

巻頭言

1 『広野』からのメッセージ ～“幸せな帰町・復興”に向けて～

遠藤 智

特集 福島第一原子力発電所の廃炉技術に関する研究開発の現状と課題

12 国際廃炉研究開発機構 (IRID) の活動と学会連携

IRID は、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術の研究開発と、将来の廃止措置技術の基盤強化を視野に入れて活動している。ここでは春の年会での5編の講演に基づいて、活動内容を紹介する。山名 元

16 廃炉に関する基礎基盤研究の推進と人材育成

廃炉に向けた取り組みでは、人材育成も重要な課題だ。ここでは、その方向性や研究課題について述べる。笠島宗憲

17 線量低減・除染に関する研究の現状と課題

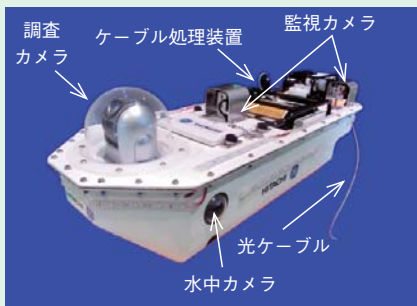
福島第一原子力発電所の燃料デブリの取り出しに向けて、格納容器の漏えい箇所の特定制や補修が計画されている。この作業を効率よく実施するためには、作業エリアおよびアクセス通路の線量低減が必須だ。

行則 茂, 木下博文, 姉川弘明

21 燃料デブリ取り出しに関する研究の現状と課題

2020年以降から1～3号機の燃料デブリの取り出しが始まる。格納容器を冠水状態にして取り出す計画だが、それ以外の工法も検討が進められている。

鈴木俊一, 木下博文, 行則 茂, 姉川弘明



漏えい箇所を調査する水上調査ロボットのイメージ



1号機PCV下部サンドクッションドレン管からの水の漏えい状況

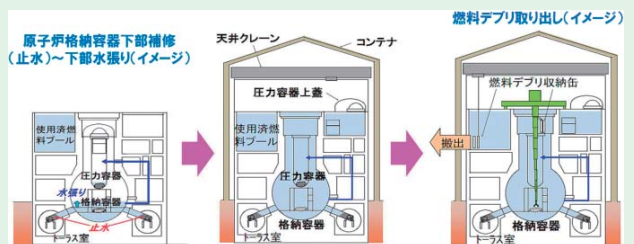
時論

2 双葉地域に「希望のまち」を ー福島復興と原発

国力と人類の英知を結集して、双葉地域を「希望のまち」として具現化できないか。福迫昌之

4 出でよ「優しい天才」 ーメガサイエンス・プロジェクト構築の要諦

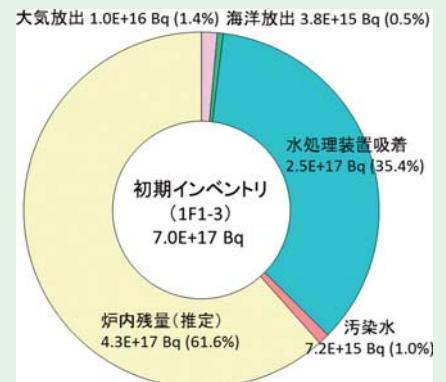
その天才とは世界人としての常識感覚を持ち、多様な立場の話を聞きながらも、斬新かつ専門的なアイデアで隘路を切り開く人のことだ。村田貴司



燃料デブリ作業取り出し作業イメージ

26 放射性廃棄物処理・処分に関する研究の現状と課題

事故で発生した廃棄物は、炉心燃料に由来した放射性核種や海水成分、さらにはゼオライトやスラッジを含む。また、汚染のレベルが多岐にわたりその物量も大きい特徴をもつ。その処理・処分のために、新たな研究開発が進められている。宮本泰明, 石川真澄



^{137}Cs の分布状況の推定結果

解説

32 日米原子力協定の歴史と今後の課題 (1)協定交渉の背景

筆者は日米原子力協定の成立過程に深く関わってきた。この協定の成立経緯と協定の内容、今後の課題を3回にわたって紹介する。 遠藤哲也

38 カナダにおける放射性廃棄物管理

カナダでは、中低レベル放射性廃棄物の処分場建設に対する原子力安全委員会の承認が間近だ。同国における放射性廃棄物管理の経緯と、使用済み燃料の処分地選定プロセスの現状を紹介する。 長崎晋也

41 発電技検における40年の確性試験を顧みて—実用原子力発電所における補修技術への確性試験の役割

発電技検は新技術等の技術的妥当性を第三者として客観的に確認する確性試験を1974年から実施してきた。ここではその経緯を紹介する。 佐藤長光, 亀山雅司

サイエンス

47 遅発中性子から原子炉ニュートリノへ—ベータ崩壊と弱い力の物語

遅発中性子や原子炉崩壊熱放出は原子核のベータ崩壊に伴って生じる。ベータ崩壊は「弱い力」によって引き起こされる。この弱い力を軸に、基礎物理学探求の歴史をたどる。主役は、謎めいた基本粒子ニュートリノである。 吉田 正

51 光周波数コムが拓く長寿命核分裂生成物の精密同位体分離技術—量子ウォークの数理から放射性廃棄物低減技術へ

レーザー技術を利用して、重元素の同位体を分別できないか。それが実現できれば、長寿命核分裂生成物の核変換の前処理や使用済み燃料中の有用元素の精製が可能になる。 横山啓一, 松岡雷士

報告

55 福島第一原子力発電所事故に関する国際専門家会議—IAEAはどのような教訓を学んできたか？

山田勝己

意見交換の広場

63 本学会の裁判判決に対する見解表明への私見

木村逸郎

6 NEWS

- 化石燃料依存度が88%に、エネ白書
- 中間貯蔵施設で政府主催の説明会開始
- 規制委、周辺住民の被ばく線量試算
- 海外ニュース

私の主張

59 福島第一原発従事者を守る仕組みの構築を

原発作業員にはさまざまな種類がある。そこでの需給のミスマッチや環境の未整備が、作業員の不足を招いている。 吉川彰浩

談話室

61 英国で感じた原子力施設の息づかい

セラフィールドでは、古い施設の解体と新しい施設の建設が同時に進んでいた。

福井由紀子

屋外燃料貯蔵プールとウィンズケール炉の煙突(NDA提供)



理事会だより

64 会員の皆様とのよりよいコミュニケーションのために

- 46 新刊紹介「いちえふ 福島第一原子力発電所労働記」 三谷信次
- 58 From Editors
- 65 会報 原子力関係会議案内、人事公募、平成26年度役員紹介、第47回学会賞受賞候補者推薦募集のご案内、新入会一覧、「2014年秋の大会」見学会ご案内、英文論文誌 (Vol.51, No.7-8) 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/>

『広野』からのメッセージ ～“幸せな帰町・復興”に向けて～



福島県広野町長

遠藤 智 (えんどう・さとし)

福島工業高等専門学校卒，東京経済大学経営学部卒。
東電工業株式会社，広野町議会東日本大震災災害復興に関する特別委員会委員長を経て，平成25年12月から現職。

福島県広野町は，福島第一原子力発電所から約23kmの場所に位置し，平成23年3月に原子力発電所の事故により全町避難を余儀なくされたが，平成23年9月に「旧緊急時避難準備区域」が解除された。その後，生活インフラの復旧，除染作業などを進め，平成24年3月，行政機能を広野町に戻し避難指示を解除した。平成26年6月現在，約1,550名(人口の30%，手続きを経ずに戻っている町民を含めると約50%)の町民が帰町している。帰町者の年齢別統計を見ると，20代から40代の子育て世代の女性の帰町率が同年代の男性と比較し，半数にも満たない状況となっている。広野町には，原発事故収束等に当たる約2,600名の作業員が居住している。国が示す廃炉に関する中長期ロードマップから，今後30～40年程度，こうした状況は続くであろうと推測される。震災を機に，当町を取り巻く環境が大きく変化し，町民の帰町のとまどいとなっているのも事実である。様々な課題を広野町，当地域は抱えているが，＜共生＞をキーワードに，“幸せな帰町・復興”に向けたまちづくりを，双葉地方の広域的な観点から福島復興に向けて進める決意である。そこに必要なことは，[世界の英知]の結集である。

去る6月15日，町公民館において，広野町への帰町を自ら選択されるような“幸せな帰町・復興”を実現するため，内外の専門家と町民による国際シンポジウムを開催し，『広野』からのメッセージを採択した。内容は，以下のとおり。

1. 避難者との対話集会を通じて学んだこと。
家族の中で意見を交わすこと。町民同士が素直に話をする。町民と行政が本音で話をする。
2. パネル・ディスカッションを通じて学んだこと。
あらゆるステークホルダーがお互いに本音の声を交換できる場をつくること。時間をかけ，住民が主体的に関わる中で事業を進めること。
3. 世界の避難者，難民の実態を通して学んだこと。
一つ一つの事例毎に異なる課題はあるように見えるものの，その根底には，世代間の対話の重要性など，共通する要素も数多く存在する。今後もシンポジウムを繰り返し広野町で開催することは，「FUKUSHIMA」のためだけではなく，世界の避難者問題に取り組む上で大きく貢献できる。
4. “幸せな帰町・復興”を図るには，子育て世代の視点を取り入れていくことがあり，その実現には「子育て世代の女性」が主体的に参画し活動することが肝要であり，それを可能にする環境を整えることが大切である。
5. シンポジウムの開催を機に，広野町が内外の‘知と心の交流’の場となるよう，文化豊かで感性に溢れたまちづくりを目指し，広野町のみならず「FUKUSHIMA」全体の復興に向け[世界の英知]を結集できるよう全力を尽くす。

来る平成27年4月，未来へ向けた人事育成に寄与する県立中高一貫校が広野町に開校される。「双葉地方の子どもを守る」ということは「ふる里を守る」ことであり「自分のまちを守る」ことである。未来に向けた希望の架け橋となるべく，双葉郡8町村が心一つとなり国・県一体となって取り組んでいく。また，広野火力発電所に英知の東京五輪の時期に向け石炭ガス化複合発電(IGCC)が設置される。私たちは，新時代に向け町民との合意形成を図り，協力・協働し，復興を成し遂げなければならない。

(2014年6月21日記)



双葉地域に「希望のまち」を一福島復興と原発



福迫 昌之 (ふくさく・まさゆき)

東日本国際大学 経済情報学部長
慶應義塾大学大学院社会学研究科修士課程修了。(財)電気通信政策総合研究所, 東日本国際大学専任講師, 助教授等を経て教授, 2012年より現職。同大学地域経済・福祉研究所長を兼務。専門分野はコミュニケーション論, マス・コミュニケーション論, 地域社会論。

東日本大震災発生から3年が過ぎる。福島県浜通り地域の中核都市であるいわき市に立地し、福島第一原発から40km余りの場所に位置する本学でも、表面的には変わらないキャンパスの姿がそこにある。

私自身、当時、大学で学生の対応に追われる中、第一原発の水素爆発を映すテレビの画面を眺めながら、「世界の終わりとはこういうことなのか」と、昔読んだ『渚にて』をオーバーラップさせていたことが昨日のようでもあり、遠い昔のようにも感じる。

この間、状況は刻々と変化し、被災地からの距離に比例するように震災の風化が進む一方、被災地、とりわけ原発立地地域である双葉地域において、震災は現在進行形の課題であり、その収束はいまだ見えていない。

こうした状況で、いま現地から原発と地域、そして復興を考えると、3つの観点が重要であると考えている。

第1に、「トラウマ」としての原発である。福島県民が震災で覚えた恐怖、不安、絶望は、程度の差こそあれ、地域社会の記憶として厳然として残っている。もしも原発の絶対的安全性が担保されたとしても、地域社会の「トラウマ」を克服するのは容易ではない。まして元々が安全神話に馴らされ、しかもいまだに人為的ミスなどによる原発トラブルが頻発する現状ではなおさらである。「トラウマ」は克服すべき、という考えもあるが、それはその元を作った張本人がいうべき話ではない。

第2に、「NIMBY (Not In My Back Yard)」としての原発である。今般の震災で原発が「NIMBY」である(あった)という背景を抜きに、全てを責任転嫁すれば、現状が好転するわけではない。多くの原発立地地域と同様、双葉地域においても、地域振興の切り札として原発を誘致したことは間違いない。そして、雇用拡大や固定資産税だけでなく、多額の交付金が下りてくるということは、他の産業誘致とは異なる「リスクが存在する」という意味であること、同時にそれでも原発の必要性を追認している(いた)ことを改めて直視しなければならない。

今般の「人災」が想定されたリスクの許容をはるかに超

えていることは間違いない。ただ、リスクと必要性、費用対便益のバランスが重要な判断基準の一つであるにもかかわらず、それと真正面に向き合えないならば、今後の教訓とすることも、妥当な判断を下すこともできない。

第3に、最も重要な点は「環境」としての原発である。「裏庭」に建設された巨大施設はすでに地域環境の一部となり、まして30年から10万年単位で語られる原発は、否が応でも地域を構成する環境要素の一つとなっている。さらに、基幹産業としての原発依存は、自治体財政や雇用のみならず、地域社会システムに組み込まれた生活環境として地域住民に染み付いている。「ひと」が「まち」を構成する最重要要素であることからすれば、地域復興という観点からは、この点が最も深刻かもしれない。

いずれにせよ双葉地域の復興を考えると、再稼働の有無に関わらず、ハードおよびソフトとしての原発の存在を抜きに語ることはできない。もはやそれは福島の「宿命」と言わざるをえない。そして、この「宿命」は福島県民にとって複雑な状況を生み出している。

(一部の)原発反対派に、「原発推進派が福島県民を人体実験として利用している」といった論調があるが、これは一見、福島県民に同情しているようでありながら、実際には福島に住み続ける人々への攻撃になっている。

彼らから見れば、福島で生活すること自体が、地域環境としての原発(あるいは放射能)を受け入れたことであり、すなわち原発推進に加担している、と解釈できるのかもしれない。しかし、福島県民が原発推進派であるということは事実と反しており、むしろ逆である。

福島に今も住み続ける県民の率直な意見は、原発推進派に利用されるのはご免だが、同様に、原発反対派が自らの主張を通すために、あるいは福島県を忌避する人達が自らの言動の正当化のために、福島県民を利用したり、攻撃したりすることも真っ平ご免である。

我々の周囲に数多く存在する様々なリスクの中で、「フクシマ」を最大化して忌避する自由を、妨げることも非難することもできないし、結果として福島県民が移行

するのであれば、その判断は尊重されるべきである。

同様に反原発論者や自主避難者等が自己の正当性を主張するために、福島県民をスケープゴートにすることも許してはならない。福島県で健康かつ幸せな生活を送れるようになることは都合が悪いかもしれないが、いかに(彼らにとって)崇高な使命であろうと、「目的が手段を正当化しない」ことを肝に銘じなければならない。

福島県浜通り地域の復興は、これら全ての要素を受け止めたうえで、克服するという宿命を負わされている。

確かに国の責任は大きい。技術立国であり経済大国でもある日本が、世界に類を見ない原発事故を起こし、結果周辺地域を「死の町」にするならば、国の威信に係わる重大な事態である。まして2020年東京オリンピックの際に「コントロールされている」はずの地域が消滅していたとすれば、日本の国力と信頼の低下は免れない。

ただし、地域復興とは地域社会の自立であり、それを目指すものでなくてはならない。国を含め、あらゆる外部からの保障、補助、支援そして施策はそれに資するものであるべきだ。地域にはその覚悟と戦略が求められ、それを放棄した地域に復興はあり得ない。

その大前提となるのは、避難状態の解消である。避難は緊急時の特異かつ短期的な行動あるいは状態であり、決して恒久的であってはいけない。避難という極限状態にある限り、自己防衛のための「現実逃避」と「思考停止」は避けられない。しかし、個人から行政に至るまで、被災地はその状態を脱していないのが実情である。

双葉地域が原発立地地域となった歴史的背景を顧みれば、原発事故により運転がストップしたことだけでも、財政基盤を失った町村のとるべき道は限られる。その選択肢の一つが合併であり、双葉地域が、原発がなければ既に合併していたことも疑いない。そもそも日本全体が人口減少段階に入り、地方にその傾向が顕著に現れ、都市集約(コンパクトシティ)や都市再構築も叫ばれる状況下で、被災地の町村だけがそれぞれ発展するような復興の青写真を描くこと自体に無理がある。市町村合併の功罪は様々な議論があるが、少なくとも地域存亡の危機に直面し、その議論が出てこないこと自体が不自然である。

いずれにせよ福島県浜通りの、双葉地域の現実的な再生と復興のためには、双葉郡の抜本的な再構築が不可欠である。震災発生以来、復興庁や双葉郡各町村では定期的に住民アンケートを実施しているが、確実に帰還希望者は減少している。また、帰還希望の割合が高いのは高齢者層に偏っており、逆に子育て世代、若年層の割合は低く、さらに回答者母集団の年齢層や回答率を考慮すれば、その延長線上に未来像を描くことはおろか、当面のまちを形成することも甚だ困難と言わざるを得ない。

無論、帰還希望者の減少を、地域アイデンティティの欠如と断じることは出来ない。むしろ、「避難者」のまま塩漬けにされるという特異な状態を抜け出し、避難先の

住民として「生活者」に戻ったならば、その覚悟と努力に対し、必要な支援が行われるべきであろう。

しかし、時間の経過とともに他地域での「生活者」が増えていくとすれば、帰還希望者の中にまちを支え、まちをつくる人がどれだけ残っているだろうか。「まち」が「ひと」であることからすれば、それ自体が双葉地域の命運を握ることは言うまでもない。そのためには、まちを支える人、まちをつくる人が希望を持てるビジョン、そしてその人々とともにまちをつくる仕組みが不可欠である。それがなければ、あるいは時機を逃すことになれば、事実上移住による避難状態の解消しか選択肢が存在しないことになる。

また、地震大国日本で、現在予想されている大地震がどこかで発生したとき、東日本大震災が忘却の彼方になることは疑いない。その意味からも、「時間軸」がこれからの復興の最重要課題になる。

事実、人間社会そして自然が持つ修正能力によって、人類は様々な困難を乗り越えてきた。しかし、修正の過程で多くのものが切り捨てられてきたことも摂理である。その瀬戸際に双葉地域があることを、肌で感じている人々も、そして実際その方が都合がよいと考える人々も少なくない。

無論、廃炉には相当な時間を要することから、原発周辺地域にはいわゆる廃炉ビジネスに関連する産業集積が不可欠である。電力、原子炉、建設、一般機械、ロボット、計測機器、医療、廃棄物処理など多様な分野の産業およびそれらの研究拠点となることが、双葉地域の「使命」であり、それは地域復興の担保でもある。ただ、それも現状の延長では労働者が往来する巨大な「作業の場」にしかならず、むしろそれは「まち」としての双葉地域の死を意味する。双葉地域が結集し、都市機能を集約した拠点として整備することによって「生活の場」としてのまちが形成され、復興が現実化する。

チェルノブイリ原発事故からわずか4ヵ月後、旧ソ連政府(ウクライナ)は東50kmの地点にニュータウン建設を決め、2年余りで完成させたという。日本で同様なまちをつくるためには、政府のみならず、地方自治体、そしてまちの住民を始めとする様々なステークホルダーがビジョンを共有し、協働の推進体制をつくるべきだが、その決断とスピードについては学ぶ必要があるだろう。

21世紀の日本で、もし地域エゴではなく、地域アイデンティティを発揮し、「現実逃避」と「思考停止」から脱することができるならば、社会の修正能力によって双葉地域が消える前に、行政の壁をはじめとする様々なハードルを乗り越え、国力と人類の英知を結集した復興モデルとして、双葉地域に「希望のまち」を具現化することが可能になる。それは同時に、これからの日本の都市政策、まちづくりの試金石となるだろう。

(2014年5月12日記)



出でよ「優しい天才」

—メガサイエンス・プロジェクト構築の要諦—



村田 貴司 (むらた・たかし)

早稲田大学 招聘研究員

1955年、東京都生まれ。早稲田大学政治経済学部政治学科卒業、京都大学大学院エネルギー科学研究科博士後期課程修了(博士(エネルギー科学))、早稲田大学客員教授を経て2011年より現職。著書は「原子力政策学」(共著)など。

1. はじめに

世を挙げて、イノベーションへの期待が高まっている。3Dプリンターの出現は、モノづくりプロセスのみならず、産業立地等モノづくりの諸条件を一変する可能性を生んだ。生産年齢人口の減少は、規模の経済に依存する産業、社会構造を変えつつある。既存ストックの活用、データを起点としたサービスの統合による新たな価値創造への期待。

こうしたトレンドは、日本だけではなく。地球上の人口が90億人以上になると予測され、日本以上のスピードでアジア諸国の高齢化は進展している。この全世界的な趨勢に柔軟に対応するためには、従来の流れとは不連続な成果、イノベーション創出が必要で、多様な価値の融合に基づく視点・発想を積極的に展開させる必要がある。研究開発活動が人類社会の「希望」と結びつく理由がここにある。

ダイヤモンド等は、未来洞察のためのビジョンとして「潤沢のピラミッド」¹⁾を提唱した。ピラミッドは3層。食糧、水、住居といった、生存に必須のインフラを基層とし、エネルギー、教育機会、通信と情報へのアクセスといった、更なる成長を促す第2層の上に、自由と健康を位置づける。研究開発は第2層に属し、基層と最上層を結びつけるイノベティブな基盤となる。

他方、「知の爆発」とも称される科学的知見の急速な拡大、変容の中、さらに新しい知恵を獲得するためには、一層新しい手段・手法を開発し利用する必要に迫られている。しかし、この新たな手段・手法の開発は、従来技術では容易に開拓できない領域を含むこととなり、多様な知恵と巨額の資金投入が必要となる。これは理学的な理論を工学的に実現する際に必然的に起こる、いわば工学的翻訳能力の不足を乗り越えるためのコストに他ならず、その額は一国では購うことが難しい。いわゆるメガサイエンス・プロジェクトは世界が共有すべきイノベティブ基盤としての文脈で、その存在価値を有する。

昨年公表された国際リニアコライダー計画(ILC計画)

に関する日本学術会議の所見²⁾はその事情を示している。曰く、ILC計画は、「……ヒッグス粒子やトップ・クォークの精密測定とそれらを通した標準模型を超える物理の探索について、素粒子物理学としての学術的意義は認められる。その一方で、……本計画に必要な巨額の投資に見合う、より明確で説得力のある説明がなされることが望まれる。」「ILC計画は、その必要経費や人的資源の規模からして、単独の国や地域では実施し得ない……。」

国際的なメガサイエンス・プロジェクトには、ILC計画のみならず、国際宇宙ステーション計画、国際熱核融合実験炉計画、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計計画等々、さまざまな性格のものがあるが、いずれも、コアとなる装置自体の研究開発要素を克服し、遺憾なく当該装置が建設・運転されて初めて異次元の価値創造に至る。新たな価値創造には、従来の思考の地平を超える新しいタイプのリーダー(チーム)の主導が必要だ。

2. メガサイエンス・プロジェクト構築の要諦

こうしたプロジェクトの遂行には、技術課題の達成以上に、次のような多面にわたる課題を新たな視点からダイナミックに克服していく必要がある。

(1) 国際政治・外交的側面からくる課題

もちろん、プロジェクト発足の経緯から、特定のホスト国の発言権が非常に大きい場合もあるが、参加国の拠出金額が大きければ大きいほど、参加国の多様性が大きいほど、参加国の間の調整には時間がかかり、適時的確な技術的対応が難しくなる場合が想定される。

また、全体を統括する能力・権威が実施体制の中で十分機能しない場合、あるいは、参加国間で、責任に関する消極的な争いが起こる場合もあろう。その結果、活動全体の効率的な実施が妨げられ、責任の陥穽が生じる可能性がある。責任境界面における分担の在り方は、周到に事前調整すべきであろう。

(2) プロジェクト実施組織の課題

コアをなす大型装置は、通例、概念設計、工学システム設計、製作・設計、建設、運用、廃止と多くの段階を踏む。このプロセスを管理するため、集約的にプロジェクトを実施する仕組みが組織される場合がある。この場合、参加国からは、拠出額等に応じ当該組織に人員が派遣されるのが通例であろう。

こうした組織では、例えば次のような理由で、組織の長を中心とするガバナンスを働かせることが難しい。

- ①基礎的な研究、概念設計段階から建設を前提としたシステム設計段階に移行する場合、必要とされる人材の質が大いに異なるにも関わらず、モノづくり経験の少ない者中心の体制が構築される可能性があること
- ②各国からの派遣人員が、定義された業務に沿う能力を有する者ではない可能性があること
- ③当該組織の幹部が、政治的・外交的配慮等、研究開発メリット以外の理由により配置され、当該計画の経緯・環境を十分理解していない場合には、完成という最終目標に向かって資源を機能的、効率的に動員できず、組織肥大化、非効率化の可能性があること

以上は、あくまでも可能性に留まるものだが、モノづくり文化が異なる社会の出身者で構成される国際的な組織では、周到な準備を行わない限り、全体の工学的な設計統合作業や、工程管理を統合的に行うことは難しく、その結果、建設自体が円滑に進まないことが危惧される。

こうした状況を未然に回避するためには、システム設計の段階から、産業界の製造経験を十分に活用できるよう、産業界との協働関係を構築しておく必要がある。

(3) モノづくり体制の課題

メガサイエンス・プロジェクトにより作られる大規模装置は、商業的に多数建設されるものとは異なる、多くの場合、最先端の技術開発を伴う「単品もの」である。従って、その建設に当たっては、当該装置の特質を十分に勘案した、最適な建設体制を構築する必要がある。特に、一つの機能実現のために各参加国が分担部分を持ち寄る場合には、早期に概念設計を固定し、部分間のマージンの調整を含む設計基本データの統合的整理を行いつつ、工程管理・品質管理をより具体的、厳密に行う必要がある。これは、言うは易く実行は難しい。こうした活動では、電機関係、計測・制御関係、建屋関係、その他付帯設備を含む総合的なエンジニアリングに関する知見・経験を十分に踏まえ、すべての設計情報が設計図面、組立図面において統合される必要がある。

複雑な構造を有する巨大装置の設計・製作にかかわる中心組織と産業界の役割分担には、日米欧でさまざまな違いがあるが、いわゆるプライム契約等の活用による産業界との連携体制は一つの解となろう。特に研究開発成果を実利用につなげるべきエネルギー関連プロジェクトでは、実用段階に向け産業界の技術の育成、経験の蓄積

を図る観点も重視されなければならない。

(4) 国益確保の観点からの考慮

メガサイエンス・プロジェクトの多くは、一国の経済力、技術力では対応出来ない規模になる。このため、建設・製造段階のさまざまな経験、ノウハウを獲得、蓄積するための戦略的対応が参加各国には必要となる。

技術の育成・経験の蓄積が、最終的には人を介して行われることを考えるなら、人員派遣も、意識的かつ長期的観点から行われるべきである。国家的要請により、民間人を個人および当該個人が所属する民間企業に不利益なく、長期間派遣するための、例えば保険や年金等の制度整備、充実のみならず、必要な人材(個人)の継続的確保のための受け皿体制の確立が求められる。

3. おわりに

メガサイエンスは、最終的にはノーベル賞クラスの成果を目指すにしても、開発要素の多い装置オリエンテッドな計画の場合がほとんどである。そのプロジェクト構築にあっては、参加各国における予算の確保、国際的な運営方法の確立、研究者・技術者間、参加国間の意志疎通の確保など、マクロな視点からの課題解決の重要性が言われるが、具体的な事例からはこれらに留まらない多くの個別課題が検出される。少なくとも装置の建設段階では、基礎研究者中心の組織体制ではなく、大型装置建設の知識・経験を有する者を中心に、モノづくり経験を念頭においた指導力ある組織体制、産業界との協働によるエンジニアリング機能に力点を置いた体制を構築する必要がある。活動が長期にわたることを考えれば、長期的視点に立った高等教育との連携をも含め、社会全体としての支援を得ることも不可欠であろう。

以上のような技術面、マネジメント面での潜在的困難性を抱える国際的なメガサイエンス・プロジェクトの遂行には、ある種の天才が必要だ。天才というと、鋭く、尖った、近寄りたくないイメージだが、ここでは当該計画に関する技術開発状況を熟知していることは当然として、世界人としての常識感覚を持ち、さまざまな利害、立場の話聞きながらも、斬新かつ専門的なアイデアで隘路を切り開き、究極的には潤沢のピラミッドの最上層、つまり人類の幸福を一番に考える、いわば「優しい天才」³⁾(チーム)による、単なるコンサルテーションではなく、プロジェクトの実質的な主導が待望される。

(2014年5月12日記)

— 参考文献 —

- 1) P. H. Diamandis, S. Kotler, Abundance — The Future Is Better Than You Think, (2012).
- 2) 日本学術会議, 国際リニアコライダー計画に関する所見, (2013).
- 3) 内閣府, イノベーター基盤としての産業人材に関する研究会第1次報告書, (2014).



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 まで情報をお寄せ下さい。

電力の化石燃料依存度が 88% に、エネルギー白書

政府は 6 月 17 日、2013 年度のエネルギー白書を閣議決定し、我が国の 1 次エネルギー自給率は震災前の 19.9% から、2012 年度には 6.0% まで低下したことがわかった。この水準は OECD34 カ国中、ルクセンブルグに次いで 2 番目に低いことになる。

電力の化石燃料依存度は 88% で、第 1 次石油危機時の 80% より高い水準となっている。なお原発停止と燃料価格の上昇、為替価格の影響から、鉱物性燃料の輸入額は 2013 年度で 27 兆円と、震災前に比べ 10 兆円増

加。貿易収支は 11 兆円と過去最大となる赤字を記録した。原発停止分の発電電力量を火力発電の焼き増しで代替していると試算すると、2013 年度における燃料費は 3.6 兆円増加したと推定される。

これに伴って電気料金も上昇。一般家庭の電気料金は約 2 割、工場や事務所などの電気料金は約 3 割上昇した。また、電力分野の温室効果ガスは 2010 年度に比べ 7.6% 増加した。

（原子力学会誌編集委員会）

中間貯蔵施設で政府主催の説明会開始

原子力災害に伴う除染で発生した廃棄物の中間貯蔵施設に関する政府主催の説明会が、5 月 31 日のいわき市開催を皮切りに始まった。主に施設が計画される双葉町と大熊町の住民を対象とするもので、6 月 15 日までに、都内も含め福島県内外で計 16 回開かれる。

説明会では環境省や復興庁より、土地に関する補償や

生活再建・地域振興策などが説明され、住民らと質疑応答が行われた。また中間貯蔵後の最終処分に関し、説明会では具体的に PCB 廃棄物処理を行う日本環境安全事業に、中間貯蔵に係る事業も実施できるよう法整備を図っていくとの考えが示された。

（以下は日本原子力産業協会提供）

原子力規制委、周辺住民の被ばく線量試算

原子力規制委員会は 5 月 28 日、地域防災計画の策定などを進める関係自治体の参考になるモデルケースとして、原子力発電所で過酷事故が発生した場合、周辺住民の被ばく線量がどの程度になるかの目安を示す試算結果を公表した。半径 5km 圏外は、事故後 1 週間の被ばく線量で 100 ミリシーベルトとした国際原子力機関 (IAEA) の避難基準を下回り、屋内退避などの対策でさらに低減できると評価。放射性物質放出前の予防的避難

が重要としている。試算は、出力 80 万 kW 級の軽水炉 (PWR) で過酷事故が発生した場合を想定。2 日間、木造家屋に退避した場合で 25% を、またコンクリート製建物の場合で 50% の被ばく線量をそれぞれ低減できると推定した。また甲状腺被ばくについては、対策なしには 5km 圏内で IAEA の安定ヨウ素剤の服用基準に達する恐れがあるが、コンクリート製建物の屋内に退避しヨウ素剤の服用を併用すると、基準を下回るとした。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

〔米国〕

NRC が地震リスク再評価で詳細分析を優先する 21 原発を特定

米原子力規制委員会 (NRC) は 5 月 9 日、中・東部のロッキー山脈より東側に立地する原子力発電所 59 サイト

と未完成の 1 サイトのうち、21 サイトを最新の地震リスクに基づく詳細分析を優先的に実施すべきサイトとして特定した。福島第一原発事故が耐震問題の重要性を浮き彫りにしたことから、サイト毎のリスク再評価に基づいて詳細分析を行い、現行の関連作業をフォローアップする考え。まず 10 サイト・18 基の原子炉で 2017 年 6 月末までに詳細分析の結果を提出するよう指示し

ており、早急にアクションが必要と判断した場合は適切な対応を取る方針だ。

詳細分析の優先実施サイトを定めるに際し、NRCでは3月末までに各発電所から提出された地震リスクの再評価に関する最新情報を審査。オリジナルの設計プロセスで許容された地震動と各サイトで再計算した地震の新たな危険性を比較した。NRCの認識では、これらの発電所は設計上、想定した地震の危険性を上回る十分な安全裕度を保有。さらなる改善作業を実施するとはいえ、これらすべての原発が安全に操業を継続できる点では確信があると強調した。

しかし、地震による新たな危険性が設計想定を超えていけば、その発電所では事故リスクに対応する変更部分を特定する詳細な分析作業が必要。安全上の重要機器を補強すべきか確かめる作業も短期的に行わねばならない。このためNRCは、発電所の構造物や配管、ポンプ、安全系に影響を及ぼす周波数の地震エネルギーがどのように伝わるかなど、複数のファクタに基づいて詳細分析の優先実施リストを作成したと説明している。

その結果、17年6月末までに詳細なリスク分析の結果報告を求める発電所として、NRCはキャラウェイ、クック、インディアンポイント、ノースアナ、オコーニー、ピーチボトム、ピルグリム、ロビンソン、ボーグル、ワッツバーの10サイトを指定。19年12月末までとする発電所は、ビーバーバレー、ブラウンスフェリー、カトーバ、ドレスデン、フェルミ、ハッチ、ラサール、オイスタークリーク、パリセード、V・Cサマー、セコヤーの11サイトとした。

これら21サイトの原発では、大地震の発生時に原子炉を安全に停止させるために重要な炉心冷却機器の評価と強化を目的とした優先アプローチ審査を年内に完了することになる。そして、当該機器を補強する必要性が明らかになれば、16年12月までに作業を終えなくてはならない。

NRCはまた、このほかの22サイトと未完成のベルフォンテ原発サイトについて、詳細なリスク分析が必要か現在検討中。これらに対しても年内に優先アプローチ審査の実施を求める方針で、地震リスクの詳細分析が必要な場合、それらは20年末までに結果報告書の提出が必要だ。

一方、中・東部の残りの16サイトは新たな地震リスクにも当初設計で責任が負えるとNRCは判断。さらなる分析の必要性を否定している。

なお、ロッキー山脈以西に立地する3サイトについては、地質学的な複雑さのために作業が1年遅延。NRCは2014年3月までに再評価情報を提出させ、追加のリスク分析が必要か見極める計画だ。

TRU 処分場の放射線漏れで州が原因箇所の封鎖を命令

軍用・超ウラン元素(TRU)雑固体廃棄物の深地層処分場(WIPP)が立地する米ニューメキシコ州の環境局(NMED)は5月20日、所有者である米エネルギー省(DOE)、および管理操業を受け持つニュークリア・ウエイスト・パートナーシップ(NWP)社に対し、今年2月の放射線漏れの原因箇所と特定された地下655mの区画を封鎖するよう指示する行政命令を公布した。原因物質と推定される硝酸塩含有廃棄物のコンテナを早急に隔離することを要求したもので、施設の安全性が確認されるまでWIPPの操業再開を許さない方針だ。

DOEは5月2日、TRU廃棄物パッケージに未処理の硝酸塩が含まれる可能性に言及した報告書をNMEDに提出。その時点で可能性の高い放射線漏れの原因として、パッケージ中の硝酸塩とセルロース物質による熱化学反応だとする専門家の結論を明示した。環境フィルター中のサンプルと同比率のアメリシウムとプルトニウムを含む硝酸塩廃棄物のコンテナは第7区画・第7室に貯蔵されており、その中にはロスアラモス国立研究所(LANL)からのコンテナが含まれていた。

また、5月15日の再入場時に撮影した写真により、LANLから搬入された疑わしいコンテナ2個のうち1個が破損していたことが判明。蓋が外れるとともに周辺部分が熱損傷を受けていたことから、DOEは同コンテナ中の硝酸塩廃棄物と、水分吸収剤として使われていた有機砂(猫用トイレの砂と同成分のセルロース)が化学反応の原因になった可能性が高いとしている。

これを受けてNMEDは、WIPP地下施設内にある有害な硝酸塩廃棄物の貯蔵・処分・取り扱いにより、人々の健康および環境が差し迫った危険にさらされていると判断。まず、LANL内に残存する硝酸塩廃棄物コンテナの隔離計画を5月21日までに提出することを19日付けの行政命令でLANLとDOEに指示した。

そして、その翌日の行政命令ではNWPとDOEに対し、同様のコンテナが313個貯蔵されている地下施設の第6区画、および55個が残る第7区画・第7室を早急に隔離封鎖する詳細な計画を5月30日までに提出するよう要求したものの。

事故時に非常用機器を配送する地域対応センターが完成

米国の商業用原子力発電所で事故が発生した際に、24時間以内に国内62サイトのどの発電所にも非常用

バックアップ機器の配送が可能になるという地域対応センターの1つが、5月22日に西部アリゾナ州フェニックスの近郊で完成した。福島第一原発事故の教訓に基づき米国の原子力産業界が策定した安全戦略「FLEX」の一環となるもので、想定外の極端な事象に見舞われた発電所毎の状況に応じて、柔軟な対策が取れるバックアップ安全機器を提供。米原子力エネルギー協会 (NEI) は従業員と一般公衆を守る多重の防護に新たな層が追加されたと自信を深めている。

