

### 巻頭言

#### 1 エネルギー基本計画と原子力の研究開発

上田隆之

### 解説

#### 14 粘土鉱物へのセシウム吸着機構解明(1) —原子・分子レベル構造解析から新しく何がみえるか?

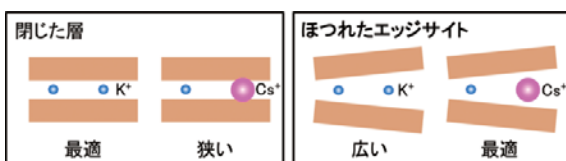
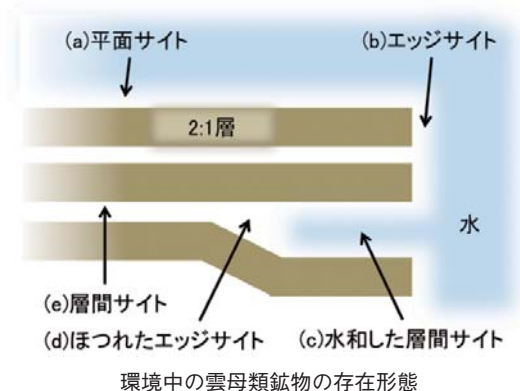
土壌中のセシウムの構造や化学結合状態を原子、分子レベルで調べたところ、セシウムと粘土鉱物との間にはアルカリ金属として特異な相互作用があることがわかった。この結果は土壌の減容化に活用できる可能性がある。

矢板 毅, 池田隆司, 松村大樹

#### 20 粘土鉱物へのセシウム吸着機構解明(2) —第一原理計算による原子・分子レベルの吸着挙動解析

セシウムの土壌吸着機構を調べるため、第一原理計算手法と呼ばれる高精度の計算科学手法を用いた結果、粘土鉱物結晶内の層間距離がセシウムの選択的吸着と関係する他、鉱物酸素との特異な結合が吸着後の不可逆性と関連していることが分かった。

奥村雅彦, 中村博樹, 町田昌彦



吸着機構

### 時論

#### 2 国際廃炉研究開発機構の活動と今後

福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術の研究開発が、最大の役割だ。

鈴木一弘

#### 4 バックフィットの国民的議論が必要

規制委が行っている安全審査は、新基準にもとづくバックフィットである。

諸葛宗男

#### 6 「原子力の神話」化と戦後日本のナショナリズム

カタカナ表記の「フクシマ」には、深刻な問題群が横たわっている。

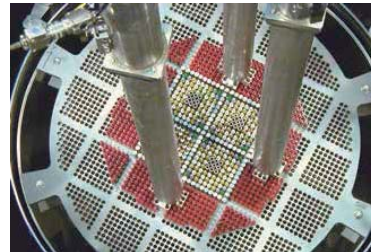
小菅信子

### 解説

#### 26 ABWR における MOX 燃料の全炉心利用技術—フル MOX の技術的バックグラウンドは何か?

大間原子力発電所は MOX 燃料を全炉心で利用できる世界で初めての“フル MOX — ABWR”だ。その特徴についてウラン燃料炉心と比較しつつ解説する。

小林哲朗



軽水臨界実験装置の全 MOX 燃料炉心 (旧原子力安全基盤機構パンフレットより)

#### 32 福井県の原子力研究教育の取り組み—福井県の原子力はどうか

原子力に対する信頼感や安心を回復するために、福井県内の原子力関連組織は何をすればよいのか。どう連携すればよいのか。人材教育と学生に「夢」を与えるためには何が必要か。

竹田敏一, 宇宅正美

#### 36 福島復興への「地域力」づくり

#### —コミュニケーション強化に向けて「相談員」システム化に期待する

事故後3年が経過し、放射線量の違い、除染の進捗などにより、地域の状況は多様化している。リスクと向き合う方々と、地域・社会はどう共に歩むのか。

崎田裕子

## 解説

### 40 わかりやすい放射線の解説 一般の方に誤解を与える放射線量の数値等 について

放射線の数値の解釈について、世の中では誤解される場合がある。原産新聞で掲載された4編のコラムをもとに、これについてわかりやすく説明する。

石田健二, 丸末安美

## 解説シリーズ

### 世界の原子力事情 (7) 最終回

### 45 福島事故後の世界の原子力開発の動向

日本の原子力発電所は全基が停止中だ。しかし世界に目を転じると、多くの国々が原子力開発を推進あるいは拡大する方向にある。

小林雅治

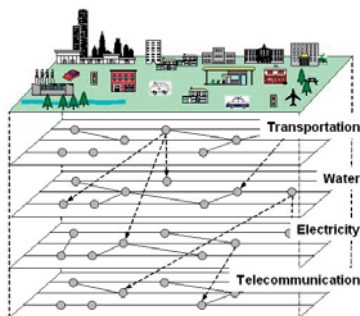
## 解説シリーズ

### レジリエンスエンジニアリングの動向 (3)

### 51 レジリエンス評価における技術社会的 問題

レジリエンスを技術社会的文脈において評価する際の問題について論じる。第1点は、社会インフラシステム、サービスシステム、生活システムの間に存在する相互依存性の問題であり、第2点は価値観の異なるさまざまなステークホルダー間の利害調整の問題である。

古田一雄



社会インフラの多階層ネットワークモデル

## 談話室

### 62 原子力英語よもやま話

英米人が普通に使っているが日本人には使い切れない表現や、間違っている表現のいくつかを紹介する。

工藤文夫

## 8 NEWS

- エネルギー基本計画を閣議決定
- 消費者庁、放射線影響で意識調査
- 廃棄物WG、地層処分の課題整理
- 核物質最小化で日米が共同声明
- 海外ニュース

## 解説シリーズ

### 核燃料サイクル—フロントエンド (4) 最終回

### 55 ウラン濃縮における技術開発と事業の 動向

濃縮技術はガス拡散法から遠心法への移行が終了し、ロシアを含む欧米ではその規模の拡大傾向が続いている。一方で国内で更新中の新型遠心機性能は、世界のトップクラスに位置する。

本多直人



青森県六ヶ所村の新型遠心機カスケード

- 25 新刊紹介「エネルギー問題の誤解  
いまそれをとく」 川久保陽子
- 64 会告 日本原子力学会 総会のご通知
- 65 会報 原子力関係会議案内、主催・共催行事案内、  
人事公募、年会費お支払いのお願い、英文論文誌  
(Vol.51, No.6) 目次、和文論文誌 (Vol.13, No.2) 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、学会ホームページの「目安箱」  
(<http://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/>

# エネルギー基本計画と原子力の研究開発

## 巻頭言



資源エネルギー庁長官

上田 隆之 (うへだ・たかゆき)

東京大学法学部卒。経済産業省大臣官房審議官（エネルギー・環境担当）、大臣官房長、製造産業局長、通商政策局長を経て昨年6月から現職。

東日本大震災から3年余りが経過しました。エネルギー政策の当局として過酷事故を防ぐことができなかったことを深く反省し、今なお多くの方々が避難生活を送っておられることを、重く受け止めなければなりません。

昨年1月、安倍総理より、前政権のエネルギー政策をゼロベースで見直し、責任あるエネルギー政策を構築するよう御指示がありました。総合資源エネルギー調査会において17回の議論を重ね、パブリックコメントを通じていただいた国民のご意見・与党での議論等を踏まえ、政府として第四次エネルギー基本計画を閣議決定しました。

基本計画決定後のエネルギー政策のあり方としては、引き続き、福島再生・復興が政府の最優先課題であり、政府としての責務を果たすべく、廃炉・汚染水対策、原子力賠償、除染・中間貯蔵施設事業、風評被害対策などに全力で取り組んでまいります。今回の基本計画のポイントとしては、まず、各エネルギー源については、電源として使用する際の特性を明確化しました。具体的には、①石炭火力・原子力・一般水力・地熱など、コストが安く出力が一定のベースロード電源、②LNGなどのミドル電源、③石油などコストが高いものの出力変動が容易なピーク電源を明確に区分しました。また、徹底した省エネルギー社会の実現と、再生可能エネルギーの導入加速に重点的に取り組むこととし、特に、再生可能エネルギーについて、①「再生可能エネルギー等関係閣僚会議を創設」すること、②「これまでのエネルギー基本計画を踏まえて示した水準を更に上回る水準の導入を目指す」こととしました。さらに、60年ぶりの抜本的な電力システムの改革を着実に進めるとともに、ガスシステム等の改革にも取り組むことで、市場の垣根を外していく供給構造改革を推進していくことを明確にしました。

今後、基本計画に記載されている方針に基づき、総合資源エネルギー調査会の下で省エネ、再エネ、原子力などの詳細な事項についてそれぞれ議論してまいります。

原子力については、低炭素の準国産エネルギー源として、優れた安定供給性と効率性を有しており、運転コストが低廉で変動も少なく、運転時には温室効果ガスの排出もないことから、安全性を大前提に、エネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源と位置付けています。その上で、不断の安全性向上追求と安定的な事業環境の確立、最終処分場の確保に向けた取組や核燃料サイクル政策の推進、国民・自治体・国際社会との信頼関係構築など、原子力政策の再構築に向けた方針が示されています。原子力の研究開発の方向性としては、国際協力をより強化していくことと、高度な技術・人材の維持・発展に取り組むことが必要です。東京電力福島第一原子力発電所事故で得られた教訓を生かし、各国と協力して世界共通の困難な課題に対応していくとともに、長期的視点を持って高いレベルの原子力技術・人材を維持・発展させ、今後多数見込まれる廃炉に関しても技術開発と技術・人材の確保を進めることが必要です。具体的には、軽水炉の安全性・信頼性の向上に資する技術開発、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の開発、高速炉や加速器を用いた核種変換など放射性廃棄物の減容化・有害度低減や、安定した放射性廃棄物の最終処分に必要となる技術開発を進めることとしています。

世界共通の課題解決に我が国が貢献していくには、優秀な人材と技術が不可欠です。日本原子力学会の皆様におかれましては、より一層の研究開発に係る高度な貢献を期待したいと考えております。

(平成26年4月11日記)



## 国際廃炉研究開発機構 (IRID) の活動と今後



鈴木 一弘 (すずき・かずひろ)

技術研究組合国際廃炉研究開発機構  
専務理事

1977年、早稲田大学大学院理工学研究科修了。東京電力(株)入社後、福島第一原子力発電所勤務。日本原燃出向を経て、東電執行役員原子燃料サイクル部長。東電退社後、原燃輸送(株)社長。2013年6月に原燃輸送(株)を退任し現職。

### 1. IRID を巡る状況

福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術の研究開発に全力で取り組み、将来の廃炉技術の基盤強化に資することを役割として、技術研究組合国際廃炉研究開発機構 (International Research Institute for Nuclear Decommissioning; 以降 IRID (アイリッド)) は、平成 25 年 8 月 1 日に設立認可を受け、8 月 8 日よりその活動を開始した。

IRID のおよそ 8 ヶ月間の活動を振り返ると、実施中の複数の研究開発プロジェクトの一元的なマネジメントに取り組むことに加え、業務を的確、効率的に実施するための基盤の整備と IRID の活動を皆様にご存知いただくことにも注力した。

この経験を踏まえるとともに、福島第一の現場ニーズと技術シーズの最適化を図りながら、事業計画の優先順位づけも考慮しつつ、今後の研究開発プロジェクトの品質向上に取り組んでいる。

一方で、外部要因として、原子力損害賠償支援機構に廃炉支援業務を付加することおよび東京電力内に福島第一廃炉推進カンパニーを設置するという廃炉体制の強化への取り組みが行われている中、IRID との業務分担の見直し、明確化についても今後検討していく必要があると認識している。

### 2. 研究開発プロジェクトの進捗状況

平成 25 年度の活動としては、IRID 活動の基本となる「中長期ロードマップ」に沿った着実な研究開発に加え、可及的速やかな緊急対応を要した福島第一原子力発電所の汚染水問題について、国からの依頼を受けて技術提案公募を行い、その解決策の立案に大きく貢献した。

さらに、昨年 11 月に 4 号機使用済燃料プールからの燃料取り出しがスタートしたことで「中長期ロードマップ」の第一期が終了し、「燃料デブリの取り出し開始までの期間」である第二期に入っており、IRID における研究開発が本格化する段階に入っている。

中長期ロードマップの「研究開発計画」に位置づけられている 3 つの分野、「燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発」、「固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発」および「使用済燃料プールから取り出した燃料等に係る研究開発」に関して、14 件の研究開発プロジェクト(①燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発が 10 件、②固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発が 2 件、③使用済燃料プールから取り出した燃料等に係る研究開発が 2 件)に取り組み、成果の一部は、実際に福島第一原子力発電所において活用されている。

### 3. 研究開発マネジメント

IRID の基本理念は、「将来の廃炉技術の基盤強化を視野に、当面の緊急課題である福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術の研究開発に全力を尽くす」ことである。

そのためには、複数の研究開発プロジェクトを効果的・効率的に推進すべく、一元的・統合的なマネジメントを行うことが重要である。

具体的には、以下の取組みを行っている。

- ・研究開発プロジェクトの内部・外部評価スキームを構築するとともに、技術委員会および同委員会内に専門部会を立ち上げた。
  - ・福島第一原子力発電所の現場の課題を抽出するチームと遠隔技術ソリューションを検討するチームを始動した。
- 今後は一層の向上を目指して、下記に取り組んでいる。
- ・研究開発プロジェクトの詳細な計画や進捗状況について、IRID 内部や異なる研究開発プロジェクト間での情報共有を行い、迅速な展開に活用すること。
  - ・研究開発プロジェクトに関する内部・外部評価において提起された意見や問題意識を次の展開に反映していくこと。
  - ・研究開発プロジェクトの計画策定プロセスを構築し、具体化するとともに、得られた成果のアーカイブ化を

具体的な仕組みとして構築し、次の展開に活用できるように整備すること。

#### 4. 国内外の叢智の結集

極めて難しい課題が多い福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究開発プロジェクトを効果的・効率的に進めるためには、国内外の多種多様な叢智を結集することが、IRIDの重要な役割である。

IRIDは、海外の専門家より、プロジェクト管理全般の方針や戦略に関する助言を受ける国際顧問と、福島第一原子力発電所の廃炉に向けて東京電力(株)が直面する課題全般や廃炉に係る研究開発の個別課題、および、IRIDが提起する個別課題について技術的提言を受ける国際エキスパートグループ(IEG)を設置し、そこから様々な助言や提言を受けている。それらに対する優先順位づけや実現方法の検討も、今後の重要な課題として検討を進めていく。

さらに、IAEA総会や国際会議(WM14: Waste Management Symposia 2014等)の場を利用し、IRIDの存在意義や設立目的を国際的に紹介するとともに、海外の主要機関や原子力企業の上層部との交流に積極的に取り組んだ。

日米、日仏、日英など二国間関係を維持・強化するため、継続的なコミュニケーションの実施に取り組んだ。

特に、汚染水対策の技術提案公募という具体的な取組みを通じ、国内外から情報提供等を受けるスキームを確立する過程で各国と円滑な情報共有や意見交換するチャネルを強化し、また、開かれたIRIDのアピールに努めた。現在は、「汚染水対策」に続き「燃料デブリ取り出し代替工法」に対する情報提供依頼(RFI: Request for Information)にも取り組んでおり、その役割はますます重要なものになっていくものと考えている。

引き続き、燃料デブリ取り出し代替工法のRFIに続く取り組みであるワークショップ、提案公募(RFP: Request for Proposal)、コンセプトual・スタディ(C/S)やフィージビリティ・スタディ(F/S)の計画的実施を開かれたIRIDの旗印として積極的にアピールしていくことにより国内外の関係機関との連携強化に努めるとともに、これらの取組みをタイムリーに紹介するためのウェブサイトの充実に取り組んでいる。

海外機関との関係では、IAEAレビューミッションに適切に対応し、先方からIRIDに対して大きな期待が示された。また、OECD/NEAを通じた国際共同研究プロジェクトについても、検討を開始した。

また、専門家による国際的な議論、学会との連携強化を図るため、日本原子力学会との連携、遠隔機器関連学会イベントへの参画などに積極的に取り組んだ。

#### 5. 開かれた組合活動への期待

IRIDの存在や活動の認知が高まるにつれて、IRIDの活動に関心を示す企業や研究所等が出てきており、複数の国内外の機関から打診がきている。このため、IRIDの活動への参加方法や加入条件の整備も緊急の課題であり、その整備を進めている。

#### 6. 将来の人材育成・確保を視野に入れた大学・研究機関との連携強化

30～40年程度は要すると見込まれている福島第一原子力発電所の廃炉の現場作業、および研究開発プロジェクトを進めるにあたっては、中長期的な視点で人材を確保し、育成していくことが重要であり、積極的に人材育成に取り組むこととしている。

人材育成に関する重点分野の設定および中核となる大学・研究機関の選定を目的とした文部科学省プロジェクトと連携し「東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究開発計画と基盤研究に関するワークショップ」を共催した。

全国各地で大学等の協力のもと、廃炉に向けた技術的課題についてのワークショップを合計9回実施し、人材育成に向けたネットワークの構築をスタートするとともに、関係者間において廃炉研究に係るニーズおよびシーズの情報共有が図られるよう取り組んだ。

IRIDが実施する研究開発プロジェクトの一環として、国内の大学・研究機関との共同研究・委託研究を積極的に進め、7つの研究開発プロジェクトにおいて合計23件の委託研究又は共同研究を行い、関連する研究者との連携強化に取り組んだ。

#### 7. おわりに

東日本大震災により過酷事故を起こした福島第一原子力発電所の廃炉の加速化と、これによる福島の早期復興は、全国民の心からの願いである。

しかし、福島第一原子力発電所の事故は類例のない大事故であるため、その廃炉に至る道筋は、乗り越えるべき極めて難しい技術的課題が山積する、長期にわたる世界にも例がない一大プロジェクトである。

IRIDが担っていく研究開発は、福島第一原子力発電所の廃炉の加速化に不可欠であるとともに、その成果を将来の原子力発電所の廃炉に広く活用していくことが期待されており、国民の大きな期待を背負うものである。我々は、強い責任感と自覚を持ちながら、研究開発に注力していく所存である。

引き続き、皆様のご指導とご協力をお願いしたい。

(2014年3月28日記)



## バックフィットの国民的議論が必要



諸葛 宗男 (もろくず・むねお)

東京大学公共政策大学院 非常勤講師  
1970年東大原子力工学科卒。同年(株)東芝入社。  
同社で約36年間燃料サイクルプロジェクトに従事。  
2002年同社原子力事業部技監。2006年東大公共政策大学院特任教授、原子力安全規制法制の研究に取り組む。2013年4月より現職。

### 1. はじめに

現在、8電力会社、17基の原子力発電所の安全審査が行われている。政府は原子力規制委員会(以下「NRA」)が安全だと認めた原子力発電所は再稼働させると言明している。この2つのことから、多くの国民はNRAが今、審査しているのは再稼働の審査だと思っているが、実際に行われているのは再稼働の審査ではない。原子力発電所が新しい規制基準に適合しているかどうかを審査しているのである。NRAもホームページで「適合性審査」と表記し、「新規制基準適合性に係る審査」と明記している。では「適合性検査」とは一体何なのか、ほとんどの国民はよく分かっていない。それもそのはずで、これは本邦初の手続きなのである。「適合性検査」とは、実はマスメディア等で「バックフィット」と言われていたものであり、今回の法改正で初めて導入されたものである。

本稿では「適合性検査」と呼ばれる「バックフィット」のルールや進め方がどうなっているのかを示し、今行われているやり方に問題はないのかについて論ずる。

### 2. 適合性審査とは何か

#### ○事故前はバックチェックだった

最初に、読者に馴染みのない「適合性審査」とは何かについて述べる。この審査は事故前には法的に存在しなかったものである。国の技術基準が改正された場合、原子力施設に限らず一般的に、法の不遡及の原則に拠って過去に許可・認可されている施設に新しい基準が遡及して適用されることはない。しかし、原子力施設の場合は安全性を重視する立場から、最新の技術知見を反映させるため、国が行政指導により事業者に対して新しい基準を自主的に適用することを求めていた。いわゆる「バックチェック」である。事業者に新しい基準に基づいた安全性チェックを依頼することにより、実質的に新しい基準が適用されていたのである。国は事業者からのバックチェック報告を受け、「バックチェック審議」と称してその報告を審査し、事業者はその審査をパスするまで修正を重ねていた。ただし、バックチェックはあくまでも自主的な対応であるため、施設の操業の条件とされること

はなく、操業しながら対応することが可能であった。

#### ○事故後にバックフィットが導入された

福島第一事故を受け、平成24年6月の法改正で核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(以下「原子炉等規制法」)に新しく「バックフィット」ルールが盛り込まれた。具体的には「発電用原子炉設置者は、発電用原子炉施設をNRA規則で定める技術上の基準に適合するように維持しなければならない。」との条文(第43条の3の14)である。これにより、基準が改訂された場合、発電用原子炉に遡及して適用されることとなった。さらに「技術上の基準に適合していないと認められる場合、原子力規制委員長は発電用原子炉施設の使用の停止、改造、修理又は移転、発電用原子炉の運転の方法の指定その他保安のために必要な措置を命ずることができる。」との条文(第43条の3の23)も定められたため、新しい基準に適合していない場合、原子力規制委員長は場合によっては施設の停止を命令できることとなった。この2つの条文がセットで「バックフィット」が成り立っている。

#### ○他分野での導入例はあるのか

我が国には既述の通り「不遡及、一事不再理の原則」(憲法39条)が存在し、国の許認可は技術基準が改訂されても遡って適用されないこととされている。建築基準法の例が分かりやすい。耐震基準が強化されたから貴方の住んでいる家は今日から違法建築になります、出て行ってください、と言われたら混乱する。だから不遡及の原則が存在する。しかし、個人の権利よりも公共の利益を優先すべき場合は例外的に遡及適用が行われる。

その一つは公共の福祉を優先した例外である。戦後の農地改革立法と平成3年の証券取引法の改正がその例である。もう一つの例外は国民の利益を増進する場合である。消防法に煙探知器の設置を義務づけた例と大阪千日デパートビルなどのビル火災の教訓に基づき、既存の百貨店等に対して防災上必要な防火避難施設の設置を義務づけた例がそれに相当する。いずれの場合も適用範囲について国会で議論が行われ、適用範囲を最小限に止めるよう慎重な配慮がされている。具体的には防火避難施設の設置に関しては衆議院建築委員会が数次にわたって審

議が行われ、(1)防災改修に要する費用とそれに対する助成の問題、(2)代替措置の問題、(3)遡及適用の対象となる規定の問題、(4)技術的問題点などが審議されている。

○原子炉等規制法の改正でその配慮はされたか

今回の法改正では NRA の独立性の強化問題に議論が集中し、残念ながらバックフィットの範囲や条件について国会ではほとんど議論されていない。「福島第一事故の教訓に基づき、既存の原子力発電所に対して事故防止に必要な対策を義務付ける」ことが最大の目的だったことから、上述した「防災上必要な防火避難施設の設置を義務づけた例」に類似していると言えるが、防火避難施設の場合は国会で詳細な適用範囲が検討され、大阪千日デパートビルなどのビル火災の教訓に基づくものだけに限定適用されたのに対して、今回の原子炉等規制法の改正では国会では適用範囲をどのようにするのかについての議論がなく、財産権の保障に対する配慮はされなかった。

○海外での導入例はあるのか

海外の原子力法制でバックフィットを導入している例は米国とドイツにある。米国の場合は適用する範囲をコストベネフィット評価によってメリットがある場合に限定することとされている。ドイツの場合はバックフィットに要する費用は国が負担することとされているのが特徴である。

### 3. 何を審査しているのか

一言で「適合性審査」と言っても実際に行われている審査は広範にわたる。①設置許可変更申請、②工事認可申請及びそれに伴う使用前検査、③保安規定変更申請である。すなわち、原子力発電所の新設時の法手続きと同等の手続きである。通常、新設時にはこれらの審査、検査には数年を要するが、今回の適合性検査では通常、①→②→③と段階を追って直列式に行われるところを、①、②、③のそれぞれを同時並行的に審査することにより、6ヶ月で終えることとしていた。実際には本稿執筆時点では、先行している川内1.2号機が8ヶ月を経過してようやく申請書の修正と審査書案の作成に着手する段階に入っただけで、目標を大幅に超過している。審査物量が多い上に、大半の項目は FOAK (First-Of-A-Kind) と言って初物ばかりであるから、申請する側も審査する側も試行錯誤的にならざるを得ず、審査期間が長引いているものと思われる。

### 4. 再稼働とバックフィットの関係

事故前のバックチェックと事故後のバックフィットの違いは、前者が自主的適合だったのに対し、後者は法的裏付けのある適合という点である。では、事故前のバックチェックと同じように、バックフィットも運転しながら実施できないか、という疑問が生ずる。唯一の問題は不適合状態にある場合、停止を命令できる、とした第43

条の3の23の規定を発動するかどうかの問題だけである。その問題に直面したのが、大飯3、4号機のケースである。平成24年8月に再稼働が認められ、定期点検のため停止する昨年9月まで運転していたが、新規制基準が施行された昨年7月以降は「基準不適合」状態に陥ったためである。この時、NRA は次のことを決定した。(1)事故後最初の再稼働は旧基準のまま認める、(2)2回目の再起動までに基準への適合を求めるという内容である。これにより、大飯3.4号機は停止を免れることとなった。

では他の原発はなぜ同じように「事故後最初の再稼働は旧基準のまま認める」が適用されないのかという疑問が生ずる。その答えは「原子力規制委員長見解」にある。「今後は新基準に適合していないと再稼働を認めない」との見解である。この見解により、大飯3.4号機の前例は他原発に適用されないこととなった。その差は何なのかについて原子力規制委員会からは何も明確な説明がされていない。最も不透明な部分である。

## 5. バックフィットの問題点

○バックフィット範囲の明確化

福島第一事故による社会的・経済的影響の甚大さを考えれば、不遡及の原則の例外として既設の原発に新規制基準をバックフィットし、厳重な事故防止対策を求めることは妥当な判断だったと言えるが、問題は追加された法律の条文にバックフィットの適用範囲や条件が一切書かれていないことである。米国のようにコストベネフィット評価により実施の可否を判断することや、ドイツのように費用を国が負担する配慮もされていない。憲法に定める権利に反して定める法律であるから、木目細かな配慮が払われるべきだったのではないだろうか。

○裁量範囲を最小化すべき

現在の条文では第43条の3の14では「技術基準への適合義務」を定めているが、第43条の3の23では不適合状態にある場合の措置を全面的に原子力規制委員長の判断に委ねている。停止命令を発することも可能だが、黙認することも可能である。実際には技術基準の改正の都度、既設施設へのバックフィットの可否を事業者に通知することになると考えられるが、その判断基準が法律に示されず、行政の裁量に委ねられていることは問題である。

## 6. バックフィットの国民的議論を

バックフィットルールは憲法に定められた権利を制限するほど重大なものであるにも関わらず、国会でもほとんど議論もされずに導入が決められた。遡及適用に伴う不利益やコスト(年間数兆円に上る代替燃料費用等)はいずれ国民が負担させられるものであることを勸告すれば、適用範囲や費用負担などに関する国民的議論を行って、バックフィットに関する透明性の高い運用ルールを作ることが強く望まれる。(2014年3月23日記)



## 「原子力の神話」化と戦後日本の ナショナリズム



小菅信子 (こすげ・のぶこ)

山梨学院大学法学部教授

主著等に『戦後和解』（中公新書・石橋湛山賞）『ポピーと桜』（岩波書店）『東京裁判とその後』（中公文庫）『戦争の記憶と捕虜問題』（東京大学出版会）『戦争と和解の日英関係史』（法政大学出版局）ほか。新刊に『放射能とナショナリズム』（彩流社、2014年）。

「ひめゆりの塔を売り物にして生きる人らは戦争知らぬ世代か」(平成4年作)

東京電力の福島第一原子力発電所が位置する町に暮らしていた歌人が詠んだ一首だ。歌人の名は佐藤祐禎氏。現在、いわき市で生活しておられるという。佐藤氏は、昭和4年に福島県双葉郡大熊町に生まれた。佐藤氏の『歌集 青白き光』（いりの舎）のなかで、私にとって最も衝撃的だった一首だ。

戦後・戦後後世代が「売り物にして」きたのは、ひめゆりの塔だけではない。「唯一の被爆国の国民」なる言説も同じだ。戦後日本で圧倒的に消費されてきた言説であり、戦後日本における平和志向のナショナル・アイデンティティの一つだ。

戦後日本において、平和教育とは反戦平和教育とほぼ等しかった。私はそれを批判しようとしているわけではない。そうではなく、平和は反戦平和主義だけでは達成できないと付け加えたい。暴力をなくさなければ平和を達成することはできないし、人間性の保護なくして人権思想を理解することはできない。そうした平和教育の伸びが顕在化したのが、東日本大震災の発生に始まる複合大災害ではなかったか。

原発政策は徹底的に議論と論争の対象にすればよい。他方、だからといって直接的・間接的・構造的暴力は許容されない。人間性が保護されない地平に人権は実現されえない。名誉毀損、侮辱、誹謗中傷、差別発言、暴言、「御用学者狩り」は看過すべきでない。プロメテウスは神話の登場人物であるから、現代において「畏」をしかけることはできないだろう。奇妙な万能感にひたりながら巻き散らかされる「滅亡」や「安心」は、しばしば詐欺、独善、反社会的行為へとつながりやすい。

人間性の尊厳が危機にさらされているときは、たとえば赤十字条約に示されるような人道の諸原則による戦後・災害後の救護、支援、援助、平和構築が不可欠である。同時に、人道支援は、しばしば搾取や抑圧を意図せず被支援地にもたらしやすいものであることも心に刻む

べきである。援助活動を実践し、内省し、人道の諸原則や活動の理念と実際の実践の乖離を克服する努力を怠らず、さらによりよい実践のありかたを探求すべきだ。

私が、この3年間、「フクシマ」というカタカナ表記について懐疑的であったのは、「福島」と「フクシマ」の間に横たわる溝を憂慮したからだった。

熱狂的な反原発運動、広域がれき処理反対、風評被害の蔓延、学者による差別発言や暴言——初めて「レベル・セブン」の原発事故を経験してきた日本社会、とくに東京のジャーナリズムが示す反応を観察すると、カタカナ表記の「フクシマ」にこそ、深刻な問題群が横たわっているのが容易にみとれる。それらは多かれ少なかれ、神話的権威に依存し、ある種の再教育への欲望の臭いを漂わせている。TEPCO 1F 事故は自然災害であり人災である。にもかかわらず、「戦争」に見立てる論調も多かった。極限状況において人間性の尊厳が危機にさらされるという意味では、紛争地と被災地には共通点が多くある。だが、原子力発電そのものを「敵視」する言説が、もっぱら TEPCO 1F の最たる「受益地」から発信されたことは重要である。

TEPCO 1F 原子力災害による被害や犠牲を神聖化する、犠牲崇拝主義が蔓延している。まだ死んでもいない子どものために葬列を組む反原発デモ、得体の知れない情報——何百人が福島で被曝死したが政府や自治体が隠ぺいしている、放射能汚染の影響で奇形動物が見つかった、深刻な障害をもった赤ん坊が生まれた、福島に行くとき鼻血が止まらない——過剰にセンセーショナルでエキセントリックな情報が、この3年間、とくにインターネット上のデジタルサイト、ブログ、ツイッター、Facebook を中心に溢れかえってきた。なぜ、これほど容易に理性をかなぐり捨てる人びとが少なからず目立つのか。

私はこの問題を、戦後日本のナショナリズムとナショナル・アイデンティティとしての「唯一の被爆国」なる言説に注目しつつ考察を重ねてきた。

「唯一の被爆国」の国民であることをナショナル・アイ



デンティティの一つとしてきた戦後日本のナショナリズム、あるいはそれに自己撞着あるいは対立するナショナル・アイデンティティを求めてきた社会とその構成員。二項対立的に近現代史を論じてきた言論人と論壇。TEPCO 1F事故で破綻したのは、そうした一部の言論人や学者・論壇、ジャーナリズム、報道と人権そして報道倫理ではないのか。それこそが、いまのところ、今次の原発事故がもたらした最悪の社会的損失ではないか。

知的無効な二項対立的図式に自らを押しこめ、あいかかわらず「原子力の神話」と個人攻撃に熱心なジャーナリズム、テレビメディア、ネットメディアの象徴が、迷走する日本のナショナリズムを端的に示す「フクシマ」という表記である。そして、その間を右往左往している学者や知識人たちだ。福島在住者が使い始めたわけではないこのカタカナ表記の「フクシマ」は、そもそもは東京の活字メディアと福島県外に住む知識人や文化人が合作で創出した他者表象の記号である。マッチポンプであり迎合である。福島はTEPCO 1F事故のあとまもなく、「フクシマ」として、東京のマスメディアによって勝手に売り出され、搾取や抑圧の対象となったのである。「フクシマ」という表記は、身もふたもない言い方をすれば、少なくとも、そのように名づけ直した日本の言論機関や言論人による、独りよがりの国際的表記にすぎない。なぜなら、「フクシマ」という名づけ自体、日本語の文脈でなければ理解できないからだ。

いわゆる放射能汚染の問題と差別の問題を分けて考えるべきではないという学者たちもいる。後者の根底には、政府や東電への圧倒的な不信があるのだからと。たとえば被災がれきの広域処理協力への拒否運動はむろんのこと、群馬大学教授の早川由紀夫氏による「殺す前に殺す」のような一連の暴言や差別発言さえも容認ないしは看過する風潮があった。それはとくにインターネットに顕著であり、同時に、全国紙ジャーナリズムがインターネットに市場を広げようと本格的な取組を展開するようになった時期と重なる。

放射線量がゼロであることを自ら確認できなければ安心できないとする、とりわけ乳幼児や子供たちを育てる母親や保護者の強い不安は、二人の子供の子育てを経験した私にも容易に理解できる。しかし、原子力や放射線をめぐる科学的知見を十分に持たぬマスメディアの報道が風評被害を増幅させ、日本社会の不信の連鎖を強化している側面があることもはや見逃せない。

マスメディアが科学的根拠に乏しい報道を行い、非専門家であっても不安を煽る声の大きなコメンテータを登場させ、あるいは毒にも薬にもならぬような気慰めエッセイを掲載することで、人々の恐怖や不安に迎合し、反原発熱を煽り、もう一方では差別発言や暴言を容認している。さらに、「安心」や「癒し」という同調圧力をかけようとしているきらいもある。細菌で放射能が除去

できるといったようなニセ科学が幅を効かせている。

いま、改めて問い直していただきたい。満州事変期の、軍部が主導しているのか新聞が自発的に煽っているのか分からない軍国熱・排外熱の時代と、現在の反原発熱には類似する部分があるのではないか。さらに時代を遡るべきなのかもしれない。自由民権派が他方で非常に民主的な私擬憲法を提案しつつ、排外主義の軛や排外熱を煽らせた時代まで遡ったほうが、現下の反原発熱を理解しやすいかもしれない。あるいは、自ら「文明国」となって「植民地」を獲得し統治し、そこに暮らす人びとを文明化し善導することを理想に掲げていた明治時代の日本における知的指導層の集合心性に似ているというべきか。TEPCO 1F事故以降の反原発をめぐる言説には、多かれ少なかれ、彼(女)ら名づけたところの「原子カムラ」のそれとは異なる疑似コロニアリズム、すなわち福島をはじめとする日本国内の原発立地の人びとに、帰属か否かを強いるかの如き抑圧や排除、教えたがり、被害者蔑視、そしてそれに呼応する犠牲の神聖化への野心をみてとることができるのではないか。

私がTEPCO 1F事故の発生以来、「福島」を「フクシマ」とカタカナ表記が目立ち始めたことに懸念を感じたのは、雑駁にまとめると、上のような文脈のなかでのことだった。誰が、どんな媒体で、福島をフクシマと最初に表記し、そしてどのように拡散したのだろうか。新聞・雑誌を検索すればおおよその拡散源はわかる。ただし、誰がどの媒体で使い始めたのかを追及するよりも、原発事故の被害を直接かつ最も深刻に受けた福島の人々や同地の地方紙が、率先して福島をフクシマと表記しはじめたのではないことを確認しておくべきである。

核の脅威は本来的に越境性のあるものだ。人類史上初めて核兵器による攻撃を受け、廃墟と化した広島市や長崎市を、文脈によってヒロシマ、ナガサキとカタカナ表記にすることは、すでに定着している。被爆者をヒバクシャと表記することもあるのは、大気圏内核実験がさかんに行われていた時代に、死の灰による放射能汚染に苦しめられた中部・南太平洋地域などの住民たちの母語に、あるいはこの問題に関心を抱いた海外諸国の言語に、被爆者をあらわす適切な言葉がなかったためらしい。(ちなみに、アメリカで核実験に伴う軍事演習で被爆した兵士たちは、アトミック・ソルジャーと呼ばれた。)したがって、国際的な注目を浴びている今次の原発事故を契機に、国際連帯を期する反原発運動や即時廃炉運動の集合的意志は理解できる。問題は、「フクシマ」なるカタカナ表記に、今次の原発事故による被害の越境性、問題の国際的共有や反原発運動を促進するための国際連帯への期待をみてとれると同時に、現段階で、多かれ少なかれ、最も苦痛を強いられている被害者への排他性や攻撃性、原子力の神話化を観察しうることである。

(2014年3月7日記)



このコーナーは各機関および会員からの情報をもとに編集しています。お近くの編集委員（目次欄掲載）または編集委員会 [hensyu@aesj.or.jp](mailto:hensyu@aesj.or.jp) まで情報をお寄せ下さい。

## エネルギー基本計画を閣議決定

政府は4月11日に新しいエネルギー基本計画を閣議決定した。この計画は、我が国のエネルギー政策の基本的な方向性を示すもので、2003年に最初の計画が策定された。今回は第4次計画で、東日本大震災以降では初めての改訂となる。

今回の基本計画では原子力発電について、「政府及び原子力事業者は、いわゆる安全神話に陥り、十分な過酷事故への対応ができず、このような悲惨な事態を防ぐことができなかつたことへの深い反省を一時たりとも放棄してはならない」とした上で、「原発依存度を可能な限り低減する」と記述。一方で、安定供給性と効率、運転コスト、温室効果ガスの排出抑制に優れることから、「原子力はエネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源である」とも記載した。

また、原子力発電所の再稼働については、「原子力規

制委員会により世界で最も厳しい水準の規制基準に適合すると認められた場合には、その判断を尊重し原子力発電所の再稼働を進める。その際、国も前面に立ち、立地自治体等関係者の理解と協力を得るよう、取り組む」と明記。再生可能エネルギーについては「これまでのエネルギー基本計画を踏まえて示した水準を更に上回る水準の導入を目指す」とし、脚注で、「2020年の割合は13.5%、2030年は約2割」と明示する表現にとどめ、具体的な数値は掲げなかった。

