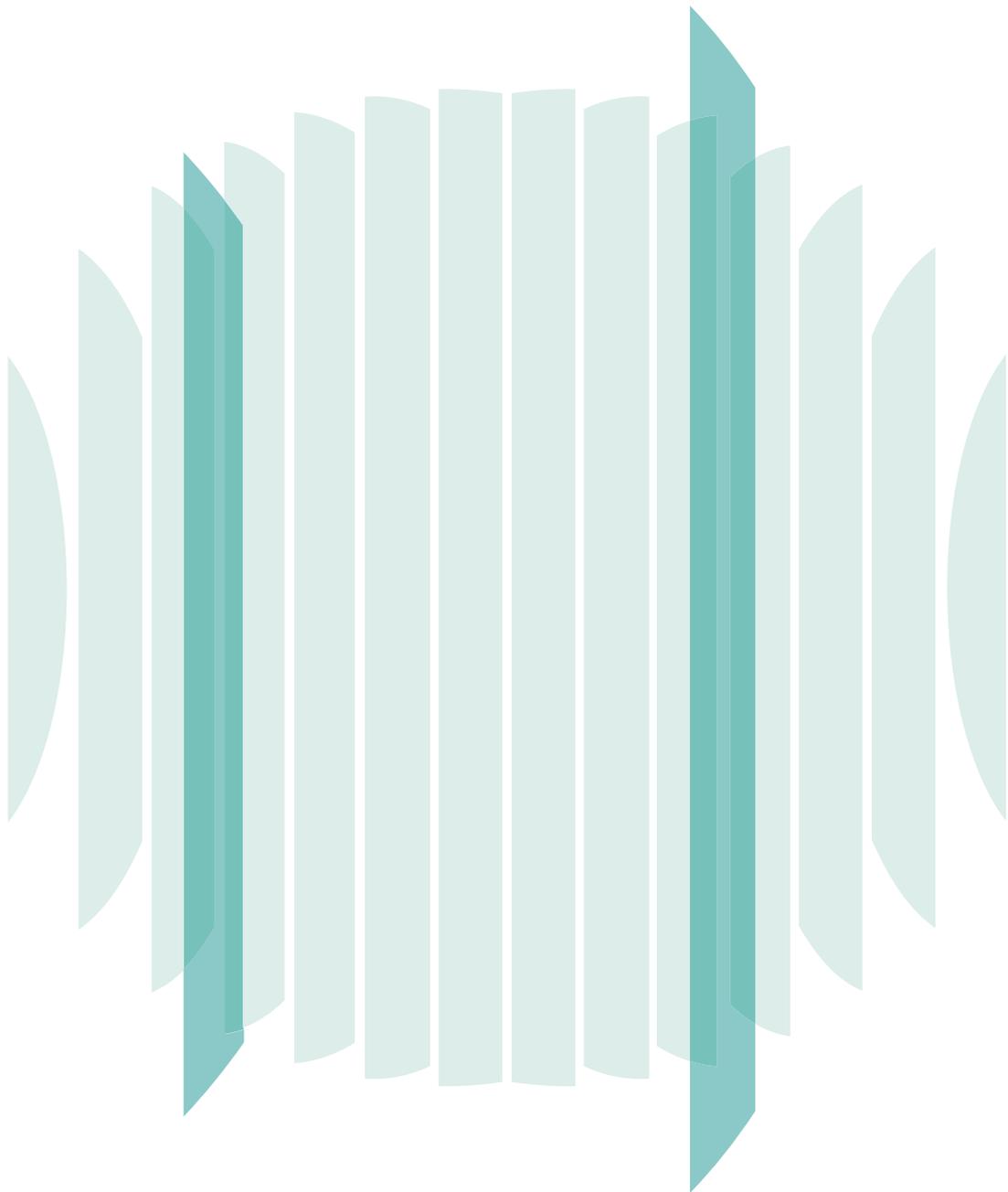


季報 エネルギー総合工学

Vol. 41 No. 2 2018. 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】

創立 40 周年おめでとうございます

東京大学大学院 工学系研究科附属総合研究機構
機構長・教授

寺井 隆幸 …………… 1

【寄稿】

シェール・ガス革命, シェール・オイル革命の現状と
国際エネルギー情勢への影響

和光大学 経済経営学部 教授

岩間 剛一 …………… 3

【寄稿】

原子力革新技術への挑戦 —SMR への期待—

(公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター
専務理事

田中 隆則 …………… 20

【調査研究報告】

原子力発電所の廃止措置安全要件に係る最近の動向について

原子力工学センター 参事

堀川 義彦 …………… 30

【調査研究報告】

酸素水素燃焼タービン発電技術の動向

プロジェクト試験研究部 主管研究員

松本 俊一 …………… 41

【事業報告】

平成 29 年度 事業報告の概要

(一財)エネルギー総合工学研究所 ……………55

【研究所のうごき】 …………… 57

【編集後記】 …………… 60

巻頭言

創立 40 周年おめでとうございます

寺井 隆幸 (東京大学大学院 工学系研究科附属
総合研究機構 機構長・教授)



エネルギー総合工学研究所におかれましては、本年 4 月に創立 40 周年を迎えられましたこと、心よりお喜び申し上げます。

1978 年の創立時は第 2 次オイルショックの時期であり、エネルギー問題が国家的な課題として認識されはじめていた頃でした。脱石油を目指して、原子力発電の軽水炉国産標準化計画が進められ、また、サンシャイン計画やムーンライト計画が実施され、いわゆる「新エネルギー」の研究開発が始まりました。その後、「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC) の活動をとおして地球環境における CO₂ 排出量削減問題が大きくクローズアップされてきました。しかし、福島第一原発事故を受けて、原子力に対する信頼が大きく損なわれ、将来に向けたエネルギー戦略が大きく揺らぎました。今年度、策定された第 5 次エネルギー基本計画では、原子力発電を基盤エネルギーのひとつとしながらも、2030 年における再生可能エネルギーの割合を総発電量の 22～24% としており、この目標を達成するためには、バイオマスや太陽光発電、風力発電などの伸びに期待せざるを得ない状況となっています。

再生可能エネルギーのうち太陽光発電や風力発電は間欠性という欠点を有しているため、電力供給の安定性や変動負荷に対する供給性を確保するには、電力貯蔵や電力変換エネルギー貯蔵システムの開発が重要になると思われます。現在の電力貯蔵システムの主流は揚水発電ですが、容量が限られており、新增設も困難です。NaS 電池や Li 電池などの蓄電池も開発されていますが、コストや規模、将来的な資源制約などの問題があります。エネルギーの貯蔵輸送媒体である水素等についても研究開発が進んでいますが、そもそも、エネルギー貯蔵については、そのシステムの動特性や規模、寿命やライフサイクル等についての十分な考慮が必要です。また、IoT や AI 技術も取り入れたスマートグリッドなどの電力ネットワークについての研究も極めて重要です。

A decorative border consisting of a repeating floral and leaf pattern surrounds the text on the page.

第5次エネルギー基本計画では、わが国が抱える構造的課題と情勢変化、2030年に向けた基本方針と政策対応、2050年に向けたエネルギー転換・脱炭素化への挑戦が謳われています。エネルギー総合工学研究所は、原子力のみならず、エネルギー技術全般についての俯瞰的な視野の下、再生可能エネルギーの要素技術開発やエネルギーシステム解析をはじめ、電力ネットワークに関する研究なども実施しておられます。名実ともに「エネルギーという極めて重要な課題を工学をベースに総合的に研究する」専門家集団としての引き続きのご活躍に期待しつつ、お祝いの言葉とさせていただきます。

[寄稿]

シェール・ガス革命, シェール・オイル革命の現状と 国際エネルギー情勢への影響

岩間 剛一 (和光大学 経済経営学部
教授)



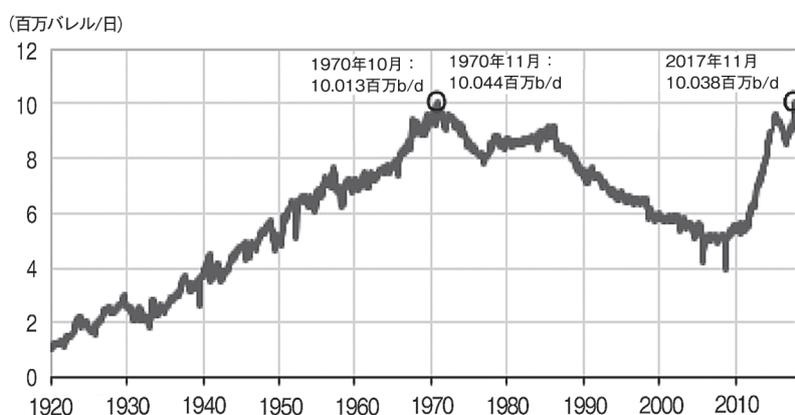
1. 原油価格上昇とともに増加する米国 の原油生産量

2018年4月のシリアへの米国、英国、フランスによるミサイル攻撃に加え、5月の米国トランプ大統領によるイランとの核合意の破棄により、中東の地政学リスクが高まり、原油価格が一段と上昇している。2017年秋以降から見ると、①石油輸出国機構(OPEC)加盟国と非OPEC加盟国による協調減産、②中東の地政学リスクの高まりで原油価格が上昇した。それにより米国の原油(Crude Oil)だけの原油生産量(Crude Oil Production)は、2017年11月に1,003万バレル/日(b/d)と、47年ぶりに1,000万b/dを超えた。(図1参照)。米国の原油生産量は、2018年に入り、さらに増加しており、米国は、シェール・オイル革命により「世界最大の産油国」に復権した。

もともと、原油価格と米国のシェール・オ

イル生産量は、「コインの裏表」の関係にある。原油価格が上昇すると、米国のシェール・オイルの生産量が増加し、米国のシェール・オイルの生産量増加に伴う国際石油需給緩和から、原油価格が下落し、米国のシェール・オイルの生産量が減少する。こうした、サイクリカルな動きの繰り返しが、2014年秋以降のサウジアラビア原油と米国のシェール・オイルとの消耗戦開始から続いている。

2017年秋から2018年春にかけては、サウジアラビアをはじめとするOPEC加盟国とロシアをはじめとする非OPEC加盟国が、協調減産を100%以上順守し、国際石油需給が均衡に向かうとの見方が国際原油市場において有力となり、WTI(ウェスト・テキサス・インターミディエート)原油価格は堅調で60~70ドル/バレルを超える水準となっている。そのため、米国のシェール・オイルの生産量は、2018年6月時点において、600万b/dを超えている(図2参照)。



(出所:米国エネルギー情報局(EIA)統計)

図1 米国の原油生産量の推移(1920年1月~2017年11月)

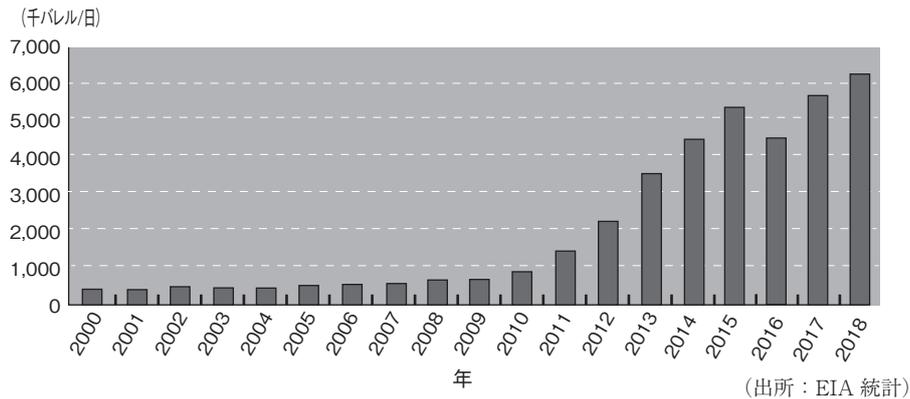


図2 米国におけるシェール・オイル生産量推移

2. 米国のシェール・オイルと OPEC との関係

上述のように、2018年に入って、原油価格は堅調となっている。2018年春以降において、米国におけるシェール・オイルの生産量が増加しているにもかかわらず、原油価格が下落しない要因としては、第1に、サウジアラビアをはじめとする OPEC 加盟国が、協調減産を順守し、国際原油市場における原油需給が均衡するという見方が市場に根強いことが挙げられる。実体経済を見ても、世界経済は、順調に成長を続けており、中国、インドなどで石油消費量が増加している。国際通貨基金 (IMF) による世界経済見通しにおいても、世界経済は、順調に成長を続けている (表1 参照)。

第2に、米国がイランとの核合意の見直しを行い、イランへの制裁を再開し、イラン原油の輸出量が減少する可能性がある。イランは、2015年7月に、米国、英国、フランス、

ドイツ、ロシア、中国の6カ国と、ウラン濃縮を削減することを条件として、制裁を解除されている (表2 参照)。

しかし、トランプ大統領は、大統領選挙の時からイランとの核合意の破棄を表明し、イランとの核合意から離脱し、イランに対して「最大の制裁」を課すことを主張してきた。トランプ大統領は、常々、オバマ大統領による政治的成果、歴史的遺産 (レガシー) を否定し、イランが核開発を行い、シリア、レバノン、イエメンにおける影響力を増加させていると主張している。具体的には、米国の「国防授權法」により、イラン中央銀行と取引する外国の金融機関は、米国の金融機関との取引ができなくなる。イラン原油を輸入する場合には、イラン中央銀行と取引する必要があるが、米国で金融業務を行うには、イラン原油の輸入を削減することが求められる。イランは、2017年時点において、250万 b/d 程度の原油を輸出し、その大部分は、中国をはじめとす

表1 IMF 世界経済見通し

	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
世界	3.4	3.4	3.4	3.4	3.2	3.7	3.9	3.9
日本	1.5	1.6	0.0	1.1	0.9	1.8	1.2	0.9
米国	2.3	2.2	2.4	2.6	1.5	2.3	2.7	2.5
ユーロ	-0.7	-0.4	0.9	2.0	1.8	2.4	2.2	2.0
中国	7.7	7.7	7.3	6.9	6.7	6.8	6.6	6.4
インド	4.7	6.9	7.2	8.0	7.1	6.7	7.4	7.8
ブラジル	1.0	2.7	0.1	-3.8	-3.5	1.1	1.9	2.1
アセアン5	6.2	5.1	4.6	4.9	4.9	5.3	5.3	5.3
中東アフリカ	4.8	2.4	2.7	2.7	4.9	2.5	3.6	3.5

(出所：IMF 統計、2018年1月)

表2 イランの核開発経緯

年	概要
2002年8月	イランによる核開発問題が発生
2003年	I A E A理事会でイランに対する非難決議案採択
2006年7月31日	国連安全保障理事会はイランに核開発中止を求める決議採択
2008年9月	遠心分離機約3,800基が設置されるとI A E Aが報告
2009年11月	I A E Aが核施設建設停止を求める決議を採択
2010年2月	20%濃縮ウランの製造を開始
2011年1月	イスラエルによるイランの核施設へのサイバー攻撃
2011年12月	米国がイラン原油の禁輸を内容とする国防授權法成立
2012年1月	E Uがイラン原油輸入禁止で合意
2012年6月	米国のイラン原油制裁法発効
2012年7月	E Uがイラン原油禁輸
2013年8月	穏健派のロウハニ大統領就任
2013年11月	イランと6カ国が共同行動計画で合意
2014年2月	イランと6カ国が包括解決への協議開始
2015年7月14日	6カ国とイランが最終合意
2016年1月16日	核開発に関する制裁解除
2016年11月8日	イランの核合意を批判するトランプ米国大統領当選
2017年10月13日	米国トランプ大統領がイランは核合意を順守してないと演説
2018年5月8日	米国トランプ大統領が核合意を破棄、制裁再開

(出所：各種新聞報道)

るアジア諸国が相手となっている(図3参照)。

イランは、2016年に制裁が解除されるまでは、原油輸出量が150万b/d程度まで減少していた。米国のシェール・オイルの生産量が増加しているといっても、それだけでは、イラン原油の輸入削減措置による100万b/dに達する減少分を補うことはできない。こうした、石油需給逼迫への懸念が原油価格上昇要因となっている。

第3に、サウジアラビア、イスラエルは、イランに対する敵視政策を強めている。イスラエルは、トランプ大統領によるイランとの核合意破棄に呼応するように、シリアの軍事拠点への攻撃を行っている。サウジアラビアも、イラン、カタールと国交断絶しており、イエメンにおいて、イランが背後にいるイスラム教シーア派反政府組織フーシへの軍事攻撃を行っている。中東の大国サウジアラビアとイランとの緊張関係

の高まりと、米国、ロシア、中国の利害の衝突で、中東における地政学リスクが高まっていることから、世界の主要油種となっている北海ブレント原油価格、WTI原油価格は、上昇基調にある。

このように、2018年7月時点においても、国際石油需給が均衡し、中東における地政学リスクが高まっていることから、米国のシェール・オイルの生産量増加が、原油先物市場において、材料視されていないといえることができる。

3. 2018年におけるシェール・ガス革命の3つのポイント

2018年春におけるシェール・ガス革命の3つのポイントを考えると、第1に現時点においても、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命は、米国においてのみ顕著な成果を挙げているエネルギー革命といえる。中国などでも、シェール・ガス開発は行われているものの、生産量は多くない。米国では、「地に足が着いた」現実的なエネルギー革命となり、米国は、世界最大の原油生産国となっている(図4参照)。

第2に、世界最大の石油消費国、天然ガス消費国である米国の「エネルギーにおける自立」は、中東産原油輸入の必要性を低下させ、中東に対する関心を低下させることとなる。米国に

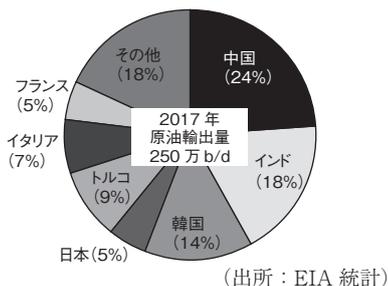


図3 イランの原油輸出先

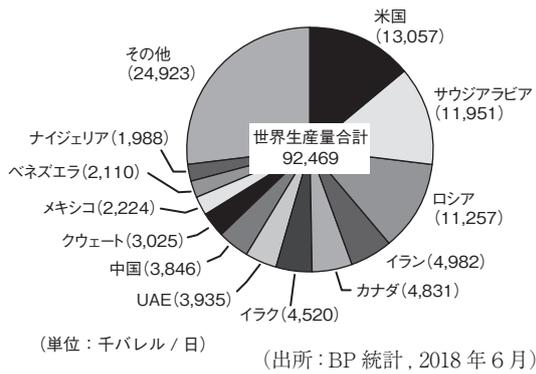


図4 国別原油生産量割合 (2017年)

における石油純輸入量は、急速に減少している(図5参照)。米国における石油純輸入量は、2005年と比較して、800万b/d以上も減少している。これはOPEC加盟国のうち、原油生産量第2位のイラン、第3位のイラクの原油生産量を合わせた量に匹敵する。今の米国にとっては、以前のように中東に巨大な軍事費を投入し、多数の米軍兵士を危険にさらして中東の安全保障に係わる必要性が低下している。

第3に、トランプ大統領による、内向き指向、保護貿易主義、貿易戦争の根底では、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命による米国の「エネルギーにおける自立」と米国のエネルギー産業の繁栄が通奏低音のようにつながっている。米国が、石油、石炭、天然ガスの自給を達成しつつあり、海外にエネルギーを依存する必要がなくなるならば、米国は、国内にとじこもる内向き指向となる。米国国内において、エネルギーと食糧の自給が実現するならば、自由貿

易主義を否定し、貿易赤字解消のために、最大の貿易赤字相手先である中国に貿易戦争を仕掛けることとなる。また、米国経済が国内において完結するならば、米国国内の政治情勢だけを見て、内向きな外交政策をとることが可能となる。トランプ大統領の支持基盤は、白人保守層であり、米国中西部から南部の「ラスト・ベルト」(錆びた工業地帯：かつて石炭産業、鉄鋼産業が繁栄した地域)、「バイブル・ベルト」(南部、中西部のキリスト教保守派の住民が多い地域)は、熱心なトランプ支持基盤となっている。こうした背景があるからこそ、2018年11月に中間選挙を控え、鉄鋼に25%、アルミニウムに10%の追加関税を課すことで、支持基盤の挺入れを図っているのである。エルサレムをイスラエルの首都と認定することも、イランを極端に敵視することも、その根底には、ユダヤ系市民とキリスト教保守派の票を取り込む狙いがある。

米国では、長期的に、シェール・ガス、シェール・オイルの生産量増加が見込まれている(図6参照)。米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命により、国際石油需給は緩和し、原油価格、LNG(液化天然ガス)価格の下落により、日本にとっても、貿易収支の改善、国富の流出の回避という恩恵を受けている。しかし、米国が中東地域に対する関心を低下させ、中東情勢の安定化に責任を負わなくなると、中東情勢が混迷し、原油価格上昇要因となると

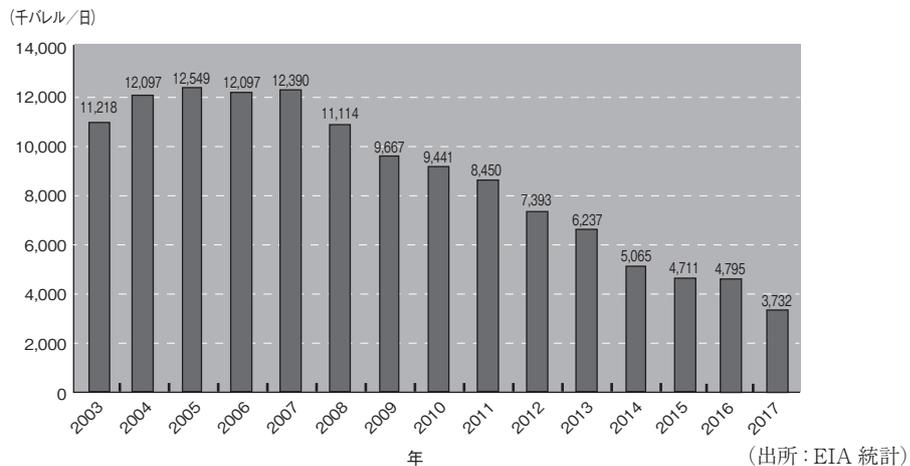


図5 米国の石油純輸入量推移

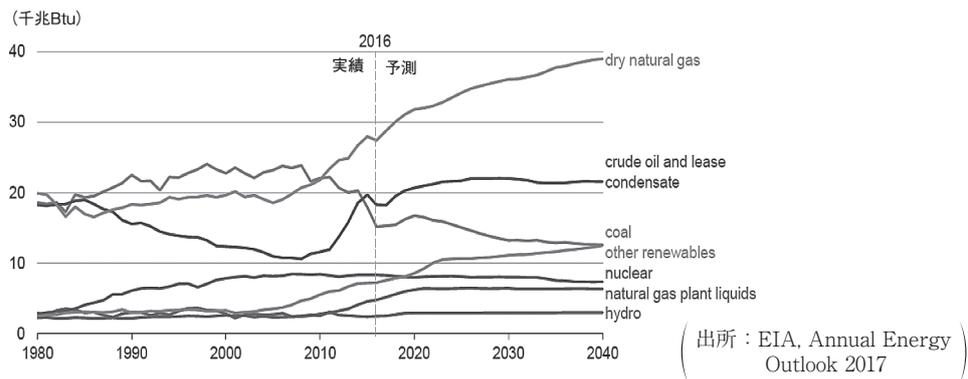


図6 米国のエネルギー生産見通し

もに、その隙を突く形で、中国、ロシアが台頭する可能性がある。既に、シリアは、アサド政権を支持するロシアとイラン、反政府勢力を支持する米国とサウジアラビアとの代理戦争の様相を呈し、それにクルド人の独立運動も加わって、内戦が泥沼化している。イスラム国(IS)という共通の敵が崩壊し、イランが、シリア、レバノンにおいて影響力を増加させ、イランとイスラエルとの緊張も高まっている。

米国が中東への関心を低下させ、中東和平への仲介役を放棄すると、中東地域の紛争、原油供給途絶の可能性が高まる。第1に、米国が国内の選挙対策として、イランの核合意を一方向的に破棄し、イランへの制裁を強化すると、イランの保守派が反発し、核開発が始まる。イランの核開発の強行に、中東諸国が対抗し、核兵器開発ドミノが始まる危険性がある。サウジアラビアは、イランに対抗すべく、核兵器開発の検討も行っている。第2に、米国がシェール・ガス革命、シェール・オイル革命により、中東の原油依存から解放され、中東諸国全体との友好関係を考えることなく、キリスト教保守派の意見を取り入れ、サウジアラビア、イスラエルに過度に肩入れすることにより、中東全体の安全保障の責任者としての役割を果たせなくなる。米国の中東におけるプレゼンスが低下するならば、中東地域における勢力拡大を狙う中国、ロシアが台頭し、中東地域における政治情勢が一段と複雑になる。第3に、米国のシェール・オイル革命により、原油価格の下落が先進国経済に恩恵を与えた反面、シェール・オイル革命

による、米国の中東への関心低下が中東の地政学リスクを高め、結果として原油価格を上昇させるという矛盾が発生する。

こうした状況の変貌には、米国のシェール・オイル生産企業にとっては、シェール・オイルの生産量を増加させているにもかかわらず、原油価格が高値を維持し、石油収入を増加させるという面があることも注視する必要があるのである。

4. 今後の米国のシェール・オイルの生産量

中長期的な国際石油需給を考えるうえで、重要なことは、米国におけるシェール・オイルの生産量だといえる。国際エネルギー機関(IEA)は、米国のシェール・オイルの生産量は、2022年頃をピークに減少していくという見方をしている。一方、図6に示したように、米国エネルギー情報局(EIA)は、2040年にかけて増加を続けていくと予測している。

