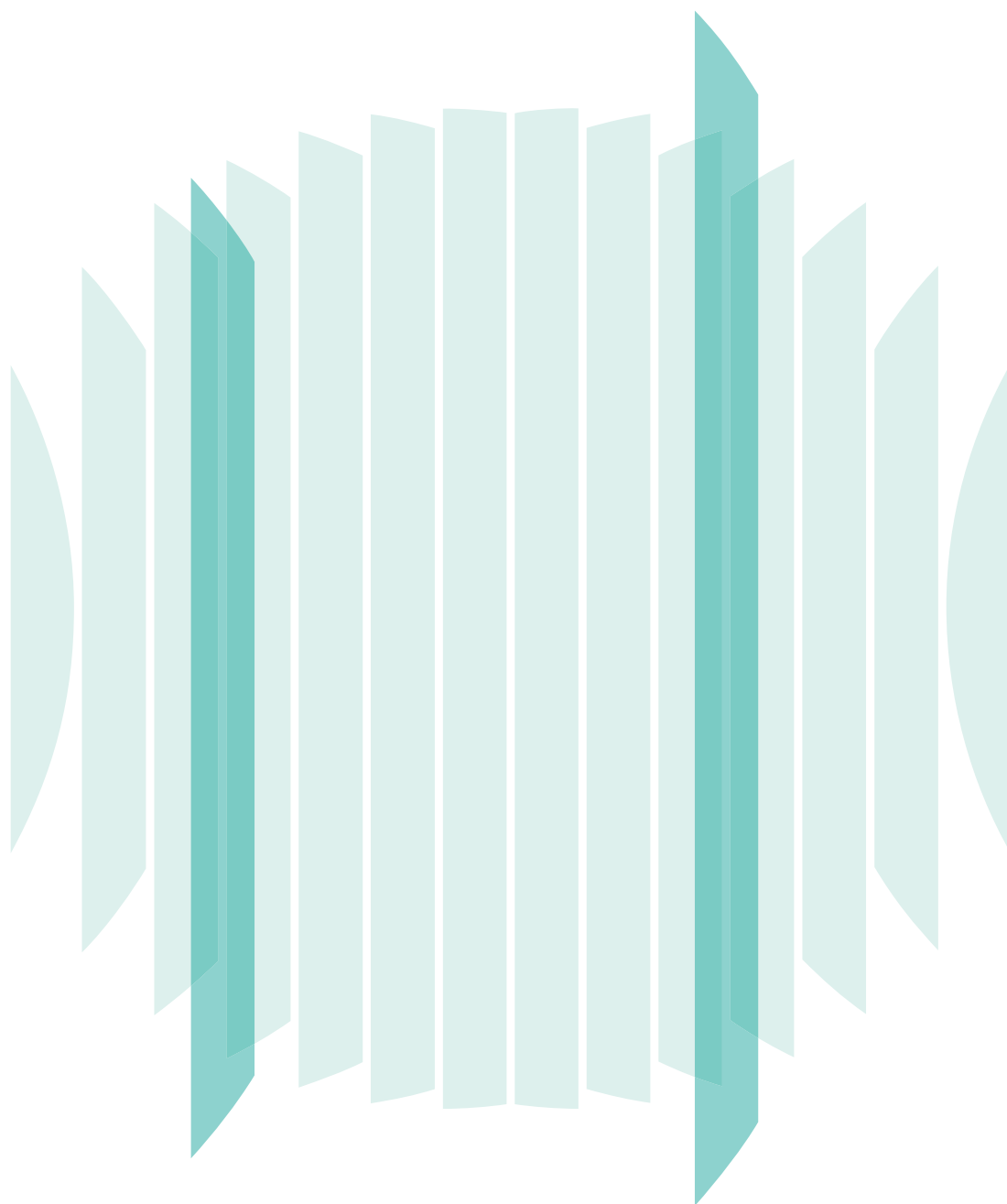


季報 エネルギー総合工学

Vol. 35 No. 2 2012. 7.



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】

今後のエネルギーについて二項対立を超えた議論を 東京大学大学院教授 前日本原子力学会会長	田 中 知	1
---	-------	---

【座談会】

化石エネルギー資源は確保できるか？ 和光大学 経済経営学部 経済学科 教授 (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) 石油開発推進本部 石油調査部 上席研究員 (財)石炭エネルギーセンター (JCOAL) 情報センター長 電源開発(株) (J-POWER) エネルギー業務部長 東京ガス(株) 資源事業本部 原料部長 司会 (財)エネルギー総合工学研究所 研究顧問	岩 間 剛 一 伊 原 賢 原 田 道 昭 吉 田 篤 司 野 畑 邦 夫 足 田 知 士	3
---	--	---

【寄稿】

欧米諸国における電気事業の現状 ～発送電分離, 卸市場活性化, 小売市場自由化を中心に～ 一般社団法人 海外電力調査会 調査部 副主任研究員	大 西 健 一	19
--	---------	----

【寄稿】

持続可能な発展と「エネルギー学」の役割 筑波大学 産学リエゾン共同研究センター長 教授	内 山 洋 司	31
--	---------	----

【寄稿】

福島以後のパラダイムシフト ～村から脱却して世界視野の取組みに～ 法政大学大学院 デザイン工学研究科 客員教授	宮 野 廣	43
---	-------	----

【調査研究報告】

石炭ガス化の現状と化学原料製造 ～中国におけるガス化炉の運転状況を中心に～ プロジェクト試験研究部 主管研究員	坪 井 繁 樹	53
---	---------	----

【事業報告】

平成23年度 事業報告の概要 (財)エネルギー総合工学研究所	58
--------------------------------	----

【研究所のうごき】	60
-----------	----

【編集後記】	62
--------	----

巻頭言

今後のエネルギーについて二項対立を超えた議論を

田中 知 (東京大学大学院教授
前日本原子力学会会長)



6月末のエネルギー・環境会議においてエネルギー・環境に関する選択肢が示された。今後、7月に国民的議論が行われ、8月に「革新的エネルギー・環境戦略」が決定されることがある。2030年のわが国のエネルギーの在り方を巡る正に重要な段階である。論点の一つは、原子力の割合をどのように考えるかであるが、これは二項対立を超えた議論がどこまでできるかにかかっている。

エネルギーセキュリティ確保、炭酸ガス排出抑制などの観点から原子力の長所は認識しつつも、原子力発電所の安全に心配を持つ人は多い。また、高レベル放射性廃棄物処分サイト選定作業が進んでいないことは短所である。「原子力村」がまだ随所に残っていることも指摘されている。また、福島第一原子力発電所サイト外の除染が遅れていることも懸念である。このような状況において、従来型でなく、一般国民が原子力に対して抱いている心配に正面から答え、説明していくようにしないと、原子力の持つ利点が十分に発揮されず、結果としてわが国の将来を見誤る恐れがあるのではないか。

広く将来のエネルギーを考える場合には次のことについて十分な議論が必要ではないか。2030年ごろの世界、特にアジアにおけるわが国の立ち位置の変化。技術立国とそこでの原子力産業の位置づけ。エネルギーセキュリティの観点からのベストミックス。再生可能エネルギー割合の技術的、経済的限界。エネルギー地政学的考慮などである。

原子力については次の質問，疑問に明確に答えられねばならない。原子力の安全はどのように確保されるかについてシステマティックな説明。ここでは予期せぬ事象に対する安全対策，新しい規制庁の役割，専門能力なども含む。原子力安全確保に係る電力間の関係などを含む電気事業者の真摯な取組の姿。高レベル放射性廃棄物処分の具体的な進め方。使用済燃料対策。電気事業者，核燃料サイクル事業者の技術能力。

化石エネルギー資源は確保できるか？

岩 間 剛 一 (和光大学 経済経営学部
経済学科 教授)

伊 原 賢 (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC)
石油開発推進本部 石油調査部 上席研究員

原 田 道 昭 (財)石炭エネルギーセンター (JCOAL)
情報センター長

吉 田 篤 司 (電源開発(株) (J-POWER)
エネルギー業務部長

野 畑 邦 夫 (東京ガス(株)
資源事業本部 原料部長

司会
正 田 知 士 (財)エネルギー総合工学研究所
研究顧問

(本座談会は平成24年5月22日に実施しました。)



はじめに

役割が大きくなった火力発電と化石燃料

正田 昨年3月11日の東京電力福島第一原発事故の結果、この5月5日には日本の全ての原子力発電所が停止しました。さらにこの先の再稼働の進展が容易でないと予想されるなか、化石燃料による火力発電、化石燃料の役

割が極めて大きくなっています。今、政府によるエネルギー基本計画の策定作業が進んでいますが、再生可能エネルギー推進の色々な政策が講じられるとしても、やはり限界があるので、火力発電燃料の中長期にわたる安定的な確保はわが国にとって重要な課題であろうと思われます。

そこで、本日はご関係の方々にお集まりいただき、資源の調達、利用等について、最近脚光を浴びています非在来型資源も含めて、様々な観点からご議論いただきたいと思います。

足田 まず、各出席者の皆様から基本認識をお話いただき、その後で議論をしたいと思っています。

世界の中の化石エネルギー資源

乱高下が激しくなった世界経済と資源価格

岩間 21世紀に入って世界経済の大きなパラダイムシフトが起こり、これまでの先進国主導の経済から、中国、インドを初めとした新興諸国も加えた経済へと変わっています。これに伴い、エネルギー資源を使う人口は先進国の8億人から、新興諸国も含めた30億人に一気に拡大し、資源消費量は飛躍的に大きくなりました。

世界経済の成長率が一段かさ上げされたと同時に、世界経済の乱高下が非常に大きくなってきました。例えば、2008年のリーマンショック、2011年のギリシャに始まる欧州の信用危機で景気の振れ幅は大きくなっています。

また、エネルギー資源がかなりコモディティ化し、一般の商品先物市場で価格が乱高下するようになっています。例えば、ニューヨーク原油先物市場の参加者の9割を投機資金が占め、世界経済の景気変動に伴う原油価格の変動性、ボラティリティーは一段と高まっています。

高まる石炭火力、天然ガス火力への期待

岩間 中国を初めとしたアジア諸国では、石油・天然ガス、石炭の需要は大きく伸びています。それ以上に電力需要が伸びていて、アジア諸国での電力不足が深刻になっています。そこで、石炭火力や天然ガス火力に対する期待が大きくなっています。

震災後高まった化石エネルギー資源の重要性

岩間 少なくとも東日本大震災までは「原子



岩間 剛一

(和光大学 経済経営学部 経済学科)
教授

力カルネッサンス」ということで、世界の中で原子力は急増する電力需要に応えるものとして大きく期待されていました。しかし、震災後、ドイツなどいくつかの国では、原子力の見直しが進められ、石油を初めとした化石エネルギー資源の重要性が増してきています。

そのような中で、石油・天然ガスなどの化石エネルギー資源の安定的な調達を図っていくことは、日本にとって非常に重要であると言えると思います。

原油価格も石炭価格も高い時代

岩間 2008年に資源枯渇論が米国の投資銀行の間でかなり喧伝され、原油価格が2008年7月11日には147ドル27セント／バレルという史上最高値を記録しました。その後、「リーマンショック」の影響で暴落したのですが、世界経済の回復と中東アフリカ諸国における民主化運動が重なって、再び100ドル／バレルを超える水準になりました。2011年は石油産業の150年の歴史にとって、初めて1年を通じて100ドル／バレルを超えた年でした。しかも、今や100ドル／バレルという原油価格に誰も驚かない「高原油価格の時代」になっています。しかし、ここ数年、シェールガスを初めとした非在来型天

石炭についても石油同様に需給逼迫が強まっています。2009年には中国が石炭純輸入国になって豪州炭を買い漁るようになりました。石炭価格は20世紀の5倍ぐらいの水準になっています。

伸びる化石エネルギー資源の可採年数

化石エネルギー資源の可採年数は常に伸びていますが、それは技術進歩と資源の取引価格の上昇が後押ししているからです。

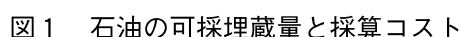
1950年代にキング・ハバートが唱えた「ピークオイル論」では、世界の石油採掘量がピークに達した後、産出可能な原油が減少するということでした。この「ピークオイル論」は米国の48州の陸上油田で当てはまっていました。ですが、世界全体で見ると、2002年に石油価格が20ドル／バレルを超えるようにな

非在来型石油・天然ガスのありか

在来型天然ガスは地中へ穴を開けると噴き出しますが、非在来型天然ガスは、地中に穴を開けても何も起こりません。シェールガスというのは、石油根源岩のナノスケールの隙間にある残留ガスだからです。それを割れ目を作って取り出すのです（図2参照）。

非在来型石油で埋める将来の需給ギャップ

伊原 2009年の世界の原油生産は日量8,500万バレルです。その10年後、今から7年後の2019年には需要が日量9,500万バレルと予想されています。在来型の減退を考えれば、日量1,000万バレルでは足りず、日量4,500万バレルの新規生産が必要だろうと、国際石油工学者協会（SPE）の会長が語っています。それは、



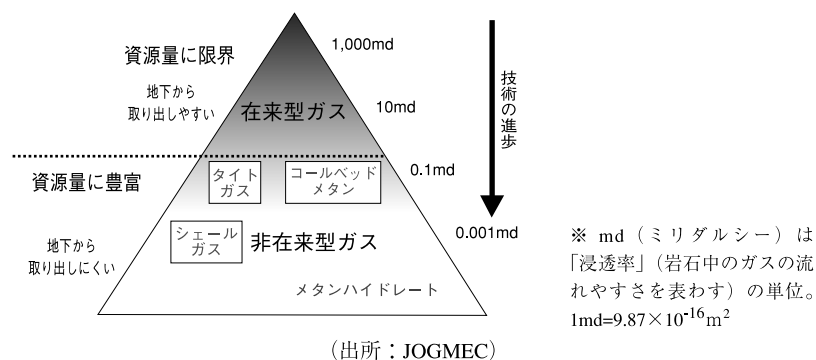


図2 天然ガスの資源量トライアングル

非在来型の資源開発に、技術力、資金、人的資源を投入すれば可能だと私は思います。

非在来型天然ガスによる調達先の多様化

伊原 在来型天然ガスの3分の2を、ロシア、カタール、イランがコントロールしてきたわけですが、シェールガスのような非在来型が北米などで経済合理的に採れるようになってきたので、これら3カ国も油断できなくなりました。日本にとっては、ガス調達先の多様性を確保できるチャンスだと言えます。

「脱原発」で威力を発揮する天然ガス

伊原 天然ガスというのは、ガスタービン・コンバインドサイクルに代表されるようにエネルギー供給側での省エネ効果が大きいエネルギー資源です。原子力の穴を埋めるために、ガスの有効利用は再生可能エネルギーがある程度普及するまで相当威力を発揮するのではないかと考えています。

炭火力の発電量に占める割合は25～30%くらいですが、米国では約45%、豪州では約80%、中国では約80%、インドでは約70%です。

中国もインドも石炭火力が中心で、両国とも自国でも石炭が採れるのですが、ここ数年は輸入国に転じています。今は石炭が安定的に確保できている日本ですが、これからどう考えていったらいいか重要な問題だと思います。

シェールガス革命で増える北米炭の輸入

原田 今、米国では、シェールガスの生産量がかなり増え、新設火力はガス火力がほとんどです。石炭火力の比率はここ1、2年減っています。

オイルショック直後、日本は米国などから石炭を輸入していました。その後、豪州やインドネシアから安く安定的かつ大量に輸入できるようになり、米国炭の輸入はほとんどゼロになっていましたが、シェールガス革命の影響で今、日本だけでなく、韓国、中国、インドも北米炭を輸入しています。

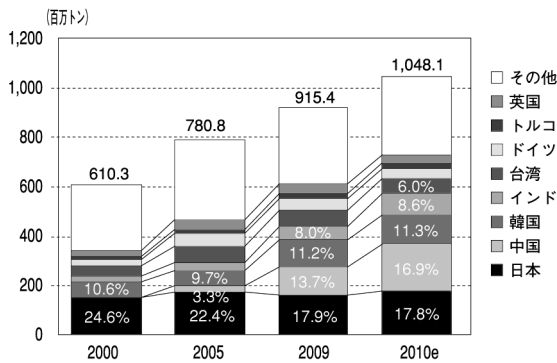
日本、中国、インドの石炭輸入

石炭資源の現状

石炭火力の現状

原田 石炭は埋蔵量が豊富で安いことから、昔から発電に使われてきています。日本では、石

原田 石炭というのは基本的に地産地消のエネルギー資源でした。日本のような資源小国がオイルショック後ひたすら輸入を増やしました。世界の貿易量が約10億トンのところ、2010年は日本だけで約1億8,000万トンを入力しています。昨年2011年は、3.11の津波の影



(出所：IEA Coal Information 2011)

図3 石炭輸入量の国別推移

響でしばらく発電できない石炭火力があって、日本の石炭輸入量は1億7,000万トン台だったのですが、中国はそれを抜いて1億8,000万トン以上を輸入しています。中国は数年前まで石炭を輸出していて、日本も2,000万トンくらい中国から輸入していた時代もありましたが、今や中国も大量に輸入しています(図3参照)。

中国もシェールガスの埋蔵量は相当あると言われています。2020年、2030年にかけて中国がシェールガスを生産していくようになって石炭需給が緩和されて、また日本に輸出してくれるとありがたいとは思いますが、どうなるかまだ予測できない状況です。

石炭が沢山あるインドも2010年に約9,000万トンを入力しています。経済成長に伴い、インドネシア、豪州、南アフリカからどんどん輸入するようになっていて、今後も輸入量が増えていくと思われます。

石炭の安定供給へ向けて

原田 原子力の再稼働の進展が難しい今の日本の状況ですから、シェールガス革命の影響で、天然ガスの輸入は増えていきますが、石炭は微増にとどまるのではないかと予想しています。将来的には、1つの燃料のシェアを抜きん出て大きくすることは避け、これまでのようにバランスよく調達していく形で安定供給を図っていかねばいけないと思います。

日本で使われている石炭は全量輸入ですの



原田 道昭

(財)石炭エネルギーセンター (JCOAL)
情報センター長

で、今までの産炭国から安定的に供給してもらっただけでなく、最近話題になっているモンゴル、アフリカのモザンビークといった国々に新たな石炭資源を見出して日本へ安定供給してもらおうように考えているところです。

日本の石炭調達と石炭火力

震災前の石炭火力の位置づけ

吉田 石炭火力の位置づけ、電力業界と石炭の調達等についてお話ししたいと思います。

まず、福島事故が発生する前の日本における石炭火力の位置づけです。原子力、水力と共に、石炭火力はベース電源であり、埋蔵量が豊富で、色々な所にあって、価格も安い石炭を有効に使う発電として位置づけられています。石炭火力の設備容量合計は、震災前の2010年度末時点で39GWです。設備容量比率は石炭火力16%、原子力20%、LNG火力26%、石油火力19%、水力その他19%となっています。

日本の一般炭の輸入量は2011年に約1億2,000万トンでしたが、その7割くらいの量を

電力業界で使用しています。その輸入先内訳としては、6割前後が豪州からで、3割くらいがインドネシア、残りはロシア等からです。中国からの輸入は近年激減しています。

震災後の石炭火力の位置づけ

吉田 今、エネルギー政策の見直しについて議論がなされている最中で、原子力の位置づけが決まらないうちに、石炭火力の位置づけも決まらない状況にあります。そうした中、例えば、石炭火力最大の課題である二酸化炭素(CO₂)問題との関連から、環境省審議会で議論されている対策の中で、石炭火力の位置づけについて3つのケースが出ています。

1番目は、これまでどおり石炭火力もLNG火力とともに並行して同程度に発電していくという案。2番目は、CO₂排出量が多い石炭火力は抑制していくという案。リプレースにより現状程度の発電量とするということです。3番目が、技術開発・実証や技術継承に必要な程度の更新にとどめていこうという案です。

日本の石炭火力の新増設計画を、電力各社の設備投資計画ベースで紹介しますと、東京電力が建設中の常陸那珂2号と広野6号が2013年に運転開始予定です。私どもJ-POWERでも広島県の竹原火力発電所で老朽化が進んでいるプラントのリプレースを計画しています。

CO₂対策には高効率化で対応

吉田 石炭火力にはこれまで、硫黄酸化物(SO_x)や窒素酸化物(NO_x)の排出問題がありましたが、既に脱硫装置や脱硝装置が開発されて対策がとられてきました。CO₂問題対応の1つとしては、石炭火力の発電効率を高めてきています。現在では超々臨界圧(USC)と呼ばれている形態がとられ、発電効率は43%くらいに上がってきています。

もっと効率を上げていくために、私どもは北九州市若松区の試験プラントEAGLEで、石炭ガス化の技術開発を行ってきました。また、広島県大崎上島町では、EAGLEの経験を活かし、これを大型化した「大崎クールジェンプロジェクト」を中国電力と共同で進めています。これはCO₂回収プラントまで一緒に作るという大型実証プロジェクトです。より発電効率を上げていくことがCO₂対策の1つになると考えています。

石炭火力の技術移転でグローバルにCO₂削減

吉田 日本の石炭火力の発電効率は、中国、インド、米国よりも格段に高く、世界最高水準ですから、日本の高い技術を中国やインドネシア、インド等に持って行って、そういった国々のCO₂排出を下げる、グローバルに減らすことによってCO₂問題に貢献できると考えています(図4参照)。

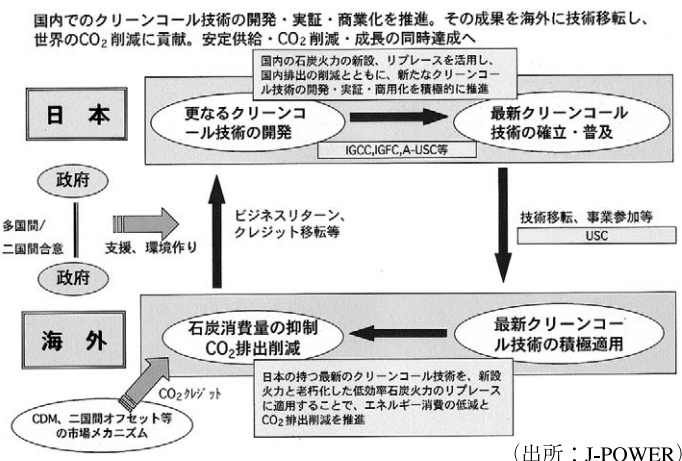


図4 クリーンコール技術で世界のCO₂削減に貢献

昨年、インドネシアの石炭会社アダロ社、伊藤忠商事、私どもで合弁会社を作り、効率の高いUSC石炭火力をインドネシアジャワ島中部で建設することに合意いたしました。そういった形でも、CO₂対策を進めていきたいと考えています。

低灰分炭の安定的調達に向けた上流投資

吉田 電力業界では近年、石炭を燃やすと発生する石炭灰の処理が大きな課題になっています。

石炭灰処理の問題は2つあります。1つは環境規制が厳しいために、埋立てが年々難しくなっていること。もう1つは、かなりの量をセメント会社に引き取ってもらってきた石炭灰ですが、日本経済の低迷でセメント消費量が落ちていて、石炭灰の引取量が伸びないということです。

そのため、日本の電力会社は、良質炭である「低灰分炭」を求める傾向にあります。すると、鉄鋼会社が使っている非微粘炭とかなり接近している部類になってきて、値段も高い、量の確保も難しくなります。

J-POWERはそういった低灰分で高発熱量の石炭をオフテイク契約（長期供給契約）とセットで確保しようということで、豪州で、2008年にナラブライ炭鉱、2012年にモールズ・クリーク炭鉱の高品位炭の権益を一部取得しました。



吉田 篤 司

（電源開発(株)（J-POWER）
エネルギー業務部長）

数字が2011年度の輸入量だと思います。2010年度までは東京電力が一番で、次が東京ガス、それに中部電力です。中部電力は2011年度に大幅に増して2番目になっています（図5参照）。

2009年度の輸入先の国別構成比を見ると、マレーシア（21%）、豪州（19%）、インドネシア（18%）など、環太平洋地域が中心となっています。

特徴的なのは、中近東からの輸入が比較的少なく、11%のカタールを含めても20%程度にとどまっています。東京ガスに限れば3%です。カタールの天然ガス生産量は、日本の年間輸入量に相当する7,700万トンですが、そのうちの一部しか日本に入ってきていません。ヨーロッパ、米国向けが主であるということです。

日本と天然ガス

LNG輸入の状況

野畑 天然ガスについて、需要を中心に説明してまいります。

2010年度の日本のLNG輸入量は約7,000万トンでした。これに1,300万トンくらいを足した

中長期に向けたガス事業者の取組み

野畑 日本のガス事業全体の中長期に向けた取組みについて話します。震災前の資源エネルギー庁の資料では、2030年では原子力の発電量に占める割合をかなり増やして、低炭素化を図るということでしたが、今、2030年での原子力比率については、0%、15%、25%、35%といういくつかのシナリオが検討されて

