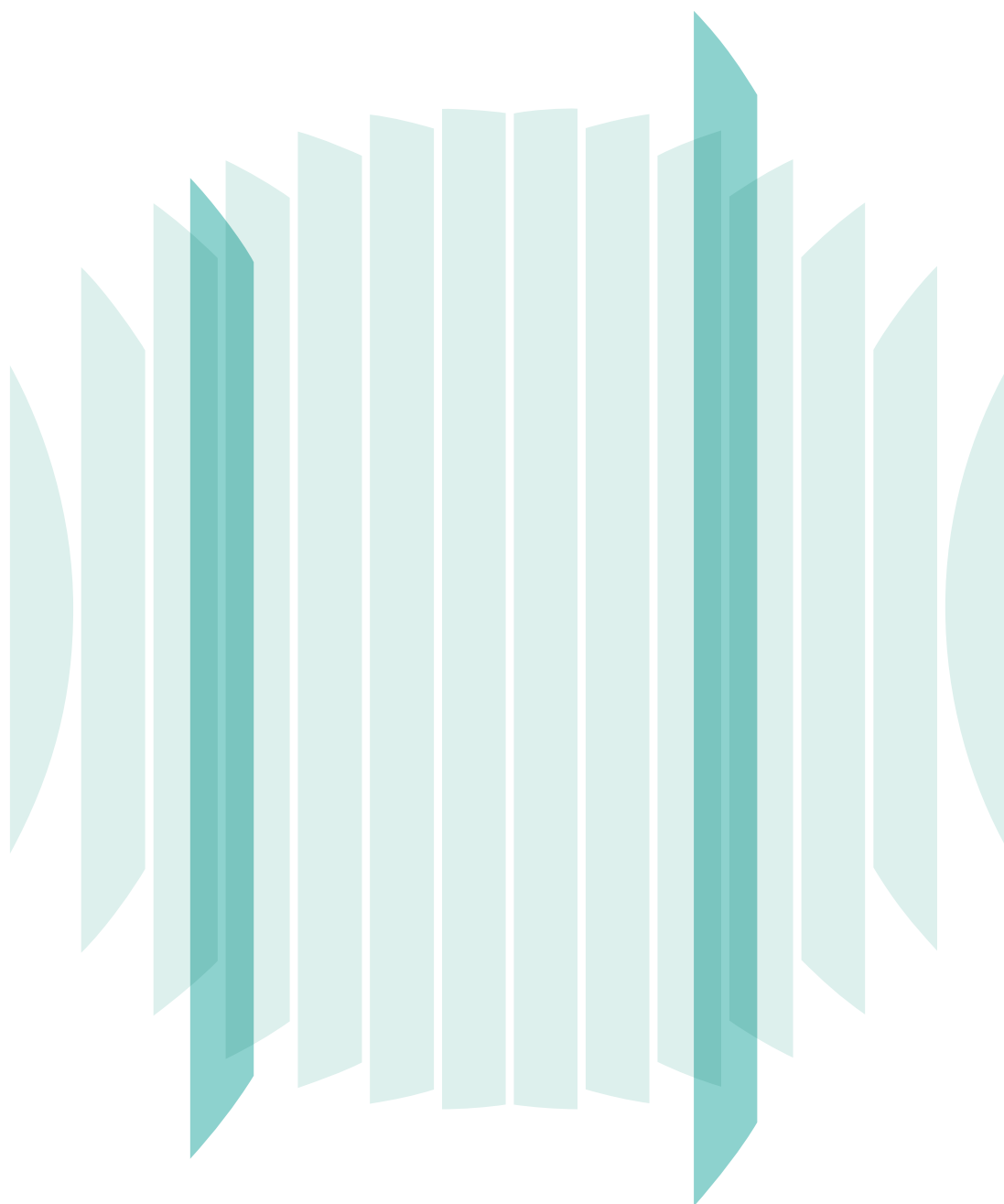


# 季報 エネルギー総合工学

Vol. 36 No. 2 2013. 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】

資源エネルギー庁 審議官 中西 宏典 …………… 1

## 【座談会】

### 地熱エネルギー開発への期待

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

## 【寄稿】

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

## 【寄稿】

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

## 【調査研究報告】

革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト  
～発電から CO<sub>2</sub> 貯留までのトータルシステムのフィージ  
ビリティー・スタディー～  
プロジェクト試験研究部 主管研究員 坪井 繁樹 …………… 46

## 【調査研究報告】

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

## 【事業報告】

平成 24 年度 事業報告の概要 (一財) エネルギー総合工学研究所 …………… 64

【研究所のうごき】 …………… 66

【編集後記】 …………… 69

# 巻頭言

中西 宏典

( 資源エネルギー庁  
審議官 )



近年、シェール革命によって、米国は天然ガス輸入国から純輸出国に転換するのではないかと指摘も見られる。そして、それは国内のエネルギーコスト、ガスを原料とする化学製品価格の低下をもたらし、更に中国の労働コストの高騰等とも相まって、製造業の米国国内への回帰、さらには産業競争力の向上にすらつながる可能性を秘めていると言える。

他方で、逆に、エネルギー輸出国である国が輸入国に変貌してしまうことを何とか回避しようとする動きも顕在化している。中国は2000年代に入り石油の大輸入国に変わり、近時、世界で資源・エネルギーの確保を展開しており、インドネシアも経済発展のため天然ガスは輸出に回すものの、石炭の輸出は抑えようとしている。また、中東諸国においても、自国の石油・天然ガス資源を温存するために、代替エネルギー源を確保しようとする国もあり、中には原子力発電の導入に積極的な国も出て来ている。

目を日本に転じれば、福島第一原子力発電所事故を契機に、LNGを中心に石油などの火力発電の焼き増しを行ったことで、国際的な天然ガス市場に一つの大きな消費国が出現したかのような状況を生みだし、価格高騰を引き起こす等のインパクトをもたらしている。

これらを背景に、わが国の2012年度の貿易収支は、約8兆円の輸入超過と、2年連続の大幅赤字となった。天然ガスで見れば、輸入量の増大とともに価格も上昇し、この2年間で輸入金額は3.5兆円から6.2兆円へと急増している。これは、図らずも原子力発電という技術がもたらしめている経済面でのインパクトを示したものとも言えるが、日本経済への影響は極めて大きいと言える。

幸い、日本の自動車産業は依然国際競争力を保っており貿易収支も 11 兆円の黒字を計上しているが、電機産業についてみると、20 年前には 9 兆円を超えていた貿易黒字が 2012 年度にはわずか 5,500 億円に縮小してしまっている中で、エネルギー分野においても、このような状況が続けば、日本経済の基盤に大きな問題を生じることとなりかねない。

当然ながら、国内のエネルギー価格の上昇は、日本経済の競争力を低下させることとなり、このままであれば、わが国の経済の国際競争力が大きく低下してしまう状況にある。そのような意味で、この 6 月に取りまとめられた新たな成長戦略である「日本再興戦略-Japan is back」において、立地環境整備の一環として低廉な電力供給が一つの主要なテーマと位置づけられた点は大きな期待が持たれる。とりわけ、米国のシェール革命は世界レベルで天然ガス価格の低下をもたらしつつあり、その恩恵をうまく日本に取り込むことは、わが国にとっては一つの追い風に乗る意味からも重要である。

現在、総合資源エネルギー調査会においてエネルギー政策の見直しの議論が進められているが、エネルギー安定供給の確保とともに、エネルギーコスト低減は重要な柱であり、その実現に向け、あらゆる努力を講じることが重要である。省エネルギー、再生可能エネルギーの拡大は言うに及ばず、電力システム改革、さらには安全確保と地元の理解を前提とした原子力発電所の再稼働も視野に入れ、今後のエネルギー政策の構築を図って行くことが求められる。

座 談 会

## 地熱エネルギー開発への期待

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

(本座談会は平成 25 年 5 月 17 日に実施しました。)



### はじめに

疋田 本日はお忙しいところ、お集まりくださいましてありがとうございます。

福島原発事故以降、再生可能エネルギーが注目される中、太陽光や風力と異なって安定稼働が期待される地熱発電に対する期待が高まっており、すでに多くの地熱開発プロジェ

クトが動き出しているという状況です。従来、やや停滞してきたともいわれる地熱開発のトレンドを大きく変える状況になるかどうか。世界第3位ともいわれるわが国の地熱資源を活用して、エネルギー自給率の向上を図るという重要な役割を担う地熱エネルギーについて、地熱開発の過去を振り返り、かつ、現状を分析し、課題を明らかにして、さらに将来の可能性を探りたいということで、本日は長く地熱開発のさまざまな局面に携わってこら

れた方々にお集まりいただき、ご議論いただきたいと思います。

まず、ご出席の皆さまから、それぞれのお立場、これまでのご経験を踏まえて、地熱開発に関する基本的な認識をお話しいただきたいと思います。

## 地熱開発の現状

### 日本における地熱開発の歴史

阪口 私は、工業技術院地質調査所（産業技術総合研究所の前身）にいた頃から30年ぐらい地熱の研究を行っています。日本初の松川地熱発電所の開発にも我々の先輩が携わっています。産業技術総合研究所は、特に地下資源の探査・開発技術について研究を行ってきました。従来型地熱発電の概念は図1に示すようなものです。

世界初の地熱開発は、1904年にイタリア・ラルデレロで行われた発電実験でした。1913年には発電所が建設されましたから、地熱発電には1世紀の歴史があります。日本では、1966年に松川地熱発電所（岩手県）ができましたから、半世紀近い歴史があります。しかし、2011年の設備容量は日本全体で約50万kW

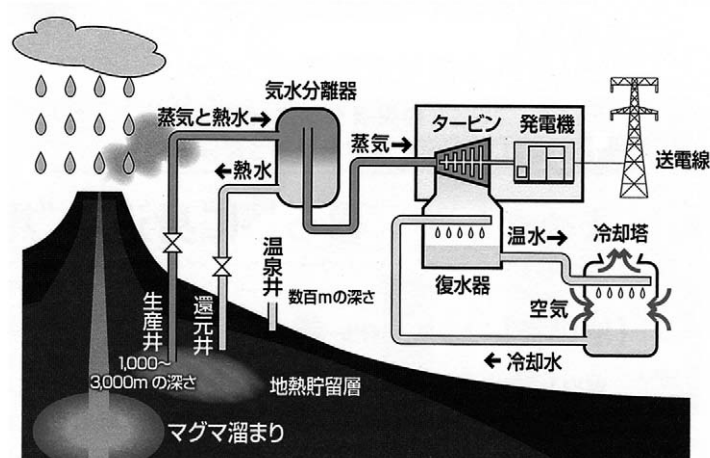


阪口 圭一 氏

（独）産業技術総合研究所 地圏資源環境  
研究部門 地熱資源研究グループ長

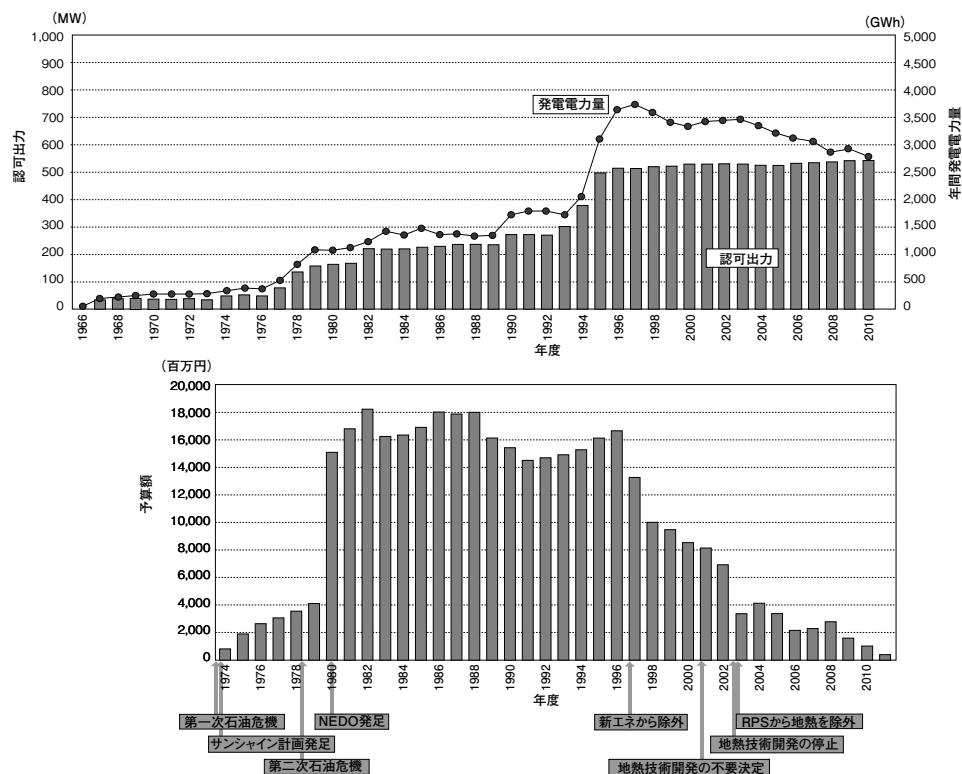
であり、アメリカの311万kWなどに比べ見劣りしており、世界8位にとどまっています。世界ではコンスタントに成長している地熱発電が、日本では停滞しているという状況だと思います。

我々、地下の資源として地熱をとらえていた者からいうと、やはり火山国である日本は、地熱資源が豊富であると言えます。ただ、日本中どこでもというわけではなく、火山の近くに限られる上に、熱水や蒸気が貯まる「地熱貯留層」は地層中の割れ目という非常に不均質なところにあります。さらに、地下に固定されている鉱物資源とは異なり、地熱は取り出して使っていくと、貯留層の温度や圧力といった地下の資源の状況が変わるという事情



（出所：JOGMEC『地熱－地域・自然との共生にむけて』, 2013年3月）

図1 地熱発電の仕組み



(出所：火力原子力発電技術協会 (2011))

図2 日本の地熱発電設備容量 (上) と地熱政策予算の推移 (下)

があります。そこが他の地下資源と違って、地熱の難しいところだと思います。

地熱開発の予算は、図2に示す変遷をたどっています。2002年から研究開発の予算が止まってしまいましたので、それ以降の10数年間は、あまり大きな研究ができていません。日本の地熱は止まっている間にも世界の地熱はどんどん動いていました。今年度から経済産業省の地熱技術開発予算が復活し、地熱研究が再スタートをするタイミングだと思っています。

では、どういうところで技術開発が必要なのか。まずは、熱水が貯まっている地下の貯留層の断裂を的確にとらえる技術。次に、地下の貯留層をうまく管理していく技術。それから、少し将来的な展望になりますが、EGS (Enhanced Geothermal System)と言われる、より人工的に貯留層を作ったり、管理・開発をしていく技術です。我々はそういう技術の開発をこれから進めたいと思っています。

さらに、今、温泉との関係が社会的な面、技術的な面で大きな問題だと考えていますの

で、温泉までを含めた地熱系全体を理解して、その中で地熱発電と温泉の両方ともうまくいくような開発に向けて何ができるのか、どういことをすればいいのかということも大事な課題だと思っています。

### 地熱開発促進に向けた3つの課題

**中島** 今、「エネルギー基本計画」の議論が進められていますが、以前の「エネルギー基本計画」(2010年6月)では、地熱発電は2030年に電力量ベースで今の4倍程度を目指すという目標が掲げられていました。その直後、地熱開発関係の調査予算が事業仕分けでゼロになったのですが、震災後、予算措置がなされ、様々な開発が動き始めています。

地熱開発が進んでいく際の大きな課題は3つに集約されると思います。まず、コスト・経済性の問題。次に、国立・国定公園や自然環境との調和の問題。そして、温泉を含めた地元関係者の方々との合意形成です。

コスト・経済性については、固定価格買取制度（FIT）の導入によってかなり有利な状況になっていると思います。地熱発電については、政府の『コスト等検証委員会報告書』（平成 23 年 12 月）でも、40 年の中期的視点で見れば、火力発電並みの経済性が得られることが示されています。一方で、経済計算をする際の 15 年という減価償却期間で見ると非常に高い。これは地下資源の特徴として、初期の調査費用が重くのしかかってくるからです。つまり、地熱発電は安定して操業を続けられれば、他の電源と遜色のない電源になるということです。それと、経済性については、表面的には FIT でクリアしているわけですが、やはり「地下のリスク」というものがコスト要因として大きく関わってくると思います。阪口さんからもお話がありましたように、探査技術ですとか、地下の貯留層を評価・管理していく技術を進歩させることでそのリスクを低減して、コストが十分予想でき、安定的な運転ができる方向に進めていく必要があると思います。

一方で、国立・国定公園の問題については大きな進展がありました。以前は経産省と環境省の間で、公園内での当面の開発を見合わせるという覚書が締結されていました。昨年これが撤廃され、さらには、公園内の特別地域（第 1 種、第 2 種、第 3 種）のうち、2 種、3 種では、自然環境等に十分に配慮し、地元の方々と十分調和して開発を進める優良な事例についての開発の可能性が示されました。先ほどの経済性と併せて、地熱開発が進んでいく環境が整いつつあると思います。

最後の温泉との関係、またはその温泉を含めた地元の方々との関係ですが、これにつきましても、地元との十分な協議なり、地元の合意をとりつつ進めていくということが、関係者の中である程度ルール化されつつあります。

あと、温泉と地熱の貯留層の関係を科学的に明らかにしていくことで、十分温泉関係者の方々のご理解をいただきながら開発を進め



中島 英史 氏

（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）  
特命参与（地熱担当）

ていくことが重要だと思います。私どもとしては、広報も含めて、科学的な知見を広めるとともに、さまざまな方の理解を進めることで、企業さんの地熱開発活動に対する支援をしていきたいと考えています。

#### 山葵沢地熱発電所（仮称）の設置計画の概要

中西 現在、私どもが進めています山葵沢地熱発電所（仮称）の設置計画について、お話をしたいと思います。事業主体の湯沢地熱株式会社というのは、電源開発㈱、三菱マテリアル㈱、三菱瓦斯化学㈱の 3 社の共同出資で平成 22 年 4 月に設立された事業会社です。私は電源開発㈱の社員ですが、湯沢地熱株式会社の社長も兼務しています。

開発を行っている場所は、秋田県湯沢市の山葵沢地域で宮城県との境に近いところです。県道 310 号線の、秋の宮温泉郷と泥湯温泉との中間地点に発電所と生産設備を設置して、直線距離で 2 km ぐらい離れているところに還元設備を設け、その間に還元熱水の配管を敷設する計画としています。

事業計画の策定を経て、今、環境アセスメントの手続きに入っています。平成 23 年 11 月に「環境影響評価方法書」を提出し、方法書の手続きが終わり、その後現地調査をやっ

ています。1年間の四季調査等が必要ですので、昨年の夏の調査から始まり、今年の5月末に春の調査を行うことになっています。

事業概要と予定工事工程は表1の通りです。出力は42,000kW級です。発電設備はダブルフラッシュ方式（2回フラッシュさせて、一次蒸気と二次蒸気を得て、タービンを回す方式）を採用する計画です。

工事工程ですが、環境アセスメントが平成26年度までかかるので、平成27年の工事開始を予定しています。この地域はほとんどが国有林、それも保安林の中なので、環境アセスメントの手続きが終わってから、国有林野貸付手続き、保安林解除手続きが必要であり、土地造成開始まで時間が空いているのは、そういう手続きの期間を考えているからです。運転開始は平成32年を予定しています。

これまでの地熱発電所建設に係る環境影響評価は、通産省省議決定（昭和52年）に基づく「省議アセス」だったのですが、山葵沢地熱発電所設置計画は、「環境影響評価法」のもとでは初めての地熱案件です。おそらく、山葵沢の案件が今後の「環境影響評価法」のもとでの地熱の環境影響評価のひな形になるのではないかと考えています。

環境アセスメントの手続きの流れですが、①配慮書（法改正前だったので山葵沢では無



中西 繁隆 氏

（電源開発（株） 主管技師長、  
湯沢地熱（株） 社長）

し）、②方法書、③調査・予測・評価の実施、④準備書、⑤評価書の手続きがあります。山葵沢の案件では、方法書の手続きが平成24年3月に終了し、現在は現況調査を行っているところです。その後、予測、評価を行い、今年度末には準備書を届出たいと思っています。その後、評価書の手続きがありますので、現在のところ、平成27年の着工を考えています。

今、経済産業省と環境省との間で、環境アセスメント短縮化の検討がなされています。今後、環境アセスメントが短縮されていくと思いますが、山葵沢の場合は、すでにアセスメント手続きに入っています。両省による検討状況を見ながら、例えば審査期間の短縮に

表1 山葵沢地熱発電所（仮称）設置計画の概要

|       |         |                              |     |      |     |      |      |    |    |    |    |    |    |
|-------|---------|------------------------------|-----|------|-----|------|------|----|----|----|----|----|----|
| 事業の内容 | 原動力の種類  | 汽力（地熱）                       |     |      |     |      |      |    |    |    |    |    |    |
|       | 出力      | 42,000kW 級                   |     |      |     |      |      |    |    |    |    |    |    |
|       | 所在地     | 秋田県湯沢市高松字高松沢及び役内字役内山国有林内     |     |      |     |      |      |    |    |    |    |    |    |
|       | 主な工事の概要 | 土地造成工事，道路工事，生産・還元設備工事，発電設備工事 |     |      |     |      |      |    |    |    |    |    |    |
|       | 工事開始時期  | 平成27年（予定）                    |     |      |     |      |      |    |    |    |    |    |    |
|       | 運転開始時期  | 平成32年（予定）                    |     |      |     |      |      |    |    |    |    |    |    |
| 工事日程  | 着工後の年数  | 1                            | 2   | 3    | 4   | 5    | 6    |    |    |    |    |    |    |
|       | 着工後の月数  | 0                            | 6   | 12   | 18  | 24   | 30   | 36 | 42 | 48 | 54 | 60 | 66 |
|       | 全体工程    | ▽新設工事開始                      |     |      |     |      |      |    |    |    |    |    |    |
|       | 土地造成    |                              |     | (24) |     |      |      |    |    |    |    |    |    |
|       | 道路      | (3)                          | (3) | (3)  | (3) |      |      |    |    |    |    |    |    |
|       | 生産・還元設備 |                              |     |      |     | (60) |      |    |    |    |    |    |    |
|       | 発電設備    |                              |     |      |     |      | (36) |    |    |    |    |    |    |

（出所：湯沢地熱株式会社『環境影響評価方法書のあらまし』）

対応できるように工事計画を検討するなどして、できるだけ早い運転開始を目指しているところです。

この山葵沢は、栗駒国定公園の外なので、自然公園の規制の問題はありません。

また、一番重要な地元の温泉との関わりですが、この地域では、調査を開始する段階から、地元の温泉の所有者のご理解を得て、モニタリングをしており、そのデータも地元の皆さんと共有しています。また、調査を進める色々な局面で、事前説明や調査結果を報告することで、地元の皆さんとコミュニケーションを密にとりながら進めています。湯沢市さんの積極的な支援もあって、現在のところ、地元の方々のご理解は得ていると思います。今後とも、コミュニケーションを密にとって、進めていきたいと思っています。

#### 秋田県湯沢市による地熱開発・利用の事例

藤原 宮城県、山形県、岩手県の県境に位置する湯沢市は人口約5万人の街です。基幹産業は主に農林業ですが、日本三銘うどんの1つ「稲庭うどん」、国の指定伝統工芸品である「川連漆器と仏壇」や東北の灘とも評される「日本酒」など地場産業も盛んです。昨年、国際ワインコンテスト（IWC）で世界一の賞をとった木村酒造の「福小町」は生産が追いついていないようです。

そのほかに、世界三大美女の1人である「小野小町」の生誕・終焉の地、日本三大霊地の1つである「川原毛地獄」や「小安峡大噴湯」があり、特に紅葉の季節には、沢山の観光客に来ていただいています。

また、ユネスコ（国連教育科学文化機関）の世界ジオパークを目指して、「ゆざわジオパーク」に取り組んでいます。昨年9月に「日本ジオパーク」に認定され、現在はジオパーク推進協議会を中心に一般の方々への普及・啓蒙活動を進めています。

「ゆざわジオパーク」には3本の柱がありま



藤原 崇一 氏

（湯沢市 総務企画部  
主査）

す。1つ目は鉱物資源。江戸時代、日本最大の銀の産地だった院内銀山など、かつては鉱物資源が豊富でした。2つ目は水です。ミネラルが多く含まれている水が、お酒やうどんの品質の秘訣です。3つ目が地熱です。これまでの調査から、地熱資源の量は国内でもトップクラスと言われており、地熱をジオパークに入れているのは、湯沢市だけのようです。

地熱に関しましては、東北電力㈱の上の岱地熱発電所を始め、山葵沢地熱発電所設置計画、東北電力グループの木地山・下の岱地域での計画、出光興産㈱など3社による小安地域での計画が行われています。

今、山葵沢地熱発電所設置計画は、国内で最も運転開始に近い大規模地熱発電所計画ということで湯沢地熱さんが先頭を走っています。小安地域、木地山・下の岱地域での地熱調査は、栗駒国定公園内での調査です。両地域とも今年の夏～秋にかけて公園内での構造試錐井や温泉のモニタリング井の掘削を予定しており、昨年の規制緩和以降、国内1例目、2例目の公園内掘削になるようです。3例ともに日本のトップランナーとして開発されていますので、地元湯沢市としては、非常に責任を感じているところです。

湯沢市としては、企業の皆さまをバックアップして、地元の住民説明会の開催や、公園内開発では地域協議会を両地域で立ち上げてい

ますので、しっかり運営していきたいと思っています。

湯沢市の地熱開発への取組みですが、昭和40年、50年代、地熱開発が盛んになってきたころから、熱水を利用した施設を建設し、運営してきました。例えば、水耕ミツバハウスは温泉の熱水をパイプラインでハウス内に引いて、冬でも栽培が可能となっています。

農産加工所では、熱水を利用して野菜を乾燥させて、切り干し大根などの乾燥野菜チップを製造しています。地元の女性の方々を中心とした利用者組合で運営・管理をしているのですが、首都圏でも人気商品になっているようです。

栗駒フーズは、日本で最初の地熱エネルギーを活用した乳製品の製造販売企業で、昭和62年に設立された会社です。温泉の熱を原乳の低温殺菌などに活用していて、経産省の新エネ百選に認定されました。

湯沢市では地熱発電にも挑戦してきました。新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の調査制度を利用して、平成16年度と17年度に3本の井戸を掘削しました。生産井の能力は3,500kWほどあり、非常に有望な井戸だと言われていまして、平成22年度には総務省の交付金を活用して、90日間の長期噴出試験を行いました。昨年7月にNEDOから無償で譲渡を受け、今は活用方法を検討しているところです。

#### 電力中央研究所の取組み

海江田 私が電力中央研究所(電中研)に入った昭和57年頃は、日本全国で地熱開発が華やかでした。従来型の地熱開発は、すでに電力会社でも発電所を建設していました。そこで、電中研として地熱開発で何を研究すればいいのか検討した結果、新たな地熱のテーマとして「高温岩体発電(HDR: Hot Dry Rock)」を取り上げました。これはアメリカで考案されたものですが、日本でも将来の地熱開発と



海江田 秀志 氏

(電力中央研究所  
上席研究員)

いうことでは、「火山発電のフィージビリティスタディ」として、地下にある熱水をくみ出すだけでなく、もっと積極的に人間のほうで熱水が出る仕組みを作ろうという研究テーマを「サンシャイン計画」の中でもやろうとしていました。しかし、アメリカのロスアラモス国立研究所が「高温岩体発電」を大々的に打ち出して、世界的に認知されていたので、それを学ぶために日本からもNEDOを通して研究者が派遣されました。私もその派遣研究員の1人として、ロスアラモスに行って勉強してきました。

高温岩体発電は図3に示すように、地下に井戸(注入井)を掘り、水圧をかけて岩盤に亀裂を造って、その亀裂を掘り抜くように別の井戸(生産井)を掘り、岩盤の熱で温まった熱水や蒸気を生産井から取り出すという仕組みです。ロスアラモスでは初め亀裂と井戸

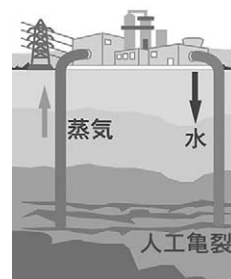


図3 高温岩体発電の概要図

との繋がりがうまく行かず、熱水を取り出すのに失敗を繰り返しましたが、最終的には岩盤の破壊音（AE：Acoustic Emission）を観測することによって、亀裂の分布状況が評価できるということが分かって、その分布域に井戸を掘り直して、熱水を取り出すことができました。したがって、今ではまず高温岩体内に井戸を掘って水圧で亀裂を造り、その分布状況を AE の観測で評価してから生産井を掘るという手順が、高温岩体開発の世界的のスタンダードになっています。そういう技術を我々は学んできて、NEDO の「サンシャイン計画」の 1 つのプロジェクトとして資源環境技術総合研究所がリーダーシップをとって、山形県肘折で高温岩体発電実験が実施されました。