米国のシェール・オイルは、開発当初は、生産コストが高く、資源量も多くはないと考えられていた。しかし、サウジアラビアとの消耗戦による原油価格の下落局面において、油田開発工程、生産プロセスの効率化により、生産コストを低下させている。具体的には、1本の井戸の掘削期間も、深度3,000メートルを掘削するために必要な期間が数カ月から数週間に短縮され、1本の井戸掘削の費用も4億円程度にまで低減している。また、水圧

破砕（Fracturing）による振動波をコンピューター解析して、3次元、4次元の地質構造把握を行い、掘削作業の最適化を行っている。こうした生産工程における生産コストの低減により、2018年5月時点における、開発条件の良い、スイート・スポットの油田の生産コストは、130ドル／バレル程度まで低下している（図7参照）。

現時点では、70ドル／バレルを超える原油価格において、シェール・オイル生産企業は、十分な利益を手に入れることが可能である。2018年に入ってから、米国のシェール・オイル生産企業のキャッシュ・フローは大幅に改善し、今後のシェール・オイル開発の財務体質は強化されている。もちろん、サウジアラビアの在来型石油（Conventional Oil）と異なり、水圧破砕、水平掘削（Horizontal Well）

などの複雑な作業工程が入ることから、米国のシェール・オイルの生産コストは、中東産油国の原油生産コストよりも割高である。しかし、漸進的な生産プロセスの改良により、シェール・オイルの生産コストは、順調に低下している。

米国では、将来的にも、シェール・ガス、シェール・オイルの生産コストの低下が見込まれ、エネルギー純輸出国となることが期待されている（図8参照）。

5. 天然ガス輸出国となる米国

もともと、シェール（頁岩）の開発は、生産プロセスが容易なシェール・ガスから始まっている。米国では、天然ガス生産量が増加基調にある（図9参照）。2016年には、原油価格の暴

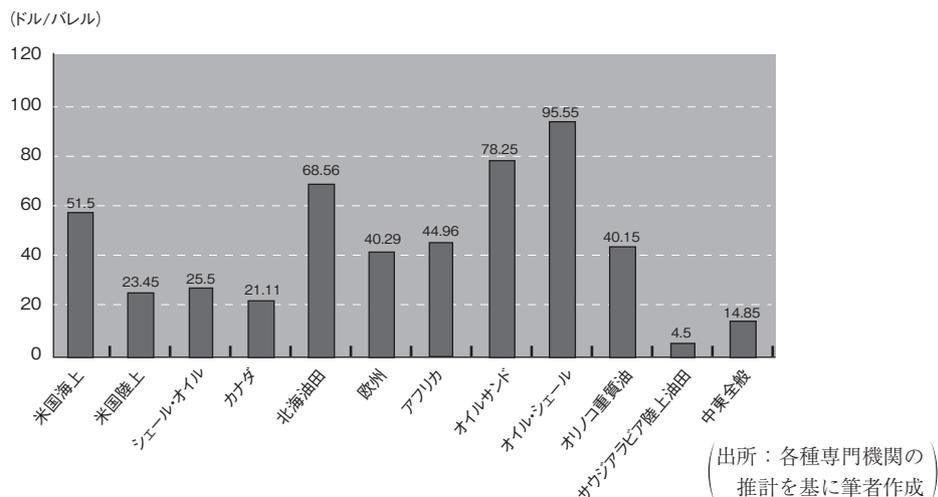


図7 地域別油田発見・生産コスト

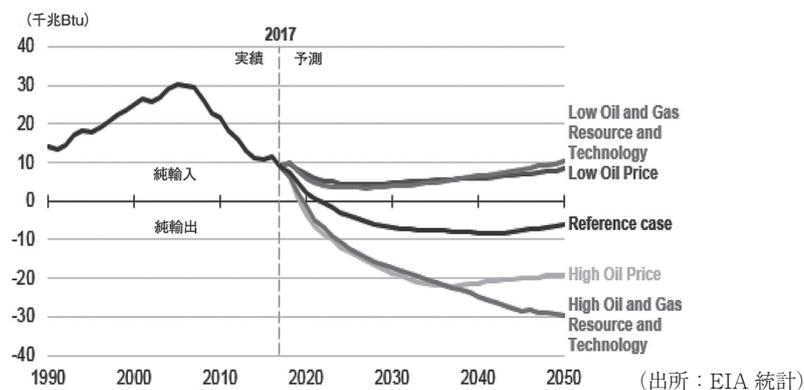


図8 米国のエネルギー貿易見通し

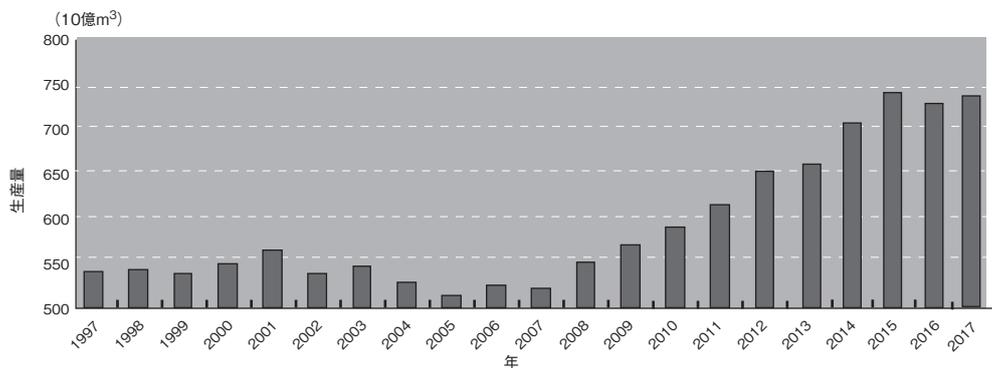
落でシェール・オイル開発が停滞したことから、シェール・オイル生産に伴う天然ガスの生産量が減少し、米国の天然ガス生産量も減退したが、2017年以降は、再び増加基調にある。

シェール・ガス革命により、米国の天然ガス生産量は、2005年を底に、急速に増加している。米国は、2008年時点では、米国国内の天然ガス消費量の増加に伴って、LNGの輸入量が増加し、2020年には、日本を抜いて世界最大のLNG輸入国となると予測されていた。しかし、シェール・ガス革命により、米国の天然ガス生産量が増加し、2017年には、米国は天然ガス純輸出国となった。2016年2月にサービン・パス LNG が、米国本土48州から初めてLNG輸出を開始し、2017年1月には、日本の中部電力(株)がシェール・ガスを原料としたLNGの輸入を開始した。日本は、総輸入量の1割を超える年間1,000万トンのLNGを米国から輸入する契約を締結している。一方

で、米国は、2020年までに、年間7,000万トンに達するLNG輸出能力を持つと見込まれる。

米国では、シェール・ガスを原料としたLNG輸出プロジェクトが相次いでいる(表3参照)。2018年からは、住友商事(株)、東京ガス(株)が参画したコープ・ポイント LNG、中部電力(株)、大阪ガス(株)が参画したフリー・ポート LNG、三菱商事(株)、三井物産(株)が参画したキャメロン LNGなどが、LNG輸出を開始する予定で、日本のLNGの安定調達に貢献することとなる。

米国のシェール・ガスを原料としたLNGの特徴は、第1に、米国ルイジアナ州ヘンリー・ハブ渡しの天然ガス価格を基準とし、原油価格とは連動していないことである。中東、アジア諸国のLNGの場合、日本の輸入量の8割に達する長期契約について、アジアのLNG需給に関係なく、原油価格を指標に価格決定されるフォーミュラとなっている。それに対して、米



(出所：BP 統計，2018年6月)

図9 米国の天然ガス生産量推移

表3 米国 LNG 輸出プロジェクト

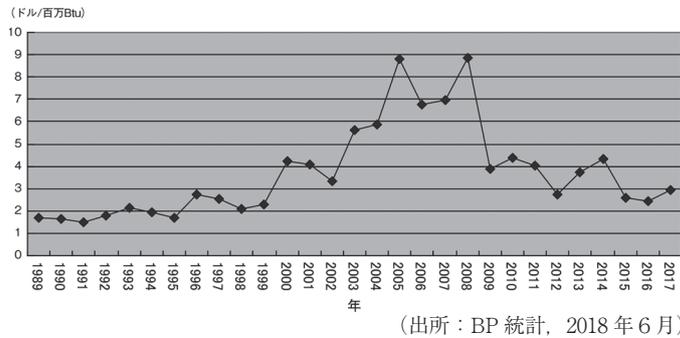
地域	プロジェクト名	事業主体	液化能力 (百万トン)
アラスカ	ケナイ LNG	コノコフィリプス、マラソン	20.0
カナダ	キティマット LNG	三菱商事、シェブロン	10.0
カナダ	ダグラス・アイランド LNG	BCLNG 輸出事業体	1.9
カナダ	プリンス・ルパート LNG	シェル・カナダ	7.5
ルイジアナ	サービンパス LNG	シェニエール・エナジー	27.0
テキサス	フリーポート LNG	フリーポート、豪州マッコーリー	13.9
テキサス	コルバス・クリスティアー LNG	シェニエール・エナジー	13.5
ジョージア	エルバ・アイランド LNG	キンダー・モーガン	2.5
メリーランド	コープ・ポイント LNG	ドミニオン	5.3
ルイジアナ	ドリフトウッド	テルリアン	26.0
テキサス	レイク・チャールズ LNG	サザン・ユニオン、BG	15.0
ルイジアナ	キャメロン LNG	センブラ・エナジー	13.5
オレゴン	ベレセン LNG	ベレセン	7.8

(出所：各種新聞報道)

国の LNG 価格は、米国国内の天然ガス需給を反映して決定されている。米国の場合、ヘンリー・ハブ価格で天然ガスを市場で購入し、天然ガスの液化を専門企業に委託する契約（トーリング方式）となっている。あくまでも、ヘンリー・ハブ価格が LNG 購入の基準となる。米国のヘンリー・ハブ価格は、シェール・ガス革命により、百万 Btu（英国熱量単位）当たり 2～3 ドルと低位安定している（図 10 参照）。そのため、2018 年 7 月時点では、中東情勢の緊迫化で北海ブレント原油価格が 80 ドル／バレル近くに上昇、原油価格連動の LNG 価格が百万 Btu 当たり 10 ドル超となっているのに対し、米国の LNG 価格は、百万 Btu 当たり 7～8 ドル程度と割安となっている。

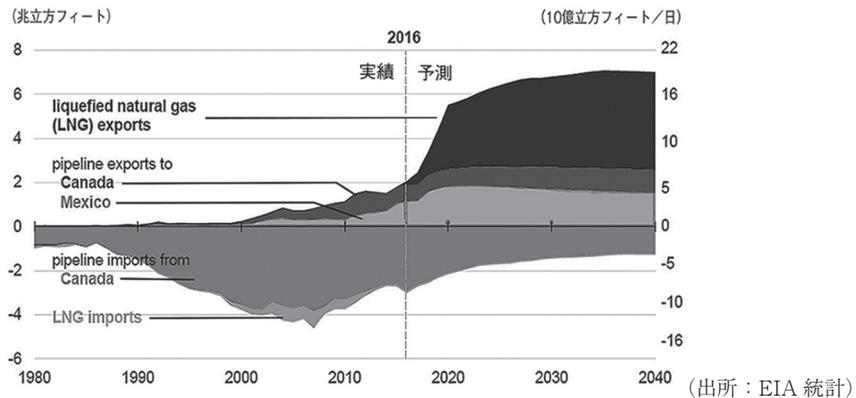
第 2 に、北米の LNG 契約には「仕向け地条項」がない。中東の LNG やアジアの LNG の場合、契約に定められた場所に輸送することが義務付けられ、かつ転売が禁止される「仕向け地条項」がある。米国の LNG の需要家は、LNG が余剰になった場合、より高く購入してくれ

る需要家に転売することが可能となる。日本の需要家である電力企業、都市ガス企業にとっては、原発の再稼働、冬場と夏場の気温変化で LNG 需要が変動することへの対応が課題となっている。そのため、電力企業、都市ガス企業の LNG 事業の採算性において、原発の再稼働、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーの発電状況によって余剰となった LNG が転売可能となる意味は極めて重要といえる。このように、原油価格に連動せず、転売が禁止されていない、米国の LNG の登場は、国際 LNG 取引において、調達源の多角化、価格決定フォーミュラの多様化の観点から、大きな意味を持っている。日本にとっても、地政学的に安定した米国から LNG を輸入することは、エネルギー安全保障の観点からも重要である。さらに、トランプ政権が重視する米国との貿易収支改善にも寄与する。長期的に、米国の LNG 輸出は増加すると見込まれている（図 11 参照）。



(出所：BP 統計，2018 年 6 月)

図 10 米国の天然ガス価格（ヘンリーハブ渡し）



(出所：EIA 統計)

図 11 米国の天然ガス貿易の見通し

6. 日本経済にも大きな恩恵をもたらす 米国のシェール・オイル革命

シェール・ガス革命，シェール・オイル革命により，米国が世界最大の原油生産国となることによって，国際原油市場における OPEC の相対的な影響力が低下した。その結果，国際原油価格は，急速に下落した。2018 年 7 月時点では，米国によるイランとの核合意の破棄，エルサレムをイスラエルの首都と認定したことによる中東情勢の緊張化，イラン原油の供給途絶懸念から，原油価格は上昇基調にあるものの，2014 年時点と比較すると，原油価格は 3 割程度低い水準にある（図 12 参照）。

つまり，21 世紀に入ってからの原油価格の高騰により，もともとは生産コストが割高だったシェール・オイルの開発インセンティブ（誘因）が発生した。一度，シェール・オイルの生産が始まると，生産量の増加→生産効率の向上→さらなる生産コスト低下，という好循環のメカニズムが動き出し，世界的な原油生産量の増加による需給緩和から原油価格の下落圧力が醸成される。原油価格の下落は，直接的には，原油輸入価格，石油製品輸入価格の下落につながるが，それ以外にも，原油価格に連動する長期契約分の LNG 輸入価格の下落をもたらす。さらに，原油価格下落の影響を受け，サウジア

ラビアの国営石油企業サウジアラムコが一方的に通告する，液化石油ガス（LPG）販売価格となるサウジアラムコ CP（コントラクト・プライス）の引き下げにもつながるのである。

米国では，シェール・ガス，シェール・オイルの生産に伴って，プロパン，ブタンなどの LPG 生産が増加している。もともと，米国国内では，天然ガスを発電用，冷暖房用の燃料に利用していたことから，LPG の国内需要は小さい。そのため，シェール・ガス生産に伴った LPG の輸出量が増加し，日本の米国からの LPG 輸入量も増加している。シェール・ガス革命の前，日本の LPG 輸入は，カタール，サウジアラビアをはじめとする中東産油国から大部分を占めていたが，2017 年度では，50% 以上を米国が占めている（図 13 参照）。

米国のシェール・ガス生産，シェール・オイル生産に伴って，LPG の輸入量が増加することは重要な意味を持っている。中東産油国からの LPG 輸入は，アジア地域における LPG 需給と関係なく，サウジアラムコ CP を受け入れるしかない。それに対して，米国の LPG 価格は，米国メキシコ湾モンテベルビュー渡しの市場価格が指標とし，米国国内における LPG の需給関係を反映する。そのため，米国の LPG 輸出が増加すると，サウジアラビアも，一方的に割高な価格を提示できなくなる。サ

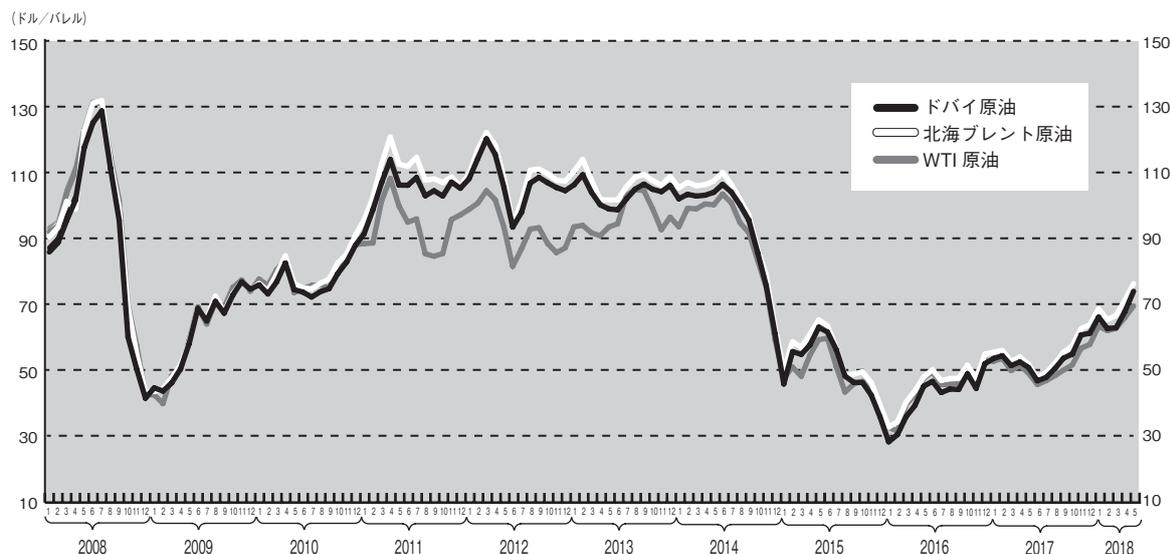


図 12 主要原油価格の推移（2008 年 1 月～2018 年 5 月）

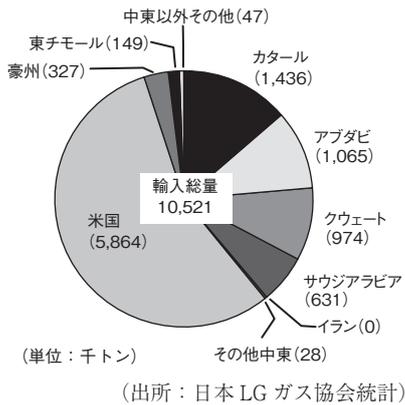


図13 日本の国別LPG輸入量 (2017年)

ウジアラムコCPも、米国のLPG価格を考慮せざるを得なくなり、米国からのLPG輸出量の増加とともに、価格が下落基調となっている(図14参照)。

日本は、米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命によって、原油価格、石油製

品価格のみならず、LNG価格、LPG価格の低下を通じて貿易収支が改善するという、大きな恩恵を受けているのである。

7. シェール・ガス革命と石炭火力発電

上述のように、2017年1月のトランプ政権の誕生とシェール・ガス革命は、底流でつながっている。

シェール・ガス革命で天然ガス価格が低下したために、天然ガス火力の発電コストが石炭火力の発電コストを下回り、天然ガス火力の発電量が石炭火力の発電量を上回っている(図15参照)。一般的には、天然ガス価格が百万Btu(英国熱量単位)当たり4.1ドルを下回ると、天然ガス火力のほうが石炭火力よりも経済性がある。米国では、シェール・ガス

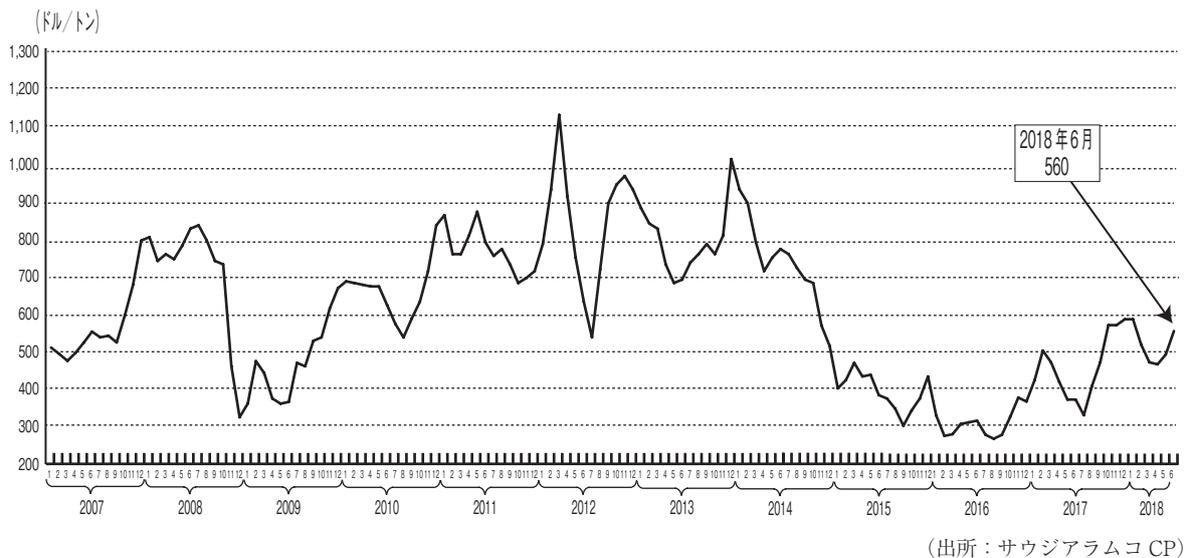


図14 プロパン価格(サウジアラムコCP)の推移

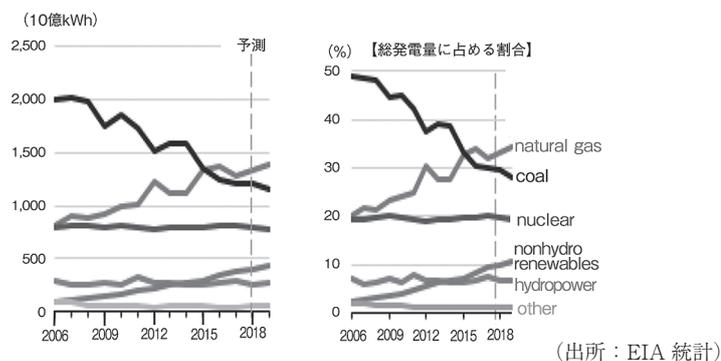


図15 米国における電源別発電量(2006～2019年)



図 16 米国における電源別発電量 (1978年)

革命が起こってからは、長期的に、天然ガス価格が百万 Btu 当たり 2～3 ドルと低位安定している。そのため、米国では、老朽化した石炭火力から、最新鋭の高効率天然ガス火力への切り替えが行われ、結果として、米国の石炭生産量が減少を続けている (図 16 参照)。

もともと石炭産業は、米国における有力なエネルギー産業であり、石炭産業と石炭労働者は、米国共和党の強い支持基盤となっている。石炭生産量の減退にともなう石炭産業の衰退による石炭労働者の不満を、巧みにすくい取ったのがトランプ大統領である。トランプ大統領は、「石炭の消費による地球温暖化はない」という立場にあり、石炭火力発電に係わる環境規制の見直しを行っている。オバマ大統領時代に、石炭火力発電への公的融資の規制が行われたが、トランプ大統領は、石炭火力を促進する姿勢を鮮明にしている。2017年6月には、トランプ大統領は「パリ協定」からの離脱を表明し、石炭産業と石炭労働者は、トランプ大統領を熱烈に支持している。つまり、シェール・ガス革命により天然ガス火力が経済性で優位にたち、石炭産業が苦境に陥り、石炭産業と石炭労働者からの期待を受けてトランプ政権が誕生した。このように、シェール・ガス革命と地球温暖化対策に反対するトランプ大統領は、底流においてつながっている。

8. 地球環境保護にも寄与していシェール・ガス革命

トランプ政権は、「石油、石炭をはじめとする化石燃料の利用による地球温暖化はない」という立場であるが、現実には、天然ガス利用の増加により米国国内の炭酸ガス排出量が減少している (図 17 参照)。

「人類の経済活動による地球温暖化はない」という大統領の立場と矛盾しているように見えるが、シェール・ガス革命により、米国国内では天然ガス消費量が増加し、石炭消費量が減少することによって、トランプ政権は、経済成長を図りながら、炭酸ガスの排出削減による地球温暖化対策に成功している。

シェール・ガス革命により、米国の天然ガスの生産量と消費量が急速に増加している。石炭と比較して、燃焼時の炭酸ガス排出量が半分程

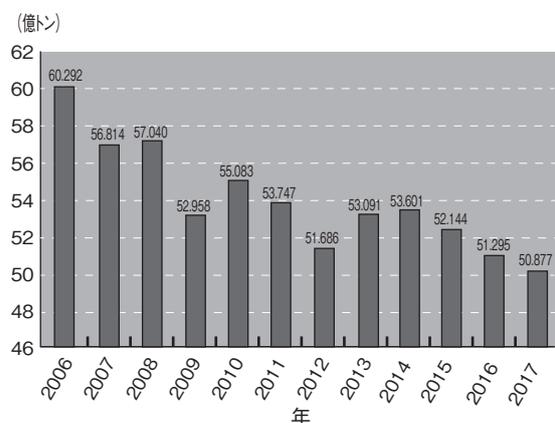


図 17 米国の炭酸ガス排出量

度の天然ガスの利用により、米国全体の一次エネルギー消費量が増加しているにもかかわらず、炭酸ガス排出量が減少するという好循環を形作っている。福島第一原発事故の影響で、炭酸ガスを排出しない原発の再稼動が順調にいとっているとはいえない日本が、炭酸ガス排出量を増加させていることとは対照的といえる。

地球温暖化対策として、世界的にも LNG 貿易は、活発化している。日本における LNG 輸入量は、原発の一部再稼動、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーの普及により、ピークを越えたと考えられる。日本の LNG 輸入量は、年間 9,000 万トン程度が上限となっているが、中国、インドをはじめとする新興経済発展諸国は、地球温暖化対策、大気汚染防止策として、LNG 輸入を急増させている。特に、中国は、石炭火力発電を抑制し、天然ガス火

