

特集 核燃料サイクルを考える

座談会

3 国家的なリーダーシップの不在が根底に —「もんじゅ」の失敗を総括する

我が国の核燃料サイクルの中核と位置付けられていた「もんじゅ」の廃炉はなぜ決まったのか。私たちはそこから、何を学ぶべきか。

井川陽次郎, 江沼康弘
澤崎浩昌, 林 司, 柳澤 務, 向 和夫, 澤田哲生



解説

30 六ヶ所再処理工場の現状と課題

六ヶ所再処理工場は新規規制基準に基づいた安全対策の強化に取り組んでいる。軽水炉リサイクルの能力の限界を踏まえれば、高速増殖炉とその核燃料サイクルの準備も重要である。

田中治邦

35 日本における新型炉開発計画 —持続可能社会に適合する新型炉開発

我が国の動力炉開発方針とその経緯、原子力エネルギーに対するニーズを踏まえ、将来に向けての新型炉開発計画に求められる要素を整理した。

山口 彰

40 高速炉サイクルの経済性評価 —炉の建設コストと燃料サイクルコスト

高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT) フェーズIにおけるナトリウム冷却高速炉及び燃料サイクル施設の設計をベースに、追加的な安全対策費や社会的費用を考慮し、高速炉サイクルの発電コストを試算した結果を紹介する。

向井田恭子, 加藤篤志, 紙谷正仁, 石井克典

インタビュー

14 改めて問う—「もんじゅ」は活用すべき! —有馬朗人氏に聞く

澤田哲生

対談

17 高速炉は「資源を産みつつゴミ焼却も 行う究極の発電炉」、将来必ず必要に なる 資源と環境—今世紀末まで見通す視点を

河田東海夫, 澤田哲生

特別寄稿

22 高速炉開発の現状と展望

第4世代原子炉 (SFR) の実用化に向けた世界の取り組み状況。

佐賀山 豊

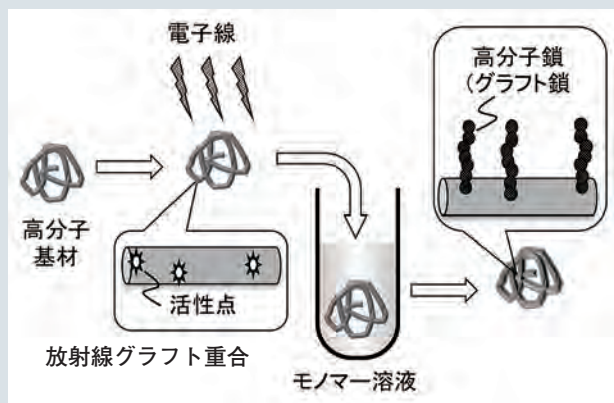
24 東海再処理工場の軌跡

山村 修

26 海水からのウラン採取技術の現状と展望

海水には膨大なウラン資源が溶け込んでいる。それを採取するためには、効率よくウランを吸着できる捕集材の開発が鍵となる。

玉田正男



28 サンクコストの呪縛

青野由利

巻頭言

1 原子力の未来のために原子力学会が 技術者集団としての情報発信を

櫻井よしこ

時論

48 私達は廃炉にどう向き合っていくべきか

遠藤 瞭

解説シリーズ

59 WEO2017 と内外エネルギー情勢への 示唆（第6回・最終回） 世界のエネルギー需給情勢と原子力

WEO2017 では経済性のあるエネルギー資源の枯渇化や気候変動問題を踏まえれば、再エネ導入拡大の中でも、原子力発電は重要なエネルギー源になると示唆している。

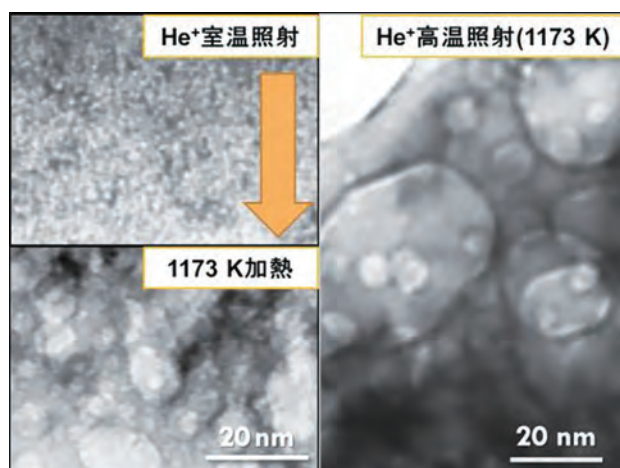
小宮山涼一

連載講座 核融合トリチウム研究最前線 —原型炉実現に向けて（第7回）

64 トリチウム蓄積

核融合炉の継続的な運転のためにはブランケットシステムでのトリチウム増殖と閉じ込め、回収等によるロスを低減させることが必要不可欠である。

大矢恭久, 周啓来, 小林 真



室温および1173 KでHe⁺照射した
タングステン表面のTEM写真

理事会だより

76 専門知の価値について

山口 彰

50 NEWS

- 復興庁が年次報告
- エネ研、2050年のエネ需給を予測
- 海外ニュース

56 Column

- | | |
|--------------------|------|
| 「日本・ベラルーシ友好訪問団」 | 井内千穂 |
| 「感謝をこめて・・・」 | 北岡哲子 |
| 「スロバキアの原発の歴史」 | 妹尾優希 |
| 「立地地域の方たちへの感謝を込めて」 | 竹内純子 |
| 「六回目を迎えて」 | 渡辺真由 |
| 「何を食べたいか」と小銭の管理」 | 渡辺 凜 |

FOCUS 国内外の原子力教育事情（1）

70 東京工業大学での原子力教育の取組み

小原 徹

談話室

73 これからの原子力・放射線教育

教育・研究に使える原子炉が今は茨城県と大阪府にしかない。広く原子力・放射線教育に使える環境が整うことを期待する。

鶴田隆雄

科学コミュニケーション 第7回

75 学生たちの提案

岸田一隆

- | | |
|----|---|
| 63 | From Editors |
| 77 | 会報 原子力関係会議案内、人事公募、新入会一
覧、誤記訂正、編集委員会からのお知らせ 特集
号論文募集、英文論文誌（Vol.56, No.1）目次、
主要会務、編集後記、編集関係者一覧 |

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「目安箱」
(<https://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>)にお寄せくだ
さい。

学会誌ホームページはこちら
<http://www.aesj.or.jp/atomos/>

原子力の未来のために 原子力学会が科学技術者集団としての情報発信を

巻頭言



国家基本問題研究所理事長・ジャーナリスト

櫻井 よしこ (さくらい・よしこ)

ハワイ州立大学歴史学部卒業後、「クリスチャン・サイエンス・モニター」紙東京支局、日本テレビニュースキャスター等を経て、2007年より現職。

2018年1月の豪雪時、首都圏では多くの関係者が肝を冷やした。大停電の一手手前までいったのである。日本国の中枢、首都圏の大停電となれば、非常事態だ。数時間で病院の非常用電源がとまり、生命維持装置、手術室、保育器も機能を停止し、命にかかわる事故が発生しかねない。国防機能も失われ、国家存立の危機に襲われかねない。

電力会社の必死の努力で辛うじて大停電は回避されたが日本のエネルギー供給体勢の脆弱さが浮き彫りになった。

同年9月6日、今度は北海道で本当に大停電が起きた。胆振東部地震で165万kWの苫東厚真火力発電所が運転停止し、北海道全域が大停電になった。太陽光・風力の再生エネルギーが、地震に伴う周波数の低下で瞬時に送電網から離脱したからだ。

「原発ゼロでも自然エネルギーだけで十分にやっていける」という小泉元首相らの主張が壮大な間違いであることが明らかになった瞬間だった。氏の主張は、わが国の太陽光発電は平成26年度末で2,688万kW、1基100万kWの原発に置きかえれば約27基分との計算に基づくと思われるが、同じ論法で計算すれば平成29年度末での太陽光発電は原発49基分だ。つまり太陽光発電は、東日本大震災以前の原発と互角の電源になった。

しかし、太陽が強く輝くのは1日の内約6時間、24時間の25%だ。さらに雨の日、曇りの日、雨の日、台風の日もあり、年間では25%の約半分、13%ほどの時間しか発電できない。太陽光発電の稼働率(設備利用率)は約13%前後にすぎず、残りは火力発電に頼るしかない。50基の原発はわが国の電力の30%を供給していたが、太陽光は3%に過ぎない。

自然エネルギーだけで十分という小泉氏の主張に従ってエネルギー政策を構築する場合、多くの人命が失われる大停電も発生し得る。稼働率13%の太陽光発電の場合、残り90%弱をどう補うのかが切実な問題なのだ。

東日本大震災(3・11)のあと、わが国は石炭・ガス・石油などの化石燃料への依存を急速に高め、エネルギー全体に占める比率は世界で最も高い84%だ。二酸化炭素削減など全く置き去りである。

こうした事情を小泉氏は理解していない。影響力の大きい元首相の間違った言説は、控えめに言っても無責任の極みである。

東京電力は福島第2原発(2F)の全4基廃炉の検討に入ると表明した。内堀雅雄知事は「全基廃炉は県民の強い思い」と強調した。すでに廃炉作業に入った福島第1原発(1F)の悲劇を考えれば多くの県民も同様に考

えるのは自然であろう。だがここで、2F について冷静に考えてみよう。

4 基の原子炉を擁する 2F は千年に一度の大地震と大津波を生き残った立派な原発だ。津波で全ての非常炉心冷却系が使用不能になった中、所長の増田尚宏氏、技術責任者の川村慎一氏以下所員、下請け会社の職員 400 人が力を合わせた。余震の続く中、闇の中で 200 人が肩に食い込む重いケーブルを 9km にわたって敷設した。水没した海水ポンプモーターの代替機を東芝の三重工場から自衛隊機で運び、柏崎原発からも陸送し、交換した。2F はこうして生き残った。その見事な事故収束対応は、米国の原発事故対応行動に模範的対応として明記され、世界で絶賛された。にもかかわらず 2F は廃炉になる。

3・11 後、報道が 1F の悲劇に集中したのは当然だが、何年過ぎても日本のメディアは 2F の成功を報じない。想像をはるかに超える大災害の中で、原発を制御した成功事例を日本人は大切にしない。成功に学ばず、失敗に屈服するだけでは前進はない。

この間、内外エネルギー事情にはいくつか大きな出来事があった。

猛暑の韓国では 2011 年 9 月 15 日に大規模停電が発生した。文在寅政権は深刻な電力不足で稼働停止中の原子力発電所再稼働させていたが、建設停止の新規原発の工事もこのほど再開した。また、2017 年 8 月 15 日、台湾でも大規模停電が発生した。その結果、「2025 年までに原発の運転を全て停止する」と定めた電気事業法の条文削除を問う住民投票が 2018 年 11 月 24 日にあり、賛成多数で削除が決まった。フランスのマクロン大統領は 2018 年 11 月 27 日、国内の発電に占める原発依存度を「2025 年までに 50% に削減する」とした政府目標は実現不可能だとして、10 年先送りにした。すでに世界では、脱原発・原発削減に急ブレーキがかかっている。大事なことはイデオロギーや政局ではない。世界の情勢を踏まえ、科学の視点で原子力学会が情報発信することだ。国家の基盤をなすエネルギー政策を科学の視点で構築できるか否か、その岐路に、原子力学会は立っている。ご健闘を祈念したい。

本稿は産経新聞 2018 年 7 月 2 日に掲載されたコラム【櫻井よしこ 美しき勁き国へ】を一部転用し加筆したものである。

座談会

国家的なリーダーシップの不在が根底に ー「もんじゅ」の失敗を総括する



読売新聞	井川陽次郎
日本原子力研究開発機構	江沼康弘
日本原子力研究開発機構	澤崎浩昌
日本原子力研究開発機構	林 司
元日本原子力研究開発機構	柳澤 務
NPO ニュークリア・サロン	向 和夫
東京工業大学	澤田哲生(司会)

我が国の核燃料サイクルの中核と位置付けられていた「もんじゅ」。その廃炉はなぜ決まったのか。私たちはそこから、何を学ぶべきか。さらにそれは、今後の核燃料サイクル政策に、どのような影響をもたらし、私たちはどうふるまうべきなのか。座談会では「もんじゅ」の設計や建設、運転、そして廃炉に関わってきた当事者を交え、これらの問題を議論した。その結果、「もんじゅ」のような国家プロジェクトのあり方や進め方については強力なリーダーシップが必要で、その不在こそが失敗の大きな一因であり、このことは今も解決されることなく、温存されたままではないかとの指摘がなされた。

Keyword: nuclear fuel cycle, Monju, decommissioning, national project, valley of death, verification of failure

軽水炉のトラブルは原潜開発の過程で克服された

澤田 今日座談会は、「もんじゅ」の廃炉が決まった今、計画開始からこれまで半世紀以上にわたる「もんじゅ」の経験を今後どう活かしていくのか。そしてさらには核燃料サイクル全体についていま一度共通認識を確認して、一定の総括をしようということで企画したも

のです。

さて、最近では高速増殖炉(FBR)のうちの増殖(Breeder)を意味するBがなくなってしまい高速炉(FR)と呼ぶ慣わしになっています。もともとは資源小国である日本が、プルトニウムを増殖する、準国産のエネルギーを獲得するというのが我が国の重要な目標のひとつだったと思います。

そもそもFBRの導入時期は計画通りにいけばいつごろ

だったのですか。また、いつからBが消えたのですか。

柳澤 アメリカが初めて高速炉に取り組んだのが1946年で、その10年後の1956年に、日本で最初の原子力利用長期計画ができ、増殖型動力炉を国産化することが、目標に定められました。原子力を進めるにあたって当時の最大の問題は、濃縮ウランが入手できるかどうかということでした。このため当時の長計では、燃料のことにかなり言及しています。この燃料の問題をクリアするために、プルトニウムを利用した増殖炉が焦点化されました。

澤田 1955年に日米原子力研究協定が仮調印されました。その翌年に設置された原子力委員会の委員だった湯川博士が「こんな協定ではウラン燃料を自由に手に入れ自由に使うことができないので、原子炉の国産化などできない」という趣旨の危機感をあらわしていたころの話ですね。ちょうどその頃に、潜水艦用の軽水炉を陸にあげた最初の発電用の加圧水型軽水炉である Shipping Port 原子炉が建造されました(1957年12月2日初臨界)。

柳澤 そうです。また、その後に世界的に軽水炉がうまくいったのは、それ以前に潜水艦用の軽水炉を開発する過程で、いろいろなトラブルを経験してその教訓が反映されてきたためです。けれどもそれは軍事技術だから、冷戦中の厳しい情報管理の下でほとんど外には知られることはなかった。そんな経験を経て、ほとんど完成した軽水炉がその後、世界市場を席巻することになります。「もんじゅ」のような高速増殖原型炉の建設や運転のプロセスで直面するトラブルは、軽水炉の場合だと軍事開発の中で解決されてきたということになります。だから多くの人は、そんなトラブルの多くを克服した後の軽水炉を見て、原子力というものはそれなりにうまくいくものだと思合点してしまっただけで、高速炉も同じようにうまくいくのではないかと海外でも思ってしまった。

澤田 そこで実用化の当初の目標ですが、1997年(平成9年)の原子力委員会の高速増殖炉懇談会では、原子力産業会議の村田浩氏が実用化の目処として2030年頃とする資料を示していますね。

柳澤 そうです。

澤田 この時点では、高速“増殖”炉とまだ銘打っていますが、FBRがFRになったのはなぜですか。

柳澤 当初は、燃料としてのウランを確保することが難しいという問題があった。けれどもその後、濃縮ウランが提供されるようになって、それが緩和された。高速増殖炉から高速炉へとトーンダウンしたのはそれが一因です。一方で電力会社の関心はその後、当然ですが軽水炉の安全対策が主流となり、長期的な燃料確保は薄れた。

澤田 ともあれ、軽水炉利用のあとの核燃料サイクルの中核として、「もんじゅ」が位置づけられるはずでした。高速炉を使うと、プルトニウムが複数回利用できる

マルチサイクルが可能になります。マルチサイクルでは燃料コストが軽水炉以下になる可能性がある。高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT)では軽水炉の燃料コストを1円/kWhとすれば、高速増殖炉サイクルでは0.7円/kWh程度の可能性があるとする試算も得られていると聞きます。それに加えて、高速炉は環境負荷が軽水炉に比べて低下する。これらの点が今はあまり共有されなくなりました。軽水炉だとプルトニウムの同位体組成比がたちまち劣化するので、サイクルは1回程度しか回せない。それがいわゆるプルサーマルですね。ところが、高速炉だと高速中性子のなせる技で、理論上は何回サイクルをまわしてもプルトニウムが劣化しないように出来る。したがって、何回でも回せる。その結果、燃料コストも安上がりになる。そういう仕組みですね。

柳澤 そうです。普通に炉内の核物質を核分裂させると、違う核種に変わる。だから、原子力の本質は核種転換であり、化学分離が必須となり、再処理と一体のものなのです。私は市民の方々と話をするときには、原子力発電は核分裂反応で湯を沸かして蒸気をつくってタービンを回すというより、地球からウランを借りてきて、それをとことん使って、その使い終わったものを地球に戻す一連のプロセスだと説明しています。いろいろな問題のかかわりが見えてくるという感想ももらっています。

澤田 しかし、使い終わった廃棄物を、なかなか元、つまり地球に戻せない。科学技術の問題だけではすまないところがあります。

柳澤 そうですね。ただし、高速炉だとその地球に戻す物の量を軽減できる。それは大きなメリットです。だから、軽水炉利用とは、未来に向けて長く原子炉を使っていくという大きな流れの中の途中の一つのプロセスと位置付けられます。

澤田 廃棄物はそもそもその元になったウランを地球から掘り起こして使用して出てきたものです。だから元々あった地球に廃棄物を戻す上で、高速炉利用が意味を持ってくるわけですね。そのことを、原子力界は世の中つまり社会に、きちんと伝えていない。

澤崎 日本は今、余剰プルトニウムを相当もっていると言われています。核兵器を保有するつもりがないことをアピールするためには、プルトニウムを消費していかなければならない。その意味では増殖のBの部分は、社会的な要求がない。そのために炉心の形状を少し変えて、FRでやっていこうということだと思います。

林 私はFBRに憧れて、この世界に入ってきました。これを使えば、日本はエネルギー供給国になれるのではないかと。私は原子力機構が、そんな夢をかなえてくれることを今でも期待しています。「もんじゅ」のような炉を輸出できるかもしれないし、燃料を海外に輸出できるのではないかと期待もありました。

澤田 その夢や期待は今後もあり続けるはずですね。

少なくとも高速炉の開発計画は現存していますから。

江沼 私は高速増殖炉や核燃料サイクルを導入することで、化石燃料の数十年規模をはるかに上回る千年単位のエネルギー源を確保できていると思っています。国家百年の計につながるようなエネルギー源として、核燃料サイクルの必要性は変わり得ないものだと感じています。

井川 もともと、FBRのBを強調し過ぎたのが、失敗の始まりだと思います。社内でも「もんじゅ」の廃炉が話題になった時に、「高速炉なのか？高速増殖炉なのか？」という話が繰り返されました。社内で説明する時には、軽水炉がプロペラ機だとすると高速炉はジェット機のようなものだと。原理と利用目的が混在した名前になってしまっていて、本質的なことが理解されていなかった。その上、Bの部分を支えていたはずの再処理の実験施設は予算を削られた。Bの実現は困難になっているにもかかわらず、その説明がきちんと整理されないままに今日に至っています。高速炉であれ、高速増殖炉であれ、それは燃料の配置の違いだけなので、本質的な問題ではない。

向 1991年に京都で開かれた高速炉の会議は「FR91」という名称で、Bはなかった。FBRは技術的にはFRに含まれ、世界ではかなり早くからFRが用いられてきたが、日本では、法律等に用いられている「高速増殖炉」が使用されてきました。ただ、社会に対しては、日本は資源がほとんどないから自前の資源を持つ、そのために増殖という機能を有する高速増殖炉の開発が必要だ、と説明してきたと思います。なお高速炉の特質は、資源論だけではなく、環境論もあると、理解しています。

澤田 高速炉を使えばプルトニウムはサイクルの中に閉じ込められるし、高レベル放射性廃棄物の量が軽減され環境負荷が減らせるということですね。

向 そうです。そこは軽水炉とは違って、高速炉の大きなメリットです。次世代である第4世代の原子炉にはサステナビリティが求められます。ここでいうサステナビリティとは、環境負荷を低減することと、資源の有効利用になります。資源としての核燃料の有効利用とは、そこにある燃料をできるだけ燃やしきる（燃焼度を上げる）ことと、燃料の増殖つまりプルトニウムを生産することからなりたちます。

柳澤 フランスでは長寿命核種を減らすために、廃棄物バタイユ法の中で、高速炉での研究開発を計画的に進めることを明確にしました。

澤田 高速炉はプルトニウムの消滅炉にもなりますね。

柳澤 高速炉という名称については、私はこの炉は化学処理と一体のものだから、リサイクル炉という名称を提案しました。そのことは1994年の長計にも言及され、目的ではなく機能を重視したりサイクル試験炉を検討することを始めようとして書いてあります。

井川 専門家集団は技術という観点から物を言えばいいのに、それに夢のようなことや独自の意味をつけ加え

てしまう。そうするとかえって足を引っ張られるということになる。しかもメディアは、狙い通りには、取り上げてくれない。

澤田 なるほど。高速増殖炉はかつて“夢の原子炉”というのが専門家集団のウリでしたね。夢は潰える。

「もんじゅ」は国プロとしての失敗

澤田 さて、次は「もんじゅ」は失敗したかどうかという問いかけです。もちろん、失敗していないという意見もあると思いますが、世間の目は失敗だと見ているのではないのでしょうか。

新型転換炉(ATR)の原型炉「ふげん」を廃止することになったのは1995年で、その際にももとは大間に「ふげん」の次のATR実証炉をつくることになっていたはずでしたが、電力業界がコストの問題を主張し、大間は100% MOX燃料を挿荷する“フルMOX”の沸騰水型軽水炉になりました。

「もんじゅ」はナトリウム事故と燃料中継機の落下があり、結局は一度も100%出力運転に至ることはなく3.11が起こってしまった。その結果原子力規制体制が変わり、原子力規制委員会が「もんじゅ」に対して勧告を出して、それを受けた形で通称、有馬委員会も開催されましたが、最終的には政府の関係閣僚を軸にした委員会が廃止を決めた。昨今はさらに、原子力委員会も核燃料サイクルに否定的になっています。さて向さんは「もんじゅ」は決して失敗ではなかったとおっしゃっていると認識していますが。

向 「もんじゅ」ではナトリウム漏えい事故があり、その後いろいろな事情で再開まで14年半かかり、その後片づけをしているときに炉内中継装置が落下するというトラブルが発生し、その始末に約2年かかりました。また、3.11福島事故を受けての緊急、応急対応も実施し、再開への準備を進めていたが、政策的判断により最終的にはこうなりました。ただ、これらの事故・トラブルは、高速炉の本質的な意味での技術的な失敗ではありません。とはいえ、国家プロジェクトとして推進しえなかったという点では、失敗だと言えます。

澤田 いろんな事情とおっしゃってるが、地元がストップをかけたこと、名古屋高裁金沢支部の“もんじゅ判決”でもたついたことが大きかったのでは。とりわけ地元首長がなかなか肯首しなかったのはおおきかったのではないかと、私は思っています。

さて、国プロとしての失敗とはどういうことですか。

向 「もんじゅ」を原型炉としてきちんと動かして次の実証につないでいくという役目を果たさないままに、プロジェクトが終了させられたという意味では、国プロとしては失敗したと思っています。高速炉を実用化する上で「もんじゅ」でやるべきことはまだたくさんあったし、

きちんと動かせばできたと思います。

澤田 2年前に「もんじゅ」の若手職員数人に出てきていただいて本誌で座談会ⁱをやったときに、「もんじゅ」はびかびかです、もう納車はしている状態なので、国が火を入れろと言ったらいつでも入れられますよという主旨の話を聞きました。現場は万全の体制になっていたようですけれども、そういうことですね。

向 もちろん再開するとしたら点検等が必要になるけれども、プラントをきちんと動かせるというのは、間違いありませんでした。

井川 国プロとしての失敗は、このプロジェクトの本質をきちんと納税者である国民に説明できなかったことが、第一点。それから国家プロジェクトであるからには、メーカーの技術も高度化し、定着させていかなければならない。けれども、温度計一つとってみても、普通の技術者なら設計しないような形状の温度計が納品された。さらに燃料中継装置を回収する機器には、不具合を起こしそうな取っ手が付いていた。プロジェクトとしてメーカーに、しっかりしたものを納入させるという基本的なところが、確立できなかったということも問題だと思います。もちろん、基本的な設計や原理は、すでに常陽でも実証済みだったと思いますが、国家プロジェクトなのに電力会社が途中から抜けていくなど、オールジャパンでやるべきところをそうしえなかった。失敗の観点からすると、国プロとしては組織論としてもいろいろな問題があったと思います。

向 国家プロジェクトとして大規模な開発を円滑に遂行するためには、単年度予算等の制度的課題の解決を含め、相当な強い権限と責任を持ったプロジェクトリーダーが必要でした。しかし、基本的には動燃は研究開発を担う技術者集団としての役割を受け持っており、政治に翻弄されている「もんじゅ」の状況を打破する強いリーダーは存在しなかった、と言わざるを得ないと思います。また、こういうプロジェクトをやる時には、政治も必要だし、国民やメディアに対してしっかり理解させるという努力も必要となります。これは国の仕事だったと思います。

澤田 国とは霞ヶ関。旧科技庁、今の文科省がだめだったということですか。

向 漏えい事故が起きたのは動燃、メーカーに原因があると思います。けれども、その後の運転再開までになぜ、あれほどの時間がかかったのかというのは、一つには地方と中央の政治の問題がありました。そこでは国の政治力、強いリーダーシップが働かなくて、地元で納得してもらうのに十何年かかってしまった。だから、そのときに本当に再開に向けて事態を進めなければならない

という危機感に基づく強い意志が国なりにあれば、地方の理解がもっと早く得られたのではないかと思います。

澤田 動燃としてなぜもっと積極的に動きかけられなかったのですか。そこが変わらないと同じことは今後も繰り返すと思いますが。動燃は科技庁の傘下にあって勝手に動くことはそもそも許されなかったということでしょうか。

向 プロジェクトの実施責任と権限は動燃にあったわけですから、まず動燃の経営責任が問われると思いますし、地元のトップに強く働きかけるべきだったとは思いますが、しかし、予算権限は所管官庁が握っていますし、地元の要求は国政全般に亘っており、地元の交渉相手は、動燃ではなく国そのものでした。だからと言って、動燃は国任せではなく、国にも強く働きかけ、国と一体となって積極的に福井県等と話し合うべきだったと思いますね。地方と国の関係は非常に機微で難しいことは分かりますが、国家プロジェクトを円滑に進めるためには、その在り方を見直す必要があると思っています。

リーダーシップの不在が根底に

澤田 ところでご指摘のリーダーシップは本来、どこにあるべきなのでしょう。

柳澤 もんじゅとは、運転して事故、トラブルを経験し、原因究明や対策、さらに社会や世界への説明責任を通じて、技術、人材、規制が育っていく道場と考えています。それに対する構えが大事であり、けん引するリーダーは極めて重要です。昔の国鉄は総裁を置いて、権限と責任を与えていました。事故があれば総裁の首が飛ぶ。2年したら変わる大臣とは違います。昔の動燃事業団の理事長は、あかつき丸の時などは相当の覚悟を持っていたと思います。「もんじゅ」をやり始めた時には事業団にリーダーシップがあった。しかし、地元との関係や事故に対する監督官庁としての役割からだんだんと権限や責任が、動燃理事長から役所にうつり、そこに伺いを立てるような流れになっていきました。

澤田 初期のころには強いリーダーシップを持った動燃の理事長がガバナンスを発揮していたけれども、それがだんだん薄まり、リーダーシップをとる存在そのものが役所つまり科技庁に移っていった。動燃は骨抜きにされたということですね。オーナーシップの乏しい単なる専門家集団へと。それこそそこへ事故が追い打ちをかけたということですか。その頃には動燃理事長も科技庁の単なる下部組織のトップに過ぎなくなってしまったと。

向 今後は、かつてのような強いリーダーシップがないと、プロジェクトはできないと思います。

井川 例えばアメリカの宇宙開発ではスペースシャトル爆発事故後、政府がファンドを創設して、有人宇宙船や

ⁱ 座談会「どうする？もんじゅ」4——原型炉の保全や規制は経験を積むことで進化する 日本原子力学会誌, Vol.58, No.5 (2016) pp.301-311

ロケットの開発を民間に委ねるなど、技術開発の方式を転換しました。スーパーコンピューターも民間が開発の主体です。複数年度にまたがった支援もあります。さらに、誰が責任をとるのかというのが明確になっている。しかし、日本の場合は、そこが曖昧です。また、もし政治主導にしたとしても、ポピュリズム全盛ですから、何も決められない可能性がある。大きな事業は決めにくい時代です。原子力発電所の再稼働にしても、原子力規制委員会に責任を押しつけているような状態ですから、高速炉開発というのはますます難しくなっています。

澤田 ということは、日本にはそんな国プロを行う技術があるかもしれないけれども、それらをまとめて遂行していく力や資格、つまりリーダーシップやガバナンス力がないということになりますか。少なくとも「もんじゅ」やその後継開発においては。

井川 このままだとたぶん、日本はじり貧になっていくのではないかと。「もんじゅ」の件で学ぶべきことは、業界と主要メーカーを巻き込んだ大きな国家プロジェクトをどう進めるかということ。今回の件は、その体制から考え直す、良いきっかけになります。

林 私たち技術者は、技術的なところを一生懸命押さえてきましたし、社会にも発信し続けてきました。けれども、そのことが社会にはよく伝わってこなかった。技術的な話をすれば、安全だということが言えるし安心感も得られると思っていたのですが、それが安心感には結びつかなかった面があります。そのための取り組みを、我々のような現場の人間がやるべきだったのか、あるいは誰か、別の方がやるべきだったのか。

澤田 うーん。そこの答えは林さん自身に見出して欲しいのですが。

ここにおられる若手3人の方は、これからは国が定めた廃止措置に全力を尽くすということだと思います。それとは別に、何か具体的な将来は見えていますか。

一方でさきほどから、技術の問題とは別に、それらをまとめて遂行するリーダーシップや責任主体がないならば、自分たちには与えられたミッションの中でこちんまりと業務をこなしていくしかないという思いですか。

林 そうではありません。しかし、まずは現場の話があるので、我々は廃炉を円滑に終わらせる。可能であれば、私たちが公表している期間よりも早く終わらせたい。そうすれば社会からは、原子力機構の能力を評価してもらえるのではないかとと思っています。

澤田 廃炉プロセスのパフォーマンスを見せることによって、社会がもっていたネガティブイメージを払拭したいと。

林 そうすると次に、何かやろうよという話が出てくるかもしれないし、私たちもそれを正々堂々と言えるかもしれません。

澤田 しかし、「もんじゅ」の廃炉に世間やメディアが

そんなに関心持ちますかねえ。10年すればみんな忘れてしまうのでは。第一、「ふげん」がそうになっていますよね。「ふげん」なんぞは今や原子力関係者でも多くは忘れ去っているのではないのでしょうか。

澤崎 まずは廃止措置をきちんとやります。その後ですが、これまで議論されたように、実験炉の段階では政治のフェーズに入ってしまうと先に進めなくなる場合があります。であれば、政治とは関係のないもの、例えば小さい規模の原子炉をつくるのはどうかと思っています。これだと予算的な制約も少ないし、試験的な装置の開発・設置も容易で、経験を蓄積でき、政治的な制約も少ないと考えます。そういうフェーズで国民の皆さんに私たちの成果を、目に見える形で示していく。その成果が、世の中にこんなふう役に立つということを見せていくことが、大事だと思います。そうすると政治と言わずとも、国民の皆さんが高速炉開発の必要性を感じてもらえるのではないかとと思っています。

澤田 今まで“見せてこれなかった”のに、急にそんなに見せることができるようになるのですか。第一に規模が小さいから政治とは関係ないなんてことはありえない。研究開発予算はどうするのかという問題もあります。

江沼 「もんじゅ」が廃炉になった背景には政治的な問題が当然あったのですが、「もんじゅ」を実際に運用していく、保全を行っていく過程で、十分な改善のプロセスに入ることができなかった。その部分については、今後の「もんじゅ」でも相応の保全は続きますので、きちんと分析した上で、将来の次期炉やプロジェクトが立ち上がった際に、その反省や教訓を生かすために、知見を積み上げていきたいと思っています。

澤田 廃炉に向かう中で、将来につなげられる技術的知見を得ていくということですね。

江沼 設計を検証する時には、物を動かした結果を見ることが大切です。回転機器を動かした結果の物の当たり方が、設計した時の想定と合っているかどうか。解体をしたときにそれを確かめることができます。また、腐食が想定どおりの部分や範囲で起こっているかどうかなどの分析をするということが大事で、単に安く早く壊せばいいだけではなく、「もんじゅ」で得られる成果はとことん取り尽くすという視点を持って廃炉に向かっています。我々にはそうしたことを行う責任があると思っています。

向 炉心の稼働時間は少しだけでも、ナトリウムループとしては二十数年間を動かしています。だから、それを解体した時に得られる知見は重要です。

澤田 しかし、世間の人々は炉心とループって特段分けて考えていないですよ。

江沼 補助冷却設備のエアクーラーの出口弁も、数十年にわたって温度制御で常に動いています。そのバルブがどのぐらいのダメージを受けているかを調べることも

大事ですし、「もんじゅ」のポンプというのは主モーターを動かすことを想定して設計しているのですが、アイドルリングの状態が20年も続くというのは想定外で、設計想定を超えている部分もあるので、見るべきところはたくさんあります。

澤田 うーん、話が何かとても細かいような気がしますが。まあしかし、つぎもし何がしかの高速炉をつくる機会があったとして、信頼性データの蓄積に一役買うようなことがあればいいですね。

もんじゅの失敗を総括的に検証すべき

井川 さきほど、技術はうまくいったけれども、保全がうまくいかなかったという発言がありました。しかし、本当に技術はうまくいったのか。機械というのはもともと省メンテナンス、つまり手間をかけずに動くもののほうがいい。その意味では「もんじゅ」は、大失敗なのかもしれないと思っています。今後、廃炉を進める中では、そんなことも含めて技術が本当にうまくいったかということを検証課題に入れてほしい。例えば再稼働したときに、計測モニターが鳴りまくってまともな運転ができず、地域との間でもめたことがありました。研究開発には有用でも、運転には、不要なものを鳴らさなくてもきちんとメンテナンスできるような仕組みに本当になっていたのかどうか。温度計も事故を起こしたから欠陥がわかったけれども、そのほかにも隠れた問題はなかったか、それが顕在化しても、大きなことにならないようにするシステムになっていたか、そういうハードの部分も、さらにはソフトの部分も含めて検証していただきたい。

また、これらのことは、本来ならメーカーが十分注意すべきことです。それを管理しているのが原子力機構ですが、ここにおられる三人の方はプラントの管理者となるとありますが、皆さんは技術者としての役割をかなり狭くとらえられている。お三方とも技術としてはよかったとおっしゃりますが、プラント側の技術者であればその責任や立場をもっと広く捉えないと、今後はうまくいかないのではないかと思います。

江沼 ソフトの面ではご指摘の通りだと思います。これから点検や保全が続くので、警報の問題も含めて、いろんなことを拾い上げた上で、次期炉を設計するタイミングがもし来るのであれば、それを反映していきたいと思っています。

井川 技術向上に役立つのなら仕方ないとしても、プラントとして、無用なトラブルなしできちんと動く。それはどういうものであるべきだったのかということを、もっと全体として考えてほしい。

向 確かに試験運転再開の時に漏えい検出器が何度も発報し、派手に報道されましたが、これらの漏えい検出器は元々安全系に位置付けられていたのではなく、非常

に高感度なセンサーを有し、運転員に補助的な情報を与える設備だったのですが、保安規定でそれを重要設備に取り込んでしまった。そこが大きなミスです。そのためにプラント運営管理上の問題と、とられてしまった。軽水炉は何十年も運転してきた経験があり、本当に異常の発生あるいは兆候がある時しか鳴らないようにチューニングが進んでいる。一方、「もんじゅ」は運転経験がほとんどないプラントであり、警報が鳴るレベルもきちんと調整出来ていなかった。あれはむしろ、運転していく過程で調整していかなければならなかったことです。そういう意味で開発炉は、運転の過程で克服しなければならないところがたくさんあります。

「もんじゅ」の役目は技術的な検証のほかに、ソフト面もあります。例えば高速炉プラントを運用するために保安規定や保全プログラムがあり、さらには規制や基準もある。これらについては「もんじゅ」を実際に運転し適用していく過程で、必要な改善やチューニングをしていかなければならない。けれども廃炉によって、その機会を逸したことは残念です。

井川 「もんじゅ」では長い間、ナトリウムだけ回していた時期もあり、そのメンテナンスはどうだったのか。そんなことも含めて、広くソフト面も取りあげて、できるだけ教訓を得ていただきたいと思います。

柳澤 「もんじゅ」ではこれから燃料やナトリウムを抜きます。その抜いた機会をねらって、例えば原子炉容器廻り供用期間中検査装置(RV-ISI)がきちんと動くかどうかというような実験をやってみたらと思っています。そういうことで「もんじゅ」の保全計画の検証試験をきちんと行ったらどうかと思います。

高速炉の規制自体も適宜、見直しを

井川 もともと、保全計画や保安規定の類いは相当に問題があり、修正や改善すべきことがかなりありました。けれども原子力規制委員会はこの点については一切考慮せず、勧告にまで至った。規制委は、廃炉については柔軟に聞いてくれるのですか。

柳澤 相当がんばらないと難しいのではないのでしょうか。「もんじゅ」では多くの経験のないことをやるので、すべての作業は試験と位置付けて進めてほしいです。

井川 廃炉の保全計画や保安規定については柔軟に、今後の規制や廃炉を考える際の資産となるように、ともに考えるという方向にもっていければ良いのですが。

澤田 そのためには、リーダーシップをとれるリーダーが原子力規制委員会や規制庁にきちんとコミュニケーションしなければならない。

井川 それをやるのはトップですね。

澤田 トップとは文科省ではなくて、日本原子力研究開発機構(JAEA)の理事長ですね。

向 トップがまず、その意識をもつ必要があるし、現場も含めてみんながその意識を持たなければ。

井川 それは組織として対応すべきことになりますね。トップが、役所の人に整然としっかり説明し、理解を得てもらわなければならない。

澤田 それはコミュニケーションの基礎の基礎ですが、結構難しいのではないのでしょうか。これまでの経緯を見ていれば楽観は全くできないですね。

江沼 規制において、純技術的に正しくないところはそれを正すというのも、原子力機構の役割の一つだと思っています。

向 だから規制対応にしても、必要な意見を主張すべきだという時には、所長や担当理事、さらには理事長も含めて、機構として言うべきことは言わなければならない。

澤田 今まででできなかったことが、本当にできるのですか。

井川 専門家は、問題のポイントをわかりやすく説明しなくてはなりません。規制側にも、適切にデータを示し、理をもってきちんと理解してもらう。それにはテクニックも必要で、専門家同士のコミュニケーションスキルでもあります。

また、担当者同士は理解しあえたとしても、原子力規制庁では幹部がひっくり返すことも多い。このため技術的な説明は、そこまで想定した緻密なものにする必要があります。

特にこういう国家プロジェクトになると、その結果が地元や一般の人にまで及ぶ時がある。そうしたことまで含めてどのような流れになるか一歩先を考えたうえで、多くの人に納得してもらえるような説明になっていないと、ひっくり返ります。

澤田 どうすればいいんですか。

柳澤 まず、規制委員会と、きちんとコミュニケートしなければならない。それには、高速炉のため、あるいは世界のためにこれをやらなければならないと思ったら、メーカーにも協力してもらって、万全の体制で準備しておかなければならない。

一方で「もんじゅ」は、道場のようなものです。規制委員会も、この道場で学ぶことができます。そのような場になることをめざして、理事長が大きな提案をしていく。また、それをめざすのであれば、廃炉を早くすませるという方針とは異なり時間がかかる。そういうことも、考えなければなりません。

澤田 メーカーの協力とおっしゃいますが、それは本当に期待できるのでしょうか。

柳澤 「もんじゅ」は国の大プロジェクトでした。そのために動燃をつくり、あかつき丸の時は外務省や日本政府、さらには外国の政府まで巻き込んで、ヨーロッパからプルトニウムを運んできました。だから、「もんじゅ」の廃炉は「失敗」なんかで片づけられるものではない。そ

れをきちんと検証しなければなりません。けれども、その検証が全くなされていない。

廃止措置を決める時には経産大臣と文科大臣と機構理事長、メーカー、電力の代表の5人で決めています。しかし、そこでは学会や地元の知事の見解は考慮されていない。そういう決め方でよかったのか。それらも含めて検証してほしい。

また、廃止を決めた際には、技術的内容ではなくマネジメントに問題があったとされた。では、そのマネジメントをどうすればよかったのかについては、どこも議論していない。高速中性子やナトリウムを使った新技術は、みんなから不安がられている。そのような新技術を含む開発については、どういう備えや構えが必要だろうか。

澤田 廃炉にするにしても、「もんじゅ」の勧告で突きつけられた宿題が、まだ残っています。そこで問われたのは、オールジャパン的な開発体制の問題だったと思いますが、マネジメントの問題が未解決とは、日本でそういう体制ができないということですか。省庁間の壁の問題があい変わらず大きいことは、「もんじゅ」勧告以降オールジャパン態勢をなんとか構築しようと躍起になったが結局できなかった。省庁間の壁の厚さは、痛いほど思い知らされたはずですが。

柳澤 省庁間を越えて、誠実で覚悟を持った行動ができ、主張する開発主体を作ることが大事です。官庁が前面に立っては、現場の掌把やプロジェクト完遂の使命感、責任の取り方があいまいになる。国際的な核不拡散、地域との共存、社会への説明責任などから、堅固な組織にし、多彩な人材と陣容をそろえないといけません。

国プロは長期的で戦略的な視点が必要

井川 動燃は、初期のうちは強気で、がんがんやっていました。反対派やメディアに対しても、ある種の強引さをもって、良くも悪くも進めていたところがあった。あのころ関係者は、小さなトラブルはあるにせよ、開発はこのまま順調に進んでいくと思っていたのではないのでしょうか。旧科技庁の安全担当部門も、「もんじゅ」の安全性の細部はそれほど重大視していなかった。けれども実際のところは、組織としてはがたがただったということがはっきりしました。

澤田 それはナトリウム漏れ事故の時にわかったのですか。

井川 ナトリウム漏れ事故で危機管理の甘さが露呈した。その後に東海でアスファルト固化体の爆発が起きて信頼を決定的に失った。結局、組織は解体され、今に至っています。「もんじゅ」はいったん、地元の理解を得られて動かしたけれども、中継機を落としてしまう。その結果、「今ごろ何をやっているのだ」ということになりました。

澤田 体制の劣化や崩壊は、階段を転げ落ちるように続いていったわけですね。

井川 この体制は、国家プロジェクトにはなじまないということが教訓です。

澤田 では、どうすればいいのですか。

井川 日本のシステムをどうするのか。熟慮が必要です。アメリカ方式でやるのか、欧州みたいにがっちり計画を固めた上でやるのか、中国みたいに上からトップダウンでやるのか、日本はどういう方式で進めるのかを決めるのは、非常に難しい。政治が今は、こういう状態ですから。

ただ、規制や世間との対処の仕方は、想像力を働かせないと。今のままでは絶対、先に進まないですよ。

柳澤 原子力安全・保安院のころは「もんじゅ」は、開発物だと取り扱われていました。けれども規制委員会になってから実用炉と一緒に扱われるようになりました。2012年に原子力規制委員会が発足しましたが、その際すぐに、「もんじゅ」の開発とは何かということを、改めて規制委員会にも、社会に向けてもきちんと説明すべきだったと思います。それが出来なかったのはとても残念です。ただ、あのころはそんな状況ではなかったことも事実ですが、覚悟が足りなかった。

井川 原子力業界の人は、規制の担当者や目の前にいるメディアが納得すれば、それでよしと思うかもしれませんが、世間は決してそうではないということをまず理解すべきでしょう。何が理解されていないか。どんな批判があり得るのか。十分に考えておく必要があります。技術開発という狭い世界ではなくもっと幅広く想像力を働かせることが必要です。

