

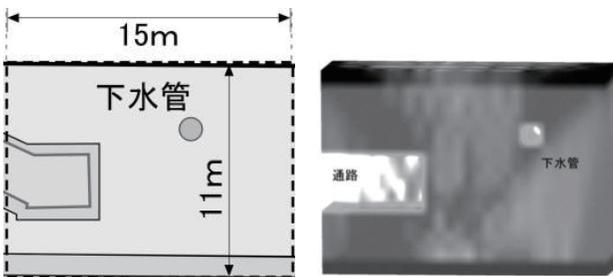
巻頭言

- 1 「審査と稼働の同時並行化」を原子力規制改革の柱に! 石川和男

解説シリーズ ミューオン (1)

- 14 宇宙線ミュオンを利用した地盤や大型構造物の内部可視化技術

宇宙線ミュオンは、20世紀後半に地盤や大型の構造物を対象に内部を可視化する技術として考案された。これまで火山内部の可視化などが実現している。本稿では地盤や大型構造物の可視化技術としての最近の成果を取り上げ解説する。 鈴木敬一



下水管や通路がある地下空間を3次元トモグラフィで探査した断面図の例

解説シリーズ 地層処分概念の変遷 (1)

- 19 地層処分黎明期(1950年代～1980年代中頃)

高レベル放射性廃棄物の最終処分についてはなぜ地層処分が選ばれたのか。それはどのように具体化され、実施段階に入ろうとしているか。その経緯を3回に分けて紹介する。 増田純男, 佐久間秀樹, 梅木博之

連載 放射性廃棄物概論—施設の運転および廃止措置により発生する放射性廃棄物の対策

- 50 第8回(最終回)将来展望

今回は放射性廃棄物の地層処分に焦点を合わせ、実施に向けた課題を整理する。また、福島原子力発電所事故に伴う廃棄物についての処分についての基本となる考え方について記述する。

大江俊昭, 新堀雄一

時論

- 2 原子力の課題への挑戦

我が国がなすべきことはこれまで培ってきた原子力技術と事故の経験によって、世界の原子力安全の確保に貢献していくことだ。 田口 康

- 4 福島を理解自体の困難を乗り越えて

その背景には「敵・悲劇フレーム」と「量的把握の不可能化」がある。 開沼 博

- 6 IRED 2014 からのメッセージ

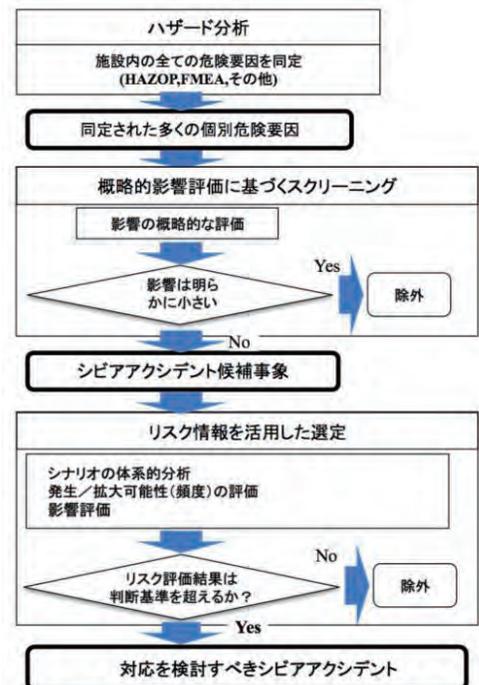
IRED は、再生可能や分散電源のエネルギーシステムへの統合に関する国際会議である。 荻本和彦

解説

- 25 核燃料サイクル施設における対応を検討すべきシビアアクシデントの選定方法と課題

再処理・リサイクル部会核燃料サイクル施設シビアアクシデント(SA)研究WGは、核燃料サイクル施設における内的及び外的事象に起因する事故SAをとして選定する方法について議論し、その成果をまとめた。

再処理・リサイクル部会
核燃料サイクル施設シビアアクシデント研究WG



34 原子力における水素安全の課題と対策 —原子力における水素安全対策高度化 ハンドブック

福島第一原子力発電所事故では原子炉建屋で水素爆発が発生した。軽水炉の事故時水素をめぐる様々な事象の連鎖については異分野の専門家が共通の理解を持ち、共同でその知識を更新していくことが求められる。

小川 徹, 中島 清, 日野竜太郎

40 川内村における放射線健康リスク コミュニケーション—長崎大学・川内村 復興推進拠点における活動を通して

放射線健康リスクコミュニケーションを行うにあたり、地元の行政機関と専門家とが連携を取り住民に対してきめ細かい対応をとっていくことが重要だ。

折田真紀子

「匠」たちの足跡

44 内部被ばく実験棟とプルトニウム内部 被ばく研究 <—研究者の回想録>

放射線医学総合研究所では内部被ばく実験棟を建設し、プルトニウムの生物影響リスクを評価するための実験を行った。ここではその経緯と、そこから得られた成果を紹介する。

小木曾洋一

報告

56 ISCN-WINS 共催ワークショップ開催 報告—核セキュリティと原子力安全の インターフェース

原子力安全と核セキュリティは密接に関係している事から、拮抗する事象の発生を抑制すると共に、双方の役割を尊重した対策を取る必要がある。

中村 陽



初期対応時を想定した演劇

8 NEWS

- 「外から見た原子力学会」をテーマに
- 1号機燃料は下部へ溶け落ちたと推定
- 美浜など5基が廃炉に
- 原子力委、基本的な考え方を取りまとめ
- 高レベル廃棄物処分基本方針を改定へ
- 規制委員会が5か年中期目標を決定
- IAEAが福島第一をレビュー
- IAEA、日本の核セキュリティを評価
- 原燃、ガラス固化流下性の向上を確認
- 海外ニュース

会議報告

59 各国原子力分野の若手との議論で得た 経験—2014年度世界原子力大学夏季 研修に参加して

西内嗣浩

福島からの風

60 民間ボランティアの使命

吉田憲一

理事会だより

62 学会の経営健全化に向けた取り組み

- 33 From Editors
- 55 新刊紹介「生命科学の欲望と倫理」 木村逸郎
- 61 新刊紹介「プラズマ物理の基礎」 新谷吉郎
- 意見交換の広場「日本学術会議の「HLW 処分」
について」 豊田正敏
- 63 会告 平成27年度新役員候補者投票のお願い
- 64 会告 平成27・28年度代議員の決定
- 65 会報 原子力関係会議案内、共催行事一覧、人事
公募、新入会一覧、意見受付公告、英文論文誌
(Vol.52, No.5) 目次、主要会務、編集後記、編集関
係者一覧
- 後付「第47回(平成26年度)日本原子力学会賞受賞概要」

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「目安箱」
(<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/>

「審査と稼働の同時並行化」を原子力規制改革の柱に！



NPO 法人社会保障経済研究所 代表

石川 和男 (いしかわ・かずお)

1989年東大工卒，通産省(現経済産業省)入省。
電力・ガス改革，産業保安，産業金融政策などに
従事。2007年退官。

今の原子力規制運用における最大の隘路は，“40年規制”と“バックフィット”。

まずバックフィット審査。これは本来，プラントを稼働させながら実施することが，諸外国の原子力規制や他の産業保安規制の運用とも整合する合理的な方法。だが規制委は，いわゆる“田中委員長私案”により，稼働させながらのバックフィット審査ではなく，停止した状態でのバックフィット審査に合格しないと再稼働は認めない，という運用ルールを決めてしまった。こんな重要ルールを法令ではなく私案で決めてしまうのは行政として甚だ不適格である。規制委は本当に行政機関なのか？それを黙認している政治やマスコミは一体何なのか？

次に40年規制。前政権時の法令変更により，“原則40年だが，規制委の認可で1回限り20年の運転延長が可能”とされた。この40年という数値に科学的根拠はない。この認可基準は，なんとバックフィット規制に係る基準と同じなのだ。40年規制は長期運転原発の安全性確保に関するもので，バックフィット規制は原発を常に最新基準に適合させるためのもの。バックフィット規制の審査は再稼働までに行えばよいとしているのに対し，40年期限を超えようとしている原発には40年期限までにバックフィット規制の完了を条件としている。これはおかしい話だ。

例えば，60年までの運転が認可された原発で，60年期限までに基準が見直されたら，その時点でバックフィット規制が適用される。バックフィット規制は原発の年齢に関わらず適用されるもの。40年期限が迫る原発だけに適用されるものではない。他方で，こうした規制によって40年期限を迎えた原発の運転許可を失効させたとしても使用済燃料は存在しており，安全を保つ必要性は失効以前も失効以後も同じ。失効に至った原発では，使用済燃料の管理などに関してバックフィット規制が適用されるとしても，そのための設備投資を行うための資金調達能力はほぼ皆無だろう。

原発の安全を考える時，“停止＝稼働時より安全”でもなく，“稼働＝停止時より危険”でもないことをしっかりと認識しておく必要がある。原発の運営においては，安定的な発電によって安全投資のための資金を調達しなければならない。原発のライフサイクルがそういうものであることは，建設計画段階から了知されていることだ。

今，40年以上の運転延長を目指している関西電力の高浜原発1・2号機と美浜3号機。ただでさえ“無期限”化しているバックフィット審査を，40年規制と絡め，1年程度で審査が終わらなかつたら，それは事業者の対応が悪いからと事業者に責任を押し付けるのが現行のバックフィット審査の運用。これは適切な規制運用ではない。

規制委はバックフィット審査の途中で40年期限を迎えた原発についても，運転許可を失効させるのではなく，審査を継続するような規制改革を行うべきだ。その際，バックフィット規制の運用として，稼働(発電)しながらの審査の実施を積極的に容認していくことも必須である。40年規制は原発を殺処分するためのルールではなく，原子力平和利用を適切に進めていくためのルール。「年間3.7兆円」，「1日当たり100億円」を超える国富流出を一刻も早く止め，原発の安全投資へと振り向けていくための財源を確保すべきだ。それこそが『原発の正常化』に他ならないからだ。

(2015年3月5日記)



原子力の課題への挑戦



田口 康 (たぐち・やすし)

文部科学省大臣官房審議官(研究開発局担当)

1986年科学技術庁入庁。1996年在ロシア大使館一等書記官, 2001年文部科学大臣秘書官事務取扱, 2007年研究振興局研究環境・産業連携課長, 2009年研究開発局原子力計画課長, 2010年同環境エネルギー課長, 2012年同開発企画課長, 2014年大臣官房政策課長などを歴任し, 2015年1月より現職。

私が、「原子力の岐路, 私の岐路」というタイトルで2009年10月号の本誌本欄に寄稿させていただいてから5年半が経過した。当時は「原子力カルネサンス」という言葉が使われるほど原子力の有用性が認められ, 地球温暖化ガス排出削減への貢献, 原子力発電プラントの輸出, 高速増殖炉実証炉建設計画の前倒しなど, 原子力開発利用への機運がおそらく原子力の黎明期以来高まっていた。一方で将来に向けて解決すべき多くの課題もあり, 人材確保をはじめ我が国の原子力技術の国際競争力を高めていくことが必要だった。東京電力福島第一原子力発電所(1F)事故以降, 成すべきことは多様さと困難さを増しているが, 今, これらに果敢に挑戦していくことが必要だと思う。

エネルギー安全保障や温暖化ガス排出削減など我が国にとっての原子力エネルギーの重要性・必要性は, 多くの(大半ではないかも知れないが)国民に認識されていることと思う。だからこそ, あのような事故の後も政府はエネルギー基本計画において原子力を「重要なベースロード電源」として位置づけた。また, 国際的には原子力発電が拡大していく中, 我が国がなすべきことはこれまで培ってきた原子力技術と事故の経験によって, 世界の原子力安全の確保に貢献していくことだと考えるし, 多くの国々がそれを期待している。

そして原子力発電を行う限りは, 使用済燃料を含む放射性廃棄物の処理・処分の問題を解決しなければならない。ここには, 数々の, また研究から実際の処分まで様々な段階のチャレンジングな課題がある。まず実現すべきは六カ所の再処理施設の運転開始とそこから出てくる高レベル放射性廃棄物の処分地の選定であるが, 中長期的には減容化・有害度低減のための高速炉やADS(加速器駆動システム)による核変換技術の開発がある。高速炉による消滅処理と核燃料サイクルの高度化の研究開発を本格化するためにもんじゅの再稼働を早く実現させなければならない。ADSは未だ基礎的研究段階である

が, 我が国の加速器技術の優位性も活かすことができ科学的・技術的にも大変興味深い。また, 高レベル放射性廃棄物処分では安全をより確かなものにするための技術開発や試験のみならず, 処分地選定のための社会科学的アプローチが求められている。

さらに, エネルギー基本計画においては, 高温ガス炉の研究開発を進めることが明記された。燃料電池自動車の市販開始等水素エネルギーの本格的な利用が視野に入り, また, 固有安全性の高い中小型炉が国際的に注目されてきている中, 高温ガス炉が見直されている。日本原子力研究開発機構(JAEA)は高温工学試験研究炉(HTTR)の開発・運転を通じて, 950℃という世界一の熱取り出し能力を達成しており, これを次の段階に発展させることが重要である。まもなく「高温ガス炉産学官協議会」も設置されることとなっており, 今後の展開に期待が持てる。

私は, かつて安全規制を担当していた頃から, 原子力開発利用を規定するのは安全規制のあり方だと考えていた。しかしながら, 霞ヶ関の省庁の中で規制業務は, 政策の企画・立案業務などと比べてあまり高い地位を与えられず, 政策的な決定事項を実現するための新たな基準等の作成を除き, 主として既定の基準等に基づく確実な業務の実施のみが求められてきたのではないだろうか。原子力の安全確保のための規制は, 国民からの信任を得て原子力開発利用を進めていくために最も重要であり, 確実な安全規制業務の実施が求められる一方, 新技術の適用や世界的な動向も見ながらその手法や安全確保の考え方を常に進化させて行くべきものであると思う。それがあって初めて事業者は新技術の導入や安全性向上のための研究開発等が可能となる。1F事故後の原子力規制委員会の設置や新規基準の適用によって, 私がかつて考えていたことが現実のものとなっているが, 最新の科学的知見を合理的な規制に繋げていく安全規制の専門人材の育成と確保が最大の課題であると思う。

これら従来からの課題に加えて, 1F事故そのものへの

の対応が我が国の最重要課題として残っている。

汚染水対策では、モニタリングと汚染物質の性状把握、流出対策、処理等を行うが、そこでは地質学や様々な核種除去プロセスのための化学等の知見や技術開発が必要となる。

廃炉作業は更に技術的難易度の高い多くの課題があり、人類の英知を結集して取り組むべき課題である。現在は、メルトダウンした1～3号機の炉内状況の把握とそれに基づく技術戦略を構築中であるが、ロボット技術や高エネルギー物理学研究所(KEK)のミュオン測定装置を用いるなど、様々な分野での最新の知見を導入してデブリ取り出しを実現すべく研究開発やその成果の応用への取組が行われている。JAEAはこれを加速するため「廃炉国際共同研究センター」を設置し、東電、国内外の企業、大学、研究機関の共同の場とする計画である。研究開発が一定程度進んでデブリ取り出し作業が始まった後も作業中に生じ得る様々な課題を解決するため、作業現場と研究現場の連携が不可欠となるだろう。廃炉作業を通じて、他分野へのスピアウトも可能な世界初の技術がいくつも出てくることが期待される。

サイト外では、避難区域の解除に向けた取組が被災地の復興のために必須である。除染作業や中間貯蔵施設の整備が続く一方で、福島県が「環境創造センター」を整備し、環境放射能のモニタリング、JAEA及び国立環境研究所による除染や環境回復のための調査研究、モニタリング結果や研究成果の情報収集・発信、放射線や環境に関する教育・研修・交流が実施される。

また、原子力損害賠償法に基づき民法等の専門家から成る原子力損害賠償紛争審査会が示した指針に従い、東電はこれまで5兆円近い賠償金を被害者に支払っているが、原子力損害賠償紛争解決センター(ADRセンター)が設置され、400名以上の弁護士が被害者と東電の和解を仲介しており、これまで7万人近い被害者がADRセンターを利用し、事故から4年が経過した現在も毎月数百件の仲介申し立てがある。

以上のような我が国の原子力を取り巻く課題に取り組んでいくためには多種多様な人材が必要である。そして今、原子力人材の育成・確保が大きな課題とされている。原子力関係企業による合同就職説明会では、参加企業数及び参加者数ともに平成23年以降激減している。我が

子が電力会社を含め原子力関係の仕事に就くことに反対する親も多いと聞く。原子力人材の不足の象徴としてよく大学の原子力工学科等の数や学生数を引用することがあるが、大学で何を専攻しても、原子力の仕事は幅広く必ずどこかでそれを活かせるだろう。決して基盤技術を空洞化させてはいけませんが、より多種多様な人材を取り込んでいくことが重要であり、「原子力村」との批判を払拭するためにも、我が国全体、ひいては人類全体の課題として様々な人達を巻き込んで仕事を進めていくことが必要だと思う。その上で、これまで述べてきたような課題に対して興味と問題意識を持って積極的に取り組む人材の育成と確保をすることが必要である。どれも社会的・技術的な意義とやりがいのある仕事であり、自然科学あるいは社会科学としてもそれぞれの分野で新しい価値を創造し得る。しかも原子力エネルギーの利用に賛成か反対かは問題とならない課題も多い。日本弁護士連合会は、原発の再稼働反対と即時廃止の意見書を出しているが、被害者救済のためのADRセンターの活動を支援している。

本稿を読んでくれている学生や若手研究者・技術者には、是非、何らかの形でこれらの課題に取り組んでくれることを望む。

私は、前回の「時論」を米国の初代原子力委員長リリエンソールの言葉を引用して次のような文章で結んだ。

一著書「岐路に立つ原子力」の中でリリエンソールは、「原子力とともに生きることが、きたるべき未来のすべての人類の“生”(あるいは“死”)の条件の一つである」と述べている。我々は、核軍縮や核不拡散と同時に、原子力というプロメテウスの火を安全に使いこなし、人類の持続的な発展を図るための道のりを着実に進まなければならない。原子力に携わる関係者が自信を持って、かつ、市民に対する謙虚な姿勢を忘れずに、我が国の原子力平和利用を進めていくことを確信している。私自身もその一員として努力を惜しまず職務を全うしたい。一

上記の思いは今でもまったく変わらないし、我が国の多くの原子力関係者も同じ思いを共有していると信じている。

(2015年3月17日記)



福島を理解自体の困難を乗り越えて



開沼 博 (かいぬま・ひろし)

福島大学つくしまふくしま未来支援センター特任研究員

東京大学文学部卒。同大学院学際情報学府修士課程修了。現在、同博士課程在籍。専攻は社会学。経済産業省資源エネルギー庁総合資源エネルギー調査会原子力小委員会委員を務める。著書に『「フクシマ」論 原子カムラはなぜ生まれたのか』(青土社)など。

2011年3月11日から今日まで、東日本大震災・福島第一原発事故の影響は続いている。ただ、多くの人が「福島の問題」の困難を認識しているが、その内実を具体的にどれだけ理解しているかはわからない。

「除染」「避難」「賠償」といった象徴的なイメージと結び付けられた福島像は氾濫するが、産業や雇用、医療・福祉、家族、教育等に対する3・11の影響や避難指示区域周辺に住む人の生活がいかなるものか具体的に把握している人は少ないのではないか。

本来ならば、時間の経過とともに論点が整理され、熱狂が落ち着く中で情緒的な議論が整理される可能性もあっただろう。だが、現実には逆に進んではいないか。つまり、論点は複雑化し、理解可能性が下がり、情緒的な議論が論理的な議論を圧倒する。一方では、「原発・放射線」でも「政府・東電」でもいいが「敵」を吊り上げる議論が、他方では「かわいそう、いつまでも苦しみ続ける人々」を恣意的に切り取った形で「悲劇」を強調し続ける「いい話」が手を変え品を変え再生産され続ける。

当然、「敵」も「悲劇」も一定程度必要だ。「原発・放射線」「政府・東電」が何も咎められることなく免罪されるほど起こっている事態は甘いものではない。悲劇の共有も重要な営為だ。例えば、心的外傷を癒やし、未来への教訓を残す上で重要な意味を持つ。

しかし、あまりにも、物事の認識がこの「敵・悲劇フレーム」に陥るがゆえに私たちが本来捉えるものを捉えきれずに来た部分はあった。いま、私たちは福島の何を知り得ているのか。多くの人は「敵」と「悲劇」があるというメタ情報以上の何を知っているのだろうか。あるいは、本誌をご覧の方の中には、福島第一原発の状況や周辺環境の状況について誰よりも詳しく知る専門家の方々も多くいるだろうがその上で、福島に生きる人々の暮らしの状況、産業のあり様、未来の描き方についてまで知り得ているのか。

「福島の問題」は時間の経過とともにより複雑になってきている。「福島の問題」の理解自体が困難になっていることを理解するべきだ。

理解自体が困難になってきている背景の一つには、いま述べた「敵・悲劇フレーム」があるだろう。もう一つは「量的把握の不可能化」がある。それぞれ説明する。

過剰な「敵・悲劇フレーム」が社会に固定化することは、社会的には「モラル・パニック」と呼ばれる社会現象としてとらえられる。「モラル・パニック」は本来、社会で共有すべき認識が共有されない状態を生み出す。

「モラル・パニック」とは、人々が漠然と感じる社会不安・恐怖感の原因を、社会体制が根本的に抱える危機自体ではなく、ある特殊な集団・事象に求める現象のことを言う。わかりやすいのが「魔女狩り」と呼ばれる現象だ。貧困・疫病・政治的抑圧などによって高まる不安のはけ口が、でっち上げてでも作られた「敵」に向けられ、それを過剰に情緒を煽るような「悲劇」が支える。

その際、「モラル」が語られることがポイントだ。つまり、「我こそが正義の側に立っている」という前提のもとで、その吊り上げ合戦は正当化され、過激化する。ナチズムにせよレイシズムにせよ、「歌舞伎町浄化作戦」や「禁煙ファシズム」と呼ばれる、人によっては過剰だとみなす施策にせよ、背景には、古来人類が繰り返してきた、同構造の集合行動の要素が見える。

ただ、3・11以後のモラル・パニックがそれらと違う点もある。それは科学と統制システム、それら自体がモラル・パニックの対象となったことだ。すなわち、「原発・放射線」等の科学と「政府・東電」等の統制システム自体が「反モラル」「悪」とされた。

通常、モラル・パニックの中で「不安・不満の原因の全て」とされる対象について、例えば「その民族(or 宗教, 文化, 科学技術…)」を蔑む理屈は合理性に照らして誤っている」と科学的に指摘する、あるいは、「その行動は政治的に正当性・正統性を持たない」と統制システムが指摘したり制度変更を模索したりすることでモラル・パニックの収束に向かう可能性が生まれる。しかし、その「歯止め」であるはずの「科学」や「統制システム」自体の信頼が失われている中ではモラル・パニックは落とすどころ

ろを見失う。疑似科学や安易な体制批判が「合理的」「正当・正統」とされ続ける。

これは大雑把な議論ではあるが、「福島の問題」の理解を困難にする背景にたしかに存在する構造であろう。

もう一つは、それと直接的につながっている課題であるが、「量的把握の不可能化」がある。例えば、放射線に関するリスクの判断をする前提として、食品の基準値を他先進国と比較したり、空間線量を世界の高い地域と比較したり、成田－ニューヨーク間の飛行機往復時の被ばく量と比較したりする。こういった「モノサシ」の共有・啓発を進めようとする事自体が批判される、例えば「御用学者」というレッテル貼りの的となるような状況があった。いままも一定程度続いているだろう。

たしかに、初期対応にまずい部分もあった。例えば、福島に暮らす小さな子を持つ女性が、専門家の講演を聞きに行ったらタバコと放射線のリスク比較の話をされ「子どもがタバコ吸っているわけでもないのに何言っているんだ」と憤るのを聞いたことがある。科学者が悪気なく使った話だろうが、その女性の感覚もわかる。「安全だという答えありき」というメタ情報しか彼女は受け取っていなかった。そのようなことが積み重なる中で「リスク・コミュニケーション」と聞いただけで「安全神話の再生」と批判的に見る人もいる。

ただ、そんな「量的把握を可能にすることに抵抗する」社会的意識が強すぎた結果、量的把握のための「モノサシ」が共有されて来なかった状況もあるのではないかと。調査をすると先に出したような最低限の知識を知らずに、漠然とした不安を語り続けるひとは多い。

また、4年たつ中で福島での継続的な調査の中からわかってきた知識も知られていない。

例えば、福島県産米の全量全袋検査の結果、毎年1,000万袋ほどの中で基準値100Bq/kg以上のものが限りなくゼロになり、20Bq/kg以上のものですらほとんど出なくなっていること。試験操業の対象となるような魚介類でも同様に放射線自体検出されないこと。ホールボディカウンターやガラスバッチを用いた大規模調査で、外部被ばくや内部被ばくの量は、野生のイノシシ・シカ・キノコ・山菜を食べ続けるようなことをせずに通常暮らししていれば、ほとんどが検出限界値以下のものであるこ

と。これらについても、私は調査を進めているが、極めて現状理解が進んでいない状況は続いている。

3・11後、人文・社会学者の中には、あたかも自分たちが一方的な被害者であるかのように振る舞う者も少なからずいた。疑似科学を信じこみデマをばら撒いたり、「人々が立ち上がれば社会は変わる」などと無茶な根性論を繰り返したりしながらモラル・パニックに加担してきた。

あるいは、「現代は科学の問題を科学では解決できないトランスサイエンスの時代である」とか、「人々の知識の欠如を埋めれば科学技術の受け入れが進むという欠如モデルではダメだ」といった言い方をしながら科学における社会的合意の重要性を説く者もいた。その考え自体には全く合意する。たしかに、「トランスサイエンス」も「欠如モデル批判」も考え方として重要だし、科学において社会的合意もますます重視されるべきだ。しかし、それらが「量的把握の不可能化」に加担してきた側面もあるだろう。数値・データに基づいた最低限の科学的前提も共有していない、今後もしそうにない現状は、3・11後の福島への認識についてトンデモサイエンスを生み出しても、それ以上の何かを生み出すことはないだろう。

これらの現状を踏まえ、乗り越えながら「福島の問題」を理解する前提を整えていかなければならない。原子炉や放射性物質に対応することも勿論重要だが、それだけではなく総体的に「福島の問題」を捉えていく必要がある。3・11から4年にあわせて刊行する拙著『はじめての福島学』（イーストプレス社）は3・11後の福島について、人口、産業、雇用、家族、旧警戒区域などの現状をデータから読み解くものだが、これは、ここまで述べてきたような課題を乗り越えながら総体的な「福島の問題」を理解する前提をつくるための一つの試みだ。4年経ったことで様々なデータが揃い、混乱も落ち着きが見えてきたからこそできる議論をしている。

山積する原子力に関する種々の課題を解決するためにも、「福島の問題」を多くの関係者が理解し、あるいは研究を深めることのメリットは小さくはないだろう。ぜひ多くの人に福島の問題に関わってもらいたい。

(2015年1月26日記)



IRED2014 からのメッセージ



萩本 和彦 (おぎもと・かずひこ)

東京大学 特任教授

東京大学工学部卒業。電源開発に入社し、直
流送電、電力系統解析、技術戦略などに従事、
2008年より東京大学生産技術研究所エネル
ギー工学連携センター特任教授(現職)

IREDは、再生可能や分散電源のエネルギーシステムへの統合に関する国際会議である。2014年11月のIRED2014では、29カ国から349名の参加者が、政府、産業、電力会社、研究機関の多様な分野の専門家がそれぞれの最新の動向を報告し、活発な議論が行われた。本稿では、このIRED2014の概要とそこからの日本そして世界に対するメッセージについて述べる。

1. IRED2014

IRED(the International Conference on Integration of Renewable Energy and Distributed Energy Resources)は、2004年ベルギーのブリュッセルでの第1回を皮切りに、米国ナバ、フランスのニース、米国アルバカーキ、前回の2012年ドイツのベルリンと、2年毎に開催されてきた。第6回であるIRED2014は、初めてのアジア開催として、2014年11月に、3日間の本会議と2日間のサイドイベントによる日程で、紅葉の京都国際会議場で開催された。筆者は、会議議長としてこの会議に参加した。

