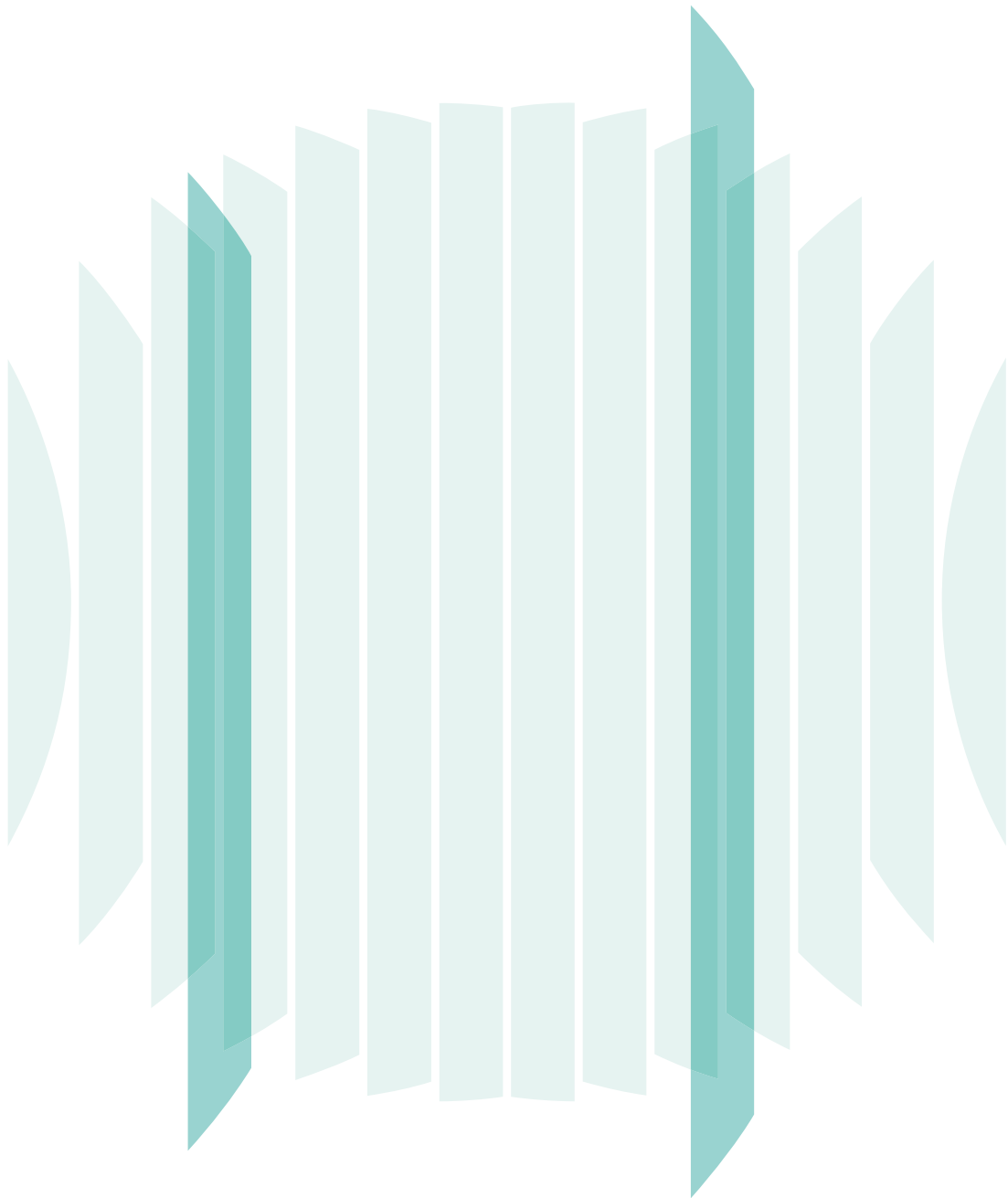


季報 エネルギー総合工学

Vol. 39 No. 2 2016. 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】

これまでのエネルギー政策からの脱皮

中小企業庁 事業環境部長
(前資源エネルギー庁 資源エネルギー政策統括調整官) 吉野 恭司 1

【寄稿】

シェール・ガス革命, シェール・オイル革命が日本経済と世界経済に与える影響

和光大学 経済経営学部 教授 岩間 剛一 3

【寄稿】

地熱・地中熱の利用技術～見えない地下の見える化を目指して～

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
再生可能エネルギー研究センター 総括研究主幹 安川 香澄 19

【調査研究報告】

福島第一原子力発電所の現状と廃炉に向けての活動

原子力工学センター 副センター長 内藤 正則 31

【調査研究報告】

CO₂ フリー水素普及シナリオ研究～ IAE 自主研究会の活動概要～

プロジェクト試験研究部 水素グループ 参事 笹倉 正晴 37

【事業報告】

平成 27 年度 事業報告の概要 (一財)エネルギー総合工学研究所 46

【研究所のうごき】 48

【編集後記】 52

巻頭言

これまでのエネルギー政策からの脱皮

吉野 恭司 (中小企業庁 事業環境部長
前資源エネルギー庁
資源エネルギー政策統括調整官)



最近、エネルギー関係のシンポジウム、講演会、大学での講義等の機会が多いのですが、いつも感じるのは政策の現場で抱える諸課題を伝えることの難しさです。まず、原子力発電の再稼働や核燃料サイクルについては、福島第一原子力発電所事故により失墜した社会的信頼の回復が第一であり、福島の復興再生はもちろん、安全性向上に向けての不断の努力、原子力防災計画の改善向上などに取り組みつつ、エネルギー政策上の必要性を丁寧に伝え、少しずつでも理解を得る努力を続けていくしかありません。一方、再生可能エネルギー（再エネ）、石炭火力、電力システム改革などについても、法改正を含め様々な政策を展開してきていますが、多くの新しい課題を抱えており、それらを伝えることの難しさを感じます。

例えば、再エネについては、賦課金の額が膨らみ国民負担増大といったシンプルな論点はよいのですが、系統接続、出力抑制、系統安定化コストとなってくるとこれが伝えにくい。石炭火力についても、電源構成の国際比較において日本の石炭比率は低い、また、わが国のプラントは世界最高効率だといった事実はそれとして伝えればよいのですが、2030年に向けて電力事業全体でCO₂排出源単位を下げっていく取組、これを後押しするための省エネ法、エネルギー供給構造高度化法に基づくきめ細かな措置となると、これらがまた複雑で伝えにくい。

更に具体的な議論としては、ドイツで既に深刻な問題となっているように、再エネ導入拡大は火力発電の設備利用率の低下、これに伴い発生する費用負担や調整電源の容量確保の問題につながる。また、今後、FIT電源の送配電買取、卸市場を経由した取引、これにも関連して地域間連系線の運用の見直しなどの議論も出てくる。さらに、上述の高度化法による非化石電源の調達のために検討が必要な低炭素電源取引に係る仕組みも絡んでく

る・・・とここまで来ると、本誌を手にとられるエネルギー関係の皆様はさておき、一般の方々にとってはかなり難易度の高い議論になります。

エネルギーミックスをご覧になって、「再エネ比率は低すぎる」「これまでの需給見通しの延長、代わり映えしない」との声をしばしば耳にしますが、実際には、その具現化のために以上のように複雑に絡む多くの新しい課題に向けて、エネルギー政策は旧来の体系からの脱皮（今時の流行で言えば「エネルギー政策 2.0」とでも言うのでしょうか）が求められています。

総合資源エネルギー調査会の各委員会においては、上記の中のいくつかの議論が既にキックオフされています。今後の課題解決向け、エネルギー総合工学研究所をはじめ多くの有識者・専門家、事業者の皆様のお力添えをよろしくお願いします。

[寄稿]

シェール・ガス革命，シェール・オイル革命が日本経済と世界経済に与える影響

岩間 剛一（和光大学 経済経営学部 教授）



1. シェール・ガス革命，シェール・オイル革命の現在

筆者がシェール・ガス革命について，本格的な研究を始めて，2016年7月時点において，7年以上となるが，米国におけるシェール・ガス革命は，筆者の予想よりも2年以上も早いペースで，日本経済および世界経済に大きな影響を与えている。2016年7月時点における米国を震源地としたシェール・ガス革命，シェール・オイル革命については，大きく2つのポイントを挙げることができる。

第1に，シェール・ガス革命は，現時点においても，米国だけにおいて成功しているエネルギー革命であり，中国，ポーランド等に

おいて，欧米メジャー（国際石油資本）等によるシェール・ガス開発が進められているものの，顕著な成果が出ていない。その理由としては，地質構造が複雑であり，シェール・ガス開発にとって重要な水の調達等が困難であるという状況があり，米国において成功したシェール・ガス開発のノウハウが応用できないということが挙げられる。あくまでも，シェール・ガス革命は，米国だけで起こっている革命であって，世界全体に広がっているエネルギー革命とはいえない。

第2にシェール・ガス革命，シェール・オイル革命が，現時点においては，米国だけのエネルギー革命であるものの，米国は世界最大のエネルギー消費国，エネルギー生産国で

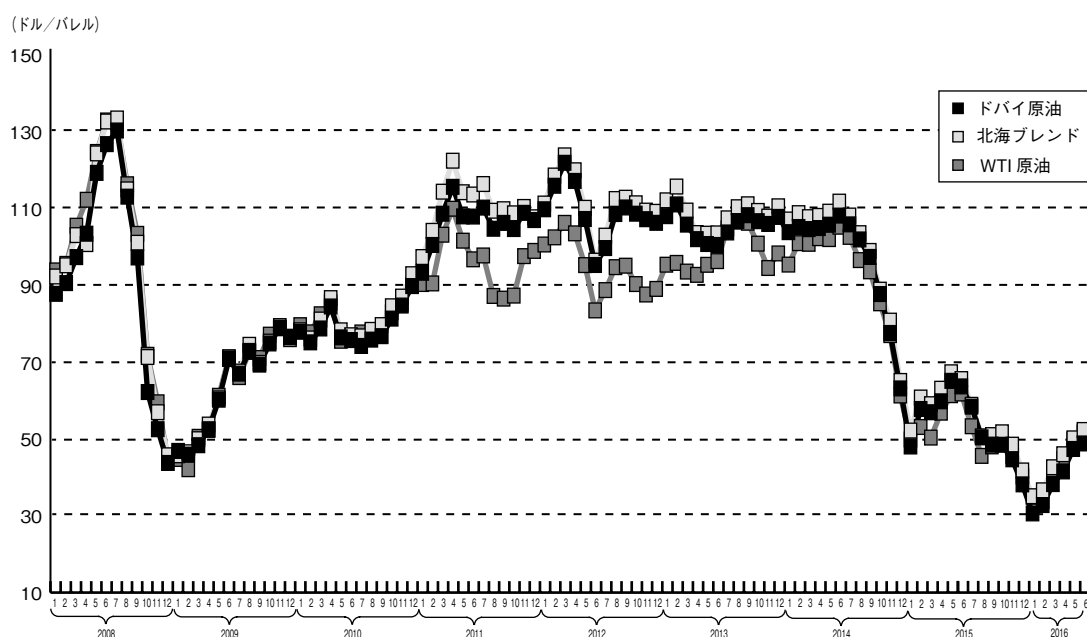


図1 主要原油価格の推移

あることから、米国におけるシェール・ガス、シェール・オイルの生産量の増加は、玉突き的に世界全体のエネルギー需給の緩和をもたらすことである。世界全体におけるエネルギー需給の緩和は、具体的には原油価格の暴落、液化天然ガス（LNG）価格の下落という形で顕在化している（図1参照）。

筆者は、世界的な原油価格下落、LNG 価格下落は、米国のシェール・ガスを原料とした LNG の輸出が本格化する 2017 年頃に発生すると考えていた。しかし、実際には、米国のシェール・ガス革命の世界への影響を、2 年先取りする形で、原油価格、LNG 価格は下落し、WTI 原油価格は、2014 年 6 月の 107 ドル/バレルから 2016 年 2 月には 26 ドル/バレルに、LNG スポット価格は、2014 年 2 月の 20.5 ドル/百万 Btu（英国熱量単位）という過去最高値から、2016 年 6 月には 4 ドル/百万 Btu と、大きく暴落した。LNG 価格に関しては、東日本大震災以降における、日本の LNG 輸入量の増加において、米国の天然ガス価格が、3 ドル/百万 Btu（石油換算 18 ドル/バレル）、日本の LNG 購入価格が、18 ドル/百万 Btu（石油換算 108 ドル/バレル）という 6 倍もの価格差の発生というアジア・プレミアムは、解消の方向に向かっている（図2参照）。これも、シェール・ガス革命による、原油価格の下落に伴う原油価格連動の LNG 価格の下落、世界

的な天然ガス需給の緩和に伴うスポット（随時契約）LNG 価格の下落という、シェール・ガス革命の恩恵を日本が受けている例である。

もちろん、原油価格下落の大きな要因として、2014 年 11 月の石油輸出国機構（OPEC）総会において、OPEC の盟主であるサウジアラビアが、下落傾向にあった原油価格に対して、原油生産量の削減を行わず、スイング・プロデューサー（原油生産調整役）を放棄し、米国のシェール・オイルとの消耗戦を開始したことが挙げられる。サウジアラビアは、原油生産量を削減することは、米国のシェール・オイル生産企業に、原油市場シェアを奪われるだけの結果となることを懸念し、原油市場におけるシェア維持を優先した。サウジアラビアが、原油価格下支え役を放棄したことが、ヘッジ・ファンドをはじめとした投機資金による原油先物売りを加速し、原油価格の下落をもたらすとともに、原油価格に連動する長期契約分の LNG 価格の下落をもたらした。サウジアラビアは、米国のシェール・オイルとの消耗戦を開始してから、2016 年 6 月時点においても、原油価格維持よりも、石油市場シェア維持を優先し、2015 年を通じて、米国、サウジアラビア、ロシアの三大産油国は、1,000 万 b/d を超える、過去最高水準の原油生産を続けている（図3参照）。

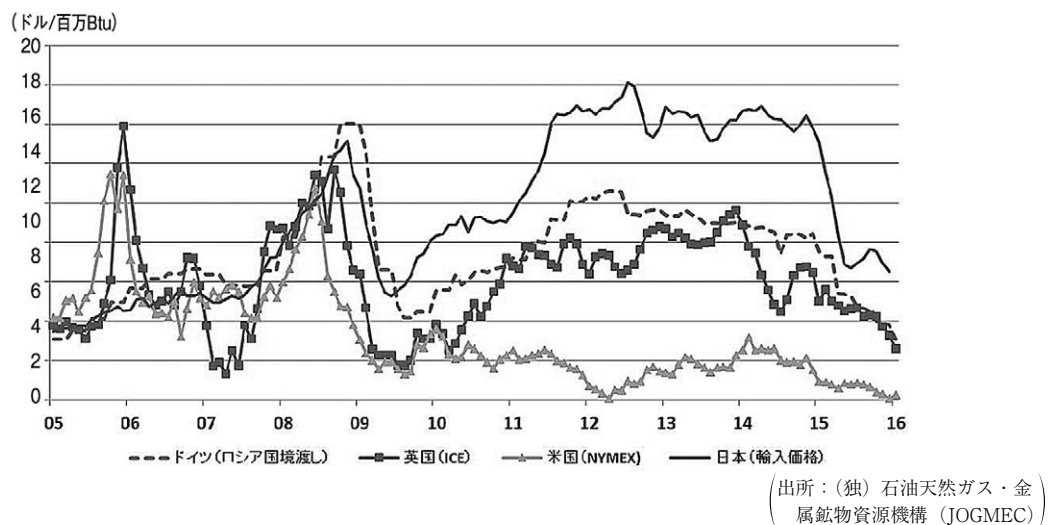


図2 世界の天然ガス価格の動き

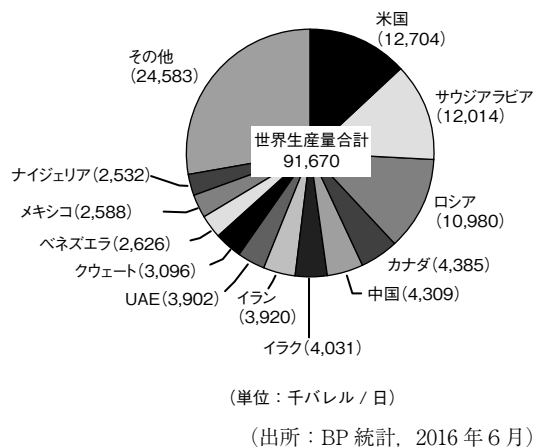


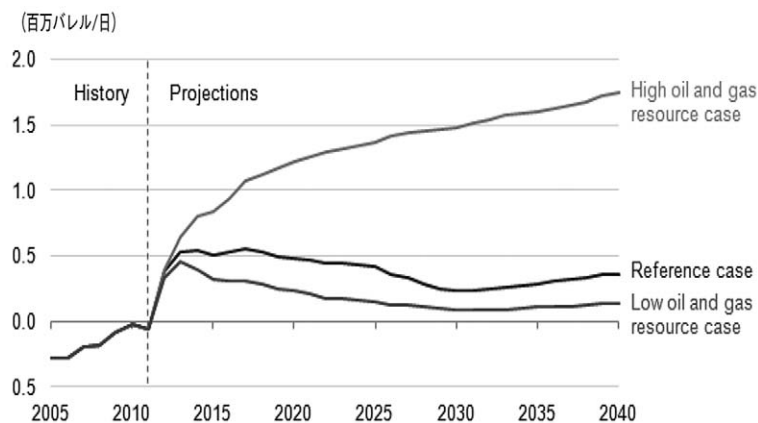
図3 国別原油生産量割合 (2015 年)

2. LP ガス価格にも影響を与えるシェール・ガス革命

シェール・ガス革命は、原油価格の下落、LNG 価格の低下という影響を与えただけではなく、プロパン、ブタンをはじめとした LP ガス価格にも大きな影響を与えている。油田は原油だけを、天然ガス田は天然ガスだけを、生産するわけではない。油田は、原油に随伴して、天然ガスの生産が行われ、天然ガス田は、随伴して、コンデンセート（粗製ガソリン）、プロパン、ブタンをはじめとした LP ガスの生産が行われる。米国においては、シェール・ガスの生産量の増加に伴って、プロパン、ブタンという LP ガスの生産量が増加し、LP ガスの輸出が増加している（図4 参照）。米国の場合には、国内の全家庭の半分において、冷暖房は、天然

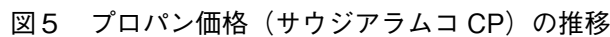
ガスによるガス・ヒート・ポンプを利用し、LP ガスを利用することは、少ない。そのため、米国メキシコ湾沿いのモント・ベルビュー渡しの LP ガス価格は、2016 年春時点において、200 ドル/トン程度に下落している。

日本の場合には、これまでは、カタールをはじめとした中東産油国から、主として LP ガスを輸入し、LP ガスの購入価格は、サウジアラビアの国営石油企業であるサウジアラムコが一方的に通告する、アジアの LP ガス需給を必ずしも反映しているとはいえない、サウジアラムコ CP（コントラクト・プライス）を受け入れて、LP ガスを購入している。2013 年 12 月には、タクシーの燃料として利用されるブタンの価格は、1,225 ドル/トンと、過去最高を記録した。しかし、米国からの安価な、シェール・ガスに随伴する LP ガスの輸入が、日本の LP ガス輸入量の 2 割近くに達し、サウジアラムコも、以前のように、アジアにおける LP ガスの需給とは関係ない、割高な LP ガス価格を提示できなくなっている。米国の LP ガスは、2016 年 6 月から、パナマ運河の拡張工事の完成により、米国メキシコ湾から、パナマ運河経由により、21 日程度で輸入が可能となった。拡張された、記念すべきパナマ運河における商業通航の最初の船舶は、日本郵船が保有する、アストモスエネルギー(株)による LP ガス運搬船であった。米国からの LP ガスの輸入拡大もあり、2016 年 2 月における、調理用に用いられるプロパン価格は、



(出所：米国エネルギー情報局（EIA）統計)

図4 米国の LP ガス輸出見通し



3. 先進国経済に大きな恩恵を与える シェール・ガス革命

いる。日本の名目国内総生産（GDP）は、499兆円であることを考えると、名目GDPの2%に相当する国富の流出を回避したこととなる。一般の新聞等においては、円安と株安による景気回復効果が喧伝されるものの、それは、自動車産業をはじめとした一部の輸出主導型企業に効果が限定されており、地方における多くの中堅・中小企業にとっては、海外への輸出の影響は小さく、国内市場が事業の中心であり、円安による輸出事業の利益拡大効果よりも、原油価格下落によるエネルギー・コストの低下による利益拡大の効果のほうがはるかに大きい。日本の場合には、2015年には、石油輸入額で7兆円、LNG輸入額で3兆円、石油とLNGとLPガスの輸入額において、合計10兆円の輸入額減少という効果が出ている（図6参照）



4. 1年半を超える消耗戦を経て少し減少するシェール・オイル

2014年11月に、サウジアラビアが、原油生産量の削減を行わず、米国のシェール・オイルとの消耗戦を挑んで1年半が経過する。当初のサウジアラビアの予想とは異なり、原油価格が下落しても、米国のシェール・オイルの生産量は、2015年は逆に増加し、それがさらなる原油価格の下落をもたらした。当初のエネルギー専門家、サウジアラビア石油省の見方では、原油生産コストが、4～5ドル/バレル程度のサウジアラビアの陸上油田に対して、シェール・オイルの生産コストは、60～80ドル/バレルと考えられ、サウジアラビアとの生産コスト競争を本格的に開始すれば、米国のシェール・オイル企業は、資金繰り難から、経営破綻する企業が相次ぎ、米国のシェール・オイルとの競争は、簡単にサウジアラビアが勝利を取めると考えられていた。しかし、米国のシェール・オイル生産企業における開発技術は、日進月歩であり、生産性の向上に伴う原油生産コストの低下から、米国のシェール・オイル生産企業は、原油価格下落にもかかわらず、シェール・オイルの生産を続けることが可能であった。米国の場合には、エクソンモービルをはじめとした巨大企業から、家族経営の小規模企業まで、シェール・オイル生産企業は、4,000社程度ある。2016年に入って、シェール・オイル企業の経