福島第一原発事故では、発電所が全電源喪失などの大きな課題に直面したことから、FLEX 戦略が扱う機器は緊急時の発電所に対する炉心冷却用の水と電力の供給が目的。このため、産業界では南東部のテネシー州メンフィスと西部のフェニックスに地域対応センターを設置することを決め、各発電所常設の安全システムや配備済みのバックアップ安全機器を補完するための可搬式発電機やポンプ、標準規格連結器、ホースなどを置くこととした。

メンフィスの対応センターは来月にもオープン予定だが、両センターそれぞれにこれらすべての機器を5セット常備する計画で、4セットはいつでも発電所への配送が可能。これらはまた、常に利用可能な状態であることを確認するため、定期的に試験を実施することになる。

経費については、開設時に約4千万ドルが1センター毎にかかるほか年間の運営コストが400万ドルほどだが、これらは国内の原子炉100基を操業する事業者らが共同で負担。産業界の創設した「FLEX 緊急時対応のための戦略的連携 (SAFER)」チームが運営に当たることになっており、30年以上も産業界で緊急時に必要な取替用機器の納入実績がある「プール用機器在庫会社 (PEICO)」や、仏アレバ社の米国法人などが人員とサービスを提供する。アレバ社からは特に、緊急時対応計画とその起動、プロジェクト管理、エンジニアリング、許認可など、業界でもトップレベルのサービス提供が期待されている。

〔英国〕

ムーアサイド計画が前進、事業者が用地オプションを延長

英国エネルギー気候変動省 (DECC) は5月1日、西カンブリア地方セラフィールドでムーアサイド原子力発電所の建設を計画している東芝と仏 GDF スエズ社が、建設用地購入オプションを延長するための主要取引条件について、用地売却を担当する原子力デコミッションング機構 (NDA) と合意に達したと発表した。

ムーアサイド原発計画は元々、GDF スエズ社とスベ

インのイベルドロウラ社の合併企業であるニュー・ジェネレーション (NuGen) 社が進めていたが、2013年12月に東芝はイベルドロウラ社が保有していた NuGen 社株50%の購入を決定。この売買取引は関連当局の承認に加えて、NuGen 社が2009年に7千万ポンドで確保した200ヘクタールの建設用地購入オプションの延長が条件となっていた。

このため、DECC は今回、3基・340万kW相当の原子炉を2024年から順次完成させるという同計画は大きく前進し、その実施が再確認されたと歓迎。英国に少なくとも100億ポンドの投資がもたらされるだけでなく、建設ピーク時に6千名以上と予想される雇用を含め、建設期間中の雇用は1万4千名規模となるほか、操業段階でも約1千名分の常勤雇用が維持されるとの試算を明らかにした。

東芝は今年1月、イベルドロウラ社の50%に加えて、GDF 社から NuGen 社株10%を取得する方針を表明。同計画を通じて、英国に同社傘下の WH 社製 AP1000 の建設機会を確保するとしている。

低レベル廃棄物用貯蔵所が完成

英国のキャベンディッシュ・ドーンレイ・パートナーシップ社は5月15日、ドーンレイ・サイトの環境復旧計画で建設する6つの放射性廃棄物地下貯蔵所のうち、低レベル用の2つが完成したと発表した。

民生用原子力サイトをすべて所有する原子力デコミッションング機構 (NDA) から同社が2012年に受注した契約によるもの。建設工事を請け負ったグラハム建設から同日、同パートナーシップ、およびその子会社でサイト認可会社 (SLC) として廃止措置事業を運営管理するドーンレイ・サイト・レストレーション社 (DSRL) に引き渡された。

スコットランド北部に位置するドーンレイ・サイトには、閉鎖済みの高速実験炉 DFR や高速原型炉 PFR、材料試験炉 DMTR、再処理工場などの核燃料サイクル施設が多数残存しており、2036年までにサイト環境を浄化・復旧させる計画が進行中。現在の作業フェーズでは同計画の推進に必要な新しい施設の建設がメインで、廃止措置段階で生じる17万5千 m^3 の低レベル固体廃棄物 (LLW) を処分するため、サイト境界の東側隣接区域に最大6つの貯蔵所を建設する計画への許可が09年に発給された。サイト内には既存の LLW 浅地層処分ピットも存在するが、サイト操業中に生じた LLW により90年代に満杯となっていた。

最初の2つの貯蔵所建設でグラハム建設が掘削した岩は、2階建てバス370～450台分に相当する24万

3千m³に達しており、床部の位置は地下11m。使用したコンクリートや鉄筋、構造鋼材の総量はそれぞれ、7,600m³、1,330トン、260トンとなっている。付属施設と合わせた建設費は約2千万ポンドで、サイトの閉鎖プログラム全体のうちLLW管理用の総コストは1億1千万ポンドに達すると見積もられている。

廃止措置段階でこれまでに生じたLLWは、現在、サイト内のコンテナで貯蔵中だが、規制上の承認等を経て今年後半にも最初のコンテナがドーンレイから同貯蔵所に移される予定。満杯になった時点でこれらの貯蔵所は隙間充填材で埋め戻し、後の世代に影響を及ぼさないよう頑丈なブロック状とする計画だ。

また、後続の貯蔵所建設は、サイト閉鎖プログラムの審査により、後日決定するとしている。

〔スペイン〕

ガローニャ原発で60年の運転認可更新を申請

スペインのニュークレノール社は5月27日、2013年7月に閉鎖したサンタマリア・デ・ガローニャ原子力発電所(BWR、46.6万kW)の運転認可を2031年3月まで60年間に延長する申請書を産業エネルギー・観光省に提出した。同国の内閣が2014年2月、安全性や放射線防護上の理由以外で閉鎖された原発について、運転終了後1年以内であれば、認可の更新申請が可能となるよう規制修正した王国令を承認したことによるもの。

同炉がGE社製であることから、ニュークレノール社は運転認可更新に関する米国の現在の原子力規制慣行に合わせて運転期間を設定したと説明。米国の技術による原発という事実はスペイン原子力安全委員会(CSN)が同炉で長期的な運転が可能であるか技術評価した際にも参照されたと指摘した。また、同炉の運転プロジェクトを実行可能なものとし、必要な投資を行う際に適切な安定性と確実性を保証するには、これだけの運転期間が必要だとしている。

申請書と合わせてニュークレノール社は認可更新の要件遵守を保証する文書を添付。同炉を長期間安全に運転するために必要な構造物や機器の管理能力があることを確認する内容であるほか、ストレステストでCSNから指摘された設計上の改良や投資計画についても記述しているとした。

一方、同社は燃料の再装荷前に、CSNから要求されていた発電所の改良も行う方針。具体的には電気系統の分離やガス処理システムの導入、防火対策などが含まれるが、必要経費は1億ユーロを超えるとの見方もあり、再稼働実現までの見通しは不透明だ。

同原発は1971年に運転を開始。09年の運転認可更新時、CSNはいくつかの安全上の条件を満たせば19年まで操業が可能と明言していた。しかし、ニュークレノール社は13年から課せられる税金を回避するため、13年7月以降の認可更新を申請せず、12年12月で操業を停止。13年5月には運転再開を実現するために省令の一部修正を政府に要請したが認められず、同年7月6日に閉鎖していた。

〔フランス〕

政府、アルストム社への買収提案で外資拒否可能な新法令

フランス首相は5月15日、エネルギーや輸送など6つの経済分野で国益を保障するため、外国資本の国内投資に対して政府の管理権限を強化する法令案に署名した。防衛や技術分野で政府に実質的な拒否権を与えていた既存法令の適用分野を拡大したもので、フランスの主要な戦略的産業において外国資本によるフランス企業買収に影響力を行使するのが目的。官報に発表された後、直ちに発効しており、今後は外国企業のいかなる買収提案も、フランス経済相の承認が必要となる。

米国のGE社が5月1日、フランスの大手重電機器メーカーであるアルストム社に対して火力発電・再生可能エネルギー・送配電事業を合計169億ドルで買収する提案をしたことから、これを阻止するために採られた措置と見られている。この件に関してA・モンテール生産再建大臣は、「フランス国内の雇用や投資、研究開発等に影響するほか、フランスの原子力産業の独立性にも関わる」との懸念を表明していた。

また、ドイツのシーメンス社もアルストム社に事業連携を提案すると発表したが、現地の報道によればモンテール大臣は、GE社の提案をあらかじめ批判する一方、欧州企業がエネルギー・輸送事業で連携するというシーメンス社の提案については「欧州に2つの巨頭を生み出すことになる」と賛意を示した模様。

また、今回の法令は多国間事業の利益と国益間のバランス再調整の意図があり、フランスのエネルギー自立の重要な輪であるアルストム社については、買収よりも合併事業に類する提携構造を要求したと伝えられている。

〔スイス〕

ミューレベルク原発で住民投票、63%が即時停止に反対

スイスの首都ベルンを擁するベルン州政府は5月18日、州内で稼働するミューレベルク原子力発電所

(KKM) (BWR, 39万kW)の即時停止を求めた州民発議について、住民投票を行った結果、全投票数の63.25%に当たる23万6,285票の反対により、同発議が否決されたと発表した。これにより同原発は、所有者であるBKW社が2013年10月に発表していた通り、2019年に閉鎖される予定。スイス原子力フォーラムでは、「政治的理由による性急かつ時期尚早な閉鎖を望まないという州民の州議会に対する明確な意思表示だ」と評価している。

1972年に運開したKKMについて、連邦政府は09年に「国の安全要件を満たしている限り無期限に運転期間を延長できる」と判断。しかし、福島第一原発事故を受けて、同国の総発電電力量の約36%を賄う合計5基の原子炉は平均稼働年数を50年と設定し、34年までに順次閉鎖していくことになった。

KKMの場合は、運開後50年目の22年まで操業が可能だったが、反対派住民がKKMの炉心シュラウドにヒビがあるとして提訴。法廷闘争が最高裁まで及ぶなど同炉の運転を可能とする年数が二転三転したことから、BKW社は長期運転に伴う規制面や政治経済的面で不確定要素を熟慮した上で、KKMを3年前倒しの19年に閉鎖すると決定した。

福島第一原発事故後、同国で初めての住民投票結果についてBKW社は、州民が同社を信用し、KKMの秩序立てた閉鎖を支持していることが判明したと歓迎。残りの運転期間の運転・維持費として、予定通り2億スイスフランを投資するが、このうち1,500万フランは設備改良のための追加対策に充てるとした。また、この計画書を6月末までにスイス連邦原子力安全検査局(ENSI)に提出するとしている。

〔フィンランド〕

サウジの原子力導入計画に協力

フィンランド放射線・原子力安全庁(STUK)は5月5日、サウジアラビアの原子力導入計画推進担当機関である「アブドラ国王原子力・再生可能エネルギー都市(KACARE)」に対し、放射線・原子力安全当局の設立等で協力することになったと発表した。

この複数年協力契約の実施計画と付随プロジェクトは4月23日と24日の両日、サウジの首都リヤドで開かれた両者の会合で承認され、開始が宣言された。国内の電力需要を満たす石油の代替電源、また持続可能性の高い電源として2032年までに16基・約1,800万kWの原子力設備開発を目指すサウジにとって、初めての具体的なステップになるとSTUKは説明。KACAREの戦略的パートナーとしてサウジの規制当局設立に必要なイ

ンフラの整備に力を貸していくと明言した。

具体的にSTUKは、高い安全基準の遵守と透明性に配慮した規制当局の設置に加え、安全規制と監視機能の構築に資する活動の特定と実施に必要な専門的技術と知見を提供予定。また、規制に関わる人材の養成プログラムや登用手続きに関しても支援を行うとしている。

〔カザフスタン〕

原発新設でロシアと協力覚書

ロシアの原子力総合企業ロスアトム社は5月29日、カザフスタンにおける新たな原子力発電所建設協力で両国が了解覚書に調印したと発表した。カザフでは旧ソ連邦時代に建てられた電熱併給・海水脱塩用の商業高速増殖炉(BN-350)(出力15万kW)が1999年までアクタウで稼働。今後は生産量で世界第1位という豊富なウラン資源を背景に、原子力産業を一層開発していく方針で、出力30万~120万kWのロシア型PWR(VVER)を建設するため、年内は資金調達計画に関する事項も明示した二国間協定の別途締結に向けて準備作業を進めるとしている。

ロシアの協力で原子炉を新設する計画は過去に何度か浮上していたが、今回、ロシアのV・プーチン大統領がカザフの首都アスタナでN・ナザルバエフ大統領と会談したのを機に具体化した。覚書にはロスアトム社のS・キリエニコ総裁とカザフの国営原子力企業カザトムプロム社(KAP)のV・シュコリニク総裁が調印。原子炉の設計、建設、起動、運転、廃止措置に関する両者の意向を取り決める内容。また、両国の産業協力枠組みの中で、同原発用燃料の加工や構成部品の製造をカザフで行う可能性など、燃料供給についても協力するほか、従業員的能力向上や訓練といった部分の協力も提供される。

〔ロシア〕

新型原子力砕氷船を建造へ

ロシア統一造船会社(USC)の一部であるバルト造船所は5月7日、北極圏の海と河川の両方で使用できる新世代の原子力砕氷船建造プロジェクト「22220計画」で、最初の2隻の建造契約を原子力総合企業ロスアトム社から獲得した。同プロジェクトで建造される「LK-60」は全長173.3m、幅34mという最大規模の砕氷船で、出力17.5万kWの小型原子炉「RITM-200」を2基搭載予定。北極圏における国益の防護と戦略的保障を目指すロスアトム社が、長期間の航行が可能な砕氷船開発のために2013年1月に入札を実施した。

しかし、入札要件を満たした応札会社がバルト造船所

のみであったことから、同社が総額 860 億ルーブルというこの建造計画を受注。北極圏のムルマンスク市に世界で唯一の砕氷船団を保有するアトムフロート社へ、2020 年までに 2 隻の LK-60 を納入することになった。

なお、バルト造船所ではすでに、2012 年に約 370 億ルーブルで請け負った同型の試験船「ARCTICA 号」の起工式を 2013 年 11 月に実施。2015 年の 11 月に進水し、17 年 12 月にもアトムフロート社に引き渡す計画である。

〔中国〕

国内で 19 基目となる寧徳 2 号機が営業運転開始

中国広核集团有限公司 (CGN) は 5 月 5 日、福建省の寧徳原子力発電所サイトで 2 号機 (PWR, 108 万 kW) が 168 時間の試運転を経て 5 月 4 日付けで営業運転を開始したと発表した。2013 年 12 月に初臨界達成後、2014 年 1 月に送電網への初併入を果たしていた同炉の正式な運開により、中国の原子力発電設備は 19 基、1,695 万 kW に到達。このうち 62% にあたる 10 基、1,050 万 kW が CGN の所有だと強調している。

CGN は大唐集団、福建能源集団との共同出資により、運転会社の福建寧徳核電有限公司 (FNNPC) を設立した後、2008 年に同原発の建設工事を開始した。フランスの技術を元に開発した CPR1000 設計を 1 期工事分として合計 4 基建設する計画で、機器の国産化率は 80% に達しつつあると明言。すでに 1 号機は 2013 年 4 月に営業運転入りしている。

後続の 3、4 号機も建設進捗率はそれぞれ 88% と 68% に達しており、どちらも 15 年までに完成予定。3 号機では 5 月 4 日から正式にコールド試験が開始された。4 基すべてが運転を開始すれば、同原発の発電量は年間 300 億 kWh に達する見通しで、標準炭にして年に 980 万トン を節約できるほか、CO₂ の排出量は 2,400 万トン、二酸化硫黄の排出量は約 2,300 万トン抑えることが可能だとしている。

20 基目の紅沿河 2 も営業運転

中国遼寧省の紅沿河原子力発電所 2 号機 (PWR, 110 万 kW) が 5 月 13 日付けで営業運転を開始した。

2008 年 3 月に着工して以降、中国広核集团有限公司 (CGN) は 2013 年 11 月に初めて同炉を国内送電網に接続。同日までにフル出力による試運転 168 時間という営業運開の条件を満たしたとしている。5 月 4 日に福建省の寧徳 2 号機が同国 19 基目の商業炉として運開し

たのに続き、早くも 20 基目となった同炉により、中国の原子力発電設備容量は 1,800 万 kW を突破した。

同炉の設計はフランスの PWR をベースとする「CPR1000」で、広東・大亜湾や嶺南原発の建設を通じてフラマトム社 (現アレバ社) の技術を習得した CGN が国産化を推進。1 期工事として合計 4 基を建設中の同原発全体で国産化率は 80% に達したとしている。サイトではまた、後続の 3 号機がホット試験を完了、4 号機でも機器の据え付け作業がピークを迎えた。

開発事業者である遼寧紅沿河核電有限公司には、CGN と中国電力投資集団公司 (CPI) が 45% ずつ出資しているほか、地元遼寧省の大連建設投資集団有限公司が 10% 参加。4 基すべてが完成すれば、同省第二の都市である大連市では、大気汚染の主原因である PM2.5 のレベルを 14.8% 削減できると期待している。

福建省の新設計画を地元政府が承認

中国電力業界の非営利支援グループである中国電力発展促進審議会 (CEPPC) のウェブサイトによると、福建省のショウ州市議会が 5 月 27 日に 6 基の原子力発電所建設計画を承認した。

ショウ州市における原発建設は 2007 年に計画が持ち上がったが、福島第一原発事故を受けて国務院が新規立地点の計画承認を暫時停止したことから準備作業は中断。今年 1 月になって市当局が作業の再開を決めていた。

1 期工事となる最初の 4 基だけで 544 億元の投資が見込まれており、完成すれば年に 350 億 kWh を発電する見通し。炉型について CEPPC は今年 4 月、6 基すべてがウェスチングハウス社製 AP1000 になるとの見方を示していた。担当企業は中核国電ショウ州能源有限公司で、中国核工業集団公司 (CNNC) と中国国電集団公司が 51 対 49 の比率で出資。ショウ州公司是、4 基合計の設備容量は 500 万 kW と説明している。

福建省ではすでに、CNNC が福清に 4 基の「CP1000」を建設している一方、中国広核集团有限公司 (CGN) が寧徳で 4 基の「CPR1000」を運転・建設中だ。

特集

国際廃炉研究開発機構 (IRID) の活動と学会連携

国際廃炉研究開発機構 山名 元

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それによる福島の早期復興は国民の願いである。しかし、類例のない大事故であるが故に問題を乗り越え、収束に役立つ技術面における課題は多い。この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で取り組み、将来の廃止措置技術の基盤強化を視野に技術研究組合国際廃炉研究開発機構 (IRID) は活動している。

本特集では、日本原子力学会「2014年春の年会」の特別講演・報告のセッションにおいて、IRID から「福島第一原子力発電所の廃炉技術に関する研究開発の現状と課題」と題して行われた5編の講演(座長 東京大学大学院 田中知教授)に基づいて、活動内容を紹介する。

1. はじめに

東京電力株式会社福島第一原子力発電所(以下、福島第一)1~4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(以下、中長期ロードマップ)が、2011年12月16日に開かれた第22回原子力災害対策本部会議において決定された。この中長期ロードマップでは廃炉について「世界的にも例の極めて少ない難しい課題に挑戦することから、国内外の専門家及び産業界の英知を結集するとともに、柔軟かつ機動的な進め方を可能とする体制を整備する」とし、廃炉に向けた研究開発の推進体制、在り方に関する方向性が示された。

2012年12月に今の新しい政権が発足して、翌2013年2月8日に「東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議」が設置され、6月27日の会議で、廃炉を加速していくために、政府、東京電力に加えて、関係機関の長の参加を得て、現場の作業と研究開発の進捗管理を一体的に進めていくこととし、ロードマップの大きな見直しが行われた。その内容の特徴的なことは、号機ごとの状況を踏まえてスケジュールを見直し、これにより一部前倒しが検討されたこと。廃炉に係る作業に関する福島県内企業とのマッチングや意見交換の場の提供、地元企業の育成等による地域経済の活性化等、地元とのコミュニケーション強化を目的に「廃炉対策推進会議福島協議会」が設置されたこと。国際的な英知を結集する体制を本格的に整備することであった。

2013年8月1日に、経済産業大臣から技術研究組合法に基づく設立認可を取得し、技術研究組合 国際廃炉

研究開発機構 (IRID: International Research Institute for Decommissioning) を設立し、8月8日の設立総会を経て発足した。

2. IRID の特徴と体制

IRID は3つの大きな理念を掲げている。

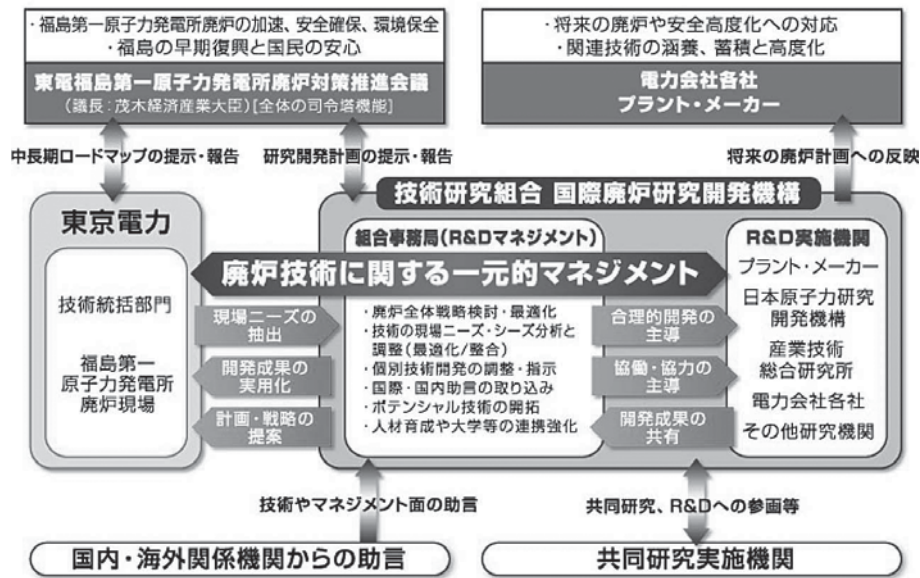
一つめは、廃炉に関わる統合的なエンジニアリングを進めること。つまり、廃炉に関わる研究開発は分野を横断的に見ていかないと成功しない。二つめは、国際連携や国内との広い連携。つまり、世界的にも例の極めて少ない難しい課題に挑戦する覚悟をもって、世界中の英知を集めて取り組むということ。三つめは、人材育成や基盤的な部分の強化。福島第一1~4号機の廃炉は、30年、40年という長期の取り組みになるということである。

この理念のもとに、IRID は次のような特徴をもった組織である。

まず、独立した法人格を持つ共同研究組織であり、17法人が研究者や研究費、設備等を出し合って、統合的なエンジニアリングについて全体で調整、共同研究を行う。その成果を共同で管理し、相互に活用する。組合は17法人が集まって設立し、いくつかの条件はあるものの、原則的には組合員になりたい機関、思いを同じにする人たちは組合員として活動することができるという特徴を持っている。大学や試験研究独立研究法人、高専、地方公共団体、試験研究を主たる事業とする財団等が参加できることから、産学連携の器として活用できる。主務大臣に報告が義務付けられており、ホームページを使って広く情報を発信するので、組織運営の透明性、信頼性が高まる。技術研究組合法に基づいて会社の新設、組織変更、組織分割などで株式会社、合同会社を設立して研究成果を円滑に実用化することが可能である。現状、そのような会社設立の計画はないが、組織的に機動

The Current Activities of the International Research Institute for Nuclear Decommissioning (IRID) and Perspectives on the Cooperative Relationship with the Atomic Energy Society of Japan (AESJ) : Hajimu YAMANA.

(2014年5月19日 受理)



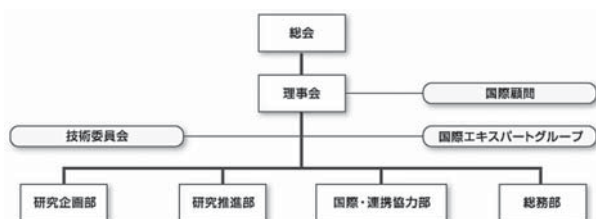
第1図 国際廃炉研究開発機構の役割のイメージ

性が高い。

第1図にIRIDの取り組み体制を示す。プラントメーカー3社、日本原子力研究開発機構(以下、JAEA)、産業技術総合研究所(以下、産総研)、原子力発電を行っている電気事業者11社及び日本原燃の17法人で構成され、組合員の東京電力は福島第一の廃炉対策を進める主体であるので、ここと強くリンクして、廃炉に必要な様々な研究開発を統合的にマネージメントしていこうというのがIRIDである。国際的な連携、国内関係機関との連携、研究開発成果は国のロードマップに反映し、廃炉計画・政策に反映させる位置づけにある。

IRIDの組織体制を第2図に示す。総会で運営方針を決定し、執行部としての理事会が運営を行う。その下で研究企画部が予算の計画を立て、研究推進部が研究全体の統合エンジニアリングを行う。研究推進部の下には、燃料デブリ取り出しグループ、炉内・燃料デブリ評価技術グループ、廃棄物処理技術グループを設けている。国際・連携協力部は、海外との連携、アカデミア等との連携を図る。海外との連携の面では福島第一の廃炉に有益な経験、知見を持った様々な専門家で構成された国際顧問及び国際エキスパートグループ(IEG)の2つのシステムを敷いている(第1表参照)。

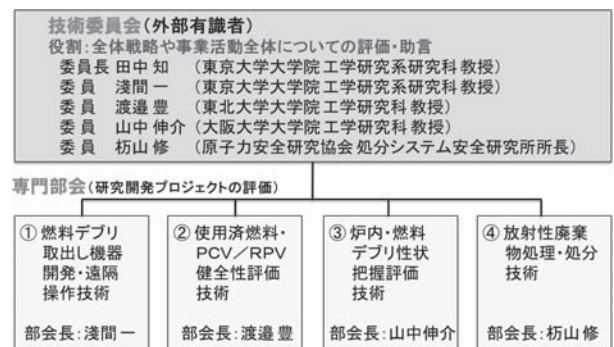
同じく国内にも技術的な提言をもらう技術委員会を設



第2図 IRIDの組織体制

第1表 国際顧問・IEGメンバーリスト

◆国際顧問	IRID運営全体に対する助言
Mr. Lake H. Barrett (米国)	TMI事故時 NRC現地対策ディレクター
Dr. Adrian Simper (英国)	英国原子力廃止措置機関(NDA)理事
Mr. Luis E. Echavarri(スペイン)	経済協力開発機構 原子力機関 事務局長(OECD/NEA)
◆国際エキスパート・グループ	技術的助言
Dr. Douglas Chapin(米国)	MPR社CEO、TMI事故収束・施設クリーンアップ
Dr. Rosa Yang(米国)	EPRI Senior Technical Executive、TMI 事故対応
Dr. Adrian Simper(英国)	(兼務)英国原子力廃止措置機関(NDA)理事
Dr. Joel Pijselman(フランス)	濃縮技術会社会長(元アレバ副社長)
Mr. Nikolai Steinberg(ウクライナ)	チェルノブイリ原発廃止措置戦略の策定
Dr. Anton Leshchenko(ロシア)	バクシュ原発の損傷燃料取出作業



第3図 研究開発プロジェクトの評価体制

けており、5名の委員に就任してもらっている(第3図)。この委員会の下にさらに専門部会をおいて、遠隔技術、健全性評価、デブリ性状、放射性廃棄物に関する専門分野の有識者から助言を得ている。

3. IRIDの当面の研究開発プロジェクト

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の廃炉に向けた研究開発に全力を尽くす

こととし、その研究開発分野の柱は次の3つである。

(1) 使用済み燃料プール燃料取り出し

4号機は昨年11月18日から取り出しが始まっている。1, 2, 3号機はこれからである。海水の注水、ガレキの落下等を受けた取り出し燃料を今後どのようにすれば健全に管理できるかを研究する必要がある。

(2) 燃料デブリの取り出し準備

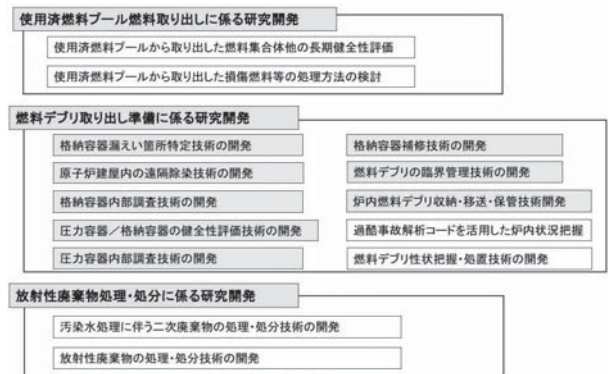
溶け落ちている燃料デブリをどうやって取り出して、安全な状態に維持していくかが最大のテーマであり、一番大きなタスクになっている。

(3) 放射性廃棄物の処理・処分

福島第一から出てくる種々雑多、極めて特異な放射性廃棄物を最終的にどう処理し、しっかりした処分に持ち込むかは長期の取り組みを要する研究課題である。

平成25年度に行った研究開発プロジェクトの個別項目を第4図に示す。使用済燃料プールからの取り出し燃料に関しては、長期健全性評価、再処理できるかどうかを含め損傷燃料等の処理方法の検討等について、組合員であるJAEAが取り組んでいる。

燃料デブリの取り出し準備に関しては、政府の補助金を活用して主にプラントメカ3社が、自らも費用を出して取り組んでおり、例えば、格納容器(PCV)の漏えい箇所を特定する、PCVを補修・止水する、建屋内を遠隔で除染し、PCVや圧力容器(RPV)の内部を調査する、RPV、PCVの長期健全性を評価する、過酷事故を模擬するための解析コードの高度化、炉内状況を把握す



第4図 2013年度の当面の研究開発プロジェクト

る、燃料デブリの再臨界という問題があり、これを研究することは非常に重要である。

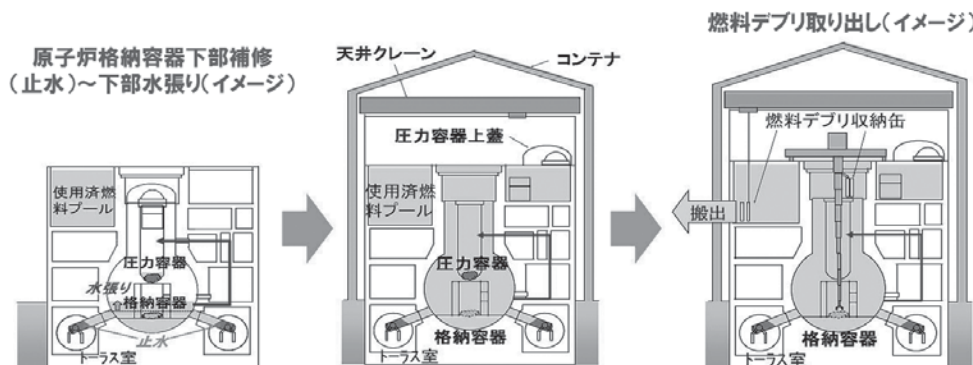
燃料デブリの性状を模擬試験や海外情報等を反映して把握する研究、ならびに、放射性廃棄物の処理・処分では、汚染水を処理した時に出てくるゼオライトの吸着体や多核種除去設備から出てくるスラッジや吸着体などの2次廃棄物、瓦れきや伐採木を最終的にどうするかといった研究に関してはJAEAに依頼している。

4号機の使用済燃料の取り出しが昨年11月18日に開始され、中長期ロードマップは現在第2期に入っている。燃料デブリの取り出しを早ければ2020年上期に始めたいという非常にチャレンジングな目標を設定しているが、研究開発は長期的視点で推進し、燃料デブリ取り出し準備の本格化に向けて多角的かつ重層的な工法・機器の開発を行い、廃棄物の処理処分、廃炉の在り方を見据えて着実な取り組みを行っている。

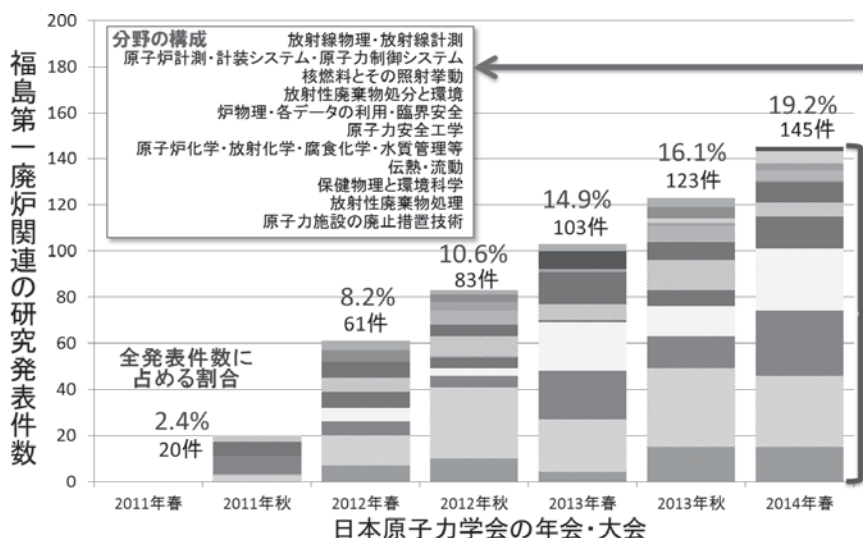
中長期ロードマップにおいては、TMIでの燃料デブリ取り出しと同様の「冠水法」を取り出し工法の基本に置いている(第5図)。PCVの漏えい箇所を特定、遠隔で補修、止水し、オペレーションフロアまで冠水させ、炉内からの放射線を遮蔽する。そして長い遠隔ハンドリングの装置で、炉内に手を伸ばして燃料デブリ等を回収、収納、保管していく。並行して、冠水法が困難な事態を想定してデブリ取り出しの代替工法、例えば気中でデブリを取り出す、横からアクセスして取り出す等、様々な方法を探る目的で、既に国内外に技術情報の提供を依頼し、世界中から約200件の技術提案を得ている。今後、代替工法に関しても概念検討、実用化検討を行い、間断なく廃炉が進むよう取り組んでいる。

4. 基盤研究の推進と人材育成、学会連携

中長期的な人材育成・確保を図るため国内の大学・研究機関・日本原子力学会等と連携しつつ、基盤研究を推進したいと考えている。廃炉に関わる研究開発・人材育成の拠点化プロジェクトの計画があり、日本の中に、出来るだけ広く、廃止措置に関わる研究、人材育成をやってもらえる大学や研究機関を中核拠点と位置付けて取り



第5図 燃料デブリ作業取り出し作業イメージ



第6図 福島第一廃炉関連の研究発表件数推移

組んでいくというプロジェクトである。その少し先走ったものとして、文部科学省の協力を得て、昨年9月から本年1月まで、関東、福島、東北、西日本、中部、北陸で全9回のワークショップを開催してきた。非常に強い興味を持っていただき、技術的なアイデアを持っている国内の先生方と今後も強い連携を結んでいくのがIRIDの目標である。

第6図は、福島第一の廃炉に関するテーマで、「2011年春の年会」以降、「2014年春の年会」まで原子力学会の年会・大会でどのような研究発表があったかを調査、整理したものである。大震災後の「2011年秋の大会」では20件であったが、「2014年春の年会」までに単調に増加し、この春は多くの分野のセッションにわたって145件が発表されている。それだけ福島第一の廃炉が非常に重要なテーマと捉えられ、真剣に取り組んで頂いていることが分かる。例えば、廃棄物処理、保健物理、環境科学、伝熱流動、廃止措置のセッション回りは非常に多くなっている。IRIDはできるだけ多くの知見を集めたいと考えており、統一的な研究発表の場を創設できれば良いが145件を統合することは困難である。したがって、従来の個別分野で発表するパターンを続けることになると考えるが、例えば総合講演・報告など、多様な分野の研究者、技術者が一堂に会して、分野横断的にディスカッションをする場を設けたい。

日本原子力学会では、福島第一の廃炉に向けて、課題の抽出と専門性を生かした検討を俯瞰的視点で行い、併せて、学会内における関連する活動情報の集約・共有化を図る目的で「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」を設置した。IRIDはこの検討委員会と強い連携を取っていきたいと考えている。例えば、廃止措置を進める際に

どうリスクを低減していくかのリスク戦略は非常に重要である。学会の先生方の専門知識でそのリスク低減の考え方を提示してもらうことはIRIDにとって非常に有益である。さらに、現在、福島第一は特定原子力施設として緊急的な安全措置を要求される施設である。廃止措置を進めていくには必ず安全規制が必要になる。学会が積極的に福島第一の廃炉に関わる規制の在り方、考え方を育ててくれることを望んでいる。

5. おわりに

過酷事故後のプラントの廃炉は、世界にも例はなく極めて難しい技術課題が山積しており、これらの課題を解決するためには、現在視野に入りつつある先端研究のみならず「未踏領域へのチャレンジ」も必要となる。IRIDは、将来の廃炉技術の基盤強化を視野に、福島第一原子力発電所の廃炉作業に向けて必要となる研究開発を効果的・効率的に進めるとともに、中長期的な視点での人材育成・確保に取り組んでいる。日本原子力学会の福島第一原子力発電所廃炉検討委員会をはじめ、統一的なディスカッションの場、研究発表の場を通じて、各技術分野における福島第一廃炉関係の基礎基盤研究、人材育成へ関心が高まることを期待している。このことから、IRIDは、毎年の日本原子力学会「秋の大会」で総合講演等を通じて活動報告を行うこととする。

著者紹介



山名 元 (やまな・はじめ)
 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構、京都大学原子炉実験所
 (専門分野) アクチニド化学、核燃料サイクル工学

廃炉に関する基礎基盤研究の推進と人材育成

文部科学省 笠島 宗憲

「東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」に位置付けられた「中長期の視点での人材育成及び大学・研究機関との連携」を進める観点から、文部科学省では平成26年度より、人材育成及び中長期ロードマップの重点分野の中でも民間企業では着手しづらい基礎基盤研究について委託事業を実施する。本事業では、安全かつ着実な廃止措置を進める上で必要となる「多様な分野の英知を結集する」ことを推進し、実施にあたっては中核となる大学・研究機関(中核拠点)を設置する。本稿では、平成25年度の調査事業により検討された人材育成の方向性及び研究課題の方向性並びに平成26年度に実施する予定の事業について、その概要を紹介する。

文部科学省では、平成26年度の本格公募に向けて必要な基礎基盤研究および人材等の情報に係る事前調査を公益財団法人原子力安全研究協会に委託して進めてきた。平成25年度に、外部有識者委員会を設置して、研究開発・人材育成の方向性等を検討した。この委員会は、大学等有識者、東京電力、IRID、電力中央研究所、日本原子力研究開発機構、資源エネルギー庁、文部科学省等、廃炉・汚染水対策検討チーム事務打合せメンバーで構成されており、廃炉・汚染水対策検討チーム関係者と緊密な連携を図る形で公募事業の方向性を検討してきた。

並行して文部科学省は、IRIDとともに平成25年9月から平成26年1月の間にワークショップを東北・北海道地域、福島地域、関東地域(3回)、中部地域、北陸地域、関西・西日本地域(2回)で計9回開催した。毎回約100～150名前後の大学研究者、学生、民間研究者等の参加を得て、IRIDから大学等研究機関での実施を望む基礎基盤研究テーマ(第1表)を、大学等から福島第一の廃止措置に関連する研究の現状・成果を相互に紹介した上で意見交換、アンケート調査を実施し、公募事業の検討に反映した。

この結果、人材育成の方向性に関しては、(1)研究課題の専門に特化した人材育成を行う方法、(2)研究課題に関連した福島第一原子力発電所の廃止措置に必要な人材育成を行う方法のどちらも選択が可能とし、研究課題の方向性としては、①研究開発要素が大きいもの、②基盤的、継続的に取組が必要なもの、③その他 i) 学生の参加、施設共同利用等の促進を支援、ii) 廃炉全体を俯瞰しつつ、関係者間の情報交換、必要な技術のマッチング等の活動促進、iii) IRIDにおける廃炉等の技術開発と

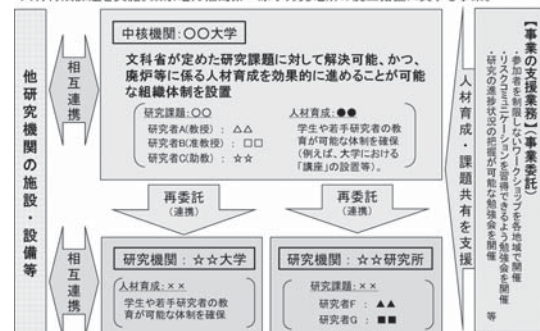
の分担、連携に留意して進めることとした。

文部科学省が平成26年度に実施しようと考えている事業のスキームを第1図に示す。

第1表 ワークショップでIRIDから提示された研究課題

IRIDから研究機関に提示された研究課題	中長期ロードマップにおける重点分野
高線量下における遠隔非破壊検査技術	格納容器建屋等の健全性信頼性確保
既存構造物の終局強度評価	
高温履歴を受けた鉄筋コンクリートの健全性評価	遠隔機器装置等の開発実証、運用
実機事象に反映できる材料評価	
建屋内無線技術	燃料デブリ性状把握、保管管理、処置
軽量・小型化技術	
耐放射線技術	炉内状況把握のための事故解析
デブリ物性データの拡充	
デブリの性状・挙動評価	放射性廃棄物の核種分析
デブリ脱水・乾燥技術	
デブリ保管時の長期健全性評価	放射性廃棄物管理処理処分
境界評価用モデル構築	
格納容器及び圧力容器内熱水力学挙動評価	放射性廃棄物管理処理処分
燃料及び制御棒の損傷と溶融状態評価	
放射性物質の燃料からの放出と移行評価	放射性廃棄物管理処理処分
圧力容器の変形と破損挙動評価	
難測定核種・高線量サンプルの分析技術	放射性廃棄物管理処理処分
高線量環境における分析技術	
廃棄物対策の技術	放射性廃棄物管理処理処分
廃棄物処理の技術	
デブリの取出し・安定化に必要な技術	放射性廃棄物管理処理処分
廃止措置の技術	
廃止措置からサイト復旧までに必要な技術	

中核拠点となる大学を中心に、共同研究機関と連携し、文部科学省が定めた研究課題・人材育成課題を実施。東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置に資する事業。



第1図 廃止措置等基礎研究・人材育成プログラム委託費

著者紹介

笠島 宗憲 (かさじま・むねのり)

文部科学省(現在、内閣府)

(関心分野) 科学技術政策



The Promotion of Fundamental Studies on and Human Resource Development for the Decommissioning of Nuclear Power Plants: Munenori KASAJIMA.