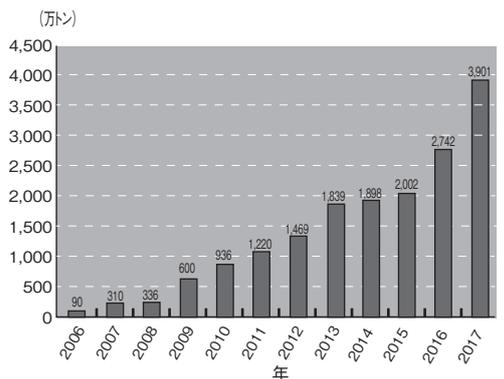
力を増加させるために、2017 年には、LNG 輸入量を増加させている（図 18 参照）。

中国は、2017 年に韓国を抜いて、日本に次いで世界第 2 位の LNG 輸入国となっている。日本、韓国という、従来のプレーヤーの LNG 輸入量が伸び悩む一方で、中国、インドの LNG 輸入量が増加している。世界の LNG 需要は、長期的にも増加し、2023 年頃には、LNG 需給が逼迫する。そうした状況において、米国のシェール・ガスを原料とした LNG 輸出は、LNG 需給の緩和、価格の高騰抑制に、大きな意味を持っている。米国におけるシェール・ガス革命、シェール・オイル革命は、米国のみならず、世界の環境保護にも貢献しているのである。

9. 今後も増加する米国の原油生産量

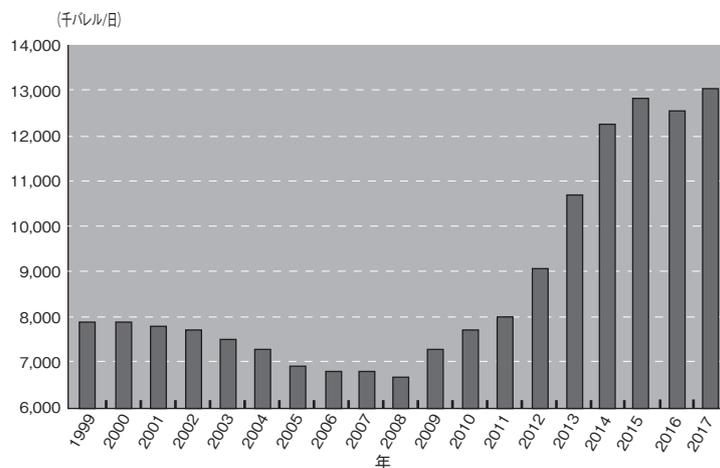
米国でのシェール・オイルの開発は、2018 年に入ってから原油価格の回復により、活発化している。最新の BP 統計によると、米国のシェール・オイルを含めた原油生産量は、2017 年には再び増加している（図 19 参照）。米国の原油生産量は、天然ガス液（NGL）も含めると、1,300 万 b/d を超え、過去最高となった。

米国の原油生産量は、IEA の統計では、1,000 万 b/d を超えており、1970 年代以来の水準に達している。米国は、サウジアラビア、ロシアを抜いて、世界最大の原油生産国となっている。



(出所：国際 LNG 輸入者協会統計)

図 18 中国の LNG 輸入量推移



(出所：BP 統計、2018 年 6 月)

図 19 米国の原油生産量推移

サウジアラビアの陸上油田と米国のシェール・オイルとの消耗戦により、2016年2月には原油価格が26ドル/バレルまで暴落した経験を踏まえ、サウジアラビアをはじめとするOPEC加盟国とロシアをはじめとする非OPEC加盟国が、2017年1月から合計180万b/dに達する協調減産を実施した。サウジアラビア、ロシアともに、原油生産量が2016年比で減少している。協調減産の実行により、原油価格が回復したことから、米国のシェール・オイルをはじめとする原油生産量が増加した。つまり、サウジアラビアが原油価格上昇を優先したため、米国のシェール・オイルの市場シェアが拡大するという皮肉な結果となっているのである。

10. シェール・ガス革命により動き出したエチレン・プラント

米国におけるシェール・オイル、シェール・ガスの生産量の増加とともに、世界の石油化学産業にも、大きな影響が与えている。シェール・ガス、シェール・オイルの生産により、天然ガスの主成分であるメタン(CH₄)に加えて、エタン(C₂H₆)が随伴して生産される。エタンは、C₂系として、エタン・クラッカーにより、石油化学の基礎原料となるエチレン(C₂H₄)が製造できる。日本の石油化学は、ナフサ(粗製ガソリン)を原料として、ナフサ・クラッカーにより、エチレンを製造している。原油価格が1バレル70ドル台であるのに対して、エタ

ン価格は、百万Btu当たり3ドル(石油換算18ドル/バレル)であることから、汎用品であるエチレン、ポリエチレンを生産するには、米国のシェール・ガスを原料としたエチレンに、圧倒的なコスト競争力がある。米国では、天然ガス生産量と原油生産量の増加とともに、安価なエタンを利用したエチレン・プラントが、2017年後半以降、次々と稼働を開始している(表4参照)。

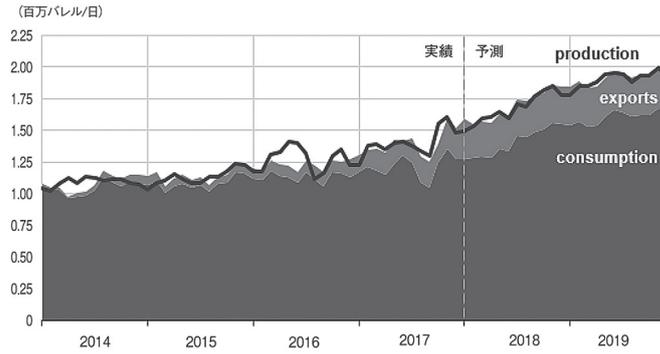
シェール・ガス革命が本格化した当初は、2017年に、シェール・ガスを原料としたエチレン・プラントが本格稼働する予定であった。しかし、2017年に来襲した大型ハリケーンの影響と原油価格の低迷によるシェール・ガス開発、シェール・オイル開発の短期的な停滞から、米国におけるエチレン生産が遅延している。中国の石炭化学も石炭利用への環境規制から抑制されている。そのため、2017年にはアジアのエチレン需給が逼迫し、エチレン価格が上昇し、日本の石油化学企業は、「米国のシェール・ガス革命の脅威」という予想と異なり、史上最高決算となっている。しかし、2018年夏以降からは、米国の安価なエチレン生産が増加する。米国では、今後ともエチレンの原料となるエタンの生産量も増加すると見込まれている(図20参照)。

2018年以降は、米国からの安価なポリエチレンをはじめとする汎用品のアジアへの輸出が本格化し、これが日本の石油化学企業にとって大きな脅威となる。米国、中東の安価な天然ガスを原料としたエチレンとポリエチレン

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	2017
エクソンモービル	150	テキサス州	2018
シェブロン	150	テキサス州	2018
Formosa(台湾)	115	テキサス州	2018
信越化学	50	ルイジアナ州	2018
サゾール	155	ルイジアナ州	2018
オキシデンタル	55	テキサス州	2017
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	2018
エクソンモービル, SABIC	180	テキサス州	2020

(出所：各種新聞報道)



(出所：EIA 統計)

図 20 米国のエタン生産量（月別）の推移

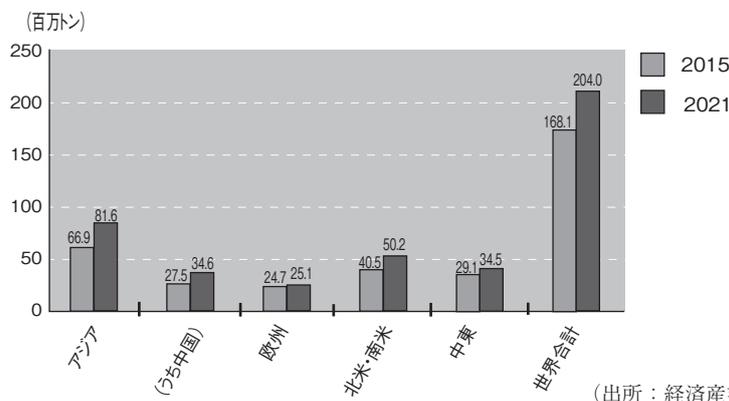
がアジアに大量に流入することで、汎用品の分野において、日本の石油化学企業のコスト競争力が低下するからである。そのため、日本の石油化学企業としては、シェール・ガスでは生産が難しい、プロピレン、ベンゼンなどの高付加価値化学製品の生産、機能性化学品（エンジニアリング・プラスチック）の生産強化をはかる必要がある。これまでも、日本の石油化学企業は、ナフサを原料としなければ生産できない機能性化学品に注力してきた。現在、C₂系では、製造が難しいベンゼンをはじめとする芳香族の得率を向上させることが求められている。食品トレー、建材などに利用されるポリスチレンは、エチレンにベンゼンを混ぜることから、日本のJXTGエネルギー(株)、出光興産(株)などから、米国へのベンゼン輸出が増加している。信越化学工業(株)も米国の安価なエチレンに塩素を混ぜた塩化ビニールの生産能力増強に活路を見出し、

年産50万トンのエチレン・プラントを米国で建設している。これらの動きにより、2021年に向けて、米国におけるエチレン生産能力が増強される（図21参照）。

日本の石油化学企業は、2018年夏以降、米国のシェール・ガスを原料としたエチレンとの戦いが本格化することから、単純な価格競争に巻き込まれることなく、エタンでは生産できない、ナフサを原料とした石油化学の強みを発揮する必要がある。

11. シェール・オイルと今後の原油価格

2018年6月22日のOPEC総会、23日の非OPECとの会合において、おりからの原油価格の上昇を受けて、協調減産の緩和が議論された。しかし、米国からの制裁を再開されたイランなどの反発を受け、積極的な減産緩和ではなく、減産順守率を100%とすることにと



(出所：経済産業省統計)

図 21 世界のエチレン換算生産能力の推移

どめた。2017年1月から実施された協調減産は、エネルギー専門家の予想を超えて、順守率が150%に達している（表5参照）。OPEC加盟国と非OPEC加盟国による協調減産がエネルギー専門家の予想を超えて順調に達成されていることから、世界の石油需給は均衡に向かい、原油価格が上昇している。

OPEC加盟国の状況を見ると、リビア、ナイジェリアなどは、国内情勢の混迷から、原油生産量が減少し、ベネズエラは、国内政治情勢、社会情勢の不安定から、原油生産量が大きく落ち込んでいる。そのため、OPEC加盟国全体としては、当初の目標を大幅に上回る減産を実現し、原油価格回復に成功した。しかし、ガソリン価格の高騰が中間選挙に与える影響の懸念から原油価格の上昇に反発するトランプ政権への配慮もあり、2018年6月のOPEC総会では、協調減産緩和へ戦略をの切り替えた。他方、サウジアラビアが主導する100万b/dに達する積極的な増産姿勢に対し、増産ができないイラン、イラクなどは、減産緩和による原油価格下落が石油収入の減少につながることから、増産に強硬に反発した。その結果、OPEC加盟国全体として、積極的な協調減産幅を明示せず、目標を超過し

た減産を、当初の目標値まで戻すという消極的な減産緩和にとどまっている。そのため、OPEC加盟国による協調減産を織り込んで下落した原油価格は、OPEC総会后に上昇し、WTI原油価格は、2018年6月28日時点で1バレル73.45ドルに上昇した。2018年7月時点では、①OPEC加盟国と非OPEC加盟国による協調減産緩和が小幅にとどまること、②世界経済が順調に拡大していること、③米国がイランとの核合意を破棄し、イランに対する制裁により、イラン原油の供給が減少すること、④米国がイラン原油の輸入取りやめを日本をはじめとする各国政府に求めイランを兵糧攻めにしていることなどにより、原油価格のさらなる上昇への期待感が原油先物市場に渦巻いている。夏場のドライブ・シーズン到来により、米国のガソリン需要が増加することから、WTI原油価格は、2018年8月には、1バレル80ドル近くまで上昇する可能性がある。

他方、原油価格の上昇は、米国におけるシェール・オイルをはじめとする原油生産量を増加させる。米国における原油生産量は、EIAの月別統計によると、1970年以来の過去最高に達している（図22参照）。

表5 OPEC原油生産実績

(単位：百万バレル/日)

加盟国	従来の目標生産量	2018年4月生産量	2018年5月生産量	削減目標	5月達成率(%)
アルジェリア	1.20	0.99	1.04	0.05	98
アンゴラ	1.52	1.50	1.53	0.08	283
エクアドル	0.43	0.52	0.53	0.03	69
赤道ギニア		0.12	0.12	0.01	167
ガボン		0.19	0.17	0.01	356
イラン	3.34	3.82	3.82	-0.09	n.a.
イラク		4.41	4.47	0.21	43
クウェート	2.22	2.71	2.71	0.13	98
リビア	1.47	0.99	0.97	0.00	0
ナイジェリア	1.67	1.59	1.47	0.00	0
カタール	0.73	0.60	0.61	0.03	127
サウジアラビア	8.05	9.92	10.02	0.48	108
UAE	2.32	2.87	2.87	0.14	103
ベネズエラ	2.15	1.41	1.36	0.10	744
OPEC合計	30.00	31.64	31.89	1.18	158

(出所：IEA オイル・マーケット・レポート、2018年6月13日)

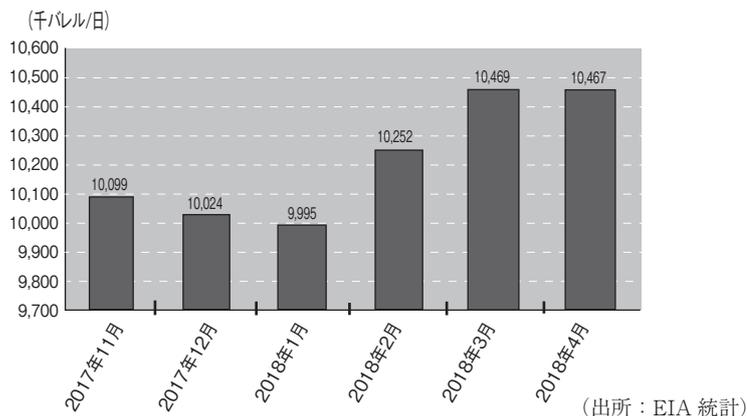


図 22 米国の原油生産量

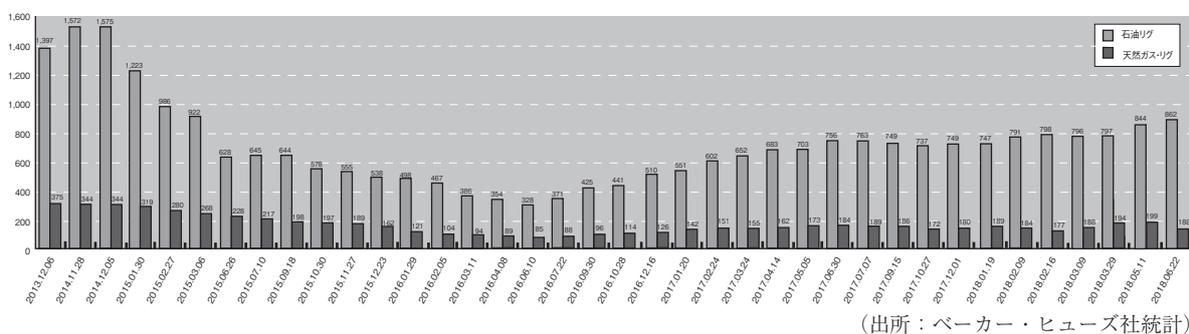


図 23 米国のリグ稼働数推移 (2013～2018年)

2018年6月時点では、1,090万 b/d 程度まで、増加している。米国におけるリグ（新規油田開発のための掘削装置）稼働数も増加基調にある（図 23 参照）。

米国におけるシェール・オイルの開発活発化に伴うシェール・オイルの生産量増加は、原油価格の上値を抑える要因となる。しかし、イランに対する制裁再開による、イラン原油の輸出量減少幅は、100万 b/d を超える可能性があり、短期的には、米国のシェール・オイルの生産量増加が補うことは難しい。そのため、国際原油市場における石油需給逼迫感が増し、2018年秋に向けて、原油価格は上昇基調となる可能性が高い。こうした原油価格の強気な見方により、米国のシェール・オイル生産企業の開発投資は、増加基調にある。低炭素社会構築への動き、電気自動車普及の見通しから、先進国における石油需要は減少することが見込まれる。しかし、アジアをはじめとする途上国では、ガソリン車の普及によ

り、世界全体としては、2040年に向けて、世界の石油需要は、増加すると予想されている（図 24 参照）。

2040年まで世界の石油需要が増加し、1億 b/d を超え、米国のシェール・オイルの生産量も長期的には増加する。とするならば、今後も、中東産油国の原油と米国のシェール・オイルとの消耗戦が続き、国際原油価格への OPEC の影響力は低下し、米国のシェール・オイルの生産動向が国際石油需給、原油価格の主導

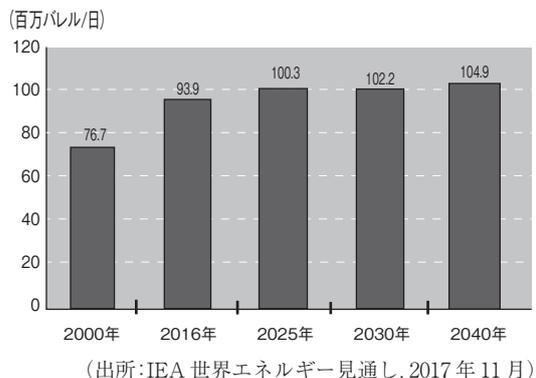


図 24 世界の石油需給見通し

権を掌る可能性がある。それと同時に、米国のシェール・オイルの生産量が増加を続けている状況において、欧州諸国をはじめとする環境先進国の機関投資家、年金基金、金融機関などは、石油関連事業の Divestment（投資引き揚げ）の動きを見せている。大手自動車メーカーは、一斉に電気自動車（EV）の開発に舵を切り、フランス、英国などは、2040年までにガソリン車販売を禁止することを表明するようになっている。この1年において、石炭のみならず、石油も炭酸ガスを排出する化石燃料として、脱石油の動きが加速している。従来の「石油ピーク論」は、世界の原油生産量が減退し、原油供給が途絶して、原油価格が天文学的に高騰するという「供給サイドの石油ピーク論」であった。しかし、現在議論されている「石油ピーク論」は、石油を必要としなくなる「需要サイドのピーク論」に変貌している。

OPEC加盟国と非OPEC加盟国による協調減産により、原油価格は、再び上昇基調にあり、財政赤字に直面する中東産油国の財政状況も改善している。しかし、長期的な国際エネルギー情勢を考えると、新たなシェール・オイルの開発への動きと石油需要ピーク論に注視することが求められているのである。

[寄稿]

原子力革新技術への挑戦 —SMR への期待—

田中 隆則 (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター
専務理事



1. はじめに

日本の原子力利用は、「エネルギー基本計画」に基づき、進められてきているが、本稿の執筆時(2018年6月)においては、「第5次エネルギー基本計画(案)」のパブリックコメントが行われている。この計画案において、原子力利用のベースは変わらないものの、技術開発の視点から、「小型モジュール炉や熔融塩炉を含む革新的な原子炉開発を進める米国や欧州の取組も踏まえつつ、国は長期的な開発ビジョンを掲げ、民間は創意工夫や知恵を活かしながら、多様な技術間競争と国内外の市場による選択を行うなど、戦略的柔軟性を確保して進める。」としている。

このような、方針案が提示されることとなった背景として、近年、海外において小型モジュール炉(SMR: Small Modular Reactor)の開発に向けての様々な取り組みが行われている現実が、無視できないほど活発化していることを要因の1つとして挙げることができる。

特に、米国、英国、カナダにおいては、政府も積極的に開発を支援する動きがみられており、国際原子力機関(IAEA)や経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)などの国際機関においても、SMRに関連する報告書が取りまとめられるなど、国際的にSMRへの関心が高まっている。このようなSMRの特性を分析し、そのエネルギー供給に占める役割を考察する。

筆者は、2017年10月末まで(一財)エネルギー総合工学研究所(IAE)に勤務し、原子力分野の調査研究を行っていたが、退任の直前までSMRの国際動向に関して所内の関係者で調査を進め、そのエネルギー市場へのインパクトについて検討を行っていた。そのIAEにおける調査研究の成果を以下に紹介する。

なお、本稿は、筆者が「日本原子力学会誌」(Vol.60, No.7)に掲載した解説記事「小型モジュール炉(SMR)を巡る国際動向とそのインパクト」(本年2月執筆)を基に、本年6月までの最新情報も踏まえ加筆等を行い、取りまとめたものである。

2. 原子力事業の現状

2011年に発生した福島第一原子力発電所事故は、原子力災害の影響の甚大さを認識させるものとなり、各国の原子力政策に大きな影響を与えた。また、電力市場を始めとするエネルギー市場の自由化の進展に伴い、投資回収に長期を要する原子力事業は、リスクの高いものと見なされ、新設が難しくなっている。

一方、シェールガスの生産技術の革新により、国際石油情勢は大きく変貌し、天然ガスの利用が拡大すると共に、再生可能エネルギーは、政策支援と技術の進歩により、その供給シェアを大きく伸ばしている。また、IT技術は、スマートグリッド/デジタルグリッドの成立を可能としている。また、地球温暖化問題は、

国際的に喫緊の課題となっており、これまで以上に効果的な対策を大規模に進めることが求められている。

変貌するエネルギー情勢の中で、様々なニーズに同時に対応するため、原子力をはじめとするエネルギー技術のイノベーションへの期待が高まっている。

これまで、原子力技術に関しては、「第4世代原子力システムに関する国際フォーラム」(GIF)等の枠組みにおいて、高度な安全性、持続可能性、良好な経済性等を開発目標とした革新的原子炉の研究開発が進められている。GIFで取り上げられている炉型のうち、高温ガス炉、高速炉を中心にその研究開発が、米国、英国、フランス、ロシア、中国、インドといった国々で進められている。

このような炉型とは別の視点から最近になって注目されているのが、SMRである。出力が小さく工場生産によるモジュールの組合せで設置するSMRは、各種の炉型が構想されているが、共通に、安全性の向上、自由化市場への対応、原子力産業の活性化など様々な視点から優れた特性を持つと期待され、米国、英国、カナダを中心として開発へ向けての取組みが見られる。さらには、アジア、中東等の諸国でも現行の大型軽水炉に加え、SMRも含めた革新的原子炉の研究開発・導入への関心が高まっている。

3. SMRへの期待

従来、SMRとは、中小型炉 (Small and Medium Reactor) の呼称であり、IAEAにおいても、そのような使い方をしていたが、国際的な小型モジュール炉の開発の動きを受け、現在は、IAEAも含め一般に小型モジュール炉 (Small Modular Reactor) をSMRと呼んでいる。

このSMRは、次のような特性を持っており、従来の大型炉と比べ、安全性の向上、電力自由化への対応、スマートグリッドへの適合性、などの点で時代のニーズに応えるものとなるとの期待が持たれている。

- フルパッシブなど革新的な安全設計が期待され、内蔵放射能が小さいことともあり、リスクの低減に伴い合理的な安全基準の適用や防災計画エリアの縮小などが可能 (レジリエンス性が高い)。
- ほとんどを工場で組み上げる生産方式の採用が可能となり、品質の維持・向上を達成しやすい。
- 燃料取り換え不要、あるいは取替頻度を小さくすることにより、メンテナンスが容易となり、核セキュリティ上のメリットもある。
- 電力需要が小さい地域や電力グリッドの未発達な地域 (途上国等) への普及が可能となる。
- 熱供給と併せた活用の自由度が拡大する。
- 初期投資が抑えられ、早期の投資回収、段階的な容量増加など柔軟な選択が可能となり、電力自由化市場に対応した経営戦略にマッチする。

4. 国際機関における SMR の位置づけ

(1) 国際原子力機関

IAEAは、SMRに関するワークショップ、技術会合、コンサルタント会合などを2012年から数多く開催している。2014年9月には、SMRの開発状況等を取りまとめた報告書 “Advances in Small Modular Reactor Technology Developments”⁽¹⁾ を公表している。現在も、SMRの技術ロードマップや環境影響評価に関する報告書や安全に関するTECDOC (Technical Documents) などを取りまとめているところである。

IAEAの安全基準に基づく協力を基礎として、各国の規制機関 (幹部) が規制に関する知識や経験の共有を図るフォーラム (RCF: Regulatory Cooperation Forum) は、IAEAの第61回総会 (2017年9月22日) のサイドイベントとして、第8回会合を開催し、「SMRに特化した許認可プロセス」をテーマとして取り上げた。その後、技術会合やワークショップなどの活動がパイロット・プロジェクトとして行われ、2018年1月には規制上の課題を取り上げた報告書が作成された。今後、安全要件設定に関して包括的な指導要綱も作成する模様である。

また、IAEA の共同研究プロジェクト（CRP: Coordinated Research Project）において、SMR に関する研究が実施、あるいは計画されている。例えば、“Design and Performance Assessment of Passive Engineering Safety Features in Advanced Small Modular Reactors” が 2017 年 7 月に 3 年計画で開始された。SMR のうち、特に、現在開発中の PWR 型のものを中心に検討されている。また、“Development of Approaches for Determining Technical Basis for Emergency Planning Zone (EPZ) for SMR” が 2018 年から開始される予定となっている。IAEA の革新的原子炉開発プロジェクト（INPRO）においても、工場生産型の SMR の普及に関するケーススタディが実施されている。

また、これまで軽水炉（軽水/重水）の技術に関する検討を行う技術作業グループ（TWG-LWR）が、革新炉や SMR も含めた検討を行ってきたが、SMR に関する検討を行うための技術作業グループを新たに設置し、2018 年 4 月末に第 1 回会合を開催した。上記の IAEA のプログラムと連携を持って活動を行う予定である。