それと併せて、電中研でも秋田県雄勝町（現湯沢市）で独自の研究をやりました。電中研の実験は、あくまでも要素技術の開発でした。電中研独自の水圧破碎法として世界でも初めて 1 つの井戸で深さを変えて 2 カ所から亀裂を造る方法を始め、精度のよい AE 観測、光ファイバーを使った温度計測などを開発しました。

将来大規模に地熱発電をやるためには、天然の熱水や蒸気を取り出すだけではなくて、人工的に地下から熱を取り出す仕組みを造る技術開発が必要だということで進めてきたのですが、高温岩体発電では従来型の地熱発電よりも発電コストが高くなることが予想され、1990 年代後半になって、景気の低迷や発電コスト重視の観点から研究予算も大幅に削られ、2002 年に雄勝実験が、2003 年には肘折実験が終了となってしまいました。

ただ、電中研の場合は幸いなことに、我々が雄勝町でのプロジェクトを終えた 2002 年に、オーストラリアで高温岩体発電プロジェクトが始まりました。オーストラリアからの協力要請もあり、我々が開発した技術を今度はオーストラリアに適用することができ、それによって技術力をキープしたというところがあります。

1970 年代から 80 年代には、アメリカでは高温岩体発電だけではなく、マグマ発電の研究も精力的に進められていました。サンディア国立研究所が室内実験でのマグマの特性評価や材料の開発の他、ハワイの溶岩をマグマに見立てて、掘り方や熱の取り出し方など、色々な研究をしました。最終的には、4,000m ぐらい掘ればマグマに辿り着くと期待して、カリフォルニア州ロングバレーで調査井を掘ったのですが、その段階で予算が削られて、プロジェクトが中止になったということがありました。

高温岩体発電、マグマ発電といった技術が開発できれば、日本だけではなく世界的にすごいエネルギー資源量になるという観点から、それに向けた技術開発がやられていたのですが、1990 年代後半から 2000 年にかけての世界的な景気の低迷などにより、そういった技術開発の予算がつかなくなってしまったわけです。

ところが、地球温暖化問題がクローズアップされてから、特にアメリカでは 2006 年に地熱開発の重要性を訴えるマサチューセッツ工科大学（MIT）のレポート“The Future of Geothermal Energy”が出されたのを機に、連邦議会が地熱開発に予算をつけて、地熱に対して前向きになりました。最近では名称を HDR（高温岩体発電）から EGS に変えて、高温岩体発電の技術を従来型の地熱発電に適用しようという研究開発が進められています。

そして、日本でもそういう技術開発をこれからやっていこうということになるのではないかと思います。基本的に高温岩体発電、従来型の地熱発電という仕分けではなく、開発リスクを減らして、地下からどうやって安定的に熱を取るかというところに重点を置き、より安全で低コストな地熱発電のための技術開発を集中的にやることになると思います。

高温岩体発電や EGS のように人工的に地熱貯留層を作る地熱開発は、必要な水は自分たちで用意して、それを地下で温めて取り出すだけだから、温泉にはほとんど影響ないという見方もでき、温泉業者の方の危惧も少ない

のではないかと思います。実際、我々が秋田県雄勝町で実験をやる時にも、地元の人たちからは、「川の水を地下に入れて温めて出すだけだから、温泉への影響はあまりなさそうだ」という意見もありました。「温泉への影響が心配だから絶対反対」という意見ではなかったというあたりも、高温岩体発電の実験が少しはやりやすかったところでした。

これからの地熱開発は、自然に任せた状態だけではなく、人間が地下に働きかけて安定した蒸気を取り出す必要があるのではないかと思います。我々も高温岩体発電技術として開発した技術を、どのように在来の地熱開発に適用して行くかについて、今、検討を進めているところです。

なお、最近アメリカやアイスランドなどでは、マグマ掘削プロジェクトとしてマグマの開発を目指した研究開発も進められているとのことです。

---

## 質疑応答

---

**疋田** ご出席の皆さま方から、それぞれの基本的な認識をお話しいただいたわけですが、まず、相互にご質問とか、コメントとか、ございましたらお願いしたいと思います。

**海江田** 藤原さんにちょっと聞きたいのですが、湯沢市が地熱発電用の生産井を掘削されたというのは非常にめずらしい例ですね。市で発電されるという意識でしょうか。

**藤原** 掘った時は、発電所を建てる計画をNEDOに出しましたが、当時はまだ売電価格が非常に安かったので、採算がとれないということで発電まで至りませんでした。現在はFITという有利な制度がありますが、売電は民間の方にお任せして、行政としてはもっと違った形で活用できないかと考えています。

例えば、発電所を市で建てて、その電気を安く提供するので企業の方に工場を建ててもらおう。そこで雇用も生まれるし、例えば地場の農業を活かせる野菜の加工工場などをつくってもらって、野菜を農家が提供する。そうすれば、雇用だけではなくて一次産業にも波及するとか、そういったすそ野を広げた活用方法の案も出ています。企業誘致というのはなかなか難しいのですが、今、電気代の値上げという話があるところですので、「湯沢市が格安の電気を提供します」ということができればいいなと思っています。

**海江田** こういうものを全国に先駆けて湯沢市さんがやられると、ほかの自治体も参考にされるんじゃないかと思います。

**阪口** 湯沢市さんで私が感心するのは、やはり熱水を使った事業を以前からやられているということです。ほかのところでも熱水を使って色々やろうとしたけれども、なかなかうまくいっていない所が多いと聞いています。湯沢市がうまくいっている秘訣は、どこにあるのでしょうか。

**藤原** 今も当時の施設が残っているのは、小安地域がある旧皆瀬村です。市が直接やっているところは、地熱開発利用センターという花卉栽培施設です。水耕ミツバハウスは、地元の農協が主体になってやっています。なぜこれだけ成功したかという、安定した熱水の確保はもちろんですが、地域の方々の雇用や農業、畜産業といった地場産業を活用したこと、商品の販路確保等、しっかりとした事業スキームの下で取り組まれてきたからだと思います。

先日、超党派議連の皆さまが湯沢に来られて、これらの施設を視察されました。「この農産加工場をやってよかった点は何ですか」という質問に、利用者組合の方が「元気になったことです」と答えていたことが印象的でした。そういった地元の方々が熱心になってやっているということが、長く続いている秘訣だと思います。

中西 やはり、地域の人、民間が熱エネルギーをうまく利用することが大事です。北海道の森発電所の熱を利用した地元のキュウリとかトマトは有名ですし、東京電力さんの八丈島地熱発電所も復水の温水を熱交換して、地元の方が花卉栽培をやって、それを首都圏に出荷して非常にうまくいっています。やはり、その地域の人たちがうまく利用できる仕組みというか、何かそういうものがないと、熱利用は上手くいかないのではないかと思います。

疋田 地熱について親しみを持ってもらったというこうした例は、地熱発電の社会受容性にとって大変有効ではないかという印象を持ちました。

中島 八丁原地熱発電所の地元、大分県九重町なども、古くから栽培しているバラの花弁の数が、地熱を使ってやると多くなる。それで、ブランド化して高値で売れると有名になりました。やはりコストと付加価値とかブランド化とかが、キーワードになってくると思います。

---

## 討論

---

### 今後の地熱開発の進め方

疋田 それぞれのお立場からお話いただいたことを踏まえながら、さらにご議論いただきたいと思います。地熱エネルギーの今後についてですが、どれくらいの発電量を期待することができるのか、コメントをいただければと思います。

中島 発電規模、開発規模の話の前に、やはり、重要な視点の1つに、原子力を含めて基本的に今の発電は、再生可能エネルギーを除けばすべて使えば無くなっていく資源によって行われているということがあります。原子

力は非常に少ないウランで長く発電できると言われていますが、それでもウランは消費されていけばなくなるわけです。ましてや石油、天然ガス、石炭は、すべて消費されれば終わる資源です。

一方、イタリアのラルデレロでは地熱発電が操業開始から100年を迎えました。地熱発電は、出力が小さくても非常に長い期間に沢山電気を作り出してくれます。日本でも松川地熱発電所の操業が50年近くになろうとしています。全国で2番目に古い大岳発電所（大分県）では、次の50年を目指して建屋の建替え作業に入ると聞いています。

今必要な全体の電力の中で見た時に、例えば、「100万kWの原子力発電所と5万kWの地熱発電所では、規模が20倍も違うじゃないか」という議論がある一方で、「地熱発電所が100年、200年運営されれば、5万kWでも何十万kWの発電所と同じような効用がある」と考えていけるのではないかと。そういう視点も必要だと思います。

地熱は自然エネルギーですので、「地下のサイズに合わせた発電所をつくり、長く運営していくことに意味がある」と皆さん認識しています。ですから、適正規模で作って長く運営していくことが、今の世代にとって大事なだけでなく、後の世代にも残していける財産として大事だと考えるのが、地熱発電について一番正しい理解ではないかと思います。

阪口 基本的に中島さんの言われるとおりだと私も思っています。ですから、先ほど言った貯留層の管理が1つのキーポイントかと思っています。

今、日本の既存の発電所でも、出力の低下が問題になっています。設備容量が横ばいであるのに、発電電力量は少し右肩下がりという状況があります。例えば、5万kWの発電所を作ったけれども、それに見合う蒸気量が確保できていないというのが現状です。地下の状況が運転とともに変わっていくので、運

転を開始する時にその地域のベストの容量を見極めるのは非常に難しいと思います。ですから、控えめな資源量評価に基づく出力を設定しておいて、余裕があればそれを拡大していくということが、地熱資源には向いているという感じがしています。

**疋田** 冒頭に中島さんのほうから、前の「エネルギー基本計画」の中で、2030年までに現行の4倍程度という計画であったというお話がありました。そうした数字を追いかけるのは必ずしも適当でない、ということでしょうか。

**中島** 長く操業しなければいけないことを考えると、ブームだからといって無理をしすぎではいけないと思います。一方で、国民の期待やわが国が置かれている今のエネルギー状況を考えれば、できる限り急いで開発を進めることも必要ですから、色々なリスクを落とすための努力を関係者の方々と一緒に考えながら頑張っていくことが大事だと思います。

普通の発電所と違って50年後、100年後も運営する地熱発電所ですから、生活や環境などで影響を受ける地元の人たちに対しては、丁寧な対応をしていかなければいけません。最終的には「おらが村、おらが町の電源」として、地元と発電所が共生していく形が一番望ましいだろうと思うのです。そうするための課題はまだいっぱいあると私たちも思っています。そこは事業者の方々、さらにいうと役所を含めた政策当局もいろいろ考えていくべきところだと思います。

**中西** 私も中島さんと同じ思いでいます。今、社会環境も変わって、ずっと開発が停滞していた地熱が非常に注目されています。私もできる限り、それを伸ばしていかないといけないという気はしますが、無理しないことが重要です。

日本は非常にポテンシャルはあるのですが、アイスランドやアメリカ、インドネシアなど



疋田 知士 氏

（エネルギー総合工学研究所  
研究顧問）

に比べて進んでいません。他の国にはない国内の制約があるからです。日本の地熱資源は、アイスランドやアメリカなどに比べると地形条件が厳しいところにあると思います。また至るところに人が住んでいるというのも制約になると思っています。

国立・国定公園内の規制は緩和されましたが、これから優良事例を作り上げていくのはそう簡単にできることではありません。湯沢市が一番先頭を走っていますが、先ほど藤原さんが言われたように「ステップ・バイ・ステップ」で進めていかないといけない。せっかく地熱に日が当たっている今の時期に、本当にしっかりとやらないといけないと思います。

**海江田** 例えば、ドイツなどでは、お湯を取るために地熱開発をやるということもあります。ドイツのミュンヘン郊外ウンターハビング町では、熱水供給をメインにしている、余ったお湯で発電するという意識です。ドイツは環境意識が高いので、二酸化炭素の排出削減として化石燃料の使用をできるだけ減らすため、地下のお湯で発電できれば電気を売り、発電できなくてもお湯で地域の暖房をとれば良いという姿勢で開発しています。ドイツではお湯もFITの対象になっているとのこと。100℃ぐらいのお湯の抽出を目指した開発となれば、開発コストもかなり安くな

る気もします。日本での地熱開発も、発電に加えてお湯の活用についてもう少し見直す必要があるのではないかと考えています。

**藤原** FITが始まってから、今まで地熱開発の経験がない分野の方々が湯沢市内での発電事業の相談に来ています。今の制度だと、ある企業が線引きした調査エリアに他社が立ち入ってはいけないという明確なルールがないのです。湯沢市に“NO”という権限もありませんので、対応に困っています。2,3社が隣りあって開発することによって、付近の住民の方々、例えば、温泉に影響があった場合、原因者の特定ができないという心配もあります。言葉は悪いのですが「乱開発」みたいにされると、地域の方は不安だろうと思うのです。将来的にはそういった不安を解消するための法整備やルール作りがされればと思っています。

**中島** JOGMECとしては、木地山・下の岱地域、小安地域で調査を進めている事業者に対して、相互の干渉とかについて、お互いに十分連絡を取り合ってチェックをするよう指示、指導をしています。

今、地熱開発については、温泉法の掘削許可と土地の所有権の2つしかありません。あるところでは有望な地熱資源が見つかり、隣にたまたま見つけた人が使用权も所有権も持たない土地があって、そこに新規参入者が高い金で「おれに貸してくれ」とか「おれにこの土地を売ってくれ」といって入ってこられても、地熱資源の発見者がそれを排除することができないのです。そこは開発企業の方々も懸念をしています。

今までは、設定された調査エリアは、基本的に業界の企業同士では相互不可侵で、先に調査を始めた企業があきらめて、その調査地域から出て行くまで他の企業は手をつけないというルールがありました。ですが、今のブームで不動産業者を始め、さまざまな業者さんが出てこられているので、湯沢市さんが懸念されているように、開発による当事者同士の

紛争や争議が起こらないように、気をつけなければいけないと心配しているところです。

**疋田** それはまさに、「無理をしてはいけない」ということにつながっていく話ですね。ですから、再生可能エネルギーの中には、比較的短期の収益を目指した参入も多いようですが、地熱はもっと長期に考えるようなことでなくてはならない、短期に儲けようとする人はお断りということですね。

**中島** 採算性も含めた議論が十分に分かっていない方が「FITがあるから儲かる」という思惑だけで入ってこられると困ります。だから、私も、そういう知識のない方がご相談に来られた時には、ぜひ専門のコンサルタントさん、もしくは専門の企業さんにご相談をして、知識のある方々と組んで詰めていただくようにと話しています。そうしないと、彼らにとっても散財をして、結局撤退という話になったりすれば、企業の方々としてもアンハッピーでしょうし、ましてや、それで井戸を沢山掘られて、外しまくられる地元の方々には不信感しか生まれないということになります。そういうことはぜひ避けたい。やはり「無理をせず息長く急いでいく」というのが地熱開発の鉄則だと思います。

#### 産学全体として取り組む人材育成の必要性

**中島** もう1つ大きな問題点として、地熱開発がほとんど行われなかった時期があったために、人材や機材が不足しています。専門のコンサルタントとか、知識のある方々も決して多くありませんし、開発をしておられる会社でも、50歳前後が若手と言われるくらい高齢化が進んでいます。短期ですべて解決するのはなかなか難しい話なので、やはり中期的に色々な課題を整理して、関係者、業界、学会含めて対応していく必要があると私たちも思っています。

**阪口** 今、地熱の教育を行っている大学は、数

えるほどという感じです。それは地下資源全般にそういうことが多いんですが。企業が元気じゃないと、そこへの人材の供給元である大学も元気になるという関係もあって、例えば、大学の人員や講座を増やしたからといって、それがすぐに効いてくるわけではありません。やはり今おっしゃったように、中期的、長期的に取り組む必要があるのではないかと思います。

**中島** 石油、天然ガス、金属、石炭を含めて、JOGMECで担当させていただいている業種全般について、今、そういう状況になっています。資源産業が一時期衰退した中で、卒業生だけではなく、大学の先生方も含めて、一般的に人材が足りないという状況が続いています。逆に、それこそ私ども JOGMEC と会社さんで、人を取り合うみたいな状況ですね。それぐらい人が足りない。そういう意味では、この課題はやはり全体として考えていかないといけませんね。

**疋田** 地熱開発に対する関心が高まっている今の状況というのは、人材育成や大学において地熱関連の研究を促進するにはいい状況ですね。ただ、それが息長く続かないことには、大学における研究も充実しないだろうし、そこから出てくる人材も人数は増えない。だから、「息の長い地熱の開発」という状況が続けることが、何しろ必要なんだということですね。

**阪口** 国には早く「エネルギー基本計画」を出してもらい、これから何十年後かの日本はこれを目指すんだと示してもらって、それに向かって業界などが対処していくという、そういう目標が必要な気がします。

**中島** 一時期、非常に資源が安い時代があって、自ら開発しなくても海外から買ってくれば十分手当てできると勘違いした時代がありました。その直後に石油の値段が暴騰するような世界が来たわけです。90年代から2000年の初頭にかけての「失われた10年」に、や

はり業界、大学を含めて、色々なものが相当程度失われたというのが実態だと思うのです。

### 地熱開発にかかる長い期間

**中西** 人材育成には時間がかかると思いますが、山葵沢地熱発電所設置計画のように、少し規模の大きい地熱開発には環境アセスメントと建設だけでも時間がかかってしまう。例えば、湯沢市の国定公園の中の調査は、一から始めるようなところがありますので、初期調査で3年ぐらい、その次の本格的な地熱調査による規模の確認に3、4年、さらに、発電所計画を立てた後の環境アセスメントに3年ぐらい、建設に3年となると、今から始める場合、最も早く進んでも15年前後かかるということになります。このことは認識しておかないといけません。幸い、JOGMECの新しい支援制度もできているので非常に助かると思いますが、それでも時間がかかってしまいます。

**疋田** その時間のかかり方について、この先、何とか短縮していく必要がありますが、その方法は……。

**中西** 1つには、探査、調査の精度を上げるという技術的要素があります。今まで3～4本掘る必要があった井戸が、1本や2本で済むとか、調査のための井戸の本数を減らしても地下の状況が分かれば、その分、調査期間は短くなります。

それから、地元の皆さんの理解促進も短縮化につながる大きな要素です。

**疋田** 藤原さんのお話で、地域協議会というのは、プロジェクトと地元との共存とか、共同とかを推進する組織ですね。

**藤原** そうです。国立・国定公園内での開発の条件の1つに「地域との合意形成の構築」があげられています。温泉経営者といった地

域の関係者、自然保護団体、地元住民、大学の先生にも参加してもらい、調査ごとに協議をし、同意をもらってからでないと、県から許可をいただけないのが現状です。

湯沢市での地熱開発の場合、幸い反対される方はいないのですが、構造試錐井を1本掘るたびに協議していきます。今後も地域協議会を運営していく上では、専門性の高い地熱開発を委員の方々により深く理解してもらうにどうしたらいいか、開発企業とも議論しています。

**中島** 私どもJOGMECが作成したパンフレット『地熱－地域・自然との共生にむけて』なども、半年ぐらいで整備して、地元の方々にお配りしています。大人向け、子ども向け、両方用意させていただいて、開発地域、もしくは希望されるところにはどんどん配っています。

今年は、進行中の調査を映像化するなどして、地熱開発に必要な作業が分かりやすくなるようなものを整備していきたいと思っています。

**海江田** 電中研でも「リスクコミュニケーション」という社会科学的な検討も進めています。「リスクコミュニケーション」に係わる研究者が地熱開発を研究の対象として、温泉業者と地熱開発業者の意思疎通がなかなか図れないことをどうすればいいのか検討しています。アンケートをとったりすると、お互い思っていることが違うということがクローズアップされます。地熱開発に反対のひとと賛成の人が直接話をしてもなかなかうまくいかないで、その間に立つ第三者的な機関、あるいは中立な機関のようなものが必要だという気がします。先ほど出た地域協議会などがその1つではないでしょうか。

**阪口** その中でも、自治体の役割には大きなものがあります。自治体がしっかりしてやっておられるところは、うまくコミュニケーションが

とれます。自治体が尻込みしているところだと、うまくいかない場合があると感じています。

**中島** やはり地域が豊かになっていくことが重要です。湯沢市さんのように、資源を十分チェックしながら利用していくことで、地元を活性化し、町自体が豊かになることが大事です。発電所ができれば良いというではなく、やはりその発電所を立地した地域の住民の方が具体的にそれで豊かになる。地熱発電所は、50年、100年、あるいは200年という長い期間を目指していかなければいけない発電所ですから、地域と共生しない限り、地熱の将来はありません。外部から入ってきて開発し、発電して利益だけ持っていくというだけでは済みません。法人税と固定資産税以外に、地域にとってどういうメリットがあるのか、その地域に合った共生の仕方を、企業の方々や地元と一緒に作っていくのが地熱開発の基本ではないかと思います。

地熱発電は、井戸を掘り続けなければいけない、ある一定期間に一定の作業をしていかなければいけない電源でもあります。だから、地域で工事も発生するし、人も入り続けることになります。その時には人が地域で宿泊もする。そういう作業があるところを見に行きたいという人たちも出てくるでしょう。皆がハッピーになるような絵を、それぞれの地域で整理していくことが大事だと思います。ちなみに、八丁原発電所がある大分県九重町などは、山の中の町でありながら、財政的には非常に健全で優良団体の1つとされています。

**疋田** これから地熱を息長く開発していくためには、原子力発電所を設置してきたのとはまた別のモデルをこの先作り上げていかなければいけないということなんですね。その中で、湯沢地熱さんとか湯沢市さんは先頭を走っておられる。

**中島** 湯沢市さんなどは、地元で学会だとか

の関連イベントをやったり、議連の方々が訪れたり、それ以外でも観光客で、発電所を見たいといって訪れる方も出てきていると思います。地元はさらにそれを地域の活性化のためにうまく使っていただく。やはり努力している方々が報われることが大事だと思います。

八丁原地熱発電所がある大分県九重町なども、大吊橋とか自分たちで努力して観光資源を作り、発電所を含めた地元の資源をうまく宣伝して豊かになってきています。

立地をしていただく地元の方には、発電所を自分たちが豊かになっていくための資源の1つとして、うまく使って豊かになっていただきたいなと思います。

発電所だけできて地元がそれで廃れてしまったら、何も意味がないというのは、ある程度長く地熱をやっておられる事業者とか関係者の方々に共通した思いだと思います。

**阪口** 湯沢市が「ジオパーク」の中で唯一地熱を打ち出しておられます。

「ゆざわジオパーク」は、地熱を地元の宝として取り上げられているということは、私はいいなと思っていますね。

**中島** 基本的に、地熱資源というのは、時間がたつと熱水型の鉱床になります。そういう意味では「鉱山」になるのです。地熱が生み出される基盤としての地質がどうつながっていて、地元の生活に密着した資源として利用されているのかを感じていただくほうが、本来の「ジオパーク」の趣旨に合っている気がします。

### 高温岩体発電の今後

**疋田** 海江田さんから冒頭、高温岩体発電開発、あるいは、EGSとして色々な場面にその技術を活用していくというお話がありましたけれど、長期的に見た時に、今日本で実際に行われている地熱発電とは別に、もうちょっ

と深い、温度の高い地熱開発が、どういう時間軸の中で行われていくのか。それをちょっとお話ししたいかと思います。

**海江田** 以前実施した高温岩体発電開発を今すぐ再開して実用化を図るというわけにはいかないと思います。高温岩体発電やマグマ発電の実用化にはまだ課題も多く残されています。まずは、今進められている従来型の地熱開発がうまく行くことが重要です。ただし、高温岩体発電の実用化に向けた技術開発も必要なので、それをどういうシナリオで進めるかです。今進められている地熱開発に対して、高温岩体発電の技術がどう貢献できるのかを検討し、それをやりながら、高温岩体発電の技術を発展させていくというやり方が考えられます。例えば、井戸を掘ったが熱水が全然出てこない、あるいは期待したより少ないという場合、この辺にもっとあるはずだというのであれば、水圧破碎など多少刺激を与えてその周辺の亀裂の発達状況を調査したり、亀裂を拡大させたりすることぐらいは、高温岩体発電の技術を適用してできます。また、刺激する際に、AEの観測を高精度にやれば、亀裂が伸びた方向などから熱水の位置の評価もできる可能性があります。これらが開発リスクの低減に役立つのではないかと思います。そして、これらは将来高温岩体発電をやるうとした時に重要な技術でもあります。

近年、石油開発においてシェールオイルとか、シェールガスとかが発展したのも、井戸を水平に掘る技術や水圧破碎技術およびAE観測による亀裂進展評価技術が発展したからと言われています。アメリカではそういう技術をEGS技術として地熱開発にも適用しようとしています。また、今の地熱開発でも、生産井での水圧破碎をはじめ井戸を使ったAE観測や比抵抗探査などによる探査精度の向上などにも発展性があるのではないかと思います。

海外では深さ5,000メートルまでの地熱資

源分布を評価するというのが標準です。アメリカでもオーストラリアでも、ヨーロッパでも深さ 5,000 メートルまでを資源量評価の対象にしています。日本での地熱資源マップは、基盤と呼ばれる地層の深度(2,000～3,000 メートル)までが評価の対象です。もし日本で深さ 5,000 メートルの地熱資源マップができたなら、アメリカもびっくりするぐらいの地熱資源国になるのではないかという気がします。それぐらい日本にはポテンシャルがありますし、技術もそれなりに投資すれば開発されてくると思うので、長期的にそういう技術開発に取り組んでいければと思います。

**阪口** 高温岩体発電や EGS に使う技術の中には貯留層管理技術など、今の地熱開発でも使えるものがあります。地熱開発もやっと再スタートしたという段階です。一足飛びに「次は EGS だ」というところまでは行かないので、今は海江田さんが言われたように、将来に向けた技術開発をやりながら、従来型地熱開発のリスクを下げるために、その高温岩体発電の技術を応用していく段階だと思います。

特に、我々のような研究所では、そういうところを見据えて、研究を絶やさないようにしていく役目があると思います。

**中島** 5 月 15 日に平成 25 年度予算が成立しました。正式に私ども平成 25 年度から技術開発の予算をお認めいただき、技術開発を再開することができます。その中で、探査技術、貯留層の評価・管理をする技術を開発していきます。そういった中で、関係者の方々と一緒に、今言ったような課題に取り組んでいく予定にしています。それでリスクをさらに低減し、コストも下げながら、地下を把握するレベルを上げることで、不安に思っている方々にも、十分説明ができるような開発に結びついていければとは思っています。

EGS に関しては、平成 24 年度に海外の状況も含めて、海江田さんに委員長になってい

ただいて、調査報告書を作りました。そういったものが、今後の技術開発の課題として織り込まれていくことになります。実際にどういう形で研究開発、技術開発が進められていくかは、今後、具体的な計画が明らかになってから説明していく予定です。

一方で、先を見据えながらも、なるべく早く技術開発の成果を出して、それを現場に適用していく。目の前も見ながら色々な計画を進めていくことになると思います。

**海江田** まずは現在進められている地熱開発が順調に進み「もっと地熱資源が開発できないか」となったとき、高温岩体発電とかマグマ発電とかがクローズアップされるのではないかと思います。従来型の地熱開発がうまくいかなかったら、その先には行けないのではないかと思います。つまり、今進められている地熱開発が事業としてうまく行き、「地熱開発はいいね」となり、もっと地熱開発を進めたいとなった時に、高温岩体発電やマグマ発電も必要となってくると思います。しかし、必要となってから研究開発を始めていては間に合わないので、EGS として従来地熱開発への適用を図りながら、基礎的な技術の開発や実用化を進めたいと思います。

**中島** これは確定した話ではないのですが、私が、一番気にしているのは、FIT の後を見据えて、どういう制度整備をすればいいのかということです。今、底上げをしていただいているのが業界の状況ですが、色々な支援がなくても技術力など能力さえあれば開発ができる、という状況にしたいと思っています。

「高いんです」と言いながら、海外ではどんどん開発されているところもあるので、何がどう違うのか。コストなのか、制度なのか、地質なのか。そういう議論も進めていかなければいけないのではないかと考えています。例えば、アイスランドで地熱開発コストが安

いのは熱水供給で稼いでいるからです。地熱事業者、開発業者というのは、実は水道事業者でもあるのです。彼らは発電しながら、熱水を熱交換したりする。それを大都市に大きな送水管で送って、各家庭に熱とかお湯を供給しているわけです。それで全体としてコストを落として、発電も安くできるし、地域の方々はそれをお風呂に使い、暖房に使うというので、国としてみれば、その分、化石資源を買ってこなくていいわけです。

