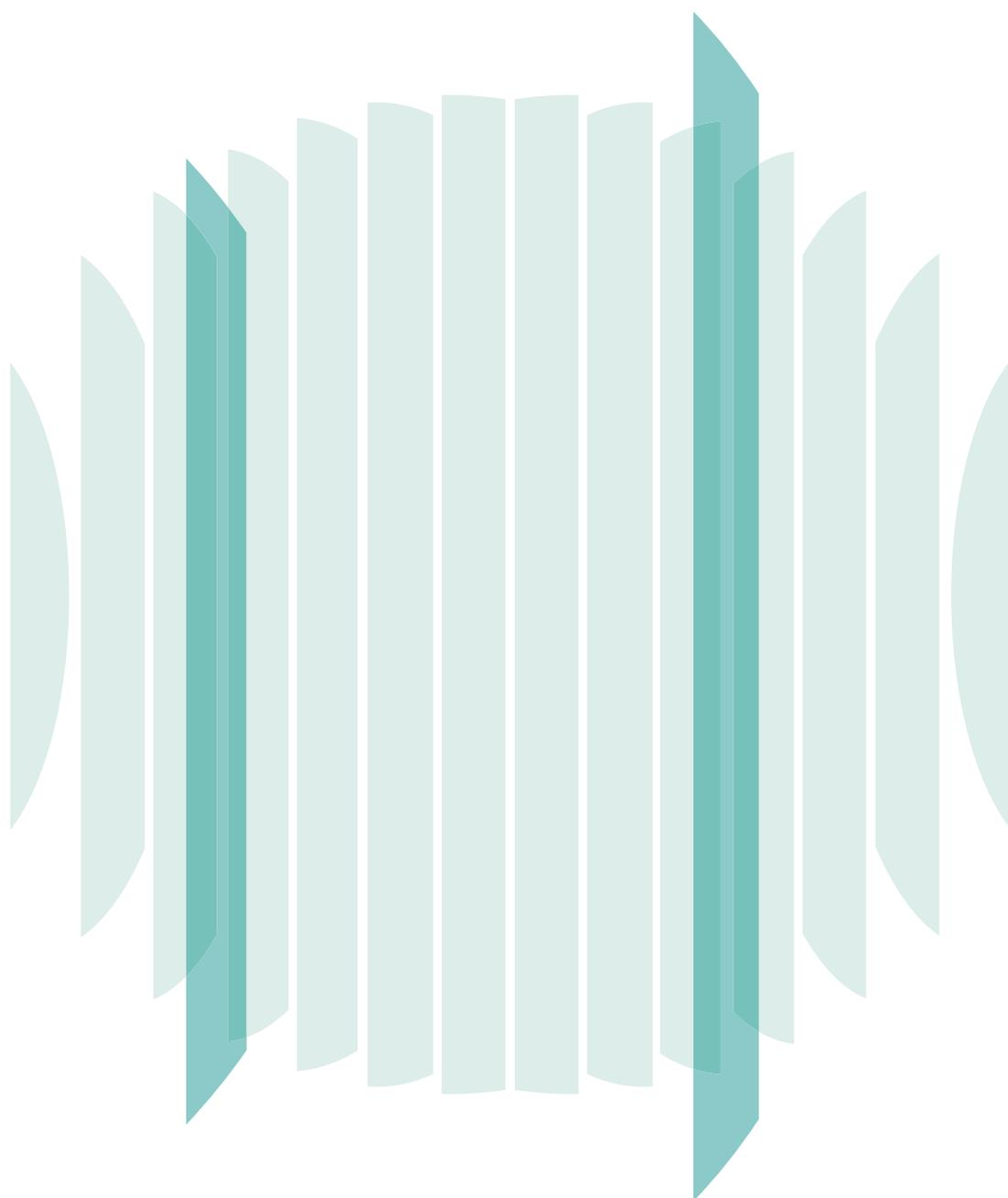


# 季報 エネルギー総合工学

Vol. 42 No. 2 2019. 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】

令和時代のエネルギー政策～ Beautifully Harmonized Energy ～

一般社団法人 日本電機工業会 専務理事 高本 学 …………… 1

## 【座談会】

気候変動対策における環境管理規格  
～ ISO14000 ファミリーの役割と開発の課題～

(一財)日本エネルギー経済研究所 理事 工藤 拓毅  
(国研)国立環境研究所 社会環境システム研究センター  
広域影響・対策モデル研究室 室長 高橋 潔  
筑波大学大学院 人文社会科学部 国際日本研究専攻  
ISO エキスパート 福村 佳美  
司会： (一財)エネルギー総合工学研究所  
プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員 黒沢 厚志 …………… 3

## 【寄稿】

シェール・ガス革命, シェール・オイル革命の新たな動きと挑戦

和光大学 経済経営学部 教授 岩間 剛一 …………… 23

## 【調査研究報告】

海外の高速炉の廃止措置の取り組み状況

原子力工学センター 特任参事 林道 寛 …………… 40

## 【調査研究報告】

過酷事故条件下における  
原子炉隔離時冷却系 (RCIC) の挙動に関する研究

原子力工学センター 主管研究員 都築 宣嘉 …………… 52

## 【事業報告】

平成 30 年度 事業報告の概要 (一財)エネルギー総合工学研究所 …………… 64

【研究所のうごき】 …………… 66

【編集後記】 …………… 68

# 巻頭言

## 令和時代のエネルギー政策 ～ Beautifully Harmonized Energy ～

高本 学 ( 一般社団法人 日本電機工業会  
専務理事 )



平成から令和へと改元し、新しい時代への期待と希望を抱いている方々が多いことと  
思います。多様化する地域構造やライフスタイルの時流にあって、社会生活に必須となっ  
ている電力エネルギーは、安定供給という宿命を担いながらも、デジタル革新に立脚した  
Society 5.0の実現に向けて世界をリードする技術・制度革新を求められています。今まさ  
しく、電力システムはパラダイムシフトに直面しているとも言えるのではないでしょう  
か。

2018年7月に「第5次エネルギー基本計画」が閣議決定されました。火力、原子力、水力、  
再生可能エネルギーなど電源構成ごとのベストミックスを追求する方針です。しかしなが  
ら、その後の議論は産業界も含めて、電源の長・短所の再確認、社会受容性向上施策、国  
民負担低減論など、重要ではありますが、定量的な評価基準が曖昧なまま、議論がかみ合っ  
ていないようにも感じます。発電事業のみならず送配電事業・小売事業への有効な経済投  
資を促進する観点からも、事業リスクを定量的に評価できる「付帯的な外部コスト」や「社  
会便益」の項目と評価基準の議論が先決だと思われます。これらの評価基準は諸外国の事  
例を参考にすべきではありますが、日本の電力供給システムにおける歴史的背景や特長、  
燃料海外依存度（セキュリティ）、導入コストなど固有の項目への配慮も必要だと思われ  
ます。また、評価基準ですので公平性・透明性が必要となってきます。そのような観点から、  
一般財団法人 エネルギー総合工学研究所の調査研究事業に期待するところは大きく、大変  
困難な道のりではありますが、社会的議論の活性化をリード頂きますよう期待しており  
ますし産業界としましても一緒になって検討したいと思います。

また、電源のベストミックスと少し違った観点から、電源同士のベストハーモニーの検  
討も必要になってくるのではないかと思います。洋上風力の設置拠点メリットを活用した、

竜巻・津波・台風・雷など自然情報の早期データ把握と陸上ベースロード電源設備への対策反映，発電所設置自治体との良好な関係を反映した洋上風力事業化のリスク低減など，電源種別のみならず多様化する事業者間のハーモニーによる経済コストの合理化や事業予見性の向上など全体最適化を目指すことが可能なのではないのでしょうか。

令和時代の Beautifully harmonized energy を目指して，IoT や AI を活用した次世代電力インフラ構築に向けた技術イノベーションを産業界一丸となって後押ししていきたいと思えます。

座 談 会

**気候変動対策における環境管理規格  
～ ISO14000 ファミリーの役割と開発の課題～**

工藤 拓毅 (一財) 日本エネルギー経済研究所 理事

高橋 潔 (国研) 国立環境研究所 社会環境システム研究センター 広域影響・対策モデル研究室 室長

福村 佳美 (筑波大学大学院 人文社会科学研究科) 国際日本研究専攻 ISO エキスパート

司会：黒沢 厚志 (一財) エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員




---

はじめに

---

黒沢 エネルギー総合工学研究所（エネ総研）では、ISO/TC265（CCS）、ISO/TC301（エネルギー管理と省エネ）で国際標準化機構（ISO）の規格開発を支援しています。その分野にはある程度の知見があるのですが、気候変動関連規格 14000 ファミリー全体の活動となると、分野がかなり広がってきたこともあつ

て、中々理解しにくいところがあります。今日は全体像を把握しながら、それぞれの専門の立場から最近の活動がどうなっているか議論して頂ければと思います。

最初に、ご自身の ISO 規格開発での主な活動内容と標準化との関わりについてお話し下さいますか。

工藤 日本エネルギー経済研究所の工藤です。私は、ISO/TC207（環境管理）の中にある、温室効果ガス（GHG）排出量の算定と関



工藤 拓毅 氏

(一財)日本エネルギー経済研究所  
理事

連活動を扱う第7分科委員会（SC7）の国内委員会の委員長を務めています。2005年頃、ISO14064ファミリーで、GHG排出量のMRV（計測（Measurement）、報告（Reporting）、検証（Verification））を標準化するために、パート1（算定、報告）、パート2（GHGプロジェクトに関連したガイダンス）、パート3（検証）が立ち上がりました。私はパート1の規格化から関わっています。

その後、14064ファミリーは、検証機関に加えて、検証人のガイダンスへ、さらにはGHGの算定・報告以外の分野－適応や脆弱性評価の分野、ファイナンス系の分野－にも広がり、気候変動関連規格の寄せ集めの場所になっています。

また、ISO/TC207だけでなく、ISO/TC17（鉄鋼）では、鉄鋼分野における二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の算定方法についての標準化や鉄鋼製品のライフサイクルアセスメント（LCA）も手伝っていますし、二酸化炭素回収・貯留（CCS）関連のTC265、エネルギー管理のTC301などにも関与しています。

**高橋** 国立環境研究所・社会環境システム研究センターの高橋です。

私自身は、研究者として、もっぱら温暖化の影響予測に携わってきました。気候変動で

50年先、100年先が心配されていますが、変化が生じた時に農業や水資源、人間の健康にどんな影響が表れるのか、部門ごとにシミュレーションモデルを構築して予測計算をすることを研究の中心に据えてきました。また、気候変動の影響を予測した後、悪影響を軽減させるための適応策の検討・評価の研究にも範囲を広げています。昨今だと、適応策と緩和策の同時分析や、対策を行った時の他分野への波及影響の評価も研究対象としています。

私がISOの活動に参加したのはおよそ2年前からですが、TC207/SC7のワーキンググループ11（WG11）による気候リスク評価のガイドライン作りに、エキスパートとして参加しています。

これまでの国際活動としては、「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）の『第4次評価報告書』（AR4、2007年公表）では「適応」の章の主要執筆者として参加して、そのあと『気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関する特別報告書』（SREX、2011年公表）へも執筆者として参加し、『第5次評価報告書』（AR5、2014年公表）では、複数のセクターや地域の影響リスクを総合評価する章の執筆者として参加しました。

そういった研究のバックグラウンドやIPCCでの執筆や情報整理の経験などを踏まえて、今回ISOの活動に参加させてもらっています。

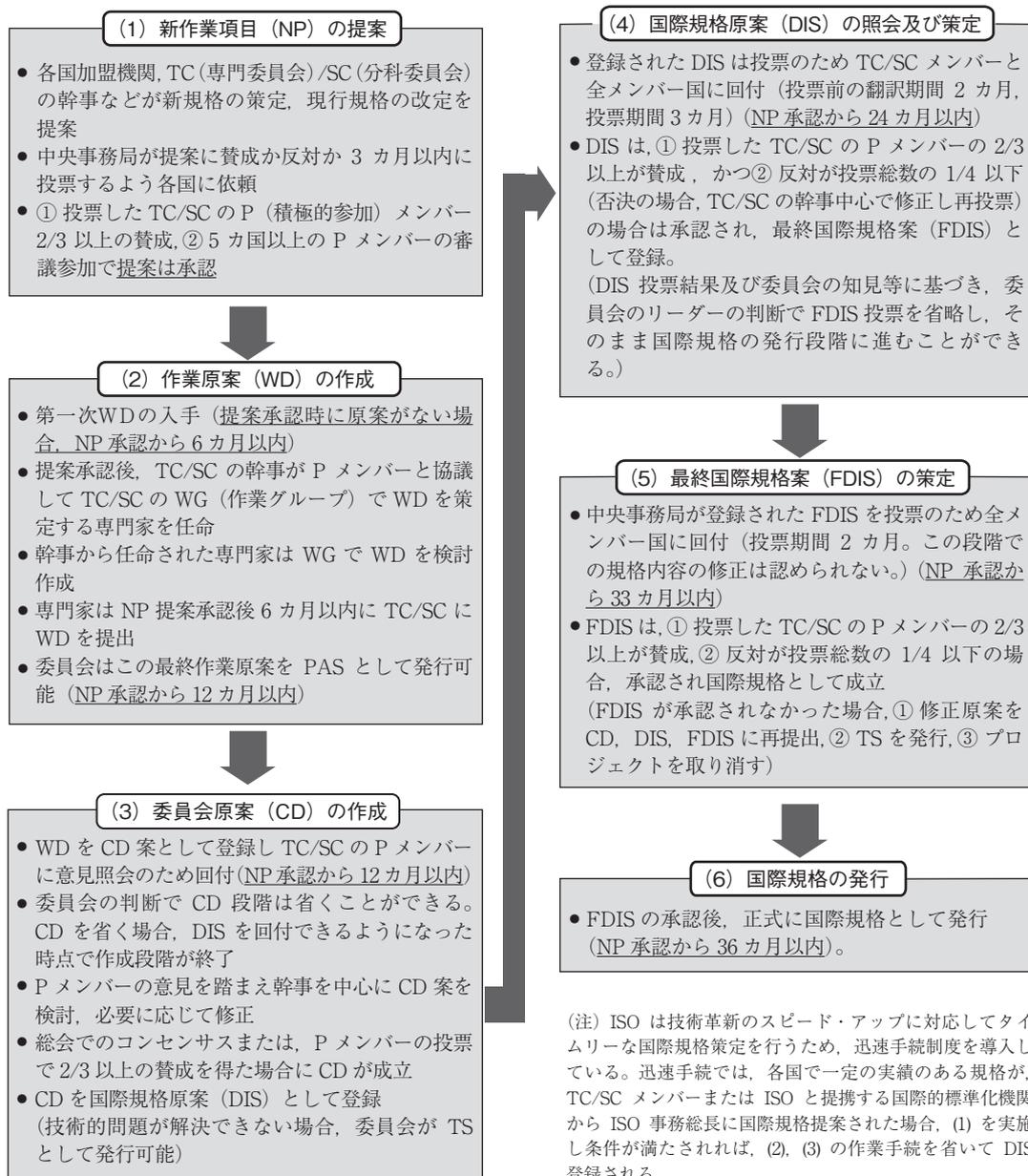
**福村** 筑波大学大学院の福村です。ISOをはじめとする国際規格に関する経験が10年ほどあります。今日は国立環境研究所・気候変動適応センターの脇岡靖明・副センター長の代理で参りました。脇岡とISOとの関わりは2017年からです。

ISO/TC207ハリファックス総会（2017年6月）で、適応計画を扱うワーキンググループ12（WG12）の立ち上げが採決され、それ以降、脇岡が中国と共同という形で、日本側取りまとめ役（コンビナー）を務めています。私はWG12にエキスパートとして参加しています。

気候変動適応センターは、「気候変動適応法」(2018年12月制定)に従い、地域と国における気候変動影響評価や適応推進に関する情報提供・技術協力の提供などを行うセンターです。地域と関わるといところで、センターの活動は、WG12で作っているガイダンスと重なる部分が多く、適応センターもISOの活動から学ぶところが大きく、感謝しています。

肱岡は研究対象が影響評価ということで、IPCCのAR5の「第24章 アジア」の統括執

筆責任者(CLA)を務めた後、『1.5℃特別報告書』の「第3章 1.5℃上昇の自然と人間システムへの影響」では代表執筆者(LA)を務めています。また、WG12ではコンビナーとして、事務局を務める産業環境管理協会と一緒に、これまで3回ほど会合を開いています。ガイダンスの初稿から執筆を担当し、改訂を重ねながら、編集者と内容の検討を行っているところです。



(注) ISO は技術革新のスピード・アップに対応してタイムリーな国際規格策定を行うため, 迅速手続制度を導入している。迅速手続では, 各国で一定の実績のある規格が, TC/SC メンバーまたは ISO と提携する国際標準化機関から ISO 事務総長に国際規格提案された場合, (1) を実施し条件が満たされれば, (2), (3) の作業手続を省いて DIS 登録される。

(出所: 日本工業標準調査会ウェブページ - <https://www.jisc.go.jp/international/iso-prcs.html> - )  
の情報を基にエネ総研で作成

図1 ISO規格の制定手順

表 1 TC207/SC7 下での ISO14000 ファミリー規格の開発状況 (2018 年 12 月 12 日現在)

規格番号	JIS 規格名称 / ISO 規格名称	備考 <sup>※</sup>	発行 / 開発状況	JIS 化の状況
ISO14064-1 : 2018	温室効果ガス-パート 1 : 組織における温室効果ガスの排出量及び吸収量の定量化及び報告のための仕様並びに手引	2006-03-01	発行準備中	JIS Q 14064-1 : 2010
ISO14064-2 : 2006	温室効果ガス-パート 2 : プロジェクトにおける温室効果ガスの排出量の削減または吸収量の増加の定量化、モニタリング及び報告のための仕様並びに手引	2006-03-01	改定作業中 (FDIS 段階) 2019 年発行予定	JIS Q 14064-2 : 2011
ISO14064-3 : 2006	温室効果ガス-パート 3 : 温室効果ガスに関する声明の妥当性確認及び検証の仕様並びに手引	2006-03-01	改定作業中 (FDIS 段階) 2019 年発行予定	JIS Q 14064-3 : 2011
ISO14065 : 2013	温室効果ガス-認定または他の承認形式を使用するための温室効果ガスに関する妥当性確認及び検証を行う機関に対する要求事項	2013-04-01	改定作業中 (CD 段階) 2020 年発行予定	JIS Q 14065 : 2011 JIS 改定作業中
ISO14066 : 2011	温室効果ガス-温室効果ガスの妥当性確認チーム及び検証チームの力量に対する要求事項	2011-04-15	SR 定期見直し 2016 年 “確認”	JIS Q 14066 : 2012
ISO14067 : 2018 (旧 ISO/TS14067 : 2013)	温室効果ガス-製品のカーボンフットプリント-算定のための要求事項及び指針 (旧名称: 製品のカーボンフットプリント-算定及びコミュニケーションのための要求事項及び指針)	2018-08-01	2018 年度 IS 改訂版発行	
ISO/TR 14069 : 2013	温室効果ガス-組織の温室効果ガス排出量の定量化と報告-ISO14064-1 の適用のための手引	2013-05-01	-	
ISO14080 : 2018	温室効果ガス管理及び関連活動-気候変動アクションにおける方法論のためのフレームワーク及び原則	2018-06-25	2018 年度発行	
ISO14097	気候変動に関連する投資と財務活動の評価のための枠組みと原則	WD 段階	2017 年 1 月 NP 承認 2020 年発行予定	
ISO14090	気候変動適応-原則、要求事項及び指針 (旧名称: 気候変動適応に関するフレームワーク原則、要求事項及び指針)	DIS 段階	2016 年 11 月 NP 承認 2019 年発行予定	
ISO14091	気候変動適応-脆弱性、影響及びリスク評価 (旧名称: 気候変動適応-脆弱性評価のための指針)	CD 段階	2017 年 4 月 NP 承認 2020 年発行予定	
ISO/TS 14092	気候変動適応-地方自治体や地域社会を含む組織のための適応計画の要求事項と指針	WD 段階	2017 年 4 月 NP 承認 2020 年発行予定 (2019 年中の発行を目指す)	
ISO19694-1	固定発生源-エネルギー多消費産業のための温室効果ガス算定方法-パート 1 : 一般的側面	WD 段階	2017 年 5 月 NP 承認 2020 年発行予定	

※ 発行予定日は、ISO Project Portal に記載されている Time frame (規格発行の目標期日) による。

【略語の意味】

NP : New Work Item Proposal (新規規格提案)

CD : Committee Draft (委員会原案)

FDIS : Final Draft International Standard (最終国際規格案)

IS : International Standard (国際規格)

TS : Technical Specification (技術仕様書 / 標準仕様書)

WD : Working Draft (作業文書)

DIS : Draft International Standard (国際規格案)

SR : Social Responsibility (社会的責任)

TR : Technical Report (技術報告書 / 標準報告書)

(出所: 日本規格協会グループのウェブページを参考にエネ総研で整理の情報を基にエネ総研で作成)

黒沢 皆さん、ISO の活動にある程度長く関わられ、特に工藤さんは非常に長く関わられていて、最近活動が始まった分野でも皆さんが活発に活動されていると理解しました。

ファミリーの役割と範囲の広がりについて、その背景や現状について工藤さんからご説明頂ければと思います。

## 14000 ファミリーの全体的な動向

### 数多くの新規格が立ち上がってきた背景 ～京都議定書とパリ協定～

黒沢 最初に、全体的なことについて。なぜこれほど色々な規格が立ち上がっているのか議論して頂きたいと思います。新しい規格が立ち上げる背景については、まだ、一般の方には理解できていないと思いますので、14064

工藤 ISO の管理規格としては、まず ISO9000 ファミリーで品質管理システム規格ができ、それが今、環境管理規格へと進んできています。環境管理規格はまだ新しい規格です。

ISO の環境管理規格というのは、民間の取り組みですから、常にどこにニーズやマーケットがあるのか模索しながら進んできています。14064 ファミリー規格開発の最初のタイミングはやはり、京都議定書 (1997 年) を巡る動きでしょう。京都議定書では、排出量取引やクリーン開発メカニズム (CDM) といった新しいマーケットメカニズムについても明記されて、それに類似する各地域における取り組

みは色々あって、京都議定書という1つのルールに基づいて皆が動き出す時に、算定方法や検証、プロジェクトの組成に関する標準化ニーズがきつとあるだろうということでISOも動き出したという訳です。

実際には、京都議定書の方がオリジナルのルールを作り込んで進展していった、ISO規格は、後追的にフォローして行ったのです。一方で、事業者、企業のGHG排出量管理に対する違った視点、ルールの使われ方に関するニーズがどんどん出てくるようになっていきます。例えば、東京都独自の総量を削減する取引制度では、信頼性の観点から「ISOの算定報告や検証報告が使える。適宜参照して行こう」となっています。最近では、企業に対してGHG排出量の公表を求めるカーボン・ディスクロージャー・プロジェクト（CDP）とか、ファイナンス系の人達も企業の気候変動への取り組みを色々評価して、リスク評価の情報を投資家に開示するようになっていきます。やはり、共通の物差はどうしても必要になります。ですから、「算定方法やデータの確からしさ、検証方法について、標準化された物を使って開示して下さい」といったニーズに応える規格を京都議定書もしくはその枠の中で構築しようという話が出てきました。

規格を巡る最近のトレンドに影響を与えたのは、やはりパリ協定（2015年）だと思います。京都議定書の枠組みに途上国を参加させるのは難しいということで、パリ協定では各国が自主的にGHG排出削減目標を設定し、且つ法的拘束力のないものになりそうだと分かった時、「色々な温暖化防止の関連活動で独自の標準を見出したい」という思いが気候変動の分野に関与してきた人達に芽生えたのです。

今後求められる温暖化関連活動に、様々なステークホルダー自ら取り組んだり、企業を巻き込んだりしている時に、「ISOのガイダンスが色々なテーマで作ってあると使われるのではないか」といった意識が今の様々な規格化の活動につながっています。京都議定書と

パリ協定を契機として今の動きがある、というのが私の印象です。

### 競争的な気候変動関連の規格化

**黒沢** 規格化が気候変動対策とかなりリンクしながら推移し、ビジネスやノン・ステート・アクターへの対応も含めた色々動きがある中で、横断的な調整について、技術管理評議会（TMB）や工藤さんが委員長を務めるTC207/SC7の議長諮問グループ（CAG）ではどういよう議論がなされているのでしょうか。

**工藤** 気候変動関連の規格化は、「協調的」と言うより「競争的」になってきています。ISOの場合、各TCは、それぞれの規格内容の範囲を明確に規定しています。例えば、ISO/TC142（空気その他ガスの浄化装置）では、大気汚染物質の計測に関連する産業別ガイドラインを担当しています。ところが、ISO/TC142で「GHG排出量のモニタリングの規格化をやりましょう」となると、範囲がISO/TC207とオーバーラップしてきます。また、ISO/TC322（持続可能なファイナンス）で狙っているのは持続可能性に関連したファイナンス系のガイダンスで、これもISO/TC207と範囲が類似しています。TMBは、最近、そういったオーバーラッピングを非常に気にしていて、「オーバーラッピングは調整しなさい」と各TCのCAGに呼びかけています。「気候変動」「持続可能性」「持続可能な開発」は似てないようで実は似ているものなので、TC間での「陣取り合戦」のような状況になっています。ISOの地方事務局もこの交通整理を考えなければいけませんし、各TCも自分達の存在価値を維持しながら、どういう形で活動分野にフォーカスしていくか考える状況になろうとしています。

それから、14000ファミリーでは、「特定産業の規格は作らない」という行動規範があります。例えば、「〇〇産業の温暖化対策行動関

連規格」となると ISO/TC207 では作りません。それをやる他の TC と連携して規格を参照し合う形になります。例えば、TC207 がガイドラインを作ったら、エネ総研でやっている ISO/TC265 や ISO/TC301 と連携して、それぞれの TC の相互関係も視野に入れた上で規格化を進めることになります。そこでやることで非常にシンプルなのは、定義を揃えることです。これは国際標準化の中で一番大事なことの 1 つで、どこで同じような定義が設定されているのか確認する意味でも、連携は重要です。オーバーラッピングがある部分で様々な TC が連携し、共通の用語、考え方、特定産業のガイドラインについても、それぞれの規格の中で位置付け、規格の利便性を高めていけると思います。

ただ、実際には、事務局の責任者が結構忙しくて、他の TC の会議に出席しないという事情もありますから、規格策定段階で連携する他の TC の人達に積極的にレビューしてもらうとか、複数の TC に関与している人達から生の情報をもらうとかすれば、連携する意識を高めていけると思います。

---

## 個別分野の活動

---

### 企業や自治体によるリスク評価に役立つ 標準化されたガイドライン

黒沢 次に、皆様の具体的な分野の活動について議論したいと思います。論点としては、規格がどう役に立つのかということです。ビジネスに役立ったり、自治体の色々な計画によって市民生活に役立ったりということも考えられます。それぞれの分野の活動の概要と目的、考えられるメリットについて伺いたいと思います。今度は高橋さんから、リスクと脆弱性に関するところをお願いします。

高橋 ISO/CD14091（気候変動への適応－脆弱性、影響及びリスク評価）でガイドラインを作る作業に 2 年ほど参加しています。このガイドラインは、企業だけでなく、幅広く自治体等の気候リスク評価にも活用してもらおう想定で作られています。

CDP や気候変動関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）では、各企業が排出削減に対応できているのかといったことだけでなく、気候変動で気温が上昇するとか、豪雨等の災害にさらされるとかした場合に、企業活動にどんな影響が生じるかを把握し報告することも求められています。これまであまり危機意識を持っていなかった企業に対して「投資家にリスク情報を開示せよ」というニーズが突きつけられている訳です。危機意識も方法も経験もない企業とリスク情報を求める投資家との間のギャップを、標準化されたガイドラインで埋めることに役立てられるのではないかと思います。

温暖化の影響を受ける対象は多様で、リスクの種類も対応も異なります。ですから、企業や自治体の特性を考慮した上で議論しなければなりません。一方で、リスクの評価を行う際、標準化されたガイドラインで共通部分を明確にしておくとか、各々の特性に応じて、必要な追加的評価をより明確に議論できるようになると思います。ガイドラインの標準化で共通の大前提を補強していけるのであれば、それは企業活動にも役立つのではないのでしょうか。

黒沢 気温上昇のほうは経済的な影響まで含めたリスク、災害等のほうは物理リスクとして、ISO/CD14091 の範囲に入っていると理解して良いのでしょうか。

高橋 気候変化に関連して企業が有するリスクは、大きくは、移行リスクと呼ばれるものと、物理リスクと呼ばれるものに分けて論じられます。移行リスクというのは、気候変動対策