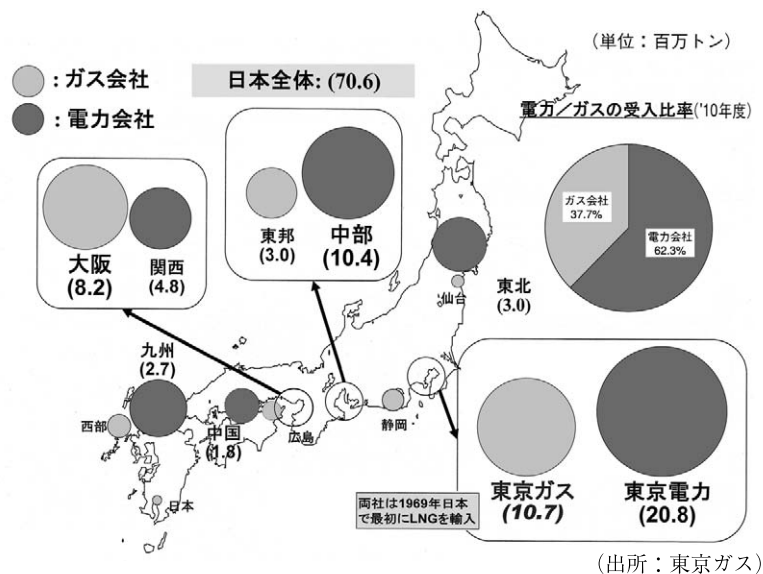


図5 日本の会社別LNG輸入量（2010年度）

います。しかし、どうしても震災直前の26%よりは減らさざるを得ない可能性が高いでしょう。そうすると、当然再生可能エネルギーも増やしていくのですが、天然ガスの役割が相当高まってくるのではないかと思います。

震災以降、天然ガスのコージェネや発電へのニーズが高まってきています。ガス業界としては電力の不足分を、天然ガスコージェネと再生可能エネルギーの組合せ、あるいは集中電源のLNG火力と分散型の天然ガスの組合せ、それに加えて省エネ努力を増やしていきながら埋めていきたいと考えています。

2030年に向けた天然ガスの普及拡大の目標ですが、コージェネは現行500万kW弱を6倍の3,000万kWにしています。震災前の計画でも1,500万kWくらいでしたが、震災後はその倍以上になりました。夏場の電力ピークシフトに効果があるガス空調は、現行1,300万RTを倍くらいの2,600万RTに、家庭用燃料電池も現行2万台を50万台にと、大胆な目標を設定しています。

そんな中、1つの取組みとして、天然ガス・分散型エネルギーを核とした「スマートエネルギーネットワーク」の役割がますます高まっているのではないかと思います。電力だけのグリッドではなく、コージェネを入れ熱のグリッドを構築することによって、より省エネを図っ

ていく。さらに、再生可能エネルギーが入ってきますと、「スマートエネルギー」という閉じられた空間の中のグリッドを安定させることにも有効であり、普及させていくべき、というのがガス業界の全体の流れです。

東京ガスとしては、今、200万kWの電力事業を行っています。この量を2020年では300万～500万kWまで拡大していきます。

コージェネは、150万kWであるのを、2020年に3倍の400万kWにしていこうと考えています。ガスの供給量は、現行150億m³のところ、2020年には220億m³になると想定しています。

それに伴うインフラ整備として、日立港でのLNG基地の建設計画を進めており、2015年度の建設完工を目指しています。それに合わせて、パイプラインの敷設も進めています。

上流事業への投資

野畑 原料価格を下げる取組みとして上流事業への投資を考えています。豪州西部のダーウィンLNG、ブルートLNG、ゴーゴンLNG、東部のクィーンズランドカーティスLNGのプロジェクトに参画しています。ブルートLNGの関西電力への出荷は既に始まっていて、近日中に東京ガスへの出荷も始まります。また、クィーンズ

ランドカーティスLNGはコールベッドメタン(CBM)を原料とする非在来型のLNGです。

それから、カナダのブリティッシュ・コロンビア州でのシェールガス開発にも投資していきます。

石炭火力とCO₂排出問題

疋田 皆様から一渡りご意見を頂戴しました。化石燃料の重要性が確認できたと思いますが、更に幅広く、またリスクについての課題も含めて議論を深めたいと思います。岩間先生からお願いします。

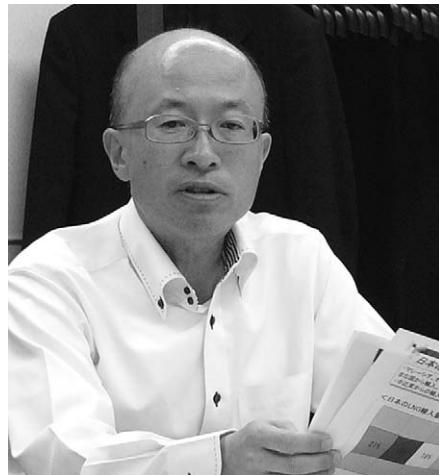
優位性がある日本の石炭火力技術

岩間 アジアの電力需要の伸びに短期的に対応する上で、石炭火力は非常に重要だと思います。石炭は価格が圧倒的に安いのに、中国、インド、インドネシアに豊富にあるからです。

日本は石油精製プラントでは、価格面で韓国の現代重工等にかなり負けていると思いますが、超々臨界圧石炭火力ではまだ日本が優位性を持っていますので、日本のインフラの成長戦略という観点からも石炭火力を重視すべきではないかと思います。

確かに石炭火力にはCO₂排出問題がありますが、私は、第17回気候変動枠組条約締約国会議(COP17)の昨年の議論を見ても、世界経済が危機に陥った場合、温室効果ガスの排出削減に積極的に取り組んでいる国は欧州諸国を除くとあまりないと思います。そうすると、CO₂制約というのは少なくとも2020年くらいまではあまり大きな問題として出てこない。そうになると、資源が遍く存在し、価格が安いことから石炭というのは非常に重要ではないかと私は思います。

原田 中国、インド、インドネシアで安い石炭の使用が増えていくことは確実だと思います。



野 畑 邦 夫

(東京ガス(株)
資源事業本部 原料部長)

す。中国、インド、インドネシアで日本が開発した高効率な石炭火力を使ってもらうようにして、グローバルなCO₂排出削減に貢献していくのが取るべき道だと思います。

最近、日本のメーカーも現地で合弁工場を作っていますので、日本の技術がそういう形で途上国に浸透し、石炭を使ってもCO₂排出削減に進んでいければ、我々にとってはありがたいことです。

原子力に頼らないCO₂排出削減

疋田 日本は2020年までに25%削減するという国際公約を、原子力を大幅に増やすことで達成しようと考えていたわけですが、その前提が崩れてしまった今、非常に困難な状況になると思われます。削減目標が今後どのように扱われていくか問題ですね。

野畑 ガス会社からみても石炭火力はベース電源として非常に重要です。バランスからいってもきちんと伸ばしていかなければなりません。CO₂排出削減では、アジアでこれから増えていく石炭火力で日本の技術を活かせると思います。コストが高い最先端技術でなく、セカンドベスト、サードベストの技術でもいいのではないかと思います。

原田 原子力に頼って減らそうとしていたのがこれまでのCO₂対策の基本計画でしたが、今や頼れない。では、どうやって減らすか。やはり、CO₂のトレーディングで、減らせる余地のある国で減らすことに日本が貢献する形なら、かつて言われた25%削減という数値に近づくことも可能ではないかと思います。

シェールガス革命の石炭への影響

野畑 シェールガスには確かに期待して取り組んでいます。シェールガスというエネルギー資源が新たに出てきたことによって、日本として選択肢が増える、バランスがよくなるのが一番重要だと思いますし、間接的な貢献も期待できます。例えば、米国でも石炭の消費量が減って、減った分が安く日本に入ってくるとかです。

岩間 そういう玉突き的な影響は大きいと思います。米国の場合、シェールガス革命が起きてエネルギーの需給緩和が進み、石炭火力から天然ガス火力に転換されることによって石炭が余る。余った分がアジアに入ってきて、石炭価格が下がりました。例えば、発電用の一般炭価格は去年130ドル／トンでしたが、今年は15ドル安の115ドル／トンになっています。そういうふうに、米国におけるシェールガス革命による需給緩和が日本にもいい影響を与えているというのは確かにあると思いますね。

天然ガス価格をめぐる

割高な天然ガス？

岩間 電力会社は発電コストの安い原子力や石炭火力という多様な電源を持っていて、天然ガスはその中の1つと考えられていた。ところが、原子力がかなり難しくなってくると、

電力会社も石炭、天然ガスを見直さなければならぬでしょうね。

それから、7月から再生可能エネルギーの固定価格買取制度が始まります。再生可能エネルギーを普及促進させる上では意味があるとは思いますが、買取価格がかなり高く設定されているので、電気料金上乘せの問題が出てくると思います。

さっき伊原さんがおっしゃったように、再生可能エネルギーは出力変動が大きいですから、それを調整するための天然ガス火力は非常に重要だと思います。そこで、日本の場合、LNGを安定的かつより安く調達することが重要ではないかと思います。

野畑 震災前まで、電力会社はLNGに対する要求がガス会社とは若干違いました。電力会社にとっては、価格競争力はもちろん大事でしたが、時としては価格よりも量を確実に確保しかつフレキシビリティがあることが優先されました。

震災後、「日本だけが高いLNGを買っている」とかなり言われるようになってからは、何とか安く調達しようという動きが強まってきました。産業の競争力、国力にも関係してくることなので、この動きが非常に強くなってきたと感じているところです。

そんな中、ガス会社としては、色々なLNGプロジェクトを競わせて安いものを買っていくというのが一番の戦略です。東京ガスは今、年間約1,100万トンと11のプロジェクトから買っています。2015～2017年での購入が決まっているだけでもさらに3つのプロジェクトが加わります。そこにシェールガスが入ってくると結構面白いことになってくるのではないかと考えています。

「原子力ゼロ」なら価格上昇の懸念

伊原 天然ガスを安く調達できない要因の1つは、そもそもスポット市場自体で量が少な

いところに、欲しい、欲しいという姿勢だからではないかという気がします。

野畑 実際は冷静に対応しているので、震災後の1年間も、欲しい欲しいということではなかったのですが、今度、エネルギーの全体の計画が出て、中長期的に必要な天然ガスの量がはっきりしてくると、交渉が非常に難しくなってくるかも知れません。

疋田 今までベース電源であった原子力がどうなるか分からない状態になってしまうと、石炭を買うにしても、天然ガスを買うにしても、価格交渉力が弱くなることが懸念されます。

野畑 これから先、極端な例ですが、原子力が0%になると本当にとんでもない状況になっていくと思います。

伊原 業界の人は皆とんでもないことになるということを知っているのですが、一般の人は「エネルギーと電力は何とかなるだろう」と思っているようです。例えば、再生可能エネルギーの固定価格買取制度で発電量に占める割合を20%にすると、電気代はどれくらい高くなるのだろうと思ってしまいます。そうすると、日本には、高い電気代を払えるお金持ちだけが残って普通の人は残れなくなるのではないか。工場も日本で物を作れなくなって、失業者が溢れるという状態になるのではないか。その可能性もあるのです。だから、1つの原発事故で全部の原発を止めるというのはあまりにも乱暴な気がします。

個人的には原子力がもっと安全性を高めて、納得できる説明をして、再稼働してもらわないと、多分、化石燃料だけでは発電はもたないと思います。

岩間 伊原さんがおっしゃるように、「原子力ゼロ」は暴論だと思います。できるだけ安全性を考えながら稼働させていくことが重要だ



伊原 賢

(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC)
石油開発推進本部 石油調査部 上席研究員

と思います。

エネルギー問題というのは非常に専門的で深い問題なので、一般の国民に理解してもらうことは大変だと思います。地域住民の過半数の同意を得ながら原子力を再稼働させていく、新設をしていくというのは、かなり難しいと思います。そういうことを念頭に置きながら、現実的な化石エネルギーの利用を考えていく必要があると思います。

野畑 量は何とかなるのですが、安く持つてこられるか心配です。家庭用は節約・節電で対応していくのかも知れませんが、産業用はもうもたないですね。

伊原 産業用がもたないと、そこで働いている人たちの雇用が確保できませんね。

疋田 企業の海外移転がますます促進されるということになりますね。

パイプラインによる生ガス輸入の可能性

岩間 天然ガスを安く調達する上での日本の弱みは、パイプラインによる生ガス輸入という代替手段を持っていないことだと思います。

生ガスとLNGとを天秤にかけた交渉ができないのです。

その点、ドイツなどは、国内に石炭資源がある程度あること、ロシアのガスプロム社から生ガスを輸入するパイプラインを持っていることを天秤にかけて、例えばカタールやアルジェリアからLNGを安く輸入できるという強みをもっていると思います。

日本の場合、国内の石炭は生産コストが高いのでほとんど使えない。生ガスを輸入するパイプラインも持っていない。そういう弱みがあるので、野畑さんもおっしゃったように、できるだけ調達先を増やして行って、互いに競争させることも重要だと思います。

野畑 韓国も日本と同じで資源小国なので、韓国は北朝鮮経由でロシアから天然ガスを輸入することを真剣に検討しています。噂では、中国までつなぐことによって、中国からもシェールガスが出てきたら中国からもガスを輸入することを考えています。韓国はパイプライン戦略というよりも国家戦略として考えています。

伊原 日本人は「天然ガス＝LNG」とっていますが、それは世界から見ればLNGはマイナーで1割、地産地消の生ガスが9割です。パイプラインで運ぶ生ガスのほうが、液化コスト、船代のかかるLNGよりも安くなるのは当然です。シェールガス革命の影響で、ロシアはヨーロッパに売るよりも東アジアに売った方が儲かる状況です。

「パイプラインは敷設コストが高いだろう」という議論ばかりでなくて、パイプラインを引いて途中で分岐すれば分散型発電にも使えますので、ロシアに近い稚内だとか、「引けるところはパイプラインを引きましょう」という議論を真剣にやらないといけないと思います。

足田 LNGの場合、液化コストがかかる、あるいは再ガス化コストがかかる、パイプライ

ンだとそれが要りませんね。しかし、一方でパイプラインの敷設コストや調達先の固定化のリスクがありますね。

野畑 非常に政治的な点が沢山あるのですが、ロシアはプーチン大統領になってから東アジアに流したいという意向が強まってきているようです。

「国産エネルギーの夢」：メタンハイドレート

野畑 JOGMECの伊原さんがいらしているのでお伺いしますが、南海沖でも色々やられているメタンハイドレードが出てくると、面白いことになるのではないですか。

伊原 メタンハイドレードには弱点が2つあるのです。1つ目は海であること。陸地まで運ばなければいけないからです。だから、海上での天然ガス田の大前提はかなりの量があるということなのです。豪州の場合がそれです。

2つ目は、メタンハイドレードの生産方法が確立されていないことです。ただ、10年後くらいにはできているかも知れません。東海地方の電力会社、ガス会社は、メタンハイドレートに相当期待しているので、発電に使われるのは間違いないと思います。

メタンハイドレードを回収できるとなると、日本が世界のフロンランナーになることは間違いありません。こういった技術をもっと世界に展開しますよと言うだけで、ひょっとすると、日本も供給側に入っていけるかも知れません。

伊原 ただし、初めて開発する資源は認知されるまで非常に時間がかかります。今でこそ誰でも知っているシェールガスですが、私が3年前に初めて扱った時、「何だそれは？」という反応がほとんどでした。

メタンハイドレードも、納得できるように

言葉で説明して、データで補強しないといけません。

足田 夢に見た「国産エネルギー」ということです。ですから国も開発を推進している。時間がかかるかも知れませんが、いつかは実現することを期待したいですね。

価格リスクと調達リスク

足田 先ほどからお伺いしていると、化石エネルギー資源というのは、量的には心配ないということですが、価格、供給安定性について、あまり心配しなくても大丈夫だという理解でよろしいのでしょうか。

石油・天然ガスの供給リスク

伊原 供給のリスクを思うと、例えば、「国産は大丈夫」という固定観念がありますが、実際に途絶しているのは準国産の原子力なわけです。石油も天然ガスも価格上昇はあっても供給が途絶えたことはないのです。

私はアブダビで働いた経験があるのですが、アブダビ政府は天然ガスを全部ただ同然で得ることができるので、売りたいくてもないのです。だから、日本には売りたいくてもないのか考えていないのです。だから、天然ガスの供給リスクはほとんどないと思います。

天然ガスの価格決定メカニズムへの対応

野畑 天然ガスの価格についてはリスクがあります。歴史的に天然ガスの購入は、原油価格との連動（オイルリンク）が長期契約の主流でしたから、原油価格が上がった時にそれにつられて、天然ガス価格が上がるところがあるからです。これから、発電がガス利用のメインになってくると、原油に代わる新たな

指標がどう出てくるかということがポイントになると思います。そこに米国ヘンリーハブ指標のシェールガスのLNGが入ってくる意味は大きいと思います。

足田 LNGの価格決定メカニズムがオイルリンクであるために、価格がなかなか安くならないと、よく指摘されますね。

野畑 LNGは液化のところで大規模な投資が必要です。20年間の長期契約をベースにやるとなると、キャッシュフローを安定させ、かつファイナンスをつけるにはある程度の指標が必要で、それが石油だったということだと思います。ただ、売り手になるべく高く売ろうとするのは当たり前です。

そこで、東京ガスでは新しく開発を立ち上げるところに協力すること、「ファウンデーションカスタマー」になることで、競合力のある条件を引き出そうと考えています。

オイルリンクではない契約を結ぶとすると、当社としてリスクを取ることになります。例えば、ブレントリンクでも、石炭とかバスケットにしても同じです。それをどうバランスして考えていくかということになると思います。

いずれにしろ、そういう取組みによって色々と競合させることができると思います。

産ガス国の資源ナショナリズム

野畑 天然ガスの量について心配なのは、生産国で資源ナショナリズムがどう働くかということです。例えば、ポテンシャルがとても高いインドネシアで、資源ナショナリズムの問題がうまく解決できれば、供給源としてかなり期待できます。

岩間 シェールガスや石炭が米国という経済合理的に動く国に大量にあるということは大事なことだと思うのです。経済合理的に行動する限り、売らなければ損なわけですから、供給を止

めてまで相手を恫喝することはあり得ないわけです。ところが、経済合理的に動かない国もあって、そういう国から資源を偏って調達することになってしまうと、リスクが高まってくると思います。実際、中南米のいくつかの国では、生産量を落としてまで、経済成長率を落としてまでも資源の国有化をするというポピュリズム的な動きがあるわけです。

安い資源ということでは、例えば中東の国々はかなり生産コストが安いですね。未開発の油田が沢山あって、そういうところを米国の石油企業に開放していないわけです。もし、開放するようになっていけば、原油の生産コストもかなり下がってくるでしょうし、資源の調達先も増えてくると思います。今のところは開放していないわけですから、調達リスクはあると言えます。

新技術の導入と多様化で調達リスクに対応

吉田 インドネシアでは、石炭の国内使用が徐々に伸びてきて、今後も石炭火力に相当依存していくものと思われます。そのため、彼らも生産者に対して、国内に優先的に出荷する義務を課したり、価格統制を強めたりする動きがあります。

電力炭としてかなりの比重を求めている豪州でも、環境政策としてCO₂関係の税金や資源税が新たに導入されることになっています。豪州とインドネシアに偏っている日本の発電用石炭の輸入先ですから、もっと多様化を進めたいと思っています。コロンビアや米国が供給元として出てくるのであれば、チャレンジしていきたいと思っています。

CO₂対策の1つとして石炭ガス化の研究が続けられてきているわけですが、よりカロリーが低い石炭が使える石炭ガス化複合発電(IGCC)などが導入されれば、石炭灰の量も減るというメリットがあります。

新しい技術の導入と調達先の多様化がリスクへの対応策になるのではないかと考えています。



疋田 知 士

(財)エネルギー総合工学研究所
研究顧問

リスクをとる上流投資で調達リスクに対応

伊原 米国でも内陸のウェストバージニア州や豪州の内陸の方ではシェールガスが発見されていますが開発資金がない、パイプラインがないとかいう状況です。そういうところは値段が安いのです。そういう所に投資して先に唾をつけたほうがいいと思います。

今カナダでは、ブリティッシュ・コロンビア州が非常にホットですが、隣のアルバータ州がアプローチしてきた時にどう対応するかで、将来の道が拓けるかも知れません。

野畑 過去を振り返ると、価格はその時の需給バランス、経済情勢で決まっています。常に高いものを買ってきたわけではなく、安いものも結構買っています。これからどうなるか。個人的には楽観視しています。巨大な天然ガス開発プロジェクトが、東アフリカやアラスカ州のブルドーベイでも始まりますから、2020年になると、かなりの量が市場に出きます。そういうタイミングで買いに行くと非常にいい買い物ができると思います。

伊原 そうですね。モザンビーク、タンザニアとかで、権益の一部でも取ると、相当大き

い。「そんなに売ってくれないのなら、アフリカから在来型も持ってきますから」という話をすれば、交渉力も高まりますね。

岩間 学者として、エネルギー業界にあえて苦言を呈したいと思います。日本というのは資源小国ですが、人口1億3,000万人という大きな国内市場があって、国内市場で十分に食べていけたので、リスクテイクをする企業風土があまりなかったと思います。

その点、米国のエネルギー産業は国内に豊富なフィールドを持っているので、常にリスクテイクをして大きな利益をあげるビジネスモデルを確立したのだと思います。日本はこれから市場が縮小していく。しかも、原子力が非常に難しい状況ですから、日本のエネルギー業界もある程度のリスクテイクをしなければいけないと思います。例えば、カナダは人口が少ないですが資源が豊富にある。しかも、隣国の米国はシェールガス革命でエネルギーが余っていて、カナダは輸出先に困っている。カナダのような国に積極的に取り組むことによって、カナダにとっても外貨獲得になるし、日本にとってもエネルギーの調達先が増えてきます。そういうリスクテイクをする方法を模索することも必要ではないかと思っています。

原田 今、カナダの話が出ましたが、それは既に始まっています。石炭の権益も取りに行っていますし、韓国、日本のカナダからの石炭輸入も増えています。モザンビークもそうかも知れませんが、ある程度リスクテイクして投資して、市場ができてやっと商売になっていくということは、化石エネルギーが必然的に負っている宿命だと思います。

石炭が沢山あると言っても安定的ではない面が出てきています。例えば、中国は2000年頃には13億トンしか生産していませんでしたが、今や30億トンを超えています。10年間でこれだけ増えてしまいました。さらに、中国は豪州や南

アフリカで炭鉱を買い始めています。

岩間先生が先ほどおっしゃったように、米国やカナダのように経済合理性で動くところに投資をする、あるいは依存することがこれから重要ではないかと思います。

米国は石炭埋蔵量が一番多い国なので、もっと米国炭に依存してもいいのではないかと思いますし、カナダの州の首相とかが来日して資源を売り込んでいるなら、それに対応してもいいのではないかと思います。米国、カナダは日本から遠い国ですが、国としては安定しています。最近、「石炭メジャー」ができつつあるようですから、そういうところが牛耳らないようにしていくのが重要だと思うのです。

エネルギーの重要性を知る良い機会

岩間 日本のエネルギーの景色と世界のエネルギーの景色はかなり違っていると思います。日本では基本的に最大電力こそ大きくなってきていますが、年間の電力販売量はほとんど変わらないのです。燃料油の販売量も、LPガスの販売量も全部減少していて、日本の市場は縮小しているのです。実は、今後、エネルギー調達を拡大する必要はあまりないのです。

多分、今の日本の所得水準であれば、価格は高くなっても資源を買うことはできます。問題は、高い価格で買ってしまえば、日本の産業の国際競争力がなくなって、結局、日本の雇用を守れないということです。ですから、それとの兼ね合いで、化石エネルギー資源をどう安定的かつリーズナブルな価格で調達するかが大事になってきます。

私は最近、電気料金のことで週刊誌から取材を受けたのですが、女性誌までが電気料金を気にする、日本の一般の人たちが電気料金を気にするというのは、電気事業が始まって初めてのことだと思います。そういう意味では、今回の電力不足問題は、一般の人たちが

エネルギーの重要性を知る良い機会だったと思います。

伊原 私としては、「脱原発」、再生可能エネルギーについては言い尽くされた感があるのに、化石エネルギーの話が少ない気がします。「原発で非常に困っている」とあまり言わないで、原発の再稼働や再生可能エネルギーの普及に加え、化石燃料についても真剣に考える必要があるということをこの座談会のメッセージとして発信することが大事なと思います。

