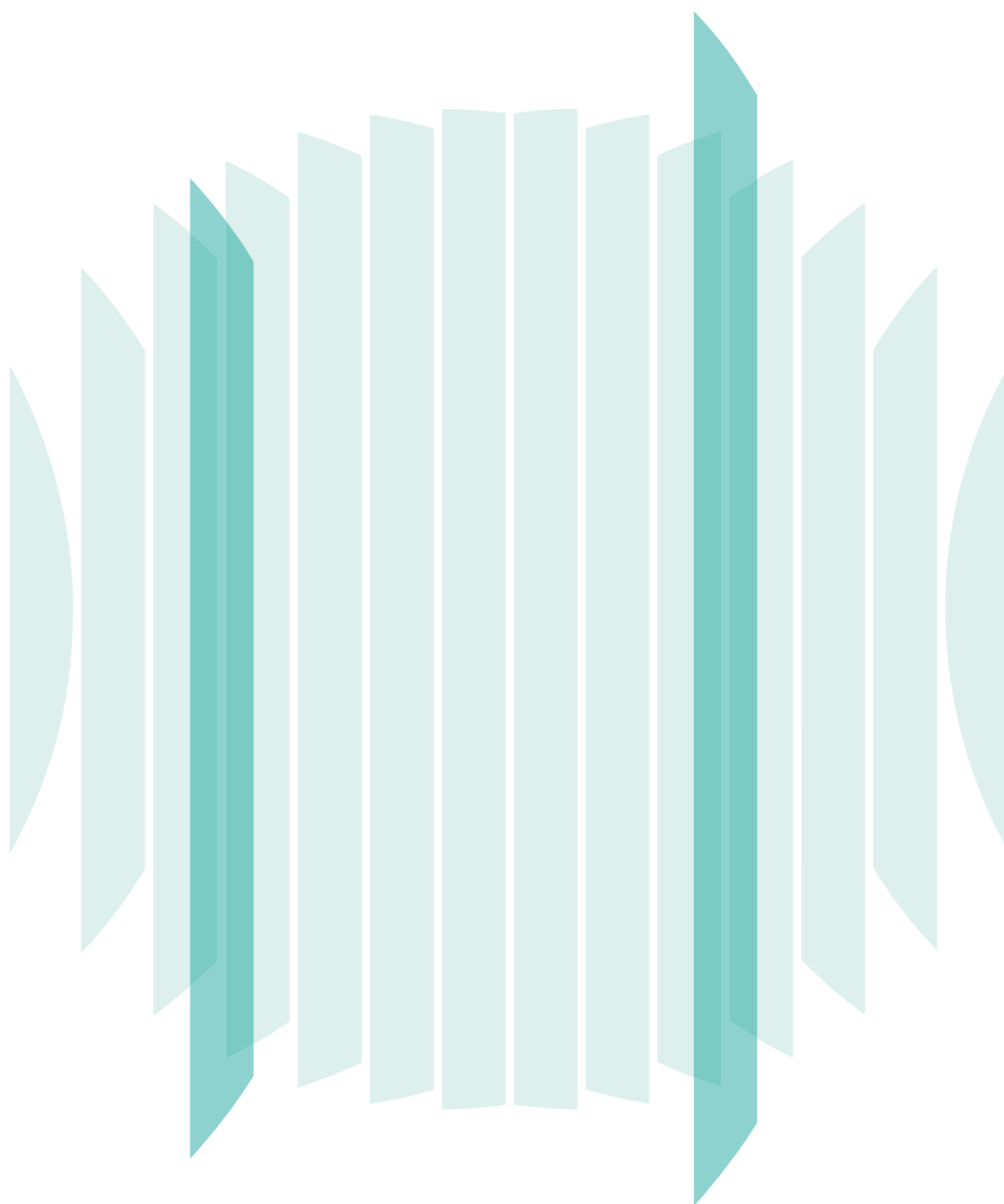


季報 エネルギー総合工学

Vol. 37 No. 2 2014. 7.



一般財団法人 エネルギー総合工学研究所
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

目 次

【巻頭言】

エネルギー基本計画の実行にむけて

経済産業省 資源エネルギー庁 長官 上田 隆之 …………… 1

【座談会】

本格化する水素社会へのアプローチ

(公財)地球環境産業技術研究機構 理事

地球環境産業技術研究所長

山地 憲治

(独)産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所長

大和田野芳郎

トヨタ自動車(株) 技術総括部 主査

広瀬 雄彦

J X日鉱日石エネルギー(株) 中央技術研究所 フェロー

斎藤健一郎

川崎重工業(株) 技術開発本部 技術企画推進センター

水素プロジェクト部長

西村 元彦

千代田化工建設(株) 技術開発ユニット 兼

水素チェーン事業推進ユニット 技師長

岡田 佳巳

司会 (一財)エネルギー総合工学研究所 参事

プロジェクト試験研究部 部長

坂田 興 …………… 3

【寄稿】

シェール・ガス革命, シェール・オイル革命の2014年における動向

和光大学 経済経営学部 教授

岩間 剛一 …………… 24

【寄稿】

2030年に向けたコージェネレーション普及拡大の展望

(一財)コージェネレーション・エネルギー高度利用センター

普及促進部長

杉浦英太郎 …………… 33

【調査研究報告】

中長期リスク要因を考慮したエネルギーシステムのあり方

プロジェクト試験研究部 原子力グループ 主管研究員

都筑 和泰 …………… 44

【調査研究報告】

微細藻類バイオ燃料について

プロジェクト試験研究部 環境グループ 主管研究員

松井 徹 …………… 54

【事業報告】

平成25年度事業報告の概要 (一財)エネルギー総合工学研究所 …………… 64

【研究所のうごき】 …………… 66

【編集後記】 …………… 69

巻頭言

エネルギー基本計画の実行にむけて

上田 隆之 (経済産業省
資源エネルギー庁 長官)



「季報エネルギー総合工学」平成26年度第2号の発行に際し、本年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」と最近の国際エネルギー情勢について簡単に紹介させていただきます。

3.11以降、わが国は新たなエネルギー制約に直面しており、①海外からの化石燃料への依存度の増加に加えて、②原発停止による燃料費の増加、③電気料金の上昇、④CO₂排出量の増加などの様々な問題も生じております。一方、政府及び原子力事業者は、過酷事故という悲惨な事態を防げなかったことへの深い反省を一時たりとも放念してはならず、その反省に立ってエネルギー政策を再構築しなければなりません。

そこで、今般4月11日に震災後初の「エネルギー基本計画」を閣議決定し、エネルギー情勢などを踏まえつつ、被災された方々の心の痛みにしっかりと向き合い、寄り添い、福島復興・再生を全力で成し遂げ、震災前に描いてきたエネルギー戦略は白紙から見直すことを出発点とし、国民生活や経済活動を支える責任あるエネルギー政策を再構築するための、中長期的かつ総合的な政策の基本方針をまとめました。

本計画では、エネルギー政策の基本的視点として、「エネルギーの安定供給」、「経済効率性の向上」、「環境への適合」、「安全性」の同時実現を確認し、加えて「国際的視点」と「経済成長」を加味したものとなっております。また、各エネルギーの特性を考えると、あらゆる面（安定供給、コスト、環境負荷、安全性）で優れたエネルギー源はないことから、現実的かつバランスの取れたエネルギー需給構造の実現を目指すべき姿と位置付けております。

国際的にもエネルギー安全保障に関する議論が行われています。5月のG7エネルギー大臣会合では、エネルギー安全保障を確保し、一国に供給を依存しないために、①柔軟、透明、競争的なエネルギー市場の開発、②エネルギー源の多様化、③国産資源の開発を含めた供給源の多様化、④省エネルギーの推進、に合意いたしました。

今後、政府を挙げて、この「エネルギー基本計画」に記載されている方針に基づき施策を着実に実行するとともに、G7エネルギー大臣会合において、合意した原則やアクションを各国協力のもと着実に実施してまいります。今後も、わが国の国民生活と経済・産業を守るための責任あるエネルギー政策を立案・実行すべく、全力で取り組んでまいります。

エネルギーの専門家である読者の皆様には、エネルギー行政に対して、引き続き御理解と御協力をいただくとともに、忌憚のない御意見をいただくことをお願いできれば幸いです。

座 談 会

本格化する水素社会へのアプローチ

山地 憲治	(公財)地球環境産業技術研究機構 理事 地球環境産業技術研究所長
大和田野芳郎	(独)産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所長
広瀬 雄彦	トヨタ自動車(株) 技術総括部 主査
斎藤健一郎	J X 日鉱日石エネルギー(株) 中央技術研究所 フェロー
西村 元彦	川崎重工業(株) 技術開発本部 技術企画 推進センター 水素プロジェクト部長
岡田 佳巳	千代田化工建設(株) 技術開発ユニット 兼 水素チェーン事業推進ユニット 技師長
坂田 興	(一財)エネルギー総合工学研究所 参事 プロジェクト試験研究部 部長



はじめに

高まってきた水素への期待

坂田：ここ数年、水素エネルギーに対する関心が非常に高まってきています。もともと二酸化炭素（CO₂）排出抑制やエネルギー安全保障での有力な選択肢の1つではあったので

すが、値段等の問題もあって、大規模導入には至っていません。しかし、最近、政府で2つの大きな動きが出てきました。

1つは、「第4次エネルギー基本計画」（4月11日閣議決定）で、水素が従来よりも具体的に描かれました。エネファーム（家庭で使う電気とお湯を一緒に作り出すシステム）、2015年の商業販売による燃料電池車（FCV）、水素供給、水素発電等の利用技術、製造・輸送・貯蔵の技術開発等が書かれています。さら

に、新しい「エネルギー基本計画」を踏まえ、資源エネルギー庁が「水素社会の実現に向けたロードマップ」の策定を進めています。

もう1つは、内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム」(SIP)です。対象課題候補「エネルギーキャリア」の中で、水素(気体および液体)が選ばれ、府省庁の横断的なプログラムとして実施されようとしています。

一方、企業では、2015年のFCVの普及開始に向け、精力的に取り組まれています。また、CO₂排出抑制、エネルギー安全保障のための水素の大規模導入、大規模輸入に関し、FCVに続く水素の利活用検討が進んでいます。

さらに、新しい流れとして、再生可能エネルギーの大量導入時の課題解決のために、国内外でエネルギーキャリアとしての水素の利用が提案され、一部実証されています。

水素に対する、こういう急速な関心の高まりを踏まえ、本日は関係各界の権威の方々にお集まりいただきました。FCVの普及を始め、水素の可能性や課題について、忌憚のないご意見をいただければ幸いです。

初めに、2015年からの商業販売が予定されているFCVについて、また、水素供給について、その経緯や今後のお考えなど、広瀬さんから伺いたいと思います。

水素燃料電池車と水素インフラ

「究極の車」を目指す開発 ～HVからPHV、EVそしてFCVへ～

広瀬：ブラジルや東南アジア、アフリカなど、世界ではまだ大勢の人たちが自由に色々な場所に行ける移動手段(モビリティ)が必要だと思います。そのモビリティを皆でシェアし、皆が使えるエネルギーで、大気汚染もなく走らせないとはいけません。それが「究極の車」です。



広瀬 雄彦 氏

(トヨタ自動車 ㈱)
技術総括部 主査

まず最初に開発したのがハイブリッド(HV)車です。1997年、私が最初のハイブリッド開発に参加した時は、今のように普及するとは思っていませんでした。電気自動車(EV)、プラグインハイブリッド車(PHV)、FCVには共通部品が多くあり、それらは、モーターやインバータなど、日本が得意とする技術です。今まで世界中で600万台売ったHV車の部品は全て日本製です。だから、そういう技術を日本で、ちゃんとやっていかなければいけません。

将来は、EV、FCVが普及すると思うのですが、内燃機関も非常に重要なので、ガソリンがある当面は、HVやPHVが普及し、その先、CO₂排出抑制や代替燃料の強化というところまで行くと、EVやFCVが普及していきます。その時、EV、FCVのどちらかではなく、棲み分けることになると思います。普通の車の航続距離は500～600kmですが、EVとFCVのシステムコストは、ある航続距離を過ぎるとFCVのほうが安くなります。もうじき発表されるFCVの価格ですが、べらぼうに高いわけではありません。

資金の海外流出が少ないFCV

図1は車が10km走った時のコストを、HV

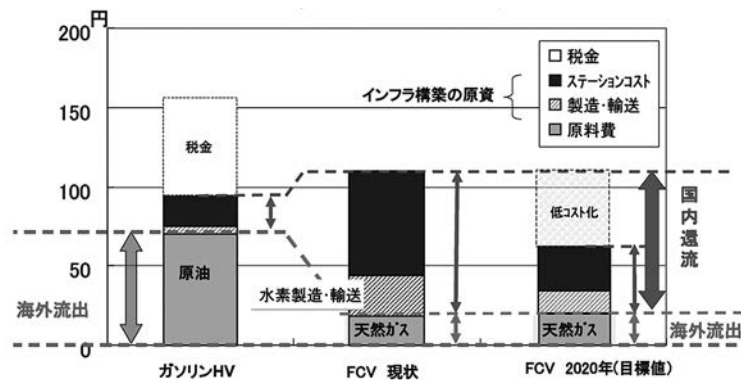


図1 ガソリンHVとFCVの燃料代比較（同格車，10 km 走行時）

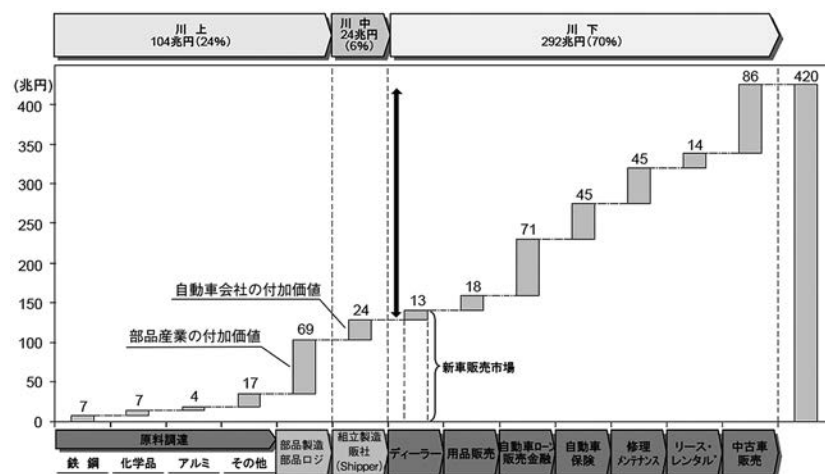
とFCVで比較した図です。現状ではFCV用の水素は決して安くありません。それは、新しいインフラを作るコスト（ステーションコスト）を減価償却していくとかなり大きくなるからです。ただ、FCV自体は効率が良く、1 km 走るのに必要なカロリーは少ないので燃料代を安くできる可能性はあります。また水素は、価格のうち経済的に国内に落ちる付加価値が大きいのが特徴です。将来減価償却が進めば大幅に安くできる可能性もあります。とは言え、ステーションコストをどうするか。将来のマージンは水素供給会社とお客さんとで分けることにも意味があるのではないかと思います。

420兆円の自動車産業バリューチェーン

図2にあるように、日本のグローバル自動

車関連市場のバリューチェーンは2004年時点で年間約420兆円です。その中で一番多いのは、中古車販売（96兆円）です。車は何度も転売されていきますが、例えば、燃料電池が劣化して無価値になってしまうと売れなくなりますから、FCV開発では価値を失わない技術が大事だと思います。日本は、1トン1万円でオーストラリアから鉄鉱石を買ってきて、1トン5万円の鉄にし、それを皆で1トン当り150万円のカラーラにしている。1トン1万円を超える差額分は、結果的に全部が国内の雇用に戻っています。だから、次の技術が出てくるまでは、自動車がこういう技術で頑張らなければならないと思っています。

FCVは、これに近いバリューチェーンを持っています。燃料電池の材料は、セパレーター用の金属、カーボン、そして僅かな白金



（出所：三井物産自動車本部資料を元に作成）

図2 自動車産業バリューチェーン：自動車産業の市場配分構造（2004年度時点）

です。結局、原料を買ってきて、それに付加価値を付けて車を造るというバリューチェーンです。もし日本でこれができれば、日本の経済的な価値は大きくなると思います。書いてはありませんが、実はこの上に、エネルギーのバリューチェーンがあります。水素はこれも手に入れる可能性があります。この部分のバリューチェーンが日本の手に入れば、日本の経済的価値はもっと増えます。

FCV の最新動向

当社が開発中の FCV ですが、3分で充電できる EV だと思ってもらって結構です。「多様な一次エネルギーから製造できる水素」、「ゼロエミッション」、「走りの楽しさ」、航続距離約 700km、水素充填時間約 3 分という「使い勝手の良さ」、EV の 4、5 倍もの「大きな非常時電源供給能力」(一般家庭では 1 週間以上)といった特徴があります。現在、コスト低減に努めているところで、2015 年、セダンタイプの FCV を、図 3 に示す日米欧の水素供給インフラが整備される見込みの地域へ導入する予定です。

HV 車の時は、弊社だけの開発だったのですが、FCV 開発は状況が違います。2015 年には、ホンダも FCV を出します。ヒュンダ

イも今、一生懸命頑張っていますし、ダイムラー、日産もすぐ出てきますし、フォルクスワーゲンもこれに続くと思います。

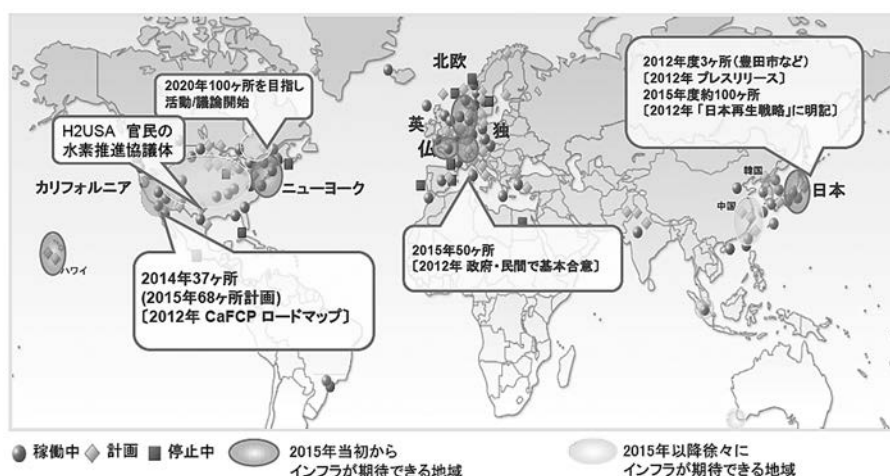
ハイブリッド車は十数年日本の独壇場でしたが、FCV はそう簡単にはいきません。

FCV の将来ですが、再生可能エネルギーが大量導入された時に、水素を貯蔵に使うという使い方も検討されています。特に、ドイツなどで、増加した風力からの水素で発電と FCV に活用する取組みが行われています。

FCV でも日本の技術は、世界最先端です。だから、「将来の世界の姿はクリーンでサステイナブルだ」ということを早く見せて、われわれの技術で頑張ると次が見えてきます。それは、日本が儲かる道です。儲からない時から頑張ってきた HV 車で経験したことです。やはり、そういう意味で挑戦しようということが大切だと思っています。

水素は 200 年来の燃料

水素について色々なことが言われていますが、水素は「すごく新しい、知らない危ない技術」ではありません。水素は電気より前にガス灯の燃料として、さらには都市ガスの一部として家庭や街中で 200 年以上も利用されてきているのです。水素というだけで、もの



(出所：トヨタ自動車㈱)

図3 世界の水素インフラ動向

すごい防護装置が要するというのは心配過剰です。安全は大事ですが、もの凄い防護装置がなくても、皆の知恵で安全に使うことができると私は思っています。

－質疑応答－

[燃料電池のコスト高の意味]

坂田：自動車のバリューチェーンと燃料電池のバリューチェーンが同じというお話でしたが、これまで燃料電池は材料費のせいで高いと言われていたと思います。もう材料費は相当下がってきているというご認識でしょうか。

広瀬：私たちは、部品になったものが高いと言っていましたが、部品のメーカーは、すごく安い材料を買って来て加工します。われわれが「材料費が高い」というのは、例えば、カーボンだと、燃料電池に使うための撥水性を持たせたり、ものすごく細かくしたり、手間をかけている、という意味です。輸入しなければいけない原材料費が高いわけではないことに気が付きました。

坂田：次に、斎藤さん、お願いいたします。

水素供給チェーン構築へ

水素社会実現の可能性が最も高い日本

斎藤：ずっと前から「20年後の水素社会」という議論はありましたが、今、本当に「20年後の水素社会」が見えてきたと思っています。

理由の1つは、エネファームの普及が始まっていること。もう1つは、2015年からFCVが発売されることです。

ドイツなどでも水素の話が出ていますが、それは、再生可能エネルギーを使うための検

討です。日本は、自動車という現実にあるもので水素社会のスタートを切ろうとしていて、現実になる可能性が一番高いと思っています。

われわれから見ると、「もう水素社会が始まってしまう」という意識があります。「20年後のことは言っていられない。この先の5年後が勝負だ」、もっと言えば、「1年勝負。1カ月後が勝負」とか色々な話があるのです。

供給側の取組み：HySUT

水素社会実現に向けた、われわれの取組みとして、「HySUT（水素供給・利用技術研究組合）」について紹介いたします。

この組合には、石油、ガス、産業ガス、エンジニアリング、自動車メーカーと皆が揃っています。組合を作った頃、「誰が水素供給をするのか」というところが見えなかったのです。そこで、皆で気持ちを1つにして、見える形で水素を進めたいということで、設立したのがHySUTです。

現在、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援による「地域水素供給インフラ技術・社会実証」事業は昨年度で終了し、引き続き、その中の水素ステーションを利用して、色々な技術開発を行っています。

日本でも可能になったSSとの併設

JXの例をお話しします。神の倉は、オンサイト型70MPaの水素ステーション、海老名中央はオフサイト型70MPaのステーションです。

神の倉と海老名中央のいずれもが、サービスステーション（SS）の中に併設したということが日本で初めての取組みです。海老名と神の倉では、奥に水素のディスペンサー、手前にガソリン・ディスペンサーがあります。こういう形で設置できるようになったのはここが初めてです。これができるのは、規制見直しの結果です。それまで、水素ステーションとSSの併設が当たり前だったドイツなどを羨ましく思っていた

のですが、それが日本でも実現しました。

JX の基本ビジネスモデル

水素ステーションには、オフサイト型、オンサイト型があり、オンサイト型は現地で水素をつくるタイプで、東京ガスなどがやっているタイプです。われわれは、製油所で作った水素を圧縮して、川崎重工業(株)製の 45MPa トレーラー、35MPa トレーラーで運ぶというのを、基本のビジネスモデルと捉えています。

よく「製油所にはまだ副生水素が余っている」と言われます。しかし、これは勘違いです。水素が余っているわけではなく、装置に余裕があるということなのです。その水素をトレーラーで運んで行く実証をしているところです。

規制の見直しに関する調査研究

もう 1 つ、HySUT の事業で重要なのが、昨年度から開始した水素利用技術研究開発事業です。NEDO の委託事業として、規制の適正化、品質管理方法、計量管理方法などに関連した研究開発に取り組んでいます。

水素に関する規制の見直しは、第 2 次小泉内閣(2004 年 9 月～2005 年 9 月)の頃にスタートして、官民共同で色々な取り組みをしてきています。もともと、水素は街中での使用が想定されていなかったもので、「基本的に街中では使えない」というところからスタートして、規制見直しをしていただいているところです。

差し迫った話として重要なのは、水素の品質・計量管理方法の研究開発です。これまで、車への充填に関する研究ばかりだったのですが、量り売りする場合、どう量るか、その正確さをどう担保し、どう品質管理をしていくか、ということに取り組んでいます。一般の方々に水素を売るとなると、ガソリンや軽油並みの品質管理をやらないと、自動車メーカーやお客さんに迷惑をかけることになりますから。



斎藤健一郎 氏

(J X 日鉱日石エネルギー(株)
中央技術研究所 フェロー)

水素ステーション整備の現状と課題

平成 25 年度から経済産業省の「燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業」が開始され、昨年度は東京ガス(株)、岩谷産業(株)を始め、19 カ所の水素ステーション建設が補助金対象として選定されました。うち 10 カ所が JX ステーションです。平成 26 年度は、2 次公募で 5 カ所の JX ステーションが採択されています。しかし、ステーション建設コストが 5 ～ 6 億円というのが現状、補助金をいただいてもまだ大きな負担が残ります。従って、ステーション整備の第一の課題は建設のコストダウンということになります。

もう 1 つの課題は、水素供給インフラと車は、「ニワトリと卵」の関係にあるということです。これまで何度も広瀬さんとは議論してきましたが、水素ステーションが先でないことには、お客さんに対して「車を買って下さい」とは言えないということでした。ガソリンの場合は、供給インフラと車が自然に増えています。多分、自動車というものが全くないところからスタートしているので、自然に両方が増えてこれたのだと思います。しかし、既に便利なガソリン車、ディーゼル車が走っている中で、それを FCV に入れ替えていくのだから、「ニワトリと卵」の関係が出て来ます。

最初に水素ステーションを作らざるを得ないことは明らかです。また、できたばかりの水素ステーションにお客さんがいないことも明らかです。水素ステーションだけでは、コストを負担しようがないわけです。「将来、車が絶対増える」と分かっているならば、そこまで我慢できるわけですが、誰もそう言えない状態では、最初にお客さんが来ない部分のデメリットや将来リスクは、やはり国や自動車などの関係者全員で応分に負担してもらうしかありません。水素社会実現が国全体の方針ですので、先行者のデメリットと将来リスクを何とか皆で負担する仕組みを作ってくれるようお願いをしているところです。

この部分を何とかしないと、水素社会はスタートできないと思っていますので、今、みんなで知恵を絞っています。

－質疑応答－

[水素ステーションの箇所数]

西村:FCV200万台の時に、ステーション1,000カ所というのが1つの基準ですか。

斎藤:そうです。

広瀬:どれくらい利便性があれば、お客さんにFCVを買っていただけるか。「少し走ったところにある」と言うのは1,000カ所くらいですね。

斎藤:全国1,000カ所であっても適正な間隔で配置できれば大丈夫だと思います。

西村:発売予定のFCVがプラグインタイプで、家で充電できるのであれば、ステーションまで自走して行けますが。

広瀬:われわれは、プラグインタイプのFCVは考えていません。大きなバッテリーを積む

より、50～100km走れる量の水素を余計に積める車のほうが、お客さんの利便性も高いと思いますので。

[水素燃料電池の逆反応で水素製造]

山地:防災対応で使うことを考えた場合、FCVの水素から電気を取り出せるのだから、燃料電池の逆反応でチャージする(電気で水素を造って貯める)のは技術的に可能ですか?