「もんじゅ」については、「廃棄物の減容・有害度の低減や核不拡散関連技術等の向上のための国際的な研究拠点」と位置付け、前回の計画にあった高速増殖炉の「2025年頃までの実証炉の実現、2050年より前の商業炉の導入」との記述はなくなった。

（原子力学会編集委員会）

## 消費者庁、放射線影響で意識調査

消費者庁は3月11日、食品中の放射性物質に関する意識調査結果を発表した。福島原子力事故に伴う被災県産の農水産物への消費者の買い控え行動に対応し、今後のリスクコミュニケーション活動や、風評被害対策に資するため実施したもの。調査は13年2月、同年8月に続く3回目。

今回の調査では、被災県および被災県産農林水産物の主要な出荷先として、岩手、宮城、福島、茨城、埼玉、千葉、東京、神奈川、愛知、大阪、兵庫の11都府県を選定。その地域に住む20～60代の男女を対象にインターネット調査を実施し、5,176人から有効回答を得た。

その結果、食品の産地について「気にする」、「どちらかといえば気にする」と回答した人は65.7%で、前回と前々回の68.2%から微減傾向となった。そのうち「放射性物質の含まれていない食品を買いいたい」と回答した人

は全体に対し21.0%で、前々回の27.9%、前回の24.2%と比較し減少傾向が続いている。さらに、「放射性物質の含まれていない食品を買いいたい」と回答した人のうち、購入をためらう産地を「福島県」と回答した人は全体に対し15.3%、「被災3県（岩手県、宮城県、福島県）」と回答した人は11.5%で、いずれも時間の経過とともに減少傾向にあることがわかった。

また、放射線に関する認知度では、「単位としてベクレル、シーベルトについて知っている」が48.1%、「放射線にはアルファ線、ベータ線、ガンマ線といった種類があることを知っている」が42.8%、「自然放射線を受けていることを知っている」が41.3%となった。上位3項目の順位は調査回次で変わっておらず、全体として基礎的な知識については、横ばいまたは微減傾向だった。

（資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ）

## 廃棄物WG、地層処分の課題整理

経済産業省の総合資源エネルギー調査会放射性廃棄物ワーキンググループ（委員長＝増田寛也・野村総合研究所顧問）は3月14日、地層処分に向けたこれまでの取

組みの現状と課題を整理し、今後の処分地選定推進体制の改善を求める中間取りまとめを概ね了承した。処分制度の創設から10年以上を経て、最終処分地の選定に目

処が立っていない状況や大震災の経験を踏まえ、13年5月から、政策の枠組み見直しの議論を行ってきたものの。

取りまとめでは処分地選定のプロセスについて、これまでの広く全国を対象とした調査地域の公募では、「なぜここか」の説明が困難で、受入れを表明する自治体の説明責任や負担が重くなっていると状況を分析。その上で、国が科学的に適性が高いと考えられる地域を示すことなどを通じ、立地への理解を求めるとしている。

## 核物質最小化で日米が共同声明

磯崎総理補佐官とモニーツ米エネルギー省長官は3月24日、第3回核セキュリティサミット開幕に先立ち、世界的な核物質最小化への貢献に関する日米首脳による共同声明を発表した。

声明では、日本と米国が共通の目標である核テロの阻止に向け、二国間の核セキュリティ作業グループや地球規模脅威削減イニシアティブ(GTRI)などの活動を通じて、核セキュリティを強化し更なる協力を進めることについて再確認した。

また、日本原子力研究開発機構(JAEA)の高速炉臨界実験装置(FCA)から、高濃縮ウラン(HEU)及び分離プルトニウムを全量撤去し処分することを同日表明したことにも触れた。これらの核物質は米国に安全に輸送された後、セキュリティの強固な施設でより機微でない形に完全に転換するとしており、プルトニウムは最終処分に向けて処理、HEUは低濃縮ウラン(LEU)に希釈して民

また、処分事業の信頼性を確保する上で、「行司役」となる第三者評価を実施する仕組みを整備する必要から、原子力委員会にその役割を担ってもらうことを提案している。

取りまとめは最後に、「超長期にわたる最終処分事業に対して、たとえ小さな一歩でも、それを踏み切る勇気と覚悟を持つこと」を訴え、処分事業の前進に寄与することを期待し締めくくっている。

生目的に利用する。

一方、3月24日と25日、オランダのハーグで行われた第3回核セキュリティ・サミットに出席した安倍首相は、全体会合のステートメントで、日本の核セキュリティ向上への姿勢として(1)核物質の最小化と適正管理についての日本の取組みとコミットメント、(2)核物質防護条約の改正等の日本国内の取組み強化、(3)輸送セキュリティに関するフランス、韓国、英国、米国との5か国共同声明の発表等からなる国際貢献の強化——の3つの柱を表明した。

核テロ発生時の初動対応など各国首脳が議論する政策シミュレーションの場で、安倍首相は、福島第一原発事故を経験した立場から、国民に対して正確な情報を提供することと国民の健康被害を防止するためにできる限りの措置をとることの重要性を指摘した。

## 海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

### 【米国】

## WH社がスロベニア原発にフィルターベント

東芝傘下のウェスチングハウス(WH)社はこのほど、スロベニア唯一の原子力発電施設であるクルスコ原発(PWR, 72.7万kW)の格納容器に完全に受動的なフィルター付きベントシステム(PCFVS)を設置したと発表した。福島第一原発事故後、同国の原子力安全当局(SNSA)が設置を要求していたもの。欧州で初めて同システムを設置したクルスコ原発は、勧告事項や安全確保に対する原子力産業界の取組み姿勢を明確に示したとしている。

WH社の説明によると、PCFVSは格納容器内側の工

アロゾルフィルター5種類と補助建屋内側のイオンフィルターや破裂板やバルブといった様々な補助設備で構成されている。72時間以上フルに受動的な稼働を保証しており、福島第一原発事故に類する事象発生時に放射性物質の放出量を大幅に抑えるなど、周辺コミュニティへの影響を軽減することができる。

設計と設置には15か月を要したが、クルスコ原発は今後、従来のベント設計に付随する大型の水タンクの代わりに、コンパクトなモジュール型の乾式メタル、ファイバーフィルターでエアロゾルを捕集することが可能。格納建屋内など、設置場所を問わない柔軟性があると強調している。

PCFVSはまた、化学制御や加熱、排水といった補助システムが不要であるなど、唯一メンテナンスフリーなシステムだとWH社は指摘。運転時や待機モードの間

も外部電源その他の電源を必要としない受動性があるとしている。

## MOX 工場建設は凍結、米エネ省の予算要求

米エネルギー省(DOE)が3月4日に公表した2015会計年度(今年10月～15年9月)の予算要求額について、米原子力エネルギー協会(NEI)は小型モジュール炉(SMR)開発に対するDOEの盤石な支援姿勢を賞賛する一方、6割方完成したMOX燃料製造工場(MFFF)については「建設作業を凍結状態に置く」ための予算しか要求していないとして落胆の意を表明した。MFFFはDOEの国家核安全保障局(NNSA)が兵器級余剰プルトニウム処分戦略の一環として、2007年からサウスカロライナ州サバンナリバーで建設していたもの。年間3.5トンのプルトニウムを民生用原発のMOX燃料に転換し、安全かつ効果的に処分することが目的で、昨年4月には同工事を請け負ったショーアレバMOXサービス社が、外部構造となる屋根部分に最終層用のコンクリート注入を完了したところだった。

しかし、建設前の04年当時に18億ドルと試算されていた総工費は07年の見積もりで48億ドルに上昇。米国会計監査院(GAO)は昨年2月、MFFFの建設コストが近年さらに20億ドル増加したとして、財政的危険性の高い政策プログラムの一つに挙げた。同年6月の2014会計年度予算要求では、管理ミスを問われた同計画の予算は1億8,300万ドル分の削減となったほか、完成までに77億ドルかかるとの見通しもあった。15年度予算では、NNSAの核不拡散活動予算16億ドルの中からMFFF計画を凍結保持するための経費が賄われるが、請負業者の間では、建設休止は計画の終了に等しいとの見方が広がっている。

NEIは、あらゆる技術的側面からMOXプログラムを安全かつ成功裏に行えることは保証されていると強調。今回の政府方針と予算により、安全保障上重要な使命が果たされなくなるほか、プルトニウムが核兵器に転用可能な状態で放置されるとし、MFFFをぜひとも完成させるべきだと政府に訴えている。

## 濃縮大手 USEC が破産申請、日独の原発停止が影響

米オハイオ州パイクトンで「米国遠心分離濃縮プラント(ACP)」を建設中の米国濃縮会社(USEC)は3月5日、昨年12月に公表していた方針どおり、連邦破産法11条の適用をデラウェア地区の連邦破産裁判所に申請し

た。福島第一原発事故後、日本の原子炉50基以上が運転を一時停止したほかドイツの8基が閉鎖されたため、核燃料が供給過剰となり、過去10年間で最低レベルの価格低下が引き起こされたのが短期的に大きく影響。ACP計画に必要な物資の多くが価格高騰し、計画の範囲と日程に追加や変更が生じたことも資金繰り悪化の要因になったと説明している。

USECによると、裁判所に提出した財政再建計画は貸借対照表の改善とACP計画推進能力の強化、長期的な事業機会の獲得を目標とするもので、東芝、パブコック&ウィルコックス(B&W)社を始めとする投資家グループからは同意が得られたとしている。

破産申請によって同社の通常業務に支障を来すことはなく、米エネルギー省(DOE)から一部資金の提供を受けて実施しているACP用遠心分離機(AC)の研究開発、実証(RD&D)活動は継続して実施。昨年、同社が操業を終了したパデューカのカス拡散法濃縮工場のDOEへの返還手続きや、在庫を使用した濃縮ウランの販売、ロシアからの低濃縮ウラン購入も影響なく続ける計画だ。

具体的な再建方法としては、5億3,000万ドルの負債を5年満期の新たな債券および新株2億4,040万ドル相当と交換。債券所有者達は2億ドル相当の新たな債券と約79%の普通株を受け取る一方、東芝とB&W社はそれぞれ、2,019万ドルの新債券と8%の新株を受け取る。裁判所が再建計画を承認するまで90～120日を要する予定で、この間の運転資金はUSECの子会社が提供。ただし、子会社は更正手続きの対象とはならないとしている。

USECは12年までに年間3,800トンSWUの生産能力達成を目指して07年にACPの建設を開始。08年に核燃料サイクル事業分の融資保証20億ドルの適用を米エネルギー省(DOE)に申請したが「技術的、財政的な審査の結果、商業規模の操業に移行する準備ができていない」として却下された。その代わりに、政府から技術実証開発支援金の提供を受けることで合意。2010年以降は、濃縮ウランの供給を受ける権利の取得など原子力フロントエンド事業の一貫体制確立を目指す東芝、B&W社からも出資を受けていた。

## 監査院が各国規制当局の活動を調査

米国政府監査院(GAO)は3月11日、日本を含む16か国における原子力規制当局の、福島第一原発事故後の活動について審査した報告書を公表した。各国当局が同事故を真摯に受け止め、それぞれの規制手続きや要件、インフラを強化する好機と捉えていることから、規制当

局が今後も過酷事故の発生を最小限にとどめ、最も効果的な緊急時対応を確実にする上で主要な役割を果たし続けると明言。一方、こうした規制組織の強化に役立つ国際原子力機関(IAEA)のピアレビュー勧告について、その実行状況をIAEAが系統的に把握することが求められるとの問題点を指摘した。

GAOは連邦議会の要請に基づき、政府機関の財務検査や政策プログラムの評価を通じて予算の執行状況等を監査する機関。今回の調査項目は、(1)選定国における原子力規制当局の原子力安全強化活動、(2)事故データの自動収集・伝達システムを各国が導入した度合い、(3)同事故後、IAEA、世界原子力発電事業者協会(WANO)、EUの3機関が各国の原子力規制当局を支援し、世界の原子力安全促進のために取った対策——となっていた。

このためGAOは、2013年9月時点で世界の原子炉の78%をカバーする13の代表的な原子力発電国と3つの原子力導入中および検討国を選定。米国の関連連邦機関や諸外国の15規制当局、および国際機関にインタビューを実施し、情報を入手した。その結果、民生用原子力発電所に許認可を与え、監視を行う米原子力規制委員会(NRC)、原子力安全問題も含めて国内政策と国際機関・関連条約の間を調整する行政府に対し、(1)ピアレビュー勧告の実行状況をIAEAが系統的に追跡把握できるよう後押しするなど、両者がともに協力して働く、(2)NRCは、原子炉主要データの自動伝達システムをアップグレードすべきか、またそれをどのように行うべきかの判断を早めるよう考慮すべき——と勧告した。

## 【カナダ】

### シガーレイク鉱山が操業開始

東京電力と出光興産がそれぞれ5%と8%出資しているカナダのシガーレイクウラン鉱山が約9年の建設工事を経て、ようやくウラン鉱石の生産を開始した。同鉱山のオペレーターとして50.025%の権益を保有するカナダのカメコ社が3月14日付けで発表したもので、昨年12月末までの総投資額は26億カナダドルに達したとしている。

同鉱山から70km離れた仏アレバ社のマククリーンレイク製錬所で最初の生産鉱石の処理が始まるのは今年の第2四半期を予定。同製錬所の生産能力は年間1万900トンとなっており、2014年には770~1,100トンのウラン精鉱(U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)生産が見込まれている。また、本格稼働を達成する18年初頭までに生産能力は年間8,100トンまで増強される計画だ。

## 【英国】

### ホライズン社が計画進展に併せ、人員増強

2012年12月に日立製作所が買収した英国のホライズン・ニュークリア社は3月19日、ウェールズ地方のウィルファとグロスターシャー州オールドベリー両サイトにおける新設計画の進展に併せて新たな従業員を補充するなど、両地点の事業本部を大幅に拡大していく計画を明らかにした。

両サイトに建設を提案しているUK-ABWRも今年1月、政府による4段階の包括的設計審査が第2段階に移行するなど、EDFエナジー社のヒンクリーポイントC計画に次ぐ同国の新設計画は18年の初号機着工を目指して順調に進展中だ。

ホライズン社の従業員数は現在、150名ほどだが、事業本部で400名程度の従業員を確保するために新規雇用を年間100名のペースで創出しているところ。2016年にも新たな事業本部の利用を開始する予定で、両サイトの作業が建設・運転段階に進めば、この数は数千人規模に膨らむ。具体的には建設作業のピーク時に6,000名規模とした後、操業時には両サイトにそれぞれ1,000名の従業員を置くとしている。

日立製作所とホライズン社は昨年12月、2018年までに初号機を完成させるウィルファ原発建設プロジェクトの重要な資金調達方法として、英国政府の債務保証スキームを適用することで同国財務省と合意、協力契約に調印した。

ホライズン社はまた同じ頃、同計画についてエンジニアリング・技術設計サービスの提供を受ける3年間の戦略的枠組契約を英国籍のAMEC社、アトキンス社、キャンディッシュ・ニュークリア社およびジェイコブス・エンジニアリング・グループと締結。1次外注先となるこれら4社、およびそれぞれの供給チェーンと長期的なパートナーシップを構築していくことになった。

### ONRが外局から法定の規制機関に

英国の原子力規制局(ONR)は3月31日、ONRが1日付けで政府・保健安全執行部(HSE)の外局という立場から、「2013年エネルギー法」に基づく独立採算制の公共安全規制機関に変わると発表した。2011年に開始された独立法定機関への移行手続きがようやく完了したものの、同時に、2014/15年の年次計画と新たな実施方針声明を公表しており、ONRが国民への透明性や説明責任を重視するとともに、均衡性、整合性の取れた規制原

則に基づく近代的な組織として、民生用原子力関連の安全セキュリティ業務、および放射性物質の輸送に関する規制を一元的に実施していくとしている。

ONRのJ・ジェンキンス長官は、「立場が強化されたことにより、英国のエネルギー・ミックスの中核を原子力産業が担うという将来に向き合っていく準備が出来た」と歓迎。原子力産業界の変化に迅速に対応できるだけの柔軟性が財政面や運営面でもたらされるだけでなく、優秀な人材を引き付け、保持することも可能になると指摘した。

## デコミ機構がガス炉等で廃止措置の契約先を選定

英国の原子力デコミミッション機構(NDA)は3月31日、国内12か所の歴史的な原子力関連サイトの廃止措置完了契約で、キャベンディッシュ・フルアー・パートナーシップ(CFP)を優先入札企業に選定したと発表した。14年間で70億ポンド(約1兆2,000億円)相当の大型公共事業契約をCFPに与えることで、少なくとも10億ポンドの税金節約につながると強調している。

英国では現在、1950年代から60年代にかけて建設された第1世代の民生用原子力発電所であるガス冷却(マグノックス)炉サイト10か所、および原子力開発黎明期にハーウェルとウインフリスに建てられた2つの研究センターで廃止措置作業が進展中。CFPは米国籍のエンジニアリング会社のフルアー社と英国籍の原子力供給・サービス会社であるキャベンディッシュ・ニュークリア社の合併事業体で、この廃止措置作業をNDAの戦略に従って最終段階に移行させることになった。

具体的には、これらのサイトを管理するマグノックス社およびリサーチ・サイト・レストレーション社(RSRL)の新たな親会社組織(PBO)として、両社の株式を現行PBOであるエナジーソリューションズ社および英原子力公社から受領。法的手続きとして契約締結前に義務付けられる10日間の休止期間と、それに続く5か月間の契約移行段階を経て、CFPは9月1日付けで新PBOとなる段取りだ。

ウェールズ州ウィルファ原発電サイトでは最後のマグノックス炉1基が現在も稼働中だが、NDAは今年失効する現行の廃止措置契約を更新するため、2012年に競争入札計画を公開。現行PBOのエナジーソリューションズ社も含めて4つの企業連合が応札した。コストや安全セキュリティ等に関する基準、技術的根拠の実証や商業的および社会経済的な観点から4社の提案を4か月にわたり包括的に精査・評価した結果、CFPを選定

したとしている。

なお、9月までの期間は現行PBOが業務を継続、関連する残りの入札3件についても準備が行われることになる。

### 【ドイツ】

## E.ON社、来年に1基を前倒し閉鎖へ

ドイツのE.ON社は3月28日、南部バイエルン地方で操業しているグラーフエンラインフェルト原発(PWR、134.5万kW)の閉鎖予定日を7か月前倒し、2015年5月下旬とする方針を発表した。

福島第一原発事故後、ドイツ政府は2022年までに既存炉17基すべてを閉鎖する方針を決定。1982年に運開したグラーフエンラインフェルト原発は15年末までの運転が可能だが、同年5月はちょうど燃料交換の時期に当たり、年末まで運転する場合は新たに装荷する新燃料1グラムにつき145ユーロの核燃料税を支払わねばならない。

同税の徴収期限が16年であることから、E.ON社では経済性を考慮して前倒し閉鎖を決めた。国内送電網を管理する連邦ネットワーク庁、および送電系運用者のTENNET社にも今回の決定を通達している。

この核燃料税は福島第一原発事故が発生する直前の2011年1月から施行。既存炉の運転期間を平均12年延長することが交換条件だったが、同事故後にその約束は果たされず、各原発は法定発電枠が満了し次第、順次運転が停止されることになった。

各原子力発電事業者はこれに対する異議を様々な裁判所に提訴。同税が欧州の規定に従っているかについては欧州司法裁判所に持ち込まれたが、裁定が下る16年初頭までは同税を払い続けなければならないという事情も背景にある。

### 【カザフスタン】

## 洪水でウラン鉱山が操業停止

カザフスタンの国営原子力企業のカザトムブロム社が3月19日に発表したところによると、南カザフスタン州ソザク地区で雪解け水が洪水となって道路を封鎖し、インカイ・ウラン鉱山の操業に必要な化学物質の供給が途絶したことが明らかになった。インカイ鉱山は、カナダの大手ウラン生産業者のカメコ社とカザトムブロム社が6対4の割合で出資。すべてのアクセス道路で修復が完了すれば、3か月以内に通常の操業に戻れる見通しだ。

また、道路封鎖は同地区の複数のウラン採掘プロジェ

クトに予備掘削サービスを提供するボルコフジオロジー社の操業も停止させたが、こちらは7～10日以内に作業が再開される。洪水により日程が遅延するプロジェクトはないとしている。

## 【中国】 フランスとの原子力協力を強化、 リサイクル施設建設へ

中国とフランスは3月26日、国際安全保障や地球温暖化防止などに加えて、民生用原子力を含む複数の経済分野で両国の協力関係を強化していくとの共同声明を発表した。約30年前、中国の原子力発電黎明期に広東大亜湾原発等の建設で協力関係を結んだフランスが、商業規模の使用済み燃料の再処理など燃料サイクル全般にわたって協力の枠組を拡大。英国の新設計画における両国のパートナーシップ強化にも言及したほか、両国の原子力企業間で同日に締結した個別の協定についても明らかにしている。

今回の共同声明は、両国の国交樹立50周年を機に中国の習近平国家主席がパリでF・オランドフランス大統領と会談したのに併せたもの。原子力分野においては、新規原子力発電所の建設運転を始め、高いレベルの安全セキュリティ基準の遵守と環境保全、使用済み燃料の再処理およびウラン採掘に至るまで、燃料サイクル全般にわたって、両国産業界と関連機関が協力努力を重ねていくよう促す。

また、英国でEDFエナジー社が進めているヒンクリーポイントC計画およびその他の新設計画の実施で共同歩調を取るほか、EDFの協力により中国広核集团有限公司(CGN)が広東省台山で進めている2基の欧州加圧水型炉(EPR)建設計画でも長期的な連携関係を構築するとしている。

この関連でCGNは2010年にEDFと結んだ原子力分野の協力協定を更新。原発の運転・維持やエンジニアリング、研究開発に加えて、最も厳しい安全基準の保証という共通目標についても協力を継続する。両社はまた、英国原子力市場でEDFと中国企業の産業協力を発展させるための議定書に調印した。

また仏アレバ社は、民生用原子力分野で両国の戦略的パートナーシップが昨年、30周年を迎えた点を強調。中国で年間800トン規模の使用済み燃料の処理リサイクル施設を建設するプロジェクトについて、同社と中国核工業集团公司(CNNC)が昨年4月に基本合意した項目の推進のため、アレバ社のL・ウルセル社長兼CEOとCNNCの孫勤董事長が協定に調印した。同プロジェクトに関する産業交渉は順調に進展中で、タスクや責任

の配分を特定する技術協議は日程に沿って最終段階に到達。ほどなく商業段階に移行するとしている。

両社はこのほか、同施設の将来的な操業やメンテナンス支援に対する協力の拡大を計画。今後数年間に中国が堅実な成長を遂げると予想される使用済み燃料関係事業の実施チェーンについても協力していく考えだ。

両社は今回、さらに2件の追加協力協定を締結しており、うち1件はアレバ製のデジタル式・計装制御(I&C)系「TELEPERM・XS」を中国の原子力市場に供給するのが目的。このために設立する合弁事業体にはアレバ社とCNNCが49対51の比率で出資することになる。

## 陽江1号機が営業運転開始、 運転中18基に

中国広核集团有限公司(CGN)は3月26日、南シナ海に面した広東省陽江原子力発電所で1号機が25日付けで営業運転を開始したと発表した。同炉は昨年12月31日に初めて送電網に併入された後、営業運転モードによる168時間の実証運転を経て、同国18基目の商業炉となった。これにより、中国の原子力発電設備容量は1,586万kWに増加した。

設計はCGNがフランスのPWR技術を元に自主開発した100万kW級PWRの「CPR1000」で、初号機は2010年9月に嶺澳Ⅱ期1号機として運開。その後、同型設計の同2号機が11年8月に営業運転を開始した後、昨年4月に福建省の寧徳1号機、同年6月に紅沿河1号機が後を追って運開している。

これらのほか、1994年から03年にかけてフランスの原子力企業とCGNが協力して完成させた広東大亜湾1、2号機、嶺澳Ⅰ期工事の2基を加えると、中国で運転中の原子炉のうち9基までがCGNの所有。原子力設備容量にして59%を占める計算だとしている。

合計6基の建設を想定した陽江原子力発電所建設プロジェクトは08年に国务院が正式承認しており、同サイトでは現在、2～6号機も建設中。1号機と同設計の2号機ではホット試験の準備が進められているほか、CPR1000設計に経済性や安全性で25項目の技術的改善を施した「CPR1000+」となる3号機が機器の据え付け段階に、また4号機が土木建築工事段階にある。

さらに、31項目の重要技術改善により、第3世代炉の安全技術特性を有する「ACPR1000」として5、6号機の本格的な作業が昨年からはじめられた。

# 粘土鉱物へのセシウム吸着機構解明(1)

## 原子・分子レベル構造解析から新しく何がみえるか?

日本原子力研究開発機構 矢板 毅, 池田 隆司, 松村 大樹

粘土鉱物へのセシウム吸脱着機構は、1950年から1960年代にかけて多くの研究成果の報告があり、セシウムが土壌表面近くに存在するメカニズムなど、様々な説明がなされてきたが、原子、分子レベルでのセシウム存在状態に関して直接観察等を通じた報告は意外に少ない。そこで本研究において、構造・化学結合特性などに焦点を当て、放射光や理論計算などを通じて詳細に検討したところ、セシウムと粘土鉱物との間には、アルカリ金属としては特異な相互作用が存在することを新しく指摘した。この結果については、2稿にわたり解説することとし、本稿では、特に放射光および経験的なパラメータ等を含まない第一原理に基づく分子動力学計算による結果について紹介する。

### I. 研究の背景

#### 1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震は、関東地方にまで広がる地域に未曾有の大被害を与えた<sup>1)</sup>。この震災によって、地震およびそれに伴う津波という自然災害だけでなく東京電力福島第一原子力発電所の原子炉の事故が発生し、その結果、大量の放射性セシウムおよびヨウ素などの放射性同位元素が飛散し、比較的半減期の長いセシウム-137は、いまだに深刻な環境汚染をもたらしている。このような背景の中、福島環境回復のために、生活圏内の空間線量を下げる目的で、天地返し、土壌表面の剥離、それに引き続く中間所蔵などが検討されている。これらの作業においては、原発事故により放出されたセシウムが土壌に取り込まれ、安定化される過程を理解し、さらには必要に応じて効率的に引き剥がし、処分することが必要である。セシウム吸脱着機構に関しては、1950～1960年代に大気中核実験などの影響を理解する上で多くの報告がなされており<sup>2)</sup>、現在、地層処分でのシミュレーション、環境放射能研究における挙動把握においては、ほとんどがこの年代のモデルが利用されているとあって過言ではない。

今回の福島原子力発電所の事故を通じて、セシウム除染問題に改めて取り組んだとき、多くの研究者がこれらのモデルだけでは説明、解決できない技術的問題に直面

したことも事実である。これは、環境試料の多様性、本稿ではあえて触れないが、有機物の影響や、セシウムのカリウムに対する存在度に加え、放射性セシウムというキャリアフリーの元素の振る舞いの特異性など、実験的解明が難しい問題に関しては、研究が十分に進んでいないと考えるのが正しいだろう。

本稿では、この中でも粘土鉱物での存在状態を明らかにするため、放射光および第一原理分子動力学計算を用いたセシウムの存在状態について得られた結果を2稿にわたって紹介するとともに、これら基礎的知見をどのように福島環境回復に貢献させていくかなどを解説する。

#### 2. 福島の地質<sup>3)</sup>および研究対象とした粘土

福島県は、東側から浜通り、中通り、会津と区分され、南北方向に細長い低地域が分布し、それらの間には阿武隈高地、奥羽脊梁山脈が南北方向に連なる。今回の原発事故においては、特に浜通り中～北部を中心とした地域が問題となっている地域である。浜通り地区は、南北方向の幅の狭い範囲に新第三紀の砂岩、泥岩を主とする堆積岩が分布し、全体に東側に緩傾斜した構造を示している。また、海岸に面した平坦地には、粘性土が厚く分布する軟弱地盤を形成している。太平洋沿岸丘陵地域の西側に分布する阿武隈高地には、主に花崗岩類・古生層・中生層などの先第三紀に形成された岩層が分布し、白亜紀の花崗岩類は、深層風化に伴うマサ化<sup>4)</sup>が著しい。このほか、北部では新第三紀の火山噴出物を主とする地層も分布する。このように浜通り地域では、白亜紀の花崗岩からの土壌の理解が重要で、岩石を構成する長石、雲母類の風化物がマサ化し、粘土へと変化することか

*Study on Cesium Sorption Behavior on Clay Minerals; Atomic and Molecular Level Analyses will prove New Information? :*  
Tsuyoshi YAITA, Takashi IKEDA, Daiju MATSUMURA.

(2014年1月16日受理)



ら、本研究では雲母鉱物からの変成物であるパーミキュライト、イライトなどの粘土鉱物を中心に分析した。

粘土鉱物の基本的な構造に関しては、同解説(2)のI、II章に記載されているので、本稿では詳細には述べないが、ケイ素原子の周りに4つの酸素原子が取り囲んだ四面体がシート状に連なった四面体シートとアルミニウムなどの原子一つを酸素原子6個が取り囲んだ八面体が連なった八面体シートにより構成される。特にセシウムなどを効率よく吸着する雲母や粘土鉱物は、四面体：八面体シート比が2：1であるフィロケイ酸塩であり、本研究では福島県産パーミキュライト、イライトを試料とした。ただし、粘土鉱物は、厳密には鉱物名で物質の性質を完全には規定できないことを断っておくが、得られた結果はこれらの粘土鉱物に特徴的であり、いくつかの試料におけるケーススタディーにより再現性は確認できている。

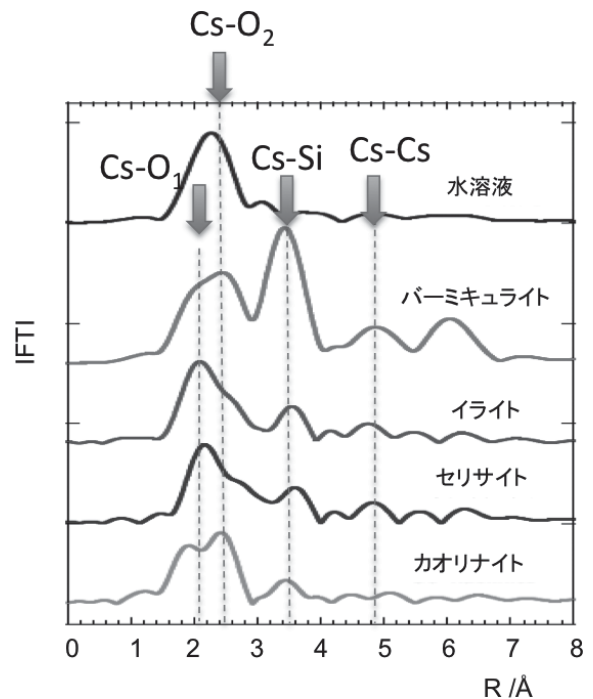
## II. 粘土鉱物中でのセシウムの局所構造および吸着時の動的過程

福島の汚染地域で見いだされるセシウムは、土壌中に含まれる成分に均一に吸着しているというより、限られた鉱物に吸着していることがイメージングプレートおよびSEMあるいはTEM-EDS<sup>5)</sup>を組み合わせた実験で指摘されている<sup>6)</sup>。その中でフィロケイ酸塩は、有機-無機物質複合体と併せて重要な吸着体の一つと考えられており、雲母系、雲母系風化鉱物であるパーミキュライトなどは、福島土壌に豊富に存在する粘土鉱物であり、放射性セシウムを効率よく捕捉する。Bradburyら<sup>7)</sup>は、イライトを中心として粘土鉱物に対するセシウムの等温吸着実験を行い、その吸着サイトは、ほつれたエッジサイト<sup>8)</sup>(Frayed Edge Site : FESと略す)などの3つの異なるサイトがあり、特にキャリアフリー(すなわち極微量)で放出される放射性セシウムは、最も吸着容量が小さく選択性の高いFESへの吸着が極めて重要であることを指摘している。そこで我々は、セシウムの土壌中での安定性評価、剥離法開発において最も重要な情報の一つとして、粘土鉱物中セシウムの存在状態に注目し、その局所構造についてSPring-8を用いるEXAFS<sup>9)</sup>により調べた。併せて、第一原理分子動力学計算によるシミュレーションから、粘土鉱物に対するセシウムの吸着特性について詳細に検討した。

### 1. 粘土中セシウムの局所構造解析

Bradburyら<sup>7)</sup>が報告した等温吸着線によれば、数十ppb以上のセシウムを含む場合、このXAFS<sup>9)</sup>スペクトルの与える情報は、選択的かつ交換容量の小さいFESのような特異吸着サイトではなく、表面吸着など比較的吸着容量の大きいサイトである可能性が高い。JAEA専用ビームラインであるSPring-8のBL11XUは、挿入光

源を用いたビームラインであり、極めて輝度の高いX線を取り出すことができる。これまで、La K吸収端における測定では、0.1mM(10ppm程度)の透過法のEXAFS<sup>9)</sup>スペクトルの測定および解析に成功しており、比較的薄い濃度の構造決定が可能である。本研究では、当該ビームラインにおいてEXAFSスペクトルを取得した。本研究では、粘土鉱物の全ての吸着サイトを満たすような十分量のセシウム吸着を確認し、粘土鉱物(イライトおよびパーミキュライト他)中セシウムの局所構造をEXAFS測定により解析した。得られたEXAFS振動に対するフーリエ変換の絶対値、すなわち動径構造関数(擬動径分布関数)を第1図に示した。パーミキュライトおよびイライトは主に、大きく見て4つの相互作用(ピーク)が観測された。また、比較のため塩化セシウム水溶液、雲母鉱物および四面体シート：八面体シート比が1：1のカオリナイトのスペクトルを示したが、イライトとセリサイトは、雲母系鉱物としてそのスペクトル形状が酷似しており、パーミキュライト、カオリナイトは、異なる状態で吸着していることが詳細に観察できる。特にファーストピーク(2~2.6Å)およびセカンドピーク(3.5Å)に特徴的な違いがあると思われるので、以下詳細にピークの帰属を行った。これまでの報文で<sup>10)</sup>粘土鉱物中のセシウムに関するEXAFS解析の結果が取り上げられているが、我々は実験と理論を有機的に組み合わせ、微細な相互作用を議論するのが重要であるとの認識からも、第一原理に基づく分子動力学計算によりEXAFSスペクトル(第1図)の約2~4Åのピークの帰



第1図 種々の粘土鉱物に吸着したセシウムのCs-K EXAFSによる動径構造関数  
原子間距離(R)は位相シフトを考慮していないので、実際の距離は0.2~0.8Å程度長い。

属を実施した。計算はイライトを対象にセシウムが層間内部に取り込まれた場合と端部周辺に留まる場合を想定して行った。

第2図に分子動力学計算から得られた動径分布関数  $g_{CsX}(R)$  の一例を示す。この動径分布関数からセシウム周りの局所構造に関する詳細な情報を得ることができる。まず、第2図(a)に示した  $g_{CsO}(R)$  に注目すると、Cs-O 間距離にはおよそ 3.0 Å の成分(Cs-O<sub>1</sub>)と 3.3 Å の成分(Cs-O<sub>2</sub>)の2成分があることがわかる。このうち前者は第2図(b)のように粘土鉱物の骨格を形成する SiO<sub>4</sub> 四面体シートの Si が Al<sup>3+</sup> に過剰に置換されたサイトでの Cs-O 間の相関に相当し、後者は同様の計算手法を用いて得られたセシウム水溶液中での Cs-OH<sub>2</sub> 間距離に近いことから<sup>11)</sup>、第2図(c)のように端部周辺あるいは層間で水和した状態で留まっている Cs と水分子の酸素原子

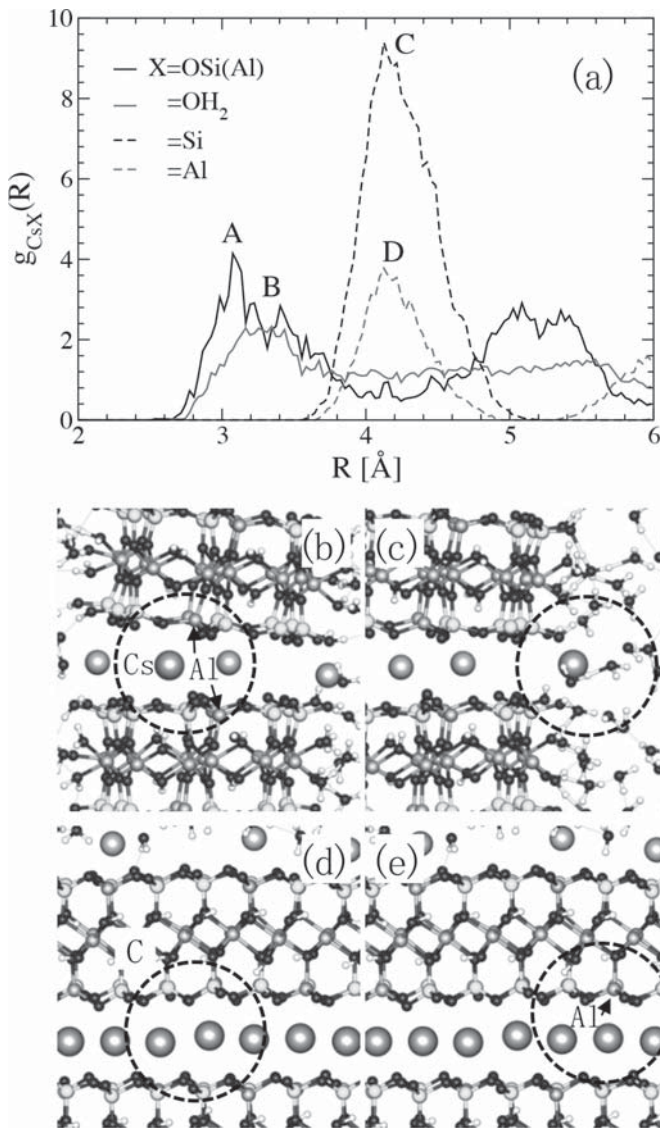
との相関あるいはこれに相当するものと考えられる。この結果は第1図の EXAFS 動径構造関数の塩化セシウム水溶液のスペクトルのピーク位置に近いことから水和あるいはそれに匹敵するレベルの相互作用と考えて問題ないと考えられる。一方、セシウムが層間内部に取り込まれ無水状態で層間に固定される(第2図(d), (e))と Cs-Si と Cs-Al 間の相関に由来するピークが約 4.0 Å に現れることがわかる。

以上のように、第一原理分子動力学計算によりそれぞれ、Cs-O<sub>1,2</sub>, Cs-Si (Al, O を一部含む)の相互作用と帰属された。その他のピークは、同様に取り込まれた、Cs-Cs, その他高 R の領域は多重散乱による相互作用に由来すると帰属した。このモデルに基づくカーブフィッティングを実施したところ、それぞれの原子間距離は、バーミキュライトで  $R_{Cs-O_1} = 2.97$  Å,  $R_{Cs-O_2} = 3.25$  Å, イライトで、 $R_{Cs-O_1} = 2.98$  Å,  $R_{Cs-O_2} = 3.20$  Å となった。これらは、第一原理分子動力学計算により得られた原子間距離とほぼ一致する。この結果は、極めて重要で、特に 3 Å 以下の相互作用は、酸化物などの結晶から得られるセシウムのイオン半径と酸素とのイオン半径<sup>12)</sup>の和より明らかに短い。すなわち、軌道間の相互作用に由来する、共有結合的相互作用を含む化学結合をしている可能性を示唆している。