まとめ

足田 冒頭に申し上げたように、この先の原子力発電の稼働がどうなっていくのか不透明な中で、化石エネルギー資源の重要性、および調達リスク、さらにその対策等についていろいろとご議論頂き、大変ありがとうございました。

世界の経済およびエネルギー需給の動向、アジア諸国における急激な経済成長およびエネルギー需要の急増、米国で始まったシェールガス革命や米国外の諸地域の燃料事情への影響について議論がありました。資源価格の上昇や技術開発によって量的にはエネルギー資源は確保できるであろうこと、ただし価格、資源ナショナリズム等の政治的リスクが伴うことも指摘されました。調達リスク低減のための上流進出努力の継続、一定のリスクテイクの必要性、天然ガスのパイプライン輸入、また長期的にはメタンハイドレートの可能性についても言及がありました。わが国の先進的な高効率石炭火力技術の海外移転の重要性およびその実施計画も紹介されました。原子力の穴を埋める上での役割を期待される天然ガスについては、集中電源やコージェネレーションに関する計画およびそのためのインフラ整備が実施されつつあることも紹介されました。

出席者の皆様が一致して、原子力、天然ガス、石炭、再生可能エネルギーのバランスをとることの重要性を指摘されたと思います。

原子力発電の稼働を維持することは、化石燃料の価格交渉力を保持する観点からも重要である、と指摘されたことが印象的でした。本日はお忙しい中を大変ありがとうございました。

欧米諸国における電気事業の現状 ～発送電分離、卸市場活性化、小売市場自由化を中心に～

大西 健一 (一般社団法人 海外電力調査会
調査部 副主任研究員)



1. はじめに

わが国では2011年3月の東日本大震災を契機として、大規模電源の停止による供給力の不足に対して、どのように効率的に安定供給を確保していくかについての議論が行われている。2011年12月に発表された「電力システム改革に関するタスクフォース」の論点整理では、「低廉で安定的な電力供給」を実現する「より競争的で開かれた電力市場」を構築することを基本理念とし、改革に早急に着手すべきではないかとの提言が行われた。この論点整理を受けて、「電力システム改革専門委員会」が設置され、発送電分離等の様々なテーマが議論されている。この「電力システム改革専門委員会」では、度々海外事例も引き合いに出されていることから、本稿では欧米諸国における発送電分離の現状、卸市場の活性化策の導入状況、小売市場自由化の現状等について紹介していきたい。

2. 欧米諸国における発送電分離の現状

(1) 欧米諸国における発送電分離の背景

欧米諸国における電気事業体制は、各地域で事情が異なるものの、電気事業は「自然独占性」を有する産業と位置付けられ、一般的に発送配電一貫体制の垂直統合型事業者が管轄地域内の電力供給を実施してきた。発電部門における「規模の経済性」に関しては、ベース需要に対して原子力発電設備や石炭火力発電設備といっ

た大規模電源を建設・運用していかなければならないことから、単独の大規模事業者がこれらの発電設備を一元的に保有することが効率的であると考えられていた。また、送電部門や配電部門における「規模の経済性」に関しては、複数の事業者による重複投資を回避すること等を理由に地域毎に送電事業者、配電事業者が独占的に事業を行うことが正当化された。そして、発送配電部門毎に各事業者が運営するよりも発送配電事業を単独の事業者が運営するほうが費用優位性を有しているとの考えから、発送配電一貫体制の垂直統合型事業者が電力供給を行うことが効率的であるとされた。このように電気事業は伝統的に「規模の経済性」、「範囲の経済性」を有する産業として見なされてきた歴史がある。

しかしながら、このような伝統的な電気事業の考え方は1970年代以降変化が見られ始めた。欧米諸国では1970年代の石油危機を受けて世界的なインフレーションの進行、景気悪化に伴う失業率の上昇等で経済が停滞期に移行していた。このような景気低迷の中で、米国でレーガン大統領のレーガノミクス、英国ではサッチャー首相のサッチャリズムに代表される公益事業の民営化や規制緩和といった「小さな政府」を志向する経済政策が展開された。また、1990年代以降において中小規模電源（コージェネ設備等）において大規模電源の経済性に対抗し得る技術的進歩があったことから発電部門における「規模の経済性」が薄れてしまった可能性が指摘された。このような公益事業の規制緩和への

流れ、中小規模電源の経済性の向上等を背景にして、発電・小売供給部門を自由化することで電気事業者の経営効率化・活性化、電気料金の低廉化、サービスの多様化等への期待が高まり、発電・小売供給部門への競争原理の導入が欧米諸国で検討されるに至ったのである。ただし、送配電部門といったネットワーク部門については、従来通り「自然独占性」を有することになり、独占体制が維持される根拠となっている。

では、なぜ欧米諸国において発送電分離が議論されることになったのか。欧米諸国では、発電・小売供給部門で自由化が行われた結果、既存事業者がこれまで独占していた市場に新規事業者が新たに参入することが可能となった。自由化された電力市場では既存事業者と新規事業者はイコールフットイングな競争条件の下で電気事業を行えるように規制機関は市場監視を行うことになる。発電事業、小売供給事業を行う場合、既存事業者、新規事業者を問わず全ての電気事業者は送電線を利用して発電所から需要家に電力を送ることが求められる。その際、既存事業者が送電部門を有しているならば、既存事業者の送電部門は新規事業者に対して差別的な取り扱いをするのではないかと疑念が生じてしまう。それ故、一般的には規制機関が「行為規制」に基づき送電部門の中立性・公平性を担保することは最低限必要とされる。

「行為規制」に関しては、垂直統合型事業者内における発電・小売供給部門と送電部門との情報遮断、人事交流の制限といった「機能分離」が広く適用されている。米国においては連邦エネルギー規制委員会（FERC）が1996年4月に制定した「オーダー888」によって原則的に送電部門を有する全ての電気事業者は「機能分離」を実施することが義務付けられている。一方、欧州では電気事業の規制緩和は欧州連合（EU）27カ国の電力市場を単

一市場として統合することを目的としていることから、発電・小売供給部門における自由化は1カ国にとどまらずEU域内全域まで対象とされる。このため、EUでは各国の電気事業制度を調和化するために競争障壁と見なされる各国固有の制度に対して改善を図るEU大の規則・指令が策定されてきた。欧州における発送電分離はこのような背景から議論されてきた経緯があり、2009年に制定された「第三次EU電力自由化指令」では発電・小売供給事業者が送電部門の資本所有を制限することを求める「所有権分離」までがオプションの1つとして盛り込まれるに至った。このように、欧州では「構造規制」の導入によって電力市場の競争条件を整備していることが特徴的である。

（2）欧米諸国における発送電分離の類型

米国では、FERCが策定した1996年4月の「オーダー888」において、電気事業者はIPP等に対して送電サービスを非差別的に提供することや送電部門の「機能分離」*を行うことが義務付けられた（表1参照）。同時に、複数の制御地域で系統運用を行う「独立系統運用者（ISO）」を設立することも奨励されている。このように米国では、「オーダー888」の制定を契機に卸電力市場の自由化が促進され、さらには州レベルでの小売電力市場の自由化、既存事業者による発電設備の売却、ISOの設立といった電力市場の構造変化が生じた。その一方で、卸電力取引の増加による送電線混雑の多発、それに伴う卸電力価格の高騰といった様々な問題が発生した。このため、地域大での発送電システムの調整や送電設備の計画・運用等の重要性が指摘され、地域大で一元的に系統運用・計画を行う地域送電機関（RTO）の設立を奨励する「オーダー2000」が1999年12月に制定された。なお、ISOやRTOの設立は義務付けではなく、米国の北西部、南

* わが国では、「機能分離」を垂直統合型事業者から系統運用部門を独立させるといった構造規制の意味で用いられているが、米国では機能分離を共通の送電料金表の提示、送配電部門との情報遮断、人事交流制限といった行為規制の意味で用いられている。

表1 欧米諸国における発送電分離の類型

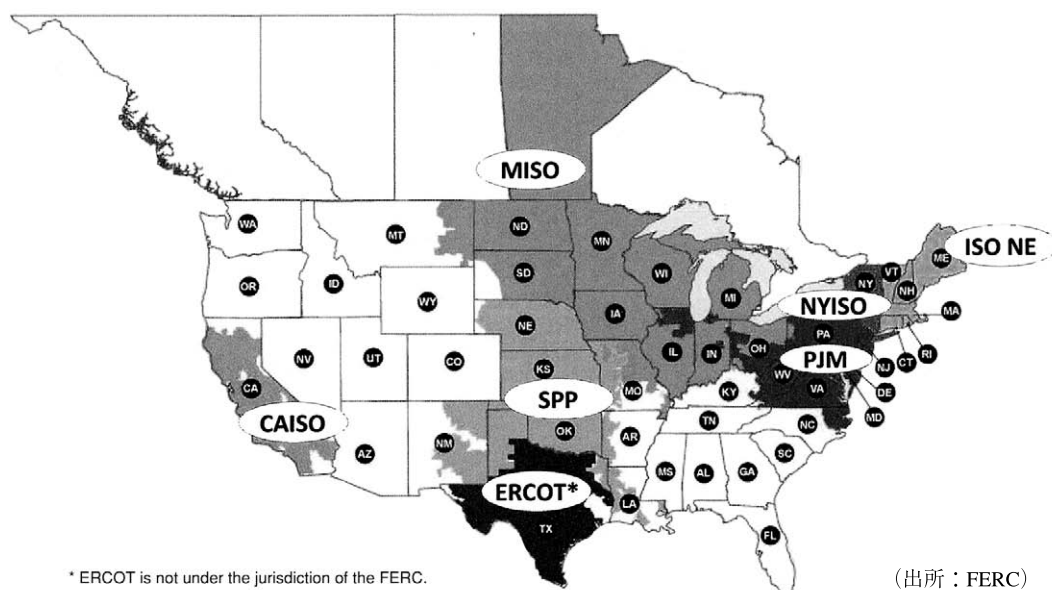
	類型	概要
行為規制	(米国) 機能分離 (Functional Unbundling)	共通の送電料金の提示、送配電部門との情報遮断、人事交流制限
	(欧州) 会計分離 (Accounting Unbundling)	発送配電部門毎に財務諸表を区分
	(欧州) 経営分離 (Management Unbundling)	送配電部門を運営面において垂直統合型事業者から独立（例：送配電部門の責任者が垂直統合型事業者の取締役会に参加できない）、送配電部門との情報遮断
構造規制	(欧州) 法的分離 (Legal Unbundling)	垂直統合型事業者から送配電部門を別会社化（垂直統合型事業者の子会社として存続可能）
	(欧州) 独立送電系統運用者 (ITO)	垂直統合型事業者から送配電部門を別会社化（垂直統合型事業者の子会社として存続可能、垂直統合型事業者の発電・小売供給子会社との資本関係を断絶）
	(米国, 欧州) 独立系統運用者／地域送電機関 (ISO/RTO)	垂直統合型事業者から系統運用部門を分離、垂直統合型事業者が資産を所有
	(欧州) 所有権分離 (Ownership Unbundling)	垂直統合型事業者による送配電部門の資本所有を制限

東部等では従来の垂直統合型事業者の下で電力供給が行われている（図1参照）。

さらに、FERCは全米大で卸電力市場を標準化することで、電力取引を活性化させることを等

を目的として「標準市場設計（SMD）規則案」を2002年7月に提示した。しかし、米国北西部や南東部の地域事情の軽視、州政府の規制権限の侵害等の反発が広がり、「SMD規則案」は2005年7月に廃案とされた。その後はFERCによる電力市場改革は「構造規制」ではなく「行為規制」に重点が置かれることになり、新たにRTOを設立するといった動きはない。

一方、欧州では、物、人、サービス、資本の自由移動を促進して共通市場を創設するという壮大な政策目標が掲げられており、電力部門も例外とされていない。このため、EUの執行機関である欧州委員会は、EU加盟国の電気事業制度を調和化し、EU大で電力取引を障害なく非差別的に実施する方向に沿って1990年代初めから議論を開始していた。非差別的な条件の下で誰もが送電系統を利用することを可能とするためには、発送電一貫体制を維持している垂直統合型電気事業者の送電部門が独立性を確保することが重要である。自然独占性を有している



※ISO/RTOが設立されていない地域は一般的に垂直統合型事業者による電力供給体制が維持されている。

図1 北米におけるISO/RTOの設立状況（2011年）

送電部門を競争にさらされている発電部門や小売供給部門から区分することは、非差別性を保証するために必要とされる。この観点から、1996年12月に制定された「EU電力自由化指令」では、EU加盟国において送電部門の「経営分離」、「会計分離」等を導入することが義務付けられた。「経営分離」とは、送電部門の責任者が垂直統合型事業者の取締役会に参加することを禁止するといった送電部門の運営面において独立性を高める措置である。また、「会計分離」は送電系統利用料金の透明性及び非差別性を高めるために発送配電部門毎に財務諸表を区分することである。

このように、「EU電力自由化指令」では「経営分離」や「会計分離」といった最低限の発送電分離の基準が規定されたものの、大部分のEU加盟国では既に「法的分離」（送電部門を別会社化）等の発送電分離が導入されていた。欧州委員会が2000年に実施した利害関係者からの聞き取り調査では、多くの市場参加者や規制機関からEU域内における最低限の基準を「法的分離」に引き上げるべきとの意見が多く示されていた。欧州委員会もこのような世論を後ろ盾に「法的分離」を義務付ける指令案を策定し、2003年6月に制定された「改正EU電力自由化指令」で送電部門の「法

的分離」が規定されるに至った。

そして、EU加盟国で「法的分離」の導入が完了して間もなく、欧州委員会は2005年から電力部門における市場統合が機能しているかどうかを調査し始め、2007年初めに結果を発表した。なお、この調査では信頼できる統計データがほとんどないとの理由で利害関係者に対して実施したアンケートを考慮して評価を行っていることが特徴である。アンケートの回答では、送電部門の「法的分離」だけでは送電事業者が同じグループ企業である発電・小売供給子会社に対して優遇的な措置を講じている恐れがある、また垂直統合型事業者の送電子会社は全ての系統利用者の利益に鑑みて送電系統を増強するインセンティブを持ち得ない等の意見が多く提示されたと欧州委員会は説明している。

このような状況証拠等に基づき欧州委員会は2007年9月に垂直統合型事業者（発電・小売供給部門）による送電部門の資本所有を制限する「所有権分離」、また代替案として垂直統合型事業者から系統運用部門のみを独立させ、送電資産は引き続き垂直統合型事業者が所有するISOを導入することを義務付ける指令案を提示した。この欧州委員会の指令案に対して、フランス、ドイツ等のEU8カ国は一斉

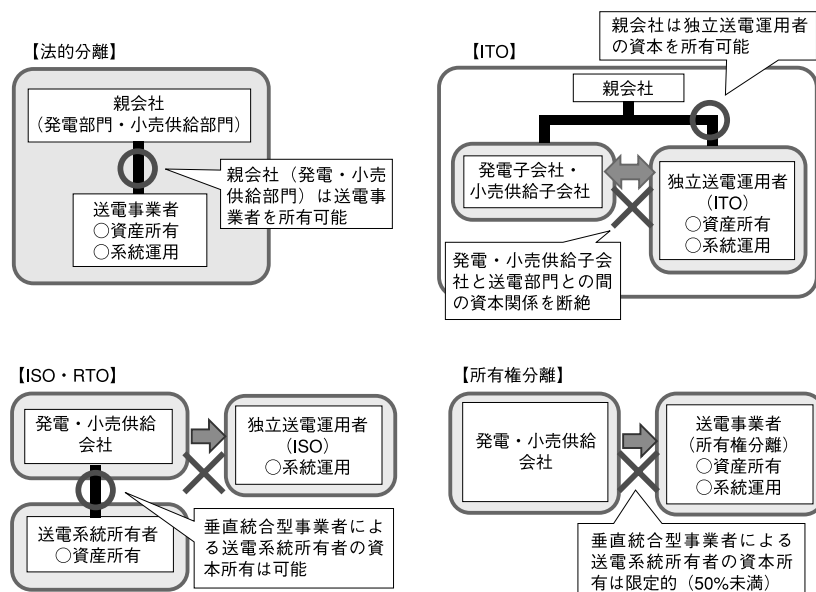


図2 欧州における発送電分離のイメージ

に反論を展開した。その結果、2008年6月のエネルギー閣僚理事会における審議で「所有権分離」、「ISO」、そしてフランス、ドイツ等が提示した妥協案「独立送電運用者（ITO）」（垂直統合型事業者の子会社として存続可能、垂直統合型事業者の発電・小売供給子会社との資本関係を断絶）のいずれかを選択することができるとの規定が盛り込む方向で調整が行われた（表1、図2参照）。そして、2009年7月に制定された「第三次EU電力自由化指令」で、EU加盟国は上記の発送電分離の方式を選択できるとの規定に落ち着き、欧州では発送電分離の議論はひとまず収束するに至った。2010年現在で英国、スペイン、イタリア、北欧諸国等の主要国で「所有権分離」が導入されている一方、フランスは「所有権分離」を選択していない状況である（図3参照）。

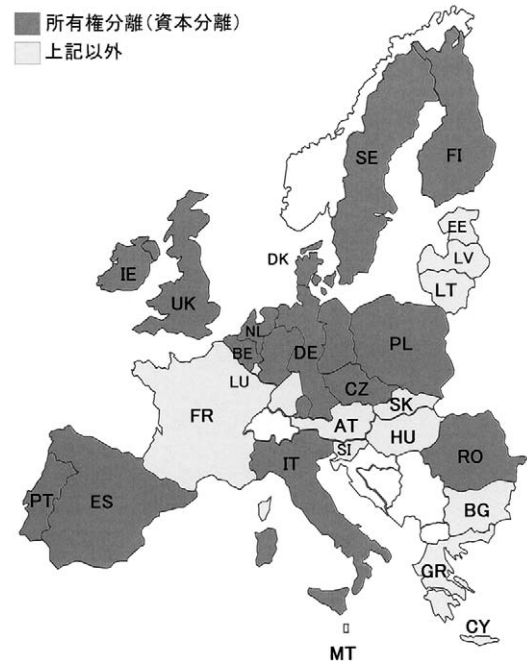


図3 欧州における「所有権分離」の導入状況（2011年）

（3）発送電分離のメリット・デメリット

欧州で発送電分離が行われ規制から構造規制と強化されてきた背景には、EU域内における電力市場統合を背景に言葉・文化が異なる中で送電部門の中立性・透明性を高めるために、欧州委員会はあえて厳格な発送電分離を導入せざるを得なかったことが挙げられる。理念先行で発送電分離を実施してきたため、発送電分離に関する費用便益分析を行っていない。定性的な評価としては、Mulder, et al. (2005), Baarsma, et al. (2007), Pollitt (2007) 等で整理されており、例えば、Mulder, et al. (2005) はネットワーク部門の分離のメリットとして、① ネットワーク設備投資の効率化（垂直統合型事業者の利害にかかわらず送配電投資を行うことが可能）、② 規制の効率化（規制機関による監視が簡素化・効率化）、③ 競争の促進（垂直統合型事業者の内部補助を防止）を挙げている。ただし、メリット①については、逆に送電投資が減退する恐れもあるとの指摘もされている。送電事業者は発電事業者からの系統接続申請に基づき送電設備の建設を行うことになるが、送電事業者が送電設備の建設

を行っている間に発電事業者がプロジェクトを中止したり、発電事業者そのものが倒産したりすれば、これまでの送電設備の投資が無駄になる可能性もある。このような事態を恐れて送電事業者は送電設備への投資に慎重になることも考えられる。従って、設備投資にどのような影響が出るか判断は難しい側面もある。一方、デメリットとして、① 移行費用の発生（情報通信システムの構築費用等）、② 「範囲の経済性」の喪失（発電部門と送配電部門との協調的な事業運営が不可能となること）、③ 発電設備の投資インセンティブ減退（発電部門の資本コスト上昇）を列挙している。

（4）発送電分離に関する課題

欧米諸国ではより厳格な発送電分離が導入される場合もあるが、わが国において発送電分離を進めていく場合には欧米諸国とは前提条件が異なることを留意しておく必要がある。例えば、わが国のエネルギー自給率は原子力を国産エネルギーと見なさない場合、わずか4%であり、エネルギー資源の大部分を国外に依存している状況である。欧州では、エネ

ルギー自給率が約760%のノルウェー，約130%のデンマーク，約80%のオランダ，約70%の英国等は「所有権分離」を含めた発送電分離を実施しているが，エネルギー自給率が約30%のドイツ，約9%のフランス等は政府の方針として「所有権分離」の導入に強く反対している。この背景には，エネルギー自給率が高い国は，化石燃料を国内で安定的に調達することが可能であることから，燃料調達の際に電気事業者がバーゲニング・パワーを保持することを目的に電気事業者の規模や垂直統合性を高める必要性は比較的少ない。しかし，エネルギー自給率が低い国は安定した化石燃料の確保が求められる他，原子力発電のような準国産エネルギーの開発が必要となるため，電気事業者の大規模化・垂直統合化は有効な体制となる。実際，2007年当時にフランスの産業担当大臣であったフランソワ・ロース氏も「発電用燃料を輸入に依存しているのであれば，電気事業者の規模を拡大することで産油・産ガス国に対して燃料調達量・価格に関する交渉力を行使することができる」として発送電分離に強く反対した。一方，わが国では，エネルギー資源が乏しい状況の下で再生可能エネルギーの導入を将来的に増加させていくことが検討されている。出力変動が激しい風力発電や太陽光発電のバックアップ電源として火力発電の重要性はますます高まっていくことが予想され，電気事業

者による発電用燃料の安定的な確保が求められることは想像に難くない。

また，わが国では東日本大震災の発生以降，原子力発電設備の停止が続いており，東日本地域だけではなく国全体で供給力不足が懸念されている状況である。現在，垂直統合型事業者である一般電気事業者が地域全体の需給バランスを維持するために必要な供給力（及び需給調整電源）を確保している（図4参照）。しかしながら，発送電分離を進め，送電部門を別法人化する場合，欧州諸国の事例を見ると垂直統合型事業者に代わって送電事業者が地域全体の需給バランスを保証することになる。一方，送電部門を持たない発電・小売供給事業者は自社需要に見合う供給力のみを確保すれば良く，地域全体の需給バランスを考慮する必要はない。地域全体で供給力不足の傾向になれば，送電事業者は高い調達コストを払ってでも発電事業者等から需給調整電力を確保しなければならない。わが国では将来的に出力変動が激しい太陽光発電等の再生可能エネルギー発電設備を導入していく方向性を打ち出しているが，これらの出力変動をサポートする需給調整電源の確保は今後ますます困難となる恐れもある。送電部門が別法人化された状況で需給調整電源を適切に確保することができるか検討することも重要な論点の1つである。

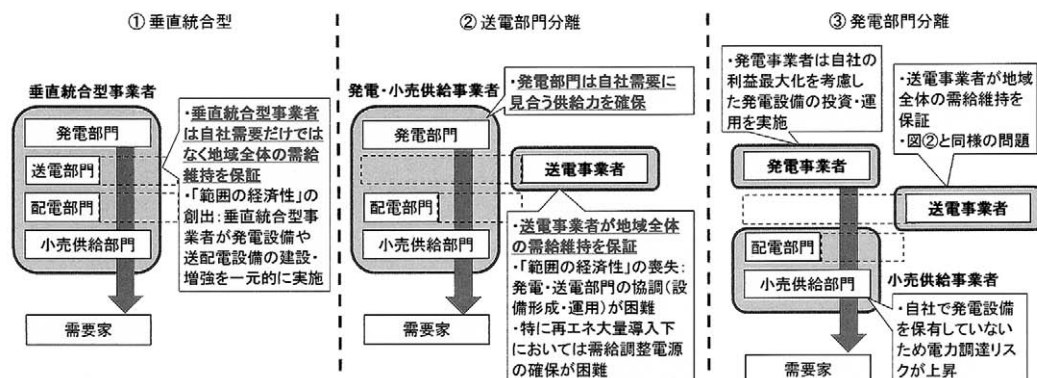
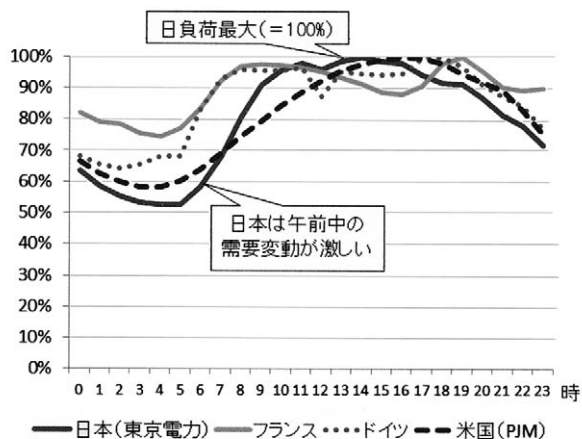


