

EAJ 報告書 2022-03

一般財団法人 新技術振興渡辺記念会
令和3年度（2021年度）下期科学技術調査研究助成

「2050 脱炭素社会構築に向けた持続可能な バイオマスプラントの開発のための調査研究」 成果報告書



令和4年（2022年）12月

公益社団法人日本工学アカデミー
「2050 脱炭素社会構築に向けた持続可能なバイオマスプラントの開
発のための調査研究」プロジェクト
（リーダー：佐伯とも子）

2022 年 11 月 21 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。

「2050 脱炭素社会構築に向けたバイオマスプラントの開発のための調査研究」プロジェクトでは、バイオマス利活用の戦略を構築すべく、日本企業が国内外で運営しているバイオマスプラント及び海外の代表的なバイオマスプラントについて、持続可能な運転を可能にする諸条件を明らかにするための調査研究を実施しました。その結果、2050 脱炭素社会構築に向けてバイオマス利活用として取り組むべき課題と提言を取りまとめました。今般、報告書原案につき、政策提言委員会で査読を受け、理事会での審査を経て、最終版を確定し、日本工学アカデミーとしての発出が理事会で承認されました。世界が脱炭素社会を目指すなか、本提言が広く活用されることを期待します。

本報告は、公益社団法人日本工学アカデミーが一般財団法人新技術振興渡辺記念会の助成を受けて実施した「2050 脱炭素社会構築に向けた持続可能なバイオマスプラントの開発のための調査研究」の結果をとりまとめ公表するものである。

公益社団法人日本工学アカデミー
2050 脱炭素社会構築に向けた持続可能なバイオマスプラントの開発のための調査研究プロジェクト構成員
(所属等は 2022 年 10 月 31 日時点)

リーダー 共同研究者	佐伯とも子*	正会員、東京工業大学名誉教授
	西嶋昭生*	正会員、早稲田大学招聘研究員
	大戸範雄*	武田計測先端知財団専務理事
	佐村秀夫*	正会員、(株)FS コーポレーション代表取締役社長
	坂西欣也*	正会員、産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域長補佐
	神本正行	正会員、弘前大学特別顧問
	野村正勝	正会員、大阪大学名誉教授
	匂坂正幸	産業技術総合研究所名誉研究員
	竹内和彦	元産業技術総合研究所研究員
	村上秀之	正会員、早稲田大学教授
	澤 一誠	日本環境エネルギー開発(株)代表取締役社長
	大竹正之	(株)三菱ケミカルリサーチ
	安永裕幸	正会員、UNIDO 本部マネージング・ダイレクター

*: 運営委員

要 旨

1. 作成の背景

本調査研究は、日本企業が国内外で運営しているバイオマスプラント及び海外のバイオマスプラントについて実地調査し、様々な課題があるにも関わらず社会実装に成功し、持続可能な運転を可能にする諸条件(政策、技術、原料供給体制、立地条件等々)を明らかにすることを目的とする。本調査結果と、2020年11月に日本工学アカデミー サステナブル・バイオマスアジアプロジェクトが公表した政策提言「東アジア諸国と国内産官学のバイオマス利活用社会実装に向けた提言」を基にして、2050 脱炭素社会構築に貢献する持続可能なバイオマスプラント開発についての戦略を構築しその政策提言を示すものである。

2. 調査研究結果

(1) バイオマス発電

2020年度の日本の発電量 10,008 億 kWh の中バイオマス発電量は 361 億 kWh で全発電量の 3.6%(再生可能エネルギーの 20%)を占めている。バイオマス発電は、再生可能エネルギーの中では気象条件に左右されない重要な安定電源である。さらに、そのバイオマス発電量 361 億 kWh の中、バイオマス専焼の 10,000kW 以上の発電所の発電量は 93 億 kWh、10,000kW 未満の小規模発電所の発電量は 98 億 kWh で、バイオマス専焼発電は、自家発電や混焼を含むバイオマス発電全体の 53%を占めている。今回の調査で、以下のような業界の構図が明らかになった。

① 国内立地/国内産原料の発電所

多くが 10,000kW 未満の小規模発電所である。地域の未利用材を活用するため地元の林業関係者や地方自治体が誘致、あるいは主体的に関わって設置したもので、地域の雇用を創出し、林業の value chain の中でプロフィットセンターとして機能している。原料である地域の森林近くに立地しており、燃料供給は安定している。一方、地域の未利用材を利用するため、規模の拡大は困難である。

② 国内立地/海外原料の発電所

対象案件は、10,000kW 以上の大規模発電所であり、港湾立地となっている。燃料の調達量を上げて規模を拡大し、発電効率を上げることが可能であるが、バイオマス燃料の国際市況によっては燃料調達が困難になるという危険性も孕んでいる。

③ 海外立地/海外原料の発電所

未稼働であるが、燃料供給先のパーム油工場に隣接しており、安定な原料供給を期待できることが強みである。

④ 安定稼働の条件

いずれの国内バイオマス発電所も安定した燃料供給と固定価格買取制度(FIT)を使って売電することが安定経営の条件になっている。FIT が終了すると経営は困難になる。

(2) バイオリファイナリー

バイオリファイナリーは、再生可能な原料からマテリアルを製造するものであり、循環型経済にとってキーとなる存在になりつつある。バイオリファイナリーの生産物についての背景は、次のとおりである。

① バイオマス燃料

世界の一次エネルギー消費量は石油換算で約 139 億トン、その中、ジェット燃料の使用量は 3.3 億トンであり、航空機のバイオジェット燃料(SAF)使用が急務となっている。国際民間航空機関は、現在は努力目標になっている SAF の

使用を 2027 年には義務化することを決めており、SAF を持たない航空会社は国際線を飛ばせない時代が来ると予測される。

② バイオプラスチック

世界が EV 化に向かう中、脱化石資源の動きが急である。総合化学企業は、バイオナフサの使用や回収プラスチックからの再生ナフサ使用を軸とした循環型経済に舵を切りつつある。

そこで、今後の社会の課題は、SAF やバイオプラスチックの原料となるバイオマスの安定供給である。バイオリファイナリーは、この課題に対応するものとして期待される。

③ バイオリファイナリーの持続可能性

フランスとタイのバイオリファイナリー2 件は、生産地に立地し、地元の一つ又は複数のバイオマス原料を用いて複数の製品を製造する複合型バイオリファイナリーである。バイオリファイナリーでは複数の製品、さらに、新しい製品の開発が必要となる。製品ファミリーを増やすことで事業規模が拡大し、新製品の投入でリファイナリー全体の持続可能性が高まる。

3. 2050 脱炭素社会構築に向けた戦略

- (1) バイオマス発電は、気象条件に左右されない安定した電源として一定の発電規模を維持・拡大する。国内立地/国内原料のバイオマス発電所はバイオマスの国際市況に左右されない安定した電源であり、発電効率向上、林業の value chain のコスト負担の見直し等による自主努力で FIT に頼らない安定稼働を目指す。海外原料を利用する大規模バイオマス発電所は、一次エネルギーにおける再生可能エネルギー率拡大を担うものである。一方、国際市況により燃料調達が困難になる恐れがあり、規模拡大・技術改良による発電効率向上を図るとともに、国際協力による燃料の安定調達を目指す。
- (2) バイオリファイナリーとバイオマス発電所の協業によるバイオクラスターを形成する。バイオクラスターは、バイオマス燃料・バイオプラスチックなどコモディティ製品製造による循環型経済構築を通じた脱炭素化を目指す。
- (3) 現在の土地利用態様を大幅に変えずに大量生産可能なバイオマス原料を栽培・生産する。

4. 政策提言

上記 3. の戦略を達成するために以下の諸施策を提言する。

(1) 短期的施策

①バイオマス発電効率向上、②燃料コスト低下、③新規燃料開発、④既存設備改良に対する政策支援、⑤バイオマスのトレーサビリティ推進

(2) 中長期的施策

①高効率なバイオマス発電技術開発、②バイオマス発電とバイオリファイナリーの協業、③特区指定によるバイオクラスター形成、④バイオマス製品へのインセンティブ付与

(3) 国際協力に関する施策

①安定供給可能なバイオマス原料開発、②サステイナブル・パームプランテーションの推進

Research on the Sustainable Development of Biomass Plants toward the
Construction of the Carbon-Neutral Society
in 2050

This is a report on “Research on the Sustainable Development of Biomass Plants toward the construction of Carbon-Neutral Society in 2050”, which the Engineering Academy of Japan conducted with funding from the Watanabe Memorial Foundation for the Advancement of New Technology in Japan.

RESEARCHERS

Project leader: Tomoko Saiki, EAJ, Tokyo Institute of Technology

Co-researchers: Akio Nishijima, EAJ, Waseda University
Norio Ohto, The Takeda Foundation
Hideo Samura, EAJ, FS Corporation
Kinya Sakanishi, EAJ, National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology (AIST)
Masayuki Kamimoto, EAJ, Hirosaki University
Masakatsu Nomura, EAJ, Osaka University
Masayuki Sagisaka, AIST
Kazuhiko Takeuchi, AIST
Hideyuki Murakami, EAJ, Waseda University
Issey Sawa, Nippon Environmental Energy Development Co., Ltd.,
Masayuki Otake, Mitsubishi Chemical Research
Yuko Yasunaga, EAJ, UNIDO

(Positions and institutions are as of 31st of October, 2022)

Summary

1. Background

This research was conducted to clarify the conditions and environments of current biomass plants that support sustainable operation, and to propose policies toward the construction of the Carbon-Neutral Society in 2050. The research focused on several successfully operating biomass plants that differ in location and raw material supply (domestic site/domestic raw materials, domestic site/imported raw materials, foreign site/foreign raw materials). Based on the results of this research and the former Policy proposal made in 2020, we have compiled strategies and policy proposals as follows.

2. Results

(1) Biomass power plants

Biomass power plants generate 36 TWh, 3.6 % of all electricity generated (1000TWh) in Japan, and about 20% of all renewable energy including hydro, solar, wind, and others. Small scale biomass power plants (under 10,000kW) generate 9.8 TWh, 27% of all biomass power electricity including biomass co-firing and in-house power generation, while mid to large scale biomass power plants (over 10,000kW) generate 9.3 TWh, 26% of all biomass power electricity in Japan. Biomass power plants provide a stable electricity supply regardless of weather conditions. The research revealed the following features.

① Domestic power plants with domestic fuel

Biomass power plants of this type are mostly small scale, and constructed through local initiatives to use unused local woods. They provide not only electricity but also employment to the local community, and act as a profit center in the local forestry value chain. They are located near local forests, and use local biomass fuels, which guarantee a stable supply of fuel for the power plants but at the same time limiting their expansion.

② Domestic power plants with imported fuel

Biomass plants of this type are mid to large scale (over 10,000kW), and located next to harbors. They can expand in scale and improve efficiency in generating electricity by importing more biomass fuel, but at the same time may face difficulty in importing sufficient amounts of biomass when world biomass market conditions get tighter.

③ Foreign biomass plants with foreign biomass fuels

The plant of this type that we selected is not operating yet, but would seem to have the advantage of a stable supply of biomass fuel since it is located next to a palm processing factory, and can use palm byproducts as fuel.

④ Conditions for stable operation

Conditions for the stable operation for all domestic biomass power plants include a stable fuel supply and stable sales of the generated electricity based on Feed-in Tariff (FIT). Stable operation will be difficult when FIT ends.

(2) Biorefineries

Biorefineries produce commodity goods from renewable raw materials including biomass and recycled plastics, and are becoming a key tool for a circular economy. The research reveals the following trends in circular economy.

① Biofuels

The world consumption of aviation fuels is 330 Mt, 2.4 % of the world primary energy consumption, and it is becoming an urgent matter for airline companies to replace fossil fuels with sustainable aviation fuels (SAF) derived from renewable materials such as biomass. Currently, the International Civil Aviation Organization (ICAO) recommends the use of SAF by international airlines, but Members of the ICAO have reached an agreement by which all international airlines should use SAF by 2027. On and after 2027, airlines can not use international airports if they don't use SAF.

② Bioplastics

Society is quickly moving toward the use of electric vehicles (EV), and it is expected that naphtha production will be significantly slowed down in the future since EV do not use oil. All chemical companies are trying to deal with this trend by using bio-naphtha or recycled naphtha from recycled plastics. Manufacturing commodity goods requires the stable supply of huge amounts of starting materials, which means that huge amounts of bio-naphtha will be necessary. Biorefineries are expected to play a key role in fulfilling this requirement by producing bio-naphtha from biomass.

③ Sustainability of biorefineries

The French biorefinery and Thai biorefinery are integrated types located on farming sites and sustainably manufacture multiple products from single or multiple starting materials. Integrated biorefineries seem sustainable by not depending on a sole product. They can develop new products, and the expansion of product families contribute to sustainable operation.

3. Strategies for the construction of the Carbon-Neutral Society in 2050

(1) Biomass power plants

Biomass power plants provide stable electricity regardless of weather conditions. They should be maintained or expanded as a stable source of electricity in the course of constructing the Carbon-Neutral Society in 2050. Domestic power plants using domestic raw material supply are environmentally friendly and can act as a profit center in the value chain of the forestry economy. Domestic power plants with imported raw materials can contribute to the expansion of the renewable energy supply. They should improve their power generation efficiency through capacity expansion and technological progress, and maintain sustainable operation through international cooperation with biomass supplying countries.

(2) Bio-clusters

Biorefineries convert renewable materials (biomass and recycled plastics) into commodity goods such as biofuels and bioplastics, and are expected to play a major role in the circular economy. Integrated biorefineries, bio-clusters, represent a sustainable form of biomass refinery. Biomass power plants should be integrated with bio-clusters to maintain a sustainable power supply.

(3) Development of new biomass starting materials

The Carbon-Neutral Society will use huge amounts of renewable commodity goods such as biofuels and bioplastics to replace commodity goods derived from fossil resources. The development of new biomass starting materials is necessary without changing current land use.

4. POLICY PROPOSALS

We propose the following policies to promote the Carbon-Neutral Society in 2050.

- (1) Short term policies include improvement of power generation efficiency, lowering biomass fuel costs, use of agricultural biproducts for biofuels, funding the improvement of existing facilities, and promoting traceability of biomass operation.
- (2) Mid to long term policies include the development of high efficiency power generation technologies, cooperation between biomass power plants and integrated biorefineries, designation of certain districts for bio-cluster formation, and granting incentives to biomass products.
- (3) International cooperation includes the development of new biomass starting materials without changing current land use, and the promotion of sustainable palm plantations by helping palm plantations solve local environmental problems.

目次

I	調査研究の背景と目的	1
II	調査研究方法	2
III	調査結果	3
III-1	バイオマス発電	3
III-1-1	各バイオマス発電所の訪問調査	6
①	真庭バイオマス発電所	6
②	宮の郷バイオマス発電所	6
③	だいがバイオマス発電所	7
④	上野村バイオマス発電所	8
⑤	鹿児島七ツ島バイオマス発電所	8
⑥	アチェ・バイオマス発電所	9
III-1-2	質問事項への回答結果	10
III-1-3	調査結果と考察	13
III-1-4	2050 脱炭素社会構築に向けたバイオマス発電に関する戦略案	15
III-2	バイオリファイナリー	20
III-2-1	各バイオリファイナリーの訪問調査	20
⑦	Green Earth Institute 株式会社	20
⑧	Neste Singapore Refinery	21
⑨	三井化学株式会社 大阪工場	23
⑩	積水バイオリファイナリー	25
⑪	Bazancourt Pomacle Bio-cluster	26
⑫	タイ・バイオリファイナリー	28
III-2-2	調査結果と考察	30
III-2-3	バイオリファイナリー戦略案	31
IV	2050 脱炭素社会構築に向けたバイオマスプラント戦略案	31
V	助成先からのコメントに関する回答	33
VI	提言	36
VI-1	短期的施策	37
VI-2	中長期的施策	39
VI-3	国際協力に関する施策	40

参考資料 会議開催記録

添付資料 西嶋昭生、佐村秀夫、坂西欣也、竹内和彦、「真庭バイオマス発電所 調査報告書」、2022 年 6 月 10 日（訪問日 2021 年 12 月 16-17 日）

I 調査研究の背景と目的

日本政府は 2050 年脱炭素社会構築を目標とした「2050 年カーボンニュートラルとグリーン成長戦略」を制定し、再生可能エネルギーの導入、高炉や火力発電所のような CO₂ 発生源でのカーボンキャプチャリング、補足した CO₂ の地下貯蔵 (Carbon Capture and Storage, CCS) 及びその利用 (Carbon Dioxide Capture, Utilization, and Storage, CCUS) など、様々な取り組みを行ってきた。再生可能エネルギーの導入では太陽光や洋上風力発電への期待が高まっているが、これらの再生可能エネルギーは日照時間や気象条件に依存することが大きい。今後、一般電源における再生可能エネルギーの割合が高くなればなるほど、気象条件に左右されない安定した電源の確保が重要になる。バイオマス発電は、カーボンニュートラルな原料であるバイオマスを使用し、気象条件に左右されない安定した電源の一つであり、脱炭素社会構築に向けて導入を拡大していく必要がある。

一方、脱炭素社会を構築するにはエネルギーを再生可能なものにするだけでは十分ではない。化石資源由来の日用品を使う限り、化石資源→日用品(プラスチック製品)→廃棄物→CO₂ の一方通行を断ち切ることができないからである。今後は、化石資源ではなくカーボンニュートラルなバイオマスを出発原料とする製品ファミリーを構築することが求められている。

地球温暖化のような地球環境課題は一国の努力で達成できるものではない。日本政府は、長年、地球規模課題国際科学技術協力 (SATREPS) や東アジア・サイエンス・イノベーションエリア共同研究プログラム (e-ASIA JRP) といった国際プログラムで環境やエネルギーに関するアジアと日本のアカデミアによる国際共同研究を支援してきたが、産業界の参画も十分でなく社会実装まで至ったものは少ない。また、経済産業省、環境省による二国間クレジット制度 (JCM 制度ⁱ) も行われているが、脱炭素社会構築に向けて更なる努力が求められている。

本研究者らは 2017 年から 2019 年にかけて、日本工学アカデミー サステイナブルバイオマスアジアプロジェクトとして、産学官メンバーによる日本と東南アジアとのバイオマス共同開発についての調査を行い、2020 年 11 月に国際産学官連携に向けた政策提言を行った。

本調査研究では、日本企業が国内外で運営しているバイオマスプラント及び海外の代表的なバイオマスプラントについて実地調査し、様々な課題があるにも関わらず社会

i JCM 制度とは、日本の低炭素技術を用いてパートナー国の低炭素社会構築に寄与しようというもので、パートナー国における CO₂ 削減分を日本の削減目標達成に活用できる。環境省と経済産業省の JCM プロジェクトに選定されると設備建設費の半分以上の補助金を受けることができる。また、設備投資以外にもアジア開発銀行や国際協力銀行から融資を受けることができる。

実装に成功し、持続可能な運転を可能にしている諸条件(政策、技術、原料供給体制、立地条件等々)を明らかにして、2050脱炭素社会構築に向けた持続可能なバイオマスプラントを開発するための政策提言を行う。

Ⅱ 調査研究方法

調査対象プラントの選定と調査方法

バイオマス発電では、表1に示すように、発電規模や立地・原料供給条件の異なる(国内立地/国内原料、国内立地/輸入原料、海外立地/海外原料)バイオマス発電所を6箇所選定した。

表1 調査対象としたバイオマス発電所

番号	名称	所在地	原料
①	真庭バイオマス発電所(真庭と略記することあり)	岡山県真庭市目木1-1	国内産木材
②	宮の郷バイオマス発電所(同じく宮の郷)	茨城県常陸大宮市宮の郷473-41	国内産木材
③	だいがバイオマス発電所(同じくだいが)	茨城県久慈郡大子町北田気1235-2	国内産木材
④	上野村バイオマス発電所(同じく上野村)	群馬県多野郡上野村大字川和899番地	国内産木材
⑤	鹿児島七ツ島バイオマス発電所(同じく七ツ島)	鹿児島県鹿児島市東千石町1番38号	主として輸入ヤシ殻(PKS)
⑥	アチェ・バイオマス発電所(同じくアチェ)	インドネシア・スマトラ島アチェ州	現地パームヤシ空果房(EFB)

なお、⑥のアチェ・バイオマス発電所は、新型コロナのパンデミックによりインドネシア訪問が困難だったため、当該発電所を運営しているAURA GREEN TECHNOLOGY社の東京事務所を訪問して当該発電所について取材した。