広瀬:技術的には可能です。今、水素貯蔵タンクが70MPaなので、どこでも誰でも充電できるわけではありませんが、そういう燃料電池も発表されています。そういう燃料電池は、できた水素を貯めないといけなくて、ものすごくかさばってしまうのです。また、車用には向いていないと思います。

ただ、将来の水素社会では、定置用燃料電池を使って、色々な電力で水素を造っておいで後で使う、という形の可能性はあると思います。水素のととても良いところは、そういうステーションが1カ所あれば、3分間で、何百台何千台にも充電できるということです。

西村:結局、FCVをプラグインにするには、巨大な電池を積まないといけなくて、それがもったいないということですね。

広瀬:そういうことです。実は、電池が一番頭が痛いのは消耗です。例えば、車の値段が約100万円の時に、100万円のバッテリーが5年で価値ゼロになったら、バッテリーの載せ換えにまた100万円必要なわけです。そうすると、新車の時に、バッテリーの劣化分まで補完しなければいけません。これは、ビジネスとして非常に難しいです。

坂田:最初に水素ステーションを作った場合、お客さんがいない段階でのコストを誰かに負担してもらわないと、立ちゆかないという辺

りは、エネルギーシステムの中で新しいインフラを作っていく難しさだと思います。

そこで、エネルギーシステムの面から、水素について考察していただければと思います。山地先生、いかがでしょうか。

水素エネルギーシステム

水素の普及促進は「クリーンな燃料電池」で

山地：エネルギーの大きな流れからいっても、水素は非常に面白いです。今、温暖化対策として低炭素化が話題になっていますが、そう言われる前から、人類の燃料使用の歴史は、低炭素化の歴史になっています。燃料の水素とカーボンの比率の推移を見ると、傾向的に水素リッチになってきています。これは、技術進歩のトレンドだと思います。傾向として、このまま行くと、先は水素となります。

ただ、世の中そんな単純ではないと思います。石炭、石油、天然ガスのそれぞれで、キラーアプリケーション（普及促進の用途）があります。石炭では蒸気機関、最初は往復動でしたが蒸気タービンが出てきて今でも発電技術の中心です。石油では、エンジン（オットーサイクルによるガソリンエンジンと、ディーゼルエンジン）、今でも石油は自動車を中心とする輸送機関の主力燃料です。20世紀は「エンジンの自動車と電気の時代」でした。天然ガスでは、高効率発電のガスタービンだと思います。

では、水素のキラーアプリケーションは何かと言うと、クリーンな燃料電池です。水素は二次エネルギーです。二次エネルギーの代表格は電気です。電気もCO₂クリーンなソースから作ることができます。水素と似ていますが、電気はモノではありません。水素はモノです。その違いをうまく使う上で、自動車のアプリケーションというのは、非常に面白いと思っています。



山地 憲治 氏

（公財）地球環境産業技術研究機構 理事
地球環境産業技術研究所長

燃料電池以外の用途～水素発電

しかし、FCV だけを作っても駄目で、水素ステーション、つまり、インフラが必要で、両方を並行して進めなければいけません。基本的な課題はそこにあると思っています。

そこで、エネルギー総合工学研究所が事務局となった「CO₂ フリー水素チェーンの構想研究会」（構想研究会）では、インフラ形成において、燃料電池だけで良いのか検討しました。燃料電池だと、今はFCV とエネファームがメインです。しかし、究極のゴールを「CO₂ フリー」とし、色々なアプリケーションで利用できる水素を考えていくほうが良いと思います。実は、今回の「エネルギー基本計画」には「水素の本格的な利活用に向けた水素発電等の新たな技術の実現」と書かれています。確かに、水素専焼で発電しても、混焼で発電しても高効率に電気を作れます。そこも視野に入れるということです。水素供給インフラを考える時、対象をFCV, 「エネファーム」から水素発電等を広げるのは、1つのポイントだと思います。

それと、水素チェーン全体で本当にCO₂ フリーになるのかということも考えたい。

国際的水素チェーンの検討

もう1つは、国際展開です。水素はモノだから、液化水素、有機ハイドライドという形で取引できると思います。わが国にとって、液化天然ガス（LNG）みたいに海外から持ってくる水素は、「擬似一次エネルギー」になり得るのではないかと。そして、燃料電池はもちろん、水素発電、あるいは水素のその他の利用も含めて、大きな水素需要を創ってあげれば、大きなインフラ形成ができるのではないかと。「構想研究会」、「CO₂フリー水素チェーン実現に向けたアクションプラン研究会」では、そういう点も考えました。

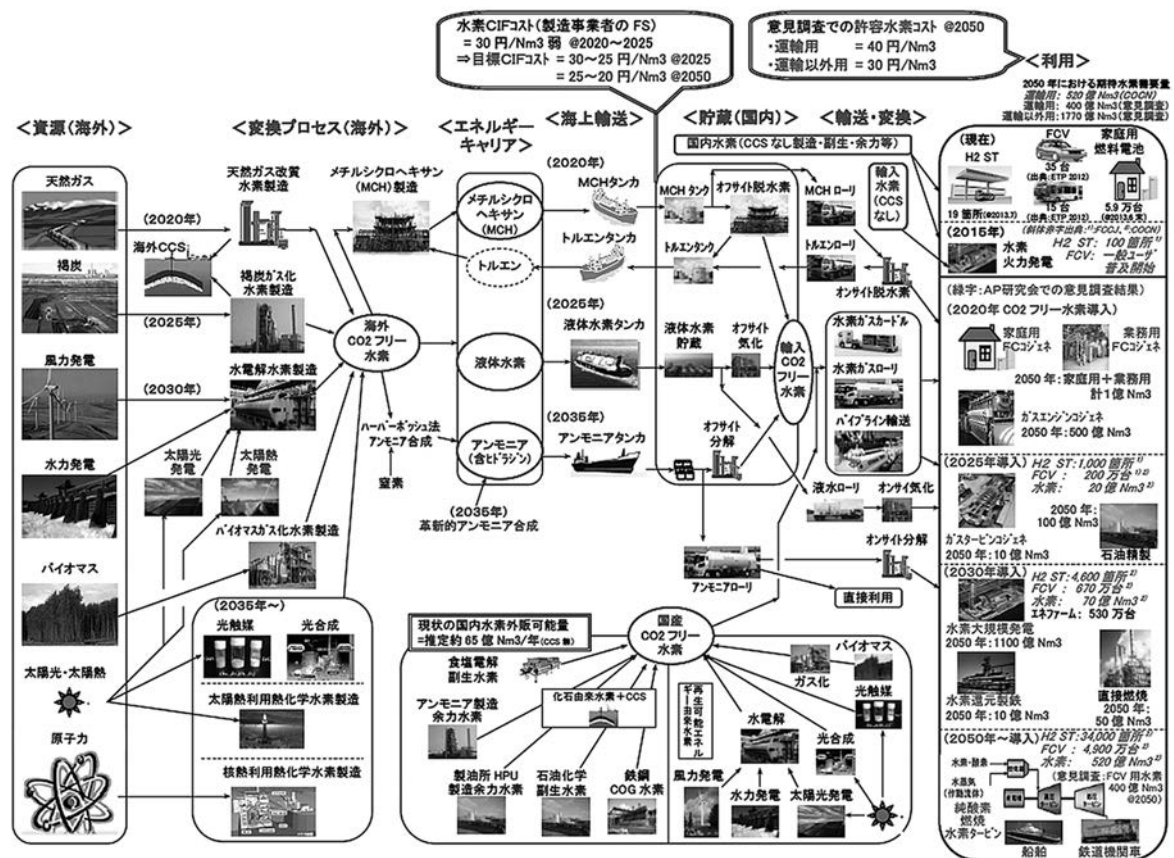
良いタイミングでの水素インフラ形成

水素利用と並行してインフラを形成しなければならないので、一番難しいのは、その担

い手をどうするかです。ですが、今、タイミング良く、電力システム改革、ガスシステム改革が始まり、「総合エネルギー産業」が出てきました。その中に水素事業を組み込んでいく、本当に良いタイミングだと思っています。

これまで何度か、水素に対する期待のうねりがありました。しかし、今回の高まりは、低炭素化だけでなく、もう少し広げて水素供給のインフラ形成に臨んでいく良いタイミングだと思います。実現すれば、エネルギーシステムの形態が大きく変わります。もちろん、一朝一夕にできるわけではありません。だから、「FCV200万台、水素ステーション1,000カ所」という目標は、非常に重要なステップだと思います。

その辺りの全体像を描いたのが図4です。海外のこと、色々なアプリケーションの分野のこと、途中のキャリア媒体のことも見て、どのルートを進めていくのか。こういう全体像を持っている必要があります。



(出所:「CO₂フリー水素チェーンのアクションプラン研究会」, エネルギー総合工学研究所, 2014年3月)

図4 CO₂フリー水素チェーンの構成要素の俯瞰

[徐々にCO₂フリーへ]

広瀬：われわれも、中長期的に「CO₂フリー」がキーワードだと思います。自動車もそれを目指していますが、今あるガソリンや石油を置き換えていかなければいけません。その際、経済原則に則って、例えば、安価な化石燃料をうまく使いながら、そこに水素も入ってくるという道筋が作れないかと思っています。

山地：インフラ形成には莫大な投資が必要だから、いきなり「CO₂フリー」というのは、ハードルが高過ぎて現実的ではないと思います。まずは、副生水素も使う供給インフラを作り、その後で海外の褐炭とか天然ガスによる水素製造の国際ネットワークを作る。その上で、「CO₂フリー」にするために、二酸化炭素分離貯留（CCS）を付けるという進め方もあると思います。

坂田：例えば、最初からCCSを気にしていると、全然進まない可能性がありますので、シナリオが進む中で導入すれば良いと思います。

実際に企業のお立場で、大量の水素を海外から持ってきて、いくつかインフラもつくってしまいたいという、千代田化工建設㈱の岡田さんからお話を伺いたいと思います。

大規模な水素輸入

SPERA 水素システム

岡田：弊社は2013年4月から、有機ケミカルハイドライド法を用いた「大規模水素貯蔵・輸送システム」として、図5の「SPERA 水素システム」の実証試験を行い、2013年5月末に技術実証の成功と開発完了を発表しました。



岡田 佳巳 氏

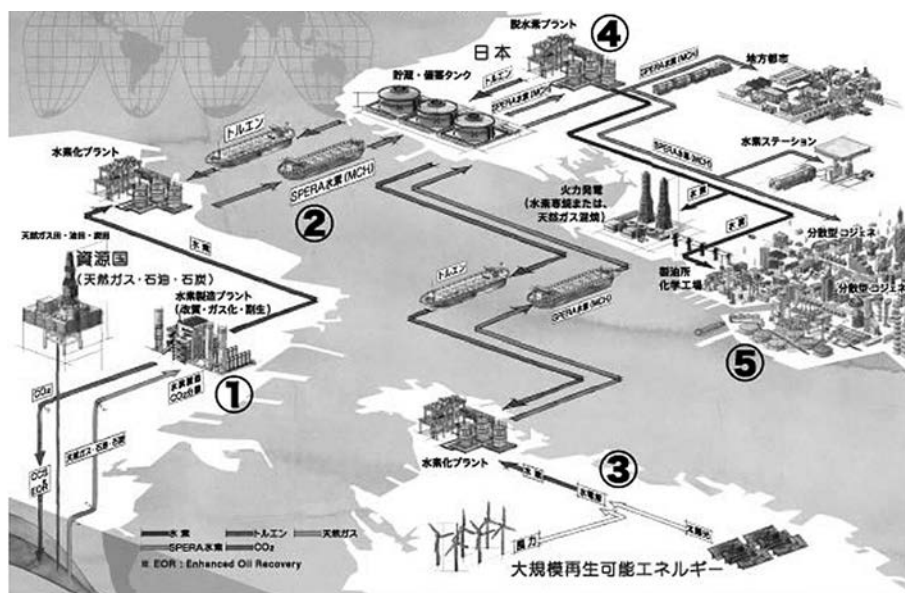
（千代田化工建設㈱ 技術開発ユニット 兼
水素チェーン事業推進ユニット 技師長）

早ければ数年内に5万トン級タンカーを使って、川崎市の臨海工業部で水素の輸入事業を開始する予定です。最初は大手商社との共同事業を想定していますが、将来的には水素のユーザーである、電力、ガス、石油業界の方々にもご参加いただくことになるかと思っています。

水素を大規模に実用化、普及させていく意義というのは、①汎用エネルギーの選択肢を増やすことによる、エネルギー安全保障の強化、②現状、まだCO₂削減シナリオを世界のどこも持っていない中、日本の水素のポテンシャルを使った、世界初のCO₂削減シナリオの策定だろうと思っています。

また、SPERA 水素システムは、ガソリンの成分に水素を固定し、ガソリンの既存インフラを使って、大量の水素を運べるシステムですので、石油業界のビジネスモデル転換に非常に役立つと考えています。

さらに、今、日本だけが大規模に水素の「貯める・運ぶ」ができるわけですから、このリード期間を有効に利用して、実用化普及に努めれば、世界に先駆けてわが国に水素エネルギー産業を育成できると思いますし、わが国からの関連機器の輸出も含めて、2030年ぐらいには、大きな経済波及効果が得られると思います。



（出所：千代田化工建設ホームページ）

図5 SPERA 水素サプライチェーン

多様な水素源—中東、東南アジア

まず、水素源ですが、一足飛びに再生可能エネルギーからの水素というのは難しいと思いますので、まずは、天然ガスや石炭などの化石燃料から製造した水素を工業原料や混焼発電に利用することから始めて、大規模な水素利用を実現することが肝要だと思います。

今後、中東地域を中心に1,000以上の油田で原油促進回収（EOR）が実施されると言われています。先日、東洋エンジニアリング(株)はEOR事業に投資していくと新聞発表されています。CO₂がEORの最も優れた溶媒であることは1970年代から知られています。この時に大事なのは、CO₂は燃えかすのゴミではなく、水素と逆シフト反応させれば、将来の貴重な炭素原料、合成ガス原料になるという認識を世界に持ってもらうことだと思います。

また、今、弊社は中東、東南アジアを中心に、水素調達の交渉を行っています。中東、東南アジアが、今の日本にとって重要な地域だからです。しかし、そこに頼ってばかりでは、エネルギー安全保障面で何も変わりませんから、将来は北米のシェールガス、天然ガスを水素にして、新しい商品として出してもらえ

ればと思います。

しかしながら、海外から水素を買っている限り、これまでの資源と同じように、価格を上げられてしまう恐れがあります。これからは、日本も東南アジアの中小ガス田などの権益を持ち、そこで「日の丸水素」を製造して日本に持って来る。その価格を水素の「デファクト・スタンダード」にする戦略もわが国にとって重要ではないかと思います。その際に、将来、日本のCCS実証プロジェクトで確立される技術で、日本も将来の炭素資源の貯留ができれば良いと思います。

水素ステーション用燃料電池の開発へ

弊社は、”SPERA 水素”を利用した水素ステーションの開発を始めたいと考えています。SPERA 水素ステーションは、水素源から遠い場所や離島用に便利だと思います。さらに、MW程度の燃料電池と組み合わせて「マルチ・エネルギー・ステーション」という商業設備用の大型エネファームを20年代に商品化できればスマートシティ向けに貢献できるのではないかと考えております。

先ほど触れた「逆シフト反応」ですが、製

鉄所の CO₂ 削減分を合成ガスでリサイクルするとか、物理的な処理だけではなく、化学的な固定方法による CO₂ の処分方法を確立することも大事でしょう。ドイツは既に“Power to Gas”（余剰電力を気体燃料に変換して貯蔵・利用する方法）を検討していますが、日本の場合、水素を日本に運べれば、回収した CO₂ と水素から逆シフト / メタン合成を行って「合成都市ガス」にすることが技術的には既に可能だと思います。

要は、車だけではなく、発電や産業といった全分野で水素を利用すれば、車用の水素コストも下げやすいと思います。水素の利用分野の技術はかなり進んでいますので、政策が重要な段階に来ていると思います。2020 年の東京オリンピックは日本の水素エネルギー利用を世界に発信する良い機会だと思います。

－質疑応答－

〔国内再生可能エネルギー由来で水素製造へ〕

坂田：私は、10 年くらい前から岡田さんと一緒に技術開発をやらせていただいています。先ほど、「合成ガス原料」とおっしゃるのは、CO₂ から水素を使って、肥料を作るというイメージですね。

岡田：その通りです。逆シフト反応は合成ガス製造反応で、国内で回収した CO₂ と輸送した水素から合成ガスを製造して、都市ガスのメタンを製造する技術は日本が進んでいますし、肥料となるアンモニア製造は既存の技術が適用できます。あとは経済性の話だけです。

坂田：そういう意味では、中東で EOR と組み合わせるとか、化学の世界で選択肢が相当増えるということですね。

岡田：その通りです。最終的なターゲットは、日本の再生可能エネルギーでの水素製造で自

給することでしょう。この理想が実現するのは、多分、来世紀だろうと思います。今世紀中は、化石資源と共存しながら水素の普及を進め、時代とともに、化石資源が少しずつ再生可能エネルギーに置き換わり、最後に自国の再生可能エネルギーだけで自給できる姿になると思います。

〔有機ハイドライド技術の魅力〕

斎藤：有機ハイドライド技術というのは、輸入だけではなく、国内流通でも使えるかも知れませんね。やはり、水素を高圧タンクで運ぶのは、それなりに辛いので、液体で運べるようになると、少し遠い場所へも楽に運べるようになりますね。

岡田：JX の既存インフラで、全国津々浦々に普及できると良いですね。

斎藤：石油の場合、液体なので船で運んで来て、普通にタンクローリーで運べます。内陸部に運ぶためには、途中に中間基地があります。有機ハイドライドの場合、これらの施設が全部使えるわけです。高圧水素用の中間基地を造るのは厳しいと思います。有機ハイドライドの方がかなり世界が広がると思います。

坂田：ありがとうございます。もう 1 つの取組みとして、川崎重工業(株)の西村さんからお話を伺いたいと思います。

FCV 以外の水素の新規用途

水素需要は本当に出てくるのか

西村：3.11 の前に、エネルギー総合工学研究所が「将来の一次エネルギーのポートフォリオ解析」で水素需要をシミュレーションしています。

解析の前提条件は、① 水素価格が 25 ～ 45 円 / Nm³、② CO₂ 制約を 2020 年に 15% 減、2050 年に 80% 減、③ 以前の「エネルギー基本計画」の目標に則り、原子力上限が総発電量の 50%、自然エネルギーが最大でも 15%、④ 国内での CCS は難しい、と置いています。

こういう前提条件の下で、どういう一次エネルギーの組み合わせが、最少の国民負担で CO₂ 削減を達成できる組み合わせなのか。解析結果は図 6 の通りです。

価格が 25 円 / Nm³ の場合、2020 年頃から水素需要が出て来て 2050 年には 40% になります。もし、値段が 45 円 / Nm³ になると、2050 年の水素の割合は 20% になってきます。これくらいの需要があれば、十分インフラ整備への投資が成立すると考えられます。では、本当に 25 ～ 45 円 / Nm³ という価格の水素ができるのか、当社で検討してみました。価格については、製造、運搬、利用まで、全部を考えないといけません。さらに、利用するところでも、既存の発電や化石燃料より高いか安いかが議論しないとはいけません。こういった全般を見渡した検討をしています。

海外での水素製造

究極的に目指すのは、「再生可能エネルギーからの CO₂ フリー水素」、しかも、純国産であれば一番良いと思います。その際、インフラ整備の大変さを考えると、水素エネルギー



西村 元彦 氏

(川崎重工業(株) 技術開発本部 技術企画推進センター 水素プロジェクト部長)

導入初期は、計画生産できる化石燃料から手をつけるのが良いと思います。

図 7 は、世界の色々な CO₂ フリー水素の検討状況です。スカンジナビア半島では、風力、水力、天然ガスからの水素が出てきます。ノルウェーは、世界第 2 位の天然ガス輸出国で、その天然ガスで水素を造って、FCV の燃料用にドイツなどへの輸出を考えています。北極海航路が開通したら、それを船で日本に持って行くことも考えています。また、ノルウェーは、94.6% の発電を水力で賄っていますが、今、どんどん風車を建てていて、将来は再生可能エネルギーからの水素を造ろうとしています。彼らの計画で面白いのは、最初、化石燃料からの水素を導入してインフラを整備し、そこへ再生可能エネルギー由来の水素を供給し順次増やして、2100 年頃には、ほとんどが再生

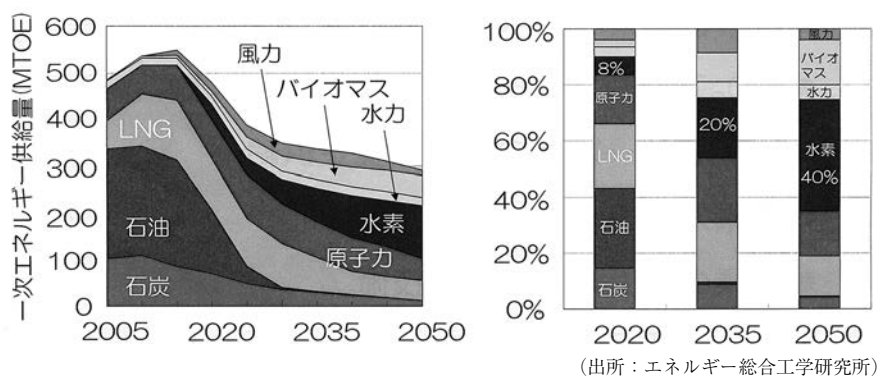


図 6 水素と将来のエネルギー需要 (25 円 / Nm³ の場合)

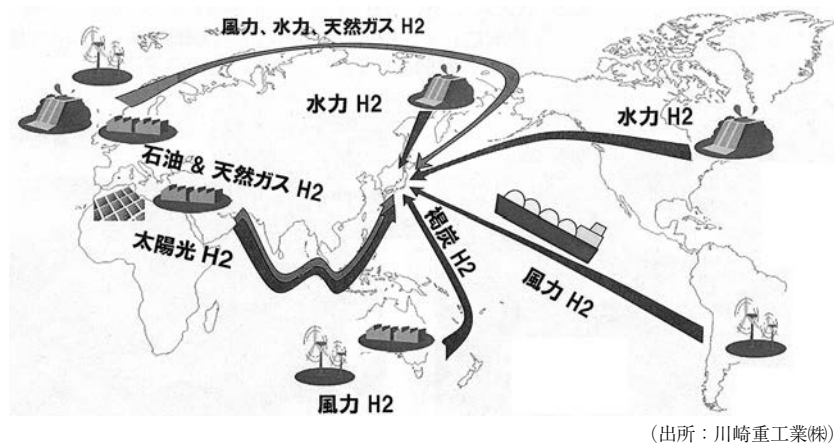


図7 検討中の海外 CO₂ フリー水素チェーンプロジェクト

可能エネルギーからの水素に変わるという絵を描いているところです。

弊社が検討しているのは、豪州の未利用である褐炭を使った水素製造と輸送貯蔵、日本での利用を検討しています。また、豪州は2020年までに総発電量の20%まで再生可能エネルギーを導入しようとしています。既に、風力発電のコストはかなり下がってきていますから、将来は再生可能エネルギーで水素を造ることも考えられます。これに加えて、ロシア・マガダン州の水力発電の余剰電力で水素を造れば、事業として成り立つだろうかプレ FS（フィージビリティスタディー）に取り組んでいます。

水素の輸送手段とチェーン

実は、液化水素は既に種子島宇宙センターでロケット燃料として30年来使われています。液化水素のメリットは、体積が非常に小さくなること、純度が高いので蒸発させてそのまま燃料電池に使えるということです。国際航路を運ぶための液化水素運搬船がまだない、といったところが課題ですが、既に、国内では陸路で運んで大量に使っています。

一方、豪州には、「カーボンネット・プロジェクト」という CCS の国策プロジェクトがあります。豪州政府はこのプロジェクトに既に150億円の予算をつけています。当社は、化石燃料から水素を製造する時に出る CO₂ を大気中

は出さずに、このプロジェクトに渡し、できた CO₂ フリー水素を日本に運ぼうと考えています。製造能力は770トン/日、年間約22万5,000トンだから、FCVだと300万台分の燃料に、水素発電だと65万kWのガスタービン・コンバインドサイクル1基分の燃料量になります。

褐炭は、乾燥させて持って来ようとする、内部から酸化反応が進み、温度が上がり、しまいには火事になる危険性があるので、乾燥させて運ぶことはできません。現地ですぐに使うことになります。豪州では、メルボルン郊外のラトロブバレー炭田で露天掘りした褐炭を、20時間以内にボイラーに入れて発電し、メルボルンの消費電力の8割を賄っています。

ラトロブバレー炭田には、日本の200年分の電力を発電するのに必要な量の褐炭があります。未利用資源なので燃料代が安く済みます。これで水素を造っても安くなるだろうということで、NEDOの委託事業で試算した結果、水素の船上引き渡しコスト（CIF: Cost, Insurance and Freight）は、30円/Nm³となりました。先ほどの25～45円/Nm³という価格ターゲットに入ってくるコスト構造になっています。しかも、現地に直接払うのは、褐炭の2.3円/Nm³、「カーボンネット」にCO₂を引き取ってもらう時に払う2.9円/Nm³、それからプラント建設や運転のための現地雇用の費用がかかります。ですが、日本の技術、日本のプラントを供給しますから、当然日本にもリターンが

入ってくるというコスト構造です。なお、他の化石燃料との比較のため、コストには日本側の受け入れ基地のコストは入っていません。船上引き渡しのコストだからです。

しかし、すぐに30円/Nm³の水素がきるわけではありません。LNGなどは構想から輸入までに15年かかると言います。水素もやはり、今から大型船を開発して、ガスタービン発電までとなると、10年くらいかかります。

もう少し先まで見据えた商用チェーンを考えますと、2隻の船で運んで来ると30円/Nm³。船の数が増え、もっと生産量が増えると、学習効果やプラントの大型化等でコストが下がり、最終的に20円/Nm³を切ります。こうなると、LNGと同等以下になります。LNGでもチェーンが増えるのに30～40年かかっていますから、水素がここまでくるには、非常に時間がかかるので、計画的に進める必要があります。弊社の計画では、パイロットが2017～2020年で、商用手前の実証が2025年。2隻就航での商用開始は2025年以降と考えています。そのあと市場の動きを見ながら、40隻、80隻と順次、増えるものと見ています。

商用時に経済性が成立することは分かりましたが、いきなり大規模な770トン/日のプラントのサプライチェーンに投資するわけにはいきませんので、最初は非常にコンパクトな、10トン/日のサプライチェーンを作り、液化水素の海上輸送ができることを実証したいと考えています。

弊社は、豪州で造った水素を船で日本に運ぼうとしています。その船を世界で初めて日本が実現しようということで、今、国土交通省の支援・指導を頂きながら進めているところです。2,500 Nm³の船の積荷部分の基本設計に関する世界初の基本認証を、去年のクリスマスに日本海事協会からいただきました。

それを受けて、今年2月、国土交通省海事局が豪州の当局に行き、2国間でこの船を就航させるための協議に入りました。基本的には就航できるということで、今は詳細の詰めに入っ

ています。実は、船の国際認証は、国際海事機関(IMO)が与えるものですが、これは、ある程度実績がないともらえません。そこで、2国間で協定を結び、船を就航させて実績を作っていくことになります。その実績作りに向けて、日本と豪州との協議が進展しているわけです。

水素発電用タービン開発

弊社は、工場の自家発電用として、産業用ガスタービンを作っています。従来、工場の副生水素をボイラーで燃やして熱利用していたのですが、最近、燃料代や電気代が高騰してきているので、「ガスタービンで発電にしたい」という相談がありました。弊社は、ボリュームで天然ガスに対して水素60%まで混ぜて発電できる28MWのガスタービンの開発について目処をつけています。1年後には受注できるよう開発を進めているところです。

また将来は、通常時は天然ガスで熱電併給しているコージェネレーションのガスタービンを、災害で都市ガスが途絶えたときには、水素ステーションに蓄えてある液化水素を使って、数日間は地域に熱電提供するということも考えられます。

今、水素と天然ガスを自在に切り替えられる、7MW級までのガスタービン燃焼器を開発中です。天然ガス100%から水素100%まで、どんな濃度でも安全かつ安定的に燃やせます。普通の天然ガス用のガスタービンの燃焼器に水素を100%入れると、ノズルのところが真っ赤に赤熱して焼損するのですが、開発中の燃焼器では専用ノズルの採用によりそういう問題はありません。

あとは、規制見直し、そのための実績という話ですが、水素を混焼して発電する時の問題として、電気事業法に水素が燃料として規定されていないという課題があります。今、当社のお客さまと一緒にやろうとしている水素60%混焼のガスタービン発電の実績などが、規制整備の役に立てるのではないかと考えています。

水素貯蔵容器の開発

日本初となった、軽量のCFPR複合容器を採用した高圧水素トレーラーも開発しています。トレーラー1台で、FCV50台分の水素を充填できます。さらに、もっと大量に水素ステーションに運ぶ時は、液化水素のローリーを考えています。種子島宇宙センターのロケット基地へは、岩谷産業㈱が、堺から液化水素を陸送、最後はフェリーに乗せて輸送されており、安全実績を積み上げています。

14年前に弊社が造った液化水素のタンクは、真空二重容器で、14年間、何の問題も起きていません。水素の蒸発量は1日で0.1%以下なので何年も貯めておけます。陸上タンクの技術は既にありますから、あとはこれを船に積んで、海上輸送を実現することが、技術開発の重要ポイントになってきます。

最近の取組み～HyGrid研究会

図8は、「HyGrid研究会」で検討中の電気のスマートグリッドと水素と電気を融通するハイブリッドのグリッドです。大規模風力発電で、季節変動対策として、蓄電池に電気を貯めておくのは大変なので、水素を造って貯蔵したらどうか協議しているところです。