に必要な費用の捻出等によるリスク、低炭素化への移行に際して生じるリスクのことを指します。緩和の努力を求められることにより企業活動に生じるリスクです。一方で、物理リスクとは、気候変化によって受ける被害やその復旧費用などのリスクです。昨今、物理リスクの評価と情報開示が企業に新たに求められてきており、標準化されたガイドラインはそこをサポートするツールとして役立つと期待されています。

ISO/CD 14091 で評価の対象として扱うリスクは物理リスクのみで、移行リスクは対象に含まれていません。

#### バラエティに富む地方自治体と 適応計画のためのガイダンス作り

**福村** 私ども ISO/TS14092 のガイダンスの範囲は、地方自治体とコミュニティ（地域社会）です。ファミリーの中に ISO/14090（気候変動への適応－原理原則・要件およびガイドライン）がありますが、ISO/TS14092 が立ち上がるまで ISO/14090 は、「ハイレベルなフレームワークの適応」という名前でした。ところが、2018 年冬にこの「フレームワーク」が外れて、私ども ISO/TS14092 とのオーバーラップが大きくなってきたので、どちらがどこまでやるのか調整する活動も行っています。

ISO/14090 が全ての組織、集合体を対象にしているのに対し、ISO/TS14092 は地方自治体とコミュニティが対象です。ただ、適応に必要なプロセスや実装への工程などは共通する部分が多いので、書き分けについて議長やエキスパート同士で意見交換したり、共同でワークショップを行ったりしています。さらに、ISO/14090、ISO/CD14091、ISO/TS14092 で用語を揃えるための調整を進めているところです。

IPCC でもパリ協定でも適応は非常にローカルな問題だということに一致しています。日本の気候変動適応法が地方自治体に適応計

画を立てることを推奨しているように、こういった取り組みが世界的に加速していくとの考えで作られた規格が ISO/TS14092 だと思います。難しいのは、ISO の性質上、発展途上国から先進国までどこでも使える規格を作らなければならない、というところです。

適応に関するプロセスの標準化は、非常に有意義だと思います。諸外国でも「適応計画」と称しているところは案外少なく、その多くが「適応戦略」「適応方針」という名前になっています。では、何を持って「計画」というか、まだ議論の余地があると思います。ですから、規格を作る段階で、計画の骨子を示すことも意義があると思っています。

**黒沢** 能力が不足している途上国や中小企業に使ってほしいということだと思いますが、それを支援するガイダンスを作る活動もされているのでしょうか。

**福村** 日本国内であっても十分な知見や資源（リソース）を持っているところ、そうでないところ、バラエティに富んでいます。ISO/TS14092 のガイダンスの根幹は、今あるものをもう一度見直すことです。適応に関し、今までの気候に起因した出来事を振り返り、何処に手当が必要なのかを見直す過程や自分達が今行っている施策に気候変動を加味した優先順位を付けることで、手元にあるリソースを最大限活用しようという狙いがあります。

#### 途上国の政策実行を助ける規格

**工藤** 先ほどマーケットという話がありましたが、これから、先進国以上に新興国・途上国で規格に対するマーケットが出てくるのかどうか、規格を作る側としては非常に興味があります。

途上国には適応の能力やリソースがないので、そういったガイダンスは欲しいはずだと思います。途上国では手元のリソースを補完



高橋 潔 氏

(国研) 国立環境研究所 社会環境システム研究  
センター広域影響・対策モデル研究室 室長

するという、規格の開発機会が出てくるのではないかと思います。例えば、ISO14080 (GHG 管理及び関連活動－気候変動対策アクションに関する方法論の枠組み及び原理) では、政策立案の方法が書かれていて、具体例として日本の「低炭素社会実行計画」が載っています。途上国が本格的に政策を実行していく時に、彼らをガイドしていく規格が ISO14080 です。

パリ協定の場合、地方自治体や企業グループなど、様々な主体が気候変動対策に取り組むこととなります。そういった人達にも共通の定義や考え方を提供し、それを活用してもらうためには、適応のガイダンス作りの方々の大変な作業が大事になってくると思います。そこで適応の共通定義ができ、適応に対する投資や活動で行われると、当然それにビジネスが重なってきます。標準化されたことの中に強みのある企業や国は、その標準化を強く推し進めていくこと、日本にその強みがあるならば、色々な形で標準化に参画していくことが大事なアクションだと思います。

#### 適応計画の中でリスク評価を支援する 14091

高橋 ISO/CD14091 の役割は、適応と適応計画の実践の中でリスク評価を助けることです。気候変動による、ネガティブな影響、あるいは

はポジティブな機会を評価するステップが必要になるので、その手法や手順について標準化されたガイダンスを WG11 が作っています。

リスクの評価手順が順を追って説明されていますが、実際の世の中では、必ずしもその手順に従い評価される訳ではありません。リスク評価に割ける時間、人材、資金などのリソースの大小、扱う対象数などによって、データやツールの精度や手間・費用も変わってきますので、そのような手順の具体詳細まで ISO/CD14091 で標準化される訳ではありません。共通な手順について抽出してガイダンスとしてまとめていると思います。

リスク評価と言うと、定量的なリスク分析を想起する人が多いと思います。悪いことが起きる確率とそれが起こった時に生じる被害を掛け合わせてリスクの量を算定し、その量のある値以下に抑える対策を検討するための定量的なリスク分析のことです。しかし、気候変動問題の場合、扱う問題の中に未知な部分が非常に多く不確実性も大きいので、定量的なリスク評価の手法について、細かくガイドラインを決めたとしても応用できない場面が多々あります。ですから、ISO/CD14091 では、より広く定量的な評価が困難なリスクも見逃さず評価し、また、その大小を論じるための手順についてまとめています。

ISO/CD14091 で作るガイドラインは、リスク評価をやったことのない企業や国、自治体が、リスク評価を実施する前に、どのようにリスク評価を進めたらよいのか、勘所を掴むための資料としても使えると思います。また、実際にリスク評価の作業を自分達でできない場合、リスク評価を請け負うコンサルタントに外注することが考えられますが、そのコンサルタントが精度や有用性が保証されない独自の方法ではなく、標準化された方法で評価を行うように誘導するためにも ISO/CD14091 のガイドラインを活用できると思います。

## TCFDでの活用の可能性がある 14091

工藤 TCFDの推奨開示項目の中に「リスク」という言葉があるのですが、規格を検討する際に、TCFDのガイドラインとの整合性も意識しているのですか。

高橋 両者の整合性を図るとか、活用できる場所を探すとといった議論は必ずしも明示的には行われていないと思います。関係者の間では、その必要性が感じられているとは思いますが、ガイダンスを作る作業の中でTCFDと足並みを揃えようとしている感じはありません。

黒沢 ISO/CD14091のエキスパートでTCFDの中身に精通した人は結構いるのですか。

高橋 リスク評価を請け負うコンサルタント会社の人たちは何人かエキスパートとして参加しています。ただ、その人達が必ずしもTCFDの議論に直接参加して、発言力を持っている訳ではないと思います。

工藤 TCFDの取り組みが1つのメインストーリーとして動いているなら、日本政府がガイドラインを出すぐらい注目している訳なので、ISO/CD14091が考えている規格が完全にスタンダード化して誰が使うのかという話になるより、TCFDとの連携しながらコンテンツ構成をやった方が、市場性が高まると思います。逆に言うと、皆がTCFDの細かいガイドラインを勝手にどんどん作る流れになっていますから、リスク管理とかシナリオ的な観点からのリスク評価とか、結構面白い規格を思いついたものだと思います。

高橋 はい。ISO/CD14091のガイドラインが今後、TCFDで活用されていく可能性はあると思っています。

## vulnerability assessment から risk assessment へ 定義変更された「リスク評価」

黒沢 基本的な考え方として、ハザード（気候変動の場合は、極端に暑い日、強い台風、豪雨の頻度など）、曝露、脆弱性があって、リスクが決まるという考え方は踏襲されていると考えて良いでしょうか。

高橋 規格の原案を作る作業の最初のころに、それを踏襲するという確認がかなり慎重に行われました。当初、ISO/CD14091は「脆弱性評価」(vulnerability assessment)という名前で提案されました。脆弱性と曝露、災害の3要素でリスクの大小が決まるというリスク評価の議論がここ10年ぐらいで一般的になりつつありますが、1990年代から2000年代の初めあたりまでは、気候変動分野では、そのようなリスク評価は「脆弱性評価」と呼ばれていたのです。ところが、2007年公表のAR4から2014年公表のAR5までの間に定義が大きく変更され、ISO/CD14091もAR5の「リスク評価」(risk assessment)の定義を採用することとしました。

ハザードの部分、例えば異常気象の規模や頻度だけに注目して緩和のみでリスク管理するのではなく、適応を通じて脆弱性と曝露の管理もしていく考え方です。その時、3要素のいずれかについて定量的な予測結果の信頼度が必ずしも高くない場合でもリスク管理しなければならず、定性的なリスク評価と定量的なリスク評価を組み合わせて実施することが必要になります。ISO/CD14091のリスク評価で大事な手順として強調されているのが「インパクトチェーン」です。1個1個のリスクは単独で起きるのではなく、それらが繋がりを持って起こり様々な影響をもたらします。ISO/CD14091では、その繋がりと影響の関係を図示して、対応が必要なリスクは何かを漏れなく議論することを強調しています。定性的な評価を併用することで、定量的な評価のみではできない、リスクの複雑な繋がりを押さえた検討も可能になります。

工藤 僕は、適応や脆弱性を気候科学的な要素として、また防災的な観点からのイメージで考えていたのですが、今話を聞いていて、これにTCFDを組み込むことの意義が見えてきました。TCFDが情報開示で説明を求められているのは強靱性なのですね。強靱性の裏にはリスクがありますから、どこに自分達の脆弱性やリスクがあって、それにどう適応できるかという情報を開示することで、「自分達のビジネスは強靱である」と主張して下さいということです。TCFDは、リスク管理的な要素と適応できないものの双方を企業が斟酌して、自分達のアクションをアピールできるものとして捉えられます。

高橋 以前は自分たちの弱みを隠すことがあったのかも知れませんが、今は透明性を持って開示しなければならない時代です。自分達の弱みを把握して、それに適切に対処しているとアピールすることが企業価値を高めます。その際、自分達にとっての気候変動のリスクが何なのかをどう調べるのか、どう評価するのかという部分で、14091がそのためのツールを与えることになると思っています。

#### 定期的見直しで有用性を高める 適応計画のガイドライン

黒沢 福村さんにお伺いします。14092のガイドラインは作っておしまいでしょうか。もう少し踏み込んで、こういうものをやった方が良いというガイダンスも提供するのでしょうか。

福村 ISO/TS14092は自治体による気候変動のリスク管理が目的ですから、ISO31000（リスク管理－指針）のリスク管理の構成に似ています。まずプランを立て、それを実装し、モニタリング、評価をして、見直すというサイクルを続けて行きます。適応計画を1回立てて終わりという訳ではありません。

ISO/TS14092では、まず重要な決定をする人を決めます。次に、その決定を実装するチームを決めます。そのチームは、県や町の既存の施策を洗い出し、近隣県や国がどういう動きをしようとしているのかも考えながら、将来の気候変動の影響を見据えて必要となる対応を検討して適応計画を立て、実装していきます。実装していく中で、気候も社会も変動していくので、実装したものがどれくらい有効なのか定期的に見直します。その見直し過程で明らかになった不具合や得られた知見を次のサイクルに活かすというのが基本です。

そういった過程で必要なのが評価するための指標ですが、この指標を決めるのが非常に難しいのです。モニタリングと評価のためのしっかりした指標がまだ固まっていないので、まだまだ調査が必要だと思っていますが、初期の段階では、まずは仮の指標を定めておくことで適応計画は十分回っていくと思います。計画を実践していく中で、気候変動がどういうリスクとなって現れてくるか、県や地域社会全体で考えないといけません。適応計画は、その県で一番重要なものは何なのか、どこを守っていくべきかを、ステークホルダーと積極的にコミュニケーションを取りながら一緒に考えて、気候変動のネガティブあるいはポジティブな影響に対応していく必要があります。例えば、平均気温が上がることでメリットが生じることもあります。愛媛県では、これから栽培適地になってくるので、ポンカンよりも高く売れるブラッドオレンジの栽培を県が積極的に盛り立てていく動きがありました。

黒沢 定期的な見直しは、大変そうですが。

福村 そうですね。ですが、ISO/TS14092では、まずは計画を立て、それを実践しながら学ぶという考え方でいます。1回目のリスク評価の結果を見直して、見直したリスクに対して指標も合わせて検討していきます。計画自体を見直すのではなく、計画に含まれてい

る構成要素を見直していくのです。大変ではあるのですけれど、見直すことでより効果的な対策が打てるというガイダンスになることを目指しています。

**黒沢** 日本の適応計画では、ISO/TS14092のガイドラインの考え方を推奨しているのでしょうか。

**福村** 実は、ISO/TS14092の初稿は、環境省が作ったガイドラインに準拠していますから、日本の知見を反映していると思います。環境省は、地域適応計画策定を支援する目的で、「地方公共団体における気候変動適応計画策定ガイドライン（初版）」（2015年）と「地域気候変動適応計画策定マニュアル」（2018年）の2つを発行していますが、ガイドラインの方はリスク管理に沿っていて、マニュアルの方はリスクアセスメントに特化しています。両方を突き合わせることで非常に効果的な対策を講じることができると思います。

#### カーボンフットプリントの定量化と スコープの拡大

**黒沢** ISO14064ファミリー（GHG排出量の算定や第三者検証等に関するガイドライン）、ISO14067（カーボンフットプリント定量化のための要件とガイドライン）、ISO/TR14069（組織のカーボンフットプリント）の概要、特にISO14064-1（組織におけるGHG排出量および吸収量の定量化および報告のための仕様並びに手引き）の話を、活動範囲が広い工藤さんからお願いいたします。

**工藤** ISO14064ファミリーには、企業のGHG排出量イベントリーの作成と報告、検証の考え方が記載されています。何に使うかというと、例えば、自治体が企業に排出量の報告をしてもらい、その結果を公表することで企業活動を展開していくフレームワークに使

えます。また、投資家に対して企業活動の財務関連情報の開示を求めるCDPや、客観データを必要とする類似したフレームワークでは、排出量イベントリーが共通のガイダンスとしても使えます。

まず、ISO14064-1（パート1）には、組織レベルでのGHG排出量イベントリーおよび算定報告書の設計、開発、管理、報告するための原則と要件が記載されています。ISO14064-2（パート2）では、プロジェクト活動に伴うGHG排出に焦点を当てています。国や自治体を使うか使わないかは別にして、パリ協定では自主的な削減目標の設定が求められていますから、自分達でプロジェクトGHG排出量評価をやる場合には、パート2が使われることがあると思います。そして、ISO14064-3（パート3）では、GHG排出量データや情報の検証機関のための原則、要件、手引きが記載されています。検証機関については、ISO14065が、検証機関の人事についてはISO14066がありますから、この中から自分達に適用可能なものを組み合わせることでプロジェクトをやっていただけます。つまり、「GHG排出量の算定と検証の枠組みの基本形はできた」と思っています。

ちょうど、今、パート1からパート3までの改定が終わったところです。改定で大きく変わったのは、パート1のところにサプライチェーンの要素が多く書かれたことです。これは、スコープ3（従業員の出勤・出張、製品の輸送など工場外での企業活動によるGHG排出）の考え方によるものです。京都議定書では、スコープ1（工場からのGHG排出）、スコープ2（買った電気や熱が作られるところからのGHG排出）でしたが、最近では、スコープ3まで考えるようになりました。やはり、国境を越えた取り組みをトータルで評価する仕組みへと視点が変わってきていると思います。

カーボンフットプリントの定量化は、先進国と途上国で相当もめたのですが、とりあえず、算定方法だけは規格化されISO14067ができました。なぜ、途上国が反対するかとい

うと、自分達の能力が低いまま、「製品のカーボンフットプリントを下げろ」という要求が出てくると、自分達の製品が国際市場から排除されると心配しているからです。

このように、カーボンフットプリント、サプライチェーンに関する規格化に対して途上国は慎重なのですが、世界全体でGHG排出量を減らすための動議付けをしなければならないので、サプライチェーン的な要素の広がりは今後も、強化こそされ、ウエイトが下がることはないと言う気がします。

**黒沢** スコープ3までやると、「ライフサイクルGHG」になってしまうのですが、境界線の考え方はどう整理されているのでしょうか。

**工藤** スコープ3のガイドライン作りに参加した、持続可能な開発のための世界経済人会議（WBCSD）、世界資源研究所（WRI）は、そのガイドラインの中で「基本的に全部計算してくれ。できない場合は理由を言ってくれ」と規定しています。CDPも同じです。スコープ3となると、データが集まるかどうか難しいですから、取りあえず、当事者は全部の項目についてできるかどうかを判断しながら、できないところの理由も含めて情報開示するのが基本的な流れだと思います。それが企業の格付けにも繋がっていくと思います。

**黒沢** スコープ3が全面的に採用されると、ビジネスへの影響が大きいので、その辺をちょっと注意して見ていかなければならないと思うのですが、もうそういう流れになってしまったのでしょうか。

**工藤** 最初にその流れに火を着けたのは、CDPだと思います。スコープ3ガイドラインに基づいて、CDPがグローバル市場での商品の影響力を気にするようになってきた企業に対して「スコープ3へ移行して下さい。それで格付けをして、投資家が判断します」と圧

力をかけているのです。実際問題、データの収集や計算能力のある企業でないと対応が難しいとは思いますが、その流れはできつつあります。TCFDの推奨項目に明記されてしまっていることから、金融系からの圧力でスコープ3の項目が企業にとって必須になってくると私は思います。

#### 新しく出てきた規格

～サステナビリティ・ファイナンス、鉄鋼、CCS、エネルギー管理～

**黒沢** GHG以外の新しい規格について、新しい情報がありましたらお願いいたします。

**工藤** パリ協定の前後から、TCFDといった、金融機関が主体となった、もしくは金融機関を巻き込んだ温暖化対策が最近の大きな動きだと思います。

現在開発中のISO14097（気候変動関連の投資と財務活動の評価と報告のための枠組みと原則）では、金融機関が気候変動関連の貢献を意識したポートフォリオを持っているかの評価を行うための報告のあり方が規定され、「金融機関は貸し先の活動にどのような影響を及ぼし得るか意識して貸し出しをして下さい」という企図が含まれています。また、TC207/SC3では、ISO14030としてグリーン債の規格が検討されていますが、その中で持続可能性やグリーンの定義に照らして、適格な技術のリスト化が検討されています。例えば、「石炭火力発電所はグリーン債の適用から除外するか、しないか」とか、「原子力もサステナビリティの観点から適用除外する」とか、そんな話が草稿の段階で出てきているのです。金融機関に向けたガイダンスと言いながら、各国の政策に大きく影響することになってくるので、行政担当者も注意を払わないとまらない動きだと思います。

それとの関連で、最近、ISO/TC322（サステナビリティ・ファイナンス）ができました。

ヨーロッパが提案した、サステナビリティの観点からお金の確な貸し方を考える話です。この動きは、グリーン債で議論されているような適用対象技術の選定基準をリードするものになるのではないかと懸念されています。石炭火力はサステナブルではないと思う人、思わない人がいるわけで、各国に対して白黒つけるなんて話になってきますと、ここは物凄い「戦場」になる可能性がある気がします。

セクター規格という点では、ISO/TC17で、鉄鋼関係のCO<sub>2</sub>排出や鉄のリサイクルでの規格化を日本の鉄鋼業界が一生懸命やっています。あと、エネ総研が支援しているISO/TC265、ISO/TC301とかがあります。これらは直接・間接的に互いに関連する規格なので、この先、規格間の連携が問われてくると思います。TCの算定方法や一連のファミリーと、ISO14060ファミリーとがどうリンクしているかの確認について、もしかしたら色々議論されてくるのではないかと興味があります。

#### 自治体を取り組みやすいリスク評価と理想的なガイダンス

**黒沢** 個別の活動について紹介して頂いたのですが、相互に聞いてみたいことがあれば、お願いします。

**福村** 先ほど、高橋室長からお話しがあったリスク評価についてです。自治体が一番取り組みやすいリスク評価の手法というのがあるでしょうか。

**高橋** ISO/CD14091のガイダンスが想定する利用者には自治体も入っています。ただ、自治体には、大きな資金的・技術的体力のあるところと、ないところがあって、資金的体力があまりない小規模な自治体は企業に近いと思います。一方で、大きな体力のある自治体のほうは、より多くのリソースを投入した幅広いリスク評価が可能かつ必要になると思います。



福村 佳美 氏

(筑波大学大学院 人文社会科学研究所)  
国際日本研究専攻 ISO エキスパート

今、ISO/CD14091で提案されているガイダンスは、リスク評価に多くのリソースを割けない規模の企業や自治体でも、最低限のリスクの洗い出しができることを目指しています。

**工藤** 十分な能力が備わっていない自治体に対して「お金を掛けて適応を下さい」と言うのには無理があります。そこは県や国といった行政機構の中で上位の人達がうまく差配して、下の人達が規格のフレームワークに沿って、できる範囲でリスク評価をしてもらえばいいと思います。差配する際、コンテンツを考える助けになるガイドラインというのが、規格の理想形のような気がします。

**福村** そうですね。地域適応計画もリスク評価に基づいて立ていくことが非常に重要だと思います。そういったところから、ISO/TS14092では、「ISO/CD14091のガイダンスを参照しましょう」と書いて、ISO/CD14091との整合性を持たせていくのが私達の役目だと思っています。

**高橋** ISO/CD14091のガイダンスの記述も、その編集・改訂を重ねる中で、リスク評価の内容を具体的に詳細に書いたり、原理原則的な部分だけに留めたりを繰り返して、揺れ動いています。例えば、利用するデータのスペッ

ク等について具体的に書き込みすぎると、そのデータが手に入らないところには適用できず、せっかくのガイドラインが広く活用されないことが心配されます。一方で、一般性を持たせるために原理原則の部分だけで整理すると、逆に抽象的すぎるという批判が出ます。必要最小限の適用事例や具体データへの言及にとどめるなど、工夫が続けられています。

**工藤** そこは結構大事なポイントです。エキスパートだけで議論していると、必ず行ったり来たりしてキリがありません。最初、基本的な原則が並んでいるシンプルなガイドラインやガイダンスを作り、そこで具体的に物事を考えるために規格の1つ下の技術仕様書(TS)や技術報告書(TR)で事例を上手く積み上げるといったやり方もあります。規格部分だけで全部終らせようとするのは絶対に無理があるので、その辺の調整は必要だと感じます。

**福村** 私どもはTSですので、ISO/14090、ISO/CD14091に倣う感じになってくると思っています。適応計画のフレームワークの原則はISO/14090、リスクに関してはISO/CD14091を参照しながら、地方自治体やコミュニティに特化したガイドラインになるよう気を配っています。

**工藤** 最初から100点満点なものではできないはずなので、とりあえず1回ガイドラインを作って実装し、3年から5年後に見直して、必要なものをやるということを通じて、持続的に発展させていかないとはいけません。そこでリーダーシップを発揮してくれる人がいるといいなという感じはします。

**黒沢** 自治体にも色々な大きさがあって、資金力もかなり違うと思います。東京都みたいな大きな自治体だと、ハザードマップを作る時にリスク評価もできますが、非常に小さい

自治体だと多分できません。そこで、もう少し大きな地域で評価をするという考え方はないのでしょうか。

**福村** 今回の気候変動適応法の整備に伴って、幾つかの県からは地域気候変動適応センターを立ち上げようという提案がある一方で、他の県からは、公害に特化した研究所はあるけれど気候変動のエキスパートはいませんというような話も聞いています。このことから、気候変動適応法では、複数の県が協働して適応計画を策定あるいは地域適応センターを設置してよい、となっています。

海外に目を向けると、日本と同じレベルの観測データが整っていないところが圧倒的に多いです。最近、国連の支援を受けて観測データを取り始めたところなどは、過去のデータがない訳です。そういった場合でも、とりあえず今あるものを並べ、今できることが何かを考えてみて、できない部分でどういう支援が欲しいか洗い出せるところまでをISO/TS14092のガイドラインで打ち出せば、それが地域にとって有効なリソースになると思います。

#### 適応と緩和を同時に最適化する難しさ

**黒沢** 高橋さん、他のお2人に何か聞きたいことはありますか。

**高橋** 企業や自治体が対応しなければならぬリスクの中には、気候変動対策を講じることによる波及的、副作用的な影響もあると思います。今のISO/CD14091には、それらが明示的には入っていませんが、TC207/SC7の下にある多様な規格群を上手く連携させることで、波及的な影響も押さえてリスク評価できる枠組みになっていくといいと思います。例えば、適応と緩和を合わせて一緒に扱う動きはありますか。工藤さんにお伺いしたいのですが。

工藤 適応と緩和を一緒に扱うのは、モデル評価でのチャレンジだと考えられています。ですから、緩和だけで気候変動影響を評価するとか、そこに適応も加味して評価するとか、丁度踊り場に来ているのではないかと思います。適応コストと緩和コストについて、どうやって国際的な社会費用を最小化すればいいかは別として、多分、分析する側には適応と緩和を一緒に扱うという視点があるのではないですか。

黒沢 はい。昔、高橋さんと一緒にやったプロジェクトでもそれを目指しました。やはりデータの問題があって、適応と緩和を組み合わせた最適化は、永遠の課題だと思っています。GHGの濃度は世界で同じになっているので、どこで緩和策を講じてもその効果は世界で平等に分配されるという性格があります。しかし、適応にはかなりローカルな性格があってそれが当てはまりません。やはり、地理的なバラつきがかなりある適応をどうやって緩和と組み合わせていくかは、学問的な課題でもあるし、政策上の課題でもあると思います。

工藤 そういう標準化にそぐわないものは、もう少し現場に落として考えなければならぬと思います。例えば、小さな町の人達は、省エネを推奨しながら、一方で、豪雨で脆弱性が見えてきたので、適応を防災計画的に考えなければならぬのです。実は、潜在的には適応と緩和の両方をやっているケースは、沢山あると思います。ですから、適応と緩和を合わせて標準化を行なって自治体の人達がリソースの有効利用をできるとか、色々なメリットを生み出せれば、それは1つの面白いアイデアだと思います。特に、途上国では適応と緩和のバランスをどうとるか悩んでいる人達が沢山いると思います。適応と緩和の2つを合わせて標準化するメリットがあれば、高橋さんと黒沢さんで示し合わせて日本から提案してみたらどうでしょうか。

福村 実際、自治体の人と話した時、適応のためにエアコンをつけるとその電気を作るためにGHG排出が増えて気温が上がるけれど、それは緩和にとってどうなのか、と訊かれたことがあります。ですから、適応と緩和の2つを合わせて標準化するのは非常に難しいと思いますが、とても意義があることだと思います。

工藤 GHGを排出しないために、再生可能エネルギーで作った電気でエアコンを回す、とかでしょうか。

福村 それが1つの考え方だと思います。

---

## 今後の方向性

---

### 再整理されることになる環境管理規格

黒沢 今後の方向性について考えてみたいと思います。環境管理の14000ファミリーで、色々な規格が作られてきたのですが、標準化の範囲がかなり広がってきた感じがします。今後、環境管理の標準化の範囲は、どこまで広がっていくのでしょうか。

工藤 環境管理の規格は、これから範囲が広がるというより、再整理が行われるのではないかと感じています。例えば、カーボンフットプリントのグローバルな利用活動を見ようとした時、フットプリントにはLCA的な発想もあるし、企業の会計といった発想もあります。その両方を加味しているのがスコップ1, 2, 3です。少なくともグローバルな企業活動を意識したモニタリングの仕組みがあれば、サプライチェーン的な発想での評価が広がっていきます。例えば、今はGHGが対象ですが、ISO/TC207にも、これから盛り上がっていきそうな水や海洋プラスチックといったグロー

バルな影響を及ぼす新たなものが少し入ってきています。

エネ総研が支援している ISO/TC301（エネルギー管理）では温暖化とは別に考えていますが、その中の検証の話は ISO/TC207（環境管理）の検証の話と非常に似ています。実は、今、それを ISO/IEC17020（検証機関認定制度）に統合しようという動きが出てきています。

3番目は、持続可能性。持続可能性という言葉は、環境を包含してしまいます。ISO/TC207を始め ISO で取り組んできた環境の話が、国連の持続可能な開発目標（SDGs）の中に取り込まれるのか、私も正直言って良く分かりません。ただ、この SDGs 関連の動きが、環境に関係する TC の再統合に繋がってくる可能性はあると思っています。

**黒沢** 確かにそうですね。SDGs 自体かなり幅広い枠組みなので、そういう形で分野を広げていけると思います。水とプラスチックについては、ISO で取り組むことが決まったようなニュースも流れています。そういうところと SDGs との活動の整理をどうしていくのか、結構重要な課題だと思います。