IRED2014では、アジアから20名、ヨーロッパから15名、北米から14名の、合計17カ国49名のハイレベル専門家による、再生可能エネルギーおよび分散型エネルギー資源とスマートグリッドに関する最新技術、市場と政策に関する招待講演と、一般論文のポスター発表が行われた。

招待講演では、ハイレベルの招待講演者と聴衆は、プレナリーと6つのセッションを通して、それぞれの経験と最新の情報を共有することができた。議論された内容は、導入のための政策とプログラム(Session 1)、再生可能エネルギーと分散電源のより多くの連系のための標準(Session 2)、大規模プロジェクトポートフォリオの成果報告(Session 3)、送電・配電・需要の各層における技術、システム化、モデリング・シミュレーションの最新動向(Session 4)、市場と規制の枠組み(Session 5)、近未来の最終消費者のエネルギーマネジメントシステム(Session 6)であった。

また、本分野の国際的な活動に関するサイドイベントとしては、International Institute for Energy Systems

Integration Workshop, ELECTRA IRP/EERA Smart Grids Workshop, ISGAN Smart Grid International Research Facilities Network (SIRFN) Technical Meeting, Microgrid Application to Infrastructure Resilience, U.S.-Japan Collaborative Smart Grid Project Workshop 2014が行われた。

ポスター発表では、42件の報告が行われ、会議の議論をより多くの視点から深掘りすることができた。技術交流会では、それぞれのポスターの内容を2分間で述べるエレベータートークが行われ、参加者間の対話とネットワーク作りが促進された。ポスター発表では、3つの優良賞と2つの若手エンジニア賞が与えられた。

IRED2014の詳細なプログラム、講演資料等については、<http://www.ired2014.org/index.html>を参照されたい。

2. IRED2014の背景

IREDが取り扱う分野は、いわゆるスマートグリッドと呼ばれる分野である。スマートグリッドという言葉は2008年頃、当時のオバマ新政権がリーマンショック後の景気低迷への対応策として、スマートグリッド分野への政策的な大規模な投資を発表し、日本を含めた各国がそれにほぼ追随したことで人口に膾炙するようになった。

当時、海外では、最大需要の増加に電力供給が不足(どちらかというとも米国の状況)、再生可能エネルギーの導入のために電力システムの何らかの対応が必要(どちらかというとも欧州の状況)などの異なる理由で、スマートメータを始めとする技術に大きな期待が寄せられた。他方、日本では電力需給に大きな課題がなく、日本の電力システムはすでにスマートであるという冷めた見方も多かった。

その後、海外では風力発電や太陽光発電での大規模導入により、配電網や送電網の電圧、容量の問題にはじまり、最近ではそれらの出力の不確定で大きな変動による電力システム全体の需給調整の安定問題が顕在化してきた。ドイツや米国カリフォルニア州は、国内の報道でも理想的な再生可能エネルギーの導入事例として紹介され

ることが多かったが、変動する再生可能エネルギーの大量導入により、もはや再生可能エネルギーの「優先給電」といった運用における特別扱いは限界に達し、どのようにして出力抑制を行うことが適切なのかという議論が活発化している。

我が国では、東日本大震災と福島第一原子力発電所事故に端を発する電力需給の問題は、2014年4月のエネルギー基本計画の改訂の後も本質的な解決には程遠い状況である。これに加え、再生可能エネルギー導入へのあまりに高い期待は、2012年7月の固定価格買取制度において、国際的な相場に対しかなり高い買取価格を設定した結果、太陽光発電の大量の導入申し込み・実際の導入につながり、北海道や九州南部に代表される比較的地価の安いエリアへの大量導入が続いている。この状況において、日本は、出力が不確定に大きく変動する再生可能エネルギー発電の導入の課題の深刻さにおいて、世界有数の水準に達したといえる。

3. IRED2014からのメッセージ

上述の背景のもと、IRED2014からのメッセージは、「風力発電や太陽光発電のように、出力が不確定に大きく変動する再生可能エネルギー発電を大規模に活用するためには、現在そして将来のエネルギーシステムのすべての可能性を使ってシステムの『柔軟性』を向上することが必要」でありそのためには「新しいエネルギーシステムの形成には、技術ばかりではなく、制度や運用ルールの改善、ライフスタイルの変化も必要」ということである。

具体的には、Session 1では従来議論されることの多い地域に加え、世界には、アジア、南米など様々な背景と課題に取り組みを行っている国・地域があること、Session 2では、多数の分散システムを安全、安定、経済的に調整するための標準の重要性、Session 3では大規模実証試験の最新報告が総括的に議論された。Session 4では送電、配電、需要の各層について、個別の技術、システム化、モデリング・解析技術などが議論され、再生可能エネルギーの出力抑制(調整)、需要の調整、システム運用などによる課題解決の可能性が議論された。Session 5では、卸電力市場や電力システム運用、規制の枠組みの実践と機能向上の可能性が議論され、Session 6では電力システムの需給調整の切り札となる需要の能動

化のうち、家庭などの分散エネルギーマネジメントシステムに焦点を当てた議論が行われた。

これらの議論を通して浮き彫りになったのは、2012年の前回のベルリンでのIRED2012の後の大きな状況変化として、「日本を含めた各国は、出力が不確定に大きく変動する再生可能エネルギー発電の導入の課題解決の必要性和チャンスと同じレベルで共有している」ことである。会議のある参加者は、現在の電気事業、電力市場のモデルでは解決が難しいこの状況を「溶ける電気事業・壊れる電力市場」と表現した。

標準化の議論に見られたように、教訓を共有しようとする特定のテーマに関する議論がある一方、それぞれの国や地域の実情に合わせた、地域特有の実態に沿った解決策が模索される状況もある。技術や市場の議論に見られるように、次世代のエネルギーシステムのための確実な価値を持つ多様な技術を我々は開発し、実用レベルに達しつつあるが、その技術を活用し収益化する市場設計、運用制度が不足している現実もある。

IRED2014は、再生可能エネルギー発電の導入の世界共通の課題の深刻さと、その解決のための、技術的、制度的な必要性を示したといえる。

4. おわりに

IRED2014の最大の価値は、日本がこれからエネルギーの分野で進む道について、アジアの東端から個別の専門家を訪問するなど限られた環境でしか得られない生きた情報を、各国の様々な分野のトップレベルの専門家による5日間の議論を通して目の当りにできたことである。

将来への大きな期待のみでは、社会インフラとしてのエネルギー・電力システムの進化に係る困難な課題を解決することはできない。特に、今般の課題の解決には、既存のエネルギー・電力システムの資産の最大活用と、社会インフラとして安定性、経済性、環境性そして安全性を兼ね備えた持続的なシステムの進化を、技術の開発・導入と制度の整備・改善と併せて計画的に進めることが重要と考えられる。

IRED2014で得た知識を、今後の取り組みに活用できることを期待する。

(2015年1月29日記)



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

「外から見た原子力学会」をテーマにセッション

日本原子力学会は3月20日から22日までの3日間、茨城県日立市で「春の年会」を開き、初日に「外から見た原子力学会」をテーマとするセッションを開いた。専門家集団である学会の今後の目指すべき姿を検討することがねらいで、藤田玲子会長は、「学会は福島原発事故の責任を自覚し、安全に対する意識を高め、原点に戻り再出発をしている。世界に学術的な成果を発信できる学会を目指し、他の学術分野との連携や協力も進めている。また除染情報プラザへの専門家派遣や稲作試験によるセシウム移行メカニズムの解明など、福島に住む人たちに寄り添った活動である福島特別プロジェクトを引き続き推進していく」と述べた。

また、作家の神津カンナ氏は、「原子力界の人は外の目を内部に取り入れているか、今も疑問だ。原子力に携わる人たちの視点は『どうしたら原子力のことがわかってもらえるか』に拘泥しており、一般の人たちの思いに寄り添ったものではない。人々が何を考え、何を知りたがっているかを踏まえた取り組みが必要だ」と述べた。

日経新聞の滝順一氏は、「日本の世論は原子力の存続に否定的である。それを前提に専門家は、何を社会的に負託されているかを自問すべきだ。原子力を進めること

が正しいと思う思い込みが強すぎる」と指摘。また事故については「学会は過去の清算が不十分。専門家でさえ安全神話を信じていたのであれば、なぜそうなったのか、どうすれば今後はそうならないのかを精査して公表すべきだ」と述べた。

福島県原子力対策監を務められている会津大学の角山茂章・教育研究特別顧問は、「日本の緊急時対策は、事故前はもちろん、今も不十分のまま。現場知識を踏まえた強い連携とリーダーシップが必要」と指摘。また、汚染水をめぐるとリチウムの処理については、「学会は住民側の視点に立って、セカンドオピニオンを出すべきだ」と述べた。

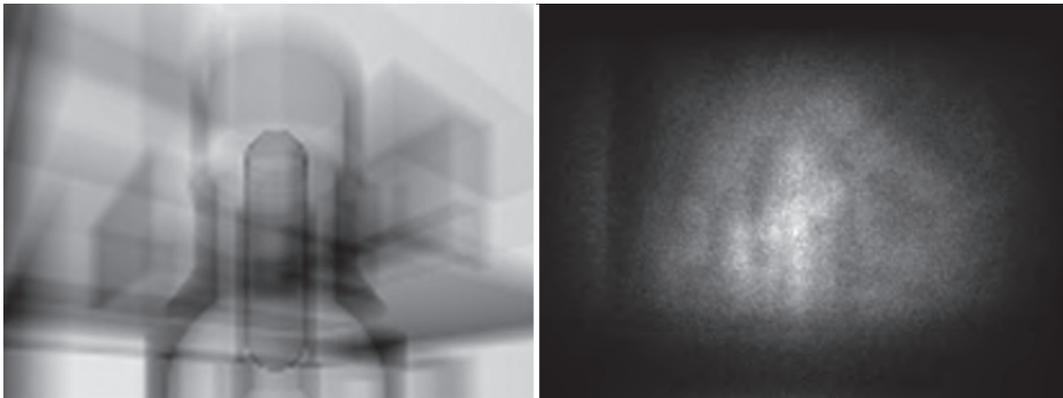
茨城県生活環境部の田中豊明理事兼防災・危機管理局長は学会に対し、科学的知見の蓄積を踏まえて国や事業者に積極的な提言をすることや、放射線に関する知識の普及に向けた情報発信、次世代を担う技術や人材の育成を求めた。また地方自治体に対しては、「専門的な立場から、自治体や住民に対するアドバイザー的な機能を期待する」と述べた。

(原子力学会編集委員会)

1号機燃料は下部へ溶け落ちたと推定

東京電力は3月19日、福島第一原子力発電所1号機の炉心には、1mを超えるような燃料の塊は確認できず、燃料は格納容器下部まで溶け落ちた可能性が高いとする測定結果を公表した(=下図)。宇宙線から生じるミュオ

ンは、核燃料のような高密度の物質には遮られやすい。この性質を利用し、2月12日から約1ヶ月かけて建屋近くにミュオンを測定する装置を置いて得られたデータを解析した。圧力容器の炉心部には水がたまっていない可



左は設計図面から作成したイメージ。右は測定結果から得られた画像(東電HPより)

能性が高いことや、燃料プールには燃料があると推定されることもわかった。これらの結果は、同社がすでに公表している状態の推定と基本的に一致するという。

この調査は国際廃炉研究開発機構や高エネルギー加速器研究開発機構と共同で行っているもの。東電では今後、原子炉下方の燃料デブリがどうなっているかを調べるためにロボットを投入し、調査を実施する予定。

また高エネ研の高崎史彦名誉教授は3月20日、原子力学会の年会でこの問題にふれ、ミュオンを用いた調査では、原子炉建屋近くの地下に計測装置を置くことができれば、原子炉の最下部に溶け落ちた核燃料のようすを観測できる可能性があるものの、そのための工事は簡単ではないと述べた。

(同)

美浜など5基が廃炉に

関西電力などの電力会社は3月17日から18日にかけて、原子力発電所の廃炉を相次いで正式に決定した。廃炉になるのは関西電力の美浜原子力発電所1、2号機、日本原子力発電の敦賀1号機、中国電力の島根1号機、九州電力の玄海1号機の5基。

また、関西電力は3月17日に、高浜1、2号機と美浜3号機について、新しい規制基準への適合性審査を原子力

規制委員会に申請した。

一方、原子力規制委員会は18日に、九州電力の川内1号機の工事計画を認可した。これをうけて九州電力は19日に、再稼働に向けた同機の使用前検査を原子力規制委に申請した。

(同)

原子力委、基本的な考え方を10月頃に取りまとめ

原子力委員会は2月10日、原子力利用の「基本的な考え方」作成にあたっての進め方について発表した。総論から始まり、「東京電力福島第一原子力発電所から学んだ教訓」「原子力発電利用に関する取組」「研究開発」「国際情勢を踏まえた原子力の活用」「国民理解・教育、人材育成」——を想定しており、有識者からの意見聴取の結果を踏まえて適時柔軟に見直すこととしている。

進め方については、多様性と専門性の観点から選定した有識者から8月頃までに意見を聴取した上で、その結果を踏まえて原子力委員会で10月頃までに「基本的考え方」(案)を取りまとめ、2016年1月末頃に閣議決定を求めていく予定。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

高レベル廃棄物最終処分基本方針を改定へ

総合資源エネルギー調査会の放射性廃棄物ワーキンググループは2月17日、高レベル放射性廃棄物最終処分の基本方針改定について議論した。会合では課題の存在を広く国民に認識させる必要があることから、国民的な議論を喚起し合意形成に向けた対話を重ねていくとしている。改定案で新たに追加される事項は、「現世代での解決」、「全国大の理解醸成」、「科学的有望地の提示、国による申し入れ」、「地域合意形成支援」、「原子力発電環境整備機構の改善・強化、事業者の責任」、「可逆性・回

収可能性、選択肢の確保」、「評価の仕組み」など。評価に関しては原子力委員会が技術開発や調査地区選定について活動状況の妥当性について評価を行い、信頼性を高めていくことが重要だとしている。

また、福島第一原子力発電所事故の教訓も踏まえ、直接処分に関する調査研究を推進することも盛り込まれた。

最終処分基本方針は、経済産業大臣が閣議決定を経て定める。

規制委員会が5か年中期目標を決定

原子力規制委員会は2月12日、15年度から5か年にわたる中期目標を決定した。12年9月の同委発足以来、初めてとなるもので、組織目標として「原子力に対する確かな規制を通じて人と環境を守ること」を明記。施策目標では、(1)原子力規制行政に対する信頼の確保、(2)

原子力施設に係る規制の厳正かつ適切な実施、(3)福島第一原子力発電所の廃炉に向けた取組の監視、(4)原子力の安全確保に向けた技術・人材基盤の構築、(5)核セキュリティ対策の強化および保障措置の着実な実施——について基本的考え方や戦略を述べている。

IAEA 福島第一レビューミッション、暫定報告で責任体制の明確化など評価

IAEA の福島第一原子力発電所廃炉に関する第 3 回レビューミッションが 2 月 17 日、暫定報告書を経済産業省に提出した。報告書では 2013 年に実施した前回のミッション時と比べ、廃止措置計画の実施状況は「著しい進展を達成している」と高く評価。一方で「状況は依然、大変複雑」とも述べ、短期的には増大する汚染水を持続可能な状態に持っていくこと、長期的には燃料デブリの取り出しが課題だと指摘している。

団長のファン・カルロス・レンティッホ氏は、組織面

では廃炉カンパニーや原子力損害賠償・廃炉支援機構の設立による責任体制の明確化、サイトでは 4 号機使用済み燃料プールからの取出し完了や、汚染水処理システムの改善で進捗があったと評価した。また、トリチウムを含む処理水の海洋放出に関する質問に対し、同氏は住民や地元漁業関係者などステークホルダーの理解を得て、「様々な便益、バランスを分析し、全体の安全性が向上する戦略として検討されるもの」と答えた。

日本の核セキュリティを評価、IAEA/IPPAS 国内初のミッション

日本における核セキュリティ対策の実施状況レビューを行う IAEA の国際核物質防護諮問サービス(IPPAS) ミッションが 2 月 27 日、全日程を終了し、報告書案を原子力規制委員会に提示した。IPPAS ミッションチームは核物質防護施設を保有する加盟国からの要望に基づき、政府関係者や事業者からのヒアリングを通じて、核物質防護条約や IAEA 技術文書に準拠した防護措置を実施する上で必要な助言を行うもの。日本への受入れは今回が初めて。

今回のミッションは、「国の核セキュリティ体制」、「3 つの原子力施設(日本原子力研究開発機構プルトニウム燃料技術開発センター、同高速炉臨界実験装置、中部電力浜岡原子力発電所)における核セキュリティの実施状

況」、「コンピュータセキュリティの実施」をレビューするのが目的で、2 月 16 日から約 2 週間、現地視察やヒアリングなどを実施した。

終了後、ミッションチームからは、「日本の核セキュリティ体制、原子力施設および核物質の防護措置実施状況は、全体として強固で持続可能なものであり、また近年顕著に向上している」などと評価する見解が、施設については、良好事例とともに、継続的な改善のための勧告や助言が示された。また、IAEA のフローリー事務次長は、「この IPPAS ミッション成果を踏まえ、日本は必要なフォローアップ措置を講じるとの意思表示があったことを喜ばしく思う」との所感を述べた。

原燃、新型ガラス溶融炉試験で流下性の向上を確認

日本原燃は 2 月 27 日、再処理工場の新型ガラス溶融炉開発に向けたモックアップ試験について、14 年 11 月から実施している第 2 段階の前半では流下性が著しく向上し、炉底部に白金族元素の堆積する兆候は確認されなかったなどとする成果を公表した。

13 年 11 月から 14 年 2 月までかけて実施した第 1 段

階では模擬廃液に白金族元素などを加え、現行炉と同様の運転条件で新型ガラス溶融炉の温度管理や流下性が優れていることを確認済み。第 2 段階後半では、廃液の処理能力を確認し、総合的に新型ガラス溶融炉の実機への導入を判断する。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

原子力安全条約・外交会議がウィーン宣言採択

原子力安全条約(CNS)加盟国による外交会議が 2 月 9

日、同条約事務局を務める国際原子力機関(IAEA)のウィーン本部で開催され、福島第一原発事故を契機とする原子力安全のさらなる強化に向けた国際努力の一部となるウィーン宣言を全会一致で採択した。施設の安全性向上・維持のための CNS 目標を実行に移すよう各国を導く一連の原則を盛り込んだ内容。敷地外汚染を回避す

るための原則に法的拘束力を持たせるというスイス提案を決議するのが目的だったが、この件で77の加盟国すべてが合意に達するのは難しいとの判断から、議長が代替案での合意を取りまとめるに留まった。

スイスの提案は昨年春に開催された第6回 CNS 再検討会議に提出されていた。要件により格納容器の健全性を維持する重要性が国際社会で何度も指摘されていたにもかかわらず、法的拘束力のある国際文書で実行されることはなかったと同国は主張。このため再検討会議では、CNSにおける敷地外汚染回避の原則が法的拘束力を持つよう第18条の修正について外交会議で審議すること、外交会議の少なくとも90日前までに加盟国が意見交換し、規則手続きの採択準備を進めておくことが決定していた。

外交会議の議長を務めたアルゼンチン常任代表のR・グロッツ大使によると、加盟国は少なくとも8回の事前協議によりスイス提案の分析や規則案の調査を行った。しかし、原子力安全の強化において加盟国全員が不可欠と考える全会一致決議を、スイス提案について出すのは難しいとの結論に至ったとしている。

「ウィーン宣言」では、放射性物質放出事故の発生防止とそれに付随する影響の緩和というCNSの目標実行のために、次の原則が盛り込まれた。すなわち、(1)新規の原子力発電所は、起動・運転時の事故発生防止、および万一事故が発生した際にも敷地外で長期的な汚染をもたらす放射性物質放出の可能性軽減という目的に即して設計・立地・建設される、(2)安全性改善点を特定するため、包括的かつ系統だった安全評価を、既存設備の運転期間全般を通じて定期的・規則的に実施する、(3)原子力発電施設の全運転期間を通じたこの取組に対する各国の国内要件と規制は、IAEAの関連安全基準、およびCNS再検討会議で特定された適切な良慣行を考慮した内容とする。

この宣言はまた、IAEAの安全基準委員会に回され、IAEAの関連安全基準に組み込むことを念頭に技術的な要素などが審査される予定。さらに、IAEAの広報資料でCNS非加盟国を含めた一般市民にも広く公表されるとしている。

【アルゼンチン】

4 基目建設で中国との協定批准

アルゼンチンの計画投資省は2月3日、同国4基目の原子炉となるアトーチャ原子力発電所3号機(80万kW級加圧重水炉)を中国の協力で建設するため、昨年7月に同国と調印した協力協定を正式に批准したと発表した。昨年9月に、アルゼンチン国営原子力発電会社(NASA)が中国核工業集团公司(CNNC)と商業的枠組契

約を結んだのに続くもので、今後は商業契約の締結や中国の金融機関から58億ドルの投資支援を受ける準備作業を進めていく。

批准のための調印は計画投資省のJ・デビド大臣と、中国国家能源局のヌル・ベクリ局長が実施。同計画では、CNNCが秦山Ⅲ原発で操業する70万kW級のカナダ型加圧重水炉(CANDU6)を設計参照炉とし、必要となる技術や機器・サービス、資材等を提供する。一方、NASAは同計画の所有者兼アーキテクト・エンジニアとして準備作業から設計、建設、起動、運転までを担当。機器の7割はアルゼンチン企業が製造する予定だ。

なお、アルゼンチンはこれまでの加圧重水炉路線と並行してPWRを5基目の原子炉に採用する計画を進めており、CNNCもロシアや欧米のPWR企業と並んで予備的な有資格企業5社の一つだと明言していた。

CNNCの5日付けの発表によると、ヌル・ベクリ局長とデビド大臣は中国の習近平国家主席とアルゼンチンのC・キルチネル大統領立ち合いの下で「アルゼンチンにPWRを共同建設するための両国政府間協力協定」に調印。これは、CNNCと中国広核集団有限公司(CGN)が双方の第3世代PWR設計を融合して開発した「華龍1号」の対南米輸出に道を拓くものだとして説明している。

【ベルギー】

ドール3号機などに新たなヒビ

ベルギーの連邦原子力規制局(FANC)は2月13日、2012年6月に圧力容器からヒビの兆候が検知されたため、昨年3月から停止中のドール原子力発電所3号機とチアンジュ2号機について、昨年、手順を修正して検査を実施した結果、ヒビの数はそれぞれ1万3,047本と3,149本に増加したと発表した。新たに検知したヒビの兆候は、2012年と13年に確認したヒビと同種のもので、圧力容器の同じ部分にあったとしている。

両炉で毛状ヒビが検知された原因として、FANCは2013年に材料中の元素組成が偏り、水素が集まって生じた「白点」の存在を指摘。事業者のエレクトラベル社は、両炉の安全運転を保証するために立てた仮説を検証するため、FANCが指示した中期的な検査計画に沿い、(1)超音波探傷検査技術、(2)水素白点のある鋼材の物質特性、(3)水素白点のある圧力容器の構造的健全性——について検査を実行した。

しかし昨年春、(2)について行ったテストでは、専門家達の予想に反して白点のある母材が理論モデルよりも強く放射線影響を受けるとの暫定結果が出た。また、(1)に関しては水素白点によるすべてのヒビが正確に検知されるよう、圧力容器の溶接部や割れを検査するために導

入されていた探傷検査機の検出信号レベルを低めに調整。この条件で昨年実施したテストで、新たなヒビを発見するに至ったとしている。

同社は現在も、圧力容器母材の物質特性や予想に反したテスト結果に関する研究を継続中。フランスとドイツから水素白点のある試料を入手し、国内のBR2試験炉で4回目の照射試験を実施しており、結果は4月にも判明するとしている。

【ハンガリー】

ロシアとハンガリーが人材育成で覚書、増設協力の一環

ロシアの原子力総合企業ロスアトム社は2月18日、ハンガリーの人材省と原子力分野の人材育成協力で了解覚書(MOU)を締結したと発表した。

昨年1月に両国間で結ばれた原子力平和利用分野における協力合意に基づくもので、この合意によりロシアはハンガリー唯一の原子力発電所であるパクシュ原発(50万kW級ロシア型PWR4基)に建て替え用の大型原子炉2基を増設する計画に協力する予定。総工費の8割を低金利融資することになっており、今回の協力は資金調達支援に加えて、これらの新規炉の設計・建設・運転に従事する新世代の優秀な人材の養成支援がねらいた。

覚書の調印式典にはロシアのV・プーチン大統領がハンガリーのV・オルバーン首相とともに同席。ロスアトム社のS・キリエンコ総裁とハンガリーのZ・バログ人材大臣が署名した。具体的な協力項目は、教育訓練、教育的科学活動、共同訓練プログラムなどで、原子力コミュニティに高度な能力を持った人材が輩出可能となるよう関連する学部生や大学院生、博士課程の学生、学会員の交換プログラムを促進することになる。

バログ大臣は、今回の覚書によって学術界や科学分野における両国間の長年の協力を強化する法的な枠組がもたらされるだけでなく、両国間の良き伝統が継続されると指摘した。これまでにハンガリーの数多くの原子力エンジニアがロシアで学位を取得し、パクシュ原発の安全な運転に貢献した事実にも言及。両国の関係機関における活動を調整していく準備は出来ていると強調した。

【フィンランド】

地層処分場計画、規制当局が設計の安全性保証

フィンランド放射線・原子力安全庁(STUK)は2月11日、国内2つの原子力発電事業者の合併事業体であるポシバ社が作成した使用済み燃料最終地層処分場と廃棄物

封入施設の設計について長期的な安全性を審査した結果、「安全な施設として建設し得る」との見解を雇用経済省に提出した。

両施設の設計が原子力法における要件を満たしていることと保証したもので、ポシバ社が2012年12月に提出した両施設の建設許可申請に対し、雇用経済省と政府が結論を下すために必要とされるステップ。建設許可が発給された場合、ポシバ社は2020年にもこれらの操業許可を申請するとみられている。

STUKの担当官によると、両施設は建設許可を発給するに足る十分な安全性を有している。しかし、全く新しいタイプの施設であることから手続きは段階的に進めるとともに、設計は蓄積された知見に基づき念入りに審査。これらが着工した後でも、最終処分する深さの岩盤特性については一層詳細な知見を求めていくとした。

STUKはまたポシバ社に対し、今後も長期的な安全性に関する調査を継続し、安全分析や処分シナリオをさらに綿密に練り上げるよう要求。同社も施設の安全性を裏付ける証拠として操業許可申請用に起草した「安全文書(セーフティ・ケース)案」を改善し、最終処分事業やその安全性に関する見解や結論を明確に示していく考えだ。

廃棄物基金、事業者の年間払い込み額決定

フィンランドの雇用経済省(TEM)は2月26日、国内2つの原子力発電事業者らが昨年分の放射性廃棄物管理費として今年3月末までに国の基金に払い込むべき金額は9,100万ユーロ(約121億円)になると発表した。

同国では原子力発電所から発生する廃棄物の処分費は事業者であるテオリスデーデン・ボイマ社とフォータム社の負担となっており、高レベル放射性廃棄物の処分費用に加えて中間貯蔵や輸送の経費、廃止措置費を、TEMが管理する放射性廃棄物管理基金に積み立てている。TEMはまず、これら全般の経費として2社が見積もった額を精査した上で、両社が最終的に支払わねばならない債務評価額を決定。このうちの固定費等を長期で分割払いできるよう調整した積立目標額を事業者と研究炉を保有するVTT技術研究センターに毎年提示し、同基金に払い込ませるシステムだ。

最終処分に要する総経費は近年、約33億ユーロと見積もられており、内訳は投資額7億ユーロ、操業費24億ユーロ、廃止措置費2億ユーロほど。昨年未現在の同基金の残高は23億8,000万ユーロで投資利益は2,550万ユーロ。13年末残高の22億7,000万ユーロと投資利益額1,900万ユーロから増加したとした。