図4 電気事業体制と需給維持責任主体



注) 日本(東京電力)及び米国(PJM)は夏ピークであるため2010年7月第3水曜日(21日)、フランス及びドイツは冬ピークであるため2011年1月第3水曜日(19日)を利用

図5 主要国における日負荷変動

さらに、わが国は欧米諸国と比較すると、業務用消費電力量の比率が高く、平日午前から正午にかけての負荷変動幅が大きい(図5参照)。このような前提条件の下で需給バランスを維持し、電力潮流を管理していくためには発電部門と送電部門が緊密に連携して需給運用を行うことが必要である。発送電分離が進められる中で需給運用に影響を与える恐れはないのか精査する必要がある。

最後に、発送電分離の課題として送電部門(または系統運用部門)を垂直統合型事業者から分離することで、事務所の移転費用、システムの変更費用、契約更新に伴う諸費用といった追加費用が発生することが指摘されている。米国では、系統運用部門を独立化させるISO方式を導入する地域もあるが、中にはフロリダ州のようにISO設立に伴う費用便益分析を実施し、費用が便益を大幅に上回るとの結果が示されたことから、ISO設立を見送ったケースも存在する。

3. 欧米諸国における卸市場活性化策の導入状況

(1) VPP利用権制度の導入背景

欧米諸国では、自由化された電力市場にお

いて卸市場活性化を進める、または市場支配力の行使を防止する観点から既存電気事業者の市場シェアを低減させるために、市場支配力を有する電気事業者を分割する、または一部の発電設備を物理的に売却させるといった抜本的な改革を行う国もあった。例えば、英国では1990年に行われた国有発送電事業者(CEGB)の民営化に伴い、CEGBは発電事業者3社、送電事業者1社に分割された。また、イタリアでは2003年以降、単独事業者が国内発電電力量の50%以上のシェアを有することが禁止されるとの法律が制定されたことを受けて、当時国有電気事業者であったEnel社は1,500万kWの発電設備を売却、結果としてEnel社の国内発電設備容量は2000年で5,661万kWから2003年で4,185万kWに減少した(発電電力量のシェアは2000年70%⇒2003年49%)。このように、電気事業者が国営・国有の場合は私有財産権の保障がそれほど問題とならないことから抜本的な改革を行うことも可能であるが、①設備所有権の移転を伴うことから再び現状回帰させることが不可能であること、②多大な取引コスト・移転コストを伴うこと、③設備所有権の移転は政治的・法的な問題に発展する可能性があること等の理由で必ずしも容易に実施できるわけではない。このような課題を考えると、事業分割や設備売却を行うことよりも、設備所有権の移転を対象としない仮想発電設備(VPP)利用権の競売制度を導入するほうが実施容易性の観点から評価できる側面もある。VPP利用権の競売制度とは、「電気事業者が第三者に電力を売却する権利を競売で第三者に割り当てる制度」である。VPP利用権の競売制度は2000年代初頭からフランス、アイルランド、ベルギー、オランダ、デンマーク、ドイツ、イタリア、スペイン、米国テキサス州等で幅広く実施された事例がある。

(2) VPP利用権制度の概要

具体的なVPP利用権競売制度に基づく電力

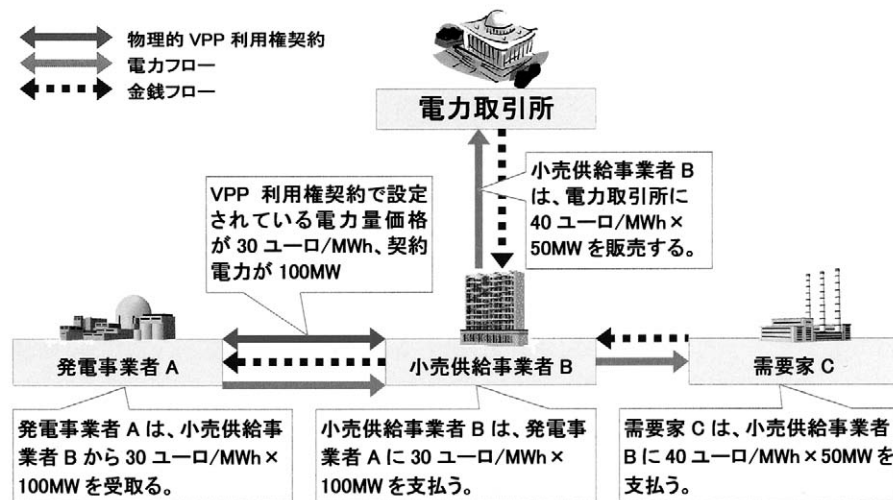


図6 VPP利用権に基づく電力調達の流れ

調達の流れを概観すると（図6参照）、小売供給事業者Bは発電事業者AからVPP利用権（ユーロ/MW/月）を競売で落札し、発電事業者AとVPP利用権契約を締結しておくことが前提である。VPP利用権の競売は数カ月おきに実施される場合もあれば年1回の場合もある。そしてVPP利用権を締結した小売供給事業者Bは発電事業者Aから事前に設定されたVPP電力量価格（ユーロ/MWh）でVPP発電電力を購入することになる。このVPP電力量価格は一般的には発電事業者の発電原価のうち変動費用部分が対象となり、VPP利用権の競売毎に燃料費変動等が考慮され事前に設定されることが一般的である。小売供給事業者Bは購入したVPP発電電力を需要家Cへ販売、または電力取引所に再販することが可能である。よく誤解されることであるが、小売供給事業者は発電事業者から割安な価格で電力調達することが可能となるわけではなく、小売供給事業者が発電事業者に支払う総費用は、小売供給事業者が電力取引所からの電力調達費用とほぼ同じ水準となる。VPP利用権の競売制度には小売供給事業者だけではなく、金融機関等のトレーダーも参加することができるので、発電事業者から調達したVPP発電電力を電力取引所に売却して鞘取りで利益を得ようとする。このようなトレーダーは電力取引所の価格推

移を考慮してVPP利用権の競売で応札するため、電力取引所の価格が高くなると想定される場合にはVPP利用権の応札価格も高めに設定する。結果として、事前に設定されたVPP電力量価格と競売で決定されるVPP利用権価格を含めた仕上がりの価格水準は電力取引所の価格水準とほぼ連動する傾向が発生するのである。

（3）VPP利用権制度の課題（主にフランスの事例）

フランスでは2000年代初頭から2011年までフランス電力会社（EDF）がVPP利用権競売制度を導入した実績がある（拠出規模は540万kW相当）。エネルギー規制委員会（CRE）が発表した資料によると、2002年から2006年までの新規参入者の電力調達の方法は、① 自社発電設備からの発電電力、② EDFのVPP発電電力、③ 相対取引に基づく他社からの調達電力、電力取引所からの調達電力に分類されている。VPP発電電力の利用比率は概ね40%を超えている状況が続いており、一方で新規参入者の自社発電設備からの発電電力の利用比率は約30%程度で推移している状況であった（図7参照）。この結果、新規参入者の販売電力量は年々増加しているものの、自社発電設備による電力調達は微増にとどまっている。

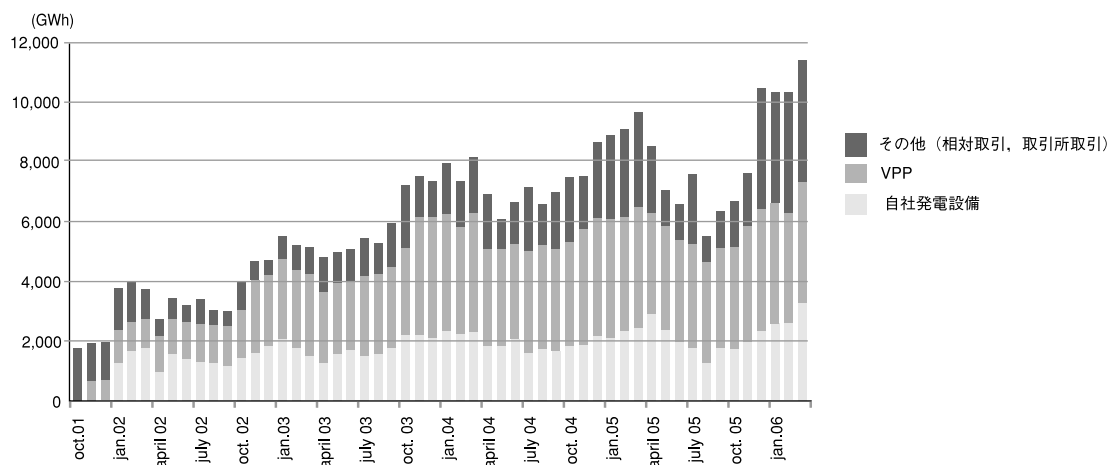


図7 フランスにおける新規参入者の電力調達の方法

新規参入者はVPP制度が利用できれば、あえてリスクを取って自社発電設備を建設・所有しようとするインセンティブを持つことはなく、VPP制度が存続する限り同様の傾向が続く恐れもある。

また、VPP利用権の競売制度で利用されるVPP発電電力は一般的に対象事業者の発電容量の数%程度であり、対象事業者が電力供給している需要家に影響がない範囲で運用されている状況である。対象事業者の発電容量から自社需要家への供給容量を差し引いた余剰の発電容量以上にVPP電力を抛出しなければならぬとすると、対象事業者はその不足分を穴埋めするために電力取引所等から電力をかき集めることになる。そうなると、電力取引所の価格水準を短期的には引き上げる結果となりかねない。従って、VPP発電電力の抛出は対象事業者の余剰発電容量を考慮して実施されることが望ましい。実際に、欧州におけるVPP利用権競売制度の実施事業者の発電容量（国内分）に占めるVPP抛出電力の割合は、フランスEDFで6%，ドイツRWE社で1%，ドイツE.ON社で1%，イタリアEnel社で2.5%，スペインEndesa社で4%，スペインIberdrola社で4%程度ある。

（４）マーケット・メーカーの導入状況

欧州の電力取引所では市場流動性を高める

ためにマーケット・メーカー制度を導入している場合もある。マーケット・メーカー制度とは、「マーケット・メーカーがザラバ取引において一定のスプレッド（値幅）の範囲内で、売り・買い注文を一定量、同時に提示することによって市場参加者の取引に応じる制度」であり、先物市場を中心に導入されている他、現物市場では北欧のNord Pool Spotの時間前市場（ELBAS）、ベルギーのBELPEXの時間前市場・前日市場等で導入されている（図8参照）。一般的にマーケット・メーカーが提示できるスプレッド（値幅）は前日市場の価格水準に基づき変動するように設計されており、例えば、北欧の電力取引所Nord Pool Spotの時間前市場（ELBAS）では、① 前日市場価格20～40ユーロ/MWh：スプレッド5ユーロ/MWh，② 前日市場価格40～60ユーロ/MWh：スプレッド10ユーロ/MWh，③ 前日市場価格60～80ユーロ/MWh：スプレッド15ユーロ/MWh，④ 前日市場価格が20ユーロ/MWh以下および80ユーロ/MWh以上の場合、注文提示義務は無しと区分されている。このNord Pool SpotのELBASでは現在、3社がマーケット・メーカーとして市場に売り・買い注文を一定量提示している。Fortum Power and Heat社はフィンランド区域で2万kW/3万kW×2注文、Vattenfall社は13時～17時の時間帯でスウェーデン区域①で4万kW×2注文、スウェーデン区域②で1万

	売気配株数 (MW)	配株値 (€/MWh)	買気配株数 (MW)
		成行	—
		40	
		39	
		38	
		37	
		36	
MM事業者A①	40	35	
MM事業者B①	20	34	
MM事業者A②	40	33	
MM事業者B②	30	32	
		31	10
		30	40
		29	20
		28	40
		27	30
		26	
		25	

図8 マーケットメーカー（MM事業者）の売り・買い注文の提示イメージ

kW×2注文，E.ON Energy Trading社はスウェーデン区域②・区域③で1万kW×2注文を提示する契約となっている。これらの売り・買い注文の規模を見ると，前述したVPP利用権競売制度と比較して（フランスEDFはVPP電力として540万kWを拠出），卸市場活性化の効果は一定の効果しか得られないと思われる。

4. 小売市場自由化の現状

（1）米国における小売市場の自由化状況と小売電気料金の水準

米国では，1990年代以降に小売電気料金が比較的割高な州において小売電力市場への競争原理の導入に関する取り組みが行われてきた。北東部のロードアイランド州で1997年7月に産業用需要家に限定した自由化が米国で最初に開始された。現在は15州及びワシントン特別区で自由化が導入されている状況であり（自由化州の販売電力量は米国全体の約40%程度），米国の大半は伝統的な規制下で垂直統合型事業者等が電力供給を行っている。米国で小売市場の自由化が限定的である理由としては，2000年から2001年にかけてはカリフォルニア電力危機が発生し，輪番停電が実施される事態に陥ったことが影響している。このカリフォルニア電力危機が与えた衝撃は大きく，カリフォルニア電力危機以降に小売

電力市場の自由化を志向している州はない。そして，バージニア州，モンタナ州，ネバダ州，アリゾナ州，ニューメキシコ州，アーカンソー州では自由化の便益が限定的であるとして自由化を中断・廃止している。

米国の家庭用小売電気料金水準については，自由化を実施したカリフォルニア州や北東部諸州等は他州と比較して小売電気料金水準が一樣に高いことが特徴であり（図9参照），このため州政府が小売電力市場の自由化を導入することで小売電気料金の低減を図ろうとした背景が考えられる。小売電力市場の自由化を導入していない州は一般的に小売電気料金が比較的安価な水準であり，その要因としては電源構成において水力発電の比率が高いことや産炭地が近接していること等が挙げられる。発電原価が安価である水力資源は米国北西部に豊富に存在しており，特にアイダホ州（水力発電比率：80%），ワシントン州（同70%），オレゴン州（同58%）等では古くからロッキー山脈の水力資源開発が行われてきた。また，米国では東部のアパラチア炭田や中西部のイリノイ炭田，西部のパウダーリバー炭田等の主要産炭地が内陸部に存在している。特にウェストバージニア州（石炭発電比率：96%），ケンタッキー州（同93%）等のアパラチア炭田周辺州では発電電力量に占める石炭火力の比率が90%を超えており，これ

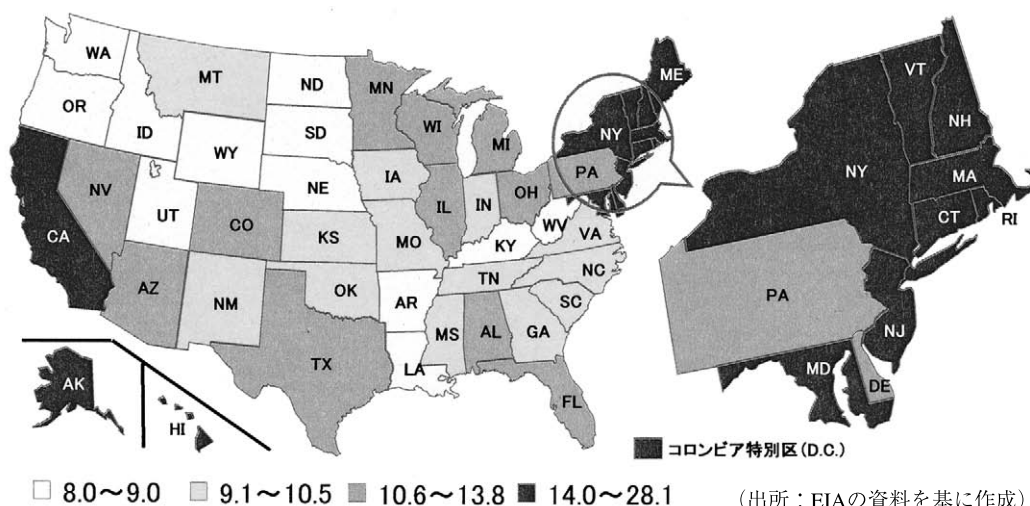


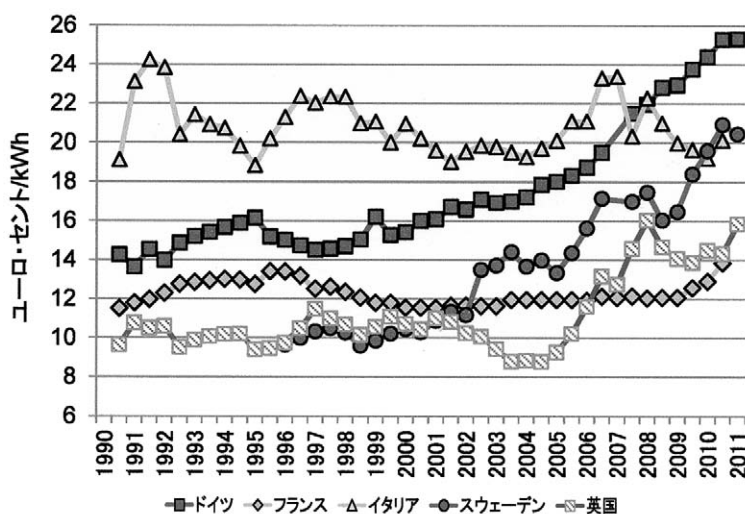
図9 米国各州における家庭用電気料金の水準（税抜，名目）（2010年，セント/kWh）

らの州の小売電気料金は周辺州と比較しても低い水準である。米国は地域によって電源構成が異なるため大きな内々価格差が存在している。

（2）欧州における小売市場の自由化状況と小売電気料金の水準

欧州では、1996年12月の「EU電力自由化指令」に基づきEU加盟国毎に小売電力市場の自由化が開始された。全面自由化はドイツで1998年4月に、英国で1999年4月に開始されている。フランスは「改正EU電力自由化指令」で規定された2007年7月に全面自由化を導入

した。小売電気料金の動向については、自由化が開始されつつあった2000年から現在の2010年までの家庭用需要家向けの小売電気料金は多くの国で上昇傾向となっている（図10参照）。フランスの小売電気料金が低廉かつ安定的に推移している背景には、①燃料調達コストに左右されない原子力比率が約80%と高い水準である、②全面自由化が導入されたものの未だに政府による規制料金の下で小売電気料金が発電原価等に基づき決定されているといった事情がある。イタリアは火力比率が約80%と高水準であり、さらに化石燃料の大部分を国外輸入に依存していることから燃料



（出所：Eurostatの資料を基に作成）

図10 欧州主要国における家庭用電気料金の推移（税抜，名目）（2009年，セント/kWh）

調達コストが割高となっている。1990年では石油火力比率が47%、ガス火力比率が18%という電源構成であったが、老朽化した石油火力発電設備を最新鋭のガス・コンバインドサイクル発電設備に置き換えた結果、2010年では石油火力比率が7%まで低減し、ガス火力比率が52%まで上昇している。火力発電所における熱効率の改善等で発電コストの増加に歯止めをかけているものの、小売電気料金は他国と比較して高い水準にある。スウェーデンは原子力・水力比率が約90%程度であり、1990年代では小売電気料金は比較的安価な水準であったが、2000年からエネルギー税（原子力発電電力量に対して課税）が導入されたことや卸電力取引所の価格水準が上昇傾向にあることから小売電気料金は2000年代を通じて増加した。英国はイタリアと同様に火力比率が約80%と高い水準にあるが、英国内に北海油田・ガス田を保有していることから燃料調達コストは比較的にかからない。ただし、2000年代後半以降は化石燃料価格の高騰と共に小売電気料金も上昇している。ドイツでは小売電気料金の水準は上昇する傾向となっている。小売電気料金の上昇の背景としては、ドイツの電源構成が火力電源に約6割程度依存していることもあり、燃料価格に影響されやすいことが挙げられる。また、再生可能エネルギー発電電力の固定価格買取（FIT）制度の費用負担が家庭用電気料金に転嫁されており、再生可能エネルギー発電設備の導入と比例して小売電気料金に与える影響も深刻となっている。

5. おわりに

本稿では、欧米諸国において発送電分離の現状、卸市場の活性化策の導入状況、小売市場自由化の現状等について事例を交えながら紹介した。発送電分離を進めていくかどうかは、国・地域によってメリット・デメリットも異なることもあり、慎重な判断が求められる。

最近では、発送電分離の導入がいかにもすべての課題を解決してくれるかのような主張が展開される場合もあるが、発送電分離を進めることで発生するであろう課題等を十分に議論しておくことが重要である。卸市場活性化については、欧米諸国では時限的な措置としてVPP利用権の競売制度を導入する国もあるが、新規参入者が自社発電設備を建設するインセンティブを保持させるような取り組みも求められることになろう。そして、小売市場自由化については、自由化が導入されても燃料費の高騰や再生可能エネルギー追加負担等の影響で、需要家は低廉な電力を享受しているとは言えない状況である。皮肉にも欧米共に自由化を実施していない州や規制料金制度を継続しているフランス等で電気料金高騰の影響が比較的及んでいない状況となっている。小売市場の自由化を実施すれば電気料金が低減するという単純な状況となっていないのが現実である。

参考文献

- (1) Baarsma, B., de Nooij, M., Koster, W. and van der Weijden, C (2007), 'Divide and rule. The economic and legal implications of the proposed ownership unbundling'.
- (2) Mulder, M., Shestalova, V. and Lijesen, M (2005), 'Vertical separation of the energy-distribution industry: an assessment of several options for unbundling'.
- (3) Pollitt, M (2007), 'The arguments for and against ownership unbundling of energy transmission networks'

[寄稿]

持続可能な発展と「エネルギー学」の役割

内山 洋司

(筑波大学 産学リエゾン共同
研究センター長 教授)



1. はじめに

18世紀にヨーロッパで生まれた産業革命による工業化の流れは20世紀に入ってアメリカで花開いた。科学技術の進歩は経済を発展させ、これまでの人類史上では考えられない物質的に豊かで便利な社会をもたらしている。機械や電気などの技術進歩によって肉体労働は機械に置き換えられ、情報技術の発展によって精神労働までもがコンピュータによって処理されるようになった。科学技術の発展による工業化の流れは留まることがない。ナノテク、IT、バイオなど科学技術の高度化が進んでおり、グローバル化と情報化は人やモノが移動する量と速度を増加しているだけでなく、世界の国々に技術や情報を普及する速度を速めている。

工業化が著しく進展したのは、第二次世界大戦以降の僅か半世紀程度の期間である。この間、世界の人口は2.5倍、経済成長は6.5倍、そしてエネルギー消費は5倍にまで増加している。そして、その増加基調は今も衰えることがない。新興国や開発途上国では工業化による経済発展と欧米型のライフスタイルを取り入れつつある。21世紀に入ってから物質的な豊かさを求める経済発展の流れは、先進国から新興国や開発途上国へ急速に広がり始めている。

工業化は基本的には物質の大量消費によって成り立っている。エネルギーなどの鉱物資源や木材・食糧などの生物資源の消費量は毎年、増

加し続け、食糧の大量生産によって世界人口が増大している。世界人口は現在70億人であるが、国連の人口予測によると2050年には90億人に達すると推計されている。人口の増大と世界の経済発展は、資源の大量消費を招き、天然資源の世界需要を急増することになる。石油・天然ガスなど化石燃料や希土類・モリブデン・ニッケル・銅などの鉱物資源、魚・えび・貝などの水産資源、飲料水・農業用水・工業用水などの水資源、それに熱帯林などの森林資源の需要が増大し続けていくと、将来、世界は資源の供給不足に陥る恐れがある。

一方で、資源の大量消費は大気、水質、土壌の汚染問題を発生させている。その汚染は工場や都市で、また人々の生活空間に広がっている。それだけでなく、有害物質の越境移動、酸性雨、熱帯林の喪失、砂漠化、海洋汚染、オゾン層破壊、さらに地球温暖化など環境問題のグローバル化が進んでいる。地球規模の環境問題は病気に譬えると生活習慣病のようなものである。飽食や運動不足が原因で若い間は病気の症状は見られないが、年をとると突然、体の色々なところに症状が現れ、それから対策を立てても手遅れとなる。

限りある資源をできるだけ子孫に残し、環境保全を図っていく「持続可能な発展」が望まれている。1986年に開かれた国連の「環境と開発に関する世界委員会」にて、「持続可能な発展に向けた行動指針」が採択された。それは、“永続的で安定した生活物資の供給を通じて、世界の貧しい人々を絶対的貧困から救

うこと”，“基本的な資源の減耗と環境の悪化を最小にすること”，“広義な視点から，経済成長のみでなく社会的・文化的な発展を含む”，“あらゆるレベルでの意思決定において経済学と生態学の統一を要求する”を基本とした内容のものである。国連会議で，ノルウェーの首相であったブラントランド女史（Bruntland, Gro Harlem）は，次に示す4つの側面から持続可能性を訴えている。