澤田 想像力と言っても、それを実際に鍛錬する場がないと育くまれないですよ。

林 職人の集まりなので、口下手だということはありません。例えば炉心に燃料があってそれはナトリウムが満たされているけれども、ナトリウムの沸点はとても高いので安定していますと我々が説明しても、世間は安全だとは思ってくれませんでした。確かに想像力やいろいろな予想を含めて考えないといけないなとは思っています。

澤田 “口下手”を言い訳にしていけないと思います。

柳澤 規制委員会も、新技術に対してどういう規制をしたらいいかということを大局観をもって考えなければなりません。ただ、少なくとも今の規制委は、再稼働の審査でいっぱいだと思います。

澤田 ここまでの話の中で指摘された一つは、JAEAは規制に対して物を申すためにはトップつまり理事長が筋を通さないといけない。もう一つは、社会とどう向き合っているかということ。技術的な視点で説明しても伝わらないということでしたが、そこでどう想像力を働かせるか。また、社会との対話はもっと難しいところがあります。そのためには、いろいろな人とパートナーを組

むという選択肢もあります。このようなことのために、何かやっておられるのですか。「もんじゅ」の勧告が出た後に、敦賀には原子力のことを応援している人たちがいるので、そういう人たちとコミュニケーションの場をつくってはどうかということを提案したことがあったのですがⁱⁱ。

向 敦賀には原子力に強く反対する人も、逆に強く賛成する人もそれほど多くなくて、中庸的な意見をもっている人が多い。ただ、全体的には、いろいろな情報を得た上で、原子力は必要だよねと言う人が多い。とはいえ、機構の現場の人たちがどんなことをやっているのか、何を考えてやっているかがわからないというような意見もあります。そのために、そういう場をつくったことがあります。けれども、継続されていない。お互いに多忙を理由に、自然に消えてしまいました。

現場としては、現場力を上げてトラブルを起こさないということが地元から信頼される一番早い近道です。もちろん、社会とつながりを持つ人は必要になってくる。そういう場をもっていると、トラブルがあった時に、理解していただくことが早いし、広がっていく。とはいえ、実際にトラブルが起きると、批判は当然出てきます。

林 私は電力の方ともお付き合いが多いのですが、電力の方でさえ「もんじゅ」に対する関心は低かったです。3.11以降、関心の中心は再稼働や新規性のことであるのは当然なのですが、同じ原子力業界において、その状況は我々のアピール不足を痛感し、ショックでした。

地元の人を交え、もんじゅの失敗検証を

澤田 先ほど向さんが敦賀の人々は中庸だとおっしゃってたが、私は全くそう思いませんよ。

例えば敦賀の地元には、福井県原子力平和利用協議会という40年以上の歴史を持つ熱い人々の任意団体があります。1970年の万博以前の頃から原子力発電をサポートしてきている、原子力にはその恩恵も被っているという思いをもっている人も多く、そういう人たちとのコミュニケーションがあまりないのではないですか。

柳澤 他方、都会の市民とのコミュニケーションはもっと難しい。先日は、都会の脱原発を考える年配の女性中心の会を「もんじゅ」に連れて見学してもらいました。一生懸命に説明する現場の担当者や作業を見て、彼女らは、「そんなにいいかげんなことをやっているのではないのね」「あんなに真剣にやっているのであれば」「ナトリウムは手(手袋)で触れるんだ」という発言もありました。もちろん、だからといって彼女らの原発に対する考えがすぐに変わったわけではありません。

ⁱⁱ 座談会1「もんじゅ」の今後は地元とも十分な共考を——地元軽視は国への不信感につながる 日本原子力学会誌、Vol.58、No.12 (2016) pp.688-693

都会では、市民の質問、疑問にさえ答えてくれるところがない不満があります。

澤田 それも改善していかなければならないと思います。ですが、まずは地元のひと、もっと関係を深めるようなことを考えたほうがいいのではないですか。彼らこそが、より広い社会への入り口だと思うのです。

向 現場の人は難しいと思うけれども、地域の中の活動にもっと入っていけると、多様な人との交わりを持つことになります。その中で「あれはあなたがやっているのね」ということは、とても重要ですね。

澤田 ただし、時間がかかります。

向 かかります。私は観光ボランティアガイドをやっていますが、三十数人いる仲間からは、原子力に慎重な考えの人も含めて、原子力についていろいろと聞かれることがあり、説明すると真剣に聞いてくれる。また、ガイドしているといろいろな人と接する。その中で、たまに原子力の話が質問で出てきたら、きちんと答えています。そういうつながりの中で理解してもらうことが重要だと思います。

柳澤 今は地域交流部というものがあります。部長をはじめ職員は、JAEAは何をやっているのかを伝え、みんながどんな話を望んでいるかを聞くために、地元のあちこちを出歩いています。現場の皆さんも、折にふれてそういう場に参加するようにしないといけない。

澤田 少しまとめます。まず、規制委員会ときちんとコミュニケーションすることが大切で、そのためにJAEAの理事長には、筋を通すためにがんばっていただく。

二つ目は、職員は地元の方々とパートナーとして想像力とコミュニケーション力を磨いていただく。鍛錬ですね。地元には仲間になりそうな人がいるわけだし、慎重派の人から厳しいことを言ってもらったほうがいいかもしれません。そういう人と付き合っていくと、世間が皆さんをどう思っているか。世間に対して皆さんがこれからやろうとしていること、やってきたことをどう説明するかということを考えるよい場になると思います。

井川 精神論だけでは教訓になりません。話を戻しますが、今日のテーマは失敗の本質に迫るというものですね。残念ながら、「もんじゅ」の失敗については、まだまだ学ぶべきことがあると思う。

そこで地域の方との交流ですが、例えば大学や町の商工会の人たちも含めて、「もんじゅ」の失敗について一緒に検証して、その結果を資料として残す活動をやってみてはどうでしょうか。技術者の方も、自分たちのどこがいけなかったのか、外部の意見を聞きつつ考えてみる。地域の大学生と共同でやるのもいい。何が失敗したのか、何がいけなかったのかなというのを、部分ごとでも良いから、分析していく。失敗を自ら分析してまとめるという作業の過程で、技術者も磨かれるし、問題点、改善点も浮上してくる。できればその中に、例えば婦人会

のような多様な人を交えると、新たな発見につながるのではないかと思います。廃炉が決まってしまったからこそできる検証です。技術者も外部の人も少し冷静になれる。そのための資金を、理事長が出してくれるといい。

澤田 確かに、技術開発の方は相応に進められてきたと思いますが、社会にどのように相対峙していくか、理解をいただき共有していくかというメカニズムがないと、同じ失敗を繰り返しますよ。

向 いい提案をしていただいたと思います。ここにいる若いあなたたちが動けば、我々はサポートすることはできます。

澤田 ぜひとも動いて行かれることを願ってやみません。最後に一言ずつ。また、原子力学会へ向けた提案もあればお願いします。

江沼 「もんじゅ」の技術はこれまでで相応に確立されたものの、それは時間の経過とともに失われるものでもあります。技術の伝承はモノを作って運転することにあります。このままだと維持すらできなくなるので、ぜひ小型炉をつくらせてほしいと思っています。

澤田 どんな小型炉ですか。ASTRIDの10メガワットですか。

江沼 規模はそこそこでいいのですが、発電系まで持ったものを希望します。高速炉の技術は機構だけが持っているのではなくて、メーカーを含めた全体の技術者集団として高速炉技術が成り立っています。すでに製造や設計の技術は、だんだんと弱体化していると感じます。

澤田 それは誰に言えばいいのですか。役所ですか。

柳澤 そういうことを議論するところ自体が、今はない。昔は長計の中で議論していましたが、今はエネルギー基本計画しかなく、その中では技術開発戦略は取りあげてもらえないのではないのでしょうか。

林 私は廃炉を予定より早く円滑に進めて、原子力機構の能力を示したいという気持ちがあります。一方で、「もんじゅ」をやっていると言われたら、まだやりたいという気持ちはもちろんあります。そのことをもっと早く、また、その重要性をもっとしっかりと言わなければいけなかったということが、反省点としてはあると思います。

澤崎 廃炉の過程でもさまざまな成果は出てきます。その成果を学会などで公表していきたいと思います。

澤田 学会という場での発表はもちろん大切ですが、地元の人たちとの交流の場を設けて、そこで自らの取り組みなどを説明し、成果だけでなく悩みなどを共有できれば、いろんな形でフィードバックできると思います。

向 例えば地元の若手経営者や一般の人、あるいは学生や大学の先生たちとであれば、私たちがそれをつなぐ役ができるので、どんどん言ってほしいと思います。

「もんじゅ」は結局、原子力規制委員会から、保守管理の不備にきちんと対応出来ない組織だと是正勧告が出さ

れ、それに対応できなくて廃止に追い込まれた。きちんと管理できないのは組織体制に問題があると指摘されたけれども、「もんじゅ」が頓挫した本当の要因は、まだきちんと検証ができていない。現場力の問題や、国プロの進め方に対する問題もある。これを克服していかないと、次のステップでも同じような失敗を繰り返す。今後、このような国プロを進める体制がどういうふうにあるべきか、日本でやれる最適な体制というのはどういうものなのかという議論をまじめにしないと、人と金と時間を費やすだけになってしまうという気がします。

澤田 それは誰がどこでやるのですか。

向 国のエネルギー政策、技術力あるいは国力の問題につながり、本来は政治の課題ですが、まずは学会が提案してはどうですか。ともかく、このまま10年放置していたら、産業界で高速炉をやる人はいなくなるし、ASTRIDにはあまり期待できないと思います。

澤田 政治で言えば、現政権に強い影響力を持つ重鎮が、専門家が声をあげその熱意が伝わってこなければ、政治としても動き難いと仰ったことがあります。

そこで、学会といえ、まずは新型炉部会ですね。それに今の日本原子力学会長は三菱の方ですから、「提案」の条件が揃っているのではないですか。向さんや柳澤さんが、まずは部会および会長筋に「もんじゅ」が頓挫した本当の要因」の解明・検証委員会の発足を呼びかけられるということでしょうか。

向 新しい取り組み方という点で学会全体の課題ですね。会長に呼び掛ける意義もあります。いいでしょう。やってみましょう。

「死の谷」を超えられなかったもんじゅ

柳澤 「もんじゅ」の位置づけは、将来の実用化を目指したもの。常陽は実用化ではなく、研究開発だった。けれども実用化を目指す際には「死の谷」があり、それを越えられなかった。アメリカの試験用高速炉 FFTF は燃料とナトリウムを抜いて不活性雰囲気ですばらく置いて、国際原子力パートナーシップ (GLOBal Nuclear Energy Partnership: GNEP) で使おうとしました。「もんじゅ」も今は廃炉になることになっているけれども、別の用途に生かすという選択肢もありうる。

文科省は、「もんじゅ」では目標の成果の16%しか得られていないと評価しましたが、高速炉を原型炉から実用化に向かわせる局面では、規制や安全確保が大事になる。これが地元や国民の皆さんから受け入れられる最低限の要件となる。それには、相当な運転や試験の実績が必要です。そうすると、将来もんじゅをどうすべきかで含めてもっと冷静に議論すべきだというのが、一つ目です。

また、「もんじゅ」で得られた知識は形式知と暗黙知と

があり、それを現役の人がきちんと整理してほしい。もちろんOBもお手伝いする。さらに、どこがまずかったか、何をやり残したかという総括は、今後の技術開発にとって極めて重要です。機構の人は毎日、廃炉の作業で手いっぱい、これまでのどこが悪かったかなどの検証をやる時間がない。だから、少なくとも国家プロジェクトの総括に対して自らで糸口までは作るのはやらなければならないと思います。

澤田 そうですね。今、向さんから提案があった「もんじゅ」が頓挫した本当の要因」の解明・検証委員会がその機会や場所になると思います。

柳澤 原子力を進めていく上では地元の人の応援がないと絶対できない。それに沿うべく、「もんじゅ」は拠点化をやりました。さらにそこでは、機構の人たちの存在というのを、もっと強めておかなければいけなかったと思っています。そういうことも検証で忘れないでほしい。

井川 話を聞いていて、少しずれているなという感じがします。そもそも今、新型の高速炉をつくることや、新しく小型炉をつくるというのは社会的に厳しい。まず足元を見つめ直して、そこをどうクリアしていくのかを考えなければいけない。そのためには、そもそもマネジメントに問題を抱えた組織を、どう変えたのか示さなくてはいけない。さらに、原子力の業界が全体としてどう変わったのか、どう変わろうとしているのかを明確にする必要がある。そういうことができないと、失敗の教訓を学んだことにならない。組織改革にしても、廃炉の過程だからこそ逆に言えば大胆に変えられるかもしれない。例えば今後、電力から女性所長を出してもらい、みたいな選択肢もあり得る。

澤田 その通りだと思います。

井川 もっと自由闊達に意見を出せると良いですね。国プロについても、改革の決定版というのはなかなかないので、皆さんでいろんな案を出されてはどうですか。原子力業界には提案を一つにまとめて公表すれば、世間は聞いてくれるのではないかと期待がありますが、逆に若手の人から出されるような多様な意見も重要です。エビデンス・ベースで、この国プロではこうやってここがうまくいって、ここはうまくいかないなどと、議論を積み上げた提言がふえると世間も聞く耳をもつと思います。

澤田 「もんじゅ」の歴史は、未来に向けてのある種の宝の山だと思います。それをもっと使い倒すような意見もありました。そのことに関連してさらにご意見ありませんか？

井川 OBの方が協力されるとおっしゃったのだから、教訓発見団として現場でサポートしていただければどうでしょうか。

澤田 それはいいですね。ある種のオンブズマンですね。廃炉措置はもちろん重要ですが、若手・中堅の方が

コアになって、失敗教訓を発見していくチームを編成する。そこに、経験豊富で時間の融通がきくような方を集める。

井川 さらに外部の人にも加わってもらおう。そういう仕組みを原子力学会やJAEAが協力して築かないことには、次のステップへの展望が開けない。次を目指すのなら、そのための、新たな視点からの検証作業がぜひとも必要です。

澤田 「もんじゅ」でいろいろな失敗をしているのは間違いない。それは未来に向かっての糧になるはずだし、しなければいけない。その中心になるのが、今日いらしているような中堅コアの人たちで、皆さんがそのような発議を出して、それをみんなで共有していくというところから始めてはどうかと思います。

佐田 「もんじゅ」の不始末については、ハード面の話は、まな板の上ののってある程度まで料理されていると思います。しかし、ソフト面の話はまだ生煮えです。例えばメーカーとの関係や規制庁との関係、あるいは官邸や電力と、国民、自治体との関係、さらには全体のガバナンスなどのソフト面の話は、まな板の上ののってはいないもの、ほとんど手付かずのままだと思います。

とりわけ自治体との関係が、「もんじゅ」をめぐる前半の大失敗の原因だったと思います。リスクを伴う施設立地と、地元との共生や利益供与の問題はほかの原発でも共有された構造的な問題であり、これはどこかで検討すべきことだと思います。

向 それはまさに、日本の原子力の全体の問題ですね。

柳澤 アメリカでは、日本の環境審査にあたるものを、環境保護庁(EPA)がやります。その際には社会的、経済的な要因のほかに、景観や倫理的な要因まで審査に入れます。日本でも最初から、地元との共存共栄を審査項目に入れて議論しておけば、もっとスムーズにいくのではないかと思います。

井川 最初から議論すれば変わりますよね。

澤田 今日はいろいろな提案がJAEAや原子力学会に投げかけられました。それらのことを関係する方々に自省的にもう一度考えていただき、未来を開くためにぜひ発案、考案して、内部と世間を巻き込みながらポスト「もんじゅ」の道を拓いていただければと思います。

江沼 私の部署が、「もんじゅ」の知財を次につなぐためにはどうすべきかと考える部署になっています。その

中では「もんじゅ」のデータを使い尽くして、仮想的なプラントを計算機上で実現し「もんじゅ」で得られなかった知見・経験をリカバリすることや開発費用の低減・合理化を狙った次期炉設計最適化ツールを開発するということも考えています。

柳澤 廃炉の楽しみというのは、風景が変わることです。それは次につなげるというものでもあります。

井川 いい意味で、廃炉を楽しんでください。

澤田 今日はありがとうございました。

(2018年10月2日実施)

<登壇者>

井川陽次郎(いかわ・ようじろう)

読売新聞 論説委員

江沼康弘(えぬま・やすひろ)

日本原子力研究開発機構

高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所 高速炉サイクル研究開発センター 高速炉解析評価技術開発部

澤崎浩昌(さわざき・ひろまさ)

日本原子力研究開発機構

敦賀廃止措置実証部門 敦賀廃止措置実証本部 廃止措置推進室 計画グループ 副主幹

林 司(はやし・つかさ)

日本原子力研究開発機構

敦賀廃止措置実証部門 高速増殖原型炉もんじゅ廃止措置部 計画管理課 副主幹

柳澤 務(やなぎさわ・つとむ)

元日本原子力研究開発機構理事

原子力学会新型炉部会 前部会長

向 和夫(むかい・かずお)

NPO ニュークリア・サロン理事

(元もんじゅ所長)

佐田 務(さた・つとむ)

本誌

澤田哲生(さわだ・てつお)

東京工業大学

INTERVIEW

改めて問う—「もんじゅ」は活用すべき！

有馬 朗人 氏に聞く

原子力規制委員会の「もんじゅ」への勧告は、最終的に「もんじゅ」を廃止措置に追い込む結果となった。あれから2年。「もんじゅ」の意義をここに改めて問う。日本のエネルギー事情の将来を俯瞰すれば、資源のないわが国のエネルギー事情の事情にとって核燃料サイクルを閉じることのできる高速炉の意義はなんら変わるところがない。いまここで「もんじゅ」をやめてしまう訳にはいかない。今からでも遅くない“「もんじゅ」を活用すべき！”——行政経験豊かな碩学が改めて世論に問いかける。

聞き手 澤田 哲生（本誌、東京工業大学）



有馬 朗人 氏（ありま・あきと）

東京大学理学部物理学科卒業、理学博士。
東大理学部教授、東大総長、理化学研究所理事長、参議院議員・文部大臣、科学技術庁長官などを経て、2006年から武蔵学園学園長。核物理研究等で文化勲章。

エネルギーを長期的に見通した戦略がない

—第5次エネルギー基本計画が閣議決定されましたが、エネルギーの長期的な見通しや原子力のあり方について有馬先生のお考えを。

有馬 今の国の方針では、2050年にも原子力は必要だとしています。そういう方針のもとにある以上、現行の第3世代や第3+世代の次の原子力、つまり第4世代の原子力につながる研究開発をやらなくてはいけない。それをどうするのが全く見通しが悪い。無いと言ってもいいのではないのでしょうか。経産省資源エネルギー庁のもとエネルギー情勢懇談会は2050年には、再エネが「主力電源」になると位置付けていますが、科学技術的に見てそれがどこまで可能なのかについては、原子力関係者も精緻な分析に基づく発信をしていかなければならないでしょう。そして、原子力20%は本当に実現できるのかということのを常に考えていないといけなのではないでしょうか。

—エネ基には、今後の原子力研究開発に関して少し具体的なことが書いてあります。

有馬 エネ基では、熔融塩炉、小型炉、高温ガス炉に言及しています。ですが実体的な受け皿をどう考えているのかはよく分かりません。というより、政府は全く考えていないと思います。私はあちこち当たって見ましたが、そういわざるをえない状況です。

—小型炉などは第4世代原子炉からすると後退しているようにも見受けられます。サイクルの課題である“サイクルを閉じる”ことはどうするのかと。

有馬 私はね、当面の研究活動維持策として、高温ガス炉、小型炉、熔融塩炉を行うのはいいでしょう。しか

し、その先には、真剣に“breeder(増殖炉)”つまり高速炉をちゃんと見ていかなければいけない。しかしながら、ポスト「もんじゅ」として日仏が協力して進めて行くというASTRID計画は今やかなり覚束ない。

プルトニウムは有用な資産

—増殖炉とはつまりプルトニウム(Pu)の生産を意味します。つまりPuを増やすことになります。しかし、原子力委員会がPuを減らせと言い始めました。

有馬 高速炉はPuを燃やし同時に生産することは勿論ですが、それに加えて使用済み核燃料から出てくる高次の放射性物質をシステム内に閉じ込めることができ、放射性物質の環境への負荷を減らすことができます。Puは有用な資源であり資産でもある。確かに、2018年7月末に原子力委員会は日本の保有するPuに“CAP制度”を嵌めようとしています。CAP制度とはこれ以上Pu保有量を増やしませんと言ってしまったことです。これはねえ、私は見直さないといけないと考えていますよ。

—CAP制度とエネ庁などが進めようとしている高速炉の次期炉ASTRIDは政策的に矛盾しているように見えますが。

有馬 原子力委員会はこの期にプルトニウム政策を見直さなければいけないと言っていました。そして5項目にわたるガイドラインのようなものまで発表した。方や、経産省の資源エネルギー庁は、高速炉の開発は今後ASTRIDを舞台に続けていくと見栄を切って「もんじゅ」をあっさりと止めてしまいました。「もんじゅ」はねえ、特にみなさんのような専門の方には釈迦に説法ですが、どこも悪くない。いつでも動かせる装置です。2016年に委員会の委員長として色々調べましたが、ロシ

アの BN800 は実証炉に相当しますが、その運転実績は素晴らしい。まあ、色々と表に出せないことがあるのかもしれませんが、実にうまくやっています。BN800 は商用炉の一手手前ですからね。日本に比べて随分と先を行っています。

改めて問う―「もんじゅ」は活用すべき

―「もんじゅ」への勧告から廃炉決定までを振り返って
いまお考えになることは。

有馬 そもそも「もんじゅ」は 1995 年にナトリウム漏れを起こしましたが、あれは 2 次系の温度計の靱管の設計ミスでした。ナトリウム火災を起こして結果的に大きな社会問題になりました。情報公開で失敗したんですね。事故当時通産大臣であって翌年 1 月に総理になった橋本龍太郎さんがね、まあ言っちゃあなんだが、カンカンに怒ってしまいました。

ミステイクとは何かといえば、マシン本体ではなくていわばマネジメントの問題であったわけです。その後燃料の炉内中継装置の落下がありました。この件もナトリウム漏れもローテクの問題です。そこで事件が起こって結果的に未来永劫止めてしまいました。これは実にもったいないことです。

―有馬先生が座長を務められた委員会では様々な意見がでたようですが。

有馬 私の委員会では、「もんじゅ」を潰すなという方向に委員の大勢が向かって行きました。その結果、管理運営をしっかりして「もんじゅ」は今後も使っていく方がいいよという答申を出しました。しかしながら、最後は大臣 5 人くらいで潰されてしまいました。つまり、2016 年 12 月 21 日に、「もんじゅ」を廃止するということが第 6 回原子力関係閣僚会議¹で決定されたのです。経産大臣は「もんじゅ」に対しては巨大な金がかかるから、ASTRID にサイコロを振ったのですね。

しかしねえ、その後の経緯を皆さんもご存知のように ASTRID への本気度が見えませんか。私は今でも「もんじゅ」を復活させて動かすほうが、日本のためでも世界のためにでもあると思っていますよ。

「もんじゅ」をはじめとして、科学技術が衰退していく

―官邸あるいは経産省主導で「もんじゅ」はお払い箱にされましたが、「もんじゅ」はそもそも国産原子炉であっ

て、旧科技厅はその研究開発のために設置された役所でした。原子力委員会は 1956 年 1 月 1 日に設置され、同年 5 月 19 日に科学技術庁が当時の総理府の外局として設置されました。両者は双子のような関係で、原子力＝科学技術というのが霞が関の中にありましたが、今そこが地殻変動しているのでしょうか。

有馬 原子力の利用に関しては、エネ庁がきちっとできると見えています。しかし、そこに至るまでの原子力に関する基礎科学技術の研究開発主体はどこですか？私が見るところ、そこには穴が空いている。総合科学技術会議が今きちっと動かしていないですね。旧科学技術庁に代わる組織が今ありませんね。科技厅は 2001 年に文部省に吸収合併されましたが、その頃から原子力特に「もんじゅ」の予算が徐々に減らされ続けてきました。私はねえ、文科省はもっとしっかりやれと言いたい。かつての科技厅は今や文科省の開発技術局の局長程度になっています。橋本行革の影響がじんわりと出てきた結果です。私は、文部科学省を作り直す必要があると思っています。同様に、経産省の工業技術院も潰されてしまいました。そして盛んに「イノベーション」が取りざたされる世の中になってきました。

―イノベーションは最近やたら耳にします。イノベーションの原動力はなんだとお考えですか。

有馬 それは明確です。ボトムアップの研究力ですよ。ノーベル賞のことばかりをいうのではないが、わかりやすいので言いますが、かつて小柴昌俊さんが物理学賞を受賞した。小柴さんは、浜松フォトリクスに乗り込んで、ニュートリノ観測装置「カミオカンデ」に用いた光電子増倍管を開発させたんですね。当時浜松フォトリクスは全く無名でした。こういうボトムアップの研究開発が大変な発見やイノベーションにつながるんですよ。いくらトップダウンで資金をつけてヤレって言ってもイノベーションなんてできっこないですね。2018 年のノーベル賞の本庶佑さんもそうですね。長い年月かけて、決して信念を曲げずに地道な基礎研究を続けてきました。その結果として医薬品の偉大なイノベーションに繋がったのです。オブジーボの開発はボトムアップの基礎科学研究の成果です。

―ではトップダウンでは道は開けませんか。

有馬 もちろんトップダウンを否定しているわけではありません。大学でいえば運営費交付金はその類ですね。とにかく一定額の運営費交付金があれば、その予算の中でかなり自由に研究ができます。

日本の科学力は、科技厅がなくなって総合科学技術会議ができました。そして昨今は、総合科学技術会議が総合科学技術・イノベーション会議に様変わりしました。このような段階を踏むごとに、科学力が衰えてきていると思います。イノベーション先行的かつトップダウン的で、短期にイノベーションに結びつかないような科学研

¹ 菅内閣官房長官、世耕経済産業大臣、松野文部科学大臣、山本環境大臣/内閣府特命担当大臣(原子力防災)、鶴保内閣府特命担当大臣(科学技術政策)、蘭浦外務副大臣、萩生田内閣官房副長官、野上内閣官房副長官、杉田内閣官房副長官、岡原子力委員会委員長、古谷内閣官房副長官補、日下部資源エネルギー庁長官、田中文部科学省研究開発局長が出席した。

究は切り捨てられる傾向があります。

—原子力のイノベーションについてはいかがでしょうか。

有馬 原子力に関していえば、行政としての原子力規制はこれはまあいいでしょう。しかし、原子力を前に進める原動力となる研究は、自分の意志と力でやるしかないのです。それがないと、やがて衰退していきます。その良い事例は基礎科学論文の発表数の推移に表れています。日本はかつて米国に次いで世界2位だったのですが、今は中国にも抜かれて5位です。トップダウン的にイノベーションばかり言っていて、本当に好きなことはなかなかやらせてくれません。予算が付かなくなってしまうようになりました。大学でいえば毎年運営費交付金が削られて、いわゆる競争的な公募研究に予算が回されるようになってきています。

今はまだノーベル賞が出ていますが、2020年頃をすぎるとパタッと出なくなる——廃れてしまうのではないかと怖れています。東大生も最近では将来金持ちになることを考えている学生が多くて、基礎研究にチャレンジしようというのは今やあまり流行らないと聞きます。同時に霞が関に就職しようという有能な学生も減ってきているようです。

原子力界の若者に対してメッセージを

—原子力をこれからもやっていこうとする若者、大学生やもっと若い中高校生も少なくありません。

有馬 原子力の世界にも、当然のとながら元気のよい大学生や若手研究者が出てこないといけません。原子力の新しいことをやりたいという意欲をもっと持って欲しいのです。それに、日本原子力学会にはもっと誇りを持ってと言いたいですね。

—有馬先生が東大生だった頃はどんな時代でしたか。

有馬 私は原子核物理の研究を大学生の頃からやってきました。東大に入学したのが1953年です。原子核研

究といえば加速器、サイクロトロンです。理研のサイクロトロンは戦後米国の指導のもとで破壊されました。当時、核物理は実験さえしてはいけないと言われていたんですね。失意のどん底に落とされたのです。しかし、いろんな人が努力して、1953年にようやく理研に第3号サイクロトロンが完成しました。

今大学の原子力研究、特に若手は苦悩の時期だと思いますが、そういう時こそもっと頑張れと言いたいですね。

—今から10年くらい前は原子力カルネッサンスが謳われ、原子力を研究する大学生や若手は未来に希望を持っていましたが。

有馬 その通りです。原子力カルネッサンスの呼び声が高い時期もありましたが、3・11で完全に腰砕けになってしまいました。私は原子力の将来はbreederだという信念があります。そして燃料のサイクルを閉じることですね。今の軽水炉でやっていけるとはとても思えない。そのことを原子力学会、なかでも若手はもっと遠慮せずに表明しろと言いたいのです。信念を持って研究に臨んでいって欲しいですね。

—いま原子力界の中にはなかなか信念を発揮できないところがありますが。

有馬 現在どうするのか、近未来をどうするのか、そしてさらにその先に何があるのか——想像力と創造力とを発揮して行って欲しいのです。1995年阪神淡路大震災の頃まで、地震の問題をめぐる工学と理学の対立がありました。あれは相互理解の不足で、私は両者のコミュニケーションの場が必要だとして、そういう機会を設けてだいたましくなってきました。工学と理学はコンプリメンタリー(相補的)な関係です。原子力学は両者が行き交う格好の場だと思います。歴史を振り返れば、基礎科学の頑張りが工学を伸ばしました。逆も真なりです。

とりわけ若手は広い視野に立って、恐れずにチャレンジして行って欲しいのです。そうすれば必ずや道は開けていくと思います。

(2018年10月19日実施, 編集協力: 本誌 佐田 務)

対談

高速炉は「資源を産みつつゴミ焼却も行う究極の発電炉」、将来必ず必要になる 資源と環境—今世紀末まで見通す視点を



河田 東海夫
澤田 哲生 (本誌)

日本の核燃料サイクル政策が、不透明になりつつある。高速炉開発に深く関わってきた河田東海夫氏は「将来の化石燃料の生産減退・価格上昇に備えたオプションとしての高速炉技術を保持しておくことは必須」と述べるとともに、「海水ウランを回収すれば軽水炉直接処分で十分との意見もあるが、それでは高レベル廃棄物の処分場面積は高速炉の場合の6倍に増える」と指摘する。また、「いったん衰退した技術を復活させることは難しく、「高速炉時代が来た時に日本や米国は、中国に頼らざるを得なくなる」と危惧。「将来世代のために、エネルギー全体を見通した上で十分な知恵を出し合うことが必要だ」と述べた。

かわた とみお／東北大学大学院工学研究科修士課程修了。動力炉・核燃料開発事業団に入社し、高速増殖炉開発、核燃料サイクル技術開発などに従事。核燃料開発機構理事、日本原子力研究開発機構地層処分研究開発部門長、原子力発電環境整備機構理事などを歴任。

プルトニウム分離は軍事利用から始まった

澤田 プルトニウムは1940年にカリフォルニア大バークレイ校のシーボーグが発見したのが最初だと聞いています。河田さんとプルトニウムの関わりはいつですか。

河田 私は昭和44年に動燃(動力炉・核燃料開発事業団)に入社し、プルトニウム燃料部に配属され、グローブボックスで褐色のプルトニウム粉末を初めて触りました。

澤田 このプルトニウムは、自然界に存在しない人工元素として登場し、悪の産物のように言われることがあります。けれども、実は自然界にもともと、存在していたものです。1980年代の後半になると、超新星爆発や中性子星が重力崩壊するときに、プルトニウムなどの重い

元素が生成されるということがわかってきました。そのプルトニウムですが、Pu239だと半減期が2万4,000年なので、地球上にはかつてはあったけれども、今は天然ウランの中に形跡をとどめる程度になっています。

さて、このプルトニウムとウランとの最大の違いは何でしょう。

河田 どちらも核分裂性の同位体を含む元素です。最も異なるのは、プルトニウムの場合、同位体濃縮などの難しい技術と使うことなく、化学分離という簡単な技術で核分裂性物質を集めることができることです。それが、核開発に適していました。

澤田 そのプルトニウムを作るために、原子炉が構想され建造されました。

河田 バークレイのサイクロトロンを使って最初の超

ウラン元素を発見したのはマクミラン、原子番号が93番のネプツニウムを発見しました。その仕事を引き継いだのがシーボーグで94番のプルトニウムをつくることに成功しました。

澤田 そして1942年の9月にマンハッタン計画が始まり、12月にシカゴ・パイル1(CP-1)で人類初の核分裂連鎖反応に成功。その燃料は何だったのですか。

河田 中心部は天然ウランの金属で、まわりには不足を補うために酸化ウランが配置されました。CP-1はプルトニウム239の生産手段の技術実証として登場したものです。

澤田 それが平和利用として使われるようになったのは、いつでしょう。

河田 1944年4月にシカゴでフェルミら研究者たちがニューパイルコミティ(新型炉委員会)というのをつくり、戦後を見据えた原子力の平和利用を考え始めました。そこにいたフィリップ・モルソンが、当時希少資源と考えられていたウランから十分なエネルギーを取り出すためには、ウラン235の利用だけでなく、ウラン238をプルトニウムに変換しながら燃やしていく必要があると主張しました。

澤田 プルトニウムサイクルの最初の発想がそこにあったんですね。

河田 それにフェルミも賛成した。そこでまず、最初にマザープラントを作って、そこで大量の天然ウランに中性子を照射してプルトニウムをつくり、それを多数の発電用原子炉に供給するという案が出ました。ついで、さらに効率的なウランの利用法として高速増殖炉の基本概念が、そのときに考案されました。彼らは第2次大戦が終わったら早速高速炉の開発に取り組みました。

澤田 その一方であるときから、プルトニウムの平和的利用、民生利用はやめたほうがいいという意見が出てきます。

河田 たしかにフェルミも1944年にすでに、「燃料が原爆に転用可能なエネルギー源を大衆が受け入れてくれるかどうかはわからない」と述べています。これが……

澤田 核拡散問題の原点ですね。

河田 その前にレオ・シラードが、核技術が世界的に伝播することへの懸念を示しています。だから、彼らは核技術を、タイトに守っていくべきだと考えていた。しかし、核技術を抱きかかえるのではなく、むしろ核技術を世界的にシェアする。もちろんその際には、国際的な管理が必要になる。それが、アトムズ・フォア・ピースにつながっていく。

澤田 アトムズ・フォア・ピースとはアメリカ合衆国大統領選挙ドワイト・D・アイゼンハワーが1953年12月8日に国連で行った演説ですね。日本でも1954年ごろに武谷三男や朝永振一郎らが同じ理念を共有していて、日本独自の原子力の平和利用を考えていた。それが後の国

産化原子炉につながっていく。それはさらに高速実験炉常陽から原型炉「もんじゅ」に繋がって行きました。

文芸春秋が1954年5月号で、坂田昌一、菊池正士、湯川秀樹、佐治淑夫による座談会「活かせ原子力」という記事を掲載しており、そこでは日本での原子力の平和利用の未来をどう開いていくかという議論が実に真剣かつ希望に溢れるような雰囲気の中で展開されています。

河田 米国ではマンハッタン計画の時にリーダーとなったヴァネヴァー・ブッシュやジェームス・コナントらも、核拡散や軍拡競争について懸念をもっていました。

澤田 そんな中でアイゼンハワーはなぜ、世界的な原子力の平和利用、言い換えれば核技術の拡散に踏み切ったのですか。

河田 1949年8月ソ連が原爆実験に成功すると、米国は直ちに水爆開発を決断。初の水爆実験は1952年11月に成功したが、その9か月後にソ連が追いついてしまった。そのことに米国は、強い危機感をもちました。このまま核競争していったら、相互破滅しかない。であるならば平和利用と抱き合わせで、国際的な核管理体制をつくらうとしたのです。

澤田 そこでは平和利用の枠内で、核技術を移転するというコンセプトですね。

河田 そうです。

高速炉による夢のマルチリサイクルが構想される

澤田 1953年暮にアトムズ・フォア・ピース演説を行った時、米国は既に平和利用面では最初の高速炉EBR-1を運転していましたね。軽水炉でプルトニウムを使うと、プルトニウムは1回ぐらいの利用で劣化してしまう。一方で高速炉の場合は、何度もリサイクル利用できる、マルチリサイクルが実現できるということに、大きな意義があります。

河田 そうですね、プルトニウムを何回もリサイクルしながら使えるという高速炉の概念は、神の恵みだったと思います。その秘訣は、もちろん、炉心で燃やすと劣化するプルトニウムに、ブランケットで生まれるフレッシュなプルトニウムと混ぜながら使うことで、プルトニウムの品位を一定レベルに保てることにあります。

澤田 このマルチリサイクルが実現するというのは、いつごろわかった話ですか。

河田 EBR-1は1951年12月に人類初の原子力発電を行い、4ケの電灯を灯すことに成功しました。それを手がけたのはフェルミの弟子で初代ANL所長になったウォルター・ジンですが、彼やその仲間が最初に発見したと思います。次のEBR-2では、クローズドサイクルⁱ

ⁱ クローズドサイクルとは、“閉じた”核燃料サイクルを意味します。つまり使用済燃料を再処理し、回収したウランやプルトニウムを新燃料として再び原子炉に戻すことを意味します。

を実現していますので、その過程で彼らはマルチリサイクルの実現性をしっかりと認識したと思います。そうした米国を追いかけ、各国が高速炉開発に乗り出していく。

澤田 マルチリサイクルの一番のメリットは、燃料コストが安くなるということですか。確か高速増殖炉サイクル実用化研究開発(通称 FaCT プロジェクト)の試算では、燃料コストはワンスルー方式を1とすると、プルサーマルで1.5、高速炉マルチサイクルでは0.7だったと思いますが。これはあくまで様々な想定のもとでの“試算”ですが、ポイントはプルトニウムが事実上ほとんど劣化しない、かつワンスルーよりも安価な燃料コストの実現可能性があるということです。これが仮に日本で実現すれば、潜在的には日本も核燃料輸出国になれますね。

河田 1950年代ぐらいまでのウランはまだ、希少資源でした。だから、第1回ジュネーブ会議(1955年)では再処理技術は公開されたけれども、各国のウラン資源量は機密事項で公開されなかった。だからこそ、高速炉でプルトニウム使いながら燃料を増やせるということに力点が置かれていた。マルチリサイクルでの持続性というより、足りないウラン235の代替としてプルトニウムを作らなければならないというイメージが強かった。

けれども高速炉は構造的には複雑だし、その後に出てきた軽水炉より、コストが高いということはわかってきた。それでも当時の先進各国は、高速炉には資源制約から解放される魅力があるということを強く認識して、一生懸命進めていた。日本もそれは同様で、1964年の第3回ジュネーブ会議に刺激されて開発を本格化し、動燃(動力炉・核燃料開発事業団)をつくることになった。そして、高速実験炉常陽が1977年に臨界を達成しました。

澤田 その常陽で、少量ながらもプルトニウムをリサイクルしたという実績があるわけですね。

河田 1983年に常陽使用済燃料の再処理試験を高レベル放射性物質研究施設(CPF)で行い、回収されたプルトニウムで翌年 MOX 燃料ペレットに仕上げ、新たな常陽燃料に組み込んで燃焼開始しました。ほんの数個の燃料ペレットですが、高速炉でのプルトニウムリサイクル利用を実証しました。次いで、高速炉の先進的再処理技術を工学的な規模で実証しようとしたのが、リサイクル機器試験施設(RETf)計画でした。けれども、その後の「もんじゅ」事故と東海再処理工場のアスファルト事故で、それがなくなった。これはとても残念な歴史です。

原子力を長期に利用するなら高速炉は必須

澤田 これまでの話からすると、プルトニウムというのはうまく使えば、とても利用価値が高い。さらにもう一つの点は、軽水炉はいずれ、高速炉に移行していかなければならないということがありますね。第4世代の原子炉としては6のコンセプトが提出されています。第4

世代の原子炉の重要な要求事項の一つが核燃料の高効率利用であり生産つまり増殖です。第4世代の原子炉候補のうちこれまでに唯一実際に建造されてきたのはナトリウム冷却の高速炉です。燃料の増殖も考えればナトリウム冷却高速炉以外の実現には多くの困難なチャレンジの壁があると思いますよ。さて、その高速炉への移行のイメージについて、説明をお願いします。この点は今の若手も、情報を得る機会が減っているのではないのでしょうか。

河田 原子力利用を今世紀の中ごろ以降も続けていくのであれば、私はいずれ高速炉に移行して軽水炉が残す厄介者の後始末をしていくということが、ぜひとも必要だと思います。軽水炉でプルトニウムを燃やすといっても、実際に燃えて無くなるのは、作られたプルトニウムの5%ぐらいで、あとの95%は MOX 使用済燃料のかたちで品位は低下するがそのまま残る。

軽水炉で再処理・リサイクル方式を採用ことのメリットは、資源節約もありますが、高レベル廃棄物処分場の必要面積を直接処分に比べ三分の一に減らせることで、この点は国土の狭い日本では願ってもないことです。もし、高速炉時代を迎えないのであれば、MOX 使用済燃料の処分が必要になり、結果的に処分場必要面積は直接処分の場合と変わらないことになる。

一方高速炉時代を迎えるのであれば、①軽水炉 MOX 使用済燃料の低品位プルトニウムを燃やし尽くせる、②軽水炉用低濃縮ウラン生産で残される膨大な量の劣化ウランもプルトニウムに転換しつつ燃やし尽くせ、実質的に数千年分の発電を可能とする、③ MA もリサイクルで燃やせ、その結果、高レベル廃棄物処分場の必要面積が、再処理・リサイクル方式の軽水炉に比べ半減できる。要するに高速炉は、軽水炉時代が残す様々な厄介者をすべて燃料に転化して燃やし尽くせ、しかも数千年にわたる電力供給を可能とする「究極のゴミ焼却発電炉」なのです。しかも処分場の負担軽減もできるので、日本で原子力の長期利用を進めるためには、今世紀後半のどこかで高速炉にぜひ移行していくべきだと考えています。

なお、原子力発電容量の大きな上位5ヶ国は、米、仏、日、中、露ですが、米国以外はすべて再処理・リサイクル方式を採用、または志向しており、究極的には高速炉でのプルトニウムリサイクル利用を目指しています。米国も、国立研究所等の技術陣は第4世代原子炉の検討参加などを通じ、将来的な高速炉の重要性は十分認識しています。

海水ウラン利用直接処分方式なら処分場面積は6倍

澤田 それは、環境負荷低減の問題ですね。つまり、軽水炉利用は環境負荷が大きくなってしまおうということです。

河田 もちろんそうですが、日本では地層処分事業に

国民や住民の理解を得るのに大変難渋しています。それを少しでも進めやすくするためには、廃棄物にプルトニウムや MA を持ち込まずに毒性を極力下げたり、処分場の必要面積を小さくする努力はとても大切であり、それを高速炉が可能にしてくれます。

澤田 ともあれ、原子炉はすでに使っているわけですから、プルトニウムや劣化ウラン、高レベル放射性廃棄物などがどんどん溜まる。だから、何らかの形でそれらの全体的後始末をせざるを得ない。そういう中での高速炉の役割はきわめて重要ということですね。

河田 プルトニウム利用に反対する人の中には、海水からウランが無限にとれるから将来もずっと軽水炉の直接処分で行けると主張することがあります。けれども、その方式では、高速炉利用の場合より6倍ぐらい広い処分場を将来にわたって確保していかなければならない。処分の観点から国土の狭い日本では決して勧められません。

澤田 海水ウランは総量は多くても、非常に広い範囲に極めて低い濃度で分布しているので、エントロピーが極めて高い。バケツに溢した万年筆インクを回収するようなものです。つまりコストの観点からも資源には成り得ません。高速炉によるプルトニウム利用にはその他の意義はないのですか。

河田 ウランの新たな採掘が不要になります。ウラン採掘自体が、環境へ相当の負荷を与えています。高速炉では、すでに地上に厄介者として溜まっている劣化ウランを補給してだけで数千年の発電が可能になります。

澤田 だから、いわゆる国産エネルギーとなる。

河田 それは国連が定めた持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals: SDGs) の理念にもかなう。今の軽水炉だと、ウラン資源の1%も有効利用できません。また、直接処分ではプルトニウムを埋設すると、300年後は割に簡単に取り戻せるようになるとともに、核兵器材料としての魅力も高まるので、将来世代に核拡散上のリスクを押し付けることにもなります。

澤田 どういうことですか。

河田 原子炉級プルトニウムを長期間、そのまま放置すると、核兵器転用への障壁要因の一つである発熱がどんどん低下します。同時に放射能が大きく低下するのでその分再取り出しが容易になる。1995年に米国原子力学会がまとめた「プルトニウムの防護と管理」という文書でも「直接処分は国家的核拡散リスクを完全除去することにはならない」と指摘しています。