セシウムのような1価の第3周期以降のアルカリ金属イオンは、最外殻が極めて安定な閉殻の s,p 軌道からなり、ドナー原子とはイオン相互作用をすることが主たる反応であると考えられるが、この結果は、粘土鉱物との強固な相互作用を説明する上で極めて興味深く、FES を含む粘土鉱物の基本的な相互作用であることを化学結合特性の観点から初めて明らかにした。

イライトとバーミキュライトとの違いは、水和層を持つバーミキュライトとの違いとも解釈されるが、第一原理計算の結果を加味すると、およそ 3.5 Å (第1図)の位置に現れる EXAFS スペクトルのピーク強度は、脱水したセシウムの数の多さを示す指標、すなわち粘土鉱物の層間内部に取り込まれたものの指標となると考えられるので、バーミキュライトに関しては、層間内部に存在するがやや結合の弱い相互作用も存在する可能性を示唆している。

また、イライトは、この強い相互作用の成分が相対的に多い一方で、Cs-Si に由来する相互作用が少ないことが分かる。EXAFS 動径構造関数の強度は、単純な存在度の大小を反映しない可能性もあるが、存在度がピークの大小関係に由来すると考えたとき、これは二八面体型の粘土に見られる四面体シートの六員環ポケットの存在に由来する非対称的吸着構造や、バーミキュライトに比べ相対的に層間内部への吸着量が少ないことなどを反映しているものと考えられる。残留電荷密度の小さい鉱物表面への吸着が示唆されたことは非常に興味深く、これ



第2図 (a)分子動力学計算から得られた動径分布関数  $g_{CsX}(R)$  ( $X=O, Si, Al$ )  
ピーク A ~ D に対応する局所構造をそれぞれ (b)~(e)に示した。

らの特徴は、福島の大気中のセシウム濃度を理解するうえで注目すべきであろう。

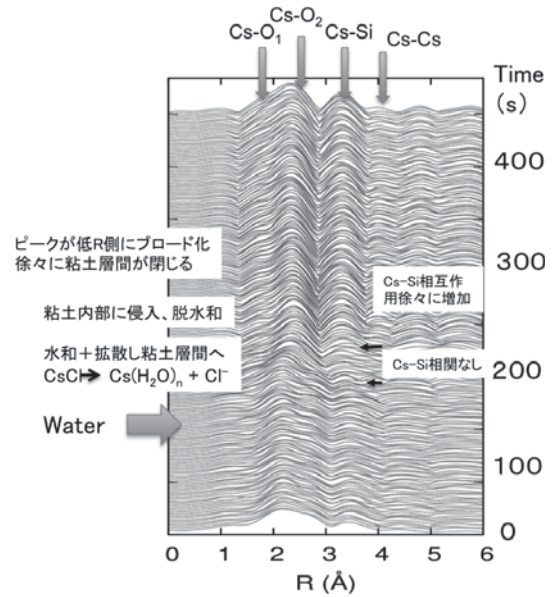
## 2. 時間分解分散型 EXAFS (TR-DXAFS) による粘土鉱物へのセシウム吸着ダイナミクス

次に、粘土鉱物へのセシウムの取り込みに関する動的過程を評価するために、時間分解エネルギー分散型 X線吸収微細構造法 (TR-DXAFS) による結果について紹介する。TR-DXAFS は、様々な波長の光を含む放射光を単色化せずに EXAFS 測定に利用するもので、ワンショットの照射で EXAFS 測定を行うものである。その時間分解能はミリ秒オーダー測定も可能であり、構造・電子状態の視点からの化学反応経路の追跡など、極めて有効な測定手段である。測定は、JAEA 専用ビームラインである SPring-8 の BL14B1 において実施した。

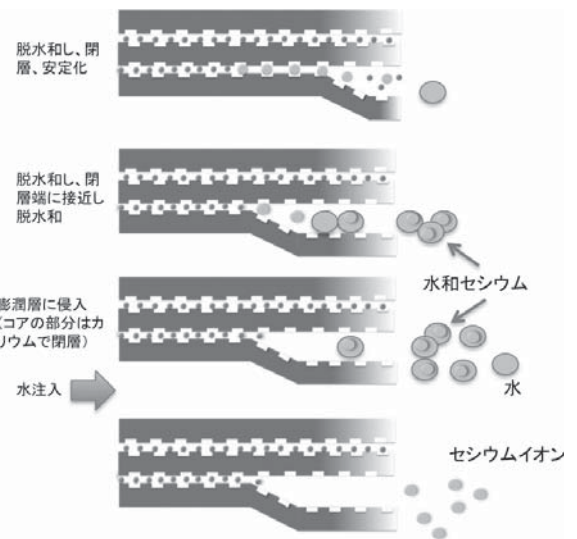
取り込み過程としては、次のようなシナリオを想定した。すなわち、原発事故により大気中に放出されたセシウムは、現在の汚染地域に降下、土壌表面に降り積もったと考えられる。その後、降雨や地下水がセシウムと接触、これらとの接触を通じて水和し、土壌中に浸透する。その過程で、吸着能力の強い粘土鉱物などに吸着、濃集することになる。表層に粘土鉱物などセシウムに対する吸着能が高い鉱物が存在することから、結果として表層に蓄積されることとなる。このシナリオは、1960年代頃までの大気中核実験や 1986 年のチェルノブイリ原発事故によって放出された放射性セシウムが、いまだに表層に留まっていることから明らかである。

そこで本研究では、まず安定セシウムを粘土鉱物に一定量物理的に混合し、これに地下水などを想定した水を浸漬させたのちに、セシウム周りの局所構造がどのように変化するかを、TR-DXAFS により追跡した。粘土鉱物は、パーミキュライトを選定した。パーミキュライトは、福島県の土壌に極めて多く存在し、セシウムを非常によく取り込む。一般に膨潤層を有しているものの、セシウム、カリウムのようなやや水和の弱いイオン<sup>7)</sup>が粘土鉱物の層間内部に入ると、水や水和イオンと置換しながらこの層間を閉じることが知られており、結果として FES のような端面をも作りうる。雲母系鉱物における FES のシミュレーションには非常に有効である。この特性から雲母系鉱物の FES への取り込みに比べ、層間内部に侵入するセシウムの量も多いことから、風化雲母系鉱物では検出できない詳細な層間の状態変化を検出できる可能性がある。

第 3 図は、TR-DXAFS によって得られた EXAFS 動径構造関数の時間変化を示したものである。水の注入後、セシウムは、瞬時に水和し、粘土鉱物に吸着されているわけであるが、注目したいのは、約 3.5Å 程度の、Cs-Si の相互作用である。水注入後、約 50 秒程度の間 (図中黒い矢印) このピークが見えていない。この時間帯に水和セシウムは層間へと拡散し、さらに 100 秒後位か



第 3 図 TR-DXAFS による Cs K-EXAFS 動径構造関数の時間変化  
図中 Water は測定開始後、水を注入したことを示し、図上部の Cs-O の矢印は、相互作用の現れるおおよそのピーク位置を示す。



第 4 図 パーミキュライトへのセシウム取り込みに関するモデル図  
反応は下から上へと進行する形で記載してある。図中小さい○はカリウム、大きい○はセシウムを示し、セシウムより大きい楕円は水を表す。

ら、このあと粘土との相互作用により徐々に脱水和している過程が観察できている。すなわち、第 4 図のモデル図に示したように、膨潤層 (FES のような端部を示す) に入り込み、イオン交換後、セシウムが接着剤となって層間を閉じる様子が観察することができた。

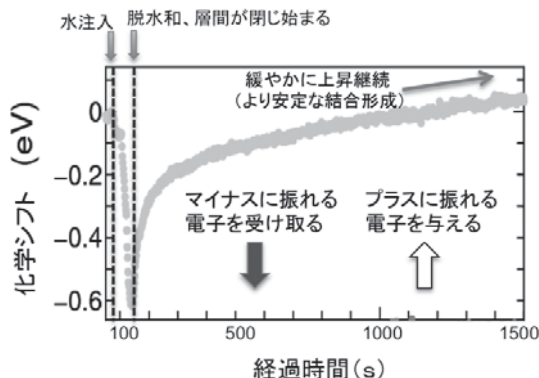
この過程は、あらかじめ層間を閉じた状態で反応させた場合は、このような過程は観測できなかった。すなわち、粘土層間 (層間コア部分) への侵入は、水和膨潤層、FES など開いた部分が必要であり、FES サイトは、安定に保持するサイトと考えるより、脱水和、閉層の反応

ポイントであると考えるのが合理的であろう。閉層後は、セシウムの粘土内部での拡散などによる侵入確率は下がると推測できる。

さらに興味深いのは、第5図の化学シフトの値の変化である。水和イオンが膨潤層に拡散浸透している過程で、まだ十分に粘土の酸素との相互作用が完結しておらず、緩やかに反応が進んでいることが分かる。すなわち、電子状態が平衡となり、化学結合が完結するのは、予想外に時間がかかるということを示唆している。さらに注目すべきなのは、化学シフトの変化の方向である。塩化セシウムからスタートし、水との相互作用において水和イオンとなり、粘土鉱物に取り込まれる過程がTR-DXAFSによって観察できるが、その化学シフトの変化が、まず水和の過程で起点のゼロからマイナス側に約 $-0.6\text{eV}$ に振れ、粘土の層間が閉じる過程でプラス側 $-0.2\text{eV}$ まで急に振れ、その後、緩やかに $0\text{eV}$ を超えて振れ続けている。これは、セシウムおよび粘土鉱物の特性を理解する上で極めて重要な情報である。

水和における水との結合の特徴は、典型的なイオン性相互作用であると考えられるが、この考えに基づいた時、化学シフトはまず、水和によってセシウムが電子密度を受け取りマイナスに振れることが予想されるが、実験結果は予想通り、 $-0.6\text{eV}$ に振れていることが分かる。一方、粘土鉱物との相互作用は、相互作用のドナー原子が同じ酸素であるにもかかわらずプラスに振れ、10分程度で起点となる塩化セシウム水和物の基準値( $0\text{eV}$ )よりプラスに振れて電子密度がドナーである酸素側に移動していることが分かる。すなわち、セシウムは、水和においては、ルイス酸(電子対受容体)的挙動を示す一方で、粘土鉱物とはルイス塩基(電子対供与体)的振る舞いを示していることが分かる。これまでの常識では、1価のセシウムはアルカリ金属イオンであり、閉殻のs,p軌道は極めて安定であるため、イオン相互作用をとるイオンとして考えられていた。しかしながら、この共有結合的相互作用を含む化学結合を形成することは、これまでの常識とは異なることが分かる。

また逆の見方をすれば、粘土鉱物の酸素は、一般的な

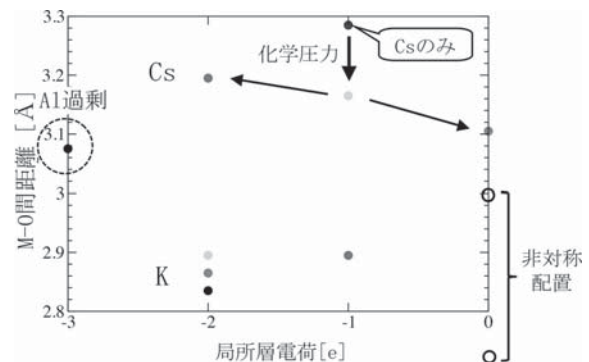


第5図 TR-DXAFS測定で観測されたCs K吸収端における化学シフト変化

酸素と異なり、塩化物イオンよりソフトな性質を示す酸素である可能性もある。このことは、他の酸素ドナー系イオン、例えば、水、炭酸イオン、硫酸イオン、硝酸イオンなどと比較すると、粘土鉱物に吸着したセシウムのXANES<sup>9)</sup>スペクトルは明らかに高エネルギー側に振れることを確認しており、その電子状態は明らかに異なる。すなわち、セシウムの粘土鉱物中での安定性は、これらの極めて高度な相互作用に起因して達成されており、これらの状態分析に基づく詳細な科学的知見をセシウムの中長期的安定性の評価などに結びつけることは、重要なことである。また、化学結合の詳細は次稿に譲る。

### 3. 第一原理計算に基づく特異的吸着サイトに関する考察

最近接M-O (M = K, Cs)間距離に対する四面体シートのSiを $\text{Al}^{3+}$ に置換することにより導入される層電荷の影響とCsとKを混合することによる影響をまとめて第6図に示す。まず層電荷量がゼロの場合、カリウムでは $\text{SiO}_4$ 面の底面酸素がつくる6員環よりもイオンの大きさが小さいため底面酸素に非対称に配位するが、セシウムではイオンの大きさが底面酸素の6員環の大きさとほぼ一致しているため最近接Cs-O間距離は $3.1\text{Å}$ 程度と比較的小さくなっている。四面体シートの層電荷量をゼロから $-2e$ まで増やすと、カリウムでは平均的にはK-O間距離が縮む傾向を示すが、セシウムでは逆に伸びる傾向を示すことがわかる。これは $\text{K}^+$ と $\text{Cs}^+$ の表面電荷密度の違いによるものと考えられる。しかし第2図(b)のように向かいあう四面体シートのどちらにも過剰に $\text{Al}^{3+}$ が存在する場合には、Cs-O間距離がそれまでの局所層電荷量依存性から外れ、 $3.1\text{Å}$ 以下にまで極端に縮むことがわかった。電子状態を詳細に解析したところ、 $\text{Al}^{3+}$ と直接結合している底面酸素の2p軌道とCsの5s, 5p軌道間に小さいながら共有結合性が生じていることが認められ、EXAFS等で得られた結果と調和的である。これは内殻軌道である5s, 5p軌道が価電子軌道のように振る舞うことを意味しており、重元素アルカリ金属であるCsに特有の現象であると考えられる。



第6図 四面体層の局所層電荷量と最近接M-O (M=K, Cs)間距離の関係

一方, Cs と K を層間に混合するとイオン半径が約 0.3 Å 違うことを反映し, Cs のみが層間にある場合よりも化学圧力により Cs-O 間距離が約 0.1 Å 短くなる。環境中のセシウムの存在量はごく微量であることを考えると, Cs と他のサイズの小さいイオンが共存することも無視することはできない。このようにセシウムは, (1)底面酸素の 6 員環とのイオンサイズ適合性, (2)化学圧力効果, (3)特異な電子状態の発現により, 四面体シートの酸素に特異的に強く吸着する可能性がある。これらのシミュレーションの結果は, 実際の構造解析の結果と合わせて考えると, 原子間距離の短い相互作用は, セシウムへの選択性を考える上で重要である。

### III. まとめ

セシウムの粘土鉱物への吸脱着機構について過去の研究の報告および今回明らかになった結果から簡単にまとめてみる。

まず, セシウムの吸着という観点では, 概ね吸着容量の観点から 3 つのサイトとして, 基底表面 (Planner site), 層末端部 (Type II で, 実際は FES の可能性あり), 層間コア部分 (おそらく Bradbury らの実験の FES に相当) があるといえるであろう。FES サイトは, 既に述べたように閉層, 安定化というプロセスを考えたとき反応ポイントとして重要で, 必ずしも不可逆的な吸着を示すポイントではない可能性もある。また, EXAFS によるバルクの構造解析等から, 粘土鉱物とセシウムとの相互作用は, それぞれのサイトで水和レベルの結合とやや共有結合性を帯びた結合の 2 つの相互作用があり, これはカオリナイトへの表面吸着などでもセシウム吸着が起こる前の環境条件によっては, 比較的セシウムを強く補足する可能性も否定できない。

粘土鉱物の層電荷と結合特性の関係としては, 四面体シートのサイズ適合性との関連から層電荷は低い方がセシウムは安定する傾向を示すものの, 特異点としては四面体シートの高電荷密度ポイントにおいては, 共有結合性を含む特異吸着を示す。さらには, キャリアフリーの放射性セシウムは, 環境にマクロ量存在するカリウム存在下では化学圧力を受け, より強く結合することも考えられる。

粘土鉱物のセシウムに対する選択性は, これまで指摘されてきたように, イオンのサイズ, 水和の強さに伴い, 閉層する過程でカリウム以下のアルカリ金属からの識別が起こることに加え, 本研究で指摘した重元素としてのセシウムの特性として共有結合的な相互作用も新しく加えるべきであろう。

また本稿では触れていないが, 受け手側の粘土鉱物の吸着前の状態は極めて重要で, 粘土鉱物の起源となる母岩, 風化プロセス, 日常の環境条件 (イオン交換のコンディショニングに相当するようなことも含め) など様々

な要因によって吸着状態に違いが出ることも考慮しなければならない。これまでの研究では, セシウムの吸着という一点を考えたとき, 非常に効率よく粘土に吸着するという事実を踏まえ, モデルが単純化されてきたという背景もあると思われる。

これらの基礎的知見を踏まえ, 具体的にどのような減容化に向けた方策があるのかなど, 本解説 (2) で紹介する。

#### — 参考資料 —

- 1) 原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する  
日本国政府の報告書 “東京電力福島原子力発電所の事故について”,  
[http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea\\_houkokusho.html](http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html).
- 2) B.L.Sawhney, *Clays Clay Miner.*, **20**, 99-100 (1972).
- 3) 東北地質調査業協会編, “福島県”,  
<http://www.tohoku-geo.ne.jp/technical/provinces/fukushima/>.
- 4) マサ化: 花崗岩などが, 風化に伴い鉱物粒単位でかぼろぼろになった状態.
- 5) SEM-TEM-EDS: 走査型電子顕微鏡 (SEM), 透過型電子顕微鏡 (TEM), エネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) の略.
- 6) 小暮敏博 (東京大学), 私信.
- 7) Bradbury, *et al.*, *J. Con. Hydrog.*, **42**, 141-163 (2000).
- 8) M.L.Jackson, *Trans. Int. Soc. Soil Sci.*, 4281-292 (1968).
- 9) XAFS, EXAFS, XANES, DXAFS: XAFS (X 線吸収微細構造の略で, 本稿では, 用いた X 線吸収分光法の総称として用いている), EXAFS (広域 X 線吸収微細構造の略, 吸収端から 50eV 以上の振動構造を指し, これから構造, 運動, 電子状態に関するパラメータを算出できる), XANES (X 線吸収端近傍構造の略で, 吸収端から 50eV までの領域を指し, 非占有軌道の状態密度に対応する), DXAFS (エネルギー分散型 X 線吸収微細構造の略.)
- 10) B.C.Bostick, *et al.*, *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 2670-2676 (2002).
- 11) T.Ikeda, *et al.*, *J. Chem. Phys.*, **137**, 041101 (2012).
- 12) R. D.Shannon, *Acta Cryst.*, **A32**, 751-767 (1976).

#### 著者紹介



矢板 毅 (やいた・つよし)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野) アクチノイド化学,  
X 線発光吸収分光/分子設計



池田隆司 (いけだ・たかし)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野) 計算科学/特に水の  
化学物理



松村大樹 (まつむら・だいじゅ)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野) X 線吸収分光/触媒  
反応の時間分解観測

## 粘土鉱物へのセシウム吸着機構解明(2) 第一原理計算による原子・分子レベルの吸着挙動解析

日本原子力研究開発機構 奥村 雅彦, 中村 博樹, 町田 昌彦

福島原発事故により放出された放射性セシウムを除去するため、大規模除染が行われたが、膨大な量の除去土壌が発生し、その効率的且つ経済的な処理法の研究開発が求められている。一方、表層土壌に吸着したセシウムは風雨により一部移動することが知られ、再汚染や海洋への流出が懸念されており、環境中でのセシウム挙動は重要な研究課題である。しかし、セシウムの土壌への吸脱着に関する科学的知見の不足により、上記の研究開発の進展はまだまだ不透明である。本稿では、前稿のセシウムの土壌吸脱着に関する実験・観測結果を受け、第一原理計算手法と呼ばれる高精度の計算科学手法により得られた新知見を紹介し、除去土壌の減容化法及び貯蔵法、そして、環境中セシウムの動態予測に対して、今後の研究開発の方向性を示す。

### I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故により、多量の揮発性放射性物質が環境中に放出された。中でも放射性セシウムは、半減期が30年と長い上に、土壌に強く吸着され地表に長期間留まるため、住民避難の主たる原因となっている。この事態に対し、政府は住民の被ばく低減や避難住民の帰還に向けて除染を大規模に進め、放射性セシウムの吸着土壌を除去してきた。この除染手段は効果的であるが、発生する除去土壌は最大で約2,800万 $\text{m}^3$ にも上ると見積もられており、仮置き場・中間貯蔵施設・最終処分場の建設地選定や安全性の確保等、様々な課題が山積している。特に、処分場等の問題に対しては、除去土壌に含まれる放射性セシウムが微量であるため、効率良くセシウムを分離し、減容化が可能となれば、その効果は極めて大きい。しかし、これまでに世界中で実施されてきた膨大な数の研究と技術開発によっても、その効率的且つ経済的な分離法は確立しておらず、いまだ研究開発段階に留まっている。

除染が進んだ地域がある一方、未除染地域に残るセシウム吸着土壌は、風雨により地表を移動し、川そして海へと流れ込むため、セシウム吸着土壌の移行による居住地・農地の再汚染や海洋汚染が懸念されている。セシウム吸着土壌は、pHや種々のイオン濃度が異なる環境へ

移動する(山野から農地へ移動した場合や、河川の流れて運ばれ沿岸部に到達し、海水中に移行した場合など)と、作物や魚に吸収されやすいイオンとして水に溶け出すことが報告されており、作物等の将来の安全性評価のためには、溶出条件を明らかにする必要があるが、その詳細はいまだ不明なままである。

環境中におけるセシウム挙動の理解は、福島環境修復、ひいては帰還住民の安全に直結する課題であり、迅速な研究開発が求められている。中でも、未解明部分の多い土壌に対するセシウムの吸脱着反応に対して、正確な科学的知見を取得することは、原子力に関わる研究者及び技術者だけでなく、日本の科学技術界全体にとって最も重要な研究課題の一つであると言えよう。

日本原子力研究開発機構では、上記課題の解決を目標とし、国内外の研究機関との連携を通じて、セシウムの吸着化学形態に関する科学的知見の取得から、脱離法の開発、そして貯蔵法の検討を研究課題とするプロジェクトを進めてきた。本解説記事では、セシウムの吸着化学形態に対する科学的知見の取得という最も根本的な課題に対し、前稿解説記事(1)での実験・観測事実を受け、第一原理計算手法と呼ばれる計算科学的アプローチにより得られた成果<sup>1-3)</sup>を報告する。なお、本稿では、土壌構成粒子の中でも、最も特異な吸着様態を示すことが知られている雲母類粘土鉱物に集中し、その吸着機構と吸着化学結合形態に対する解析結果を報告する(雲母類粘土鉱物は福島の地質上も重要な鉱物である。福島県の地質や他の粘土鉱物への吸着形態については、本解説記事(1)に詳述)。そして、その結果に基づき、減容化手法や

*First-Principles Studies on Cesium Adsorption of Clay Minerals: Mechanism and Chemical Bonding*: Masahiko OKUMURA, Hiroki NAKAMURA, Masahiko MACHIDA.

(2013年12月27日受理)

除去土壌の貯蔵法等について議論する。

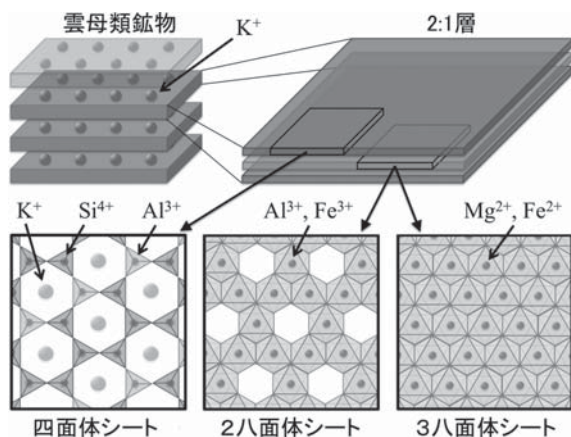
## II. 雲母類粘土鉱物とほつれたエッジ

土壌に吸着している放射性セシウムの重量比を構成粒子の粒径別に比べると、半径  $2\ \mu\text{m}$  以下の“粘土鉱物”が一番大きいことが知られている。これは、粒径が小さいほど、表面積/体積が大きくなるため、自然な帰結であり、吸着は主に粘土鉱物の表面で生じていることが分かる。しかし、粘土鉱物の中でも雲母類粘土鉱物は、非自明な (1) 選択的吸着、(2) 不可逆的吸着を起こすことが知られており、以下ではその謎に迫るべく、雲母類粘土鉱物に集中する。

(1) 選択的吸着とは、粘土鉱物の周りの水中にセシウムイオンとその他のイオンが共存する場合、セシウムイオンが選ばれて吸着することを指す。この事象に対して、「気相イオンの水和傾向が  $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Rb}^+ > \text{Cs}^+$  の順となるため、最も脱水和しやすいセシウムが選択的に吸着される」という説明がある。しかし、脱水和したセシウムは、粘土鉱物に吸着される(気相イオンではなく)ことから、上記説明は不十分であり、雲母類粘土鉱物によるセシウム吸着の選択性はいまだ非自明である。

(2) 不可逆的吸着は、雲母類粘土鉱物に一旦吸着したセシウムが、他のイオンとの交換等で容易に取り出せず、残留することを指している。これも、①選択的吸着と同様に、その理由は自明でない。

なぜ、これらの非自明な吸着反応が雲母類粘土鉱物だけで起こるのであろうか。その原因を探るため、まず、雲母類粘土鉱物の基礎となる結晶構造から見ていこう<sup>4)</sup>。第1図は欠陥がない様な結晶構造の模式図である。主な構成要素は、正電荷イオン(主にカリウム)と負に帯電した2:1層である。2:1層は四面体シートと八面体シートからなる。前者はケイ素(シリコン)を中心として酸素を頂点とした四面体が、後者はアルミニウムを中心として酸素を頂点とした八面体が配置し、頂点の酸素を



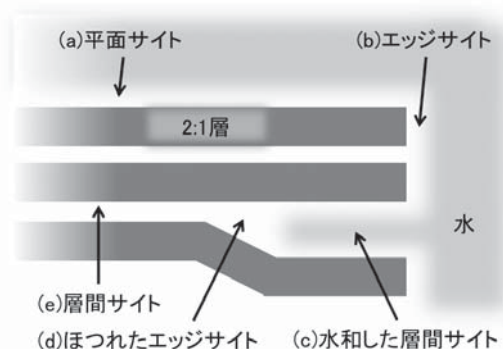
第1図 雲母類鉱物の構造

共有することで、第1図に示すようなシートが重なった構造を形成する(八面体シートにはその構成の違いから、2八面体シートと3八面体シートの2種類がある)。先に「2:1層は負に帯電している」と述べたが、それは、四面体や八面体の中心原子(ケイ素やアルミニウムなど)が置換されることで実現する(例:四面体シートの場合  $\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$ 、2八面体シートの場合  $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Mg}^{2+}$ )。このように、雲母類粘土鉱物は負に帯電した2:1層と陽イオンからなる層が引き合い、層状構造を形成する。

以上、無限に続く理想上の結晶構造を説明したが、実際の粘土鉱物では、“端”が存在する。端は環境と接するため、風化し第2図のような構造になると推測されている<sup>5)</sup>。こうした構造も考慮すると、セシウムの吸着サイトは(a)平面サイト、(b)エッジサイト、(c)水和した層間サイト、(d)ほつれたエッジサイト、(e)層間サイト、に分類される。

(a)平面サイトは最も面積が広く、四面体/八面体シートの負電荷が吸着の原因となるが、吸着・脱離しやすい吸着サイトで、特異な吸着特性を持たない。(b)エッジサイトは、エッジに存在するヒドロキシル基(OH基)の水素イオンとセシウムイオン(共に+1価)が交換することにより吸着が起こり得る。しかし、四面体/八面体シートの恒久的負電荷による吸着よりも弱いと考えられている。(c)水和した層間サイトの吸着特性は、水和した層間サイトから構成される雲母類粘土鉱物の一種である「パーミキュライト」や「スメクタイト」等の粘土鉱物の吸着特性と同じと考えられる。それらの粘土鉱物は、多くの実験結果から、風化した雲母類粘土鉱物よりも選択性が低いことが知られている。(e)層間サイトは、層間が閉じているため、層間イオンと外部の水和イオンとの直接交換は起こり難く、吸着はほとんど起こらないと考えられる。

以上、(a)~(c)、(e)のいずれのサイトも特異な吸着特性を示さない。従って、特異性は(d)ほつれたエッジサイトに起因するものであると考えられ、これまでに



第2図 環境中の雲母類鉱物の存在形態

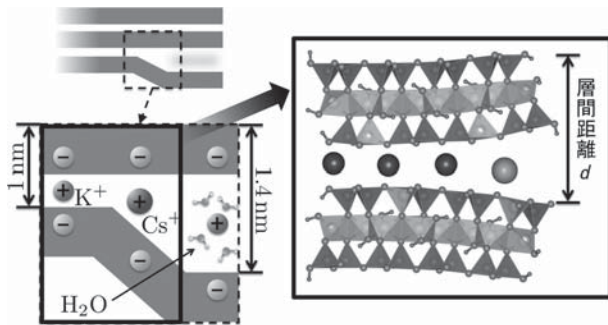
様々な研究が行われてきた。

しかしながら、そもそも、疑問①「ほつれたエッジサイトはセシウムを本当に選択的に吸着するのか否か?」、疑問②「ほつれたエッジサイトのセシウム吸着機構は?」、更に疑問③「吸着したセシウムと粘土鉱物の化学結合形態は?」の3つの疑問が残る。これらの問いに答えるため、実験で直接観測の難しい、ほつれたエッジサイトの原子レベルの構造を計算機上でモデリングし、第一原理計算手法(密度汎関数法)により解析を行った<sup>1~3)</sup>。

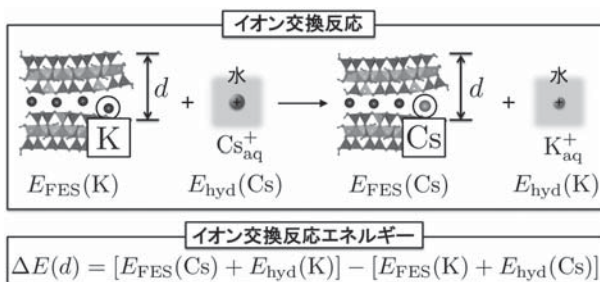
III. 第一原理計算による解析結果

1. ほつれたエッジのセシウム吸着機構

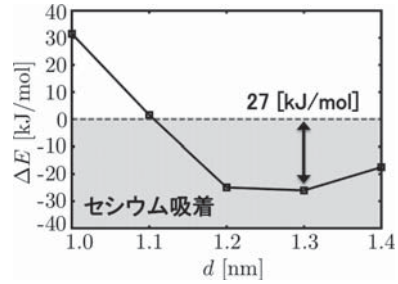
まず、疑問①「ほつれたエッジサイトはセシウムを本当に選択的に吸着するか否か?」という問いに答えるために、典型的な雲母類鉱物である白雲母のほつれたエッジサイトを計算機上でモデリングした(第3図)。詳しい作成方法は文献<sup>1)</sup>に譲るが、モデルでは、ほつれたエッジサイトの特徴であるくさび形構造を第3図(原子数176個で構成)のように作成し、層間距離 $d$ を変化させ、風化の度合いがセシウム吸着に及ぼす影響を調べた。具体的には、ほつれたエッジに本来あったカリウムイオンと粘土鉱物を取り巻く水中に存在する水和セシウムイオンとのイオン交換におけるエネルギー差 $\Delta E$ を、層間距離 $d$ を変数として評価した(第4図)。ただし、各イオンの水和エネルギー $E_{hyd}$ (K/Cs)については、簡略化するため、実験値を用いた。計算は、Vienna Ab initio Simulation Package (VASP)<sup>6)</sup>を用いて日本原子力研究開発機構のBX900スーパーコンピュータ上で行い、第5図の結果を得るのに128~512並列で数週間を要



第3図 ほつれたエッジサイトのモデリング



第4図 イオン交換反応エネルギーの定義

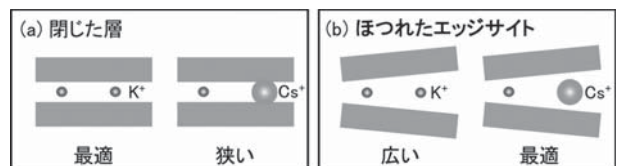


第5図 イオン交換エネルギーの層間距離依存性

した。計算結果である第5図から、層間が開いている時( $d=1\text{nm}$ )は、イオン交換反応エネルギーは正であり、ほつれたエッジがカリウムを脱離させてセシウムを吸着すると、エネルギーを損することを意味している。つまり、層間が開いた状態では、セシウム吸着は起こり難い。しかし、層間距離 $d$ が $1.1\text{nm}$ より広がると、そのイオン交換反応エネルギーが負になることが分かる。これは、ほつれたエッジがカリウムを放出し、セシウムを吸着することを意味している。この結果により、ほつれたエッジは層間が開くことでセシウムを選択的に吸着することが明確に示された。

次に、疑問②「ほつれたエッジサイトのセシウム吸着機構とは?」という問いに答える。詳細な計算・解析結果は文献<sup>1)</sup>を参照していただくとして、第一原理計算から「ほつれたエッジの層間距離とセシウムのイオン直径との適合」が吸着機構であることが分かった。それを模式的に記したのが第6図である。第6図(a)のように、雲母類粘土鉱物は元々カリウムイオンによって構成されているため、そのイオン半径に適した層間距離となっている。そこに、より大きなイオン半径を持つセシウムイオンが入り込むと、エネルギー的に不安定になる。ところが、風化によってエッジがほつれることによって層間距離が開き、セシウムイオンに適した大きになると、今度はセシウムイオンが入り込んだ方がエネルギー的により安定になる(第5図の計算結果及び第6図(b)参照)。これは、ゼオライトがセシウムを極めて効率良く吸着する機構と本質的に共通である<sup>7)</sup>。

本節の最後に、本研究と実験との比較結果を示し、モデルの妥当性を議論しよう。第4図のイオン交換エネルギーは、正確には「標準反応ギブズエネルギー」であるが、これは実験で測定可能な選択係数 $K_c$ から算出することが可能である。我々の計算結果と実験値を比較すると、両者ともに約 $27\text{kJ/mol}$ であり(第5図及び文献<sup>8)</sup>)、



第6図 吸着機構を示す模式図



極めてよく一致する。本解析では様々な単純化を行っているが、この定量的一致は、我々のモデル計算が本質を十分に捉えている可能性を示していると考えられる。

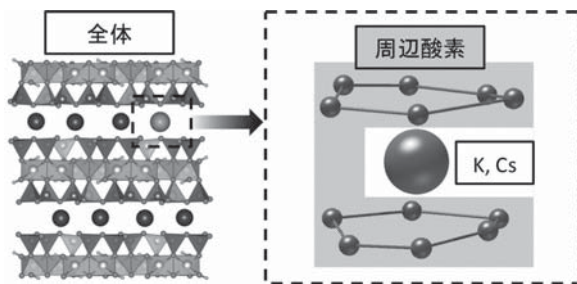
## 2. 粘土鉱物とセシウムの化学結合形態

これまで、雲母類粘土鉱物におけるセシウムの吸着機構について述べたが、本節では、最後の疑問③「吸着したセシウムと粘土鉱物の化学結合形態は？」に回答し、結合形態の詳細を明らかにする。セシウム(陽イオン)は粘土鉱物の構成要素のうち、酸素(陰イオン)と引き合う。従って、酸素とセシウムの化学結合が重要であり、第一原理計算結果からその結合形態を詳しく評価した。計算はBX900上でVASP<sup>6)</sup>を用いて行い、第8図の結果を得るのに128並列で数十時間を要した。

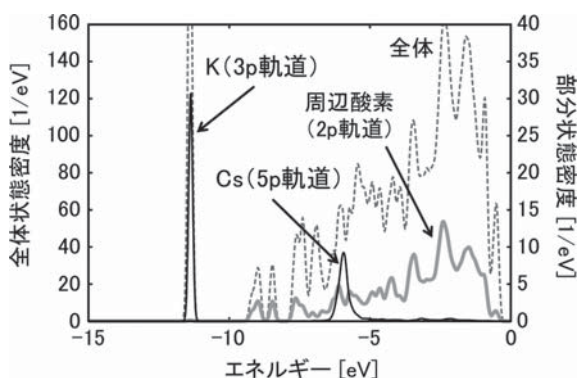
セシウムと粘土鉱物が強く結合する状況として、ほつれたエッジにセシウムが吸着した後に層間が閉じる現象(後述)が知られており、このような状態を想定し、バルクの白雲母のカリウムの一つをセシウムに置換した状態で計算を行った(第7図左図<sup>9)</sup>参照。原子数168個で構成)。第8図には、全電子、カリウムの3p軌道及びセシウムの5p軌道電子の状態密度、周辺最近接12個の酸素原子(第7図参照)の2p軌道電子の状態密度の和のエネルギー依存性を各々示した。まず、カリウムの3p軌道の状態密度の位置と形に注目してみよう。-11.3[eV]周辺を中心に鋭いピークが存在する。更に、このピークは周囲の元素の状態密度ピーク、特に、近接した酸素の状態密度と重なりが全くないことが見て取れる。これらの特徴は、カリウムの内郭電子がしっかりと原子

核に束縛され、原子軌道を構成して、カリウムが一つの陽イオンとして存在していることを示している。つまり、この結果から、カリウムは陽イオンとして雲母類粘土鉱物とイオン結合していると判断できる。一方、セシウムの内郭電子の状態密度を見ると、その位置は近接した酸素の状態密度と大きく重なり、その形はカリウムのように鋭いピーク構造ではなく、広がっている。これは、セシウムと近接酸素が電子を共有していることを示唆している。つまり、セシウムはカリウムと違って、粘土鉱物内で単なるイオンとして存在するのではなく、粘土鉱物の酸素と電子を共有し、分子軌道を形成していることが分かる。

