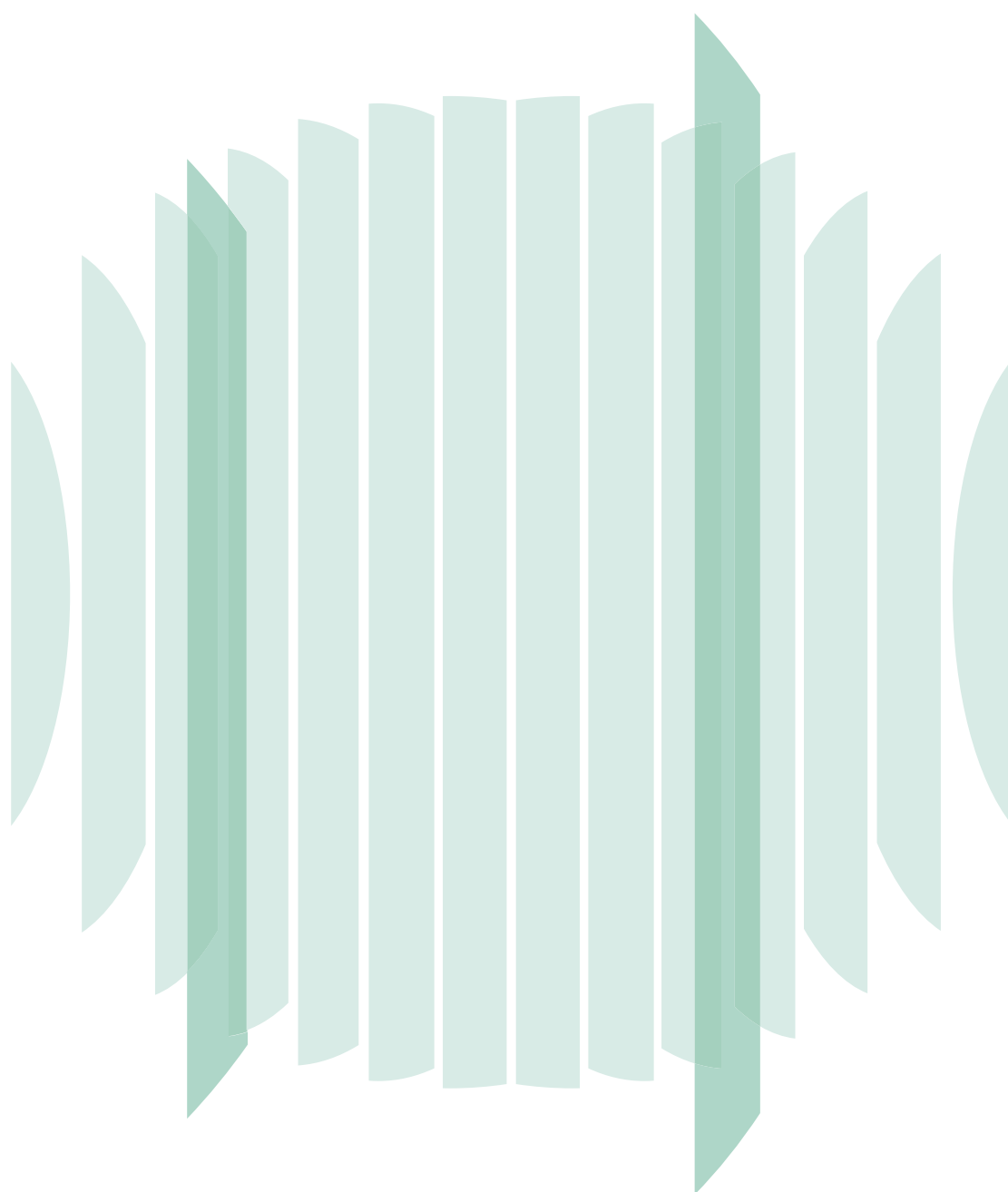


季報 エネルギー総合工学

Vol. 40 No. 2 2017. 7.



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

目 次

【巻頭言】

夏，電力，ときどき私

資源エネルギー庁
資源エネルギー政策統括調整官

小澤 典明 1

【座談会】

2050 年に向けたわが国の火力発電技術開発

東京大学 生産技術研究所 特任教授
東京大学大学院 工学系研究科

小林 由則

航空宇宙工学専攻 教授

渡辺 紀徳

(国研) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)

環境部 統括研究員 (クリーンコール)

在間 信之

(一財) 電力中央研究所 (電中研)

原 三郎

エネルギー技術研究所 副所長

三菱日立パワーシステムズ(株) (MHPS) エンジニアリング本部

ボイラ技術総括部 ボイラ開発部 部長

山内 康弘

司会： (一財) エネルギー総合工学研究所

プロジェクト試験研究部 部長

小野崎正樹 3

【寄稿】

エネルギー分野における

サイバーセキュリティ対策およびトラストの役割

(一財) 日本情報経済社会推進協会 (JIPDEC)

常務理事・インターネットトラストセンター長

山内 徹

インターネットトラストセンター 主席研究員

杉田 修

インターネットトラストセンター 主席研究員

金子 成徳

情報マネジメントシステム認定センター (ISMS-AC)

企画グループリーダー

成田 康正 24

【寄稿】

トランプ政権誕生と

シェール・ガス革命，シェール・オイル革命の最新動向

和光大学 経済経営学部 教授

岩間 剛一 34

【調査研究報告】

再生可能エネルギー導入に伴う配電分野における課題と今後

プロジェクト試験研究部 電力システムグループ 主任研究員

河瀬 和貴 52

【調査研究報告】

過去の LNG 国内導入経緯に基づく

水素エネルギー導入の将来シナリオ分析

プロジェクト試験研究部 水素グループ 研究員

水野 有智 62

【事業報告】

平成 28 年度 事業報告の概要 (一財) エネルギー総合工学研究所 72

【研究所のうごき】 74

【編集後記】 77

巻頭言

夏，電力，ときどき私

小澤 典明 (資源エネルギー庁
資源エネルギー政策統括調整官)



蒸し暑い時期に入った。東京では今年はまだ雨が少ないが、蒸し暑さは変わらない。寝入る際にはエアコンを使ってしまう。またこの時期が来たのだと思う。

今年の夏は暑い日が続くのか、電力需要の見通しはどうか、供給は大丈夫か・・・仕事柄、気になる。東日本大震災から6年。節電は比較的定着し、電力需要は落ち着いている。供給力もぎりぎりの所から何とか予備率が高まってきた状況だ。ただし、急な発電所の停止などいつ起こるかわからない。油断は禁物。やはり予備率の確保、安定した供給は大事だ。

自宅の電力料金の明細を見る。実は、今年から息子が一人暮らしを始め、世帯の人数が1人少なくなった。わが家の電力需要はおよそ2割減。独りほくそ笑むが、冷静に考えると仕送り先の息子の電気料金も私が立て替えている。息子が電力料金をいくら払っているか、そんな情報を息子が送ってくるはずもなし。全体の支払いはむしろ増えているのだろう。う～ん、親の辛さが身に染みる・・・

内訳に載っている再生可能エネルギー発電の賦課金を見る。約600円。料金全体の1割以上だ。裏面を見ると請求料金に含まれているものが他にもある。使用済燃料再処理等既発電相当額、電源開発促進税など。正確な記載であるが、一般には少々わかりにくいかもしれない。単価の比較もできる。再生可能エネルギー発電の賦課金は1kWh当たり2.64円、再処理等既発電相当額は0.112円、電源開発促進税は0.406円。

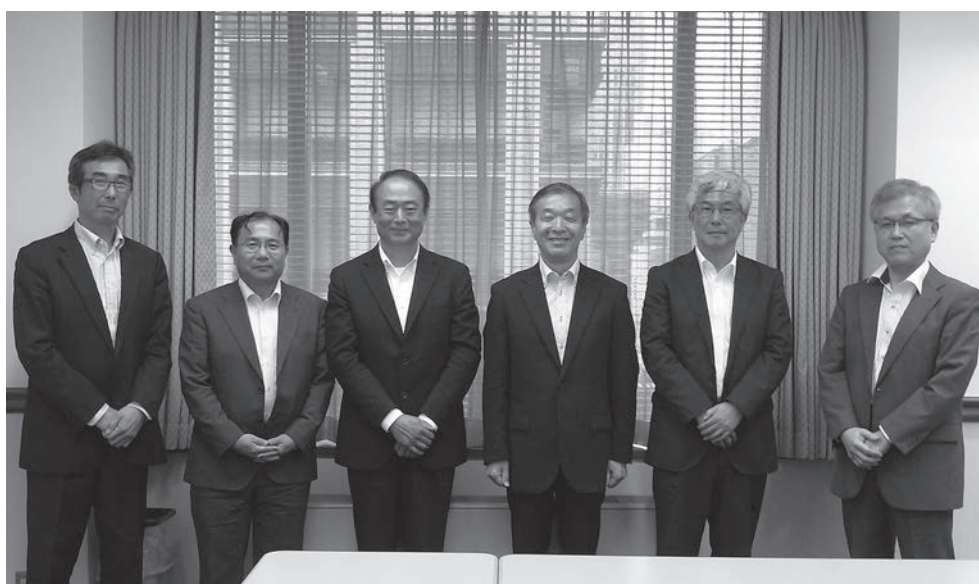
再生可能エネルギーの導入拡大に取り組むことがエネルギー政策として重要であることは論を待たない。それにしても、再生可能エネルギー発電の賦課金は急上昇だし、相当の規模だ。これを家庭を含めた全ての需要家の皆さんに負担していただいているのだから、やはり負担と導入のバランスは考えなければならないと思う。今、再生可能エネルギーの大量導入へ向けた論点整理が行われている。しっかりと現実を見つめ、より望ましい姿を追求する。こうした姿勢で、努力を怠らず、それを継続することを肝に銘じて、仕事に邁進したいと思う。

暑い夏は目の前だ。今夜もエアコンに、う～ん、やっぱり頼るかな・・・

座 談 会

2050 年に向けたわが国の火力発電技術開発

小林 由則 (東京大学 生産技術研究所 特任教授)
 渡辺 紀徳 (東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻 教授)
 在間 信之 (国研) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 環境部 統括研究員 (クリーンコール)
 原 三郎 (一財) 電力中央研究所 (電中研) エネルギー技術研究所 副所長
 山内 康弘 (三菱日立パワーシステムズ(株) (MHPS) エンジニアリング本部 ボイラ技術総括部 ボイラ開発部 部長)
 司会: 小野崎正樹 (一財) エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 部長



はじめに

小野崎 「エネルギー需給見通し」(平成 27 年 7 月)では、2030 年度の総発電量で LNG 火力 27%, 石炭火力 26%, 石油火力 3%, 火力合計で 56%という目標になっています。平成 27 年度、平成 28 年度に、資源エネルギー庁石炭

課主催、NEDO 共催で「次世代火力発電の早期実現に向けた協議会」(以下、次世代火力協議会)が開かれ、火力を中心に二酸化炭素(CO₂)回収も含めた 2030 年までの「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」(以下、技術ロードマップ)が作成されました。

本日は、技術ロードマップに照らして、皆さんの火力への関わり方とロードマップへのコメントを伺うことから始めたいと思います。

技術ロードマップを巡って

小野崎 最初に、NEDO でクリーンコール技術のリーダーである在間さんから技術ロードマップの趣旨と特徴についてご紹介いただきたいと思います。

技術ロードマップの紹介

在間 小野崎さんや小林先生にも委員として参加して頂いて、次世代火力協議会を開催いたしました。次世代火力協議会では、① 2030 年度までのエネルギーミックスの着実な達成のためにエネルギー効率の高い火力発電をどう実現するか、② 2030 年度以降を目指した環境と経済を調和させた CO2 削減技術をどう導入していくかについて、専門の方々からご意見をいただいて「技術ロードマップ」をとりまとめました。

2030 年度での高効率火力発電の実現に向けて、図 1 にあるように、2025 年度には、究極の高効率発電技術であるガスタービン燃料電池複合発電（GTFC）や石炭ガス化燃料電池

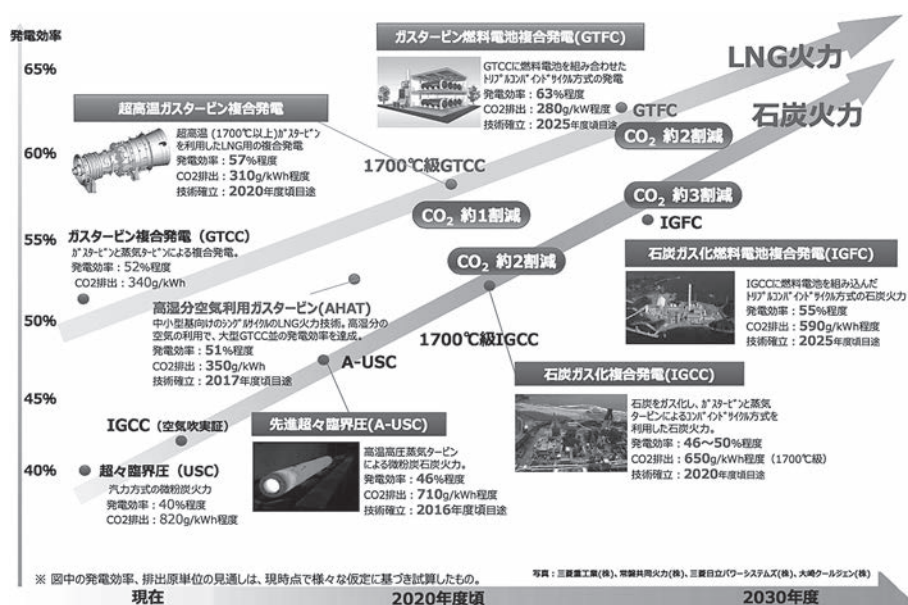


在間 信之 氏

(国研) 新エネルギー・産業技術総合開発機構
環境部 統括研究員 (クリーンコール)

複合発電（IGFC）の技術を確立することを目指
標としています。

また、図2に示すように、既存技術を高効率化する技術も併せて促進していきます。図2の第1世代は、ガスタービンや蒸気タービンを単体で使用する技術。石炭火力でいえば先進超々臨界圧（A-USC）という、商業化済みの超々臨界圧（USC）の蒸気条件を700℃級まで上げて発電効率46%を目指す高効率化技術です。LNG火力のところにある高温分空気利用ガスタービン（AHAT）というのは、中小型のガスタービン複合発電に対し、高温



(出所:次世代火力発電の早期実現に向けた協議会,2016年6月30日)

図 1 次世代火力発電に係る技術ロードマップ

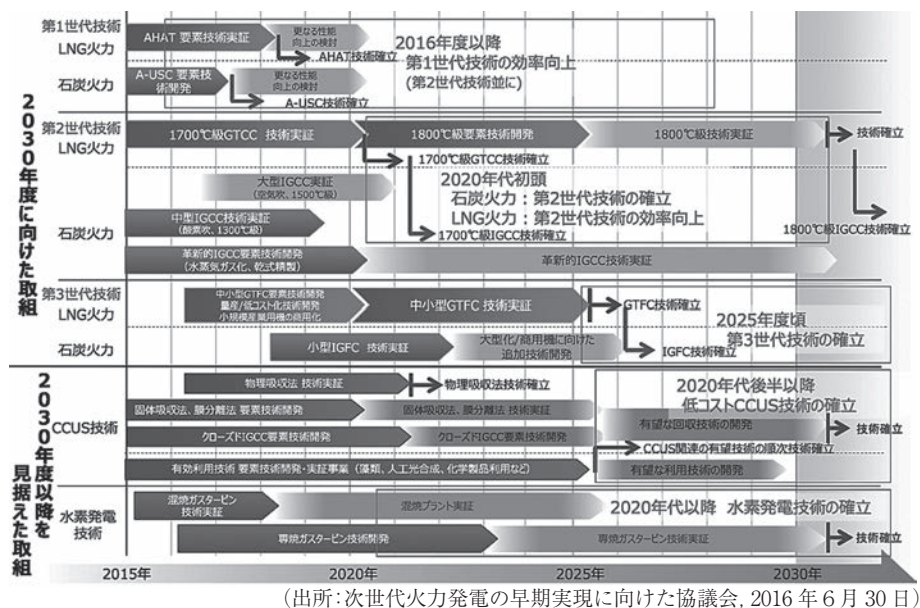


図2 次世代火力発電技術の早期確立，実用化に向けた工程表

の水蒸気を混入し，ガスタービンに蒸気タービン機能を持たせ，中小型ながらも高効率発電を実現する技術です。

第2世代としては，今1600℃級まで商業化されているガスタービン複合発電（GTCC）のガスタービンを1700℃級，さらに1800℃級と高温，高効率化していく技術があります。また，石炭ガス化複合発電（IGCC）については，ガスタービンの温度を上げつつ効率も高めていこうとしています。中型IGCCでは，空気吹きIGCCが勿来で商業化済みで，さらに広野でも商業化されつつあります。酸素吹きIGCCについても，中国電力㈱大崎発電所で実証試験が進められているところです。

第3世代は，ガスタービンと燃料電池を組み合わせたものです。まずはLNGを燃料とする中小型GTFCの技術を実証し，それと並行して小型のIGFCから大型のIGFCへと2025年を目途に技術確立を目指しています。

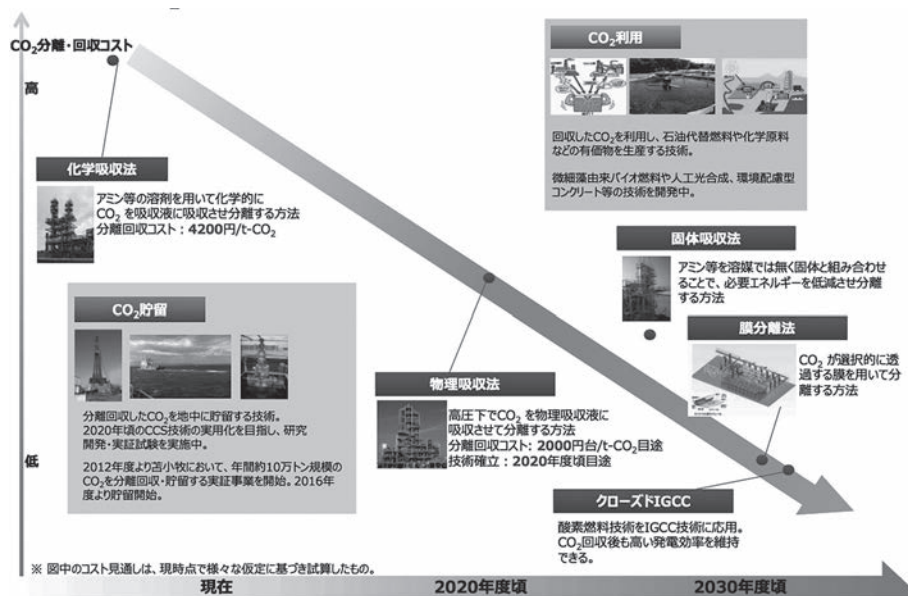
2030年度以降を見据えた取組としては，CO₂回収・利用・貯留（CCUS）技術と水素発電技術があります。大幅なCO₂削減をどうするのかと共に，CO₂フリーの水素をどう使っていくのかということです。まずは水素の混焼ガスタービンから始まり，専焼ガスタービンへということでCO₂排出のない発電システ

ムを創っていくことを目指しています。

図3には，NEDOとして取り組むべきCO₂回収技術を示しています。CO₂回収では，経済性を高めるために，投入エネルギーの最小化と装置のコストダウンが重要で，まずは回収CO₂当たりの低コスト化を目標としています。

現在，微粉炭火力の燃焼後CO₂回収には化学吸収法が使われていますが，IGCCと組み合わせた場合，高压下のCO₂回収には物理吸収法が有利と考えられています。電源開発㈱若松研究所で行われていた「多目的石炭ガス製造技術開発」（EAGLE）でも物理吸収法がパイロットプラントに導入されました。さらに，大崎クールジェン㈱の酸素吹きIGCC実証試験の第2段階でも物理吸収法の性能を確認しようとしているところです。最終的なCO₂回収技術として，膜分離法があります。膜分離法は高压システムに適しているので，2030年度頃までには確立したいと思っています。

燃焼後回収で高濃度CO₂を得る技術とは別に，酸素燃焼法で排ガス中のCO₂濃度がほぼ100%になるシステムを作るとか，クローズドIGCC（酸素燃焼IGCC）で，排ガス中のCO₂を石炭搬送とガス化に使い，酸素燃焼ガスタービンを用いて，排ガスをCO₂リッチにして，CO₂回収装置を不要とするシステムを開発し



(出所：次世代火力発電の早期実現に向けた協議会，2016年6月30日)

図3 次世代のCO₂回収関連技術の開発見通し

ているところです。これらシステム技術の確立を次のCCUSにつなげていこうと考えて、技術ロードマップを作成しました。

技術ロードマップへのコメント

小野崎 次に、ご出席の皆さんが技術ロードマップに載っている技術のどれに絡んでおられるのか紹介していただきたいと思います。メーカー代表として、三菱日立パワーシステムズ(MHPS)の山内さんからお願いいたします。

山内 MHPSは、三菱重工業(MHI)と日立製作所が出資して設立された会社ですから、ほとんど全部の技術に絡んでいます。

まず、IGCCについてですが、空気吹きIGCCはすでに勿来で商用運転が始まっていますし、酸素吹きIGCCでは、昨年度末にプラントを引き渡し、今年度から大崎クールジェン(株)による実証試験が行われています。

燃料電池に関しては、NEDOの支援の下、MHPSで1MW機を開発中です。その後はどうシステム化していくかが課題になると思います。

LNGに関しては、国家プロジェクトとして

1700℃級ガスタービンを開発させていただいています。日立製作所がAHATの開発を行っていたので、今はMHPSが実施しています。

CO₂回収技術に関しても、今、MHIが開発したアミン溶液を使った化学吸収法のCO₂回収量5,000トン/日のプラントがアメリカでこれから動こうとしています。コストの問題は残っていますが、燃焼後のCO₂回収技術は確立されていると思います。

クローズドIGCCについては、燃料電池部と一緒に開発中で、今、長崎にある石炭処理量24トン/日のガス化炉で実証試験を実施しています。

小野崎 今、キーワードとして「燃料電池」が出ましたので、永年開発に携わってこられた小林先生にお話を伺いたと思います。

小林 私は、火力全般、特に石炭焚きのUSCとIGCC、そして燃料電池、特にSOFCと水電解水素製造、さらに大学に来てからは、再生可能エネルギー(再エネ)も含めた「エネルギー変換工学」をライフワークとして取り組んでいます。

「長期エネルギー需給見通し」では、天然ガ

スと石炭を主燃料とする火力発電が2030年度のわが国電源の56%を占めており、先進諸国の中でも際立って高い比率での貢献が求められています。従って、その分なおさらCO₂削減のための高効率化技術の開発を加速していくことは、わが国にとって極めて重要なミッションであると考えています。

また、中国やインドを中心とした新興国には、未だに電化の恩恵に浴していない10億人以上の人々がいます。これらの新興国で世界の8割近い石炭を消費しているわけですから、わが国の技術革新による国際貢献が重要であることは、グローバルな観点からも誰も異論がないと確信しています。従って、この技術ロードマップは、特に燃料電池について時間的に非常に厳しいものではありませんが、このスピード感は何としても守らなければいけないと強く感じているところです。

同時に、最近の石炭火力に対する厳しい論調からすれば、わが国の2030年の目標も、決してそれ以降に向けた十分条件とは言えないレベルだと考えます。やはり、われわれエネルギー関係の研究者、実務者が相当な危機感と覚悟を持って、再エネと火力発電のエネルギーミックスに本腰を入れていかなければいけないと感じています。

小野崎 IGCCの高効率化と同時にCO₂回収技術の確立を進めなければいけません。高い発電効率を維持しながらCO₂回収を行うクローズドIGCCに永く携わっておられた原さんにお話を伺いたいと思います。

原 私はIGCCを専門にやってきましたので、空気吹きIGCCの勿来10号機が商用運転まできたことに感慨深い思いを持っています。IGCCの着実な普及のために、引き続き必要な技術の評価を継続していきたいと思っています。そういった技術をベースに、電中研では、CO₂回収をしてもできるだけ高効率を維持できるよう、NEDOプロジェクト「CO₂回収型



山内 康弘 氏

(三菱日立パワーシステムズ㈱ エンジニアリング)
本部 ボイラ技術総括部 ボイラ開発部 部長

クローズドIGCC技術開発」(2015～2019年度)をMHPS、MHIと共同で実施しています。また、高効率化という観点では、石炭火力の第2世代技術の革新的IGCC要素技術として、水蒸気ガス化や乾式ガス精製の開発も行っています。

さらに、水素キャリアの1つとしてアンモニアが注目されていますが、アンモニアを石炭火力で混焼するとどうなるのかも、ここ数年取り組んでいます。

また、電中研全体としては、AHATや固体酸化物形燃料電池(SOFC)の研究も行っており、技術ロードマップの実現に貢献できればと思っています。

小野崎 IGCCを推進していく中で、効率向上についてはガスタービンがかなり大きな要素だと思います。ガスタービンがご専門の渡辺先生からお話を伺いたいと思います。

渡辺 私の研究室は、もともとジェットエンジンやロケットエンジンの流体の研究室です。ガスタービンについては、ジェットエンジンとしてのガスタービンを研究していますが、日本ガスタービン学会で産業用や発電用ガスタービンの共同研究もやらせていただきました。今、ガスタービン学会が中心になり、電中研のとりまとめで、再エネが入ってきた時の急速起動ガスタービンの先導研究を始めています。

残念ながらこの技術ロードマップには、その辺りはあまり入っていません。非常に複合的な要因の中で、どのように日本のエネルギーを考えて行くのかについて、議論やコンセンサスが足りていないのではないかと痛感していますので、火力だけではなく、もう少し上位の検討機関や決定機関が必要ではないかと感じているところです。

技術ロードマップに載っている技術の中では、AHATの要素技術開発を日立製作所と共同でやっています。AHATでは入口から水を吹きますので、圧縮機の中に水滴が入ってきます。その水滴がどのようにガスタービン圧縮機に影響を及ぼすのかといった基礎的な研究や圧縮機内の流れの不安定現象のシミュレーションを行ったりしています。

これからNEDOプロジェクトの中で、再エネが大量導入された時にも電力系統が安定するようなガスタービンを考えていきたいと思っていますところ。

高効率火力技術の必要性和今後の課題

小野崎 再エネの導入目標は、2030年で22～25%です。そういう時代に火力には、負荷追従性が求められてくると思います。今後火力に求められる課題についてお話を伺いたいと思います。

調整力としてのガスタービンの急速起動

小野崎 最初に渡辺先生から、ガスタービンの急速起動についてももう少しご紹介いただけないでしょうか。

渡辺 2015年度のNEDOエネルギー・環境新技術先導プログラムに採択され、「再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発」(2015

年2月～2016年2月)を行いました。

ジェットエンジンには、立ち上がりも立ち下がりも急速であるという機動性があります。部分負荷で高効率を維持するのはガスタービンの弱いところですが、ジェットエンジンの機動性と高効率を両立でき、なおかつ大型の設備を開発するという新しい課題に取り組みました。

この研究の背景には、「長期エネルギー需給見通し」には、2030年の電源構成において太陽光発電(PV)が7%とありますが、PVは稼働率がそれほど高くないので、膨大な設備容量が必要になるという認識です。また、各電力会社による認定量、接続申込量、接続可能量を見ますと、東京電力(株)、中部電力(株)、関西電力(株)は、今のところ、いくらでも対応しますという態度のようですが、九州電力(株)や東北電力(株)では、申込量が接続可能量をはるかに超えています。特にPVだと、夕方に電力が足りなくなりますから、それを補完するためにガスタービンを急速に立ち上げることを考え、そのためのガスタービン技術を開発しようとしているわけです。

研究の体制ですが、電中研が取りまとめで、関連会社全て(MHPS、(株)東芝、IHI、川崎重工業(株))が参加しています。

調査研究の結果、今後、大容量にせざるを得ないということで、MHI製のJ型ガスタービンの場合、コンバインドで起動時間10分、ガスタービン単体なら5分で立ち上げるという目標を掲げました。そして、そのための技術課題を抽出したわけです。

プロジェクトは、今、第1フェーズ(先導研究段階)にあり、要素開発の国家プロジェクトを立ち上げたいということで、今年度のNEDOエネルギー・環境新技術先導プログラムで「機動性に優れる広負荷帯高効率GTの開発」を行うことになりました。その後に第2フェーズの要素技術の開発をしたいと思っていますところ。

小野崎 出力変化率や起動時間の目標値は、どのようにして決まってくるのでしょうか。

渡辺 揚水発電が5分ぐらいで起動できるということから、それと同じぐらいの時間が必要だということで、大型のガスタービンを5分で立ち上げるという目標を設定しました。

ボイラや蒸気タービンへの調整力の要求状況

渡辺 今のプロジェクトの中で、ボイラや蒸気タービンはどうするかという話も出ています。当然、ガスタービンの急速起動に追従できるボイラや蒸気タービンが必要になってくると思います。ただ、私たちのプロジェクトでは、調査対象を手に負える範囲に絞って、ガスタービンだけを対象にしているのです。

山内 ドイツではすでに褐炭焚きも負荷変動するところに来ています。また、メリットオーダーの電力自由市場になってしまいましたので、発電原価の高い天然ガス焚きのガスタービンはほぼゼロになってしまいました。次は、普通の歴青炭焚きのボイラを負荷変動させるということです。

小野崎 顧客から発注仕様書で負荷変動に耐えられる設計を求められてはいないのですか。

山内 検討依頼はあるようですが、なかなか具体化しません。ただ、今後そういうニーズは出てくるとは思っています。

負荷変動追従性という技術課題

小野崎 これまでの高効率火力の技術開発の中で、再エネ大量導入に対応する技術課題は出てくるのでしょうか。

山内 負荷変動追従性の要求は当然出てくると思います。また、PVを系統に25%入れて



渡辺 紀徳 氏

(東京大学大学院 工学系研究科
航空宇宙工学専攻 教授)

しまうと、PVの出力変動を吸収するのは大変かと思います。やはり、二次電池をうまく使うという話になっていかないと解決できない。解決できないなら、出力制限をするしかないと思います。

巷では、今、電気自動車(EV)がこれから急速に増加していったって、EV用電池のコストがkWh当たり200ドルを切るという目論見もあります。もしそうなったら、十分な容量を持つ家庭用EVをホームエネルギー・マネジメント・システム(HEMS)を用いて系統電力が余った時の充電に使ってPVからの電力を吸収していくほうが、日本のエネルギー収支全体からいくと得だと思います。火力発電の負荷を変動させるとエネルギー効率が落ちますので、全体的にエネルギーを無駄に使うことになります。安い燃料を高効率で燃やすのが一番効率が良いわけです。それで、負荷変動部分は二次電池とかで急速に吸収させて、火力発電はなるべく一定運転をするというような形にもっていくと、トータルの燃料代が一番下がります。

原 再エネの大量導入を見据え、火力が負荷調整や最低負荷切り下げを受け持つということは、既に取組が始まっています。

ただ、それだけではなく、蓄電池などでのエネルギー貯蔵も含めて、再エネと火力のトータルとして良い姿になるように考えなければ

いけないと思っています。最近では、例えば、パワーガスでは、再エネを使って水素を作るという話もあります。そういったところも見据えて、全体の最適化を図っていくべきではないかと思っています。

負荷変動対策と NEDO の技術開発

小野崎 負荷変動対策では、NEDO で技術開発が進められていると理解していますが、いかがですか。

在間 渡辺先生たちの今年度の提案は、かなり野心的な技術革新を狙ったもので、通常の火力発電の高効率化にも寄与できる技術なので、NEDO として支援させて頂くことにしました。

それと同時に、PV の電力を使って水素を作り、それを CO₂ と絡めてメタンを作るという CCU の考え方、先ほどのパワーガスについても NEDO で支援させていただいています。日本のガス会社の高圧パイプラインの圧力変動の幅をそのまま負荷追従性のキャパシティーとすると、約 6,000 万 kW のキャパシティーになります。電力が余剰な時メタンを作って貯めて、電力が足りない時にメタンを放出するという考え方もあるということです。

もう 1 つが、コージェネレーション（電力・化学品併給）という考え方。石炭ガス化炉自身の負荷追従性はそれほど高くありません。しかし、発電に供すること、それから出てきた石炭ガスから化学品を作り、負荷に対する割合を変動させるという対応であれば、かなりのキャパシティーがあると考えます。

この他に、蓄電池と再エネ、バイオマスと CCS（CO₂ 回収・貯留）を組み合わせることで、CO₂ の排出削減ではなく、CO₂ そのものを削減していこうという取組もあります。最終的にどういうところがベストなのか、やはり経済合理性との兼ね合いで色々検討していかなければいけないと思っています。

「蓄エネミックス」という考え方

小林 再エネでは、政策として進めやすい PV が先行したのは当然の成り行きだったと思います。しかし、直流電源で、しかも回転体でもないということで、あまりにも安定性がない、制御性がないということから今のような議論が生まれています。