- ① 持続可能性は、永続的で安定した生活物資の供給を通じて、世界の貧しい人々を絶対的貧困から救うことである。
- ② それは、基本的な資源の減耗と環境の悪化を最小にする。
- ③ また広義な視点から、経済成長のみでなく社会的・文化的な発展を含む。
- ④ あらゆるレベルでの意思決定において経済学と生態学の統一を要求する。

「持続可能な発展」については多くの人や機関によって議論されており，明確な定義はないが，それらに共通している点は，以下の「環境性」，「未来性」，「公平性」の3つである。

- 「環境性」：自然環境，人工的環境および文化的環境の価値を強調する。
- 「未来性」：短・中期的未来と長期的未来の双方に配慮する。
- 「公平性」：社会における最も恵まれない人々のニーズを満たすこと（世代内公平性）と共に，将来の世代を公平に扱うこと（世代間公平性）を強調する。

持続可能な社会を構築する活動は，世界各国で広まりつつある。それは，国だけでなく企業の活動にも影響を与えている。企業は，利潤追求という基本目標を，さまざまな社会制約と環境・資源制約の中で達成していくことを余儀なくされている（図1参照）。企業の社会的責任（CSR：Corporate Social Responsibility）への注目が高まっている。企業活動は，社会の健全かつ持続的な発展があってこそ成り立つという点から，企業は社会の一員として，より良い社会を築き支える責任を負っている。消費者の中に，商品の選別や企業の評価の際に，CSR活動を判断基準とする人々の数は増加しており，その活動は企業にとって信頼性向上および競争力強化のために欠かすことのできない取り組みとなっている。

また，持続可能な発展の理念は教育界にも取り入れられつつある。それは，生徒に初等・中等教育の過程から，過去の結果として現在があることを理解させ，現在が将来にどのように繋がっていくのか，また将来のあるべき姿を前提にして“未来から現在を設計する”能力を身に付けさせるものである。そして，現代および将来のエネルギー・環境問題への理解を深めさせることで，持続可能な社会に求められる産業活動や暮らし方を考える力を育成するものである。それには，現状を分析し，将来を見据えた社会の形成を担える問題設定・解決型能力を身に付け，将来に対して望ましい選択と行動できる能力の養成が必要となる。

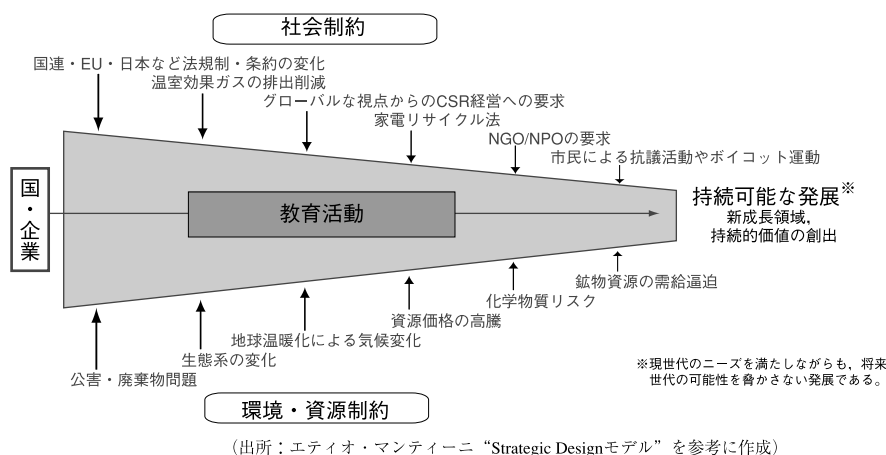


図1 情勢変化に求められる国・企業の対応

世界が持続可能な発展を遂げていくためには、私たちが直面しているグローバル、かつローカルな問題を客観的に明らかにし、その解決に向けた処方箋を何枚もつくり、対策を実行していくことが求められている。「エネルギー学」は、社会の持続可能な発展をエネルギー分野から支援する学問として誕生したものである。まだ、学問として明確に体系化されていないが、本稿では、著者が考えている「エネルギー学」について紹介する。

2. 「エネルギー学」の定義と関連学問分野

(1) エネルギー学の定義と目標

エネルギー学は、持続可能な発展という人類の運命にかかわる大きな学術的課題に対して、エネルギー分野の面から応えていくことにあり、現象の解明や新たな理論の展開にとどまらず、問題解決といった目的を持った学術である。エネルギー学については、平成12年の日本学術会議「社会・産業・エネルギー研究連絡委員会」にて議論され報告書が出されている⁽¹⁾。その報告書を参考にしてエネルギー学とは何かを述べることにする。

まず、エネルギー学の目標は、エネルギー問題について多面的で的確な評価・判断ができる見識を社会の中に醸成することである。エネルギー問題とは、資源、経済、社会、環境、技術などの要因から発生するリスクの被害事象である。リスクとは、社会や人々に被害を及ぼすものであるが、一方で便益と一体となっているものも多く、ある特定事象のリスクを受け入れることで他の面での便益を得ることができる性質のものでもある。エネルギー問題の解決策は、リスクを最小化する方策と同時に、リスクをある程度まで受け入れることで他の便益を最大化する方策を検討することになる。その対策は、リスクの発生時点だけでなく、事前、あるいは事後において必要となる。対策の検討には、利害関係者への対応も求められる。リスクに係わる利害関

係者には、国、企業、NPO、住民など、立場が異なる様々な組織や人が含まれる。彼らのリスクに対する認知は、必ずしも同じになるとは限らず、むしろ異なることが多い。

エネルギー学は、エネルギーに関する諸学の知識を構造化して俯瞰的「知」として体系化すると同時に、エネルギー問題のリスク事象の解決に向けた方法論の構築を図ることであり、かつ異なる立場にある利害関係者の主張や要求に対して、社会の持続可能な発展の理念を基本に、客観的、かつ中立的な立場から応えることができる科学的論拠を与える学問である。その目標とすることは、利害関係者すべての要求を平均的に満たすことではなく、利害関係者が持続可能な社会の発展という共通理念に向かって協力し合える体制整備と実行計画を培うことにある。

エネルギー学が目指す方法論とは、持続可能な社会発展を目標に、世界・地域・国・地方・企業・住民など様々な組織や人が直面しているエネルギー問題の解決に必要となる分析・予測・評価手法を、資源、技術、環境、社会経済といったエネルギーシステムに対して総合的に構築していくことである。方法論の特徴は、問題解決にむけて広範なディシプリンを統合することである。

その方法論は、エネルギー政策・計画の立案、エネルギー資源・技術の選択や評価を支援するものである。今日、われわれが直面する多くの問題は、オゾン層破壊や地球温暖化問題に見られるごとく、現象認識の手段である科学を応用しやすいように、この基本目的を分断・細分化して個別目的をばらばらに追求したことにより生じている。これは目的と手段の倒錯である。エネルギー学には、「人間にとって」という基本目的に立ち返り、諸学の知識と方法論を統合することで新しい学問像を生み出すことが求められている。

エネルギー問題における再生可能エネルギーや原子力の役割は、それぞれの分野で技術の特性を評価し開発課題を検討するだけでは

理解できない。エネルギーシステムの中にこれらを位置付け、資源や環境容量の制約の中で、人類の長期的なエネルギー需給の姿を描き、持続可能性などの総合的な評価基準の下で解析することではじめて的確な評価が可能となる。エネルギー問題には、諸学を統合することではじめて理解できる真理が生まれるという問題構造を持っている。

（２）関連する学問分野

エネルギー学に必要な知識と関係する学問分野は多岐にわたっている。その関連分野は自然科学と人文社会科学の数多くの既存分野である。表１は、エネルギー学に関連する既存の学問分野を列挙したものである。自然科学の中には理学、工学、環境科学、生物学・医学が、人文社会科学には心理学、経済学、政治学が関係しており、それらの既存学問分野の知見がエネルギー学の基盤を形成している。既にこれらの知見はそれぞれの分野では多くの蓄積があり、各学問領域の方法に従って体系化が図られている。エネルギー学は当然これら学問的蓄積を基盤として展開されるべきである。

エネルギー学における方法論についても、数理科学（統計学、推計学）・情報科学（OR、システム分析）の分野で、対象とする問題は異なるが数多くの知見が蓄積されている。エネルギーに関する既存分野で蓄積された学問的成果を、システム概念に基づく方法論を用いて総合化することがエネルギー学の展開

の基本的方向である。また、エネルギー学においては長期的で幅広い視点から問題を設定して解析することが特徴であり、そのためには各学問分野に対して横断的に適用できる基礎概念の構築が重要になる。

以上のような基本的特徴をもつエネルギー学の方法論では、問題の設定そのものが重要な役割を果たす。問題を如何に設定するかがエネルギー学の方法の核心である。この意味で、エネルギー学は、従来の多くの学問のように論理実証的であることによって成立する学問ではなく、論理整合的であることで成立する学問であるといえる。このようなアプローチからも、個別問題の構造や個別問題間の関係の中に普遍的な問題の基本構造を見つけるなどの展開により、先端的、創造的な知的発展性を期待することができる⁽¹⁾。また、人間にとっての価値を中心概念としてエネルギーの諸問題を取り扱うエネルギー学においては、現象を理解する認識科学と共に、あるべき価値観を創造するという設計科学の視点を重視している。

３．「エネルギー学」の役割

エネルギー学の役割には、エネルギー政策・計画の立案、エネルギー資源・技術の選択や評価を支援する以外に、青少年の段階から社会の持続可能な発展を客観的に理解できる能力を身につけさせるエネルギー教育もある。ここでは、「エネルギー政策」「エネルギー

表１ エネルギー学に関連する学問領域

領域	自然科学				人文社会科学		
学問分野	理学	工学	環境科学	生物学・医学	経済学・商学	政治学・法学	社会学
主な基礎学問	数理科学（統計学、推計学）・情報科学（OR、システム分析）						
	物理学 化学 生物学 地理学 地質学	資源工学 機械工学 電気・電子工学 化学工学 材料工学 土木工学 建築学	環境学 気象学 生態学	実験生物学 疫学	社会経済学 厚生経済学 環境経済学 金融学 簿記	国際関係学 国際政治学 行政学 地方自治 政策科学 公法 民事法	社会ネットワーク論 社会心理学 コミュニケーション論 行動科学 社会調査

ー資源・技術評価とリスク認知」「エネルギー教育」についての概要を紹介する。

(1) エネルギー政策

現代の複雑な技術社会が生み出した諸問題に対して、責任ある政策者は種々の選択肢（代替案）をいろいろな選択基準から総合的に判断し意思決定を下さなければならない。エネルギー政策は、エネルギー問題という多目的のシステムに対する意志決定問題である。一般に、多目的問題は、客観的・解析的な過程と主観的・判断的な過程から成り立っている。前者は、システム構造の中で本来的に定量的で、かつ決定論的な局面に対応するものである。これに対して判断的な過程は、本来的に定性的、非数量的であり、しばしば非決定論的な局面に対応している。それは、意志決定者である利害関係者の選好構造に大きく依存する性質をもっている。エネルギー政策の立案とは、これら2つの局面の間のギャップをいかに合理的な手続きをもって埋めることができるかに係わっている。利害関係者の選好は、社会のエネルギー情勢の変化に依存するために、エネルギー政策は常に見直しが求められる。また、エネルギー事情は国ごとに異なるために、その政策は国によって異なったものになる。わが国のエネルギー政策も時代とともに見直しが行われ、今日に至っている。日本は、エネルギー自給率が4%（原子力を除く）と主要先進国の中で最も低く、エネルギー資源の大半を海外に依存している。また、一次エネルギーの約50%は石油によって供給されており、その87%が中東地域からの輸入である。現在、中国やインドなどの開発途上国を中心とする経済成長と人口増加によりエネルギー需要が大幅に増加しており、化石燃料の資源獲得競争が激化しつつある。日本は欧米と違い、地理的かつ政治的にも近隣諸国との間でエネルギーの融通が難しい状況にあるため、需要面では更なる省エネルギーを積極的に進めていくとともに、供給面では効率

向上に加えて利用するエネルギー資源の多様化を図っていくことが不可欠である。

2002年6月7日にエネルギー政策の大きな方向を示すことを目的に「エネルギー政策基本法」が議員立法として国会に提出され成立し、同月14日に公布・施行された⁽²⁾。この基本法には「安定供給の確保」、「環境への適合」、「市場原理の活用」といった今後のエネルギー需給に関する施策の基本方針が掲げられており、目標を達成するために必要な国と事業者のそれぞれの役割が明記されている。国の役割は「基本方針にのっとり、エネルギーの需給に関する施策を総合的に策定し、実施することであり、それに対して事業者は「自主性・創造性を発揮しつつ、エネルギー利用の効率化、地域環境並びに地球環境の保全に配慮したエネルギー利用に努めるとともに、国・地方公共団体の施策に協力する」こととされている。また第12条には、政府はエネルギーの需給に関する施策の長期的、総合的かつ計画的な推進を図るため、エネルギーの需給に関する基本的な計画（エネルギー基本計画）を定めなければならないことが記されている。

エネルギー基本計画は2003年10月に策定され、基本法で掲げた基本方針を具体化した施策と、その施策を実現していく上での技術的、社会的な課題が示された⁽³⁾。政府は、エネルギーをめぐる情勢の変化を勘案し、及びエネルギーに関する施策の効果に関する評価を踏まえ、少なくとも3年ごとにエネルギー基本計画に検討を加え、必要があると認めるときには、これを変更しなければならない。内容は、施策に必要な課題を“エネルギー需要対策の推進”、“多様なエネルギーの開発・導入”、“電気事業制度・ガス事業制度のあり方”などに分類して、それぞれについて具体的に達成すべき項目を掲げており、基本法に比べて一歩踏み込んだものになっている。

原子力発電の開発・導入については、長期的、総合的かつ計画的に講ずべき施策の1つ

として「原子力発電は、安定供給、地球温暖化対策の観点から優れた特性を有するエネルギーであり、安全性確保を大前提に基幹電源として推進する。核燃料サイクルについても、安全性及び核不拡散を確保しつつ推進する」と、その重要性が明記されている。なお核燃料サイクルのバックエンドについては「電力自由化に伴い、事業者が原子力に係る投資に慎重になることも懸念されるとともに、バックエンド事業のリスクの大きさが懸念されている。このため、原子力発電の推進を図るため、所要の環境整備を行う」と記されている。このように核燃料サイクルの進め方は長期的な視点からエネルギー情勢、ウラン需給動向、核不拡散政策、プルトニウム利用の見通し等を勘案して、硬直的でなく柔軟性を保ちつつ着実に実施していくとされている。

エネルギー基本法とエネルギー基本計画の制定に伴い、原子力委員会は新しい長期計画を策定する「新計画策定会議」を設置し、国民各層からの参加により、多角的に審議・討論し約1年半の期間をかけて「原子力政策大綱」を2005年10月にとりまとめた⁽⁴⁾。原子力政策大綱の中で原子力発電は、エネルギー安定供給と地球温暖化対策に貢献が期待される電源であり、2030年以降も総発電電力量の現在と同じ30～40%程度か、それ以上の供給割合を担うことを目指すと位置づけられている。

しかし、2012年3月11日の東日本大震災と津波による原子力事故によって、エネルギー基本計画と「原子力政策大綱」は見直されることになった。政府はブレのないエネルギー政策として掲げたにも係わらず、その政策はわずか5年程度の歳月で白紙に戻された。今回の原子力事故には、それほど大きな影響力があったといえる。

新しいエネルギー政策は、現在、検討中であって、具体的な内容はまだ決まっていない。エネルギー政策の意思決定者である政治家、官僚、専門家、企業、マスコミ、市民といった利害関係者の多くが、事故以前に比べて原

子力に対してかなり批判的な立場になっているのは確かである。当面の課題は、定期点検で止まっている原子力発電の再稼働問題である。脱原発を唱える人や団体は、再稼働を認めない立場にある。政府の委員会と政治家の判断は、ストレステストの安全性を確認し地元の了解を得たうえで稼働を認めていく方針である。現実的に見て、原子力発電の再稼働がなければ今夏の電力需要に対して供給力が足りなくなる地域がいくつかある。停電は、産業活動だけでなく市民の生活にも甚大な被害を及ぼすことになる。社会の混乱を避けるためにも原子力発電の再稼働は不可欠と判断され、再稼働を認めない脱原子力路線は否定された。

問題は中長期的な位置づけである。今回の原子力事故を踏まえて、原子力発電は中長期的にどのように位置づけられるのか。原子力への批判が高まる中、原子力依存度を下げていく縮原子力、あるいは減原子力の方針も検討されている。その場合、原子力発電所の耐用年数を何年にするかが課題となる。技術的には60年は可能であると見做されている。新設が許されない状況下で、耐用年数の長さは「原子力政策大綱」で掲げた使用済燃料の再処理路線への影響も大きく、短くなれば使用済燃料再処理の必要性も低下する。トラブル続きで稼働の目途が立っていない六ヶ所再処理工場やウラン濃縮プラントに対しても、国民やマスコミの見方は厳しさを増しており、“もんじゅ”を含めてこれまでの核燃料サイクルの継続は極めて難しい状況になるであろう。また、使用済燃料の直接処分路線も打ち出されており（最終処分なのか回収可能処分なのか明確でない）、これまでの全量再処理・高レベル放射性廃棄物の最終処分計画も見直されることになる。

安全保障と経済性からエネルギー供給に脆弱な構造を持つわが国にとって、これまでのエネルギー基本計画の政策目標である「安定供給の確保」「環境への適合」「市場原理の活

用」がどのように見直されるかが課題である。政策目標を達成していく上で、原子力発電は大きな役割を担っていたが、それを補完する代替電源や省電力の可能性が具体的に検討されなければならない。

（２）エネルギー資源・技術評価とリスク認知

私たちは、豊かさや快適さを得るために大量のエネルギーを水や空気と同じように無意識に使っている。しかし、エネルギーは水や空気と違って自然に得られるものではない。エネルギー源には、化石燃料、原子力、再生可能エネルギーがあるが、それらを石油製品や電気、都市ガスなど社会で使えるエネルギーにするためには、輸送、貯蔵、転換・変換などの供給システムを構築しなければならない。

社会の産業活動と人々の生活を支えていくためには、安全で安心できるエネルギーを供給することが必要となる。エネルギーの供給には、大別すると、次に示す３つの基本要件が求められている。

- 「エネルギーセキュリティの確保」：価格変動が供給途絶の心配がないエネルギー資源を長期にわたり安定に確保する。
- 「供給基盤の整備」：入手した資源を使いやすいエネルギー形態に変換するための施設を建設し、信頼性の高いエネルギーサービスを行う。
- 「社会的な受容」：資源をエネルギーとして社会に利用する一連のプロセスで環境への影響や事故による被害をなくし、人々が環境や安全の面でエネルギーを安心して利用できるようにしていく。

エネルギー源である化石燃料、原子力、再生可能エネルギーは、基本要件に対して、それぞれが異なる利点と欠点をもっている。安全で安心な社会を築くには、基本要件を満たす技術開発や制度づくりが求められている。しかし、それらの活動は経済的な制約のもとで行われており、両者の間にはトレードオフ関係があって、すべての要件を完全に満たすことはできない。エネルギー源である化石燃料、原子力、再生可能エネルギーには、それ

ぞれが異なる利点と欠点をもっており、すべてに優れているものはない。表２は化石燃料、原子力、再生可能エネルギーについて、日本の立場から見た基本要件の特徴を示したものである。社会がエネルギーを使って持続可能な発展を遂げていくためには、各エネルギー資源の欠点を克服し、利点を最大限に発揮する利用方法を考えていくことになる。

表に掲げられているエネルギー源にはどれもリスクがあり、エネルギーの利用には容認できるレベルである許容量の概念が必要になる。例えば、放射線影響はシーベルトという単位の許容量で判断されている。人々は天然から年平均2.4ミリシーベルトの放射線を日常的に浴びているが、それによる癌の発生は臨床医学でも明らかにされていない。人工的に放出された放射線の許容量は、一般人で1.0ミリシーベルト以内と限定されている。曝露量がどこまで許容されるかは、専門家の間でさまざまな議論があるが、低線量領域での許容量は疫学的に見て明確になってはいない。許容量の概念は、「害か無害か、危険か安全かの境界として科学的に決定される量」ではなくて、人間生活から見て、「どこまで我慢しても、科学技術のプラス面を考えるか」という社会的概念である。

リスクの性質には、「その事象が顕在化したときに発生する望ましくない影響」と「その事象がいつ顕在化するかが明らかでないという発生の不確実性」がある。望ましくない影響は、受け手の持つ価値や選好が様相によって左右される内容のもので、しかも、主体は常に同じ価値や選好の意識を持っているのではなく、個人的、社会的状況によってリスクの大きさは変化する。すなわち、物理的に観測・推定される客観的リスク評価と主観的リスク評価とは一致しないことが少なくない。不確実性は、あいまい性とは異なり、確率的なもの、偶発的なもの、未解明のもの、予見不能なもの、交渉条件的なものを指している。

リスクを一義的に定義することは難しいが、

表2 基本要件からみた化石燃料、原子力、再生可能エネルギーの特徴

基本要件		化石燃料	原子力	再生可能エネルギー
エネルギーセキュリティの確保	賦存性	●長期的に見た資源枯渇（石炭と非在来型資源の潜在的な量は豊富にある）	●長期的に見たウラン資源枯渇（ウランをプルトニウムに核変換すれば資源量は豊富にある）	●資源量は潜在的に豊富、しかし経済的な利用可能量は多くない。
	安定性	●資源の偏在性（石油の確認埋蔵量の3分の2は中東地域にある） ●供給途絶（資源保有国の政治経済問題やシーレーンでの海賊問題がある） ●燃料価格変動（石油や石炭などの資源高騰がある）	●長期契約による取引と炉内装荷期間が長いこと、化石燃料に比べて供給途絶への不安は小さい。	●供給途絶がない（輸入バイオマスを除く）
供給基盤の整備	供給力	●設備能力（最大需要に合った設備能力を確保できる） ●立地問題（特に石炭火力には厳しい環境アセスメントが必要になる） ●設備投資（LNG基地などインフラ投資が巨額になる）	●設備能力（最大需要に合った設備能力を確保できる） ●立地問題（発電所と核燃料サイクル施設を含め地元の理解を得るのに長期間が必要となる） ●設備投資（核燃料サイクルを含めてインフラ投資が巨額になる）	●設備能力（気象任せの発電である風力発電と太陽光発電は設備価値が小さい） ●立地問題（特に風力発電は立地場所によって電気出力が大きく変動する。また、資材の搬入や送電線の敷設問題がある）
	信頼性	●電気の質（安定した出力で、周波数・電圧の変動が小さい） ●需給調整（負荷変動へは優れた追従能力がある） ●自然災害、ヒューマンエラーによる停電（比較的早く復旧できる）	●電気の質（安定した出力で、周波数・電圧の変動が小さい） ●停電（大規模なプラント事故があると供給力不足の影響を与える）	●電気の質（太陽光や風力など間欠的なエネルギーは、出力だけでなく周波数・電圧が大きく変動する） ●需給調整（太陽光や風力は、蓄電池が必要になる）
社会的な受容	環境性	●大気汚染（SOx, NOx, ばいじんなどによる健康被害と生態系汚染） ●地球温暖化（温室効果ガスである二酸化炭素が放出されている）	●放射性物質の漏洩（健康被害と環境影響が大きい）	●最もクリーンと言われている（バイオマスの大量消費による森林破壊が懸念されている）
	安全性	●施設事故（タンカーの座礁、ガス爆発、炭坑事故の不安がある）	●施設事故（原子力施設の重大事故は長期にわたり健康被害と社会影響を与える） ●風評被害（原子力事故や放射性物質漏洩が地元生産物の販売に影響する） ●テロ行為、核拡散	●施設事故（工事中の落下事故などがあるが、全体から見て比較的軽微と考えられている）

それらに共通するのは負の要因である「損失」が含まれることである。リスクとは、現時点より先に起こりうる可能性がある事象の「損失」の大きさを定量的に表すことと考えられる。被害規模を損失の大きさと捉える考えは、人間活動で対応できる範囲に事象を絞るということである。これからリスクを判断する基準は、被害に対して対応可能な範囲、すなわち我慢できる範囲をいい、危機や破局のよう

に対応不可能な被害や、それとは逆に広く受け入れられている程度の被害はリスクと見做されない（図2参照）。

グローバル化した社会では、さまざまなリスクが発生しており、それぞれのリスクの許容量を客観的に捉えていくことが大切になる。反原発への感情論が先行している中、エネルギー関連のリスクを客観的な立場から同じように評価していくことが難しい状況にある。