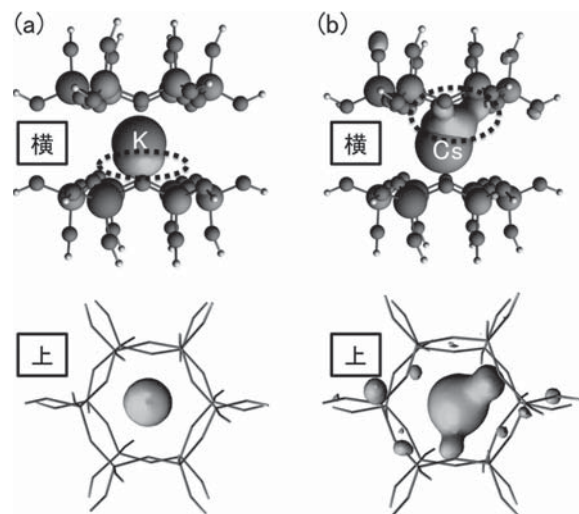
これらの考察結果を直接検証するために、雲母類粘土鉱物に対し、セシウムが吸着したサイトの近傍のみを切り取り、適当な処理を行った後、電子の波動関数を視覚化した。計算はPC上でAmsterdam Density Functional program (ADF)<sup>10)</sup>を用いて行い、第9図の結果を得るのに12並列で数分である。第9図に、電子の存在確率が0.03となる等高面を示す。第9図(a)はカリウムと近接酸素の波動関数を示しているが、カリウムの電子の波動関数の広がりほとんどなく、状態密度から内郭電子が原子軌道に束縛されているとした考察が正しいことを示唆している。一方、第9図(b)はセシウムと近接酸素が結合している際の波動関数を示しており、セシウムの波動関数は近接酸素にその存在密度を拡げていることが分かる。これも、状態密度からの考察結果を裏付けるものであり、セシウムと粘土鉱物の酸素との間には電子を共有する分子軌道が形成されることが分かる。つまり、化学結合形態は単なるイオン結合だけではなく、共有結合性も有することが示された。



第7図 全体状態密度と部分状態密度の分け方



第8図 全体状態密度と部分状態密度



第9図 イオンと粘土鉱物内酸素の分子軌道(a)カリウム、(b)セシウム  
上からの図は粘土鉱物を簡略化して表記した。

#### IV. おわりに

本章では、これまでに紹介した科学的知見を基に、セシウムの土壌吸着シナリオと減容化法及び貯蔵法の開発や環境中セシウム動態研究の方向性について議論する。

土壌中には大量の種々の粘土鉱物が存在するが、ほつれたエッジを持つ雲母類粘土鉱物も、多く存在することが分かっている<sup>11)</sup>。従って、多くの放射性セシウムが、十分な時間経過(条件にもよるが、数分から数週間<sup>12,13)</sup>の後、その安定な吸着サイトに入り込む。ただし、吸着後の状態によって不可逆性の度合いが異なることを指摘する。まず、ほつれたエッジ周辺において陽イオン濃度が低い場合は、セシウム吸着後もほつれたエッジは閉じないまま、第4図の化学反応が平衡状態に達する。この場合、層間がセシウムに適した距離であるためイオン交換は起こり難く、不可逆性が発現したように見える。一方、ほつれたエッジ周辺において、陽イオン濃度が高い場合や、極微量のセシウムが吸着した後に様々な要因によりカリウム等のイオン濃度が高まった場合には、十分な時間経過の後、層間が閉じてしまい、真の不可逆性が現れる。

次に、このシナリオに沿い、雲母類鉱物のほつれたエッジから放射性セシウムを取り出す方法について考える。ほつれたエッジが十分に閉じていない雲母類粘土鉱物の場合、イオン交換は基本的に可能である。ただし、イオン半径が同じ非放射性セシウムイオン、または、セシウムイオンに近い半径を有するルビジウムイオンやアンモニウムイオンのように交換率の高いイオンを用いるのが有効である。その際、ほつれたエッジが閉じないよう、交換に用いるイオン濃度は十分に低い必要がある。一方、ほつれたエッジが閉じた雲母類粘土鉱物の場合、酸などによる溶解によって、粘土鉱物の骨格を破壊する必要があるだろう。ただし、実際には両者が混在すると考えられるため、上記手法を組み合わせて実践するのが効果的である。

上記の考察を踏まえて、大量の除去土壌に対する減容化と貯蔵について議論しよう。土壌から微量の放射性セシウムを完全に除去するのは容易でないことから、放射性セシウムの濃度が高い土壌を減容することを目標にするのが現実的である。まず、セシウムを強く吸着するが、体積の小さい雲母類粘土鉱物を土壌から分離するのが有効である。現在開発中の粒径による分級法や帯磁した雲母類粘土鉱物を磁気分離法などによって分離できれば、低セシウム濃度の土壌と少量の高セシウム濃度の粘土とに分離できる。前者はイオン交換等により、可能な限り放射性セシウムを取り除き貯蔵する。一方、後者は、上記の考察に基づき、酸やアルカリで土壌構成粒子表面を一部融解し、放射性セシウムを放出させ、選択性の高い吸着材により捕集し、残った土壌を貯蔵する。た

だし、この処理を効率的且つ経済的に行うためには、融解過程を理解し、セシウム除去過程を最適化する必要がある。そのためには、今後、実験と原子・分子レベルのシミュレーションの双方からの研究が必要であろう。

最後に、放射性セシウムの貯蔵施設からの漏洩の可能性とその対策、そして、環境中での動態について述べる。上記の知見を基に、貯蔵に際して処理を適切に行えば、貯蔵施設からのセシウムの漏洩は多くないと期待できる。しかし、漏洩の可能性とその対策を考慮しておくことは必要である。漏洩の形態には、セシウムの吸着した土壌が漏洩する可能性に加えて、次に挙げる2つの可能性から、水溶したセシウムイオンの漏洩も考えられる。

一つ目は、これまで土壌中に存在する生物由来の有機物を無視してきたが、有機物により雲母類粘土鉱物が被覆され、セシウムがほつれたエッジまで到達できずに土壌から脱離する可能性である。二つ目は、腐敗等の微生物相の影響により、酸やアンモニア等が相当量発生し、先に論じたイオン交換や表面での融解が自然に起こってセシウムが水に溶出する可能性である。従って、漏洩対策として、貯蔵施設から漏洩した場合の溶存体放射性セシウムの挙動をシミュレーション等で予測し、適切な位置にモニタリング装置を設置して、継続的な放射線モニタリングを行うことが有効と考えられる。漏洩した溶存体セシウムは、周辺の土壌に吸着されると考えられるため、周辺土壌の事前調査を行い、土壌中の挙動を予測する必要がある。また、地表近くで漏洩したセシウムを吸着した周辺土壌は、風雨などによって環境中を移動すると考えられるが、これらについては、様々な研究機関が実施しているセシウムの環境中動態研究の成果を整理し活用できる。

今後は、本稿の静的な知見を発展させ、セシウム脱離条件等の動的挙動の知見を取得する一方、粘土粒子同士の相互作用やそれらの塩水中での挙動などにも本稿のミクロな知見を活用し、様々な環境中での動態研究にも寄与することを目標としたい。

#### — 参考文献 —

- 1) M. Okumura, H. Nakamura, M. Machida, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 033802 (2013).
- 2) 奥村雅彦, 他, 表面科学, **34**, 135 (2013).
- 3) 奥村雅彦, 他, RIST NEWS, **55**, 24 (2013).
- 4) 粘土ハンドブック第三版, 日本粘土学会編, 技報堂出版, (2009).
- 5) B.L. Sawhney, *Clays Clay Miner.*, **20**, 93 (1972);  
R.M. Cornell, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **171**, 483 (1993);  
B. Delvaux, *et al.*, in *Trace Elements in the Rhizosphere*, ed. G.R. Gobran, *et al.* (CRC Press, Boca Raton, FL, 2001) p.61;  
A. Nakao, *et al.*, SANSUI: An Environmental Journal for the Global Community, **6**, 17 (2012).
- 6) G. Kresse, J. Hafner, *Phys. Rev.*, **B 47**, 558 (1993);

- G. Kresse, J. Furthmüller, *Phys. Rev.*, B **54**, 11169 (1996).
- 7) H. Nakamura, M. Okumura, M. Machida, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **82**, 023801 (2013).
- 8) J. Zachara, *et al.*, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **66**, 193 (2002).
- 9) K. Momma, F. Izumi, *J. Appl. Crystallogr.*, **44**, 1272 (2011).
- 10) G. te Velde, *et al.*, *J. Com. Chem.*, **22**, 931 (2001).
- 11) A. Nakao, *et al.*, *Sci. Total. Environ.*, **468-469**, 523 (2014).
- 12) A. De Koning, R.N.J. Comans, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 2815 (2004).
- 13) R.N.J. Comans, D.E. Hockley, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 1157 (1992).

### 著者紹介

奥村雅彦 (おくむら・まさひこ)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野) 環境中のマイクロ現象  
とその原子・分子シミュレーション解析

中村博樹 (なかむら・ひろき)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野) 計算物理学, 原子・  
分子のシミュレーション

町田昌彦 (まちだ・まさひこ)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野) 理論及び計算物理学,  
放射線科学, 生命科学

## 新刊紹介

### エネルギー問題の誤解 いまそれをとく

小西哲之著, 241p. (2013.8), 化学同人(定価 1,800 円)  
ISBN-10: 4759813543

東日本大震災で、われわれはライフラインとしてのエネルギー供給が短期間で失われるという強烈な体験をした。以来、わが国ではエネルギーセキュリティ確保を巡る議論は政策決定者にとどまらず、全国的な関心事となった。しかし、これらの議論は必ずしも科学的根拠に基づいているとは言いがたく、またエネルギーの成り立ちや社会・環境との関係に関する共通認識を有していないために、噛み合わない議論も多い。こうした状況において、本書は数式や専門用語を出来る限り排除し平易な言葉で、エネルギーとは何か、今後のエネルギー選択はどうあるべきかを丁寧に分析・解説している。

本書は、エネルギー問題の本質はエネルギーが「あるかないか」ではなく、「エネルギーが必要な場所に、必要な時に届くかどうか」であることを前提としている。したがって本書の特徴は、「資源の枯渇化」や「(二酸化炭素排出量が少ないという意味において)エコ」のみに論拠を置く短絡的な議論とは一線を画し、エネルギーを「変換」し、「運搬」し、「分配」す

るサプライチェーン全体を見て、どこに問題の本質(本書では「制約」という語が用いられている)があるかを見極めようという姿勢にある。そして、このエネルギーの「制約」を作り出すのは工学・科学だけでなく、経済や政治の論理であるとして、多角的視点から化石燃料資源、原子力及び再生可能エネルギーのそれぞれの強みと問題の所在を明らかにした上で将来のエネルギーシステムの選択肢を提示している。一つのエネルギー源に偏重することなくバランスのいい議論を展開しているのが印象的であった。

とかく震災後は、感情的・一面的議論が散見されるが、国民が主体的に将来のエネルギー選択に参画するためには冷静かつ論理的にエネルギー問題をとらえなおし議論の共通基盤を構築することは重要であろう。本書は専門的知識がなくても十分に読み進められるため、エネルギー問題に関心を寄せる一般の人々に「議論の入り口」としてぜひ一読を勧めたい。また、原子力の専門家である本学会誌読者諸氏にも、今一度、日本の将来のエネルギー構成を考え直すための好機を提供する良書と言えるであろう。

(日本原子力研究開発機構・川久保陽子)



# ABWR における MOX 燃料の全炉心利用技術 フル MOX の技術的バックグラウンドは何か？

電源開発(株) 小林 哲朗

現在建設中の大間原子力発電所(電気出力 1,383MW, 青森県大間町)は, MOX 燃料を全炉心で利用できる“フル MOX-ABWR”であり, 軽水炉のフル MOX は世界で実績がないとの理由から「商業炉で危険な実験をするようなもの」との誤解もある。そこで本稿では, MOX 燃料炉心の特徴を紹介しつつ, フル MOX-ABWR の技術的バックグラウンドを解説する。

## I. はじめに

大間原子力発電所は, ウラン燃料だけでなく, ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料(MOX 燃料)も全炉心で利用できる改良型沸騰水型軽水炉(ABWR)であり, MOX 燃料の炉心装荷率を段階的に増やし, 全炉心での MOX 燃料利用を目指している。

このことから, 本発電所は, 1995 年 8 月の原子力委員会決定において, 「中期的な核燃料リサイクルの中核的担い手である軽水炉による MOX 燃料利用計画の柔軟性を拡げるといふ政策的な位置づけを持つ」とされている。

## II. 国内外での MOX 燃料の実績

### 1. MOX 燃料の利用実績

海外の軽水炉においては, 1960 年代から 50 基を超える原子力発電所で累計 7,000 体以上の MOX 燃料が装荷されており, フランスやドイツでは多くの MOX 燃料が継続的に利用されている(2011 年末現在)<sup>1)</sup>。

ドイツのカール(BWR, 電気出力 16MW)において, MOX 燃料棒が 1/4 程度入った MOX 燃料集合体を全炉心に装荷した例があり, フランスでは, 欧州加圧水型軽水炉 EPR において MOX 燃料の炉心装荷率を 100%にすることが検討されているが, 現在, 海外では MOX 燃料集合体は炉心装荷率約 40%以下で利用されている。

一方, 国内の軽水炉においては, 1986~1991 年に BWR, PWR 各 1 基で MOX 燃料の少数体規模の照射実証が行われ, 2009 年からは MOX 燃料の本格的な利用(MOX 燃料棒の炉心装荷率 1/3 まで)が始まっている。

また, 新型転換炉ふげん発電所(2003 年 3 月に運転終

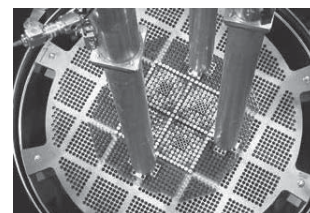
了)では, 1978 年以来, MOX 燃料集合体を累計 772 体(炉心装荷率 34~72%)装荷した実績<sup>2)</sup>があり, 沸騰軽水冷却であるなど BWR と同様の燃料使用環境である。そのため, MOX 燃料の取扱い・管理技術のほか, BWR の燃料棒熱・機械設計コードの MOX 燃料への適用性の確認<sup>3)</sup>など, 軽水炉の MOX 燃料利用に多くの知見を提供している。

軽水炉などにおいて, MOX 燃料集合体の全炉心利用の実績は限られるものの, 以上のように, MOX 燃料の利用自体は一般に普及している技術といえる。

### 2. 全炉心に MOX 燃料を装荷した試験

全炉心に MOX 燃料を装荷して行われた炉物理試験は, 1970 年代には日本原子力研究所(現, 日本原子力研究開発機構(JAEA))の軽水臨界実験装置 TCA において行われ<sup>4)</sup>, 2000 年以降では, 原子力安全基盤機構(現, 原子力規制委員会)により, フランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)の軽水臨界実験装置 EOLE(第 1 図)において行われた<sup>5)</sup>。これらの試験のほか, MOX 燃料を炉心の一部に装荷した臨界実験装置や軽水炉の測定データも用いて, BWR の核設計コードが MOX 燃料炉心でもウラン燃料炉心と同等の精度で解析できることを確認している<sup>6,7)</sup>。

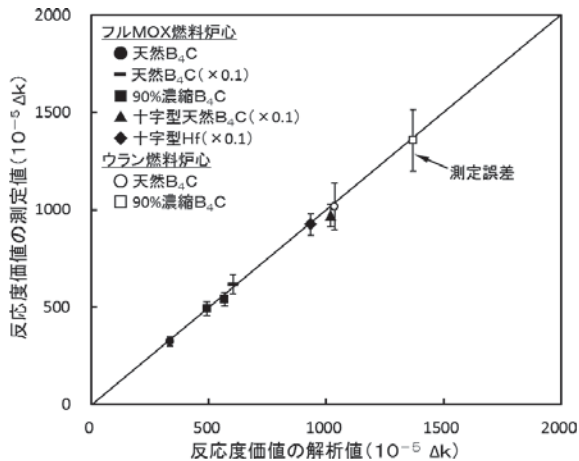
その一例として, 第 2 図に示す EOLE における制御



第 1 図 EOLE の炉心  
(旧)原子力安全基盤機構パンフレットより)

Status of the Full-MOX reactor Technology in ABWR :  
Tetsuro KOBAYASHI.

(2014 年 1 月 10 日 受理)



第2図 EOLEにおける制御材反応度値測定<sup>6,7)</sup>

材反応度値測定では、測定値と解析値が測定誤差の範囲内で一致しており、燃料や制御材の種類によらず同等の精度で解析できている<sup>6,7)</sup>。

### III. 大間原子力発電所での MOX 燃料利用

大間原子力発電所で使用する MOX 燃料は、その炉心装荷率が 1/3 程度までの BWR と同様、これまで十分な使用実績があるウラン燃料「高燃焼度 8 × 8 燃料」と同一の基本構造としている。また、ウラン燃料は、BWR で現在使用されている「9 × 9 燃料」である(第 1 表)。

MOX 燃料を全炉心(燃料集合体 872 体)に装荷する場合、核分裂性プルトニウムの年間平均使用量は約 1.1t

第 1 表 大間原子力発電所の燃料集合体(取替燃料)

項目	9 × 9 燃料 <sup>*1</sup>	MOX 燃料
<b>燃料集合体</b>		
配列	9 行 × 9 列	8 行 × 8 列
全長	約 447m	同左
燃料棒本数	A 型: 74 本 B 型: 72 本	60 本(うち MOX 燃料棒 48 本)
ウォータロッド	A 型: 2 本	1 本
ウォータチャンネル	B 型: 1 本	—
平均 <sup>235</sup> U 濃縮度	約 3.8 wt%	約 1.2 wt% <sup>*2</sup>
平均 Puf 富化度	—	約 2.9 wt% <sup>*3</sup>
最高燃焼度	55 GWd/t	40 GWd/t
取出平均燃焼度	約 45 GWd/t	約 33 GWd/t
<b>燃料棒</b>		
外径	約 11mm	約 12mm
被覆管厚さ	約 0.7mm	約 0.9mm
有効長さ	A 型: 約 3.7m 約 2.2m(短尺)	約 3.7m(ウラン) 約 3.6m(MOX)
ペレット材	UO <sub>2</sub> UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub> UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

\*1 A 型と B 型は燃料製造メーカーが異なり、その設計仕様等が多少違うが性能は同等である。  
\*2 プルトニウムと混合する劣化ウランの <sup>235</sup>U 濃縮度が約 0.2wt% の場合。  
\*3 原料プルトニウムの Puf(核分裂性プルトニウム)割合が約 67wt% の場合。MOX 燃料棒は約 3.6wt%。

であり、ウラン燃料炉心の 1,000MW 級軽水炉で発生する核分裂性プルトニウム量(約 0.14t/年)の 7 ~ 8 基分に相当する。

また、ウラン精鉱(天然ウラン)の年間平均必要量は、ウラン燃料を全炉心に装荷する場合の約 1/3 になる。

ここで、MOX 燃料を全炉心に装荷する場合でも天然ウランが必要なのは、MOX 燃料集合体中の燃料棒 60 本のうち 12 本がウラン燃料棒(第 3 図)であるためである。

このことから、大間原子力発電所は、燃料集合体の炉心装荷率でみて“フル MOX”と呼んでいるが、燃料棒の炉心装荷率で見ると“80% MOX”である。

以下、MOX 燃料棒の割合が 80% (燃料集合体の全燃料棒に対する MOX 燃料棒の出力分担が支配的)である MOX 燃料集合体を全炉心に装荷したものをフル MOX 燃料炉心ということとする。

### IV. フル MOX 燃料炉心の特徴と影響

一般に、MOX 燃料または MOX 燃料を装荷した炉心には、ウラン燃料またはウラン燃料を装荷した炉心と比べて、第 2 表に示す特徴がある。

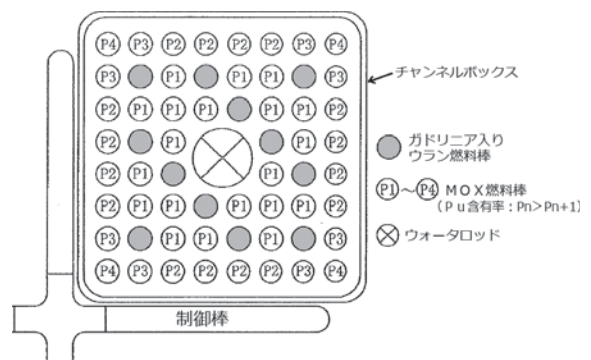
第 4 図に示すように、ウラン燃料炉心でも、ウランから生成したプルトニウムが核分裂しており、全核分裂に占める割合は 30 ~ 40% である。フル MOX 燃料炉心ではプルトニウムの核分裂は約 80% を占めるようになる。

同様に、炉心全体の核特性は MOX 燃料の炉心装荷率に応じて変化することから、以下では、このような核特性を中心に、フル MOX 燃料炉心を、9 × 9 (A 型)燃料のみを装荷したウラン燃料炉心と比較して述べる。

#### 1. ボイド係数およびドップラー係数

ボイド係数(減速材の気泡の増減による反応度変化)およびドップラー係数(燃料温度の増減による反応度変化)は BWR の主要な負のフィードバックであり、これらは、原子炉の出力増加に対しては増加を抑制するように、出力低下に対しては低下を抑制するように働く。

フル MOX 燃料炉心では、ウラン燃料炉心に比べて両係数ともより負になるため(第 3 表)、異常時の出力増加がより抑制される。一方、通常運転時では、ボイド係



第 3 図 MOX 燃料集合体の燃料棒配置

第2表 MOX 燃料炉心の主な特徴とその影響

一般的な特徴	主な影響
<b>&lt;核特性&gt;</b>	
①ボイド係数, ドップラー係数がより負となる*	通常運転時の運転制御異常時のプラント挙動
②遅発中性子割合, 遅発中性子寿命が小さい*	通常運転時の運転制御異常時のプラント挙動
③制御材の反応度値が相対的に低下*	制御棒反応度 ホウ酸水反応度
④燃料組成と核分裂収率の違いにより, 放射性物質の炉内蓄積量が異なる*	崩壊熱 放射性物質の環境への放出量
⑤燃料集合体外周などの熱中性子が多い所にある燃料棒の出力がより高くなる	燃料集合体内出力分布
<b>&lt;物性・照射挙動&gt;</b>	
⑥ペレット融点, 熱伝導度がプルトニウム含有率の増加に伴い低下する	燃料ペレット温度
⑦核分裂生成ガス放出率およびヘリウム生成量がウランペレットより高くなる	燃料棒内圧
⑧ペレット内にプルトニウム含有率が局所的に高いプルトニウムスポットが存在する	燃料ペレット温度

\* MOX 燃料の炉心装荷率に応じて炉心全体への影響が変化する。

第3表 炉心の核特性(平衡サイクル 初期～末期)

	フル MOX 燃料炉心	ウラン燃料炉心
ボイド係数 (\$/%ボイド)*	-0.21 ~ -0.22	-0.14 ~ -0.15
ドップラー係数 (\$/°C)*	-0.32 ~ -0.31 × 10 <sup>-2</sup>	-0.23 ~ -0.27 × 10 <sup>-2</sup>
遅発中性子割合 (%)	0.42 ~ 0.43	0.60 ~ 0.53
即発中性子寿命 (μsec)	22 ~ 26	35 ~ 43

\* \$ = (Δk/k)/遅発中性子割合

数がより負になると, そのフィードバックの時間遅れにより, 炉心全体の出力振動が起こりやすい方向となる。また, 原子炉圧力が急激に増加するような負荷の喪失事象では出力上昇がより大きくなる。

前者については, 炉心全体の出力振動に対する安定性の減幅比(1を超えると発振)の最大値は, フル MOX 燃料炉心では 0.68 と, ウラン燃料炉心の 0.37 から増加するが十分に減衰する。また, 後者についても, 負荷の喪失事象における燃料表面熱流束の最大値は, フル MOX 燃料炉心では定格の約 109%と, ウラン燃料炉心の約 102%(初期値とほぼ同じ)から増加するが, 燃料損傷の基準 165%を十分下まわる。

なお, ABWR は, 従来の BWR よりチャンネルボックス外側の非沸騰の水領域が大きいので, ボイド係数の絶対値が低減する。例えば, ABWR のフル MOX 燃料炉心のボイド係数は, 水領域が 1 割以上小さい BWR の 1/3MOX 燃料炉心のボイド係数とほぼ同じである。

2. 遅発中性子割合および即発中性子寿命

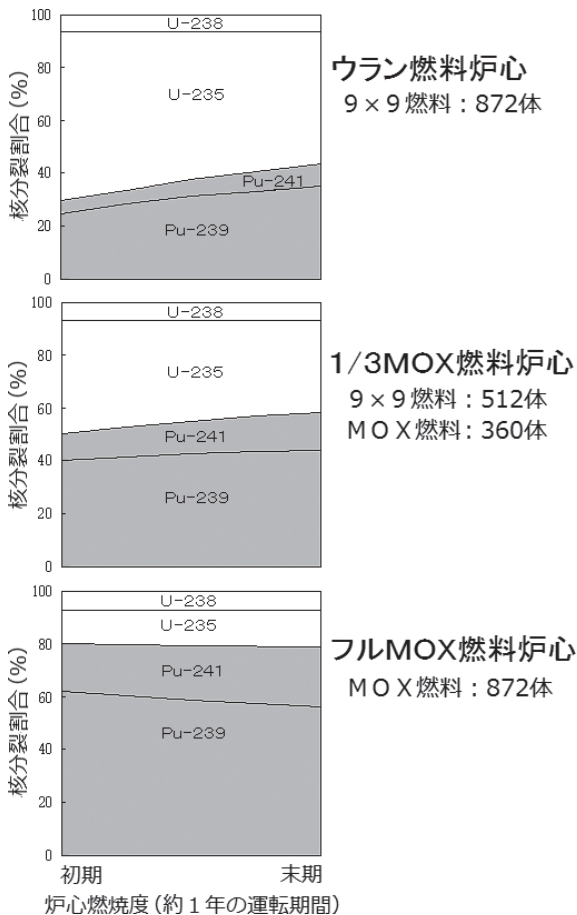
核分裂反応により発生する 2~3 個の中性子のほとんどは核分裂後 10<sup>-4</sup> 秒程度で放出(即発中性子)され, 一部は 1 秒以上の時間遅れで放出(遅発中性子)される。

即発中性子寿命や遅発中性子割合が小さくなると反応度投入時の出力増加率は大きくなり, 遅発中性子割合が小さいと投入反応度(単位 \$)も大きくなる。

このため, 制御棒落下事故において, フル MOX 燃料炉心では, ウラン燃料炉心に比べて, 即発中性子寿命や遅発中性子割合が小さく(第3表), 出力増加率はより大きくなるが, 出力増加を抑制するドップラー係数がより負となるため, 炉心および原子炉冷却材圧力バウンダリーの健全性の指標である燃料エンタルピーの最大値は, 両炉心でほぼ同等である。

3. 制御棒およびホウ酸水の反応度値

一般に, MOX 燃料を装荷すると, 熱中性子を吸収しやすいプルトニウムによって熱中性子が減り, 制御棒などが吸収できる熱中性子が減るため, 制御棒などの反応度値が相対的に低下する。これについて以下に述べる。



第4図 ウランとプルトニウムの核分裂割合(ABWR)

(1) 制御棒系

BWR は制御棒をチャンネルボックス外側の水領域に挿入する構造であり、この水領域は燃料領域よりも MOX 燃料装荷に伴う熱中性子束の低下が小さいため、制御棒の反応度値は MOX 燃料装荷による影響を受けにくい。さらに、ABWR は従来の BWR よりもこの水領域が大きいので、MOX 燃料を全炉心まで装荷しても全制御棒 (205 本) の反応度値の低下はわずかである (第 5、6 図)。

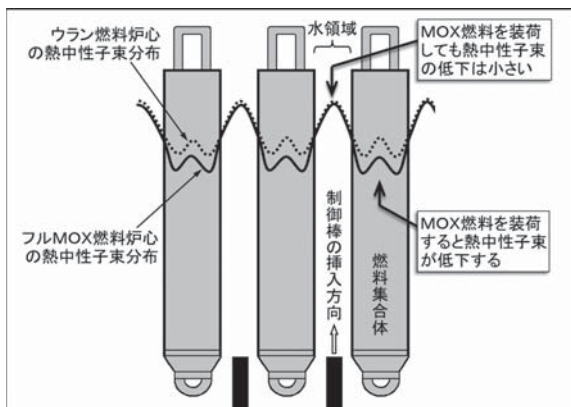
このため、原子炉停止余裕 (反応度値が最大の制御棒が挿入できなくても残りの制御棒で原子炉を停止できる余裕度: 単位  $\Delta k$ ) は、フル MOX 燃料炉心とウラン燃料炉心とで同等である。

また、フル MOX 燃料炉心のスクラム反応度 (原子炉を緊急停止する能力) は、遅発中性子割合が小さくなる効果によって、むしろウラン燃料炉心よりも大きくなる (第 7 図)。なお、安全評価においては、スクラム反応度がより小さい設計値を用い、より厳しい評価結果になるようにしている。

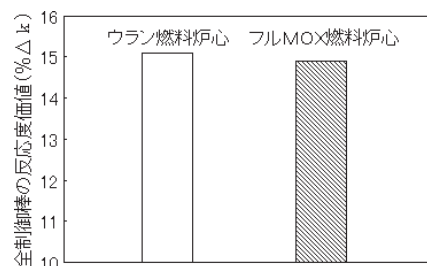
(2) ホウ酸水注入系

ホウ酸水注入系は、万一、制御棒が挿入できない場合のバックアップとして、熱中性子を吸収するホウ酸水を炉心の冷却水に注入し、原子炉を停止させる設備である。

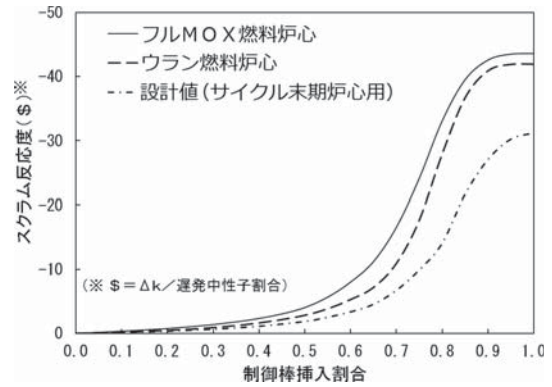
ホウ酸水は、制御棒と異なり炉心全体に注入されるため、MOX 燃料を全炉心まで装荷するとホウ酸水の反応度値の低下が大きく、後述の設備対応が必要となる。



第 5 図 炉心内の熱中性子束分布のイメージ



第 6 図 全制御棒の反応度値 (平衡サイクル末期)



第 7 図 制御棒のスクラム反応度 (平衡サイクル末期)

4. 放射性物質の炉内蓄積量

MOX 燃料とウラン燃料では、初期の燃料組成や核分裂収率 (核分裂で生じた核種の生成率) の違いで、放射性物質の炉内蓄積量が異なるため、以下の影響がある。

(1) 崩壊熱<sup>8)</sup>

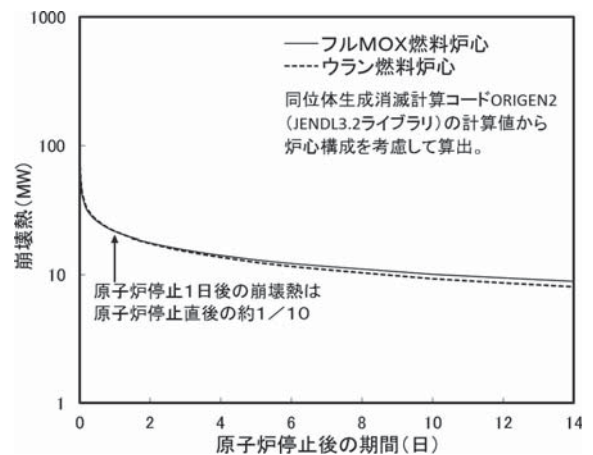
崩壊熱とは、<sup>235</sup>U や <sup>239</sup>Pu が核分裂してできた半減期の比較的短い核分裂生成物およびプルトニウムなどが核分裂せずに核変換してできた半減期の長い超ウラン元素が、原子炉停止後に核変換するときの発生熱である。

核分裂発生エネルギーあたりの核分裂生成物の生成量は <sup>235</sup>U よりも <sup>239</sup>Pu の方が若干少なく、燃焼度もウラン燃料より MOX 燃料の方が低いため、第 8 図の例では、原子炉停止後 1 日程度まではフル MOX 燃料炉心の崩壊熱はウラン燃料炉心よりも若干小さい。その後、核分裂生成物が減り、超ウラン元素の発熱が相対的に大きくなると、フル MOX 燃料炉心の崩壊熱の方が大きくなる。

このため、原子炉停止後に非常用炉心冷却系の機能が喪失するような重大事故の場合、事故発生後すみやかに炉心冷却のための代替注水を開始する必要があるが、ウラン燃料炉心の崩壊熱を除去できる代替注水流量を確保すれば、フル MOX 燃料炉心も適切に冷却できる。

(2) 放射性物質の環境への放出量<sup>8)</sup>

通常運転時および設計基準事故時の被ばくについて



第 8 図 炉心の崩壊熱 (平衡サイクル末期)

は、<sup>235</sup>U と <sup>239</sup>Pu の核分裂収率を比較し、放射性物質(希ガス, ヨウ素)ごとに、より厳しい結果になる生成割合をそれぞれ選択した仮想的な組合せにより炉内蓄積量を求めて敷地周辺の実効線量を評価し、その結果が判断のめやす(通常運転:年間50マイクロシーベルト, 設計基準事故:5ミリシーベルト)を下回ることを確認している。

一方、実際の炉心では、さまざまな燃焼度の燃料が存在しており、<sup>235</sup>U や <sup>239</sup>Pu のほか <sup>238</sup>U や <sup>241</sup>Pu も核分裂しているため(第4図)、これを考慮すると、フル MOX 燃料炉心ではウラン燃料炉心と比べて、希ガスおよびヨウ素は数%の差異、セシウムは約4割少なく、プルトニウムは約5倍の炉内蓄積量となっている(第9図)。

ここで、これらを含む放射性物質60種類の炉内蓄積量をもとに、燃料溶解が生じて原子炉停止24時間後に放射性物質が大気中に放出する重大事故として、第4表に例示した放射性物質の大気中への放出割合を用いて試算(セシウムなどの粒子状物質を99.9%以上除去するベントフィルタなどを含む重大事故対策は考慮していない。)すると、フル MOX 燃料炉心とウラン燃料炉心の発電所外における実効線量は同等となる。

これは、希ガス, ヨウ素などによる被ばく線量はフル MOX 燃料炉心の方が大きい、地表沈着したセシウムによる外部被ばく線量はウラン燃料炉心の方が大きく、これらがほぼ相殺するためである。また、プルトニウム(アメリシウムやキュリウムも同様)は、ヨウ素やセシウムに比べて吸入による内部被ばくで人体に与える影響が大きいものの、気化しづらい粒子状物質であり大気中へ

の放出割合が極めて小さいため(第4表)、プルトニウムは線量全体の0.1%未満の寄与にとどまる。

なお、MOX 燃料からの放射性物質の放出挙動を調べた JAEA の VEGA 試験<sup>9)</sup>においては、燃料溶解を伴うような高温状態では、ペレットからほぼ全量のセシウムが放出されており、MOX 燃料とウラン燃料からの放出率には差がないとしている。

### 5. その他

MOX 燃料の炉心装荷率に依存しない MOX 燃料自体の特徴(第2表⑤~⑧)について、以下で簡単に述べる。

MOX 燃料集合体外周などにある燃料棒の出力はより高くなる傾向があるが、ウラン燃料と同様、燃料集合体内の各燃料棒の核分裂物質濃度を変えて(第3図)、燃料集合体内出力分布が適切になるよう調整している。

ペレット融点, 熱伝導度, 核分裂生成ガス放出率などの物性・照射挙動の影響については、通常運転時において、MOX 燃料棒の燃料温度は融点に対して950℃以上の余裕があり、MOX 燃料棒内圧は MOX 燃料棒のガス溜め(プレナム)体積を増やすことによりウラン燃料棒並みに抑えている。

プルトニウム含有率が局所的に高いプルトニウムスポットについては、プルトニウムスポットの温度は周囲より約10℃高い程度であり、燃料健全性に影響を与えることはなく、ペレットの平均プルトニウム含有率が均一なペレットと同じで複数のプルトニウムスポットが点在するペレットは、ペレット最高温度が均一なペレットに比べて必ずしも高くない<sup>10)</sup>。また、JAEA の NSRR 反応度投入実験においては、製造仕様を超える大きさのプルトニウムスポットでも燃料の破損しきい値に影響を与えないとの結果が得られている<sup>11)</sup>。

## V. フル MOX 燃料炉心への設備対応

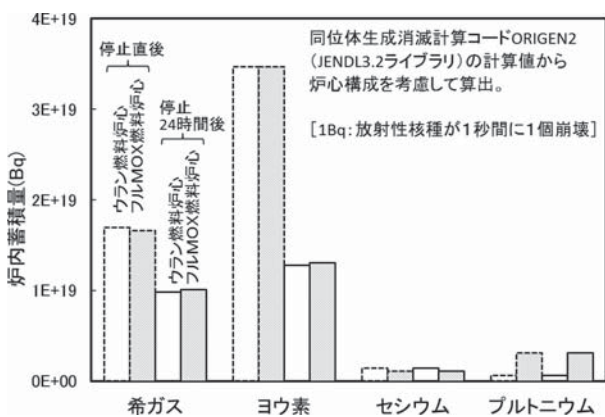
大間原子力発電所では、既設 ABWR と基本的なプラント構成は同じであり、将来の MOX 燃料の高性能化も勘案したうえで、以下の設計対応をしている(第10図)。

なお、重大事故などへの対策(設備, 資機材, 体制・組織)は燃料装荷までに整備する計画であり、その対策はフル MOX 燃料炉心もウラン燃料炉心と同じである。

### 1. 高価値制御棒の採用

フル MOX 燃料炉心でも、従来の制御棒で十分な原子炉停止能力を持つが(第6, 7図)、205本ある制御棒の一部に反応度値を高めた高価値制御棒を採用し、原子炉停止およびスクラム反応度に対して、さらに十分な余裕を確保することとした。

高価値制御棒は、従来の<sup>10</sup>B濃度約20%の天然ホウ素に代えて、<sup>10</sup>B濃度約50%の濃縮ホウ素を用いて、反応度値を約10%高めたものである。



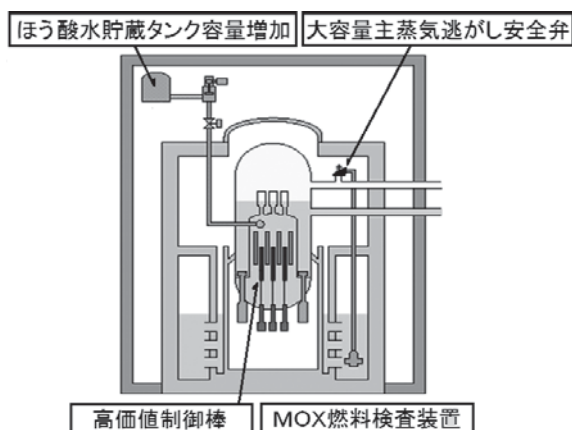
第9図 放射性物質の炉内蓄積量(平衡サイクル末期)

第4表 放射性物質の大気中への放出割合\*

放射性物質	大気中への放出割合
希ガス類(Xe, Kr)	97 %
ヨウ素類(I)	2.78 %
Cs 類(Rb, Cs)	2.13 %
Ce 類(Ce, Np, Pu)	1.51 × 10 <sup>-4</sup> %
La 類(La, Am, Cm など)	3.87 × 10 <sup>-5</sup> %

\*福島第一原子力発電所事故並みの放出割合(原子力規制委員会「実用発電用原子炉に係る重大事故時の制御室および緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価に関する審査ガイド」からの抜粋)





第10図 フルMOX燃料炉心への設備対応

## 2. ほう酸水貯蔵タンクの容量増加

フルMOX燃料炉心におけるほう酸水の反応度価値の低下への対応として、ほう酸水注入系のほう酸水貯蔵タンク容量を既設ABWRの約 $29\text{m}^3$ から約 $36\text{m}^3$ に増加して炉心に注入するほう酸水を増やすことにより、確実に原子炉を停止できるようにした。

## 3. 大容量主蒸気逃がし安全弁の採用

フルMOX燃料炉心では、ポイド係数がより負となるため負荷の喪失事象で出力上昇がより大きくなることはすでに述べたが、その際、蒸気発生量が多くなるため原子炉圧力上昇も大きくなる。この場合でも原子炉冷却材圧力バウンダリーの最高使用圧力に達することはないが、圧力上昇を緩和して余裕を増やすため、主蒸気管に設置する主蒸気逃がし安全弁の総容量を増加させている。

具体的には、その吹出し容量を従来の約 $400\text{t/h}$ から約 $460\text{t/h}$ に増加した大容量主蒸気逃がし安全弁を採用して弁数を18個から16個とし、総容量を増加させた。なお、弁数減少は保守点検作業が軽減する利点もある。

## 4. MOX燃料検査装置の採用

発電所に搬入した新燃料の表面線量率は、MOX燃料では $^{241}\text{Am}$ からの $\gamma$ 線や $^{238}\text{Pu}$ からの中性子線によって、ウラン燃料よりも高い。

そこで、多くのMOX新燃料を取り扱う際の放射線防護の観点から、必要に応じ、一時的な遮蔽を使用することに加えて、遠隔操作のMOX燃料検査装置を採用した。

## VI. おわりに

大間原子力発電所では、定期的な燃料取替ごと段階的にMOX燃料の炉心装荷率を増加させる際、起動試験または定期検査において、他の原子力発電所と同様に、原子炉停止余裕、最大線出力密度などの測定・検査を行うが、これに加えて、制御棒反応度価値、燃料集合体燃焼度分布(発電所内の $\gamma$ スキャン装置にて測定)などの測定値も蓄積し、現行の設計手法を再確認する計画であり、将来の設計手法の高度化にもつながると考えている。

なお、現在のMOX燃料は、国内では一世代前のウラン燃料と同じ $8 \times 8$ 燃料形状であるが、海外では、炉心の諸特性、使用済燃料発生量、経済性の観点から、 $9 \times 9$ 燃料形状から $10 \times 10$ 燃料形状へと高性能化を進めており、国内でもMOX燃料の高性能化を進めることは、新たな許認可を要するものの、将来的にメリットは大きい。

また、今後ともMOX燃料関連を含む国内外の最新の技術的知見を踏まえつつ、継続的な安全性の向上に取り組むこととしている。

### — 参考資料 —

- 1) 日本エネルギー研究所, 「平成24年度発電用原子炉等利用環境調査(核燃料サイクル技術等調査)報告書」, 平成25年3月.
- 2) T. Ohtani, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 40 [11], 959-969 (2003).
- 3) 小林哲朗, 他, 日本原子力学会「1997年秋の大会」(L57), 1997年10月.
- 4) H. Tsuruta, et al., JAERI-1234, (1977).
- 5) 原子力安全基盤機構, 「平成23年度全MOX炉心核設計手法信頼性実証試験成果報告書」, 平成25年2月.
- 6) 日立製作所, 「沸騰水型原子力発電所フルMOX-ABWRにおける混合酸化物燃料装荷炉心の設計解析手法について」, HLR-066 訂2, 平成20年4月.
- 7) 柳沢直樹, 他, 日本原子力学会「2014年春の年会」(O02), 2014年3月.
- 8) 守下志強, 他, 日本原子力学会東北支部第37回研究発表会(2-2), 2013年11月27日.
- 9) T. Kudo, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 44[11], 1421-1427 (2007).
- 10) 表貴之, 他, 日本原子力学会東北支部第36回研究発表会(2-2), 2012年12月7日.
- 11) T. Abe, et al., J. Nucl. Mater., 188, 154-161 (1992).

