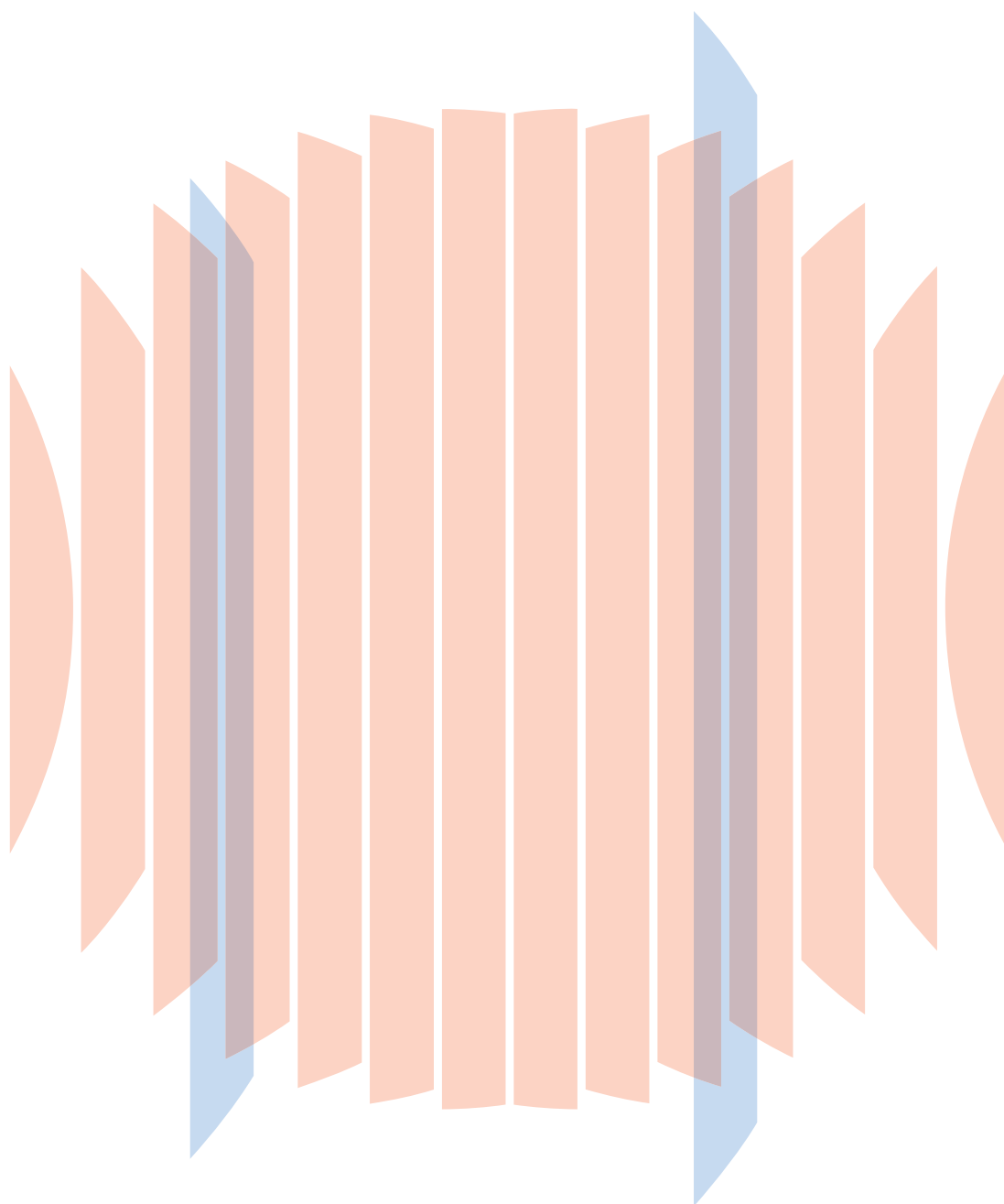


季報 エネルギー総合工学

Vol. 37 No. 1 2014. 4.



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】 想定外について考えて見た	
JX 日鉱日石リサーチ(株) 代表取締役副社長執行役員	吉田 正寛 …………… 1
【寄稿】 電気自動車用ワイヤレス充電—実証評価と標準化の最新動向	
公益社団法人 自動車技術会 ワイヤレス給電システム技術部門委員会 幹事	横井 行雄 …………… 3
【寄稿】 バイオマスエネルギー産業の現状と将来展望	
三菱商事(株) 地球環境・インフラ事業グループ CEO オフィス 環境エネルギー政策担当	澤 一誠 …………… 11
【寄稿】	
光電極およびレドックス光触媒反応を用いたソーラー水素製造 (独) 産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 首席研究員 (兼務) 太陽光エネルギー変換グループ長	佐山 和弘 …………… 26
【調査研究報告】	
核燃料サイクル技術の安定性に関する検討	
プロジェクト試験研究部 原子力グループ 部長 プロジェクト試験研究部 原子力グループ 参事	藤井 貞夫 波多野 守 …………… 36
【調査研究報告】	
シェールガス／オイルについて	
プロジェクト試験研究部 化石・環境グループ 参事 プロジェクト試験研究部 化石・環境グループ 副参事	水田 美能 埴 雅一 …………… 49
【事業計画】	
平成 26 年度 事業計画 (一財)エネルギー総合工学研究所	……………61
【研究所のうごき】	…………… 68
【第 36 巻通巻目次】	…………… 71
【編集後記】	…………… 75

巻頭言

想定外について考えて見た

吉田 正寛

(JX 日鉱日石リサーチ(株)
代表取締役副社長執行役員)



2月14日深夜から15日未明にかけて関東甲信や東北は大雪となり、交通や物流は大混乱。1週間過ぎても4都県で360人を越える人が孤立状態で、記録的な大雪であった。この状態を想定外と言っても異論のある人はいないだろう。なぜなら観測史上最多降雪量を各地で更新する極めて稀な大雪で、対策をするのは発生頻度と費用対効果を考えると現実的ではない、仕方ないことであると社会コンセンサスが得られたからである。

では、事故や災害の原因説明をした際に、想定外だったと言ったら異論が噴出するのはどんな場合であろうか。想定外には大きく3つのケースがある。①本当に想定できなかった。②想定できたが、データが不確か、確率が低いと見て除外された。③発生が予測されたが、対策費用が巨額になるため、当面起こらないだろうと楽観視し、除外された。異論が噴出するのは②と③に当てはまるケースではないかと疑念を持たれた場合である。②③ともここまでやっておけば良いと言う「想定ライン」があり、そのラインまで対策すれば責任を果たしたと主張できると考えたケースである。しかし、専門家の想像力をフルに活用した「想定ライン」であっても、物事を考えるために人為的、意図的に作られた「ライン」に過ぎず、発生確率がゼロでない限り想定外の事故や災害が発生し、責任を問われることになる。すなわち、総てを想定内とすることは現実的になし得ないと考えべきである。このため想定外に何があり得るか、想定外への対応シナリオはどうあるべきかを明確化し、発生時に迅速かつ適確な意思決定により被害を最小化できるようにすることが重要である。備えあれば憂いなしと言われるが、まさに想定外を想定し、それにどう対応するかである。

東日本大震災後にすべての原子力発電が停止し、化石エネルギー輸入増による貿易収支の赤字が恒常化し、電気料金の負担は膨らんでいる。先に政府が公表したエネルギー基本計画案では、将来の電源構成比率は示されなかったが、原子力発電は重要なベースロード

電源と位置づけられた。原子力規制委員会では原発の新規制基準への適合性審査が行われており、先行組の6原発10基が審査の最終段階に入ったとされている。新規制基準は従来と比較すると、シビアアクシデントを防止するための基準を強化し、万一シビアアクシデントやテロが発生した場合に対処するための基準を新設したもので、まさに想定外の想定を盛り込んだものである。原発の再稼働は安全性の確認に加え、地元の同意が不可欠であり、政府が具体的な手続きを示すことで早期の運転再開に繋げることを期待する。

最後に30年前に出向でお世話になったエネ総研からの執筆依頼は嬉しい想定外であった。勝手な事を思いつくまま書かせて頂いたことお許し頂くとともに、エネ総研がエネルギーインフラのイノベーションに貢献されることを大いに期待する。

[寄稿]

電気自動車用ワイヤレス充電 －実証評価と標準化の最新動向

横井 行雄（公益社団法人自動車技術会
ワイヤレス給電システム技術部門委員会 幹事）



1. はじめに

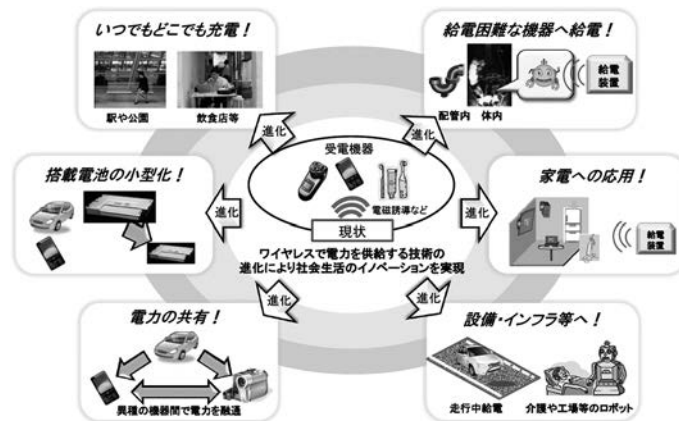
自動車のEV（電気自動車）化は、二酸化炭素（CO₂）排出の削減など地球環境負荷低減の観点からその普及が大いに期待されている。EVにはこれまで何度かブームがあったが、今回は日産のリーフ、米国テスラ（Tesla Motors）のmodel S、Ford Voltに端を発し、2014年にはBMWからi3、VWからe-up、RenaultからSOE等々が市場に投入され、日・米・欧で一気にEV化が拡大する兆候を見ている。一方で、充電インフラはe-mobility（電動交通システム）を支える基幹インフラとして、日本でも整備を一挙に加速すべく、2013年から政策対応が行われている。ドイツでは、官民合わせたNPE（電動交通国家プラットフォーム）計画の下で4カ所の重点地域（ショーケース）を設定して推進している。ベルリン、フランクフルト等の主要都市では、公共スペースを中心に普通充電スポットの整備が急速に進展し街の様相を一変させている。パリでもカーリース向けの充電スポットが市内に張り巡らされて市民生活の利便性が大きく改善されている。

しかし、ケーブルを用いる充電インフラは、国際標準化の努力が進められているが依然コネクタ形状が多種多様存在することに加え、操作性、安全性の観点から改善の余地が大きいことが認識されている。この課題を抜本的に改善すべく、主として欧州において、電磁誘導方式のワイヤレス給電の評価が1990年代後半から数多く積み重ねられてきた。しか

し、給電間隔が狭いという限界が、乗用車向けEVへの適用を困難にしていた。2007年のマサチューセッツ工科大学（MIT）による磁界共鳴方式の再評価を契機に、給電間隔の自由度が高まり、ワイヤレス充電のEV/PHEVへの適用に道を開き、多くの実証実験が世界各国で開始されている。並行して国際規格化、基準・認証に向けた動きが急である。ワイヤレス充電が無線区間を持つことから、わが国においても、主として総務省において、制度の見直しのための検討が進められている。本稿では、日本、欧州の動きを中心に、米国、韓国、中国の動向を含め、ワイヤレス給電の実用化に向けた実証評価と標準化の最近の動向を報告する。

2. 地球環境エネルギー課題とEV

e-mobilityは地球環境改善のための主要なプログラムの1つとして、国際的に取り上げられている。経済協力開発機構（OECD）は、2012年12月にパリで将来の代替輸送エネルギーに関する会合を開いた。EV向けインフラについて日本からもワイヤレス充電を含めた報告が行われた⁽¹⁾。また、国連欧州経済委員会（UNECE）でも「電動車両と環境」（EVE）と名づけたパネルが2012年6月皮切りに2014年2月までに9回開催され、東京（2013年4月）、北京（2013年10月）でも開催された。その中でEV規制参照ガイド⁽²⁾がEVE IWG（電気自動車と環境の非公式作業部会）により準備され、ワイヤレス給電も充電イン



(出所：総務省「電波利用環境委員会」第11回会合（2013.6.5）資料）

図1 ワイヤレス電力伝送技術がもたらす未来の社会

フラの1つとして言及されている。

また、わが国においては2013年5月に情報通信審議会電波利用環境委員会の下に、ワイヤレス電力伝送作業班が設置され積極的に活動している。その中で、充電を含むワイヤレス給電の期待される将来像が提示され、EVのみならず社会の多くのシーンでの活用が期待されている（図1参照）。

ワイヤレス給電は、充電を含む幅広い概念であるが、将来の充電インフラの重要な形の1つとして、おおいに期待されている。

3. ワイヤレス給電の開発・実証動向 (欧州と日本・アジア)

ワイヤレス給電の実用化を目指した歴史で最初に挙げねばならないのは、交流送電の実現を目指したNikola TESLA氏である。彼は1900年にニューヨークにワイヤレス送電タワーを建



図2 Teslaのウォーディングクリフタワー

設し（図2参照）、特許も1914年に取得したが、実用化には至らなかった（図3参照）。

一方でわが国における大電力ワイヤレス給電は、(株)ダイフクによる搬送機への商品化が既に行われている。公共交通向け適用では早稲田大学、昭和飛行機工業(株)などにより市街地での評価試験が積み重ねられてきている。2014年3月に終了した長野市における評価は3年にわたって行われ、多くの実用化に向けたデータが得られている⁽³⁾。

一方、乗用車EV/PHEV向けのワイヤレス

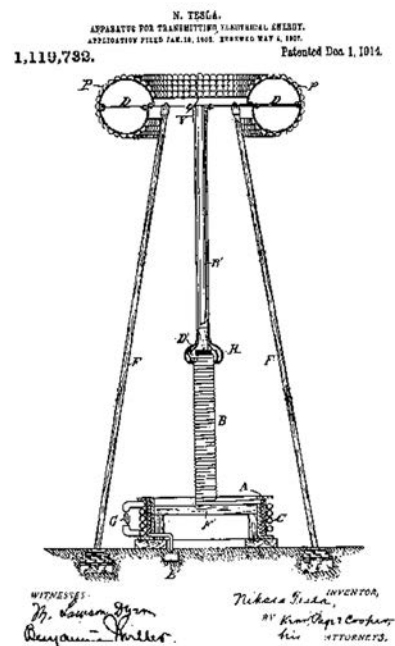


図3 Teslaの特許



図4 千葉県柏の葉でのワイヤレス充電実証住宅



図5 ワイヤレス充電の地上側・車上側パッドの様子

充電は2010年の上海万博においてGMから「2030年の上海」という未来交通システムのデモ映像が公開され、小型EVのeN-Vにワイヤレス充電する様子を描いている。その後、日・米・欧で発表・デモが各社より行われるようになり、2011年には横浜で開催されたEVTec'11において1kWクラスの充電システムの報告が行われた⁽⁴⁾。さらに2012年の東京モータショーではeN-Vを含めて10社

近くが展示を行うなど盛況であった。2013年10月には、柏の葉キャンパス駅前地区の地域エネルギーマネジメントシステム（REMS）に組込む形で、住宅の駐車場でワイヤレス充電試行の発表を三井ホーム㈱と㈱IHIが行った（図4参照）。そこでは住宅の駐車場に設置した給電インフラからの電力をその直上の車上で受電する（図5参照）。2013年12月には総務省が実験目的の高周波利用設備の条件緩



（出所：トヨタ自動車㈱）

図6 トヨタワイヤレス充電実証システム

和を行った。それを受け2014年2月にはトヨタ自動車が、豊田市で一般の住宅を用いる実証評価の開始を公表した（図6参照）。今後国内においても各地で多くの実証評価が、実用化に向かって試みられると考えられる。2014年5月のEVTec&APE 2014では、日・米・欧・韓からのワイヤレス給電に関する報告が16件も予定されていて、世界中の実用化に向けた期待の高さを感じさせる。

英国では2012年からQualcomm社がロンドン市内で実証評価を実施中である（図7参照）。また、2014年初頭には、ロンドン近郊のミルトンキーンズ市において三井物産㈱が統括し、Condux Wampfler社が機材を開発した、バスの商用走行が始まっている。

欧州大陸では、早くからドイツを中心に電

磁誘導方式の評価試験が盛んに行われてきている。その他地域では2012年10月にフランスのDBT社が組織し、欧州連合（EU）の7th Framework Programの支援を受けたFast inChargeというコンソーシアムが活動を開始した。ここには、フランス、イタリア、ギリシャ、スペイン、ブルガリア、スロベキアの6カ国から8社が参加していて今後の動向が注目される（図8参照）⁽⁵⁾。

韓国では、韓国科学技術科学院（KAIST）が主として公共交通の走行中給電の実用化を目標に開発と評価試験を進めており、昨年8月にはグミ市での商用運行も開始された（図9参照）⁽⁶⁾。

また中国も、2013年10月に北京で開催されたEVEの7th sessionでZTE（中興）社が



（出所：Qualcomm 社）

図7 ロンドン市内での実証（キャメロン首相と実証車両）



（出所：FastInCharge News Letter）

図8 FastinCharge コンソーシアム参加企業



（出所：KAIST）

図9 KAIST Gumi 市での運行車両

このようなワイヤレス給電の実証実験の積み重ねが、世界各地で進められていることと、次章で述べる標準化があいまって、EV/PHEV 向けのワイヤレス充電の実用化が実現し、ケーブルを用いる現状の充電インフラが大きく様変わりする社会が到来するであろう⁽⁸⁾。

ワイヤレス給電の健全で実りある産業化が実現するためには、規律としての標準が整備されることが重要である。とりわけワイヤレス充電が、ケーブルを用いた充電と異なり、給電のためにエアギャップ（無線区間）を持つことから、利用周波数（制御用周波数を含

国際的な EV 向けのワイヤレス給電の標準化は、国内外の各標準化機関の連携の中に非常に活発に進められている（図 11 参照）。大市場である、北米、欧州、日本を含むアジアの間での国際協調が極めて重要である。北米の米国自動車技術会（SAE）、ドイツでは自動車メーカ主要 5 社の作業チーム（図 12 参照）、日本では日本自動車研究所（JARI）に設置された非接触充電作業グループが協調し国際規格作成のために連携している。

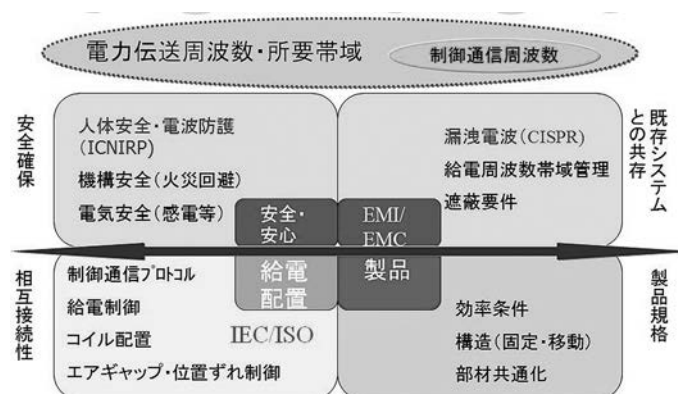


図 10 ワイヤレス充電の標準化領域

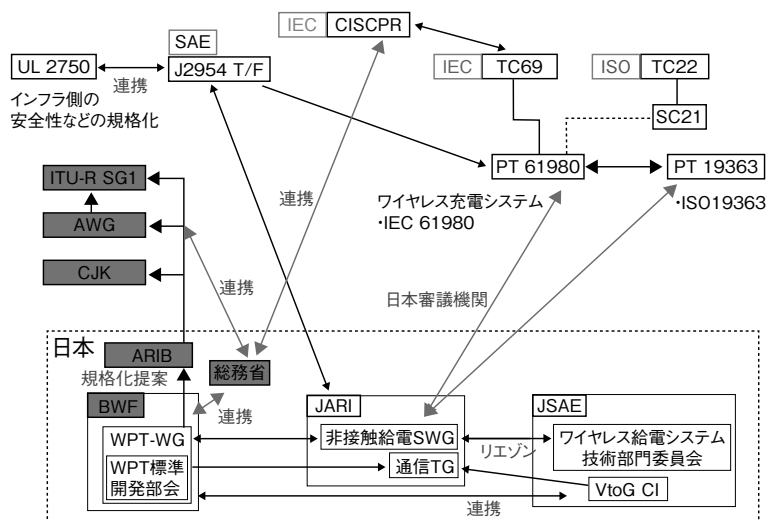


図 11 EV/PHEV；日本・米国・欧州 国際標準化の体制

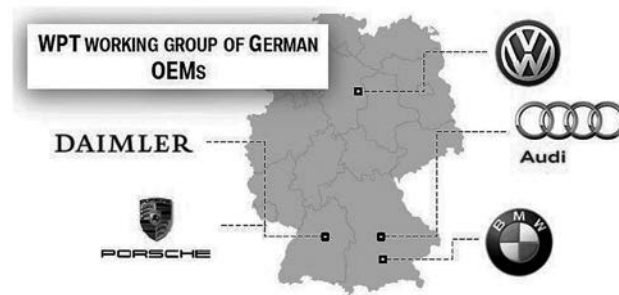


図 12 ワイヤレス充電：ドイツ自動車メーカーの作業部会構成

主として相互接続性に関わる規格は、国際電気標準会議（IEC）、国際標準化機構（ISO）の国際規格として制定され、各国の規格になる。IEC では 2010 年秋に PT61980 規格策定が開始され、一般要件を「- 1」として 2014 年 2 月に CDV 投票を通過し、最終国際規格案（FDIS）化への適否を含めて現在最終段階にある。さらに、充電プロセスの御通信すなわち相互接続を担保するための制御通信規格を「- 2」として、また具体的に磁気を用いた方式の技術要件を「- 3」として本年中の技術仕様書（TS）化を目指して検討が進められている。さらにはこれらも将来的に国際標準（IS）に格上げされる計画である。

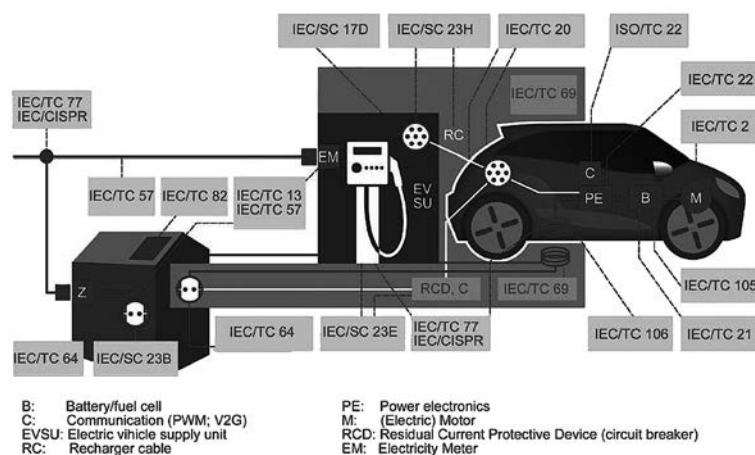
一方、2014 年 2 月には ISO19363 が安全性と接続性の国際標準を定めるべく検討を開始した。

この IEC・ISO での国際標準化は、ケーブル

ルを用いる現行の EV 充電規格と緊密に関係している。ドイツを代表する標準機関である DKE の資料はそのあたりの状況を良く整理している（図 13 参照）。

電波は人類共通の財産であり、国際的にも国内的にも規律をもって利用されている。そのため、ワイヤレス充電のような新しい技術は、既存の電波サービスに大きな影響を与えないことが要求されている。ワイヤレス充電ではインフラからの充電のためのエネルギーは主として EV の電池に充電するために使われるが、残りは熱としての放射と、若干の不要な電磁波の漏えいエネルギーとなってエアギャップを通して空間に放射される。

この不要輻射は、エネルギー伝送に利用される周波数に大きく依存する。EV のワイヤレス充電に利用する周波数は、日本からの提言を踏まえて、2013 年 10 月のドイツの自動車



（出所：DKE）

図 13 充電規格の IEC/ISO での審議分担

メーカーの作業チームが乗用車 EV に関する提言を行い、ほぼ 85 KHz 帯に集約する見通しになっている。しかしこの周波数はいわゆる長波であり、近年は有効に利用されてきたとはいえず、従って、不要輻射に関する計測法はおろか基準も十分に検討されてこなかった。IEC にはそのための専門員会である「国際無線、障害特別委員会 (CISPR)」が活動している。主として日本からの寄書で 2013 年 10 月のオタワでの会合において、日本からの寄書をきっかけに、ワイヤレス充電からの漏えい電磁界の規律に関する検討が開始された⁽⁹⁾。それを受け、国内でも総務省情報通信審議会電波利用環境委員会において、国際的な寄与をすべく積極的な活動が始まっている。

電波の有効利用という側面で国際的な周波数管理を行っているのは国際電気通信連合 (ITU) である。2013 年以降ワイヤレス給電も、その下部のアジア地域を統括するアジア太平洋電気通信共同体 (APT) の中の APT 無線通信グループ (AWG) での検討を含めてテ-

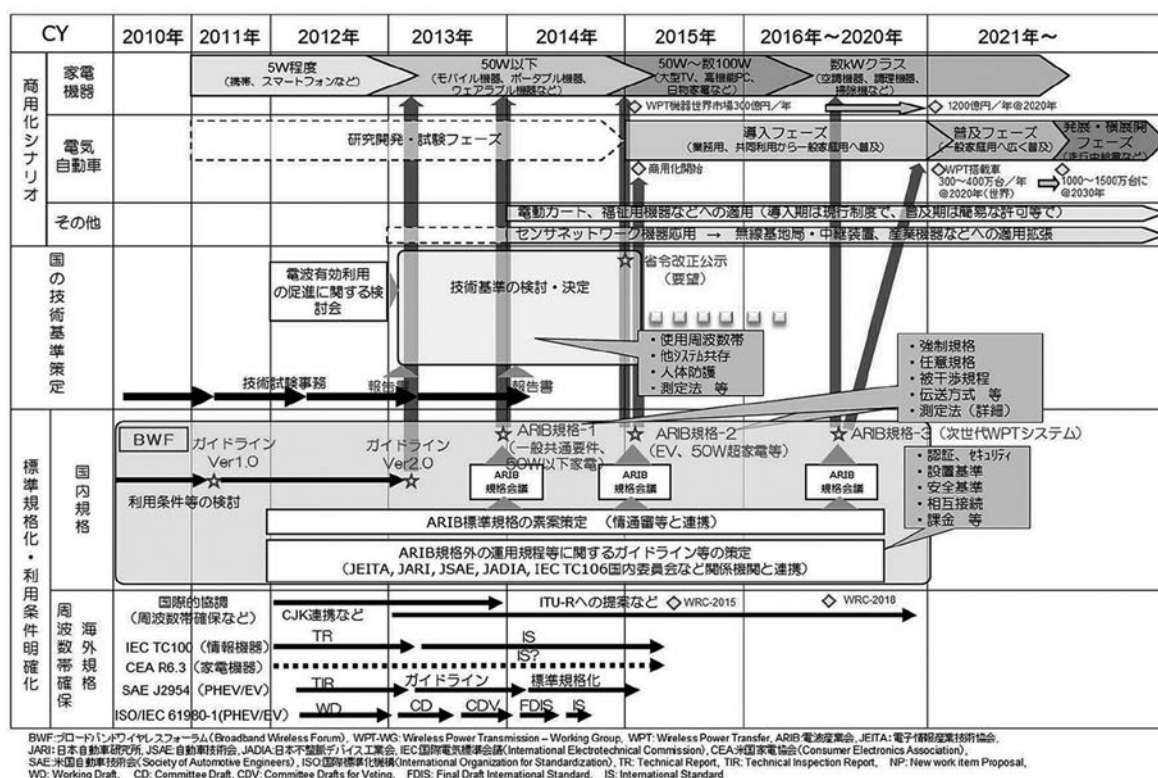
マとして取り上げられるようになった。

ワイヤレス給電はひとり EV を対象にするわけではなく、家電、情報機器等、生活の多くのシーンでの利用が期待されている。そのため標準化に関わる機関の数も多くなり、それらの標準化機関の国際協調と連携が始まっている。

5. 今後の展開

ワイヤレス給電が夢の世界と考えられていた Tesla の時代から 110 年以上経ち、MIT のチームが磁気共鳴方式による 2 m の距離の給電可能性を示してから 7 年が経過した。e-mobility の中核を成す乗用車 EV/PHEV が市場に多く登場するようになって、ワイヤレス充電への期待が日・米・欧を中心に一気に加速している。

日本では総務省の実験用高周波利用設備の規制緩和が行われワイヤレス充電の実証試験が本格的に始まっている。欧州でも、ドイツ、



(出所：総務省「電波有効利用の促進に関する検討会」報告書別添3、2012年12月25日)

図 14 ワイヤレス電力伝送技術の実用化に向けたロードマップ

イギリス以外の諸国にまでこの技術の実用化を目指す動きが巻き起こっている。一方で、このワイヤレス充電（電力伝送）技術が多くの既存の技術分野にわたるため、用語の問題ひとつ解決するのも容易ではない。

日本のワイヤレス給電に最初から関わっている「ブロードバンドワイヤレスフォーラム」(BWF) は、ガイドラインを発表するとともに2012年に総務省の電波有効利用の促進に関する検討会にロードマップを作成、提供した(図14参照)⁽¹⁰⁾ ⁽¹¹⁾。

このロードマップは、2020年までの技術の産業化と規律の整備のための標準化を整理したものであり、おおむねこのロードマップに沿った展開となっている。

ワイヤレス給電は、産・官・学の連携が極めて密であり、近年にない日本発の産業化の大きな可能性を秘めている。本格的な実用化のためには今後の数年間が極めて重要になると考えるので、関係者、機関が総力を挙げて取り組み続けることを期待している⁽¹²⁾。