まず再エネ自体について言えば、PV や風力だけではなく、世界第 3 位の地熱エネルギーのポテンシャルを持っている日本の国情にあった再エネを選ぶという考え方もあります。地熱は出力の安定性と制御性が極めて高い再エネですが、今、そのポテンシャルの 2 % しか使っていません。

次に再エネの負荷変動の対策としては、正確な需給の予測技術や広域運用技術と共に、二次電池、揚水、CAES、あるいはパワーガスといった様々な蓄電・蓄エネ技術があります。その中で、季節間の変動、日々の変動、時々刻々の変動、その得手不得手と相性をよく見定めて、蓄電・蓄エネ技術を上手に使い分ける、「蓄エネミックス」の考え方を持ってこないと厳しいだろうと思います。

そして、2030 年の電源構成で 50 % 以上を占める火力が系統の安定化のために負荷調整機能を担って行くのは当然の使命だと思います。また、同時にこれは日本の産業の国際競争力を維持伸長するという意味でも非常に重要なことだと考えます。火力が再エネの犠牲者であるかのように捉えるのではなく、火力が更に進化していくためのチャンスと捉えて、火力における高負荷変動性、負荷調整能力等の技術力を一層伸長させる努力が必要だと考えています。

CO₂ 回収型火力発電の新技術

小野崎 次に、CO₂ を回収する場合、これからどんな技術が求められるのかという話題に

移りたいと思います。

再エネ導入にも限界がありますし、発電効率を上げてても、2050年にCO₂を80%削減することになると、CCUSが必要になってくると思います。原子力の稼働状況にもよりますが、CCUSの対象となるCO₂量が、年間数千万トン規模という話になってきますと、本当にできるのかという疑問も出てきます。

微粉炭火力に回収設備を後付けし、燃焼後にCO₂回収をすると、発電効率が10ポイントくらい下がってしまいます。そこで、CO₂回収機能を前提として発電効率を下げない技術を開発しようと、7,8年前からケミカルルーピングの開発の必要性を訴えてきました。

ケミカルルーピングという技術

小野崎 それでは、山内さんからNEDOのプロジェクトとして推進しているケミカルルーピングについてご紹介いただけないでしょうか。

山内 はい。図4にケミカルルーピングの原理を簡単に示しました。ケミカルルーピングというのは、金属酸化物を用いた酸素燃焼です。具体的には、イルメナイトという鉄チタン酸化物を用います。空気反応塔で酸化させて、燃料反応塔で酸化物の酸素で燃料を燃焼させる。燃料反応塔から出てきた酸素の減った酸化物をもう一度空気で酸化させて戻します。化学的に反応させながら循環させるので「ケミカルルーピング」と言っているのです。

石炭と酸化鉄との直接燃焼（固体と固体の

反応）というのは基本的にはできませんから、燃料反応塔の下から蒸気を入れて、石炭を水蒸気ガス化でCOと水素にして、ガスと酸化鉄を反応させます。

基本的に酸素燃焼ですので、燃料反応塔から出てくる排ガスは水蒸気とCO₂となり、CO₂分離工程が不要です。また、酸素燃焼と異なり深冷分離法で大きなエネルギーを使って酸素を製造しないので、結果として、発電効率が普通の微粉炭ボイラ並みになります。

酸化鉄が100ミクロンぐらいの粒子なので、燃料反応塔、空気反応塔には流動床を用います。そのため、あまり大型の装置を造れず、どうしても中小型への適用となります。

通常化学吸収法によるCO₂分離では、吸収液再生時のエネルギーロスがあり、発電効率が低下しますから、CO₂分離をやっても石炭火力の発電効率として40%超を狙うには、ケミカルルーピングという技術が候補として考えられます。そこで、NEDOでCO₂分離型化学燃焼石炭利用技術開発（2015～2020年度）を始められています。この技術の肝は、回る酸化物を何にするか、その寿命が十分であるかです。金属酸化物を「酸素キャリア」と呼んでいますが、その開発を3年間でやるということでプロジェクトが実施されています。

小野崎 そのプロジェクトは、MHPSが全体の旗振りをし、（一財）石炭エネルギーセンター、（国研）産業技術総合研究所、そして私ども（一財）エネルギー総合工学研究所が関わっています。いつ頃の実現を目指している

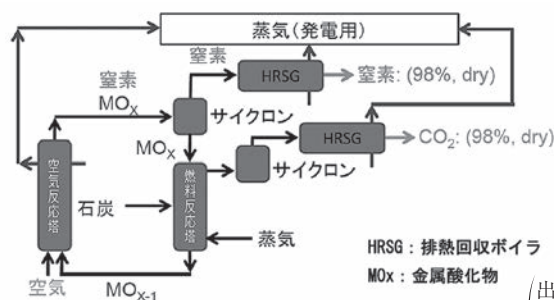


図4 ケミカルルーピングの原理

のでしょうか。

山内 2050 年頃ではないでしょうか。全ての火力発電所が CCS をやらないとケミカルレーピングは日の目を見ません。中小規模発電の場合は、発電所で CO₂ の積出港を持っていないので、CO₂ パイプラインや CO₂ 集積のインフラが必要です。100 万 kW の大規模発電なら自分で港から CO₂ 船を出して CCS ができるのですが、中小型の発電所になるとなかなか厳しいと思っています。

小野崎 そうすると、IGCC からの CO₂ 回収が早めに実現するということでしょうか。

山内 はい。まず IGCC などの大型発電所から始まると思います。

クローズド IGCC の仕組み

小野崎 原さんから、クローズド IGCC についてご紹介下さいませんか。

原 図 5 で NEDO プロジェクト「CO₂ 回収型クローズド IGCC 技術開発」で行っているクローズド IGCC システムについて簡単に説明します。

通常の IGCC の場合、ガス化炉から出てきた主に、CO と水素からなる石炭ガスをシフト反応器に入れ、水蒸気を少し加えて、CO と水蒸気を水性シフト反応で CO₂ と水素にしています。そして吸収液で CO₂ を除去し、CO₂ 除去後の水素リッチなガスをガスタービンに持っていくというシステムです。吸収液

の再生やシフト反応器で蒸気が必要になるなどの要因で、効率が落ちてしまいます。それを何とかしたいというのがもともとの発想でした。

クローズド IGCC では、図 5 のように、微粉炭ボイラを対象に開発されている酸素燃焼の概念を IGCC にも適用してみようということです。従来のガス化炉では、石炭の搬送等に窒素を使っているので、酸素と窒素がガス化炉に入る「O₂/N₂ 吹き」といえます。一方、クローズド IGCC では、石炭の搬送に CO₂ をそのまま使ってしまうということです。つまり、ガス化炉には、石炭、ガス化剤になる酸素、そして CO₂ を入れます。ガスタービン燃焼器についても、空気燃焼ではなく酸素燃焼にして、排ガス中の CO₂ 濃度を高めようというシステムです。

ガスタービンの排ガスの一部は、燃焼器のほうに循環し、燃焼器の酸素濃度を適正に保って、温度コントロールもします。また、残りの排ガスが CO₂ として回収されますが、回収された CO₂ の一部をガス化炉にもリサイクルして、石炭搬送に使うというシステムを組んでいます。

ガス化炉に CO₂ をリサイクルしていますが、石炭ガス化の基本的な反応は、C を水蒸気や CO₂ でガス化することですから、ガス化炉にとってみれば、CO₂ がガス化剤としても作用する分、投入する酸素量を減らせてガス化炉の性能が向上する可能性があると考えています。

今まで経験がないのは、やはりクローズドサイクルのガスタービンシステムです。ガス化炉のほうは、電中研の小型ガス化炉でこれまでに基礎試験をやってきていますし、また、

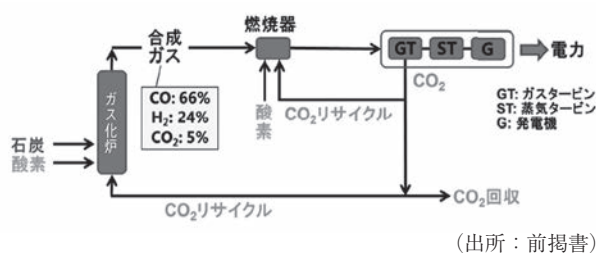


図5 CO₂ 回収型クローズド IGCC

現在の NEDO プロジェクトでは、MHI の長崎にあるガス化炉を用いて実証していこうという計画が進んでいます。

図 5 には書かれていませんが、石炭ガス化の場合に、ガス精製にどういう技術を使うかという課題もあります。クローズドサイクルの場合、最大限効率を高めるために、湿式のガス精製ではなく乾式のガス精製を導入しようということで、乾式ガス精製技術の開発もプロジェクトの中でやっています。

乾式ガス精製技術は、通常の IGCC にも導入可能になりますから、そちらでも貢献できるという期待もあって、本プロジェクトを進めているところです。

小野崎 CO₂ をリサイクルすると、ガス化炉の中の条件もだいぶ変わってくると思います。CO₂ によるガス化技術と言えますが、冷ガス効率が上がるとかを期待して良いのでしょうか。

原 入れた CO₂ がガス化剤として働いてくれば、メインのガス化剤である酸素の量を減らすことができ、ガス化炉の冷ガス効率を上げることが可能になってくると思います。また、酸素をガス化炉に供給する際の昇圧動力も低減するので、プラント全体としての効率向上に寄与する可能性があると思っています。

ただ、石炭などの搬送ガスが N₂ から CO₂ に代わると、炉内温度が上げにくくなることも想定されますので、そこはガス化炉側の操作パラメータなどを調整してうまくコントロールするよう気を付けています。

山内 ガス化剤として酸素の代わりに CO₂ が入りますから、通常の酸素吹き of ガス化に比べて酸素消費は減るということですね。そうするとチャーのリサイクル量が減るので、カーボンの反応率が上がりますね。

原 そうです。チャーの量も減ると考えています。



原 三郎 氏

(一財) 電力中央研究所 エネルギー技術研究所
副所長

山内 実は、このプロジェクトは MHPS が今実施しています。今、酸素消費量を減らすところまでいけるのか分りませんが、少なくともチャーリサイクル量が減ることは確認したいと議論をしています。この結果、冷ガス効率が上がります。

クローズド IGCC を「酸素吹きの化学合成用プラント」として考えた場合、チャーリサイクル量の減少は、冷ガス効率を上げる効果があります。

小野崎 ガス化剤が酸素から CO₂ に代わると、ガスタービン側ではどういう対応をするのでしょうか。

山内 比熱比が違いますので、翼を作り直さないとはいけません。

原 まず燃焼器の部分で酸素燃焼になるということ、CO₂ をリサイクルして希釈剤的に入れるということです。燃焼器自体を開発する必要があると思います。その時難しいのが、排ガスをガス化炉側にも持って行きたいわけですから、排ガス中の残存酸素は減らしたいのです。そうすると、燃焼器では、できるだけ余剰酸素を入れずに等量比に近い燃焼条件にしなければいけないわけです。しかし、

CO が主成分の石炭ガスを燃やす時に希釈剤として CO₂ が入ってくると、燃焼反応としてはあまり良くない方向にいく、ここが1つの課題です。

また、タービンのほうですが、燃焼排ガスの組成が通常の空気燃焼ガスタービンと異なるため、比熱比が違ってきます。その結果として、ガスタービン出口の排ガス温度が下がっていくってしまいます。材料の面から言っても、ガスタービン出口の排ガス温度はある程度以下にしたいので、ガスタービンをクローズド IGCC 用に設計し直す必要があるかも知れないと思っています。

小野崎 今回のこのクローズド IGCC の技術が実現する時期はどの辺を目標にされているのでしょうか。

原 技術的には、2030～2040年の間を見据えています。

山内 実現時期は、CO₂ の排出規制にもよるでしょう。

小野崎 そうですね。規制が早くなると実現時期が早まるでしょう。

在間 どちらが先かという話になると思います。CO₂ 回収の必然性と技術開発のための投資という考え方があるので、実現時期は、そのバランスで決まると思います。技術だけを先に開発することもできると思いますが、それが市場とマッチングする時期というのが現実的な実用時期になると思います。

IGCC の高効率化～次世代ガス化技術開発～

小野崎 電中研の原さんにクローズド IGCC よりも早めの実現すると予想されている、IGCC の高効率化技術の説明もお願いいたします。

原 はい。こちらは、NEDO の「次世代ガス化システム技術開発」プロジェクト（2015～2018年度）として進めています。

噴流床のガス化技術は、空気吹きと酸素吹きも実用化、あるいはその一步手前まできています。その技術をベースに、更なる効率向上を図っていくために、水蒸気を活用できないかと考えています。クローズド IGCC での石炭ガス化では C と CO₂ の反応でしたが、この次世代ガス化では C と水蒸気を反応させます。水蒸気をうまくガス化炉に入れてやれば、ガス化炉としての効率、ひいてはシステム全体の熱効率向上につながる可能性があります。最初は机上検討からスタートして、今のプロジェクトは、そこに基礎的な実験も組み合わせて、基盤技術の開発を行っているところです。

具体的には、図 6 にある噴流床ガス化炉に、水蒸気をガス化剤として作用するように入れてやって、ガス化剤として投入していた酸素量を減らすことで、ガス化炉としての冷ガス効率を向上させようということです。高効率化を狙うという意味で、乾式ガス精製も組み合わせて全体の効率向上を図っていこうという計画です。

また、酸素分離のところでは、酸素分離膜も含めた高性能で低コストの酸素分離装置の調査と評価にも取り組んでいます。

小野崎 酸素分離膜を導入し、ガス化炉も変え、乾式ガス精製を採用することで、全体でどれくらい効率が上がると期待しているのでしょうか。

原 効率向上の効果については、本当にどれくらいまでいくのか、今のプロジェクトの中で精査しているところです。

小野崎 この水蒸気ガス化技術は、現在のガス化炉で使えるのですか。

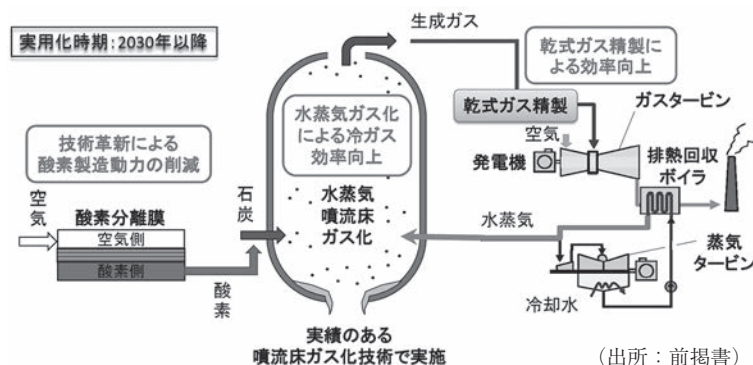


図6 次世代ガス化技術の概要

山内 ガス化炉の部分だけであれば大きな問題はあります。ですから、今の酸素吹きガス化炉の効率向上に使えます。

在間 NEDOとしては、この次世代ガス化技術をIGCCを建設する時にトッピングする1つの選択肢だと考えています。ですから、これを選んでくれれば、すぐにでもできると思います。

特に、乾式ガス精製の技術は、湿式に比べ潜熱回収の点で大きなメリットがありますから、選択肢を広げるという意味合いで開発を進めています。

原 ガス化部分だけなら、ハードルはそれほど高くないのではと思っています。また、乾式ガス精製の開発は、クローズドIGCCとの共通部分ですから、効率的に開発が進められれば、実用化に近付いていくと思います。

IGCCの高効率化～アンモニア混焼～

小野崎 電中研では石炭とアンモニアの混焼もやっていますね。

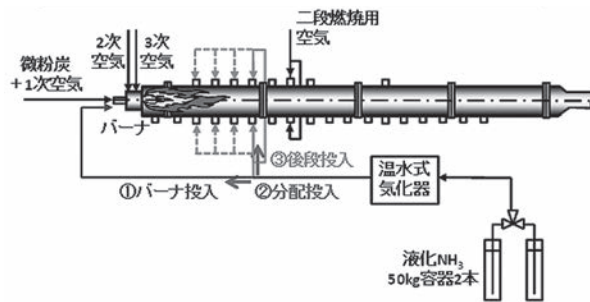
原 石炭火力発電所でのアンモニア利用に関する研究として進めています。これは、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「エネルギーキャリア」の委託研究課題「アンモニア直接燃焼」において実施しているものです。

電中研では、アンモニア直接燃焼の中でも既設の微粉炭火力でのアンモニア利用を中心に検討しています。電中研が横須賀地区に保有する石炭処理量100kg/hのシングルバーナ炉（横置き）にアンモニアを安定的に供給する設備を追設し、微粉炭燃焼場にアンモニアを投入する燃焼試験を実施しました。

当然、アンモニアを燃やすと窒素酸化物（NO_x）になるのではないかと疑問が出てくると思います。アンモニアをどこから入れるかが、かなり結果に影響しますので、図7のように、バーナの部分から一緒にアンモニアを入れるパターンと、炉の側壁の部分でバーナからの位置をずらしてアンモニアを注入するパターンで、火炉出口でのNO_xがどうなるのかデータを取得しました。

まず、バーナから混焼率20%（低位発熱量（LHV）ベース）でアンモニアを投入した時には、火炉出口NO_x濃度の増加は石炭専焼時の2割程度に留まることが分かりました。バーナから離れた側壁部分から入れていくと、場所によっては20%混焼でも石炭専焼時とほぼ同等のNO_x濃度に抑えられるというデータが得られました。ただし、限られた炭種や燃焼条件での結果ですので、様々なパラメータの影響評価を行うため、今年度も引き続き燃焼試験を実施する計画です。

小野崎 将来、2050年の水素の導入等を目指して、色々な研究が行われていますけれど、



(出所：電力中央研究所プレスリリース，2017年1月10日)

図7 電中研のアンモニア混焼試験でのアンモニア投入位置

水素導入までの過渡期としてアンモニアが非常に重要になると考えています。

味で、再エネと火力が共存する合理的なエネルギー・ミックスの姿ではないでしょうか。

資源合成・リサイクルへの回収CO₂の利用

小野崎 回収したCO₂の利用で他にアイデアはないでしょうか。

小林 昨春秋、(国研)産業技術総合研究所や日立造船(株)と共にCCR(Carbon Capture & Reuse)研究会を立ち上げ、座長を務めさせて頂いています。本研究会の主旨は、再エネ由来の水素と回収したCO₂から、メタン等の燃料や化学原料といった資源を合成・リサイクルする社会システムを構築することで、工業的にカーボン・ニュートラルを実現して、ネット・ゼロ・エミッションに貢献しようというものです。

そもそもCCSの取組を否定するものでもありませんし、水素の貯蔵・輸送・利用のためのキャリアは色々あり、それぞれのメリット・デメリットを吟味して、上手に使い分ければ良いと考えています。

要は、この分野で先行しているドイツ・エネルギー局(DENA)のような、CO₂の回収・再利用といったパワーガス議論を、わが国でももっと活発にするための、公平でオープンなプラットフォームを作ることが、当面最大の活動意義と考えています。少し大げさな言い方をすれば、「環境と資源」という視点から21世紀を俯瞰した時に、CCRはある意

わが国火力技術の国際競争力強化

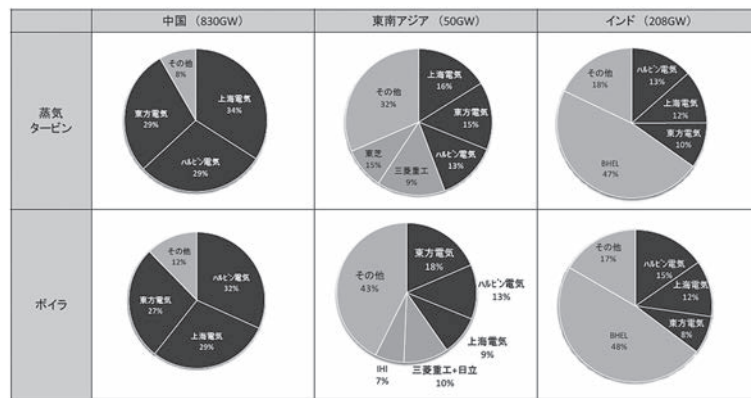
小野崎 国際競争力の強化について伺います。図8に示すように、アジア地域では、中国企業のシェアが増えています。さらに今、中国ではUSCを年に何十基も国内で建設しています。もともと安い人件費を武器にしてきた中国で、これだけの基数を建設しているのですから、建設コストはかなり下がってきています。そんな中、わが国メーカーがどう海外展開をしていくのが良いのか議論したいと思います。

「インフラ輸出」というキーワードの中で、様々なビジネスモデルの検討をされてきたNEDOとして、その辺りのビジョン、方向性について結果は出ているのでしょうか。

PQ, O&M でアピールする日本の技術力

在間 2000年を境に、日本企業の市場シェアが各段に落ちてきています。そこで、どうやって日本の火力発電システム、特にボイラや通常タービンの競争力を上げていけば良いのか、色々調べました。

中国のコストの安いUSCを導入するという国がある一方、日本と欧米のシェアが高い国もあります。理由は、やはり事前入札資格審



(出所：McCoy Power Report より、みずほ銀行産業調査部が作成)

図8 アジア地域における汽力発電機器シェア（2001～2013年の累計）

査（PQ）です。最初の技術審査でPQが作られているのです。その中で、特に、どれだけ長いUSCの運転経験があるか、どれだけ安定した性能を維持しているかという点で、日米欧のボイラやタービンが入っています。ですから、日本としては、PQをうまく導入して競争力を維持していく必要があります。

また、日本の運転管理・保守点検（O&M）技術は、世界に冠たるものがあって、高い効率と稼働率の維持では他国を凌駕しています。ですから、ライフサイクルコストで考えれば、日本のUSC技術の値段は必ずしも高くありません。それを事業展開にどう組み込んでいくのが重要になってくると考えます。その時、O&Mをいかにミニマム化するか、あるいは稼働率の維持や効率の維持をどうサポートしていくのか。単純に保証するとなるとリスクが高いので、O&Mをうまくブラックボックス化して、1つのメリットとして受け入れられるようなシステムを作っていかなければなりません。それをどう実現するかということで技術開発を進めているところです。

山内 クリーンコールテクノロジーの国際会議「ICT2017」(2017年5月、於イタリア・カリヤリ)で講演を聴いたのですが、今、中国では「SPEプロブレム」が深刻だそうです。「SPEプロブレム」とは、酸化スケール剥離の問題のようです。

日本企業が国際競争力を強化するには、プラントの運転管理のところでリハビリを提案するとか、アフターサービスで事業展開していく手があると思います。プラントを建設する前では、どうしても、技術水準の高さよりプラントの安さが優先されますから、アフターサービスで日本企業の技術力を証明していく、例えば、非常に調子の悪いプラントを改修することで稼働率を大幅に上げるという手もあり得ると思います。

燃料電池開発における国際競争力強化

小野崎 今後の話として、GTFC、IGFCでは燃料電池が重要な技術となります。では、小林先生から燃料電池の将来見通しについてお話しただけませんかでしょうか。

小林 将来的には何よりも、固体酸化物形燃料電池SOFC、その燃料電池をガスタービン複合発電に付けたGTFC、IGCCに付けたIGFCといった新技術、新製品を次々と開発していくことが、火力発電技術の国際競争力の強化には必須だと思います。その意味で、技術ロードマップにGTFC、IGFCが明記されたことは、本当に重要なことであり、まずはそのスピード感を何としても守らなければいけないと思っています。

一方、新技術で海外市場へ参入するのは非

常に難しいところがあります。市場に入ろうとすればどうしても技術を一部開示しなければいけません。いざ開示すると、安いコストで真似されてしまうことがあります。

ではどうするか。やはり、新製品、新技術の開発の早い段階では海外市場や海外資金をあてにしなければならないというのが、私の持論です。国策として特別な指導育成をやって、国内で技術を完成させ、完全にブラックボックス化してから海外に出していくという、この基本戦略が大事だと思います。

もっともその点、燃料電池のコア技術であるセラミックスの部分は真似されにくいという強みがあります。焼き上がった製品を叩き割って中を見たり成分分析をしたりしても、焼く前の仕掛けは残っていません。

製品規格については、早くからオープンにして世界標準を日本がリードする必要があると思いますが、やはりコアの技術のところは最後まで持ち続ける、隠し続けるという長期的な投資戦略を国家レベルで持っておくことが、唯一、新興国に対抗する手段だろうと思います。

小野崎 NEDO では、そういう戦略を立てられるのですか。

在間 特許戦略という考え方はありますが、個別の技術やノウハウについて、NEDO が「クロードにするように」とか、「オープンにするように」とか指導するところまではいいません。そこは、内部をよく知っている開発者がやる。NEDO はトータルで考えるということだと思います。

ガスタービン開発と国際競争力強化

小野崎 競争力強化では、今後、ガスタービンをどうしていくかがかなり重要な課題だと思います。そこで、渡辺先生に伺いたいと思います。



小林 由則 氏

(東京大学 生産技術研究所
特任教授)

渡辺 大型のガスタービン市場は、GE 社、シーメンス社、MHPS の 3 社で占められています。どうやって GE、シーメンスに勝っていくかという話になりますが、技術開発では、1700℃の超高温ガスタービン開発が当面の目標になると思います。

日本が勝っていくために、素材の強みを活かすという手があります。GE もジェットエンジンに採用しようとしているセラミックマトリックス複合材料 (CMC) は、日本の会社が開発した炭化ケイ素繊維から作られています。こういう日本生まれの素材を活かせば、大型ガスタービンの競争力も強くなると期待できるのではないかと思います。

次に、ガスタービンでは、中小型サイズが中東で今までも売れてきました。中型ガスタービンにフレキシビリティとかの付加価値を付けて発電パッケージにすると、かなりの需要があるようです。それを、これから需要が伸びそうな東南アジアの国々に持っていけば、国際競争力の強化につながると期待しています。

ただ、CMC については不安なことがあります。ジェットエンジン用 CMC の場合、その素材を作っているのは、日本の 2 社しかありませんが、その中の多くの技術を外国企業が押さえてしまいました。ですから、今、日本企業は、日本製の CMC 素材を部分的にしか使えないという状況になってしまいました。うかうかして

いと、外国企業にみんな取られてしまうという危険性があるので、十分注意してウォッチしていく必要があると思います。

小野崎 今、CMC の話が出ましたが、日本から出願している CMC 関連特許は少ないですね。欧米が圧倒的に多くて、なんで日本からの特許件数が少ないのかなという、素朴な印象を受けました。

新興国における環境規制と市場形成

小野崎 中国では硫黄酸化物 (SOx) や窒素酸化物 (NOx)、煤塵 (PM) の規制が強化されつつあります。インドはどうでしょうか。

在間 インドは、日本よりも厳しい環境基準を入れようとしています。

山内 2017 年 1 月から、新設は SOx が 100mg/Nm³、NOx が 100mg/Nm³、PM が 30mg/Nm³ に、水銀が 0.03 mg/Nm³ になりました。

在間 インドは、もっと規制を強化していきますよ。

小野崎 規制が強化されてくると、環境設備としてのマーケットができ上がってきますね。

山内 はい。中国もようやく、設備の単独バラ買いをしているとプラントがまともに動かないことを理解するようになりました。ですから、MHPS では「一括で買ってください。そうしたらちゃんと保証します」と言って、中国で技術展開をしています。

小野崎 中国もインドも、環境設備のマーケットがかなり広がるなら、環境性をテコに、全体のシステムとして売り込む手がありますね。

山内 ある中国のプラントでは、50 mg/Nm³ 以上だった SOx 濃度が、MHPS の一貫システムを導入したら 35 mg/Nm³ 以下になりました。ですから、中国の多くのプラントは、全体システムできちんと動かしていないのではないかと思います。

在間 今、NEDO でも環境技術の輸出を目指し、「クリーンコール技術開発／石炭利用環境対策事業／石炭利用環境対策推進事業／インドでの脱硝技術展開のための調査事業」(平成 29 年度)を公募しています。基本は、脱硝触媒と高煤塵濃度の影響です。

IoT の導入 (第 4 次産業革命)

小野崎 「第 4 次産業革命」の流れの中で何ができるのか、という話題に移ります。IoT (Internet of Things) あるいはビッグデータ、人工知能 (AI: Artificial Intelligence) という言葉が先行していますが、電力業界では、PV や風力などの再エネ大量導入で需給調整が難しくなっていく中、IoT 技術がそれにうまくマッチングできていないのかなと思います。

GE は、2012 年からインダストリアル・インターネット (Industrial Internet) というコンセプトを提唱して、産業用機器にセンサーを付けうまく整理してネットワークに接続し、膨大なデータを分析して生産性向上を図っていかうとしています。また、発電での競争力強化で IoT を使うために、プレディックス (Predix) という IoT プラットフォームを導入して、プラントが運転される期間の予防保全に使うと言っています。

特に、ガスタービンの予防保全で、今後 IoT 導入がどう進んでいくのか、渡辺先生からお話を伺いたいと思います。

先行する航空エンジンでの開発事例

渡辺 IoTについては、ガスタービンよりも先に進んでいるのは航空エンジンです。航空エンジンの事例を少しご紹介します。今や常識になっている「オンコンディション・モニタリング」は、航空機エンジンに沢山のセンサーを付けていて、飛行中のエンジンの全データを、エンジンメーカーのデータセンターにダウンリンクするサービスです。ただ、飛行中ずっと見ているわけではなく、「トレンド・モニタリング」といって、ある点で見えています。異常な兆候を見つけると、原因を特定して不具合を解消することで、安全性の向上にかなり役立っています。

今、日本航空㈱は、GEと共同で、モニタリングの精度向上に取り組んでいます。離陸から着陸まで切れ目のない全てのデータを取り、それを飛行中ずっとダウンリンクできるようにしようとしています。この「ビッグデータ」で、より詳細な解析が可能になり、一時的であっても不具合の予兆を捉えて予防保全を行うシステムを開発中だということです。

将来考えられるのは「バーチャルジェットエンジン」です。コンピューター上にエンジンを作っておき、トレンド・モニタリングで異常を捉えた時に、どこが悪いのかシミュレーションで再現することを目指しています。地上のガスタービンについてもそういう方向でIoTが進んでいくと思います。

AIによるボイラの最適燃焼調整

小野崎 ガスタービンだけではなく、ボイラ関係でもIoTの取組をされていると思います。山内さん、いかがですか。

山内 MHPSは、台湾電力の石炭焚き火力発電所で、AI活用によるボイラ燃焼調整の自動化に向けてのシステムを使った導入試験をし

ました。AIによる調整は、ベテラン技師による調整と遜色ありませんでした。

今回の実証試験は、AIからの提案を受けて人間が操作する形で行いました。

次の段階では、AIをどんどん賢くして試験をやろうと思っています。今後更に火力発電所でAIに学習させてデジタルモデルを発展させていければと考えています。

小林 発電所で使用する燃料の石炭が変わった時に自動的に対応できる点も良いですね。

山内 そうです。石炭毎の最適運転が可能になるのだと思います。

小林 一方で、自動車の自動運転と同じで、AIがミスオペレーションをした時に、責任をどうするかという問題も生じてきますね。

山内 はい。そういう問題があるので、そこはやはりメーカーとしての経験がものをいうところだと思います。

また、MHPSでは、ICT（Information Communication Technology）を活用して、火力発電設備の運転を最適化するデジタルソリューションサービス「TOMONI（トモニ）」の提供を始めました。データを取って色々なサービスができる可能性はあるのですが、どういふところに価値があるかお客さんと密接に協議しながらやらないと実現が難しいのです。われわれが考える価値とお客さんの価値のギャップがあることも考えられます。

そこで、TOMONIでは、そういう顧客ニーズをくみ上げて、ICT技術を活用してソリューションを提案していくものです。

電中研におけるIoT関連研究

小野崎 電力業界のニーズを把握している電中研のIoTへの取組について、原さんからご

紹介いただきたいと思います。

原 図9が電中研の最近の取組状況をまとめたものです。電中研の中には、専門分野別の研究所があります。システム技術研究所では、以前からビッグデータ解析やAIに取り組んでいました。