**海江田** どこに行っても人が住んでいるというような日本であれば、お湯を供給するシステム、なるべく暖房には化石燃料を使わない仕組みは作れるのではないかという気がします。

**中島** やはり、温度、気温の問題があります。アイスランドとかなら非常に寒いので、暖房は必須ですから。

**海江田** それこそ湯沢市さんとか、北海道などでも、地熱の有望な所は結構寒い所が多いような気はするのですが。

---

## おわりに

---

**疋田** 最後に皆さま方から、今後の地熱開発に対する抱負や期待を一言ずついただきたいと思います。

**阪口** 地熱発電は、長い期間使える安定な電源というところが一番大事なところだと思っています。それに合った制度設計、場合によっては法整備も必要になってくると思います。ただ、今まで地熱の扱いが色々変わってきています。ある時は新エネルギーだったり、ある時は新エネルギーから外されてしまったり、今は「急げ」と言われたり。そういうことがあって、

やはり国全体として「エネルギー計画」の中で、適切に利用すると長く使える電源という位置づけをしてもらって、それに見合った色々な制度設計が必要じゃないかと思います。

**中島** 課題は山のようにあるのですが、やはり、その中で1つ1つ、課題をクリアするよう努力していったって、再生可能エネルギーの利用を最大限に進めるというのは、学生時代からの信念でもあります。微力ながら、ぜひ1つでも多く安定して長く操業されるような地熱発電所を立地していけるよう、関係者の皆さんと努力していきたいと思っています。

**中西** 私は事業者の一員ですので、着実に目の前にあるプロジェクト、山葵沢地熱発電所（仮称）設置計画をしっかりと進めますし、また新たな地点のプロジェクトを立ち上げて、進めていきたいと思っています。規模が小さい話など色々ありますが、長い目で見ると、日本の再生可能エネルギーの中で地熱は重要です。多くの制約はあっても日本の地熱発電が発展していけばいいなと思いますし、日本型の地熱開発のモデルみたいなものができていけばいいと思います。また、若い人への技術継承も図っていききたいと思っています。

**海江田** 基本的に、日本に沢山ある地熱を活用すべきだと思っています。オーストラリア、フランス、ドイツの友人からは「なぜ日本はもっと地熱を活用しないんだ」とよく言われます。火山のない国から見れば、日本の地熱資源は羨ましいようです。まずは今進められている地熱開発プロジェクトが順調に進み、ちゃんと発電所ができて、「やっぱり地熱はいいね」となれば、私の夢である高温岩体発電の実用化も近づくのではないかという期待を持っています。

**藤原** 地熱を成功させるには、我々地元自治体、開発企業の方々、地域住民の間の信頼関

係が一番重要だと思います。幸い、湯沢市で開発されている湯沢地熱さんをはじめ、各社の方々には、非常に丁寧に、地元の方に説明していただいていますので、今後も継続してほしいと思っています。

湯沢市としましては、地熱案件としては「環境影響評価法」の下で最初となる山葵沢地熱発電所設置計画、公園内開発の1例目、2例目に当たる小安地域、木地山・下の岱地域での地熱開発が順調に進み、湯沢市が地熱開発の優良事例として全国に波及できるよう、国内の地熱開発の一助となればと思っています。

**疋田** 皆さまから地熱に関して色々なお話をいただきました。日本に豊富にある地熱資源ですが、一足飛びに開発を急ぐのではなく、まずは息長く地元との共同を進める、「地熱利用はいいものだ」という理解を得つつさらにその先に進んでいく、そういうように焦らずに地熱利用を国産エネルギーの1つとして育てていくべきだ、という結論が得られたと思います。

今後の地熱開発の順調な進展を願いつつ、今日の座談会を終わらせていただきたいと思います。本日はありがとうございました。

[寄稿]

## シェール・ガス革命と日本および世界のエネルギー情勢

岩間 剛一 (和光大学 経済経営学部 教授)



### 1. 日本の貿易赤字問題は根底にエネルギー問題がある

日本は2011年に31年ぶりの貿易赤字に転落し、2012年の貿易赤字は6兆9,273億円と過去最大を記録した。2012年の経常収支も2013年2月8日の速報値では4兆7,036億円の黒字と1985年以降における最小の黒字額にとどまった。その1つの要因は、福島第一原子力発電所事故により、日本の原子力発電所は大飯原子力発電所の3号機と4号機しか稼働しておらず、残りの52基は停止したままであるために、液化天然ガス（LNG）火力発電の増強を行い、LNG輸入量が増加したうえに、米国の天然ガス価格がシェール・ガス革命により2013年6月27日時点で百万Btu（英国熱量単位）当たり3,582ドルであるのに対して、日本の2013年2月時点におけるLNG購入価格は、スポット物で百万Btu当たり19.5ドルと、米国と比較して6倍も高値で購入しているからである。日本のLNG輸入量は、2012年に8,731

万トンと過去最高に達し（図1参照）、輸入金額が6兆円と膨張して、貿易赤字の大きな要因となっている。

日本におけるLNGの輸入額は、東日本大震災以前の3兆円から6兆円に増加しており、3兆円に達する国富流出につながっている。しかし、利子・配当を合わせた貿易外収支が10兆円程度の黒字であることから、経常収支は黒字を維持している。そのため、日本国債を新規発行しても、海外からファイナンスする必要がなく、海外の投機資金に金融市場が振り回されることがない。また、米国におけるシェール・ガス革命、シェール・オイル革命によって、米国にとって最大の輸入品目である石油・天然ガスの輸入量が減少し、結果として米国の経常収支赤字が改善傾向にあり、それがドル高・円安をもたらしている面もある。米国はシェール・ガス革命、シェール・オイル革命によって、国内の天然ガス生産量、原油生産量が急速に増加しており、国際エネルギー機関（IEA）の見通しによれば、天然ガス生産量は2015年にロシ

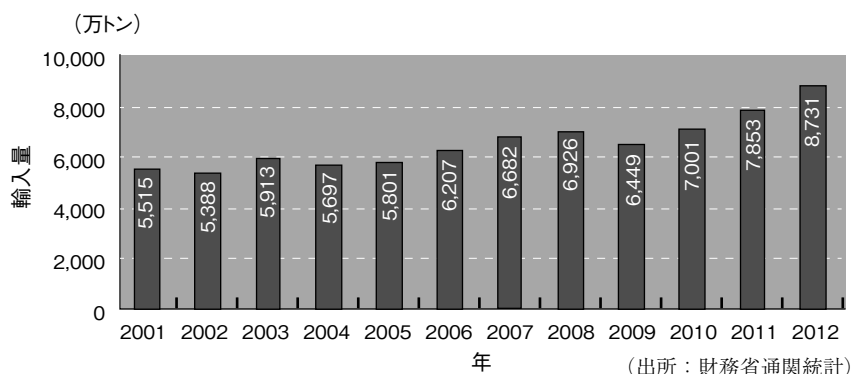


図1 日本のLNG輸入量の推移

アを抜き、原油生産量は2017年にサウジアラビアを抜くと予測されている。実際には、BP統計では、2009年に米国はロシアを抜いて、世界最大の天然ガス生産国となっている（図2参照）。米国における豊富な天然ガス生産と原油生産は、資源エネルギー価格の低下を通じて、米国産業の再生と貿易赤字の改善、さらには消費者のエネルギー・コストの低減という大きな恩恵を受ける状況となっている。米国は、天然ガス生産量の3割以上をシェール・ガスが占めており、2013年には天然ガスの自給をほぼ達成している。

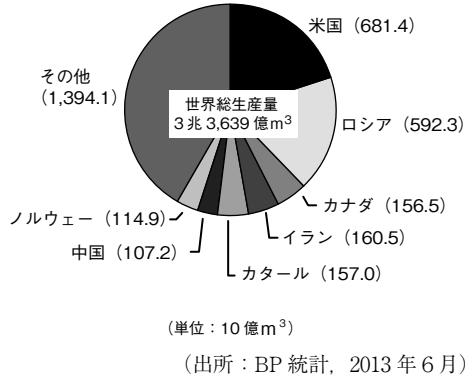


図2 国別天然ガス生産量（2012年）

2. ケインズ流の経済政策の効果

アベノミクスは、基本的に伝統的なケインズ政策を踏襲したものといえる。自民党が選挙時に掲げた公約における経済政策を見ると、金融政策、財政政策を総動員して日本経済再生をはかるというものである（表1参照）。

基本的には、国債、社債、外債を日本銀行が買い入れることによって、市場にマネーを潤沢に供給し、物価を上昇させ、投資を活発化させ、さらに公共投資によって有効需要を喚起し、名

目経済成長率をプラスにするというものである。こうした政策は、2013年春時点においては成功しているといえる。もちろん、伝統的なケインズ政策に批判的な経済学者からは、「アベノミクスのバブル」という言葉が象徴するように、金融政策、財政政策によるケインズ流の景気浮揚対策は、短期的には効果があるものの、長期的には景気浮揚への効果はないという反論もなされている。実際に、2013年5月下旬以降は、米国の中央銀行である連邦準備制度理事会（FRB）による金融緩和政策縮小への懸念から、世界の金融市場は乱高下を繰り返している。

しかし、一部の経済学者、アナリストが批判している点については、以下の点への考察が欠如していると筆者は考えている。第一に、物価上昇率目標を設定すると、とめどなく物価上昇が続き、ハイパー・インフレーション（天文学的に物価が上昇すること）が発生し、日本銀行による物価の制御が不可能になるという議論である。戦争中の軍事費調達を目的とした軍事国債発行を日本銀行が引き受けたために、その後の通貨増発によって、戦後の混乱期に激しい物価上昇に襲われたことが必ず例に出される。ドイツが第一次世界大戦に敗北した時のレンテン・マルクのハイパー・インフレーションも必ず、通貨増発による制御不可能なインフレーションの発生例として取り上げられる。そうしたハイパー・インフレーションの例は、敗戦直後のモノ不足の時代、つまり大量のマネーが市場に流通しているにもかかわらず、購入できるモノの供給力が絶対的に不足している状況において発生している。上の例でいえば、戦争によって生産設備が破壊され、市場にカローラが1台しか供給されていないのに、市場に流通し

表1 自民党の経済政策

|      |                               |
|------|-------------------------------|
| 構造改革 | 世界で一番企業が活動しやすい国               |
| 構造改革 | 雇用と所得が拡大する国                   |
| 物価目標 | 物価目標2%を設定し、日本銀行と協調            |
| 中央銀行 | 日本銀行法の改正も視野に入れる               |
| 円高対策 | 財務省と日本銀行、民間が参加し、官民協調外債ファンドの創設 |

(出所：自民党重点政策2012)

ているおカネが1,000万円存在する状態である。その場合には、カローラ1台の価格は1,000万円にまで上昇する。一部の新興経済発展諸国における現在のインフレーションも、基本的には旺盛な需要の増加に対するモノ不足が原因である。だが、21世紀の今、中国の過剰な粗鋼生産能力、自動車生産能力をはじめとして、日本国内の需要に対して、日本企業と中国の供給能力がはるかに上回っており、モノが有り余っている状況で物価上昇が起きるであろうか。上の例でいえば、市場に流通しているおカネが1,000万円であっても、供給されるカローラは20台に達している。とすれば、カローラ1台50万円である。かりにカローラの価格が1台50万円以上となれば、たちまちのうちに多数のカローラ生産者が殺到し、物価を引き下げってしまう。日本の場合の石油化学におけるエチレン生産能力は年間721万トンに達し、それに対して国内需要は年間500万トンしかない。とすると、残りの年間200万トンは輸出に振り向けるしかない（表2参照）。こう考えると、戦争直後におけるような中央銀行が制御不能なハイパー・インフレーションが起こる可能性はない。

第二に、中央銀行の独立性が損なわれ、無制限に日本銀行が国債の引き受けを行うと、財政規律がなくなり、日本の政府債務残高の

累増に歯止めがきかなくなるという議論である。確かに、対GDP比の政府債務残高は、日本が先進国の中で最低である。欧州諸国の信用危機が叫ばれているものの、対GDP比で見れば、イタリア、フランスのほうが、はるかに健全である。日本は、この数年にわたって国債の新規発行額が年間50兆円を超えており、もはや2013年3月末時点において名目GDP500兆円の2倍を超える水準にまで、政府債務残高は膨張している（表3参照）。

確かに、日本銀行法を改正するとしても、日本銀行に無制限に国債を引き受けさせ、政府債務残高をこれ以上膨張させる状況にはない。日本の政府債務残高の対GDP比がイタリアよりも劣後しているにもかかわらず、国債暴落（金利は上昇）が発生しないのは、日本の国債が90%以上国内においてファイナンスされており、経常収支が黒字であって、世界最大の純債権国であるからである。もし、国内の個人金融資産を上回る水準まで政府債務残高が累増し、海外から国債消化のための借入を行うような状況となったならば、欧州諸国における信用危機と同じような危機が日本にも到来する。その意味で、日本銀行の役割は、あくまでも①通貨価値の安定、②雇用の創出と景気浮揚、に限定すべきであって、無制限の国債引受による政府債

表2 日本のエチレン需給推移

(単位：万トン)

|        | 2008年 | 2009年 | 2010年 | 2011年 | 2014年 | 2016年 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| エチレン生産 | 688   | 691   | 702   | 669   | 681   | 681   |
| エチレン内需 | 560   | 437   | 493   | 510   | 511   | 513   |
| エチレン輸出 | 123   | 199   | 169   | 109   | 122   | 119   |

(出所：日本化学工業協会統計)

表3 日本政府の債務残高

(単位：億円)

| 区分     | 2013年3月末残高 | 2012年3月末比増減 |
|--------|------------|-------------|
| 普通国債   | 7,050,072  | 351,398     |
| その他国債  | 1,164,699  | -30,077     |
| 借入金    | 548,593    | 11,184      |
| 政府短期証券 | 1,152,677  | -15,996     |
| 総合計    | 9,916,011  | 316,508     |

(出所：財務省統計)

務残高の膨張は、将来世代の負担を強いるだけである。ただ、日本銀行の独立性を強調し、インフレーションの発生を食い止めるだけでは、円高の進展と物価の下落を放置することとなり、米国のFRBのように雇用の創出への金融政策の果敢な実施を行うことが求められる。

### 3. 今後の自民党によるエネルギー政策

自民党は、民主党政権時代に策定されたエネルギー基本計画と革新的エネルギー・環境戦略を完全に見直すとしている。2012年に民主党政権のもとで策定された「革新的エネルギー・環境戦略」は、2030年代に原子力発電所稼働がゼロとなると明記されている（表4参照）。しかし、資源エネルギー小国日本にとって、原子力という重要な選択肢を完全に廃止することは得策とはいえない。LNGの購入価格ひとつをとってみても、原子力発電所が稼働しているかどうかは重要である。日本では、2012年夏に関西電力が大飯原子力発電所の3号機と4号機を稼働させることによって、LNGの購入価格は百万Btu当たり13.5ドルまで低下した。逆に、2013年1月に入り、日本、韓国をはじめ

めとした北半球が厳冬に襲われ、韓国の原子力発電所がトラブルを起こしたために、韓国のLNG輸入が増加し、2013年2月時点のLNG購入価格は百万Btu当たり19ドルを超え、カタルが提示する価格は百万Btu当たり20ドルと過去最高の水準に達している。その意味で、LNGを安価に購入する交渉材料として原子力発電所の稼働は必要である。

その点、自民党のエネルギー政策は現実的である。原子力発電所の再稼働に関しては、順次判断し、3年以内に結論を出すとして、原子力発電所の再稼働と原子力発電所の新增設に前向きである（表5参照）。

今後の日本のエネルギー政策を考えていくうえで、まず一次エネルギーにおける原子力発電の位置づけが決まらなと、石油・天然ガスという重要な化石燃料の位置づけも決まらない。原子力発電が一定の基幹的なエネルギーとなって、初めて石油、天然ガス、LPガスという優れたエネルギーの価値が強まる。そうした意味で、エネルギー業界に対して現実的な政策を行える自民党政権の追い風に大きな期待を持つことができる。

表4 民主党による革新的エネルギー・環境戦略案

|               |                                |
|---------------|--------------------------------|
| エネルギーの安定供給    | 火力発電に一定量依存                     |
|               | 火力発電の環境評価を3年から1年に短縮            |
| 原子力発電に依存しない社会 | 2030年代に原発稼働ゼロが可能となる政策          |
|               | 原子力規制委員会の安全確認を得たものだけ再稼働        |
|               | 原発の40年運転制限を厳守                  |
|               | 原子力発電所の新設・増設はしない               |
|               | 核燃料サイクルは続ける                    |
| 地球温暖化対策       | 2020年時点で温室効果ガス排出量は1990年比5～9%削減 |
|               | 2030年時点で温室効果ガス排出量は1990年比2割削減   |

（出所：各種新聞報道）

表5 自民党のエネルギー政策

|            |                                 |
|------------|---------------------------------|
| 原子力発電      | 原発の再稼働に関しては、順次判断し、3年以内に結論を目指す   |
| 再生可能エネルギー  | 当面は、3年間再生可能エネルギーの最大限の導入、省エネの推進  |
| 中長期エネルギー政策 | 遅くとも10年以内には、持続可能な電源構成のベスト・ミックス  |
| 資源開発       | 従来の化石燃料に加えて、メタン・ハイドレート、レアアースの開発 |
| 環境技術       | 世界有数の日本の環境技術により炭酸ガス排出削減         |

（出所：自民党重点政策2012）

#### 4. 禁輸緩和政策と公共投資で日本経済と石油企業は強靱になれるのか

経済政策については、「100人の経済学者がいたら、101の経済理論がある」という格言があるように、人によって大きく意見が分かれる。金融緩和政策についても、一度通貨の増発を始め、物価上昇が始まると、歯止めがきかなくなり、日本の第二次世界大戦敗戦後のようにハイパー・インフレーション（天文学的な物価上昇）が発生するという考え方がある。また、国土強靱化計画についても、古い自民党政権の公共土木工事の焼き直しに過ぎず、政府債務の膨張につながるといった意見もある。確かに、通貨の増発を行い、物価が上昇しても、給料が増加せず、企業業績も向上しないというスタグフレーション（物価上昇を伴う景気後退）という可能性も考えられる。また、デフレーションについても、物価の下落は日本銀行による金融緩和政策が不足しているわけではなく、中国をはじめとしたアジア諸国からの安価な工業製品の大量の流入によるという考え方もある。

しかし、筆者の考え方としては、以下の点が挙げられる。第一に、これまでの民主党政権は、経済政策の一貫性が欠けているうえに、産業界との関係が疎遠となっており、企業経営の実態に対する現実感覚が欠如していた。産業界と敵対関係にあるかのような政権が存在する状況において、日本企業の株式を購入することは難しい。第二に、民主党政権は市場との対話の姿勢に欠けていた。もちろん、財政の均衡、物価の安定は重要である。しかし、日本とは対照的に、米国のFRBは、市場が何を求めているか、市場との対話を重視し、通貨価値の安定とともに、雇用の創出も重要な目標として掲げている。市場が求めていることを的確に把握せず、表面的な財政規律、物価の安定だけを考えるならば、市場から見放されることは当たり前の話である。第三に、景気とは文字どおり「気」に影響される。すなわち、企業の景気見通し、消費者心理とい

う気持ち、心理に影響される。企業の設備投資、個人消費は、将来の物価上昇率見通しに大きく影響される。かりに将来の予想物価上昇率を $\Pi_e$ とする。多くの企業、消費者が、 $\Pi_e$ がゼロよりも大きい、すなわち物価が上昇すると予想した場合には、企業は名目の売上高が増加することから、設備投資を積極化し、個人は物価が上昇する前に商品を購入しようと、前倒しで個人消費が活発となる。結果として、企業の設備投資と個人消費の増加を通じて、景気は拡大する。逆に $\Pi_e$ がゼロよりも小さい。すなわち物価の下落が続くと考えるならば、企業の売上高は減少することから、設備投資を控え、消費者も将来は物価が下落すると予想するならば、商品の購入を先延ばしし、個人消費が低迷する。結果として、設備投資と個人消費が減少し、景気が下落する。このように、景気というものは、予測が自己実現的になる。このように、企業と消費者ともに物価が上昇し、景気が良くなると予想するならば、設備投資の拡大、個人消費の活発化によって、景気拡大が実現する。そうした観点からみると、日本銀行の従来の慎重な金融緩和姿勢では、企業と消費者は物価が上昇し、景気が拡大するという見通しを持てない。そして、消費者は消費に慎重となり、物価の下落が続くという悪循環となる。こうした場合には、企業と消費者に将来は物価が上昇し、景気が拡大するという予想を植え付けることが重要となる。そうした将来見通しに、金融緩和政策と公共投資計画は、好ましい効果をもたらす。上述したように、多くの消費者が物価は上昇し、自分の給料が上昇すると予想するようになると、自動車を購入し、ガソリン消費量も増加し、結果として企業の設備稼働率が上昇し、景気が回復する。そこで、課題となるのは、第一に、人口が減少し、市場が縮小する日本において、再び経済規模が拡大するかである。その点については、日本の場合には人口が減少しているといっても、年間10万人～20万人程度であり、1億3,000万人の人

口からいえば、大きな規模ではない。問題は、消費者の購買意欲であり、消費者の購買意欲を活発化する明るい展望を与えることが必要である。さらに、人口減少に関しては、アジア諸国の成長する需要と労働力を取り込むことが重要となる。アジア全体を1つの日本と考えるのである。第二に、一度インフレーション政策を取ると、歯止めがきかなくなるという考え方がある。よく戦後のハイパー・インフレーションが挙げられる。しかし、戦後のハイパー・インフレーションは、戦費調達のための莫大な国債発行と戦後のモノ不足から発生した。だが、現在は中国に過剰な供給能力が存在し、粗鋼生産、雑貨等の過剰生産能力から、モノが日本に溢れかえっている。日本の物価が少し上昇すれば、すぐさま中国の安価な工業製品が日本に流入し、日本の物価を鎮静化させる効果がある。ハイパー・インフレーションを懸念する論者は、20世紀前半における世界経済において恒常的に人類の需要が供給を上回っていた時代を念頭においたものであり、21世紀の中国の過剰な供給能力を人類が持て余す時代とは異なるものである。むしろ、物価上昇を心配するあまり、円高の進展を放置し、日本企業の国際競争力を低下させ、産業の空洞化によるエネルギー業界への悪影響を放置することのほうが懸念される。まずは、企業と消費者に物価上昇と景気拡大への明るい将来予測を抱かせることができるかどうかによって、日本経済の再生と2013年の景気回復は決まり、縮小を続けてきた日本のエネルギー市場の拡大する未来も決まるといえる。

## 5. 米国におけるシェール・ガス革命、シェール・オイル革命の拡大

筆者がシェール・ガス革命の研究を始めて4年以上が経過する。米国を震源地とするシェール・ガス革命、シェール・オイル革命が一段と拡大している。シェール・ガスとは

シェール（頁岩）と呼ばれる泥などが硬く固まった岩盤の中に含まれているメタンであり、その存在は昔から知られていたものの、生産コストが百万 Btu 当たり 200 ドルを超えると考えられ、エクソンモービルのような世界最優良のメジャー（国際石油資本）でさえ、経済的に無理であると開発を最初から放棄していた。しかし、チャサピーク社をはじめとした米国の中堅石油企業は、天然ガス価格が21世紀初頭に、百万 Btu 当たり 10～15 ドルと高値で推移していたことから、通常の油田・ガス田において用いられていた水平掘削、水圧破碎、マイクロ・センシング等の技術を精緻に組み合わせ、シェール・ガスの生産ノウハウの蓄積に努力した。その結果として、シェール・ガスの生産コストが劇的に低下し、2010年には百万 Btu 当たり 4 ドル、2013年時点において一番好条件のスイート・スポットにおいては、百万 Btu 当たり 1.5 ドル程度と極めて生産コストの安いシェール・ガスの生産に成功している。こうした思いがけない米国テキサス州を中心としたシェール・ガス開発の成功は、米国の天然ガス生産量の増加につながっており、米国は2009年にロシアを抜いて、世界最大の天然ガス生産国となり、米国国内のエネルギー需給の緩和を促し、米国国内の天然ガス価格は、ヘンリー・ハブ渡ししが2012年4月には百万 Btu 当たり 1.8 ドル（石油換算1バレル10.8ドル）と21世紀に入って最低を記録した。米国における天然ガス価格が、あまりに下落したことから、天然ガス火力発電の割合が増加し、米国における天然ガス消費量が増加している2013年6月時点においても、米国の天然ガス価格は百万 Btu 当たり 3.5 ドルと低値で推移している。米国の天然ガス価格の下落は、冷暖房に天然ガスを利用する米国家庭、産業用ボイラーの燃料価格低下を通じて、米国企業と消費者にエネルギー・コスト低下をもたらし、米国経済再生の牽引車として2012年11月に行われた米国大統領選挙においても、大きなテーマとなった。

## 6. 世界最大の天然ガス生産国となった米国

チェサピーク社をはじめとした米国の中堅石油企業によるシェール・ガス開発の動きが一段と進んでいる。もともとは、21世紀初頭に米国における天然ガス価格が百万 Btu 当たり 15 ドル程度の高値で推移していたことから、石油換算で 1 バレル 90 ドルと高値に相当することから、天然ガス生産によって利益を挙げられる可能性もあるという一種の試行錯誤の中で、シェール・ガス開発を始めた。ところが、メジャーのみならず、米国エネルギー省さえ予想できなかったほど、米国の天然ガス生産量が増加し、今では米国は世界最大の天然ガス生産国となっている。

シェール・ガスとは、もともと泥岩等が硬く固まった岩盤である頁岩の中に含まれる天然ガスの主成分であるメタン ( $\text{CH}_4$ ) であり、頁岩への水の浸透率が、通常的气体田の地層における天然ガスの貯留岩での水の浸透率と比較して 1 万分の 1 程度と極めて硬い岩盤構造であることから、「井戸を掘削しても、天然ガスが自噴することはなく、経済性はない」とエクソンモービルをはじめとしたメジャーも考えていた。シェール・ガス、シェール・オイルの存在そのものは、50 年以上前から知られていたものの、シェール・ガスの生産コストは百万 Btu 当たり 200 ～ 300 ドルを超えると考えられていたことから、ほとんどの石油企業は、経済性がないとして最初から開発を放棄していた。しかし、チェ

サピークをはじめとした中堅石油企業は、第一に、21 世紀初頭に米国における天然ガス価格が高値で推移していたこと。第二に、メジャーのような外交交渉力、巨額の資本を持っていないために、海外の巨大な LNG プロジェクト、メキシコ湾深海部油田のような大型プロジェクトを手掛けることができないことから、米国国内に豊富に存在する油田・ガス田の開発に地道に注力せざるを得なかったこと。等を要因として、21 世紀初頭頃からシェール・ガス開発を本格的に開始し、その結果として米国国内の天然ガス生産量は、2005 年を底として急速に増加している（図 3 参照）。米国国内の天然ガス生産量は 1970 年代をピークに減退の一途を辿るという悲観的な資源枯渇論は、天然ガス生産量の急速な増加という事実の前に完全に覆されている。

## 7. 資源量の膨大なシェール・ガス

米国におけるシェール・ガス革命が、広く日本において知られるようになったのは 2010 年以降のことであり、新聞等で新型ガスとして大きく扱われるようになったのは、2012 年に入ってからである。その意味では、もともと国内に天然ガス資源がほとんどない日本の人々にとって、シェール・ガス革命がもたらす大きな意味が理解できないかもしれない。米国の天然ガス生産量は 2005 年を底に急速に増加し、2009 年にロシアを抜いて、米国は世界最大の天然ガス生産国となった。世界最優良の石油企業であるエクソンモービルのティ