澤田 日本は今や、脱プルトニウム世界になりつつあります。原子力委員会も、プルトニウム削減に向けた指針を出しました。そこで対象となっているのは、分離プルトニウムです。しかし将来を見越せば、この貴重な資源をわざわざ、いま急いであえて「減らす」あるいは使えなくするという事はないと思うのですが。

河田 将来高速炉を導入するつもりであれば、立ち上

げ時に大量のプルトニウムを必要としますので、そのために長期備蓄すればよいのです。もちろん核拡散上の懸念を払拭するため IAEA 保障措置の下での厳格な管理が必要です。

澤田 その時に、原子炉級のプルトニウムが軍事利用に転用できるかどうかという、永遠の神学論争のようなことが起きる。原子炉級のプルトニウムは兵器にはならないというようなことをいう人もいますが。

河田 いえ、その考え方は素朴ですね。原子炉級プルトニウムでもそこそこの爆発威力を持つ核爆発装置なら作れます。しかし、ミサイルに搭載し常時配備しておくような本格的核兵器には使えません。例えば軽水炉由来のプルトニウムですと、その発熱が100ワット程度になってしまい、爆縮用の火薬を不安定化させてしまいます。

澤田 今はプルトニウムを減らすと言っているけれども、どうやって減らすのですか。

河田 プルサーマルが進まない限り、日本では削減の道はないと思います。電力は、今でも16~18基でのプルサーマルを目指すと言っていますので、国はフル MOX の大間原発の完成も含め、その実現に向け最大限の支援を行うべきです。

イギリスでは100トンを超える民生用プルトニウムが溜まっており、政府は長年それをどうするか検討してきましたが、数年前に、廃棄物として捨てるのではなく、MOX 燃料にしてこれから建設される軽水炉で燃やすことが望ましいとの決断を下しました。現在カナダの改良型 CANDU 炉 (カナダ式重水ウラン炉) や、米国の PRISM (革新型小型モジュール炉) で燃やす代案をも検討していますが、いずれにしても実際にプルトニウムを燃やし始めるのはかなり先になります。実施組織である NDA (Nuclear Decommissioning Authority) の責任者は、「プルトニウムの後始末は短距離競争ではなく、マラソンのような仕事だ」と言って、じっくりと構えて対応するというメッセージを国民に出して、理解を求めています。

澤田 日本ではなぜ急に、分離プルトニウムを何とかしようという話になったのでしょうか。

河田 日米原子力協力協定が30年の満期になる際に、日本国内の再処理反対グループが米国政府周辺にいろいろな疑問を投げかけるロビー活動を行いました。米国内には、カーター政権以来伝統的にプルトニウム利用に反対する民主党系の学者や議員などがいてこれに呼応し、彼らが連携して「日本のプルトニウム保有に国際社会で懸念が広がっている」といったネガティブキャンペーンを展開しました。実際に日本のプルトニウムに文句をつけたのは、米国以外では中国と北朝鮮のみで、いずれも日本たたきの言いがかりに過ぎないのです。

澤田 それでも、それに日本政府が乗ってしまったと。

河田 日本政府の今の担当者は、長い実務経験を持つ

人たちから意見を聞く場がなくなってきた。そういう人たちから意見を聞くと、それは推進側との癒着と批判されてしまう。原子力に関する日本政府のいろいろな情報収集メカニズムが劣化しているということだと思います。

澤田 改めて、日本がプルトニウムを利用した高速炉によるリサイクルを進めるということの意義を。

核燃料サイクル技術を手放してはならない

河田 日本は無資源国です。石油や天然ガスはシェールガスやシェールオイルのおかげでしばらくは大丈夫だという雰囲気ですが、シェールオイルもシェールガスもいずれ、陰ります。それは宿命で、今世紀後半になると石油・ガス系の燃料は非常に厳しい状況になることが予見されます。

けれども、この前公表されたエネルギー基本計画は、2030年までが主で、2050年を超える状況への備えは全く考えていない。化石燃料はこれからひっ迫するし、コストも当然、上昇していく。それをふまえてベースロード電源をしっかりと確保しなければならない。それは北海道の停電でもわかったことです。その意味で、原子力への長期依存は、日本国民にとっては避けたい選択肢であるという認識を高める必要がある。原子力への長期的依存が避けたいのであれば、再処理・リサイクル路線の堅持が不可欠であり、将来的な高速炉サイクル実現に向けての足固めを日本はしっかりと進めないといけないのです。

そのための実力養成の場になるはずだったのが「もんじゅ」です。その運転によって日本の技術を実務経験に裏打ちされた強靱な技術に高め、実用化に向けて力強い体制構築ができると思っていたのですが、残念ながら今、それを捨てようとしています。

米国ではかつて、いくつかの MOX 燃料製造施設があり、優秀な製造能力があったのですが、カーター政権で潰され、関連する技術が途絶えてしまいました。その結果、米ロ協定のもとで進める解体核プルトニウム処分のためにサバンナリバーで開始した MOX 燃料工場の建設がうまく進まず、計画放棄に至るという惨たんたるありさまで。このまま「もんじゅ」を潰し、再処理も抑えるということで、六ヶ所が尻すぼみになれば、今の米国と同じように、プルトニウムを利用するインフラがなくなり、それを自らつくりえない国になります。将来高速炉時代が来た時には、日本も米国も中国に頼らざるを得ないということになるかもしれない。果たして日本は、そういう道をとっていいのか。政治家がなすべき大きな決断だと思います。

澤田 「もんじゅ」問題でも結局、政治はどこを向いているのかわからないような状況になって行きました。

河田 文科省は、福島第一原発事故以前から重たい原

子力開発からは早く足を洗い、その予算と人員を削って、宇宙や海洋などに回したいという意図が見え見えてした。

澤田 2050年までを見通したエネルギー情勢懇談会があるけれども、明確なメッセージを出すに至っていません。原子力のあり方を議論し、統括する司令塔がそもそもない。原子力を含めたエネルギーに関するグランドデザインを考え、それに沿ってやるべきことを実行していく。3.11以降、そこが崩れたままです。

河田 かつては原子力委員会が長期的な視点も含めて議論する場としてあったけれども、その再復活というのは、望むべくもない。今の中途半端な原子力委員会は廃止し、エネ庁に原子力推進側の全責任を集中させるべきではないでしょうか。それと合わせ、エネ庁の中に、日本の長期的なエネルギーセキュリティという根幹の議論をする場を設ける必要があるのではないかと思います。その際には、今世紀中ごろ以降、どれだけ化石燃料に頼ることができるのか、その化石燃料のコスト上昇に日本はどれだけ耐えられるのか。再エネはどこまで頼れるのか。ベースロード電源はどこまで必要か。少なくとも今世紀いっぱいまでを見通して、どういう道を歩むのが将来世代のために安全か。そうした議論を行い、国家百年の計の基本ビジョンを提示するエネルギー安全保障部会のようなものを、ぜひ作ってほしい。今の総合資源エネルギー調査会は、本来はそういう機能を持っていたべきなのですが、今は極めて近未来的なことに議論が集中しています。特に原子力はインフラ整備に長い時間を要するので、近視眼的な議論だけではかみ合わないリスクがあります。エネルギー資源小国日本では、近未来の議論においても、土台に100年先への基本ビジョンを持つておくことは極めて重要だと思います。

この問題は原子力という枠の中で議論することではありません。それを含めてエネルギー全体をも見通した中でさまざまなオプションを提示して見直し、将来世代のために知恵を出し合うということですね。

澤田 原子力学会の中にも、いまお話しいただいたような大きな視点からの議論を交わす場があってもいいのではないのでしょうか。

河田 ぜひ学会でもそういう議論を支えてほしい。最近狭い範囲の研究者ばかりが目立ちます。トータルビジョンというか、鳥瞰図的にこの世界を眺める人が、どんどんいなくなってしまっています。さらに、そのことを誰に向かって訴えればいいのかさえ、わからなくなっています。ぜひ、そのことを意識し、学会においても政策論を含む大局的な議論の場の復活に向けた努力をしてほしいものです。

澤田 今日は誠に貴重な知識提供とご提案をいただきました。ありがとうございました。

(2018年9月28日実施)

高速炉開発の現状と展望

日本原子力研究開発機構 佐賀山 豊

次世代の第4世代原子力システム(Gen-IV)については、将来の世界のエネルギー需要に対応するため、持続可能性、安全性・信頼性、経済性、核拡散抵抗性などの開発目標を設定し、この開発目標を満たす優れた概念を目指して各国で研究開発が進められています。その中で、多国間協力枠組みとして2001年に発足した「第4世代原子力システム国際フォーラム(Generation-IV International Forum(GIF))」が活発に活動しています。GIFでは、上述の開発目標を達成可能な炉型として、ナトリウム冷却高速炉(SFR)、超高温ガス冷却炉(VHTR)、ガス冷却高速炉(GFR)、超臨界圧軽水冷却炉(SCWR)、鉛冷却高速炉(LFR)、熔融塩炉(MSR)の6つが選定されています。このうち、SFR、VHTR、LFRについては、近年ロシア、中国等で原型炉や実証炉の設計・建設・運転が進められています。特にSFRに関しては、ロシアにおいて実証炉の運転が開始され、実用炉の設計が進むなど、GIFの目標である2030年頃の実用化が射程に入ってきています。GFR、SCWR、MSRについても研究が進められ、それぞれの特徴を活かしたプラント概念が検討されています。このGIF活動の中で、世界的に合意されていることは、ウラン資源の有限性や環境負荷低減の必要性に基づき、Gen-IVは持続可能性(Sustainability)の能力・特性を持つ必要があるということです。SFRが近い将来それを実現出来る最も有力な概念と認識されており、SFRの安全設計クライテリアとガイドラインを作成し、国際標準化に向け世界の規制メンバーとの協議を進めています。

こうした国際動向を踏まえれば、2018年7月に閣議決定された「第5次エネルギー基本計画」に記載されている通り、核燃料サイクルに期待される資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減が可能なGen-IVの開発が必要と言うことになります。また、マイナーアクチノイド(MA)やプルトニウム(Pu)等の超ウラン核種(TRU)の変換・燃焼(燃料利用)により、放射性廃

棄物中に長期に残留する放射能をさらに少なくし、放射性廃棄物の処理・処分の負荷を低減する技術等の開発も、国際協力を活用しつつ推進されるべきでしょう。

これまで、我が国では、Gen-IVの革新炉開発としては、SFRを中心に進めてきました。そこでは、前述の通りウラン資源の有効利用、放射性廃棄物の環境負荷低減を主眼に、熱出力100MW(申請中)の実験炉「常陽」や電気出力280MWの「もんじゅ」の建設・運転、電気出力750MWの実証炉並びに電気出力1,500MWの実用炉JSFR等の設計研究や必要なR&Dを行ってきました。2011年の東日本大震災による東電福島第一原子力発電所のシビアアクシデントの後、実証炉開発研究である「FaCT」のフェーズ2(建設に向けた概念設計)への移行は見送りになったわけですが、「第4次エネルギー基本計画(2014年4月)」を踏まえ、米国や仏国等の研究開発機関とも協力し、SFRの安全性強化、放射性廃棄物の減容・有害度低減を目指した研究開発を継続してきています。

このような継続的な研究開発の結果、我が国はSFRに関して、実用化を目指せる技術基盤を産業界、研究機関共に保有しています。経済産業省・高速炉開発会議の提案を受け、2016年12月の原子力関係閣僚会議で決定された「高速炉開発の方針」に記載されている通り、「もんじゅ」廃炉決定後も、資源を持たない我が国は、これまでの研究開発活動を通じて培ってきた世界最高レベルの技術基盤の維持・発展を図りつつ、高い安全性と経済性を同時に達成するSFRサイクル技術を世界に先駆けて開発・実用化し、もって国際標準化に向けたリーダーシップを最大限に発揮することが望まれます。そうした高速炉研究開発の具体的方向性については、2017年3月から開始された高速炉開発会議・戦略ワーキンググループにおける、今後10年程度の開発作業を特定する「戦略ロードマップ」検討作業の中で、国内外有識者の意見を聞きながら検討されているところです。

なお、今後の高速炉研究開発においては、「第5次エネ

ルギー基本計画」に示されている通り、パリ協定を受けた我が国の脱炭素化(2050年温室効果ガス排出80%削減)の方向性を踏まえ、2050年代に発電起源のCO₂を殆ど排出しない世界を実現すべく、その時代の新設原子力の主流と期待されている高速炉を中核とする次世代原子力システムを目指すと共に、再生可能エネルギーとのコンビネーションのあるべき姿を提案していく必要があると考えています。

仏国は欧州で唯一のウランのリサイクル利用に成功した国ですが、再生可能エネルギー拡大による気候変動対応を指向したエネルギー移行法の成立とそれを受けた原子力規模縮小の動きや、仏原子力・代替エネルギー庁(CEA)やパートナー各社の資金不足を背景に、次の世代に向けた高速炉開発を如何に継続していくか苦心しています。一方、そうした厳しい状況下でもCEAとしては、引き続きSFR技術の維持・発展を目指すとしています。日本がこれまで開発してきた「もんじゅ」を代表とするループ型と、仏国のタンク型のSFRは、原子炉や一次主冷却系の構成は異なるものの多くの共通技術を有しています。日本は2014年より、両国の共通技術のうち特に安全性を向上させる技術に関して、その設計を協力・分担して実施すること、並びに関連する研究開発を分担あるいは共同実施すること等により、仏国のSFR実証炉であるASTRID開発に協力してきました。これにより、仏国のSFRに関する知見や設計概念検討を通しての知見を取得し、我が国の設計オプションや関連する技術知見を拡充しつつあります。今後は、同協力を日本の高速炉開発にさらに一層役立てるべく、仏国との協力範囲拡大の可能性や協力内容について詰めていく予定です。

欧州全体を俯瞰すれば、EUレベルでのSFR、GFR及びLFR実証炉等の設計活動や、仏国のASTRID開発の動き、最近の英国における次世代モジュール炉選定の動き等はあるものの、全体として高速炉開発は停滞気味です。米国では、原子力利用の更なる推進及び新型炉開発が民間活力に任されていることにより、DOEによる民間活動支援(Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear(GAIN:国立研による支援)や資金提供の公募(Funding Opportunity Announcement(FOA))はあるものの、高速炉開発は産官学での大規模な動きにはなっていません。また、政権交代もあり、国としての次世代原子力に関するイニシアティブの提案も遅れています。ただし、多目的試験炉(Versatile Test Reactor(VTR))としてSFR建設の動きが出てきています。連邦議会が支援

していることもあり、その動向は注目されます。

一方、前述の通り、中国、インド、ロシアでは、2030年頃の高速炉、取り分けSFRとそのサイクルの実用化を目指して、精力的な開発が進められています。原子力の発電規模拡大を目指している中国は、中国製PWR(HPR1000)の建設・利用に続き、燃料サイクルと共にSFRの開発に積極的であり、2023年運転開始を目指して電気出力600MWの実証炉CFR600を建設しています。インドは、電気出力500MWの原型炉PFBRの建設を終了し、試運転の準備をしている段階です。これに続く電気出力600MWの実用炉6基をシリーズ建設する計画であり、実用炉1号機は2029年の運転開始を目指しています。これらの国のうち、特にロシアのSFR開発が最も進展しており、電気出力880MWの実証炉BN-800の運転を2016年に開始し、電気出力1,200MWの実用炉BN-1200を2032年までに完成させるとしています。また、ロシアは原子力における覇権獲得を目指して、安全性と経済性に優れた最新鋭のPWR(VVER-1200)と、将来的なGen-IVとしての要件を満たすSFR実用炉のBN-1200を世界標準の原子炉とすべく、ロシアの世界戦略炉として開発しています。このため、ここ数年中国と同様にアジア、アフリカ等の原子力の導入を目指している国々に向けて、協力関係構築を働きかけています。

これまで高速炉に関する現状を振り返ってきましたが、「第5次エネルギー基本計画」、「高速炉開発の方針」にある通り、資源を持たない我が国は世界に先駆けて高速炉とそのサイクル技術を確立し、CO₂を排出しない世界を実現すべきでしょう。そのため、発電体系における再生可能エネルギーとの適切な組み合わせの将来像を提案し、これを世界に向けて発信していく責務があると考えています。その際、将来的にCO₂排出量抑制の観点で、非化石燃料エネルギーである原子力と再生可能エネルギーの割合を拡大していく場合、安定で安価な電力の供給の観点で、どのような両者の比率が適正か?に回答すべく、再生可能エネルギー関連技術の発展も見据えたベストミックスを考えていくべきでしょう。また、TRU核種と共に、放射性廃棄物である長寿命核分裂生成物(LLFP)を分離抽出して高速炉炉心に添加し、それらの短寿命化を実現する事により、最終的には長寿命の高レベル放射性廃棄物を無くすことに繋がる可能性があります。こうした理想的な原子力の将来像の実現に向けた技術開発にも、果敢に挑戦していくべきと思われます。

(2018年10月15日記)

東海再処理工場の軌跡

日本原子力研究開発機構 山村 修

昭和 40 年(1960)代になって、事業としての施設の必要性から、国・原子力委員会の導入技術路線に沿い、原子燃料公社(旧動燃、現日本原子力研究開発機構)にて、実用規模(0.7tU/d, 210tU/年(y)処理)の東海再処理工場(TRP: Tokai Reprocessing Plant)が、仏国を中心とする技術をベースに建設された。当時は LWR 使用済燃料再処理(L 再)が世界的に見ても黎明期であったことから、その設計技術も成熟したものとはいいがたく、結果として TRP は様々な運転上のトラブルに遭遇することになった。このトラブルを克服する過程で独自の技術開発を加えざるを得なくなり、この経験を通して TRP を準国産の再処理工場として仕上げると共に、我が国独自の技術を獲得する機会を得ることができたと言える。

立地地域との関係で、岩上茨城県知事は、原子力審議会の答申、県議会及び関係市町村の意向を 7 項目に集約し、昭和 45(1970)年 2 月 20 日「核燃料再処理施設の設置に関する諸問題について」で科学技術庁長官にその処置を確実に講じるよう申し入れ、同年 5 月 29 日西田科学技術庁長官および原子力局長からこの要望についての回答があり、茨城県は、動燃の TRP の設置を容認することになった。

I. 安全審査

動燃は安全性に関する資料を作成、昭和 43(1968)年 8 月 13 日安全審査の申請を行った。再処理施設の処理能力は以下とした。

最大 約 0.7tU/d 年間最大 210tU

但し、せん断・溶解・分離第 1 サイクルの能力は 1tU/d

使用済燃料の受け入れは乾式

処理対象燃料の燃焼度は平均 28,000MWd/tU

設計最大 35,000MWd/tU

昭和 44(1969)年 3 月 25 日、再処理施設安全審査専門部会は、安全性は十分であると原子力委員会に答申した。昭和 44(1969)年 11 月 27 日 原子力委員会は、「再処理施設は安全」と内閣総理大臣に答申を行い、昭和 45(1970)年 1 月 12 日には、内閣総理大臣は再処理の安全性について承認した。この安全審査での気体廃棄物の放出量は表 1 の通りである。

表 1 気体廃棄物放出量

核種	燃料 0.7t を処理するときの放出量(Ci)
Kr-85	8.0×10^3
H-3	4.9×10
I-129	1.5×10^{-4}
I-131	1.44×10^{-3}
Xe-133	1.76×10^{-4}

被ばく線量評価の計算結果は、以下の通りである。

(A) 外部被ばく：全身線量として、年間 32mrem

(B) 内部被ばく：

放射性ヨウ素による甲状腺被ばく線量として、I-131 の呼吸摂取による被ばく線量を計算し(主排気筒より南西方向約 2km の地点で)成人の甲状腺について年間 0.03mrem 液体廃棄物については、放出放射能は、年間 260Ci、3ヶ月当り 65Ci、1日当り約 0.7Ci(1日最大 1Ci でトリチウムを除く)トリチウムは 1日 140Ci。

(A) 内部被ばく

海産物摂取に因るもの、年間全身 2.1mrem

(B) 外部被ばく(何れも年間)

ガンマ線全身 9.6mrem

ベータ線皮膚 14.5mrem

手の皮膚 130mrem

海洋放出放射能の設計については放出放射能は 1日最大 0.7Ci へと変更した。即ち、実用規模の再処理工場として、周辺公衆の被ばくへの寄与を当時、世界で一番厳しく抑えた再処理施設とした。

詳細設計の設計条件は、下記項目とした。

処理対象燃料：原電敦賀 1 号炉、原研国産 1 号炉、JRR-3、原研動力試験炉 JPDR、標準型軽水炉発電所(BWR 及び PWR)

燃焼度：濃縮ウラン燃料(平均)28,000MWd/tU

設計最大 35,000MWd/tU

処理能力：機械的脱被覆工程と高放射能取扱区域：1tU/d その他：0.7tU/d

装置の耐用年数：10 年

燃料貯蔵プール貯蔵能力：低濃縮ウラン燃料換算 140tU(金属ウラン換算)

Ⅱ. 設計・試運転ならびに本格操業

1. 詳細設計

昭和 40(1965)年 10 月、原子燃料公社は SGN を選定した。

詳細設計の内容は、1)FDB(Firm Design Basis)即ち、基本設計と 2)詳細設計に大別される。基本設計には AMF 社の設計した Chop and Leach 法を組み込み、また第 2 次詳細設計の中には、設計費見積 (cost estimate schedule)が含まれていた。

2. 伝導技術に基づく技術の変遷

TRP のプラントの信頼性向上に関しては、様々な改良の成果が挙げられる(表 2)。

環境負荷低減に関しては、液体・気体放出核種の低減化技術開発が、また廃棄物処理ではその発生量低減化技術開発や安定化・固定化技術開発が挙げられる。また核拡散抵抗性の向上に関して、日米再処理交渉により約束事項とされた Pu-U 共抽出(co-processing)の検討および、その代替の Pu-U 混合転換技術ならびに SG 技術の開発が挙げられる。

3. 試運転・本格操業

TRP のホット試験の開始は、核不拡散を巡る日米再処理交渉の結果、日米原子力協定に基づく共同決定を必要としたことから多少遅れたが、国からの保安規定の改定認可も受け、昭和 52(1977)年 9 月 22 日から原研動力試験炉(JPDR)の使用済燃料のせん断を開始、順次燃焼度の高い BWR 試験、PWR 試験と進めた。総合試運転

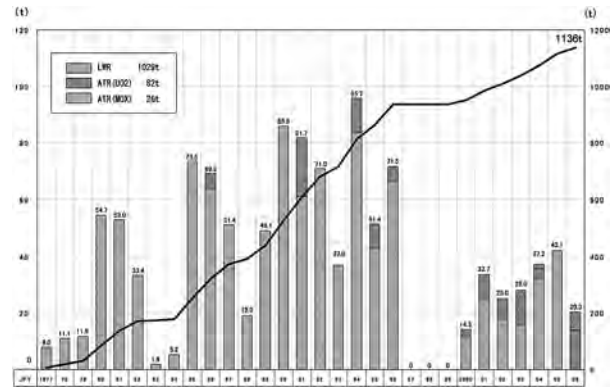


図 1 運転実績

を昭和 54(1979)年 11 月に再開し、基本契約上の受取試験を PWR 使用済燃料を用い行い、ホット試験が昭和 55(1980)年 2 月 24 日完了した。

昭和 55(1980)年 12 月、建設中における検査も含め、再処理施設が総理府令で定める技術上の基準に適合しているとして、科学技術庁長官より使用前検査合格証が交付され、以降操業運転となった。

昭和 56(1981)年 1 月から本格操業に入ることとなり、これを機に東海事業所再処理建設所の名称を再処理工場に変更した。こうして、独り立ちした直後の昭和 57(1982)年 4 月、溶解槽の 2 基のうちの 1 基が故障した。

昭和 52(1977)年 9 月にホット試験を開始して以来、平成 18(2006)年まで、1,136 トンの SF(使用済燃料)を処理した TRP の運転実績を図 1 に示す。

Ⅲ. 保守・保全技術の確立

国へのトラブル報告が 55 事象にのぼり、その内稼働率に大きく影響を与えた「故障」案件が 30 件。この内訳は、動的機器(機械系)が半数でせん断機やその周辺機器であり、残る半数が静的機器(化学系)における腐食に起因する漏えい等である。TRP では、蒸発缶類の伝熱部の故障は「加熱用蒸気凝縮水系の放射線量率の上昇」として検出され、凝縮水に流出した放射能は自動的に閉じ込められるよう設計され、これが機能し汚染を検知した。

一 参考文献

- 1) 杉山俊英, 山本徳洋, 中井俊郎, 他, “軽水炉使用済燃料の再処理,” 動燃技報, No.100, (1996).
- 2) 高橋啓三, “再処理技術の誕生から現在までの解析および考察,” 日本原子力学会和文論文誌, 5[2], 152(2006).
- 3) 山村修, 山本隆一, 野村茂雄, “東海再処理工場における保守技術開発に関する分析評価,” 日本原子力学会和文論文誌, 6[4], 491(2007).
- 4) 小山謙二, 石橋祐三, 大谷吉邦, “東海再処理工場における遠隔補修・点検技術,” 日本原子力学会誌, 28[2], 108(1986).
- 5) 大谷吉邦, “溶解槽の遠隔補修について,” 動燃技報, No.53, (1985).

(2018 年 10 月 20 日 記)

表 2 東海再処理施設における技術開発成果

プラントの信頼性向上	○機器腐食への対応・改良 硝酸環境下の加熱塔槽類の腐食対策 ○不溶解残渣閉塞への対応・改良 不溶解性残渣による詰まり防止対策、詰まり除去技術の開発 ○遠隔保守技術開発 遠隔操作による機器補修技術、点検技術の開発 ○機器の改良開発 保守、運転性、稼働率の向上
環境負荷低減	○液体放出核種の低減化技術開発 放出低減化のための技術開発施設(E, Z 施設)の建設 ○気体放出核種の低減化技術開発 ヨウ素放出の低減化 放射性クリプトンの回収・固定化技術の開発
廃棄物処理	○廃棄物発生量の低減化技術開発 含塩廃液の低減化 ○廃棄物の安定化・固定化技術開発 低レベル濃縮廃液の固定化技術、廃溶媒の処理技術 高レベル放射性廃液のガラス固化技術の開発
核拡散抵抗性の向上	○プルトニウム-ウラン混合転換技術の開発 ○保障措置技術の開発

海水からのウラン採取技術の現状と展望

量子科学技術研究開発機構 玉田 正男

I. 海水中のウラン資源

地球上の海水中には45億トンの膨大なウラン資源が炭酸イオン錯体の形態で溶けている。このウラン資源量は、世界に437基ある原子力発電所のウラン需要量である57千トン¹⁾の約8万倍である。また、海底の岩盤には、海水に溶存するウランの1,000倍以上のウランが含まれており、海水中のウランを採取しても岩盤からの滲出により、平衡が保たれる。したがって、長年にわたり採取が可能なウラン資源として有望である一方、溶存濃度は3.3ppbであり、海水1トンに3.3mgと極めて低い。そのため、この資源の採取には、海水中の500万倍のナトリウムイオンやマグネシウムイオンの共存下で、効率よくウランを吸着できる捕集材の開発が鍵となっている。

II. ウラン捕集材開発の経緯

1970年代からイギリス、フランス、ドイツ、日本などで、含水酸化チタン($\text{TiO}(\text{OH})_2$)がウラン捕集材として注目され研究開発が始まった。日本では、含水酸化チタン粒の流動層へ海水を汲み上げることでウランの採取が試みられた。その結果、海水の汲み上げなどに要するポンプ動力に多くの経費がかかった。この課題の解決のため、1980年代には海水を汲み上げるのではなく、海水中に浸漬する捕集材の研究開発が進められた。海水と比重が同程度である有機材料について、200種類以上の材料がスクリーニングされ、アミドキシム基($-\text{C}(-\text{NH}_2)=\text{N}-\text{OH}$)が選出された。アミドキシム基は、セーターや毛布に利用されているアクリル(ポリアクリロニトリル)繊維のニトリル基($-\text{CN}$)をヒドロキシルアミンと化学反応させて作製することができる。アミドキシム基型捕集材は、親水性を高めて膨潤性を増大させるとウランの吸着性能は向上するが、機械的強度が低下するため、海水中に浸漬できる捕集材作製を目指した研究開発は難航した。この相反性は、高分子の放射線加工技術であるグラフト重合によって解消され、ウラン吸直性能と機械的強度を合わせ持つウラン捕集材の開発に至っている。

放射線グラフト重合は図1に示すようにポリエチレンなどの高分子基材に高エネルギーの電子線を照射して活性点を形成したのち、反応性のモノマー溶液中で活性点

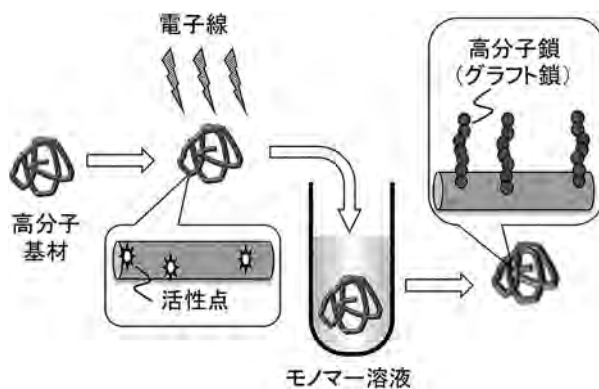


図1 放射線グラフト重合

を起点として重合を進めることにより新たな高分子鎖(グラフト鎖)を導入する技術である。この手法で得られたウラン捕集材はグラフト鎖がウラン吸着性能を、高分子基材が強度を担う。

III. 海域試験とコスト試算

1990年以降に、図2に示す捕集材カセット方式とモールド状捕集材方式の係留方式で海域試験が日本で行われた。

捕集材カセット方式では、高分子不織布基材への放射線グラフト重合でウラン捕集布が合成され、得られたウラン捕集布は120枚積層したカセット(16cm×29cm×29cm)の形態で金属製吸着床(144カセット充填可)に充填され、海面に浮かべた鋼管フレームから海中に垂下される。むつ関根浜沖合の海域において、3年間で12回の浸漬実験が行われ、1kgのイエロケーキが回収され、ウラン捕集材を海中に浸漬することで、ウランが採取できることが実証された²⁾。本方式のコスト試算による課題は、係留費用が約80%を占め、その原因は重量のある金属製の鋼管フレームなどの海上構造物に費やされていることであつた。コスト低減化は、捕集システムの軽量化が必要であり、そのため、モールド状捕集材が考案された³⁾。

モールド状捕集材方式は、モールド状のウラン捕集材を海藻であるジャイアントケルプのように海底から立ち上げて係留する。捕集材カセット方式のように海面を専有することがないため、船舶の航行も妨げることなく、また、荒天時でも影響を受けにくい。モールド状捕集材は糸状の高分子基材への放射線グラフト重合でウラン捕集糸を合

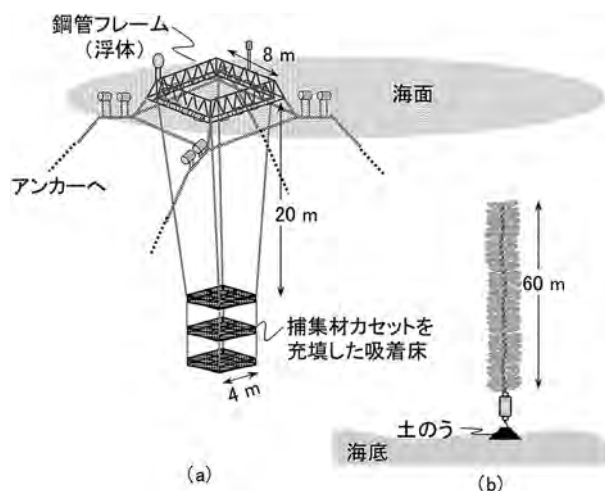


図2 海域におけるウラン捕集材の係留方式
(a) 捕集材カセット方式 (b) モール状捕集材方式

成し、モール状に編み上げて作製される⁴⁾。沖縄海域で行われた試験では、むつ海域に比較して海水温が高いことで1.5倍、海水との接触効率の向上により2倍となっており、捕集性能は30日で1.5gU/kg-捕集材となった。この捕集性能は、含水酸化チタンの捕集材の15倍に匹敵する。

モール状捕集材方式での海域試験で得られた結果に基づいたウランコストが、年間ウラン捕集採取の規模を金属ウラン換算で1,200t/年として試算された。これは100万kW級原子力発電所6基分の核燃料の年間需要量に相当する。この採取規模に応じた捕集材製造、捕集材によるウラン採取、溶離によるウラン回収、精製の各工程を考慮したコスト試算の結果を図3に示す⁵⁾。基準となる捕集材のウラン捕集性能は2g-U/kg-捕集材であり、捕集期間として海水に浸漬する日数は60日とされている。この値は海域試験で得られた30日浸漬での1.5gU/kg-捕集材の性能を60日に換算したものである。沖縄海域で行なわれた実験室規模の試験では、30日の浸漬で3gU/kg-捕集材の値が得られており、60日浸漬換算では、4gU/kg-捕集材となる。また、捕集材からのウランの溶離を経る繰返し使用に関しては18回目まで達成できるとすると、現状で到達の可能性の高いコストは2万5千円/kg-Uとなる。2018年9月のウランの週間取引価格は\$27.4/lb-U₃O₈であり、換算すると8.0千円/kg-Uとなるため、海水からの採取では鉱山ウランの3.1倍となる。

IV. 今後の展望

海水ウランに関する研究開発は、放射線利用の一環として、日本が牽引してきた。ウラン捕集材を駆使した海水ウランの捕集技術は世界を変える7つの化学分離技術としてNatureにも取り上げられている⁶⁾。2015年3月の米国化学会では、2日間にわたって海水ウランに関す

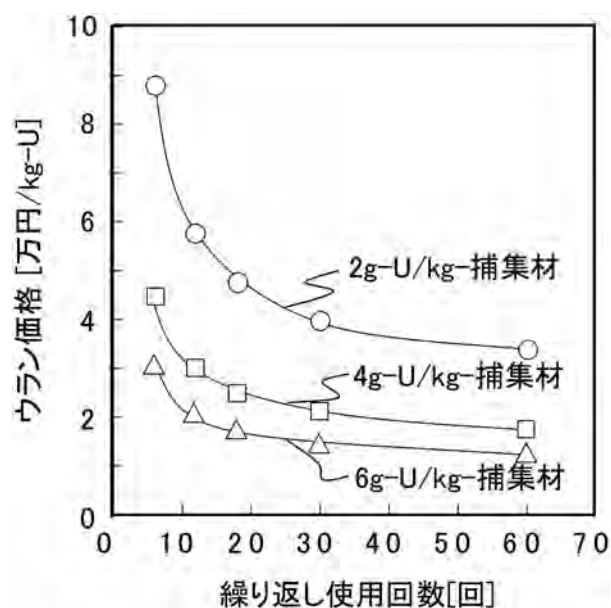


図3 モール状捕集材方式に基づくウランコストの試算⁵⁾

るシンポジウムが開催され、官能基や基材の視点からの新規ウラン捕集材合成や海水を用いた評価技術の開発など42件の成果が特別号として出版されている⁷⁾。その後、米国エネルギー省傘下の研究所では、日本の放射線グラフト重合の手法で合成した捕集材を用い、30℃の海水による評価において56日で7.8g-U/kg-捕集材の性能が達成されている⁸⁾。したがって、海水から採取されるウランの更なる低価格化が期待され、燃料サイクルの技術開発と導入に時間的余裕を与えることもできる。

日本近海に流れる暖流である黒潮は、秒速2m、幅100kmの大きな潮流であり、1年間で鉱石ウラン(<\$260/kg-U)の発見資源量¹⁾の7割に匹敵する520万トンのウランを日本にもたらす。この資源量は、日本のすべての原子力発電所が稼働している場合の年間ウラン需要量の約700倍であり、日本は海水ウランの採取に適した位置に存在すると言える。ウラン捕集材の海水への長期浸漬の影響や係留システムに関する要素技術など開発課題があるが、日本が国産エネルギー資源とその安定的な確保による国際競争力を堅持するため、海水ウランの採取技術の開発は資源政策として重要である。

(2018年9月26日記)

— 参考資料 —

- 1) NEA et al, Uranium 2016, Chapter 1 (2016) 15.
- 2) N. Seko, et al., Nuclear Technology, 144 (2003) 274.
- 3) 清水隆夫 他, 海洋開発論文集, 18 (2002) 737.
- 4) 瀬古典明 他, 海洋開発論文集, 20 (2004) 611.
- 5) 玉田正男 他, 日本原子力学会和文論文誌, 5 (2006) 358.
- 6) D. S. Sholl et al., Nature, 532 (2016) 435.
- 7) S. D. Alexandratos et al, Ind. Eng. Chem. Res. 55(2016)4101.
- 8) L-J. Kuo et al., Chemistry Select, 3 (2018) 843.

サンクコストの呪縛

毎日新聞 青野 由利

「信念」が、合理的選択を惑わす

科学記者として主にライフサイエンスや天文学をカバーしてきた。原子力は専門分野ではない。だが、2011年3月11日に発生した原発過酷事故以来、そんなことは言っていられなくなった。

あれから8年近くを経て感じるのは、原子力の専門家であればあるほど、それまでの積み重ねから自由になれず、合理的な方針転換がむずかしいのではないかということだ。

お金も時間も技術も(そして心も)投資してしまったことによる「サンクコストの呪縛」であり、むしろ、専門外の人間の方が合理的な判断ができる場合があるのではないだろうか。

その最たるものが、再処理・核燃料サイクル政策だと感じる。

念のため、サンクコスト(埋没費用)とは経済学でよく使われる言葉で、もう既に投資してしまっただけで回収できない費用をいう。どうせ取り戻せないのだから、その先の意思決定はこのコストを無視して考えるのが合理的なのだが、過去の投資を思うとやめられず、さらなる投資を続けてしまう。これがサンクコストの呪縛だ。

個人的には原発そのものもできるだけ早く幕引きした方がいいと思うが、原発は目の前のエネルギー問題や電力システムと不可分で、不確定要素や変数が多く、合意形成がむずかしい。

だが、再処理・サイクル政策は違うだろう。

核燃料サイクル肯定派でも、現在の日本でサイクル政策がうまく言っていると考える人はいないはずだ。

それでも、この先も追求すべきだという人々の主張は、まず第一に「資源の少ない日本は原子力でも資源をリサイクルすることが大事」という信念だろう。かつて枯渇が心配されたウランが豊富にあるとわかった今でも、その主張に変わりはない。

さらに、高速増殖原型炉「もんじゅ」の廃炉が視野に入ったところから、「高レベル放射性廃棄物の減容化」もその主張に加わった。

しかし、いずれの場合も、その目的が達成できるのは「サイクルがうまく回せた時だけ」だ。

では、「サイクルがうまく回る」とはどういうことなのか。

本当にサイクルをうまく、回せるのか？

使用済み核燃料の再処理で取り出したプルトニウムをMOX燃料に加工して高速炉で燃やす。その使用済みMOX燃料を再び再処理して燃料に加工し、再び高速炉で燃やす。

現在の軽水炉が高速炉に置き変わり、こうしたサイクルが何回も回って初めて、燃料がリサイクルされ、原理的には放射性物質の減容や長寿命の放射性物質を短寿命のものに変える核変換にもつながるはずだ。

つまり、「複数の高速炉」「使用済みMOX燃料の再処理工場」「高速炉用のMOX燃料加工工場」の三つがそろって初めてサイクルの意味が生まれる。しかも、「うまく回す」ためには、経済性があり、安全であることも欠かせない。

ところが現実を見ると、この3つとも商業的に成り立つめどはまったくみえない。かつては高速炉をめざし、その後撤退した米独英はもちろん、今も高速炉政策を維持しているフランスでも状況は変わらない。

それなのに、日本が再処理に固執した結果、何が起きているかと言えば、消費できるめどが立たない約47tものプルトニウムの蓄積だ。この内の約15tがフランスに、約21tが英国に、残る約11tが国内にある。

政府の原子力委員会は2018年7月、再処理で得たプルトニウム利用の指針を15年ぶりに改定した。核不拡散に対する国際社会の懸念に配慮し、「保有量の減少」や「消費する分だけ再処理」を盛り込んだものだが、私には

肩すかしに思える。

なぜなら、削減の量もペースも示さず、在庫は「現在の水準を超えない」とあったからだ。

これでは、青森県に建設中の再処理工場を稼働させ、そこで増える分はプルサーマルで燃やすが、プルトニウムの総在庫量はそのまま、ということになりかねない。

「欧米の現実」が物語るもの

問題は在庫量が減らないだけではない。プルトニウムから作る MOX 燃料は通常のウラン燃料に比べて高く付く。再処理費用まで含めると 8~12 倍といわれ、プルトニウムに経済性がないことを米国ははっきり認めている。

すでに再処理事業からの撤退を決めた英国が、「有償でなら英国内にある日本のプルトニウムを引き取ってもいい」と言っていることから、プルトニウムにはマイナスの価値しかないことは明らかだ。フランスが、「もんじゅ」の後継機と位置づけられる高速実証炉「アストリッド」の大幅な縮小計画を打ち出し、高速炉の実現を遠い未来まで延期したのもその現れだろう。

実用化するとしても 80 年ごろという驚くほどの先送りの理由が、「ウラン市場は安定していて、高速炉実用に緊急性はないから」と聞けば、経済性のない高速炉を本気で実現する気がないと思うしかない。

日本がプルトニウム消費の頼みの綱とするのはプルサーマルだが、経済合理性がないだけでなく、使用済み MOX 燃料を増やして廃棄物の最終処分を難しくするマイナス面もある。いつ終わるともしれない「高速炉までのつなぎ」としてプルサーマルを続ければ続けるほど、使用済み MOX 燃料は溜まり続ける。サイクルが回らない限り、これもやっかいな廃棄物でしかない。現時点でさえ困難な廃棄物の最終処分場選定を、さらに困難にする恐れがある。

さらに大きな問題は、日本の余剰プルトニウムは核不拡散上の懸念を生み出し、近隣諸国の疑念も招きかねない、ということだ。既に大量に保有し、資源として不経済であるにもかかわらず、まだ再処理を続けようとするのであれば、国際社会から疑問を抱かれるのは避けられないだろう。

政府がここへきて「保有プルトニウムの削減」を打ち出したのも、そうした懸念が無視できないと思えばこそだ。

今や、プルトニウムは「資源」ではなく、経済的にも、核不拡散の上でも、やっかいな「ごみ」だ。これ以上「ごみ」を増やすことなく、再処理・核燃料サイクル政策には幕を引いた方がいいというのが私の考えだ。

熟慮を経た政治的決断を

こういうことを言うと、必ず「これだから素人は困る」という声が聞こえてくる。

たとえば、これまで「資源」として扱われてきたプルトニウムを「ごみ」と位置づけたとたん、「資源」として使用済み核燃料を受け入れてきた青森県が、発送元に「持ち帰り」を要求する。そうなったら、原発が立ちゆかなくなるのをどうするつもりなんだ、といったことだろう。

もちろん、長い経緯のある政策を変更することが簡単だとは思わない。だが、こうした課題こそ、政治の出番だと私は思う。

先送りすればするほど、「サンクコストの呪縛」は強化され、ますます政策変更が難しくなる。原子力委員会は 2005 年、原子力政策大綱を策定した際に、再処理より直接処分の方が安いという試算が出ていたにもかかわらず、「政策変更コスト」がかかることを理由に、全量再処理を維持した。これはまさにサンクコストの呪縛であり、実際、その後の政策変更をさらに難しくしてしまった。

当事者にとっては残念だとは思いますが、過去の投資は忘れ、過去の投資の結果である経験や知識は最大限に生かすことを考え、今ここから最善の策を考えることを専門家の方々には期待したい。

*本記事は執筆者個人の見解です。

(2018 年 11 月 9 日 記)

著者紹介



青野由利（あおの・ゆり）

科学ジャーナリスト。毎日新聞論説室専門編集委員。東京大学薬学部卒。東大大学院総合文化研究科修士課程修了。1984 年から科学記者として生命科学、天文学、地震、火山、原子力、環境などの分野を担当。著書は『ニュートリノって何?』『インフルエンザは制圧できるのか?』『宇宙はこう考えられている』など。

六ヶ所再処理工場の現状と課題

日本原燃 田中 治邦

六ヶ所再処理工場の化学処理の主工程は実質的に完成しており、現在は新規基準に基づき重大事故までを含めた安全対策の強化に取り組んでいる。当面はこの工事の完了と本格操業の実現が最も重要であるが、一方、廃炉の増加による軽水炉の発電容量削減との整合性や、プルサーマル対象炉の再稼動、分離プルトニウム保有への理解の訴求など、周辺との関係にも意を用いる必要がある。さらに軽水炉リサイクルの能力の限界を踏まえれば、資源の乏しいわが国の将来にとって切り札となる高速増殖炉とその核燃料サイクルの準備も重要である。

KEYWORDS: *Spent fuel, Reprocessing, Plutonium recycling, Active tests, MOX fuel*

I. 六ヶ所再処理工場の現状

1993年4月に着工した六ヶ所再処理工場の建設は様々な設計変更、建設工事中のトラブル、試運転開始後のトラブル、福島第一原発事故の教訓を受けて制定された新規基準への適合性の審査、その審査の中で明らかとなった安全対策の追加の必要性などの為に完成が遅れ、着工から25年が経過した本稿執筆中の2018年10月現在も、アクティブ試験の最終段階である第5ステップの終了間際に留まっている。

1. アクティブ試験の実績

アクティブ試験の目的は、使用済燃料を実際に再処理し、工場全体の機能・性能・安全性・操作性を確認すること、また設備の運転特性を把握して調整を行うとともに不具合部位を発見して修正すること、さらにトラブルの経験から運転と保守のノウハウを蓄積することにある。商業規模の再処理工場の建設は初めてであったため、例えば高レベル廃液のガラス固化設備など様々な設備でトラブルを経験したが、これまでに使用済燃料425t (BWR燃料219t, PWR燃料206t)を剪断・溶解し、ウラン製品粉末約366t, MOX製品粉末約6.7tHM, ガラス固化体346本を製造した¹⁾。苦労した高レベル廃液のガラス固化設備の社内試験は、2013年5月に終了し、これにより化学処理の主工程は実質的に完成している。

2. 東日本大震災の影響

東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日 Mw 9.0)の影響は、六ヶ所村で震度4、むつ小川原港での津波高さ3.5mで、再処理工場で観測された加速度は37galであった。東北電力の発電設備の被災により東北地方の広域で停電が発生し、六ヶ所再処理工場も外部電源が全喪失したが、サイト内の非常用ディーゼル発電機が全て無事に起動し、安全性を損なうような影響は無かった。

六ヶ所再処理工場では、2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原発の経験を基に、既に東日本大震災の前から構内道路の地盤改良、免震構造の緊急時対策所の新設工事、電源車の配備、不整地走行用消防車の配備などを進めていた。

3. 緊急安全対策の実施

しかし、この東日本大震災で環境へ著しい放射能を放出することとなった福島第一原発の事故の発生に鑑み、再処理工場でも緊急にとるべき安全対策として、電源車の更なる追加配備、外部電源の受電ルートの強化(東北電力が工事)、敷地内の貯水槽や尾駁沼などから取水して消防車や可搬式ポンプを用いて冷却系や燃料プールへ注水する手段の整備、塔槽類の中の水の放射線分解で発生する水素の滞留防止のためにエンジン付き空気圧縮機の配備などを実施することとした。なお再処理工場は海拔55mの高台にあり、津波の影響は考えられない。

この緊急安全対策を青森県の検証委員会も確認し、アクシデントマネジメント(AM)策の強化、厳冬期の訓練、事業所内連携および県内事業者間連携の強化、モニタリングカーの増配備、衛星電話の設置、リスクコミュ

Current state and the future of Rokkasho Reprocessing Plant :
Harukuni Tanaka.