営破綻が生じているものの、50社程度に過ぎず、米国全体にとって、大きな影響はない。しかし、地質構造が複雑で、条件が好ましくなく、生産コストが割高なシェール・オイル油田の新規開発が停滞し、サウジアラビアが、消耗戦を開始して、1年半を経過して、米国のシェール・オイルの生産量は、2016年に入り、ようやく減少基調となっている（図7参照）。

1年半を超えるサウジアラビアとの消耗戦を経て、WTI原油価格は、2014年6月の107ドル/バレルから、2016年2月には26ドル/バレルまで暴落した。これまで、底力を見せていた、米国のシェール・オイルも、さすがに、原油価格が、30ドル/バレルを割り込むと、米国のシェール・オイルの生産量に減少傾向が見えてくる。さらに、米国とインド等におけるガソリン需要が堅調であることから、原油需給が引き締まってきたという見方が強まっている。特に、2016年春におけるカナダのアルバータ州の山火事、ナイジェリアにおける武装勢力による石油施設の破壊等により、原油供給量が、合計150万バレル/日（b/d）程度減少したことも加わり、原油価格は、2016年春以降は、50ドル/バレル程度と、回復基調にある。

5. シェール・オイル革命の現時点における3つのポイント

筆者は、米国を震源地とするシェール・オイル革命において、3つのポイントがあると考え

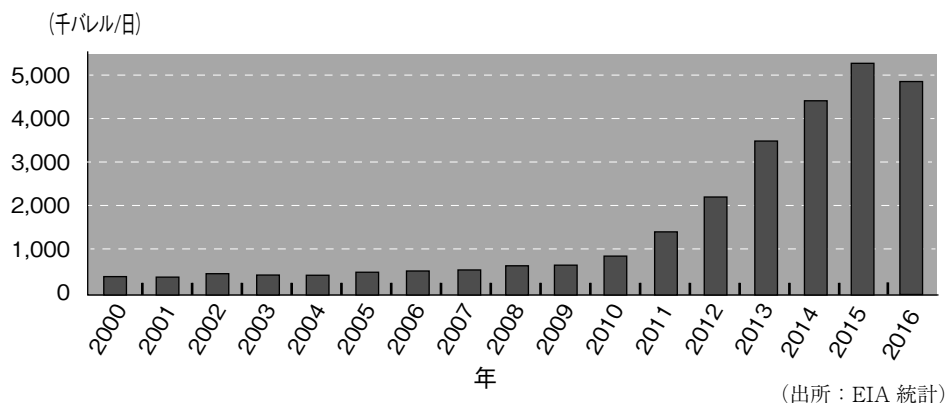


図7 米国におけるシェール・オイル生産量推移

ている。第1に、原油価格が下落しても、米国のシェール・オイルの生産量が大きく減少しないこと。つまり、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発に関連する技術が日進月歩であり、米国のシェール・オイル生産企業には、原油価格の下落に対して、強い底力があることである。米国のシェール・オイルの生産量は、2015年6月の560万b/dから、2016年4月に487万b/dと、原油価格の大きな下落にもかかわらず、80万b/d程度しか減少していない。

第2に、原油価格の下落により、原油先物売りのヘッジが難しくなり、資金繰り難から、2016年4月以降に経営破綻するシェール・オイル生産企業が相次ぐという、ある種の期待が、国際原油市場にはあった。しかし、上述のように、米国のシェール・オイル生産企業は、家族経営の小規模企業を含めて、4,000社程度あり、そのうち経営破綻したシェール・オイル生産企業は、50社程度である。小規模企業の大部分は、自己資金によりシェール・オイルの開発を行っており、金融機関の融資審査厳格化の影響を受けない。また、経営破綻し、連邦破産法11条(日本の民事再生法に相当)を適用した場合にも、財務内容が清算され、より強靱な企業となって、シェール・オイルの操業が続き、原油生産量が減少することはない。実際に、2016年7月上旬時点においても、米国のシェール・オイル生産企業の大規模な経営破綻によって、シェール・オイルの生産量が大きく減少するということは起こっていない。

第3に2016年4月17日において、サウジアラビアとロシアをはじめとした主要産油国の増産凍結が先送りされ、2016年6月2日のOPEC総会においても、OPEC加盟国における大産油国である、サウジアラビアとイランとの対立もあって、増産凍結の合意ができず、OPEC加盟国の生産目標を設定しなかった。にもかかわらず、原油価格が下落しない理由としては、米国におけるシェール・オイルを含めた原油(Crude Oil)生産量の減少傾向が挙げられる(図8参照)。

原油生産量といっても、BP統計における原油生産量は、NGL(天然ガス液)を含んでいるのに対して、米国エネルギー情報局(EIA)の原油は、Crude Oilだけであり、統計の数値が異なる。しかし、直近の統計を見ると、米国の原油の生産量には減少傾向がある。そのため、OPEC加盟国による増産凍結の合意ができなくとも、原油価格が下落しない。

6. シェール・オイル開発の最新動向

サウジアラビアが、原油生産量の削減を行わず、2014年秋以降に原油価格が下落を始めた時点においては、国際エネルギー機関(IEA)をはじめとしたエネルギー専門機関等は、原油価格が60～80ドル/バレルを割り込むと、米国のシェール・オイル生産企業の半分は、採算割れを起こすと予測していた。確かに、原油価格の下落とともに、経済性の低い新規のシェール・オイル油田の開発が停滞し、リ

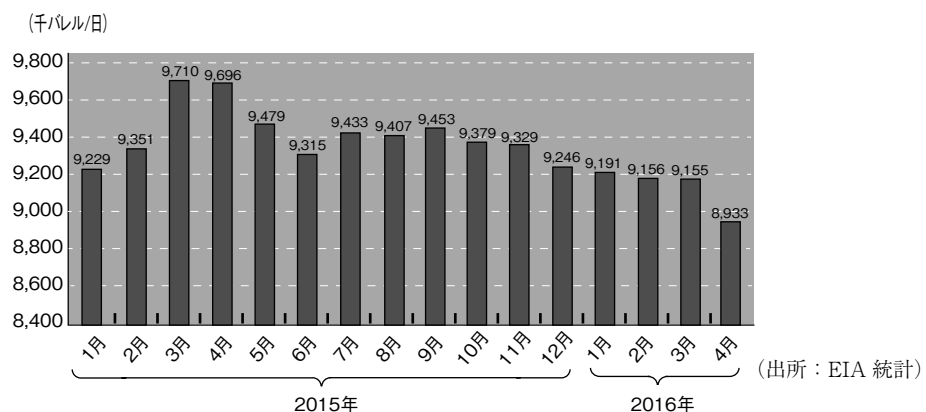
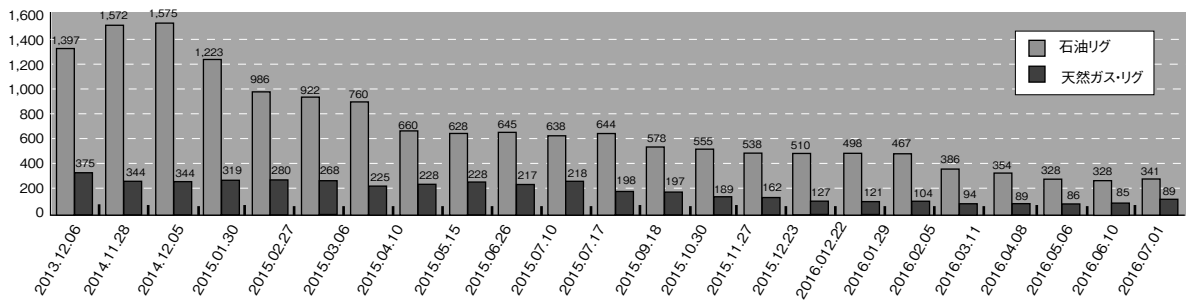


図8 米国の原油生産量見通し(2015年1月～2016年4月)



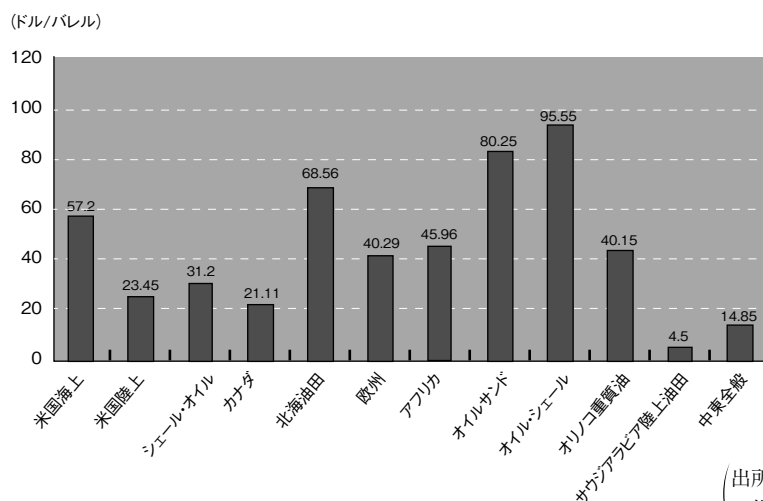
(出所：ペーカー・ヒューズ社統計)

図9 米国のリグ稼働数（2013年12月～2016年7月）

グ（新規油田開発のための掘削装置）稼働数は、減少基調にある（図9参照）。現時点における、米国国内の稼働リグ数は、1949年に、ペーカー・ヒューズ社が統計をとりはじめて、過去最低の水準となっている。

しかし、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発に関連する基礎技術といえる、地下でシームレス・パイプラインを水平に折り曲げて掘削する、水平掘削（Horizontal Well）、地下の地層において、高圧の水をぶつけて、原油の生産性を向上させる、水圧破碎（Fracturing）に関連する技術は、日進月歩である。シームレス・パイプラインを地下で水平に折り曲げる水平掘削の延伸距離を、3,000メートルから5,000メートルに延ばし、頁岩（けつがん）との接触面積を増加させて、シェール・オイルの回収率を向上させている。水圧破碎の技術も、60年を超える歴史を持ち、在来型の油田においても

用いられてきた技術であるものの、フクチャリングの科学的な解明が、完全に行われているとはいえず、今後の技術革新の可能性が大きい。最新の技術では、高圧の水を岩盤にぶつけた場合の振動をコンピューター解析し、一番効率的な部分に高圧の水をぶつけるノウハウの蓄積が行われている。高圧の水を岩盤にぶつけ、割れ目をつくる場合に、通常は岩盤の弱い部分に水が集中し、岩盤の弱い部分のシェール・オイルしか採取できない。そのため、岩盤の硬い部分に高圧の水をぶつけることが難しいために、岩盤の弱い部分に高圧の水があたらないように工夫し、岩盤の硬い部分からもシェール・オイルを採取することによって、シェール・オイル油田の生産性を向上させ、シェール・オイルの生産コストを低減させている。そのため、経済性があるシェール・オイルの生産コストは、30ドル／バレル以下となっている（図10参照）。



(出所：各種専門機関の推計を基に筆者作成)

図10 地域別油田発見・生産コスト

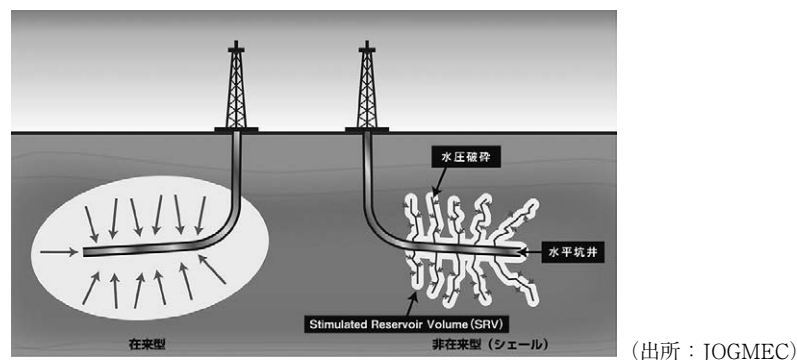


図 11 シェール・オイル油田開発における技術革新例

さらに、高圧の水によって、岩盤に割れ目をつくる部分を大きくして、頁岩に含まれるシェール・オイルを生産できる部分を大きくする、SRV（Stimulated Reservoir Volume）の拡大という開発技術の革新も行われている（図 11 参照）。

現状においては、経済性があるシェール・オイルの生産コストは、30～40 ドル／バレル、米国においてシェール・オイルの生産が豊富なビッグ・スリー（バッケン・シェール・オイル油田、イーグルフォード・シェール・オイル油田、パーミアン・シェール・オイル油田）において、

地質構造の条件が良い、スイート・スポットでは、生産コストが20 ドル／バレル程度のところもある。2016 年に入ってから、オクラホマ州のストーク鉱区、スタック鉱区という優良鉱区の開発も進んでいる。米国国内においては、地質条件が良く、生産コストが安価な、新規のシェール・オイルの鉱区開発が進められており、今後も、米国におけるシェール・オイルの生産コストが低減すると見込まれる。米国においては、原油価格の下落にもかかわらず、今後の原油価格回復を見込んで、シェール・オイル鉱区の取得が活況を呈し始めている（表 1 参照）。

表 1 シェール・ガス開発の新たな動き（2014 年 9 月～2016 年 6 月）

年 月	概 要
2014 年 9 月	住友商事がシェール・オイルで 1,700 億円の損失計上
10 月	チェサピークがシェール・ガス権益を 5,800 億円で売却
2015 年 1 月	米国シェール・オイル企業 WBH エナジー経営破綻
2 月	シェブロンがポーランド、ウクライナのシェール・ガス開発から撤退
4 月	ロイヤル・ダッチ・シェルが 470 億ポンドで BG 買収
5 月	米国ノーブル・エナジーが 21 億ドルでロゼッタ・リソースを買収
6 月	コノコフィリップスがポーランドのシェール・ガス開発から撤退
6 月	伊藤忠商事、米国のシェール・ガス権益撤退、累計損失 1,000 億円
8 月	欧米石油メジャー 6 社が 2015 年の投資額を 300 億ドル削減
9 月	サムソン・リソースが 41.5 億ドルの負債を抱え経営破綻
12 月	2015 年 12 月までに 35 社が経営破綻
2016 年 1 月	米国のシェール・オイル輸出開始
2 月	シェニエールがシェール・ガスを原料とした LNG 輸出開始
2 月	エクソンモービルが 120 億ドルの社債発行計画、シェール権益取得
3 月	グッドリッチ・ベトロリアムが利払い延期
4 月	BP が中国の CNPC と四川省のシェール・ガス開発で提携
4 月	グッドリッチ・ベトロリアム、エナジー XXI が経営破綻
4 月	エクソンモービルが 60 年ぶりにトリプル A から格下げ
6 月	パイオニア・ナチュラル・リソースがパーミアン鉱区を取得
6 月	マラソンがオクラホマ州スタック鉱区を取得
6 月	東京ガスがイーグルフォード鉱区を取得

（出所：各種新聞報道）

東京ガス(株)も、2016年6月にイーグルフォードのシェール・ガス鉱区を、50億円という安価で取得している。原油価格の下落により、米国国内における、シェール・ガス権益、シェール・オイル権益の価格が下落しており、欧米メジャーも、将来的な原油価格、天然ガス価格の上昇を見込んで、積極的な権益取得の動きを行っている。特に、欧米メジャーは、従来は、水深2,000メートルを超える、深海部油田の開発、LNGプロジェクトの開発等、資金面、技術面において、メジャーしか開発できないプロジェクトに注力しており、シェール・ガス、シェール・オイルの開発は、手薄であった。そのため、現状におけるシェール・ガス権益、シェール・オイル権益の価格低下は、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発を拡大する石油企業にとって、最適の時期と考えている。

7. シェール・ガス、シェール・オイルの今後と日本経済、世界経済への影響

原油価格の下落にもかかわらず、米国においては、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発の動きは、着実に進んでいる。2015年12月に米国の原油輸出が解禁され、シェール・オイルの輸出が2016年1月から開始された。日本のコスモ石油も、2016年4月にシェール・オイルの輸入を行い、中東産原油と比較

して、割安なシェール・オイルを購入している。米国のシェール・オイルの輸入は、原油調達源の多様化、原油価格交渉力の強化につながる。2016年2月には、シェニエールが、シェール・ガスを原料としたLNGの輸出を開始している。米国における天然ガス生産量は、天然ガス価格の下落にもかかわらず、増加基調にある(図12参照)。

シェール・ガスの分子は、シェール・オイルの分子と比較して、1,000分の1程度と小さいために、岩盤の割れ目を通しやすく、生産コストが、シェール・オイルよりも安価である。そのため、シェール・ガスの生産量は、天然ガス価格の低下にもかかわらず、大きく減少しない。米国は、2013年には天然ガスの自給を、ほぼ達成し、国内においては、天然ガスの余剰感が強まっている。米国の天然ガス価格は、2016年の冬に、米国北東部が暖冬に見舞われたために、ヘンリー・ハブ渡しの天然ガス価格は、2ドル/百万Btuを割り込む安値となった。米国にとっては、天然ガス価格の下落と天然ガスの余剰感から、シェール・ガスを原料としたLNGの輸出計画が、相次いで構想されている(表2参照)。

米国のLNGプロジェクトは、ヘンリー・ハブ渡しの天然ガス価格を指標として、天然ガス液化委託契約により液化し、仕向け地条項、転売禁止条項がない。つまり、アジア、中東

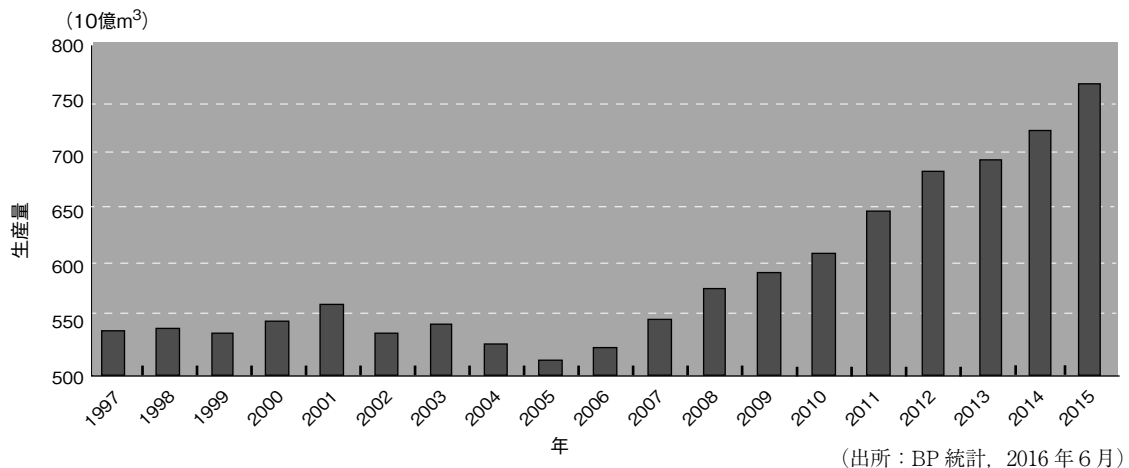


図12 米国の天然ガス生産量推移

表2 米国の LNG 輸出計画

地域	プロジェクト名	事業主体	液化能力（百万トン）
アラスカ	ケナイ LNG	コノコフィリプス、マラソン	20.0
カナダ	キティマット LNG	三菱商事、シェブロン	10.0
カナダ	ダグラス・アイランド LNG	BCLNG 輸出事業体	1.9
カナダ	プリンス・ルパート LNG	シェル・カナダ	7.5
テキサス	サビーンプラス LNG	シェニエール・エナジー	27.0
テキサス	フリーポート LNG	フリーポート、豪州マッコーリー	13.2
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	22.5
ジョージア	エルバ・アイランド LNG	シェル	2.5
メリーランド	コーブ・ポイント LNG	ドミニオン	5.3
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	12.0

(出所：各種新聞報道)

をはじめとした従来の LNG プロジェクトのように、テイク・オア・ペイ（LNG を引き取るか、代わりに代金を支払う条項）、決まった場所にしか LNG を輸出できない仕向け地条項、もっと割高に LNG を購入してくれる買い主があったとしても、転売することができない、という条項がない。また、実際の LNG 需給とは関係なく、原油価格に連動する価格スキームともなっていない。米国国内の天然ガス需給関係を反映した、市場価格といえる。2016 年 7 月時点においては、米国の天然ガス価格＝2.9 ドル、液化コスト＝2.5 ドル、輸送費用＝3 ドルと、合計 8.4 ドル／百万 Btu と、原油価格連動の LNG の 5 ドル／百万 Btu と比較して割高となっている。しかし、米国のシェール・ガスを原料とした LNG の輸出開始が、世界の LNG 価格低下の大きな要因となっていることを忘れてはいけない。日本としては、米国から LNG を受け入れ、より割高に LNG を購入してくれる買い手がいるならば、転売によって利益を挙げることが可能となる。今後は、LNG のトレーディング部門が重要となってくる。中部電力㈱と東京電力㈱の共同による㈱ JERA も、LNG のトレーディングを強化する動きを行っている。2016 年 6 月 26 日に、パナマ運河の拡張工事が完成し、LNG 輸送船の通航が可能となった。米国メキシコ湾から、日本まで、シェール・ガスを原料とした LNG が、21 日間で輸送できるようになった。これは、

中東のカタールからと同じ輸送日数といえる。さらに、原油価格が 50 ドル／バレルを超えると、米国のシェール・オイルを新規開発するためのリグの稼働数も増加する。現状においては、2016 年夏以降には、国際原油市場における需給が均衡に近づき、原油価格は 1 バレル 50 ドル台で推移する可能性が大きく、米国におけるシェール・ガス、シェール・オイルの生産量も、増加基調となると見込まれる。米国におけるシェール・オイルの生産量の増加が、原油価格を 50 ～ 60 ドル／バレルに安定させる可能性が大きい。米国におけるシェール・ガス革命、シェール・オイル革命は、これから一段と本格的な歩みが始まる。