オルキルオト原発が立地するエウラヨキ市に建設予定

の使用済み燃料最終処分場は、2012年に事業者2社の合併事業体であるボンバ社が申請した建設許可を放射線・原子力安全庁(STUK)が審査中。サイトの精密調査用に着工した地下特性調査施設(ONKALO)では建設作業と並行して地下水のモニタリングも行われているが、TEMでは国内すべての放射性廃棄物と使用済み燃料を処分するのに十分な資金が同基金に蓄えられると保証した。

【スリランカ】

インドとスリランカが原子力協定締結

インド首相府は2月16日、隣国スリランカと二国間の原子力平和利用協力協定を締結したと発表した。先月スリランカ大統領に選出されたばかりのM・シリセナ氏が初めてインドを訪問したのを機に、ニューデリーでインドのN・モディ首相と結んだ4つの両国間協力合意のひとつ。

スリランカには現在、発電炉は存在しないが、2020年代以降に実行可能なオプションとして予備的なフィージビリティ・スタディを実施する方針を政府が2010年に発表。こうした状況を踏まえ、同協定では専門的知見の移転や情報交換に加えて、放射性同位元素の利用や原子力安全、放射線安全、原子力セキュリティなど平和利用分野での人材育成、関係資源の共有や能力の増強を図っている。

また、スリランカでは親中国派であった前大統領が多くのインフラ設備整備を中国の支援により進めていたことから、スリランカにおける中国の影響力を牽制するという両国首脳のおねらいがあるとも伝えられている。

【韓国】

24基目の新月城2号機、送電網に接続

韓国水力・原子力会社(KHNP)は2月26日、同国で24基目の商業炉となる新月城原子力発電所2号機(PWR, 100万kW)を初めて送電網に接続したと発表した。出力を段階的に上げる試運転を実施し、7月にも営業運転を開始する見通しだ。

同炉の設計は、コンバッション・エンジニアリング社(現ウェスチングハウス社)製「システム80+」の技術をベースに改良した「最適化炉(OPR)」で、2008年に最初

のコンクリート打設を実施した。昨年11月14日に原子力安全委員会から運転許可を取得した後、同日中に最初の燃料装荷を完了。高温機能テストなどの試運転を104日間続けていた。

韓国では2013年5月、新古里1,2号機(各100万kWのOPR)と新月城1,2号機に安全性評価結果の偽造された制御ケーブルが設置されていることが判明。新月城2号機は当時、運転開始を控えて機器の動作審査段階にあったが、同年中に数か月かけてケーブルの交換が行われたと見られている。

安全委員会が月城1号機の運転延長承認

韓国原子力安全委員会は2月27日、30年間の設計寿命期間を終えて2012年から停止中の月城原子力発電所1号機(PHWR, 67.9万kW)について、運転期間の10年延長を認める判断を下した。認可満了後、2年以上が経過していることから、実質的な延長期間は約7年になると見られている。

同炉の継続運転に関しては安全規制の専門機関である韓国原子力安全院(KINS)が審査。同炉が原子力安全法令の技術基準を満たしており、運転を10年延長しても安全性に問題はないと結論付けていたほか、福島第一原発事故後、大規模な自然災害に関して実施したストレステストでも対応可能との結論が出ていた。安全委は同日、約14時間に及ぶ議論の末、延長に賛成する委員7名が票決により決定。野党の推薦委員2名は票決を拒否して退場したとしている。

韓国では国内最古の古里原子力発電所1号機が07年に30年の運転期間を満了したものの、10年の期間延長が認められて現在も稼働中。同炉に次いで古い月城1号機は1978年に着工した後、83年から営業運転を開始した。12年11月20日に運転期間が満了したが、事業者の韓国水力・原子力会社(KHNP)は2009年に期間の延長を申請。機器の寿命や放射線による環境影響などの審査に加えて、同炉を韓国初の閉鎖炉とするかについて協議が行われていた。

安全委の票決に先立つ24日、KHNPは審議状況に関する地元説明会を開催。住民代表から「技術的な安全性だけでなく崩れた地元住民との信頼回復が優先だ」との見解も示された。

宇宙線ミュオンを利用した地盤や大型建造物の内部可視化技術

川崎地質(株) 鈴木 敬一

宇宙線ミュオンは、20世紀後半に地盤や大型の建造物を対象に内部を可視化する技術として考案された。これまで火山内部の可視化などが実現している。本稿では地盤や大型建造物の可視化技術としての最近の成果を取り上げ解説する。さらに、今後の展望についても示す。

I. はじめに

1980年代に都市部において地盤の空洞が原因となった陥没事故が相次いだ。幸い死亡事故などには至らなかったが、自動車やバスなどが陥没した穴に転落するなどの被害があった。これらの地盤の空洞化の原因は、主に下水道などの埋設管など地下インフラ施設の老朽化によるものである。老朽化した埋設管にひびが入り、そこに土の粒子が吸い込まれて空洞ができる。できたばかりの段階で空洞は、埋設管の真上にあるが、空洞は徐々に崩れて地下の浅い部分に移動する。極浅いところまで空洞が移動すると、陥没が生じる。地下インフラ施設だけでなく、戦時中に掘られた防空壕や、鉱山の跡などの坑道が、長時間のうちに風化し、陥没を引き起こすこともある。

陥没するより前にこのような空洞を発見するために、物理探査が適用される。しかし、物理探査も万能ではなく、深さ10m程度の空洞を探索することが難しいとされている。その理由のひとつに、物理現象、例えば電波や振動(弾性波)などの波動を使った場合、深くまで調べようとすると波長の長い波動を利用する必要がある。しかし、波長が長い場合は解像度が低下する。一方で、波長の短い波動を利用した場合は、解像度は満足するが探索する深さを満たさない。

従来の物理探査ではできなかった深さまで高解像度の空洞探査を行うには、宇宙から降り注ぐ素粒子に起源をもつ宇宙線ミュオン(ミュオン粒子やミュオンとも表記する)を利用することにより可能になると考えられる。

Visualization Technology for Internal Structure of Ground and Large Scale Construction Using Cosmic Ray Muons : Keiichi SUZUKI.

(2015年1月30日 受理)

本稿ではミュオンを利用した非破壊探査の歴史を概観し、現状の地盤の探査方法とその成果、さらに今後の展望について解説する。

II. なぜミュオンなのか？

宇宙線ミュオンは、太陽や超新星の爆発などによって生じた陽子やアルファ粒子(1次宇宙線)などが大気中に突入したときに、大気中の原子や分子に衝突して生じる。そのため地上から数kmから十数kmの上空で発生する。静止寿命は約 $2\mu\text{s}$ であるが、光速に近い速度で移動するため、相対論的効果(いわゆる浦島太郎効果:特殊相対性理論において、物体が高速で移動するほど、その系における時間の進みが遅くなること)により地表付近にまで到達する。

ミュオンは、電子と同じ素粒子(レプトン)の一種であり、質量は電子の約200倍で、電子または陽電子と同じように電荷を持っている。また、エネルギーが非常に高く、海面付近のエネルギー・スペクトルを参照すると、数GeVにピークを持っていることがわかる。質量が大きく、エネルギーが高いことから、物質中での相互作用が電子などに比べて少ないため崩壊確率が小さい(ミュオンは物質中の原子との相互作用により、電子とニュートリノに崩壊する)。崩壊確率が小さいため、物質中も容易に透過することが可能である。ガンマ線や中性子などを用いた非破壊検査法なども考案されているが、検査できる深さが数m程度であり、中性子などは特に不安定で検出も難しい。また、ガンマ線や中性子を発生させるための線源(放射線源や加速器、原子炉など)や、取り扱いのための資格、放射線防護対策なども必要となる。宇宙から到来する自然の高エネルギー素粒子であるミュオンではそのような線源が必要ないため、装置全体も簡便である。

宇宙から来る素粒子にはニュートリノなどのように地球も透過するような、物質とほとんど相互作用しない素粒子もある。しかし、絶対数がミュオンに比べて非常に少なく、検出も難しい。ニュートリノを検出するには、スーパーカミオカンデのような、巨大な検出器が必要である。余談だが、南極の氷を検出器として利用して地球内部を可視化しようという研究も行われている¹⁾。

それに比べて宇宙線ミュオンは、地表面で10cm²(手のひら程度)あたり1秒間に1個程度と数も多く、検出も容易である。自然に存在するものであるから、安全かつ安定している。これをうまく使って、非破壊検査ができないかと考えるのはごく自然である。

Ⅲ. ミュオンを用いた探査原理

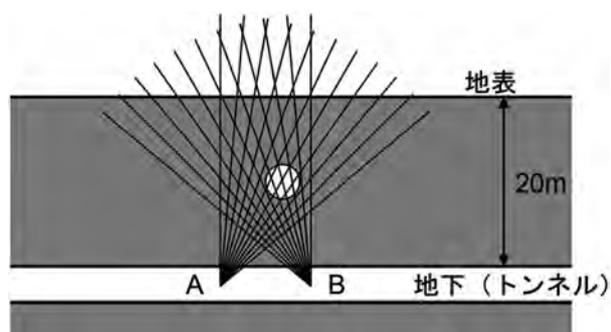
1. 可視化の原理

第1図に地盤中を透過するミュオンを利用した可視化の原理を示す。トンネル内に検出器を設置し、特定の方向からのミュオンを計数する。例えば第1図に示すように、地下20mの深さの地盤の中央に、直径3mの空洞が存在する場合、その下のトンネルで検出器の角度を変えてミュオンの単位時間・単位面積・単位立体角あたりの計数率、すなわちフラックスを測定する。第1図では5度ごとに測定しているが、その角度分布をプロットしてみると第2図のようになる。この図では真上をゼロ度として、5度刻みに計測した結果を示している。このような分布を天頂角分布という。

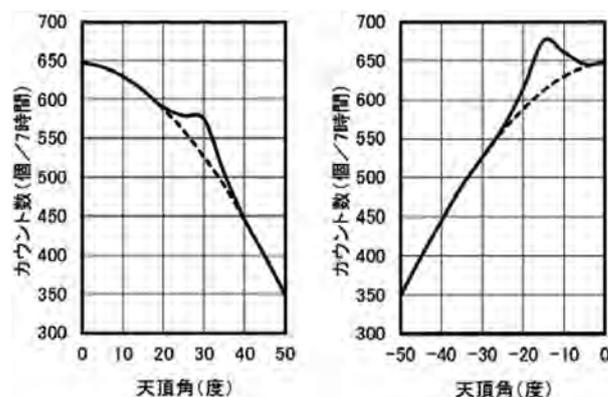
A地点では角度30度方向でカウント数が大きくなっており、B地点では反対側の角度15度でカウント数が大きくなっている。では、このようなミュオンをどのようにして測るのだろうか。

2. 検出器

ミュオンを検出するための検出器そのものは放射線の検出器とほとんど同じである。自然の放射線は、トリ



第1図 ミュオンによる地盤可視化原理



第2図 7時間あたりの計数
(左:A地点, 右:B地点)

ウム²³²の2.65MeVが最大であるから、それ以上のエネルギーで検出された放射線はほとんどがミュオンと考えてよい。ディスクリミネータ(波高弁別器)を用いることで、3MeV以上のエネルギーの放射線をミュオンとして計数する。

天頂角分布を得るには、検出器を2台用いて、同時計数法を適用する。すなわち、2つの検出器を同時に通過したミュオンだけを同時計数回路を通して計数することで、2つの検出器が張る立体角に入射するミュオンを計数することができる。

2つの検出器の中心に対して回転させることで、天頂角分布を求めることができる。また、2台以上の検出器を用いて、同時に複数の方向の天頂角分布を計数することができるマルチチャンネル方式も可能である。

3. 解析方法

解析の方法は、ミュオンのフラックスと面密度(ミュオンの透過経路に沿った地盤の平均かさ密度×鉛直方向の深さ)の関係を示した湊の式(あるいは三宅の式)を用いる。ミュオン・フラックスを計測することができれば、湊(あるいは三宅)の式を用いて、面密度を得ることができる。測定位置は測量や図面などから得ることができるので、面密度を深さで割ることにより、ミュオンの透過経路に沿った地盤の平均かさ密度を得ることが可能である。

多数の地点で天頂角ごとの平均かさ密度を得ることができれば、CTスキャンと同じ方法で深さ方向と水平方向の地盤の密度分布を断面として得ることができる(奥行き方向のデータもあれば3次元解析も可能)。地盤に対してCTスキャンを適用する手法をジオトモグラフィという。例えば、弾性波を利用したジオトモグラフィが実用化されているが、弾性波の速度にコントラストがある場合には弾性波は屈折する。そのため屈折を考慮した解析を行うが、計算が難しい上、使い方も非常に難しい。宇宙線ミュオンは、地盤中の密度変化程度であれば、屈折を考慮する必要がなく、解析精度は非常に良い。こ

れもミューオンを利用する長所のひとつである。

IV. これまでの報告例

1. ピラミッド内部の可視化

宇宙線ミューオンを利用して、構造物内部を見てみたいという要求にこたえて実行された最も有名な事例は、ノーベル物理学賞を受賞したカリフォルニア大学の Alvarez らによるエジプト・カイロ近郊のギザ大地にそびえる3大ピラミッドへの適用である³⁾。3大ピラミッドの中央にあるメンカウラー王のピラミッド内部へミューオン検出器を持ち込んで、未発見の空間を探そうという試みである。これまでに、王の間、王妃の間、重力軽減の間、地下の間と大回廊という5つの大空間が発見されているが、それ以外にも空間があると考えられている。ピラミッドは、全部が岩石で満たされているとすると、支えている基礎地盤が岩石の重量に耐え切れないという指摘もある。

筆者もかつて早稲田大学の吉村教授と、宇宙線ミューオン検出器を持って、エジプトに出かけたことがある⁴⁾。このときは、エジプト考古庁の許可が下りずに、ピラミッドの石材を切り出したといわれる場所で、簡単な実験をただけであった。しかし、今後ピラミッド内部にミューオン検出器を持ち込むことができれば、未発見の空間を発見できる可能性は大いにあると考えられる。

2. 建物や地下鉄の可視化

筆者が初めて宇宙線ミューオンを利用して地盤や大型構造物を非破壊で調べることができる可能性を知ることになったのは湊博士による研究成果である。工業技術院名古屋工業技術試験所(現在の産業技術総合研究所)の湊博士は、宇宙線ミューオンを利用して、高層ビルや大型タンクの密度、あるいは地下鉄駅⁵⁾の深さを調べることを試み、その研究成果は数多く報告されている。前述のように、今日、筆者が宇宙線ミューオンを利用することができているのも湊博士の成果があったためである。

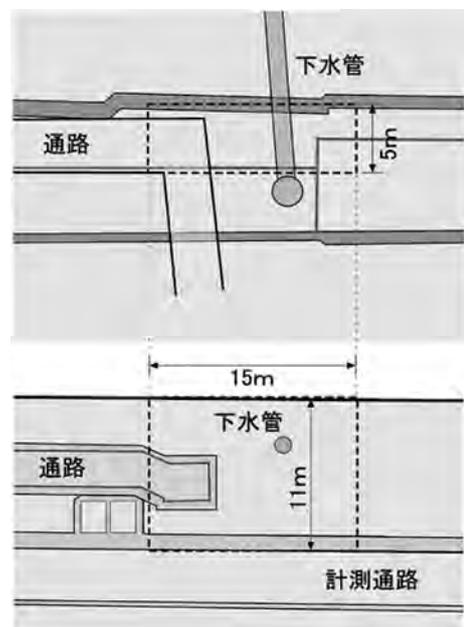
3. 火山の可視化

宇宙線ミューオンを用いた可視化技術として実用化されてきた技術としては、火山体内部のラジオグラフィであろう。これまで浅間山、昭和新山、薩摩硫黄島などで成果を上げてきた⁶⁾。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震以来、日本列島全体の火山活動が活発化したのではないかとされている。西ノ島の火山活動も活発なまま続いている。2014年には御嶽山の噴火で甚大な被害があった。その後も桜島や霧島、蔵王や草津白根山、富士山など活火山噴火の懸念が生じている。宇宙線ミューオンによる火山体内部の可視化が、よりいっそう求められている。

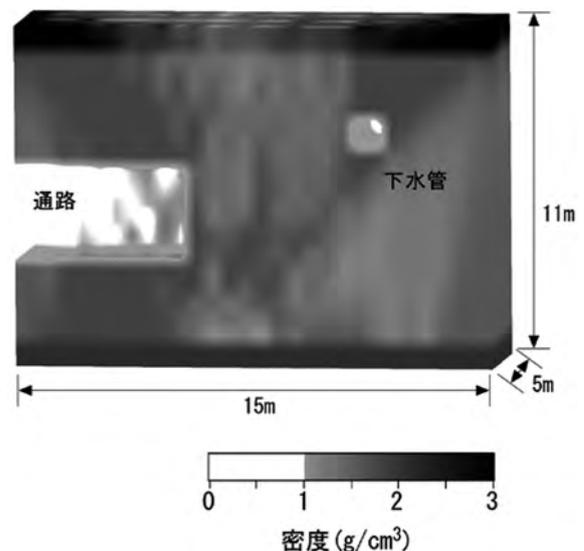
V. 空洞探査への適用

1. 3次元トモグラフィによる可視化

宇宙線ミューオンを用いて3次元のトモグラフィ解析による地盤可視化の可能性を検討するため、地下11mにおいて実証実験を行った。第3図に計測場所の概要を示す。地下11mの地盤中に屈曲した通路と下水管が敷設されている。その下の通路に検出器を設置して、縦断方向15m区間を1mピッチで計測した。第1図に示したような天頂角分布を多数取得し、3次元のトモグラフィ解析を行って、地盤中の密度分布を求めた結果が第4図である。計測通路の上にある屈曲した通路の一部と下水管が低密度で解析されている。この結果から、宇宙線ミューオンを利用した3次元トモグラフィにより地盤



第3図 3次元トモグラフィ計測場所の概要
(上段：平面図，下段：断面図)



第4図 3次元トモグラフィによる空洞探査事例

内部の可視化が可能であることが示された。この結果について詳しい説明が報告されている⁷⁾。

2. 大深度の空洞・地質構造探査

宇宙線ミュオンが地盤中でも長い透過距離を進むことができることを利用してこれまで探査できなかった空洞探査を試みた例もある⁸⁾。深度45m程度の深さに敷設されている水路トンネルにミュオンの検出器を入れ、天頂角分布を求める。ミュオン・フラックスは深さが増えると指数関数的に減少する。そのため正確なミュオン・フラックスを得るには長時間の測定が必要である。しかし、稼働している水路トンネルでは、メンテナンス期間中などの短期間で計測を実施しなければならないという制約がある。そのため細かい天頂角分布を計測するのではなく、縦断方向にラジオグラフィと同じようなイメージを得ることで、空洞の存在する範囲を推定することができる。この場合は、深さ方向の空洞の位置がわからないため、ボーリング調査などの別の調査を併用する必要がある。このように宇宙線ミュオンの探査と別の調査を組み合わせることにより、これまで精度よく探査ができなかった大深度の空洞調査も行うことができる。

さらに大深度への適用を試みた例もある。地層処分技術を研究するための施設の深さ300mにおいて、その上部の岩盤の密度を推定する試みである。このような大深度で高分解能の密度情報を得る方法は、これまでほとんどなかったといつてよい。現在は研究途上であるが、今後データの蓄積により実現の可能性は十分にあると考えられる。

VI. まとめと今後の展望

本稿では、宇宙線ミュオンを利用した可視化技術・非破壊探査について、主な歴史的背景を示し、最近の地盤3次元可視化技術の例を示した。今後の可能性として、これまで探査ができなかった大深度の空洞探査・地盤調査に応用できる可能性についても示した。しかし、まだ技術としては実用化までには至っていない。今後、実用化を図るにあたっての課題を以下に示して締めくくりにしたい。

1. 効率化と小型化

宇宙線ミュオンを利用した非破壊探査技術は、ソースが不要というメリットがある。その反面、それをコントロールできないという側面もある。高エネルギーのミュオンが到来してくるのをじっと待つしかない。人工的にミュオンを発生させればよいのではないかということ質問されることも多い。しかし、地盤探査ができるような高エネルギーのミュオンを発生させるには、非常に大規模な加速器が必要である。また副次的に

発生する不要な放射線の防護なども必要となる。従って、ミュオンを人工的に発生させることは現実的でない。ではどのようにして効率よくミュオン・フラックスを計測するか？それは検出器の断面積を大きくするしかない。ここでいう断面積とはひとつの検出器についてのものでなく、トータルとしての断面積である。すなわち一つひとつの検出器は小さくても、数を増やすことで断面積を大きくすることは可能である。

現在の検出器はシンチレータと光電子増倍管を用いている。そのため、検出器を数多く製作するには費用がかかる。これを半導体や光ファイバ(いわゆるシンチファイバ)を用いて安価に製作できれば、結果として断面積の大きな検出器を実用化できる。

地盤探査に用いるには地下の空間に検出器を設置する必要がある。下水管などのインフラ施設の老朽化に伴う空洞は、対象とするインフラ施設の上部に発生する。従って、インフラ施設そのものに検出器を設置することができる。ただし、人が入れないような小さなインフラ施設もあるため、小型化が必要である。その場合、先に述べた理由により、検出器の数を増やして、断面積をかせぐ必要がある。また、防水・防塵などの対策も必要である。小型化することにより、ボーリング孔などの小孔径の孔を空けて、その中に検出器を設置することも可能となる。

2. 精度の向上

本稿のはじめの方で、ミュオンは安定していると述べた。しかし、詳細に検討してみると時間変動がある。その変動の原因は、①太陽活動によるもの、②気象条件によるもの、③計測器周囲の環境によるものである。

宇宙線ミュオンの起源となる素粒子は荷電粒子であるため、地球の近傍に到来すると地球磁場の影響を受ける。地球磁場は太陽活動の影響を受けるため、地球に到来する高エネルギーの素粒子も影響を受け、その結果大気に突入する数が太陽活動に伴って変動する。

気象条件とは気温と気圧である。同じ気温であれば気圧が高いほど見かけの大気の深さが厚くなるので、地表付近に到達するミュオンの崩壊確率は増加する。同じ大気圧であれば、気温が高いほど見かけの大気の深さが厚くなるので、地表付近に到達するミュオンの崩壊確率は増加する。これが気象の条件による時間変動である。

計測器周囲の環境は主に温度である。これは計測器に温度補償機能を設けることである程度緩和される。しかし、細かく見ると部品の劣化や電源電圧の変動などにより若干の変動が見られることがある。

太陽活動と気象による時間変動についての効果係数は参考資料⁹⁾に報告されている。

ミュオンの起源である1次宇宙線は荷電粒子である

ため、地球磁場によって曲げられる。これにより、ミュオン・フラックスが方位によって僅かに差が生じる(東より西からの方が少し多い)。これを東西効果といい、ミュオン・フラックスの違いとなって現れる。これについても時間変動と同様に効果係数を求める必要がある。

今後、このような成果を用いて、より正確なミュオン・フラックスを用いることにより、対象物の密度の推定精度は向上するものと考えられる。

3. 適用分野の開拓

ピラミッドや建物、地下鉄や地盤の調査に宇宙線ミュオンが利用できることはこれまで示したとおりである。その他に適用可能な分野として、ダムなどの大型構造物の非破壊探査が考えられる。ダムについても建造後時間が経過して老朽化したものもある。幸いダムには監査廊という点検用の通路が必ずあるので、そこにミュオン検出器を置くことは可能である。ダムの建造中にはダムサイトに人が入れるような横坑と呼ばれる地質調査用の坑道を掘削するので、その中に検出器を入れることもできる。ダムサイトでは大規模な断層や破砕帯と呼ばれる弱部が問題となることがある。また岩石が風化して弱くなった岩盤もある。地質構造が非常に複雑な場合、横坑調査だけではそれらの弱部の分布を正確に把握することが難しい場合が多々ある。そのような弱部は密度が低下しているはずであるから、宇宙線ミュオンを利用すれば、それらの弱部を把握することが可能である。

ダムの形式のひとつにロックフィルダムというものがある。これは土や岩石を盛り立てて建造するものである。ダムの品質管理には、建造中の堤体の密度管理が重要であるが、堤体全体を調べる方法がない。これにも宇宙線ミュオンの技術が適用できる。

ダムと似たような例として堤防がある。堤防内部にもところどころに樋門や樋管という水路が横断している。これらも老朽化により空洞が発生することがある。この中に検出器を入れれば、空洞を発見することができる。堤防そのものを調べるには、堤体内部に検出器を埋めてしまうという手もある。同様に斜面の崩壊を事前に検知するために、斜面の下の方に検出器を埋めておくことにより、その上部の密度変化を捕らえることが可能であ

り、防災・減災に役立つ。

最近注目されている最大のミュオンの利用方法としては、原子炉の内部可視化である。これまでも基礎実験によりそれが可能であることが示されている¹⁰⁾。特に福島第一原子力発電所の事故以来、ミュオンを利用した内部可視化の技術は期待されている。

このように宇宙線ミュオンによる探査技術は様々な場面で、安心・安全な社会に貢献できるものとして、今後の実用化が期待されている。

— 参考資料 —

- 1) 田中宏幸, ミュー粒子・ニュートリノの透過力を応用した非破壊検査技術, 検査技術, 13, 8, 1-7 (2008).
- 2) 湊 進, 宇宙線透視像, 放射線, 19[1], 49-56 (1992).
- 3) L. W. Alvarez, J. A. Anderson, F. El Bedwei, J. Burkhard, A. Fakhry, A. Girgins, A. Goneid, F. Hassan, D. Iverson, G. Lynch, Z. Miligy, A. H. Moussa, M. Sharkawi and L. Yanozolino, Search for hidden chambers in the Pyramids, Science, 167, 832-839 (1970).
- 4) 吉村作治, モダンテクノロジーの考古学に於ける応用 - 早稲田大学古代エジプト調査隊の例 -, 早稲田大学人間科学研究, 6[1], 157-168 (1993).
- 5) S. Minato, Feasibility study on cosmic-ray nondestructive testing through structural analysis of subway stations, NDT International, 20, 231-234 (1987).
- 6) 田中宏幸, 素粒子ミュオンによる火山体内部のイメージング, Jpn. Geosci. Lett., 4[3], 2-4 (2008).
- 7) 鈴木敬一, ミュー粒子による土木物理探査の可能性, 物理探査, 65, 251-259 (2012).
- 8) 鈴木敬一, 大沼 寛, 奥村忠彦, 宇宙線ミュオン粒子を利用した水路トンネル空洞探査, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, VI-114 (2013).
- 9) 湊 進, 地下 μ 粒子計数の時間変動に関わる因子ごとの効果係数, RADIOISOTOPE, 62, 375-383 (2013).
- 10) 竹上弘彰, 高松邦吉, 伊藤主税, 日野竜太郎, 鈴木敬一, 大沼寛, 奥村忠彦: 宇宙線ミュオンによる HTTR 内部構造の可視化予備試験, 日本原子力学会和文論文誌, 13[1], 7-16 (2014).