**工藤** ユーザビリティ (usability) を考えると、体系的に分かりやすく整理して欲しいということもあります。SDGs を通じて、そういう声が上がってきてもおかしくないと思います。

#### 気候変動と SDGs との間の指標の整理と選択

**黒沢** 高橋さん。リスク管理自体がどんどん広がっていく傾向は感じられていますか。

**高橋** 物理リスクに気候変動対策のリスクも合わせて評価・管理していくほうが、各主体による対応検討の際にはより効率的・効果的だったりもするので、その流れで標準化の対応が変わっていくのか、いかないのか丁寧に議論しなければならないと思います。

緩和関連では、GHG 排出量はその共通指標になると思いますが、影響や適応関連では必ずしも単一の共通指標を設定できません。何の影響を管理しなければならないのか、それを測る指標は何なのか、ガイダンスの形でまとめるのは難しいとは思いますが、漏れのない指標のリストアップの仕方、そこから指標をどう選んでいくのかについては、標準化の範囲として大事になっていくと思います。また、評価対象としなければならない指標の整理と選択を考えていく中で、SDGs の話も関わってくると思います。

各々の SDGs の達成に向けて、どのような指標で評価するのが良いか議論されていると思いますが、その指標が温暖化の影響で変わる場合もあります。結局、温暖化の影響を何で測って、それをどう管理していくのかという気候変動問題の議論の延長として、SDGs への波及効果を議論することもできるのではないのでしょうか。逆に、気候変動と関係ない部分での SDGs の達成に向けた動きが、気候変動問題にどう影響してくるのかの整理も求められると思います。

#### ガイドラインが適応を通して支える 世界の安全・安心

**福村** 私が携わっている ISO/TS 14092 のガイドラインは、TS であって国際規格 (IS) とは性質が違います。

ですが、個人的にこれに託す希望は、世界中の自治体が ISO/TS14092 のガイドラインに従って適応計画を立てて、自分達がどのくらい気候変動に適応しているかを測り、上手くいっているところの知見は広め、足りないところは皆が手を差し伸べるという形で、ガイドラインがローカルな適応を支え、ゆくゆくは世界全体が安全・安心に暮らせるようになると思います。

**黒沢** 結果としてグッドプラクティス、成功

事例みたいなものがデータベース化されて、参照できるようになると、使いやすいものになるのではないかと思いますね。

**福村** そういったデータベースを国が参照して、自治体に対する支援の検討にも役立って欲しいとも思っています。

#### 使われることで大きくなる ISO 規格の役割

**黒沢** 規格は使われなければ意味がないので、どう政策に反映されるか、ビジネスにどう活用されていくのかというポイントが重要だと思います。ご自分が関わっている規格が政策やビジネスにどう活用されていくのか、将来像を伺いたいと思います。

**工藤** 気候変動への取り組みというものは、基本的にパリ協定に従って、それぞれの活動計画と政策を考え、それを実行することだと思います。バラバラに見えても、実は、共通のプラットフォーム、共通のルールで動いているということが必要になると思っています。

企業単位での色々な行動を考えた時には、排出量の算定、そのデータの報告、レビューという基本的な MRV に加え、それぞれのプログラムオーナー達が、こぞって自分のやりたいことを志向していきます。金融の世界は正にそうだと思います。ISO の規格は、標準化されたガイドライン、ガイダンスですから、それが周辺からの信頼を高めるツールとして使われれば、比較可能性が生まれてきます。比較可能性があれば、ガイドラインが一種の政策的、構造的なものとなっていく潤滑油のような役割を果たすのではないかと思います。

**黒沢** ありがとうございます。高橋さん、如何でしょうか。

**高橋** 気候変動リスク評価のガイダンスに関して言えば、それによって気候変動リスク評

価のハードルが下がる部分があると思います。リスク評価をやってみたい、やらなければならない立場にある自治体や企業がそれを参照して、リスク評価を行い、その結果が他のところで比較・評価可能な形でストックされて行ったら、つまり横展開されていったら、次にリスク評価を新たに実施する自治体や企業は、前例に倣いながら、またストックされた評価結果を参考にしながら、自分達の評価を実施することができます。

それが広がっていくと、リスク評価を行うハードルが下がると共に、不足しているところもはっきり見えてきます。実例を踏まえることで、手法の高度化や必要データの認識、データ収集の強化といった、気候変動リスク管理をより適切なものにしていく道具を揃える好条件になっていくと思っています。

**福村** ISO/14090 と ISO/CD14091 との連携があつてこそその ISO/TS14092 だと思っていますので、ファミリーの中で繋がりを持ちながら、ISO/TS14092 のガイドラインを使って適応計画を立ててもらい、その過程でのコミュニケーションを通じて、自治体内での適応取り組みを促進し、ゆくゆくは、行政から個人、企業へと適応に関する動きが広がるきっかけとなる規格になればと思っています。

#### 適応の意識を高めるアウトリーチの課題

**黒沢** 適応と脆弱性はローカリティが強いと共に、途上国でのリスク評価や対応が必要性が認識されていないかも知れないと思います。そういう意味で、支援活動や普及活動などアウトリーチの役割について、ご意見あればお願いします。

**高橋** 影響評価や、それを踏まえた適応の計画検討支援など途上国の担当者や研究者と議論していると、相手から日本でもまだ実践できていないような高度な手法やデータを要求

されることがあります。そこで「いいや、そんなものはないです」と言ったら、「ないのなら支援なんか要りません」となりかねません。そこで標準化文書があつて、皆で参照できる適用事例も多くあると、途上国で適応計画を展開する際のミスコミュニケーションを解消する助けになるのではないかと思います。

途上国での適応施策検討などに関する支援の際に、上手く標準化文書を活用しながら進めていくことが必要だと思います。

**福村** ISO/TS14092では、途上国の方にもエキスパートとして議論に参加してもらって、本規格がどれくらい有効なのか議論しながらガイダンス作りを進めています。また、ガイダンスに沿った適応計画の策定は、まずは今、自分達が持っているリソースを洗い出すところから始められるハードルの低いものになっています。リソースの洗い出しの次に、自分達が今、打てる手は何なのか明らかにして、それを元に自治体が国と話をしてみる。そして、国は、支援機関と話をする際に、「実はうちの地域社会のここが弱いんだ」と言えるように、そういうことを可視化できるような計画、であってほしいなと思います。

**工藤** 一般的にアウトリーチは、地域社会全体のためにやることです。ですから、どういう形でアウトリーチしていくかは結構大きな問題です。規格の中でもアウトリーチについて色々議論はしています。規格を作りたいと思っている人は積極的に動くのだけれど、後から見に来た人に「それは素晴らしい」と思って使ってもらえるような流れを作り込むのを誰がリードするのは、結構大きな課題です。例えば、CDPでは、使用側になっているわけです。そういった人達も、適応なり脆弱性評価は、国やローカリティというポイントを見つけ出していくのです。ISOでは、それをどう広げていくのか、広げる役割を誰が担うのか明確にすることが必要なのでしょう。

**高橋** 活用事例の情報をうまく整備しておいて見やすい形で示していくことが、アウトリーチのために必要だと思います。

**工藤** ISO/TC207の分科委員会SC7のウェブサイトはISO中央事務局が作って、そこで情報伝播するという方法はよく言われる話です。それから、国連気候変動枠組み条約(UNFCCC)の国際会議に来る途上国の人達に向けてサイドイベントをやつて訴求を図る方法もあります。適切な人が集まる比較的パブリックな場所で、情報を発信していくことはやっていることだと思います。

**高橋** 規格が全部でき上がった後に、「使つて下さい」と言うのではなくて、作っている途中経過も含めて、途上国の潜在的なオーディエンスに伝えて、「それはちょっと自分達のほしいものと違う」とかという意見も拾いながら規格を作ることが必要だと思います。

**工藤** 間違いなく、期待する国のエキスパートに規格の開発プロセスに参加してもらうことは大事です。もしも国際会議にエキスパートが参加していれば、ほぼ必ず、その後ろにはミラーコミッティ(直接・間接に政府や産業界に繋がっている人達の集まり)があります。最近は規格の数が多くなってしまい、それぞれの規格開発プロセスにリソースを割けないという事情があるでしょうが、その国でISO規格に関係するところの「大元」-日本なら日本規格協会や産業環境管理協会、エネ総研-の人達を押さえて、その人達と情報交換を一生懸命やるということがチェアマンシップの中で求められることです。

**福村** 私どもは日本適合性認定協会(JAB)の紹介で、情報誌ISO focusでISO/TS14092のPRの一環として、日本の自治体の適応計画の事例を取り上げていただきましたし、欧州気候変動適応会議(ECCA)ではISO/CD14091

やISO/TS14092の活動についてアピールしてきました。また、2018年12月、ポーランド・カトヴィツェの第24回気候変動枠組条約締約国会議(COP24)では、脇岡の代理のエキスパートがWG12の活動を発表しました。さらに、国立環境研究所が運営するサイトA-PLAT([http://www.adaptation-platform.nies.go.jp/report/20190601\\_2.html](http://www.adaptation-platform.nies.go.jp/report/20190601_2.html))では、ISOのアウトリーチの一環として広報活動を行っています。

このようにアウトリーチ活動はしているのですが、一体どこまでがコンビナーの役目なのでしょうか。

**工藤** それはケースバイケースだと思います。チェアの負担を増やさないためには、その辺のコミュニケーションは本来、SC事務局がすることでしょう。それがSCの手に余るならTCでやるというふうに、戦略的に考えないといけません。そこで規格が発行した時の効果が高まるとか、そういう調整が必要です。

---

## まとめ

---

**黒沢** 最後に、3つのポイントで言いたいことをまとめていただきたいと思います。高橋さんからお願いします。

**高橋** 1つ目はガイダンスの抽象度についてです。標準化に際しては、特にガイダンスの場合、幅広い様々なケースで適用できるように、手順や評価指標の選択が記述される必要があります。データの利用可能性やリスク評価の経験などに応じて、「松竹梅」、幾つかの違ったレベルの選択肢が提示できると、より実用性の高いものになるのではないのでしょうか。そのためには、1回作って終わりではなく、個別の事例や経験を踏まえて、有用なものに改善して繰り返しのプロセスが必ず必要になると思います。



黒沢 厚志 氏

(一財) エネルギー総合工学研究所  
プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員

2つ目は、そのような繰り返しのプロセスについてです。プロセスの一環として、自治体や企業活動、途上国支援での活用事例を増やし、メリットもデメリットも記録して、他の人達も見られるようにして、より良く活用できるガイダンスにしていくことが必要だと思います。

3つ目は、気候変動標準化の枠がどんどん広がっていることについてです。標準化のスコープが広がってきて、SDGsへの波及効果なども議論されるようになっていきます。今後、それに対応した標準化がどのようなものになるのか活発に議論していく必要があるのではないかと思います。

**福村** まず1つ目。どこでも活用できるガイダンスの作成を目指して、地域がより気候変動に対して適応できる計画を作る一助となることが大きな目標だと思います。

2つ目。ガイダンスを活用してもらう中で、自治体だけが適応に取り組むというのではなく、地域全体とコミュニケーションを取りながら、自分達の明るい未来を描くような話題を提供できるような適応計画ができればいいなと思っています。

3つ目。適応という枠組みが、ISOで作られたので、ISO/14090(適応)ファミリーの

中で整合性を図りながら、相互に助け合うことで、より効果的な適応計画が立てられるガイダンスになるよう、ISO/14090、ISO/CD14091と一緒に取り組んでいきたいと思えます。

**工藤** 全体のフレームワーク的な見方なのですが、パリ協定のプレッジ・アンド・レビュー・プロセスを意識すると、国と民間の取り組みについて説明する国際責任をどう果たせるのが問われるのだと思います。

自分たちの生産性や創造性を国際社会に認知させるという観点から、1つ目は、日本の政策を積極的に規格開発に繋げていく戦略を持つべきでしょう。そのために、様々な柔軟性も含めた、戦略を考える場が欲しいところです。

2つ目は、そこへの日本のエキスパートの関わり方。手弁当で手伝っているような状況では、じっくりと中身の交渉をやって日本の良さを意識させるという戦略に合致した規格開発プロセスがリードできるかという点、中々できません。そういった国際標準を担うエキスパートの処遇も含めた工夫が気になる点です。

3番目ですが、やはり、ISOの規格開発プロセスは多数決で物事を決めていくので、日本だけで良い案を作っても、他の国から賛成を得られないことがあります。特に、27カ国あるヨーロッパと1国でしかない日本では、ヨーロッパと対立した時には絶対勝てません。仲間作りをしておかないと、日本が戦略的なプロセス作りをリードできないと思います。

そういった観点では、アウトリーチ的なことを含めて、パリ協定下でもアジアという地域の中で標準作りを進めていくパートナーを作っていくべきではないかと思えます。それは個別のTC、SC、WG、あるいは国のどこがリードして戦略を作るかという話に戻ってきますね。

**黒沢** 長い間お時間いただきまして、ありがとうございました。こういう機会はあまりありませんね。外から見ているだけでは分からなかったことを知ることができる、非常に良い機会になったと思います。どうもありがとうございました。

[寄稿]

## シェール・ガス革命, シェール・オイル革命の 新たな動きと挑戦

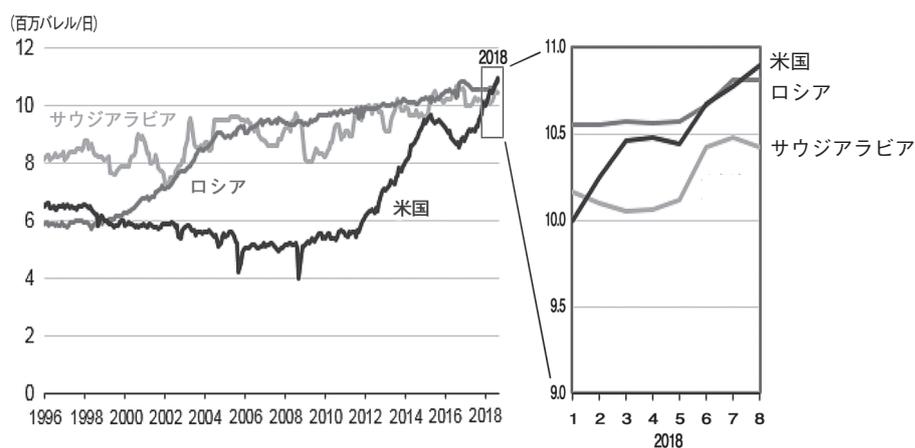
岩間 剛一 (和光大学 経済経営学部  
教授)



### 1. 米国の原油生産は好調

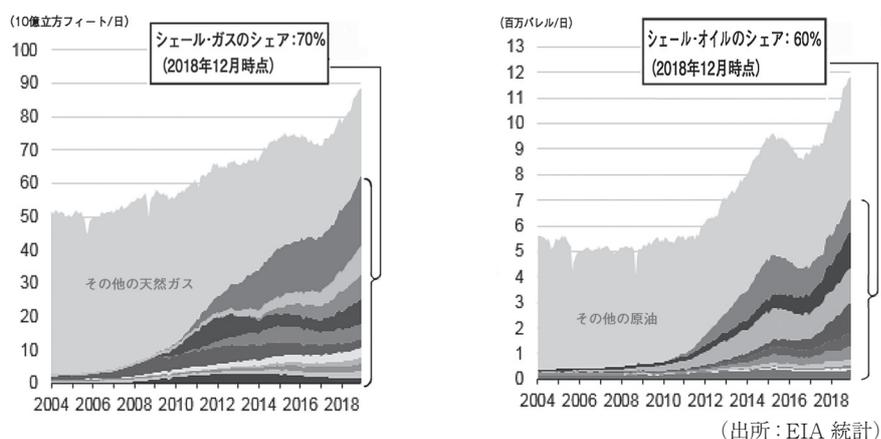
2019年1月からの、サウジアラビアをはじめとしたOPEC（石油輸出国機構）加盟国と、ロシアをはじめとした非OPEC加盟国による合計120万バレル/日（b/d）に達する協調減産により、原油価格は安定している。WTI（ウェ

スト・テキサス・インターミディエート）原油価格は、50～60ドル/バレルに安定し、米国のシェール・オイルの生産は好調となり、米国の2018年における原油生産量は、1,096万b/dと過去最高を記録、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（図1参照）。



(出所: 米国エネルギー情報局 (EIA) 統計)

図1 米国, ロシア, サウジアラビアの原油生産量（月産）の推移（1994年1月～2018年8月）



(出所: EIA 統計)

図2 米国の天然ガス生産量と原油生産量（2004年～2018年）

米国は、1973年以來、45年ぶりに世界最大の原油生産国に返り咲き、2027年には原油生産量が1,400万b/dに達すると見込まれている。同時に、米国のシェール・ガスの生産量も2050年まで増加すると予測されている。米国では、原油生産量の60%をシェール・オイルが占め、天然ガス生産量の70%をシェール・ガスが占めるまでになっている（図2参照）。

米国における原油生産量は、2019年春においても増加を続け、2019年4月の原油生産量は、1,200万b/dを超えている。米国のシェール・オイルの生産量は、2019年も増加し、シェール・オイルの生産量だけでも、800万b/dを超えると見込まれている。

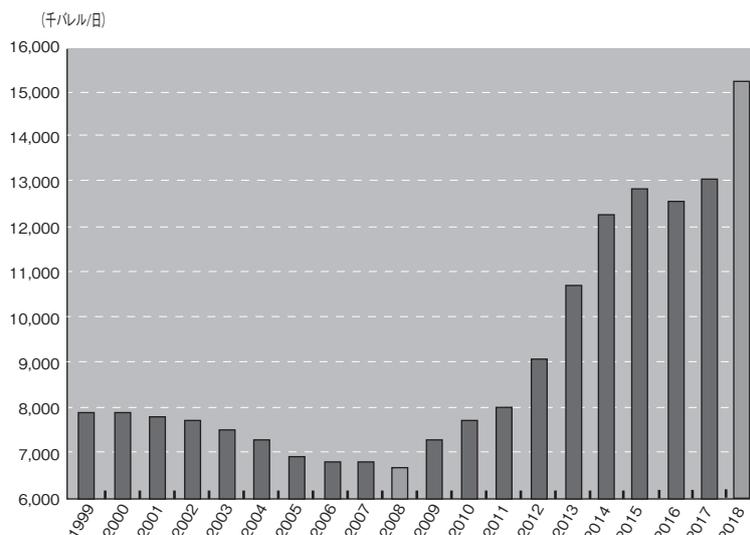
## 2. シェール・オイルの生産量増加による米国の外交

21世紀における、最大のエネルギー革命は、いうまでもなく、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命といえる。米国の天然ガス生産量と原油生産量は、急速に増加し、2020年には、1953年以來、67年ぶりに、米国が石油、石炭、天然ガスを含めた、エネルギー純輸出国になる。BP統計によると、米国の原油生産量は、

2008年からの10年間に、900万b/d近くも増加し、過去最高となった（図3参照）。

米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命のポイントを考えてみると、第1に、2019年7月時点においても、米国においてのみ実現している革命であるものの、すでに足場を固めた、現実的なエネルギー革命となっていることである。つまり、電気自動車（EV）、再生可能エネルギーのように、経済性があるかどうか現時点において未知数なものとは異なり、現在の原油価格、天然ガス価格において、経済合理性をもったエネルギーとなっている。つまり、シェール・ガス、シェール・オイルは、利益を挙げられる事業といえる。

第2に、米国においてのみ広く成功しているエネルギー革命であるものの、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の自立は、玉突き的に、世界の石油需給を緩和させ、原油価格上昇の抑制要因となることである。さらに、米国は、21世紀初頭よりも中東産原油に依存する必要性が低下したことから、中東産原油を守るために、巨額の軍事費を投入し、米軍の兵士を危険にさらす必要があるのかという議論につながってくる。2019年6月にホルムズ海峡で勃発した、日本の石油タンカー攻撃事件においても、ト



（出所：BP統計、2019年6月）

図3 米国の原油生産量推移

ランプ大統領は、「ホルムズ海峡を安全航行する利益を得ている国が、自分で船を守るべきであり、米国が無償で安全を守る必要はない」と発言し、日本のエネルギー安全保障政策にも動揺を与えている。トランプ政権の中東に対する関心は低下し、シリアからの米軍撤退への動きをはじめ、エルサレムをイスラエルの首都と認定し、イスラエルが1967年の第3次中東戦争において、武力で占領したゴラン高原に対するイスラエルの主権を認める等、国連をはじめとした国際社会の合意に反し、中東諸国の反発を招き、中東情勢を不安定化させる政策をとることができるようになった。これは、シェール・オイル革命により、米国の原油輸入における中東産原油への依存度が低下したことによる。米国の石油純輸入量は、2005年と比較すると、900万b/d近くも減少している(図4参照)。900万b/dという数値は、OPECの大産油国イラン、イラクの原油生産量の合計を上回る。逆にいえば、米国以外の産油国は、OPEC加盟国2カ国分の輸出先を失ったことを意味する。

第3に、トランプ政権による米国第一主義、内向き指向、保護貿易主義は、米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命と通奏低音のようにつながっている。シェール・ガス革命、シェール・オイル革命により、米国がエネルギーの自立を達成したからこそ、海外との自由貿易を重視することなく、米国国内の国益だけを考

えて行動することが可能となる。トランプ大統領は、エネルギー政策について、一貫性がないといわれる。イランに対する制裁を強化し、2019年5月から、イラン原油の全面禁輸を行い、イスラエルとの関係を強め、中東情勢を緊張化させ、原油価格上昇要因をつくっている。他方、原油価格高騰にともなうガソリン価格上昇は、国内の支持率を低下させることから、OPECに対して、原油価格を引き下げようとしている。トランプ大統領は、原油価格に関して、矛盾した政策を行っているように見えるが、2020年の大統領選挙に勝利するという点では、一貫している。ゴラン高原に対するイスラエルの主権を認めることは、トランプ大統領の支持基盤であるキリスト教福音派の求めることであり、支持基盤を強固とする。イラン敵視政策、ガソリン価格の上昇抑制も、国内支持率を維持するために必要な政策となる。トランプ大統領が、選挙に勝つための外交の自由度は、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命により強まっている。

そもそも、トランプ大統領誕生の原動力は、シェール・ガス革命にある。シェール・ガス革命により、米国の天然ガス価格が下落し、米国において、天然ガス火力発電による発電量が石炭火力発電による発電量を抜いた(図5参照)。天然ガス価格が、百万Btu(英国熱量単位)当たり41ドルを下回ると、天然ガス火力発電の発電コストのほうが、石炭火力発電の発電コス

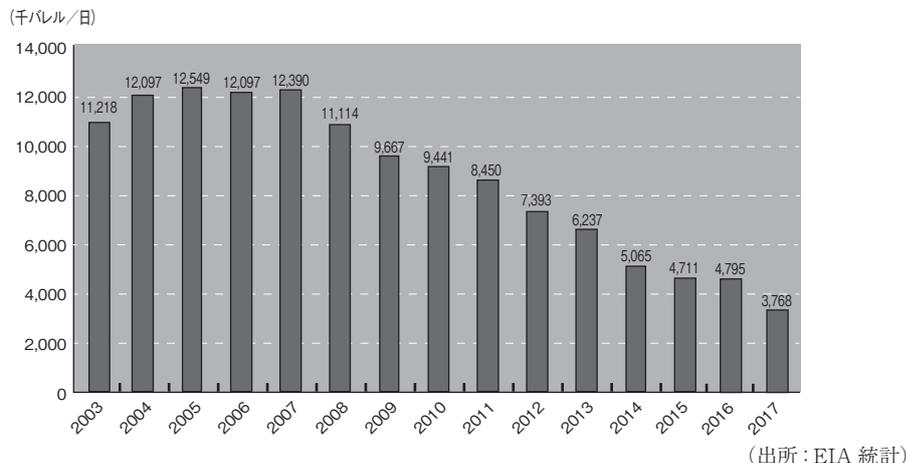


図4 米国の石油純輸入量推移

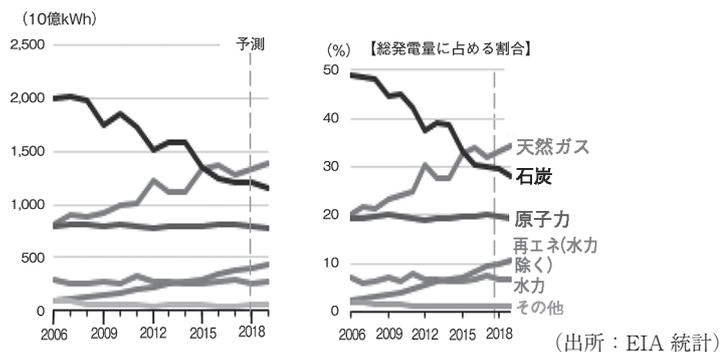


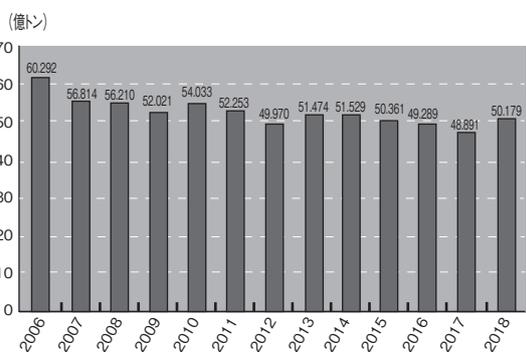
図5 米国における電源別発電量 (2006年～2019年)

トよりも割安となる。米国の天然ガス価格は、シェール・ガス革命により、長期間にわたって、百万 Btu 当たり 2～3 ドルと、低位安定している。そのため、以前は、電力の 5 割を占めていた石炭火力発電が、2019 年では 3 割を下回っている。石炭火力発電の減少は、共和党の支持基盤である石炭産業、石炭労働者に打撃を与える。そこで、トランプ大統領の「米国の石炭産業を育成し、石炭労働者の雇用を守る」という主張は、白人労働者の圧倒的な支持を得た。シェール・ガス革命により、危機的状況に直面してい

た石炭産業と石炭労働者にとって、地球温暖化はないとし、石炭の消費を奨励し、石炭労働者に救いの手をさしのべたトランプ大統領の言葉は、福音となった。米国は、天然ガス火力発電の増加により、経済成長と炭酸ガス排出量削減の同時達成を実現している (図6参照)。

米国の天然ガス価格が低位安定する限り、米国の石炭火力発電の割合は低下し、米国の石炭消費量は、長期的に減少すると予測されている (図7参照)。

米国における石炭消費量が、将来的に減少すると見込まれる状況において、石炭産業と石炭労働者を擁護するトランプ大統領を熱狂的に支持する白人労働者は増加する。



(出所：BP 統計、2019年6月)

図6 米国の炭酸ガス排出量

### 3. 地球環境保護と対立するトランプ政権

トランプ政権は、中東に対する関心を低下させ、中東諸国に対する敵対的な外交を行うとともに、地球環境保護の世界的な動きにも、反対する動きを示している。2017年6月、トランプ

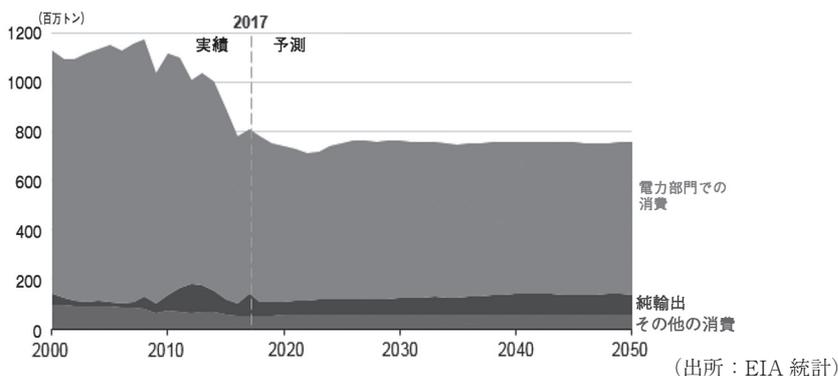


図7 米国の石炭消費量と純輸出力

表1 トランプ政権の主要閣僚 2019

閣僚	現職	政治的主張
国務長官	ティラーソンを 2018 年 3 月解任, 後任は CIA 長官ポンペオ	対イラン強硬派
大統領補佐官 (安全保障)	マクマスターを 2018 年 3 月解任, 後任は国連大使ボルトン	保守強硬派
エネルギー長官	前テキサス州知事リック・ペリー	エネルギー業界支持
EPA 長官	オクラホマ州司法長官スコット・プルイット	石炭火力発電規制反対
国防長官	退役海兵隊大将ジェームズ・マティス→2019 年 1 月退任	テロとの戦い支持
財務長官	元ゴールドマン・サックス幹部スティーブン・ムニューシン	金融規制緩和
国家経済会議委員長	ゴールドマン・サックス COO ゲーリー・コーン→2018 年退任	保護貿易主義に反対
厚生長官	下院予算委員長トム・プライス	オバマケアに反対
内務長官	モンタナ州下院議員ライン・ジンキ	シェール・ガス開発規制緩和
司法長官	アラバマ州上院議員ジェフ・セッションズ→2018 年 11 月更迭	移民反対の保守派