8. 急速に減少する米国の石油輸入量

米国国内の原油生産量は、原油だけで見ると、2005 年頃には、500 万 b/d 程度まで減少していた。米国は、1970 年に 1,000 万 b/d の原油生産量を誇る、世界最大の産油国であったことを考えると、米国にとって、サウジアラビアをはじめとした中東産油国からの原油輸入は、極めて重要であった。しかし、シェール・オイル革命により、米国の石油輸入量は、ネット・ベースにおいて、急速に減少している（図 13 参照）。

米国の石油消費量は、2,000 万 b/d 程度であり、2005 年には、そのうち 1,200 万 b/d 以上を、

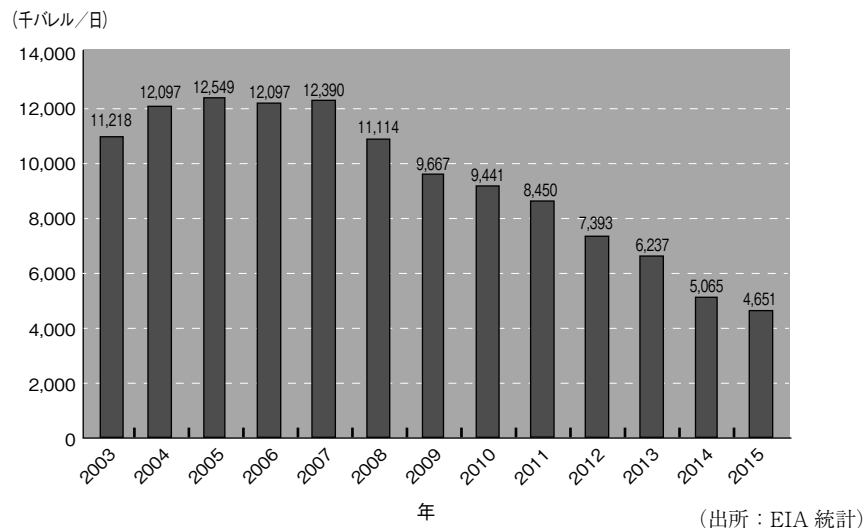


図 13 米国の石油純輸入量推移

海外からの輸入に依存していた。米国にとっては、サウジアラビアをはじめとした中東産油国の原油は、米国のエネルギー安全保障にとって、極めて重要であり、1991 年の湾岸戦争、2003 年のイラク戦争は、米国にとっては、中東産原油の安定供給を目的とした戦争と考えられていた。しかし、米国におけるシェール・オイル革命により、米国国内の原油生産量が増加し、米国は、2014 年には、サウジアラビアを抜いて、世界最大の原油生産国となった(図 14 参照)。

9. 米国の中東政策の大きな変貌

米国国内の原油生産量が増加し、米国における中東産油国からの原油輸入量が減少すると、2つの変化が生じる。

第 1 に、米国が中東産原油への依存が小さくなると、米国の議会をはじめとして、巨額の軍事費を投入して、中東地域の安全保障に米国が係わる必要があるのかという議論が出てくる。2016 年秋に行われる米国大統領選挙においても、共和党の有力候補であるトランプ氏が、TPP（環太平洋戦略的経済連携協定）

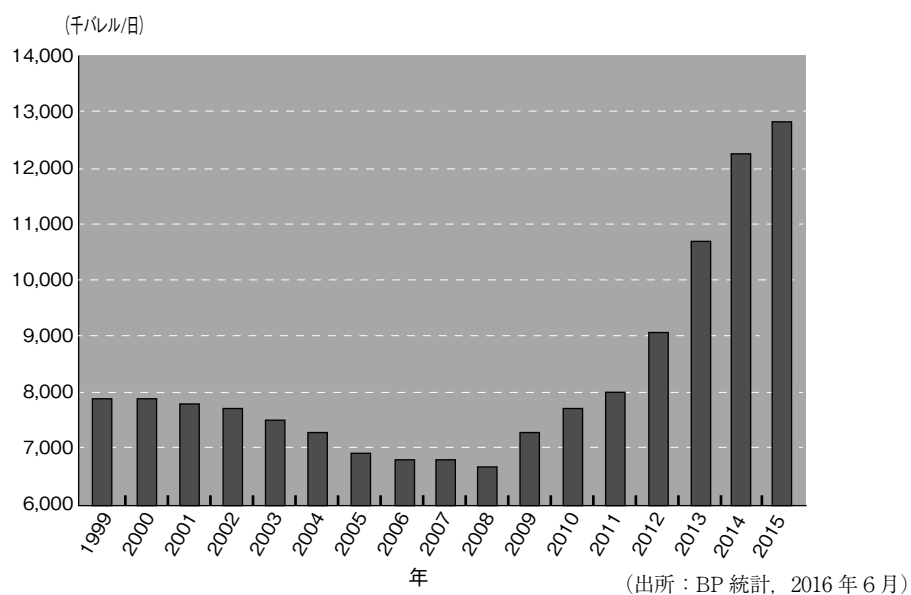


図 14 米国の原油生産量推移

に反対し、内向きな政策を主張する背景も、米国が、中東に依存せず、エネルギーの自給を達成しつつあるという自信が挙げられる。当然のことながら、中東地域の安定に対して、米国だけが、巨額の軍事費を負担し、ペルシャ湾に空母を派遣し、中東地域の安全保障に責任を負う必要はなく、中東産原油を輸入している日本も、米国の軍事力の傘にタダ乗りするのではなく、日本も応分の負担を負って、原油を輸送するシー・レーンの防衛費を負担すべきだという議論が出てくる。

第2に、米国は、もともと中東産の重質原油を、大量に輸入していたことから、米国メキシコ湾に集中する製油所は、石油精製設備のスペックが、重質原油対応となっている。ところが、シェール・オイルは、コンデンセート（粗製ガソリン）に近い軽質原油であり、米国の多くの製油所における設備にとって、オーバー・スペックであることから、シェール・オイルの生産量が増加すると、米国国内における軽質原油の需給緩和が進む。そのため、品質が優れるWTI原油価格が、品質が劣る北海ブレント原油を下回り、シェール・オイルも、軽質原油にもかかわらず、米国国内において安価で取引される。そのため、米国は、2016年7月時点にお

いても、ネット・ポジションで石油を輸入しているにもかかわらず、より割高に販売できる、欧州諸国、アジア地域に輸出する必要が出てくる。米国が、2015年12月に原油輸出を解禁したことは、余剰感があるシェール・オイルを、より高値で販売できる海外へ輸出したいという米国石油企業の要望を入れたものといえる。米国が、世界最大の原油生産国となり、米国のシェール・オイルの輸出が本格化すると、これまでの中東一極集中という国際資源地図が大きく変貌する。OPECの盟主であるサウジアラビアにとっては、米国の営利企業であるシェール・オイル生産企業が、国際原油市場におけるプレゼンスを大きくすることは、国際石油市場に大きな影響を与えてきたOPECの大産油国としての威信にかかわる。そのため、2016年5月時点においても、1,000万b/dを超える、過去最高水準の原油生産量を維持している（表3参照）。

10. シェール・ガス革命の世界の石油化学産業への影響

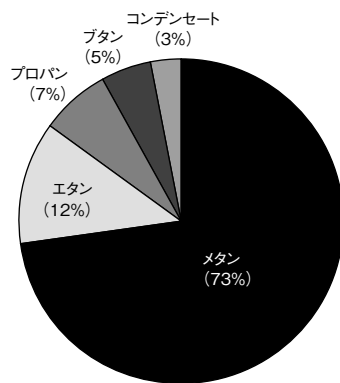
シェール・ガス革命は、世界の石油化学産業にも大きな影響を与えている。シェール・ガスには、メタンとともに、エタンが含まれ

表3 OPEC加盟国の原油生産量実績

（単位：百万バレル／日）

加盟国	目標生産量	2016年4月生産量	2016年5月生産量	生産能力	余剰生産能力
アルジェリア	1.20	1.09	1.09	1.12	0.03
アンゴラ	1.52	1.75	1.75	1.81	0.06
エクアドル	0.43	0.53	0.54	0.55	0.01
インドネシア		0.73	0.74	0.74	0.00
イラン	3.34	3.56	3.64	3.65	0.01
イラク		4.36	4.27	4.40	0.13
クウェート	2.22	2.73	2.85	2.87	0.02
リビア	1.47	0.35	0.27	0.40	0.13
ナイジェリア	1.67	1.62	1.37	1.85	0.48
カタール	0.73	0.66	0.66	0.67	0.01
サウジアラビア	8.05	10.21	10.25	12.20	1.95
UAE	2.32	2.82	2.89	2.93	0.04
ベネズエラ	1.99	2.31	2.29	2.40	0.11
OPEC 合計	30.00	32.72	32.61	35.59	2.98

（出所：EIA オイル・マーケット・レポート、2016年6月14日）



(出所：資源エネルギー庁統計)

図 15 シェール・ガスの成分

ている。特に、ウェット・ガスには、主成分のメタンに加えて、エタン、プロパン、ブタンも含まれている（図 15 参照）。

エタン（ C_2H_6 ）は、 C_2 系の化学物質であることから、基礎化学品である C_2 系のエチレン製造の原料となる。エチレンは、レジ袋等のポリエチレンの原料となる。現在の石油化学の技術においては、 C_2 系のエチレンは、エタンを原料としたエタン・クラッカー、ナフサ（粗製ガソリン）を原料としたナフサ・クラッカーから製造される。日本の石油化学企業の場合には、石油精製から製造されるナフサを原料としたナフサ・クラッカーによるエチレン製造であるものの、米国の場合には、石油と比較して、極めて安価なエタンを原料としたエタン・クラッカーによるエチレン製造が行われている。特に、シェール・ガスの生産量の増加により、エタンの生産量も増加

している。米国の場合には、低熱量のガスを利用しているため、エタンは熱量が高すぎて、パイプライン、コンプレッサーにとって、オーバー・スペックとなり、フレア（炎）として大気に廃棄していた。そうしたタダ当然のエタンを原料として、エチレンが、大量に製造できることとなった。これまで、人件費が割高な米国において、製造業の復活は不可能であると考えられてきた。しかし、シェール・ガスを原料としたエチレン・プラント新設計画が、相次いでいる（表 4 参照）。

2016 年 7 月時点において、原油価格が下落したといっても、50 ドル／バレル程度に対して、米国の天然ガス価格は、2 ドル／百万 Btu（石油換算 12 ドル／バレル）と、エタンは、ナフサに対して、圧倒的なコスト競争力を持っている。そのため、汎用品の石油化学製品に関しては、ナフサを原料とした石油化学製品は、エタンを原料とした石油化学製品との価格競争に勝つことは難しいといえる。米国のテキサス州は、シェール・ガスの集積地であり、エタンが安価に手に入る。日本の信越化学は、米国のシェール・ガスを原料に、安価なエチレンを製造し、岩塩による塩素を混ぜて、塩化ビニールを製造し、米国の子会社であるシンテックが、大きな利益を挙げている。米国のテキサス州は、原料であるエタンが、豊かつ安価に手に入り、電気料金も、日本の半分程度であり、製造プロセスのコストを低減できる。さらに、塩化ビニールは、水道管、

表 4 米国のエチレン・プラント新設計画

企業名	エチレン年間生産能力（万トン）	場 所	稼働年
ダウ・ケミカル	150	テキサス州	2016
エクソンモービル	150	テキサス州	2017
シェブロン	150	テキサス州	2017
Formosa（台湾）	115	テキサス州	2017
信越化学	50	ルイジアナ州	2018
サソール	150	ルイジアナ州	2018
オキシデンタル	55	テキサス州	2018
ロッテ化学	100	ルイジアナ州	2018
ロイヤル・ダッチ・シェル	150	ペンシルバニア州	2017

(出所：各種新聞報道)

表5 石油化学産業の統合・再編

年 月	概 要	金額 (億ドル)
2015 年 12 月	ダウとデュポンの経営統合合意	685
2016 年 2 月	中国化工集団がシンジェンタ買収	467
2016 年 5 月	バイエルがモンサントの買収交渉	620

(出所：各種新聞報道)

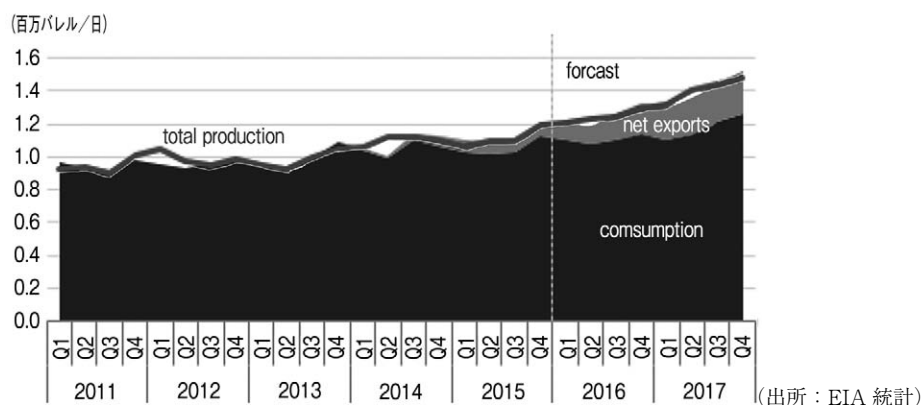


図16 米国のエタン輸出見通し

建材の材料となることから、米国、メキシコ等の住宅市場という巨大な市場が近くにある。テキサス州から、メキシコにかけて、石油化学製品輸送用の鉄道網も整備されている。つまり、シェール・ガス革命により、安価な原料、割安な電気料金、巨大な販売市場、というすべての要素が揃ってきたこととなる。さらに、米国、メキシコにおいては、自動車生産も好調であることから、内装品としての石油化学製品需要も伸びている。シェール・ガス革命は、世界の石油化学産業のM&A（合併・買収）にも大きな影響を与えている（表5参照）。

米国の場合には、エタンが豊富に生産されるようになったことから、エタンの欧州諸国への輸出拡大も見込まれている（図16参照）。

欧州諸国の石油化学は、ナフサが中心の原料であるものの、ブタンを原料とした基礎化学品であるC₃系のプロピレンの生産も行っている。今後は、シェール・ガスに伴う、米国の安価なエタン、ブタンを輸入して、価格競争力を持った石油化学製品の製造に注力することが期待される。米国は、今後もエチレン生産能力の増強を目指している。現時点

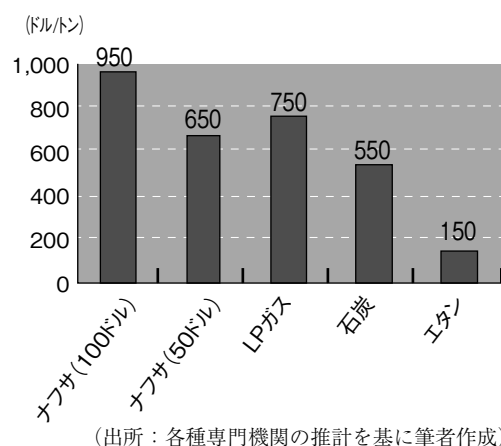


図17 原料別エチレン製造コスト

における米国の天然ガス価格、中東産油国における原油生産に伴う天然ガス価格をもととすれば、ナフサを原料としたエチレンと比較して、圧倒的に安価なエチレンを、製造することが可能といえる（図17参照）。今後は、価格競争が熾烈化する汎用石油化学品と、付加価値が高く、ナフサを原料としなければ製造できない、電子機器等に用いられる機能性化学品（Engineering Plastic）との分化が、一段と進むことが見込まれる。

11. まとめ

米国におけるシェール・ガス革命、シェール・オイル革命は、第1に、シェール・ガス革命に伴う原油価格の下落により、日本、米国をはじめとした先進国の交易条件を改善し、貿易収支、経常収支の黒字額の増加をもたらす。

第2に、世界最大の消費市場である米国経済の成長率上昇から、自動車販売台数が増加し、特に、価格が高く、利幅が大きい、5,000～6,000CCクラスの大型車の販売が好調であることから、日本の自動車企業および関連の部品メーカーへの景気波及効果が生まれている。米国におけるエネルギー・コストの低下に伴う、可処分所得の増加から、米国の自動車販売台数は、2015年に1,747万台と、過去最高を記録している（図18参照）。

第3に、米国経済と米国のエネルギー安全保障が、中東の地政学リスクに振り回される

可能性が小さくなっていることから、国際資源地図の変貌に伴う、米国の中東への軍事費負担を小さくし、米国の財政赤字の縮小につながる可能性が大きくなっている。米国の財政赤字の削減は、米国経済の信認、米国ドルの価値向上にもつながる好循環をもたらす。

その反面、シェール・ガス革命によって、予想を超えた原油価格の下落によって、第1に中東産油国のみならず、ブラジル、豪州をはじめとした資源国の経済への打撃がもたらされている。20世紀の世界経済においては、先進国における経済状況の改善＝世界経済の発展、という簡単な構図であったものの、21世紀に入り、先進国のみならず、資源国をはじめとした新興国の世界経済におけるプレゼンスが大きくなり（図19参照）、原油価格の下落に伴う、新興国の景気低迷が、世界経済への打撃を与えるようになっている。そのため、原油価格をはじめとした資源エネルギー

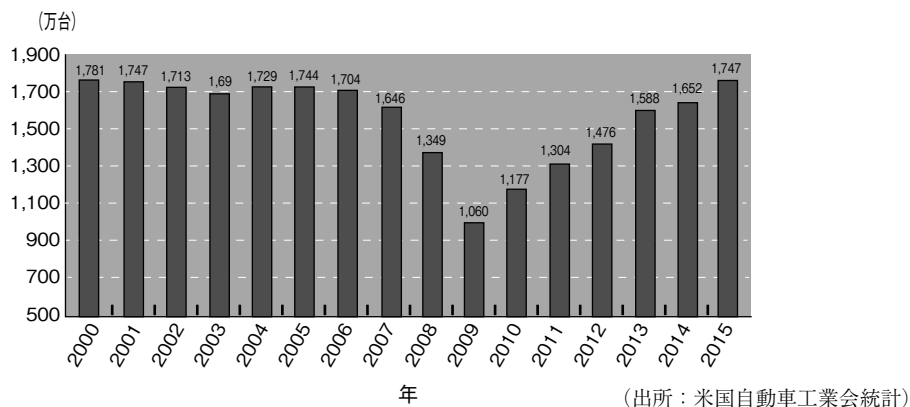


図18 米国の自動車販売台数推移

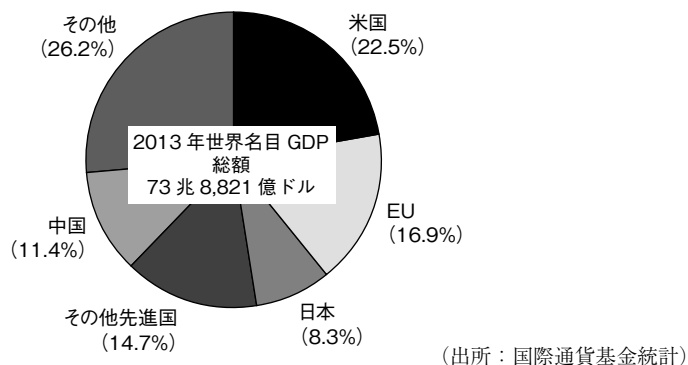


図19 世界の名目 GDP 割合 (2013年)

価格の下落に伴うマイナスの側面に注視する必要がある。

第2に中東地域に対する米国の関心の低下に伴って、その間隙を突くように、イスラム教スンニー派原理主義組織であるイスラム国(IS)が台頭し、中東・アフリカ諸国にとっての、新たな地政学リスク要因となったことである。シェール・ガス革命による、中東のプレゼンス低下は、同時に、米国の中東への関心低下につながり、米国による軍事的影響力の低下が、逆に中東・アフリカ諸国の混迷をもたらし、それが、結果として、欧米先進国への難民の流入、同時多発テロの勃発による、先進国経済における社会情勢の不安定化をもたらすという皮肉な結果も生み出している。もちろん、マクロ経済学的には、シェール・ガス革命は、エネルギー・コストの低下というプラスの面を持っているものの、同時に新たな中東・アフリカ諸国における地政学リスクの強まり、資源国経済の成長率の鈍化による、世界経済と国際金融市場への影響に留意する必要があるのである。

[寄稿]

地熱・地中熱の利用技術 ～見えない地下の見える化を目指して～

安川 香澄 (国立研究開発法人 産業技術総合研究所
再生可能エネルギー研究センター 総括研究主幹)



1. はじめに

のっけから私事で恐縮だが、この正月明け、激しい腰の痛みで整形外科医院へ駆け込んだ。その数日前から、階段や歩道で急に足首の力が抜けて転びそうな感覚に襲われ、しかし、実際は踏み外すことはなく、どうも神経がおかしいと感じていたところだった。

腰のレントゲン画像を撮ると、腰椎の間隔が狭くなっている部分が見つかり、椎間板ヘルニアの可能性も十分あったようだ。だが、椎間板ヘルニアに特徴的な、体の曲げ伸ばしや脚の可動域の制約は無く、神経ブロックの注射をしても痛みが緩和しなかったので、整形外科の先生は他の病気を疑っていた。それで、大病院に予約を入れてMRI (Magnetic Resonance Imaging: 磁気共鳴断層撮影) を撮った。MRI 画像では、脊椎 (腰椎) 中に異物があり、それが神経の束「硬膜」を圧迫している。これが激痛の原因だ。「異物って何ですか?」と恐る恐る訊ねると、「腫瘍とか。…硬膜外腫瘍の可能性ががあります」という先生の返事。

異物の正体を調べるため、今度は造影剤を注射して、造影MRIを撮ることになった。ネットで調べると、「硬膜外腫瘍は、ほとんどが悪性」。こんな時に限って大病院が込み合い、予約を入れてから造影MRIの結果が出るまで計3週間以上かかってしまった。その間ずっと、悶々と日を送る羽目となった。

2. 医療用可視化検査技術と地下探査の相違点

MRIは、核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance) という現象、すなわち磁場をあてると体内の水素原子が一斉に同じ方向を向き、その際に水素原子核から弱電流が流れる性質を利用して、体内の水分等の分布を画像化するものだ。体を筒のような装置に入れて固定し、360度全方向から信号を照射して縦横のスライス画像を得る点は、CT (Computer Tomography: コンピューター断層撮影) と同じである。ただしCTはX線を使うのに対し、MRIは磁場を使うので被ばくのリスクは無い。同じX線を用いるレントゲンでは1回の被ばくで済む代わりに、一方向の情報しか得られない。