著者紹介

鈴木敬一 (すずき・けいいち)

川崎地質(株)

(専門分野/関心分野) 物理探査/特に地盤の空洞化調査



解説シリーズ

地層処分概念の変遷

第1回 地層処分黎明期(1950年代～1980年代中頃)

原子力安全研究協会 増田 純男,
元日本原子力研究開発機構 佐久間秀樹, 原子力発電環境整備機構 梅木 博之

高レベル放射性廃棄物は既に存在し遠い将来にわたり環境への脅威となりうる。その対策については、廃棄物を発生させた世代が基本的な考え方を明らかにし、それを実現する手法を確立し、社会的な合意のもとに処分を開始するという方向で研究開発が始められた。それから数十年、地層処分は科学的な安全性の確認と技術的な実現可能性の保証が最も確実にできる概念として専門的には広く認識され、各国に固有の条件を反映した具体的なシステムが開発・評価されて事業を開始する段階を迎えつつある。今後の地層処分事業を円滑に進めていくためには、日本においても、あらためて社会的な合意の基盤となる情報が発信され、共有されることが大変重要であると認識される。

本稿はこのような情報発信の一つとして、地層処分の概念が選ばれ、具体的な手法とされ、実施段階に至るまでの経緯を3回に分けて振り返り「いま、なぜ地層処分なのか」を考える一助としたい。

I. はじめに

1950年代に米国においてその検討が開始されて以来、地層処分は高レベル放射性廃棄物(HLW)あるいは使用済核燃料(SNF)の最終処分に最適な考え方として、世界各国で採用されてきた。

地層処分の安全性や実現性を裏づける研究開発段階の成果が蓄積されてきている一方で、実施段階に入り処分場予定地の選定など社会との接点が増えるにつれて、地層処分に対する社会的な合意の形成が不十分であることが各国において表面化してきている。

日本においても、2012年に日本学術会議が最終処分事業推進における根源的な問題点として、地層処分に対する社会的合意形成が極度に困難である現状に関し、その客観的諸要因を明確にし、直視することの重要性を指摘した。その要因の一つとして、地層処分の安全性、実現性と緊要性に関しては専門家の間で数十年にわたる多角的な議論に基づき国際的な共通認識が構築されてきたものであるとしても、「なぜ今地層処分が必要か」という基

盤的な認識が社会に共有されていないことなどがあげられる。この背景には、地層処分の考え方やそれが選択されるに至った経緯等の記録が情報として整理され提供されてこなかったことがあるものと考えられる。これについては、2014年に日本原子力学会放射性廃棄物地層処分の学際的評価研究専門委員会も、「何故、当該の選択肢を選んだか、議論の道筋と参照された根拠をアーカイブとして残しておき、後でトレースできるようにすることが段階を踏んで社会全体における意思決定のプロセスを着実に進めていく上で不可欠である。」と指摘している。

地層処分の概念の変遷には、1950年代から約60年の歴史がある。こうした概念の発展の大きな流れについては、たとえば安¹⁾によって紹介が行われている。本解説シリーズではそれを補完するものとして、むしろ様々な視点から概念変遷の転換点となった議論や国際的合意をできるだけ丁寧に説明し、その背景を浮かび上がらせることに腐心した。

地層処分の概念が固まり、ジェネリックな研究開発の段階を経て、各国における地層処分計画が実施段階に至るまでの経緯を今回と次回において振り返ってみる。

History of Geological Disposal Concept, (1): The predawn phase of geological disposal (1950s to mid.1980s): Sumio MASUDA, Hideki SAKUMA, Hiroyuki UMEKI

(2015年2月12日 受理)

II. HLW 問題の認知とその対策の模索

1. 米国における HLW 対策に関する議論の開始

地層処分の研究開発を最も早く開始したのは米国であり、1955年9月には、米国プリンストンにおいて、記念すべき会議が開かれた。この会議は、米国の原子力委員会(Atomic Energy Commission: AEC; 当時)が放射性廃棄物の地層中への処分の可能性を明らかにし、それに必要な研究を明らかにするために、全米科学アカデミー(National Academy of Sciences: NAS)に委託して開催されたものであり世界的にも前例をみない会議であった。

会議には、地質学や地球物理学の研究者を中心に65名が委員として招聘された。会議の規模と委員の構成からも、当時、米国がこの問題を重要視していたことが伺える。この会議の結果は1957年、NASレポート“The Disposal of Radioactive Waste on Land”として公表された²⁾。

当時、国防用の原子力施設があったワシントン州ハンフォードでは、高レベル廃液用のタンクが小規模の漏洩を起こす一方、ハンフォードやテネシー州オークリッジ等の原子力施設に隣接するサイトでは、一般のゴミ捨て場と変わりのない放射性廃棄物の地下投棄が定期的に行われており、関係者はこのような状況が長期に継続されるのは問題であるという認識を持つに至っていた。

この会議の最も重要な勧告は放射性廃棄物を岩塩層の中に処分する方法が有望であること、従って岩塩に関する研究を直ちに開始すべきであるということであった。

岩塩層は、海水が蒸発してできた地層であり、物理化学的に安定で地下水を含まないという性質から放射性廃棄物を長期間閉じ込めておくのに極めて好ましい特長をもつものと考えられた。たとえば、岩塩は可塑性が大きいので、処分空洞と廃棄体の空隙に充填物や緩衝材を施工しなくても、岩塩自体が変形して廃棄物を包み込むこと、岩塩層を長期間存続させた周辺岩盤の力学的安定性等の地質環境条件が将来的にも長期にわたり変化しないことが見込まれることなどである。

1965年にコロラド州ロッキーフラッツのPu工場で火災があり、事故処理により超ウラン元素(TRU)で汚染された大量の放射性廃棄物が発生した。1969年になって、これらの廃棄物をアイダホ州内に貯蔵することについて、州知事は1970年代末までには廃棄物を州から撤去することをAECに要求した。AECはこの要求に対して、1970年に地元への事前説明なしに、カンザス州のライオンズを処分場サイトとすると発表、地元と州政府がこれに反対する事態となった。これにより、ライオンズにおける岩塩層を対象にした研究も中止に追い込まれ、本件は、放射性廃棄物処分施設の立地に社会的な合意を得ることの重要性について、関係当事者に全くその認識がなかった最初の事例として、その後、批判と反省の対象となった。

ハンフォードの原子力施設においては、1972年に放射性廃液タンク貯蔵の歴史で最大の漏洩事故が起こった。タンク貯蔵の管理責任者は、事故が発生して以後6週間もの間、タンクの液面が低下しているとする情報を廃液の漏洩と結びつけて考えなかった。

この事故は関係者に最終処分の必要性和緊急性を再認識させることとなった³⁾。すなわち、第1に、高レベル廃棄物を液体の状態のまま長期貯蔵してよいのかどうか、第2に、長期的な人間の管理に果たして全面的な信頼をおいてよいのかどうか改めて検討される契機となるとともに、出来るだけ早い時期に処分場を開設しようとする誘因ともなり、1970年代後半以降、米国におけるHLW対策に関する本格的かつ組織的な研究が展開されるようになった。

2. 日本の黎明期

1962年4月、原子力委員会に設置された廃棄物処理専門部会が10回の会合を経て、報告書を取りまとめた。専門部会委員は、海洋と放射線防護の専門家が多数を占め、地質の専門家はほとんど参加していなかった。処分の方式としては、以下のとおり「閉じ込め方式」、「拡散方式」および「準閉じ込め方式」が考えられるとされた。

(1) 閉じ込め方式

一定地点に安全に閉じ込める方式で、たとえば再処理高レベル廃液のタンク貯蔵が、この方式にあたる。

(2) 拡散方式

環境の拡散能力を利用して希釈する方式で、たとえば極低レベル廃棄物を海洋に廃棄する場合はこれにあたる。

(3) 準閉じ込め方式

環境の一部を使用しても放射能の人間への影響が極めて少なく、何らの障害もおこさないような方式によって廃棄物を一般環境へ放出する方式で、たとえば地質構造の利用がそれに相当する。

この分類によると、現在の地層処分に当たる概念は準閉じ込め方式に近いものとされていたと考えられる。

さらに、報告書は「高レベル放射性廃棄物に対しては、放射線障害防止の立場から閉じ込め方式を処分の原則とするが、タンク貯蔵等の閉じ込め方式は常に管理を必要とするので最終的な処分とはいえない。」としており、当時は処分を「当面の措置としての処分」と「最終処分」に分けて考えられていたことがわかる。

最終処分方式としては、次の2方式、すなわち、

- ・容器に入れて深海に投棄すること
- ・放射性廃棄物を人の立ち入ることの不可能な、かつ漏洩の恐れのない土中に埋没したり、天然の堅牢な洞窟あるいは岩石層に入れたりすること

をあげ、「これらの方式については放射性廃棄物の最終処分の問題の重要性に鑑み、経済性、安全性について最

も望ましい方式を確立するため、大きな努力を払って研究を進めなければならないが、国土が狭いので、地震のあるわが国では最も可能性のある最終処分方式としては深海投棄であろう。」としている。

さらに、「現行の放射線障害防止法では、放射性廃棄物の土中埋没は認められていない。わが国における地下水の分布とその利用状況、人口の分布状況などからみて、放射性廃棄物の土中埋没による処分は好ましい方法ではなく、今後も現行法通り禁止すべきであると考え。しかし、人の立ち入ることの不可能でかつ漏洩のない土中、天然の堅牢な洞窟あるいは岩石層、無人島など放射性廃棄物の処分の可能な場所の調査発見には努力すべきであろう。」としていることから、当時は、現在のような方式による地層処分の概念は、検討の対象にされていなかったのではないかと推察される。一方、専門部会報告書で「研究開発を進める」とされていた深海投棄に関する研究開発が実施された形跡はなく、最終処分の見直しに関する当時の記録も全く残されていない。

その後、1973年には、前年6月に改訂された原子力開発利用長期計画に示された放射性廃棄物の処理処分に関する計画を実施していくための案を具体化させることを目的として、原子力委員会に環境・安全専門部会放射性固体廃棄物分科会が設けられ、12回にわたる審議の結果が取りまとめられた。報告書においては、「高レベル固体廃棄物の処分方法として、人造の保管施設を用いた保管方法について、国際的な技術の進展に注目しつつ研究開発を進める。」とされた。

このように、わが国において、第1期における国レベルの検討の記録には、「地層処分」という言葉は見当たらず、また地層処分とみなされる概念やそれに類似した考え方が議論された経緯もないことから、地層処分という選択肢は検討の対象にはなかったものと考えられる。

Ⅲ. 放射性廃棄物対策に関する議論の進展

1. 国際的な環境問題の認識の高まり

資源、環境等、全地球的な問題に政策提言を行っているローマクラブが1972年に発表した「成長の限界」において、人口の増加や工業の発展がこのまま進んだ場合、地球上の天然資源が枯渇し、環境汚染が自然の持つ自浄能力を超えて全地球的に進行すると警鐘を鳴らしたことが大きな契機となり、環境問題が世界的に注目されるようになった。そして、同年、ストックホルムで開催された「国連人間環境会議」において「人間環境宣言」が採択され、環境保全を目的とする国際的な協調と連携による対応が開始された。

スウェーデンにおいては、新規原子炉への燃料装荷の許可条件として、電力会社がSNFあるいはHLWを安全に処分する可能性を示すことを要求する「原子力条件法」が1977年に成立した。スイスにおいては、国民投票

により原子力発電の継続にはHLW対策の技術的実現可能性の提示が条件とされ、1978年に原子力施設の必要性の証明と放射性廃棄物の恒久的な安全管理が可能であることの保証を求めるよう原子力法が改訂された。これらの法定要求に対して、スウェーデンにおいてはスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(SKB)が、スイスにおいては放射性廃棄物管理共同組合(Nagra)が、それぞれ地層処分の実施主体として設立された。

また、カナダにおいては、「核燃料廃棄物管理プログラムに関する1978年の連邦政府とオンタリオ州政府との共同声明」に基づき、カナダ原子力公社(AECL)が地層処分の研究開発を実施することが決定された。

一方、フランス、英国、日本など再処理路線にあった諸国においては、Pu利用の観点から使用済み燃料は資源とみなされ、HLW対策が喫緊の課題であるという認識はなかった。実際、英国ではHLW管理の方針として50年間の貯蔵のみが決定された。

この時期においては、各国でHLW対策への取り組みに差があり、原子力の利用に伴う放射性廃棄物の問題解決のために、様々な努力がなされてはいたが、それらの研究開発成果の多くは断片的であり、国際的に集約されるには至らなかった。

2. Polvani 報告書

このような状況の下で、1977年にOECD/NEAが各国の専門家から成るグループの協力によって取りまとめた「原子力発電計画に伴う放射性廃棄物管理の目標・概念・戦略」報告書(Polvani報告書)⁴⁾は、廃棄物問題を包括的な視点から捉えた最初の報告書であり、多くの国において、この報告書を出発点とする放射性廃棄物対策に関する計画が策定され組織的な活動が開始された。

同報告書は、HLW対策の基本方針について以下のような認識を述べ、将来技術としての核種分離・消滅処理の展望、当面の措置としての工学的貯蔵の可能性に言及しつつ、地層処分を技術的にも実現可能性の高い処分方法として推奨している。

- ・現世代は、放射性廃棄物を一定期間、安全に貯蔵する技術能力を保有する。
- ・貯蔵は回収する意図を持って廃棄物を措置することであり、継続的な監視を要する一時的な対策である。
- ・ある種の廃棄物の放射能は、将来におけるその危険性が予測できないほど長い時間にわたり残存するものである。たとえ封入隔離の健全性を、人間による継続的・制度的な管理に頼るとしても、極めて長い期間に及ぶ隔離に信頼を置くことはできない。
- ・処分は、回収する意図なく廃棄物を放出し、あるいは措置することであり、気体や液体状の廃棄物を環境放出する処分は非可逆的である。
- ・深地層に設ける“実証過程”の試験中は廃棄物の回収

が容易であり、その措置は貯蔵の一形態とみなされるが、もはや、廃棄物を回収しないとすれば、その措置は処分とみなされなければならない。

地層処分に期待される基本性能について、廃棄物の処分に関する地層の適性の基本的条件は放射能が危険でないレベルに減衰するまで環境から放射能を隔離することであり、地層による封じ込めの安定性が最も重要なバリアであるとしている。またこれに加えて以下のような数種のバリアが廃棄物の隔離に寄与するとしている。

- ・ 廃棄体の性質：低浸出性の固化体への調製は廃棄物に地下水が接触した場合、放射能の移動を遅延させる。
- ・ 容器への封入：地層の地球化学的環境に対して安定性を有する物質を容器として利用することは数百年以上に及ぶ期間、廃棄物の封じ込めを可能にする。
- ・ 廃棄物の移行の阻止：廃棄物を処分した地層の環境にみられる様々な機能、たとえばイオン交換、濾過、表面吸着などは大部分の放射能の移行を阻止する。この阻止の程度は地層と廃棄物の組成によって変化する。このような条件下での元素の移行阻止事例の存在を傍証する天然事象が研究されており、例えば18億年前に天然の核分裂反応が生じたオクロにおいてはプルトニウムが移行しなかったことが知られている。

同報告書には、長寿命廃棄物の処分に適した地層として、当時注目されていた岩塩層に加えて粘土質岩と結晶質岩も候補になり得ることが指摘されている。

さらに、処分オプションの評価結果が示され、地層処分、海洋底下処分、氷床処分、地球外処分、消滅処理を対比し、安定な地層中への閉じ込めることが、最も進歩したオプションであると結論づけている。

3. 米国における処分オプションの評価と地層処分の骨格形成

1974年、NPT未加盟のインドがプルトニウムを利用した核実験を実施した事態を憂慮した米国のカーター政権は、1977年に商業用再処理とプルトニウム利用の無期限延期政策を発表した。これにより再処理後の高レベル廃液ではなく、SNF自体がHLWになるなど、放射性廃棄物対策の大幅な見直しが必要となり、1978年3月、カーター大統領は関係省庁に対しスタクフォースの設置を要請する書簡を発送した。1979年には、14の関係省庁からなる検討グループ(IRG)が、全ての放射性廃棄物の管理方策についてパブリックコメントを踏まえた報告書⁵⁾を取りまとめ大統領に政策提言を行った。この中でHLWについては、6つの候補技術(鉱山型地層処分：mined repository, 深海地堆積物中定置：deep ocean sediments, 深孔ボーリング：deep drill holes, 岩石溶融：rock melting, 群分離・消滅：partitioning and

transmutation, 宇宙放出：ejection into space)を評価し、その中から、鉱山型地層処分概念がもっとも早期に実用可能な方策であると結論づけられた。

地層処分技術の開発は、地質環境や廃棄体など個々のバリアを組み合わせ、多重バリアとして総合的にみるシステムアプローチを採用すべきであること、処分場による長期にわたる隔離の程度は、処分場の設計、地層、気候および人間活動の変化の影響に関する解析モデルによってのみ予測的に評価可能であること、永久的な処分へのアプローチは技術的に保守的な方法で段階的に進めるべきであること、回収可能性概念については、回収が必要な状況や技術的側面に関してさらなる定義が必要であること等、現代にも共有される地層処分に関する主要な論点を、当時のIRG報告書に見ることができる。

当初の地層処分は、廃棄体を岩塩層という特定の地層中に埋設しようというもので、地質環境の天然のバリア機能のみに依存した方法であった。また、その方法によってなぜ長期の安全性が保たれるかについて、改めて問われることはなかった。これに対し、改定された地層処分の考え方は、要求される地質環境条件を満たすものであれば、どのような地層であっても、地層処分の候補として研究の対象になり得るとされた。また地層処分に要求される廃棄物を隔離する性能は、天然の条件だけに依存するのではなく、工学的な対策をも含む一つのシステム、すなわち地層処分システム全体により構成されるという考え方が取り入れられたことが注目される。さらに、地層処分システムの性能が、長期にわたり、満足できるものか否かについては、合理的、科学的な評価が要求されることとなった。

これらは、今日の地層処分の考え方の技術的な骨格をなしている。

4. 国際協力プロジェクトの普及

1980年代におけるもう一つの顕著な動向は、地層処分分野における国際協力の進展である。放射性廃棄物の超長期的な対策に関しては、どのような目標あるいは基準にそった対策をたてるべきかが重要であり、基本になる基準の確立は、むしろ国際的に共有されるべき課題であると考えられた。また、この時期は各国において、対象となる地質環境が特定される以前にあったことから、地層処分の安全性や技術的な実現可能性に関する研究開発課題には、国際的に共有されるものが多くあった。

このような時代における国際共同研究の代表例として、国際ストリパ計画をあげることができる。

OECD/NEAの国際共同研究として1980年に開始されたこの計画は、スウェーデンの旧鉄鉱山を地下研究の場として、地層処分に必要な調査技術と基礎的な知見を確立し、計画に参加する各国がそれらを共有することによって国際的な技術レベルの確立と向上を図ることを目

的とした。計画には、日本を含む9カ国が参加し、1992年に終了するまでにさまざまな調査や研究開発が行われ、ここで得られた知見やここで形成されたテクニカルコミュニティは、その後の地層処分の国際的な技術基盤となった。

5. Coady 報告書

1980年代には、地層処分に関連する基準についての国際的な議論が進み、その成果を示す報告書が次々に発表された。

それらのうち代表的なものとして、放射性廃棄物の処分に関する基本原則に関し、OECD/NEAが1982年に集約した「放射性廃棄物の処分：原則の概観」、通称Coady報告書⁶⁾があげられる。主要な集約意見として、特に現在においても引き続き議論されている点に関し当時の論点を以下に抜粋して示す。

・将来世代に対する責任

- 放射性廃棄物処分における議論の特長の一つは、将来世代の安泰が重視されることである。
- 原子力や放射能の利用により、多くの利益が将来世代に引き継がれていくことは明らかであるが、放射性廃棄物処分の場合、利益の定量化がリスクの想定より難しいので、廃棄物処分に関する問題は現世代が負担し、将来世代への負担を極力少なくするという考え方が支持される。

・受動的 (passive) なシステムと永久管理 (perpetual care)

- 放射性廃棄物処分における選択は、長期的には人間の関与を必要としない方法と制度的な管理の継続的なバックアップを必要とする方法の間でなされる。
- 一部の人は、廃棄物を再利用する意図はなくとも、継続的な人間の関与が保たれるように処分方法を設定すべきであると考えている。「永久管理」に賛成する議論では、廃棄物は制度的な監視下に置き、管理不能な処分形態は利用しないという意識を反映したものである
- 受動的な方式の支持者もその主張の根拠を将来世代の問題にしているが、処分後の廃棄物の管理が将来世代の負担になることを避けたいという願望と長期の制度的管理に対する悲観的な見通しから、そのような管理は結局中断されてしまうと考えている。
- 比較的短期間に無害なレベルに崩壊する廃棄物は、制度的な管理に依存した方法で処分することができると思われる。その他の廃棄物では、このような管理を必要としない受動的な処分方法を開発することが目標である。

・回収可能性

- 処分の定義から明らかなように、処分施設から廃棄物を回収する意図はない。従って、回収の可能性は

閉鎖段階後では処分施設に必要な設備条件とはならない。

- 回収の意図がないことは必ずしも回収ができないことを意味しない。回収作業の難しさや費用は廃棄物の種類や処分場所、処分開始後の経過時間によって決まるが、最新技術を使用すれば、分散状態ではない物質はほとんど回収可能である。
- 技術的ではない何らかの理由で、処分施設に廃棄物回収を容易にする機能を含める決定がされた場合、封じ込めシステムの健全性に悪影響を与えないように注意しなければならない。

6. 当時の日本の状況

前記「国連人間環境会議」における決議の1つを受けて、1972年11月ロンドンで「海洋汚染防止に関する国際会議」が開かれ、「廃棄物その他の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」が採択された。この条約は「ロンドン条約」と通称され1975年8月に発効し、HLWも禁止の対象として規定されることとなった。

このため、原子力委員会放射性廃棄物対策技術専門部会は、諸外国におけるHLW対策の状況を再調査し、「昭和75年(2000年)頃までに見通しをうることを努力目標に地層処分を中心に調査研究及び技術開発を図る。」という、地層処分に言及した研究開発の方針を原子力委員会に報告した。これを受け、1976年10月には、それまでの方針から大きく転換する研究開発方針を原子力委員会決定として発表した。

1976年10月8日、原子力委員会決定

高レベル放射性廃棄物の処分については、当面地層処分に重点をおき、わが国の社会的、地理的条件に見合った処分方法の調査研究を進め、今後3~5年のうちに処分方法の方向付けを行うものとし、さらに、昭和60年代から実証試験を行うことを目標とする。

原子力委員会決定に従い、1980年12月には、放射性廃棄物対策専門部会が報告書「高レベル放射性廃棄物処理処分に関する研究開発の推進について」を取りまとめ、原子力委員会により了承された。

地層処分研究開発の進め方として、5段階を経て行うものとされた。

第一段階において、動力炉・核燃料開発事業団(動燃)は所掌業務の一つであるウラン探鉱によって蓄積された地質データや地質探査手法を活用して、岩種や場所を特定することなく「可能性ある地層の調査」を進め、その結果を1984年に同専門部会に報告した。

報告を踏まえ、同専門部会は、1984年8月に報告書「放射性廃棄物処理処分方策について(中間報告)」を取りまとめ、公表した。報告書においては、以下のような評

価結果が示された。

- ・わが国における「有効な地層」として、未固結岩等の明らかに適性の劣るもの以外は岩石の種類を特定せずに可能
- ・同一種類の岩石でもそれが賦存する地質条件によって適性に差異
- ・地質条件に対応して必要な人工バリアを組み合わせることにより安全確保可能
- ・処分予定地の選定は、動燃が電気事業者等の協力を得て行い、選定の結果については、国が所要な評価等を行って、その妥当性を確認
- ・処分の実施主体については、適切な時期に具体化

HLW 処分に関するわが国の計画においては、1976年の原子力委員会決定に基づき、地層処分に重点を置く基本方針を受けて上記のような5段階立地選定プロセスにより、可能性のある地層の概査からスタートし、第2段階において有効な地層を選定し、さらに、試験地を絞り込み、その地点で模擬固化体、次いで実固化体を用いた試験を行って、地層処分システムを確立するという手順が定められていた。しかしながら、このような地点絞り込み方式は、1984年時点であい路に入り込み、以降それ以上の進展をみることはなかった。

可能性のある地層から有効な地層を絞り込むには、調査結果に基づく地層や地点の諸特性を何らかの尺度と照らして評価する作業が不可欠であるが、そのための客観性のある評価尺度が存在しなかった。専門部会報告書に示された手順は、「可能性ある地層に関する調査研究」と「工学バリアに関する研究」のそれぞれの成果を「地層処分システム研究」に集約して「総合評価」を行うことによって、有効な地層を選定するというものであった。

総合評価という曖昧さが残る手法で、社会的にも関心が高い施設の立地問題を解決できるという考え方は、楽観的に過ぎ、結局、期待されたような地点絞り込みには進展しなかった。

また、当時の地質探査の手法は鉱物資源探査に用いられる手法を応用したものが主であり、地層処分システムを構築する、一定の広がりを持った地質環境の適性の評価という視点からは十分に検証されたものではなかった。

地質環境に有意の差をつけ、さらに評価結果に対してその地層が存在する地域や地元の住民の関心、(たとえば「なぜこの地層、この地点が選ばれたか」という問い)に答えられる客観性と公平性のある判断基準が曖昧なままに、立地を進めることは、困難というより不可能に近かったことは、現時点で考えると当然と思われる。

IV. おわりに

米国で HLW 対策に関する議論が始まった 1950 年代から地層処分は有力な選択肢とされ、米国においては岩塩層における原位置試験が始められたが、放射性廃棄物

施設の立地に対する社会的な合意の重要性に関する認識の欠如により、試験開始後数年で中止に追い込まれ、場所を変えて再開されるまでの間しばらくは空白状態となった。その他の諸国において本格的な研究開発が始まったのは 1970 年代後半である。国際的な環境問題の認識の高まりを受けて、現在も共有される地層処分に關する主要な考え方が、米国や OECD/NEA において専門家の集約意見として取りまとめられ、これらを拠り所とした研究開発が各国において開始された。

日本で HLW 対策の議論が始まった時点で、地層処分は選択肢ではなかったが、HLW の海洋投棄が国際的に禁止されたことを契機に、地層処分が有力なオプションと位置づけられた。しかし、実固化体を用いた実証試験を行う地点の選定を至近の目標においた当初の研究開発計画は、数年で頓挫することになった。

今回は、日本における地層処分計画の基盤を構築することになった研究開発に焦点を当てて経緯を紹介する。

— 参考資料 —

- 1) 安 俊弘, 「高レベル放射性廃棄物地層処分: 概念発達史と今日の課題」KAGAKU, Oct. 2013 Vol 83 No. 10.
- 2) "The Disposal of Radioactive Waste on Land", National Academy of Sciences (April, 1957).
- 3) 村野 徹, 「放射性廃棄物地層処分の基本的考え方」, 季報エネルギー総合工学, 11 巻, 4 号, (1989. 1).
- 4) "Objectives, Concepts and Strategies for The Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes", OECD/NEA, (1977).
- 5) TID-29442, "Report to the President by the Interagency Review Group on Nuclear Waste Management", March 1979.
- 6) "Disposal of Radioactive Waste: An Overview of Principles Involved", OECD/NEA (1982).