大統領は、パリ協定離脱を表明している。トランプ大統領は、閣僚のすべてを、エネルギー業界寄り、「地球温暖化はない」という人材で固めている(表1参照)。

トランプ大統領の政策は明快で、地球温暖化はなく、石炭、石油をはじめとした化石燃料の消費を奨励し、米国のエネルギー産業を育成し、米国経済を発展させることにある。中国、イラン等は、米国の国益を損なう脅威であり、徹底的に対決しなければならない。国際協調、穏健な外交を指向する閣僚を追い出し、中国との貿易戦争をいとわず、地球温暖化を主張する欧州諸国とも対決する閣僚を選んでいる。

その意味では、米国の石油企業も二分される。国際的に活動するエクソンモービルの前 CEO (最高経営責任者) であったティラーソン氏のように、国際協調を重視する人材は、トランプ大統領と袂を分かたず。エクソンモービル、シェブロン等のメジャー(国際石油資本)は、世界的な石油・天然ガス開発を行っていることから、経営戦略そのものが保護貿易主義、米国中心主義とは親和性がない。それに対して、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発の主役を担っている米国の中堅・中小の石油企業は、米国国内の事業が中心であり、トランプ大統領の米国国内回帰、米国のエネルギー産業重視と両立する。特に、テキサス州、ルイジアナ州等の中堅・中小の石油企業は、民主党が掲げる地球環境保護、脱石油、マイノリティーの保護等とは経営理念が合わ

ず、地球環境保護との対決姿勢を強めるトランプ政権を支持することとなる。

#### 4. これからも増加する米国のシェール・オイル

シェール・オイル革命が実現して、10年近くが経過する。これまでも、シェール・オイルの開発・生産に関しては、①好条件のシェール・オイル油田は、米国国内において掘り尽された、②原油価格が下落すると、シェール・オイル生産企業の財務状況が悪化し、シェール・オイルの開発を行う力がなくなる、③原油価格が低迷すると、金融機関による融資審査が厳格化され、シェール・オイル開発のための融資が受けにくくなる、等の課題が挙げられてきた。しかし、米国の原油生産量は、急速に増加している。

2019年6月に発表された、最新のBP統計によると、米国の原油生産量(天然ガス液(NGL)を含む)は、2018年に1,531万b/d。2008年と比較すると、852万b/dも増加している。この10年間の原油価格の動きを見ると、WTI原油価格は、2008年7月11日に147.27ドル/バレルまで高騰し、史上最高値を記録したものの、2016年2月11日には26.21ドル/バレルまで暴落している(図8参照)。

原油価格がジェット・コースターのように乱高下し、原油価格が暴落した時期があるにもかかわらず、米国のシェール・オイルの生産量は、堅調に増加を続けている。

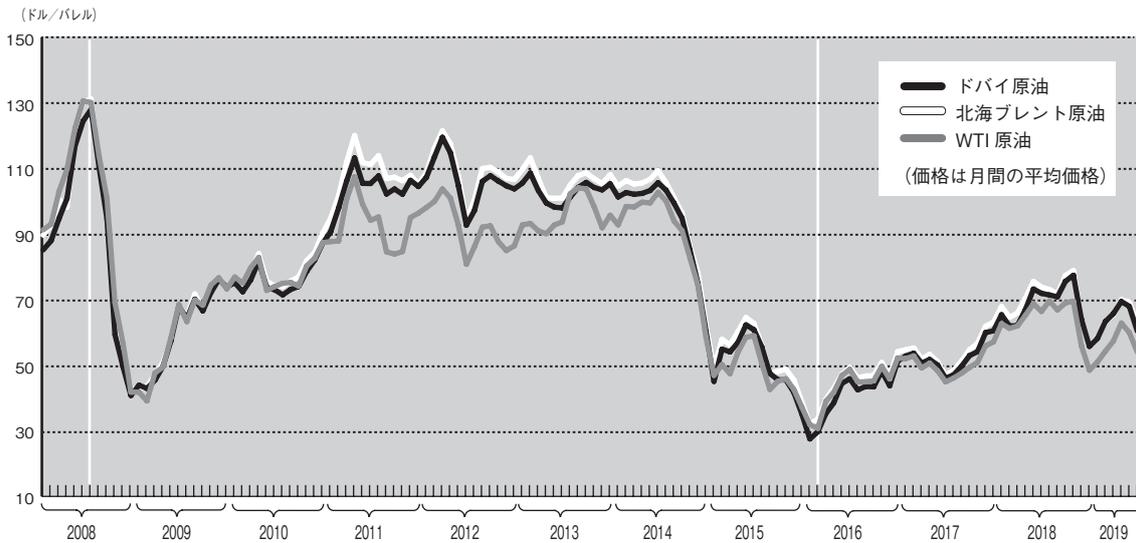


図8 主要原油価格の推移 (2008年1月～2019年6月)

### 5. 米国のシェール・オイルの底力

原油価格が下落しても、米国のシェール・オイルの生産量が増加する理由としては、第1に、1井戸当たりのシェール・オイルの生産性向上が挙げられる。シェール・オイル開発にあたっての掘削深度は、3,000～4,000メートル程度であるものの、掘削技術の進歩により、井戸の掘削期間は短縮されている。数年前には、井戸の掘削に、数ヵ月程度の時間が必要であったものの、現在では、10日間～数週間程度に短縮され、開発コストが低下している。さらに、水平掘削の水平延伸距離を伸ばし、シェール(頁岩)層とシームレス・パイプラインとの接地面積を増やし、水圧破碎の技術向上により、

シェール・オイル油田の生産効率を向上させている。EIA統計を見ても、新規の1井戸当たりの原油生産量は、増加基調にある(図9参照)。1バレル当たりの生産コストが低下すると、原油価格の下落に対する抵抗力が強まるとともに、新規の1井戸当たりの原油生産量が増加し、開発油田数が増加していなくとも、米国全体のシェール・オイルの生産量は増加する。もともと、米国のシェール・オイルは、中東の巨大油田、米国メキシコ湾の深海部油田のような、1井戸から10～20万b/dの原油生産を行う、初期投資が巨額な油田と異なり、1井戸で500～1,000b/d程度の少量の生産を行う代わりに、開発費用が1井戸当たり5～10億円程度の小規模油田にとどまる。こ

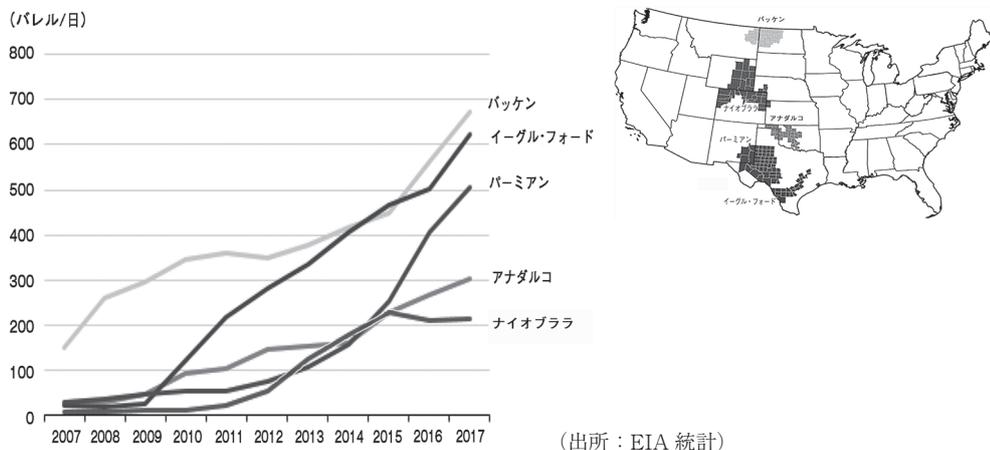


図9 1井戸当たりの原油生産量

こうした小規模油田を数多く開発するシェール・オイルは、中堅・中小石油企業に適合した油田開発の形態となっているといえる。逆にいえば、1井戸の規模が小さいことから、企業規模が大きく、人件費が割高なメジャーの目線には合わない。もっとも、1井戸当たりの生産量が、1,000b/d程度としても、1,000本のシェール・オイル油田を開発するならば、10万b/dの原油生産量に達する。米国のシェール・オイルの底力は、こうした1つ1つの小規模油田の生産性向上によって支えられている。

第2に、米国国内の好条件の油田が掘り尽されたといわれても、それは在来型油田についてであって、シェール・オイルの油田については、未開発の地域も多い。シェール・オイルの開発とともに、有望な鉱区が広がっていることが挙げられる。もともと、米国北部

ノースダコタ州のバッケン・シェール・オイル油田の開発が始まり、米国におけるシェール・オイルが注目されるようになった。次にテキサス州のイーグル・フォード油田が、好条件のシェール・オイル鉱区として注目された。その後、テキサス州とニューメキシコ州にまたがるパーミアン鉱区が、シェール・オイル開発の中心となっている（図10参照）。

米国のシェール・オイル開発については、バッケン、イーグル・フォード、パーミアンの3鉱区が「ビッグ・スリー」と呼ばれ、シェール・オイル生産の中心となる場所となっている。シェール・ガスについては、米国北東部のマーセラスが中心となる。しかし、米国本土48州全体から見れば、シェール・ガス、シェール・オイルの開発が行われているのは、現時点においても、国土全体の一部に過ぎない（図11参照）。

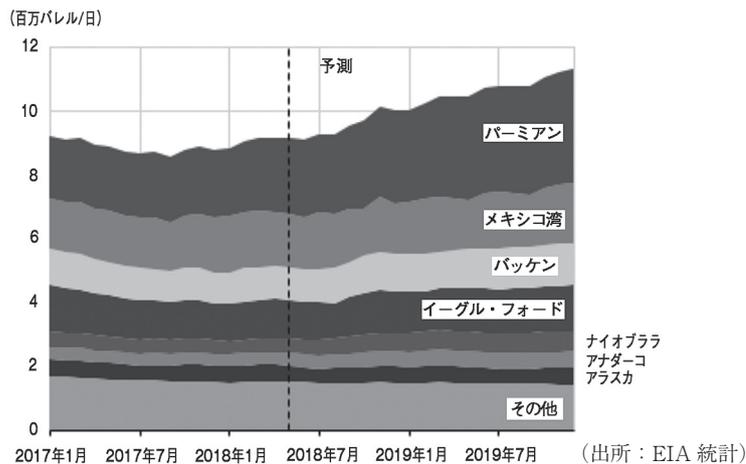


図10 米国の原油生産量推移（2017年1月～2019年12月）

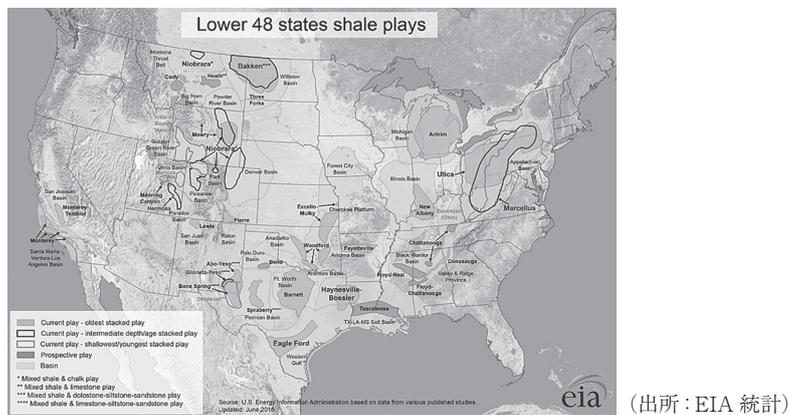
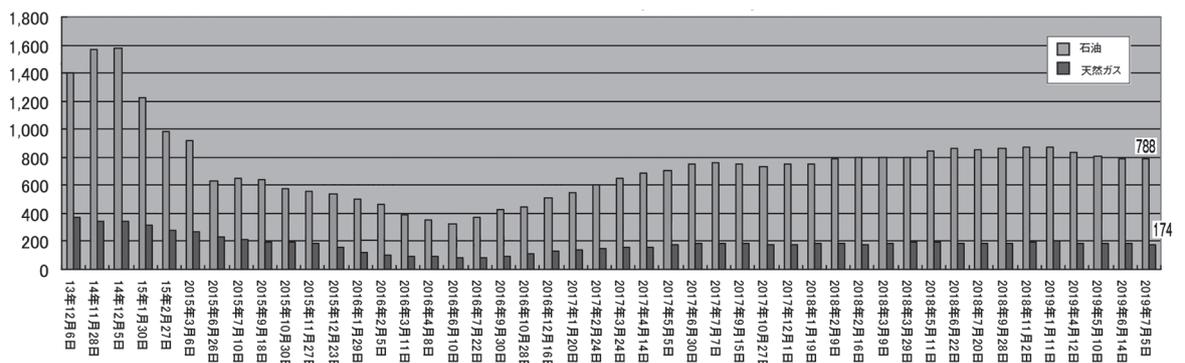


図11 米国本土48州のシェール・ガス、シェール・オイル鉱区



(出所：ベーカー・ヒューズ社統計)

図 12 米国のリグ稼働数推移 (2013年～2019年)

米国は、1859年に世界最初の商業油田ドレーク油田の開発から、2019年において、160年の歴史を持ち、米国本土48州には、在来型の豊富な油田と天然ガス田が存在する。そのため、米国全体に、石油・天然ガス・パイプライン、ベーカー・ヒューズ、シュルンベルジェをはじめとした石油サービス・カンパニー、石油精製設備等のインフラストラクチャーが整備され、非在来型の石油・天然ガス開発を促した側面がある。そのため、上述のビッグ・スリーに加えて、米国本土48州の他の地域において、新たな有望鉱区の開発が行われる可能性は十分にある。

2019年7月時点では、シェール・ガス、シェール・オイルの生産量が増加していることと比較して、リグ（新規油田開発のための掘削装置）の稼働数は、大幅には増加していない（図12参照）。リグ稼働数が増加していないにもかかわらず、米国のシェール・オイルの生産量が増加しているのは、上述のように、1井戸当たりの生産性が向上し、原油価格に応じて、条件が良い、スイート・スポットのシェール・オイル油田、シェール・ガス田の開発に絞り込んで開発を行っているからといえる。米国のシェール・オイルの開発が本格化した2013年頃には、米国国内で1,500基を超えるリグが稼働していたが、2018年～2019年は、原油価格が回復したにもかかわらず、700～800基程度しか稼働していない。

シェール・オイル油田、シェール・ガス田

の開発の場合、生産開始から、1年程度で生産量が半分程度に減少することから、原油生産量、天然ガス生産量を維持・増加させるために、常に新規開発を行う必要がある。

こうした新規油田・天然ガス田開発のために必要なリグの稼働数が、以前と比較して減少しているにもかかわらず、原油生産量、天然ガス生産量が増加している理由として、①1井戸当たりの生産性が向上していること、に加えて、②原油価格低迷時に掘削だけ行い、原油価格上昇時に備えて、生産を控えているDUC（Drilled but Uncompleted）の積み上げが挙げられる。原油価格が下落し、経済性がない井戸については、将来のために掘削作業だけを行い、一種の在庫として、原油価格が上昇したときに、坑井仕上げを行い、安価なコストにより、シェール・オイル、シェール・ガスの生産を開始する。米国におけるDUC数は、増加基調にある（図13参照）。

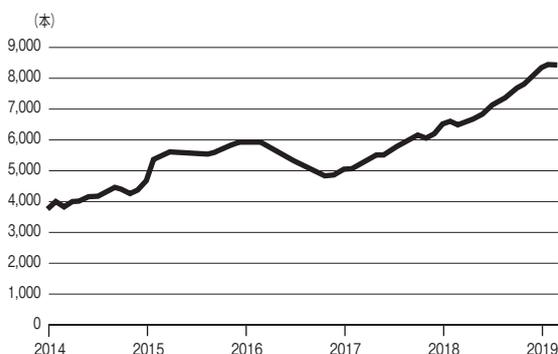


図 13 米国のDUC数

こうした米国のシェール・オイル生産企業による DUC の存在もあり、リグ稼働数が、大きく増加しなくとも、原油価格上昇時には、DUC のシェール・オイル生産を開始し、原油価格上昇による果実を得て、米国のシェール・オイルの生産量が増加している。

## 6. 米国の原油生産量，天然ガス生産量は将来的にも増加する

米国の 2018 年における原油生産量，天然ガス生産量は、過去最高となった。米国の天然ガス生産量は、最新の BP 統計によると、2018 年には、前年比 11.5% も増加している（図 14 参照）。

もともとの天然ガス田における、天然ガス生産量の増加に加え、シェール・オイルの生産量の増加により、シェール・オイル生産に伴う天然ガスの生産量も増加する。米国は、2017 年に天然ガスの自給を達成し、LNG（液化天然ガス）の輸出を本格化している。米国は、シェール・ガス、シェール・オイルの輸出拡大により、貿易収支の改善を目指している。EIA、国際エネルギー機関（IEA）をはじめとして、エネルギー専門機関の多くが、米国は、石油・天然ガスの純輸出国となり、エネルギーの自給を達成すると予測している。また、EIA は、原油価格の下落による変動要因は別として、2050 年に向けて、米国のシェール・オイルの生産量は、増加を続けると予測している（図 15 参照）。

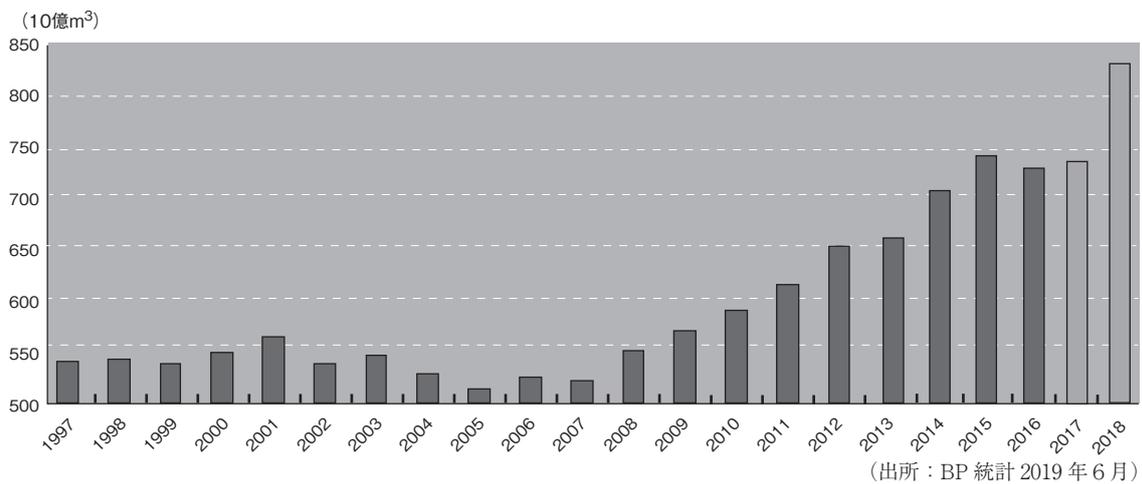


図 14 米国の天然ガス生産量推移

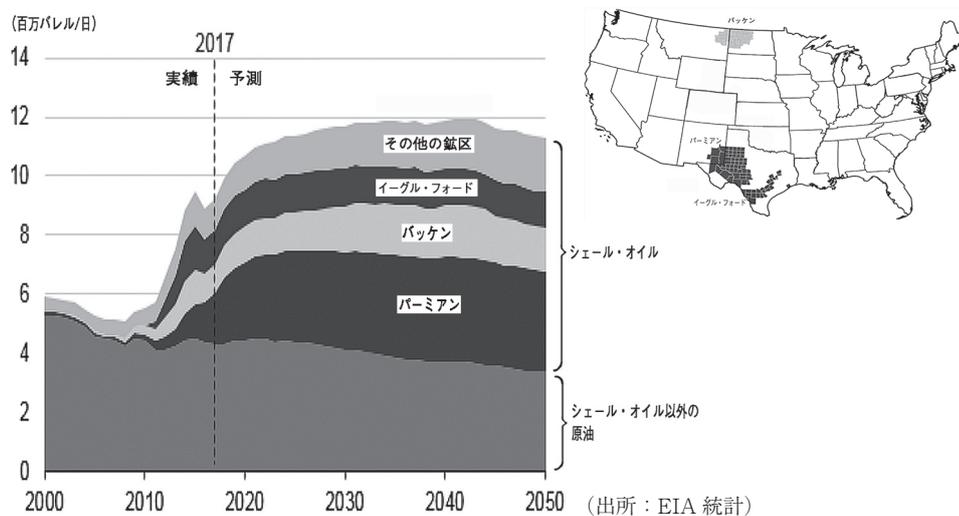


図 15 米国の石油生産量見通し

米国における、シェール・オイルとシェール・ガスの実力は、底知れず、米国の原油生産量、天然ガス生産量は、長期的にも増加し、国際エネルギー市場におけるパワー・バランスを大きく変貌させることが見込まれる。

## 7. シェール・ガス革命はLPガスにも影響

米国におけるシェール・ガス革命は、米国の天然ガス生産量を大幅に増加させ、天然ガス価格を引き下げた。シェール・ガス革命は、こうした、石油、天然ガス情勢への影響のみならず、LPガス（液化石油ガス）の国際需給関係にも大きな影響を与えている。

プロパン、ブタンをはじめとしたLPガスは、シェール・ガスの生産に伴って生産される。もともと、米国では、暖房用のエネルギーとして天然ガスが用いられており、LPガスの生産量増加は、米国国内におけるLPガスの余剰感をもたらす。こうした、随伴するLPガスの輸出が増加している（図16参照）。

シェール・ガス生産、シェール・オイル生産に伴って生産されるLPガスは、当初は欧州諸国に輸出され、石油化学の原料とされていた。石油化学の原料は、天然ガスの成分の1つであるエタン（ $C_2H_6$ ）、LPガスの成分の1つであるブタン（ $C_4H_{10}$ ）、ナフサ（粗製ガソリン）が利用されている。そのうち、ナフ

サが、もっとも化学式が複雑であり、多様な石油化学製品を製造することが可能であるものの、コスト的には、エタン、ブタンを原料としたほうが、安価にエチレンを生産することができる。そのため、欧州諸国の石油化学は、米国のシェール・ガスに伴ってブタンを原料としている。さらに、米国におけるLPガス生産が増加すると、日本をはじめとしたアジア諸国への輸出が増加している。特に、2016年6月、パナマ運河の拡張工事が完成し、米国メキシコ湾から日本へのLPガス輸出が容易となった。パナマ運河の拡張工事後に、最初に通航した日本の大型船は、LPガス輸送船である。米国のLPガスが輸入される以前は、日本のLPガスは、カタール、サウジアラビアをはじめとした中東産油国に依存していた。2007年度におけるLPガスの中東依存度は、9割以上に達し、米国からのLPガスの輸入はゼロであった（図17参照）。

中東産のLPガスも、原油生産、天然ガス生産に伴ってプロパン、ブタンを輸出している。サウジアラビアをはじめとした中東産LPガスが、日本市場において、圧倒的なシェアを持っていた時期には、サウジアラビアの国営石油企業サウジアラムコが提示するサウジアラムコCP（コントラクト・プライス）が、絶対的な影響力を持っていた。日本は、原油輸入のみならず、LPガス輸入においても、中東の地政学リスクに脆弱であった。そのため、

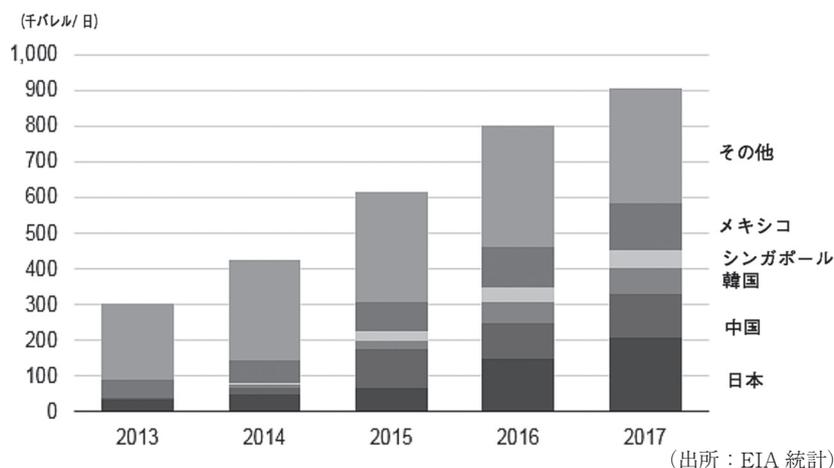
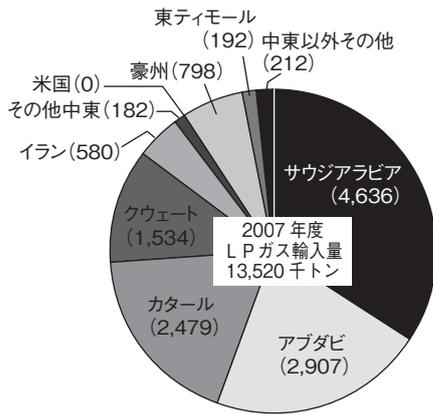
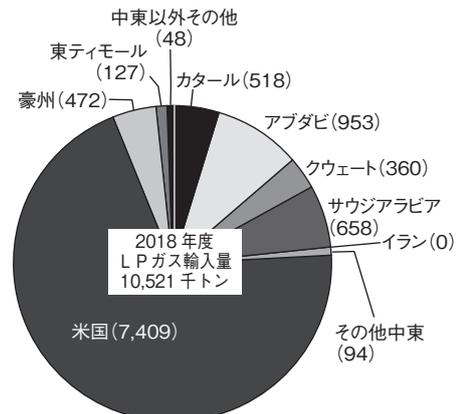


図16 米国のLPガス輸出の動き



(出所：日本 LP ガス協会統計)

図 17 日本の LP ガス国別輸入量 (2007 年度)



(出所：日本 LP ガス協会統計)

図 18 日本の LP ガス国別輸入量 (2018 年度)

日本は、原油に加え、LP ガスについても、中東産油国からの供給途絶に備えて、2019 年 4 月末時点において、民間備蓄と国家備蓄を合わせて 100 日分以上の備蓄を行っている。

しかし、米国産 LP ガスの輸入増加とともに、米国産のシェアが上昇し、2018 年度では、日本の LP ガス輸入に占める米国産の割合が 7 割を超えている (図 18 参照)。米国からの LP ガス輸入の増加とともに、日本は、中東の地政学リスクへの耐性を強めている。

従来は、日本が輸入する LP ガス価格のほとんどは、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してくる、サウジアラムコ CP によって決まっていた。2019 年 6 月時点においても、カタール、アラブ首長国連邦 (UAE) 等は、サウジアラムコ CP を基準として、LP ガスの輸出を行っている。サウジアラムコ CP は、アジアにおける LP ガス需給を、必ずしも正確に反映したものとはいえず、割高な原油価格に引っ張られる傾向があり、価格形成に不透明感があった。それに対して、米国の LP ガス価格は、米国国内の LP ガス需給を反映した、米国メキシコ湾のモントベルビュー渡しの市場価格により決定される。価格形成に透明性があり、割高な中東産 LP ガスと比較して、安価である場合が多い。日本をはじめとしたアジア諸国における、シェール・ガスに伴った米国産 LP ガスの

シェアが上昇するとともに、中東産油国も、以前のような割高な LP ガス価格を提示できなくなっている。中東産 LP ガスは、2013 年頃には、1,100 ドル/トンを超えていたものの、米国のモントベルビュー渡しの LP ガス価格が、2019 年 6 月時点において 230 ドル/トン程度と、低位安定していることから、サウジアラムコ CP も、米国の LP ガスと比較して割高な価格を提示せず、2019 年 6 月には、375 ドル/トンまで下落している (図 19 参照)。特に、2019 年 7 月から、OPEC と非 OPEC は、合計 120 万 b/d に達する協調減産を、2020 年 3 月までの 9 カ月間延長することを決めた。中東産油国の原油生産量が削減され、随伴する中東産 LP ガスの生産量が減少する状況において、米国からのシェール・ガスに伴う LP ガスの供給量が増加することは、エネルギー安全保障上も大きな意味がある。