（2）経済協力開発機構 / 原子力機関

OECD/NEA においても、加盟国の SMR への関心の高まりを踏まえ、2016 年 12 月、報告書 “Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment”⁽²⁾ を公表した。この中で、SMR の経済性評価を行い、原子力市場への影響を分析し、将来の普及予測を示している。また、米国とロシアを対象としてケーススタディを行い、SMR の可能性と課題を検討しており、それらの結果に基づき、提言等を取りまとめている。

5. 各国の動向

（1）米国

米国においては、原子力技術、原子力産業におけるリーダーとしての位置づけを維持するこ

とが、安全保障の観点からも不可欠との視点があり、SMR も含めた原子力技術開発への積極的な取り組みが見られる。なお、英国やロシアなどと同様、軍用原子炉の維持・開発ニーズがあり、関連産業が存在している点は、日本と異なる環境にあることに留意する必要がある。米国議会下院は、2017 年 1 月、新型原子炉技術の研究開発促進法案を可決、上院環境・公共事業委員会で審議中である。法案では、原子力発電における米国のリーダーシップ維持の観点から、新型原子炉許認可を効率化するため、エネルギー省（DOE）と原子力規制委員会（NRC）が連携して取り組むことを求めている⁽³⁾。

DOE においては、次世代革新炉としてガス炉（NGNP）の開発支援を行ったが、民間との共同開発のフェーズに移行できないまま、開発は中断されている。現在は、SMR をはじめとする革新的原子力技術の早期導入に向けて、特に、許認可プロセスの確立に向け産業界・NRC と連携した取り組みを行っている。具体的な支援プログラムは、次のとおりである。

- LTS (Licensing Technical Support program) : 新しい原子力技術に関する許認可対応を支援する制度。SMR は、革新的な炉型であり許認可リスクが大きいことから、支援対象としており、NuScale の軽水型 SMR が支援を受け、NRC の設計認証の審査を受けているところ。
- GAIN (Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear) : 産業界や大学・研究機関に対する革新技術の研究を支援。DOE の国立研究所を活用。
- MEITNER (Modeling-Enhanced Innovations Trailblazing Nuclear Energy Reinvigoration) : ARPA-E (エネルギー高等研究計画局) は、2017 年 10 月、大幅なコスト低減、安全でセキュリティ性に優れた簡単運転、建設期間の劇的な短縮などを実現するための革新的原子力技術を開発するためのプロジェクトとして、MEITNER を立ち上げた。現在、運搬可能で負荷追従可能なモジュール・ガス冷却炉など 10 件の技術開発プロジェクトを選定、支援している。

DOE は、2017 年 1 月には、SMR も含めた革新炉について、2030 年代の導入を目指した

開発・導入のビジョンと戦略を取りまとめ、公表している。

NRCは、DOEの支援を受け、アイダホ国立研究所内で炉の建設を予定しているNuscale社の設計認証（炉の型式認証）申請を受理し審査を進めており、2018年4月に安全審査の第1フェーズが終了した。最後の第6フェーズは2020年9月に終了するというスケジュールを公表している。その他、2件のSMR（BWXT mPower, SMR-160）についてPre-Applicationが出されているが、いずれも軽水炉型であり、既存の規制基準の延長上で対応可能と思われる。しかし、SMRに特有の課題もあるため、10数件に亘る課題（ソースタームの計算方法、緊急時計画の要件など）を抽出して検討を行っている。その多くは、軽水炉型SMRのみならずnon-LWR型にも適用されるものである。許認可に関しては、これらの設計認証申請のほか、TVA社がClinch River Nuclearサイトに複数のSMRを設置するとの早期立地許可（Early Site Permit）を申請しており、安全面と環境面の審査が平行して進められている。2019年8月に審査を終了するとのスケジュールが公表されている⁽⁴⁾。なお、NRCは、出力30万kW以下の軽水炉をSMRと定義しており、非軽水炉型の炉は、出力に関係なくnon-LWR型の革新炉とのくくりで取り扱うなど、用語については、注意が必要である。

政府におけるSMR関連の取り組みは、これ以外にも米航空宇宙局（NASA）において行われている。NASAは、出力10kWで10年の連続運転可能な超小型原子炉（Kilopower）を太陽エネルギーが利用できない宇宙空間でのエネルギー源とするため、DOEの協力を得て開発すべく取り組んでおり、2018年5月、宇宙での利用が可能であることを実証したと発表している。

このような政府の動きの背景には、SMRを巡る産業界の活発な動きがある。SMR設計の商業化を進めている米国企業14社が連合して業界団体「SMR START」を創設し、米国で

開発されるSMRの国内建設と将来的な輸出を加速するには、官民の連携が不可欠であると連邦政府に訴える声明文を発表するなど、DOEをはじめとする政府、議会等への働きかけを行っている。「原子力イノベーション連合（NIA）」は、原子力分野の技術革新と革新炉の商業化を提唱する技術者、学者、企業・投資家、環境保護団体などの連合組織であるが、2017年10月11日、政府に対してSMRの開発・商業活動に対して支援を呼びかける報告書を取りまとめた⁽⁵⁾。この報告書では、コスト面も含めたSMRの優位性や、再生可能エネルギーと組み合わせた電力システムの構築可能性、などをアピールするとともに、許認可や税制面など、技術開発後の競争条件整備を求める提言が盛り込まれている。

なお、原子力機器の製造技術が衰退している状況を転換し、原子力産業を復活させるべく、先進的製造技術に取り組む「先進的原子力製造センター（CANM）」を発足させるなど、積極的な取り組みも進められており、NuScale社の内蔵型蒸気発生器の開発もここで実施予定とのことである。

具体的な革新炉への取り組みは、Nuscale社などの軽水炉型のSMRだけに留まらない。ARCニュークリア社（aSMR, GEH（PRISM）と連携）、TerraPower社（TWR：進行波炉）、Transatomic Power社（溶融塩炉）などのnon-LWR、さらにはTri Alpha Energy社の核融合炉など、ベンチャー企業による革新技術開発への挑戦が行われており、それらに民間資金が投入されていることに驚かされる。

（2）英国

英国は、マグノックス炉の運転終了と石炭火力の低減方針のもと、それらを代替する電源として、ホライズン社などによるヒンクリーポイントでの大型軽水炉の新設を早期に実現させるべく取り組んできている。しかし、これらのプラントはいずれも海外のベンダーによる事業であり、国内の原子力産業の振興の

観点から SMR の開発を求める声が、議会、政府、研究機関、産業界から挙がってきている。

2014 年、国立原子力研究所 (NNL) は、政府からの委託を受け、SMR の市場性や技術に関するフィージビリティスタディ (FS) を実施し報告書を取りまとめた⁽⁶⁾。その中で、有望な技術として 4 種類の SMR (ACP100, NuScale, mPower, Westinghouse SMR) を選定している。英国の官民連携シンクタンク、エネルギー技術研究所 (ETI) は、2016 年 9 月、2030 年までに SMR を開発するための政策的な取組等に関する報告書を公表し、熱電供給システムとしての利用を推奨している。

このような動きの中、キャメロン政権 (財務相はジョージ・オズボーン) の下、ビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS: Department for Business, Energy & Industrial Strategy) は、原子力の革新的技術開発において英国がリーダーシップをとるための施策の一環として、SMR の開発と商業化および資金調達に対する市場の関心を正確に把握するため、SMR コンペ (フェーズ 1) を 2016 年 3 月に開始、2016 年秋までにフェーズ 1 を終わるとのスケジュールが示されていた。しかし、締め切りを過ぎても政府からの正式な発表はなく、このような政府の対応を踏まえ、2017 年 5 月には、議会上院・科学技術委員会が、報告書 “Nuclear research and technology: Breaking the cycle of indecision”⁽⁷⁾ において、原子力産業の振興に向けて政府が必要な決断を行う必要性を指摘し、研究開発支援の拡大、第 4 世代炉開発 (GEN-IV) への参加、NNL への資金供与などを求めた。また、SMR コンペの工程が守られていない点に、戦略決定ができない政府の問題が表れているとも指摘している。なお、SMR を巡っては、これまで議会下院から開発支援を行う前に市場性を確認すべきとの指摘もなされていた。

現在のメイ政権が SMR に対してどのような対応を取るのか注目されていたが、2017 年 12 月 7 日、「SMR コンペ (フェーズ 1)」が終了し

たことが公表された。関心表明を行った 33 の組織とプロジェクトの名前が示されたが、フェーズ 1 の次のステップが特段計画されていないことも明らかとなった。その一方、BEIS は、同日付で、革新的原子力技術の開発に資金供与 (2016 年 11 月に開始された幅広い革新原子力技術開発支援の第 2 フェーズ) を開始する旨公表した。安全・セキュリティ技術、核燃料技術がその対象となる。これと併せて、SMR を含めた革新モジュール炉について、規制機関の審査能力の向上を図ると共に、8 程度のベンダーに対し、炉の技術的・経済的実現可能性調査を支援し、その結果、有望な 3~4 程度のベンダーに対し、開発促進のための資金支援をさらに実施するとの方針を示した。

産業界は、軍事用の小型原子炉技術を持つロールスロイス社を中心に、積極的に SMR の開発を進め国内のサプライチェーンと雇用の創出を図る必要があると主張し、政府に対して働きかけが行われている。なお、国際市場を目指すには、英国企業のみでは困難であり、海外企業との連携が必要とされている。製造技術の開発のため、2017 年 7 月、「原子力先端製造研究センター (Nuclear AMRC)」が開設されている。

(3) カナダ

カナダにおいては、政府系研究機関を中心として、SMR 実現に向けた取り組みが行われている。特徴的な点は、規制機関において、多くの SMR のベンダーから設計に対する事前審査サービスへの申し込みを受け、審査が進められていることである。

カナダ原子力研究所 (CNL: Canadian Nuclear Laboratories) は、SMR 技術を優先研究課題に位置付け、Chalk River サイトにおいて 2026 年までに商業炉としての成立性を示すことを目標としている。2017 年 6 月、ベンダーや研究者やユーザー等に対し SMR に対する関心表明を求めた。8 月 9 日に応募は締め切られたが、世界各地から 80 件 (381 機関・個人) の関心表明があり、日本からも 1 件あった模様で

ある。応募者が開発中の革新炉は、様々な炉型に亘っており、核融合炉も含め21に上っている。CNLは、提出された情報を基に、SMRの特性やカナダでの開発の可能性を分析し、2017年10月にサマリーレポートを公表した⁽⁸⁾。CNLは、このレポートを踏まえ、2018年4月17日、AECL（Atomic Energy of Canada Ltd.）社のサイトに建設するSMRの提案募集を開始した。2018年6月11日に応募は締め切られたが、今後、炉型選択等がどのように進むのか注目される。

規制機関であるカナダ原子力安全委員会（CNSC：Canadian Nuclear Safety Commission）は、正式な許認可手続きとは異なるサービスとしてベンダーに対する原子炉設計の事前審査（Pre-Licensing Vendor Design Review）を行っている。フェーズ1において、設計が規制基準全般に亘り適合しているかを評価（12～18カ月）、フェーズ2において、許認可上障害となり得る点を同定する詳細な評価（約24カ月）が行われる。表1に示すとおり、2018年6月時点で、SMR10件が申請されており、2件の軽水炉以外の8件が非軽水炉型SMRとなっている。既に1件はフェーズ1を

終了しフェーズ2に向けて調整中、3件がフェーズ1を実施中、1件がフェーズ1を中断、5件が審査に向けて調整中である。

議会の天然資源委員会は、2017年6月、『岐路にある原子力セクター』と題するレポートをまとめた。同レポートでは、SMRについても言及し、SMR開発へ向けた政府の支援を勧告しており、SMRの推進に前向きである。

また、広大な地域を抱えた州政府も独自の検討を行っている。オンタリオ州エネルギー省（Ontario Ministry of Energy）は、北部遠隔地の鉱山地域に設置可能なSMRについて、HATCH社にFSを依頼し、2016年6月、報告書が取りまとめられた。現在、鉱山地域などでは、ディーゼルによる発電が行われているが、それに対して、SMRは、熱供給も可能であり、期待がもたれている。HATCH社の報告書では、まず、ショートリストにおいて9つのSMR技術に絞り込んだ後、ナトリウム冷却高速炉（SFR）、鉛冷却高速炉システム（LFR）、2タイプのガス冷却炉（GCR）の4技術が利用に適したものとして取り上げられている。

表1 CNSCにおけるPre-Licensing Vendor Design Reviewの状況一覧（2018年6月現在）⁽⁹⁾

開発者	炉の名称（炉型）	出力（MW-e）	申請フェーズ	評価開始日	評価状況
Terrestrial Energy Inc.	IMSR（改良型溶融塩炉）	200	1	2016年4月	終了
			2	2018年夏（未定）	協定調整中
NuScale Power, LLC	NuScale Integral PWR（軽水炉）	50	2	2018年半ば（未定）	協定調整中
Ultra Safe Nuclear Corp. / Global First Power	MMR-5, MMR-10（高温ガス炉）	5～10	1	2016年12月	実施中
			2	2018年夏（未定）	協定調整中
Westinghouse Electric Company, LLC	eVinci Micro Reactor Solid core and heat pipes（ヒートパイプ炉）	25以下 （種々の出力レベル）	2	未定	協定調整中
LeadCold Nuclear Inc.	SEALER（溶融鉛炉）	3	1	2017年1月	ベンダーの要請で保留
Advanced Reactor Concepts Ltd.	ARC-100（液体ナトリウム炉）	100	1	2017年秋	実施中
URENCO	U-Battery（高温ガス炉）	4	1	2018年春（暫定）	協定調整中
Moltex Energy	Moltex Energy Stable Salt Reactor（溶融鉛炉）	300	1 & 2	2017年12月	実施中
SMR, LLC. (A Holtec International Co.)	SMR-160（加圧軽水炉）	160	1	未定	協定調整中
StarCore Nuclear	StarCore Module（高温ガス炉）	10	1 & 2	未定	協定調整中

（出所：CNSCの公開情報を基に作成）

(4) その他の国々

上記以外の国においても、SMRを巡って下記のような動きがある。

- アルゼンチンは、研究炉の開発・建設経験を活かし、発電または海水淡水化等に用いるPWR型SMR(CAREM-25)を建設中である。
- 中国においては、精華大が中心となりペブルベッドHTGR型SMRの開発が進められている。
- 韓国は、未来創造科学部(MSIP)主導でシステム一体型・先進モジュール炉(SMART)を輸出プラントとすべく、開発を進めている。
- 上記のほか、ロシアや中国においては、船用原子炉技術をベースとして浮揚式原子力発電所(ロシア:KLT-40S, 中国:ACPR50S)を建設している。
- これらの国に加え、ウクライナは、ホルテック社のSMR-160を国内建設と国産化を計画している。インドネシアは、インドやロシア、中国と高温ガス炉等の共同開発を計画、サウジアラビアは、アルゼンチン(CAREM)や韓国(SMART)、中国(高温ガス炉)からSMRの導入を計画している。

以上のように、原子力発電(あるいは熱供給)施設の導入が未経験の国も含め、SMRを巡って様々な動きがみられる。

なお、日本においては、過去にSMRの開発を積極的に進めていた例があるが、現在は、ほとんどが中断している。今後、国際的な動向を注視し世界市場を目指した取り組みを期待したい。

6. SMRの課題と求められる対応

国際的にSMRへの期待が高まっていることは確かであるが、SMRは、実現までに解決すべき課題も多く抱えている。それらのうち、特に、主要な課題を記す。技術と併せて、ビジネスモデルの革新も必要になると考えられる。

(1) 経済性

従来、より大規模な出力を持った原子炉を開発することにより、スケールメリットを実現しコスト削減を図ってきた。出力の低減は、その方向に反するアプローチであり、経済性

が低下するとの本質的な問題を抱えている。当然、小型化に伴う、安全系の簡素化、運営体制の合理化などのコスト削減メリットが想定されるが、同一設計で数多くの製造を行う量産効果が必要となると考えられる。なお、電力自由化の環境下においては、投資リスクの縮小が求められ、少ない投資で早期に資金回収が図れるとのメリットとの関係から、経済性の低下が相殺される面もある。また、核燃料サイクルが既存のインフラを活用できるか否かも大きく影響する。

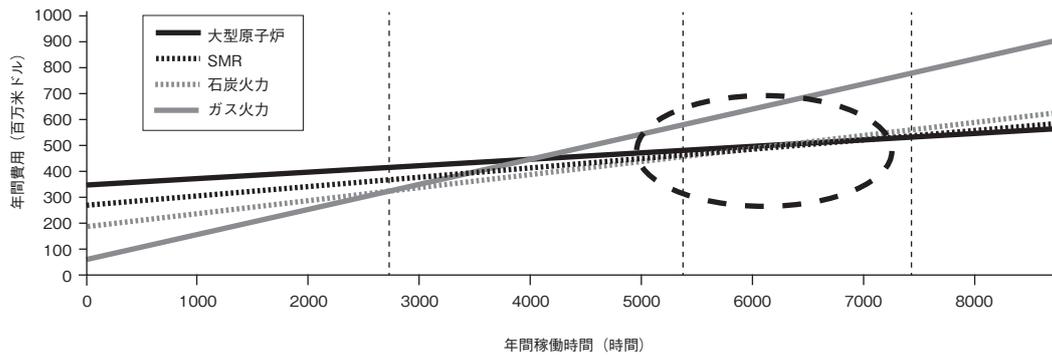
経済性に関して、OECD/NEAの報告書“Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment”で分析が行われており、その結果に基づき以下のような普及予測等が行われている。

- 部分負荷60～85%の範囲では、SMR(成熟機)が最も安価との分析。
- 将来、化石燃料に替わり調整電源としての利用も考えられる。
- SMRの設備容量に関して、2035年時点における、世界の地域別に予測。
- Highケースでは、新規に建設される原子炉の9%、21GWe。
- Lowケースでは、大幅に低下し、1GWeにも達しない。地域もほぼ北米と南アジアに限られている。
- 条件が不確定なため、予測が困難な状況と考えられる。

図1に年間の稼働時間とコストの関係におけるコスト比較を、図2に世界の原子力の予測を示す。

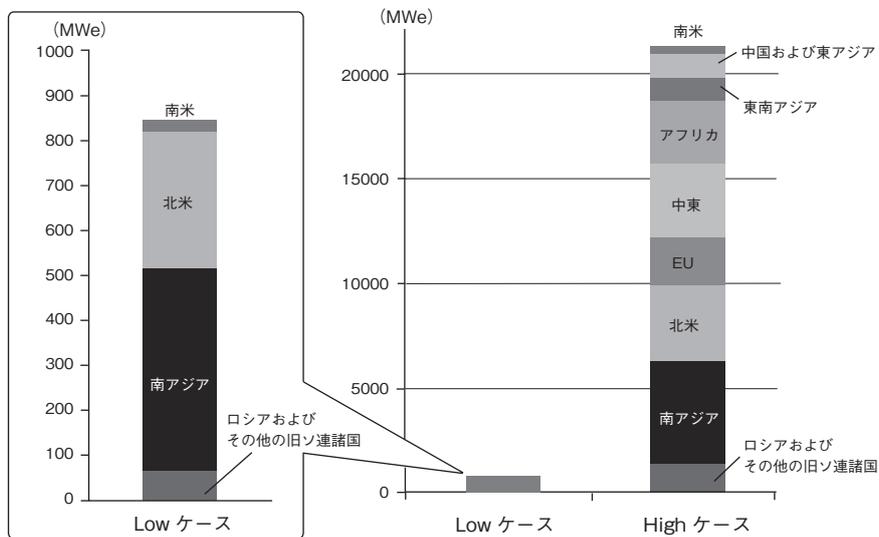
(2) 許認可

現行の軽水炉については、多くの許認可経験が規制側、事業者側ともに積み上げられてきているが、それでも、新設炉の審査には多くの時間とリソースが費やされている。SMRの場合、軽水炉であっても革新的な設計がなされるなど、従来と異なる設計思想や技術が適用されており、許認可に要する負担が膨大なものとなるリスクがある。少ない投資と時



(出所：OECD/NEA, “Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment,” 2016)

図1 稼働時間による費用の比較



(出所：前掲書を基に作成)

図2 2035年における世界のSMR設備容量の予測（地域別）

間で実現し得ることに優位性を持つはずのSMRがかえって、大型炉以上に規制上の負担を求められる可能性があるわけである。

IAEAにおいては、このような懸念に対応する観点から、規制上の課題についての検討が進められてきており、既に、Graded Approach（重要度による意思決定）の適用のあり方、深層防護の適用のあり方、EPZ（防災対策を重点的に充実すべき地域の範囲）の考え方など、問題となる点について整理を行っており、今後の議論に期待したい。

なお、現在、国際標準炉とされ、複数の国の規制機関が審査を行っている炉に関しては、

国際的な組織として多国間設計評価プログラム（MDEP：Multinational Design Evaluation Programme）が設立され、規制経験を国際的に共有するシステムが活用されている。SMRについても、MDEPの枠組みを参考として、特定の国の経験を各国の規制機関が迅速に共有する国際的な仕組みが求められる。特に、現在SMRの審査に携わっている米国、カナダの経験の共有が期待される。

（3）製造技術

SMRは、小型でモジュール生産型であることから、これまでの立地場所で建設を行う大型

炉とは異なる工場生産型に移行していくと考えられる。このため、製造技術についても、低価格汎用品の活用拡大、廃止措置・核燃料のバックエンドの取り扱いの革新など、従来の手法・技術にとらわれない検討が必要である。

特に、これまでの原子力技術開発においては、効率性を追求する視点から、温度条件をより厳しくするなど全般に亘り、より高度な技術を求める傾向があった。しかし、SMRの開発においては、既存の定着した技術と組み合わせるなどの取り組みも必要である。

(4) FOAKの実現

SMRの今後の可能性の検討を困難にしている最大の要因は、まだ1基も具体的に建設さ

れていないことである。このため、最初の炉（FOAK：First of a kind）の実現が期待されることとなるが、米国およびカナダが早期のSMR実証炉の建設に向けて進んでいる。DOEのビジョンでは、図3に示すように、2030年までに実証炉の運転実績を積み、2030年代に商用炉の運転を開始するとのスケジュールが示されている。

さらに21世紀までの米国における電力需給を展望し、産業用熱供給から輸送部門の需要にも対応するため、2050年までに原子力の容量を現在の倍に拡大する必要があると見ている。その電力供給のため、図4に示すように、大型軽水炉、SMR、第4世代炉が組み合わせられて利用されると想定している。

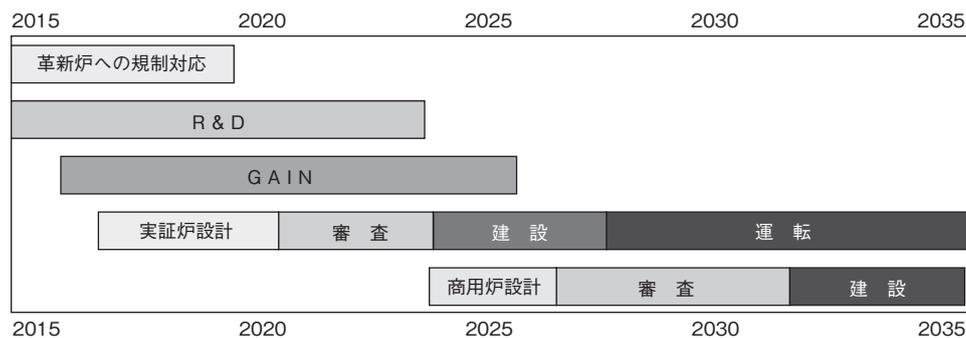


図3 DOEが描く革新炉の開発導入スケジュール

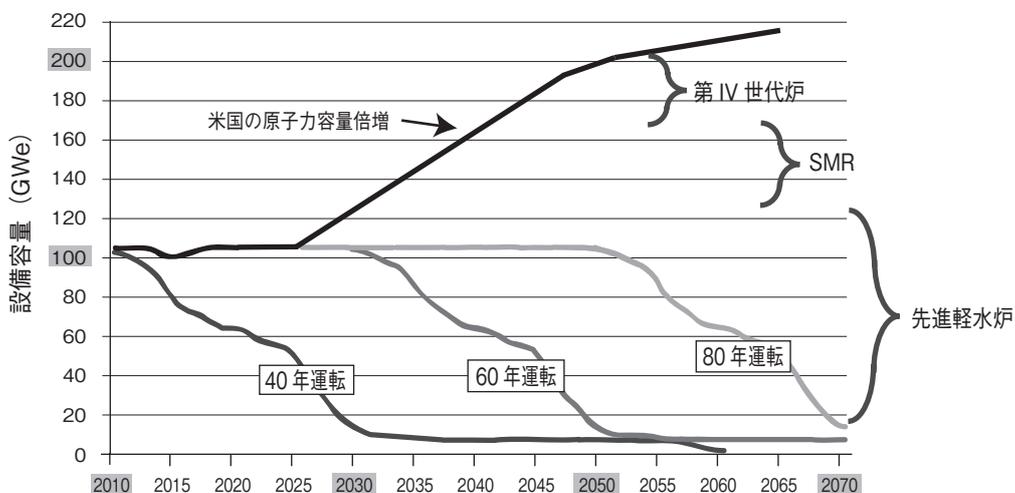


図4 DOEが描く長期の炉型推移の見通し

7. 結び

これまで、世界の主要なベンダーは、大型の原子力発電炉の開発を進めてきており、SMRの実現可能性については、懐疑的な見方が付きまとっている。IAEAやNEAの報告書においても、まだ、1基も実稼働していない状況において、言わばカタログのみで今後の市場への適合性を判断するのは難しいとしている。

一方、数年前の時点からは、状況が変化してきていることも事実であり、2013年にSMRへの期待に疑問を呈するレポートを出した「憂慮する科学者同盟（UCS：Union of Concerned Scientists）」もその後、SMRを巡る現在の国際的な動向については、特段の発言をしていない。