(2014年5月15日 受理)

線量低減・除染に関する研究の現状と課題

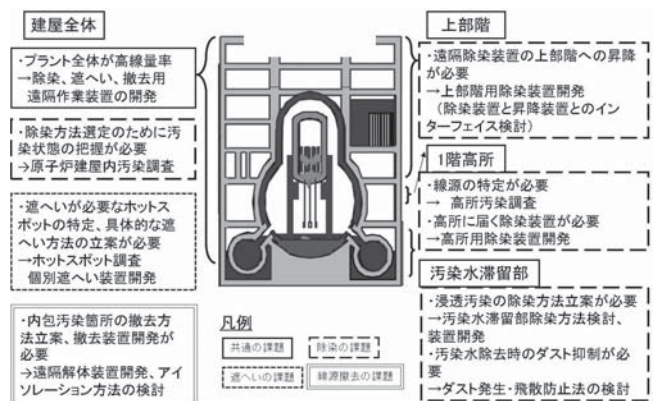
国際廃炉研究開発機構 行則 茂, 木下 博文, 姉川 弘明

福島第一原子力発電所1号機、2号機及び3号機の燃料デブリの取り出しに向けて、原子炉格納容器(PCV)漏れい箇所調査や補修作業等が計画されており、これらの作業を効率よく実施するためには、作業エリアおよびアクセス通路の線量低減が必要である。作業エリアの線量低減策としては、除染、遮へい、線源撤去等の方法があり、作業エリアの状況に適した方法の選定が必要であるとともに、遠隔での作業が望まれる。作業エリアの線量低減に向けては、種々の課題があり、経済産業省の補助事業「原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発」、「総合的線量低減計画の策定」において、汚染状況の調査、遠隔除染装置の開発、線量低減計画の策定等を実施している。本稿では、これらの活動状況を紹介するとともに、活動を通して得られた課題と今後の対応について紹介する。

1. 原子炉建屋の線量低減の課題と対策

福島第一原子力発電所1～3号機の原子炉建屋内部では、依然として雰囲気線量率の高い状態が続いており、この線量率低減は、燃料デブリ取り出しに向けた一連の作業における作業員の被ばく線量を低減するために必要である。対象は、特に燃料デブリ取り出し作業に関連するエリアである。中長期ロードマップに示された2020年度上半期に燃料デブリを取り出すことを目指して、今後原子炉格納容器(以下、PCV)漏れい箇所の調査、補修・止水、内部調査を実施する必要がある。これら作業を成立させるためには、PCVの漏れい箇所調査、補修等の作業エリアとなる原子炉建屋(以下、R/B)1階から4階、燃料取り出し機器の復旧や交換作業の作業エリアとなる原子炉建屋オペレーションフロア(以下、オペフロ)の線量を低減させることが必要である。目標線量率は、作業員の1回の作業時間が適切となるよう、オペフロでは毎時1mSv以下、R/B1～4階のアクセス通路では毎時5mSv以下、作業エリアでは毎時3mSv以下としている。雰囲気線量率の低減は、除染だけでなく、遮へい、線源の撤去を含めて、プラント状況に応じて総合的かつ適切な組み合わせによって達成する。

第1図に具体的な雰囲気線量率低減の課題と対策について示す。建屋全体では、遠隔作業装置の開発、除染方法選定のための汚染状態の把握、個別の遮へい装置の開発、内包汚染物質撤去のための工法確立と装置開発等が、また、上部階の除染については、遠隔除染装置の昇



第1図 福島第一1～3号機の雰囲気線量率低減の課題と対策
降、1階高所除染では線源の特定や高所に届く除染装置の開発等が課題であり、新たな対策が必要となっている。

2. 建屋内の汚染形態と汚染状況の調査結果

(1) 建屋内の汚染形態

除染技術の検討にあたりR/Bの汚染形態を事故経緯から推定した。1～3号機では、地震に伴う津波の影響により電源と炉心冷却機能が喪失し、原子炉压力容器(以下、RPV)、PCV内の温度・圧力が上昇したことにより、圧力的に脆弱な部位から蒸気や水素が漏れ出して建屋内に拡散した。この蒸気に汚染が随伴したと想定されている。また、1、3号機では、水素爆発が発生しR/B上部が破損したため、放射性物質を含むコンクリート粉が建屋内に堆積していると考えられる。さらに、各号機ともにR/B、タービン建屋(以下、T/B)の地下には汚染水が滞留している。これらの状況から、「遊離汚染」、「汚染蒸気ばく露による固着・浸透汚染」、「滞留水浸漬による固着・浸漬汚染」の3種類(第2図)が主要な汚染モードとなり、これにコンクリート表面のエポキシ塗装「あり」、「なし」の2パターンを考慮した計6つの汚染形

The Current Status of and Research and Development Issues in Respect of Decontamination of the Interior of Reactor Buildings : Shigeru YUKINORI, Hirofumi KINOSHITA, Hiroaki ANEKAWA.

(2014年5月26日受理)

飛散した汚染の降り積もり (遊離)	汚染蒸気にはく露 (固着・浸透)	滞留水に浸漬 (固着・浸透)
エポキシ塗装されているコンクリート床面に、コンクリート破砕層が降り積もり	エポキシ塗装されているコンクリート床面が、汚染蒸気や凝縮水に接触しその後乾燥	エポキシ塗装されているコンクリート床面に、滞留水が接触しその後乾燥

3種類の汚染に対し、建屋コンクリートの状態(エポキシ塗装、無垢)により6種類の汚染状態で検討

第2図 原子炉建屋内の汚染の種類

態が想定される。

(2) 建屋内の汚染状況

2012年の汚染状況調査結果を以下に示す。

①原子炉建屋1階の線量率調査結果(床上150cmの例)

- ・1号機 3.2～8.9mSv/h (南側通路を除く)
- ・2号機 6.8～30.3mSv/h
- ・3号機 15.8～124.7mSv/h

②原子炉建屋1階の主なホットスポット

- ・格納容器貫通部
- ・制御棒駆動機構水圧制御ユニット(HCU)下部
- ・3号機機器ハッチのレール部

③汚染状況調査結果(主要核種)

- ・¹³⁷Cs：約60%
- ・¹³⁴Cs：約40%
- ・^{110m}Ag：極微量
- ・¹²⁵Sb：極微量

(α核種は検出されなかった)

④汚染状況調査結果(エポキシ塗装面の浸透汚染)

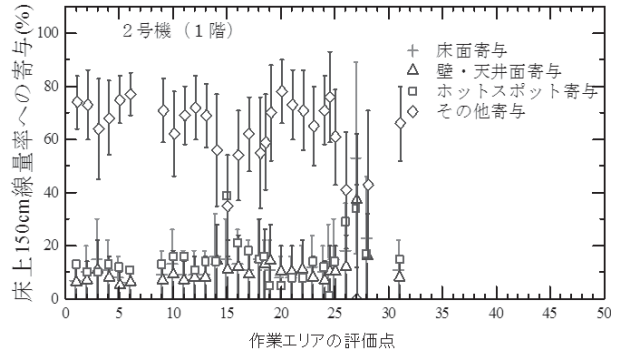
- ・エポキシ塗装内部への汚染浸透なし
 - ・コンクリート内部への汚染浸透なし
- なお、^{110m}Ag、¹²⁵Sbは核分裂生成物起源、¹²⁵Sbはジルカロイ中の不純物(Sn)の放射化、^{110m}Agはパッキン材等に含まれる銀の放射化などにも由来する可能性が考えられる。

雰囲気線量率に対する特定部位の寄与割合については、実測した床上5cm、150cmの線量率測定結果およびセシウムのγスペクトル測定結果から評価した。その結果、床面からの寄与は20%程度、壁・天井やホットスポットからの寄与は10%程度であるが、その他の寄与が70%程度と大きい。第3図に、2号機R/B1階の作業エリアにおける線源の寄与割合の評価結果を示す。◇で示した「その他寄与」が相対的に高く、これらについては、高所エリアの配管やダクト、ケーブルトレイ等の機器表面の付着放射性物質、ダクトや盤の上部に堆積したほこり等に蓄積した放射性物質、または配管、ダクト内部に存在する放射性物質からの寄与などが主要な線源として想定される(第4図)。

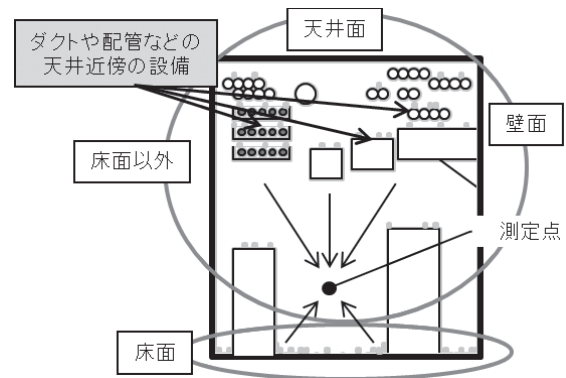
3. 除染装置の開発

(1) 要素技術の選定

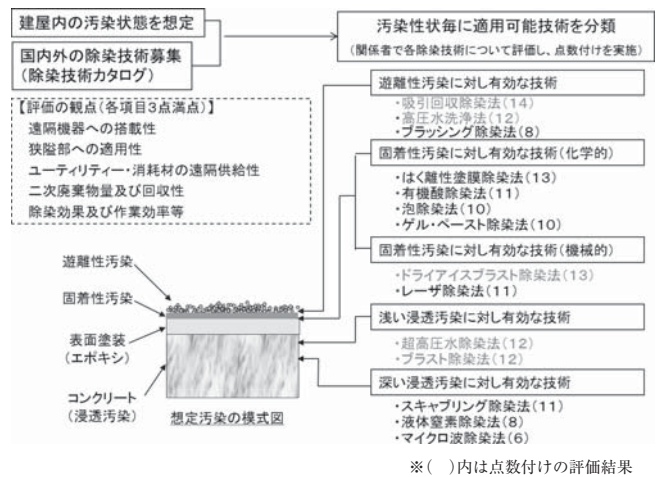
プラントの汚染状況の推定結果を踏まえて除染要素技術の選定を行った(第5図)。左下の図が想定汚染の模式図である。右側には、技術カタログに掲載された主要



第3図 2号機1階の作業エリアにおける線源の寄与割合
平成24年度の経済産業省補助金事業
「総合的線量低減計画の策定」
(補助事業者：アトックス)



第4図 線源率分布モデル(模式図)
平成24年度の経済産業省補助金事業
「総合的線量低減計画の策定」
(補助事業者：アトックス)



第5図 除染技術の選定

な除染要素技術を示す。これらは、国内外への公募の結果集まった除染技術であり、どのような汚染に有効かという視点で分類した。抽出された技術について、遠隔機器への搭載性や狭隘部への適用性といった観点で関係者による評価を行い、まず、低所での除染方法を確認し、各汚染形態に対して適用可能と考えられる除染技術を分

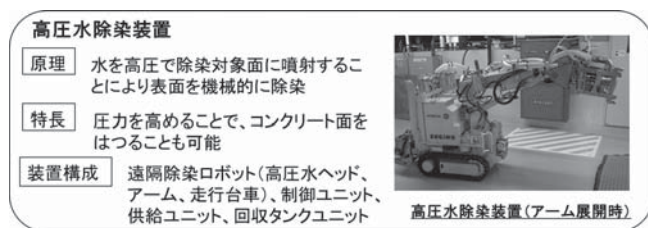
類している。この検討結果から、「超高压水除染法」、「ドライアイスプラスト除染法」、「吸引・プラスト除染法」を選定し、装置を開発することを決定した。高所の寄与が大きいといっても低所(床)も20%は寄与しており、高所の除染や遮へいを施すにしても足場となる床面(低所)の除染は汚染拡大防止の観点から重要である。

(2) 除染装置の開発

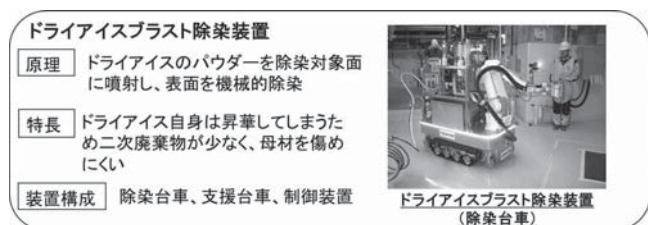
いずれの装置も平成23年度の経済産業省補助事業により開発を開始し、福島第二原子力発電所において遠隔除染装置としての走行性能、遠隔操作性等について確認、良好な結果が得られている。平成25年度は装置を改良して福島第一原子力発電所での実証試験を目指している。

第6図は、日立GEが開発している高压水除染装置である。水を高压で除染対象面に噴射することにより表面を機械的に除染し、圧力を高めることでコンクリート面をはつることも可能である。第7図は、東芝が開発しているドライアイスプラスト除染装置である。ドライアイスのパウダーを除染対象面に噴射し、表面を機械的に除染する。特長として、ドライアイスは昇華するので2次廃棄物が少なく、母材を傷めにくい。第8図は、三菱重工業が開発している吸引・プラスト除染装置である。研削材を噴射して表面を研削する。研削材はスチールグリッド(特殊鋼製の多角形粒子)であり、噴射後に回収して汚染と分離した後に再利用する。この装置は単独吸引モードで1cm程度の小さい瓦れきの回収も可能である。

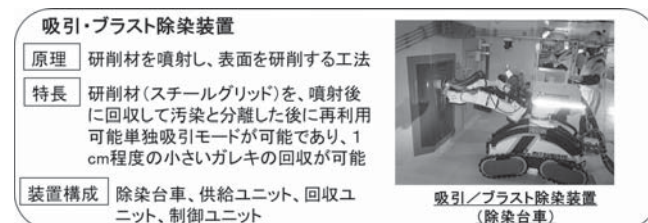
現在、天井・高所壁などの高所、及び上部階用の遠隔



第6図 高压水除染装置



第7図 ドライアイスプラスト除染装置



第8図 吸引・プラスト除染装置

除染装置の開発に着手している。天井、高所壁などの1階高所での遠隔除染装置では、①遊離性、固着性、浸透汚染等多様に混在する汚染形態への対応、②複雑な形状に付着した汚染の除去、高所コンクリートの浸透汚染対応等異なる機能の装置開発、③装置の最大到達高さは床上約8m、複雑形状でも効率的に除染可能であり、2次廃棄物の回収を最大限実施可能といった点が開発の狙いである。

2階以上の上部階用遠隔除染装置では、①昇降装置で2階以上の上部階に移送される小型除染システム、または、分割昇降とする場合には上部階で遠隔接続が可能、②作業台車、搬送台車、支援台車、中継台車を共通化、③電気、水等のユーティリティや通信が2階以上へ供給可能といった点が開発の狙いとなる。

4. 総合的に線量を低減するための作業計画

(1) 除染による線量低減効果の予測

建屋内の線量低減においては、号機毎の状況に応じて総合的かつ適切な線量低減計画を確立することが必要である。以下に平成24年度経済産業省補助事業「総合的線量低減計画の策定」において(株)アトックスが実施した研究開発について紹介する。

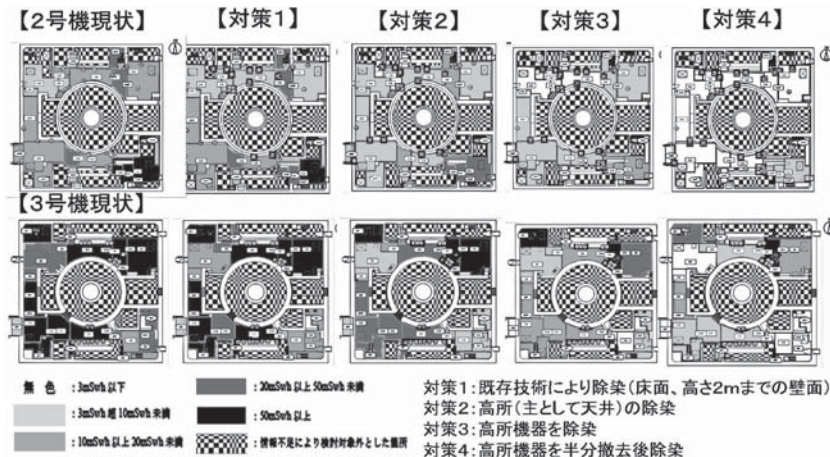
第9図に、線量低減方法の組合せによる評価の例を示す。対策1～4を段階的に実施することにより2号機では、建屋内線量率が毎時20mSv以上を示す濃い灰色から毎時20mSv未満を示す薄い灰色に変化する。対策4である高所機器の一部撤去により、ほぼ全域が毎時3mSv以下を示す無色に変化する。3号機では、現状の線量率は2号機より高いため、さらなる撤去や遮へいが必要となる。

(2) 遠隔での遮へい設置の検討

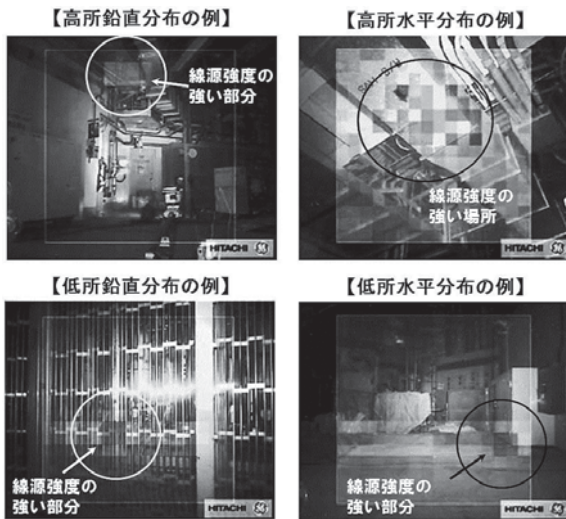
総合的な線量低減対策の一つである遠隔での遮へい設置の考え方について示す。1～3号機1階のホットスポットをガンマカメラの映像から104箇所を抽出し、線源強度を考慮してそのうち60箇所が「遮へいが必要な箇所」と判断した。遮へいが必要な箇所について、ガンマカメラの映像等に基づいて場所と分布を分類し(第10図)、分類毎に「遮へい構造」、「遮へい体の種類」、「遮へい体設置工法」等の遠隔遮へい方法を検討した。一例として、第11図に高所で鉛直または水平に分布したホットスポットに対する「パンタグラフ型」の遮へい設置工法の例を示す。遮へい体をパンタグラフで持ち上げ、設置後、遮へい体に充填材を加える。この工法では通路部に設置した場合、作業員や他の遠隔ロボットの動線を遮る可能性があり、適切な配置が必要となる。

(3) 汚染源の撤去に関する検討

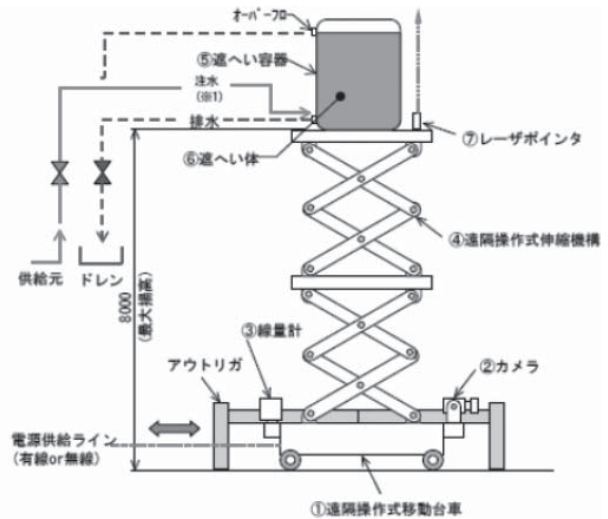
汚染源の撤去については、まず遠隔除染装置を用いた除染作業に影響のある干渉物の撤去計画を策定し、一部現地作業を実施している。現在実施されている現地作業



第9図 線量低減方法の組み合わせによる評価
平成24年度経済産業省補助事業「総合的線量低減計画の策定」(補助事業者：アトックス)



第10図 遮へいが必要な場所と分布の分類の例



第11図 遮へい体設置工法(案)

は、1、3号機 R/B 1 階通路部の除染作業に障害となる干渉物を小型重機 ASTACO-SORA により撤去することである。さらに、作業エリアの線量低減の視点で、直接ホットスポットとなる系統・機器、例えば空調ダクトや不活性ガス系 (AC 系) の配管等の撤去を進めることが効果的であると考えており、干渉物撤去に適用可能な技術を整理した。

5. おわりに

今後、1 階高所エリアについては線源を特定し、雰囲気線量率増加に影響する高所機器を特定し、適切な線量低減対策を検討する。この結果を受けて平成 26 年度内に除染装置の工場モックアップ試験を完了する予定である。また、2 階以上の上部階の除染については、平成 25 年度に基本設計を実施し、平成 26 年度に製作を予定している。

平成 26 年度には、滞留水のある地下階等への線量低減対策として、長時間にわたる浸透汚染箇所の除染方策の検討及びドライアップ時のダスト飛散対策の立案を新

たに開始する予定である。IRID は、これらの研究開発を確実に進め、中長期ロードマップの遂行のため遠隔除染装置の開発を始めとする建屋内の「線量低減や除染」に係る研究開発を推進してゆく所存である。

著者紹介



行則 茂 (ゆきのり・しげる)
技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
(専門分野/関心分野) 原子力機器設計/
廃炉技術一般



木下 博文 (きのした・ひろふみ)
技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
(専門分野/関心分野) 原子力機器設計/
廃炉技術一般



姉川 弘明 (あねかわ・ひろあき)
技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
(専門分野/関心分野) 再処理プロセス設計/
廃炉技術一般

燃料デブリ取り出しに関する研究の現状と課題

国際廃炉研究開発機構 鈴木 俊一

福島第一原子力発電所4号機の使用済み燃料プールからの燃料取り出しが2013年11月18日から開始されたことで、「東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」は次なるフェーズ(第2期)に移行した。第2期のゴールは、2020年以降に燃料デブリの取り出しを開始することであり、必要な現場作業や関連研究開発の迅速な遂行が求められている。米スリーマイル島2号機事故(TMI-2)対応での経験に基づき、現在、作業員の被ばくを最小限に抑えるため、原子炉格納容器を冠水状態にして燃料デブリの取り出しを行うことが前提となっている。一方、2013年6月27日の中長期ロードマップ改訂にあたっては、従来の方向性に加え、「冠水方式の検討・実施に伴い発生すると予想される種々の課題を考慮し、代替工法の検討も開始すること」が明記されており、デブリ取り出しのための着実な準備が求められている。

1. はじめに

燃料デブリ取り出しを早ければ2020年度上半期からスタートするというのが現状の計画である。燃料デブリの取り出しについては、「冠水方式」を大原則としている。しかしながら、TMI-2と比較して福島第一では大幅に困難になることが想定される。主たる違いは原子炉周りの損傷状況と下部構造である。福島第一とTMI-2の主な差異を第1表に示す。これらを踏まえて、デブリ取り出し準備に関して約15の研究開発プロジェクトが進められている。燃料デブリ取り出しに向けて、取り出しステップごとの主な課題を次章に示す。

2. 燃料デブリ取り出しのステップと想定する課題

ステップ1：原子炉建屋内除染

建屋内の線量低減は、後段の作業実施に不可欠であ

第1表 福島第一原子力発電所とTMI-2の主な差異

比較項目	TMI-2	福島第一原子力発電所
原子炉建屋(R/B)の状況	損傷は限定的	水素爆発による損傷(1号機、3号機、4号機)
水バウンダリ	原子炉容器からの漏えいはなし	原子炉圧力容器(RPV)、原子炉格納容器(PCV)とも漏えい(1号機～3号機)
燃料デブリ位置	原子炉容器底部	RPV外に落下している可能性
原子炉底部形状	半球状の下鏡構造物なし	多数の制御棒駆動機構等が貫通した複雑な形状

The Current Status of and Research and Development Issues in Respect of Preparation to Remove Fuel Debris : Shunichi SUZUKI, Hirofumi KINOSHITA, Shigeru YUKINORI, Hiroaki ANEKAWA.

(2014年5月26日 受理)

る。除染・線量低減作業の現状に関しては、本特集の前期にて紹介しているので本報では省略する。主な技術的課題は、①高線量(最大Sv/hオーダー)、②原子炉建屋(R/B)内に散乱した瓦れき等の障害物除去、③BWR-3・BWR-4元来の狭隘な建屋設計によるアクセス性の制限などである。

ステップ2,3：PCV漏えい箇所特定と補修

PCV外部から漏えい箇所を特定し、補修を実施する。主な技術的課題は、①PCV内の高線量と湿度、②濁度の高い水中にある損傷箇所(推定)、③高濃度汚染水が流れている条件下での漏えい箇所の補修などである。

ステップ4,5：PCV下部の水張り、PCV内部の調査

PCV下部に水を張り、PCV内部を詳細に調査するとともに、デブリの分布状況を把握する。主な技術的課題は、①高線量に伴う低アクセス性、濁度による視界の制限、②調査装置の耐放射線性、③調査機器挿入箇所に必要な漏えい対策などである。

ステップ6,7：PCV上部の補修、PCVの冠水

PCV漏えい箇所を補修した後、内部を冠水する。その後、炉内機器や燃料デブリ取り出しのためのクレーン、R/Bコンテナを設置する。PCV内に十分な水位まで水張りが完了した後、PCV及び原子炉圧力容器(RPV)の上蓋を開放する。主な技術的課題は、①高線量に伴う低アクセス性、②冠水後の耐震安定性確保、③PCVからの放射性物質放出の抑制、④冠水時の再臨界防止などである。

ステップ8：RPV内部調査、デブリサンプリング

RPV内部の状況やデブリの分布・性状を調査する。主な技術的課題は、①高線量、低アクセス性、濁度による視界の制限、②必要な高線量下遠隔操作機器の開発、③デブリサンプリング技術の開発などである。

ステップ9：RPV/PCVからの燃料取出し

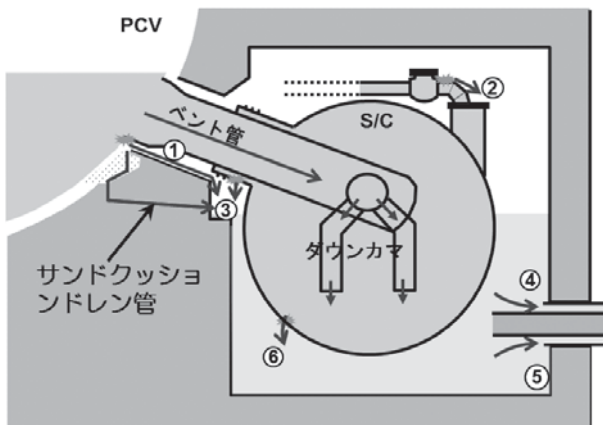
RPV/PCVから炉内構造物や燃料デブリを取り出す。主な技術的課題は、①BWRの複雑な炉底部構造物やRPV外部まで落下している燃料デブリの取り出し方法、②多種の金属やコンクリートとの混合による燃料デブリの核特性、機械的特性、化学特性の事前把握、③再臨界防止、④燃料デブリ保管技術の確立などである。

3. 燃料デブリ取り出し準備の現状

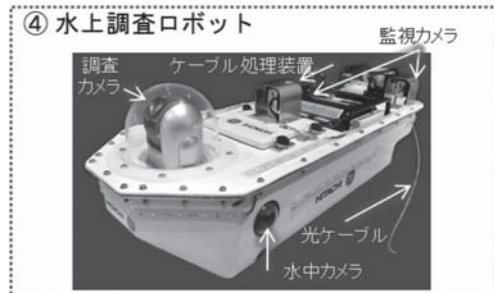
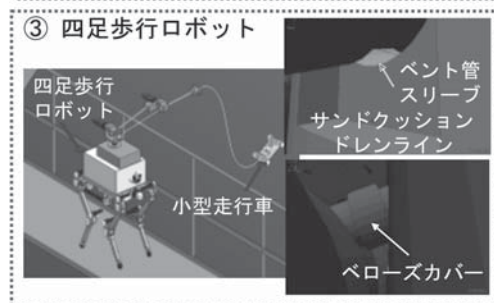
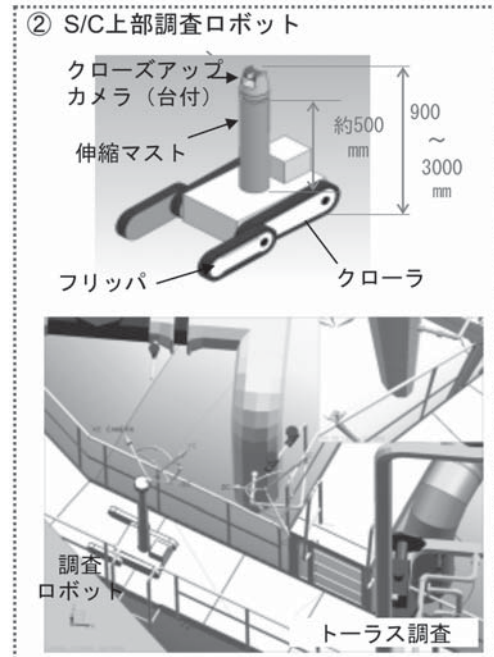
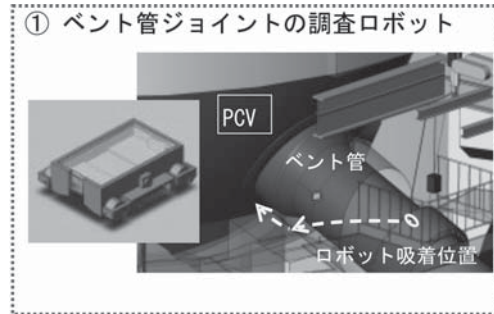
(1) PCV 漏えい箇所の特定(下部気中漏えい箇所)

PCV漏えい調査及び補修に関しては、気中の漏えい箇所を調べるためのロボットが開発されている。第1図に、PCV下部とトラス室、サプレッションチャンバー(以下、S/C)、ベント管、そのジョイント部分やS/C上部にあるバルブ、サンドクッションドレン管等の配置を模式的に示す。第2図は、PCVとS/Cを結ぶベント管とジョイント部やS/C下部、並びにS/C上部バルブを目視調査するための気中調査ロボットである。ベント管接合部調査ロボット①は、ベント管の外部表面に吸着し、ベント管とコンクリート壁の間からベント管とドライウエル(D/W)の接合部に接近して損傷を調査する。S/C上部調査ロボット②は、トラス室のキャットウォークから最高で約3m、S/C上部構造物からの漏えいを調べる。四足歩行ロボット+小型走行車③は、ベント管の下部付近からの漏えい有無の調査のために使用する。

1号機のPCV下部周辺で漏えい箇所の有無を水上調査ロボット④にカメラを搭載して調査した結果、サンドクッションドレン管及びS/C壁に漏えいが確認された。(本開発は現在IRIDの専門部会として承継されている遠隔技術分野の有識者から成るタスクフォースでの議論を受けて実施。)第3図はサンドクッションドレン管からの漏えい状況の写真である。なお、損傷箇所がどこかは現在確認されていない。2号機S/C全周の気中部に漏えい箇所がないかは東京電力が四足歩行ロボットを使っ



