる。固定買い取り制度などの導入により市場が拡大すれば、開発も促進されて、コストシナリオの前倒しも可能になるので、PVシステムの導入を積極的に進めることが経済活動の活性化に役立ち、低炭素社会構築を進める。

表6. 2 太陽電池のコストシナリオ

(円/w)

| | 2011年 | 2015年 | 2020年 | 2030年 |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| モジュール | 150 | 120 | 100 | 50 |
| BOS | 200 | 150 | 100 | 70 |
| システム全体 | 350 | 270 | 200 | 120 |

※現状の工場プラント辺りの生産量は1GW/年に到達しており、工場規模の拡大によるスケールメリットの影響は少ない。今後のコスト削減は技術開発によるもの大きい。

設備導入量の想定シナリオ ベースケース

| | 2011年 | 2015年 | 2020年 | 2030年 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 累積導入量 | 4GW | 15GW | 38GW | 80GW |

6. 2. 2. 資源量と今後の方向

CIGS や他の高効率化合物半導体の材料としてはガリウム (Ga) やインジウム (In) が多く使用されている。1 kW の太陽電池にそれぞれ 20 g 程度必要である。現在の生産量、資源量から Ga、In それぞれ 1000t/年は生産できると推定され、年産 50GW の PV システムを生産する資源量はありそうである。この 50GW は日本の全電力の約 5% に相当する、全世界では 1% 以下の値である。

今後 20~30 年はこの系の PV システムの生産を拡大していっても資源的に問題はないであろうが、その後は集中光発電方式をとらない場合は Ga や In 以外の材料を主に使うシステムにする必要がある。発電効率 40% 以上の資源問題や安全性に問題のない無機材料や耐久性有機材料を用いたタンデム電池など、挑戦する価値のあるテーマが多くある。

6. 3 今後の電源構成と低炭素化

原子力電力のコストは最も低い 5.9 円/kWh とされているが、今後、安全性を高めていくためのコストやライフサイクルコストを見直すと高くなることは間違いない。仮に原子力発電所の現在の設備費など間接費が 2 倍の 8.8 円/kWh になると、直接費を加えた電力コストは 10.3 円/kWh になる。この値は現在の石炭火力の 7.6、LNG 火力の 9.9 円/kWh より高い。どの程度のコストになるかは明確ではないが、火力発電単価に近づいていくであろう。一方、従来の原子力電力の CO₂ 排出量は火力の 3% の 20g-CO₂/kWh と非常に低く、今後どんなに原子力発電関連設備を重装備化しても火力電力を超えることはないであろう。

これまでの電源構成計画は原子力発電所の増設と稼働率向上が主なもので、再生可能エネルギー比率も徐々に上げようというものであった。しかし、福島第一発電所の事故は世界の原子力発電に対する考え方を大きく変えている。大震災前の日本の CO₂ 削減対策の大きな柱であった原子力発電所の増設、稼働率向上の計画は大きく変える必要がある。どのように変えるかは今回の事故処理の過程・結果や、他の稼働中・停止中の発電所の安全性に対する世間の認識による。2020 年までの期間で見れば、大震災以前の原子力発電所能力計画値と原子力発電所全廃の間のどこかになる。

図 6. 2 に当初増設計画値と現存する原子力発電所の寿命を 40、30 年にした場合の残余設備容量の経年変化を示す。

2020年の計画設備容量（ベースケース）は63.7GW（6370万kW）であり、新設しない場合は58.4GW、そこから福島第一1～4号機と浜岡1・2号機を差し引くと47.0GWとなる。現在

（2011年8月18日）は15基の原子力発電所が稼働し13.3GWを発電している。定期点検中の発電所が順調に立ち上がっていくのか、部分的なものになるかの判断は中長期的な電源構成計画に大きな影響を与える。稼働基準を皆が理解するきっちりしたものにし、安全、経済、環境の観点からの総合的な判断から決定することが大切である。また震災復旧、復興を推進していくためには、社会活動を安心して進めることのできるエネルギーシステムの安定的な供給体制の見通しを示すことが急がれている。

まずは2020年の電源見通しを考える必要があり、その計画が2050年以降の長期計画と齟齬のないようにつながらねばならない。大震災前の2020年計画での原子力発電能力63.7GW、稼働率が85%の場合、その年間発電量は470TWhとなり、全電力1180TWh¹⁵⁾の40%になっていた。