著者紹介



増田純男 (ますだ・すみお)
(公財)原子力安全研究協会
(専門/関心分野)放射性廃棄物処分



佐久間秀樹 (さくま・ひでき)
元日本原子力研究開発機構
(専門/関心分野)放射性廃棄物処分



梅木博之 (うめき・ひろゆき)
原子力発電環境整備機構
(専門/関心分野)放射性廃棄物処分

解説

核燃料サイクル施設における対応を検討すべきシビアアクシデントの選定方法と課題

日本原子力学会 再処理・リサイクル部会
核燃料サイクル施設シビアアクシデント研究ワーキンググループ

日本原子力学会 再処理・リサイクル部会核燃料サイクル施設シビアアクシデント研究ワーキンググループでは、福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、核燃料サイクル施設における内的及び外的事象に起因する事故を科学的・技術的観点からシビアアクシデントとして選定する方法について議論してきた。その成果を報告書として取りまとめたので、概要を報告する。

I. はじめに

福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえて、核燃料サイクル施設についてもシビアアクシデント(SA)のリスクを検討し、これに基づいて安全確保のあり方を見直し、一層の安全性向上について検討することが、喫緊の課題となっている。

日本原子力学会 再処理・リサイクル部会では、科学的観点から上記課題を検討し、その成果を社会に発信することは重要な使命であると考え、平成25年4月に核燃料サイクル施設シビアアクシデント研究ワーキンググループ(WG)を設置し、日本原子力学会 原子力安全部会の協力を得つつ、平成26年7月までに17回の会合を開催し、報告書¹⁾をまとめた。報告書は再処理・リサイクル部会のウェブサイトに掲載されている。

ここでは、核燃料サイクル施設における内的及び外的事象に起因する事故を科学的・技術的観点からSAとして選定する手法について議論した。具体的には、原子力分野で用いられてきたリスク分析の手法をレビューし、これを基に対応を検討すべきSAの選定方法を提案し、またその選定方法の実行可能性を確認するために、再処理施設を核燃料サイクル施設の代表施設として事故の発生可能性や影響の評価事例を検討した。さらに、これらの検討を通して認識されたリスク評価上の技術的課題及

び評価結果の活用に向けた課題をまとめた。

なお、核燃料サイクル施設においては、発電用原子炉施設のようなSAという用語はこれまで使われていなかった。本報告書で用いる「核燃料サイクル施設のSA」とは、「設計基準事故の想定を超える条件で発生し、その判断基準を超えて大きい影響をもたらす事故」と定義することとする。ここでは、原子力規制委員会による新規規制基準²⁾での「重大事故」(「設計上定める条件より厳しい条件の下において発生する事故」とし6種の具体的な事故形態が定義されている)と区別して用いている。

上述のSAの定義から、その選定方法は、SAと呼ぶべき「影響の大きい事故を網羅的に同定する手法」と、同定されたSAの中から、発生の可能性を考慮しつつ、施設の安全確保の観点から「対応を検討すべきSAを選定する手法」の2つの内容を含んでいる。

以下では、報告書¹⁾の構成に沿って、第II章において核燃料サイクル施設のリスク評価手法が持つべき特性を述べた上で、WGの検討結果としての「対応を検討すべきSAの選定手順」を説明する。次いで第III章では、そこで必要となる定量的な判断基準を定める上での参考情報として国内外の安全規制におけるリスクの判断基準をレビューする。次いで第IV章では提案した手順の実施可能性を示すために具体的な適用例を検討する。第V章では、全体のまとめと今後の課題について述べる。

(東海大学・浅沼徳子、日立GE・深澤哲生)

II. 対応を検討すべきSAの選定手順

1. 基本的な考え方

我が国及び米国、英国、フランス等においては、発電用原子炉施設だけでなく核燃料サイクル施設について

Selection Method of Severe Accidents at Nuclear Fuel Cycle Facilities for which the Countermeasures should be considered and Remaining Issues: The Reprocessing and Recycle Technology Division, The Severe Accident Study Working Group for the Nuclear Fuel Cycle Facilities.

(2015年1月14日 受理)

も、事故の経験を踏まえつつリスク評価の必要性が認識され、その評価手法の研究開発がなされてきている。この手法整備の経緯及び福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえるならば、SAと呼ぶべき事故を認識し、そこから対策を検討すべき事故を選定する上では、次の2つのことを踏まえた手法とすることが重要である。

(1) リスク評価の必要性

設計評価の基礎となる単一故障や二重偶発性の想定を超える多重故障や人的過誤を考慮し、かつ影響も評価する系統的な手法が必要である。また、多重故障のシナリオは無数にあるので、有意な頻度を有するシナリオを選定できる手法が必要である。さらに、設計での想定を超える自然現象を考慮するため外的誘因事象のハザード評価を含む手法が必要である。(一般に、外的誘因事象の強度と発生頻度を評価することをハザード評価と呼び、本報告書で後述する施設の潜在的な危険要因を分析するハザード分析とは異なる概念である。)

(2) グレーデッドアプローチの重要性

核燃料サイクル施設では、影響の大きな事故が想定される一方、その拡大可能性を考慮しても影響が限られる事故も多い。それゆえ、事故のリスクの大きさに応じた対策を講じるグレーデッドアプローチが採られている。そのための評価手法についても、想定されるリスクの水準に応じて詳細さの異なる手法が使われており、評価手法に関するグレーデッドアプローチが採用されている。

2. 選定の手順

提案した選定手順は、次の3つのステップからなる(第1図参照)。

ハザード分析：施設に内在する潜在的な危険要因を体系的、網羅的に同定する。

概略的影響評価に基づくスクリーニング：危険要因が顕在化し拡大した時に、影響緩和機能を考慮せずとも大きな影響を与えるおそれのない事象を除外し、残りをSA候補事象とする。

リスク情報を活用した選定：各候補事象に対しリスク評価(半定量的な評価を含む)を行い、大きい影響を持つ事故をSAとする。影響と頻度の2次元の判断基準により、対応を検討すべきSAを選定する。

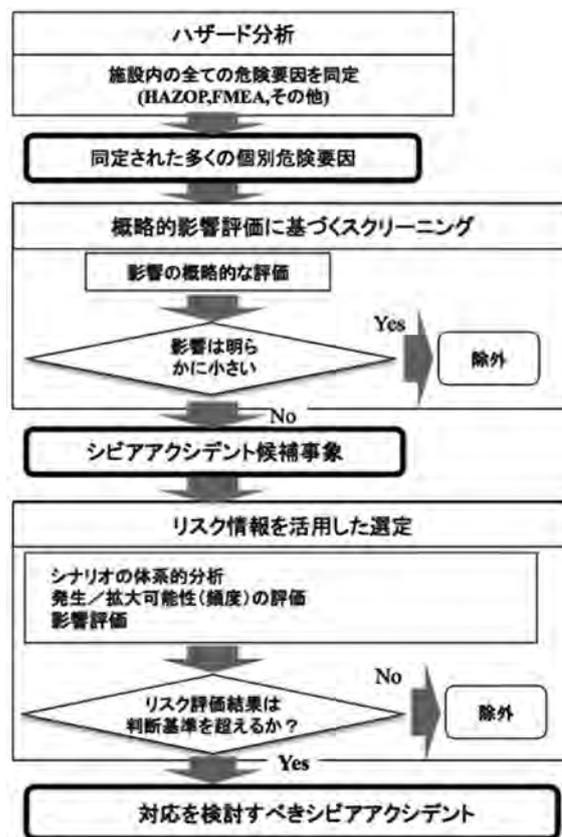
各ステップの要点は次の通りである。

(1) ハザード分析

ハザード分析では、広い範囲での危険要因の詳細な分析に適した手法として、次をベースとして用いる。

a) 故障モード影響解析(Failure Mode and Effect Analysis ; FMEA)

システムを構成する機器が故障した際に、その故障の形態(故障モード)毎にシステムに与える影響を分析する。



第1図 対応を検討すべきSAの選定手順

b) ハザードと運転分析(Hazard and Operability Analysis ; HAZOP)

システム内に生じる擾乱に着目し、その擾乱がシステムに与える影響を評価するとともに、擾乱の発生原因についても分析する。

ただし、低頻度の自然現象や多重故障までを含め、発生可能性が極めて小さな事象が洩れることがないよう危険要因を同定することが重要であり、例えば放射性物質は全て危険要因とするといった方法で広めに列挙する。

(2) 概略的影響評価に基づくスクリーニング

ここでは、(1)で上げられた候補事象について、保守的方法を用いて概略的に影響を評価し、大きい影響を持ち得ない事象を除外する。例えば、設計基準への対応として既に備えられた設備や運転操作等の影響緩和機能に期待しない評価を実施し、影響が小さい事象を除く。

(3) リスク情報を活用した選定

ここでは、まず対象施設のリスクの特性に応じて、適切なリスク評価手法を選定し、リスク評価を行う。ここでいうリスク評価とは、発生しうる事故のシナリオ、その発生可能性及び拡大可能性(この2つは定量的には発生頻度で表現する)及び影響(敷地近傍の被ばく線量で表現する)の大きさを定量的又は半定量的に評価することである。外的誘因事象の評価等、評価手法が未整備の部分は、可能な範囲で軽水型原子力発電施設の確率的リスク評価(PRA : Probabilistic Risk Assessment)の手法

(学会標準等)を援用する。手法については、次節でさらに説明する。

次に、発生可能性及び拡大可能性と影響に関する判断基準に基づいてSAの選定を行う。

ここでは、まず核燃料サイクル施設のSAの定義に基づいて、設計基準事故の想定を超える条件で発生し、その判断基準を超えて大きい影響をもたらす事故をSAとする。さらにSAに対して、発生頻度と影響の2次元の尺度を考慮して、対応を検討すべきSAを選定する。

なお、設計基準の条件の範囲内の構築物・系統・機器のみを考慮してリスク評価を行った場合は、既にアクシデントマネジメント(AM)策を講じている事象も含めた「対応を検討すべきSA」が選定される。また、AM策を含めてリスク評価を行った場合は、その段階での「新たに対応を検討すべきSA」が選定される。

3. 選定手順の各ステップの特徴

対応を検討すべきSAの選定に用いるリスク評価手法について説明する。

(1) シナリオの体系的分析と発生/拡大可能性(頻度)の評価

シナリオの分析には、よく知られたイベントツリー手法及びフォールトツリー手法を用いる。ただし、発生頻度の評価では、必要な起因事象発生頻度や機器故障率などのパラメータが必要となるが、発電用原子炉施設では同種の施設が多く存在し、従来から運転経験データの蓄積があるのに対し、核燃料サイクル施設ではデータの蓄積が限られていることや、安全確保の手段には自動化されていない機器や管理的手法による割合が大きいことから、これに適した手法が必要となる。具体的には、頻度指標や信頼度指標と呼ばれるオーダーレベルで数値を設定する半定量的なパラメータを用いる手法を必要に応じて用いる。

(2) 影響の評価

環境への放射性物質放出量の評価では、核燃料サイクル施設の決定論的安全評価及びリスク評価において従来から用いられてきた五因子法をベースとして用いる。これは、放出量を次式のような5つのパラメータの積で表現する方法である。

$$ST = MAR \times DR \times ARF \times LPF \times RF$$

ここで、ST：放出量、MAR：存在量、DR：事故影響を受ける割合、ARF：浮遊割合、LPF：放出割合、RF：吸入され得る粒子割合である。なお、RFは吸入による被ばくの評価でのみ用いる。

パラメータの選定に際しては、サイクル施設を対象とした米国の事故解析ハンドブック(AAH: Accident Analysis Handbook)³⁾等の文献から条件が最も近いと考えられる推奨値を選択する方法が考えられるが、必要に応じて、評価対象条件に一層適合した実験データ・解

析データを取得することにより信頼性を向上させることができる。環境影響の評価では、次の2つの方法が可能であるが、SA選定の判断基準を定義する上で、英国、米国などで従来から用いられている指標との整合性が得やすいことなどから、後者を適用する。

a) 発電用原子炉施設のレベル3PRA手法

事故シナリオ毎に評価されるソースターム(放出核種、放出量、放出タイミング等の情報)を用いて、気象条件の確率分布を含めて、短期及び長期の健康影響を評価する方法。

b) 旧「発電用原子炉の安全解析に関する気象指針」に基づく手法

事故シナリオ毎に評価されるソースタームを用いて、保守的に選定された気象条件を用いて敷地近傍での一定時間内の被ばく線量を評価する方法。

(3) 外的誘因事象に関するリスクの考慮

地震を例として、2つの評価手法を説明する。

a) 地震に関する確率論的リスク評価(地震PRA)

対象サイトの周辺の地震活動を調査し、これに基づいて発生しうる地震動の強さと発生頻度の関係を定める地震ハザード評価、入力地震動の強さに応じて機器の損傷する確率を定めるフラジリティ評価、発生しうる事故のシナリオとその発生頻度を定める事故シーケンス評価の3つのタスクからなる評価手法である。

b) 耐震裕度評価手法(マージン法)

耐震設計における基準地震動 S_s を超える地震の発生を仮定して余裕を評価する手法である。地震ハザード評価は含まれていない。

比較的大きい影響がありうる核燃料サイクル施設ではPRA手法を適用することが望ましいが、手法の整備が十分でない場合には、地震動の発生頻度への配慮等を適切に加えることにより、耐震裕度評価手法を適用することも可能と考えられる。

(4) リスク評価の品質確保に関する一般的留意事項

リスク評価を行うにあたっては、施設のリスクの大きさに応じて、適切な品質を有するように、以下を考慮して評価作業を管理することが望ましい。

a) 品質保証活動

適切な基準の下に品質保証(QA: Quality Assurance)活動を行う。

b) 文書化

情報公開、ピアレビュー、継続的更新などへの利用を考慮する。

c) 不確かさへの配慮

不確かさを考慮した評価手法及び結果の活用方法を用いる。

(東京都市大学・村松 健, 三菱重工業・眞部文聡)

Ⅲ. 対応を検討すべき SA 選定の判断基準

SA の選定に当たり、どのレベルの頻度及び影響を判断基準にするかは、国際的な動向から大きく離れるべきものではない。そこで、今後の判断基準検討の参考に資するため、我が国の規制基準における判断基準及びリスク情報を活用している英国と米国の規制基準を調査した。

1. 新規制基準が示す判断基準等

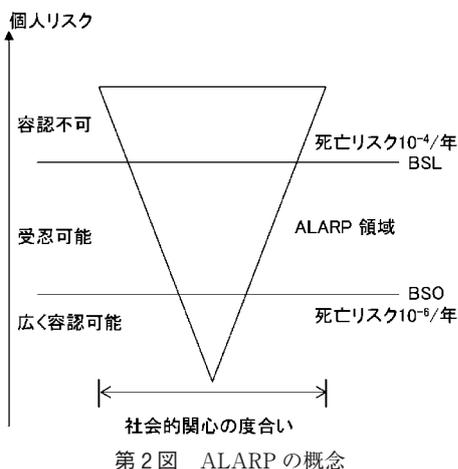
我が国では福島第一原子力発電所の事故の教訓を踏まえ、核燃料施設の新規制基準が策定された。新規制基準では、従来の安全審査指針で求められていた設計基準事故に関する評価に加え、新たに「設計上定める条件より厳しい条件の下において発生する事故(臨界、蒸発乾固、水素爆発、有機溶媒等の火災・爆発、使用済燃料の著しい損傷及び放射性物質の漏えい)」を「重大事故」と定め、その発生の防止、拡大防止及び影響緩和のための対策(重大事故対処策)を講じることを求めている。影響の大きさについては、対処策の有効性を判断する基準として、長期影響を低減する観点から、放出される放射性物質質量が、¹³⁷Cs 換算で 100 TBq を十分下回ることを求めている。

安全確保活動における資源の有効配分あるいはグレーデッドアプローチの適用という観点からは、発生の可能性と影響という2つの情報、即ち、リスクの大小を考慮した優先度付けが必要となるが、国の定める「重大事故」は、設計基準事故を超える事象を全体として一まとめに扱っているため、リスクの大小により対応の軽重を付けることが難しくなっている。

2. 英国、米国の判断基準

(1) 英国

英国では、保健安全執行部の原子力規制局(ONR)により、安全評価原則(SAP: Safety Assessment Principles)⁴⁾への適合性が審査される。第2図に示すよ



第2図 ALARP の概念

うに、SAP では「リスクの受忍可能性」の枠組み(「容認不可」, 「受忍可能」及び「広く容認可能」の3つのレベル)に基づき基本安全レベル(BSL: Basic Safety Level)及び基本安全目標(BSO: Basic Safety Objective)が用いられ、数値は主として、線量レベル、頻度で構成されるリスクで表される。事業者は、ALARP (As Low As Reasonably Practicable)の原則に則ってリスクの低減を図る。

事故による敷地外の公衆に対する個人リスクは、敷地内のすべての施設起因のすべての事故による敷地外の個人の死亡リスクを対象とし、BSL: 1×10^{-4} pa, BSO: 1×10^{-6} pa (pa: per annum, 1/y と同義)が示されている。また、その補助目標値として、単一の施設からの個人の被ばくのリスクとして第1表に示す線量区分毎の発生頻度の指標が示されている。

さらに、SA 解析に対しては、大規模事故が考察され、社会的リスクに対する目標値として、100人又はそれ以上の死亡を伴う事故の頻度として BSL: 1×10^{-5} [1/y], BSO: 1×10^{-7} [1/y]が記されている。社会的影響を生起する事故の頻度目標は、1992年版のSAPでは、特定の2つの核種の放出量(¹³¹Iについては10,000 TBq, ¹³⁷Csについては200TBq)に対して与えられていた。しかしながら、放出量と死亡数との関係、放出される主要な核種が¹³¹I及び¹³⁷Csではない事故での放射性物質の放出量を定める方法が明確でない等の問題があった。現行のSAPでは、社会的リスクの指標を100人以上の即発、又は最終的死亡の発生のリスクに置き換えている。

(2) 米国

米国の原子力規制委員会(NRC: Nuclear Regulatory Commission)は、2000年9月に核燃料サイクル施設を対象とした連邦規則法典 10 CFR Part70⁵⁾(以下、10 CFR 70)を改訂した。そこでは、事業者に対し総合安全解析(ISA: Integrated Safety Analysis)⁶⁾を実施(10 CFR 70.62)し、すべての潜在的な事故を同定し、その影響と発生の可能性を評価し、すべての事故が10 CFR 70.61に示す性能要求(第2表)を満たすことを示すように求めている。

影響区分は、「従事者」、「公衆」、「環境」の各々について放射線及び化学的影響について定義されている。第3

第1表 SAPにおけるサイト外個人被ばく線量目標値

実効線量 [mSv]	全予測頻度 [1/y]	
	BSL	BSO
0.1 - 1	1	1×10^{-2}
1 - 10	1×10^{-1}	1×10^{-3}
10 - 100	1×10^{-2}	1×10^{-4}
100 - 1000	1×10^{-3}	1×10^{-5}
> 1000	1×10^{-4}	1×10^{-6}

(単一クラスの事故の頻度は1/10)

第2表 リスクマトリクスに示した「性能目標」

影響	頻度区分1 極めて低い	頻度区分2 低い	頻度区分3 低くない
影響区分3 大	許容可	許容不可	許容不可
影響区分2 中	許容可	許容可	許容不可
影響区分1 小	許容可	許容可	許容可

第3表 影響区分

影響度	従事者	公衆	環境
影響区分3	1Sv以上	0.25Sv以上	
影響区分2	1Sv以下 0.25Sv以上	0.25Sv以下 0.05Sv以上	10CFR20 App.B の表2の5000倍
影響区分1	上記以下	上記以下	上記以下

表には放射線影響の区分を示す。頻度区分はNRCの合意を得て事業者が定義する。

具体的な判断基準の例として、例えばMOX燃料加工施設を対象とした標準審査計画⁷⁾ Appendix Aに次のような値が示されている。

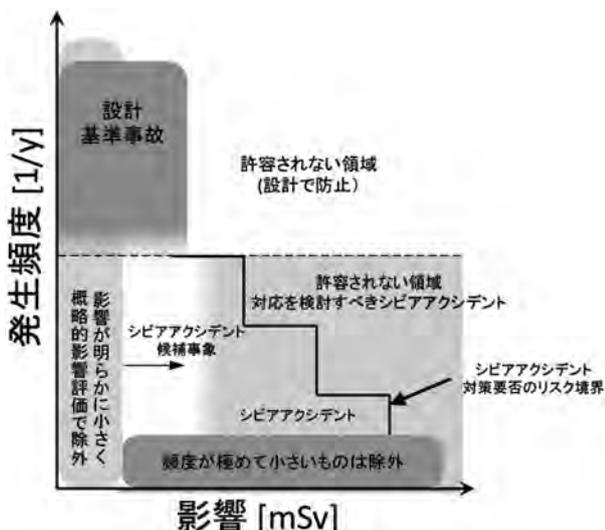
頻度区分1：極めて低い： $< 10^{-5}/\text{y}/\text{event}$

頻度区分2：低い： $< 4.0 \times 10^{-4}/\text{y}/\text{event}$

頻度区分3：低くない： $> 4.0 \times 10^{-4}/\text{y}/\text{event}$

3. WGでの検討

WGが提案するSA選定基準の概念を第3図に示す。SAは、“設計基準事故の想定を超える条件で発生し、その判断基準を超えて大きい影響をもたらす事故”であるから、横の破線の下側のグラデーションを施した淡い灰色の領域に位置する。選定手順の「概略的影響評価に基づくスクリーニング」で、「影響が小さい事故」が除外され、「SA候補事象」が選別される。「リスク情報を活用した選定」の段階で実施するリスク評価の結果から、「頻度



第3図 対応を検討すべきSA選定の基準の概念

が極めて小さい事故」は除外される。それ以外の領域において、SA対策の要否のリスク境界(階段状の実線)の右側の許容されない領域に位置する事故が、「対応を検討すべきSA」として選定される。

このような2次元の判断基準の導入は、公衆の被ばく影響が幅広いスペクトルを有する核燃料サイクル施設において、科学的合理性の高い安全規制を行う上で非常に有効である。また、事業者が自主的に継続的安全向上を図る際に、影響の大きい事故へ手厚い対応を行うための目標を合理的に設定できる。このような基準は、グレーデッドアプローチ及びリスク情報活用の基本である。

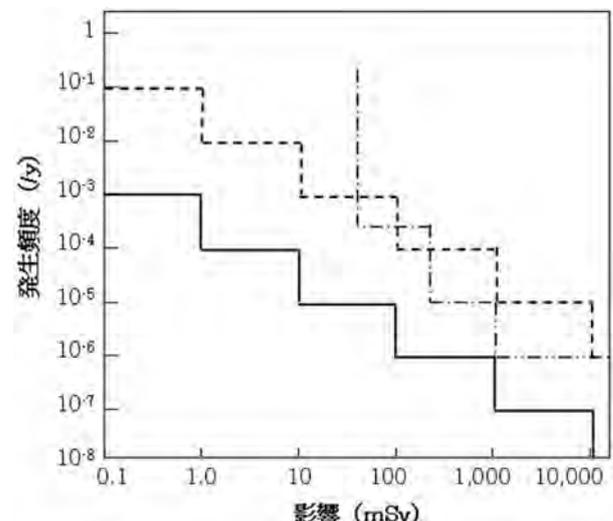
以上、対応を検討すべきSA選定の判断基準の基本的な考え方を提案した。WGの目的は選定の考え方を示すことにあり、SAP型基準を導入する際の具体的な判断基準値については、WGで定めることはしないが、参考として、第4図に英国と米国の核燃料サイクル施設の異常事象に対する判断基準の比較を示す。なお、NRCは将来の再処理工場建設に備えた検討をしており、許容可・不可に対するリスク判断基準に対するスタッフ提案が文書化され公表されている⁸⁾。(JAEA・吉田一雄)

IV. 適用例

1. 適用例検討の目的

第1図に提案した選定手順を適用するには、現状で定量的または半定量的なリスク評価を行う技術が存在することが前提となる。そこで、現状でリスク評価が可能かについて、再処理施設におけるセル内有機溶媒火災と臨界事故を例として、具体的な評価例を調査・検討した。以下に、その検討の結果得られた評価例、評価を実施する際に参考となる情報及び改良すべき評価上の技術的課題を示す。

なお、リスク評価の準備段階としてハザード評価及び



第4図 英国、米国の核燃料サイクル施設異常事象の判断基準比較

概略的影響評価に基づくスクリーニングを行う必要があるが、ハザード分析では、有機溶媒が存在すれば容器の破損等で漏えいし火災に至ると見なすこと、核燃料物質が存在し臨界管理が必要な場合はその失敗により臨界に至ると見なすことで、これらの事故は危険要因として選定される。以下では、リスク評価に限って述べる。

2. 再処理工場における安全対策の概要

再処理施設は、核物質を取り扱う巨大な化学工場である。具体的には、使用済燃料のせん断、せん断燃料片の硝酸による溶解、溶解液からのU・Puと核分裂生成物・マイナーアクチニドとの分離、UとPuの分離・精製、精製された硝酸ウラニル及び硝酸ウラニル・硝酸プルトニウムの脱硝(UO₃及びUO₂/PuO₂製品)、高レベル廃液のガラス固化(製品)等多数の工程から構成される。

再処理工場はこのように多量な放射性物質を取り扱うため、放射性物質を適切に閉じ込めることにより周辺公衆及び従事者を守ることが最も重要な安全機能となる。そのためには、この閉じ込め機能を損なうおそれを防止する以下の安全対策を確実に実施する必要がある。具体的には、核分裂性物質が臨界量以上存在する工程では、臨界事故の防止を図る必要がある。高濃度の放射性溶液が存在する工程では、冷却機能喪失時の崩壊熱による沸騰事故、掃気機能喪失時の放射線分解水素爆発事故の防止が必要となる。この他、化学工場に特徴的な火災・爆発事故、重量物の落下或いは腐食に伴う放射性物質を含む溶液の漏えいなど閉じ込め機能の喪失につながる事故の防止が重要となる。

再処理施設の安全対策は、旧原子力安全委員会の「再処理施設安全審査指針⁹⁾」に従い、周辺公衆保護を目的とした深層防護の考え方に基づいて、レベル1：異常の発生防止、レベル2：異常の事故への拡大防止、レベル3：事故の影響緩和の3段階に分けて計画・設計されてきた。

例えば、セル内溶媒火災に対しては、レベル1では、漏えい防止や溶媒の温度管理、異常な発熱の防止等の対策を採る。レベル2では、漏えい発生や溶媒温度の異常を早期に発見し、漏えい箇所の隔離や異常を検知して工程を停止する操作が可能な設計とする。レベル3では溶媒火災の発生を想定して消火設備を準備する。

さらに、各種の異常や事故に共通の安全対策として、施設を多数の部屋(セル)に区分してコンクリートの壁で仕切ること、セルにHEPA(High Efficiency Particulate Air)フィルタを備えたセル換気系を置くこと、及び建屋全体に対してHEPAフィルタを備えた建屋換気系を置くこと、重要な安全機能をもつ設備に対しては外部電源喪失時にも機能するよう多重性を持たせた非常用電源系を備えること等の対策を行っている。これらは、異常の拡大防止及び影響緩和に重要な役割を果たしている。

3. セル内有機溶媒火災

(1) 概略的影響評価に基づくスクリーニング

影響緩和機能の喪失を仮定すれば平常時線量限度を超えるので候補事象となる。概略的影響評価には、五因子法を用いることが有効である。

(2) SA候補事象のリスク情報を活用した選定に係る検討

a) シナリオの体系的分析

有機溶媒火災発生に必要な①有機溶媒の漏えい、②引火点以上への加熱(崩壊熱、漏えい溶媒回収時のスチームジェットポンプ蒸気の逆流や温水配管の破損による加熱水の漏えい等)、③着火源の存在(ケーブル破損によるスパーク等)の条件の成立性を、設備・運転管理情報及び外的事象に関する情報に基づき検討し、事故シナリオを系統的に構築することが重要である。放射線分解水素の放出がある場合は、爆発の観点からの検討も必要となる。

b) 発生可能性(頻度)の評価

内的事象としての火災発生に関するPRA結果が、旧英国核燃料会社(BNFL British Nuclear Fuel Limited)¹⁰⁾及びJNFL^{7, 11)}から報告されている。また、旧JNESは発生頻度を評価している¹²⁾。これらの報告書によると火災発生頻度はいずれも10⁻⁶/y以下としている。JAEAでは火災に対する性能目標設定の観点から、その発生頻度評価で用いられているイベントツリー及びそこで用いられているパラメータを比較検討している¹³⁾。リスク評価の精度向上には、これらにおいて例示された発生頻度パラメータの引用根拠及び評価結果に及ぼす影響を明示することが重要である。また、有機溶媒の着火条件に係る科学的知見の整備や水蒸気の静電放電発生への影響及び放電エネルギーの上昇による着火確率への影響も検討する必要がある。

c) 拡大可能性の評価

セル内酸素濃度が13%以下になれば消火する。内的事象のPRA事例では、防火ダンパの閉止、セル排風機の停止による窒息消火のシナリオを想定している。地震時には、防火ダンパの閉止不全が想定されるが、換気入口の閉塞ができれば窒息消火が有効である。セル排風機の地震による機能喪失は影響緩和策として働くが、セル換気系統はセルと環境間の最短経路となるのでHEPAフィルタは影響緩和機能を有する。したがって、火災時のHEPAフィルタの性能に係るデータについても適切に想定することが重要である。他の事象(水素爆発等)との重畳が考えられる場合には、HEPAフィルタへの影響の重畳を発生の可能性との関連で検討する必要がある。

d) 影響評価

影響は五因子法を用いて評価することが有効であ

る。LPFを計算コード等で評価し、被ばく線量を求めることにより現実的な値を得ることができる。

(3) 評価上の技術的課題

耐震Sクラスの機器は、基準地震動 S_s を超える地震時でも安全機能の全てあるいは一部を維持している可能性がある。このため、影響評価では想定される地震動の強さの関数として影響緩和機能の喪失割合の関数が必要な場合がある。例えば、換気系とHEPAフィルタのように、健全か完全喪失かの2つの状態だけではなくその中間の状態もあり得るからである。このため、HEPAフィルタのフラジリティ曲線と除染係数を関係づけられれば影響評価に役立つ。建屋の場合も、遮へい、閉じ込め、設備・機器の保持等の安全機能を有するが、通常は耐震壁のひずみにより損傷の有無の判断基準(損傷基準)を定義し、それを越えた場合は保守的に建屋の崩壊とし、それ以上のシナリオ分析を行わない場合がある。しかし、損傷の程度に応じて上記安全機能の一部が維持される可能性がある。この関係を定量化できれば、より現実に近い影響評価が可能となる。地震PRA標準¹⁴⁾では破損モード(例えば、亀裂や表層剥離などの破損の形態)と部位を抽出することを求めているが、このような損傷モードと放出量との関係をモデル化することができれば、より現実的な評価が可能となる。