昨年10月に、新たに「エネルギーイノベーション創発センター」を設置し、分野別の研究所と連携して取り組んでいこうとしています。

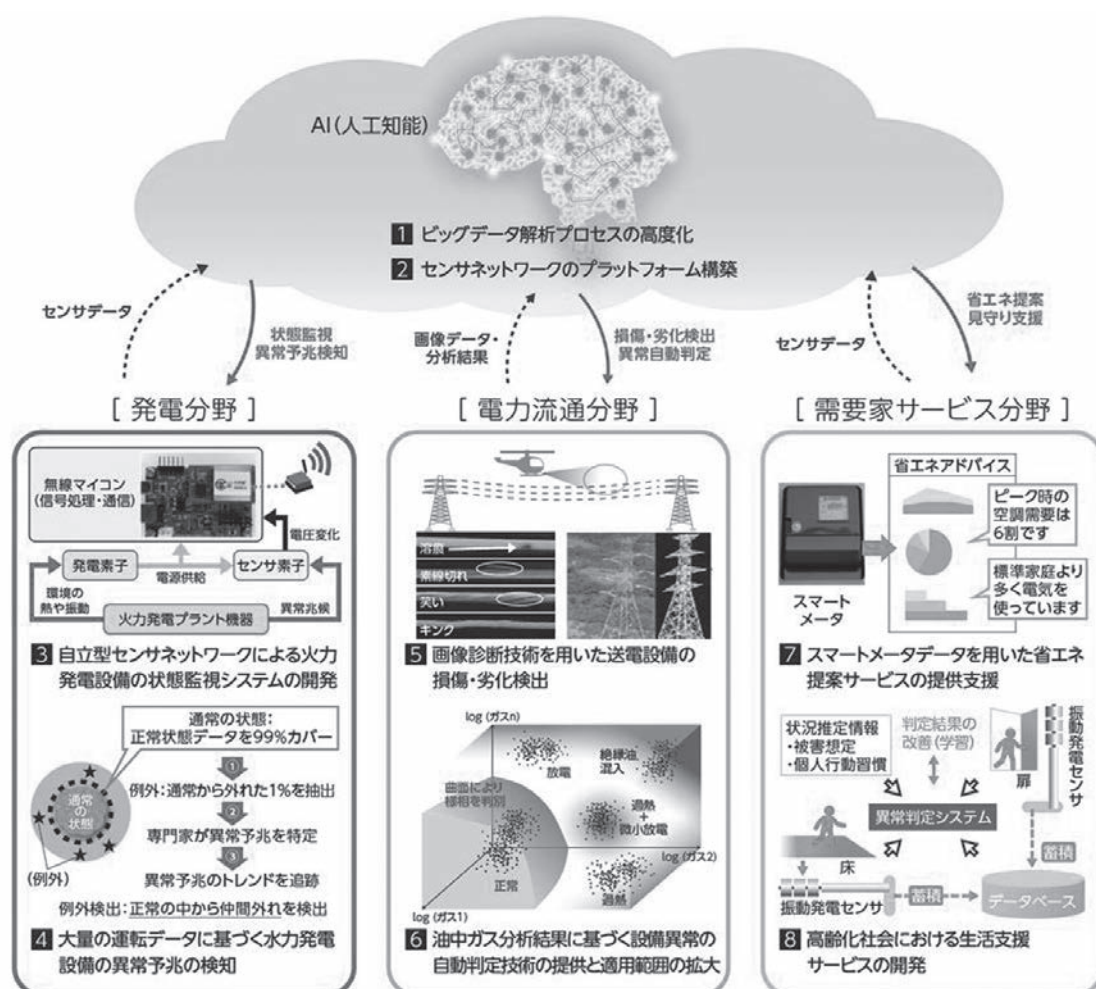
現状は、図9にあるように、ビッグデータ解析プロセスの高度化、センサーネットワークのプラットフォーム構築に取組むとともに、発電分野、電力流通分野、需要家サービス分

野への展開を進めつつあります。

データ解析の部分では、膨大なデータの中から正常状態データと、そこから外れたデータを検出できる幾つかの手法を使って、予兆検知に使うという取組も進めています。

センサー関連では、設置環境の熱や振動などから自ら電力を生み出す「環境発電（エナジーハーベスティング）技術」を用いた自立型センサーネットワークの開発などに取り組んでいます。

火力の分野でどうなるのかですが、個人的にはIoTやAIという言葉は、イメージがつかめていない部分があると思います。最新のデジタル技術を使うことにより、どういう価値を生み出すのかを明確にする必要が



(出所: Annual Plan 2017、http://criepi.denken.or.jp/intro/info/2017annual_plan.pdf)

図9 電中研におけるIoT関連研究への取組

あると思います。

また、電中研単独ではなく、メーカー、ITベンダー、電力会社などと協力して開発を進めていくことが非常に重要だと感じています。

小野崎 IT、IoT の具体例としては、今のところ、ガスタービンやボイラの燃焼調整が中心ですが、これから広がりがあると思います。

おわりに

小野崎 締めくくりに当たり、火力発電技術全般について夢なり抱負なり、一言ずつ願います。

山内 これから成長する国、これからエネルギーを必要とする国にとって、CO₂の問題とエネルギー価格の問題は非常に重要な問題です。そこを、先進国の論理で「CO₂を出すな」とは言えないと思うのです。そういう意味で、石炭火力発電は重要な手段の1つです。

過去に公害を経験し、日本がたどり着いた化石燃料をきれいに使う技術ですから、それをこれから成長しようとする国に供給していくのは、日本の責務という気がします。

また、エネルギーを持たず、しかも外と隔絶されている島国の日本が生き残れる1つのモデルも作らないといけないと思います。適用可能なら、そのモデルがフィリピンや台湾といった国々に展開されていくということも非常に重要なことだと思います。

やはり各国の資源とか状況と人口と今の経済の状況によって、色々な解があるはずなので、それに対してわれわれはきめ細かいソリューションを提供していけば、新たなビジネスの展開もあるのではないかと思います。

在間 今回、技術ロードマップを作らせて頂きましたが、石炭火力も LNG 火力も、基本的

には化石燃料を使った火力発電という1つの分野の中で、一体として考えていかなければなりません。それを一元管理する NEDO の役割はかなり重要ですから、これからも頑張っていかなければならないと考えているところです。一方、先進火力をどうやって海外で普及、展開するか考えるのも、われわれ NEDO のミッションです。

また、発展途上国には、石炭火力に対してアレルギーみたいなものがあります。やはり、黒い煙に黒い水というイメージがあります。それを乗り越えて、安定的に運転できる高効率な火力を提供できているのが日本ですから、石炭を有する発展途上国にそれを提供していく、増大する CO₂ をトータルで抑えていくのも日本の役割だと思います。

最後に、個人的な意見としては、やはり、化石燃料をいつまでも燃やしてはいけません。発電できれば PV でも風力でも良いのではないかと考えています。石炭火力、特に石炭ガス化については、それをケミカルユースしたり原料に使ったりしていった、「資源」という観点で、石炭の重要性を見出していかなければいけないと考えているところです。

小林 火力の将来に関してということで、まさに今、在間さんがおっしゃられた「資源」という捉え方が大事だと思っています。これから再エネの大量導入が目指されていますが、再エネと火力は、うまく組み合わせることで、21 世紀全般を通じた日本のエネルギー戦略を立てる貴重な2つの柱になると思っています。既に行われている石炭火力へのバイオマス混焼もその一例ですが、先程も話に出たパワーガスのような形で、再エネ由来の水素とカーボンを用いてメタンを作ること、再エネと火力のうまく組み合わせだと考えます。これは燃料の再生産であると同時に化学製品の原材料生産という資源の話でもあります。このように、資源をどうするかという発想からエネルギー戦略を組み立てていく、

守っていく、発展させていくことも重要だと思っています。

最後になりますが、去年の夏のリオデジャネイロ・オリンピックで日本が男子陸上400メートルリレーで銀メダルを取ったことは、日本のモノづくりの原点にも通じるものと大変嬉しく感じています。私は、日本の陸上チームが採用した「アンダーハンドパス」は速さを追求する余り、どこかで失敗するのではないかと危惧しておりました。モノづくりでも、品質の高い物を作るためには、どうしても重ね合わせが重要になりますが、現代のように効率や採算ばかりを厳しく求められると、この重ね合わせのための糊代の部分がどんどん短くなっていて、やがては信頼性を損ないかねないと心配しています。ところが、選手たちはそれを猛練習と、日本人固有の極めて信頼の高いチームワークで成功させて銀メダルを取った。それは本当にわが国のモノづくりの現場で日々苦勞している人たちを勇気付ける快挙であり、日本のモノづくりはこれからも必ずや国際競争に打ち勝って行けると信じています。

渡辺 私は、日本の環境適合技術で国際的なCO₂削減に貢献するのが今後の日本の責務ではないかと思っています。その中で、火力発電、火力技術がいかに大切か一般の方々にも理解して頂けるようにする情報発信にも力を入れる必要があると思っています。それで皆さんの意識も高めて、国際貢献、環境適合技術の国際展開をやっていけたらなと思っています。

原 「再エネの大量導入」、「火力でのCO₂削減」、「エネルギー」といったキーワードを考えた時、日本としては、やはり、火力発電技術を軸にした技術オプションをうまく揃えておくこと、すぐに必要な技術、近い将来必要な技術、さらに先を見据えた先進的な技術を意識しながら、技術オプションを揃えていくことが必要だと感じています。



小野崎 正樹 氏

(一財) エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長

また、渡辺先生から急速起動のガスタービンの話や調整力の話が出ましたが、これがうまく導入されていくには制度面も非常に重要です。開発した技術がきちんと導入され、トータルとしてうまく成立するような制度面の整備も重要なポイントではないでしょうか。

小野崎 今日の座談会を通して、最初に技術ロードマップからスタートして、再生可能エネルギーの大量導入に当たってどういう課題があるのかということで、急速起動や負荷変動の話が出ました。CO₂回収の面では開発中の様々な技術の紹介もありました。火力技術で国際競争力を上げていく方策の話もさせていただきました。最後に、第四次産業革命の中でのIoTでどんな進め方があるのかということで、ガスタービンだけでなく、ボイラ全般、火力全般についての適用可能性の話がありました。

今後とも、火力発電、それを支える火力技術は、世の中の基幹になる技術であって、その技術の役割も時代とともに少しずつ変わっていく。それに十分適合していかなければいけないし、その適合というのは単に技術の問題だけではなくて、制度面あるいは周りの人へのアピール、さまざまなものと絡み合った形でやっていかなければいけないと、つくづく感じた次第です。

終わりに当たって、本座談会がメーカーの方、電気事業者、あるいは政策分野の皆さんの役に立つであろうと信じて、今回の座談会を終わりにしたいと思います。拙い司会ではございましたけれども、ご協力ありがとうございました。

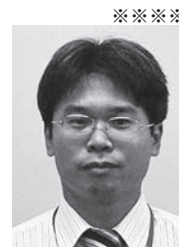
[寄稿]

エネルギー分野におけるサイバーセキュリティ対策 およびトラストの役割

山内 徹 ※ (一財)日本情報経済社会推進協会 (JIPDEC)
常務理事・インターネットトラストセンター長



杉田 修 ※※ インターネットトラストセンター
主席研究員



金子 成徳 ※※※ インターネットトラストセンター
主席研究員

成田 康正 ※※※ 情報マネジメントシステム認定センター
(ISMS-AC) 企画グループリーダー



1. はじめに

インターネットの急速な普及は、政治・経済・社会の広範な分野において多大な影響を与えてきた。とりわけ、近年の半導体回路の集積度の向上、電子計算機の高度化および通信の高帯域化がもたらしたクラウドコンピューティングとスマートフォン、タブレットなど高機能端末の爆発的な普及が、企業行動、個人の生活様式等を抜本的に変革しつつある。電力、ガス、石油等のエネルギー分野にも影響が及んでいる。

他方、インターネットを悪用した犯罪や悪意のある攻撃の増加が、グローバルな問題となっている。わが国でも、政府機関、地方公共団体、民間企業、消費者等が、マルウェアへの感染やソフトウェアの脆弱性に起因する攻撃の被害を受けている。電力・ガスなどのエネルギー産業を狙ったサイバー攻撃も十分に想定されるところであり、実際に諸外国では、イランやウクライナなどにおいて電力などエネルギー施設を標的とした事件が発生してきた。企業、個人ともに、電子メールのなりすましやWebサイトの改ざんへの対策として、サイバーセキュリティの抜本的な強化が求められている。

このような状況の中、民間企業、団体、個人等が安心してインターネットを利活用するための環境を示す「トラスト」の概念が重要になっている。インターネット上の個人、法人、モノ等の実在性および属性等を証明するための仕組みを提供するデジタル認証局やタイムスタンプなどが、インターネット上のサービスをトラストする基盤として改めて注目を浴びている。

電力、ガス、石油などエネルギー分野は、重要インフラ⁽¹⁾として、サイバーセキュリティへの対策が求められる。本稿は、エネルギー分野でのサイバーセキュリティ対策の現状と課題とともに、インターネット上の情報の信頼性を示すトラストの役割について述べる。

2. エネルギー分野における制御システムのサイバーセキュリティ対策

(1) 制御システムのセキュリティ

国のサイバーセキュリティ戦略本部は、13分野の重要インフラを指定している。これら分野に属する企業は、重要インフラ事業者として、「重要インフラの情報セキュリティ対策に係る第3次行動計画」に基づいた対策が求められている。

電力、ガス、石油等は重要インフラであり、一般的に、発電所やプラント等に多くの制御システムを保有している。制御システムのセキュリティにおいては、サービスの継続を守るように設計・運用することが基本である。すなわち、情報セキュリティの3要素CIA（Confidentiality：機密性、Integrity：完全性、Availability：可用性）のうち、制御システムにおいては、可用性（止まらないこと）を最重視している。仮に制御システムにおいて意図的または非意図的な障害が発生しても、電力やガスの供給サービスに支障をきたさないことを一番の目標としている。

（２）エネルギー分野の制御システムの特徴

これまで、エネルギー分野の制御システムには、高度な可用性とリアルタイム性（ミリ秒単位のレスポンス等）が要求される一方、他のシステムとデータ連携等を行うニーズは存在しなかった。

従って、プラント等のメーカーが提供する独自の技術・製品を用いられてきた経緯がある。また、個別の制御システムは独立したネットワーク上に構築され、かつ外部のネットワークからも隔離して運用されてきた。さらに、障害の発生確率を低減するため、必要最小限の機能のみを実装し、機器やネットワークを冗長構成とすることも一般的である。

他方、エネルギー供給設備は10年以上使用

されることが当たり前で、それに付随する制御システムも、同様の期間稼働する。これは、OAシステムの稼働期間（5～6年）と比べると非常に長い。

（３）制御システムの環境変化

このような特徴を持つエネルギー分野の制御システムであるが、図1に示すように、近年はメーカーの独自技術を用いた製品が少なくなっている。汎用的な技術や製品（TCP/IPやWindows等）でも独自製品と同等の機能を実現できるようになってきたこと、独自製品を維持するには、要員の育成やコストの問題などがあり、メーカーとして負担が大きいことに起因すると考えられる。従って、制御システムでもWindows等の汎用製品が普及している。

また、プラントの運転記録等を分析、可視化してインターネットを通じて公開したい、あるいは他のシステムで活用したい、という要求も大きくなってきている。特に、IoT（Internet of Things）のキーワードの下、制御システムの運転記録等をビッグデータとして活用しようとする動きも顕著である。制御システムにおいても、他のシステムとの大量かつリアルタイムなデータ連携が要求され、外部ネットワークと接続しなければならないケースもある。

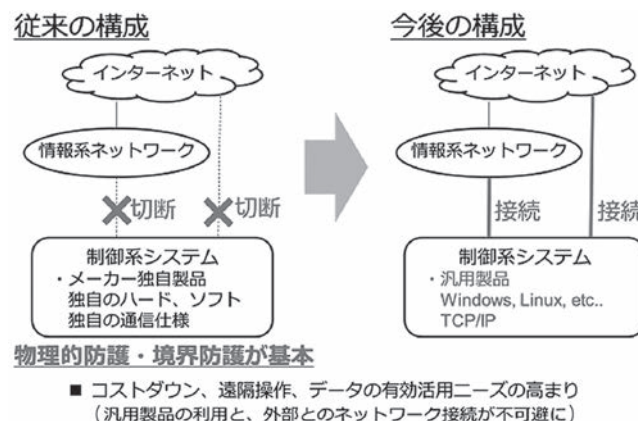


図1 制御系システムの環境変化

(4) 考慮すべきサイバー脅威

制御システムにおける汎用製品の利用と外部ネットワーク接続の広がり、図2に示すように、制御システムに対しても、OAシステムと同様の攻撃手法が使えるようになってきたことを意味する。従って、制御システムでも、保守業者によって持ち込まれるような偶発的なものを含むマルウェアの侵入や不正アクセスなどへの考慮が必要となっており、サービスの継続と実被害の最小化を目指し、エネルギー事業者と監督官庁とが連携しながら対処を行っていく動きが出ている。

(5) 対策上の留意点と課題

制御システムでは高度なリアルタイム性が求められることから、実際のシステムには細やかなチューニングが施されており、微妙なバランスの上で動作しているものが多い。従って、一般的には、完成したシステムに対して後付けのセキュリティ対策（設定変更やセキュリティ更新プログラムの適用：パッチ当て等）を講じると、そのバランスが崩れ、本来の機能を損なう可能性が高い。特に、ウイルス対策ソフトの後付けは、処理の遅延を招くことが明白なため忌避される。

このように、稼働中の制御システムでは、後付けのセキュリティ対策は基本的に許されず、システムへの変更を及ぼさない範囲での対策が求められる。最近、制御システム内のネットワークパケットを監視・分析し、異常な兆候を把握して、実害に及ぶ前に火消しするなどの

対策が検討されているものの、このようなアプローチはまだ広く普及していない。

今後安価で使いやすい制御システム向けのセキュリティ製品の登場が待たれるとともに、エネルギー事業者自身による監視や事故対応体制の充実が必要である。その際には、既存の設備監視や事故対応体制（保安体制）の中に、サイバー攻撃への対応をうまく練り込むことができれば、より実効性が上がると考えられる。一方で、物理的対策、境界防護等の従来型の対策を着実に運用することも依然として重要である。

(6) 更なるセキュリティ強化のために

既存システムに対する後付けのセキュリティ対策が困難なことは前述の通りではあるが、新たに構築される制御システムでは、開発の初期段階からセキュリティ対策を考慮することができるため、エネルギー事業者および制御システムのシステムインテグレータは、リスクアセスメントを通じて必要な対策を盛り込むようにすべきである。例えば、運用開始後でもセキュリティ上の更新を可能とするようなシステムづくりや、公開鍵暗号基盤を用いた機器認証や通信の暗号化、あるいは所定のプロセスしか動作させないようにする制御、さらに遠隔での監視を可能とする仕組みが考えられる。このような対策を制御システムの発注仕様の中に含めるようにし、確実に実装されるようにすることが重要である。

ところで、サイバー攻撃の脅威は、時とと

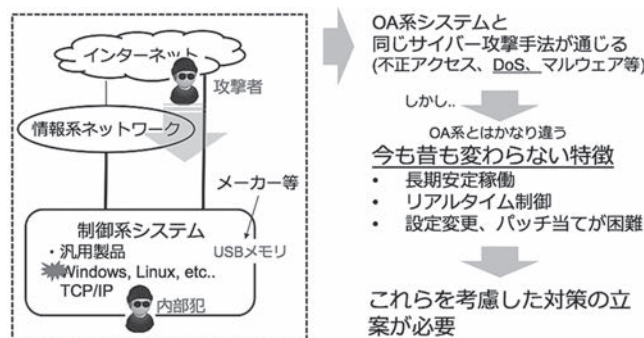


図2 制御系システムにおける脅威

もに変化し、それらがシステムやビジネスに及ぼす影響も変化する。したがってセキュリティ対策は一度講じれば終わり、ということではなく、常にこの変化を把握し、対策を変化させることが必要である。そのために有用な仕組みとして「情報セキュリティマネジメントシステム」(ISMS: Information Security Management System)があり、エネルギー事業者やシステムインテグレータの中でこれを構築し、運用していくことが、変化への対応のためにきわめて重要である。

さらに、ISMS やセキュリティ対策の構築、監視や事故対応を担う人材の育成も課題である。この点については経済産業省によって「産業サイバーセキュリティセンター」が開設され、重要インフラ分野を中心とした受講生に2017年度から教育を行うことになっており、近い将来において卒業生の活躍が期待される。

3. 情報セキュリティマネジメントシステムの活用

(1) ISMS 認証の概要とクラウドセキュリティへの取組

① ISMS 認証の概要

エネルギー分野における情報セキュリティの強化に向けて、ISMS 認証の活用が期待される。ISMS の要求事項は、国際規格の ISO/IEC 27001:2013 に規定されている。

(一財)日本情報経済社会推進協会(JIPDEC)の附属機関である情報マネジメントシステム認定センター(ISMS-AC)が運用するISMS適合性評価制度⁽²⁾は、ISMSを運用する組織を第三者である民間の認証機関が認証する制度である。図3で示すように、2017年6月現在、ISMS-ACは26の認証機関を認定し、それら認証機関は約5,200の組織を認証している。この数は、世界一であり、世界中のISMS認証取得組織数の約4割を占めている。このことから、ISMS認証は、わが国の情報セキュリティの向上に大きく貢献していると言えよう。

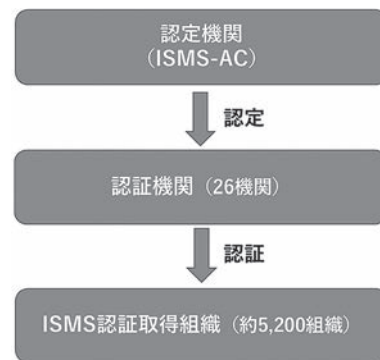


図3 認証・認定の仕組み

ISMS 認証の取得は、組織の情報セキュリティ管理体制の整備や社内組織の強化のみならず、顧客や取引先からの情報セキュリティ要求事項への対応などを通じて、組織の信頼性向上に貢献する。

② ISMS で達成すべきこと

ISMS は、技術対策の他に組織のマネジメントとして、自らのリスクアセスメントにより必要なセキュリティレベルを決め、プランを立て、資源を配分して、システムを運用することである。

ISMS で達成すべきことは、リスクマネジメントプロセスを適用することによって、情報の機密性、完全性および可用性をバランス良く維持・改善し、リスクを適切に管理しているという信頼を利害関係者に与えることにある。ISMSでは、情報セキュリティの3要素CIA(機密性、完全性、可用性)について、図4のように定義している⁽³⁾。

情報セキュリティというと、機密性としての情報漏洩の対策に注意がいきがちであるが、ランサムウェアのような重要情報へのアクセス障害のリスク対応として、必要なときに必

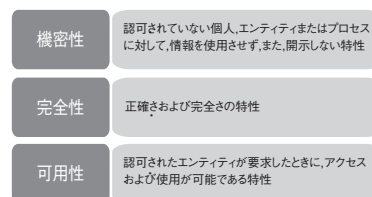


図4 CIAの定義

要な情報にアクセスすることができる可用性の観点も大事であり、CIAの3つの観点でリスクへの対応を行っていくことが肝要である。

③クラウドサービス固有のリスクへの対応

昨今の事業環境の変化へ迅速に対応していくためにクラウドサービスの利用が急速に進んでいる。サービス利用開始までのスピード、サービス資源の拡張のしやすさなどのクラウドサービスの特徴をいかして、事業を行う組織が増えてきている。

一方、図5に示すように、クラウドサービスを利用することで新たなリスクも出てきている。データ管理におけるガバナンス喪失のリスク、マルチテナントによるリスクなどの多種のリスクが考えられ、新たな問題に直面している。

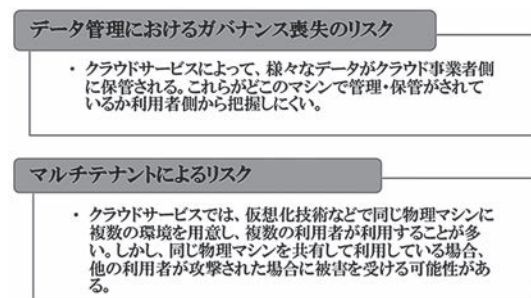


図5 クラウドサービス利用のリスク

このようにクラウドサービスを活用したいが、利用することへの不安がある中、日本では経済産業省より「クラウドサービス利用のための情報セキュリティマネジメントガイドライン」が2011年4月に公表された。その後、このガイドラインを国際標準化機構（ISO）へ提案し、2015年12月15日に「ISO/IEC 27002に基づくクラウドサービスのための情報セキュリティ管理策の実践の規範」（ISO/IEC 27017）が発行された後、2016年12月にJIS化され、JIS Q 27017:2016が制定された。制定までの流れを図6に示す。

④ISMSクラウドセキュリティ認証の開始

2016年8月、ISMS-ACは、ISMSクラウドセキュリティ認証⁽⁴⁾に対する認定を開始した。

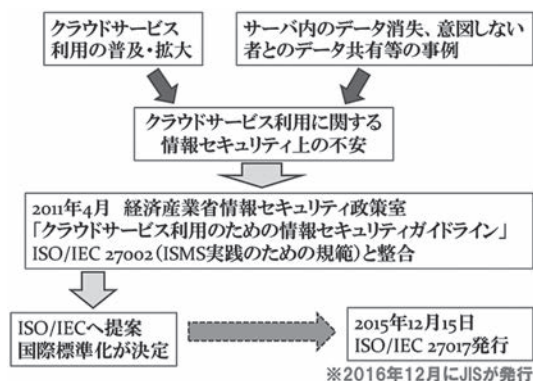


図6 ISO/IEC 27017の発行経緯

ISMSクラウドセキュリティ認証は、ISMS認証を取得している組織に対して、クラウドサービスについてJIS Q 27017:2016に規定されるクラウドサービス固有の管理策が追加で特定され実施されていることを認証するものである。ISMSクラウドセキュリティ認証で使われる認証基準は、ISMS-ACが策定したJIP-ISMS517-1.0であり、ガイドラインであるJIS Q 27017の管理策を認証されたISMSに取り込むための要求事項が規定されている。

ISMSクラウドセキュリティ認証の対象者は、図7に示すように、クラウドサービスプロバイダ（CSP、クラウドサービスを提供している組織）、またはクラウドサービスカスタマ（CSC、クラウドサービスを利用している組織）、あるいはその両方の立場である組織となる。

ISMSクラウドセキュリティ認証において、2017年6月現在で、認証機関5機関、認証取

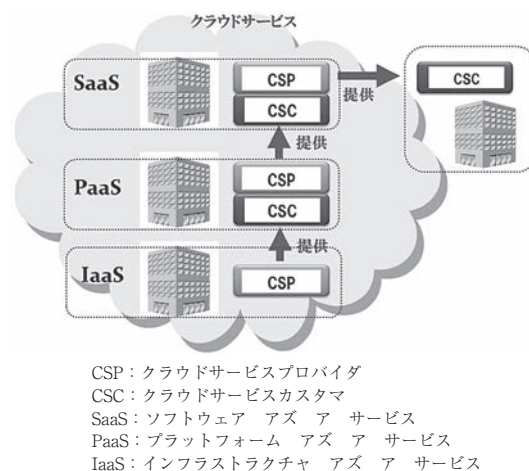


図7 ISMSクラウドセキュリティ認証の対象者

得組織 17 組織あり、順調に認証件数も増えてきている。これらの数は、ISMS 認証の認証機関数および認証取得組織数の内数である。今後は、ISMS クラウドセキュリティ認証を普及させることにより、クラウドサービスの信頼性の向上が期待される。

(2) 制御システムセキュリティ認証

① 概要

サイバーセキュリティマネジメントシステム（CSMS：Cyber Security Management System）適合性評価制度⁽⁵⁾は、「産業用オートメーションおよび制御システム」（以下、制御システム）における CSMS を、第三者が認証する制度である。制御システムについては、国際電気標準会議（IEC）が IEC62443 シリーズを発行している。IEC 62443-2-1 は、このうち制御システムに関わる組織のマネジメントシステムに関する国際規格である。ISMS-AC は、これをベースにした「CSMS 認証基準（IEC 62443-2-1:2010）」を策定し、2014 年 7 月から CSMS 適合性評価制度を開始した。図 8 に CSMS の対象となる事業者を、図 9 に CSMS 活用の流れを示す。

ISMS 適合性評価制度と同様、CSMS 適合性評価制度では、ISMS-AC が認定した「CSMS 認証機関」が個々の評価対象組織を認証する仕組みとなっている。2017 年 6 月現在、CSMS 認証機関は 2 機関、CSMS 認証取得組織は 4 組織となっている。

なお、CSMS の“C”は、“Cyber”を表しているが、“Cyber”という言葉の持つ意味は広く、

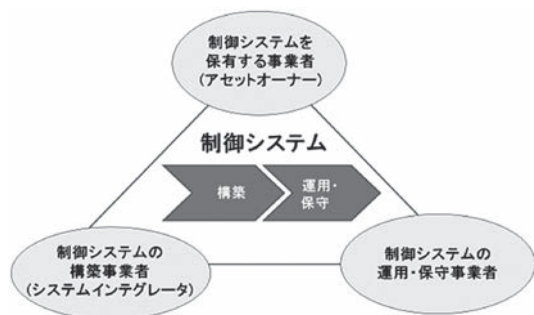


図 8 CSMS の対象となる事業者

このままでは制御システムを対象とする意図が伝わりにくい。よって ISMS-AC は、CSMS の意味を“Control system Security Management System”と捉えた方が適切であると考えており、普及啓発活動の中ではそのような説明を行うこともある。

② 特徴

CSMS における、制御システムを扱うことに由来する特徴を 3 つ挙げる。

第 1 の特徴は、“HSE”への考慮である。OA システムにおけるセキュリティは、機密性、完全性、可用性、すなわち CIA を考慮するが、制御システムでは、それに加えて健康（Health）、安全（Safety）、環境（Environment）を考慮する。この考え方は、IEC 62443-2-1 でも定義されている。制御システムは、物理的な機器を制御するので、運転員や通行人、周辺住民などの死傷や健康被害、有害物質の流出等による環境影響も考えてサイバーセキュリティ上のリスク分析を行う必要がある。

第 2 の特徴は、CSMS では制御システムを保有する事業者（アセットオーナー）だけでなく、構築事業者（システムインテグレータ）と運用・保守事業者も一緒になって制御システムのセキュリティを評価し、対策を立案していくことを考慮している点である。

アセットオーナーが自らの組織の事業リスクを考慮し、制御システムのリスクアセスメントを実施することはある意味当然だが、システムインテグレータや運用・保守事業者も、アセットオーナーにおける制御システムの稼

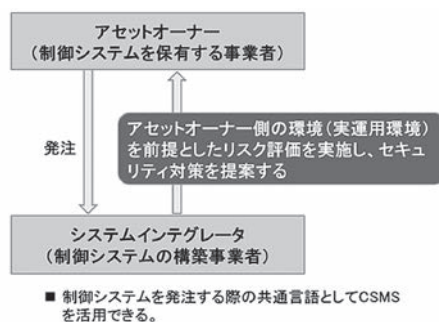


図 9 CSMS 活用の流れ

働環境（本番環境）を想定し、制御システムのセキュリティ評価や対策の提案を行うことがCSMSの認証基準に定められている。このことにより、制御システムにおける現実的かつ確実なセキュリティ対策の立案と実装が期待できる。

第3の特徴は、対策を検討する際に制御システム用の管理策を利用することである。制御システムの運用環境は、用途によって様々であるが、例えば、入退室管理や24時間の有人監視により、制御システムを操作できる要員が限られ、かつ、プラントの事故時などの緊急時にはその場にいる全員が速やかに制御システムを操作しなければならないこともある。そのようなケースでは、制御システムの利用前にすべての利用者に対してログイン認証を行うことは現実的でない。そのようにすると、制御システムの運用に支障をきたす。従って、CSMSにおける認証の管理策は、物理的なものとシステム的なものの組み合わせを認めている。

以上は一例であるが、CSMSの管理策は一般的に制御システムの特徴を考慮したものになっている。

③ 普及に向けた課題

2017年6月現在で、CSMS認証取得組織はまだ4組織にとどまっている。2020東京五輪に向けた重要インフラ分野におけるサイバーセキュリティ意識の高まりやIoTの普及と制御システムのオープン化、それに伴うサイバーセキュリティ脅威への懸念といった要因により、制御システムにおける情報セキュリティマネジメントシステムの構築の重要性は高まっているが、まだCSMS認証の知名度は高いとは言えない。

今後、CSMSの普及ならびに制御システムにおけるサイバーセキュリティ対策を推進するための課題を2つ挙げる。

第1の課題は、企業において、制御システムに対する実効的なリスクアセスメント実施体制を構築することである。これまでは、サ

イバーセキュリティに関してはOAシステムを狙った不正アクセスやマルウェア等が問題視されていたことから、企業の中でOAシステムを所管する情報システム部門には、サイバーセキュリティに関するある程度の見識や経験がある。そのため多くの企業では、いままです制御システムとはほぼ無関係だった情報システム部門が、制御システムを含めた会社全体のセキュリティ対策を推進する役割を担っている。しかし今のところ、経営者が期待するほど制御システムのリスクアセスメントが進んでいないのが実態であろう。

これは、OAシステムと制御システムとではシステムの作りや運用の要件、環境が大きく違うにもかかわらず、そういった知識や経験に乏しい情報システム部門の要員が、OAシステムのサイバーセキュリティの流儀で制御システムに向き合ってしまうことが主要因であると思われる。

例えば、制御システムそれぞれの運用環境を考慮せず、ウイルス対策ソフトの利用や定期的なパッチ当てを進めようとする、あるいは脆弱性診断にて判明した脆弱性に対し、OAシステムの価値観で重要度を判断し、設定変更やソフトのバージョンアップ等で対応しようとする、といったことである。前述したように、このようなことは制御システム（特に、稼働中のもの）では到底受け入れられない。