第1図 PCV下部のS/C、トラス室の断面模式図

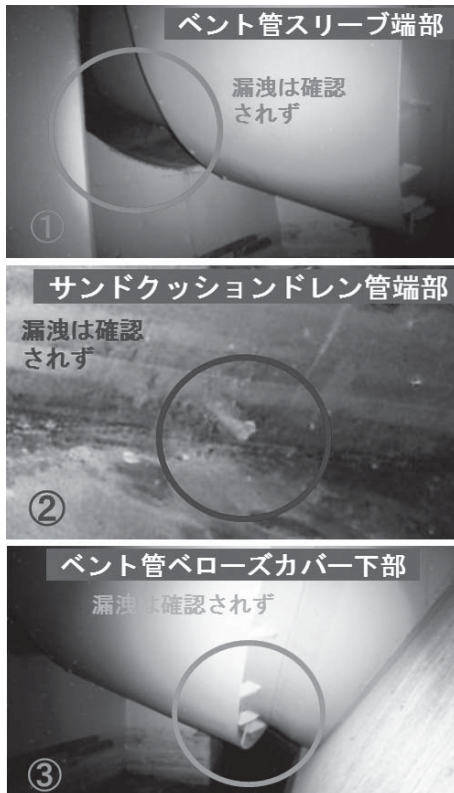


第2図 気中の漏えい箇所調査用ロボット

て調査した。第4図は、2号機のS/Cベント管スリーブ部、サンドクッションドレン管、ベント管下部の写真である。気中部においては水の漏えいは確認されなかった。



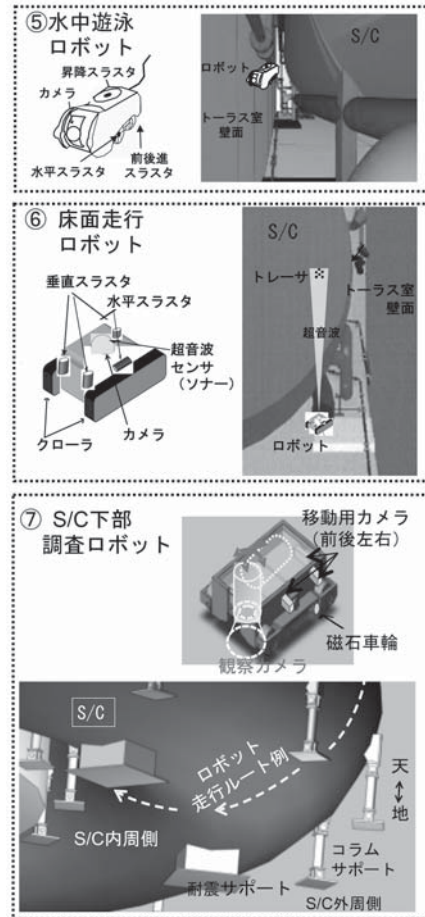
第3図 1号機PCV下部サンドクッションドレン管からの水の漏えい状況



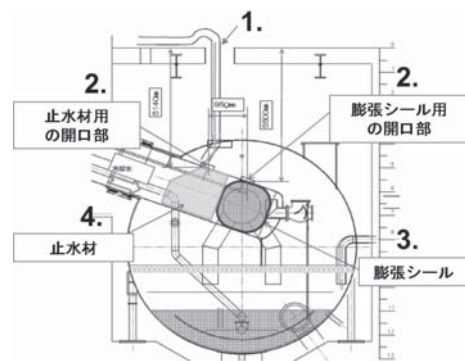
第4図 2号機PCV下部, S/C周辺の気中漏えい調査

(2) PCV 漏えい個所の特定(水中漏えい箇所)

トラス室及びS/C内に水が入っており、かつ漏えい量が多くないと推定される条件にあって、水中の漏えい箇所をどのように確認するかは課題である。現在、S/C下部を調査するロボット、水中を遊泳しながら調査するロボット、水中内床面を走行するロボットの開発が進められている(第5図)。トラス室水中壁面調査ロボットである水中遊泳ロボット⑤は、カメラ映像を見るオペレーターによって遠隔操作され、建屋ペネトレーションの損傷を調べる。床面走行ロボット⑥は、水中床面を走行し、離れた場所における漏えいを調べるために超音波を用いる。S/C下部調査ロボット⑦は、S/C外面、外部構造物及びペネトレーション配管における損傷を表面に吸着して調べる。



第5図 水中の漏えい箇所調査ロボット

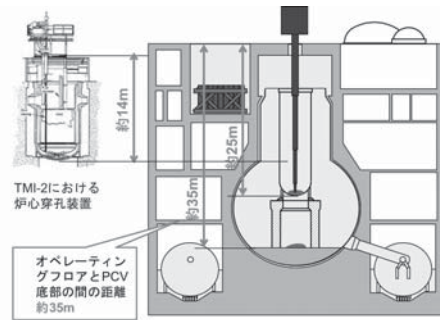


第6図 PCV下部の止水のための工法概念

(3) PCV 下部の補修(止水)概念

PCVの冠水に向けた漏えい箇所補修(止水)の工法として有力な案の一つは、ベント管内で止水をしてベント管より上に水を張る方式である。具体的には、ベント管端部にエアバックのような膨張シールを挿入し、膨らませてベント管に栓をした後、止水材(グラウト:流動性と水中不分離性能を併せ持ったモルタル状高強度遮水材)を注入して、閉塞・止水を行う。(第6図)

現場での作業工程としては、まず、R/B1階の床を穿孔して、ベント管にアクセスし、次に膨張シールをベント管端部で膨張させ、その後、グラウトを注入して止水



第7図 オペレーティングフロアとPCV底部の距離

する。現在、グラウトによるベント管部止水の基礎試験が進められている。

(4) PCVの内部調査

PCV内部調査は、PCVからの燃料デブリの取り出しに先立ってPCV内のデブリの位置・形状を調査するために実施される。現在、制御棒を交換するRPV下のエリアを使って、RPV底部やPCV下部を目視調査できる遠隔操作機器を開発中である。

2号機ではX-53と称する貫通孔から制御棒交換レーンを使ってPCV内部にアクセス可能である。一方、1号機では同一貫通孔付近の線量が非常に高いため、簡単には作業員がアクセスできない。そのため、X-100Bと称するX-53とは反対側に位置する貫通孔からアクセスする計画であるが、X-100Bは直径が10cmと、機器を挿入するには狭い。現在、カメラと線量計及びクロウを縦一列に配列して、貫通孔からPCV内に入った後にコの字型に変形して床面を走行するロボットを開発中である。

(5) RPVの内部調査

RPV内部調査は燃料デブリの取り出しに先立ってRPV内部の情報を得るために実施される。原子炉内のデブリ位置を調査するだけでなく、RPV内上部の構造物がどのような状態になっているか確認する必要がある。冠水法による燃料デブリ取り出しでは、まず、PCV、RPVの蓋を外し、炉上部にあるドライヤー、気水分離器等の機器を取り出した後、デブリを取り出す。そのため原子炉上部に設置された機器の状況や雰囲気線量などをまず確認する必要がある。

燃料デブリ位置については、過酷事故(SA: Severe Accident)解析コードにより炉心状態の推定が行われている。東京電力は、シビアアクシデント総合解析コードMAAP (Modular Accident Analysis Program) を用いて、また、JAEAは、シビアアクシデント進展解析コードMELCORで計算した結果、1号機では燃料のほとんどがPCV下部に落ちており、2号機、3号機では半分以上がPCVの下部に落ちているという推定となった。これらの解析精度を向上させるべく、種々の研究開発を実施しており、解析情報は経済協力開発機構(OECD)のプロジェクトと一緒に世界的安全研究者と共有し

ている。また、素粒子ミュオンによる原子炉内部の透視技術の適用性評価等を実施する計画がスタートしている。デブリサンプリングのための開発も進めている。

(6) 燃料デブリ取り出し

冠水工法を前提とした場合、燃料デブリ取り出し及びPCV/RPV内部調査において以下のような課題が考えられる。

- ・高い線量率(2号機 R/Bの最上階で最大毎時880mSv)
- ・複雑な炉内構造物や狭隘なPCV内空間
- ・複雑かつ多様なため漏えいを止めることが困難なPCVペネトレーション
- ・オペフロからPCV底部までの物理的距離(第7図)

現行ロードマップはTMI-2の対応をベースに考えられているが、TMI-2はオペフロから炉容器底部まで約14mである。一方、BWRの場合には、オペフロから原子炉底部まで約25m、PCV底部までは約35mである。しかも、燃料デブリは炉内の機器等を溶かし込んでいることから、TMI-2とは組成が異なっている可能性がある。燃料デブリ取り出しの機器開発を行う上で、硬さ、靱性、加工性、機械的特性、不均一性の把握が必要である。海外では、TMI-2やSA研究で実デブリ分析や模擬デブリ作製の実績があるものの、BWR(福島第一)とPWR(TMI-2)のデブリ成分系の差異や、福島第一原子力発電所特有の条件などから、既存の知見を直接活用することには限界がある。取り出し機器の開発のためには、①ウランU/ジルコニウムZr比率、②炉底部構造材(Fe/Ni)の混合、③コンクリートの混合(MCCI: Molten Core Concrete Interaction)生成物、④高温状態の持続時間などを考慮したデブリ特性を把握する必要がある。

4. さらなる研究開発のための 情報提供依頼の状況

IRIDでは、PCV/RPVの内部調査技術とPCV/RPVからの燃料デブリ取り出し技術に関して、国内外の英知を結集すべく情報提供依頼(RFI: Request for Information)を実施した。

トピックA: PCV/RPVの内部調査

A-1: PCV/RPV内部調査の代替工法の概念検討

A-2: PCV/RPV内部調査のために必要とされる技術

トピックB: PCV/RPVからの燃料デブリ取り出し

B-1: 燃料デブリ取り出し代替工法の概念検討

B-2: 燃料デブリ取り出しのために必要とされる技術

第2表に情報提供の状況をトピック別、国別の件数で示す。約200件近くの情報を頂いており、国別には日

第2表 国内外からの内部調査、燃料デブリ取り出しに関する情報提供の状況

RFIの募集分野	合計	国別内訳								
		日	米	英	独	仏	ベルギー	加	露	
PCV/RPV内部調査 トピックA	A-1：概念検討	33	20	7	3	-	2	-	1	-
	A-2：必要とされる技術	58	32	6	10	6	2	2	-	-
燃料デブリ取り出し トピックB	B-1：概念検討	43	23	8	3	2	5	-	1	1
	B-2：必要とされる技術	60	41	7	3	4	2	2	-	1
合計（情報件数）		194	116	28	19	12	11	4	2	2
合計（組織・機関数）*		95	61	13	8	4	4	1	2	2

本が半分以上、以降件数順で、米国、英国、ドイツ、フランス、ベルギー、カナダ、ロシアから種々の概念が提供された。原子炉内部の調査に関しては、直接見る技術とか、素粒子ミュオンにより間接的に内部を見る（透視）技術など、いろいろなアイデアが寄せられた。

燃料デブリの取り出し技術としては、冠水、部分冠水、気中で取り出す方法、取り出し方向も上部以外に、横から、下からなどの提案が出されている。デブリの切断では、反力の観点からレーザー技術を使った技術提案が多く見られた。

5. おわりに

廃炉を取り巻く現状は、従来経験したことのない複雑かつ困難な課題を内包しており、IRIDは、その解決のために国際的な協業により代替工法も含む多面的なアプローチの検討が必要であると認識している。燃料デブリ取り出しのためには、まずはデブリ位置を確認することが重要であり、また、どのように取り出すか手法の概念を検討する必要がある。このため、IRIDでは国際的な英知と経験を結集するために、PCV/RPV内部調査、及びPCV/RPVからの燃料デブリ取り出しについて国内

外からの情報提供を依頼した。現在、これらの技術の整理が行われており、今後選定のステップを経て、概念研究、実用化研究を進める予定である。

本件は、資源エネルギー庁の補助金事業「平成23年度発電用原子炉等事故対応関連技術開発補助金」及び「平成24年度発電用原子炉等事故対応関連技術開発補助金」にかかる成果の一部を取りまとめたものである。

著者紹介



鈴木 俊一（すずき・しゅんいち）
技術研究組合国際廃炉研究開発機構
（専門分野/関心分野）原子炉材料/廃炉技術一般

木下 博文（きのした・ひろふみ）
本誌, 56 [8], p.00 (2014)参照.

行則 茂（ゆきのり・しげる）
本誌, 56 [8], p.00 (2014)参照.

姉川 弘明（あねかわ・ひろあき）
本誌, 56 [8], p.00 (2014)参照.

放射性廃棄物処理・処分に関する研究の現状と課題

国際廃炉研究開発機構 宮本 泰明, 石川 真澄

福島第一原子力発電所の事故により発生した廃棄物は、炉心燃料に由来した放射性核種を含んでいること、津波や事故直後の炉心冷却に起因する海水成分を含む可能性があること、高線量であり処理・処分の実績がないゼオライトやスラッジを含むこと、汚染のレベルが多岐にわたりその物量も大きいこと等、従来の原子力発電所で発生する放射性廃棄物(操業廃棄物)と異なる特徴がある。これらの放射性廃棄物の処理・処分に関する安全性の見通しを得るため、従来の放射性廃棄物とは異なる点を把握したうえで、研究開発を実施している。

1. はじめに

事故で発生した放射性廃棄物の保管管理は福島第一サイトで行われていくものであるが、まず発生量の低減と適正な保管を行うための対策が進められている。事故及び事故炉の廃止措置に伴い発生する廃棄物は、廃炉シナリオに応じて廃止措置作業が変わることから発生量の想定が困難であり、並行して進められる廃止措置シナリオの検討状況を考慮した対応が必要である。

福島第一サイトで発生する放射性廃棄物の処理・処分に関しては、東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(以下、中長期ロードマップ)において全体概要が示されており(第1図)、判断ポイントとして、2017年までに「固体廃棄物の処理・処分に関する基本的な考え方の取りまとめ」を、2021年までに「固体廃棄物の処理・処分における安全性の見直し確認」を行うことが示されている。その後は、中長期ロードマップの第3期において、廃棄体仕様・製造方法の確定、廃棄体製造設備の設置及び処分の見直しを確認する計画である。一方、廃炉に関しては、2015年度までに廃止措置シナリオを立案し、第3期において、除染・機器解体工法の確定、廃棄物処分の見直し・必要な研究開発を終了する計画である。

2. 福島第一事故廃棄物の状況

(1) 事故廃棄物の特徴

通常運転における操業廃棄物は、管理された状態で発生するため、操業期間中の発生量はもとより今後の推移、個別の廃棄物中の含有放射能量や化学物質等の基本的な廃棄物性状に係わる情報が把握されている。また、未処理・処理済みの双方とも現行の規制に基づく保管管

理等が適切に行われており、処分方法や安全評価方法に加え、対応する規制・基準についても整備されている。

これに対して、事故廃棄物は、多くの汚染が事故によりコントロールできない状態で発生していること、汚染範囲が広く、高線量箇所もあるため、特に長半減期核種の組成等のデータが限定的であること等、非常に多くの不確実性がある。この不確実性を解消し、管理された状況に置くことが事故廃棄物に関する対策、技術開発の大きな課題である。

福島第一の事故によって発生した放射性廃棄物は、廃棄物の汚染形態によって、水素爆発により拡散した気体状核種に汚染されたもの、循環冷却水に燃料から溶出した核種に汚染されたもの、燃料デブリ及び燃料デブリが付着して汚染されたもの、の3種類に括ることができる。それぞれの代表的な廃棄物とその特徴は以下の通りである。また、これら3種類以外にそれぞれの汚染起源が複合したもの及び事故前の操業による汚染と複合したものがある。

① 瓦れき、伐採木等

原子炉建屋の爆発の際に揮発性の核種の拡散や飛散による表面汚染が主であり、一部が滞留水を通じた浸透汚染を受けており、物量が多く、広範囲に分布している。

② 汚染水処理2次廃棄物

放射性核種を含んだ汚染水を処理するゼオライト等の吸着材や、汚染水が流れた配管やタンク(貯槽)である。処理・処分実績が乏しく、原廃棄物の採取は困難であるが、装置の特徴に応じて発生量や核種量の一部推定が可能である。

③ 燃料デブリ/解体廃棄物

デブリそのもの、及びデブリで汚染されている炉心部分の解体廃棄物が相当する。高線量の物も多く、現状ではアクセスが難しい。

(2) 放射性廃棄物の発生状況

第2図に福島第一原子力発電所から発生する瓦れき、

The Current Status of and Research and Development Issues in Respect of Processing and Disposing of Radioactive Waste ;
Yasuaki MIYAMOTO, Masumi ISHIKAWA.

(2014年5月27日受理)

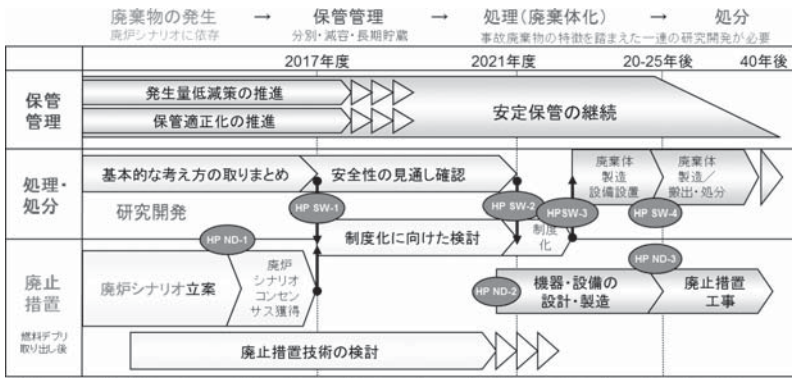
伐採木、水処理2次廃棄物の保管量の推移を示す。瓦れきは、原子炉建屋周辺に散逸した鉄筋コンクリート、残存建屋から撤去された鉄筋コンクリート及び原子炉建屋

周辺に散逸、残存建屋から撤去された金属類が主体である。伐採木は、有機物(セルロース)廃棄物であり、幹部分の線量は低く、枝葉部分はチップ化による減容が図られる。また、腐植が進行し、土壌との分別が困難になる可能性がある。

汚染水処理2次廃棄物は、セシウム吸着装置及び第二セシウム吸着装置の使用済ベッセル、除染装置の廃スラッジ、及び多核種除去設備の保管容器が主要な廃棄物となる。また、水循環に用いた配管等も廃棄物として発生しているが、物量としては瓦れき類に含まれている。

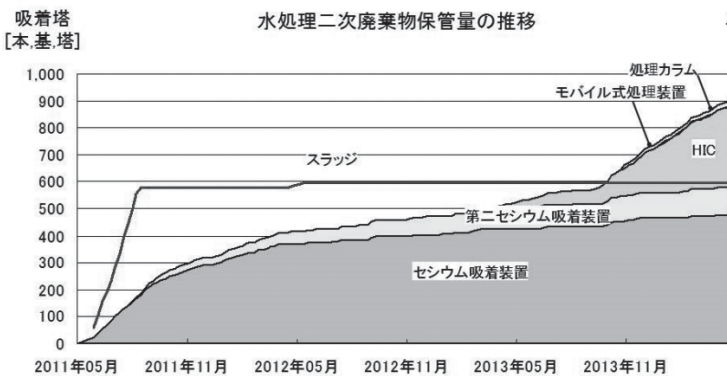
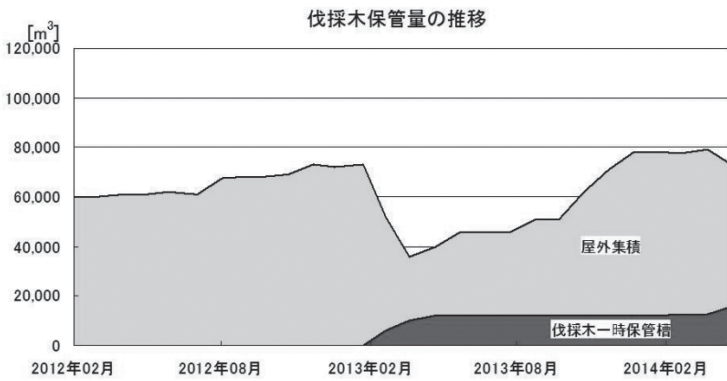
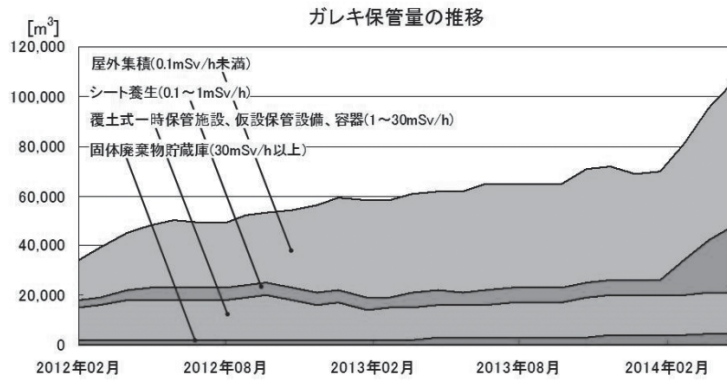
(3) 放射性廃棄物の一時保管の状況

第3図は瓦れきを保管する覆土式の一時保管施設の概要である。トレンチ内に瓦れきを配置し、覆土をしていく。第4図は伐採木の一時保管状況である。伐採した樹木は、幹と根・枝葉に分け、敷地内に場所を決め一時保管している。枝葉については、線量低減対策及び、伐採木の腐敗等に

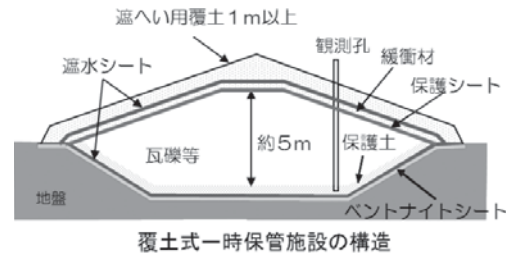


HP 次工程へ進む判断のポイント。追加に必要な研究開発や工程又は作業内容の見直しも含めて検討・判断する。

第1図 放射性廃棄物対策の全体概要



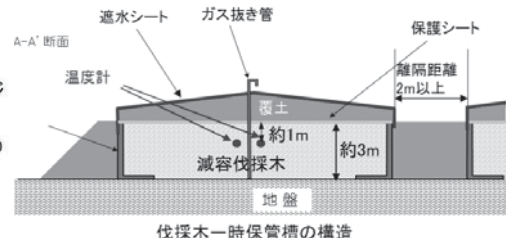
第2図 福島第一原発事故廃棄物保管量の推移



覆土式一時保管施設の構造



第3図 瓦れきの一時保管状況



伐採木一時保管槽の構造



第4図 伐採木の一時保管状況

よって熱が出て火災になるリスクへの対処として伐採木をチップ化して覆土式の一時保管槽に保管，定期的に温度管理を実施している。

多量な廃棄物が発生しているが，第1表に示すように，瓦れき類はただ廃棄物として保管するだけではなく，コンクリートくずは再生コンクリートとして活用，金属くずは溶融してインゴット化して減容，あるいは鋳造品へのリサイクルをすることも視野に入れている。伐採木については，幹の部分はほとんど汚染していないのでリサイクルが十分検討できると考えている。

3. 研究の現状と課題

放射性廃棄物の処理・処分にに関して，「性状把握」，「長期保管方策検討」，「廃棄物の処理に関する検討」，「廃棄物の処分に係る検討」の4つの観点から研究開発を行っている。特に「性状把握」と「廃棄物の処理に関する検討」及び「廃棄物の処分に係る検討」に関しては，研究開発成果を相互に活用しながらそれぞれの開発計画にフィードバックし最適化することが重要である。それぞれの研究項目の概要は第2表に示す通りである。

(1) 性状把握

汚染水，瓦れき・伐採木の放射能汚染核種を分析する。取得したデータを使ってインベントリーの評価，その手法を開発していく。なお，瓦れき，伐採木については現地でサンプリングし，JAEA 東海にて分析している。

事故後の¹³⁷Csの分布状況を推定した結果を第5図に示す。事故時に炉心部分の¹³⁷Csの初期インベントリーは 7.0×10^{17} Bqと推定され，このうち，約2%が大気放出，海洋放出等により環境中に放出されたと推定される。汚染水中に溶出した¹³⁷Csは約36%であり，そのほとんどがセシウム吸着装置等により吸着されている。原子炉内に残留している¹³⁷Csは約62%と推定されているが，炉内での存在場所及び存在形態は明確になっていない。

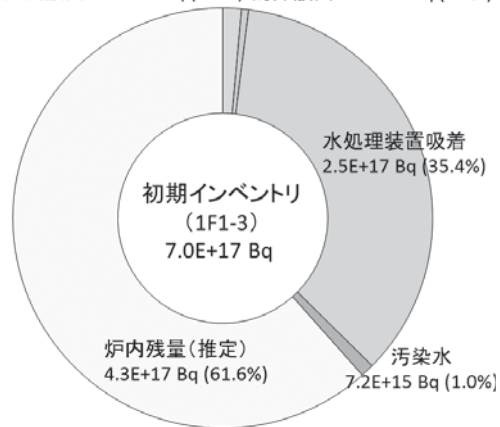
汚染水中の¹³⁷Csの濃度分析値の変化を第6図に示す。放射性核種の濃度は当初，冷却水の注入や地下水の流入

による希釈により単調な減少が期待されていたが，濃度の低下が緩やかになっていることがわかる。事故初期に

第2表 研究項目の概要

項目	実施内容
性状把握	<ul style="list-style-type: none"> 水処理二次廃棄物である廃吸着材・スラッジ等に関し，長期保管可能な方策検討や処理・処分技術の開発に必要な廃棄物の性状を把握する。 ガレキ，伐採木，土壌，解体工事に伴い発生する解体廃棄物等について，処理・処分技術開発に必要な放射性物質の付着状況等の性状を把握する。 分析方法が確立されていない処理・処分技術の検討に必要な難測定核種の分析技術の開発ならびにインベントリの評価手法を開発する。
長期保管方策検討	<ul style="list-style-type: none"> 水処理二次廃棄物は，処理・処分技術の確立まで安定に保管する必要があるため，水f発生，発熱及び腐食等，長期保管に向けた対策を検討する。
廃棄物の処理に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> 水処理二次廃棄物の長期保管方策の検討において，十分な保管性能が担保されないケースに対応し，廃棄体化に係る処理技術の基礎的検討を実施する。 既存の処理技術（廃棄体化技術）を調査し，その結果を基に廃棄体化のための技術開発を行い，廃棄体性能を評価する。
廃棄物の処分に係る検討	<ul style="list-style-type: none"> 性状把握及び廃棄物の処理に関する検討の成果を基に，既存の処分概念及び安全評価手法の適用性を確認し，処理・処分に必要な課題の抽出及び課題の解決策を検討する。 既存の処分概念や安全評価手法の適用が困難な廃棄物について，新たな処理・処分技術を検討する。
データベースの開発	<ul style="list-style-type: none"> 研究開発成果や情報を整理するためのデータベースを開発する。

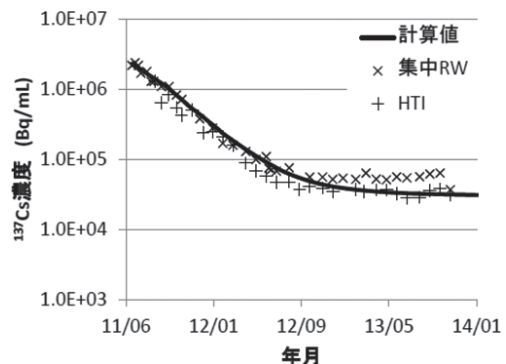
大気放出 1.0E+16 Bq (1.4%) 海洋放出 3.8E+15 Bq (0.5%)



第5図 ¹³⁷Csの分布状況の推定結果

第1表 減容処理とリサイクル方策案

廃棄物の種類	当面の処理	将来の計画
コンクリートくず	<ul style="list-style-type: none"> ・ 破碎により減容 ・ 並行して路盤材としてリサイクルできるものは積極的にリサイクル 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 再生コンクリートとしてのリサイクルも検討
金属くず	<ul style="list-style-type: none"> ・ 切断により減容 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 溶融・インゴット化による減容及び鋳造品へのリサイクルも検討
伐採木	<ul style="list-style-type: none"> ・ 表面線量率の低い幹は屋外での原型保管を続けながら焼却により減容 ・ 表面線量率の高い枝葉は遮蔽を目的とした覆土保管を続けながら焼却により減容 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ニーズがあればリサイクルも検討



第6図 汚染水中の¹³⁷Cs濃度の推移

第3表 主要核種の炉心部からの継続的移行率

	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	⁹⁰ Sr	¹²⁵ Sb	¹⁰⁶ Ru	⁶⁰ Co	⁵⁴ Mn
初期炉心インベントリ(Bq)	7.00E+17	7.20E+17	5.20E+17	4.20E+16	2.20E+18	9.40E+12	2.80E+14
初期濃度(Bq/ml)	2.40E+06	2.20E+06	1.60E+05	1.70E+02	2.30E+01	1.40E+02	5.20E+02
継続的移行率(Bq/d)	2.50E+13	2.60E+13	3.60E+13	1.30E+10	8.80E+09	1.40E+09	1.30E+09
半減期	30.04y	2.065y	28.74y	2.758Y	373.6Y	5.271y	312.1y

滞留水へ移行したものに加えて、継続的に流入する寄与を仮定したモデルを考え、継続的移行率を評価した。¹³⁷Cs以外の主要FPについても同様の評価を行った結果を第3表に示す。この結果から、炉内に残留した核分裂生成物(FP)が継続的に汚染水に溶出しており、¹³⁷Csの溶出量は、炉内に残留すると推定される量の約2%/年に相当することが分かった。

瓦れき・伐採木について、これまでに実施した57試料の汚染核種分析結果及び埋設処分におけるコンクリートピット濃度上限値の推奨値を第4表に示す。濃度上限値の推奨値は、処分場における受入濃度の上限を規定したのではなく、通常は、推奨値よりも2桁程度低い値が設定される。

検出下限値を超えて検出された核種は、 γ 線核種で⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, β 線核種で¹⁴C, ⁷⁹Se, ⁹⁰Sr, ⁹⁹Tcであった。 α 線核種については検出下限値未満であった。この中で特徴的なのが、¹³⁷Csによる汚染が支配的であることである。¹³⁷Csの放射能濃度は、⁹⁰Srに対して約2~3桁、検出下限値も含めてその他の核種に対して数桁以上高い。

汚染水処理により発生する廃ゼオライト、スラッジ等は高線量であり、直接放射能分析を行うことが困難であり、処理装置の前後の汚染水や処理水の放射能分析結果の差分から間接的な評価を実施している。セシウム吸着塔のインベントリ推定値は、セシウム吸着装置で約 4×10^{14} Bq/本、第二セシウム吸着装置で約 1×10^{15} Bq/本と推定され、コンクリートピット処分の濃度上限値の推定値と同レベルの値となっている。最終的に処理、処分をするときに安易に減容してしまうとピット処分の濃度上限値を超える濃度まで上がってしまう恐れがあり、処理処分方策を検討する際に考慮する必要がある。

また、廃棄物集中処理建屋及び高温焼却炉建屋から採

第4表 瓦れき・伐採木の放射能濃度分析結果

核種	放射能濃度(Bq/g)		
	瓦れき・伐採木	ピット処分濃度上限値の推奨値	
γ 核種	⁶⁰ Co	ND (<7E-02) ~ 5.6E+00	1.00E+10
	¹³⁷ Cs	2.0E+00 ~ 1.9E+05	1.00E+09
β 核種	¹⁴ C	ND (<5E-02) ~ 2.7E+00	1.00E+06
	⁶³ Ni	ND (<5E-02)	1.00E+07
	⁷⁹ Se	ND (<5E-02) ~ 2.1E-01	-
	⁹⁰ Sr	ND (<5E-02) ~ 1.0E+02	1.00E+07
α 核種	⁹⁹ Tc	ND (<5E-02) ~ 8.9E-02	1.00E+03
	²³⁸ Pu	ND (<5E-03)	1.00E+04 @Am-241
	²³⁹ Pu + ²⁴⁰ Pu	ND (<5E-03)	
	²⁴¹ Am	ND (<5E-03)	
²⁴⁴ Cm	ND (<5E-03)		

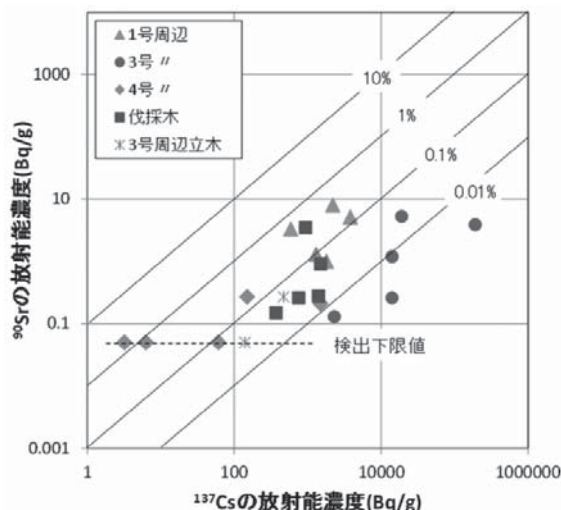
取した汚染水を分析したところ、微量のPuを検出した。²³⁸Puが 2.4×10^{-3} Bq/g, ²³⁹Pu+²⁴⁰Puが 8.3×10^{-4} Bq/gであった。これらは同位体組成から福島第一原子力発電所事故に由来するものと考えられるが、レベルとしては、過去の核実験によるフォールアウトに起因した環境中のPu濃度と同程度である。

瓦れき・伐採木の汚染における¹³⁷Csと⁹⁰Srの放射能濃度の関係を第7図に示す。瓦れき・伐採木の¹³⁷Cs/⁹⁰Sr比には比例関係の傾向がみられる。¹³⁷Cs/⁹⁰Sr比は、瓦れきと伐採木において、大きな差がなく、0.002~0.62%の範囲であった。現時点ではデータ数が少ないため、今後、データの蓄積を継続して双方の相関の精度を向上する必要がある。チェルノブイリ事故で発生した廃棄物中の¹³⁷Cs/⁹⁰Sr比(約23%)は燃料中の組成に近い比であり、事故進展の違いが廃棄物中の¹³⁷Csと⁹⁰Srの比に反映されていると推定できる。

(2) 長期保管方策の検討

水処理2次廃棄物は、処理・処分技術の確立まで安定に保管する必要がある。このため、放射線分解による水素発生量の評価、発熱及び容器の腐食の評価等、長期保管に向けた課題点の検討を実施した。

Cs吸着装置のゼオライト吸着塔内での最高温度及び水素濃度の解析的評価を行った結果を第5表に示す。保管初期には残水により水出口管下部が閉塞し、空気の流れが遮断されることを想定し、廃ゼオライト吸着塔内の温度、水素分布を評価した。また、吸着塔内のセシウム濃度は均一ではなく上下方向に分布があることを考慮している。



第7図 瓦れき・伐採木の汚染におけるCs/Sr比

第5表 解析により求めた吸着塔内の最高温度及び水素濃度

Cs 吸着	水位	最高温度	水素濃度
618W 不均一吸着	24cm (水出口管下部が浸水)	261℃	≤ 1.8%
504W 均一吸着	同上	211℃	≤ 1.6%
同上	0cm	210℃	≤ 1.1%

吸着塔に水が残る場合、空気は上部プラグ等を通して排出される。Cs 吸着量が最大の場合(放射線源が最大となる)にも、水素濃度は爆発下限界(4%)以下に抑えられる。ゼオライト層温度も水素の自己着火温度(約560℃)以下と評価される。吸着塔に水がない場合には、水出口管から空気が流入し、上部のベントプラグ等から排出される体系となり、水素濃度は相対的に低くなる。

福島第一原発では、事故発生後に炉心冷却水として海水を用いたため汚染水も塩分を含んでいる。Cs を吸着したゼオライト吸着塔内には、使用後に真水での洗浄を行うものの塩分が残留するため、塩素イオンが共存し、放射線影響がある条件で腐食の進展を評価する必要がある。ゼオライト吸着塔の材質はSUS316Lであり、ステンレス鋼(SUS316L)の局部腐食(孔食・すきま腐食)のリスクを発生臨界電位と定常自然浸漬電位により評価した。

ゼオライトが共存しない溶液では、放射線照射で定常自然浸漬電位が上昇し、比較的低い塩素濃度において定常自然浸漬電位が発生臨界電位よりも大きくなるため局部腐食発生リスクが存在する。これは、放射線分解による H_2O_2 の生成が原因と考えられる。しかし、ゼオライトが共存する場合は、放射線照射においても定常自然浸漬電位の上昇が抑えられた。ゼオライトが共存する場合でも局部腐食発生リスクは存在するが、共存しない場合に比べてリスクが大幅に低下すると言える。今後の課題として、ゼオライト共存による局部腐食発生の低減作用の機構の解明、塔内の残水濃縮過程の検討、ゼオライトの保水性能の評価等の局部腐食に関する詳細なリスク評価を行う必要がある。

除染装置の運転により生じたスラッジを対象として廃スラッジ一時保管施設が整備されており、今後運用されることになっている。廃スラッジ一時保管施設貯槽内で海水成分とスラッジが共存することによる効果を考慮して、放射線による水素発生量及びスラッジの成分に含まれるフェロシアン化物からのシアン化水素の生成量を γ 線照射試験により評価した。また、貯槽内の温度解析を行い、フェロシアン化物の別分解の発生の有無を評価した。

水素の放射化学収率(G値)は、フェロシアン化物と海水成分の寄与により増加するが、最大でも純水の2倍以内であった。貯槽は換気されるため、貯槽内の水素濃度は爆発下限界(4%)に達しないと考えられる。また、10

年間保管相当の6MGyの照射試験において、気相中のシアン化水素は検出限度(5ppm)未満であることを確認した。

貯槽内の温度解析を行った結果、初期の温度上昇速度は約0.03℃/hであり、徐々に平衡状態へ移行し、約50日後に、外気温に対して+20℃で平衡になるとの評価を得た。外気温が40℃の場合、中心部温度は約60℃になるが、フェロシアン化物の分解温度(250~280℃)に比べて十分に低く、熱分解によりシアン化水素は発生しないと考えられる。