画像を得る医療検査としては、この他に超音波を使ったエコー検査や、陽電子を使ったPET (Positron Emission Tomography: 陽電子放射断層撮影) などがあり、見たい対象とリスクやコストに応じて使い分けている。この考え方は、地下探査とよく似ており、地下探査でも対象に応じて音波 (弾性波) や電磁波等を使い分け、場合によっては組み合わせて利用している。

筆者は、地面の自然の電位分布を測定して、地下の天然熱水だまりである「地熱貯留層」の中の水の流れを調べる研究を専門としている。要は、地下の岩石中を水が流れると弱い

電流が発生し、岩質や水の流れが変わる場所では電流量が変化することを利用して、地表で電位を調べることによって、地下の構造や水の流れを推定するということだ。

これは自然電位法と呼ばれる探査手法で、図1に、その仕組みを示す。地下の岩石の個々の粒子中では分極が発生し、粒子表面が正（または負）に帯電している。このため、岩石の隙間を水が流れると、水分子の負イオン（または正イオン）が岩石表面に引き付けられ、残る正イオン（または負イオン）だけが流れ、電流が発生する。岩石の物性境界では電流量が変化するので、正（または負）のイオンが蓄積されている。そのため地表で電位を測定すると、地下の境界の位置や水の流量を推定できる。

自然電位法では、利用する物理現象はMRIと異なるが、電流を捉えることで見えない内部を可視化する点は共通している。ただし、解像度は全く比べ物にならない。

整形外科の先生から、MRI画像を見せられた筆者は、その解像度の高さに目を見張った。縦スライスと横スライスで、脊椎とその周辺が良く映っている。横スライス、つまり胴体の輪切りでは、脊椎の中に神経の束が通っているのがはっきりと見える。硬膜の中に神経がポツポツと1つずつ丸く映っているさまは、RS232Cのコネクタにピンが並んでいる様子とまるでそっくりだ。データロガーなどの計測機器からパソコンへの接続に、以前はよくRS232Cコネクタを使ったものである。よく考えれば神経は電気信号だから、電線と似ていても不思議ではないが。

さて、解像度が違うのは、筆者たち地熱研

究者がサボっていて医療技術に追いつかないためではない。信号とセンサの配置に大きな違いがあるからだ。

医療用MRIでは、体に対して360度全方向から照射し、さらに上下にも移動して3次的に測定できるので、3次的に明確な画像が得られる。しかも、体内の構造は予め解っているから、画像が示すものを容易に理解できる。

ところが、地下に対する測定では、基本的に一方向、地表からしか照射も測定もできない。対象物の反対側にセンサを置けないことは、大きなハンディである。既に深井戸が複数ある場所では、その間で信号を捉える方法もあるにはあるが、そういう場所は稀だし、複数といっても2坑井間の2次元的な画像しか捉えられない。さらに地熱探査の場合は、火山地域などの山林や深い藪で足場が悪いことが多いので、測定機器の設置もままならず、必ずしも理想的な位置に測点を設けられない。また利用するのが電磁波に地震波にしろ、解像度が高くなる高周波数の波はすぐ減衰してしまうので、遠くの井戸や地下深くまでは透過しない。数キロ深の地熱貯留層を捉えようとすると、解像度はどうしても低くなる。

さらに地熱探査のハンディは、熱水や蒸気が貯まっている「地熱貯留層」がどんな形状か解らない点である。貯留層という名前の水平な地層が広がっている訳ではない。「地熱貯留槽」と表記する場合もあるが、浴槽かタンクのようなものが地下にある訳でもない。地下の「亀裂」、断層や地下応力によって岩盤に亀裂が走って隙間ができた部分、そういった複数の亀裂が繋がった部分を熱水が対流している、そんな部分が「地熱貯留層」である。

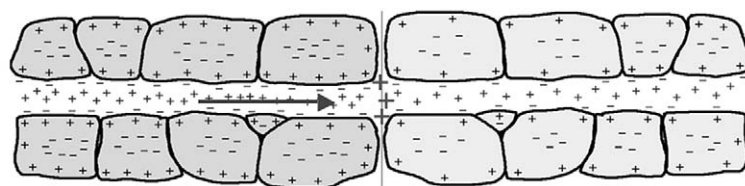


図1 自然電位法による地下の流動探査の仕組み

いくつかの大きな断層に沿って貯留層が発達している場合もあれば、もっと小さな亀裂のネットワークという場合もあり、不定形なのである。カルデラ壁に沿って亀裂と貯留層があると思いきや、それは一部だけでカルデラの反対側には何もない場合が多い。地形等の状況から、もっと先まで貯留層が広がっているように見えても、地下では硬い貫入岩（マグマが地表近くまで上昇してきて冷えてできた岩石）に遮られて貯留層が切れていることもある。人間の骨格や臓器の位置が決まっているのとは大違いである。

この点は、石油・ガス層と地熱貯留層との大きな違いでもある。油層は通常、砂岩などの堆積岩、つまり「地層」という言葉から受ける印象通りの、水平に積もった地層である。図2で示すように、その地層が少し上向きに凸となっている場所に、石油やガスが貯まっている。あるいは、断層によって流動が遮られた場所に、石油やガスが貯まっている。基本的に水平な地層だから、地表から弾性波を送り、その反射波を捉えて解析すれば、地下構造がわかる。これは医療用のエコー検査とほぼ同じ仕組みである。こういう地下構造なら、対象物の反対側にセンサを置けない点はハンディとならない。堆積岩からなる地域は主として平野部なので、地形も平らであり、火山地域のように探査機器の設置に不自由することもない。また水平かどうかに関わらず、構造（骨格）がほぼ既知である

点も探査上の大きなメリットで、医療の場合と似ている。そのため、石油探査の分野では、弾性波反射法という手法が大いに利用され、技術改良が進んでいった。

もう1つ、石油や医療と比べて、地熱が異なっている点がある。それは、石油探査や医療機器では、可視化技術にどんなに費用がかかっても、それを払うだけの価値があるということだ。石油の場合は商品価値、医療の場合は人の命である。もちろん実際は、費用対効果は十分考慮されているはずだが、かなりのコストをかけても成り立つ。一方、地熱は、「ライフサイクルCO₂排出量が極めて少なく、利用率が極めて高い再生可能エネルギー電源」という素晴らしい特徴を持ちながら、電源としてのコスト競争力を保つためには探査にさほど費用をかけられないという制約があり、比較的安価で効果的な手法を組み合わせざるを得ない。

弾性波反射法は、探査のための大型機器や現場の労力、高度な解析技術のために、コストが高いが、石油探査では高い効果を出すため大いに利用され、発達してきた。ところが図3のように、色々な方向を向いた亀裂の集合体である地熱貯留層は、明瞭な反射面を持たないから、反射法は一般的にはあまり役立たない。しかも山がちの地熱地域で林道しか無いような場所には、反射法の機材を持ち込むのがほぼ不可能である。このような事情で、

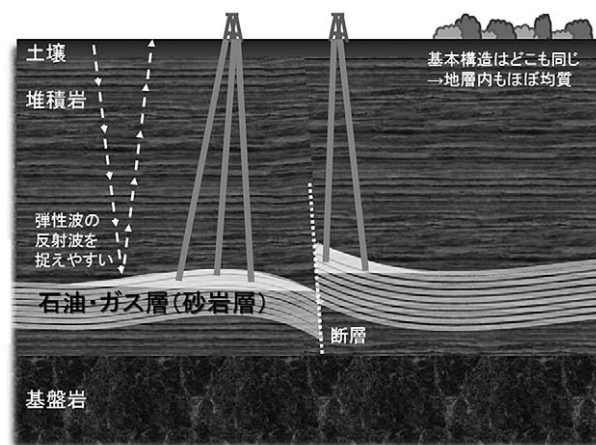
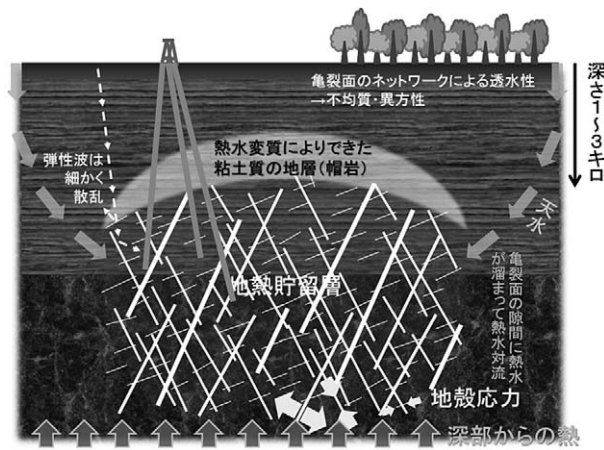


図2 石油・ガスの地層（ほぼ水平な堆積岩で形成）



※イタリアのラルデレロでは反射面が貯留層深度を反映しており、反射法が活用されてきた。これは特例である。

図3 地熱貯留層（明瞭な地層ではなく亀裂の集合）

地熱探査では、反射法はほとんど利用されてこなかった。

世界的に、地熱探査に一般的に用いられるのは、電磁波を利用して地下の比抵抗（電気比抵抗）構造を調べる MT（Magnitotelluric Method：マグネトテルリック法）である。岩石の比抵抗は、温度が高ければ低くなり、水分を多く含むと低くなるので、熱水が貯まって温度の高い地熱貯留層では、比抵抗が低くなると予想され、技術が発達してきた。ただし実際に測定してみると、地熱貯留層を覆うように熱水変質してできた粘土質の「帽岩」のほうが地熱貯留層よりはるかに比抵抗が低い（粘土が水を多く含むため）。そのため、比

抵抗が極端に低く帽子のような形をした部分を探せば、その下が貯留層と考えられるようになった。図4では、上部で色が濃くなっていく部分が帽岩、その下が貯留層である。

太陽磁場の変化（オーロラを起こす現象）を信号源とする MT 法は、非常に波長の長い波を利用できるため可探深度が深く、10 キロ深程度までの情報を得ることができる。そのため、数キロ深をターゲットとする地熱貯留層の探査に適している。ただしもちろん、深くなるほど解像度は低くなる。人工の信号源を使って同様の計測を行う場合もあり、こちらは波長が短いため、浅い部分を精度よく調べるのに適している。

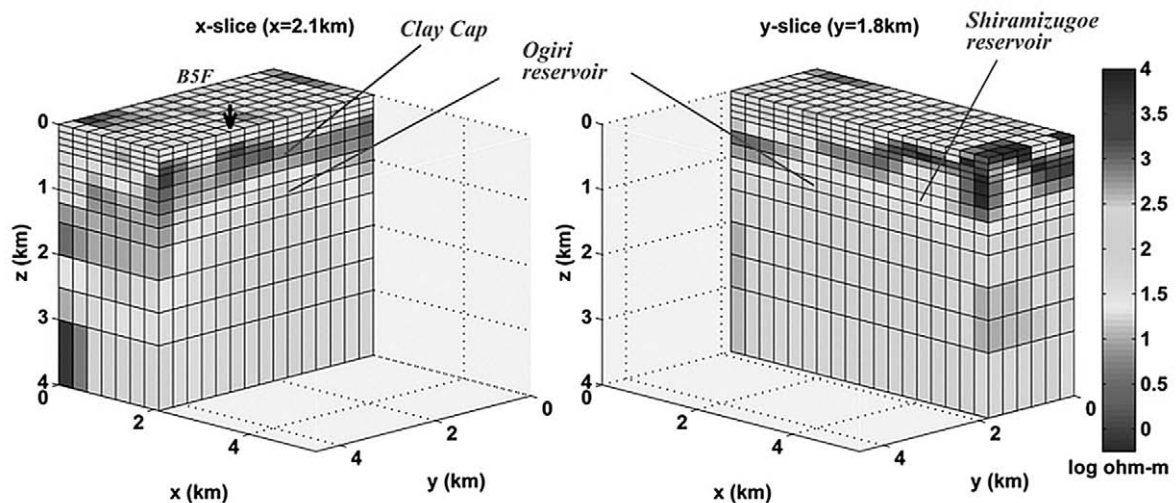


図4 大霧地熱地域の三次元 MT 法による比抵抗モデル（0.070 ～ 72Hz）⁽¹⁾

表 1 可視化のための手法の比較（一般的な場合）

	医療用可視化検査	石油探査	地熱探査
信号とセンサの位置関係	対象物の両側に信号とセンサを配置でき、360度方向で調べられる。	地表から地表へ、または2坑井間のみ	地表から地表へ、または2坑井間のみ
センサ配置上の制約	理想的な位置に設置できる。	ほぼ理想的な位置に配置できる。	足場の制約があり設置箇所は限られる。
対象物の形状	既知	ほぼ既知	未知
費用対効果	かなり高コストでも成り立つ（石油製品）	かなり高コストでも成り立つ（人命）	コストはかけられない（発電コスト競争）
よく使われる手法 (信号源)	▷レントゲン(X線) ▷CT(X線) ▷MRI(電磁波) ▷PET(陽電子) ▷エコー(超音波) (いずれも人工信号)	▷弾性波反射法(音波) ほか (人工信号)	▷マグネテルリック(MT)法 (電磁波) ▷重力探査(重力) ▷微小地震観測 ほか (いずれも自然信号) ※電磁波については人工信号による手法も使われる。

表 1 にも整理したが、可視化のための手法として紹介した以上の探査法は、全て地下の物理的性質を利用しており、「物理探査」と呼ばれる。

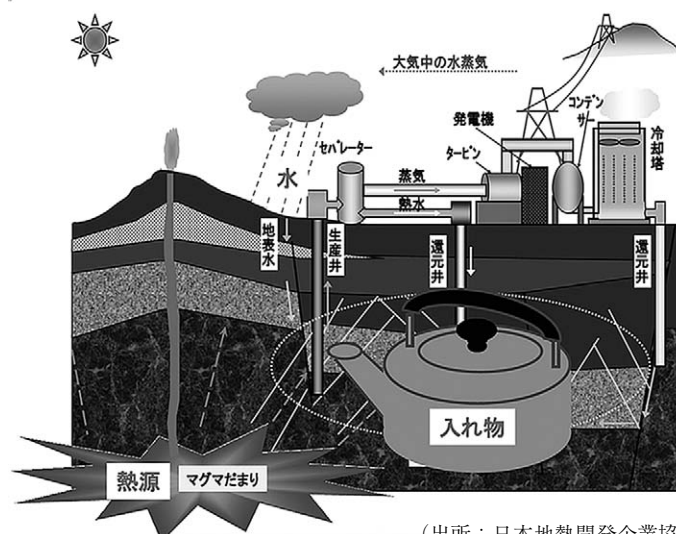
3. 地熱の 3 要素と地熱探査の順序

ここまで地熱と石油の違いを述べてきたが、石油分野で急成長を遂げた反射法の解析技術が極めて高くなり、必ずしも水平でない構造をつかめるようになったため、近年では国内の地熱地域で新たに反射法探査を試みたり、過去の反射法データを再解析した結果、地熱探査に役立つ情報が得られた例もある。逆に、

地熱分野で発達した亀裂の探査手法が、シェールガスの探査に応用されている。

それでもなお、地熱が石油と決定的に違う点がある。それは、図 5 に示した地熱の 3 要素と呼ばれる、熱、水、入れ物である。この 3 条件が揃わなければ地熱貯留層と言えない。ここまでは地下の構造、つまり入れ物の話しかしていなかったが、熱源と水がなければ、地熱貯留層は成り立たない。本章では、可視化とは直接つながらないものの、地熱調査に欠かせない地質調査と地化学調査について紹介する。

地熱調査では、まず地表の地質調査を行い、熱水変質帯と呼ばれる熱水変質鉱物を含む岩石（粘土化した白っぽくて脆い岩石）の分布



（出所：日本地熱開発企業協議会の資料を基に作成）

図 5 地熱の 3 要素：熱源（マグマだまり）、入れ物（岩石亀裂からなる地熱貯留層）、水（水の存在と浸透率）

を調べる。近くに地熱貯留層がありそうかどうか、それはどの辺まで広がっているのか、地表で解る範囲を調べるわけである。また火山岩を採取して、岩石の年齢を調べる。 C^{14} と呼ばれる炭素の放射性同位体の量を測定すると、 C^{14} の半減期との比較から、その岩石ができた年代を調べることができる。この年代測定は、地熱発電に使える地熱貯留層がありそうかどうかを推定するうえで、非常に重要である。というのは、火山の近くに地熱貯留層が存在するのは、最後の噴火から少なくとも数万年たっている場合だからであり、経験的に4万年～10万年くらいの範囲が良いとされる。数値シミュレーションで地下が冷たい状態を初期状態とし、深部に熱源を置いてから熱水対流系が発達して定常状態になるまでの期間を計算すると、約2、3万年かかることから、この年代の正当性は説明できる。従って、活火山の直近には地熱貯留層が存在しない。なぜなら、活火山の定義は「最後の噴火から1万年以内の火山」であり、熱水対流系が発達する時間がいないためである。以上のように、地質調査は、熱・水・入れ物の3条件が揃っている可能性を調べる調査である。

これらの地質調査は、医療において、発疹の出ている範囲を目視で確認したり、疑わしい部位の細胞組織をとって分析し、病気の可能性を調べたりするのと似ている。

地質調査の結果として、地熱貯留層の存在可能性とおよその存在範囲が特定されると、次に、貯留層温度を推定する地化学調査が行われる。

地質学的には同様な構造の断層が並んでいても、熱源との位置関係や地形により、この断層は地下深部からの熱水の上昇域、あちらの断層は冷たい天水の下降域、となっていて貯留層として繋がっていない場合もある。このように地熱地域で断層が地表に達している場合、その場所で火山性ガスの検出を行うと、熱水（火山性ガスを含む）の上昇域か否かが確認できることがある。また、近くの河川水

や温泉水を採取して化学分析を行い、成分比から地下の貯留層の温度を推定する「地化学温度計」という方法がある。このように、現場で採取した水やガスの化学分析を行って調べる方法を、「地化学探査」と呼ぶ。地化学探査では、地下の正確な位置の特定はできないが、付近の地下に高温域があるのか無いのか、ある場合にはその温度がどの程度であるか、調べることができる。

地化学探査は、医療で言えば、血液検査や尿検査で病気の有無を調べ、どんな病気の可能性があるのか診断するのと似ている。

次に、「入れ物」の場所を特定する物理探査（主としてMT法）が行われる。

最後に残った「水」という要素は、探査においては最後の段階で確認される。日本ではどの地域でも天水が浸透しているので、「水の存在」については探す必要がない。ただし長期に渡って熱水を生産して地熱発電を行う予定なら、地下の「透水性」が重要な問題となる。地質調査、地化学調査、物理探査と段階を追って地熱貯留層の範囲が絞られた後、探査井の掘削を行い、熱水の生産性を調査して透水性を確認する。

ここまでが一般的な地熱探査の手順だが、坑井を掘っても必ずしも熱水に当たらず、その成功率は探査井の段階では3割程度と言われる。数キロ深の井戸を掘削するには数億円単位の費用がかかるため、坑井の成功率を上げること、つまり探査の精度をあげることが、地熱発電の発電コスト削減に直接かわってくる。このため、既に一般的に行われているMT法の他に、さまざまな探査法が開発されている。

もう1つ重要なことは、生産井と還元井が掘削され、地熱発電所が運開した時点でも、まだ貯留層の全体像が把握できたわけではなく、生産・還元を長期間続ける中で得られたデータを元に、貯留層のモデルを精緻化していく必要があるということである。それと同時に、長年の生産・還元に伴って、貯留層圧

力をはじめ、貯留層内の状況が変化していくので、それをモニタリングして適切な対処をしていく必要がある。井戸周りの各種トラブルや、貯留層の圧力減衰や注水による局所的な冷却など、迅速に対応しなければならない問題も多々発生する。したがって、井戸や貯留層の日頃の健康管理をしてくれる主治医が必要なのである。

モニタリング手法としての必須項目は、生産井から生産される流体の温度や化学成分の変化、生産井の圧力変化など井戸周りの項目となるが、より広域的な貯留層挙動を調べるためには、MT法や重力調査などの繰り返し測定など、探査手法として用いられる手法を応用している。ただし、重力調査は探査段階では構造を調べる目的で行われるが、モニタリング手法としては、貯留層内の質量変化を調べる目的で行われる。MT法も、モニタリング時には初期状態からの比抵抗変化を調べるのが目的である。

4. 産総研の地熱チームによる可視化技術

産業技術総合研究所（産総研）再生可能エネルギー研究センター 地熱チーム（チーム長：浅沼 宏）では、地熱開発・利用に関連したさまざまな技術の開発を行っている。中でも、MEMS（Micro Electro-Mechanical Systems：微小電気機械システム）、光ファイバ等を利用

した地熱モニタリング用センシングシステムの開発、多元非定常信号処理、統合解釈法等の高度解析技術の導出により、貯留層内で生じている現象の理解と可視化を目指している。

前章までに紹介した探査手法では、実際に水が移動している亀裂の位置を特定できるものは無いが、水の移動に伴って亀裂の微小な滑り現象が発生する場合には、滑り現象に伴って発生する音波を検知することで、発生源である亀裂の位置を調べることができる。音波は微小な地震波として検知されるので、微小地震探査と呼ばれている。

センサである地震計の設置個所を増やし、できれば坑内など地下にもセンサを設置することが探査精度（亀裂の位置特定の精度）につながるが、地熱開発地域は、山中などアクセスが悪い場所が多いため、従来の重い地震計では、測点数を増やすことができない。また坑内での測定には、非常に小型のセンサでないと挿入できない。そこで、MEMS、光ファイバ等を利用した小型で軽量のセンサや、それを使ったセンシングシステムを世界に先駆けて開発し、精度の高い測定と解析を目指している。

図6に、地熱井用坑井内3成分地震計を示す。地熱貯留層内外で発生する非常に微小な地震動を坑井内で高感度に検出可能な装置である。図7には、光MEMSセンサ多重化計測装置を示す。一本の光ファイバに多数の光MEMSセンサを取り付け、多点での地震動計