これこそが、「純国産再生可能エネルギーか

らの水素」という理想を目指す形です。あえて「目指す」と言うのは、相当な時間がかかる話だからです。導入段階では、色々な水素があつて然るべしということで、CCS付きでのCO₂フリー達成に固執せず、まずは、様々な製造形態の水素の普及から入っていこうと考えています。

－質疑応答－

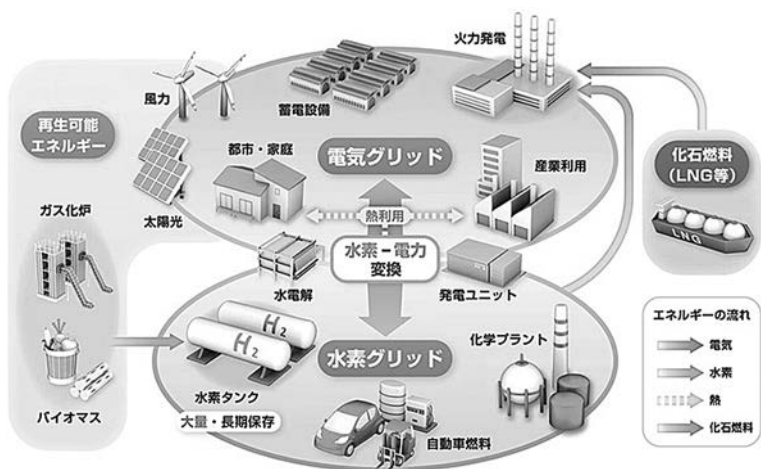
〔液化水素運搬船の就航〕

岡田：2,500m³液化水素運搬船の就航はいつ頃ですか？

西村：2017年の技術開発の完了を目指しています。もちろん、この船は、お客さまからの発注がないと詳細設計や製作にかかれませんが、それはまだですが、技術開発だけは間に合うように進めます。

岡田：先ほど、IMOから認証を受けるために、実績が求められるという話がありましたが、今回はその辺の融通を利かせてもらったということですか？

西村：はい。2国間で合意すれば、船は運航できます。液化水素を積載する基本構造につ



（出所：川崎重工業㈱）

図8 水素を活用したエネルギー需給の最適化

いては、日本の認証機関である日本海事協会から基本認証をいただきました。そういう手順を踏めばできるということです。

[各種ライセンスとの関係]

坂田：西村さん、LNG タンカーの基本特許は英国が持っているとか。

西村：ヨーロッパは、基準、特許およびライセンスに関わるビジネスが非常にうまいのです。弊社が1981年にアジアで初めて建造したLNG 輸送船用タンクは、ノルウェーのモス方式を採用しており、未だにライセンス料を支払っています。タンカーは、英国が最初に動かして実績を構築しました。LNG 基地・プラントも同様で、日本では千代田化工建設^(株)等が世界に冠たるプラントメーカーで、実績も一番ですが、ライセンスの多くはヨーロッパとアメリカが持っています。

坂田：そういう商売で回っている部分があるわけですね。

西村：ライセンサーになれることは先行者利益の1つですね。逆にライセンスを受けているライセンシー側は、新興国の後発ライセンシー企業と価格競争をさせられるわけです。そこで、今、最初にやって世界標準を取りに行っています。合理的にうまくやらないと、「技術で勝ってビジネスで負ける」となってしまいます。やはり、世界標準を取りに行けるようなことを考えないといけません。

[ノルウェーの計画]

大和田野：途中で紹介されたノルウェーの話ですが、彼らのタイムスケールはどのくらいですか？

西村：彼らは2100年までの絵を描いています。

坂田：ノルウェーは、2030年までにCO₂排出をゼロにすると宣言してませんでしたか？

西村：化石燃料由来の水素を使いながら、CCS付きでCO₂排出ゼロにしようとしています。彼らは、1994年から沖合のスライプラナーガス田でCCSを行っているのです。貯留可能量について訊ねると、「欧州連合（EU）が排出するCO₂の200年分」と言っていました。

岡田：数年前の世界石油会議で、スタットオイル社が「2018年からCCSを事業化すべく、3カ所で大型実証を行っている」と言っていました。そういうことが根底にありますね。

[水素発電タービン開発]

岡田：水素発電についてですが、28MWのガスタービンで、水素60%、天然ガス40%ですね。水と蒸気と水素だけでは駄目なのですか。

西村：水素60%までの混焼は、蒸気や水を入れないドライでというのが、当社製燃焼器の特徴です。なぜドライかというと、28MWガスタービンに水や水蒸気を入れると、発電効率が下がるからです。1ポイント下がるだけでも、燃料代が年間7,000万円くらいかかります。

岡田：弊社が検討している川崎のプロジェクトでは、輸入した水素の大方は、原料用として石油業界と化学業界に売りますが、一部は天然ガスとの混焼にして、独立系発電事業者（IPP）を検討しています。水素70%、天然ガス30%の大型タービンは既にありますので、そういったタービンの調達を検討しています。

西村：そういうタービンは、窒素酸化物（NO_x）の排出量を下げるために、だいたい蒸気混焼になっていますが、弊社のはドライでNO_x低減を実現します。28MWのタービンの商用時期は2015年で、「L30A」という商品になります。

[水素の国内輸送]

山地：この水素輸送コンテナで、液化水素を種子島まで運んでいるのですね。

西村：はい。堺市に岩谷産業(株)と関西電力(株)が出資する(株)ハイドロエッジの工場で、天然ガスを改質して造った水素を、種子島まで運んでいます。海路は、コンテナをフェリーに載せます。

広瀬：大量の水素を運ぶほうは結構できるのです。ところが、どこかに貯めて水素ステーションで使うとなるとすごく難しい。

山地：不思議な話ですね。動いているほうが危険な気がします。

西村：そこが高压ガスの悩ましいところかも知れません。移動体になると適用される規制も変わります。

広瀬：実は、移動体については規制がなかったので、一生懸命に頑張っ、て、車用の世界標準を作っ、て、世界的な規制にしたのです。ところが、プラントについては、その国の法律が適用されます。まだ、お客さんの水素を売るとかについて、法整備ができていないという感じがします。今適用されている法律は、もっと大きなプラントを安全に動かせるようにするための法律であり、街中で小売するということを考えた法律ではないということが課題です。

岡田：液化水素法の効率ですが、現在、30～35%と聞きました。つまり、ロスが6割程度あるわけですが、これを国家プロジェクトで2025年までに4割未満にしようとしているという理解で良いですか。

西村：そうです。あと、液化機の大規模化という課題もあります。今、(株)ハイドロエッジで

使っている液化機の液化能力は5トン/日です。商用化となると、その10倍くらいの大きさが必要なのです。

岡田：先ほど、2025年以降に商用化予定の水素チェーンは、770トン/日という話でしたね。

西村：その時も液化機の大きさは、50トン/日とか、今、日本で使っている液化機の10倍くらいが必要です。

それについては今、ヨーロッパで「アイデルハイ」というプロジェクトが行われていて、大型化と高効率化の検討を同時に進めています。シェルが幹事で、有名なノルウェー産業科学産業技術研究所（SINTEF）やリンデ社、そして当社も参加しています。

岡田：この時、海外との違いは邪魔にならないのですか？

西村：その時は、国際協力でやることになるのでしょうか。大型液化機の開発投資額は、非常に大きくなりますから。切磋琢磨しつつも、協力すべきところは一緒に実現を加速する方が現実的と考えます。

坂田：ありがとうございました。国内の再生可能エネルギーでの水素製造、水素による電力貯蔵、水素発電に関して、この度できた、産業総合研究所（産総研）で再生可能エネルギー研究所の大和田野所長からお話をいただければと思います。

再生可能エネルギー導入支援の水素

水素キャリアの製造・貯蔵・利用システム

大和田野：これまで産業総合研究所でも水素研究をやって来たのですが、今回、福島県に

再生可能エネルギー研究所を作りました。ここで取り組むのは、再生可能エネルギーの大量導入です。これからの本格的な大量導入を支え、その時の課題解決が研究テーマです。

再生可能エネルギーによる電力で運ぶ際、電力系統の容量を増やすこともやるべきだと思いますが、将来は、オプションとしての水素発電、再生可能エネルギーの電気を水素の形で貯めて運ぶことが必要だと思います。再生可能エネルギーの出力変動対策としての蓄電池は、コストが高いし、比較的短時間の貯蔵しかできないという欠点があります。水素で貯蔵すれば、大量に、安価に、長期間貯蔵することができ、輸送も楽になります。そういう数々の利点があるので、図9に示す「水素キャリアの製造・利用システム」の開発に取り組んでいます。

再生可能エネルギーネットワークの概要ですが、自前の発電能力として、太陽光発電500kW、風力発電300kWを持っています。

水素キャリアの製造・貯蔵では、有機水素、メチルシクロヘキサンの研究をしました。出口としては、小型の水素エンジンシステムを考えています。しかも、再生可能エネルギーの出力変動に対応するために、コージェネレーションの燃料に水素を使うシステムの完成を数年間の目標とした取り組みを始めました。有機水素の製造、水素発電の基本的な技術は、ある程度完成していますが、私どもで取り組

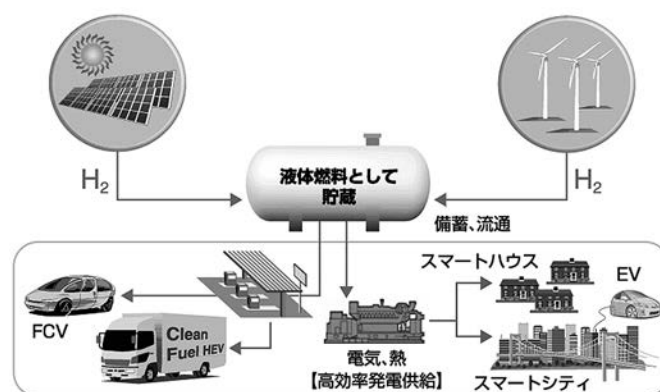


大和田野芳郎 氏

(独) 産業技術総合研究所
福島再生可能エネルギー研究所長

むのは、風力発電、太陽光発電の出力から水素や電気を作り貯めることです。エネルギーを取り出す際には「脱水素」をしないと いけません、そのための熱は、水素エンジン、コージェネレーションが供給する熱の一部を使おうと考えています。その際、最初から水素100%ではなく、軽油の炊き減らしから始め、最終的に水素80%くらい、残りをバイオ燃料でというところを、5年くらいで完成させる計画になります。燃料はできるだけ国内で調達できればと思っています。

水素キャリアを、再生可能エネルギーを導入する手段にすること、また、発電では既存燃料との併用や水素100%の発電に使うということで、従来の問題を克服できると期待しています。



(出所：福島再生可能エネルギー研究所，2014年4月)

図9 再生可能エネルギーからの水素キャリア製造・利用

発電設備は全部完成しています。水素チェーンの設備では、 20Nm^3 の水素キャリアのタンク、 30MW/h のエネルギーを貯蔵できる 100kW 水素エンジンを持っています。

再生可能エネルギーを大量導入しようとする際、出力変動が電力系統接続の制約になるなら、水素キャリアというオプションもあります。こんなことを主張して、水素のできるだけ早い普及に努めたいと思っています。

－質疑応答－

[金融も組み合わせた開発]

山地：日本で技術開発というと、ついついハードの開発になってしまいがちですが、水素エネルギーの問題は、どうやって社会経済的に導入していくかということです。これだけ政策的に水素導入をやろうとしている今、技術と金融とビジネスをうまく合わせた開発をやらないといけないと思うのです。

西村：全く同感です。超長期的な視点だと、将来、水素供給が再生可能エネルギー由来 100% になっても、天変地異や紛争などで設備が使えない期間は、化石燃料でバックアップしないといけません。 CO_2 削減という要請もありますし、水素は二次エネルギーだからすごく複雑なマーケットが出てくるはずなのです。だから、そういうマーケットを、うまくコントロールできるか、どう関与していくか、日本もしっかり考えるべきではないかと思います。日本は資源のない国ですが、水素エネルギーの流通では世界をリードしていく、というくらいのことを考えても良いと思います。

[期待されるサプライチェーン形成]

坂田：大和田野所長からご紹介いただいたプ



坂田 興氏

(エネルギー総合工学研究所 参事
プロジェクト試験研究部 部長)

ロジェクトは、サプライチェーンに関しても最初から最後まで見るという、非常に珍しい試みで素晴らしいと思います。バリューチェーンまで考えての検討をご紹介のプロジェクトに重ねることができると、企業にとっても、国にとっても、より深い意味づけができるかも知れませんね。

大和田野：すでにご一緒させていただいた企業は、当然そういうことを考えておられると思います。

先ほどのご指摘ですが、天変地異の時、水素なら化学エネルギーですので、ある程度自立したエネルギーシステムとしての利用価値を見せるのも一手だと思います。

坂田：そういう意味で、プロジェクトファイナンス、リスク管理も含めた検討材料を提供していただませんか。

岡田：すぐにではありませんが、水素エネルギーの輸入ビジネスも計画しています。リスクヘッジも事業計画で一番重要なことで、実際に、海外の金融機関や投資家の方々が「金融工学」と称して、お手伝いしてくれる環境が少しずつ整いつつあります。

おわりに

坂田：水素に関しては、超長期、中長期のイメージがあると同時に、実は明日が勝負だとか、1カ月、1週間で勝負だということが現実に進んでいます。超長期の水素といえども、実際のビジネスになったら、そうなるはずで
す。それを前倒しして、ご苦労いただいでい
らっしゃる部分も含めて、水素の話をお伺い
できて、非常によかったと思います。

今日はお忙しい中、しかも非常に短時間の
日程調整の中、これだけの方にご出席いた
きまして、本当にありがとうございました。

[寄稿]

シェール・ガス革命, シェール・オイル革命の 2014 年における動向

岩間 剛一 (和光大学 経済経営学部
教授)



1. 2013 年以降も増加を続ける米国の 天然ガス生産量

21 世紀に入ってから米国を震源地とするシェール・ガス革命は、2014 年までの 2 年間に
おいて、中東一極集中であった世界の資源地図
を大きく変貌させている。これまでの石油・天
然ガスの分野における中東地域における在来型
天然ガス、在来型石油の集中から、世界の天然
ガス消費量の 20% 以上を占める米国における天
然ガス生産量の増加によって (図 1 参照), 米

国における天然ガス価格は下落基調にある。米
国においては、天然ガス価格が下落したため天
然ガス生産量が減少するという見方もあった
が、2013 年も天然ガス生産量は堅調に増加して
いる。

米国の天然ガス価格は 21 世紀に入り、米国
国内の天然ガス需要が増加するとともに高騰
し、その後この数年の間に急速に下落している。
それは、米国における天然ガス需要の増加を上
回るペースで、シェール・ガス革命により天然
ガス生産量が増加したからである (図 2 参照)。

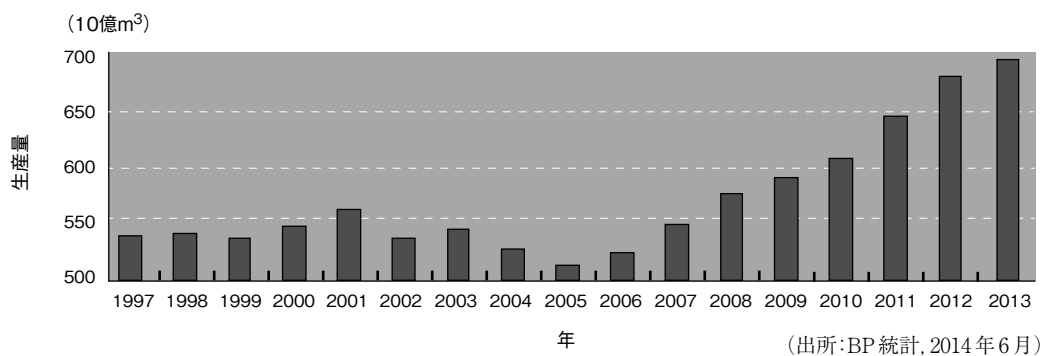


図 1 米国の天然ガス生産量の推移

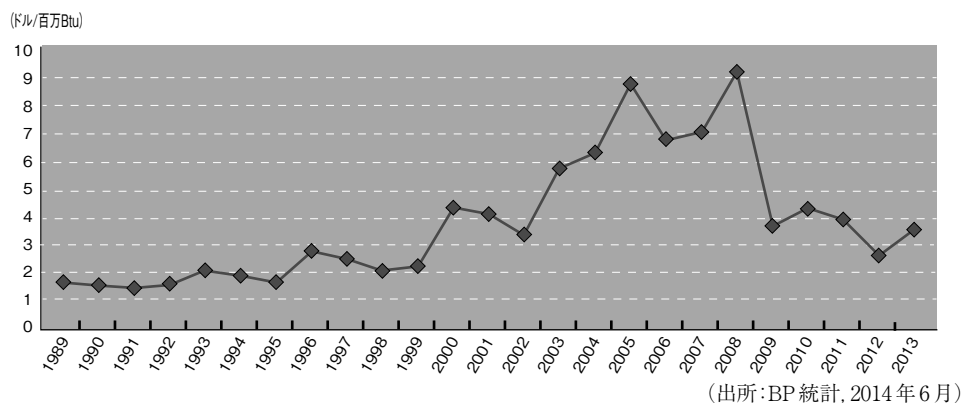
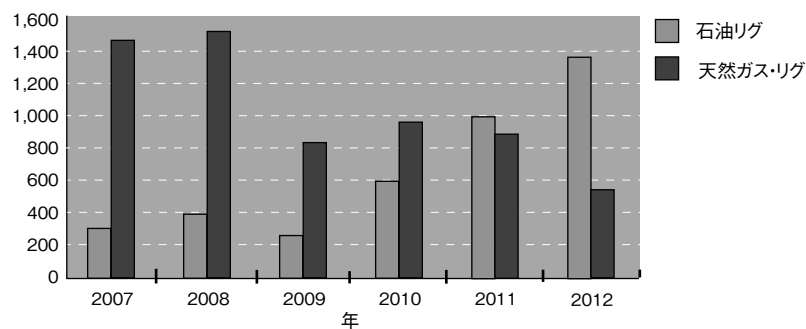


図 2 米国天然ガス価格の推移 (ヘンリー・ハブ渡し)

このように、この数年の間に天然ガス価格が下落すると、米国の石油企業は、米国国内における天然ガス販売で、ほとんど利益を挙げることができない。なぜならば、第1に米国の天然ガス生産量の3割をシェール・ガスが占めるものの、同時に生産コストが極めて高い米国メキシコ湾深海部の天然ガス生産量もあり、総合的には米国の石油企業は、米国における天然ガス・ビジネスでは十分な利益を挙げられないからである。第2に米国のエネルギー専門家の間においては、米国の天然ガス価格が、あまりに低迷しているために開発の中心をシェール・ガス狙いから相対的に割高のシェール・オイル狙いに切り替え、米国の掘削リグ2,000のうち7割以上はシェール・オイル狙いの開発を行っている（図3参照）。そのため、米国の原油生産量が増加し、天然

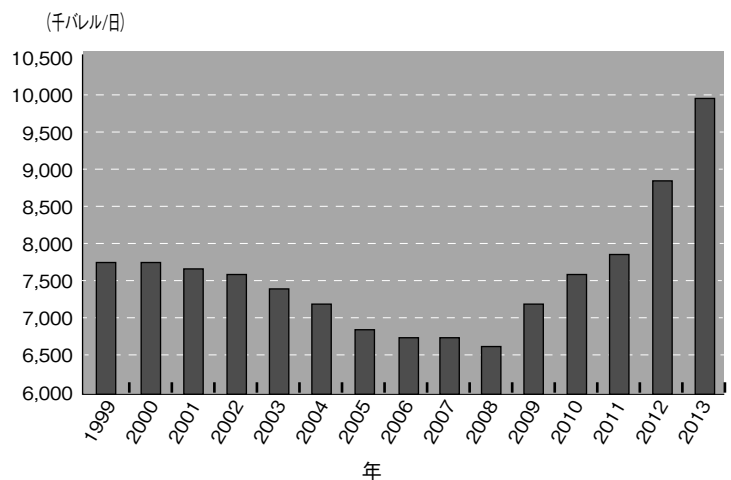
ガス生産量が減少するという予測もあった。

しかし、実際にはシェール・オイルの開発を行うと、シェール・オイルの生産が増加するとともに、随伴してシェール・ガスの生産も行われ、生産されたシェール・ガスは、既に米国国内に整備された天然ガス・パイプラインを利用して、企業、消費者に販売されることから、結果として米国のシェール・ガスの生産量は2013年も増加した。米国の企業と消費者は、エネルギー・コストの低下による可処分所得の増加という恩恵を十分に受けている。また、米国のシェール・オイル生産量も増加し、米国の原油生産量は急速に増加しており、2013年に1,000万バレル/日を超えた（図4）。米国は、再び世界の大産油国の仲間入りを果たしている。



（出所：米国エネルギー省エネルギー情報局統計）

図3 米国における掘削リグ数推移



（出所：BP統計、2014年6月）

図4 米国の原油生産量推移

2. シェール・ガス革命の恩恵を十分に受けていない日本

米国は、天然ガス価格の下落による企業と消費者のエネルギー・コストの低下を通じた可処分所得の増加という恩恵を受けているものの、日本の場合には、原油価格の高値推移、原油価格連動による割高な液化天然ガス（LNG）購入によって、石油、LNG、液化石油ガス（LPガス）の輸入額が、2013年は22兆円に達している（図5参照）。

日本のLNG輸入額は、東日本大震災前には3兆円程度であった。しかし、福島第一原子力発電所事故によって、54基すべての原子力発電所の稼働が停止し、2014年6月時点においても、稼働している原子力発電所はない。そのため、年間2,000万トンも追加的にLNGを調達したことと、LNGの購入価格が、百万Btu（ブリティッシュ熱量単位）当たり東日本

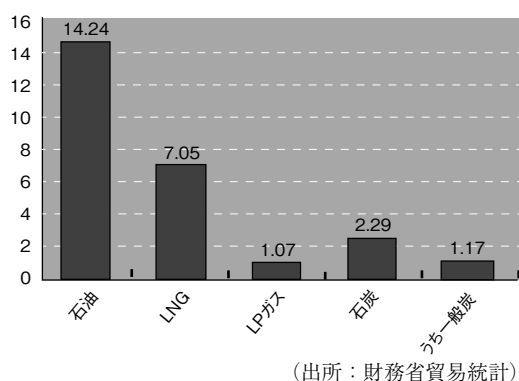


図5 日本の化石燃料輸入額（2013年）

大震災以前の9ドルから18ドル～20ドルに上昇したことから（図6参照）、LNG輸入額は7兆円を超えている。こうした円建てで見たLNG輸入額の膨張が、貿易赤字の拡大、国富の流出をもたらしている。

現状においては、天然ガスは常温・常圧で気体であるために、輸送・貯蔵・取り扱いが容易ではなく、物理的に市場が分断されている。天然ガス価格は、百万Btu当たり、シェール・ガス革命に沸く米国は3ドル、石油製品価格等価の欧州諸国は10ドル、日本をはじめとしたアジア市場は18ドルと大きな価格差が発生している。日本がこのような割高な価格でLNGを購入せざるを得ない理由としては、日本は、ドイツ等と異なって、安価で豊富な石炭資源を国内に持っておらず、石炭と天秤にかけてLNGが安価であれば購入するという交渉材料を持っていないことによる。欧州諸国は、もともと石炭資源が豊富であるうえに、米国のアパラチア産の石炭も輸入しており、石炭火力発電を増強させて、天然ガス火力発電の比重を低下させ、欧州連合（EU）における天然ガス消費量は、環境先進国というイメージとは逆に減少している（図7参照）。

欧州諸国は、ロシア、ノルウェー、アルジェリア等からの生ガスのパイプラインが、網の目のように整備されている。しかし、現状においては、欧州諸国にとっては、ロシアの国営天然ガス企業であるガズプロム社から購入する百万Btu当たり10ドルという価格は高す

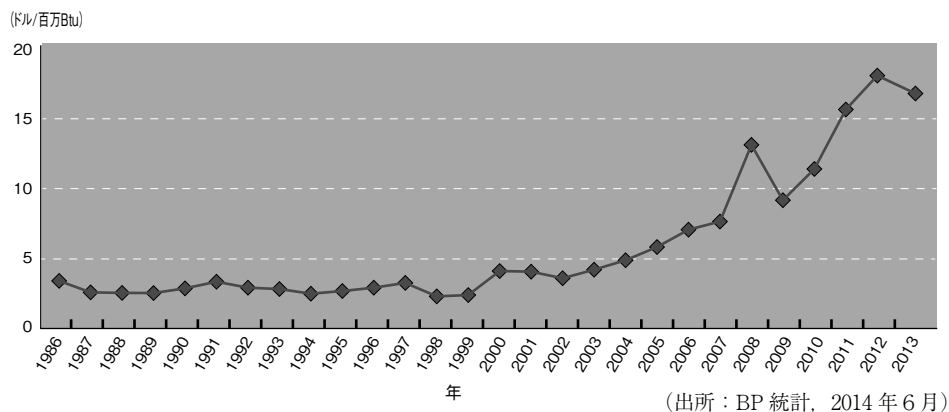


図6 日本のLNG輸入CIF価格推移

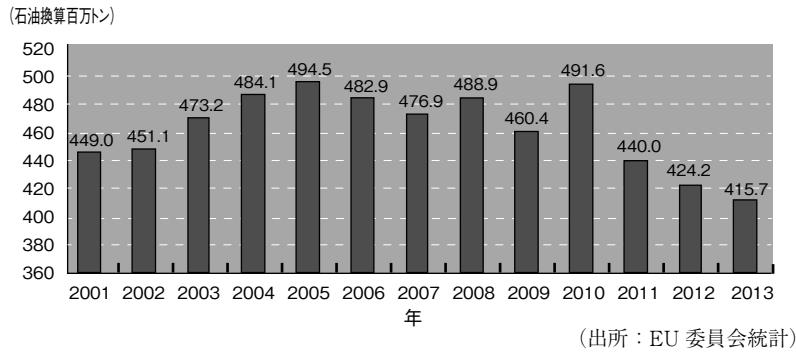


図7 EU 諸国における天然ガス消費量

ざる。そのため、割高な天然ガスの消費量を削減し、割安な石炭の消費を増加させている。それに対して、日本の場合には、国内の石炭資源は生産コストが高く、石炭のほぼ100%を海外からの輸入に依存している。また、石炭火力発電は、ベースロード電源として、24時間フル稼働させており、これ以上石炭火力発電の増強ができない。そのため、電力需要の変動に合わせて出力を変動させることが容易な、ミドル電源としてのLNG火力発電をフル稼働させることによって、原子力発電所の稼働がゼロとなっている状況においても、電力不足を起こさないようにしている。そのため、

原子力発電を失った分をLNG火力発電が補う形で、日本のLNG輸入量は、年間9,000万トン近くに達している(図8参照)。

また、日本は世界の3分の1を超えるLNGを輸入しているにもかかわらず、十分のバーゲニング・パワーを発揮していない(図9参照)。

本来であれば、大きな買い手は、売り手に対して交渉力が強まり、より安価なLNGが購入できるはずである。しかし、日本の場合には、国内に石炭資源が、ほとんどなく、生ガスの輸入パイプラインを持っていない足元を見られ、原油価格連動の割高なLNGの購入を余儀なくされている。

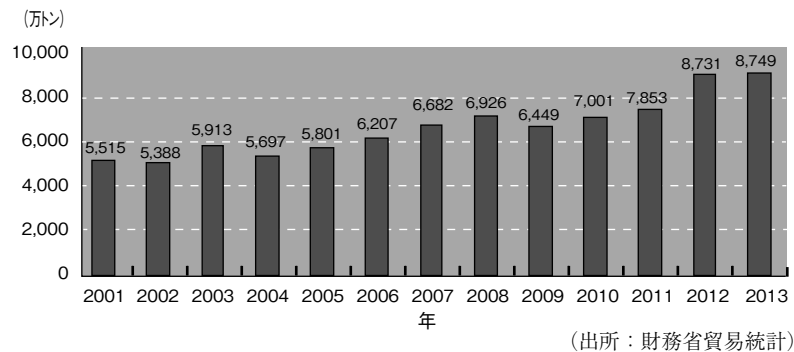


図8 日本のLNG輸入量推移

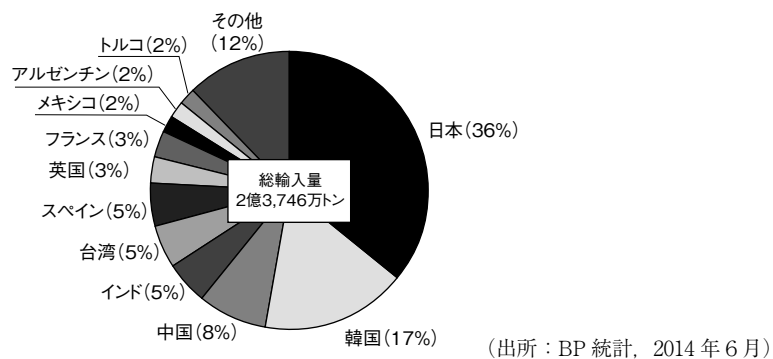


図9 国別LNG輸入割合(2013年)