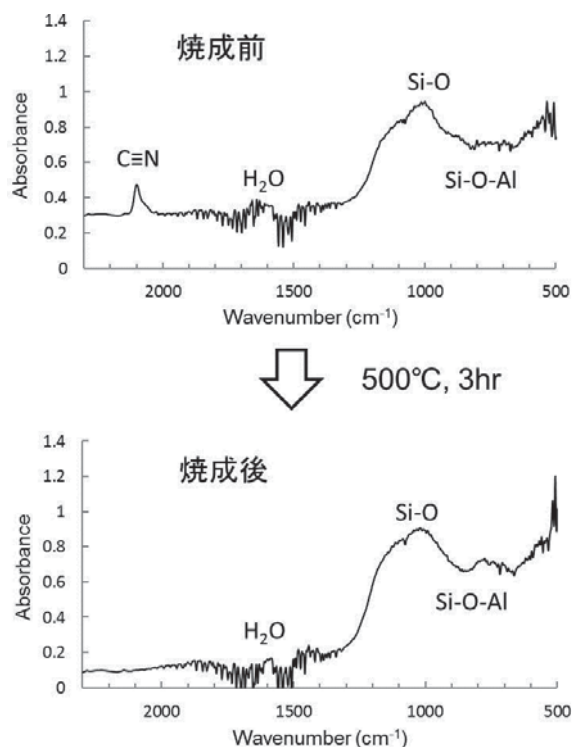
(3) 廃棄物の処理に関する検討

水処理廃棄物では、これまで扱ったことのない性状のものが発生しているため、安定的に保管していく処理技術の基礎的な検討に着目して進める必要がある。

水処理2次廃棄物に含まれるフェロシアン化物は、無害化、安定化が必要であるが、分解に伴い遊離するセシウムを固定化できる処理方法を検討する必要がある。スラッジの廃棄体化に関しては、シアンは無害化、セシウムの不溶化・不揮発化といった観点からジオポリマーを用いた処理方法に着目した。

ジオポリマーは、主にアルミニウムとケイ素で構成されるアモルファス状の無機系材料である。フィラー(フライアッシュ(FA)等)とアルカリ活性剤(水ガラス、水酸化ナトリウム等)を混練・養生することで作製する。

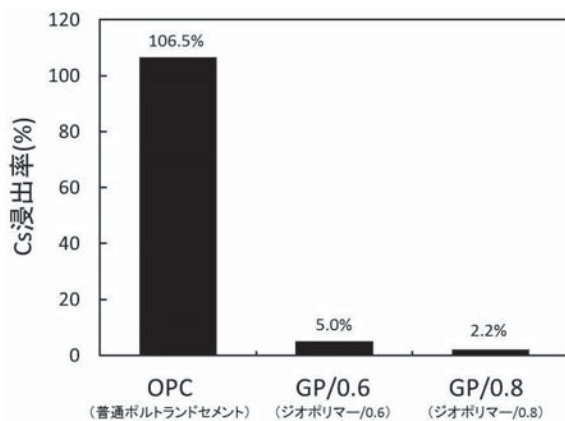
ジオポリマーを焼成する前後のFT-IR(フーリエ変換赤外分光法)分析結果を第8図に示す。500℃で3時間焼成した結果、フェロシアン化物(C≡N)はほぼ完全に分解していることが分かる。また、OPCとジオポリマー



第8図 ジオポリマー焼成前後のFT-IR分析結果

第6表 福島第一事故廃棄物に関する課題と対策

課題	可能性のある対策案		
	性状把握	処理・廃棄体化	処分
発生廃棄物量が大量	・廃止措置シナリオのオプション選択	・複雑形状(瓦れき等)除染技術 ・放射能高速測定技術 ・減容(有機物焼却、高温溶融等)技術	・処分場容積確保 ・廃棄体定置方法やレイアウト等の最適化による設置密度向上
インベントリ評価が十分にできない	・実測データ充実(現行手法) ・革新的核種分析手法開発 ・現行の核種分析技術の簡易化、自動化	・均一化(含む、ブレンディング)技術 ・高温溶融技術	・安全評価でのインベントリの幅を保守的に考慮した評価により安全性の確認
原廃棄物の種類や核種組成が従来廃棄物と異なる可能性	・同上	・高性能固化剤開発 ・特定物質の処理方法・技術(フェロシアン化物等)の確立	・同上
不純物や混合物等の従来廃棄物では想定していない物質の存在	・化学成分分析手法開発	・除染技術 ・分離技術	・安全評価のシナリオ、モデル、パラメータへのインパクトの検討(含む変更)と、それに伴う評価結果の変動を踏まえた安全性の確認 ・不純物や混合物の影響を抑制する処分システムの開発 ・影響プロセス等の現象論的理解等によるシナリオ、モデル、パラメータの改良・開発
廃棄物・処分区分のための規制がない	-	-	・対象とする廃棄物・廃棄体と区分毎の処分概念の適合性評価(処分場実現性、安全性)



第9図 焼成試料のセシウム浸出率

で作製した固化体を焼成した後の固化体からのCs浸出率を第9図に示す。OPC(普通ポルトランドセメント)においては、焼成によりフェロシアン化物が分解してしまうためにCsの吸着能力がなくなり、水に浸漬した際にはほぼ全量のCsが浸出してしまいが、ジオポリマーにおいては、ほとんど浸出しないことが分かる。この結果から、Csを吸着したフェロシアン化物の処理技術にジオポリマーを適用することは高い有用性を持つことが分かる。

(4) 処分にに関する検討

既存の処分概念が適用できるのか、安全評価手法が適用できるのかをまず確認する。適用できない部分に関しては、新たな解決策を検討する。性状把握及び廃棄物の処理に関する検討の成果を基に、既存の処分概念及び安

全評価手法の適用性を確認し、処理・処分に必要な課題の抽出及び課題の解決策を検討し、新たな処理・処分技術を検討する。

(5) データベースの開発

前記の研究開発によって得られた研究開発成果や情報を整理し、データベースを開発する。公開することを検討している。

5. おわりに

第6表に福島第一事故廃棄物に関する課題と対策を整理して示す。特に、性状把握が重要な研究課題になると考える。

本件は、資源エネルギー庁の委託事業「平成25年度発電用原子炉等廃炉・安全技術基盤整備事業」の成果の一部を取りまとめたものである。

著者紹介



宮本泰明(みやもと・やすあき)
研究技術組合 国際廃炉研究開発機構
(専門分野/関心分野)放射線廃棄物処理技術、放射能測定技術



石川真澄(いしかわ・ますみ)
研究技術組合 国際廃炉研究開発機構
(専門分野/関心分野)原子炉物理、中性子工学、放射線廃棄物処理・処分

日米原子力協定(1988年)の歴史と今後の課題

第1回 協定交渉の背景

元原子力委員会委員長代理 遠藤 哲也

1988年に発効した日米原子力協定は「包括事前同意」によって日本の原子力活動に事実上の自由を認めるものであったが、その締結交渉は非常に難航した。それまでの日本の原子力活動が個別同意制度によって規制されており、1974年のインドの核実験以降、世界の核不拡散体制が厳しくなるにつれ、“はしの上げ下げ”まで文句がつけられるようになった。特に、カーター政権下の米国は多国間ベースでも、二国間ベースでも厳しかった。1981年に発足したレーガン政権は、核不拡散の重視については党派を超えた政策であったが、前政権と違うのは、同盟国・友好国からの信頼を回復する点にあった。日本及びユーラトム諸国に対しては「包括同意方式」を導入するための新協定を提案するというもので、ここに日米協定改定交渉の動きが具体化してきた。

シリーズ解説の第1回は、協定交渉の背景を振り返る。第2回は、日米交渉の始まりと交渉上の問題点と協定の締結合意と発効までの経緯を紹介する。第3回は、協定の評価と今後の課題を記し、経験に基づく提言をまとめた。

I. はじめに

日米原子力協定は、日本が数多く結んでいる原子力協定のうちでも歴史的に最も古く、最も重要である。1950年代の初め、日本が最初に導入したのは英国のコールダー・ホール型の炭酸ガス冷却・黒鉛減速の原子炉であったが、その後は米国で開発された軽水炉(PWR, BWR)に切换え、燃料の濃縮ウランも圧倒的に米国からの調達に頼った。日本の原子力利用は良くも、悪くも米国とともに歩んで来た。

現行協定はとりあえず30年の有効期限をもつが、早いもので2018年7月には満期を迎える。その間、原子力を巡る国際情勢は大きく変化した。世界の原子力利用は、スリーマイル島事故(1979年)、チェルノブイリ事故(1986年)の後遺症からようやく立直り、その後は地球温暖化防止対策、新興国を中心とする経済発展とエネルギー需要の急増などが追い風となって原子力ルネサンスの兆しさえみられるようになった。ところが、2011年3月11日の東日本大震災のマグニチュード9の巨大地震と巨大津波は、福島第一原子力発電所を直撃し、

Historical Analysis of Japan-US Nuclear Cooperation Agreement (1988) and Issues toward Future (1); Preface Background of Negotiations : Tetsuya ENDO.

(2014年4月17日 受理)

INES7という大損害を引き起こした。この事故が国際的にも大きな影響を及ぼした(原子力に国境なし)が、日本では国論を二分し、日本の原子力活動は核燃料サイクルを含めて岐路に立たされている。

1974年のインドの核実験を契機に世界の原子力界に「疾風怒濤」の時が訪れた。1970年に発効したばかりのNPTは、大きく揺さぶられ、核不拡散体制を一層強化すべしとの声が湧き起こり、米国のカーター大統領がその先鋒であった。(米国)内に対しては、商業再処理、高速増殖炉の延期を求めるとともに、(米国)外に対しても新核不拡散法(1978年)を通じて厳しい核不拡散措置を要請して来た。日本に対しては、1977年に運用間近の東海再処理工場に待ったをかけ、日米間の大きな政治問題となった。

東海再処理交渉は、何とか乗り切ったが、これを契機に1968年の日米原子力協定改訂の動きが具体化して来た。改訂交渉は、文字通り波乱万丈、長くとれば10年、短くとも6年を要したマラソン交渉であった。だが、1988年7月17日に発効した現行協定は、包括事前同意を導入するという甚だ画期的なもので、日本の原子力活動は米国との関係で事実上自由に行えるようになり、日米原子力協定は空気の如くその存在はほとんど感じられないくらいである。

日本として、遠からず満期の来る日米原子力協定に如

何に対処すべきか。世界及び日本の原子力を取り巻く状況は大きく変わっているが、現行協定の交渉、締結の時の経験とそれから得られる教訓は今後の対処に何らかの参考になるのではないかと思う。筆者は、現行協定交渉のほぼ全期間に参加し、前半は日本代表団の次席、後半は首席代表を務めた。その個人的体験を踏まえつつ、交渉の概要、気付きの点、今後の課題などを振り返ってみることとしたい。

II. 二国間協定の必要性

1. 二国間原子力協定の意義

原子力関係の資機材や技術は、一般商品とは違って二国間の原子力協定に基づいて移動されることが多く、移動後にも供給国の規則(供給国の「国籍」)がついてまわる。なぜかという、軍事利用の防止、核不拡散の確保の観点から核兵器の不拡散に関する条約(Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, 略称:NPT)だけでは不十分、NPTは必要条件ではあっても十分条件ではないと見なされているからである。二国間原子力協定は、原子力分野での協定を促進するとともに、以上のような供給国側の「国籍」を通ずる規則を目的としており、日米協定もこの二つの要素から成り立っていて、後者に大きなウェイトがかかっている。

2. 原子力黎明期の日米協定の流れ

最初の日米原子力協定は、1955年に結ばれたが、これは米国から研究用原子炉と濃縮ウランの供与をうけるための「研究協定」であった。1958年には、協力の範囲を動力炉の分野まで広げる「原子力一般協定」が結ばれ、次いで1968年には商業用原子炉を対象とした「包括的な協定」が締結された。(1973年に一部改正)

III. 協定交渉の背景

1. インドの核実験と核不拡散体制強化の動き

協定交渉のそもそもの根源は、インドの核実験とそれに触発された世界的な核不拡散体制強化の動きである。

(1) インドの核実験の衝撃

1974年5月のインド西部ラジャスタン砂漠での地下核実験は、NPT体制に深刻な衝撃を与えた。インドは建国以来、原子力開発に積極的に取り組んで来たが、1961年中印国境紛争で中国軍に屈辱的な敗北を被ったこと、1964年には中国が核実験に成功し、NPTの下で核兵器国として公認されたことなどから、頑としてNPTには加盟せず核兵器開発へと舵を切ったものと思われる。しかしながら、このときのインドは核実験を平和目的のための核爆発(PNE: Peaceful Nuclear Explosion)と強弁し、対印経済協力を維持するために日本をはじめ関係諸国に説明にまわっていた。筆者は当時、外務省でインド亜大陸を所掌する南西アジア課長の

任にあり、インド代表団の応接にあたったが、誰もインド側の説明を額面通り受け取る者はいなかった。しかし、1998年の第2回目の核実験の際には、インドは平和目的との仮面を捨てて、軍事利用を公言するに至った。なお、印・パ対立の関係から、インドに続いてパキスタンが核開発に向うであろうことは、当時から予想されていた。案の定、パキスタンはインドに続いて核実験を行った。

(2) 核不拡散体制強化の動き

インドの1974年の核実験以降、核拡散防止に対する関心は急速に国際的なレベルで広まってゆき、多国間、二国間の動きとしてあるいは国の独自の政策として核不拡散体制強化の動きは当時の時代の潮流となっていた。

(a) ロンドン・ガイドラインの成立(多国間での動き)

多国間での動きとして注目されるのは、ロンドン・ガイドライン(現在のNSG(核供給国グループ)の前身である)の成立であった。インドの核実験を契機に、米国が日本をはじめ主要原子力国に対しウラン等核物質、原子炉など原子力資材の輸出に際しては核拡散の防止のために共通の輸出政策をとるための協議を呼びかけた。

この協議は当初、米、日、英、仏など先進7ヶ国が参加して発足したが、その後、ソ連等共産圏諸国も加わって15ヶ国となった。(NSGには2013年8月現在48ヶ国が参加している。在ウィーン日本政府代表部が事務局を務めている。)協議の結果、1977年に「ロンドン・ガイドライン」と称する共通輸出ガイドラインが作成され、1978年1月には参加国はこのガイドラインに沿った輸出規制策をとることをIAEAに通報した。ロンドン・ガイドラインは、ウランなど核物質や原子炉など原子力資材を非核兵器国に輸出するに当たっては、受領国から核拡散の防止のための約束を取り付けることを主な内容としている。

(b) 国際核燃料サイクル評価(International Nuclear Fuel Cycle Evaluation, 通称 INFCE)

インドの核実験を契機に、原子力の平和利用、特に核燃料サイクルと核拡散の防止は両立しうるか、そのためにはいかなる技術的方策があるかが国際的争点となった。カーター大統領は、就任早々の1977年4月に厳しい核不拡散政策を発表したが、その中で国際核燃料サイクル評価(INFCE)を提案した。次いで、同年5月ロンドンで開かれた先進7ヶ国サミットでこの問題をとりあげ、核燃料サイクルと核拡散の対立を調整するには、いきなり政府間交渉を始めるよりは、専門家によってこの問題の技術面、経済面を国際的に分析、検討し、評価するのが先決ではないかと提案し、サミットの支持を取り付けた。カーター大統領の意図は、このような作業を通じてカーター新政策の厳しさを国際的に納得させ、再処理や高速炉の建設を国際的に遅らせたいということに

あったのではないか。

カーター提案に基づいて「国際核燃料サイクル評価」(INFCE)は、1977年10月から開始された(ワシントンで設立総会)。INFCEは、具体的には核燃料サイクルに用いられる技術、機器、設備、材料、核燃料などが核兵器の製造に転用され得るものかどうかを調べ、この軍事転用を阻止するためにはいかなる手段が最善の方法として考えられるかを検討するものであった。

検証作業は、8つのテーマ、すなわち核燃料サイクルの特定の側面として、①核燃料及び重水の入手可能性、②濃縮役務の入手可能性、③核不拡散と両立する核燃料、重水及び役務の長期供給保証、④再処理、プルトニウムの取扱い、リサイクル、⑤高速増殖炉、⑥使用済燃料の管理、⑦廃棄物管理及び処分、⑧新型核燃料サイクル及び新型原子炉の概念をそれぞれ検討分野とする8つの作業部会に分かれて作業が行われた。日本は、自主的核燃料サイクルの確立を重視する立場から、英国とともにこの問題を直接に取り扱う第4作業部会の共同議長を務めた。

INFCEは、46ヶ国と5つの国際機関から成る大会議であり、500名以上の専門家が参加して、2年4ヶ月の月日を費やし、2万頁を超える莫大な作業文書を作成し、1980年2月に幕を閉じた。(ウィーンで最終総会。日本代表団の首席代表が総会議長を務めた。)

INFCEに示された米国の意図は、再処理を媒介しつつ軽水炉から高速炉へ向うというこれまでの米国の原子力政策に依存してきた各国の原子力開発に混乱を巻き起こし、特に米国の技術と戦略に全面的に依存してきた日本の原子力利用の基本路線を覆しかねないものであった。日本は比較的立場を同じくする西ドイツ(当時)、英国、フランスなどと協調しつつ、文字通り日本原子力界の総力を結集してINFCEの諸会合に対処した。

INFCEの検討結果は、原子力の平和利用と核不拡散の両立は可能というもので、日本としてはおおむね満足できるものであったが、他方、核燃料サイクルに対し、国際的に強い規制を希望していたカーター大統領にとってはおそらく意にそぐわないものであったろう。但し、INFCEの性格は、そもそも技術的、分析的検討であって外交交渉や各国政府への勧告というものではなかった。従って、その後の日本の原子力外交の焦点は、INFCEの結論を踏まえた二国間や多数国間交渉の場に移ってゆくことになった。それらの場において、INFCEの検討結果は、間接的ながら日本の立場をバックアップしてくれた。

INFCEは、「泰山鳴動して…」的なところはあったが、原子力に関する各国の相互理解を深め、今後の基本的な方向付けを行い、かつ核不拡散体制への国際世論を喚起したことなどの点で、一応の成果を残したと言えよう。

(c) 二国間の動き

二国間の動きとしては、米国、カナダ、オーストラリアなど供給国を中心とする二国間の原子力協定改定交渉の動きが注目された。米国については後に詳述するので、まずはカナダとオーストラリアについて触れる。

1974年5月のインドの核実験に使用されたプルトニウムが、インドがカナダから輸入した原子炉から生じたものであったことに衝撃を受けたカナダ政府は、自国の原子力関係資材の輸出について規制措置を強化する政策を表明し、諸外国との原子力協定を供給国の規制権を強化する方向で改正することとした。これを受けて、日加間でも協議が開始されたが、カナダは協議が意向どおりに進捗していないとの理由で、1977年1月、一方的にウランの対日供給を停止した(カナダはユーラトム諸国及びスイスに対しても同様の措置をとった。)。ちなみに、当時はウランは売り手市場であった。その後、日加間で交渉が続けられ、新しい協定に盛り込むべき諸原則について合意が成立し、1978年に新協定(正式名は改正議定書)が署名され、1980年に発効した。新協定では、これまでの協定で規定されていた核物質及び原子炉の移転に関する事前同意権に加えて、濃縮、再処理に関わる機微な技術の移転、ウランの高濃縮、プルトニウム及び高濃縮ウランの貯蔵の事前同意権が盛り込まれ、また適切な核物質防護措置の適用、平和目的核爆発の禁止などが新たに規定された。

オーストラリアは、世界有数のウラン埋蔵量を持つ国であるが、1977年5月に規制強化の核拡散防止策を打ち出し、旧原子力協定の改定交渉を行いたい旨を日本はじめ関係国に申し入れた。これをうけて、日豪間で交渉が行われ、1982年3月に新協定署名、同年8月に発効した。新協定には、天然ウランの供給以外にも、原子力の平和目的利用の詳細な規定、核物質等の防護措置の強化、INFCEの結論の反映、再処理についての規制などが新たに追加された。

2. 米国の核不拡散政策の強化

(1) カーター大統領の政策

米国の核不拡散政策というと、まずはカーター大統領(民主党)を思い浮べるが、政権によって濃淡の差はあるものの、実は核不拡散政策は米国の原子力政策の底流にあり、超党派的なところがある。共和党、民主党にかかわらず一皮むけばほぼ同じといったところがある。

インドの核実験を受けてフォード大統領(共和党)は1976年10月、カーターを相手にした大統領選挙戦の最中であつたが、核拡散防止の強化を目的とした次のような原子力政策を明らかにした。これはカーター大統領候補の原子力政策に対抗してか、選挙対策的なところもあつたように思われる。

- (1) 米国における再処理の商業化を遅らせること
- (2) 再処理及びウラン濃縮の技術と施設の輸出を最低

3年間は抑制するよう全ての国に対して働きかけること

(3) 再処理及びプルトニウムのリサイクルについて核拡散防止の見地から評価検討を行うこと。

なお、これらの政策は、一層強化された形で次のカーター大統領に引き継がれていった。

大統領に当選したカーターは就任早々 1977年4月に非常に厳しい核不拡散政策を大統領声明として発表した。カーター大統領の核不拡散政策の理論的根拠となったのが、同年3月に発表されたフォード・マイターレポート「Nuclear Policy: Issues and Challenge」であった。この報告書は、フォード財団の資金援助によって軍と密接な関係のあるシンクタンク Mitre Corporation が作成したもので、商業再処理、プルトニウムリサイクルの無期延期、高速増殖炉の商業化延期等を提案していた。カーター大統領声明の主要点は次の通りである。

- ①商業用再処理とプルトニウム・リサイクルの無期限延期
- ②高速増殖炉の開発計画変更と商業化延期
- ③内外の需要を満たすため、米国国内での濃縮ウランの増産
- ④濃縮、再処理の施設及び技術の輸出禁止
- ⑤国際核燃料サイクル評価の開催

なお、カーター大統領は記者会見で日本に関して大要次の通り発言した。

- ・すでに運転中の再処理施設を持っている(または、近く持とうとしている)日本、フランス、英国、西独といった国々に対しては米国の意向を強制しない。
- ・西独、日本等は、自身の再処理を推進し、継続してゆく完全な権利を有している。

ところが、この大統領の記者会見に対し、当時の米国の実務レベルの担当者と目されていたナイ国務次官補代理(現ハーバード大学教授)は当日、次のように補足発言をした。

「大統領は日本、西独に、再処理に関し完全な権利があるといったが、西独と異なり、日本との間には原子力協定があるので、日米双方の同意に基づく共同決定が必要である。」このことは、確かに日米原子力協定の存在を極めて事務的に指摘した発言ではあったが、(ちなみに米国・西独間には再処理の共同決定を規定するような二国間の原子力協定は存在しない)聞きようによっては日本の再処理を否定するような発言と受け止められ、日本国内で大問題となった。

このような米国の新原子力政策の発表と前後して、日米再処理交渉が行われることになった。なぜこのような交渉が行われるようになったかの背景について簡単に説明しておきたい。

(2) 東海再処理交渉等

日本は1950年代の原子力開発の黎明期から、すなわち原子力委員会が策定した1956年の第1回長期計画以降、核燃料サイクルを原子力政策の中核に置いており、濃縮、再処理の開発に取り組んで来た。ところが、日本最初の再処理施設である東海工場が完成し、いよいよ1977年7月から運転開始という段階になって、突然、米側から待たされたがかかった。カーター大統領になって、厳しい核不拡散政策適用の最初のテストケースとして、この東海再処理工場の運転問題がクローズ・アップしたのである。1968年日米協定改正議定書(1973年)の8条(C)(文末[参考]参照)による共同決定(joint determination)が出来ないというのであった。8条(C)によれば、米国产の核燃料(使用済燃料)を日本で再処理する際には日米両国による「共同決定」をしなければならないことになっている。それでは、何についての共同決定かということ、この再処理が果たして「効果的な保障措置」の下で行われるか否か、再処理にしても核の軍事転用が起こる心配がないか否かについてである。つまり、Safeguardableかどうかについての決定である。「共同決定」というと、肯定的な決定が行われることが前提になっているようだが、一方の国が異を唱えれば、片一方の国だけでは単独の決定はできないので、「共同決定」は事実上の拒否権として機能する。

日本側は最高首脳レベルにおいても反論に努めたが、これに対し米側は、日本のエネルギー事情や核不拡散に対する誠意は十分認識するとしながらも、一般論として使用済燃料からプルトニウムが単体で、つまり純粋な形で抽出されるような方法(単体抽出法での再処理)については、技術的にみて「効果的な保障措置」が適用されるとは言えないから、このような再処理は認めることはできない。日本だけに例外を認めると、他の国に対し拒否することができなくなる、どうしても再処理をしたいのならばプルトニウムとウランが混合した形で抽出される混合抽出法でやるべきだと米側が主張した。当時、福田首相は、米国の主張を評して、「ビールを作るつもりで作った機械からサイダーを作れといっているようなものだ」とコメントしたと伝えられるが、当時の日本側の雰囲気をよく現している。交渉は難航を極めたが、1977年9月に何とか期限・処理量の制限付で東海再処理工場の運転を可能とする日米共同決定に合意をみた。

この8条C項は「効果的な保障措置」が適用されるというもっぱら技術的な判断に基づくとされているが、現実には、NPT加盟国であり、核拡散防止に貢献するとともに、再処理の保障措置技術の改善に努力している日本にある工場だから再処理が認められるのだという優れて政治的な配慮が払われたのではないかとみる向きもある。

一言に言うと、カーターの核政策は、プルトニウムは

悪というものであり、プルトニウムの利用は平和目的であっても認めない、控え目に言っても厳しい制限を課すというものであった。

(3) 第三国移転に対する米国の規制—MB#10 問題

1968年の日米原子力協定の今一つの問題は、使用済燃料を再処理などの目的で第三国へ移転する場合に米国の同意が必要であるという点である。

具体的に言うと、日本の電力会社は(わが国以外でも、ユーラトムに属していないスイス、スウェーデンなど西欧諸国もそうであった)、使用済み燃料を再処理するために英国核燃料公社(BNFL)やフランス核燃料公社(COGEMA。現在 AREVA)に輸送するたびに事前にMB#10 (Material Balance#10)という書式を作成して米国政府(窓口はエネルギー省)に申請し許可をもらう必要があった。この書式は原子力発電所毎に、それぞれ何トンの使用済燃料を、いつ、どこに移転するか、その理由は何かなどを記載するもので非常に煩雑なものであった。しかも1件毎に米連邦議会の上下両院の了承を要するもので(議会の休会中を除き15日間議会からクレームがつかなければよい)、電力会社の役員(副社長クラス)が参考人として招致されることもあった。申請してから許可が得られるまで、最低でも2、3ヶ月、最悪の場合は6ヶ月以上もかかった。しかもその間、果して米側の許可が得られるのか、いつ得られるのか不明で電力会社の担当者はこの不確定要素のため配船も含め随分苦しい経験をさせられた。政府サイドでも、外務省、通産省、科技庁の担当者は対米折衝で苦勞した。

(4) 米国核不拡散法の成立

米行政府、具体的にはカーター大統領が厳しい核不拡散政策を打ち出したことは上述のとおりであるが、これに加えて、米議会でも核不拡散の強化を求める声が強まり、核不拡散に強い関心を持つグレン上院議員(民主党、元宇宙飛行士)等のイニシアティブにより、1978年3月、「1978年核不拡散法(NNPA: Nuclear Non-Proliferation Act)」が制定された。これは法律として現在も効力をもっている。NNPAは①米国からの原子力設備および核物質等の輸出に際して、諸外国に課すべき条件、規制の強化、②核燃料の供給保証政策の具体化の方針、③核不拡散強化のための国際的働きかけと、国際協力の実施という3つの柱から成っている。このうち②と③は米国の政策の表明であり、大統領の努力目標を示しているものであるが、問題は①である。①はこの輸出基準を満たすよう各国との原子力協定の内容を大幅に変更する、つまり米側の規制強化を要求して来ることを意味している。

この規制強化の一例として、例えば1968年日米原子力協定ではなら規定されていなかったウランの高濃縮(20%以上)について新たに事前同意が必要となる、あるいは再処理や管轄外移転の場合、事前同意権の対象が

「派生物」(例えば、米国から移転された原子炉において使用されたり、または生産された核物質等)にまで拡大される、核物質防護措置(PP)などが挙げられる。これは、日本に対して重大な波紋を投げかけるものであった。

3. レーガン政権の成立と原子力政策

インドの核実験をきっかけに、1970年代は原子力、特に核拡散を巡っての「激動の10年」であった。カーター政権の厳格な核不拡散政策、NNPAの成立、オーストラリア、カナダによる核不拡散体制強化の動き、多国間ベースではロンドン・ガイドラインの成立、INFCEなどが挙げられる。日本についても、東海再処理工場の運転開始が難航し、また商業用再処理施設計画の推進に大きな制約が課せられた。後者について言えば、東海再処理交渉に関する1977年9月の日米共同声明で、日本側は商業規模の再処理工場の建設については「主要な措置はとらない」ことを約束させられていた(ちなみに、この制約がなくなったのは、後述の1981年10月の日米共同声明においてであった)1970年代のカーター時代は原子力にとって悪夢であったというのはいい過ぎかもしれないが、いずれにしても、日本にとってはやりにくい時代であった。

1981年1月に成立したレーガン政権は、核不拡散は米国の安全保障と世界の平和の維持にとって重要であり、その努力は継続されるべしとするもので、この点は前述したとおり米国の政権にとって党派を超えた伝統的な政策であった。かつ、1978年に成立したNNPAは法律として厳然として存続しているのも、レーガン政権としてもその法律に縛られていた。しかし、レーガン政権が前政権と違うのは、原子力平和利用分野での協力において同盟国、友好国からの信頼を回復する点にあった。そのために、原子力資材の供給について手続きの迅速化及び簡便化をはかってゆくと同時に、供給の条件としては輸出先において適切な保障措置が適用されることを条件にすることを明確に打ち出したことを特徴としていた。

このような雰囲気の下でカーター政権の4年間、ケース・バイ・ケースの解決ないし一時的な解決に甘んじて来た日本としては、もうこのあたりで諸懸案を長期的かつ予見可能な形で一気に解決したいという気持ちが強くなって来た。レーガン政権が発足して早々にとられた新しい原子力政策は次のように要約される。

(1) 鈴木・レーガン日米首脳会談(1981年5月8日)

レーガン政権発足後に行われた日米首脳会談において、レーガン大統領は日本にとって再処理が特に重要であるとの鈴木総理の見解を支持し、両首脳は東海再処理工場の運転継続問題などの懸案事項の早急かつ恒久的な解決(a permanent solution at an early date)を図るた

めに協議を開始すべきことについて意見の一致をみた。

(2) 新核不拡散政策に関するレーガン大統領声明
発表(1981年7月16日)

(a) 核拡散の危険を減少させるため、核拡散の多様な側面を考慮して総合的なアプローチをとってゆく。

(b) 米国は適切な保障措置の下で原子力平和利用分野での協力において信頼性のあるパートナーになる。

(原子力協定に基づく輸出申請、承認申請を速やかに処理することなど)

(c) 進んだ原子力計画を有し、核拡散の危険がない諸国における再処理及びFBR開発を妨げない。

(3) 日米新共同決定および共同声明(1981年
10月30日)

上記日米首脳会談及びレーガン大統領の政策発表を踏まえて、7月から9月にかけて日米間で集中的に交渉を行った結果、次のような新たな共同決定及び共同声明が発表された。

(a) 1984年末までに「長期的取極め」を作成する。

(b) それまでの間、東海再処理施設のフル運転(210トン/年)が認められる。(註：東海再処理施設の運転期間、プルトニウム抽出量に関する共同決定は、1977年9月の最初の決定以来、細切れに5回延長され、その期限は1981年10月末となっていた。)

(c) 商業規模の再処理工場の建設(註：現在の六ヶ所村再処理工場のこと)についても「主要な措置はとらない」との従来の制約をなくする。(主要な措置とは例えば立地手続など)

この措置は、日本側が強く希望した文字通りの恒久的な解決そのものでなく、一定期間の暫定的な解決であったが、一足飛びに無期限の共同決定にならなかった理由としては、米国議会の核拡散に対する懸念が非常に強かったことや、再処理施設に対する保障措置技術への米側の不信感などがあげられるのではないと思われる。

(4) 米国対外原子力協力方針決定(1982年6月)

レーガン政権は、上記(2)の1981年7月発表の核不拡散政策の実施細目として、1982年6月に再処理、プルトニウム利用に関する方針を決定した。具体的には米国がNNPAの要請に従って原子力協定の改正により米国の規制権の拡大を行う際には、日本及びユーラトム諸国に対しては「包括同意方式」を導入するための取極めを新協定ないし改正協定の一部として提案するというものである。「包括同意方式」とは再処理の際の事前同意権など核物質等に関する規制権を個別のケース毎に行使するのではなく、あらかじめ一定の条件を定め、その枠内であれば再処理等の諸活動を一括して事前に承認し、一つ一つ個別に規制権を行使しないようにする方式で、プログラム方式とも言う。「包括同意方式」はINFCEの場で登場したもので、このINFCEがたどりついた結論は、「再処理、移転等の事前同意権は、供給国の恣意によって行

使されると消費国に重大な不都合を生ずるおそれがあるから、従来のようなケース・バイ・ケースでなく、長期間にわたり、予見可能な、つまり信頼性のある方法で行使されなければならない」というものであった。(INFCE最終総会記者会見議長ペーパー)

IV. 第1回の締めくくり

かくて、日米原子力協定改訂交渉が始まったものの、両国の利害がからみあい、交渉は難航を極めることとなる。米国の最大の関心は核不拡散体制を、日本に対して、世界に対して如何に守るかであり、特に米国議会の核不拡散強硬派に対して核不拡散政策を守ることであった。日米の信頼関係を踏まえたレーガン大統領の英断が協定成立の大きな決め手であった。

[参考] 1968年日米協定改正議定書(1973年)

第8条C

「アメリカ合衆国から受領した特殊核物質が再処理を必要とするとき、又は同国から受領した燃料資材を含む照射を受けた燃料要素が原子炉から取り出されてその形状若しくは内容が変更されるときは、その再処理又は変更は、第11条の規定が効果的に適用されるとの両当事国政府の共同の決定に基づいて日本国の施設において、または相互に合意するそのほかの施設において行うことができる。」

[参考] 1968年日米協定第10条A(3)項

「日本国政府又はその管轄の下にある認められた者に対しこの協定又は旧協定に基づいて移転された資材(設備及び装置を含む。)が前記の認められた者以外の者に対し、又は日本国政府の管轄の外に移転されないこと。ただし、合衆国委員会が、第三国又は国際機関への資材の移転がアメリカ合衆国とその国又は国際機関との間の協力のための協定の範囲内であると認めて、その移転に同意する場合は、この限りでない。」

— 参考資料 —

- 1) 本解説の記述は、「日米原子力協定(1988年)の成立経緯と今後の問題点(改訂版)」、平成26年1月、公益財団法人日本国際問題研究所」をもとに手を加えたものである。
- 2) 田宮茂文、80年代原子力開発の新戦略：ポスト INFCE の展開、電力新報社、p.267～290(1980)。

著者紹介

遠藤哲也(えんどう・てつや)

元原子力委員会委員長代理、元在ウィーン国際機関日本政府代表部大使、日本国際問題研究所特別研究員
(専門分野) 原子力問題、特に核不拡散問題、外交問題



カナダにおける放射性廃棄物管理

マクマスター大学 長崎 晋也

カナダでは、オンタリオ州で発生した中低レベル放射性廃棄物の処分場建設に対する原子力安全委員会の承認が間近である。国内で発生している使用済み燃料の最終処分についても 21 自治体からの関心表明が行われ、現在 NWMO (Nuclear Waste Management Organization) によりサイト選定のための評価が進められている。本解説では、カナダにおける放射性廃棄物管理の経緯をまとめた後、使用済み燃料の処分地選定プロセスの現状を紹介する。

I. 高レベル放射性廃棄物

カナダでは、高レベル放射性廃棄物とは使用済み燃料のことであり、used nuclear fuel と表現される。使用済み燃料については、人間生活圏からの適切な隔離の必要性が 1940 年代後半には認識され、その管理については原子力産業界の発展と歩調を合わせて研究開発が進められた¹⁾。とくに 1950 年代に入って原子力エネルギー開発が加速される中で、当時はウラン資源が豊富ではないと考えられていたこともあり、使用済み燃料の再処理ならびにリサイクルに関する研究も強化された。その中には、再処理で発生した廃棄物のガラス固化体の耐浸出性が良いかどうかフィールド実験で確かめるといったものもあった²⁾。しかし 1960 年代後半までにカナダにはウラン資源が豊富に存在することがわかると、再処理をしないワンスルーの核燃料サイクルと使用済み燃料の直接処分へと関心が移っていった³⁾。この直接処分は、時間スケールに応じて、中間貯蔵と長期管理に分けられる。

1. 中間貯蔵

CANDU 炉の使用済み燃料 (バンドルと呼ばれる燃料集合体は直径 10cm、長さ 50cm、ウラン重量 20kg 程度) は、原子炉から取り出された後、各発電所内のプールに保管され、数年の冷却期間の後、パッシブな空気冷却機能を有するコンクリートキャスクによる地上乾式貯蔵に回される。現時点で約 200 万本の使用済みバンドルが中間貯蔵されているが、その体積はサッカー場を選手の背の高さまで敷き詰める程度の量である。中間貯蔵される使用済み燃料は 2035 年までには約 400 万本になると予想されている⁴⁾。ちなみに、これらの使用済み燃料は、7 箇所の主要な原子力施設 (ホワイトシェル研究施

設 (マニトバ州)、チョークリバー研究施設、ブルース発電所、ピッカリング発電所、ダーリントン発電所 (以上オンタリオ州)、ジェンティリー発電所 (ケベック州)、ポアンルプロー発電所 (ニューブルンズウィック州)) から発生しており、オンタリオ州がその 90% を占めている。

2. 長期管理

カナダでも使用済み燃料の長期管理に関する研究開発は地層処分に焦点が当てられてきた。1975 年にカナダ原子力産業界はその目的を、「放射性物質を隔離し閉じ込めることで、将来世代に長期的なサーベイランスを必要とさせないこと。いかなるときも人と環境へのリスクが無視し得るものとする。深部地下にある低透水性の地層中への貯蔵により最低限のサーベイランスとメンテナンスによって環境からの究極的な隔離を実現すること」と定義している⁵⁾。1977 年に、エネルギー・鉱山・資源省の作業部会が、中間貯蔵は安全であると結論付け、花崗岩系地層中への使用済み燃料の処分が勧告された (主査の名前を取って、ヘア・レポートとして知られる)⁶⁾。

ヘア・レポートを受けて、1978 年にカナダ連邦政府とオンタリオ州政府は共同してカナダ核燃料廃棄物管理計画 (CNFWMP) を作成した。この計画により、現実にはカナダ原子力公社 (AECL) によってであるが、連邦政府が計画の実施と使用済み燃料の最終処分に関する技術開発についての責任を負うこと、オンタリオ州政府は電力会社であるオンタリオ・ハイドロ (現在は、オンタリオ・パワー・ジェネレーション (OPG)) に中間貯蔵と輸送に関する技術開発を進めさせる責任を負うことになった。同時に、エネルギー・鉱山・資源省 (現在は、天然資源省) 内のいくつかの部署と複数の国内の大学、コンサルタント会社も計画に参画することになった。そして 1981 年、連邦政府とオンタリオ州政府は、CNFWMP

Current Situation of Radioactive Waste Management in Canada : Shinya NAGASAKI.