(2018年10月16日 受理)

ニケーション活動などの追加措置の提言を受け日本原燃は実施している。

4. ストレステストの実施

破滅的状況(Cliff edge)への余裕を評価するストレステストも、アクティブ試験状態の現状を対象とした評価結果を2012年4月に、また竣工後に再処理をフル稼働させている状態を対象とした評価結果を2013年5月に国へ報告・公表している。いずれも緊急安全対策+AM影響緩和策の有効性(時間余裕)が確認されている。

5. 再処理工場に対する新規制基準の制定

2012年9月に発足した原子力規制委員会は、2013年11月に再処理工場の安全審査に関する新規制基準を決定した。この新規制基準によれば、内部事象対策のうち火災防護の強化、内部溢水への対策、化学薬品の漏洩対策の強化、また外部事象のうち竜巻による飛来物、火山ガス、火山灰、火砕流、森林火災などへの対策の強化、核物質防護の強化、緊急時の通信連絡設備の強化などが必要となる。耐震設計の妥当性を評価するための基準地震動の設定に係わる規制基準も強化された。さらに、福島第一原発では設計で想定した事故状態を超える過酷事故が発生したことから、再処理工場でも重大事故(過酷事故)として、臨界事故の発生、冷却機能喪失による高レベル廃液貯槽等の蒸発乾固、放射線分解により発生する水素の爆発、有機溶媒等による火災・爆発、使用済燃料貯蔵プールの水位低下等の想定が求められ、これらへの対策実施とその有効性評価を行う必要が生じた。

日本原燃は六ヶ所再処理工場の新規制基準への適合性審査を受けるため、2014年1月に規制委員会へ事業変更許可を申請した。事業者としてはアクティブ試験を実質的に終了して本格操業開始の準備の整った六ヶ所再処理工場は、この新規制基準に基づく安全対策強化のために大幅な設計変更が必要となり、あたかも安全審査のやり直しを受けるような事態となった。

II. 新規制基準への適合性審査の申請内容

1. 設計用基準地震動の変更

六ヶ所再処理工場の設計用基準地震動 S2 は当初申請で 375gal、2006 年の耐震安全性評価(バックチェック)では 450gal であったが、新規制基準を受けてあらためて評価し直し、設計用基準地震動 Ss として Ss-A(最大加速度 700gal)を 1 波、Ss-B(出戸西方断層による地震)を 5 波、震源を特定せず策定する Ss-C(岩手・宮城内陸地震及び留萌支庁南部地震)を 4 波、合計 10 波を設定した。これにより設備機器の耐震性能の再確認と必要に応じた強化工事が発生し得ることとなった。

2. 第三層までの安全設計の強化

次に深層防護における第三層までの安全設計の強化、即ち従来から想定していた設計基準事象への対策の頑健性を高めるために様々な追加対策をとることとした。

内部火災には異なる原理の火災感知器の追加設置による多様化、耐火壁(防火ダンパ、貫通部シール等)による 3 時間耐火対策を実施する。内部溢水には該当建屋内に保有する水量に機器・配管に接続される他建屋及び洞道が保有する水量を加えて最大の溢水量を算出し、その影響評価に基づき遮断弁の設置、堰・防水扉の設置等が実施される。化学薬品の漏洩には硝酸溶液、腐食性ガス、有機溶媒、強アルカリ溶液を内包する機器(容器・配管)の破損の想定、耐震 B・C クラスで基準地震動により破損する機器からの化学薬品漏洩の想定に基づき影響を評価し、必要に応じ防護板の取り付け等の対策が講じられる。

外部事象としては、国内最大規模の竜巻の風速 100m/秒を想定し、建物の開口部と屋外施設に防護対策(飛来物防護ネットまたは飛来物防護板)を行う。落雷は、雷撃電流 270kA を想定し(従来は 150kA)、保安器の設置、使用済燃料再処理の停止等の安全対策を実施する。火山影響は、降下火砕物により非常用ディーゼル発電機などの安全機能が損なわれないよう防護対策(給気フィルタの追加設置、後述する重要度高の蒸発乾固対策対象貯槽の冷却)などを実施する。外部火災対策としては、幅 25m 以上の防火帯を再処理施設周辺に設置する。

3. 重大事故への深層防護

設計基準事故を超える重大事故への対処に要する時間を十分に確保するため使用済燃料を剪断処理するまでの冷却期間が 15 年以上となるように管理することとした。

そもそも重大事故への対策は、基本設計における 3 段階の「深層防護」が破れた場合に第 4 層のシビアアクシデント対策として常設型あるいは可搬型の重大事故対処設備を準備し、それらを用いて必要な時間以内に現場操作を行って事故を収束させるというものであるが、この重大事故への対処を確実なものとするために、重大事故へ至る可能性のある異常事態の発生防止、かかる異常事態が発生したとしても重大事故への拡大の防止、それでも重大事故となった場合にその影響を緩和(外部への放射性物質の異常な水準の放出を防止)するという「深層防護」の備えを重大事故対策の中でも採用している。

4. 重大事故の重要度分類と対策

炉心が存在せず常時は核分裂連鎖反応がない再処理工場では安全機能の喪失から重大事故に至るまでの時間的余裕がある一方、重大事故の発生するリスクは複数の建屋に広く分散していることから、例えば地震を共通の起因事象とする場合には複数の重大事故が同時にまたは連鎖して発生する可能性がある(複数箇所での蒸発乾固、水

素爆発の同時発生等)。かかる特徴を踏まえ主に可搬型の設備を用いて対処するが、様々な重大事故モードについて事象進展の早さ(対処に要する時間的余裕の短かさ)と発生した際の環境影響の大きさを考慮して重要度分類を行い対策実施の優先順位を整理している。

この重大事故対策実施の優先順位は、事象進展が早くかつ環境影響が大きいものを「重要度高」として速やかに発生防止、拡大防止及び異常な水準の放出の防止の対策を講ずる。環境影響は大きい事象進展が遅いものは「重要度中」とし、発生防止対策を講ずるとともに拡大防止及び影響緩和対策は状況に応じて実施することとする。それ以外は「重要度低」とし、状態監視を実施して「重要度高」の重大事故への対処の支障とならない時期に対策を講じる。「重要度低」でも事象進展が極めて遅い事象は状態監視を実施した上で、既設設備の復旧により対応することを基本とする。

再処理工場では同一建屋の複数の貯槽等に対する冷却機能が同一の冷却系統施設(安全冷却水系の内部ループ)で構成される複数の機器、または同様に共通化した安全圧縮空気系により水素掃気用の圧縮空気を供給される複数の機器があり、これらを一つの「機器グループ」として共通の重大事故対策を行うことにより同一機器グループに属する全ての機器での重大事故対策を一斉に完結することが可能となり得る。重大事故対策の有効性の評価はこの機器グループごとに行うこととし、必要な期限までに対策を完了できるかを評価している。

5. 重大事故の同時発生への対処

新規制基準が重大事故の同時発生の評価を求めていることから、地震を起因として、13 機器グループで冷却不能による貯槽類の蒸発乾固、5 機器グループの塔槽類で水素爆発、使用済燃料プールで冷却機能喪失、ガラス固化設備で熔融炉の閉じ込め喪失が同時発生すると想定する。この事態に対処する要員数、使用する重大事故対処設備の容量、個数、水源、可搬電源とその燃料保有量に不足が無く、必要な時間内に余裕を持って対処を完了できることを確認している。重大事故対策は多くの人的活動に依存するものであるから、対応操作を行う現場への複数のアクセスルートの確保、作業環境における対策要員の被ばく線量の抑制にも問題の無いことを確認しており、操作手順書を整備し訓練が繰り返されている。重大事故の同時発生による Cs-137 換算の放射能放出量は新規制基準の判断基準 100TBq を十分に下回っている。

再処理工場の重大事故対処の基本方針は、機器から漏洩する放射性物質を大容量のセルに閉じ込めて減衰、沈着を図り、セルの内圧上昇等の二次的リスク発生の可能性がある場合に限り排気フィルタ等を通して管理放出するものである。この閉じ込めの境界であるセル及び建屋

は基準地震動を超える地震においても直ちには建屋内の作業環境へ影響を及ぼさないよう、基準地震動に対して十分な耐震性を確保する。

さらに、大規模な自然災害、大型航空機の墜落等による施設の大規模な損壊が発生した場合には、建屋放水等、放射性物質の放出及び放射線の影響を最小限にとどめるために必要な措置を講ずることとした。

Ⅲ. 今後の課題

1. 本格操業開始の見通し

この日本原燃の申請に対して規制委員会の審査が5年近く続けられており、本稿が公開される頃には許可の目処がついていると期待している。しかしその後の設計及び工事の方法の認可、保安規定の認可、使用前検査等の手続きを考慮すると、再処理工場が本格稼働を開始できるまでには時間を要する見通しである。日本原燃は24回目の変更となった最新の竣工予想時期(使用前検査の最終合格)を2021年度上期中と表明している。

一方これまでに全国の原子力発電所から受け入れた使用済燃料の累計は、2018年8月現在でBWR使用済燃料9,829体(約1,703t)、PWR使用済燃料3,942体(約1,690t)、合計13,771体(約3,393t)であり、このうち425tをアクティブ試験で再処理したので、現在は受入貯蔵プール(容量3,000t)の中に2,968tが保管されている¹⁾。全国の原子力発電所で発生し、現在国内に貯蔵されている使用済燃料は17,000tを超えており、六ヶ所再処理工場も使用済燃料対策として大きく貢献している²⁾。

六ヶ所再処理工場にとっては新規制基準対応による追加設備を含めた建設工事の完成・本格操業の実現が最も重要な課題であるが、一方その周辺には原子力発電と核燃料サイクル全体に係わる課題も存在する。本稿では特に以下について解説する。

- ・東日本大震災の前と比べ、わが国が必要とする年間発電電力量のうちの原子力比率を下げた22～20%でよいとしたエネルギー政策と六ヶ所再処理工場の処理容量との整合性
- ・六ヶ所で回収されるプルトニウムの利用見通しとプルサーマル対象炉の扱い
- ・分離プルトニウム保有量の扱い
- ・プルサーマルの位置付けと核燃料サイクルの将来像

2. 原子力容量削減との整合性

2030年の原子力比率20%から発生する使用済燃料は「長期エネルギー需給見通し」の計算条件に従うと；

$$(1,065\text{TWh} \times 20\%) \div (45\text{GWd/t} \times 24\text{h/d} \times 34.7\%) = 570\text{t/年}$$

となり、これは六ヶ所工場の能力800t/年より少ない。

一方国内の各原子力発電所と六ヶ所工場に保管されて

いる未処理の使用済燃料合計 17,800t と、今後 40 年間の発生分との合計を考えると；

$$17,800 + (570 - 96 - 40) \times 40 \text{ 年} \\ = 35,160\text{t} > 32,000\text{t} (= 800 \times 40 \text{ 年})$$

となり、フル稼働し続けたとしても再処理し切れず収支均衡状態(570t/年)に下げる余裕は無いことが分かる。

使用済ウラン燃料中に残存する核分裂性 Pu の割合を 0.6% とすると 800t/年の再処理から核分裂性 Pu が 4.8t/年発生し、これを 5% 富化度の軽水炉用 MOX 燃料に加工するとすれば、MOX 燃料工場から 96t/年の MOX 燃料が生産されプルサーマル対象炉に出荷される。上の式で 570t から 96t を差し引いたのは、六ヶ所工場では使用済 MOX 燃料を再処理しないためである。

また英仏にある日本のプルトリウムから MOX 燃料を作り、海上輸送して日本の軽水炉に装荷する将来の安定状態の量は核分裂性 Pu で 1~2t/年であろうから、MOX 燃料集合体で 20~40t/年ということとなり、その最大値として 40t/年を上式の式から除いている。

原子力比率 20% が国内外で製造される MOX 燃料を装荷する容量を持っていることを示す。1 基はフル MOX 炉(取替率 23t/年)である。普通のプルサーマル対象炉は 1/3 ないし 1/4 プルサーマルであるから平均 1/3.5 として；

$$(96 + 40 - 23) \times 3.5 = 396 < 547 (= 570 - 23)\text{t}$$

となり十分な MOX 装荷枠を持っていることがわかる。

3. プルサーマル対象炉の扱い

では個別のプルサーマル計画の進捗状況はどうか。全電力会社がプルトリウムを保有しており、これを平和利用して行く責任がある。

各社が MOX 燃料を装荷する炉とするものは比較的新しい原子炉で、電力会社は廃炉でなく新規制基準に適合させて再稼働したいと考えるものである。2018 年 9 月末現在適合性審査申請されている原子炉 27 基(建設中の大間、島根 3 号を含む)の中で 10 基がプルサーマル対象炉である。福島第一事故の直前の段階で MOX 燃料を装荷して運転していた炉が 4 基、既に発電所に MOX 新燃料が搬入されていた炉が 3 基あった。

新規制基準適合性審査に合格して再稼働したプルサーマル対象プラントは現在 4 基である。この再稼働したプルサーマル対象プラントの数が少ないから、六ヶ所再処理工場の稼働により回収されるプルトリウムとの関係において収支がバランスせず「余剰プルトリウム」が発生するので問題だとの意見がある。

しかしこれは全くの見当違いである。六ヶ所再処理で回収されたプルトリウムが利用されるのはずっと先のことである。それが発電所の燃料として使用されるのは、六ヶ所 MOX 燃料製造工場が稼働(2022 年度上期竣工)して燃料加工が始まり、完成 MOX 燃料体が国内の各発

電所へ輸送され、その後原子炉が定期検査で停止した際に取替燃料として装荷され、更に原子炉が運転開始して MOX 新燃料が燃焼し始めるまで数年を要する筈であるから、恐らく 2025 年頃ということになろう。それまで 6 年程度があるので、多くのプルサーマル対象炉が再稼働できていると考えて差し支えあるまい。

将来届けられる MOX 燃料を装荷する原子炉があるかが重要であって、現時点で稼働しているかは意味を持たない。2003 年 8 月当時の原子力委員会が整理したプルトリウム利用計画公表の考え方³⁾は、電力各社のプルサーマル計画が安全審査を通過済みか、地元了解を得ているかは計画時点での必要条件ではなく、回収されて各電力会社に割り当てられるプルトリウムを、各社が発電用燃料として使って行く将来計画があるかを問うものであった。その将来計画を確認できれば六ヶ所再処理の稼働を認めることを意味していた。このような単純な事実が、現在の原子力委員会や行政当局も理解できなくなってしまっているのではないかと不安に感じることがある。

現在ある軽水炉はずっと前に運転開始していたから、六ヶ所再処理工場の供用期間の途中で寿命に達するので、その時点で対象炉の調整(選手交代)をしなければならないし、そうすればよいだけのことである。プルサーマル対象炉が現時点で再稼働したか否かの追求は意味の乏しいことで、それらの炉に拘る必要性は無い。

4. 分離プルトリウムの保有量

しかし、政府は分離プルトリウムの在庫量を減少すると宣言してしまった⁴⁾。

2018 年 9 月末現在、わが国は六ヶ所工場に 3.6t、原子力発電所に 1.0t(MOX 新燃料)、原子力機構に 4.6t、合計 9.2t の分離プルトリウムを保管している。全てウランとの混合酸化物である。また電力業界がこれまでに英国 Sellafield 再処理工場に 4,193t、仏国 LaHague 再処理工場に 2,944t の使用済燃料の再処理を委託⁵⁾した結果、今日英国に 21.2t、仏国に 15.5t、合計 36.7t の分離プルトリウムを保有している。国内外合計 45.9t である⁶⁾。

これはプルトリウム型原爆で数千発分の批判がある。しかし熱エネルギーを安定かつ継続的に取り出す燃料として使う場合の量と、爆発力だけ持つ原爆とを単純に比較する議論は大きなミスリードである。プルトリウムは日本のエネルギー資源であり、これを減らして行くとの宣言はわが国の将来にとって大きな損失である。六ヶ所工場で再処理してプルトリウムを回収すれば、それが炉心で再び燃焼を始めるまでには数年の時間差があるから、その間帳簿から消えることは無く国内にある分離プルトリウム在庫は必ず増加するので、国内外合計の保有量を減らせる保証はない。燃料としてのプルトリウムの保管は IAEA の厳しい査察を受けており、日本の誠実な平和利用の姿勢は IAEA から高く評価されている。

蓄積する使用済燃料対策と資源の有効利用の二つのメリットを持つ再処理を制約するのは国益を損なうものであり、政府は将来大いに後悔することになる。

5. プルサーマルの資源節約効果

その電力業界が自ら取り組む軽水炉のプルサーマル計画の存在意義はどこにあるだろうか。

軽水炉の使用済燃料は全 Pu 同位体合計で 1%弱、核分裂性 Pu で約 0.6%を含む。これを回収して富化度を 5%程度とすれば 12% ($=0.6\% \div 0.05$) の資源節約となる。また同じく 94%程度のウランが燃えずに残っており、その中の U-235 の比率が天然ウランの存在比程度にまで劣化しているとして、これを 4.5%程度にまで再濃縮すれば簡単な計算⁷⁾で分かるように新燃料の 10%程度の資源節約となり、合わせて 22%程度の効果がある。

勿論回収ウランの再濃縮利用は、若干の反応度損失と汚染により濃縮や成型加工コストが天然ウランの場合より高くなっても、現状見通せる資源価格などからウランクレジットを期待できる⁸⁾。従って国内軽水炉再処理でも回収ウランが蓄積すればその利用に商業的成立性が十分にあると判断できるが、現在の核燃料サイクルの経済性計算ではそのコストメリットを考慮していない。

高速増殖炉の場合と比べ資源節約効果が小さく、従ってフロントエンド側の負担を減らす効果が低く、また燃焼度も 5%程度しかとれないために再処理単価が高い軽水炉の燃料リサイクルは、直接処分(ワンスルー)に比べてコストメリットが無いのは事実である。そもそも分別回収してリサイクル利用することは手間がかかり、単純に捨てるよりも割高になるのはごく当たり前の話である。大切なことはコスト高のリサイクル利用を道徳的にはと認めるか否かであり、一般社会では多くの汎用品がリサイクルにより再生産されている。

軽水炉の場合に重要なことは、再処理・リサイクルを含んだ原子力発電コストが、他の電源と比べて競争力があるか否かである。このコスト比較はこれまでに幾度もなされ、最新のコスト検証結果でも、福島第一事故の反省から強化された新規制基準へ適合するための設備追加に起因する資本費や事故リスクコストを反映してすら原子力は最も競争力ある電源となっている⁹⁾。

6. 本命は高速炉とその核燃料リサイクル

今世紀の後半には、新興国の原子力に牽引されて世界の原子力発電量が増え、市場経済の必然としてマネーが流入してウラン価格はかつて経験したように再び高騰の恐れがある。ウラン資源は無限にあるから心配は要らないなどと脳天気なことは言っていられない。取引価格決定の主導権を握ること、即ちウランの価値を下げる技術

が必要で、それが新たなウラン調達を極小化できる高速炉によるプルトニウムリサイクルである。今世紀の後半、世界は高速炉を利用することになる。

エネルギー資源の乏しいわが国こそ特に高速炉とその核燃料サイクルが必要で、その導入には現在の議論とは比較にならない量のプルトニウムが必要である。高速炉が自ら増殖するプルトニウムを回収し再び新燃料として炉心装荷できるまでの間、初装荷燃料および初期段階の取替燃料の製造に大量のプルトニウムが必要である。例えば 20GW の高速炉の立ち上げには 160t 程度のプルトニウム(核分裂性 Pu で 120t)が必要である。再処理で回収されたプルトニウムはできるだけ早く高速炉用の燃料に成型加工したとしても分離プルトニウムにカウントされ、炉心で燃え始めるまで帳簿からは消えない。現在の 46t のプルトニウム保有量も、また今後の再処理稼働も議論となるようでは日本のエネルギー確保は覚束ない。

資源の乏しいわが国には、安定かつ長期に持続可能な電力供給を確立できる原子力発電は欠かせない選択肢で、それには核燃料リサイクルが必要である。その理解に基づき、使い捨て方式と比べれば経済性の劣る軽水炉核燃料サイクルに取り組み、将来の高速炉核燃料サイクルの実現に役立つ技術経験の蓄積に努めているのである。

－ 参考資料 －

- 1) 日本原燃：安全協定に基づく定期報告書(毎月更新)
https://www.jnfl.co.jp/ja/business/report/public_archive/safety-agreement-report/2018.html
- 2) 電気事業連合会：使用済燃料貯蔵対策への対応状況について(2017 年 10 月 24 日)。
- 3) 原子力委員会：我が国におけるプルトニウム利用の基本的な考え方について(2003 年 8 月 5 日)。
- 4) 原子力委員会：我が国におけるプルトニウム利用の基本的な考え方(2018 年 7 月 31 日)。
- 5) WNA Information Library, Japan's Nuclear Fuel Cycle(Oct. 2015)。
- 6) 原子力委員会：わが国のプルトニウム管理状況(2018 年 7 月 31 日)。
- 7) 濃縮プロセスの廃品濃度を 0.25%として計算。
- 8) 原子力委員会 技術等検討小委 資料第 2 号 P. 6-7(2011 年 11 月 8 日)。
- 9) 総合資エ調 発電コスト検証 WG 報告 P.12, 13, 73, 78, 79, 発電コストレビューシート(2014 年 5 月)。

著者紹介



田中治邦(たなか・はるくに)

日本原燃株式会社
(専門分野/関心分野)炉心設計, 安全解析,
リスク評価, 核燃料サイクル, 原子力の経済性

日本における新型炉開発計画

持続可能社会に適合する新型炉開発

東京大学大学院 山口 彰

我が国の動力炉開発方針とその経緯、原子力エネルギーに対する今日的なニーズなどを踏まえ、2030年あるいは2050年に向けての新型炉開発計画に求められる要素を整理した。新型炉開発計画を策定するにあたり、技術的成熟度に加え、多様な評価軸をもってレビューを実施し、それを踏まえた定期的な見直し戦略的柔軟性とエネルギー自立を調和させる枠組みが求められる。2050年に向けての我が国の技術力と組織力のチャレンジである。

KEYWORDS: *Next Generation Reactor, National Energy Policy, FR Development Strategy Roadmap, Sustainable Society*

I. はじめに

2018年の7月に閣議決定された第5次エネルギー基本計画¹⁾の序文は以下のように述べている。“戦後一貫したエネルギー選択の思想はエネルギーの自立である。膨大なエネルギーコストを抑制し、エネルギーの海外依存構造を変えろというエネルギー自立路線は不変の要請である。今回のエネルギー選択には、これにパリ協定発効に見られる脱炭素化への世界的なモメンタムが重なる”。原子力基本法が原子力利用の目的とするのは、“将来におけるエネルギー資源を確保し、学術の進歩と産業の振興とを図り、もって人類社会の福祉と国民生活の水準向上とに寄与する”ことである。この文脈から、エネルギーの自立を可能とし、かつ脱炭素化を両立させること、エネルギー資源の確保に繋がることから、原子力のエネルギーは将来にわたっても意義あるものと位置付けられる。

新型炉についても同様である。日本における新型炉開発計画でエネルギーの自立と脱炭素化への貢献は重要な視点の一つである。新型炉は、現在の主流である第3世代炉(第3+世代炉も含む)から適切な移行期を経てこれに代わる原子炉である。したがって、第一に、現世代の原子炉の発電と安全に関わる性能を上回ることが求められる。さらに、第3世代炉当時から今日に至る技術的・社会的情勢の変化を踏まえ、将来においての社会的ニ

ーズにより適合するものであることが求められる。結果として、持続可能性と社会的受容性が既設のものを凌駕するような原子炉システムということになるであろう。

我が国の新型炉開発計画は今のところ定められていない。平成28年に高速炉開発会議が設置され、今後10年間を見据えた高速炉開発戦略ロードマップがまとめられつつあるところである。国際的には第4世代原子力システムに関わる国際フォーラム(GIF)²⁾が設置されており、第4世代炉の研究開発を行う枠組みが構築されている。ここで対象とする原子炉は、第1世代(初期の原型炉)、第2世代(商用発電炉)、第3世代(改良型軽水炉)に続く、新たな原子力システムである第4世代原子炉である。

本稿では、これまでの動力炉の開発の経緯を踏まえつつ、新型炉の有すべき特徴と開発計画の考え方について解説する。

II. エネルギー基本計画と動力炉開発

第4次エネルギー基本計画と第5次エネルギー基本計画で変わらない文言がある。「我が国は、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進を基本の方針とする」というところである。また、「再処理やプルサーマル等を推進」し、「米国や仏国等と国際協力を進めつつ、高速炉等の研究開発に取り組む」という方針も共通である。

60年の時を遡り、昭和31年の原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画は、「わが国の国情に最も適合

Next Generation Reactor Program in Japan : Akira Yamaguchi.
(2018年10月22日 受理)

する型式の動力炉を国産化することを目標とする」としている。さらに、原子燃料サイクルについては、「極力国内における自給態勢を確立するものとする。このため、国内資源の探査および開発を積極的に行い、あわせて民間における探査および開発を奨励する。また、不足分については海外の資源を輸入し得るよう努力する。なお、将来わが国の国情に応じた燃料サイクルを確立するため、増殖炉、燃料要素再処理等の技術の向上を図る」としている。そして、「わが国における将来の原子力の研究、開発および利用については、主として原子燃料資源の有効利用の面から見て増殖型動力炉がわが国の国情に最も適合すると考えられるので、その国産に目標を置くものとする。」と、増殖炉が最も適合すると明記されている。

このように、当初からの連続性ある一貫した考え方は、プルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの確立と、わが国の国情に適合する動力炉を目指すことである。

さて、2018年7月に決定した第5次エネルギー基本計画は、2050年のエネルギー自立のあり方を視野におき、原子力は準国産エネルギーに位置付けられること、よって軽水炉技術の向上を始めとして、国内外の原子力利用を取り巻く環境変化に対応し、その技術課題の解決のために積極的に取り組むとしている。原子力利用の安全性・信頼性・効率性を抜本的に高める新技術等の開発を進める取組はもちろん、それに加えて、再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションを促進するという観点の重要性を指摘している。すなわち、原子力技術の今日的課題は、安全性だけにとどまらず、他のエネルギー技術との共存や多様な社会のニーズに応えるための技術イノベーションが求められることである。

必然的に多様な開発シナリオに言及する。例えば、水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ、固有の安全性を有する高温ガス炉などは、安全性の高度化に貢献する技術開発を、海外市場の動向を見据えつつ国際協力の下で推進するとしている。さらに、小型モジュール炉や熔融塩炉を含む革新的な原子炉開発を進める米国や欧州の取組も踏まえ、国内外の開発動向と市場動向も考慮すべき要因のひとつである。国は長期的な開発ビジョンを掲げ、民間は創意工夫や知恵を活かしながら、多様な技術間競争と国内外の市場による選択を行うなど、戦略的柔軟性を確保して進めるとの基本方針が示される。

さて、新型炉開発計画には人材・技術・産業基盤が必要である。安全性・信頼性・効率性を高める技術基盤、これらの取組を支える人材育成や試験研究炉の整備など、産学官の垣根を越えた基盤強化が求められる。人材・技術・産業基盤に関する戦略も新型炉開発計画の重要な構成要素である。

技術動向や社会のニーズを踏まえた戦略的柔軟性が機

能するには、エネルギー選択を的確に行う仕組みが必要である。そこで、第5次エネルギー基本計画で導入されるアプローチが科学的レビューメカニズムである。2050年に向けては、野心的な複線シナリオを取るとした。技術と世界情勢は予見し難い形で大きく変動するからである。科学的レビューメカニズムは、最新の技術動向と情勢を科学的に把握して、透明な仕組みと手続きのもと、各選択肢の開発目標や技術的重点度合い、すなわち政策資源の重点化を柔軟に修正・決定するものである。世界のエネルギー情勢と技術革新の進捗、主要な選択肢の発展段階(研究／実証／実用)を評価し、想定しうる最大リスクを最小化して管理する。当該概念の技術的可能性、自国技術の優位性の検証も行う。人的ネットワーク形成、データベース構築、コスト・リスク検証手法を用意する必要もある。こうして、エネルギー情勢を判断しつつ科学的レビューに取り組む。これは大仕事であるが、成功の鍵となるきわめて重要な取組である。

これらの社会的・政策的要請を踏まえ、広い視野と確かな情報をもって状況分析を行い、適切な計画を構築することが新型炉開発に求められよう。過去からの連続性によって支えられる開発方針の延長上に、新型炉の将来の姿があるとは限らない。統合的なレビューを踏まえた見直し、いわゆる Review and Revise: R&R が行われ、戦略的柔軟性とエネルギー自立を調和させる枠組みが求められる。

Ⅲ. 高速炉開発戦略ロードマップ

我が国は、高速炉開発の推進を含めた核燃料サイクルの推進を基本的方針としている。高速炉ⁱは、核燃料サイクルによって期待される高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減、資源の有効利用の効果をより高めるものである。平成28年9月21日の原子力関係閣僚会議において、「エネルギー基本計画」に基づき、核燃料サイクルを推進するとともに、高速炉の研究開発に取り組むとの方針を堅持するとの方針が確認された。また、同会議の決定(今後の高速炉開発の進め方について³⁾)に基づき、我が国の高速炉開発の司令塔機能を果たすべく「高速炉開発会議」が設置された。同会議での議論を踏まえ、開発に携わる全ての関係者の今後の指針として、12月19日の高速炉開発会議で「高速炉開発の方針」⁴⁾がとりまとめられ、平成28年12月21日に原子力関係閣僚会議で決定された。核燃料サイクル政策の一翼を担う高速炉開発の具体的な進め方についても、「エネルギー基本計画」の定める基本的方針を前提としつつ、我が国の技術

ⁱ 平成28年10月7日の国会答弁によれば、ここでいう高速炉とはどのようなものかとの質問に対して、「高速炉とは、核分裂の連鎖反応が高速中性子によって維持される原子炉を指し、原型炉である「もんじゅ」はその一つである」と回答されている。

開発の「強み」と「弱み」を客観的に評価し、最適な戦略を提示する必要がある。今後はこの方針に基づいて、将来の高速炉の実現に向け、戦略の策定、体制の整備等を一体的に進めることとしている。

高速炉の開発にてこれまで培った技術や人材の厚みは、我が国の新型炉開発の技術基盤の形成に大きく貢献し、最先端技術の獲得や国際貢献を行うに貴重な資産である。高速炉開発の意義は、昨今の状況変化によっても、何ら変わるものではないと、「高速炉開発の方針」は述べる。他方で、東電福島原発事故後の状況を含め、前述の過去20年あまりの状況変化の中で、より効率良く安全性の高い高速炉開発を進めることが求められるとも指摘する。原子力依存度を可能な限り低減させていくという方針をもって、いかに技術・人材を継承していくかという重い課題が顕在化していることも事実である。

高速炉開発会議は、経済産業大臣を議長とし、文部科学大臣、日本原子力研究開発機構及び高速炉開発に携わる民間事業者（電力事業者及び原子炉メーカー）の参画を得て構成され、今後の我が国の高速炉開発方針を検討する役割を担っている。平成29年からは、高速炉開発会議の下に戦略ワーキンググループが設置された。平成30年6月現在で10回開催され、高速炉開発戦略ロードマップが審議されている。しかし、その絵姿は未だ見えてこない。東京電力福島第一原発事故後には、研究開発段階炉（ナトリウム冷却高速炉）の規制基準が策定された。これについて原子力学会の新型炉部会が検討会を設置し、報告書やパブリックコメント、企画セッションの報告などを部会のホームページにて公表する⁵⁾。これも今のところは深い議論が行われるには至っていない。日仏高速炉協力は、ASTRID計画の出力規模縮小などの変更が行われ、不確かな要因を含んでいる。

高速炉開発の意義とその役割について価値が再確認された。同時に我が国の高速炉開発を取り巻く環境について、近年、大きな情勢の変化があったことも指摘されている。これらの状況を冷静に捉え、国内の高速炉開発の司令塔機能を担うとした高速炉開発会議にて次世代炉開発計画の検討が進められるものと考えらる。

1. 高速炉開発環境の変化

高速炉開発基本方針を定めるにあたり、考慮すべき状況変化が分析されている。この20年あまりの間、とりわけ、東日本大震災以降、我が国の高速炉開発は、4つの主な状況変化に直面している。(1)安全最優先の考え方、(2)プロジェクトマネジメント機能の重要性、(3)政策と市場構造の変化、(4)国際的動向の展開である。

前者二つは、開発体制が総体として備えるべき組織内の課題である。何よりも安全性を優先させることが原子力利用を進めていく上での大前提と強く認識された今、こうした社会的要請に真摯に対応する取組が求められ

る。また、「もんじゅ」が廃止措置に至った経緯を踏まえ、プロジェクトマネジメント機能の重要性が指摘される。「もんじゅ」では研究開発そのものよりも手続きや保守管理の問題で多くのコストを費やしたように思える。高速炉開発プロジェクトに対する社会的な信任を得るためには、プロジェクトマネジメント機能の強化と効率化の徹底を図る必要がある。

後者二つの状況変化は、外的な要因に関する課題である。原子力政策を取り巻く環境自体も大きく変容している。我が国の原子力発電依存度を可能な限り低減させるという方針の下では、各種の前提条件を見直す必要が生じている。将来の国内の原子力市場は、福島第一原子力発電所事故以前に想定していたよりも、縮小を見込まざるを得ない。また、電力自由化が進展し安定供給との両立が課題となる中で、高速炉開発に対する民間投資環境はより厳しい。国際的な開発動向も変化しつつある。原子力開発を積極的に進めてきたいわゆる「原子力先進国」では、英国や米国は高速炉開発に一定の研究開発リソースを維持しつつ、各国固有の諸事情を勘案した見直しが進められる。フランスは2010年頃から新たな実証炉ASTRIDの開発を始めた。実証炉BN-800が2014年に初臨界して送電を開始し、BN-1200を建設中のロシアは高速炉開発を更に進める。中国、インドといった「原子力新興国」が、将来のエネルギー確保の観点から2025年頃の実証・実用化を目指した高速炉開発の取組を強化し、存在感を高めている。

2. 新たな取組み目標と4つの原則

我が国の高速炉開発は、世界最高レベルの技術基盤の維持・発展を図りつつ、高い安全性と経済性を同時に達成する高速炉を開発し、将来的な実用化を図り、もって国際標準化に向けたリーダーシップを最大限に発揮することを目標に掲げる。その実現のため、高速炉開発をめぐる様々な状況変化を踏まえ、開発目標と開発計画を具体化する必要がある。

我が国の国情に合致する原子炉システムは、昨今の国際的状況や他のエネルギー技術との共存の可能性も踏まえれば、強化すべき評価軸があるのではないかと。まず、福島第一原子力発電所事故後の社会と技術の要請に応える確かな安全性の確立である。新型炉においても、地震・津波対策の強化やシビアアクシデント対策等の新たな規制要求に応じていくとともに、世界の最新の知見を取り入れて、事故リスクを低減させていく不断の取組がなされなければならない。第二に、経済効率性の追求と、本格導入時の市場環境への適合である。将来導入される時点での電力市場環境下においてエネルギー政策の状況に適合した電源とすることが求められる。また、開発コストや、安全性と供給信頼性、環境負荷低減性等を考慮した上で、運転経済性を含めた発電原価換算での経

済性を備えたものでなければならない。第三に、国際的枠組みの活用である。新型炉の開発は容易ではなく、国際協力を通じて技術知見獲得や国際標準化を効率的に達成することの可能性は広がる。国際協力の場を戦略的に活用する視点は開発計画の策定において重要である。

「高速炉開発方針」では、今後の高速炉開発を進めていくに当たって、これまでの研究開発の経験により得られた知見と教訓を十分に踏まえ、4つの原則に沿って対応するとしている。第一の原則は、国内の技術・知見・人材の徹底活用(国内資産の活用)である。第二の原則は国際ネットワークを利用した最先端知見の吸収、第三の原則は費用対効果の高い、コスト効率的な開発の推進、第四の原則は責任体制の確立である。

「常陽」と「もんじゅ」の設計・建設・運転保守を通じて得られた高速炉特有の技術等の活用は知識管理(Knowledge Management)として重要であり早急に取り組む課題である。実証炉の開発では、安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性等を同時に成立させる実用化概念が追求された。これらの過程では、技術的・人的基盤、原子炉や燃料・材料実験施設、ナトリウム取扱試験施設等のインフラが蓄積された。技術、人材、インフラの効果的な活用がポイントである。国際ネットワークの利用については、第四世代原子力システムに関する国際フォーラム(GIF)をはじめとした多国間の協力や、二国間での国際協力への取組方針を明確にする必要がある。開発資金の確保には、費用対効果を追求しなければならない。高速炉開発の将来の費用見通しや開発リスクなど、時間軸も含めた分析が望まれ、リスク分散やコストの低減化を図るべく国際協力の活用も視野に入る。今後実施される科学的レビューメカニズムは、この原則を的確に反映して構築されるものと期待する。

新型炉開発は、研究開発、その評価、的確な取捨選択の繰り返しとなる。これを行う組織のガバナンスは不可欠である。「高速炉開発の方針」では、“こうした適切な体制の構築のための第一歩として、まずは国、メーカー、電力、研究機関が密に連携しつつ、責任関係を一元化した体制の下で今後の高速炉開発を進めていくことが必要である。こうした体制の実現に向けて、国としても主導的な役割を果たしていく”とする。国際リスクガバナンス協議会は、“(当事者が)権限を行使して、決定を行い、実装するにあたり、規範とする、行動、プロセス、慣例、制度を、ガバナンスと云う”とガバナンスを定義する。

エネルギー基本計画に述べる、野心的な複線シナリオと科学的レビューメカニズム、技術イノベーションと戦略的柔軟性は新型炉開発計画にも通じる。

IV. 新型炉開発計画と持続可能な社会

新型炉がその実力を発揮するまでには時間的余裕がある。持続可能な社会への要請は2050年を目指したもの

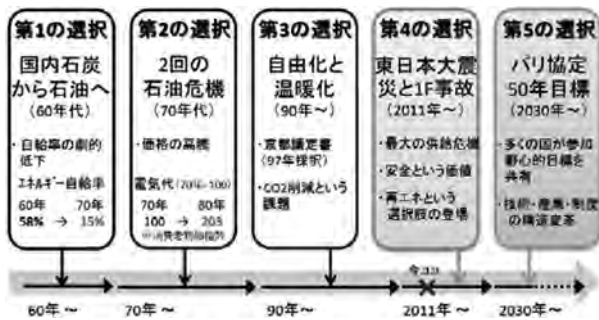
である。新型炉開発計画は持続可能社会の実現に貢献するべく使命を設定する必要があるのではないだろうか。いくつか、持続可能社会の在りようを示す国際的な議論を概観する。

第4世代原子力システムに関わる国際フォーラムは、研究開発を国際協力により効率的に進めるための枠組みであり、将来的なエネルギー需要の増大に対応するための進歩的な原子力システムの開発を目的として立ち上げられた。現在13ヶ国(アルゼンチン、英国、カナダ、韓国、日本、ブラジル、フランス、米国、南アフリカ、スイス、中国、ロシア、オーストラリア)と1機関(欧州原子力共同体(ユーラトム))がGIF憲章に参加し、6つの原子力システム(ナトリウム冷却高速炉(SFR)、超高温ガス炉(VHTR)、ガス冷却高速炉(GFR)、鉛冷却高速炉(LFR)、溶融塩炉(MSR)、超臨界水冷却炉(SCWR))の研究開発に関する国際協力を進めている。

第4世代原子炉では、原子力以外のエネルギー源と競合できる高い経済性及びより高度な安全性を実現すること、廃棄物の負担を最小化すること、より高度な核拡散抵抗性を備えることを目指している。特に「炉心損傷頻度の飛躍的低減」や「敷地外の緊急時対応の必要性排除」など安全性と信頼性の本質的向上を目指している。また、エネルギー源としての持続可能性を備え、2030～2040年代の導入を目標としている。

2015年9月25日第70回国連総会において、「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択された。第5次エネルギー基本計画は2030年あるいは2050年を見据えた時に特筆すべき状況変化として、パリ協定の発効とならんで、「持続可能な開発のための2030アジェンダ」の国連での採択をあげている。このアジェンダは、人間、地球及び繁栄のための行動計画であり、エネルギー、経済成長と雇用、気候変動等に関する17の持続可能な開発目標(SDGs: Sustainable Development Goals)が掲げられている。あらゆる形態の貧困を撲滅することが最大の地球規模の課題であり、持続可能な開発のための不可欠な必要条件であると認識のもとに、「目標7. すべての人々の、安価かつ信頼できる持続可能な近代的エネルギーへのアクセスを確保する」として、エネルギー問題の解決を謳っている。世界全体で今世紀後半に温室効果ガスの人為的な排出量と吸収源による除去量との均衡の達成を目指すとしており、世界的に脱炭素化ⁱⁱへのモメンタムが高まっている。このようなSDGsの達成や、地球温暖化問題の本質的な解決のためには、国内の排出削減はもとより、世界全体の温室効果ガス排出量の大幅削減を行うことが急務である

ⁱⁱ ここでは「今世紀後半の世界全体での温室効果ガスの人為的な排出量と吸収源による除去量との均衡の達成に向けて、化石燃料利用への依存度を引き下げること等により炭素排出を低減していくこと」を指す。

図 日本エネルギー選択⁶⁾

とする。2030年までに、再生可能エネルギー、エネルギー効率及び先進的かつ環境負荷の低い化石燃料技術などのクリーンエネルギーの研究及び技術へのアクセスを促進するための国際協力を強化し、エネルギー関連インフラとクリーンエネルギー技術への投資を促進するとしている。

第5次エネルギー基本計画は我が国のエネルギー選択の歴史を振り返り、これまでに4つのエネルギー選択があったとする。図は、日本のこれまでのエネルギー選択、その分岐点を表している。第一の選択は1960年代の国内石炭から石油への転換であり、これによりエネルギー自給率は大幅に低下するとともに石油依存の構造となった。第二の選択は1970年代。二度の石油危機を経験して脱石油への転換が図られ原子力発電の導入が加速された。1990年代には第三の選択を迎える。電力自由化の流れの中で温暖化抑止が求められる。これまでの転換はいずれも原子力発電の役割を高め明確化するものであったといえる。実際に、2009年に「2020年までに1990年比で25%削減する」という目標を国際公約し、原子力発電の比率を50%以上にするとされた。第四の選択は2011年の東日本大震災を受けてである。停電が長期にわたり、原子力の安全に対する信頼が失墜し、再生可能エネルギーの拡大が脚光をあびる。

現在は再生可能エネルギーの限界と過大なコスト負担が顕在化し、原子力発電所の再稼働は遅々として進まない中、パリ協定の発効にともなう境界条件が課された。エネルギー基本計画は、技術間競争の高まりによる可能性の拡がりと、その帰趨は不透明であるという不確かさの中で野心的な複線シナリオを標榜している。その全方位的な方針においてエネルギー選択を的確に実施するための科学的レビューメカニズムが導入される。これらの

持続可能な社会を求める要請と新型炉開発計画がうまく適合することが不可欠であり、その点こそ第3世代の原子炉の時代から進化した、新型炉の目指すゴールであると思う。

V. まとめ

新型炉の開発計画を議論するにあたり、これまでの我が国の動力炉に関する方針や経緯、原子炉に対するあるいは原子力技術に対する今日的なニーズ、これらを踏まえ、今後2030年あるいは2050年に向けての新型炉開発計画には何が求められるかを分析した。

新型炉は研究開発要素が多分にある。従来は、技術的な成熟度として、その開発に対する必要性和実現性を評価し、意思決定をした。今や、技術的成熟度は評価軸のひとつにすぎないかもしれない。いかなる評価軸を持つべきかの議論を深めること、新型炉開発に同期する規制の考え方を考えること、開発組織や国の役割とガバナンス機能をどう設計するのか、2050年に向けての我が国の技術力と組織力のチャレンジである。

福島第一原子力発電所の事故の後、自主的安全向上の活動を進めるとしてリスクガバナンスの枠組み構築が不可欠とした。新型炉開発では、開発目標を設定し、技術開発リスクを評価し、統合的に開発戦略を決定して、開発リスクを最小化する。枠組みはそっくりである。

— 参考資料 —

- 1) エネルギー基本計画, 平成30年7月.
- 2) https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public
- 3) 今後の高速炉開発の進め方について, 原子力関係閣僚会議 (第5回平成28年9月21日).
- 4) 高速炉開発の方針(案), 原子力関係閣僚会議(第6回平成28年12月21日).
- 5) <http://www.aesj.or.jp/division/ard/Material.html>
- 6) 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会(第1回2017年8月9日).