### 著者紹介



小林哲朗 (こばやし・てつろう)

電源開発(株)

(専門分野/関心分野) 原子力安全技術, 炉心・燃料設計, 原子力法制度

# 福井県の原子力研究教育の取り組み

## 福井県の原子力はどうか

福井大学 竹田 敏一, 宇埜 正美

原子力に対する信頼感, 安心を回復するには, 福井県内の原子力関連組織として何を, どうやって実施すれば良いかについて考える。プラント安全性, 原子力防災について県内の大学, 研究所, 電力がどのように連携するのが望ましいかについて述べる。今後の原子力の安全性を維持・向上する上で教育(人材育成)をどう進めるべきかについて述べる, また原子力をやる気のある学生が原子力関連の組織で活動するには原子力の夢が必要である。どのような夢があるかを, 研究面から述べる。

### I. はじめに

福島原子力発電所事故以前では, 日本原子力発電(株)敦賀発電所の2基, 関西電力(株)美浜, 大飯, 高浜発電所の11基に, 日本原子力研究開発機構(原子力機構)の「もんじゅ」, 「ふげん」を含めると全部で15基が稼動していて, 日本一の原子力立地県であり, 日本の原子力発電量の約1/4が福井産であった。原発がある嶺南地域は現在, 活気がない状態が続いている。今後, 福井県の原子力はようになっていくのであろうか。福井県内の原子力関連機関はどうすればよいのであろうか? 各機関の現状を踏まえ, まず, 今後の課題について考えてみる。

福井県の原子力を復興するには, プラントの内部事象による事故(特にシビアアクシデント)に対する安全性確保だけでなく, 地震, 津波, 火災, テロ等の外部事象に基づく事故の安全対策を最新の科学的知見をもとに総合的に確立すべきである。

福井県内には原子力の科学的基礎を研究している大学(福井大学, 福井工業大学), 原子力安全を社会・技術両面から研究している原子力安全システム研究所, 高速増殖炉を開発している原子力機構, 原子力発電事業を行っている関西電力および日本原子力発電がある。各機関の特色を生かして連携を図り, シビアアクシデントに対する対策をより一層充実すべきである。合理的な安全性向上には確率論的リスク評価が不可欠である。確率論的リスク評価はプラントの脆弱性を見出し, 効果的な対策の立案に適した手法であり, 過剰な設備を設置することに

*Education and Research on Nuclear Engineering in Fukui Prefecture* : Toshikazu TAKEDA, Masayoshi UNO.

(2013年12月20日受理)

よる誤操作, 誤作動や安全設備への接続によって新たな機能喪失の脅威を生み出す可能性を科学的に分析することができる。トータルとして安全性向上にほとんど影響しない機器対応策だけに固守するのは科学的でない。原子炉を止める, 冷やす, 放射性物質を閉じ込めるという安全性の基礎分野の信頼性向上を図った上で, 総合的安全性を高めなければならない。そのためには, 確率論的リスク評価の研究を含め, 各機関でそのポテンシャルの維持・向上を図るべきである。また, この安全性向上の方式が認められるよう原子力規制委員会も規制を検討すべきである。

さらに, 原子力防災に関する対策が原子力立地県として重要になる。放射線モニタリング, 避難対策はもちろんのこと, 放射線被曝の影響, 特に低線量放射線に対する影響についての更なる研究も必要である。県内には大学のほか, 若狭湾エネルギー研究センターもあり, 連携して研究成果を高めることが期待される。原発サイトでは, 電力が災害が発生した場合の, 現場での緊急対策について準備しており, 訓練等によりより実効的な対策にしてほしい。また, 地元住民に対し, 放射線影響, 避難方法等に関してリスクコミュニケーションを電力, 自治体, 大学が連携して実施していくことが, 原子力の信頼感を取り戻す唯一の方法である。

このように, 原子力の復活には多くの課題を抱えており, 原子力の総合的安全性を向上するには, 今後の原子力を支えていく人材の育成が不可欠である。そこで, II章では, 教育(人材育成)を取り上げ, III章で原子力に入ってくる人に対する夢のある研究について述べる。

## II. 教育（人材育成）

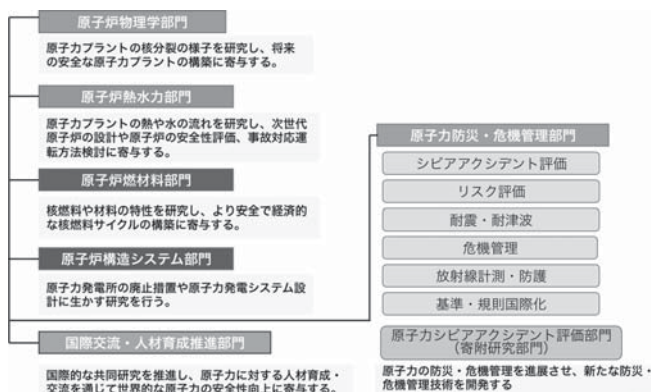
### 1. 福井大学での取り組み

福井大学での原子力教育は、本年度創立10周年を迎えた大学院工学研究科原子力・エネルギー安全工学専攻に所属する大学院生を対象に行われており、福井市の文京キャンパスでは主に原子力システムの周辺技術を、敦賀キャンパスの附属国際原子力工学研究所ではプラント関係の教育を担当している。特に研究所では、福島事故後の研究所建屋の敦賀移転に合わせ、原子力防災・危機管理部門を新設し、新たな教員も迎え入れて組織の充実を図っている。現在の附属国際原子力工学研究所の部門とその研究内容を第1図に示す。

原子力・エネルギー安全専攻に入学した学生は文京キャンパスのエネルギー安全工学分野と敦賀キャンパスの原子力工学分野に分かれて勉強することになり、原子力工学概論、原子力防災・危機管理、エネルギー変換工学、安全工学など一部の必修の講義を除いて、それぞれ別々のキャンパスで異なるカリキュラムとなる。必須ではないが両方の分野で共通の講義の中にはPBL(Project based learning)が設けてあり、通常の企業インターンシップに加え平成26年度からは文部科学省の原子力人材育成事業等のファンドにより様々な機関が行っているセミナーの中から、個人の専門に合わせて必要な物を選択し、最大4単位を授与させることが可能となる。

また、福井大学では原子力を学べる学部はないが、工学部の全学科の2～4年生を対象とした副専攻科目で原子力システムや原子炉燃料材料などを教えている。

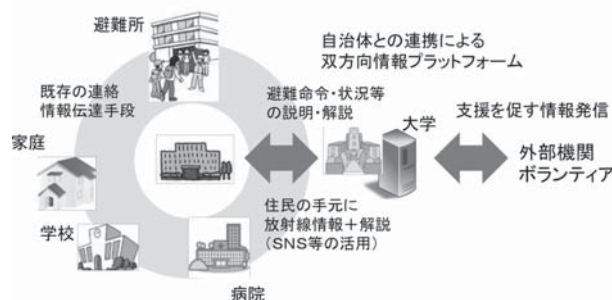
福井大学では文部科学省より平成25年度予算として「原子力防災・危機管理社会システムモデルの構築」が措置された。ここでは、種々のシミュレーターを用いて原子力発電所の事故を含む様々な原子力災害を福井大学の学生だけでなく、敦賀市の防災担当者等などにも教育を行う。また第2図に示すように、附属国際原子力工学研究所が中心となって、事故時の市民の避難行動を判断するのに必要な双方向の情報プラットフォームを構築し、自治体と大学が中心となってその運用の仕組みを検



第1図 福井大学附属国際原子力工学研究所の組織

○双方向情報プラットフォーム  
 地域住民の要望  
 普段からの連携による情報発信元との信頼構築と  
 有事に被災側から救援要請等、外部との連携を促す仕組み

例)原発周辺にはモニタリングポストがあるが、住民の手元にはその情報が届くのかどうか不安



第2図 原子力災害双方向情報プラットフォーム

討し、そのような地域と一体となった教育システムを福井モデルとして発信する。

### 2. 嶺南地区の機関の連携した取り組み

福井県嶺南地区では、様々な機関が種々の原子力施設を持っているため、これら原子力機関との連携を通じ座学で学んだことを体験的に実学することにより、即戦力となる人材育成を行うことができる。

若狭湾エネルギー研究センターと福井大学が共同で提案した文部科学省の原子力人材育成イニシアティブ事業、「福井の人材育成機能等を活用した原子力の安全・国際協力に資する人材育成」(平成23～25年度)では、関西、中京圏の大学院生等を毎年15名程度集めて、原子力基盤コース、原子力危機管理コースおよび国際セミナーを行っており、原子力危機管理コースでは、座学だけでなく敦賀市のオフサイトセンターの見学など福井県嶺南地区の設備をフルに利用した実践教育を行っている。また、本年度からは同じく若狭湾エネルギー研究センターが中心となり、経済産業省の原子力人材育成事業として、高専生、学部生を対象とした敦賀原子力サマースクールを行っており、平成26年度以降はこれに福井高専も加わって教育内容を充実させていく予定である。

福井大学における海外研修生の受け入れとしては、フランス原子力庁(CEA)の教育機関であるINSTNから、日本原子力研究開発機構の支援の下、毎年2～4名の留学生を受け入れており、彼らは5ないし9ヶ月の滞在でほぼ修士論文相当の研究を完成させる。また、原子力安全研究協会の支援や若狭湾エネルギー研究センターとの連携の下、主に原子力発電所導入国の行政官となる人材の研修生を受け入れている。ここでは、リクスコミュニケーションや原子炉熱水力学などそれぞれの分野に応じた研修のほかに、ベトナム電力大学の教員は福井大学に来てカリキュラム設計を行っている。

以上は、福井大学附属国際原子力工学研究所が、これまでも様々な人材育成事業を行ってきた福井県嶺

南地区の機関と連携した人材育成の取り組みの一例である。各機関でも様々な新しい取り組みが行われている。その一例として、原子力安全の面から人材育成の更なる充実を図ろうとしている日本原子力発電(株)の敦賀総合研修センターを紹介する。敦賀総合研修センターは平成20年度の福井県エネルギー研究開発拠点化計画推進方針において重要施策の一つとして位置づけられ、平成24年10月に開所した。同社の社員研修はもとより、地元をはじめとする国内の技術者や学生、また海外からの研修生を対象とした体系的な研修を実施している。研修は社員研修のほか他機関、大学等からの受託研修、一般に公開された公開研修があり、これまで延べ約4,000日・人を受け入れている。第3図はフルスコープシミュレーターを使った敦賀発電所2号機運転員へのシビアアクシデント対応の研修風景である。公開研修は安全文化コースと安全技術コースがあり、それぞれ6個、23個のコースがある。机上研修だけでなくプラントシミュレーターや保修訓練設備を用いた実習研修により、技術力を身につける人材育成が実施されている。

限られた人材と予算の中で各組織が個別に体系的な原子力教育カリキュラムを構成するのは困難であり、複数が連携して効率的な投資を通じた教育を今後とも実施していく必要がある。

### III. 研究

#### 1. 安全性向上

原子力発電所を再稼動するには、まず各プラントの安全性向上を図り、事故が発生しないようにし、さらにシビアアクシデントが発生した場合でも放射性物質の放出の防止・低減を図ることが必要である。

福井大学でも設立当初からの高速炉を中心とした核燃料および熱水力学研究に加え、平成24年度からは新たに設置された原子力防災・危機管理部門を中心に、軽水炉のシビアアクシデント研究も開始している。例えば、電源喪失時にタービン動補助給水系を用いて2次側に給水し、1次系の自然循環により炉心を冷却した場合の蒸気発生器内流動の解析モデルの構築や、シビアアク



第3図 日本原子力発電敦賀総合研修センターでの研修

シデント時の炉心溶融物の挙動の解析に必要な高温溶融材料の物性測定技術の確立のために、超音波や静電場における気泡や液滴の挙動解析を行っている。

福井大と原子力機構では、平成25年度から4年間の文部科学省原子力システム研究開発事業として共同で採択された「ナトリウム冷却高速炉における格納容器破損防止対策の有効性評価技術の開発」で、ナトリウム冷却高速炉特有の重大事故現象や固有の安全性に関する事項を考慮しつつ、格納容器の破損防止対策の有効性を評価するための手法を開発する。ここでは以下の4つの研究課題を行う。

#### (1) 格納容器の破損モードに関する評価手法の開発

①ナトリウム燃焼時の熱影響詳細評価手法の開発では、ナトリウムが圧力容器から格納容器内の運転床に漏れた場合のナトリウムのスプレイ燃焼挙動とその熱影響を評価する手法を開発する。

②炉心溶融物/ナトリウムとコンクリート構造物との反応挙動の解明では、実際のナトリウムを用いてコンクリートとの反応試験を行い、反応停止機構、水素発生機構、コンクリート侵食挙動を解明する。またその反応機構における燃料デブリの影響も評価する。

③ナトリウム環境下における水素燃焼挙動評価手法の開発では、ナトリウムとコンクリートの反応により発生した水素が格納容器内で誘導拡散燃焼する挙動について、着火機構や3次元の燃焼挙動モデルを構築する。

(2) 格納容器の構造健全性に関する評価手法の開発では、シビアアクシデント時の格納容器内への放射性物質の閉じ込め機能の中でも、特にこれまで軽水炉ではあまり着目されてこなかったバウンダリーの座屈に着目し、格納容器貫通部ベローズ IHX (Internal Heat Exchanger) 下部鏡および IHX カバーガスベローズについて、座屈を生じるまでと破損を生じるまでの挙動を実験・解析両面から検討し、耐圧裕度、破損時開口量などを評価する手法を開発する。これらの評価手法の開発により、高速炉特有の現象や固有の安全性を考慮した格納容器破損モードに対する評価手法が確立される。またここでは、上記4つの研究開発テーマについて、それぞれで福井大学と原子力機構が共同で行う。そのために原子力機構から3名の社会人博士課程学生を受け入れ、課題終了後も彼らにより上記研究が原子力機構で継続されることを特徴としている。

#### 2. 放射性廃棄物の減容

原子力発電所から出る使用済燃料の再処理で発生する高レベル放射性廃棄物には長期の放射能や発熱を有するマイナーアクチニド(MA)が含まれる。その高レベル放射性廃棄物を地下埋設処分すると、高レベル放射性廃棄

物を埋設する廃棄物処分場の負担が大きくなるとともに、埋設に伴う潜在的な有害度が増すことになる。そこで、国内外で MA 等の分離変換技術の研究開発が行われてきた。

分離変換技術を用いて高レベル廃棄物から MA を分離変換することの効果については、原子力機構において、軽水炉及び高速炉を対象として、潜在的な有害度、実効線量率、廃棄体発生量及び処分場の廃棄体定置面積に及ぼす影響が評価された。その結果、MA 核変換は、長期にわたる潜在的な有害度の低減や処分場の面積の抑制の観点から効果が高く、特にプルトニウム利用時の効果が大きいことが明らかにされた。

MA 核変換技術としては、加速器駆動核変換システム (ADS) と高速炉を用いた方法がある。文部科学省は平成 25 年度の国家課題対応型研究開発推進事業として原子力システム研究開発事業「環境負荷低減技術研究開発」の公募をした。福井大学は代表機関としてそれに応募し、「[もんじゅ]データを活用したマイナーアクチニド核変換の研究」が認められ、4 年間の予定で研究を進めている。

この研究はナトリウム冷却高速増殖炉 (SFR) による MA 核変換を対象とするものである。MA 核変換炉心の MA 装荷量 (MA 核変換の経済性指標の一つである MA 核変換量と直接関係) とナトリウムボイド反応度やドブラー係数等 (炉心安全性と直接関係) は、トレードオフの関係にあり、一般的には安全性確保のために、MA 装荷量を抑制している。今後、一層の MA 核変換量や炉心安全性向上を目指そうとすれば、MA 核変換量と炉心安全性との新たな調和点の追求、例えば、MA 核変換量向上を目指しつつナトリウムボイド反応度やドブラー係数の改善を図ることのできる炉心概念の追求が必要となる。さらに、その炉心の MA 核変換量やその他の核特性の予測精度の向上が極めて重要である。

そこで本研究では、MA 核変換量、ナトリウムボイド反応度等の炉物理特性を精度よく計算する方法を新たに提案し、MA 核変換量とその他炉心核特性の計算精度向上を図る。「もんじゅ」データ等の活用により、予測誤差の低減を図るとともに、MA 核変換量等を精度よく予測するにはどのような「もんじゅ」の運転試験を実施すればよいかを感度係数、予測誤差低減の観点から提案する。

また、過去及び今後の「もんじゅ」データの活用についての位置付けを明確にし、更に両方のデータの活用により、MA 核変換量等の計算精度の一層の向上について評価する。

MA 核変換炉心としては、MA 核変換量の増加、ナトリウムボイド反応度の低減を目指した多様な炉心概念を

探り、「もんじゅ」データを活かしてその炉心の計算精度を向上し、安全性特性等に対する影響を検討する。更に、MA に随伴する不純物 (希土類等) の効果についても検討し、その影響を評価する。

### 3. 廃止措置研究

福島第一原子力発電所の廃止措置の取り組みを加速する目的で平成 25 年 8 月、「技術研究組合国際廃炉研究開発機構 (IRID)」が設立された。また、秋ごろより文部科学省と IRID の共催で、廃炉に係わる基礎基盤研究課題の創出・検討のためのワークショップが、東京を皮切りに仙台や大阪などで開かれてきた。福井でも平成 25 年 12 月 25 日に、敦賀の附属国際原子力工学研究所で第 7 回のワークショップが開かれた。ここでは、材料の長期健全性、遠隔技術および燃料デブリ取り出しの 3 つのテーマが取り上げられたが、それまでの講演会的なワークショップではなく、参加者を大学関係者に限定した議論や研究シーズの提案が行われた。さらに福井大学から「廃止措置計画の評価手法に係わる研究開発課題」というテーマで技術提案・議論も行われた。今後、福井大学では、大阪大学や京都大学などと連携した燃料デブリ取り出しに係わる研究や教育などで、廃止措置研究に寄与していく予定である。

## IV. おわりに

上述したように、福井県で福島原子力事故を収束するための廃止措置研究をはじめ、若い人に原子力の夢を与えられる原子力プラントの安全性向上、放射性廃棄物の核変換による消滅・減容の研究が進められている。夢を実現するため、人材育成も福井県内の関連組織との連携、更には県外との連携を活用し着実に実施されている。このような取り組み、更には住民の方とのリスクコミュニケーションにより、原子力に対する住民の方の信頼感を取り戻したいと考えている。

### 著者紹介

竹田敏一 (たけだ・としかず)

福井大学  
(専門分野/関心分野) 原子炉物理/高速炉システム



宇笠正美 (うの・まさよし)

福井大学  
(専門分野/関心分野) 核燃料工学・原子炉材料学/燃料デブリ取り出し





## 福島復興への「地域力」づくり

### コミュニケーション強化に向けて「相談員」システム化に期待する

NPO 法人 持続可能な社会をつくる元気ネット 崎田 裕子

事故後約3年が経過し、自然放射線より高い放射線と向きあって暮らす、という日本で初めての状況に福島の方々は直面しており、リスクコミュニケーションの重要性が高まっている。しかし、事故後の放射線量の違い、除染の進捗による低減状況の違いなども影響し、避難継続地域、帰還準備地域、日常生活を取り戻そうとする地域など、地域の状況は多様化し、リスクとの向き合い方は、一人ひとりがどう決断するかにかかっている。また、個人の決断は勿論ながら、地域性に応じた対応や、除染だけではなく復興やこれからの暮らしや地域づくりなど、地域社会の将来像とも密接につながってきている。

科学的知見と社会的知見を総合化して地域による柔軟性を確保しながら、放射線を低減し環境回復を実現しつつ放射線と暮らす方々を、社会がどう支えてゆくのか。住民自身の視点と、それを支える社会システムづくりの視点の両面から、今とこれからの福島を展望する。

#### 1. はじめに

福島県では、東京電力福島第一原子力発電所事故の後、災害廃棄物処理に関する住民説明会や環境回復に向けた除染説明会、仮置き場確保のための説明会、健康影響相談など多くの対話の場が設けられてきた。

当初は、避難されているご苦労や日常の放射線の不安から、参加者が抑えられない激しい感情をぶつけて紛糾する場も多く、環境学習や高レベル放射性廃棄物の学び合いでファシリテーター(進行役)を務める自分の経験が少しでも役に立てばと、数カ所傍聴させていただいた。

痛感したのは、思いを伝えたい参加者と環境回復への道筋を相談したい主催者双方にとり、多様な立場の方が一堂に会する場が紛糾するのは、あまりにもったいないということ。厳しい質問も冷静に話していただき、しっかり答える。対話の場を成立させ、半歩でも前に進んでほしいと願い、多様な場の進行役を務めてきた。

事故後3年、冷静な話し合いは徐々に増えているが、最近では復興へのつながりや、故郷の未来にどのような希望が描けるのか知りたい、という意見・質問が増えている。復興を強く意識する転換期を迎え、緊急に国や県市町村が対応してきた取り組みを踏まえて、継続的に復興を支えるコミュニケーションを定着させる時期に来ている。

#### 2. 福島の実況

##### (1) 福島の方々の現状と不安のありよう

対話の場が落ち着いてきたと言っても、簡単に不安が払拭される訳ではない。特に子供を育てている家族は、健康影響を少しでも早く減らしたいという願いは強い。このような思いから「年間被ばく線量1mSvまで低減化することが除染の長期目標」と言われてきた内容が「1mSv以下にならないと帰還できない、安心して暮らせない」と受け取られるようになり、放射線に関する冷静なリスクコミュニケーションの重要性が長く顕在化している。

事故後、原子力学会をはじめとする多くの大学や放射線専門家が福島に入り、地域の方々の不安に対応してきた。除染を担当する環境省も福島駅近くに福島県庁と連携し「除染情報プラザ」を開設。専門家を市町村の除染説明会や学校・地域の放射線学習に派遣するなど、緊急対応の仕組みを作ってきた。けれど難しいのは、放射線量の違いや除染の進み具合、家族構成などで、地域ごと家族ごとに悩みが違うことであり、一人ひとりが自ら判断できるよう不安に寄り添うには、人的・社会的な資源が充分とはいえない。現状の理解に向けて、放射線量に応じた福島の方々の状況を4段階に分けて考える。

##### (2) 避難生活の続く地域

11市町村にわたる避難指示区域は、国直轄除染の対象「除染特別地域」に指定され、下記3区域に編成されている。

Communication for Recovery of FUKUSHIMA's Environment : Yuko SAKITA.

(2014年1月11日 受理)

- ・帰還困難区域(50mSv以上の地域)
- ・居住制限区域(20mSvを超えて、50mSv以下)
- ・避難指示解除準備区域(20mSv以下)

この3区域と低線量地域を含めると4段階となり、特に線量の高い「帰還困難区域」と「居住制限区域」は、避難生活が長く続く地域にあたる。2013年12月の福島県データによれば、県内で避難生活を送っている方は9万人、県外に避難されている方は約5万人、合計14万人おられる。

「帰還困難区域」は大熊町、双葉町、浪江町を中心に7市町村。例えば全町民のほとんどが「帰還困難区域」に住んでいた大熊町では、現在、会津若松市といわき市を中心に避難生活を送っておられる。復興庁と県庁が12月に公表した住民意向調査では、67%の方が「戻らない」と答え、理由に“放射線や原子力施設の状況、生活用水”など健康面の不安だけでなく、“日常の買い物、医療、住宅”など生活インフラ復旧への不安をあげている。線量低減化だけでなく復興に向けた地域の将来像が重要であり、大熊町や双葉町、避難指示解除準備区域の楢葉町では、除染廃棄物の中間貯蔵施設用地候補として環境省の調査が進むなど、新たな要素も加わっている。

「居住制限区域」は日中の自由な立ち入りは可能で、除染や放射性物質の自然減衰で年間追加被ばく線量が20mSv以下になることが確実にした場合、「避難指示解除準備区域」となる。飯館村の広範囲の地域と、南相馬市、浪江町、大熊町、富岡町、川内村の一部が指定されており、5、6年で避難指示解除準備地域になる可能性もあり、将来設計には世代による多様性も顕在化している。

### (3) 避難指示解除準備区域

年間追加被ばく線量が20mSv以下になることが確実にされた地域は「避難指示解除準備区域」に指定されており、田村市、飯館村、川俣町、南相馬市、浪江町、葛尾村、川内村、楢葉町、富岡町の一部など広範囲にわたる。日中のみ、帰還のためのインフラ整備や、自宅の片づけのための一時帰宅、居住しない製造業など事業再開が認められており、徐々に生活の立て直しに入っている。

このような地域は、住民や事業者を対象にしたリスクコミュニケーションを早急に手厚く整備すべき地域といえる。日常の中で放射線影響とどう付き合い、減らしていくか。情報提供だけでなく、特に育児中の家庭を対象に「放射線との暮らしの疑問に迅速に対応できる人材」を地域に配置して常に対話できる状況を確認する体制が必要となる。また健康影響、食の内部被ばく、仕事、学校、病院、商店、農林業再開、地域の人々のつながりは戻るのか、多様な疑問心配にワンストップで対応できる行政部署の設置など、国と地域の連携施策が望まれる。

### (4) 日常生活を取り戻す地域

線量が低く市町村が除染を担う「汚染状況重点調査地域」は100市町村。除染計画を策定した94市町村のうち、40市町村は福島県内にある。自主避難中の住民もおられるが、多くの住民は居住し続けており、早く除染して放射線量を下げ、復興への歩みを本格化させたい地域といえる。ただし2013年11月末に福島県がまとめた市町村除染実施状況データによれば、除染を計画している公共施設5,951カ所の69.9%が実施済みなのに比べ、住宅の除染計画240,395戸に対し、実績は28.5%と低い割合にとどまっている。理由として、住宅除染の同意取得や除染廃棄物の仮置き場確保が進まないといわれている。

一方で、こどもの多い地域で早急に除染を進めるために、住民理解の下、住宅地に近接して仮置き場を設置し、定期的にモニタリング結果を公表して周辺住民の信頼を得ている事例もある。情報を的確に把握・公表し、しっかり対話するなど、自治体の情報把握やコミュニケーションへの姿勢など、再考する余地がまだまだあると考える。

## 3. 学ぶべき事例

### (1) 情報整備の重要性を伊達市に学ぶ

コミュニケーションの基盤となる情報整備共有の重要性に気づき、取り組んでいる自治体もある。市町村除染事業が進んでいる伊達市を2013年12月に訪問した。

除染に関しては、市内を3エリア(比較的線量の高いAエリア、年間追加被ばく5mSv以上のBエリア、年間積算線量が5mSv以下のCエリア)に分けて実施。除染廃棄物の仮置き場を、行政主導ではなく各地区長のリーダーシップに任せて決めてきたのが特徴。ただしその結果、仮置き場が70カ所になり除染廃棄物の多さを実感し、Cエリアは面的ではなくスポット除染に方針変更。長期的な1mSv以下という目標を急いで達成するには低線量地域の入念な除染が必要で、除染廃棄物の量と費用を考え、1mSvまで除染する目標は現実的ではないと、市は判断している。

ただし、市民の不安を払拭するため、全市民63,000人にガラスバッジを配布し外部被ばく線量を1年間実測。11月末に市が公表した結果によれば、全市民の約8割52,783人の年間被ばく線量の平均値は0.89mSv。しかも、年間被ばく線量1mSvは空間線量0.23 $\mu$ Svに相当すると国は推計しているが、実際には約2倍にあたる空間線量0.5 $\mu$ Svに住む方でも、累積被ばく線量は年間1mSvを超えなかったとのこと。国の基準作成時点で安全サイドに沿って計算したことが実証され、コミュニケーションの基盤として、信頼できるデータ集積は重要となる。

## (2) 福島の地域課題解決に向けて

〈避難指示解除準備区域〉〈日常生活を取り戻す地域〉では、1～20mSvの放射線と暮らす心構えが基盤となる。けれど、地域の方に笑顔が戻るのは、将来に再び希望が見いだせた時であり、避難されている方の帰還や日常生活を後押しするのも、暮らし再建の意欲が鍵となる。

前出の伊達市では、線量の下がった地域で地場産業「あんぼ柿」製造を3年ぶりに再開。製品の線量検査機の導入に予算を割くなど、復興への道筋を共有するために住民・行政が一体となった取り組みを進めてきた。

環境回復から復興に向けたコミュニケーションを考える際、情報整備、対話の場や人材確保、人々の共創意欲の掘り起しなど、バランスよくシステム整備が進んでいるか、国や県・市町村や専門家、地域リーダーの方は冷静に判断し、地域での施策展開に活かしていただきたい。

そこで考えた要素は8項目であり、環境回復から復興に向けた地域力を自己チェックしてはどうだろうか。

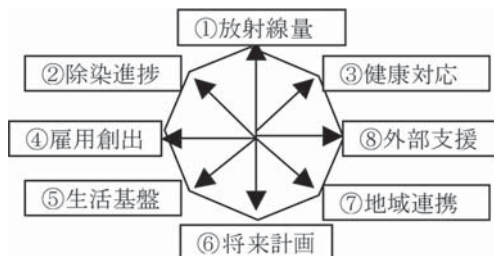
### 【環境再生から復興へ地域力チェック項目】第1図参照

- ①放射線量
- ②除染進捗(住宅・公共施設・道路除染, 仮置き場設置)
- ③健康対応(地域に根ざす相談員や個人線量把握など)
- ④雇用創出(地場産業の復活・新しい仕事おこし)
- ⑤生活基盤(食の安心・住宅・学校・商店・病院など)
- ⑥地域の将来(地域の将来像・計画を描けているか)
- ⑦地域連携(自主活動・まつり・話す場等つながり作り)
- ⑧外部支援(外部専門家・観光客・定住者など外部流入)

【チェック方法】8項目評価点を線でつなぎ、全体のバランスを見て、自己診断していただきたい。

- 全く進んでいない(0点)
- 準備が進み始めている(1点)
- 少し進んでいる(2点)
- 進んでいる(3点)

※①放射線量に関しては(年間積算線量が高い0点, 5mSv以上1点, 5mSv以下2点, 1mSv以下3点)



第1図 環境再生から復興への地域力チェック

## (3) 復興への歩みを川内村から学ぶ

地域の今をどうとらえるか、2013年10月に訪れた川内村を事例として考えてみたい。

2012年1月、村長が「戻れる人から戻ろう」と帰村宣言し、4月から帰村をはじめ、保育園や小中学校も再開。村役場では3年での復興をめどに「復興対策課」を設置。

除染を進め、米やそばの作付、雇用創出に向け植物工場など企業誘致や、アパートの新設などにも取り組む。

商工会も事業者の業務再開を支援し、損害賠償サポートなど、積極的に活動。いち早く村に戻った婦人会メンバーは、地域の女性たちと「帰村した方々が寄り合える場」をサロンとして開設し、地域の方々の気持ちをほぐし、つなぐ活動に取り組んできた。

地域外からも農業支援に取り組む若者が引越し、放射線を学んだ大学生が定住してモニタリングや商店街のまちづくり支援に取り組み、放射線の専門知識を持つ保健師も村に入り、村と大学の連携協定の下で、健康相談の個別訪問を開始するなど、地域の方を支える方策が積極的に進んでいる。地域の方々にとっても、自らの取組と、外部からの支援で元気になり、次の一歩は、地域の将来をどうデザインするか、という段階になっている。

## 4. 福島復興に向けて

### (1) 地域力を醸成する相談員のシステム化

地域の特性だけでなく、住民の方お一人おひとりの心に寄り添うには、川内村で出会った「放射線に関する地域に根ざしたアドバイザー」が各市町村や小中学校などに重点的に配置されることが望ましいと考えている。

この報告執筆と同時期に発表された原子力規制委員会の「帰還に向けた安全・安心対策に関する基本的考え方」に「帰還の選択をする住民を身近で支える相談員の配置」が提案されており、この地域に根ざすシステムの具体化に期待する。また、この「相談員」は個人ではなく地域に即したチームであるとしている点も重要で、行政、民間、保健師など、すでに地域に根付いている多様な取り組みを活かせるよう報告書が書かれている点を評価したい。保健師(健康・暮らし対応)・行政(学校・仕事・損害賠償など)・専門家(放射線学習)、商工会(生活再建)など多様な視点のワンストップサービスが重要であり、各自治体に最低ひとチームは位置付けていただきたい。

「相談員の活動を支援する拠点の整備」も挙げられているが、緊急的に整備した「除染情報プラザ」にも専門家派遣制度もあり、積極的な活用を望む。また、2015年に開設予定で準備が進む「福島県環境創造センター」に関しても、除染モニタリングや環境再生に向けた研究だけでなくリスクコミュニケーションの拠点として重要な位置づけと考えられる。



## (2) 復興へポジティブなリスクコミュニケーションを

最後に報告したい動きがある。福島県と環境省が開設した除染情報プラザでは、「ポジティブカフェ」と銘打ち、自ら主体的に地域のモニタリングやボランティア除染に取り組む団体の情報共有を呼びかけ始めている。

リスクコミュニケーションとしての情報整備・発信や共有の次の段階として、市民参加によるリスクガバナンスは、多様な主体の信頼関係の再構築には重要と考える。けれどこれまで、今回の事故による放射線被害を受けた福島県の方々に、放射線管理や低減に向けて共に汗をかこうという呼びかけは申し訳なく、ポジティブなリスクコミュニケーションは実施しにくいと思われてきた。けれど、除染は国・自治体が事業者の費用負担を前提に実施するもの、というイメージを強く持っておられ

た福島県民の方々の中にも、迅速な線量低減に向けて、自らできることはないのか、という動きが広がっている。

このようなリスクコミュニケーションの方向性を理解し、相談員(チーム)も受け身の対応ではなく、活力を持って生きる意欲を取り戻していただけるよう共に取り組むことが、福島の本格的復興につながると考えている。

### 著者紹介

崎田裕子(さきた・ゆうこ)

ジャーナリスト・環境カウンセラー

(専門分野)持続可能な社会に向けたパートナーシップ形成と地域づくりを専門とし、福島事故後は地域コミュニケーションに携わる。



## 学会誌への投稿記事の採否に関する判断基準

日本原子力学会 編集委員会

学会誌への投稿は、記事原稿の作成に先立ち、記事提案書(学会HPに記載)の提出が必要となります。提出された記事提案書は編集委員会で審議し、通過したものについて記事原稿を提出していただくことにしています。

投稿記事の内容については著者に責任がありますが、記事提案書の審議において、投稿記事が下記のいずれかに該当すると判断した場合は、学会誌に掲載することをお断りすることになっています。なお、記事提案書に基づいて執筆された記事原稿につきましても、下記のいずれかに該当すると判断した場合や、記事提案書と異なる内容の原稿が提出された場合は、掲載することをお断りすることになっています。

- (1) 事実を無視し、あるいは歪曲した意見。
- (2) 真偽が不明な内容を含む場合。
- (3) 文章に論理性がない場合。文章が意味不明な場合。
- (4) 掲載することにより、学会の品位に傷がつく恐れがある場合。
- (5) 良識に欠けると思われる意見。例えば、個人あるいは組織の中傷・誹謗、一方的な極め付けなど。
- (6) 美醜、好悪に類する判断に依拠している場合。
- (7) すでに掲載された記事と同様の内容である場合。
- (8) 商業的な広告・宣伝などを目的とする場合。
- (9) 会員にとって掲載する価値がない場合。
- (10) 余り期間を空けない同一者からの投稿。

(注1) 記事提案書の審議結果については約1か月で事務局よりお知らせいたします。

(注2) 掲載否の場合、該当事由の番号をお知らせしますが、それ以上の説明は致しません。

(改定 2012年6月1日)

# わかりやすい放射線の解説

## 一般の方に誤解を与える放射線量の数値等について

日本原子力産業協会 石田 健二, 丸末 安美

日本原子力産業協会では約3年前の2011年1月、毎週発行の原子力産業新聞の紙上に、理科好きの女子高校生「ゆりちゃん」が世の中に広く利用されている放射線について質問し、ものしり博士の「タクさん」が分かりやすく回答する「原子力ワンポイント」の連載を始めた。その途中、福島第一原子力発電所事故が起こったため、2011年4月7日からは「日本の放射線・放射能基準」について、男子高校生の「ゲンくん」が質問し、ものしり博士の「カワさん」が回答する「番外編」を組み込んだ。そして事故から約2年半が過ぎた2013年9月5日、もう一度、初心にかえり、「広く利用されている放射線」についての解説を再開した。本稿では、執筆済みの中から、放射線量の数値等が独り歩きをして一般の方に誤解を与えているケースに対し、分かりやすく解説したコラムを「4編」選んで紹介する。

### I. はじめに

人類は放射線がある中で誕生してきた歴史があり、放射線を正しく怖がり、役に立てていくことが大事である。放射線の正しい姿が理解されることを目指して、また、放射線を活用して新たな価値の創造を目指す機運の高まりを願ってコラムを執筆してきた。これまでに発表したタイトル(当協会HP (<http://www.jaif.or.jp/>)の“放射線の基礎知識”の欄に既にコラム掲載中)を以下に示す。

#### 1. 広く利用されている放射線

- (1) 放射線の誕生
- (2) 放射線の種類
- (3) 星からの宇宙線の放出
- (4) 放射線の単位
- (5) 放射線発見の歴史
- (6) 核分裂の連鎖反応と原子力発電
- (7) 放射線の透過力
- (8) 放射線による電離や励起
- (9) 放射線の計測
- (10) 放射線影響の目安
- (11) 自然界にある放射線
- (12) 活性酸素と放射線

- (13) 放射線で有害物質を無害化し環境保全
- (14) 放射線育種や害虫根絶で農業に貢献
- (15) 食品照射で発芽抑制や殺虫・殺菌
- (16) 放射線の橋かけ反応を利用し新素材開発
- (17) 放射線技術で医学分野に貢献(診断編)
- (18) 放射線技術で医学分野に貢献(治療編)
- (19) 科学的研究進むラドン温泉の効能
- (20) 進化の過程で構築された生体防御システム
- (21) がん発症までには生体防御の4つの砦
- (22) DNA損傷の主役は放射線よりも酸素

#### 2. <番外編>日本の放射線・放射能基準(福島第一原子力発電所事故をめぐって)

- (1) 緊急作業被ばく量と飲料水・食料の規制値
- (2) 放射線量に基づく避難措置
- (3) 事故後の大気・海水・水道水中の放射性物質
- (4) 屋外での子どもたちへの影響
- (5) 臓器ごとに異なる内部被ばく
- (6) チェルノブイリでの放射能汚染食品対策
- (7) セシウムの蓄積を防ぐとされるカリウム
- (8) 測定器は正しい使い方です平均値を出す
- (9) 飲酒や喫煙に放射線以上の発がんリスク
- (10) 放射線でがんができる理由
- (11) 20ミリSvの被ばくでは0.1%のがん増加
- (12) 暫定規制値は危険値ではない
- (13) 人間の体内にも放射性物質は存在する
- (14) 一定レベルの放射線は生命維持のために必要

*Plain Explanation of Radiation; About the Numerical Value of Radiation Which Gives False Impression to General* : Kenji ISHIDA, Yasumi MARUSUE.