3. シェール・ガス革命の恩恵は日本企業に徐々に

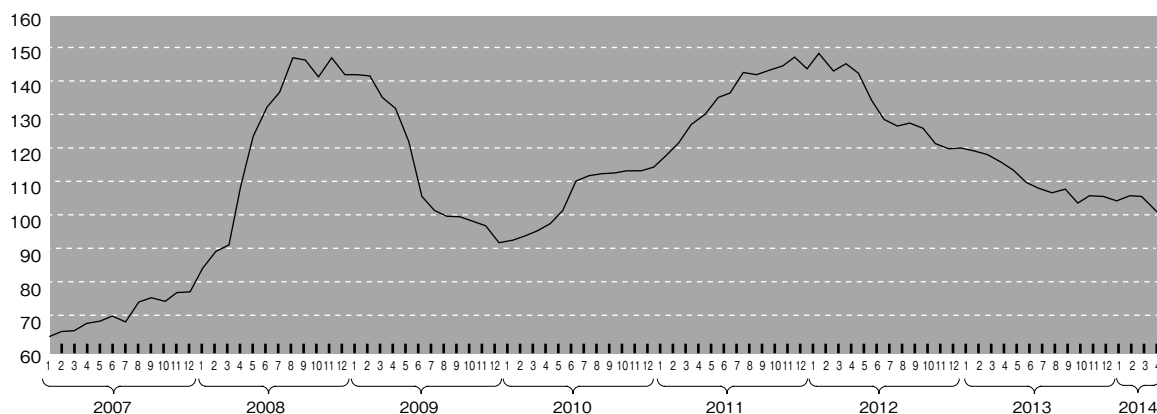
米国におけるシェール・ガス革命の恩恵は、上述のように日本においては、現段階では十分に出ているとはいえない。米国における天然ガス価格が安価で推移しているにもかかわらず、日本は割高に推移している原油価格に連動する形で、LNGを購入している。しかし、シェール・ガス革命の影響は、日本経済に徐々に出てきている。まず、米国における石炭火力発電の減少で、コロンビア産の石炭が、米国に輸出できなくなり、アジア大洋州に大量に流れ込んでいる。米国は、シェール・ガス革命によって、豊富かつ安価に天然ガスを利用できるようになったことから、国内の石炭業界の反発を押し切って、地球温暖化対策として、石炭火力発電所の新設を抑制し、さらに海外における石炭火力発電所建設への世界銀行をはじめとした国際金融機関による融資を禁止する動きに出ている。米国の身勝手といえば、身勝手であるが、米国は2001年3月に京都議定書を離脱している。その理由は、当時は米国の電力の5割を石炭火力発電が担っていたことから、炭酸ガスの排出削減数値目標を設定すると、発電コストの安価な石炭火力発電を利用できなくなるからである。しかし、シェール・ガス革命によって、天然ガス火力発電の発電コストが石炭火力発電の発電コストを下回る

と、石炭火力発電の比率を引き下げ、米国アパラチア産石炭が余っている。そのため、日本の電力企業が火力発電の燃料として輸入している豪州ニューカッスル港渡しの一般炭のスポット価格においては、ピーク時の1トン当たり180ドルから2014年5月時点におけるスポット価格が1トン当たり78.95ドルにまで暴落している。そのため、日本における一般炭の輸入価格も下落している（図10参照）。

日本は、一般炭について年間輸入量のほぼ半分の価格を毎年4月に契約するが、2011年4月に東北電力とエクストラタとの間で1トン当たり130ドルと過去最高の価格で火力発電用の一般炭購入契約が締結された。しかし、2014年4月に東北電力(株)とグレンコア・エクストラタとの間では、1トン当たり82ドルと50ドル近くも安い価格で購入交渉が成立している。このような形で、日本の石炭火力発電のコストは低下している。豪州の資源メジャーであるグレンコア・エクストラタ、BHP ビリトン等は、①安価なコロンビア産石炭の流入、②中国の石炭需要の伸び悩み、③中国特需を狙った積極的な設備投資による過剰生産能力、④豪州の高コストな人件費、等に苦しめられ、現状では、多くの炭鉱において、利益を挙げられない状況にあり、石炭生産能力の削減に乗り出している。

また、シェール・ガス生産に随伴して、プロ

(ドル/トン)



(出所：財務省貿易統計)

図10 日本における一般炭輸入価格の推移

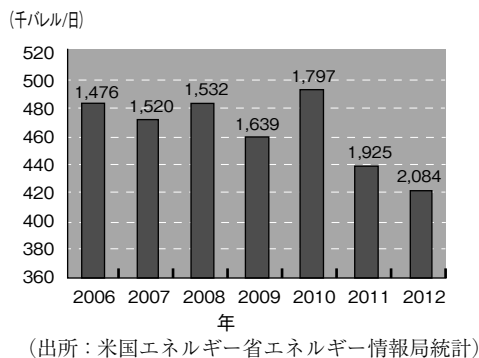


図 11 米国の LP ガス生産量の推移

パン、ブタンをはじめとした LP ガスの生産量も増加している（図 11 参照）。

いくらシェール・ガス革命の影響により、米国の天然ガス価格が下落して、シェール・ガス狙いからシェール・オイル狙いに油田掘削の方針が変更されたとしても、液体分のシェール・オイルだけ生産できるわけではなく、シェール・ガス、プロパン、ブタンをはじめとした LP ガスが随伴して、米国の LP ガス生産量が増加する。そのため、米国における LP ガス価格も下落している。米国の LP ガスの指標価格である米国メキシコ湾モントベ

ルビュー渡しの LP ガス価格は、1 トン当たり 400 ドル程度と、日本が購入するサウジアラビアの国営石油企業であるサウジアラムコが提示するサウジアラムコ CP（コントラクト・プライス）が、2013 年 12 月にブタンが 1 トン当たり 1,225 ドルであったことと比較して、半分以上の価格となっている。日本の場合には、アジアにおける LP ガスの実際の需給に関係なく、サウジアラムコが一方向的に通告してくるサウジアラムコ CP を基準に、カタール、アラブ首長国連邦（UAE）等から LP ガスを購入することを余儀なくされている。サウジアラムコが通告してくる CP は、米国の LP ガス価格と比較して、極めて割高なものとなっている（図 12 参照）。

そのため、日本のアストモス・エネルギー、ENEOS グローブ、岩谷産業をはじめとした LP ガス企業は、米国からのシェール・ガスに随伴した安価な LP ガス輸入を開始している（表 1 参照）。

現状においては、米国メキシコ湾から大西洋経由、シンガポール経由で日本に輸入する

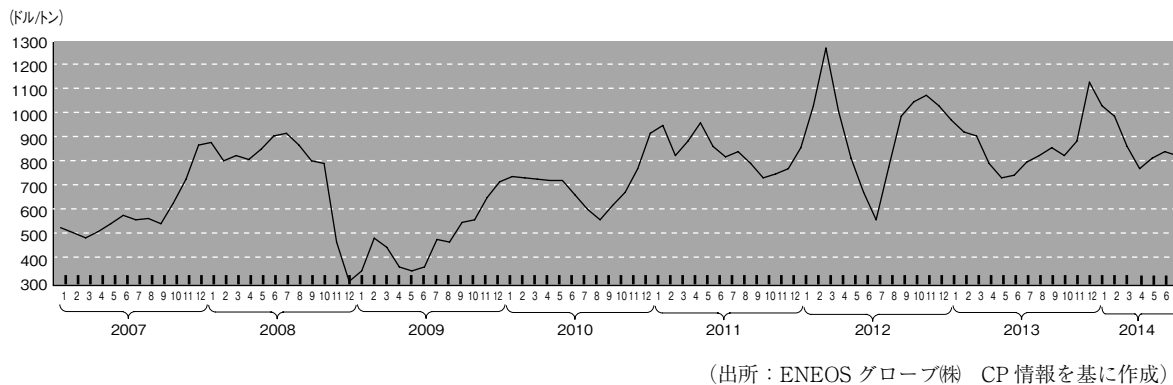


図 12 サウジアラムコ CP によるプロパン価格の推移

表 1 シェール・ガス随伴の LP ガス輸入例

企業名	概要	相手企業
アストモスエネルギー	2015 年から現状の 3 倍の年間 53 万トンを入力	エンター・プライズ・プロダクト
ENEOS グローブ	2014 年から年間 20 万トンを入力	エンター・プライズ・プロダクト
岩谷産業	2014 年から年間 8 万 8,000 トンを入力	エンター・プライズ・プロダクト
東燃ゼネラル	2010 年代半ばから合計 60 万トンを入力	エンター・プライズ・プロダクト
東京電力	2013 年から 3 年間合計 20 万トンを入力	アストモスを通じたエンター・プライズ・プロダクト
伊藤忠商事	2014 年末から年間 100 万トン輸入	欧州ヴィートル・グループと共同事業

(出所：各種新聞報道)

船賃を考慮に入れても、中東諸国から LP ガスを購入するよりも、米国のシェール・ガスに随伴する LP ガスのほうが安価であり、米国のシェール・ガスに随伴する LP ガスの輸入量は増加している。2014 年 1 月には、東京電力㈱は LP ガス専用の姉崎火力発電所に、米国のシェール・ガス生産に随伴した LP ガス輸入を行い、発電コストの低減に努力している。特に、LP ガスは石油製品扱いとなっているため、米国エネルギー省の輸出許可を必要とせず、民間企業が自由に輸出できることから、米国の LP ガス商社であるエンタープライズ・プロダクト社から、LP ガスの輸入が増加している。もっとも、日本の年間の LP ガス消費量は 1,600 万トンに達し、LP ガスの輸入量も 1,200 万トンを超えることから（図 13 参照）、現状においては、米国の安価な LP ガス輸入は部分的なものにとどまっている。

日本全体の LP ガス価格低下にはつながっていないものの、サウジアラムコ CP は、アジア

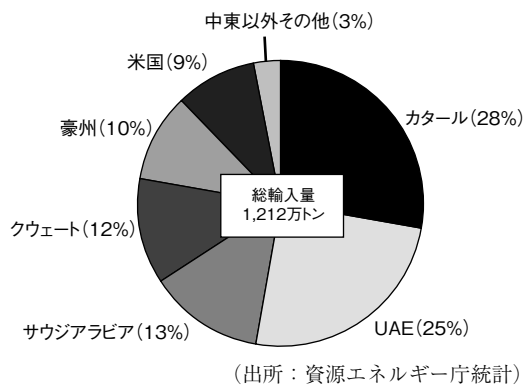


図 13 日本の国別 LP ガス輸入割合 (2013 年)

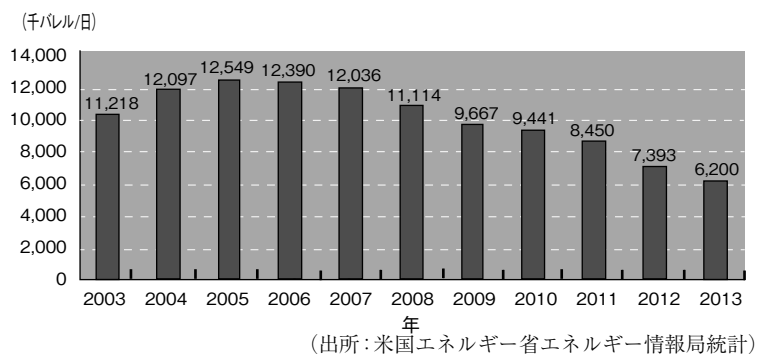


図 14 米国の石油純輸入量

の実際の需給と関係なく割高に設定される傾向があるため、カタール、UAE 等も適用している。しかし、割安なシェール・ガス随伴の LP ガスの米国からの輸出が増加するならば、将来的には中東諸国からの LP ガス輸入価格の下落への圧力となると考えられる。

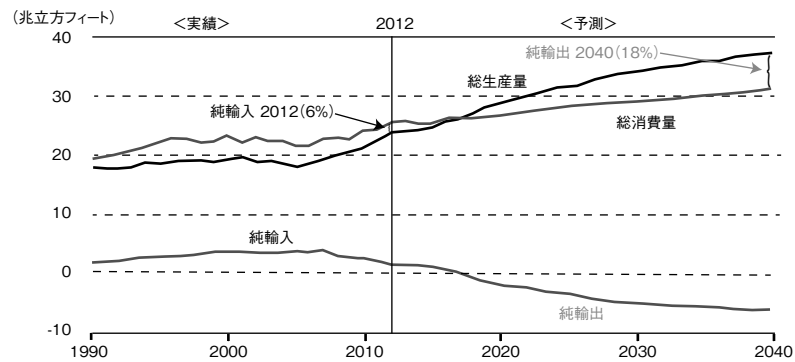
4. 米国におけるシェール・ガス開発の今後

米国における天然ガス生産量のうちシェール・ガスが占める割合は、2014 年時点で 30% 程度に達している。しかし、今後もシェール・ガスの生産量が増加を続けることから、2040 年には天然ガス生産量の 50% 程度をシェール・ガスが占めるものと考えられる。さらに、シェール・オイルの生産量の増加によって、米国の石油純輸入量は減少基調にある（図 14 参照）。

米国エネルギー省エネルギー情報局の見通しでは、米国は 2020 年には天然ガスの純輸出国となり、2040 年には米国の天然ガス生産量の 18% は輸出されると予測している（図 15 参照）。

これまで世界最大の天然ガス輸入国になると見込まれていた米国が、天然ガス輸出国となることによる国際エネルギー情勢への影響は極めて大きい。

また、今後は、より開発の困難なシェール・ガス構造を掘削することから、掘削コストが上昇し、技術革新の必要があることから、米国の天然ガス価格は、2020 年に百万 Btu 当た



(出所: 米国エネルギー省エネルギー情報局統計)

図 15 米国の天然ガス生産量見通し

り 6 ドル, 2030 年には百万 Btu 当たり 7 ドルへと上昇する可能性があるとしている (図 16 参照)。

米国におけるシェール・ガスの生産量の増加は, 今後も続き, 2040 年には米国の天然ガス生産量の 50% は, シェール・ガスが占めると見込まれている。米国におけるシェール・

ガス生産量の増加は, 必然的に海外への LNG 輸出の拡大につながっていく。現状においても, 米国においては, 数多くの LNG 輸出計画が構想されている (表 2 参照)。

日本は, 2016 年に関西電力が, サービン・パス LNG の輸入を開始し, 2017 年以降に本格的にシェール・ガスを原料とした LNG の輸入を



(出所: 米国エネルギー省エネルギー情報局統計)

図 16 米国の天然ガス価格見通し

表 2 北米の LNG 輸出プロジェクト

(単位: 百万トン)

地域	プロジェクト名	事業主体	液化能力
アラスカ	ケナイ LNG	コノコフィリップス, マラソン	20.0
カナダ	キティマット LNG	三菱商事, シェブロン	10.0
カナダ	ダクラス・アイランド LNG	BCLNG 輸出事業体	1.9
カナダ	プリンス・ルパート LNG	シェル・カナダ	7.5
テキサス	サビンパス LNG	シェニエール・エナジー	19.5
テキサス	フリーポート LNG	フリーポート, 豪州マッコーリー	13.5
テキサス	コルパス・クリスティー LNG	シェニエール・エナジー	13.5
ジョージア	エルバ・アイランド LNG	シェル	2.5
カリフォルニア	レイク・チャールズ LNG	サザン・ユニオン, BG	15.0
カリフォルニア	キャメロン LNG	センブラ・エナジー	12.8

(出所: 各種新聞報道)

拡大する。現在の米国における天然ガス価格を基準とすると、(日本の LNG 輸入価格) = (ヘンリー・ハブ価格 3 ドル) + (液化コスト 2.5 ドル) + (船賃 3 ドル) = 8.5 ドルと、現在の LNG 輸入価格よりも 10 ドル近くも安価な LNG を輸入することが可能となる。米国におけるシェール・ガス革命は、日本の LNG 輸入価格の低減を通じて、日本の企業の国際競争力強化、消費者のエネルギー・コストの低下をもたらすのである。

[寄稿]

2030 年に向けたコージェネレーション普及拡大の展望

杉浦 英太郎 (一財) コージェネレーション・エネルギー高度利用センター 普及促進部長



1. はじめに

国のエネルギー政策の基本となる「エネルギー基本計画」については、東日本大震災以降、議論が重ねられ、先般 2014 年 4 月に閣議決定に至った。この中では、定量的な記載は控えられたものの、コージェネレーションシステム（以下、コージェネ）は「熱電利用を同時に行うことによりエネルギーを最も効率的に活用することができる方法の 1 つ」と評価され、緊急時の電力の確保が可能で強靱化にも資する電源として、排熱の面的利用の推進も含め、その導入拡大が明記されている。

こうした背景の中、一般財団法人コージェネレーション・エネルギー高度利用センター（コージェネ財団）では、コージェネの普及に関する課題と取組みについて検討するため、産業用・業務用のコージェネユーザーや学識経験者の参画を得て、2012 年 10 月に「アド

バンスト・コージェネレーション研究会」(AC 研) を立ち上げた。研究会では、普及拡大のポイントとなるコージェネの導入意義・価値や市場への導入モデル、技術開発などの検討、これらを踏まえたコージェネの導入量の推計、そしてこれらを実現するための課題、提言などを検討した。

以下、コージェネの普及状況や最近のエネルギー政策との関連も交えて、取りまとめられた検討結果の概要を紹介する。

2. コージェネの普及状況

まず、コージェネ普及状況（家庭用を除く）を紹介する。図 1 にコージェネの単年度導入量の推移を示す。

省エネルギー推進、二酸化炭素 (CO₂) 削減が求められる中、1990 年代半ば以降、地球温暖化対策の重要性が高まり、コージェネの導入

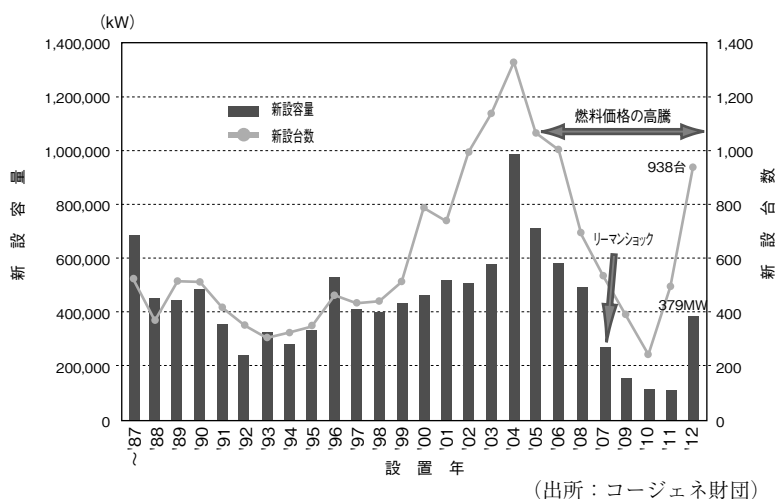


図 1 コージェネ単年度新規導入量（家庭用除く）

拡大が進んできた。特に、2000～2007年頃には高効率大型機などが数多く発売開始となり導入が加速した。その後、燃料価格高騰、リーマンショック等の影響で導入量が鈍化した。東日本大震災以降、分散型電源としてのコージェネへの期待の高まりから、2012年度の新設容量は37.9万kWと増加し、2012年度末の既導入量は985万kW、約14,000台に達している。また、用途別の累積導入量を図2に示す。容量ベースでは工場など産業用コージェネが780万kWと全体の8割程度を占めている。一方、台数では全体約14,000台のうち7割程度（件数では全体約9,300件の8割弱）を業務用コージェネが占めている。

熱と電気を併給するコージェネとして位置づけられる家庭用燃料電池（エネファーム）の導入状況については、図3に示すように当初、2009年度には年間約5,000台の販売台数だったが、補助金政策による推進なども行われ、2013年度には3万台を超える販売台数となっている。

3. コージェネとエネルギー政策

（1）エネルギー基本計画

エネルギー基本計画の中では、分散型と集中型のエネルギーシステムの相互補完により多重化・多様化した柔軟なエネルギー需給構

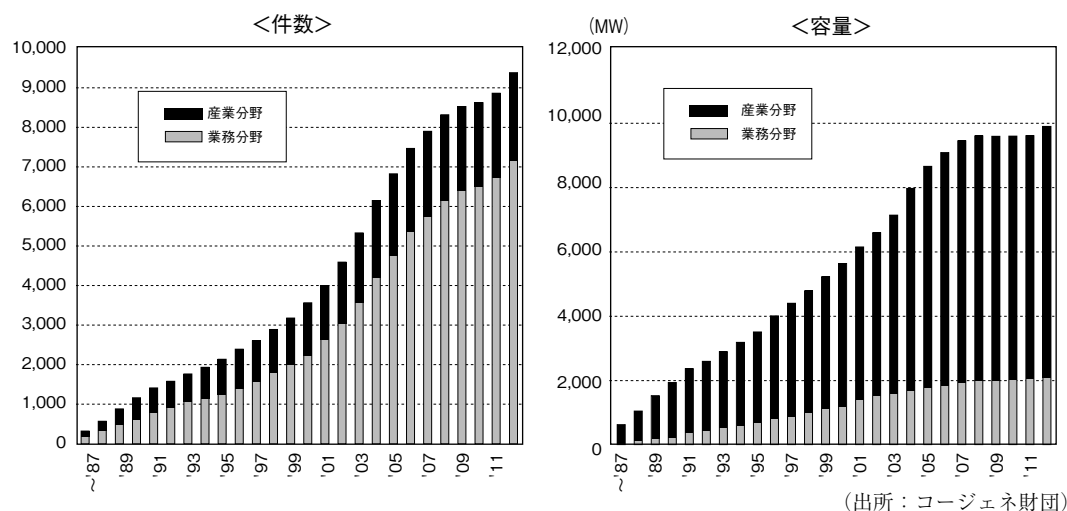


図2 コージェネ累積導入量の推移

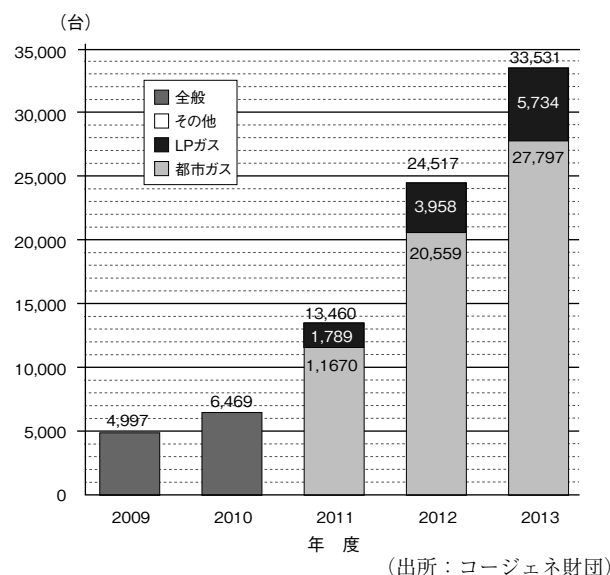


図3 家庭用燃料電池（エネファーム）メーカー販売台数（2014年3月末）

造の構築を目指すとされている。分散型エネルギーシステムであるコージェネは、以下のように位置づけられている。

①省エネ・省 CO₂、エネルギーの高度利用関連

エネルギーの効率的活用及び地球温暖化対策の観点から、コージェネなど地域における電源の分散化、コージェネや再生可能エネルギー熱等の利用促進をはかる。

②非常時等の対応（強靱で柔軟なエネルギー供給体制の構築、BCP 対応）関連

コージェネなどによる分散型エネルギーシステムは、危機時における需要サイドの対応力を高めるものとしてその構築を進めていく。

③エネルギーシステム改革関係

柔軟性ある安定供給体制確立のため、電力・ガスのシステム改革、熱供給事業に関するシステム改革を進めていく。コージェネについては導入支援策の推進とともに燃料電池を含めコージェネからの電気の取引の円滑化等の具体化に向けて検討する。

④家庭用の定置用燃料電池

2020 年 140 万台、2030 年 530 万台の導入を目標に市場自立化に向けた導入支援を行う。

⑤スマートコミュニティ関連

スマートコミュニティの導入により、需要に応じた多様なエネルギー源の組み合わせによる大幅な省エネルギーの実現や非常時のエネルギー供給の確保が可能となる。建築物や

工場等の単体でのコージェネの利用に加え、地域単位での利用推進による導入拡大を図ることが必要。

なお、今般の計画案において、家庭用燃料電池を除き、電源構成等エネルギーミックスに関する具体的な数値目標は示されておらず、今後、具体的な検討がなされるものと思われる。

（２）電力システム改革

平成 25 年 10 月に「電気事業法の一部を改正する法律案」が国会で可決された。今後も「広域的運営推進機関の設立」、「電気の小売業への参入の全面自由化」、「法的分離による送配電部門の中立性の一層の確保、電気の小売料金の全面自由化」の 3 本柱の改革の実施が 2018 ～ 2020 年頃を目途に進められる予定である。図 4 に示すように、ここ数年の間でもさまざまな制度・規制に係る改革が実施されてきたが、さらに今後、託送や自営線に関する制度、各種電力取引市場の整備など、コージェネをはじめ分散型電源による電気の取引の円滑化に向けた議論が期待される。

（３）ガスシステム改革

一方、コージェネの主要燃料であるガスについても、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会の下、「ガスシステム改革小委員会」において検討が行われており、「競争の活性化



（出所：アドバンスト・コージェネレーション研究会（AC 研））

図 4 コージェネ普及に関わる電力システム改革関連事項

による料金抑制」「天然の調達価格低廉化に向けた取組み」「ガス供給インフラの整備」等が、今後のコージェネ普及につながるものと期待される。

（４）国土強靱化

国土強靱化に関する総合的かつ計画的な施策推進のため、内閣に設置された国土強靱化推進本部のもと、国土強靱化担当大臣の私的諮問委員会として有識者で構成されるナショナル・レジリエンス（防災・減災）懇談会では、コージェネはエネルギー需給の強靱化に資する自立・分散型エネルギー源として位置づけられている。

また、2014年6月に閣議決定された国土強靱化基本計画では、「第3章 国土強靱化の推進方針」の中で、国土強靱化の推進方針として、エネルギー分野において、「コージェネレーション、燃料電池、再生可能エネルギー、水素エネルギー等の地域における自立・分散型エネルギーの導入を促進するとともに、スマートコミュニティの形成を目指す。」と記載された。

また、併せて国土強靱化推進本部にて決定された「国土強靱化アクションプラン2014」では、例えば、鉄道や医療施設、福祉関連施設等の地域の重要拠点に対し、災害時や電力逼迫時にもエネルギー確保の観点からガスコージェネレーション等の導入の促進が記されている。

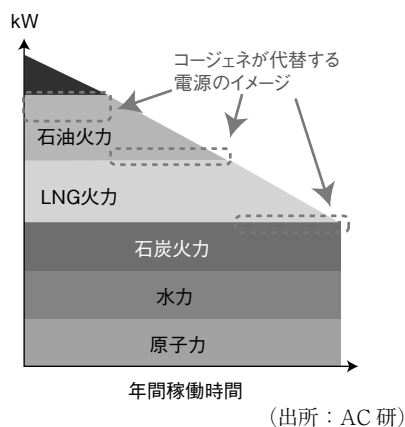


図5 2030年の年間負荷曲線イメージ

4. コージェネの意義・便益

（１）意義・便益の整理

熱電併給のシステムであるコージェネは、省エネ・省CO₂に資するシステムとしての価値を既に広く認識されている。東日本大震災以降では、国内の電力需給逼迫や非常時においても経済活動や都市・生活機能を確保したいというニーズの高まり等もあり、分散型電源としての「電源価値」および経済活動などの継続を可能とするためのいわば「BCP 価値」がコージェネの新たな価値として注目されている。このため、研究会ではこれら2つの価値に注目し、今後のコージェネ普及に重要な意味を持つ要素として検討することとした。