（出所：産総研 再生可能エネルギー研究センター
パンフレット）

図6 地熱井用坑井内3成分地震計



（出所：産総研 再生可能エネルギー研究センター
パンフレット）

図7 光MEMSセンサ多重化計測装置

測を可能にする装置である。

前述の通り、貯留層内で生じている現象を理解し、適切な対処を行うには、高精度なリアルタイムモニタリングが欠かせない。そこで、地熱チームでは、高密度微小地震遠隔モニタリングネットワークを開発している。

2015年度から、福島県柳津西山地熱発電所（東北電力㈱）に蒸気供給している奥会津地熱株式会社では、蒸気生産量減衰防止・生産量回復のための涵養注水試験を実施している。地熱チームでは、本地域に地熱井用坑井内3成分地

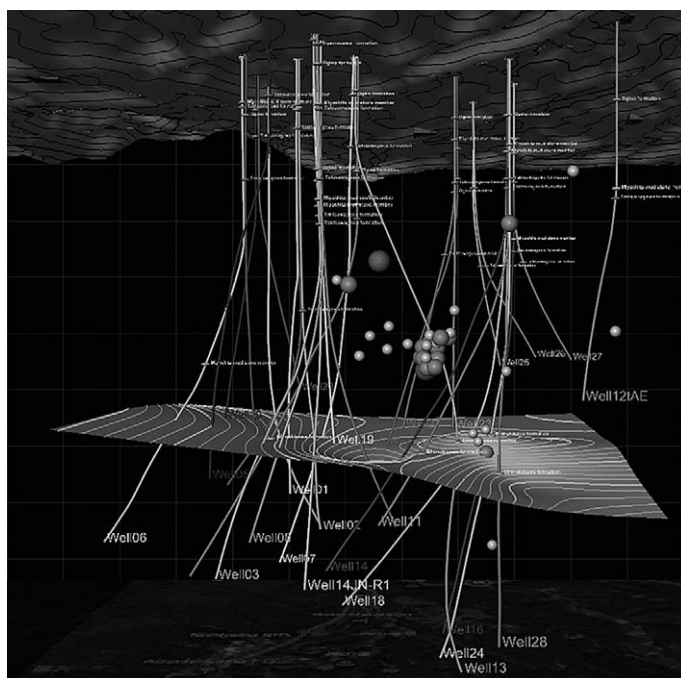
震計等を使用した高密度微小地震遠隔モニタリングネットワークを設置し、運用を開始した。

図8は坑井内3成分地震計の設置状況、図9は可視化システムである。図9の丸印が微小地震の震源分布を示しており、微小地震が水の通り道で発生している状況が見てとれる。なお中央のコンターはその深度での等温線、上のコンターは、地表面の標高を示している。これにより、微小地震活動の遠隔リアルタイムモニタリング、高度統合解析を行うことが可能となってきた。これを利用して、適切な



（出所：産総研 再生可能エネルギー研究センターパンフレット）

図8 地熱井用坑井内3成分地震計の設置状況（ソーラーパネルはシステムの電源）



（出所：産総研 再生可能エネルギー研究センターパンフレット）

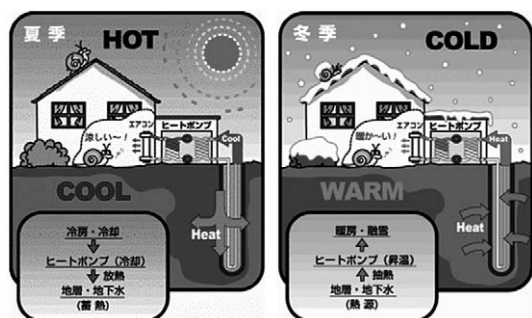
図9 微小地震情報統合可視化システム（注水した水の挙動のモニタリング）

注水による生産量の回復に寄与する計画となっている。

5. 地中熱利用システムとポテンシャルマップ

次に、地中熱利用とその可視化について述べる。地中熱利用は、地表と地下の温度差を利用して、地下と熱交換を行うことにより、冷暖房や給湯、融雪などを効率よく行う方法である。ヒートポンプを組み合わせることにより、より多くの採熱ができ、利用側の温度を自由に設定できるため、「地中熱ヒートポンプ (Ground Source Heat Pump)」として使われることが多い。もともとは欧米の比較的冷涼な地域で、暖房用の温熱源として地下を利用したのが始まりなので「地熱ヒートポンプ (Geothermal Heat Pump)」と呼ばれていたが、冷熱源として利用することもあり、また地熱発電と区別する目的から、「地中熱ヒートポンプ」という呼称が定着してきた。

さて本章では、地熱地帯ではなく、大都市の多い平野部など、普通の地下温度の場所を対象として地下温度の説明をする。図 10 に示すように、こういった地域の地下 10～100m 深程度の「地中の温度」は年間を通してほぼ 15～20℃ 程度で一定しているので、外気にくらべて夏は涼しく、冬は暖かい。この温度差を利用して、地下を熱源としたヒートポンプを使うのが地中熱ヒートポンプである。

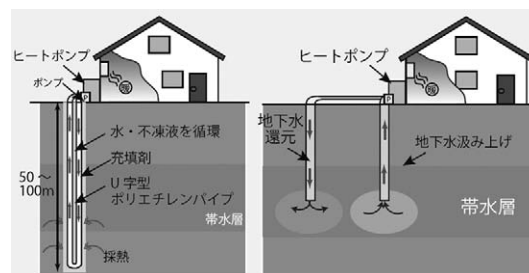


(出所：産総研 再生可能エネルギー研究センター
パンフレット)

図 10 地中熱利用の仕組み

地中熱利用の第一の特徴は、省エネ・節電である。また化石燃料からの置き換えで CO₂ 排出削減にもなり、都市部ではヒートアイランド現象の対策として非常に有効である。なぜなら、夏も大気に熱放出しないので、真夏の電力のピークカットに非常に効果的なのである。さらに、非常に寒冷な地域では、普通のエアコンを使おうとするとデフロスト運転ばかりになってしまっていて実際暖房に使えないという問題があるが、地中熱ヒートポンプではデフロスト運転は不要なので、真冬もずっと使い続けることができ、化石燃料からの置き換えが可能である。

これだけメリットの多い地中熱ヒートポンプだが、日本は欧米諸国に比べて導入が遅れている。最大の理由は、1970 年代の第一次オイルショックの際、日本では代替電力だけを考えたことであろう。欧米の一部では、地中熱の研究開発が 70 年代から始まり、80 年代には普及していき、2000 年以降はその他の地域でも急速に普及していった。日本でも 2000 年頃から普及活動が開始されたが、初期の段階では知名度の低さが最も大きな障害となり、なかなか普及が進まなかった。量産できないため導入コストが高いこと、空気熱源エアコンの普及率が諸外国より格段に進んでいたことも、普及の遅れの原因である。地下の温度・水理情報の整備ができていないため、どうしても地下の採熱設備がオーバースペック気味になる点も、コスト高の原因となっていた。



〈クローズド・ループ方式〉 〈オープン・ループ方式〉

(出所：産総研 再生可能エネルギー研究センター
パンフレット)

図 11 地中熱ヒートポンプシステムの 2 方式

地中熱ヒートポンプシステムには、色々なバリエーションがあるが、図 11 に示すように、最も大きく分けると「クローズド・ループ」と「オープン・ループ」の2つの方式がある。

クローズド・ループでは、地下に穴を掘り、この穴の中にU字管というチューブを挿入する。そのチューブの中に、水や不凍液といった媒体を循環させることで、地下と直接熱交換を行う。この地下部分を地中熱交換器と呼ぶ。夏季には、地上で冷房からの排熱により温まった媒体が地下で冷えて戻ってくる、それを再び冷房に利用するという方式である。この方式は地下と熱交換をするので、揚水規制などを受けずに基本的にどこでも利用可能である。ただし場所により、熱交換率、地下の地質構造、土壌の構造などによって熱交換率が違ってくる。

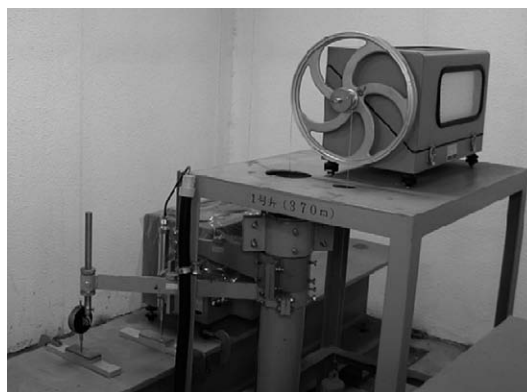
オープン・ループでは、帯水層という地下水が流れている地層に井戸を掘って水を汲み上げ、その水に対して採排熱するもので、使った水は帯水層に還元する。この場合には揚水規制のある地域では利用できない（実際は地下に水を戻すのだが、それに関係なく揚水が禁止されている）。また、帯水層が浅いところになればコスト高となるし、最低限でも2つの井戸が必要なために、小型システムでは割高となる。ただし、地下水の熱を直接利用するため、熱交換効率はオープン・ループの方が高い。従って運転コストが低く、条件さえ揃っていれば大規模な開発には向いている。

このように、オープン・ループとクローズド・ループでは、適した地下水理条件が違ってくるので、産総研の地中熱チーム（チーム長：内田洋平）では、それぞれの方式について地下条件をコンパイルし、地中熱利用の「ポテンシャル・マップ」を作成している。もちろん、クローズド・ループはどこでも利用可能だが、地下との熱交換条件が良く、より経済的に熱交換できる場所を「適地」とした地図を作っている。その手順を以下に紹介する。

地下水流動の状態を知るには、地下の温度分布を地下水流動のトレーサーとして扱い、数値シミュレーションとのマッチングにより、流動モデルを構築する。そのために、まず現場の調査を行う。現場では、地盤沈下対策用の観測井を利用して鉛直方向の温度プロファイル調べ、1つの盆地や平野について何カ所も測定することで、3次元的な温度分布を調べていく。

図 12 は、温度プロファイルを得るのに使う井戸の例である。地下の温度プロファイルを得るには、このような観測用の井戸か、現在使っていない井戸を利用する必要がある。揚水用に使用している井では、井戸の中の温度が擾乱され、地下の温度を正しく反映していないからである。国内の多くの盆地や平野では、都道府県等が設置した地盤沈下対策用の観測井があり、これを地下の温度測定用に利用している。

図 13 に、タイのチャオプラヤ平野内の2地域で得られた、複数の井戸の温度プロファイルを示す。縦軸は深度、横軸の温度を示し、



(出所：産総研 再生可能エネルギー研究センターパンフレット)

図 12 地盤沈下対策用観測井の例

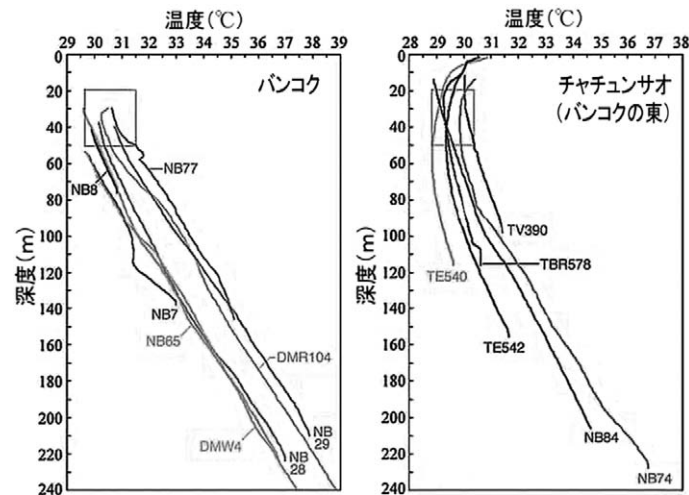


図 13 タイのチャオプラヤ平野内の2地点で測定された温度プロファイル (2)

いずれも左右の図は同じスケールで示されている。左のバンコクの図で浅部のデータが抜けているのは、井戸内の水面が低いためである。左図は深度と共に温度が急上昇するという湧出域に特徴的な曲線を示し、右図は浅部では温度上昇しない（あるいはいったん温度が下がる）という涵養域に特徴的な曲線・温度を示しており、その地域の地下水流動系における位置づけが見て取れる。

通常は、このように観測井での温度プロファイルを得て、それに一致するような地下水流動数値モデルを作成し、各地での採熱シミュレーションを行うことで、ポテンシャル・マップを作成する。しかし、観測井が存在しない

地域や利用できない地域では、この方法が通用しない。そこで、最近の研究では、熱交換井での熱応答試験（TRT）の結果を組み入れた地下水流動・熱輸送モデルを構築した。その解析結果から有効熱伝導率の分布を推定し、有効熱伝導率と地下温度分布図をGISで重ね合わせることで、図 14 のように、全く新しいポテンシャルマップ（暖房利用）を作成した。

日本の平野部のように第四系の地層が厚く堆積した熱帯モンスーン地域では、熱交換量に対する地下水の影響が非常に大きい。このため、実験室で得られる岩石の熱伝導率ではなく、地下水の影響を考慮した熱伝導率を調べる必要がある。水で飽和した岩石の「有効

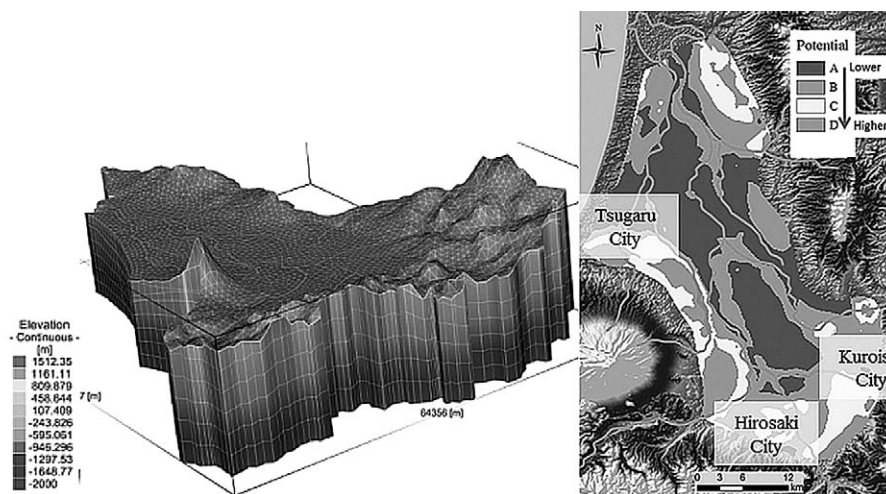


図 14 津軽平野 3 次元地下水流動・熱輸送モデル（左）とポテンシャルマップ（右） (3)

熱伝導率」，さらには地下水の流速を考慮した「見かけ有効熱伝導率」が，実際の熱交換量に効いてくる。そのため地中熱チームでは，欧米で発達した岩相のみで地下の熱伝導率を決める方法ではなく，地下水流動の影響を考慮した日本独自の手法を確立してきた。

地中熱利用技術については，地下水流動シミュレーションモデルが，地下水流動の可視化に，またポテンシャル・マップが，予測される採熱量の可視化に相当している。

6. おわりに

さて，再び私事に戻って申し訳ないが，造影MRIの結果をお知らせしよう。自分が3週間苦しんでいた分を，たった数分間でも読者にも押し付けようと企てた未熟な筆者のエゴをお許しいただきたい。

造影剤が入った血液は，MRI画像では白く映る。癌細胞には血液が流れるので，悪性腫瘍なら白く映るはずだ。だが，手元のMRI画像では，黒い異物が神経を圧迫している。良かった，悪性腫瘍ではない。「でも，じゃあこの異物は何ですか，先生？」と私は訊ねた。

圧迫されて外にはみ出すと椎間板ヘルニアになるものが，外に出ないで腰椎の中に入り込んで異物となったそう。根本的な治療法は無いので，痛みを薬で押さえ，異物が周りの組織に自然に吸収されて消えるまで，数カ月単位で待つしか無いという。まだ半年以上も薬漬けとは。今年についていない……安心したとたんに，こんなエゴがでる。間違えてはいけない，今年は幸運なのだ。なにしろ，ろくに問診もしない医師だったら，レントゲン画像だけで椎間板ヘルニアと決めつけただろうに，きちんと調べて原因をつきとめてくれる先生に出会えたのだから。

地熱探査や地中熱利用にも，こんなふうにも全体を見渡して正しい判断をしてくれる，頼れるお医者さんがもっと必要である。そんな研究者を目指して精進したいものである。

参考文献

- (1) Uchida, T. "Application of Audiofrequency Magnetotelluric Method in Ogiri Geothermal Field, Southwestern Japan, " Proceedings of the 7th Asian Geothermal Symposium, July 25-26 2016, p.111-114, (2006)
- (2) Yasukawa, K., Uchida, Y., Tenma, N., Taguchi, Y., Murooka, H., Ishii, T., Suwanlaert, J. "Groundwater temperature survey for geothermal heat pump application in tropical Asia" Bulletin Geological Survey of Japan, vol. 60, p.459-467, (2009)
- (3) Shrestha, G., Uchida, Y., Yoshioka, M. and Ioka, S. "Assessment of development potential of ground-coupled heat pump system in Tsugaru Plain, Japan, " RENEWABLE ENERGY, vol. 76, p.249-257, (2014)

福島第一原子力発電所の現状と廃炉に向けての活動

内藤 正則 (原子力工学センター
副センター長)



1. はじめに

2011年3月11日に東北地方の太平洋岸一帯を襲った巨大地震と、それに伴う巨大津波によって東京電力福島第一原子力発電所（以下、福島原発）1号機～3号機は甚大な被害を受け、多量の放射性物質が環境に放出された。多くの報道からも明らかなように福島原発では炉心が溶融し、水素爆発によって原子炉建屋の上部が吹き飛んだ。現在は、溶融した核燃料は後述する循環冷却方式によって常時冷やされており、固まった状態にある。

炉心が溶融し、加えて水素爆発まで起こした原発は廃止措置とすること（廃炉）が決まっているが、溶融後固まった状態にある核燃料の内部には依然として多量の放射性物質が含まれているため、その環境への放出が二度と起きないように細心の注意を払いつつ廃炉に向けた作業を進めていくことが重要である。

本稿では、事故発生から5年以上が経過した現在、福島原発はいまどのような状態にあるのかを解説するとともに、事故進展過程を実測値と解析によって評価する。

2. 福島原発の現在の状態

原子力発電所では、核分裂で生じたエネルギーを熱として利用し、その熱を電気に変換して発電している。原子力発電所の運転を停止するということは、核分裂（の連鎖反応）

を止める（これをスクラムと言う）ことであり、核分裂による発熱がなくなるので電気の発生もなくなる。

核分裂とは、例えばウラン原子が中性子を吸収して別の2つの原子に分裂することであり、核分裂でできた2つの原子（これを核分裂生成物と言う）は放射線を放出してまた別の原子へと崩壊してゆく。放射線もエネルギーを持っており、最後は熱に変換されるので、これを崩壊熱と言っている。放射線の放出率は時間経過とともに減衰していくので崩壊熱量も時間とともに減少するものの崩壊熱そのものは長期間にわたって発生し続ける。

地震発生時まで運転中であった福島原発1号機～3号機は、地震の信号を検知して自動的にスクラムした。しかし、それまでの運転の継続によって核分裂生成物が蓄積しており、崩壊熱の発生が続いている。この熱を除去しないと溶融後一旦固まった核燃料が再び過熱して再溶融に至る恐れがあるため、スクラム後も長期間にわたって崩壊熱を除去するための冷却が必要である。そのため循環冷却方式によって現在も連続的に冷却水の循環が維持されている。

循環冷却が安定に作動を継続している現状における福島原発1号機～3号機の状態を図1に示す。図には原子炉への注水流量と各場所の水位の実測値も示している。注水は崩壊熱を除去するのに十分かつ余裕のある流量が維持されている。

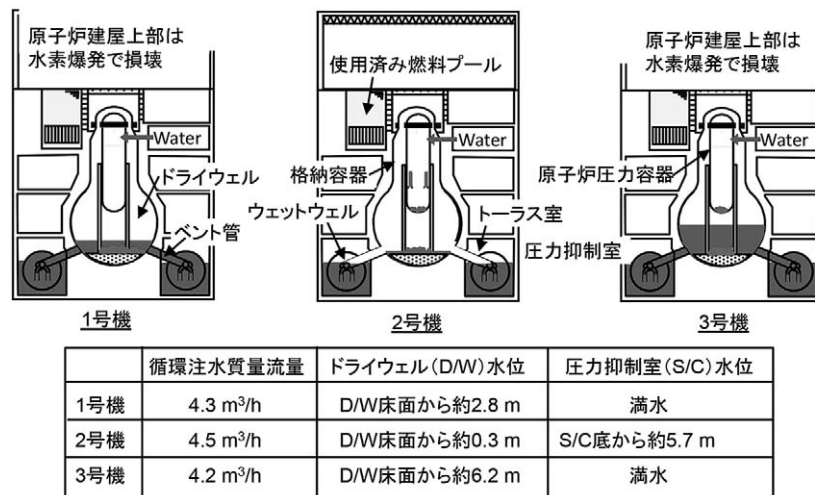


図1 循環冷却継続時の格納容器内水位の状況

図1の水位の状態から各号機の状態を次のように推定できる。

(1) 原子炉圧力容器底部の破損

循環冷却方式では、まず原子炉圧力容器に冷却水を注入する。原子炉圧力容器からの漏水がなければ、注入された水は内部に溜まってゆくはずである。しかし、原子炉圧力容器に設置された水位計は一向に水位の上昇を示さない。注水は実行しているが漏水しているということである。すなわち、各号機とも原子炉圧力容器の底部は損傷していること（亀裂の発生、あるいは溶融して穴が開いている状態）が推定される。

(2) 格納容器壁の損傷

原子炉圧力容器から漏れ出た水は格納容器内に溜まるはずである。格納容器の水位の実測値を図1にあわせて示しているが各号機ごとにそれぞれ一定の水位を保っている。このことから各号機の格納容器の状態は以下のように推定できる。