具体的には、地震動の強さの関数である地震の発生頻度(地震ハザード曲線)及び地震動の強さの関数で表される構築物・系統・機器の安全機能の喪失割合の積を地震動強さで積分し平均することによって、実効的な安全機能の喪失割合を定義し、それを使用することも考えられる。

4. 臨界事故

(1) 概略的影響評価に基づくスクリーニング

臨界事故時の核分裂数は、核燃料物質質量、添加反応度、臨界を終息させる影響緩和策によって決まる。また、遮へい(影響緩和策)がなければ核分裂に伴う放射線により従事者が大きな影響を被るおそれがある。これらの点からSA候補事象として同定される。

(2) SA候補事象のリスク情報を活用した選定に係る検討

a) シナリオの体系的分析

外的事象起因の臨界事故については、臨界状態に至る具体的なシナリオを分析するには、詳細な設備情報を必要とするため、これ以降の具体的な分析はしないこととした。内的事象(管理グレードの低い機器への誤移送等)について、SA候補事象選定シナリオを検討した。

b) 発生可能性(頻度)の評価

誤移送に起因する臨界事故の評価では、溶液の機器間の移送が複数のパラメータで管理される場合には、

各パラメータの組合せで臨界となる領域を臨界計算により求め、各パラメータの失敗の種類及び失敗の回数(組合せ)を考慮し臨界発生シナリオを構築することが有効と考える。この場合、1つの失敗の原因が他の失敗の共通原因に成り得るかについても検討することが重要である。

c) 拡大可能性の評価

過去の事故における臨界停止機構として、中性子吸収材投入等の人為的措置、臨界事故により発生した機械的(圧力)及び熱的エネルギーによる臨界体系の変化(容器破損、沸騰蒸発による減速条件変化等)等がある。これらの条件を考慮して評価することが必要である。具体的には、核分裂率が高い、例えば、 10^{16} fissions s^{-1} の場合、発熱は300 kW程度になるので、貯槽外に蒸気が放出され、凝縮水が戻らない構造であれば臨界は停止する。一方、核分裂率が低い場合、発熱は貯槽を通して放熱されるが、あるレベルの核分裂数、例えば 10^{20} fissionsに達するには、時間余裕があり、また、放射線強度も核分裂率に比例するので低くなり、セル等の遮へい壁があれば運転員による未臨界措置を講じやすい。また、燃料溶液が過減速状態の場合や低濃度のプルトニウム溶液体系では、正の温度係数となる場合があり、適切な停止措置が実施されなければ、高出力状態が継続する可能性もあるので、評価の際に留意すべきである。

d) 影響評価

国内の再処理施設の安全評価では、臨界事故が発生した場合の周辺公衆への影響は、建屋外へ放出された短半減期の気体状放射性核種からのガンマ線被ばくとされている。一方、JCOの臨界事故を含め過去の事故において、公衆が気体状放射性核種から有意な被ばくを受けたという報告はない。また、塔槽類換気を停止すればこれら核種の多くは外部に放出される前に減衰する。臨界体系への影響(蒸気流量の変化による溶液濃度の変化等)を考慮したうえで、塔槽類換気の停止の有効性について検討することが重要である。

(3) 評価の詳細化に向けた課題

周辺公衆への影響を評価する場合には、施設外への放射性物質の放出履歴を知る必要がある。五因子法のMAR(存在量)(あるいは定義の考え方によっては $MAR \times DR$ (事故影響を受ける割合))の時間変化は、体系中の核分裂率の時間履歴に各核種の生成収率を乗ずることで求められる。したがって、信頼性の高い計算コードあるいは評価式を用いて、未臨界措置等も考慮したうえで、反応度添加条件や体系の冷却条件を考慮して総核分裂数や核分裂率を評価することが重要である。総核分裂数の増加(臨界継続時間の増加)は、この間の未臨界措置の可能性が増加するので、発生可能性(頻度)は減少することになる。

明確な事故シナリオの想定とシナリオに基づく解析により核分裂数を求めることが困難な場合には、我が国の臨界安全ハンドブック第2版¹⁵⁾や米国の事故解析ハンドブック³⁾等が参考となる。前者には臨界事故評価事例として、米国では最大 2×10^{19} fissions(米国指針に基づくものと考えられる)が、我が国では 10^{20} fissions(過去の事故の最大値を踏まえたものといえる)が紹介されている。後者には体系条件で区分した核分裂数の一覧が掲載されている。溶液体系では最大 3×10^{19} fissionsである。SAの想定核分裂数を定めるにはこれらの情報が役立つ。

放射性物質の移行解析を行う場合には、再処理施設特有の条件を考慮したARF(浮遊割合)及びLPF(放出割合)を採用することが重要である。短寿命核種の施設外への放出量の評価の観点からは、臨界事故発生以降の換気系運転の有無やリークパスをどのように考えるかが重要となる。外部事象に起因する臨界事故では、地震及びそれに起因する溢水(地震による配管の破損あるいは津波)による施設や設備・機器の損傷の程度と関連付けて施設外へのリークパス等を考慮する必要がある。

(JAEA・阿部 仁)

V. まとめ及び今後検討すべき技術的課題

WGでは、福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえた核燃料サイクル施設における安全の確保・向上を目的として、対応を検討すべきSAの選定方法を検討した。その結果、核燃料サイクル施設の特徴を考慮して、定量的又は半定量的なリスク評価手法を基礎とし、SAを体系的に洗い出すとともに、その中から発生の可能性と影響の2面から対応を検討すべきSAを選定する方法を提案した。

この過程でリスク評価及びリスク情報活用に関する技術的課題についても検討を行い、次の事項を指摘した。

(1) 地震等によるSAのシナリオ分析と発生可能性評価に係る課題

地震等を誘因とする外的事象の発生可能性(頻度)評価においては、核燃料サイクル施設では評価の経験が少なく、内的事象と異なる以下のような評価上の技術的課題がある。

- ・ 機器等の地震時フラジリティ評価
- ・ 事故時の対応方策を考慮できるリスク評価手法及びデータの整備
- ・ 長期の事故管理を想定した場合の評価用データの整備

(2) SA選定での影響評価の重要性

再処理施設は、発電用原子炉施設と同等の安全対策を要求されることが多い。リスクを重要な情報として、SAの選定、対策の検討及びその妥当性の評価・改善に用いる場合には、発生可能性(頻度)だけでなく影響を適

切に評価する必要がある。

(3) リスク評価対象外事象への考慮

対応を検討すべきSA選定方法は、潜在的影響を有する事故を漏れなく洗い出すための工夫がされているが、それにもかかわらず漏れた事故及びシナリオの特定や評価が難しいテロ等についても対応する必要がある。これらを考慮して、柔軟性及び融通性を有する対応を考える必要がある。

(4) 継続的安全性向上へのリスク情報の活用

本報告書で提案したリスク情報を活用したSA選定方法は、グレーデッドアプローチの考え方に基づいて、公衆及び環境保護の面で真に重要な対策に優先度を与えるために役立つと考えられるが、これに加えて、安全確保の最適化を図り、科学的合理性の高い安全性向上につなげることができれば一層効果的なものとなる。そのためには、安全規制や運転管理におけるリスク情報の効果的な活用方法を検討することが重要である。具体的には、安全機能の重要度分類、耐震重要度分類、SA対策の改善、教育訓練等への活用が考えられる。

(東京工業大学・池田泰久)

VI. おわりに

本WGでは、原子力分野で用いられてきたリスク分析の手法をレビューし、それを基に「対応を検討すべきSAの選定方法」を提案し、その選定方法の実行可能性を確認するため、再処理施設を例として事故の発生可能性や影響の評価事例を検討し、これらの過程でリスク評価及びリスク情報活用に関する技術的課題を抽出し、報告書としてまとめた。

本提案に対する忌憚のないご意見やご批判を歓迎するとともに、WGの報告書が規制機関、事業者及び学術界における核燃料サイクル施設の科学的合理性の高い安全確保策の最適化検討及び更なる安全性向上の契機となることを期待する。

— 参考資料 —

- 1) http://www.aesj.or.jp/~recycle/sawg/sawg_report_final.pdf
- 2) 原子力規制委員会規則第二十七号「再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」、原子力規制委員会規則第十七号「加工施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」、2013. 他。
- 3) Science Applications International Corporation, "Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook," NUREG/CR-6410, 1998.
- 4) Health and Safety Executive, "Safety Assessment Principles for Nuclear Facilities," 6 Edition, Rev. 1, 2006.
- 5) Code of Federal Regulations, Title 10, Energy, Part 70, "Domestic Licensing of Special Nuclear Material."
- 6) U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Integrated Safety Analysis Guidance Document," NUREG-1513, 2001.

- 7) U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Standard Review Plan for the Review of an Application for a Mixed Oxide (MOX) Fuel Fabrication," NUREG-1718, 1999.
- 8) U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Reprocessing Rulemaking : Draft regulatory basis and Path Forward," SECY-11-0163, 2011.
- 9) 原子力安全委員会, 「再処理施設安全審査指針」, 昭和 61 年 2 月 20 日, 原子力安全委員会決定.
- 10) N. J. James, et al., "The Control of Flammable Hazards in Nuclear Reprocessing Facilities," Paper presented to the Society of Fire Protection Engineers at the WATTEC 1987 Conf., Feb. 17-20, 1987, Knoxville, Tennessee.
- 11) 玉内義一, 他, "六ヶ所再処理工場の確率論的安全評価, (Ⅲ) -セル内有機溶媒火災(内的事象)-", 原子力学会和文論文誌, Vol.10, No.3, pp.170-184(2011).
- 12) 原子力安全基盤機構, "再処理施設の確率論的安全評価手法の整備 = 有機溶媒火災事象の解析手順 = に関する報告書", JNES/SAE07-005 07 解部報-005, 2007.
- 13) 核燃料施設性能目標調査専門部会, "核燃料施設性能目標策定に係る技術基盤の検討", JAEA-Review 2010-028, 2010.
- 14) 日本原子力学会標準委員会, 「原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準 : 2007」, AESJ-SC-P006: 2007, 2007.
- 15) 臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ, "臨界安全ハンドブック第 2 版", JAERI 1340, 1999.

核燃料サイクル施設 SA 研究 WG メンバー

(順不同, 敬称略, ○: 主査, □: 副主査, △: 幹事)

○池田泰久(東工大), □村松 健(東京都市大), △浅沼徳子(東海大), △阿部 仁(JAEA), △深澤哲生(日立 GE), 青柳春樹(JNFL), 池田 昭(東芝), 井上 正(電中研), 大濱稔浩(関電), 佐藤修彰(東北大), 澤田佳代(名大), 清水武範(JAEA), 塚田毅志(電中研), 中島 健(京大), 林 昭宏(電事連), 平野光将(電中研), 眞部文聡(MHI), 森岡信男(MMC), 吉田一雄(JAEA)

[オブザーバ]

飯塚政利(電中研), 越智英治(JNFL), 久野祐輔(東大), 小玉貴司(JNFL), 瀬川智史(JNFL), 関根啓二(JNFL), 玉内義一(JNFL), 藤田玲子(東芝), 松岡伸吾(JNFL)



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 —
(4月7日第9回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・ 2 月期に英文誌は 37 論文, 和文誌は 4 論文が投稿された。
- ・ 次年度編集委員を決定した。
- ・ 英文誌の引用を向上させるための方策を検討し, 編集委員への周知と注目論文の宣伝を出すこととした。
- ・ JNST Article Awards 内規, PNST 出版要領の修正を検討した。

【学会誌関係】

- ・ 理事より, 次年度予算が承認された旨の理事会報告があった。

- ・ 委員の交代について, 学会誌編集長より報告があった。
- ・ 春の年会企画セッションの記事候補の進捗状況の報告があった。理事会セッションについては, ニュース記事として学会誌 5 月号に掲載する。
- ・ 今後の記事企画の材料とするため, 3 月の特集号に掲載された各学会や有識者からの記事を整理している。また, 学会誌記事企画だけでなく, 秋の大会あるいは春の年会で「知の統合」をテーマに企画セッションを立案することとした。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

原子力における水素安全の課題と対策

原子力における水素安全対策高度化ハンドブックの作成

長岡技術科学大学 小川 徹, (株)三菱総合研究所 中島 清,
日本原子力研究開発機構 日野 竜太郎

福島第一原子力発電所事故では、少なくとも3つの原子炉建屋で水素爆発が発生した。号機ごとの事故の推移や事象の詳細を解明することは今後の課題として残されているが、軽水炉の事故時水素をめぐる様々な事象の連鎖について、異分野の専門家が共通の理解を持ち、共同でその知識を更新していくことが求められる。われわれは多くの専門家の協力により「原子力における水素対策安全高度化ハンドブック」を作成する作業を進めている。本稿ではハンドブック作成活動の方針、内容について簡単に紹介する。

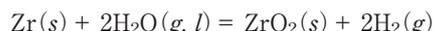
I. はじめに一ハンドブック作成の背景

1. TMI-2 事故における水素

米国には政府機関に雇用され、それぞれの機関の、いわば正史を残す public historian がいる。原子力分野では、1936~1946年の原爆開発史を記した Hewlett と Anderson の “The New World” が、巨大なプロジェクトの進展と様々な関係者の人物像を活写して、1963年のピューリッツァー賞候補にもなった。1979年3月のスリーマイルアイランド2号機(TMI-2)事故のエネルギー省(DOE)側の正史は、Cantelon と Williams の共著として1982年に出版された。同事故の米国原子力規制委員会(NRC)側の正史は、やっと25年後の2004年になって、J. Samuel Walker の著書として出版され、これも高い評価を得たようである。その Walker が、2009年3月の Bulletin of the Atomic Scientists 誌に “Documenting Three Mile Island” (「スリーマイルアイランド事故を記録するということ」)という記事を寄せている。この記事で彼は TMI-2 事故の水素バブル騒動の顛末を再び取り上げている。

3月28日水曜日朝4時の TMI-2 事故発生から約16時間後の夜、ようやく炉心冷却が回復した。その前、13時50分に運転員たちは、どこかで何か重いものが落ちたかぶつかったような異音を聞いた。そのとき、格納容

器圧力の記録計の針は一瞬 28psig (0.19MPa-g) ほどはねあがって、また収まった。しかし、これは記録計のノイズとして見過ごされた。この圧力スパイクは格納容器内での水素爆発だったのだが、そのときは爆発が起きたとは誰も気づかなかったのである。翌29日の遅くになって、やっと水素爆発が起きたのだと認識されるに至り、その報告が30日朝に NRC 本部に届いた。水素はジルカロイ被覆管の水蒸気との反応、



によって発生した。問題は原子炉圧力容器内に滞留して冷却水の循環を妨げている水蒸気と水素を含んだバブルに、さらに水の放射線分解による水素と酸素が加わって、爆発組成に至ることがあるかどうか、あるとしてそれがいつなのかということだった。

この情報は不確かなまま報道されてしまい、地元で大パニックを引き起こした。Walker は歴史家として、このときの社会的混乱を TMI-2 事故の最大の危機的局面としつつも、あらゆる証拠に照らして、NRC が圧力容器内での水素爆発の切迫性を信じたことはなかったとした。いずれにしても、4月1日の午後には、圧力容器内で水素爆発が起きるような酸素の発生はまずありえないという結論が出された。その結論が確定したのは、その日、カーター大統領が TMI-2 を視察した直後のことだった。これほど時間がかかったのは、当時 NRC 内に水の放射線分解について十分な専門知識がなかったためであると、大統領諮問の事故調査委員会報告書、いわゆ

Hydrogen Safety in Nuclear Power – Issues and Measures ; Preparing “Handbook for Improved Hydrogen Safety in Nuclear Power” : Toru OGAWA, Kiyoshi NAKAJIMA, Ryutaro HINO. (2014年12月4日 受理)

る Kemeny 報告は指摘している。

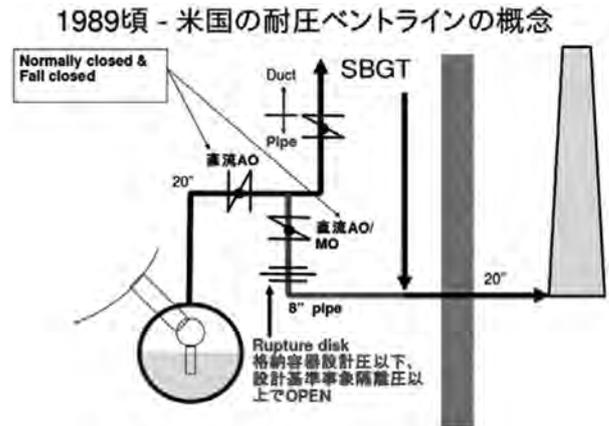
2. 福島第一原子力発電所事故における水素

福島第一原子力発電所事故では、少なくとも3つの原子炉建屋で水素爆発が発生した。これにより、原子炉建屋という2次格納容器の機能喪失と、事故後対応に不可欠な機器の損壊という深刻な事態をもたらした。最初に1号機で爆発が起きるまでは、わが国の原子力専門家のはほとんどは建屋での水素爆発の発生を予見しなかった。軽水炉にかかわる技術者としてシビアアクシデント時の水素挙動について知っていなければならないはずの基本的な事項の幾つかが、多くの専門家の視野から欠落していたのである。

沸騰水型炉(BWR)の格納容器(福島第一原子力発電所2~5号機ではドライウェル+圧力抑制室空間で4,240+3,160m³)は加圧水型炉(PWR)の大型格納容器(70,000m³)に比べて著しく小さいことから、格納容器内を窒素で常時不活性化することで格納容器内での水素燃焼の可能性を排除できる。しかし、格納容器が小さいために、シビアアクシデント時に圧力バウンダリーが損傷するなどして高温の水蒸気とともに非凝縮性の水素が大量に格納容器内に漏洩したときは、さらに格納容器から建屋への漏洩が起きるおそれがあることは1980年代後半から米国内でしきりに議論されてきた。

特に Mk-1 型の格納容器は容積が小さいことから、米国原子力規制委員会(NRC)は1989年に、Mk-1型格納容器を持つBWRについて、耐圧ベントの設置にかかわる書簡を出した¹⁾。1990年には米国の事業者団体BWROG(BWR Owner's Group)は耐圧ベントの自主規格を作成した。さらに、1994年には、新設された耐圧ベントラインの実地検証や耐圧ベント使用に関わる緊急時手順書の確認を含むNRC暫定検査マニュアルが作られた。同マニュアルでは、弁とスタックとの間に置かれるラプチャーディスクの破壊圧力は、格納容器設計圧より低く、かつ設計基準事象のピーク圧力より高く設定されるべきこと、また、緊急時には手動破壊できることとされた(第1図)。(以上のように耐圧ベント設置はNRCが主導したとはいえ、事業者の自主性に任せられてきた。NRCは2012年5月、Mk-1、Mk-2型格納容器のBWRに対して耐圧ベントの信頼性向上に関する指示を出した。)

米国原子力発電運転協会(INPO)報告²⁾は、福島第一原子力発電所事故について、日本の電力会社が格納容器圧力が設計圧を上回っても破壊に至ることはない、設計圧の2倍になるまでベント操作は遅らせることができると判断した点に着目している。今回の事故で2号機ではベント弁を開けることはできたが、ラプチャーディスク破壊圧(格納容器設計圧380kPa[gage]より高い427kPa[gage])に設定されていたまでウェットウェル圧



第1図 米国 NRC Generic Letter 89-16 に対応した耐圧ベントライン概念図

力が到達しないまま、ベントに失敗している。このときウェットウェル圧力計の読みがドライウェルのそれに比べて著しく低くなっており、圧力計が壊れていた可能性もあるので、ラプチャーディスク破壊圧設定値がベント失敗の原因とは限らない。しかし、この破壊圧の設定には、シビアアクシデント対策の基本思想にかかわる問題点が象徴されている。

環境に放出され広範囲の汚染をもたらした放射能のほとんどは1,3,4号機の水素爆発そのものによるものではない。むしろ、3月15日早朝から24日頃にかけての長期間にわたる放出の寄与が大きい³⁾。しかし、全世界に配信された原子炉建屋爆発の映像の衝撃はあまりにも大きい。号機ごとの事故の推移や事象の詳細を解明することは今後の課題として残されているが、同時に、軽水炉の事故時水素をめぐる様々な事象の連鎖について、異分野の専門家が共通の理解を持ち、共同でその知識を更新していくことが求められる。

3. ハンドブックの作成

TMI-2 事故後の1983年に米国NRCから報告書、“Light Water Reactor Hydrogen Manual”⁴⁾が出た。この報告書は、耐圧ベント設置に代表されるようなBWRの事故時水素対策が現れるより前の段階のものだが、軽水炉における事故時水素の問題を多面的に扱っているものとして優れた参考書となっている。福島第一事故後に、シビアアクシデント時の水素対策は、わが国において大きな技術的課題として認識されるに至った。しかし、原子力技術者と燃焼・爆発の専門家とのあいだで共通の知識基盤を形成し、将来の原子力安全を確保、向上させていく努力は始まったばかりである。

そのような活動の一つとして、日本原子力学会は「水素安全対策高度化」特別専門委員会(委員長・村松 健(東京都市大学))を平成25年度に組織し、同特別専門委員会を主体とした一般公開セミナー「原子力のための水素安全高度化」を開催して、最新知見の普及に努めている。

また、上記活動とも連携しつつ、われわれは「原子力における水素安全対策高度化ハンドブック」を作成する作業を進めている(平成 27 年度末完成予定)。このハンドブック作成活動は資源エネルギー庁受託事業「水素安全対策高度化」の一環として実施している。本稿では以下に、ハンドブック作成活動の方針、内容について簡単に紹介する。

II. 原子力における水素対策安全高度化ハンドブック

1. 作成方針

平成 24 年度に大学、原子力メーカー、事業者、研究機関の原子力及びガス燃焼・爆発の専門家からなるハンドブック作成活動を立上げ、ハンドブックの作成方針、目次構成等を議論してきた。25 年度中に初校を回収し、26 年度は初校の改訂と補遺とを進めている。発刊は 27 年度末を予定している。

活動メンバーや執筆者には、「BWR 配管における混合ガス(水素・酸素)蓄積防止に関するガイドライン」(火力原子力発電技術協会)⁵⁾作成や、新エネルギーとしての水素の安全利用技術にかかわる調査や評価⁶⁾に関与した経験をもつ専門家が多数参加している。

ハンドブックとしては、次のようなものを目指している。

- ・原子力の技術者が理解しておくべき水素安全技術の先端を示す。
- ・原子力技術者に協力すべき燃焼、爆発専門家向けに、原子力における水素安全の要点が示されているものとする。
- ・事故後、廃棄物管理までを視野に入れて、放射線分解水素に関する情報を拡充する。
- ・過酷事故解析等の特定・狭義の専門家を対象にするものではない。高度な解析式なしに、迅速に図表で判断を助けるものとする。
- ・解析技術者にも役立つように、詳細なデータベースの所在や、最新の解析ツールのオーバービューを添える。

以下では、ハンドブックで扱うべきテーマの幾つかを例示する。

2. シビアアクシデント・マネジメント(SAM)と水素管理

きわめて蓋然性が低いと考えられる事象について予め検討しておくことは深層防護の基本である。事故が設計基準を超えて進展した場合には、以下を目的としたアクシデントマネジメント(AM)が講じられる。

- ・その事象がシビアアクシデントに拡大することを防ぐこと、
- ・シビアアクシデントの影響を緩和すること、

- ・長期的に安全で安定した状態を達成すること。

AM の 2 番目の項目(シビアアクシデントの影響を緩和すること)は、シビアアクシデントマネジメント(SAM)と呼ばれる。有効な SAM の立案のためには、

- ・事前に入念な調査・解析を行い、
- ・柔軟な対策を用意し、
- ・それらの対策の実施に必要な信頼性ある計装を備え、
- ・計装や手段の限界を十分把握している必要がある。

シビアアクシデントのように、状況によって様々な分岐が考えられる事態については、すべてを十分な精度で予測することは不可能である。予測の限界を知り、常に最先端の知見を集め、解析手法と解析に基づく対策とを更新していく持続的な努力が求められる。

SAM を、正確にまたは最適に実施するには事故進展を把握し、発電所の損傷状態を特定する必要がある。水素にかかわる SAM において、炉心の状態は水素生成の状況、格納容器の状態は水素の分布状況に影響する。炉心の損傷・溶融状態と水素生成とはおおむね第 1 表のような関連が想定される。炉心損傷の状態は、起因事象、非常用炉心冷却系の状況、ヒートシンクの状況を把握することにより推定することができる。さらに、格納容器バウンダリーの状態と水素分布とはおおむね第 2 表のような関連が想定される。格納容器バウンダリーの状態は、炉心損傷の状態、格納容器熱除去の状況を把握することにより推定することができる。格納容器から漏れ出した水素は原子炉建屋に蓄積することとなる。

第 1 表 炉心状態と水素生成

炉心の状態	水素生成等
燃料棒被覆管は健全	水素生成なし
炉心が露出して燃料被覆管が損傷	ジルカロイのおよそ 1% の反応に相当する水素生成
炉心が露出して溶融(溶融炉心は原子炉容器内)	ジルカロイのおよそ 25% の反応に相当する水素生成
溶融炉心が原子炉容器を破損、格納容器コンクリートと反応	ジルカロイのおよそ 50% の反応に相当する水素生成
溶融炉心が格納容器に落下して冠水状態でコンクリートと反応	ジルカロイのおよそ 75% の反応に相当する水素生成

第 2 表 格納容器の状態と水素分布

格納容器の状態	水素分布等
格納容器健全	発生した水素は格納容器内に蓄積する。一部は漏れい箇所から原子炉建屋に漏れ出る。
格納容器隔離失敗	発生した水素は格納容器から原子炉建屋に漏れ出る。
格納容器バイパス	発生した水素は格納容器をバイパスして原子炉建屋またはタービン建屋に漏れ出る。
格納容器破損	発生した水素は格納容器から原子炉建屋に漏れ出る。

第3表 SAMにかかわる水素燃焼事象

-全体的な水素燃焼に対する格納容器の健全性
-原子炉冷却系からの水素プルームの燃焼
-破断箇所とタイミングによる格納容器内での水素の層化と、火災加速伝播による格納容器内機器類の損傷の可能性
-格納容器内区画における水素の爆ごうの可能性と格納容器への影響
-局所的な拡散炎(可燃性気体と空気とが分かれていて、その間の界面に火炎が存在し、その界面に拡散によって両者が供給されることで火炎が維持されるような火炎の形態)の発生の可能性と格納容器壁への影響
-深層防護としての水素濃度抑制手段の用意