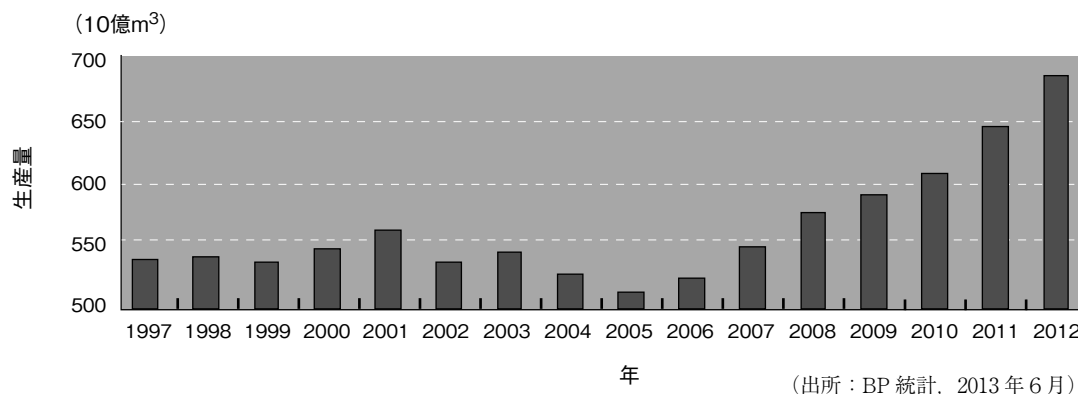


図 3 米国の天然ガス生産量推移

ラーソン CEO（最高経営責任者）も、「私たちは、シェール・ガスの可能性を完全に見誤っていた」と正直に発言している。それほど、米国国内のエネルギー情勢に大きな影響を与えている。シェール・ガスの革新的なことは、その資源量である。従来の天然ガスは背斜構造というラクダのこぶのような地質構造に存在する炭化水素であると考えられていた。その意味では、限定された地層である。ところが、シェール・ガスは頁岩という岩盤構造であり、在来型天然ガス資源と比較して資源量が桁外れに大きい（表6参照）。

在来型天然ガスの埋蔵量と比べて5～6倍もの資源量を持っている。しかも、在来型の石油・天然ガスのように一部の国に集中して

おらず、世界中に遍く、大量に存在している。2013年6月には米国エネルギー省エネルギー情報局（EIA）が42カ国を対象に最新のシェール・ガス、シェール・オイルの資源量を発表している（表7、表8参照）。

## 8. 天然ガス価格の下落はシェール・オイル開発へと拡大

中国、米国をはじめとしたエネルギー大消費国に大量のシェール・ガスの存在が推定されており、米国エネルギー省は、「今後250年～400年にわたって米国は天然ガスを安心して利用できる」という資源楽観論が台頭してきている。それとともに、米国における天然ガス価格は下

表6 非在来型天然ガス資源量

（単位：兆立方フィート）

|      | コール・ベッド・メタン | シェール・ガス | タイト・サンド・ガス | 小計     |
|------|-------------|---------|------------|--------|
| 北米   | 3,017       | 3,840   | 1,371      | 8,228  |
| 中南米  | 39          | 2,116   | 1,293      | 3,448  |
| 西欧   | 157         | 509     | 353        | 1,019  |
| 東欧   | 118         | 39      | 78         | 235    |
| ロシア  | 3,957       | 627     | 901        | 5,485  |
| 中東   | 0           | 2,547   | 823        | 3,370  |
| アフリカ | 39          | 274     | 784        | 1,097  |
| 中国   | 1,215       | 3,526   | 353        | 5,094  |
| その他  | 509         | 2,625   | 1,450      | 4,584  |
| 世界合計 | 9,051       | 16,103  | 7,406      | 32,560 |

（出所：米国地質調査所（USGS）統計）

表7 国別シェール・ガス資源量（2013年）

（単位：兆立方フィート）

| 国名     | 技術的回収可能資源量 |
|--------|------------|
| 中国     | 1,115      |
| アルゼンチン | 802        |
| アルジェリア | 707        |
| 米国     | 665        |
| カナダ    | 573        |
| メキシコ   | 545        |
| 豪州     | 437        |
| 南アフリカ  | 390        |
| ロシア    | 285        |
| ブラジル   | 245        |
| 世界合計   | 7,299      |

（出所：EIA 統計）

表8 国別シェール・オイル資源量（2013年）

（単位：億バレル）

| 国名     | 技術的回収可能資源量 |
|--------|------------|
| ロシア    | 750        |
| 米国     | 580        |
| 中国     | 320        |
| アルゼンチン | 270        |
| リビア    | 260        |
| 豪州     | 180        |
| ベネズエラ  | 130        |
| メキシコ   | 130        |
| パキスタン  | 90         |
| カナダ    | 90         |
| 世界合計   | 3,450      |

（出所：EIA 統計）

落の一途を辿り、現状の天然ガス価格では、メジャーは、米国国内における天然ガス販売で利益を挙げられない状況にある。なぜならば、シェール・ガスのもっとも好条件のスイート・スポットにおける生産コストは、百万 Btu 当たり 1.5 ドルであるものの、メジャーは生産コストの高い米国メキシコ湾深海部油田から生産される天然ガスも販売しており、天然ガス価格が百万 Btu 当たり 4 ドル以上でなければ、利益を挙げられない。そのため、天然ガス価格は百万 Btu 当たり 3 ドル（石油換算 1 バレル 18 ドル）に対し、原油価格は北海ブレント原油価格が 2013 年 6 月下旬時点において 1 バレル 105 ドル、WTI 原油価格が 1 バレル 95 ドルと 10 倍もの格差があることから、割安なシェール・ガスから割高なシェール・オイル狙いに、米国の石油企業による石油・天然ガス開発の重点が変わってきている。2012 年に入って、米国国内において掘削されているリグの 8～9 割はシェール・オイル狙いとなっている（図 4 参照）。

シェール・オイル開発も、基本的にはシェール・ガス開発と同じように水平掘削、水圧破碎等の技術が活用され、シェール・ガス開発で蓄積されたノウハウが応用されている。掘削された頁岩の中に含まれている成分が気体であればシェール・ガス、液体であればシェール・オイルということとなる。もちろん、シェール・オ

イル狙いの掘削であっても、石油だけが採取できるわけではなく、随伴して、シェール・ガス、プロパン、ブタン等の気体も生産されることから、米国における天然ガス生産量は、結果として減少しない。シェール・オイルが持つ、シェール・ガスに対する優位性は、第一に、常温・常圧で液体であるために輸送、貯蔵、取り扱いが簡単であること。第二に、液体であることから、輸送が簡単であるために、世界中どこでも価格の高い地域にタンカーで運んで、より大きな利益を上げることができる国際商品であること。そのため、シェール・オイルの生産増加は、シェール・ガスの生産増加よりも国際価格に与える影響が大きいこと。第三に、シェール・オイルは、在来型の原油よりもガソリンをはじめとした軽い石油製品の得率が高い、軽質原油あるいはコンデンセート（粗製ガソリン）であるために、在来型の原油よりも割高な価格で販売することが可能であること。等が挙げられる。そのため、米国における原油生産量は急速に増加しており、2011 年と 2012 年に世界で一番原油生産量を増加させた産油国は米国である（図 5 参照）。もちろん、シェール・オイル狙いの開発を行っても、軽質原油に随伴して天然ガスとプロパン等の LP ガスが生産されるため、米国の天然ガス生産量の増加は止まらず、安値で推移し、米国の指標プロパン・ガス価格（メキシ

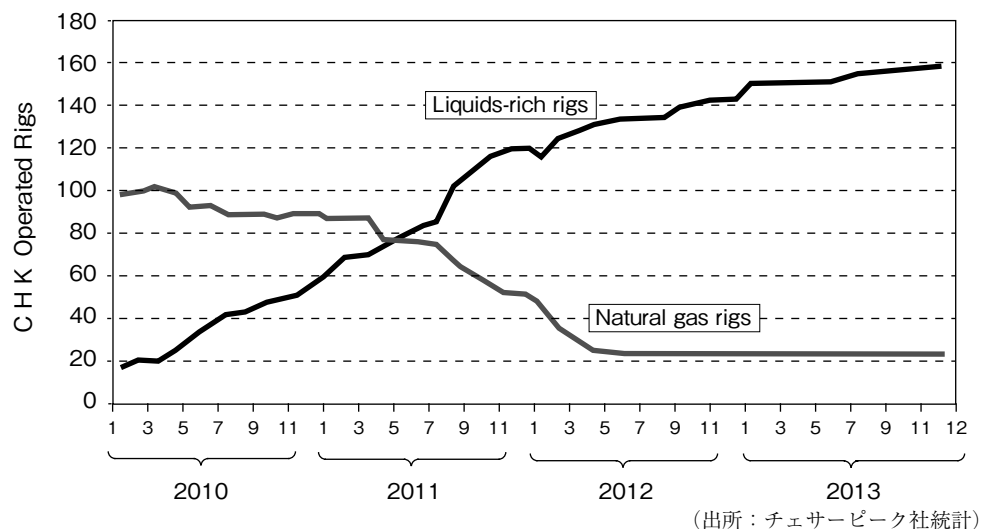


図 4 チェサーピーク社の掘削リグ数推移

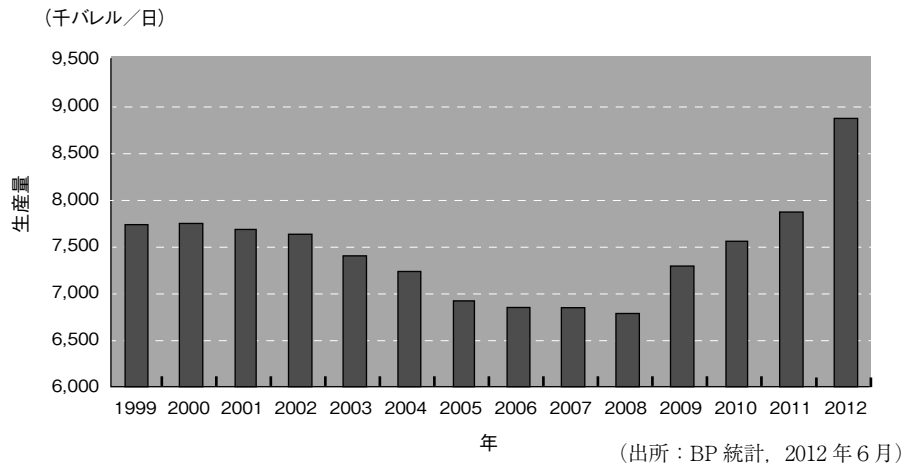


図5 米国の原油生産量推移

コ湾沿いのモントベルビュー渡し)も1トン当たり400ドル程度と安価な水準で推移し、米国におけるエネルギー需給緩和が急速に進んでいる。米国における天然ガス価格の下落は、米国の発電の5割を占める石炭火力発電から天然ガス火力発電への転換をもたらし、米国のアパラチア産石炭価格も下落し、米国に輸出されていたコロンビア産石炭が行き場を失い、アジア大洋州に流れ込んで、豪州ニューカッスル港渡し的一般炭価格の下落を招くという米国外のアジア大洋州地域への影響も顕在化している。

米国の原油生産量は2008年を底に急速に増加しており、米国は1970年に原油生産量がピークを迎え、以後は米国の原油生産量は減退の一途を辿って、原油価格は天文学的に高騰するという、2008年に米国の名門投資銀行によって喧伝されたオイル・ピーク論は、原油生産量の増加という事実の前に完全に覆されている。ただ、シェール・ガス価格と比較してシェール・オイル価格が熱量換算で見た場合に割高であるといっても、シェール・オイル開発を進めていくと、随伴してシェール・ガスの生産が進み、結果として米国のシェール・ガス生産量が増加するため、米国の天然ガス価格が低位で推移する。ノースダコタ州のバッケン・シェール油田の開発においても、生産される石油・天然ガス成分のうち35%程度は気体分であるシェール・ガスが占めている。もちろん、シェール・オイル油田ごとに、液体

分と気体分の構成比率は異なるものの、シェール・オイルの生産を行うと、かならずシェール・ガスも随伴するため、割高なシェール・オイルを狙った開発を行うと、結果としてシェール・ガスの生産も増加し、米国のエネルギー需給緩和に伴って、天然ガス価格が安価で推移するという状況が米国において続いている。

## 9. 2020年には国際資源地図を塗り替えるシェール・ガス革命

こうした米国を震源地とするシェール・ガス革命は、欧州諸国、中国にも拡大している。欧州のポーランドではシェール・ガスの開発が進み、中国の四川省でもシェール・ガスの試掘が始まっている。IEAは、『天然ガス黄金時代』(The Golden Age of Natural Gas)というレポートを発表しており、世界的なシェール・ガスの開発により、世界の天然ガス生産量は2010年の3兆2,760億立方メートルから2020年には3兆9,820億立方メートル、2035年には5兆1,120億立方メートルにまで拡大すると予測している(図6参照)。

米国のみならず、欧州諸国、中国におけるシェール・ガスの生産増は、天然ガス価格の低位安定をもたらすとともに、在来型の天然ガスが特定の国に集中していることに起因する地政学リスクを低減する効果をもたらす。天然ガスは、単位熱量当たりの炭酸ガス排出量が石炭の

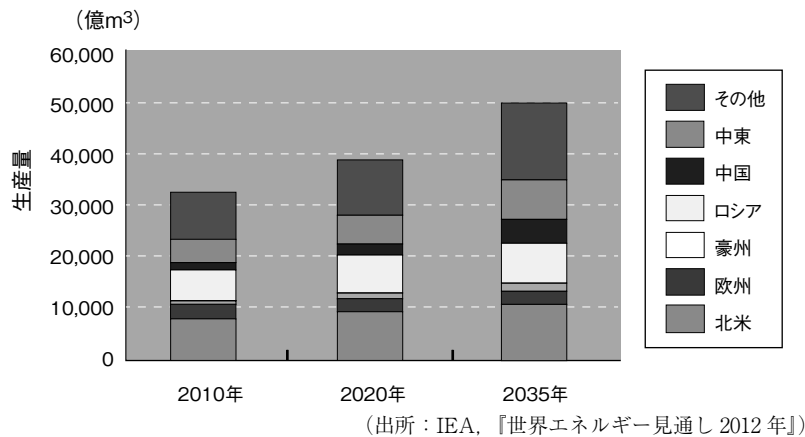


図6 世界の天然ガス生産量見通し

半分程度であり、環境の世紀と呼ばれる 21 世紀における有力なエネルギーである。特に、福島第一原子力発電所事故以降の原子力発電所推進政策の見直しにおいて、もっとも現実的なエネルギーは天然ガスである。しかし、在来型天然ガスは、将来の生産ポテンシャルを示す埋蔵量の半分がロシア、イラン、カタールの 3 カ国に集中している (図 7 参照)。

それに対して、シェール・ガスは、世界の多くの国に存在し、今後のシェール・ガス開発の進展に伴って、天然ガス価格が世界的に低下する可能性が極めて大きい。現状では、天然ガスは常温・常圧において気体であるために、北米市場と欧州市場とアジア大洋州市場が物理的に分断されており、百万 Btu 当たりの価格は、北米市場 3 ドル、欧州市場 10 ドル、アジア大洋州市場 19 ドルと大きな価格差が発生している。しかし、2014 年～2015 年にパナパ運河の拡張

工事が完成し、14 万 5,000 立方メートルという標準的な LNG 船が通航できるようになると、米国メキシコ湾から LNG の輸出が可能となり、2020 年以降には世界の LNG 価格が 1 つに収斂する可能性が大きい。米国においては、天然ガスの自給率 100% がほぼ達成できる状況にあり、天然ガス価格は、当面は百万 Btu 当たり 3～4 ドルの安値で推移すると考えられる。それに対して、国内にわずかな天然ガス資源しかもたず、海外からの幹線パイプラインによる生ガス輸入という交渉材料を持っていない日本の場合には、今後 2～3 年程度は、百万 Btu 当たり 15～20 ドル程度という原油価格リンクで LNG を購入せざるを得ないと考えられる。しかし、今後の世界的なシェール・ガスの開発進展、LNG の国際貿易の拡大と LNG 輸出国に米国、カナダが登場するインパクトを考慮に入れると、日本も安価な LNG を調達することが可能であり、

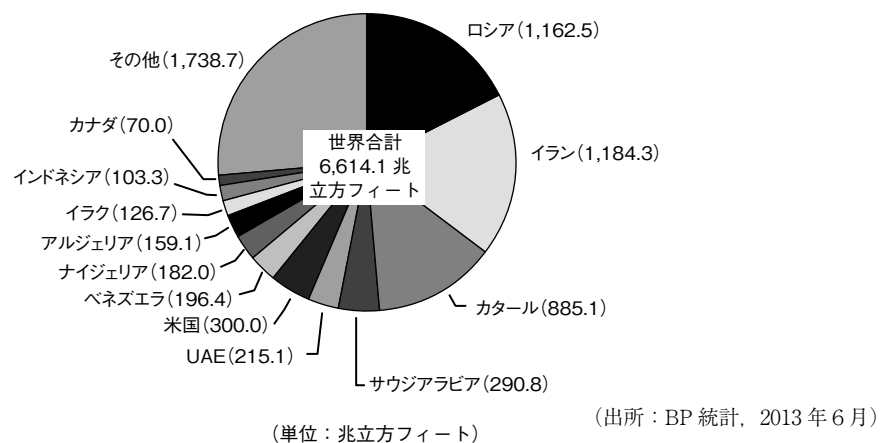


図7 国別天然ガス埋蔵量 (2012 年末)

電力不足に直面する日本経済の持続的な発展にとって好ましい影響をもたらすことが予想される。IEA も「シェール・ガス開発の進展によって、日本の天然ガス価格は、2020 年から 2035 年にかけて百万 Btu 当たり 12 ドル程度で低位安定する」と予測している（図8参照）。

また、安価な米国、カナダの天然ガスを LNG として輸出する計画も進んでおり、米国では合計すると年間 1 億トンを超える LNG 輸

出計画が構想されている（表9参照）。

米国からの LNG 輸出が本格化すると、米国の 6 倍近くもの高値で推移する日本の LNG 購入価格も低下する可能性が強い。2013 年 5 月 17 日には、日本の大阪ガス、中部電力が参画するフリーポート LNG の輸出許可が、米国エネルギー省によって出された。日本は、2017 年以降に米国のヘンリー・ハブ渡しに連動した LNG を輸入することが可能である（表10参照）。

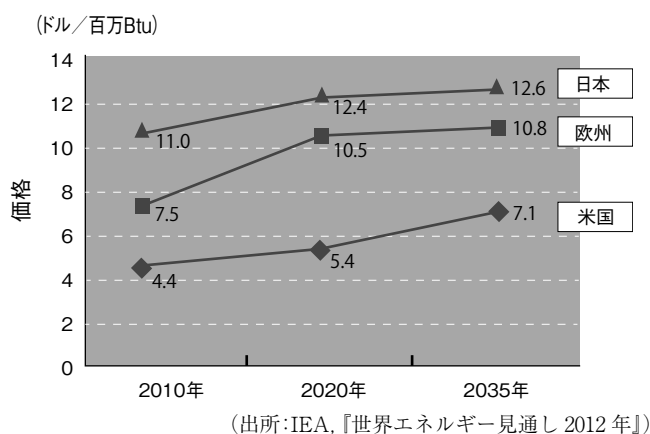


図8 天然ガス価格見通し

表9 北米における LNG 輸出計画

(単位：百万トン)

| 地域      | プロジェクト名         | 事業主体            | 液化能力 |
|---------|-----------------|-----------------|------|
| アラスカ    | ケナイ LNG         | コノコフィリップス、マラソン  | 20.0 |
| カナダ     | キティマット LNG      | 三菱商事、シェブロン      | 10.0 |
| カナダ     | ダグラス・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     | 19.5 |
| テキサス    | フリーポート LNG      | フリーポート、豪州マッコーリー | 13.5 |
| テキサス    | コルバス・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   | シェル             | 2.5  |
| カリフォルニア | レイク・チャールズ LNG   | サザン・ユニオン、BG     | 15.0 |
| カリフォルニア | キャメロン LNG       | センブラ・エナジー       | 12.8 |

(出所：各種新聞報道)

表10 米国フリーポート LNG の権益取得

|          |                                          |
|----------|------------------------------------------|
| プロジェクト名  | フリーポート LNG プロジェクト                        |
| 液化設備能力   | 年間 440 万トン 3 トレイン                        |
| LNG 事業主体 | フリーポート LNG (20%)、ザクリー (55%)、大阪ガス (15%) 等 |
| LNG 液化権益 | 大阪ガス (年間 220 万トン)、中部電力 (年間 220 万トン)      |
| 稼働開始     | 2017 年                                   |
| 場所       | テキサス州ヒューストン                              |

(出所：各種新聞報道)

表 11 米国ヘンリー・ハブ連動 LNG 輸入計画

| 日本企業      | 相手企業      | LNG 輸入量（年間） | 輸入開始   |
|-----------|-----------|-------------|--------|
| 大阪ガス、中部電力 | フリーポート    | 220 万トン × 2 | 2017 年 |
| 東京ガス、住友商事 | ドミニオン     | 230 万トン     | 2017 年 |
| 三菱商事、三井物産 | センブラ・エナジー | 400 万トン × 2 | 2016 年 |
| 東京電力      | 三井物産等     | 200 万トン     | 2017 年 |
| 関西電力      | BP        | 50 万トン      | 2017 年 |

（出所：各種新聞報道）

表 12 米国におけるエチレン・プラント建設計画

| 企業名          | エチレン年間生産能力 | 場所         | 稼働年     |
|--------------|------------|------------|---------|
| ダウ・ケミカル      | 150 万トン    | テキサス州      | 2017 年  |
| エクソンモービル     | 150 万トン    | テキサス州      | 2016 年  |
| シェブロン        | 150 万トン    | テキサス州      | 2017 年  |
| Formosa（台湾）  | 80 万トン     | テキサス州      | 2010 年代 |
| 信越化学         | 100 万トン    | 未定（塩化ビニール） | 未定      |
| ロイヤル・ダッチ・シェル | 150 万トン    | ペンシルバニア州   | 2017 年  |

（出所：各種新聞報道）

米国のヘンリー・ハブ渡しを指標とした LNG の場合には、（米国天然ガス価格 3 ドル）＋（液化コスト 2.5 ドル）＋（輸送費 3 ドル）＝ 8.5 ドルで LNG を購入することが可能となり、現状の LNG 購入価格よりも、百万 Btu 当たり 10 ドルも安価である。また、2013 年の米国における原油生産量のうち 100 万バレル / 日以上はシェール・オイルが占めており、世界最大の原油輸入国である米国における原油生産の増加に伴う原油輸入量の減少は、玉突き的にアジア大洋州地域における原油需給を緩和させる効果を持つ。日本の電力会社をはじめとした公益事業も米国の天然ガス価格を指標とした割安な LNG 購入計画を進めている（表 11 参照）。

2013 年後半にかけて、米国エネルギー省は、次々と LNG の輸出許可を進めていくことが見込まれ、米国におけるシェール・ガス、シェール・オイルの生産増加に伴うエネルギー需給の緩和、エネルギー価格の低下は、国際石油市場における中東のステータスの低下、米国経済の復活というグローバル・パワー・バランスの変化をもたらす。さらに、米国においては、安価なシェール・ガスを原料としたエ

チレン・プラントの建設が相次いで発表されている（表 12 参照）。

シェール・ガス、シェール・オイルの革命的な出現は、21 世紀最大のエネルギー・ショックともいえ、世界の資源地図を大きく塗り替えるのみならず、世界の産業構造、日本と米国の景気動向を大きく変革する可能性を持っている。人件費が割高である米国における製造業の復活、割高なエネルギー購入を余儀なくされている日本のエネルギー輸入コストの低減という新たなエネルギーの新世紀を迎えることは間違いないのである。

[寄稿]

## 欧米諸国における電気事業の現状 ～電力市場自由化と供給力確保を中心に～

大西 健一 (一社) 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2012年2月から電力システム改革専門委員会が開催されている。2013年2月に取りまとめられた「電力システム改革専門委員会報告書」を受けて、「電気事業法の一部を改正する法律案」が2013年4月に閣議決定された。報告書では2015年を目途に広域系統運用機関を設立した後、2016年を目途に小売電力市場の全面自由化を導入することが示されている。

欧米諸国では1970年代の石油危機以降、公益事業の民営化、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。電気事業に関しても例外ではなく、1990年代以降に欧米諸国で規制緩和が導入された。欧州では、欧州連合(EU)域内共通市場の創設と言う理念を背景に2007年までに小売電力市場の全面自由化を原則として導入することが義務付けられた。米国でも、1990年代末から北東部諸州、テキサス州、カリフォルニア州などで小売電力市場の全面自由化が導入された。しかし、カリフォルニアで2000年から2001年にかけて電力危機が発生してカリフォルニア州が自由化を中断したのを境に米国では新規に小売電力市場の全面自由化を行った州はない。

小売電力市場の全面自由化の導入によって、これまで管轄地域内において電力を独占的に供給してきた既存事業者の位置付けも変わった。自由化以前は既存事業者が必要家への供給義務が課せられる一方、規制料金に基づき発電設備の建設・維持に係る費用を確実に回収できた。

しかし、全面自由化後は既存事業者が供給義務を一義的に担うことはなくなる。一方で、規制料金ではなく市場料金の下で既存事業者は費用を回収していかなければならなくなる。この場合、特に投資回収が長期に亘る発電設備の投資インセンティブが減退する恐れも指摘されている。自由化後に懸念される最大の課題は、自由化市場において将来の供給力をいかに確保していくかということになる。

全面自由化後における供給力確保策に関しては欧米諸国において国・地域で講じられている対策は様々である。欧州では全面自由化の実施時点で発電設備が余剰傾向であったため、小売供給事業者に供給力確保義務を課するような供給力確保策を導入した国はほとんどない。一方で、米国の自由化州では発電設備への投資インセンティブを高める、または発電設備の閉鎖を先送りにさせるために比較的早い段階で供給力確保策を導入している。

しかし、これまで積極的に供給力確保策を講じていなかった欧州でも最近では再生可能エネルギー発電設備の大量導入によってガス火力発電設備の稼働率が悪化している。将来的に再生可能エネルギー発電設備は増加していく傾向にあることから、ガス火力発電設備への投資減退や閉鎖前倒しが懸念され始めている。このため、供給力確保策を講じてこなかった欧州各国では一様に制度設計の検討が行われている状況である。

本稿では、まず欧米諸国におけるエネルギー需給や電源構成の現状などを概観し、各国の

特徴を取り上げる。そして、欧米諸国における小売電力市場の自由化動向、供給力確保策の導入状況を紹介したい。

## 2. 欧米諸国におけるエネルギー・電力需給等の現状

### (1) 主要国におけるエネルギー自給率

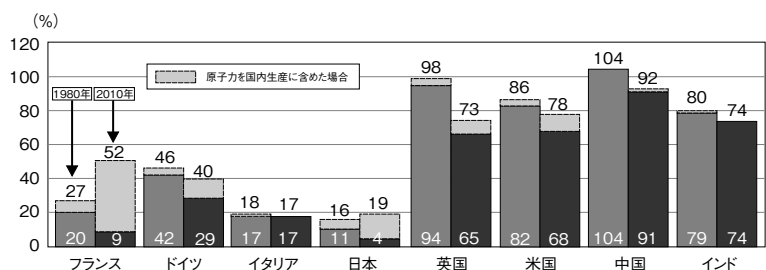
わが国では国内にエネルギー資源が乏しいことから原子力開発を行ってきた。その結果、原子力を国産エネルギーに含めた場合、1980年で16%だったエネルギー自給率は2010年に19%まで増加した(図1参照)。しかし、福島第一原子力発電所事故をきっかけに2011年以降、天然ガスが原子力の代替エネルギーとして利用されており、この傾向が続くようであればわが国のエネルギー自給率は数%にまで落ち込むことも考えられる。

主要国の中で抜本的にエネルギー自給率の向上に取り組んだ国として挙げられるのはフランスであり、エネルギー自給率は1980年から25ポイント上昇して2010年は52%となっている。この背景にはフランスもわが国と同様に国内資源が乏しく、1970年代の石油危機以降、エネルギー安全保障を確立するた

めに国を挙げて原子力発電の導入を推進してきたことが挙げられる。また、国際競争力のあるエネルギー企業を国内に有することが結果的に自国のエネルギー安全保障の強化につながるとの考えからフランス政府は巨大エネルギー事業者(石油:トタル社、ガス:GDFスエズ社、電力:フランス電力会社(EDF)、原子力:アレバ社)を積極的に育成してきた。ドイツについては、石炭資源が国内に多く賦存しているため、エネルギー自給率は日本やイタリアよりも高い水準である。英国は北海油田の開発で自給自足体制を構築したものの、2000年代半ば以降は北海油田の生産量が減退していることから、エネルギー自給率も若干低下している。米国では国内に豊富な天然ガス、さらには近年開発が進んでいるシェールガスが大量に賦存することから、エネルギー自給率は一定水準を維持すると考えられる。

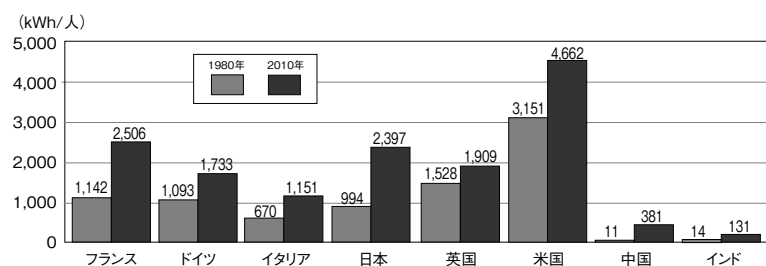
### (2) 主要国における1人当たりの家庭用消費電力量、家庭用エネルギー消費の電力化率