各国において積極的にSMRの開発に向けた動きがあることを概観したが、SMRは、前述の課題に対応し、自由化市場の中で普及が始まった場合、脱炭素社会の需要、スマートグリッドやデジタルグリッドの進展、より高い安全性（より低い放射性物質拡散リスク）を求める社会的要求との親和性、などの観点から、大型炉と共存する形で世界に普及する可能性があると考えられる。筆者は、原稿の校正中（6月下旬）、パリで開催されたWNE2018に参加したが、その際、EDFのSMRや、GE-HitachiのBWRX300（沸騰水型SMR）をはじめ、SMRに対する新たな取り組みが多く紹介されていた。開会挨拶を行ったIAEAの天野事務局長も、今後SMRがアジア等途上国での電力供給に貢献するとの期待を表明した。

IAEにおいては、従来から大型の発電炉である次世代軽水炉の開発を進めてきており、そのニーズは今後の新設・リプレースにおいて続くものと考え、国内のメーカー、電力各社と協力して引き続き開発に携わっている。しかしながら、筆者は、同時に、「エネルギーの未来を拓くのは技術である」との視点から、技術開発に挑戦して行くことが重要と考えており、わが国が長年培ってきた優れた原子力技術を生か

し、SMRの開発にも取り組んでいくことを期待したい。その中で、世界をリードする人材の維持・育成も行われていくものとする。

なお、わが国のエネルギー需給における原子力の役割については、「第5次エネルギー基本計画案」に示されており、SMRを含めた技術開発の重要性についても言及されているが、必ずしも国内のエネルギー供給と直結しない面もあり、エネルギー基本計画の枠内で議論を完結できない側面がある。産業政策の視点を入れつつ、世界のエネルギー問題にどのように貢献するかといった、よりグローバルな視点での取り組みが必要と思われる。

このような視点に立つと、世界市場を志向する日本のベンダーの積極的な取り組みが不可欠であり、海外ベンチャーとの連携も含め、柔軟な対応を期待したい。

参考文献

- (1) "ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS 2016 Edition, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)," Aug. 2016
- (2) NEA Nuclear Development (2016), "Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment,"
- (3) 115th CONGRESS 1st Session H.R.590
- (4) <https://www.nrc.gov/reactor/new-reactors/smr.html>
- (5) Matt Bowen, Ph.D., "NUCLEAR INNOVATION ALLIANCE, Enabling Nuclear innovation Leading on SMRs," Oct. 2017
- (6) NATIONAL NUCLEAR LABORATORY, "Small Modular Reactors (SMR) Feasibility Study," Dec. 2014
- (7) House of Lords Paper160, "Science and Technology Select Committee, 3rd Report of Session 2016 - 2017, Nuclear research and technology: Breaking the cycle of indecision," May 2017
- (8) "PERSPECTIVES ON CANADA'S SMR OPPORTUNITY, Summary Report: Request for Expressions of Interest, CNL's Small Modular Reactor Strategy," Oct. 2017
- (9) <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/index.cfm>
- (10) (本稿全般に亘り) 田中隆則, 解説記事「小型モジュール炉 (SMR) を巡る国際動向とそのインパクト」, 日本原子力学会誌 (Vol.60, No.7)

原子力発電所の廃止措置安全要件に係る最近の動向について

堀川 義彦 (原子力工学センター 参事)



1. はじめに

近年、国内外における原子力施設の廃止措置の増加に伴い、安全で効率的な廃止措置 (decommissioning) に向けた検討が国際原子力機関 (IAEA) や経済協力開発機構/原子力機関 (OECD/NEA) などの国際機関を始め、欧米各国で積極的に行われている。

わが国においても、廃止措置に係るワークショップが国内外からの参加者を得て開催されている。そこでは、安全確保の在り方や効果的かつ効率的な廃止措置の実施などが議論されている。

本稿では、廃止措置の特徴を踏まえ、安全要件の在り方について、最近のIAEAの取組みとわが国の取組みについて紹介する。

2. 廃止措置を取り巻く環境

(1) 国内外の原子力発電所の廃止措置の実施状況

わが国の原子力発電所の廃止措置は、日本原子力研究所 (現・日本原子力研究開発機構) の動力試験炉 (JPDR: Japan Power Demonstration Reactor) で初めて実施された。1982年に解体届が提出され、1996年に解体が終了した。そこで、廃止措置がおおむね既存技術で実施できることが実証された。

わが国における原子力発電所の廃止措置の現状を表1に示す。廃止措置が完了したJPDRのほかに、現在、東海発電所を始めとする11プラントが廃止措置中であり、3プラントが廃止措置準備中である。また、図1に示す通り、

表1 わが国の廃止措置プラントの現状

プラント	運転者	炉型	電気出力 (MW)	営業運転開始日	廃止日	廃止措置の状態
JPDR	日本原子力研究開発機構	BWR	13	1965.03.15	1976.03.18	完了
東海	日本原子力発電	GCR	166	1966.07.25	1998.03.31	実施中
ふげん	日本原子力研究開発機構	ATR	165	1979.03.20	2003.03.29	
浜岡-1	中部電力	BWR	540	1976.03.17	2009.01.30	
浜岡-2	中部電力	BWR	840	1978.11.29	2009.01.30	
敦賀-1	日本原子力発電	BWR	357	1970.03.14	2015.04.27	
美浜-1	関西電力	PWR	340	1970.11.28	2015.04.27	
美浜-2	関西電力	PWR	500	1972.07.25	2015.04.27	
玄海-1	九州電力	PWR	559	1975.10.15	2015.04.27	
島根-1	中国電力	BWR	460	1974.03.29	2015.04.30	
伊方-1	四国電力	PWR	566	1977.09.30	2016.05.10	
もんじゅ	日本原子力研究開発機構	FBR	280	1991.05.18	2016.12.21	
大飯-1	関西電力	PWR	1175	1979.03.27	2018.03.01	準備中
大飯-2	関西電力	PWR	1175	1979.12.05	2018.03.01	
伊方-2	四国電力	PWR	566	1982.03.19	2018.05.23	



(注) 特定原子力施設である福島第一原子力発電所1~6号は除く。

図1 国内原子力プラントの廃止措置スケジュール

現在実施中のプラントの廃止措置工程は24~40年間を要する計画となっている。

一方、原子力発電所の廃止措置は世界各地で行われており、図2に示す通り、本年5月末時点で168基に達している。しかし、廃止措置が終了したプラント数は、米国の13基、ドイツの3基、わが国のJPDR 1基にとどまっている。このように、廃止措置の完遂を目指すプラント数は、国内外を含めまだ多く存在する。したがって、廃止措置を安全に効果的、効率的に行うには、これまでに得られた経験、教訓を反映することが重要となる。

このような状況を踏まえ、IAEA、OECD/NEAなどの国際機関では、廃止措置に伴うリ

スク、廃止措置で発生する大量の放射性廃棄物、廃止措置の実施コストなどの最適化を考慮して、廃止措置の戦略策定、計画立案、実施・終了確認についての検討が進められており、各種提言がなされている。

(2) 廃止措置とは

廃止措置とは、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」(以下「炉規法」)の規制の下で運転をしていた原子炉や燃料サイクル施設等の原子力施設が、その運転を永久に停止し、機能を停止させ、安全な状態に置かれるための措置である。基本的には図3のプロセスで行われる。

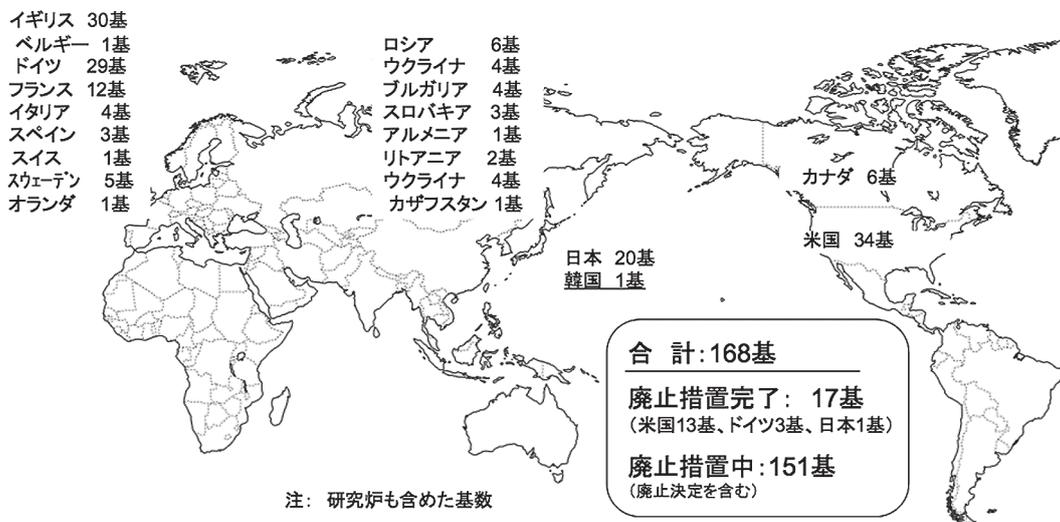


図2 海外発電プラントにおける廃止措置状況 (2018年5月末現在)

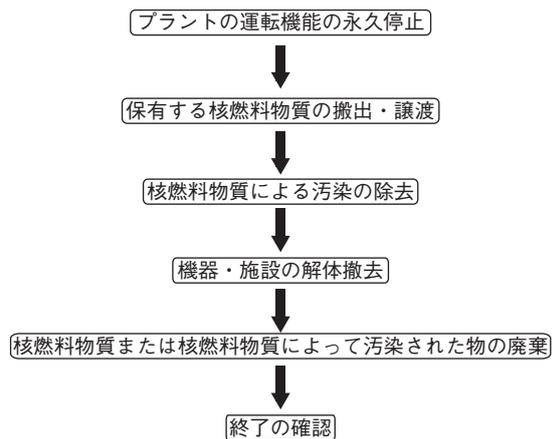


図3 一般的な廃止措置プロセス

原子力発電所の廃止措置では、最終的には炉規法の規制の終了に必要なレベル（＝以後の規制が不要なレベル）まで、発電所内に残っている放射性物質を減少させ、周辺公衆への放射線被ばくのリスクを安全で合理的なレベルまで減少させる。

換言すれば、廃止措置とは、①放射性物質という「リスク」を内包しているシステムを解体し、②放射性物質を廃棄もしくは管理下におくとともに、③発電所自体からは、放射性物質による被ばくもしくは汚染のリスクを無くすこと、である。

IAEAが発行している用語集では、廃止措置を「原子力施設または放射性物質を取り扱う施設において、規制管理の一部、もしくは全てを撤廃する許可を得るために行われる事務的および技術的作業」と定義されている。廃止措置の主目的は、原子力施設もしくは放射性物質を扱う施設で運転中に使用された放射性物質並びに非放射性物質を、体系的に撤去し、施設やサイトを規制管理から解放することである。この際に重要なことは、作業従事者の安全と一般公衆および環境の防護が確保されることである。

施設は、その役目を終えることにより廃止措置が行われるが、そのほかに種々の理由により計画運転期間に到達する前に運転を停止し廃止措置が行われることもある。施設の早期停止の理由には、経済的な要因や規制上あ

るいは技術的な要因などが挙げられるが、わが国では、福島第一原子力発電所事故による場合を除けば、経済的な理由によるものである。

廃止措置の方策は、①即時解体、②遅延解体（安全貯蔵後、解体）、③遮へい隔離に分けられる。即時解体とは、施設の運転停止後、現実的な範囲で解体が速やかに行われることである。遅延解体とは、運転停止後数年から数十年の安全貯蔵の後に解体が行われることである。一方、遮へい隔離とは、放射性物質が十分に減衰するまで長期に亘って遮へいし、隔離することである。しかし、最近では、IAEAを始め国際機関は、遮へい隔離を廃止措置戦略とみなしておらず、計画的に最終的な運転停止を行った施設の選択肢としては考えられていない。

(3) 廃止措置の特徴

原子力発電所は、ウランを核分裂させて得られた熱エネルギーを電気に変換して供給する設備であり、電力の安定供給を長期に亘って行うことを使命としている。

使命遂行中である運転段階、使命を終えた設備を限られた期間内に安全に解体撤去する廃止措置段階では、要求される安全機能と行動様式・考え方（カルチャー）が全く異なる。運転段階と廃止措置段階を表2で比較した。運転段階で要求される安全機能は、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」であり、また、職員のマインドは、基本的に電力安定供給を維持するために必要な運転カルチャーに適應するものとなる。一方、廃止措置段階で、燃料搬出までに要求される安全機能は「冷やす」、「閉じ込める」であり、燃料搬出後に要求される安全機能は「閉じ込める」である。また、職員のマインドは、安全を前提に、限られた資源と工程のなかで廃止措置を完遂させる廃止措置カルチャーに適應することが要求される。

また、図4に示す通り、運転段階から廃止措置プロセスに進むにつれ、放射線リスクと

表2 プラント運転時と廃炉時の相違点

項目	運転時	廃止措置時
組織体制	・恒久的で安定した体制への信頼	・暫定的な組織体制の導入
安全管理	・通常運転に基づいた安全管理	・廃止措置作業に基づいた安全管理
管理目標	・生産性重視の管理目標	・プロジェクト重視の管理目標
教育・訓練	・日常訓練と再訓練	・新しい活動や技能や専門的な請負業者のためのスタッフの再訓練
雇用形態	・日常的な目標達成に向け活動する常勤雇用	・期限が限られている雇用スタッフの作業目標の方向転換
規則	・確立した規制	・規制の焦点の変更
リスク	・原子力・放射線の潜在的リスクが大きい。	・原子力リスクの減少。放射線リスクの質の変化、潜在的に重要な産業リスク
作業の焦点	・システムの機能に焦点を当てる。	・物質および放射線インベントリの管理に重点を置く。(例えば、廃棄物の最小化)
作業活動	・繰り返しの作業	・単発的な作業
作業環境	・これまでの実績から周知	・未知の環境が生じる場合もある。
外部とのコミュニケーション	・外部関係者との日常的なコミュニケーション	・作業状況等の変化に応じたコミュニケーション
放射線管理	・放射線/汚染レベルは低い。 ・比較的重要ではない場合もある。	・放射線/汚染レベルは低い。 ・クリアランスは重要
高放射線/汚染地域へのアクセス	・高放射線/汚染エリアへのアクセスはほとんどないか短期間	・高放射線/汚染エリアへのアクセスは日常的にあり、長期間に及ぶ。
廃棄物搬出量	・オフサイトに搬出される物質の量はほぼ日常的に点綴される。	・オフサイトに搬出される物質の量は大量。
汚染物質の核種組成	・同位体組成は比較的安定	・同位体組成は時間とともに変化する。

作業リスクが変化していく。すなわち、運転段階から燃料搬出をすると、それまで支配的であった放射線リスクは大幅に低減し、その後の解体作業準備段階では、産業リスクより低くなる。機器、設備の解体作業が始まると、放射線源との距離も短くなること、放射線下作業等による潜在的放射線リスクの上昇、また、高所作業、切断作業等による潜在的産業リスク上昇が生じる。この段階以降は、放射線源が徐々に除去・撤去されていくことから、リスクとしては放射線リスクより、産業リスクの方が支配的となるが、廃止措置作業が進行するにつれて、いずれも低下して自然界のリスクに近づく。

運転段階に比べて廃止措置段階でのリスクが大幅に低減すること、また、燃料搬出後は、放射線リスクより産業リスクの方が支配的となることから、廃止措置で重要なことは、産業リスク対策を適切に講じることである。

3. 原子力施設に求められる廃止措置の安全要件への取組

(1) IAEAの安全基準体系

前述のように、原子炉の運転中、安全確保のために要求される主な機能は、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」である。これに対し、廃止措置段階（燃料搬出後）では、施設内の放射性物質の「閉じ込め」や放射線の遮へいが主な機能となる。具体的には、次の事項が重要となる。

- 解体中における保安のために必要な原子炉施設の適切な維持管理の方法
- 一般公衆及び放射線業務従事者の放射線被ばくの低減策
- 放射性廃棄物の処理等の方法

使命が終了した原子力施設の廃止措置が各国共通の重要課題であることから、IAEAは、

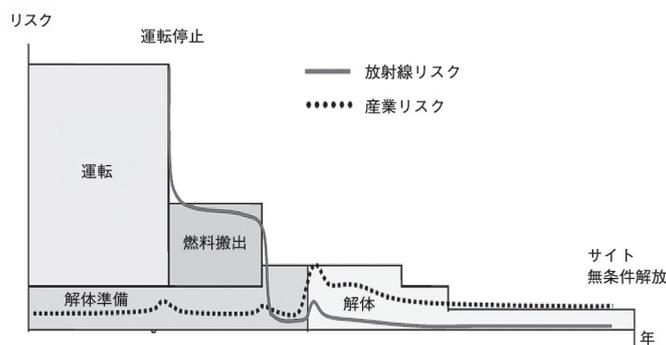


図4 運転から廃止措置に至る期間での放射線リスクと産業リスクの変移

廃止措置に必要な技術や規制等の検討や情報を整理している。具体的には、廃止措置の「安全基準の整備」、「廃止措置の技術・経験の取りまとめ」などの活動がある。このうち「安全基準の整備」については、原子力活動の安全な終了に係る指針や基準の作成を主要な課題とし、廃止措置や放射性廃棄物処理処分に関する検討が実施されてきた。

IAEA の安全上の目的は、人と環境を放射線の有害な影響から防護することである。その目的を達成するために、安全原則として「基本安全原則 (Fundamental Safety Principles :

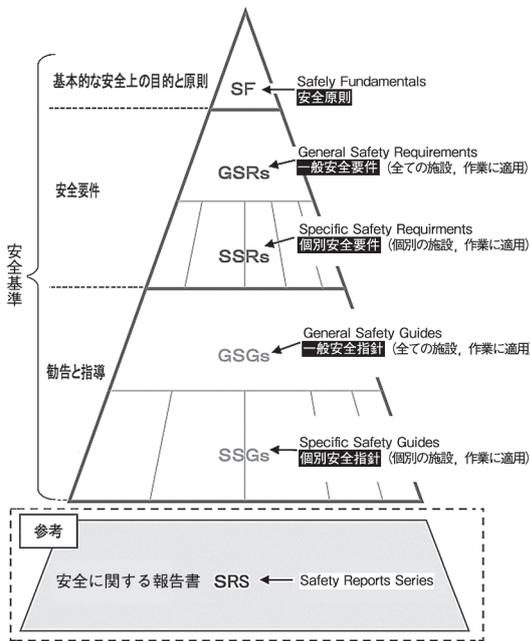


図5 IAEA の安全基準の体系

SF-1)」が2006年に発行された。

IAEA による原子力施設の安全の枠組みは、図5に示すとおり、安全原則 (SF)、一般安全要件 (GSR)、個別安全要件 (SSR) で構成される。SF では、防護と安全の目的、概念および10原則を提示し、GSR の基礎を規定している。また、GSR では、安全確保のために満たなければならない要件を規定している。SSR では、要件を満たすための措置、条件、手続きを提示している。

図6に示す IAEA の長期構想の下、各レベルにおける文書の整備が進められてきている。GSR 「Part 6 施設の廃止措置」(2014年)、GSG 「WS-G-5.2 放射性物質を用いた施設の廃止措置のための安全評価」(2008年)、SSG 「WS-G-2.1 原子力発電所と研究炉の廃止措置」(1999年)とSSG 「WS-G-2.4 核燃料サイクル施設の廃止措置」(2001年)が刊行された。現在、2つのSSG文書を統合するとともに最新の廃止措置知見を反映する「SSG-47 原子力発電所、研究炉及びその他の核燃料サイクル施設の廃止措置」の制定に向け手続き中である。

(2) 廃止措置の IAEA 一般安全要件

GSR 「Part 6 施設の廃止措置」(2014年)は、表3に示すように、原子力発電所を含む放射性物質を使用する施設を対象に、廃止措置の立地・設計から、廃止措置の計画立案時・

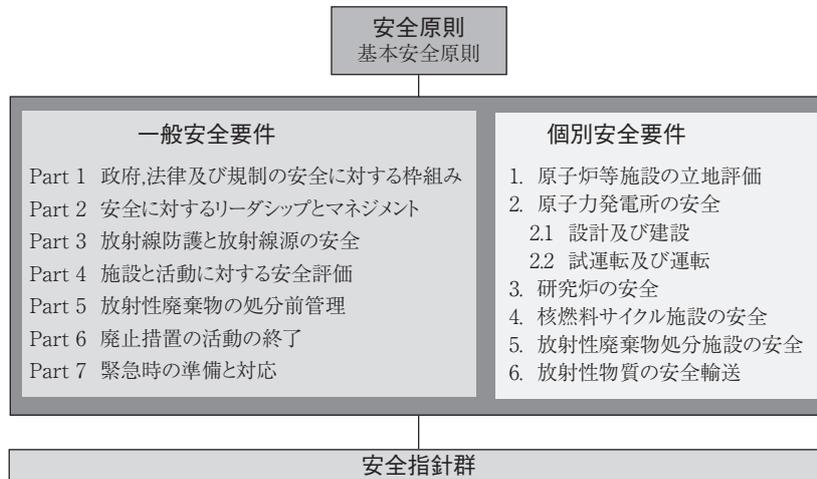


図6 IAEA 安全基準シリーズの構想

表3 GSR「Part 6 施設の廃止措置」の適用範囲

施設	立地	設計	建設	運転	廃止措置	終了確認
原子力発電所	○	○	○	○	◎	○
研究炉	○	○	○	○	◎	○
核燃料サイクル施設	○	○	○	○	◎	○
核燃料サイクル施設に由来しない廃棄物の処理および貯蔵のための施設	○	○	○	○	◎	○
自然起源放射性物質 (NORM) を処理するための施設	○	○	○	○	◎	○
関連する医療施設、産業施設および研究施設	○	○	○	○	◎	○
適用除外施設の支援建屋およびユーティリティの供給設備 (Service)	○	○	○	○	◎	○
放射性廃棄物処分施設、NORM あるいは探掘および鉱物処理からの廃棄物の処分施設	×	×	×	×	×	×

◎: Part 6 要件の大部分が適用 ○: Part 6 要件の一部が適用 ×: 適用されず

表4 GSR「Part 6 施設の廃止措置」の内容

カテゴリ	一般安全要件
1 人の防護と環境防護	要件 1: 廃止措置における防護及び安全の最適化 要件 2: 廃止措置におけるグレーデッドアプローチ 要件 3: 廃止措置のための安全評価
2 廃止措置に係る責任	要件 4: 廃止措置における政府の責任 要件 5: 廃止措置における規制機関の責任 要件 6: 廃止措置における認可取得者の責任
3 廃止措置のマネジメント	要件 7: 廃止措置の統合マネジメントシステム
4 廃止措置の戦略	要件 8: 廃止措置戦略の選択
5 廃止措置の資金調達	要件 9: 廃止措置の資金調達
6 存続期間中の廃止措置の計画立案	要件 10: 廃止措置の計画立案 要件 11: 最終廃止措置計画
7 廃止措置の実施	要件 12: 廃止措置活動の実施 要件 13: 廃止措置のための緊急時対応の手配 要件 14: 廃止措置における放射性廃棄物管理
8 廃止措置活動の完了と廃止措置認可の終了	要件 15: 廃止措置活動の完了と廃止措置認可の終了

実施時・認可終了時に、人と環境の防護のために満たされるべき安全要件を規定している。

GSR Part 6では、表4に示すように、施設のライフサイクルにわたって、計画立案、実施、終了に必要、または関係する分野を8つのカテゴリに分け、15要件のGRSを規定している。カテゴリ1～5は、廃止措置全体に係わることで、カテゴリ6～8は、廃止措置プロセスに応じて必要とされる安全要件である。

前記「2(3)」で述べた廃止措置の特徴を勘案すると、燃料搬出後には、リスクが大きく低減し、その後解体作業が始まるとともに一時的にリスクが上昇するものの、解体作業が進むにつれリスクが低下していく。廃止措置段階では、安全を前提に、限られた資源と工程のなかで廃止措置を完遂させることが重要であることから、安全確保を前提に、限られた資源を一様に安全対策に投じるのではな

く、リスクに見合った資源投資、すなわち、リスクの大きいところに、より資源を多く安全対策として投入を、また、リスクの低いところはそれに応じた投資を行うことが重要である。これは、「要件2 廃止措置におけるグレーデッドアプローチ」が意図することである。この安全要件は、安全の一義的責任を有する許認可取得者(要件6)は当然のこととして、廃止措置に係わるすべてのものは規制機関(要件5)も含めて適用されることとされている。

また、廃止措置のマネジメントは、同様に、安全の一義的責任者である許認可取得者だけでなく、規制機関にも適用される。

なお、GSR Part 6の一般安全要件の下、より具体的な「勧告と指導」として、原子力発電所、研究炉及びその他の核燃料サイクル施設を対象とした個別安全指針「SSG-47」が近く発行される予定である。

(3) わが国における廃止措置安全基準の取組み

①廃止措置の標準類の整備計画

日本原子力学会では、原子力施設の設計、建設、運転、廃止措置といった設備のライフサイクルに応じた技術的な指針となる規格基準を制定する作業を行い、技術標準として刊行している。そのなかで、廃止措置関連の安全基準として、これまで以下の学会標準を発行している。このうち、前2つの標準については、後年の改訂作業で廃止しており、現在、4つの学会標準が発行されている。

- 原子力施設の廃止措置の計画と実施：2006 (AESJ-SC-R003：2006) ⇒ 廃止
- 原子力施設の廃止措置の計画：2009 (AESJ-SC-A001：2009) ⇒ 廃止
- 実用発電用原子炉施設等の廃止措置の計画：2011 (AESJ-SC-A002：2011)
- 原子力施設の廃止措置の実施：2011 (AESJ-SC-A003：2011)
- 発電用原子炉施設の廃止措置時の耐震安全の考え方：2013 (AESJ-SC-A006：2013)
- 試験研究炉及び核燃料取扱施設等の廃止措置の計画：2013 (AESJ-SC-A007：2013)