シェール・ガス革命は、中東諸国の地政学リスクを小さくするのみならず、LP ガス輸入価格の面でも日本に恩恵を与えている。日本は、都市ガスの導管を敷設するための平地が少なく、国土面積の 94% に LP ガスが供給され、日本の総世帯数の半分近い 2,400 万世帯が LP ガスを利用している。米国のシェール・ガスに伴った LP ガスの生産量の増加は、中東の地政学リスクを低減し、調達源の多角化、価格フォーミュラの多様化にも寄与することとなる。

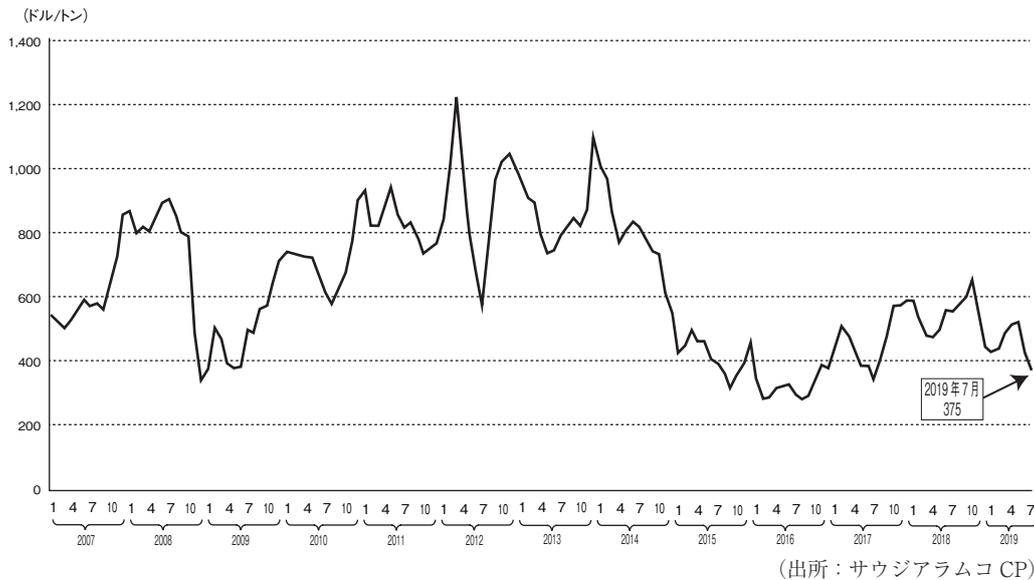


図 19 LP ガス価格（サウジアラムコ CP）の推移

## 8. 世界の LNG 貿易にも貢献するシェール・ガス革命

米国におけるシェール・ガスの生産量増加により、2017年、米国は天然ガス純輸出国となり、米国のLNG（液化天然ガス）輸入量は、減少を続けている（図 20 参照）。

米国の天然ガス生産量が減少していた 21 世紀初頭、米国の LNG 輸入量は、2020 年には日本を抜いて、年間 1 億トンを超えると予想されていた。実際に、米国の LNG 輸入量は、2007 年には、年間 2,000 万トン程度に達していた。米国メキシコ湾沿いには、将来的な米国の LNG 輸入増加に備えて、多数の LNG 受入基地が建設されていた。しかし、シェール・ガス革命により、状況は 180 度変化した。米

国では、天然ガスが余剰となり、米国メキシコ湾沿いの LNG 受入基地が天然ガス液化基地に設計変更された。2016 年 2 月、アラスカを除く本土 48 州から初めて、サービン・パス LNG が輸出され、2017 年 1 月には、中部電力（株）が、シェール・ガスを原料とした LNG を輸入した。

米国では、潤沢なシェール・ガスを原料とした LNG の輸出計画が相次いで動き出している。パナマ運河の拡張工事の完成により、米国のメキシコ湾から、日本までの輸送日数は 21 日程度と、中東からの輸送日数と変わらなくなり、米国の LNG は、輸送コストの面においても競争力を持つようになった。2018 年 3 月には、東京ガス（株）と住友商事（株）が参画するコーブ・ポイント LNG が、LNG 輸出を開始し、

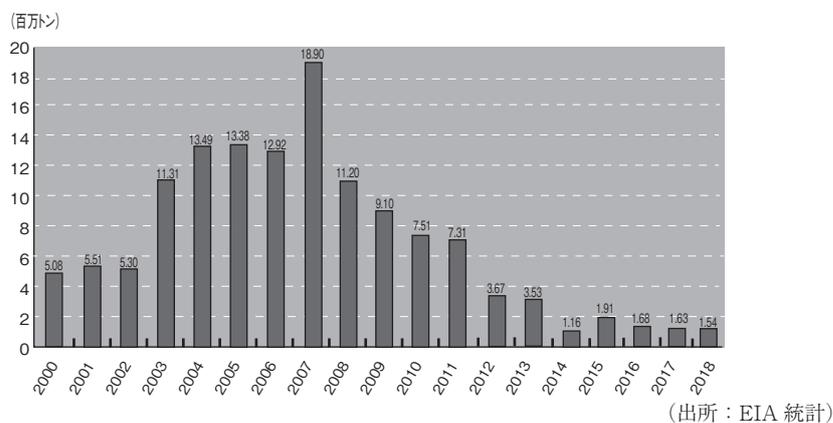


図 20 米国の LNG 輸入量

表2 米国の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	コノコフィリップス, マラソン	20.0
ルイジアナ	サビーンパス LNG	シェニエール・エナジー	22.5
テキサス	フリーポート LNG	フリーポート, 豪州マッコリー	13.9
テキサス	コルバス・クリスティー LNG	シェニエール・エナジー	9.0
ジョージア	エルバ・アイランド LNG	キンダー・モーガン	2.5
メリーランド	コーブ・ポイント LNG	ドミニオン	5.25
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
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	4.5
ルイジアナ	キャメロン LNG	センブラ・エナジー	13.5
テキサス	ゴールデン・パス LNG	エクソンモービル, QP	15.6
オレゴン	ベレセン LNG	ベレセン	7.8

(出所：各種新聞報道)

2018年5月には、東京ガス(株)が、コーブ・ポイント LNG からの長期契約 LNG 輸入を開始した。2019年においても、大阪ガス(株)、中部電力(株)が参画するフリーポート LNG、三菱商事(株)、三井物産(株)が参画するキャメロン LNG 等が、次々と LNG 輸出を開始する計画となっている(表2参照)。

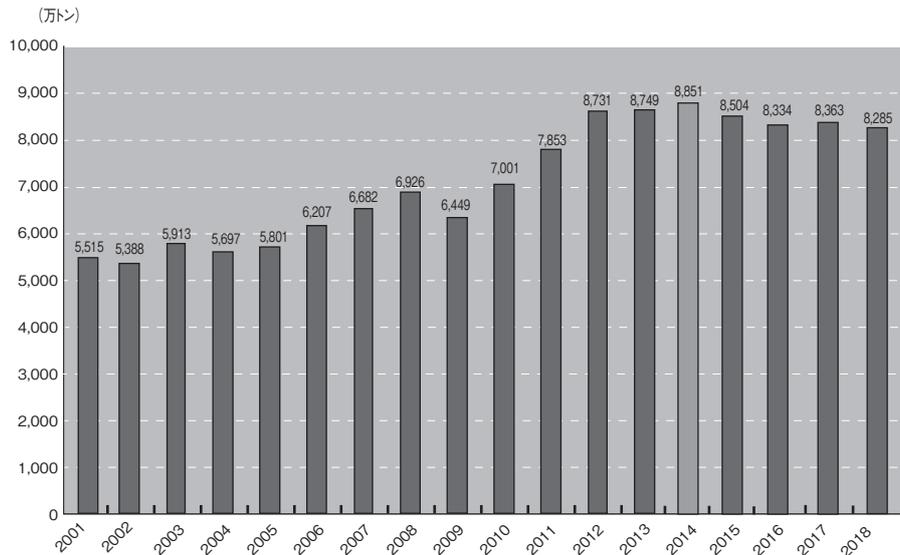
米国からの LNG 輸出量は、2022年までに年間7,000万トンに達し、日本への輸出は、年間1,000万トンと、日本の LNG 輸入量の1割を超える。米国と豪州を合わせると、年間1億トン程度の LNG が追加的に供給されることから、国際 LNG 需給は、2021年頃までは緩和することが見込まれる。

米国のシェール・ガスを原料とした LNG 輸出が拡大することによる、国際 LNG 貿易への影響は大きい。その理由は、第1に、米国のシェール・ガスを原料とした LNG 価格は、ルイジアナ州ヘンリー・ハブ渡しの市場価格を基準とし、液化コスト、船賃を上乗せしたものであり、米国の天然ガス需給を反映した、透明性が高いものとなっている。中東、アジアからの LNG 価格は、原油価格を基準としており、必ずしもアジア地域における LNG 需給を反映したものではない。そのため、価格フォーミュラの多様化が可能となる。2019年7月時点では、米国のシェール・ガスを原料とした LNG は、(LNG 価格) = (天然ガス価格: 2.5ドル) + (液化コスト: 2ドル) + (船賃:

2ドル) = 6.5ドル程度となっているのに対して、原油価格連動の LNG 価格は、8ドル/百万 Btu 程度で、米国のシェール・ガスを原料とした LNG のほうが割安となっている。

第2に、中東産 LNG、アジア諸国の LNG のような仕向け地条項がなく、あらかじめ決まった港に LNG を輸出することが求められておらず、その時点における、LNG が必要な場所に LNG を輸送することができる。東京ガス(株)によるコーブ・ポイント LNG も、関西電力(株)向けの LNG をスワップしたものである。

第3に、転売禁止条項がなく、LNG の買い手にとって余剰な場合には、より割高で購入してくれる買い手に転売することが可能である。春秋の不需要期には、電力企業、都市ガス企業をはじめとして、購入した LNG が余剰となる場合がある。また、今後、原子力発電所の再稼働によって、契約した LNG を輸入すると、LNG が余剰となる可能性がある。日本の場合には、原子力発電所の再稼働、太陽光発電をはじめとした再生可能エネルギーの普及により、LNG 輸入量は、ピークを越えている(図21参照)。中東、アジアからの長期契約の LNG は、必ず受け取るか、代金を支払わなければならない、テイク・オア・ペイ (Take or Pay) の条項がある。その意味では、米国の LNG の増加は、買い手の LNG の需要状況に合わせた、LNG のディーリングを可能とする。東京ガス(株)をはじめとしたエネルギー企



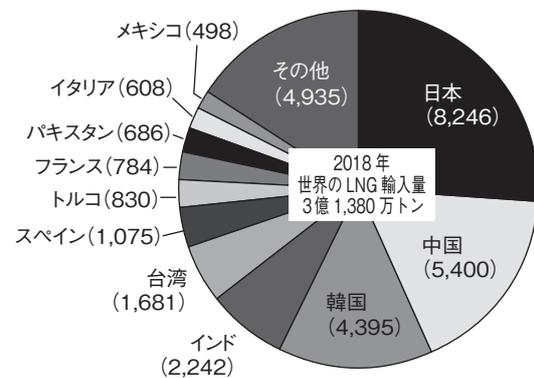
(出所：財務省貿易統計)

図 21 日本の LNG 輸入量推移

業は、シンガポール等に、LNG ディーリングの拠点を設け、米国から購入した LNG をもとに、アジア諸国との LNG 売買を行い、新たな収益機会を模索している。

第 4 に、米国のシェール・ガスを原料とする LNG の輸入は、「トーリング」と呼ばれるように、LNG 購入希望者が生ガスを米国市場で調達し、液化委託契約により、米国のエネルギー企業が天然ガスから LNG を生産・輸出する契約となっている。米国のエネルギー企業は、天然ガス液化業務を行い、LNG 購入者から液化受託業務手数料を受け取るだけであり、LNG のマーケティングは行わない。従来の LNG プロジェクトでは、日本は、天然ガスの生産コスト、液化コストをはじめとした LNG 生産・販売に係わるコスト構造を正確には把握しておらず、LNG 輸出国の言い値で購入せざるを得なかった。しかし、天然ガスの生産から液化事業まで、日本企業が参画することにより、世界最大の LNG の買い手である日本(図 22 参照)が、LNG のコスト構造をより正確に把握することで、いっそう透明性がある LNG 取引に参画することができる。

天然ガスは、単位熱量当たりの炭酸ガス排出量が、石炭の半分程度であり、硫黄酸化物、窒素酸化物をほとんど排出しないことから、



(出所：国際 LNG 輸入者協会統計)

図 22 国別 LNG 輸入量 (2018 年)

2018 年における LNG 貿易量は、史上初めて、年間 3 億トンを超えた。今後も世界的に LNG 需要が増加すると見込まれている。

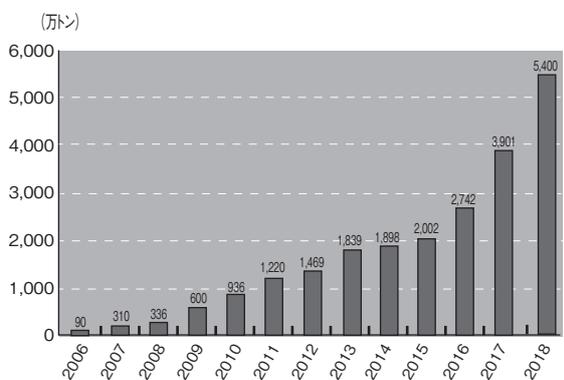
## 9. 世界の LNG 貿易は長期的に増加基調

既に述べたように、日本における LNG 輸入量は、原子力発電所の一部再稼働、太陽光発電をはじめとした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。今後も、再生可能エネルギーの拡大により、LNG 輸入量は、年間 9,000 万トンを下回る状況が続く。しかし、中国、インドをはじめとした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 の輸入を急速に増加させている。

特に、中国は、石炭火力発電を抑制し、天然ガス火力発電を増加させ、産業用ボイラーの燃料を重油から天然ガスに切り替えている。中国のエネルギー消費量の1%は、LNG4,000万トン程度に相当し、中国がエネルギーを地球環境に優しいLNGに少し切り替えるだけで、国際LNG貿易は、大きな影響を受ける。中国は、この数年にわたってLNG輸入量を増加させている（図23参照）。中国によるLNGの買い漁りが、2018年における国際LNG価格を上昇させた面がある。2022年頃には、中国が日本を抜いて、世界最大のLNG輸入国となる可能性があり、国際LNG貿易における指導的な立場が、中国に掌握されることが考えられる。

中国は、2017年に韓国を抜いて、日本に続く、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輸入量が伸び悩むことに対して、中国、インドのLNG輸入量が増加し、世界のLNG需要は、長期的にも増加する。

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、LNG価格の高騰抑制に大きな役割を發揮すると期待される。しかし、米中貿易戦争による関税引き上げ合戦により、中国は、2019年6月1日に、米国産LNGに対して、25%の追加関税を実施し、米国から中国へのLNG輸出が減少している。中国による米国産LNGへの追加関税は、長期的には米国のエネルギー業界の輸出戦略に打撃を与える可能性がある。トランプ



(出所：国際LNG輸入者協会統計)

図23 中国のLNG輸入量推移

政権は、シェール・ガスを原料としたLNG輸出を、貿易収支改善の切り札と考えており、今後の中国との貿易交渉による米国産LNGへの追加関税の動向に留意する必要がある。

## 10. 石油化学にも影響を与えるシェール・ガス革命

これまで述べてきたように、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命は、LPガス、LNGというエネルギー固有の分野にも大きな影響を与えてきたが、それだけにとどまらない。シェール・ガスに含まれるエタンは、石油化学の基礎化学品エチレン(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)の原料となる。米国では、低熱量の天然ガスが用いられ、発熱量が高いエタンは、パイプラインによる輸送等において、オーバー・スペックとなり用途が限定されていたが、エチレン製造のための安価な原料としてのエタンの利用が拡大している。米国では、ダウ・デュポン社、エクソンモービル社をはじめとして、シェール・ガスを原料とした巨大なエチレン・プラントの稼働が始まっている（表3参照）。

原油価格が、一時期の100ドル/バレル超から下落したとはいえ、2019年7月時点においても、60ドル/バレル程度と高値であるのに対して、米国の天然ガス価格は、2~3ドル/百万Btu(石油換算12~18ドル/バレル)と極めて割安である。そのため、エタン・クラッカーでエタンからエチレンを生産するコストは、ナフサ・クラッカーで原油由来のナフサからエチレンを生産するコストの半分以下に過ぎない。日本の石油化学企業は、主にナフサ・クラッカーを使って、ナフサからエチレンを生産している。米国のシェール・ガスを原料としたエチレン・プラントの登場は、コスト競争力において大きな脅威となる。2019年以降にも、シェール・ガスを原料としたエチレン・プラントの稼働が見込まれている。エチレンは、常温・常圧において気体であることから、そのままの輸出は難しいが、エチレンの誘導

表3 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・フィリップス	150	テキサス州	2018
Formosa (台湾)	115	テキサス州	2019
信越化学	50	ルイジアナ州	2019
サゾール	155	ルイジアナ州	2019
オキシデンタル	55	テキサス州	2019
ロッテ化学	100	ルイジアナ州	2019
ロイヤル・ダッチ・シェル	150	ペンシルバニア州	2019
エクソンモービル, SABIC	180	テキサス州	2020

(出所：各種新聞報道)

品であるポリエチレン等の汎用品が米国メキシコ湾沿いの巨大エチレン・プラントからアジア大洋州に流れ込み始めており、長期的にはアジア大洋州地域におけるエチレン価格の低下につながる。

信越化学工業(株)も、米国のシェール・ガスを原料としたエチレンの生産を開始し、塩素と混ぜた塩化ビニールの生産を計画している。塩化ビニールは、水道管、建材として用いられ、北米市場における需要は、今後も増加する。米国の安価なエチレンと塩素は、極めて強いコスト競争力を持っている。米国のシェール・ガス革命は、日本の石油化学企業の経営戦略にも大きな影響を与えている。

### 11. 石油、天然ガス、石炭のすべてにおいて純輸出国となる米国

EIA の見通しによると、2020 年には、米国は、

石油、天然ガス、石炭という、すべての化石燃料の純輸出国となる (図 24 参照)。

今から 160 年前の 1859 年、米国のペンシルバニア州で世界最初の商業油田であるドレーク油田の生産が開始された。それ以降、米国は、世界最大の原油生産国として、また世界の石油産業の中心として君臨してきた。

1970 年の原油生産 1,000 万 b/d をピークに、米国国内における原油生産は、減少の一途をたどり、米国が再びエネルギー大国に返り咲くことはないと考えられてきた。そこでは、原油生産量は、ピークを越えて減退の一途をたどり、原油価格は、天文学的に高騰するという、陰鬱な「オイル・ピーク論」が喧伝され続けていた。しかし、21 世紀初頭からのシェール・ガス革命、シェール・オイル革命により、「オイル・ピーク論」は覆された。

米国は、再び、世界最大のエネルギー生産国として復活した。米国は、世界最大の石油

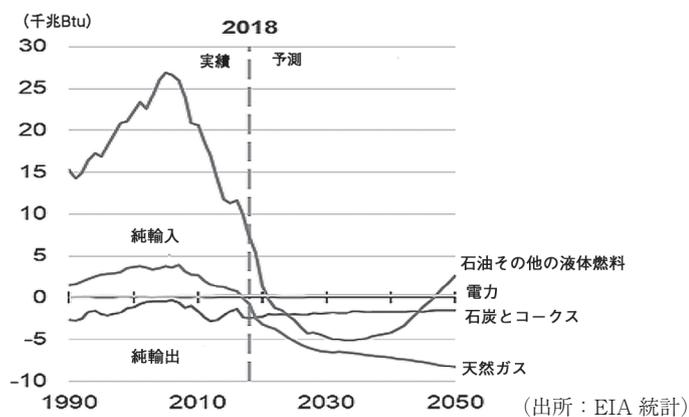


図 24 エネルギー純輸出国となる米国

消費国、天然ガス消費国であるとともに、世界最大の原油生産国、天然ガス生産国として、自信を取り戻しつつある。サウジアラビアをはじめとした OPEC 加盟国も、米国の原油生産国としての復権に脅威を感じている。2019 年 7 月の OPEC 総会と、それに続く、ロシアをはじめとした非 OPEC 加盟国との閣僚会合において、OPEC に非 OPEC 加盟国を含めた「OPEC プラス」の創設を恒久化することで合意した。巨大な産油国として復活した米国に対抗するべく、サウジアラビアとロシアという 2 大産油国が手を結び、米国との原油市場の覇権争いに立ち向かい、国際原油価格の主導権を奪還することを目指している。

21 世紀の世界を振り回すトランプ大統領の選挙演説をなぞらえるなら、“Shale Gas and Shale Oil make America Great Again” が実現しつつある。米国のシェール・ガスとシェール・オイルが、未来の国際エネルギー情勢をどのように変えるのか。シェール・ガスとシェール・オイルの世界への挑戦は、第 2 章に突入したのである。

## 海外の高速炉の廃止措置の取り組み状況

林道 寛 (原子力工学センター  
特任参事)



### 1. はじめに

わが国の「高速増殖原型炉もんじゅ」については、平成29年12月6日、原子力規制委員会に廃止措置計画書が提出され、平成30年3月28日に認可された。高速炉の廃止措置は、軽水炉の廃止措置とは異なり、冷却材として使用しているナトリウム (Na) に伴う諸課題の対応が必要となり、軽水炉と比較すると、廃止措置工程は長くなる可能性がある。「もんじゅ」は、全体工程を30年間と想定している。

高速炉の廃止措置は、既にフランス、英国、米国、ドイツやロシア等で実施されてきており、各国の取り組みを今後の「もんじゅ」の廃止措置に活用していくことが重要である。

このような状況を踏まえて、(一社)日本技術者連盟は平成27年～平成30年にかけて、欧米に高速炉の廃止措置調査団を3回派遣し、実態調査を行った。著者はこの調査団の団長として参加する機会を得た。表1に廃止措置段階の各国の高速炉を示す。本稿では、主に調査を実施したフランスのフェニックスとスーパーフェニックス、米国の高速実験炉 FFTF および英国の実験炉 DFR と原型炉 PFR の現状について紹介する。

### 2. 廃止措置段階の高速炉と廃止措置方式

解体が終了したプラントを含めて、廃止措置段階にある高速炉は、小型の研究・実験炉

表1 廃止措置段階の各国の高速炉

国	プラント名	炉型	クラス	出力 (MWt/MWe)	冷却材 (1次系/2次系) (t)	運転期間 (年)	閉鎖理由	現状と計画
フランス	RAPSODIE	ループ	実験炉	40/0	Na (37/20)	1967-1983	安全性	廃止措置中 (2030年までに終了予定)
	PHENIX SUPER PHENIX	プール	原型炉	563/255	Na (800/381)	1974-2010	使命終了	廃止措置中 (2041年度終了予定)
			実証炉	2090/1242	Na (3200/1500)	1986-1998	経済性等	廃止措置中 (2030年終了予定)
英国	DFR	ループ	実験炉	60/15	NaK (51/63)	1962-1977	使命終了	廃止措置中 (2025年終了予定)
	PFR	プール	実験炉	650/250	Na (650/250)	1975-1994	開発中止	廃止措置中 (2026年終了予定)
米国	EBR-I	ループ	実験炉	14/0.2	NaK (15/18.5)	1951-1963	使命終了	廃止措置終了 (1975年)
	SEFOR		実験炉	20/0	Na	1969-1972		2018年3月廃止措置終了予定 (グリーンフィールド)
	EBR-II	プール	実験炉	62/20	Na (286/41)	1965-1994	開発中止	安全貯蔵中 (フェーズIIまで実施)
	FERMI-I	ループ	実験炉	200/65	Na (160/102)	1963-1972	事故	安全貯蔵中
	FFTF		実験炉	400/0	Na (406/199)	1980-1992	開発中止	2030年代廃止措置終了 (Entomement?)
	HALLAM		実験炉	254/0	Na (260/370)	1963-1964	開発中止	廃止措置終了 (1969年)
ドイツ	KNK-II	ループ	実験炉	58/20	Na (27/50)	1972-1991	開発中止	廃止措置中 (2021年終了予定)
ロシア	BR-10	ループ	実験炉	8/0	Na (2/5)	1958-2003	使命終了	廃止措置中
カザフスタン	BN-350	ループ	原型炉	750/135 +淡水供給	NaK (470/450)	1973-1999	安全性	安全貯蔵中 (2075年終了予定)
日本	もんじゅ	ループ	原型炉	714/280	Na (760/760)	1995-2010	開発中止	廃止措置中

から原型炉および実証炉まで大きさや炉型式は様々であるが、表1に示すように、既に15プラントが該当している<sup>(1)(2)</sup>。冷却材には、Na（融点約98℃、沸点約883℃）とナトリウムカリウム合金（NaK：常温で液体、沸点約785℃）が用いられている。いずれも沸点が高く、水より軽く、高温で利用できることから熱効率も良く、高速炉の冷却材に適している。しかしながら、NaとNaKのいずれも水と接触すると激しく反応するため、カバーガスとして不活性ガスのアルゴンが使用されている。高速炉の廃止措置を実施する際には、通常の軽水炉とは異なり、抜き取った冷却材の処理処分と炉内や機器・系統に残留している冷却材の対応が必要となる。

廃止措置方式には3つの方式－即時解体（Immediate Dismantling）、遅延解体（Delayed Dismantling）、原位置埋設（Entombment）－がある。国際原子力機関（IAEA）は、原位置埋設方式を認めていないが、米国だけがこの方式を取り入れ、EBR-IIでは、使用済燃料の撤去後、Naの回収と周辺設備を撤去後に原子炉にモルタルを充てんした状態で廃止措置を終了している。原位置埋設方式はFFTFにも適用される予定である<sup>(3)</sup>。また、遅延解体は、60年以上の安全貯蔵後、主にCo-60の濃度減衰を待って解体に着手する方式で、カザフスタンのBN-350が取り入れている。

### 3. 廃止措置工程

冷却材としてNaやNaKを使用していることから、高速炉の廃止措置は、通常の軽水炉の廃止措置と比較すると若干長めの工程になっている。高速炉の廃止措置工程は、炉心から燃料を取出した後、Naを貯蔵タンクに排出（ドレイン）後の抜き取り、あるいは直接抜き取り→撤去可能な主要機器の撤去→残留Naの安定化処理→機器・系統・炉内構造物の撤去といった手順で行われる。

英国のDFRとPFRは、元々英国原子力公

社（UKAEA）が北部のドーンレイ研究所に研究開発用として建設、運転していた。しかし、DFRは1977年、PFRは1994年に運転を停止し、予算の確保等の関係から廃止措置が遅れていた。その後、UKAEAは英国原子力廃止措置機関（NDA）の設立とともに、NDAに移管され、ドーンレイ研究所全体の環境修復の一環として、2013年から13～14年間で廃止措置を終了する計画となっている<sup>(4)</sup>。

フランスでは代替エネルギー庁（CEA）が所有する実験炉ラプソディーおよび原型炉フェニックスとフランス電力会社（EDF）が所有するスーパーフェニックスが廃止措置中である。このうち、フェニックスは2009年に運転を停止し、2041年まで約30年かけて廃止措置を実施する予定である。また、スーパーフェニックスは1988年に運転を停止し、2030年頃に廃止措置を終了する予定である。いずれも30年程度で廃止措置を終了する計画であるが、運転停止した時期はスーパーフェニックスのほうが10年ほど早く、実証炉の廃止措置の結果を原型炉の廃止措置に反映していくようになっている。なお、英国とフランスは、定期的な会合等を通して連携し、高速炉の廃止措置を実施している<sup>(5)</sup>。

また、米国のエネルギー省（DOE）が所有するFFTFは、1992年に運転を停止したが、その後安全貯蔵期間を経て、2002年から燃料の取り出しやNaのドレインが開始され、2009年に閉鎖措置（中間的措置）となっている。資金の関係等から、安全貯蔵状態にあるが、今後大型機器の解体撤去を行い2030年頃には、原子炉容器へのグラウトの注入を行い、EBR-IIと同様、原位置埋設を行う計画になっている<sup>(6)</sup>。

### 4. 廃止措置の実施体制

英国の原子力施設の廃止措置は、発生する放射性廃棄物の処理処分を含めてNDAが実施責任を負っている。NDAはそれぞれのサ

イトのバックエンド対策を合理的・効率的に実施するために、マネジメントに徹し、図1に示すような体制をとっている。NDAは、国際競争入札により各サイトを経営する親会社（PBO：Parent Body Organization）と協定を締結し、実際のサイトの業務を行うサイトライセンス会社（SLC：Site License Companies）の株式を保有、経営を行うとともに、NDAとの管理・運営委託契約を締結したSLCから配当を得る仕組みになっている。

フランスの高速炉の廃止措置は、フェニックス、スーパーフェニックスともに、実務作業は旧アレバ社が中心となって行われていたが、原子力業界の再編成により、現在は、スーパーフェニックスを所有するEDF傘下のフラマトム社が実務作業を担っている。プラントを所有するCEAやEDFは、全体のマネジメントを担っている。