(2014 年 5 月 26 日 受理)

を特定の処分場の決定を求めることなくジェネリックな計画に焦点を当てるように修正した。

1988年、CNFWMPに基づきAECLは使用済み燃料の長期管理に関する報告書を連邦政府に提出した⁷⁾。そして10年にわたる評価・検討の後、1998年3月に環境影響評価委員会(いわゆるシーボーン委員会)は、「深地層処分計画は技術的には安全であり、使用済み燃料は人間生活圏から安全に隔離されるが、カナダでは社会的にはまだ受容される状態には至っていない」との結論をまとめた報告書を連邦政府に対して提出した⁸⁾。報告書では同時に、処分事業のための独立した機関の創設と、処分事業プロセスに対してすべての住民が参加することの重要性も提言された。

2002年6月に制定された核燃料廃棄物法に基づき、同年11月にNWMOが設立され、カナダにおける使用済み燃料長期管理はNWMOによって遂行されることとなった。NWMOの活動は、天然資源省によって監督されているが、天然資源省は核燃料廃棄物局を設置し意思決定プロセスへの住民参加を促すということも行っている。

NWMOは核燃料廃棄物法に基づき、3年にわたる研究と対話を通して、カナディアンシールドでの深部地層処分、各発電所における地上管理、1箇所における集中管理についての検討を行い、2005年11月に「適応性のある段階的管理(Adaptive Phased Management: APM)」戦略を推奨するとする最終報告書を発表した⁹⁾。APMは1箇所での処分を想定した計画ではあるが、住民との対話を含む段階的なアプローチを前提とし、段階ごとに意思決定点を設け、将来の技術開発の進展や社会の意思の変化に従ってその長期的な戦略を柔軟に修正できるという特徴を有したものとなっている。APMは、2007年6月14日に、連邦政府によって正式に承認されることとなった。

II. 低レベル放射性廃棄物

カナダでは低レベル放射性廃棄物とは以下の2種類の廃棄物をいう。

1. 歴史的に残された廃棄物

1930年代のラジウムの製造など、過去の原子力産業活動で発生した放射性物質で汚染された土壌や残渣がこれに相当し、体積換算で今日、カナダに存在する低レベル放射性廃棄物の2/3以上を占めている(約150億m³)。これらの低レベル放射性廃棄物は、一般には中間貯蔵施設で保管中である。歴史廃棄物の管理は連邦政府がその責任を負うとされている。連邦政府による低レベル放射性廃棄物の管理は、天然資源省内の低レベル放射性廃棄物管理局(LLRWMO)によって行われているが、LLRWMOは現実的にはAECLによって運営されている。

2. 現在発生している廃棄物

原子力発電所や原子力研究施設などから発生している廃棄物で、全国で約60万m³存在する。この廃棄物に関しては、発生者がその管理についての責任を負うことになっている。OPGは、柏崎刈羽原子力発電所に次いで世界第2位の原子力発電容量を有するブルース原子力発電所があるキンカーディン町からの自発的な申し出に基づき、地下680mにオンタリオ州で発生した中低レベル放射性廃棄物処分場の建設を計画している。昨年秋、住民ヒアリングも行われ、今年の夏から秋にかけて建設に向けての許可が出されるものと思われる。

これらのほかに、ウラン鉱山から発生する鉱さいや尾鉱(選鉱でウランを採取した残りの低品位鉱物)、ウラン燃料加工施設からの廃棄物も低レベル放射性廃棄物に区分されるようになった。全国には2億トン以上の廃棄物が存在している。ウランを含有あるいはウランにより汚染された廃棄物管理については今後の課題となっている。

III. 中レベル放射性廃棄物

アルファ線核種や長半減期の放射性核種を含有する廃棄物で一般に数100年以上の隔離を要する廃棄物をいう。リファージメント(CANDU炉の寿命延長のための改修プログラム)¹⁰⁾で発生する廃棄物や原子炉で使用されるイオン交換樹脂、放射線治療で使用される放射線源などがこれに相当し、現在発生者責任のもと、発生施設で中間貯蔵されている。

IV. 使用済み燃料最終処分地選定プロセスの状況

APMは市民と専門家の対話を基盤として、浅地中での貯蔵というオプションも持ちながらの深部地層中での集中処分、継続的なモニタリング、再取り出し可能性の維持という技術面と、事業実現までの時間スケールと事業形態に柔軟性をもたせる、段階的で適用性のある意思決定、技術の進歩だけではなく、長い歴史と独自の文化を有する先住民のアボリジニの人々の知恵と価値観の取り込み、より知りたいという意味を持っている自治体に透明で公平なプロセスにより情報を提供する、事業の最終段階まで継続的に住民と社会とともに進むという管理面との融合と考えることができる。

使用済み燃料の処分候補地については、一昨年9月末に関心表明受付が締め切られた。結果として、原子力発電所立地自治体ではない22自治体から最終処分場への関心が表明された。1自治体は地質環境条件の評価が困難ということで表明後に撤回された。APMで示されるサイト選定プロセスは、9つのステップから構成され、第2ステップはスクリーニング、第3ステップは潜在的に適地があるかどうかの予備的評価となる。2014年4

月現在までに、6自治体については地質環境条件がNWMOが公開している第3ステップの基準を満たしていないので次のステップには進まないことが決定し、4自治体が第3ステップの基準を満たしていると判断され、10自治体が第3ステップの、1自治体が第2ステップの評価が実施されているところである¹¹⁾。

APM全体は60年以上かけて実施される。そして次の第4ステップはここ2年程度のうちに開始されると思われるが、対象自治体を1, 2箇所絞り込んで、自治体の同意と、周辺自治体ならびにアボリジニコミュニティの参加も得ながら5年程度をかけて詳細なサイト特性調査が行われることになっている。同意が得られない、あるいは処分地としての適地に関する基準を満たさない場合には、第3ステップ基準を満たした他自治体の中から選定をし直すことになる。ここで、2年、5年、60年という具体的な数字を挙げたが、この数字はあくまでNWMOが組織としての予算計画などのために設定している数字である。調査のための年数や自治体の意思決定などに要する時間などの最終決定はすべて、当該自治体が行うことになる。

V. カナダで処分地選定が進む理由

フィンランドやスウェーデンでは、国民の数が少ないこと、とくにスウェーデンでは脱原発と決めていたという社会状況もサイト選定が進んでいる理由にあるようではあるが、カナダは3,500万人強の国民をかかえ、アボリジニ、メティス、イヌイットなどの先住民の方々や数多くの移民の方々なども生活をする複雑な社会である。本解説の最後に、そのカナダでなぜ処分場選定プロセスが少なくとも現時点までは順調に進んでいるのかについての個人的な意見を述べたい。

1. 肅々と自分のやるべき仕事を責任と誇りを持ってこなす

NWMOの職員の多くは、工学、理学、社会学などの学位を持ったその分野のエキスパートである。努力をすれば骨は必ずNWMOに拾ってもらえる。OPGの顔を伺う必要もなく、電力業界での優先事項に左右もされない。また、たとえばアボリジニ社会との対話担当者と技術系研究者とは、互いに相手の仕事を完全には理解できなくても尊敬しあっている。技術系研究者の1人は、「なぜ21箇所も手が上がったかわからない」と言いつつも、NWMOの仕事に誇りを持って自身の仕事に邁進している。職員全員が自らの職責を果たしている、これに尽きるのではないか。決して、熟議民主主義的議論・手続きといった問題ではないだろう。

2. 急がない

住民対話やNWMOの活動の説明会などがカナダ全国で行われたが、地元紙に集会がある旨の広告は出しても、動員などはかけていない。その結果、誰も集会に来

ないこともあったようであるが、それもよしとするくらい気長に考えることが重要である。急がば回れであろう。

3. 相手を尊敬する

NWMOの職員は技術系も含めて全員がコミュニケーションの訓練を受けている。サイト選定について話をするときには、言葉を選んで話をしていることがわかる。最初は自己防衛、組織防衛のためだと感じていたが、あるときに相手の立場に沿った話し方をしようとしていることに気が付いた。先住民の方々は、部族ごとに異なった言語を使う。NWMOは関係する部族の言葉でコミュニケーションを取ることもしているし、その文化を尊敬している。10年以上昔、筆者が六ヶ所村の役場の近くの寿司屋で食事をしていたとき、役場の方々と思われる若い人たちが隣の席に来られたことがあった。残念ながら筆者の席の者は筆者を含めて皆、彼らが話している言葉がわからなかった。それでは決して地元には受け入れられない。

こう書いて、ヒラリー・クリントン前米国防務長官がリーダーシップについて語った言葉を思い出した¹²⁾。(1)リーダーシップとはチームスポーツである、(2)最良の決断は理念からではなく確固たる証拠に基づくべき、(3)現場に足を運ばずに成功はない、(4)大声を出すのではなく、地道な努力こそが最も重要、(5)仰々しい広報に頼らず進むべき道を着実に歩むこと。少なくともカナダでは、これと同じことが行われている。

— 参考資料 —

- 1) A.M. Aikin, AECL-158, (1954).
- 2) A.R. Bancroft, J.D. Gamble, AECL-718, (1958).
- 3) W.W. Morgan, *Nucl Technol.*, 24, 409 (1974).
- 4) NWMO, Annual Report 2012, (2012).
- 5) P.J. Dyne, AECL-5136, (1975).
- 6) F.K. Hare, *et al.*, Energy, Mines and Resources Canada Report EP77-6, (1977).
- 7) AECL, AECL-10711, (1994).
- 8) <http://www.ceaa-acee.gc.ca/default.asp?lang=En&n=0B83BD43-1>
- 9) NWMO, *Choosing a Way Forward*, (2005).
- 10) <http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/power-plants/index.cfm#RLE>
- 11) <http://www.nwmo.ca/>
- 12) <http://www.respectfulworkplace.com/2013/08/22/leadership-lessons-from-hilary-rodham-clinton/>

著者紹介

長崎晋也 (ながさき・しんや)

カナダ マクマスター大学

(専門分野/関心分野) 核燃料サイクル・放射性廃棄物処分システム工学/特にシステムの安全評価とアクチニド化学



解説

発電技検における 40 年の確性試験を顧みて 実用原子力発電所における補修技術への確性試験の役割

発電設備技術検査協会 佐藤 長光,
 原子力安全推進協会 亀山 雅司

確性試験は、昭和 49 (1974) 年から開始し、以来、新技術等の技術的妥当性を第三者として客観的に確認してきた。特に実用原子力発電所の規制対象設備への補修技術での新技術等が技術基準に適合するか技術的に判断するために重要な役割を果たしてきた。その後、確性試験は規制との関連はなくなったが、新技術等への技術的妥当性を確認するという役割を継続している。スムーズに実機適用可能な新技術等とするには開発の初期段階で純技術的な検討と合わせて許認可手続き時の技術基準適合性の説明性を見据えておくことが重要なポイントとなる。

新技術等については、規制、民間ともに安全のためという目的は同じである。したがって、新技術等の技術的妥当性が確認されれば、以降は、検討結果を規制機関に許認可を申請するバックデータとして活用する、依頼者自らの新技術等の妥当性の説明性を高めるために活用するなどが可能である。どのように活用するかは依頼者の選択となる。確性試験はそのスキームを提供しているのである。

なお、本解説は、発電技検の確性試験について¹⁾を基に、これまでの経緯等を加筆すると共に内容を拡充したものである。

I. はじめに

一般財団法人 発電設備技術検査協会 (以下、発電技検という) は、昭和 49 (1974) 年 1 月 11 日から確性試験を開始し、平成 26 (2014) 年 3 月 31 日までに 118 件の確性試験の依頼を受け、実施している。平成 25 (2013) 年は、開始後 40 年目の節目の年にあたる。

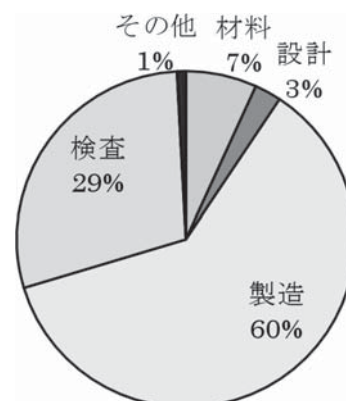
この「確性」とはどのような意味であるか、英語ではどのように表現すべきかとのお問い合わせを頂く場合がある。この言葉は、古くから他産業を含めて広く用いられており、我々には認知されているものの、詳細な国語辞典²⁾にも掲載されておらず、正確な日本語ではないようである。このため、英語でも正確には表しにくく、「KAKUSEI」とご回答している。

このような背景があり、発電技検における確性試験 (以下、確性試験という) は、「技術基準や規格等に記載されていない新たに開発された材料、設計、製造及び検査等に関する技術 (以下、新技術等という) の技術的妥当

性を第三者として客観的に確認すること」としている。

依頼のあった 118 件を技術分野の割合で分類したものを第 1 図に示す。多くは、製造と検査の技術分野で、両技術分野で約 90% を占めている。また、原子力に関する依頼が多く、全体の 92% を占めている。例として、現在実施中のものを第 1 表に、至近に終了したものを第 2 表に示す³⁾。

実用火力発電所の材料及び構造の技術基準は平成 9 (1997) 年に、実用発電所の溶接の技術基準は平成 12 (2000) 年に、実用原子力発電所の材料及び構造の技術基



第 1 図 技術分野の割合

The Recollection to KAKUSEI Examination of 40 Years in Japan Power Engineering and Inspection Corporation :
 Takemitsu SATO, Masashi KAMEYAMA.

(2014 年 5 月 14 日 受理)

第1表 現在実施中の確性試験

No.	件名(略号)
1	ライニングに関する水中乾式 TIG 溶接による当て板溶接工法確性試験(BTS)

第2表 至近に終了した確性試験

No.	件名(略号)《証明書発行日》	備考
1	再処理施設の配管等に関する接着材補修工法についての確性試験(ARR) 《平成26年2月18日》	報告書はHPで公開
2	再処理施設の配管等に対する当板・肉盛溶接補修工法に関する確性試験(BBR) 《平成25年11月21日》	報告書はHPで公開
3	小口径管台補修工法(テンパービード溶接)適用に関する確性試験(MTS) 《平成25年6月25日》	
4	原子炉容器炉内計装筒及び下部鏡補修溶接部への開口合成法による超音波探傷試験の適用に係る確性試験(MSU) 《平成25年6月14日》	
5	原子炉容器炉内計装筒及び下部鏡補修工法(テンパービード溶接)適用に関する確性試験(MTB) 《平成25年6月10日》	
6	高震度対応型(フリースタANDING方式)PWR使用済燃料ラックの確性試験(FSR) 《平成24年6月22日》	
7	BWRプラントの手動TIG溶接による封止溶接補修に関する確性試験(BERM) 《平成24年3月5日》	
8	ホウ酸水注入・差圧検出ノズル取付溶接部及びICMハウジング取付溶接部の封止溶接工法に関する確性試験(HER2) 《平成23年12月22日》	
9	原子炉容器炉内計装筒補修工法(封止溶接)適用に関する確性試験(MER) 《平成23年7月25日》	
10	高ニッケル合金溶接部の渦電流探傷試験法及び炉内外超音波探傷試験法に関する確性試験(HEU) 《平成23年1月20日》	
11	補修IHHSIの適用性に関する確性試験(RIHSI)《平成22年8月9日》	
12	水中レーザによるテンパービード溶接及びクラッド溶接適用に関する確性試験(TCW) 《平成22年7月8日》	

準は平成17(2005)年に性能規定化され、技術的妥当性の説明性の自由度が増した。しかし、自由度は説明性とトレードオフの関係にある。スムーズに実機適用可能な新技術等とするには、開発の初期段階で純技術的な検討と合わせて許認可申請時の技術基準適合の説明性を見据えておくことが重要なポイントとなる。

本解説では、これらの状況を踏まえつつ、確性試験の経緯、規制との関連、実施体制、技術的妥当性の説明性、実施の意義、手続き及び効率的に進めるための視点

について概説する。

なお、本解説は、発電技検の確性試験について¹⁾を基に、経緯、実施体制を加筆すると共に内容を拡充したものである。

II. 確性試験の経緯

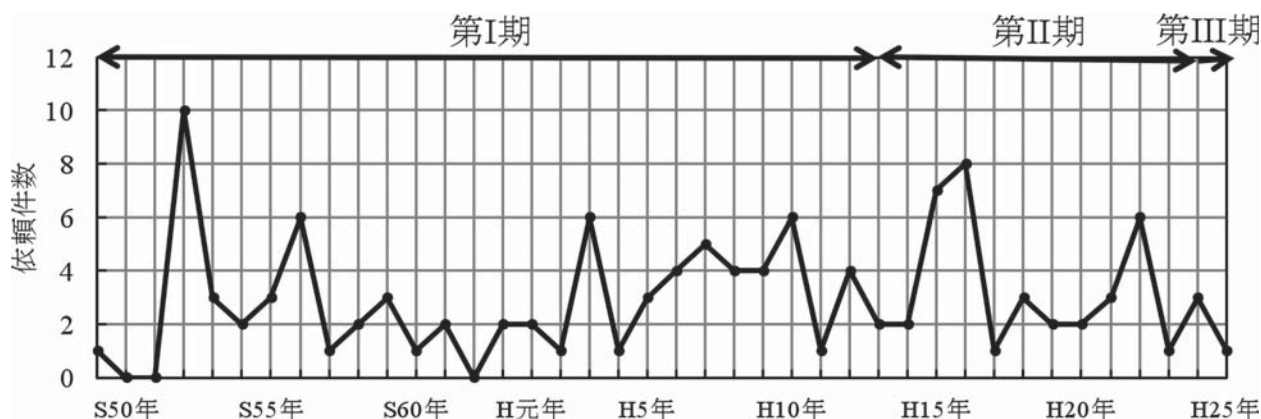
確性試験は、火力及び原子力の実用発電所への特殊設計認可申請の内容が技術的に妥当か否かを検討するために開始された。その後、当時の規制機関の行政指導により実用原子力発電所での定期検査で用いられる検査機器等(データ処理装置を含む)が規格等の試験条件を満足しているかを確認(以下、検査機器確認という)することが追加された。このように当時は規制の一部として実施されていた⁴⁾。この期間は第I期とも呼べるもので、昭和49(1974)年から平成12(2000)年の27年間である。

平成13(2001)年には規制機関として原子力安全・保安院(以下、NISAという)が設立され、設立当時は新技術等についてNISAが技術的に妥当かを判断するとしていた。したがって、それまでの確性試験の仕組みはその役割を終えたものと考えられた。しかし、NISAが要求する新技術等の法令適用事前確認手続きに対応するため、確性試験は主にこの申請の内容が技術的に妥当かを検討することに活用されることになった。法令適用事前確認手続きは、一般にノーアクションレターと言い、平成13(2001)年3月27日に閣議決定された、民間企業等が実現しようとする自己の事業活動に係る具体的行為に関して、当該行為が特定の法令の規定の適用対象となるかどうかを、あらかじめ当該規定を所管する行政機関に確認し、その機関が回答を行う手続きを言う。この期間はいわば第II期であり、平成13(2001)年から平成23(2011)年の11年間である。

平成24(2012)年には原子力の規制機関として原子力規制委員会(以下、NRAという)が設立され、新安全基準等の新たな規制が施行されているが、その内容の詳細は明確でなく、NRAの新技術等への取り組みの方針や技術的能力も明らかではない。この2年間を仮に第III期とする。なお、同年には、火力の規制機関として経済産業省内に商務流通保安グループ電力安全課も設立されている。

全体を振り返り、昭和49(1974)年から平成25(2013)年の年別の確性試験の依頼件数を各期と共に第2図に示す。昭和52(1977)年は沸騰水型原子力発電所の再循環配管の応力腐食割れへの予防保全としての溶接残留応力改善工法等について確性試験のニーズが多かったため、件数が多くなっている。以降、新技術等の開発に応じて依頼がされている。1件の依頼もなかった年もあるが、平均すると約3件/年の依頼があったことになる。

上述のように、確性試験の開始が実用発電所に適用される新技術等の技術的な検討であり、かつ規制の一部と



第2図 年別の確性試験依頼件数

して実施され、その期間が長かった。そのため、確性試験は現在でも規制との関連があるように捉えられかねないが、平成13(2001)年のNISA設立とほぼ同時に規制との関連はなくなっている。

新技術等に対する技術的妥当性を第三者として客観的に確認するため、依頼内容も供用期間中に適用されるものが多い。当初の依頼内容は予防保全がほとんどであったが、平成15(2003)年頃から欠陥を残存させた上での事後保全についての依頼もあり、技術的な難易度も高まっている。

確性試験の多くは、実用原子力発電所の補修技術に関する依頼が多い。その成果の多くは、一般社団法人日本機械学会(以下、JSMEという)が発行している発電用原子力設備規格 維持規格(以下、維持規格という)の補修章への規定として反映されている。

Ⅲ. 確性試験と規制との関連

以上で述べたように、確性試験は、昭和49(1974)年から開始され、以来、新技術等の技術的妥当性を第三者として客観的に確認してきた。特に実用原子力発電所の規制対象設備への新技術等が技術基準に適合するか技術的に判断するために重要な役割を果たしてきた。

かつての技術基準は具体的な適合内容を告示等で詳細に規定しており、これに記載のないものは工事の都度、特殊設計認可により告示等に相当する内容を定める必要があった。これは、慣例法の代表である米国機械学会の規格(以下、ASME規格という)を参照して制定された技術基準にあっては、当然のシステムであった。米国ではASME規格のCode Caseとして新技術等について規定し、規制機関がこれを是認するシステムであるのに対し、国内では規制機関が直接特殊設計認可により新技術等を詳細に規定するというシステムの手続きに相違があった。

技術基準が性能規定化された後は、かつての告示等のように詳細に規定されていなくとも、性能規定化された技術基準に適合していれば、特殊設計認可によらない許

認可申請がシステム上は可能となった。例として、実用原子力発電所に適用する材料と構造を詳細に規定した告示第501号は廃止され、民間規格としてJSMEが発行する発電用原子力設備規格 設計建設規格や維持規格等を規制機関により技術基準に適合することが是認されるシステムとなっている。これにより、一見、許認可申請の敷居が下がったかのように思えた。

性能規定では、技術基準が要求する性能を満たすための具体的な手段は制限されていない。また、申請者はそもそも性能を満たしていない技術を採用して許認可申請を行おうとは考えないから、当然、自分自身が提案する新技術等は技術基準を満たしていると考えている。そのため、技術基準に適合していることは、以前より容易に説明可能と考えられたのである。その結果、民間でも確性試験はその役割を終えたかのようにも考えられた。

確性試験は、その開始の経緯から、規制との関連が重視されてきた。しかし、新技術等の技術的妥当性については、規制や民間の区別は意味のないものである。このため、新技術等の技術的妥当性が確認されれば、以降は、手続きとして規制機関に許認可を申請するバックデータとして活用するか、依頼者自ら新技術等の妥当性の説明性を高めるために活用するかなど、検討結果をどのように活用するかは依頼者の選択となる。発電技検では確性試験においてそのスキームを提供しているのである。

Ⅳ. 確性試験の実施体制

確性試験は、依頼毎に検討内容に応じた専門分野の学識経験者等の委員により構成される確性試験委員会(以下、委員会という)を設置し、この委員会で新技術等の技術的妥当性を第三者として客観的に確認している(検査機器確認は除く)。依頼者のノウハウやプラント情報を含んで検討する必要があるため、通常は非公開で開催される。ただし、一般公開していないという意味での非公開であり、委員の他にも関係者がオブザーバとして委員会に参加している。規制に関連する新技術等の技術的

妥当性を確認する場合は、オブザーバの一人として規制機関の職員も委員会に参加している。オブザーバは委員会で意見を述べることができ、状況に応じて委員会の検討に反映されている。

委員会で最終的に取りまとめる報告書は、委員会での検討結果をまとめる性格のものであるため委員及びオブザーバのみに配布される。報告書は委員会の設置者である発電技検名で発行されるが、著作権は依頼者が有している。

近年の時代の要請もあり、委員会の開催状況は発電技検ホームページ(以下、HPという)で一般公開するようにしており、委員会の検討結果から依頼者のノウハウやプラント情報のみを除いてまとめた報告書も依頼者の了解後、HPで一般公開することにより、プロセスの改善に努めている。

確性試験は、委員会を組織するため、ある程度の検討期間が必要となり、少なからず費用が発生する。このため、機動性が発揮しにくいという短所がある。これを改善するため、委員会を組織しない「第三者評価」というスキームも準備している。

V. 技術的妥当性の説明性

前述のように、許認可の申請者は自らの技術が当然のごとく技術基準に合致していると考えている。しかし、それは申請者の視点で考えていることであって、外部に対しても具体的に客観的に技術基準に合致していることを説明できなければならない。

技術基準が性能規定化されたことにより説明手段の自由度は増している。しかし、前例にとらわれずに自由に記載すれば、受け取り手にはその考え方の妥当性を理解することが難しくなる。すなわち、自由な記載は説明性の良さとトレードオフの関係にある。

性能規定化の下では両者のバランスの取り方が、許認可を得るまでの労力と時間に影響を与えやすくなったのである。

以上を考慮すると、申請者は説明の自由度と説明性について、技術の開発段階から実機適用段階までを視野にいれ、試験の内容を組み立てることが重要になる。既に認められている規格や前例のある技術との差分で説明するのか、全くオリジナルの説明をするのかにより、説明に必要となるデータ、すなわち試験で採取するデータの質も量も異なるからである。

また、技術開発によって得られる効果に対して、労力や時間が見合ったものであるかという視点もある。従来技術を少し拡張する程度であれば、既に認められている規格や前例のある技術との差分で説明する方法は労力が少なくてよい。逆に、従来技術から大幅に拡張するのであれば、前例と異なる方法で労力と時間をかけて説明することが望ましい場合もある。

一般に、新技術等は従来技術の延長に立つものが多い。例えば、溶接技術の適用範囲について、より低入熱や高速度の範囲まで拡大する技術開発の場合は「機械強度や金属組織など、従来の確認項目を比較したところ相違がなく」などの説明が理解してもらいやすい。検討の主題はデータが許容値を満たしているかどうかである。一方、「外観上不具合がなければ溶接の健全性として問題がない。そこで、社内で取得したデータでは……」といった説明を採用すると、「外観上不具合がなければ溶接の健全性として問題がない」という考え方自体が溶接の健全性の判断として妥当なのか、という議論が最初に必要になる。

もし仮に、こういった視点なしに技術的検討が進み、検討が終了してしまうと、許認可申請の段階になって「外観上不具合がなければ溶接の健全性として問題がない」という説明の妥当性を検討することになる。もし、既に終了した試験内容に、後から理由を付与するには多大な労力と時間を、場合によっては後戻りを要する。

この例は例外的なものではない。実際にありがちな例である。

新技術等を開発してもなかなか実用化に至らないのは、規制が必要以上に厳しいからとの意見を時折耳にすることがあるが、開発者側に説明性という視点が足りないことが原因と感じられる場合もあるように思われる。

VI. 確性試験実施の意義

規制機関でない発電技検における確性試験で技術的妥当性を確認する意義は何か。確性試験は発電技検以外の組織でも実施可能であるし、実施された例もある。確性試験という名称も発電技検に独占されたものではない。

確性試験は自主的に実施するものであり、確性試験で技術的妥当性が確認されたものに発行される証明書も、あくまでもその査証を示すものであって許認可のお墨付きを与えるものではない。これはかつて確性試験が不要と考えられた理由である。

しかし、発電技検はこれまで長年にわたって許認可に関連した技術に関わってきた。規制権限は持たないとはいえ、その技術検討の背景を共有していることから、技術基準適合に対して上述のような説明性のよい考え方ができるという特徴がある。これは発電技検の確性試験ならではの付加価値と言える。

加えて、事務局を構成する発電技検職員は、国内外での規格委員会において規格の作成・改正を通じて説明性や規格としての必要要件について理解しており、委員会での検討に際してサポートを行うことができる。また、職員は、発電所の溶接検査等を通じて機器や現場環境等についても理解しており、これらも、サポート要素となっている。ただし、委員会での意思決定について、事務局は関与せず、委員の合議により最終判断がなされ

る。

確性試験の検討結果をまとめた報告書には、実機での施工を考慮した要領をまとめることとしている。実機適用までを想定した検討がなされる点についても、発電技検における確性試験ならではの付加価値と言える。

また、事務局としては、40年にわたる確性試験の実施経験に基づいた、次の基本方針を代々引き継いでおり、これも特徴の一つと言える。基本方針はごく当たり前の内容ではあるが、常に身を持って実行することはいかなかなか容易なことではない。

- (1) 新技術等の実機への施工によって、施工前の状態に悪影響を与えない。
- (2) 委員会での説明には、まず戦略を構築し、委員会の検討で承認を得たいものを明確にする。
- (3) 委員会での検討範囲や対象を明確にする。
- (4) マイナス要素となる試験データや事象があった場合、委員会には正直に、かつ積極的に提示し、委員会の判断を仰ぐ。
- (5) 委員との信頼関係を構築するように常に心がける。

VII. 確性試験の手続き

確性試験の主な技術分野は、材料、設計、製造及び検査であるが、これらに限定されるものではなく、その他の技術分野でも依頼は可能である。依頼者はHPに掲載されている書式で確性試験を依頼する。発電技検は、確性試験の依頼毎に検討内容に応じた専門分野の委員による委員会を設置し、委員会を開催する。

委員会の開催回数は順調に進捗すれば4回程度であり、おおむね次のように検討され、終了となる。

- 第1回 全体計画とデータ取得計画の検討
- 第2回 採取されたデータを用いた技術的妥当性の検討
- 第3回 実機条件での試験結果の検討
なお、試験結果や試験の実施状況を実際に確認するため委員会を現地で開催することも多い。
- 第4回 報告書の審議を含んだまとめ

ただし、データの採取遅れ、委員会コメントの対応状況によっては、委員会の開催回数の追加を余儀なくされることがある。

検討が完了すると委員会の委員長から終了報告がなされ、発電技検は依頼者に証明書を発行する。

なお、上述の委員会を組織しない「第三者評価」というスキームでは、関連業務経験者等による依頼内容に対する評価を行うものであり、専門分野の委員による委員会を設置し、委員会の審議により検討はしない点のみが異なっている。この関連業務経験者等については、発電技検職員から選定することになる。

VIII. 確性試験を効率的に進めるための視点

性能規定を満足する技術的選択肢は沢山ある。正解は一つだけではない。依頼者は、一定の技術水準が確保されていれば、技術以外の事情を考慮しても構わないので、何を優先するのか積極的に全体の進行の基礎となるニーズを明確にすることが望ましい。例えば、早期の実機適用を優先したいというニーズや、将来の拡張性に重点を置きたいというニーズなどが考えられる。

委員会のコメント対応等の検討をしているとニーズとは異なる、部分的に魅力的な選択肢が目移りすることがある。そうすると論理の一貫性を失い、議論が発散し、収束がつきにくくなる傾向にある。優先事項を求心力にして論理の一貫性を維持することが、結局は議論終結の近道になる場合が多い。

次に具体的な確性試験計画を策定する。試験データは技術的妥当性を説明するためのものであるから、確性試験で実験等により取得してもよいし、過去の試験結果や文献を引用することでもよい。

一方、「過去に類似の確性試験で同じ試験を実施した」という理由で新たにデータを採取しても、技術的妥当性の根拠にはならないことに留意したい。データ採取は目的に応じて実施される「行為」であって、目的が示されていないければ、技術的な意味をなさないのである。

IX. おわりに

確性試験は、昭和49(1974)年から開始し、以来、新技術等の技術的妥当性を第三者として客観的に確認してきた。特に実用原子力発電所の規制対象設備への新技術等が技術基準に適合するか技術的に判断するために重要な役割を果たしてきた。

その後、確性試験は規制との関連はなくなったが、新技術等への技術的妥当性を確認するという役割を継続してきた。

スムーズに実機適用可能な新技術等とするには開発の初期段階で純技術的な検討と合わせて許認可手続き時の技術基準適合性の説明性を見据えておくことが重要なポイントとなる。

発電技検の確性試験は長年にわたって許認可に関連した技術に関わってきたことから、性能規定化された技術基準の下でも説明性のよい考え方ができるという特徴がある。

確性試験を効率的に進めるには依頼者が何を優先したのかを明確にし、論理の一貫性を保つことが効果的である。

また、新技術等については、技術的妥当性が確認されれば、確性試験の依頼者は、検討結果を規制機関に許認可を申請するバックデータとして活用する、依頼者自ら

の新技術等の妥当性の説明性を高めるために活用するなどが可能である。どのように活用するかは依頼者の選択となる。確性試験はそのスキームを提供している。

— 参考資料 —

- 1) 亀山雅司, 発電技検の確性試験について, 発電技検レビュー, Vol. 8, 2012, 発電設備技術検査協会.
- 2) 例えば, 日本国語大辞典, 小学館, 昭和 48 年 9 月 1 日.
- 3) 発電技検 HP :
<http://www.japeic.or.jp/gyoumu/kakusei/oshirase/oshirase.htm>
- 4) 発電技検三十年史, 平成 12 年 7 月 14 日, 発電設備技術検査協会.