著者紹介



山口 彰 (やまぐち・あきら)

東京大学

(専門分野/関心分野) 原子力工学, 安全工学, リスク学, シミュレーション工学など

高速炉サイクルの経済性評価 ー炉の建設コストと燃料サイクルコストー

日本原子力研究開発機構 向井田 恭子, 他

原子力機構は高速炉サイクルの開発当初から、軽水炉サイクルに対し経済的競合性を持つシステムとすることを開発目標の一つとして掲げその研究開発を進めてきた。本稿では、高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT)フェーズⅠにおけるナトリウム冷却高速炉及び燃料サイクル施設の設計をベースに、追加的な安全対策費や社会的費用を考慮し、高速炉サイクルの発電コストを試算した結果を紹介する。

KEYWORDS: JSFR, fast reactor system, fuel cycle system, generation cost, economic evaluation

I. 背景

軽水炉による原子力発電の経済性については、2015年の総合資源エネルギー調査会基本政策分科会・長期エネルギー需給見通し小委員会・発電コスト検証ワーキンググループ(以下、検証WG)において、将来軽水炉として2030年を想定したモデルプラントを10.3円/kWhとする評価がなされ、追加的な安全対策費や社会的費用等を考慮したとしても他電源に対し原子力発電が競合可能であることが示されている¹⁾。一方、ナトリウム冷却高速炉(SFR)については、軽水炉とは異なる冷却材を利用するという特徴から原子炉プラントの建設費が高く、軽水炉に比肩することは困難だとする意見がある。例えば、ナトリウム冷却高速炉は軽水炉の1.15倍から1.9倍の建設費と評価した1978年の米国の文献を例に、軽水炉よりもSFRの建設が安価になる根拠ある評価はないとする主張である²⁾。

高速炉サイクルは開発段階ではあるものの、将来的に軽水炉サイクルに対し経済的競合性を有するシステムとしていくことが、1999年の実用化戦略調査研究(FS)開始当初からの開発目標の重要な一つである。原子力機構は2006年から開始した高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT)フェーズⅠにおける検討の結果、SFRの建設費は軽水炉のそれより高いものの、SFRサイクルが将来軽水炉サイクルと同等の発電コストを達成できるとの

見通しを提示した^{3~5)}。

一方、この評価に対して、建設費評価手法の検証の不十分さや、設備毎の検討の偏り等を挙げて評価結果に疑問を呈する意見もある⁶⁾。

この評価結果は国の評価委員会に供され、原子力機構はその後Generation IV International Forum(GIF)におけるSFRの安全設計クライテリア/ガイドラインの検討・策定を主導する他、高速炉のシビアアクシデント対策等、安全性向上の検討を進めてきたが、これらの安全対策に起因するコストの増加を考慮すると、高速炉サイクルの経済性に対する懐疑的な意見は、更に強まることも考えられる。

本報では、FaCTにおけるSFR及び燃料サイクル施設の概念検討をベースに、追加的な安全対策費や検証WGで考慮された社会的費用等を考慮して、現時点でのSFRサイクルの経済性について述べる。

II. FS/FaCTの評価

1. 高速炉プラント

(1) これまでの検討概要

高速炉サイクルの経済性を確保するために高速炉プラントの建設費の低減が主要な課題であることは、各国共通の理解となっている。一般にSFRでは、炉心冷却を行う1次冷却系統に中間熱交換器を設置し、そこで2次冷却系統に接続して蒸気発生器で熱交換を行う系統構成となる。この結果、冷却設備や建屋面積が増加し、建設費が高くなる要因となる。これを考慮し、過去に電気事業者が実施した電力実証炉設計研究においては、実用段

The prospect of economics of Fast Reactor cycle: Kyoko Mukaida, Atsushi Kato, Masayoshi Kamiya, Katsunori Ishii.
(2018年10月31日受理)

階の 100 万 kWe 級のプラント建設費を軽水炉建設費の 1.5 倍以下とすることが目標とされていた。

原子力機構は FS フェーズⅡにおいて、軽水炉や多電源と比肩し得る経済性を達成することを目標とし、高速炉が有する固有の課題を克服し、その長所を最大限に活用した実用化候補として、MOX 燃料装荷を念頭に置いた SFR である Japan Sodium-cooled Fast Reactor (JSFR) プラント概念を構築した。JSFR は、経済性向上に資する革新技術を採用することでプラント物量の大胆な合理化を図った概念である。具体的には「システム簡素化のための冷却系 2 ループ化」、「原子炉容器のコンパクト化(切込炉上部機構とパンダグラフ式燃料交換機の採用)」等を採用し、中間熱交換器等の SFR 固有の機器や 2 次冷却系等を考慮しても、全体のプラント物量を大幅に削減可能なシステム概念を構築した。これらに加え、燃料費の低減のために、「高燃焼度化に対応した炉心燃料の開発」も採用し、プラント物量の大幅な削減と燃料費の低減によって軽水炉の発電コストに比肩する経済性の達成を目指すこととした。

(2) 建設費評価

① プラント物量データ

FaCT フェーズⅠの最終年度である 2010 年度には、原子力機構は JSFR の実用炉(150 万 kWe ツインプラント)及び実証炉(75 万 kWe シングルプラント)について、合計 81 種に及ぶ設計根拠資料を整備した。この中で「各設備文書」は、革新技術による経済性の向上を目指した炉心、原子炉構造、冷却系、燃料取扱系などの主要な機器の検討のみに偏らず、タービン設備、電気計装、BOP 設備、建屋にわたるプラント全体の概念検討を含んだ評価としている。加えて、これらを内包する原子炉建屋の設計においては、燃料交換時のみならず、保守補修時のクレーンによる機器交換に必要な原子炉上部スペースを確保すると共に、保守スペースを確保した建屋配置設計を実施した上で、建屋設計を行った。原子力機構は、これら 1999 年の FS 開始から継続して積み上げられた設計研究の成果に基づいて算定されたプラント物量データを利用して建設費評価を行ってきた。後述する建設費評価に直接用いる 300 種を超える物量データのみならず、それらを裏付ける豊富な背景情報に基づいた建設費の評価は、GIF の専門家会合(経済性評価ワーキング：Economic Modeling Working Group)の場での議論にも供されてきている。

② 建設費評価コード

軽水炉の建設費が建設実績に基づいて評価される一方、実用炉の建設実績がない高速炉プラントでは、概念検討に基づくプラント物量データと各種材料の単価データを用いたボトムアップ方式で建設費を評価している。FaCT では、電力実証炉及び FS で用いられていたコマンドコストコード(CCC)⁷⁾の基本フレームを参照しつ

つ、設計メーカのノウハウを含む非公開情報の要素を排除し、評価結果の説明性の高い評価を目指して、海外の公開文献に基づくコストデータベースを整備し、高速炉固有の機器の特徴を考慮して科目毎の単価を見直した SCALLE コードを開発した⁸⁾。この開発においては、検証のために軽水炉に対する評価と、CCC と SCALLE コードで高速炉プラントに対する評価結果比較を行い、CCC と同等程度の妥当性を有することを確認した。

図 1 に、JSFR 実証炉(75 万 kWe シングルプラント)のプラント物量と SCALLE コードを基にした建設費評価結果の例として、直接費の各科目の構成比率を示す。比較のため、図には 2018 年に発行された米国エネルギー省の PWR-12(114.4 万 kWe)、及びナトリウム冷却の先進燃焼炉 ABR-1000(38 万 kWe)が評価したコスト比率を併せて示す⁹⁾。この図から、JSFR の各科目の構成比率は、同じく SFR である ABR-1000 の構成比と全体的に良く一致している一方で、これらは PWR の構成比率とは大きく異なっている。特に高速炉でタービン発電設備(科目 23)の構成比率が小さい。これは、軽水炉の入口蒸気条件が圧力 6.7MPa、温度 284℃であるのに対し、ABR-1000 及び JSFR では圧力 15.5～18.6MPa、温度 454～495℃であることから、コンパクトで効率のよい亜臨界火力タービンが利用でき、出力当たりのコストを低減できていることに起因している。他の部分についても、SCALLE コードを用いることにより、軽水炉の科目構成との相対的な差が合理的に説明可能であり、JSFR の評価において補機系統を含む検討が十分行われた上で、プラント全体にわたる概念検討に基づいた合理的な評価となっている。

(3) FaCT フェーズⅠ評価結果

評価の結果、実用炉である 150 万 kWe ツインプラントの初号機(FOAK)で 25 万円/kWe(建中利子込)、習熟機(NOAK)で 18 万円/kWe(建中利子抜)となり(2005 年

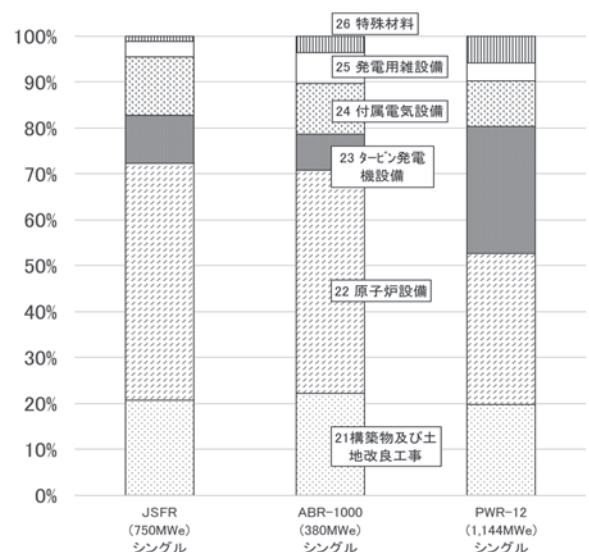


図 1 高速炉の直接費の構成比率

価値), FaCT の目標である将来の国内軽水炉の建設費を念頭に置いた習熟機で 12 万円/kWe(建中利子抜)には届かないものの、公開ベースで得られた当時の国内軽水炉の建設費 25~29 万円/kWe より 3~4 割程度低く、将来における基幹電源として競合できる建設コストを達成できる可能性があると判断した。なお、燃料サイクル施設の処理単価を含め金利及び割引率は FaCT 当時最新の国の評価であった 2004 年の原子力委員会新計画策定会議・技術検討小委員会基本シナリオの核燃料サイクルコスト比較に関する報告書における想定値に倣い、2%/年とした。

実用炉の建設経験のない高速炉の建設費を評価する上で、概念設計段階でプラント物量の削減を図り、その効果をその都度確認していくアプローチは各国共通である。例えば、1990 年代に欧州の高速炉ユーティリティグループ(EFRUG)が検討した SFR である欧州統合型高速炉(EFR)の設計検討においては、JSFR と同程度の概念検討レベルの段階では、設計努力に基づく物量の削減によりスーパーフェニックス炉の半分以下の物量に削減可能な見通しを得た上で、軽水炉に比肩し得る経済性を有すると評価した¹⁰⁾。FaCT フェーズ I における経済性の判断は、継続して設計、研究開発、及び経済性評価を行うプロジェクト・サイクルを回していくことを前提に行われた初期のものであるものの、JSFR の設計概念が将来的に経済性目標を達成できる可能性があることを示すものとする。

2. 燃料製造

炉心燃料の高燃焼度化は高速炉サイクルの経済性を大きく高める上で重要な要素である。一方、高速中性子照射量の増加に対応できる寸法安定性に優れたフェライト鋼製被覆管を適用した上で、高燃焼度下での燃料-被覆管化学的相互作用による被覆管内面腐食を低減する必要がある。高燃焼度の高速炉 MOX 燃料の製造には、酸素-金属原子数比(O/M 比)を 1.97 以下に調整する工程が必要となる。また、後述する再処理への晶析法の採用により高線量の低除染回収ウランを取扱うことから、炉心領域毎に専用のセル内製造ラインを設け遠隔保守を行う必要があり、従来と比してライン数や保守に伴う機材が増加する。さらに、環境負荷低減を考慮したマイナーアクチノイド(MA)含有燃料の製造には、MA の発熱に対応するため、粉末及びペレットの取扱いと貯蔵、加えて、燃料集合体の組立や貯蔵等を空冷方式とする必要があり、設備費や運転費も増加しうる。

このような高速炉燃料固有の特性は燃料製造の経済性を悪化させる要因となるが、FS 及び FaCT⁴⁾においては燃料製造工程を合理化した簡素化ペレット法を採用することによって全体としての工程数の増加を抑え、コストの低減を図ることとした。簡素化ペレット法は、プルト

ニウム富化度を溶液段階で調整した後、脱硝・転換・造粒一元処理工程により流動性の良い MOX 粉末に転換し、ダイ潤滑成型機により直接成型する方法であり、粉末形態でのプルトニウム富化度調整、原料粉末への潤滑剤添加工程及び予備焼結工程を不要とし、現行法よりも工程数を大幅に削減することが可能となる。また、脱硝・転換・造粒一元処理工程については、バッチサイズを 2kgHM から 5kgHM に拡大することにより系列数の増加を抑え、溶液の受入れから造粒工程まで同一容器でハンドリングする「容器共用化」の概念を導入することにより、機器設計を合理化した。さらに、製造機器のメンテナンスを行うための保守用セルを各製造ラインで共有することにより、施設設計を合理化した。

これらの方針の下、経済性評価にあたっては、まず炉心領域毎の燃料製造量と設備能力から、各製造ラインの設備台数を算出した。主要工程の設備費に関しては、設備の概念設計結果を基にした見積額と設備台数の積により求めた。ただし、同一設備の 2 台目以降は、設計費(機器単価の 10%)を差し引くものとした。また、製造量に応じて能力の異なる設備を設置する場合、各サイズの設備単価は設備能力の 2/3 乗に比例するものとして推定した。主要工程以外の設備費については、保守設備費は配置設計により、オフガス・廃液処理設備、ユーティリティはそれぞれの発生量・使用量を基に、分析・計装設備は分析・計装点リスト等を基に、建物・電気・換気設備費は建設容積とセル施設の実績単価の積により算出し、これらの費用合計を建設費とした。

操業費のうち、人件費については、設備ごとの運転要員数を積み上げて管理職を加え、人件費単価を乗じた。修繕費は建設費を基に、耐用年数に応じた比率で毎年費用が発生するものとした。消耗品費として、ユーティリティ及び試薬費を、それぞれの使用量と単価を基に算出した。部材費に関しては、もんじゅ燃料集合体製造の実績を基に、量産によるコストダウンを期待して設定した。その他、諸費も考慮した。廃止措置費用は、処分区分ごとの廃棄物発生量と処分単価から算出した。

建設費、操業費(人件費、修繕費、消耗品費、部材費、諸費)及び廃止措置費並びに全操業期間(40 年間)中の総製造量に対し、金利と割引率の双方を 2%として、商業燃料製造施設(簡素化ペレット法、年間製造量 200tHM/y)の燃料製造単価を評価した結果、26 万円/kgHM となった。(なお、立地に依存する用地取得費及び燃料輸送費は含んでいない)。

3. 再処理

核物質を扱う装置類は臨界安全性の観点から寸法精度の要求も厳しいため非常に高いコストとなる。これに対処するため、FS 及び FaCT においては以下①~④のとおり再処理工程の合理化を図り、更に、臨界管理が必要

な溶液の取扱量を低減することでコストの低減を図ることとした。

- ① 精製系の削除：上述のとおり、高燃焼度化に伴うプルトニウム自体の放射能の増加や MA のリサイクルによる取扱対象の放射能の増加から、燃料製造はセル(又は重遮蔽グローブボックス)内にて遠隔で行うと想定される。その場合、線量を下げするための精製を省略することか可能であり、精製のための核物質を取扱う装置の点数、容量の大幅な削減をすることができる。
- ② 晶析法による分配：晶析法は試薬を必要とせずウランの分離、及びプルトニウム/ウラン比の調整(分配)が可能な技術である。高速炉使用済燃料の場合、晶析法によるウランの回収率は 70% 程度でプルトニウム/ウラン比がおおむね 1/2(プルトニウム富化度にして 33%)の製品が得られ、内側炉心燃料に比べて高い富化度となる外側炉心燃料を製造するに足る組成を得ることができる。晶析後の母液は抽出処理することになるが、そこに含まれるウラン・プルトニウムは、全量抽出処理する場合の約 1/3 であり、必要なプロセスの物量も低減できる。また、晶析法によって回収されるウランは硝酸塩の形態であり、ウラン溶液の蒸発濃縮工程も不要となる効果が期待できる。
- ③ 取扱溶液の高濃度化：晶析法への供給液には高濃度の溶液が必要であるが、溶液の高濃度化は必要な槽類の容積の低減も可能である。単位処理量あたりの必要容積が小さくなることでコスト低減が可能となる。
- ④ 小内容量機器の採用：臨界制限上の要求と合わせて単位処理量当たりの装置内容積の小さい機器を採用することにより、機器の小型化、定常状態に達するまでの迅速化を図ることが可能となる。

上記の経済性の観点に加え、FaCT では、環境負荷の低減を図るため、MA の回収も考慮した再処理システムとして先進湿式法を提案した。

なお、上記①～④はコスト低減に係わる項目であるのに対して、MA 回収についてはコストが増加する項目である。これは、分離のための設備が追加されることに加えて分離プロセスで使用する流量が大きいため廃液処理設備の増強が必要となることが原因となっている。

これらの R&D 成果を反映した年間処理量 200tHM/y 規模の再処理プラントの設計を実施して再処理単価の評価を行った。設計は、プロセス設計(工程系統図、物質収支計算、ユーティリティ負荷集計、廃棄物集計等)、機器設計(主要機器リスト、機器・機械計算等)、配置設計(機器、建屋)等を中心に実施した。

建設費の見積もりのうち、内装設備については主要機器について設計による分析を行い、リサイクル機器試験

施設(RETf)等の既存施設の建設時の実績値から機器種類・容積・サイズ・材料に応じた計算式を作成し、機器費を積算した。配管、架台、計装等については主要機器の合計値とそれらの附属機器類のコスト比率の実績値をもとに算出した。

また、建築・電気、換気設備費については主要機器の設計結果を基に配置設計を行い、建屋規模を算出し、RETf の建屋容積当たりの単価実績(1999 年時点)を基に見積もった。

運転費について機器等の年平均の交換比率を設定し、修繕費等を算出し、人員についても運転配置を考慮して設定を行った。その他、廃止措置費なども燃料製造と同様の手法にて再処理単価を評価した結果、金利と割引率の双方を 2%として 26 万円/kgHM となった。

III. 経済性評価の概要

1. 発電コスト評価方法

(1) 評価手法

今回の発電コスト評価にあたっては、検証 WG が公表しているライフサイクル平準化発電原価評価手法を用いた。本評価手法においては、2012 年の原子力委員会原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会の評価から発電コストに取り入れられた社会的費用(事故リスク対応費及び政策経費)を採用する一方、新たに建設費を減価償却費ではなく初期投資費として一括計上する手法を採用している。本評価における高速炉サイクルの発電コストの代表的な炉概念は、比較対象とした検証 WG の軽水炉と同規模の革新技術ループ型 SFR120 万 kWe シングルプラントとし、現行軽水炉と同じく 40 年のプラント寿命とした。また、将来的な高速炉サイクルのポテンシャルを示すため、併せて、実用化段階の高速炉の設計目標である 150 万 kWe ツインプラント、60 年のプラント寿命での条件についても評価した。使用済燃料については検証 WG における軽水炉サイクルの想定ではその半分を 50 年間中間貯蔵しその後再処理する想定であるが、高速炉サイクルでは全量所定の冷却貯蔵後タイムリーに再処理することを想定した。

高速炉、再処理、及び燃料製造施設等の単価、並びに社会的費用についての想定は次項以降に示す。なお、本評価は検証 WG の評価年に合わせ費用を 2015 年価値に換算し、割引率も検証 WG にて採用された 3%とした。

(2) 高速炉プラント

福島第一原子力発電所の事故(以下、1F 事故)を受けて、SFR に必要な安全強化方策について設計検討を実施した。そこでは、第 4 世代炉の安全設計クライテリア及びガイドラインに則った設備対策を検討した。なお、防潮堤等、将来の立地サイトの環境条件に依存した安全強化対策については、採用対象外とした。追加的な安全対策としては、プラント内部の事故事象(内部事象)に加え

て、あらゆる外部事象(地震、津波、竜巻、火山灰、航空機落下等)への耐性を強化した。具体的には、機器の耐震性強化、建屋壁厚の強化、崩壊熱除去系の系統数増加及び分散配置等の対策を講じた。

ここでは最も検討の進んでいる 75 万 kWe シングルプラントを例に追加的な安全対策の影響を考察する。図 2 及び図 3 に安全対策を図った SFR-75 万 kWe シングルプラントについて、原子炉蒸気供給システム(NSSS)、及び建屋の物量(重量、体積等)の変化を示す。図では JSFR と同じく革新技術を採用した場合のループ型炉に加え、1 次系ポンプと中間熱交換器を分離配置し、蒸気発生器の型式を直管 2 重管からヘリカルコイル単管に変更する等の代替技術を採用した場合のループ型 SFR への影響を示している。加えて、近年の仏国との ASTRID 協力の進展を踏まえ、我国に適用可能なタンク型 SFR への影響も併せて示す。耐震、過酷事故防止・緩和の安全対策の強化により、NSSS 設備については、主に原子炉・1 次系システムの重量、及び崩壊熱除去システムの除熱容量の増加が著しい。また、航空機落下対策による建屋内機器配置の物理的な分散配置に伴い、格納容器、及び原子炉建屋の体積の増加が顕著である。

図 4 に SFR-75 万 kWe シングルプラントの建設費を示す。建設費は、建設工事費デフレーターにより検証 WG の評価年度である 2015 年価値に換算している。ここでは FaCT における概念に対して安全対策を施した革新技術ループ SFR 以外に、革新技術を一部代替技術に変更した「代替技術ループ SFR」、及び型式を変更してタンク型炉にした「代替技術タンク SFR」について評価した。安全対策を追加した上記 3 つの概念のプラント物量は、FaCT フェーズ I 時に比べて最大でおよそ 40% 増加しているが、上記 3 つの概念間の差異は概ね無視できる程度となった。ここで代替技術を採用した SFR の建設費が JSFR より低く評価されている理由は、次のとおりである。JSFR では蒸気発生器の伝熱管破断の発生頻度が十分小さくなるよう直管密着二重管を用いていたが、代替概念では、国内で製造経験があり、技術開発のリスクが小さな単管ヘリカル伝熱管に変更したことによる。これによって、製作工程の負荷が緩和され、建設費が低く評価された。SFR の建設費評価に対しては、合体機器等の革新技術開発には不確実性があるため、既存技術で代替した場合には、プラント物量の合理化に限界があり、軽水炉に比肩する建設費の実現は困難であるとする意見もあるが、FS や FaCT の評価でも技術開発の不確実性を踏まえた評価を実施している。ここで一例として示したが、代替技術の採用に切り替えた場合でも経済的に軽水炉に比肩する可能性を示した。

図 5 に高速炉の経済性見通しを図る上で重要な 150 万 kWe ツインプラントの建設費(2015 年価値換算)を示す。図には以下の 2 つの軽水炉の推定値を示している。

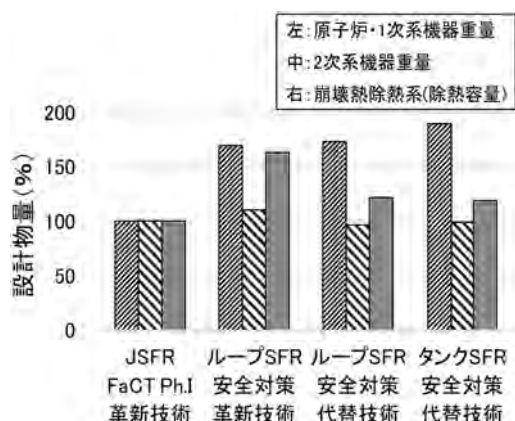


図 2 追加安全対策等によるプラント物量の増加(NSSS) (JSFR FaCT フェーズ I の設計物量で規格化)

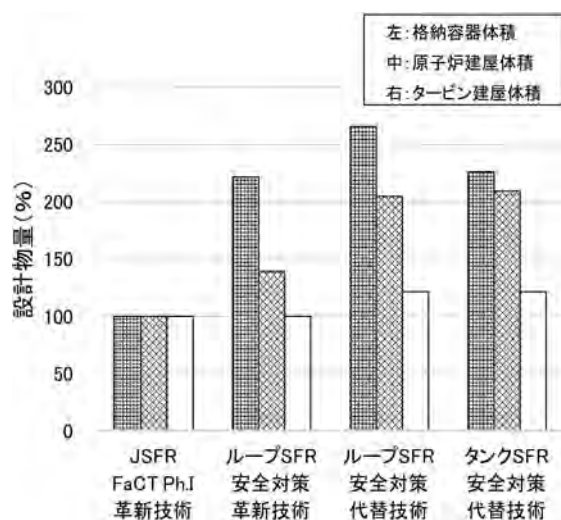


図 3 追加安全対策等によるプラント物量の増加(建屋) (JSFR FaCT フェーズ I の設計物量で規格化)

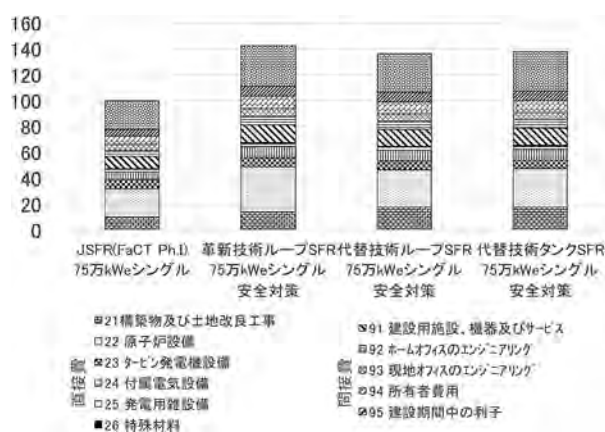


図 4 追加の安全対策等による建設費の増加
75 万 kWe シングルプラント
(FaCT フェーズ I の建設費で規格化)

PWR-12: 2018 年の DOE の評価⁹⁾ の 100 万 kWe 軽水炉シングルプラントの建設費を基に 2/3 乗則によるスケール効果を考慮して 150 万 MWe シングルプラントの建設費を算定する。これを 2 倍し、ツインプラント化に

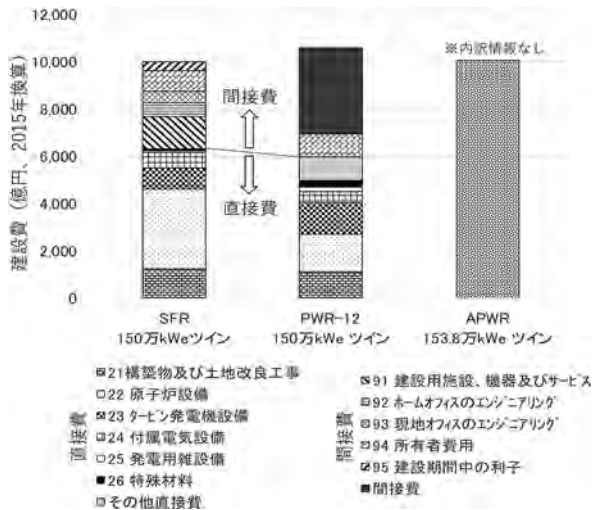


図5 高速炉の建設費の見直し
150万kWt ツインプラント (2015年価値換算)

よる共用効果として15%の建設費削減効果(FaCTフェーズIまでの設計・建設費評価に基づく値)を見込んで推定したものである。

APWR: 原電・敦賀3.4号機(153.8万kWt ツインプラント)は¹¹⁾、2基分の新規制基準に適合するための安全対策費¹⁾として1202億円加えて推定した建設費である。

SFRの直接費(NOAK)は、PWR-12と同等程度となっているが、このプラントは、日本で実施されているような1F事故以降の安全対策がなされていない。このため、日本国内に立地する場合には、耐震性向上を含めた追加安全対策によって建設費が増加する可能性があると考えられる。間接費については、PWR-12が高くなっているが、その内訳は限定的にしか示されていない。ただし、唯一内訳の明らかな所有者費用(オーナーズコスト)については、SFRの評価値と同等であることが分かる。一方、APWRについては、直接費、間接費の内訳は示されていないが、新規制基準対応のための安全対策費を考慮して推定した値であり、SFRの経済的なポテンシャルを測る上で一つの参考になる。実用規模のSFRについても75万kWt シングルプラントと同様にFaCTフェーズI時に比べて建設費は大きく増加する見込みではあるが、図5の比較により軽水炉も追加の安全対策を考慮すれば建設費が増加することから、両者の経済性は競合する可能性はあると考えられる。実用化時代のSFRの習熟機についての評価結果は32万円/kWe(建中利子込)程度になる見込みである。例えば震災後に行われたSFRの建設費評価としてロシアのBN-1200の評価が挙げられるが¹²⁾、BN-800をはじめとする設計・建設経験に裏付けられた設計の合理化、出力の増加、およびツインプラント化による共用効果により、ロシア型加圧水型原子炉(VVER)を下回る建設費を達成し得る見込みが示されており、SFRの固有の課題を克服しつつ、軽水炉に比肩する経済性を確保しようとする技術的努力が

世界的にも続けられている。

以上の検討を踏まえ、SFR120万kWt シングルプラントの建設費はSFR150万ツインプラントの検討をベースに、2/3乗則にて出力を120万に合わせた上で、ツインプラントの共用効果を除く事で約41万円/kWeと評価した。

(3) 燃料製造

燃料製造施設はFaCT以降、安全強化方策の検討はなされていない。このため、FaCTにおいて設計のベースとした日本原燃(株)のMOX燃料加工施設の建設費の実績値を用いて新規制基準適合のための建設費の増加を想定することとした。FaCTフェーズI当時である2010年の日本原燃(株)のMOX燃料加工施設の建設費は約1,900億円と公表されているが、その後の新規制基準適合に係る安全性対策工事等により、2018年には約3,900億円に増加したことが公表されている。高速炉の燃料製造設備に対してもFaCTフェーズI当時の概念から同様の対策が必要と想定して、FaCT当時の建設費の評価値⁴⁾に対して同程度の割合でのコストアップを想定し、2倍(3900億円/1900億円)とした。これに伴って操業費の内の修繕費及び固定資産税も2倍となった。また、金利と割引率の双方を2%から3%に見直し、約45.5万円/kgHMと評価した。

(4) 再処理

再処理施設もFaCT以降、安全強化方策の検討はなされていない。このため、FaCTにおいて再処理施設の設計のベースとした日本原燃(株)の六ヶ所再処理施設の建設費の実績値を用いて、新規制基準適合のための建設費の増加を想定することとした。FaCTフェーズI当時である2010年の日本原燃(株)の六ヶ所再処理施設の建設費は約2兆1,400億円と公表されており、その後、竜巻対策工事、大型ポンプ・放水砲等の過半設備を含む新規制基準適合に係る安全性対策工事等により、2018年には約2兆9,000億円に増加したことが公表されている。高速炉の再処理施設に対してもFaCTフェーズI当時の概念から同様の対策が必要と想定して、FaCT当時の建設費の評価値³⁾の1.35(2兆9000億円/2兆1400億円)倍とし、約45.6万円/kgHMと評価した。FaCT評価時の26万円/kgHMからの増加は、建設費の増加と割引率の変更(2%→3%)に拠る。

(5) 社会的費用

社会的費用のうち、立地交付金、防災等に関する政策経費については高速炉についても軽水炉と同等と想定し、検証WGの想定値1.5円/kWhとした。事故リスク対策費は1基あたりの算定根拠及び損害賠償費用より求められることから、高速炉1基あたりの算定根拠及び損害費用は軽水炉と同等と想定した。算定根拠は検証WGと同様に4000炉・年とし、損害費用は検証WG以降、経済産業省が2016年12月に示した1F事故による損害費

用の見積もり総額 21.5 兆円を軽水炉及び高速炉の双方において考慮する事とした。具体的には、検証 WG において 1F 事故の総損害費用 12.2 兆円を出力規模、地域性、人口比で補正し 9.1 兆円と想定していることを踏まえ、その比約 0.75 で 21.5 兆円を補正した 16 兆円を軽水炉及び高速炉双方の損害賠償費とした。

(6) その他

運転費については人件費・業務分担費を軽水炉と同等とした他、FaCT 評価と同様とした。その他の燃料費として、高レベル放射性廃棄物処分費は軽水炉と同等とした他、保守的に、FaCT 評価にて考慮している高レベル放射性廃棄物貯蔵費・輸送費 (0.04 円/kWh) も併せて考慮した。また、検証 WG では各システムの費用に含まれていると考えられる低レベル放射性廃棄物の貯蔵・輸送・処分費についても FaCT 評価と同様に考慮した (0.1 円/kWh)。

2. 発電コスト評価結果

本評価で想定した軽水炉及び高速炉サイクルの緒元を表 1 に示す。発電コストの評価結果を図 6 に示す。

上述の通り、損害賠償費を検証 WG での評価値の 9.1 兆円から 16 兆円に増加させたことにより、事故リスク対応費が 0.3 円/kWh から 0.6 円/kWh に増加し、軽水炉サイクルの発電コストは 10.3 円/kWh から 10.6 円/kWh となった。軽水炉の発電単価と高速炉サイクルに

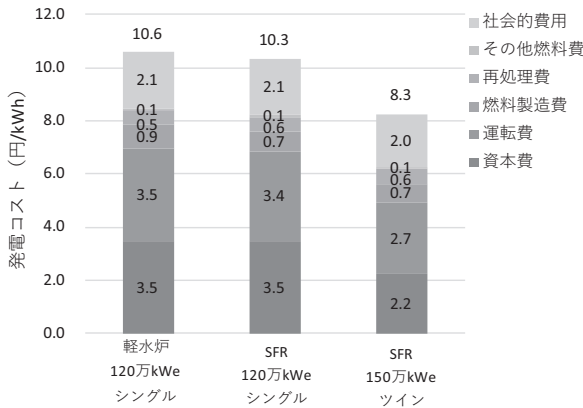


図 6 発電コスト評価結果

よる発電単価を比較する観点から、革新ループ SFR で軽水炉と同等の条件である 120 万 kWe シングルプラントの発電コストを評価した。結果は 10.3 円/kWh となり、軽水炉サイクルの 10.6 円/kWh とほぼ同等の結果となった。資本費については先に示したように建設単価において同等となっているためほぼ同じ評価とされる。SFR MOX の燃料単価については軽水炉ウラン燃料及び軽水炉 MOX 燃料の平均単価 (次世代燃料生成率 0.15 を考慮すると 36.5 万円/kgHM) と比して 125% 高いものの、SFR の熱効率が軽水炉 (34.7%) に比して 42% と、約 122% 高く、燃焼度がウラン燃料炉心と MOX 燃料炉心を平均した約 49,500GWd/t と比して約 165% 高いこと

表 1 軽水炉・高速炉の緒元・主要な想定値

		軽水炉サイクル ¹⁾ 2030 年モデル	高速炉サイクル (SFR)	備考
電気出力		120 万 kWe シングル	←/150 万 kWe ツイン	
設備利用率		70%	←	
稼働年数		40 年	←/60 年	
燃焼度 (ウラン燃料)		45,750GWd/t	—	
燃焼度 (MOX 燃料)		40,000GWd/t	81,670GWd/t ^{**}	※全炉心平均
熱効率		34.70%	42.50%	
所内率		4.00%	4.40%	
割引率		3%	←	
資本費	建設単価	42 万円/kWe ^{**}	41 万円/kWe /32 万円/kWe ^{**}	※ NOAK を対象 追加安全対策費含む
	固定資産税率	1.40%	←	
	廃止措置費用	716 億円	1169 億円 /1153 億円 ^{**}	※ FS 時の検討例から建設費の約 24%
運転費	人件費単価	20.5 億円/年	41 億円/年 ^{**}	※ ツインあたり
	修繕費単価	2.2%/年 ^{**}	←	※ 建設費比率
	諸費単価	84.4 億円/年	83.2 億円/年 ^{**} /164.2 億円/年 ^{***}	※ 軽水炉緒費の建設費比率を適用 ※ ツインあたり
	業務分担費単価	13.4%/年 ^{**}	←	※ 直接費比率
燃料費	ウラン燃料単価	31.2 万円/kgU	—	
	MOX 燃料単価	45.9 万円/kgHM	45.5 万円/kgHM	
	再処理単価	44.7 万円/kgHM	45.6 万円/kgHM	
	HLW 処分単価	11.5 万円/kgHM	←	
政策経費		1.5 円/kWh	←	
事故リスク対応費単価		40 億円/炉年 ^{**}	←	※ 本文参照

から、所内率や現在価値換算を考慮しても約 200%, 1tHM あたりの発電量が高くなる。この結果、軽水炉サイクルの燃料製造費 0.9 円/kWh と比して約 70% SFR サイクルのコストが小さい結果となった。再処理費は軽水炉サイクルの 0.5 円/kWh よりも SFR サイクルの方が約 120% 高くなる。これは上述のとおり、SFR サイクルでは原子炉から取出し後 4 年目に再処理することを想定している一方、軽水炉サイクルの場合使用済燃料の半分を 50 年間中間貯蔵した後に処理することが想定されているためであり、再処理単価は同等であるものの、現在価値換算の効果により相対的に再処理費が低くなることが影響している。

一方、将来的な SFR サイクルのポテンシャルを考慮した場合、ツインプラント化及び大出力化(120 万 kWe → 150 万 kWe)による建設単価の削減(共用効果とスケールメリット)並びにプラントの長寿命化(40 年 → 60 年)による総発電量の増加を見込むことができる。これらを考慮した場合には 8.3 円/kWh となり、将来の軽水炉の発電コストと競合可能な経済性を有すると考える。

IV. まとめ

FaCT フェーズ I における高速炉サイクルシステムの概念検討に基づき、1F 事故後のコスト増加要因も考慮して、高速炉サイクルの経済的な見通しについて再評価を行った。FaCT においては、高速炉プラントの建設費を当時の軽水炉より 30~40% 削減可能であることが示されていたが、1F 事故後の新規制に依る追加安全対策を考慮したプラント概念を検討した結果、FaCT 当時と比較して最大でおよそ 40% の物量増加と評価されたものの、追加安全対策を考慮した軽水炉と比較して競合可能と考えられる。また、革新技術を採用したループ型炉、代替技術によるループ型炉及びタンク型炉を併せて比較した結果、同等の建設単価と評価された。燃料サイクル施設については六ヶ所の既設プラントにて新規制対応により発生した建設費増加が FaCT の燃料製造及び再処理施設概念に対しても同程度に発生する(燃料製造設備建設費 2 倍、再処理施設建設費 1.35 倍)と仮定して燃料製造単価、再処理単価を評価した。これらを考慮して高速炉サイクルによる発電コストを現行の軽水炉と同等の条件で評価した結果、10.3 円/kWh となり、2030 年の軽水炉の値(10.6 円/kWh)とほぼ同等の結果となった。また、将来的な SFR サイクルのポテンシャルを考慮した場合、ツインプラント化による共用効果による物量削減、大出力化(120 万 kWe → 150 万 kWe)によるスケールメリットによる建設費削減、プラントの長寿命化

(40 年 → 60 年)による総発電量の増加を見込めば、発電単価 8.3 円/kWh となる。

以上より、SFR サイクルは、将来の他電源に対して経済性で十分競合できると考える。

— 参考資料 —

- 1) 発電コスト検証ワーキンググループ、長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告、平成 27 年 5 月。
- 2) 岡芳明、原子力利用に関する基本的考え方、日本原子力学会 2017 秋の大会、2017 年 9 月 13 日。
- 3) 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究－フェーズ II 最終報告書、JAEA-Evaluation 2006-002(2018)。
- 4) 日本原子力研究開発機構、高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT プロジェクト)－フェーズ I 報告書－、JAEA-Evaluation 2011-003 (2011)。
- 5) 日本原子力研究開発機構、FBR サイクルシステム概念の性能目標への達成度評価、平成 22 年 12 月 16 日。
- 6) 岡芳明、日本の原子力利用の課題と人材育成、日本技術士会原子力・放射線部会特別講演、2018 年 6 月 15 日。
- 7) 小竹他：高速炉サイクルシステムの経済性評価手法、原子力学会誌、2005 年 2 月号。
- 8) Katoh 他：Design features and cost reduction potential of JSFR, Nuclear Engineering and Design (2014)。
- 9) DOE, Report on the Update of Fuel Cycle Cost Algorithms, NTRD-FCO-2018-000439 (2018)。
- 10) J.C. Lefevre, et.al., European fast reactor design, Nuclear Engineering and Design, 162 P133-143 (1996)。
- 11) 日本原子力発電株式会社、平成 17 年度経営効率化への取り組み、平成 17 年 3 月。
- 12) Joint Stock Company, Innovative Designs and Technologies of Nuclear Power, ISBN 978-5-98706-110-7 (vol. 1) (2016)。

著者紹介

向井田恭子 (むかいだ・きょうこ)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)原子力特性評価、海外原子力動向

加藤篤志 (かとう・あつし)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)経済性評価、高速炉設計

紙谷正仁 (かみや・まさよし)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)経済性評価、再処理設計

石井克典 (いしい・かつのり)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)MOX 燃料製造、レーザー同位体分離



私達は廃炉にどう向き合っていくべきか ～高校生と考える廃炉座談会の開催を通して～



遠藤 瞭 (えんどう・りょう)

福島県立ふたば未来学園高等学校3年生
福島県双葉郡大熊町に生まれ。小学校4年生で震災・原発事故により避難。中学生時代から現在に至るまで一貫して放射性廃棄物の最終処分について研究している。本年8月には住民との合意形成に着目した「高校生と考える廃炉座談会」を主催。