一方で制御システム側の要員には、サイバーセキュリティの知識や攻撃に対処した経験を持っていない、あるいはサイバーセキュリティに関する世の中の動向に詳しくない人も多く、極端なケースでは「制御システムは外部とネットワーク接続がないから、サイバーセキュリティは関係ない」と主張することもある。その結果、情報システム部門と制御システム部門との間に軋轢が生まれている。

このような状況では、経営層によるトップダウンで情報システム部門によるガバナンスを進めても、サイバーセキュリティ対策、およびその根拠となるリスクアセスメントはな

かなか進まない。そこで、OA システム、制御システムを含めた全体のサイバーセキュリティの推進役を情報システム部門に担わせる場合であっても、制御システムにおけるリスクアセスメントや対策の立案は制御システム部門自らが実施できるようにすることが重要になってくる。また、リスクアセスメントは一度実施して終わりではなく、脅威や対策技術の動向等を見極めながら、継続的に行う必要がある。そのためには、制御システムの開発や運用の当事者をサイバーセキュリティの専門家として育成し、制御システム部門の内側からリスクアセスメントを進められるようにすること、ならびにそれを継続的に行うことが重要である。前述の「産業サイバーセキュリティセンター」⁽⁶⁾における教育では、このような効果が期待される。

第2の課題は、アセットオーナーが制御システムの発注する際にサイバーセキュリティに関する仕様を明文化することである。制御システムにおいては、機能要件は発注仕様として当然のように書かれるものの、非機能要件であるサイバーセキュリティ対策が書かれることはまだ少ない。アセットオーナーがこれを書こうとすれば、制御システム開発の上流工程でおのずとリスクアセスメントを実施することになり、その際には、CSMS の認証基準、およびリスクアセスメントの実施プロセスが大いに参考になるはずである。

また、アセットオーナーとシステムインテグレータとの間で、CSMS を「共通言語」としてセキュリティの仕様を詰めていけば、制御システムを運用する場面において、現実的なセキュリティ対策を確実に実装するという意味で、非常に効果的である⁽⁷⁾。

さらに、制御システムの発注時に CSMS 認証の取得を条件とする動きが出てくれば、日本の制御システム全体のセキュリティレベルの向上が期待できる。

これらのことを視野に入れながら、ISMS-AC としてはセミナー等の開催を継続しつつ、

アセットオーナーとシステムインテグレータ双方への働きかけを行い、CSMS が企業の中で有効に活用されるための普及啓発活動を実施する予定である。

4. JIPDEC のインターネットトラスト確保への取組

(1) 送信側におけるメールなりすまし対策

2014 年に発覚した日本年金機構、2015 年の大手旅行代理店等、昨今の個人情報の大規模漏えい事案は、終息する兆しが見えない。

これら事案の端緒の多くは、なりすましメールによる標的型攻撃といわれている。なりすましメール対策を実施することによって、情報漏えい被害を未然防止することが重要である。なりすましメール対策としては、不正添付ファイルの無害化や URL のフィルタリング、標的型攻撃訓練等、いわゆるメール受信者側の対策が注目されているところである。

他方、JIPDEC は、送信者側におけるメールなりすまし対策の必要性に着目した。標的型攻撃を未然防止するためには、メール送信者自身がなりすまされないための対策を喫緊の課題と捉え、図 10 に示すように、いくつかの取組を行っている。メールなりすまし対策は、インターネットトラストの重要な柱の 1 つである。

(2) JIPDEC の取組と安心マークの概要

JIPDEC の送信者としてのメールなりすましの取組を大別すると、メールアドレス単位の対

メール送信者として、
「なりすましメールの送信者」=「加害者」とならない
ためにすべきことがあります。
JIPDEC では、加害者とならない施策の普及に力を入れています。

➤ 正しいメールを正しいと判断できるようにする。

・電子署名付きメール (S/MIME) を使う。

・送信ドメイン認証 (DKIM) に対応し、

さらに「安心マーク」により DKIM の可視化をする。

➤ 正しくないメールを正しくないとして判断できるようにする。

・DMARC に対応する。

S/MIME: Secure / Multipurpose Internet Mail Extensions, DKIM: Domain Keys Identified Mail, DMARC: Domain-based Message Authentication, Reporting & Conformance

図 10 送信者としてのなりすましメール対策

応策である S/MIME とメールドメイン単位の DKIM になる。特に、後者については、JIPDEC が構築・運営している「サイバー法人台帳 ROBINS」⁽⁸⁾ との連携に基づいたソリューション「安心マーク」の普及・推進に力を入れている。

図 11 に示す安心マークは、メール受信時に認証された送信メールドメインと ROBINS 上のデータベース上の送信メールドメインリストとの照合を行い、当該メールドメインの存在が確認できると、メール受信者のメールボックス上に視覚的に分かりやすいマークを表示するものである。安心マークは、送信ドメイン認証の 1 つ DKIM 等の技術面を意識することなく、メール受信者がメールボックスを一



図 11 安心マーク

目見て、安心して開いてよいメールを判断できる画期的な仕組みである。

現在、安心マークは、図 12 に示すように、ヤフー(株)、ニフティ(株)、(株)コミュニティネットワークセンターのウェブメールシステム上で表示される。図 13 にヤフーメールでの事例を示す。

安心マークは、2013 年に始まったインターネットを利用した選挙運動において、政党のメールマガジンのなりすまし対策のために初採用された。その後、金融機関、地方自治体、情報サービス事業者等、採用範囲が徐々に広がってきている。

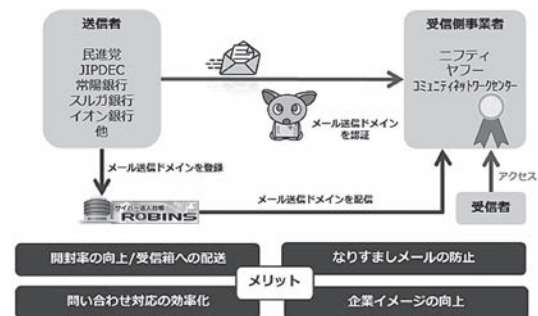


図 12 安心マークの仕組みと普及状況

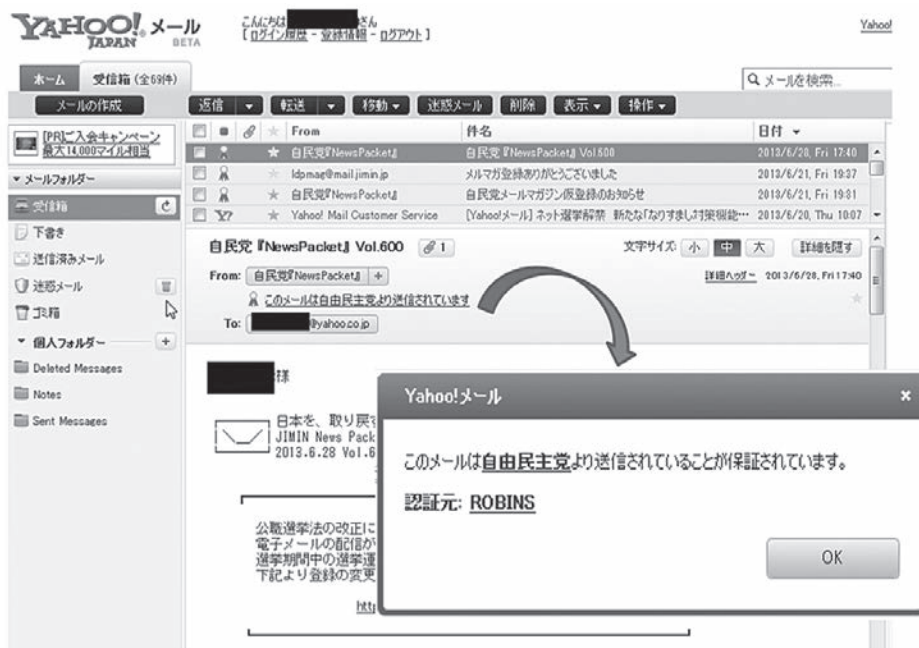


図 13 安心マークの表示例

(3) 安心マークの普及施策と今後の方針

安心マークの普及を促進するため、メールを利用する企業・団体、メール送信代行事業者、メール受信サービスプロバイダー、セキュリティソリューションベンダー等、23企業・団体の結束の下、JIPDECが事務局となって2017年1月に安心マーク推進フォーラムが発足した。

JIPDECは、送信者としてのメールなりすまし対策をインターネットトラストを形成する重要な要素と位置づけ、今後も主要な活動の1つとして取り組んでいく所存である。

電力、ガス、石油などの重要インフラ事業者における安心マークへの関心が高まることを、本稿を通じてお願いしたい。

5. まとめ

エネルギー分野におけるサイバーセキュリティ対策のためには、標的型攻撃のトリガーとなるメールなりすまし対策への取組とともに、組織の情報セキュリティの体制整備が重要である。JIPDECおよびISMS-ACは、情報セキュリティ対策として、ISMS適合性評価制度を運用してきており、エネルギー分野での普及が望まれる。

また、クラウドコンピューティング等インターネットの普及によるサイバーセキュリティへの対策や電子文書の改ざん等の問題が顕在化するなかで、インターネットを前提とした健全な情報化社会の実現（インターネットトラストの確保）に向けた事業活動（インターネットトラスト活動）を行っている。

メールなりすまし対策についても、インターネット上の個人、法人、モノ等の真正性を保証する仕組みが重要であり、企業の実在性等を示すための「サイバー法人台帳ROBINS」とドメイン認証DKIMを組み合わせた「安心マーク」等の普及に取り組んできた。

今後は、インターネット上の情報の信頼性を確保するためのインターネットトラストの

考え方を、国の重要インフラであるエネルギー分野にも普及していくことが重要であると考ええる。

2017年度は、JIPDEC設立50周年の節目であり、IT分野のみならず各分野への広がりを通じた情報経済社会の実現に向けた取組を多角的に展開しているところである。

本稿で紹介した話題が、エネルギー分野のサイバーセキュリティ対策の底上げにつながるととともに、エネルギー分野の企業や関係団体の皆様とJIPDECの連携・協力の機会になれば、幸いである。

参考文献

- (1) <https://www.nisc.go.jp/active/infra/outline.html>
- (2) <https://isms.jp/isms.html>
- (3) <https://isms.jp/isms/index.html>
- (4) <https://isms.jp/isms-cls/about-cls.pdf>
- (5) <https://isms.jp/csms.html>
- (6) <https://www.ipa.go.jp/icscoe/>
- (7) <https://isms.jp/csms/doc/JIP-CSMS120-20.pdf>
- (8) <https://robins-cbr.jipdec.or.jp/>

[寄稿]

トランプ政権誕生とシェール・ガス革命, シェール・オイル革命の最新動向

岩間 剛一 (和光大学 経済経営学部
教授)



1. 2017 年におけるシェール・ガス革命の 3 つのポイント

米国を震源地としたシェール・ガス革命が顕在化して 8 年以上が経過する。現時点においては、3 つのポイントが挙げられる。

第 1 に、2017 年 7 月時点においても、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命が現実となっているのは、米国だけである。そして、米国は世界最大の原油生産国に返り咲いている（図 1 参照）。中国等においても、シェール・ガスの開発が行われているものの、中国、ポーランド等においては、2017 年 7 月時点においても、顕著な成果は挙がっていない。

第 2 に、世界最大の石油消費国、天然ガス消費国である米国における資源エネルギーの自立は、中東産原油の必要性を減少させ、中東に対する関心の低下につながっている。オバマ政権時代に、シリアの内戦への介入に米

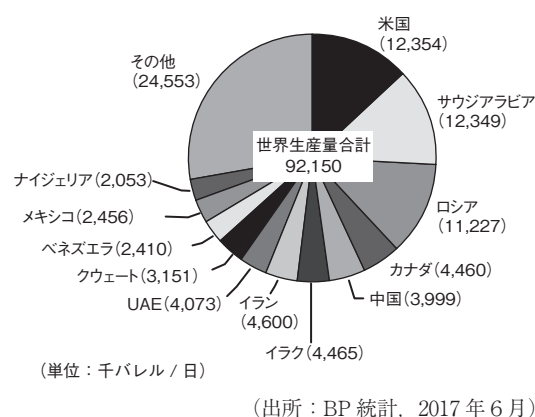


図 1 国別原油生産量割合 (2016 年)

国が消極的となった理由は、米国が中東産原油に依存する度合いが低下したことがある。米国は、原油価格低迷の影響を受けて、2016 年の天然ガス生産量は減少しているものの、長期的な基調として、米国国内の天然ガス生産量は、増加傾向にある（図 2 参照）。2016 年においては、天然ガス価格が低迷したことにより、天然ガス田開発が低調であったことに

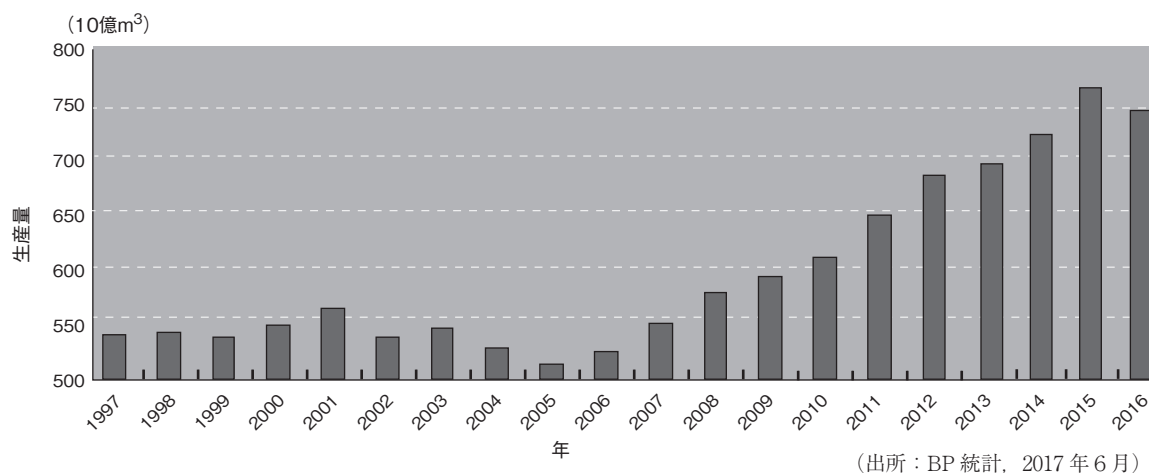


図 2 米国の天然ガス生産量推移

加えて、原油価格低迷により、シェール・オイルの開発が伸び悩んだことから、原油生産に随伴する天然ガス生産量が減少した。ただ、足元においては、2017年に入って、原油価格が回復し、米国におけるシェール・ガスの生産量は増加基調にある。

第3に、トランプ政権誕生に伴う米国の内向き指向、保護貿易主義の根底には、米国の原油生産量、天然ガス生産量の増加がある。米国は、シェール・ガス革命により、石油純輸入量が、急速に減少している（図3参照）。

米国の石油純輸入量は、2005年における1,254.9万バレル／日（b/d）から2016年には487.1万b/dへと800万b/d近くも減少している。これは、OPEC（石油輸出国機構）加盟国第2位のイラン、第3位のイラクにおける原油生産量の合計に匹敵する。つまり、OPEC加盟国2カ国分の石油需要が、米国から消えたことを意味する。これは、米国の資源エネルギー安全保障にとって、大きな意味を持っている。米国は、以前と比較して、中東産原油に依存しなくなっており、中東の平和維持のために、巨額の軍事費を投入し、米国人の生命を危険にさらす必要がなくなっている。米国の内向き指向、米国第一を掲げるトランプ政権の誕生とシェール・ガス革命は、底流においてつながっており、コインの裏表の関係にある。

2. 原油価格 50 ドル／バレルで生産量が増加する米国のシェール・オイル

2017年1月1日から実施されているOPEC（石油輸出国機構）加盟国と、ロシア、メキシコをはじめとする非OPEC加盟国との協調減産は、当初の目標を100%超えて順守されている。サウジアラビアをはじめとした主要産油国の目標達成により、国際石油需給は、引き締まりを見せ、2017年1～3月にかけて、WTI原油価格は、50～55ドル／バレルの範囲で安定した動きを示した。サウジアラビアを始めとした主要産油国は、財政赤字への危機感から、多くのエネルギー専門家の予想を超えたペースで、原油生産量の削減を行っている。しかし、WTI原油価格が上昇すると、経済性のあるシェール・オイル油田の数が増加し、シェール・オイルの生産量が増加基調となる。既に、米国のシェール・オイルの生産量は、底を打ち、再び、増加傾向にある（図4参照）。

米国エネルギー情報局（EIA）の統計によると、米国のシェール・オイルの生産量は、原油価格の低迷により、2015年6月の560万b/dから、2016年12月には454万b/dに減少したものの、2017年7月には545万b/dに回復し、2017年を通じて、再び500万b/dを超えることが見込まれている。こうした米国のシェール・

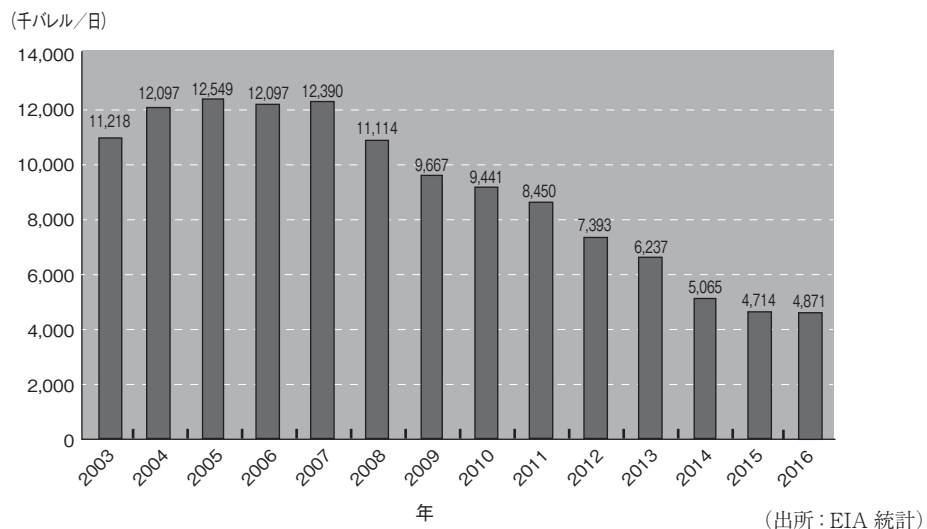


図3 米国の石油純輸入量推移

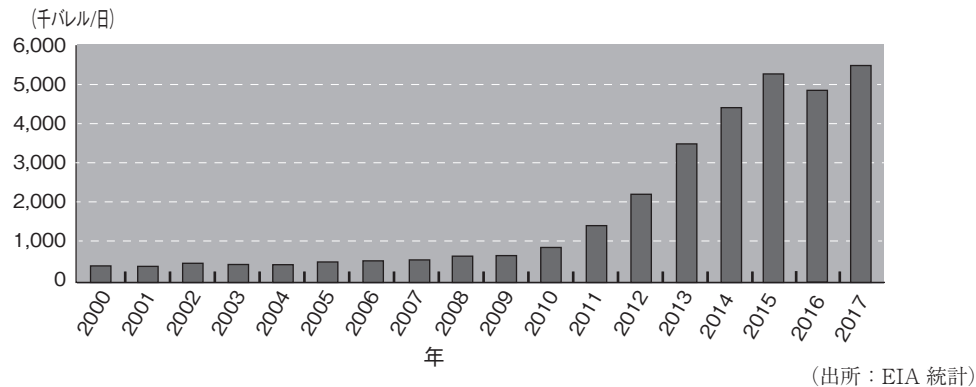


図4 米国におけるシェール・オイル生産量推移

オイル生産量の増加は、国際原油価格を引き下げる効果をもたらす。

2017年5月29日から、米国のドライブ・シーズンが始まったものの、石油需要が伸び悩んでおり、米国の原油在庫量も、2017年6月23日時点において、5億920万バレルと過去最高に近い水準にあり、原油価格が上昇しにくい状況にある。WTI原油価格は、2017年6月29日時点において、44.93ドル／バレルに下落している。

3. 共和党トランプ政権誕生とシェール・ガス革命、シェール・オイル革命

(1) 石炭産業を衰退させたシェール・ガス革命

米国におけるシェール・ガス革命は、同時に、共和党の支持基盤である石炭産業の衰退を引

き起こした。シェール・ガス革命により、米国の天然ガス価格が百万Btu（英国熱量単位）当たり2～3ドル程度まで下落し、米国における発電コストの点において、石炭火力発電よりも、天然ガス火力発電に経済的優位性がでてきた。天然ガス価格が、4.1ドル／百万Btuを下回ると、天然ガス火力発電が、石炭火力発電よりも、経済的に有利となる。その結果として、発電割合において、天然ガス火力発電が石炭火力発電を上回り、米国の石炭生産量が、大きく減少している（図5参照）。

シェール・ガス革命が起こる前には、米国の発電量の5割を石炭火力発電が占めていた。しかし、シェール・ガス革命に伴う、米国の天然ガス価格の下落とともに、米国の天然ガス火力発電の割合は、3割程度に下落した。米国における石炭生産量は、石炭火力発電の

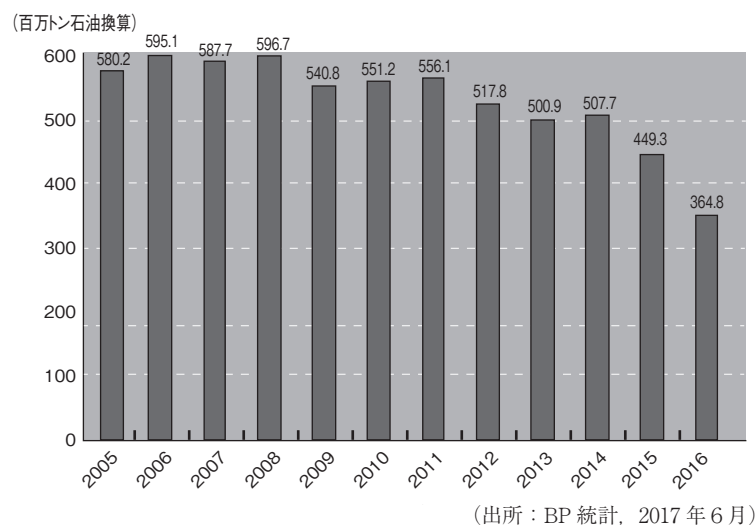


図5 米国における石炭生産量推移

割合の低下に伴い、2016 年は前年比 19.0% も減少している。米国の石炭生産量の減少は、上述のように、共和党の有力な支持基盤である石炭産業の衰退をもたらす。そのため、ワイオミング州をはじめとした石炭生産州における石炭産業の振興、雇用の創出を掲げ、トランプ大統領は、石炭産業の白人労働者の圧倒的な支持を得た。トランプ大統領と主要閣僚は、「石炭をはじめとした化石燃料の消費による人為的な地球温暖化はない」という立場にあり、オバマ政権が打ち出した石炭火力発電に係わる規制の見直しを行っている。トランプ政権誕生の原動力となった米国中西部は、「ラスト・ベルト」（「錆びた工具」の意で、製造業が衰退している米国中西部を指す）と呼ばれる。この地域は、モンタナ州のバッケン・シェール・オイル油田から、テキサス州とニュー・メキシコ州のパーマン・シェール・オイル油田、テキサス州のイーグル・フォード・

シェール・オイル油田へと連なるシェール・オイル地帯、石炭の巨大炭鉱地域と重なっている（図 6 参照）。トランプ政権誕生とシェール・ガス革命と石炭産業は、米国国土のなかでつながっている。

（2）シェール・ガス開発、シェール・オイル開発に積極的なトランプ政権

トランプ大統領の政策は、基本的に、南部のテキサス州をはじめとした産油州、中西部の製造業の企業と白人労働者の意見を取り入れたものとなっている。主要閣僚についても、地球環境保護よりも、エネルギー業界寄りの立場を明確にするエネルギー業界、金融業界の人材を登用している（表 1 参照）。

トランプ大統領および国務長官をはじめとした主要閣僚は、①人類の経済活動による地球温暖化はなく、従って、石炭、石油等も消費しても地球環境に影響を与えない。②シェー

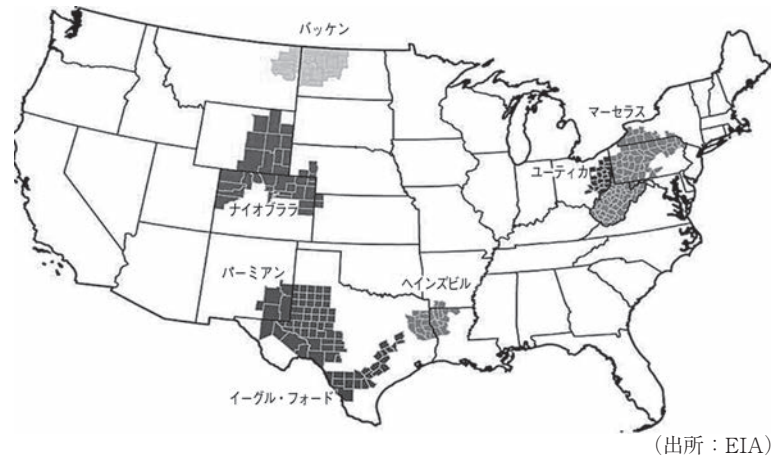


図 6 米国の主要なシェール・オイル地域

表 1 トランプ政権の主要閣僚

官職名	氏名	前職	政治的主張
国務長官	レックス・ティラーソン	エクソンモービル CEO	エネルギー開発振興
エネルギー長官	リック・ペリー	テキサス州知事	エネルギー業界支持
EPA 長官	スコット・ Pruitt	オクラホマ州司法長官	石炭火力発電規制反対
国防長官	ジェームズ・マティス	退役海兵隊大将	テロとの戦い支持
財務長官	スティーブン・ムニューチン	元ゴールドマン・サックス幹部	金融規制緩和
国家経済会議委員長	ゲーリー・コーン	ゴールドマン・サックス COO	金融規制緩和
厚生長官	トム・プライス	下院予算委員長	オバマケアに反対
内務長官	ライン・ジンキ	モンタナ州下院議員	シェールガス開発規制緩和
司法長官	ジェフ・セッションズ	アラバマ州上院議員	移民反対（保守派）

（出所：各種新聞報道）

ル・ガス開発，シェール・オイル開発に関する規制を見直し，開発を活発にさせることによって，景気浮揚をはかり，雇用を創出する。

③石炭火力発電に関する規制を見直し，石炭産業の振興をはかる，という立場で共通している。このように，これまでのオバマ政権の政策と180度異なる主張を行っていることから，野党民主党の反発が強く，与党共和党自身も，一部に慎重論があり，議会による閣僚承認が進まなかった大きな要因となっている。

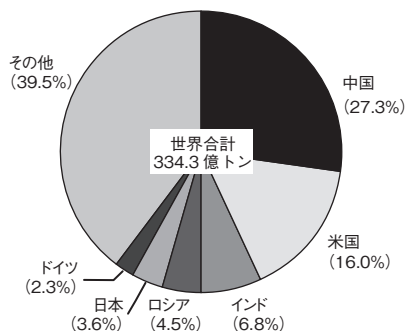
環境保護庁（EPA）長官に指名されたスコット・プルイット氏は，産油州であるオクラホマ州の司法長官として，地球温暖化対策としての石炭火力発電規制に反対し，EPA長官就任前は，EPAそのものの不要論を主張していた。そのため，トランプ政権において，EPAの予算が削減され，地球温暖化対策が，大幅に後退している。既に，EPAのホーム・ページ上から，地球温暖化に関する研究のサイトが，数多く削除されており，2016年11月4日に発効したパリ協定に対しても，トランプ大統領は，2017年6月1日に離脱を表明した。世界第2位の炭酸ガス排出国である米国が（図7参照），パリ協定を離脱し，途上国への資金支援も行わなくなるとすると，もともと炭酸ガス排出削減に後ろ向きな途上国も地球温暖化対策を行わなくなり，パリ協定は実質的に形骸化する。

内務長官に指名されたライン・ジンキ氏は，バッケン・シェール・オイル油田があるモンタナ州下院議員であり，かねてから，シェール・

ガス開発規制の見直しを主張し，米国の国土における2割を占める連邦政府所有地について，シェール・ガス開発，シェール・オイル開発に係わる規制を見直すことを求めてきた。

オバマ政権は，水圧破碎による，水質汚濁，地震誘発をはじめとした環境汚染，石油消費に伴う地球温暖化から，シェール・ガス開発，シェール・オイル開発に関して，規制を強化してきた。これに対して，トランプ大統領は，シェール・オイル開発企業大手のコンチネンタル・リソースの最高経営責任者（CEO）ハロルド・ハム氏をエネルギー政策の顧問とし，「シェール・ガス開発，シェール・オイル開発による環境汚染に根拠はなく，オバマ政権による間違った規制が，米国のエネルギー業界に打撃を与え，雇用を奪っている」と主張している。オバマ政権が，地球温暖化，環境汚染から反対していた，キーストーンXLパイプラインの建設を，トランプ大統領は承認した。2017年3月28日には，トランプ大統領は，石炭火力発電に対する規制の見直しを行う大統領令に署名し，シェール・ガス開発，シェール・オイル開発についても，連邦政府所有地の開発規制を見直すとしている。

こうしたトランプ大統領による，石油，石炭の消費奨励，シェール・ガス開発，シェール・オイル開発に係わる規制緩和，加えて，原油価格の回復基調を受けて，米国においては，シェール・ガス開発，シェール・オイル開発が活発化している。米国におけるシェール・オイルの生産量の増加とともに，原油価格は，再び下落傾向にある（図8参照）。



（出所：BP統計，2017年6月）

図7 炭酸ガス国別排出量割合（2016年）

（3）長期的な原油価格に不透明感を与えるトランプ政権

エネルギー業界全体としては，トランプ政権が，国務長官に，世界最大のメジャー（国際石油資本）のCEOであった，レックス・テイラーソン氏を指名し，シェール・ガス開発の推進をはじめとして，エネルギー業界寄りの政策を続けていくことは間違いないと考えら

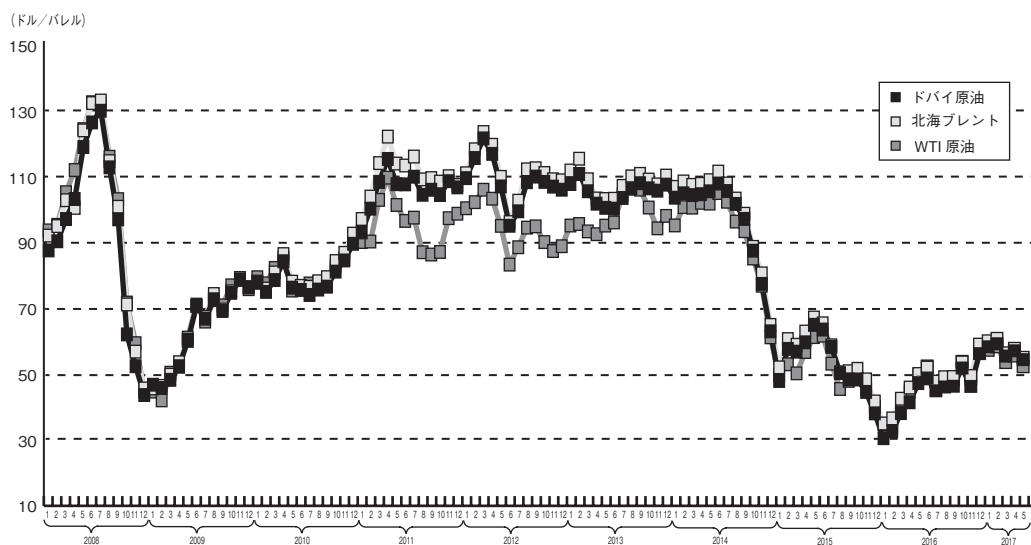


図8 主要原油価格の推移

れる。しかし、長期的には、トランプ政権によるエネルギー政策、環境政策、保護貿易主義の動きに不透明感があり、長期的な原油価格の見通しを難しくしている。

しばしば、トランプ候補が大統領選挙に当選した後、実際に大統領に就任すれば、過激な言動を抑制し、世界経済の健全な発展を考えて、現実的に行動するという楽観論が主張された。しかし、筆者の予想とおり、2017年1月20日の大統領就任演説と、その後の環太平洋戦略的経済連携協定（TPP）離脱、北米自由貿易協定（NAFTA）の見直し、イランをはじめとした7カ国のイスラム教国からの入国禁止をはじめとした大統領令、パリ協定離脱等、トランプ氏は、大統領に就任してからも、選挙戦から行ってきた過激な言動、米国一国主義的政策に変化はない。経済学の理論とは異なった、場当たりの発言も続いている。

こうした、トランプ大統領の、先が読めない政策に、今後の世界経済が翻弄されることは間違いない。トランプ大統領の、予測不可能な行動は、今後の原油価格の動向にも大きな影響を与える。トランプ政権の登場が、2020年に向けての原油価格に影響を与える要因としては、原油価格上昇要因と原油価格下落要因に分けられる。