参考文献

- (1) 寺谷達夫：日本のEV/PHEV開発と充電インフラの現状と将来～OECD WORKSHOP出席報告と欧州動向～, TECHNICAL REPORT OF IEICE WPT2013-06 (2013-06)
- (2) UNECE EV Report; Electric Vehicle Regulatory Reference Guide [DRAFT 3], E GRPE-68-13; Jan 2014)
- (3) 高橋俊輔：実証評価が進む公共交通用ワイヤレス給電, 特集ワイヤレス給電技術, OHM2013年2月号
- (4) Yokoi et al; Development of kW Class Wireless Power Transmission System for EV Using Magnetic resonant Method, 1053 EVTeC' 2011, May 2011
- (5) Fast inCharge : 1st News letter, May 24, 2013; 2nd News letter, Jan.28, 2014
- (6) KAIST News : KAIST's wireless Online Electric Vehicle (OLEV) runs inner city roads, 2013-8-7
- (7) ZTE : Wireless Power Charging is ready for cars now : UNECE EVE-07-09e
- (8) 横井, 居村, 高橋：日本におけるワイヤレス給電技術動向と今後の展望, 自動車技術, 20124608, Vo.66, No. 9, 2012, 自動車技術会
- (9) 総務省：オタワ会議での審議結果, 第14回電波利用環境委員会資料
- (10) BWF：ワイヤレス電力伝送技術の利用に関するガイ

ドライン V2.0, 2013年6月

- (11) 庄木：国際標準化・規格化の最新動向, 特集ワイヤレス給電技術, OHM 2013年2月号
- (12) 日経エレクトロニクス ワイヤレス給電ビジネス, 2013年12月, 日経BP

[寄稿]

バイオマスエネルギー産業の現状と将来展望

澤 一 誠 (三菱商事(株) 地球環境・インフラ事業グループ)
CEO オフィス 環境エネルギー政策担当



1. はじめに

欧米起点の戦略産業として既に7兆円規模のグローバル市場が形成されたバイオマスエネルギー産業に対する日本の取組みは極めて限定的で注目度も低い。本稿では、今後日本が取るべき政策の方向性として、アジア・大洋州地域で開発輸入＋地産地消型のバイオマス・リファイナリー産業を官民連携で展開することについて提唱する。

2. 世界のバイオマスエネルギーの動向

まず、国際エネルギー機関（IEA）“World Energy Outlook 2012”から輸送用バイオ燃料の実績・将来予測を引用する。道路輸送用燃料の2010年実績は18.5億toe（石油換算トン）。これが2035年には1.3倍の24.5億toe。一方、バ

イオ燃料の2010年実績は5900万toe。これが2035年には3.5倍の2億400万toeになる。また、アジアの2010年実績は300万toeだが、2035年には12倍の3600万toeとなり世界の18%を占めるまで成長すると予想されている。なお、この数字は、米国シェールガス・オイル革命の要素も織り込んだ予測なので、2011年版よりも若干下方修正されたが、その影響は限定的である。さらに、2011年4月20日発表のIEA「輸送用バイオ燃料ロードマップ」(Technology Roadmaps - biofuels for Transport)によれば2050年には2010年比12.7倍の7.5億toeに達する。この数字と“Outlook 2012”の2010年、2035年の数字を一覧表にしたのが表1だが、市場規模を金額イメージで示すと2010年には既に7兆円産業になっており、これが2035年には24兆円、さらに2050年には80兆円規模の産業になることになる。2050年の内訳は、

表1 世界の輸送用バイオ燃料の需要予測

年	2010	2035	2050
石油換算量	5,900万toe	2億400万toe (3.5倍)	7億5,000万toe (12.7倍)
平均混合率	3%相当	8%相当	27%相当
金額イメージ	7兆円	24兆円	80兆円

(出所：2050年分は『IEA 輸送用バイオ燃料ロードマップ』, 2011.4.20
2010年、2035年分は“IEA World Energy Outlook 2012”)

表2 2050年の輸送用バイオ燃料の内訳

乗用車用（ガソリン代替）：エタノール	2億7,000万toe (37%)
トラック・重機用（ディーゼル代替）：BDF	2億toe (26%)
航空機用（ケロシン代替）：Bio SPK	2億toe (26%)
船舶用（重油代替）：BDF	8,000万toe (11%)
合計	7億5,000万toe

(出所：『IEA 輸送用バイオ燃料ロードマップ』, 2011.4.20)

表2に示すように、エタノール2.7億toe（全体の37%）、BDF 2億toe（同26%）に加え、現時点で未導入の航空機用2億toe（同26%）、船舶用8,000万toe（同11%）が導入されると予想されている。

2010年にバイオ燃料の平均混合率は3%を超えた。Shell社、BP社等オイルメジャーは、かねてから3%を超えたらエネルギーポートフォリオの一角と見なすという見解を示していたので、これを機にブラジルで大型投資を実行した。Shell社はエタノール最大手COSAN社と合弁会社Raizen社を設立し220万kl/年の製造会社を傘下に収め、5年後500万kl/年まで拡大する旨を発表。一方、BP社は180万kl/年のエタノール製造会社CNAA社を買収した。また、既に米国で先行するADM社、Bunge社等穀物メジャーもブラジルに進出し、正に世界のビッグプレイヤーが出揃った。

この成長の原動力は、政策的に導入され、国の支援に基づき戦略産業として育成されるバイ

オマスエネルギーの特性である。すなわち、図1に示すように、バイオマスエネルギー導入の背景は3つあるが、まず「エネルギー政策」ではエネルギー源多様化の観点からエネルギーポートフォリオの一角を占める存在に位置付けられ、次に「農業政策」では農業を起点とした複合産業の創造という意味で6次産業化を実践しており、さらに「環境政策」では二酸化炭素(CO₂)を削減するために確実かつ有効な手段として位置付けられているからである。

バイオマスエネルギーはこの3つの政策に基づき導入され、さらに産業政策として雇用創出を目的に推進が図られ、欧米起点の新たな戦略的グローバル産業として世界中に普及している。

3. 米国のエタノール燃料産業

図2に示すように、米国は2006年以降ブラジルを抜き世界一となり、2011年には140億

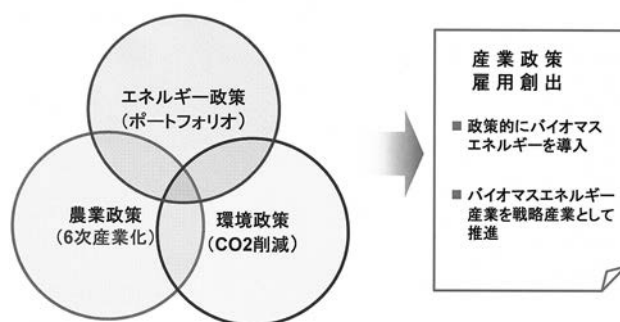


図1 バイオマスエネルギーの政策導入・戦略産業化

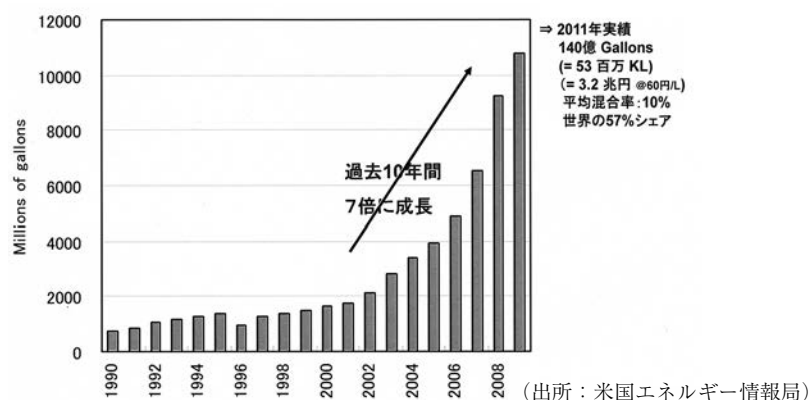


図2 米国のエタノール製造量の推移

ガロン (= 5,300 万kl) と世界の 57% のシェアを占め、平均混合率は 10% に達した。米国のエタノールは過去 10 年間で 7 倍に成長したが、この推進役は米環境保護庁 (EPA) で、2004 年に大気汚染対策として RFS (Renewable Fuel Standard) を法制化、2007 年に改訂版 RFS2 で非常に意欲的なバイオ燃料使用義務量を設定。これによってエタノールの導入は飛躍的な伸びを示した。

図 3 に示すように、米国のエタノールは一大産業で 2011 年には 218 工場で 5,300 万kl を製造し 3 兆円を超える規模の産業に発展した。この産業構造として 2 つのトライアングルが有機的に機能したと考える。まず需要サイドでは「政府」主導で、「石油業界」に RFS、「自動車業界」に CAFE (自動車燃費基準) を適用し、政策誘導により強制的にエタノール燃

料の市場を作った。一方、供給サイドは「トウモロコシ農家」が主体で、「プラントエンジニアリング会社」が技術面を、「銀行・Fund・VC」が資金面を担い、正に 6 次産業的にエタノール製造事業者として新規参入を図った。需要側の石油会社は RFS2 義務量達成のため再生可能エネルギークレジット制度 (RIN) に基づき製造事業者からエタノールを購入。係るスキームが有効に作用し需要見合いで供給体制整備が行われ新産業として急成長した。

RFS2 バイオ燃料使用義務量ではトウモロコシ由来のエタノール使用上限を 150 億ガロン (5,700 万kl) と定め、それを超える義務量はセルロース由来エタノール等先進バイオ燃料の導入で賄うとしている。図 4 に示すように、2015 年にはトウモロコシエタノール上限の 150 億ガロンに到達し、先進バイオ燃

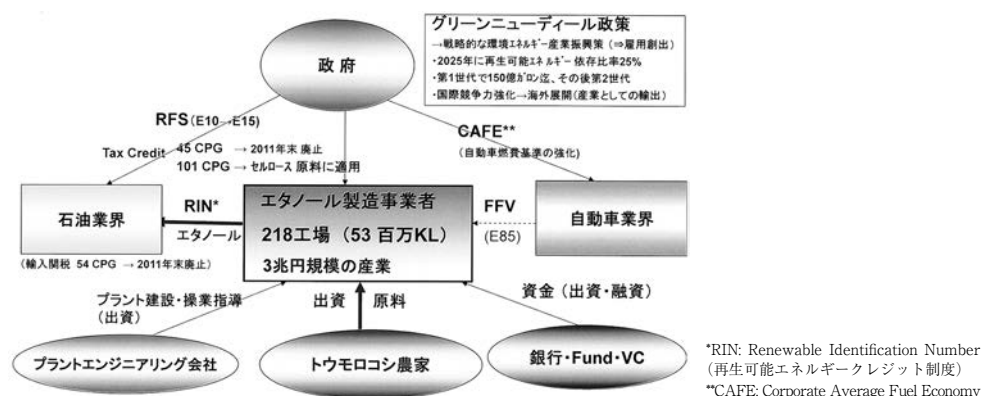


図 3 米国のエタノール燃料産業構造

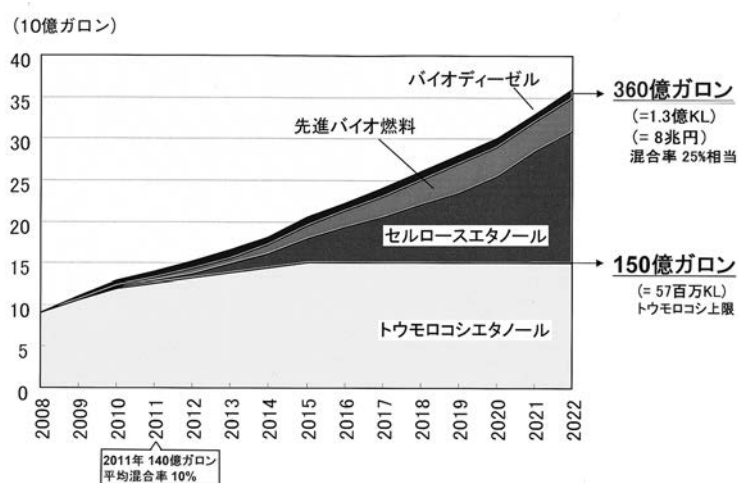


図 4 米国 RFS2 バイオ燃料導入計画（使用義務量）

料 55 億ガロンと併せ 205 億ガロンとする計画で、さらに 2022 年には先進バイオ燃料導入を 210 億ガロンまで拡大し、全体で 360 億ガロンの導入を図る計画となっている。なお、先進バイオ燃料は LCA ベースで 50% 以上 CO₂ 削減可能なものと定義され、サトウキビ由来エタノールや BDF (Bio Diesel Fuel) も含めることとなっている。セルロースエタノールは未だ商業生産技術が確立されておらず、2010 年以降設定の当該使用義務量は未達の状況だが、EPA は 2013 年分までは総使用義務量の見直しは行わずに、一応総使用義務量は達成したという体裁を整えるために辻褃合わせ的な運用を行っている。具体的には、2011 年はセルロースエタノール使用義務量 2.5 億ガロン分をトウモロコシエタノール増産分で補ない、総使用量目標 139.5 億ガロンを上回る 140 億ガロンの実績を計上した。2012 年は、干ばつによるトウモロコシの不作と、2012 年からガソリン税免除 45 セント / ガロンと輸入関税免除 54 セント / ガロンのインセンティブ制度廃止による影響から、エタノールの生産量は初めて前年比割れの 133 億ガロン (義務量は 132 億ガロン) となったが、セルロース分 5 億ガロンは BDF 追加導入と RIN 繰越し分充当で賄うことで 152 億ガロンの総使用義務量を達成した。2013 年は、EPA が昨年 8 月 7 日に声明を出してセルロース分の使用義務量 10 億ガロンを 600 万ガロンに下方修正したが、165.5 億ガロンの総使用義務量は据え置く

旨を発表。BDF と RIN に加えて 2013 年分の適用期間を 2014 年 6 月 30 日まで延長して達成を図る予定。なお、2014 年分の RFS2 使用義務量は 2014 年 6 月 30 日までに見直すことを同時に発表した。

4. バイオマスエネルギーに対する欧米と日本の取組みの違い

日本は、バイオマスエネルギー分野において現時点では欧米に比べて後発ポジションにある。その欧米と日本の比較を表 3 に示す。まず、エネルギー政策では、欧米はエネルギー安全保障の意味合いが強く、バイオマスエネルギーは再生可能エネルギーの中でメジャーな存在で、エネルギーポートフォリオの一角を占める形で大規模な導入目標が設定され産業規模の市場が形成されている。一方、日本でも 3.11 以降電力分野で再生可能エネルギーに注目は集まっているが、バイオマスエネルギーへの注目度は極めて低くマイナーな存在である。次に、農業政策では、欧米では農産物の新たな利用用途として市場拡大を図る志向が強く、農業事業者のエネルギー産業への異業種参入による新産業創出という 6 次産業化が実現した。特に米国ではトウモロコシ農家の収入アップと政府補助金の大幅削減が結果として達成された。それに比べて、日本ではプラントメーカー等による技術開発や実証事業の域を出ない取組みである。また、環境

表 3 バイオマスエネルギーに対する欧米と日本の取組みの違い

	欧米	日本
エネルギー政策	●エネルギー安全保障政策として推進 ●エネルギーポートフォリオの一角 ●再生可能エネルギーの中のメジャーな存在 ●革新的導入目標 ⇒ 産業レベルの大規模市場 ●大規模導入による展開	●再生可能エネルギーの中の劣等的な存在 ●限定的な導入目標 ⇒ 市場規模が小さい ●小規模導入による展開
農業政策	●農作物の新たな利用用途 ⇒ 市場の拡大 ●新産業創出 (6 次産業化) ●農家の収入アップ、農業補助金の削減	●プラントメーカー等による技術開発案件 ●自治体等による技術実証事業
環境政策	●最も確実で効果的な大規模 CO₂ 削減手段	●CO₂ の削減手段として位置付けられていない ●「食との競合」や「生物多様性」等の負の側面が強調されている
産業政策	●戦略産業として積極的に推進 ●新たな雇用機会の創出 ●持続可能性基準の設定 ⇒ 国際競争力強化策 ●補助金・税制優遇 ⇒ 義務化・市場価格転化	●国内で補助事業として推進 (技術開発や小規模実証が主流)

政策では、欧米では効果的な CO₂ 削減手段とされているが、日本ではその意識は低く、食との競合や生物多様性等負の側面が必要以上に強調されるきらいがある。産業政策面では、欧米では戦略産業と位置付けられているので日本とは考え方に根本的な違いがある。日本でも今後意識転換が図られ、新産業創造や雇用創出の視点での戦略的アプローチが行われることが望まれる。

5. 日本のエネルギー事情と日本政府のバイオマスエネルギー関連政策

2012 年度版エネルギー白書（2010 年度統計ベース）によれば、日本はエネルギー自給率が 4.4% と極端に低く、一次エネルギーにおける化石燃料依存度が 81%、石油依存度が 41%、石油の中東依存度が 87% と極端に高く、さらにはエネルギー起源の CO₂ が 90% 弱と高い（世界平均は 62%）という我が国固有の問題を抱えている。また、世界的な資源ナショナリズムの台頭と中国等消費国間の資源獲得競争の激化によって深刻化するエネルギー安全保障上の問題、さらには 3.11 以降原子力発電代替の LNG 等火力発電用燃料輸入急増の問題から、これを少しでも改善する対策として、再生可能エネルギー、とりわけバイオマスエネルギーを加速度的に導入する必要がある。

次に、日本政府のバイオマスエネルギーに関連する象徴的な 3 つの政策を以下に列挙する。

（1）エネルギー供給構造高度化法（2011 年 4 月施行、経産省）

エネルギー供給構造高度化法（以下「高度化法」）によってエタノール導入が義務化された。2011 ～ 17 年度の導入義務量は表 4 の通

りで、上が石油換算義務量、下がエタノール換算量である。

米国、ブラジル等諸外国ではエタノールをガソリンに直接混合する形式（E10、E15、E25、E85 等）だが、日本では、石油会社指導に基づき ETBE（ガソリンのオクタン価向上剤 MTBE の代替品。メタノールの代りにエタノールを、イソブテンと約 4：6 の比率で混合した添加剤）をガソリンに混入する形式を取っており、これがバイオガソリンの名称で販売されている。2013 年度は、全ガソリンの 1 割強の 600 万 kℓ にエタノールを 35 万 kℓ（ETBE 84 万 kℓ）混入したバイオガソリンが販売され、義務量が達成された。なお、2010 年版エネルギー基本計画では 2020 年のエタノール導入目標をガソリンの 3 % 以上と定めたが、高度化法の 2017 年度義務量 50 万 kℓ は、ガソリンが現在の 4 分の 3 の 4,000 万 kℓ に減ったと仮定しても、導入比率は 1.25% 相当にしかない。

高度化法運用上の判断基準として設定された持続可能性基準では、CO₂ 削減量を LCA ベースで 50% 以上減らすことが条件とされている。また、国産・準国産（アジア等からの開発輸入）の比率を半分以上にする目標や、食料競合や生物多様性について国がモニタリング・評価することが規定された（この検討委員会には筆者も参加した）。

なお、エタノールの調達は石油会社 8 社共同出資の一元的調達窓口 JBSL（バイオマス燃料供給有限責任事業組合）が行なっている。国内のエタノール製造事業者は、図 5 に示すように、北海道の北海道バイオエタノール（三菱商事出資先）とオエノンホールディングス、新潟県の JA 全農の 3 社で何れも農水省補助事業として実施しているが、国内原料調達の制約から生産能力は合計でも年間 3.1 万 kℓ に

表 4 エネルギー供給構造高度化法におけるバイオエタノールの導入義務量

年 度	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
石油換算量（万 kℓ）	21	21	26	32	38	44	50
（参考） エタノール換算（万 kℓ）	(35)	(35)	(43)	(53)	(63)	(73)	(83)

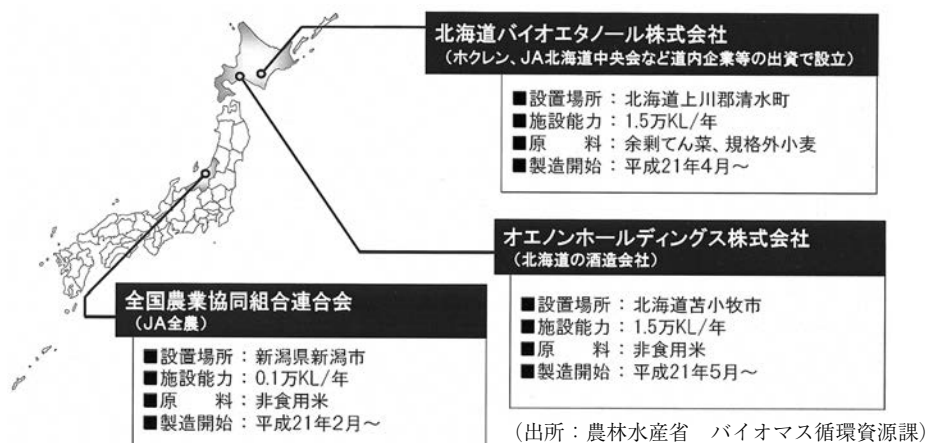


図5 日本のバイオエタノール製造の取組み（農水省実証事業）

とどまる。従い、JBSL はエタノールの大半をブラジルから輸入しており、ETBE 転換も国内製造設備で賄えない分は米国で転換した上で ETBE として輸入している。

（2）バイオマス活用推進基本計画（2010 年 12 月閣議決定，農水省）

農水省は 2020 年に 5,000 億円規模のバイオマス産業創出を掲げた「バイオマス活用推進基本計画」を 2010 年 12 月閣議決定。2012 年度，7 府省横断組織「バイオマス活用推進会議」付属委員会「バイオマス事業化戦略検討チーム」（筆者も参加）で議論した結果を「バイオマス事業化戦略」として 2012 年 9 月に発表し，バイオマス利用技術ロードマップで事業化推進分野・スケジュールを特定し，その事業化推進策として「バイオマス産業都市構想」が提示した。

（3）再生可能エネルギー固定価格買取制度（以下「FIT」）（2012 年 7 月 1 日，経産省）

経産省資源エネルギー庁（以下「エネ庁」）は 3.11 以降の再生可能エネルギーの導入促進を目的にドイツ等欧州先行事例を参考に制度設計した FIT を 2012 年 7 月 1 日導入した。この制度は，電力会社がエネ庁認定の再エネ発電事業者から FIT 買取価格で電気を 20 年間固定で買取るものである。買取価格は事業者が事業採算を確保できるレベルで算定されており，導入実績に基づき毎年見直されるが，当初 3 年間は特別導入促進期間として優遇措置がとられる方針である。

バイオマスの買取価格は，表 5 の通り 5 種類で，内訳は直接燃焼発電 4 種類とガス化発電に分かれる。ガス化発電はメタン発酵発電のみが対象で 39 円 /kWh（税抜き）。その他

表 5 バイオマス発電の FIT 買取価格

電源		バイオマス						
買取区分		ガス化 (下水汚泥)	ガス化 (家畜糞尿)	固形燃料燃焼 (未利用木材)	固形燃料燃焼 (一般木材)	固形燃料燃焼 (一般廃棄物)	固形燃料燃焼 (下水汚泥)	固形燃料燃焼 (リサイクル木材)
費用	建設費	392万円/kW		41万円/kW	41万円/kW	31万円/kW		35万円/kW
	運転維持費 (1年当り)	18.4万円/kW		2.7万円/kW	2.7万円/kW	2.2万円/kW		2.7万円/kW
IRR		税前1%		税前8%	税前4%	税前4%		税前4%
買取価格 1kWh当り	区分	【メタン発酵ガス化 バイオマス】		【未利用木材】	【一般木材(含 パーム椰子殻)	【廃棄物系(木質以外) バイオマス】		【リサイクル木材】
	税込	40.95円		33.60円	25.20円	17.85円		13.65円
	税抜	39円		32円	24円	17円		13円
買取期間		20年						

4 種類中木質系燃料の 3 種類は未利用木材 32 円 /kWh (同), 一般木材 (輸入木材やパーム 種子の殻 PKS 等も含む) 24 円 /kWh (同), 建設廃材等リサイクル木材 13 円 /kWh (同)。廃棄物系は 17 円 /kWh (同) である。

6. FIT によるバイオマス発電の状況

FIT による再生可能エネルギー導入目標値の正式公表はないので、2012 年 9 月 14 日公表の「革新的エネルギー・環境計画」と「再生可能エネルギー導入 15 シナリオ」から引用した数字に基づく 2030 年度導入目標と 2010 年度実績を比較したものを表 6 に示す。2010 年度総発電量 1.1 兆 kWh を 2030 年度に 1 割減の 1 兆 kWh にする前提。水力を除く再生可能エネルギー総電力量の 2010 年度実績 250 億 kWh を 2030 年に 8 倍の 1,900 億 kWh にするという目標で、これに水力を加えて 3,000 億 kWh とし

再生可能エネルギー発電比率を 30% とする目標である。これは民主党政権時の計画であって見直される可能性はあるが、原発比率に拘わらず「再生可能エネルギーの最大限の導入を図る」という政府方針に変わりはないので、これを前提に考えることとする。この内訳は、太陽光を 17.5 倍 (666 億 kWh) に、風力を 15.4 倍 (663 億 kWh) にするという可也難しい計画となっており、この 2 つで 7 割を賄う予定だが、これに比べバイオマスは控えめで 2.3 倍の 328 億 kWh とする計画で貢献度は 17% である。また、設備利用率で見ると、太陽光が 12%, 風力が 20%, バイオマスが 80% にて、設備導入容量見合いの発電電力量が低くなる特徴がある。係る状況から、太陽光、風力を最大限導入するべきではあるが、現在あまり注目されていないバイオマスの導入促進を積極的に図り電力量を稼ぐ政策が今後検討されるべきと考える。

表 7 は昨年 10 月末時点の再生可能エネルギー

表 6 電源別の再生可能エネルギーの導入目標

	2010年	2030年	倍率
① 総合発電電力量	11,000億kWh	10,000億kWh	▲10%
水力を除く再生可能エネルギー総電力量	250億kWh[2.3%] (900万kW)	1,900億kWh[19%] (10,800万kW)	8倍 (12倍)
② 内訳			
太陽光[設備利用率:12%]	38億kWh (400万kW)	666億kWh[35%] (6,000万kW)	17.5倍
風力[設備利用率:20%]	43億kWh (250万kW)	663億kWh[35%] (4,000万kW)	15.4倍
バイオマス[設備利用率:80%]	141億kWh (210万kW)	328億kWh[17%] (500万kW)	2.3倍
その他[設備利用率:80%]	28億kWh (40万kW)	243億kWh[13%] (300万kW)	8.7倍

(出所: ①総量:『革新的エネルギー・環境戦略』, エネルギー・環境会議, 平成 24 年 9 月 14 日)
②内訳:『再生可能エネルギー導入 15 シナリオ』他

表 7 再生可能エネルギー発電設備導入・FIT 認定状況 (平成 25 年 10 月末)

(単位:万kW)

設備導入量(運転を開始したもの)								設備認定容量
	固定価格買取制度導入前	固定価格買取制度導入後						固定価格買取制度導入後 (平成24年7月～ 平成25年7月末)
	平成24年6月末までの 累積導入量	平成24年度 (7～3月末)	平成25年度(4～10月末)					
			4～7月末	8月分	9月分	10月分		
太陽光(住宅)	約470	96.9	87.0	55.2	13.0	10.0	8.7	204.2
太陽光(非住宅)	約90	70.4	312.3	169.1	44.5	41.9	56.8	2,249.0
風力	約260	6.3	0.7	0.3	0	0.4	0	83.7
中小水力	約960	0.2	0.3	0.1	0	0.1	0.1	12.6
バイオマス	約230	3.0	8.2	7.1	0.5	0	0.6	71.0
地熱	約50	0.1	0	0	0	0	0	0.5
合 計	約2,060	176.9	408.3	231.7	58.0	52.4	66.2	52.4
		585.2						2,621.1

表 8 2030 年目標対比 FIT 発電量達成状況（平成 25 年 10 月末）

	2030年の目標	FIT導入以前 (2012.7時点)	FIT導入後の 発電量目標	FIT発電量 [設備認定]	構成比 [認定]	達成率 [認定]
太陽光 (利用率:12%)	666億kWh (6,000万kW)	62億kWh (560万kW)	604億kWh (5,440万kW)	54.4億kWh (566.6万kW) [237.5億kWh (2,153.2万kW)]	86% (97%) [78% (94%)]	9% [39%]
風力 (利用率:20%)	663億kWh (4,000万kW)	43億kWh (260万kW)	620億kWh (3,740万kW)	1.1億kWh (7.0万kW) [13.4億kWh (83.7万kW)]	2% (1%) [4% (3%)]	0.2% [2%]
バイオマス (利用率:80%)	328億kWh (500万kW)	151億kWh (230万kW)	177億kWh (270万kW)	7.2億kWh (11.2万kW) [45.4億kWh (71万kW)]	11% (2%) [15% (3%)]	4% [24%]
地熱/小水力 (利用率:80%)	243億kWh (300万kW)	57億kWh (70万kW)	186億kWh (230万kW)	0.3億kWh (0.5万kW) [8億kWh (12.6万kW)]	1% [3%]	0.2% [4%]
再生可能エネ ルギー合計 (除く、水力)	1,900億kWh (1億800万kW)	313億kWh (1,120万kW)	1,587億kWh (9,680万kW)	63億kWh (585.3万kW) [302.3億kWh (2,620.5万kW)]	100%	4.0% [19%]

ギー発電設備導入量（FIT 前・後）と設備認定容量のエネルギー発表で、表 8 はこれを発電電力量に換算して表 6 の 2030 年度目標と対比したものである。これで明らかなのは、設備導入容量の 97%、認定ベースでも 94% が太陽光に偏っていることである。しかしながら、これでも太陽光の達成率は 9% で、認定ベースでは 39% ではあるが設備認定のみ受けて着工しない事業者が多く認定取り消しが検討されている状況である。設備利用率の低い太陽光偏重の図式から全体の達成率は 4% にとどまり、2030 年度の目標達成のためには発電電力量をさらに 1,524 億 kWh (= 1,587 - 63 億 kWh) を上積みする必要がある。一方、バイオマスについては達成率がまだ 4%、認定ベースで 24% となっている状況だが、これらは全てバイオマスの専焼発電である。今後発電量が稼げる石炭火力発電所でのバイオマス混焼を積極的に推進して発電電力量を稼ぐ方が有効と考えられ、これも加味すればバイオマス発電の目標数字を上方修正することは可能と考える。

7. バイオマス発電、とりわけ混焼発電の推進について

(1) バイオマス発電のメリットと課題

バイオマス発電のメリットは、まず設備利用率の高い安定電源であること。また、火力

発電同様、発電量を主体的にコントロールできるので、太陽光、風力発電のバックアップ電源にもなり得る。さらに、太陽光、風力と違い、燃料が輸送できるので、必ずしも原料立地で発電を行う必要はない。一方、課題は、バイオマスの国内調達には限りがあり容易でないことである。