無知であることへの焦燥感

15歳。福島県双葉郡にある帰還困難区域に立ち入るためにはその年齢を越えなければならない。私が東日本大震災を経験した時は10歳だったため、初めて故郷の大熊町に帰ったのは震災から5年が経ってからであった。荒れた土地が時間の流れを感じさせるなかで、時間があの日で止まったように変わらないものがあるという現実を前にし、撮影した写真はぶれていた。

中学生の時、学校で役場職員から中間貯蔵施設の説明を受けた。私は話を聞くまで中間貯蔵施設について無知だった。町の未来の決定に大きく関わることなのに、自分はそのことを知らなかった。自分の知らない所で町の未来が決まっていくことに焦りを感じたことを覚えている。そこから廃炉に向けた私の探究が始まった。

その後私は、福島第一原発(以下、1F)に視察に行き、「原子力安全部会第五回夏季セミナー」をはじめとしたフォーラムや学会に幾度も参加し廃炉の状況を理解したいと学んできたが、途中からあることが私の心にひっかかっていた。それは、私の身近な大人も意外と廃炉に関する問題について知らないということだ。確かに普通に生活していく上では知らなくても済むことだ。しかし本当にそれで良いのだろうか。今では考えられないことだが、震災当時はまさか原子力発電所で事故が起きているなどと、そこの住人でさえも考えてもみなかった。それだけでなく、多くの国民が安全神話を信じており、現在の常識からすれば盲目的であったと思えるほどである。もう二度と“想定外だった”という状況に陥らないため、私は「非専門家である一般市民が原発事故処理の技術的に難解な問題についてどう理解を深め、意思決定に参画すべきか」というテーマの社会的な探究を始めた。

“高校生と考える廃炉座談会”の開催

福島県の浜通りでは廃炉関係のフォーラムが盛んに行われている。だが私はそれらに参加し、“いつも同じような顔ぶれ”“結論ありきの進行”“一方的なコミュニケーション”

という課題を感じていた。それらを乗り越えるため、2018年7月28日、私はふたば未来学園高校の同級生2名と共に「高校生と考える廃炉座談会」を企画した。“廃炉座談会”と銘打ってはいるが、廃炉との“向き合い方”を考える座談会だ。廃炉の問題があまり知らうとされない理由の一つとして、私は「いわゆる廃炉実行側を含む専門家と住民の間のコミュニケーションに何かしらの問題があるのではないか」と考えた。よってこの会の主な課題設定を「専門家と住民のコミュニケーションはどうあるべきか」とし、学生、地域住民、専門家と様々な立場の、様々な価値観を持つ人が話し合う会とした。

誰もが安心して発言できる場づくりのためにいくつかルールを設定した。まず、“立場によってではなく個人として相手と接すること”だ。東京電力や国などの廃炉実行主体の人達には組織の一員として正確な情報を伝えるという責任があるのだが、一般市民が廃炉実行主体に本当に聞きたいのは会社の用意した決まり文句や当たり障りのない言葉ではなく、多少個人的な見解の含まれる本音なのではないだろうか。責任ある立場を背負って来る人が少しでもそのような発言がしやすいように、お互いに目の前にいる一個人として接するということを徹底してもらった。そして、“自分の思いを話す”ということ。この地域では廃炉について話すことが暗黙のうちにタブー視されているように感じる。そういった観念に囚われない存在という意味でも学生が担う役割は大きかった。

原発に関する議論は反対や賛成という二元論に陥ることが多い。その結果“意見の主張”と“説得”という形の議論が多くなるが、大事なことはそうではないと考える。主張を裏付ける考え、根底にある価値観、対話を通して「こういう考えもあるのか」という異なる考えを知り、「ここは共感できるな」という点を探すこと。相互理解の積み重ねこそが建設的な議論の第一歩だと考える。

当日は主に“住民と専門家の「双方向コミュニケーション」の問題点・解決策”について議論した。そこでは「なぜ一般市民が知らうとしない、興味を持ってないのか。



「高校生と考える廃炉座談会」(2018年7月28日)

それは結論ありきで自分達に選択肢があると感じられる議論の場が少ないからだ。答えありきだと勝手にやれぱと感じてしまう。その繰り返しが今につながっている。あくまでも専門家は選択肢を、可能性を提示し、住民が意思決定をすることを目指すべきではないだろうか。」という意見が出た。

この意見には私も賛成だ。また、「説明会やフォーラムでの住民とのセッションでよく行われる疑問と説明の繰り返し、それはコミュニケーションなのか」という意見も出た。コミュニケーションとは辞書では“互いに意志や感情、思考を伝達し合う事”とある。そう考えると確かに答えありきの疑問と説明はコミュニケーションと言えるのだろうか。

住民による意思決定というのは理想論なのかもしれない。しかし、汚染水の処分など、風評をはじめとした大きな社会的影響を生み、人によって価値観も多様で科学的な見解だけで判断できない問題がある以上、このような形を目指す必要があると思うのだ。トランスサイエンス問題としての廃炉には科学的合理性による絶対的解がないため、社会的合理性も含めて導き出される相対的解が大きな意味をもつのだ。

廃炉をめぐる対話の現状と課題

2018年8月5日、私はNDF主催の「第三回福島第一廃炉国際フォーラム」にパネリストとして参加し、壇上で原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF)、東京電力、経済産業省、OECD-NEA、IAEAの方々と、トランスサイエンス問題としての廃炉における意思決定のあり方について、議論を交わした。「合意形成のあり方」について、現在の方法に問題があるという点で山名元NDF理事長、ウィリアム・マグウッドOECD/NEA事務局長らと共鳴でき、ステークホルダーミーティングなど多様な方法を検討することができた。

その一方で、2018年8月30日、31日に、東京・郡山・富岡の三か所で行われた「多核種除去設備等処理水の取扱いに係る説明・公聴会」を通し、これまで私が問題視してきた「科学と社会の距離」「トランスサイエンス問題でありながら社会知が尊重されていないこと」という問題

の深刻さを感じ、正直動揺した。議論の前提すら成り立っていないように感じた。それは「専門家サイドが住民の意見を本当に取り入れようと考えているのか」ということだ。場所や回数が限定的であり、質疑応答の時間の専門家の態度を見てもそういった熱意が私には見受けられなかった。そして「一般市民が専門家の発言を信頼していない」ことにも問題があると考え。開催の直前にALPS処理水にはトリチウム以外の放射性物質も含まれていることが発覚したことにより、「そのことを言わなかったのだから他に何か隠しているのではないか」という疑念があらゆる質問の根底にあったように感じた。この議論においてはある程度科学的知識が前提とされるため、何でも疑ってしまっただけでは議論が成り立たない。その意味では発言者にも科学的素養が必要だ。だが、科学的素養を持った人のみで構成される議論の場というのは閉鎖的である。あらゆる人に発言の機会があるべきだ。私は今回の公聴会は課題がたくさんあったと思っただけで、初めて公的な場でALPS処理水の議論を行ったという意味では意義のあるものだったと思う。議論の場はどうあるべきかという悩みはより深まったが、私は「高校生と考える廃炉座談会」の経験から、目先の成果に囚われず、結論を急がず、なし崩し的に判断が下されることのないよう、建設的に議論を重ねていってほしいと考える。

私達は廃炉にどう向き合っていくべきか

廃炉に関するコミュニケーションにおいては「知ることを相手に任せっきりにしないこと」が大切だと考える。確かに、廃炉実行側は廃炉に関するフォーラムや説明会をたくさん行っている。しかし、そうやって情報を発信したからすなわち伝わったというわけではない。一般市民が知りたいと思っているニーズに発信している内容が合致しているのか、そしてそれをどう届けるのか、そこまで考えることが大事ではないだろうか。それが“知ることを相手に任せっきりにしないこと”だ。また、私達一般市民は、「専門家は何も分かってない」「知りたいことを教えてくれない」と言いがちだ。しかし私達一般市民が何を知らなくて何を知っているのか、何が知りたいのか、これらは自分達から話さないと専門家に伝わらないではないか。一般市民のニーズを“知ることを相手(専門家)に任せっきりにしてはいけない”。両者の違いを挙げればきりが無い。目線の違いを前提として、お互いのことを知るためにお互いのことを伝えあい、その差を埋めていくコミュニケーションが大事だと私は考える。

廃炉について、私が目指す理想の意思決定の形は“住民が主体的に判断を下すこと”だ。廃炉実行主体は東電だが、影響を受けるのは“住民”。大事な問題の意思決定の判断主体は“住民”ではないのだろうか。

(2018年10月30日記)



復興庁が年次報告

復興庁は2018年11月30日、「東日本大震災からの復興の状況に関する報告」を公表した。復興に関するこの1年間の動きをまとめたもので、原子力災害については帰還困難区域を除いたほとんどの地域で避難指示が解除され、復興と再生に向けた動きが本格的に始まったと述べている。

報告では廃炉対策について、格納容器底部に燃料デブリと思われる堆積物があることを確認し、汚染水対策では凍土壁が深部の一部を除いて完成したとして、「中長期ロードマップ」にもとづき、取り組みは着実に進展していると記述した。また、中間貯蔵施設については用地取得、施設整備、除去土壌等の輸送を進めており、除去

土壌の最終処分については国の責務規定である「中間貯蔵後30年以内に、福島県外で最終処分を完了する」ために、除去土壌の再生利用を促進するなどとしている。

除染については2018年3月までに、帰還困難区域を除く8県100市町村のすべてで面的除染が完了。避難住民や事業者に対しては総額約8兆3,529億円の賠償が支払われ、ADRセンターでは18,382件の和解が成立したと報告した。

なお大震災による避難者数は約5万6千人(2018年10月時点)で、原子力災害による避難指示区域からの避難対象者は2万4千人(同4月時点)となっている。

(原子力学会誌編集委員会)

エネ研、2050年までの世界のエネルギー需給を予測

日本エネルギー経済研究所はこのほど、2050年までの世界エネルギー需給や気候変動対応を展望する「IEEJ アウトルック2019」をまとめた。

それによると世界のエネルギー需給は、今後も趨勢的な推移を想定する「レファレンスシナリオ」の場合で、1次エネルギー消費が2016年の138億トン(石油換算)から2050年には193億トン(同)まで増大し、増分の55億トン(同)は中国、米国、日本の現消費量に匹敵するものと分析している。

OECD加盟国全体では横ばいもしくは減少傾向で推移し、増分のほとんどは非OECD加盟国が独占。特に世界最大の消費国である中国は、2040年代半ばにエネルギー消費量が40億トン(同)弱でピークに達するとしている。一方、インドやASEAN諸国、MENA諸国(中東・北アフリカ)は急速な経済成長と人口増加に伴い、エネルギー消費量は堅調に増加し続け、なかでもインドは2040年代半ばに米国と入れ替わり世界第2の消費国となる見通しだ。

化石燃料では石油が2050年においても世界のエネルギー需要の3分の1を支える最大のエネルギー源であり続け、天然ガスは消費量を大きく伸ばし2030年代半ばに石炭を抜いて第2のエネルギー源になると予測している。石炭の消費量は緩やかに増加し2040年代半ばには減少傾向となるが、大気汚染対策などから減少に転ずる中国とは逆に、インドとASEANでは2050年の石炭依

存度が現在より高まり、世界の石炭消費の実に82%がアジアに集中する見通し。

世界全体の発電電力量は2050年に、2016年のほぼ2倍にまで増加。再生可能エネルギーのシェアが伸びるものの、火力発電が中心となる大枠に変化はないとしている。原子力の設備容量は世界全体で、2016年の406GWが2050年には518GWに、発電量も1.3倍に拡大する。しかし、総発電量の急激な伸びには追いつかず、発電量全体の構成比では3ポイント低下するなど分析した。

エネルギー起源のCO₂排出量は、2050年に419億トンまで増加する見通し。ただし、省エネ・低炭素技術が最大限展開されることを想定した「技術進展シナリオ」の場合だと、2020年台半ばをピークに緩やかな減少に転じ、2050年には2016年比約11%減の287億トンになっている。「技術進展シナリオ」では2050年の原子力発電の設備容量を、中国、インド、東南アジア諸国の躍進や、新興国での運転開始を見込み848GWと想定した。

今回のアウトルックには、「石炭火力の新設を2020年以降全面的に禁止し、天然ガスまたは再生可能エネルギーで代替」とのシミュレーションも盛り込まれたが、CO₂排出量の減少につながらず、同研究所計量分析ユニットの榊澤明氏は「これだけで気候変動問題は解決できない」などと述べている。

(資料提供：日本原子力産業協会)

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

WANO と WNA, 世界中の原子力産業界の能力向上へ覚書

世界原子力発電事業者協会(WANO)と世界原子力協会(WNA)は2018年10月17日、世界中の原子力発電所や産業界が能力の向上を目指すための協力基盤として、新たな了解覚書に調印したと発表した。

具体的な協力分野として挙げられたのは、「緊急時対応支援」、「輸出規制」、「原子力供給チェーン」、および「能力強化」。原子力産業界が直面しているこれら4分野の課題について議論を行い、解決策を割り出すことにより、産業界にとってより良い結果を導き出していきたいとしている。

WANOはチェルノブイリ事故後の1989年、世界30か国以上の国と地域で約460基の商業炉を運転する事業者が、安全性と信頼性の改善支援を行うために設立された非営利の国際組織。WANOのP. プロゼスキー CEOは、この合意を通じて両者の関係はこれまで以上に緊密かつ正式なものになると指摘。WNAと一層連携することによって、WANOはその会員のみならず世界中の原子力産業界も含めて、双方が関心を持つ主要4分野で改善と利益が図られるよう、双方の専門的知見や実績、資源力と影響力を活かすことになると述べた。

協力分野の1つである「緊急時対応支援」については、両者は機密の保持を常に尊重しつつも、情報交換を通じてともに協力していくことで合意。世界の原子力産業界を代表するWNAのA. リーシング事務局長は、WNAの使命について「国際的な影響力を持つ人々に信頼できる情報を提供したり、エネルギー問題に関する議論に貢献して、原子力への理解を幅広く深めていくことだ」と指摘。その上で、「WNAは緊急時も含めて産業界や一般市民、メディアに対してもコミュニケーション支援を任されている」と明言した。WNAのそうした役割は、WANOとの協働により、さらに強化されていくとの認識を示している。

また、「輸出規制」に関しては、両者が協力して原子力供給国グループ(NSG)との関係を一層強化していくとした。NSGは1974年のインド核実験を機に1978年に設立された組織で、原子力関連資機材や技術の輸出国が守るべき指針「NSGガイドライン」に基づいた輸出管理を行っている。プロゼスキー CEOは、「核不拡散に関する国毎の規制と、過度に煩雑な手続きがリスクと相応に釣り合うよう、我々としての提案を引き続き行っていく」

と説明。原子力輸出で不必要な官僚主義が横行すれば、世界中の原子力発電所で安全関係の重要な仕事を行う際に、両者の能力が妨げられることになるとした。

リーシング事務局長も、WNAがNSGと協議する機会が得られるとして歓迎。原子力機器や燃料、技術など、原子力関係の合法的な国際貿易に対する不必要な影響を、輸出規制はどのようにして回避可能にするのかという議論に参加したいと述べた。

さらに、「原子力供給チェーン」関連では、WANOは影響力のあるWNA供給チェーンの作業部会合に参加する意向を表明。これにより世界的な供給チェーン問題、すなわち産業界への影響を強めつつある合理化や近代化、能力強化などの問題について、連携を強めていく考えを明らかにしている。

IAEA, サイバー攻撃への原子力施設防護で訓練コース

国際原子力機関(IAEA)は2018年10月24日、サイバー攻撃に対する原子力施設の防護など、加盟国における原子力セキュリティの強化支援を目的とした新しい国際訓練コース(ITC)を開始したと発表した。

このITCは、IAEAが米エネルギー省(DOE)の国家核安全局(NNSA)と協力して開発。DOE傘下のアイダホ国立研究所(INL)がホストを務めており、情報・コンピューター・セキュリティ関係でIAEAが実施するITCシリーズとしては最初のものになる。同ITCでIAEAは、サイバー攻撃が原子力施設に及ぼす脅威やその潜在的な影響について、関係者の認識を高めることに重点を置いたとしている。

2018年10月初頭に開催された2週間のITC「原子力セキュリティ体制におけるコンピューター制御システムの防護」には、13か国から合計37名が参加。コンピューターの防護上、最良の慣行を学ぶ訓練が実体験ながらの方式で提供された。具体的には、原子力施設に共通する最新鋭デジタル・システムの実物大模型を使い、参加者の技能をテスト。これらのシステムにはデジタル技術により、施設の安全な運転やセキュリティ、核物質の計量管理、機微な情報の防護等を支援するための機能が備わっていたという。

同ITCを開発するにあたっては、IAEAのほかにDOEのINL、パシフィック・ノースウェスト国立研究所、ロス・アラモス国立研究所から、サイバー・セキュリティの専門家が協力。原子力施設で一般的に見かける機器などを複製した学習環境が整備された。

IAEA 核セキュリティ部の R. アドナン部長は、「原子力セキュリティの責任者なら誰でも、施設内のシステムの脆弱性を完璧に理解していなければならない」と強調。その上で、システムをサイバー攻撃から防護するとともに、その影響を緩和する方法を知っておく必要があると述べた。同部長によると、IAEA ではコンピューター・セキュリティの様々な訓練コースを提供することが可能。これにより加盟国の政府や関係機関は、高度に熟練した攻撃者と遭遇した後も、技術面と規制面で必要なツールを確保できると指摘している。

IAEA, HLW の処分で国際的な実施主体団体と協力

国際原子力機関(IAEA)は 2018 年 10 月 30 日、高レベル放射性廃棄物(HLW)や使用済燃料を安全で効果的かつ確実に処分する解決策を開発するため、世界各国の HLW 処分実施主体の集まりである「放射性物質環境安全処分国際協会(EDRAM)」との協力・調整を強化すると発表した。

廃棄物の処分方法の中でも特に、深地層処分(DGD)の開発は数十年の時間が必要になることから、IAEA は現在、この関連で得られた知見を維持・継承するための経験やアプローチについて、加盟各国から情報を収集中。EDRAM は IAEA が進めるこのプロジェクトに対し、戦略的評価の共同実施などを提案している。

IAEA がウィーン本部で開催した両者の会合には、日本の原子力発電環境整備機構(NUMO)を含め、カナダやフィンランド、フランス、ドイツから EDRAM に所属する国家的組織のトップが出席。EDRAM には現在、11 か国の処分実施主体が加盟しており、NUMO の近藤駿介理事長は EDRAM の会長職を務めている。IAEA 側からは、J. C. レンティッホ原子力安全・セキュリティ担当次長や M. チュダコフ原子力エネルギー担当次長らが会合に参加。HLW と使用済燃料の DGD も含め、包括的な国家放射性廃棄物管理戦略を実施する際の重要課題について議論した。

また、操業中と封印後の両段階の深地層処分場について、セーフティ・ケースの開発・審査を行うプロジェクトなど、IAEA におけるその他の活動に関しても協議が行われた。

同会合では、世界中で数十年間にわたり放射性廃棄物が安全・確実に管理されているものの、再処理するかなど用途が定まらない使用済燃料や HLW を処分する施設が未だに一つも稼働していない点が指摘された。しかし出席者らは、フィンランドとスウェーデンおよびフランスでは、処分場開発が着実に進んでいる点に注目。

レンティッホ次長は IAEA として改めて、「放射性廃棄物を安全に管理する唯一の解決策は、IAEA の安全基準でも説明されているように、処分することだ」と述べ、これには HLW と使用済燃料の地層処分が含まれるとした。IAEA はこのような原則に従って、加盟国の廃棄物管理を支援していくとしている。

EDRAM の近藤会長は、「EDRAM 内においても国際機関との間でも、我々はみな、関係する諸問題について継続的に情報交換していく必要がある」と指摘。その上で、そうした情報を技術面や産業面の観点からステークホルダーに説明できるよう、互いに異なる点や共通する事項について、非常に深く理解することが必要との認識を表明した。

ロシア、中国の田湾発電所増設と高速炉建設支援で実施契約

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は 2018 年 11 月 7 日、中国における田湾原子力発電所増設計画の実施と高速実証炉建設計画の支援で、同社のエンジニアリング部門が 6 日に中国核工業集团公司(CNNC)と複数の契約を締結したと発表した。

両者は 2018 年 6 月、両国首脳立ち会いの下でこの件に関する協力の枠組契約を北京で締結しており、今回の契約はこれを実行段階に移すことを目的としたもの。ロスアトム社は田湾発電所で、第 3 世代+(プラス)の 120 万 kW 級ロシア型 PWR(VVER)設計を採用した 7, 8 号機を増設するとともに、中国福建省の霞浦で 2017 年末に本格着工した出力 60 万 kW の高速実証炉「CFR600」に対し、機器・サービスなどを提供することになる。

2018 年 6 月の枠組契約で、ロスアトム社は高速炉建設計画の支援に加えて、江蘇省の田湾発電所で 2 基、遼寧省沿岸部に位置する新規サイトの徐大堡でも同型の VVER を 2 基建設するとしていた。CNNC の発表によると、今回結ばれた実施契約は 4 件で、田湾関係は「7, 8 号機の技術設計契約」。残り 3 件は CFR600 関係で、ロスアトム・グループに所属する OKBM アフリカントフ社と CNNC 直属の国際貿易企業の間で締結された。具体的には、ロシア側が「機器・サービスを供給する実施契約」と「設計文書を審査する実施契約」および「(関係する)ソフトウェア・ライセンスの使用権に関する実施契約」となっている。

田湾発電所では現在、100 万 kW 級の VVER 設計(AES-91 シリーズ)を採用した 1, 2 号機が稼働中。これに加えて、同型の 3 号機が 2018 年 2 月に営業運転を開始したほか、4 号機も 10 月から送電を開始している。5, 6 号機については、CNNC がフランスの技術を

国産化して開発した第3世代のPWR設計「ACP1000」が採用されており、2015年と2016年からそれぞれ建設中である。

中国では核燃料サイクルを確立することで、持続可能な原子力発電の開発利用を目指しており、2011年7月に電気出力2.5万kW(グロス)の高速実験炉「CEFR」が北京南部で送電を開始。その後は実証炉として、ロシアから出力80万kWの高速炉「BN-800」を2基導入する計画と、自主開発技術による建設計画を並行して進めていたが、現在では自主技術の「CFR600」開発に重点が置かれている。CNNCでは同炉の完成を2023年に予定している。

【中国】

世界第2, 3基目のAP1000が営業運転入り

中国の国家電力投資集团公司(SPIC)は2018年10月23日、山東省で8月から試運転中だった海陽原子力発電所1号機(PWR, 125万kW)が、10月22日付けで営業運転の開始条件をクリアしたと発表した。

フル出力による168時間の連続運転試験を完了したもので、ウェスチングハウス社製AP1000としては、9月に世界で初めて営業運転入りした三門原子力発電所1号機に次いで2基目。中国の運転中商業炉としては41基目であり、国内の原子力発電総設備容量は、米国、フランスに次ぐ世界第3位のレベルを維持したまま4,000万kW台に突入している。

最新の受動的安全系を装備する同炉はまた、山東省で運転を開始した最初の商業炉となった。海陽発電所に65%出資するSPICは、同省のエネルギー構造や生態学的環境を最適化していく上で、海陽1号機は重要な役割を担うとの認識を提示。同炉はまた、SPICが世界的レベルのクリーン・エネルギー企業となることを後押しするとした。さらに近い将来、AP1000の出力拡大版として中国が知的財産権を保有する「CAP1400」を建設する際にも、同炉の建設は盤石な基盤を築くとしている。

出力140万kWの第3世代設計である「CAP1400」は現在、同じ山東省内の栄成石島湾で、SPIC傘下の国家核電技術公司(SNPTC)が実証炉建設プロジェクトを準備中。同設計は2016年5月に、国際原子力機関(IAEA)の一般原子炉安全レビュー(GRSR)を終えており、原子炉建屋部分のコンクリート打設について最終承認待ちとなっている。

SPICはまた、2017年10月にブラジルで開催された「大西洋国際原子力会議」においても、CAP1400設計を大きく紹介。栄成石島湾の実証炉プロジェクトの進展状

況について説明したほか、2018年5月には、南アフリカやトルコなどの市場開拓で重要な進展があったことを明らかにしている。

さらに、中国核工業集团公司(CNNC)は2018年11月6日、浙江省の三門原子力発電所で試運転中だった2号機(PWR, 125万kW)が、11月5日の夜10時頃に営業運転の開始条件を達成したと発表した。

フル出力による168時間の連続運転に成功したもので、ウェスチングハウス(WH)社製AP1000として営業運転入りしたのは三門1号機、海陽1号機に次いで世界で3基目。これにより、中国における商業炉は42基、4,155万kWとなった。

これは米国、フランスに次ぐ原子力設備容量だが、中国ではさらにAP1000を採用した海陽2号機や、フラマトム社製・欧州加圧水型炉(EPR)となる台山1号機などが試運転を実施中。2020年までに運転中の原子力設備を5,800万kWとすることを定めた同国の開発目標は、達成に向けて大きく進展している。

同炉の建設工事は、1号機が着工した8か月後の2009年12月に始まった。建設工事を担当する三門核電有限公司には、CNNC傘下の中国核能電力股份有限公司が51%を出資している。同炉は2018年8月17日に初めて臨界条件を達成した後、同月24日から国内送電網に接続され、試運転を続けていた。

後続のAP1000建設計画としては、三門と海陽の両サイトでⅡ期工事(各2基ずつ)の建設が計画されているほか、中国核能行业协会(CNEA)の趙成昆・専門委員会常務副主任は2018年6月、遼寧省の新規サイトである徐大堡においても、これまでの計画どおりAP1000が建設される可能性が高いと述べた。しかし、この数日後にCNNCとロシア国営原子力総合企業のロスアトム社は、徐大堡で計画されている6基のPWRのうち、2基は120万kWのロシア型PWR(VVER)になると発表しており、同サイトでは2つの設計が混在する可能性が生まれている。

また、中国が知的財産権を保有するAP1000の拡大版「CAP1400」についても、国家核電技術公司(SNPTC)が山東省の栄成石島湾で初号機となる実証炉を建設する計画。現在、原子炉建屋部分でコンクリート打設を行うための、最終承認待ちとなっている。

【ロシア】

ロスアトム社、鉛冷却高速炉実証炉の建設で2千億ルーブル申請

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は2018年10月30日、鉛冷却高速炉のパイロット実証炉「BREST-300」建設計画を含めた国家プログラム案「原子力科学

とエンジニアリング、および技術の開発」について、2024年までの予算 2,000 億ルーブル(約 3,446 億円)を連邦政府に申請中であることを明らかにした。

出力 30 万 kW の「BREST - 300」や専用の燃料製造プラントなどを建設することは、鉛冷却高速炉をナトリウム冷却高速炉と並行して研究開発するという「ブレークスルー・プロジェクト」の一部。建設ロードマップは 2017 年、調整を加える方向で決定しており、燃料プラントの着工を 2021 年とした上で、2023 年から「BREST - 300」のために窒化物燃料の製造を開始するとした。「BREST - 300」自体の運転は 2026 年に始める計画で、専用の使用済燃料再処理プラントは 2028 年までに必要になるとしている。

ロシアでは国内のエネルギー需要を満たすとともに、天然ウランと使用済燃料を有効活用できるような核燃料サイクルを確立するため、高速中性子炉の実用化を進めている。すでに、電気出力 1.2 万 kW の高速実験炉がディミトロフグラードで稼働中のほか、ナトリウム冷却方式の 60 万 kW の原型炉(BN - 600)と 80 万 kW の実証炉(BN - 800)がベロヤルスク原子力発電所で稼働中である。

2011 年に始まった「ブレークスルー・プロジェクト」でロスアトム社は、「BREST - 300」に続いて、120 万 kW の商業用・鉛冷却高速炉を建設することも検討中。この計画については、トムスク州の知事が近年、プロジェクトを州内のセベルスクに誘致するため、提案書をロスアトム社傘下の燃料製造企業 TVEL 社に送付したとしている。

ロスアトム社が着手した国家プログラムでは、原子力発電を最終的に、熱中性子炉と高速炉がセットで稼働するという「2 つの要素で構成されるシステム」に移行させる方針。高速炉で生み出された余剰プルトニウムを熱中性子炉用の燃料として再利用するなど、濃縮ウランの有効活用と核拡散リスクの軽減を狙っている。

同プログラムは現在、連邦政府の複数の執行機関が調整しているが、ロスアトム社は「2 つの要素で構成されるシステム」への移行を、「ブレークスルー・プロジェクト」枠内の国際協力で進めることを計画中。また、出力 120 万 kW の商業用・ナトリウム冷却高速炉(BN - 1200)の建設計画についても、同プロジェクトの枠内で经营主体の決定イニシアチブを開始したことを明らかにした。

【ウズベキスタン】

ロシア製 PWR で新規原子力導入国へ

ロシア大統領府は 2018 年 10 月 19 日、ウズベキスタン初の原子力発電所建設プロジェクトを請け負ったロシ

ア企業が、サイト選定のための地質調査を同国北西部のナボイ州で開始したと発表した。

2018 年 9 月にモスクワで調印された原子力発電所建設のための二国間協定に基づくもので、国際原子力機関(IAEA)の最新の安全要件を満たした 120 万 kW 級のロシア型 PWR(VVER)を 2 基、建設する計画。最初の 1 基は 2028 年末よりも前の運転開始を予定しており、順調に進めば、現在 31 か国・地域を数える原子力発電開発利用国の 1 つとして、新たに仲間入りすることになる。

今回の発表は、ロシアの V. プーチン大統領が両国間の第 1 回地域協力フォーラムに出席するため、ウズベキスタンの首都タシケントを訪問した際、プロジェクトの準備作業開始を祝う記念式典で明らかにされた。これに先立ち、ウズベキスタン政府は 2018 年 7 月、同国初の原子力発電所建設についてロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社と合意。天然ガス資源が存在するウズベキスタンでは、年間 690 億 kWh という国内電力需要の約 85%を天然ガスと石炭火力で賄っているが、原子力発電所を導入することにより、天然ガスを輸出用や高付加価値化学製品の原料として、一層有効に活用したい考えた。

地域協力フォーラムの閉会式で、プーチン大統領はウズベキスタンの S. ミルジヨエフ大統領とともに声明文を発表。両国が明るい見通しを持っているエネルギー部門の協力には特別な注意が払われるべきだとした上で、ロスアトム社が実施する原子力発電所建設は単なる大規模産業施設の建設に留まらず、ウズベキスタンに新しい産業と経済部門を生み出すことになると述べた。

同大統領は合計出力 240 万 kW の原子炉 2 基により、ウズベキスタンの顧客とその他の中央アジア諸国に安価でクリーンな電力を供給する予定。これにより、ウズベキスタンのみならず、中央アジア地域全体にエネルギーの安定供給がもたらされるとした。ロシアとしては、最も先進的な技術と効率的かつ信頼性の高いエンジニアリング・ソリューションを原子力発電所建設に適用する方針で、最も高い安全性や環境面の要件についても遵守されると強調している。

現地の報道によると同プロジェクトの総工費は約 110 億ドルで、その大半はロシアが提供する貸付条件の緩やかなローンで賄われる模様。また、複雑なプロジェクトであるため、初号機の最初のコンクリート打設が 2020 年より前に行われることはないとの見通しを伝えている。

【フランス】

国務院、フェッセンハイム発電所を早期閉鎖する省令を破棄

フランス政府の諮問機関であるとともに行政訴訟に関

して最高裁判所の役割を担う国務院は 2018 年 10 月 25 日、フェッセンハイム原子力発電所(90 万 kW の PWR × 2 基)を早期閉鎖するために、2017 年に当時の環境相が公布した運転認可の無効化省令を破棄するとの判断を下した。

この省令は、F. オランド前大統領が制定した政策「原子力発電の設備容量を現状レベルの 6,320 万 kW に制限する」を、同政権の統治期間が満了する前に実行するための措置だった。しかし国務院は、省令を官報で公表してしまう前に、事業者であるフランス電力(EDF)が運転認可の無効化を政府に要請すべきだったと裁定。EDF の要請に基づかずに公布された省令は、フランスの法制度に反していると結論づけた。

一方、仏原子力安全規制当局(ASN)は 2018 年 10 月 22 日付けの情報メモで、EDF が同発電所の運転認可を更新する意思のないことを確認。今回の裁定で、EDF の閉鎖計画に大きな影響が及ぶことはないとの見方が有力である。

フランスでは 8 か月にわたった全国的な討論の結果、「緑の成長に向けたエネルギー移行法」が 2015 年 8 月に成立した。これにより、オランド前大統領の政策が正式に決定し、EDF は建設中のフラマンビル 3 号機(163 万 kW の PWR)(FL3)の完成に合わせて、既存の発電所の中から同程度の容量のものを閉鎖することになった。

EDF は 2017 年 1 月 24 日と 4 月 6 日の理事会で、国内最古のフェッセンハイム発電所を閉鎖する際の条件を承認。この中で、(1)運転認可の無効化承認は、FL3 が起動した日によりのみ効力を発揮すること、(2)発電所の閉鎖は、原子力設備を現状レベルに制限したエネルギー移行法を遵守する上での必要事項であること、などとした。また、これらの条件に基づき、FL3 の起動に先立つ 6 か月以内に、フェッセンハイム発電所の運転認可の無効化省令を政府に要請するよう、EDF の J. B. レビイ会長兼 CEO に指示していた。

しかし、当時の S. ロワイヤル環境・エネルギー・海洋大臣はこの 2 日後の 4 月 8 日、EDF からの正式要請を待たずにフェッセンハイム発電所の運転認可無効化に関する省令を公布。その合法性については、地元のフェッセンハイムを含む複数の地方自治体、およびエネルギー関係の 2 つの労組連合が異議を申し立てていた。

現時点で FL3 は 2018 年末までに起動することになっているが、国務院は「EDF の会長が未だに運転認可の無効化要請をしていないことは明らかだ」と指摘。今後は、EDF の要請に基づく新たな省令が必要になると見られている。

【米国】

ドミニオン社、サリー 1, 2 号機で 80 年の運転期間延長を申請

米バージニア州でサリー原子力発電所(87.5 万 kW の PWR × 2 基)を運転するドミニオン・エナジー社は 2018 年 10 月 16 日、1, 2 号機の運転期間をさらに 20 年延長し、合計 80 年とするための申請書を米原子力規制委員会(NRC)に提出したと発表した。

同発電所では 2003 年 3 月に最初の運転期間延長申請が承認されており、現在の 1, 2 号機の運転期間は当初の 40 年に 20 年をプラスした 2032 年と 2033 年まで。2 回目の運転期間延長申請が NRC の審査をクリアした場合、両炉はそれぞれ 2052 年と 2053 年まで稼働し続け、安全かつ信頼性の高い廉価なクリーン電力の供給を 24 時間年中無休で行うことが可能になる。

NRC はすでに 2018 年 5 月、フロリダ・パワー＆ライト社のターキーポイント 3, 4 号機について、2 回目の運転期間延長申請書を受理したほか、8 月にはエクセロン社のピーチボトム 2, 3 号機についても、合計 80 年間の運転に向けた申請書の審査を開始すると発表。今回のドミニオン社による申請書提出は、米国内で 3 例目となる。

米国では近年、巨額の初期投資を必要とする大型原子炉新設の動きが一段落。一方、既存の商業炉 99 基のうち、89 基までが 1 回目の運転期間延長手続を終えて、合計 60 年の稼働を許されている。

全米 19 州で 600 万もの顧客を擁するドミニオン社は、発・配電や天然ガスの貯蔵・輸送等で 780 億ドルの資産を有する巨大エネルギー企業で、太陽光発電についても国内有数の事業者。2030 年までに同社の炭素強度を 50% まで削減することを計画しており、2015 年 11 月に「サリー 1, 2 号機で 2 回目の運転期間延長申請を 2019 年春に行う」と NRC に通知していた。2018 年になると、同じバージニア州内にあるノースアナ原子力発電所 1, 2 号機(各 PWR、約 99 万 kW)についても、「2020 年に 2 回目の運転期間延長を申請する」考えを表明している。

ドミニオン社の発表によると、同社は今後 10 年にわたりサリーとノースアナの両発電所で、40 億ドルをかけた運転期間の延長プログラムを推進する。その中で、バージニア州議会からも超党派で支援が得られており、発電所の運転期間延長は税收や雇用などの点で州経済の成長に寄与するとともに、同州が中部大西洋地域や南部地域でクリーン・エネルギー生産のリーダー的立場を維持する一助になると強調している。

日本・ベラルーシ友好訪問団

フリージャーナリスト 井内 千穂

10月8日体育の日。福島県内のJヴィレッジを訪ねると、ベラルーシの学生たちがいた。チェルノブイリ原発のある現在のウクライナよりも放射性物質による被害が大きかったという北隣のベラルーシからやってきた6人の女子学生だ。日本語学科で学ぶ彼女たちは、少し緊張しながらも見事な日本語で、原発事故から30年以上経ったベラルーシについて語った。

彼女たちは、昨夏10日間にわたりベラルーシを訪問した福島県浜通りの高校生24人と共にベラルーシ各地を回り、放射線教育の現場や汚染地域の廃村などを見学した。10月には日本を訪ねて高校生たちと再会。福島県内の中間貯蔵施設や福島第二原発などを一緒に見学し、震災後7年の福島の現状を体感したところだった。

再開したばかりのJヴィレッジで開催された報告会では、福島の高中生たちとベラルーシの学生たちが次々に登壇。実際に行き、見て、感じたこと、学んだことを語る若者たちの真摯な言葉が心に響く。チェルノブイリの原発事故は、ベラルーシの学生たちにとっても生まれる前の出来事で、今回初めて知ったことも多いようだ。両国の若者たちが共有していたのは、まず歴史と現在を知り、原発や放射性物質と向き合おうとする姿勢、そして、次代を担う意志である。その場の大人たちも大いに感銘を受けた。

地元の企業や諸団体をも巻き込んで3年前からこの国際交流プロジェクトを実行し、さらに継続の意欲を示す広野町のNPO法人ハッピーロードネットの西本由美子理事長のリーダーシップにつくづく感服する。と同時に、このような若い世代の貴重な声がなかなか県外まで聞こえてこないことをもどかしく思う。その場で「東京から来た人間」である肩身の狭さに耐えつつ、改めて国内交流の欠如を痛感した。

Column

感謝をこめて・・・

日本文理大学 工学部 北岡 哲子
特任教授

「3哲会」なるものをご存知だろうか。

東京工業大学教員時代の同僚であり、原子力推進派の澤田「哲」生氏と自然再生エネルギー派の飯田「哲」也氏に、北岡「哲」子が加わり「3哲会」と称し、数年前からゲストを招き、哲人対話というネット番組を配信してきた。本コラムも3哲がきっかけで依頼された。

毎回収束することのないバトルを繰り広げる澤田氏と飯田氏の真ん中で、専門分野が異なる筆者は中庸な立場から論争の矛先を転じたり和らげたり、さしずめ緩衝材の役割か。

そんなある日のゲストに、原発差し止め裁判で有名な河合弘之弁護士が登場した。個性的ないでたちと絶妙なトークは、出会った人の記憶に深く入り込むためのツールに違いない。

エネルギー問題に対する意見を問われ、論を張れる考えもなく回答に窮した筆者を、福島のような惨事が一たび起これば大学で勉強など一切できなくなるわけで、数多ある社会的な問題の最優先重要事項でしょ、と河合氏はあきれ顔で論じた。

主張が異なれどこの対談の出演者は身を粉にし精力的に活動なさっている方ばかりで、そのパワーに圧倒されモチベーションの高さに敬服してしまう。バーナードショー曰く「人を賢くするのは、過去の思い出ではなく、未来への責任感だ」の言葉通り、自分も責任ある大人の一員として、改めて日々の精進を誓う心境になる。

5月号から8回、3哲会と同様のスタンスで綴ってきた本コラムも今日が最終回となる。読者の皆様とはいつか3哲会ででもお目もじできる機会を願い、締め言葉に代えさせていただきたい。

スロバキアの原発の歴史

コメニウス大学 妹尾 優希
医学部英語コース

スロバキアよりこんにちは。夏休みも終わり、医学部4年生として、スロバキアに戻って参りました。さて、これまでのコラムの連載では、スロバキアを始めとする欧州の原発やエネルギー事情について、紹介しました。そこで、今回は一度改めてスロバキアの原発の歴史についてお話します。スロバキアに初めて原子力発電が導入されたのは、1972年12月25日、まだスロバキアがチェコスロバキア社会主義共和国であった時代です。当時の首都であったプラハから東南に約440km、スロバキアの現在の首都ブラチスラバより東北150kmほどに位置するボフニチェで、チェコスロバキア政府が1958年に建設を開始していました。このスロバキア初の原子炉A-1号基は、ロシア製の重水減速ガス冷却炉(HWGCR)というもので、日本で主流の沸騰水型(BWR)や加圧水型(PWR)とは異なり、減速材に重水を使用し、冷却材として炭酸ガスを用います。一方この頃日本では、1952年に発効されたサンフランシスコ条約により原子力の研究が解禁され、1966年に日本で初めてにして唯一のガス冷却型原子炉である英国製の黒鉛減速炭酸ガス冷却型原子炉(GCR)が東海村で運転を開始しました。

その後、スロバキアでは旧ソ連で開発された加圧水型原子炉(VVER440/V-213)が、ボフニチェにV2-1・V2-2号機として1979年と1980年に、モホフツェの1・2号機として1998年と2000年に営業運転が開始されました。日本の加圧水型原子炉はアメリカ型(PWR)ですが、基本的な原理はロシア型と変わらないかと思います。次の投稿では、原発が導入される前の、スロバキアや東欧の国々のエネルギー資源について紹介したいと思います。

Column

立地地域の方たちへの感謝を込めて

国際環境経済研究所 竹内 純子
理事・主席研究員

10月24日に、全国原子力立地自治体協議会の設立50周年の記念講演会にお招きいただいた。原子力事業は地域の理解と協力なしに進めることはできないものだが、多くの立地地域の方たちとお話して感じたのは、彼らは徒労感に押しつぶされそうになっているということだ。

そもそも立地地域の方たちが原子力発電所との共存を決断するに至った理由は何か。絶対安全という神話や、地域に対する経済的メリットが影響したことは確かであろうが、共通して感じるのは、国のエネルギーを支えることへの矜持だ。

しかし福島原子力発電所事故以降、その矜持を踏みにじるような状況が続いている。遠くの発電所から送られる電気によって快適な生活を営む消費地の人たちは、「原発ゼロ」を簡単に口にする。福島の事故に心痛めぬ人間などいるわけがないし、放射性廃棄物の処分場所が決まっていなくてその量を増やすことの是非が問われるのも理解できる。しかし、エネルギー供給が化石燃料依存になることも、温暖化という別のリスクを増加させるし、コストが上昇したり供給が不安定になれば国民の生活そのものが脅かされる。代替手段として期待される再生可能エネルギーは、まだ電力需要の8%程度を賄うに過ぎないし、蓄電技術と合わせて導入しなければネットワークの安定性が保てないという未熟な技術だ。許容できるリスクと、エネルギーインフラの転換に必要な時間軸を国民全体で共有する必要がある。

立地地域にはエネルギー・環境政策のトレードオフの難しさを学び、悩み、葛藤した上で原子力設備との共存を決めたという方も多い。その電気を使う我々消費者は、どれだけの努力をしたらどうか。1年間続けてきたコラムの締めくくりとして、この問いを投げかけたいと思う。

六回目を迎えて

東洋大学社会学部 渡辺 真由

毎回手探りで書いてきたこの連載も、ついに一つの節目である六回目を迎えた。連載の話がなければ、毎月地元について考える事も、今までのこと・これからのことについて友達と話し合うこともなかっただろう。震災や事故がなければ、こうして様々な方々に向けて自分を発信することもなかった。拙い文章ではあるが、このコラムを通して何かが伝わり、何かを感じ取り、考えるきっかけになれば幸いだ。

福島も東京と変わらず、一見普通の生活を送っている。しかし、忘れそうになるが、その中には「当たり前」の生活を奪われ、新しい「当たり前」を獲得し、新しい日常生活を送っている人も一定数いる。最近、首都圏でも地震が多く当時を思い出すことが多い。

初回のコラムで、東京と地元のギャップについて執筆した。相変わらず、東京で福島のニュースを耳にすることは少ない。しかし、地元ではモニタリングポストの撤去について住民説明会が開かれていた。いわき市の空間線量が、全国平均と比べて安定して下回っており、維持費もかかることから、一部を除いて撤去する方針となったようだ。「事故以前の状態を取り戻しつつある」という安堵感と共に、「いつ、再び事故が起こるか分からない」「次の世代を考えると心配」「簡単に終止符を打って良いものか」「風化させず見守り続けていくべきでないか」という様々な感情が住民の心中を渦巻いている。どちらの意見にも共感できるから、賛成か反対かなんてははっきりと言えない。

十八歳になり選挙権が与えられ、私達も政治に参加できるようになった。しかし、放射能問題や事故の対応を含んだ政治について決断を下すのは、十八歳の私達にとってはあまりにも重すぎるような気がした。

Column

「何を食べたいか」と小銭の管理

東京大学大学院
工学系研究科 原子力国際専攻 渡辺 凜

「世界はどうなるのだろう」「どんな世の中にしたいか」と考えるとき、真っ先にエネルギーについて心配することは決して「自然」で「合理的」なことではない。それは、券売機で食券を買うときに、お腹の具合や食欲を差し置いて、まず持っている小銭の種類と枚数を考えて食べるものを決めることに似ている。

専門家とは、その不自然で非合理的とも思える考え方を極めた人たちである。全員の小銭入れの中身を調べてデータベースを作り、券売機を完璧にマスターし、今後の短期・中期・長期のメニュー予測を発表し合う。このノウハウがあれば小銭の管理は万全だ。しかし、こうしたノウハウだけでは「何を食べたいか」という問いを立てたり、答えたりすることはできない。同じように、エネルギーについて専門性は「どんな世の中が望ましいか」を考えるときには必ずしも有用ではない。むしろ、たくさんの情報の中で本質的な問いを見失う可能性さえある。

専門家は、人々のエネルギー問題への関心を高めようとするべきなのだろうか。人々の専門知識が増えることは良いことなのだろうか。エネルギーはあくまで人間の営みを実現するための手段である。エネルギーを手に入れることや、その方法を考えることに皆が関心を持ち、社会全体で注力すべきだと思っていれば、それは金の亡者ならぬエネルギーの亡者だ。世の中の問題をなんでもエネルギーの観点で考える人は、専門家くらいでちょうど良いのではないかな。

WEO2017 と内外エネルギー情勢への示唆

第6回(最終回) 世界のエネルギー需給情勢と原子力

東京大学 小宮山 涼一

WEO2017 では、2040 年にかけて、経済性のあるエネルギー資源の枯渇化や、気候変動問題を踏まえれば、米国、欧州、アジアの主要な電力市場において、太陽光・風力発電といった再生可能エネルギー導入拡大の国際的なトレンドの中にあっても、原子力発電は重要なエネルギー源となることが示唆されている。日本では、将来のエネルギー情勢の緊迫化と温室効果ガス排出削減への国際的圧力の高まりの可能性を踏まえ、原子力を有望な技術オプションとして長期的に維持することが重要であると考えられる。

KEYWORDS: *United States, Europe, Asia, fuel price, power generation cost, electricity price, nuclear energy*

I. はじめに

国家のエネルギーの供給のあり方は、エネルギー需要の動向のほかにも、資源や技術の利用可能性、エネルギー安全保障や環境政策、産業政策など、様々な要因によりその方向性が定まるといえる。このような多様な要因との相互作用を通じて、エネルギー・ミックスの中で原子力エネルギーへのニーズが形成され、利用可能な有効なエネルギー源として、原子力の技術や運営管理方策が発展を遂げてきた。WEO2017 のある程度確実性の高い新政策シナリオでは、世界の原子力発電設備量は2040年まで着実に増加する見込みであるが、先進国全体では欧米での閉鎖の影響により減少する一方、中国など電力需要の旺盛な新興国では増加し、地域間での導入のベクトルに差異が見られる。このような原子力発電の展望の違いは、各地域の固有の状況を反映していると考えられる。例えば、米国ではシェール資源の増大、欧州では再エネ拡大や原子力開発コストの上昇、中国では大気汚染問題やエネルギー安定調達への取組などが、各地域での原子力の位置づけに寄与していると見られる。こうした背景を踏まえ、本稿では WEO2017¹⁾での各地域でのエネルギー需給の展望や、電力コストの展望等を概観し、

今後の原子力の位置付けについて考える。

II. 各地域のエネルギー需給の展望

1. 米国の電源構成の展望

米国は石油、天然ガス、石炭といった豊富な化石資源量を保有すると同時に、広大な国土を背景に、風力や太陽光発電等の再エネ導入ポテンシャルも大きく、エネルギー供給面では国際的に見ても充実した環境にある。その中で米国の原子力発電は近年、シェール革命による逆風の中でも、稼働率は高水準を維持しており、2017 年も設備利用率が92%へ達し、利用効率の最大化がはかられている。しかし、シェール革命以前では米国で原子炉閉鎖は見られなかったが、近年では経済優位性のあるシェールガス資源の生産に起因する卸電力価格の低迷により、国際的に見ても極めて高い設備利用率にもかかわらず、収益確保が困難となり、10基を上回る多数の原子炉の閉鎖が決定されている。そのため、電力安定供給等の観点から、原子炉閉鎖を予防するための支援制度のあり方に関して検討が行われている。

WEO2017 の新政策シナリオにおいても、2040 年にかけて原子炉閉鎖が徐々に進み、原子力発電量が減少するとともに、原子力の電源比率も2016年の20%から2040年には14%へ低下する(図1)。一方、2℃目標と整合性のある持続可能な開発シナリオでは、国内に十分な資源量が存在する風力発電の拡大と共に、原子力発電の電源比率も18%で現状水準にて維持され、発電量自体も大きな減少は見られない。一方、環境適合的なガス火力でも

Implication from WEO 2017 for energy system (6); World energy status and nuclear energy : Ryoichi Komiyaama.