これらの学会標準は、技術の進歩などを適切に反映し、標準の最新化する必要があることから、定期的に改定の要否評価が行われている。

学会の標準委員会傘下で廃止措置関係標準の維持管理を所掌している廃止措置分科会は、2011年、関連法案に基づく実用発電用原子炉等の廃止措置計画認可申請を行うに当たり、廃止措置計画を立案する上での記載事項と技術的要求事項を規定する学会標準「実用発電用原子炉施設等の廃止措置の計画：2011(AESJ-SC-A002:2011)」(以下、計画標準)を制定した。この標準の制定以降、原子力発電所6基の廃止措置計画が認可されている。今後、計画変更認可申請や新たな廃止措置計画認可申請が予想されること、廃止措置計画立案の標準化が急務であること、また、IAEAから2014年に発行されたGRS「Part 6 施設の廃止措置」を国内での廃止措置に取り込むことが要求されていることなどから、廃止措置分科会が計画標準を改定する。

また、現在発行されている4つの廃止措置標準では、計画に関する標準類と実施に係る標準類が独立している。しかし、標準類は相互に参照する関係にあり、さらに、計画標準では廃止措置の準備段階で実施する個別作業については十分な記載がない。そこで、「廃止措置分科会」は、標準類を階層化し同時に相互の関係を明確化すること、「廃止措置で遵守すべきこと」と「廃止措置で実施すること」について、要件に「漏れ」や「抜け」がないようにすることとした。

具体的には、廃止措置の活動(作業：要素技術)ごとに内容を充実させるべく、計画標準を2つの基準(コード：計画、安全評価)と3つの指針(ガイド：放射能インベントリ評価、特性調査、廃止措置の作業)に分ける。

廃止措置分科会は、次の方針で計画標準の改定を進めることとした。

- 廃止措置を安全かつ合理的に計画し、実施し、完遂するために標準類を階層化するとともに、廃止措置全般にわたる基本的な安全の要件を制定する。
- 廃止措置の計画段階、実施段階および終了段階のそれぞれで活動の規範となる標準類を順次制定していく。

廃止措置の標準類の現状と今後の整備計画を図7に示す。

なお、廃止措置の標準類の策定に当たり、廃止措置分科会は、以下のように、国際的な動向を積極的に取り込むこととしている。

- 廃止措置計画立案に必要な事項は、既存の標準類の記載およびこれまでの国内の廃止措置の実績を踏まえ、国際的な動向を積極的に取り込む。
- 個別の要素技術についても、IAEAの発行文書のほか、経済開発協力機構/原子力機関(OECD/NEA)、米国原子力規制委員会(NRC)の発行文書などを参照し、国内の実情に合わせて適用する。
- 国内の固有事項については、海外の類似事例を調査し、両者の差異を把握するとともに、国内の固有事情への適用の妥当性を検証する。

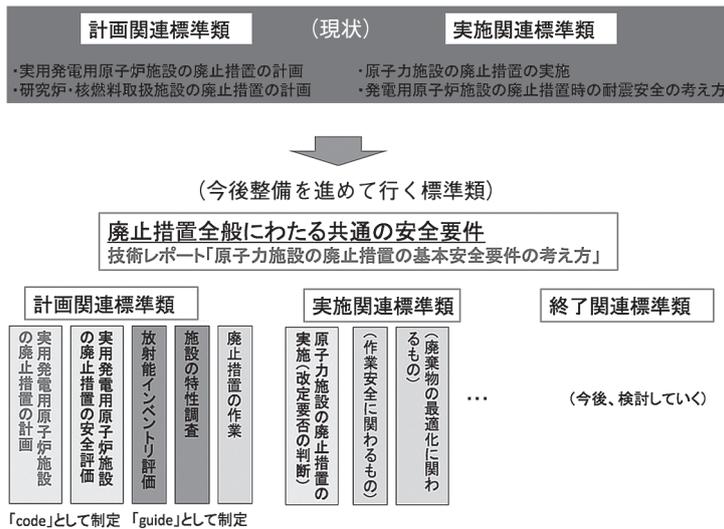


図7 わが国の廃止措置の標準類の現状と今後の整備計画

②「原子力施設の廃止措置の基本安全要件の考え方」に係る技術レポート策定の取組み

これまでの廃止措置関連の標準類の改定／制定の作業で、各廃止措置標準の安全要件を整理する必要性が認識された。例えば、発電用原子炉施設の廃止措置では、燃料搬出後は、「止める」、「冷やす」の安全機能が不要となり、放射能インベントリ（放射能の残存量）は格段に減少する。廃止措置の安全確保において、このような特徴を明確にし、グレーデッドアプローチの適用や廃止措置に特化した安全要件の考

え方を整理することが必要になってきた。また、廃止措置の全活動の規範となりうる基本安全要件の考え方を明確にする必要性も強く認識されるようになった。

このため、廃止措置分科会は、既存の廃止措置関係の標準類、標準委員会技術レポート、IAEA 安全基準体系を参照して、廃止措置の基本安全要件の考え方を整理し、技術レポートとしてまとめているところである。なお、この技術レポートは、図8のように、IAEA 安全基準体系の一般安全要件（GSR）に相当する。

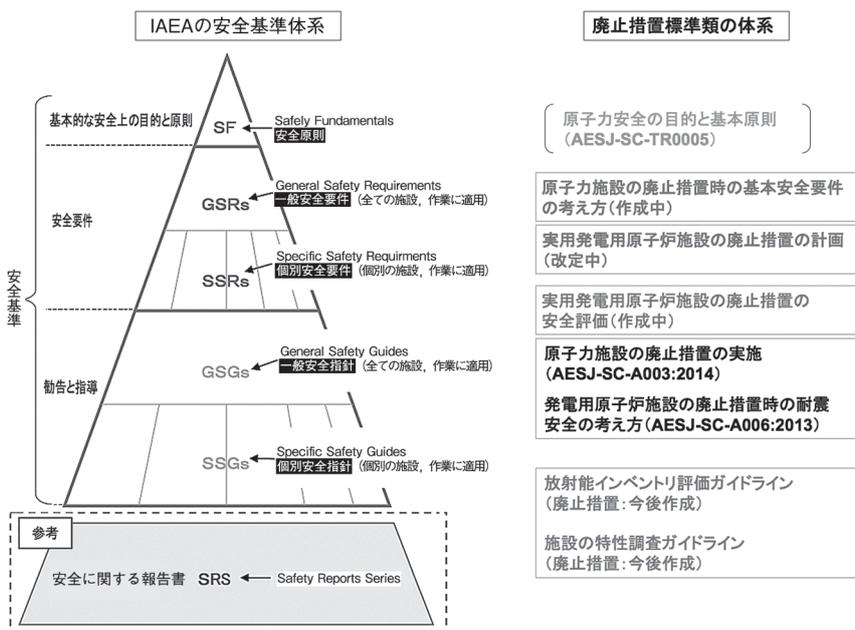


図8 「廃止措置の基本安全要件の考え方」に係る技術レポートの位置づけ

以下、廃止措置の計画に関連する標準類の整備計画および「原子力施設の廃止措置の基本安全要件の考え方」に係る技術レポート策定への取組みを紹介する。

(a) 国内外の動向整理

「廃止措置の基本安全要件に考え方」に関する技術レポートは、次の方針の下で策定することとなった。

- 原理原則に基づいた基本安全要件とする。
(日本原子力学会標準・技術レポート、IAEA 安全基準、学術機関の標準類等を参考)
- 国内原子力施設の廃止措置活動の規範となる基本安全要件とする。

「基本的な安全上の目的と原則」に連なる廃止措置の基本安全要件の考え方を整理するため、標準委員会技術レポート（「原子力安全の基本的考え方について 第I編 原子力安全の目的と基本原則」など）、IAEAの安全原則（SF-1）と一般安全要件（GSR Part 6）を調査した。調査した文書例を表5に示す。

これまで廃止措置分科会で制定してきた廃止措置関連の標準類における安全要件の共通点を整理するとともに、標準委員会技術レポート、IAEA GSR Part 6、その他のIAEA文書

から廃止措置に関連する箇所を抽出し、廃止措置に係る基本的な安全要件を整理した。

(b) 廃止措置の安全確保の全体像と特徴

整理した安全要件をもとに、「どのような廃止措置の安全目標達成のための基本方針のもとで」、「誰が」、「何を」、「どのようにして」、行うかについて、安全要件を整理した結果、また、関係機関の役割を図9に示す。

本稿でまとめた廃止措置の安全確保のための目的と基本安全要件についての特徴は、次の通りである。

- 廃止措置安全の目的：人と環境を、廃止措置対象施設と廃止措置活動に起因する放射線の有害な影響から防護することである。
- 基本安全要件の特徴：
 - ①15項目の基本安全要件から構成される（GSR Part6と同じ）。
 - ②廃止措置における基本となる3つの安全要件の明確化
 - 放射線の防護と安全
 - グレーデッドアプローチの適用
 - 安全評価
 - ③許認可取得者及び規制機関の役割及び責任の明確化並びに説明責任の重要性の明確化
 - ④許認可取得者及び規制機関において、組織の全

表5 「廃止措置の基本安全要件の考え方」に係る技術レポート策定のために調査した文書の例

<ul style="list-style-type: none"> ・「実用発電用原子炉施設の廃止措置の計画」(AESJ-SC-A002:2011) ・「発電用原子炉施設の廃止措置時の耐震安全の考え方」(AESJ-SC-A006:2013) ・「原子力施設の廃止措置の実施」(AESJ-SC-A003:2014)
<ul style="list-style-type: none"> ・標準委員会技術レポート「原子力安全の基本的考え方について 第I編 原子力安全の目的と基本原則」(AESJ-SC-TR0005:2012) ・標準委員会技術レポート「原子力安全の基本的考え方について 第II編原子力安全確保のための基本的な技術要件と規格基準の体系化の課題について」(AESJ-SC-TR0007:2014)
<ul style="list-style-type: none"> ・IAEA SF-1: Fundamental Safety Principles (2006) ・IAEA GSR Part1 (Rev. 1): Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety (2016) ・IAEA GSR Part2: Leadership and Management for Safety (2016) ・IAEA GSR Part3: Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards (2014) ・IAEA GSR Part4 (Rev. 1): Safety Assessment for Facilities and Activities (2016) ・IAEA GSR Part5: Predisposal Management of Radioactive Waste (2009) ・IAEA GSR Part6: Decommissioning of Facilities (2014) ・IAEA GSR Part7: Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency (2015) 他

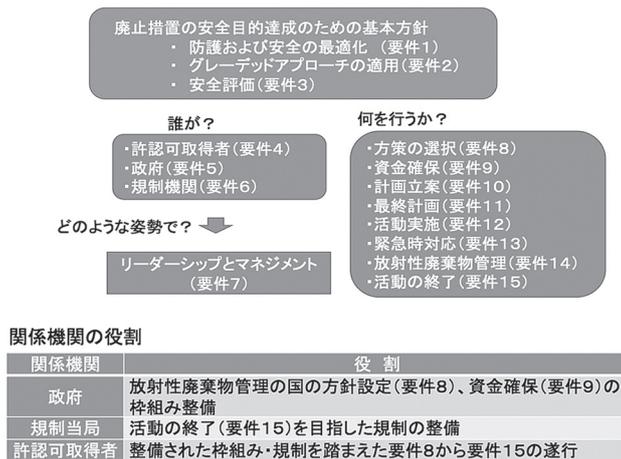


図9 わが国の廃止措置の安全確保の全体像

体にもわたる安全を最優先とする組織文化 (安全文化) を浸透すること並びにリーダーシップとマネジメントの重要性の明確化

- ⑤廃止措置に係る施設と活動に対するリスク抑制及びその継続的取り組み、並びに廃止措置の完遂の重要性の明確化

(c) 技術レポートの基本安全要件について

策定中の技術レポートの基本安全要件は、レポートの利用者に理解しやすくかつ誤解が無いよう、簡潔にすることが肝要である。

そのためには、必要に応じて、用語の定義、要件の導出の背景・考え方、留意事項などを補足する事項 (細目) を作成することも重要で、基本安全要件を廃止措置に携わる関係者に適切に理解・運用してもらうために、細目も併せて整備しているところである。

(d) 今後の予定

技術レポート策定は、日本原子力学会の「春の学会」、「秋の学会」での発表および廃止措置関係の国内ワークショップや国際会議での発表を通じて、幅広い分野の専門家を含めて意見交換を実施して進めていく計画である。

4. おわりに

世界では150基以上、日本国内だけでも11基の原子力発電所が廃止措置中である。一方、

廃止措置の完遂に至った事例は、米国の13基、ドイツの3基、そして、わが国のJPDR 1基にとどまっている。

最も多い事例を持つ米国では、これまでの経験と実績をもとに安全確保の最適化に取り組んでいる。事業者も効果的な廃止措置マネジメント活動に取り組んでおり、これに合わせて米国原子力規制委員会 (NRC) は、廃止措置規制についてもグレーデッドアプローチを実践している。英国でも同様な取り組みが行われている。

わが国では、今後の廃止措置標準類の整備計画を進めるに当たって、IAEAなどの活動を含む国際動向を見極めつつ必要事項を積極的に取り入れていくこと、事業者を含む関係者によって廃止措置活動の品質をきちんとマネジメントしつつ、廃止措置全体を最適化に取り組んでいくことが重要と考える。

参考文献

- (1) 電気事業連合会パンフレット、『原子力発電所の廃止措置』, 2018年6月
- (2) 原子力百科事典 ATOMICA, 『廃止措置に関するIAEA国際協力 (05-02-01-09)』, 2012年1月 (http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=05-02-01-09)
- (3) IAEA SRS-77, "Safety Assessment for Decommissioning, Annex I, Part A," June 2013
- (4) IAEA TRS-420, "Transition from Operation to Decommissioning," 2007

- sioning of Nuclear Installations," April 2004
- (5) IAEA GSR Part 6 "Decommissioning of Facilities," July 2014
 - (6) IAEA, Long Term Structure of the IAEA Safety Standards and Current Status, June 2018
 - (7) 日本原子力学会標準委員会技術レポート『原紙原子力安全の基本的考え方について 第I編原子力安全の目的と基本原則』,AESJ-SC-TR000 (2012), 2013年6月
 - (8) 堀川 義彦, 田村 明男, 田中 健一, 水越 和満, 清水 祐輔, 工藤 清一, 門林 洋文, 湊 博一, 仲田 宗生, 黒川 登, 『廃止措置の計画に係る標準の整備 (2) 廃止措置の一般安全要件の検討』, 日本原子力学会 2017年秋の大会, 2017年9月13日

酸素水素燃焼タービン発電技術の動向

松本 俊一 (プロジェクト試験研究部
主管研究員)



1. はじめに

水素は、家庭用の燃料電池や燃料電池自動車などの普及に伴って身近な存在になっており、将来、石油、石炭や天然ガスなどの化石燃料の代わりに水素を利用する「水素社会」の実現が期待されている。資源量も豊富にあるが、水や天然ガスなど様々な形で存在しているため、水素を利用するには純粋な水素を取り出す必要がある。このため、将来の水素社会実現に向けて、水素の製造、貯蔵、輸送、利用を安全かつ経済的に行うための技術開発が進められている。

水素を火力発電用の燃料として用いる場合には、燃焼しても水（水蒸気）ができるだけで二酸化炭素（CO₂）を発生しないため、発電設備に水素を供給するまでの製造、貯蔵、輸送時にCO₂を発生しなければ理想的な発電方式となる。特に水素の製造においては、化石燃料を原料とする場合にはCO₂が発生するため、CO₂を分離・回収して地中に貯留（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）することや、風力や太陽光などの再生可能エネルギー電源によって水を電気分解することで、製造時にCO₂を生じない水素（CO₂フリー水素）として供給することができる。

CO₂フリー水素を用いる水素発電の導入は、効果的な温暖化対策として我が国の電源構成の選択肢を増やすとともに、大量の水素を安定供給するためのインフラを整備することなどによって、「水素社会」の構築に向けた取り組み

の重要な役割を担うものと考えられる。現在、「水素・燃料電池戦略ロードマップ」や「水素基本戦略」において水素発電の導入目標を定めており、ガスタービン発電設備などで水素を利用するための技術開発や実証事業が進められている。

一方、発電設備の熱効率を向上することで燃料使用量やCO₂排出量を削減できることから、効率向上のための様々な研究開発が行われており、例えばタービンの入口温度を高くするための新材料の開発や冷却技術の高度化などが行われている。但し、既存のガスタービンの燃料を水素に代えてもガスタービン入口温度の制約等があるため効率向上にはつながらない。

このようなことから、水素の特性を生かしてCO₂排出ゼロと大幅な効率改善を実現できる次世代の発電方法として純酸素と純水素の燃焼による酸素水素燃焼タービン発電技術が注目されている。この技術は酸素と水素の燃焼時に発生する水（水蒸気）によってタービンを回転して発電する方式であり、既存のガスタービンよりも熱損失の少ないサイクルを構成することが出来るため、大幅な発電効率の向上が期待できる。また、燃焼時にCO₂や窒素酸化物（NO_x）を発生しないため、理想的なゼロエミッション・高効率発電技術と言われている。但し、その実現には安価な水素および酸素の安定供給や酸素水素燃焼技術の実用化のための課題も多い。

本稿では、酸素水素燃焼タービン発電の実現に向けた研究開発課題の特定を目的として、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開

発機機構（NEDO）の情報収集事業として平成29年度に実施した水素発電に関わる酸素水素燃焼技術に関する国内外の研究動向や技術開発課題等の調査内容の一部を紹介する⁽¹⁾。

2. エネルギーを取り巻く最近の動向

わが国は化石燃料のほぼ全てを海外に依存しているため、その安定供給の確保がエネルギー安全保障に係る重要な政策課題となっている。また、化石燃料の利用によって深刻化する地球温暖化問題に対応するために温室効果ガス排出量の大幅削減が求められている。これらのエネルギー安全保障の確保と温室効果ガスの排出削減の課題を同時並行で解決していくために、中長期的な観点に基づくエネルギー政策が策定されており、ここではエネルギー基本計画、水素・燃料電池戦略ロードマップ、水素基本戦略の概要を示す。

(1) エネルギー基本計画

わが国のエネルギー政策の基本計画は、2003年に第1次計画が策定された後、3年毎に見直しが行われ、直近では東日本大震災以降の最初の計画として第4次計画が2014年に策定されている⁽²⁾。その基本的な視点は「3E+S」で示され、安全性（Safety）を前提とした上で、エネルギーの安定供給（Energy Security）と経済効率性の向上（Economic

Efficiency）を実現するとともに環境への適合（Environment）を図ることとしている。

水素が初めて基本計画に位置付けられたのは「第4次計画」であり、水素を本格的に利活用する「水素社会」の実現に向けた取り組みとして、水素の製造から貯蔵、輸送、利用までのサプライチェーン全体を視野に入れ、関連する技術について安全性、利便性、経済性および環境性に優れた技術の開発や低コスト化を推進することとしている。具体的な実施項目は以下の通り。

- 定置用燃料電池（エネファーム等）の普及・拡大
- 燃料電池自動車の導入加速に向けた環境の整備
- 水素の本格的な利活用に向けた水素発電等の新たな技術の実現
- 水素の安定的な供給に向けた製造、貯蔵・輸送技術の開発の推進
- “水素社会”の実現に向けたロードマップの策定

2018年7月に「第5次計画」が策定されたところであり、基本的な方針は「第4次計画」をベースとして、「2030年に向けたエネルギーミックスの実現に向けた取り組みの強化」と「2050年におけるエネルギー転換・脱炭素化に向けた挑戦」とされている⁽³⁾。

(2) 水素・燃料電池戦略ロードマップ

水素・燃料電池戦略ロードマップは、前述の「第4次計画」に基づいて2014年に策定され、水素社会の実現に向けた取り組みを図1のよ

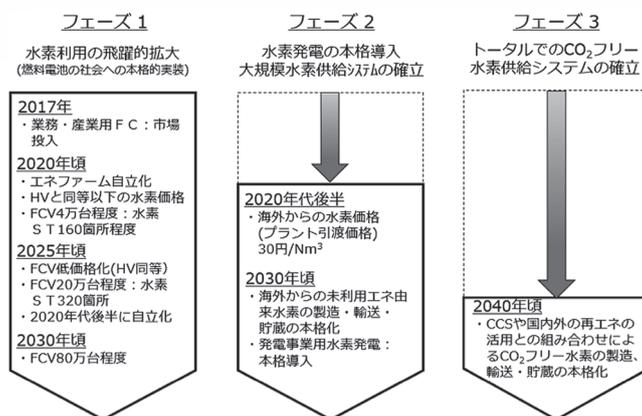


図1 水素・燃料電池戦略ロードマップの概要⁽⁴⁾

うに3つのフェーズに区分して示している。ここで、水素発電はフェーズ2において、2020年代半ばからの大規模な水素供給システムの確立とあわせて具体化していく計画である⁽⁴⁾。

その後、新たな目標や取組の具体化を盛り込んだ改訂版が2016年に策定され、水素発電の本格導入と大規模な水素供給システムの確立における5項目の目標が示されている⁽⁵⁾。

- 2020年頃自家発電用水素発電の本格導入、2030年頃発電事業用水素発電の本格導入開始
- 2030年頃に海外からの水素供給のサプライチェーンの本格導入開始。
- 水素供給コストは、2020年代後半に30円/Nm³程度（発電コスト17円/kWh程度）
- 水素製造は、海外の未利用エネルギーから、安価で安定的に環境負荷の少ない形で行う。
- 水素の輸送・貯蔵は、有機ハイドライド及び液化水素の形で行う。

率」および「CO₂排出制約」を解決するとともに、水素利用で世界をリードしていくための取り組みとしている。

- 低コストな水素利用の実現
- 国際的な水素サプライチェーンの開発
- 国内再生可能エネルギーの導入拡大と地方創生
- 電力分野での利用
- モビリティでの利用
- 産業プロセス・熱利用での水素活用の可能性
- 燃料電池技術活用
- 革新的技術開発
- 国際展開（標準化等）
- 国民の理解促進、地域連携

電力分野での水素利用に関しては、水素を安定的かつ大量に消費する水素発電と国際的なサプライチェーンの構築をセットで進めるべきことを最重要としており、目指すべき目標値を以下のように設定している。

(3) 水素基本戦略

「水素基本戦略」は、政府が世界に先駆けて水素社会の実現を目指して取り組むため2017年に策定された。図2に示すように、2050年を視野に入れた目指すべきビジョンを示し、その実現に向けての行動計画とされている⁽⁶⁾。

前述の水素・燃料電池戦略ロードマップを踏まえて10の実施項目を定め、水素をカーボンフリーなエネルギーの新たな選択肢と位置づけ、わが国のエネルギー需給を巡る構造的課題である「エネルギーセキュリティ/自給

- 2030年頃に商用規模のサプライチェーン構築。水素を年間30万トン程度（発電容量で1GW）調達し、30円/Nm³程度を目指す。また、水素発電の商用化を実現し17円/kWhを目指す。
- 将来的（2050年ごろ）には、水素を年間500万～1,000万t程度（発電容量で15～30GW）調達し、20円/Nm³程度を目指す。また、既存のLNG（液化天然ガス）火力発電と同等の12円/kWhを目指す。

この目標を達成するために、最初は既設の天然ガス火力発電設備での水素の部分的な利

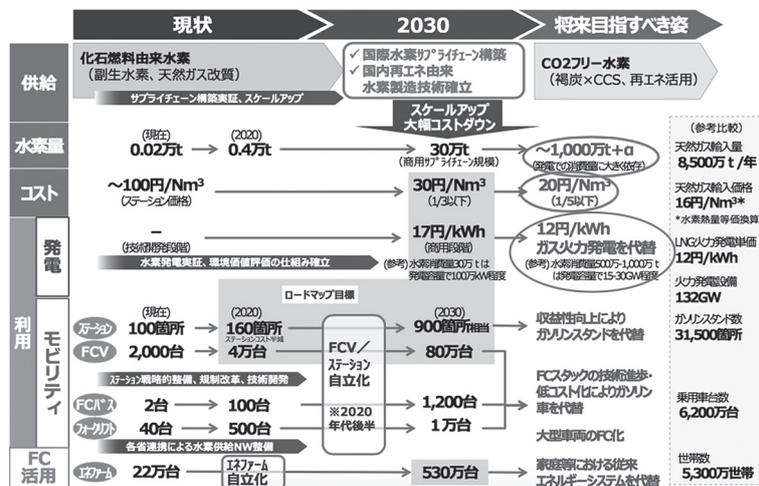


図2 水素基本戦略のシナリオ⁽⁶⁾

用（混焼）を中心に、小規模なコージェネレーションシステム等における水素利用も含めて導入拡大を図り、将来的には水素のみを利用する専焼発電を実現することとしている。

このため、水素の燃焼特性に応じた燃焼器の開発が進められており、燃焼時に発生するNO_xを低減できる新たな燃焼技術の早期の実用化を目指すこととしている。

3. 水素発電の新たな方向性と役割

(1) 水素発電システム

水素による発電システムとしては、前述のように普及が進んでいる燃料電池によるものと今後の導入普及を目指す水素を利用してガスタービンや蒸気タービンを駆動して発電する水素燃焼タービン発電がある。

燃料電池については、既に分散型（都市型）エネルギー供給システムとして普及しており、今後はコスト低減によってPEFC（固体高分子型燃料電池）やSOFC（固体酸化物型燃料電池）の更なる普及促進を図る計画である。但し、現行の定置用燃料電池（エネファーム等）は運転時に天然ガス（都市ガス）から水素を製造する際にCO₂が発生するため、2030年以降はCO₂フリー水素を燃料とする純水素燃料電池の導入・普及を図る計画である。