電力不足の状況で夏を迎えて東電管内の電力不足が心配され、大口電力使用制限や家庭での節電等により、緊急停電を回避できる見通しが立ってきた。昨年と今年の気温と電力使用量の関係（図6.3）から、高温時のピークカット率は20%を超えていることがわかる。このことから2020年の電力消費量は計画値を1000TWh程度に下げることの可能性を示している。この減少分を原子力電力の計画値から差し引くと290TWh（38.9GW）が原子力電力の必要量となる。このように原子力発電設備能力を38.9GWに下げても、電源からのCO₂排出量（380Mt/y）は計画時より増加はしない。CO₂排出量を増加させることなく、さらに原子力発電量を減少させるにはその減少分を再生可能エネルギーで代替するか、火力発電所にCO₂回収・貯留システム（CCS）を付加せねばならない。ここでは一先ず産業活性化の波及効果、技術進歩状況を考えて、再生可能エネルギーの代替を選択してみる。

麻生政権時代のPVの設置容量計画は2020、2030年でそれぞれ28GW、58GWであった。ここではそれらの値より大きい38、80GWをベースケースとして、その値を2および4倍にしたケースでのPVコストと現電力平均コスト（10.1円/kWh）との差額を

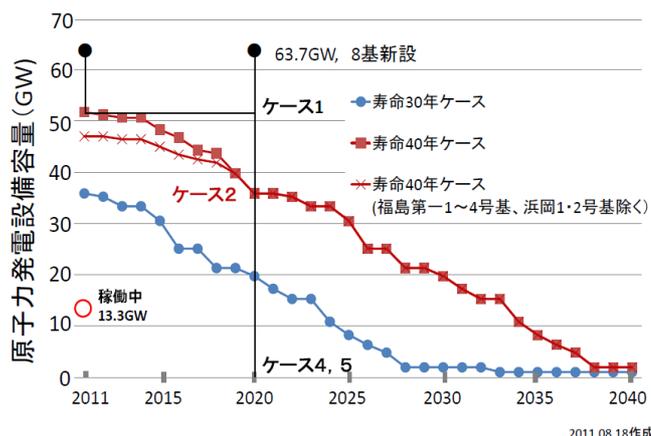


図6.2 原子力発電設備容量と寿命

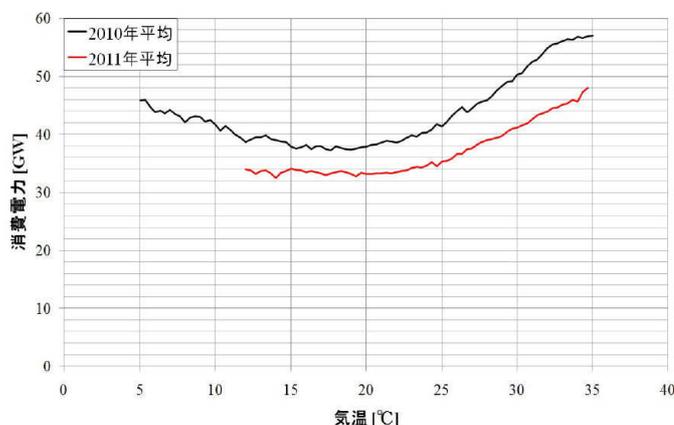


図6.3 平日消費電力比較(9-20時データ)

支出額として累積値を計算した。この累積支出額は全額が社会負担になるのではなく、その最大値である。関連産業発展による収入、PV 購買者が安全安心の価値を認めて高いことを受容する等の変化をもたらすからである。

図6. 4にPV 設備容量とコスト、図6. 5に累積支出額、を示す。

なお、ここでの計算にはPV 電力が全電力の20%を超えると大量の蓄電設備が必要になるが、その設備費は入れていない。そのように大量に太陽電池などの自然エネルギーが導入されるのは2030年以降と考えられる。それまでにはまず蓄電池の大幅な性能向上、コストダウンを進めねばならない。そして安価な安定電力供給のためには、蓄電池、電気自動車、スマート家電等を組み合わせ、それらを組み込んだスマートシティを作っていく等、多くの新しいシステムを導入していく必要がある。