バイオリファイナリーでは、表2に示すような国内3箇所、海外3箇所(シンガポール、タイ、フランス)を選定した。

表2 調査対象としたバイオリファイナリー

No	名称	所在地	製品
⑦	Green Earth Institute 株式会社	千葉県木更津市	バイオジェット燃料
⑧	Neste Singapore Refinery	シンガポール 637301	バイオナフサ、バイオジェット燃料
⑨	三井化学株式会社 大阪工場	大阪府高石市	バイオプラスチック製品
⑩	積水バイオリファイナリー	岩手県久慈市	バイオエタノール
⑪	Bazancourt Pomacle Biorefinery	シャンパーニュ、フランス	エタノール、コハク酸、化粧品原料等
⑫	タイ・バイオリファイナリー	バンコク、タイ	バイオ燃料

なお、⑧の Neste Singapore Refinery は、訪問を交渉したが、Neste 側の下承が得られず、文献による調査を行った。⑧のバイオナフサを輸入してバイオプラスチックを製造している⑨の三井化学大阪工場は、新型コロナ感染予防のため部外者の立ち入りを禁止していることから、本社担当者のオンラインインタビューで取材を行った。また、⑫のタイ・バイオリファイナリーも、現地調査の下承が得られなかったため、タイ政府関係者に面談すると共に文献調査を行った。

選定したバイオマスプラントを訪問する際、訪問先に下記の質問事項を事前に送り、訪問時に回答を得るようにした。また、訪問できなかったプラントについては、上記のようにそれぞれオンラインインタビュー、運営企業事務所での取材、文献調査を実施した。

表 3 プラント関係者への質問事項

技術関係	プラント新設の主な目的は何でしょうか。例えば、実証試験、地域へのエネルギー・製品提供、温室効果ガス削減等。
	本プラントを持続可能にするためのカギとなる技術開発は何だったのでしょうか。例えば、触媒の性能アップ、スケールアップによるコストダウン、残渣処理等。
原料関係	原料供給は持続可能でしょうか。
	原料の集積・輸送上の工夫とは何でしょうか
営業関係	製品の安定的な販売先はどこでしょうか。
	プラントとしての収益性はいかがでしょうか。
地域社会	新設のプラントが地域社会に受け入れられるには、どのような方策を取られたのでしょうか。
法的措置	プラントを運営する上で利用している法的措置(例えば FIT、JCM)は何でしょうか。
将来性	バイオマス利用の事業を更に拡大するには何が必要でしょうか。 バイオマス利用の事業を将来的に阻害するような要因があるとすれば、それは何でしょうか。

Ⅲ 調査結果

Ⅲ-1 バイオマス発電

国内材料を用いるバイオマス発電では、まず、森林で木材が伐採され、集積所に陸送される。集積所に集まった木材は、チップ製造工場に送られ、木質チップが製造される。バイオマス発電所では、チップ製造工場から送られてきた木質チップを燃焼して水蒸気を発生させ、蒸気タービンを回して発電する。発電された電気は、送電線を通して配電会社に送られるか、自家消費に回される。また、海外からの輸入燃料を用いるバイオマス発電所は、船荷を最短距離でバイオマス発電所に運ぶため港湾立地になっている。

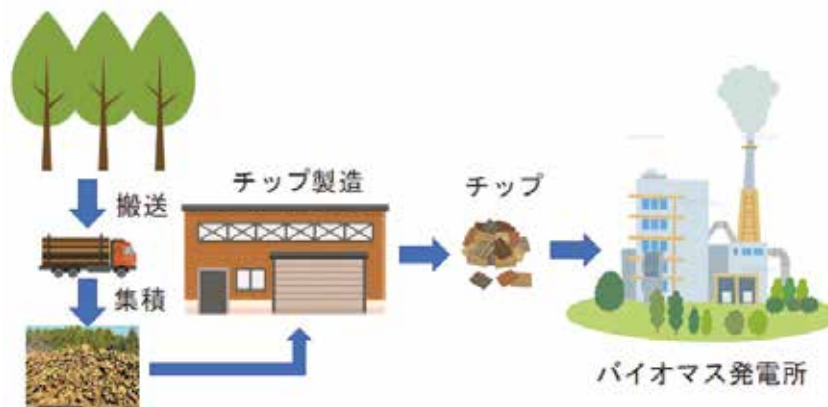


図1 森林からバイオマス発電所まで

バイオマス発電の燃焼方式として代表的なものにストーカ方式と流動層方式がある。流動層方式のボイラーの図を下に示す（図2）。この流動層方式燃焼炉は、宮の郷バイオマス発電所で使用されているもので、炉上で、燃料媒体（けい砂）と燃料を高熱の空気で流動化させ、燃焼させて水蒸気を発生させるものである。発生した水蒸気でタービンを回し、発電する。

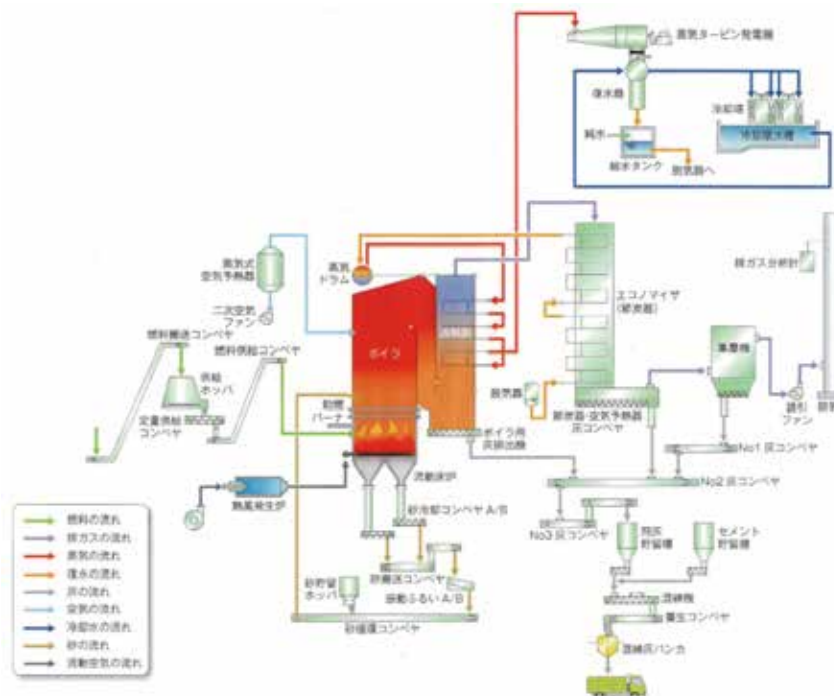


図2 流動層式燃焼炉

もう一つの方式はストーカ方式と呼ばれるもので、燃料を火格子(ストーカ)上で燃焼させるものである。下の図はだいがバイオマス発電所で使用されているストーカ方式燃焼炉である。

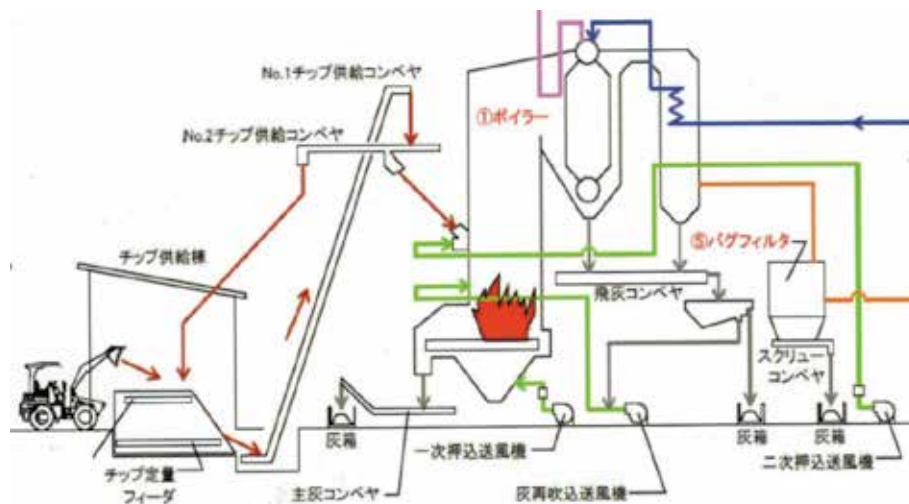


図3 ストーカ方式燃焼炉

これら燃焼炉は、石炭火力発電等で確立されたものをバイオマス発電用に転用したものであるが、バイオマス燃料は石炭と比べて水分含量が高く、燃料にあった微調整が必要である。例えば、鹿児島七ツ島バイオマス発電所では燃料の塩分のために配管が腐食しやすいので、配管材料の選択には注意している。また、アチェ・バイオマス発電所では燃料がアルカリ金属を含むため、クリンカ（灰分が凝固したもの）が発生しやすいので、対策を講じている。

小規模の発電では、ガス化発電が行われる。下の図は上野村で使用されているガス化発電装置である。木質ペレットを熱で分解し可燃性のガス(CO、H₂、CH₄等)を発生させる。ガスを燃料としてエンジンを駆動させるので、燃焼効率が高いが、設備費、燃料代が高くなる。

ガス化プロセス

- 還元ゾーン 850-1100℃
燃焼したガス成分の還元反応が行われる
 $C + CO_2 \Rightarrow 2CO$ $C + H_2O \Rightarrow H_2 + CO$
 $CO \Rightarrow$ 可燃性ガス(CH₄...etc.)
- 酸化ゾーン 700-1200℃
ガス生成のための化学反応を維持するための熱源としての部分燃焼が行われる
- 熱分解ゾーン 350-650℃
熱分解: 燃料は気体・液体・固体に分解される(CO, H₂, H₂O, CO₂)
- 乾燥ゾーン 25-275℃
燃料に含まれる水分が蒸発する



図4 ガス化発電装置

Ⅲ-1-1 各バイオマス発電所の訪問調査

国内材料を用いるバイオマス発電所は、上記のような発電装置やプロセスで発電を行っているが、各バイオマス発電所の詳細および、木材の伐採から発電までのプロセスでどのような努力や工夫を行って持続可能な運転を行っているか調べた結果を以下に示す。

① 真庭バイオマス発電所¹⁾

表 4 真庭バイオマス発電所概要

事業者	真庭バイオマス発電株式会社(平成 25 年 2 月設立)
資本金	2 億 5 千万円(出資者：真庭市 (3 千万円)、銘建工業、真庭森林組合、真庭木材事業協同組合、岡山県森林組合連合会、岡山県北部素材生産協同組合など地域内林業・木材関係団体など)
ボイラー	ストーカ方式ボイラー
発電規模	10,000 kW (22,000 世帯分の需要に相当, 真庭市約 18,000 世帯)
年間発電量	約 82,400 MWh
燃料供給	木質バイオマス 11.7 万トン(未利用木材：一般材＝6：4) 燃料費 14.7 億円
売電	固定価格買取制度(認定 2013 年 8 月)を用いて間伐材 32 円/kW、一般材 24 円/kWh で新電力に売電
売上高	約 22.3 億円
送電設備	約 2 km 先の中国電力の送電網に接続するため鉄塔などの送電設備を 2 億円で整備
雇用創出	50 人以上(ガイド 3 人、集積基地 17 人、発電所 15 人、発電事業にかかる関連事業 15 人)を雇用

- ・ 燃料の安定供給上の工夫：地元の素材業者、製材業者、チップ業者等が「木質資源安定供給協議会」を設け、操業に必要なかつ十分な木材を確保している。また、多様な木材が集積基地に搬入されるため、QR コードシステムを用いて木材の生産者と材質(未利用材、一般材の区別)を記録して燃料管理を行っている。このシステムにより、固定価格買取制度(FIT)発電コストが明確になり、電力業者の信用を得、また生産者へ正当な補償を返すことができるようになった。
- ・ バイオマス発電所新設の背景：真庭市の人口は約 1995 年の 5.7 万人から 2021 年の 4.4 万人へと単調に減少しており、このまま推移すると 2040 年には 3 万人以下にまで低下すると予想されていた。そこで、真庭市の強みである林業の活用による木質バイオマス資源活用産業クラスター構想を策定し、地域を活性化することとした。バイオマス発電所の新設はこの構想の一環である。

② 宮の郷バイオマス発電所²⁾

表 5 宮の郷バイオマス発電所概要

事業者	日立造船株式会社
資本金	454 億円
ボイラー	流動層方式/水冷
発電規模	5750kW(後背地の常陸大宮市は 15,600 世帯)

年間発電量	36,000MWh
燃料	木質バイオマス
売電	FIT を利用して 32 円/kWh で売電している
売上高	11 億円
燃料	未利用材 63,000 トン
送電設備	自前で、近くの東京電力の送電線まで配線
雇用創出	発電所だけで 17 名

- ・ 燃料の安定供給上の工夫：地元の林業関係者より結成された「宮の郷バイオマス有限責任事業組合」が国有林の計画伐採による未利用材を利用してチップを製造している。貯木場と木質チップ製造工場は、バイオマス発電所に隣接しており、製造された木質チップはベルトコンベアで発電所に運ばれる。
- ・ バイオマス発電所新設の背景：国有林から計画伐採される未利用材を利用するため地元林業関係団体が誘致活動を行ったこと、日立造船（株）としても従来から培ったゴミ焼却施設建設ノウハウを活用したいという希望があったことから、バイオマス発電所新設となった。また、常陸大宮市の茨城発電所を運営しているという関係もあった。

③ だいがバイオマス発電所²⁾

表 6 だいがバイオマス発電所概要

事業者	株式会社クリハラント
資本金	9 億 8 千万円
ボイラー型	ストーカ方式/空冷
発電規模	1990kW(後背地の太子町は 6200 世帯)
年間発電量	13,460MWh(一般家庭 3,730 世帯分)
利用燃料	木質バイオマス
売電	FIT を利用して 40 円/kWh で売電
売上高	5.4 億円
燃料	未利用材 27,000 トン
送電設備	自前で、近くの東京電力の送電線まで配線
雇用創出	発電所だけで 10 名

- ・ 燃料の安定供給上の工夫：地元の林業関係者によって結成された「一般社団法人だいが再生可能エネルギー協議会」が国有林の計画伐採による利用材を利用してチップを製造している。貯木場からトラックで木材をチップ製造工場に運び、製造した木質チップは、隣接したバイオマス発電所にベルトコンベアで運ばれる。
- ・ バイオマス発電所新設の背景：事業主体の（株）クリハラントの社長と現地の土地所有者が友人関係にあり、地元の誘致活動の結果、新設された。発電所の土地は現地の土地所有者から賃貸している。

④ 上野村バイオマス発電所³⁾

表 7 上野村バイオマス発電所概要

事業者	上野村
発電装置	ペレットを高温でガス化し、発生させたガスに少量(3ℓ/h)の軽油を混合した混合気でディーゼルエンジンを動かし、発電機を回して発電
発電規模	180kW(きのこセンターへの熱電供給設備)
年間発電量	70～80 万 kWh
利用燃料	木質ペレット
売電	きのこセンターへ 14 円/kWh で電気を供給している
売上高	約 1,000 万円の赤字
送電設備	きのこセンターへ送電
雇用創出	発電所だけでは 1 名

- ・ バイオマス発電所新設の背景：上野村ペレット燃料製造工場で生産したペレットを使い切るため発電施設を設置した。きのこセンターには 14 円/kWh で電気を供給している。また、発電で出る熱から吸収式冷凍機を使用して冷水を製造し、センターに送って冷房に使用している。菌床から熱がでるので冷房中心である。上野村では、上野村森林組合に 41 名、上野村ペレット燃料製造工場に 4 名、上野村きのこセンターに 40 名が雇用されている。発電所は約 1,000 万円の赤字がでるが、村内循環システム構築のための経費として考えている。ペレットの事業は収支がほぼ同じである。

⑤ 鹿児島七ツ島バイオマス発電所⁴⁾

表 8 鹿児島七ツ島バイオマス発電所概要

事業者	七ツ島バイオマスパワー合同会社(出資者：IHI、東京センチュリー、九電工、鹿児島海陸運送、島津興行、南国殖産など)
資本金	5 億円
ボイラー	循環流動層方式ボイラー
発電規模	49,000kW
年間発電量	337,000 MWh (一般家庭約 77,000 世帯分)
燃料	パームヤシ殻 20 万トン(80%) 木質ペレット 3.6 万トン(15%) 木質チップ 1.2 万トン(5%) 燃料費 32 億円
売電	九州電力へ売電
売上高	75 億円
雇用創出	七ツ島バイオマスパワー合同会社本体：4 人 委託事業：42 人

- ・ 燃料の安定供給上の工夫：プライベート桟橋を有しており、いつでも積荷を発電所まで運ぶことができる。バイオマス発電プラントの規模は燃料バイオマスの収集可能量に依存しており、条件が合えばスケールアップも可能である。パームヤシ殻

(PKS) はマレーシアとインドネシア、木質ペレットはベトナムから輸入しているが、今後、海外資源の枯渇や価格の高騰の可能性がある。間伐材は、地元の島津興業および鹿児島県森林組合を通じて、県内全域から調達している。

- ・ バイオマス発電所新設の背景：造船所跡地の活用や再生可能エネルギーへの取り組みにおいては鹿児島県からの要請があった。最初は、PKS だけの操業を予定していたが、県からの要請があり、県産の間伐材も使用している。
- ・ 持続可能な運転上の工夫：石炭火力発電の流動層方式ボイラーを転用して使っているが、バイオマス燃料は塩素分を含んでいるため石炭に比べてボイラー配管材の減肉が早い。また、流動層に用いる硅砂が凝集し、内部を浸食しやすく、改善が必要である。このような課題を解決するため技術開発が必要であると思っている。バイオマスの燃焼で生じる灰分は回収して路盤材として販売できており、産廃処理費用の削減に貢献している。

⑥ アチェ・バイオマス発電所(東京事務所での聞き取り調査)⁵⁾

表 9 アチェ・バイオマス発電所概要

事業者	AURA GREEN ENERGY アチェ・バイオマス発電所の事業では、インドネシア側と合弁会社 (SPC、アウラ社は 30%出資) を設立
資本金	4500 万円
発電規模	12MW
利用燃料	パームヤシ空果房 (EFB) : 10 万トン/年 パーム繊維 : 2 万トン/年 パームヤシ殻 : 2 万トン/年
売電	インドネシアの配電会社の PLN に Rp. 975/kWh で売電する
雇用創出	15 名程度の従業員を雇用する計画、一次的な募集は終わっている

- ・ 燃料の安定供給上の工夫：インドネシア国営のパーム農園・工場と連携しており、同工場から廃棄されているパームヤシ空果房 (EFB) を燃料とする。パーム油工場からベルトコンベヤで EFB 等が送られてくるものを炉に投入する。EFB は工場では処分費をかけて廃棄しており、パーム油工場では EFB の廃棄証明の提出が政府から求められている。パーム油価格の高騰により、生産が増進され、EFB の発生も増加が予想されることから、この燃料供給は持続性があると考えられる。
- ・ バイオマス発電所新設の背景：JCM 事業として実施している。本発電による温室効果ガス (GHG) 削減量は 31,332 トン/年で、これが日本の GHG 削減量に加算される。
- ・ 持続可能な運転のための工夫：EFB の燃焼では炉内にクリンカが発生する。燃焼炉は EFB 燃焼の際のクリンカ対策に実績のあるドイツ企業の技術 (中国製) を採用している。炉内温度 (一次燃焼部) は 770℃を超えないよう空気調整を行い、クリンカの形成を防止する。

Ⅲ-1-2 質問事項への回答結果

(a) プラント新設の目的

表 10 質問事項への回答：プラント新設の理由

	真庭	宮の郷	だいご	上野村	七ツ島	アチェ
発電規模 (kW)	10,000	5,750	1,990	180	49,000	12,000
立地/原料	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/輸入	海外/海外
回答	地域経済 効果、雇 用促進果	地元から の誘致	地元から の誘致	林業活性 化、雇用 創出	地域貢献 林業活性 化	JCM 実証 試験

- ・国内立地のバイオマス発電所の新設目的は発電規模によらず、主として林業活性化、雇用創出による地域貢献であり、地元からの誘致活動の結果できたものである。主として輸入原料を使用している七ツ島も鹿児島県の実証試験もあり、林業振興を考慮して少量ではあるが、間伐材を使用している。

(b) 持続可能のカギとなった技術開発

表 11 質問事項への回答：カギとなった技術開発

	真庭	宮の郷	だいご	上野村	七ツ島	アチェ
発電規模 (kW)	10,000	5,750	1,990	180	49,000	12,000
燃焼方式	ストーカ	流動層	ストーカ	ガス化	流動層	流動層
燃料	未利用材	未利用材	未利用材	未利用材	PKS	EFB/PKS
回答	燃料の安定 供給の仕 組み	特になし	特になし	村内循環 システム 構築	耐久性の 高い配管 材料開発	燃焼炉の クリンカ 発生対策