また、水素燃焼タービン発電については、既存の火力発電システムにおいて燃料を化石燃料から水素に転換することで燃焼時にCO₂を発生しない発電を比較的容易に実現できるため、水素の燃焼特性に応じた燃焼器関連の技術開発が行われている。水素の燃焼は天然ガスに比べて①発熱量が低い（体積当たり3分の1以下）、②燃焼速度が速い（約7倍）、③燃焼温度が高い（+10%程度）、という特性があるため、主な開発課題としては燃焼の安定性（逆火防止）とNO_x低減である。このため、既存のガスタービンで水素混焼するための燃焼器として、拡散方式（水蒸気噴射）および予混合方式（ドライ型）の開発・実証が進め

られるとともに、水素専焼用の燃焼器の開発が進められている。

一方、純酸素と純水素の燃焼方式による酸素水素燃焼タービンについては、以下のような特徴から、現行の火力発電システムよりも熱損失が少なく高効率化が期待でき、燃焼時にCO₂およびNO_x発生が無い理想的な高効率発電システムと言われている。

- 燃焼生成物が水（水蒸気）であるため、外部に放出せずにクローズドサイクルを形成して効果的な熱利用を実現できる。
- 水蒸気を作動媒体としてガスタービン（プレイトン）サイクルと蒸気タービン（ランキン）サイクルを直結したシステムを構成できる。

このシステムは、現行の空気中で水素燃焼するガスタービンとは全く異なるシステムとなるため開発課題も多く、これまでに候補サイクルの検討や燃焼技術の研究開発等が行われているが、机上検討や基盤的な要素研究の段階であり、今後の研究開発が期待されている。

以上の水素発電システムの特徴を整理して表1に示す。

(2) 酸素水素燃焼タービン発電システムの役割

酸素水素燃焼タービン発電は、ボイラ設備を用いなくても燃焼時に高温、高圧の水蒸気ができることから、水蒸気を作動媒体としてガスタービンサイクルと蒸気タービンサイクルを直結した複合システムを構成することが可能となる。コンパクトな設備構成とすることで熱損失の低減による効率改善と大容量化を実現でき、さらに、水素を液体で供給する場合には、液化時に投入されたエネルギーを酸素製造時の冷熱利用として回収することができる。

この酸素水素燃焼技術は、様々な水素利用技術のなかでも最も環境性に優れていることから、画期的な高効率期待できる水素燃焼タービンシステムとして、これまでに水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発（WE-NET：World Energy Network）の

表 1 水素発電システムの特徴比較

項目	空気・水素燃焼タービン	酸素・水素燃焼タービン	燃料電池 (低温型：PEFC, PAFC,) 高温型：MCFC, SOFC)
燃料供給	液体水素または気体水素	液体水素または気体水素	天然ガス, 石炭, メタノール等からの水素, CO ₂
主な長所	豊富な実績, シンプルシステム, コンパクトな燃焼器	無公害, 無排気, 密閉系可能, エネルギー有効利用	規模によらず高効率化可能 回転部がなく低騒音, 低振動
主な短所	NO _x 排出	システム制御系が複雑 (酸素供給他)	付帯設備大, 耐久性の向上
環境保全	良 (大気開放系)	優 (密閉系)	良
立地性	面積	中～大	小～中
	場所	地域, 供給基地周辺	都市, 供給基地周辺
発電規模	中～大	中～大	小～中
発電効率	良 (約 50%, LNG 火力と同等)	優 (LNG 火力より 10%程度高い)	優
運転・保守性	容易	気密保持要 (密閉系)	消耗等による交換
安全性	水素貯蔵供給系	水素, 酸素 2 系統対策要	高温作動型への対策
供給体制	水素, 水素化合物	液水, 水素, 水素化合物 酸素製造可 (液体水素の冷熱利用)	水素, 一酸化炭素等燃料多様化
技術課題	予混合燃焼, NO _x 抑制	材料, 燃焼制御等	耐久性, 複合化
開発段階	混焼は実証～商用段階, 専焼は技術開発段階	基礎・要素研究段階	家庭用, 車載用は実用化段階, 他は開発・実証段階
新規性	小	大	小
水素の優位性	中	大	PEFC, PAFC: 改質器不要等 MCFC: CO ₂ 添加の必要性

(出所：巻末参考文献 (7) に追記)

第 I 期 (1993 ～ 1998 年までの 6 年間) において研究開発が行われている。当時の開発目標は、タービン入口温度 1700℃ の下で発電効率 60% 以上を達成できる最適サイクルの選定であり、同時に燃焼制御方式、タービン翼冷却構造などの関連技術に関する研究開発が行われ、パイロットプラントを概念設計した段階で開発を休止している。

その後約 20 年を経た現在までに水素エネルギーをめぐる環境が大きく変化しており、水素発電に関しては、供給面では水素を燃料として安価で大量に供給するための国際的なサプライチェーンの実現を目指して、製造・輸送・貯蔵に係る技術開発・実証事業が進められており、同時に、利用面では既設のガスタービン発電システムをベースとする燃焼器 (水素混焼/専焼方式) の開発や水素を燃料とする分散型コジェネシステムにより電力と熱を供給する実証事業が行われているような状況である。

今後、高効率の酸素水素燃焼タービン発電

技術の実用化を目指すことは、わが国の課題である「エネルギーセキュリティ/自給率」および「CO₂ 排出制約」を解決するとともに、水素利用分野で世界をリードしていくための重要な取り組みであり、WE-NET の研究開発知見を活用することで効果的な研究開発が実施できるものと考えられる。

なお、WE-NET の研究開発時は、再生可能エネルギーによる水素製造基地建設、国際エネルギーネットワークに関する国際的理解、国際ネットワークによる供給に見合うだけの国内水素需要と社会インフラの導入・整備など、様々な社会政策的な課題があり、開発の継続には大きな制約があったものと推察される。しかしながら、その後 20 年を経て、それらの課題への対応が進み、今後、大量の水素を安価に供給するための政策目標が設定されて様々な取り組みが進められていることを踏まえ、当時の開発技術を最新の知見によって見直す良いタイミングと考える。

4. WE-NET 研究開発プロジェクトの概要

(1) WE-NET 計画の概要

WE-NET 研究開発は、ニューサンシャイン計画の一環として、世界的に偏在する再生可能エネルギーを水素等の輸送可能な形に転換し、世界の需要地に輸送し、発電、輸送用燃料、都市ガス等の広範な分野で利用する国際エネルギーネットワークの導入を可能とすることを目的として1993年（平成5年）から2002

年（平成14年）までの10年間（第I期：1993～1998年の6年間、第II期：1999～2002年の4年間）に実施された。その全体構想である水素エネルギーシステムフローを図3に示す。

(2) WE-NET 第I期の計画概要

WE-NET 第I期（WE-NET（I））計画において実施された研究項目、件名、実施機関を表2に示す。研究項目を（1）～（5）に

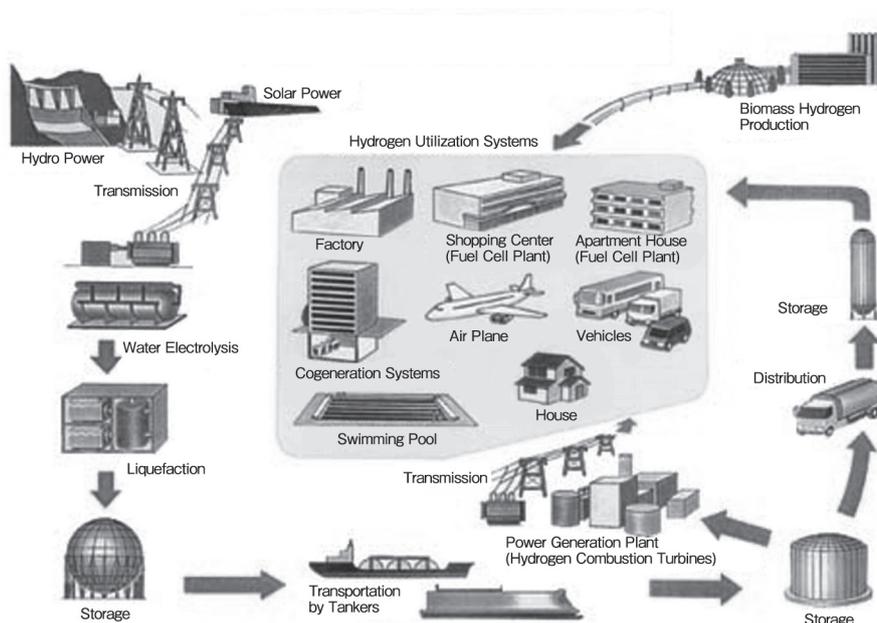


図3 WE-NET 水素エネルギーシステムフロー (8)

表2 WE-NET（I）の研究項目 (9)

研究項目	件名	実施機関
(1) 全体システム		
サブタスク1	総合評価と開発計画のための調査・研究	(財) エネルギー総合工学研究所
サブタスク2	国際協力推進のための調査・検討	(財) エンジニアリング振興協会
サブタスク3	全体システム概念設計	電源開発(株) (財) 電力中央研究所
(2) 水素製造技術		
サブタスク4	水素製造技術の開発	(財) エンジニアリング振興協会
(3) 水素輸送貯蔵技術		
サブタスク5	水素輸送・貯蔵技術の開発	(財) エンジニアリング振興協会
サブタスク6	低温材料技術の開発	(財) 金属系材料研究開発センター
(4) 水素利用技術		
サブタスク7	水素利用技術に関する調査・検討	(財) エンジニアリング振興協会
サブタスク8	水素燃焼タービンの開発	(財) 電力中央研究所 (財) 発電設備技術検査協会
(5) 革新的・先導的技術		
サブタスク9	革新的・先導的技術に関する調査・研究	(財) エネルギー総合工学研究所

表3 各研究項目の目標と実施内容 (9)

研究項目		実施内容
(1) 全体システム	概念設計	水素製造、水素輸送・貯蔵、水素利用にわたる全体システムの概念設計等
	安全対策	水素の安全性に関する調査研究等
	その他	国際的情報交流の推進、水素エネルギーの社会への導入効果の推定、他
(2) 水素製造技術	固体高分子電解質水電解法に関する技術開発	電解槽の高効率化、大型化の検討、水電解プラントの概念設計等
(3) 水素輸送貯蔵技術	大量輸送・貯蔵技術	水素液化システム及び液体水素輸送・貯蔵システムの概念設計等
	分散貯蔵・輸送技術	定置式設備及び移動体への適用を目的とした水素吸蔵合金の探索
(4) 水素利用技術	水素燃焼タービン	発電用水素-酸素燃焼タービンに関する調査研究及び要素技術開発等
	その他の利用技術	上記以外の水素利用技術に関する調査研究
(5) 革新的・先導的技術		(1)～(4) 以外の革新的・先導的技術に関する調査及び基礎研究、有望技術の抽出

区分してそれぞれの目標を設定し、研究対象の分野別にサブタスク1～9に分けて検討している。なお、酸素水素燃焼技術に係る研究開発は、「(4) 水素利用技術、サブタスク8、水素タービンの開発」において技術調査、基礎研究および要素技術研究が実施された⁽⁹⁾。

各研究項目に関する目標と実施内容は表3の通り。

(3) WE-NET (I) サブタスク8の概要

サブタスク8では、水素利用技術の1つとして画期的高効率期待できる水素燃焼タービン開発をテーマとして、そのパイロットプラント開発に必要な技術を確立するため、以下の5項目に関する調査、要素技術開発等を実施している。

- 水素燃焼タービン最適システムの評価
- 燃焼制御技術の開発
- タービン翼、ロータ等主要構成機器の開発
- 主要補機類の開発
- 超高温材料の開発

これらの研究開発で得られた知見は、その後のガスタービンの高効率化に向けた研究開発に反映されている。各項目の実施概要は以下の通り。

①水素燃焼タービン最適システムの評価

タービン入口温度1,700℃で発電端効率60% (HHV：高位発熱量) を達成できる最適システムを選定するため、7種類の候補サイクルの熱効率を解析・評価して3種類のサイクルに絞り込んだ後、各サイクルの発電プラントを概念設計して2種類のサイクルが発電端効率60%以上を達成できる見通しが得られた。

また、経済性、実現性、信頼性、環境性、などを比較評価した結果、総合得点はトッピング再生サイクル、新ランキンサイクル、再熱再生ランキンサイクルの順となり、水素燃焼タービンの最適サイクルとして、図4に示すトッピング再生サイクルが選定された⁽¹⁰⁾。

②燃焼制御技術の開発

水素燃焼タービン用燃焼器の基盤技術を確立するため、3方式の燃焼器について1,700℃、25MPaなどの条件下で燃焼試験を行い基本的な性能を確認した。さらに、試験結果に基づいて燃焼性能（着火特性、圧力損質、燃焼安定性、残存水素・酸素濃度、出口ガス温度分布、壁面温度分布）および燃焼方式・基本構造（安全性、制御性、保守性、発展性）を評価し、水素燃焼タービンに最適な燃焼器として酸素希釈燃焼方式のアニュラー型燃焼器を選定した。

また、燃焼後の残存水素・酸素濃度連続測

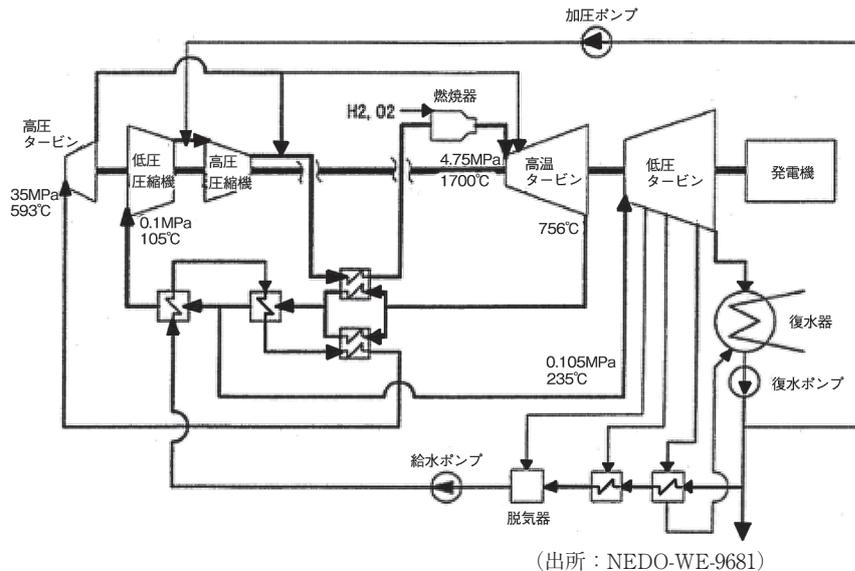


図4 トッピング再生サイクル⁽¹⁰⁾

定装置を試作し、試験には適用できるものの、プラント制御への適用には応答速度の改善が必要であること、また、最高約1,800℃までガス温度を計測できることを確認した⁽¹¹⁾。

③タービン翼、ロータ等主要構成機器の開発

タービン翼冷却技術については、3方式のタービン翼冷却構造(回収式内部(対流)冷却、フィルム冷却+回収式内部冷却、水冷却(静翼)/回収式内部冷却)について検討した。

冷却翼の評価試験(1700℃, 2.5MPa)用のタービン翼(翼高約40mm)を設計・製作し、タービン動・静翼の冷却特性の確認試験を実施するとともに、遮熱コーティング(TBC: Thermal Barrier Coating)の健全性を確認(短時間での試験)して成立性を明確化した。

3方式の冷却性能試験結果および構造成立性等を総合評価した結果、3方式に大きな差異は無かったものの、フィルム冷却+回収式内部冷却、水冷却(静翼)/回収式内部冷却、回収式内部(対流)冷却の順とした。

ロータ冷却技術については、数値流体解析(CFD: Computational Fluid Dynamics)により高温主流ガス巻き込み現象とその防止策を検討し、ロータのシール構造を含むロータ部の基本設計、強度検討およびロータディスク

の最適冷却設計等を行い、目標効率を達成できることを確認した⁽¹²⁾。

④主要補機類の開発

液体水素の冷熱利用に関して、水素燃焼タービンプラント用の水素・酸素供給システム(水素気化/酸素製造)として酸素製造装置について、実用規模プラントに適用される設備の規模、熱交換器の必要熱交換量、主要構成機器の仕様および機器の配置を検討した。

さらに、1,000MW(500MW×2基)発電プラント用の空気分離装置が非常停止した場合に要求されるバックアップシステムを検討し、必要な設備として水素気化器、液体水素貯槽および酸素気化器の概念設計を実施した。また、関連機器類(主熱交換器、酸素蒸発器等)の設計検討を行うとともに、バックアップシステムを含めたコスト積算および経済性評価を実施した。

高温熱交換器に関しては、最適サイクルとして選定されたトッピング再生サイクルで最も厳しい条件(716℃, 35MPa)の熱交換器について、コンパクト化を念頭に置いて伝熱フィン形状の最適化、構造健全性の評価および断熱構造等を検討し、技術的成立性を確認した。また、伝熱管、伝熱管分岐・支持構造、圧力

容器，配管接続構造および運転性，保守性，寿命，コストについて総合的な評価を行い，自立型管束構造物+円筒型ケーシング型熱交換器が有望であることを確認した⁽¹³⁾。

⑤ 超高温材料の開発

タービン入口温度 2,000℃ の水素燃焼タービンへの適用可能性が期待される以下の 6 種類の材料について，材料の設計・開発，素材レベルでの基本特性を確認し，製法等の基礎技術の見通しを得た。

- 単結晶超合金+繊維強化セラミックスのハイブリッド冷却翼
- 耐熱超合金冷却翼用遮熱コーティング (TBC)
- 金属間化合物 (MoSi₂)
- セラミック基複合材料
(Ceramic Matrix Composites : CMC / 長繊維)
- セラミック系多重構造材料
(CMC / 表面部+中間部+芯部)
- CC (Carbon Composites) 及び弱冷却部品用 CMC の 3次元繊維複合材料

特に，セラミック基複合材料は高強度で耐熱性・耐環境性に優れており，円筒形状モデルの試作により，部品レベルでの製造技術の見通しを明らかにした。その他の選定材料についても試験片レベルでの各種試験を行い，高強度で耐熱性・耐環境性に優れていることを確認した。

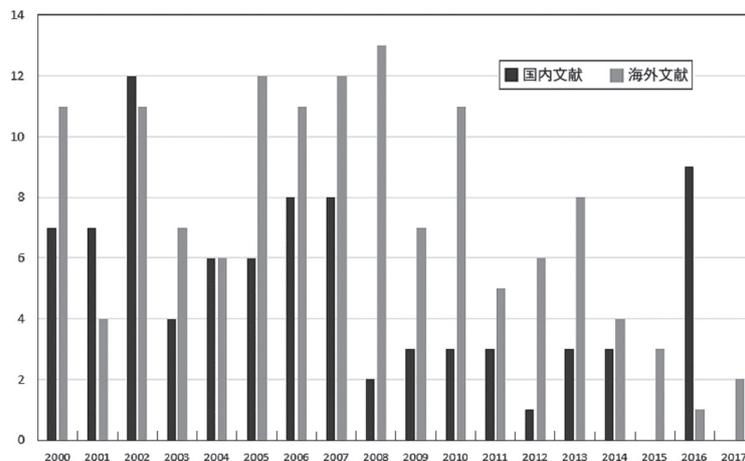
また，材料試験評価法の開発では，化学特性について水蒸気雰囲気耐久性試験法 (1,800℃, 0.1MPa) を開発し，1,700℃までの適用性を確認した。なお，1700℃級の蒸気冷却翼には単結晶超合金を用い，耐熱性確保のため TBC の適用が不可欠であるため，長期信頼性の高い TBC の開発が課題となった。高温下における部品適用に際して最も期待できる材料は，耐環境コーティングを施したセラミックス基複合材料であると判断された⁽¹⁴⁾。

5. 特許・文献調査

国内外での酸素水素燃焼技術に関する技術開発動向を把握するために，公開文献および特許情報をキーワード検索して収集，整理した。その際，WE-NET (I) サブタスク 8 の成果報告書類は重複を避けるために対象外とした。なお，酸素水素燃焼技術に係る特許情報は，ほとんどが WE-NET (I) 関連の内容であった。

(1) 水調査資料の概要

今回収集した資料は技術文献 245 件，特許資料 140 件の合計 385 件であり，技術文献の内訳は国内 102 件，海外 143 件であった。技術文献のうち 2000 年から 2017 年までの間の年度毎の文献数を図 5 に示す。



(出所:収集文献を基にIAE作成)

図 5 2000～2017年までの調査文献数の推移

各年度の文献数は、2000年から2010年までは内外合わせて毎年10～20件程度が公開されており、その後は減少傾向にあるが、国内文献については2015年の0件から2016年に9件と急増している。これは、WE-NET 研究開発の終了後も要素技術として関連分野で技術開発が進められ、2014年の第4次エネルギー基本計画策定等を踏まえ、水素関連の技術開発が活発化しているためと推察される。

一方、国内特許資料については、酸素水素燃焼タービンに係る特許公開資料は1993年から2000年までに22件あり、その後はクローズドサイクルやIGCC等の関連技術であった。

(2) 最近の技術文献の概要

酸素水素燃焼技術に関する最近の技術開発動向を確認するため、調査した国内外の技術文献から2015～2017年の3年間に公開されたものの一部を紹介する。これらの文献は水素エネルギーの利活用について、それぞれの立場から検討、考察したものであり、今後の酸素水素燃焼タービン発電の実現に向けた各種検討作業において参考となる重要な文献と考える。詳細内容は原本を参照されたい。

国内文献については、2016年に9件公開されているが、2017年と2015年は0であった。9件の内訳は、直接関連する文献は2件のみであり、他は学会報告等4件、アンモニア関連2件、プレゼン資料1件であった。また、2011年の東日本大震災の前後で我が国のエネルギーを取り巻く状況が大きく変化していることに留意し、震災前の文献も紹介する。

海外文献については、2017年2件、2016年1件、2015年3件の6件があり、酸素水素燃焼に係る文献は4件であった。2017年の2件は既設ガスタービン用の水素燃焼器に関する報告とCO₂回収のための酸素燃焼に関する報告であり、2015年の1件はマイクロ多孔質燃焼器での酸素水素の予混合燃焼特性に関する報告であった。ここでは、2016年のグラーツ（Graz）サイクルに関する報告と2015年の蒸気タービンサ

イクルによる水素利用システムを評価した報告と加湿条件下での水素・酸素の化学量論燃焼に関する報告の要旨を以下に示す。

①国内文献1：「低炭素社会に向けた水素エネルギーチェーン構築に関する研究」⁽¹⁵⁾

本論文は、低炭素社会を構築するための経済的・技術的に実現可能な水素エネルギーチェーンを提案するとともに、水素利用機器のさらなる効率向上と水素エネルギーを最大限有効に利用するための方策について検討した研究成果をまとめている。

酸素水素燃焼タービン発電については、第4章に検討内容が示されており、水素ガスタービンプラントの高効率化の方策としてエクセルギー解析による損失評価と改善方法の検討等について述べている。特に、現行プラントの最大の損失は燃焼器のエクセルギー損失であること、損失低減には圧縮機・タービンなどの流体機器の効率向上と高圧力比化が有効であることが示されている。さらに、水素ガスタービンの検討では、水素酸素燃焼の特徴を利用した1,200℃級グラーツサイクルはエクセルギー解析によって1,600℃級コンバインドサイクルと同等のサイクル性能を実現できることが示されている。検討例として図6の1,200℃級グラーツサイクルのエクセルギー線図

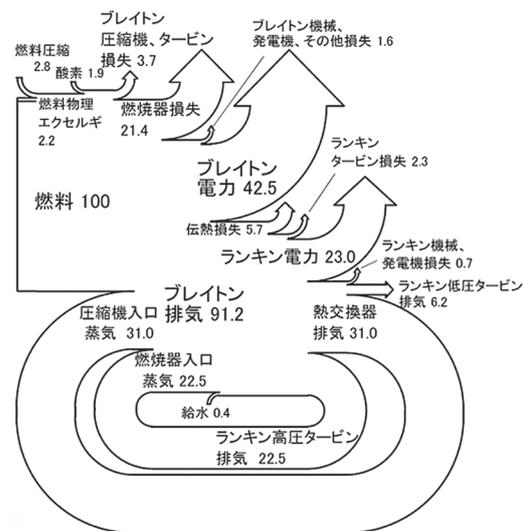


図6 グラーツサイクルエクセルギー線図⁽¹⁵⁾

図から、エクセルギー効率 65.5%（ブレイトン電力 42.5% + ランキン電力 23.0%）という試算結果が示された。

また、液化水素で水素を供給する場合には液化水素の物理エクセルギー（冷熱のエクセルギー）を有効に利用することが重要であり、液化水素の冷熱を利用した深冷分離で酸素を供給した場合、送電端効率が改善するうえに、タービン入口温度の上昇と高圧力比化により、さらなる高効率化のポテンシャルを持っていること、などが示されている。

②国内文献 2：「水素エネルギーシステムの開発課題と現状」⁽¹⁶⁾

本文献は、図 7 に示すような水素の利用を基軸としたエネルギー社会を作り上げていくにあたっての課題と展望についての概括的解説を行ったものであり、「まとめ」部分を以下に示す。

「水素エネルギーシステムは将来のエネルギーにかかわるトリレンマ解決の手段の一つとして有効と思われるがこれを現実のものにするためには、（1）燃料電池等各種の目的に合致した安全で効率的な水素の利用方法の開発、（2）安全かつ経済的な水素の製造・輸送・貯蔵・供給ネットワークの確立、（3）大量水素製造法の開発とこのための一次エネルギーの確保、（4）高分子材料、鉄、触媒等水素システム構成に必要な材料資源や製造法の確保、（5）水素-材料相互作用における基礎現象の解明、（6）将来のエネルギーにかかわる