さてこれらの検討からPV をどのような速度で導入していくかを考えてみる。現在PV 製造設備能力は2GW/y 程度であり、2020年にベースケースのPV を38GW 設置するためにも今から3倍増の製造設備増設計画を実施する必要である。また、PV はコストが下がっていくので2050年までを考えれば全てのケースで支出増が取り戻せるが、当面の支出増に日本が耐えられるかの問題もあるので、ベースケースがよい選択と考えられる。

再生可能エネルギーの更なる上積みは風力なども考えられるが、ここでは論じない。

2020年には原子力発電が寿命40年で35.9GW と減少してしまうが、上述したように節電により電力需要を減らしているため火力発電を増やす必要はなく、PV 導入ベースケースでもCO₂排出量も当初計画値を確保できる。また、2038年に原子力発電が総て停止しても、図6.4によれば、PV 発電量がベースケースで約180GW と見込まれるので、電力需要は確保できると予想される。

しかし寿命30年の場合は原子力が19.7GW に減少するので、その不足分140TW/年をPV で補うには140GW が必要になり、上述のPV 4倍ケースに近くなり、現状の国内PV 生産能力からこれは困難である。CO₂排出量の制限を外すと火力発電を選択できる。この場合CO₂排出量は90Mt/年程度増加する。CO₂排出量の増加はこれまでの削減計画に

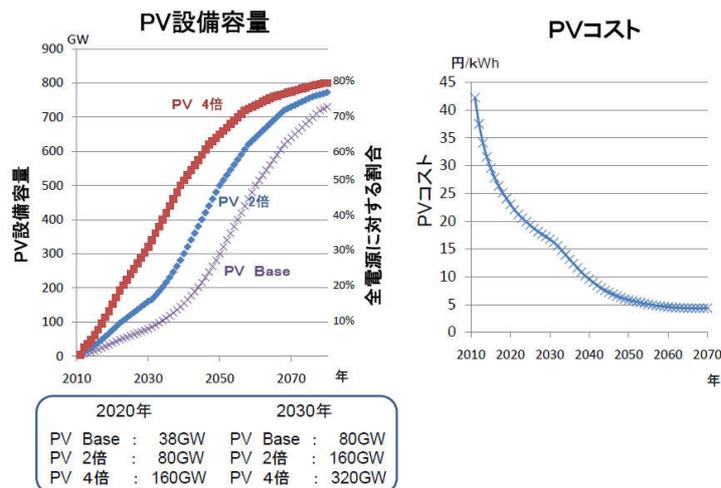


図6. 4 PV設備容量とコスト

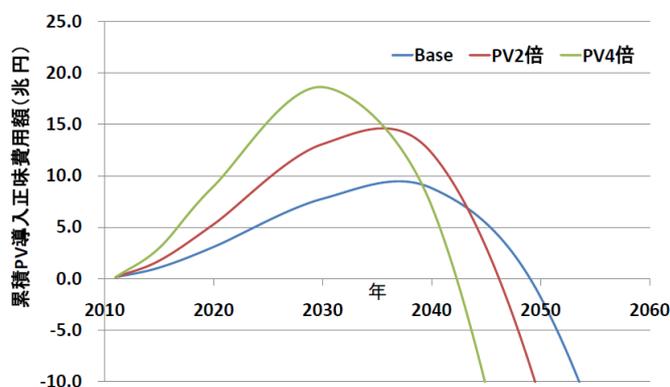


図6. 5 社会全体での正味費用累積額(系統電力料金 10.1円/kWh)
(現在系統電力料金とPV 料金との累積差額)

家電、自動車のさらなる省エネルギーを進めれば相殺される可能性はある。しかし、原子力発電所が寿命 30 年以上のスピードで廃止されていくと CO₂ の削減は先送りにせねばならなくなるであろう。

火力発電の高効率化については、例えば固体酸化物燃料電池とガス-蒸気タービンの組み合わせ複合発電で 65% (HHV) の値が期待できる (三菱重工)。原子力発電が減少して行く情勢下ではこのような開発も促進する必要がある。

6. 4 まとめ

今後の低炭素エネルギーシステムは需要側の「日々の暮らし」からの徹底した省エネルギーシステムの導入が主になる。

供給側の電源については、低炭素に結びつくはずであった原子力発電がいつまでに、どこまで下げることになるか、再生可能エネルギーをどれだけの速度で導入量を増やしていくかを考えねばならない。