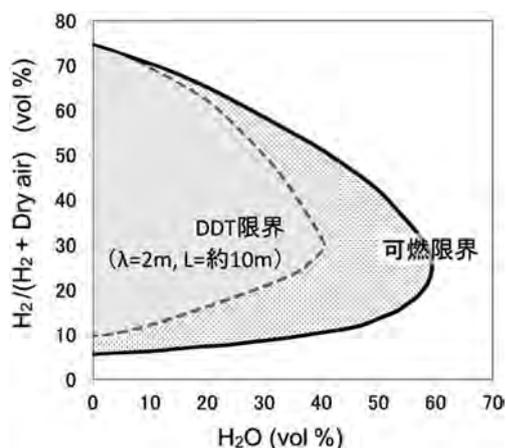
3. 考慮すべき水素燃焼事象

SAMに関する水素燃焼事象は第3表のように集約される。

これらの現象が個々の炉型においてしめる重要度と、それらに関連する解析は、ハンドブックの扱えるところではないが、いくつかの具体例をあげて理解を助けるものとした。また、第3表のうち水素濃度抑制手段(静的触媒式再結合装置 PAR: Passive Autocatalytic Recombiner)、イグナイタ(電気的水素燃焼装置)、フィルタ付ベント)については、それぞれの使い方、期待する役割について、必ずしも国際的なコンセンサスが定まっていない。ハンドブックでは現状と課題を可能な限り分かりやすく示したい。また、水素にかかわる計測技術の最近の進展も重要なテーマである。

4. 空気-水蒸気-水素系の挙動

軽水炉シビアアクシデントにおける水素挙動が他の分野の水素安全に比べて複雑になるのは、そこに凝縮性の水蒸気が大量に共存し、放出に至る経緯や放出後の履歴によって、混合気の組成が大きく変化するからである。第2図に空気-水蒸気-水素系の燃焼限界を示す。水蒸気は水素燃焼を不活性化する効果を持つ。逆に、水蒸気が



第2図 空気-水蒸気-水素系の燃焼限界及び爆燃-爆ごう遷移(DDT)限界(代表長(L)10mの空間において爆ごうセル幅(λ)2mとして想定したもの: IAEA 報告書⁷⁾)

凝縮するとその不活性化効果は失われる。

BWRのシビアアクシデントでは、格納容器内への高温蒸気+水素の漏洩で内圧が高まる結果、早期ベント失敗の場合には、原子炉建屋への漏洩が起きる可能性がある。格納容器からの漏洩が継続している限りは、水蒸気濃度が高く可燃限界を大きくはずれている。しかし、漏洩が止まるか小さくなると、水蒸気供給より建屋壁面や天井への水蒸気凝縮が上回ることになり、空間の気体組成は可燃限界の内側に入ってくる。そこに、摩擦火花のようなささいなエネルギーの投入があれば爆発が起きる。福島第一では各号機のオペレーション・フロア天井は鉄骨トラス構造だったが、壁は1号機では鉄骨構造、3号機では鉄筋コンクリート構造だった。水蒸気の壁面凝縮や凝縮にバランスする外気の流入を評価することは容易ではないが、放出履歴に加えて、建屋構造の違いによる水蒸気凝縮過程とその結果としての水素分布の違いも影響した可能性がある。

また、大型のPWR格納容器で水蒸気凝縮の関与する事象として、IAEA報告書⁷⁾は次のような例を示している。

PWRのコールド・レグの低位置での小口径LOCA(冷却材喪失事故)の場合、格納容器内に初期はほとんど水蒸気だけが放出され、後期に水素濃度の極めて高いガスが放出される。このように大きく濃度の異なるガスが放出されると、すでに格納容器に充滿している水蒸気とすぐに均質化することは難しい。そこに急に水蒸気が凝縮するようなことがあると、高濃度の水素含有箇所での爆発が発生する可能性がある。このような水素成層化現象とその燃焼挙動については、欧州が域内の共同研究として近年、精力的に研究を進めている。その最近の成果についてもハンドブックの中で触れる予定である。

5. PAR, イグナイタ, 格納容器スプレー

空気-水蒸気-水素系の特異な挙動は、PAR(静的触媒式再結合装置)、イグナイタ、格納容器スプレーの設置や運用も頭に入れておかなければならない。

現在用いられているPARは水素-酸素再結合触媒を塗布した金属板などを、チムニー効果を有する容器の中に縦に複数枚配置して、動力や運転員の操作なしに空間中の水素の蓄積を防止しようというものである。すなわち、触媒板上での水素-酸素の再結合の反応熱によって温められた空気が上部に排出され、下部から新たな水素含有ガスが引き込まれる。ただし、格納容器等に設置されるPARは、事故時に予想される水素発生量に比べて1基あたりの水素処理量は決して大きなものではない。

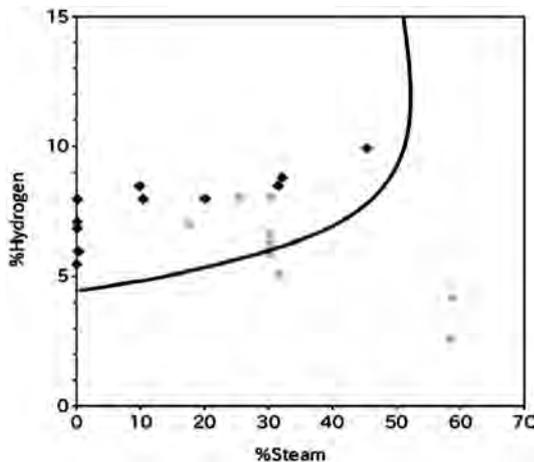
PARに期待する役割は国によって違っている。日米ではともに大型の格納容器を持つPWRでは、PAR等を使わなくても水素濃度が重大な火災加速を起こす10vol%に達することはないとして、従来は特別な水素

対策は要求してこなかった。ただし、わが国では福島第一事故後に、各発電所で、深層防護の手段として、PARやイグナイタを設置して水素濃度管理に用いることを計画し、一部では既に設置されている。

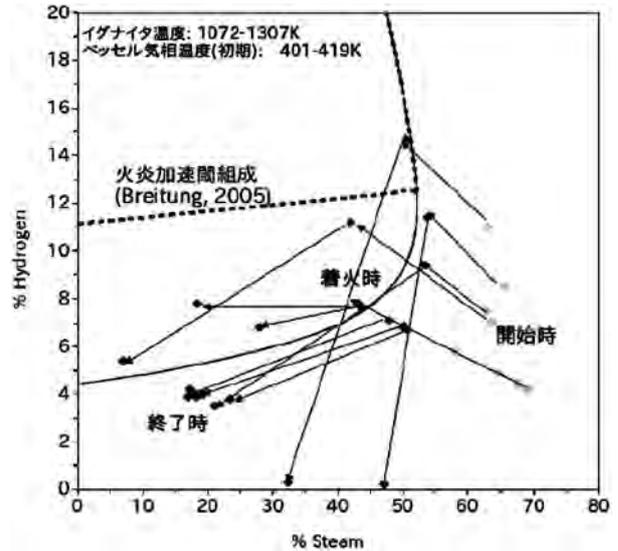
米国内ではPARは着火源となるので、危険であり、外すべきだという請願も出されたほどで、PAR利用は定着していない⁸⁾。一方、日米と対照的に、欧州ではスウェーデンのRinghals-2~4号機(Westinghouse製3ループ型PWR)のように、最も保守的な解析をするとシビアアクシデント時の水素燃焼ピーク圧力が格納容器設計圧をわずかに上回る可能性があるとして、従来からPARを備えている例が少なくない。また、その場合、PARによって水素濃度が十分低下するまでは、格納容器スプレーによって水蒸気を凝縮させないことがSAMガイドライン(SAMG)で定められている。PARと格納容器スプレーの位置づけについては、フランスも同様の立場をとっている。

フランスの放射線防護原子力安全研究所(IRSN)は、PARによる着火事象を調べる試験を行っている。PARは水素の蓄積を防ぐことがその設置の目的だが、特定の雰囲気組成下においては、イグナイタとして機能することが示された(第3図)⁹⁾。すなわち、PAR周囲の水素濃度が上昇するような条件においては、過剰な燃焼圧力波が発生しない段階で着火を発生させる効果があるとされている。

上記のIRSNの試験結果を、過去に米国で行われた格納容器スプレー作動下でのイグナイタによる着火試験結果と比べると興味深い。第4図は米国サンディア国立研究所における試験結果である。同試験では、格納容器スプレーにより水蒸気が凝縮し可燃組成に到達するような条件で、水素濃度が過大とならないうちにイグナイタによる適時な着火が可能かどうかを、縮尺容器内で調べた。試験では、水蒸気-空気-水素混合気を容器に満たしたところで、イグナイタをオン状態にしてスプレーを作



第3図 PARによる空気-水蒸気-水素系の着火⁹⁾
菱形点が着火の起きた条件、四角点は着火が起きなかった条件、実線は可燃組成限界線。



第4図 格納容器スプレー作動下でのイグナイタによる着火試験結果(米国サンディア国立研究所)¹⁰⁾
空気-水蒸気-水素混合気を容器に満たしたところで、イグナイタをオン状態にしてスプレーを噴射。実線は可燃組成限界線、破線は火炎加速閾組成。

動させている。この場合は、混合気組成の層化の有無に関わらず、可燃限界線近傍で着火が起きて、数度の火炎発生の後、水素濃度が下がり、やがて火炎が消えることが示された¹⁰⁾。

ハンドブックでは、これら相互に関連する事例を示すことで、今後の対策立案の参考として用いられるようなものとする。

6. 含水廃棄物管理

水に浸された履歴を有する大量の放射性廃棄物の管理は、まだわが国では経験の乏しい分野である。米国では核開発で出た大量のTRU廃棄物(プルトニウム等のアクチノイドを含む廃棄物)の保管、輸送、長期貯蔵で、水分やプラスチック等の放射線分解により発生する水素への対策が重要な課題となり、技術開発が進められてきた。例えば、サイト保管や輸送では最大60日以内での容器空間中水素濃度を5%以内に抑えるように規定されており¹¹⁾、そのための水素ゲッターや水素-酸素再結合触媒の利用技術が開発されてきた。古くは、TMI-2事故で汚染水の処理に用いたゼオライト吸着容器は脱水・乾燥後の長期保管のために、容器内にカナダ製の再結合触媒を装填した¹²⁾。

放射性廃棄物における水の放射線分解の基礎とともに、この分野における諸外国の経験もこのハンドブックの中で紹介したい。

IV. おわりに

福島第一原子力発電所事故を経て、学び直さなければならぬことは少なくない。過酷事故時のみならず、廃止措置、廃棄物管理を通して水素の管理は今後長く難し

い課題となる可能性がある。失敗を繰り返さないために、コミュニティとして知識管理をたゆまず続けていかなければならない。このハンドブックもその知識管理の中に適切に組み込まれていかれるようなものとしたい。

－ 参考資料 －

- 1) NRC GENERIC LETTER 89-16, "Installation of a Hardened Wetwell Vent", Sept. 1, 1989.
- 2) Institute of Nuclear Power Operations, "Lessons Learned from the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station", Aug. 2012.
- 3) H. Terada, G. Katata, M. Chino, H. Nagai, Journal of Environmental Radioactivity, 112, p.141-154. (2012).
- 4) A.L. Camp, et al., "Light Water Reactor Hydrogen Manual", NUREG/CR-2726, Aug. 1983.
- 5) BWR 配管における混合ガス(水素・酸素)蓄積防止に関するガイドライン, 火力原子力発電技術協会, 2015年12月.
- 6) 水素利用技術集成 Vol.2-効率的な大量生産, CO2フリー, 安全管理, エス・ティー・エス, 2005年5月, ISBN4-86043-072-7.
- 7) IAEA-TECDOC-1661, "Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants", International Atomic Energy Agency, Vienna, 2011.
- 8) NRC Director's Decision Under 10 CFR 2.206, US-NRC ML13050A610.
- 9) A. Bentaib, et al., "Evaluation of the Impact that PARs Have on the Hydrogen Risk in the Reactor Containment: Methodology and Application to PSA Level 2", Science and Technology of Nuclear Installations Vol. 2010, Article ID 320396.
- 10) T. K. Blanchat, D. W. Stamps, "Deliberate Ignition of Hydrogen-Air-Steam Mixtures in Condensing Steam

Environments", NUREG/CR-6530, May 1997.

- 11) M. J. Connolly, et al., "Mixed Waste Focus Area TRU Transportation Development Activities", WM'98 Conference, paper 26-02.
- 12) T. W. McIntosh, et al., Handling, "Shipping and R&D Disposition of Special TMI-2 Wastes", Proc. Waste Management Conference, Tucson, AZ (USA), 27 Feb - 3 Mar 1983, pp. 491-494, American Nuclear Society, La Grange Park, IL (USA).

著者紹介



小川 徹 (おがわ・とおる)
長岡技術科学大学
(専門分野/関心分野) 核燃料工学, 高温化学



中島 清 (なかじま・きよし)
(株)三菱総合研究所
(専門分野/関心分野) システム工学, 原子力安全工学, 確率論的リスク評価, シビアアクシデント解析



日野竜太郎 (ひの・りゅうたろう)
日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 原子力水素システム, 水素安全技術

川内村における放射線健康リスクコミュニケーション 長崎大学・川内村復興推進拠点における活動を通して

長崎大学 折田真紀子

2011年3月、東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故(以下、福島第一原発事故)が発生し、環境中へ放射性物質が放出された。目にも見えず、においもなく、五感で感じることができない放射線に対して人々の間で大きなパニックが起こった。これにより、放射線被ばくと健康影響に関する「放射線健康リスクコミュニケーション」が社会的にも大きな関心を集めることになった。放射線健康リスクコミュニケーションとは、放射線の健康リスクに関する情報を専門家、行政、住民間で共有し、相互の意思疎通を図ることであると捉えられているが、現在では、空間線量や被ばく線量、個々の生活実態それに個々人の考え方に沿った放射線健康リスクコミュニケーションが重要となってきたと考えられる。

2013年4月20日、福島県双葉郡川内村と国立大学法人長崎大学は包括的連携協定を締結し、村内に長崎大学・川内村復興推進拠点を開設した。筆者は、2013年4月から現在に至るまで同拠点で放射線と健康に関する保健活動を担当してきている。今回はその拠点での活動について報告する。

I. 福島県双葉郡川内村

福島県双葉郡川内村は、震災当時の総人口約3,000人、福島県浜通り地方、阿武隈高原中腹に位置し、田園風景広がる風光明媚な村である。村は福島第一原子力発電所から20~30km圏内に位置し、2011年3月の福島第一原発事故の影響を受け、事故初期において川内村役場ごと福島県郡山市へ全村避難した。その後、村内の空間線量が比較的に低かったこともあり、2012年1月には避難している他の市町村にさきがけ「帰村宣言」を行った。村役場は「戻れる人から戻ろう」と住民に呼びかけ、2012年3月末に役場機能を避難先の郡山市から村内に戻し、除染計画、農林業の再興、商業の振興など復興を果たすための取り組みを着実に進めてきた。

2015年1月現在、川内村へ帰村した住民は総人口約2,700人中、約1,600人程度であり、帰村宣言からこれまで徐々に帰村者は増えてきたが、その一方で約4割の住民は他の市町村で避難生活を続けている。住民が帰村

しない原因として教育インフラ、医療インフラ、日常生活の利便性などが考えられるが、福島第一原発における廃炉作業への懸念、放射線被ばくによる健康影響への懸念が残るためだとも考えられている。

II. 長崎大学・川内村復興推進拠点

長崎大学は、2011年12月から川内村の復興を支援する取り組みを続けてきた。具体的には、2011年12月に帰村に先立って土壤中の放射性物質の測定を通じた住民の被ばく線量推定を行い、帰村が科学的に見て妥当であることを示したほか、それらの結果について、講演会等にて川内村の住民へ伝えるなど、帰村、復興に向けた村の取り組みを科学的な立場から支援してきた。

そして、長崎大学と福島県川内村は2013年4月20日、川内村の復興と活性化に向けた包括連携に関する協定を締結し、村内に長崎大学のサテライト施設である「長崎大学・川内村復興推進拠点」を開設した。村役場と密接に連携しながら、土壌や食品などの放射性物質測定を通じた住民の安全・安心の担保、測定したデータを基にした放射線に関する健康相談の実施を行っている。そのほか、拠点では、地元の保健師と長崎大学医学部の地域リハビリテーションおよび地域保健の専門家(保健師、理学療法士、作業療法士)とが一緒に、村内で行われる地

Radiation Health Risk Communication in Nagasaki University/Kawauchi Village Reconstruction Promotion Base ; Department of nursing, graduate school of biomedical sciences ; Makiko ORITA.

(2015年2月19日 受理)

域サロン等の場を活用して種々の健康相談を行ったり、運動療法等の健康増進活動を行ったりしている。本拠点の大きな特徴は、専門家(長崎大学)と行政(川内村)が緊密な連携をとって「復興」のための活動を行っていることである。専門家が行政と一体となって取り組むことで、より効率的に放射線健康リスクコミュニケーションを推進することができると考えている。

Ⅲ. 放射線健康リスクコミュニケーションに関する活動

筆者は同拠点で、放射線と健康に関する保健活動を担当している。筆者が川内村と関わるきっかけとなったのは、川内村が避難先から帰村して間もない2012年5月からの1か月間、大学院修士課程の現地実習として村に滞在し、地元の保健師とともに放射線に関する健康相談や戸別訪問を実施してきたことにある。そして、2013年4月に川内村と長崎大学が連携協定を締結したことを受け、2013年4月から村に常駐し、同大拠点にて活動を続けてきた。地元の保健師が行う保健活動は、母子保健、老年・精神保健、地域の健康増進、感染症対策などさまざまな活動があるが、それらの中で、拠点では放射線に関する保健活動の分野を主に担当してきた。広島と同じく世界で唯一の被爆地である長崎大学は、これまで放射線被ばくによる健康影響や放射線発がん機構の解明と同時に、原爆被爆者の健康を管理する役割を担ってきた歴史があり、福島第一原子力発電所事故以降は、その知見を活用し活動を行っていくことが求められている。拠点は川内村役場近くのコミュニティーセンター「なかよし館」(第1図)内に設置されているが、役場を通じての広報活動や村内、あるいは避難先において頻繁に行われている住民懇談会の場で周知することによって、その存在について住民の方に少しずつ認知されつつある。

基本的には、拠点から直接自宅を訪問して相談に応じる場合が多く、住民からの質問内容として、水・米は食べても大丈夫か、子どもが虫を触っても大丈夫か、長崎原子爆弾投下後は除染したのか等が聞かれる。また、「避難者のための懇談会」や「これからの土地利用を考

る懇談会」など村が主催する様々なテーマの住民懇談会に参加して(第2図)、放射線と健康に関する質問が住民からあれば回答したり、線量計が住民に寄贈されたのを機に村内の各公民館において住民に線量計を配布し(第3図)、あわせて線量計の正しい使用法についての説明を行ったりしてきた。

また、放射線と健康に関わる相談内容として、「数値の意味」に関することが多い。事故以来、これまで一般の住民には全くなじみのなかった「マイクロシーベルト」、「ベクレル」、「内部被ばく」といった言葉が飛び交い、まさに情報の洪水とパニックが起こったが、その後の時間の経過に伴って、福島県下のいたるところに空間線量計が設置され、毎日各地の線量率が新聞紙上で事細かに紹介され、さらに最近では線量計の普及が進み、川内村ではほぼ全員が1台以上の線量計を持っているという状態になっている。これによって住民は一人一人がそれぞれの「線量」という情報を持っている。その一方で、その線量をどのように解釈すればよいか、という点については、対策が後手に回っている状況にある。そこで長崎大学では、「数値の解釈」という点について特に重要視し、保健活動を展開している。

放射線健康リスクコミュニケーションを行う場合、線



第2図 地区集会所での住民説明会の様子(川内村, 2014年6月)



第1図 長崎大学の拠点があるなかよし館(川内村, 2013年10月)



第3図 地区集会所での線量計を配布する様子(川内村, 2013年6月)

量の評価が重要である。拠点では、住民の自宅やその周辺の空間線量率を測定したり、土壌や野菜等を持ち帰り、放射性物質の測定を行ったりしている。そして、測定した結果を住民の方へ提示しながら、「数値の意味」について個々に説明を行っている。このようにして住民が日々の生活の中で持つ放射線に関する疑問点、不安に思う点に対応している。「実際に自分たちが住んでいる土壌や食べ物の放射性物質の数値がわかれば、安心につながる」という住民の声を聞くことも多い。

2014年5月以降、公益財団法人原子力安全研究協会の協力のもと、村内にゲルマニウム半導体検出器が1台設置され、運用が開始されている。これまで川内村では、各区集会所に簡易測定器を置き、食品の放射性物質検査を実施してきたのに加え、長崎大学でも住民から依頼され、預かった食品等を長崎に送り、学内で放射性物質の測定をしてきた。今回、この機械が導入されたことによって、現在実施されている食品検査に加え、住民からの要望が多い土壌や水などを迅速に測定できることが可能となっている。放射線に関する客観的な数値の評価を行い、それらの結果をもとにして健康相談等の放射線健康リスクコミュニケーションを行っていくことが重要なことであると考えられる。

IV.川内村避難指示区域の帰還に向けた取り組み

川内村は2011年4月以降、警戒区域と緊急時避難準備区域に区域設定されていたが、緊急時避難準備区域は2011年秋に解除され、福島第一原発から20km圏内にあたる警戒区域は2012年4月に新たに居住制限区域と避難指示解除準備区域に再編されてきた。居住制限区域と避難指示解除準備区域のいずれにしても、住民は区域内の元の自宅には自由に立ち入ることができるものの、宿泊はできない現状が続いてきた。一方で川内村ではこのような地域においても除染がほぼ完了しており、帰還に向けての取り組みが進められてきた。

事故後の種々の評価から、空間線量率から推定される被ばく線量は、住民の行動様式や家屋の遮蔽率を一律で仮定しているため、個人線量の測定結果とは必ずしも一致しないことが明らかになってきた¹⁾。これを踏まえて現在福島では、帰還の選択をする住民を支援するために、個人の被ばく線量に着目した対策を講じることが求められている。そこで長崎大学では、避難指示区域における環境放射能と個人被ばく線量の評価を行ってきた。具体的には、年末年始等の特例宿泊の際に一時帰宅をした住民に線量計を配布して、空間線量の評価や土壌中からの放射性核種分析を行うと同時に、個人の被ばく線量評価を用いて年間の被ばく線量を推定し、避難指示区域における帰還の妥当性の評価を行ってきた。

その結果、個人被ばく線量計で測定した線量は、最小値が年間0.71ミリシーベルト、最大値が2.15ミリシー

ベルト、平均値が1.25ミリシーベルト、中央値が1.21ミリシーベルトであった。平均値では国際放射線防護委員会(ICRP)が定める平常時の公衆の年間被ばく線量限度である1ミリシーベルトを若干上回るものの、その線量は極めて限られていることが示された。また、同時に特例宿泊時に一時帰宅をした住民の自宅における玄関前、家の裏、畑でそれぞれ空間線量率を測定し、年間積算線量を算出した。玄関前では年間に換算すると最小値が0.88ミリシーベルト、最大値が1.75ミリシーベルト、平均値が1.14ミリシーベルト、中央値が1.04ミリシーベルトであり、個人被ばく線量で測定した線量とほぼ同等かやや低かった。これは、避難解除準備指示区域においてもすべての住宅で除染が完了しており、線量の低減化が奏功しているためと考えられる。同様に、家の裏では年間に換算すると最小値が0.99ミリシーベルト、最大値が2.15ミリシーベルト、平均値が1.63ミリシーベルト、中央値が1.58ミリシーベルトであった。畑では年間に換算すると最小値が1.45ミリシーベルト、最大値が3.29ミリシーベルト、平均値が1.82ミリシーベルト、中央値が1.77ミリシーベルトであり、やはり家の周りに比べると畑では若干線量が高いことが示された。以上の結果から考えて、川内村の避難指示解除準備区域における外部被ばく線量は年間1から2ミリシーベルト程度と限られており、帰還は妥当であることが示された。広島や長崎の原爆被爆者を対象としたこれまでの大規模な疫学調査では、100ミリシーベルトを上回る被ばくを一度にした被爆者では、がんの発症リスクが線量に比例して増加することが知られているが、その一方で100ミリシーベルトを下回る被ばくについては、これまでの調査でがんのリスクの上昇は証明されていない。国際放射線防護委員会(ICRP)では、平時における公衆の年間被ばく線量を、なるべく追加の放射線被ばくをしないようにするという考え方から1ミリシーベルト以下と定めているが、1ミリシーベルト以上の被ばくによってがんリスクの増加がみられるということではないことには注意を要する。また、放射線災害発災時における年間被ばく線量限度について、ICRPは災害が継続している期間は年間20~100ミリシーベルトの間で達成可能な範囲でできるだけ低く設定すること、そして災害が収束したのちには年間被ばく線量を漸減させていき、最終的には年間1ミリシーベルトに戻すことを勧告している。川内村では除染活動等により被ばく線量の低減化を図ってきたが、上記の結果を受け、川内村役場は除染の効果の継続的な評価、引き続き着実なインフラ整備を行い、住民、村役場、多方面の専門家が継続して連携する形で地域の復興を進めることを前提に住民の帰還は妥当であると判断し、2014年10月1日に村内の避難指示解除準備区域は解除された。一方で解除後も、引き続き希望する住民を対象とした外部被ばく線量のモニタリングと同時に、被ばく線量をも

とにしたきめの細かい相談事業の充実が必要であると考えられる。

放射線健康リスクコミュニケーションを行うにあたり、長崎大学の拠点が川内村という復興の最前線に設置されたことによって、常に住民のニーズ、疑問点を把握できる体制をとることができたと考える。また現地に滞在し、住民のニーズを捉えながら日常の活動を行っていく中で、問題点疑問点が生じた時は適宜、長崎大学にいる専門家に相談をして問題を解決するという、常駐している人に対するバックアップシステムが機能してきた。震災から5年目を迎えるなかで、川内村よりも人口規模が大きい福島第一原発周辺自治体の帰還が想定される中、きめ細かい支援のあり方を考えていく必要がある。国においては「相談員制度」によって地域の中に放射線被ばくと健康に関する相談員を配置する計画がなされているが、相談員に求められている課題の明確化及び相談員へのバックアップ体制を構築していくことが必要であると考えられる。長期継続的な視点で考えると、「被ばく医療」に精通した医療人の人材育成が急務であると考えられる。福島県下の医療体制を一義的に支える責務を負っているのは福島市に位置する福島県立医科大学であり、このようなシステム構築の中心となっていくと考えられる。また同時に福島県立医科大学を支える全体的な支援体制の中で、相談員と専門家が連携できるシステムの構築を行っていく必要があると考えられる。

V. 今後の課題

放射線リスクコミュニケーションを行うにあたり、放射線被ばくに対する考え、帰還するもしくは帰還しない等の意思決定は、最終的には住民一人ひとりに委ねられており、医療従事者や専門家には、それらの住民の意思決定を支える活動が求められていると考える。

その一方で、放射線健康リスクコミュニケーションを行う専門家の不足が大きな問題としてクローズアップされている。今後の課題は、まさに専門家をどのように育成すべきかである。看護師保健師はその地域の生活実態をよく理解しており、原子力災害の発生、復興期のすべての過程において、極めて重要な役割を担うと知られている。しかし、看護師保健師教育における放射線、特に被ばく医療の分野の教育はこれまでほとんど行われてこなかった。長崎大学は、被爆地の教育機関として、10年ほど前から看護師保健師になる保健学科の学部教育の中で、「被ばくと看護」という講義を行い、被ばく医療において看護師、保健師が果たすべき役割についての知識の普及を図ってきたが、このような学部レベルでの取り

組みはいまだごく限られた大学でしか行われていない。長崎大学大学院の修士課程には、放射線被ばく医療学に関する専門的知識を持つ看護師、保健師を育成するための養成コースである「放射線看護専門看護師養成コース」が平成22年度に開設された。筆者も同養成コースに進学し、放射線防護学、放射線影響学に関する基礎知識、被ばく医療における看護師保健師が果たすべき役割について学び、同修士課程卒業後、同大学原爆後障害医療研究所の博士課程に現在在籍している。しかしながら、現在日本において、大学院(修士課程)において放射線看護の人材育成をしているのは弘前大学、長崎大学、鹿児島大学の3大学のみであり、それらの大学院でも年間の入学者数は数名と限られている。原子力災害からの復興を長期継続的な視点で考えた場合、「被ばく医療」に精通した看護師保健師等の医療者の存在が重要となってくる。今後、福島でも20km圏内の地方自治体が帰還する中で、「被ばく医療」に精通する看護師保健師の存在は欠かせないものがある。さらには、看護師や保健師が放射線防護、被ばく医療についての最低限の知識を有することは、単に日常診療の充実という点にとどまらず、原子力災害対策における専門家の在り方を考えた場合にも極めて重要であると考えられる。