(2) バイオマス混焼発電のメリットと課題

次にバイオマス混焼発電のメリットは、バイオマス専焼発電ではバイオマス 100% で発電可能な流動床ボイラー等の新規設置が必要だが、混焼発電は既設の微粉炭ボイラーで石炭を一部バイオマスで代替する燃料転換だけで良く、原則新規設備投資は不要である。この微粉炭ボイラーは発電効率が 40 ～ 45% にて、流動床ボイラーの 25 ～ 30% より 15% 程度高い。ただし、以下 2 つの課題があるので、これらを解決しない限り普及は限定的なものとなる。

① 既設ボイラーの場合、石炭と混焼したバイオマス分のみ FIT 買取価格で売電できない。

電気事業法の「1 事業所 1 受電点」規制によって受給契約単位は 1 需要場所につき 1 契約種別にて、引き込み線・計量装置は 1 回線しか認められない。このためバイオマス分のみを FIT 買取価格で売電することができず（売電価格はバイオマスと石炭の平均値となり）、自家発電

用に微粉炭ボイラーを保有する工場はFITによる売電事業に進出することができない。ボイラーを新設する事業者には特例措置として回線の追加が認められているが、既設ボイラーを活用する場合には認められていないので、「1事業所1受電点」規制の緩和が行われるか、RPS法の運用のようにバイオマス比率を規定して当該分をFIT適用によって売電することを認める方向での制度改革が必要である。

② 木質チップ・ペレットの微粉炭ボイラーでの石炭との混焼率上限はカロリー比3%。

これは粉化しづらい木質チップ・ペレットを微粉炭ボイラーのミルで石炭と混合粉碎可能な上限として規定された基準である。欧州のようにバイオマス混焼を前提にバイオマス専用ミルを備えた微粉炭ボイラーを導入すれば5～10%程度の混焼は可能だが、カロリー低下によるボイラー効率低下を招き10%以上の混焼は現実的ではない。そこでこの混焼率大幅アップのために後述するTorrefaction技術の開発が行われており、この早期商業化への期待は大きい。

8. 政策面の今後の検討課題と方向性

2010年版エネルギー基本計画では一次エネルギーに占める再生可能エネルギーの割合を2020年10%、2030年13%にする目標が掲げられている。これは欧州連合(EU)の2020年20%、米国の2025年25%の目標と比べれば低い目標だが、少なくともこの目標は達成する必要があると思う。

目標達成のための方法論としては、上述のFITによる電力部門での再生可能エネルギー電力導入をバイオマスも含めた形でさらに積極推進することが急務だが、再生可能エネルギー導入総量を大幅に増やす方策として輸送用バイオ燃料の導入促進が極めて有効と考える。今後、エタノールやBDFの本格的な導入促進、さらにバイオジェットの導入検討が必要と考えるが、そのためにはFITのように参入事業者の

リスク・リターンが見合う事業環境の整備と仕組み作りが不可欠と考える。

9. プロジェクトの適正評価手法について

バイオ燃料事業の推進可否につき様々な議論があるが、これには然るべき評価軸に基づき議論すべきと考える。その評価軸として、以下の通りエネルギー源としての7つの評価軸と、当該技術の成熟度と原料の供給余力の2つの視点を加味した多面的な総合評価を行うべきと考える。

- (1) 効率性：EPR (Energy Profit Ratio=投入エネルギーと出力の比率)、エネルギー密度
- (2) 利便性：貯蔵、輸送・移送、物流の利便性
- (3) 供給安定性：原料供給量、価格変動リスク
- (4) 安全性：操業リスク、危険物等
- (5) 経済性：LCC (ライフサイクルコスト) ベース、波及効果 (一次・二次) を含む経済効果
- (6) 環境性：LCA ベースでのCO₂削減、副産物や廃棄物の処理
- (7) 社会性：新規雇用創出効果、既存産業 (農業、林業等) に与えるインパクト

10. バイオ燃料産業のサプライチェーン

産業として考えるためには、図6に示す通りサプライチェーン全体を考慮する必要がある。

まず「販売」なくして「製造」はないので、「販売」が担保された上で「原料」調達を、最後に「製造」という順序でサプライチェーンを完備することが肝要である。「販売」するには市場があることが前提で、まずは規模感のある安定市場を作るところから始めるべきである。その次に、市場に見合った「原料」を必要な量・価格で安定調達できる環境が整った上で製造事業の立ち上げを検討するという順序である。製造事業は民間企業の範疇だが、安定的な市場創造や原料確保に関しては政府系機関の関与が必要と考える。即ち、市場ができて需要変動や市場価格変動のリスクがあまりにも大きいと民間では吸収しきれない

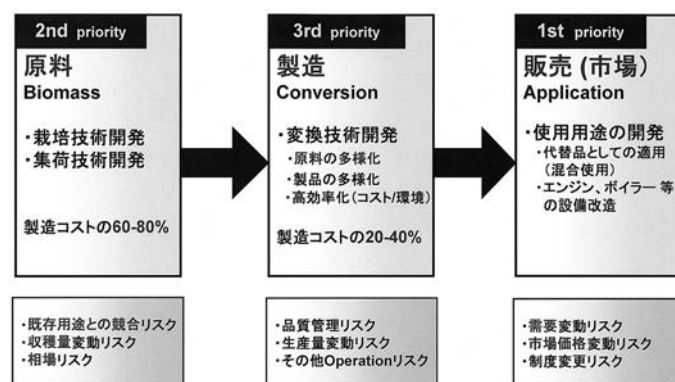


図6 バイオ燃料産業のサプライチェーン

ので、義務化導入による数量の確保とインセンティブを付与による市場価格安定化を図り、安定市場を確立する必要がある。

また、原料では、食との競合に代表される既存用途との競合リスクの回避が極めて重要で国や第三者機関による認証制度の導入等の対策が有効と考える。さらに、製品と原料の量的ミスマッチや相場の非連動性による事業採算変動リスクに対してリスク・リターンを見合う事業環境を整えるための仕組み作りが必要である。これらのリスク回避策が講じられグラウンド整備ができた段階で、民間企業がバイオ燃料製造事業に参入するという順序で取進めるべきである。技術開発では、バイオ燃料は現行技術で原料コストが製造コストの6～8割を占めるので、原料のコスト削減に繋がる栽培技術や集荷技術開発が重要な要素を占める。また、製造技術では原料の多様化に繋がる技術開発が重要である。なお、第1世代と第2世代の液体バイオ燃料に関しては、食との競合や土地の取り扱い等の問題は当然避けるべきだが、第1世代の穀物系燃料も、

ルール化することで一定量まで導入し、その延長線上で、第1世代原料の残渣を使って第2世代へ移行していくのが現実的な選択肢と考える。図7に示すように、第2世代技術の商業化タイムフレームを正しく把握した上で、第1世代と第2世代バイオ燃料に並行的に取組み、カスケード利用による共生を図り、技術開発の時間軸を念頭において第2第世代バイオ燃料の導入量を徐々に増やしていくというアプローチが必要と考える。

11. セルロースエタノール

図8にバイオエタノールの製造プロセスを示す。お酒とバイオエタノール製造の違いは、味を気にせず大量生産し、脱水してアルコール濃度を99.5%まで上げることである。サトウキビやテンサイは絞ると糖液になるので、そのまま糖液を発酵させる方法だが、トウモロコシ、麦、米、キャッサバ等デンプン系原料は発酵前にデンプンを酵素で糖に変換する糖化工程が加わる。農業残渣や木質原料・

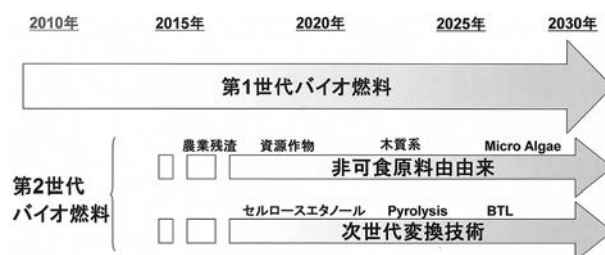


図7 第1世代と第2世代バイオ燃料の共生

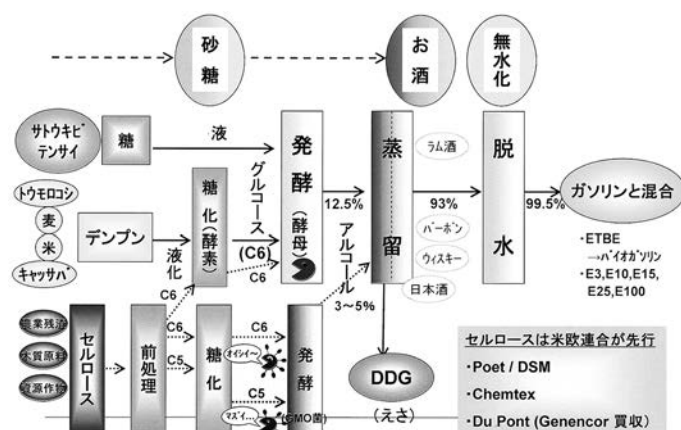


図8 バイオエタノール製造プロセス（セルロース併設）

資源作物等セルロース原料は、そのままでは酵素糖化できぬため、前処理することで酵素が働く環境を整えて糖化する。この糖化液を遺伝子組換え菌（GMO 菌）を使って発酵させてエタノールを作る。これでできたアルコールは濃度が薄いので（通常 12.5% に対し 3～5%）、蒸留・脱水工程でのエネルギー消費が大きくコストがかかる等の課題もある。

日本では経産省、農水省等の補助事業で、多数のグループがセルロースエタノールのプロセス開発に取り組んでいる。JX 等 6 社のバイオエタノール革新技術研究組合、王子製紙・新日鉄エンジニアリンググループ、神戸大学グループ等の取り組みが有名だが、どの取り組みもまだ商業化への道のは遠い。一方、米国は日本より先行しており近々年産 10 万kl 規模の商業生産プラントが稼働すると再三報道されるが生産は未だ確認されていない。エタノール最大手の POET 社は全米 26 カ所の工場で年産 400 万kl 以上トウモロコシエタノールを製造しているが、その残渣を原料とした製造技術確立して既存設備に追加設置（レトロフィット）するコンセプトで展開を目指している。また、プラントエンジニアリング会社の Chemtex や世界最大の化学品会社 DuPont も開発を進めており、これらは商業化が近いと言われているが、開発課題は未だに残っている模様である。

エネ庁は 2013 年 3～7 月「第 2 世代バイオ燃料の戦略検討会」（筆者も参加）を開催して

平成 26 年度以降の取り組み方針を議論した。技術開発動向が不明確な現状下、明確な戦略策定には至らなかったが、今後米国等とのベンチマークを正しく把握した上で、日本が商業展開を図るにあたって妥当なビジネスモデル（生産量、原料、製造場所、製造コスト、時期等）を想定して、日米協調の可能性も視野に入れて、製造プロセス開発戦略を策定するという方向性を確認した。

12. バイオジェット

ジェット燃料は電化できない分野なのでバイオ燃料が今後 CO₂ 対策の主流になると思われる。現在ジェット燃料は世界で約 3 億kl 使われ、内民生用は約 2.3 億kl だが、この 1% の 230 万kl をバイオジェットで代替することをボーイング社が提唱している。2012 年に EU が域内排出量取引制度（EU-ETS：Emission Trading System）で、EU に乗り入れるジェット機は一律 15% 以上 CO₂ 削減という規制を発表。その後中国等の反対や EU 経済状況悪化もあり見直しはされたが、航空業界ではバイオジェット導入機運が高まっている。ボーイング社は航空機の CO₂ 削減手段としてバイオジェットが最も有効との見解を示し熱心に取り組んでおり、バイオジェット燃料の米国 ASTM 品質規格作りを主導したり、航空会社に呼びかける等先導役を果たしている。バイ

オジェット燃料導入の検討のため、米国の海軍や空軍、ルフトハンザ等欧州航空会社、米国ユナイテッド航空（UA）、日本も日本航空（JAL）、全日本空輸（ANA）がデモフライトを実施。一部商業フライトでも使用された。このように需要先行型のバイオジェット燃料ではあるが、現時点では供給量と価格レベルに見合う原料調達が困難という問題から未だ商業化には至っていない。図9にバイオジェット燃料の製造方法を示す。元々のジェット燃料ケロシン製造技術の水素化・異性化・精製技術で植物油脂原料から製造することは技術的に可能である。植物油脂原料には、菜種油、大豆油、パーム油があり、これらは既にBDFに使用されているが食料との競合の危険性がある。その代りとして、カメリナ（菜種の一種）、カリナタ（マスタード）、ジャトロファ（南洋アブラギリ）等の油が使える可能性があると思うが、これらは未だ商業栽培されていないので、バイオジェットの導入数量、価格、時期見合いに栽培を行う形を取る必要がある。将来的には Micro Algae（微細藻類）原料の

活用も有り得るかもしれぬが、これには相当長い期間技術開発が必要と認識している。また、将来熱分解（Pyrolysis）やBTL（Biomass To Liquid = バイオマスのガス化・液化）の技術が商業的に成立つようになれば、セルロース系や廃棄物系バイオマスから作ることも有り得ると思う。何れにせよ、当面は植物油脂原料から数量を限定して製造する形で徐々に導入を図るのが現実的と思うが、その際に導入価格に関しては何らかのインセンティブ適用が必要である。

13. Torrefaction（半炭化）

固体バイオ燃料では、いわば次世代ペレット製造技術としてTorrefaction（半炭化）がある。図10に示すように、Torrefactionは通常のペレット製造工程の前処理技術で、バイオマス1を投入して、コーヒーの焙煎のように、無酸素状態、300℃以下で30分弱蒸し焼きにすると重量が約3割減の0.7となる。一方、エネルギーは1割減の0.9になるので、

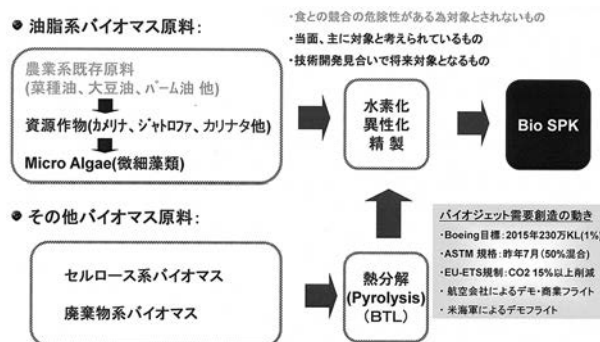


図9 バイオジェット燃料（Bio SPK）の製造方法

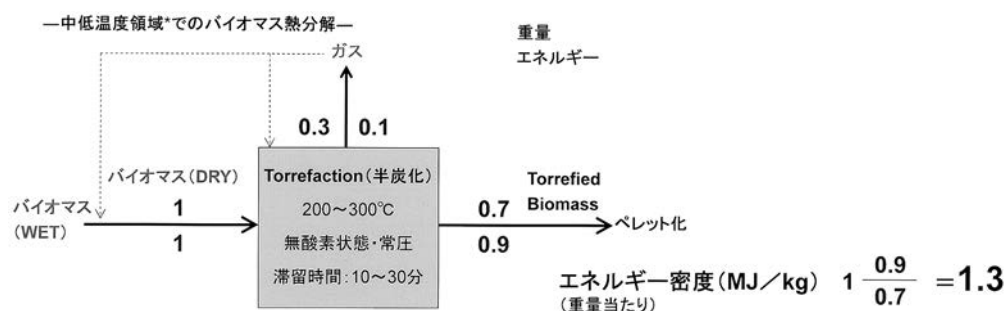


図10 Torrefaction（半炭化）とは？

エネルギー密度が約 1.3 倍に上がるという技術。また、このプロセスではオフガスを回すことで外部投入エネルギーをできるだけ使わずに Torrefaction 反応を進めるのが基本である。未だ商業生産には至っていないが、既に Torrefaction 後ペレット化した Torrefaction Pellet（以下「TP」）を 1 トン /h 連続生産できる Demo Plant の稼働を確認しているため、商業化は近いと考えられる。図 11 の通り、通常のペレット（左側）は水に浸すと膨潤するが TP は耐水性が担保される。表 9 に木質チップ、ペレットと TP との組成比較を、表 10 に TP のメリットを示す。通常ペレットに比べて重量当りエネルギー密度は 1.3 倍だが、かさ比重を考慮すると体積当りでは 1.5 倍になり、輸送・貯蔵効率は 1.5 倍となる。また、粉碎性が良好にて、通常カロリー比 3% が上限の微粉炭ボイラーでの混焼率が 30% 以上になることが実機試験で確認されており、理論的には 100% でも問題ないと言われている。

また、将来的には林業残渣のみならず、農業残渣も含めた原料の多様化の可能性もある。

なお、三菱商事は平成 22 年度の農水省「緑と水の環境技術革命プロジェクト事業」でサンプル製造を含めフィージビリティスタディのための様々な調査を行なった経緯がある。

図 12 に示すように、この TP 製造による複合プロジェクト展開のコンセプトとしては、森林資源ではチップから通常のペレットを作り、その残渣で TP を作る。一方、農業資源の糖・デンプンからはエタノールを作り、植物油で BDF を作るが、その残渣部分を活用して TP を作る。また、セルロースエタノールや BTL は将来的な技術なので、TP で原料確保を行ない、将来的に原料をシフトすることも考えられる。セルロース原料も将来取り合いになる可能性が想定されるので、まずアジアで TP 製造を行ない、原料を確保し、それに基づき展開を図る図式が考えられる。

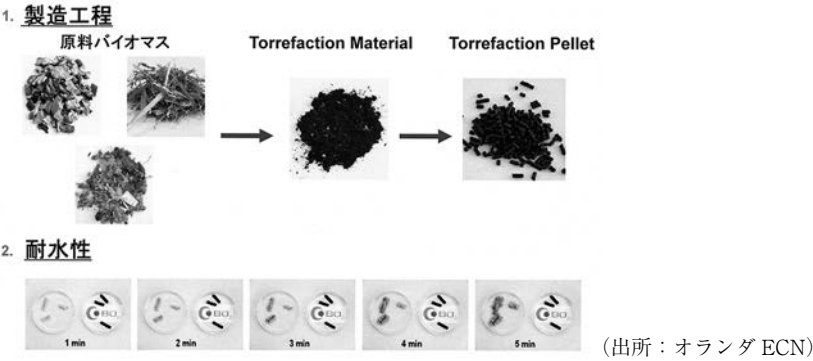


図 11 Torrefaction Pellet とは？

項目(単位)	木質チップ	木質ペレット	Torrefaction Pellet
含水率(%)	35%	10%	3%
重量当たりのエネルギー密度 LHV (MJ/kg)	10.5 (67%)	15.6 (100%)	19.9 (128%)
かさ比重(kg/m ³)	475	650	750
体積当たりのエネルギー かさ密度 (GJ/m ³)	5.0	10.1	14.9
輸送効率(比率%)	△ (50%)	○ (100%)	◎ (150%)
貯蔵・ハンドリング性	○	△	◎
粉碎性	△	○	◎

(出所：オランダ ECN)

表 9 Torrefaction Pellet の組成
(木質チップ、木質ペレットとの比較)

1. 良好な粉碎性	➡ 石炭混焼率大幅UP (3% ⇒ 30%以上)
2. 高エネルギー密度	➡ 輸送・貯蔵効率の向上 (20MJ/kg、15GJ/m ³) (木質チップの3倍、木質ペレットの1.5倍の効率)
3. 疎水性、非発酵性	➡ 耐水性、自然発火防止 石炭に準ずるハンドリング性 (新たな貯蔵設備への投資は原則不要)
4. 原料の多様化	➡ 林業残渣、農業残渣等未利用資源 混合バイオマス原料の使用 生産量拡大、コストダウン

表 10 Torrefaction Pellet のメリット

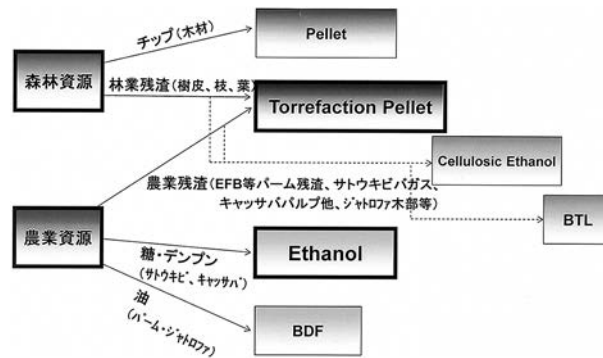


図 12 Torrefaction Pellet 製造における複合プロジェクトの展開

14. Asia-Pacific Biomass Community の構築に向けて

最後にバイオマスエネルギー産業を日本のイニシアティブでアジア・大洋州にて展開することを図 13, 図 14 に示す通り提案する。国内で最大限製造するべきではあるが、製造拠点を一部アジアに置く視点も必要と考え

る。サステナビリティを考慮してサプライチェーン全体を作り、かつリスク・リターンが見合うモデルを構築することが肝要である。マーケットは、まずは産業規模の安定消費市場を日本で作る必要があり、国内製造で不足する部分をアジアで製造して開発輸入を行なう。また、製造したものの半分程度は現地消費に充当して、「開発輸入 + 地産地消」型モデル



図 13 持続可能なバイオマス複合産業の展開

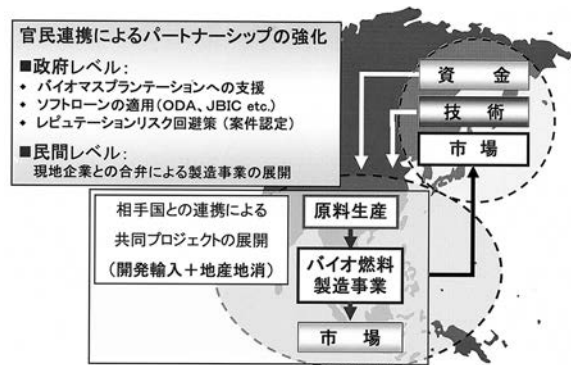


図 14 バイオマス産業でのアジア・大洋州との連携 (Asia-Pacific Biomass Community の形成)

ルでの展開を図る。マーケットの前提条件として数量と価格の安定があるが、安定販売を可能にするため、数量は長期契約、価格は原料リンク（コスト＋フィー）といった条件を整えることが必要で FIT 的なコンセプトでの政策運用が望ましい。安定市場が存在すれば、次に原料確保のためにバイオマスプランテーション的な展開を図ることも必要と考える。この出口はバイオ燃料だけではなく、食料用途は勿論、飼料・肥料等の用途、バイオマス発電用途、バイオケミカル製造用途等多面的な出口を用意して農業増産プロジェクトを進めるのが良い。日本は、元々アジアを中心に政府開発援助（ODA）で農業増産プロジェクトを推進してきたので、その延長線上で多面的な用途に適応した次世代農業・林業の考え方で供給力を高めることが必要と考える。これを契約栽培として現地企業と展開し、できた農業資源をカスケード的に残渣を含めて利用する枠組みを作ることが重要である。これら出口と入口が整えば、後は民間企業がバイオマスリファイナリー（バイオマスエネルギー／ケミカル／マテリアル製造複合産業）のコンセプトで、エタノール、ペレット、バイオケミカル・マテリアル、肥料・飼料、バイオマス発電、バイオジェット、BDF の製造を同一拠点で行ない複合的産業を起こしていく。そして技術開発状況見合いで、エタノールはセルロースへ、ペレットは TP に転換していくことが考えられる。

バイオマス産業でアジア・大洋州との連携を図るため“Asia-Pacific Biomass Community”の形成を官民連携の下で構築するべきと考える。日本からは技術と資金を供与し、現地の原料を使って現地企業との合弁でバイオ燃料製造事業を展開し、作った物は日本向けと現地で販売するという現地との win-win の関係を構築することを提案する。その際に、食料との競合や生物多様性の問題は当然回避しなくてはならないので、これは政府が案件を認定してレピュテーションリス

ク回避策を講ずるべきで、その方法としては原料栽培のバイオマスプランテーションを日本の ODA で行ない、さらに製造事業に JBIC ソフトローン等を適用することで政府が案件を認定するシステムを作れば良いと思う。

[寄稿]

光電極およびレドックス光触媒反応を用いた ソーラー水素製造

佐山 和弘 (独) 産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門
首席研究員 (兼務) 太陽光エネルギー変換グループ長



1. はじめに

エネルギー密度が低い太陽エネルギーを有効利用するためには、太陽電池以上に安価でかつ非常にシンプルな革新的技術開発が必要不可欠である。太陽エネルギー利用の数少ない選択肢の一つとして、植物の光合成と同じように光子を直接化学エネルギーに変換する人工光合成技術がある。この広義としては植物の光合成機構の全体または一部を模倣することであるが、必ずしもエネルギー問題の解決に直接つながらない研究も多い。より目的指向の言葉として人工光合成技術の中で、光触媒や光電極を用いたソーラー水素製造 (Solar Hydrogen) や「ソーラー燃料 (Solar fuel)」という言葉が使われはじめています。2012 年度には経済産業省の「未来開拓技術実現プロジェクト」において、「ソーラー水素」という言葉を用いて光触媒的な水分解水素製造の研究がスタートしている。文部科学省のプロジェクトにおいても、東日本大震災以降に人工光合成やソーラー水素の研究が活発になっている。ソーラー水素製造は太陽エネルギーによる水分解水素製造に特化し、かつクリーンで持続可能な水素社会実現のための技術に用いる。光合成機構は明反応と暗反応に大別されるが、光子によりエネルギー蓄積型 (自由エネルギー変化: $\Delta G > 0$) の化学反応を直接進行させているのは水から酸素を引き抜きながら高いエネルギー状態の還元体を生成する前段の明反応であり、水の分解反応が光合成の基本反応である。近年、地球温暖化

問題がクローズアップされ、さらに石油価格が上昇したことから、これらの研究が注目を集める状況になっている。米国では 2010 年からエネルギー省 (DOE) の Solar Innovation Hub の大型プロジェクトがスタートしている。韓国でも 2009 年から人工光合成の研究センターが創設されて研究が加速している。本報告では、粉末光触媒および多孔質光電極による水からのソーラー水素製造について、背景および最近の動向、さらに著者らの開発した Z スキーム型光触媒反応や光触媒 - 電解ハイブリッドシステムについて記載する。

2. 半導体を用いた様々な太陽光水素製造技術の比較

太陽光を利用する第一過程は光吸収材料による光子の吸収である。人工光合成の中の太陽光水素製造の研究において、光吸収材料としては半導体と色素に大別されるが、現状では前者の方が進んでいる。世界中で研究されてきた半導体を用いた様々な太陽光水素製造技術の研究は、歴史的には大きく光触媒系と光電極系の流れに分けられる。それぞれの原理を図 1 に示す。二酸化チタン (TiO_2) 光電極による水分解が日本で発明されて、その後光触媒水分解の概念が確立された。光吸収と電荷分離の原理は太陽電池と同じであるが、太陽エネルギーを直接水素という化学エネルギーに変換して長期貯蔵できる点でその全体概念はバイオマスに近い。図 2 に様々な水分解技術とその電位図を示す。光触媒の水分解

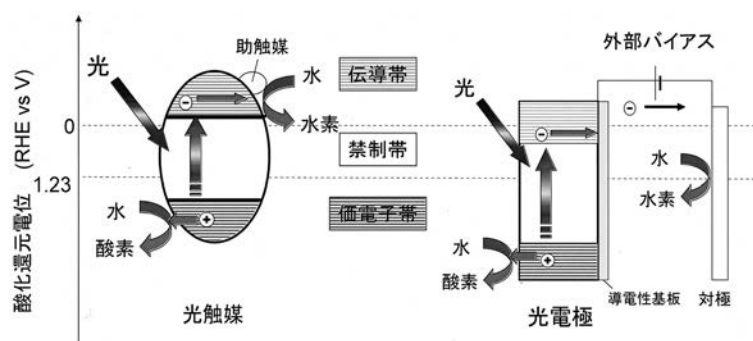


図1 半導体を用いた光触媒と光電極による水分解の原理

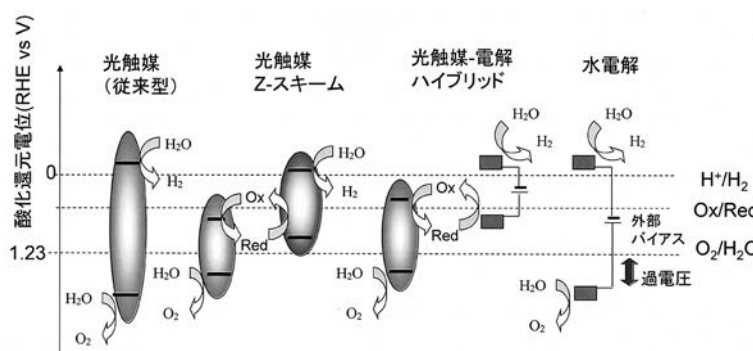


図2 様々な水分解技術とその電位図

では、水素発生側の伝導帯電位は0Vより負に、酸素発生側の価電子帯電位は1.23Vより正に位置する制約がある。通常の光電極は外部バイアスを用いる短所があるが、半導体の準位の制約が無くなり、電荷分離がバイアスで促進され、水素と酸素が分離発生できる長所がある。一方、光触媒は半導体粒子それぞれで反応が完結するので、電荷移動距離が短く、単純化できる長所を持つ。現在では光電極系と光触媒系は様々な形態に分化・発展している。光触媒系は一段光励起（従来型）、レドックス媒体を用いる二段光励起（Zスキーム型）、光触媒-電解ハイブリッドシステムに大きく分類される。レドックス媒体とは酸化と還元をサイクルしながら電子を受け渡す物質である。光触媒系はどれも日本の研究が先行している。光電極系はn型半導体、p型半導体、p型半導体+n型半導体、pn接合膜に分類される。多孔質薄膜の場合は電荷分離が粉末の光触媒同様に微粒子内部で起こるために、著者らは光触媒電極とも呼んでいる。

3. レドックス媒体を用いた二段光励起機構（Zスキーム機構）による水の完全分解

（1）Zスキーム機構の研究背景

一段光励起型の光触媒による水の完全分解は理想的である。紫外線での反応は100種類以上の光触媒が報告されている。しかし、可視光を利用することが半導体の準位の制約のために非常に難しい。堂免らによりオキシナイトライド半導体で完全分解が報告⁽¹⁾されているがその種類は非常に限定的である。