著者紹介



佐藤長光 (さとう・たけみつ)
発電設備技術検査協会
(専門分野/関心分野) 規格基準



亀山雅司 (かめやま・まさし)
原子力安全推進協会
大阪大学
(専門分野/関心分野) 原子力発電設備保全
技術, エンジニア・メンタルの補強

新刊紹介

いちえふ 福島第一原子力発電所労働記(1)

竜田一人著, 186p (2014.4), 講談社.
(定価 580 円+税), ISBN978-4-06-388318-3

本書は, 事故 1 年後の福島第一原発 (1F) に 2012 年, 作業員として廃炉作業に従事した首都圏に住む一人のマンガ家の目を通して 1F 作業現場の実態を率直に描いた渾身の原発ルポ漫画で, 漫画週刊誌「モーニング」の 13 年と 14 年掲載の一部を単行本にしたものである。連載が始まるや国内外のメディアの間で大反響を呼び, NHK, 読売, 朝日, 産経, 週刊プレイボーイをはじめ, 海外では AP, AFP 通信他多数のメディアで紹介された。

内容は, 第零～六話, 番外編を入れ 186 頁に及ぶ, 臨場感溢れる現場の廃炉助勢作業を極めてリアルに描いた一種の学習マンガというべきものである。

原発現場についてのルポ記の類は, これまでの一部週刊誌, 告発本のいくつかに見受けられるように, 暗い印象を受けがちであるが, 作者はマンガという手法で読者が実際に平易に理解できるよう明るいタッチと前向きな姿勢で 1F の現実を描写している。

作者の目を通した心の描写も見事である。最初は多少の不安を持って東電の 7 次下請や, 後に大手企業の下請けに入り廃炉の後方支援作業に従事する。地元福島で被災した人達はじめ全国からやってきた仲間達とも信頼関係ができ, 過酷な

現場に苦しみながら, 一つ一つ困難を克服していく。1F の現実を見ていくうちに, 週刊誌のインチキや都市伝説など, これまで聞いてきたことと日々経験する現実とが乖離していることを次々と明解に解き明かしてゆく。作業仲間の誰もが, 1F 現場の賃金手当てが他より高いことと, 自分達の手で 1F をやっつけてやる (廃炉を終結させる) ぞという強いモチベーションで支えられているようにも映る。このマンガが少しでも多くの国民の目に触れることにより, ありのままの 1F の現実が広く理解され, 過酷な状況で戦っている関係者への支援の輪がより深まり, 廃炉の収束に力を貸そうという人々の増えていくことを願ってやまない。

廃炉に関して 1F に入所する予定の専門家は, 遠隔ロボット技術や水処理化学, 解体処理等々これまで原発現場でないと仕事をしてきた人達も, 今後多く投入されることが見込まれる。1F 入所に過度の不安を覚えることなく, 本書を予め目を通しておくことでかなりの事前学習になろう。同時に, 後方支援の作業者の人達を思いやるきっかけになればと思う。第 2 巻は 14 年秋ごろ発売予定で, 原子炉建屋のフロント作業編とのことである。

(原子力コミュニケーションズ・三谷信次)



サイエンスよみもの

遅発中性子から原子炉ニュートリノへ ベータ崩壊と弱い力の物語

東京工業大学 吉田 正

遅発中性子の放出には時間遅れが伴い、それが原子炉の制御を可能にしている。原子炉工学の基本である。原子炉崩壊熱の放出にはさらに長い時間がかかる。ともに原子核のベータ崩壊に伴う現象であることが大きな時間遅れの原因である。ベータ崩壊は自然界の第四の基本的な力、弱い力によって引き起こされる。本稿では、この弱い力を軸に、基礎物理学探求の歴史を物語風にたどる。主役は、謎めいた基本粒子ニュートリノであり、原子炉で生まれるニュートリノを用いた弱い力に関わる最新の実験も概観する。

I. はじめに

核分裂の連鎖反応をつなぐ核分裂中性子の一部は遅発中性子として放出される。遅発中性子の放出には時間遅れが伴い、その時間遅れが原子炉の制御を可能にしている。一方、原子炉崩壊熱の放出にはさらに長い時間がかかる。我々はこれを、福島事故直後から数週間、テレビ報道等を通じて実時間で体験することになってしまった。崩壊熱放出はいまだ終わってはいない。

この時間遅れは遅発中性子や崩壊熱放出が核分裂生成核のベータ崩壊に伴って起きることに原因している。ベータ崩壊は「弱い力」によって引き起こされる。身も蓋もない命名だが、陽子と中性子を結び付け、原子核をまとめあげている「強い力」との対比からそう呼ばれる。強い力、弱い力、電磁気力、重力の4つが自然界の力のすべてである。弱い力は弱い相互作用とも呼ばれる。

いったん「弱い力」というキーワードを手にすると、小柴昌俊のノーベル賞受賞以来、一般の耳にもなじむようになったニュートリノとか、同じくノーベル賞の小林-益川理論といった現代物理学の核心につながる道が見えてくる。新聞等でも報じられるこういった科学界最先端のトピックスも原子力技術と地続きなのである。

II. 時間スケールの大きな広がり

炉心内で中性子がウラン原子核を横切るのに要する時間は 10^{-22} 秒ほどだ。時には中性子は原子核に取り込ま

From Delayed Neutron to Reactor Neutrino ; Brief History of Beta Decay and Weak Force : Tadashi YOSHIDA.

(2014年5月12日 受理)

れて核分裂を引き起こす。核分裂には $10^{-19} \sim 10^{-17}$ 秒という長い(!)時間が必要だ。そのとき放出される核分裂中性子が次の世代の核分裂を引き起こして連鎖反応のひとコマがつながるのは、さらに 10^{-4} 秒ほど後である。これが連鎖反応のすべてなら、中性子はあっという間にネズミ算で増え、原子炉の制御は不可能である。しかし、核分裂から 0.1 秒ほどすると核分裂片からの遅発中性子が活躍を始める。核分裂に要する 10^{-18} 秒を 1 秒に引き延ばしてみると実に 30 億年も後のことである。これが原子炉の制御を可能にする。ベータ崩壊があいだに挟まるため生じる大きな時間遅れが、原子核世界の時間スケールと人間世界の時間スケールをつないでいる。

III. フェルミのベータ崩壊理論

1. フェルミと仲間たち

1926年、フェルミ(Enrico Fermi)は25歳にしてローマ大学理論物理学教授に任命された。やがて物理教室のあったパニスベルナ街にはイタリア中の俊才が集い、彼らは Via Panisperna Boys と呼ばれるようになる。アマルデイ、マヨラナ、ポンテコルヴォ、セグレといった、その後の物理学史に残る名が連なる。その中から、本稿で後に登場願う一人を少し詳しく追ってみたい。

マヨラナ(Ettore Majorana)は1906年、シチリア島のカタニーニャに生を受け、若くして鬼才の名をほしいままにする。マヨラナ粒子、マヨラナ力などにその名を刻印し、生涯に論文9報と多量のメモと伝説を残した¹⁾。31歳の時、ナポリ大学教授となるが、その翌年の1938年3月、彼は無断で職場を離れ、シチリアの州都パレルモ行きのフェリーに乗る。目的は不明。数日後、ナポリへ



第1図 マヨラナが最後に乗船したシチリア・パレルモ港
(2013年11月筆者写す)

の帰便に乗ったことが確認されているが、下船しなかった。この謎の失踪は第一級の実験的ミステリーであり、大戦直前の切迫した情勢が背後あるともされている。戦後、彼を南イタリアの修道院で見かけた、ヴェノスアイレスで対話したといった目撃談が数多く残るが、すべては謎である。

2. ベータ崩壊とニュートリノ

ベータ崩壊は原子核内の中性子が自発的に電子を放出して陽子になる現象である(本稿では β 崩壊に話を限る)。しかし、ベータ崩壊の発見により物理学者たちは大変な難題を抱え込んだ。崩壊の前後でエネルギーが保存されていないのである。基本原理中の基本原理、エネルギー保存則を放棄せざるを得ないこの窮状を救うため、1930年にパウリはニュートリノの導入を提唱する。電荷がなく軽い、謎の粒子である。ライネスらによるその実在の確証までには、その後、実に25年を要した(1995年ノーベル賞)。ニュートリノが全くといっていいほど物質と反応しないためだ。だが全くではない。

原子核反応の起こりやすさを与える物理量は反応断面積である。例えばU-235の熱中性子に対する核分裂反応断面積は約600バーンである。が、しかしニュートリノが陽子に吸収され中性子を生む反応の断面積は 10^{-19} バーンほどしかない。この反応によってニュートリノの進行を阻止するには1兆kmを優に超える水の層が必要となる。非現実的だ。つまりニュートリノの検出は極めて難しい。しかし、現代の技術はそれを可能にしたばかりか、ニュートリノによりプラント外部から原子炉の運転状況を監視したり、太陽の内部をまるでCTを使っているかのように観察することを可能にしつつある。

3. すべてはディラック方程式から始まる

時代を遡ろう。1925年は大変な年であった。ハイゼンベルクが行列力学を提唱し、シュレーディンガーが波動力学を構想した。その全く異なる外見にかかわらず、

すぐに両者が数学的に同等であることが証明された²⁾。量子力学の誕生である。一方、電子は軽いため容易に光速に近づく。電子に対しては特殊相対論との共存が不可欠であることは誰の目にも明らかだった。ディラック(P.M.A.Dirac)が登場する。しばらくの間、その簡潔な美しさに免じて、数式に少しだけお付き合い願いたい。ディラック方程式

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \quad (1)$$

は、原子力技術の根幹をなす中性子輸送方程式とか流体の方程式に比べても実にシンプルだ。しかしこの方程式は驚くほど豊かな物理的内容を包含しているのである。ここで、 ∂_μ は時間($\mu=0$)および空間座標($\mu=1\sim 3$)による偏微分であり、 $\gamma^\mu \partial_\mu$ のように同じ項に μ が2つ現れたら μ を順次0, 1, 2, 3とおき、そのたびに足し合わせるという記法上の約束に従う。 m は質量である。一方、相対論の要請に答えるために係数 γ_μ はもはや普通の数ではなく、4行4列の複素数行列となる。電子の挙動を記述するこのディラック方程式は、電子の持つ不可解ではあるが必須の性質であるスピンと、反粒子(この場合、陽電子)の存在を自然に導き出した。ディラック方程式に従う粒子はディラック粒子と呼ばれ、電子はディラック粒子である。本稿の主役であるニュートリノはディラック粒子であると考えられていたが……。これについては本稿末尾で述べるが、そこでマヨラナの名に再び出会うことになる。

4. フェルミのベータ崩壊理論

1934年、フェルミはパウリのニュートリノ導入を受けて、ディラック方程式に基づき、有名な「ベータ崩壊の理論」を発表した。彼は中性子が電子と反ニュートリノを放出して陽子になるベータ崩壊過程を支配する最も重要な因子、普遍振幅と呼ばれる量を

$$\mathcal{M} = G(\bar{u}_n \gamma^\mu u_p)(\bar{u}_\nu \gamma_\mu u_e) \quad (2)$$

と表した³⁾。Gはフェルミ定数。 \mathcal{M} の二乗がベータ崩壊確率(寿命の逆数)を与える。最初の括弧は中性子(n)が陽子(p)になる過程を、2つ目の括弧は反ニュートリノ($\bar{\nu}$)と電子(e)が生まれる過程を表している。 u はディラック方程式の解を更に具体化したものである。ディラック方程式の係数 γ^μ がここにも現れる。文献3)の著者は、(2)式を「フェルミの靈感と呼ぶべき推測」と評する。弱い相互作用に係る、いや、それにはとどまらず物質世界そのものに係る人間の理解の根拠を揺るがしたのちの多くの発見を経ても、(2)式は最小限の変更だけで生き残った。これをV-A型相互作用という。

5. その後の発見

フェルミ理論成立後になされた発見のうち、最も衝撃的だったのは、Lee (李政道) と Yang (楊振寧) による弱い力に関わるパリティ非保存の発見であろう。発表の翌年にもうノーベル賞 (1957 年) を受けていることから、当時の衝撃の大きさが理解できる。

IV. 素粒子の標準理論

1. 3種類のニュートリノ

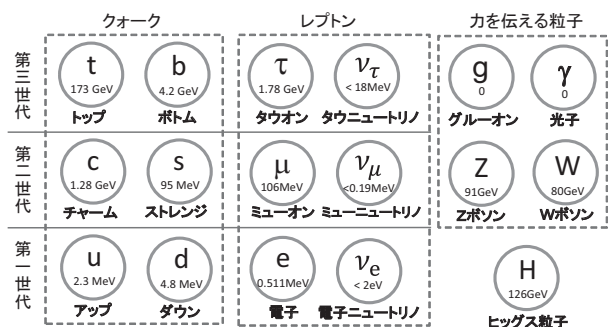
1936年にミューオンが発見された。ミューオン μ^- は、電子と反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ とミューニュートリノ $\bar{\nu}_\mu$ に崩壊するが、この崩壊も弱い力によって引き起こされる。ミューニュートリノは、いわば電子ニュートリノの兄貴分であり、さらに長兄のタウニュートリノも発見される。

2. 素粒子の標準理論

なにやら話が込み入ってきたので、時代を一気に半世紀進めてしまおう。現在、物理的な世界、この宇宙を構成している基本粒子は、第2図の粒子とその反粒子であるとされている。これらの粒子の間の関係や振る舞いは素粒子の標準理論によって矛盾なく記述されている。しかし標準理論によって物質世界が完全に理解されたとはもはや考えられていない^{a)}。物理学者たちは標準理論を超える次の理論体系の構築に努力している。標準理論は究極の理論ではなく、それに至る道のり、しかし見事な一里塚である。なお、昨年のノーベル賞で広く報道されて一般に知られるようになったヒッグス粒子は、標準理論というジグソーパズルの最後の1ピースであった。

3. クォーク、レプトン、ゲージボソン

標準理論では基本となる粒子はクォーク、レプトン、ゲージボソン (力を伝える粒子) の3種類に分類される。



第2図 標準理論を構成する基本粒子とその世 (数字は質量)

^{a)} 1970年代から、標準理論で記述される物質、つまり陽子、中性子、電子といった我々になじみの物質は、宇宙を構成する物質のごく一部なのではないかと考えられるようになった。この説は次第に動かしがたいものとなり、いまや標準理論を超える次の展開が求められる大きな理由のひとつとなっている。

クォークは強い力を媒介に物質世界を作り出す。実際、陽子はアップクォーク2個とダウンクォーク1個から、中性子はダウンクォーク2個とアップクォーク1個から出来上がっている。これらのことがら、現在では高校の物理教科書にもしっかりと記載されている。

ここで注目すべきは、基本粒子たちは第一世代から第三世代までの3つの世代に分かれ、階層構造をなしていることである。しかし、なぜそうなっているのかと問うたら、物理学者たちは、ここ半世紀の間に蓄積されたすべての実験データがそれを支持し、階層構造を基本として取り入れた標準理論が驚くほど成功している事実があると答えるだろう。あとは神のみぞ知る。さらに、3つの世代 (階層) は完全に切り離されているわけではなく、互いに少しずつ「浸透」し合っていて、この浸透についての理解の深まりが、弱い力の探求と相補いつつ進展し、標準理論の完成に至ったと筆者は理解している。なお、強い力を伝えるのは図中のグルーオンであり、弱い力を伝えるのはWボソンとZボソンである。

V. ニュートリノ振動

1. PMNS 行列とポンテコルヴォの予言

ポンテコルヴォ (Bruno Pontecorvo) はマヨラナに遅れてパニスペルナの仲間に加わった。ユダヤ系であったため、1938年にムッソリーニ治下のイタリアを離れ、米国に逃れる。そして戦後、1950年に中立国スウェーデン経由でソビエト連邦へ亡命するという意表をついた行動に出た。Wikipediaは彼がソ連のエージェントであったとさりげなく記している。ドブナでの後半生は多産で、ニュートリノに係る多くの先駆的な業績を残した。PMNS (Pontecorvo-牧-中川-坂田) 行列はレプトンに係るもっとも基本的な関係式である。この式は弱い相互作用で生まれたばかりのニュートリノ (ν_e, ν_μ, ν_τ) は、決まった質量をもったニュートリノ (質量の固有状態: ν_1, ν_2, ν_3) の混合であるとしてその混じり具合を記述する。つまり、レプトン世界における、3つの世代間の相互「浸透」を記述する。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

この混合によって、ニュートリノは進行中にその種類が変化するが、これがポンテコルヴォの予言したニュートリノ振動現象である。我が国のスーパーカミオカンデ (岐阜・神岡の地下にある巨大検出装置) での実験を嚆矢として、ニュートリノ振動現象は各国で確認されてきた。このことはニュートリノが質量を持つことも意味している。

しかし困ったことには、標準理論ではニュートリノが質量を持つことは許されない。これは、前述したV-A型相互作用を受け入れたことの直接の帰結である。だが

その時点で他に選択肢はなかった。そこで、PMNS 行列を高い精度で知ることは、ニュートリノが質量をもつことを許さない標準理論を乗り越え、次の段階に進むための突破口となる。そのため多くのニュートリノ実験が世界中で進められてきた。最初に重要な成果をあげたのがスーパーカミオカンデ実験であり、その後も日本はこの分野のトップランナーの一人でありつづけている。

レプトン世界の PMNS 行列の、クォーク世界における相棒が小林・益川 (MK) 行列である (2008 年ノーベル賞)。KM 行列は標準理論から導かれたのではなく、逆に、これが標準理論の核心である三世代構造を決定づけた。KM 行列は CKM 行列とも呼ばれ、C は先駆的な業績をあげたカビボ (Nicola Cabibbo) の名に因む。ローマ大学つながりで、彼もまたパニスペルナ街の仲間たちの末裔である。

2. 太陽, 宇宙線, 加速器

PMNS 行列中の諸数値は実験でしか決められない。実験にはニュートリノ線源が必要である。太陽で生まれるのは電子ニュートリノで、太陽にかざした我々の手を毎秒 1 兆個が貫通するほど大量に飛来する。一方、宇宙線起源の、および加速器で人工的に生成されるニュートリノはともにミューニュートリノで、この領域でもスーパーカミオカンデは大きな成果をあげている (筑波 KEK の加速器を用いた K2K 実験, 東海村 J-PARK 加速器を用いた T2K 実験)。ひと口にニュートリノ実験といっても、その詳細な目的に応じて、これらさまざまなニュートリノ線源が巧妙に使い分けられている。

3. 原子炉ニュートリノ実験

ベータ崩壊があるところには必ずニュートリノが発生する。運転中の原子炉しかりである。現在、PMNS 行列の高い精度での決定のため、原子炉ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) を用いた実験が各国で行われている。フランスのショー原子力発電所で行われているのがダブル・ショー実験である。韓国の RENO 実験, 中国の Daya Bay 実験も成果を上げている。日本でも国内の原子力発電プラントからやってくるニュートリノを使ったカムランド実験 (神岡) が進行中だったが、福島事故後の全炉停止に遭遇した。しかしカムランドグループは逆にこれを好機に変え、地球中心部でのベータ崩壊で生まれる地球ニュート

リノ検出で大きな成果をあげたばかりでなく、炉停止後のデータを利用して誤差を低減することにより既得の原子炉ニュートリノデータの信頼性向上にも成功している。

4. マヨラナニュートリノ

標準理論で禁じられているニュートリノ質量を矛盾なく理論に取り込むすべはいくつか提案され、有力視されているのがニュートリノはマヨラナ粒子であるとする考え方である。マヨラナ粒子も (1) 式と同じ型の方程式を満たすが γ^5 が大きく変わり、ニュートリノと反ニュートリノが実は同一の粒子であることを主張する⁴⁾。このことが標準理論との矛盾を解消する。この考えが正しいか否かは、原子核内の中性子 2 個がニュートリノを放出せず一挙に陽子 2 個に変わる 2 重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) と呼ばれる現象の発見にかかっている。実験は各国で古くから行われているが、まだ決定的な証拠はない。日本では「カムランド禅」実験が $0\nu\beta\beta$ 現象の可能性を追求している。

VI. おわりに

筆者が原子炉崩壊熱の研究に携わった 40 年の間、欧米の研究者との交流で得たものは多大であった。それなしには一歩も進めなかった。本稿の執筆を通じ、右肩上がりの時代には忘れがちだった欧米の科学技術の底力、その執ようなパワーに改めて圧倒されている。困難を抱えるいまこそ、再び彼らの姿勢と能力に謙虚に学びなおす時ではないかと考え始めた。

— 参考資料 —

- 1) J・マゲイジョ, マヨラナー消えた天才物理学者を追う, NHK 出版, (2013).
- 2) 朝永振一郎, 量子力学 I, みすず書房, (1952).
- 3) F. ハルツェン, A. D. マーチン, クォークとレプトン, 培風館, (1986).
- 4) F. Wilczek, *Nature Physics*, 5, 614 (2009).

著者紹介

吉田 正 (よしだ・ただし)

東京工業大学

(関心分野) 核データ, 炉物理, 原子核物理。原子炉崩壊熱の基礎研究に長年かわる。



サイエンスよみもの

光周波数コムが拓く長寿命核分裂生成物の 精密同位体分離技術 量子ウォークの数理から放射性廃棄物低減技術へ

日本原子力研究開発機構 横山 啓一, 広島大学 松岡 雷士

日本原子力研究開発機構の量子ビーム応用研究センターでは、パルス中性子線や放射線、放射光など量子ビームテクノロジーを駆使した研究を展開している。その中で関西光科学研究所では、最先端のレーザー技術を利用して重元素の精密な同位体分離技術の創出に取り組んでいる。つまりシーズ側の立場から始められている。しかし、重元素の同位体を精密に分別できれば、われわれの社会が核反応を利用する限りどこかでニーズが生まれるであろう。もちろん、現時点で知られている要請だけでも、実現すれば原子力エネルギーシステムに新しい展開をもたらす。本稿でとりあげる Cs-135 など長寿命核分裂生成物の核変換の前処理や使用済み燃料中に含まれる Pd など有用元素の精製などである。すぐにすべてを実現できる見通しがあるわけではないが、今の研究を続けることで技術のステップを一段登ることができると信じている。

I. 同位体選択的加熱の提案

1. 背景

(1) セシウム同位体分離の要請

Cs-135 は主要な長寿命核分裂生成物の一つであり、Tc-99, I-129, Sn-126, Zr-93 などと共に長期にわたって放射線を出し続ける。そのため高速炉や加速器駆動未臨界炉などによる核変換の対象になっている。マイナーアクチノイドの核変換とあわせると千年以内に潜在毒性を天然ウランレベル以下にできるといわれている。一方、TRU 廃棄物として地層処分すると、ガラス固化体から地下水を通して環境中に溶け出す公衆被ばくリスクがある。百万年後には Cs-135 が最大のリスク源になる。Cs-135 を核変換すればこれを 2 桁下げることができる。これら 2 つの理由で Cs-135 の核変換が希求されている。しかし、Cs-135 と同程度生産される Cs-133 の核変換により Cs-135 が再生産されてしまう。そのため中性子照射の前に同位体分離が必要なことが分かっている。同様な理由により Sn-126 と Zr-93 についても同位体分離が

必要である。

重元素に対する同位体分離技術として、ガス拡散法、遠心分離法、レーザー法が知られている。しかし、上述のセシウム同位体分離にこれらが使えるかという点と絶望的である。それは、極めて高い選択性が要求されているためである。要求される分離係数は、ウラン濃縮の 20 程度に対して、セシウム分離では数千になる。その理由は、核変換に必要な高い Cs-135 濃縮度および環境負荷低減効果の観点から望まれる高い Cs-135 除染率を同時に満たす必要性から生じる。このような極めて高い分離係数を実現する手段として、レーザー光のもつ高い秩序性にその可能性を求めることができる。ただし従来のレーザー法をより洗練させる必要がある。

(2) 従来技術の課題と解決法

従来のレーザー法ウラン濃縮は原子法、分子法ともに実用化には至っていない。その原因として光反応-回収システムの複雑さや効率の低さがあげられる。一方、軽元素の C-13 ではレーザー法は工業化までいった。このように結果が分かれた原因として、前者はガスジェットなど器壁との衝突が許されない熱的非平衡状態、後者はガスセルなど器壁との衝突が許される熱平衡状態という点に着目した。後者は特段の工夫をしなくても試料分子・原子を繰り返し何度でもレーザー照射可能であり、光路長も容易に長くできる。複雑な光反応-回収システ

Optical Frequency Comb Opens up Highly Efficient Isotope Separation of Long-lived Fission Products ; The quantum walk to reduce radioactive waste ; Keiichi YOKOYAMA, Leo MATSUOKA.

(2014 年 5 月 30 日 受理)

ムも必要ない。その結果, 光利用効率と試料利用効率に大きな差が生まれる。そこでわれわれはセシウム分離でもガスセルでの実現方法を探ることにした。

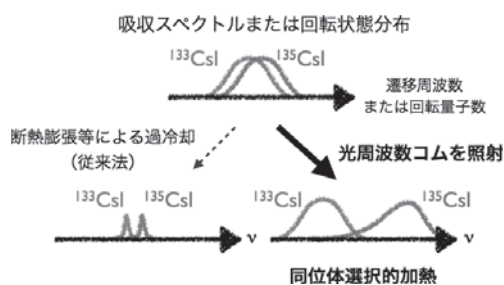
原子法では電子遷移スペクトルの超微細構造の同位体シフトを選択原理として利用する。しかし, 高温ガスセル中のセシウム原子の場合, 並進運動に起因するドップラー広がり同位体シフトより大きい。そのため, そのままでは使えない。われわれはこれを回避するための研究も行っているが, 今回紹介するのは分子法についてである。分子法では, 内部エネルギー準位の同位体シフトは絶対値としては十分大きい。しかし, スペクトルの熱的広がりがその活用を妨げている。特に準位密度が高い重元素で著しい。従来法ではこのスペクトルの重なりを解消するためにガスセルではなくガスジェット (=断熱膨張による過冷却)を導入せざるをえなかった。そこで, 冷却せずにスペクトルを分離する方法として, われわれは同位体選択的加熱の概念を提案した(第1図)。

同位体選択的加熱とは, 同位体が混在する無秩序な分子集団において, 特定の同位体元素が含まれる分子すべてに対してエネルギーを注入する操作, という意味である。従来の単色レーザーでは基本的に単一の内部状態にしかエネルギーを注入できないため, 多数の回転状態を含む無秩序な系, 例えば高温の重元素試料の蒸気に対して同位体選択的加熱はできない。広帯域レーザーを用いた量子制御, とくに量子ウォークと呼ばれる数学的概念を導入することで初めて実現性が示された¹⁾。

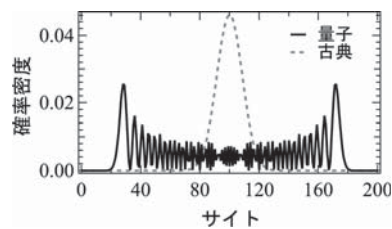
2. 原理

(1) 量子ウォークと光周波数コム

同位体選択的加熱は量子ウォークとアンダーソン局在という2つの原理に基づいている。量子ウォークは, 古典系における酔歩問題(ランダムウォーク)の量子力学版として数学の分野で近年注目されている。ランダムウォークの場合, 密度分布の拡散速度は試行回数の平方根に比例し, 密度分布関数の最頻値は初期値から移動しないガウス型関数になる。これに対して量子ウォークの場合, 確率密度分布の拡散速度は試行回数に比例し, 最頻値は拡散の最前線に近いベッセル関数になる。すなわち実質的な拡散のスピードがまるで違う(第2図)。拡散現象を利用した同位体分離法としてガス拡散法がある



第1図 同位体選択的加熱の概念



第2図 量子ウォークとランダムウォークの違い

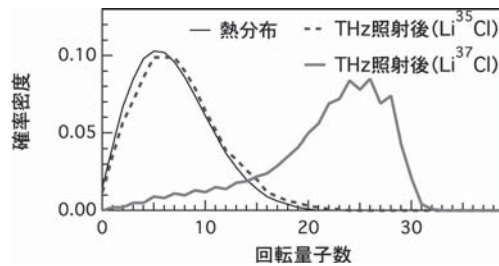
が, これは古典的拡散に基づいている。ガス拡散法の場合, 同位体選択性は質量差による拡散速度の差から生じる。拡散速度は質量の平方根に反比例するため重元素ではその差は極めて小さい。これに対して量子拡散法では同位体選択性は拡散速度の差ではなく, 「拡散するかしないか」で決まる。つまり, 片方の同位体では高速に拡散が起こるのに対して, もう一方の同位体では全く拡散が起こらないという状況を作り出すことができる。この現象は古典的には想像しにくい, これも量子力学のなせる技でありアンダーソン局在と呼ばれている。この2つの原理により, 量子拡散法は効率と選択性の両面で飛躍的な進展をもたらす可能性を秘めている。

われわれは, パルス列電場中での二原子分子の回転運動において, 角運動量空間で量子ウォークが起こることを指摘した²⁾。鍵となるのは, パルス列の時間間隔が分子の古典的回転周期に一致することおよび, 個々のパルスの中に分子の回転遷移に必要な周波数成分が含まれることである。科学的な正確さを犠牲にしてあえて身近な現象にたとえると, 「かざぐるま」を手で回す時のイメージに近い。タイミングと手のスピードが羽の動きにシンクロすると, かざぐるまをどんどん速く回せるが, そのどちらかが少しでもずれるととたんに止まってしまう。この例では, 回転が速くなるにつれて手のスピードも上げなければ加速し続けることはできない。ところが, われわれがやろうとしている方法では, スピードの違う手を必要な数だけ同時に作用させることができる。これを繰り返せば, 速さがバラバラのかざぐるまの集団を一括して加速し続けられる。

その「手」に相当するのが近年注目されている光周波数コムである。光周波数コムはスペクトルが櫛の歯状になった光であり, 2005年ノーベル物理学賞に輝いた発明である。すでにGPS高度化などわれわれの生活に深く関わっている。同位体選択的加熱は, この技術をマスプロセスに応用しようとする試みといえる。分子の回転遷移周波数はテラヘルツ帯にあることが多く, 同位体選択的加熱にはテラヘルツ光周波数コムが必要になる。

(2) 数値シミュレーション

無秩序な分子集団にテラヘルツ光周波数コムを照射したときの回転状態の挙動を数値計算により調べた³⁾。第3図からわかるように, 熱による回転状態分布の広がりを大きく凌駕する分布移動が片方の同位体のほぼすべて



第3図 塩化リチウムでの数値計算例

の分子 (Li^{37}Cl) に起こっている。これが量子拡散の賜物である。古典的ランダムウォークでは分布はほとんど動かない。注目すべきは、もう一方の同位体分子 (Li^{35}Cl) の全数がほぼ元の状態にとどまっていることである。これがアンダーソン局在の効果である。これらの量子力学特有の効果が、大きな処理速度と高い選択性につながると期待される。繰り返しになるが、従来のレーザー法ではたとえスペクトルの重なりを避けて励起できたとしても、一つの準位のみ、全体の中のごく一部 (例えば 1,000 K の CsI では 1 万分の 1 程度) を励起できるだけであり、効率を高めることは難しい。

現実には、分子の持つ遠心力歪みの影響を補正する必要がある。これは、パルス列の一発ごとに一定量のチャープ (周波数成分を時間的にずらすこと) をかけることで補償できることが示された。また、必要であればさらに高精度を目指すこともできる。われわれが交替 π パルスと呼ぶ方法では、完全に分布の重なりを排除するため分離係数を原理的には無限大にできる¹⁾。この方法は数学的に特に注目されている離散時間型量子ウォークの斬新な実装方法となっており、数学と産業の接点としても興味を引いている⁴⁾。

II. セシウム同位体分離実現にむけて

1. 成立性

(1) 技術的成立性

現時点での主な技術的課題は高強度テラヘルツパルスの発生とその分散制御、及び分離回収技術である。作業分子としてヨウ化セシウム CsI 分子を用いる場合、必要なテラヘルツ光のパルスエネルギーは約 10 mJ と予想されている。現在の最高値は約 100 μJ である。数年前には数 μJ であったことを考えると 10 年後には要求レベルに到達していても不思議はない。遠心力歪みの影響を補正するための分散制御技術の開発も重要になる。メタマテリアルやいくつかの原理的な研究がなされているがまだまだこれからの分野である。とはいえ、可視光、赤外光の波長領域ではすでに精度の高い分散制御が可能になっており、テラヘルツ領域でもいずれ可能になると思われる。

分離回収技術については、同位体選択的加熱→回転状態選択的結合解離→吸着材による原子の捕集というシナ

リオを描いている。回転状態選択的結合解離は、レーザー電場をとり入れた量子力学的運動方程式の数値計算により検討している。振動励起状態を経由させることで実現できそうである²⁾。吸着剤に関しては、分子軌道法計算による吸着エネルギーの計算結果から、現在のところ、フラーレン類が有望視されている。また、解離後の同位体交換反応 (例えば $\text{Cs} + \text{CsI}$) の反応速度定数の評価に取り組み、これを抑制するため濃度を極力薄くする必要のありそうなことが分かってきた。

(2) 工学的成立性

いまはまだ多くの仮定が必要であるが、本セシウム分離法を核変換システムに組み込んだ場合の工学的成立性を検討する。百万 kW 級原子炉 1 基あたり年間 10 kg の Cs-135 が発生する。同位体選択的に加熱された分子集団が 100% 分離回収できることおよび、テラヘルツ光の伝送ループ内での損失補償・分散補償が完璧にできると仮定する。その場合、10 kg/y のセシウムを分離係数 1,000 で処理するには 10 mJ/pulse, 10 Hz のオーダーのテラヘルツ光源が必要と予想される⁵⁾。すなわちテラヘルツ光の平均出力は 0.1 W である。電力からのテラヘルツ光発生効率を 10^{-6} とすると、テラヘルツ光発生に必要な電力は 100 kW になる。分離システム全体に必要なエネルギーのほとんどをテラヘルツ光発生が占めると仮定すると、分離に要するエネルギー消費割合は全発電量の 10^{-4} になる。したがって、セシウム分離に割くエネルギーは核変換のエネルギー収支にはほとんど影響を及ぼさないとと思われる。

2. 研究の現状

関西光科学研究所において原理実証を目指した基礎研究が進められている。テラヘルツ光源開発としては、 Yb:YAG 薄膜ディスクを利得媒質に用いた高効率ピコ秒ドライバレーザー、将来のテラヘルツ光大口径化に対応するためのコンタクトグレーティング型テラヘルツ光発生デバイス、光シャッター組込みエタロンを用いた高効率のテラヘルツ光パルス列化技術などの開発に取り組んでいる。テラヘルツ光源以外の要素技術開発としては、ハロゲン化アルカリ分子の回転状態観測技術およびそれに必要となるパルス幅・波長可変チタンサファイアレーザーの開発を進めている。これらの技術開発に加えて、テラヘルツ光パルス列の代わりに既存の近赤外光パルス列を用いた同位体選択的加熱の部分的実証実験および理論計算による回収技術の概念設計などを行っている。

(1) 部分的実証実験

既存の近赤外光パルス列を用いた同位体選択的加熱の部分的実証実験について紹介する。これは、テラヘルツ光源が完成する前に、現在入手可能な光源を用いた誘導ラマン散乱により、テラヘルツ光パルス列の作用を模擬

するものである。ラマン散乱は、テラヘルツ光による共鳴1光子遷移とは違って、非共鳴2光子遷移であるためレーザー光を強く集光する必要がある。そのため微小体積にしか適用できないので、大量分離には使えないが原理の確認には有効である。

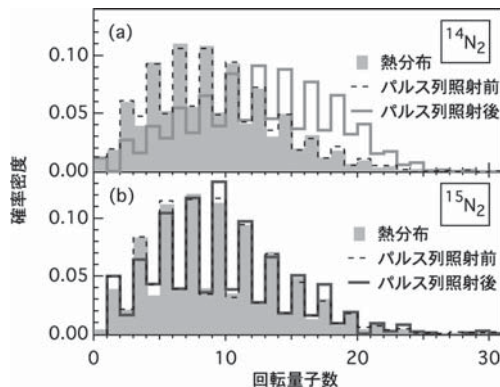
対象分子として扱いやすい窒素分子 N_2 を選んだ。室温条件下、ガスセル内の窒素ガスの圧力は 200 Torr とし、パルス幅 50 fs、波長 800 nm のレーザーパルスを3段のマイケルソン型干渉計で8連パルス列に整形した。パルスエネルギーの総和は 200 μ J、集光スポット径は約 20 μ m。パルス列の時間間隔は $^{14}N_2$ の古典的回転周期 8.4 ps に合わせた。最終的には回転分布の移動量が最大になるように微調整した。回転分布の情報を得るためにコヒーレントアンチストークスラマン散乱 (CARS) 分光法を利用した⁶⁾。

測定された CARS 時間波形を、適当に仮定した解析モデルを用いて非線形最小二乗法により解析し、回転分布を反映するポピュレーションパラメータを決定した。その結果、第4図(a)に示すように $^{14}N_2$ では明確な分布移動が起こっていることが示唆された。一方、 $^{15}N_2$ ではほとんど移動が起こっていないことが第4図(b)から見て取れる。このようにして、セシウム分離実証の最初の目標である、ラマン散乱による同位体選択的加熱の実証に成功した。

III. おわりに

今後、「テラヘルツ光による」同位体選択的加熱の実証、テラヘルツ光の高強度化、パルス列化の効率向上、テラヘルツ光分散制御、同位体選択的「解離」の実証、CsI 放射性同位体での実証、回収システムのご概念設計と実証など、多くの課題をクリアしていく必要がある。実用化にはさらに、回収まで含めた効率向上など工学的研究も必要になる。今はまだ関西光科学研究所だけで取り組んでいるが、これらの課題を全て単独で実施することは現実的ではない。将来は複数の機関にまたがるプロジェクトとして進められればと思う。われわれは今後、量子ビームテクノロジーを駆使した基礎研究を通して、社会にインパクトを与える技術革新の土台作りに貢献していきたい。

本研究の一部は文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」の受託事業として実施した。



第4図 ラマン散乱による同位体選択的加熱の実証実験結果の一例

— 参考資料 —

- 1) L. Matsuoka, *et al.*, "Theoretical study for laser isotope separation of heavy-element molecules in a thermal distribution", GLOBAL2011, 392063 (2011).
- 2) L. Matsuoka, *et al.*, "Numerical study on quantum walks implemented on cascade rotational transitions in a diatomic molecule", *J. Korean Phys. Soc.*, **59**, 2897-2900 (2011).
- 3) A. Ichihara, *et al.*, "Quantum control of isotope-selective rovibrational excitation of diatomic molecules in the thermal distribution", Abstracts in Optical Manipulation Conference '14 (OMC'14), OMCp3-15 (2014).
- 4) L. Matsuoka, *et al.*, "Physical implementation of quantum cellular automaton in a diatomic molecule", *J. Comput. Theo. Nanosci.*, **10**, 1617-1620 (2013).
- 5) 横山啓一, 他, 「分子の選択的励起方法およびこれを用いた同位体分離方法, 同位体分析方法, 分子の選択的励起装置, 同位体分離装置」特許第 5476596 号 (2014).
- 6) F. Yoshida, *et al.*, "Displacement of rotational-state distribution in diatomic molecules with a train of femtosecond laser pulses", Conference Proceedings of CLEO-PR2013, WPB-4 (2013).