（２）電源価値の検討

分散型電源は集中型電源との相互補完等によって電力需給に貢献する。2030年時点で、経年40年以上の火力・原子力発電所が6,500万kW程度に達する見込みであること等を考慮すると、コージェネは系統電源の供給力確保としての役割を有するとともに、その稼働により、老朽火力等の代替として電力総コストの低減に資する価値を有するものと考えられる。こうした電源としての価値の評価手法として、コージェネ導入によって回避される費用による定量化を検討した。具体的には、時間帯別に、もしコージェネが無かった場合に稼働するであろう代替電源を想定し、その停止により回避される費用を価値として評価し、定量化することとした。

時間帯別に代替する電源種を図5、および表1のとおり想定したうえで、コスト等検証委員会によるデータを参照し、時間帯別のコー

表1 コージェネが代替する電源種の想定

時間帯	短期(2016年)	長期(2030年)
ピーク	既存石油火力	既存石油火力
昼間	既存LNG火力／既存石油火力	新設MACC／既存石油火力
夜間	既存石炭火力／既存MACC	新設IGCC／新設MACC

●IGCC:石炭ガス化複合発電 ●MACC:1500℃級コンバインドサイクル発電
●電力需給や設備状況等を踏まえ、代替される可能性のある電源の幅を示す。

(出所：AC 研)

表2 コージェネの電源価値評価結果

試算例		kW価値(円/kW/年) (維持管理費・建設費節減価値)	kWh価値(円/kWh/年) (燃料費節減価値)	省CO ₂ 価値 (円/kWh)	買電価格換算 (円/kWh) ※託送単価不含
短期 (2016年)	ピーク	5,510	14.4	0.10	39.0
	昼間	3,480~5,510	10.4~14.4	0.04~0.10	11.3~15.8
	夜間	6,900~3,480	5.0~8.0	0.17~0	6.2~8.5
中長期 (2030年)	ピーク	5510	14.4	0.10~1.4	39.0~40.2
	昼間	8,520~5,510	4.9~14.4	0~1.4	6.9~17.1
	夜間	20,701~6,900	4.1~5.0	1.5~2.2	8.5~8.2

(出所：AC研)

前提条件：需給検証委員会報告書（平成25年4月24日）、平成25年度電力供給計画（電力各社）、コスト等検証委員会報告書（平成23年12月19日）、米国PJM社資料等をもとに作成
 時間帯別負荷：一般電気事業者の時間帯別料金メニューを参考に、以下の条件を想定。
 （ピーク時間帯：夏季（7月～9月）平日（土曜含む）13時～16時→年間約225時間稼働相当
 昼間時間帯：夏季以外の平日（土曜含む、但し年末年始・GWの指定日除く）8時～13時・16時～22時→年間4074時間稼働相当
 夜間時間帯：上記以外の時間帯→年間8760時間稼働相当、ただし価値計算の際は定期検査等を想定し稼働率80%相当で試算）
 省CO₂価値：従来システム（ガスボイラー+代替電源）とガスコージェネ（2MW級GE及び10MW級GT）を比較した場合の削減量に対し、短期は3ドル/tCO₂（直近のCO₂取引価格）、長期は40ドル/tCO₂（コスト等検証委員会）を積算し算定。

ジェネの電源価値を算定した。

その結果を表2に示す。ピーク時間帯では最大40円/kWh程度の価値に達する。短期的には、既存火力のメンテナンスコストを低減しつつ、燃料費を低減する価値があることが示唆される。中長期的に多くの火力発電が高経年化する中、大規模な電源更新の一翼を担うと期待される。

（3）BCP 価値の検討

自立的な電源を確保し得る分散型エネルギーシステムとしてコージェネの導入意義が注目されている。近年の防災対応型のシステムの導入等により、単体建物あるいは街区・エリア全体のエネルギー（電源）セキュリティの向上に資するものとして、BCPに対する寄与が見込まれる。例えば、事業継続という観

点から、停電、節電要請などの直接的な被害の回避に加え、BCP対応されている建物では不動産価値の向上、非常時の電源供給による災害拠点の機能確保といった価値が想定される。さらには建物や地域のブランド力が向上による地域経済への波及効果といった副次的な価値も想定される。

AC研では、BCPに関わるコージェネの価値の項目・内容について、便益個々の項目の独立性に留意しつつ、一般論的な観点から検討し、その便益の主な受け手（建物・土地所有者、建物ユーザー、国・自治体、地域住民、地域エネルギーサービス事業者など）を整理した。さらに、こうした価値の定量評価手法を検討し、都市におけるコージェネ導入モデルを対象に試算した。なお、ここでは、停電等による物損的あるいは利益面での直接的な

表3 BCP 価値による便益の内容と受け手の例

便益	主な便益の受け手	便益の内容
①停電による被害の回避	建物ユーザー	・ 停電、節電要請時の被害（逸失利益、機会損失等）の回避
②節電要請による被害の回避		・ 企業価値の低下による損失も含む
③不動産価値の向上	建物ユーザー 土地・建物所有者	・ 建物ユーザーの被害回避の対価については①、②で整理 ・ 上記以上のメリットとして、不動産のリスク（空室率増加リスク、規制リスク等）軽減による価値が考えられる。
④災害拠点の機能確保	自治体・地域住民	・ 周辺の就労者や地域住民等のための災害拠点として期待される機能
⑤地域経済への波及効果	自治体・地域住民	・ 投資による経済波及効果や空室率改善による就業人口増に伴う消費・利益の増加など、①～④の副次的な効果として見込まれる（但し、今回は定量化せず。）

(出所：AC研)

被害回避に加え、副次的に想定される効果も含め、「BCP 価値」という言葉で表現する。

まず、便益の内容と受け手を整理したものを表 3 に示す。便益の項目としては、①停電による被害の回避、②節電要請による被害の回避、③不動産価値の向上、④災害拠点の機能確保、⑤地域経済への波及効果、の 5 つに整理し、定量化を検討した（但し、⑤については定量化せず）。こうした BCP 価値の特徴をまとめると以下の通りである。

- BCP 価値に伴う便益は、その受け手（例えば、ユーザーの業種・業態の条件など）によってその大きさが変動する。（幅を持った値となる。）
- 地域社会等への便益では、投資主体以外に地域住民などさまざまな便益の受け手が

存在し、こうした便益が必ずしも投資主体に還元されるとは限らない。

- BCP 価値の観点からコージェネの導入促進を図るには、価値の移転・配分方法（価値評価制度や投資主体への支援策等）の検討が必要と考えられる。

さらに、表 4 に示した評価方法・前提条件にて、定量化を試みた。なお、コージェネには熱の供給価値も考えられるが、今回の検討では発電機能を主眼に検討を行った。また、防災ラインと同等レベルの燃料供給もしくは備蓄、冷却についてもラジエーター方式等での対応等、自立電源としての条件を備えた前提とした。

大都市でのコージェネ導入モデルでの試算例を図 6 に示す。コージェネの耐用年数 15

表 4 BCP 価値定量化評価（試算）の評価手法・前提条件

便益(評価項目)	評価方法・前提条件
①停電による被害の回避 ②節電要請による被害の回避	・ 停電、節電要請時のインパクトコスト(逸失利益、機会損失、企業価格の低下等)に関する既往調査(電力系統利用協議会による調査)に基づく推計 ・ コージェネレーションシステム(CGS)の耐用年数である15年に1回災害が発生した場合のインパクトコストとして試算 ※結果的に災害が発生しなかった場合は保険費用と同等の考え方 ・ 停電時間:2010年度(災害発生年)の実質平均停電時間(8.6時間)～自治体防災計画等(72時間)を想定 ・ 節電時間:夏季平日50日間×11時間(9:00～20:00)、冬季平日62日間×12時間(9:00～21:00) ・ 節電率:2010年度の電力需要実績に基づきピーク電力に対して夏季15%、冬季10%の節電が求められた場合の上記期間・時間等における使用電力量の削減率を試算し、夏季4.6%、冬季1.7%と想定 ・ 防災負荷対応用の電力分については、①②の試算には含まない。
③不動産価値の向上	・ 建物ユーザーの被害回避の対象については、①②で整理 ・ それ以外のメリットとして、不動産のリスク(空室率増加リスク、規制リスク等)軽減による価値について不動産分野のアンケート調査による推計(ニッセイ基礎研究所「第8回不動産市況アンケート結果」(2011.10) ・ CGS寄与率(価値向上に占めるCGSの割合):10%(日本政策投資銀行(DBJ)「BCM格付融資制度」における評価体系を元に設定(p.20参照))
④災害拠点の機能確保	・ 計画停電を経験した地域の住民に対する支払意思調査((独)科学技術振興機構 低炭素社会戦略センターによる調査等)に基づく推計 ・ 停電時等の災害拠点(避難所、帰宅困難者収容等)として、Lowケース(8.6時間)～Highケース(72時間)にて試算

(出所：AC 研)

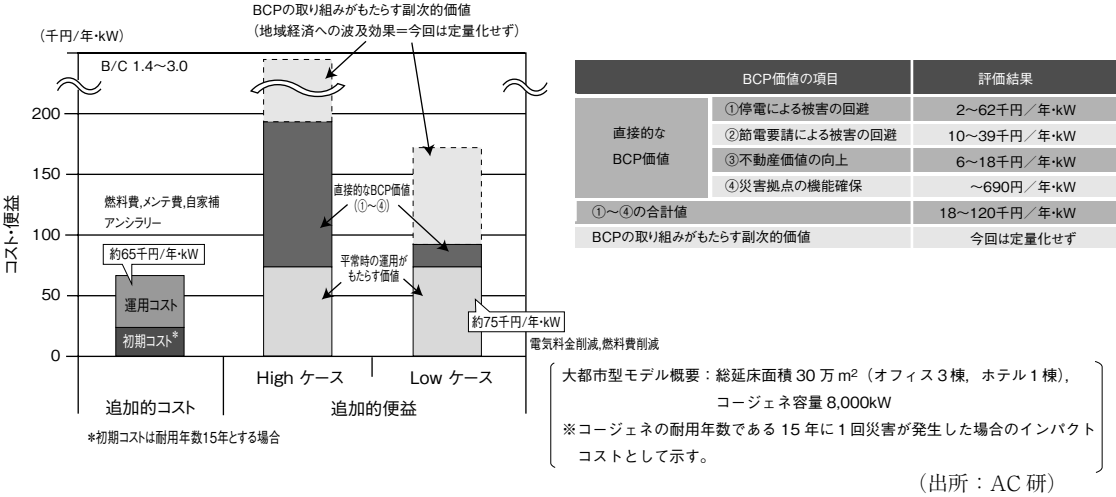


図 6 BCP 価値の試算例（大都市型モデル）

年間に1回災害が発生した場合のインパクトコストとして試算すると、このモデル（総延床面積約30万㎡（オフィス3棟、ホテル1棟）、コージェネ容量8,000kW）の場合、BCP価値はコージェネ1kWあたり年間18～120千円程度と試算され、平常時の運用がもたらす価値（エネルギー費用削減約75千円／年・kW）に対して十分なインパクトを持つBCP価値を想定し得る結果となった。

5. 技術開発関係

(1) 目指すべき目標水準

コージェネ導入量推計に先立ち、2030年時点のコージェネが目指すべきエネルギー効率とコストの目標水準を検討した。「将来の高効率火力発電所と同等以上の一次エネルギー効率」「自立的に普及が進むコスト水準」との前提に立ち、発電効率の向上やシステム導入や

メンテナンス面での改善などコスト低減要素等を考慮し、目指すべき水準について表5のように設定した。

(2) 全蒸気取り出し技術

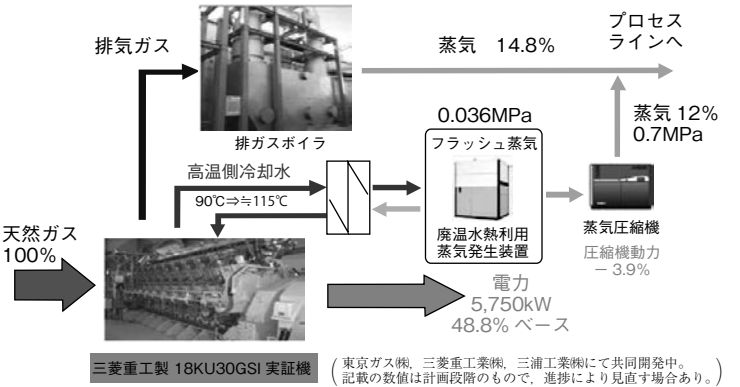
一方、コージェネ普及に向けての重要な要素として、排熱利用技術、特に比較的低温の排熱として温水の利用技術に注目した。中でも、図7に示す現在開発中の「全蒸気取り出しガスエンジンシステム」については、空調用途が少なく低圧蒸気用途の多い産業用途の一部（例えば食品、飲料等）において、温水から蒸気を取り出し排熱を有効利用することで発電効率の高いガスエンジンの利用拡大が可能となる。

この技術が利用可能な業種では、分散型電源として逆潮流を行う「電源コージェネモデル（後述）」を想定すると、ガスエンジンの利用拡大により、コージェネ導入規模拡大が期待される。

表5 コージェネ普及に向けて目指すべき技術水準

機種別	指 標		発電効率[低位発熱量]			廃熱回収率 (総合効率)	イニシャル コスト	メンテナンス コスト
			現状Max.	～2020年	～2020年代以降	～2020年	～2020年	～2020年
GE	大型	5MWクラス	49.0%	50%超	51%超	発電効率アップによる排熱温度レベルへの影響はあるものの、総合効率を維持(2020年以降は同じレベルをキープ)	現状(2020年)より3分の1削減(←同左)	現状(2020年)より3分の1削減(←同左)
	中型	1～2MWクラス	42.8%	46%超	48%超			
	小型	0.5MWクラス	41.0%	42%超	44%超			
GT	大型	30MWクラス	38.8%	40%超	42%超			
	中型	15MWクラス	34.5%	36%超	38%超			
	小型	6MWクラス	30.6%	32%超	34%超			
		2MWクラス	26.5%	27%超	28%超			

注) 各機種とも容量規模の区分(大,中,小)に応じて代表機種を提示。イニシャルコストおよびメンテナンスコストは、システム全体の導入・維持コスト。
また、ここでのイニシャルコスト削減は補助金を含む。(出所：AC研)



【機関冷却水の有効利用
・ガスエンジンの冷却水出口温度を110～115℃まで高め、フラッシュ蒸気発生器で大気圧レベルの蒸気を生成。
・低圧蒸気を圧縮機で加圧し、排ガスボイラからの蒸気に加える（排熱を蒸気で取り出す）。】

(出所：AC研)

図7 全蒸気取り出しガスエンジンシステムの概念図

6. コージェネの導入量推計

(1) 導入ポテンシャルおよび導入量の推計

業種別の電力・熱需要の既存統計を基に、エネルギー・環境会議の議論を参照して、将来におけるマクロフレームの変化および省エネ取組み推進による熱需要減を折り込み、2030年時点のコージェネ導入ポテンシャルを推計した。

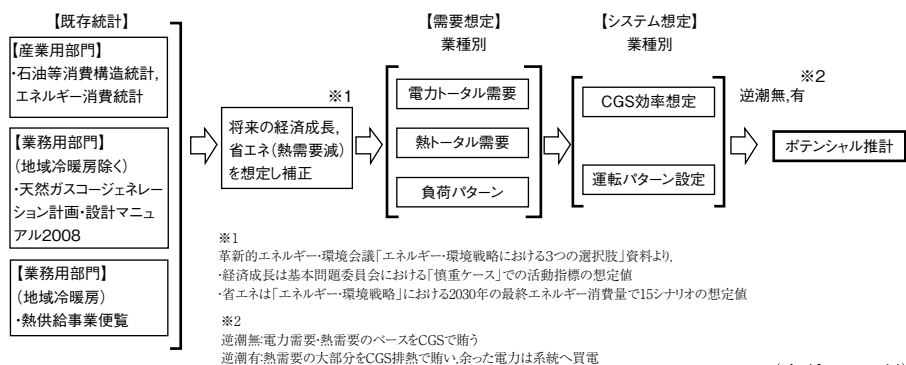
現状の主流である逆潮が行われないケースと、将来的な売電市場の活性化を想定して逆潮が行われるケースについて、図8の流れでポテンシャルの推計を行った。

その結果、図9の通り、導入ポテンシャルは、逆潮無のケースで約2,800万kW、逆潮が行われるケースでは約8,100万kWと推計された。また、約8,100万kWのうち約5,400万kWが産業用分野、約2,700万kWが業務用分野となった。併せて、熱需要データにおける使用燃料種

ごとに区分した導入ポテンシャルを示した。

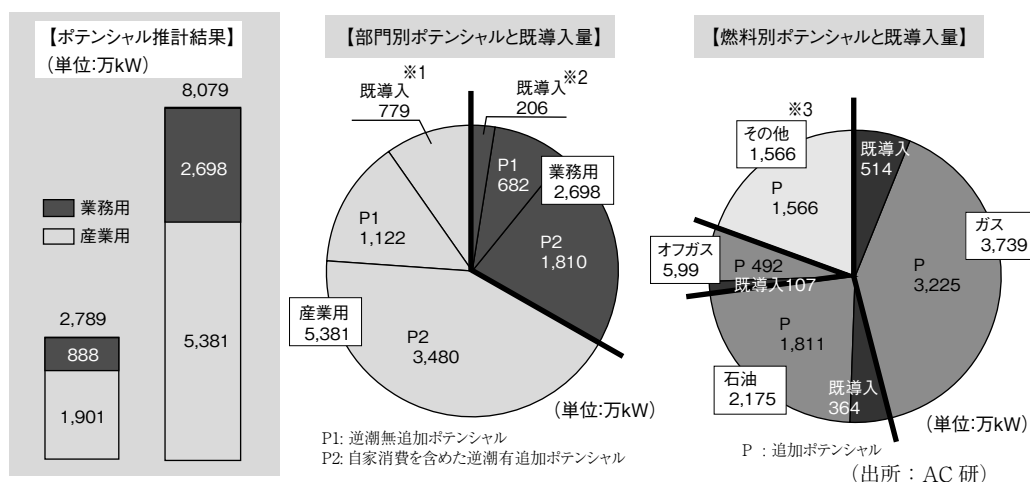
こうして求めた2030年時点のコージェネの導入ポテンシャルのうち、経済性が成り立ち、導入量として顕在化するコージェネの導入規模を推計する。具体的には産業用・業務用分野ごとに投資回収年数と顕在化率の関係を米国エネルギー省データ等により求め、これをもとに推計した。また、後述する産業用分野での導入モデル（電源コージェネモデル）、業務用分野での導入モデル（都市開発モデル）など、今後の市場への導入モデルを織り込んで推計を行った。

その結果、図10に示す通り、コージェネ導入量は、2030年に約3,140万kW、発電電力量で約1,540億kWh（総発電電力量約1兆kWhの15%超）に達し得るとの結果を得た。これに伴い、省エネルギーやCO2削減、燃料輸入費用低減といった多大な効果が期待できる。



(出所：AC研)

図8 コージェネ導入ポテンシャルの検討フロー



(出所：AC研)

図9 コージェネ導入ポテンシャルの推計結果（家庭用除く）

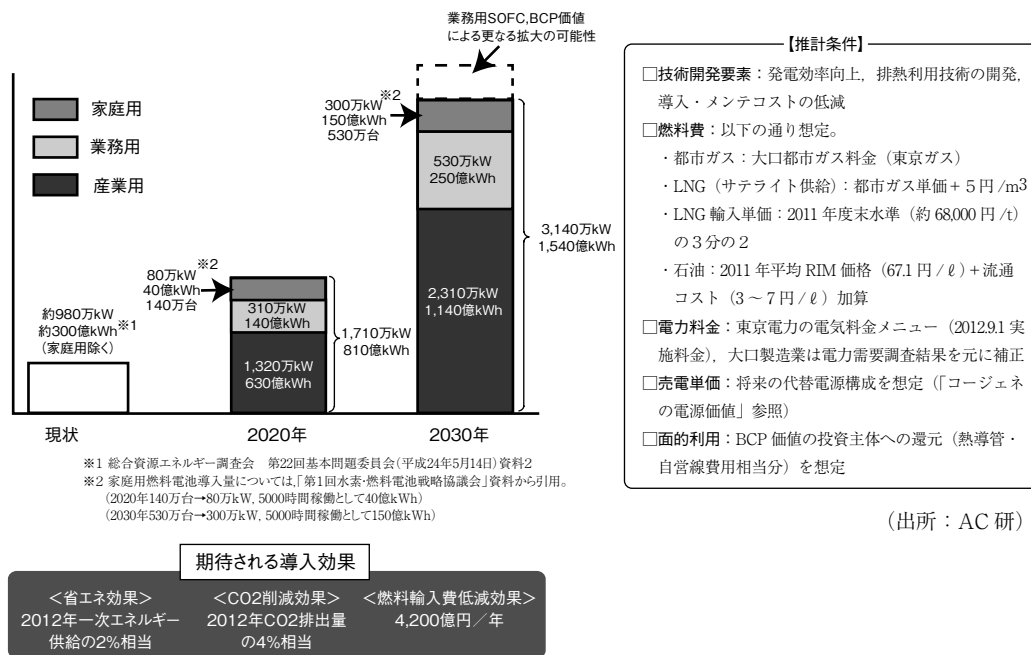


図 10 2030 年のコージェネ導入量推計

また、分野別の導入推計量は、産業用分野では 2,310 万 kW（1,140 億 kWh）、業務用分野は 530 万 kW（250 億 kWh）、加えて、家庭用燃料電池分 530 万台（300 万 kWh、150 億 kWh 相当）、となっている。さらに、小型ガスエンジンの適用が難しい分野へ追加導入が見込まれる業務用 SOFC と BCP 価値の適正評価によってさらなる拡大の可能性が考えられる。なお、産業用・業務用分野のそれぞれ市場における、今後の有望な導入モデルとして、以下の取組みによる拡大が期待できるものと考えた。

【産業用】「電源コージェネモデル」の拡大：

前述の電源価値評価の考え方を踏まえると、産業用分野では熱需要に応じた大規模コージェネ導入による逆潮流モデル（余剰電力販売）の拡大による導入量増加が見込まれ、排熱利用技術（全蒸気取り出しガスエンジンシステム）の普及と合わせて、約 360 億 kWh（約 800 万 kW）の増量要素を見込む。

【業務用】「都市開発モデル」の拡大：

都市部にてエネルギー（熱・電力）の面的利用を行いつつ、コージェネを導入することで地

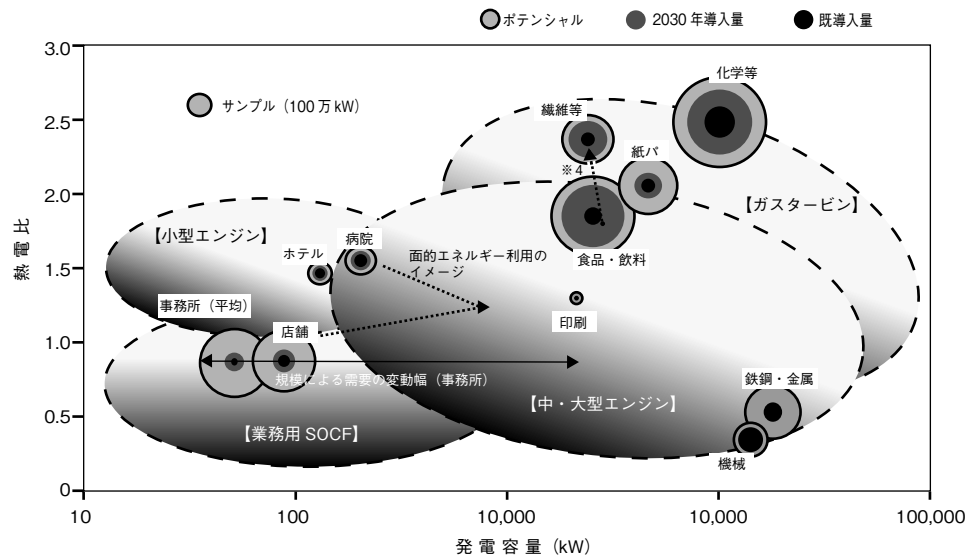
域の省エネ・省 CO₂ や BCP 機能向上などの便益が期待され、こうしたモデルの推進が予想される。またその場合には、地域内での熱負荷の集約・平準化効果により導入可能なコージェネ容量増加が期待でき、地域冷暖房を含め約 60 億 kWh（約 140 万 kW）の導入量を見込む。

（2）コージェネ導入市場の検討

産業用および業務用の主要な業種別市場ごとにポテンシャル・2030 年の導入量推計値・既導入量をまとめ、各市場の平均的なエネルギー需要の特性として図 11 に示した。図の縦軸は熱電比（熱需要／電力需要）、横軸は電力需要（導入されるコージェネは平均的な発電容量に換算）を示す。上方ほど熱需要が大きく、右方ほど電力需要が大きい市場となる。

業務用分野ではホテルや病院、産業用分野では化学、紙・パルプ、食品・飲料、繊維など、いずれも比較的熱電比の高い業種に導入が進んでおり、今後の導入余地も大きい。

一方、業務用分野では、事務所ビルのポテンシャルは大きいですが、小規模物件が多数なため、平均的な電力需要や熱電比が小さい、こうした規模の小さい事務所ビルでは、ガスエンジン



※1 円の大きさはポテンシャル、2030年導入量、既導入量の大きさを示し、円の中心点は各業種（需要）の平均的な熱電比（熱/電）、平均的なコージェネ発電容量（kW）を示す。
 ※2 楕円のグラデーションは、単機の大動機（2030年目標の効率向上加味）が存在するカ所箇所の濃度が濃く、条件（複数台設置や部分負荷運転等）によって対応できる箇所は濃度が薄い領域を示す。
 ※3 電源コージェネモデルは、ポテンシャル、導入量に反映済。
 ※4 繊維等の円は、食品・飲料の円と重複するため円の中心を移動させている。

（出所：AC 研）

図 11 コージェネの市場別導入量の推計結果

などのコージェネの導入がし難い。しかし、例えば小規模事務所を病院やホテル等と組み合わせる面的エネルギー利用を行うことで、中・大型ガスエンジンコージェネを導入しやすい熱電比、発電容量へシフトする。

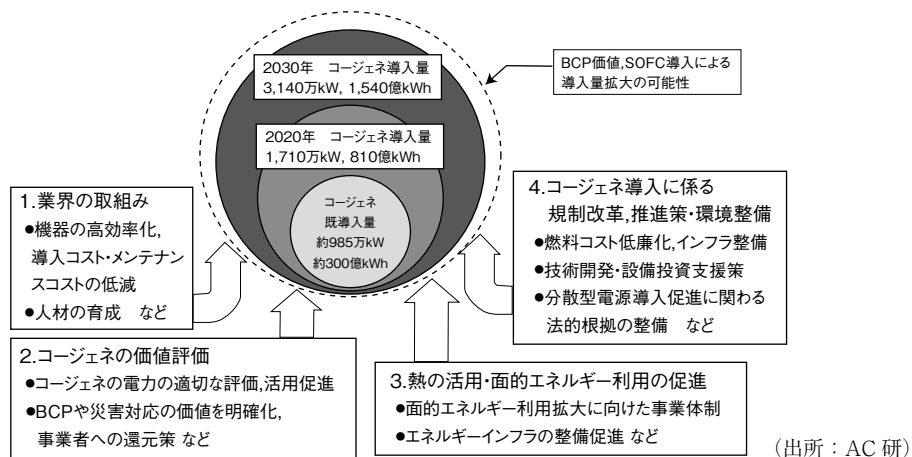
7. 今後の取組み

AC 研では、図 12 に示すように、エネルギー政策の動向等を踏まえ、コージェネの新たな意義・提供価値として、「電源価値」や「BCP 価値」に注目しつつ、今後の技術開発や市場

導入モデル等についても議論し、さらに 2030 年に向けた導入量推計を行い、いわば普及ロードマップとして検討した。

一方で、ロードマップ実現に向け、より具体的な方策について検討を深めていく必要がある。そのための課題や提言項目について以下の通りまとめた。引き続き業界として取り組みを続けるとともに、より制度改革や導入支援・推進策なども含め、官民連携による取り組みが必要である。