まずは 2020 年の原子力発電量については、現状の稼働している発電量が 13.3GW であり、また停止発電所の再稼働条件の不明確さから産業界は国内での事業発展に不安を持っている。このことを考えて、この値を基準に予測を行う。原子力発電所の寿命が 40 年で再稼働条件を大幅に見直すとしても、電力使用量を省エネルギーにより 20%程度削減可能なことが今夏の経験からもわかったので、この場合は 2020 年に 35.9GW 残り、CO₂ 排出量を増やすことなく、PV も設置可能な量で済みそうである。寿命を 30 年にすると原子力発電所は 19.7GW になり、CO₂ 排出量を増加させないためには PV を 2020 年に 140GW も導入せねばならず、これは PV 生産量からも無理がありそうである。90Mt-CO₂/y の排出量増加を許せば火力発電への切り替えで可能ではある。このような状況下では 2020 年の温室効果ガス削減目標は見直しが必要である。なお、2038 年に原発がすべて停止しても PV 能力が 180 GW あるので (図 6.4)、その分を補うことが可能である。

最後は安全基準をどうするかで原子力発電設備量は決まるが、その際には環境問題、財政問題との整合性も考慮する必要がある。

提言

原発事故の結果を踏まえた上で、エネルギー供給を安定化することは日本全体の経済および市民生活において最も重要な課題であるといえる。検討会においてはエネルギーの安定供給について中長期的な観点から詳細な検討を行った。その結果に基づいて以下の提言を行う。

(1) 原発の安全性の向上

原子力利用は安全であれば、日本にとって重要なエネルギー源であることは言を俟たない。しかしながら、いずれの技術においても安全に絶対ということはありません。これは学術の分野においては既に確立された概念である。今回の福島第一発電所の事故で明らかになったように、一旦事故が起きると制御不能になり、予測不能の甚大な被害を及ぼした点に注目する必要がある。従って、現存する原発を稼働させる際には安全に対する設備、操作基準の整備、保安訓練などに十分な資源（予算、人員）を投入する必要がある。またその対応策には際限はなくまた妥協は許されないことを認識すべきで、その為の組織、制度を十分に検討の上構築すべきである。従来の省庁縦割りを排して研究・技術開発から実用化まで、原子炉から放射線まで、一元化・一貫化された効率的な行政体制の構築が望ましい。特に安全に関しては、原子力分野以外の専門的な知見を活用すべく、有識者による第三者委員会を設けて広く意見を聴くことが必要である。

なお、今回の事故による放射能汚染については環境の回復に取り組むことは当然であるが、使用済み燃料の処理、高レベル廃棄物処理は避けられない課題であることを指摘したい。したがって、核燃料サイクルを含めこれらの研究は今後も続ける必要がある。ただし、ナトリウム冷却高速中性子型増殖炉「もんじゅ」については金属 Na を用いることの安全性の問題も指摘されており、この時点で原子力および核燃料サイクル技術開発の再構築の中で廃止を含め再検討すべきである。なお、日本においてはテロの危険は少ないと思われるが、何らかの要因、手段による原発に対する破壊行為の防止策も重要である。

既存の原発の安全な運転には技術的な支援が必要であり、原子力工学研究は継続して発展することは必要である。また、廃炉や廃棄物処理に関する技術研究も不可欠である。従って、原子力工学に関する技術研究は今回の事故に関わらず重要であり、長期的視野で継続すべきである。同時に、安全に関する学問、安全学の構築も必要である。

(2) 再生可能エネルギーの実用化

再生可能エネルギーは現状ではコストが高く、発電に利用した場合には電気料金の増加は 15～20%といわれている。また、分散型のエネルギー源であり安定性にも問題がある。これらの解決にはスマートグリッドの利用が重要であり、その為には Na-S 蓄電池などの蓄電池のイノベーション、全体を最適化するエネルギーシステム工学の進展が必要で、この分野への研究助成、投資を増強することが是非とも必要と考える。また、風力（地上、洋上）、バイオマスの利用、小規模水力、地熱の利用、太陽電池など実用化できる技術については政策的に利用を図り、段階的な実用化を広めることが望ましい。その為にも、直流超高压送電網の増強を図り、50 Hz と 60Hz に分かれている周波数の統一

も長期的観点から段階的に進めるべきである。将来は再生可能エネルギーが信頼できる安全防護システムを備えた原子力と共にあるいは更に、原子力に変わるべく電気エネルギーの 30%程度の割合を供給できるように中長期的展望の下にエネルギー源のベストミックスによる実用化を進めることが必要である。なお、再生可能エネルギーへの投資は諸外国に比べて極めて少なく、今後速やかに改善することが望ましい。