（４）トランプ政権下での原油価格上昇要因

原油価格上昇要因としては、第1に、トランプ政権が掲げる、1兆ドル（約109兆円）に達する、インフラ整備と大型減税による経済成長に伴う石油需要の増加が挙げられる。トランプ大統領は、巨額のインフラ投資によって、2,500万人の雇用創出と経済成長率の2%から4%への引き上げを公約している。米国経済にとっての大きな悩みは、潜在成長率の低下にあった。そのため、経済成長率の引き上げは、ニューヨーク株式市場に好感されている。

第2に、強硬なイラン政策による中東情勢の緊張化が挙げられる。トランプ政権が、オバマ政権の対話を重視した中東政策とは異なり、強硬な中東政策を掲げている背景には、上述のように、米国におけるシェール・ガス革命により、米国の石油純輸入量が、減少し、中東産原油への依存が低下したことが挙げられる。米国が、中東産原油へ依存する必要性が低下したことから、米国は、より強硬な中東外交を展開できる。トランプ政権は、オバマ政権時代の、宥和的なイランとの核合意を批判しており、イランとの核合意を見直し、イランによる弾道ミサイル発射に対して、追加的な制裁を行っている。イランは、米国の強硬な姿勢に反発し、ウラン濃縮の再開にも言及し、イラン国内において、保守強硬派が

台頭すると、ホルムズ海峡閉鎖という中東産原油供給途絶の事態も考えられる。

第3に、トランプ政権による親イスラエル政策が挙げられる。トランプ大統領は、米国の在イスラエル大使館を、イスラエルが首都と主張するエルサレムに移すことを検討している。また、イスラエルのネタニヤフ首相は、トランプ政権の親イスラエル政策を後ろ盾に、パレスチナ自治区への入植を進めている。しかし、エルサレムは、ユダヤ教、イスラム教、キリスト教の三大宗教の聖地であり、国連に加盟する多くの国は、エルサレムをイスラエルの首都と認めておらず、中東和平に配慮して、日本をはじめとした先進国は、最大都市であるテルアビブに大使館を設置している。1970年代の石油ショックをはじめとして、石油というエネルギーのリスクの根底には、常にイスラエルとパレスチナとの問題があり、トランプ政権が、大使館をエルサレムに設置した場合には、アラブ諸国、さらにはイスラム教国全体の反米感情を強め、抗議デモ、テロの続発、イスラム国（IS）の台頭を招き、中東全体が、コントロールできない混乱状況に陥る可能性がある。世界における原油埋蔵量の3分の2を占める中東地域における混乱は、原油価格高騰につながる。第4に、中東最大の産油国であるサウジアラビアとの関係も、完全に修復したとはいえない。トランプ大統領は、かねてより、サウジアラビアに駐留する米軍の軍事費負担に関して、サウジアラビアの負担増額を求めている。さらに、9.11同時多

発テロにおけるテロリストの多くが、サウジアラビア出身者であったことから、遺族が、サウジアラビア政府に損害賠償を請求できる法律が制定されている。こうしたトランプ政権の動きが、サウジアラビアの不満を募らせている。米国が、中東諸国の関係を緊張化させることは、中東情勢を混乱させ、原油価格上昇要因となる。

（5）トランプ政権下での原油価格下落要因

逆に、原油価格下落要因としては、第1にトランプ政権による保護主義的政策による、世界経済の成長率低下に伴う石油需要低迷が挙げられる。国際通貨基金（IMF）も、2017年1月における世界経済見通しにおいて、トランプ政権によって、世界経済に不透明感が強まったとして、世界経済の成長率を下方修正している（表2参照）。過激な発言を抑制した、2017年2月28日の上下両院議会における演説が好感された翌日の2017年3月1日に、世界の自由貿易の原則となるWTO（世界貿易機関）の裁定には、必ずしも従わないとして、保護貿易的姿勢を打ち出し、世界を驚愕させている。

第2に、トランプ政権は、米国国内における積極的な石油・天然ガス開発を推進している。同時に、親ロシア的姿勢が、ロシアとトランプ政権の癒着の可能性というトランプ政権支持率低下の火種となっている。外交関係にも影響するロシアとトランプ政権の密接な関係により、米国とロシアの両国が、原油生産量を将来的に増加させ続けると、世界の石

表2 IMF 世界経済見通し

	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
世界	3.9	3.4	3.4	3.4	3.2	3.1	3.4	3.6
日本	-0.6	1.5	1.6	0.0	1.2	0.9	0.8	0.5
米国	1.8	2.3	2.2	2.4	2.6	1.6	2.3	2.5
ユーロ	1.5	-0.7	-0.4	0.9	2.0	1.7	1.6	1.6
中国	9.3	7.7	7.7	7.3	6.9	6.7	6.5	6.0
インド	6.3	4.7	6.9	7.2	7.6	6.6	7.2	7.7
ブラジル	2.7	1.0	2.7	0.1	-3.8	-3.5	0.2	1.5
アセアン5	4.5	6.2	5.1	4.6	4.8	4.8	4.9	5.2
中東アフリカ	3.9	4.8	2.4	2.7	2.5	3.8	3.1	3.5

（出所：IMF 統計、2017年1月）

油需給が緩和し、原油価格下落要因となる。

トランプ大統領が掲げる、巨額のインフラ投資、大幅減税、規制緩和が好感され、ニューヨーク株式市場のダウ平均株価が好調であるものの、このように、トランプ政権の政策が、世界経済の成長率上昇→原油価格上昇となるのか、保護貿易主義による世界経済の低迷→原油価格下落となるのか、現時点においては、不透明な部分が多い。

(6) 180度切り替わるトランプ政権の環境政策

オバマ政権は、地球環境保護を重要視する民主党の考え方に従って、地球温暖化対策としての炭酸ガスをはじめとした温室効果ガス（GHG）排出削減に積極的に取り組み、脱石油、低炭素社会の構築を掲げた。従来は、平等な炭酸ガス排出削減を求める先進国と「炭酸ガスの濃度上昇は、主として、産業革命以降の先進国の責任である」と主張する途上国との対立から、地球温暖化対策への交渉が停滞した。

しかし、オバマ政権が中心となって、2016年11月4日にパリ協定が発効し、人類の歴史上初めて、世界の196の国と地域が、1つとなって、温室効果ガス排出削減の自主目標を設定し、地球温暖化対策に取り組むこととなった（表3参照）。

米国大統領選挙においては、民主党のクリントン候補も、オバマ政権における地球環境保護政策を継承することとしていたものの、パリ協定発効の4日後には、多くの選挙予想を覆す形で、トランプ候補が勝利を収めた。トランプ大

統領は、「地球温暖化はない」という立場にあり、パリ協定の離脱を表明し、途上国に対する地球温暖化対策のための資金支援も見直す。もちろん、オバマ前大統領も、トランプ大統領就任によるパリ協定離脱に備え、4年間は、パリ協定を離脱できない取り決めとなっていることから、トランプ大統領の決定によっても、ただちにパリ協定を離脱することはできない。しかし、パリ協定は、自主目標であり、すべての国が、目標を達成しても、気温上昇を、産業革命前から2℃以内に抑えられないだけではなく、目標達成に義務付けがなく、ペナルティーがないことから、世界第2位の炭酸ガス排出国である米国が、石油をはじめとした化石燃料の消費を増加させ目標達成を無視すると、自主目標を順守する国との不公平感から、世界各国が炭酸ガス排出削減目標達成に消極的となり、パリ協定は、事実上空洞化する。気候変動の専門家、環境保護派が多い民主党の反発をもたらしている。

石炭火力発電の推進、石炭産業の振興、石炭労働者の雇用の創出は、トランプ政権が、選挙戦から掲げている公約である。「人為的な地球温暖化はない」という立場のトランプ政権は、米国のみならず、世界全体における石炭消費の促進政策を行う可能性が強く、米国における炭酸ガス排出量が増加する可能性が大きい。また、米国証券取引委員会（SEC）が求めるカーボン・リスク※の開示についても、廃止への動きを行っている。

米国経済の中心ともいえる自動車産業の保護に関しても、トランプ政権は、企業の育成と雇

表3 パリ協定の概要（京都議定書との比較）

	京都議定書	パリ協定
採択年	1997年	2015年
対象国	先進国のみ	世界196の国と地域
地球全体の目標	2012年までに1990年比5%削減	平均気温の上昇を産業革命前から2℃未満、1.5℃以内に抑制する努力
各国の目標	日本6%、EU8%	作成、報告を義務化、達成は義務づけない
途上国支援	規定なし	先進国の支援義務、途上国の自主的拠出

（出所：各種新聞報道）

※炭酸ガス排出が気候変動をもたらす、ペナルティー、企業価値の低下等、企業の収益・財務に悪影響を与えるリスクを有価証券報告書に記載することを求める規制で、石油企業をはじめとしたエネルギー企業の経営に大きな影響を与える。

用の創出の観点から、保護貿易主義的政策を打ち出し、GM、フォードをはじめとした米国の自動車業界は、燃費が良い、小型車が得意な日本の自動車メーカーと異なり、多目的スポーツ車（SUV）のような、燃費が悪い、大型車の生産に強みを持つことから、トランプ政権に、オバマ政権時代の厳しい燃費規制の緩和を働きかけている。トランプ政権による、米国の自動車産業保護、燃費規制の緩和政策は、米国のガソリン消費量に影響を与えるとともに、電気自動車、燃料電池車をはじめとした環境対応車の開発にも大きな影響を与える。なぜならば、米国は、中国に世界首位を譲ったとはいえ、カリフォルニア州をはじめとして、環境対応車規制に関して、先進的な役割を果たしてきており、5,000～6,000CC級の大型車の市場として、堅調に伸びているからである（図9参照）。

（7）地球環境保護政策見直しの石油・天然ガス開発への影響

地球環境保護政策の見直しは、石油・天然ガス開発にも影響を与える。トランプ政権は、「人

為的な地球温暖化はない」という立場から、積極的に油田開発・天然ガス開発を行い、石炭、石油、天然ガスの大量消費を行い、労働者に仕事を与え、経済を発展させるという考え方を持っている。

そのため、第1に、オバマ政権が慎重であった、米国メキシコ湾沖合い油田、北極海油田の開発に係わる規制の緩和を行う。既に、エクソンモービル、シェブロンをはじめとした米系メジャーは、深海部油田の開発への投資拡大を検討している。原油流出事故を引き起こしたBPも、米国メキシコ湾深海部油田開発を活発化している。米国メキシコ湾沖合い油田の原油生産量は、増加基調にある（図10参照）。

第2に、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発による環境汚染はなく、水圧破砕による地震誘発の危険もないという立場から、オバマ政権時代の規制を緩和し、シェール・ガス、シェール・オイルの開発コストを低減する動きが進められている。シェール・ガス開発、シェール・オイル開発に関する規制は、州政府ごとに決められているものの、米国の

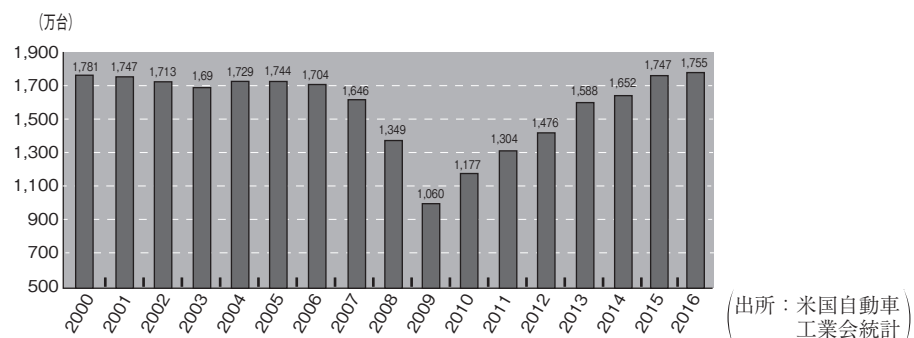


図9 米国の自動車販売台数推移

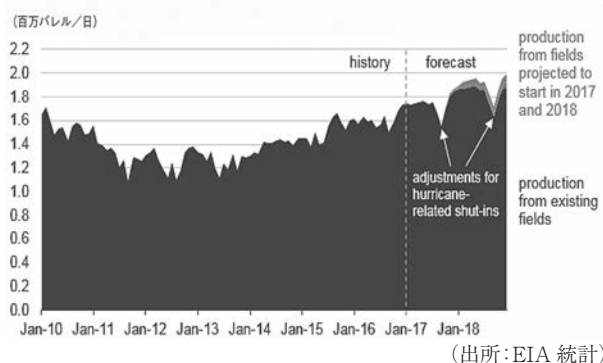


図10 米国メキシコ湾原油生産量（2010～2019年）

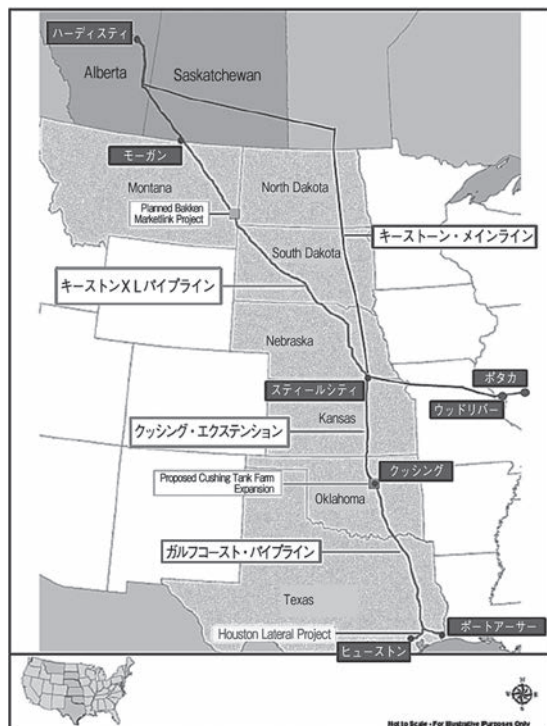
国土の2割を政府保有地が占めており、政府保有地と天然資源を管理するライアン・ジンキ内務長官は、バッケン・シェール・オイル油田があるモンタナ州の下院議員として、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発の規制緩和に前向きであり、将来的に、米国の天然ガス生産量、原油生産量は、増加することが期待される。

第3に、エネルギー開発に係わるインフラ整備が進められることが予想される。既に、オバマ政権時代に、環境破壊への懸念、米国内の石油消費を増加させるという理由から、大統領拒否権が発動されていた、カナダのオイル・サンドを米国メキシコ湾の製油所に輸送するパイプラインであるキーストンXLパイプライン（全長2,700km）と、ノースダコタ州のシェール・オイルを、中西部の製油所に輸送するダコタ・アクセス・パイプライン（全長1,900km）、の建設を推進する大統領令に2017年1月24日に署名している（図11参照）。石油・天然ガス・パイプラインをはじめとしたエネルギー関連のインフラ整備は、トラン

プ政権の重要な政策であり、今後も地域経済への好影響が期待されている。

第4に、シェール・ガスを原料とした、液化天然ガス（LNG）の輸出が、一段と推進されることが見込まれる。米国においては、シェール・ガス革命により、天然ガス生産量が増加基調となっている。天然ガス生産量の増加とともに、米国国内の天然ガス余剰感から、天然ガス価格が下落し、米国の石油企業は、余剰なシェール・ガスを原料としたLNGの輸出拡大を、政府に要望している。トランプ政権は、石油産業振興のためにも、自由貿易協定（FTA）締結国以外にも、積極的にLNGを輸出していく政策をとることと考えられる。米国のシェール・ガスを原料としたLNGは、ルイジアナ州ヘンリー・ハブ渡しの天然ガス価格を指標とし、仕向け地条項がなく、転売も認められていることから、日本にとって、LNG調達源の多様化につながるとともに、LNG調達価格の柔軟化、機動的なLNGのディーリングが行えることとなる。米国においては、既に、数多くのLNG輸出プロジェクトが、構想されている（表4参照）。

炭酸ガス排出規制に反対し、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発が環境を破壊せず、石油の大量消費を通じて、経済成長と雇用の創出をはかるといふ、大統領就任後におけるトランプ政権の政策は、石油業界をはじめとしたエネルギー業界にとっては、追い風である。シェール・ガス、シェール・オイルの開発規制緩和は、シェール・ガス、シェール・オイルの開発コストを低減させ、油田開発、天然ガス田開発を容易にさせる効果を持っている。また、炭酸ガス排出規制の撤廃は、自動車、航空機をはじめとした輸送用燃料の大量消費を促し、従来の供給面からのオイルピーク論とは異なった、需要面における、世界の石油消費量がピークに達し、石油の時代が終わるという懸念を払拭できる可能性がある。トランプ大統領のエネルギー政策の勝者は、シェール・ガスであるという見方が出ており、米国は、シェール・ガス革命により、石油産



（出所：石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC））

図11 キーストンXLパイプライン概要

表4 米国 LNG 輸出プロジェクト

地域	プロジェクト名	事業主体	液化能力（百万トン）
アラスカ	ケナイ LNG	コノコフィリプス、マラソン	20.0
カナダ	キティマット LNG	三菱商事、シェブロン	10.0
カナダ	ダグラス・アイランド LNG	BCLNG 輸出事業体	1.9
カナダ	プリンス・ルパート LNG	シェル・カナダ	7.5
テキサス	サビーンプラス LNG	シェニエール・エナジー	27.0
テキサス	フリーポート LNG	フリーポート、豪州マッコーリー	13.9
テキサス	コルバス・クリスティー LNG	シェニエール・エナジー	13.5
ジョージア	エルバ・アイランド LNG	キンダー・モーガン	2.5
メリーランド	コーブ・ポイント LNG	ドミニオン	5.3
ルイジアナ	ドリフトウッド	テルリアン	26.0
カリフォルニア	レイク・チャールズ LNG	サザン・ユニオン、BG	15.0
カリフォルニア	キャメロン LNG	センブラ・エナジー	13.5

（出所：各種新聞報道）

業の発展と、単位熱量当たりの炭酸ガス排出量が、石炭よりも少ないシェール・ガスの利用により、炭酸ガスの排出削減という二重の効果を得られると考えられる。米国国内のシェール・オイルの生産量も、底を打って、2017年には、再び500万b/dを超える。米国エネルギー情報局の見通しによると、将来的にも、米国のシェール・オイルの生産量は、増加を続けると見込まれている（図12参照）。

4. 米国シェール・オイルの底力

（1）シェール・オイルにより上値を抑制される原油価格

2017年1月から行われているOPEC加盟国と非OPEC加盟国による合計180万b/dに達する協調減産によって、一度は原油価格が50

ドル／バレル台を超えた。しかし、2017年5月以降は、WTI原油価格は、50ドル台を割り込んでいる。これは、原油価格の回復とともに、米国のシェール・オイルの生産量が増加していることによる。

2017年5月25日のOPEC総会において、2018年3月まで、9カ月間協調減産を延長することを決定したにもかかわらず、WTI原油価格は、2017年6月29日時点において、44.93ドル／バレルを割り込んで低迷している。

2017年7月時点において、米国のシェール・オイルの生産量と原油価格は、コインの裏表の関係にある。OPECが原油生産量を削減し、原油価格が回復すると、米国のシェール・オイルの生産量が増加する。米国のシェール・オイルの生産量が増加すると、原油価格が下落する。さらに、原油価格の下落は、米国の

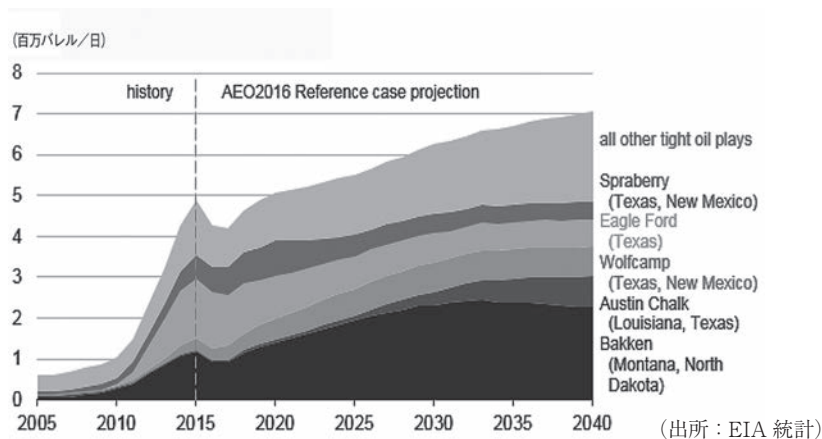


図12 米国のシェール・オイル生産量

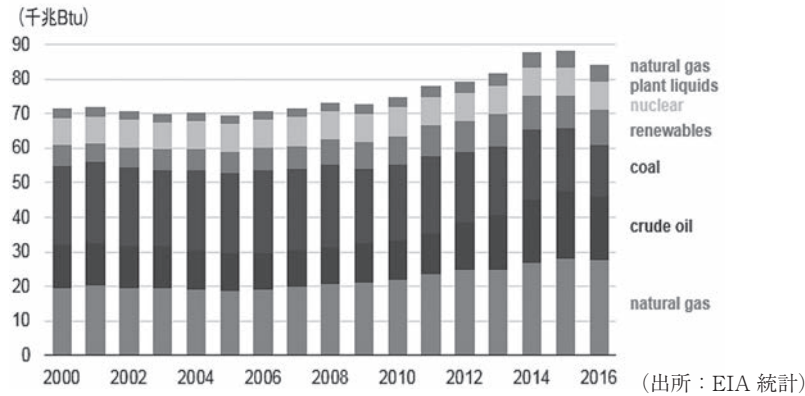


図 13 米国のエネルギー生産量

シェール・オイル開発の停滞をもたらす。原油価格は、2016 年を通じて低迷したことから、米国におけるシェール・ガス、シェール・オイルの生産量は、7 年ぶりに減少に転じている（図 13 参照）。

つまり、原油価格上昇→米国のシェール・オイルの生産量増加→原油価格への下方圧力→米国のシェール・オイルの開発停滞→原油価格への上方圧力、というサイクルである。そのため、OPEC が協調減産を延長することによって、原油価格の暴落を回避しているものの、逆に、原油価格が回復すると、米国のシェール・オイルの生産量が増加して、上値を抑制する結果をもたらす。市場の言葉を使うならば、フロア（下限）を OPEC の協調減産が支え、キャップ（上限）を米国のシェール・オイルが抑制している（図 14 参照）。

（2）底力を増す米国のシェール・オイル

2017 年 1 月 1 日から、OPEC と非 OPEC による協調減産が実施され、OPEC 加盟国による減産順守率が 100% を超え、石油需給均衡への期待感から、WTI 原油価格は、50 ～ 55 ドル／バレルの範囲で推移した。しかし、サウジアラビアをはじめとした OPEC 加盟国は、米国のシェール・オイルの底力を、再び見誤った。これは 2 度目となる。

2014 年 11 月の OPEC 総会において、米国のシェール・オイルとの消耗戦をサウジアラビアが開始した時点において、米国のシェー

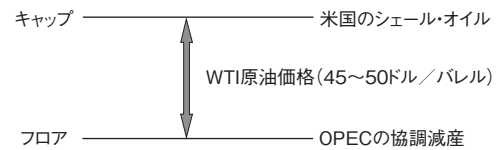


図 14 国際原油価格のメカニズム

ル・オイルの生産コストは、60 ～ 80 ドル／バレルと考えられていた。サウジアラビアが、原油生産量を削減せず、「原油価格を市場に任せ」、原油価格の下落を放任すれば、米国のシェール・オイル生産企業は、経営破綻し、米国のシェール・オイルの生産量は減少すると予想されていた。しかし、2015 年に入り、WTI 原油価格が、50 ドル／バレルを割り込んでも、米国のシェール・オイルの生産量は、減少するどころか、逆に増加した。シェール・オイルの底力を、サウジアラビアは見誤った。

サウジアラビアが見誤った理由として、第 1 には、米国のシェール・オイルの生産コストが低下することはないと考えたことが挙げられる。もともと、シェール・オイルは、水の浸透率が、通常の油田（在来型油田）と比較して 1 万分の 1 程度という、硬い岩盤である頁岩（けつがん）に存在する非在来型石油である。水の浸透率が極めて低いため、シームレス・パイプライン（継ぎ目のない鋼管）によって井戸を掘削しても自噴しない。当然のことながら、原油を生産するのに手間がかかり、生産コストは、在来型油田よりも割高となる。サウジアラビアが、米国のシェール・オイルに消耗戦を挑んだ時点におい

ては、米国のシェール・オイルの生産コストは、60～80ドル／バレル程度、それに対して、サウジアラビアの陸上油田の生産コストは、4～5ドル／バレルだった。これだけ生産コストに差があれば、価格競争を挑めば、簡単に米国のシェール・オイル生産企業が経営破綻すると考えても当然といえる。ところが、米国のシェール・オイル生産企業は、生産コストの引き下げに成功した（図15参照）。

2017年7月時点において、条件が良い、標準的なシェール・オイルの生産コストは、20～30ドル／バレルに低下している。こうなると、原油価格が40ドル／バレルとなっても、米国のシェール・オイル生産企業は、シェール・オイルの生産が可能となる。

第2に、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命を、革命たらしめた開発技術の核心は、坑井仕上げ、水圧破碎、水平掘削、等の最新の油田開発技術における精緻な組み合わせにある。在来型石油の油田と非在来型石油の油田の構造は、石油工学的に異なっている。

在来型石油とは、在来型の油田から生産される原油であるが、在来型石油は、貯留岩という粗い砂粒から構成された砂岩の砂粒の隙間に、石油の粒が存在している。水の浸透があり、縦にシームレス・パイプ（継ぎ目がないパイプ）によって掘削すると、井戸が、地下の貯留岩に届くと、地下の圧力によって、自然に自噴して

くる。そのため、通常の油田においては、掘削という初期投資は大きいものの、操業費（ランニング・コスト）は、極めて小さい。

それに対して、非在来型石油の場合には、石油の根源岩に相当する頁岩という水が、ほとんど浸透しない硬い岩盤の中に、石油の成分が含まれている。そのため、単純に縦に井戸を掘削しただけでは、シェール・オイルは、自噴しない。もともと、地下の頁岩に石油が存在することは、50年以上前から、石油専門家には知られている。

しかし、井戸を掘削しても、自噴しないことから、生産コストが200ドル／バレルを超えたと考えられ、経済性がないことから、世界中の石油企業は、最初からシェール・オイルの開発を放棄していた。つまり、地球上に存在していても、経済的に生産できないということは、存在しないことと同じである。しばしば、地球上の海には、人類が消費する合計7万年分のウランが存在しているとされ、地球に降り注ぐ太陽エネルギーの1時間分は、人類が消費するエネルギーの1年分に等しいとされている。しかし、それは理論上の話であり、地球上にエネルギーとしては存在するものの、海水に含まれるウランの濃度が低すぎ、経済的に取り出す技術、地球に降り注ぐ太陽エネルギーを、宇宙空間において採取する技術を、現在の人類は、持っていないために、

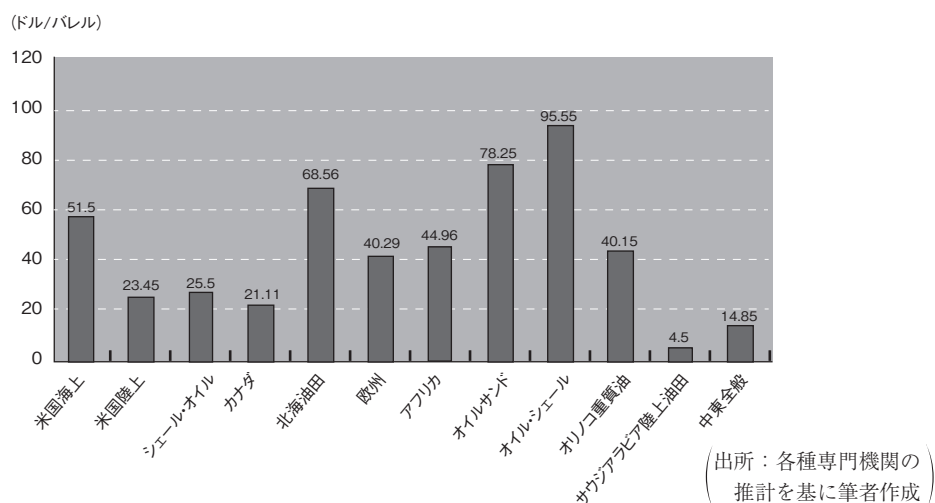


図15 地域別油田発見・生産コスト

経済的に利用できるエネルギーとはいえない。

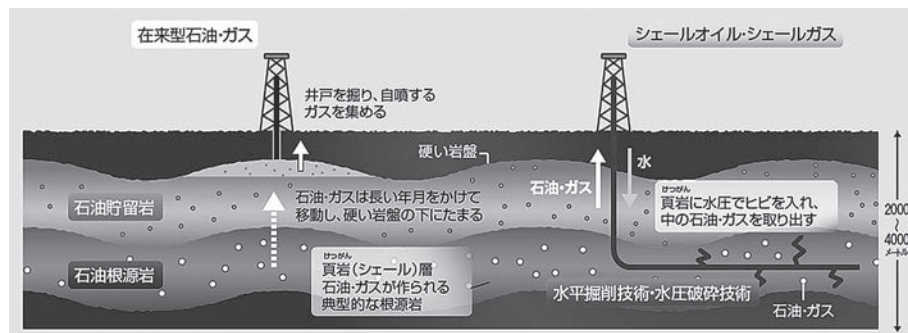
この、「経済的に利用」というポイントは、多くのエネルギーの分野において、重要となる。資源エネルギーというものは、「経済的」であって、初めて、エネルギーといえる。宇宙の物質における4分の3は、水素という物質から成り立っている。だからといって、銀河系の外から、水素を採取してくることは、現在の人類の技術ではできないことから、水素エネルギーは、無限であるとはいえないことと同じである。

同様に、21世紀初頭までのシェール・オイルも、そうした資源エネルギーの1つであった。ところが、上述のように、既存の油田において実用化されていた、水圧破碎（高压の水を岩盤にぶつけて、割れ目を作り、石油を採取する技術）、水平掘削（地下の深い部分で、シームレス・パイプを、水平に折り曲げ、パイプが、石油を含む岩盤と接する面積を増やす技術）、プロパント（水圧破碎によって、作り出した岩盤の割れ目が塞がらないようにする砂粒等の物質）、化学物質（岩盤を溶かす硫酸、界面活性剤等）をはじめとした、様々な技術を精緻に組み合わせることによって、生産コストを劇的に低下させることに成功し、米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命が実現したと言える（図16参照）。

こうした歴史から、原油価格の下落に対応すべく、生産コストを一段と低下させるためには、上述の技術を、さらに磨き上げる必要が求められた。具体的には、①水圧破碎によって発生する振動波を、コンピューター解析することに

よって、地質構造を精密に分析し、最適な岩盤の割れ目の作り方を研究し、②水平掘削によって、水平に延伸されたシームレス・パイプの長さを延ばし、頁岩と接触する面積を大きくし、③プロパントにセラミックを利用することによって、より岩盤の割れ目が、狭まらないようにする、等の技術開発を日々行っている。

こうした、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発に、日本企業も貢献している。日本の石油化学企業であるクレハが、世界最初に工業生産に成功した、ポリグリコール酸(PGA)も、シェール・オイル開発における生産コストの低減に、大きく寄与している。ポリグリコール酸は、生分解といって、細菌等により、自然に分解する性質を持っており、これまでは、手術の際の縫合用糸として利用され、自然に分解するため、抜糸の必要がなかった。こうした性質が、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発に応用されている。なぜかという、シェール・オイルの開発は、開発期間が3～4カ月と短期間であるものの、シェール・オイルの生産量も、1年で7～8割程度減退する性質を持っている。そのため、シェール・オイルという小さな井戸を短期間で掘って、短期間のうちに投資を回収するために、原油生産量が減退し、井戸を閉じるうえで、ポリグリコール酸によって、地下の設備を作っておくと、自然に溶けてしまい、掘削した井戸を閉鎖するコストを節約できる。こうした、様々な開発技術の進歩が、シェール・オイルの生産コストを低下させ、サウジアラビアの原油にとって、大きな脅威となっている。



(出所：『日本の石油産業 2016』、石油連盟、2016年4月)

図16 シェール・オイル油田開発における技術革新例

第3に、シェール・オイルは、操業費（ランニング・コスト）の割合が、初期投資と比較して大きく、コスト低減の可能性が大きいことが挙げられる（図17参照）。シェール・オイルは、陸上の地下4,000 m程度を掘削し、地上に巨大な設備を必要としないことから、巨額の初期投資は必要がないものの、井戸を掘削した後に、高压の水を注入し、界面活性剤等の化学物質を利用して、原油生産時に、常に作業を行う必要がある、ランニング・コストが占める割合が大きい。逆に言えば、そのランニング・コストを低下させることによって、シェール・オイルの生産コストを低下させることが可能となる。