- ・ストーカ方式も流動層方式も石炭火力発電分野において技術的には完成したものではあるが、燃料の品質によって高効率の発電ができないのが現状で、各プラントもそれぞれのバイオマス燃料に特化した対策を講じている。例えば、PKS は塩分濃度が高く、配管が腐食しやすい。七ツ島では、配管材料の選定に留意している。また、EFB はカリウム濃度が高く、クリンカが発生しやすい。アチェでは、クリンカ発生対策を講じている。

(c) 原料供給の持続可能性

表 12 質問事項への回答：原料供給の持続可能性

	真庭	宮の郷	だいご	上野村	七ツ島	アチェ
立地/原料	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/輸入	海外/海外
発電規模 (kW)	10,000	5,750	1,990	180	49,000	12,000
燃料	未利用材	未利用材	未利用材	未利用材	PKS	EFB/PKS
燃料重量	11.7	6.3	2.7	n. a.	24.8	14.7

(万 t)						
回答	持続可能にするためのシステム構築	国有林の未利用材を利用	国有林の未利用材を利用	材木入荷継続の必要	資源の枯渇、価格高騰の可能性	廃棄物を原料として使用、持続可能

- ・ 国内原料を使用している発電所は、設定された規模の発電を確保するための原料は確保されている。輸入原料を使用しているプラントは、海外における原料供給がリスク要因の一つになっている。

(d) 原料集積・輸送上の工夫

表 13 質問事項への回答：原料集積・輸送上の工夫

	真庭	宮の郷	だいご	上野村	七ツ島	アチェ
立地/原料	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/輸入	海外/海外
発電規模 (kW)	10,000	5,750	1,990	180	49,000	12,000
燃料	未利用材	未利用材	未利用材	未利用材	PKS	EFB/PKS
燃料重量 (万 t)	11.7	6.3	2.7	n. a.	24.8	14.7
回答	集積・輸送システムの構築、集中管理	木材チップ工場からの輸送距離が最短	木材チップ工場からの輸送距離が最短	原料の場所に近接	原料価格動向注視、専用栈橋の所有	原料を供給するパーム油工場に隣接している

- ・ バイオマスは広く浅く存在しているので、それを集積・運搬するのにコストがかかる。いずれのバイオマス発電所でも、原料へのアクセスが最短になるよう工夫している。

(e) 製品の安定的な販売先

表 14 質問事項への回答：製品の安定的な販売先

	真庭	宮の郷	だいご	上野村	七ツ島	アチェ
立地/原料	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/輸入	海外/海外
発電規模 (kW)	10,000	5,750	1,990	180	49,000	12,000
年間発電量 (MWh)	82,400	36,000	13,460	700~800	337,000	
後背地世帯数	18,000	30,000	6,200	552	270,000	n. a.
回答	配電会社へ売電	配電会社へ売電	配電会社へ売電	きのこセンター	配電会社へ売電	配電会社へ売電予定

- ・ 上野村のバイオマス発電所は利益目的ではなく、上野村きのこセンターへの熱電供

給施設として機能している。上野村を除いて全て配電会社に売電しているか、あるいは売電する予定。発電量は後背地の世帯数を考慮した規模になっている。

(f) プラントとしての収益性

表 15 質問事項への回答：プラント収益性

	真庭	宮の郷	だいご	上野村	七ツ島	アチェ
立地/原料	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/輸入	海外/海外
発電規模 (kW)	10,000	5,750	1,990	180	49,000	12,000
年間発電量 (MWh)	82,400	36,000	13,460	700~800	337,000	
回答	黒字	黒字	黒字	赤字	黒字	採算がとれる見通

- ・ 上野村を除いて採算がとれている。アチェはまだ稼働していない。上野村は、規模が小さく、コスト的には赤字である。利益を出すことが目的ではなく、村のプロフィットセンターであるきのこセンターへ電気を供給し熱を利用するインフラと捉えている。

(g) 地域社会の受入れ方策

表 16 質問事項への回答：地域社会の受け入れ方策

	真庭	宮の郷	だいご	上野村	七ツ島	アチェ
立地/原料	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/輸入	海外/海外
発電規模 (kW)	10,000	5,750	1,990	180	49,000	12,000
年間発電量 (MWh)	82,400	36,000	13,460	700~800	337,000	
後背地世帯数	18,000	30,000	6,200	552	270,000	
回答	地域が主体的に運営	地元からの誘致	地元からの誘致	地域が運営	地域の要請	地元との合弁会社

- ・ 国内立地のバイオマス発電所はいずれも地元関係機関が主体的に経営しているか、地元からの要請で建設されている。また、海外立地は地元との合弁会社になっている。

(h) 利用している法制度

表 17 質問事項への回答：利用している法制度

	真庭	宮の郷	だいご	上野村	七ツ島	アチェ
立地/原料	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/輸入	海外/海外
発電規模	10,000	5,750	1,990	180	49,000	12,000

(kW)						
回答	FIT	FIT	FIT	なし	FIT	JCM

- ・ 国内立地のバイオマス発電所は上野村を除き、いずれの企業も FIT を利用して売電を行っている。上野村のバイオマス発電所は国の補助金を使用しているため FIT 制度は使えない。海外立地のアチェは、JCM を使ってバイオマス発電設備を建設している。

(i) 将来性

表 18 質問事項への回答：将来性

	真庭	宮の郷	だいご	上野村	七ツ島	アチェ
立地/原料	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/国内	国内/輸入	海外/海外
発電規模 (kW)	10,000	5,750	1,990	180	49,000	12,000
利用法制度	FIT	FIT	FIT	なし	FIT	JCM
回答	FIT 終了後は安定稼働困難	FIT 終了後は安定稼働困難	FIT 終了後は撤退	事業拡大は求めず経費節減	FIT 終了後は安定稼働困難	原料供給に強味があり、懸念していない

- ・ 国内立地のバイオマス発電所は、FIT 終了後の安定稼働に懸念を表明している。アチェは、コロナ禍のためスケジュールが遅れており、まだプラントは稼働していない。

Ⅲ-1-3 調査結果と考察

訪問調査と質問事項への回答をまとめると、以下のようになる。

・ バイオマス発電所新設の理由

主として国内燃料を使用しているバイオマス発電所は、いずれも、地元関係者が建設に主体的に関わるか、あるいは地元からの誘致で建設されている。

・ 燃料の安定供給上の工夫

国内原料の場合は、地元の林業関係者が組織をつくり、木材の調達とチップ製造を行っている。輸入原料の場合は港湾立地になっており、原料へのアクセスを重要視している。また、主として輸入原料を利用している七ツ島でも、鹿児島県森林組合や地元業者が県の間伐材の調達に協力している。

・ 持続可能性

国内原料の供給は地元林業のバックアップで安定しており、FIT 下で売電する限り、黒字経営となっている。課題は、FIT 終了後、売電価格が市場価格まで下がった場合である。調査した全てのバイオマス発電所は、FIT が終了すると安定稼働が困難であると回答している。

調査によって得られた情報を基に更に事業構造を分析してみた。

(a) Value Chain

国内原料を使用する場合、バイオマス生産地から発電所までのプロセスは、図1で示したように、森林からの木材(間伐材)の切り出し→切り出された木材を集積所まで運送→集積所から運ばれた木材から木質チップ製造となる。森林から木材を切り出し、それを使って木質チップを製造するプロセスには、バイオマス発電所は直接関与しないが、木質チップを購入することで、上流にある木材伐採、運送、チップ製造の value chain を支えている。真庭の例では、木質チップを 14.7 億円で購入しており、これで、木材の集積基地の 17 人及び関連事業 15 人を雇用している。更に、バイオマス発電所でも 15 人を雇用しており、木材伐採から発電事業まで、50 人を超える雇用を生み出している。これは地域にとって大きな経済効果である。バイオマス発電所は電力業者に売電することにより外から地域に利益をもたらす。林業の value chain の中でプロフィットセンターとして大きな役割を担っている。地元がこぞってバイオマス発電所を誘致する理由がここにある。一方、太陽光発電や風力発電では、バイオマス発電のような原料供給に関わる value chain は存在しない。また、多数の運転要員も必要ない。これが、同じ再生可能エネルギーでありながら、バイオマス発電が太陽光発電や風力発電と大きく異なる社会経済的要素の一つである。

(b) 燃料

バイオマス発電所のコストでは燃料費が大きな割合を占めることが知られている。輸入燃料は PKS のような海外の安価な原料を利用するので、国内原料より価格が安いのではないかと考えられるが、今回の調査で分かった国内燃料と輸入燃料の重量当たりの単価を計算してみると、表 19 に示すように、国内産未利用材も輸入 PKS の値段も 1.3 万円程度であり、輸入燃料と国内燃料の間には大きな差はない。東南アジア現地における PKS の価格は安くてもⁱⁱ、輸送費がかかることから、輸入燃料は、国内産燃料とほぼ同じ価格になっているのであろう。輸入原料の強味は価格が安いということではなく、どこからでも燃料を購入できる、ということだと思われる。七ツ島の訪問調査では、燃料の供給量が上がれば、発電所のスケールアップも可能であるということであった。しかし、どこからでも輸入できるということは、一方でバイオマス燃料の国際市況によっては、燃料調達が困難になるという危険性も孕んでいる。

ii マレーシアでは 250~300MR (7,000~8,000 円) で取引されている。(第 12 回 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 資料 2)

表 19 バイオマス発電所の燃料価格

	鹿児島七ツ島バイオマス発電所	岡山真庭バイオマス発電所
発電規模 (kW)	49,000	10,000
立地/原料	国内/輸入	国内/国内
燃料費	32 億円	14.7 億円
燃料重量	24.8 トン	11.7 トン
燃料単価 (万円/トン)	1.29	1.26

(c) 効率性

発電事業の観点からも地球温暖化対策からの観点でも、バイオマス発電の効率性は大きな問題である。訪問調査したバイオマス発電所の発電規模と絶乾燃料重量当たりの発電量をプロットしたのが、図5である。図5から、絶乾燃料重量当たりの発電量は、発電規模が大きいほど大きく、スケールメリットがあるのが分かる。また、今回調査した発電所が使用している木質チップの水分含量は約 40%であるので、チップをより乾燥させれば、燃料当たりの発電効率は上がる。

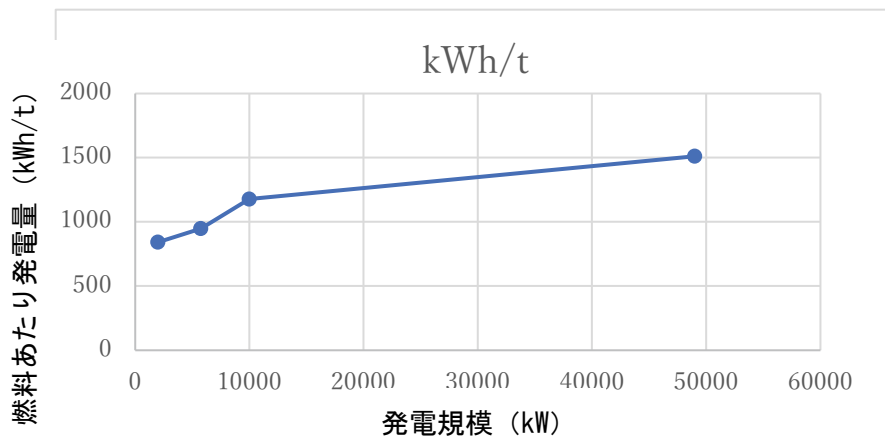


図5 発電規模と燃料重量当たり発電量

Ⅲ-1-4 2050 脱炭素社会構築に向けたバイオマス発電に関する戦略案

1) 短期的戦略：FIT 終了後の自立化

2020 年度の日本の発電量は、10,008 億 kWh、そのうち自然エネルギー（水力、バイオマス、地熱、風力、太陽光）比率は、約 20%であった⁶⁾。2021 年 10 月の閣議決定では、2050 年脱炭素社会に向け、2030 年の再生可能エネルギー比率を 36～38%に増加させるとしている。再生可能エネルギーのうち、バイオマスは4～5%程度の寄与が見込まれている。2020 年度の統計では、バイオマス発電のうち、バイオマス専焼の 10,000kW 以上

の発電所の総発電量は 93 億 kWh、10,000kW 未満の小規模発電所の発電総量は 98 億 kWh で、自家発電や混焼を含むバイオマス発電全体の 53%を占めている⁷⁾。今回、調査した国内立地/国内原料のバイオマス発電所は 10,000kW 未満の小規模発電の範疇に入るが、今回訪問した全てのバイオマス発電所で、FITが終了すると安定した経営は困難であると回答している。これらの小規模発電所は、地域の雇用を支え、林業の value chain でのプロフィットセンターになっている。FITが終了し、これらの小規模発電所が経営困難に陥ると地域経済に与える影響は大きい。また、2050 脱炭素社会構築に向けて、安定電源としてバイオマス発電を推進する動きにとっても大きな頓挫になる。地域社会を支えるこれらの小規模バイオマス発電所を維持することは、2050 脱炭素社会構築に向けて是非とも必要である。主として海外からの輸入燃料を使用している 10,000kW 以上の大規模バイオマス発電所も FIT 終了後の経営事情は同じである。従って、将来にわたって現状のバイオマス発電比率を維持するにはまず、現在稼働しているバイオマス発電所を FIT 終了後も安定稼働させる必要がある。これが、バイオマス発電にとって短期的な戦略になる。そこで、これらバイオマス専焼の発電所の安定稼働について規模別に考えてみる。

(1) 小規模バイオマス発電所の自立化

FIT 終了後、これらの小規模バイオマス発電所が安定経営できない最大の理由は、発電コストが高止まりしているからである。これを解決するには以下の 2 つの方法が考えられる。

① バイオマス発電用の燃料コストの低減

② バイオマス発電の発電効率の向上

バイオマス発電用燃料コストを低減する方法の一つは、森林の伐採からバイオマス発電までの value chain における全てのコストを見直すことである。森林伐採に関するコスト、輸送コスト、木材チップ製造のコストを見直し、木材チップの価格をバイオマス発電所で採算が取れる水準まで見直す。また、燃料の品質管理の見直しによるコストパフォーマンスの向上もコスト低減に有効であろう。バイオマス発電の燃料として、木材以外に地域でとれる未利用農業資源を使うことも考える必要がある。例えば、米作で副産物として出てくる籾殻は、ほとんど利用されていない。青森県では、籾殻からペレットを製造し、これを燃料として発電に利用する動きが出てきた。木材チップと籾殻ペレットの混焼ができれば、燃料コストは下がる。(一社)日本有機資源協会と(一社)木質バイオマスエネルギー協会が 2021 年 3 月に出した「国産バイオネズ発電導入見通し」⁸⁾では、燃料材の効率的な供給システムの構築により、燃料費 8,000 円/t 程度に低下させるとともに、設備投資額の低減、所内率の向上など総合的な対策を取ることで、発電原価 15 円/kWh の水準を確保することは可能であるとしている⁸⁾。

バイオマス発電を持続可能にするもう一つの方法は、発電効率の向上である。例え

ば、真庭の場合、年間 11.7 万トン of 木質チップを用いて、82,400MWh の発電をしている。発電効率は、総発電量÷木質チップの熱量、で計算できる。11.7 万トン of 木質チップで 82,400MWh を発電する場合の効率を計算すると、22.5%となるⁱⁱⁱ。バイオマス発電の最大発電効率は 30%と言われているので、真庭の 22.5%はまだ向上の余地があるということを示している。仮に、発電効率が 30%になれば、8.8 万トンの燃料で 82,400MWh の発電が可能になり、燃料コストは、75%になる。現状の設備を大幅に変更せずに発電効率を上げる最も有効な方法は、バイオマス燃焼時の温度を上げるということである。バイオマス発電から出る熱を利用して、木質チップの乾燥度を上げ、燃焼温度を上げることができる。

(2) 大規模バイオマス発電の自立化

上記Ⅲ-1-3 (c)の効率性の議論で述べたように、バイオマス発電にはスケールメリットがあり、規模が大きいくほど発電効率が高まる。例えば、七ツ島の場合、24.8 万トン (PKS20 万トン、木質ペレット 3.6 万トン、木質チップ 1.2 万トン)の燃料を用いて 337,000MWh の発電をしている。PKS と木質ペレットの発熱量を 4000kcal/kg、チップの発熱量を 2700kcal/kg とすれば、発電効率は $2.9 \times 10^{11} \div 9.4 \times 10^{12} = 0.30$ となり^{iv}、バイオマス発電で想定されるベストの値になっている。FIT 終了時には、減価償却が終わっていると想定されるので、固定費は低下する。大型バイオマス発電所の場合、燃料コストの低減、規模を拡大することによるスケールメリットの活用で、FIT 終了後も自立できる可能性は高いと思われる。

七ツ島のような大規模バイオマス発電では、燃料は主として PKS や木質ペレットのような海外からの輸入バイオマスになる。大規模バイオマス発電にとって最大の課題は、燃料の安定調達である。日本がバイオマス原料として輸入しているのは、主としてパーム油生産に伴って出てくる PKS であり、2019 年にはインドネシアとマレーシアで併せて、13800 万トンが発生している⁹⁾。PKS は、水分含量が少なく(10%程度)、熱量も平均 4000kcal/kg 程度で、有用なバイオマス原料である。しかし、それを発生しているパーム農園は、欧米の環境保護論者から、熱帯雨林の減少と生物多様性の減少、泥炭地からの大量の CO₂ 排出、森林火災や泥炭火災による CO₂ 排出など様々な問題を指摘されている。しかし、東南アジア諸国にとってパーム油製造は重要な産業であり、それを廃棄して熱帯雨林に戻すことは、現地の経済に大きな打撃を与えるとともに、

iii 絶乾木質チップの発熱量は 4500kcal/kg であるので、40%水分を含む木材チップの発熱量を 2700kcal/kg とした。11.7 万トンの木質チップの発熱量は、 $11.7 \times 10^7 \times 2.7 \times 10^3 = 3.16 \times 10^{11}$ kcal となる。82,400MWh は熱量に換算すると、 8.24×10^7 (kWh) $\times$ 860 (kcal/kWh) となるので、発電効率は、 8.24×10^7 (kWh) $\times$ 860 (kcal/kWh) $\div$ 3.16×10^{11} kcal = 0.225

iv 燃料の発熱量は、 $(20 \times 10^7 \times 4000 + 3.6 \times 10^7 \times 4000 + 1.2 \times 10^7 \times 2700) = 9.4 \times 10^{12}$ kcal となり、337,000MWh の電力量は 2.9×10^{11} kcal なので、発電効率は、 $2.9 \times 10^{11} \div 9.4 \times 10^{12} = 0.30$ となる。

泥炭地からの大量の CO₂ 排出、森林火災や泥炭火災による CO₂ 排出などの問題解決を放棄することになる。日本は、これまで SATREPS や国際協力機構（JICA）事業で培った知見を用い、東南アジア現地と一体となって、より環境負荷の小さいパーム農園経営に貢献すべきだと思われる。そうすることによって、東南アジア諸国は脱炭素社会構築に向かって進むことができるし、日本もまた、東南アジアからの PKS の輸入を確保することができる。

以下、マレーシアのパーム農園経営における諸問題について検討してみる¹⁰⁾。

パームオイル産業の抱える環境問題には、化学物質や原材料の輸送、エネルギー使用、バイオマス分解・燃焼等に伴う温室効果ガス（GHGs）の排出、パーム油搾油工程で生じる排液（Palm Oil Mill Effluent, POME）の大量発生、高いカーボンフットプリント、工場操業時の低いエネルギー効率（蒸気ボイラー使用率）などがある。現在、特に問題となっているのは、水溶性有機化合物を含む大量の POME の廃棄である。大量の POME の排出によって、水生生物の酸素欠乏と窒息を引き起こし、生態系を破壊しつつある。パーム産業がマレーシア/日本政府に期待しているのは、POME の環境負荷を低減する新しい浄化処理である。例えば、九州工業大学は、粗パームオイル（Crude Palm Oil, CPO）を回収した EFB の残留油分を高圧洗浄水で二次回収し、さらにマイクロバブル処理を組み合わせることにより油分回収率を向上させる技術を有している。この技術が社会実装されれば、POME 中の有機物が低減し、排液の浄化に繋がる。また、回収油分と洗浄された EFB は、それぞれ、バイオディーゼル燃料やバイオマス原料として使用できる。