(2014年2月19日受理)

- (15) 精米や製粉によりセシウムは大幅低減
  - (16) 100 ミリ Sv 以下ではがん発生率上昇せず
  - (17) 100 ミリ Sv 未満の被ばくなら DNA は修復
  - (18) セシウム、福島でも核実験時の半分
  - (19) セシウムは以前から世界中に降っていた
  - (20) 新基準値は危険値でなく「管理基準値」
  - (21) 様々な年齢考慮新基準 100Bq/kg
  - (22) がん増加は被ばくよりストレス原因説も
  - (23) 被ばく線量の表し方は2種類あるので注意
  - (24) 日本人の年間自然被ばく線量は？
  - (25) 屋内ラドン濃度が日本よりも数倍高い国も
  - (26) 地球内部では原子核崩壊が起こっている
- 本解説では、これらの中から4編を選び、紹介する。

## II. 「等価線量」と「実効線量」の混同

福島第一原子力発電所事故で問題となった放射性ヨウ素による「内部被ばく」を議論する際には通常、「甲状腺等価線量」が使われる。一方、がんリスクに基づいて放射線防護基準を論ずるときには、「実効線量」が使われる。2013年5月27～28日にかけて報道された複数の新聞の記事を見ると、これら2つの線量を区別して報道された例は極めて少なく、「人々に無用な誤解や不安を生じさせている」との懸念を払拭することができなかった。そこで、「被ばく線量の表し方は2種類あるので注意」と題したコラムを執筆し、等価線量と実効線量の違いについて解説を試み、甲状腺等価線量から実効線量に換算した値と日本人が日常生活で受ける被ばく線量2.1mSvとを比較すべきであることを述べた。その概要を以下に示す。

### 1. 新聞報道事例

東京電力福島第一原子力発電所事故で放出された放射性物質による住民らの被ばくについて、原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)による評価の報告書が27日判明した。福島県民の甲状腺の最大被ばく線量は、旧ソ連のチェルノブイリ原発事故(1986年)の60分の1以下で、現在の調査で見つかった甲状腺がんの患者数は、「被ばくと無関係に発生する割合」としている。

(途中省略)

事故後1年間に1歳児(当時)が甲状腺に受けた被ばく線量は、福島県内の避難区域外では1人あたり33～66ミリシーベルト(mSv)、区域内では20～82mSv、大人は区域外で8～24mSvとなった。いずれも甲状腺がん発症のリスクが上がるとされる100mSvを大きく下回った。

### 2. コラム：日本の放射線・放射能基準「被ばく線量の表し方は2種類あるので注意」

ゲンくん：つい最近、新聞で「福島第一原発事故によって避難区域内の当時1歳だった子が、事故後1年間に受けた甲状腺の最大被ばく線量は、82ミリシーベルト(mSv)」と書かれた記事を読んだよ。ほくたち日本人が日常生活で受ける被ばく線量は、約2.1mSv(1年間)と言われているから、これより約40倍も大きな量の被ばくを受けていたなんて、本当にびっくりしたよ。

カワさん：その記事を読んだ多くの人は、ゲンくんと同じようにびっくりするでしょうね。新聞記事に掲載された線量と日常生活で受ける線量が、同じ単位(mSv)で使われていたら、単純に割り算をして影響が大きいとか小さいとか言ってしまいますよね。でも実際はそれほど単純ではないのです。新聞に書かれていた被ばく線量は、甲状腺という(放射線に敏感で大事だけれど)小さな一つの臓器のみへの被ばくの影響を現しています。それに対して、日常生活で受ける被ばく線量は、全身への被ばくに関わる量ですから、話がぜんぜん違うのです。

ゲンくん：どうということ？

カワさん：それは臓器によって放射線の影響を受ける程度が違うということです。この違いを考慮して、国際放射線防護委員会(ICRP)が、「甲状腺等価線量」を「実効線量」に換算するための係数(組織加重係数)を勧告したのです(第1表)。この係数はもともと「がんによる死亡リスク」を現すものだったのですが、今は「損害の大きさ」を現すものとなっています。基本的には死亡リスクですが、甲状腺がんのようにめったに死なないがんでも「生活の質」が下がるので、そういう場合でも「損害」を考慮しておこうということです。

ゲンくん：そうすると、新聞に載っていた甲状腺等価線量で82mSvは実効線量ではどのような数値になるの？

第1表 組織加重係数(標準人)

組織・臓器	組織加重係数		
	ICRP103 (2007年)	ICRP60 (1990年)	ICRP26 (1977年)
生殖腺	0.08	0.2	0.25
赤色骨髄, 肺	各0.12	各0.12	各0.12
結腸, 胃	各0.12	各0.12	項目なし
乳房	0.12	0.05	0.15
甲状腺	0.04	0.05	0.03
肝臓, 食道, 膀胱	各0.04	各0.05	項目なし
骨表面	0.01	0.01	0.03
皮膚	0.01	0.01	項目なし
唾液腺, 脳	各0.01	項目なし	項目なし
残りの組織・臓器	0.12	0.05	0.3

カワさん：繰り返しになりますが、実効線量は甲状腺等価線量に、ICRP が勧告した「組織加重係数」をかけることによって換算（厳密にいいますと、実効線量は、生殖腺や肺など他の臓器についても同じように等価線量を求めて、その後に足し合わせたものと定義されるのですが、放射性ヨウ素は甲状腺にたまる性質があるので、他の臓器の影響は無視）できます。ICRP の最新の勧告（2007年）によれば、甲状腺に対する組織加重係数は0.04となっています。そうすると、甲状腺等価線量で82mSv という数値は、実効線量で3.28mSv (= 82 × 0.04) という数値に置き換えることができるのです。

### Ⅲ. コミュニケーション不足だった 「日本の自然被ばく線量」の見直し

日本における自然の放射線による被ばく線量はこれまで年1.5mSvと言われてきた。確かに、放射線医学総合研究所が、福島第一原子力発電所の事故直後に作成した「放射線被ばくの見直し」にも、1.5mSv という数値が記載されていた。しかし、2013年5月に作成された最新版を見ると、2.1mSv という新たな数値に変更されていた。この変更に対して7月24日、「被ばく見直し説明せず改定」という新聞報道がなされた。実は、この報道の約2週間前（7月11日）、原子力産業協会では、「日本人の年間自然被ばく線量は？」と題してコラムを既に発表していた。以下に新聞記事とコラムを対比して紹介する。

#### 1. 新聞報道事例

放射線医学総合研究所（放医研）が一般向けの「放射線被ばくの見直し」を十分な説明なしに改定している。

（途中省略）

自然放射線量についても、今年（2013年）5月末、1.5から2.1mSvに引き上げた。「根拠とする報告書が改定されたため」という。この報告書は、電力会社幹部らが役員を務める原子力安全研究協会が2011年12月に出した。国内外の論文を検証して、主に魚の内臓などに含まれるポロニウムによる内部被ばくの線量を上方修正したという。原発事故の影響は考慮されていない。しかし、放医研の修正が周知されていないこともあり、文部科学省の小中高校生向け「放射線副読本」や政府のサイトなどは放医研の旧来の見直しなどが引用されたまま。副読本には別の研究機関が出した「2.2ミリ」という第3の数字も紹介されている。自然放射線と医療被ばくを除いた一般住民の平常時の被ばく限度は年1mSv。細井義夫・東北大学教授（放射線医学）は「0.6ミリは大きな変化。原発事故以来、国民が被ばくに大きな関心を持っているのに、複数の自然放射線量が混在するのは良くない」と話す。

#### 2. コラム：日本の放射線・放射能基準

##### 「日本人の年間自然被ばく線量は？」

ゲンくん：僕はこれまで、放射線医学総合研究所が福島第一原子力発電所事故直後の2011年4月に作成した「放射線被ばくの見直し」を見て、日本人は自然放射線から毎年「約1.5mSv」被ばくしていると思っていたんだ。でも見直しの最新版（2013年5月）では、「約2.1mSv」と変更されているよね。どういうこと？

カワさん：ゲンくんは、自然放射線の起源が主に①宇宙線、②大地放射性物質、③気中に浮遊する天然の放射性物質（主にラドンなど）、④食品に含まれる放射性物質（主にポロニウム210（Po-210）など）にあることを知っていますか。①と②の放射線は体の外側から人々を照射して「外部被ばく」を、③と④の放射線は体の内側から人々を照射して「内部被ばく」を生じます。日本人の自然放射線による年間の被ばく線量は、これら4つの影響を足し合わせたもので、「原子力安全研究協会編：生活環境放射線—国民線量の算定—」によって、その時々の数値が公表されてきました。1.5mSv という数値は、今から約20年前の「1992年版」に載っていたものです。その後、人々の生活状況が変化し、国民線量の見直しが必要になり、詳細な調査が進められ、2011年12月に『新版生活環境放射線（国民線量の算定）』が刊行（2012年11月に一部修正）されました。2.1mSv という数値はこの新しい公表値です。新旧の公表値を比べると、特に食品中放射性物質からの線量が増えたことがわかります。この食品からの被ばく線量の変更が主な理由だったのです（第2表）。

ゲンくん：どうして食品からの影響がそんなに増えたの？原発事故で食品が汚染されたのではないの？

カワさん：国民線量の算定に関する新版が刊行された時期を考えると、ゲンくんのように「福島事故の影響」が原因と思う人が少なくないでしょうね。でも本当は、「①食品影響の調査が、事故の起こる6年も前の2005年に日本分析センターによって行われていたこと、②食品からの放射線の大部分が天然に存在する「Po-210」によるものであり、その年間の被ばく線量は0.8mSvであ

第2表 日本と世界の自然放射線による1人当たりの年間被ばく線量 (mSv/年)

	* 日本 (1992年)	** 日本 (2012年)	世界平均 (2008年)
宇宙線	0.29	0.30	0.39
大地放射性物質	0.38	0.33	0.48
気中放射性物質	0.40	0.48	1.26
食品中放射性物質	0.41	0.99	0.29
合計	1.48	2.10	2.42

\* 原子力安全研究協会「生活環境放射線」(1992年)

\*\* 原子力安全研究協会「生活環境放射線」(2011年)、その後2012年11月に一部修正

ることが知られていたことから、原発事故とは全く関係がないと言えるのです。

それではなぜでしょう。その主な原因は、Po-210が放出する放射線が、実は透過力の小さな「アルファ線」だったからです。もう少し具体的に言いますと、2005年の報告では、「臓器の外から放射線測定して体内のPo-210濃度を求め、被ばく線量を計算」していたため、十分な検出感度が得られませんでした。

一方、新しい報告では、「食品に含まれるPo-210の濃度を直接測定」して被ばく線量を計算したので、高い検出感度を得ることができました。この測定法の違いが、新旧の被ばく線量に大きな変化を生じたのです。Po-210からの被ばく線量は、年0.8mSvと見直されましたが、これは世界でも高い値です。Po-210が魚介類に多く含まれているため、日本人の「魚好き」が自然の内部被ばくを高めているというわけです。自然放射線の情報は、人の放射線影響を考える上で基本となる量の一つであり、内容の正確な理解がまずなされるべきことと思います。

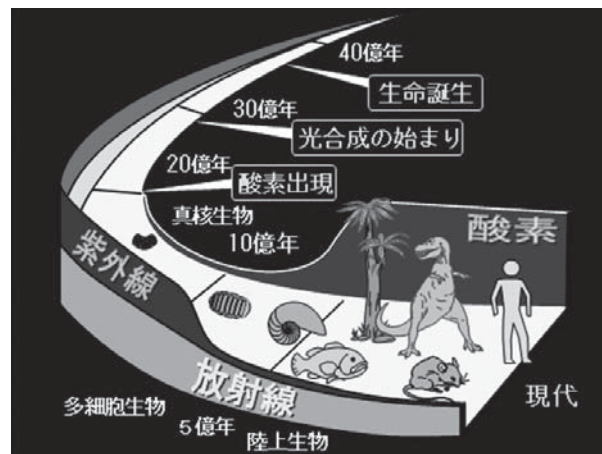
#### IV. 生命 40 億年進化の歴史を探る

多くの人が、「放射線は遺伝子(DNA)を傷つけてがんのもとになる悪玉」と思っている。しかし、生命維持に必要な酸素も遺伝子(DNA)を傷つけるという事実は、あまり知られていない。通常環境では、酸素の方が、自然放射線よりもはるかに高い「発がんのポテンシャル」を秘めているのだ。呼吸で摂取された酸素の一部は、体細胞の中で、反応性の高い物質(活性酸素)に変化する。そして、この活性酸素がDNAに傷をつけるのだ。実は、放射線の場合も酸素と同様、体中の水と反応して「活性酸素」を生み出している。放射線によるDNAの傷の多くもこの活性酸素がつくるのだ。放射線と酸素の影響を支配するキーワードは、「活性酸素」と言うことができるだろう。しかし、生命は約40億年の進化の過程で活性酸素の影響を抑制する仕組みを作り上げた。この仕組みは、放射線がつくる活性酸素に対しても有効に働き、放射線の量が多くなければ、「発がん」のリスクを無視できるレベルに保つことを可能にしたのだ。もう一度言うと、「日常生活において本当に怖いのは自然放射線よりも酸素」だったのだ。この事実をぜひ、知ってもらいたいという気持ちが抑えきれず、2編のコラムを執筆した。以下に紹介する。

##### 1. コラム：広く利用されている放射線「進化過程で構築された生体防御システム」

ゆりちゃん：「活性酸素が発がんリスクの主役」ってどういうことですか。

タクさん：その理解には、「人類の長い進化の歴史(第1図)」をたどる必要があります。



第1図 人類の長い進化の歴史

まずは「アミノ酸」の生成です。これには諸説ありますが、「炭素・窒素・水素を主成分とする原子の大気と、高エネルギーの宇宙線が反応して作られた」という説が有力です。そして今から約35億年前、このアミノ酸を基にして細胞分裂して子孫を残すことができる「生命」が誕生したのです。ここで注意すべきことは当時、地球には酸素がほとんどなく、空からは多量の紫外線が降り注いでいたため「生まれた生命は、酸素を利用する“好気性の生物”ではなく、増殖に酸素を必要としない“嫌気性の生物”であり、発生場所は、深い海の中だった」ということです。

ゆりちゃん：それからどうなったのですか。

タクさん：それから約10億年の年月が経った時、海中にシアノバクテリアと呼ばれる藍藻(らんそう)が発生しました。この藻は、海水中の炭酸ガスを取り入れて、逆に、酸素を放出する「光合成」を営む特別な生物でした。嫌気性生物にとって、酸素は猛毒ですので多くは死に、一部は酸素の少ない海底深くに逃げていきましたが、ほんの一握り、思いもよらぬ行動に出たものがいました。彼らは、「先ず仲間同士で融合し、生命にとって最も大事な“DNA”を膜で包み込んで保護された“真核生物”へと変化したのです」。さらには仲間だけでなく、「好気性生物をも自分の細胞内に取り込み、合体・共生した」のです。これが、酸素と食事で摂取したブドウ糖を結びつけ、エネルギーを生み出す細胞の中の大事な小器官「ミトコンドリア」の起源となったのです。一方、地上では、海中から移動してきた酸素の濃度が徐々に高まっていき、今から約5億年前にはかなり厚いオゾン層が形成されます。これにより、有害な紫外線が遮られ、生物が地上で生活できるようになりました。しかしここで大きな問題が生じます。それはミトコンドリアに関係した問題でした。ミトコンドリアが営む「酸素代謝」によって動物が活動に必要なエネルギーを得る一方で、「代謝に使われた酸素の一部が、酸化力の強い活性酸素に変化し、DNAを傷つけ、発がんのリスクを高めると

ということです。酸素にはプラスとマイナスの両面があったのです。活性酸素は放射線によっても生じます。そして放射線の害の7割近くは、この活性酸素によることがわかっています。それ故にルイ・パストゥール医学研究センターの宇野賀津子先生は、「放射線の影響のかなりの部分は活性酸素によるもの」と説いています。でも生物は、酸素毒を体験した進化の過程で、「活性酸素の悪い影響を抑制する“生体防御システム”を構築」して微量な放射線の悪い影響を防ぐ能力を得たのです<sup>1)</sup>。

## 2. コラム：広く利用されている放射線「DNA 損傷の主役は放射線よりも酸素」の執筆

ゆりちゃん：酸素と放射線が、遺伝子(DNA)を傷つける仕組みは同じなのですか。

タクさん：酸素が、エネルギーを生産する体内の工場(ミトコンドリア)で消費されると、反応性の高い物質(活性酸素)が作られます。この活性酸素がDNAと反応してDNAに傷をつけるのです。一方、放射線の場合は①DNAに衝突して直接的に傷をつける、②体内に存在する水と反応して活性酸素をつくり、間接的に傷をつける、と言う二通りの方法をとります。館野之男博士は著書『放射線と健康』の中で、「放射線(X線やガンマ線)がDNAに衝突して直接的に傷をつける割合は、全体の5%くらい」と述べていますが、実は、放射線の場合も酸素と同様、DNAの大部分の傷は「活性酸素」によってつくられるのです。

ゆりちゃん：それでは、どうして、放射線ばかり怖がられるのですか。

タクさん：DNAはちょうど梯子(はしご)のように、「遺伝子の情報をにう物質(塩基)を真ん中にして2本の鎖で支える」構造をしています。DNAの傷は3種類に分けられます。それらは①鎖が2本ともほぼ同じところで切れる場合(2本鎖切断)、②鎖が1本だけ切れる場合(1本鎖切断)、③塩基だけが傷つく場合(塩基損傷)です。1本鎖切断と塩基損傷はほぼ100%修復されることがわかっています。これに比べて2本鎖切断は治しにくく、がん発症の主な原因と考えられています。酸素がつくる2本鎖切断の割合は、「1,000万個の傷のうち1個程度」なのに、放射線がつくる割合は、「100個の傷のうち2個程度」と多いのです。このことから従来、体内に取り込まれた酸素がつくるDNAの傷は、「修復可能」だが、放射線がつくる傷は、「修復不能」という常識ができていたのです。

ゆりちゃん：日常生活では酸素と自然放射線のどちら

第3表 酸素と自然放射線のどちらがDNA損傷の主役か

損傷の種類 作用源	DNA 損傷(総数) (個/細胞/日)	DNA 損傷(2本鎖 切断(個/細胞/日))
酸素(細胞呼吸)	1,000,000	0.1
自然放射線 (1mSv/年 ≒ 2.5μSv/日)	0.005	0.0001

館野之男著「放射線と健康」より作成

がDNA損傷の主役ですか。

タクさん：米国のマイロン・ポリコーブ博士は、「がん発症までには生体防御の4つの砦(第1段目は活性酸素の消去機構、第2段目は傷を受けたDNAの修復機構、第3段目は増殖途中のがん細胞を自殺に追い込むアポトーシスの仕組み、第4段目は免疫機構)があることを考慮して、「呼吸する酸素と自然放射線が、1日当たり、1個の細胞当たり、何個の傷をDNAにつけるか」、理論的に計算しました。その結果を第3表に示します。驚くことに、自然放射線がつくる2本鎖切断の数は、酸素がつくる傷の約1,000分の1しかないのです。つまり日常生活において、修復不能なDNAの傷をつくる主役は、放射線ではなく、「人が呼吸して体内に取り入れる酸素」だったのです<sup>2)</sup>。

## V. おわりに

放射線の基礎を解説する「原子力ワンポイント」コーナーを設けてから既に3年が経過した。これからは「リスクコミュニケーション」など、社会的な視野にたって考えるコラムにも挑戦したいと考えている。

### —参考資料—

- 1) NHKサイエンススペシャル, 生命40億年はるかな旅1: 海からの創世, 1994年4月24日放送.
- 2) 館野之男, 「放射線と健康」, 2001年8月20日初版.

### 著者紹介



石田健二 (いしだ・けんじ)  
日本原子力産業協会  
(専門分野/関心分野) 保健物理, 低線量放射線影響



丸末安美 (まるすえ・やすみ)  
日本原子力産業協会  
(専門分野/関心分野) 人材育成, 放射線利用普及, 輸送・貯蔵関係, 核融合

## 解説シリーズ

## 世界の原子力事情

## 第7回（最終回）福島事故後の世界の原子力発電開発動向

日本原子力産業協会 小林 雅治

福島第一原子力発電所事故から3年が経過した。現在、日本の原子力発電所は48基全基が停止中だが、年内には数基が運転再開しているものと期待される。しかしながら、世論調査では、原子力発電所の再稼働や原子力発電利用についてネガティブな意見が多い。

一方、世界に目を転じると、ドイツのように原子力の段階的廃止を明確に標榜した国は少数で、多くの国が将来のエネルギー安全保障やCO<sub>2</sub>対策などから、原子力開発を推進あるいは拡大する方向にある。特に、これから原子力発電所を新規に導入しようとする国が増えているのが実態である。福島事故後を中心に世界・各国の原子力開発動向を俯瞰的に眺めてみる。さらに将来炉の開発状況や日本の役割についても簡単に触れる。

## I. 原子力発電の現状

2014年2月1日現在、世界で運転中の原子力発電所は、31ヵ国・地域で434基、合計出力3億7,400万kWである。全発電電力量に占める原子力の割合は約11%（2012年実績値）である。（詳細については第1表参照）

米国は、100基、9,900万kWが運転中で、世界最大の原子力発電国である。フランスは、58基、6,300万kWが運転中で世界2位の原子力国であり、全電力供給に占める原子力の割合は75%を占め、世界最大の原子力シェアを誇っている。日本は、48基、4,300万kWで世界3位だが、原発の停止状態が続いているため、2012年の原子力シェアはわずか2%だった。福島事故前の2010年は29.2%だった。

世界4～6位には、ロシア、韓国、中国の順に続く。これら3ヵ国は、建設中、計画中の基数も多く、今後の原子力開発で中心的役割を果たす。日本の今後の開発見通しは、福島原子力事故を受け不明確である。

世界で建設中の原発は70基で、このうち7割近くの46基がアジア地域に集中している。特に4割を占める中国の原子力開発の急ピッチ振りが目立ち、計画中と提案中を含めると、いずれ世界最大の原子力国に成長する。

現在、原発を持たないが、将来の導入を計画・検討している国（いわゆる新規導入国）が、アジア・中東地域に

目立つ。既にアラブ首長国連邦（UAE）とベラルーシでは原発の建設が始まっている。アジア、中東に加えて、旧東欧諸国などでも新規建設が始まる見込みである。

## II. 原子力発電開発の将来見通し

世界の将来の原子力発電規模の予測については、国際原子力機関（IAEA）、国際エネルギー機関（IEA）、米国エネルギー省エネルギー情報局（DOE/EIA）などが発表している。それらを総括したものを第2表に示す。IAEAが2013年9月に発表した世界の原子力発電開発予測によると、2030年には原子力発電規模が4.35～7.22億kWに拡大する。これは現在の規模の1.17～1.94倍である。現実的にはその中間程度が妥当な規模と見られる。

IAEAは長期的には、開発途上国における人口増加や電力需要増加だけでなく、気候変動対策やエネルギーの安定供給、他の燃料価格の不安定性などの理由から、原子力はエネルギーミックスの中で重要な役割を果たすと指摘している。IAEAの将来予測（第3表参照）について、地域別に原子力開発を見ると、原子力の増加が著しいのは、中国、韓国を含む極東地域である。極東地域は2012年末の0.83億kWから、2030年には1.47～2.68億kWに拡大する。次いで、ロシアを含む東欧諸国や中東・南アジア地域（インドを含む）も強い成長ポテンシャルを持っている。

西欧や北米地域は一部の脱原子力国やシェールガス革命の影響、寿命を迎えた原発の退役などにより、今後の原子力規模については、若干減少から若干増加までの幅があり、各国の状況によって流動的である。

さらに参考までに、IEAが2013年11月に発表した「世界のエネルギー展望」（WEO2013）での原子力発電設

*Current Trends in Nuclear Energy (7) : World Nuclear Development after Fukushima Daiichi NPP Accident : Masaharu KOBAYASHI.*

(2014年3月22日 受理)

■前回タイトル

第6回 内外に積極的に原子力展開するロシア

第1表 世界各国・地域の原子力発電開発状況

2014年2月1日現在

地域	国・地域名	2012年の原子力 発電量とシェア		運転中の 原子力発電所		建設中の 原子力発電所		計画中の 原子力発電所		提案中の 原子力発電所	
		億 kWh	%	基	万 kWe	基	万 kWe	基	万 kWe	基	万 kWe
アジア	中国(6)	927	2.0	20	1,704.2	28	3,163.5	58	6,263.5	118	12,200.0
	日本(3)	172	2.1	48	4,256.9	3	303.6	9	1,294.7	3	414.5
	韓国(5)	1,435	30.4	23	2,065.6	5	687.0	6	873.0	0	0
	台湾(14)	387	18.4	6	492.7	2	270.0	0	0	0	0
	インド(15)	297	3.6	21	530.2	6	430.0	18	1,510.0	39	4,500.0
	パキスタン(28)	53	5.3	3	72.5	2	68.0	0	0	2	200.0
	北朝鮮	0	0	0	0	0	0	0	0	1	95.0
	インドネシア	0	0	0	0	0	0	1	3.0	4	400.0
	ベトナム	0	0	0	0	0	0	4	400.0	6	670.0
	タイ	0	0	0	0	0	0	0	0	5	500.0
	マレーシア	0	0	0	0	0	0	0	0	2	200.0
バングラデシュ	0	0	0	0	0	0	2	200.0	0	0	
中東・北アフリカ	イラン(27)	13	0.6	1	91.5	0	0	1	100.0	1	30.0
	トルコ	0	0	0	0	0	0	4	480.0	4	450.0
	イスラエル	0	0	0	0	0	0	0	0	1	120.0
	UAE	0	0	0	0	2	280.0	2	280.0	10	1,440.0
	サウジアラビア	0	0	0	0	0	0	0	0	16	1,700.0
	ヨルダン	0	0	0	0	0	0	1	100.0	0	0
	エジプト	0	0	0	0	0	0	1	100.0	1	100.0
欧州	スウェーデン(11)	615	38.1	10	950.8	0	0	0	0	0	0
	フィンランド(18)	221	32.6	4	274.1	1	170.0	0	0	2	270.0
	英国(10)	640	18.1	16	1,003.8	0	0	4	668.0	7	892.0
	フランス(2)	4,074	74.8	58	6,313.0	1	172.0	1	172.0	1	110.0
	ドイツ(9)	941	16.1	9	1,200.3	0	0	0	0	0	0
	スイス(17)	244	35.9	5	325.2	0	0	0	0	3	400.0
	ベルギー(13)	385	51.0	7	594.3	0	0	0	0	0	0
	オランダ(30)	37	4.4	1	48.5	0	0	0	0	1	100.0
	スペイン(12)	587	20.5	7	700.2	0	0	0	0	0	0
	チェコ(16)	286	35.3	6	376.6	0	0	2	240.0	1	120.0
	ハンガリー(21)	148	45.9	4	188.9	0	0	2	240.0	0	0
	ブルガリア(19)	149	31.6	2	190.6	0	0	1	95.0	0	0
	スロバキア(22)	144	53.8	4	181.6	2	94.2	0	0	1	120.0
	ルーマニア(25)	106	19.4	2	131.0	0	0	2	131.0	1	65.5
	スロベニア(29)	52	53.8	1	69.6	0	0	0	0	1	100.0
	リトアニア	0	0	0	0	0	0	1	135.0	0	0
ポーランド	0	0	0	0	0	0	6	600.0	0	0	
イタリア	0	0	0	0	0	0	0	0	10	1,700.0	
(CIS等) 旧ソ連	ロシア(4)	1,663	17.8	33	2,425.3	10	916.0	31	3,278.0	18	1,600.0
	ウクライナ(8)	849	46.2	15	1,316.8	0	0	2	190.0	11	1,200.0
	アルメニア(31)	21	26.6	1	37.6	0	0	1	106.0	0	0
	ベラルーシ	0	0	0	0	1	120.0	1	120.0	2	240.0
	カザフスタン	0	0	0	0	0	0	2	60.0	2	60.0
北米	米国(1)	7,707	19.0	100	9,909.8	5	601.8	7	846.3	15	2,400.0
	カナダ(7)	891	15.3	19	1,355.3	0	0	2	150.0	3	380.0
中南米	メキシコ(24)	84	4.7	2	160.0	0	0	0	0	2	200.0
	ブラジル(20)	152	3.1	2	190.1	1	140.5	0	0	4	400.0
	アルゼンチン(26)	59	4.7	2	93.5	1	74.5	1	3.3	2	140.0
	チリ	0	0	0	0	0	0	0	0	4	440.0
アフリカ	南アフリカ(23)	124	5.1	2	183.0	0	0	0	0	6	960.0
世界合計	49ヶ国・地域	23,460	11.3	434	37,433.5	70	7,491.1	173	18,638.8	310	34,917.0

出典：WNA データ(2014年2月1日現在)をもとに作成。国・地域欄の( )表示は、運転中原子力発電規模の世界順位を示す。

運転中=送電開始を含む、建設中=原子炉建屋への初コンクリート打設、又は大規模改修工事中、

計画中=承認、投資確認、8~10年以内に運転開始見込み、提案中=個別プログラム、サイト提案、15年以内に運転見込み。

太字は原子力発電国(原子力発電所が運転している国、現在31カ国・地域)。

細字は新規導入国(運転中の原子力発電所を持たない国、表には主な国として18カ国列举)。

発電規模(kWe)については、運転中はネット出力、その他はグロス出力を示す。



第2表 世界の原子力発電規模予測

2012年末 (実績)	2030年 (IAEA予測)	2035年 (IEA予測)	2040年 (DOE/EIA)
3.73億kW	低: 4.35億kW 高: 7.22億kW	5.78億kW	7.17億kW

(注)低: 低成長予測, 高: 高成長予測

第3表 IAEA: 世界の原子力発電規模見通し

単位: 100万kW

	2012年	2020年	2030年	2050年
北米	115.6	118 124	101 143	64 163
中南米	4.3	5 6	7 15	13 59
西欧	113.8	94 117	68 124	33 137
東欧	48.5	64 75	79 104	79 138
アフリカ	1.9	1.9 1.9	5 10	10 42
中東・南アジア	6.0	13 22	27 54	47 142
東南アジア・ 太平洋	-	-	0 4	5 20
極東	82.8	112 158	147 268	189 412
世界合計	373.1	407 503	435 722	440 1113

(注)上段は低予測, 下段は高予測。

備見通しを第4表に示す。これは、各国の政策公約が慎重に実行されるという新政策シナリオに基づき作成されたものである。世界の各地域の原子力開発の傾向としては、IAEAの見通しと基本的に変わらない。なお、世界合計の数値は、統計の取り方によって、各出典で若干異なるが、ここではあまり気にしないことにする。

IEA見通しで特筆すべきこととして、2011年末時点では世界の原子力発電規模の82%がOECD加盟国にあるが、2035年にはOECDのシェアは56%に落ち、非

第4表 IEA: 世界の地域別原子力発電設備見通し

	2011年		2035年	
	100万kW	割合	100万kW	割合
OECD計	319	82%	322	56%
北米	123	31%	137	24%
米国	108	28%	117	20%
欧州	131	34%	114	20%
アジア太平洋	66	17%	71	12%
日本	46	12%	24	4%
非OECD計	72	18%	256	44%
東欧・ユーラシア	43	11%	62	11%
ロシア	25	6%	38	7%
アジア	23	6%	172	30%
中国	13	3%	128	22%
インド	5	2%	29	5%
中東	1	0%	8	1%
アフリカ	2	1%	7	1%
中南米	3	1%	7	1%
世界合計	391	100%	578	100%

出所: IEA, 「世界のエネルギー展望」(WEO2013)

OECDのシェアが増大することが分かる。中国は2035年の原子力規模が1億2,800万kWで、米国の1億1,700万kWを追い越す。一方、日本は2035年には2,400万kWとほぼ半減する。日本のエネルギー基本計画が近く決定されるが、原子力発電規模等は未定のままとされている中、権威あるIEAの推定値として参考までに示した。

### III. 世界の原子力開発の推移

原子力発電開発の歴史的推移を第5表に示す。

原子力平和利用は、1953年の国連総会におけるアイゼンハワー米大統領の「アトムズ・フォー・ピース」演説で始まった。1954年にはソ連でオプニンスク原発(6千kW, 黒鉛減速炉), 1956年には英国でコールダーホール原発(6万kW, ガス炉), 1957年には米国でシッピングポート原発(10万kW, PWR)が発電を開始した。

その後、原子炉は改良, 大型化が進められた。1973年の第1次石油危機を契機に石油代替エネルギーとして原子力発電が一躍脚光を浴び、原子力の建設ラッシュ時代を迎えた。1970年代の世界における原発の平均年間着工基数は31基と、1960年代の14基から倍増した。しかし、1979年のスリーマイルアイランド(TMI)原発事故と1986年のチェルノブイリ原発事故により、原子力開発は停滞した。1980年代の平均年間着工基数は14基に減少し、1990年代にはさらに3基にまで落ち込んだ。

2000年代に入ると、原子力カルネサンスと呼ばれるように復活しつつあった。2000年代の平均年間着工基数は、わずかであるが5基に増加した。

そのような中で福島原子力事故が起きた。原子力開発が後退するとの懸念もあったが、若干のブレーキがかかった程度で、世界的には原子力開発推進の方向に動いている。事実2010～13年の4年間の平均年間着工基数は9基になっている。既に述べたように、中国、ロシア、インド、韓国などの新興国の原子力開発が盛んである。UAEが2012年に、ベラルーシが2013年に、それぞれの国にとっての初めての原発建設を開始した。今後、トルコ、ベトナム、バングラデシュ、リトアニアなどでも初の原発の建設が始まる予定である。その意味で、原発の新規導入国の時代を迎えたと言える。

### IV. 主要国の原子力開発動向

福島事故後の世界各国の原子力政策や原子力計画から、大きく原子力推進国と原子力撤退国(脱原子力国)に分類される。

脱原子力国には、ドイツ、イタリア、スイス、台湾などが含まれる。これらの国は原子力発電所を早期に閉鎖するか、寿命延長や建替え(リプレース)を行わないとしている。世界的に見れば、脱原子力国は少数である。