効率的に可視光で水を完全分解する戦略として、筆者らは水の酸化による酸素発生反応を安定な可視光応答性の酸化物半導体で行わせ、あるレドックス媒体の還元反応を進行させ（PS2[O₂]）、次に別の光触媒系でレドックス還元体を酸化させると同時に水を還元して水素を発生（PS1[H₂]）できれば全体として水が完全分解できるという二段光励起システムの研究を行ってきた。この反応はまさしく植物のZス

キーム型光合成反応の模倣である。このZスキーム型システムの考え方自体は古くからあったが、光触媒粉末系ではなく光電極系であったり片側の反応のみの研究がほとんどであり、実際にPS2[O₂]とPS1[H₂]を結びつけた光触媒の実証実験は困難であった。著者らのグループでは、酸化タングステン(WO₃)系光触媒と鉄イオンレドックス媒体の紫外線直接励起反応を組み合わせて、Zスキーム反応での水の完全分解、および水素と酸素の分離発生の実証に世界で初めて成功した⁽²⁾。次に、紫外線照射下で2種類のTiO₂光触媒とI/I₃⁻レドックスを用いた完全分解を成功させた⁽³⁾。さらに、I/I₃⁻レドックスを利用し、Pt-WO₃および工藤らがメタノールからの可視光水素発生で報告していたSrTiO₃(Cr,Taドーパ)半導体の2種類の光触媒を用いて、可視光のみで水を完全分解できる光触媒システムを世界で初めて実証できた⁽⁴⁾。また、硝酸/亜硝酸レドックスにおいても紫外線を利用するが炭酸塩の助けを借りてZスキーム型の水の分解反応⁽⁵⁾が進行できた。その後、このZスキーム型機構は鉄レドックス媒体の反応や色素増感光触媒、非酸化物系光触媒利用など様々な発展を遂げている。

(2) 粉末光触媒による水分解について最近の動向

オキシナイトライド系でレドックスを用いたZスキーム型では、Pt/BaZrO₃-BaTaO₂N固溶体の水素発生用半導体光触媒とPt-WO₃およびヨウ素レドックスによって水の完全分解ができており⁽⁶⁾、水素への太陽エネルギー変換効率(Solar-to-hydrogen 効率, STH)として0.0067%であった。酸素発生光触媒をTiO₂にするとSTHは0.014%であった。Ir-CoOx-Ta₃N₅にRu-SrTiO₃(Rhドーパ)を混合して、レドックス媒体の無い条件でZスキーム型での水の完全分解を達成しており⁽⁷⁾、このSTHは0.013%であった。一方、これまでTaON半導体は、そのバンド構造からは単独で水分解ができると推察されてきた

が、実際にはZスキーム型での完全分解しかできていなかった。Zスキーム型は2倍の光子を必要とするので、単独型の方が望ましい。前田らはZrO₂で修飾したTaONを用い、量子収率は420 nmで0.1%以下であるが可視光での水の完全分解に成功した⁽⁸⁾。酸素発生助触媒でIrO₂、水素発生助触媒としてCr₂O₃/RuOxを用いている。

工藤らは[Co(bpy)₃]^{3+/2+}や[Co(phen)₃]^{3+/2+}の錯体レドックスを用いてZスキーム型での完全分解を報告している⁽⁹⁾。無機のレドックスだけでなく有機のレドックスを利用できることを示した結果は今後の応用の広がりを示す結果である。有機の配位子を修飾することで酸化還元準位をコントロールできる。バナジン酸ビスマス(BiVO₄)の有機物分解する能力の乏しい性質をうまく利用している。SrTiO₃RhとBiVO₄を水素および酸素発生用の光触媒に用い、それぞれのガスの分離発生にも成功している。また、我々はI/I₃⁻新規レドックスが利用できることも最近確認している⁽¹⁰⁾。

Zスキーム型は光触媒とレドックス媒体との多彩な組み合わせのために通常の一段光励起機構よりも自由度が格段に大きいためにより有利な技術である。天然の光合成の進化の歴史を振り返ると、元々別の微生物が持っていたPSIとPSIIがシアノバクテリアに両方が取り込まれて融合し、数億年かけて量子収率100%近い反応系を構築したように、Zスキーム型の水の分解反応も量子収率および太陽エネルギー変換効率向上に向けて進化発展すると思われる。ただし、実用化の観点では現状の反応系は問題点もいくつかある。次章以降でその解決策を提示する。

4. レドックス媒体を用いた光触媒 - 電解ハイブリッドシステム(実現可能性の高い人工光合成システムを目指して)⁽¹¹⁾

従来型の光触媒技術のみによる水分解水素

製造システムは、製造技術として非常に低コストできる可能性があり扱いやすいことが長所であるが、大面積での利用を考えた場合、水素の酸素との安全な分離および広範囲に発生する水素の捕集技術などを考慮しなければならない。また現状では助触媒やドーパ成分として貴金属を利用して性能向上しているが、その効率は充分ではない。これらを全て解決するための戦略として、筆者らは、図3に示すように、Zスキーム型水分解のPS2[O₂]側の反応を光触媒反応で進行させ、PS1[H₂]側を電気分解反応により進行させるハイブリッドシステムを提案し検討してきた⁽¹¹⁾。図4は全体概念を示したジオラマである。このシステムは、Zスキーム型光触媒同様にレドックスを仲介させることで、光触媒システムでは酸素のみを、電解システムでは水素のみをそれぞれ別々に発生させることができる。そのため、高純度水素の捕集が容易であるほか、太陽光エネルギー変換を担う光触媒システムに特別な捕集技術は必要なく、太陽光利用のために必須な大面積化しやすいという長所を最大限に生かせるシステムとなる。さらに、

レドックスの還元体は安定に貯蔵できるため、二次電池のような役割も持ち合わせており、好きな時に電解により水素を取り出せることから電力平準化にも貢献できる。電解システムでは電力を使うことになるが、例えば鉄レドックスの場合、通常の直接水電解と比べ電解コストを約半分程度(1.6V → 0.8V)と大幅に削減できる。この削減率はレドックスの酸化還元準位に依存するものであり、新規なレドックス媒体を開発すれば、さらなる削減も原理的には可能である。電気分解による直接水電解水素製造では、電力単価の安い夜間電力を利用した場合であっても電解電圧コストが全体コストの大半を占め、その削減が重要課題となっている。低コスト技術である光触媒により、太陽光エネルギーを利用してその電解電圧コストを大幅に削減できるこのハイブリッドシステムは、理想的な低コスト水素製造技術となる可能性を秘めていると言えるだろう。

このシステムに残された課題は、水を酸化しながらFe³⁺をFe²⁺へ還元する反応を代表とするPS2[O₂]側のエネルギー蓄積型の光触媒反応を高効率に進行させることである。水

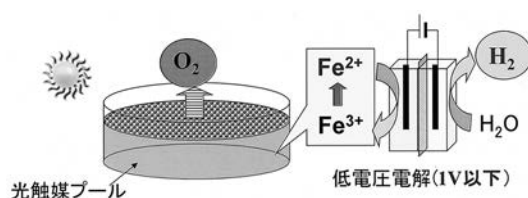


図3 光触媒-電解ハイブリッドシステムによる水分解水素製造の原理

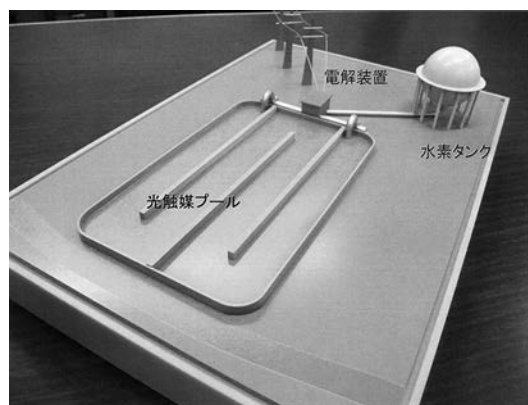


図4 全体概念を示したジオラマ

を酸化しながら Fe^{3+} を Fe^{2+} へ還元する反応は、熱力学的にはアップヒル反応であり水分分解よりも圧倒的に進行させやすい反応ではあるが、今までにこの反応系を対象とした研究はあまり行われていない。植物の Z スキーム反応のレドックス媒体にも $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 反応はいくつか使われているので、この反応はまさに PS2[O₂] を模倣した人工光合成反応である。そこで筆者らは、酸素生成用光触媒として有名な WO_3 に着目して、高効率反応を進行させるための指針を確立するための研究を進めてきた。 WO_3 光触媒は可視光を効率よく利用して、様々な有害有機物を CO_2 にまで酸化分解できる光触媒として報告されている。しかしながら、水を酸化しながら Fe^{3+} を Fe^{2+} へ還元する反応の可視光照射下での量子収率は 0.4% 程度と極端に低い値しか報告されていなかった。このように、反応系が違う場合にフォトンを高効率に利用できる例があることから、我々は、低効率の要因の 1 つが触媒表面にあると考え、 WO_3 に対して様々な表面処理を試みた。その結果、Cs 塩水溶液で表面処理を行った WO_3 光触媒(以後 Cs- WO_3 と表記する)が水を酸化しながら Fe^{3+} を Fe^{2+} へ還元する反応に対して非常に高い性能を示すことがわかった⁽¹¹⁾。Cs- WO_3 光触媒の劇的な活性向上メカニズムを詳細に調べた結果、 WO_3 表面に偏在した Cs を強酸性水で強制的に除去することで、通常の WO_3 表面には無かったイオン交換可能なサイトが形成されていることが実験的に推察された。さらに、このイオン交換サイトにプロトン (H^+) と水が H_3O^+ の形で特異吸着したサイトでは水の酸化反応が、一部 Fe^{2+} が置換したサイトでは Fe^{3+} の Fe^{2+} への還元反応がそれぞれ効率良く進行しているというメカニズムが電気化学的手法により推察された。420nm の単色光照射下での量子収率は 19 % に達し、その値はこれまでの論文報告値 0.4 % (405 nm) の 45 倍となった。表面改質処理が高性能化のための非常に有効な手段であることを実証できた有意義な成果

であると考えている。また、この光触媒反応は貴金属などの助触媒を担持しなくても十分に高い活性を発現できることも特徴の 1 つである。

さらに筆者らは、反応効率を支配する 1 つの因子として、触媒表面だけでなく溶液中のレドックスの形成する錯イオン構造に着目し、様々な鉄塩水溶液からの TiO_2 光触媒による酸素生成活性を調べた。その結果、硝酸イオンや過塩素酸イオンが共存する場合の鉄還元活性は、硫酸イオン存在下のものと比べ 10 倍以上高いことがわかった⁽¹²⁾。いずれの反応溶液を用いた場合でも、トータルの酸素生成量が仕込んだ Fe^{3+} イオンのモル量から見積もられる理論生成量と良く一致し、副反応は起きていないことを確かめている。最適条件での TiO_2 光触媒の見かけの量子収率は 55% (365 nm) であった。このように、同じ光触媒を用いているのにもかかわらず、 Fe^{3+} イオンの還元活性は、反応溶液中のアニオンの種類に依存して大きく変化することを初めて明らかにした。 TiO_2 以外の光触媒材料を用いた場合にも、 Fe^{3+} イオンの還元活性は反応溶液中のアニオンの種類に依存して同様の序列で変化し、Cs- WO_3 の 420 nm 単色光照射下での量子収率は過塩素酸鉄水溶液を用いることで 31% にまで向上した。照射した太陽光エネルギーに対して Fe^{2+} イオンとして蓄えられたエネルギーを算出すると 0.38% となり、バイオ燃料の有望原料作物として有名なスイッチグラス (0.2 %) を大きく超える値を達成した⁽¹³⁾。可逆的なアップヒル反応を起こす光触媒としては最も高い効率である。

このような成果は、まだ実用化に対しては十分な効率は達成できていないが、実証を考えると残された大きな課題はほぼ効率のみであり、その効率も近年大幅に向上している点で大きな意味がある。理論的にはさらに一桁以上高められる可能性があり、魅力的なエネルギー変換システムの候補の 1 つとして研究を進めるべき課題であると考えている。

5. 高性能な酸化物半導体光電極による太陽光水素製造

(1) 半導体光電極の研究背景

酸化物半導体光電極による水分解水素製造は、本多・藤嶋らによる紫外光を吸収するTiO₂単結晶電極の報告が最初である。光電極を用いた水分解による太陽光水素製造の原理を図5に示す。光電極は対極とつながっており、通常その間に太陽電池のような補助電源をつけて用いる。太陽電池と水電解装置を組み合わせた水分解反応では、理論上1.23V以上、実際には過電圧の影響で1.6V以上の補助電源電圧が必要である。しかし、光電極を用いれば、伝導帯単位と水素還元単位の差程度の小さな補助電源電圧で水分解反応を進行させることができるので補助電源の減少につながる。近年、WO₃や酸化鉄(Fe₂O₃)などの可視光応答性の酸化物半導体を導電性基板上に塗布・空気焼成だけで薄く成膜した多孔質

光電極の研究が盛んになった。安定性と経済性、大面積化、水素捕集、単純な調製などを考慮すると、n型酸化物半導体を利用できることが理想的と考えられる。しかし、太陽光エネルギー変換効率は低く、半導体光電極を用いた水分解による太陽光水素製造技術の実用化のためにはさらなる効率の向上が必要不可欠であった。

太陽光エネルギー変換効率とは、入射した太陽光エネルギーに対して変換して利用できるエネルギーの割合である。水分解水素製造の場合は、水素として変換蓄積したエネルギーの割合であり、半導体光電極の水分解では、太陽光エネルギーに加えて補助電源からの電気エネルギーも使っているので、投入したエネルギー分を差し引いて求める。したがって、投入したバイアスエネルギー分を考慮した太陽エネルギー変換効率($\eta_{\text{sun}}^{\text{ex}}$ または Applied bias photon-to-current efficiency: ABPE)は、次の(1)式であらわされる。詳細は図6に示す。

$$\eta_{\text{sun}}^{\text{ex}} = \frac{J_{\text{OP}} \times (1.23 - E_{\text{OP}})}{\text{Int}_{\text{A.M.1.5}}} \times 100 \quad (1)$$

J_{OP} : E_{OP} 電位下における光電流密度[mA/cm²]

E_{OP} : 最適動作状態下における印加電位[V]

Int: A. M. 1.5 1SUN 擬似太陽光の光量[mW/cm²]

1.23: 水の理論分解電圧[V]

図5 半導体光電極による水分解水素製造の意義

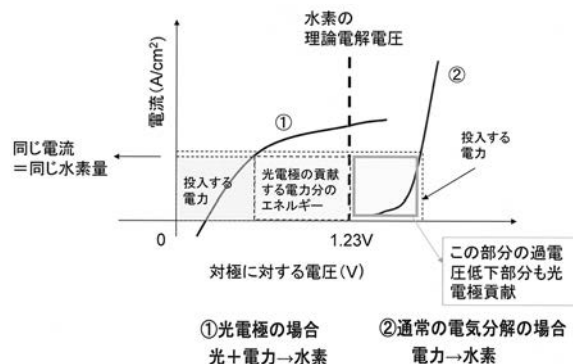
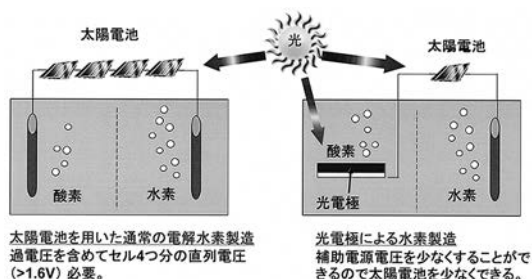


図6 光電極の太陽エネルギー変換効率の考え方

Augustynski らにより WO_3 多孔質半導体光電極を用いて、非常に高い IPCE 効率 (410 nm ではほぼ 100%) で水を分解できることが報告された。 Fe_2O_3 多孔質光電極においては欧州の複数の研究グループも改良を行っており、Grätzel らはカリフラワーのように基板から成長した Fe_2O_3 多孔質電極により、420 nm において 36% の IPCE を達成している。著者らは、銀イオン犠牲剤から酸素を発生する光触媒として既に知られている BiVO_4 を多孔質光触媒電極にすると高い量子効率を示すことを世界で初めて報告し⁽¹⁴⁾、 BiVO_4 光電極研究の先駆けとなっている。

近年、著者らは、3種類の半導体を積層した構造の酸化物半導体光電極と高濃度の炭酸塩電解液を用いることにより性能を大きく向上させ、酸化物半導体光電極の中で、最も高い η_{sunex} の達成に成功した⁽¹⁵⁾。図7のように、導電性ガラス基板の一層目に WO_3 、二

層目に酸化スズ (SnO_2)、三層目に BiVO_4 を順番に積層させた光電極には、 BiVO_4 側から光照射を行うと、 BiVO_4 が 520 nm までの可視光を主に吸収し、 WO_3 は効率的な電子移動を担い、その間の SnO_2 は半導体接触界面での電荷再結合のロスを低減する働きがある、と推察している。この3層複合型光電極を高濃度炭酸塩電解液中で水分解反応を進行させると $\eta_{\text{sun}}^{\text{ex}}$ は 0.85% に達し、420 nm において IPCE は 53% であった。さらにこの光電極には2枚重ね合わせたスタックかつ反射板設置による簡易な方法の光閉じ込め構造が有用であることを明らかにし、この時、図8に示すように、 $\eta_{\text{sun}}^{\text{ex}}$ は 1.35% になった。この光電極の2枚重ね手法は効率を向上できるが、コストが約2倍になる問題があった。そこで半導体膜の調製法を工夫して光閉じ込め効果を発現させることや膜厚を大きくしても電荷の拡散長が延びない多孔質構造を制御するこ

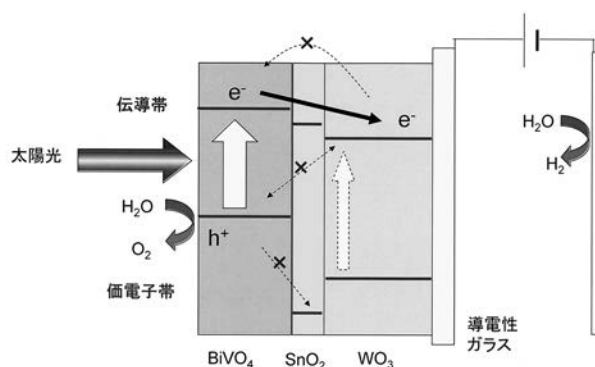


図7 3種類の半導体膜の積層効果

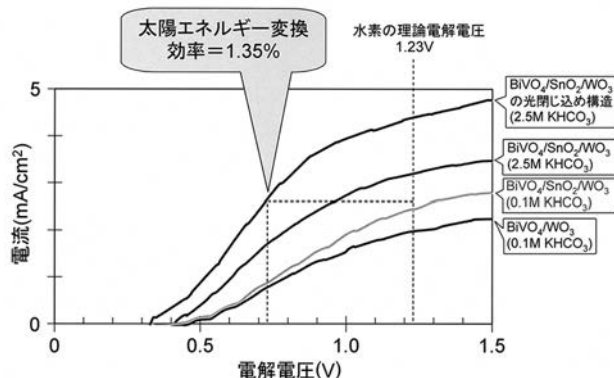


図8 3種類の半導体を積層した構造の酸化物半導体光電極の電流電圧特性

とで、光電極 1 枚でも高い効率を得られる現実的な光電極を目指した。BiVO₄ 半導体膜を調製する前駆体溶液に界面活性剤と多量の酸化剤を同時に添加することで、低温で結晶性が高くかつ高表面積の多孔質膜を合成することができた。微視的な加熱促進で適度な二次凝集が形成されて光散乱性が増大し、効果的な光閉じ込め構造が形成された。それらの結果、効率は約 5 割向上し、1 枚単独の酸化物光電極としては世界最高の太陽光エネルギー変換効率 ($\eta_{\text{sun}}^{\text{ex}}$: 1.28%) を得ることに成功した⁽¹⁶⁾。光電流向上における高濃度炭酸塩の効果は、炭酸イオンが酸化還元を繰り返して触媒のように水分解反応を促進させていると考えているが、その詳細なメカニズムについては現在解明中である。

(2) 多孔質光電極による水分解について最近の動向

R.Krol らは BiVO₄ の特性を W の傾斜ドーピングとリン酸コバルト助触媒の組み合わせで非常に向上できることを最近報告している⁽¹⁷⁾。5 価の V⁵⁺ を 6 価の W⁶⁺ に置換することにより、ドナー準位を増やして BiVO₄ 内部の電子移動をスムーズにするとともに、伝導帯と価電子帯の準位に傾斜をつけて電荷分離を促進する設計を取り入れている。また同時に、BiVO₄ 表面のリン酸コバルト助触媒担持で正孔と水の酸化反応の効率を 100% に近づけている。この電極の $\eta_{\text{sun}}^{\text{ex}}$ は約 1.3% であり、筆者らの光電極と同等レベルである。この報告では BiVO₄ 光電極の後ろに 2 層タンデム型のアモルファスシリコンの太陽電池を設置し、外部バイアスレスでの水分解にも成功し、その Solar-to-H₂ 効率は 4.9% に達している。ソーラー水素製造のマイルストーンになる結果である。

工藤らは n 型の BiVO₄ と p 型の SrTiO₃:Rh の 2 つの光電極を直接つないで、外部バイアス無しで可視光での水分解に成功している⁽¹⁸⁾。まだ性能は低いが多孔質光電極の今後の可能

性を示した成果である。BiVO₄ 以外の多孔質酸化物光電極では、スイスの M.Graetzel らは 1 個で 1 V 以上の開放電圧の DSC を用いて、Fe₂O₃ や WO₃ 光電極に DSC-1 直列でつなぎ、STH で 1.17% と 3.1% を達成している⁽¹⁹⁾。

一方、阿部および堂免らは非酸化物系のナイトライドやオキシナイトライド半導体の光電極の研究を進めている。TaON 半導体の光電極に Co-Pi 助触媒を担持することで光電流および安定性を向上させている⁽²⁰⁾。また、700 nm 付近まで利用できる BaTaO₂N 半導体の光電極について、RhO_x および CoO_x の 2 種類の助触媒を担持した光電極では、IPCE は 420 nm で約 20% (1.23V-RHE) であった⁽²¹⁾。水素と酸素の化学量論的な発生も確認している。ごく最近、堂免らは基板から垂直に成長させた Ta₃N₅ のナノロッド形状の光電極を用いて ABPE で 1.5% を報告した⁽²²⁾。n 型半導体としては最も高い値である。ナノロッドは単結晶のように揃っており、かつ多孔質でもある。Ba をドーピングすることで低バイアス側の光電流特性が改善している。Co-Pi 助触媒を表面に担持して、550 nm まで利用でき (バンドギャップは 2.1 eV)、IPCE は 400 nm で約 88% (1.23 V) である。水素と酸素の化学量論的な発生を確認している。また、J.Lee らは n 型 TaON 光電極上に p 型 CaFe₂O₄ を積層し、さらに Co-Pi 助触媒をコーティングすることで IPCE を約 6 倍に向上する効果を報告した⁽²³⁾。FTO 導電性ガラス上に TaON 粒子をアセトン中に懸濁して 2 つの電極間に電圧をかけて成膜している。CaFe₂O₄ の粒子は 1,100 度の高温で調製し、その後同様に電圧をかけて成膜している。CaFe₂O₄ は 1.9 eV のバンドギャップで 650 nm までの光を吸収できるが、実際の IPCE スペクトルは 500 nm までの光しか利用しておらず、TaON の吸収を反映している。p-n 接合で電荷分離が促進されていると推察される。p 型 CaFe₂O₄ の価電子帯の準位が水の酸化準位に近いために、酸素発生の困難さを予想されるが、酸素の化学

量論的な発生を確認している。

一方で、本来の測定すべき項目がなく、正しい評価ができない論文もいくつか出てきている。例えば、S修飾したTiO_{2-x}:S光電極の報告では紫外線領域だけで異常に大きな電流密度（約4 mA/cm²）になっている⁽²⁴⁾。正しい測定法の早期の標準化が求められている分野と言える。

6. 半導体の高速スクリーニング技術

$\eta_{\text{sun}}^{\text{ex}}$ を向上させるには、光電流を増大させつつ補助電源電圧を低下させる必要がある。そのためには、さらに長波長の可視光を十分に利用でき、伝導帯準位が負に大きい、電荷分離効率が高いという3つの特徴を持つ新規半導体を開発することが重要である。光電極技術は半導体の高速スクリーニングに適応しやすい利点がある。筆者らは有機金属塩熱分解法と多層ロボット塗布を組み合わせた半導体膜ライブラリー自動作成装置および光電流自動評価装置を独自に開発してきた⁽²⁵⁾。1日に最大384個の多孔質半導体サンプル膜を調製することが可能である。3元系の高速自動探索結果の例を図9に示す。このような高速スクリーニング技術の進展は新規材料開発に20年前のバイオテクノロジー進展と同様のイノベーションを起こす可能性がある。

量子効率をさらに向上させて、500 nm また

は600 nmまでの波長の光をすべてこの反応に利用しつつ補助電源電圧をゼロに近づければその理論限界の太陽光エネルギー変換効率（Solar-to-H₂効率）は8%および15%に達し、太陽電池と水電解を単純に組み合わせたシステムと同等の効率を単純な光電極で実現できるようになる。

7. おわりに

人工光合成の第一次ブームは石油ショックの頃であるが、原油価格の低迷とともに研究ブームは終わった。その後1990年代から地球温暖化問題がクローズアップされ、原油価格の上昇とともに人工光合成の第二次ブームとなっている。その追い風の中、30年前は夢物語であった太陽光水素製造はこの数年で大きく進展し、実用化のスタートラインに立っている。太陽光水素製造や人工光合成の研究は人類が絶対に実現させるべき継続性の必要な研究であり、もはや一過性のバブル研究にしてはいけない。米国では人工光合成の大型プロジェクトが進行している一方で、シェールガス開発や不況の影響で再生可能エネルギーへの関心が薄れていく可能性がある。しかしシェールガスも将来的には枯渇する資源であることを忘れてはならない。化石資源価格の増減に惑わされることなく実用化に向かって確実に研究を継続することが重要である。

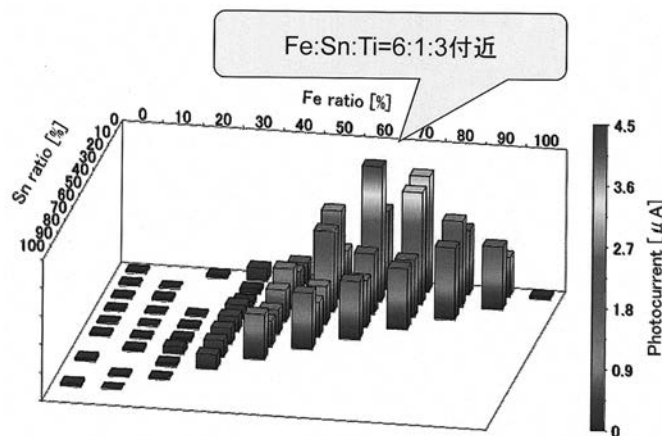


図9 3元系の高速自動探索結果の例

将来の理想像は外部バイアス無しのシステムであるが、近未来のマイルストーン設定とコスト試算も重要である⁽²⁶⁾。NEDOの水素ロードマップ目標の水素製造コストとして30円/Nm³以下を目指すのであれば、効率の高さだけでなく、大面積化でき、低コスト、長寿命の革新的なシステムを目指さなくてはならない。粉末光触媒系だけでなく、光触媒－電解ハイブリッドシステムやn型多孔質光電極は30円/Nm³以下にできる可能性を持っており、これらの更なる研究の革新が望まれる。

【謝辞】：本研究の一部は最先端・次世代研究開発支援プログラムの成果である。

参考文献

- (1) K. Maeda, K. Teramura, D. Lu, T. Takata, N. Saito, Y. Inoue and K. Domen, *Nature*, 440, 295 (2006)
- (2) K. Sayama, R. Yoshida, H. Kusama, K. Okabe, Y. Abe, H. Arakawa, *Chem. Phys. Lett.*, 277, 387 (1997)
- (3) R. Abe, K. Sayama, K. Domen, H. Arakawa, *Chem. Phys. Lett.*, 344 (2001) 339
- (4) K. Sayama, K. Mukasa, R. Abe, Y. Abe, H. Arakawa, *Chem. Commun.*, 2416 (2001) ; K. Sayama, K. Mukasa, R. Abe, Y. Abe, H. Arakawa, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 148, 71 (2002) ; R. Abe, K. Sayama, H. Sugihara, *J. Phys. Chem. B*, 109, 16052 (2005)
- (5) K. Sayama, R. Abe, H. Arakawa, H. Sugihara, *Catal. Commun.*, 7, 96 (2006)
- (6) K. Maeda, D. Lu, K. Domen, *ACS Catal.*, 3, (2013) 1026.
- (7) S. Khine Ma, A. Kudo, K. Domen, et al, *Chem. Eur. J.*, 19, (2013) 7480
- (8) K. Maeda, D. Lu, K. Domen, *Chem. Eur. J.*, 19, (2013) 4986
- (9) Y. Sasaki, H. Kato, A. Kudo, *J. Am. Chem. Soc.*, 135, (2013) 5441
- (10) Y. Miseki, S. Fujiyoshi, T. Gunji, K. Sayama, *Catal. Sci. Technol.*, 3, (2013) 1750
- (11) 09/028495 (US) , 98301444 (EU) , 3198298 (JP) ; Y. Miseki, H. Kusama, H. Sugihara, K. Sayama, *J. Phys. Chem. Lett.*, 1, 1196 (2010)
- (12) Y. Miseki, H. Kusama, H. Sugihara, K. Sayama, *Chem. Lett.*, 39, 846 (2010)
- (13) Y. Miseki and K. Sayama, *RSC Adv.*, 4, (2014) , 8308.
- (14) K. Sayama, A. Nomura, Z. Zou, R. Abe, Y. Abe, H. Arakawa, *Chem. Commun.*, (2003) , 2908
- (15) R. Saito, Y. Miseki and K. Sayama, *Chem. Commun.*, 48, 3833 (2012) ; *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 258, 58 (2013)
- (16) I. Fujimoto, N. Wang, R. Saito, Y. Miseki, T. Gunji, K. Sayama, *Int. J. Hydrogen Energy*, in press.
- (17) F. Abdi, L. Han, A. Smets, M. Zeman, B. Dam, R. Krol, *Nature Commun.*, 4, 2195 (2013)
- (18) Q. Jia, K. Iwashina, A. Kudo, *PNAS*, 109, (2012) 11564.
- (19) J. Brillet, J. Yum, M. Cornuz, T. Hisatomi, R. Solaris, J. Augustynski, M. Graetzel and K. Sivula, *Nature Photonics*, 6, (2012) 824
- (20) M. Higashi, K. Domen, R. Abe, *J. Am. Chem. Soc.*, 134, (2012) 6968
- (21) M. Higashi, K. Domen, R. Abe, *J. Am. Chem. Soc.*, 135, (2013) 10238
- (22) Y. Li, O. Terasaki, K. Takanabe, K. Domen, et al., *Nature Commun.*, 4, (2013) 2566
- (23) E. Kim, K. Domen, J. Lee et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 135, (2013) 5375
- (24) C. Yang, F. Huang et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 135, (2013) 17831
- (25) K. Sayama, *Electrochemistry*, 78, 64 (2010)
- (26) K. Sayama, Y. Miseki, シンセシオロジー , in press