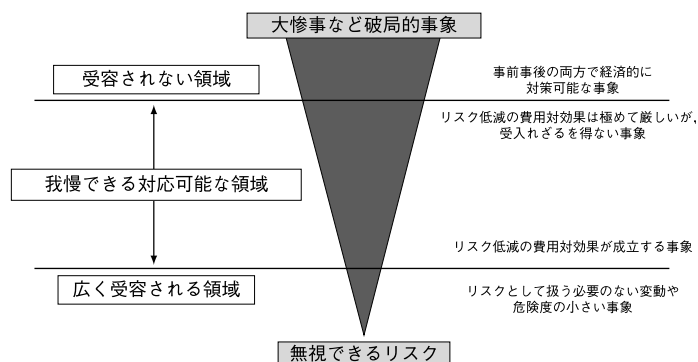


図2 リスクの性質

しかし、エネルギー資源・技術選択は、長期的な視点から検討していくものであり、その視点からリスクを総合的に捉えて政策を立案することが望まれる。

（３）エネルギー教育

① 持続可能な発展に向けた教育

物質的な豊かさを追い求めている世界の潮流の中で、天然資源の大量消費、環境汚染や地球温暖化問題、生態系の破壊が世界規模で進んでいる。世界が発展し続けていくためには、環境との調和が不可欠である。1986年に開かれた国連の「環境と開発に関する世界委員会」にて、持続可能な開発に向けた行動指針が採択された。

北欧をはじめとする欧州各国では、国連の行動計画に示された持続可能な社会を構築する活動に取り組み始め、その理念は教育界にも取り入れられている。それは、初等・中等教育の過程から生徒に、過去の結果として現在があることを理解させ、現在が将来にどのように繋がっていくのか、また将来のあるべき姿を前提にして“未来から現在を設計する”能力を身に付けさせるものである。そして、現代および将来のエネルギー・環境問題への理解を深めさせることで持続可能な社会に求められる産業活動や暮らし方を考える力を育成するものである。

エネルギー教育は、科学、技術、経済、環境など関連分野が広いために、各教科間の連携や教科横断的な教育となる。わが国でも文部科学省による「総合的な学習」の中で環境やエネルギーをテーマにした授業がある。授業は、教員の自由裁量で実施できるもので、地域性を生かした生態系調査やリサイクル活動のほか、外部施設見学、社会人講師による講演会、企業による出前授業などが行われている。しかし、その多くはオムニバス形式で実施されており、現在の「総合的な学習」によって生徒に持続可能な社会を考える能力を高めさせる教育が体系的に実践されていると

は言い難い。本稿では、初等・中等学校の生徒に考える力や創造力を育成するため、早くから「持続可能な開発のための教育」を取り入れた北欧のスウェーデンにおけるエネルギー教育を紹介する。

② 「考える力」の育成

北欧（フィンランド・スウェーデン）の教育では、問題解決能力の向上や自ら学ぶ力の育成のため、体験学習を重要視している。スウェーデンでは特に、「知識は与えるものでなく自らの中で育つ」という考えの下で授業が行われ、その教育方法は、子どもは様々な体験を通して自分の中に理論を構成していく「構成主義“constructivism”」に基づいている。これは、教育は子どもに知識を注入し、学習者が知識の受容によって知識を増やしていくと考えられた従来の教育論とは正反対の立場で、子どもには体験学習が大切と考えられている。

体験的な学習は、学校外での自然体験や社会体験に着目しがちであるが、授業内での教材を用いた実験や実習体験なども重要である。ここでは、総合的な学習あるいは理科を中心とした授業に使われているスウェーデンの教材を紹介する。

a. ミニボトル生態系

スウェーデンの中学校で興味を惹く教育例に、栓で塞がれたボトル内の植物の成長をモデルにしてグローバルで持続可能な社会のあり方を理解させる「ミニボトル生態系」がある。この教材を用いた学習の狙いは、生物の生態系分野、地球温暖化問題等の理解であるが、最も重要な狙いは「持続可能性」に関して生徒に理解させることである。同時に、この教材は単に提示し知識を注入するだけののではなく、考える力や創造力を最大限に利用しながら、生徒自身に持続可能性を理解させられる。

ミニボトル生態系によって生徒が学べる内容や教育上の狙い、その指導上の留意点は、

次に示す4点となる。

- **生態学的要素**：生徒は、植物・動物・食物連鎖・エネルギー・安定性の相互作用を理解する。そして、水・酸素と二酸化炭素・ミネラル・金属循環の知識を得る。
- **社会構造**：基本的な生活に必要な収獲物、動物、植物について学び、豊かな暮らしに必要なものを考える。
- **人生の意味**：人生に必要なものは何か、規律や生き方を考えさせる。例えば、正と誤、善と悪、利己主義と利他主義などについて学ぶ。
- **持続可能性**：上記を理解させた上で、「持続可能」とは何かを考えさせる。ここでは、動物・植物との共存、循環、リサイクルなどの概念を現実的に理解させ、「宇宙船地球号」の概念である「人間はボトルのように限られた空間で、限りある資源と共に生きている」ことを簡単に理解させる。その結果、生徒は、持続可能な社会の状態と、機能的・豊かさ・満足出来る社会を得るための価値、アプローチ、ルールを学習できる。

教師は上記の内容を教育する際、オゾン層の破壊・地球温暖化・酸性雨等、地球が世界規模の危機にさらされている事実も認識させる。一方で、生徒には時間や知識を与え、発展による明るい未来の可能性についても考えさせる。生徒は自らの力で持続可能な仕組みの原理を理解するようになり、そうなれば彼らはこれからの社会を形成していくためには何が必要になるかを、教師から指導されなくても判断できるようになる。

ミニボトル生態系を用いた指導の留意点は、「知識は与えるものではなく、育てるものである」との考えの下、生徒からの疑問が出たら、生徒に議論をさせ、教師がヒントを出す形式で、生徒自身の考える力や「知識を育てる」姿勢を最優先に考える点である。

ミニボトルの中の植物の存在を導入に、ボトル全体を地球に見立て、宇宙空間における地球の存在、地球温暖化についての勉強、および大気の組成、光合成など、個々のメカニズムについて勉強していく方法がとられていた。この学習方法により、エネルギー・環境問題を個々の要素によるものとして捉えるのではなく、様々な事象や生物が複雑に絡み合うものとして理解することができる。

b. 理想の家“ドリームハウス”

同じくスウェーデンの学校で利用されている教材に「理想の家」がある。これは電力などエネルギー供給システムから「持続可能な社会」におけるエネルギーのあり方を考えさせるものである。

教材として、最初に住宅の間取りを描く画用紙が一枚用意される。生徒には、画用紙の上に自分が住みたい家の間取りを描かせる。そして生活していく上で必要となる電化製品や照明器具を選ばせ、またガス、水道、ごみ処理についてもどのようにするかを決めさせる。次に、生徒はテレビやクーラーなどの電化製品を間取り図の中に配置し、屋内配線を描く。間取り図上に電化製品と照明器具の配置が決まったら実際に豆電球やモータなどで負荷を模擬し、それらをリード線によって配線させる。それらの体験を通して、「理想の家」に必要となる電化製品の種類と台数を学び、省エネについても考えるように導く。この段階で、屋内の電気配線を設計すると同時に電気の流れや消費電力について考えさせている。なお、直列と並列の配線を理解できるよう、乾電池を用いて「理想の家」に電気を流した際、その家の電気容量をオーバーすると、ヒューズが切れるような仕組みになっている。

最終段階では、1つの家の中だけで考えられていた電気配線を地域レベルや国レベルにまで発展させ、身近な地域や国における電力供給システムを考えさせる。生徒は、身近な環境である家庭の配線図を基にして、住宅や商店、事務所が集まった地域社会、そして国全体の電力供給システムのあり方を考える。「理想の家」の屋内配線モデルによって、生徒は以下の3点を学習する。

- 家庭で必要とする電化製品について、種類や数と電気の大きさや電圧を知る。
- 家庭内の配線。
- 地域、国全体の電気の流れ（発電所の位置、送電のメカニズム）。

また、教育上の狙いは以下の3点である

- 家庭から地域や国へと視点を広げていくため、「持続可能な社会」のためのインフラストラクチャー、地球規模における国のあり方などを、身近に捉えられる。
- 多くの電化製品に支えられている自分たちの生活を、見える形で確認できる。
- 電気エネルギーや熱エネルギーについての学習、およびエネルギー変換の学習を行うのみならず、持続可能な社会における省エネルギーのあり方を学ばせ、最終的に社会に参加できる市民意識を形成させる。

c. “Goal Based System” 教育

「持続可能な開発のための教育」は、人類の存続は地球環境が守られてこそ可能になると理解させることが重要である。その指導用カリキュラムには、「生徒が環境について考えることは、生徒が直接関わる環境に対する責任感を持たせ、一般的、世界的な環境問題に個人的な参加を促すよい機会である。(中略)学際的総合的な教育方法こそ、問題解決型で批判的な思考能力を高められる。具体的には、以下の4点を踏まえた教育を行うことが望ましい。」と明記されている。

- 様々な教育方法
- 過去から未来、地域から世界を見渡せる内容
- 意思決定への参加
- 事実に基礎を置いた学習

教育方法には、“Goal Based System”が取り入れられている。それは、「生徒と教師が規定されている目標(Goal)によって、到達点を明確に理解し、階段を一步ずつ上がるように目標に近づいていく」ことである。階段は6歳から15歳までの間で大きく3つのレベルに分けられており、それぞれのレベルで木目細かい階段が用意されている。

低学年の段階では教科書を使わないことが多く、ついていけない生徒に対しては授業を繰り返すことで習得させる。9年間の義務教育期間に全国統一試験が4年目と9年目に2回ほど実施される。大学など上級学校への入学試験は実施されず、学校の内申書と全国統

一試験の結果で入学が決まる。

その精神は、すべての国民に生涯学習の基礎となる学力を保証し、一人一人が豊かな自己実現を図ることを目標としている。それは、日本での他人との比較で相対的に評価し、優秀な生徒を選抜していくという学習方法と異なっている。生徒の学習達成度の評価は、ジズソーパズルに例えられており、G(可:この名前は何か、いろんな破片をどうやって組み合わせるのか)、VG(良:どうすればうまく合うのか、それぞれの働きは何か、結合した形は何になるのか)、MVG(優:できあがったパズルから想像力を働かせる)で評価される。評価方法は、ペーパーテストのほか、観察、質問、ノート、作品、レポート、実技など多様である。教育を支援するために「学習ノート」が準備されており、それには年間学習計画が書き込まれており、生徒の学習ノートとしてだけでなく、教師から生徒へのアドバイスやコメント、教師による評価(ランク付けは行わない)、保護者のコメントが毎日のように記入されるようになっている。

わが国の総合的学習は、「生きる力」、知識や技能、意欲、思考力・判断力、表現力、そして「確かな学力」を持った人材の育成が目標である。フィンランドのクロスカリキュラムでは、生徒に身に付けさせたい能力として「現状を分析できる能力」「意見を発表できる能力」「社会の傾向等を将来の視点から評価できる能力」「望ましい将来のために選択し行動できる能力」を挙げ、社会を担う上で必要とされる能力の育成を理想としている。スウェーデンのテーマ教育では、自由な発想とそこから生まれる創造性を試し、可能性を探れるよう、生徒に自由と責任を与え、「教科の枠にとらわれず自由に発想し、探究心、計画性、発表方法など、学習技術を習得するための方法を自ら考える力」、「意思決定力」、及び「持続可能な社会の形成を担うための能力」を身に付けさせる。

4. おわりに

2011年3月に発生した原子力事故は、社会に余りにも大きな影響を与え、これまで築き上げてきたわが国のエネルギー・電力政策と電源構成を見直さざるを得なくなっている。原子力のエネルギー比率は計画より大幅に下がることが予想され、わが国はもう一度、脆弱なエネルギー供給構造に戻ることを余儀なくされている。

これまで地道に努力を重ねて築き上げてきたエネルギー安全保障の確立は振り出しに戻り、脆弱なエネルギー供給構造の中で安定供給を脅かすリスクに耐えていかなければならない。また、地球温暖化対策として政府が掲げた二酸化炭素の大幅削減目標は不可能となった中、国際公約を破棄したときの国際社会からの批判も受けることになる。

原子力発電をすべて停止し、その分を再生可能エネルギーや化石燃料に置き換えれば、電気代は高くなり、企業の海外進出を加速することになる。それは日本の技術力の低下だけでなく、国内の雇用問題にも影響する。こういった難しい立場に立たされたエネルギー事情に対して、エネルギー学が日本の持続可能な発展にいかに関与できるかが問われる時代となった。

参考文献

- (1) 社会・産業・エネルギー研究連絡委員会報告（2000年6月26日）
- (2) エネルギー政策基本法（2002年6月），
http://www.ron.gr.jp/law/law/energy_k.htm
- (3) 資源エネルギー庁「エネルギー基本計画について」（2003年10月7日）
<http://www.meti.go.jp/kohosys/press/0004573/>
- (4) 原子力委員会「原子力政策大綱」（2005年10月），
<http://aec.jst.go.jp/jicst/NC/tyoki/tyoki.htm>

[寄稿]

福島以後のパラダイムシフト ～村から脱却して世界視野の取組みに～

宮野 廣

（法政大学 大学院
デザイン工学研究科 客員教授）



要旨：わが国の「バベルの塔」の崩壊とも言える、世界一優秀と自負していた原子力発電所の事故を目の当たりにし、私たちは言葉を失った。村の崩壊である。今こそ、よくよく考えてみなければならない。社会の在り方、産業の在り方、原子力の在り方、反省ではなく、根本から考えることに取り組むことが必要ではないか。パラダイムシフトである。過去にとらわれることなく、新たな仕組みへの転換に踏み出すことが、必要なのである。

エネルギー問題への取組みを、どのように見直すべきか。社会の膨張に対して、食糧もエネルギーも不足することは明白である。世界の生き方を問われる時代になっていくのではないか。誰がどのように富を使って行くべきか。文明が全てを解決するわけではない。文明を使う仕組みと使わない仕組みを使い分けることも必要であろう。

1. はじめに

2011年3月11日に襲った大津波は、福島第一原子力発電所の施設を破壊し重大な事故をもたらした。あれから1年が過ぎ、一時は全てのわが国の原子力発電所が停止する事態にもなったが、ようやく、関西電力の大飯発電所（PWR）が再起動するにいたった。津波による被害の回復も、原子力発電所の事故による被害の回復も見た目には遅々として進まないようにも見える。政府事故調（畑村委員長）

の中間報告が昨年12月26日に公表され、今年に入って2月27日には民間事故調（北沢委員長）の結果が公表され、6月20日には東電の事故にかかわる最終報告書が公表された。そして、7月5日に国会事故調（黒川委員長）の報告書が公表され、7月末には政府事故調の最終報告もあると聞く。1つの事故を扱っているが、それぞれに見方が異なり、事故の原因として言及していることも様々である。後付けの原因究明は、専門家がしっかりと技術の目で見なければ、やじ馬的になってしまい真理が捉えられず、政治的な分析と判断に陥ることになる。そういう意味で、日本原子力学会に設けられる事故調査委員会には大いに期待するものである。

事故原因の究明はさておき、私たち原子力に携わってきた者にとって、この事故をどのようにとらえて行かなければならないのだろうか。1979年の米国TMI（スリーマイル島原子力発電所）2号機での炉心損傷事故、そして1986年ソ連チェルノブイリ原子力発電所4号機の炉心での急激な核反応による水蒸気爆発と水素爆発の事故が発生し、世界では深刻にそれらを捉え対応しなければならず、原子力発電所の建設は長い低迷の時を経てきた。更にわが国では様々な不適合事象が多発しており原子力発電の稼働率は世界でも最低のレベルにまで落ち込んでいた。近年ようやく世界的に“原子力ルネッサンス”と言われ、原子力発電に光が当たり始めてきたのであった。

そんな時期に、記録された歴史上、最大級の津波が原子力発電所を襲い、わが国の原子力発電所の設備、体制ともにその外力に耐えることができず、原子炉事故を起こすに至ってしまったのである。原子力発電に携わる技術者にとって、信頼する技術、信頼する設備、信頼する仕組みに対する、その信頼、自らに対する信頼が大きく崩れてしまったのである。それは、私たち人類への警鐘でもあったのではないかと考える。「バベルの塔」の崩壊のようなものであったのか、後の歴史がそれを裁くことになるだろう。しかし幸いに事故の発生地区、福島では、原子力発電所の原子力事故によって、亡くなった人もなく、放射線障害を受けた人もいない。今のところ、被害の多くは人災とも言える“風評被害”ばかりである。しかし、放射線障害の問題は慎重に追跡、監視して行くことが望ましく、国は長期に渡り地道に対応する必要がある。

今回の事故を契機に、私たちは将来のエネルギーについて考えなければならない現実直面することになった。「これからの日本、世界はなるのか。どうあるべきか。」私たちが向き合った厳しい現実の経験を活かして、これから訪れるであろう、エネルギー問題として、生活様式や、産業の仕組み、構造など、様々な面から“パラダイムシフト”を考えてみたい。

3.11以降、電力不足への対応として、生活を省エネや電力を使わないスタイルに変えようというような動きもみられた。電力不足への対応として、出勤曜日のシフト、出勤時間のシフトをはじめ、電車の間引き、電気からガスへの転換、自前での発電などなど様々な取り組みが行われた。当然、無駄なエネルギーの使用は、控えるべきであるが。経済を沈滞化させることは避けなければならない。エネルギーは全ての活動の根幹である。様々な使い方があり、末端の燃料としてのエネルギーだけを見てはいけいない。どのエネルギー源を、どのように有効に使うべきかを考えなければならない。一方、忘れていけないのは

「炭酸ガス（CO₂）問題」である。地球温暖化への影響はどうあれ、環境を変えてしまうことへの警鐘は、過去に多くの歴史が物語っている。地球全体がイースター島にならないようにしなければならない、と考える。

2. パラダイムシフト

パラダイムシフトとは、社会としての価値観や考え方の転換である。私たちは何を、どのように転換しなければならないのであろうか。福島事故以来、すべてにおいて見直そうとの機運がある。原子力発電からの脱却、「脱原発」もその内の1つであろう。しかし、考え方だけを転換しては、これまでと同じ便益は得られない。それは国民全体として合意できるものであろうか。政治と言うのは、声の大きな民意を反映するものでもなく、時には将来を見て見識ある判断をし、国として進むべき道を国民に知らしめ、導くこともしなければならない。これまで世界第2位の国内総生産（GDP）を誇ってきた国として、同等の便益を得るにはどういう方法があるのか、国際社会の中での位置づけも考慮した転換を進める必要がある。そう言う観点で、原子力発電所の事故を契機に考えてみたい、いくつかのパラダイムシフトを以下に示す。

（1）「想定」から「想定外」への拡大 — 「想定外」にどう取組むか

これまで多くの人たちは、政治家も含め、これほどの大きな津波が、わが国を襲うとは想像もしていなかったのではないかと。万里の長城バリの大堤防が、命を守ってくれると信じていた多くの人たちを、この大津波は容赦なく呑み込んでしまった。しかし一方で、福島の原子力発電所のこの津波被災による事故は、“想像もしていなかった”ということをタブーとしてしまった感がある。私たちはどのように、「想定外」をなくすことに取り組んで行けばいいのだろうか。「想定外」とはどういうことなのであろうか、考えてみた。

表1 福島事故における「想定外」

第1：発生確率が低く、想定から外した。	例：隕石の落下への対応、大きな地殻変動などは、理解はしても検討からは除外している。多くの人は経験のないこと、すなわちこれほどの大きな津波は想像もしない、ということである。
第2：発生確率はある程度はあるが、学会として問題ないと判断した。	例：当時の教会を中心とする学会は、ガリレオの地動説を排除した。同じように土木学会では、津波高さの想定は、歴史、評価の信頼性等から、可能性を限定した。
第3：発生確率の存在は理解できるが、他の外部要因とのトレードオフとした。	例：結果としては安全とコストの比較であるが、予算に限界があり、安全対策上の必要性に順番を付けて、工事を実施する。対津波工事とSCC対策工事（Stress Cracking Corrosion：ステンレス材料の腐食割れ問題への対策工事）のニーズとのバランスを考慮し、実施の順番を付け、対応した。
第4：発生確率が存在するのに過信や慢心、また不安を払しょくするべく、想定から外した。	例：安全設計指針27の決定時には、社会の電源喪失の確率は十分に小さく、送電事故は無いという実績があり、慢心してしまった。
第5：発生確率が存在すること自体、気がつかなかった。簡単に言えば、勉強不足であった。	例：海外事例を参考に、水没による事故の確率が高いことを分析していたものの、安易に周囲に同調－出来上がった安全意識から逃れられない－してしまい、原子力発電所が巨大津波に弱いとの想定に対する、対応策を検討するまでには至らなかった。

「想定外」というのは5つに分類される、というのが木下京大名誉教授（現国際高等研究所フェロー）の“リスク学”から見た分類である。以下に筆者の理解を加え、福島事故を取り上げ、それぞれの例を表1に示した。

様々な「想定外」がある。第4、第5の想定外に陥らないように戒めることは当然ではあるが、第1、第2、第3の「想定外」に対して、どのように対応して行くべきか、議論が必要である。第1の「想定外」にまで足を踏み入れなければならない時代に入ったのであろうか。しかし、そこには意味のない想定もある。どこまで想定に対応するかは難しい問題である。例えば、「東京に4年以内にM9規模の震度7クラスの地震が発生する」と言っても言わなくても災害への備えは必須であり、具体的な対応策を取らなければ意味がない。このように「想定」してしまえば、それは「想定外」ではなくなってしまう。重要なことは、「想定外」を「想定」することではなく、また「想定外」の部分に対して具体的にどこかを対応することではなく、様々な「想定」を超える事態に対応できるようにしておくということである。一方、「想定」は“文化”とも言われる。具体的な議論は、別の機会に譲るとして、日米の比較においても、リスクを考えるか否か、重大事態を知らせるか

否か、文書で明文化するか否か、これらの課題における対応の違いは“文化”に根差すものとも言われる。“文化”をどう変えていくか重要な視点と言える。

（2）「絶対」の神話からリスクヘーリスク&ベネフィット、コスト&ベネフィットを考える

この「絶対」へのこだわりはどこから来るのであろうか。これも“文化”に根差すものであろう。白か黒しか認めない文化である。裏ではグレーがあるにもかかわらず、表向きはいずれかしかないのである。従って、安全に関しては、「リスクはない」、すなわち「絶対安全」と言ってもらわねば認めない、そういう社会の風潮がある。長い年月を経て、わが国では“お上”崇拝を育ててきた。お上の支配は絶対であり、戦前は「負ける」と言う言葉がないというのは、お上崇拝の典型である。「お上」とは政府、政治家、それに続く存在である。安全も「絶対」でなければならないのである。誰もが、「絶対」はあり得ないとは、気がついてはいるのだが、これまで「お上」の言葉は絶対であった名残が社会にあり、少なくとも今は、「絶対安全」でなければ、許すことができないのである。それで、「原子力

発電は絶対に事故を起こしません」と言い続けてきたのである。しかし、3.11の事故が起きた。「絶対安全」と言ってきたのに、と誰かを血祭りにあげなければ許すことができない風潮が、また誤った道へと動かしている。そして、再起動。ここでも、「二度と事故を起こさない」、「絶対安全である」と言わなければ、「再起動を認めない」という。

リスクというものは必ず存在する。リスクのないものはないのであるが、日本の社会は、リスクが少しでもあれば“危険”、“安全ではない”と認識する。こういう文化の中で、リスクが健全に理解されるかどうか疑問が多い。しかも、リスクはベネフィットと併せて考えるべきもので、リスクのみを取ることはあり得ない。日本の社会では、リスクゼロで、当然、便益、ベネフィットは黙っていても与えられる、と考えている人が多い。そういう世界は存在しない、にもかかわらず、リスクゼロでなければならないのである。すなわち、「絶対安全」を常に求めるのである。しかし、これからはどれだけのコストをかけてリスクを回避し、どれだけのベネフィットを獲得するか、という視点で見ていかなければならないのである。適切にそういう評価ができるか、受け入れられるか、世界標準に合わせていく上では重要な文化の取り込みである。リスクが見える形にして、「健全な不安」と「健全な安心」とすることがまず必要であろう。

（３）「拡大」から「均衡」社会へ ―エネルギーの果たす役割

戦後、これまでは、世の中は常に拡大基調で来た。1940年に7,000万人の人口が今や1億2,000万人に、経済は1965年の約5倍の500兆円のGDPを生みだすまで拡大してきた⁽¹⁾。バブル崩壊後、伸び悩んでいるもののいまだ生産規模は同程度である。一方、人口は平衡状態からやや減少してきている。人口が減少方向にある日本社会の課題の1つは、これまでの拡大路線を、いかに均衡を受け入れる社会