1人当たりの家庭用消費電力量に関しては、米国は年間4,662 kWh/人であり、欧州や日本と比較して2~4倍程度高い水準である(図2参照)。米国では他国と比較して電化製品の



(出所: 国際エネルギー機関 (IEA) の資料を基に作成)

図1 主要国におけるエネルギー自給率 (1980年, 2010年)



(出所: IEA 資料を基に作成)

図2 主要国における一人当たりの家庭用消費電力量 (1980年, 2010年)

所有率，電気暖房・温水器，電化厨房の普及率が高いことなどが背景として指摘されている他，米国における家庭用の最終エネルギー消費量に占める電力の割合（以下，電力化率）を計算すると 2010 年時点で 46％に達していることも電力消費量が多い要因の 1 つと考えられる。他の主要国のうち，フランスと日本がそれぞれ 2,506 kWh/人，2,397 kWh/人と比較的高い水準にある。家庭用最終エネルギー消費量の電力化率はフランスで 32％，日本で 53％となっており，米国と同様に比較的高水準である。フランスでは，1970 年代の石油危機以降，“tout électrique – tout nucléaire”（全電力化，全原子力）というスローガンの下で原子力発電の割合を高め，同時に電力化率も底上げするエネルギー政策を展開してきたことが背景にある。一方，イタリアでは電力化率が 19％という低い水準であることや，湿

気が少なく過ごしやすい気候であることなどから 1 人当たりの家庭用消費電力量は 1,151 kWh/人と低い水準である。（図 3 参照）

### （3）主要国における発電電力量の電源別シェア

次に主要国の発電電力量の電源別割合を比較すると（図 4 参照），米国では国レベルでは電源構成のバランスが取れているように見えるが，地域によって電源構成が著しく異なり，北東部諸州では原子力発電の割合が比較的高い反面，テキサス州やフロリダ州ではガス火力発電および石炭火力発電の割合が大分を占めている。フランスは前述したように 1970 年代の石油危機以降に原子力発電の割合を高め，現在は約 80％程度を占めるに至っている。一方で，ドイツでは国内炭を利用した火力発電の割合が高く，石炭比率は約 50％程度を占める。最近では風力発電などの導入量も増加し

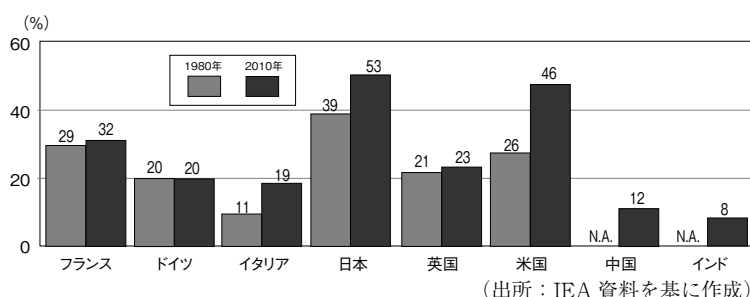


図 3 主要国における家庭用エネルギー消費の電力化率（1980 年，2010 年）

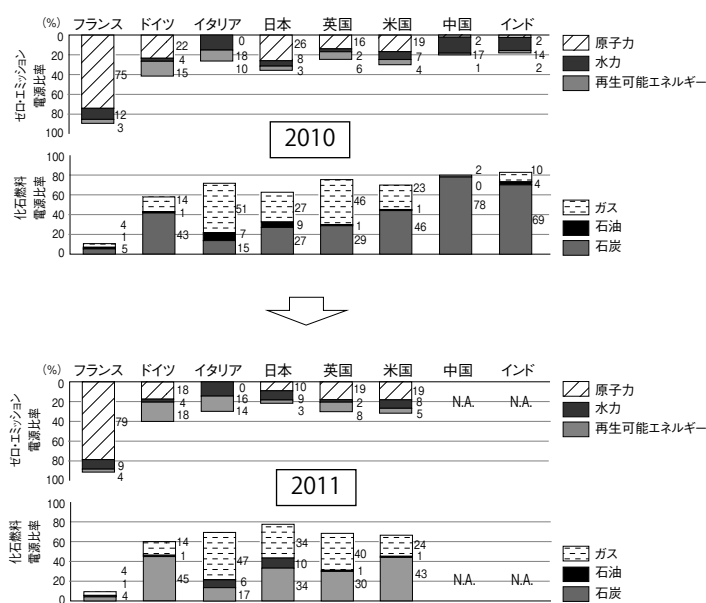


図 4 主要国における発電電力量に占める電源別シェア

ており、ドイツにおける再生可能エネルギー発電（風力、太陽光、バイオマスなど）の割合は18%まで上昇している。また、ドイツでは2011年は脱原子力政策が講じられたこともあり、原子力発電の割合が下がっている。イタリアは国内資源が乏しく発電用燃料の大部分を輸入に依存している状況であり、火力発電の割合が約70%を占めている。このように欧州では各国の電源構成が様々であることから季時によっては発電電力に過不足が発生、または卸電力価格の水準が変化することから国際的な電力取引が一般的に行われている。

### 3. 電力市場自由化

#### （1）米国における小売市場自由化の状況

米国では、1990年代以降に電気料金が比較的割高な州で小売電力市場への競争原理の導入についての議論が開始された。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開始されたことを皮切りにカリフォルニア州、北東部諸州などでも小売電力市場の自由化が導入された（図5参照）。しかし、2000年から2001年にかけて「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を受けて米国での小売電力市場の自由化に向けた議論は停滞することになる。「カリフォルニア電力危機」が発生した背景には、①発電事業者が財務危機に陥った既存事業者（PG&E社、SCE社）に対して

電力供給を渋ったこと、②卸電力価格の吊り上げを狙った発電事業者が発電電力を出し惜しんだために本来利用可能なはずの発電設備が使えなかったこと、③既存事業者が電力調達を行うための先渡契約などを活用できなかったこと、④卸電力調達でかかった費用を需要家から回収することができなかったことが指摘されている。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・廃止した。しかし、一度は自由化を中断したカリフォルニア州では、2010年4月から限定的な範囲で自由化が再開されている。自由化の上限は、2001年に代替事業者によって供給された販売電力量シェアに相当する11%に設定され、供給事業者の変更申し込みは先着順、上限に達し次第受け付け終了という枠組みとなっている。

#### （2）米国各州における電気料金の特徴

米国の家庭用小売電気料金の価格推移については、①自由化実施州では自由化未実施州よりも電気料金の水準が歴史的に割高、②自由化実施州と自由化未実施州の双方で2000年代以降において電気料金が上昇といった特徴を確認できる（図6参照）。

州毎の水準を見ると、自由化を実施したカ

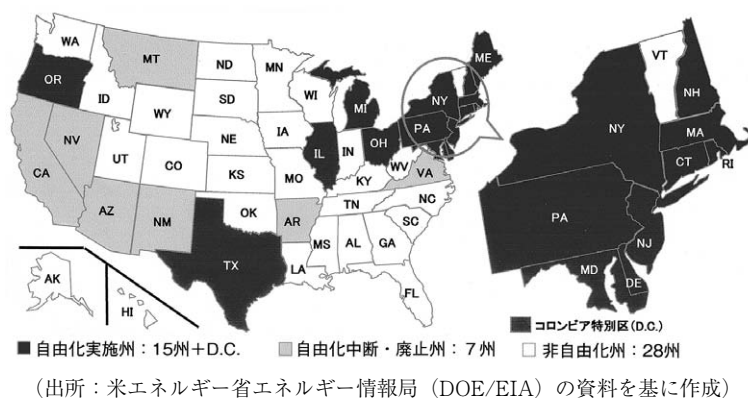


図5 米国各州における小売電力市場の改革動向（2010年9月）



表 1 欧州主要国における小売市場自由化のプロセス

|        | ～1997          | 1998           | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004～2006 | 2007 | 2008～          |
|--------|----------------|----------------|------|------|------|------|------|-----------|------|----------------|
| ドイツ    |                | 1998年4月, 全面自由化 |      |      |      |      |      |           |      |                |
| フランス   |                |                | 22%  | 30%  |      |      | 37%  | 非家庭用需要家   |      | 2007年7月, 全面自由化 |
| イタリア   |                |                | 30%  | 35%  |      | 40%  |      |           |      | 2007年7月, 全面自由化 |
| スウェーデン | 1996年1月, 全面自由化 |                |      |      |      |      |      |           |      |                |
| 英国     | 1990年4月, 部分自由化 | 1999年4月, 全面自由化 |      |      |      |      |      |           |      |                |

の小売供給事業者を選択できる。ただし、徐々に新規事業者のシェアは増加しているものの、既存の小売電気事業者へのローヤルティは強く、急激な変更には至っていない。2011 年末時点での家庭用需要家向けの小売市場における新規事業者シェアは約 17%である（図 8，表 2 参照）。

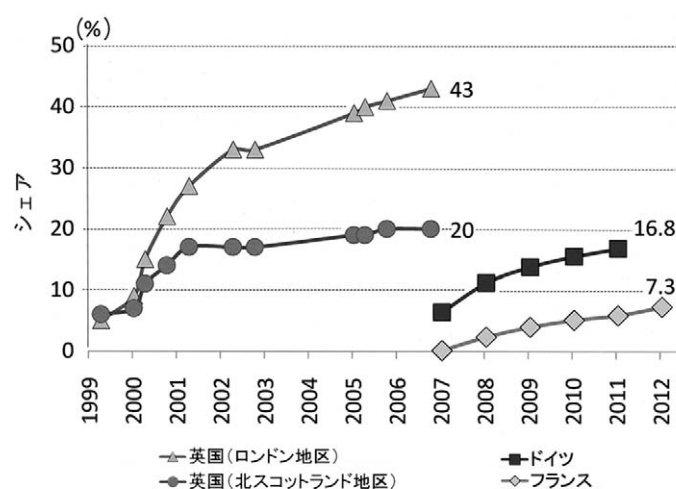
フランスでは原子力発電設備を所有するフランス電力会社（EDF）が競争力を有している。新規事業者はコスト面で EDF と対等に競争しにくい市場環境であったが、2011 年以降に EDF は原子力発電電力の一部を原価ベースで新規事業者に卸販売することが義務付けられたため、最近では新規事業者も割安な料金メニューを提示することができるようになっ

ている。家庭用需要家向け小売市場における新規事業者シェアは僅かながら増加傾向であり、2012 年末時点では約 7%である。

英国では電気料金が下落した 2000 年代初頭から新規事業者シェアが一気に拡大しており、2007 年 3 月時点でロンドン地区で約 43%，北スコットランド地区で約 20%に達している。小売電力市場での顧客争奪は激しく、事業者によっては複雑な料金メニューを提示する，中には需要家に虚偽の情報提供を行うなどの自由化の弊害も顕著に表れている。

#### （4）欧州主要国における電気料金の推移

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



（出所：欧州電力・ガス規制者グループ（ERGEG），英電力・ガス規制局（Ofgem）資料を基に作成）

図 8 欧州主要国における家庭用需要家向け小売市場に占める新規事業者シェア

表 2 欧州主要国における家庭用需要家の事業者選択可能性（2013 年 4 月）

|                  | ドイツ(ベルリン)       | フランス(パリ)      | 英国(ロンドン)     |
|------------------|-----------------|---------------|--------------|
| 選択可能事業者数         | 123 社           | 9 社           | 18 社         |
| 選択可能料金メニュー数      | 316             | 35            | 128          |
| 電気料金(年間3,500kWh) | 年間705～1,205 ユーロ | 年間482～657 ユーロ | 年間542～687ユーロ |

気料金は多くの国で上昇傾向となっている(図9参照)。

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などにに基づき決定されているといった事情がある。

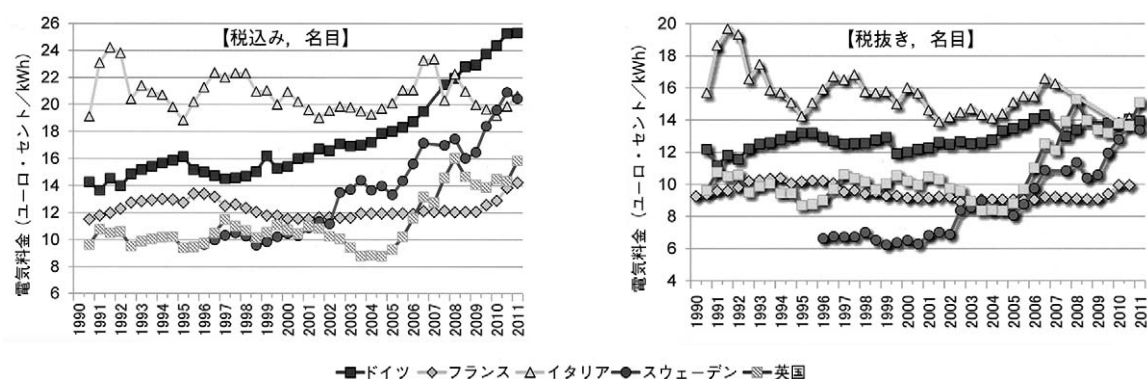
イタリアは火力比率が約70%と高水準であり、さらに化石燃料の大部分を輸入に依存していることから燃料調達コストが割高となっている。1990年では石油火力比率が47%、ガス火力比率が18%という電源構成であったが、老朽化した石油火力発電設備を最新鋭のガス・コンバインドサイクル発電設備に置き換えた結果、2010年では石油火力比率が7%まで低減し、ガス火力比率が52%まで上昇している。火力発電所における熱効率の改善などで発電コストの増加に歯止めをかけているものの、小売電気料金は他国と比較して高い水準にある。

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。特に卸電力取引所の平均価格は2000年から2010年までの10

年間で年平均15%程度の上昇を示し、4倍程度の水準となっている。その背景には、北欧4カ国と欧州大陸諸国との国際連系線が建設され、電力輸出入が増加したことが挙げられる。もともと北欧4カ国では廉価な水力発電比率が50%程度も占めていたが、相対的に発電原価が高かった欧州大陸諸国との電力取引が可能となれば電力輸出入は増加する。このため、両地域の価格水準は収斂していかざるを得ず、比較的、市場規模が小さい北欧諸国では卸電力取引所の価格が顕著に上昇する結果となった。

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面で優位に立っていた。しかし、2000年代後半以降は化石燃料価格が高騰すると共に、電力市場自由化を背景に小売電気料金も上昇している。

ドイツでも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。2013年時点で一般的な家庭用需要家の月々の小売電気料金の支払額は約1万1,000円で、この内約2,000円が再生可



(出所: 欧州統計局 (Eurostat) 資料を基に作成)

図9 欧州主要国における家庭用電気料金の推移

能エネルギー電力の買取費用分となっている。今後も、再生可能エネルギー電力の導入量が増加するにつれてドイツの小売電気料金が上昇していく傾向は変わらない模様である。

上記のように小売電気料金水準は国内の電源構成、化石燃料価格の推移、政府による規制料金、そして環境税や再生可能エネルギー費用負担などの公租公課の増減に大きく左右される側面があり、必ずしも電力市場の自由化や構造改革を実施することで小売電気料金水準が大きく低下するわけではないと言える。

## 4. 供給力確保

### (1) 全面自由化下における供給力確保

欧米諸国で小売電力市場の自由化が行われる以前は、管轄地域を有していた電気事業者が需要家に対する電力供給義務があったため、地域全体の電力需給バランスを維持していくために中長期的な供給力（最大需要＋予備力）を確保していた（図10参照）。

しかし、小売電力市場が自由化されれば、これまで需要家に独占的に電力供給を行ってきた既存事業者は地域全体の供給力を担保する必要性がなくなり、自社需要に見合う供給力のみを確保すればよいことになる。地域全体の需給バランスを維持する責務は中立的な送電事業者の役割である。

ここで問題となるのが地域全体の需要を考慮した供給力をどのように確保していくかである。自由化された市場環境下では、電気事業者

はリスク回避の観点から発電設備を必要以上に保持しないような行動を取ることが考えられる。仮に契約している需要家の電力需要が急増したとしても、不足分を電力取引所から調達できるのであれば、自社で発電設備を保有する必要性が低下するかも知れない。一方で、需給逼迫時に電力取引所で高い価格で電力を売却できるのであれば、年間数時間稼働しても元手が回収できるとしてピーク電源を保持する電気事業者も現れるかもしれない。

このように自由化された市場環境下では、地域全体で適切な供給力を確保できるかどうかは、電力取引所（kWh市場）において電気事業者に対してどの程度価格シグナルを発するかという側面が重要となる。この価格シグナルが作用しなければ、長期に亘って供給力不足に陥る恐れがある。

### (2) 供給力確保に関する課題

将来における供給力確保の動向には、各国・地域におけるエネルギー政策や電力市場の制度枠組みなどからの影響が少なからず見受けられる。供給力確保に大きな影響を与えていると考えられる要因として、①ピーク電源による収益の取りはぐれ（Missing Money）、②再生可能エネルギー電源による火力電源の市場締め出し（Thermal Plant Squeeze）といった数年単位の中期的な背景、また③長期固定電源の投資リスク増大といった10年～数十年単位の長期的な背景がある。

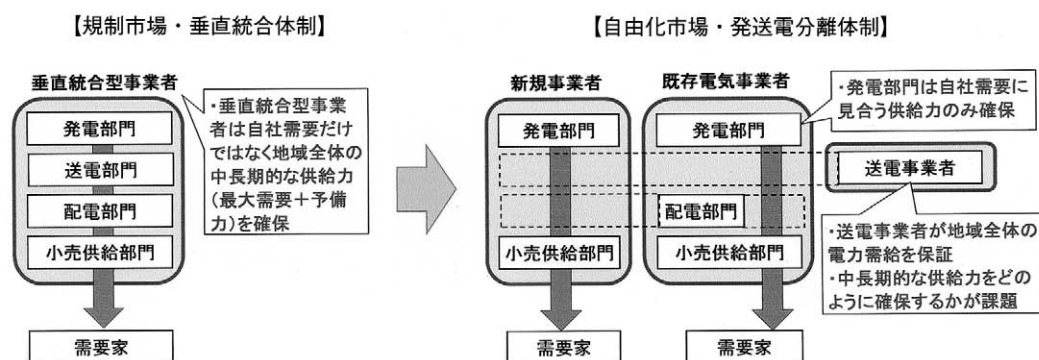


図10 自由化前後における供給力確保主体の変化

### ①ピーク電源による収益の取りはぐれ

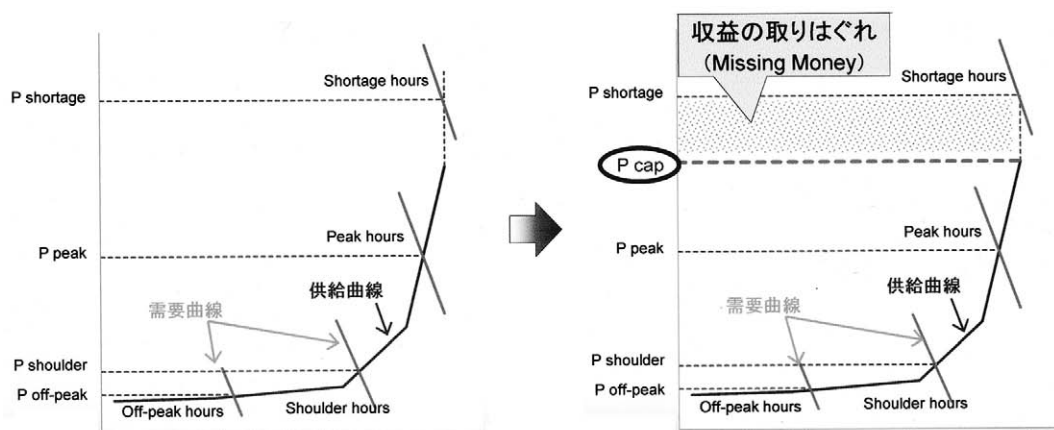
中期的な供給力確保に関する課題として、ピーク電源が電力取引所（kWh 価値を取引する電力量市場）から本来得ていたであろう収益を取りはぐれる事態が指摘されている。卸電力取引が相対取引よりも電力取引所を介して一般的に行われている場合、発電事業者はこの電力量市場から得られる収益から発電設備の固定費用、可変費用を回収する必要がある。可変費用が比較的割安なベース電源であれば電力量市場において価格競争力を有していることから、年間を通じて大部分の時間帯で落札され、固定費用を回収する機会も増加する。一方、可変費用が割高なピーク電源は大部分の時間帯において価格競争力を有していないことから、年間を通じて数時間～数十時間程度の需給逼迫時のみ落札されることになる。需給逼迫時には電力量市場における卸電力価格は非常に高い水準に上昇することから、ピーク電源はこの数時間～数十時間の限られた期間に可変費用に加えて固定費用も回収しなければならない。

しかし、卸電力価格の高騰を抑制するために上限価格が恣意的に設定される場合には、ピーク電源は本来であれば獲得したであろう収益を取りはぐれてしまうことになる（図 11 参照）。上限価格規制によってピーク電源が十分な収益を取りはぐれ、固定費用（建設コストなど）を回収できなければ、発電事業者はピーク電源の

運転継続が困難となる。その結果、発電事業者はピーク電源の新規建設を行ったり、既存のピーク電源を早期に閉鎖したりすることもある。電力量市場で回収できない固定費用を補填するための枠組みとして、米国においては、小売供給事業者に対して必要な供給力（最大需要 + 予備力）の確保を義務付け、小売供給事業者が発電事業者に対して供給力確保の対価として固定費用相当の供給力価値（kW 価値）を支払う制度が導入されている地域がある。

### ②再生可能エネルギー電源による火力電源の市場締め出し

英国、ドイツ、フランスなど欧州主要国では米国と異なり供給力確保を義務付ける制度設計を構築してこなかった。その背景として、卸電力市場の価格水準（kWh 価値）が高騰すれば発電設備の建設インセンティブが付与され、価格水準が低下すれば老朽化した余剰発電設備を閉鎖させるという価格シグナルに期待する側面があった。しかし、欧州諸国では近年、再生可能エネルギーを拡充させる観点から電気事業者や系統運用者が固定価格買取制度（FIT）などに基づき再生可能エネルギー発電電力を割高な価格で購入し、卸電力市場に再販する傾向が強まっている。本来であれば、発電原価の高い再生可能エネルギー発電電力は卸電力市場で流通するはずもなかったが、電気事業者や系統運用者が購入した再生



(出所：Chandley, J. (2008), "PJM's Reliability Pricing Mechanism")

図 11 上限価格の設定によってピーク電源が収益を取りはぐれているイメージ

可能エネルギー発電電力を卸電力市場において成行注文で売却するため、再生可能エネルギー発電電力が落札される傾向が強まった。再生可能エネルギー発電の落札量が増加すれば、ガスタービン発電設備などのピーク電源が卸電力市場から締め出されることになる(図12参照)。この結果、ピーク電源の稼働率が低下することが想定され、発電事業者はピーク電源に積極的に投資を行うインセンティブを喪失してしまう。このため、欧州でも米国と同様に小売供給事業者に対して必要な供給力を確保することを義務付け、小売供給事業者が発電事業者に対して供給力確保の対価として固定費用相当のkW 価値を支払う制度を導入することが検討されている状況である。

### ③長期固定電源の投資リスク増大

長期的な供給力確保に関する課題としては、長期固定電源の投資リスクが増大していることが挙げられる。全面自由化に伴い総括原価方式の規制料金が撤廃され、市場原理に基づく料金の下では必ずしも発電設備の建設・維持に係る費用を回収できない恐れもある。このような投資回収リスクを考慮すれば、建設リードタイムが長期且つ固定費用が多大な長期固定電源に対して電気事業者が積極的に投資を行っていくことには限界が出てくる。なお、10年～数十年を見越した長期的な供給力

確保策に関しては、欧米諸国において何らかの措置を講じている国はほとんどなく、電気事業者の投資判断に依存する傾向がある。一方、フランスのように政府が多年度発電設備投資計画を策定し、計画に合致するように必要に応じて政府が発電設備の競争入札を行うといった制度設計も存在している国もある。

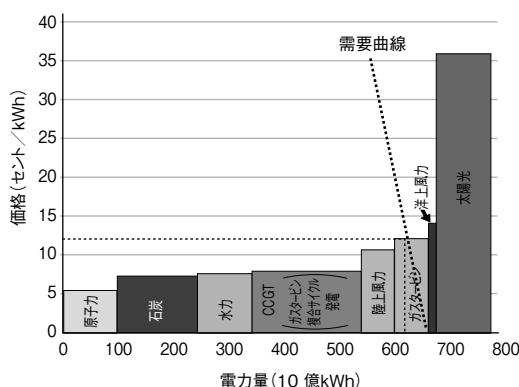
### (3) 供給力確保策のオプション

次に欧米諸国で導入されている供給力確保の制度設計について概観する。制度設計の類型は、(a) 小売電力市場が全面自由化されている場合でも供給力確保を義務付けているか否か、(b) 前もって供給力確保を行う期間が短期(数カ月前～翌日)または中期(数年前～1年前)か、(c) 供給力確保を行う手段として容量市場を導入しているか否かといった観点で整理することができる。

ドイツ、英国、フランスなど欧州諸国や米国のERCOT(テキサス州)では、一般的に供給力確保が義務付けられておらず、電力量市場(Energy Market)の価格シグナルに期待する枠組みとなっている(表3①参照)。この枠組みでは、発電事業者は可変費用(燃料コストなど)と固定費用(建設コストなど)を電力量市場での収益から回収することが前提とされている。なお、フランスと英国については容量市場を伴う供給力確保を小売供給事業者に義務付け

#### 【再生可能エネルギー電源への支援制度がない場合】

再生可能エネルギー事業者が再生可能エネルギー電力を電力量市場に応札



#### 【再生可能エネルギー電源への支援制度がある場合】

系統運用者が再生可能エネルギー電力を購入し、電力量市場に応札

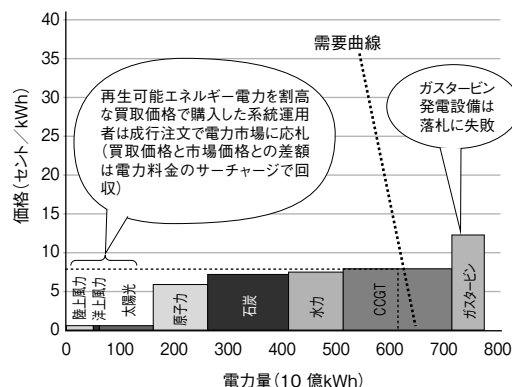


図12 再生可能エネルギー発電の安値応札によって火力発電が落札できないイメージ

表3 米国、欧州主要国における供給力確保策の導入状況・計画

|                   | 供給力確保義務なし                                                                  | 供給力確保義務あり<br>(前日～数カ月前から供給力確保)                              | 供給力確保義務あり<br>(1年前～数年前から供給力確保)                                                 |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 電力量市場             | ①[+上限価格引き上げ]<br>[+ストラテジック・リザーブ]<br>ERCOT(米国),スウェーデン,フィン<br>ランド,ドイツ,フランス,英国 | ④ SPP(米国)                                                  | ⑤ CAISO(米国)                                                                   |
| 電力量市場<br>+オプション取引 | ②[+容量支払]<br>イタリア,スペイン<br>③[+リライアビリティ・オプション]<br>イタリア[予定]                    |                                                            |                                                                               |
| 電力量市場<br>+容量市場    |                                                                            | ⑥a[小売事業者確保型]<br>NYISO(米国),MISO(米国)<br>⑥b[系統運用者確保型]<br>ギリシャ | ⑦a[小売事業者確保型]<br>フランス[予定],MISO[予定]<br>⑦b[系統運用者確保型]<br>PJM(米国),ISO-NE(米国),英国[案] |

ERCOT(Electric Reliability Council of Texas), SPP(Southwest Power Pool), CAISO(California Independent System Operator), NYISO(New York Independent System Operator), MISO(Midwest Independent System Operator), PJM(Pennsylvania, New Jersey, Maryland Independent System Operator), ISO-NE(Independent System Operator- New England), ISO: 独立系統運用機関

る制度を検討中であるが、欧州でこれまで供給力確保を小売供給事業者に義務付ける制度を導入したのはギリシャぐらいである(表3⑦b参照)。一方、スウェーデンやフィンランドといった北欧の一部では、基本的には電力量市場の価格シグナルを活用する枠組みを取り入れているものの、独立機関(一般的には系統運用者)が供給力不足に直面する場合のみ運転を行う予備的発電設備を確保する制度「ストラテジック・リザーブ」が導入されている(表3①参照)。