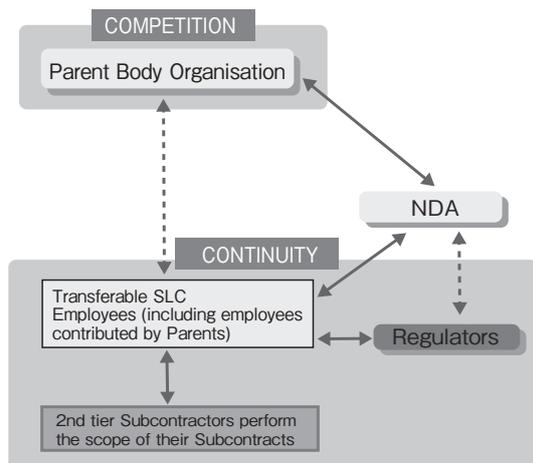


図1 NDAの廃止措置と放射性廃棄物管理の実施体制

フランスと英国は、地理的に近いことや廃止措置工程が似ていること、また、PFRのNaの処理方法にCEAが開発したNOAH法の技術を導入していることから、図2に示すように、技術開発、人材育成、エンジニアリング等の多岐にわたり、効率的に進めるために連携を図っている<sup>(5)</sup>。

米国の高速炉は、DOEが所有する開発段階の炉であり、DOEの管理責任の下、解体業務そのものは専門会社であるFLOUR社を中心となって実施されている<sup>(6)</sup>。

高速炉に限らないが、廃止措置を効率的に進めるためには、解体により発生する放射性廃棄物の処分場があることが必須条件であり、英国、フランス、米国ともに処分場は廃止措置の実施前から確保されている。

## 5. 廃止措置時のNa対策

高速炉の廃止措置を行う上で、軽水炉との大きな違いは、2章で述べたように、冷却材として使用するNaの存在である。高速炉の機器・システムを解体する前に、多量のNaを抜き取る必要がある。しかし、Naを抜き取った後も、機器・システムにはNaが付着しており、安定化処理を行う必要がある。また、原子炉容器内にも、炉型（タンク型、ループ型）を問わず、残留Naが多く存在する。このため、炉内構造物などの解体には、安定化処理ができない金属Naが存在している可能性があり、解体方法に工夫を要する。処理後のNaは、

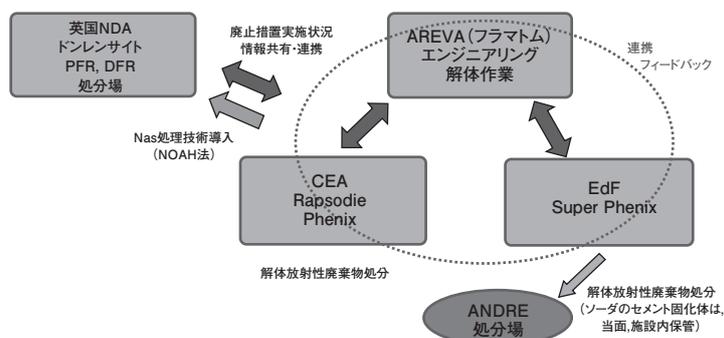


図2 英国とフランスの高速炉の廃止措置に関する連携

保管施設が必要であり、保管後の取扱いも考慮しておく必要がある。

### (1) 抜き取った多量の Na の処理方法

使用済燃料を炉心から取り出して、措置した後、冷却材として使用されている Na は、タンクにドレインした後に抜き取るか、直接的に抜き取る。抜き取られた Na は、他へ再利用する以外は安定化処理を行うが、処理時には、その次の工程の処分までを考慮する必要がある。

多量の Na の安定化処理方法として、フランスの CEA が開発した NOAH 法と米国のアルゴンヌ国立研究所 (ANL) が開発した ANL 法が良く知られている。基本的には同じ方法であり、水酸化ナトリウム (NaOH) 水溶液中に、少量の液体 Na を注入し、NaOH 溶液中の水と反応させて NaOH 水溶液にする方式である。その際に、多量の水素 (H<sub>2</sub>) ガスが発生するため、取扱いに注意を要する。

処理されて NaOH 水溶液となった Na は、その後、処分のために中和 (塩化ナトリウム (NaCl) に転換) され、放射能の濃度減衰を待つて海洋放出されるか、放射性廃棄物として処分するために固化される。

### (2) 残留 Na の処理方法

多量の Na を機器・系統から抜き取った後も、表面に Na が付着している。冶具を工夫してさらに Na を抜き取るが、プラント規模と炉型によっては、原子炉容器内底部に Na が数十キロから数十トン残留している。残留 Na 量を極力少なくするために、スーパーフェニックスや FFTF では、アクセス方法を工夫して、より多く抜き取る方法が考案された。

残留 Na の代表的な処理方法には、(i) 湿潤窒素ガス法、(ii) 湿潤炭酸ガス法がある。前者は、窒素と蒸気の混合ガスを用いて、残留 Na を水と反応させて Na を NaOH に転換し、さらに二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) と反応させて、炭酸水素ナトリウム (NaHCO<sub>3</sub>) にする方法である。水素濃度を抑制する必要があることから、窒素ガス中の水蒸気量で制御するが、水素濃度の発生量の制御が難しく、現在では使用されていない。後者は、少量の水蒸気を含む炭酸ガスや炭酸ガスと窒素の混合ガスを注入する方法で、炭酸化 (NaHCO<sub>3</sub> 化) は緩やかで、水素濃度も制御される。NaHCO<sub>3</sub> は科学的に極めて安定であり、強固であるため、表層部を炭酸化した後の解体作業を容易にする。主な高速炉の Na の処理方法を表 2 に示す<sup>(7)</sup>。

表 2 主な高速炉の廃止措置に伴う Na の処理方法

項目	プラント	フランス			英国	米国		ドイツ	カザフスタン
		ラブソディ	フェニックス	スーパーフェニックス	PFR	EBR-II	FFTF	KNK-II	BN-350
1 次系取出しナトリウム	処理	NOAH 法 (Phenix で)	NOAH 法 (Phenix で)	NOAH 法	NOAH 法	ANL 法, NaOH 固体化	ANL 法, NaOH 固体化 (NOAH 法)	英国ドレイにて処理 (NOAH 法)	ANL 法で処理予定
	処分	中和 (NaCl 転換), 減衰保管後に海洋放出	中和 (NaCl 転換), 減衰保管後に海洋放出	ソーダをセメント固化し, 浅地中処分	中和 (NaCl 転換) 後に, 海洋放出	中和 (NaCl 転換) 後に, 海洋放出	固体低レベル廃棄物 (保管中)	中和 (NaCl 転換) 後に, 海洋放出	NaOH を Geo Cement Stone 化
2 次系取出しナトリウム	処理	NOAH 法	NOAH 法	NOAH 法, NaOH をセメント固化	NOAH 法	ANL 法, NaOH 固体化→保管	ANL 法, NaOH 固体化→保管	英国ドレイにて処理 (NOAH 法)	——
	処分	NaCl 転換後に海洋に放出	NaCl 転換後に海洋に放出	浅地中処分予定 (VLLW)	固体低レベル廃棄物 (保管中)	——	——	中和 (NaCl 転換) 後に, 海洋放出	——
	再利用	NaOH を再処理工場へ	——	——	——	——	——	——	再利用化
1 次系残留ナトリウム	処理	炭酸ナトリウム化	炭酸ナトリウム化	炭酸ナトリウム化	湿潤窒素洗浄	湿り炭酸ガスで炭酸ナトリウム化	湿り炭酸ガスで炭酸ナトリウム化	湿潤窒素ガスを注入後に乾燥	湿り炭酸ガスで炭酸ナトリウム化
2 次系残留ナトリウム	処理	処理せず撤去	炭酸ナトリウム化	炭酸ナトリウム化	湿潤窒素洗浄	湿り炭酸ガスで炭酸ナトリウム化	湿り炭酸ガスで炭酸ナトリウム化	なし	湿り炭酸ガスで炭酸ナトリウム化
1 次系機器	付着ナトリウム処理	撤去後, エチルカルビトールで洗浄, 燃発事故により中止。炭酸ナトリウム化	撤去後, 大気中で処理後, ビットで洗浄処理	撤去後, 大気中で処理後, ビットで洗浄処理	原子炉容器解体時に処理	原子炉容器中に残留	——	付着したままで解体, 切断後に洗浄	——
	解体	ビットで洗浄後, 細断	洗浄後に細断	洗浄後に細断	解体時に処理	大気中で切断	大気中で切断	撤去後 WS で解体	——
2 次系機器	付着ナトリウム処理	処理せず撤去	大気中で処理後解体	大気中で処理後解体	解体時に処理	——	——	処理せず	——
	解体	洗浄後に撤去	洗浄後に細断	洗浄後に細断	洗浄後保管	大気中で切断	大気中で切断	解体後に洗浄処理	——
原子炉容器	解体	炭酸ナトリウム化後に水を張り水中解体	炭酸ナトリウム化後に水を張り水中解体	炭酸ナトリウム化後に水を張り水中解体	大気中切断予定	解体せずにグラウト充填	解体せずにグラウト充填?	窒素を充填して解体後, Na を洗浄	50 年間の安全貯蔵

## 6. 高速炉の廃止措置実施例

表1に示したように、既に多くの高速炉が廃止措置段階にある。ここでは、現在解体作業が行われているフランスのフェニックスとスーパーフェニックス、および米国のFFTFの例を中心に紹介する。

### (1) フェニックス<sup>(5)</sup>

高速原型炉フェニックスは、2009年に運転を停止し、廃止措置の準備段階を経て、現在解体作業が実施されている。

廃止措置工程は、図3に示すように、準備期間（燃料搬出、放射性廃棄物処理、通常設備の解体など）、解体期間（Naのドレイン、炉内構造物、炉内機器、原子炉容器等）と最終確認（建屋サーベイ・解体、サイトサーベイ等）の3段階に分かれており、約30年間で

廃止措置が終了する計画になっている。

フェニックスの燃料交換機は、図4に示すように、炉心燃料やブランケット燃料のみの交換を考慮した設計になっており、一部の反射体や中性子遮へい体は、現状の燃料交換機では下段左に示すようにアクセスが困難である。このため、燃料交換機のアームを延長する改造を行い対処した。改造にあたっては、使用材料、剛性力の確保、システムの補強や制御性などについて技術を開発し気中試験を経て実用化を図った。図5に改造した燃料交換機を示す。

フェニックスは、1次系、2次系併せて約1500トンのNaを保有している。Na処理にはNOAH法を適用するが、NOAH施設は、2019年中に建設が終了し、2年間の試験を経て、2021年から稼働予定である。1次系Naは2年かけて、2次系Naは1年かけて、処理する計画である。NOAH法により処理され

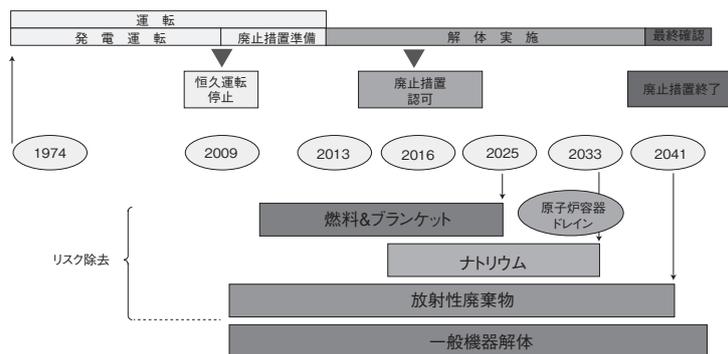


図3 フェニックスの廃止措置工程

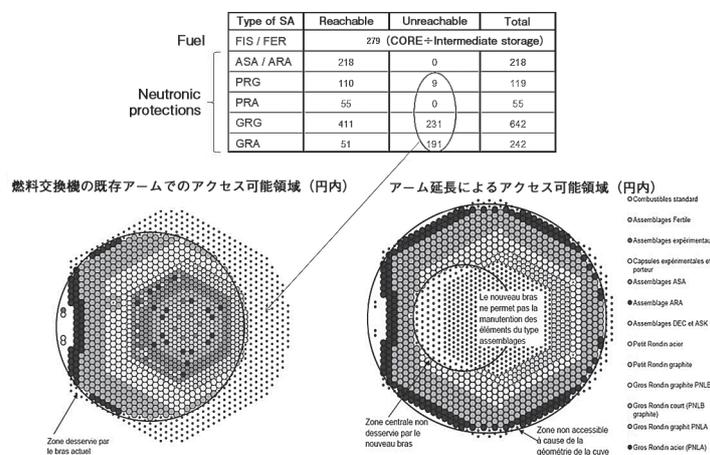


図4 フェニックスの燃料交換機の炉心構成要素へのアクセス性

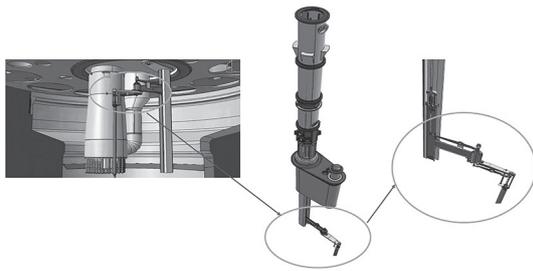


図5 フェニックスの燃料交換機の改造  
(アームの延長)

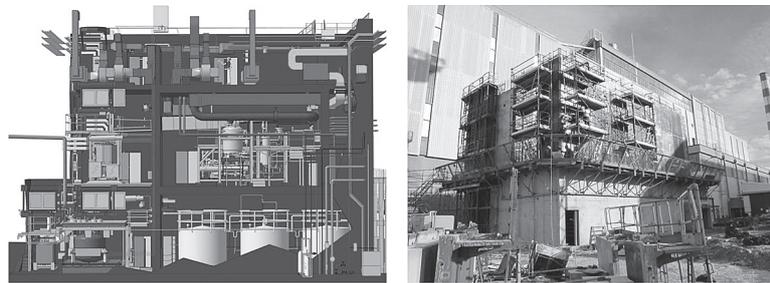
たNaは水酸化ナトリウム (NaOH) 溶液となり、さらに塩酸を加えて、塩化ナトリウム (NaCl: 塩) にして、ローヌ川へ放出することになっている。フェニックスの2次系Naには、セシウムが多く含まれているため、施設の遮へいを強化するとともにセシウムトラップを配置する設計になっている。図6にNaOH施設の外観と内部構造を示す。

(2) スーパーフェニックス (5) (8)

高速増殖実証炉スーパーフェニックスは、

現在 EDF が所有する世界初の実証炉で、1986年から1998年まで運転した。スーパーフェニックスは、フランス、西ドイツ、イタリア、ベルギー、オランダ、英国が参加する国際プロジェクトとして始まり、当初、共同出資した NERSA コンソーシアムが所有していたが、閉鎖決定に伴い、1998年から、所有者が EDF となった。

廃止措置は図7に示すように4段階に分かれている。第1段階(1999年～2006年)は、準備作業期間であり、燃料集合体の取出しやタービンホールの内装設備の解体を実施する。第2段階(2007年～2017年頃)は、Naの処理期間と位置付けられており、大型機器の解体や抜き取ったNa、残留Naの処理等を実施する。第3段階(2018年～2030年)は原子炉構造物、機器の解体や除染を実施する。第4段階(2026年～2030年)は建屋の除染や解体およびサイトサーベイ等を実施して、サイトを開放する予定である。



(土木工事は完了、プロセス装置の建設中、2021年の許認可予定)

図6 フェニックスのNa処理設備 (NOAH法) の建設 (外観と内部構造)

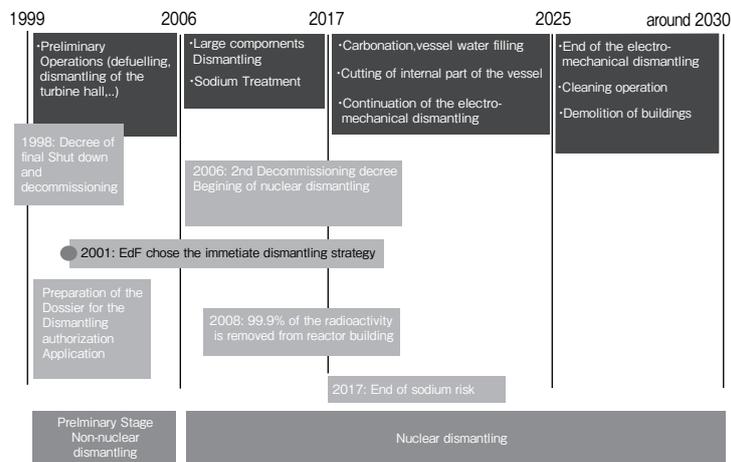


図7 スーパーフェニックスの廃止措置工程

全体として、約30年間の廃止措置作業となっている。それぞれの段階の主要なトピックスを以下に示す。

(i) 第1段階の作業（1999年～2006年）

第1段階では、解体の準備作業として、まず燃料集合体（FA：Fuel Assembly）を炉内から取り出す作業を実施した。約600体のFAを取り出し後、付着しているNaを除去後に隣接する燃料貯蔵プールのラックに装荷（水中貯蔵）した。その後、タービンホールの内装設備（タービン、交流発電機、復水器、ポンプ等）を撤去した。解体作業は2003年6月から約18カ月で行い、約1万7,000トンの解体物を搬出した。現在タービンホールは、解体により発生した放射性廃棄物の処理と一時保管場所として利用されている。これらの作業と並行して、水・蒸気系配管の解体や原子炉上部のドームの解体も実施した。ドームの解体にあたり、トリチウムが拡散することから、トリチウムの閉じ込め性に留意する必要がある。

また、運転中とは異なる運用を行うために、コスト低減化の観点から簡素化を図った設備として、開閉所設備（高圧線、鉄塔、変圧器から20kV地中電線と変圧器）や取水設備（ローヌ川より15万m<sup>3</sup>/h、地下水くみ上げ1万5000m<sup>3</sup>/h）および脱塩水生成装置（5,000m<sup>3</sup>/日～40m<sup>3</sup>/日）があげられる。

(ii) 第2段階の作業（2007年～2017年）

第2段階では、小型機器や大型機器の解体およびNaの処理を実施した。小型機器は原子炉建屋内にワークショップ（切断機、小型

クレーン等）を設置し、切断作業を行った。大型の長尺機器（1次系ポンプ、中間熱交換器）は原子炉建屋内に既設のコンクリートスラブをダイヤモンドワイヤーソーで切断して、縦長の空間を確保し、ワークショップを設置して搬出に必要な作業を実施した。図8にワークショップを示す。

その他、2次系機器・配管の解体や燃料出入機の解体を実施した。2次系ポンプの解体では、「Clementine」と呼ばれている湿式のダイヤモンドワイヤーソーが使用されたが、切断には極少量の水を使用した。水に溶解するトリチウムはごく微量であり、水処理は不要であった。原子炉容器の内外で燃料の受渡しを行うシュート方式の燃料出入機は775トンの重量物であり、解体には4カ月を要した。

ドレインしたNaは約5,500トンであり、NOAH施設（2系統）でNaOH溶液にした後、EDFが開発したセメント固化施設で約7万トンのコンクリートブロック（1m<sup>3</sup>ブロック×3万8,000個）として保管している。1つのコンクリートブロックには、632ℓのNaOH溶液が充填されている。図9にコンクリートブロック化の工程を示す。NOAH施設は稼働率を向上させるために、タービン建屋内に2系統設置した。Naの処理速度は6トン/日であり、24時間体制で処理を行った。

コンクリートブロックは、サイト内の別の建屋で2035年までの保管が許可されており、その後は、極低レベル（VLLW）の放射性廃棄物として、フランス放射性廃棄物管理庁（ANDRA）の処分場へ搬出する予定である。現在、NaOH溶液をセメント固化体で廃棄す



図8 スーパーフェニックスの原子炉建屋内の大型機器用ワークショップの設営

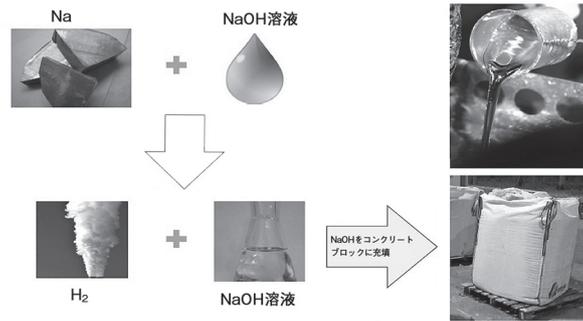


図9 抜き取ったNaの処理（コンクリートブロック化）

るための受入れ基準がなく、安全評価を行う必要がある。

NaとNaOHを反応させる反応槽は反応による振動が発生するため、これを吸収するダンパーを架台に設置して、疲労クラックの発生を防止している。また、反応槽からのガス排気系には反応により発生する水素を捕獲する水素フィルタが設置され、水素濃度を0.8%以下にして外気へ放出している。なお、使用している計器類は全て防爆構造である。

Naについては、EDFも当初はフェニックスと同様、NaOH溶液を塩化ナトリウムに転換し、ローヌ川に放出する予定であったが、環境保護団体等の反対にあって断念した。

スーパーフェニックスの機器・系統の切断には、原子炉の構造を考慮し、遠隔装置を開発して実施された。例えば、スーパーフェニックスには、コアキャッチャがあり、ドレイン後もNaが残留している。このため、炉上部スラブ貫通孔から、ドリル穿孔の遠隔装置を導入して、コアキャッチャを開孔してNaをドレインした。また、1次系統に残留しているNaをドレインするためや1次系ポンプ出口配管やペロー

ズの切断には、レーザー切断による遠隔装置をAREVA社（現フラマトム社）が開発して実施した。切断対象物の板厚が大きい場合、機械切断を適用するとロボットアームでの切断が困難なケースが考えられるため、レーザー切断装置を適用することでアームに負担がかからない方式を開発した。図10にその概念を示す。

第2段階の最終作業として、炭酸化により安定化処理した残留Naが存在する状態で、放射線遮へいを兼ねて、少量ずつ水を注入する。注入流量は2 m<sup>3</sup>/h、総注入量は2,330 m<sup>3</sup>である。図11にその概念を示す。

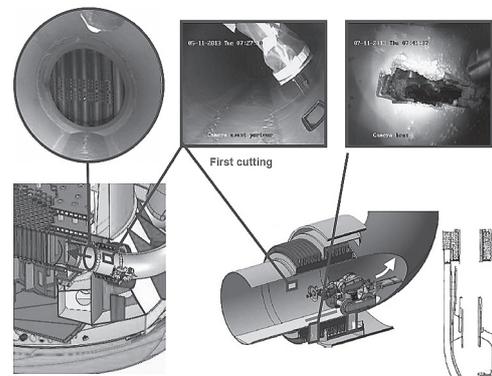


図10 残留Naを抜き取るためのレーザー切断装置

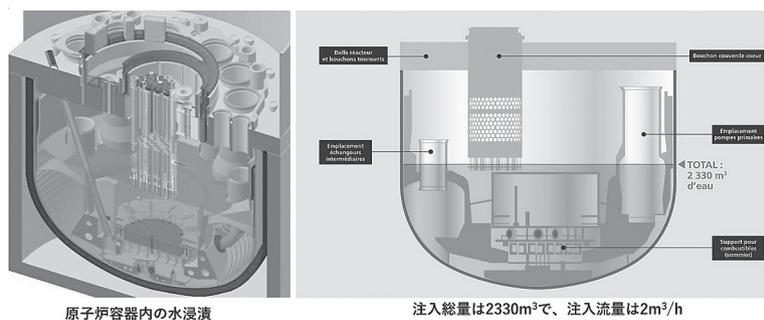


図11 原子炉建屋内構造物の切断のための原子炉容器内への水の注入

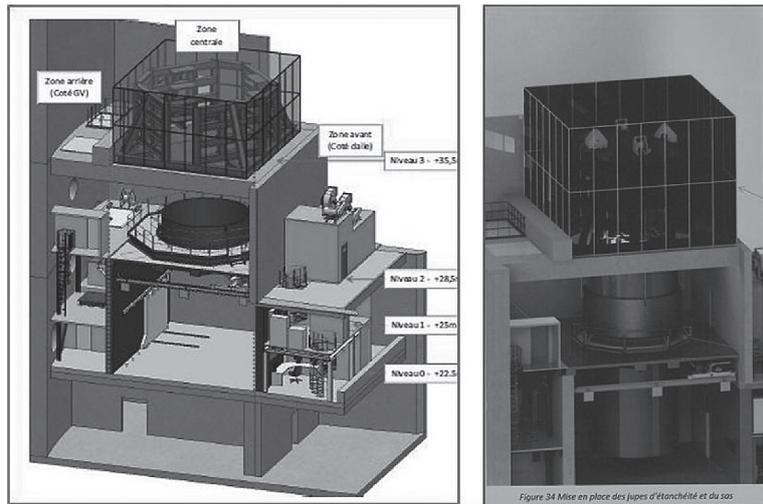


図 12 炉心上部機構や小回転プラグの解体用のワークショップ（原子炉建屋内に設置）

(iii) 第3段階の作業（2018年～2026年）

第3段階は、原子炉容器内構造物や原子炉容器の解体を実施する。これには、1次主ポンプや中間熱交換器のケーシング（プラグ）の撤去、炉心上部機構や炉心支持構造物などが含まれている。これらの機器・構造物の撤去後、遮へいのために注入した水を抜き、原子炉容器を切断する。

最初の段階で、炉上部の各プラグを撤去するために、炉上部の構造物を全て撤去する。並行して、原子炉建屋内にワークショップを設けて、引き抜いた炉心上部機構や小回転プラグの解体を行う予定である。図12にワークショップの概念を示す。昨年10月、原子炉容器の上部を開放するための規制委員会の合意が得られているが、ワークショップの設置が完了し、現在最終試験を実施している。また、炉上部機構の引き抜きは2019年の半ばに予定されており、解体作業は2年かけて行う計画となっている。炉内構造物の解体は2020年から開始される予定であるが、このための専用ワークショップが設置されることになっている。

(iv) 第4段階の作業（2026年～2030年）

第4段階では、残りの機器等を解体し、建屋全体をサーベイした後で、解体（Demolition）を行う。これらすべての設備の解体撤去作業

の終了後、サイトサーベイを実施して、サイトを開放する計画となっている。

(3) FFTF<sup>(6)</sup>

FFTFは、DOEが所有する高速実験炉で、燃料・材料やプラント構成要素の照射試験施設として、また、高速増殖原型炉クリンリバー（CRBRP）のための試験を行うことを目的に、1982年～1992年まで運転を行い、1993年～2001年の運転停止命令を経て、廃止措置へと移行した。炉心からの燃料の取り出し、Naのドレインと取り出しは終了しているが、現在、財源不足等の理由で安全貯蔵の状況にある。今後、2030年頃から解体作業が再開される予定になっている。

全ての使用済燃料は、1995年4月までに原子炉から取り出し、2003年6月にサイト外（アイダホ国立研究所）へ搬出した。図13に燃料搬出用のキャスクを示す。搬出された376

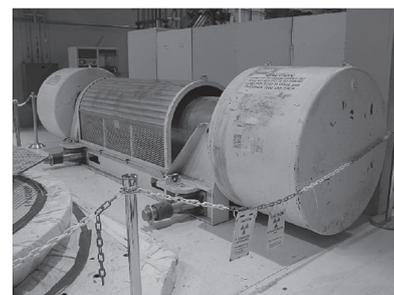


図 13 FFTF の燃料搬出用キャスク

体のうち、126体は洗浄処理後に乾式貯蔵施設へ、250体は洗浄待ちでNaプール内に貯蔵されている。1次、2次系のNaトラップ(コールドトラップ)を除き、2次系からのNa取り出しが2003年3月から開始され、その後、1次系と原子炉容器、燃料貯蔵施設の順にドレインを行い、2009年6月に全て終了した。その他、中間貯蔵減衰設備の冷却系等、機能的に不要となった設備の運転を停止している。

ドレイン後のNa(約26万ガロン)は、FFTFサイト内4基の大型タンクに不活性ガスであるアルゴンをカバーガスにして常温(固体)で保管している。機器・系統内の残留Naはそのままの状態である。保管中のNaは、今後NaOH溶液に転換して、再処理施設の高レベル硝酸廃液の中和剤として使用する予定である。また、残留Naは、今後解体前に処理する計画になっている。