マレーシアのパーム農園経営におけるもう一つの問題は、小規模農家の存在である。マレーシアのパーム油生産量のうち 40%は、独立または組織化された小規模農家によって生産されている。小規模農家には、組織化された小農と独立した小農がある。組織化された小農にはマレーシア連邦土地開発機構（FELDA）、連邦土地開発・再開発機構（FELCRA）、天然ゴム小規模農園開発公社（RISDA）などの政府機関による技術・人材・市場支援があるが、独立した小農の多くにはこうした支援がない。これらの小規模農家は、資本力が十分でないため、施肥量の減少等による生産高減少の危険性に曝されており、適切な肥料散布、効果的な病虫害防除、収穫方法改善などの圃場管理技術や環境対策の教育が必要になっている。日本は、ただ、パーム副産物を購入するだけでなく、パーム油製造に係る様々な問題解決に現地と一緒に取り組む、環境を考慮したパーム産業の発展に貢献すべきである。そのことが、結局は、パーム油産業からのバイオマス燃料の安定調達につながると考えられる。

2) 中長期的戦略：高効率なバイオマス発電技術の開発

小規模バイオマス発電の燃焼効率を上げるいくつかの方法が提案されている。一つは、ガス化発電である。この発電システムでは、木質バイオマスをチップまたはペレ

ットにし、それを熱分解・還元反応でガス化して、発生したガスでレシプロエンジンを回して発電する。ガス化発電は小規模でも発電効率が30%程度まで上がると言われている。ガス化発電のメリットの一つは、発電出力に対して2~2.5倍の熱が回収され、エネルギー利用の総合効率が70~80%に達することである¹¹⁾。ガス化発電で、チップやペレットの乾燥をすれば、これらの燃料製造に伴うCO₂排出も抑制することもできる。課題は、燃焼過程でタールが生じ、炉内を閉塞させるというトラブルが発生することである。また、メンテナンス費用も高額になる。また、バイオマス発電固有の材料の劣化過程を防止する技術開発も発電効率向上や固定費削減には有効であろう。ガス化発電が普及するには更なる技術改良が必要と思われる。

近年、注目されている高効率発電技術の一つにケミカルルーピングという技術がある。この技術では大気中の酸素の代わりに金属酸化物を用いて炭化水素を酸化(燃焼)する。まず、金属酸化物(MeO_n)を燃料を用いて還元する。この反応では水とCO₂が発生する。次に、還元された金属酸化物(MeO_{n-1})を大気中の酸素と反応させて酸化する。この時発生する熱を利用して高温水蒸気を発生させ、タービンを回して発電する。また、還元された金属酸化物と水を直接反応させて水素をつくることもできる。このシステムは、容易にCO₂を単離できることから、石炭からCO₂を製造する目的で開発された。しかし、適当な金属酸化物を選択すれば、酸化還元反応が可逆的に進行することから、近年はバイオマス発電における発電効率を上げる目的でも研究されている。反応は通常は流動層で行われるが、固体粒子ハンドリングのための装置開発でまだ多くの課題を残しているようである。資源エネルギー庁は2030年の社会実装を目指して技術開発を支援している。

3) バイオマス発電プロセスで生じる温室効果ガス(GHG)排出

バイオマス発電の効率を上げることは、地球温暖化対策の上でも重要である。最近、バイオマス発電はカーボンニュートラルではないとする議論がある。森林を伐採して、木材から木質チップやペレットを製造し、それを燃焼して発電した場合、伐採した森林が回復するまで数十年程度かかること(炭素負債といわれている)、伐採による森林減少などの土地利用変化に伴い、森林や土壌に貯蔵されていた炭素が、CO₂の形で大気中に排出されること、更には、伐採、運送、チップ製造の工程でCO₂が排出されるからである¹²⁾。日本の場合、発電規模が10,000kW未満の小規模発電では、燃料は主として間伐材などの未利用材である。日本の人工林(カラマツ)の二酸化炭素吸収と間伐施業について調べた明石による研究¹³⁾では、森林のCO₂吸収量は、間伐後は弱度間伐区と無間伐区はほぼ同等の数値を示し、無間伐区で枯死木が発生した時期には、弱間伐区が無間伐区を上回る吸収を示したということであった。明石は、人工林では成長の早い樹種を植えること、森林を適切に間伐することなどで、CO₂を吸収しながらも森林が持つ洪水緩和作用のような有用性を生かすことができると結論している。日本の人工林

では、明石の述べるような間伐施業によって、炭素負債は最小限に留めることができる。しかし、チップ製造までのプロセスにおけるCO₂排出はどうしても避けられないし、発電効率が低ければ、CO₂排出に関してバイオマスは化石資源と同じではないかと、という誹りを免れない。小規模バイオマス発電は、間伐材などの未利用資源を使い環境負荷の小さいエネルギー源である。また、ウクライナ紛争のような国際紛争が生じて輸入燃料が品薄になった場合、日本が利用できる貴重な安定電源でもある。小規模バイオマス発電は、日本が2050脱炭素社会構築を目指していく中で維持・拡大すべきエネルギー源と言える。

Ⅲ-2 バイオリファイナリー

バイオマスのもう一つの用途はバイオリファイナリーによる物質生産である。バイオマス発電の場合は、燃料を燃やして発電し、電力を配電会社に供給するという同一のビジネスモデルであったが、バイオリファイナリーの場合は、出発原料、製造する製品、ビジネスモデルが異なる。そこで、バイオリファイナリーの場合は、ビジネスモデルに注目して調査を行った。

Ⅲ-2-1 各バイオリファイナリーの訪問調査

⑦ Green Earth Institute 株式会社(以下、GEI 社)¹⁴⁾

GEI 社は公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)のスパınアウト企業で RITE が開発したコリネ型細菌による発酵技術を使って各種アミノ酸やバイオジェット燃料などを製造するプロセスを開発している。同社は日本航空株式会社に依頼されて古着からバイオジェット燃料を製造した。GEI 社のコア技術はコリネ菌を使って糖からアルコールを製造する技術である。バイオジェット燃料の製造では、古着を糖化し、GEI 社が千葉の研究所でイソブタノールを製造。それを用いて高圧化学工業株式会社がイソブタノールを脱水・オリゴマー化してバイオジェット燃料を製造した。

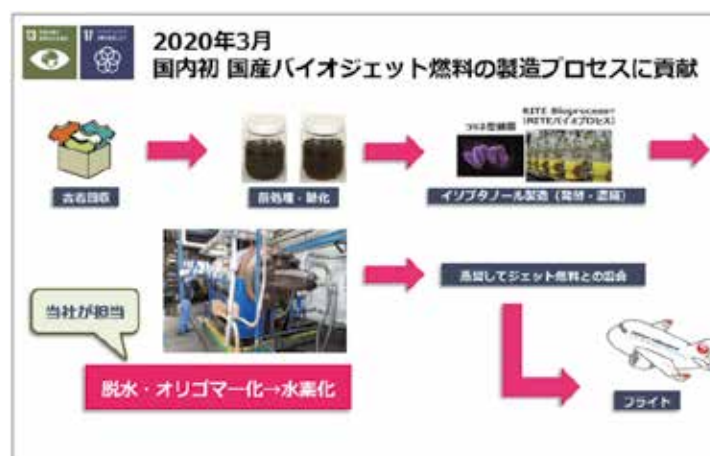


図6 古着からバイオジェット燃料製造(高圧化学株式会社ホームページ)¹⁵⁾

GEI 社の行ったイソブタノール製造は小試験レベルのものであり、商用規模のものではない。同社が目指すのは、バイオリファイナリーにおける要素技術の開発であり、技術のライセンスアウトである。同社はバイオマス技術開発における日本のファウンダリーを目指すと言っている。GEI 社の資本規模では固定の工場を持つのは容易ではなく、また、一つのバイオマス製品製造に社運をかけるのはリスクが大きいという判断に基づいている選択だと思われる。同社は、バイオリファイナリーのニーズは今後拡大すると見ており、様々なバイオ製品生産のプロセス開発が彼らのマーケットであると見ているようである。

バイオジェット燃料(持続可能な航空燃料: Sustainable Aviation Fuel, SAF)の需要は急速に拡大している。世界の一次エネルギー消費量は石油換算で約 139 億トン、ジェット燃料の使用量は 3.3 億トン(日本の旅客機のジェット燃料は国内・国際線合わせて 800 万はキロリットル)である。世界が脱炭素化に向かうなか、航空機の脱炭素化が大きな課題になっており、バイオマス由来の持続可能な航空燃料の使用が現実化している。国際民間航空機関(ICAO)は、現在は努力目標になっている SAF の使用を 2027 年には義務化することが決めている。SAF を持たない航空会社は国際線を飛ばせない時代が来る。

SAF の製造法には表 20 のようなものがある。製法が確立しているのは、ATJ(Alcohol to Jet)法で、穀類や甜菜等から発酵法で得たエタノールを脱水・オリゴマー化する方法である。この方法の課題は、食糧と競合するという点にある。糖ではなくセルロースを使えば食糧との競合を避けることができるが、セルロース発酵ではリグニンやヘミセルロースとの分離といった糖にはないプロセスが必要であり、その分コスト高になる。

表 20 バイオジェット燃料製造法

原料	前処理	技術の概要	事業者
穀物・甜菜 非可食植物	糖化	糖からバイオエタノールを合成し、脱水・オリゴマー化	Bits 等
一般ゴミ (木屑、廃プラ等)	糖化	糖からイソブタノールを製造し、脱水、オリゴマー化	B1
	ガス化	ガスから微生物を用いてアルコール合成	LanzaTech
		Fischer-Tropsch 合成	三菱パワー、JERA、TEC 等
排ガス由来の CO ₂ と電解 H ₂	工場 CO ₂ 回収 電解 H ₂ 製造	CO ₂ + H ₂ を用いて Fischer-Tropsch 合成	東芝、出光興産 TEC, 日本 CCS、
廃油(植物油、 獣脂)	HEFA	廃植物油を高圧で水素化分解・還元	Neste (MCI) IHI 等

⑧ Neste Singapore Refinery (文献調査)¹⁶⁾

Neste は、石油精製、高品位輸送用燃料を生産するフィンランドの会社である。

Neste が世界に注目されるようになったのは、それまでの FAME(脂肪酸メチルエステル)型軽油に代わる、水素化脱酸素法 (NExBTL) を開発してからである。石油精製における水素化精製技術の応用であり、低粘度で、エンジン燃焼特性、貯蔵安定性、石油系軽油との混和性に優れたバイオディーゼル燃料を製造できる。水素化脱酸素法には、油脂、獣脂などのトリグリセリドを水素化脱酸素する第一反応と、選択的水素化クラッキング・異性化を行う第二反応、両反応間 and/or 第二反応後にバイオナフサ (C5-C10)、バイオジェット燃料 (C11-C13)、バイオディーゼル (C14-C20) を蒸留分離する工程がある。このプロセスで注意すべきは、水素化・改質油の分留で SAF とバイオナフサを同時に製造できるということである。市況に応じて、SAF とバイオナフサの製造量を調節できる。

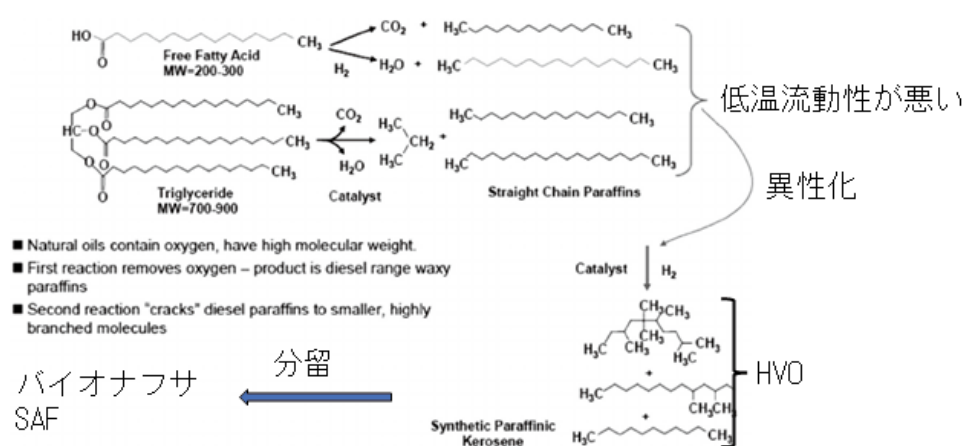


図7 動植物油からの SAF/バイオナフサの製造¹⁷⁾

このビジネスモデルを支えているのは、航空業界の高い SAF 需要と化学業界におけるバイオプラスチックへの取り組みである。SAF は、航空燃料のケロシン(リッター65 円)の 4 倍から 6 倍の価格で取引されている。原油由来のナフサがリッター80 円であるのに対してバイオナフサの価格はリッター200 円になっている。化学業界が、バイオナフサを欲しがるのは、今後、EV 化が進展すると燃料需要が低減し、結果として原油由来のナフサが不足になると予想されるからである。

Neste Singapore Refinery は、2010 年に 550 million Euro を投資して建設された。従業員は 300 名で再生可能製品(軽油主体)の生産能力は 130 万 t/年である。2023 年にはシンガポール、ロッテルダムとも設備増強中で、2023 年には世界での生産能力は 450 万 t/年となる予定である。シンガポールにはアジア最大の石油精製・石油化学基地があり、隣国のインドネシア、マレーシアは世界最大のパーム油生産国である。また、シンガポールには東南アジア・中国地域最大級の廃食油を集荷・販売する Apeiron Bioenergy 社があり、豊富な植物油原料の確保が可能と考えたことがシンガポール立地

の理由であると思われる。しかし、SAF やバイオナフサの需要が今日拡大し、廃調理油など、原料油脂の確保は東南アジアでも困難になりつつある。

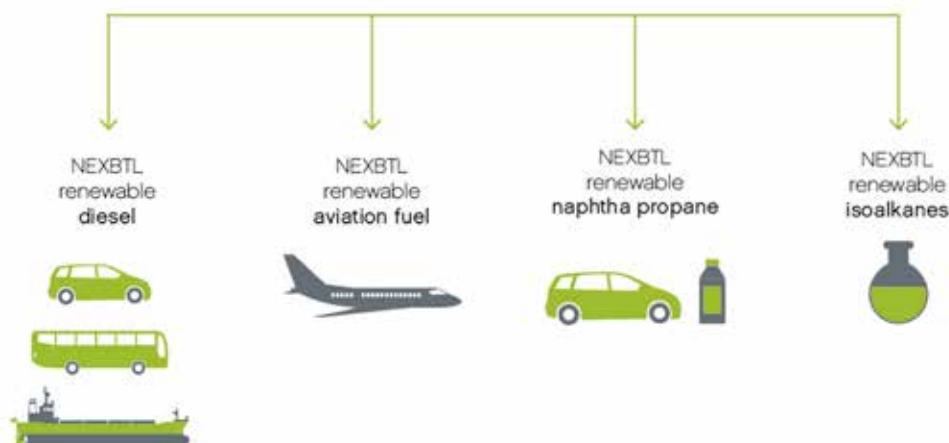


図8 水素化脱酸素法 (NExBTL) 製品の種類と用途 (Neste 社ホームページ)

⑨ 三井化学株式会社 大阪工場（以下、三井化学）¹⁸⁾

三井化学は、シンガポールの Neste 社より約 3000 トンのバイオナフサを輸入してバイオプラスチックの製造を開始した。バイオナフサと石油由来のナフサを混合したものをナフサクラッカーに投入し、プラスチック原料のモノマーを製造している。製造したプラスチックに含まれるバイオナフサ由来のカーボンの割合は、第三者 (Control Union) に確認してもらうマスバランス方式を採用している。



図9 バイオナフサを用いたバイオ化学品製造¹⁹⁾

こうして製造したバイオプラスチックはバイオマス由来の製品であるというロゴを付けて販売される。しかし、高いバイオナフサ（石油由来のナフサの2、3倍の値段）を使うため、出来上がったバイオプラスチックの単価は高くなる。それを社会がどう受け入れるかが、このビジネスモデルの最大の課題である。現在は、一部のコンビニエンスストアが、環境に配慮している企業ということを示す PR 製品として購入しているようである。

バイオナフサ以外のナフサ供給源として三井化学が注力しているのが、回収プラスチックからのナフサ製造である。この方法は、回収プラスチックを分別せずに熱分解してナフサクラッカーに投入する。このケミカルリサイクルと呼ばれる方法では手間が省け、回収率も上がる。この技術は既に欧州で実用化されている。このビジネスモデルの最大の課題は廃プラスチックをどう集積し、運搬するかである。

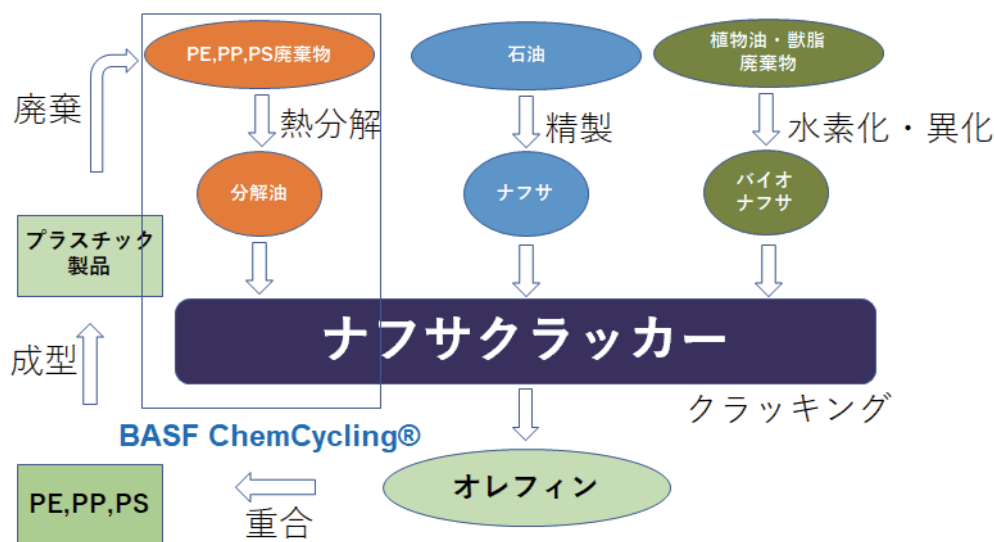


図10 プラスチックのケミカルリサイクル

三井化学が脱炭素化に取り組んでいるもう一つの方法がポリマーをバイオマスから製造するプロセスである。

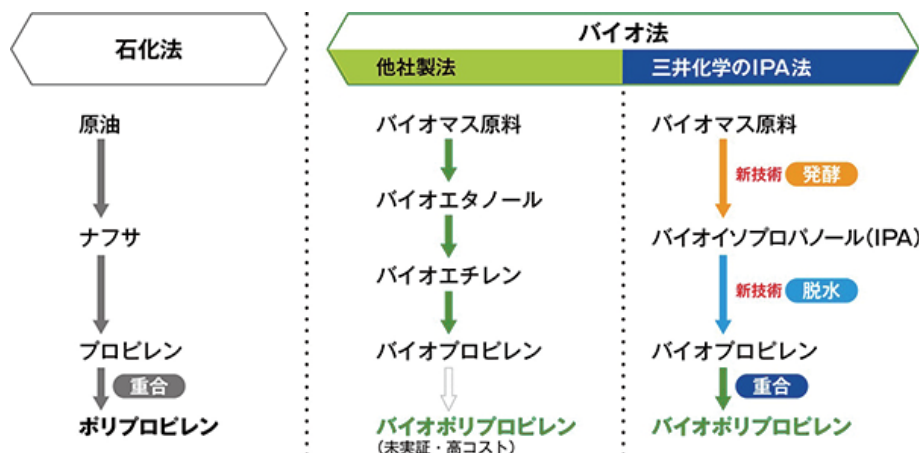


図11 バイオマス原料を用いるバイオポリプロピレン製造²⁰⁾

原料にはソルゴー（イネ科の1年草）からとった糖蜜を使用し、これを発酵法を用いて1段でイソプロピルアルコール(IPA)を製造する。次に、IPAを脱水してプロピレンを製

造し、これを重合させてポリプロピレン（PP）を製造する。2024 年には事業化し、2030 年には年産 100 キロトンのバイオ PP を製造する計画であるという。三井化学は日本でトップのプロピレンメーカーであり、販売には自信があるのだろうが、課題はバイオマス原料の栽培と糖蜜の運送である。