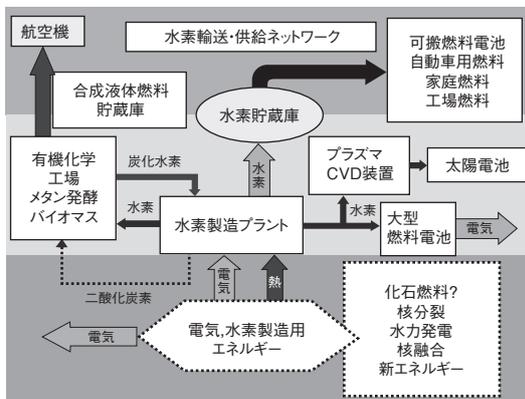


図 7 水素の利用を機軸としたエネルギー社会⁽¹⁶⁾

技術的・社会的問題を総合した効率的エネルギーシステムの開発戦略の策定、を同時に解決する必要がある。いずれの課題もこれからの研究によるブレークスルーを必要としているが、研究者として取り組み甲斐のある相手である。なお、エネルギー貯蔵や輸送を余裕あるものにするため、水素社会においても二次電池や揚水発電所を活用しエネルギー利用における最適化を図ることが望ましい。また、水素エネルギー社会が到来するとしても、将来長期にわたる一次エネルギー源を考える時、石油、天然ガス、石炭および軽水炉用ウラン資源の枯渇が心配されるが長期救援投手としての核融合炉の登板が期待される。」

③海外文献 1：“Adapting the Zero-Emission Graz Cycle for Hydrogen Combustion and Investigation of its Part Load Behaviour”⁽¹⁷⁾

再生可能エネルギーに基づく現代のエネルギーシステムはエネルギー貯蔵システムを必要とする。水素は有望な候補であり、貴重な燃料水素を電気に再変換するためには、最も効率の良い発電システムが必要である。本研究では、酸素水素燃焼技術に基づくゼロエミッション発電プラントであるグラーツサイクルを提案する。グラーツサイクルは、純酸素で化石燃料を燃焼させ、作動流体の約半分を再圧縮することで最高 65% の効率を実現する。また、水素燃焼に適合しており、ほぼ純粋な蒸気の作動流体が利用可能である。

設計上の熱力学的検討は、ピークサイクル条件として 1,500℃ および 40 バールの最先端ガスタービン技術を前提としている。図 8 で試算したサイクル効率は 68.5% (LHV) であり、既存発電所の効率よりも著しく高い。高い効率は、サイクル流体の約半分を再圧縮することでプロセスからの熱損失を減少させることで得られる。しかし、そのためには構成機器間で密接な相互作用をもたらすため、部分負荷運転の実現可能性が研究される。提案する制御システムでは、非常に高い効率のまま

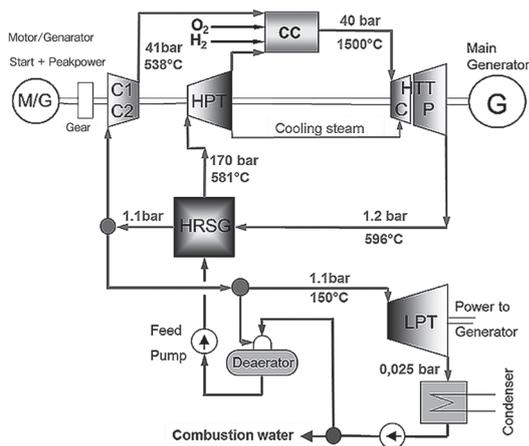


図8 酸素水素燃焼のグラーツサイクル
フロー図 (17)

部分負荷をベースロードの30%まで低減することができる。部分負荷および全負荷での高い効率は、グラーツサイクルを、水素を貯蔵媒体とする将来のエネルギーシステムにおける水素の再転換の有望な候補とする。

④ 海外文献2：“Hydrogen utilization by steam turbine cycles” (18)

蒸気タービンサイクルにおける水素の利用について、4機関が提案している酸素水素燃焼タービン発電サイクル (GRAZ, TOSHIBA, WESTINGHOUSE, MNRC) を対象として熱力学的解析手法により比較評価した。同じソフトウェアと同じ熱力学的機能を用いて計算した結果を表4に示す。50～250barの高圧燃焼器

の採用により、現行の最高効率の発電ユニットよりも10%程度高い発電効率 (η HHV:59.5%～66.4%) を達成できることが試算されている。

⑤ 海外文献3：“Stoichiometric Hydrogen-Oxygen Combustion under Humidified Conditions” (19)

再生可能エネルギーの利用拡大は、電力システムの安定性を確保するために迅速かつ柔軟な貯蔵と電力供給を必要とする。有望な貯蔵方法として電気分解による水素および酸素の製造がある。水による完全なクローズドサイクルを用いる可能性は、水素および酸素が、高効率、ゼロエミッションのエネルギー貯蔵のための方法として有望となる。電気分解は高圧下で行えるため、ガスタービンの圧縮機動力が不要となり、効率の点で有利である。さらに、既存のガスタービンよりも容易に高いタービン圧力比に達することができる。

しかしながら、ガスタービンにおける水素と酸素の燃焼は困難な課題である。水素と酸素の混合物は極めて反応性が高く、非常に高い火炎温度となる。本研究では、化学量論的条件における水素と酸素の蒸気希釈燃焼の可能性を示すとともに適切な燃焼器を開発して実験的に検証する。また、化学量論的水素酸素燃焼のために、湿度を系統的に変化させ、火炎形状、燃焼温度の推定および運転の限界について比較、検討する。

表4 酸素水素燃焼タービン発電サイクルの主要パラメータ (18)

Cycle Parameter	GRAZ	TOSHIBA	WESTINGHOUSE	MNRC
p_{max} [bar]	350	380	250	250
t_{max} [°C]	1,700	1,700	1,700/1,600	1,700
Gross power [MW]	513	513	513	513
η_{LHV} [%]	70.8	71.2	74.0/72.8	79.0
η_{HHV} [%]	59.5	59.8	62.2/61.2	66.4
Specific Power [kJ/kg]	2,202	3,331	3,489	4,706
Net (electric) power [MW]	500	500	500	500
$\eta_{el,LHV}$ [%]	69.0	69.4	72.2/71.0	77.0
$\eta_{el,HHV}$ [%]	58.0	58.3	60.6/59.7	64.7
Temperature at the most thermal loaded point [°C]	1,700	1,700	1,700/1600	1,700
Pressure at the most thermal loaded point [bar]	50	73	250	250
Pressure at the most pressure loaded element [bar]	350	343	277	277
Temperature at the most pressured loaded element [°C]	650	876	517	463
Quantity of heat exchanged (HRSG heat load) [MW]	315	329	256	165

6. 酸素水素燃焼タービン発電を構成する要素技術の現状・今後の見通し

(1) 酸素水素燃焼タービン発電を構成する要素技術の現状

酸素水素燃焼タービン発電を構成する要素技術としては、前述の WE-NET (I) 水素燃焼タービン開発の開発項目であった燃焼制御技術(燃焼器の燃焼方式, 基本構造), タービン翼・ロータ等主要構成機器(タービン翼冷却技術, ロータ冷却技術), 主要補機類(液体水素冷熱利用技術, 高温熱交換器)などの個別機器関連の技術と発電プラント全体を最適化するためのシステム検討技術がある。

当時の研究開発プロジェクトは, 500MW 級水素燃焼タービンの開発を目標としていたが, パイロットプラントのための概念設計段階で休止しており, 開発技術の実用化には至っていない。その後は酸素水素燃焼発電に係る要素技術開発は行われていないが, WE-NET で培われた知見は, 火力発電の高効率化に向けた 1,700℃ 級ガスタービンコンバインドサイクル発電や石炭ガス化発電(IGCC)の開発に活用され, 最近では既存の LNG 火力発電での水素混焼・専焼等の実用化に向けた研究開発が進められている。

一方, 海外の最近の取り組み状況については, 環境対策(CO₂ 排出削減)と発電効率向上の観点から蒸気タービンサイクルにおける水素の利用について研究開発が行われており, グラーツサイクルの運転制御や高効率化に関する検討, 様々な提案サイクルを比較した検討結果, 酸素水素の化学量論的燃焼のための燃焼器開発, ガスタービンでの水素燃焼試験, などの報告があり, 主にタービンサイクルの高効率化に向けた検討と酸素水素燃焼技術に関する研究開発が行われている。

また, WE-NET から 20 年を経て飛躍的に進歩した技術としてシミュレーション技術がある。過去の研究開発においては理論解析と実験による検証が両輪となり, シミュレーシ

ョン技術はそれらを数値的にサポートするためのツールとしての位置付けであったが, 近年の計算機, 計算モデル, 計算手法等の高度化により, 研究開発の初期段階から製品化に至るまでの期間や費用などを合理化するために不可欠なツールとなっている。特に, 酸素水素燃焼に係る実験は, 高圧ガス関連設備の整備と安全対策, 大量供給が必要な酸素や水素の費用などの制約条件が厳しいため, プラント全体システムの最適化検討や酸素水素燃焼挙動などに関するシミュレーション技術の開発が不可欠であり, 今後の検討作業による技術の確立が期待される。

このようなことから, 酸素水素燃焼タービン発電を構成する要素技術の現状としては, 我が国では WE-NET の終了とともに他分野での研究開発に活用されているような状況であり, また, 海外においても継続的な研究報告はあるがサイクル検討が主体であり, 実機レベルでの酸素水素燃焼発電の技術開発に関する取り組みは行われていないものと推察する。

(2) 今後の見通し

わが国のエネルギー政策に基づく水素・燃料電池ロードマップでは, 2020 年代後半に大規模な水素供給システムの確立とともに水素発電の本格導入を目指している。

酸素水素燃焼タービン発電システムは, 現在, 開発中の水素発電技術とは異なる燃焼技術に基づくものであり, その開発ターゲットとしての目安は, 発電効率 75% (LHV), 発電コスト 12 円/kWh 以下を達成することである。このような発電システムを将来, 実用化していくために研究開発が必要と考えられる技術課題を以下に示す。

- | |
|--|
| <p>① トータルシステム技術
水素エネルギーの供給側と重要側の条件を明確にして酸素水素燃焼タービン発電システムを中核とした将来のサプライチェーンの全体システムの検討, 水素の安全性に関する調査研究, 安全確保のための技術開発課題の抽出。</p> <p>② 酸素水素高圧燃焼技術
超高圧条件での酸素水素燃焼特性を解明するため</p> |
|--|

の解析手法（シミュレーション技術）の検討、燃焼器要素試験による燃焼時の残留未燃水素・酸素等の課題の明確化。

③ 内燃蒸気タービンサイクル

液体水素の冷熱を活用した空気からの酸素分離、酸素水素量論比燃焼、水蒸気を作動媒体とする完全なゼロエミッションと高効率（75%）を実現するサイクルの検討。

④ 候補サイクルのシステム動特性

上記の(3) 内燃蒸気タービンサイクルで検討されたサイクルについて、タービンの起動停止、部分負荷運転等を想定した動特性の検討。

⑤ タービン技術

候補となるタービンシステムについて、タービン・凝縮機の開発目標の検討。

7. おわりに

水素酸素燃焼タービン発電システムは、高効率とゼロエミッションを両立できる理想的な発電システムではあるが、その実現のためには、酸素水素の高圧燃焼技術など高度かつ基盤的な研究開発や工学的な見地からの機器開発が不可欠であり、長期的な観点からの段階的な研究開発計画の策定と適切なマネジメントが必要と考える。

今後、WE-NET プロジェクトで得られた様々な知見を学びつつ、その後の20年間で進歩した材料技術やシミュレーション技術などを適用することで、WE-NET が目指した水素社会実現に向けて努力している関係諸機関とともに取り組んでいきたいと考える。

[謝辞]

本報告はNEDOの平成29年度情報収集事業の調査内容の一部を取りまとめたものである。発表の許可を頂いたNEDOに感謝する。詳細については「情報収集事業 酸素水素燃焼技術の研究動向、技術課題抽出に関する調査」報告書を参照願いたい。

また、調査研究においてご協力を頂いた（国研）産業技術総合研究所、東京工業大学、（一財）電力中央研究所、東京大学、（一財）石炭エネルギーセンター、川崎重工工業（株）の関係者に感謝

するとともに、技術文献の概要を紹介した山下誠二氏、西川正史氏に感謝する。

参考文献

- (1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、(委託先) 一般財団法人エネルギー総合工学研究所、平成29年度成果報告「情報収集事業 酸素水素燃焼技術の研究動向、技術課題抽出に関する調査」、平成30年3月
- (2) 経済産業省、「第4次エネルギー基本計画」、平成26年4月
- (3) 経済産業省、「第5次エネルギー基本計画」、平成30年7月
- (4) 経済産業省、「水素・燃焼電池戦略ロードマップ」、平成26年6月
- (5) 経済産業省、「水素・燃料電池戦略ロードマップ改訂版」、平成28年3月
- (6) 経済産業省、「水素基本戦略」、平成29年12月
- (7) 平成4年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書「水素燃焼タービンの調査」、(財) エンジニアリング振興協会、平成5年3月
- (8) エンジニアリング協会ホームページ
- (9) 産業技術審議会評価部会、水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発評価委員会、最終評価報告書「ニューサンシャイン計画、水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)研究開発・第1期」、平成11年12月
- (10) NEDO-WE-NET-9681、平成8年度成果報告書「(1) 水素燃焼タービン最適システムの評価研究」
- (11) NEDO-WE-NET-9882、平成10年度成果報告書「(2) 燃焼制御技術の開発」
- (12) NEDO-WE-NET-9983、平成10年度成果報告書「(3) タービン翼 ロータ等主要構成機器の開発」
- (13) NEDO-WE-NET-9984、平成10年度成果報告書「(4) 主要補機類の開発」
- (14) NEDO-WE-NET-9885、平成10年度成果報告書「(5) 超高温材料の開発」
- (15) 山下誠二、京都大学博士論文「低炭素社会に向けた水素エネルギーチェーン構築に関する研究」、2016年7月
- (16) 西川正史、「水素エネルギーシステムの開発課題と現状」、プラズマ・核融合学会誌 Vol.80, No.1, 2004年1月
- (17) Wolfgang Sanz, Martin Braun, Herbert Jericha, Max F. Platzer, "Adapting the Zero-Emission Graz Cycle for Hydrogen Combustion and Investigation of its Part Load Behaviour," GT2016-57988, March 15, 2018
- (18) Jaroslaw Milewski, "Hydrogen utilization by steam turbine cycles," Journal of Power Technologies 95 (4) (2015), p. 258-264
- (19) Sebastian Schimek, Panagiotis Stathopoulos, Tom Tanneberger, Christian Oliver Paschereit, "Blue Combustion: Stoichiometric Hydrogen-Oxygen Combustion under Humidified Conditions," GT2015-43149, June 15-19, 2015

平成 29 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 29 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、その時々の上社会的な要請に応じて調査研究対象の重点化と研究基盤整備を図ってきている。

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

また、原子力災害の発生という現実を見据え、現在の軽水炉の安全向上を図るための技術開発を継続するとともに、当研究所の解析コード (SAMPSON) を福島第一原子力発電所の事故炉の炉心状況の把握に活用するためのプロジェクトや過酷事故 (シビアアクシデント) 時の安全系の機能に関する研究、通常炉の廃止措置に係る標準に関する調査検討、人材育成の支援等も進めた。

(3) 以下に各エネルギー分野における調査研究活動の概要を示す。

① エネルギー技術全般

国内外の緩和策にとって重要な技術についてのイノベーションに関する調査、エネルギー・環境技術のイノベーションについて検討を行う国際フォーラム Innovation for Cool Earth Forum (ICEF) の開催支援等を進めたほか、最新の技術情報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、第四次産業革命の影響に関する調査を実施した。

② 新エネルギー・電力システム関連

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、蓄エネルギー技術を用いた再生可能エネルギー大量導入時の出力変動対応技術に関する研究開発やバーチャルパワープラントの構築に関する実証事業、再生可能エネルギー発電設備の遠隔出力制御に関する評価等を進めた。

また、再生可能エネルギー分野では水を作動媒体とする小型バイナリー発電システムの研究開発や集光型太陽熱発電（CSP）等に関する調査研究、省エネルギー分野では高効率空調システムの開発や省エネルギーポテンシャル等に関する日独の二国間比較調査を実施した。

③ 水素エネルギー関連

CO₂フリー水素の普及シナリオに関する研究や製造・貯蔵・輸送に至るサプライチェーンに関する調査、水素の利用技術である酸素・水素燃焼技術の研究開発に係る調査等を実施した。

④ 化石エネルギー関連

化石燃料の高度転換技術に係る研究に関して、次世代の石炭ガス化複合発電（IGCC）に関する調査や革新的なCO₂分離・回収技術に係る調査、Power-to-Gas、Power-to-FuelなどのCO₂有効利用技術に関する調査等を行うとともに、化石燃料利用に係る新技術の研究に関し、石炭火力においてCO₂回収設備が不要となるケミカルルーピング燃焼に係る技術開発を行った。

⑤ 原子力関連

福島第一原子力発電所事故を踏まえ、さらに高い水準の安全確保を図るため、原子力の安全性向上に資する技術開発プロジェクトを実施したほか、事故炉の総合的な炉内状況把握の高度化、過酷事故（シビアアクシデント）解析手法の高度化に関する研究、シビアアクシデント時の原子炉隔離時冷却系の機能に関

する研究等を進めた。また、福島第一原子力発電所事故後の国内原子力産業の動向や海外の原子力研究開発の枠組み、諸外国における原子力安全制度の整備状況に関する調査等を行うとともに、原子力発電所の廃止措置計画に係る標準に関する調査検討、海外諸国における廃止措置の技術動向に関する調査、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事業等を行った。

研究所のうごき

(平成30年4月2日～7月1日)

◇ 第15回理事会

日時：6月4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29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 公益目的支出計画変更認可申請について
- 第四号議案 定時評議員会の開催について
- 第五号議案 顧問の委嘱について
- 報告事項 業務執行の状況について
その他

◇ 第16回理事会(書面決議)

決議があったとみなされた日：6月22日(金)

議題：

- 第一号議案 第9回評議員会(定時評議員会)の招集について

◇ 第9回評議員会(書面決議)

決議および報告があったとみなされた日：

6月22日(金)

議題：

- 第一号議案 平成29年度事業報告(報告事項)および決算について
- 第二号議案 公益目的支出計画実施報告書(報告事項)について
- 第三号議案 公益目的支出計画変更認可申請について
- 第四号議案 役員の一部改選について
- 第五号議案 評議員の一部改選について

◇ 月例研究会

第377回月例研究会

日時：4月13日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館5階 501・502会議室

テーマ：

1. 平成30年度の供給計画の概要について

(電力広域的運営推進機関 理事 寺島一希氏)

2. シェール・ガス革命, シェール・オイル革命の最新動向と新たな石油需要ピーク論

(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378回月例研究会

日時：5月11日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館5階 501・502会議室

テーマ：

1. エネルギー産業の2050年 Utility3.0へのゲームチェンジ

(東京電力ホールディングス(株) 経営技術戦略研究所 経営戦略調査室 チーフエコノミスト 戸田 直樹氏)

2. エネルギービジネスは第四次産業革命でどう変わるのか?

((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 特任参事 新谷 隆之)

第379回月例研究会

日時：6月8日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館7階 701・702会議室

テーマ：

1. 自動運転技術の開発動向と課題

((一財) 日本自動車研究所 ITS 研究部 次長 安達 章人氏)

2. Mobility as a Service: 移動の革新

(特定非営利活動法人 ITS Japan 理事 穂場 亨氏)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：坂田 興

テーマ：Current Status of Development of Hydrogen Technology in Japan and the Governmental Policies

発表先：The Korean Hydrogen & New Energy Society

日時：5月3日

- 発表者：坂田 興
 テーマ：持続可能なエネルギー社会構築に向けた水素の貢献可能性
 発表先：愛知県 水素エネルギー社会形成研究会
 日 時：5月25日
 資源学会 研究発表会(大阪国際会議場)
 日 時：6月12日
- 発表者：福田 健三
 テーマ：持続可能なエネルギー社会構築に向けた水素の貢献可能性
 発表先：東京電蝕防止対策研究会 創立50周年記念特別講演会
 日 時：5月29日
 発表者：黒沢 厚志, 加藤 悦史 他
 テーマ：2050年に向けた低炭素システムの検討：将来の低炭素システムにおける革新技術の役割－需要側の低炭素化とバイオ CCS 利用可能性の分析－
 発表先：エネルギー・資源学会 第37回エネルギー資源学会 研究発表会(大阪国際会議場)
 日 時：6月12日
- 発表者：小野崎 正樹
 テーマ：シンクタンクのお仕事－研究から政策立案まで－
 発表先：早稲田大学 早稲田応用化学会 第32回交流会講演会
 日 時：6月30日
 発表者：黒沢 厚志, 飯田重樹, 水野有智, 坂田 興
 テーマ：Impact Assessment of Hydrogen Energy Import on National Wealth Outflow
 発表先：22nd World Hydrogen Energy Conference (WHEC 2018), Rio de Janeiro
 日 時：6月17日～22日
- [学会等発表]
 発表者：加藤 悦史
 テーマ：Efficient technologies and sustainable feedstock for BECCS deployment in mitigation pathways
 発表先：International Conference on Negative CO₂ Emissions (Chalmers 大学主催 / Global Carbon Project, IEAGHG, IEAIETS, IEA Bioenergy 共催)
 日 時：5月22日～24日
 発表者：黒沢 厚志
 テーマ：日本とドイツの省エネルギーに関する比較考察
 発表先：エネルギー・資源学会 第37回エネルギー資源学会 研究発表会(大阪国際会議場)
 日 時：6月11日
 発表者：黒沢 厚志, 加藤 悦史
 テーマ：2050年に向けた低炭素システムの検討：将来の低炭素システムにおける革新技術の役割
 発表先：エネルギー・資源学会 第37回エネルギー資源学会 研究発表会(大阪国際会議場)
 日 時：6月12日
 発表者：黒沢 厚志, 加藤 悦史 他
 テーマ：2050年に向けた日本のエネルギーシステム－TIMES-Japanを用いた分析－
 発表先：グランド再生可能エネルギー2018国際会議(パシフィコ横浜)
 日 時：6月17日～22日
 発表者：蓮池 宏, 川村 太郎, 松岡 成樹 他
 テーマ：Development and Field Demonstration of Binary Power Generation System using Water as Working Fluid
 発表先：グランド再生可能エネルギー2018国際会議(パシフィコ横浜)
 日 時：6月17日～22日
 発表者：蓮池 宏, 日浦 俊哉, 鈴木 守 他
 テーマ：Development and Demonstration of Compressed Air Energy Storage System for Power Compensation of Intermittent Renewables
 発表先：グランド再生可能エネルギー2018国際会議(パシフィコ横浜)
 日 時：6月17日～22日

発表者：Yuki Ishimoto, Mari Voldsund, David
Berstad, Petter Nekså, Ko Sakata

テーマ：Value chain analysis for long distance
transport of hydrogen carriers

発表先：World Hydrogen Energy Conference 2018

日時：6月18日～22日

[寄稿]

寄稿者：黒沢 厚志

テーマ：COP23に参加して

寄稿先：『エネルギー・資源』Vol.39 No. 3 (2018
年5月号)

寄稿者：蓮池 宏

テーマ：CAESによる再生可能エネルギー貯蔵

寄稿先：『電気評論』2018年6月号

◇人事異動

○4月27日付

(退職)

伊藤あゆみ 原子力工学センター 主任研究員

○5月31日付

(退職)

Richard Finger 原子力工学センター 嘱託研究員

○6月30日付

(出向解除)

臼井健一郎 プロジェクト試験研究部 主任
研究員

○7月1日付

(出向採用)

穴見直也 プロジェクト試験研究部 主任研
究員

(常勤嘱託採用)

炭谷 一朗 プロジェクト試験研究部 参事

(非常勤嘱託採用)

堀田 善治 プロジェクト試験研究部 参事

編集後記

先日、ネアンデルタール人が絶滅した原因を取り上げたドキュメンタリー放送があった。ネアンデルタール人と言えば、筆者が子供の頃はわれわれ現生人類の祖先とされていたと記憶しているが、これまでの研究によればホモ・サピエンスの祖先ではなく、われわれと共通の祖先がヨーロッパに渡って進化し30万年前に出現した別の種だというのが定説になっている。現生人類とほぼ同程度の脳、頑丈な骨格と高い運動能力を備え、優れた技術を使って社会的な生活を営んでいたネアンデルタール人であるが、それが3.9万年前に絶滅したのである。長期間の寒冷期による食糧不足、感染症の蔓延、ホモ・サピエンスの侵略などが原因として議論されてきたが、化石に残されたDNA解析等の結果によれば、狩猟生活に有利な小集団で暮らしてきたために遺伝的多様性が弱まり、それにより出生率の低下、

病気への抵抗力の低下が生じ、人口が減少して絶滅に至ったということらしい。一方で、アフリカ以外で暮らす現生人類の遺伝子にはネアンデルタール人のそれがわずかながら含まれているということは、ホモ・サピエンスにとってはネアンデルタール人との交配が遺伝的多様性の拡大に貢献したということになるのだろうか。

いずれにせよ、これは生物多様性にまつわる話であるが、このような自然科学の分野のみならず、宗教や価値観、地域、文化など社会・人文科学的分野も含めた様々な面での多様性について、環境の変化などをうまく取り入れながら広げていくことが、ダイナミックな変革を起こしつつ社会の発展・繁栄をもたらす重要な要素の1つになるのではないかと今更ながらに気づかされた次第である。

編集責任者 重政弥寿志

季報 エネルギー総合工学 第41巻第2号

平成30年8月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(6F)

電話 (03) 3508-8891

FAX (03) 3501-1735

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

(印刷) 株式会社 吉田コンピュータサービス

※ 無断転載を禁じます。