原子炉容器内の下部入口プレナムとコールドレグ入口配管下の原子炉容器底部には、ドレインされないNaが残留している。図14

に概念図を示す。下部入口プレナムに対しては、原子炉容器上部からドリルストリングスとリーマストリングスを挿入して、下部プレナムプレートを直接穿孔することにした。これは深さ約40フィート(12.2m)のところに、57フィート(17.4m)離れた場所から、約200℃の溶融したNaが入っている4.6度傾斜した板厚3インチ(76.2mm)の鋼材に直径4分の3インチ(19.1mm)の穴を開けるという極めて困難な作業であり、隣接するモックアップ試験施設(MASF: Maintenance And Storage Facility)で開発試験を行い、適用した。図15に試験の状況とドリルビットを示す。ドリルビットは、窒化チタンでコーティングされたコバルト鋼を使用している。また、コールドレグ入口配管下の容器底部のNaに対しては、上部の原子炉容器入口配管に穿孔機かドリルで穴を開けて、約80フィート(14.4m)のフレキシブル配管を挿入して、配管先端を原子炉容器底部に到達させ、電磁ポンプにより抜き取ることで技術開発を進めた。図16

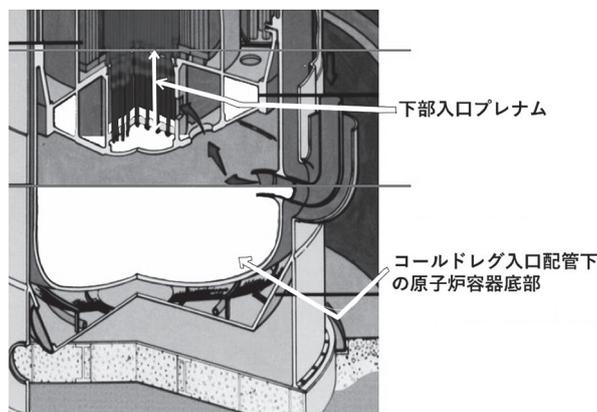


図14 FFTFでドレインできないNaの滞留箇所

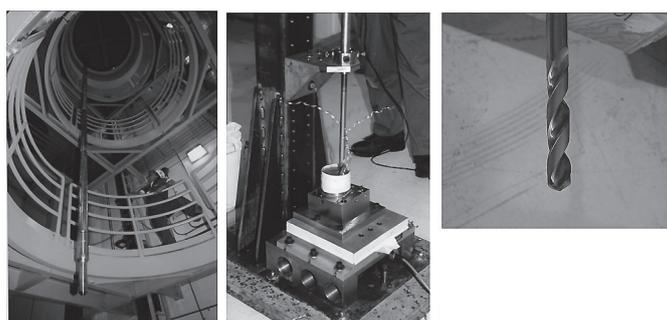


図15 MASFにおける試験の状況とドリルビット(交換刃)

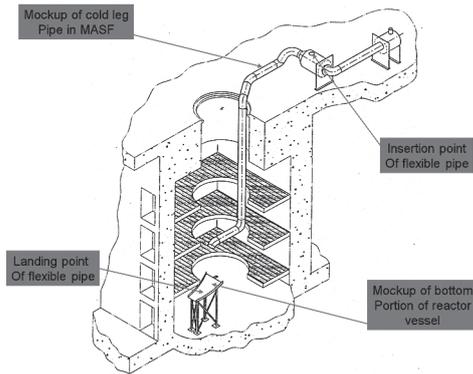


図 16 フレキシブル配管を用いた MASF での試験

に MASF に設置した試験体を示す。

その他、今後の解体作業に向けて、残留 Na の処理の技術開発が行われた。FFTF の原子炉容器には、3 基の燃料交換機、3 基の炉心上部機構があり、極めて複雑な構造となっている。このため、MASF に原子炉容器の 3 分の 1 スケールのモックアップ試験装置 (CRCTA : Composite Reactor Components Test Activity) を設置して技術開発を行った。FFTF の残留 Na の処理の条件 (Na 温度, 酸素濃度, 窒素と過熱蒸気の供給量) を想定した試験により、約 100 時間の連続試験により反応が完了した状態 (反応による水素濃度の上昇がない状態) であることが判明した。これらの結果は、FFTF の残留 Na の処理に適用される。図 17 に CRCTA の試験の状況を示す。

FFTF の廃止措置作業は、2030 年頃から再開される予定であるが、今後の大きな作業として残留 Na の処理がある。DOE は先を見据えて、隣接する技術開発施設で様々な技術開発を行い、実作業に臨んでいる。このような施設がプラントに隣接していると、トラブル時の対応がスムーズにできることにもなる。なお、DOE は EBR-II と同様、FFTF の原子炉容器内にモルタルを充填して、原位置埋設とすることが有力である。

## 7. まとめ

高速炉の廃止措置については、欧米や旧ソ連、日本において開発が進められてきた。このうち、実験炉や原型炉、一部の実証炉が、既に廃止措置段階にある。高速炉は冷却材として Na や一部ではあるが NaK を使うことから、軽水炉とは異なり、廃止措置時には、抜き取った Na, 残留 Na や機器・系統に付着している Na の処理・処分対策が必要となる。

欧州では、現在フランスのフェニックスとスーパーフェニックス、英国の DFR と PFR が廃止措置中であり、互いに合理的・効率的に業務を進めていく観点から、多岐にわたり連携を深めて実施している。

また、米国は、EBR-II の廃止措置を実施するにあたり、Na に起因する課題に対して技

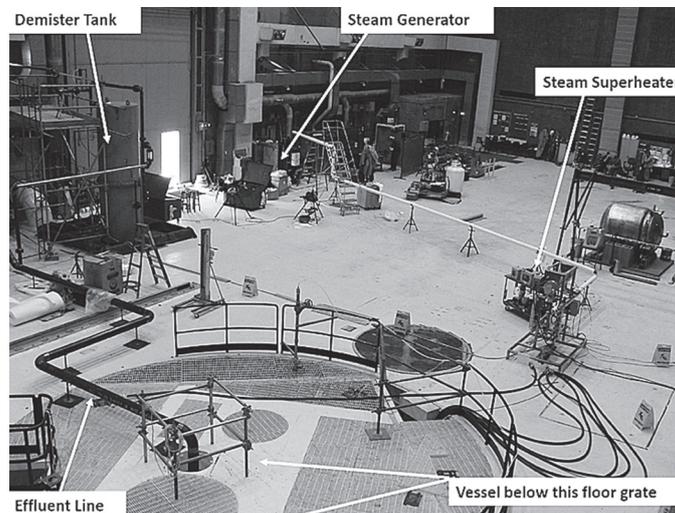


図 17 CRCTA 試験の状況

術開発を行いながら着実に進めてきた。この成果は、後続の FFTF に引き継がれ、さらに FFTF の課題に対処するために、プラントの隣接地に技術開発施設を設置して、技術開発を行って、実機に適用するようにしている。軽水炉と異なり、高速炉はプラント数も少ないため、廃止措置を実施するにあたり、過去の知見や知識を反映することが重要である。

現在、日本でも原型炉もんじゅが廃止措置段階にあるが、欧米の先行しているプラントの廃止措置や Na の取扱い、放射性廃棄物の処理処分といった関連する業務を含めて、その進め方を十分活用することを期待する。

#### 参考文献

- (1) IAEA, PRIS; Research Reactor & NFCIS Databases
- (2) IAEA TECDOC-1531, Fast Reactor Data-base 2006 Update, January 2007
- (3) U.S.DOE Experience with D&D of EBR-2 and FFTF: for the Second Expert Panel on Monju Decommissioning: Tsuruga, Japan, 19 July 2017
- (4) 欧州における原子力発電所の廃止措置実態調査団報告書, (一社)日本技術者連盟, 平成 28 年 10 月
- (5) EU における再処理・高速炉の廃止措置実態調査団報告書, (一社)日本技術者連盟, 平成 29 年 11 月
- (6) 米国の軽水炉と高速炉の廃止措置実態調査団報告書, (一社)日本技術者連盟, 平成 30 年 12 月
- (7) IAEA-TECDOC-1769, Treatment of Residual Sodium and Sodium Potassium from Fast Reactors, August 2015
- (8) IAEA-TECDOC-1633, Decommissioning of Fast Reactors after Sodium Draining, November 2009

## 過酷事故条件下における 原子炉隔離時冷却系（RCIC）の挙動に関する研究

都築 宣嘉

（原子力工学センター）  
主管研究員



### 1. 東日本大震災発生時の原子力発電所の対応

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震、いわゆる東日本大震災が発生した。巨大地震によって日本のあらゆる物事が影響を受けたが、原子力発電所に関して言えば、その地震動を感知した東日本の原子力発電所は一斉に非常停止（スクラム）を行い、その後運転員はマニュアル通りにスクラムに続く炉心冷却プロセスを開始した。

原子炉は核分裂反応によってエネルギーを取り出すが、原子炉の非常停止によって急激な核分裂反応を止めることに成功しても、その後放射核種の崩壊による発熱反応（崩壊熱の発生反応）が続く。崩壊熱の発生を急に止めることは不可能であり、原子炉では発電用の核分裂反応を止めた後も、その崩壊熱に対する炉心冷却を続けなければならない。もし、その炉心冷却が止まってしまうと、崩壊熱が炉心内部にたまり続け、最終的には炉心溶融が発生し、ひどい場合には放射性物質が原子炉の格納容器から漏れ出るシビアアクシデント（過酷事故）に進展してしまう。

東日本大震災時、各原子力発電所では、スクラムに続く炉心冷却プロセスを、場所によっては地震による停電の影響や余震の影響を受けながらもそれなりに順調に行っていた。しかし、震源地に近かった福島県沿岸部では地震の約1時間後に到達した、従来予想されなかったほど大きな津波とそれによる被害が、マニュアル通

りの炉心冷却プロセス実施を不可能にした。

特に、福島第一原子力発電所では、津波による浸水で配電盤が使用不能、あるいは、ポンプの浸水で冷却装置が使えなくなる事態が発生し、色々なものが使用不能となった。例えば、非常用発電機は空冷式の1機以外すべて使えなくなった。その生き残った空冷式非常用発電機は、5・6号機向けに設置されたもので、当該号機でも炉心内に装荷された燃料冷却は行わなければならなかったこともあり、余剰電力を1～4号機の復旧作業に向けることはできなかった。そのため、地震発生時運転中だった1～3号機における非常停止後の炉心冷却、定期点検中で使用済み燃料を炉心からプールに移し冷却中だった4号機、燃料が炉心に装荷されていた5・6号機の炉心冷却すべてを、一部のバッテリーに残された電力だけを頼りにやらねばならなくなった。

運転員はマニュアルにない過酷事故に対して決死の努力を行ったにも拘らず、放射性物質を放出してしまう事態に至ってしまった。

### 2. 再稼働に求められるより高い安全性

この福島第一原子力発電所事故（福島事故）という過酷事故は、日本史上かつてないほどの大事故に発展した。東日本大震災とこの過酷事故による影響はいまだに日本に暗い影を落としているが、特に原子力分野に大きな影響を与えている。

原子力発電所での軽水炉の炉型には大き

く分けて沸騰水型炉（BWR：Boiling Water Reactor）と加圧水型炉（PWR：Pressurized Water Reactor）の2種類がある。事故から8年以上たった本稿執筆時点（2019年6月）でも、再稼働が認められたのはこの件で事故を起こしたものではないタイプ（PWR）の9基に限られており、福島第一原子力発電所で使われていたタイプ（BWR）に関してはいまだに1基も再稼働が認められていない。

福島事故後、国は原子力安全規制を改革し、原子力規制委員会を組織して、新規規制基準を作成した。その新規規制基準に適合した原子力施設のみ再稼働が許可される。現状廃炉の予定がない原子炉は、BWR 20基、PWR 16基である。PWRについては、12基が新規規制基準への適合性を認められ（そのうち前述のように9基が既に再稼働）、残り4基もすべて新規規制基準に基づく審査を申請中である。一方、20基のBWRについては、本稿執筆時点で、柏崎刈羽原子力発電所の6、7号機と東海第二原子力発電所が新規規制基準への適合性を認められ、再稼働への大きな一歩を踏み出したが、再稼働自体はまだ認められていない。そして8基が新規規制基準に基づく審査を申請中、残りの9基は審査申請さえできていない。

新規規制基準の適合性を認められるには、原子力施設が再び東日本大震災級の大地震・事故にあっても過酷事故につながらないような、非常に高度な安全性が求められる。既存の施

設に関して、建設時のレベルの安全性では、新規規制基準には適合せず、「安全性が不十分だ」と判断される施設も多い。そういった施設を再稼働するには、新規規制基準の安全性に適合するように安全性を高めていくことになるが、そのためには、基本的に安全にかかわる施設を増設しなければならない。一方、さらなる安全装置の設置は、費用面と設置場所の面でコストを要求する。特に、現状再稼働が認められていないBWRを用いる発電所には余剰のスペースが少ないこともあって、このコストが大きいのしかかっている。

福島事故では、従来想定されていなかった危険性が明らかになった一方、逆に予想外に安全性への効果が認められた装置もある。その1つが原子炉隔離時冷却系（RCIC：Reactor Core Isolation Cooling）である。

### 3. BWR 安全性向上の可能性～RCICの成果

RCICは、その名前のおり、BWRの炉心が発電用の主タービンから隔離された時に、主タービンの代わりにRCICが備えるタービンを起動させ、そこから得られる力で炉心に冷却水を注入するシステムである。図1に概要を示す。図の中央付近の点線内にあるタービンとポンプ、場合によってはタービンの前の弁2つを含めたものがRCICシステムと認識されている。

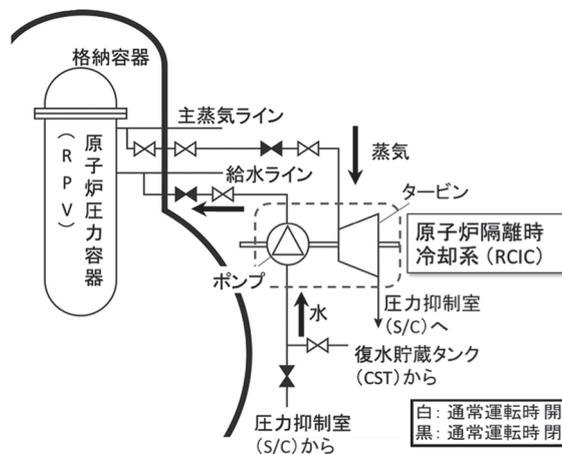


図1 RCICシステムの概要

RCICシステムを稼働させるには、RCICの前にあるモーター駆動の弁を開く必要がある。また、通常のRCICの運転ではRCICタービンの回転数の調整のために弁の開度を調整するためのモーターへの電力が若干必要となるが、電動ポンプだけで炉心注水を行う場合に比べれば格段に少ない電力で炉心の冷却を行うことができる。

福島第一原発においては、1号機にはRCICに代わるICという装置が、2号機から6号機にはRCICが備え付けられており、そのうち地震直前まで営業運転を行っていた2号機と3号機とで、スクラム後の処置として運転員がRCICを起動させた。津波が来るまでに、炉心内部の冷却水水位を見ながらRCICは数度オン・オフされているが、津波襲来当時はRCICがオンであったことが幸いして、津波襲来後運転員がプラントから退避した後もRCICは無入・無制御状態のまま炉心冷却を続け、結果として事故の進展を遅らせることに寄与した。

RCICの設計稼働時間は約8時間であるが、福島事故においてはそれを遥かに上回る間炉心冷却を行い、3号機では約20時間、2号機においてはなんと約66時間の長期にわたって

働いたとされている。図2、図3に2号機、3号機の地震発生直後の炉心圧力と燃料域水位の変化を示す。センサは2系統ずつある。

#### 4. 安全性を高める可能性のあるRCIC

RCICの設計稼働時間は8時間だが、それよりも大幅に長い時間稼働する潜在能力があると判断される。さらにRCICには、単に稼働可能な時間が設計での稼働時間より長かったというだけでなく、従来は稼働しなくてもよいと考えられていた低圧条件でも十分機能して炉心を冷却し、事故の進展を遅らせることに寄与できるという可能性もある。

潜在的なものを含めた形で実際のRCICの安全性を正確に評価することができれば、RCICを備えるBWRが、従来の評価よりもさらに高い安全性を持っていたことを示せる可能性がある。つまり、RCICの再評価によって、費用面と設置場所の面でのコストを要求しない安全性の向上が図れるのである。

RCICの再評価による安全性の向上で、従来見逃されていた危険性に対応できるようになる可能性は低い。しかし、例えば、福島事故のように複数の炉で事故が発生した場合で

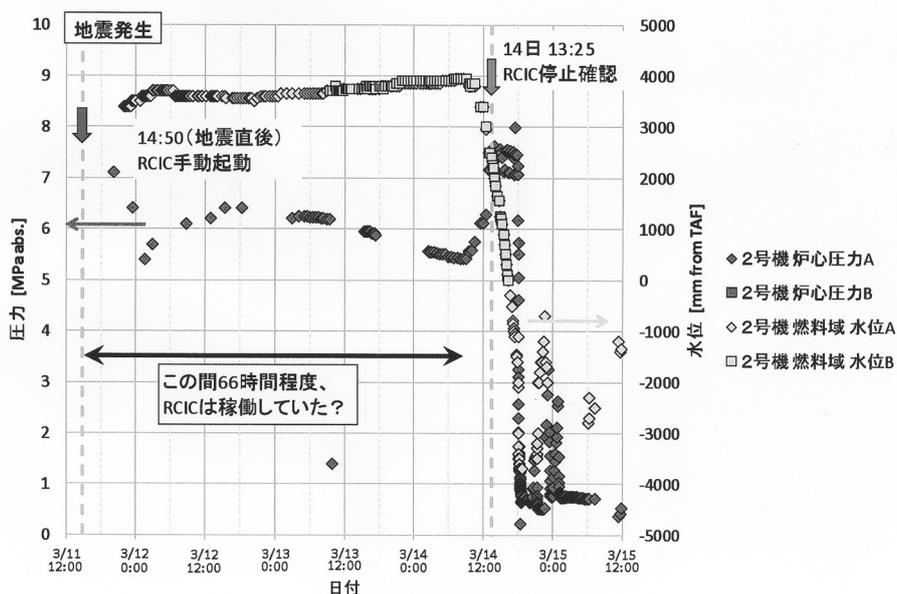


図2 2号機の炉心圧力と燃料域水位

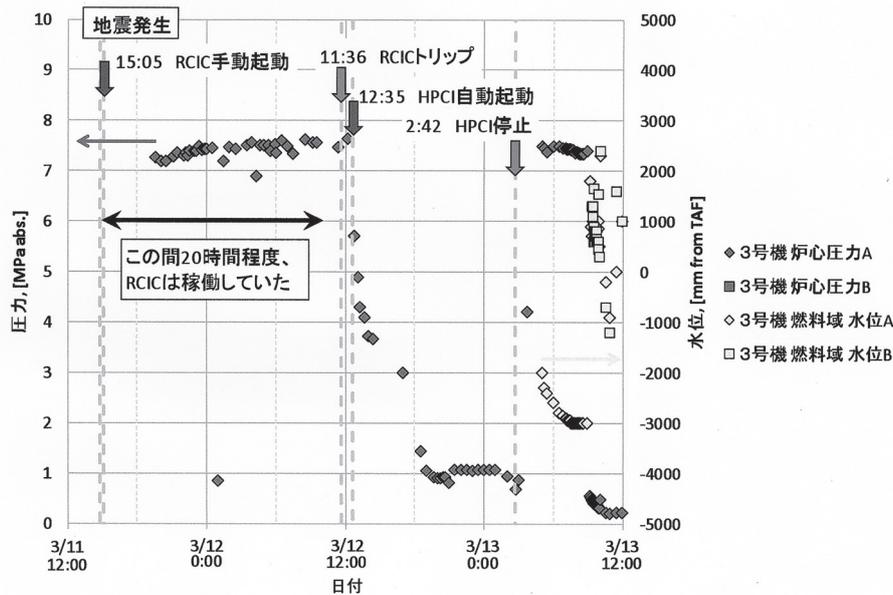


図3 3号機の炉心圧力と燃料域水位

も、比較的事態がゆっくり進行していて過酷事故に繋がる可能性が低い炉ではRCICをオンにしておくことで、若干の監視のみで長時間放置しても構わないという判断ができるようになる可能性がある。そうなれば、緊急に対応しなければならない他の炉に運転員・技術者を集中させ、全体的にはより余裕をもった形で事故の収束を図ることが可能となるのである。

### 5. 「過酷事故条件下における原子炉隔離時冷却系の挙動に関する研究」の目的

福島事故の経験から、RCICの安全性再評価によって追加のコストを必要とせずに原子炉の安全性を実質高めることができる可能性がある。そこで、当研究所は、アメリカで同じ意見を持つサンディア国立研究所を中心としたグループと共同で、経済産業省の「原子力の安全性向上に資する共通基盤整備のための技術開発事業」の1つとして、「過酷事故条件下における原子炉隔離時冷却系の挙動に関する研究」(平成27年度～)というプロジェクトを推進している。

具体的には、RCICが無制御の状態であ

り稼働したことについても調査する。通常の機器は無制御で用いると、例えばRCICにはタービンがあってそのタービンを蒸気で回すことでRCICは動作するが、何も制御せずに用いられれば、タービンを動かすための蒸気の流量が少なすぎるか、多すぎるかになるのが普通である。前者の場合はタービンが少々回ったとしてもじきに停止するか、あるいはRCICとして十分な効果を発揮できず、後者の場合はタービンが回りすぎて壊れてしまうか、あるいはそれを防ぐ安全装置(停電時は機械的なもののみ有効)が働いて、どちらにせよ長時間は稼働できずに停止すると考えるのが一般的である。

しかし、この福島事故の場合は、長時間無制御の状態で回り続けた。その理由として、1つに、タービンの前の弁が停電により中途半端な開度のまま止まり、タービンにとってちょうど良い流量が流れ続けたという説、また、『自己流量制御』が発生したという説、さらにその両方が発生したという説がある。

ここで「自己流量制御」というのは次のような説である。RCICのタービンへの流量が多くなってタービンの回転数が多くなると、タービンと軸を共有しているRCICのポンプ

が炉心に注水する流量も多くなり、炉心付近に貯められる冷却水量が増加する。それでも炉心注水量が減らないと、炉心付近からあふれ出した水が、RCICのタービンへ向かう配管へ流れ出し、最終的にタービン入口に至る。

RCICのタービンは、蒸気で動く前提で作られているので、水が入るとタービンの効率が落ちる→タービンの回転数が落ちる→炉心への注水量が減る→炉心付近からあふれ出す水が減る→タービン入口に向かう水も少なくなる→タービンの効率が良くなる→回転数が上がるという説である。この自己流量制御に関しては仮説の段階であり、推測の域を出ないが、その仮説を検証して、RCICの長期稼働に関して科学的な説明をつけることを目的とする。そのために、タービンや弁の特性、水と蒸気の割合に対する挙動に関しても詳しく調べる。

そして、このRCICは2号機では約66時間後にその効果を失い、3号機では約20時間後に稼働を停止した。3号機での稼働停止は運転員の操作によるもので、停止に関して不明な点はないのだが、2号機で約66時間でRCICが効果を失ったことに関しては、理由が不明である。その効果を失った理由を調べることは、RCICが長時間の稼働をした理由を裏付けることにつながり、現行のRCICを改良してさらに安全性の高い新しいRCICを作り出す手助けとなる。

すなわち、RCICが福島事故時の2号機、3号機において、設計稼働時間の8時間を大きく上回って稼働した理由、ならびに最終的に停止した理由を明らかにし、そこから科学的に妥当な現行のRCICの可動許容時間を再評価し、RCICを使用している原子炉に存在していた潜在的な安全性裕度をも用いられるようにすることで、過酷事故での緊急対応（アクシデントマネジメント）において猶予を与えて、原子力安全に寄与することが本プロジェクトの第1の目的となる。

そして、これらのRCICのタービンとポン

プ、あるいは周囲の弁を含めたシステム全体の流量や圧力に対する挙動の詳細なデータは、原子炉の挙動を主に事故時に関して解析する過酷事故解析コード（SAコード）にも大いに役立つ。当研究所では、そのSAコードでも数少ない国産のもの1つとしてSAMPSONを開発しているが、このRCICシステム全体に関する詳細なデータを反映させることによって、原子炉のより正確な挙動に関する予測が可能になる。そのことによっても、原子力関連施設の安全性向上に寄与する。SAコードは有名なものが全部海外製のものであるが、海外に原子力研究開発に関する主導権を握られてしまわないためにも、国産コードの開発を続けることは重要である。これが第2の目的となる。

また、現行のRCICの詳細なデータは、新型のRCICの開発にも寄与する可能性がある。これが第3の目的となる。

## 6. 国際協力による実施体制

安全性を正確に評価し、原子炉の再稼働に向けた本プロジェクトは、日米共同研究事業の形で行われている。

米国側では、日米民生用原子力開発ワーキンググループ（CNWG：US-Japan Civil Nuclear Energy Research and Development Working Group）の枠組みの中で、SAコード評価部門の中の1つのプロジェクトとして、RCICタービンの型式名称であるテリタービンに因んで“Terry Turbopump Expanded Operating Band（TTE<sub>Ex</sub>OB）”という名称で、RCICの安全性再評価プロジェクトが行われている。

アメリカ側メンバーは、BWRオーナーズグループ、アメリカ政府の代表であるエネルギー省（DOE）を始め、いくつかの電力会社、サンディア、アルゴンヌ、アイダホ等の国立研究所や大学の関係者、開発元であるGE-Hitachi他の企業に所属する専門家や、アメリカの原子力発電所への資材供給をとりまとめている

PIM などである。日本側のメンバーは、BWR オーナーズグループの一員としての東京電力(株)と日本側の代表としての当研究所である。

年に4回程度、広く参加者を募った会合(Advisory Committee Meeting)を開き、30名程度の参加者にプロジェクトの進行具合を説明しながら、RCICの安全性解明に関する幅広い知識と意見を集めるとともに、重要事項に関しては別にその都度参加者を限定した会合(Steering Committee Meeting)を開いて、集中した話し合いを行っている。その様子を図4に示す。また、アメリカ機械学会(ASME)の学会やテリータービンユーザーズグループの会合などでも研究成果を発表し、反響を得ている(参考文献(3)など)。



図4 TTExOB 会議の様子

本プロジェクトは、マイルストーン (MS) と名付けた段階制で進めており、各マイルストーンの終了時に評価をして、次の段階へ進むかの判断をしている。各マイルストーンの内容は、以下のとおりである。

MS1	プロジェクト実現可能性を探る初期調査と計算モデル試作(正式に予算がつく前に終了したため、プロジェクトの資料からは省略されている時もある)
MS2	原理と現象論調査;日米の利害関係者を含めたプロジェクトの目標とプロジェクトによる利益の検討
MS3	実機要素実験;実機 RCIC のパーツを用いた実験、それに伴うモデル化
MS4	テリーターボンプ基礎実験;実機スケールおよびその縮小モデルのテリータービンを使

用した実験、それに伴うモデル化

MS5	長時間・低圧の実機総合実験;実機スケールのタービンを使用し、実際の炉内の環境もある程度考慮した総合試験
MS6	福島第一原子力発電所2号機を模擬した自己制御に関するスケール実験;「RCIC が設計時間以上の長時間稼働したのは、原子炉・配管・弁・タービン等の組み合わせにより、タービンへの蒸気流量が自己制御されたからだ」という仮定を検証するためのテリータービン縮小モデルを使用した実験
MS7	MS3 から MS6 までで行ったモデル化のまとめ

本プロジェクトは現在も継続して行われており、平成29年度・30年度には、MS3 実機要素実験、MS4 テリーターボンプ基礎実験をアメリカのテキサス A&M 大学で行った。筆者もその2年間、客員研究員として同大学に駐在し、アメリカ側のスタッフと共同で研究を行った。本稿はそのプロジェクトの中間報告となる。

## 7. 研究対象となる RCIC の構造

図1でBWR内でのRCICの配置・働きを示したが、実際のRCICのタービンとその前の弁2つの写真を図5に示す。テリータービンという型式のタービンと、その流量を制御する2つの弁が写っている。原子炉が主タービンから隔離された時に、急激な核分裂反応はスクラムによって止めるが、その後も続く崩壊熱によって炉心で発生する蒸気を、このRCICのタービンに導き、タービンを回すこ

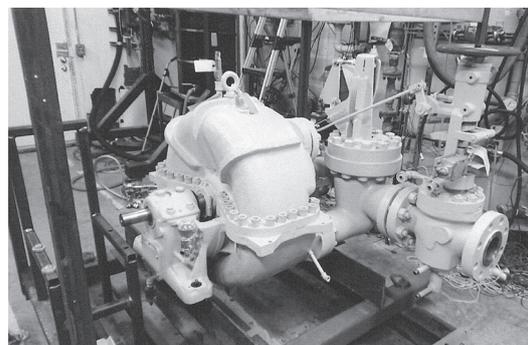


図5 テキサス A&M 大学での RCIC タービン

とで仕事をさせ、タービンシャフトを回す。そのシャフトはポンプにつながり、ポンプは復水貯蔵タンクに溜められた冷却水（あるいは圧力抑制プール内の水）を炉心に注水して、炉心冷却を行うことができる。このタービン単体の大きさとしては、大人の胸ぐらいまでの高さとなっている。