ベストミックスによるエネルギー源の確保に当っては、エネルギーに対する政策を総合的に考えることが必要である。原子力工学の分野には学術的に高度な蓄積があり、優秀な研究者・技術者も多い。いまや原子力のみならずすべてのエネルギーを統合して最適化を考える総合エネルギーシステム工学が必要であり、このような学問分野の設置、展開を期待する。

(3) 省エネルギーの推進

3月11日の原発事故を契機として原発の安全に対する住民の不安が大きくなって、現在54基ある原発のうち停止しているものの割合が非常に高くなっている。従って、いわゆる電力不足が将来、夏冬の需要期に深刻になるおそれがある。原発の是非については国民的議論が必要であるが、省エネルギーを推進することはエネルギー需給を安定化する為にも、また事故を契機として電力を制限なく消費するということを転換する意味でも必要不可欠なステップである。産業界や一般家庭における節電による需要の削減の他に、電力消費の時間シフトを併用すると効果が更に向上する。また、空間的なシフトは需要の平準化に役立つ。試算によれば省エネルギー対策により東京電力管内で短期的には280万kW、また生産拠点の時間的・空間的シフトをすることにより615万kWの省エネルギーが可能である¹⁴⁾。

(4) 今後のエネルギー供給のシナリオ

原発の寿命は材料の更新などにより60年が可能ということもいわれているが、一般的には40年と考えられている。当面は日本においては原子炉の新設はかなり難しいと考えられ、仮に新設がないとすると2038年には総ての原発が運転を停止する。日本の安定した経済、社会の維持を考えると、その時点よりもかなり前に代替エネルギーを実用化しなければならない。天然ガス資源にはまだ余地があるが、二酸化炭素排出の削減を考慮すると余りこれに頼ることはできない。従って、再生可能エネルギーの実用化を急ぐ必要がある。2020年に原発の寿命40年のものを全て停止するとしても、35.9GWの原子力エネルギーが依然稼働可能であり、不足分は太陽電池を利用するとして設備的に可能である。その場合、太陽エネルギーによる発電コストは約20円/kWh程度と推算される。また、2038年にすべての原発が停止しても、それを再生可能エネルギーのベストミックスでまかなう可能性があると考えられる。

同時に省エネルギーとエネルギー低消費社会の構築が必要である。これらを実践するには新しい分野の科学（自然科学のみならず人文・社会科学を含む）・技術の展開が必要であり、工業的にも新たなイノベーションが必要で新しい業種などの発展も期待できる。加えて、近隣諸国において仮に今回のような原子炉の重大事故が発生すると、その時点で日本に対する社会的影響は計り知れない。新しいエネルギー生産技術を輸出できれば、

日本の安全にとっても望ましいことである。

[付属資料]

(参考1) ストレストテストの概要

1) ストレストテストの歴史

ストレストテストという名称は、2009年に米金融当局（FRB、連邦準備制度理事会）などが、金融機関の大手19社を対象に実施した資産の健全性を調べる検査に「ストレストテスト」という名称を使ったことにより一般的になったとされている。

金融経済でのストレストテストは、今日では、金融市場での不測の事態が生じた場合に備え、金融工学によって開発し流通させている金融商品の、損失の程度や損失の回避策を予めシミュレーションしておくリスク管理手法を言う。しかしながら、過去の金融市場では、10ないし20年に一度の頻度で、ブラックマンデーやアジア通貨危機、リーマンショックなど、通常の市場環境下では不可測の大幅な価格変動が発生している。この現象は、確率論上はロングテール、ファット・テールないしベキ分布の問題として知られ、非線形複雑系の数理モデルにより定性的に再現されている(OECD 文献⁹⁾)。1960年代から物理学では協働現象と二次相転移で、1970年代にはマンデルブローのフラクタル数学、1980年代はサンタフェ研究所での複雑系研究、として基礎論として発展した。