スペインやイタリアでも供給力確保は義務付けられてはいないが、供給力の水準を維持するために特定の発電設備に対して一定額を報酬として付与する「容量支払制度」(Capacity Payment)が導入されている(表3①参照)。この場合、発電事業者は可変費用と固定費用を電力量市場での収益から回収する他、容量支払制度に基づく報酬で固定費用の回収を補填することができる。なお、イタリアでは2017年から「リライアビリティ・オプション」という制度が導入される予定である(表3③参照)。この制度では、発電事業者が一定期間において送電事業者から一定のプレミアム(kW価値)を報酬として受け取ることができる。なお、このプレミアムは競争入札によって決定される。そして、送電事業者とオプション契約を締結した発電事業者には発電電力を電力取引所で売却

することが義務付けられる。ただし、電力取引所の市場価格が事前に決められた行使価格を上回る場合、発電事業者はその差額分を送電事業者を支払うことが条件となっている。

一方、米国では一般的に供給力確保が義務付けられている。米国南西部を制御地域としているSPPやカリフォルニア州のCAISOでは、小売供給事業者に供給力確保義務が課せられており、小売供給事業者は相対取引を介して供給力クレジットを発電事業者から調達することが求められる(表3④、⑤参照)。発電事業者は供給力クレジットの売却報酬を固定費用に充当することができる。また、ニューヨーク州のNYISO、中西部のMISO、北東部のISO-NEや東部のPJMでは、小売供給事業者に供給力確保義務が課せられている。この場合、小売供給事業者は相対取引以外に容量市場で供給力クレジットを調達することもできる(表3⑥a、⑦a、図13参照)。なお、ISO-NEやPJMでは自社供給や相対取引で供給力クレジットを確保できない小売供給事業者に代わって送電事業者が一括して供給力を容量市場で調達し、事後的に送電事業者が調達した供給力クレジットの費用を小売供給事業者から回収する枠組みが採用されている(表3⑥b、⑦b参照)。

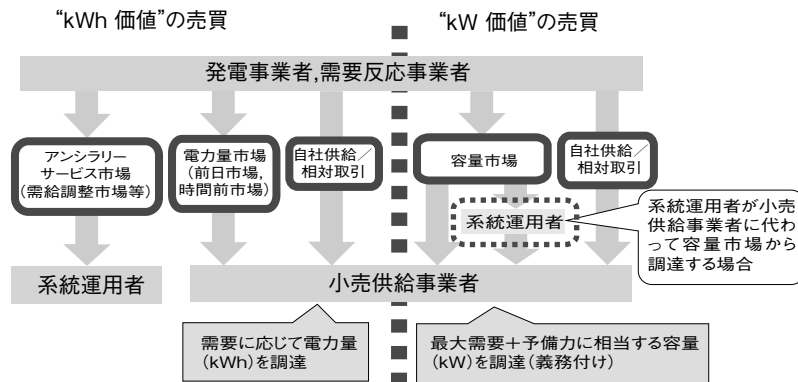


図 13 電力量 (kWh) 市場と容量 (kW) 市場との関係

## 5. おわりに

本稿では、欧米諸国におけるエネルギー需給や電源構成の現状などを概観した後、欧米諸国における小売電力市場の自由化動向と供給力確保策の導入状況などを紹介した。

小売電力市場の自由化状況は欧米諸国で様々である。米国では、元々小売電気料金が割高であった地域を中心に小売電力市場の自由化が導入されたが、カリフォルニア電力危機以降は新たに自由化を志向する州はなく、むしろ州によっては自由化を中断・廃止している状況である。小売電力市場の自由化については、期待されたほどの料金低減につながっていないとする指摘もあるなど評価が分かれている。欧州では小売電力市場が全面的に自由化されているものの、燃料費の高騰、再生可能エネルギー発電費用の負担などから小売電気料金の水準は年々上昇する傾向にある。

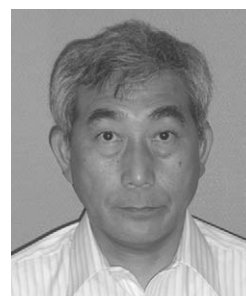
供給力確保に関しては、米国では自由化導入当初から制度設計が講じられているが、修正を重ねて現在に至っている。一方、欧州では、1990年代から小売電力市場の自由化が導入され、電力需給は市場原理に基づき適切に調整されとの意識が強く、米国のような制度設計は行われてこなかった。しかし、再生可能エネルギー発電設備が大量導入されてきたことから、負荷追従に優れたピーク電源が従来以上に重要な役割を担うことが期待されている。発電事業者がピーク電源に投資することが難しい状況になると電力安定供給が達成されない恐れも出てくるため、欧州においても米国のような供給力確保の義務付けや容量市場の導入が検討されるに至っている。

わが国において、将来的に小売電力市場の全面自由化および供給力確保策を導入することになれば、欧米諸国の先行事例を考慮しながら慎重に議論することが必要となろう。

[調査研究報告]

# 革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト ～発電から CO<sub>2</sub> 貯留までのトータルシステムのフィージ ビリティー・スタディー～

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

地球温暖化問題の対策として二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出量の削減が強く求められている。

「世界全体の温室効果ガス排出量を現状 (2007 年) と比較して 2050 年までに半減する」という「Cool Earth—エネルギー革新技術計画」(平成 20 年 3 月) が提唱する CO<sub>2</sub> 削減目標を達成するためには、図 1 に示すように、今後は CO<sub>2</sub> の分離・回収・貯留 (CCS) および高効率火力発電も視野に入れた革新的な技術開発が必要とされている。また、総合科学技術会議の「環境エネルギー技術革新計画」(平成 20 年 5 月) での技術開発・普及のテーマとして、石炭ガス化複合発電 (IGCC) 含む高効率火力発電や CCS が揚げられ、平成 25 年 5 月の中央環境審議会地球環境部会合同会合においても必要性が確認されている。<sup>(1)</sup>

このような状況の中、発電から発生する CO<sub>2</sub> を、CCS を含めたゼロエミッション型でかつ高効率でありながら CCS による効率低下も少ない IGCC の実施可能性を検討することが必要となってきた。

CO<sub>2</sub> の貯留に関し、これまでわが国では 1 万トン規模の模擬ガスによる基礎試験的貯留<sup>(2)</sup>、または IGCC および CO<sub>2</sub> の分離回収のプロジェクト<sup>(3)</sup> が幾つかなされてきた。しかし、石炭ガス化発電システムからの CO<sub>2</sub> の分離・回収・輸送・貯留に至る一貫したトータルシステムについて、システムの概念設計、コストに基づいて評価した例はない。

そこで、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が推進する『革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト』として、CO<sub>2</sub> の発生源と貯留サイトのマッチングを考慮し、複数の候補での実施可能性を詳細に検

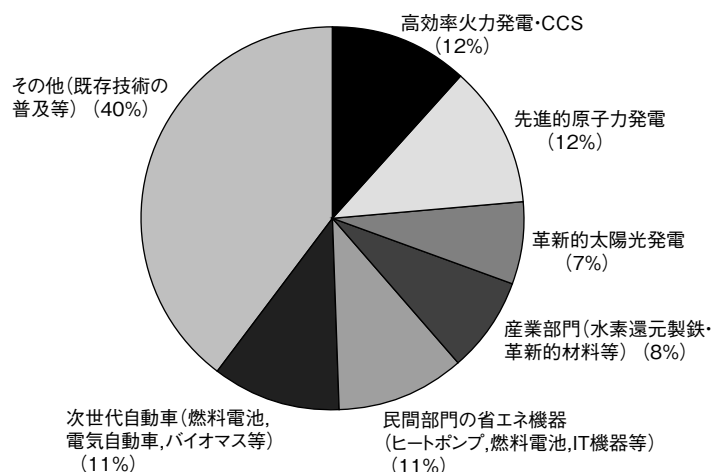


図 1 2050 年 CO<sub>2</sub> 半減に至る削減へのエネルギー革新技術の寄与度

討し、石炭ガス化発電から CO<sub>2</sub> の分離・回収・輸送・圧入・貯留までのトータルシステムのフィジビリティ・スタディーを行い、総合的な評価を行った。本稿では、検討結果である概念設計、コストデータを基に当研究所が担当した経済性評価について紹介する。

## 2. 実施体制および概念設計

### (1) 実施体制

NEDO から委託を受けて下記体制で行った。専門分野が多岐に亘ることから緊密な情報連絡、分担を明確にした。

#### ①石炭ガス化複合発電（IGCC）と CO<sub>2</sub> 分離回収システムの概念設計

発電グループ；電源開発(株)、中国電力(株)、(株)日立製作所

#### ② CO<sub>2</sub> 輸送システムの概念設計

輸送グループ；（一財）エンジニアリング協会、JFE テクノデザイン(株)、大成建設(株)、(株)大林組、三菱重工(株)、三井造船(株)

#### ③貯留サイトの評価と貯留システムの概念設計

貯留グループ；（公財）地球環境産業技術研

究機構、応用地質(株)

#### ④トータルシステムの評価

全体評価グループ；（一財）エネルギー総合工学研究所、（独）産業技術総合研究所

### (2) 石炭ガス化複合発電設備（IGCC）

まず実証機での検討を実施し、その後商用機を対象に検討した。概念設計結果としての基本仕様を表 1 に示す。以後、本稿では商用機を対象に述べる。

### (3) CO<sub>2</sub> 分離回収システムの概要

CO<sub>2</sub> の分離技術で実用化されているものとしては、①化学吸収法、②物理吸収法、③吸着法（PSA）および④分離膜法がある。

化学吸収法と PSA では、化学吸収法が有利と判断される。PSA は、CO<sub>2</sub> 回収率が 70%程度で、運転圧力が低いため、装置が大型化し、設備建設費は化学吸収法の約 2.3 倍となるためである。

分離膜法では、実用化されている CO<sub>2</sub> の高分子膜による分離の実施例は、CO<sub>2</sub> ガスを含む天然ガスからの CO<sub>2</sub> 除去が大部分である。これは、

表 1 IGCC 実証機、商用機の基本仕様

| 項目                                     | 実証機                    | 商用機                    | 備考        |
|----------------------------------------|------------------------|------------------------|-----------|
| 1. 使用燃料<br>主燃料                         | 石炭                     | 石炭                     | 海外炭（1 炭種） |
| 2. 設備要領<br>石炭処理量                       | 1,000 ～ 1,500 t/ 日     | 2,200 ～ 2,400 t/ 日     |           |
| 3. 設備構成                                |                        |                        |           |
| (1) 石炭ガス化設備<br>ガス化炉形式<br>ガス化剤          | 加圧噴流床 1 室 2 段<br>酸素    | 加圧噴流床 1 室 2 段<br>酸素    |           |
| (2) ガス精製設備<br>ガス精製方式                   | 水洗浄－湿式脱硫               | 水洗浄－湿式脱硫               |           |
| (3) 複合発電設備<br>ガスタービン<br>蒸気タービン<br>HRSG | 開放サイクル型<br>復水型<br>横置き型 | 開放サイクル型<br>復水型<br>横置き型 |           |
| (4) 空気分離設備<br>空気分離形式                   | 加圧深冷分離                 | 加圧深冷分離                 |           |
| 4. 周囲条件                                |                        |                        |           |
| (1) 大気温度                               | 15℃                    | 15℃                    |           |
| (2) 相対湿度                               | 60%                    | 60%                    |           |
| (3) 大気圧力                               | 101.3kPa               | 101.3kPa               |           |
| (4) 取放水温度差                             | 7℃ 以下                  | 7℃ 以下                  |           |

膜を透過し易いCO<sub>2</sub>と透過し難い炭化水素の組合せである。今回の検討では、共に膜を透過し易いCO<sub>2</sub>と水素を主成分とする燃料ガスを分離するのが目的であり、高分子膜による水素とCO<sub>2</sub>の分離は開発段階であり実用化には至っていない。

以上より、化学吸収法と物理吸収法を対象にシフト反応と組み合わせたシステムについて比較検討を行った。化学吸収プロセスは、過去において水素製造設備での炭酸ガス吸収分離システムとして数多く使用されており、多くの吸収液が実用化されているが、最近ではアミン系吸収液が主体となっている。また、物理吸収の代表的プロセスには、吸収液にメタノールを使用するRECTISOLプロセスと、ポリエチレングリコールを用いるSELEXOLプロセスがある。一般的に、化学吸収法と物理吸収法ではガス分圧1.0MPaがその分岐点であり、1.0MPa以下では化学吸収法が、1.0MPa以上では物理吸収法が有利と言われている。

シフト反応におけるシフト触媒には、硫黄により活性が失われるスィートシフト触媒と、硫黄により活性を維持するサワーシフト触媒がある。スィートシフト触媒を使用する場合とサワーシフト触媒を使用する場合ではシステム構成が異なる。スィートシフト触媒の場合、シフ

ト反応装置を脱硫装置の下流に設置しなければならないのに対し、サワーシフト触媒の場合は脱硫装置の上流に設置する必要がある。

CO<sub>2</sub>分離回収方式として、化学吸収法および物理吸収法を組合せたそれぞれのシステム構成を図2に示す。なお、化学吸収法をシフト後脱硫に適用するとCO<sub>2</sub>の随伴吸収が過大となり不利なため、検討ケースより除外した。

A, B, Cの3ケースを比較した結果、CO<sub>2</sub>吸収性能やユーティリティー消費量の点で優位なAを最適プロセスとして選定した。AとBのユーティリティー消費量はほぼ同等であるが、機器構成ではAのほうがより簡素である。ただし、ガスタービンのさらなる高温高压化に伴いプロセス圧力が上昇した場合は、Bが優位となる可能性はある。

以上に基づくIGCCおよびCO<sub>2</sub>分離回収システムのシステム構成を図3に示す。

プラント性能は表2に示すとおりである。最大90%のCO<sub>2</sub>回収が可能であるがその場合、ガスタービンの出力低下を防ぐため石炭投入量をCO<sub>2</sub>回収しない場合より約9%増やしている。90%回収時の回収CO<sub>2</sub>量は5,280t/日、年間稼働率を80%として年間154万tとなる、貯留期間は20年としている。

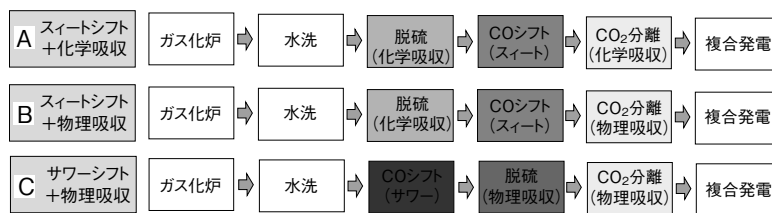


図2 システム構成（ケース A, B, C）

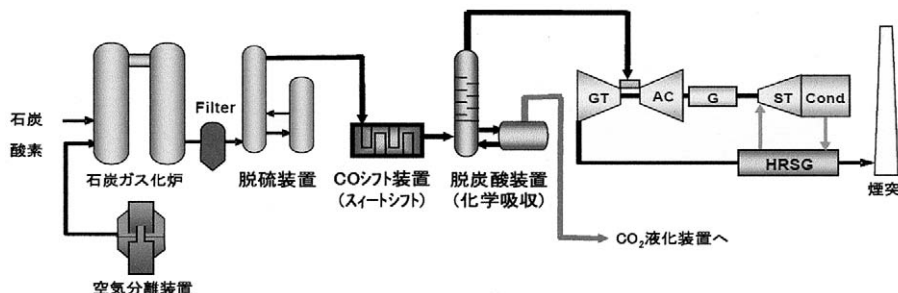


図3 商用機システム構成

表2 CO<sub>2</sub> 分離回収設備 IGCC プラント性能

| 検討条件                | 単位  | 370MW 級 IGCC + CO <sub>2</sub> 分離回収設備 |       |
|---------------------|-----|---------------------------------------|-------|
| CO <sub>2</sub> 回収率 | %   | 0                                     | 90    |
| 石炭処理量               | t/d | 2,178                                 | 2,380 |
| 発電端出力               | MW  | 364.1                                 | 341.7 |
| 所内動力                | MW  | 48.9                                  | 59.2  |
| 送電端出力               | MW  | 315.2                                 | 282.5 |
| 発電端効率 (LHV)         | %   | 55.0                                  | 47.3  |
| 送電端効率 (LHV)         | %   | 47.6                                  | 39.1  |

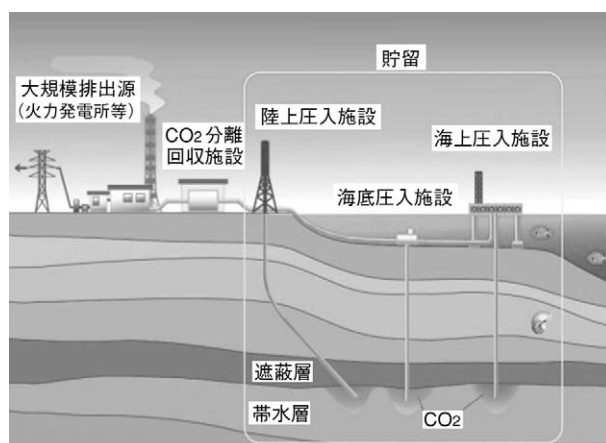


図4 貯留概念図

#### (4) 貯留サイトの概要

わが国に多数ある貯留候補地の中から図4に示すように、地質構造条件として貯留する帯水層の上に遮蔽層があること、層厚・孔隙率等より貯留容量が充分あること、超臨界状態のCO<sub>2</sub>を維持するため貯留層深度が900 m

から1,800 mであること、さらに海域の場合圧入作業の簡易性より水深が200 m以浅であることを条件に3カ所を選定した。各貯留候補地については圧入条件（圧力、流量等）を変えて圧入後CO<sub>2</sub>の経時変化をシュミレーション（図5参照）して、CO<sub>2</sub>範囲（図中の白い部分）が拡大したり、漏洩によって消滅したりしないこと、すなわち安定性を確認した。コストの算出においては事前調査、坑井設備設置、運転、モニタリング、廃坑、廃坑後50年モニタリングを考慮している。

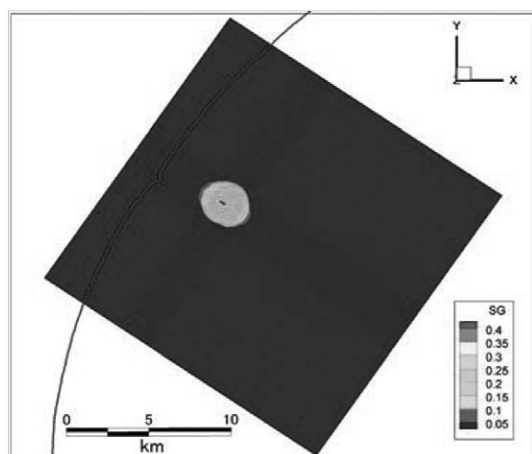


図5 CO<sub>2</sub> 挙動の予測シミュレーション

#### (5) 輸送システムの概要

輸送形態として、液体CO<sub>2</sub>の船舶による輸送、およびパイプライン（液体、気体）を検討した。CO<sub>2</sub>ハイドレートの船舶輸送については、実証機で検討した結果、設備建設コストが大きいことより商用機検討では除外した。

### ①液体 CO<sub>2</sub> の船舶輸送条件

#### a) 輸送時の液化 CO<sub>2</sub> 条件の設定(温度, 圧力)

CO<sub>2</sub> の場合, 既存技術である液化天然ガス (LNG) や液化石油ガス (LPG) とは液化条件が異なる。一般に, LPG の輸送時状態は, 常温 / 1.5MPa または - 45℃ / 常圧であり, LNG は - 162℃ / 常圧であり, この条件では CO<sub>2</sub> は液体状態にならない。CO<sub>2</sub> が液体状態を保ちかつできる限り低圧にして貯蔵タンク材質の低温強度を考慮した結果, 最適液体 CO<sub>2</sub> 条件を - 46℃ / 0.7MPa と設定した。

#### b) 輸送条件

船舶輸送における荒天待機や, 輸送日数等を考慮して, 陸上基地や洋上基地の貯蔵タンク容量 (バッファータンク容量) を 2 万 4,000 トンとした。運搬船については, 運搬能力を 2 万 1,000 トンとし, 船数は 2 隻とした。

### ②パイプライン輸送条件

パイプライン輸送については, 液体 (10.5 ~ 13MPa, 配管径: 300mm), 気体 (1.8 ~ 3 MPa, 配管径: 600mm) の 2 ケースで検討した。

### ③輸送ケースの選定

発電から貯留までのトータルシステムを考  
える場合, 貯留サイトの特性と輸送形態の組

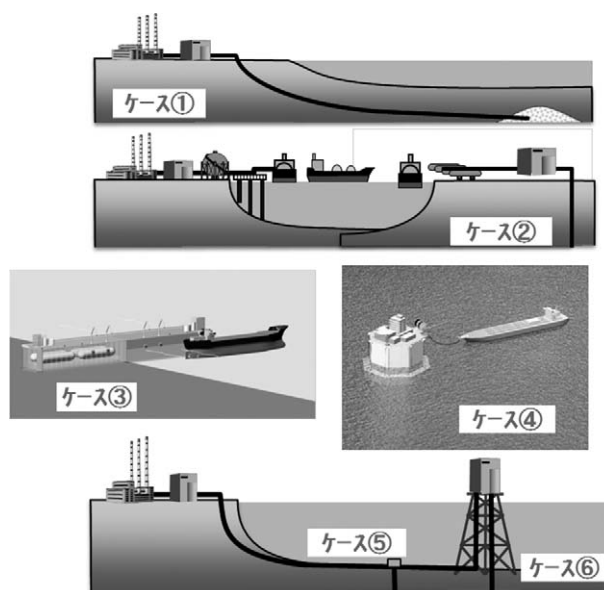
み合わせとして多数考えられるが, 図 6 に示す 6 ケースを選定した。

## 3. 経済性評価

経済性評価は「リーマンショック」による経済指標の変動影響を避けるために 2005 年を基準として算出した。基準年を揃えるためのロケーションファクターや為替レートの調整に『2010 年 PCI/LF (プラントコストインデックス / ロケーションファクター) 報告書』(2010 年 10 月, 日本機械輸出組合) を用いた。

### (1) 発電原価

発電原価の積算結果を図 7 に示す。IGCC による発電単価は 11.4 円 / kWh である。習熟度によるコスト低下については別途検討を要する。CCS 実施では輸送無しのケース①が当然ながら最も安く 16.3 円 / kWh で, CCS 無しと比較した場合 43% (16.3 円 / kWh / 11.4 円 / kWh) 増加している。増加率としては NETL のスタディー事例<sup>(3)</sup> の 40% と比較しておおよそ同等である。しかし, 船輸送のケース 2,3,4 およびパイプライン輸送のケース⑤, ⑥は CCS 無しと比較した場合 57 ~ 78% 増加している。米国国立エネルギー技術研究所 (NETL) のスタディー事例<sup>(4)</sup> の



ケース①: CO<sub>2</sub> 回収地 (IGCC) の近くに貯留する。

ケース②: 船舶輸送で, 輸送船が陸地に接岸可能。

ケース③: 船舶輸送で, 水深が浅い海域に基地を設置する。

ケース④: 船舶輸送で, 水深が深い海域に基地を設置する。

ケース⑤: 液体 CO<sub>2</sub> パイプラインで輸送する。

ケース⑥: 気体 CO<sub>2</sub> をパイプラインで輸送する。

図 6 ケース選定

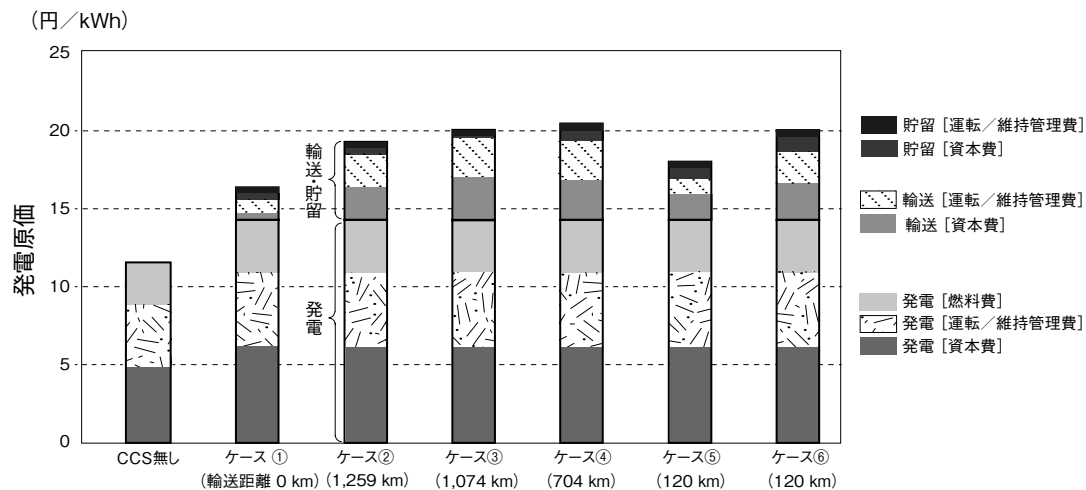


図7 発電原価の内訳

45%と比較して大きい値となっている。このように、輸送によるコスト増加が明確となった。

## (2) 輸送システムの建設費用

本フイージビリティスタディー (FS) での輸送システムの建設費の内訳を図8に示す。

パイプライン輸送 (ケース⑤, ⑥) でのコスト増加の要因は、本FSで選定した貯留サイトが海側であり海底パイプラインのため、NETLのスタディー事例<sup>(4)</sup>である米国の大平原でのパイプライン敷設に比べコストが大きいと考えられる。

船舶輸送の場合は、接岸可能なケース②においても払出貯蔵設備、輸送船、受入貯蔵設備がバッファータンク設置のため必要であり、接岸不能のケース③, ④ではさらに洋上基地が必要であり、コスト増の要因となっている。

わが国の貯留サイトは海域に多いことおよび容量も大きくないものが多い。すなわち、貯留サイトを適時変更する必要がある、船舶輸送が適している。船舶輸送システムのコスト検討は今後必要であり、例えば、CO<sub>2</sub>タンクをバージに設置したタンクに統一し (タンクバージ)、タグボートで運搬する輸送システムの超概略検討 ((一社) エンジニアリング協会で実施) では、発電原価で約1割削減の可能性が見込まれた。更に、シャトル船と洋上圧入方式<sup>(5)</sup>等の輸送システムの開発 (尾崎東京大学教授, 千代田化工建設(株)で開発中) が期待される。

$$CO_{2,captured} = \frac{COE_{CCS} - COE_{ref}}{(CO_{2,captured} kWh^{-1})_{CCS}} \quad \dots\dots (1)$$

- COE<sub>ref</sub> [円 /kWh]: 発電原価 (CCS 無し)
- COE<sub>CCS</sub> [円 /kWh]: 発電原価 (CCS 付き)

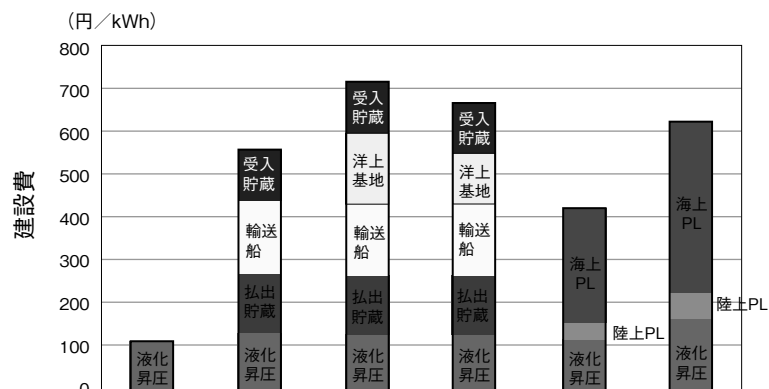


図8 輸送システムの建設コスト内訳

### (3) CO<sub>2</sub>の処理費用

CO<sub>2</sub>の処理費用の内訳を図9に示す。図中の棒グラフは Captured Cost (CO<sub>2</sub> captured) で式1で表される。

これは回収CO<sub>2</sub>の単位量当たりのCCSによる増加費用で、その内訳は、分離回収、液化・昇圧、輸送、貯留およびエネルギーペナルティーに分割される。エネルギーペナルティーとは、分離回収による送電端電力量の低下および液化・昇圧、輸送、貯留に必要な電力量の総量に電力単価を乗じた数値で、売れたであろう電力の遺失利益を表している。

$$CO_2 \text{ avoided} = \frac{COE_{CCS} - COE_{ref}}{(CO_2 kWh^{-1})_{ref} - (CO_2 kWh^{-1})_{CCS}} \dots\dots (2)$$