シェール・ガス開発、シェール・オイル開発には次のような性質がある。①在来型の油田と比較して、数多くの手間のかかる技術を、精緻に組み合わせる必要があること。②在来型の油田の場合には、開発に5～10年の時間を必要とするのに対して、シェール・オイルの開発には、3～4カ月程度しかかからず、原油価格が上昇すれば、すぐに開発を開始し、原油価格が下落すれば、開発を先送りするという、機動的な対応が可能であること。③シェール・オイルの場合には、井戸の掘削という初期投資よりも、井戸を掘削した後に、高压の水を注入したり、水平に折り曲げた井戸を延伸したりといった、後の手間、井戸のメンテナンス費用の割合が大きい。

生産コスト構造（図17参照）を見ても分かるように、米国のメキシコ湾深海部油田の場合には、深海で作業するロボット（ROV）を利用した、高压に耐えられる設備の建設、海底から陸地までのパイプラインの建設、巨大な洋上設

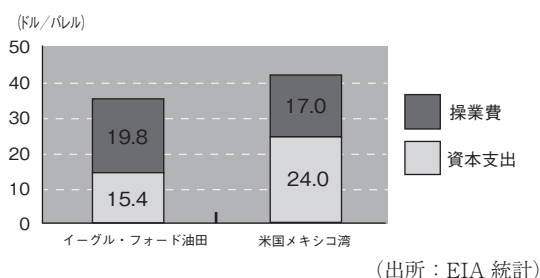


図17 シェール・オイル油田の生産コスト構造

備の設置等、巨額の投資が必要であるものの、一度原油生産を開始すると、原油が自噴するために、後のメンテナンス費用は、大きくかからない。ところが、シェール・オイルの場合には、陸上の井戸の掘削に、巨額の設備は必要がないものの、常に、高压の水を注入し続け、岩盤に割れ目を作って、フロー・バックという、水と一緒に、岩盤に含まれた石油の粒を追い出すという作業が必要であり、また、プロパント、化学物質の注入も行っていかなければならない。

こうしたシェール・ガス、シェール・オイルの性質から、次のようなことが言える。第1に水压破碎をはじめとした技術は、既に確立した技術であり、新たな革新的発明は必要ない。どちらかといえば、確立した技術を、より職人芸的に磨き上げる方法をとる。そのため、漸進的な生産コストの低減が可能となる。ちょうど、半導体の記憶容量を、徐々に大きくしていく技術進歩と同じである。超音速ジェット旅客機、宇宙空間を往復するスペース・シャトル、高速増殖炉、核融合をはじめとした革新的な技術開発は、50～100年単位の時間が必要とされる。それに対して、ガソリン・エンジンの燃費向上は、燃料噴射装置のコンピューター解析、自動車車体の軽量化をはじめとした、漸進的な技術開発により、より容易に達成できる。シェール・オイルの生産コスト低減は、ガソリン・エンジンの燃費向上の技術開発と似たところがある。

第2に、初期投資と比較して、操業費の割合が大きいということは、現場の作業を、どのように効率化し、コストを削減できるかという生産性の向上が占める割合が大きいということが挙げられる。例えば、高压の水注入における作業員の最適配置、注入した水の回収・汚染処理の効率化等、日本の製造業において、日々努力しているコスト低減努力と同じことを行っている。

第3に、シェール・ガス、シェール・オイルの開発期間が短く、同時にシェール・オイルの生産期間が短いという性質から、小規模の油田

を、原油価格の動向に応じながら、掘削する井戸を増やしたり、減らしたりするという機動的な対応ができるということもいえる。通常の油田の場合には、原油価格が高騰している時期に、権益を取得し、開発を始め、5年後に原油生産を開始した時点では、原油価格が下落しているというリスクがあるものの、シェール・オイルには、そうしたリスクは小さいといえる。また、井戸の掘削期間が短く、初期投資が小さいことから、井戸を掘削して、坑井仕上げを行わず、原油価格が上昇するまで、シェール・オイルの生産を待つ油田（DUC:掘削済み未仕上げ坑井: Drilled but Uncompleted）を在庫として持つにおいて、原油価格が上昇した時に、シェール・オイルの生産を開始し、利益を上げることも可能となる。実際に、原油価格が低迷した時には、この在庫であるDUCの開発を行って、掘削投資を抑制しながら、シェール・オイルの生産を行い、利益を上げながら、生産量を維持したという経験がある。

このように、シェール・ガス、シェール・オイルは、既存技術の磨き上げ、経験の蓄積による学習曲線、日々のコスト削減への生産性向上、より地層構造が簡単なシェール・オイル油田の開発等が、2017年7月時点においても行われている。米国のビッグ・スリーと呼ばれる、バッケン・シェール・オイル油田、イーグル・フォード・シェール・オイル油田、パーミアン・シェール・オイル油田における、好条件な、スイート・スポットと呼ばれるシェール・オイルの生産コストは、20ドル／バレル程度まで低下している。米国における、シェール・ガス、シェール・オイルの生産性向上は、今後も行われることは間違いない。

（3）まとめ：サウジアラビアを見誤らせた米国シェール・オイルの生産コスト低下

2017年に入り、サウジアラビアは、再び、米国のシェール・オイルの底力を見誤っている。OPECと非OPECが協調減産を行い、WTI原油価格が50ドル／バレル超に回復し、

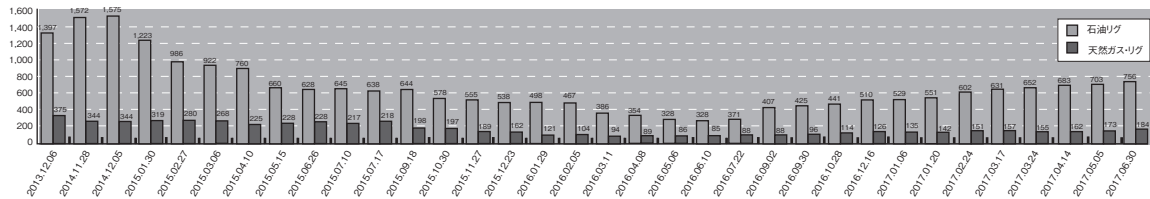
中東産油国の財政が一息ついた。原油価格の上昇によって、中東産油国をはじめとした資源国の経済が安定化したものの、同時に、原油価格が50ドル／バレルを超え、サウジアラビアの予想よりも早く、米国のシェール・オイル開発が活発化している。サウジアラビアとしては、WTI原油価格が、60ドル／バレルを超えた水準から、米国のシェール・オイルの生産が増加すると考えていた。ところが、米国のシェール・オイルは、WTI原油価格が50ドル／バレル程度で油田開発が活発化する。

その理由として、次のことが挙げられる。第1に、シェール・オイル開発、シェール・ガス開発における生産性の向上が挙げられる。水圧破碎、水平掘削の技術革新、コンピューター解析によるマイクロ・センシングのノウハウの蓄積等により、1井戸当たりのシェール・オイルの生産量が増加している。

第2に、井戸掘削の技術革新が行われている。1本の井戸を掘削する時間とコストが削減されている。2017年7月時点においては、地下3,000mの井戸掘削に、1週間程度の作業日数しか必要としない。そのため、シェール・オイル開発の初期投資が低減している。

第3に、シュルンベルジェ社、ベーカー・ヒューズ社をはじめとした石油サービス会社の開発ノウハウが蓄積し、中堅・中小石油企業が、より安価にシェール・オイル開発の外部サービスを受けることが可能となっている。

こうした、生産性の向上に伴うシェール・オイルの生産コストの低下により、WTI原油価格が50ドル／バレルを割り込んでも、シェール・オイルの開発が行われている。国際原油先物市場は、2015年、2016年と同じく、米国における油田開発に用いるリグ（新規油田開発のための掘削装置）稼働数を注目している。米国のリグ稼働数は、2017年に入って、増加が続いている（図18参照）。



(出所：バーカー・ヒューズ社統計)

図 18 米国リグ稼働数推移 (2013～2017 年)

5. 増加する米国からの原油輸出と LNG 輸出

米国は、2017 年 1 月からの原油価格回復により、シェール・オイルの生産量は、再び増加基調にあり、2016 年は、500 万 b/d を割り込んだものの、2017 年には、再び、500 万 b/d を超えている。米国における、シェール・オイルの生産量の増加は、国際石油需給の緩和につながり、原油価格の下落要因となる。米国の石油企業にとっては、米国国内において、シェール・オイルという軽質原油の余剰感から、シェール・オイルの輸出を拡大するインセンティブ（誘因）が働く。

さらに、米国における天然ガス生産量の増加から、シェール・ガスを原料とした LNG 輸出が、2016 年から開始されている。米国においては、相次いで、シェール・ガスを原料とした LNG 輸出プロジェクトが構想されている。米国は、アラスカを除いて、本土 48 州からの LNG 輸出は行われていなかった。しかし、今後は、2040 年に向けて、米国からの LNG 輸出が、大きく増加する可能性が強い(図 19 参照)。

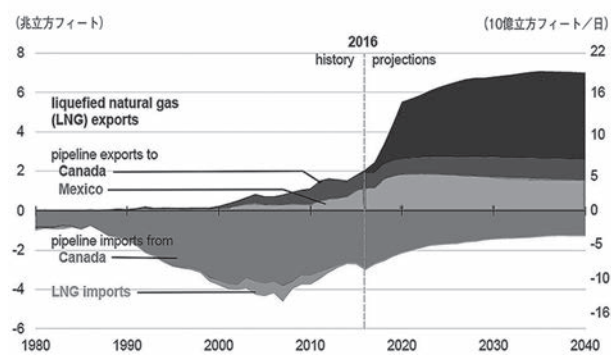
OPEC 加盟国においても、協調減産の対象

外となっている、ナイジェリア、リビアの原油生産量が増加している状況において、さらに、米国からの原油輸出、LNG 輸出が増加する状況は、原油価格、LNG スポット（随時取引）価格の下押し要因となる。ただ、WTI 原油価格が、45 ドル／バレルを割り込み、2017 年 6 月 30 日には、ようやく、米国における稼働リグ数が、減少に転じている。今後は、OPEC 加盟国による協調減産の動向と、米国のシェール・ガス、シェール・オイルの生産コスト低減との消耗戦が、2018 年に向けての原油価格に大きな影響を与えられられるのである。

6. おわりに：シェール・ガス革命は日本経済にとって大きな恩恵

米国における、シェール・オイルの生産量の増加に伴う原油価格の下落は、2つの経路を通じて、日本経済に恩恵をもたらしている。

第 1 に、日本における原油購入価格の面から考えると、シェール・オイルの生産量が増加し、2016 年における国際原油市場は、100 万 b/d ～ 150 万 b/d 程度、供給過剰の状況となり、原油価格が下落する。日本にとって、最大の輸入品



(出所：EIA 統計)

図 19 米国のシェール・オイルと LNG の輸出入

目は石油であり、日本が輸入する原油価格は、ドバイ原油とオマーン原油のスポット価格の平均に連動することから、国際原油価格の下落は、石油輸入金額の減少をもたらす。

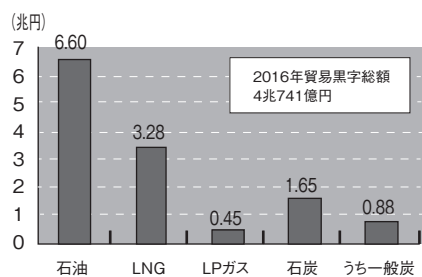
第2に、日本が輸入するLNG購入価格の面においては、輸入するLNGの7～8割程度は、10～15年程度の長期契約であり、購入価格は原油価格に連動することから、原油価格の下落に伴い、長期契約のLNG購入価格の低下につながる。さらに、米国、豪州等から、新規LNGの供給が始まっていることから、LNGの需給が緩み、スポット（随時契約）取引のLNG価格も下落する。2017年7月時点においては、米国、豪州からのLNG供給量が増加したこと、日本、韓国が冬の天然ガス需要期を過ぎたこと等から、LNGスポット価格は、6ドル／百万Btu程度となり、東日本大震災直後と比較して12ドルも下落している。輸入原油購入価格、LNG購入価格の下落により、日

本の2016年の貿易収支は、東日本大震災以降、初めて黒字となった（図20参照）。

日本の石油をはじめとした化石燃料の輸入額は、過去最大の貿易赤字となった2014年と比較して、2016年は、石油が10兆円、LNGとLPガスを合わせて5兆円、合計15兆円も減少している。日本の名目国内総生産（GDP）は、499兆円であることから、名目GDPの3%にも相当する可処分所得拡大効果、国富の流出を回避することが、シェール・ガス革命によって起こっている。

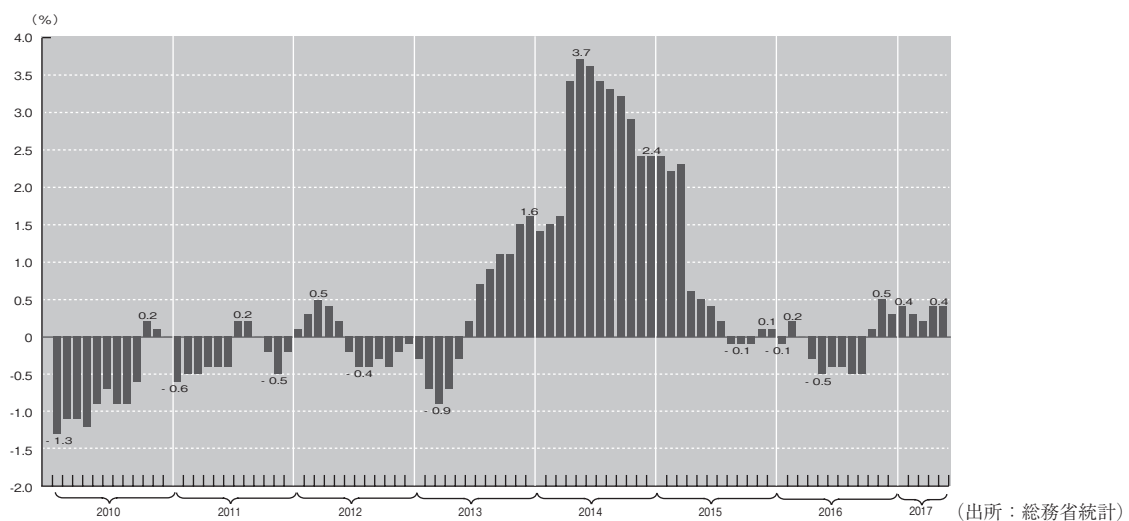
さらに、シェール・オイル革命による原油価格の下落は、日本における物価の安定につながっている。原油価格の下落は、ガソリン代をはじめとした輸送用燃料の低下をもたらすのみならず、石油化学製品をはじめとした素材価格の下落、物流費の削減にもつながる。そのため、日本をはじめとした欧米諸国は、過度なインフレーション（物価の持続的な上昇）を免れ、物価が安定する。日本の場合も、この2年間にわたって、消費者物価指数は、安定している（図21参照）。

日本にとって、米国国内において、起こったシェール・ガス革命が、日本経済の成長率かさ上げ効果、物価安定効果につながり、既に、米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命は、日本経済に、現実として、大きな恩恵を与えているといえることができる。



(出所：財務省貿易統計)

図20 日本の化石燃料輸入額

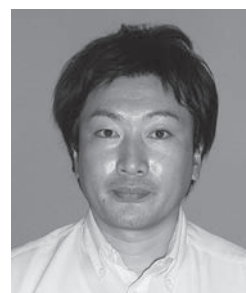


(出所：総務省統計)

図21 日本の消費者物価指数の推移（対前年同月比）

再生可能エネルギー導入に伴う 配電分野における課題と今後

河瀬 和貴 (プロジェクト試験研究部
電力システムグループ 主任研究員)



1. はじめに

わが国の配電分野においては、高度経済成長期の電力需要増加を受けて設備が大量に建設されるとともに、配電自動化システムの導入などによって、停電時間、停電回数は極めて少なく、世界トップ水準の信頼性の高い良質な電気を供給している。

昨今では、電力システム改革が推進される中、太陽光発電などの再生可能エネルギー（再エネ）が配電系統に大量に連系することによって、配電系統の潮流や電圧が急峻かつ大きく変化し、電力品質の維持が困難となることが懸念される。

また、東日本大震災や熊本地震などの自然災害に伴う大規模停電が相次いで発生している中、電力の安定供給に対する社会的要求レベルもさらに高まっている。

以下、配電分野の概要を報告するとともに、配電分野を取り巻く環境の変化および再エネ導入に伴う課題について報告する。更に、それらの課題解決に向けた当研究所（IAE）の取り組み状況および配電分野を取り巻く至近の動向を報告する。

2. 配電分野の概要

(1) 概要

わが国の配電設備は、高度経済成長期の電力需要増加を受けて大量に建設され、2015年度末断面において、支持物数は約2,200万基、線路亘長は約131万2,000km⁽¹⁾（地球約33週分に相当）施設されている。

また、配電自動化システムや最新の無停電工法の導入および迅速な災害復旧作業などの努力によって、図1に示す通り、事故停電発

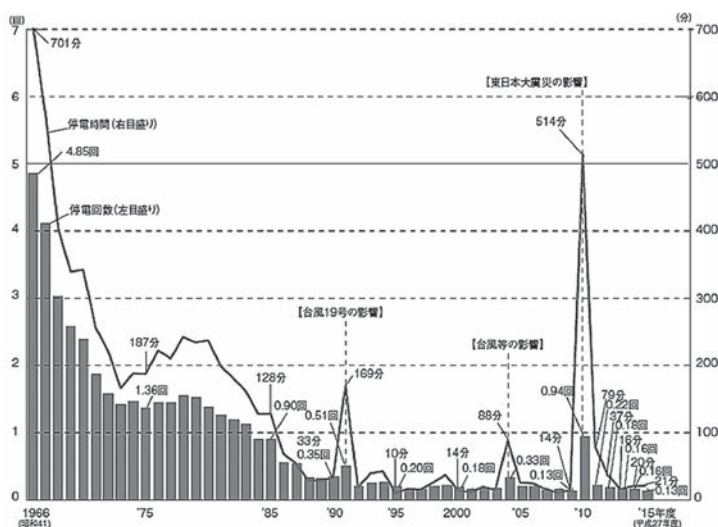


図1 国内における需要家1件当たりの年間停電時間と停電回数の推移⁽²⁾

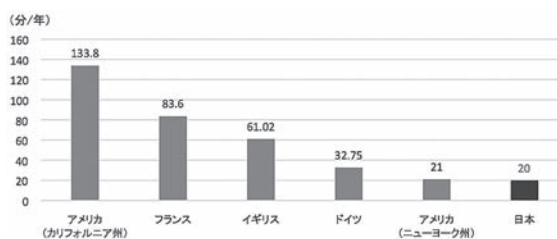


図2 需要家1件当たり停電時間の国際比較 (3)

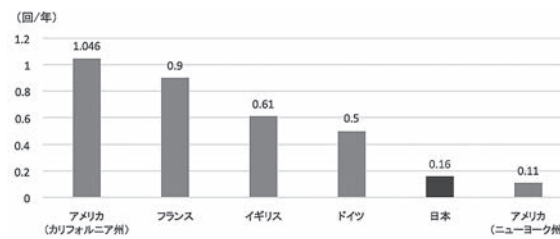


図3 需要家1件当たり停電回数の国際比較 (3)

生回数の減少，発生した場合の1事故当たりの停電時間の短縮に取り組んでいる。その結果，図2，図3に示す通り，現在わが国における停電時間，停電回数は極めて少なく，世界トップ水準の信頼性の高い良質な電気を届けている。

(2) 配電自動化システムの導入

昭和50年代から始まった高度情報化社会の進展により，需要量の増大とともに高品質，高信頼度の電力供給が求められていた。このような背景から配電系統保守・運用の自動化推進による電力供給信頼度のいっそうの向上，保守業務の省力化を図ることが重要であった。そのため，図4に示すような，配電線事故時の早期送電や配電系統運用の業務効率化が行える配電自動化システムの導入が進められてきた。

現行の配電自動化システムの代表的な機能を図5に示す。「監視・制御機能」とは，配電系統や機器の現在状態表示，状態変化の表示，電圧・電流値などの計測，および自動化機器の遠隔制御（入・切など）を行う機能である。

「事故検出・復旧機能」とは，配電線路の事

故を配電自動化親局にて検出し，配電線用遮断器（FCB）の再閉路リレーや自動開閉器の時限順送を組み合わせる事故区間を特定後，開閉器操作手順を自動作成し健全停電区間へ自動送電を行う機能である。

「運用支援機能」とは，システムが保持している各種情報をもとにした高圧系統運用業務の支援機能や，配電業務系システムなどの他システム連携機能，配電自動化親局のシステム運転に関する機能をいう。

配電自動化システムの機能は，自動開閉器の監視制御のみの機能からスタートしたものが次第に機能拡充が図られ，現在では配電系統運用業務の中核を成すシステムとなっている。

(3) センサ開閉器の導入

至近年，再エネの大量導入などを見据えて，各電力会社において高機能な自動開閉器として，開閉器内部にセンサを内蔵したセンサ開閉器を順次導入している。センサ開閉器による配電系統監視イメージを図6に示す。センサ開閉器は線間電圧や相電流，相力率の他，零相電流・電圧や高調波を計測でき，1分か

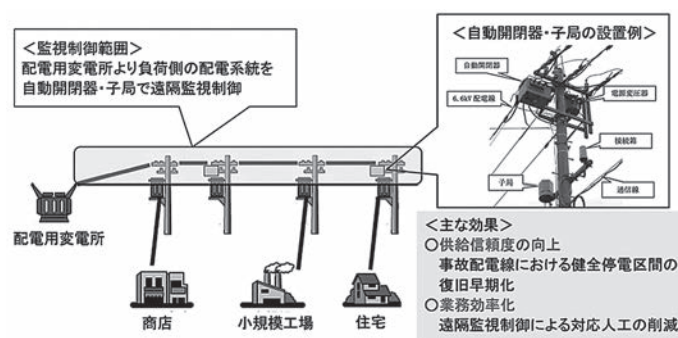


図4 配電自動化システムのイメージ

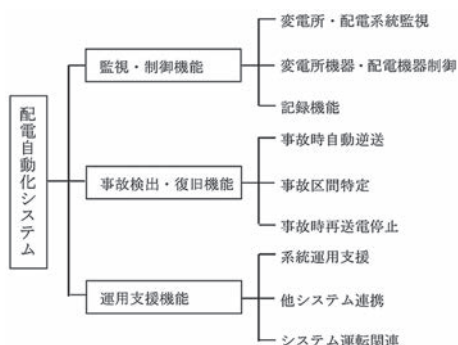


図5 配電自動化システムの機能 (4)

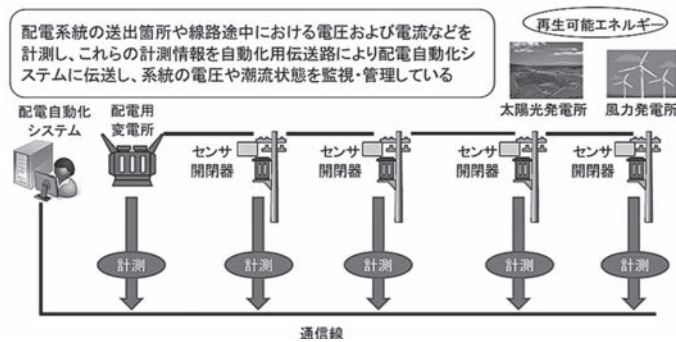


図6 センサ開閉器による配電系統監視イメージ

ら1時間周期で配電自動化システムへ伝送することで、従来の自動開閉器と比較し、より詳細に系統状態を監視することができる。現在、各電力会社では、センサ開閉器の計測情報について効果的な利活用手法の検討を進めているところである。

(4) スマートメーターの導入

スマートメーターおよび関連システム全体像・効果のイメージを図7に示す。スマートメーターは、通信機能を有し、遠隔での検針や遠隔での供給開始・停止業務等を行うことが可能である新しい電力量計であり、2016年4月よりスタートした電力小売全面自由化後、

時間帯別料金など多様な料金メニューの提供等を支える基盤としての役割を果たしている。また、スマートメーターを活用することで、需要家による省エネ・省CO₂のためのデータ活用および系統安定化のための需要家側の機器制御も可能となる。各電力会社では、2020年代早期のスマートメーター全数設置を目指し、計画的に設置を進めている。

3. 配電分野を取り巻く環境の変化

(1) 電力システム改革の推進

図8に電力システム改革の全体像を示す。「安定供給の確保」「電気料金の抑制」「電気利

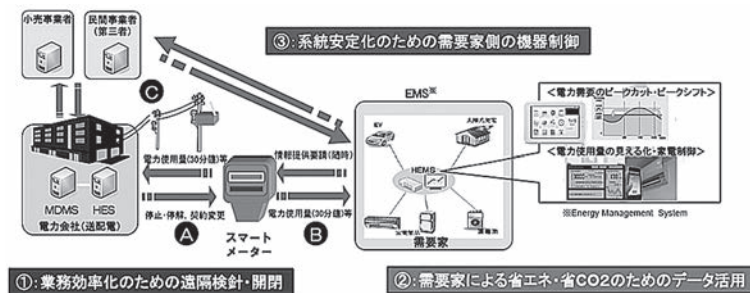


図7 スマートメーターおよび関連システム全体像・効果のイメージ (5)

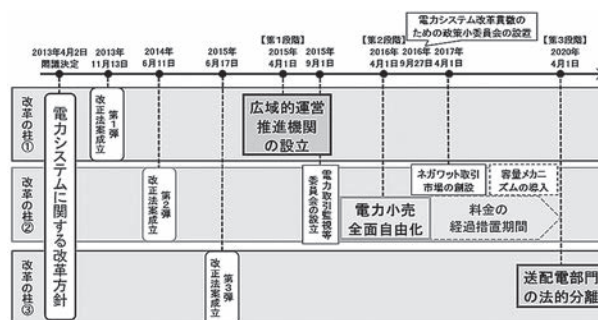


図8 電力システム改革の全体像

用の選択肢や企業の事業機会の拡大」を目的に、2013年4月に、電力システムに関する3つの改革方針が閣議決定した。2015年4月には改革の第1段階である電力広域的運営推進機関が設立され、地域を越えた電気のやりとりが拡大された。2016年4月には、第2段階である電力小売全面自由化がスタートし、発電、小売の双方において新規事業者が大きく増加し、2016年度末断面における登録小売電気事業者数は389事業者⁽⁶⁾となっており、家庭でも電力会社や料金メニューを自由に選べるようになった。また、2020年4月には、第3段階として送配電部門の法的分離が予定されている。

このような中において、電力システム改革を貫徹するため、更なる競争活性化に向けた施策と、市場原理のみでは解決が困難な公益的課題の克服を図るための施策を検討することを目的に、2016年9月に、電力システム改

革貫徹のための政策小委員会が設置された。同委員会での中間とりまとめが2017年2月に提示され、その概要を図9に、新たな各制度の導入時期を図10に示す。今後、電力システム改革の取組を停滞させず、改革を貫徹するために、更なる競争活性化策とともに、自由化の下でも公益的な課題に対応するための様々な施策が講じられていく。

(2) 再生可能エネルギーの導入拡大

図11に国内における太陽光・風力の導入量の推移を示す。2012年7月からスタートした固定価格買取制度（FIT制度）導入以降、太陽光発電を中心に全国各地で再エネが急増している。太陽光発電は、日照条件や敷地確保等に優れる西日本エリア（九州、四国）を中心に導入が進展している。一方、風力発電は、風況が良い東日本エリア（北海道、東北）を中心に進展している。また、系統連系までの

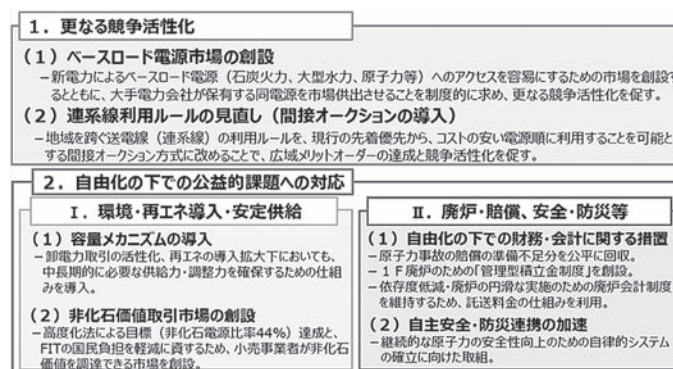


図9 電力システム改革貫徹のための政策小委員会中間取りまとめの概要⁽⁷⁾

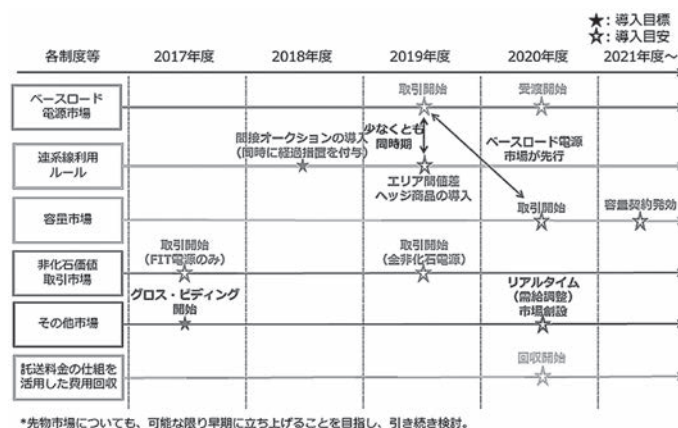
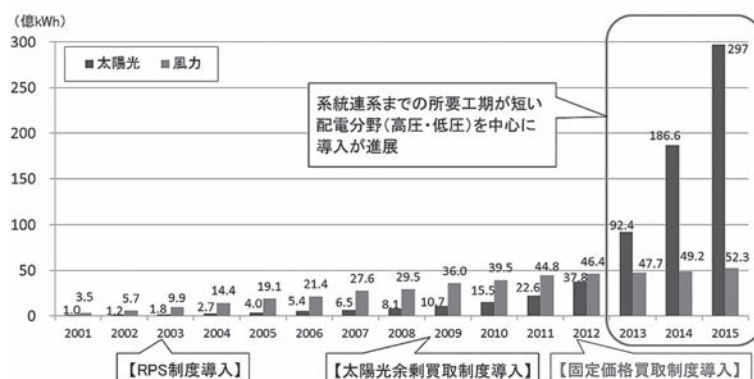


図10 各制度の導入時期⁽⁸⁾



所要工期が短い配電分野を中心に導入が進展している。

このような状況の中、至近年においては、東北北部エリア等で 275kV、500kV 送電線においても連系制約が発生してきており対策を講じていく必要がある。

今後、図 12 に示す通り、温室効果ガスによる地球温暖化問題などを背景として、更なる再エネの導入が見込まれる。

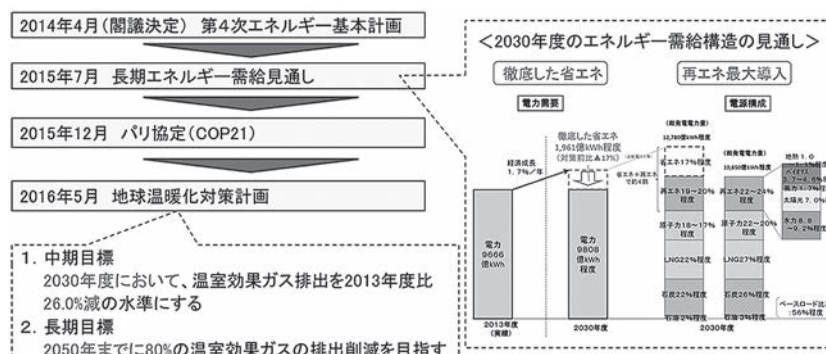


図 12 再エネ導入長期ビジョン⁽⁹⁾

表1 再エネ導入拡大における技術的課題

	技術的課題	主な対応策
電力品質	・急激な出力変動に対する周波数調整力の不足	・出力変動の調整やバックアップのための電源確保(火力・揚水発電等) ・ストレージ(蓄電池・水素等)の活用
	・ベース供給力と再エネの合計発電量が需要を上回ることによる余剰電力の発生	・揚水発電、地域間連系線の活用 ・再エネの出力制御 ・ストレージの活用
	・系統側への電気の流入(逆潮流)が増加することによる配電系統の電圧上昇 ・再エネ発電出力が不安定な場合における電圧変動の急峻化	・電圧調整装置の設置 ・柱上変圧器の分割設置、電線の太線化
設備容量	・電力需要が少ないエリアでの再エネの増加による送配電設備の容量不足	・送配電設備の整備、増強

持」「配電設備の有効活用」「配電分野の要員確保」である。以下、これら3つの課題について報告する。

（１）適正電圧の維持

配電分野においては、表2に示す通り、電気事業法第26条および電気事業法施行規則第44条で定められた電圧の範囲内に維持する必要がある、これまで各電力会社は適正電圧を維持してきた。