に持っていくかであり、社会構造の転換が必要である。社会の根幹であるエネルギー問題は、今までの大きなエネルギー消費社会を継続するか否かということである。エネルギーの浪費大国と言われる米国も、それを縮小せざるを得ない状況になって来ている。世界に目を向けると、1960年の約30億人であった人口は、2010年には約68億人にまで急速に増大している⁽²⁾。一方で、社会を支えるエネルギーは枯渇の方向にある。国際社会の重要な課題となっており、避けては通れない問題である。人口増を抱える国も、エネルギーの大量消費国も、安定した大規模エネルギー源の1つとして、原子力発電を採用せざるを得ない状況にある。と言うよりも、積極的に採用して安定な社会を維持したいと言う事情があるのである。

社会の安定は、食料とエネルギーに依存する。均衡した安定な社会を構築するには、国としての経済の収支を把握し、人口とそれに見合った食糧の確保とエネルギーの確保を確実にする政策が必要である。エネルギーの多くは輸入に頼るしかないのが日本の実情である。どんなエネルギーをどの程度確保できるか、冷静に分析し、手を打って行かなければならない。エネルギー問題は一朝一夕には解決しない。長期的な視野に立ち着実に進めることが必要である。

原子力エネルギーは発電の形でしか手に入れない。原子爆弾を作るだけなら、それなりの技術導入で対応できるであろうが、大量の安定したエネルギー源として原子力発電所を長期に運用して行くには、高度な技術が必要とする。そこには人材育成の問題など様々な課題がある。原子力発電だけの問題ではない。均衡社会の限られた人材資源の中で、どのように役割を分担し、必要な人材を確保して行くか、重要な課題である。

（４）日本社会における「欧米路線」から「世界戦略」へ―産業体制の改革

戦後わが国は、米国の占領下にあったことか

ら、欧米の文明と共にその文化を積極的に導入してきた。特に、ソ連・中国の共産主義国家への極東防衛のかなめとして、日本はその役割を果たすことで、米国の同盟国として庇護の元、経済も大きく伸び、この分野では世界第2位の経済大国にまでになった。しかし今、世界の経済地図は大きく塗り替えられようとしている。経済活動の自由度が増え、競争が激しくなっている。経済活動の基盤はエネルギーである。米国とその同盟国や欧州連合（EU）のみならず、ロシア、中国の大国に加え、インドを含めた国々のエネルギー争奪は戦争の状況を呈している。新興大国は周辺弱小国に対する軍艦を投入するまでに拡大している。日本社会は、それをどのように受け入れるのであろうか。もはや米国は日本に何を期待して同盟関係を持つと言うのか。真に独立することは容易ではない。このような世界情勢や環境変化の中で生活レベルを維持して生きていくには、日本という国の世界の中での存在感を高め、広く支持を得ていかなければならない。容易に資源を得ることは難しくなっている。国際社会での様々な資源の争奪戦争の中で、わが国は、どの分野の経済で戦うのか、それとも文化で戦うのか、技術で戦うのか、またそれとも政治手腕で戦うのか、今や世界から孤立しては生きてはいけない時代である。世界戦略が求められる時代であり、私たちもそれを考えて行かなければならない。

ものを作って供給するだけの時代は終わったのである。システムとしてソフトを含めて、売って行かなければならない時代であり、国として戦略を作り上げるべきではないのではないか。

繁栄の源は、産業の振興である。かつての“MITIモデル”と言われた護送船団方式は世界のビジネスモデルにもなった。鉄鋼、造船から家電、電気機器、半導体、自動車と世界に売れる日本の産業は大いに奮った。世界を席卷し、いまだにその余韻が残り日本社会は潤うことができている。これらの産業は一朝一夕に育ったわけではない。これからの日本を

支える産業を育成しないと膨大な借金を抱えた赤字国家に転落してしまうことになる。社会を支える要となるようなシステム産業を育成することが急務と言える。交通や送配電、物流、食糧生産など広い分野には、システム産業として育成できるものがある。

（５）「均一」から「選択」へ——一元化社会から多様化社会・文化的分散社会への変革

戦後の日本の社会は均一社会を目指し、“1億総中流”とも言われる社会を造ってきた。全てが大学を卒業し、会社員となって社長を目指す—そんな社会を構築すべく教育を行ってきた。平等教育である。結果、“1億総白痴”とも言われる社会現象も出現している。わが国での大量生産の時代は終わったのである。競争力のない単なる労働集団で、日本の国を支えることができるか、はなはだ疑問である。様々な文化が日本に入ってきており多様化している。社会の仕組みも、多様化した社会では、一人ひとりが役割を分担して効果的に働く社会を作り上げなければならない。これからは、わが国も6,000万人の労働人口は急速に減少する。男女の均等な労働や、適切な役割分担で、労働を選択できる社会や生活を実現しなければならない。原子力産業では、女性の技術者は極めて少ない。米国では、原子力発電所の技術者のトップに女性がいるのも珍しくはない。原子力学会においても男女共同参画として、平等で活動する場を設けてきた。しかし、なかなか実効が上がらないのは、男性の意識の低さからなのであろうか。そこに変革を遂げなければ、海外からの人の受け入れの難しい日本の社会では、人口を増やして発展に結び付ける経済活動の活性化は難しい。国際化を進めるとともに、男女共同の社会を構築し、労働を選択できるようにして行くことが必要であろう。

一元化社会とは、同じ文明、同じ家電製品、車、家、生活スタイルを持ち、女性は家庭を守り、男性が会社に出かけ、同じ時間に会社

に出勤し、同じ時間に退社して飲んで帰る、というような夫婦子供2人の家庭を持つことが望まれていた、そんな社会である。この社会から、男女が自由な時間に仕事をし、夫婦で共働き、子供はいる・いないは選択して、空いている季節に休暇を取り海外へ遊びに行く、そんな生活スタイルも選択できる多様化社会へ転換して行かなければならない。それは、役割を分担して効率よく働く社会である。一律な、一元化した均一社会が多様化社会に転換できるか、時間のかかる難しい課題であるが、取り組まねばならない。

一方、地域に目を向けてみると、一時期の“東京へ、東京へ”から、最近では“大阪へ”や“名古屋へ”と同じような大都会がたくさんできたことで、地方の都会への集中も進むようにはなってはきた。しかし、やみくもに地方の多くの都市が大都市化を目指し、社会インフラの膨張と、都市の空洞化が現れてきた。ニーズのない大都市化は、経済的な負担が大きく、経済の失速で様々な難しい問題に直面している。このような一律な大都市化という地方での一極集中を進めていいのだろうか―考えさせられる課題である。

生活スタイルの多様化と合わせて、文明社会と文化社会の選択も可能な社会を構築することも必要ではないだろうか。それは、日本の社会ばかりではなく世界でも言える。世界は日本を含め欧米先進国と言われる文明社会に一律に統一する必要はない。中東のイスラム社会との軋轢はこの問題を我々に提起しているのではないか。中国の社会は13億人、米国の3億人と同じエネルギー消費社会を構築すると、世界はどうなるか。日本では東京や大阪には文明社会を築き、地方には地方の非文明・文化社会を残す。選択して社会生活ができるような多様化社会を構築することが必要なのではないだろうか。エネルギーを始め生活物資を効果的に使って行くには、集中と分散をうまく使って行くしかないと考える。

(6) 化石燃料拡大でいいのか―地球温暖化対策、環境社会への回帰

地球温暖化対策として温室効果ガスの削減が叫ばれ、1997年の京都議定書の制定により、CO₂の売買まで行われるようになった。しかし、日本は首相が、2025年までには1990年基準で25%削減を国際社会に約束したが、昨年の3.11以来、この約束に対する動きは全く停滞しており、実現の見通しは暗い。昨年来の原子力発電所の停止で石油やLPGなどの化石燃料の使用による発電への切り替えにより、その放出量は大幅に増えた。地球温暖化対策へのパラダイムシフトができないうちに、元来た道の方に踵を返してしまった。この動きは極めて重大な問題と言える。

ガス社会から電気社会へと転換を目指してきたはずだが、もう一度ガス社会に戻ろうとしている感がある。日本の社会はその基盤が充実しており、電力、電気を使う社会構造が整っていると言える。地震国として神戸での体験からも特に都会でのガスを使用することは大きなリスクになることが立証されている。蓄積でき運搬が容易なガス利用の特徴を活かした利用の仕組みを考えなければならない。特に都市部でのガスから電気の利用への転換、この“パラダイムシフト”は捨ててはいけなと考える。原子力発電の停止に伴う電力・電気の不足が、もう一度ガスの利用社会への回帰を目指すのは、安全や地球環境問題を考えると間違っていないか、よく考えなければならない。

太陽光発電や風力発電など、自然エネルギーを使うことは、化石燃料などの資源の乏しいわが国にとって必要なことではある。しかし、技術が伴わない今、多くの電力をこれらの不安定な自然エネルギーに頼ることは残念ながら全く見通しのないことである。世界の自然エネルギー導入の先進国である、ドイツやスペインを見ても、太陽光発電の利用は1%にも満たない、風力発電は風況のいいスペインでも10%であり、脱原発のドイツでも原子力発電による電力

の供給は23%を超える。フランスからの電力の輸入を考えると産業を支える電力は原子力発電に頼っている状況がわかる。フランスの原子力発電による電力利用は76%を超えるものであるが、多くの欧州の先進各国は、60%を超える化石燃料への依存が大きい状況にある。そういう状況では環境問題は深刻である。

このように環境に配慮する社会に向かうには、国際社会にも多くの課題がある。しかし、日本は、原子力発電や水力発電により約40%にもなる電力量を供給しており、CO₂の排出を大きく押さえてきた。日本ほど環境に配慮している先進国はないというのも事実であり、国際社会を主導して行くには強みである。

(7) 発送配電一体体制から分離へ

電力の価格競争のために、送配電の分離を進めると言う議論がある。3.11以来の事情を見ると、電力の融通が全国でできることは望ましいことである。

まず送電については、全国一律の送電網の整備が必要と考える。そのためには、

- ① 周波数帯の整備（全国60Hzへの統一）
- ② 北は北海道から南は九州・鹿児島までの
 高压電力幹線の統合一元化
- ③ 安定供給のための送電グリッドの構築
 等の対策が必要である。

このように整備することで、強力な送電網が完成する。その上で、発電、送電、配電の事業を国、民間でどのように分担すべきか、を考えなければならない。

発電では、原子力発電と水力発電は、国もしくは国の外郭団体が設置運営の責任母体となる。他の発電は安定供給の部分は、上記の国の運営で、その他の火力の価格競争部分および太陽光、風力発電の部分は民間の活用が適切と考える。これは1つの案である。

配電は、現状維持か地方自治の領域統合問題を合わせて考え、その領域での統合化を進めるとよいと考える。きめ細かい運用は民間で行うべきであり、国の関与は慎重に考える

必要がある。これから経済均衡の時代に入ると、基幹事業の電力や上下水道、コミュニティー交通のインフラを支える部分は、長期的な見通しの上での投資整備が必要であり、国の運用とならざるを得ない。

ここで取り上げた電力の発送配電の分離の問題は、単純な経済問題ではない。安い電力を得るという経済効果を期待するのは、狭い国土であり、インフラ整備が進み、社会が人種的にも社会構成としても均一であるわが国では、益はないのではないのか。

3. エネルギーのパラダイムシフトはできるのか

(1) エネルギーの現実

これからの日本は、エネルギーの選択として、どんな道を歩むべきなのだろうか。

エネルギー問題は難しい、様々な要因が絡み合い、政治的要素も含む問題である。単純に選択はできない。現在、世界の人口が約70億人、その一次エネルギー消費は石油換算で約130億トンである。CO₂の排出量は約300億トンと1990年の約200億トンの1.5倍である。京都議定書での削減目標を目指すどころか、2030年には更に1.5倍の約450億トンにもなる見通しである。世界的な人口の増加と情報の平等化に伴う生活レベルの向上の指向により、世界はエネルギー戦争の時代に向かおうとしている。わが国は、石油はもちろんLPG/LNGにしても、ウランにしてもほぼ全てのエネルギー資源は輸入に頼っている。エネルギー自給率は4%と極めて少ない。長期に使い、再生もできる原子力発電のウラン燃料を国産として加えて、ようやく20%弱である。無駄には使えない。これからは、エネルギーセキュリティが重要な課題となってくる。

一方、例えば太陽光パネルのシリコン原材料も使える状態にするのに膨大なエネルギーが必要なのである。かつて、アルミニウムを金属として得るのに、膨大な電力が必要で

あり、わが国の電力料金の高さから、わが国でのアルミニウムの精錬をあきらめた経緯がある。それほどに、原材料を使える形にすること自体が、エネルギー利用として重要な課題なのである。太陽光パネルはそのほとんどが電気料金の安い中国で生産されている。日常の生活においても同様である。例えば、冬の夏野菜の消費や灯油で育った野菜や果物を考えてみればわかる。そんな社会システムが出来上がっているのが現実である。単純に「節約」だけではすまないように思える。

全体としての効果的なエネルギーの使い方を考えた社会システムを構築していかなければならない。

（２）2050年に向けてのエネルギー選択

発電設備は短期に建設できるものではない。短期と言われる火力発電所でも環境アセスメントから始め、完成までには10年程度はかかる。全ての送発電設備はほぼ同じようなものである。2050年に向けての決断のためには、2030年の計画を今進めなければならない。先にも述べたように、電気を得るためには、ウラン燃料などの核燃料は極めて効率的であり、発電に供することで、原子力の大きなエネルギーは平和利用としての活用に貢献できる。しかし、どんな文明の利器にも求められるように、注意深く使うことが重要である。風力発電は、その技術は成熟したものであり、比較的安価に制作できるので有効な風が吹く地域では大いに活用すべきである。一方、太陽光発電は、太陽パネルを製造するのにコストがかかることや負荷変動に大きな負担を与えることを克服すれば、極めて有用な自然エネルギー源となる。日本のような資源の少ない国では、エネルギー源の全てを効果的に使うべきであり、使う使わないを、決めてかかるほどにエネルギー源が豊かな国ではないのが現実である。これらの多様なエネルギーをシステム化し、有効に効率よく活用することこそ、今進めなければならない。

電源構成は一度決めてしまうと、10年や20年では大きくは変更できず、子供、孫の世代の生活に大きな影響を与える。一時的な感情に流されることなく、少なくとも20年以上先の地球環境や世界やアジアの状況、技術の進展の見通しを想像した上で、国民一人ひとりが納得のいく判断、より正しい判断をすることが必要である。原子力発電は、有効なエネルギー確保の手段である、現実的に最も有望である。しかし、ウラン燃料の扱いなど、将来の燃料確保と廃棄物の処理処分とを考えて、最適な方法を選択することが必要である。

４．研究開発戦略の“パラダイムシフト”は可能か

原子力発電の分野での研究開発はどうあるべきか。研究開発における“パラダイムシフト”とはなにか。

これは重要な問いかけである。原子力発電を国として推進するか否か、判断をしなければならない。国内の産業の競争力を持たせるために進めてきたのが、原子力発電ではないか。安い電力を提供し、産業を育成し、それにより輸出を推進することは、国として益を得る重要な課題である。そこで原子力発電にかかわる、特に安全にかかわる研究開発は、国として推進することに抵抗はない。ここで、もう一度、産官学が一体となって、必要な研究開発を進める体制を構築することが必要ではないか。その統合の一環として、原子力安全にかかわる研究開発の「技術戦略マップ」いわゆる「ロードマップ」を作成し、それに基づき、産官学で分担して目標を明確にした研究開発を進める管理の体制を構築して、推進してはどうだろうか。

これまでは、新しい次世代のシステム、機器の開発を目指してきた。しかし、3.11以降、機器システム、特にハードはもろいものと言う認識が生まれた。原子力安全を確保する研究開発のテーマを例示する。3.11の教訓を活

かした反省への対応のための研究開発項目は多々あるが、場当たりの課題ではなく、本質的に原子力安全を担保するための研究開発に取り組む必要がある。

○ システムとしての安全評価

いわゆるシステム安全の評価方法は、確率論的安全評価（PSA）として炉心溶融確率（CDF）を求める手法がある。しかし、物理現象をトレースする評価法の概念はあるが、具体的には提案されてはいない。原子力発電システムではその安全確保はますます厳しく、また見える評価が求められるようになった。この複雑系の系統や機器の相互の関係を考慮したシステムの安全評価手法を一般化して確立することが、原子力発電システムの安全性を見える形で示すものと考ええる。

○ 経年プラントのシステム安全評価

運転プラントの原子力安全の評価については、これまでは維持基準などにより、き裂があるものの健全性評価は行われてきた。しかし、運転プラントの安全評価への見直しには真剣に取り組まれてこなかった。30年目、40年目の高経年化技術評価においてようやく、構造劣化の評価を網羅的に行っている状況である。そこで、国のプロジェクトでは、プラント全体の安全を総合的に評価する「システム安全」を確保するための、運転プラントの原子力安全を保全と結び付けた定量的評価手法の研究を進めている。それは、様々な材料劣化などの機能を低下させる状態変化の影響を含めて、系統の全てに渡り評価し、その機能低下による系統の求める機能の喪失（損傷）することにより、生じるリスクの総和として評価することで、安全の程度を把握することである。同時に、基準となる安全限界や考え方の基盤を考慮して、最新の基準値で評価することが重要なポイントになる。

このように、運転プラントのシステム安全の定量的な評価法は、その構築に取り組み始めたばかりであるが、重要な役割を果たすこ

とが期待される。

○ プラントシミュレータの開発研究

原子力発電所の設計・製造・建設は多くの規制・基準を適用して行われる。また、最新の知見を反映して、常に最適化が図られている複雑な系統、システムである。これからの原子力発電システムの設計・製造・建設においては、先のシステム安全の評価と合わせて、システム全体としての健全性評価・確認および安全評価が複雑に、またその評価精度や安全評価の定量化など厳しく求められるようになる。そこで、これらの評価を一貫して、また全体を整合して、取り扱える解析評価モデルを構築することが必要である。

この仕組みを用いて、運転プラントでの補修・保全に適用することや、非常時のシミュレーションを行い、改善工事計画や保全計画、異常事象への対応の訓練にも適用できる。もちろん先に示した経年プラントのシステム安全評価への適用も可能となる。

このシミュレータは、炉内・炉心・燃料の挙動はもちろん、冷却システムの作動状態、構造の振動や健全性評価が行えるようにするものである。種々の物理・工学モデルを適用し、個々のプラント全体の解析・評価が常時、非常時を通して適切に行える、様々なレベルのモデル開発により達成される。

5. まとめ

これからの日本は、米国の庇護のもとから脱却して新たに国際社会に乗り出さざるを得なくなる。これが最も重要な“パラダイムシフト”である。

そのために改革しなければならないことは、ここにも挙げたように社会の仕組みの改革を含め、多々ある。3.11の福島原子力発電所の事故は、1つの教訓であり直接的な対応の課題もあるが、それを広く展開して本質的な社会の様々な改革に取り組むということが、

私たち、日本人に突き付けられた重要な課題であろう。原子力発電システムを参考に、わが国が取り組むべき社会構造の変革と日本の社会が進むべき産業の育成、日本の電力事情とその研究開発の方向を上げた。これまで培ってきたシステム構成能力を活かし、世界に売り込むことが、わが国の新たな産業の創生に役立つものと考ええる。

日本の社会がこれらの“パラダイムシフト”に、どの程度取り組めるか、期待したい。

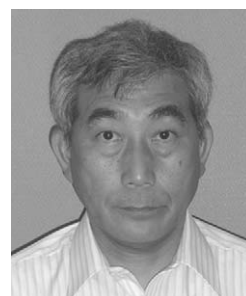
参考文献

- (1) Japan Almanac
- (2) History Database of the Global Environmentによる年央推定・予測人口。K. Klein Goldewijk and G. van Drecht, "HYDE 3.0: Current and historical population and land cover," in Eds. A. F. Bouwman, T. Kram, and K. Klein Goldewijk, "Integrated modelling of global environmental change. An overview of IMAGE 2.4," Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP), Bilthoven, The Netherlands.

石炭ガス化の現状と化学原料製造 ～中国におけるガス化炉の運転状況を中心に～

坪井 繁樹

（プロジェクト試験研究部
主管研究員）



1. はじめに

東日本大震災以降、日本におけるエネルギー政策は大きく転換を迫られ、あらためてエネルギーベストミックスの在り方が重要視されている。石炭は安定供給、経済性において優れたエネルギー源である。石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated coal Gasification Combined Cycle）および石油に替わる化学原料として石炭のガス化技術が注目されている。

本稿では、化学原料製造のための石炭ガス化技術について、中国を主体に、最近の現地での調査結果を基にガス化炉仕様、トラブル内容および対応等の現地の運転状況について報告する。

2. 中国でのガス化炉（化学原料製造）の設置状況

石炭ガス化炉の世界（中国以外）での設置状況は十数基で、中国内での石炭ガス化炉の設置状況は約50基であり、全世界では中国が大半をしめている。中国においてGE炉は初期に多く導入された炉で、スラリーフィードで効率は若干低いが現在でも多く新設されている。GE炉の運転実績により中国にて独自開発された華東理工大炉は2000年代に入り設置数が急増している。Shell炉は2006年以降に導入され、初期トラブルも克服され現在は概ね安定しており増加傾向にある。

3. 中国における石炭ガス化炉導入経緯および背景

中国における初期のガス化炉導入目的は、肥料用のアンモニア原料を得ることであり、主にGE炉が導入された。また、資源政策により、石油、天然ガスを原料とした大型アンモニアプラントが石炭原料によるガス化炉に転換され大型化された。

2000年代に入り肥料の自給が達成されると、メタノール利用量の拡大に伴いメタノール目的の石炭ガス化炉プラントが増加してきた。大型メタノールプラントの計画が頻発したため、中国政府の抑制策として、100万トン/年以下の規模、および天然ガス原料のメタノールプラント計画は認可しない方針が2006年に打ち出された。現在、新規計画は減っている。

メタノールの利用先としては、図1に示す

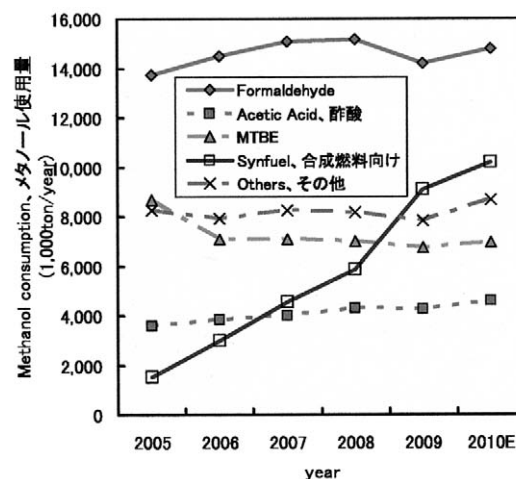


図1 世界のメタノールの利用状況⁽¹⁾

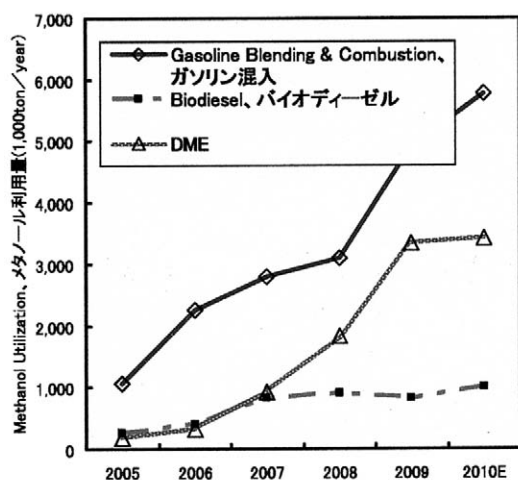


図2 合成燃料の利用状況⁽¹⁾

ように、ホルムアルデヒド、MTBE (methyl tert-butyl ether)、酢酸、合成燃料が主体である。ホルムアルデヒドはフェノール樹脂、尿素樹脂の原料で、接着材、塗料、防腐剤に利用されている。MTBEはガソリンのオクタン価向上添加剤として利用されている。

合成燃料用としては、図2に示すようにガソリン混入、DME (dimethyl ether) としてLPG混合して利用される。特に中国ではガソリン混入での利用が多い。

4. 中国における石炭ガス化炉 (GE炉) の運転状況

上海焦化有限公司は、上海市南部の工業団地内にある。1980年代から都市ガス用として各種石炭ガス化炉 (コークス炉、U-Gas炉、UGI炉) を設置していたが、現在全て停止している。1995年からメタノール生産用としてGE炉を設置し、現在8基 (1995年：3基、2003年：2基、2008年：3基) を有している。市街に近いことから、同敷地内では増設許可が困難なため、安徽省の工場にGE炉を4基増設中で、2012年5月運転開始予定である。