核燃料サイクル技術の安定性に関する検討

※
藤井 貞夫 (プロジェクト試験研究部
原子力グループ 部長)



※※
波多野 守 (プロジェクト試験研究部
原子力グループ 参事)



1. はじめに

当研究所は、わが国あるいは世界のエネルギーに関連する重要課題について委員会や運営会議等を設置して議論することを主な役割の1つとし、これまでわが国のエネルギー政策、その中でも特に、原子力エネルギー政策に対する提言を行ってきている。この一環として、幾度かの竣工時期の延期を経てきた六ヶ所再処理工場⁽¹⁾において、試験運転の最終段階であるガラス固化試験が2013年5月末に完了したことを契機として、再処理、放射性廃棄物処理・処分に関する技術的な視点から、自主研究「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討」を行うこととした。

本検討は、2つのステップより構成されている。第一ステップでは六ヶ所再処理工場の操業開始に当たって、種々のトラブルを経験して工程遅延の要因の1つになっているガラス固化設備の安定運転実現に向けた見通しについて、第二ステップでは六ヶ所再処理工場全体の安定した運転に関する課題と見通しについて技術的検討と評価を実施した⁽²⁾。実施に当たって、事業者（日本原燃株）より関連技術資料の提供を求めるとともに、内容聴取を行った。いずれのステップにおいても、客観性を確保するために、学識経験者により構成される委員会を設置して検討を行った。

本報は、以上に述べた「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討」の第一および第二

ステップに関する技術的検討と評価を取りまとめたものである。

なお、2013年12月に使用済燃料再処理施設の新規制基準が施行されたが、六ヶ所再処理工場に対する新規制基準による適合性評価については、別の場で取り扱われるものであることから、今回の報告の範囲外である。

2. 六ヶ所再処理工場の概要と試験運転の状況

(1) 六ヶ所再処理工場の全体プロセス

六ヶ所再処理工場は、軽水炉使用済燃料を対象とした日本で初めての商業用再処理工場であり、最大処理能力は、800トンU/年で、これは100万kW級原子力発電所約40基が1年間稼動した時に発生する使用済燃料を処理する能力に相当する。再処理工場では、原子力発電所から運ばれてきた使用済燃料はせん断され、硝酸にて核燃料の部分のみが溶解される。核燃料を溶解した硝酸溶液は、リン酸トリブチル抽出剤を用いて、大部分の核分裂生成物を除去し、その後ウランとプルトニウムを分離し、それぞれ精製される。核分裂生成物を含む硝酸溶液である高レベル廃液は、ガラス溶融炉の中で溶融され、キャニスター内にガラス固化されて安全に保管される。

再処理工場の建屋間には、溶液を貯留するためにバッファ槽が設けられているが、前処理建屋－分離建屋間、分離建屋－精製建屋間

では数日程度、精製建屋－ウラン脱硝建屋間、精製建屋－ウラン・プルトニウム混合脱硝建屋間では2週間程度と、長期間溶液を貯留する容量を持っていないため、使用済燃料をせん断してから製品になるまではほぼ連続的に処理が行われる。

六ヶ所再処理工場は、実用可能な最良技術として、フランスの技術を中心に、イギリス、ドイツの技術を導入し、国内技術と組み合わせて構成されている。

(2) 六ヶ所再処理工場の建設、試験運転の経緯

六ヶ所再処理工場は1989年の国への申請、1993年の着工建設を経て、2001年より様々な

試験運転が行われてきた。図1に試験運転の経緯を示す。試験運転は、通水作動試験、薬品のみを使った化学試験、ウランを用いたウラン試験を経て、試験運転の最終段階であるアクティブ試験が行なわれた。図2および図3にアクティブ試験の経緯を示す。実際の使用済燃料を使用するアクティブ試験は、5つのステップに分けて段階的に試験を進めた。ガラス固化試験においては種々のトラブルが発生したが、これらトラブルに対し、基礎試験、モックアップ試験を含め、種々の検討が行われ、対策が講じられた結果、2013年5月にはガラス固化試験が終了し、アクティブ試験として予定されていた実施項目は全て終了している⁽¹⁾。

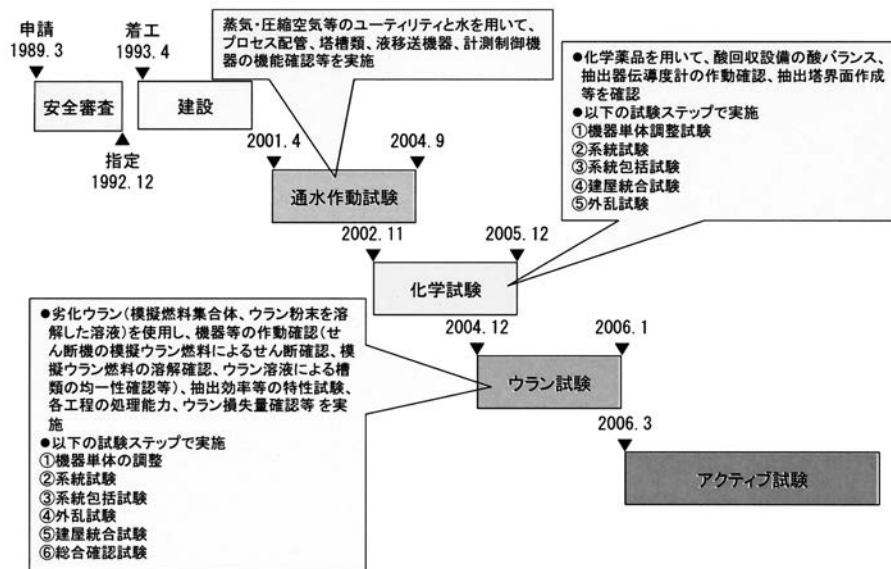


図1 六ヶ所再処理工場における試験運転の経緯

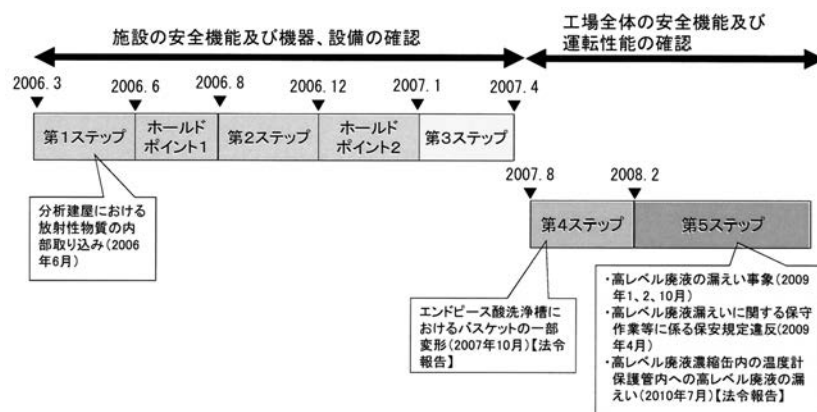


図2 六ヶ所再処理工場におけるアクティブ試験の経緯

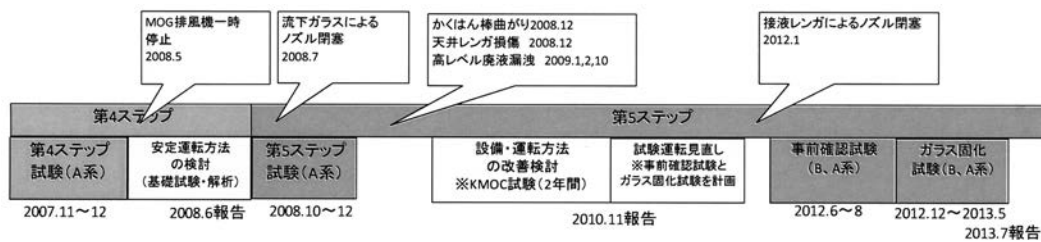


図3 六ヶ所再処理工場におけるアクティブ試験の経緯

(3) アクティブ試験の実績

アクティブ試験では、溶解液中の核燃料物質濃度が核的制限値よりも低く設定した目標値以下であること、放射エネルギーが所定の値以下であること、主要な核分裂生成物に対し、除染係数が目標値以上であること等の「設備、機器の安全機能の確認」や定格処理量での運転が連続して実施できること等の「設備、機器の運転性能の確認」、22.2日以内に80トンの処理ができること等の「処理能力の確認」を行っている。

安全機能については、再処理施設の事業指申請書等に記載された各設備の安全に係る性能、能力又は廃棄物の処理能力、並びに運転管理手法の妥当性の根拠として、試験による確認が必要な「閉じ込め機能」、「放射線被ばく管理」、「放射性廃棄物の放出管理」等の事項に対して確認をしている。

3. ガラス固化設備の安定運転実現に向けた見通しについて（第一ステップ）

(1) 高レベル廃液ガラス固化施設の概要

高レベル廃液ガラス固化施設は、高レベル廃液（高レベル濃縮廃液、アルカリ濃縮廃液、不溶解残渣廃液）と原料ビーズを溶融し、ガラス固化体を製造・検査する施設である。以下に、各設備の概要を示す。

① 高レベル廃液貯蔵設備

主工程から払い出される高レベル濃縮廃液やアルカリ濃縮廃液等を貯蔵する設備である。

② 高レベル廃液ガラス固化設備

高レベル廃液貯蔵設備から各廃液を受入れ、廃液調整した後、ガラス溶融炉にて溶融・固化する設備である。ガラス溶融炉はA系列、B系列の2系列(50%×2系列)から構成される。

③ 高レベル廃液ガラス固化廃ガス処理設備

ガラス溶融炉から発生する廃ガスから放射性核種等を除去する設備である。

④ ガラス固化体取扱設備

ガラス溶融炉で製造したガラス固化体の蓋溶接、除染を行い、種々の検査を経て、貯蔵施設へガラス固化体を移送、貯蔵する工程である。

なお、ガラス固化は、ガラスのケイ素と酸素で構成される基本的マトリックスに、核分裂生成物元素を閉じ込め、処分に適した安定な形態とするものである。

(2) ガラス溶融炉の概要

高レベル廃液ガラス固化施設のガラス溶融炉は、高レベル廃液をガラス原料（ビーズ形状）とともにガラス溶融炉に連続供給し、直接通電加熱（ジュール加熱）によって1,200℃付近で溶融した後、間欠的に固化体容器に抜き出すことによりガラス固化体を製造する装置である。

ガラス溶融炉の構成イメージを図4に示す。ガラス溶融炉は、耐火物を外側から金属製のケーシングで囲った構造であり、溶融槽には耐食性に優れたアルミナ・クロミア電鍍レンガが採用されている。溶融槽には、対向する壁面に主電極および補助電極が設置されてお

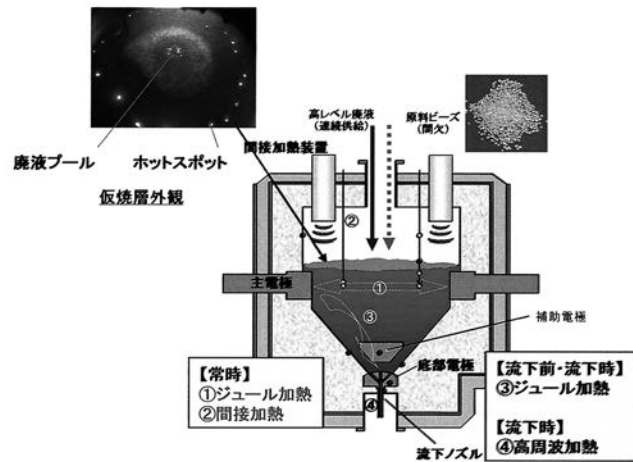


図4 ガラス溶融炉の構成イメージ

り、耐食性に優れたニッケル・クロム・鉄を主成分としたインコネルが採用されている。ガラス溶融炉底部（炉底部）には、溶融したガラスをガラス固化体容器に注入するために、溶融ガラス抜き出し用の流下ノズルが設置されている。流下ノズルを高周波加熱・空気冷却することで溶融ガラスの抜き出し、停止を行うことができる。溶融槽のガラス保有量は、最大約 4,800kg、ガラス溶融炉への高レベル廃液供給速度は最大 70 l /h（1 日当たりの最大再処理能力 4.8 トン U に相当）であり、1 日当たり 2～3 本のガラス固化体を製造する能力を有する。また、ガラス溶融炉の設計寿命は、高温の溶融ガラスによるレンガや電極の腐食等を考慮し、5 年に設定している。

なお、六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉は、先行施設である日本原子力研究開発機構 (JAEA) の東海ガラス固化技術開発施設の溶融炉を大型化（5 倍のスケールアップ）したものである。

① ガラス固化設備の運転計画

ガラス固化設備の運転は、ガラス溶融炉の立上げ（熱上げ）、廃液供給運転、停止（ドレンアウト）の流れで行い、年間の廃液供給運転日数は 250 日間程度を見込んでいる。また、廃液供給運転以外のガラス溶融炉の立上げ・停止、保守・点検等は、115 日間程度の期間である。

② ガラス溶融炉の運転方法

ガラス溶融炉では、上部から高レベル廃液とガラスビーズを連続的に供給し、主電極間通電によるジュール加熱と間接加熱装置による外部加熱により、1100～1200℃ 程度で溶融する。高レベル廃液には、白金族元素（Ru, Rh, Pd）が含まれており、この白金族元素は、(a) ガラスへの溶解性が悪い、(b) 密度が大きく沈降しやすい、(c) 濃度増加により溶融ガラスの粘性が増加する、(d) 濃度増加により溶融ガラスの電気抵抗が低下する、等の特徴を有しており、通電により加熱を行うガラス溶融炉では、この白金族元素の管理が重要となる。このため、ガラス固化設備の運転計画で示した廃液供給運転におけるガラス溶融炉の運転は、以下のステップを繰り返して行うこととしている（図5参照）。また、以下の(a)～(d)のステップの1サイクル分を1バッチと定義している。

(a) 炉底低温運転：ガラス溶融炉上部（炉上部）のガラスは高温状態とし、炉底部ガラスは補助電極等に冷却空気を流して炉上部ガラスよりも低い温度に保つ。それによって、白金族元素の炉底部への沈降・堆積を防止する。

(b) 炉底加熱：溶融ガラスを流下するための準備として、炉底部ガラスの温度を流下可能な温度まで上昇させる。

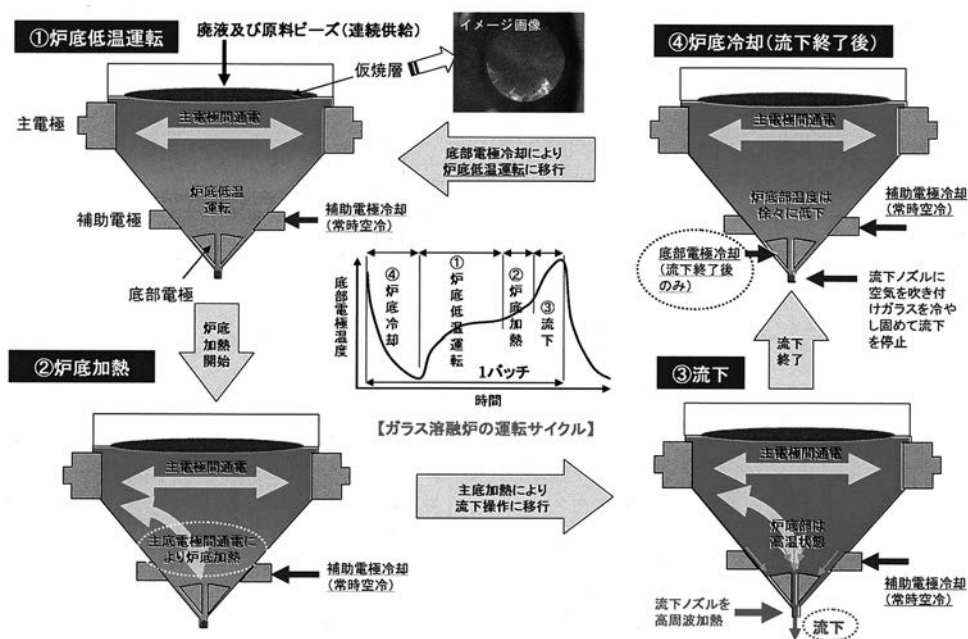


図5 ガラス溶融炉の運転方法

(c) 流下：炉底部ガラスの温度が流下可能な温度に達した後、高周波加熱コイルにより流下ノズルを加熱し、溶融ガラスをガラス固化体容器に流し込む。

(d) 炉底冷却（流下終了後）：流下終了後、(a)の状態とするため、炉底部を冷却空気により強制的に冷却を行い、炉底部ガラスの温度を下降させる。

③ ガラス溶融炉の炉内温度管理

炉上部温度管理は、ガラス温度と気相温度を目標範囲内に制御するため、それら温度を監視しながら、主電極間電力と間接加熱電力によって調整する。炉底部温度管理は、炉底温度を管理範囲内に制御するため、底部電極および補助電極冷却空気流量で調整する。

④ ガラス溶融炉の白金族管理

白金族元素は、ガラス溶融炉内で沈降・堆積することで、溶融ガラスの粘性上昇や電気抵抗を低下させ、流下性低下や炉底加熱性低下に繋がることが確認されている。このため、白金族管理としては、「炉底低温運転」によって、白金族元素の沈降・堆積を抑制するとともに、炉底加熱性や流下性を監視している。炉底加熱性

や流下性の監視により、白金族元素が炉底部に沈降・堆積した場合は、洗浄運転と攪拌運転等を行い、炉内状態を回復する。これらを回復運転と定義している。洗浄運転は、白金族元素を含んだ高レベル廃液の供給を停止し、白金族元素を含まない模擬廃液等を供給し、溶融ガラスをガラス固化体容器に抜き出すことで、ガラス溶融炉内の白金族元素保有量を低減するものである。攪拌運転は、直棒等を用いてガラス溶融炉内の白金族元素を強制的にガラス固化体容器に抜き出すことである。

(3) アクティブ試験で経験したガラス固化設備における事象

アクティブ試験で経験したガラス固化設備における事象を以下に示す（図2および図3を参照）。これらの事象に対して、その都度原因を究明し、適切な対策を取ってきた。

事象① ガラス温度が安定した状態を維持できない

事象② 事象①の影響により白金族元素が炉底部に沈降・堆積した

事象③ 初期のアクティブ試験の多くのバッチでイエローフェーズ（YP）が発生。イエローフェーズとは、核分裂生成

物に含まれるモリブデンを主成分とする低粘性流体

事象④ 流下ガラスによる流下ノズル閉塞

事象⑤ かくはん棒の曲がり

事象⑥ 天井レンガ落下

事象⑦ 高レベル廃液漏えい

事象⑧ 不溶解残渣廃液（FINE）を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した

事象⑨ 接液レンガによる流下ノズル閉塞

（４）第一ステップにおける検討の視点

技術的評価・検討に先だって、「安定運転」とは、当該設備・機器の性能を安定に維持し、それに基づき、所定の期間を運転し所定の処理量を達成すること、と定義し、それに基づき、評価に係わる３つの検討の視点を策定した。ここで、「性能を安定に維持」とは、当該設備・機器は消耗品であるとの認識の下にその設計寿命期間中に安定な性能を維持すること、「所定の期間」とは、１年程度～設計寿命、「所定の処理量」とは、ガラス溶融炉の処理廃液条件に基づいて決められた年間当たりの使用済燃料の処理量、と定義した。

①アクティブ試験で顕在化した技術課題に対する対応策の妥当性

ガラス固化設備のアクティブ試験において、どのような技術課題に遭遇し、それをどのように解決してきたかという取組みと得られた成果を整理し、操業運転開始後のガラス固化設備の安定運転の見通しが得られているか、という視点から以下の２点について検討する。

- ・アクティブ試験で経験した事象に対する取組み
- ・安定化対策の確認試験

②操業中の諸条件の変動を想定した安定運転の見通し

操業運転において、発生する様々な不具合事象や想定される運転条件の変動へ適切に対

応できるか、という視点から以下の２点について検討する。

- ・不具合事象への対応
- ・操業中の運転条件の変動への対応

③ガラス固化に関する技術開発

現行のガラス固化設備の安定運転に関する見通しという観点からは付加的な事項であるが、これまで経験してきた事象が将来発生することも想定して、それらの発生頻度と影響の大きさを低減するために、さらなる改善に向けた努力が継続的にかつ的確になされているか、という視点から以下の点について検討する。

- ・技術開発状況の確認

（５）第一ステップに対する技術的検討と評価

「①アクティブ試験で顕在化した技術課題に対する対応策の妥当性」および「②操業中の諸条件の変動を想定した安定運転の見通し」という２つの視点に基づいて、現行のガラス固化設備の安定運転の見通しを評価できるものと考えた。また、「③ガラス固化に関する技術開発」という視点については、将来に向けた改善への期待と合わせて評価した。

①アクティブ試験で顕在化した技術課題に対する対応策の妥当性

- ・当初は必ずしも十分に把握されていなかった根本的な要因にまで遡及した原因究明がなされ、運転管理に必要な項目の洗い出しと安定運転のための管理範囲が把握される等、安定運転に必要な対策が講じられている。
- ・原因究明と対策検討に関するプロセスにおいて、安定運転の面から各々の対策が相互に悪い影響を及ぼしていないことを確認しながら、設備の制約条件下で効果的な対策を講じていくという一連の事象を解決していくプロセスは妥当であった。
- ・事業者においてガラス溶融炉の安定運転確認と性能確認の判断基準が定められ、その基準を適用してガラス固化試験において、その判

断基準を達成することができたことから、これまでに経験した事象に対して講じた対策の有効性と妥当性が確認された。

- ・ガラス固化施設と上流設備の間には一定期間のバッファ容量が確保されており、ガラス固化設備の一時的な稼働率低下が上流設備の稼働率に、あるいは逆に上流設備の稼働状況がガラス固化施設の稼働に直ちに影響を与えるものでない。
- ・ガラス固化設備では、運転管理指標を確実に監視し、「廃液供給 10 バッチ＋洗浄運転 3 バッチ」サイクルを基本とし、状況に応じて洗浄頻度を変える等の柔軟な運転をすることによって、既設炉の設計寿命期間中の安定運転が期待できる。また、安定運転が継続できないような状況が発生した場合においても、早期の検知が可能である。
- ・ガラス固化体の品質管理方法が定められており、そのための運転管理方法等が整備されている。さらに、既に相当程度の品質管理基準を満足するガラス固化体の製造実績があることから、操業運転においても安定した品質のガラス固化体製造が期待できる。

②操業中の諸条件の変動を想定した安定運転の見通し

- ・ガラス熔融炉等の運転管理マニュアル類には、想定される事象への対応を含め、化学試験、アクティブ試験、KMOC 試験⁽¹⁾等で得られた貴重な知見が反映されており、ガラス固化設備の安定運転を目指す上で必要な対策が講じられている。
- ・継続的な教育・訓練の実施や技術・技能認定制度を整備し、定期的な試験や面接を行うことにより、運転員の技術力の維持・向上を図るしくみや社内バックアップ体制が構築されている。
- ・アクティブ試験の廃液条件は操業運転の運転範囲を踏まえて決められたものであり、その廃液条件で実施したアクティブ試験のガラス固化試験において安定運転ができています。

- ・上記 3 点より、操業運転において発生が想定される事象や運転条件へ適切に対応できる能力がある。

- ・アクティブ試験で経験した当初想定していなかった事象に対応した実績が示すとおり、発生が想定される事象以外の事象が発生した場合においても適切に対応できる体制がある。

以上のことから、ガラス固化設備と運転管理体制に対して、様々な対策が練られており、現時点で想定される範囲において安定運転実現に向けての準備が整っていると判断した。但し、ガラス固化設備は経験工学的要素が強く、発生することを想定していない事象が発生する可能性は否定できないが、それらに対応するための技術サポート体制が整えられており、万一そのような事象が発生したとしてもタイムリーに適切な対応が期待できるものと評価する。なお、操業運転開始後は継続的な状態の変化を常に監視し、状況に応じて柔軟かつ適切な対応を講じることが肝要である。

なお、以上は現行設備の制約条件の中で判断したものであって、ガラス熔融炉等の寿命や経年劣化を考慮して、今後も継続的な改善を行う必要がある。

③ガラス固化に関する技術開発と今後の改善への期待

現行のガラス固化設備の安定運転に関する見通しを得るという観点からは付加的な事項であるが、ガラス固化に関する技術開発という視点からの評価と今後の改善へ期待される事項を合わせて、以下に示す。

- ・安定運転の達成に対する役割を担ったと考えられる定期的な洗浄運転は、ガラス固化体量の増加に繋がるため、廃棄物減容の観点からは望ましいことではない。今後、継続的な運転技術の向上等によりその頻度や量を低減化する努力を行うこと。
- ・アクティブ試験で発生した様々な不具合事象に対する対策は、現行設備の制約を踏ま

えて運転管理の面から実施されたものであることを理解した上で、ガラス固化技術の高度化、すなわち新型炉の開発では、より抜本的な設備改善により、可能な限り洗浄運転を極小化する（あるいは必要としない）ガラス溶融炉の実現を目指すこと。

また、操業中の運転管理体制に関しては、今後経験する新たな知見についても逐次マニュアル等に反映し、安定運転に必要な体制の改善に継続的に取り組むこと。

- ・ 運転期間が増加すると、各種機器の経年劣化等も考えられることから、寿命を意識した保守作業の実施を心がけること。
- ・ ガラス固化設備の運転をマニュアル通り実施していても、運転条件の変動によって廃液条件が変化し、品質へ影響することから、運転データを分析・解析することによりガラス固化の状況を把握すること。

将来技術への期待として、

- ・ 流下ガラスの温度、流動状況のモニタリングについては、ガラス溶融炉が設置されている場所が高放射線下にあるという制約を踏まえ、古典的ではあるが頑健な方法も視野に入れて検討すること。
- ・ 不溶解残渣廃液を他の高レベル廃液とは別に処理することの是非については、最終処分を含めた最適化の観点より検討すること。

4. 再処理工場の安定した運転に関する課題と見通しについて(第二ステップ)

(1) 先行施設の実績

国内外の先行再処理工場の中で、年間処理量、運転監視方法等の観点で、再処理工程の主要部分（主工程）であるせん断、溶解、分離等の技術導入元であるフランス UP3 再処理工場が、もっとも類似点が多い。フランス UP3 再処理工場は、海外の電力会社の使用済燃料を再処理するために建設された軽水炉酸化燃料用の再処理工場で、年間処理能力は800トンであり、前処理施設のせん断、溶解、清澄工程を2系列持っている。六ヶ所再処理工場と同様に、通水作動試験、化学試験、ウラン試験という段階を経て、1989年11月に使用済燃料等を処理するアクティブスタートアップを向かえ、1995年に年間800トンの定格操業に至っている。使用済燃料の処理運転開始以降のフランス UP3 再処理工場を含むラ・アーグ再処理工場における運転実績を図6に示す。

(2) 第二ステップにおける検討の視点

安定運転の定義は、第一ステップと同様としたうえで、対象設備の違いを念頭において、「所定の処理量」については、各設備の処理条件に基づいて決められた処理量、と定義した。六ヶ所再処理工場のアクティブ試験において、使用済燃料のせん断、溶解等を行う主工程は、

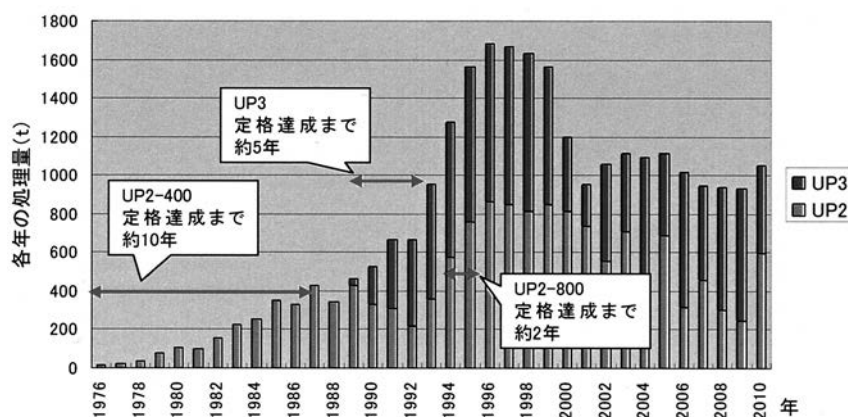


図6 先行施設／ラ・アーグ再処理工場の運転実績

幾つかの不具合を経験したものの、計画した試験を全て終了し、試験の判断基準を満足するとの結果が得られ、規制機関（旧原子力安全・保安院）にも報告されている。また、六ヶ所再処理工場の主工程の主要な技術導入元であるフランス UP3 再処理工場も、順調な運転の実績を残している。

その一方で、六ヶ所再処理工場の主工程は、2008 年に使用済燃料の処理を行って以降、停止期間が5年を経過し、また建設から既に10数年を経過している。従って、アクティブ試験において主工程設備・機器が所定の性能を発揮することが確認されているとはいえ、安定した運転に関する課題と見通しに対する評価として、設備の機能および運転員等の技術力の維持、設備の高経年化対策という観点から、検討・評価が必要と考えられる。