表2 維持すべき電圧の範囲

標準電圧	維持すべき値
100ボルト	101ボルトの上下6ボルトを超えない値
200ボルト	202ボルトの上下20ボルトを超えない値

しかし、近年の再エネ導入拡大に伴い、図13に示す通り、系統側への電気の流入（逆潮流）が増加した場合には配電系統の電圧が上昇し、また、太陽光発電における曇天時などの再エネ発電出力が不安定な場合には電圧変動が急峻化することで、適正電圧の維持が困難となってきている。

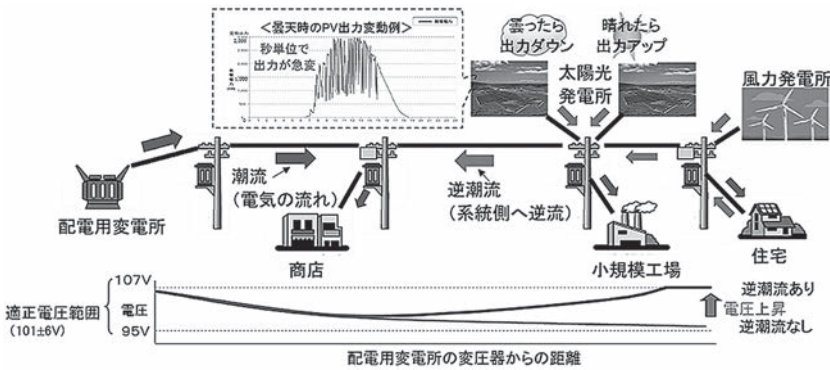


図 13 再エネ導入拡大に伴う電圧変動のイメージ

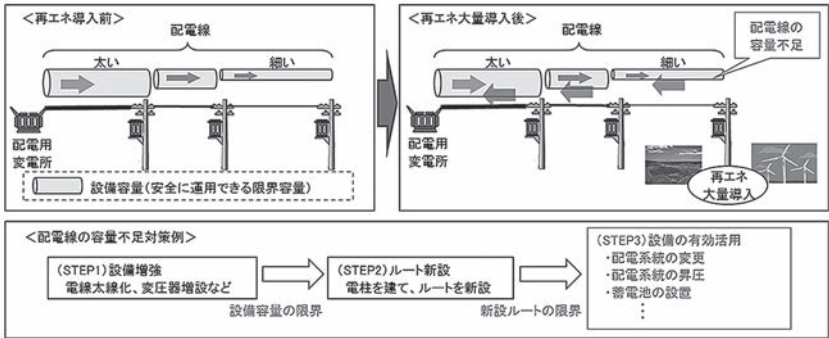


図 14 配電設備の容量不足イメージ

（２）配電設備の有効活用

これまで、配電用変電所から需要家へ一方に電力を供給することを前提に、送電容量を需要に見合う量とする効率的な配電設備を形成してきている。しかし、図14に示す通り、近年の再エネ導入拡大に伴い、再エネが電力需要の少ない地域で増加すると、逆潮流により既存の設備に容量不足が生じ、電線の太線化や変圧器増設などの設備増強や配電線ルート新設等の対策が必要となってきている。但し、設備増強やルート新設を行う際には、設備容量および電柱設置ルートには限界がある。今後、既存配電設備を有効活用し、再エネの最大限導入可能な設備を構築していく必要がある。

（３）配電分野の要員確保

図11で示した通り、FIT制度導入以降、全国各地で再エネが急増しており、それに伴う配電分野での業務量も増加している。図15に再エネ系統アクセス業務の流れを示す。これ

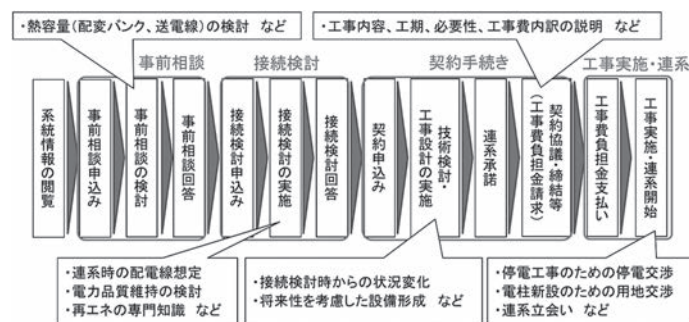


図 15 再エネ系統アクセス業務の流れ

までの配電知識だけでは対応できず、再エネの専門知識等を要することや日々変化する配電設備や再エネ系統アクセス状況等も考慮する必要があり、再エネ系統アクセス業務に多大な時間と労力を要している。図 16 には、2015 年度における 500kW 以上の発電設備等系統アクセス業務に係る事前相談・接続検討・契約申込みの受付件数を示す。2015 年度の 500kW 以上の発電設備等系統アクセス業務に係る事前相談・接続検討・契約申込みの受付合計件数は、東京電力株式会社（現在は分社化により東京電力パワーグリッド株式会社）が最多であり、その次に東北電力株式会社が多かった。契約申込みの受付件数だけを見ると、九州電力株式会社が最多であった。また、受付件数の 7 割が高圧連系での申込みであり、配電分野においては、その他 500kW 未満の高圧および住宅用などの低圧連系での申込みについても対応している。今後、少子高齢化等

により要員の確保が困難となることが想定され、再エネ導入に必要となる要員を育てていく必要がある。

5. 将来の配電系統のあるべき姿

配電分野において、「4. 再エネ導入に伴う配電分野における課題」にて挙げた、様々な顕在化してきている課題に対し、安定した電力供給を継続していくために、将来を見据えて速やかに対応していく必要がある。また、今後起きうるいかなる環境変化においても、これまでと同様に世界トップ水準の信頼性の高い良質な電気をお届けする必要がある。

これら課題解決に向けて、IAE では、将来を見据えた配電系統の検討を実施している。現在、IAE が受託し進行中の事業は、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から受託した「分散型エネルギー次世代電力

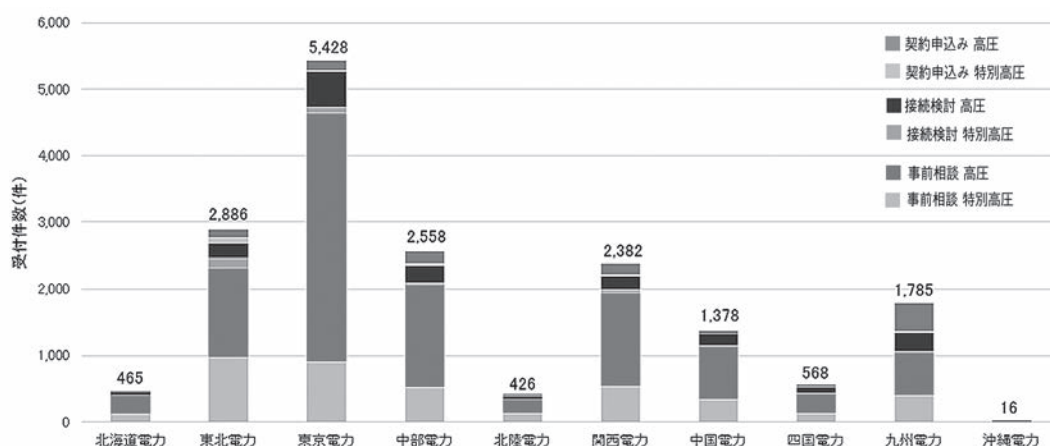


図 16 事前相談・接続検討・契約申込み（500kW 以上）の受付件数（2015 年度）⁽¹⁰⁾

網構築実証事業・次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発」,「分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業・未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ」,そして「電力系統出力変動対応技術研究開発事業・再生可能エネルギー連系拡大対策高度化」である。

「次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発」においては,2030年頃の次世代配電システムの検討として,SiC パワー半導体を用いた次世代電圧調整機器とその制御システムを配電網に適用し,再エネの大量導入を図るための共通基盤技術の開発を実施している。

また,「未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ」においては,2050年頃の次々世代配電システムの検討として,現状の状況にとらわれない配電網のあるべき姿を明らかにすることを目的としたフィージ

ビリティスタディを技術的優位性と経済的成立性を踏まえ実施している。

更に,至近の課題として,2015年1月に施行されたFIT 制度の見直しにより,義務付けされた遠隔出力制御システムについて,「再生可能エネルギー連系拡大対策高度化」において,出力制御機能付きパワーコンディショナー(PCS)の開発等を実施している。

6. 配電分野を取り巻く至近の動向

現行の託送料金制度が,電力自由化の進展や再エネ普及等の環境変化に十分対応できなくなっている可能性があることから,2016年9月から電力・ガス取引監視等委員会の「送配電網の維持・運用費用の負担の在り方検討ワーキンググループ(WG)」にて,検討が進められている。表3に検討概要を,図17に検

表3 「送配電網の維持・運用費用の負担の在り方検討 WG」の検討概要⁽¹²⁾

検討の目的	課 題
①送配電網の維持・運用コストの抑制・低減	①送配電網への負担と独立に電源を設置 ・発電事業者は,託送コストを意識せずに電源立地場所を選定することから,託送コストが増大する懸念
②需要家負担に係る公平性の確保	②送配電網の固定費の回収不足や需要家間の不公平 ・固定費が8割を占めるが,基本料金で3割しか回収していない。 ・需要の減少や自家発電の普及がある中,固定費が安定的に回収できないと,安定供給に必要な送配電網の維持・運用に,将来的に支障をきたす可能性
③イノベーションの促進	③蓄電池,IoT等を活用した高度なネットワーク利用の推進 ・従来,電気が高圧系統から低圧系統に流れる前提で費用を配賦 ・近年,低圧の再エネ等の分散型電源から系統に流れる電気が増加

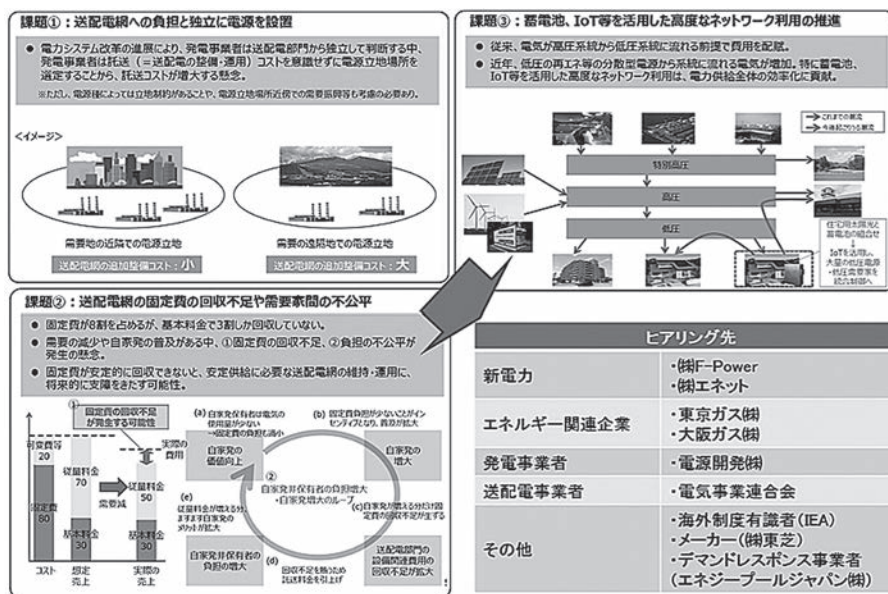


図17 「送配電網の維持・運用費用の負担の在り方検討 WG」の検討イメージ⁽¹¹⁾

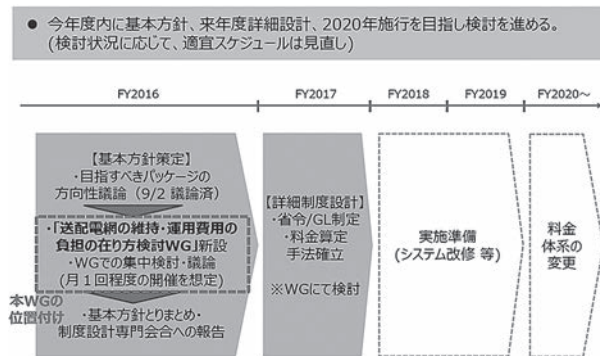


図18 「送配電網の維持・運用費用の負担の在り方検討ワーキンググループ」の検討スケジュール⁽¹²⁾

討イメージを、図18に検討スケジュールを示す。今後、どのように基本方針がとりまとめられ、詳細制度設計に移行していくのか注視していく必要がある。

また、2016年10月に経済産業省により設置された「東京電力改革・1F問題委員会」において、2016年12月に東電改革提言が示され、その中に配電分野の今後を示唆する提言が示された。その内容は、国内需要が構造的に減少する中で、託送コストを抑えつつ、再エネの導

入拡大やIT技術革新の進展を背景として、ネットワーク投資を拡大し、デジタル化対応していくには他電力と共同事業体を設け、再編・統合を目指しグローバル企業にするといった提言である。図19に再編・統合ステップを、図20に再編・統合の検討スケジュールを示す。他電力との協議の中で、将来の配電分野の形態が見えてくると思われるため、こちらの動向についても注視していく必要がある。

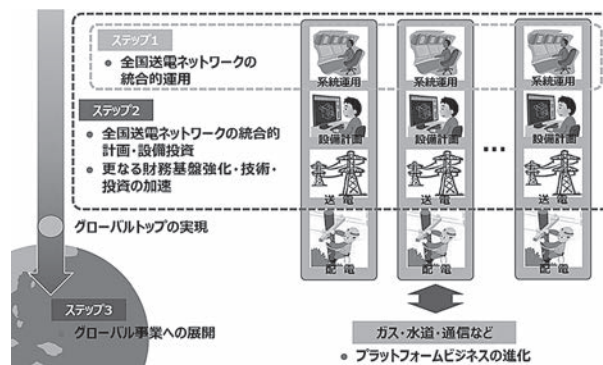


図19 送配電事業における再編・統合ステップ⁽¹³⁾

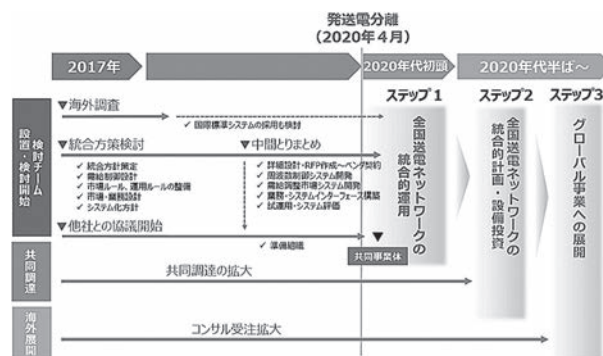


図20 送配電事業における再編・統合の検討スケジュール⁽¹³⁾

7. おわりに

(13) 経済産業省 東京電力改革・1 F 問題委員会, 第 7 回
配布資料 2 (平成 28 年 12 月)

これまでの配電分野は、電力需要が右肩上がりに伸びる中で、その需要に応えるために設備を大量に建設・更新し、また、供給信頼度の向上や業務効率化を主目的に、時代の変化に合わせて配電系統の電力品質の維持や、事故時の停電範囲の縮小、復旧時間の短縮化による供給信頼度の維持などに取り組んできた。近年は、電力システム改革の推進や再エネの導入拡大、または需要の伸びの鈍化等、配電系統を管理する上での不確実性が拡大しており、この環境変化に伴って配電分野において多くの課題が顕在化してきている。

こうした現状認識の下、今後の社会環境の動向変化等も注視し、わが国における将来の安定的な電力供給に資するような配電分野のあるべき姿を見据えつつ、その実現に向けた課題解決のための取組を着実に進めていく必要がある。

参考文献

- (1) 電力統計情報, 電気事業連合会ホームページ
- (2) 電気事業のデータベース (INFOBASE), 電気事業連合会ホームページ
- (3) 海外電気事業統計 2015 年版, 海外電力調査会
- (4) “配電自動化技術の高度化”, 「電気協同研究 第 72 巻 第 3 号」, pp.13-14 (平成 28 年 10 月)
- (5) 総合資源エネルギー調査会 電力基本政策小委員会, 第 1 回配布資料 7-1 (平成 27 年 10 月)
- (6) 登録小売電気事業者一覧, 資源エネルギー庁ホームページ (平成 29 年 3 月 30 日時点)
- (7) 総合資源エネルギー調査会 電力システム改革貫徹のための政策小委員会, 第 4 回配布資料 3- 1 (平成 28 年 12 月)
- (8) 総合資源エネルギー調査会 電力システム改革貫徹のための政策小委員会, 中間とりまとめ (平成 29 年 2 月)
- (9) 総合資源エネルギー調査会 長期エネルギー需給見通し小委員会, 長期エネルギー需給見通し (平成 27 年 7 月)
- (10) 電力広域的運営推進機関, 発電設備等系統アクセス業務に係る情報の取りまとめ (平成 27 年度の受付・回答分) (平成 28 年 7 月)
- (11) 電力・ガス取引監視等委員会 送配電網の維持・運用費用の負担の在り方検討 WG, 第 1 回配布資料 3 (平成 28 年 9 月)
- (12) 電力・ガス取引監視等委員会 送配電網の維持・運用費用の負担の在り方検討 WG, 第 2 回配布資料 3 (平成 28 年 10 月)

過去の LNG 国内導入経緯に基づく 水素エネルギー導入の将来シナリオ分析

水野 有智 (プロジェクト試験研究部 水素グループ 研究員)



1. はじめに

水素は、使用時に二酸化炭素 (CO₂) 排出のない燃料の 1 つであり、主に日本や世界の先進国において、低炭素排出なエネルギーシステム構築のための手段として、水素のエネルギー利用が検討されている。しかし、水素が社会の中で広く用いられるためには、製造から利用までを結ぶ供給インフラを新たに構築し、電力や化石燃料を中心とする、100 年以上の時間をかけて構築されてきたエネルギー供給・利用体制の中に居場所を確保していく必要がある。ここで、社会のエネルギー供給・利用体制の転換をエネルギーシフトと呼ぶならば、水素のエネルギーシフトには困難が伴うものと考えられる。

他方、過去に目を向けてみると、ここ数十年の間に大規模なエネルギーシフトが起こっていたということに気づく。それは、1960 年代を中心に起こった LNG (液化天然ガス) の国内導入である。この LNG の導入経緯を分析することで、今後水素エネルギーの国内導入があり得るとすると、どのような形になるのかを深く考察できるのではないかと考えた。

そこで本稿では、過去の LNG 国内導入経緯の調査を行い、その結果に基づいて水素エネルギー導入の将来シナリオを描くという調査研究の結果について述べる。ここで将来シナリオとは、社会や環境システムといった対象の将来の可能性を、文章や数理モデルによる計算結果を用いて表現したものと定義する⁽¹⁾。代表的

な将来シナリオの例として、ロイヤルダッチシェルが作成したシナリオ⁽²⁾が挙げられる。

2. 本研究の調査分析手法

本研究を実施する上では、「風が吹けば桶屋が儲かる」ということわざのごとく、時代背景や当時の人物の決断等の出来事とその間のつながりの総体が LNG エネルギーシフトであると考ええる。さらに、LNG エネルギーシフトのような歴史的な動きの背後には、様々な出来事を引き起こすたくさんの要因がそれぞれ因果的に関係しあっていると仮定する。

本研究ではこの仮説に基づく手法で LNG と水素という 2 つのエネルギーを比較することで、過去の知見に基づいて将来のシナリオを作成する。本研究には以下の 3 つの考え方に基づく 4 つの手法を用いる。

1. 文献、関係者へのヒアリング結果から分かる LNG エネルギーシフト時の出来事の前後関係を整理し、関連づける。

手法 1：タイムライン分析
手法 2：イベントツリー分析

2. 関連づけられた過去の出来事からそれらの背後にある、LNG エネルギーシフトに関連する要因を推定して、水素エネルギーにまつわる同様の要因を調査し、推定して比較する。

手法 3：因果ネットワーク分析

3. 過去と現在の比較に基づいて、将来をシナリオという形で描く。

手法 4：将来シナリオ作成手法

手法1：タイムライン分析

タイムライン分析の目的は、過去に起きた大きな出来事を構成する個別の小さい出来事や時代背景（これらをまとめてイベントと呼ぶ）の時間的な前後関係を整理することである。ここで、イベントは「AがBする」といった、主部と述部から構成される「節」として表現する。イベントをステークホルダー毎に、時系列順に整理した表をタイムラインと呼ぶ。

表1は、LNGエネルギーシフトを構成するイベントを文献調査とヒアリングにより抽出して作成したタイムラインのうち、1960年に東京ガスがLNG導入を会社として決定する出来事の前後の一部を取り出したものである。

手法2：イベントツリー分析

イベントツリーの目的は、タイムラインに時系列に整理したイベント間の関係を仮定することで、過去の大きな出来事の因果的な流れを明確化することである。イベントツリーは、タイムラインの構成要素であるイベント

をノードとし、ノード間の因果関係（イベントAはイベントBの原因であるという関係）をリンクとする樹形図として表現する。

図1は、1960年に東京ガスがLNG導入を決定するまでの流れを、表1のタイムライン内に整理した出来事を因果関係で接続して作成したイベントツリーの一部である。

手法3：因果ネットワーク分析

因果ネットワーク分析の目的は、過去の大きな出来事の原因となっている「シナリオ記述対象」の構造を、対象の構成要素である要因間の因果関係からなる因果ネットワークで整理することである。本研究ではLNGエネルギーシフトと水素エネルギーシフトの背後構造の違いを因果ネットワークで比較することで、過去の知見に基づいて将来の可能性を描く。因果ネットワークは、巻末参考文献（2）の手法の定義に従う。

ここで「要因」とは、タイムラインやイベントツリー内の出来事のような「節」ではなく、

表1 タイムラインの例

ステークホルダー	1940年代	1950年代	1960~1964	1965~1969
東京ガス			1960: LNG導入を決定	1969: 根岸工場にLNG受け入れ（日本初）
		1950年代: 石油改質ガスを都市ガスとして供給開始	1960年代前半: 東京ガスの合成ガス製造工場の製造能力、ガス送出能力に限界が見え始める。	1965: 東京電力にLNGの共同導入計画を提案。
		1955: 東京ガス需要案件数が100万件に達する	1962: 東京ガス需要案件数200万人突破	1965: 年末より、20%のLNG関税低減の交渉を開始、1967: 無税化が決定
	戦前より石炭改質ガスを都市ガスとして供給	需要家増に伴うガス管などの設備投資の増大（年率25%）それに伴う経営の逼迫		
行政・政府	原油輸入権を国内石油精製会社のみに対して付与。			
	戦後復興の中核エネルギーとして国産石炭を位置づける	炭鉱労働者の労働運動活性化		
日本社会	1945: 第二次世界大戦敗戦	1950年代後半: 石油が日本の産業用エネルギーの中心へ	石油化学工業の発展に伴って国内精製ナフサの需要が増大、価格が上昇	
		公害問題が深刻化		
世界の各ステークホルダー	中東で油田開発、石炭から石油の隆起へ	1957: アメリカ銀行、東京ガスにLNG受け入れ打診		
	1945年～55年: 天然ガスの冷却液化技術が開発される。ただし、大量生産と貯蔵技術は開発されておらず。	1959: イギリスにて、メタンパイオニア号によるLNG海上輸送が試行される。		

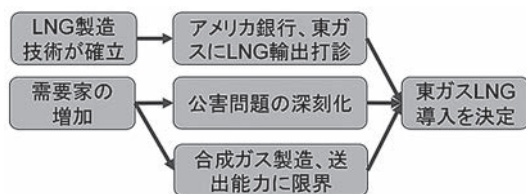


図1 イベントツリーの例

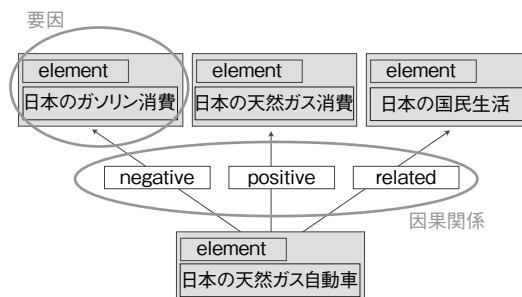


図2 因果ネットワークの例

図2内のような「句」あるいは「詞」の形式で表現する。また、要因間の因果関係として、関係の根元の要因の状態が強化、増加といったプラス方向に変化した時に、関係する先の要因の状態がどのように変化するかで3種類に分類する。3種類とは、negative, positive, related である。

図2の例は、LNG エネルギーシフトの因果ネットワークの一部を切り出したものである。日本の天然ガス自動車の普及により、自動車用ガソリン消費は減り (negative)、天然ガス消費量は増える (positive)。また、天然ガス自動車の普及により日本の国民生活は何かしらの影響は受けるだろうが、どのような影響を受けるかは確定できない (related)。

手法4：将来シナリオ作成手法

将来シナリオの作成手法として、巻末参考文献(3)の手法を用いる。これは、因果ネットワークを使ってシナリオの記述対象世界を

明示的に表現し、その中から将来の変化の軸となる要因を抽出して構造的にシナリオを作成する手法である。

本研究では、手法3でLNG エネルギーシフトの因果ネットワークに基づいて構築した水素エネルギーシフトの因果ネットワークをこの手法に用いることで、LNG エネルギーシフトの知見に基づいて水素エネルギーシフトの将来シナリオを作成した。

3. 日本の LNG 導入経緯

文献調査、ヒアリングの結果を手法1, 2を用いて分析し、日本のLNG 導入経緯を図3のイベントツリーで表現した。実際に構築したイベントツリーは、数百のイベントからなるが、主要な流れを要約すると図3のようになった。

日本では、LNG の導入は政府主導ではなく、民間主導で行われた。その中心にいたのは首都圏の電力供給事業を手がける東京電力(株)と、

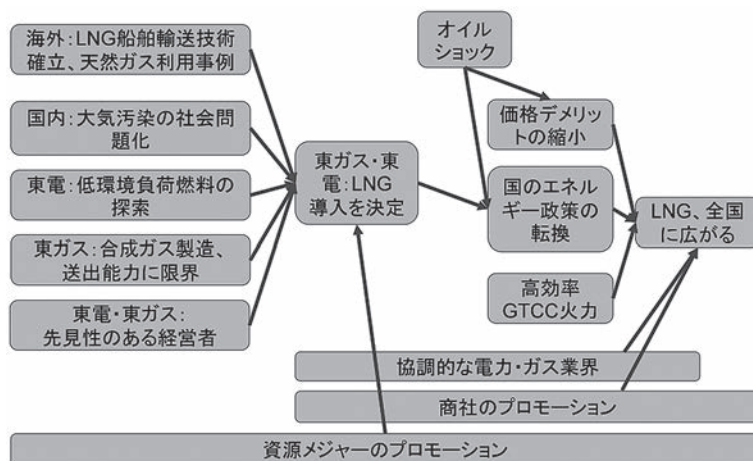


図3 LNG エネルギーシフトのイベントツリー (要約)

都市ガス事業を手がける東京ガス(株)であった。国内外の様々な動きが東京電力と東京ガスの両者に LNG 導入を決断させ、LNG 輸入開始直後に起こった 2 度のオイルショック (1973 年、1979 年) が政府のエネルギー政策を動かし、その後押しが LNG の全国的な普及を推進した。

(1) 1960 年代までの海外の動き

天然ガスの利用は、1950 年代までに欧米で始まった。その主要な用途は都市ガスとしての利用であったようだ。メタンの液化技術を用いて LNG を製造する事業を始めたのはアメリカで、天然ガス需要のピークシェービング用のガスをコンパクトに貯蔵するために用いていたようである。1950 年代に入ると、世界各地でガス田が開発された。当時大規模な需要家に乏しいアラスカやブルネイといった地域でもガス田が発見され、資源メジャーはこれらのガスの販売先を探していた。

海外から日本に入ってくる天然ガスは全て船舶による LNG 輸入であるが、この LNG の船舶輸送を始めたのは、アルジェリアから都市ガス用 LNG を輸入した英国であった。

すなわち、日本にとって LNG は舶来の技術で、参考にできる先行事例もあったのである。

ガス田開発と LNG 船舶輸送の実現という 2 つの出来事を受けて、資源メジャーがアラスカ、ブルネイ産天然ガスの船舶輸送による輸出先として日本を選定し、商社等を通じてプロモーションを掛けていた。

(2) 1960 年代の日本

1960 年代の日本は、現在からは想像もつかないような好景気の時代として羨望やノスタルジーの念をもって語られることが多いが、同時に現在からは想像もつかないくらい深刻な環境汚染が国土を蝕んでいた時代でもあった。

東京を中心とする大都市圏では人口の集中に伴って電力、都市ガス需要が急伸した。他方、重化学工業の発展に伴い、石油コンビナートが日本各地に作られ、「四日市ぜんそく」

を代表とする大気汚染問題は深刻化の一途をたどっていた。当時も公害防止の法制度や条例等はあったが、実効性に乏しく、産業活動に伴う環境汚染は野放しであった。

これに対して反公害の市民運動が起こり、さらに全国の地方自治体で反公害を掲げる革新系の首長が選出されるという動きもあった。これら反公害の動きも、LNG 導入の 1 つの要因となった。中でも、LNG 導入に主体的な役割を果たした東京電力、東京ガスに直接的に影響力を行使したのは、東京電力管区内である神奈川県横浜市の飛鳥田一雄市長 (当時) であった。就任後、東京電力が横浜市根岸地区の埋め立て地に建設を予定していた重油火力発電所の建設に、飛鳥田市長が「待った」をかけたため、東京電力はこれへの対応を迫られた。

(3) 東京電力の事情

東京を中心とする首都圏では、前述の通り人口集中で電力需要が高まり、東京電力は新たな電源の開発を行う必要に迫られていた。しかし、当時、水力発電用のダム建設に適した土地は枯渇してきていたこと、また、中東の油田開発に伴って原油価格が安かったこともあり、火力発電所の建設を進めていた。これが結果的に、首都圏の大気汚染に結びついていたため、飛鳥田横浜市長に「待った」をかけられたのである。

他方、東京電力は、大気汚染対策の取り組みを進めており、石油火力発電所での原油の生焚き (熱量当たりの硫黄酸化物排出量が重油より小さくなるが、軽質油を分離しないまま燃やしてしまう) や低硫黄原油の調達、排気浄化技術の研究開発を進めていた。しかし、いずれも 1960 年代においては問題の根本解決には寄与しなかった。

そこで、東京電力は、液化の際に不純物が取り除かれる LNG を大気汚染性が極めて小さい発電用燃料として見ていた。しかし、彼らにとって LNG は未知の燃料であり、同時に、

当時は石油よりも高価で、経済性の観点からは導入がためらわれた。

（４）東京ガスの事情

当時、都市ガスは石炭や石油から作られる合成ガスであり、水素や一酸化炭素を主成分とし、 $5,000 \sim 6,000 \text{ kcal/m}^3$ 程度の熱量に調整されていた。終戦直後、荒廃した国内産業の再生や国富流出防止の観点から、東京ガスには国内炭の引き取りが義務づけられていたが、炭鉱労働者の待遇改善を求めたストライキ等の供給リスク・価格の観点から、1960年代には石油系原料に軸足を移していた。

また、当時、東京ガスのガス製造工場は、首都圏のあちこちにあり、そこから排出される硫黄酸化物等が首都圏の大気汚染の原因となり、東京電力同様に対策を迫られていた。さらに、ガスの製造、送出能力増強のための設備投資は増加の一途をたどり、経営の観点からも根本的な問題解決が求められていた。

これらの背景から、東京ガスにとってLNGは環境、経営の両面から問題の根本解決に寄与する都市ガス原料として考えられていたようである。大気汚染性の低さと同時に熱量の高さもその理由だったようだ。現在使われている、天然ガスを主成分とする「13A」と呼ばれるガスの体積当たり熱量は、合成ガスである「6B」の約2倍の $11,000 \text{ kcal}$ である。すなわち、同じ送出設備で2倍のガスを送れることに等しい。

ただし、LNGの導入は一時的に大きな投資が必要なこと、末端のガス器具の熱量調整も必要なことから、人的にも大きな負担がかかるものであった。

（５）LNG導入に向けた動き

東京電力㈱と東京ガス㈱のどちらが先にLNGに目をつけていたかという点、東京ガス、特に安西浩副社長（当時）であった。LNG導入を先導したのも東京ガスであった。海外の資源メジャー、日本の商社からの後押しもあ

り、1955年に東京ガスが東京電力にLNGの協同購入を提案している。これには、規模の拡大、設備の共通化によるコストダウン、タンカーの隻数確保による冗長性確保、都市ガスと発電用燃料の季節間需要調整といった意図があったようだ。提案を受けた木川田一隆・東京電力社長（当時）は、当時、熱量当たりのコストが原油の170%と高かったLNG導入を決断し、取締役会を説き伏せたと言われている。このようなトップの決断により、関係各社がLNG輸入に向けて動き出した。

LNG最大の懸念は高いコストである。少しでも供給コストを下げるべく、東京電力と東京ガスは、当時の政府に、20%と見込まれていた輸入関税を撤廃するよう交渉し、これを勝ち取っている。また、当時、日本のメーカーにLNGを取り扱った経験はなく、国内に安全基準等もなかった。そのため、欧米のメーカーから技術を導入したり、安全基準を参照するなどして、LNG導入の準備を行った。