⑩ 積水バイオリファイナリー（SBR）²¹⁾

バイオマス資源という観点からは、日本で年間 6000 万トン排出されるゴミは、隠れた資源である。積水化学工業株式会社（以下、積水化学）と、株式会社 INCJ（以下、INCJ）、積水バイオリファイナリー 株式会社（以下、SBR）は、積水化学と米国ベンチャー企業 LanzaTech NZ, Inc.（以下、LanzaTech 社）が共同開発した、微生物を活用して可燃性ごみをエタノールに変換する技術の実証事業の実施、技術検証及び事業展開を行うことを目的として、岩手県久慈市に 2022 年 4 月に実証プラントを竣工した。

表 21 積水バイオリファイナリー概要

場所	岩手県久慈市侍浜町本町第 9 地割 54 番 1
敷地面積	約 2.5 万㎡（緑地分含む）
処理能力	一般廃棄物（可燃性ごみ）約 20t／日
製造量	エタノール 1～2 kL／日
製造技術	ガス化改質炉（三菱重工環境・化学エンジニアリング株式会社） ガス精製技術（積水化学） 微生物触媒（LanzaTech 社） エタノール生産技術（積水化学）

この実証プラントは、積水化学及び経済産業省が所管する官民ファンドである INCJ が共同で設立した SBR が建設し、また環境省委託事業による支援を受けている。エタノール技術の実用化・事業化に向けた最終段階の検証を行うため、スケールアップ時の技術検証、システム最適化、安定稼働の確認、事業性の確認などを行う計画である。ごみ処理施設が処理する標準的な規模の 1/10 程度の量（約 20t/日）を久慈市から譲り受けて原料としてエタノールを生産し、また自治体やごみ処理関連企業、プラントメーカー等にプラント見学やバイオエタノール事業の説明、及びエタノールのサンプル提供等を通じてエタノール技術の理解を広め、新しい資源循環社会システムを創生することを目指している。また、積水化学は、住友化学株式会社と協業し、エタノールをエチレンに、さらにはプラスチック（ポリオレフィン）に変換するループの構築を進めており、このプラスチックを消費材製造者が利用した後、廃棄される際に回収し、再びバイオエタノールプラントに戻すことが何度も可能な資源循環を構築することを目指している。生産されるエタノールは、合成アルコール（JAAS 規格、社団法人アルコール協会）であり、飲用や食用に用いることはできないが、プラスチック以外の用途にも適用可能であり、例えばエタノールからエチレンへ、さらにケロシンに転換することで SAF への活用も期待されている。



図 12 バイオエタノール技術概要²²⁾

図 12 に、バイオエタノール技術の概要を示す。積水化学と LanzaTech 社は、ごみ処理施設に収集された可燃ごみを分別することなくガス化し、このガスを精製の上、LanzaTech 社が開発した微生物により、化学触媒や熱・圧力を用いることなくエタノールに変換する生産技術を 2017 年に確立した。大量に廃棄されながらその工業利用が極めて困難であった“ごみ”を、化石資源に替わる資源として利用することを可能にする革新的な技術の一つといえよう。通常、可燃ごみは焼却の上発電利用等されているが、バイオエタノール技術により、ごみの一部をエタノールに転換することで二酸化炭素の排出の抑制にも貢献できると期待される。

積水バイオリファイナーリー実証プラントは、2022 年 4 月に竣工したが、3 月 16 日の福島県沖地震による東北電力管内の電力不足によってプラント全体運転試験計画が大幅に遅れている。また、原料となる可燃ごみの安定的な回収と原料品質の確保等に問題を抱えているため、現在はガス化炉の実証試験運転のみであり、後段のガス精製工程や微生物触媒によるエタノール生産のフル稼働は実施されていない。今後は、11 月頃を目途に実証プラント全体システムのフル稼働運転を開始する予定とのことであった。

⑪ Bazancourt Pomacle Bio-cluster²³⁾

本バイオラスターはパリの東北東 150 キロの平坦な平原に位置し、主として甜菜、小麦、アルファルファ、木材を原料としてバイオマス製品を製造している。事業規模としては、250 万トンの甜菜と 100 万トンの小麦から砂糖をとスターチを合計 55 万トン、バイオエタノールを 30 万トン、飼料を 35 万トン製造している。その他、グルコース、化粧品、コハク酸、CO₂ 等を合計した総売上高は、7.5 億ユーロ(約 1,000 億円)

で、2000 人の直接・間接雇用を生み出している。

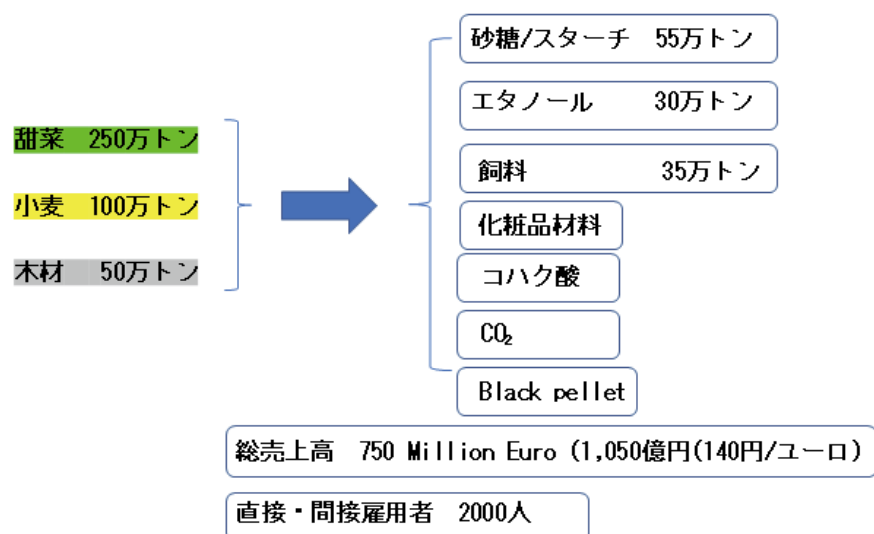


図 13 フランス・バイオクラスター概要

本バイオクラスターの特徴は以下のようなものである。

- 1) 作物の生産者組合(甜菜、小麦)がクラスターの各会社のオーナーである。彼らの目的は、土地の生産性向上と生産物の高付加価値化であり、生産物の value chain の高付加価値化を実現するためバイオリファイナリーを経営している。
- 2) 高い農業生産性を持つ生産地に立地している。バイオクラスターに作物を供給しているランス地域の小麦と甜菜の面積当たり生産量は世界一であり、これが本バイオクラスターの大きな強味になっている。
- 3) 複数の原料から複数のバイオマス製品を製造する複合型(integrated)バイオリファイナリーになっており、現地では自らをバイオクラスターと定義している。本バイオクラスターの特徴は、複数の原料の供給による年間を通したプラント稼働、複数原料からのバイオエタノール製造、中間体の組合せによる新製品開発である。

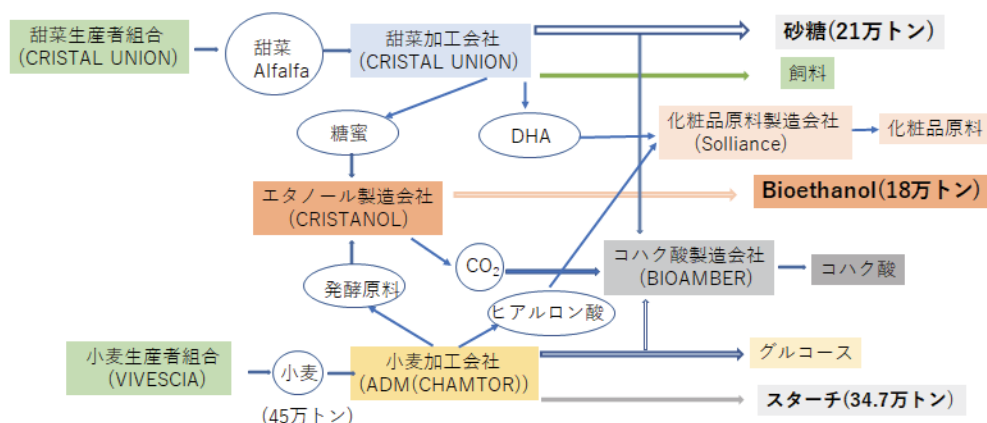


図 14 複合型バイオリファイナリーによるバイオマス製品製造

- 4) 新製品開発は、生産者組合が設置した独自の研究開発機関(ARD)が司令塔になって実施している。本クラスターにはパイロットスケールの生産を行う機関(Biodemo)が設置されており、実験室レベルから商用生産につなぐ役割を果たしている。また、本クラスターには、公的セクターからの支援により高等研究教育機関(CEBB)が設置されており、基礎研究を実施するとともに毎年国際シンポジウムを開催している。
- 5) エネルギーとユーティリティをバイオクラスター内で共用している。
- 6) 生産者組合がオーナーであり、生産地に立地していることから、生産地で収穫できる原料しか取り扱うことができないという限界がある。

このバイオマラスターが、現在、最も力を入れているのが、リグノセルロースからの有用物質生産である。彼らは麦のストローからイソブテンを生産する技術をフランスの Global Bioenergies から導入し、そのイソブテンを 3 量化してイソドデカン(isododecane)を製造する会社をクラスター内に共同で立ち上げた。イソドデカンは、メイクアップ材料やジェット燃料として使用できる。また、バイオマスを原料としてアセトンとイソプロピルアルコールを製造する技術を Global Bioenergies から導入中である。イソプロピルアルコールは容易にプロピレンに変換でき、バイオマスからのポリプロピレン製造が可能になる。

⑫ タイ・バイオリファイナリー²⁴⁾

タイは一次エネルギー消費の 50%以上を輸入に頼っており、輸入代替策として 2036 年までに再生可能エネルギーを総エネルギー需要の 30%にする計画で再生可能エネルギー開発を進めてきた。再生可能エネルギーとしては太陽光、風力、バイオマスの利用を推進してきたが、最も力をいれてきた政策の一つがバイオエタノールやバイオディーゼルのようなバイオ燃料の製造である。タイ政府は、バイオエタノールの製造を推進し、2005 年以来、バイオエタノール入りガソリン(GASOHOL)が販売されている。また、バイオエタノールプラントの新設を支援しており、以下のような優遇措置が設けられている。

- ・ エタノール製造に必要なプラント機材の輸入に係る輸入関税の免除
- ・ 8 年間の法人税の免除
- ・ 政府が設定した固定価格でのエタノール買取

その結果、タイ各地に数十のバイオエタノールプラントが稼働している。このようなバイオエタノール製造を推進しているタイ政府の財源は Oil Fund というガソリン税の導入である。無鉛ガソリンに 6.3 パーツの Oil Fund 税をかけて、エタノールを 10%含む GASOHOL95 E10 より高く設定してある。なお、タイ産のエタノール価格は、ブラジル産等の国際エタノール価格より高い。タイ政府は、国内のエタノール価格をコントロールするため、エタノールの輸入を禁止している。

しかし、このように、バイオディーゼルやバイオエタノールの製造を推進してきたタイ政府は、2021 年になって、バイオ燃料推進の方針を大きく変更した。タイ政府は、2021 年 BCG(Bio-Circular-Green)経済政策を発表し、循環型経済に重点を置いた以下のような政策をとることを表明している。

- ① 新規導入電力は再エネ率を 50%以上とする
- ② イノベーションで効率を 30%引き上げる
- ③ 4D1E 政策(decarbonation, digitalization, decentralization, deregulation, electrification)を推進する
- ④ その他、ゴミ発電の推進、プラスチック利用率 100%、自動車リサイクル、リチウムバッテリーリサイクル等を推進する

自動車では、EV の生産比率を 2030 年までに全体の 30%とする「30@30」を目指す。バイオ燃料へのインセンティブは段階的に低減される。また、東部経済回廊のインフラ整備等により経済成長を目指しているが、その目玉の一つがバイオ燃料ではないバイオリファイナリーの推進である。具体的にどのようなバイオマス製品を製造するかは明らかになっていないが、BIOPOLIS を中心としたオープンプラットフォームを建設するとしている。

タイ訪問ではコロナ禍のため、バイオリファイナリーを訪問できなかったので、既出の文献に基づいてタイのバイオリファイナリーを紹介する。典型的な砂糖・エタノール併産工場であるタイの KSL Khon Kaen Sugar Cane Complex では、サトウキビを原

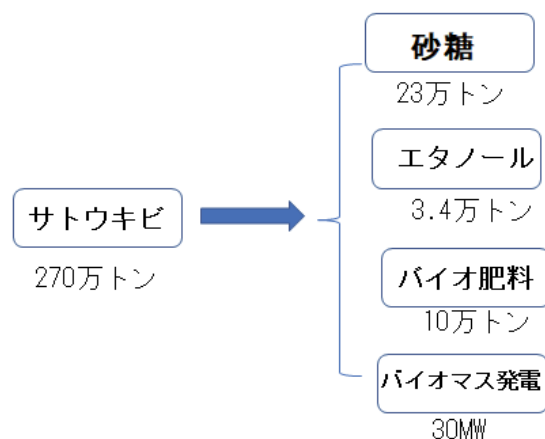


図 15 タイの KSL Khon Kaen Sugar Cane Complex

料として砂糖を製造し、サトウキビ製造中に副生物として出てくる糖蜜(molasses)を用いてエタノールを製造している。また、製糖プロセスから発生するフィルターケーキ、バイオマス発電所から発生する灰、エタノール工場からの蒸留排液を用いてバイオ肥料を製造している。また、製糖プロセスで発生するバガスを燃焼して発電しており、5MW 分を自家消費(Complex で使用)、20MW 分をタイ電力公社に、残りの 5MW 分を他

の民間企業に売電している²⁵⁾。

農家からサトウキビやキャッサバを買取り、エタノールを製造している企業もあるが、農家からの買取とエタノール製造は trade off の関係があり、エタノールだけを製造するビジネスは安定しているわけではない。KSL Khon Kaen Sugar Cane Complex のように、砂糖とエタノール併産であれば、エタノール生産の調整により、エタノール価格低迷時のリスクを回避できるが、エタノールだけを製造する企業はリスク回避が難しい。

Ⅲ-2-2 調査結果と考察

以上 Green Earth Institute からタイのバイオリファイナリーまでのバイオリファイナリーについて調査してきたが、安定的に稼働しているのはフランスとタイの複合型バイオリファイナリーのみである。両者は、

- ・競争力の高い農業生産物(フランスでは甜菜、タイではサトウキビ)を使用して砂糖を製造
- ・砂糖製造プロセスの副産物を利用してバイオエタノールを製造
- ・砂糖製造プロセスで出る繊維分を利用してフランスでは飼料を、タイでは肥料を製造
- ・バイオマス発電による電力共用

という共通した特徴を持っている。これらのバイオクラスターは、単一の出発物質から単一の製品をつくるバイオリファイナリーよりはるかに安定である。S. Takkellapati らは、バイオリファイナリーを3つの種類に分けている²⁶⁾。Phase I Biorefinery とは、一種類の出発原料から一種類の製品を製造するものである。穀類から発酵法でバイオエタノールを製造するバイオリファイナリーがこれに当たる。もう一つのバイオリファイナリーは一種類の出発原料から複数の製品を製造するもので、彼らはこれを Phase II Biorefinery と称している。タイの砂糖・エタノール併産バイオリファイナリーは、これに相当する。Takkellapati らが進んだバイオリファイナリーとして推奨するのは複数の出発原料から複数の製品を製造する Phase III Biorefinery である。今回訪問したフランスの Bazancourt Pomacle Bio-cluster がこれに相当する。タイでも、サトウキビを出発原料として砂糖・エタノールを併産する工場では、出発物質としてサトウキビ以外にキャッサバを用いる動きが出ている。二つの出発原料からのバイオエタノール製造システムができれば、サトウキビとキャッサバの市況に応じた生産ができる。まさに、Phase III Biorefinery を目指した動きになっている。

バイオマス発電事業では製品が変わるということはないが、バイオリファイナリーでは新しい製品の開発が必要となる。製品ファミリーを増やすことは事業規模の拡大につながるし、何より新製品の投入でリファイナリー全体の持続可能性が高まる。フ

ランスのバイオクラスターでは、独自の研究開発部門を持っており、それに付属する実験室スケールからスケールアップするための実証試験規模のテストプラントも持っている。バイオクラスターにおける新製品開発については説明を省くが、強調しておきたいのはフランス政府によるバイオクラスターの基礎研究への支援である。フランス政府はバイオクラスター内にフランスでトップレベルの高等研究機関(グランゼコール)や大学の研究室を設置し、バイオテクノロジーやバイオエコノミーの基礎研究や大学院教育を支援している。フランス政府は、バイオリファイナリーの中長期的な持続性を確保するためには、基礎研究からの支援が必須であると考えている。

Ⅲ-2-3 バイオリファイナリー戦略案

コモディティ製品を製造している企業は、地球環境保護・温暖化防止という世論に押されて、循環型経済に移行しつつある。その要因の一つは、EV 化の進展である。EV 化が進展して、燃料需要が減少すれば、石油化学製品向けのナフサが逼迫すると予測される。石油化学企業は、石油由来のナフサではなく、カーボンニュートラルなバイオマス由来のバイオナフサやプラスチック製品の回収・熱分解による回収ナフサの使用を始めた。バイオナフサや回収ナフサを使用すれば、現在のプラントや石油化学事業で培った技術やノウハウがそのまま利用できるからである。循環型経済移行の要因の二つ目は、経済の縮小である。大量生産・消費・廃棄の時代は終わった。再生可能な原料から必要なものを必要量生産し、使い終われば回収して、それをまた原料にしてコモディティ製品を再生産する時代が近づいている。しかし、それが現実化するには、以下の課題を解決しなければならない。

- 1) 大量供給可能なバイオマス原料の開発
- 2) それを原料とする複合型バイオリファイナリー構築
- 3) バイオマス由来の製品の社会受容

一つは、安定的に供給可能なバイオマス原料の開発である。それも現行の土地利用を大幅に変えることなく栽培する必要がある。二つ目の課題は、バイオマス製品を持続可能に製造するバイオリファイナリー形成である。農業生産物からのバイオマス製品製造を大規模に行うバイオリファイナリーが必要である。三つ目の課題は、バイオマス製品の社会受容である。地球環境保護・温暖化防止という視点で導入しようとしている SAF の価格は高く、航空会社はそれを運賃に転嫁できないでいる。バイオナフサや回収ナフサ由来のコモディティ製品は石油由来の製品より高価格となる。これを、社会が受容するインセンティブが必要である。

Ⅳ 2050 脱炭素社会構築に向けたバイオマスプラント戦略案

Ⅳ-1 バイオマス発電の自立

再生可能エネルギーの固定価格買取制度は、再生可能エネルギーを導入する手段と

して設定されたのであって、発電ビジネスを永遠にサポートするものではない。高い固定価格が設定された太陽光発電や洋上風力は、技術開発努力で、固定価格買取制度の出口に近づきつつある。バイオマス発電は、地域の林業の value chain におけるプロフィットセンターとして機能しており、地域の雇用を支えている。しかし、であるからと言って、いつまでも国の支援に頼ることはできない。今後、人口が減少し、経済が縮小して国の予算規模も縮小する。バイオマス発電は、原料採取から、運搬、集積、燃料(チップやペレット)製造に至る一連のシステムの最適化、乾燥等による燃料の燃焼カロリーの上昇、燃焼炉の技術改良による発電効率の上昇に取り組むとともに、燃料供給側も林業の value chain におけるコストを見直す等の努力をして、FIT 終了後も自立する方法を模索すべきである。

再生可能エネルギーにおけるバイオマスの寄与を増やすには、現行プラント維持だけでは不十分である。バイオマスに特化した高効率な発電プロセスを開発するとともに未利用農業残渣や草本系バイオマス作物を利用した安定供給可能な新規燃料の開発を行う必要がある。また、海外燃料の安定調達のため、燃料供給先の環境問題解決に積極的に貢献する必要がある。

IV-2 バイオクラスター形成

これまでの調査で判明したことの一つは、バイオマス発電とバイオリファイナリーは、それぞれ別個に発展してきたということである。バイオマス発電は、化石資源に替わる再生可能エネルギーの一つと期待されて、バイオリファイナリーはバイオディーゼルやバイオエタノールのような再生可能燃料の需要に応える形で発展してきた。しかし、世界が循環型社会に向かう中、間伐材とは言え、伐採したばかりの木材を燃料として燃すのは自然資源を循環的に使用しようとする社会の動向に沿うものではない。バイオマスは、長いカスケード利用が望ましい。そのため、循環型社会に向けた貢献方法としてバイオマス発電とバイオリファイナリーとの共生を考えるべきである。まず、バイオマス原料からバイオリファイナリーで製品を製造し、製造プロセスから出来るバイオマス残渣を利用するとともに、製造した製品を繰り返し使用して、最後に廃棄された段階で発電に使うという長い value chain を構築することが必要である。そうすれば、木材から派生するバイオマス製品は、空気中から固定した炭素を長く保持できる。炭素負債の問題は間違いなくクリアーできる。