さらに、操業運転開始後の運転においては、これまでの試験運転では経験されなかった不具合が発生することも考えられることから、これら不具合の発生を低減する対策の一環として実施されている、先行施設の経験の反映に関しても、検討・評価が必要と考える。

上記を踏まえ、以下に示す視点に基づき、検討・評価を進めることとした。

①設備の機能維持および運転員等の技術力維持に係る方策

使用済燃料のせん断、溶解等を行う主工程は、2008 年に使用済燃料の処理を行って以降、停止期間が5年を経過していることを踏まえ、今後の操業運転に適した状態に設備や運転員等の状態を維持しておくための方策が適切に計画され、実施されているか、という視点から以下の2点について検討する。

- ・ 機器、設備の機能維持に対する取組み
- ・ 運転員等の技術力維持に対する取組み

② 設備の高経年化対策

再処理工場全体としては、建設から既に10数年が経過しており、操業運転開始に際して、

予め高経年化対策を考慮しておくことが必要と考えられ、高経年化に対する評価および対策の検討が適切に行われているか、という視点から以下の点について検討する。

- ・ 設備の高経年化の評価および評価結果を踏まえたりプレース等の対策の確認

③ 操業開始以降の運転計画

先行施設における経験、実績を参考とし、上記①、②の課題も踏まえ、操業開始以降の運転計画が適切に計画されているか、という視点から以下の2点について検討する。

- ・ 操業開始以降の運転計画の確認
- ・ AREVA, JAEA, メーカー等のバックアップ体制

④先行施設の不具合情報の反映等に係る不適合管理

先行施設の不具合情報を入手し、未然防止策として適切に活用しているか、という視点から以下の点について検討する。

- ・ 先行施設の不具合情報の分析と反映

なお、先行施設の不具合情報等が適切に処理される品質保証体制が構築されていること、アクティブ試験において発生した不具合への対応状況について、合わせて確認する。

(3) 第二ステップに対する技術的検討と評価

①設備機能維持および運転員等の技術力維持に係る方策

(a) 機器、設備の機能維持に対する取組み

- ・ 再処理工場にある約15万点に上る機械設備、計装設備、電気設備に対して、機器の安全上の重要度や機器が故障した場合の再処理運転への影響度に応じて、保全方法の分類を予防保全と事後保全に分けている。
- ・ 予防保全については、保全対象設備を選定するとともに、国内外の先行再処理プラントの実績、国内原子力発電所の実績およびプラントメーカーの推奨内容を考慮して点検頻度・点検内容を設定して取り組んでいる。

- ・事後保全については、保全実績を評価し、その結果を蓄積していくことにより、その後の予防保全と事後保全の仕分けや、予備品確保等へ反映している。
- ・これらの保全作業の実績として得られたデータをもとに、設備の劣化程度の確認、評価を行い、評価結果をもとに点検頻度等への保全計画に反映している。
- ・また、保全業務の管理方法については、必要に応じて見直しを図っている。
- ・さらに、今後の対応として、「各設備の保全内容の最適化」、「保全業務システムの改修」、「再処理固有設備における日本原燃の保修技術力の向上」を行うことで、保全業務の一層の改善を図る計画としている。
- ・長期停止している設備について、機器単体の定期点検や作動確認により健全性を確認するとともに、一部の工程については、工程全体を連動させた実動作確認を実施している。

これらのことから、数多くある再処理工場の機器・設備に対して、工場の安全性と操業安定性確保の観点から、維持管理を適切に行うためのシステムが、一通り構築されているものと評価した。今後、操業運転開始に向けて、構築したシステムのしっかりした運用と改善に努めることが重要である。

(b) 運転員等の技術力維持に対する取組み

- ・2008年10月以降、主工程が長期間停止している状態であり、アクティブ運転を経験した運転員が減少していることを踏まえ、必要な教育を体系的に行えるよう、「運転操作技術の習得」、「異常時、通常時の運転操作とプロセス挙動の把握」、「工程の技術的知識等の習得」を含む人材教育プログラムを整備し、技能維持と技術伝承を行っている。
- ・年度毎の教育、訓練計画では長期的な育成効果が見通せない、教育レベルにばらつきが生じる可能性が大きい等の過去の教育実態に対して、レベル毎の教育計画の設定、個人進捗管理票による年単位、長期的な進捗管理を実施する等個人毎に目標を設定した教育訓練計

画を策定するように改善している。

- ・総合運転訓練シミュレータは、先行施設であるフランスの再処理工場にもないわが国独自のものであり、教育訓練に有効に活用している。

再処理工場の各工程の運転は、起動、停止、圧力等のパラメータを見ながらの供給量等の設定変更等、運転員による手動操作が必要なものが多いという、再処理工場の特徴を踏まえた人材育成を行っている。また、長期停止している設備に対して、一部の工程については、運転員の技術力維持という観点も含め、工程全体を連動させた実動作確認も実施している。

以上のことから、再処理工場の運転開始に向け、実際の使用済燃料、実溶液を用いた運転訓練が行えない中で、現状可能な範囲において様々な工夫がなされており、運転員の技術力維持が図られているものと評価した。

②設備の高経年化対策

- ・六ヶ所再処理工場の設備に対して、国による高経年化に係る基本方針に基づき、経年変化事象を把握し、高経年化対策として、運転監視項目、定期的な部品交換の設定やリブレース計画の検討等、必要な対応を選定している。
- ・腐食環境の厳しい濃縮缶（高レベル廃液濃縮缶、酸回収蒸発缶、ウラン濃縮缶）については、減肉進展を監視するとともに、リブレースを検討している。特に、高レベル廃液濃縮缶に関しては、切替え可能な予備機が既に設置されている。それ以外の設備・機器については、通常の運転監視と部品交換により対応する。
- ・一部の設備・機器（主に制御盤、ガラス溶融炉、濃縮缶等）についてはリブレース工事期間に数ヶ月要する見込みであり、これらの設備・機器については極力同じ時期にリブレースを実施する方針とし、更に予備品供給の充実化（リブレース実施時期の裕

度確保), 製作工場における部品等のユニット化・現地搬入等の工事期間の短縮化, モックアップによる工事方法の事前検証等の方策についても検討している。

これらのことから, 現段階で必要と考えられる範囲で, 設備・機器の高経年化対策が適切に検討されているものと評価した。今後は, 操業運転開始に向けて, 運転データを積み重ね, 現在行われている高経年化対策における評価の精度を上げていくことが必要と考える。

また, 六ヶ所再処理施設を安定に運転していく上では, 発電用原子力設備で行われているように, 運転段階における検査・評価・補修の方法等に関する維持基準の規格化も必要と考えられる。再処理施設の維持基準に関しては日本機械学会等の学協会により民間規格化が行われ, 2010 年 7 月に再処理設備・設計規格, 2012 年 9 月に同・溶接規格および維持規格が, 日本機械学会制定の民間規格として発行されている。今後, 規制機関が主体となった維持基準規格化への検討が必要と考える。

③操業開始以降の運転計画

(a) 操業開始以降の運転計画の確認

- ・主工程が, 長期間停止している状態で操業運転に移行することを踏まえ, 操業開始時の運転計画として, 年間 800 トン処理の定格稼動に到達するまでの中期的計画と初年度の短期的計画に分けて計画することが必要と考えている。
- ・中期的計画については, 先行施設であるフランス UP3 再処理工場を参考に, 1 年目 40%, 2 年目 60%, 3 年目 80%, 4 年目 100%と段階的に処理量を上げる計画としている。
- ・短期的計画については, ①運転直の全班がせん断処理を行うステップを設け, ②次に, 連続運転を確認するステップを設定し, ③さらに, その後段階的に連続運転の処理量を増加させる, 計画としている。
- ・年間 800 トン処理の定格稼動に到達するまでには, 確実な処理運転の実施と並行して,

運転期間を確保する上で重要な影響因子である施設定期検査, 自主検査・点検, 機器保修の期間等の効率化を図っていくことや, 機器のリプレースについて運転期間への影響を極小化するような実施方法を検討している。

なお, 操業開始以降の運転計画を評価する前提として, 再処理工程の主要部分(主工程)であるせん断, 溶解, 分離等については, 年間処理量, 運転監視方法等の観点で類似点が多く, 技術導入元であるフランス UP3 再処理工場が順調な運転の実績を残していること, 六ヶ所再処理工場アクティブ試験等の試験運転において主工程に対する性能確認が行われていること等を確認した。

これらのことから, 事業者が検討している操業開始時の運転計画が, 段階的に処理量を増やす, 運転直の全班がせん断処理を行うステップを設ける等先行施設の経験を踏まえ, また長期間停止している状態で操業運転に移行することに配慮した計画となっているものと評価した。

また, 再処理工程の主工程については, 技術導入元であるフランス UP3 再処理工場が順調な運転の実績を残していること, 六ヶ所再処理工場アクティブ試験等の試験運転において, 定格処理量での運転が連続して実施できること, 22.2 日以内に 80 トンの処理ができること等, 処理能力等の確認が行われており, 操業開始以降の運転計画を評価する前提として, 設備として一定の処理能力を有しているものと評価した。

(b) AREVA, JAEA, メーカー等のバックアップ体制

- ・先行事業者, 建設メーカー等の技術支援を受け, 設備の性能確保や試験運転の円滑な実施が実現できたことに加え, 技術・ノウハウの伝承を受けてきている。
- ・試験運転時は, 技術支援として, 試験の立会いや運転管理全般に関する指導・助言・提案等を受けて, 試験を遂行してきた。

- ・最近の技術支援の実績として、フランス ラ・アーグ再処理工場および JAEA 東海再処理工場におけるトラブル事象等の情報共有を図る等を実施している。
- ・建設メーカから、日々の運転データの収集および過去の運転データの整理並びに予兆管理の実施やその結果に基づく異常兆候の早期発見、運転手順書の改善提案を受ける等を行っている。
- ・今後、再処理工場の円滑な操業に向けて、長期停止後には先行施設の運転実績からも初期トラブルの発生が見込まれるため、AREVA、JAEA や建設メーカの技術支援を継続していくことを考えている。

これらのことから、先行施設経験者および設備設計等を行ったメーカから必要な技術支援を受ける体制が、構築されているものと評価した。

④先行施設の不具合情報の反映等に係る不適合管理

- ・先行施設の不具合情報等について、基本設計段階、事業指定後、試験運転開始前と段階ごとに情報を入手し、設計・運転等への必要な反映を行ってきている。
- ・さらに、先行施設の不具合情報の反映とは別に、先行施設での運転・保守を通して蓄積された知見、経験を反映することを目的として設計検証を行い、先行施設の運転、保守の熟練者の意見を聞くことにより、運転手順、保守手順を改善することのみならず、設備の設計変更も視野に入れて必要な対応を図ってきている。
- ・また、フランス AREVA 社の駐在員による現場の施設管理の観察や分析を通じ、再処理工場の最新状況に応じた必要な助言、改善等の提案を受けるとともに、先行施設で発生した不具合情報等についても適宜情報提供を受けて、六ヶ所再処理工場へのフィードバックの必要性の評価を行っている。

これらのことから、先行施設の不具合情報

を適宜入手し、今後の操業運転での不具合発生リスク低減のための取組みが適切に実施されているものと評価した。今後もこれらの取組みを継続して実施することが必要と考える。

また、先行施設の不具合情報等が適切に処理される品質保証体制が構築されていることや、アクティブ試験において発生した不具合への対応状況について、以下のとおり確認した。

(a) アクティブ試験において発生した不適合事項等の措置

- ・アクティブ試験第1ステップから第5ステップの中で、679 件の不適合事項と 302 件の改善事項を抽出するとともに、不適合事項についてはその原因を特定し、是正処置を実施してきており、改善事項についても、処置内容を検討し、予防処置を実施している。
- ・アクティブ試験において発生した不適合等の分析結果に基づき、人的過誤による不適合事象発生対策として、組織の見直しも行われた。

(b) 品質保証体系と不適合管理等の仕組み

- ・不適合等の管理は、事業部（再処理事業部、埋設事業部、濃縮事業部、燃料製造事業部）ごとに、それぞれの事業部の品質保証部門が取りまとめ担当して実施しているが、事業部をまたがり全社的に水平展開が必要な場合には、全社の品質保証部門である品質保証室がとりまとめを行なっている。
- ・再処理事業部における不適合等の管理では、事象発生を受け、不適合処理票を起票した後、事象の内容、原因究明、是正・予防措置、水平展開の検討結果について不適合検討ワーキングで審議を行うことでサイドチェックを行っている。
- ・アクティブ試験における不適合等の管理の改善として、半期毎に類似事象の発生に係る分析評価を行い、必要に応じて、根本原因分析を行うこととしている。

上記のとおり、不適合等が発生した際の原因究明、必要な対策の検討およびその管理を行う

ための仕組みが構築され、不適合等の発生を抑止する対策が講じられていることを確認した。

(4) 六ヶ所再処理工場の安定運転をより確実とする提言

前項までの評価を総合し、六ヶ所再処理工場の安定運転実現に向けての準備は整っているものと評価した。安定運転をより確実なものとするため、表1に示す事項について、更に検討、実施することが望ましい。

5. おわりに

第一ステップおよび第二ステップにおける評価結果を踏まえ、六ヶ所再処理工場全体の安定運転に関する課題と見通しについての評価は、以下のとおりである。

- ・ガラス固化設備を含む再処理工場全体として、安定運転に向け、準備が整っているものと評価できる。
- ・先行施設の情報に基づく不具合発生の未然防止、不具合発生時の日本原燃(株)社内対応体制の整備と社外サポート体制の構築により、経験工学的要素がある再処理工場において、想定していない事象も含む不具合に対して適切な措置が講じられるものと期待される。

待される。

- ・今後、高経年化等が想定される設備・機器に関しては、長期的安定運転の観点から、早期にリプレース等の計画を準備し、長期にわたる運転の停止を回避する方策の具体化が望まれる。
- ・長期的には、ガラス固化における新型溶融炉の開発等、抜本的な改善策により廃棄物減容化を目指すことが望まれる。
- ・長期的な安定運転の観点から維持基準に基づく設備の保全が重要であるが、規制機関が主体となった維持基準規格化への検討が進められることが望まれる。

以上に示した評価結果を受け、事業者である日本原燃(株)に対して、再処理工場の安定運転に向けて、新規基準への対応も含め、万全の態勢を以って粛々と進めていくことを期待するものである。

参考文献

- (1) 日本原燃株式会社 HP 参照 <http://www.jnfl.co.jp/>
- (2) (一財)エネルギー総合工学研究所 HP 参照 http://www.iae.or.jp/research/result/cycle_201308.html

表1 六ヶ所再処理工場の安定運転をより確実とする提言内容

項 目		内 容
設備の機能維持および運転員等の技術力維持	機器・設備の機能維持	・PDCAを通じた、予防保全と事後保全の仕分け、予防保全機器の点検方法等の保全の考え方に関する実績評価を踏まえた継続的な改善 ・予防保全と事後保全の仕分け等の仕組みに対する継続的な改善活動の実施 ・保全業務の管理に対する実施した保全作業実績等の管理面の強化の観点での保全業務支援ツールを含めた仕組み作りの検討 ・考慮する必要があるか否かも含め、設計上考慮されていない事象の保全業務への反映検討
	運転員等の技術力維持	・先行施設での実績等も考慮し、実際の運転の中で捉えるべき現象等の知見の蓄積およびシステムティックな教育項目への反映 ・先行施設での教育訓練に関する情報調査および調査結果の必要に応じた反映
設備の高経年化対策		・計装系配管の詰まり等の発生可能性についての考慮 ・運転段階における検査・評価・補修の方法等に関する、規制機関が主体となった維持基準規格化の検討
操業開始以降の運転計画	運転計画	・各種検査等の頻度、必要とされる期間等日本固有の課題を踏まえた運転計画の評価、検討 ・再処理工場での起動／停止の回数が多いという設備の特徴を踏まえ、部品交換等に必要な期間と定期検査の期間の関係を考慮した運転計画の評価 ・可能な範囲で、実際の溶液等と用いた設備の運転により、機器の機能、運転員の技術力の維持に対する再確認を行う等、操業運転をよりスムーズに立ち上げる方策の検討
	バックアップ体制	・必要に応じた化学工業との情報交換等の継続的な実施
先行施設の不具合情報の反映等に係る不適合管理		・高経年化の観点での先行施設運転情報の分析および分析結果を踏まえた必要な対応策の検討 ・先行施設での不具合事象等の経験に対する使用環境、発生原因等に着目した分析および分析結果を踏まえ先行施設と同様な現象の発生を念頭に置いた対応策の検討

シェールガス／オイルについて

※ 水田 美能（プロジェクト試験研究部
化石・環境グループ 参事）

※※ 埴 雅一（プロジェクト試験研究部
化石・環境グループ 副参事）



1. はじめに

1970年代に陸上での生産のピークを迎えていた米国の天然ガス生産が再び復活し、その生産量は過去最高を更新し続けている。米国エネルギー省エネルギー情報局（EIA）によれば、現在の好調な天然ガス生産量の上昇はしばらく継続することが予想されており、図1に示すように、2020年以降は米国内での天然ガス生産量は、国内消費量を上回り、結果として、米国は世界第1位のエネルギー消費国でありながら天然ガスの純輸出国になることが想定されている。

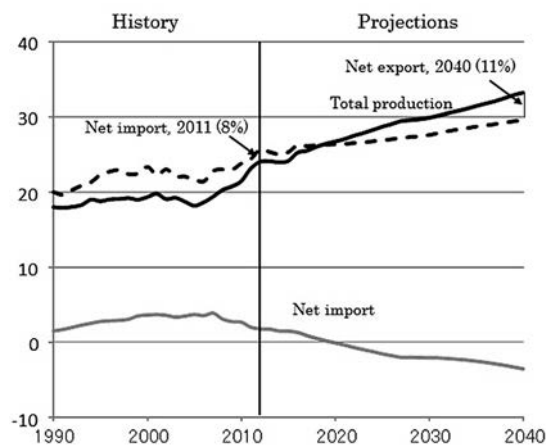
米国の天然ガスの増産は、これらの地域的需給の変化ばかりでなく、米国の天然ガス価格動向にも大きく影響を与えている。図2に1990年代後半から昨年までの、原油（世界的な指標

である Blent 原油と、米国の指標である WTI（West Texas Intermediate）原油および米国内天然ガス価格の指標である、ヘンリーハブ（Henry hub）スポット価格の推移を示した。

2007年の原油価格の高騰までは、天然ガス価格はおおむね原油価格に連動して変化してきたが、2008年のリーマンショックによる暴落以降、原油価格が急速に回復して現在の100ドル／バレル（\$/BBL）前後で推移しているのと対照的に、天然ガス価格は減少の一途をたどっている。

2012年代には2ドル／百万Btuをも割り込み、2012年4月20日には当時の最安値である1.82ドル／百万Btuを記録し、その後わずかに上昇して3ドル台で推移してきた。

この米国における天然ガスの増産にもっとも寄与しているのがシェールガスである。



（出所：EIA -Annual Energy Outlook 2013）

図1 米国天然ガス市場の予測

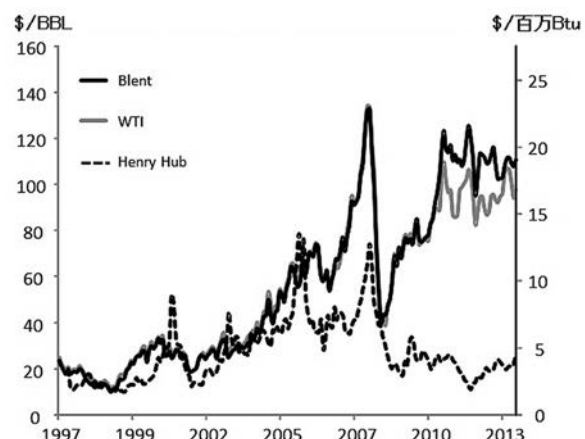
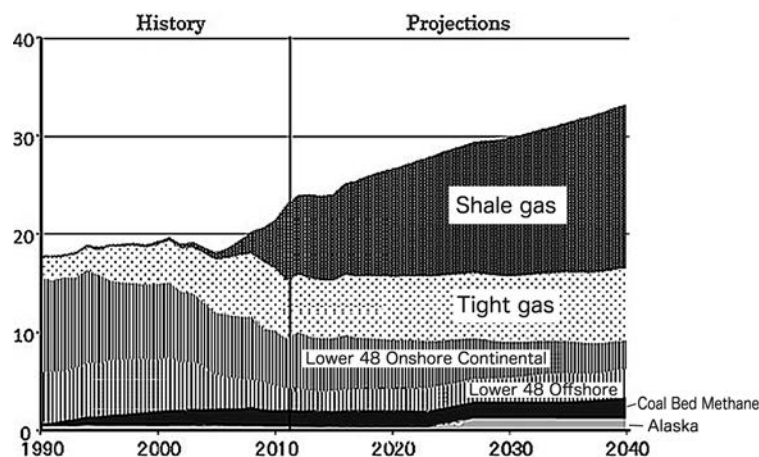


図2 原油価格と天然ガス価格の推移



(出所：EIA -Annual Energy Outlook 2013)

図3 米国の今後の天然ガス生産予測（10 兆立方フィート）

図3にEIAのデータに基づいた、1990年以降から2040年までの、ソース別天然ガス生産量実績と予測を示した。

図3からも明らかなように米国本土48州（Lower 48）の陸上（Onshore）・海上（Offshore）の在来ガス田からの生産が先細りの中でシェールガスの増産が現在の米国天然ガス市場を支えていることが明らかであり、これが「シェールガス革命」と呼ばれる所以であろう。

今回エネルギー総合工学研究所ではシェールガス革命の一端を垣間見るため、米国においてEIAや、米国で実際にシェールガス・オイルを生産している日本企業等を訪問し調査したのでその一端を報告する。

2. シェールガスとタイトオイル

シェールガス、およびシェールオイル等の非在来資源については、すでに多くの方が解説されておられるので本報告ではEIAとのインタビューの話題のみ紹介する。

多くの記述で、シェールガス／タイトガスおよびシェールオイル／タイトオイルの記載がみられるが、当研究所がEIAを訪問した際のインタビューによれば、彼らはシェールガス、タイトガス、シェールオイルおよびタイトオイルを次のように定義しているとのことである。

EIAはシェール層から移動して砂岩層等に蓄

積しているタイトガスとシェール層から回収されるシェールガスとを明確に区別している。

一方、油分については、一般にガスと同様シェール層から移動して砂岩層等に蓄積している油層（在来型の油田ではない）からの原油と、シェール層から回収される原油は混同されておりすべてシェールオイルと言われている。

例えば、バッケン（Bakken）フィールドの中部から産出されている原油はタイトサンド層からであり、ニオブアラ（Niobrara）の垂直井ではシェール層、炭酸塩層、砂岩層などからの原油が同時に回収されている。

厳密な意味でシェール層からオイルの回収が行われているのはイーグルフォード（Eagle Ford）シェールのみであり、この点から、EIAではオイルについてはすべてを包括して「タイトオイル」の名称を使用しているとのことであった。

一方、国際エネルギー機関（IEA）のレポート“Golden Rules for a Golden Age of gas, World Energy Outlook Special Report on Unconventional Gas”においても、シェール層から回収される軽質な油分は、オイルシェール（炭水化物（kerogen）を大量に含有するシェール岩を加熱することにより油分・ガスを生成）と区別するために「ライト・タイトオイル」と称することを推奨している。以降ではシェールガス（Coalbed Methaneやタイ

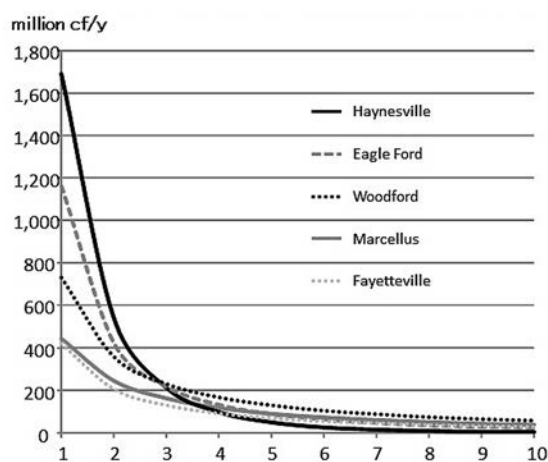
トガスとは明確に区別されている非在来ガス) およびシェールオイルを包括する「タイトオイル」の名称を使用する。

3. シェール資源の採掘技術

シェールガス革命を生み出した革新的採掘技術としては、水平坑井採掘技術、多段階水圧破碎、マイクロサイスミック等が挙げられるが、これらの技術については独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)上席研究員伊原博士等の解説が多いのでそれらを参照されたい⁽¹⁾。

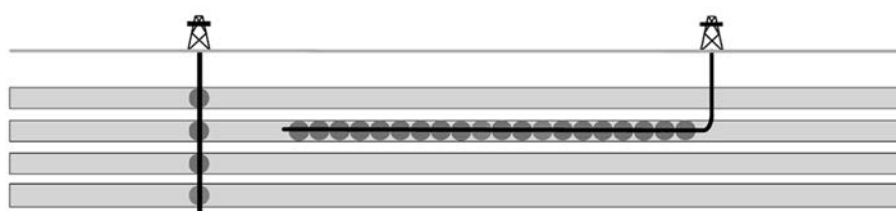
シェール資源の採掘では図4に示すように生産開始から産出ガス(オイル)が急激に減退することが知られている。

このため生産量を確保するためには常に新規採掘を行わなければならないので、採掘コスト削減と効率化が必要である。



(出所: EIA -Annual Energy Outlook 2012)

図4 シェールガス生産減退の例



(出所: EIA)

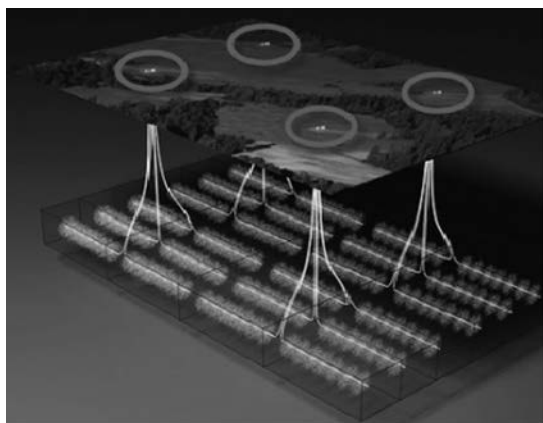
図5 垂直坑井と水平坑井での多段階水圧破碎(模式図)

図5はEIAとのインタビューにおいて示された模式図である。水平坑井の代表例では長さ2マイル(約3.2 km)の距離で12段の水圧破碎が行われており、採掘リグによる坑井形成と同程度以上のコストがかかっている。今後のシェールガス生産におけるコストダウンでは、この水圧破碎の段数の最適化および、長い坑井の中でガス生産に効率的な場所に集中して破碎するノウハウの蓄積が需要であるとのことであった。

EIAとのインタビューでは盛んに“sweet spot”に触れられており、広大なシェール資源生産地域でも、特定の生産効率の高い地域、あるいは長い水平坑井の内でも生産量を大きい区分を指しており、この“sweet spot”を探し当てるノウハウの蓄積の重要性に触れていた。

同様のことはテキサス州でシェール資源の採掘に携わっている日本法人を訪問した際にも話されていた。採掘コストの削減のためには採掘用リグを解体せずにレール等で次々に移動させることで、リグによる坑井形成にかかる日数の削減を行ったり、地域全体の資源回収段階(「スキミング」と称するとのことであった)においては、水圧破碎の作業日数の削減を図っているとのことであった。

図6はスキミング工程で形成される坑井のイメージ図であるが、1基の地上井(クリスマスツリーと称する)からマルチラテラル井が3本掘り進められており、各井は水平井に移行するところで2本が180度逆方向に延びているので1つのクリスマスツリーから各6本の水平井が構築され、それぞれ水圧破碎が行われている。



(出所：EIA)

図6 スキミングの様子

イーグルフォードの例では、各水平井の間隔は約500フィートで、水圧破碎を行うオペレーター（リグによる採鉱とは別会社）は複数の水平井に対して次々と水圧破碎を実施することで工期の短縮によるコストダウンを図っているとのことである。

4. シェール資源生産の現状

EIA とのインタビューによれば商業生産可能なシェール層では下記にまとめて示すような条件が必要であるとのことであった。

- ・空隙率が2割以上あること
- ・総有機性炭素分（Total Organic Carbon）含量が2重量%以上あること
- ・炭水化物（Kerogen）の熱熟成が十分に進んでいること（より熟成が進んでいればガス豊富であり、そうでなければ油分が多い）

- ・シェール層の厚みが十分あること
- ・粘土分（Cray）を多く含まないこと（粘土は破碎されにくく、脆弱な岩盤層であることが望ましい）
- ・十分な深さにシェール層があり、地圧が高いこと

参考として表1に主なガス生産シェール層の地質データを示した。

ジョージ・ミッチェル氏が1998年にシェールガス生産に成功したバーネットシェール層（層厚：600フィート）に比べて、近年開発が進められているヘインズビルやマーセラス等のシェール層の厚みは300フィート（約100m）以下であり、水平坑井技術の進歩がうかがわれる。

一方、図7に全米での在来型油田・ガス田を含めた採掘用のリグ数の推移と天然ガス回収量（Withdrawals：井戸元での生産量で、フレアリング、井戸への再注入等を含む量）を示したが、2010年以降のリグの増加は、原油価格の回復とガス価格の低迷の影響を受けてオイルの生産を志向した傾向が明らかである。

2013年11月時点での米国での稼働リグ数は約1,750基、内8割の1,480基あまりがオイルリグである。なお、シェール層での稼働リグは、図7に示した6地域（Bakken, Eagle Ford, Haynesville, Marcellus, Niobrara, および Permian）の合計で約1,170基程度を報告されているので、米国内での稼働リグのうち実に65%強がこの6地域でシェール層か

表1 代表的な米国シェール層の地質データ

シェール層	深度 (feet)	層厚 (feet)	空隙率	有機性炭素分	熱熟成度※ (Ro %)
Barnett	6,500-9,000	100-600	4% to 5%	3% to 8%	1.2% to 2.2%
Fayetteville	1,500-7,000	20-300	2% to 8%	3% to 8%	1.2% to 4%
Haynesville	10,500-13,500	200-300	2% to 9%	3% to 5%	>1.5%
Marcellus	4,000-8,500	50-200	3% to 10%	2% to 12%	1% to 2.5%
Woodford	6,000-11,000	120-220	3% to 9%	1% to 14%	1.1% to 3.0%