RCICで用いているテリタービンは、100年以上前の設計であるが、非常に頑強な設計となっており、今のRCICでも昔の設計とほぼ同様のシステムが用いられている。頑強であるが故に、原子力分野への適用には向いているが、東日本大震災の前までは安全基準で設定されていた8時間以上の動作をすればよいとだけ考えられて、それ以上の稼働時間に関する正確な安全性・動作の健全性の評価をされてこなかった。RCICに関しては、その動作が止まる理由としては、運転員の操作による停止以外には、タービンでの機能不全と、弁の安全装置が働いたことによるものが考えられ、実験として行うRCICが潜在的に持つ安全性の評価のためのデータ取得は、このテリタービンと弁の挙動に対する研究が主となる。

## 8. 実験内容

MS 1, MS 2は現象論等を含めた調査研究であり、実際に実験を行ったのはMS 3からである。現在はテキサス A&M 大学で行ったMS 3, MS 4がほぼ終わっており、以下にそこで行った研究実験の目的と途中経過に関して紹介する。

### (1) タービンノズル噴流実験

まずはRCICタービンの各パーツに関して要素実験を行い（MS 3：実機要素実験）、RCICが設計稼働時間を遥かに超えて稼働した理由、そして最終的に停止した理由の推測に役立つデータを取得し、さらにRCICの詳細な特性としてのデータとしても用いる。

第1の実験はタービンノズルに関するものである。RCICのタービンは高温高圧下で用いられ、その内部を図6に示すが、そこでの流れを実験的に可視化して見ることは難しい。よって、三次元CFDなどによるコンピュータシミュレーションで内部での流れの状況を理解するのだが、そのために大事な、タービンへの入口の条件であるノズルからの音速以上での噴流

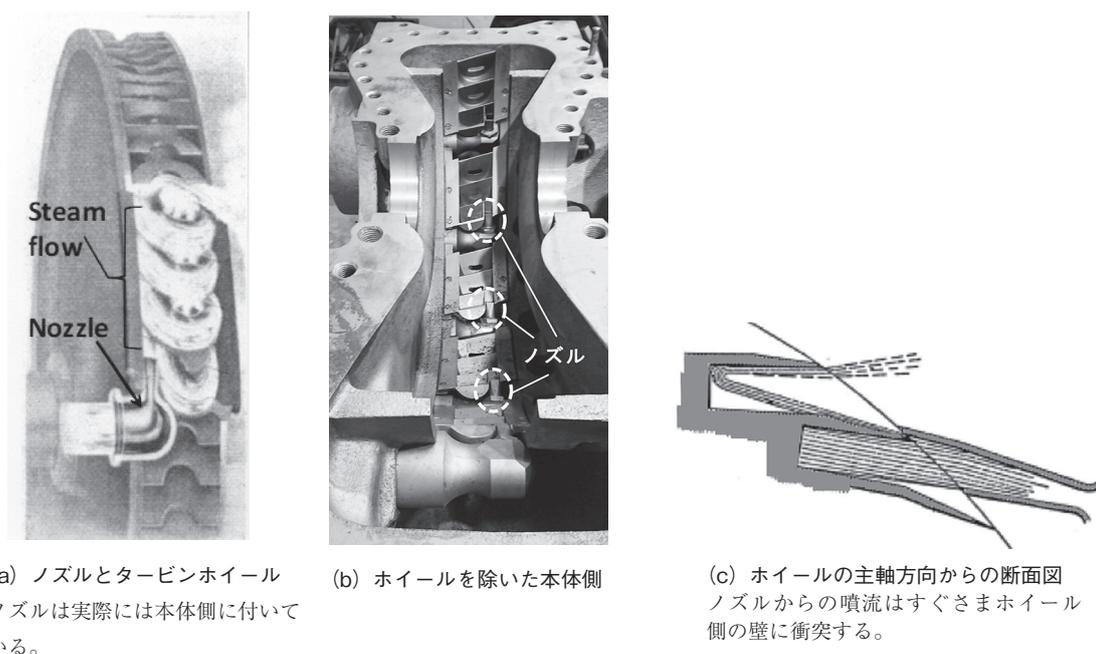


図6 テリタービン内部

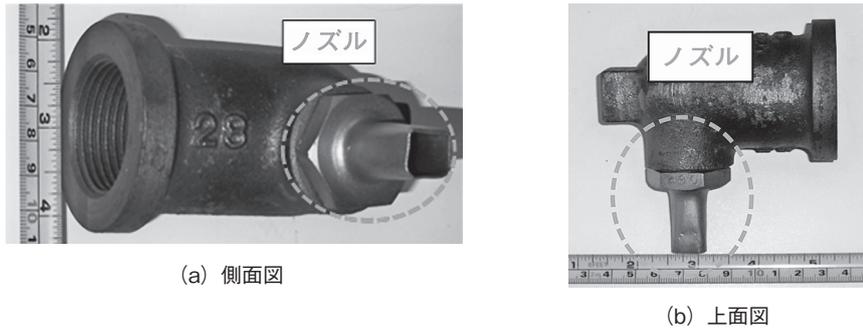


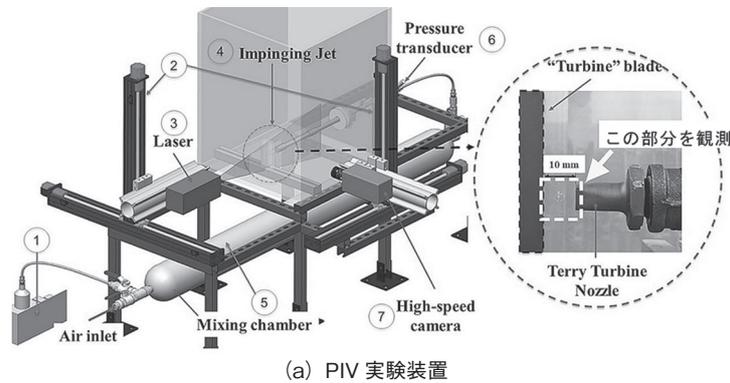
図7 ノズルの拡大写真と受け具

に関して、図7に示す実際のタービンノズルを用いて流れを明らかにする実験である。

また、図6(c)に示すように、このノズルから出た噴流はすぐさまホイール側の壁に衝突する。よって、噴流の壁との衝突挙動も重要となっており、そこも含めて対向する壁に衝突させる実験となっている。図8に実験例を示すが、この噴流の状況を観測するには、粒子画像流速分布計測法（PIV：Particle Image Velocimetry）が用いられているが、

音速以上での噴流の観測ということで、様々な困難を伴った。関係者の努力もあって、空気単相での流況を中心に情報が得られている。

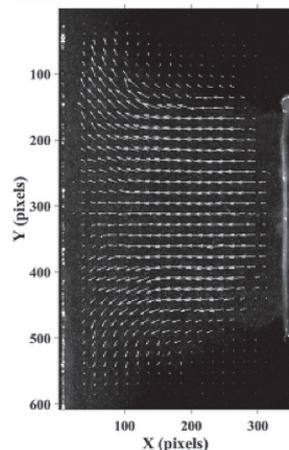
また、この実験に対して当研究所としてシミュレーション計算を行った。三次元の計算流体力学（CFD）解析コード STAR-CCM+を用いて解析したところ、例えば図8に示した実験に対応する条件でのCFD解析結果との比較は図9のようになった。左側の実験結果（PIV results）では、その解析手法のため



(a) PIV 実験装置



(b) PIV 用に撮影された画像



(c) PIV による解析結果

(短時間に撮影された複数枚の画像の微小な差から計算された粒子の動きの分布。)

図8 PIV による流速分布観測例

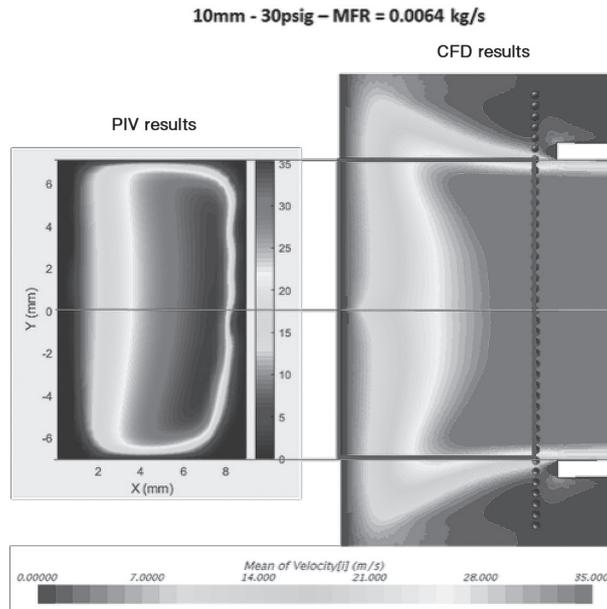


図9 図8の条件下での実験結果（PIV results）と計算結果（CFD results）の比較

にノズルを出た直後の流速を解析することができず、そのために左側の図の右端にはゼロおよびゼロに近い数値が入ってしまっている。また、スケールの色味に少し違いがあり（実験の方は最高値・最低値とも暗い色までが入っている）、そのために比較が難しいが、全体的な分布としては似た分布をしており、ノズルからの流動はこのCFDを用いた手法で十分な精度で解析ができるものと考えている。

アメリカのプラントでRCICに用いられている弁に対して、弁の開度を変更しながら、弁の入口・出口圧力を変更して、その時の流量から弁の特性値（バルブ容量係数 CV, 圧力回復係数 FL, 差圧比係数  $xT$ ）を計算した。図10に弁に関する実験の様子を、図11にその結果を示す。

また、これらの弁に対しても3D CFDコード STAR-CCM+ を用いて解析を行っており、

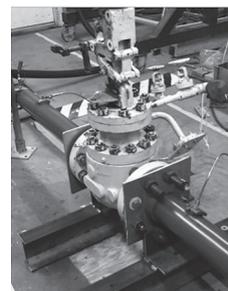
## (2) 弁に関する実験

図1や図5にあるように、RCICのタービンの上流には2つの弁があるが、その弁の特性もRCICのシステムとしての性能を理解するために必要である。

RCICは前述のとおり長時間無制御で放置されたが稼働し続けた。そこには何らかの流量制御が「勝手に入った」と考えられており、そのためにタービンの回転数オーバーによる安全装置が起動することなくタービンが稼働し続けられたのだと考えられている。その「勝手に入った」流量制御の原因はこれらの弁によるものである可能性も考えられており、そのために弁の特性を明らかにすることが求められている。



(a) フォークリフトによる弁の運搬



(b) 実験装置への組み込み

図10 弁に関する実験の様子

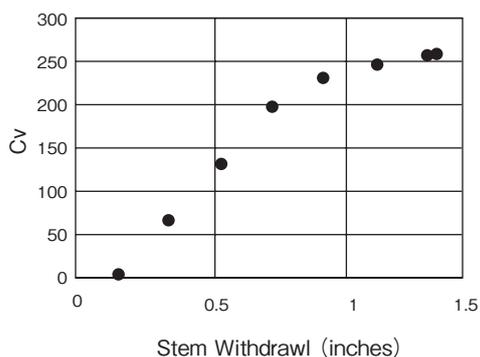


図 11 弁に関する実験結果の一例

例えば Gimpel 社のトリップ・スロットル弁に関しては相対誤差 18% で評価できることを確認した。図 12 に解析結果を示す。

### (3) 潤滑油・ベアリングに関する実験

何度も述べるが、福島事故で RCIC は設計時間を遥かに超えて稼働した。しかし、その RCIC も最終的には停止した。

RCIC が一定時間稼働した後停止する（起動

しなくなる）原因の 1 つとして、潤滑油・ベアリングの劣化による RCIC タービンの性能低下が考えられるため、実機の潤滑油・ベアリングを用いて、潤滑油の加熱実験を行った。ここに示す例は、ヒーターで約 120° C (250° F) に加熱して 72 時間保持し、その間の温度・粘性を連続的に計測するとともに、その後室温に戻し、粘性が戻るかどうかを確認したものである。外見としては図 13 に示すように、加熱後は色が若干濃くなった。また、温度に対しては、図 14 に示すように、若干の粘度低下が見られる。これにより RCIC が運転不能になるほどの大きな性能劣化であるとは思われないが、詳細な影響については現在検討中である。

### (4) タービンを用いた実験

前述の 3 つのタービンパーツに対する要素実験以外に、タービン全体を用いての基礎実験も行った。まずは RCIC 実機のタービンよりも

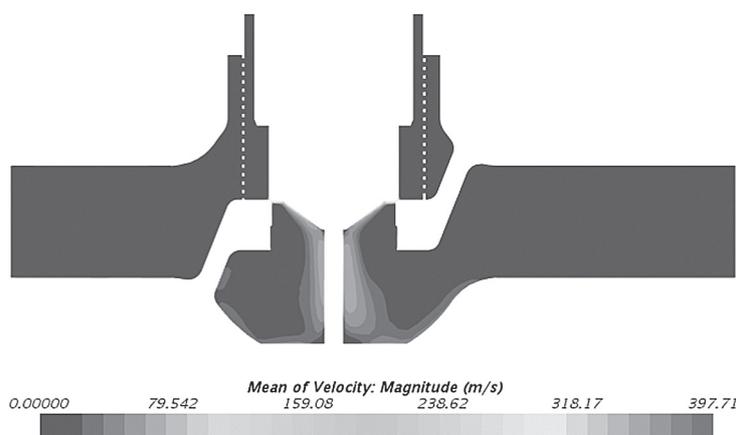


図 12 弁に関する計算結果の一例



図 13 潤滑油（加熱前：左，加熱後：右）

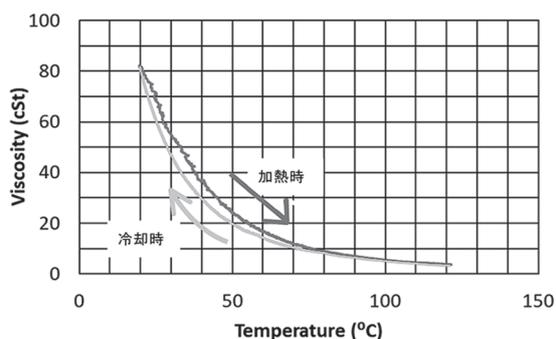


図 14 潤滑油の温度に対する粘度変化

一回り小さい Z-1 と呼ばれるタイプでの実験を行った。その様子と結果を図 15, 図 16 に示す。

それに続いて、実際にアメリカのプラントで使用された実機と同じスケールである GS-2 と呼ばれるタイプのタービンに対する実験を行った。実験の様子と結果を図 17, 図 18 に示す。

### (5) SAMPSON による解析

上記の実験結果を考慮して、例えば実際の RCIC タービンの入口に本来設計条件の蒸気だけではなく水が来た場合に、例えばタービンの効率が下がるものとして、その効率を上記タービン実験の結果から推測し、当研究所の開発している SA コード SAMPSON に組み込んだ。また、BWR プラントの最下段に位置するトラス室には、大量の水を保持し、高圧蒸気を凝縮させて減圧する働きと、場合によってはその水を炉心冷却にも用いるサプレッションプールが配置されているが、福島事故の際には津波によってそのトラス室にも海

水が浸入している。そのトラス室に浸入した海水は、サプレッションプール内の水を冷やし、予想外に炉心冷却に若干の寄与をしたと考えられているが、そういった効果も考慮して、SAMPSON による再現計算を行った。その結果の一例を図 19 に示す。

こういった改良を含めた現在の SAMPSON コードは、実測値のトレンドにより近い計算値を得ることが可能になっている。

## 9. おわりに

原子力関係施設の安全性に関する研究として、RCIC の持つ潜在能力を明らかにして、現有の原子炉に関してコストをかけずに安全性裕度を増し、それをもって原子力安全に寄与するための研究を行っている。この研究は日米共同研究として行っており、既に行った基礎実験はアメリカのテキサス A&M 大学で行った。また、シミュレーション計算に関し

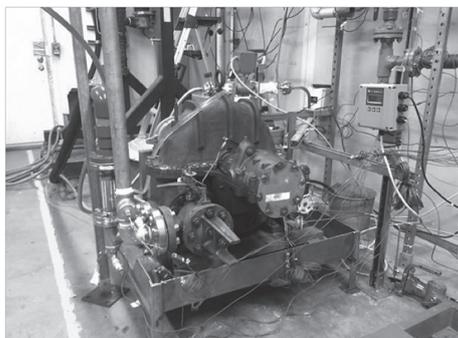


図 15 Z-1 タービン実験の様子

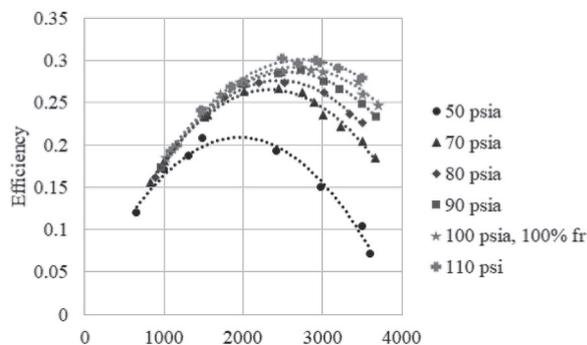


図 16 タービン入口圧力とタービン効率 (Z-1, 空気単相)

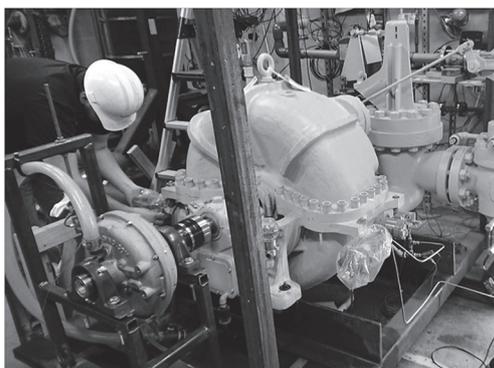


図 17 GS-2 タービン実験の様子

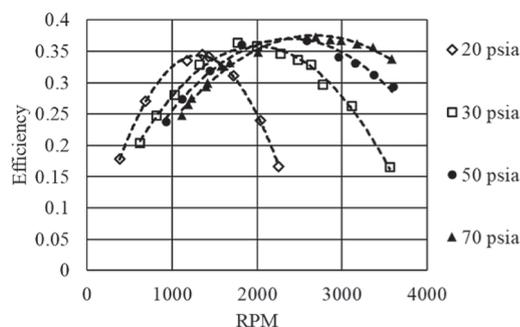


図 18 タービン入口圧力とタービン効率 (GS-2, 空気単相)

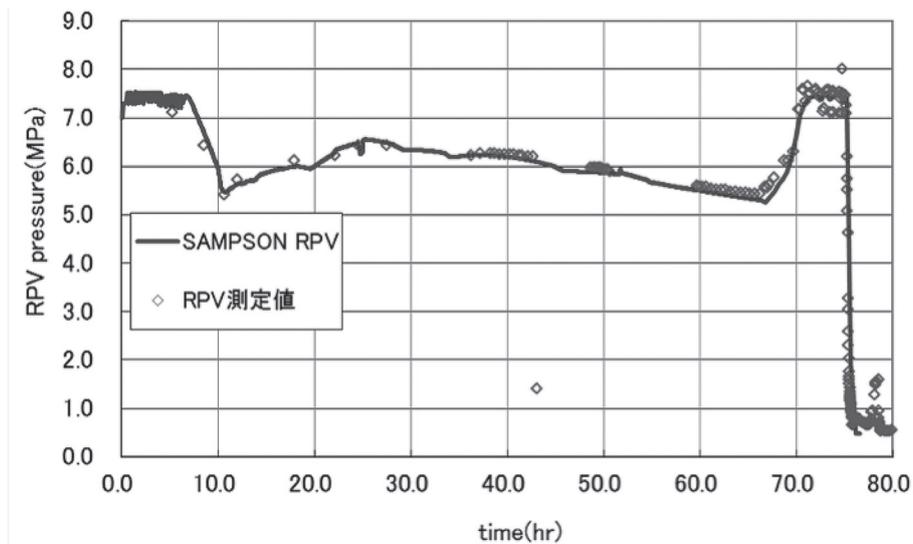


図 19 SAMPSON による福島第一原発 2 号機 (1F2) の事故における再現計算結果

ては、アメリカ側でも行っているが、当研究所の安全解析グループの方でも行った。これにより現在は RCIC に用いられているタービンの基本的な性能が明らかになっている。また、その一部結果を当研究所開発の SA コード SAMPSON に取り込んだ計算も行い、より改善された福島第一原子力発電所事故の再現結果を得ることができた。

今後もこのプロジェクトは進められ、主に実機大のタービンでの蒸気での駆動を目的とした実験が行われ、さらにタービンの特性を理解するために重要なデータが取得されていくはずである。このプロジェクトが成功裏に終わり、日本の原子力安全に寄与して、個人的には国産の SA コードの一翼という大事な役割を担っている SAMPSON の精度向上に役立つことを期待してやまない。

#### [謝辞]

本稿は、経済産業省公募の原子力の安全性向上に資する共通基盤整備のための技術開発事業「過酷事故条件下における原子炉隔離時冷却系の挙動に関する研究」において、当研究所が行った実証試験の評価・検証の一部について取りまとめたものであります。

#### 参考文献

- (1) K. Ross and J. Cardoni, "RCIC Governing Equation Scoping Studies for Severe Accidents," Proc. NURETH-16 (2015), pp. 7386-7400
- (2) W. J. A. London, Trans ASME, 39 (1918), pp. 565-594
- (3) LWRS News Letter, Issue 27, Nov. 2018, pp.1-3

## 平成 30 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 30 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、石炭ガス化複合発電技術、CO<sub>2</sub>の有効利用技術、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、当研究所のエネルギーモデルによる分析やエネルギー技術の現状と課題の整理等を行い、2050 年に向けたエネルギー技術展望を策定した。

さらに、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、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、原子力技術開発動向の調査・分析、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、当研究所の「中長期ビジョン～2050 年に向けたエネルギー技術展望～」の策定、最新の技術情報及び評価を提供するエネルギー

技術情報プラットフォームの内容の充実、エネルギーに関する公衆の意識調査、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・省エネルギー・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集光型太陽熱発電（CSP）等に関する調査研究や熱を活用した次世代型蓄エネルギー技術の検討、省エネルギー分野では高効率空調システムの開発等を実施した。

#### ③ 水素エネルギー関連

CO<sub>2</sub>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、石炭ガス化複合発電（IGCC）に関する調査やCO<sub>2</sub>有効利用（CCU）技術に関する評価、先進火力発電等技術の導入に関する検討等を行うとともに、積極的に炭素を活用するCCU技術に関する研究会を立ち上げ、検討を開始した。

#### 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、過酷事故（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、諸外国の原子力技術開発動向の調査・分析、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、国内廃止措置の最適化に向けた海外諸国の実態調査、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。

#### ⑥ 国際標準関連

ISO（国際標準化機構）の国際規格に関し、エネルギーマネジメント・省エネルギー分野や、CCS分野における国際規格の策定に係る活動を進めた。

## 研究所のうごき

(平成31年4月2日～令和元年6月30日)

### 国等からの受託事業に係る労務費の不適切計上事案について

皆様には常日頃よりご支援、ご協力賜りありがとうございます。

当研究所は平成30年度の国等からの受託事業におきまして、労務費の不適切な対応があり、過去の受託事業の精査を実施するとともに、本事案に関する原因の究明と再発防止策の検討を客観性・独立性を有する第三者の立場から行うため、「受託事業に係る労務費の不適切計上事案に関する原因究明・再発防止策検討委員会」を設置いたしました。(5月23日付け及び6月20日付けニュースリリースとして当研究所ホームページに掲載。)

皆様には、本事案によりご心配とご迷惑をおかけしておりますこと、心よりお詫び申し上げます。

当研究所としましては、上記委員会の報告も踏まえ、今後の取組みを策定して関係機関等へご報告し、通常の業務状態に回復すべく取り組んでいく所存ですので、皆様のご理解を賜りますようお願い申し上げます。

#### ◇ 第18回理事会 (電磁的記録による決議)

決議があったものとみなされた日: 4月11日(木)

議 題:

- 第一号議案 第11回評議員会(臨時評議員会)の招集について

#### ◇ 第11回評議員会(電磁的記録による決議)

決議があったものとみなされた日: 4月17日(水)

議 題:

- 第一号議案 評議員の一部改選について  
第二号議案 常勤役員候補者選考委員会委員の一部改選について

#### ◇ 第19回理事会

日 時: 6月5日(水) 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30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  
報告事項 常勤役員候補者選考委員会の結果について

業務執行の状況について

経済産業省等からの受託事業に係る労務費の精査の実施について

その他

#### ◇ 第12回評議員会

日 時: 6月20日(木) 11:00～12:30

場 所: 日本工業倶楽部(5階) 第6会議室

議 題:

第一号議案 平成30年度事業報告(報告事項)および決算について

第二号議案 公益目的支出計画実施報告書(報告事項)について

第三号議案 役員を選任について

報告事項 経済産業省等からの受託事業に係る労務費の精査の実施について

その他

#### ◇ 第20回理事会

日 時: 6月20日(木) 14:00～14:30

場 所: 日本工業倶楽部(5階) 第6会議室

議 題:

第一号議案 代表理事および業務執行理事の選定について

第二号議案 役員報酬額について

第三号議案 顧問の委嘱について

第四号議案 事務局長の委嘱について

報告事項 「受託事業に係る労務費の不適切計上事案に関する原因究明・再発防止策検討委員会」の設置について

#### ◇ 月例研究会

##### 第388回月例研究会

日 時: 4月12日(金) 14:00～15:00

場 所: 航空会館5階 501・502会議室

テーマ：

1. 2019年度 供給計画の取りまとめについて  
(電力広域的運営推進機関 理事 寺島 一希 氏)  
※ 後半に予定されていた講演は、岩間 剛一・  
和光大学教授のご都合によりキャンセルと  
なりました。

#### 第 389 回月例研究会

日 時：5月10日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館5階 501・502 会議室

テーマ：

1. 大崎クールジェン IGCC プロジェクト 第  
1段階(酸素吹 IGCC)の成果  
(大崎クールジェン(株) 技術部 技術グルー  
プ課長 神宮 伸一 氏)
2. 石炭等の炭素資源の利活用技術について  
(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 主管研究員 鴻野 健二)

#### 第 390 回月例研究会

日 時：6月14日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館5階 501・502 会議室

テーマ：

1. 圧縮空気エネルギー貯蔵技術の開発  
(一財)エネルギー総合工学研究所 理事  
蓮池 宏)
2. 地下を利用した圧縮空気貯蔵技術  
(一財)電力中央研究所 地球工学研究所  
地圏科学領域 物理探査・地下水グループ  
上席研究員 末永 弘 氏)
3. 海外における圧縮エネルギー貯蔵(CAES)  
の市場動向  
(株)神戸製鋼所 機械事業部門 開発センター  
開発企画室 次長 佐藤 隆 氏)

#### ◇ 外部発表

[講演]

発表者：橋崎 克雄

テーマ：炭素循環エネルギーシステムについて  
(CO<sub>2</sub>排出量の大幅削減に向けて)

発表先：日本学術振興会 石炭・炭素資源利用技術  
第148委員会 第169回研究会

日 時：5月9日

[寄稿]

寄稿者：橋崎 克雄

テーマ：炭素循環エネルギーシステムについて

寄稿先：隔日刊『電力時事通信』  
第7794号(5月8日), 第7795号(5月10日)

寄稿者：飯田 重樹

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

寄稿先：日本エネルギー学会誌『えねるみくす』  
第98巻3号(5月)

#### ◇ 人事異動

○4月30日付

(退職)

堀田 善治 プロジェクト試験研究部 参事

○6月30日付

(出向解除)

石原 正治 プロジェクト試験研究部 主任研究員

## 編集後記

本季报では、概ね年に1度行っている、特定テーマの座談会の模様を掲載している。今回のテーマは「気候変動対策における環境管理規格～ISO14000ファミリーの役割と開発の課題～」であり、本分野でご活躍中の専門家の方々にご参加いただいた大いにご議論いただいた。

当研究所では、エネルギー・環境の様々な分野における調査・研究・評価事業とともに、ISO（国際標準化機構）やIEC（国際電気標準会議）における国際規格の策定活動にも精力的に取り組んでおり、例

えば、エネルギーマネジメントや省エネルギー、CCS、太陽熱等の国際標準に係る国内審議団体やWGのとりまとめ等を行ってきているところである。

新たな技術や製品、サービス等の国際市場における円滑な取引、普及を図るためには、それらの技術等に対する理解を国際的に共有し、国際標準を作成することが重要であり、当研究所としては、今後ともこれらの活動に取り組んでいく所存である。

編集責任者 重政弥寿志