IV-3 新規バイオマス原料の開発

世界のジェット燃料の製造は現在 3 億 3,000 万トンであるのに、SAF の製造量は 7,000KL しかない。2025 年にはそれが 1,400 万 KL に増加することが予想されており、日本の航空業界は必死になって SAF を求めている。バイオプラスチックの原料であるバイオナフサの生産量は年間 35~50 万トンであり、到底、全世界の需要に応えられな

い。循環型社会に向けての最大の課題は、大量に安定供給可能なバイオマス原料の開発である。現行の土地利用を大幅に変えることなく大量供給可能なバイオマス原料の開発が求められている。

IV-4 国際協力

バイオマスプラントの持続可能な稼働のためには、国際協力が重要である。日本がバイオマス原料として輸入しているのは、主としてパーム油生産に伴って出てくる副生物である。しかし、それを発生しているパーム農園は、欧米の環境保護論者から、熱帯雨林の減少と生物多様性の減少、泥炭地からの大量のCO₂排出、森林火災や泥炭火災によるCO₂排出など様々な問題を指摘されている。日本は、これまで SATREPS や国際協力機構（JICA）事業で培った知見を用い、東南アジア現地と一体となって、より環境負荷の小さいパーム農園経営に貢献すべきだと思われる。そうすることによって、東南アジア諸国は脱炭素社会構築に向かって進むことができるし、日本もまた、東南アジアからのバイオマス燃料の輸入を確保することができる。

V 助成先からのコメントに対する回答

V-1 助成先コメント

- ・バイオマス施設では原料調達と残渣処理が重要であり、この観点も含めて調査研究を進めて頂きたい。
- ・実際に稼働できている施設においては原料調達における輸送コストが重要と考えられるが、輸送コスト自体も各種の環境変化に応じて変化するものであり、2050 年脱炭素に向けた長期戦略検討にあたり、この環境変化も考慮して調査研究を進めて頂きたい。

V-2 原料調達

2020 年 11 月に公表した日本工学アカデミーのサステイナブル・バイオマスアジア・グループによる政策提言では、バイオマス利活用に関する四つの課題を挙げているが、その最初の課題がバイオマス原料の安定供給であった。林野庁の統計によると、日本の 2021 年度の木材需要は、82 百万 m³ であり、製材用材 32%、合板用材 12.6%、パルプチップ用材 35.1%、燃料用材 18%、その他用材 2.4%であった²⁷⁾。燃料用材の 63.4%が輸入、36.6%が国内産であった。今回調査した 10,000kW 未満の小規模バイオマス発電所は、地域の森林からの木材を利用し、チップ製造工場から最短の距離になるよう森林近くに立地している。36.6%の国内産燃料は、こういう小規模発電所が使用していると思われる。これらの発電所は地域が誘致あるいは自ら経営に参画したものであり、地域の林業関係者が、木材伐採、集積、木質チップ製造を行い、発電に十分な量の燃料を供給している。一方、多くの大型バイオマス発電所は港湾に立地し、輸入材を燃

料として使用している。現在のところ輸入原料の調達はできているが、将来、バイオマス燃料の国際市場で競争が激しくなれば、原料が品薄あるいは高騰する危険性がある。大型バイオマス発電所は、それを承知して輸入現地に合弁会社を設けたりして原料の安定調達に対処しようとしている。

生産地に立地しているバイオリファイナリーも十分な量のバイオマス原料が供給されている。例えば、フランスのバイオリファイナリーの場合は、バイオマス原料作物の生産者組合がバイオリファイナリーのオーナーになっている。自らが生産した作物の付加価値を向上させるためにバイオリファイナリーを経営しているため、原料調達には問題はない。一方、生産地に立地しているが故に、生産地が供給可能なバイオマス原料しか使えないというジレンマがある。遠距離から原料調達を行うと生産地立地の強みがなくなるからである。バイオナフサを輸入している日本の化学会社の場合、原料調達から輸送までを総合商社が担当し、化学会社は、港湾に着いたバイオナフサを購入するという調達構造になっている。輸入燃料を使用している大型バイオマス発電所と同様に、バイオナフサを輸入している化学会社は、輸入原料を増やすことで規模の拡大が可能であるが、バイオナフサの国際市況によっては燃料調達が困難になるという問題を抱えている。

V-3 輸送コスト

国内立地で国内原料を利用しているバイオマス発電所の場合、使用燃料(木質チップ)は地元の企業が供給しており、木材伐採からチップ製造工場までの輸送コストはチップ代に含まれている。宮の郷バイオマス発電所やだいがバイオマス発電所では、チップ製造工場は発電所に隣接しており、チップは製造工場から発電所までベルトコンベアで運ばれる。一方、輸入燃料を使用している港湾立地の大型バイオマス発電所は、自ら原料調達に関わっている。例えば、鹿児島七ツ島バイオマス発電所では、現地価格でトン当たり 7,000~8,000 円で取引されている PKS の燃料代は 12,900 円となっている。差額分が輸送コストになっているものと思われる。輸入 PKS の価格は、国内産木質チップと同等であるが、PKSは木質チップより熱量が高いため、地域から木質チップを購入するより発電効率は高くなっているようである。

バイオマスの場合、化石燃料を使って輸送しているので、輸送時の GHG 排出が問題になっている。例えば、木質バイオマス資源エネルギー協会とバイオマス発電事業者協会が試算した燃料輸送時の GHG 排出量は、下記の表のようになる。

表 22 バイオマス輸送時の GHG 排出量試算

バイオマス種	生産国	輸送距離 km	輸送時 GHG 排出量 (g-CO ₂ /MJ 電力)
木質チップ	日本国内	182(トラック)	14.8~21.0 ²⁸⁾
木質チップ	ベトナム	3,700(船舶)	33.6 ²⁹⁾
木質ペレット	ベトナム	3,700(船舶)	12.2~14.9 ²⁹⁾

PKS	マレーシア	5,100 (船舶)	32.8~37.7 ²⁹⁾
-----	-------	------------	--------------------------

国内産の木質チップを国内各地から運送した場合と、ベトナムから船舶で輸送した場合の GHG 排出量と比較すると、輸入の方が多くなる。一方、木質ペレットを船舶で日本まで輸送する場合と木質チップをトラックで国内を運送する場合とでは、木質ペレットの船舶輸送の方がやや低いか、ほぼ同じ GHG 排出量となる。木質ペレットの方が木質チップより発熱量が大きいので単位電力当たりの GHG 排出量は少なくなるわけである。従って、燃料によっては、国内のトラック運送より輸入燃料の船舶輸送の方が GHG 排出量は少なくなる場合がある。今後、海外燃料を輸入する場合、輸送時の GHG 排出量も考慮して燃料の選択をすべきである。また、国内での近距離輸送は、GHG 排出量が少なくなるので、近隣の木材を利用するバイオマス発電所は環境負荷が小さいということになる。将来的には、船舶輸送も陸上のトラック輸送も EV あるいは水素エンジンが使われるので、輸送による GHG 排出問題は解消されるであろう。

V-4 残渣

まず第一に、バイオマスの循環型栽培という観点から、バイオマスの反応残渣の問題は重要である。バイオマス原料は、栽培土壌中からミネラルを吸収して成長する。バイオマス作物を収穫すると、その分、土壌中のミネラルが減少することになり、その補充はバイオマス栽培においては決定的に重要である。例えば、フランスのバイオリファイナリーでは、甜菜と小麦から、砂糖、スターチ、エタノールを製造しており、反応残渣は、繊維分と反応液である。繊維分は加工されて動物用飼料として使用される。反応液は、一旦タンクに貯蔵された後、成分調整されて、農場に散布される。反応液を農場に戻すことによって、極力、施肥の量を抑えるためである。農業だけでなく、林業においても資源循環は重要である。木材も成長する際、土壌中からミネラルを吸収する。植林する場合も、やはりミネラルの補充は必要になる。北海道工業試験所では、トドマツやカラマツから製造した木質ペレットを燃焼して残った灰分を分析している。その結果、灰中の成分は、酸化マグネシウム 3~7%、二酸化ケイ素 22~49%、リン酸 2~5%、酸化カリウム 12~13%、酸化カルシウム 14~27%、酸化マンガン 1~5% であり、肥料として十分使用できるということであった。同試験所は、木質ペレットの燃焼灰と堆肥を 1:7 で混合した肥料を作成し、カラマツ苗に施肥して安全性評価を行っている³⁰⁾。

次に、循環型社会の構築という観点からバイオマスの反応残渣は重要である。循環型社会は、資源の 3R (Reduce、Reuse、Recycle) を進めており、バイオマス製品の製造工程における残渣をいかに少なくするかということが課題になる。一般ゴミからエタノールを製造する久慈市のバイオリファイナリーでは、一般ゴミをガス化し、その混合ガスから合成ガス ($\text{CO} + \text{H}_2$) を分離して、微生物を用いてエタノールを製造している。

ガス化工程では残渣は残らず、全て気体になる。合成ガスを分離した後の混合ガスは、基準に従って大気中に放出される。バイオマス発電では、バイオマスを焼却するプロセスで重金属や塩素分が灰分中に濃縮されるので、その濃度によっては再利用されたり、産業廃棄物として処理されたりする。鹿児島七ツ島バイオマス発電所では、PKSの焼却灰は路盤材用原料として再利用されている。他の多くのバイオマス発電所では、産業廃棄物として処理されているようである。

バイオマスをガスや液体あるいは固体燃料に変換する技術として、炭化（熱分解）、ガス化、液化技術が開発されている。これらの転換技術は、プロセス（反応）条件によって、表 23 に示すように、常圧（低圧）・高温プロセスと、高圧・低（中）温プロセスに分類される。前者が、通常の ガス化、熱分解（炭化）であり、一般的に乾燥系バイオマスの転換に適用される。後者は、含まれる水分を利用するため、湿潤バイオマスに適している。このプロセスでは、500℃以下の温度で高圧あるいは超臨界流体中でバイオマスを液体に転換する。現在、実用技術といえるのは、前者の常圧（低圧）・高温プロセスであり、後者は研究開発、実証試験段階である。この場合は、灰を含む残渣をチャーとして回収するが、炭素材料等に利用するには性状・品質の安定化が必要である。

表 23 バイオマス処理法

圧力	反応様式	反応条件	乾燥	生成物
常圧	高温ガス化	800-1200℃ 0.1-1MPa	必要	ガス（合成ガス／CO、H ₂ 、等）
	熱分解	500-600℃ 0.1-1MPa		液体（重油状オイル） 固体（チャー）
高圧	低温ガス化	350-450℃ 10-20MPa	不要	ガス（メタン、H ₂ 、等）
	直接液化	250-350℃ 7-10MPa		液体（重油状オイル）

VI 提言

本調査研究を実施する中で、世界が脱炭素社会に向かおうとする滔々とした流れを感じざるを得なかった。航空運輸業界は、SAF を使わざるを得ない状況に追い込まれている。2027 年には SAF を使わない飛行機は欧州の空港を使えない状況になる。一方、東南アジアでも EV 化を目指し、これまでのバイオ燃料推進から舵をきった国も出てきた。また、コモディティの世界でも脱化石資源の動きが急である。総合化学各社は、バイオナフサの使用や回収プラスチックからの再生ナフサ使用を軸とした循環型経済に舵を切りつつある。課題は、SAF やバイオプラスチックの原料となるバイオマスの安定供給である。現在、SAF の原料として動植物廃油を用いているが、動植物廃油の供給は世界中で逼迫している。バイオプラスチックの原料となる草本系バイオマスの栽培には広大な土地が必要である。現状の耕作地利用を変更することなく、何百万トンと

いうプラスチック利用のためのバイオマスを栽培・供給することは容易ではない。また、バイオマス製品に対する社会受容も課題となっている。現状では、SAFを使用した航空機の料金やバイオプラスチックの値段は、化石資源を使う場合より割高になる。これを社会が高いコストを負担することなく受容するには、どうしたらいいか。それを解決する方法はまだ見えていない。

日本政府は、2050 脱炭素社会構築に向けて一次エネルギー供給における再生可能エネルギーの比率を引き上げようと計画している。例えば、電源構成における再生可能エネルギー比率を現在の 18%から 2030 年には 36~39%に引き上げる計画である。再生可能エネルギーとして期待されているのは太陽光発電と洋上風力発電であるが、これらの再生可能エネルギーは日照時間や気象条件に依存することが大きい。今後、一般電源における再生可能エネルギーの割合が高くなればなるほど、気象条件に左右されない安定した電源の確保が重要になる。バイオマス発電は、カーボンニュートラルな原料であるバイオマスを使用し、気象条件に左右されない安定した電源の一つであり、脱炭素社会構築に向けて導入を拡大していく必要がある。しかし、今回の調査研究で明らかになったように、バイオマス発電事業を持続可能にしているのは、固定価格買取制度(FIT)である。FIT が終了するとほとんどのバイオマス発電所は採算がとれなくなる。バイオマス発電ではスケールメリットが存在することから、大規模バイオマス発電所は、規模を更に拡大して発電効率を上げようとしている。一方、全バイオマス発電量の約 27%を担っている 10,000kW 未満の小規模発電所は、現状では FIT が終了すると持続可能な稼働が困難になる。その結果、地域では雇用が失われ、社会問題化する。何より 2050 脱炭素社会構築に向けた再生可能エネルギー拡大の動きにとって大きな頓挫になる。このように、2050 脱炭素社会構築に向けたバイオマス資源の利活用には様々な問題が立ちはだかっている。以上の問題意識を踏まえ、本調査研究の共同研究者は、2050 脱炭素社会構築に向けたバイオマス利活用推進のため、以下の提言を行う。

VI-1 短期的施策

(1) 発電効率の向上

小規模バイオマス発電所は、既存の設備の改良、乾燥を含む燃料の品質管理向上を行い、FIT 終了後も安定稼働可能なような発電効率の向上に努めるべきである。バイオマス発電所は、FIT が終了する頃は減価償却が終了しており、発電コストに占める固定費が低下している。燃料の品質管理や発電プロセスの見直し等で発電効率を上げれば、FIT 終了後も安定稼働できる可能性がある。

(2) 燃料コスト低下

林業関係者は、木材伐採、運送、チップ製造工程における value chain を見直し、小規模発電所が安定稼働可能なレベルまで燃料コストの低下に務めるべきである。

多くの国内立地/国内原料のバイオマス発電所は、地域の林業 value chain の中でプロフィットセンターとして、木材伐採、集積、運送、チップ製造等の value chain 上流の雇用を維持し、林業を支えてきた。バイオマス発電所の FIT 終了後は、林業の各プロセスにおけるコスト配分を見直し、燃料コストの低下に努めるべきである。

(3) 新規燃料開発

燃料として、これまで利用されてこなかった非可食農業残渣(例えば、稲わら、籾殻等)や草本系のバイオマス植物(例えば、ソルガム等)を使用する技術開発を行う。バイオマス発電用燃料は、主として間伐材等の未利用バイオマスが使われてきたが、森林維持の観点から、増産をすることが容易ではない。草本系のバイオマスは平地に栽培されるため収集・運搬が容易であり、これをペレット化して燃料として使うことでバイオマス発電所の燃料コストを下げる可能性がある。

(4) 既存設備改良に対する政策支援

日本政府は、小規模バイオマス発電所が FIT 終了後も安定稼働をするための設備改良を行う場合、技術的・経済的支援を行う枠組みを設置すべきである。小規模バイオマス発電所は地域の林業の value chain 維持のため稼働しており、規模を拡大して余剰利益を蓄積できるような事業構造になっていない。従って、FIT 終了後、設備改良しようとしても、設備投資のための資本がない場合が多い。地域の雇用を支えているような小規模バイオマス発電所が FIT 終了後に備えて設備改良する場合、設備投資を補助する公的枠組み(例えば、既存設備の改良のために J クレジットを利用できるようにするとか)が必要である。

(5) バイオマスのトレーサビリティ(Traceability)推進

国は、バイオマスのバリューチェーン全体にわたるライフサイクルアセスメント(LCA)-GHG の把握を可能にするバイオマスのトレーサビリティ推進のため、省庁横断的なプロジェクトを実施すべきである。バイオマスは再生可能なエネルギーや炭素資源であるが、一方、その使用には環境破壊や食料との競合が問題になる場合がある。バイオマスを持続可能かつ環境負荷を最小限になるよう使用するには、出自を明らかにし、使用から廃棄までバイオマスのバリューチェーン全体にわたって追跡することが必要である。バイオマスのトレーサビリティは、従来は紙による証明書や既報のインベントリーデータなどが用いられて来たが、手間と人手がかかり、実用的ではなかった。最近、高性能なデジタルトランスフォーメーション(DX)を活用する事で、人手を煩わせずに迅速、正確、安価にデータを採取することが可能になりつつある。例えばフィールドに強い無線通信ネットワーク[国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)が開発した対災害ネットワークのナープネットなど]やクラウド用いずに地域限定で処理する AI エッジ PC システムを用いる事により、セキュリティを担保しながらも画像を含む各種センサーで得られたデータを取

得・利用する事ができるようになってきた。

VI-2 中長期的施策

(1) 新規技術開発

国のエネルギー供給における安定な再生可能エネルギーの比率を上げるために、バイオマス発電の発電効率を上げる技術開発に務めるべきである。そのため、日本政府は、高効率なバイオマス発電の新規技術開発を可能にする枠組み(ファンド、プログラム)を構築すべきである。現行のバイオマス発電装置は、石炭火力発電の装置を転用したもので、湿気が多いバイオマス用に最適化されたものではない。ガス化発電装置も実用化はされているが、実際の稼働ではトラブルが多い。金属酸化物を用いてバイオマスから CO_2 を分離しつつ水素と電力を供給できるケミカルルーピングのような発電効率の高い新規のバイオマス発電装置の開発が待たれている。

(2) バイオクラスター

新設のバイオマス発電所は、熱電供給を基本とし、産業コンプレックスや次に述べるバイオリファイナリーとクラスター形成を行うべきである。バイオマス発電では主としてバイオマスを燃焼させて水蒸気を発生させて発電しており、発電効率は20～30%に留まる。バイオマスを燃焼する際発生する熱の多くは系外に放出されて、失われる。系外に放出されている熱を利用できれば、発電と併せてエネルギー利用率は80%程度まで上昇する。林野庁や木質バイオマス資源エネルギー協会などは、バイオマス発電の熱電併用を推進しているが、発電所から遠距離にある既存設備への熱利用は熱損失が大きく経済的ではない。新規にバイオマス発電所を設置する場合は、FIT 無しで採算が取れるよう産業コンプレックスやバイオリファイナリーとのクラスター化を条件にするような指導が必要である。

(3) 特区指定によるバイオクラスター推進

農産物集散地を特区として複合型のバイオリファイナリー/バイオマス発電所を中心とするバイオクラスターを構築し、バイオコモディティ製品の製造を行うとともに、地域へ電力を供給する。特区においてバイオマス製品を製造する企業の法人税を優遇する。例えば、福島を特区としてイネ、ソルガム、トウモロコシ等を輪作して一年を通してバイオマス原料を供給するシステムを構築する。複合型のバイオリファイナリーを新設し、バイオ燃料やグリーン水素、バイオプラスチック等を製造する。製造プロセスから出てくる廃棄物を用いてバイオリファイナリーに熱電供給を行うとともに地域へ電力を供給する。福島に複合型のバイオリファイナリーを新設することで安定した雇用を生み出し、放射能被害で離村した人々を呼び戻す。

(4) バイオマス製品へのインセンティブ

特区において製造されるバイオマス製品の社会受容を促すインセンティブ(例えば、バイオマス製品の消費税免除や消費税相当分のポイント付加)を設ける。

VI-3 国際協力に関する施策

日本工学アカデミー サステイナブル・バイオマスアジアプロジェクトは、2020 年 11 月に東南アジアとの国際協力を骨子とする以下の政策提言を行った³¹⁾。

(以下引用)

VI-3-1 作成の背景

バイオマスの利活用に関し、研究開発・社会実装を巡る国際環境の大きな、かつ急激な変化に対応するとともに、これまで多くの共同研究開発の努力がされてきたにも拘らず、社会実装にいたらなかったことを反省し、その社会実装を目指した大きな方向転換を図る。これまでの共同研究開発の反省と本プロジェクトでのバイオマス利活用の調査に基づき、東南アジアにおけるバイオマス利活用の社会実装に関わる問題点を明らかにし、脱炭素社会の実現、及び「持続可能な開発目標 (SDGs)」達成に向けた解決策を提示することとした。