このような数理的な研究成果を参照しつつ、金融市場の複雑系としての特性を把握するために、上記のストレストテストが導入された。具体的には発生確率が低いはずのリスクシナリオを複数用意し、過去の時系列データから異常な環境下の事例を抽出し、その異常値のゆらぎをインプットとして当該シナリオに当てはめ、膨大な数をしらみ潰しに可能性のあるシナリオのシミュレーション計算を行って、当該対象機関のかかわる潜在的なリスク量を計測し不測の事態に備える。なお、市場の企業ではなく、金融当局が行ったストレストテストでは、市場のマクロなパラメータを大きく変動させ、景気が悪化した場合を想定して資本不足額を試算したもので、「金融機関の資産内容の透明性を高める」と共に資本増強を促し、金融システムを安定化させる狙いがあった。現時点では、この手法は理論的にも実践的にも新しい手法であり、経済分野でも標準化されておらず、「ストレスのかけかた」の標準化はこれからの課題とされている。

2) 原子力発電所のストレストテスト

原子力発電所のストレストテストは、2011年3月11日の福島における原子力事故を受けて、3月22～23日にWENRA(西欧州原子力規制協会)が提案し、欧州議会の承認を受けてENSRG(欧州原子力安全規制グループ)が全欧州の実施課題とした¹⁶⁾。ストレストテストの欧州における実施内容は、上記の内在的な複雑性を念頭に置きながら、各発電所でとくに過酷事故発生時の対応シナリオについて計算コードを用いた多くの計算を行って、安全性を評価することになるかと思われその際、PRAがそのベースの作業方法として用いられると考えられる。

なお、ストレストテストの理論的背景となる原子力事故の確率がベキ分布となって日常的に有意な頻度で発生するメカニズムは以下のように考えられる。すなわち事象が進展する過程(タイムライン)のなかに、標準ケースからの小さな逸脱、「ずれ」がエネ

ルギー放出の大きい大規模事象に発展するきっかけ（ティッピング・ポイント、ないしクリフエッジ）が複数（例えば3個以上）存在すること、さらにその起きる状況の数やシナリオの組み合わせの数が、統計的な大数まで発散する特性を内在している。このティッピング・ポイントは具体的には、軽水型原子力発電所特有の事情として、放射性物質の崩壊熱が低下せず一定で継続すること、蒸発で失われた冷却水の補給不足で空焚きになること、炉心と水蒸気との化学反応で生じる水素の爆発や、加熱されたデブリに高温水が接触しての蒸気爆発などがある。

3) ストレステストの実施項目

ENSERGが指定した、ストレステストの実施項目内容は以下の通りである¹⁶⁾。

(1) 設計基準を越えた、地震および洪水を仮定し、さらに個々の発電所固有の考慮すべき外部事象を入力条件とすること。

(2) 安全機能が失われる実条件として、全電源の喪失すなわちプラント全体でのブラックアウトが継続する状態と、ヒートシンクが究極として失われる、すなわち冷却不能になる状態とを設定すること。

(3) 過酷事故が起きたと仮定し、炉心溶融と水素大量発生の結果として生じるシーケンスを追跡すること。

特に、過酷事故発生以後の事象進展について、(1) 自動化された動作実行（アクション、対応動作対策）と、(2) 非常時に人間の介入するオペレーショナルな動作実行と、(3) 発生防止、機能復帰、事故発展の緩和、同時に設備やプラントが被害を受けた時の相互作用などについて、検討が進められると考えられる。

(参考2) 福島第一原発事故初期の概要

平成23年3月11日14時46分、東北地方太平洋岸沖にわが国の観測史上最大のM9の地震が発生し、この地方の原子力発電所14基中運転中の9基は安全に自動停止したが、以下に事故に至った福島第一1・2・3号機（運転中）と4号機（定期検査で停止中）の初期状況について概略を述べる。

福島第一発電所では、2ルート4回線（いずれも6万ボルト）の外部電源が崖崩れなどによる鉄塔倒壊などで失われたが、自動起動した内部電源（非常用ディーゼル発電機）によって「冷やす」機能が起動した。しかし約1時間後、想定高さ5.7メートルを超える14～15メートルの津波の襲来によって標高10メートルの発電所敷地が冠水してディーゼル発電機が停止。電力に頼らない非常用復水器（1号）・隔離時冷却系（2・3号）が起動して暫時炉心を冷却したが冠水によるバッテリー電源喪失などでこれらも順次停止し、低位置の海岸近くにあった最終熱除去用海水ポンプ等の冠水による機能喪失と相俟って「冷やす」機能が失われて、炉内燃料の破損から溶融へと進展し、ジルコニウム・水反応で水素も発生した。また圧力容器・格納容器の内圧上昇を抑えるため開放した非常用ベント弁および水素爆発で失われた原子炉建屋上部（1・3号）および水素爆発によると思われる格納容器一部破損部分（2号）などから放射性物質が大量に周辺環境に放出され、「閉じ込め」機能が失われた。周辺住民への避難指示は比較的早い段階で出されている。なお水素爆発による4号機の原子炉建屋破損は、3号機の水素が3・4号機共用