(2018年9月11日 受理)

■前回のタイトル

第5回 世界をリードする中国のエネルギー市場

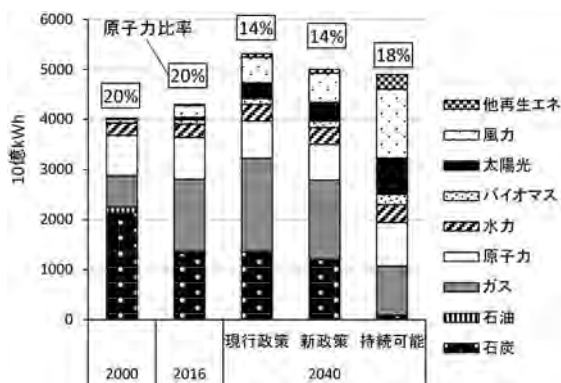


図1 米国の発電量構成の展望

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections (p.641～)をもとに著者作成

CO₂排出を回避できないため、シェールガス拡大が続く米国においても、気候変動対策としてみれば、ガス火力は大きく減少し、風力など再エネとともに、原子力発電が重要な技術オプションとなることが示唆されている。

2. 欧州の電源構成の展望

一方、欧州では各国で原子力政策に違いが見られる。ドイツでは、2022年までに稼働中の原子力を段階的に閉鎖する方針が示され、原子力依存度低減が着実にすすめられる中、フランスでも2015年に公表したエネルギー転換法により、2030年までに再エネ電源比率4割への引上げ、2025年までに原子力発電比率を50%へ引き下げる等の方針が定められた。他方、イギリスは気候変動対策、電力安定供給をはかるため、省エネ、再エネと共に、原子力推進の立場を示している。中国、日本、フランス企業等との協力の下、FIT-CfDによる原子力支援制度をうけて、原子力発電の新設計画が進められている。FITは日本でも再生可能エネルギーに対して適用されているが、FIT-CfD (feed-in-tariff contract-for-difference) は差額決済型FITとも呼ばれ、卸電力市場価格と、特定の電源の投資回収に要する電力価格との差額を発電事業者に補助する制度であり、投資回収の予見性確保を目的としている。スウェーデンでも低炭素化実現の上で原子力を重要な電源としており、原子力発電の新設、リプレースを可能としており、欧州域内では原子力依存度のあり方で各国の姿勢が異なる。WEO2017の新政策シナリオでは、欧州全体でみれば、原子力比率が現状の20%から2040年には17%へ緩やかに低下するが(図2)、2℃目標と整合性のある持続可能シナリオでは、2040年でも原子力発電量は現状水準で維持され、原子力比率が25%へ上昇し、重要な役割を果たす。

3. アジアの電源構成、エネルギー需給の展望

アジア地域では経済発展を踏まえ、旺盛な電力需要の伸びに対応するため、現状の電力供給では、域内の豊富な石炭資源量を背景に石炭火力発電が大半を担うが、中

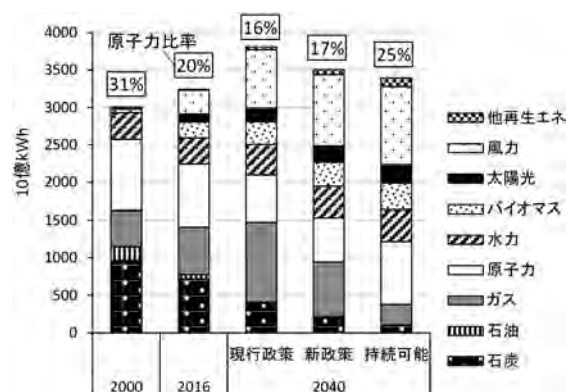


図2 欧州(EU)の発電量構成の展望

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections (p.641～)をもとに著者作成

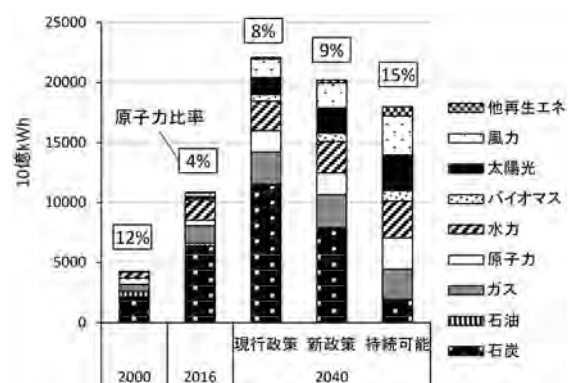


図3 アジア太平洋の発電量構成の展望

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections (p.641～)をもとに著者作成

国など新興国での石炭燃焼に伴う大気汚染問題の深刻化により、多数の原子力発電の開発、計画が進められている。WEO2017の見通しでは、いずれのシナリオでも2040年にかけて原子力発電量、比率ともに増加し(図3)、世界の原子力開発拠点としてアジアの存在感が高まる。

アジア地域は国際的に見ても、電力に限らず、エネルギー需要が急増する一方、需要増加に見合う域内のエネルギー資源量が不足しており、域外からの輸入に大きく依存している。近年は原油や天然ガス輸入量が増加し、域内でも比較的豊富な資源量が存在する石炭でさえも中国沿海部では輸入量が増加している。アジアの原油輸入量に関しては、日本や韓国では省エネ等により減少する中でも、それ以上に中国、インド、東南アジアで拡大する。その結果、WEO2017の見通しでは、アジアの原油輸入は現状よりも日量900万バレル増加して2040年には同3,000万バレルに達し、アジアの主要な原油調達先である中東からのアジア向け輸出量も同2,000万バレル程度が上限と見込まれるため、アジアでは石油の安定供給は引き続き重要な課題として位置づけられる。

またアジアでは、新政策シナリオをはじめとしたいずれのシナリオでもガス火力が拡大する結果(図3)、民生部門のガス消費増加も加わり、天然ガス消費が増加す

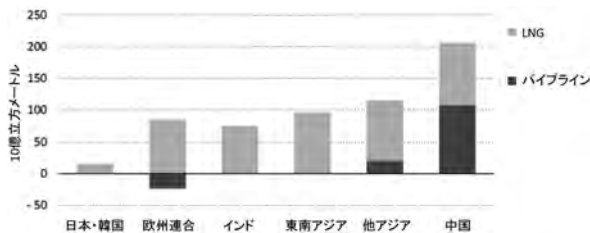


図4 天然ガス輸入増加量(2016~40年)(新政策シナリオ)
(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, pp.362, Figure8.11 を翻訳し転載

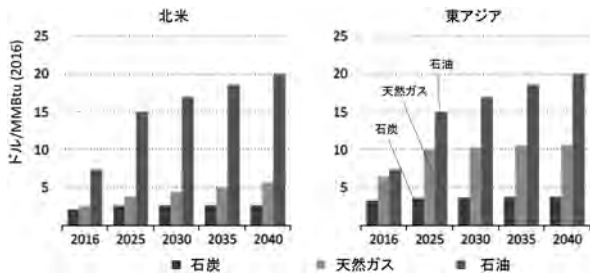


図5 燃料価格の展望(新政策シナリオ)
(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, pp.395, Figure9.16 を翻訳し転載

る。しかし、アジア域内の天然ガス生産は総じて頭打ちにあることから、LNGをはじめとする天然ガス輸入量が急増する。新政策シナリオでは、LNG輸入量は2040年にかけて国際的に増加する中(図4)、特に中国やインドなどアジアや欧州ではエネルギー安定供給や環境問題への対応から急増すると見られ、中国の2040年のLNG輸入量は世界のLNG貿易量の半分を占め、日本を抜いて世界最大のLNG輸入国となる。一方、日本のLNG輸入量の伸びは限定的であることから、日本の国際LNG貿易における存在感は相対的に低下するとみられ、LNGの安定供給確保が一層重要な課題になると見込まれる。

また、天然ガス輸入の確保と共に、天然ガスの輸入価格の安定化もコスト抑制の上で重要な課題となる。2016年現在、世界のガス価格は、国際的な供給過剰をうけて低下しており、特に欧州や日本では、価格が高騰した2012年に比べ60%も低下しているが、長期的にはコスト高のガス資源が徐々に比率を高めることで、上昇すると見込まれている(図5)。ガスは石油や石炭に比べエネルギー密度が低く、輸送コストがガス利用のコストに占める比率が高い。そのため、産ガス国への地理的な距離が、ガス利用の経済性を決定する。ガスインフラは一般的に、資本コストが高く、また、長距離、ボイルオフ(LNG)、自家消費ロス(液化、圧縮工程)、漏えい(パイプライン)に起因した輸送ロスも大きい。そのため、長距離輸送で同じエネルギー量を輸送する場合、ガスの輸送コストは、石油や石炭に比べ、7倍~10倍も高く、そのため、ガスの価格には大きな地域差が存在する。特にアジアの場合、LNG輸出地域から地理的に離れているため、北米などの天然ガス価格に比べ高水準にあり、長期

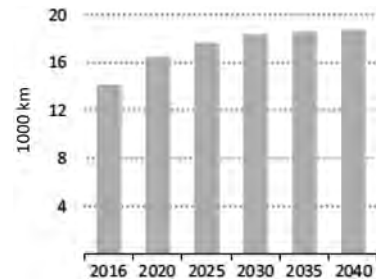


図6 LNG平均輸送距離の展望
(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, pp.365, Figure8.14 を翻訳し転載

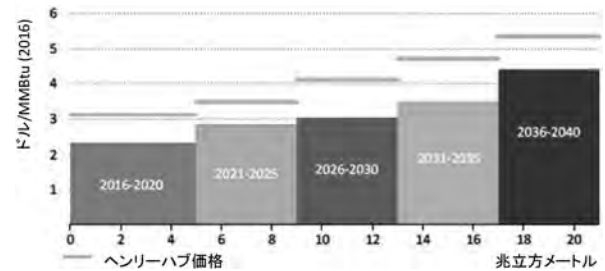


図7 米国の天然ガスの生産コストと価格の展望
(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, pp.373, Figure 9.3 を翻訳し転載

的にも価格差は解消されない見込みである(図5)。そのため、石炭から天然ガスへの燃料転換による環境対策は、アジア諸国にとっては大きなコスト負担になる。また北米においても、シェール革命により足元では化石資源価格が低下しているものの、長期的には経済性のある資源が枯渇化して生産コストの高い資源への依存を高めることから、長期的に化石燃料価格は上昇する(図5)。

またWEO2017の新政策シナリオでは、2025年にかけて世界のLNG貿易量は7割弱も拡大する中、豊富なシェールガス資源を背景に、米国が主要なLNG輸出国として台頭する。その結果、世界の平均的なLNG輸送距離が2040年にかけて長距離化し、輸送コストが一層上昇する見込みである(図6)。例えば、米国メキシコ湾岸から日本へのLNG輸送距離は、中東のカタールから日本への輸送距離に比べ5割も長距離化し、同じく米国からインドへの輸送距離は、カタールからの輸送に比べ4倍以上も延びる。またLNG貿易の拡大をうけて、2040年には世界で現状の2倍の950隻ものLNG船が稼動する見込みである。LNG輸送の距離が長距離化することで、LNG船の確保と共に、天然ガスの安定供給確保が、天然ガスにより環境問題の緩和を進めるアジアにとって重要な課題になる。

一方、米国の経済性のあるシェールガス由来のLNGの国際的影響力の高まりが予見される中、WEO2017は、長期的に米国の天然ガス価格が上昇する可能性を指摘している(図7)。WEO2017では、米国のシェールガス生産はガス価格の影響を大きく受け、現状の3ドル/MMBtuでの天然ガス価格水準では、長期的な生産増

加が困難との見方が示されている。そのため、米国の天然ガス価格指標であるヘンリーハブ価格は2040年には5~6ドルまで上昇すると見込まれている。米国では経済優位性のあるシェールガス資源が豊富にあり、その資源量も上方修正されているにもかかわらず、今後の生産増加に伴い、コスト高なガス資源に生産がシフトする見方が示されている。習熟効果や技術革新で生産コストがさらに低下する可能性があるものの、今後生産される米国のガス価格、米国の主要なLNG輸出先となるアジア向けLNG価格、ひいては、ガス火力の発電コストにも、長期的に上昇圧力がかかると見られる。そのため、原子力による電力供給の経済性確保が長期的に重要になることが示唆される。

Ⅲ. 世界の電力コストの展望

太陽光発電など再エネ電源の価格は近年、技術の習熟効果などを背景に大きく低下しており、事業用太陽光発電の価格は2010年から2016年にかけて70%も低下している(図8)。土地、労働力等のコストに地域差があるため、国際的にばらつきがあるが、世界平均で見れば、2040年には太陽光のコストはさらに現状比で60%低下する見込みである(図8)。累積生産量が2倍増加することで、太陽光発電のコストは20%低減すると見込まれている。車載用バッテリー価格は、2010年以降、年率7%で低減しており、新政策シナリオでは2025年にかけて年率6%で低下する(図8)。2040年には電気自動車のバッテリー価格は80ドル/kWh、PHEV用のバッテリー価格は100ドル/kWhまで低減すると見込まれる。自動車用に合わせて電力系統用の定置用バッテリーもコストが低下し、価格は相対的に高いものの、需要家側(Behind-the-Meter)で導入促進が見込まれている。

その中で、産業競争力や国民生活に密接に関係するため、世界的にも発電コストや電力価格の将来展望への関心が高まっている。再エネコストの低下が長期的に進むと見込まれる中、2016年現在、世界の平均発電コストは64ドル/MWhであるが、新政策シナリオでは2040年に70ドル/MWhへ現状比で1割ほど上昇する。各地域の発電コストは、地域毎の技術構成、コスト、変換効率、燃料価格等を踏まえて大きな違いが見られ、米国、中国、カナダ、ロシアは自国内のコスト競争力の高い化石資源が利用可能であるため、発電コストが相対的に安価である(図9)。一方、日本、韓国、欧州の発電コストは、費用のかかる輸入燃料に依存するため、相対的に高い。今後を展望すると、世界全体で見れば多くの地域で発電コストは上昇する(図9)。特に上昇するのは、韓国、中東、アフリカであり、これらの3地域は発電部門における天然ガス比率の拡大、世界的な天然ガス価格の上昇が背景にある。一方、日本では発電コストが低下するが、これは輸入燃料の削減効果が大い。日本の場合、2040年でも

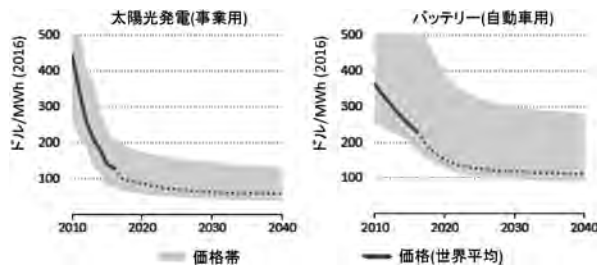


図8 太陽光、バッテリー価格の展望(新政策シナリオ)

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, pp.60, Figure1.8を翻訳し転載

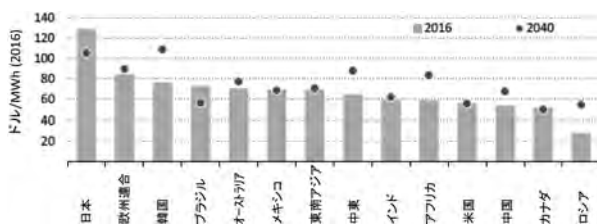


図9 世界の発電コストの展望(新政策シナリオ)

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, pp.277, Figure6.25を翻訳し転載

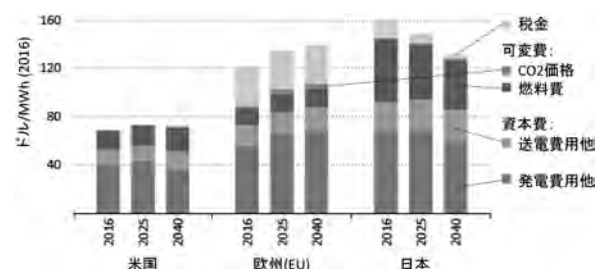


図10 産業用電力価格の展望(新政策シナリオ)

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, pp.278, Figure6.26を翻訳し転載

国際的に高コスト水準にあるが、原子力発電の再稼働と再エネ導入による電力安定供給確保が背景にある。また他の傾向として、長期的に多くの地域で発電コストの半分以上を資本費が占めるが、現状の電気料金は一般的に従量料金の比率が高い。そのため、電源の投資回収を促すための適正な電気料金の制度設計が重要になるとWEO2017は指摘している。

また、電力多消費産業にとって、電気料金は産業競争力を維持する上で重要な指標となる。新政策シナリオでは、米国の産業用電力価格は2040年にかけて安価なガス価格を背景に安定的に推移し(図10)、十分な土地や労働力も利用可能であるため、エネルギー多消費産業の競争力の向上に貢献すると考えられる。一方、欧州や日本での産業用電力価格は相対的に高水準で推移し、燃料価格の上昇、税金等が影響する。その中で、日本の産業用価格は、太陽光発電増加による燃料費削減により徐々に低下するが、依然、米国の2倍の水準にある。一方、欧州の産業用電力価格は、電力市場改革での施策の影響で資本費の電気料金への転嫁が進み、2040年にかけて国際的にも最も高い水準となり(図10)、エネルギー多消費産

業にとっては、競争力維持が重要な課題になると考えられる。

IV. 結語

WEO2017では、原子力は2040年の世界の電力供給の1割を担い、特に日本をはじめ、ロシア、韓国、欧州、米国、東欧で1割以上を占める重要な電源として位置づけられている。原子力発電の長期展望は各地域固有の競合資源・技術の利用可能性、エネルギー需要の動向、エネルギー・環境政策といった複合的な要因により形成されるため、将来の原子力の動向は予測が難しいといえる。しかし、WEO2017は、安価なエネルギー資源の枯渇化や、気候変動問題を踏まえれば、原子力は将来も有望な技術オプションとなることを示唆している。わが国のエネルギー基本計画でも、原子力は「実用段階にある脱炭素化の選択肢」として位置づけられている²⁾。

例えば現在、米国ではコスト競争力のあるシェールガス生産の増大に伴い、ガス火力が経済性を有し、原子力発電の早期閉鎖に作用して、新設炉はもとより、既設炉の経済性も低下しており、原子力は苦境の中にある。しかしWEO2017では、米国のガス供給は、安価なガス資源が長期的に徐々に枯渇し、コスト高のガス資源の比率が高まり、2040年にかけてガス価格も上昇に転じると予測されていることから、原子力発電量の減少は比較的緩やかであり、安価なシェールガス資源の枯渇が早まれば、原子力維持への追い風になる可能性もある。また、2℃目標実現のための厳しい環境制約が課された場合には、ガス依存度の低減、原子力比率の増加が必要になるため、資源制約や環境制約を踏まえれば、原子力は長期的に維持すべき技術オプションであることが示唆されている。欧州でも同様であり、新政策シナリオでは大幅に

拡大する風力発電や脱原子力政策の影響により、原子力の電源比率は縮小するが、2℃目標の制約下では、2040年まで現状水準での原子力の維持が必須となる。

WEO2017の新政策シナリオでは、2040年には日本の原子力発電設備量は福島事故前より3割程度減の3千万kWとなるが、原子力の再稼働により徐々に電力価格が低下すると見込まれている。しかし、もし再稼働やリブレースが停滞すれば、再エネ普及による燃料節約効果が一定程度期待される中であっても、燃料価格の長期的な上昇にさらされ、欧州の水準以上での電力価格高騰が長引き、国民生活や産業活動に悪影響を与え、温室効果ガス排出量の削減が停滞する可能性もある。日本では、福島原発事故以降の世論の安全に対する価値観の変化も十分に理解した上で、原子力の安全性、信頼性の向上への取り組みを最優先に位置づけるとともに、国際的にも高水準にある燃料価格や、将来のエネルギー情勢の緊迫化と温室効果ガス排出削減への国際的圧力の一層の高まりの可能性を踏まえ、原子力の再稼働を着実に進め、長期的に有望な技術オプションとして維持することが重要であると考えられる。

－ 参考資料 －

- 1) International Energy Agency (IEA)/OECD ; World Energy Outlook 2017 (WEO2017), OECD/IEA, 2017.
- 2) 経済産業省、エネルギー基本計画、平成30年7月
<http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf> (アクセス日：2018年9月1日)

著者紹介

小宮山涼一（こみやま・りょういち）
本誌、60[8]、P.29 (2018) 参照。



From Editors 編集委員会からのお知らせ

－ 最近の編集委員会の話題より －

(12月7日第5回論文誌編集幹事会)

- ・2018年10月16日～11月15日に英文誌へ36論文、和文誌へ13論文の投稿があった。
- ・論文誌関連の今年度後期の予算執行の見込み案と、来年度予算案を承認した。
- ・福島事故関連記事の英文化作業の進捗状況が報告された。著者および校閲委員の確認作業中。
- ・インパクトファクター向上策の一貫として寄与した著者に礼状を送付することとした。
- ・二重投稿および剽窃論文の対処に関して報告された。
- ・和文誌合併号の場合の定価の設定について決定した。
- ・第2分野に編集委員を1名増やすことを了承した。

- ・第4、7、11分野にもPre-Screeningを導入することとした。
- ・次回の幹事会から資料は主として電子媒体を使用することとした。

(12月7日第6回学会誌編集幹事会)

- ・60周年記念企画の記事進捗について確認した。
- ・学会誌関連、今年度の予算執行の見込み案、来年度予算案が承認された。
- ・11月号のアンケート結果の報告があった。
- ・巻頭言、時論、その他の記事企画の進捗状況を確認し、掲載予定について検討した。
- ・学会誌12月号記事について会員より誤記の指摘があった。直近号に訂正記事を掲載することとした。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

核融合トリチウム研究最前線
—原型炉実現に向けて—

第7回 トリチウム蓄積

静岡大学 大矢 恭久, 周 啓来
核融合科学研究所 小林 真

核融合炉においてトリチウムの取扱は燃料制御と安全確保の観点から重要である。核融合炉の継続的な運転のためにはブランケットシステムでのトリチウム増殖が必須であるとともにトリチウムの閉じ込め、回収等によるロスを低減させることも必要不可欠である。そのためにはプラズマ対向壁中でのトリチウム蓄積の理解とその効率的な回収手法の検討が必要である。ここではプラズマ対向壁タングステン中でのトリチウム蓄積とその除染手法の検討状況について解説する。

KEYWORDS: Fusion reactor, Tritium, Tungsten, Neutron irradiation, Helium, Impurity, Decontamination

I. はじめに

核融合炉では重水素とトリチウムを燃料とするため、核融合炉内ではこれらの燃料が様々な経路で循環している。いわゆる核融合炉の“血液”である。特にトリチウムは増殖する必要がある、トリチウム生成・供給速度が燃焼・蓄積・漏洩など実効的トリチウム消費速度を上回らなければ核融合炉は成立しない。トリチウムの生成・消費バランスについては西川らによる予測が行われており¹⁾、プラズマ対向材によりトリチウムバランスが大きく変動し、プラズマ対向材におけるトリチウムの蓄積は核融合炉の成立性を大きく左右する。現在、プラズマ対向材としては、炭素やベリリウムなど軽元素材(低Z材料)、タングステン等の金属材(高Z材料)が検討されているが、現状では低損耗率や低トリチウムインベントリの観点からタングステンの使用が最も現実的と考えられている。そのため、本稿ではタングステン中のトリチウム蓄積について核融合環境下を想定した場合、どのような現象がおこり、どのように変化すると予測されているのか、またその除去手法の現状について概説することとする。

トリチウムの蓄積挙動評価には主に昇温脱離法(TDS)が用いられている。図1に等方性黒鉛(HOPG)と

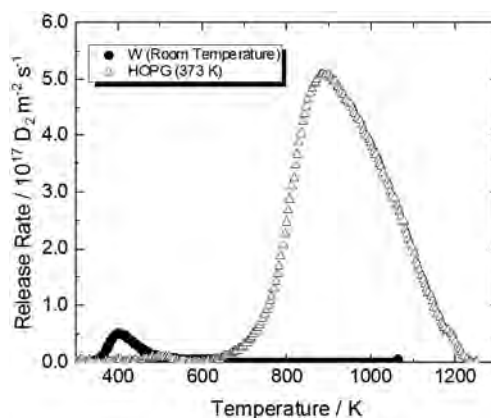


図1 等方性黒鉛と多結晶タングステンに重水素照射した際の重水素 TDS スペクトル^{2,3)}

多結晶タングステンに重水素イオン照射した際の重水素 TDS スペクトルを示す。この結果から大きくふたつのことがわかる。ひとつはタングステンにおける水素蓄積がとても少ないことである。もうひとつは脱離温度であるが、等方性黒鉛と比べてタングステンでは主要な脱離ピークが400 Kと低いことがわかる。これらのことからプラズマ対向壁としてタングステンを用いることで、トリチウム蓄積を大幅に低減できるとともに、脱離温度が低いと、回収が容易であると判断できる。このように、純粋なタングステンであれば、グラファイトよりもトリチウム蓄積制御の観点から有効であることがわかる。しかし、実際の核融合環境では、それほど単純な話ではなく、様々な要因(温度、高エネルギー粒子照射環境、不純物など)がタングステン中のトリチウム蓄積に影響する。これまでにタングステンの特性・利点が核融合炉環境下でどのように変化するかについて予測研究

Research frontier of tritium for fusion reactor – toward the DEMO reactor (7); Tritium retention : Yasuhisa Oya, Qilai Zhou, Makoto Kobayashi.

(2018年8月3日 受理)

■ 前回タイトル

第6回 トリチウム透過研究と透過低減技術開発

が行われてきた。本稿ではそのなかでも照射損傷影響、核変換影響、ヘリウム影響、不純物影響および蓄積したトリチウムの除染手法を中心に最近の知見を解説することとする。

II. 照射損傷影響

核融合環境においてプラズマ対向壁は、DT 反応で生成した 14 MeV 中性子照射環境に曝される。併せて、プラズマ対向壁では荷電交換によって高エネルギーの荷電交換中性粒子照射環境に曝されることになる。そのため、タングステン中の照射損傷量がトリチウム蓄積にどの程度影響するのか評価するトリチウムリサイクリング評価研究が精力的に実施されている。実際の核融合炉を想定するためには 14 MeV 中性子照射したタングステンをを用いて行うべきであるが、日本原子力研究開発機構核融合炉物理用中性子源施設(FNS)が停止した現在、国内で 14 MeV 中性子照射する施設がない。そのため、原子炉での中性子照射または加速器による重イオン照射による研究が主に進められている。

図 2 に室温にて 6 MeV Fe^{2+} 照射により照射損傷を導入したタングステンに 1 keV の重水素イオンを照射した際の TDS スペクトルを示す。照射損傷量が増加すると TDS スペクトルの形状が大きく変わり、重水素脱離温度が高温側にシフトしていくことがわかる。このことは Fe^{2+} 照射により原子空孔が生成すると水素が安定してタングステン中に捕捉されることを示している。照射損傷量が 0.03 dpa 以上ではさらに高温の 800~900 K に放出が見られ、照射損傷量の増加とともに主要な水素捕捉状態となる。透過電子顕微鏡(TEM)観察から高照射損傷量では原子空孔が集合することによりボイドが形成している³⁾ことから、タングステン中でボイドは最も安定な水素捕捉サイトになると考えられる。この捕捉エネルギーはシミュレーションから 1.5~1.8 eV 程度と見積もられている^{4,5)}。このように照射損傷が導入されると蓄積量も大きく変化するとともにその放出温度が高温

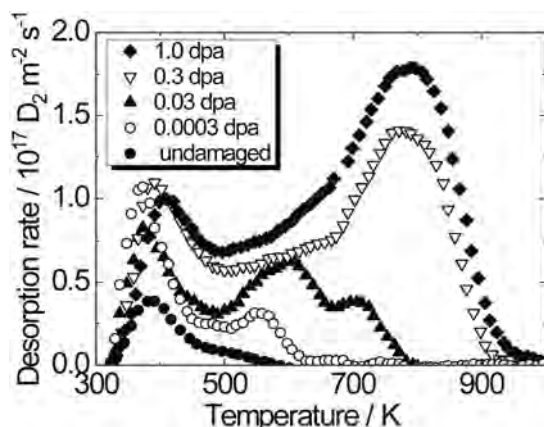


図 2 タングステンの重水素 TDS スペクトルにおける照射損傷量変化³⁾

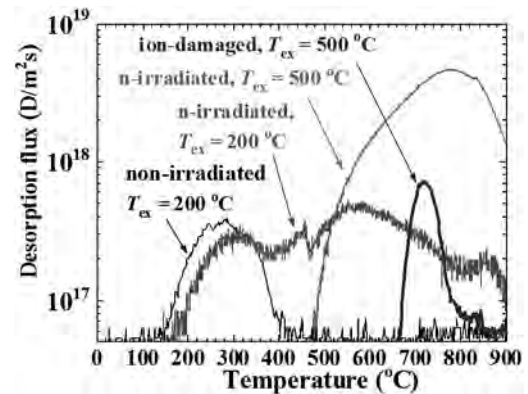


図 3 0.025 dpa 中性子照射したタングステンに TPE にて 473 K または 773 K にて重水素プラズマ照射した際の重水素 TDS スペクトル⁴⁾
(比較のために Fe^{2+} 照射したタングステンの重水素 TDS スペクトルも併せて示す。)

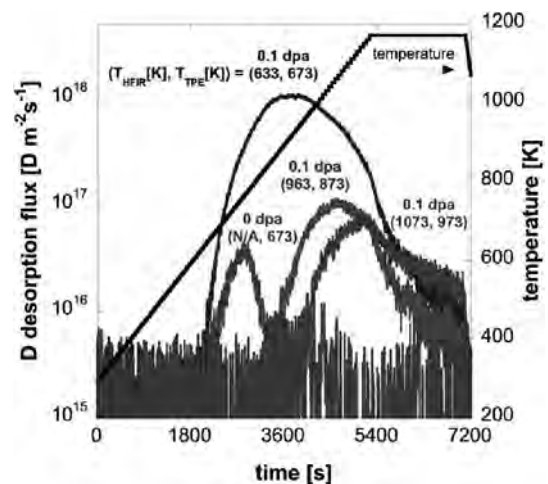


図 4 663 K, 963 K, 1073 K の高温中性子照射および重水素プラズマ照射した W における重水素 TDS スペクトル⁶⁾

側にシフトするため、トリチウムの回収が困難になることが危惧される。

トリチウム蓄積量が大きく変化する可能性が示されると、中性子照射影響をあらかじめ理解しておかなければ炉設計にも大きな支障をきたすことになる。これまでに日米共同研究 TITAN および PHENIX 計画にて中性子照射タングステンにおけるトリチウム挙動評価研究が進められている。図 4 に米国オークリッジ国立研究所(ORNL)の研究炉 High Flux Isotope Reactor (HFIR)にて冷却水温度(約 323 K)で 0.025 dpa まで中性子照射したタングステンに米国アイダホ国立研究所にて重水素プラズマ照射(フルエンス: $5 \sim 7 \times 10^{25} \text{ Dm}^{-2}$)した際の TDS スペクトルを示す⁴⁾。図 2 の重水素イオン照射試料と図 3 の重水素プラズマ照射試料で条件は若干異なるが、非照射材では重水素の脱離は 700 K までに終了しているのに対して、中性子照射材では 1,100 K 以上まで放出が継続していることがわかる。さらに 773 K の重水素プラズマ照射では、重水素の脱離がさらに高温側にシフトしている様子が見られる。これは高温照射により原子

空孔が成長することにより安定な捕捉サイトになったことを示している。また、重イオン照射材と中性子照射材における 773 K 重水素プラズマ照射では、中性子照射材では脱離ピークが高温側にわずかにシフトするとともに放出量が多いことがわかる。中性子照射材ではこのピークの幅が非常に広いことがわかる。これは中性子照射によって試料全体に照射損傷が導入される(重イオン照射では深さ約 1 μm) ことにより水素がバルク方向に拡がって分布することから、水素の拡散に大きな影響を与えると考えられる。これらの原子炉における中性子照射では核融合炉環境と違い、熱中性子の影響が大きい。核融合炉での 14 MeV 速中性子照射環境では、はじき出し損傷過程が支配的になることが予想される。照射損傷量は 10^{-6} dpa と低いが、14 MeV 中性子照射した場合、重水素の脱離が 700 K まで拡がっていることがわかり、照射損傷量が低くても原子空孔が形成され、重水素の捕捉サイトになると考えられる。

現在、日米共同研究 PHENIX 計画では高温中性子照射したタングステンにおけるトリチウム挙動評価が行われている。図 4 に示すように高温中性子・重水素プラズマ照射では蓄積量が大きく減少するが、脱離ピークが高温側に大きくシフトし、TMAP シミュレーションでは脱離エネルギーは 1.80~2.60 eV まで変化すると見積もられている。今後、中性子および重水素プラズマ照射温度および照射損傷量をパラメータとして詳細な解析が必要である。

III. 核変換影響

タングステンは中性子照射によりレニウム (Re) またはオスmium (Os) に核変換されるため、核融合炉環境下では使用とともに純タングステンは W-Re 合金に変化する。ITER 運転時の 14 年間で 0.18at.%, DEMO 炉では 5 年の運転で 3.8at% の Re が生成すると予測されている。波多野らは W-5% Re 合金を用いて 523 K 以上の高温における照射損傷と核変換の重畳効果について調べた⁷⁾。その結果、図 5 に示すように Re が添加されると空孔型欠陥の生成が抑制され重水素蓄積が減少すると考えられており、特に高温では重水素ガス吸収による重水素蓄積量が 2 桁程、重水素プラズマ照射でも 77% 程度に低減されることが示されている。

IV. He 照射影響

DT 核融合反応では 14 MeV 中性子とともに 3.5 MeV のヘリウム (α 粒子) が生成する。そのため、プラズマ対向壁には燃料となる重水素およびトリチウムとともにヘリウムが打ち込まれることになる。タングステン中において、ヘリウムは転位、原子空孔、ボイドに水素より安定に捕捉されるため、トリチウム蓄積に大きな影響があると考えられている。ヘリウムの影響は主に二つあると

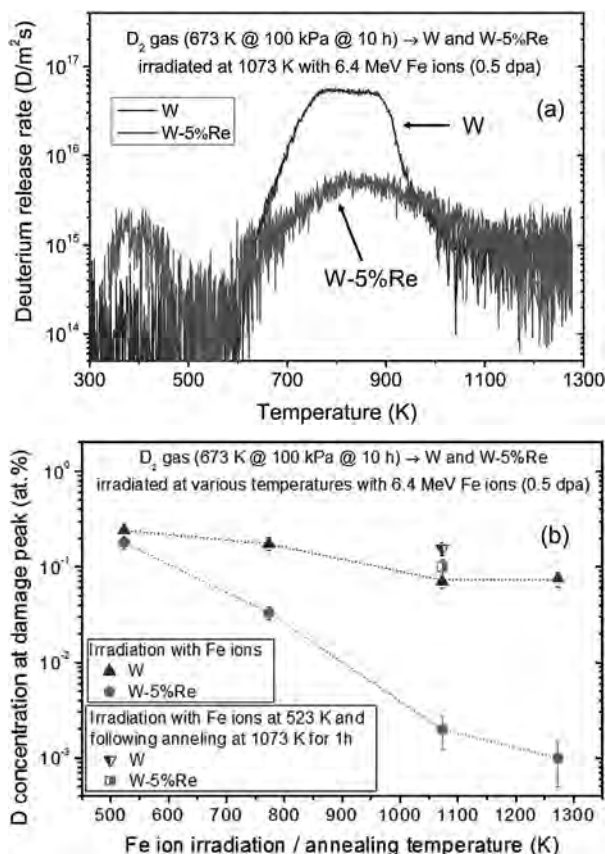


図 5 Fe イオンにて 0.5 dpa まで照射損傷を導入した W および W-5% Re の (a) TDS スペクトルと (b) 重水素蓄積量の温度依存性⁷⁾

考えられており、ヘリウム蓄積量が多くなるとバブルを形成する。しかし、1,000 K~2,000 K の温度かつヘリウムイオンエネルギーが 20 eV を超えると表面にファズとよばれるナノ構造が形成することが知られている⁸⁾。

岩切らはヘリウム予照射することにより、重水素の脱離が高温でも見られることを示した⁹⁾。また、周らは He/D 同時照射を行い、He/D フラックス比および照射深さを変えると重水素蓄積量が大きく変化することを示した¹⁰⁾。図 6 に示すようにヘリウムと水素を同じ照射深さに打ち込んだ場合、He/D フラックス比 0.6 で水素滞留量が最も多いことがわかる。そのため、ヘリウムにより形成した転位ループ中の水素が増えたと考えられる。He/D フラックス比は 0.6 を超えると、タングステン表面近傍でヘリウムバブル層が形成し、水素滞留量が低減する。また、水素の照射深さがヘリウムより浅い場合には He バブルの成長を抑制することがわかった。その代わりに、He/D フラックス比を 1.0 にしても、水素の蓄積は増えていく。このことから、タングステン中のヘリウムの存在状態、つまり転位ループ、ヘリウムバブルあるいはファズにより、水素の蓄積挙動が決まる。

図 7 に示すヘリウム照射タングステンの TEM 写真¹¹⁾を見ると、ヘリウムフルエンス 1.0×10^{21} He m⁻² に達すると、タングステン表面近傍はほとんどヘリウムバ

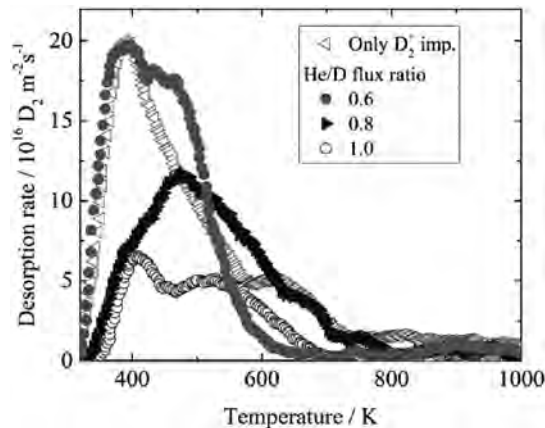


図6 3 keV He⁺-3 keV D₂⁺同時照射下におけるタングステン中の重水素 TDS スペクトル¹⁰⁾

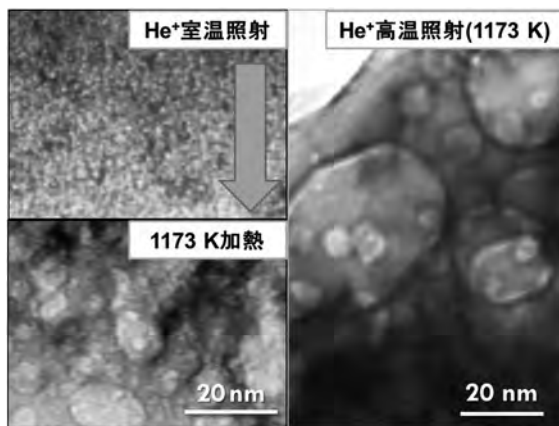


図7 室温および1,173 KにてHe⁺照射したタングステン表面のTEM写真¹¹⁾

ブルに占められている。ヘリウムバブル形成領域におけるヘリウムバブル体積がタングステン結晶体積中に占める割合は～65%と算出されている。高圧のヘリウムバブル中に水素原子は進入できないため、タングステン原子密度の低減と共に、水素捕捉サイトの数も減少するため、ヘリウムバブルが水素蓄積低減の原因のひとつであると言える。Baldwin らはヘリウムバブルが成長する時に、バブルとバブルが連結し、タングステン最表面のバブルが破裂すると、バブル層内部のヘリウムが放出することを報告している¹²⁾。高圧のヘリウムバブルが破裂することにより、空きバブルになり、水素リサイクリング経路になると考えられている。そして、タングステン中の水素はバルクに拡散せず、空きバブルに沿って再びプラズマに戻ると予想されている。この理論はヘリウムバブルによる水素蓄積低減のもうひとつの理由である。