① 1号機の水位はドライウェル床から2.8メートルの位置にあり、この高さ位置で格納容器壁が損傷しており、ここから漏水していると考えられる。この漏水は、格納容器外

からの写真撮影によって観測された事実であるが、漏水している位置を具体的に確認するには至っていない。

② 2号機の水位は、ドライウェル床から0.3メートル、ベント管の付け根の部分に保たれている。加えて、ドライウェルより下に設置されているウェットウェルは満水になっていない。ウェットウェルと、その外側のトーラス室の水位は同一である。このことから、2号機ではウェットウェルの下方に損傷があり、ここからトーラス室に漏水していると考えられる。

③ 3号機の水位は、ドライウェル床から6.2mと他の号機よりも高い位置に保たれているものの、水位はそれ以上には上昇しないことから、この水位の近辺で損傷があり漏水していると考えられる。

福島原発では、津波によってすべての交流電源を失い、かつ1号機と2号機では直流電源も失った。電源を復旧できるまでの間に炉心は溶融し、溶融物質は原子炉圧力容器の下部損傷部分からドライウェルに落下したとみられている。福島原発の現場では、プラントの状態を把握するために電源復旧前は可搬型

の直流電源（バッテリー）を使って各部の水位、圧力、温度、放射線の線量率等の実測がなされてきた。加えて、格納容器内に遠隔操作でカメラを挿入し、内部の状況を可視化する試みもなされてきた。このような、内部状況を把握する試みの一環として、ミュオンによる透視がある。ミュオンとは、宇宙から地球に降っている透過力の強い素粒子であり、原子炉建屋の外から格納容器内を透過するミュオンを計測して内部状況を把握しようとするものである。ミュオン素粒子の数密度は少ないため、数か月かけて連続測定し画像処理によって格納容器内を可視化しているが、分解能は1メートル前後である。

1号機ではミュオン計測が終了し、原子炉圧力容器内はほぼ空洞に近いという結果が得られた。

2号機は計測結果の整理・分析が続けられているが、原子炉圧力容器内には燃料を含む構造物の一部が溶融後に固化した状態で、あるいは未溶融の状態に残っているようである（溶融物は原子炉圧力容器の底部損傷部からドライウェルに落下したようである）。

3号機の計測はまだ実施されていない。

3. 事故進展過程

本章では、原子炉の核燃料を含む構造物が

どのようにして溶融し、溶融物がどのような経路をたどって移行していったのか、について解説する。溶融・移行のプロセスを実際に可視化・計測することはできないので、ここでは物理現象をどのようにシミュレーションしているか、について述べる。

（1）融点の評価

原子炉内には核燃料（ UO_2 ）の他に、構造物としてジルコニウム合金（ジルカロイ）、ステンレス鋼、および核分裂反応を制御する炭化ボロン（ B_4C ）などがある。シミュレーションにおいて定義しているこれら材料の融点を図2に示す。ジルコニウム、鉄、ボロンなどの原子炉内構造物の成分は、事故時に崩壊熱除去が不十分となって温度が上がると炉内の水（液体の水、あるいは水蒸気、いずれも H_2O ）と反応して酸化物を形成する。酸化物の融点は、もともとの金属の融点よりも高くなる。一方、これらの酸化反応は発熱を伴うので、シミュレーションにおいては崩壊熱に加えて、これらの酸化反応による発熱も発生熱として考慮する。

金属同士が高温で結合して一種の合金を形成すると、その融点はもとの金属の融点より低くなる（この合金の形成を図2では共晶反応と記述した）。

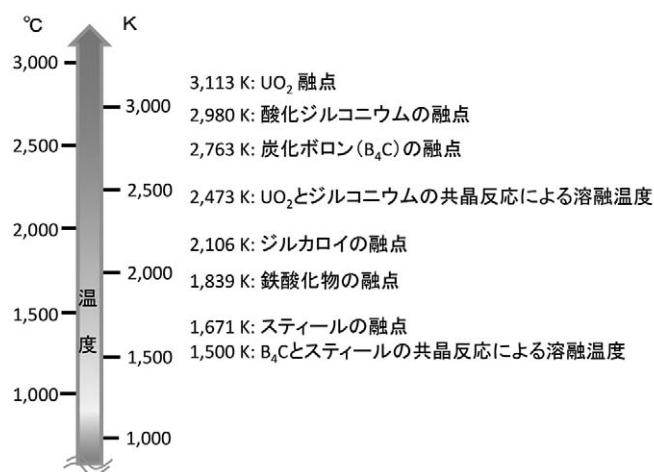


図2 シミュレーションにおける構造材料の融点の取扱い

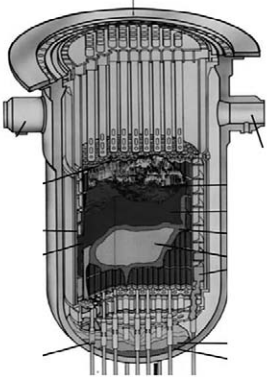
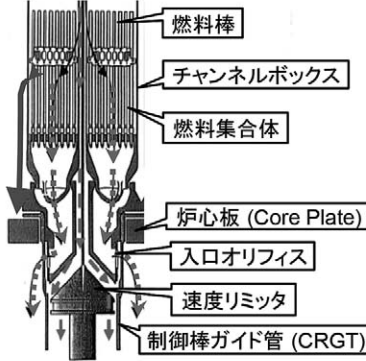
TMI型 (PWR)	福島第一原発型 (BWR)
	
✓ 炉内水位: ほぼ炉心中央に維持 [Wet core] ✓ ジルコニウムの酸化反応促進に十分な水(蒸気)が供給されていた ✓ 炉心内で生成したコリウムは多量の蒸気で冷却され、表面が固化して強固なクラストを形成	✓ 炉内水位: なし [Dry core] ✓ 炉心内で生成したコリウムは連続的に下部プレナムに落下 ✓ 粒子状デブリは炉心板の上に一旦蓄積し、再溶融したものは下部プレナムに落下

図3 溶融物の移行経路

(2) 溶融・移行過程

福島原発事故時の炉心溶融と移行の経路をTMI（スリーマイル島）事故の場合と比較して図3に示す。

① TMI 事故の場合

TMI 原発では原子炉压力容器の上部に設置されている加圧器の逃し安全弁が開く事象が発生した後、弁が開いたまま閉じない（開固着）というトラブルが起き、蒸気流出が続いたことが事故の最初の引き金である。もちろん、原子炉はスクラムしたが、崩壊熱は発生している。蒸気流出が続いた結果、炉内の水位は低下し、核燃料が水面から露出するようになる。露出部で発熱密度が高い、炉心高さ方向中央部近傍から炉心溶融が始まった。TMI では運転員の操作によって冷却水の注入が間欠的に実施されたため、炉内水位は高さ方向中央部よりやや低い位置に維持され、さらに水位が下回ることにはなかった。すなわち、核燃料が存在する炉心部は、いわゆるウェットコア（Wet Core）の状態にあり、水中に没した炉心下部は溶融には至らなかった。それより上の部分では溶融が進んだが、高温の溶融物が水と接して多量の蒸気が発生し、この蒸気

の冷却効果によって溶融物の外周は固化し厚いクラスト層で覆われた。

② 福島原発の場合

福島原発では、逃し安全弁からの蒸気の流出が長時間継続した。加えて、非常時に冷却水を注入する本来備わっていた安全設備が電源喪失のために作動しなかった（あるいは作動を停止した）ため、逃し安全弁を意図的に開放して原子炉圧力を下げ、消防車による注水を試みた。この結果、原子炉内の水位は核燃料が存在する炉心の下部を下回ることとなり、炉内には水がない、いわゆるドライコア（Dry Core）の状態となった。この炉心の状態がTMI 事故と大きく異なる点である。

ドライコアの状態となった炉心では、最初に融点の低い材料（ B_4C とスチールの共晶物やスチール、すなわち鉄そのもの等、図2参照）が溶融し、液状となって図3の破線で示す経路を通過して原子炉压力容器の下部（下部プレナム）に流下した。ドライコアにおける溶融は、発熱密度が高い炉心中央部付近から始まるが、中央部が溶融した後は、それより上にある構造物は支えがなくなるので溶融していなくても崩落することになる。このよ

うな固形分（シミュレーションにおいては、粒子状デブリと定義している）は、流路面積の狭い燃料集合体内を落下できず、炉心板の上に蓄積する。蓄積した粒子状デブリには核燃料も多く含まれるため、崩壊熱発生および下部プレナムに残存する水が蒸発することによる蒸気の流れによって構造物等が酸化反応し、そのときの発熱も加わって炉心板上で溶融に至る（このときの溶融物は核燃料とその他の構造物材とが混在した液体であり、これをコリウムと称する）。コリウムからの熱伝達によって炉心板も溶融に至り、溶融箇所からコリウムや粒子状デブリが下部プレナムに落下する。下部プレナムの壁（原子炉压力容器の下部ヘッド）も高温のコリウムや粒子状デブリによって損傷し、コリウムや粒子状デブリは原子炉压力容器下の領域（ここをペデスタルと言う）にあるペデスタル床面に落下した。ドライコアの状態が最も永く続いた1号機では、炉心部の核燃料および構造物材のほとんどが溶融し下部プレナムを経てペデスタル床面に落下した。

ドライコアの持続が最も短かった2号機では、炉内に粒子状デブリと未溶融の燃料が一部残ったが、コリウムと多くの粒子状デブリは下部プレナムを経てペデスタル床面に落下した。

3号機は、1、2号機の間隔的な挙動であり、粒子状デブリの一部が炉心部に残っていると考えられる。

ここまで述べてきた福島原発の事故進展をシミュレーションした結果をまとめると以下のようなになる。

1号機:

炉心部の核燃料を含む構造物材は100%がコリウムあるいは粒子状デブリとなって、ペデスタル床面に落下し、炉心部は空洞となっている。この結果はミューオン計測の結果とも整合する。ただし、原子炉压力容器や下部プレナム内壁にコリウムの一部がこびり付いて固化（クラスト化）している可能性もあるが、シミュレーションではそこまでの判断は難しい。

2号機:

炉心部には未溶融燃料および粒子状デブリが残存しており、炉心構成材料のうち残り50%程度はペデスタル床面に落下した。ミューオン計測では炉心部に影があることから定性的な整合性は認められる。

3号機:

1号機の状態に近いが、数%は原子炉压力容器内に残存している可能性が高い。

これらに加えて、もう1つの知見として、原子炉压力容器の下部ヘッドを貫通している炉内計装管や制御棒案内管の挙動がある。これらの貫通管は、下部プレナム内では高温のコリウムと接触して溶融したと思われるが、原子炉压力容器の下に突き出ている部分ではコリウムが貫通管の内部に入り、流下したと考えられる。

制御棒駆動機構は、原子炉压力容器の下に突き出ている部分の下端が閉鎖されていることから、流下したコリウムは管内に溜まり、放熱によってクラスト化していると考えられる。

同様に、炉内計装管のうちLPRM（Low Power Range Monitor）も下端が閉鎖されていることから、流下したコリウムは管内に溜まり、放熱によってクラスト化していると考えられる。

一方、炉内計装管のうちSRM（Short Range Monitor）およびIRM（Intermediate Range Monitor）は下端がペデスタル領域に開放している（例えば1号機ではSRMとIRM合わせて12本ある）。これらの管内に流入したコリウムは下端に到達するまでに放熱によって粒子状になる。また、放熱によって管内壁からクラストが成長し、成長したクラストによって管が閉鎖されると考えられる。管が閉鎖されるまでの間に、下端からは粒子状デブリがペデスタル床に落下することになるが、その総量は炉心構成材料の質量の10%に満たない。しかし、この場合であっても、管の内部にはクラストが存在している。

このように、原子炉压力容器下部ヘッドか

ら外に貫通している管内にもクラスト化したデブリが溜まっていると考えられる。この知見は、福島原発の廃炉にあたって燃料デブリを取り出す際に、原子炉压力容器の下に突き出ている貫通管に溜まっている燃料デブリの取り出し方法を検討しておく必要性を示唆している。

4. 福島原発の今後

廃止措置が決定している福島原発では、今後2年に満たない期間で、まずデブリの取り出し方法を決定する必要がある。

デブリ取り出しの方法として次の3つの方法が検討されている。

(1) 冠水・上部取り出し方法

格納容器を上部まで満水状態とし、上部から水中にあるデブリを取り出す方法。すでに格納容器からの漏水は確認されているが、今後漏水箇所を突き止め、漏水防止の修理をすることが前提となり、3つの方法の中では困難度が高いが、デブリ取り出しに関わる作業はすべて水中で実施されるため、放射線管理の観点からは望ましい方法である。

(2) 部分冠水・上部取り出し方法

格納容器を満水にするのが困難な場合に対応して部分冠水とする方法である。ペデスタル床面にあるデブリが水中に没する程度までは冠水させるので、デブリの主要部は水中取り出しとなるが、原子炉压力容器内や貫通管にデブリが残存している場合にはそれらは気中取り出しとなり、放射性物質の拡散防止策を確立させておく必要がある。

(3) 部分冠水・横取り出し方法

(2)と同様の部分冠水であるが、水中のデブリを横が取り出す方法である。(1)および(2)の上部取り出しでは、格納容器の頂部からペデスタル床面にあるデブリを遠隔操作で

取り出すための治具の開発があることから代替策として横取り出し方法も検討されている。

今の時点ではどの方法を採用するか決定しておらず、すべての方法に対する技術課題を国のプロジェクトとして取り組んでいるところである。いずれの方法であっても、一旦溶けて移行した溶融物が現在どのような形で固化し、どこに分散しているかという情報はデブリ取り出し方法を決定する上で必須である。そのためには、可視化・直接計測が困難な状況から、シミュレーションによる精度の向上、結果の信頼性を高めることが当面の緊急課題であり、我々もこの課題の解決に向けて努力しているところである。

CO₂ フリー水素普及シナリオ研究 ～ IAE 自主研究会の活動概要～

笹倉 正晴 (プロジェクト試験研究部
水素グループ 参事)



1. はじめに

「エネルギー基本計画」(2014年4月閣議決定)を踏まえて2014年6月に策定された「水素・燃料電池戦略ロードマップ」では、水素社会の実現に向けて、①水素利用の飛躍的拡大、②水素発電の本格導入／大規模な水素供給システムの確立、③トータルでのCO₂フリー水素供給システムの確立の3つのステップで産学官の取組を進めることが明記された。その取組の一環として、2014年10月～2015年3月まで「水素発電に関する検討会」(水素発電検討会)が経済産業省によって開催され、足元では、家庭用燃料電池の普及が拡大し、燃料電池自動車の市販が開始され、水素ステーションの整備も着実に進められている。

さらに、これら最新の状況を踏まえ、2016年3月に「水素・燃料電池戦略ロードマップ」が改訂され⁽¹⁾、新たな目標設定や、取組の具体化が行なわれた。改訂のポイントは、①家庭用燃料電池の将来的な価格目標が明確化されたこと、②燃料電池自動車の普及目標が設定されたこと、③水素ステーションの整備目標が設定されたこと、④水素発電に関し、2015年度とりまとめられた「水素発電検討会」の報告書を反映し、記載が具体化されたこと、⑤再生可能エネルギー由来水素の利活用に関し、技術面・経済面の具体的課題についてワーキング・グループ(WG)立ち上げの検討を行い、2016年度中に結論を得る旨が記載されたこと等である。

このような政府の動向に先駆け、当研究所

(IAE)は、「CO₂フリー水素チェーン実現」に向けて、2011年3月に自主研究会を立ち上げ、現在も実施中である。以下、IAE自主研究会の活動概要を報告する。

2. IAE 自主研究会の活動概要 (全般)

CO₂フリー水素チェーン実現に向け、これまでIAEが行ってきた自主研究会の活動概要を図1に示す。

(1) 2010年度～2014年度までの活動概要^{(2)～(5)}

2010年度～2014年度までは、主にCO₂フリー水素チェーンの供給面に焦点を当てた活動を行った。

そのうち、2010年度後半～2011年度末までは「CO₂フリー水素チェーン実現に向けた構想研究会」(構想研究会)の名の下、CO₂フリー水素の有用性について共通認識を醸成した。具体的には、IEAが開発した統合評価モデルGRAPEのエネルギーシステム分析モジュールを用い、エネルギーの需給バランスを定量的に示した。これにより、CO₂削減率やゼロエミッション電源比率に関する当時の政府目標に対して、CO₂フリー水素が目標達成に貢献し得る有力なオプションの1つであるという共通認識を醸成した。また、考え得るCO₂フリー水素チェーンをリストアップし、各チェーンについて技術成熟度の検討を行い、有機ハイドライドのグローバルサプライチェーンは2020年頃、液化水素のグローバルサプライ

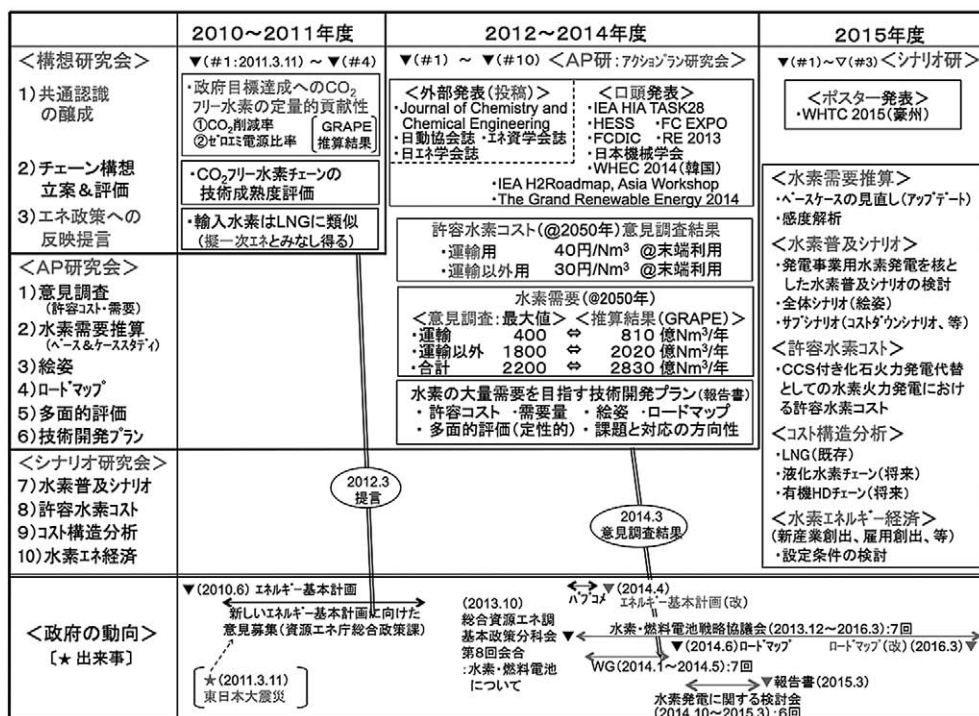


図1 CO₂フリー水素チェーン実現に向けた活動概要

チェーンは2025年頃に実用化可能と評価した。

さらに、当時、東日本大震災を踏まえ、見直しが検討されていた「エネルギー基本計画」への意見募集(資源エネルギー庁・総合政策課が実施)に対し、IAE水素グループは、輸入水素が液化天然ガス(LNG)に類似しており、擬一次エネルギーとみなし得るとの認識の下、図2に示すように「一次エネルギーの構成要素に水素を加えていただきたい」との提言を行った。

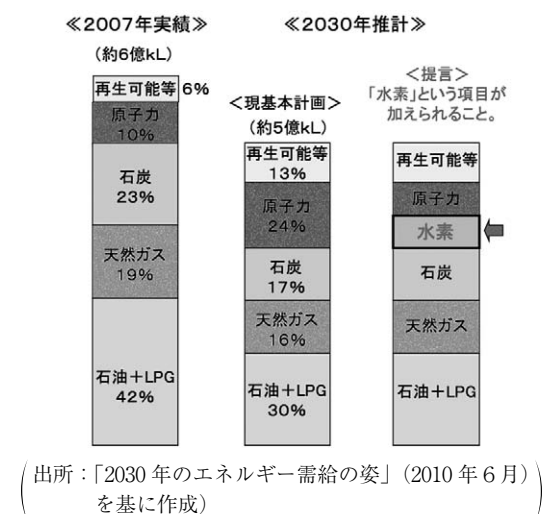


図2 一次エネルギー供給の構成要素についての提言

2012年度～2014年度までは、「CO₂フリー水素チェーン実現に向けたアクションプラン研究会」(アクションプラン研究会)の名の下、CO₂フリー水素需要に関するエネルギーユーザの意見集約、需要推算(シミュレーション)を実施した。

それにより、図3のようなCO₂フリー水素チェーンの絵姿やロードマップを作成するとともに、CO₂フリー水素の多面的評価を実施し、更にそれらを集約して「水素の大量需要を目指す技術開発プラン」としてまとめた。

(2) 2015年度以降の活動概要⁽⁶⁾

「エネルギー基本計画」に明記された「水素エネルギー社会の実現」は、究極的には、発電事業用水素発電の本格普及(経済自立)によりもたらされると思われる。

発電事業用水素発電は、定置用燃料電池や燃料電池自動車用等の本格普及、それらのインフラ整備等と相まって普及が進むと考えられる。しかし、発電事業用水素発電の経済自立のハードルは非常に高く、どのような形で導入が進むのかが不明であり、本格普及に至る