の排気塔からの4号機への逆流と考えられている。その後、消防用水や海水の注入などによる冷却、ヘリによる使用済み燃料プールへの散水などさまざまな手立てが講じられ、7月中旬に工程表の第一ステップ（炉内温度が100度前後の安定状態）の目標に辿りついた。

引用文献

- 1) 平成 21(2009)年度におけるエネルギー需給実績、資源エネルギー庁 (2011.4.26)
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/jukyu/result-1.htm>
- 2) <http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004657/energy.html>
- 3) エネルギー環境会議配布資料「当面のエネルギー需給安定策—エネルギー構造改革の先行実施」(2011. 7. 29)。
http://www.npu.go.jp/policy/policy09/archive01_02.html#haifu
- 4) 松井賢一：「エネルギー問題！」、NTT 出版 (2010)
- 5) 電気事業者連合会会長会見、2008 年 5 月 8 日
http://www.fepc.or.jp/about_us/pr/kaiken/_icsFiles/afieldfile/2008/08/20/200805.pdf
- 6) 低炭素電力供給システムに関する研究会報告 (資源エネルギー庁) (2009)
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g90727e01j.pdf>
- 7) Hurst, H., "Long Term Storage Capacity of Reservoirs," Transactions of the American Society of Civil Engineers, **116**, 770-799 (1951).
- 8) Benoit B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature", W. H. Freeman and Company, 1977
ベノワ・B・マンデルブロ他、訳、高安英樹他, 「禁断の市場」—フラクタルでみるリスクとリターン—, 東洋経済新報社 (2008)
- 9) OECD 文献: S. Thurner, "Systemic financial risk: agent based models to understand the leverage cycle on national scales and its consequences", OECD/IFP Project on "Future Global Shocks", IFP/WKP/FGS(2011)
- 10) ラスムッセン報告: "Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants" [NUREG-75/014 (WASH-1400)]
(1875 年、MIT 教授 Norman Rasmussen をリーダーとして作成された報告書)
- 11) レブソン教授による PRA 批判。Nancy Leveson: "Safeware: System Safety and Computers", Addison-Wesley, 1995 (ISBN: 0-201-11972-2)。日本語版: セーフウェア 安全・安心なシステムとソフトウェアを目指して (IT Architects' Archive)、ナンシー・G・レブソン (著), 松原 友夫 (監修, 訳), 西 康晴, 青木 美津江, 吉岡 律夫, 片平 真史 (訳)、翔泳社 (2009)
<http://systemsafety.fc2web.com/safeware.htm> および
http://en.wikipedia.org/wiki/Probabilistic_Risk_Assessment#Criticism
- 12) 米国NRCの規制 Regulations 10 CFR, Section 50.54 Condition of licenses, Chapter (hh) Item (2), および、NRC Summary of Observations, Temporary Instruction 2515/183, "Follow-up to the Fukushima Daiichi Fuel Damage Event"
- 13) 日本学術会議東日本震災対策委員会エネルギー政策の選択肢分科会: 提言「日本のエネルギー政策の選択に向けて——電力供給源に係る6つのシナリオ」(2011.6.24)
- 14) シンポジウム「震災に伴う電力不足対策に関する緊急提言」要旨集、pp. 1、化学工学会、2011年4月18日、東京早稲田大学国際会議場 (2011)
- 15) EDMC/エネルギー・経済統計要覧、2011年版、pp.325 (日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット) より、エネルギー需給展望の2020年発電電力量、最大導入ケースの1046 TWhを有効数字3桁に四捨五入して1050 TWhとし、これに自家発電量130 TWhを加えた。

- 16) ENSRG 宣言 : ENSRG (European Nuclear Safety Regulators Group) による欧州議会への 25 March 2011 の回答告知 (Declaration) :
http://ec.europa.eu/energy/nuclear/safety/doc/20110525_eu_stress_tests_specifications.pdf