(出所：EIA)

※熱熟成度（ビトリナイト反射率(vitrinite reflectance - Ro)）：泥質岩に含まれるケロジェンを酸処理等によって分離後、合成樹脂で封入・研磨して鏡面に仕上げ、顕微鏡分光光度計を用いて油浸法でコリナイト（ビトリナイト・グループに含まれる石炭質ケロジェンの1つ）を対象に、標準反射板との比較で反射率を測定したもの。一般荷、埋設深度が深くなって地温が上昇するに伴い、あるいは地質時代が古くなるほど、ビトリナイト反射率は増加する。

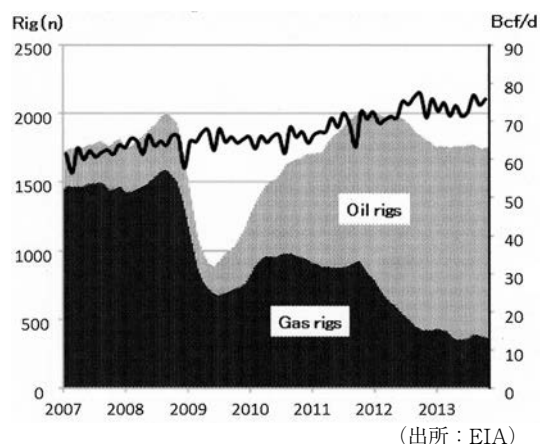


図7 オイル・ガス目的別リグ数の推移

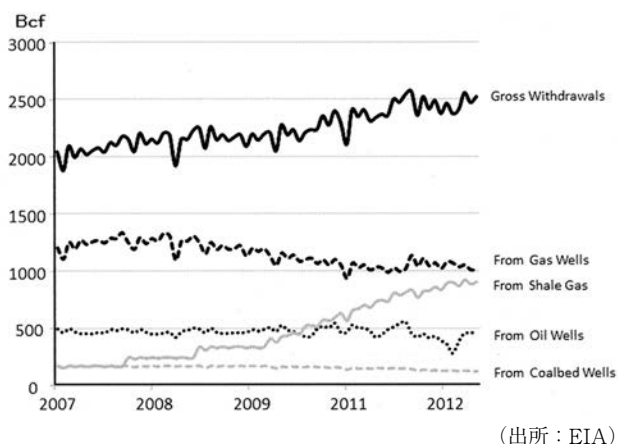


図8 全米の天然ガス回収量推移

らのタイトオイル・ガス生産に投入されており大半はタイトオイル生産目的であることが分かる。

それでもトータルのガスの回収量が落ちていないのは、タイトオイル生産井から随伴して回収される天然ガス分がかなりの量を占めていることがうかがえる。

図8に米国における天然ガス回収量の各井戸種別のデータを取りまとめたが、在来型のガス田の生産量が徐々に低下しており、油田およびコールベットメタン井からの回収量はほぼ横ばいで圧倒的にシェールからの回収量が全体の生産量増加を支えている。

米国におけるシェールガス・タイトオイルの代表的な生産地域の生産状況は、EIAが毎月発表している“Drilling Productivity

Report” (DPR) から詳細なデータを入手することが可能である。

図9にはこの DPR で詳細データが示されている代表的な米国シェールガス・タイトオイル生産地域と、この6地域のシェールガス・タイトオイル生産フィールドでの本年（2014年）初頭に生産されたタイトオイル、シェールガスの実績を表2に示した。

この表で明らかなようにフィールドによってガス中心（Haynesville, Marcellus, Permian）とタイトオイル随伴地域（Bakken, Eagle Ford, Niobrara）とに大別される。

前述6地域のための1日当りのシェールガス総生産量とタイトオイルの総生産量の推移を図10に示した。

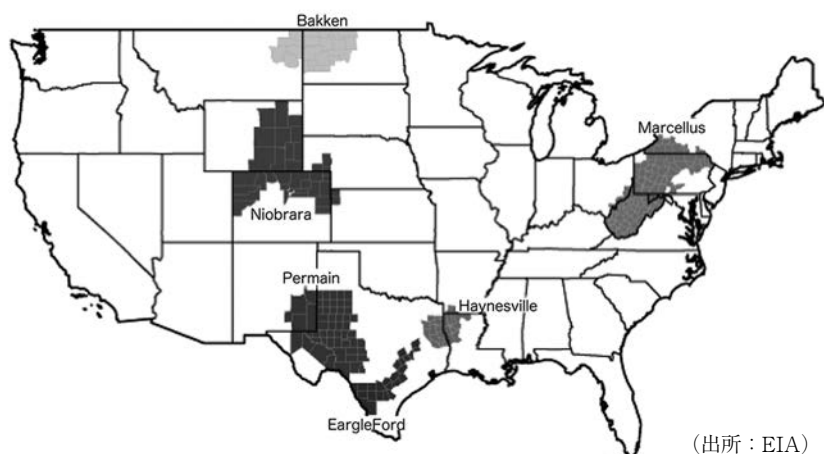
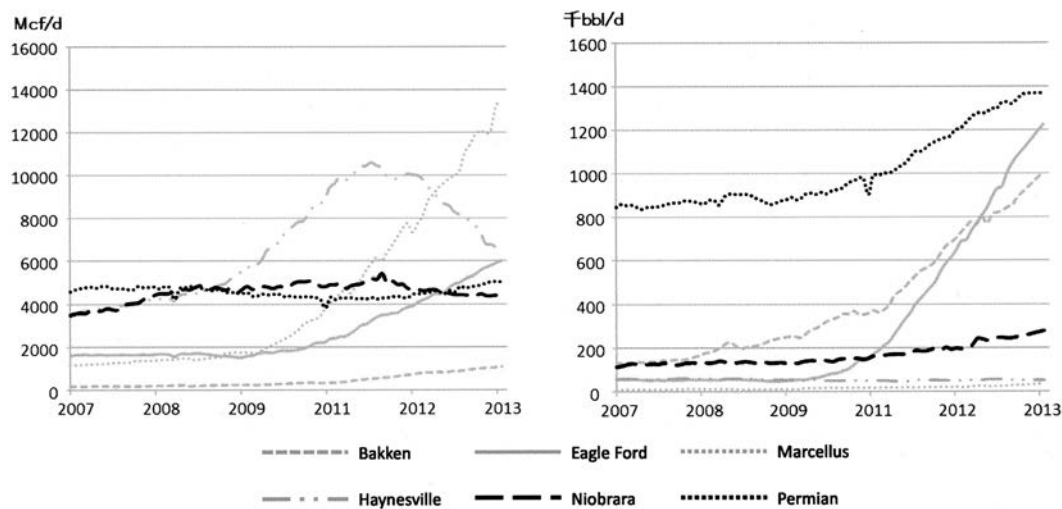


図9 米国の代表的シェール資源開発

表 2 主な 6 地域の直近の生産実績

Region	千 bbl/日			Mcf/日		
	2013 年 12 月	2014 年 1 月	増分	2013 年 12 月	2014 年 1 月	増分
Bakken	1,004	1,026	21	1,089	1,118	29
Eagle Ford	1,222	1,250	26	6,007	6,111	104
Haynesville	52	52	0	6,505	6,376	-129
Marcellus	38	40	2	13,463	13,837	374
Niobrara	277	284	7	4,363	4,326	-37
Permian	1,368	1,370	2	5,059	5,055	-4
Total	4,008	4,078	70	36,485	37,199	376

(出所：EIA-Drilling Productivity Report, Jan.10,2014)



(出所：EIA-Drilling Productivity Report, Jan.10,2014)

図 10 主な 6 地域でのシェールガス・タイトオイルの生産量推移

2010 年からの生産の主力であったヘインズビルの生産量が減少し、ガス主体のマーセラスの増加の著しいことが分かる。またオイル主体の生産が行われているイーグルフォードからの随伴ガス生産も、旺盛なシェールオイル（イーグルフォードは純粋なシェール層からのシェールオイル生産地域）の採掘にともなって急速に増加している。

これら 6 地域の総ガス生産量は 2013 年 12 月で約 365 億立方フィート/日 (Mcf/d) で、すでに全米の総生産量の 50% を超える実績となっており、特にマーセラスのみで全米の約 20% 近い生産をしていることが分かる。

タイトオイルの地域別総生産量の推移では、近年のバッケンでの生産量の上昇にもまして、イーグルフォードの生産量増加が著しいことが見て取れる。パーミアンを含めたこれら上

位 3 地域のタイトオイル総生産量は、2013 年 12 月のデータでは、約 360 万バレル/日 (bbl/d) であり、全米の同月の原油生産量 756 万バレル/日の実に 47% 強に達している。

以下の項では、DPR (2014 年 1 月 10 日発表) のデータをもとにして地域ごとに分析することで生産の様子を考察する。

(1) バッケン (Bakken)

米国北西部のノースダコタ州西部からモンタナ州東部およびその北のカナダ国内にまでまたがるシェール層であり、圧倒的にタイトオイルの生産が主体の地域である。

2013 年 12 月のデータではタイトオイル生産量は、1,003,578 バレル/日に達しており、全米の同月の原油生産量約 756 万バレル/日の 13% 強であり、大幅な生産増加を記録している

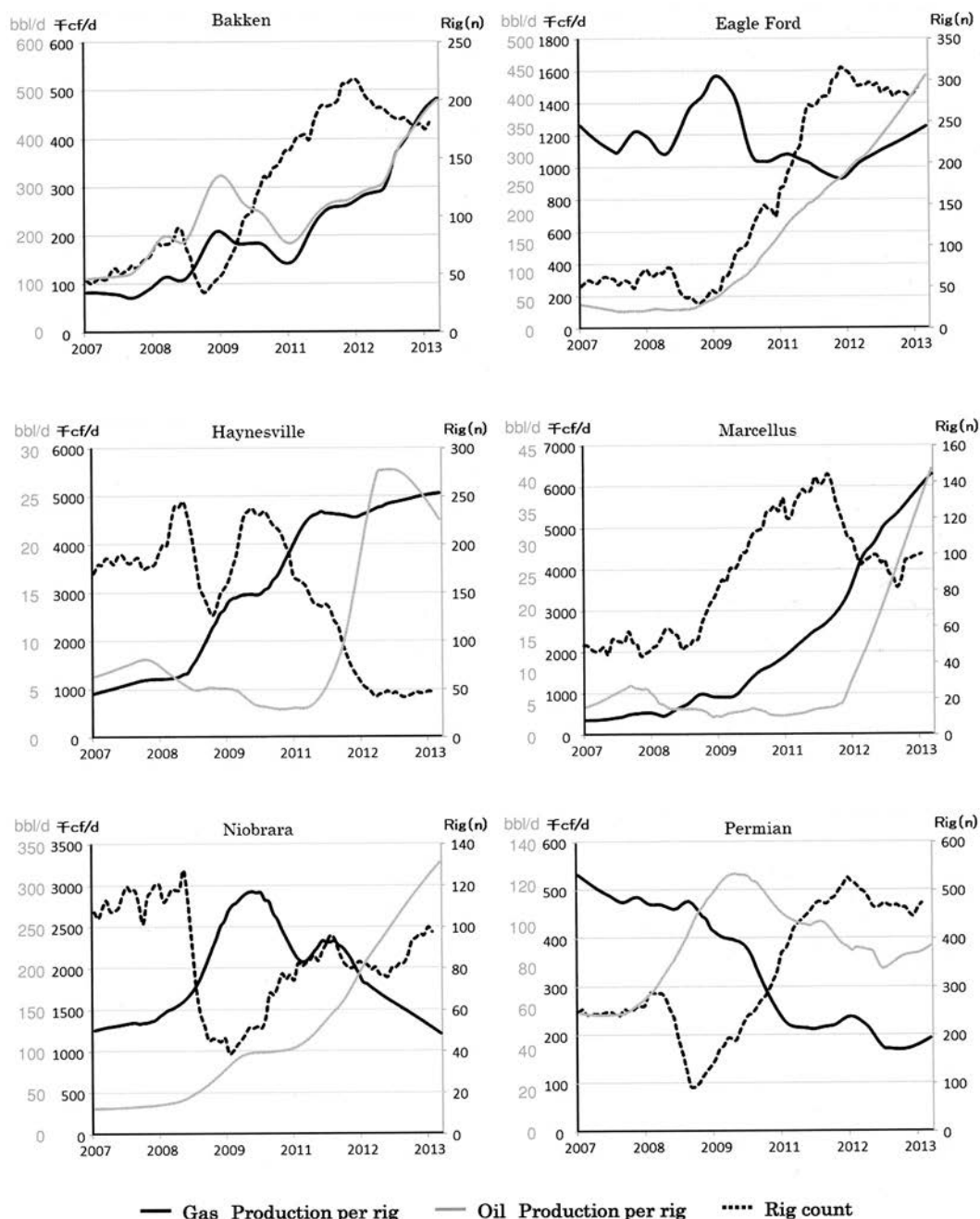
後述のイーグルフォードには2位の座を明け渡しているが、パーミアンとともに現在の米国におけるタイトオイルの3大生産地域である。

バッケン地域におけるシェールガス・タイトオイル生産井の分布図⁽²⁾によると圧倒的にオイルリッチな生産井が多く、特に地域の東部、ノースダコタ州内に分布しているようすが見て取れる。

DPR のデータをもとに、バッケン地域の開発リグ数、オイルとガスのリグあたりの生産量の推移を図11に示す。

2009年以降、一時リグ当りの平均生産性が低下していたが、2011年以降は開発に投入されるリグ数が増加するとともに、リグあたりの生産量を増加し続けている。

地域的にロッキー山脈地帯であるノースダ



(出所：EIA-Drilling Productivity Report, Jan.10,2014)

図11 主な6地域の開発リグ数と井戸当りのガス・オイル生産性

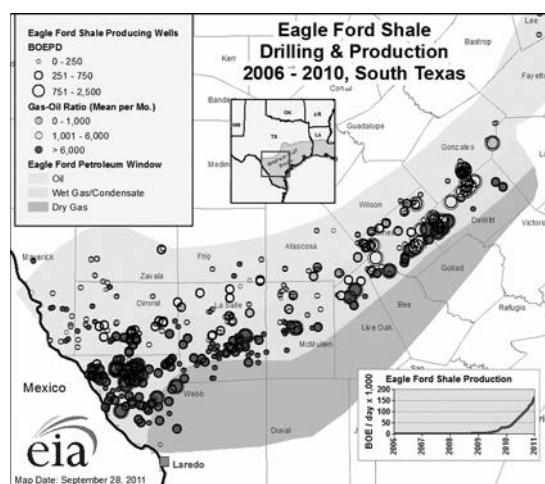
コタ州は、石油の大消費地（製油所の多い地域）である東海岸やメキシコ湾岸地域へのパイプラインの輸送能力があまり大きくないというのに、これまでビスマルク郊外に処理能力 60,000 バレル／日の製油所が 1 カ所しかなかった。このため生産されるタイトオイルの多くを鉄道輸送に頼って主にカナダ東海岸や米国中部のシカゴ地域の製油所に輸送してきた。資料によれば 2012 年段階ですでに生産された原油の 50% 以上を鉄道輸送に頼っており、現状の生産量増加から見ると、この比率はさらに高まっていると予想される。

このためか、バッケン産原油は市場において WTI に対して時期によっては 20 ドル／バレル以上の低価格でしか取引されておらず、昨年末でも 10 ドル／バレル前後 WTI より低価格取引の状況である。後述のイーグルフォード産オイルが世界的な原油価格の指標である Blent（近年は WTI より 10 ドル程度高い）と同程度の LLS（Light Louisiana Sweet）価格で取引されているのと対照的である。

昨年（2013 年）7 月に、カナダ東部のニューブランズウィック州の製油所に輸送中であった貨車が、ケベック州ラックメガンティックで脱線・転覆し爆発炎上し、この事故では最終的に 47 名の死亡者が報告されている。

さらに昨年 12 月 30 日にもノースダコタ州ファーゴ近郊で輸送中の貨車が接触・脱線し爆発炎上する事故が起きている。

2014 年 1 月 2 日、米国運輸省のパイプライン・有害物質安全庁（PHMSA）はバッケン産出のタイトオイルは「従来の重質原油と比べて燃えやすい可能性がある」との注意喚起をしており、さらに調査を続けるとの声明出している⁽³⁾。また、シェールガスのパイプラインも当然不足しているため、オイル主体の生産を志向している生産者は余剰の随伴ガスをフレアリングで燃焼させているのが現状であり、資源回収の観点からも、温室効果ガス放出の観点からも環境保護団体に注目されている。



（出所：EIA）

図 12 イーグル・フォード地域での坑井分布

（2）イーグルフォード（Eagle Ford）

米国南西部のテキサス州から南東、メキシコ国内までまたがるシェール層であり、地域によりガス主体からオイル主体の地域に区分される。図 12 に示すように地域の南部はドライガス地域であり北に向かってオイルリッチな生産地域が広がっているため、生産井は圧倒的に北に偏って分布している。

図 11 に示した、イーグルフォード地域における稼働リグ数およびリグ平均のガス・オイル生産状況によれば、2010 年以降圧倒的にオイルの生産を目的とした開発が進んでいる様子が確認され、新規の開発井の分布は圧倒的に北に偏って開発が進んでいると予想される。

この地域の位置するテキサス州は、歴史的に米国における在来型の石油・ガスの生産の中心となってきた地域である。

したがってメキシコ湾岸のテキサス州からルイジアナ州にまたがる地域は、米国有数の石油精製・石油化学プラントの林立する地域であるので、以前よりオイル・ガスのパイプライン網が発達しているという生産インフラに恵まれた地域であり、今後さらに米国での石油生産の中心となると予想されている。

（3）ヘインズビル（Haynesville）

アーカンソー州南西部・ルイジアナ州北西部からテキサス州東部にまたがるおよそ 9,000

平方マイル（約 23,000 km²）の地域に存在するガス主体のシェール層である。

図 11 で分かるように 2010 以前よりシェールガスの開発が活発に行われていた地域であって、生産量が 2008 年以降急激に増加しており、現在のシェールガス革命の端緒となった天然ガス生産地域の一つである。

新規掘削に投入されているリグ数は近年急激に減少しており、図 10 の地域別ガス総生産量もこれにともなって減少している。

（４）マーセラス（Marcellus）

ニューヨーク州南部からペンシルベニア州を貫いてウエストバージニア州およびオハイオ州の一部（北部）までおよそ 600 マイル（約 970 km）にまたがり資源賦存地域はおよそ 95000 平方マイル（約 246,000km²）ともいわれる広大なシェール層である。名前の由来はニューヨーク州の小さな村の名からとされている。

シェールガス開発の端緒となったバーネットシェールに続いて開発の開始された地域であるが、2009 年頃から盛んに開発リグが投入されており、シェールガスのリグ当り生産量が急激に増加している。

マーセラスシェールの開発地域は、他のバーネット、バッケン、イーグルフォードのような原野地域ではないため、シェール資源開発に伴う住民の環境への不安が大きいという背景を持つシェール開発地域であり、ドキュメンタリー映画『ガスランド』の舞台となった地域である。

EIA とのヒヤリングにおいても、シェールガスは今後マーセラス地域が中心となると予想されており、地域は広大であるが 2~3 か所の“sweet spot”が確認されているので今後も生産量は増加するとのことであった。

この地域は、メキシコ湾岸の在来ガス生産および工業地帯から遠く、従来は南部から北東部の都市圏への在来ガスパイプラインはあるが、逆のメキシコ湾岸へのパイプラインが

不足していた。特に天然ガス（メタンガス）に随伴する軽質分（NGL）は、精製・分離プラントの主力はメキシコ湾岸地域であり、この方面への輸送能力の不足が東部でのガス余剰感をもたらしていたが、2013~2014 年にかけてメキシコ湾岸向けのパイプライン計画が稼働することになっており、この地域での天然ガス増産には有利な状況となっている。

（５）ニオブララ（Niobrara）

米国中西部コロラド州のシェール層である。以前よりガス主体で開発が進んできたが近年の油価とガス化の価格差より、最近はオイル主体の開発が中心でその生産量も順調に増加しているものの他のバッケン、イーグルフォードほどではない。

2012 年 1 月に中国石油化工集团公司（シノペック）が、米デボン・エナジー社が保有するこの地域での権益の一部を獲得したことで注目された。

（６）パーミアン（Permian）

米国南西部のテキサス州東部からニューメキシコ州南東部にまたがる地域で、約 230,000km² の広さに及ぶ。

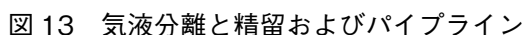
シェール革命が話題になる以前の、2008 年のデータでは、図 10 に示したようにオイル生産量は 86 万バレル／日程度で、アラスカを除く州を除く米国本土 48 州の当時の原油生産量である約 450 万バレル／日の内のおよそ 20% 程度を生産していた。その後 2013 年 12 月のデータでもこの地域の総生産量は 137 万バレル／日弱、わが国の平成 24 年度の 1 日平均原油輸入量 363.6 万バレルの 40% 近い量の生産を継続している。

図 11 によれば 2010 年以降再び採掘リグ数が増加し、現在でも 500 基近いリグが稼働している。この 6 地域の中では圧倒的に開発リグ稼働数の多い地域であるが、リグあたりの生産性は他の 5 地域の様に増加しておらず、資源としては成熟した安定生産の様子が推察される。

5. シェールガスの利用

かつては Gas Processing Unit はガスの生産者が所有していたが、1993 年に連邦エネルギー規制委員会 (FERC) 指令 636 によってガスの

ところが、電力自由化に伴う 2000 年の電力



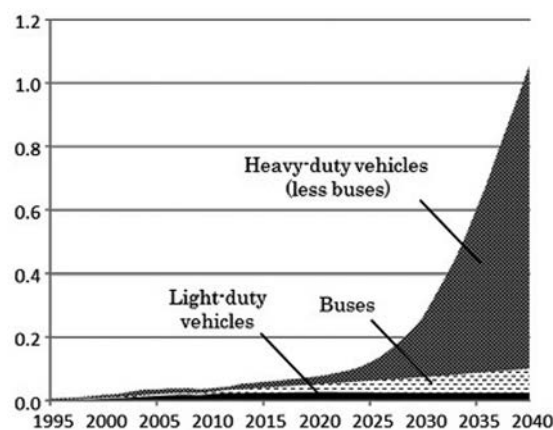
危機と天然ガス需要の急増のため、天然ガス価格が高騰すると米国の石油化学産業の競争力は急速に低下して、多くのエタンクラッカーが稼働率低下に追い込まれていった。

アンモニアやメタノールほど大幅な休廃止こそなかったものの、稼働率が低下し2001年から2002年にかけてエチレン製品の輸出が減少した。2007年にはシンガポールのナフサ価格とヘンリーハブの価格差が広がったため、米国の石油化学産業の競争力が回復し輸出が増加した。

2011年末からのエタン価格の低下とポリエチレンの国際競争力の増大を受けて、エタンクラッカーの新增設計画が急増した。完成年は当初の発表より1、2年ずれ込んできている。これらの計画のすべてが予定どおり完工するとは考えにくいだが、エタンの価格アップ要因にはなりえるものと考えられる。

このように米国のシェールガス革命は下流の石油化学産業の活性化を招いているが、米国における新たな天然ガスの市場として液体燃料である石油への依存度が高い輸送部門でも、石油との価格差から天然ガスの利用が考えられている。

EIAにおけるヒヤリングでも、米国においては長距離輸送のトラックや貨車で液化天然ガス（LNG）の利用が今後進められてゆくはずとの情報であったし、戦略国際問題研究所（CSIS）におけるインタビューでは大企業



(出所：EIA -Annual Energy Outlook 2013)

図 14 輸送部門における天然ガス利用予想

がスポンサーとなって LNG 供給インフラ整備の計画が練られているとのことであった。

図 14 に示すように輸送部門でも特に大型車での利用が予想されており、2040 年での大型車での使用量 954 兆 Btu は、同じ “EIA - Annual Energy Outlook 2013” での 2040 年時点の軽油需要量、9,820 兆 Btu の約 1 割にあたる。EIA の予想では 2040 年には輸送部門全体の 4% を天然ガスすなわち CNG/LNG が担うとされている。

LNG であれば 1 回の充填で長距離走行も可能であり、すでに図 15 に示す全米の LNG 供給設備の構想も示されている。

6. おわりに

米国では今期の厳冬の影響で瞬間的には



(出所：米国 Shell 社ホームページ)

図 15 LNG ステーションの計画案

あるがヘンリーハブスポット価格が8ドル/百万Btu 近辺まで何度か急騰しているので、今後のガス価格は、米国内での需要の増加次第では大きく振れる要素も含んでいると思われる。

一方、タイトオイルは軽質であり、米国メキシコ湾岸の分解型製油所での処理にはあまり適していない。昨年末ごろより LLS のスポット価格と Blent 原油価格との開きが大きくなっており、最近、米国内で天然ガスに続き原油の輸出解禁を求める意見が散見されるのもこれと無関係ではないと思われる。

現在の米国における天然ガス生産はマーセラス地域のガス主力の生産以外は、ガス価と油価の大幅な価格差からくるタイトオイルの積極的な増産による随伴ガスとしての生産増加が主力である。したがって今後の天然ガスの生産動向の予想においては、米国内の石油化学産業等の需要増加とともに、タイトオイルの生産動向や原油価格の動向が大きく影響すると予想される。

【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「シェールガス革命の我が国への影響の技術的評価」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であります。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) <http://oilgas-info.jogmec.go.jp/report.pl?baitai=2>
- (2) http://www.eia.gov/oil_gas/rpd/shaleoil1.pdf
- (3) Oil & Gas J, 3 Jan 2014

平成 26 年度 事業計画

(一財) エネルギー総合工学研究所

1. 基本的な考え方

当研究所は、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。

2. 最近の情勢

世界のエネルギー情勢は、再生可能エネルギーの導入促進やシェールガス等の非在来型化石資源の台頭、新興国におけるエネルギー需要の急増、電力市場の自由化、国際的な政治動向等と相まって、急激に変化している。これらに加え、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）や国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）の動きに見られるように、地球環境問題への対応も、より強く要請されることが予想される。エネルギー技術立国を目指すわが国としては、これらに的確に対応していくことが求められている。

平成 23 年 3 月、東日本大震災に伴い発生した東京電力福島第一原子力発電所事故（以下「福島第一事故」という。）は、放射性物質に

よる周辺環境の汚染という事態を引き起こし、多くの地元の方々に多大な影響をもたらした。また、事故炉の廃止措置に向けた長期に亘る対応が必要となっている中、汚染水の漏洩問題が急務の課題となっている。さらに、国内の原子力発電所が全て停止している今、従来の原子力発電を肩代わりしているのは、再生可能エネルギーの導入促進が図られてはいるものの、現実的には火力発電であり、温室効果ガス排出量の増加に加え、燃料調達コストの増加やこれによる貿易収支、経常収支への影響が生じている中、安全性が確認された原子力発電所の再稼働が期待されている。

今後、新たなエネルギー基本計画などの国の方針に沿って、化石燃料や原子力、再生可能エネルギーそれぞれの特徴を生かした新たなエネルギー需給構造の実現を目指して取組が進められることとなる。特に原子力については、継続的な安全性向上に向けた取組を進めることが求められているとともに、使用済燃料対策をはじめとするバックエンド対策を着実に進めることが不可欠となっている。

エネルギーの供給面では太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入が進む一方、需要面においてもエネルギー利用のスマート化を目指したスマートグリッドやエネルギーマネジメントシステム等に関する技術開発のほか、世界でもトップクラスにある省エネルギーに係る技術開発や、燃料電池自動車等の次世代自動車に関する研究開発が進められている。加えて、エネルギーの貯蔵・輸送媒体として、水素が大きな注目を集めつつある。

また、安定供給の確保や需要家の選択肢の

拡大等を目的に、小売及び発電の全面自由化等に向けた電力システム改革が進展する一方、東日本大震災の教訓を踏まえ、大規模災害等に備えた国づくり（国土強靱化）を目指し、災害に強い、重要な社会インフラである電力供給ネットワークの構築とともに、電気保安のあり方等に関する検討が求められている。

地球環境問題については、IPCC 第5次評価報告書第1作業部会報告書が昨年9月に公表され、人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の主な要因であった可能性が極めて高いこと等が示された。また、昨年11月のCOP19において、2020年以降の将来枠組みとして、まずは各国が自主的な削減目標を提出すること等が合意され、2015年12月のCOP21（パリ）における将来枠組みの合意に向けた準備が整えられた。わが国の2020年度のCO2削減目標については、2005年度比3.8%減とすることが昨年決定されたが、今後、エネルギー政策やエネルギーミックスの検討の進展を踏まえて見直されるものと想定される。

3. 平成26年度の事業

（1）エネルギー技術の俯瞰的評価

このような状況の下、当研究所は、エネルギーを取り巻く種々の問題の解決に向けて技術の可能性と重要性を認識し、将来のエネルギー需給のあり方についてエネルギー技術の観点から調査・分析を行ってきている。今後も、中立的な立場から、広範なエネルギー技術分野を俯瞰し、技術開発のあり方について調査、研究及び評価を行い、今後のエネルギーの安定供給確保や地球環境問題の解決に向けたエネルギービジョンや様々な提言を発信し、国民経済の発展に貢献していく。

（2）エネルギーシステムや幅広いエネルギー技術分野での取り組み

平成26年度においては、エネルギー技術に係る知見の最新化、昨今の内外情勢を踏まえ

たエネルギー技術開発のあり方の評価分析や当研究所の地球環境統合評価モデル（GRAPE）等を用いたエネルギーシステムに関する分析を行うとともに、原子力、バイオマス・太陽熱・水素等の新エネルギー、クリーンコールテクノロジー（CCT）、CO₂回収・貯留（CCS）等を中心とする化石燃料の利用や次世代電力系統に係る最新技術の国内外における調査研究に加え、洋上風力発電技術やケミカルルーピング等の技術開発にも取り組んでいくこととする。また、電力システム改革や大規模自然災害への対応等の観点から、電気保安に関する調査研究も行うこととする。