ここでは主な原子力推進国について、原子力発電国と新規導入国に分けて簡潔に紹介する。

第5表 世界の原子力発電開発の推移(流れ)

	年代区分	世界の主な出来事	原子力発電国(最初の商業炉発電年)
草創期 ↓	1950年代  平均着工基数 (5基/年)	1953 アイゼンハワー米大統領, アトムズ・フォー・ピース演説 1954 ソ連, 世界最初のオプニンスク原発(6,000kW)運転開始 1954 米国, 世界最初の原子力潜水艦ノーチラス号就役 1956 英国, コールダーホール・ガス炉(6万kW)発電開始 1957 英国, ウィンズケール原子炉事故 1957 国際原子力機関(IAEA)発足 1957 米国, シッピングポートPWR(10万kW)発電開始 1957 ソ連, ウラルの核惨事(マヤク施設事故) 1957 ソ連, 世界最初の原子力砕氷船レーニン号進水	《3ヶ国》 ロシア(1954), 英国(1956), 米国(1957)
	1960年代  (14基/年)  85基 1,564万kW	1962 米国, 原子力貨物船サバナ号就航 1962 米国, 南極マクマード基地にて小型発電炉利用 1964 中国, 初の核実験 1965 日本, 東海原発(ガス炉, 16.6万kW)発電開始 1967 米国, ガスパギー計画(平和目的)による初の地下核実験 1968 国連, 核不拡散条約(NPT)支持決議可決	《9ヶ国》 フランス(1964), イタリア(1964), 日本(1966), ドイツ(1967), カナダ(1968), インド(1969), オランダ(1969), スペイン(1969), スイス(1969)
成長促進期 ↓	1970年代  (31基/年)  228基 13,106万kW	1970 核不拡散条約(NPT), 発効 1973 第4次中東戦争勃発, 第1次石油危機 1974 インド, 核実験 1974 国際エネルギー機関(IEA)発足決定 1977 カーター米大統領, 再処理凍結, 高速炉開発延期発表 1977~1980 国際核燃料サイクル評価(INFCE) 1978 第2次石油危機 1979 米スリーマイルアイランド(TMI)原発事故	《12ヶ国・地域》 パキスタン(1972), スロバキア(1972), スウェーデン(1972), カザフスタン(1973), アルゼンチン(1974), ブルガリア(1974), ベルギー(1975), アルメニア(1977), フィンランド(1977), 韓国(1978), 台湾(1978), ウクライナ(1978)
	1980年代  (14基/年)  425基 33,568万kW	1980 スウェーデン国民投票で2010年迄の原発廃止方針 1986 旧ソ連チェルノブイリ原発事故 1986 IAEA 特別総会, 原子力事故早期通報, 相互援助条約を採択 1987 イタリア国民投票で原子力廃止へ 1987 核物質防護条約, 発効 1989 世界原子力発電事業者協会(WANO)発足	《6ヶ国》 ハンガリー(1983), リトアニア(1983), スロベニア(1983), 南アフリカ(1984), ブラジル(1985), チェコ(1985)
停滞期 ↓	1990年代  (3基/年)  425基 35,943万kW	1990~91 東西ドイツ統一, ソ連崩壊 1992 国連環境開発会議, 気候変動枠組条約採択 1994 米原子力エネルギー協会(NEI)発足 1995 NPT 再検討延長会議, NPTの無期限延長決定 1996 原子力安全条約, 発効 1997 COP3, 京都議定書採択 1997 IAEA 理事会, 追加議定書採択 1998 インド24年ぶりに核実験, パキスタン初核実験	《3ヶ国》 メキシコ(1990), 中国(1994), ルーマニア(1996)
	2000年代  (5基/年)  432基 38,916万kW	2001 米ブッシュ大統領, 原発導入含む国家エネ政策発表 2001 ドイツ政府と電力, 脱原子力取決めに署名 2003 スイス, 原子力法改正で脱原子力に終止符 2005 フィンランド, 新規原発着工(欧では10数年ぶり) 2005 IAEA及びエルバラダイ事務局長にノーベル平和賞 2006 東芝, WH買収。日立/GE, 三菱重工/アレバ, 合弁会社設立 2008 イタリア政府, 原発凍結政策の転換方針を表明 2008 英国政府, 原発建設に向け白書発表 2009 スウェーデン政府, 脱原発政策の転換発表 2009 UAE, 同国初の原発に韓国企業グループ選択 2010 トルコ, アックユ原発建設でロシアと合意	—
新興国・新規導入国時代 ↓	2010年代 (~2020年代)  (2010~13年, 9基/年)	2010 ベトナム, ニントゥアン第2原発建設者に日本を選定 2011 日本・福島第一原発事故 2011 ドイツ, 原発の段階的廃止閣議決定(同年中に8基閉鎖) 2011 イタリア, 原発再開に関する国民投票で圧倒的多数が反対表明 2011 サウジアラビア, 2030年迄に原発16基計画発表 2011 IAEA 総会, 「原子力安全行動計画」採択 2012 米NRC, 34年ぶりに新規原発の建設運転許可発給 2012 UAE, 初の原発着工(27年ぶりの新規導入国での着工) 2013 トルコ, シノップ計画で日仏企業連合に優先交渉権付与 2013 ベラルーシ, 同国初の原発建設開始(ロシア協力) 2013 ヨルダン, 原発2基建設計画でロシア選定	《2010年代:数ヶ国》 イラン(2011), UAE(2017), ベラルーシ(2017)…  《2020年代:10ヶ国程度》 トルコ, ヨルダン, ベトナム, バングラデシュ, カザフスタン, リトアニア, ポーランド, サウジアラビア…

(備考)年代区分の( )内数字は年平均の新規着工基数。末尾の数字は、各年代区分の末期の運転中原発の基数と総設備容量。

## 1. 原子力推進国

### (1) 米国

米国は1979年のTMI事故以来、原子力の新規建設はゼロであったが、2012年、30数年ぶりに新規原発4基の建設・運転一括許認可(COL)が発給され、翌年本格着工した。約20基がCOL申請中であるが、最近のシェールガス革命等の影響で原子力復活の勢いは小さい。

しかし、この停滞の30数年間に、原子力の運転面では①設備利用率の改善(1990年代の70%程度から2000年代には90%前後へ向上)、②出力向上(これまでに累計で約600万kWの出力増加)、③運転期間の延長(78基が40年から60年への運転延長認可取得)の3大進歩がなされた。

### (2) フランス

世界第2の原子力国であるフランスは、自国が誇る欧州加圧水型炉(EPR)をフィンランド、フランス及び中国で建設中で、さらに米・中・印・英でも建設計画を進めている。2012年春に誕生した社会党のオランド大統領は「2025年までに原発依存率を50%に縮小、最古のフェッセンハイム原発閉鎖」を公約に掲げているが、その実行性については必ずしも確実ではない。

### (3) ロシア

1986年のチェルノブイリ事故後、原子力開発はしばらく停滞していたが、21世紀に入って、活発に原子力開発を進めている。現在33基、約2,400万kWが運転中で、さらに10基が建設中である。

中国、インド、イラン等に原発を輸出して、建設済み又は建設中。最近ではベトナム、トルコ、ベラルーシ、バングラデシュ、ハンガリーへの輸出に成功している。

### (4) 英国

16基、約1,000万kWの原発が運転中である。1基のPWRを除く15基は旧式なため、2023年までに全て運転終了の見込み。政府の政策として、エネルギー安全保障と気候変動対策の両面から、約1,900万kWの新規建設を見込み、8サイトを承認済みである。

電力自由化の徹底している英国では、原発事業者は外資系で、フランスのEDF エナジー(中国も参加)、日立傘下のホライズン、ニュージェン(東芝、GDF スエズ)の3社が計約11基、約1,600万kWの建設計画を進めている。

### (5) 中国

運転中20基、約1,700万kW、建設中28基、約3,200万kW。福島事故後の約1年半、中国は、運転中原発の安全検査、や原子力安全計画の策定まで、新規建設計画の審査・承認を一時凍結した。ただし、建設中原発の建設は継続した。

福島事故から数ヵ月後の2011年7月には高速実験炉(CEFR)が発電開始、同年8月には嶺澳原発Ⅱ-2号機が商業運転を開始した。中国は導入炉として、米WH製

のAP1000を三門と海陽の2サイトに2基ずつ、さらに仏アレバ製EPRを台山に2基建設中である。原発規模は、2015年に4,000万kW、2020年に7,000万kWに拡大する計画である。

### (6) 韓国

23基、計2,070万kWの原発を運転中の韓国は、ドイツを抜いて世界5位の原子力国である。さらに5基、690万kWが建設中、6基、870万kWが計画中である。日本と同様にエネルギー資源に恵まれない韓国は、原子力を基幹エネルギーに据えている。当初、米加仏から原子炉を導入したが国産化を達成。2009年12月、UAEから原発4基の受注に成功し実力を世界に見せつけた。

### (7) インド

21基、530万kWの原発が運転中、6基、430万kWが建設中。1974年の第1回核実験以来、国際的に孤立し、自力開発による重水炉(PHWR)を建設してきた。自国内にウラン資源が乏しいことから、豊富に有するトリウム資源を利用し、重水炉と高速増殖炉を組み合わせた独自の三段階の開発計画を立てている。2032年には、総発電設備7億kWの9%(6,300万kW)を原発で賄う目標を掲げている。2008年9月、インドへの原発や核燃料の輸出が解禁され、米WH、GE日立、仏アレバ、露ASEがインドへの原発売込みを図っている。

### (8) スウェーデン

スウェーデンは1980年の原発国民投票を受けて、議会で2010年までの段階的廃止を決議した。しかし、その後、代替電源の開発が難しいということで、廃止期限が撤廃され、さらに2010年には脱原子力撤回法案が可決され、運転中の原発は寿命後、同サイトでリプレースができることになった。大型炉でリプレースすれば、全体の原発規模は増大することになる。

## 2. 新規導入国

IAEAによると、新規導入国として60カ国がエネルギーミックスに原子力を含めることを検討しており、このうち12カ国が原発計画を作成中で、2030年までには20カ国が原子力発電国の仲間入りをする可能性がある。

ベトナムは、14基の建設計画を持ち、福島事故前の2009年12月にロシアから2基の購入を決め、2010年10月には原発2基の供給者として日本を選定した。

バングラデシュは、2011年11月、ロシアと原発2基の建設協定を結び、2014年の着工を目指している。

UAEでは、福島事故直後の2011年3月14日にバラカ原発の起工式が行われた。2012年7月、同1号機が本格着工。UAEはさらに10基の建設計画を持っている。

ヨルダンでは、日仏企業連合アトメアとロシアが受注獲得へのしを削っていたが、昨年10月、ロシア企業が供給者に選ばれた。

トルコでは、アックユ・サイト(2010年5月、ロシア

建設で合意、4基)に続くシノップ・サイト(4基)への原発建設について、2013年5月の安倍首相訪問時に、日仏企業連合アトメアに優先交渉権が与えられた。

サウジアラビアは、原発導入組織「アブドラ国王原子力・再生可能エネルギー都市」(KA-CARE)を創設し、2011年6月には、2030年までに原発16基の建設計画を発表した。

リトアニアは2012年3月、日立との間でビサギナス原発建設について事業権付与契約に合意した。総選挙の結果、若干の紆余曲折があったが、建設交渉が継続中。

ポーランドは、建設サイトを3ヶ所に絞り2030年までに600万kWの原発を建設する計画である。

ベラルーシは福島事故後の2011年3月15日、原発2基建設でロシアと合意し、2013年11月には本格着工。

## V. 将来炉の開発

原子力開発の将来を考えた場合、現行軽水炉の改良・拡大利用は勿論であるが、技術革新に基づいた資源・環境・利便性等の面で質的な飛躍を目指した新しい原子炉として高速炉や中小型炉の開発が進められている。

高速炉開発について、日本の「もんじゅ」が1995年以来ほぼ停止状態であるのに対して、世界では着実に前進している。中国では、福島事故後の2011年7月、実験炉CEFR(2.5万kW)が発電を開始した。ロシアからの導入により原型炉BN800も建設する計画である。インドは1985年より、実験炉FBTR(1.3万kW)が運転中であり、50万kWの原型炉PFBRが年内にも試運転開始の予定。ロシアでは1980年以来、ベロヤルスクで原型炉BN600(60万kW)がほぼ順調に運転中である。同サイトでは、建設中のBN800が今年1月に燃料の初装荷を開始し、今春にも初臨界を達成する見込みである。さらにBN1200の建設も計画されている。フランスも、高速炉ASTRID(50~60万kW)について、2020年頃の運転開始を目指して設計開発を進めている。

高速炉は、消費した核燃料よりも多くの核燃料を生み出すことができるだけでなく、高レベル廃棄物の放射能の寿命や量を減少させる技術としても期待されている。

中小型炉については、米国エネルギー省(DOE)が、2012年から官民折半負担による小型モジュール炉(SMR)開発支援計画をスタートさせた。原子力規制委員会(NRC)によるSMRの設計認証と許認可取得を支援するというもので、一般公募の結果、2012年11月にB&W社のmPower炉が、さらに2013年12月にニュースケール・パワー社のSMRが選定された。

SMRは、DOEによると、電気出力が30万kW未満で、工場ではほぼ完成品の形で製造し、需要地まで運搬す

れば、すぐに利用できる原子炉と定義されている。小さな需要や需要変動に柔軟に対応でき、安全性、立地、建設、経済性等のメリットが挙げられている。既存電源の補完や老朽火力の代替、熱供給などに加えて、輸出向けにも期待されている。

ロシアでは10隻余りの原子力砕氷船が就航しているほか、これに搭載されている船用炉KLT-40を利用した浮揚式の熱電併給の原子力発電所が建設中である。中国では、清華大学の試験炉HTR-10(熱出力1万kW)の研究成果を踏まえて2012年12月、石島湾で高温ガス炉(電気出力21万kW)の建設が始まった。韓国では中小型炉SMARTが2011年7月、規制当局から標準設計認証を受けた。電気出力10万kWで、海水淡水化にも適しているとして中東諸国などへの売込みに力を入れている。日本では高温ガス炉HTTR(熱出力3万kW)が1998年に初臨界し、950℃の高温連続運転、水素製造にも成功したが、次の開発段階が決まっていない。

## VI. 日本の原子力国際展開

安倍首相は、昨年4~5月の連休、中東諸国を訪問し原子力首脳外交を展開した。トルコでは、同国のシノップ原発計画について日仏企業連合への優先交渉権付与で合意した。サウジアラビアやUAEとも、二国間原子力協定の締結や締結交渉促進で合意した。

安倍首相は、昨年5月13日の参院予算委員会で、原発輸出について、「各国から我が国の原発技術への高い期待が示されている。私自身もリーダーシップを発揮し、わが国の技術を提供していく。事故の経験と教訓を世界と共有することによって、世界の原子力安全の向上に貢献していくことがわが国の責務だ」と強調した。

2000年代に入ってから、世界的な原子力カルネサンスの動きの中で、原子炉メーカーの国際的な再編・連携が進展したが、そのキープレーヤーは、わが国の3メーカー(東芝、日立、三菱重工業)だった。1980年代以降の世界的な原子力の冬の時代でも、わが国では、新規建設を着実に推進し、設計・製造・建設、更には運転・保守面で、高い技術能力と信頼性を築いてきた。

原発の新規導入に当たっては、核不拡散・原子力安全・核セキュリティ等に関する体制の整備は勿論であるが、原発の運転管理や資金面等の支援も必要である。日本は、福島の経験と教訓を生かし、新規導入国等のニーズに応じて官民を含めた柔軟で強力な体制を構築して、世界の安全な原子力開発に貢献していく必要がある。

### 著者紹介

小林雅治(こばやし・まさはる)

本誌, 56[5], p.52(2014)参照.

## 解説シリーズ

# レジリエンスエンジニアリングの動向

## 第3回 レジリエンス評価における技術社会的問題

東京大学 古田 一雄

本稿では、レジリエンスを技術社会的文脈において評価する際の問題について論じる。第1点は、社会インフラシステム、サービスシステム、生活システムの間には存在する相互依存性の問題であり、第2点は価値観の異なるさまざまなステークホルダー間の利害調整の問題である。これらの問題を、具体的なレジリエンス評価の事例を用いて示す。レジリエンス工学の社会実装においては、これらの問題の解決が必要である。

### I. はじめに

これまで、確率論的リスク概念に基づくリスクマネジメントが、原子力をはじめとする技術社会システムの安全性向上に大きく貢献してきた。しかし、技術社会システムの巨大化、複雑化や、科学技術と社会との相互連関の緊密化とともに、従来のリスクマネジメントの手法では不十分であることが次第に認識されるようになった。特に、リーマンショックや東日本大震災とそれに伴う福島第一原子力発電所の事故を経験した今日、さまざまな分野でリスクマネジメントに関する新しい考え方が求められていると言っても過言ではない。

このような背景からレジリエンス(回復能力)という概念が注目を集めている<sup>1)</sup>。レジリエンスとは、外乱やシステム内部の変動がシステムの全体機能に与える影響を吸収し、状態を平常に保つシステムの能力、あるいは、想定を超えるような外乱が加わった場合であっても機能を大きく損なわない、損なったとしても早期に機能回復できるシステムの能力を意味する。技術社会システムにおいては、従来の静的なリスクマネジメントを拡張、補強し、リスクマネジメントが十分だったとしてもなお残ってしまう残余のリスクに対処するための有効なアプローチを提供するものと期待される。

レジリエンスを技術社会システムに造り込むこと、すなわちレジリエンスをエンジニアリングするためには、何よりもレジリエンスという概念の明確化と評価が不可

欠である。新概念であるレジリエンスの評価に関してはいまだに確立された基準や方法はなく、また対象とするシステムに依存する側面もあると考えられるが、本稿では評価基準以前にレジリエンスを技術社会的文脈において評価する際の問題について論じることにする。

すなわち、第II章では複雑な技術社会システムのレジリエンスを評価する上で考慮しなければならない、社会インフラシステムと、それに依存するサービスシステム、さらにサービスの恩恵を受けることになる人々の生活システムの間には存在する相互依存性の問題について、第III章ではさまざまなステークホルダー間の利害調整の問題について、具体的な評価事例を交えながら論じる。

### II. 相互依存性の問題

レジリエンスは、外乱下においてもシステム機能が維持されるか否かという観点で議論されるが、システム機能を技術社会的文脈で考えてみると、システム機能は一般的に技術社会システムによって提供されるサービスと考えることができる。ここで言うサービスとは、サービスの提供者と受け手とによって協調的に行われる、価値創造の過程と定義される。サービスを生産、消費する基本単位がサービスシステムである。そして、世界はこのようなサービスシステムがネットワーク状に連結した複雑で巨大なシステム・オブ・システムズであるという考え方が、サービスシステムによる世界観<sup>2)</sup>である。

ところで、医療サービス、金融サービス、行政サービスなど、現代社会を支える重要サービスシステムは、電力システムをはじめとする社会インフラシステムに強く依存している。社会インフラシステムにも、電力、ガス、上下水道、交通輸送、情報通信など、さまざまなサブシステムが存在する。従来、レジリエンスを議論する際には、これらのサブシステムのうち一つだけに着目

Current Status at Resilience Engineering (3) ; Socio-Technological Issues in Resilience Engineering : Kazuo FURUTA.

(2014年1月15日 受理)

■前回タイトル

第2回 組織安全とレジリエンス

し、その特定のアウトプットの有無のみをもってシステム機能を考え、それによって提供されるサービスにまで考察が及ぶことはなかった。しかし、そのような方法で技術社会システムのレジリエンスを論じたのでは、現実を正しく把握することにはならない。

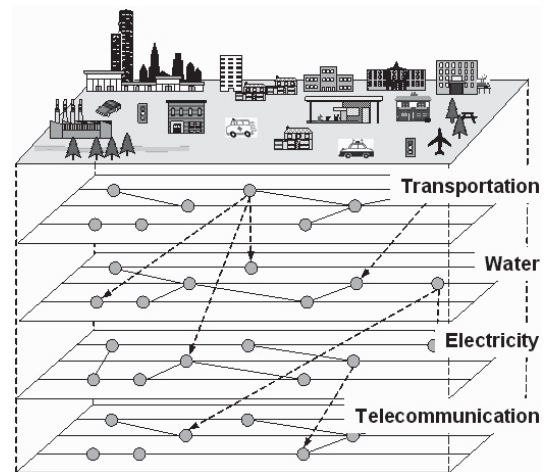
相互依存性としては、まず異なる社会インフラの間にある依存性が存在する。すなわち、災害やテロで電力がなくなれば貯水槽のポンプが停止して水道は機能なくなり、信号が作動しなくなると道路交通は麻痺する。逆に道路交通が麻痺すれば破損した電力設備の復旧が妨げられる。そして、一つのインフラシステムにおける局所的障害の影響がそのインフラシステム内で拡大伝播するだけでなく、他のインフラシステムにも波及して、複合的な社会インフラのカスケード的な機能喪失を引起す可能性が懸念される。このような背景から、欧米では相互依存性を考慮した重要社会インフラ防護の研究が進められている<sup>3)</sup>。

しかしながら、社会インフラのレジリエンスを議論する際にはインフラシステム内での相互依存性を考慮するだけでは十分でなく、その上で展開されるサービスまでを考慮に入れなければならない。そこで、ここでは災害時の透析医療サービスの事例を用いてこの状況を示すことにする。

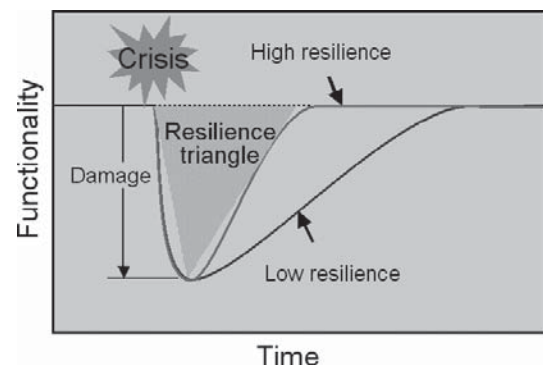
慢性腎不全の患者は腎移植を受けない限り2～3日に1回のペースで人工透析を受けなければならないが、このような患者数は東京都だけで約30,000人に及ぶ。災害時において、透析医療サービスを受けられるか否かは患者の生死に直結する。人工透析にはダイアライザーと呼ばれる医療機器と、それを稼働させるための純水、電力、特殊技能を持った技師が必要であり、さらに患者が透析病院に来院できなければならない。このため、透析医療は社会インフラに強く依存したサービスであり、災害に対して極めて脆弱である。

そこで、透析医療サービスの観点から、災害時における社会インフラシステムのレジリエンスを評価した<sup>4)</sup>。まず、社会インフラを第1図に示すような多階層ネットワークによってモデル化した。モデルの各層には、それぞれ道路、水道、電力、情報通信の各インフラ機能がネットワークによって表現されている。デモンストレーション目的であるため、ここでは5×5の矩形ネットワークを仮定した。ネットワークのノードには何らかの設備が配置され、リンクは導管・伝送路に相当する。

サービスや人の活動は、この多階層ネットワーク上を活動域とするマルチエージェントモデルで表現した。エージェントとして想定されたのは、患者、病院、救護所、本部、修復チームの5種類である。ここで、救護所は透析患者以外にも含む一般被災者向けの一時避難所であり、本部とは、どこの病院に行けば透析が受けられるかの情報を透析患者に提供する組織である。



第1図 社会インフラの多階層ネットワークモデル



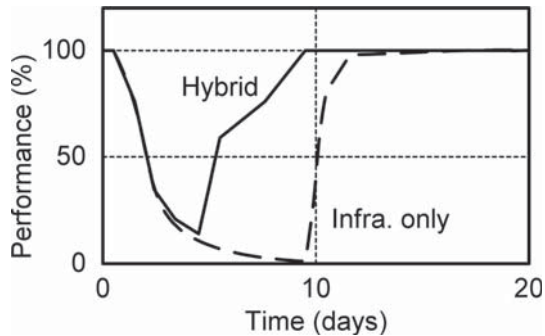
第2図 レジリエンス三角形

このシステムのレジリエンスを、受入可能患者数に対するレジリエンス三角形<sup>5)</sup>で評価した。レジリエンス三角形とは、第2図に示すように、システムの機能や容量の平常状態からの低下量を時間積分して得られる指標で、これが小さいほどシステムのレジリエンスが高い。

このシステムのレジリエンスは、修復チームによる社会インフラの修復スケジュールに依存する。そこで、修復スケジュールを遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて最適化した。すなわち、ある被災シナリオにおいて、各修復チームがどのような順番でインフラシステムの破損箇所を修復するかを遺伝子にコーディングし、ある適合度関数の下に自然淘汰、交配、突然変異の操作を加えて進化させ、修復計画を最適化する。

第3図は、適合度関数として社会インフラの回復率のみを考慮して最適化した場合(Infra. only)と、さらに受入可能患者数との組合せを使って最適化した場合(Hybrid)とで、レジリエンス三角形を比較したものである。この結果から明かなように、従来型の社会インフラの機能回復を目標とした修復計画では、これに依存するサービスシステムのレジリエンスを必ずしも高めることにはならない。

社会インフラシステムのレジリエンスという社会的に重要な問題を考える上で、透析医療サービスという特定



第3図 災害時透析医療サービスのレジリエンス評価

のサービスニーズ一つをとっても、インフラシステムとサービスシステムとの間の相互依存性を考慮しなければならないことが示された。世の中のあるゆるサービスが社会インフラに依存しており、さらに異なるサービスシステムの間にも相互依存性が存在すると考えられる。また、人々がさまざまなサービスをどう利用するかは各人の生活様式に依存して決まるので、人々にとっての最終的な効用を考える場合には、人々の生活も考慮に入れた評価が必要となる。このように、社会インフラ、サービスシステム、生活システムから構成される非常に複雑なシステム・オブ・システムズを対象とするレジリエンスの評価が、技術社会的文脈においては必要となる。

### III. さまざまなステークホルダーの問題

レジリエンスの評価はレジリエントなシステムを実現するための最初のステップであり、その基準には外乱に対するシステム応答のさまざまな側面が反映されなければならない。加えて、さまざまな利害、価値観、欲求を有する人々が、技術社会システムに求める機能は異なるので、レジリエンスはさまざまなステークホルダーにとって異なった意味を有することを認識する必要がある。したがって、技術社会システムのレジリエンスを評価する際には、このような異なるステークホルダーによるレジリエンスの捉え方の違いを反映するための何らかの方法が必要である。

その必要性を具体的な事例を用いて示すため、インターネット等で入手可能な情報のみを用い、東日本大震災後の社会インフラの復旧速度を、異なるステークホルダーに対して評価した。なお、ここでもデモンストレーションが目的の簡易評価であり、結果の精度に関しては重視しないこととする。

本評価では、Maslowの欲求段階説<sup>6)</sup>に基づき、まず被災者の欲求満足度としてレジリエンスの評価基準を決定した。Maslowの欲求段階説では、人の欲求が低位のものから、生理的欲求、安全欲求、社会的欲求、承認欲求、自己実現欲求の5段階に整理できるとする考え方である。そして、上位の欲求は下位の欲求が満足されない限り意識されることはないという、階層構造になってい

るとされる。

本評価では、震災後の比較的短期の被災者の欲求として、生理的欲求、安全欲求、社会的欲求の3段階のみを考慮した。このうち生理的欲求は、水、食料、睡眠、暖房など、生命維持のための最も基本的欲求を、安全欲求は危険な状況の回避、犯罪からの保護、精神的不安からの開放などの欲求を、社会的欲求は他人に愛されているという意識、集団への帰属意識、孤独からの開放などに関する欲求を意味する。

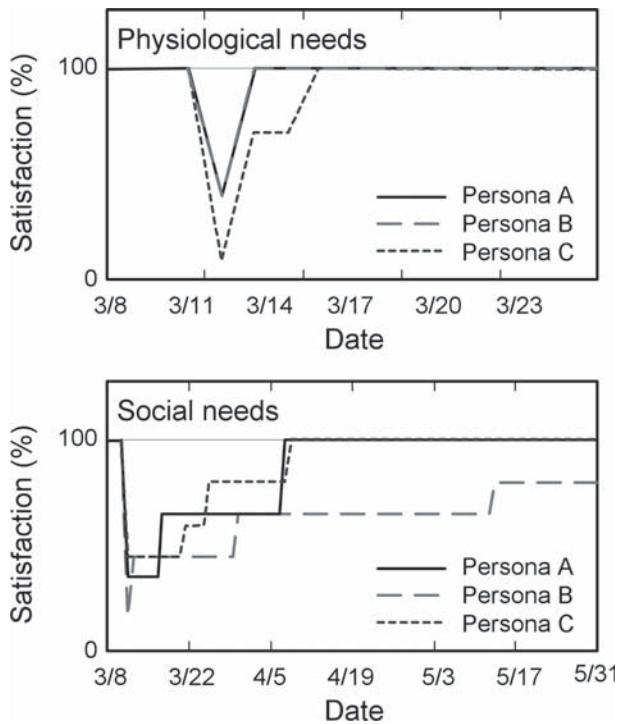
次に、3段階の欲求達成に対する各社会インフラの貢献度を評価した。ここでは被災者の手記などの記述を参考に、専門家判断によって貢献度を評価した。さらに、各社会インフラの機能を個別要素に分解し、これをインターネット上で公開されている震災後の復旧状況に関する個別情報に直接の対応が付くまで繰り返した。以上の分析に基づいてレジリエンスの評価基準を作成し、その結果を用いて特定被災者を対象とした生理的欲求、安全欲求、社会的欲求の3レベルに対する満足度の時間変化を評価した。

Maslowの欲求段階説と並んで、本評価では異なる被災者の欲求の違いを考慮するのにペルソナ手法<sup>7)</sup>を用いた。ペルソナとは、製品やサービスを企画・設計する際に想定するユーザモデルである。ペルソナはユーザの平均像ではなく、非常に具体的で特定のユーザの記述である。ペルソナ手法では複数のペルソナを作成することによって対象ユーザの全体を代表する。ペルソナを用いることによって、平均的ユーザ像では把握できないユーザのニーズを把握することが可能となる。

そこで、公開された被災者の手記などを参考に、いずれも気仙沼市の同じ町内に住む3人の被災者ペルソナを作成した。ペルソナAは20代男性の会社員、ペルソナBは40代男性の自営業者、ペルソナCは70代男性の退職者である。この3つのペルソナに対する、生理的レベル、社会的レベルのレジリエンス三角形の評価結果を第4図に示す。

各被災者の個別的ニーズの違いが、同一レベルのレジリエンスにかなり影響していることが示されている。たとえば、ペルソナCは高齢者で慢性疾患を抱えているために、他の2者に比べて医薬品の物流回復の遅れが生理的レベルの欲求満足回復の遅れを引き起している。また、被害があった店舗の復旧とビジネス再開の目処が立たないことが、ペルソナBの社会的レベルの欲求満足回復を阻んでいる。このように、同様な環境条件にあるにもかかわらず、異なる被災者にとっての社会インフラのレジリエンスは異なる。

以上の事例が示すように、技術社会システムのレジリエンスを評価し、これが最大になるように設計しようとする場合に、いったい誰にとってのレジリエンスなのかという問題がある。これは異なるステークホルダー間の



第4図 東日本大震災後のレジリエンス三角形

利害調整,あるいは社会的合意形成の問題である。民主的  
社会においては,最大多数の最大幸福,あるいは多数  
決原理に基づく集意的意思決定が一般的に採用されて  
いる。しかし,単純な多数決原理に基づく集意的意思決定  
だけでは,ペルソナCのような高齢の病弱者や,第II  
章の透析患者などの弱者は切り捨てられてしまう。また,  
万人の欲求を満たすことが不可能である場合には,  
技術社会システムの個々の機能に関する社会的トリアージ,  
優先順位付けが必要になろう。このような問題に対  
して,いかに社会的合意を形成していったらよいかに答  
えていかなければならない。

#### IV. まとめ

本稿ではレジリエンスを技術社会的文脈において評価  
する際の2つの問題について,具体的な事例を論じた。

まず,社会インフラシステムと,それに依存するサー  
ビスシステム,さらにサービスの恩恵を受けることにな  
る人々の生活システムの間には相互依存性が存在し,こ

れを考慮することが技術社会的文脈で必要となる。全体的な  
技術社会システムは複雑で巨大なシステム・オブ・  
システムズとなるが,その挙動を予測し,レジリエンス  
を評価する上では人間・社会を含めたシミュレーション  
技術の活用が期待される。

次に,技術社会システムのレジリエンスを評価する際  
に,価値観やニーズの違いが同一対象のレジリエンスの  
評価に影響することを示した。このため,異なるステーク  
ホルダー間の利害調整,あるいは社会的合意形成が不  
可欠である。特に,社会的弱者などの特定集団の利害に  
配慮することが,民主的な集意的意思決定手続きに加え  
て必要となろう。万人の欲求を満たすことが不可能であ  
る場合には,社会的トリアージの考え方が必要になろう。  
このような問題に対して,いかに社会的合意を形成  
していったらよいか今後の重要課題である。

#### — 参考資料 —

- 1) E. Hollnagel, E. Rigaud, E. (Eds.): Proc. 2nd Resilience Engineering Symposium, (2006).
- 2) J. Spohrer, S. K. Kwan, Service Science, Management, Engineering, and Design (SSMED): Outline & References, (2008).
- 3) 奥山恭英,堀井秀之,山口健太郎,相互依存性解析:研究開発動向と課題,社会技術研究論文集,5,197-205 (2008).
- 4) T. Fujii, T. Kanno, K. Furuta, Modeling dialysis service in a disaster to assess its resilience, Proc. European Safety and Reliability (ESREL) Conf. 2010, Rhodes, Greece, 2382-2386 (2010).
- 5) M. Bruneau, et al., A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, Earthquake Spectra, 19, 4, 733-752 (2003).
- 6) A. H. Maslow, Motivation and Personality, New York, US: Harper & Row, (1954).
- 7) A. Cooper, The Inmates Are Running the Asylum, New York, US: Macmillan, (1999).