8基中6～7基を運転し、約4,500 t/Dの石炭を処理している。バーナーの交換 (約3カ月毎) は別としてメンテナンス期間は1カ月/年である。運転経験が活かせるように炉の仕様

は増設4基も含めて全て同じにしている。逆に仕様が少しでも変ると運転に慣れるまでに時間が掛かるとも考えられるが、現状のGE炉8基については十分に使い慣れている様子であった。予備機までが故障停止することをトラブルとしているが、ここ数年トラブルは無いとのことであった。トラブルは地方政府に報告義務があり隠すことはできない状況となっている。

安徽省の工場に増設するGE炉を選定するときに、中国国産技術である華東理工大炉を採用しなかった理由を質問したところ、建設費は若干安いが運転に習熟したGE炉を優先したとのことであった。政府からの導入指導は特に無かった様子である。

5. 中国における石炭ガス化炉 (華東理工大炉) の運転状況

兗碭集団は1976年に設立され、石炭鉱業、石炭化学、アルミニウム、機器製造を業務とする中国内有数の企業グループである。魯南化肥工廠は兗碭集団の基幹化学工場であり、兗碭国泰化工有限公司は兗碭集団の傘下の石炭化学会社である。両社とも山東省滕州市に隣接して所在する。

兗碭集団魯南化肥工廠には、1993年および2001年に石炭処理量360 t/D基のGE炉が4基 (1基予備)、2007年に石炭処理量1150 t/D基の華東理工大炉が1基設置され、メタノール、アンモニア、酢酸、尿素が生産されている。

兗碭集団国泰化肥有限公司には、2005年に石炭処理量1,150 t/D基の華東理工大炉が3基 (1基予備) 設置されており、メタノール、酢酸、酢酸エチルエーテルの生産および80MWのIGCCの燃料とされている。ただし、IGCCは現在赤字のため停止しており、所内に別途石炭ボイラーを設置している。華東理工大炉の設置を国家プロジェクトとして認定してもらうためにIGCCを含めたとのことであった。

華東理工大炉は、兗碭集団魯南化肥工廠で

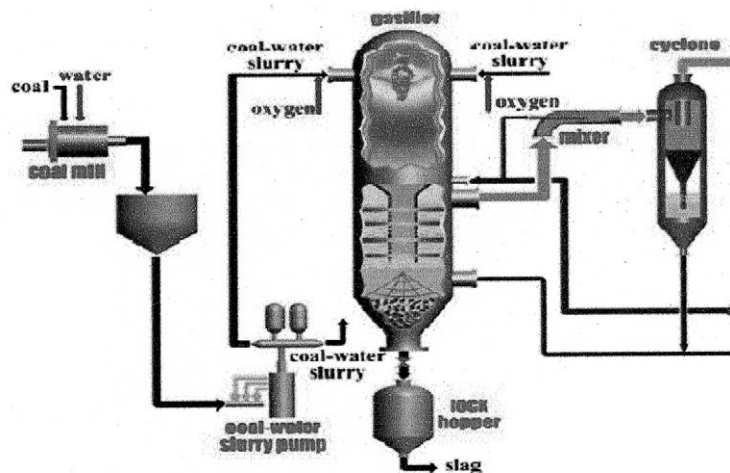


図3 華東理工大炉の構造⁽²⁾

のGE炉の長年の独自改善（稼働率140％）を基に，華東理工大と共同開発した技術で，GE炉の改良炉といえる。知的財産権利配分は，兗碭集団国泰化肥有限公司が60％，華東理工大が30％，設計会社が10％となっている。構造は図3に示すように，GE炉と同様にスラリーフィードの塔頂からのダウンフローであるが，炉頂部に小型の4本のバーナーが水平対向に設置され旋回流により安定燃焼する様になっている。

バーナー寿命は90～140日とほぼ GE炉と同等と思われる。定期メンテナンスとしては耐火材料寿命による交換工事が主体で，周期は図4に示すように7,500時間（約10カ月）である。

兗碭集団魯南化肥工廠および兗碭集団国泰化肥有限公司ともにGE炉，華東理工大炉の商用運転には自信を持っている様子であった。

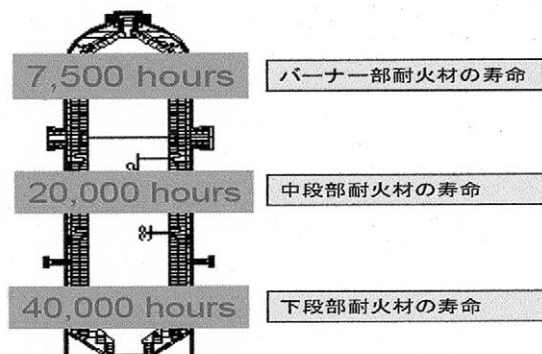


図4 耐火材料の寿命⁽²⁾

特に，国内技術である華東理工大炉については，積極的に拡大を目指しており，約20社50基の計画があるとのことであった。また，ドライフィード方式も開発しており，商用機1,000 t/Dを計画中である。

6. 中国における石炭ガス化炉（Shell炉）の運転状況

中国石化安慶分公司の所在地は図5に示す様に安徽省安慶市である。原油処理量500万 t/yの石化コンビナートで肥料，化繊原料を生産しており，2013年には原油処理量を1,000万 t/yに倍増する計画がある。2006年に石炭処理量2,000 t/DのShell炉を1基（予備無）運転開始した。アンモニアと回収した二酸化炭素（CO₂）から尿素を生産している。

燃料油の脱硫水素用に石炭処理量750 t/DのGE炉を2基（1基予備）計画しており，2013年に運転開始予定としている。コンビナートとして4年連続運転が必要なため，予備機が必要で，Shell炉に比較して投資額が少ないGE炉を選定している。

現在，Shell炉の運転は安定しているとのことであったが，過去には次のような4件のトラブル事例があったという情報を得た。事例に対応する箇所は図6に示すとおりである。

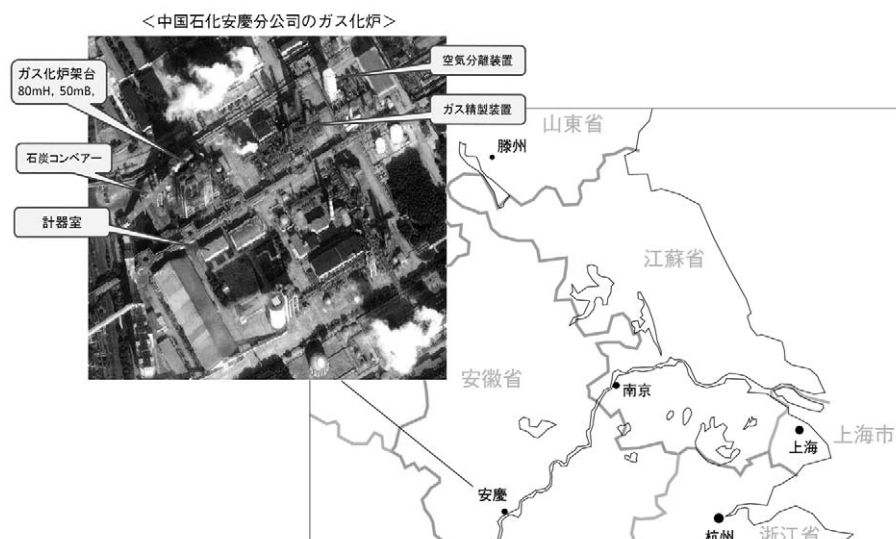


図5 中国石化安慶分公司の所在地

① マッフル部（バーナー周辺の襟巻状のプロテクト部材）に穴が開くトラブルが運転開始直後に発生した。原因は溶融灰に関連するが詳細は教えてもらえなかった。施行錯誤の結果対応策を開発し特許申請中とのことである。

② 炉出口部上昇管（水冷管ダクト部）部の水冷管減肉による冷却水漏れが運転後100日位で発生し、現在も未解決で、材質、肉厚を検討中とのことであった。

③ 炉内水冷壁に付着したスラグが山すべり状態で落下し、炉下部のスラグ出口部を詰まらす。圧力差にて検知している。

④ 出口ガス冷却用熱交換器がファウリングに

より出口ガス温度が上昇（通常280℃から340℃に）し、下流設備を損傷する。対策としては、炭種の選定方法と自社開発の添加物（特許申請中）を原料石炭に混入し、前項（スラグ出口の詰まり）と含めて解決した。炭種の選定では、Shellが推奨する灰粘度が5～25ポアズなので、対象炭の5ポアズの時の温度と25ポアズの時の温度差 ΔT （粘温特性）を指標とする。 ΔT が大きいほど運転し易い炭種となる。

7. 中国における石炭ガス化炉の運転状況のまとめ

（1）Siemens炉について

中国でのSiemens炉の導入は、2010年以降と

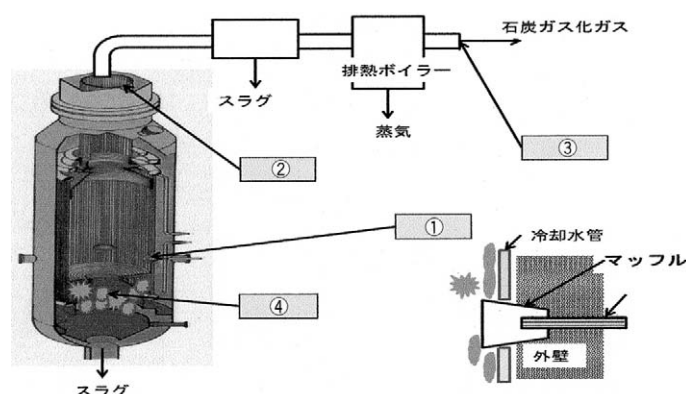


図6 Shell炉のトラブル事例

新しい。中国石油化学工業企画院の担当者より間接情報として「神華集団寧夏プロジェクト」の情報を入手した。Siemens炉は乾式石炭供給のため、湿式石炭供給に比べ炭種多様性が良いこと、および塊炭供給に比べ汚染が少ないことが期待されている。

石炭処理量が2,000t/DのSiemens炉5台は2011年据付を完了したが、試運転時に1台でトラブルが発生した（ロックホッパーの詰まり、およびバーナー異常による火炎噴射方向が変わり水冷壁が損傷）。このため、炉の立ち上げを慎重に行うことになり、5台の試運転完了は2012年半ばの予定となった。しかし、フル生産ではないが156万トンのメタノールを生産したとのことである。

（２）ガス化炉の運転状況のまとめ

今回の中国調査の結果、中国での石炭ガス化炉の運転状況全般について下記のことが言える。

GE炉の実績が長く設置台数も多い。長年の経験にて運転は安定化しており、自主改良技術である華東理工大炉も近年増加している。Shell炉についても当初限られた灰融点の炭種しか使用できなかったが、装置改造と炭種配合により、安定運転が可能となった。今回調査した工場（上海焦化有限公司、兗 礪集団、中国石化安慶分公司）では、いずれも運転は安定している様子で自信を持っていた。

Siemens炉、IGCCについても、現在トラブル等で計画が遅れ気味であるが、豊富な経験値により運転安定化する可能性が高いと考えられる。今後、2～3年後のフォローが必要であると感じた。

【謝辞】

本稿の内容は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託研究「革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト」において、弊所が実施した現地調査実績を基に取りまとめたものです。NEDOはじめ調査先の関係各位には適切なご指導を頂きました。NEDOおよび関係各位に謝意を表します。

参考文献

- (1) <http://www.methanol.org/Methanol-Basics/Resources/MMSA-Global-Methanol-Supply-and-Demand.aspx>
- (2) 山東兗礪国拓科技工程有限公司カタログ

平成23年度 事業報告の概要

(財) エネルギー総合工学研究所

当研究所における平成23年度事業の概要は以下のとおりである。

(1) 当研究所は、「エネルギーの未来を拓くのは技術である」との認識の下、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・官の緊密な連携の下、各エネルギー技術分野における専門的な知見を集め、「総合工学」の視点に立脚して調査、研究、および評価を行い、成果の普及等に努めてきている。

昨年3月発生の東日本大震災および福島第一原子力発電所事故を契機に、わが国のエネルギー政策は今夏を目途に見直しがなされている。今夏の電力需給が懸念される状況の下、原子力発電の再稼動に関し議論が行われるとともに、原子力発電の代替として石油や天然ガスの需要が高まっている。国際的には、中東情勢は、長期政権を崩壊させた中東民主化運動や、イランを巡るホルムズ海峡閉鎖の懸念など流動的で、原油価格は年間を通して100ドル/バレル程度の高い水準で推移した。また、地球環境問題に関し、わが国は延長された京都議定書において削減数値目標を明示せず、自主的に温室効果ガス削減努力を継続していくこととなった。

(2) 平成23年度において、東日本大震災および福島第一原子力発電所事故を踏まえ当研究所は、新たなパラダイムに基づくエネルギー需給構造のあり方について検討を行う全所的な調査

研究（ポスト3.11 研究）を実施した。今後の安定的な電力供給に資する高効率火力発電、バイオマス等の再生可能エネルギー利用発電技術、次世代電力ネットワーク等に関し調査研究を実施した。原子力分野では、原子力災害の発生という現実を見据え原子力安全について科学的な視点から再度問い直すため広範な専門家が参加するシリーズセミナーを開催するとともに、住民避難を余儀なくされている福島県環境回復のためのセミナーや国際シンポジウム等の開催、事故炉の円滑な廃止措置のあり方について議論する国際シンポジウム等の運営を実施した。さらに、過酷事故発生時の原子炉内の挙動解析を適確に行うSAMPSONコードの解析能力を飛躍的に向上させつつ福島第一原子力発電所の事故炉の炉心状況を一刻も早く把握することを目指したプロジェクトを開始した。

昨年6月発行した、省エネルギーや節電に資するエネルギーマネジメントシステムに係る国際規格（ISO50001）に関し、所内にISO センターを設置し、その普及促進に努めた。当研究所は、平成25年4月に一般財団法人へ移行することを目指し、本年夏頃に移行の申請を行うべく諸準備を進めた。

以下に各エネルギー分野における調査研究活動を示す。

① 総合的な見地からの調査研究

上述のポスト3.11 研究、ISO50001の策定および普及促進に加え、最新の技術情報および評価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についてアンケート調査を実施した。

② 新エネルギー・エネルギーシステムおよび水素エネルギー関連

再生可能エネルギー分野ではバイオマス由来の液体燃料製造技術，集光型太陽熱発電（CSP）等に関し，電力システム分野では次世代電力ネットワーク，蓄電池等に関し，省エネルギー分野では超臨界CO₂ガスタービンの開発，電気製品の効率向上に資する国際協力に関し，自動車エネルギー分野では蓄電池利用，電気トラック（EVトラック）等に関し調査研究を実施した。また，水素エネルギー分野では水素供給チェーン，定置用燃料電池の災害対応性等に関し調査研究を実施した。

③ 化石エネルギー関連

クリーンコールテクノロジー（CCT）およびCO₂の回収・貯留（CCS）システムに重点を置き，石炭ガス化発電からCO₂の回収・輸送・貯留までのシステムの評価，石炭利用技術ロードマップの見直し，また，将来の鉄鋼用原料炭の不足を踏まえて褐炭からの強粘結炭製造技術等に関し実現可能性について調査研究を行った。

④ 地球環境関連

地球環境問題の解決に資するため，当研究所の地球環境統合評価モデル（GRAPE）を活用して，石炭起源の低炭素原燃料とCCSの導入・普及のシナリオに係る調査研究を国際共同研究として実施するとともに，アジアと原子力に重点を置いたサステナブルなエネルギーシナリオのあり方について調査研究を実施した。

⑤ 原子力関連

原子力発電は，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が要請されており，前述のとおり，原子力安全，福島環境回復，事故炉の廃止措置に係るシンポジウムやセミナーを海外の専門家も交え開催・運営するとともに，過酷事故の挙動解析コードの性能向上等を行った。次世代軽水炉に関しては，当面は，既設および計画中の原子力発電所の安全対策高度化に活用しうる技術に絞り，重点的に開発を行っている。また，将来の革新的原子炉である第4世代炉開発の国際共同研究へ引き続き参画し，高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る自主基準の検討，トラブルの人的要因に係る教訓の抽出等の安全確保に資する調査研究を実施し，また，国が実施する原子力人材育成に係る業務の支援を行った。さらに，高速増殖炉および軽水炉の事故時における炉内の事象を把握することに資する安全解析，原子力発電施設の廃止措置等に係る調査研究を実施した。

研究所のうごき

(平成24年4月2日～7月1日)

◇ 第83回理事会

日 時：6月13日(水) 11:00～12:10

場 所：経団連会館(5階) 501号室

議 題：

- 第一号議案 平成23年度事業報告書および決算報告書(案)について
- 第二号議案 理事4役の人事について
- 第三号議案 評議員の一部交替について
- 第四号議案 公益法人制度改革への対応について
- 第五号議案 その他

◇ 月例研究会

第311回月例研究会

日 時：4月27日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館5階501・502会議室

テーマ：

1. 欧米諸国における電気事業の現状～発送電分離、卸市場活性化、小売市場自由化を中心に～
(一般社団法人 海外電力調査会 調査部 副主任研究員 大西 健一 氏)
2. 東日本大震災後から1年～世界経済とエネルギー情勢
(和光大学 経済経営学部 経済学科教授 岩間 剛一 氏)

第312回月例研究会

日 時：5月25日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館7階701・702会議室

テーマ：

1. 世界の石炭ガス化技術の全容(化学原料製造及び発電での実績と最近のトラブル事例調査)
(財エネルギー総合工学研究所 主管研究員 坪井 繁樹, 主管研究員 入谷 淳一)
2. 新しいC1化学を目指して
(富山大学大学院 理工学研究部 工学系分子反応工学分野 教授 椿 範立 氏)

第313回月例研究会

日 時：6月29日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館5階501・502会議室

テーマ：

1. 日米欧におけるHEMSの最新開発動向

(財)エネルギー総合工学研究所 主任研究員
野口 英樹)

2. BEMSアグリゲータとしての取組み

(株)NTTファシリティーズ 事業開発部 スマートビジネス部門 部門長 横山 健児 氏)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：蓮池 宏, 後藤 信之, 村田 謙二

テーマ：車種選択モデルとコスト低減モデルを用いた代自動車の普及分析

発表先：自動車技術会2012年春季大会学術講演会(於, 横浜)

日 時：5月24日

発表者：小野崎 正樹

テーマ：プロセス開発におけるプラント設計の醍醐味ー石炭液化プラントの設計・運転の経験からー

発表先：新潟地方化学工学懇話会 第130回講演会

日 時：5月24日

発表者：石本 祐樹

テーマ：Study of Global Demand for Low Carbon Hydrogen toward 2050

発表先：World Hydrogen Energy Conference (WHEC 2012)

日 時：6月4日

発表者：萩原 直人, 黒沢 厚志

テーマ：石炭火力発電所における水銀の大気排出規制の動向

発表先：エネルギー・資源学会 第31回エネルギー・資源学会研究発表会

日 時：6月5日・6日

発表者：小野崎 正樹

テーマ：日本の石炭液化技術

発表先：日中CCTセミナー

(於, 中華人民共和国太原市)

日 時：6月6日～8日

発表者：蓮池 宏, 小川 紀一郎, 宇多村 元昭(東京工業大学), 他2名

テーマ：超臨界CO₂ガスタービン発電システムのベンチスケール実証試験

発表先：日本機械学会第17回動力・エネルギーシンポジウム(於, 福岡)

日 時：6月21日

発表者：正田 知士

テーマ：ポスト福島のエネギー需給

発表先：日本学術振興会製銑54委員会（東北大学
多元物質科学研究所）

日 時：6月28日

発表者：時松 宏治，入谷 淳一，小野崎 正樹，柴田
和正（みずほ情報総研），矢次 洋平（みず
ほ情報総研）

テーマ：エネルギーを取り巻く環境変化と今後の
CCT技術開発のあり方に関する検討

発表先：NEDO平成23年度調査事業成果報告会

日 時：7月6日

[寄稿]

発表者：埴 雅一，小野崎 正樹

テーマ：「福島第一原子力発電所事故後の天然ガ
ス及び化石燃料の利用動向—第1回「化
石燃料の利用動向」

寄稿先：日本原子力学会誌『ATOMOΣ』4月号

発表者：入谷 淳一，時松 宏治

テーマ：「福島第一原子力発電所事故後の天然ガ
ス及び化石燃料の利用動向—第2回「石炭の
利用動向」

寄稿先：日本原子力学会誌『ATOMOΣ』5月号

発表者：小野崎 正樹，若村 修（新日鉄エンジニア
リング），持田 勲（九州大学）

テーマ：石炭基礎講座（14）石炭液化

寄稿先：日本エネルギー学会誌6月号

[座談会]

発表者：村田 謙二，亀山 秀雄（東京農工大学），
小島 由継（広島大学），折原 新哉（三井
化学㈱），虞瀬 正典（JX日鉱日石エネルギ
ー㈱）

テーマ：エネルギーキャリアとしてのアンモニア
利用技術の展望

発表先：PETROTECH 第35巻第5号（5月）

◇ 人事異動

○4月9日付

（嘱託採用）

Marco Pellegrini 原子力工学センター嘱託研究員

○5月1日付

（嘱託採用）

吉田一雄 プロジェクト試験研究部 参事

○6月26日付

（出向解除）

西 順也 プロジェクト試験研究部 主任研究員

○6月27日付

（出向採用）

川野光伸 プロジェクト試験研究部 主任研究員

○6月28日付

（出向解除）

野崎広治 プロジェクト試験研究部 主管研究員
兼 原子力工学センター

○6月29日付

（出向採用）

斎藤清一 原子力工学センター 主管研究員

○6月30日付

（退任・解嘱）

山田英司 専務理事 兼 企画部長 兼 プロジ
ェクト試験研究部長

（解嘱）

佐藤憲一 常務理事

（出向解除）

野口英樹 プロジェクト試験研究部 主任研究員

長野将美 プロジェクト試験研究部 主任研究員

○7月1日付

（就任）

佐藤憲一 専務理事 兼 事務局長 兼 総務部長
兼 ISOセンター長

（兼務）

田中隆則 理事 兼 原子力工学センター長：企画
部長兼務

（出向採用）

山本真一 プロジェクト試験研究部 主任研究員

橋倉 裕 プロジェクト試験研究部 主任研究員

編集後記

欧州における経済混乱の行方はどうなるのだろうか？2008年のリーマンショックのように世界を揺るがす出来事に直ぐには発展しないとしても、根の深い現象だけに中期的にはさらに大きな混乱が引き起こされることも心配される。ギリシャ、スペイン、ポルトガル、イタリアといった古い歴史を誇る国々が苦しむ姿を、単に「栄枯盛衰」、成長サイクルの必然として片付けていては、潜在する大きな危険を野放しにすることになるだろう。

国際エネルギー機関の“World Energy Outlook 2011”において、世界の一次エネルギー供給は2035年に向けて増加し続けると予測されている。ただし、その増加は“非OECD諸国”でのみ起こる。日本は減少、そして米国、EU、および“他のOECD諸国”は足踏み。と言うことで、いわゆる先進国のエネルギー消費は増えない。中国を筆頭として、インド、中東、アフリカなどの非OECD諸国は増加を続け、2035年にはOECD諸国を圧倒する。これも歴史の流れであり、この動きを変えることはできないだろう。

わが国についてみると、省エネ、人口

減少、生産の海外移転などを主な原因として、エネルギー消費は今後減り続けられると思われる。これも押し留められない変化であろう。衰退ととるか成熟と捉えるか、いずれにしても飽和の只中でその飽和をバネとして上向きの動きを作り出すことが求められている。

人口が減る、エネルギー消費が減ると言っても、1億2,000万の人口を養うために日本経済は依然として原油換算6億キロリットル弱という膨大な量のエネルギーを必要とし、そのほとんどを輸入に頼り続けなければならない。大飯原子力発電所3号機の再稼動が実現したことは、輸入依存度を少しでも減らすという意味でほっとさせることであり、残りの号機の再稼動が待たれる。当面化石燃料が、原子力の穴を埋めなければならないことは明らかであるが、原子力無しでは燃料購入時の価格交渉力も弱まることになる。原子力発電の安全性を担保するシステムの再構築を急ぎ、国民の理解を深め、原子力発電再稼動を推進する努力を粘り強く続ける必要がある。

編集責任者 正田知士

季報 エネルギー総合工学 第35巻第2号

平成24年7月20日発行

編集発行

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（8F）

電話（03）3508-8894

FAX（03）3501-8021

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

（印刷）株式会社日新社

※ 無断転載を禁じます。