著者紹介



横山啓一 (よこやま・けいいち)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野) 化学反応動力学/量子制御による同位体分離



松岡雷士 (まつおか・れお)

広島大学

(専門分野/関心分野) 原子物理, 数理工学/レーザー同位体分離

報告

福島第一原子力発電所事故に関する国際専門家会議 IAEA はどのような教訓を学んできたか？

国際原子力機関(IAEA) 山田 勝己

福島第一原子力発電所事故の後、IAEA では「原子力安全に関する行動計画」を立て、様々な活動を続けてきている。本稿では、国際専門家会議(IEM)について紹介する。これまで7回のIEMが開催され、世界の原子力安全の向上に向けて、議論を重ねている。各回のテーマは、原子炉と使用済燃料の安全性、緊急時のコミュニケーション、巨大地震・津波に対する防護、原子力事故後の廃止措置と環境修復、人的・組織的要因、放射線防護、シビアアクシデントマネジメントである。本稿では、事故の教訓と今後の課題を中心に報告する。来年は、研究開発の有効活用をテーマに第8回IEMが開かれる。過酷事故の防止および影響緩和に向けて、今後注力すべき分野を議論する。福島事故は、原子力の安全性に大きな疑問を投げかけた一方で、安全性向上の動きを加速している。福島事故が契機となり、今後、二度と大事故を起こさないことを願う。

1. はじめに

2011年3月の東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故(以下、福島事故と略す)は、国際社会に大きな衝撃を与えた。IAEAでは、事故の直後に、「事故および緊急時対応センター(IEC: Incident and Emergency Centre)」を立ち上げた。IECでは、24時間体制で、日本の政府機関と連絡を取り、事故情報を収集し、加盟国への情報提供を始めた。また、メディア向けの説明会を開催したり、一般向けのIAEAウェブサイトで情報を公開したりした。

その後、2011年5月には、日本政府からの要請で、国際専門家ミッションを日本に派遣して、福島事故の調査・分析評価を行った。

ミッションの報告を基に、6月に「原子力安全に関する閣僚会議」を開いた。IAEAの機能強化の必要性などを含む閣僚宣言が採択された。その中で、IAEAに対して、世界の原子力安全向上のため、具体的な計画を立てるように求められた。「原子力安全に関する行動計画(Action Plan on Nuclear Safety)¹⁾」が、9月のIAEA理事会で承認され、同月の総会では全会一致で支持された。

それから3年、IAEAでは行動計画に沿った様々な活動を続けてきている。本稿では、国際専門家会議(IEM: International Experts' Meeting)について紹介する。

International Experts' Meetings on the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant; What has the IAEA been learning from the accident?: Katsumi YAMADA.

(2014年5月15日受理)

IEMは、これまで7回、毎回異なったテーマで開かれている。また、来年は第8回のIEMが開催されることになっている。IEMでは、IAEA加盟国および国際機関からの専門家が各国・機関の活動を発表し、議論をする。情報交換が大きな目的の一つであるが、それだけに留まらず、加盟国やIAEAの活動に対する提言が出される。

2. これまで開催された国際専門家会議

これまでのIEMは、いずれもウィーンのIAEA本部で開催され、各回、120名から230名の参加があった。参加者は、政府機関、電力会社、研究機関、規制機関、原子炉ベンダ、国際機関などからの各分野の専門家である。日本からも毎回、数名の参加があり、テーマに則した最新情報を提供している。

以下、各IEMについて、会議で議論された福島事故の教訓と今後の課題を中心に報告する。詳細について興味を持たれた方は、会議のプレゼンテーション資料や議長サマリーなどがIAEAのウェブサイト上に公開されているので、そちらを参照されたい。

(1) 原子炉と使用済燃料の安全性²⁾

最初のIEMは、福島事故から1年後の2012年3月19日から22日まで開かれた。テーマは、原子炉と使用済燃料の安全性(*Reactor and Spent Fuel Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*)である。過酷事故時の原子炉と使用済燃料の安全性について、主に技術的な観点から議論された。福島事故の根本的な原因を分析し、より理解を深め

て、その教訓を国際社会で共有することを目的とした。

加盟国および国際機関からの発表内容は多岐にわたり、福島事故の解明と対策に向けた多大な努力が払われていることが分かった。それらは基本的に独立した活動であったが、共通点も多く、重要な課題が見過ごされていないことが確認できた。例えば、外部事象に対する防護、電源喪失やヒートシンク喪失への対応能力、コミュニケーションの改善と緊急時の対応、水素爆発の抑制、使用済燃料プール対策などである。

会議の全体の論調として、過酷事故が起きた後の影響を緩和する技術の重要性が改めて認識・強調された。

福島事故後、原子力の安全性向上のための数々の改善が実施または計画されており、1年間で安全性が格段に向上したことを確認できた。一方で、今後も教訓を学び続け、国際的に情報を共有し、有効活用を図る必要性が認識された。

(2) 緊急時のコミュニケーション³⁾

第2回 IEM は、2012年6月18日から20日まで、緊急時のコミュニケーション (*Enhancing Transparency and Communication Effectiveness in the Event of a Nuclear or Radiological Emergency*) をテーマに開かれた。メディアを含む、コミュニケーションの専門家が集まり、体験を基に緊急時のコミュニケーションにおける透明性や効率の向上、情報提供の改善に向けた教訓とベストプラクティスなどを議論した。

福島事故は、原子力・放射線事故時に効率的なコミュニケーションがいかに重要かを示した。事故の際、正しく分析・予測をして、迅速かつ正確な情報提供を行うには、関係する政府機関の技術能力を強化する必要がある。その一方、非政府機関や専門組織からの情報が事故への理解を深める場合がある。緊急時対応に当たる規制機関、電力会社の情報の透明性が、報道の正確性と信頼性に不可欠であることなどが議論された。

今後、緊急時のコミュニケーション効率を向上させるには、定期的な訓練の中に組み込む必要があるとの提言がなされた。特に、国内機関、国際機関、メディアが協力して、公衆への情報提供を行う必要がある。IAEA には、正確でタイムリーな事実の提供に加えて、事故の進展予測や影響にまで踏み込んだ情報発信が求められた。

(3) 巨大地震・津波に対する防護⁴⁾

第3回の IEM は、2012年9月4日から7日まで、福島事故の起因事象となった巨大地震と津波に対する防護 (*Protection Against Extreme Earthquakes and Tsunamis in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*) をテーマに開かれた。原子力発電所のサイト評価や自然現象への防護に関して、最新の技術開発や研究計画が議論された。

福島事故は、単独の自然現象だけでなく、地震と津波の組合せを考慮する必要があることを強く示した。ま

た、自然現象の評価には、まだ知られていない不確定性 (unknown unknowns) があり得ることも示した。

会議では、サイトの選択・評価、原子力施設の設計において、考え得る外部事象の組合せに対して十分な防護措置を取っておく必要性が確認された。また、それらの事象は、安全評価でも考慮する必要がある。特に、複数ユニット・複数サイトの共通要因故障は、予め考慮に入れておく必要がある。

今後、更に福島事故から教訓を学び、外部事象に対する原子力施設の安全要求・指針の見直しが必要である。そのために、加盟国間の情報交換を継続していくことが呼びかけられた。

(4) 原子力事故後の廃止措置と環境修復⁵⁾

2013年1月28日から2月1日まで、廃止措置と環境修復 (*Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident*) をテーマに、第4回 IEM が開かれた。主に、原子力事故後の廃止措置、サイト外の環境修復、放射性廃棄物の管理などが議論された。スリーマイル島事故、チェルノブイル事故など過去の原子力事故での経験を踏まえ、技術の観点だけでなく、社会、経済、環境などの観点から複合的に議論された。

会議では、事故後の廃止措置と環境修復のために事前に計画を作成しておくことの重要性が強調された。事故後の修復作業について指針(目標)を与えるような、何らかの国際的な包括的合意が可能か、議論がなされた。そのためには、公衆が受け入れられる、現実的な安全の定義を設定する必要がある。技術の観点では、廃止措置と環境修復のための手法と技術の開発、損傷燃料の取り扱いなどが議論された。

IAEA に対しては、原子力事故で影響を受けた地域の修復に関連する加盟国の支援を強化するよう提言があった。また、環境修復に関する IAEA 安全基準の見直しと、必要に応じて改訂版の作成・発行を行うよう、多くの参加者から提案された。

(5) 人的・組織的要因⁶⁾

第5回の IEM は、2013年3月21日から24日まで、原子力安全における人的・組織的要因 (*Human and Organizational Factors in Nuclear Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*) をテーマに開催された。事故の際の人的・組織的要因について、知識・経験を集め、共有し、教訓とベストプラクティスを得ることを目標とした。

議論の内容は、技術的要因と人的・組織的要因を統合した安全性の確立の必要性、安全文化、教育・訓練、組織間の役割と責任の分担などである。

特に興味深かったのは、原子力安全の考え方にパラダイム変更が必要との議論であった。現在の考え方は、どこかで「完全なシステム」が達成できることを前提としている。しかし、特定の条件に対して完全であればあるほ

ど、その条件を外れた場合に、柔軟性のない(脆い)システムになってしまう。本当に必要なのは、予期しない事態になった時の柔軟性であるという主張である。

今後、人的・組織的観点から個別に福島事故を見直すこと、人的・組織的要因を含めたストレステストの実施、規制機関の安全文化に関する自己評価などについて議論していく必要があることなどの提言をまとめた。

(6) 放射線防護⁷⁾

2014年2月17日から21日まで、放射線防護(*Radiation Protection after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident*)をテーマとして、第6回 IEM が開かれた。原子力事故後の長期にわたる放射線防護に関する課題を議論した。第2回および第4回 IEM との関係が深く、技術の観点だけでなく、社会、経済、環境の観点からも議論された。長期的な課題であるため、次世代を担う若い専門家も会議に招かれ、進行に協力した。

会議では、個人の被曝に関して、事故の直接的な健康影響は認められないが、精神的・社会的な影響が出ていることが指摘された。被曝量の推定には不確定性があることから、今後も個人の被曝量と晩発影響の発生の関係を見守っていく必要がある。

福島事故の後、食物・飲料水の摂取制限の基準値について、国際社会で大きな混乱があった。多くの国際・国内基準が並立しており、それらが必ずしも整合していないため、特に途上国の混乱が大きかった。

加盟国に対して、福島事故の教訓を基に放射線防護の体系を見直すこと、放射線防護の人材育成・維持を図ることなどが提言された。IAEA に対しては、関連する国際機関と協力して、事故で汚染した食物・飲料水だけでなく、それ以外の日用品の取り扱いを統一するよう提言があった。

(7) シビアアクシデントマネジメント⁸⁾

直近の IEM は、2014年3月17日から20日まで、シビアアクシデントマネジメント(以下、SAM と略す)(*Severe Accident Management in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*)をテーマに開かれた。福島事故を踏まえて、SAM に関する改善、規制上での取り扱い、過酷事故対応の訓練、過酷事故時のサイト内・外の連携などを議論した。特に、訓練の必要性はすべてのセッションで取り上げられた。

福島事故の教訓から、過酷事故に対応する組織間での効率的な情報共有は必須である。どの組織も事故の進展に関して同じ状況認識を持てるようにする必要がある。

技術的な観点では、事故の監視にどれだけのプラント変数(原子炉水位、圧力、温度など)が必要か、また、それらの計測系にどこまでの環境試験が要求されるか、が発表・議論された。

加盟国には、福島事故時の自衛隊のように、過酷事故対応に携わる可能性のある組織を予め明確にしておき、基本的な指導をするよう提言があった。IAEA に対しては、SAM および緊急時対応のベンチマークを行う場を設けるよう提言された。

3. 研究開発に関する国際専門家会議

第8回 IEM は、研究開発の有効活用(*Strengthening Research and Development Effectiveness in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*)をテーマに、IAEA 本部で来年2月に開かれる予定である。加盟国および国際機関で実施されている過酷事故に関する研究開発について情報を交換し、実用化に向けた議論を行う。

水冷却炉の過酷事故についての研究開発は、福島事故以前から行われ、多くの知見が得られていた。それらは、過酷事故対策を取ったり、事故の進展を予測したりする上で有効に活用された。しかし、残念ながら、福島事故で3基の原子炉が炉心溶融に至ったことは、これまでの過酷事故の研究開発が必ずしも十分でなかったことを示している。

第8回 IEM では、既に実用化された技術も含め、現在開発中の技術、これまでの IEM で議論された技術など、広範囲に議論する。トピックスは、外部・内部事象による共通要因故障への対応、過酷事故の防止・緩和技術、過酷事故の解析技術、緊急時への準備と対応、事故後の回復などである。世界の専門家・研究者の知見と経験を集めて、今後注力すべき分野、国際協力の必要性などを議論する。

4. まとめ

福島事故に関する IAEA の IEM について紹介した。これまでの会議を通して感じたことは、「原子力安全に終わりはなく」と言うことに尽きる。原子力安全に対しては、常に謙虚な気持ちで向かわなくてはならない。原子力施設の設計・運転・規制に自信を持つことは必要だが、それが過信に変わり、慢心に陥ることは戒めなければならない。そのためには、何らかの仕組みが必要だろう。

福島事故は、原子力の安全性に大きな疑問を投げかけたが、一方で世界の原子力の安全性向上に向けた動きを加速していることも間違いない。中長期的には、今後も原子力発電を必要とする国は増えていくと考えられる。福島事故の教訓を活かして、二度と大事故を起こさないことを願う。

— 参考資料 —

- 1) IAEA 原子力安全に関する行動計画
<http://www.iaea.org/newscenter/focus/actionplan/reports/>

- actionplanns130911.pdf
- 2) 第1回 IEM (原子炉と使用済燃料の安全性) 資料
<http://www.scribd.com/collections/3548893/International-Experts-Meeting-on-Reactor-and-Spent-Fuel-Safety-in-the-Light-of-the-Accident-at-the-Fukushima-Daiichi-Nuclear-Power-Plant>
- 3) 第2回 IEM (緊急時のコミュニケーション) 資料
<http://www-pub.iaea.org/iaeameetings/44228/International-Experts-Meeting-on-Enhancing-Transparency-and-Communication-Effectiveness-in-the-event-of-a-Nuclear-or-Radiological-Emergency>
- 4) 第3回 IEM (巨大地震・津波に対する防護) 資料
<http://www-pub.iaea.org/iaeameetings/42731/International-Experts-Meeting-on-Protection-against-Extreme-Earthquakes-and-Tsunamis-in-the-Light-of-the-Accident-at-the-Fukushima-Daiichi-Nuclear-Power-Plant>
- 5) 第4回 IEM (原子力事故後の廃止措置と環境修復) 資料
<http://www-pub.iaea.org/iaeameetings/44453/International-Experts-Meeting-on-Decommissioning-and-Remediation-after-a-Nuclear-Accident>

- 6) 第5回 IEM (人的・組織的要因) 資料
<http://www-pub.iaea.org/iaeameetings/45441/International-Experts-Meeting-on-Human-and-Organizational-Factors-in-Nuclear-Safety-in-the-Light-of-the-Accident-at-the-Fukushima-Daiichi-Nuclear-Power-Plant>
- 7) 第6回 IEM (放射線防護) 資料
<http://www-pub.iaea.org/iaeameetings/46522/International-Experts-Meeting-on-Radiation-Protection-after-the-Fukushima-Daiichi-Accident-Promoting-Confidence-and-Understanding>
- 8) 第7回 IEM (シビアアクシデントマネジメント) 資料
<http://www-pub.iaea.org/iaeameetings/46832/IEM7>

著者紹介



山田勝己 (やまだ・かつみ)

国際原子力機関 (IAEA)

(専門分野/関心分野) 改良型・革新的水冷
 却炉の開発, 研究開発の国際協力促進



From Editors 編集委員会からのお知らせ

— 最近の編集委員会の話題より —
 (7月7日第1回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・英文誌は6月期に26論文, 和文誌は7論文が投稿された。英文誌10月号入稿済。11-12月号 HTTR 特集入稿中。掲載待ち時間が長期化していることへの対応が検討された。
- ・投稿審査システムがアップデートされ, マニュアルを更新。
- ・グループメンバーが確定した。
- ・英文論文審査・査読要領の改正案をほぼ確定した。
- ・Progress in Nuclear Science and Technology 掲載論文に DOI 記号を付すこととした。

【学会誌関係】

- ・平成26年度の学会誌運営方針について編集長から説明があった。
- ・他学会が今までに「震災及び福島事故に関連した掲載した記事」のこなどを学会誌向けに書いてもらう。これを来年3月の特集号として掲載する。
- ・海外情報連絡会から提案のあった ANS と学会誌の記事交流の取り纏めは海外情報連絡会が行う。その一環として, 今後 ANS が提供した記事は学会誌に掲載していく予定。
- ・今後の記事テーマとして, 過去に掲載した「匠たちの足跡」なども今後検討していく。

編集委員会連絡先 < hensyu@aesj.or.jp >

私の 主張

福島第一原発従事者を守る仕組みの構築を

Appreciate FUKUSHIMA Workers 吉川 彰浩

震災から3年と2ヶ月が過ぎた現在において、SNS、新聞、ニュースを通し、福島第一原子力発電所（以下、福島第一）で起きているトラブルの原因が、作業員の不足を要因とするヒューマンエラーであることは、昨今ようやく叫ばれるに至った。

「作業員が、なぜ不足するのか」この問題を掘り起こすことにより、福島第一従事者が必要としている本質を一般社会へ提起し、作業員不足に歯止めをかけ、遅々として進まぬ福島第一原子力発電所の収束状況を改善に導きたい。

1. 原発作業員と一括りにできない

福島第一に従事される方々を「原発作業員」と一括りではないことを説明する。

大別すると「震災前から発電所立地地域に住み、発電所の業務に従事する者」と「震災後から新規に発電所の業務に従事する者」に分けられる。

前者については原子力発電所の運転と安全を支えるため、法令に縛られた13ヶ月に一度の総点検と東京電力が定めた定例点検による、点検修理作業を請負っていた。それらは1年を通じて安定的に彼らに仕事を供給するよう配慮されており、それ故に日々放射性物質と放射線を取り扱う作業を行うため、作業技術と作業安全に長けた人間達で構成されている。発電所立地地域に住んでいたため、福島第一原子力発電所事故により避難生活を強いられている。事故当時、復旧作業に従事していたため、初期被ばく線量が高い。

後者においては、主に福島第一構内の瓦れきの撤去や汚染水を貯めるためのタンク設置といった建設作業を請け負っている。原子力発電所での作業が初めてといった人間達で構成され、放射性物質を扱う作業に対する技術と安全については未熟である。また放射性物質への知識についても未熟である。

現在の福島第一は仕事内容により、原子力発電所特有の放射性物質を扱う作業に慣れた熟練者と慣れていない者が混在している状況になっている。

2. 震災後の福島第一構内作業の内容と量の変化

福島第一原子力発電所の事故により、福島第一構内の作業内容は一変した。水素爆発により破壊された設備の

瓦れき撤去、汚染水対策のためのタンク設置といった建設業が主業務となり、発電所の運転、安全に関わる点検修理業がほとんど行えない状況となった。稼働を目的とした作業は今後生まれず、必要最低限の安全設備機能を残すのみとなり、将来にわたり安定した仕事量が生まれるものではない。

この状況はもともと従事する者にとっては福島第一が現在から将来にわたり、まったく仕事がない状況を指している。

常時数千人の生活を保てるほどの仕事量は減り、それに代わる建設業は建設時の雇用は確保できるが、長期的スパンで仕事を生み続けるものではない。

今後の廃炉作業を長期的に見ると、安定した仕事量は激減した状態になった。

3. 従事者が辞めていく理由は様々

1. で述べた、元来の従事者のほとんどの方が原子力事故により避難生活を送っている。帰還が進まず今も避難先から通勤している。避難当時は通勤を考慮できる余裕はなかった。今も続く彼らの長時間通勤は避難が根本原因となっている。避難と勤務先での過酷な労働環境にて心身ともに疲弊し辞めていく者が後を絶たない。また、2. で述べた仕事量の激減により、発電所で勤務していくことにより生計が成り立たないことも大きな要因となっている。直接、東京電力より仕事を請け負えない規模の中小企業においては企業そのものが破産する事態につながり、労働者として働き続けたい意思を越え、離職せざるを得ない状況も起きている。

新規で福島第一に勤務する建設業の者は、一時的な仕事として入構している。それは与えられた仕事が終われば、建設業本来の一般市場側へ流れる当たり前の事象が起きている。離職ではなく、別な作業現場へ移動するといったものである。しかし、新規で入構した者も、警戒区域内に拠点となる町が失われた今、福島第一から遠方の都市での生活を送っている。それは前者と同じように長時間通勤を強いられる結果となっている。また、一時的な仕事として企業側も捉えており、多くの従事者はプレハブ住宅や民宿といった、プライバシーの保護が行き届かない生活を送っている。彼らにおいても発電所構内の過酷労働と生活とに心身共に疲弊し、離職する選択を

する者が後を絶たない。

原子力従事者への偏見、差別も続いている。放射性物質への知識や理解が一般社会に浸透したとは言えない状態が、今も原子力従事者＝放射能に汚染された人々といった誤ったイメージを植え付けている。その偏見、差別が家族側に及ぶことを恐れ、辞めていく事例が続いている。

従事する者が抱える放射能による健康不安も根深い。元来の従事者においては初期被ばく線量が100mSvを超える者もいる。事故初期の混乱においては線量計を身につけることもできず、あくまで参考値とされたのも要因になっている。放射線による人体への影響は確定的に捉えられない背景もあり、不安を完全に払しょくはできない。生活よりも健康を優先するといった考えにより離職する者がいる。

積算線量により職場に留められない問題が発生している。これは元来の従事者に多い。事故直後の初期被ばく線量が高く、5年で100mSv未達の法の制限のもと、積算線量限度に達し原子力に従事することが許されず、事務職側に移る事態になっている。会社を維持するのが困難な仕事量の状況においては、事務員として雇い入れておくことができず、解雇される事態につながっている。この定めは全国の発電所で適用されるものであり、福島第一以外で働くことも不可能となっている。

整理すると「原子力事故による避難生活による離職」「過酷労働と通勤問題による身体的理由による離職」「放射能を起因とし健康不安による離職」「社会的な差別偏見による離職」「仕事量の激減により所属する会社事由による離職」「積算線量による離職」と大きく分けられる。それらは全ての福島第一の従事者に適用はされず、置かれた環境により変わるのである。

彼らが抱える問題は仕事への誇りや、やり甲斐を喪失させるに十分足るものとなっている。

4. 従事者が抱える問題は従事者個人では解決できない

前述した辞めていく理由についての特色は、従事者個人で解決できるものではないということが挙げられる。

原子力事故は発電所設備だけではなく彼らの生活基盤をも破壊した。それらは彼らの自己努力にて解決できる範ちゅうをはるかに逸脱していると言える。

5. 原子力産業に関わる者としての責任

現在の福島第一に従事する者の環境は辞めないでいら

れる条件を探す方が難しい。人材流出が大きな問題と取り上げられる背景には、震災前に原子力産業の40年という長い歴史の中で構築されていった公私にわたる環境が崩壊していることに原因がある。原子力産業の平和利用をうたい、そして安全と安心をうたうことができたのは、原子力産業を支える従事者が安心して生活できる、安定した基盤があったからと言える。

原子力の平和利用を原子力従事者が支え続けてきたということを忘れてはならない。震災から3年が過ぎ、現地で起きている問題について、福島第一構内の労働環境のみで捉え傍観し過ぎてはいないか。

福島第一にて従事する者が安心して働いていける環境とは発電所構内に収まらず、原子力事故により喪失した生活基盤にも及んでいることを理解し改善せずには、人材流出に歯止めがかかることはない。

原子力産業に携わる我々は、原子力発電所と共生している、していた地域の経済性や地域性についても学ぶ必要があり、原子力と共に歩んだ地域への復興にも責任を持たなくてはならない。

6. 禍根だけを残してはいけない。

彼らが抱えた問題からは、原発事故により破壊された福島第一周辺立地町村の復興の遅れが見えてくる。世界でも類をみない大事故に巻き込まれた地域と共生しながらの収束作業であることを忘れてはならない。彼らの問題を解決していくことは、被害地域の復興そのものである。

人材の流出が問題になった先には、人材の確保が問題になる。何十年と続く作業は福島県の被災地域が担うことになる。無責任に放置し担わせることはあってはならない。問題に対し、託せる状態を作り上げ、引き継ぐことが原子力の恩恵を受けてきた我々の責任でもある。その責任から目を逸らすことは将来にわたり禍根を残すこととなる。

次世代のために、しかるべき教育と訓練設備を作り上げること、彼らが安心して生計を立てられる生活環境整備を行うこと、原子力従事者が誇りある仕事として認知すること、今行うことは労働環境の改善だけではないのだ。

次世代への責任を持つという点において、国、東京電力、地域行政、我々民間も協力して成し遂げていかなくてはならない。

(2014年5月30日記)

談話室

英国で感じた原子力施設の息づかい

福井 由紀子

見上げれば110メートルの煙突。

プルトニウム生産炉としての稼働を終え、現在は解体が進められているウインズケール炉のものだ。英国核開発の歴史そのものであるこの煙突の迫力に圧倒される私の横で、遠くを見ながらガイドがつぶやく。

「2週間前はあんな場所に直結コンベアなんてなかったのに。サイトの様子が毎日変わるから、案内役も大変だよ。」

古い施設の解体と新しい施設の建設が同時に進むセラフィールドでは、工事の音が幾重にも響いていた。

3月、在日本英国大使館のご尽力により、セラフィールドの原子力施設を見学する機会に恵まれた。気候変動問題への取り組みに力を入れる英国では、二酸化炭素の排出削減という文脈で、原子力エネルギーへの回帰がはかられてきた。そして、すでにその方向性は定着した感がある。

今回の滞在中にエネルギー・気候変動省の職員や、原子力産業協会の担当者、気候変動委員会の幹部とそれぞれ意見交換をすることができた。驚いたのは、いずれの関係者も「英国の原子力分野において福島原子力発電所事故の影響はない」と強く言い切ったことだ。日本国内で感じているよりも海外はずっと冷静だろうと予想はしていたが、あまりにあっさりとは断言されるので、拍子抜けした。

■研究分野の熱気

原子力利用への積極姿勢は、政府の出資にも現れている。2013年3月、英国政府は「英国の原子力の将来」という原子力工業における戦略文書を発表。その中で、「技術研究のために大学や企業が使える施設を作るために、2012年度から14年度の会計で1,500万ポンドを投資する」とした。このプロジェクトの中心になるのは、国立原子力研究所(NNL)だ。

NNLには、政府からのこの投資以外にも資金が集まっている。NNLがウインズケール研究所に増設中のラボを見せていただいた。

案内されたホットセルには“cave”と呼ばれるマニピュレーターユニットが13個並んでいた。「燃料の実験



屋外燃料貯蔵プールとウインズケール炉の煙突(提供：NDA)

や検査を幅広く行えます」と担当者は胸を張る。「軽水炉、改良型ガス炉、マグノックス炉、どのタイプの燃料キャスクにも対応しているのが“売り”です」と繰り返されると、「ああ、イギリスに来たのだなあ」と実感するものの、個々の設備は日本の研究施設のものとはあまり差がないようだ。それでもなぜか力強さを感じるのは、施設の規模の大きさと関係者の熱気によるものだろう。「こちらの設備は最新のもので。試運転を終えて本格稼働に入るのは2016年の予定で…」一歩進むごとに研究所の“売り”が紹介される。

実はこの日、ラボは屋根の工事中で、通路には「雨漏り注意」の張り紙があった。屋根もまだできていないのに、それを上回るピッチで設備をどんどん充実させていくという前のめりの姿勢に、圧倒された。

■レガシーとの闘い

もう1つ印象的だったのは、屋外燃料貯蔵プールだ。第一世代のマグノックス炉から出た使用済み燃料が、1960年代からずっと貯蔵されているという。プールの細い縁を歩きながら説明を受けるが、つつい足下ばかりを見てしまう。

「昨日雨が降ったから、ちょっと水が濁っていて残念ですね」

カンブリアのひんやりした空気の中でプールの水面が風に揺られる光景は、忘れられそうにない。

これまで、スラッジを取り除きながら安定的に貯蔵を続けてきたというが、やはり老朽化は見取れる。燃料を安全性の高い容器に収容すべく、移送作業が行われていた。作業は2011年にやっと始まり、来年度には全ての燃料を収容予定で順調なペースで進んでいる。

古くから原子力を利用してきただけに、英国内にはこの屋外燃料プールのような「過去の遺産」が数多く存在する。セラフィールドだけでも廃止措置が必要な施設が、2,200以上。気が遠くなるような数だが、すでに69の施設が完全に取り壊され、空いたスペースは新たな廃止措置のために利用されているのだという。

■ NDA の存在感

複数の廃止措置を進める上で重要な役割を果たしているのが、原子力廃止措置機関(NDA)だ。ジョン・フィリップス広報部長に話を聞いた。

2005年にNDAが設立された背景について、フィリップス氏は「原子力利用拡大という方針を国民に説明したいと思えばこそ、政府は、廃止措置への取り組みで誠意を見せることが不可欠と考えたのではないか」と指摘した。

米・仏と比べても廃止措置に特化した機関はユニークであり、英国がこの分野に力を入れていることが(裏を返せば、それだけ悩まされているということが)うかがえる。

セラフィールドの敷地内でも、NDAのヘルメットをかぶった人を多く見かけた。現場での存在感の一方で、



セラフィールド全景(提供：NDA)

役割はどう位置づけられているのか。フィリップス氏によると、作業の安全性は、規制当局と、何よりもまず事業者自身が判断をするべきであり、NDAがその責任を肩代わりすることはない。当然ながら、実際に作業を行うのは事業者であってNDAではない。NDAの役割はあくまでも、廃止措置が技術的に進歩しながら効率的に行われるようにすることだと繰り返す。

「事業者が選手、規制当局が審判なら、NDAはコーチということか？」と質問すると、フィリップス氏は「ヘッドコーチだね」と頷いた。

コーチの目から見て、廃止措置の鍵となるのは人材の育成だという。

「廃止措置で必要になるスキルは、施設の安全運転で求められるスキルとは全く異なる。廃止措置の過程では、毎日毎日昨日とは違う行程が行われる。それは『施設の建設を巻き戻す』発想に近い。」

【施設を作った経験があるからこそ安全に解体ができるのだ】という指摘は、実感がこもっていて非常に興味深い。

■呼吸するサイト

今回のセラフィールド訪問で最も感じたのは、複合サイトの強みとscrap and buildの重要性だ。

1つの敷地の中に複数の施設が存在する複合サイトは、日本にもある。東海、敦賀、六ヶ所…。しかし、セラフィールドから受ける印象は、それらとは少し違っていた。自由に手足を伸ばし、大きく呼吸をしているようなサイト自体の生命感。施設が生まれ、役目を終えれば当然のように解体される。そして空いたスペースにはまた次の施設が、当然のように現れる。

厳重な警備が敷かれたエリアには銃を持つ兵士が見張りに立ち、最近できたばかりだというプルトニウム貯蔵施設が銀色に光っていた。この複合サイトの中心には「核施設」があるということを忘れてはならない。さまざまな条件を日本とそのまま比べることはできない。

しかし、学ぶところは多い。

(2014年5月21日記)

本学会の裁判判決に対する 見解表明への私見

京都大学名誉教授 木村 逸郎

本年5月21日に出された福井地裁の関西電力大飯原発3、4号機の運転差し止め訴訟で、原告側の請求を認める判決が出された。これに対して、5月27日に本学会が見解を表明した。

設立総会から出席し、これまでずっと本学会と関係が深かった筆者から見て、福島第一原発事故以降の本学会の活動は、反省を糧に真摯で積極的であったと認識している。とくに外部への見解表明や質問への応答も真面目に取り組んできた。ただ、政府事故調の発足に際して、個人の責任追及をしないように本学会が申し入れたことは、世間ですこぶる評判が悪かったし、筆者自身も感心しなかった。

このたびの上記裁判判決に対する見解表明について、私見を述べてみたい。

(1) 本判決に対する筆者の意見は本見解に近いが、本学会が裁判の判決に対してそれを非難する見解を表明することについて、筆者は疑問の念を抱いている。会員の多くはこの見解を支持しているであろうし、学会の中で民主的に決められたことなので、積極的に反対までしないが、学会の歴史に照らしたとき、これで良いのかと感じている。学会内の自由な議論の妨げになる恐れもある。したがって、こうした政治的な見解表明は研究者個

人として行う方がいいのではないか。

(2) 今後多くの地裁はもちろん、いくつかの高裁でもこれに似た判決が出ると筆者は考える。最高裁判所でいずれも再稼働が認められようが、それさえも一抹の不安がある。本学会として、なぜこうなったかとその対策について、改めて考えるべきでないか。

(3) 筆者は以前、日本学術会議のリスクに関する委員会で、法律や行政、さらに司法の分野においてもリスクの考え方を取り入れるべきであり、法科大学院教育でもしっかり教えて欲しいと発言したが、法律家の委員はなかなか聞いてくれなかった。本学会として、他の安全分野と連携して、こうした活動を推進してはどうか。

(4) 以前のもんじゅ行政訴訟の名古屋高裁金沢支部の判決に際して、筆者は裁判官の不勉強を感じた。当時の裁判長は原告側と被告側から講師を呼び内々で勉強会をやられたというが¹⁾、不十分でなかったか、それとも被告(旧動燃)側の説明が下手だったのか、こうした裁判における調査員制度は機能しているか、などまで、学会は目を光らせて欲しい。

(5) 裁判官、それも当該の裁判の裁判官と議論することは許されないが、学会としてももう少し広く法曹界や大学の法律関係の人々と意見交換ができないか。

(2014年6月4日記)

— 参考文献 —

- 1) 磯村健太郎、山口栄二、「原発と裁判官—なぜ司法は「マルチダウン」を許したのか」、朝日新聞出版、p.119(2014)。

理事会だより

会員の皆様とのよりよいコミュニケーションのために
—学会誌「理事会だより」ページの試行—



1. 「理事会だより」の開始について

日本原子力学会(以下、「本会」)では、平成23年の東京電力福島第一原子力発電所事故(以下、「福島事故」)以来、福島との関わり合いが本会の最重要課題であるとの認識と、かつ事故を防ぎえなかったことへの反省から、昨年6月の通常総会で定款を変更し、本会の事業の中に事故にかかわる環境修復、地域住民の支援、更には事故炉の廃炉支援を明確に位置付けました。

以来、部会・連絡会および常置委員会、研究専門委員会ではそれぞれに福島事故からの回復に向けた取り組みを活発に行っています。このほかに理事会の直轄組織として学会事故調査委員会(以下、「事故調」)を昨年6月に立ち上げ、報告書を今年3月に出版(英文版も出版予定)したのはご存知の通りです。

また、事故にかかわる環境修復、地域住民の支援等を福島県の住民の方々立場に立って活動をする目的で福島特別プロジェクトを立ち上げ活動を続けています。

一方、福島事故後の我が国の原子力事業活動は困難な状況に置かれており、会費をその主な財源とする本会は厳しい財務状況に置かれています。今まで通り本会活動を活発に続けていくためには、会員相互のコミュニケーションだけでなく、理事会、事務局を含めた本会全体の活動の活性化を図り、今まで以上に世の中の認知を得て新たな会員を獲得していくことが極めて重要です。

今後、このコラムで本会の活性化のために理事会での活動状況や会員の皆様へのメッセージをタイムリーにご紹介します。たとえば、理事会での決定や審議事項で会員の皆様に知っていただきたいこと、福島事故関係の活動状況のお知らせや会員の皆様へのご協力依頼、担当理事(常置委員会)からの報告やメッセージ、本会の財務状況のご報告、理事会や事務局人事ほか、会員の皆様に本会の活動をより身近に感じていただける話題を選んでご報告します。

今後1年程度「理事会だより」を試行設置した後、会員の皆様からのご意見や反響等を見ながら常設化するかどうかの判断をしたいと思えます。また、会員の皆様からのご意見やご提案をいただき、掲載内容を改良・刷新していきたいと考えていますので、下記のメールアドレスにご意見やご提案をお寄せください。

—————理事会だよりへのご意見の送り先—————

rjikaidayori@aesj.or.jp

2. 福島でのシンポジウム開催(8月30日)のお知らせ

本会は環境省や福島県と共同で、除染活動支援のための福島でのシンポジウムを今までに6回開催し、現地住民の方々に密着した活動を行っています。

今回、第7回のシンポジウムとして、低線量被ばくの影響や除染後の対応に関する住民の方々の疑問や不安等に女性の立場に立って、女性がお答えするシンポジウムを企画いたしました。

女性だけではなく男性の皆様にも数多くご来場いただき、有用な意見交換ができることを期待していますので、会員の皆様の数多くの参加をお待ちしています。

日時：平成26年8月30日(土)13:00～17:00

場所：コラッセふくしま 多目的ホール(福島市)

<http://www.corasse.com/category/access>

参加費：無料

プログラム：

講演1「放射線の防護」：神田玲子氏

講演2「放射線の影響」：宇野賀津子氏

講演3「子供たちの健康」：市川陽子氏

パネル討論 ファシリテータ：布目礼子氏

パネリスト：講演者、横山須美氏、八塩晶子氏(予定)

(詳細は学会ホームページ参照)

3. 理事会からのお知らせ

① 「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」が活動開始

世界の原子力分野の専門家が福島事故の事故炉廃炉の進展に関心と懸念を示す中、本会では事故調報告書の提言をフォローし、事故炉の廃止措置支援等の活動について、本会としての体制を整え、この問題に長期に取り組む観点から、新たに特別な委員会として理事会直轄の「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」の設置を今年6月の総会で決定しました。

会員諸氏の積極的なご協力をお願いいたします。

② 澤田前事務局長の退任と新事務局長の公募について

一昨年7月に就任した理事・事務局長の澤田隆氏が今年6月に退任いたしました。本会「事務局長規定」に基づき、現在公募手続きを進めており、今年10月の新事務局局長就任を目指しています(詳細は本会ホームページ参照)。それまでは、事務局次長 富田靖氏が事務局長代行を務めます。