VI-3-2 現状の問題点

東南アジアにおけるバイオマス研究開発のパワーバランスが変化している中で、日本は東南アジアでのバイオマスエネルギーの普及をリードする立場へと方向転換をする必要がある。そして、バイオマスの利活用社会実装における課題は、次の点である。

- (1) バイオマス原料の安定供給
- (2) 技術面の課題～産業技術として求められる技術開発のスケラビリティ
- (3) 東南アジア諸国の多様性に対応した戦略の構築と情報共有メカニズムの不足
- (4) 産業界の参画の少なさと戦略的なバイオマス開発方針の欠如

VI-3-3 提言の内容

バイオマスの社会実装促進によるエネルギー・環境問題の解決に向けての提言は次の 4 点が中心である。

- (1) 「東南アジアバイオマス協会 (仮称)」の設立 東南アジアのバイオマス研究者、政府、民間企業をメンバーとした「東南アジアバイオマス協会 (仮称)」の設立により、政策情報の共有、技術と経験の共有、人材育成に取り組むべきである。
- (2) 東南アジア域内でのハブ機関およびサテライト機関の設置 東南アジア諸国における拠点形成とネットワーク化が重要であり、大陸部、島嶼部の 2 カ所にハブ拠点を置き、研究体制が未整備の国にはハブ機関と緊密に連携するサテライト機関を設置し、日本と東南アジア諸国のバイオマス関連の研究開発・社会実装・人材育成を進めるべきである。
- (3) 日本国内における協力体制の整備 日本国内の大学、公的研究機関、企業、政府が一体となり、国際産官学連携に向けて、資金面・人材面での体制整備を行うべきである。

- (4) バイオマス利活用技術に関わる戦略的アプローチの構築 [短期的アプローチ]
として、エネルギー効率の向上、バイオ燃料の開発、バイオリファイナリー技術の開発を行い、[中長期的アプローチ] として、バイオリファイナリーの確立、人材育成、若手人材への継承を行うべきである。
- (以上)

日本工学アカデミーのサステイナブル・バイオマスアジアプロジェクト グループは、この提言内容の実現に向けた活動を行っており、2021 年 10 月には東京農工大学を拠点とする COI-NEXT 事業「炭素循環型社会実現のためのバイオエコノミー共創拠点」³²⁾の立ち上げに貢献した。今回の調査研究では、2020 年 11 月の政策提言に加え、以下の事項を提言する。

(5) 安定供給可能なバイオマス原料および生産・利用技術の開発

日本は、東南アジア諸国と連携して大量に安定供給可能なバイオマス原料の開発に注力すべきである。リグノセルロースは、植物の細胞壁の主成分であり、植物の乾燥重量の 30～50%を占めている。地球上におけるリグノセルロースの生成量は約 2×10^{11} トン/年であり、地球上における最も豊富なバイオマス原料である。日本は、籾殻や稲わらからバイオエタノールを開発しようとした経験があり、この経験を利用して東南アジア諸国と連携してリグノセルロースからのバイオマス原料開発に取り組むべきである。リグノセルロースをバイオマス原料として利用できる技術開発が進めば、これまで利用されてこなかった木材や非可食農業残渣(例えば、稲わら、籾殻等)、草本系植物のバイオマス原料としての利用が可能になる。特に、世界で年産約 7.2 億トン生産されているコメの約 9 割がアジアで栽培されている。その副産物である稲わらは世界で約 3.5～5 億トン(日本では約 900 万トン)、籾殻は約 1.6 億トン(日本では約 200 万トン)生産されている。これらの副産物は、現状の土地利用を変更することなく大量に利用できるバイオマスであり、原料として開発された場合のインパクトは大きい。

コメの副産物である稲わらや籾殻を利用する時、一つ注意しておくべきことがある。稲わらや籾殻にはシリカが 15～25%含まれており、裁断等の前処理をする際切断機の摩耗を起こしたり、灰分に含まれる金属塩により、ボイラー等の腐食を起こしたりすることがあるからである。これまで、稲わらや籾殻中のシリカは産業資源としては利用されてこなかったが、最近になって籾殻中のシリカを低燃費タイヤの原料として使用する動きが出てきた³³⁾。また、稲わらや籾殻中のシリカは非常に純度が高いことが知られており、処理の方法によってはシリコンとして太陽光発電や半導体の材料になりうる³⁴⁾。

もう一つの大量に安定供給可能なバイオマスとして非可食性油糧植物が生成する植物油がある。非可食性油糧植物としては、微細藻類、カリナタやポンガミアがある。

微細藻類は世界中で検討されているが、大量培養に問題を残しており、実用化には時間が掛かりそうである。カリナタは近年米国東南部で大規模栽培がおこなわれ、地域の新産業として期待されている。ポンガミアは、インドネシアで石炭の露天掘り跡地の修復に向けて検討されつつあり、LCA 評価も高く、今後は環境保全と併せた開発が期待されている。これらの油糧植物からの植物油は、何れも SAF の試験生産とエアラインの実機によるフライトテストも終了し、性能的には問題が無いことが実証されている。

(6) サステイナブル・パームプランテーション推進協力

日本の大規模バイオマス発電所の多くが PKS や EFB のようなパーム油製造に伴う副産物を輸入している。パーム油産業は、東南アジアにおける主要産業一つであるが、環境保護の面から様々な問題が存在する。例えば、パーム農園においては、現在、水溶性有機化合物を含む大量の廃水(Palm Oil Mill Effluent、POME)による生態系の破壊が大きな問題になっている。大量の POME の排出が、水生生物の酸素欠乏と窒息を引き起こしているのである。日本は、POME の環境負荷を低減する新しい浄化処理技術を持っている。これを活用してパーム産業における廃水問題解決に貢献することで、東南アジアにおける持続可能なパーム農園(サステイナブル・パームプランテーション)推進に協力すべきである。

また、東南アジアのパーム油生産者の多くは小規模農家である。小規模農家の多くは政府による支援が届かないため、環境対策も十分ではなく、経営危機に陥る可能性がある。これらの小規模農家に対して、適切な肥料散布、効果的な病虫害防除、収穫方法改善、適切な環境対策などの圃場管理技術教育・技術指導を行い、持続可能なパーム農園経営に協力することが大事である。これらの小規模農家に対する支援は、政府開発援助（ODA）の枠外にあるため、JICA 等の支援が得られないでいる。そこで、NGO 等に働きかけて、東南アジア小規模農家支援に係るプログラムを開発し、支援を行う。

以上

引用研究調査報告書及び参考文献

- 1) 西嶋昭生、佐村秀夫、坂西欣也、竹内和彦、「真庭バイオマス発電所 調査報告書」、2022 年 6 月 10 日（訪問日 2021 年 12 月 16-17 日）
- 2) 大戸範雄、佐村秀夫、「宮の郷・だいがバイオマス発電所 調査研究報告書」、2022 年 5 月 19 日（訪問日 2022 年 5 月 11-12 日）
- 3) 佐伯とも子、匂坂正幸、西嶋昭生、「群馬県多野郡上野村バイオマス発電所訪問調査報告書」、2022 年 6 月 1 日（訪問日 2022 年 5 月 26-27 日）
- 4) 竹内和彦、村上秀之、「セツ島バイオマス発電所 調査報告書」、2022 年 6 月 10 日（訪問日 2022 年 1 月 18 日）
- 5) 匂坂正幸、坂西欣也、「東南アジアにおけるバイオマス発電調査 インドネシアパーム残渣（EHB）発電（インドネシアバイオマス発電聞き取り調査報告書）」（訪問日 2022 年 6 月 17 日）
- 6) 電気事業連合会、「電源別発電電力量の推移」
(<https://www.fepc.or.jp/smp/nuclear/state/setsubi/index.html>)
- 7) 相川 高 信、「統計を読む 日本のバイオエネルギーの発電量」
(<https://www.renewable-ei.org/activities/column/REupdate/20210908.php>)
- 8) （一社）日本有機資源協会・（一社）木質バイオマスエネルギー協会、「国産バイオマス発電の導入見通し」2021 年 3 月 22 日
(https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/03_03_00.pdf)
- 9) 住友商事（株）生活資材事業推進部、「燃料用バイオマス事情について」
(https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/031_06_00.pdf)
- 10) 坂西欣也、匂坂正幸、「マレーシアにおけるパームバイオリファイナリーヒヤリング調査報告」、2022 年 8 月 2 日（訪問日 2022 年 6 月 29 日）
- 11) （一社）木質バイオマスエネルギー協会、「小規模バイオマス発電をお考えの方へ導入ガイドブック」(<https://jwba.or.jp/library/jwba-shoukibo-guidebook/>)
- 12) （一社）地球・人間環境フォーラムホームページ、「見解：バイオマス発電は「カーボン・ニュートラル(炭素中立)」ではない」
(<https://www.gef.or.jp/news/info/biomassisnotcarbonneutral/>)
- 13) 明石信廣、「森林の二酸化炭素吸収と間伐施業の効果」、光珠内季報、No. 134 、5-7(2004)
- 14) 神本正行、大戸範雄、澤一誠、坂西欣也、「Green Earth Institute 株式会社（以下、GEI）かずさ研究所訪問調査報告書」（訪問日 2022 年 3 月 31 日）
- 15) 高圧化学工業（株）ホームページ
<http://www.koatsuchem.co.jp/news/detail08.html>
- 16) 大竹正之、「Neste Oil Renewable Fuel Processes（シンガポール・ネステ調査報告書）」、2022 年 9 月
- 17) D. Luna et al., “Technological challenges for the production of biodiesel

- in arid lands”, Journal of Arid Environments, 102, 127-138 (2014) の図を改変
- 18) 大戸範雄、野村正勝、「三井化学 ESG 推進室との面談メモ（三井化学調査報告書）」、2022 年 2 月 27 日（面談日 2022 年 2 月 22 日）
 - 19) 三井化学（株）ホームページ
https://jp.mitsuichemicals.com/jp/release/2021/2021_0520.htm
 - 20) 同上 https://jp.mitsuichemicals.com/jp/release/2019/2019_0926.htm
 - 21) 坂西欣也、澤一誠、「積水バイオリファイナリー（株）久慈事務所調査報告」、2022 年 9 月 2 日（訪問日 2022 年 8 月 18 日）
 - 22) 積水化学工業（株）ホームページ
https://www.sekisui.co.jp/news/2022/1373478_39136.html
 - 23) 佐伯とも子、大戸範雄、「バザンクール・ポマクル・バイオクラスター調査報告」、2022 年 7 月 15 日（訪問日 2022 年 6 月 22-23 日）
 - 24) 佐村秀夫、西嶋昭生、「タイ・バイオリファイナリー調査のためのバンコク訪問報告」、2022 年 7 月 21 日（訪問日 2022 年 7 月 4-5 日）
 - 25) 森泉由恵、Piyawan Suksri、本藤祐樹、和気洋子、「タイにおけるバイオエタノール導入—の取り組み(Ⅱ)」、Digital Asia Discussion Paper Series, DP07-002 (2007)
http://www.hondo.ynu.ac.jp/hiroki/bioethanol_J_2.pdf
 - 26) Sudhakar Takkellapati, Tao Li, and Michael A. Gonzalez, “An Overview of Biorefinery Derived Platform Chemicals from a Cellulose and Hemicellulose Biorefinery”, Clean Technol Environ Policy. 2018 September; 20(7): 1615-1630
 - 27) 林野庁、「令和 3 年木材需給表（参考資料）」
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kikaku/attach/pdf/220930-1.pdf>
 - 28) 第 12 回 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 資料 3「国産材を活用した 木質バイオマス発電における GHG 排出量の試算について（一社）日本木質バイオマスエネルギー協会」（012_03_00.pdf (meti.go.jp)
 - 29) 第 12 回 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 資料 2「バイオマス燃料のライフサイクル GHG 試算結果と今後の取組について（一般社団法人バイオマス発電事業者協会）」（012_02_00.pdf (meti.go.jp)
 - 30) 高橋徹、富田恵一、若杉郷臣、山田敦、折橋健、古賀信也、「木質バイオマス燃焼灰の安全性評価および有効利用」、第 19 回廃棄物学会研究発表会、2008 年 11 月 19 日、C5-11
 - 31) EAJ 報告書「サステイナブル・バイオマスアジア成果報告書 — 東南アジア諸国

と国内産官学のバイオマス利活用社会実装に向けた提言」
(https://www.eaj.or.jp/eajlocal/wp-content/uploads/2021/10/eaj-report-proj-20201113-02_r.pdf)

- 32) 「炭素循環型社会実現のためのバイオエコノミー共創拠点」 (東京農工大学 COI-NEXT) ホームページ(<https://sp.coinext.tuat.ac.jp/>)
- 33) エボニックジャパン(株) ホームページ、「エボニック、タイヤ業界向けにバイオベース原料シリカ提供へ」(<http://corporate.evonik.jp/ja/-178109.html>)
- 34) R. Nagahata, Y. Mori, Y. Saito, K. Takeuchi, R. Benioub, Y. Shimizu, M. Shimizu, “Microwave-assisted carbothermal reduction of rice hull ash to biogenic silicon”, Bioresource Technology Reports, 19 (2022) 101173

参考資料

会議開催記録（開催日時、参加者）

（対面）と記載している以外は、オンライン会議とした。

運営委員会

2021 年 10 月 8 日 15 : 00-17 : 00

佐伯とも子、西嶋昭生、佐村秀夫、坂西欣也、大戸範雄

2022 年 3 月 10 日 11 : 00-11 : 30 （対面）

佐伯とも子、西嶋昭生、佐村秀夫、大戸範雄

4 月 28 日 10 : 00-11 : 30

佐伯とも子、西嶋昭生、佐村秀夫、坂西欣也、大戸範雄

7 月 29 日 17 : 00-18 : 00

佐伯とも子、西嶋昭生、佐村秀夫、坂西欣也、大戸範雄

8 月 12 日 15 : 00-16 : 30

佐伯とも子、西嶋昭生、佐村秀夫、坂西欣也、大戸範雄

全体連絡会

第 1 回 2021 年 11 月 22 日 16 : 00-17 : 00

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、神本正行、野村正勝、村上秀之、澤一誠、坂西欣也、大戸範雄

第 2 回 2021 年 12 月 24 日 15 : 30-17 : 00

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、神本正行、野村正勝、村上秀之、澤一誠、匂坂正幸、大戸範雄

第 3 回 2022 年 1 月 28 日 15 : 30-17 : 00

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、神本正行、野村正勝、村上秀之、澤一誠、匂坂正幸、永井祐二（早稲田大学）、大戸範雄

第 4 回 2022 年 3 月 4 日 15 : 30-17 : 30

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、神本正行、野村正勝、村上秀之、澤一誠、坂西欣也、永井祐二（早稲田大学）、大戸範雄

第 5 回 2022 年 4 月 8 日 15 : 00-16 : 50

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、神本正行、村上秀之、澤一誠、坂西欣也、匂坂正幸、永井祐二（早稲田大学）、大戸範雄

第 6 回 2022 年 5 月 20 日 15 : 00-16 : 50

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、野村正勝、村上秀之、澤一誠、坂西欣也、匂坂正幸、永井祐二（早稲田大学）、大戸範雄

第 7 回 2022 年 7 月 1 日 15 : 00-16 : 50

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、野村正勝、村上秀之、澤一誠、坂西

欣也、匂坂正幸、永井祐二（早稲田大学）、大戸範雄

第8回 2022年7月29日 15:00-16:50

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、野村正勝、村上秀之、澤一誠、坂西欣也、匂坂正幸、大戸範雄

第9回 2022年9月2日 15:00-17:00

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、野村正勝、村上秀之、神本正行、坂西欣也、匂坂正幸、大戸範雄

第10回 2022年9月9日 15:00-17:00

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、野村正勝、村上秀之、神本正行、澤一誠、坂西欣也、匂坂正幸、大戸範雄、大竹正之

第11回 2022年9月22日 15:00-17:00

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、野村正勝、神本正行、澤一誠、坂西欣也、匂坂正幸、大戸範雄、大竹正之

第12回 2022年9月30日 15:00-16:30

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、神本正行、坂西欣也、匂坂正幸、大戸範雄、大竹正之

第13回 2022年10月7日 15:00-16:30

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、野村正勝、澤一誠、坂西欣也、匂坂正幸、大戸範雄、大竹正之

第14回 2022年10月12日 16:00-16:30

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、野村正勝、澤一誠、坂西欣也、匂坂正幸、大戸範雄、大竹正之、神本正行

第15回 2022年10月25日 9:30-11:30（対面）

西嶋昭生、佐伯とも子、佐村秀夫、竹内和彦、野村正勝、澤一誠、匂坂正幸、大戸範雄、神本正行

真庭バイオマス発電所 調査報告書

2022.6.10

調査目的：

岡山県真庭市のバイオタウン構想および関連した制度・施設（制度真庭バイオマス発電所、バイオマス集積基地、企業に設置されたバイオマス発電設備）などを視察し、現状、問題点、課題などを調査する。

調査日時：2021 年 12 月 16～17 日

調査員：西嶋、佐村、坂西（訪問手配）、竹内（報告書作成）

調査場所・対応していただいた方・調査内容：

12 月 16 日：

①真庭市役所（真庭市久世 2927-2）

真庭市産業観光部林業・バイオマス産業課 主査 道下昌弘 様

真庭市の概況、バイオマス資源の活用・発電事業に対する市の取り組みの状況、
バイオマスエネルギーを活用した庁舎内空調設備など

12 月 17 日：

②真庭市観光局（真庭バイオマスツアー）（真庭市勝山 654）

一般社団法人真庭観光局事業部 森脇由恵 様

バイオマス関連施設を案内するバスツアーの状況

③真庭バイオマス集積基地（木材集積・貯木・チップ工場）（真庭市三田 131）

真庭木材森林事業協同組合総務部総務課 藤井瑞穂 様

バイオマスの安定供給拠点の見学

④真庭バイオマス発電所〔真庭産業団地〕（真庭市目木 1-1）

真庭バイオマス発電(株)所長 坂本多加雄 様

1 万 kWh のバイオマス発電所の見学

⑤銘建工業(株)（真庭市勝山 1209）

執行役員・バイオマス事業部長・生産技術部長 坂本規 様

総務人事部長 中島洋 様

（a）CLT 活用新事業所

（b）工場併置型 5000 kWh バイオマス発電設備

（c）木屑利用のペレット工場

調査結果：

（1）真庭市の概況

- ・岡山県最北部、鳥取県に隣接する県内最大面積の市。
平成 17 年に 9 町村の合併で誕生（市制 17 年目）

- ・地勢：面積 約 828 km²（東京 23 区の 1.3 倍）縦長 南北 50 km x 東西 30km
標高 110m～1202m
豊かな山林資源 森林率 約 80%（日本平均 67%）
- ・気候：北部 豪雪／南部 温暖小雨
- ・人口：約 4.4 万人（2021 年 4 月）←約 5.7 万人（1995 年）から単調減少
このまま推移すると 2040 年には 3 万以下にまで減少する予想→3.4 万人の人口維持をめざす
高齢人口 25.7%（1995）→39.7%（2021）→42.9%（2040）



真庭市の位置

- ・産業：農林業（西日本最大の木材集散地、日本最大のジャージー牛酪農）、商工業、観光など

（2）真庭市の課題（問題点）

- ・急激な人口減少と高齢化→まちの活力の急激な衰退を招くおそれ
- 4 つの空洞化：人口減少、地域産業の衰退、耕作放棄地、自信と誇りの喪失
地域維持困難、労働力・消費者の減少、高齢化による社会保障費の増大

・真庭市の強み

山林面積 65834ha－私有林 77%（人工林 57%、国土調査 95%）、県私有林 19%、国有林 11%
木材・木製品製造業（製造品出荷額の約 27%）
人工林－ヒノキ 72%、杉 22%

- 8～13 齢級が多い－10 齢級(14～16cmφ)頃が材木として適当、高齢級は規格外
- ・ブランド「美作桧」を中心に木材生産・販売が盛ん＝西日本有数の木材集散地
上流（林業）から下流（製材、家具製作）まで揃った林業関係産業
[素材生産業者] 約 20 社、約 240 人従事（平均年齢 40 歳代）
[森林組合] と連携、高性能林業機械の導入
[原木市場] 2 社、3 市場（約 13.8 万 m³/年）－岡山県取扱量の 1/3
[製材所] 約 30 社