（3）原子力に関する取り組み

東日本大震災を契機に、安全は国民が広く希求する普遍的な価値として一層重視されてきている。当研究所としても、福島第一事故のような過酷事故発生時の原子炉内の挙動解析を適確に行うSAMPSONコードの解析能力の飛躍的な向上を目指すとともに、原子力災害を二度と起こさないための安全対策の再構築と福島復興のための除染・環境修復や事故炉の廃止措置、福島県が進める環境創造センター構想の実現に向けて、これまで蓄積してきた知見を生かし貢献していくこととする。また、軽水炉技術開発事業に関しては、既設の軽水炉の安全向上に有効な技術課題に取り組んでいくとともに、国内外の動向を踏まえ新型軽水炉、核燃料サイクル、放射性廃棄物等に係る技術課題についても調査研究を行うこととする。

（4）エネルギー需要に関する取り組み

エネルギー需要面においても、技術の進展は目覚ましいものがあり、社会的な要請も大きくなってきている。この分野での省エネルギー、スマート化や自動車に関する技術課題の調査研究を行う。また、平成23年6月に発行されたエネルギーマネジメントシステムに係る国際規格（ISO50001）の普及促進を進める。

(5) 標準化に関する取り組み

標準化は、多くの技術について、その将来の開発や普及に大きな役割を果たしている。当研究所としても、エネルギーマネジメント、スマートグリッド、CCSや太陽熱利用等に係る国際標準化機構（ISO）や国際電気標準会議（IEC）での国際標準化に貢献していくこととする。

(6) エネルギー情報の共有支援

次世代電力ネットワーク、高温ガス炉、原子炉廃止措置、化学プラントの設備管理、太陽熱等の重要な技術分野について、関係企業や大学等の専門家による研究会や委員会を設置し、当該技術に関する調査、研究を行う。

(7) 情報発信

当研究所における上記の研究成果を国民や関係機関等に情報発信するとともに、エネルギー技術に係る重要なテーマに関し、産・学・官の連携、国際的な広がりを図りつつ、適宜、シンポジウムやセミナー等を開催し、エネルギー技術開発のあり方について提言を行う。また、最新の技術に関する「情報」と「評価」を、会員企業をはじめとする関係各位に提供するため、エネルギー技術情報プラットフォームの更新・改良を進めていくこととする。

4. 事業を進めるにあたって

当研究所を巡る経営環境には依然として厳しいものがあり、事業収支の改善に向けて一層の収益の確保と業務運営全般に亘るコストダウン等により、健全な事業経営の維持に努める。このため、積極的に企画提案等を行い、これまで蓄積してきた知見を生かし、質の高い調査研究を行うとともに、役職員一同経営の効率化に向けて努力する。

その際、以下の点に留意する。

① 国の政策、市場ニーズ、社会の受容性など、技術と社会との係わりを考慮して、学

際的な調査研究の実施、異分野の調査研究との連携等による総合的なアプローチを進める。

② コンプライアンス体制の強化が不可欠であり、当研究所の事業に係る協力企業や外注先企業も含め、行動規範等の徹底を図る。また、一般財団法人としての内部統治（ガバナンス）及び会計・税務面における責務を自らが責任を持って遂行するために、内部監査を充実するとともに、規程、マニュアル等の整備を進める。

③ 調査研究成果等の適切な普及、さらには賛助会員各社をはじめとするステークホルダーへの理解促進を図り、当研究所の評価向上に努める。

5. 各エネルギー分野における調査研究等のテーマ

(1) エネルギー技術全般

① エネルギー技術開発戦略に関する調査研究
東日本大震災後、多層化・多様化した柔軟なエネルギー需給構造が求められている。エネルギー需給構造のあり方に関する調査研究を基に、新たなエネルギー基本計画などの国の方針に沿って、エネルギーの安定供給・セキュリティ、環境保護、経済性、安全性など様々な要因を考慮しつつ、わが国の将来を中長期的な観点から見据えた、エネルギー技術戦略策定に関する調査研究を行う。

② 地球規模でのエネルギーシステムに関する調査研究

地球環境問題は、途上国と先進国の利害対立などもあり、国際合意形成は容易ではない。気候変動枠組条約締約国会議において、2020年以降の温室効果ガス削減枠組作りの作業が始まっているものの、わが国は延長された京都議定書において削減数値目標を明示せず、自主的に温室効果ガス削減努力を継続してい

くこととなった。

平成 26 年度においては、当研究所が運用する、地球環境システム分析に最適な評価ツールであり、原子力、新エネルギー、化石燃料の各分野におけるエネルギーシステム分析にも活用されている GRAPE モデルに、気候工学評価機能等を追加し、利用対象の拡大や利便性の向上を図るとともに、関連するデータベースの作成を行う。また、同モデルを活用して、当研究所が実施する各種の調査研究プロジェクトにおいて、地球環境の観点からの評価研究を実施する。

- GRAPE モデル及び日本評価モデル(TIMES-Japan) の機能強化に関する調査研究
- 気候工学に関する情報収集整理に関する調査研究

(2) 新エネルギー・電力システム関連

太陽、風力、地熱、バイオマス等の再生可能エネルギー発電の開発利用をより推進する必要性が、東日本大震災後一層指摘され、平成 24 年 7 月からは再生可能エネルギーの固定価格買取制度が開始された。再生可能エネルギーが大量に導入された場合、電圧や周波数の不安定化が懸念され、それに対応するため電力貯蔵を含む様々な調整装置やバックアップ電源の適切な配置と運用が必要となる。スマートグリッドは、分散型電源の導入拡大等に対応して電力の安定的かつ効率的な供給を可能とする技術として期待されているが、わが国のエネルギー・電力事情に適切に対応したシステムとなるよう技術開発を推進することが必要である。

平成 26 年度には、次世代の電力ネットワークのあり方、系統連系技術、電気保安、デマンドレスポンス、エネルギーマネジメントシステム等について調査研究を行う。また、再生可能エネルギーについては、バイオマス利用技術や洋上風力発電、集光型太陽熱発電(CSP)等に関し調査研究を行う。産業部門では、省エネルギーに資する機器高効率化技術の調

査研究や国際協力を行う。また、運輸部門では、次世代自動車の導入シナリオ等について調査研究を行う。

(ア) スマートグリッドに関する調査研究

- ① 次世代電力ネットワークに関する調査研究
- ② 再生可能エネルギー発電の電力系統への影響と対策技術に関する調査研究
- ③ 電気保安に関する調査研究
- ④ デマンドレスポンスに関する調査研究
- ⑤ エネルギーマネジメントシステムの標準化と事業促進に関する調査
- ⑥ 電力貯蔵技術に関する調査研究

(イ) 再生可能エネルギーに関する調査研究

- ① バイオマス利用技術に関する調査研究
- ② 洋上風力発電技術に関する研究開発
- ③ CSP 技術開発に係るシミュレーションや評価に関する調査研究
- ④ 太陽熱利用技術及びその技術標準化に関する調査研究
- ⑤ 国内の中高温太陽熱利用可能性の調査研究

(ウ) 省エネルギーに関する調査研究

- ① 超臨界 CO₂ ガスタービンに関する研究開発
- ② 高効率電気機器に係る国際協力に関する調査

(エ) 次世代自動車に関する調査研究、その他

- ① 次世代自動車の導入シナリオに関する調査研究

(3) 水素エネルギー関連

水素エネルギーは、将来の重要な二次エネルギーと期待され、燃料電池自動車・水素供給インフラストラクチャーの普及促進等、導入拡大に向けた動きがある。また、長距離の再生可能エネルギー等の輸送媒体として、長期的にも活用が期待される。

(ア) 再生可能エネルギーの輸送・貯蔵媒体（キャリア）に係る技術の導入シナリオの作成

- ① 各種サプライチェーンを前提とした水素系キャリアの供給コストの調査
- ② 新規な水素キャリア製造技術の評価及び技術開発の方向付けの調査

(イ) 水素の製造、輸送、供給及び貯蔵に関する調査研究、その他

- ① 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の運営
- ② 水素の利活用のあり方に関する調査

(ウ) 水素を用いた電力貯蔵技術に関する調査研究

- ① 水素を用いた電力貯蔵と他の電力貯蔵方式との比較評価や実証に関する調査

(4) 化石エネルギー関連

化石燃料は、一次エネルギーとして重要なエネルギー源であり、温室効果ガス排出量の削減を図りつつ、その安定供給を図っていくことが必要である。かかる観点から、原油や天然ガス、石炭の供給から転換、利用、さらにCO₂の回収・貯留までの全体システムに関し調査研究を行う。

平成26年度においては、石炭ガス化複合発電（IGCC）などの石炭火力発電の高度化検討に始まり、発生するCO₂を回収し貯留（CCS）するまでのトータルシステム、埋蔵量が豊富な低品位炭を改質し付加価値を高める技術に関し調査研究を行う。さらに、化石燃料等と太陽熱等の再生可能エネルギーを組み合わせたシステムの国内外での活用について調査研究を行う。

また、CO₂回収コスト低減に向けてCO₂分離・回収工程が不要となる新燃焼技術、いわゆるケミカルルーピング燃焼に係る技術開発に関する調査研究、石油関連プラント設備等の寿命予測に関する調査研究等を実施する。

(ア) 化石燃料の高度転換技術（CCT、CCS等）

を核としたエネルギーシステム研究

- ① IGCC などの先端的高効率石炭火力発電とCCSによるゼロエミッション化に関する調査研究
- ② 非在来型天然ガス・油の社会的影響評価
- ③ CSP と化石燃料等との複合システムによる発電や熱供給に関する調査検討

(イ) 化石燃料利用に関する新技術に関する研究等

- ① CO₂ 収型化学燃焼（ケミカルルーピング燃焼）に係る技術開発に関する調査研究
- ② 石油精製・石油化学設備の寿命予測システム（LRDC）に関する調査研究

(5) 原子力関連

東日本大震災を契機に、安全は国民が広く希求する普遍的な価値として一層重視されてきている。特に原子力については、福島第一事故によってもたらされた原子力災害の影響の甚さに直面し、このような事故を二度と起こさないための安全対策の構築が強く求められている。このため、シビアアクシデント（過酷事故）対策を含め、既設の軽水炉の安全向上に有効な技術課題に取り組んでいくこととしており、平成26年度も、前年度からの技術開発を継続する。

また、一刻も早い福島復興を図るため、除染・環境修復と事故炉の廃止措置が求められており、世界の知見・技術を結集して対処する必要がある。当研究所は、これまで蓄積してきた知見や国際的なネットワークを生かし、問題解決のため積極的に貢献していくこととする。平成26年度においても、引き続きシビアアクシデントの挙動解析を行うSAMPSONコードの活用及び改良により、福島第一事故に係る炉内挙動の解析をOECD/NEAの国際ベンチマークプロジェクトの下で進め、炉内及び原子炉格納容器内の状況把握につなげる。また、周辺環境の修復のために福島県が進める環境創造センター構想の実現に向けて、県への支援を行う。

なお、原子力は、世界的に、エネルギーの安定供給及び地球環境問題への対応を図る上で重要な役割を担うと評価され、福島第一事故後においても、多くの国々で開発利用推進の方針を維持している。当研究所としては、新たなエネルギー基本計画や国内外の動向を踏まえ、原子力利用に伴う様々な課題について継続的な検討を行うこととし、平成26年度も、原子力技術に関するこれまでの研究や評価の経験を生かし、エネルギー供給シナリオにおける原子力の寄与や核燃料サイクル・放射性廃棄物に係る問題、原子力人材の育成・確保など様々な課題に関する研究を進める。将来の原子炉についても、新型軽水炉に係る研究を進めるとともに、第4世代原子力システムに関する国際共同研究開発に引き続き参画する。また、軽水炉の廃止措置については、工程評価やシナリオの検討、廃止措置中の安全確保策に関する研究を進める。高レベル放射性廃棄物処分については、技術や社会的な観点をも織り込んだ処分事業の進め方、地層処分と代替オプションのリスク比較評価等に関して研究を行う。

(ア) 福島第一事故関連

- ① 軽水炉安全対策高度化に関する技術開発
- ② 福島第一事故に係る炉内事象の解析、国際プロジェクトの推進
- ③ シビアアクシデント解析手法の改良と解析モデルの高度化
- ④ 汚染地域の環境修復・創造技術に関する調査研究

(イ) 原子力全般

- ① 核燃料サイクルのバックエンドに関する研究
- ② 核燃料サイクル施設の安全性向上に関する調査研究
- ③ エネルギー供給システムへの原子力の寄与に関する調査研究
- ④ 世界の原子力開発利用動向に関する調査

- ⑤ 原子力人材育成に関する調査研究

(ウ) 原子力プラント技術

- ① 新型軽水炉に係る技術課題の調査研究
- ② 高温ガス炉及び原子力多目的利用に関する調査研究
- ③ 第4世代原子力システム開発に関する国際研究協力

(エ) 原子炉廃止措置等に関する調査研究

- ① 廃止措置工程、技術、制度に関する調査、検討
- ② 廃止措置に関する民間規格基準整備への支援
- ③ 福島第一原子力発電所の廃止措置に係わる調査

(オ) 高レベル廃棄物処分に関する調査検討

- ① 地層処分の意思決定に係る社会科学的な視点からの検討
- ② 高レベル放射性廃棄物処分の概念、進め方等に関する評価・分析
- ③ 放射性廃棄物処分に関する規制に関する調査

6. 最新技術情報の発信

(1) 調査研究事業で得られた成果のうち、技術情報として有用度の高いものを編集し、情報提供を行う。これらの調査研究に係る活動内容や成果は、寄稿・投稿、講演会、学会発表、ホームページへの掲載等により公表し、広く利用に供することとする。また、エネルギー技術に係る重要なテーマに関して、国際的な視野も入れつつ、適宜、シンポジウムやセミナー等を開催する。

(2) 当研究所では、下記の手法により、情報発信を行う。

- ① 定期刊行物（季報エネルギー総合工学）の刊行

- ② 月例研究会やエネルギー総合工学シンポジウムなど、シンポジウムやセミナーの開催
- ③ エネルギー技術情報プラットフォームの整備及び運用

7. ISO センターの事業

当研究所の ISO センターは、平成 23 年 6 月、ISO50001（エネルギーマネジメント国際規格）の発行と同時に発足以来、その普及・促進のための活動を行ってきており、平成 25 年度も引き続き下記事業を行う。

- ① 導入・構築研修、内部監査員研修の開催
- ② 認証取得、システム構築・運用、継続的改善に資するコンサルティングの実施

8. その他

（1）エネルギーに関するアンケート調査

エネルギーに係る一般公衆の意識調査は、東北地方太平洋沖地震以前より実施してきており、引き続き同様のアンケート調査を実施し、その経年的な意識変化等の動向を分析する。

（2）エネルギー技術に関する国際標準化の調査研究

ISO や IEC における、下記分野での国際標準化に係る事業を行う。

- エネルギーマネジメント及び省エネルギーの評価・検証関連
- ホームエネルギーマネジメントシステム（HEMS）インターフェース関連
- CCS の CO₂ 削減量評価関連
- 太陽熱発電技術関連

研究所のうごき

(平成 26 年 1 月 2 日～4 月 1 日)

(三菱日立パワーシステムズ(株) 電力計画部
コンベンショナル計画 2 グループ 主席技師
火力開発プロジェクト担当 齊藤 英治 氏)

◇ 第 4 回理事会

日 時：3 月 13 日 (木) 11:00～12:00
場 所：経団連会館 (4 階) 405 号室
議 題：

- 第一号議案 平成 26 年度事業計画および収
支予算について
- 第二号議案 役員退職金規程の改定について
- 第三号議案 平成 25 年度における借入金限度
額の変更について
- 第四号議案 事務局長の委嘱について
- 報告事項 業務執行の状況について
その他

◇ 月例研究会

第 330 回月例研究会

日 時：1 月 31 日 (金) 14:00～16:00
場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室
テーマ：

- 1. 石炭燃焼排ガス中の微量元素に関わる最近
の動向
(一財) 電力中央研究所 エネルギー技術
研究所 副所長 研究参事 伊藤 茂男 氏)
- 2. 中国の石炭会社事情あれこれ～現地石炭会
社勤務経験と地方生活見聞録～
(元出光興産(株), 前山東能源新鉅集団有限公
司技術顧問 遠藤 元治 氏)

第 331 回月例研究会

日 時：2 月 28 日 (金) 14:00～16:00
場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室
テーマ：

- 1. 日本におけるメタンハイドレート研究開発
の取組と現状
(独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石
油開発技術本部 技術部 メタンハイドレ
ート開発課長 (MH21 サブプロジェクトリー
ダー 佐伯 龍男 氏)
- 2. A-USC 石炭火力高効率化技術

第 332 回月例研究会

日 時：3 月 28 日 (金) 14:00～16:00
場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室
テーマ：

- 1. 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 専務理事 石井 敏康 氏)
- 2. 電力自由化における(株)エネットのスマート
系サービスへの取組み
(株)エネット 経営企画部長 谷口 直行 氏)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：(エネ総研) 石本 祐樹, 黒沢 厚志, 都

筑 和泰, 森山 亮, (電力中央研究所)

杉山 昌広, (JAMSTEC) 増田 耕一

テーマ：気候工学のコスト分析 ～二酸化炭素直
接空気回収

発表先：第 30 回エネルギーシステム・経済・環
境コンファレンス

日 時：1 月 23 日, 24 日

発表者：蓮池 宏

テーマ：電力貯蔵の経済性

発表先：第 30 回エネルギーシステム・経済・環
境コンファレンス

発表時期：1 月 24 日

発表者：蓮池 宏

テーマ：次世代電力マネジメントシステムの展望

発表先：スマートグリッド/スマートコミュニ
ティ研究会 (主催: 大阪科学技術セン
ター, 於, 大阪市)

日 時：1 月 28 日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：Current and Future Energy System in
Japan

発表先：I2CER International Workshop Energy
Analysis 九州大学カーボンニュートラ
ル・エネルギー国際研究所（福岡市）

日 時：1月31日

発表者：松井 一秋

テーマ：日本における将来のエネルギーの在り方
～エネルギーシステムの安全性比較と事
故・災害、システムコスト～

発表先：（一財）大阪科学技術センター，第2回
講演会「日本における将来のエネルギー
の在り方」

日 時：2月28日

発表者：徳田 憲昭

テーマ：電力システム改革を巡る最近の動向につ
いて

発表先：電気倶楽部講演会（電気倶楽部主催）

日 時：3月11日

発表者：藤井 貞夫

テーマ：地球環境システムと人間社会シス
テムの共生における原子力の役割

発表先：日本工業大学大学院 FD（Faculty
Development）

日 時：3月11日

発表者：岡田 英俊，内田 俊介

テーマ：1D/3D FAC 解析コードによる減肉評価・
管理の高度化

（第3報）1D FAC コードによる配管破
断損傷リスク評価（発表者：岡
田 英俊）

（第4報）配管減肉緩和法の有効性評価
（発表者：内田 俊介）

発表先：日本原子力学会 2014 春の年会
（会場：東京都市大学世田谷キャンパス）

日 時：3月26日

発表者：内藤 正則，鈴木 洋明，森田 能弘，溝内
秀男，Marco Pellegrini

テーマ：東京電力福島第一原子力発電所炉内状況
把握の解析・評価
（第16報）全体計画と進捗状況（第17報）

SAMPSON コードにおける解析
モデル高度化の進捗状況

（発表者：鈴木 洋明）

（第18報）SAMPSON コードによる下部
プレナムへのデブリ流出評価

（発表者：森田 能弘）

（第19報）デブリ流出解析モデルの改
良を反映した事故進展解析

（発表者：溝内 秀男）

（第23報）CFD Analysis of Steam Con-
densation Phenomena in the
Fukushima Daiichi NPP Pres-
sure Suppression Pool

（発表者：Marco Pellegrini）

発表先：日本原子力学会 2014 春の年会

（会場：東京都市大学世田谷キャンパス）

日 時：3月27日

発表者：白井 浩嗣，鈴木 博之

テーマ：福島第一原子力発電所事故における放射
性核分裂生成物放出挙動の評価

（第1報）セシウム放出挙動の検討

（発表者：白井 浩嗣）

（第2報）トリチウム放出挙動とトリチ
ウム汚染水の処理

（発表者：鈴木 博之）

発表先：日本原子力学会 2014 春の年会

（会場：東京都市大学世田谷キャンパス）

日 時：3月27日

発表者：木野 千晶

テーマ：RELAP/SCDAPSIM Mod3.5 による沸騰
不安定性の解析

発表先：日本原子力学会 2014 春の年会
（会場：東京都市大学世田谷キャンパス）

日 時：3月27日

[寄稿]

発表者：山地 憲治，笹倉 正晴

テーマ：将来エネルギーとしての水素の可能性

発表先：エネルギー・資源学会誌

日 時：1月号（Vol. 35 No. 1）

発表者：疋田 知士, 小野崎 正樹, 塙 雅一, 徳田 憲昭, 楠野貞夫

テーマ：2 章 化学産業の基盤（分担執筆）

発表先：『第7版 化学便覧 応用化学編 I』（丸善）

日 時：1 月発刊

発表者：松井 一秋

テーマ：原子力の安全と促進

発表先：FBNews（千代田テクノル刊行）

日 時：2 月号

発表者：笹倉 正晴, 石本 祐樹, 坂田 興

テーマ：An Activity in Japan for Realizing CO₂-free Hydrogen Global Supply Chains

発表先：Journal of Chemistry and Chemical Engineering

日 時：2 月号（Vol. 8 No. 2）

発表者：益田 泰輔

テーマ：Evaluation of Economic-load Dispatching Control Based on Forecasted Photovoltaic Power Output

発表先：IEEE ISGT 2014

日 時：2 月 20 日

発表者：徳田 憲昭

テーマ：蓄電池の開発状況と技術展開

発表先：一般社団法人日本風力エネルギー学会
通巻 108 号

日 時：2 月 28 日発刊

発表者：松井 一秋

テーマ：ガラパゴスと怪獣と鉄腕アトム－福島原発事故から 3 年

発表先：日本原子力学会誌「福島事故とその後」
特集

日 時：3 月号

発表者：益田 泰輔

テーマ：太陽光発電予測誤差が電力需給に与える影響

発表先：電気学会全国大会

日 時：3 月 20 日

◇ 人事異動

○ 3 月 31 日付

（退職）

山中秀一 研究顧問

（出向解除）

村上嘉孝 プロジェクト試験研究部 主管研究員

山田英司 プロジェクト試験研究部 主管研究員

平川香林 原子力工学センター 主任研究員

（兼務解嘱）

疋田知士 エネルギー技術情報センター長

○ 4 月 1 日付

（出向採用）

守家浩二 プロジェクト試験研究部 主管研究員

坂本茂樹 プロジェクト試験研究部 主任研究員

富永直利 原子力工学センター 研究員

（兼務）

重政弥寿志 エネルギー技術情報センター長

第 36 卷 通 卷 目 次

VOL. 36, No. 1 (2013.4)

【巻頭言】日本の未来に期待する

株式会社日立製作所 取締役会長 川村 隆 …………… 1

【寄稿】革新的波力発電システムの開発

東京大学生産技術研究所 特任教授 橋本 彰 …………… 2

【寄稿】東日本大震災後のわが国および世界の石炭需給動向

(一財) 石炭エネルギーセンター 参事 原田 道昭 …………… 8

【調査研究報告】

高レベル放射性廃棄物等の地層処分

～事業化における海外の状況とわが国の最近の議論から～

プロジェクト試験研究部 部長・副主席研究員 蛭沢 重信 …………… 18

【活動紹介】

CO₂ フリー水素チェーン実現に向けた構想研究

プロジェクト試験研究部 主管研究員 笹倉 正晴 …………… 33

【活動報告】

『原子力の安全を問う』シンポジウムの開催

～新安全基準(設計基準, シビアアクシデント対策) 骨子案を巡る論点～ …………… 41

【事業計画】

平成 25 年度 事業計画 (一財)エネルギー総合工学研究所 …………… 44

【故秋山先生が米国機械学会賞受賞】 …………… 50

【研究所のうごき】 …………… 51

【第 35 巻通巻目次】 …………… 53

【編集後記】 …………… 57

VOL. 36, No. 2 (2013.7)

【巻頭言】

資源エネルギー庁 審議官 中西 宏典 ……………1

【座談会】

地熱エネルギー開発への期待

(独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 地熱資源研究グループ長	阪口 圭一
(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) 特命参与 (地熱担当)	中島 英史
電源開発 (株) (J-POWER) 主管技師長, 湯沢地熱 (株) 社長	中西 繁隆
(一財)電力中央研究所 上席研究員	海江田秀志
湯沢市 総務企画部 主査	藤原 崇一
司会 (一財)エネルギー総合工学研究所 研究顧問	疋田 知士 …………… 3

【寄稿】

シェール・ガス革命と日本および世界のエネルギー情勢
和光大学 経済経営学部 教授 岩間 剛一 …………… 21

【寄稿】

欧米諸国における電気事業の現状
～電力市場自由化と供給力確保を中心に～
(一社)海外電力調査会 調査部 副主任研究員 大西 健一 ……………34

【調査研究報告】

革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト
～発電から CO₂ 貯留までのトータルシステムのフィージ
ビリティー・スタディー～
プロジェクト試験研究部 主管研究員 坪井 繁樹 …………… 46

【調査研究報告】

世界の CCS プロジェクトの現状
プロジェクト試験研究部 主管研究員 村上 嘉孝 …………… 54

【事業報告】

平成 24 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

VOL. 36, No. 3 (2013.10)

【巻頭言】

エネルギー技術立国としてのトップランナー

東京農工大学大学院 産業技術専攻 教授

亀山 秀雄 ……………1

【寄稿】

地熱エネルギー開発の最新状況

(独) 産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所

イノベーションコーディネータ

阪口 圭一 …………… 3

【寄稿】

大崎クールジェンプロジェクトの概要

～石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業～

大崎クールジェン(株) 取締役技術部長

外岡 正夫 …………… 9

【調査研究報告】

バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発

～総合調査研究～事業の成果概要

プロジェクト試験研究部 部長

徳田 憲昭

プロジェクト試験研究部 主任研究員

森山 亮 …………… 17

【調査研究報告】

福島事故後の欧州原子力発電所における安全性向上策の状況

プロジェクト試験研究部 主管研究員

木村 公隆 ……………28

【調査研究報告】

福島第一原子力発電所の事故の要因と

シミュレーションによる事故事象の解析

原子力工学センター 安全解析グループ 部長

内藤 正則 …………… 37

【研究所のうごき】 …………… 50

【編集後記】 …………… 52

VOL. 36, No. 4 (2014.1)

第 28 回エネルギー総合工学シンポジウム
多様な未来に備えるエネルギー技術

平成 25 年 10 月 3 日 (木) 千代田放送会館
総合司会 エネルギー技術情報センター長 疋田 知士

【開会挨拶】	(一財) エネルギー総合工学研究所 理事長	白土 良一	1
【来賓挨拶】	経済産業省 技術総括審議官	渡邊 宏	3
【招待講演】	地球温暖化と将来のリスク管理 (独) 国立環境研究所 気候変動リスク評価研究室長	江守 正多	5
【講演第 1 部】	如何なる未来に備えるか (その 1) ～過去をふりかえる (一財) エネルギー総合工学研究所 副理事長	三代 真彰	14
【講演第 1 部】	如何なる未来に備えるか (その 2) ～将来トレンドを考える プロジェクト試験研究部 地球環境グループ 部長	黒沢 厚志	22
【講演第 1 部】	如何なる未来に備えるか (その 3) ～エネルギーの使われ方 プロジェクト試験研究部 水素エネルギーグループ 主任研究員	石本 祐樹	33
【講演第 2 部】	期待されるエネルギー技術は (その 1) ～転換・貯蔵技術の将来像 プロジェクト試験研究部 水素エネルギーグループ 部長	坂田 興	42
【講演第 2 部】	期待されるエネルギー技術は (その 2) ～輸送技術および輸送システム プロジェクト試験研究部 新エネルギーグループ 部長	蓮池 宏	53
【講演第 2 部】	期待されるエネルギー技術は (その 3) ～エネルギーをスマートに使う！ プロジェクト試験研究部 電力システムグループ 部長	徳田 憲昭	66
【閉会挨拶】	(一財) エネルギー総合工学研究所 専務理事	佐藤 憲一	78
【研究所のうごき】			79
【編集後記】			82

編集後記

先日シロアリがアリ塚を造る行動原理についての記事を目にして、今さらながら少し衝撃を受けた。シロアリに限らず、アリ全般やハチのようないわゆる社会性昆虫が共同・協力して何かをなす時に、もちろん設計図はないし複雑な手順書もない。彼らの行動は、分散化（decentralized）しており、同時に自己組織化（self-organized）されていると理解すべきであるようだ。小さな頭脳しかない1センチ足らずのシロアリがその500倍以上の高さのアリ塚を、文字通り寄ってたかって造るとき、各個体は「独立」して、「単純な規則」に従って行動すると言う。独立と言っても、個体間のある種の相互作用および個体と近接する局所的な環境との間の相互作用が「単純な規則」を創り出し、設計図なしでも整合的な動きが実現されているとのこと。「近接する局所的な環境」とは何かと言えば、例えば、建設現場に先に来た同僚アリが積み上げた「レンガ」であり、フェロモンに導かれて後から来たアリは、そのレンガを局所的な環境情報として参照しその隣にレンガをもう一つ積む。こうしたプロセスの繰り返しによって、大きなアリ塚が完

成する。あるいは六角形の微細構造を持つ大きな蜂の巣が出来上がる、と言うことらしい。

筆者の感慨は、しばしば自然の驚異として語られる小さな生物による偉大な達成に対してではない。設計図もなしに、同僚が積んだレンガの横にもう一つレンガを積むという単純労働は、昨今の人間の行動そのものではないか、と思い当たったからだ。大昔の習性を今も保持しているのは良いとしても、人間がアリよりも少しは進化したとすれば、理想を掲げた大局的な設計図をつくりそれに従って歴史を創っていくべきではないのか。我々がこのことを忘れて久しいのではないかと感じたからである。

シロアリの行動原理は長い進化の過程で磨き上げられたもので、アリの能力、材料の性質などを前提条件とした究極の効率的省エネプロセスに違いない。人間社会の各種プロセスでも小さなセグメントに応用すれば優れた省エネ設計ができそうだが、大局的な設計図の構築が前提であることは言うまでもない。

編集責任者 疋田知士

季報 エネルギー総合工学 第37巻第1号

平成26年4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。