このようにタングステン表面でのヘリウム層形成により、タングステンバルクへの水素の拡散が強く抑制されることが報告され、その理論的な理解が試みられている。一つはバルクへの拡散通路の減少、もう一つは拡散係数の低減であるが、どちらが大きく寄与しているのかはまだ十分に理解されていない。ヘリウム照射試料を用

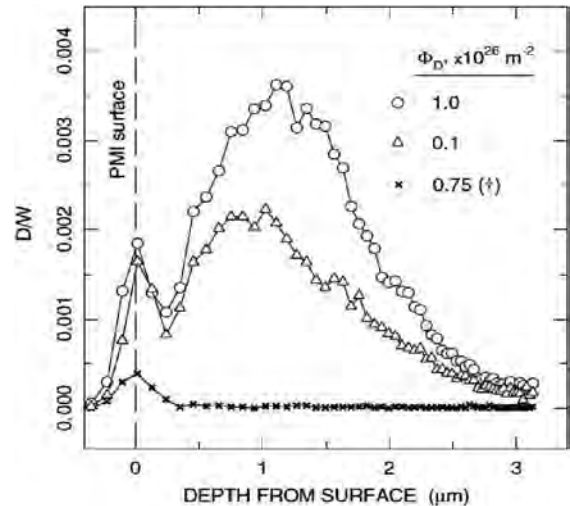


図8 473 K にて照射したタングステンに対する NRA 重水素深さ分布¹⁴⁾

($0.1 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ と $1.0 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ は重水素プラズマ照射で $0.75 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ のみ D²-0.25He 混合プラズマ照射である。)

いたガス駆動透過実験ではこの拡散障壁により 500 K ではヘリウムの透過量が1桁以上低減するとの報告がある。しかし、温度が1,000 K をこえると、ヘリウムによる拡散障壁の影響が小さくなり、非照射タングステンに近づく。このことも表面近傍のヘリウムが水素拡散位置を占有し、ヘリウムバブルを形成すると水素の拡散を低減することを示唆している。また、Ueda¹³⁾ らは水素単独照射と 0.1% He-H 同時照射を行い、同時照射により水素の滞留量が減っているが、TDS スペクトルの形状や脱離温度はほとんど変化しないことが報告されている。この結果から、ヘリウムの蓄積による実効的拡散係数の低下が示唆された。

図8は、Baldwin らの D-0.25He プラズマで 473 K にて照射したタングステンの核反応法 (NRA: Nuclear Reaction Analysis) による重水素深さ濃度分布である¹⁴⁾。混合プラズマ照射したタングステンでは、水素は表面近傍 (<100 nm) だけに集積し、100 nm を超えると、重水素の蓄積量はほぼゼロになる。さらに、高温長時間放電では、表面にファズが形成し、水素が蓄積しないと考えられる。

V. 不純物影響

近年、トリチウムインベントリ低減のために、核融合炉プラズマ対向壁は金属壁とすることが想定されている。この金属壁中での水素リサイクリング解明に向けて、九州大学にプラズマ境界力学実験装置 (QUEST: クエスト) が設置され、プラズマ壁相互作用に関する研究が精力的に進められている。クエストは金属壁 (ステンレス鋼および APS (Atmospheric Plasma Spraying)-W) であり、473 K の高温壁を有し水素放電のみで実験がなされているという特徴があり、近年プラズマ実験後の壁

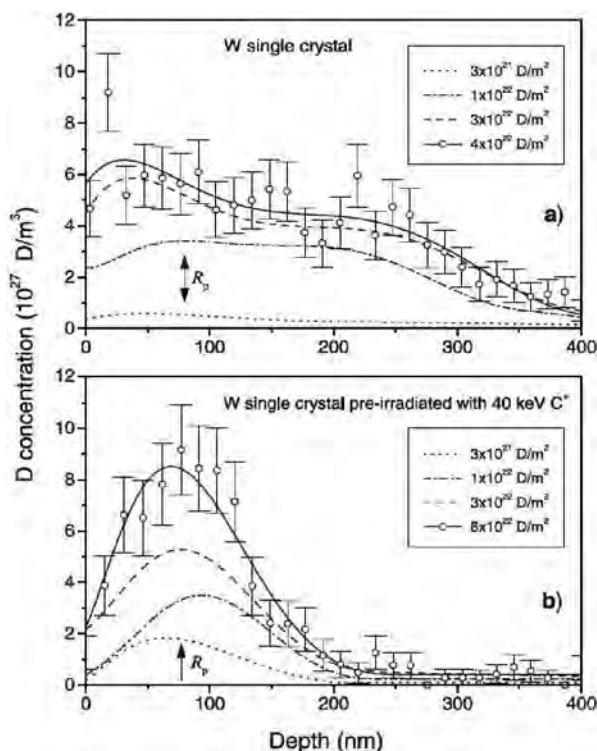


図9 単結晶タングステンと40 KeV炭素イオン照射した単結晶タングステンに重水素プラズマ照射した際の重水素深さ分布¹⁶⁾

状態の分析研究が精力的に進められている。その結果、全金属壁であるにもかかわらず、プラズマ実験後には厚い炭素堆積層が形成していることが報告されている。この炭素がどこから来たのかは十分に理解されていない。東らはこれらのプラズマ実験ごとの変化を系統的に調べ、プラズマ実験ごとに徐々に炭素不純物の蓄積が低減されていることを報告している¹⁵⁾。2015夏キャンペーンでは600 K～1,200 Kにわたる広い温度範囲で追照射した重水素が脱離しており、クエストでは下部壁に堆積層が厚く積もることから、炭素堆積層からの重水素の脱離と言える。一方、2016秋冬キャンペーンになると、重水素の脱離挙動は大きく変化し、ほぼ500 Kですべての重水素が放出してしまっている。このことから表面の炭素堆積層の影響がキャンペーンを積み重ねることによって大きく低減し、そのために、重水素蓄積量も大きく減少していることがわかる。そのため、核融合炉環境下でも炉運転後に壁の状態がどのようなのか予測することがトリチウムインベントリ評価で最も重要と思われる。核融合炉で考えれば、たとえプラズマ対向壁をすべて金属壁にしたとしても、特に初期運転時には炭素堆積層の影響は無視できないと言える。また、炭素堆積層から炭素がプラズマ内にリサイクリングされると高温下では高エネルギー炭素イオン照射によりタングステンからタングステンカーバイドと変化することも考えられる。Alimovらは40 keVの炭素イオンを単結晶タングステンに照射し、炭素注入層形成により、重水素が表面

に集積することを明らかにした(図9)。また、低温では炭素イオン照射による照射損傷も導入されることになる。東らは鉄と炭素イオンを同時に照射し、その重水素蓄積について評価した。炭素注入層では欠陥への水素捕捉エネルギーが減少するとともに炭素注入層により水素の滞留量が減少することを示した。

VI. プラズマ対向壁のトリチウム除染

核融合炉運転では軽水炉と同様に、ある一定期間の運転の後、メンテナンス期間を設ける。この際、核融合炉の真空容器は大気開放され、真空容器内に蓄積されたトリチウムが大気へ流出するリスクが生じる。このようなリスクを低減するため、あらかじめ蓄積したトリチウムを材料から取り除く必要があり、迅速で効果的なトリチウム除染法の確立が必要である。トリチウムは材料の内部まで分布しているため、ヘリウムグロー放電などで表面のトリチウムのみを取り除く除染法は効果的ではない。そこで、トリチウムは水素の同位体であることを利用し、水素・重水素を用いて同位体交換反応によりトリチウムを除染することが検討されている。

Rothらはタングステン中に予め重水素を注入し、その後水素プラズマを曝露することで同位体交換の効果を検証した¹⁷⁾。320 Kでは同位体交換は表面でのみ進行しており、バルクへの影響は小さい。これは320 K付近では水素の拡散速度が小さく、表面に注入された水素はバルクへ拡散する前に表面から脱離してしまうことが原因と考えられる。一方450 Kまで温度を上昇させるとバルク側へ水素が拡散し、同位体交換により重水素濃度が減少していることがわかる。また、Markeljらは重イオン照射により照射欠陥を導入したタングステンにおける水素同位体の同位体交換反応について調べた(図10)¹⁸⁾。600 K程度の温度における水素曝露により、予め注入され欠陥に捕捉された重水素が脱離し、濃度が減少していく様子がわかる。このように欠陥に捕獲されたトリチウ

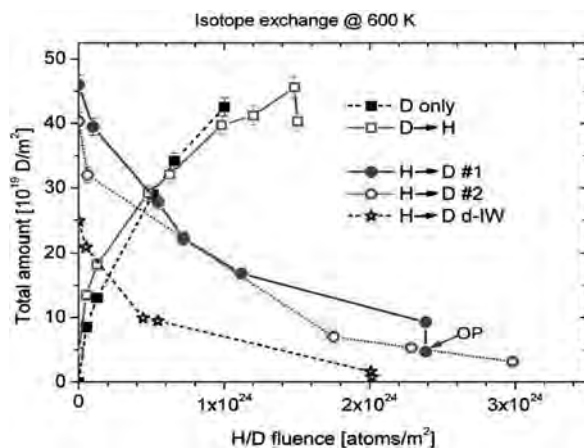


図10 タングステンイオンにより欠陥導入されたタングステン材における重水素滞留量と水素曝露下での同位体交換による重水素滞留量の変化¹⁸⁾

ムについても水素同位体同位体交換反応による除染が有効である。しかし、実際の炉では中性子照射により材料のバルクまで照射欠陥が導入されることから、バルクにおけるトリチウム蓄積が重要であり、それらの同位体交換による除染効率は水素同位体の拡散速度に比例することとなる。中性子照射材におけるトリチウム蓄積とその除染効果については今後定量的モデリングが重要であり、それに基づいた除染シナリオの検討を進めることが必要である。

VII. おわりに

ここではプラズマ対向壁タングステン中でのトリチウムを含む水素同位体挙動について見てきた。核融合炉環境下では純タングステン中の水素蓄積とは全く異なることがわかる。特に核融合炉特有の高温高エネルギー照射環境下では予想よりもトリチウム蓄積は多くなる可能性が示唆される。そこにヘリウム・不純物照射影響も重なり、炉壁の状況によってトリチウム蓄積は一変することが予想される。大型の核融合炉では実験室規模での制御された条件では想定できないトリチウム蓄積を招く可能性がある。そのため、実験室規模の研究のみならず、大型プラズマ装置を活用したトリチウム蓄積研究の両輪が必要不可欠であり、安全評価のためのデータの蓄積が今求められている。

－ 参考資料 －

- 1) M. Nishikawa, et al., Fusion Eng. Des., 87 (2012) 466-470.
- 2) Y. Morimoto and K. Okuno, J. Nucl. Mater. 313-316 (2003) 595.
- 3) Y. Oya, et al., J. Nucl. Mater. 461 (2015) 336.
- 4) Y. Hatano, et al., Nucl. Fusion 53 (2013) 073006.
- 5) H. Fujita, et al., Phys. Scr. T167 (2016) 014068.
- 6) M. Shimada, et al., Fusion Eng. Des. 136 (2018) 1161.
- 7) Y. Hatano, et al., Nucl. Mater. Energy 9 (2016) 93.
- 8) Y. Ueda et al., J. Nucl. Mater. 442 (2013) S267.
- 9) H. Iwakiri, K. Morishita, N. Yoshida, J. Nucl. Mater. 307-311 (2002) 135.
- 10) Q. Zhou et al., Nucl. Mater. Energy 16 (2018) 76.
- 11) M. Sato, et al., Fusion Sci. Tech. 68 (2015) 531.
- 12) M.J. Baldwin, et al., Nucl. Fusion, 57 (2017) 076031.
- 13) Y. Ueda, Fusion Sci. Technol. 56 (2009) 85.
- 14) M.J. Baldwin, Nucl. Fusion, 51 (2011) 103021.
- 15) 東勇太, 島根大学総合理工学研究科総合理工学専攻, 平成29年度修士論文.
- 16) V. Kh. Alimov, et al., J. Nucl. Mater. 282 (2000) 125.
- 17) J. Roth et al., J. Nucl. Mater. 432 (2013) 341-347.
- 18) S. Markelj et al., J. Nucl. Mater. 469 (2016) 133-144.

著者紹介



大矢 恭久 (おおや・やすひさ)
静岡大学大学院理学領域
(専門分野/関心分野) トリチウム理工学,
放射化学



周 啓来 (しゅう・けいらい)
静岡大学理学部
(専門分野/関心分野) 核融合工学, 材料工
学, トリチウム理工学



小林 真 (こばやし・まこと)
核融合科学研究所
(専門分野/関心分野) トリチウム理工学,
放射化学, 保健物理

Focus 国内外の原子力教育事情 (1)

本シリーズでは欧米や日本にあるいくつかの大学における原子力教育の事例を紹介する。原子力教育カリキュラムの内容や教員の待遇、あるいは共同利用施設の運用などは、各大学でさまざまに異なる。ここでは各大学の事例を紹介してそれらの差異を考察することで、日本の大学における原子力教育の今後の改善に資することができることを期待したい。第1回目となる今回は東京工業大学の教育事情を紹介する。

東京工業大学での原子力教育の取組み

東京工業大学 小原 徹

KEYWORDS: Nuclear Education, Graduate School

東京工業大学では2016年に組織の変更を伴う大規模な教育改革が実施された。

教育改革以前の東京工業大学は、3学部、6大学院研究科、4附置研究所からなっており原子力教育は、大学院理工学研究科原子核工学専攻で行われていた。原子核工学専攻は1957年に設置され、その前年の1956年に設置された理工学附属原子炉研究施設は1964年に原子炉工学研究所となり、原子炉工学研究所と大学院原子核工学専攻が車の両輪のように原子力研究と教育を担ってきた。

教育改革により2016年4月より教育体制は大きく変わった。これまでの学部、研究科、学科、専攻はすべて廃止になり、学部・大学院の一貫教育を担う機関としてあらたに学院が設置された。学院には、従来の学科・専攻に相当する系と系で実施される大学院課程としてコースが設置された。学生はどれかの系に所属し、大学院では各コースの教育カリキュラムを受講する。系・コースとも、これまでの細分化されていた学科・専攻の枠をすべて取り払い、大きな分野ごとに設置されている。これにより3学部23学科、6研究科45専攻であったものが、6学院17系に集約された。図1には、教育改革後の学院・系及びコース等の構成を示した。通常1つの系に対して1つのコースが設定されており、例えば機械系に対しては大学院教育課程として機械コースが設置されている。このような系と対をなすかたちのコースに加えて、複合系コースと呼ばれるコースが設置されている。複合系コースは、領域横断型の大学院教育を行うために設置されたもので6コース設置され、そのうちの4コースは複数の学院をまたぐ形の部局横断型複合系コースとなっ

ている。その部局横断型複合系コースの一つが原子核工学コースである。例えば、機械系を例にとると、機械系に所属している学生は大学院では、機械コース、エネルギーコース、エンジニアリングデザインコース、原子核工学コースのどれかの大学院課程で教育を受けることができる。原子核工学コースでは、機械系、電気電子系(工学院)、材料系、応用化学系(物質理工学院)、融合理工学系(環境・社会理工学院)の学生が原子核工学の教育を受けることができ、学士課程でそれぞれの分野の基礎を体系的・総合的に履修した学生が、大学院課程で原子核工学分野の教育を受けることとなる。大学院の教育カリキュラム及び修了要件はコースごとに定められているので、原子核工学コースの学生は、所属系に係わらず全員が原子核工学コースの設定したカリキュラムで教育を受けることになる。また、修士研究・博士研究も原子核工学分野のテーマで実施することになる。なお、大学院課程の教育は原則英語で実施されている。

2016年4月には教育改革と同時に研究改革も実施され、4つあった附置研究所は統合され、科学技術創成研究院となった。科学技術創成研究院は4つの研究所からなり、そのうちの一つが先導原子力研究所で、旧原子炉工学研究所の施設・教員はすべて先導原子力研究所にひきつがれた。先導原子力研究所の教員は原子核工学コースと原子核工学コースが関係する5つの系の学士課程の教育を担当している。このように新体制においては、先導原子力研究所と原子核工学コースが密接に連携して原子力研究・教育を担っている。

原子核工学コースでの教育の特徴として以下が挙げられる。まず、先に述べたとおり原子核工学コースは複合系コースであり、様々な工学分野の基礎を学んだ学生を対象とした教育を行っている点が挙げられる。学士課程でそれぞれの分野の基礎を学んだ学生は、原子核工学

Nuclear Education in Tokyo Institute of Technology : Toru Obara.

(2018年7月31日 受理)



図1 東工大の教育体制
(出典)東京工業大学ウェブサイト

コースで原子核工学の体系的な教育を受けると同時に、各自のバックグラウンドを生かした原子核工学分野の修士研究・博士研究に取り組む。原子核工学コースでは、原子核工学分野を広く網羅する授業科目を用意すると同時に、「中性子輸送理論」、「原子炉理論」、「原子力安全工学」、「核燃料サイクル工学」といった基幹的科目を必修としている。また、実験・実習を重視し、線源を用いた放射線計測実験と臨界集合体を用いた炉物理実験を行う「原子炉物理・放射線計測実験」、放射化材料を用いた材料実験を行う「廃止措置・材料工学実験」、ウラン溶液を用いた化学実験を行う「核燃料デブリ・バックエンド工学実験」、熱流動実験及びロボット技術・遠隔計測技術の実験を行う「熱流動・シビアアクシデント工学実験」の実験科目を開講している。これらの科目のうち、「熱流動・シビアアクシデント工学実験」以外は、すべて非密封の放射線管理区域で放射性物質あるいは核燃料物質を用いて行う実験である。なお、「原子炉物理・放射線計測実験」では、放射線計測の実験を東工大で行い測定技術を理解・習得した後、炉物理の実験を京都大学 KUCA で行っている。これらの科目は選択必修となっており、学生は必ず複数の科目を履修する必要がある。例えば物理系の学生であっても、物理系の実験のみならず、化学系

や材料系の実験も履修することになっている。また、蛸壺の大学院教育からの脱却を意図し、修士課程入学後自己の所属以外の複数の研究室での講究や実験に参加するマルチラボトレーニングを実施している。2014年に文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業廃止措置研究・人材育成推進事業」に採択され、廃止措置に必要な人材の継続的育成と基盤的研究の推進を目的としたプログラム「廃止措置工学高度人材育成と基盤研究の深化」を行っている。本プログラムでは当初より5年間のプログラム期間終了後も廃止措置に係る人材育成事業が継続できるよう教育プログラムの改良・充実に重点を置き、原子核工学コースにおいて先に述べた「廃止措置・材料工学実験」「核燃料デブリ・バックエンド工学実験」「熱流動・シビアアクシデント工学実験」の他、「原子炉廃止措置工学」「原子炉廃止措置工学特論」「原子炉廃止措置インターンシップ」の科目を開講し、プログラム終了後も継続して廃止措置に係る人材育成が継続できる体制をとっている。また2017年に原子力規制庁「原子力規制人材育成事業」に採択され、核セキュリティ・保障措置を理解し、3S(原子力安全、核セキュリティ・保障措置)の俯瞰・主導できる人材の育成を目的とした「原子力安全・核セキュリティ・保障措置教育の体系化と実践」を

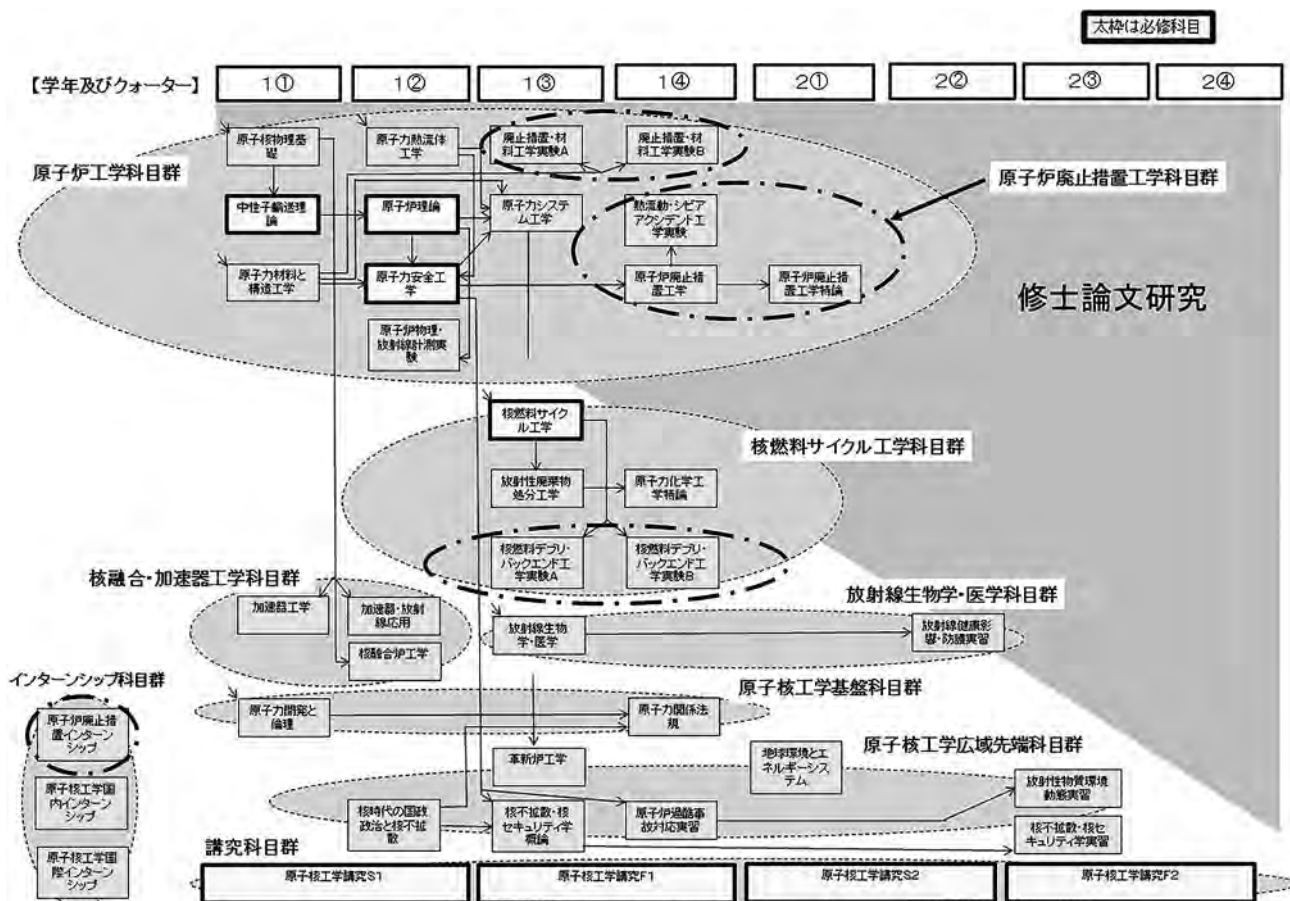


図2 原子核工学コースの科目体系(2018年度)
(出典)東京工業大学 2018年度学修案内

開始し、原子核工学コースにおいて3S関連科目を開講した。2018年度の原子核工学コース修士課程科目体系を図2に示す。なお教育改革により1年を4学期に分けるクォーター制となっている

博士課程においても、単に研究室で博士研究を実施するのみならず、博士課程学生向けに開講される専門科目、文系教養科目及び社会で実践的に活躍できる能力を身につけることを目的としたキャリア科目の履修が義務づけられており、また修了までに英語外部スコアが基準点(TOEIC換算で730点)を超えていることが義務付けられる等、国際的に通用するリーダーシップを身につけた人材を輩出することを意図したカリキュラムになっている。また、修士・博士ともIAEA等の国際機関での長期インターンシップやMITやUCバークレー等の海外の大学への留学を積極的に奨励し、2017年には文部科学省「大学の世界展開力強化事業(ロシア)」に採択され、ロシアの原子力分野でのトップ大学であるロシア国立原子力研究大学(MEPHI)への短期(2週間)・長期(3ヶ月)の学生派遣・留学も開始している。

2018年3月に原子核工学コースの1期生40名が修士課程を修了した。2018年4月現在の原子核工学コース在籍学生は、修士課程89名、博士課程48名であり、旧原子核工学専攻では、修士課程1学年30名程度であったのに比べると本学で原子核工学を学ぶ学生は大幅に増加している。

課題としては、実験科目開講のため先導原子力研究所の核燃料使用施設・放射線同位元素使用施設を利用して、これらの施設の維持が年々難しくなっているということがある。工学教育において、実験・実習は極めて重要という観点から今後ともこれらの施設を維持し教育カリキュラムの一層の充実を図りたいと考えている。

著者紹介



小原 徹 (おばら・とおる)

東京工業大学

2015年度原子核工学コース創設準備責任者、2016年度～2017年度原子核工学コース主任

(専門分野)原子炉物理学、革新炉工学

談話室

これからの原子力・放射線教育

元 近畿大学 鶴田 隆雄

個人的な昔話から始めることをお許し願いたい。中学は渋谷区立鉢山中学校だが、毎週土曜日の午後には1.5kmほど離れた松濤中学校の理科教室に通っていた。当時、区が松濤中をモデルスクールとしていて、そこに最新の理科教材を揃え、熱心な先生が他校の生徒をも招く実験授業を展開してくださっていたのである。

ある日、放電管を使った実験で、大きな感銘を受けた。放電管の中の光の帯は美しく、途中に置かれた羽根車を勢いよく回転させている。質量を持った粒子が一方方向に走っているのだ。電場で曲がる光の方向から、それはマイナスの電荷を持った粒子であるに違いない。後になって、レントゲンのエックス線の発見がこの種の実験の延長線上にあったことを知ることになる。

どの教科であれ、生徒にある感銘を与えることができれば成功である。それは、生徒に学ぶことの喜びと意味を体得させ、ある場合には生徒の生き方を決定づけることになる。中学時代には、理科だけでなく、国語、社会、音楽等の授業でしばしば感銘を受け、そうした教育の機会を与えられたことを今でも深く感謝している。

高校では、物理を学びながら、力学的、熱的、電氣的そして原子核が秘めているエネルギーまでもが互いに変換しうるものであり、同じ単位で捉えることができることに感銘を受け、結局、物理そして原子力の道に進むことになる。大学時代は、放射線を検出することによって原子や原子核の構造が少しずつに解明されていった20世紀前半の科学史に興味を持った。

東京工大の大学院原子核工学専攻には、そのころ保健物理の研究室があって、そこで放射線防護を学び、個人線量計の研究を始めることになった。京都大学原子炉実験所に採用されてからは、研究・教育に加えて、原子炉施設の建設や放射線管理の実務を担当した。

近畿大学に招かれてからしばらくして小中高の先生方を対象とする原子炉実験研修会を始めることになった。大学が保有する数少ない原子炉を、本来の目的である基礎研究と学生の教育に使うだけでなく、先生方の研修に役立て、次の時代を生きる生徒たちにより良い原子力・放射線教育をしていただこう。そうした考え方を先輩・同僚の教員と共有して始めた事業だった。

研修会に参加されたのは、皆教育熱心な先生方だったが、こと原子力・放射線については教室で教えることに

自信を持ってないでいるとのことだった。先生方の多くは理学部や教育学部の出身だが、大学で原子力・放射線の教育を受けた覚えはないとのこと。自信を持っていないままに授業をしても、生徒に感銘を与えられるはずがない。

研修は、原子炉施設の見学、保安教育、そして原子炉の物理、放射線の健康影響といった講義からなる準備教育から始まり、いよいよ実験開始ということになる。

近畿大学炉は極低出力であるから、使用中の燃料要素を、手袋をはめた手で取り扱うことができる。燃料要素の大部分を炉心から取り出しておき、それを徐々に炉心に戻しながら検出器からの信号の計数率の変化を追ひ、臨界量を推定する、すなわち臨界実験を最初に行う。

次に、自分たちで作り上げた原子炉を運転する。制御棒を操作しても直ぐに出力が変化するわけではない。そうしたことから遅発中性子の存在を知ることになる。

アルミニウムやヨウ素を炉心に挿入、生じた放射性同位元素が放出する放射線を測定、計数率の減衰状態から半減期の概念を体得する。施設内外の空間線量率を測定しながらそれぞれの線量限度との比較検討を行う。

研修会を終えた先生方が、原子力・放射線を教えることに少し自信が出来ましたと言ってくださるのは嬉しいことだったが、その際、近畿大学炉を見て原子炉のことがすべて分かったとは思わないでくださいとも申し上げた。聡明な先生は、研修会に参加していくつかのことが分かったとしても、それ以上に多くの疑問を持たれたことだろう。それが大事なことだと考える。

先生が、すべて分かったつもりで生徒に教えるよりも、まだ分からないことがあるといった気持ちで教える方が教育的効果は大きい。それは理科教育に限らない。研修を終えた先生方は、まだ多くの疑問を感じながらも、以前よりも自信を持って原子力・放射線を教えてくださり、その結果、生徒はより深い印象を受けるだろう、研修会のお世話をする我々はそのように期待していた。

研修に参加の先生方の中に、私は原発反対ですと言われる方もいた。それぞれの考え方の違いを越えて参加者の間で議論を深められたのは良かったと思う。

先生方との対話の中で、こうした研修に参加することは勿論、授業の準備をすることさえ難しいほど毎日忙しいとのこと。先生方が教育研究にあてる十分な時間を持てるような環境を整備しなければ良い教育は望めない。

福島事故で、原子力・放射線教育は大きな変革を迫られることになった。原子炉は重大事故を起こすものであって、この社会には受け入れがたいものだとの思いを多くの人々に抱かせてしまった。事故で放出される放射性物質は、平穏な暮らしに襲いかかり、その生活基盤を根こそぎ奪ってしまうことを人々が体験した。それは、これまで漠然と感じていた原子力・放射線に対する不安感とは全く別のものであった。

原子力・放射線を肯定する立場から、その教育をどのように再構築してゆくべきであろうか。事故についての深い反省と安全への決意が大前提。その上で原子力・放射線の開発・利用の原点に立ち戻るほかない。考え方に隔たりはあっても、いま、原子力・放射線に対する国民の関心は高い。その関心の高さを生かしてゆきたい。

原子力の原点は、質量をエネルギーに変換することによって人類が成功したことで、その結果、これまでとは全く別の原理で、しかも巨大なエネルギーを獲得することができるようになったことである。いつまでも化石燃料にばかり頼っている訳にはいかない。自然エネルギーの開発は大いに進める。しかし、それだけに頼る訳にもいかない。原子力は、人類がすでに直面し、これからさらに深刻化するであろう水、食糧、エネルギー等の諸問題を解決する有力な手段になる。原子力は、人類が今後生存し続けるためにこの時期に与えられた賜物であって、いま、我々はそれを生かし切れるか否かが試されている。

放射線利用の原点は、人体を透視してその内部を見ることができるようになったことで、そこを出発点として、医療、農業、工業、考古学へと大きく発展してきた。福島事故以来、ベクレルとシーベルトという単位を誰もが知るようになった。ある程度勉強をすれば、測定値からその物またはその場所が安全であることを知り、ある数値を超えた場合もそのリスクを見積もることができるようになったわけで、これは原子力・放射線教育の基盤レベルが以前よりも格段に向上したことを意味する。

この国民的な原子力・放射線についての関心の高さと知識の深さを、これからの家庭教育、学校教育、社会教育の中で生かしてゆくことができる。原子力・放射線に関係する仕事をしている方々は、ご家族に、知人に、地域の人々に、ご自分の仕事の意味と魅力を積極的に伝えるようにしていただきたい。機会があれば、出前授業で学生・生徒に直接語りかけていただきたい。

市民との対話で、また教室の授業で、基本的な情報を伝えた後、原子力・放射線の将来をどうすべきかは、市民に、学生・生徒たちに考えてもらい、討論してもらう。人々は、それぞれにある程度の知識と一定の考え方を持っているはずで、その知識に厚みを、考え方に深みを与えることができればそれでよい。そこで一つの結論を導く必要はない。小中高の授業においては、おそらく理科という領域に収まり切れないものがある。他の教

科とも連携してその成果をあげてほしいと考える。

原子力を推進しようとする場合も、現在のわが国には、福島のトリチウム汚染水、使用済み燃料の保管、蓄積したプルトニウム、放射性廃棄物の最終処分地などいくつもの解決すべき問題が残されていて、それらを解決しなければ原子力の将来を明るく見通すことはできない。問題は難しい、しかし難しい問題こそ、市民と、学生・生徒と一緒に考え、解決策を見つける努力をしたい。

市民の活動による反核運動は、核兵器禁止条約として結実した。核を持つことが危険であるばかりでなく、倫理的にも法的にも許されないことが世界の常識になりつつある。核廃絶に一層の努力を傾けよう。平和利用に徹して研究・開発を行う我が国の原子力のあり方を世界標準にするために、我々は何をするべきか、これも市民、学生・生徒に問いかけ、ともに考えてゆきたい。

原子力・放射線の施設は社会に開かれたものでなければならない。保安・警備はしっかりと行う。しかしながら、塀を高くしてその中で何が行われているのか分からないような存在になってはいけぬ。どのような産業も、国民の理解と受容あつてのものである。地域の人々にも理解され、応援される施設になるよう努力しよう。そのためには、市民に、学生・生徒に施設の内部を見せ、どのような目的で、何をしている施設かを丁寧に説明する必要がある。その機会をできるだけ多く作りたい。

見学者は、施設に建物や設備だけを見に来るのではない。施設で働く従業員の言葉遣いや態度を注視していることを忘れてはいけぬ。施設の中だけでなく、施設の外での従業員の言動が、人々の施設に対する信頼感、原子力・放射線への見方を左右する。施設は、その観点からの従業員教育にも意を用いなければならない。

約40年前のこと、全国の拠点大学にアイソトープセンターを作り、そのいくつかに教育・研究用原子炉を設置する地区センター構想というものがあった。筆者もある大学のセンター設置専門委員会の委員の委嘱を受け、その大学に何回となく足を運び、原子炉設置の意義と予定していた炉の安全性について理解を求めた。しかし、学内がまとまらず、結局原子炉の設置には至らなかった。

教育・研究に使える原子炉が茨城県と大阪府にしかない現状は寂しい。全国各地に研究・教育用の炉があつて、そこでは、原子力・放射線の研究が推進されるとともに、広く教育に使える環境が整うことを期待したい。

電力会社には、発電所の広大な敷地に低出力の教育用原子炉の設置を検討していただきたい。敷地内の教育用原子炉と併設される放射線施設は、自社や協力会社の社員教育にだけでなく、広く一般市民、教員、学生・生徒の教育に役立ち、原子力・放射線の健全な発展に寄与することになると信じる。原子力も教育も息の長い仕事で、百年先を見据えて取り組まなければならない。

(2018年9月9日記)

Science Communication

科学とコミュニケーションを考える

学生たちの提案

青山学院大学 岸田 一隆

原子力の科学コミュニケーションに存在する難点。それは、当事者の多くが、「結論はすでに決まっています、コミュニケーションによってそれを変えるつもりはない」という態度で臨んでいることだと、このコラムの初回で述べました。こうした態度を少しでも崩すため、共感・共有のコミュニケーションを通じて、人々が共同体を形成することが大事だということも、わかってきました。さて、こうした抽象論はともかく、具体的にどんなアイデアがあるのでしょうか。

私は、科学コミュニケーションについての大学の講義の期末試験に、以下のような論述問題を出題しました。「賛成派と反対派の双方がコミュニケーションを通じて自分の結論を変える気がない状況で、どのようなやり方が考えられるか述べよ」というものです。試験会場で初めて目にする課題ですし、時間が限られていますし、解かなければいけない他の問題もありますし、学生たちには様々な制約がのしかかっています。そんな中、学生たちはいろいろとアイデアを出してくれました。ここに、そのいくつかを紹介しましょう。なお、学生たちには掲載の承諾を得ています。

最初の学生は、米国で教育を受けた経験がある人物です。「日本では意見交流の場や機会が少ないというよりも、意見交流する姿勢・態度が足りていない」というのが彼の意見です。そして、教育の重要性を指摘しています。「日米の大きな違いは生徒と教師の意見交換の量」であり、「米国では先生が答を持っているという前提ではなく、生徒が自分なりに意見を持つことが大切にされている」とのことでした。そういった「風土や教室を作って、手探りで自分の意見の形成がなされる」ならば、自分の意見を変えるつもりがないという姿勢にはならないと主張しています。この学生の提案は時間がかかるやり方ですが、ことによると本質的な解決につながるかもしれません。

次の学生の指摘は、「議論が平行線になってしまうのは、同じテーマで向き合っていないからだ」というものでした。たとえば、原子力発電のことであれば、一方は「電力の安定供給」の話ばかりしていて、他方は「施設の安全性」の話ばかりをしている、ということです。これを防ぐには、「テーマ別議論」を通じて論点を整理し、その上で総合判断するのが有効である、と論じています。

一見、当たり前の主張のように聞こえるかもしれませんが、私たちが日常で出くわす議論や会議を思い起こすと、こうしたことがきちんとできているか、反省すべきではないかと痛感します。

次の学生は、世の中に氾濫する情報について述べています。「現代は情報に満ちており、調べようと思えば、誰でもいろんな情報にアクセスできる」と現状分析をした上で、「どちらの側も自分の意見に合った情報ばかりを無意識に選択してしまう」ことが問題だということです。「狭く偏った知識の中で考えるのではなく、横断的な知識に触れること、メディアでもそういった情報発信がなされること」が重要だ、と結論づけています。まさに、その通りです。しかし、実行するのが、なかなか難しいことであるのも事実です。

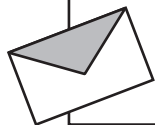
上記に指摘されているような、人が無意識に自分の意見に合った情報を選択する、そんな人間の性向を逆手に取ったアイデアもありました。「賛成派と反対派が逆になってディベートしてみる」というものです。つまり、自分とは反対意見の「根拠や証言をたくさんの資料や論文から引用したり、調査したりして相手を説得することを試みる」のです。強制的に違う立場に立たせてみて、初めて気づくことがあるはずだというのが、この学生の主張です。そして、このディベートを経て、自分の意見が変わらなかったとしても、「それを行う以前よりは、相手の意見を理解できるようになっているはず」だということです。鋭い意見です。

最後の学生は、「結論の戦いは一度棚上げして、理由の出し合いを行う」というものでした。結論を変えるつもりがない状態では、結論を戦わせる議論は不毛に終わります。そこで、理由や根拠を「結論から離れて列挙」し、それぞれについて精査すべきだというわけです。それによって、その「理由や根拠」を解決するために、「全く新しい代替案が出てくる可能性もある」という考えです。これは、なかなか科学的かつイノベティブなやり方です。

いかがでしたでしょうか。なかなかおもしろいものが集まったと言えるのではないのでしょうか。正直、私にとっては期待以上でした。若者たちは決して偏狭ではなく、広くて自由な未来を見つめています。

(2018年10月10日記)

理事会だより



専門知の価値について

東日本大震災以降、専門家への信頼が失墜したと言われることが多い。原子力に限った話ではなく、自然科学全般に向けられた批判かもしれない。原子力文化財団の調査によれば、2010年9月、原子力の専門家を信頼できると答えた方は34.2%、信頼できないと答えた方は8.9%であった。それが、2013年12月にはそれぞれ、12.1%と38.8%となった。それに呼応するように、卓越した専門知を有する方々が発言を控えるようになったと感じる。暗黙の自制であろうか、技術の失敗を眼の当たりにしての自信喪失かもしれない。

筆者は、1990年代に米国の研究者とともに地震リスク評価研究を行っていた。米国は地震リスク評価の先進国である。その当時、Zion 原子力発電所の地震リスク評価で、安全裕度を安全係数と不確かさを用いて表現する簡便かつ有用な方法が開発された。発電所の名前にちなんで Zion 法と呼ばれ、その後も世界中で広く利用されている。一方、その当時は、地震リスク評価を行うには経験とデータが不足していた。不確かさに満ちていた。地震安全性について考慮すべきあらゆる要因の安全係数と不確かさを定量化し、検証することは容易ではなく、むしろ不可能であったというべきかもしれない。しかし、地震リスク評価技術は進展し、活用されるようになった。多くのリスク知見を提供し、安全向上に多大な貢献をした。筆者はそのころ、米国の研究仲間に、「この安全係数の不確かさはどのような根拠でどうやって決めたのか、損傷モードをどのように選定したのか」といった質問を頻繁にした。彼ら、専門家は、「RPK が云った」と答える。米国の RPK 氏は、地震リスク評価の著名な専門家であった。うーん、これが答えになるのか、これほどに RPK 氏は信頼されているのか、驚きとともにややもやしたものを感じた次第である。

ジーン・ウェインガーデンというジャーナリストが、ワシントンポストに書いた記事で、2008年のピューリッツァー賞を受賞した。以下のような実験の記事である。天才バイオリニストのジョシュア・ベルは、2007年1月12日金曜日の朝のラッシュ時、300万ドル以上もするストラディバリウスを抱え、野球帽を被り、地下鉄ワシントンメトロのランファン駅にて、ストリートミュージシャンに扮した。ワシントンポストの編集者たちは、この演奏が通勤ラッシュ時の地下鉄の駅に大騒動をもたらすのではないかと心配した。ワシントン国立交響楽団の名指揮者、レナード・スラトキンは、「おそらく75%から100%の人が足を止めて耳を傾ける」と予想した。

曲目は前日に行ったコンサートと同じ有名な曲ばかり。43分間の演奏で、この横を1,097人が通過した。金を置いて行った客は28人、ちゃんと立ち止まって演奏

を聞いたのは7人、この人物がベルだと気付いたのはたった1人だった。そして、ベルが客から得た金は、ベルだと気付いた一人から得た20ドルを除けば、わずか32.17ドルだったらしい。たとえ近くで名演者が珠玉の演奏を行っても、注意深く観察していなければだれも気付かないということだろうか。私たちは目の前でできごとが大騒ぎになるまで知ることはできないのか。

さて、立ち止まって演奏に耳を傾けた7人はどのような人物だったのか。ひとは三週間前にベルのコンサートに行ったばかりの人、残りの6人は演奏家だった。演奏に聴き入った一人、ジョン・ピカレッチは、「素晴らしいバイオリニスト、あんな素晴らしい演奏は聞いたことがない。楽器も良かったし大きくて艶やかな音だった」と後に語った。さらに、実験で撮影されたビデオに当惑した様子で写っていたことを聞かれ、「そう、みんな気づいていないようだったから。何も聴こえていないみたいだ。それが私にはさっぱり理解できなくて」と語ったそうである。専門知のあるピカレッチにはベルだとわかっていた。彼は、なぜ他の人たちは気づかないのだろうと不思議に思いながらも、ただ聴き入っていただけであった。

もしもベルが野球帽をかぶっていなければ、人々は彼に気づいて地下鉄駅は大混乱になっていたのだろうか。それでも気づかれなかったかもしれない。ピカレッチが、「ジョシュア・ベルが演奏している」と叫べば、皆が立ち止まって耳を傾けたに違いない。音楽の専門家たちとともに名演奏を堪能していたことであろう。しかし、「ジョシュア・ベルだ」と、誰も叫ばなかった。

最近になって、地震リスク評価研究をしていた頃に感じたややもやが晴れるような気がしている。全体を俯瞰して、重要なところを嗅ぎ分け、程よい精度でうまく具合に定量化し、総合的に判断する、そのようなことのできる専門家が、不確かさの本質を掴んでいるのではない。私たちは、よく見えているところにはあらゆる手を尽くす、時には過剰なくらいに。見えないところについては、重要な問題ではないと主張する人々、不確かであることは大問題だと主張する人々。本質を見ようとせずに、局所ばかりを気にかけるといった事態に陥っていないだろうか。もやもやを吹き払って見通しよくしてくれるのは、専門知に裏付けられた専門家であると思う。専門知の価値を理解する専門家は、「ジョシュア・ベルが演奏している」と声を出して語るべきではないだろうか。

日本原子力学会は、専門知の価値をしっかりと発信していく必要がある。理事会の定める行動指針の中でも、1. 信頼醸成への貢献(国民・地域社会から信頼される技術情報源となるよう努める)は、ことのほか重要と考える次第である。(理事 山口 彰)