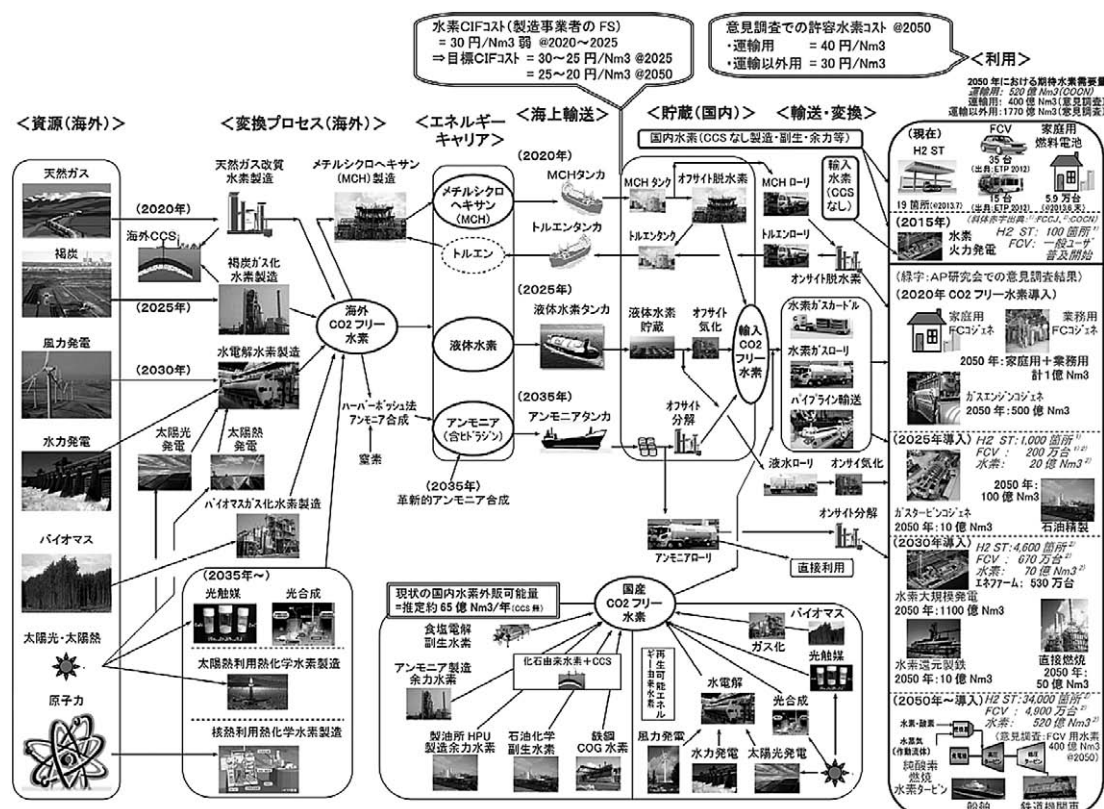


図3 CO₂フリー水素チェーンのイメージ

シナリオ検討が必要である。

このような考えの下、2015年度以降は、主にCO₂フリー水素チェーンの利用面、特に発電事業用水素発電に焦点を当てた活動を行っている。次項以降に、その概要を示す。

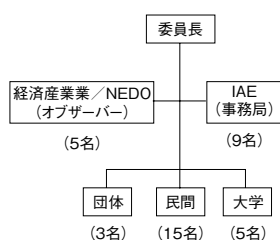
に加え、2016年3月には委員24名(委員長およびオブザーバーを含む)、オブザーバーが5名となった。2016年3月における研究会の体制とメンバー構成を、表1、表2に示す。

表2 シナリオ研究会のメンバー

3. シナリオ研究会の体制・メンバー

2011年3月に開催した第1回構想研究会では、委員が17名(委員長を含む)、オブザーバーが2名(資源エネルギー庁総合政策課とNEDOから各1名)であったが、その後徐々に

表1 シナリオ研究会の体制



(IAE(事務局):
坂田以下水素グループ8名+黒沢厚志)

	氏名	所属 ⁽¹⁾
委員長	山地 憲治	(公財)地球環境産業技術研究機構(RITE)
	大田健一郎	横浜国立大学
委員	岡崎 健	東京工業大学
	佐々木一成	九州大学
	堂免 一成	東京大学
	名久井恒司	東京理科大学
	亀山 秀雄	(一社)水素エネルギー協会(HESS)
	長谷川裕夫	(国研)産業技術総合研究所(AIST)
	浅野 浩志	(一財)電力中央研究所
	菊池 和廣	コスモ石油㈱
	伊藤 正	千代田化工建設㈱
	北川雄一郎	三菱日立パワーシステムズ㈱
	香枝 英	JXエネルギー㈱
	黒津 歩	大阪ガス㈱
	日比 政昭	新日鐵住金㈱
	鈴木 隆	新日鐵住金エンジニアリング㈱
	梶原 昌高	岩谷産業㈱
	天野 寿二	東京ガス㈱
	新道憲二郎	川崎重工業㈱
	黒田 洋介	三菱商事㈱
	馬場 賢治	三井住友銀行
オブザーバー	作野 慎一	電源開発㈱
	松島 悠人	株日本総合研究所
	小島 康一 ⁽²⁾	トヨタ自動車㈱
	資源エネルギー庁 総合政策課	
	資源エネルギー庁 省エネ・新エネルギー 新エネルギー部	
	資源エネルギー庁 資源・燃料部 政策課	
	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課	
	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) 新エネルギー部 燃料電池・水素グループ	

(1)参加者は所属先の代表としてではなく個人として出席。
(2)小島康一氏は、オブザーバーとして初参加。次回以降は委員として参加予定。

4. シナリオ研究会の活動概要

現在実施中のシナリオ研究会の主な検討項目は以下の通りである。

- 発電事業用水素発電を核とした水素普及シナリオの検討
- 許容水素コストの検討
- 水素需要推算（シミュレーション）
- 水素エネルギーのコスト構造分析
- 水素エネルギー経済の検討

（1）発電事業用水素発電を核とした水素普及シナリオ

① 全体シナリオ

全体シナリオは、発電事業用水素発電に限らず他の用途も含め、製造、輸送・貯蔵、利用、インフラ、サプライチェーンのカテゴリーに分け、各々の年次展開の概要を、図4のような水素普及シナリオの絵姿としてまとめた。

発電事業用水素発電普及に至るシナリオは、図4の中の矢印で示しているが、次のサブシ

ナリオでその考え方を示す。

② サブシナリオ

発電事業用水素発電を核とした水素普及のサブシナリオとして、CO₂フリー水素のコストダウンシナリオ、CO₂フリー水素サプライチェーンのインフラ整備シナリオ、化石火力代替水素火力導入シナリオ、CO₂フリー水素輸入シナリオ、等について基礎検討を行った。

（a）CO₂フリー水素のコストダウンシナリオ

水素普及は、目標コストを順次達成し、最終的には経済自立に向け、如何にコストダウンできるかにかかっていると看做す過言ではないと思われる。

CO₂フリー水素のコストダウンシナリオに関するIAEのイメージを図5に示す。CO₂フリー水素の許容CIF価格の試算結果は次項（2）火力発電における許容水素コストで示しているが、CO₂フリー水素が本格普及するにはCIF価格で20円/Nm³レベルを達成する必要があると思われる。

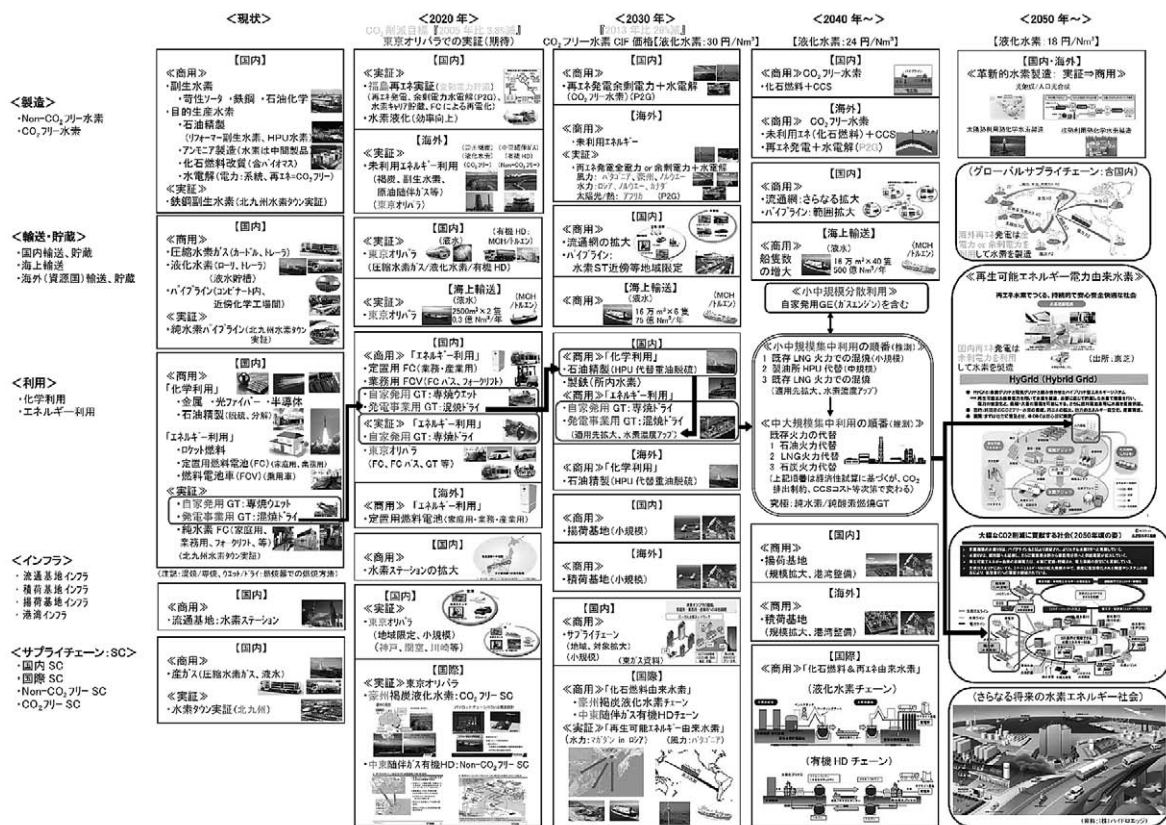


図4 発電事業用水素発電を核とした水素普及シナリオ（絵姿）

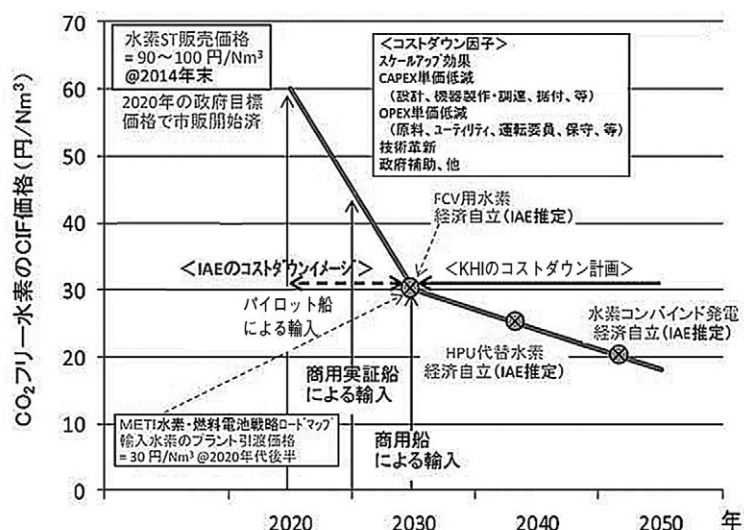


図5 CO₂フリー水素のコストダウンシナリオ

(b) 化石火力代替水素火力導入シナリオ

水素本格普及に不可欠な化石火力代替水素火力の本格導入に至るシナリオに関するIAEのイメージを図6に示す。

効率・経済性向上に、インフラ整備の要否・環境負荷軽減等の要因が絡んで水素の利用が拡大していくと思われる。化石火力代替水素火力の本格導入に関するIAEの試算では、2030年におけるCO₂回収貯留設備（CCS）付化石火力の発電コストは、CCS建設費や炭素税等によって変わるが、石炭火力・LNG火力・石油火力の順で高くなり、許容水素のCIF価格も石炭火力代替・LNG火力代替・石油火力

代替の順で高くなる。

従って、全面代替であれば、石油火力代替・LNG火力代替・石炭火力代替の順で導入される。しかし、水素火力は、システム・設備構成がLNG火力と比較的類似しており、水素割合が低い場合のLNG／水素混焼発電では、既存インフラの多くがそのまま利用できると思われることから、LNG／水素混焼火力が全面代替に先行して導入されると思われる。

LNG／水素混焼火力に先駆けて、燃焼発電への水素利用が最も早く拡大するのは、現在も実施されている自家発水素混焼であると思われるが、水素専焼自家発は、経済性が非常

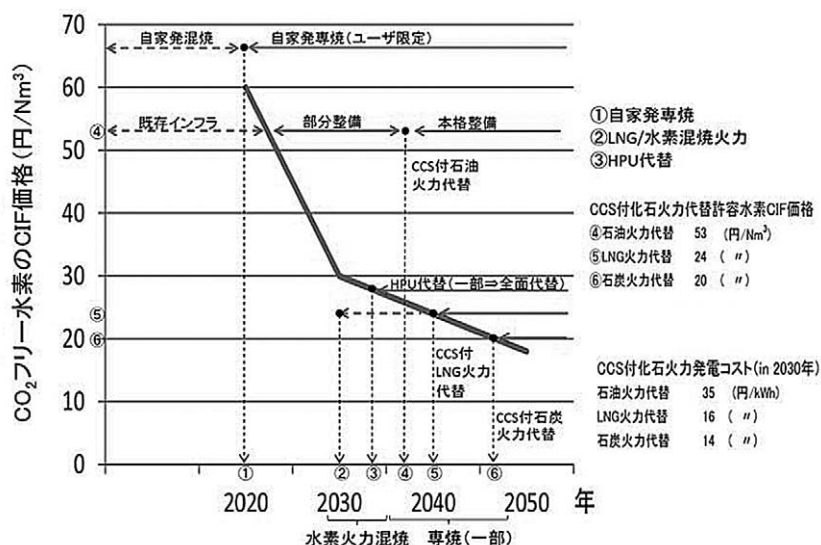


図6 化石火力代替水素火力の導入シナリオ

に厳しいことから、その本格導入は化石火力の全面代替水素火力の後になると思われる。

LNG／水素混焼火力が一部実施された後、化石火力代替水素火力の本格導入の前に、製油所の水素製造装置（HPU）の代替としてのCO₂フリー水素の活用が進むと思われる。CO₂フリー水素の許容価格がCCS付LNG火力よりも少し高いと推定されるからである。

製油所HPU代替としてのCO₂フリー水素の活用が進み、利用量が拡大してCO₂フリー水素のCIF価格が低下した後、化石火力代替水素火力の導入が本格すると思われる。

（２）火力発電における許容水素コスト

IAEで実施した火力発電における許容水素コストの試算結果の一例を以下に示す。

今回設定した条件では、図7に示すように、2030年におけるCCS付き化石火力（石炭火力、LNG火力、石油火力）代替としての水素火力発電のCO₂フリー水素の許容CIF価格は、各々、20.4円/Nm³、24.2円/Nm³、53.5円/Nm³となった。

また、CO₂フリー水素の許容CIF価格へは、化石燃料の燃料価格が比較的大きな影響を及ぼすことが分かった。

（３）水素需要推算（シミュレーション）

本研究会では継続して、統合評価モデルGRAPEのエネルギーシステム分析モジュール

を用い、水素の需給を含むエネルギー需給の分析を行った。GRAPEモデルは、世界を15地域に分割し、地域間のエネルギー資源の貿易を含む各地域のエネルギーシステムを取り扱い、資源量やCO₂排出量の制約の下、世界全体のエネルギーシステムコストを最小化するものである。

これまでの研究により、一定規模の水素導入の可能性は明らかになっている。2015年度は、従来の水素需要量の評価に加え、モデルの評価結果を利用し、CO₂フリー水素チェーンの大規模な社会導入の理由づけとなるCO₂フリー水素導入の意義や合理性を示すことを試みた。

具体的には、「3E+S」（エネルギー安定供給、経済性、環境性、安全性）の観点から水素導入の意義や合理性を示す指標を設定し、指標によるケースの評価を行った。また、CO₂排出制約やエネルギー需要を各国の約束草案（INDCs）を考慮した内容に更新した他、既設天然ガス発電所における水素利用として、熱量ベースで6％（体積で20％、ハイタン相当）の混焼が可能と想定した。原子力発電は炉ごとに状況が異なることから、既存炉の運開年を考慮し、40年寿命と60年寿命の炉が半々となる値を参考に、日本の原子力発電の設備容量の上限を設定した。

水素有ケース（ベースケース）の日本の水素需要量、供給量の推算結果を各々（図8、図9）に示す。

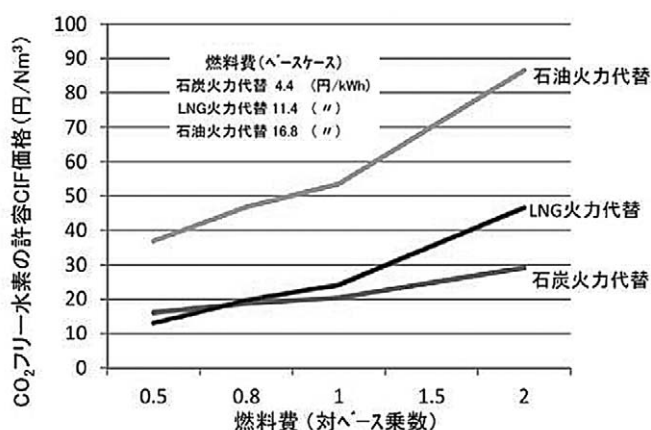


図7 CO₂フリー水素の許容CIF価格への化石燃料価格の影響

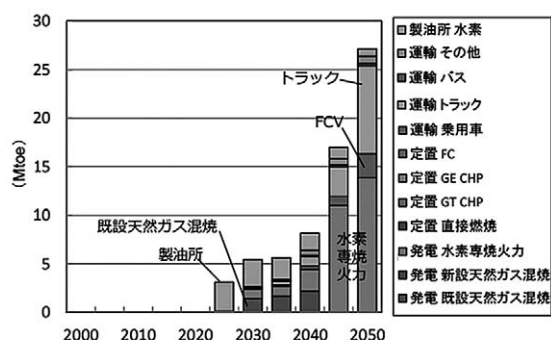


図8 日本の水素需要量

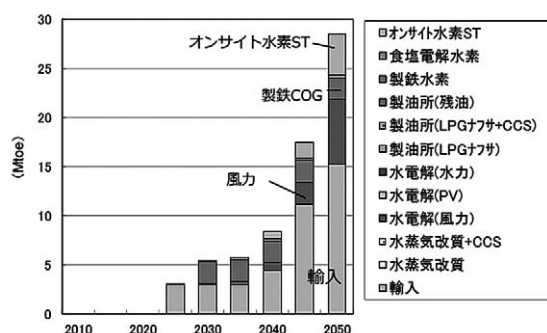


図9 日本の水素供給量

水素有ケース（ベースケース）の日本の2050年における水素需要量は、合計1,053億Nm³であった（1Mtoe=38.78億Nm³-H₂）。内訳は、発電部門51.0%，運輸部門46.3%，定置部門ゼロ，製油所水素2.7%であった。乗用車のエネルギー消費量に占める燃料電池車（FCV）用水素の割合が約2割（95億Nm³），トラックのエネルギー消費量に占める水素の割合は45%（353億Nm³），バスのエネルギー消費量に占める水素は約7割（10億Nm³）であった。

日本の2050年における水素供給量は、合計1,107億Nm³であった（供給量の合計は、定置向け及び運輸向けの配送ロス10%を含めているため、需要量の合計より多くなっている）。内訳は海外CO₂フリー水素が5割以上を占め、風力電解が23%，オンサイト水素ステーションが15%，残りの10%が副生水素（製鉄水素86億Nm³，食塩電解11億Nm³）であった。

水素有ケース（ベースケース）と水素無ケースを比較すると、日本にCO₂フリー水素が導入された時期では、環境、エネルギー安全保

障の各指標が改善される傾向があることが分かった。図10に水素有ケース、水素無ケースの日本の一次エネルギーの分散度の推移を示す。ここで、一次エネルギーの分散度はシェアの2乗和であるハーフィンダール指数を用いて算出した。

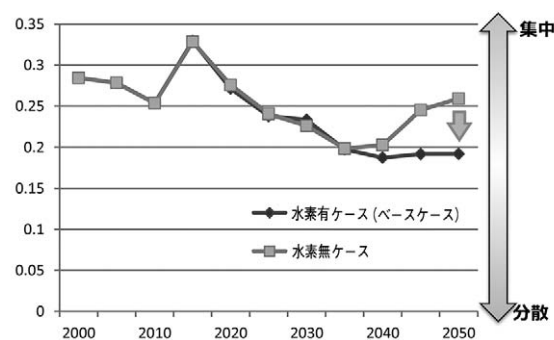


図10 日本の一次エネルギーの分散度の推移

世界全体では水素有ケースでエネルギーシステムコストが低下しており、経済的にも適切であるが、日本の場合、水素導入によってエネルギーシステムコストが低下しない場合もある。しかし、水素無ケースでは日本のCO₂排出量が水素有ケースよりも増加してしまうなど、他の指標が悪化しており、現実の世界にもみられるような指標間のトレードオフがあることが示された。

（4）水素エネルギーのコスト構造分析

シナリオ研究会メンバーの協力の下、LNGチェーンとCO₂フリー水素チェーンのコスト構造について比較検討した。以下にその一例を示す。

LNGチェーンは成熟したチェーンであり、CO₂フリー水素チェーンは現時点では将来構想であって、将来さらなる技術の進展やコストダウンが期待されるものである。従って、直接的な比較ではなく、あくまで参考比較である。また、検討結果は前提条件等によって変わり、考察には一部主観的なものも含まれている。CO₂フリー水素チェーンでは、キャリアとして液化水素・有機ハイドライド、さ

らにはアンモニア等があるが、ここでは川崎重工業（KHI）が実施したフィージビリティ・スタディの結果が公表されている，豪州褐炭由来の液化水素チェーン⁽⁷⁾を取り挙げた。

図11に豪州褐炭由来輸入CO₂フリー液化水素の海外流出率，国内還流率の試算結果を示す。これを見ると，国内還流の割合が比較的高いのは水素製造と水素液化である。従って，将来，液化水素チェーンが本格普及した時，褐炭原料にオーナー収益（ロイヤリティ）が上乗せされたとしても，国内還流率が本試算から大きく減少することはない，50%程度で維持されると期