今後、AC 研で得られた検討結果について関係各方面で共通認識を持ち、実現に向けた



（出所：AC 研）

図 12 コージェネ普及ロードマップと今後の取組み

課題解決に取り組んでいきたい。

①業界の取組み

- ・ 2030 年に向けて適切な水準となる効率の機器開発や、経済性向上に資するシステムの導入コスト・メンテナンスコストの低減への取組み
- ・ コージェネに関する設計・施工，運用，メンテナンス等をはじめとした知識・技術力を有する人材の育成 など

②コージェネの価値評価

- ・ コージェネによる電力を最大限に活用するため，電力システム改革等における適切な制度設計などコージェネの電源価値評価
- ・ BCP や災害対応の価値の経済性への転嫁等を可能とする評価制度，ラベリングなどの制度創設，価値の事業者への還元に向けた取組み など

③熱の活用・面的エネルギー利用の推進

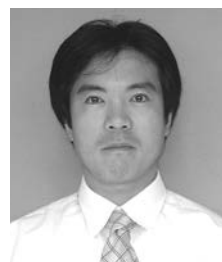
- ・ 面的エネルギー利用拡大に向けた具体策検討，自治体を中心とした官民連携の事業体制
- ・ 熱，電気のエネルギーインフラの整備促進 など

④コージェネ導入に係る規制改革，推進策・環境整備

- ・ 燃料価格（燃料コスト）低廉化，インフラ整備に向けた官民の連携
- ・ コージェネ導入円滑化に資する規制緩和や技術開発・設備投資支援策
- ・ 分散型電源導入促進に関わる法的根拠の整備 など

中長期リスク要因を考慮した エネルギーシステムのあり方

都筑 和泰 (プロジェクト試験研究部 原子力グループ)
主管研究員



1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災以降、日本のエネルギー構成のあり方についての議論が盛んに行われている。当時の民主党政権下においては、脱原子力が基本的な方向であり、2012年9月14日には「エネルギー環境会議」が「革新的エネルギー・環境戦略」を発表し⁽¹⁾、原子力に依存しない社会を目指すことを前提としたエネルギー戦略が描かれた。その後、政権交代を経て、先日閣議決定された「エネルギー基本計画」⁽²⁾においては、原子力を重要なベース電源として位置づけるとともに、核燃料サイクル政策の継続を明言した。その一方原子力を可能な限り低減することも記載されており、具体的なエネルギー構成のあり方についての検討は始まったばかりである。

このような状況の中、当所においては、2011年から震災を踏まえたエネルギー需給構造のあり方についての検討を行い、シンポジウムやパブリックコメントなどを通して情報発信をしてきた^{(3)~(8)}。これらの中で強調してきた点は、現時点で将来のエネルギー構成を決め打ちするのではなく、多様なエネルギーリスクを想定し、それらが顕在化しても対応できるよう、多様な技術オプションを保持することが重要であるということである。

本項では、まずエネルギーに関わる主要なリスク要因とその対応策を整理の上、気候変動問題について分析したのち、それを踏まえた日本の中長期エネルギー需給構造のあり方

を提言する。なお、本稿における検討結果は当所において実施してきた各種検討の結果をベースとしているが、それらに対する分析や意見は著者個人のものである。

2. エネルギーリスクとその対応

エネルギーは、モノの生産、輸送、売買、生活の向上（冷暖房、調理、風呂、家電等）、人やモノの輸送、サービスの提供⁽⁹⁾など、生活のあらゆる部分で使われている。日本の場合、2011年時点のエネルギー消費は、産業に43%、運輸に23%、民生の家庭と業務あわせて34%という構成となっている⁽¹⁰⁾。これらのエネルギーが人間の生活にとって本当に必須なものであるかどうかは意見が分かれるところではあろうが、少なくともエネルギー供給が大幅に減少すると、国全体の経済活動や生活レベルに大きな影響が生じることは明らかである。

ここで、エネルギー供給に関わるリスク要因として、表1のような整理がある⁽³⁾。東日本大震災により自然災害の影響や原子力事故の影響が顕在化したが、それ以外にも資源供給国における紛争や、価格の高騰、社会的な要因等様々なリスクがある。これらのリスクが顕在化しないよう、外交努力、自主資源の開発、経済競争力維持などの努力を継続することが重要である。また、それらの努力と並行して、リスクが顕在化しても大ダメージとならないよう、需給構造の多様化や冗長化

表1 エネルギーに係わるリスクの評価⁽³⁾

(◎実績あり、○蓋然性あり、△可能性あり)

1.物理的		2.経済的			3.社会的			
① 供給国のマーケットパワーの行使、紛争・革命等による供給途絶/削減 ② 自然災害、③施設の事故、テロ ④ 資源枯渇（資源制約の顕在化）		① エネルギー開発投資の減退 ② 中印等新興国の需要増大 ③ 市場の機能不全（投機筋の介入等）			① 地球環境問題の高まり（環境制約の顕在化） ② 環境原理主義 ③ 反核・反原子力運動			
上記表参照	1.①	1.②	1.③	1.④	2	3.①②	3.③	
リスク	供給途絶/ 削減	自然災害	施設事故、 テロ	資源 枯渇	価格 高 騰	地球環境問題/環 境原理主義	反原子 力	その他
石油	◎石油危機		◎BP	△	◎			
天然ガス	◎ウクライナ			△	◎			
石炭	○港湾スト	◎豪州洪水		△	◎	△		
原子力		◎津波/ 地震	◎TMI、 チェルノ、福島		○安全対 策	◎独等欧州	同左	
再生可能エネ					高コスト			
電力		◎津波/地震、 台風	○		○燃料高 騰			融通容量 に制約
都市ガス		◎地震	○		○燃料高 騰			全国パイプ ラインなし
石油製品		◎津波/地 震	○		○燃料高 騰			ローリー輸送

を進めておくことも重要である。

このような状況を踏まえつつ、将来の需給構造シナリオを具体的に複数想定し、それらの比較検討を進めることで、国内の需給構造のあり方についての分析を進めてきた^{(3)~(8)}。その結果、

- ①災害対応や原子力事故のリスクへの対応の重要性に加え、日本が資源の乏しい島国である以上、化石燃料の供給途絶や輸入燃料の価格高騰も震災前と同様にエネルギーシステム上の主要なリスクであり続けているということ
- ②再生可能エネルギーや省エネルギーに関しては、技術開発への高い期待を込めつつも、技術の開発・利用・展開が計画通りに進まない可能性、そしてその場合の備えについては常に留意しておく必要があること
- ③原子力については、「再生可能エネルギーの

技術開発が期待通りに進まない中で厳しい環境制約を履行する」場合など、原子力利用が必要となるシナリオもありえるということ

を示してきた。この内容を踏まえつつ、中長期エネルギー需給構造の判断の分岐点を図1に整理して示す。再生可能エネルギーの導入と省エネルギーの促進は多くのエネルギーリスクに対して有効であり、技術的・経済的に成立可能であれば、それらを中心とした社会を目指すべきである。ただし、再生可能エネルギーの中でもポテンシャルが大きい太陽光発電や風力発電については出力が安定しないため、一次エネルギーの主要な部分を供給するには、経済面だけではなく技術的にも課題がある。すなわち、太陽電池であれば、蓄電設備を大規模に導入し、晴れた日に充電し夜間や雨の日に放電するようなシステムとなる

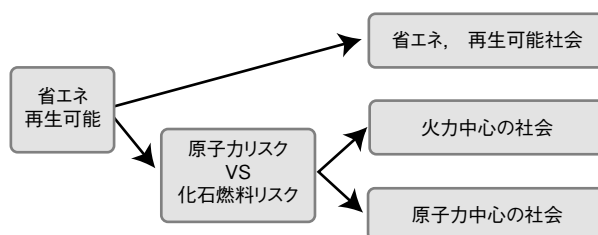


図1 エネルギーシステムの選択フローの概念図

が、このようなシステムが技術的・経済的に成立し得るかは十分に検討されていない。

再生可能エネルギーが基幹エネルギーにならなかった場合、当面は原子力か化石燃料のいずれかが中心となる。その場合、原子力に関わるリスク（事故リスク、使用済燃料問題）と化石燃料に関わるリスク（燃料価格高騰、二酸化炭素（CO₂）排出制限）を比較し、リスクが小さい方をより多く導入していくことになると考えられる。これらの選択については、原子力、火力とも2030年頃までに寿命を迎えるプラントが増えてくることから、早めに判断することが要求される。

ここで、気候変動の問題を考慮すると、より早く対策を講じることが必要となることに留意したい。当所シンポジウムに向けた検討⁽³⁾～⁽⁸⁾においては、気候変動対応を束縛条件とはせずに検討を実施したが、その結果、図2に示す通り、多くのシナリオは2050年のCO₂排出量が2000年比で3割前後減となった。図には示していないが、半減できるのは省エネルギーを最大限導入したうえで、原子力と再生可能エネルギーを最大限導入したケースのみであった。日本政府の公式見解は現時点でも2050年8割減であるから、その対応はさらに厳しくなる。

このように、気候変動問題の対応を本気で

行うかどうかは、将来のエネルギー需給構造のあり方、ひいては、短期的なエネルギー投資のあり方を検討する上で、大きなインパクトを持つといえる。CO₂排出抑制は一国で行っても意味がないことであり、3章では世界全体として気候変動問題にどう対処すべきかについて概説し、その上で日本の対応のあり方について4章で述べることにする。

3. 気候変動対策のイメージ

気候変動対策を行うための各国の削減目標については、気候変動枠組み条約の締約国会議などにおいて議論されているが、まだ結論は出ていない。ここでは、「地球環境統合評価モデル」（GRAPE）⁽¹¹⁾を用いた分析を中心に、気候変動対策に本気で取り組んだ場合のイメージを示すことにする。

（1）GRAPE ベースシナリオとその分析結果

気候変動対策のイメージを定量的に描くためには、世界のエネルギー需要の想定を行う必要がある。ここでは、①途上国が着実に経済成長をし、最終消費構造が先進国に近づいていく、②途上国を中心に2050年まで人口が着実に増加し（約90億人）、その後はほぼ横ばい、③エネルギー効率の着実な増加は想定

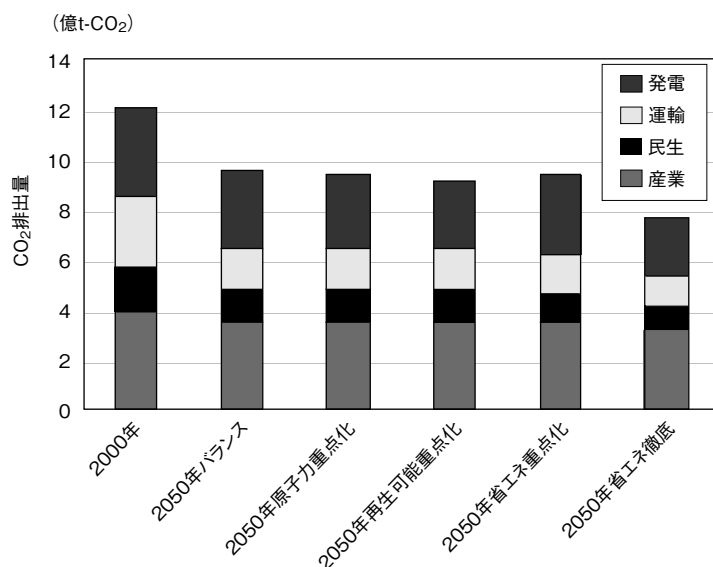


図2 シナリオごとのCO₂排出量比較⁽³⁾

するものの、社会構造の変革といったような大幅なエネルギー需給構造の変革は想定しない、と設定した。そして、先進国の最終需要は微増にとどまるが、途上国の最終需要は急増し 2100 年までに現在の 4 倍になる需要曲線を想定した。

CO₂ 排出曲線については、松野らが提唱している「Z650 シナリオ」をベースとした^{(12) (13)}。「Z650 シナリオ」は、国連気候変動条約で議論されている「産業革命後の温度上昇が 2℃ 以内」という目標を等価的に維持しつつ、来世紀半ばにゼロエミッションを実現することを前提に短中期の排出をやや多めに許容するというコンセプトで作られたシナリオである。このため、2050 年の目標は、一般的に言われている半減ではなく、2005 年比で 25% 減と、2℃ 目標維持のシナリオとしては、やや緩い設定となっている。そのイメージを「E450 シナリオ」（現在より急激に排出抑制、超長期には低位安定）との比較で示したのが図 3 である。

このような設定のもと、エネルギーモデル GRAPE⁽¹¹⁾ を用いて、エネルギー供給構造の計算を行った。その主要な結果は、キヤノングローバル戦略研究所のシンポジウム等で報告しているが⁽¹⁴⁾、短中期的には、電力部門での対策、すわなち、原子力、風力の増加が主要な対策となっている。それぞれの導入速度は、2050 年にむけて毎年、原子力 36GW/年（百万 kW の原子炉 36 基相当）、風力 90GW/年を継続して導入し続ける必要が

ある。また、2050 年にはほぼすべての火力発電所での CO₂ 回収貯留（CCS）が要求され、その実現のため、2030 年以降のほぼすべての新設プラントに CCS を装備することになっている。これらは、過去の実績や現時点での研究水準から考えて必ずしも不可能というわけではないが、かなり野心的な目標値である。

2050 年は単なる通過点であり、それ以降も継続して CO₂ 排出量を削減していく必要があることにも留意する必要がある。原子力では、ウラン資源量を究極埋蔵量とされる 1,500 万トン⁽¹⁵⁾ としているが、それでも今世紀半ばには資源問題が顕在化するため、2050 年以降、原子力発電所の廃炉リプレースや増設はすべて高速増殖炉によって行うこととしている。運輸については、2030 年以降バイオ燃料への置換が緩やかに進むとともに、2050 年以降電気自動車急速に普及し、2080 年頃にはおおむねすべての乗用車が電気自動車となる。トラックや航空機は、バイオ燃料または水素で駆動する。素材産業の大規模かつ高温の熱源については化石燃料の代替は容易ではないが、最終的には一部水素の利用で対応することとしている。

上記の解は計算条件や技術想定によって大きく変わり得るものであり、必ずしも唯一最適の解ではない。重要な点は、

- 既存の技術または実用化間近にある技術の組合せで実現可能であること
- ただし、実現のためには、相当の覚悟と努力が必要であること

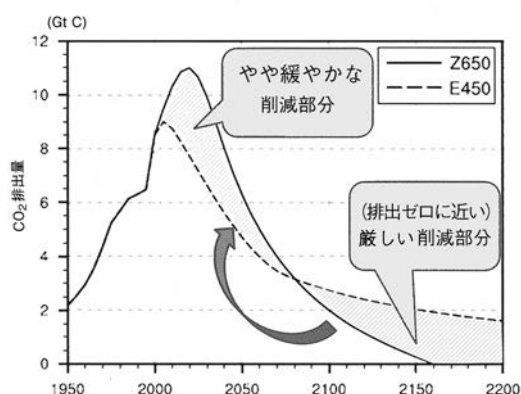


図 3 Z650 排出曲線のコンセプト^{(12) (13)}

の2点である。以下、GRAPEの主要な感度解析結果について紹介する。

(2) 早期対策か先送りか

「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)の『第5次報告書』(2013年9月)の新しい知見として、温度上昇は累積排出量に強い相関を持つことが示された⁽¹⁶⁾。このことを踏まえ、2150年までの累積排出量を一定にして、早期かつ急速な対策を実施する場合と、短期的な放出を許容し、後から対策をする場合の比較を行った。計算上の技法としては、累積排出量一定の条件で割引率を大きく変化させることとした。割引率とは将来価値を現在価値に換算するときを使う率であり、通常2～5%程度の値が用いられる。割引率が大きくなると、CO₂削減対策が先送りにされる傾向が強まる。なお、100年後の価値は、割引率10%の場合は $0.9^{100} \sim 7 \times 10^{-5}$ と非常に小さ

い価値になるのに対し、割引率0.2%の場合は $0.998^{100} \sim 0.8$ と現在とあまり変わらない数字になる。

図4に示す通り、CO₂排出経路は2030～2050年あたりにおいて、CO₂排出量の割引率の違いによって大きく異なる。その内容を調べるため、図5に2030年の部門別CO₂排出量を示す。3つの部門のうち、電力部門の変化が最も大きくなっている。すなわち、主に途上国において急増する電力需要に対して、火力発電の代わりに、比較的安価である原子力と風力をどの程度導入するかというところが当面の大きな選択肢になるということが分かる。なお、標準的なケースである割引率5%の場合、電力増加分の約半分は火力発電である。すなわち、原子力や再生可能エネルギーの導入だけではなく、高効率火力の導入もまた重要であるということも分かる。

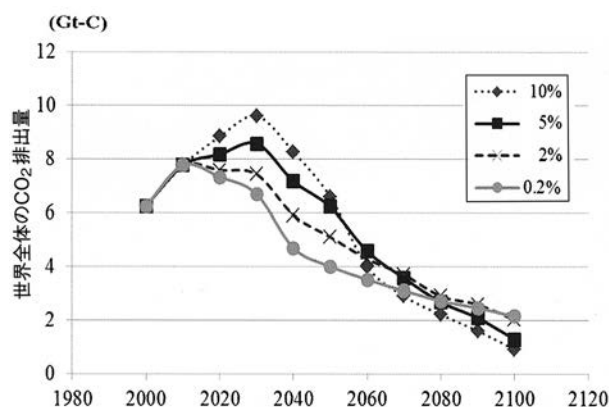


図4 累積排出量一定の条件における排出経路の割引率依存性⁽¹⁷⁾

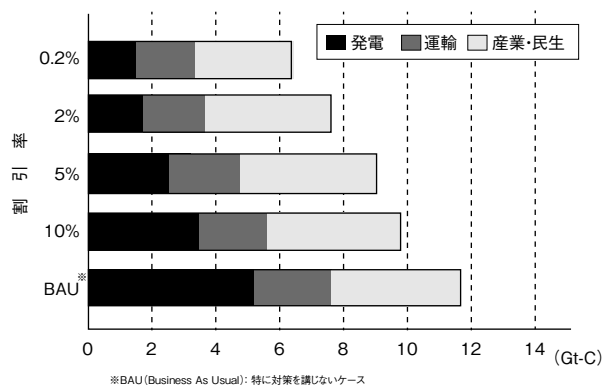


図5 2030年における部門ごとのCO₂排出量⁽¹⁷⁾

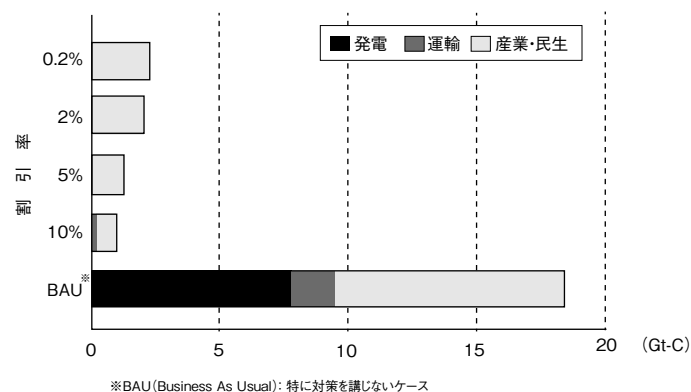


図6 2030年における部門ごとのCO₂排出量⁽¹⁷⁾

図6は、2100年における部門別CO₂排出量である。2100年には、電力、運輸とも正味の排出量はゼロになっており、産業・民生の熱源も成り行きシナリオと比べると大幅減になっている。また、エネルギーコストについては、対策を先送りした割引率10%のケースは早期に対策をした0.2%のケースの約1.2倍となる。これは、産業熱源の化石燃料の代替として再生可能エネルギー起源の水素を用いることなどによる。ただし、2100年時点における技術選択やコスト差を正確に予測することは困難である。むしろ、図6の解釈としては、短中期的にかなり積極的なCO₂削減努力を行った場合でさえも、2100年には相当に厳しいCO₂削減が必要になるということの方が重要である。言い換えると、厳しい温度上昇制約を実現するのであれば、短中期に相当に厳しい対応を行った場合でさえも、今世紀末

までにはエネルギー需給構造の変革といえるような大幅な排出削減が不可避であると結論づけられる。

(3) 技術開発の成否とエネルギーコスト

これまでの解析は、主要なエネルギー技術開発が順調に進み、それらが、世界で着実に普及していくことを想定している。一部の主要技術の開発や普及が停滞すれば、その代替としてより割高な技術を利用することになるため、エネルギーコストは増加する。その影響を調べるため、主要技術である原子力、再生可能、CCSうちのいくつかのうまいかない場合のコスト増を図7にまとめて示す。ここで、図中の○×の内容については表2の通りである。また、ここでの計算は、累積排出量一定の条件ではなく、Z650を上限とする制約で行っている。累積排出量一定で計算をすると、2050年の排出

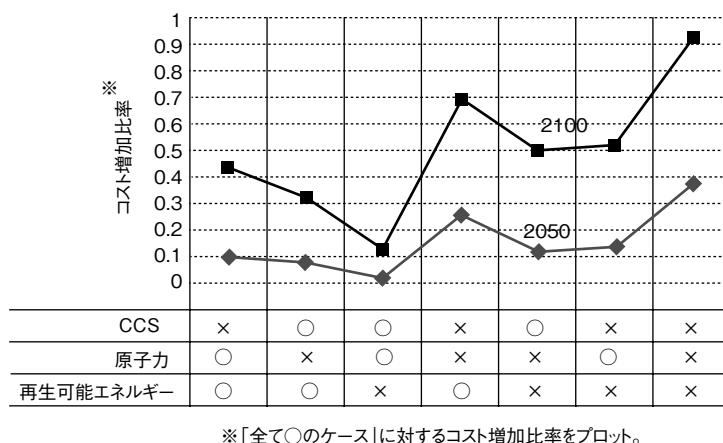


図7 主要技術の開発・普及の成否とエネルギーコストの増加分⁽¹⁷⁾

表2 図7における技術開発成否の内容

	CCS	原子力	再生可能エネルギー
○	2030年より導入可能 貯留ポテンシャルは 1500Gt-CO ₂	ウラン資源制約 1500 万トン シェア上限 40% 2050 年から高速増殖炉の導入開始	太陽光、風力ともシェア上限 30%、 ポテンシャルは実質無限
×	CCS なし	2010 年 1 以降新設なし	シェア上限 15%

量は技術構成によって増減するため、技術構成の変化と CO₂ 削減目標の変化が重畳された解となるため、技術構成の変化のみの影響を評価することは困難となる。

2050 年で、技術が 1 つ欠けた場合であれば、エネルギーコストの増加は 10% 程度にとどまる。10% の増加は、額としては 1 兆ドル / 年程度であり無視できるものではないが、世界の GDP の 1 % 弱であり代替できる範囲であるともいえる。必要な技術が、2 つ、3 つと停滞すると、エネルギーコストは着実に増加していく。このコスト増は、比較的安価な発電部門での対策が十分に行うことができなくなることにより、より割高な対策である電気自動車・燃料電池車の導入や水素の燃料使用などの技術に依存していくことによる。

技術の開発・普及の停滞の影響は 2100 年になるとより深刻になる。2100 年には電力、運輸はゼロエミッション達成・維持を想定しているが、原子力、CCS、再生可能の一部またはすべてが停滞する中で必要な電力を CO₂ を排出することなく供給していくのは容易ではない。GRAPE では、再生可能エネルギーを一旦水素に変換し、それを発電や輸送燃料、定置熱源に利用していくという解が選択されている。水素を中心としたエネルギー社会は必ずしも否定するものではないが、電力を一度水素に変換し、再度電力に変換する場合のエネルギー損失が大きいため、割高なエネルギー構成になってしまうことは避けがたい。

(4) 気候変動対策ビジョン

これまでの検討をまとめると下記のようなになる。

- 途上国の需要の増加が見込まれるなか、CO₂ 排出を大幅に削減するためには、原子力や再生可能エネルギー、CCS、省エネルギーをそれぞれ最大限導入することが必要であり、その実現は容易ではない。
- 対策コストは主要技術の成否に依存する。逆に、経済的に許容できる対策のレベルは技術開発動向に依存する。
- 短中期により積極的に対策を行っても、結局今世紀末には大幅な排出削減が必要である。よって、CO₂ 排出大幅減に資する技術開発について着実に準備を進めておく必要がある。

このような条件を踏まえ、気候変動対策のあるべき姿を考えていく。気候変動問題を最優先課題として合意できるのであれば対策は明快である。すなわち、気候変動問題に今から全力で取り組むればよい。また、「最優先とまではいえない」という場合であっても、気候変動問題が 1 つの重要なリスクであり、しかも不可逆的な側面が大きいことから、合理的に達成可能な範囲で対策を実施すべきというところまでは異論は少ないのではないかと。問題は、どこまでを「合理的」と思えるかというところにある。

長期の技術開発については、遅くとも今世紀末には必要となる可能性が高いことから、早急ではなくても着実に開発を推進することが「合理的」と考えられる。主要な技術は、下記が考えられる。

- 蓄電技術を活用し、再生可能エネルギーを基幹電源化、
- 海水ウラン、ウラン増殖
- 核融合

● 素材産業の熱源

● 船やジェット機の燃料

短中期については、より現実的な負担を伴うこともあり、「合理的な範囲」は人々の気候変動問題に対する意識と、対策技術のコストによって大幅に変化する。対策を進めるには人々への啓蒙を進めるとともに、主要な技術について低コスト化を進めることが重要である。コスト以外にも様々な課題がある。たとえば、原子力を途上国に展開するにあたっては、安全性の確保（安全の向上と、製造、運転、保守の品質確保）、投資の確保、核不拡散、セキュリティ対策などが課題となる。再生可能エネルギーについては、当面はコスト、導入規模が大きくなってくれば出力不安定性の問題が課題となる。高効率の機器や高効率の火力発電所を途上国に展開するに当たっては、技術流出についても考慮する必要がある。さらに、全体をとおして、初期投資の確保も大きな問題となり得る。

これらの問題を克服するためには、途上国としかるべき国際協力の枠組みを構築していくことが重要である。日本は、すでに2国間協力として、様々な国と連携を進めており⁽¹⁸⁾、これらの動きを加速していく必要がある。

以上のような対応のみで、厳しいCO₂排出削減目標をクリアできるかどうかは不透明であり、必要があれば、排出規制、炭素税、排出権取引なども活用しつつさらなる排出削減に取り組むことになる。ただし、個人的には、温暖化影響やその被害が定量化できていない中、経済合理性を大きく超えるような対策を行うことは避けるべきではないかと考えている。

将来気候変動被害が顕在化し、緩和策が間に合わないような状況に陥った場合の対策として、人為的に気候に介入する気候工学というオプションもある^{(19) (20)}。たとえば成層圏に硫酸エアロゾルを散布することで日射を減少させたり、大気から直接CO₂を回収したりする技術などがある。これについては、経済面、技術面、倫理面ともまだ検討の途上で

あるが、このようなオプションについても排除することなく研究開発を推進し、いざという時に備えておくことが重要と考えている。

4. 日本のエネルギー政策のあり方

日本のエネルギー政策においても、気候変動問題に対する基本的な考え方は同様であるが、それらに加えて、国内のエネルギーリスク低減という観点と、国際競争力向上という観点を加味して政策を考えるべきである。

まず、国内のエネルギーリスクの低減という観点から考える。表3は、3.11後にまとめたエネルギーリスクとその評価指標に、気候変動対策との関係を追加して示したものである。表から分かる通り、主要なエネルギーリスクに対する対策と、気候変動対策はかなりの部分で重複している。

表中で、原子力の扱いについては注意を要する。原子力は、化石燃料供給途絶や環境制約顕在化に対して有効な対策になり得るが、原子力比率が高くなると、単純に事故の発生確率が上がるというだけではなく、何らかの理由で全停止に至った場合の影響度も大きくなる。図1で示した考え方を踏まえつつ、遅くとも既存の発電所のリプレースが本格化する前に化石燃料使用のリスク（気候変動を含む）と原子力のリスクのどちらがより大きいかを判断する必要がある。

次に国際競争力向上の観点である。3章で述べた通り、短中期の気候変動対策においては、途上国の経済成長をいかにエネルギー消費やCO₂排出量を抑制しつつ実現するかということが最も重要である。そして、その対策は再生可能エネルギー、原子力、省エネ機器や高効率火力発電といった環境技術の普及促進が中心となる。ここに日本の環境技術をうまく活用していくことができれば、産業の国際競争力向上、ひいては化石燃料の調達に関わるリスク低減という効果まで期待できる。