#### 著者紹介



古田一雄 (ふるた・かずお)  
東京大学  
(専門分野/関心分野) 認知システム工学,  
レジリエンス工学, 社会デザイン



## 解説シリーズ

## 核燃料サイクル—フロントエンド

## 第4回(最終回) ウラン濃縮における技術開発と事業の動向

日本原燃(株) 本多 直人

世界の濃縮ウラン市場の獲得あるいは自国の市場確保に向け、各国が技術開発とプラント規模拡大を競っている。本稿ではガス拡散法に始まり、その後の遠心法を主体とした軽水炉用低濃縮ウランの生産に係るウラン濃縮の歴史と技術の傾向性および近年の濃縮事業の状況を概観する。また、日本国内における自主技術開発の特質を遠心法を中心に振り返り、開発の経緯、実用化までの道程および濃縮事情の概要を紹介する。更に温故知新をキーワードとして、今後の技術開発のあり方と濃縮事業の方向性を探る。

## I. 海外におけるウラン濃縮

## 1. 発展の経緯

既に1919年には遠心法<sup>1)</sup>による同位体分離が示唆され、1922年に分離理論が完成している。

しかし、高速回転体であるガス遠心分離機(以下、遠心機という)の製作に困難が伴い、実験的な成功は1936年となった。同年にウラン235が発見され、それに続く一連の核分裂の発見と相まってウラン同位体分離は世界的な動きとなった。ここまでは科学史と呼ぶべき範疇にあるが、その後は工学史としての展開を示した。

第二次世界大戦における国家存亡をかけた争いはこの開発に拍車を掛け、ついに米国がマンハッタン計画の名の下に電磁法、熱拡散法、ガス拡散法<sup>1)</sup>(以下、ガス拡散法を拡散法という)をはじめとしたウラン濃縮(以下濃縮という)の実用化に成功した。

戦後は米国において近年まで稼動した大規模工場が1956年、英国において1952年、フランスは遅れて1967年に拡散法工場を完成させた。ソ連は1940年代に拡散法工場を完成したとされ、1960年代には遠心法工場も開設して大規模工場へと発展させてゆく。中国はソ連の技術を受け、1964年から拡散法工場を運転開始した。

平和利用が強調された時代であったものの、各国は軍事用高濃縮ウランの保有量を競っており、民需用低濃縮ウランは軽水炉戦略と連動した米国の寡占状態であった。

*Nuclear Fuel Cycle—Front-end (4) : The trend of the technical development and the enterprise in uranium enrichment : Naoto HONDA.*

(2014年2月5日 受理)

■前回タイトル

第3回 海外ウラン資源開発株式会社によるウラン資源開発と最近の開発動向

これと併行して、米国、英国、オランダおよび西独は遠心法の工学的研究を着々と進めた。また遠心法小型プラントによる秘密裏での高濃縮ウラン生産への懸念から、その後1978年のロンドンガイドライン等により情報の機密化が進むこととなった。

1970年代は米国産軽水炉の拡大と石油危機から濃縮ウランの需要が急激に高まり、それに伴い各国が濃縮ウラン戦略を展開した。米国においては拡散工場の規模拡大と民営化が議論され、同時に1960年代から開発を進めていた遠心法が姿を現した。

そのジャンボ機と呼ばれる巨大さと他国の数倍はある分離性能が話題となり、実用化の段階まで到達したが、原子レーザ法<sup>1)</sup> AVLISの台頭により1985年に開発を打切った。

一方、1970年に英国、オランダ、西独3カ国は濃縮事業計画に調印し、翌年URENCOを設立した。世界で初の遠心法工場の商用化に成功し、1990年代からは着々と拡大路線を歩んだ。同社からの遠心法技術の第三国流出が問題となった時期とも重なる。

フランスにおいては、遠心法、化学交換法CHEMEXの開発成功もあったが、経済性により拡散法を選択して5カ国から成るヨーロッパ共同濃縮事業であるEURODIFを設立し、1979年に拡散法工場を運転開始した。

1970から1980年代においては、西独の設計に基づく南アフリカ共和国におけるヘリコン法、西独との協力によりブラジルで成功したノズル法<sup>1)</sup>も注目された。

同時期には米欧日において原子レーザ法(AVLIS他)と分子レーザ法(MLIS)の開発が進められ、一定の成果をあげたが実用化には至らずに終了した。分子レーザ法の系譜は1990年代からのオーストラリアにおけるSILEX法<sup>1,2)</sup>につながる。

大きな潮流として見れば世界の濃縮事業は拡散法によ

り発展し、ピーク時の1980年代には40,000tSWU/y<sup>i</sup>規模に達した。

## 2. 近年の動向と現状<sup>1,2)</sup>

遠心法の数十倍とされる電力消費型の拡散法は設備の老朽化とともに衰退し、ソ連、英国、フランスそして2013年の米国と全ての工場を停止した。

1983年頃を境として入れ替わりに急速に拡大したのが遠心法であった。経済的最小規模が小さく、段階的建設やリプレースに柔軟であることも理由であった。

フロントランナーであるURENCOは性能向上を継続して2012年には15,900tSWU/yの設備容量に達している。また米国内にも濃縮工場URENCO USAを建設し、2015年に5,700tSWU/yを確保するとされている。

一方では2013年頃から3ヵ国が保有する株式を売却する構想が浮上しており、濃縮事業の厳しさを現している。

遅れをとった米国USECは再び遠心法に舵を切り、過去に開発した大型機を改良した機種により2007年から本格的な試験を開始して商用化の技術レベルに到達した。2011年に3,800tSWU/y規模達成の計画であったが、経済性と政治的側面から停滞が見られ、2013年末に会社更生法の適用申請を発表した。今後の帰趨が注目される。

同時に米国GLEにおいてはSILEX法を米国に技術移転し濃縮工場を軌道に乗せる計画が進行している。

フランスAREVAは資本参加の形でURENCO技術を導入し、2016年を目標に7,500tSWU/yの工場建設を急いでいる。

ロシアROSATOMは既に28,000tSWU/y以上の設備容量を有しており、旧型から新型への遠心機更新も順調に進んでいる。また、役務生産の意味では、兵器用高濃縮ウラン(HEU)解体に伴う低濃縮ウラン生産があり、供給能力は5,500tSWU/yに相当するが米国との協定は2013年に終了した。それとともに2007年頃からロシアを中心とした国際ウラン濃縮センター(IUEC)構想が動き出し、一部で現実化しているが、技術移転と技術へのアクセス権が大きな課題となっている。

イラン、北朝鮮、パキスタン等における濃縮工場の規模拡大と遠心機性能向上がたびたび報じられているが、いずれの国も国際原子力機関(IAEA)の保障措置による査察を受け入れていない(なおイランは2013年末に5%超の濃縮ウラン製造中止等を欧米6ヵ国と合意し、2014年より履行を開始した)。

これらの国の濃縮技術はURENCOの技術をベースとして独自の改良を加えている模様であるが、軽水炉用低濃縮ウランの商用生産という観点から内容を割愛する。

<sup>i</sup>濃縮事業は濃縮ウランを販売するものではなく、ウラン同位体を所定の濃縮度まで分離する役務を提供する。役務の仕事量を表す単位がkgSWUまたはtSWUであり、例えば3%濃縮ウランを100万kWの発電所に提供するには年間120tSWU/yの役務作業を必要とする。

## II. 濃縮技術トレンド

### 1. これまでの技術展開

第I章における発展と現状の裏付けとなった技術面を紹介する。

拡散法は、多孔性物質である隔膜が重点となる。数マイクロンの微細孔を持つ薄膜の製造に注力し、安定した透過性、機械的強度および六フッ化ウラン(以下UF<sub>6</sub>という)への耐久性を実現する製法が確立された。また実用上は隔膜前後の圧力差を生む圧縮機の効率化も重要であった。

しかし、隔膜による1回の濃縮の度合いは小さく、原理的にも向上が望めないことから、その後の発展はなかった。

遠心法については1950年代に何種類かの遠心機構造が考案されており、その後、主流となったのがZippe型遠心機<sup>1)</sup>である。既に基本的な構造は現在に通じる完成度の高いものであった。

遠心機性能は原理的に上限がなく、以降の開発は分離性能を向上させるために、より速い回転場の応力に耐える材料開発、より長い弾性回転体に対する振動抑制技術と軸受開発が中心であった<sup>ii)</sup>。

また、高速化に伴って困難度が増すUF<sub>6</sub>の抽出方法、UF<sub>6</sub>接触部材の耐久性向上が設計と製造上の重点項目となった。

これらを側面から支えたのが戦後の技術革新であった。材料に着目すれば、軽量かつ強度を要求される航空機、車両、風車等においてアルミ合金、特殊鋼、複合材料と進歩したが、遠心機の回転胴材料も同様の経過をたどった。更に1980年代から盛んになった新素材開発は設計の選択肢を拡げて性能向上に貢献した。複合材料の繊維材、強力磁石、軽量合金が例として挙げられる。

また商品化された集積回路の応用であるCAD/CAMは精密加工をはじめとする製造システムの変革を導いた。これらはNC工作機械や産業用ロボットと相まって均質で高精度な遠心機の量産を可能とし、遠心法による大規模工場と建設費低減を実現する一因となった。また、CAEは濃縮工場全体の膨大な設備機器を統合した最適設計を可能とした。

日本において、これら新しい技術の遠心法への応用を進めたのが現場技術者の創意工夫の積み重ね(いわゆる改善)であり、表裏一体となって進化させたと言える。

<sup>ii</sup>分離性能は理論的に速さの4乗に比例し、回転胴の長さに比例する。最新級遠心機の水準を比喩的に示す。

速さ：回転胴とともに内部で旋回するUF<sub>6</sub>ガス速度のマッハ数は拳銃弾丸の1桁上である。また高速回転から生じる遠心力により1円玉は成人数名分の重量となる。  
長さ：高いアスペクト比と高速回転のために、定格回転数に到達するには弾性回転体としての共振点を数次以上通過する。

更に電子工学と光科学の発展はブレークスルーとなり、遠心法に代表される統計的分離法と異なる選択的分離法として高い分離係数が得られるレーザ法を生むに至った。

この中で最も有望と見られた原子法は実用化されることはなかった。高出力で長寿命なレーザ発振器製造の難しさ、高温金属ウランの収納容器材料選定の難しさが理由であった。分子レーザ法は分離後の製品の安定性に課題があったが、この技術は消費エネルギーの少ないSILEXへと発展した。広く使われているUF<sub>6</sub>取扱い技術を活用できることも利点である。

## 2. これからの方向性

商用遠心機の優劣は分離性能だけでなく、結局はその経済性に集約される。URENCOは従来から「遠心機の速さと長さの競争は終点に来ており、長寿命化と製造コスト低減がこれからの方向」と表明している。このようなロバスト性重視の先取り思想が成功へ導いたと考えられる。日本も同様に、この方向へ進んでいる。

一方、ロシア(ソ連)は技術的制約があったにせよ剛性回転体である小型機を採用し、当初から信頼性第一の方向で着実な成功を収めて来た。近年は、かつてのURENCOと同様の分離性能追及も行っている点が目を引く。

分離性能あるいは信頼性重視の設計、大型化および技術導入のように各国がとる当面の手法は多様化している。しかしいずれは経済性向上につながる寿命と信頼性重視の設計へ収斂するものと考えられる。

これまで遠心機に焦点を当ててきた。開発の中核をなしてきたのは建設費の過半を占める遠心機であり、今後各国が競う先端技術としての位置付けは変わらない。

しかし濃縮技術を俯瞰する上で留意すべきは、遠心機単独の性能と製作費の追及だけでは役務価格の低減に限界があるという点である。

濃縮工場は機器単体から設備区分に至るまでが集合体であり、遠心機やプラント機器の性能を個別に追及してから結果を結合する要素還元的设计に偏るべきでない。濃縮工場全体を操業や維持管理も含めた複雑系として捉え、経済性向上という目的に沿いながらまとめあげるマネジメント手法がますます要求されている。日本においても開発・設計の段階から、遠心機や各々の設備機器の機能分担が特定部分に集中しないように濃縮工場全体として最適化する努力を繰り返している。

ここまで開発のスピード感に触れなかったが、コスト低減には供用サイクルの短い自動車や家電品と同様に、開発期間を短縮して極力早期に最新設備で操業することが効果的である。モックアップ等による実証を必要としないシミュレーション技術の進歩と開発経験の積み重ねがこれを可能とした。

URENCOの開発ステップを純技術面から眺めると6.5～8.5年が標準となっている。日本もほぼ同じ期間であ

り、途中で幾つかのチェックポイントを設け慎重に歩んでいる。過去には更に何段階かのステップを置いた時期もあったし、逆にステップ短縮や省略をした例もある。

一方USECにおいては不測事象への対応は除外して、この半分の期間でプラントへ導入するとされる。寿命や信頼性評価に疑問が残るが、他国の無保守方式と異なり2～5年毎に遠心機の保守を行う設計思想が影響している。この面でも開発の方向性が一つでないことがわかる。

## III. 世界の濃縮ウラン需給

濃縮役務量は製廃品および原料の濃度と量により求まる。製品の濃縮度と量は発電側からの要求で一義的に決まる。また、廃品の濃度と量は天然ウラン価格と濃縮工場の設備費・操業費との経済性(どれだけウラン235を回収するのが経済的か)により決まる。

そのため、予測数値には変動幅を伴うが、これら因子に大きな変化がなく廃品濃度を現状並みの0.3wt%とすれば2020年に必要な役務量は4.5～5.5万tSWU/y、2035年には5～8万tSWU/yと予測されている<sup>3)</sup>。

それに対し役務供給能力はロシアHEUを加えて54,000tSWU/yとなり、今後数年の設備拡張計画を加味すると約7万tSWU/yに達する<sup>2)</sup>。

数字的に見れば、当分は原子力発電所の事故による広範囲な社会的抑制に伴う落ち込みにより需要の停滞は避けられず、やや供給過剰な傾向が続くと考えられる。

しかし需要変動に逐次対応する濃縮工場設備と技術の急激な閉止と再立ち上げは遠心法にとっても難しく、大局的な供給計画が必要である。経済的競争力の視点だけでなく化石燃料消費による温室効果への対策は世界規模の課題であり、需要のマクロ的減少は考え難い。そのため多くの原子力推進国において基本的な政策変更は見られず、アジアを中心とした発展途上国においてはより積極的な需要拡大の傾向が見える。楽観視すれば今後10年程度で現設備容量の倍近くまで増大するとの予測<sup>3)</sup>もあり、その場合でも原子力発電の比率がそれほど高いものとはならないことから拡大の余地は十分残されている。

このため、濃縮事業の競争は激しさを増しており、天然ウランの生産状況に極端な変化がなければ役務価格100～150\$/kgSWU程度の実現が事業安定化の目安となる。

## IV. 日本における濃縮技術の歴史

### 1. 濃縮技術全体の経緯<sup>4)</sup>

基礎研究から、金属銅遠心機を採用した商用濃縮工場までの経緯を紹介する。

1951年の講和条約には原子力研究禁止の条項が含まれておらず、1954年に最初の原子力予算が組まれて国内における原子力利用開発研究が始まった。翌年には濃縮ウランの言葉がマスコミに登場しており、1958年に原

子力委員会が示した「核燃料開発に対する考え方」を機に濃縮に関する基礎研究が国の支援を受けて開始された。

その後、数十年にわたる研究、開発および実用化は、学会や原子力分野の関係者のみならず、産業界をあげての道をたどることとなった。

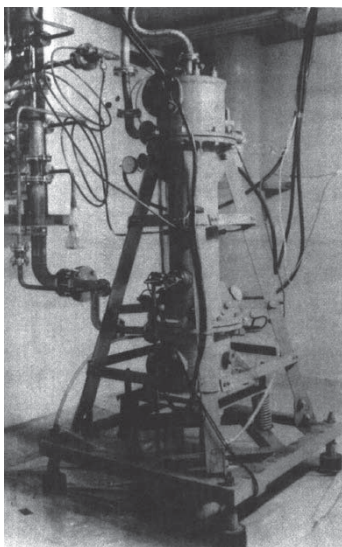
技術開発の第一歩は、1959年の理化学研究所(以下、理研という)による1号機の試作に始まる。1961年には原子力委員会決定に沿って、遠心法の開発は理研から動力炉・核燃料開発事業団(以下、動燃という)の前身である原子燃料公社に移管され、1969年に東京工業大学の小型遠心機を利用してウラン濃縮に成功した(第1図)。

特記すべきは、回転胴、軸受、駆動モータ、UF<sub>6</sub>ガス流動等に係る現在に続く基本構造が既に随所に見られることである。10年という短期間での急激な進歩の裏にはタービン部門等の工業界の底力の存在が大きかったとともに、旧陸海軍主導により1944年から開始され終戦とともに消滅した理研における熱拡散法、京都大学における遠心法の調査研究が無形の財産を残していたとも考えられる。

既に拡散法は1967年から理研と日本原子力研究所(以下、原研という)が開発を進め、1969年には遠心法に先行して成功を取っていた。

拡散法と遠心法の相次ぐ原理実証結果を受けて「特定総合研究」がスタートし、原子力委員会のもとで両者の比較評価が行われた。その結果、省電力かつ小規模プラントに適しているとの判断から、1972年に「遠心法についてパイロットプラントの建設・運転までの開発をナショナルプロジェクトとして強力に推進する」という内容の「特別研究開発計画」が決定された。

1973年以降は動燃を核とし、国の総力をあげて遠心機の性能向上を進めた。翌年には初のカスケードC-1を運転開始し、この経験は遠心機開発者に遠心機単体と



第1図 国内初のウラン濃縮に成功した小型遠心機<sup>5)</sup>  
(茨城県東海村)

カスケードとの差異を、製造者に手造りの製品と量産品との区別を学ばせる機会となった。

メーカ4社によるC-1遠心機は金属胴と複合材胴が混在していた。しかし、高強度金属材の薄肉化技術の見通しが得られたことと開発工程の優位性から、以降の商用濃縮工場に向けた標準化として金属胴遠心機を選択した。

統一した遠心機の分離性能を向上させ、順次C-1遠心機の3~7倍を得るに至った。これら遠心機によるパイロットプラントPPは1979年から12年間濃縮プラントの信頼性、経済性に関するデータ、設計と建設に関連するノウハウおよび運転制御に関する技術を蓄積した。

濃縮国産化の具体的な議論も始まり、国内運転実績を背景に1979年の国際核燃料サイクル評価会議(INFCE)で濃縮技術保有国として国際的に認められることとなった。ここに国内事業化の道が拓かれたのであり、日本の濃縮は世界に遅れてスタートし雌伏期間も経験したが、工業界全体の技術力と産学官民一体の協力体制によりキャッチアップしたと言える。

その後、金属胴遠心機の最終的な分離性能はC-1遠心機の10倍に到達し、これを用いて1989年には200tSWU/y規模の原型プラントDPを全面稼働し、商用化に必要な技術基盤を実証した。また、商用遠心機構造としてユニット化<sup>iii</sup>を進めた時期でもある。

集大成として1992年に初の商用濃縮工場である第一運転単位RE-1の操業を六ヶ所において始めた(第2図)。

順次規模を拡大し1997年に第二運転単位RE-2の操業開始に至ったが、次期導入機種を選定が難航し1,050tSWU/y規模に留まった。その後は空白の10年と呼ばれる間に老朽化により逐次運転を停止して2010年には全遠心機を停止した。

なお、RE-1運転初期段階における停止問題から遠心機信頼性に対する疑問が提起されたが、製造要領改善により目標耐用年数を満足するものを完成させている。

総役務生産量は100万kW級原子力発電所約7基の10年分相当の燃料を生産したことになる。また事業運営におけるノウハウを習得し、さらには人材育成に貢献したことから、所定の役割を果たしたと評価する。

ここで遠心法を凌ぐには至らなかったが、一定の成果



第2図 金属胴遠心機カスケード(青森県六ヶ所村)

<sup>iii</sup>遠心機の製作性や施工性を向上させるため、複数の遠心機をまとめた構造をいう。大型容器への収納、ハニカム型の集合および共通ベースへの設置の3種類を考案した。

をあげた技術を紹介する。

レーザ法は1974年の米国における成功を契機に注目された。原子レーザ法は大阪大学と原研から始まり、後に電気事業者による技術研究組合で推進した。分子レーザ法は理研に始まり、後に動燃が参加して推進した。いずれも1990年代後半までに成果をあげ、潜在的可能性を示して開発を終了した。

化学交換法は1960年代から東京工業大学と原研を中心に研究を実施した。1972年から旭化成の開発が進展し、核不拡散上の有効性も着目された。1989年にモデルプラントによる成果を得た後に開発を終了した。

## 2. 複合材胴遠心機の開発経緯<sup>6)</sup>

初の商用濃縮工場は金属胴遠心機を採用した。しかし、潜在力の高い複合材に注目して初期段階から複合材胴遠心機の並行開発を行っている。金属胴遠心機をはるかに凌ぐ分離性能を持ち、2012年に濃縮工場の交換機として結実した複合材胴遠心機の経緯を振り返る。

C-1の複合材胴遠心機は技術基盤の不足に起因する問題が発生したことから、物性データ、設計解析手法および成型加工法の技術確立に長期のR&Dが必要であることを認識し、開発の体系化を進めた。

また米国で大型機の開発を実施しているとの情報があり、大型化の技術的可能性を探るという目的を付加した。

当時は開発の力点を金属胴遠心機に置いたことから、重電3社(東芝、日立製作所、三菱重工。後の1984年にウラン濃縮機器 UEM を設立)とは別に住友電工と石川島播磨重工2社(後の1986年に日本複合材 NCM を設立)の協力により開発を進めた。

1980年に、国産大型機が金属胴遠心機の3~4倍の分離性能を得たが、将来性の判断から金属胴遠心機と同形式の高性能機へと開発の方向を転換し1985年には金属胴遠心機の1.5倍の分離性能を確認した。短期間に展開が可能であったのは、大型機開発において複合材の設計と成型加工の技術が蓄積されていたこと、軸受や駆動モータ、UF<sub>6</sub>ガス抜出構造など主要な要素技術が成熟した段階に達していたことによる。

当時の複合材胴遠心機は信頼性評価が十分といえずに量産化実証が必要であり、またカスケードの運転方法についても技術確立が必要であった。

こうして実用規模カスケード試験計画を進め、1993年から4年間試験を実施した。1台の停止もなく、高性能機の高い信頼性と品質管理の妥当性を実証した。

金属胴遠心機の性能は既に限界に達しており、複合材胴遠心機による時代の幕開けを確かなものにしたという点で、高性能機開発とカスケード実証は意味を持つものであった。しかしながら遠心機価格を中心とした経済性評価の結果、濃縮工場への導入は見送りとなった。

同時期の1992年に原子力委員会ウラン濃縮懇談会は高性能機の約2倍の分離性能を持つ高度化機開発に関する

方針を示した。事業者である日本原燃が主体的に取り組み、1989年より回転安定性と製作性に着目して自社研究を進めていた UEM が設計と製造を担当した。

開発終期における信頼性の議論から、結果的に導入には至らなかったが、設計は航空機等で実績のある複合材の特性を最大限生かす手法であった。遠心機は化学的特性の強い UF<sub>6</sub> 雰囲気下で長期間にわたる安定した運転が条件であるものの、機械としての共通性から逸脱しない設計が基本であると考えられる。複合材を使用するのであれば、繊維材を切断しない、問題を生じやすい接合部を極力設けなさいといった類であり、また部品点数の少ない単純構造がコスト低減と信頼性の向上につながるという普遍性である。これらの点で以降の設計の主流と成り得るものであった。

一方、同じ1992年から動燃は先導機の開発を開始した。基礎基盤技術として、遠心法の潜在能力を示すことを目的とした研究色の強い遠心機であり、分離性能は高度化機の2倍に設定した。

設計思想は高性能機の延長上にあり、加えて先端複合材を採用した回転胴構造は信頼性を向上させる工夫を行った。また UF<sub>6</sub> ガス抜出はスクープ方式<sup>iv)</sup>において独創的な構造を採用した。

それを受けて濃縮工場への次期導入候補機として先導機を選択し、2000年には日本原燃に動燃とメーカの技術者を結集して先導機の実用性を高めた新型遠心機開発を開始した。これまで蓄積した金属胴遠心機、高性能機、高度化機等の成果と反省点を反映した集大成の設計としており、分離性能は金属胴遠心機の4倍を得ている。

また製造面においては専門メーカに依存せず事業者自らが直営工場で最終的な遠心機を造り上げた。技術問題が生じやすい開発と製造を一体化する初の試みであり、自社技術は製造分野にまで裾野を広げた。

現在は新型遠心機の RE-2 への導入により、金属胴遠心機停止後の濃縮工場に生産空白を生じることなく役務生産を継続している。また段階的に規模を拡大し目標の1,500tSWU/yに向けたV字回復に入っている(第3図)。

## 3. その他の技術開発

濃縮工場は化学プラントの一形態と見なすことができる。システム構成は類似しており、電気設備、ユーティリティ設備、計測制御設備等は汎用技術を利用することが適切である。また扱う対象が放射性物質であるものの、放射線管理、保障措置等の技術は原子力産業に共通のものである。

独自の開発が必要なコア技術は遠心機駆動用の高周波電源、UF<sub>6</sub>を扱う機器およびカスケード編成法にある。

以下、簡単に紹介する。

<sup>iv)</sup>回転胴内に抜出管を挿入し、分離された UF<sub>6</sub> を取り出す (Scoop する) 方法。



第3図 新型遠心機カスケード(青森県六ヶ所村)

### (1) 高周波電源設備

遠心機の駆動には開発初期段階でガスタービンの試行もあったが、一貫して電気式を採用してきた。多数の遠心機を均一に精度よく高速回転させるには必然であった。

特殊な周波数領域ではないため、インバータ方式やIGBT素子のように産業の進展に沿った機器を採用して来たが、駆動モータとの整合性、カスケード運転の過渡状態と異常時における操作性に設計の難しさがある。

### (2) UF<sub>6</sub>処理設備

UF<sub>6</sub>のカスケードへの安定供給と同位体分離後の捕集回収の役割を持ち、捕集方法は温度(コールドトラップ)と圧力(コンプレッサ)に大別されるが、いずれの方法も安定した性能を実証している。

材料への腐食性が強く、また水分との反応が激しいUF<sub>6</sub>に対しては1960年代から取り扱いの研究を開始している。その後は取扱量の増大あるいは海外における事故事例に対応した評価試験に多くの時間を割き、結果を反映することで安全性を高めている。

なお臨界に関しては、事業許可に基づく5wt%の低濃縮ウランを対象として解析しており、濃縮度制限と減速材の抑制の組み合わせにより管理する。

### (3) カスケード設備

カスケードは目標とする製廃品濃度と製品量を得るために並列配置した遠心機群(段)を直列に並べて濃縮作業を繰り返す。このための遠心機の配列法と相互に連結する配管網形式が重点となる。遠心機能力を最大限発揮するため、金属胴遠心機と複合材胴遠心機では同じアイデアカスケード<sup>v</sup>であっても異なる構成となることが多い。最適化設計はカスケード特性予察手法の進歩によるところが大きい。また、遠心機や遠心機ユニットとの適合性のために数種類の配管網の形式を開発しており、配管材質や施工方法と合わせ技術的に確立している。

一方、軽水炉で進む高燃焼度のニーズに対し、上限値の5wt%近傍で精度よく濃縮度を制御する操作性の向上と共に、将来に向けた上限値見直しの検討が必要となっている。

事業面から今後更に重要性を増す技術として「使用済遠心機等のウラン系廃棄物処理処分」「劣化ウランの再転換」「劣化ウランとフッ素の再利用」「再処理回収ウランの再濃縮」「濃縮ウランの備蓄」が挙げられる。いずれも早くから動燃を中心に研究と開発を進めており、基礎技術は確立している。一部は既に濃縮工場の使用済遠心機処理工程において実用化している。

内容を紹介する余裕がなく別な機会に譲るが、今後は海外事業者との関係も含めて個々が遠大なテーマと成り得る。

## V. 国内濃縮ウランの需給と現状

「原子力の研究、開発および利用に関する長期計画」は、1956年から原子力委員会によって概ね5年毎に9回策定されており、1982年の第6回以降に需給規模が数値で示されている。

これらを踏まえて1970年代後半から商用濃縮工場のフィージビリティスタディーを実施した。規模を3,000tSWU/yとして国内需要の1/3程度を賄い、調達リスクを分散するとともに、国際的なバーゲニングパワーを保持することが骨格である。

東日本と西日本地域に濃縮工場を2分割設置する等の案が検討されたが、需要の下方修正もあり「六ヶ所濃縮工場・1,500tSWU/y規模・国際競争力の保持と着実な推進」が当面の収束点となった。この施設規模は1985年の青森県との立地基本協定に明記されている。

国内濃縮ウラン生産は当初から需要の1/3程度を目安としており、供給過不足の細かな議論は馴染まない。

今後も基幹エネルギーとしての「原子力を重要なベース電源とする」「核燃料サイクル政策は引き続き着実に推進する」基本計画の骨格は変わらないと見られるが、原子力発電比率の縮小に向かう中で当面は高い数値目標を設定して邁進する状況とはなり難い。

むしろ時間軸を考慮した需要変動に対応できる適正規模の再考と海外市場も視野に入れたビジネスプランが要求される。また事業の安定化から見た規模に関する現実問題として、地元との約束やメーカの製造技術と設備の維持も重要である。

## VI. 自主技術と技術継承

### 1. 自主技術

研究初期の1960年頃までは学会の場において西独を中心とした発表もあったが、その後の大学と国家機関による研究、国家機関とメーカが一体となった開発、民間事業に軸足を移すための技術移転、商用濃縮工場の操

<sup>v</sup>遠心機の行う分離作業を100%生かす理想的なカスケード。そのため、濃度の異なるUF<sub>6</sub>が混合して分離の損失が生じないよう配管網を構成し、配列された遠心機を接続する。

業、国内の技術者糾合という段階において一貫しているのは「徹底した機微情報管理下でのコア技術の自主開発」にある。

これは、近年話題となる中東アジア、中近東地域等における技術拡散に対応したものでなく、ロンドンガイドラインに代表される核不拡散情報の規制、更に遡れば米国の濃縮技術独占政策と1972年頃から高まった核拡散に対する危機感から1977年に発効した核拡散防止条約が背景となっている。

濃縮ウラン全量を海外に依存する考え方にはリスクがあり、エネルギー源の安定的確保として、またバーゲニングパワーを保持する方法として自主技術開発を推進したことは自然な流れと言える。同時に遠心機をはじめとした設備機器や技術を輸入することは非現実的であった。

自主技術開発は二面性を有する。まず外部との交流が制限されるため情報源が限定され、他例に倣うことが難しい。その結果、試行錯誤を繰り返し、成果を得るために多大の時間、費用、労力を要することが多い。また、研究や開発の成果発表は、直接核兵器に結び付く恐れがあるため厳しく管理統制されており、外部に対してだけでなく組織内においても制限が掛かる。そのため、研究者と開発者のモチベーション維持が課題であり、各自の使命感や責任感に支えられて来た面が大きい。

反面これらは利点となった。失敗を糧として根拠を明確とした幅広い技術を蓄積しており、想定外の事象やトラブルに対し自ら迅速に解決する能力が育てられた。

短期間に成果を得る方法として技術導入や模倣もあるが、状況変化に適応した修正をかけることが難しく、時間経過とともに価値を失ってゆく例が多い。

これに対し自主技術は変化に応じた進歩を遂げ、新しい技術として次々と蓄積される。UF<sub>6</sub> 抽出方式を例にとれば、世界の主流であるスクープ方式以外に回転軸や回転胴から直接抽出する方式を試行した。また二重回転胴構造により飛躍的な分離性能向上を示唆した例もある。これらユニークな発想を通して高速流体に関する幅広い知見を得ている。また、外乱に対する振動安定構造は他国で例のない地震国特有のものである。

## 2. 技術継承

先人の努力に負う自主技術開発により、日本は濃縮技術保有国と認知されている。再処理技術と濃縮技術を保有するのは核保有国以外で唯一であるとともに、国際情勢から見て一度でも濃縮事業を中断すれば再びは認められない貴重なものである。

1970年代からの発展期と比較して開発の人員と予算は大幅に減少した。一方で増加したのは経験と知識であり、これを活用せず世代毎に再スタートを繰り返しては継続的な技術の発展が難しい。貴重な技術を離散消滅させないためにも伝承者は有形無形の暗黙知を標準化した形式知と置き換え、継承者は技術が当事者だけのもので

ないことを悟り、それを踏み台として一步でも高見にするのが責務である。

技術継承において、実践することの重要性は古式神社の遷宮にみられように古くから認識されている。継承者が行う試行錯誤の機会を拡げ、この伝統を守り続けることが重要と考える。

## VII. おわりに

海外濃縮技術と事業の発展および現状を概観し、前世紀からの急速な進歩と国家レベルの市場競争を紹介した。現状は拡散法から遠心法への移行が終了し、ロシアを含む欧米の規模拡大の傾向が続いている。

また、この流れの中における国内濃縮技術の歴史と実用化への道程および現在の濃縮事情の概要を紹介した。金属胴遠心機と複合材胴遠心機を中心とした遠心法の発展とそれを支えた自主技術開発、また今後の方向性について述べた。

具体的な技術内容や1,500tSWU/y 規模に向けた近々の開発計画・事業計画とその活動状況を紹介できないが、先人から続く努力を垣間見て戴ければ幸いである。

現在更新中の新型遠心機性能は世界のトップクラスに位置するが、比較的小規模な国内濃縮工場で、かつ徹底した安全対策を前提として世界に伍してゆくには、今後も他国に対して技術的に常に一步先んじることが必須となっている。既に日本は安全対策、保障措置および規制体制において世界最高水準にあり、広がりが見える国際的な枠組みの中で海外へ技術や役務を提供するポテンシャルを有している。今後予測される多様な方向に対応するためにも、歩みを止めることなく戦略的に技術開発を継続し事業へ反映することが重要である。

### — 参考資料 —

- 1) 日本原子力学会 再処理・リサイクル部会 HP より  
<http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt.html> 第3章 ウラン濃縮—日本原子力学会, 2013年.
- 2) 海外ウラン濃縮企業動向—原子力海外ニューズピックス, 日本原子力研究開発機構, 2013年3月.
- 3) 世界各国の原子力政策動向と原子力発電・ウラン燃料需給の長期見通し—日本エネルギー経済研究所, 2012年11月.
- 4) 動燃30年史—動燃事業団, 1998年7月.
- 5) 日本原子力学会 第1回原子力歴史構築賞 遠心分離法ウラン濃縮技術の確立—日本原子力研究開発機構, 2009年4月.
- 6) 遠心法ウラン濃縮技術の開発—動燃技報 No100, 動燃事業団, 1996年12月.

### 著者紹介



本多直人 (ほんだ・なおと)  
日本原燃(株)  
(専門分野/関心分野)ウラン濃縮技術

# 談話室

## 原子力英語よもやま話

原子力安全基盤機構 工藤 文夫

### 学生の頃の英語力

まずは、私の学生時代の英語力をご紹介します。大学3年生の時、核融合の研究室に足しげく通い、研究の手伝いをしていました。夏休みに核融合プラズマに関する英語の教科書を輪講形式で勉強する合宿をやるので君も来ないかと誘われ参加した。輪講では、一人が教科書を訳し、それを受けて、議論しながら理解するという進め方であった。私の番になって、教科書を訳したところ、お前の日本語はさっぱり分からんと当時の助教授から叱責された。当時、辞書を引きながら英語の教科書などを読んで勉強していたが、即訳せるほどの英語力があつたわけではないので一人悔しい思いをした。

なぜ私の翻訳が日本語になっていなかったのかを考えたとき、使っている英和辞典に実用上の問題があるのでと気が付いた。いまから40年以上も前の話である。当時、英字週刊紙(TIMEやNewsweekなど)があり、とりあえず、辞書を片手に関心ある記事を読みだしたが、ある法則が見えてきた。第1の法則は、英語の表現習慣と日本語の表現習慣が違うのに英和辞典、和英辞典では単語の説明はあるが、文章での運用について解説されていないこと。第2の法則は、同じ単語でも分野が違えば翻訳用語も工夫しなければならないことである。

我々が将来苦労するのは英語で発表する時であろうと場面設定し思慮を重ねた結果、行き着いた結論は、和英翻訳であれば日本語の見出し語に対して「英借文」に徹すること、すなわち英文の用例をたくさん集めるということであった。最近でこそ「英借文」という概念を多くの人が唱えているが、当時は英借文の概念を紹介する参考書はなかった。最初は気になる日本語について対応する英文の用例を集める程度であった。

### 社会人としての英語力

就職後は、上述の英字週刊紙のほかに、仕事で読んだ文献などで役立つ表現、英語の運用と日本語の運用が異なるため、市販辞書にはない訳語を当てる必要のある表現などに印をつけ、自宅で整理したり、次の日の朝早く出勤して始業前に整理した。当時はPCなどなかったので、すべて手書きである。成果は、「英文レポート・マニュアル」(インタープレス社工業英語特別号。1976年)

及び同「用例にみる工業英語」(同。1985年)として出版することができた。後者の「用例にみる工業英語」では、市販の英和辞典にはない訳語を工夫して発表した。accommodate(対応する)、feature(仕組み)、identify(洗い出す、摘出する)、implications(影響)、insight(知見)、provision(設備対策、設備対応)などがその例であり、これらの訳語は30年以上経った今でも十分通用し、その後、他者が発刊した表現用例集などにも拙著の訳語が使用されており、市民権を得ていると感じるところである。

社会人に成り立ての頃は、原子炉容器、炉内構造物などの構造設計に携わり、核融合関係のプロマネを経て、現在は原子力安全規制に係る仕事を行っている。仕事は変わっても市販辞書にない訳語を工夫し、用例を集め整理するという日課は継続しておりライフワークとなったが、朝4時起きの日である。今の世の中PCという便利な道具があり、情報処理技術の進歩でインターネットによる検索機能も向上したので、作業自体は大幅に楽になった。

集めた用例集は、英語での発表資料の作成時に特に力を発揮し、英米人が好む表現を容易に構築可能である。最近ではIAEA(国際原子力機関)での原子力安全条約会合で各国の報告を整理して本会議で発表するRapporteur役を経験したが、持参した用例集はいかなく力を発揮した。

### 成果の紹介—散見される重大な誤用

英文用例を集めてみると、日本人が信じ切って使っている用語に問題のあることが分かってきた。かなり深刻なのが、日本法令外国語訳データベースシステムや英辞郎などで、「省令」の訳語がordinanceとなっていることである。ordinanceはlocal statuteのことを指し、英国では英国保護領の法律、米国では地方公共団体が定める法で日本の条例に相当する。日本では省庁、委員会など行政官庁は法律の委任を受けて省令、委員会規則などを制定するが、省令、委員会規則はlocal statuteではないので、これらにordinanceの訳語を当ててしまうとおかしいことになる。つまり国の行政官庁が制定したものではないと解釈されてしまうことになる。日本法令外国語訳データベースシステムや英辞郎などは、どこかで使われている例を内容も吟味せずに引用・掲出しているので



あろうと容易に推察される。吟味された表現を掲出すべきであり、早急の修正が必要である。

次の例は「災害」についてである。日本では、地震、津波、洪水などの被害を発生する原因側に対しても、物件被害や人身災害などの被害側に対しても「災害」という。この「災害」を海外に伝える場合、disaster でよいかという問題が生じる。英米では、被害を発生させる危険要因に対しては hazard を使用し、人身が被害を受けた場合は disaster を使用する。また、「防災」の英語訳として disaster prevention と訳されることがあるがこれでは preparedness についての配慮がないということで、英米では emergency preparedness and response あるいは emergency preparedness と表現される。

disaster preparedness と表現されることもある。

次は和訳に関するものである。安全文化の議論において intangible という用語が出てくる。これを「目に見えない」と解釈するのは誤りである。intangible は「目には見えても形として残らない」ことをさす。人の振る舞い・姿勢・態度を見ることができるとは、それらは形として残らない。とるべき行動を文書化することによって物として残し、物に記された取るべき行動を遵守することが安全文化の第一歩となるのである。

### 成果の紹介—散見される軽微な誤用

日本人が犯す軽微な誤りの例を紹介しよう。軽微な誤りは多々見られるが、意外と知られていない staff の使い方について解説しよう。staff の使い方は米語と英語で少し異なる。まず共通な部分では、一つの組織の中で職員数が何十人、何百人いても staffs とはならず staff である。複数の職員だということを示すために受ける動詞は複数形で受ける。たとえば、NRC staff are .. である。

数詞が付くときもたとえば 250 staff であって 250 staffs とはしない。組織一塊で「職員は..」を表す場合は定冠詞を冠して the NRC staff is .. となり動詞は単数形である。では NRC 職員と DOE 職員が同時に話題になるときはどうなるであろうか？英国では組織の数によらず staff のままであり、米語では staffs となることがある。

### なぜ、誤用が起きるか、改善提案は？

重大な誤用、軽微な誤用について一例を示したが、誤用が起きる原因は英語を注意深く読んでいないことである。留学や駐在員などの海外生活経験者で英語ができるといわれている人でも可算名詞か、不可算名詞か、あるいは不可算名詞がどういう場合に可算化するかを理解していないことに気付かされる。卑近な例を示すと、equipment は不可算名詞であるにもかかわらず equipments と平気で使っていたりする。equipment が可算名詞なのか不可算名詞なのかは用例を集めればすぐに気が付くはずである。

常に自分で文章を書くことを念頭に英語を読めば、英語独特な表現、文法的な運用の特徴が見えてくる。日本人が英語を書くにあたって必要なことは、市販の英和辞書、和英辞書に頼らないことである。英語による発表資料は自分の専門の話題を表現するわけであるから、日頃から自分の専門分野とその関連分野の英語資料をまめに読み、参考になる表現を集めておくことである。その上で、たとえば可算名詞なのか、不可算名詞なのか、また、a large amount of に続く名詞はどういう名詞がくるべきかなどに気配りして整理すれば英語力は格段に向上する。

### 新しい発見

用例収集の作業を続けると専門的な表現に加え、社会で一般的な表現がどのように表現されているのだろうかということが気になってくる。10 数年ほど前におち当たった「安全・安心」の訳語について偶然発見した例を紹介しよう。10 数年ほど前、原子力業界では、「安全・安心」が確保されなければ国民は原子力の味方とはならないといった議論が続いた。「安全・安心」の議論を海外に発信するに当たり市販辞典では気の利いた訳語は見出せなかった。そのような折、英国、米国で狂牛病が流行し大騒ぎになった。米国内で一応の狂牛病対策が整い、米国の食品安全・検査局の高官が記者会見で狂牛病対策により安全・安心な牛肉を提供できるといった趣旨の発言をした。その時使われた「安心」に対する用語が peace of mind である。以後、機会あるごとに peace of mind の用法を収集した。もちろん「安心」に相当する表現は他に reassurance などもありうるが、原子力業界、食品業界における「安心」はやはり peace of mind がしっくりすると感じるところである。ところで、名詞以外の「安心させる」、「安心する」「安心して」「安心な」なども peace of mind を使うのであろうか？色々集めてみると、「安心させる」には provide .. with peace of mind, give .. peace of mind, 「安心する」には feel safe, feel safer, 「安心して」には with peace of mind, 「安心な」には safe and secure などがよく見受けられる。

### まとめ

今まで述べてきた用語集を踏まえて、新入職員向けに英語塾を開催し、「学校では教えてくれない英語の運用」、「英米人が普通に使っているが、日本人には使い切れない表現」などについてクイズ形式で議論を吹っ掛け理解を促進させている。また、中級者向けに英作文塾を開催し、英作文のコツの講義、日本人が英訳において間違いを犯しやすい用語を含む日本語文章の英訳の実習、その結果の参加者相互による議論、その議論に対する講評と正解を示す活動を行っている。若手の英語表現力向上に微力ながら貢献していると自負している。

(2014年1月31日記)