図中の折れ線グラフは Avoided Cost (CO<sub>2</sub> avoided) で式2で表される。CCS実施前から削減されたCO<sub>2</sub>の単位量当たりのCCSによる増加費用を表す。

ケース毎の増減傾向はCO<sub>2</sub> captured, CO<sub>2</sub> avoidedとも同様で、発電原価内訳の輸送、貯留の増加分と同様の傾向を示している。

### (4) 分離・回収以降のCO<sub>2</sub>収支

CO<sub>2</sub>収支の積算結果を図10に示す。貯留量を棒グラフのマイナス側に表示し、CO<sub>2</sub>分離回収されずに大気に放出された量(未回収量10%)、液化・貯蔵・輸送・昇圧に伴う排出量、輸送時放散量を棒グラフのプラス側に表示している。CO<sub>2</sub>収支を黒丸付きの折れ線グラフ

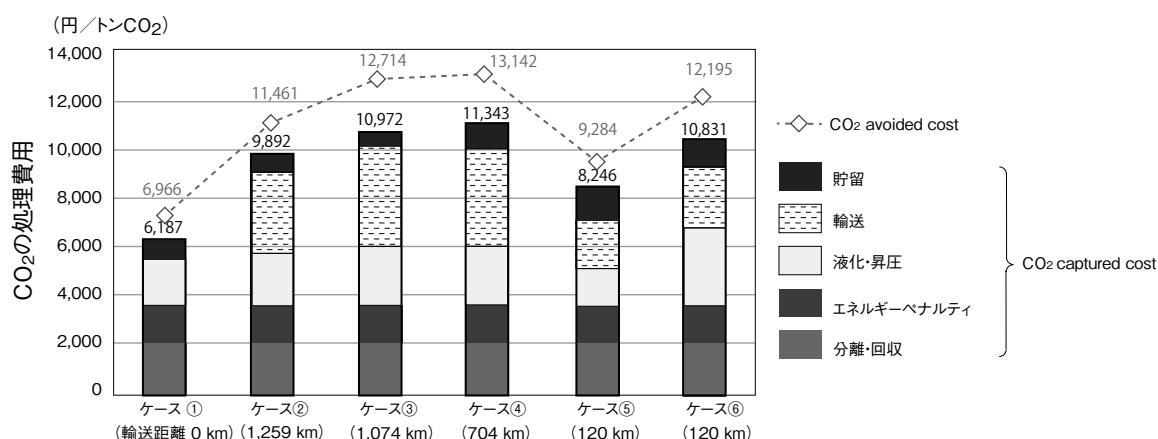


図9 CO<sub>2</sub>の処理費用

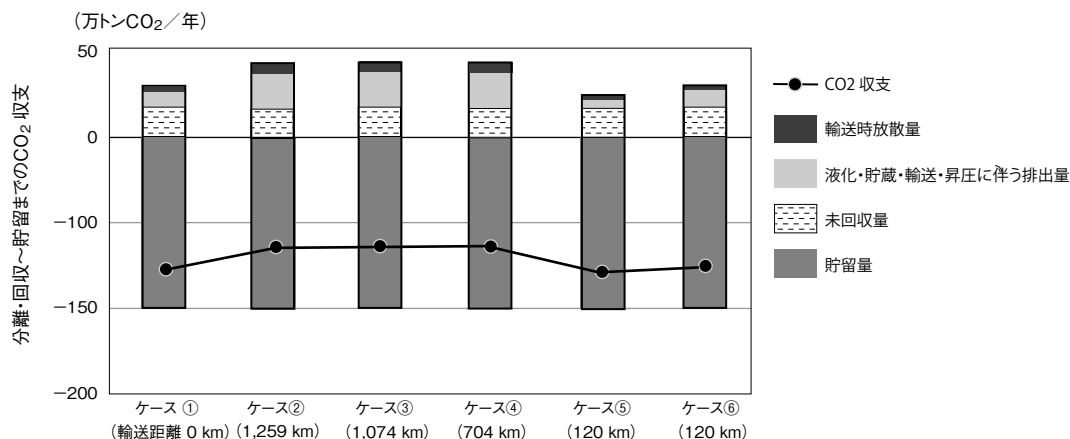


図10 分離・回収、輸送、貯留のCO<sub>2</sub>収支

で表示している。船舶輸送の3ケースは輸送船の燃料消費によるCO<sub>2</sub>排出が大きく、未回収量も含めると貯留量（回収量）の約3割が相殺されたことになる。

#### 4. まとめ

（1）今回のFSにより、IGCCでのCO<sub>2</sub>分離回収、液化・昇圧、輸送、貯留までのトータルシステムの現時点での最適な技術による概念設計、コスト算出および経済性評価を各専門部署の協力により行った。

（2）CCS実施の場合、輸送無しのケース①が当然ながら最も安く16.3円/kWhである。CCS無しと比較すると43%（16.3円/kWh／11.4円/kWh）増加した。

（3）CCS実施（CO<sub>2</sub>分離回収～貯留で輸送を含む）による発電原価の増加は、57～78%でNETLのスタディー事例<sup>（4）</sup>での結果の45%と比較して大きい。本FSでの船輸送システムの建設費が大きいことが要因で、貯蔵タンクを削減するタンクバージ・タグボート方式、およびシャトル船と洋上圧入方式<sup>（5）</sup>等による輸送システムの開発が期待される。

（4）わが国における今後のエネルギー技術開発の方向を考えると多様なエネルギー技術が必要である。特に、原子力発電が徐々に減少するシナリオでは、最新技術の火力発電設備にリプレースし、バックアップ可能な電源構

成の維持が必要であり、そのためには2025年前後にIGCC＋CCS等の導入が条件となる<sup>（6）</sup>。今回の調査研究結果を基に、さらなる研究開発が進められることを期待する。

#### 〔謝辞〕

本稿は、NEDOの委託研究「革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト発電からCO<sub>2</sub>貯留までのトータルシステムのフィジビリティ・スタディー」において当所が行った経済性評価の検討作業について取りまとめたものです。発電・輸送・貯留に関わる各プロジェクトメンバーにはデータ提供にご尽力頂きました。また、技術検討委員会委員、NEDO、経済産業省殿の関係各位には適切なコメントを頂きました。

NEDOを初めとした以上の方々に謝意を記します。

#### 参考文献

- （1）[http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004000/pdf/035\\_03\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004000/pdf/035_03_00.pdf)
- （2）CO<sub>2</sub>地中貯留プロジェクト 岩野実証試験 (<http://www.rite.or.jp/Japanese/project/tityu/nagaoka.html>)
- （3）電源開発(株)2010年年報 ([http://www.jpowers.co.jp/annual\\_rep/pdf/ann10/10-12.pdf#search=%E6%9D%BE%E6%B5%A6+CO2%E5%9B%9E%E5%8F%8E](http://www.jpowers.co.jp/annual_rep/pdf/ann10/10-12.pdf#search=%E6%9D%BE%E6%B5%A6+CO2%E5%9B%9E%E5%8F%8E))
- （4）"Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants," DOE/NETL-2010/1397
- （5）GCCSI日本事務所主催第7回勉強会資料（2013年5月16日）
- （6）時松宏治、森山亮、小野崎正樹「2050年に向けた発電技術開発」日本エネルギー学会誌、92、413-419（2013）

## 世界の CCS プロジェクトの現状

村上 嘉孝 (プロジェクト試験研究部  
主管研究員)



### 1. はじめに

国際エネルギー機関（IEA）は隔年でエネルギーにかかわる技術見通し“ETP（Energy Technology Perspectives）”を発行している。その最新版である“ETP2012”<sup>(1)</sup>では、長期的な気温上昇目標別に3種類のシナリオ（6℃上昇シナリオ（6DS）、4℃（4DS）、2℃（2DS））を検討している。この中で、2DSを実現するためには、特別な施策を講じない6DS（2050年の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量：58Gt/年）と比較して2050年に42Gt-CO<sub>2</sub>/年の削減が必要であるとし、この削減のためのコスト効率的な技術貢献度を求めている（図1参照）。それによると、削減すべき42Gt-CO<sub>2</sub>/年の17%（約70億t-CO<sub>2</sub>/年）がCO<sub>2</sub>の分離回収貯留（CCS）の寄与となり、2020年時点では2億4,000万tのCO<sub>2</sub>貯留が必要であるとしている。図2は2DSシナリオにおける地域別CO<sub>2</sub>貯留量

の累積値を示したものである。これによると、2015～2050年の35年間に累積で1,230億tのCO<sub>2</sub>貯留が必要になるとしている。

一方、現実に目を向けると、2013年5月10日、米国海洋大気局（NOAA）は、ハワイにあるマウナロア観測所で測定した大気中のCO<sub>2</sub>濃度が5月9日に1958年の観測開始以来初めて400ppmを超え、400.03ppmを記録したと発表している<sup>(2)</sup>。

本稿では、最初に、上昇し続ける温室効果ガスを削減する技術の1つとして大きな貢献が期待されるCCSについて、世界のプロジェクト動向とその進展に向けた課題について紹介する。

一方、気温上昇2℃は非常に厳しい目標であるため、目標の達成にはCO<sub>2</sub>排出量をマイナスにするような技術も必要となり、カーボンニュートラルであるバイオエネルギーとCCSを組み合わせた「バイオエネルギーCCS

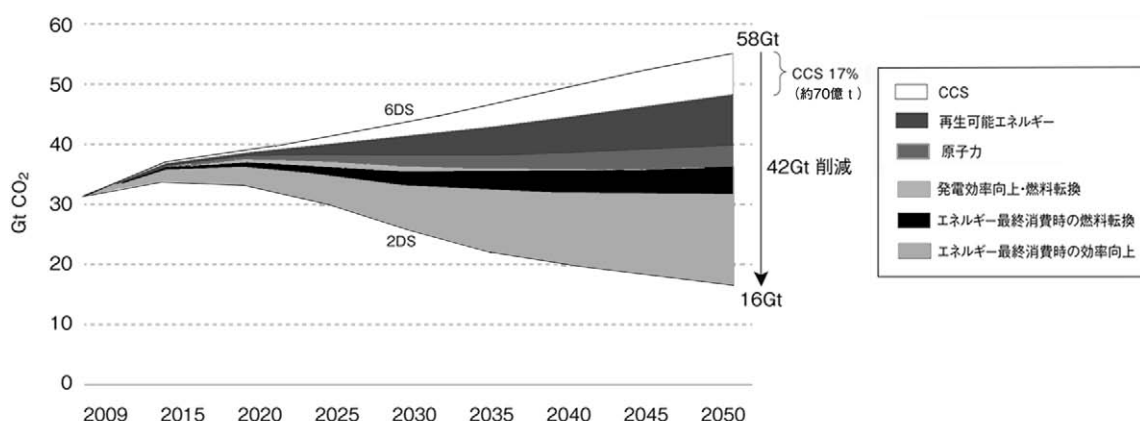


図1 長期的な温度上昇を2℃に抑えるための必要技術<sup>(1)</sup>

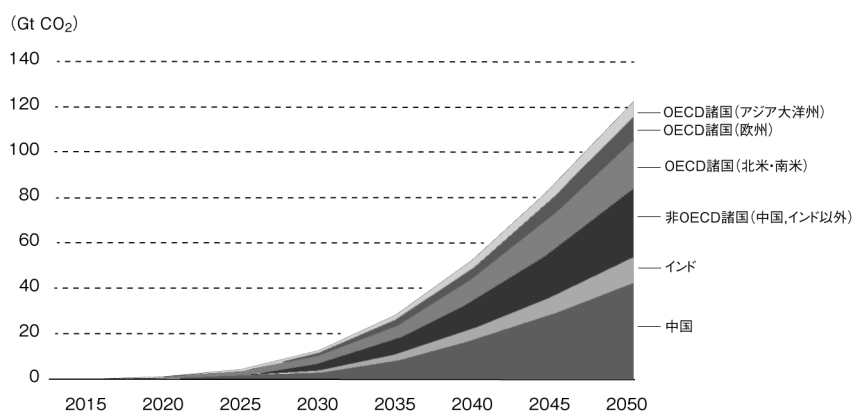


図2 2DS (2°Cシナリオ) における地域別 CO<sub>2</sub> 累積貯留量<sup>(1)</sup>

(BECCS)」が注目を浴び始めている。本稿では次に、BECCS プロジェクトの現状について紹介する。

また、CCS の進展を図るためには、国や企業による個別の努力だけではなく、CO<sub>2</sub> の回収から輸送・貯留、貯留量の算定方法やリスク管理など CCS 全般にわたる世界共通ルールの策定も不可欠となる。2011 年 5 月、カナダ標準審議会 (SCC) が CCS にかかわる国際標準化を国際標準化機構 (ISO) に提案し、国際標準化の動きが始まった。本稿では、最後にこの動向について紹介する。

## 2. 世界の CCS プロジェクトの動向と進展に向けた課題

### (1) 大規模統合 CCS プロジェクトの動向

世界の CCS の状況について、豪州キャンベラに本部を置く Global CCS Institute (GCCSI) が、2010 年から毎年、“The Global Status of CCS” と題する報告書を発行している。

この報告書では、世界の「大規模統合プロジェクト」の動向をまとめている。ここで言う「大規模」とは、石炭火力で 80 万 t/年以上のプロジェクト、それ以外では 40 万 t/年以上の CO<sub>2</sub> を貯留するプロジェクトのことで、「統合」とは、CO<sub>2</sub> の分離回収から輸送・貯留までの一貫したプロジェクトのことである。

2013 年 1 月末現在、全世界で 72 件の「大

規模統合プロジェクト」が操業・建設・計画中であり (図 3 参照)、その内訳は、操業中 8 件 (米国 4 件、欧州 2 件、カナダ 1 件、アフリカ 1 件)、建設中 9 件 (米国 4 件、豪州 1 件、カナダ 4 件)、計画中 55 件となっている。

なお、同報告書では計画中のプロジェクトを、実現可能性調査 (FS) 段階、プレ FS 段階、サイトスクリーニング段階の 3 段階にさらに細分化しているが、全 55 件の計画中プロジェクトの内、47 件が 2020 年までに操業を開始する予定であるとしている。

また、プロジェクト件数を過去の調査結果と比較している。それによると、2010 年比で全件数では 5 件減少 (22 件中止、17 件新規立ち上げ)<sup>(3)-(6)</sup> しているものの、建設中プロジェクトが 4 件から 9 件に増加するなど、CCS の進展も見られる。

図 4 に 2020 年までの CO<sub>2</sub> 貯留計画量を示す<sup>(4)</sup>。前述の通り、現在 8 件の「大規模プロジェクト」が操業中であり、その CO<sub>2</sub> 貯留量は合計 2,300 万 t/年になる。また、9 件の建設中プロジェクトにより、合計 1,400 万 t/年の CO<sub>2</sub> が貯留される計画である。さらに計画中のプロジェクトも順次建設・操業となるため、これらを合算すると 2015 年に約 7,000 万 t、2020 年には 1 億 2,000 万 t の CO<sub>2</sub> が貯留される計画である。しかしながら、2DS の実現には 2020 年時点で 2 億 4,000 万 t/年の CO<sub>2</sub> 貯留が必要とされており、それに対しておよそ

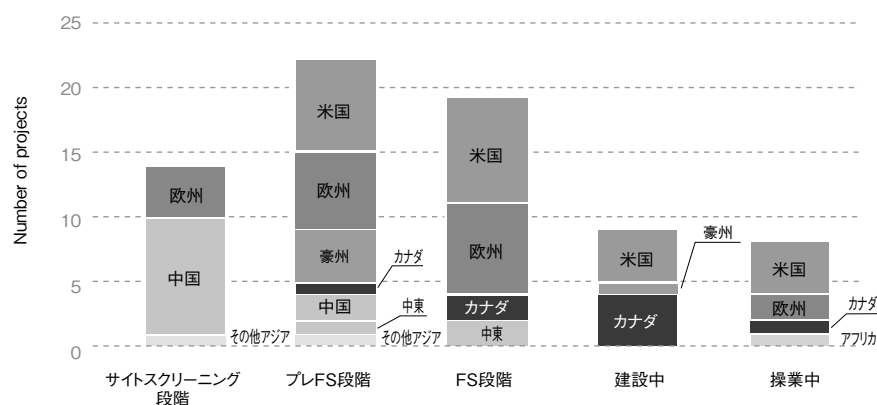


図3 プロジェクト・ライフサイクル別および国／地域別の大規模統合プロジェクトの数<sup>(3)</sup>

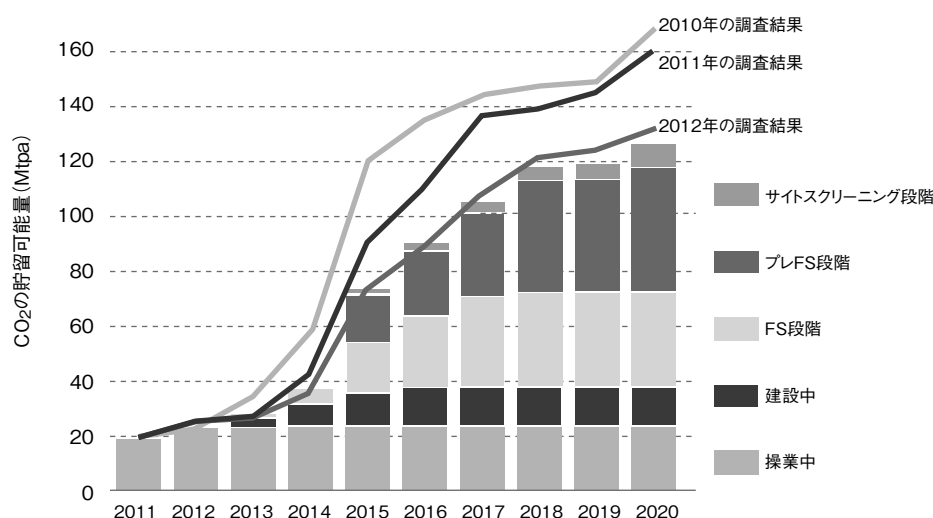


図4 2020年までのCO<sub>2</sub>貯留計画量<sup>(4)</sup>

半分の計画しかないのが現状である。

また、GCCSIは同様の調査を毎年実施している。図4の折線グラフは、2010年、2011年、2012年の調査結果であるが、時間の経過とともにプロジェクトの中止や遅延によって、CO<sub>2</sub>貯留計画量が減少している。このことは、今回報告された2020年に1億2,000万tとい

うCO<sub>2</sub>貯留量も、今後さらに減少する可能性があることを示唆している。

## (2) 操業中および建設中プロジェクトの特徴

表1に操業中および建設中の大規模統合プロジェクト(17件)のCO<sub>2</sub>排出源と主たる収入源をまとめた。

表1 操業中／建設中のCCSプロジェクト(全17件)の特徴

|                     |          | 主たる収入源 |     |                  |
|---------------------|----------|--------|-----|------------------|
|                     |          | EOR    | 補助金 | 炭素税<br>カーボンプレジット |
| CO <sub>2</sub> 排出源 | 発電       | 2      |     | —                |
|                     | 天然ガス生産   | 4      | —   | 4                |
|                     | 肥料       | 1      | 1   | —                |
|                     | 水素       | —      | 1   | —                |
|                     | 合成ガス     | 1      | —   | —                |
|                     | 石油精製     | 1      | —   | —                |
|                     | バイオエタノール | —      | 1   | —                |

全 17 件中、CO<sub>2</sub> を石油増進回収（EOR）に活用しているプロジェクトが 11 件、内 4 件はさらに多額の補助金も獲得している。残り 6 件は、ノルウェーなど炭素税を課した国におけるプロジェクトやカーボンクレジット販売益をねらったプロジェクト、および政府から多額の補助金を得たプロジェクトである。

一方 CO<sub>2</sub> 排出源から見てみると、発電プロジェクトは 2 件しかなく、両者とも CO<sub>2</sub> を EOR に活用し、さらに政府から多額の補助金を得ている。発電以外の 15 プロジェクトは、元来のプロセス中に CO<sub>2</sub> 分離工程を含む産業（天然ガス生産、肥料製造、水素製造、等）で、CO<sub>2</sub> の分離・回収に新たなコストを要しないプロジェクトである。なおバイオエタノールプロジェクトが 1 件含まれているが、後述の通りバイオエタノール製造工程での CO<sub>2</sub> 分離・回収には多額の投資は不要である。なお鉄鋼やセメントなど、CO<sub>2</sub> の分離・回収コストが他と比較して高額になると言われている産業における大規模統合プロジェクトはまだ見られない。

以上から、現在操業中および建設中の先行プロジェクトでは、EOR への CO<sub>2</sub> 販売益や政府の補助金、カーボンクレジット販売益などの収入を得ているか、あるいは炭素税などのインセンティブがあること、また CO<sub>2</sub> 分離・回収に多額のコストを伴わないことなどを特徴としていることが分かる。

### （3）中止・保留となったプロジェクト

2010 年からこれまでに 23 件（The Global Status of CCS - 2013 年 1 月更新版以降さらに 1 件の中止が発表された）の大規模統合プロジェクトが中止・保留となっている。ここでは、中止あるいは保留になったプロジェクトの事例を紹介する。

#### ①各種補助金の獲得に失敗

英国の Longannet CCS プロジェクトは、英国スコットランドにある Scottish Power 社の Longannet 石炭火力発電所（330MW）か

ら CO<sub>2</sub> を燃焼後回収（200 万 t / 年）し、北海の枯渇ガス田に貯留することを目指した、商業規模の実証プロジェクトであった。当初の事業費見積額は 10 億ポンドであったが、Scottish Power 社等が実施した詳細調査で事業費総額が 15 億ポンドになることが判明し、同社は英国政府に公的支援の増額を要請した。しかしながら、緊縮財政下の政府にはそれに応える余裕はなく、補助金の増額が認められなかったため、同社は 2011 年 10 月、プロジェクトの中止を決定した<sup>(7)</sup>。

Longannet CCS プロジェクト以外にも、オランダの Pegasus Rotterdam プロジェクトなど 4 件のプロジェクトが、応募していた公的支援制度に落選するなどして保留・中止となっている<sup>(3)-(5)</sup>。

#### ②世界の経済情勢・経済危機の影響・CO<sub>2</sub> 販売先不確定

カナダの Project Pioneer は、カナダ初の発電から貯留まで一貫した CCS プロジェクトで、アルバータ州エドモントンの西 70km にある Keephills 石炭火力発電所 3 号機（450MW）から CO<sub>2</sub> を燃焼後回収（100 万 t / 年）し、EOR への活用および深部塩水層への貯留を目指していた。同プロジェクトは、アルバータ州政府とカナダ連邦政府が 15 年以上にわたって 7 億 7,900 万カナダドルの支援を保証し、2015 年の運転開始を目指して 2012 年に建設を開始する計画であった。

TransAlta 社を中心とするプロジェクト実施者は、2012 年に基本設計（FEED）を完了。その結果は「事業は技術的に可能で設備費用も予想の範囲内」というものであったが、収入源の 1 つとしていた CO<sub>2</sub> の販売先が確保できないうえ、CO<sub>2</sub> クレジット販売益も不確定なため、経済性がないと判断し、2012 年 4 月、プロジェクトの中止が決定された<sup>(8)</sup>。

上記 Project Pioneer の他にも、米 Freeport Gasification プロジェクトなど複数のプロジェクトが、不安定な経済情勢下でのプロジェク

ト推進の困難性などを主たる理由として中止・保留に追い込まれている<sup>(3)-(5)</sup>。

### ③天然ガス価格の低下による本体プロジェクトの中止

カナダ Swan Hills Synfuels プロジェクトは、アルバータ州 Swan Hills において、地下石炭ガス化技術により合成ガスを製造し、コンバインド発電するとともに、合成ガス製造過程で発生する CO<sub>2</sub> を回収して EOR に活用（120～140 万 t/年）することを目指したプロジェクト。2015 年運転開始の計画であった。

2007 年に実証プロジェクトの設計・エンジニアリングを開始し、2011 年に実証プロジェクトを成功裏に終了。また 2011 年には、アルバータ州と 15 年以上にわたって 2 億 8,500 万カナダドルの支援を受ける契約を締結していた。しかしながら、シェールガス開発に起因する天然ガス価格の低下により、本体プロジェクトである石炭ガス化の経済優位性がなくなったとして、2013 年 2 月にプロジェクトの中止が発表された<sup>(9)</sup>。

なお、米国 Good Spring IGCC プロジェクトも同じ理由で 2012 年 5 月に中止となっている<sup>(4)</sup>。

### ④住民の反対

ドイツの Jänschwalde プロジェクトは、Vattenfall 社が主体となって Brandenburg 州 Jänschwalde 発電所に 500MW の酸素燃焼ボイラーを新設し、レトロフィット燃焼後回収と合わせて、170 万 t/年の CO<sub>2</sub> を陸域深部塩水層へ貯留することを目指したプロジェクトであった。

欧州連合（EU）の「CCS 指令」<sup>(10)</sup> は、EU 加盟国に、CCS 許可条件やリスク管理基準を定める法的枠組みを 2011 年 6 月末までに確立するよう求めていたが、Brandenburg 州などの住民が CO<sub>2</sub> の漏洩不安に基づいて CO<sub>2</sub> の輸送・貯留に反対し、CCS 指令の国内法化が進展しなかった。これに対して Vattenfall 社

は、企業が CCS を推進するには CCS 法案の早期成立が不可欠であるにもかかわらず、その法制化を実施しないドイツ政府には EU の CCS 指令を遵守して CCS を推進しようとする確固たる意思がなく、貯留の許可取得が困難であるとして、2011 年 12 月、プロジェクトの継続断念を発表した<sup>(11)</sup>。

## （４）CCS プロジェクトの進展に向けた課題

前述のプロジェクト中止・保留の事例から明らかになった CCS プロジェクトの進展に向けた主たる課題は以下の通りである。

### ①政府による支援

CCS そのものでは利益を生じないため、実証・商業プロジェクトに対する政府の補助や税優遇、炭素税の導入や炭素価格の維持などによるインセンティブの付与、長期的責任所在の明確化などの法規制整備、技術開発支援、など。

### ② CCS コストの低減

技術開発や、CCS プロジェクトのベストプラクティス共有化によるコストの低減、実証プロジェクトの実施による統合技術としてのコストの低減、など。

### ③ステークホルダーの理解促進、受容の獲得

ステークホルダーとの意思疎通がプロジェクトの基本要素であることを認識し、CCS 技術や CCS の低炭素化への貢献に対する理解促進を図り、CCS プロジェクトの推進に対する受容を獲得することが必要である。また、CCS にかかわる国際標準の策定も、ステークホルダーの理解促進や受容獲得にとって重要な手段の 1 つであると考えられる。

## 3. バイオエネルギー CCS（BECCS）プロジェクト<sup>(12)</sup>

### （１）BECCS プロジェクトの動向

BECCS は、移動発生源や小規模排出源から

のCO<sub>2</sub>など、これまで困難かつ費用がかかるとされていた排出済CO<sub>2</sub>の削減が可能であるとともに、大気中のCO<sub>2</sub>を取り込んだバイオマスを利用するため、燃焼時や発酵時に発生するCO<sub>2</sub>を回収・貯留すればネガティブCO<sub>2</sub>に繋がるとして注目を浴び始めている。

GCCSIの報告書<sup>(13)</sup>によると、世界のBECCSプロジェクトは15件（終了1件、操業中4件、計画段階7件、中止3件）となっている（表2参照）。その適用分野は、中止になった3件を除いてバイオエタノール8件、パルプ2件、バイオガス1件、ガス化1件で、貯留層あるいはCO<sub>2</sub>の活用先は、深部塩水層8件、EOR 3件、CO<sub>2</sub>による植物の生長促進を目的とした温室での活用1件（将来的に深部塩水層への貯留も計画）となっている。

表2に示すように、バイオエタノール生産

とEORを組み合わせた3件のプロジェクトが米国で見られる。原油価格が高騰している状況下では、石油製品と競合できるバイオエタノールの生産と追加的原油生産につながるEORが経済的に成立するため、導入が進んでいるものと考えられる。

## （2）イリノイ CCS プロジェクト<sup>(14)</sup>

米国イリノイ州ディケーターで米国穀物メジャーの1つであるADM（Archer Daniels Midland）社が中心となってBECCSプロジェクトを推進している。このプロジェクトは、IBDP（Illinois Basin Decatur Project）とIL-ICCS（Illinois - Industrial CCS Project）と称される2つのプロジェクトから成り立っている。