待できる。

輸入LNGと熱量等価な輸入水素の輸入金額・海外流出金額，国内還流金額のケーススタディの結果を表3に示す。

LNG（成熟チェーン）と豪州褐炭液化水素チェーン（将来構想）の輸入熱量を同じとした場合，LNGに比べ水素は，輸入額が大幅に増えるが，海外流出額は同程度であり，輸入額が増える分国内還流金額が増え，新規産業創出，雇用拡大に貢献すると考えられる。また，水素チェーンはCO₂削減にも貢献する。

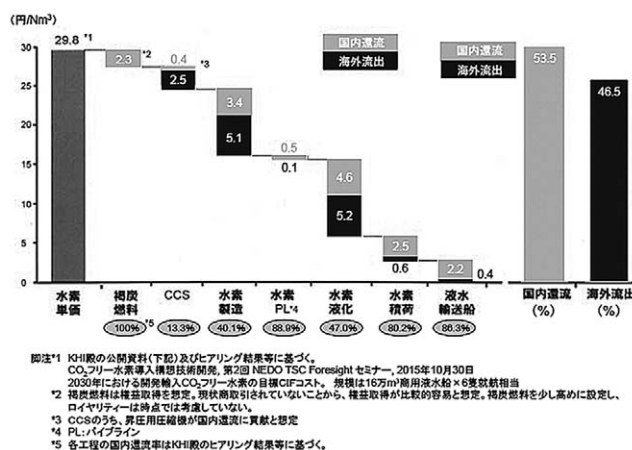


図11 豪州褐炭由来輸入CO₂フリー液化水素の海外流出率，国内還流率

表3 輸入LNGと熱量等価な輸入水素の輸入金額・海外流出金額，国内還流金額

＜検討結果:ケース1＞			＜検討結果:ケース2＞		
	LNG (成熟チェーン)	豪州褐炭液化水素 (将来構想チェーン)		LNG (成熟チェーン)	豪州褐炭液化水素 (将来構想チェーン)
輸入熱量	4,492百万MMBtu/年 ⁽¹⁾	同左	輸入熱量	3,432百万MMBtu/年 ⁽¹⁾	同左
輸入金額	64,685億円 ⁽²⁾	111,000億円 ⁽⁴⁾	輸入金額	24,196億円 ⁽²⁾	84,800億円 ⁽⁴⁾
海外流出金額	55,190億円 ⁽³⁾	51,575億円 ⁽⁵⁾	海外流出金額	21,430億円 ⁽³⁾	39,400億円 ⁽⁵⁾
国内還流金額	9,495億円 ⁽³⁾	59,425億円 ⁽⁶⁾	国内還流金額	2,765億円 ⁽³⁾	45,400億円 ⁽⁶⁾

脚注:(1) 震災以降(2012年)想定
 (2) LNG輸入価格=18ドル/MMBtu，為替レート=80円/ドルで推算
 (3) 64,685億円/年×0.853
 (4) 29.8円/Nm³-H₂×3,728億Nm³-H₂/年
 (5) 111,000億円/年×0.465 (KHI情報)
 (6) 111,000億円/年×0.535 (KHI情報)

脚注:(1) 震災以前(2009年)想定
 (2) LNG輸入価格=7.5ドル/MMBtu，為替レート=94円/ドルで推算
 (3) 24,196億円/年×0.853
 (4) 29.8円/Nm³-H₂×2,847億Nm³-H₂/年
 (5) 84,800億円/年×0.465 (ケース1と同じ。IAE想定)
 (6) 84,800億円/年×0.535 (ケース1と同じ。IAE想定)

＜検討結果:ケース3＞

	LNG (成熟チェーン)	豪州褐炭液化水素 (将来構想チェーン)
輸入熱量	3,480百万MMBtu/年 ⁽¹⁾	同左
輸入金額	45,936億円 ⁽²⁾	86,000億円 ⁽⁴⁾
海外流出金額	39,872億円 ⁽³⁾	40,000億円 ⁽⁵⁾
国内還流金額	6,064億円 ⁽³⁾	46,000億円 ⁽⁶⁾

脚注:(1) 震災前の平均
 (2) LNG輸入価格=11ドル/MMBtu，為替レート=120円/ドルで推算
 (3) 45,936億円/年×0.868
 (4) 29.8円/Nm³-H₂×2,887億Nm³-H₂/年
 (5) 86,000億円/年×0.465 (ケース1と同じ。IAE想定)
 (6) 86,000億円/年×0.535 (ケース1と同じ。IAE想定)

5. おわりに

メンバー各位・オブザーバー各位の協力の下、CO₂フリー水素チェーン実現に向けた自主研究会を現在も鋭意実施中である。

現在の主な課題は、発電事業用水素発電を核とした水素普及シナリオの検討に関してはコストダウンシナリオを中心としたサブシナリオの具体的展開検討であり、許容水素コストの検討に関してはベース条件の更新とケーススタディの実施、水素需要推算（シミュレーション）に関しては更なる感度分析の実施等、水素エネルギーのコスト構造分析に関しては有機ハイドライドチェーンについて実施すること、そして、水素エネルギー経済の検討に関しては市場規模推算の本格試行、新規産業創出・雇用創出等、波及効果を検討すること、等である。

関係各位の協力の下、引き続きCO₂フリー水素チェーン実現に向け、尽力していく所存である。

[謝辞]

これまでの自主研究会活動に参加して下さったメンバー各位・オブザーバー各位に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- (1) 水素・燃料電池戦略ロードマップ（2016年3月22日改訂）、資源エネルギー庁
- (2) CO₂フリー水素チェーン実現に向けた構想研究 成果報告書（平成24年3月）
- (3) CO₂フリー水素チェーン実現に向けたアクションプラン研究 成果報告書（平成25年4月）
- (4) CO₂フリー水素チェーン実現に向けたアクションプラン研究 成果報告書（平成26年3月）
- (5) CO₂フリー水素チェーン実現に向けたアクションプラン研究 成果報告書（平成27年6月）
- (6) CO₂フリー水素普及シナリオ研究 成果報告書（平成28年4月）
- (7) 山下誠二，吉野泰，吉村健二，新道憲二郎，原田英一，“低炭素社会に向けた水素チェーンの実現可能性検討”，「日本エネルギー・資源」，Vol. 35，No. 2（2014），pp. 33-38

平成 27 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 27 年度事業の概要は以下の通りである。

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

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

一方、国内および世界のエネルギーの情勢は、再生可能エネルギーの導入促進や非在来型化石資源の台頭、新興国のエネルギー需要の急増等と相まって、目まぐるしく変化している。このような激動の環境下において調査研究活動を実施していくには、これまで蓄積してきた知見を生かして、時代環境に適確に対応しつつ、「総合工学」の視点に立脚した当研究所の総合力が発揮できる調査研究基盤の整備を図っていくことが必要である。このような観点から、当研究所は、その時々々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) 当研究所は、気候変動に対するリスク管理戦略に関する調査研究を進めたほか、次世代電力ネットワークや再生可能エネルギー大量導入時の出力変動対応技術、双方向通信による再生可能エネルギー発電設備の遠隔出力制御技術、太陽熱利用技術、CO₂の回収・貯留・利用技術および CO₂ 回収に適した石炭利用技術、水素の製造・輸送・需要等に関する調査研究を実施した。

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

なお、エネルギーマネジメントシステムに係る国際規格(ISO50001)等に関する研修会を実施した。

(3) 以下に各エネルギー分野における調査研究活動の概要を示す。

① エネルギー技術全般

気候変動に対応するリスク管理戦略の構築の一環として地球温暖化が進行した場合の適応策および気候工学の個別評価やエネルギー・環境分野の革新的技術に関する調査を進めたほか、最新の技術情報および評価を提供するエネルギー技術情報プラットフォームの内容の充実、エネルギーに関する公衆の意識調査を実施した。

② 新エネルギー・電力システム関連

次世代電力ネットワークの調査検討を進めるとともに、蓄エネルギー技術を用いた再生可能エネルギー大量導入時の出力変動対応技術や双方向通信による再生可能エネルギー発電設備の遠隔出力制御技術、多数のホームエネルギーマネジメントシステム（HEMS）を大規模な情報基盤によりクラウド管理する事業に関する調査等を進めた。

また、再生可能エネルギー分野では食糧と競合しないバイオマス原料を用いたエタノール製造技術や水を作動媒体とする小型バイナリー発電システム、集光型太陽熱発電（CSP）等に関し、および省エネルギー分野ではネットワークに接続されるスマート家電等のスマートアプライアンスに関する欧米における標準化動向や省エネルギーのためのエネルギーマネジメントシステム、電気製品の効率向上に資する国際協力に関し、調査研究を実施した。

③ 水素エネルギー関連

水素の製造から輸送／貯蔵・消費に至るエネルギーキャリアシステムの経済性評価および特性解析を行うとともに、製造・貯蔵・輸送の各プロセス技術の課題と研究開発の方向性について、導入シナリオとしてまとめた。また、海外から水素キャリアを導入した場合の日本の中長期エネルギー需給について分析したほか、再生可能エネルギーから水素を製造し、エネルギーの地産地消や新産業創出等に活用する事業可能性について検討した。

④ 化石エネルギー関連

化石燃料の高度転換技術に係る研究に関して、CO₂回収型の石炭ガス化複合発電（IGCC）やCO₂分離・回収・利用技術に係る検討、シェールガス革命が米国の石油化学産業に与える影響等の調査を行うとともに、化石燃料利用に係る新技術に関する研究に関し、石炭火力からのCO₂回収に係る新技術として注目されて

いるCO₂分離型化学燃焼石炭利用技術について調査研究を行った。

⑤ 原子力関連

福島第一原子力発電所事故を踏まえ、さらに高い水準の安全確保を図るため、原子力発電所の安全対策高度化に活用し得る技術開発プロジェクトを実施したほか、事故炉の炉内状況を把握するため、過酷事故（シビアアクシデント）の挙動解析コードの性能向上と解析、シビアアクシデント時の安全系の機能に関する研究等を進めた。また、原子力安全規制の在り方に関する調査研究を実施し提言を行った。さらに、原子炉の炉心損傷に伴う可燃性ガスの挙動に関する調査や経年プラントの安全評価に関する研究、高温ガス炉の実用化に関する検討等を行うとともに、原子力発電所の廃止措置時の放射化放射能評価技術や海外における原子力施設の廃止措置戦略などに関する調査、原子力発電所廃止措置の計画立案や実施、計画のプロジェクトマネジメントを担う人材の育成に関する助成等を行った。

研究所のうごき

(平成 28 年 4 月 2 日～7 月 1 日)

◇ 第 10 回理事会

日 時：6 月 6 日（月）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 27 年度事業報告および決算について

第二号議案 公益目的支出計画実施報告書について

第三号議案 定時評議員会の開催について

第四号議案 顧問の委嘱について

第五号議案 役員候補者選考委員会の設置及び運営に関する要領の改定について

報告事項 業務執行の状況について
その他

◇ 第 6 回評議員会

日 時：6 月 21 日（火）11:00～12:00

場 所：経団連会館（5 階）501 号室

議 題：

第一号議案 平成 27 年度事業報告および決算について

第二号議案 公益目的支出計画実施報告書について

第三号議案 役員の一部改選について

第四号議案 評議員の一部改選について

第五号議案 役員候補者選考委員会の設置及び運営に関する要領の改定について

第六号議案 常勤役員候補者選考委員会委員の一部改選について

報告事項 その他

◇ 月例研究会

第 355 回月例研究会

日 時：4 月 22 日（金）14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. 欧米諸国における小売電力市場の動向及び消費者保護の取り組み
（（一社）海外電力調査会 調査第一部 主任研究員 大西健一 氏）

2. 2016 年におけるシェール・ガス革命, シェール・オイル革命が日本経済と世界経済に与える影響

（和光大学 経済経営学部 教授 大学院研究科 委員長 岩間剛一 氏）

第 356 回月例研究会

日 時：5 月 27 日（金）14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. 藻類バイオ燃料事業について
（株）IHI 新事業推進部 次長 成清 勉 氏）
2. セルロースナノファイバーの展望
～基礎・応用・課題～
（国立研究開発法人 産業技術総合研究所 機能化学研究部門 セルロース材料グループ 研究グループ長 遠藤貴士 氏）

第 357 回月例研究会

日 時：6 月 24 日（金）14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. 過去の LNG 国内導入経緯に基づく、水素エネルギー導入のシナリオ分析
（（一財）エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 研究員 水野有智）
2. バイオエネルギーの活用による水素社会構築の意義
（九州大学 水素エネルギー国際研究センター 客員教授 田島正喜 氏）

◇ 外部発表

[講演]

発表者：松井 一秋

テーマ：Japan Nuclear Today and Tomorrow

発表先：PBNC 2016, Pacific Basin Nuclear Conference

日 時：4 月 6 日

発表者：坂田 興

テーマ：水素社会の実現に向けて

発表先：金沢工業大学

日 時：4 月 26 日

発表者：森山 亮

テーマ：バイオマスのエネルギー利用技術～国内
外の持続可能なバイオマス利活用方法に
ついて

発表先：農学におけるバイオマス利用研究フォー
ラムグループ（東京大学）

日 時：5月20日

発表者：坂田 興

テーマ：低炭素社会への水素の役割と展望

発表先：自動車技術会

日 時：5月25日

発表者：岡崎 徹

テーマ：風力熱発電用超電導高温発熱機

発表先：2016 年春季低温工学・超電導学会

日 時：5月30日

発表者：石本 祐樹, 酒井 奨, 水野 有智, 坂田
興

テーマ：エネルギーキャリアの長距離輸送に関す
る分析

発表先：第35回エネルギー・資源学会研究発表会

日 時：6月7日

発表者：坂田 興

テーマ：水素貯蔵・水素輸送, 需要予測

発表先：第11回グレーター東大塾

日 時：6月8日

発表者：蓮池 宏

テーマ：運輸部門における再生可能エネルギー利用

発表先：(一社) 日本太陽エネルギー学会
100%RE 研究部会セミナー（於東京都内）

日 時：6月9日

発表者：Yuki Ishimoto, Atsushi Kurosawa, Masa-
haru Sasakura, Ko Sakata

テーマ：Significance of CO₂-free hydrogen in a
long-term global energy system analysis

発表先：World Hydrogen Energy Conference
2016

日 時：6月13日～16日

発表者：笹倉 正晴, 石本 祐樹, 坂田 興

テーマ：Scenario study for full-fledged hydrogen
utilization with CO₂-free hydrogen global
supply chains

発表先：21st World Hydrogen Energy Conference
2016. Zaragoza, Spain

日 時：6月13日～16日

発表者：石倉 武

テーマ：日本のデコミッショニングの現状と将来
への課題

発表先：日独デコミッショニング・シンポジウム
－原子力発電所のデコミッショニング技
術と安全性の向上（主催：在日ドイツ商
工会議所）

日 時：6月21日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：国内外の再生可能エネルギーの動向

発表先：NEDO TSC Foresight セミナー

日 時：6月27日

[論文]

発表者：内田俊介, 岡田英俊, 内藤正則, 関 靖圭,
Shunsuke Uchida, Hidetoshi Okada,
Masanori Naitoh, Yasuyoshi Seki (IAE),
Fumio Kojima (Kobe University), Seiichi
Koshizuka (The University of Tokyo),
Derek H. Lister, University of New
Brunswick, Fredericton, Canada

テーマ：Improving Plant Reliability Based on In-
spection and Maintenance of Local Wall
Thinning due to Flow-Accelerated Corro-
sion

発表先：EDF FAC2016 (Conference on Flow
Accelerated Corrosion 2016)

日 時：5月24日～27日

発表者：Masahiro Sugiyama, Shinichiro Asayama,
Takanobu Kosugi, Atsushi Ishii, Seita
Emori, Jiro Adachi, Keigo Akimoto,
Masatomo Fujiwara, Tomoko Hasegawa,
Yasushi Hibi, Kimiko Hirata, Toru Ishii,

Takeshi Kaburagi, Yuki Kita, Shigeaki Kobayashi, 黒沢厚志, Manabu Kuwata, Kooichi Masuda, Makoto Mitsui, Taku Miyata, Hiroshi Mizutani, Sumie Nakayama, Kazuyo Oyamada, Takaaki Sashida, Miho Sekiguchi, Kiyoshi Takahashi, Yukari Takamura, Junichi Taki, Takeshi Taniguchi, Hiroyuki Tezuka, Takahiro Ueno, Shingo Watanabe, Rie Watanabe, Naoyuki Yamagishi, Go Yoshizawa
テーマ：Transdisciplinary co-design of scientific research agendas: 40 research questions for socially relevant climate engineering research
発表先：Sustainability Science, doi.org/10.1007/s11625-016-0376-2
日 時：6月4日

発表者：木野千晶
テーマ：Direct Numerical Simulation of a Turbulent Flow on an Oscillating Wall Using Cut-cell Based Immersed Boundary Method
発表先：The 2016 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE24)
日 時：6月26日～30日

[寄稿]

発表者：Zaichun Zhu, Shilong Piao, Ranga B. Myneni, Mengtian Huang, Zhenzhong Zeng, Josep G. Canadell, Philippe Ciais, Stephen Sitch, Pierre Friedlingstein, Almut Arneth, Chunxiang Cao, Lei Cheng, 加藤悦史, Charles Koven, Yue Li, Xu Lian, Yongwen Liu, Ronggao Liu, Jiafu Mao, Yaozhong Pan, Shushi Peng, Josep Peñuelas, Benjamin Poulter, Thomas A. M. Pugh, Benjamin D. Stocker, Nicolas Viovy, Xuhui Wang, Yingping Wang, Zhiqiang Xiao, Hui Yang, Sönke Zaehle, Ning Zeng
テーマ：Greening of the Earth and its drivers
寄稿先：Nature Climate Change, doi:10.1038/nclimate3004
日 時：4月25日

発表者：吉田 一雄
テーマ：太陽熱の有効利用
発表先：『電気計算』5月号

発表者：松村 英功, 望月光明 (山梨罐詰株), 酒井 奨
テーマ：フルーツゼリー製造過程で廃棄されるシロップ廃液を利用したメタン発酵システムの開発
寄稿先：化学工学会バイオ部会ニュースレター No.42

発表者：小野崎 正樹
テーマ：パキスタンに行ってみたこと (巻頭言)
寄稿先：『電気評論誌』6月号

発表者：坂田 興
テーマ：水素の用途の拡大 (巻頭言)
寄稿先：『水素エネルギーシステム』Vol.41, No.2

発表者：笹倉 正晴, 福田 健三
テーマ：日本における水素関連技術の歩みと現状
発表先：『日本ガスタービン学会誌』7月号 (第44巻 第4号)

発表者：坂田 興
テーマ：CO₂ フリー水素システム～普及の可能性と今後の動向～
寄稿先：『日本 LCA 学会誌』7月号

発表者：石本 祐樹, 相澤 芳弘
テーマ：米国, 欧州連合における水素エネルギー利用に向けた動向
寄稿先：『化学工学会誌』7月号

[出版]

発表者：堀 史郎 (福岡大学), 黒沢 厚志
テーマ：ニュースが面白くなるエネルギーの読み方
出版元：共立出版
日 時：6月22日

◇人事異動

○6月30日付

(解嘱)

佐藤憲一 専務理事兼事務局長兼総務部長兼エ
ネルギー国際標準 (ISO) センター
長兼技術開発支援センター長のうち
総務部長の兼務を解嘱

○7月1日付

(嘱託採用)

玉川博美 事務局長代理兼総務部長 (参事)

(兼務)

堀内亜紀子 原子力工学センター主任研究員 経
理部兼務

佐藤優美子 経理部研究員 プロジェクト試験研
究部兼務

編集後記

6月に入って早々、関東から九州にかけて梅雨入りしたものの、この拙稿を書いている現在、関東では少雨が続いており、深刻な水不足が懸念されている。東京都の場合、水源の約8割を国交省及び水資源機構が管理する利根川水系及び荒川水系、約2割を水道局が管理する多摩川水系に依存している。現状を水系別にみると、利根川水系は矢木沢ダムはじめ8ダムの貯水容量合計約4億6,000万m³に対し貯水率約38%、荒川水系は浦山ダムなど4ダムの合計約1億4,000万m³に対し貯水率約60%、多摩川水系は小河内貯水池ほかの合計約2億2,000万m³に対し貯水率約82%と、いずれも前年を下回り、6月16日には利根川水系で10%の取水制限が開始された。中でも規模の大きい矢木沢ダムの貯水率が10%強と落ち込んでおり、干上がったダム湖の映像をニュースでご覧になった向きもおられよう。旧国土庁で「日本の水資源」（水資源白書）のとりまとめを担当したことのある筆者としては、少なからず気がかりなところである。

白書によれば、アジアモンスーン地域に位置する日本の年平均降水量は世界の約2倍であるのに対し、これに国土面積をかけて人口で割った一人当たり降水総

量は世界の約3分の1程度と低い。加えて、年降水量は長期的には減少傾向にあり、また、少雨と多雨の差は開きつつある。さらに、降雨が梅雨や台風期に集中する上、明治政府が治水のために招聘したオランダ人技師デ・レーケに滝と言わしめたほど地形が急峻で流れの速い日本の川では、かなりの部分が利用されないまま海に流出するという特徴がある。近年の気象の変化や都市化の進展等を踏まえ、かかる貴重な水資源について、適切な確保と利用を図り健全な水循環系を構築することが求められている。

日本人は長らく「空気と水と安全はただ」だと思ってきたが、大気汚染や水質汚染との長期にわたる闘いや、様々な分野における安全への意識の高まり等をみると、これらは相応のコストをかけて初めて確保されるものであることが共通の理解となっていると思われる。

電気もまた然り、再生可能エネルギーの拡大やエネルギーシステム改革の進展といった大きな変革の中、世界でトップクラスの品質を誇る電気について、どのように対応していくのか、供給側、需要側の両面から真剣に考えていくことが求められる。

(重政弥寿志)

季報 エネルギー総合工学 第 39 巻第 2 号

平成 28 年 7 月 20 日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒 105-0003 東京都港区西新橋 1-14-2

新橋 SY ビル (6F)

電話 (03) 3 5 0 8 - 8 8 9 1

FAX (03) 3 5 0 1 - 1 7 3 5

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

(印刷) 株式会社日新社

※ 無断転載を禁じます。