原木丸太仕入量 約 20 万 m³/年、製材品出荷量 約 12 万 m³/年

→差 8 万 m³/年＝バイオマス資源として活用
[製品市場] 1 市場（家一軒分の建設用材が揃うマーケット）

1. 真庭バイオマス発電所

【概要】

①運営体制

事業者・発電所：真庭バイオマス発電株式会社（真庭市目木 1-1）平成 25 年 2 月設立

資本金：2 億 5 千万円

出資者：真庭市（3 千万円）、銘建工業、真庭森林組合、真庭木材事業協同組合、

岡山県森林組合連合会、岡山県北部素材生産協同組合など地域内林業・木材関係団体など

運転開始：2015 年 4 月

運営人員：オペレータ 10 名、事業所 5 名

②発電設備

建設担当会社：(株)タクマ

（ボイラー_タクマ、タービン_新日造、発電機_シンフォニア）

型式：ストーカ方式ボイラー（燃料の種類によらず燃焼可能）

／空冷式復水器（山地で水不足のため、空冷用電力が必要）

発電規模：10,000 kW（22,000 世帯分の需要に相当、真庭市約 18,000 世帯）

送電能力：9,300 kW

年間発電量：約 82,400 MWh（2020 年度、順調稼働、大きなトラブルなし）

利用燃料：木質バイオマス

計画 約 14.8 万 t/年 [一般木材 5.8 万 t/年、未利用木材 9 万 t/年、含水率 50%想定]

実際 約 11.7 万 t/年（地域の未利用木材、製材端材、樹皮などを活用）

含水率低下実現 35～40%のため

運転日数：330 日/年 x 24 時間、稼働率 104%

③経済効果（稼働 6 年目の実績）

固定価格買取制度（FIT）で売電：FIT 認定 2013 年 8 月（期間 20 年、税抜）

間伐材 32 円/kW、一般材 24 円/kWh

売上高：約 22.3 億円

燃料購入：約 14.7 億円（未利用木材：一般材＝6：4）

石油代替：約 3.3 万 kL＝約 27.7 億円相当（灯油 84 円/L で算出）

電力供給先：新電力→中国電力

約 2 km 先の中国電力の送電網に接続するため鉄塔などの送電設備を自前で整備

＝約 2 億円で、これも比較的安価（送電網まで距離があると結構高価）

この結果

・未利用や産廃処理（処分費 1 億円以上に相当）されていたものが資源として有価で取引されるようになった。

・素材業者（約 20 社）や製材会社（約 30 社）の利益向上

・山林所有者へ燃料代のうち 500 円/t（2021 年度より 550 円/t に増額）を直接還元

合計還元見込額：約 2 億円（税込、H26.10～R3.3）

・波及効果

[バイオマス発電所]

エネルギー自給率：11.6%→約 32.4%

林地残材整理が促進→山がきれいに、再植林が容易になった

CO₂削減量：発電所のみで約 81,000 t-CO₂

[バイオマスタウン]

新たな雇用の創出、若年者の新規雇用（50+αの新規雇用創出）

コミュニティに一体感の醸成

現在、国内では 100 件以上のバイオマス発電所が稼働しているが、燃料不足により出力を落としている発電所や、燃料として輸入チップやペレットを主とするところも存在するのが実情である。そのような中で、真庭バイオマス発電所は主に地域の未活用木材を燃料として使用することで、地域の森林所有者、林業関係者への利益還元、また雇用増などの波及効果を生み出している。

順調な稼働の理由：

①バイオマス集積基地

- ・真庭木材事業協同組合（製材所の組合、同発電所の株主）が運営するバイオマス集積基地は、地域の木材資源の収集・加工・供給を目的として 2009 年に設立され、当発電所が使用する 1 万 t/月のチップのうち約 40%を供給している。

- ・複数種のチップパーで、木の幹、樹皮、枝葉にいたるすべての部位をチップ化可能。また、チップパーを有しない近隣林業関係業者からも木材を購入しており、広い地域から木材を集めることで、操業に十分な量を確保している。余剰分は岡山県内や鳥取県のバイオマス発電所にも供給。

- ・当発電所の近く（約 1km）に位置するため運搬費も小額。バイオマス発電所を運営するにあたり、近隣に木材収集能力のあるチップ供給業者があることは非常に重要である。

- ・当発電所がストロカ方式のボイラーを採用したことも重要な要因で、樹皮・枝葉の燃焼も可能（現在使用する燃料の 30%程度は樹皮・枝葉）。これまで樹皮・枝葉は一部堆肥に利用されるのみであったが、当発電所でエネルギー資源として有効に活用可能となった。

②原料チップ供給側の対応

(a)QR コードシステムによる供給業者・材質の追跡保証

- ・木材の生産者と材質（未利用材、一般材の区別）を QR コードに記録してチップ業者やバイオマス発電所へ引き継ぐことにより、FIT 発電コストを明確にすることにより、電力業者の信用を得、また生産者へ正当な補償を返すことができるようになった。

(b)未利用残材や産業廃棄物の有価化

- ・森林では、以前は伐採時に出る林地残材はほとんど山に放置されていたが、発電事業で有価となったため持ち出せるようになった。このため残存廃棄材が減り山が整頓され、土壌が強靱化され、再造林がしやすくなった。

- ・木材のうち用材として使用できない部分はチップになる。製紙用途では高い品質が要求されるが、発電所で燃料として購入してくれるほうが効率的。

- ・製材所では、以前は樹皮やおがくずやかんな屑の処分に多額の費用を要していたが、発電に使うことで処分が容易になり、また一定の増収益につながった。

③今後の課題

(a)FIT 制度

- ・現在のバイオマス発電が FIT 制度（売電価格）に大きく依存しており、FIT 終了後にも現在の体制・システムを維持できるよう対策を早期に立てることが重要である。バイオマス発電の FIT

の契約期間は 20 年で、真庭バイオマス発電所はすでに 6 年以上経過。現在のすべての供給業者が懸念している。

・FIT 終了後、万一真庭バイオマス発電所が稼働停止になった場合、チップ供給業者の経営や地域の森林環境にも悪影響が生じる可能性がある。

(b)FIT 後の対策

現在、関係者（市役所、発電者、燃料生産者など）は、

・用材として使用できない部位をエネルギー資源として利用するというバイオマス発電のシステムを保つために、木材の需要を増やし、木材自給率の向上を図るとともに、林業の効率化と生産性の向上を図り、燃料となるチップもより効率的に大量に製造できるような体制を整える必要がある。

- ・発電所の運営コストを下げるよう努力をする。
- ・チップそのものをより安価で効率的に供給できるよう、地域の林業そのものを改善する。
- ・還元金や補償金をそれなりに減額することを各事業者の理解を得る。

などの対策を考えているようであるが、決定策には至っていないというのが現状のようである。（まだ少し時間があるのでそれほど切迫した状況には感じられない…？）

2. 木質資源収集・燃料供給体制の強化

木質資源を「証明」し、加知を創出し、山元への「利益還元」を含めて流通する仕組み

①真庭バイオマス集積基地

②産地証明を含めた QR コードを用いる情報カードによる取引手続きの簡素化

①真庭バイオマス集積基地

実施主体：真庭木材事業協同組合

実施場所：真庭市目木 1-34

設置年：2009 年

設置目的：利用率の低い林地残材や製材所で発生する樹皮などを集積、貯木し、チップ化してバイオマス燃料を製造する。2つの工場を有している。

敷地面積：第一工場（1.1ha）、第二工場約（2.4 ha）

総事業費：約 5.4 億円

収容量：4 万 t

取扱木材：林地残材、樹根、製材所で発生する樹皮、家具廃材、竹、建築廃材（金属を含まないもの）など。真庭市内および岡山県内南部や鳥取県を含む近隣地域からも広く素材を受け入れている。受入量は十分で、不足の事態にも対応可能としている。



②産地証明を含めた QR コードを用いる情報カードによる取引手続きの簡素化

経緯：FIT 制度では燃料用素材の種類（一般材、未利用材）によって売電価格が異なるので、産地や種類を明らかにするシステムが必要となった。

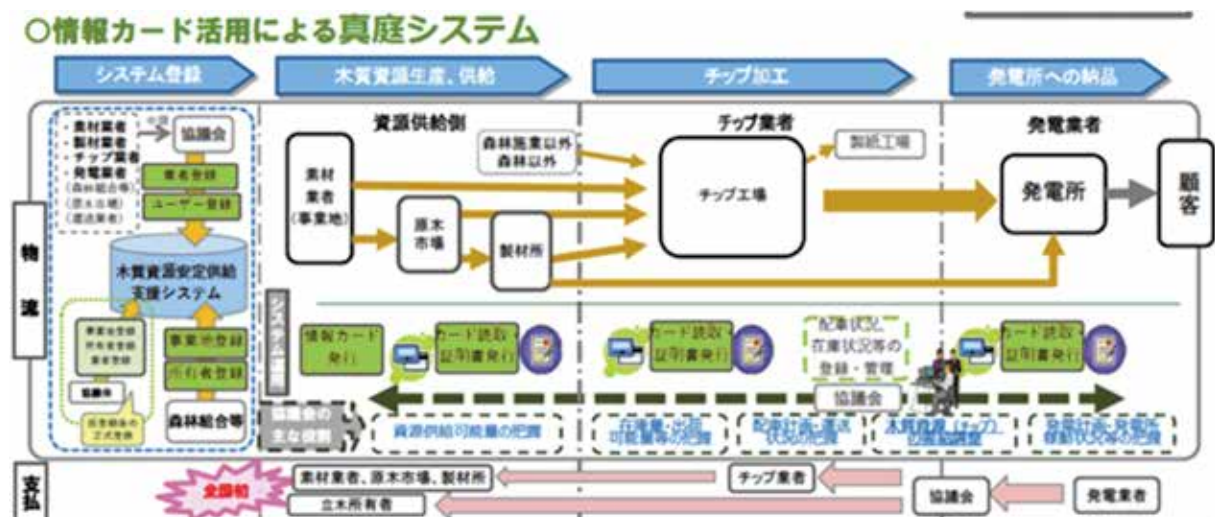
実施主体：木質資源安定供給協議会

設立：平成 25 年 3 月

参加者数：90 社・団体

活動内容：関係者の連携により素材の生産者や材質・流通・精算までのまでの情報を証明・共有し、QR コードを用いた IT 情報管理システムにのせるとともに、バイオマス発電所へ燃料として供給する。これにより、売電先の信用を得るとともに、山元などへの公正な直接的利益還元を行う。

波及効果：最近、長野県塩尻市のバイオマス発電所でも本システムの活用されたようである。





取引に用いる情報カード

3. 銘建工業(株)のバイオマス発電設備

銘建工業株式会社：真庭バイオマス発電の中核的企業

所在地：岡山県真庭市勝山 1209

創立：1923 年 中島材木店（製材所）創立、1970 年 銘建工業(株)に名称変更

資本金・従業員：3280 万円・302 名

取扱品目：集成材、CLT（Cross Laminated Timber 直交集積版）、製材、バイオマス、
木質建設物の建設請負など

バイオマス発電関連事業

自社工場内で発生する木屑（婦レナー屑）を燃料利用

発電能力・稼働開始：第一号機（1998 年）1,950 kW/h、第二号機（2021 年 8 月）4,990 kW/h

制作企業：(株)タクマ、ストーカ方式ボイラー／水冷式復水器

電力供給先：工場内の使用電力を賄い、余剰分を売電

木質ペレット

工場内で発生する木屑を原料利用（原木は主に北欧材）

木の成分であるリグニンで固形化（接着剤不使用）

製造開始：2004 年

生産量：約 25,800 t（2020 年）日本第 3 位 → 国内各地に出荷

4. 真庭市役所のバイオマス空調設備

真庭市役所本庁庁舎

2011 年 4 月開庁

自然エネルギー活用

バイオマスボイラ（いずれもスイス・シュミット社製）

チップボイラ（メイン）：能力 550 kW、サイロ 27 m³、燃料使用量 0.8 t/日（150 t/年）

ペレットボイラ（サブ）：能力 450 kW、サイロ 27 m³、燃料使用量 0.4 t/日（75 t/年）

空調対称面積：1～3回フロア／約 3,000 m²、床下から送風



チップボイラ

チップ

ペレット

【参考資料】

真庭市林業・バイオマス産業課、「バイオマス活用推進の取り組み～”バイオマス産業杜市・真庭”を目指して」、(2021 年 12 月 16 日)

太田昇（真庭市長）、「『里山資本主義』真庭の挑戦～地域資源を活かした真庭市の挑戦～」、平成 30 年 9 月 27 日 第 32 次地方制度調査会第 3 回専門小委員会、
https://www.soumu.go.jp/main_content/000576235.pdf

真庭観光局、「バイオマス産業杜市"真庭" ツアーガイドンス」(2018 年 9 月 1 日)

自然エネルギー財団、「バイオマス発電を支える地域の木材と運転ノウハウ岡山県・真庭市で 2 万 2000 世帯分の電力を作るー」、連載コラムシリーズ「自然エネルギー活用レポート」、No.2（概要版）(2017 年 6 月 30 日)

中島浩一郎（銘建工業社長）、「真庭バイオマス発電所 ～順調な稼働の理由と今後」、京都大学再生可能エネルギー経済学講座、NO.167、(2020 年 1 月 9 日)、www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/stage2/contents/column0167.html.

銘建工業(株)、「銘建工業本社工場エコ発電所第 2 号発電設備」(2017)

当委員会からの質問事項および回答および調査結果

技術関係

Q1. 木質バイオマス発電などによる地域へのエネルギー・製品提供、温室効果ガス削減など

A1. 経済効果およびこれによる雇用促進効果などは以下のとおり

【市内全域の木質バイオマスエネルギー利用量・経済・雇用・二酸化炭素削減効果】

項目	H24（調査値）	H26（推計値）	H30（推計値）
バイオマス利用量	約43,000t/年	約43,000t/年	約145,000 t/年
エネルギー投入量	約596,000GJ/年	約600,000GJ/年	約1,630,000 GJ/年
原油代替量	約15,600 k L/年	約15,700 k L/年	約42,700 k L/年
CO2削減効果	約40,000t-CO ₂ /年	約41,000t-CO ₂ /年	約102,400 t-CO ₂ /年

※H24年度真庭地域エネルギー関連調査による計算方法を活用した推計値

（Jジュール＝エネルギー単位、t-CO₂＝二酸化炭素重量）

全体経済効果

	H26（推計値）	H30（推計値）
バイオマス利用量	約 43,000 t/年 →チップ価格（12,000 円/t）で約 5 億円相当	約 43,000 t/年 →チップ価格（12,000 円/t）で約 17.4 億円相当
原油代替量	約 15,700KL/年 →灯油(83 円/L) で約 13 億円相当	約 42,700KL/年 →灯油(89 円/L) で約 38 億円相当

実雇用効果

- ・バイオマスガイド → 3 人 + α
- ・真庭バイオマス集積基地 → 17 人
- ・バイオマス発電所 → 15 人（新規）
- ・バイオマス発電事業にかかる関連事業 → 約 15 人（新規）

【結果】：バイオマス関連事業雇用創出： 50 人以上（2015 年真庭市聞き取り調査）

Q2. 本プラントを持続可能とするためのカギとなる技術開発は何であったか。

原料関係

Q2-1. 原料供給は持続可能でしょうか。

A2-2

発電燃料の安定供給に向けた仕組み

①「木質資源安定供給協議会」の設置

設立：平成 25 年 3 月

参加社・数：素材業者、製材業者、チップ業者発電業者、森林組合、原木市場、運送業者など（90 社・団体）

活動内容：関係者の連携・情報共有に余地バイオマス発電所への木質バイオマス資源の安定供給を目指す。山地証明を含め資源調達から流通・精算までの各種情報を IT 活用により効率的に管理できる仕組みを構築した。すなわち、真庭独自のシステム運用で、QR コードを用いた取引手続きの簡素化やトレーサビリティ実現を果たすとともに、山元へ直接利益還元している。

Q2-2. 原料の集積・輸送上の工夫は何でしょうか。

A2-2.

- ・IT活用集積・輸送システムを構築した。(上述)
- ・大規模なバイオマス集積基地を作り、集中管理している。

Q3. 営業関係

Q3-1. 製品の安定的な販売先はどこでしょうか。

A3-1.

・木材チップ・ペレット：民間事業所や公共部門での熱利用、一般家庭でのストーブ利用など産業部門から民生部門まで設備導入が広がっている。

→ペレットストーブ、製材所の木材乾燥、農業用ビニルハウスの加温、施設の冷暖房システムなど

- ・発電：自社利用、売電など

市内の木質バイオマスエネルギー導入状況は以下のとおり

■市内の木質バイオマスエネルギー導入状況 (R3.3末現在)

目的	設備名(導入数)	用途(設置機数)
発電	発電用蒸気ボイラ(2)	自社利用・売電(1) 売電(1)
熱利用	蒸気ボイラ(56)	木材乾燥(55)
		コンクリート製品養生(1)
	温水ボイラ(23)	温泉、プールの加温(5)
		ビニルハウスの加温(8)
		施設冷暖房(10)
	ストーブ(229)	民家、事務所等の暖房 (ペレット119、薪110)

Q3-2. プラントの収益性はいかがでしょうか。

A3-2.

- ・A1参照

地域社会

Q4. 木質バイオマス発電などの地域社会への受け入れについて、どのような方策をとられたのでしょうか。

A4.

①木質資源活用産業クラスター構想(2001年)

林業・木材産業を基盤として、その副産物の多角的(エネルギー、マテリアル)活用や異業種を

含めた産業連携を築き、地域産業の活性化と持続可能な発展ならびに循環型社会の形成を波足ることを目的とした。

②域内の中核的木材企業である銘建工業(株)でバイオマス発電（1995 年）や木質ペレット製造の開始（2004 年）と利用。

③NEDO「バイオマスエネルギー地域システム化実験事業」で「木質バイオマスエネルギー利用の地域内循環システム」（2005～2009 年度）で未利用資源（林地残材、樹皮等）を燃料化するの実証実験を実施

引き続き

地域関係者の連携による共同事業として「木質バイオマスエネルギー利用の確立・評価」を実施。（2010～2012 年度）

④③の実証実験の結果を受けエネルギー利活用に向けた木質燃料の標準化（木質燃料規格）を定め、乾燥・加工・価格などの規格に関する合意を形成した。

⑤真庭市と真庭観光局が連携し、バイオマス事業や関連施設への視察の対応し、さらに真庭地域の取り組み全体を情報発信し、また新たな観光資源として「バイオマスツアー真庭」事業をスタートさせた（2006 年）。

→（2018 年）延べ人数 30 万人突破、参加者の約半数が宿泊。

（2019 年度）開催回数 25 回、参加者 769 名。

法的措置

Q 5. 木質バイオマス発電所などを運営する上で利用している法的措置（例えば FIT）は何でしょうか。

A 5.

①FIT 制度

②補助金の活用

林野庁「森林整備加速化・林業再生事業」（2013 年度 14 億円）

Q 6. 将来性

Q 6－1. 木質バイオマス発電などの事業をさらに拡大するには何が必要でしょうか。

A 6－1. 広葉樹・雑木林の活用

日本の森林蓄積量（70億m³）のうち半分は広葉樹。成長量は年間約1億m³で、広葉樹の蓄積量がどんどん増加している。もともと針葉樹より水分率が低くまた密度も高いので、燃料として針葉樹より効率的に使用できる可能性があるが、広葉樹は枝が横に広がって成長するため針葉樹より伐採の手間やコストがかかるので現在あまり利用がすすんでいない。より効率的に広葉樹を伐採する手法や体制を作り出すことによりエネルギー資源量を拡張できるのではないかと考え、真庭市では現在、地域を挙げて、広葉樹をエネルギーとして活用することにも注力している。

Q 6－2. 木質バイオマス発電所などの事業を将来的に阻害するような要因があるとすれば、それは何でしょうか。

A 6.

[FIT 制度終了後の対策]

現在、関係者（市役所、発電者、燃料生産者など）は、

- ・用材として使用できない部位をエネルギー資源として利用するというバイオマス発電のシステムを保つために、木材の需要を増やし、木材自給率の向上を図るとともに、林業の効率化と生産性の向上を図り、燃料となるチップもより効率的に大量に製造できるような体制を整える。
- ・発電所の運営コストを下げるよう努力をする。
- ・チップそのものをより安価で効率的に供給できるよう、地域の林業そのものを改善する。
- ・還元金や補償金をそれなりに減額することを各事業者の理解を得る。

などの対策を考えているようであるが、決定策には至っていないというのが現状のようである

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。

編集発行

公益社団法人日本工学アカデミー

〒101-0064 東京都千代田区神田猿樂町二丁目7番3号HKパークビルIII 2F

Tel: 03-6811-0586 Fax: 03-6811-0587

E-mail: academy@ej.or.jp

URL : <http://www.ej.or.jp/>