IBDPは2011年に貯留を開始したプロジェクトで、表3に示すように、3年間で100

表2 世界のBECCSプロジェクト<sup>(13)</sup>

| No. | プロジェクト名         | 国           | 現状                  | 適用分野               | 貯留サイト    |
|-----|-----------------|-------------|---------------------|--------------------|----------|
| 1   | Russel          | USA         | Completed 2003-2005 | Ethanol            | EOR      |
| 2   | Liberal         | USA         | Operate 2009-       | Ethanol            | EOR      |
| 3   | Garden City     | USA         | Operate 2011-       | Ethanol            | EOR      |
| 4   | Rotterdam       | Netherlands | Operate 2011-       | Ethanol            | 温室／深部塩水層 |
| 5   | Decatur         | USA         | Operate 2011-2017   | Ethanol            | 深部塩水層    |
| 6   | Värö            | Sweden      | Evaluate            | Pulp               | 深部塩水層    |
| 7   | Sao Paulo state | Brazil      | Evaluate            | Ethanol            | 深部塩水層    |
| 8   | North Dakota    | USA         | Evaluate            | Gasification pilot | 深部塩水層    |
| 9   | Artenay         | France      | Evaluate            | Ethanol            | 深部塩水層    |
| 10  | Domasjö         | Sweden      | Identify            | Pulp               | 深部塩水層    |
| 11  | Norrköping      | Sweden      | Identify            | Ethanol            | 深部塩水層    |
| 12  | Skåne           | Sweden      | Identify            | Biogas             | 深部塩水層    |
| 13  | Greenville      | USA         | Cancelled           | Ethanol            | 深部塩水層    |
| 14  | Wallula         | USA         | Cancelled           | Ethanol            | 深部塩水層    |
| 15  | Rufiji cluster  | Tanzania    | Cancelled           | Ethanol            | 深部塩水層    |

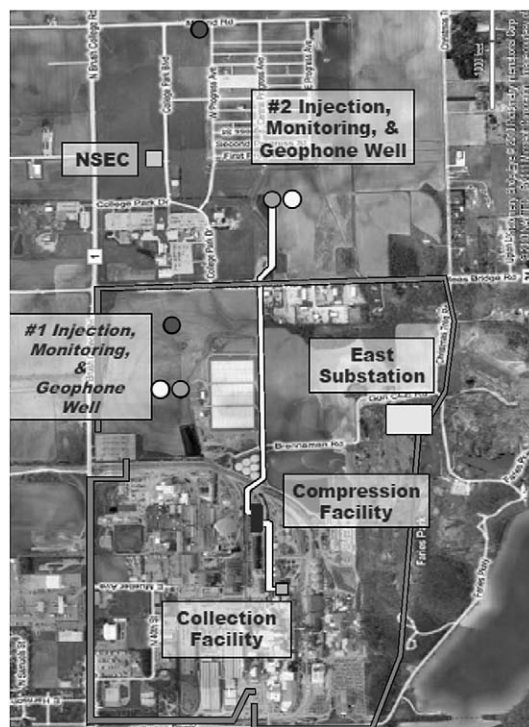
表3 IBDP と IL-ICCS の CO<sub>2</sub> 貯留計画<sup>(14)</sup>

| 年         |          | IBDP   |         | IL-ICCS |         |
|-----------|----------|--------|---------|---------|---------|
|           |          | (トン/日) | (万トン/年) | (トン/日)  | (万トン/年) |
| 1         | 2011. 秋～ | 1,000  | 33.3    |         |         |
| 2         | 2012. 秋～ | 1,000  | 33.3    |         |         |
| 3         | 2013. 秋～ | 1,000  | 33.3    | 2,000   | 73      |
| 4         | 2014. 秋～ |        |         | 3,000   | 100     |
| 5         | 2015. 秋～ |        |         | 3,000   | 100     |
| 6         | 2016. 秋～ |        |         | 3,000   | 100     |
| 7         | 2017. 秋～ |        |         | 3,000   | 100     |
| 概算計 (万トン) |          |        | 100     |         | 475     |

万 t の CO<sub>2</sub> 貯留を目指している。また、IL-ICCS は、2013 年秋の貯留開始を目指す 100 万 t-CO<sub>2</sub>/ 年規模の大規模統合プロジェクトである。両プロジェクトとも ADM 社のバイオエタノール製造設備から発生する CO<sub>2</sub> を回収して貯留するが、CO<sub>2</sub> の透過性の観点から IBDP で約 1,700m であった貯留深度を IL-

ICCS では約 2,500m とし、CO<sub>2</sub> 注入場所を IBDP の注入地点から約 1 km 離れたところに変更している（図 5 参照）<sup>(15)</sup>。

IL-ICCS のシステムフローを図 6 に示す。発酵ガス中の CO<sub>2</sub> 濃度は水分フリーベースで 99% 以上であり、水分（3% 以下）を脱水するだけで貯留可能な CO<sub>2</sub> ガスが得られるため、



#1 : IBDP  
#2 : IL-ICCS  
NSEC : National Sequestration Education Center

図 5 イリノイ CCS プロジェクトサイト <sup>(14)</sup>

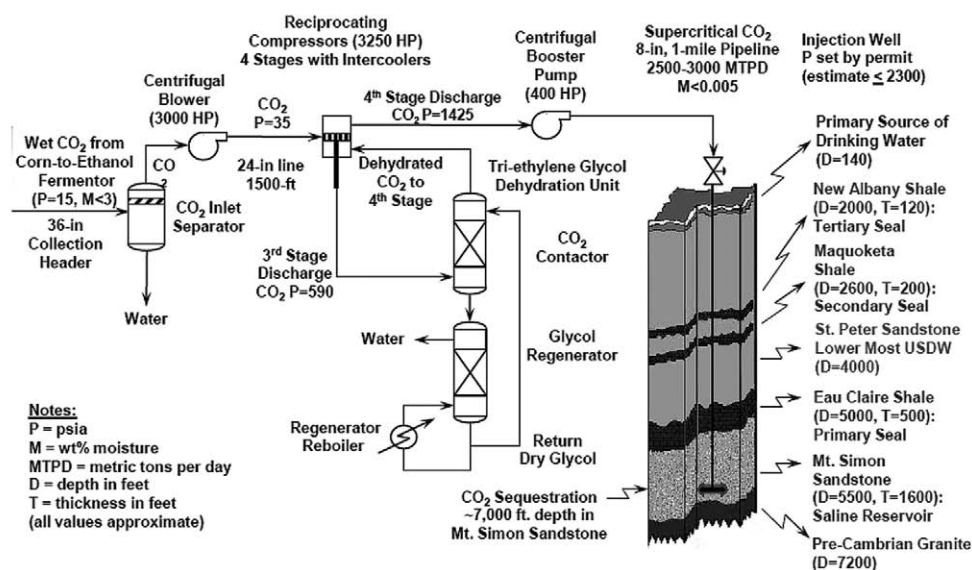


図 6 IL-ICCS システムフロー <sup>(14)</sup>

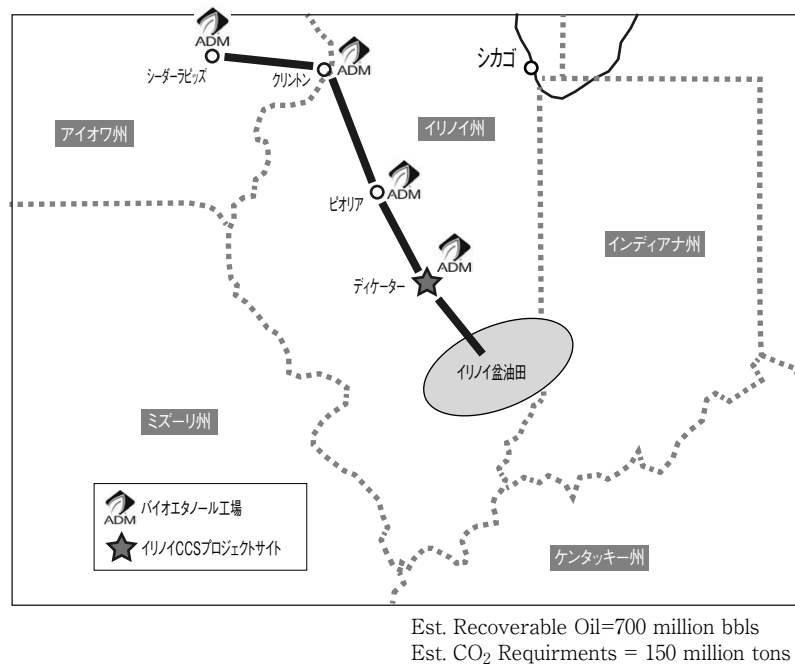


図7 ADM社の将来構想<sup>(14)</sup>

他分野のCCSと比較するとCO<sub>2</sub>の分離・回収コストが安価となる。これが、バイオエタノールCCSの優位点である。なお、IL-ICCSでは、図6に示す通り、トリエチレングリコールを用いて水分を0.005%以下まで脱水している。

IBDPおよびIL-ICCSは深部塩水層への貯留を目指したプロジェクトであるが、ADM社ではアイオワ州およびイリノイ州にある同社のバイオエタノール工場とイリノイ盆油田をCO<sub>2</sub>パイプラインで結び、バイオエタノール製造過程で発生するCO<sub>2</sub>をEORに活用するオプションも検討しているとのことであった(図7参照)。

## 4. CCSの国際標準化

### (1) CCS国際標準化の立ち上げ

CCSの国際標準化活動は、2011年5月、カナダからの提案により開始された。

この提案に対しISO加盟国の投票が行われ、有効投票数22、賛成18、反対4、P-メンバー(標準化活動に積極参加)表明13カ国となった。有効投票数の3分の2以上の賛成と5カ国以上のP-メンバー参加表明という条件を満

たし、SCCを事務局とするCCSの標準化専門委員会(TC)設置が承認され、TC265という番号が付与された。その後、P-メンバーは3カ国増えて16カ国(豪州、カナダ、中国、フランス、ドイツ、イタリア、日本、韓国、マレーシア、オランダ、ノルウェー、南アフリカ、スペイン、スイス、英国、米国)となっている。

### (2) 国内組織

国際標準化に対応するため、日本国内の組織が整備された。すなわち、(公財)地球環境産業技術研究機構(RITE)を国内審議団体として、関連業界団体や研究機関、各ワーキンググループ(WG)主査をメンバーとする国内審議委員会(委員長：佐藤光三 東京大学教授)が組織され、その下に回収、輸送、貯留、Q&V(定量化と検証)・クロスカッティングイシューのWGがそれぞれ設置された。そして当所(IAE)は、Q&V・クロスカッティングイシューWGの事務局として貢献することとなった(図8参照)。

なお、Q&Vでは、CCSの活動範囲やCO<sub>2</sub>貯留量の算定方法、算定された貯留量の第三者によるチェック方法などの標準化について、

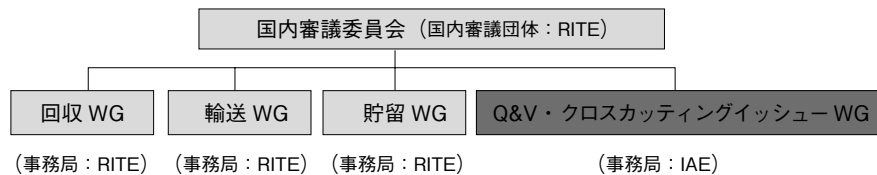


図8 ISO / TC265 日本国内組織

クロスカッティングイシューでは、CO<sub>2</sub> 回収・輸送・貯留に横断的に関係する事項（用語の定義、全体システムの統合、リスクマネジメント、社会的受容、報告およびクレジットなど）の検討を行う予定である。

### （3）ISO/TC265 総会

2012 年 6 月、フランス・パリにおいて第 1 回 ISO/TC265 総会が開催され、TC265 の名称を“Carbon dioxide capture, transportation and geological storage”とすること、TC265 のスコープを「CO<sub>2</sub> の回収・輸送・地中貯留分野における設計、建設、操業、環境計画とマネジメント、リスクマネジメント、定量化、モニタリングと検証、および関連活動の標準化」とすること、そして、TC265 の組織（図 9 参照）が決定された。

また 2013 年 2 月、スペイン・マドリードに

おいて第 2 回総会が開催され、各 WG のリーダー国と事務局が表 4 のように決定された。日本は、回収 WG のコンビーナ（WG の統括責任者）および事務局を務めるとともに、カナダと協力して貯留 WG をリードすることとなった。カナダは陸域における CO<sub>2</sub> 貯留を念頭においており、海底下への CO<sub>2</sub> 貯留に関する日本の貢献が期待されている。

### （4）今後の予定

2013 年 9 月に第 3 回 ISO/TC265 総会が北京で開催され、国際規格の策定に向けた本格的検討が開始される。各 WG では、コンビーナを中心に規格策定の提案書である新業務項目提案（NWIP）が作成され、規格開発が進められる。

CCS の国際標準化は CCS の推進につながるものであり、わが国がこれまで培ってきた技術・知見が国際的に適切に評価されるよう、



図9 ISO / TC265 組織

表 4 各 WG のリーダー国

|         | ISO/TC265    |       |       |        |                  |
|---------|--------------|-------|-------|--------|------------------|
| WG      | 回収 WG        | 輸送 WG | 貯留 WG | Q&V WG | クロスカッティングイシュー WG |
| コンビーナ*  | 日本           | ドイツ   | カナダ   | 中国     | フランス             |
| コ・コンビーナ | —            | —     | 日本    | フランス   | 中国               |
| 事務局     | 日本<br>(RITE) | ドイツ   | カナダ   | 中国     | フランス             |

\* コンビーナ（Convenor/Convener）：WG の統括責任者

また、わが国の CCS 関連業界にとって不利な規格とならないよう、規格作成に積極的に貢献していきたいと考えている。

#### 〔謝辞〕

本稿は、NEDO 委託事業「革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト、発電から CO<sub>2</sub> 貯留までのトータルシステムのフェージビリティ・スタディー、全体システム評価（発電から CO<sub>2</sub> 貯留に至るトータルシステムの評価）」の成果の一部を含むものである。NEDO および関係各位に感謝いたします。

#### 参考文献

- (1) IEA, Energy Technology Perspectives, 2012
- (2) 米国 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 発表資料, 2013.5.10  
<http://researchmatters.noaa.gov/news/Pages/CarbonDioxideatMaunaLoareaches400ppm.aspx>
- (3) GCCSI, The Global Status of CCS, update January 2013
- (4) GCCSI, The Global Status of CCS, 2012
- (5) GCCSI, The Global Status of CCS, 2010
- (6) GCCSI, The Global Status of CCS, 2011
- (7) 英 DECC (Department of Energy & Climate Change) 発表資料, 2011.10.19  
[http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/news/pn\\_1184/pn\\_1184.aspx](http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/news/pn_1184/pn_1184.aspx)
- (8) TransAlta 社 発表資料, 2012.4.26  
<http://www.transalta.com/newsroom/news-releases/2012-04-26/transalta-maintains-strong-operating-performance-first-quarter>
- (9) カナダアルバータ州発表資料, 2013.2.25  
<http://alberta.ca/NewsFrame.cfm?ReleaseID=/acn/201302/33717121A0157-D5E3-839F-750E02B41D039F98.html>
- (10) Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC, 2008/1/EC and Regulation (EC) No 1013/2006  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0114:0135:EN:PDF>
- (11) Vattenfall 社 発表資料, 2011.12.05  
<http://www.vattenfall.com/en/pressreleasedetailhidden.htm?newsid=7217C9BD4BC04D8CBC7F55B5DE07505E>
- (12) 黒沢厚志, 森山亮, 村上嘉孝, Bioenergy with CCS, 日本エネルギー学会誌, Vol.92, No.3, 2013
- (13) GCCSI, Global Status of BECCS Projects 2010, 2010
- (14) Scott McDonald, Illinois Industrial Carbon Capture and Storage Project – Project Overview, Lessons & Future Plans, 2012 NETL CO<sub>2</sub> Capture Technology Meeting, June 11-14, 2012  
<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/12/co2capture/presentations/4-Thursday/S%20McDonald-ADM-Illinois%20CCS.pdf>
- (15) NETL, Archer Daniels Midland Company : CO<sub>2</sub> Capture from Biofuels Production and Sequestration into the Mt. Simon Sandstone, NETL Project Facts  
<http://www.netl.doe.gov/publications/factsheets/project/ARRA1547.pdf>

## 平成 24 年度 事業報告の概要

(一財) エネルギー総合工学研究所

当研究所における平成 24 年度事業の概要は以下のとおりである。

(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、エネルギー技術に関する調査、研究、評価、成果の普及等に取り組んでいくことが必要である。

一方、国内および世界のエネルギーの情勢は目まぐるしく変化を続けている。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、成功体験や優位点に安住することなく、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、時代時代の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) このような視点から、当研究所は、平成 24 年度、わが国のエネルギー需給構造が抱える

広範なリスクを踏まえ、2050 年までを見通したエネルギー戦略とエネルギー技術開発について、平成 23 年度に行った「ポスト 3.11 研究」(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)の成果を活用しつつ、調査・検討を行った。このような検討を効果的に進めるためにも、当研究所の地球環境統合評価モデル (GRAPE) の機能拡張を図るとともに、わが国に適用するための評価モデルの開発を進めた。

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開始するとともに、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開始した。

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

(3) 当研究所は、公益法人改革の要請に対応し、まず「一般法人」と「公益法人」の利害得失を総合的に勘案し、事業運営上、より自由度が高く、営利を目的としない非営利型の一般法人化の道を選択した。次に、定款、公益目的支出計画、移行後の評議員など必要書類を整備し、平成 24 年 8 月 31 日に移行申請を行い、平成 25 年 3 月

21日に移行認可書の交付を受け、平成25年4月1日から「一般財団法人エネルギー総合工学研究所」となる運びとなった。

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

2050年までを見通したエネルギー戦略とエネルギー技術開発に関する調査・検討に加え、最新の技術情報および評価を提供するエネルギー技術情報プラットフォームの内容の充実、エネルギーに関する公衆の意識についてアンケート調査を実施した。

#### ② 電力ネットワークおよびエネルギーシステム関連

電力システム分野では次世代電力ネットワークの調査検討を進めるとともに、スマートハウスを含むエネルギーマネジメントシステム(EMS)の標準化と事業促進に関して、動向調査と国内外への展開可能性分析等を進めた。

#### ③ 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)の機能拡張を図るとともに、わが国に適用するための評価モデルの開発を進めた。また、温暖化対策のオプションであるジオエンジニアリングにかかわるリスクの分析等を行った。

#### ④ 再生可能エネルギー・省エネルギー関連

再生可能エネルギー分野では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、省エネルギー分野では省エネルギーのためのマネジメントシステムや電気製品の効率向上に資する国際協力に関し、自動車エネルギー分野では電気トラック(EVトラック)等に関し調査研究を実施した。

#### ⑤ 水素エネルギー関連

水素エネルギー分野では、再生可能エネルギー由来の水素(CO<sub>2</sub>フリー水素)のサプライチェーン、水素需要に係るシミュレーション等に関し調査研究を実施するとともに、国際機関が進める世界の水素システム構想に協力を行った。

#### ⑥ 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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>の回収・輸送・貯留までのシステムの評価、CO<sub>2</sub>分離型化学燃焼石炭利用技術、低品位炭の改質技術、また、石油・天然ガスの探鉱・開発技術、さらには、メタンハイドレート生産ガスのビジネスモデル等に関して調査研究を行った。

#### ⑦ 原子力関連

福島第一原子力発電所事故を踏まえ、さらに高い水準の安全確保を図るため、原子力発電所の安全対策高度化に活用しうる技術開発プロジェクトを開始した。また、事故炉の炉内状況を把握するため、過酷事故の挙動解析コードの性能向上と解析を進めた。また、安全対策に重点を置いた調査、高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る社会科学的な検討、高温ガス炉の実用化検討等を行うとともに、国の原子力人材育成に係る業務の支援を行った。さらに、欧米における原子力発電施設の廃止措置政策等に係る調査研究を実施した。

## 研究所のうごき

(平成 25 年 4 月 2 日～7 月 1 日)

### ◇ 第 1 回理事会 (書面決議)

決議があったものとみなされた日: 4 月 24 日 (水)

議 題:

第一号議案 第 1 回評議員会招集について

### ◇ 第 1 回評議員会 (書面決議)

決議があったものとみなされた日: 5 月 14 日 (火)

議 題:

第一号議案 役員候補者選考委員会委員の選任  
について

### ◇ 第 2 回理事会

日 時: 6 月 6 日 (木) 11:00～12:00

場 所: 経団連会館 (5 階) 504 号室

議 題:

第一号議案 平成 24 年度事業報告および決算に  
ついて

第二号議案 公益目的財産額の確定について

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

第六号議案 経理規程の改定について

報告事項 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 2 回評議員会

日 時: 6 月 20 日 (木) 11:00～12:00

場 所: 経団連会館 (5 階) 502 号室

議 題:

第一号議案 平成 24 年度事業報告および決算に  
ついて

第二号議案 公益目的財産額の確定について

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

報告事項 その他

### ◇ 第 3 回理事会

日 時: 6 月 20 日 (木) 14:00～14:30

場 所: 経団連会館 (5 階) 502 号室

議 題:

第一号議案 理事 3 役の選定について

第二号議案 役員報酬額について

報告事項 中長期ビジョンについて

### ◇ 月例研究会

#### 第 322 回月例研究会

日 時: 4 月 26 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～電力  
市場自由化と供給力確保を中心に～」

(（一社）海外電力調査会 調査部 副主任研究員  
大西健一 氏)

2. 「シェール・ガス革命と日本および世界の  
エネルギー情勢」

(和光大学 経済経営学部 教授 岩間剛一 氏)

3. 特別プログラム (資料紹介) 「米国にお  
けるスマートグリッドのサイバーセキュリティ  
対策に関する調査報告書 (新産業技術研究所  
作成)」 (紹介者: プロジェクト試験研究部  
主任研究員 橋倉 裕)

#### 第 323 回月例研究会

日 時: 5 月 31 日 (金) 14:00～16:00

場 所: 航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ:

1. 「日産自動車における燃料電池自動車の開発」  
(日産自動車 (株) 総合研究所 EV システム  
研究所 エキスパートリーダ 飯山明裕 氏)

2. 「2015 年に向けて動き出した燃料電池車と  
普及の課題」

(トヨタ自動車(株) 技術統括部 主査  
広瀬雄彦 氏)

#### 第 324 回月例研究会

日 時: 6 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. 「福島事故を踏まえた欧州主要国の原子力  
発電所の動向等について」

(プロジェクト試験研究部 主管研究員  
木村公隆)

2. 「福島第一原子力発電所事故の原因と事故  
事象進展の評価」

(原子力工学センター 安全解析グループ 部長  
内藤正則)

### ◇ 外部発表

[講演]

発表者: 松井 一秋

テーマ: Future Japanese Nuclear Technologies

発表先: Pillsbury Tokyo Energy Summit (東京)

日 時: 4 月 18 日

発表者：松井 一秋

テーマ：東日本大震災後の我が国のエネルギー戦略

発表先：第36回還流文明研究会（法政大学）

日 時：4月20日

発表者：松井 一秋

テーマ：Japanese Activities to reinforce Nuclear Power Plant safety

発表先：IAEA Consultants Meeting on Lessons Learned from the Fukushima Accident and Water Cooled Reactor (WCR) Technology Development（ウィーン）

日 時：4月23日

発表者：松井 一秋

テーマ：Nuclear Development activities of interest to other committees

発表先：Annual Co-ordination Meeting with the Chairs of All NEA Standing Technical Committees（パリ）

日 時：4月24日

発表者：松井 一秋

テーマ：Status report by the Chair of the Committee for Technical and Economic Studies on Nuclear Energy Development and the Fuel Cycle (NDC)

発表先：The 126th Session of the Steering Committee for Nuclear Energy（パリ）

日 時：4月25日

発表者：内藤 正則、岡田 英俊、平川 香林、マルコ・ペリグリニ

テーマ：State of the art SAMPSON analysis and future improvements on TEPCO Fukushima Daiichi NPP accident（内藤 正則）

Analysis of Accident Progression of Fukushima Daiichi with SAMPSON Code

(1) Unit 1（平川 香林）

(2) Unit 2（岡田 英俊）

(3) Unit 3（マルコ・ペリグリニ）

発表先：15th International Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-15)（イタリア・ピサ）

日 時：5月12日～17日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：海外における水銀規制動向

発表先：日本学術振興会 石炭・炭素資源利用技術 第148委員会

日 時：5月14日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：Biomass-Energy R&D and CCS status in Japan

発表先：Bio-energy and CCS (BECCS) : Options for Brazil（主催：国際エネルギー機関 (IEA)、国際応用システム分析研究所 (IIASA)、サンパウロ大学）

日 時：6月13日～15日

[学会発表]

発表者：蓮池 宏（論文共著者：小川 紀一郎、石田 敬一、堀口 章、松尾 栄人）

テーマ：水バイナリーサイクル発電システムの開発

発表先：日本機械学会 第18回動力・エネルギーシンポジウム（千葉大学）

日 時：6月21日

[ポスター発表]

発表者：笹倉 正晴

テーマ：An Activity in Japan for Realization of CO<sub>2</sub>・free H<sub>2</sub> Global Chains

発表先：4th European PEFC and H<sub>2</sub> Forum 17th conference in series, KKL Lucerne, Switzerland

日 時：7月2日～5日

[寄稿]

発表者：埴 雅一

テーマ：エネルギー需給動向と化学原料への影響  
寄稿先：『日本エネルギー学会誌』（第92巻5号）

発表者：時松 宏治、森山 亮、小野崎 正樹

テーマ：2050年に向けた発電技術開発

寄稿先：『日本エネルギー学会誌』（第92巻5号）

発表者：松井 一秋

テーマ：世界が注視する新規規制基準と国内原子力の行方

寄稿先：電力時事通信（5月1日付け）

発表者：松井 一秋

テーマ：RIC2013 (Regulatory Information Conference; 規制情報会議) に出席して

寄稿先：日本原子力学会誌『ATOMO Σ』6月号

◇ 人事異動

○5月1日付

(出向採用)

白井浩嗣 原子力工学センター主管研究員

○6月20日付

(退任)

松井一秋 理事

(解嘱)

小野崎正樹 研究理事

(就任)

小野崎正樹 理事兼プロジェクト試験研究部部長  
(主席研究員)

(嘱託採用)

松井一秋 研究顧問

○6月30日付

(退職)

横尾友美 業務部研究員兼企画部兼総務部兼  
プロジェクト試験研究部兼エネルギー国際標準(ISO)センター

(出向解除)

入谷淳一 プロジェクト試験研究部主管研究員

芝田圭市 プロジェクト試験研究部主任研究員

星場康志 プロジェクト試験研究部主任研究員

○7月1日付

(嘱託採用)

水田美能 プロジェクト試験研究部参事

入谷淳一 プロジェクト試験研究部参事

(出向採用)

川口直樹 プロジェクト試験研究部主任研究員

## 編集後記

「スローライフ」なる言葉を聞いて久しい。爾来、何か為にする感じがあって好きになれない言葉だった。ファーストフードに対する語として作られたスローフードに由来するらしいという出自のせいかもしれない。ところが、人間が高齢になれば普通はスローになる、ということに先日ハタと気付いた。今さら気づくスローさは、まさに歳のせいと言われても仕方がない。

では、高齢化社会において国民の生活は平均的にスロー化するのか？慌てず騒がずゆっくりと生活を送る人の数はどんどん増えるだろう。が、生活に余裕があるかないかは、人それぞれだ。また、健康であるかないか、本人のみならず家族にも大きく影響する。病が重ければ周囲を巻き込んで忙しさを生じさせるだろう。とても一筋縄ではいきそうもない。

国あるいは企業の経営にあたっている人がスローであるはずもないが、それぞれ多様なスロー化なり、また逆に同時に生じるビジーさに対応して、政策なり事

業運営を機敏に実行していくことになる。当然、様々な場面において、社会保障なども含めて、スローな人がどんどん増えていくことを認識した上で選択を行うことが求められる。エネルギーについても、規模が小さい小水力、バイオマスなども、地産地消のスローなエネルギーと捉えて育てていきたい。こうしたことを如何に上手にやっていくかで、成熟した豊かな社会を実現できるか、あるいはただ衰退していくのか決まるのだろう。ただ「スローで行こう」などと言っていないことは確かだ。

江戸時代を思えば、スローであったことは間違いない。江戸時代後期の日本の人口はおおよそ3,000万人で現在の約4分の1、エネルギー消費は2桁あるいは3桁小さかっただろう。そのスローさに戻ることは望むべくもないが、何かしら懐かしさを感じるその面影が、世の中のそこ此処にあるようになればいいなと思う。

編集責任者 疋田知士

### 季報 エネルギー総合工学 第36巻第2号

平成25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(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。