表 3 エネルギーリスクと気候変動対策との関係

抽出リスク	評価指標(重複する項目は省く)	気候変動対策との関係	
化石燃料供給途絶	一次エネルギー自給率	○(資源小国なので、自給率アップ～原子力や再生可能エネルギーの増加)	○ 関連性あり
	一次エネルギー源多様性	○(多様性増～原子力や再生可能エネルギーの増加)	△ やや関連性あり
	燃料備蓄日数	×	×
	省エネルギー化率(エネルギー消費原単位)	○(エネルギー消費量の低下)	
環境制約顕在化	CO ₂ 排出原単位	○	
	CO ₂ 回収・貯留(CCS)のポテンシャル	○	
	ゼロエミッション発電比率(再生可能エネルギー→原子力)	○	
	CO ₂ 排出抑制(中期目標,長期目標等)	○	
原子力の社会受容性	原子力発電の安全性	×	
	原子力発電のシェア減	×	
価格高騰	発電コスト	×	
	化石燃料使用量	○	
	再生可能エネルギーのコストダウン	○	
	安全対策,事故対策コスト	×	
大災害	分散型電源の確保	△(太陽光や風力は分散型)	
	発電余力の維持	×	
	輸送ルート,インフラ	×	

5. まとめ

資源に恵まれない島国であり、かつ産業立国でもある日本は様々なエネルギーリスクに囲まれている。これらのリスクのうち、気候変動問題は、必ずしも最大のリスクではないかもしれないが、その対策に本気で取り組むかどうかによってエネルギー政策が大きな影響を受けるという点が特徴的である。すなわち、今すぐ最大限に対策を導入しても産業革命以降の温度上昇を2℃以下にすることは容易ではなく、その意味で、本気で取り組むのであれば今すぐ最大限に対策すべきということは明白である。しかしながら、国内では、とくに東日本大震災以降、気候変動問題に対する優先順位は下げられがちである。

気候変動は最大のエネルギーリスクではないかもしれないが、将来の重要なリスク要因の1つではある。また、気候変動対策の大部分は日本の他のエネルギーリスクである化石燃料供給途絶や価格高騰対策と重なる。当面は、気候変動問題を軽視し過ぎたり重大視し

過ぎたりすることなく、適切な規模で対策を実施すべきであると考えている。具体的には、主要な対策技術である、再生可能エネルギーと省エネルギー（高効率発電所や高燃費車を含む）に関する開発・普及を進め、国際展開を図ることが重要である。CCSや原子力については、気候変動対策の観点で有効なツールであり、かつ日本が国際競争力を持ち得る領域でもあるので、その利用のあり方について継続して議論を進めるとともに、必要な研究開発を継続すべきであると考えている。

【謝辞】

本稿の分析結果の一部は、2011年の当所シンポジウムに向けた自主研究として当所のポスト3.11検討チーム（著者、森山、石本、時松、萩原）で実施したものである。また、一部の結果はキヤノングローバル戦略研究所の委託および環境研究総合推進費（S-104（3））「適応・ジオエンジニアリングを考慮した統合評価モデルの拡張と応用」によって実施されたものである。関係者の協力に謝意を表する。

参考文献

- (1) 内閣府 エネルギー環境会議「革新的エネルギー・環境戦略」平成 24 年 9 月 (http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20120914/20120914_1.pdf)
- (2) エネルギー基本計画, 平成 26 年 4 月 (<http://www.meti.go.jp/press/2014/04/20140411001/20140411001-1.pdf>)
- (3) 都筑和泰, 森山亮, 石本祐樹, 時松宏治, 萩原直人「東日本大震災を踏まえた圏内エネルギー需給構造のあり方に関する検討 (中間報告)」季報エネルギー総合工学, Vol.34 - 2, (2012) p. 29
- (4) 都筑和泰, 森山亮, 「東日本大震災を踏まえたエネルギー需給構造のあり方」, 季報エネルギー総合工学, Vol.34 - 4, (2012) p. 17
- (5) 都筑和泰, 他, 「震災を踏まえた中長期エネルギー需給構造のあり方と原子力の役割」日本原子力学会誌, 54 (2012) p. 28
- (6) 都筑和泰, 他, 「東日本大震災を踏まえた国内エネルギー需給構造のあり方に関する検討」, 日本エネルギー学会学会誌 91, (2012) p. 104
- (7) 石本祐樹, 他, 「東日本大震災を踏まえた国内エネルギー需給構造のあり方」, 水素エネルギーシステム Vol.37, (2012) p. 40
- (8) 森山亮, 他「中長期観点からの国内エネルギー需給構造のあり方と太陽光発電の役割」, エネルギー・資源 Vol. 33 (2012) p. 6
- (9) 石本祐樹, 「如何なる未来に備えるか (その 3)」季報エネルギー総合工学, vol. 36 - 4, (2013) p. 33
- (10) 資源エネルギー庁「平成 24 年度エネルギーに関する年次報告」p. 100
- (11) Kurosawa et.al., Energy Journal, 157-175 (Kyoto Special Issue)
- (12) T. Matsuno, K. Maruyama, and J. Tsutsui, Proceeding of the Japan Academy, Ser. B, 88, (2012) , pp. 368-384.
- (13) T. Matsuno, K. Maruyama, and J. Tsutsui, Proceeding of the Japan Academy, Ser. B, 88, (2012) , pp. 385-395.
- (14) 都筑和泰, 他, 「中長期エネルギービジョンについて」, キヤノングローバル戦略研究所 地球温暖化シンポジウム「地球温暖化抑制に向けて世界で共有できるエネルギービジョンと日本の役割」(http://www.canon-igs.org/event/report/20131004_2034.html)
- (15) Uranium 2005: Resources, Production and Demand, A Joint report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency (2005)
- (16) IPCC 第 5 次評価報告書 第 1 作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳 (http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf)
- (17) K. Tsuzuki, 22nd World Energy Congress (Daegu 2013) #887, "Middle and long term energy supply and demand structure with considering risks on climate change, technology development, and economy"
- (18) 環境省資料「Joint Crediting Mechanism (JCM)」の最新動向」(2014) (http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/bilateral/attach/jcm-bocm_trend1401_1.pdf)
- (19) 杉山昌広, 西岡純, 藤原正智「気候工学 (ジオエンジニアリング)」, 天気 (日本気象学会) , 58, (2011) , p. 577
- (20) Ica-rus レポート (<http://www.nies.go.jp/ica-rus/>)

微細藻類バイオ燃料について

松井 徹 (プロジェクト試験研究部 環境グループ)
主管研究員



1. はじめに

地球温暖化問題や石油代替等を背景として、バイオマスのエネルギー利用が進められている。トウモロコシ、サトウキビ等可食系を原料とするバイオマス燃料は第一世代と定義され、市場は拡大傾向にあるが、食糧との競合等が課題となっている。第二世代と定義される食糧と競合しない非可食原料（セルロース系）の利用技術の開発が推進されているが、プロセス開発が思ったように進展せず、製造コストが割高なのが現状である。一方、近年第三世代のバイオマスとして微細藻類が注目されている。微細藻類には、単位土地面積当たりの収率が高い、脂質の蓄積能力が高い等の特徴がある。現時点では藻類の生産技術等に課題があり、実用には時間を要すると見られているが、その高いポテンシャルに着目し各国で研究開発が盛んに行われている。

本報においては、文献、ヒアリング等を通して収集した、微細藻類の取り組み、培養～油抽出までの技術開発動向、近年行われている大規模なデモンストレーションの状況等について報告する。

2. 微細藻類バイオ燃料概要

バイオマスの特徴の1つとして、燃料生産が可能であることが挙げられる。太陽光や風力等では発電が主となるが、有機性のバイオマスからは燃料を生産することができる。輸

送用では電気自動車の普及等も進められてきているが、しばらくは液体燃料が使用されると予想されることから、石油代替燃料となるバイオマスからの液体燃料生産は重要であると考えられる。特に、航空部門では代替がないことから、バイオマスからの液体燃料（ジェット燃料）製造が期待されている。

微細藻類が第三世代のバイオマスとして大きな注目を集めている理由の1つに、単位面積当たりの生産量が多いことが挙げられる。表1に大豆、カメリナ等と微細藻類から生産されるバイオオイル燃料の生産ポテンシャルの比較を示す⁽¹⁾。現在生産ポテンシャルが高いと言われているパーム油（アブラヤシ）と比較して、微細藻類は同等～10倍程度のポテンシャルがあると推定されている。

微細藻類の単位面積当たりの油生産ポテンシャルを上げている理由の1つとして、油含有量が多いことがある。表2に種々の微細藻類の油分含有量を示す⁽²⁾。油分を生産する微細藻類は、淡水または海水に存在し、油分含有量が乾重量ベースで50wt%を超える種も存在する。

表1 単位面積当たりの微細藻類のポテンシャル

作物	オイル収率 (ℓ/ヘクタール/年)
大豆	450
カメリナ	560
ヒマワリ	955
ジャトロファ	1,890
アブラヤシ	5,940
藻類	3,800 - 50,800※

※ 推定値

(出所：国際エネルギー機関 (IEA))

表2 微細藻類の油分含有量

微細藻類	油分含有量 (%dry wt)
<i>Botryococcus braunii</i> ボツリオコッカス ※	26 - 75
<i>Chlorella</i> sp. クロレラ ※	28 - 32
<i>Cylindrotheca</i> sp. シリンドロテカ ※	16 - 37
<i>Dunaliella primolecta</i> デュナリエラ ※	23
<i>Isochrysis</i> sp. イソクリシス	25 - 33
<i>Nannochloris</i> sp. ナノクロリス	20 - 35
<i>Nannochloropsis</i> sp. ナノクロロプシス	31 - 68
<i>Neochloris oleoabundans</i> ネオクロリス	35 - 54
<i>Nitzschia</i> sp. ニツシア	45 - 47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i> フェオダクチラム	20 - 30
<i>Schizochytrium</i> sp. シジキトリウム	50 - 77
<i>Tetraselmis sueica</i> テトラセルミス	15 - 23

※ 淡水産微細藻類。その他は海水産。

(出所：微細藻培養技術事業化可能性調査共同事業体)

微細藻類の油生産の流れを図1に示す⁽¹⁾。微細藻類の培養に必要なものは、太陽光、二酸化炭素 (CO₂)、水、窒素源、栄養塩等である。これらを使い生長するとともに、体内に油を蓄積する。微細藻類の種類によっては、栄養が十分にある状態では生長が促進され、貧栄養になると油分を蓄積し始めるものもある。

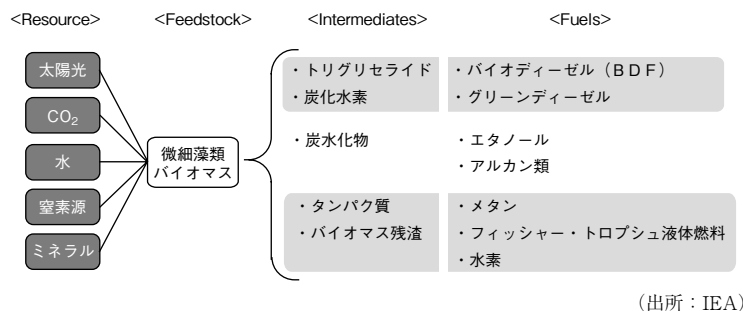


図1 微細藻類の油生産

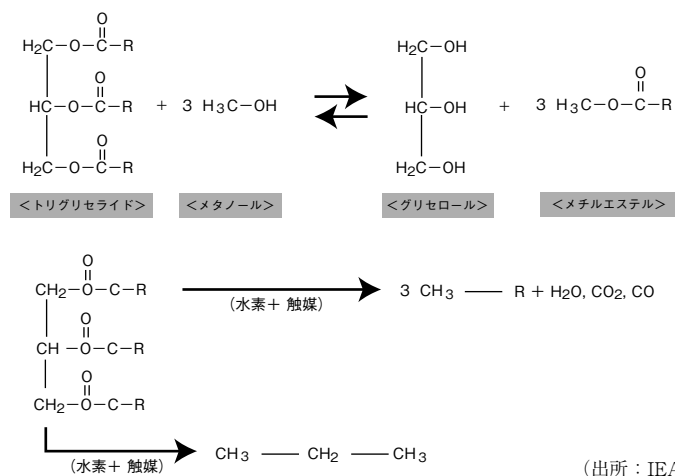


図2 バイオオイル燃料の改質

この特性を生かして、油分の蓄積度を高める研究も行われている。

微細藻類が生産する油分は、脂質系と炭化水素系になる。脂質系の油分はトリグリセライドである。現在ディーゼル代替として使用されているバイオディーゼル燃料 (BDF) の原料もトリグリセライドである。トリグリセライドはそのままでは液体燃料として使用することができないため、アルカリ系の触媒等を用いて、メタノールと反応 (メチルエステル化) させ、三級アルコールと長鎖脂肪酸エステルを合成し、その長鎖脂肪酸エステルを BDF として使用する (図2 参照)。ボツリオコッカスのように、炭化水素を生産する藻類も存在する。炭化水素の場合は、トリグリセライドから作られる BDF と違い、分子内に酸素を含まないため、安定した燃料として使用できる。なお、トリグリセライドも水素と反応させることで、脱酸素を行い、炭化水素に改質することができる (図2 参照)。

微細藻類には油分の他に、他の植物等と同じように、炭水化物（糖分）やたんぱく質等も生産する。糖分については、エタノール変換の可能性がある。タンパク質やその他有機分に関しては、エタノール発酵ができないため、メタン発酵により発生するメタン（バイオガス）での利用の可能性がある。微細藻類から油分を抽出した際には、残渣が発生する。この残渣の利用も必要な検討課題である。残渣をエネルギー変換するだけでなく、飼料等へ利用することも検討されている。

微細藻類では、バイオ燃料だけでなく、その他の有用物を生産することが期待されている。有用物としては、化粧品やサプリメント等の原料が検討されている。有用物の例としては、エイコサペンタエン酸（EPA）やドコサヘキサエン酸（DHA）等がある^{(2) (3) (4)}。燃料に比較して、有用物は高値で販売することが可能であり、微細藻類利用の経済性を確保するのに重要であることから、燃料以外の副産物に対しても十分に検討することが必要である。

3. 微細藻類に対する取組み

(1) 米国の取組み

現在、微細藻類の開発に最も力を入れているのは米国である。米国内では多くのプロジェクトが進行中で、既に大型装置を用いたデモンストレーションも行われている。

米国では、1970年代の第一次石油ショック等の影響により、1978年から米エネルギー

省（DOE）で、藻類バイオマス資源を輸送用燃料として事業化することを目的としたAquatic Species Program（ASP）が進められた⁽⁵⁾。国立再生可能エネルギー研究所（NREL）で基礎研究や実証試験が進められ、この期間約3,000種の藻類が様々な水生生態系から採取された。石油の価格との差が大きかったことや予算の制約により、DOEは1996年にASPへの資金提供を停止した。藻類はハワイ大学に送付・保管され、NRELの成果は、クローズアウト・レポート“Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program—Biodiesel from Algae”（1998年7月）にまとめられた⁽⁶⁾。

2005年に成立した「エネルギー政策法」の中で再生可能燃料基準（RFS）が設けられた。RFSとは、米国内で販売されるガソリンに対して、一定割合の再生可能燃料の混合を義務付ける基準で、バイオエタノール生産を政策で後押しするために導入された⁽⁷⁾。その後、2007年に成立した「エネルギー自立・安全保障法」（EISA）の中でRFSの修正が行われた（RFS2）。同法は、米国の再生可能燃料の生産と使用を、2022年までに360億ガロンにすることを要求している。EISAは、でんぷんベースのエタノールの使用に150億ガロンの上限を定め、残りをセルロース系エタノールや「先進バイオ燃料」で補うことを求めている⁽⁶⁾。微細藻類からのバイオ燃料は、この先進バイオ燃料にあたる。2007年に設定されたRFSの値を図3に示す⁽⁸⁾。

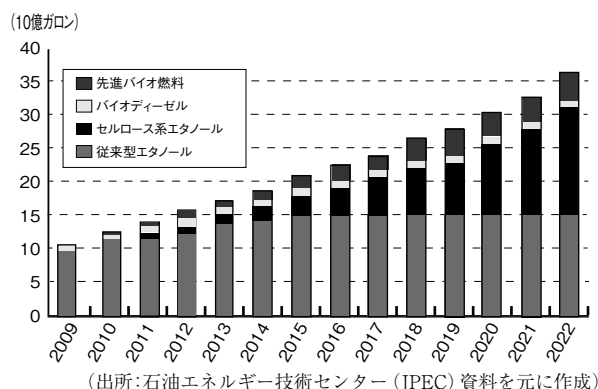


図3 RFS 義務量

① DOE の取組み

RFS を受けて、2009 年オバマ大統領は、DOE が先進バイオ燃料の研究開発とバイオリファイナリー実証プロジェクトの追加投資のために「米国再生復興投資法」の予算を利用し、再生可能エネルギーの技術開発と雇用の拡大を促進するために、7 億 8,600 万ドルの開発費を拠出する計画を策定した。そのうち、藻類原料バイオ燃料に 5,000 万ドルを投入することを発表した⁽⁹⁾。

2010 年には、“National Algal Biofuels Technology Roadmap”を発表した。この中で、藻類を先進的バイオ燃料生産のための重要な原料と位置づけ、藻類からのバイオ燃料を商業化に結びつけるために、今後も大規模な研究開発と実証（Research, Development & Demonstration: RD&D）が必要との認識が示された。また、藻類系バイオ燃料産業の育成に向け、研究者やエンジニア、政策立案者、連邦機関、民間部門を指導して、国家レベルの組織的な取り組みを実施することが目標に掲げられた⁽⁵⁾。

2010 年には、Research & Development (Consortia Initiative) に関して 7,400 万ドル、Development & Demonstration (IBR projects) に関して 1 億ドルの援助を実施している⁽¹⁰⁾。National Alliance For Advanced Biofuels and Bio-products (NAABB) は、国立研究所、大学、企業が参画しているコンソーシアムで、Research & Development で 4,400 万ドルの活動助成を受け、要素技術の開発を行うプログラムを進めている。Development & Demonstration では、下記のプロジェクト

等に援助が行われた⁽⁹⁾。

- Sustainable Algal Biofuels Consortium (アリゾナ州立大学他)
- Consortium for Algal Biofuels Commercialization (カリフォルニア大学他)
- LLC consortium (Cellana 社他)

2012 年には、アリゾナ州立大学の ATP3 (Algae Testbed Public-Private Partnership) に対して、テストベッド向けに 5 年間で 1,500 万ドル、アリゾナ大学の RAFT (Regional Algae Feedstock Trials) に対して、5 年間で 800 万ドルの援助が行われた⁽¹⁰⁾。

2013 年には、Algal Biomass Yield (ABY) プログラムとして、研究開発の補助を実施した。ここでは、2018 年までに 2,500 ガロン/エーカー/年のデモンストレーションを実施することを目標としている。本プログラム実施企業、大学および予算は以下の通りである⁽¹⁰⁾。

- Hawaii Bioenergy 社 (500 万ドル)
- カリフォルニア州立工科大学 (150 万ドル)
- ニューメキシコ州立大学 (500 万ドル)
- Sapphire Energy 社 (500 万ドル)

以上のように、DOE では微細藻類バイオ燃料の実現を推進しており、研究から実証まで幅広くサポートを行っている。表 3 に DOE が掲げる微細藻類のコスト目標を示す⁽¹⁰⁾。ターゲット目標ではあるが、2022 年には既存燃料と競合する価格が示されており、DOE で野心的な取り組みが行われていることがうかがえる。

表 3 DOE の微細藻類バイオ燃料コスト目標

2011 年ドル	単位	2010 年 ベースライン	2014 年 予測	2018 年 予測	2022 年 目標
藻類原料	ドル/GGE	18.22	13.13	6.30	3.27
供給コスト	ドル/トン	4,988	3,601	1,730	895
生産コスト	ドル/GGE	15.60	11.18	5.17	2.63
収穫コスト	ドル/GGE	2.99	2.52	1.65	0.67
前処理コスト	ドル/GGE	1.72	1.56	1.11	0.77
リサイクル クレジット	ドル/GGE	-2.08	-2.14	-1.63	-0.80

※ GGE：ガソリンガロン等量

(出所：DOE)

②米国防総省（DOD）の取組み

DOD でも微細藻類バイオ燃料に関する取り組みを行っている。DODの活動は、エネルギー安全保障拡大（供給源の多様化）、エネルギー供給ラインの短縮、エネルギー価格変動の抑制、外国産燃料依存の縮減、温室効果ガス削減（善き市民としての化石燃料使用の削減）等を目的としている⁽¹¹⁾。

DOD の防衛先進研究計画局（DARPA）は、2007 年に 1 年半の契約期間でジェット機燃料スペックを満たすバイオ燃料を実証用として生産するプロジェクト（植物油や微細藻類油を軍事用ジェット機の燃料へ転換）で、UOP 社に 670 万ドルの無償資金を提供している。同プロジェクトには、Honeywell Aerospace 社や Cargil 社、アリゾナ州立大学やその他研究機関が参加している⁽¹²⁾。

2007 年の段階で、2020 年までに海軍における使用燃料の半分について再生可能燃料を使用すると表明した。これは、およそ年間 3.36 億ガロン (127 万kl) の先進型バイオ燃料をブレンドして使用する見込みとなる⁽¹³⁾。

2010 年には、空軍でバイオ燃料 50% ブレンドの燃料による初めての飛行テストに成功（藻類由来オイルも一部使用）した⁽¹³⁾。

2011 年には、海軍で船舶用ディーゼル燃料やジェット燃料として使用可能な先進型バイオ燃料の開発・生産促進に 3 年間で 5 億 1,000 万ドルを投資すると表明した。海軍は 45 万ガロン (1,700kl) の先進型バイオ燃料を購入する契約を米国バイオ関連企業 2 社と締結した⁽¹³⁾。

2012 年には、3 件の企業（Emerald Biofuels 社、Natures Biofuels 社、Fulcrum Biofuels 社）に合計 1,600 万ドルを支援した⁽¹⁴⁾。

2013 年には、Farm-to-Fleet プログラムとして、ジェット燃料と船舶用ディーゼルについて、通常の燃料の国内購入にバイオ燃料ブレンドを組み入れることを表明した⁽¹⁵⁾。

③米農務省（USDA）の取組み

USDA では、バイオマスに関する様々な取り組みを行っている。その一環として、微細藻類バイオ燃料の開発に関しても、助成等を実施している。

前述の RFS を受けて、2008 年には「食料・保全・エネルギー法」でバイオファイナリー支援プログラムを実施した。

2009 年には、同プログラムにより、微細藻類関連企業 Solix 社 (1,050 万ドル、藻類からのエタノール生産)、Sapphire Energy 社 (5 億 4,500 万ドル、BDF 生産) に融資保証を行った⁽⁹⁾。本プログラムでは、微細藻類以外に木質バイオマス、都市ごみバイオマス等にも融資保証が行われている。表 4 には、分野別の融資保証の割合を示す⁽¹⁶⁾。この時点では、藻類分野は約 7 % であり、全体のバイオマスへの融資保証に比べるとその割合は小さい。

2013 年には、商業規模バイオリファイナリーの開発あるいは適切なバイオ燃料技術を備えた既存生産施設の改修に 1 億 8,100 万ドルの融資保証を行う予定となっている。これは、農村経済の強化に注力した活動となっている⁽¹⁷⁾。

表 4 USDA による融資保証の分野別割合

プロジェクトタイプ	プロジェクト数	債務保証額 (ドル)	割合 (%)
木質バイオマス	2	355,000,000	35
都市ごみ or その他有機性ごみ	5	241,425,000	23
農業残渣 (麦わら、 トウモロコシ茎葉)	1	232,500,000	23
多年草	1	99,000,000	10
藻類	1	75,000,000	7
トウモロコシ or 大豆油	1	25,000,000	2
合 計	11	1,027,925,000	

(出所：Taxpayers for Common Sense)

(2) 日本での取組み

日本においても、当時、世界最大規模の133億円を投じ、1990～1999年度にニューサンシャイン計画「細菌・藻類等利用二酸化炭素固定化・有効利用技術研究開発」が実施された。その後、油価の低下により、国家プロジェクトとしての微細藻類研究開発は、下火となっていた。近年、石油価格の高騰や再生可能エネルギーが注目される中で、藻類が再び注目を浴びようになり、経済産業省、文部科学省、農林水産省等の支援のもと様々なプロジェクトで研究開発が行われている⁽¹²⁾。

現在、藻類探索の基礎研究から、屋外培養の試験が行われているが、米国のような大型のデモンストレーションには至っていない。藻類バイオマス国際シンポジウム(2013年)において、日本から経済産業省、農林水産省、文部科学省の発表が行われたが、いずれの省も微細藻類バイオ燃料の2030年実用化の目標を掲げていた。日本の開発ペースとしては、2020年までに要素技術の開発を終え、その後屋外での大規模実証を経て、2030年事業化という流れである。

① 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)プロジェクト

NEDOでは、2012年から「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業」に取り組んでいる(現在継続中、2015年度予算18億円)。ここでは、次世代技術開発と実用化技術開発のプログラムがある。「Cool Earth—エネルギー革新技术計画」(平成20年3月経済産業省)における2030年頃の実用化を見据える技術として、2014年度までは、微細藻類由来のバイオ燃料の開発は、バイオマスのガス化および液体化(BTL)とともに、次世代技術開発の中で取り組まれている⁽¹⁸⁾。

② 科学技術振興機構(JST)プロジェクト

JSTでは、2010年から2013年まで「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイ

オエネルギー創成のための基盤技術の創出」に取り組んだ。この中では、チーム研究型のCore Research for Evolutional Science and Technology(CREST)と個人研究型の「さががけ」のプログラムが用意された。それぞれのプログラムで、藻類・水圏微生物に関する研究が行われ、CRESTで2010年5件、2012年5件、2013年3件、さががけで2010年11件、2012年10件、2013年7件が採択された⁽¹⁹⁾。

③ 農林水産省プロジェクト

農林水産省の微細藻類に関連する研究開発プロジェクトとしては、地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発「藻類等革新的なCO₂高吸収バイオマス利用技術の開発」が2010年度～2011年度に行われた(2010年度予算2.2億円)。ここでは、微細藻類種の探索や増殖装置の開発等が行われた。また、2012年度には、「農山漁村におけるバイオ燃料等生産基地創造のための技術開発」(予算6億円)において「微細藻類を利用した石油代替燃料等の製造技術の開発」が行われた。ここでは、微細藻類からの低コストな燃料の製造技術や、搾油後の藻体残さを飼料、肥料として利用する技術の開発が行われた⁽¹²⁾。

事業化可能性調査としては、2011年度農山漁村6次産業化対策事業に係る緑と水の環境技術革命プロジェクト事業「農山村における藻類バイオマスファームの事業化可能性調査」および同助成金の2010年度緑と水の環境技術革命プロジェクト事業「耕作放棄地における微細藻類培養技術の確立と事業化方策の検討に係る事業化可能性調査～藻から石油とオメガ3～」などがこれまでに行われた⁽¹²⁾。

(3) その他の国での取組み

① フランス

フランスでは、政府が主導し、地方自治体、産業界が協力して、微細藻類の活用を目指した研究開発が進められている。2009年からEU、フランスの自治体の出資によって、

藻類バイオマスのクラスターとネットワーク形成を目的としたコンソーシアム“Alga Sud”が始動した。国立農学研究所や Marine Renewable Energy 社の主導で、研究開発プロジェクト“Green Stars”も進行している⁽⁵⁾。

②ベルギー，オランダ

ベルギーとオランダが共同で Alchemis プロジェクトを進めている。このプロジェクトでは、約 500m² の微細藻類ファーム（大規模微細藻類生産のフィージビリティ（機能テスト，大量生産管理等）になり得る規模）で燃料ガスと排水を利用した微細藻類生産を実証試験することを目指しており，年間 4,000kg（乾燥重量）の微細藻類が生産される予定である⁽¹²⁾。