東京ガスは、LNG輸入、貯蔵、送出基地としての根岸基地と袖ヶ浦基地の建設、LNG船の輸入を主導し、同時に天然ガス環状幹線の建設、需要家の熱量変更作業を実施している。熱量変更作業は、1972年に始まり1988年まで、実に16年もの年月を要している。また、東京電力は根岸基地に隣接した、重油火力発電所の建設に「待った」をかけられた場所に南横浜火力発電所を建設している。

そして、1969年11月、根岸基地にアラスカ産のLNGタンカーが入港。ここに、現在に至る日本のLNGエネルギーシステムが産声を上げたのである。

（６）オイルショックとその影響

オイルショックは日本のエネルギー政策の大きな転換点であったが、LNGもこれに助けられたと言える。当時、発電用燃料の対抗馬であった原油の値段が急騰したことで、LNGの最大のデメリットであった価格差が縮まり、さらにエネルギー供給元の分散というエネルギー安全保

障上のメリットが明らかになったのである。

LNG の導入は民主導で始まった。最初は必ずしも国から歓迎されていなかったと言われているが、オイルショックが国のエネルギー政策の転換を促し、石油偏重から「エネルギーのベストミックス」を目指すという大きな方針転換を図らせた。LNG は、「エネルギーのベストミックス」の一部と位置づけられた。オイルショックの結果、日本はエネルギー技術の国策による研究開発を開始し、その1つである「ムーンライト計画」で、現在に至る国産ガスタービン技術の開発が開始された。

オイルショックを受けて、国際エネルギー機関（IEA）が各国に石油火力発電所の新設禁止を通達したことも、日本の電力各社に天然ガス火力発電所の建設を促した。

（7）日本全国への LNG の広がり

現在、日本の電力・ガス市場は、自由化が進み競争的な環境となっているが、当時は総括原価方式、地域独占制度に守られている分、協調的な環境であった。そのため、東京電力、東京ガスから電力各社、都市ガス各社への技術移転が円滑に進んだ。LNG は設備費が高価で、複数社で1つのガス田からガスを共同購入した方が設備等の集約が可能で都合が良かったということもあった。

都市ガスについては、1990 年、経済産業省が「IGF21 計画」という政策を打ち出し、都市ガスの天然ガスへの転換を促した。また、電力については、高効率で始動性の良いガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）火力発電が実用化、国産化されたことも、LNG 導入を促したものと考えられる。

天然ガスが都市ガス、発電用燃料として全国で広く用いられる一方で、運輸用燃料としてはそれほど普及が進まなかった。

天然ガスのエネルギーを小型でも高効率で利用できる燃料電池については、2009 年、世界に先駆けて日本で市販が始まり、2014 年に累計販売台数が 10 万台を突破した。

（8）LNG 導入経緯～まとめ～

LNG の導入は首都圏において民間主導が始まり、環境面に優れる一方で大きな設備投資を要することから、その導入開始には経営上の決断が求められた。このハードルを先見性のある経営者が乗り越え、導入が決まった。偶然にも 2 度のオイルショックが LNG の普及を助け、国のエネルギー政策の転換と共に都市ガス、発電用燃料として全国に広がった。

4. LNG 導入との対比による、水素エネルギー国内導入のシナリオ

（1）水素エネルギー国内導入のシナリオ（水素エネルギーシフトシナリオ）の問題設定

巻末参考文献（3）に従い、シナリオ全体の問題設定（枠組み設定）を表 2 に示す。シナリオの対象期間は 2015 年から 2060 年とした。

表 2 水素エネルギーシフトシナリオの問題設定

項 目	内 容
シナリオの名称	水素エネルギーシフトシナリオ
シナリオの作成目的	LNG の事例を参考にして、水素エネルギーの将来の日本における普及形態の可能性を描くこと。
対象期間	2015～2060
対象地域	日本を中心とする世界全体
考慮するステークホルダー	資源メジャー 日本国内の再エネ事業者 日本国外の再エネ事業者 日本の商社 日本国民 日本の電力事業者 日本の都市ガス事業者 日本政府

（2）因果ネットワーク分析

手法 3 の因果ネットワーク分析を実施するにあたり、まず、LNG と水素の比較を行った。その際に、対象をいくつかの項目に分割して分析する PEEST（Political, Economy, Environment, Society, Technology）分析と呼ばれる手法を参考に、社会、技術、経済、環境、政策、経営の 6 つの大項目と、その下位項目毎に LNG と水素の比較を行った。比較結果の主要部分を表 3 に示す。

表3を基に、LNGと水素の因果ネットワーク分析を実施した。図4にLNGエネルギーシフトのイベントツリーを基に構築したLNGエ

ネルギーシフトの因果ネットワークを、図5に水素エネルギーシフトの因果ネットワークを示す。水素エネルギーシフトの因果ネット

表3 LNGと水素の比較表

大項目	小項目	内 容
社会	人口動態	LNGの導入時、特に初期導入時には日本の人口、人口増加率自体が増加していたのに対して、水素導入時には減少傾向にある。
	日本の経済成長	LNG導入期は日本経済の拡大期だったのに対して、現在は低成長、あるいは衰退期に入っているとも解釈できる。
技術	一次エネルギー源	天然ガスは一次エネルギー源なのに対して、二次エネルギーである水素は、原料となる一次エネルギーを、とりわけCO2フリーのものを探さなければならない。エネルギー安全保障上有利であり、高コストが許容される用途に対しては小規模にも導入が可能。
経済	(LNG/水素)価格	価格が在来エネルギーに対して高価であるという点は共通。
環境	公害	LNGは大気汚染対策として導入された側面がある。水素導入時には企業の公害対策が進んでおり、日本で公害問題はほぼない。
	気候変動	2015年には気候変動が大きな課題。今後具体的な対策が必要となる可能性。
政策	技術開発支援	LNGの初期導入は民間主導で進んだ。GTCCの改良には国の関与があった。対して、水素には初期から政府の関与が見られる。
経営	在来エネルギー源からの移行(都市ガス)	LNG導入時は製造ガスからメタンストレート供給に移行した。水素はそのままでは天然ガスよりも熱量が小さく、混入か、メタン化して供給もあり得るか。
	在来エネルギー源からの移行(発電)	火力発電燃料としては、天然ガスも水素も大差はない。技術開発は要するが、克服できる可能性が高い。

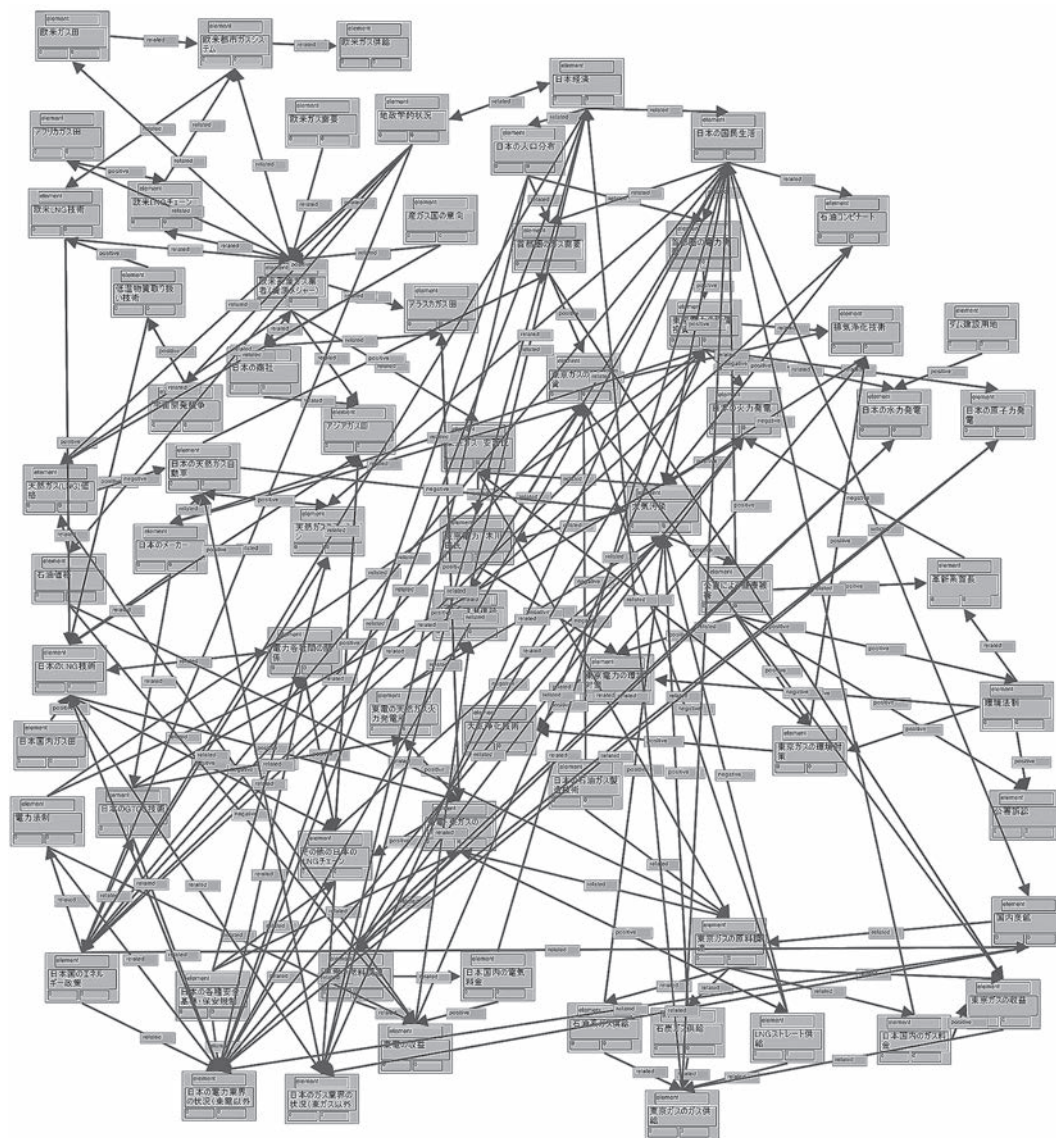


図4 LNGエネルギーシフトの因果ネットワーク

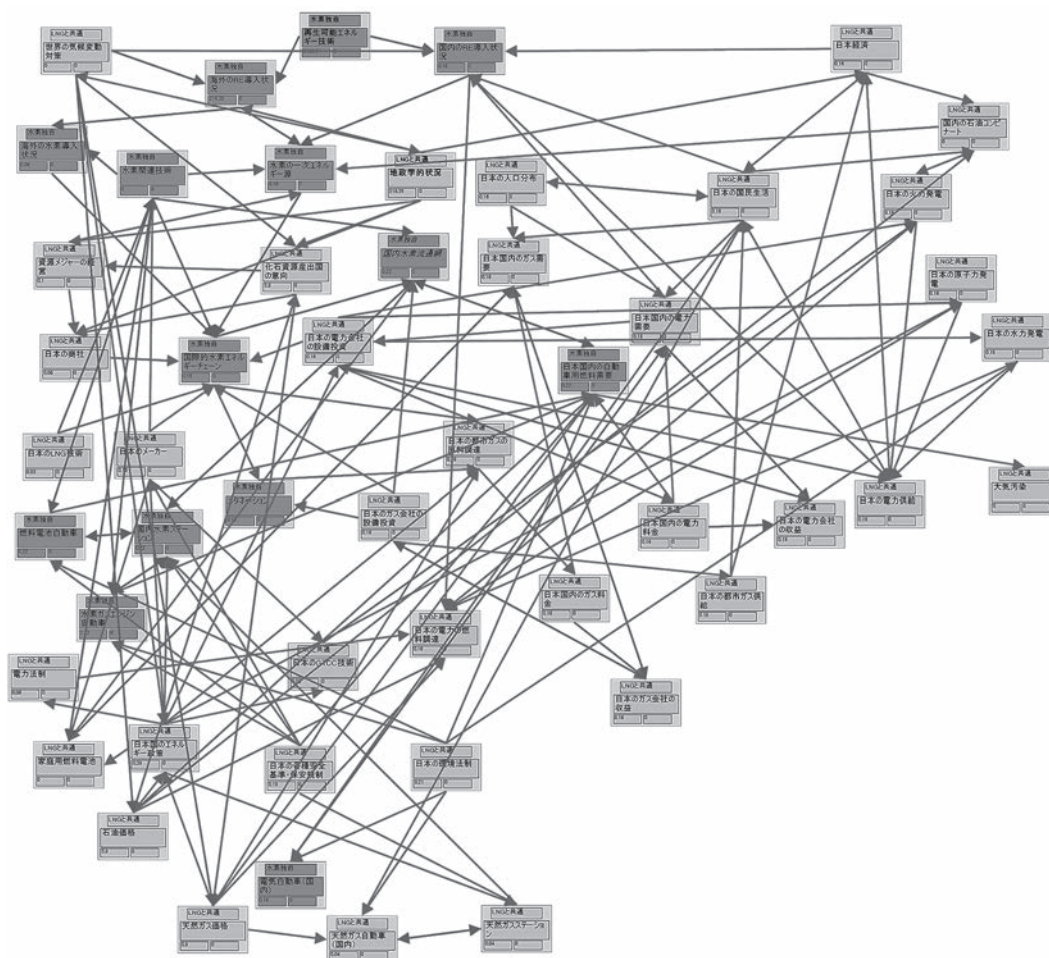


図5 水素エネルギーシフトの因果ネットワーク

ワークは、LNG エネルギーシフトの因果ネットワークと 37 個の要因を同じくし、独自の要因を 14 個含んでいる。

(3) 水素エネルギーシフトシナリオ作成

水素エネルギーシフトの因果ネットワークに対して、シナリオ作成手法の中で用いている Morphological Analysis という手法を適用した⁽⁴⁾。この手法では、「将来への影響が大きく」かつ「将来の状態が不確定な」要因（ここでは「軸」と呼ぶ）の状態変化の組み合わせに基づいて複数のシナリオを作成する。

構成する要因の中から水素エネルギーシフトの方向性を決定づける軸といずれの将来においても共通の状態をとる要因（共通前提）を抽出した。要因の不確定性は、筆者が要因間の相対値を設定し、重要度の決定に、要因

間の因果関係の重み付けに基づく要因の重要度決定アルゴリズム⁽²⁾を用いた。

共通前提：気候変動対策

- ▶ 共通前提の状態：気候変動対策が進む
- 軸 1：再生可能エネルギー技術
 - ▶ 軸 1 の状態 1a：再生可能エネルギー技術が大幅にコストダウンする
 - ▶ 軸 1 の状態 1b：再生可能エネルギー技術が漸進的にコストダウンする
- 軸 2：地政学的状況
 - ▶ 軸 2 の状態 2a：地政学的状況が比較的安定である
 - ▶ 軸 2 の状態 2b：地政学的状況が比較的不安定である

この共通前提と 2 つの軸の各 2 つの状態に基づいて、図 6 に示すように 4 本のシナリオを作成した。

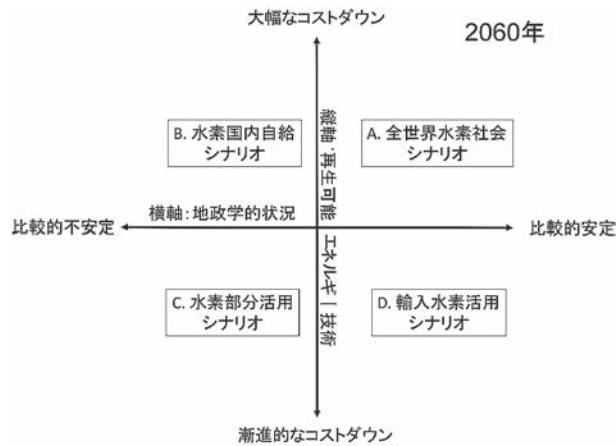


図6 軸に基づく4つのシナリオの切り分け

表4 4つのシナリオの概要

シナリオ名	軸1:再生可能エネルギー技術	軸2:地政学的状況	概要
A.全世界水素社会シナリオ	大幅なコストダウン	比較的稳定	地政学的状況が安定しており、再生可能エネルギー技術が大幅にコストダウンするため資源メジャーと日本の商社が再生可能エネルギー開発と水素を利用した国際的なエネルギー輸送を実施する。加えて、国内にも大規模に再生可能エネルギーが導入される。それに伴って電力事業者や都市ガス事業者が音頭を取って、系統安定化のための水素も入り、輸入された水素と合わせて多様な用途に用いられる。運輸、発電、民生、産業用熱源に水素が幅広く利用される。従って結果的に水素導入量は最も多くなる。
B.水素国内自給シナリオ	大幅なコストダウン	比較的不安定	地政学的状況が不安定なため、世界的にエネルギーの自給傾向が進む。再生可能エネルギー技術が大幅に低コスト化するため、国内の、あまり条件が良くないところにも再生可能エネルギーが入り、日本のエネルギー自給率が大きく高まる。再生可能エネルギーの変動吸収のために都市ガス事業者や電力事業者が投資を行い、電解水素が製造され、国内に水素供給網が整備されて水素の面的な利用が行われる。家庭用、運輸用に、国内で生産された水素が利用される。
C.水素部分活用シナリオ	漸進的なコストダウン	比較的不安定	地政学的状況が不安定で調達先の分散、エネルギーの自給傾向が強まるが、再生可能エネルギー技術があまりコストダウンしないため、条件が悪い場所には再生可能エネルギーが入らない。国内にも再生可能エネルギーが限定的に導入される。それに伴い、系統安定化のための水素導入もあまり進まない。ロケット燃料など許容コストが特に高い分野に水素が使われる。水素の輸入が化石燃料の代替と調達先分散のためにリスクが低い地域から若干行われる。再生可能エネルギーのコストダウンがあまり進まないため、海外水素の一次エネルギー源は必ずしも再生可能エネルギーとは限らず、CCS付き化石燃料改質などもある。
D.輸入水素活用シナリオ	漸進的なコストダウン	比較的稳定	地政学的状況が比較的稳定しており、再生可能エネルギーがあまりコストダウンしないので、世界的に適地に再生可能エネルギーが入っている状況である。そこで余ったエネルギーが水素として国際輸送される。国内に対する再生可能エネルギー導入は限定的で、小規模事業者が行う。国内での水素製造も限定的で、水素の流通網もあまり発達しない。国産水素価格は国外に比べて割高である。従って、日本国内での水素利用は、輸入水素についてはLNGと同様に電力事業者が出資して、既存の送配電インフラが生かせる発電用途に用いられる。国産水素は需要が比較的小さく、許容コストが高い運輸用途が中心となる。

また、図5の因果ネットワーク内で軸の先につながっている要因の状態を軸の状態から連想して、表4のように4つのシナリオの概要を決定した。水素の導入量でいうと、 $A > D > B > C$ の順となる。

(4) 考察：LNG エネルギーシフトの経緯と水素エネルギーシフトシナリオの比較

LNG エネルギーシフトの経緯と水素エネルギーシフトシナリオを比較して分かったこと

は、天然ガスと水素は、同じ気体のエネルギー源であるが、日本社会への導入過程は異なるものになるであろう、ということである。その理由としては、以下のことが挙げられる。

日本の国内状況の違い：LNG 導入時は人口が増加し、経済が急成長した時代であったのに対して、水素の普及が始まっている2015年には、人口は減少し、経済成長も低調である。従って、新たなエネルギーインフラへの投資は

LNG 導入時に比べて困難と考えられる。

日本の大気環境：LNG 導入の 1 つの推進要因は大気汚染問題の解決であったのに対して、LNG 導入がその一部に含まれる環境汚染対策のまさにそれにより日本国内の大気環境は大都市圏においても改善している。

先行者の存在：LNG については、米国、英国といった欧米諸国が先鞭をつけていた。それに対して水素のエネルギー利用は日本がフロントランナーとなっている。

日本のエネルギー政策：水素エネルギーの導入には国策が強く働いている。これは民間主導で、当初は国の協力を得られなかった LNG と異なる。

世界的な気候変動対策：LNG 導入時の 1960 年代には、現在のような気候変動に対する危機感は持たれていなかった。

導入される用途：2016 年の水素燃料電池自動車の市販に象徴されるように、水素は運輸用途で導入が始まっており、これは天然ガス自動車の普及台数が伸び悩んでいるのと対照的である。

5. おわりに

本研究を通じて、日本のエネルギーの足跡をたどり、それに基づいて将来を見通すという試みを行った。本研究で筆者が見落としている側面や要因等も当然のことながらあり、それらを考慮すると将来は大きく変化する可能性がある。本稿が読者の「温故知新」、過去に学び、未来を考える一助となれば幸いである。

参考文献

- (1) Van der heijden, K., Scenarios – The Art of Strategic Conversation 2nd edition, 2006
- (2) Wack, Pierre. " ㄨ Scenarios: Uncharted Waters Ahead." Harvard business review 1985
- (3) 水野他, 持続可能な製造業の実現に向けた持続可能社会シナリオシミュレータの開発 (第 3 報) – フォアキャスト型シナリオ設計支援手法 –, 精密工学会誌, 78, 9, 798-804, 2012
- (4) Coyle, R.G., Morphological Forecasting – Field anomaly relaxation (FAR), Futures Research Methodology – V20, AC/UNU Millennium Project, Washington D.C., 2003

平成 28 年度 事業報告の概要

(一財) エネルギー総合工学研究所

当研究所における平成 28 年度事業の概要は以下の通りである。

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

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

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

(2) 当研究所は、気候変動に対するジオエンジニアリング（気候工学）の技術動向に関する調査研究を進めたほか、次世代電力ネットワークや再生可能エネルギー大量導入時の出力変動対応技術、バーチャルパワープラントの構築実証、太陽熱利用技術、次世代の石炭ガス化複合発電技術及び CO₂ の回収・貯留・利用技術、水素の製造・輸送・需要等に関する調査研究を実施した。

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

(3) 以下に各エネルギー分野における調査研究活動の概要を示す。

① エネルギー技術全般

太陽放射管理や二酸化炭素除去等のジオエンジニアリングの評価や将来のエネルギーシステム統合技術に関する調査、エネルギー・環境技術のイノベーションについて検討を行う国際フォーラム Innovation for Cool Earth Forum (ICEF) の開催支援等を進めたほか、最新の技術情報及び評価を提供するエネルギー技術情報プラットフォームの内容の充実、エネルギーに関する公衆の意識調査を実施した。

② 新エネルギー・電力システム関連

次世代電力ネットワークの調査検討を進めるとともに、蓄エネルギー技術を用いた再生可能エネルギー大量導入時の出力変動対応技術に関する研究開発やバーチャルパワープラントの構築に関する実証事業、再生可能エネルギー発電設備の遠隔出力制御に関する評価等を進めた。

また、再生可能エネルギー分野では水を作動媒体とする小型バイナリー発電システムの研究開発や集光型太陽熱発電（CSP）等に関する調査研究、省エネルギー分野では高効率空調システムの開発や ZEB/ZEH（ネット・ゼロ・エネルギー建築物）の技術ロードマップ作成等を実施した。

③ 水素エネルギー関連

水素の製造から輸送／貯蔵・消費に至るエネルギーキャリアシステムの経済性評価を行うとともに、再生可能エネルギーや未利用エネルギーに由来する水素に関する技術や経済性等の調査、ノルウェーにおける余剰再生可能エネルギー等からの水素製造や液化水素による輸送・利用に係るフィージビリティ研究等を実施した。

④ 化石エネルギー関連

化石燃料の高度転換技術に係る研究に関して、次世代の石炭ガス化複合発電（IGCC）に関する調査や 2050 年までの長期的視点に立ったクリーン・コール・テクノロジーロードマップの検討、革新的な CO₂ 分離・回収技術に係る調査、主要石炭生産・消費国における石炭関連情報の収集・分析等を行うとともに、化石燃料利用に係る新技術に関する研究に関し、石炭火力において CO₂ 回収設備が不要となるケミカルルーピング燃焼に係る技術開発を行った。

⑤ 原子力関連

福島第一原子力発電所事故を踏まえ、さら

に高い水準の安全確保を図るため、原子力発電所の安全対策高度化に活用し得る技術開発プロジェクトを実施したほか、事故炉の総合的な炉内状況把握の高度化、過酷事故（シビアアクシデント）解析手法の高度化に関する研究、シビアアクシデント時の安全系の機能に関する研究等を進めた。また、福島第一原子力発電所事故後の国内原子力産業の動向や国内外の人的過誤事象に関する調査等を行うとともに、原子力発電所の廃止措置計画に係る標準に関する調査検討、英国における放射性廃棄物の再利用状況に関する調査、原子力発電所廃止措置の計画立案や実施、計画のプロジェクトマネジメントを担う人材の育成に関する助成等を行った。

研究所のうごき

(平成 29 年 4 月 2 日～7 月 1 日)

◇ 第 12 回理事会

日 時：6 月 5 日 (月) 11:00～12:00

場 所：経団連会館 (5 階) 503 号室

議 題：

- 第一号議案 平成 28 年度事業報告および決算について
- 第二号議案 公益目的支出計画実施報告書について
- 第三号議案 定時評議員会の開催について
- 第四号議案 役員報酬の総額について
- 第五号議案 役員退職金の支給について
- 報告事項 常勤役員候補者選考委員会の結果について
- 業務執行の状況について
- その他

◇ 第 7 回評議会

日 時：6 月 21 日 (水) 11:00～12:00

場 所：経団連会館 (5 階) 503 号室

議 題：

- 第一号議案 平成 28 年度事業報告 (報告事項) および決算について
- 第二号議案 公益目的支出計画実施報告書 (報告事項) について
- 第三号議案 役員の選任について
- 第四号議案 役員報酬の総額について
- 第五号議案 役員退職金の支給について
- 第六号議案 評議員の選任について
- 第七号議案 常勤役員候補者選考委員会委員の選任について
- 報告事項 その他

◇ 第 13 回理事会

日 時：6 月 21 日 (水) 14:00～14:30

場 所：経団連会館 (5 階) 503 号室

議 題：

- 第一号議案 代表理事および業務執行理事の選定について
- 第二号議案 役員報酬額について

第三号議案 役員退職金の支給について

第四号議案 顧問の委嘱について

第五号議案 事務局長の委嘱について

◇ 月例研究会

第 366 回月例研究会

日 時：4 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. 平成 29 年度の供給計画の概要について
(電力広域的運営推進機関 理事 寺島一希 氏)
2. トランプ政権誕生とシェール・ガス革命、シェール・オイル革命の最新動向
(和光大学 経済経営学部 教授 大学院研究科委員長 岩間 剛一 氏)

第 367 回月例研究会

日 時：5 月 19 日 (金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 701・702 会議室

テーマ：

1. サイバーフィジカルシステム実現に向けた IoT の動向とエネルギーマネジメントシステムへの応用
(株ユビキタス 代表取締役社長 佐野 勝大 氏)
2. 電力システム改革の制度設計の展望
～新たに創設される市場の役割と課題～
(一財) 電力中央研究所 社会経済研究所 副研究参事 服部 徹 氏)

第 368 回月例研究会

日 時：6 月 23 日 (金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. 電力貯蔵の動向と展望～用途面と技術面からの検討～
(一財) エネルギー総合工学研究所 理事 蓮池 宏)
2. 圧縮空気エネルギー貯蔵システムの現状と今後の課題～伊豆実証設備の紹介～
(株) 神戸製鋼所 機械事業部門 開発センター 開発企画室 室長 猿田 浩樹 氏)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：内藤 正則，鈴木 博之，マルコ ペリグリ
ニ

テーマ：Melting Test of Penetrating Tube through
BWR-RPV Bottom Wall

発表先：8th European Review Meeting on Severe
Accident (ERMSAR2017) (於ワルシャワ)

日 時：5月16日～18日

発表者：坂田 興

テーマ：持続性社会構築に向けた水素の貢献可能性

発表先：無機膜研究センター産業化戦略協議会第
5回セミナー（（公財）地球環境産業技
術研究機構（RITE）主催）

日 時：5月19日

発表者：坂田 興

テーマ：Power to Gas のケーススタディーと今後

発表先：再生可能エネルギーを用いた水素製造・
利用（Power to Gas）の動向と経済性・
展望（（株）技術情報センター主催）

日 時：6月15日

発表者：坂田 興

テーマ：水素利用技術（化石燃料との共利用）

発表先：CCT ワークショップ2017（（一財）石炭
エネルギーセンター（JCOAL）主催）

日 時：6月21日

発表者：坂田 興

テーマ：持続性社会構築に対する水素の貢献可能
性

発表先：Pakistan Academy of Engineering

日 時：7月1日

[寄稿]

寄稿者：蓮池 宏

テーマ：圧縮空気エネルギー貯蔵システム(CAES)
の開発

寄稿先：『エネルギーと動力』第288号（平成29
年春季号）

発表者：杉山 昌広，森山 亮

テーマ：気候工学：硫酸エアロゾルは温暖化対策
として使えるか

寄稿先：『硫酸と工業』6月号（硫酸協会）

◇ 人事異動

○5月1日付

（採用）

重留 義明 原子力工学センター主管研究員兼技術
開発支援センター兼プロジェクト試験
研究部

○5月31日付

（定年退職）

徳田 憲昭 プロジェクト試験研究部部長（副主
席研究員）兼技術開発支援センター

（退職）

堀内亜紀子 原子力工学センター主任研究員兼経
理部

○6月1日付

（嘱託採用）

徳田 憲昭 プロジェクト試験研究部部長（特任
参事）兼技術開発支援センター

（異動）

岡田 英俊 プロジェクト試験研究部参事

○6月12日付

（嘱託採用）

Daide Concu 原子力工学センター嘱託研究員

○6月21日付

（退任・解嘱）

佐藤 憲一 専務理事兼事務局長兼技術開発支援
センター長兼エネルギー国際標準
(ISO) センター長

田中 隆則 常務理事兼原子力工学センター長
プロジェクト試験研究部長

小野崎正樹 理事兼プロジェクト試験研究部長

(解嘱)

玉川 博美 参事兼事務局長代理

蓮池 宏 研究理事

重政弥寿志 プロジェクト試験研究部長兼務

(委嘱)

佐藤 憲一 顧問

(非常勤嘱託採用)

田中 隆則 研究顧問

(嘱託採用)

小野崎正樹 プロジェクト試験研究部部長

(特任参事)

(就任)

中村幸一郎 専務理事

玉川 博美 常務理事兼事務局長兼総務部長

蓮池 宏 理事兼プロジェクト試験研究部部長

○6月30日付

(出向解除)

太田 淳一 プロジェクト試験研究部 主任研究員

河瀬 和貴 プロジェクト試験研究部 主任研究員

(解嘱)

徳田 憲昭 特任参事

○7月1日付

(任用)

徳田 憲昭 研究理事 (主席研究員)

編集後記

先日、初めて日本の名前が付いた地質時代が誕生するかもしれないとの報道があった。茨城大学や国立極地研究所、千葉大学、国立科学博物館などからなる研究グループが、国際地質科学連合に対し、千葉縣市原市にある地層を地質時代の国際標準模式地（GSSP）として認定申請したのである。

GSSP というのは、地質時代区分を標準化するための境界を表す地層であり、それぞれの境界について世界で1カ所が認定される。今回の申請の対象は、現在が属する第四紀完新世の1つ前、更新世（約258万年前から約1万年前まで）の前期と中期の境界で、これまでに最後に地磁気の逆転が発生した時期である。

研究グループは、数年にわたり、過去70年の研究成果のレビューをはじめ、地磁気逆転年代の高精度での測定や微小な化石の詳細な分析などを行って本地層が世界の気候変動を研究する上で最適であることを示し、認定されるための諸条件を高いレベルでクリアしたという。このGSSPにはイタリアも立候補しているが、もし日本が認められれば約77万年前から約12.6万年前までの地質時代は「チバ

ニアン」と命名される予定である。昨年、第113番元素の名称として「ニホニウム」が決定されたことと並び、わが国科学史上の快挙となることは間違いなく、この分野をリードしてきた日本が認定されることを願う次第である。

ところで地質時代と言えば、生物が爆発的に誕生したカンブリア紀や、その時代の地層から多くの石炭が産出されることにより命名された石炭紀、恐竜が繁栄を極めたジュラ紀や白亜紀がすぐに頭に浮かぶが、近年、「人新世」について専門家の間で検討されているという。

現在は完新世に属すると上述したが、既に完新世は終わっており、今や人類の時代、「人新世」に突入しているとの学説である。もっとも、人類の活動による影響、例えばプラスチック等の廃棄物や核実験による放射性降下物、さらには大量に排出された二酸化炭素が雪氷層に気泡となって堆積し、地質学的な変化をもたらすという意味である。学界では真剣に議論されているとのことだが、正式に決定されるか否かは別として、現在の人類の活動に対する警告として捉えたい。

編集責任者 重政弥寿志

季報 エネルギー総合工学 第40巻第2号

平成29年7月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル（6F）

電話（03）3508-8891

FAX（03）3501-1735

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

（印刷）株式会社 吉田コンピュータサービス

※ 無断転載を禁じます。