③ 韓国

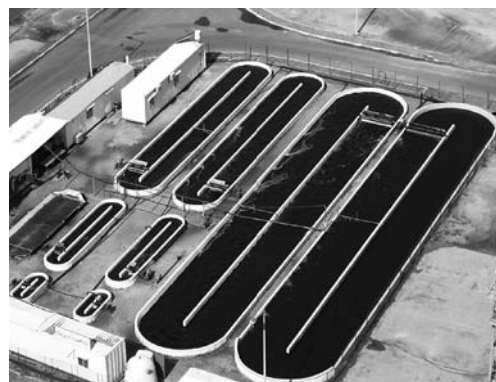
韓国では，グリーン・グロースが国家戦力として位置付けられたことから，韓国文科省のファンドで 2010-2019 年の 9 年間，政府関連の研究機関である韓国科学技術院（KAIST）が中心となって，国内のバイオマスにかかわる分野，機関を集結したコンソーシアムを設立した。この中で，微細藻類の研究開発に取り組んでいる⁽⁵⁾。

4. 微細藻類に関する技術動向

（1）培養技術の動向

微細藻類のバイオ燃料製造に関しては，培養～回収～利用まで含め，多くの技術が関連する。しかし，その中で最も重要な開発課題は，微細藻類を安定的，かつ，低コストで培養することである。微細藻類の培養装置に関しては，開放系のオープンポンド型と閉鎖系のフォトバイオリアクター（PBR）を用いた研究開発が進められている。

オープンポンド型では，大気解放の状態では，藻類の入った水を循環させながら培養を行う。図4は楕円型の培養池に攪拌機を取り付け，水を回しながら培養するもので，レースウェイ方

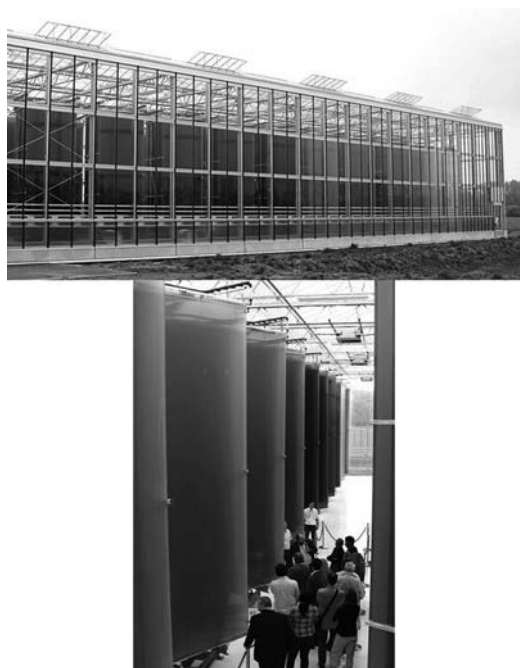


（出所：Seambiotic 社）

図4 レースウェイ方式

式と呼ばれている。微細藻類はその特性によって，水面に浮かぶものや底面に沈むものがある。開放型では太陽光は上部にしか当たらないため，攪拌により微細藻類にまんべんなく光を当て，生長を促進する必要がある。開放系で問題となるのが，汚染（コンタミネーション）である。解放状態であるため，微細藻類以外の微生物，雑菌等が培養池に入りやすい状態になる。これらのものが，微細藻類より生長が速いと，そちらが優先化し目的の微細藻類の生育が阻害される。また，開放型では気温の影響を直接受ける。一般に微細藻類は低温で成長速度が遅くなるため，特に冬場は生産量が低下する。また，あまり温度が高すぎると，微細藻類が死滅することになる。

閉鎖系の PBR では，外気と遮断されているため，コンタミネーションの問題は少ない。PBR では全方向から光を当てることができるので，効率良く培養することができる。室内培養を行えば温度コントロールが容易になるので，気温低下等を抑制することができる。PBR として多くの方法が提案されているが，その一事例として，オーストリアの Ecoduna 社のリアクター（PHOBIOR）を図5に示す⁽²¹⁾。温室内に透明な平板型のリアクターを配置し，その中で微細藻類を培養する。パネルサイズは 50m² である。写真の Bruck/Leitha のサイトでは，2012 年に運転が開始されている。現時点では，有用脂質生産を目的に行われているが，将来は燃料生産も視野に入れている。



(出所：Ecoduna 社)

図5 Ecoduna 社の PBR

PBR は効率よく微細藻類を培養することが可能であるが、大きな問題はコストである。建設費が開放型に比べ高くなることから、燃料生産を対象とした場合には、開放系が本命であるとみられている。PBR は高価な有用物の生産に用いるか、技術革新により大幅なコストダウンを図る必要がある。

微細藻類の培養では、栄養成分の供給も課題となる。微細藻類が生育するには、窒素源や微量のミネラル等が必要となる。培養液を作成して供給すれば効率的ではあるが、コストが上がってしまう。そこで、排水等に含まれる窒素源等を利用して低コスト化（場合によっては、排水処理の逆有償も期待できる）を図る検討が進められている。この場合、排水に含まれる雑菌等のコンタミネーションに注意する必要がある。

微細藻類は水中で培養しなければならないため、水の確保も課題となる。海水性の微細藻類であれば、海岸近くに設備を設置すればよいが、内陸で行う場合には大量の水の確保が課題となる。開放系の場合、蒸発を伴うので、それも考慮する必要がある。また、土

地の傾斜等にも配慮する必要がある。

微細藻類は大気中の CO_2 を吸収し、炭素を固定して生長する。大気中の CO_2 でも生育するが、 CO_2 を吹き込むことでそれを促進することができる。 CO_2 を利用する場合には、発電所等に隣接設置し、その排ガスを供給するのが効果的である。

微細藻類の培養法では、コンタミネーション、温度、栄養等のいくつかの課題が存在する。それらの課題を解決し、安定的、高収率の培養を行うには、生長が速く、環境変化にも適応する微細藻類が必要である。これまでに、多くの微細藻類が提案され、その培養条件等が研究されている。変異株、遺伝子組換え等も含め、今後も種の探索は継続して行われると考えられる。

(2) 回収・抽出技術の動向

微細藻類は培養液の中で低濃度に分散しているため、効率良く油分を取り出すには、微細藻類を回収・濃縮する必要がある。通常、汚泥等の回収・濃縮を行うには、フィルタープレスやスクリープレス等が用いられる。これらの装置を転用する場合には、微細藻類の濃度や細胞径を考慮した機器選定が必要となる。近年では、回収効率を上げるため、フロック（凝集体）を形成する藻類種の探索等も行われている。

細胞内に蓄積された油分は細胞壁内にあるため、通常の状態では取り出すことができない。油分の抽出には有機溶媒が用いられるが、単に有機溶媒と混合しても、細胞壁内の油分を抽出することはできない。一般に、油分の含有量を測定する場合には、乾燥して水分を飛ばし、含有された油分をヘキサン等の有機溶媒に溶かし分析を行う。この場合、水分が無いので、簡単に油分を抽出することができる。微細藻類は大量の水分を含む（90%以上）ので、潜熱の大きい水を飛ばすために莫大なエネルギーが必要となるので、本方法は実用的ではない。天日乾燥は敷地等の制約により適地での使用に限られるため、汎用的で効率

的な抽出法の探索が必要となる。

細胞内から油分を抽出する単純な方法としては、細胞壁を壊すことである。細胞壁は死滅すると壊れるため、中の油分が抽出しやすくなる。この状態で有機溶媒と混合し、水と油分の溶けた有機溶媒を分離し、その後沸点の低い有機溶媒を飛ばせば目的の油分を得ることができる。この際、飛ばした有機溶媒は、回収して再利用する。

このような原理を利用して、物理的圧縮技術、電磁・超音波抽出技術、電気・化学的抽出技術等が検討されている。米国の パシフィック・ノースウェスト国立研究所 (PNNL) は、亜臨界状態で水の蒸発をおさえながら抽出する技術に取り組んでおり、触媒を使い抽出とともに原油を生成する技術開発を行っている⁽²²⁾。溶媒に DME を用い、効率よく抽出する技術開発⁽²³⁾やボツリオコカスの炭化水素を低温で抽出する研究⁽²⁴⁾等も行われている。

(3) デモプラントの状況

現在、微細藻類の培養等の基礎研究が進められているが、一方で多くの研究機関、企業等で

屋外培養の試験も合わせて進められている。前述したように、米国では DOE の補助等を活用しながら、大規模なデモンストレーションが行われている。日本でも規模は小さいが、屋外培養試験が進められている。主観ではあるが、現時点では、米国はある程度実績のある微細藻種を用い、大規模実証でそのオペレーション法等を早期に開発することに主眼を置き、日本は優れた微細藻種を選定し、効率的な生産体系を早期に構築することに主眼を置いているように感じる。図6に、米国のデモンストレーションや日本の屋外培養試験の事例を記す。

5. おわりに

第三世代バイオマスとして近年注目されている微細藻類であるが、解決すべき課題があり、商用に利用されるまでには時間がかかると予測される。しかし、現在米国をはじめ多くの国で活発に技術開発が行われていることから、今後それらが進展し、将来的に高いポテンシャルを有する微細藻類バイオ燃料が実現されることを期待したい。

① Sapphire Energy社(米国)
サイト: ミネソタ州コロンバス
規模: 740 ha
運転開始年: 2013年
補助: DOE, USDA
その他: 2013年に250 haで運転開始。
2018年に5,000 バレル/日の生産が目標。



デモプラント⁽²⁵⁾

④ JX, ユーグレナ,
日立プラントテクノロジー,
慶応大学(日本)
サイト: 石垣島
規模: 0.0025 ha
補助: NEDO
その他: ユーグレナの屋外培養。



屋外培養試験装置⁽²⁷⁾

② Cellana社(米国)
サイト: ハワイ州コナ
規模: 740 ha
運転開始年: 2009年
補助: DOE, USDA
その他: 生産量は20 t/日。



デモプラント⁽²⁶⁾

⑤ IHI, 神戸大学, ネオ・モルガン(日本)
サイト: 横浜
規模: 100 m³
補助: NEDO
その他: ボツリオコカスの屋外培養。



屋外培養試験装置⁽²⁸⁾

③ Hawaii Bioenergy社(米国)
サイト: ハワイ州カウアイ
規模: 50 ha
補助: DOD
その他: ディーゼル発電の排ガス
CO₂を利用。



デモプラント⁽¹¹⁾

⑥ 電源開発(日本)
サイト: 北九州
規模: 200 m³(10 m³ × 20基)
補助: NEDO
その他: 2014年設置予定。
高オイル産微細藻類と好冷性微細藻類を併用。



屋外培養試験装置⁽²⁹⁾

図6 米国のデモンストレーションと日本の屋外培養試験の事例

[謝辞]

本稿は、一般財団法人 電力中央研究所のエネルギー技術情報に関する調査「次世代バイオマスに関する最新技術調査」において当所が行った調査の一部について取りまとめたものがあります。このような調査を行う機会を得たことを関係各位に感謝いたします。

参考文献

- (1) Al Darzins, Philip Pienkos, Les Edye, Current Status and Potential for Algal Biofuels Production, IEA BIOENEGY TASK 39, 2010
- (2) 微細藻培養技術事業化可能性調査共同事業体, 耕作放棄地における微細藻培養技術の確立と事業化方策の検討に係る事業化可能性調査報告, 2011
- (3) Stephen Mayfield, The potential of micro-algae for the production of biofuels and bio-products, International Symposium on Algal Biomass, 2013
- (4) 三井物産戦略研究所, バイオマス資源としての微細藻類, 戦略研レポート, 2011
- (5) 藻類産業創成コンソーシアム, 農山漁村における藻類バイオマスファームの事業化可能性調査報告書, 2012
- (6) NEDO 海外レポート, NO.1070, 2011
- (7) 大江徹男, 坂内久, アメリカの再生可能燃料基準 (RFS) の最終規則とバイオ燃料政策の方向性, 2010 年度日本国際経済学会関東支部大会, 2010
- (8) 石油エネルギー技術センター, 米国航空部門でバイオ燃料導入に関する最新動向, JPEC レポート, 2013
- (9) 産業競争力懇談会, 2010 年度研究会最終報告 農林水産業と工業の連携研究会～微細藻燃料分科会～, 2011
- (10) Daniel B. Fishman, The Algae Program at the U.S. Department of Energy's Bioenergy Technologies Office, International Symposium on Algal Biomass, 2013
- (11) Joelle Simonpietri, U.S.A. Department of Defense Interests in Renewable Mobility Fuels, International Symposium on Algal Biomass, 2013
- (12) NEDO, みずほ情報総研, 微細藻類等を利用した燃料等の生産に係る技術開発等の最新動向に係る検討報告書, 2012
- (13) 石油エネルギー技術センター, 米国連邦議会でのバイオ燃料政策に関する議論, JPEC レポート, 2012
- (14) Renewable Energy World.com, <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2013/05/dod-awards-16m-towards-parity-cost-drop-in-non-food-biofuels?cmpid=rss>
- (15) Biofuels Digest.com, <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2013/12/11/usda-us-navy-unveil-farm-to-fleet-program-navy-open-for-business-as-shift-to-biofuels-blends-begins/>
- (16) Taxpayers for Common Sense, Biorefinery Assistance Program Fact Sheet, 2013
- (17) USDA, <http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome?contentid=2013/10/0195.xml>
- (18) NEDO, http://www.nedo.go.jp/activities/CA_004551.html
- (19) JST, <http://www.jst.go.jp/presto/bioenergy/>
- (20) Seambiotic, Seambiotic Ltd.- Algae Pilot Plant Description Worksheet, 2010
- (21) Ecoduna, <http://www.ecoduna.com/en/projekte/demonstrationsanlage-phobior-in-bruckleitha-oesterreich/?L=1>
- (22) Pacific Northwest National Laboratory, <http://www.pnnl.gov/news/release.aspx?id=1029>
- (23) 電力中央研究所, http://cripi.denken.or.jp/press/pressrelease/2010/03_17dme.pdf
- (24) 東京大学, 微細藻類からの効率的炭化水素回収方法, 第2回 東京海洋大学 水産海洋プラットフォーム・フォーラム, 2010
- (25) Sapphire Energy, <http://www.sapphireenergy.com/locations/green-crude-farm.html>
- (26) Cellana, <http://cellana.com/production/kona-demonstration-facility/>
- (27) 日立プラントテクノロジー, ユーグレナ, 微細藻類由来のバイオジェット燃料製造に関する要素技術の開発, NEDO 新エネルギー成果報告会, 2012
- (28) IHI, http://www.ihico.jp/ihico/all_news/2013/press/2013-11-14/index.html
- (29) 電源開発, 好冷性微細藻類を活用したグリーンー貫生産プロセスの構築, 第10回福岡県地域エネルギー政策研究会, 2014

平成 25 年度 事業報告の概要

(一財) エネルギー総合工学研究所

当研究所における平成 25 年度事業の概要は以下の通りである。

(1) エネルギー総合工学研究所は、昭和 53 年 4 月の設立以来、わが国のエネルギー工学分野の中心的な調査研究機関として、産・学・官のエネルギー技術に関する専門的な知見・経験を相互に結び付け、「総合工学」の視点に立脚して調査、研究、評価、成果の普及等に努めてきた。技術は、わが国が国際社会で優位性を維持・向上する上で不可欠な資産であり、将来のリスクに対応し得る強靱なエネルギー戦略の構築・実現に貢献するものである。

当研究所は、今後とも「エネルギーの未来を拓くのは技術である」との認識の下、俯瞰的、長期的な視座をもって、エネルギー技術に関する調査、研究、評価、成果の普及等に取り組んでいくことが必要である。

一方、国内および世界のエネルギーの情勢は、再生可能エネルギーの導入促進や非在来型化石資源の台頭、新興国のエネルギー需要の急増等と相まって、目まぐるしく変化している。このような激動の環境下において調査研究活動を実施していくには、これまで蓄積してきた知見を生かして、時代環境に適確に対応しつつ、「総合工学」の視点に立脚した当研究所の総合力が発揮できる調査研究基盤の整備を図っていくことが必要である。このような観点から、当研究所は、その時々 of 社会的な要請に応じて調査研究対象の重点化と研究基盤整備を図ってきている。

(2) 当研究所は、温室効果ガスの大幅削減に必要な革新技術に関する技術ロードマップの整理や地球温暖化抑制シナリオに関する検討を進めたほか、次世代電力ネットワークや、今後導入拡大が予想される洋上風力発電や太陽熱利用技術、CO₂ の回収に適した石炭利用技術、水素の製造・輸送・需要等に関する調査研究を実施した。

また、原子力災害の発生という現実を見据え、現在の軽水炉の安全向上を図るための技術開発を継続するとともに、当研究所の解析コード (SAMPSON) を福島第一原子力発電所の事故炉の炉心状況の把握に活用するためのプロジェクトも進めた。

なお、平成 23 年 6 月に発行した省エネルギーや節電に資するエネルギーマネジメントシステムに係る国際規格 (ISO50001) に関して、ISO センターにおいて、毎月研修会を開催するとともに数社へのコンサルティングサービスを実施した。

(3) 当研究所は、公益法人改革の要請に対応し、事業運営上、より自由度が高く、営利を目的としない非営利型の一般法人化を選択し、平成 25 年 4 月 1 日から「一般財団法人エネルギー総合工学研究所」に移行した。

以下に各エネルギー分野における調査研究活動を示す。

① 総合的な見地からの調査研究

温室効果ガスの大幅削減に必要な革新技術に関する整理や地球温暖化抑制を目的とした有力なシナリオ案に関する調査・検討に加え、最新の技術情報および評価を提供するエネルギー技術情報プラットフォームの内容の充実、エネルギーに関する公衆の意識調査を実施した。

② 電力ネットワークおよびエネルギーシステム関連

次世代電力ネットワークの調査検討を進めるとともに、デマンドレスポンス（DR）のビジネス性の検討や、エネルギーマネジメントシステム（EMS）の構築と事業展開のための要件整理等を進めた。また、送電鉄塔を対象に、災害に強い電気設備の検討に係る調査を実施した。

③ 地球環境関連

気候変動に対応するリスク管理戦略の構築の一環として、地球温暖化が進行した場合の適応策および気候工学の個別評価を進めた。また、当研究所のエネルギー環境モデル（GRAPE）のエネルギーモジュールを用いて、世界の主要地域・国のCO₂排出削減ポテンシャルの分析を行った。

④ 再生可能エネルギー・省エネルギー関連

再生可能エネルギー分野では今後導入拡大が予想される洋上風力発電や、集光型太陽熱発電（CSP）等に関し、また、省エネルギー分野では省エネルギーのためのエネルギーマネジメントシステムや電気製品の効率向上に資する国際協力に関し、調査研究を実施した。

⑤ 水素エネルギー関連

CO₂フリー水素のサプライチェーン実現に向けたロードマップや技術開発プランの作成を行うとともに、再生可能エネルギーからの水素の製造やエネルギーキャリア転換・輸送等に係るシナリオ作成のためのコ

スト分析等に関し調査研究を実施した。

⑥ 化石エネルギー関連

次世代火力発電技術の動向と開発に関して、CO₂の回収に係る新技術として注目されているCO₂分離型化学燃焼石炭利用技術や次世代高効率石炭ガス化技術の検討、また、化石燃料利用に係る課題に関する調査研究として未利用炭の転換技術やシェールガス革命がわが国の経済や産業に与える影響の技術的評価等について調査研究を行った。

⑦ 原子力関連

福島第一原子力発電所事故を踏まえ、さらに高い水準の安全確保を図るため、原子力発電所の安全対策高度化に活用し得る技術開発プロジェクトを実施した。また、事故炉の炉内状況を把握するため、過酷事故の挙動解析コードの性能向上と解析を進めた。また、核燃料サイクル技術の安定性や高温ガス炉の実用化に関する検討等を行うとともに、福島県が進める環境創造センター構想の実現に向けた支援やトリチウム水の取扱いに関する調査を行った。

研究所のうごき

(平成 26 年 4 月 2 日～7 月 1 日)

◇ 第 5 回理事会

日 時：6 月 5 日 (木) 11:00～12:00

場 所：経団連会館 (5 階) 501 号室

議 題：

第一号議案 平成 25 年度事業報告および決算
について

第二号議案 公益目的支出計画実施報告書につ
いて

第三号議案 定時評議員会の開催について

第四号議案 顧問の委嘱について

報告事項 業務執行の状況について
その他

◇ 第 3 回評議員会

日 時：6 月 19 日 (木) 11:00～12:00

場 所：日本工業倶楽部 (3 階) 中ホール

議 題：

第一号議案 平成 25 年度事業報告および決算
について

第二号議案 公益目的支出計画実施報告書につ
いて

第三号議案 理事の一部改選について

第四号議案 評議員の一部改選について

報告事項 その他

◇ 月例研究会

第 333 回月例研究会

日 時：4 月 25 日 (金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. 欧米諸国における小売電力市場の動向及び
小売供給事業者の経営戦略～英国の事例を中心～
(（一社）海外電力調査会 調査部 副主任研究員
大西健一 氏)
2. 2014 年におけるシェール・ガス革命の最
新動向と日本と米国への影響
(和光大学 経済経営学部 教授 大学院研究科
委員長 岩間剛一 氏)

第 334 回月例研究会

日 時：5 月 30 日 (金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. 効果的なエネルギー管理のためのマネジメ
ントシステムの活用～ISO 50001 エネルギー
マネジメントシステムの仕組み 及び その活
用の可能性～

(IMS コンサルティング(株) 代表取締役 寺田
和正 氏)

2. エネルギー効率関連の国際規格動向と産業
界への影響～ マネジメントから省エネ量計
量、情報交換まで～

(横河電機(株) IA マーケティング本部 GF 推進
室 エネルギー効率国際標準推進グループ
グループ長 井上賢一 氏)

第 335 回月例研究会

日 時：6 月 27 日 (金) 14:00～16:00

場 所：航空会館地下 1 階 B101 会議室

テーマ：

1. 地層処分に係わる諸課題の解決に向けた学
際的評価とは
(（公財）原子力安全研究協会 放射線環境影
響研究所 主任研究員 蛭沢重信 氏)
2. 使用済燃料管理に係わる諸課題 ～日本原
子力学会の研究専門委員会における議論～
(日本原子力学会 「使用済燃料直接処分に関
わる社会環境等」研究専門委員会 幹事
山本隆一 氏)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：黒沢 厚志

テーマ：統合評価モデルの構造と気候モデルとの
連携

発表先：日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2014 年
大会 (横浜市)

日 時：4 月 28 日～5 月 2 日

発表者：蓮池 宏、新谷 隆之

テーマ：Vehicle to Grid の経済性と実現のための
課題

発表先：自動車技術会 2014 年春季大会学術講演
会（横浜市）

発表時期：5 月 21 日～ 23 日

発表者：坂田 興

テーマ：CO₂ フリー水素のサプライ・チェーン検討

発表先：日経 BP/ 日経エコロジー「水素社会の
到来とビジネスチャンス」連続セミナー
第 4 回目『CO₂ フリーの水素構造』

日 時：6 月 5 日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：気候工学の現状と課題

発表先：第 33 回エネルギー・資源学会研究発表会
（大阪市）

日 時：6 月 10 日～ 11 日

発表者：笹倉 正晴, 石本 祐樹, 相澤 芳弘, 坂田 興
テーマ：Studies in Japan for Realizing CO₂-free
Hydrogen Global Chains

発表先：World Hydrogen Energy Conference 2014
（WHEC 2014）（韓国）

日 時：6 月 15 日～ 20 日

発表者：石本 祐樹

テーマ：Analysis of Global Hydrogen Energy Sys-
tem from Low Carbon Resources toward
2050

発表先：20th World Hydrogen Energy Conference
（WHEC 2014）

日 時：6 月 16 日

発表者：鈴木 洋明

テーマ：Analysis of Accident Progression with
the SAMPSON Code in the Fukushima
Dai-ichi Nuclear Power Plant Consider-
ing Debris Flow Paths from the Core

発表先：2014 ANS Annual Meeting (Embedded
Topical: Advances in Thermal Hydraulics)

日 時：6 月 19 日

発表者：小川 紀一郎, 蓮池 宏, 大内 優, 松尾 栄人

テーマ：高効率空気タービン発電システム

発表先：日本機械学会動力エネルギーシステム部門

第 19 回動力・エネルギー技術シンポジウ
ム（福井市）

日 時：6 月 26 日

発表者：笹倉 正晴, 石本 祐樹, 黒沢 厚志, 坂田 興

テーマ：Possible sources and associated costs in
the near and long term for H₂ used in
Japan

発表先：IEA Hydrogen Roadmap, Asia Workshop

日 時：6 月 26 日

[寄稿]

発表者：坂田 興, 笹倉 正晴

テーマ：エネルギーキャリアとしての水素の研究
開発と将来展望

寄稿先：日本エネルギー学会誌 5 月号（Vol.93,
No.5）

発表者：小碓 創司, 天野 哲也, 小野村 敏之, 家本 勅,
吉田 一雄

テーマ：Field-aligned heliostats and their appli-
cation to central receiver system

寄稿先：Solar Energy (The Official Journal of the
International Solar Energy Society) (Vol.
105), 5 月 20 日（オンライン公開日）

発表者：小川 紀一郎, 石田 敬一（現中国電力）,
蓮池 宏, 他

テーマ：再生可能エネルギー利用火力発電システム
寄稿先：「火力原子力発電」（火力原子力発電協会）
6 月号

発表者：益田 泰輔

テーマ：Impact of Hot Reserve on Power Sys-
tem Operation Using Photovoltaic Gene-
ration Forecast

寄稿先：International Conference on Electrical
Engineering 2014 (ICEE 2014)（韓国）
6 月 17 日

発表者：時松 宏治, 小野崎 正樹, 入谷 淳一, 坪井
繁樹

テーマ：Costs and performance of an oxygen-blown
IGCC plant with CCS on a first-of-a-kind ba-
sis in Japan

寄稿先：International Journal of Greenhouse Gas
Control, Vol.27 (2014)

◇ 人事異動

○4月30日付

(退職)

蛭沢重信 原子力工学センター部長(参事) 兼
プロジェクト試験研究部

○6月30日付

(出向解除)

斎藤 博 経理部長

○7月1日付

(昇進)

坪井 仁 経理部長

(嘱託採用)

田中健一 原子力工学センター副参事

編集後記

あるクリエイターの話である。プログラミングなどに関する専門知識に裏打ちされた彼の発想はスポーツ大会や舞台の演出、企業のCMなど様々な分野に展開されており、例えば東京都現代美術館の企画展に出展されたリアルタイムでの金融情報の視覚映像は将来の株式取引の姿を変えるかもしれないとも言われている。また、ニュースでご覧になった方も多いと思うが、オリンピック東京招致を決めた最終プレゼンの会場で流れた、フェンシングの剣先の軌跡を光の線で視覚化した映像も彼の手によるものだ。復原された東京駅丸の内駅舎や、つい最近では浦安にあるテーマパークの演出で話題を呼んだプロジェクションマッピング（CGをプロジェクタで建物などに投映して特殊な視覚効果を生み出す映像技術。映像と対象物が寸分たがわず重なり合うところがポイント）という技術を動く被写体に応用した彼の斬新な演出を、筆者は直に目の当たりにし、その作品や発想が多く、国際的な賞や世界の名立たる企業の高い評価を獲得していることに大いに納得したものである。

ドキュメンタリー番組での彼の発言が興味深い。「誰もやらないことをやる」。

これは、アイデア勝負のクリエイターとしてはある意味当然かもしれないが、現時点で最先端と言われる技術の10年先の姿を見越しつつ、電子工学や制御工学、映像技術などの様々な分野の専門家仲間とともにアイデアを具現化し、新たな価値を生み出していくやり方や過程は、まるで研究開発におけるオープンイノベーションそのものに思えた。

ことエネルギーについてみると、4月に閣議決定された第4次エネルギー基本計画において戦略的な技術開発の推進が取り上げられているが、将来の人々の生活や経済活動のあり方や姿に想像を巡らせつつ、種々の分野の専門的な知見を結集し、柔らかな発想と堅い意志をもって技術で未来を拓いていくことに当研究所としても一役買えればと考える次第である。

既にご案内のことと思われるが、経済産業省が保有する膨大なデータを可視化するプロジェクトがスタートしている。経済産業省のホームページから、あるいは「OPEN METI」で検索しても見つかるはずである。件のクリエイターの仕事の一端を垣間見ることができる。

編集責任者 重政弥寿志

季報 エネルギー総合工学 第37巻第2号

平成26年7月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル（6F）

電話（03）3508-8891

FAX（03）3501-1735

<http://www.iae.or.jp/>

（印刷）株式会社日新社

※ 無断転載を禁じます。