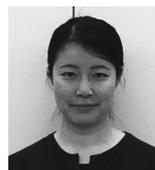
VI. 終わりに

放射線健康リスクコミュニケーションを行うにあたり、地元の行政機関と専門家とが連携を取り、住民に対してきめ細かい対応をとっていくことが重要であると考えられる。復興期における放射線健康リスクコミュニケーションにその関心が高まる中で、川内村における放射線健康リスクコミュニケーション活動は、今後の福島県の復興における一つのモデルケースになり得ると考えられる。

— 参考文献 —

- 1) Nuclear Regulation Authority. Practical Measurements for evacuees to return their homes. Available: http://www.nsr.go.jp/english/Library/data/special-report_20140204.pdf

著者紹介



折田真紀子 (おりた・まきこ)

長崎大学

(専門分野/関心分野) 社会医学、保健看護学/特に放射線に関する社会医学

一 研究者の回想録

匠たちの

足跡

内部被ばく実験棟とプルトニウム内部被ばく研究

元 放射線医学総合研究所 小木曾 洋一

福島第一原発の事故以降、全国の前発は全て停止し、再稼働に向けた動きも始まっているが、容易ではない状況にある。また、我が国の原子エネルギー政策の基幹である核燃料サイクルは稼働できない状態が長きにわたって続いている。原子力産業が右肩上がりであった1980年代から90年代にかけて、核燃料サイクルの中心に位置づけられるプルトニウムの生物影響リスクを評価するために、我が国で初めての動物実験施設「内部被ばく実験棟」が放射線医学総合研究所に建設され、実験研究が行われた時期があった。その一翼を担った研究者の立場から、実験棟の設計、建設、運用に携わった経緯を織り交ぜながら、プルトニウムを実験動物に吸入曝露あるいは注射投与して発がんのリスクを評価する研究を進めていった体験を概説する。

I. はじめに

2011年3月に起きた福島第一原発の事故が核燃料サイクルを基幹とする我が国の原子力エネルギー政策に及ぼした影響には、はかりしれないものがある。1979年のスリーマイル島原発事故、1986年のチェルノブイリ原発事故、1995年の高速増殖炉(原型炉)「もんじゅ」のナトリウム漏洩火災事故、1999年の東海村JCO臨界事故等、国内外で起きた幾多の重大事故を経験しても停まることのなかった我が国の前発が全て稼働停止し、活断層の有無、耐震性、対津波対策、非常用電源確保、緊急時の住民避難計画等々、再稼働に向けて課せられるハードルは一層厳しくなっている。また、青森県六ヶ所村にある核燃料再処理施設はトラブル続きで、いまだに本格稼働ができない状態が続いており、使用済み核燃料は各原発で貯まり続け、高レベル廃棄物の最終処分の方法と場所は全く決まっていない。このように、核燃料(高速増殖プルトニウム・MOX燃料)の製造・供給—各原発での使用—使用済み核燃料の再処理・加工といった核燃料サイクルの各プロセスが機能せず、核燃料サイクル全体が稼働できない状態が続いている。

筆者は、この核燃料サイクルの中心をなすプルトニウム(Pu)の生物影響リスクを評価するために、我が国で初めての動物実験施設「内部被ばく実験棟」(内ばく棟)を放射線医学総合研究所(放医研)に建設し、実験研究を担っ

た一員である。内ばく棟は現在、本来の使命を終えているが、ここでの経験と教訓は、その目的と中身が何であれ、将来国家的プロジェクト研究を進める上でも参考になるかと思う。やや懐古調になるかもしれないが、一研究者の立場から、それらの一端を披露させていただくことにする。

II. 内ばく棟の建設に向けて

放医研では、1960年代からマウスやラット等の小動物を用いてPuの体内分布、代謝経路、線量評価等の研究(Pu特別研究)が障害基礎研究部第三研究室(当時)を中心として行われていた。これらの研究を先導し、さらに大型のプロジェクト研究へと展開、進展させたのが松岡理先生(故人)であった。先生は、Pu等の超ウラン元素(全てアルファ放射体)をマウスやラット等の小動物からイヌあるいはサルのような中型動物に、安全かつ確実に注射投与あるいは吸入曝露できる実験研究施設が必要不可欠であると考えられ、建家の設計・建設、動物飼育・管理施設、吸入実験設備等各種の実験施設、液体・固体・気体等廃棄物処理・保管施設等の完備までの各パーツを担当し、将来それらを運用して行くことができる若手の研究者、技術者を全国の大学、研究機関等から募集、選抜した。大学院を修了したばかりの筆者は1977年に採用され、将来行うPuの生物影響研究のうち、発がん等生物効果を担当する役割を求められた。このようにして、動物飼育・管理、吸入曝露実験、代謝・挙動、線量評価、生物効果、体内除染、廃棄物処理等専門の異なる研究者、技術者及びテクニシャンを併せてわずか8名の組織が「内部被ばく実験準備室」(準備室)として発足した

Experimental Research Facility for Biological Effects of Internal Exposures to Plutonium Compounds : Yoichi OGHISO.

(2015年1月23日受理)

のが1978年であり、以後これを母体として1982年には総勢10数名の「内部被ばく研究部」が発足する。分野の異なる専門家からなる組織体制を確立したことが内部被ばく研究プロジェクトの成功の鍵となったことは明白であり、後の重粒子線がん治療研究プロジェクトを立ち上げる上でも参考になったことは間違いないが、「準備室」発足当初、新規の人員要求が実質的にできない既存の研究組織からは、あたかもがん細胞が発生、増殖を始めて周囲の組織を侵して行くかのように揶揄されたものである。

これと並行して原子力委員会(当時)の加工部会で、内ばく棟の建設とPuの生物影響に関する実験研究の重要性と予算的措置を講じる必要性が議論され、国会と行政(総理府・科学技術庁；当時)に答申がなされたのが1977年から1978年にかけてであったと記憶する。大型プロジェクトの正当性が公に認知され、予算獲得のためのお墨付きが得られたことにより、発足したばかりの準備室の少数メンバーは、管理部企画課や技術部技術課・放射線安全課(当時)等の協力を得て、内ばく棟建設のための建家・設備の概念設計、基本設計、詳細設計及び実施設計、予算案の作成と科学技術庁技術振興課(当時)を窓口とした概算要求、建設場所の選定と、核燃料規制法や放射線障害防止法(障防法)等に係る法的整備等々、ほとんど未経験の領域に全員が24時間のめり込むことになった。早朝から夜間まで設計担当の業者を交えた各レベルでの検討と打ち合わせ、全体会議、予算要求等書類作りとコピー作成等の事務的作業が毎日続く。動物実験と病理組織標本の顕微鏡観察しか知らない筆者にとってこれは相当にきつく、研究者として最も必要な実験、データ収集と整理、論文作成という作業はほとんど不可能と諦めかけたが、松岡先生からは、次々と新しいテーマを投げかけられ、上記の「事務的」作業が続く5年間、学会発表、原著論文公表を途切れることなく全うすることができた。これはひとえに松岡先生の指導方針のおかげであるが、準備室員全員がそれぞれ全く異なるテーマをもって日々の研究や技術開発等に取り組んでおり、自分しかできないという自負と責任感を各自が自覚していたことが大きいと思う。また、毎週1回、輪番制でそれぞれの研究や技術開発の成果を簡潔にまとめて話す「15分レクチャー」というセミナーを行った。これは全員に数枚の要約文(レジュメ)の写しを配り、15分以内で説明した後、専門外の仲間からの遠慮のない、ときに無知な(と感じる)質問に対してもわかってくれるまできちんと答えるが、答えられない場合は次回までの宿題にするというものであり、内向きには刺激的かつ切磋琢磨の機会が提供された。外向けには、例えば予算案や研究内容等を、行政職の職員や本省庁の行政官、あるいは一般の人々にも如何にわかりやすく説明し、理解してもらうかという絶好の訓練の場となったと思う。

内ばく棟の建家・設備の設計は、どのような性格と規

模をもたせるかを検討し、デザインする概念設計から始まり、空調・機械設備、動物飼育・管理設備、吸入実験装置等実験研究設備、放射性廃棄物処理設備、放射線管理設備等多岐にわたる各設備の中身を具体化する基本設計及び詳細設計、さらには予算規模に併せて建設工程に直結させる実施設計までを、1978年から1980年までの3年をかけて実施した。それぞれ異なる設計業者と契約し、最低でも毎週1~2回、多いときには毎日の打ち合わせで何時間もかけて議論し、得られた結論を図面にまとめる作業を積み上げていったのであるが、こちら(研究者)もあちら(設計・建築家)もお互いに未知の領域であるから、まずはそれぞれの専門用語の解説と使い方を相互に理解する必要がある。最初の概念設計、基本設計あたりまでは、まだ予算規模も、従って建家全体の規模もさほど具体化していないため、イヌ(ビーグル犬)を1,000頭、マウスやラット等の小動物を数万匹飼える施設などと途方もないような提案や、当初は千葉ではなく東海村のような遠隔の地を建設サイトの候補地としていたために、実験が夜遅くまで続く場合に備えてシャワー室とベッドのある仮眠室、食堂のある宿泊施設を備えたものにして等々、いろいろなアイデアが出た。お金のことも場所や規模との整合も考えずに、我々研究者も建築家も結構本気で取り組み、最後は同じ釜の飯を食ったような親しい関係となった。今思うと楽しく夢のような一時であった。しかし、建設サイトが千葉市の放医研敷地に決まり、詳細設計から、予算規模が決まった後の実施設計に入ると、夢は去り、現実と向き合うことを余儀なくされ、如何に決められた予算の範囲内で各施設・設備の規模を縮小、適合させるかに焦点が絞られた。具体例として、1回の吸入曝露実験で曝露できるラットの数が最大20匹と決まり、肺がんの発生率が有意に認められるような実験規模が1実験群あたり100匹とすると、最低5回の繰り返し吸入曝露を行う必要があり、吸入曝露量の異なる実験群を8群(計800匹)用意すると、これらを生涯(ラットの平均寿命は3~4年)飼育できる飼育室(グローブ・ボックスタイプの負圧管理された安全キャビネットが2基設置され、合計80匹を個別ケージに収容して飼育)は、合計10室必要といったような具合に実験規模を見積もり、それに必要な予算措置を積み上げて行く。各施設・設備ごとにこのような見積もり作業を積み重ねた設計図面と予算案とをもって、今度は建設省関東地方建設局(関東地建；当時)に説明に行き、実施設計と建設の監督をお願いした。これは放医研が所属する科学技術庁(当時)には自前の営繕部がないため、建設省に実施設計と建設を依頼せざるを得なかったからであるが、ここでも我々とは別の世界の技術者(建設技官)集団が居て、机の上に立てたイーゼルの図面と向き合って夜遅くまで仕事をしており、妙に親近感を覚えた。

詳細設計の前後から、科学技術庁原子力局が窓口と

なって原子力委員会の専門部会で、わずか数グラムのPuを使うとはいえ、核燃料使用施設である内ばく棟の安全審査が行われることになり、松岡先生以下準備室員全員と設計業者とでヒアリングに出向いた。今でこそ当たり前だが、耐震性や核ジャック対策、負圧管理、汚染防護あるいは計量管理の方策等々、原発や原子力関連施設で要求される諸基準を満たしているかが審議された。ここで原子力工学、保健物理、放射線医学等の分野で高名な先生方の顔とお名前が初めて一致し、緊張して説明と質疑応答をしたのを憶えている。また、耐震設計の審査については、茨城県つくば市の防災科学技術センター(当時)の大谷明先生の研究室をお尋ねし、丹念に検討していただいた上で特段の問題なしと保証していただいた。その折、私事で恐縮だが、当時先生の研究室に所属する主任研究官であった石田瑞穂さん(後の科学研究官)にお会いした。石田さんは多分憶えておられないと思うが、私の母校、飯田高校(長野県)の大先輩であるのに、ろくな挨拶もせずに戻ってきてしまったのがとても残念である。

Ⅲ. 内ばく棟の建設から竣工まで

このようにして、建設に向けての準備が整えられる中、立地サイトの決定、自治体や周辺住民への説明等が並行して行われた。内ばく棟は当初、茨城県東海村の原子力研究所(原研)に隣接する敷地を候補として、松岡先生以下準備室員全員で現地調査を行ったこともあったが、最終的には放医研本所(千葉市)の敷地内に建設することが決まった。具体的には、地下に配管等の埋設物がどれだけあり、遺跡・史跡などが埋まっていないかどうか、また周囲にある既存建家との距離・動線や近隣の住宅などへの日照権、テレビ等電波妨害等の問題がないかどうかを逐一検討した結果、グラウンドに面し、既に竣工済みの「晩発障害実験棟」(晩発棟)の隣に建てることになった。松岡先生が先頭に立ち、所内及び周辺住民への説明会を何度か行ったが、Pu使用施設ということで、不安を隠さない人々が多かった。わかりやすい資料を作り、丁寧に説明を重ねることで、どこにでもいる一握りの煽動的な反対論者を除いて、最終的には理解していただけだと思っているが、原子力、放射線、環境影響、人体影響等々について正しい知識の普及と理解に向けた広報活動の重要性をあらためて認識した。

1980~1981年には、建家の建設が始まった。まずは「杭打ち」という作業に始まり、土台を造り、鉄骨・鉄筋の柱を組み立てていくのであるが、全ての作業工程に、準備室員が交代で立ち会った。そして建設担当業者、実施設計担当業者及び放医研の3者による進捗状況の把握、確認、問題点等に関する打ち合わせが頻繁に行われた。自分たちの新しい居場所、研究活動の場を造るのであるからやむを得ないこととはいえ、昼間はほとんどこ

れらの作業に時間を取られ、夜か休日に実験研究をこなすという日々であったが、後で考えると、手抜き工事を防止し、設計図面と施工結果との食い違いを逐一検出する上で非常に大切な作業であったと思う。当時の国の予算要求・実行予算の実施は単年度が原則であり、効率が悪い上に、一律何%などと減額させられることもしばしばであったが、管理部企画課を中心とした事務方のご尽力で曲がりなりにも何とか予算執行が継続でき、建家の建設事業は、延々1985年まで続くことになった。

ちょうどこれと前後して筆者に留学(ポストドク研究員)の話が舞い込み、唯でさえ人手不足で、建設現場での立ち会いや打ち合わせで連日大わらわの仲間には申し訳ないと思ったが、以前から海外留学の必要性を我々に説いておられた松岡先生は、快く送り出して下さった。こうして1981年6月に、準備室の仲間全員の暖かい見送りを受け、成田空港から留学先のワシントン、D.C.に向けて出発した。最初は1年の予定であったが、向こうで従事した研究テーマが長期の動物実験であったため、もう1年延長して1983年6月までとなった。この留学期間中、松岡先生と仲間達とは頻繁に手紙(エアメール)を交換して、内ばく棟建設の進捗状況や周辺の関連情報などを報せてもらい、ときには自分の担当する実験室等の仕様の変更等について意見を求められることもしばしばであった。PCやE-mailなどまだなく、英文タイプライターのみがあるだけの時代である。当然、長文の手書きの便箋を送るので分厚いエアメールとなった。また、留学中、準備室の仲間を始め、放医研その他大学、研究機関の皆様が訪米された折には、我が家にもお招きして、時差ぼけ解消になるからと、夜遅くまで語り明かしたことが楽しい思い出である。

1983年6月に帰国すると、内ばく棟の建家はほとんど出来上がっていたが、内装設備とくに動物飼育関係、吸入実験関係、廃棄物処理関係等内ばく棟の機能の根幹をなす諸設備は、まだほとんど手がつけられていない状態であった。筆者は生物効果が担当なので、専門の実験病理関係の諸設備だけを見ていればよいというわけではなく、動物実験とその後始末全てに関わることが求められたため、これらの全ての諸設備の仕様等を決め、発注、入札、契約、納入などの業務に携わり、個別打ち合わせ及び全体会議等をほぼ連日繰り返した。また、前年(1982年)に内部被ばく研究部(以下研究部)が発足し、準備室の狭い部屋から内ばく棟1階の居室等への引っ越しの準備が進められた。

次第に設備の仕様や使い勝手が明らかになってくると、実際にPuを安全かつ確実に動物に投与し、長期間の安全な飼育、実験室での汚染動物や試料の安全取扱等、核燃料物質への内部被ばく防護・管理上のハード・ソフト両面の整備が求められるようになった。例えば動物への吸入曝露については、イヌなら事前に麻酔してグ

ローブボックス (GB) 内の吸入実験装置に搬入して暴れないように保定具で体躯をつり下げ、専用のマスクを通して吸入曝露を行う方法がとられた。一方、ラットのような小動物では、鼻先だけを露出させた専用の筒容器に収容するのであるが、麻酔して収容すると苦しんで容器の中で暴れて軀を折り曲げた状態のまま窒息死してしまう。そこで無麻酔でも確実に吸入曝露を行えるように、筒容器に無麻酔で収容し、1時間だけ自発呼吸させる訓練を毎日繰り返す馴致を事前に行った。馴致1週間後には、全てのラットがおとなしく筒容器で鼻先を出して自発呼吸ができ、吸入実験装置に装着しても安全に吸入曝露することができるようになった。このような作業は「虐待」ではないかと毎年抗議に来る動物愛護団体に対しては、決してそうではなく、動物は全て安全かつ適切な処置を受け、病原体のいない清潔な環境で寿命を全うするまで飼育されていると答えることにした。

また、吸入実験装置を始め、Pu 溶液の調整と小分け等を行うためのチェンバー、Pu 注射投与のためのチェンバー等は全て密閉・負圧管理されたグローブボックス (GB) であり、この中で行う作業は核燃料使用施設での作業と同様に、全て密閉された状態で行うこととされた。従って、全ての汚染 (Pu 吸入曝露及び Pu 注射投与) 動物の各装置内への搬出入及び実験処置後の GB の付いた (GB 型) 動物飼育用チェンバーへの搬入等は、密閉度が保たれた二重蓋付きの桶状容器を用いて GB や GB 型チェンバーへの脱着作業により行った。このような作業には複数の作業者があたり、各作業工程ごとのスミア濾紙による拭き取りと汚染検査、グローブのピンホール検査、サーベイメータによる表面汚染検査等が義務づけられた。そのため、通常非汚染あるいは一般のラジオ・アイソトープ (RI) を投与するような動物実験に比べて、おそろしく時間と労力のかかるものとなった。

さらに、廃棄物処理施設では、毎日大量に発生するイヌの尿 (し) 尿の処理のため、大型の回転円盤上に繁殖した微生物による有機物分解処理の方式が採られ、この排水処理タンクが3基並ぶ巨大な排水処理設備が内ばく棟地下に完成した。処理後の排水はイオン交換カラムや活性炭等で除染、6トン容量の貯蔵タンクに一時貯蔵され、汚染検査後に法令の定める基準値の1/10以下で放流される。発生する放射性汚泥 (放射性物質を含む微生物の死骸と有機物分解産物) は回収され、凍結乾燥後に、専用の焼却炉で燃やし、灰化してドラム缶に保管される。イヌを含む汚染動物の死体も全てこの焼却炉で燃やして灰化処理した後ドラム缶に保管される。液体シンチレーターやアルコール等有機液体も全て可燃性廃棄物と混合して燃やされる。ガラスや難燃性プラスチック等不燃性廃棄物は、出来る限りの減容後にドラム缶に詰めて保存する。このようにして気体廃棄物 (高性能 HEPA フィルター3連で濾過、放出) を除く全ての放射性廃棄物は、



内ばく棟 (現被ばく医療共同研究施設) の概観写真
(2015年2月現在、放医研ホームページより引用)

処理され、灰化・減容して貯蔵庫に保管されることとなった。当時はここまで考案し、ゼロ・リリース (一切の Pu 等放射性物質は漏洩しない) を担保する廃棄物処理施設が全て完成したのは、1985年の建家竣工から約3年後の1988年であった。建家の延べ床面積は約13,000 m²、空調設備、給排気・給排水の配管、HEPA フィルターとポンプ類が並ぶ機械室等を含むメカニカルフロアを実験室フロアの間にサンドイッチ状に挟んだ地上7階と、廃水処理施設、焼却炉及び廃棄物貯蔵庫を含む地下2階からなる直方体構造の大きな建家で、JR 稲毛駅付近を通過する総武線の車窓から山のようにそびえ立っているのが見えた。このような大規模な実験研究施設はおそらく世界的にも稀であり、国内外から多くの見学が相次いだ。国内のVIPでは、その時々科学技術庁長官の視察・見学が行われたが、印象的であったのは、江田五月元参議院議長で、上述した吸入実験装置へのラットの装着の苦勞話をすると、「おお、それは可哀想に」と揶揄され、二人とも思わず笑ってしまったが、これで緊張がほぐれ、本音の説明ができ、実験の本質を理解してもらえたことであった。江田さんは今般の原子力、核燃料サイクルについてどうお考えだろうか聞いてみたい気がする。

IV. Pu 線源の入手と研究体制の構築

動物飼育、実験研究、廃棄物処理及び放射線管理等に関係した諸設備が整えられる中、Pu の線源 (²³⁹Pu 酸化物粉末) が、旧原研東海支所から譲渡されることになり、その搬入のための準備が行われた。わずか5グラムのPu線源とはいえ、核燃料物質であることから、密封容器を耐圧性、耐衝撃性、耐熱性のコンテナに収容し、大型のクレーン車付きトラックに搭載して、正確な日時は憶えていないが、1988年夏の某日、夜間に茨城県東海村から、茨城及び千葉の両県警の厳重な監視のもと、予め設定された極秘ルートに沿って放医研に向けて出発した。迎える放医研では、所長以下、線源受け入れチームが泊まり込みでこれに備えた。筆者も内ばく棟1階の居室で

寝袋にくるまってまんじりともせず、夜明けを迎えたことを憶えている。翌日早朝にトラックが到着すると、早速コンテナが降ろされ、厳重な監視下で放射線モニタリングを行った後、4階にあるPu溶液調整室の貯蔵庫に収納された。およそ1昼夜にわたるPu線源の運搬・収納作業が終わったときはさすがにどっと疲れが出た。原研側、県警、自治体等との事前の調整を担った放射線安全課と内ばく棟管理室(当時)の尽力がなければ、なしえなかった一大事業であり、Puを用いた実験研究がいよいよ始まるというターニングポイントとなった。

搬入されたPu線源は、硝酸溶液に溶解され、試験管に小分けされて貯蔵庫内の冷蔵庫に保管された。この貯蔵庫は鉄室で、実験に使用する溶液調整用のGBとともに、Pu溶液調整室(核ジャック等保安管理のため実際には表示札はかかっていない)にあるが、出入りがVIPゲートで厳重に管理されており、実際に使用する場合には、使用申請手続きを行った上で、線源管理責任者(核燃料取扱主任者)に開錠してもらって入室する。また、定期的にIAEAからの査察が入り、厳重な計量管理が行われることになったが、そのために実験計画書を提出する際に、使用するPuの量は○ml(^{239}Pu : × gm, △ Bq)というように正確な記載が求められた。これだけでも普通のRIを用いた実験とは大いに異なっていることに最初はかなり戸惑ったものである。

こうして本格的に実験動物にPuを吸入曝露させ、生物影響等に関する実験研究が可能になったので、公衆被ばく特別研究(特研:1988~1992)及びデトリメント¹⁾特研(1993~1997)の中課題のひとつとして以下の4つの研究小課題を実施することになった。

- ・吸入Puエアロゾルの呼吸気道内挙動・代謝に関する研究(挙動・代謝研究)
- ・体外計測法による吸入Puの線量算定と評価に関する研究(線量評価研究)
- ・Puの内部被ばくによる生物効果(発がん)に関する研究(生物効果研究)
- ・Puの体内除染とリスク低減化に関する研究(体内除染研究)

これらの小課題を担当するリーダーは、準備室発足当時から内ばく棟の設計、建設に携わる傍ら、本格的なPuを使った実験研究に備えるため、基礎的な実験・技術開発研究を進めてきた研究者、技術者であり、意欲と使命感に燃えていた。しかし、実際に実験を実施してみると、予想外に人手が必要であり、核燃料物質の取扱、GB作業、半面マスクとカバー・オール式作業衣の着用、二重のゴム手袋着用、作業前後の汚染検査等に多くの時間が費やされることがわかった。例えば20匹のラットに1時間の吸入曝露を行う場合、朝8時に吸入実験室に

15~20数名が全員フル装備(カバーオール作業衣と二重手袋、半面マスク着用)で集合し、動物室から予め馴致済みのラットを1匹ずつ密閉容器に収納して吸入実験室に運搬し、フード内で吸入曝露用ホルダーに1匹ずつ装填した後、再び密閉容器に収納し、GB内に搬入して吸入曝露装置にセットする。この作業が終わるのが10時過ぎとなり、吸入曝露が始まって1時間後、今度は逆のコースで曝露済みの動物を1匹ずつ曝露用ホルダーから取り出して鼻先を濡れたガーゼで拭いて除染した後、密閉容器に入れて動物室のGB型飼育装置内に搬入するのである。全ての作業が終わるのはいつも午後2時を回っていた。このようなほとんど半日がかりの実験作業を、繰り返して何十人も的人员で安全・確実に進めるためにはそれを手当する予算が必要である。当時の放医研では、特研全体の予算枠は限られており、統計学的に意味のあるデータを得るために、実験を繰り返して一定規模の吸入曝露動物数を達成するのは容易ではなかった。しかし、運営経費から動物飼育、放射線管理・内部被ばく管理等に必要な人員と諸費用を支援していただきながら、乏しい研究費の中から動物購入費、実験器具等の消耗品をやりくりして、吸入曝露動物数を増やしていった。これはPu注射投与動物でも同様で、マウスやラットのような小動物を密閉容器に収容して注射投与室のGB内に1匹ずつ搬入し、ネオプレン製の分厚い手袋に二重のチオックス(手袋)をはめた両手を差し込んで、ほとんど無感覚に近い手触りで0.1ml宛注射するのは至難の業であったが、この実験作業には総勢8名ほどの人員が動員された。今から思うとよくやったものだと思息するが、2つの特研の行われた10年間で、筆者が担当した生物効果(発がん)に限っても、吸入曝露ラット800匹、注射投与マウス500匹という生涯実験の規模を一応達成できた。エックス線やガンマ線などを外部照射する実験に比べればはるかに小規模ではあるが、吸入曝露ラットの初期沈着量は線量評価グループと共同で体外計測により推定、最大500日までの肺への滞留率の測定も1匹ずつ行っており、発生する肺腫瘍の病理組織検索結果と併せて正確な線量効果関係のデータが得られたと確信している。このデータに対する信頼性は、その後、論文として発表された後、既にPuの動物実験を完了していたアメリカのITRI(Drs. McClellan, Boecker, Muggenburg, Brooks & Hahn), 同PNL(Drs. Sanders & Watson), イギリスのNRPB(Dr. Stather), 同AEA(Drs. Collier, Strong, Humphrey & Kellington), 同MRC(Dr. Patrick), オランダのTNO(Dr. Bartstra), フランスのCEA(Drs. Monchaux, Morlier, Fritsch & Poncy), 同IRSN(Drs. Nenot, Mechiville & Tirmarche)などから高い評価を受け、1995年以降、一部の人々とはラドンを含めたアルファ放射体の吸入毒性に関する共同研究をも発足させることができた。既に故人となられた方々も

¹⁾デトリメント:放射線被ばくによって被る損害

含めてここに深謝したい。

その後、1998年から2000年にかけては、研究部として取り組む研究テーマにラドン子孫核種が加わり、多様化した。Puの生物影響に関しては、以下の3つの研究小課題が継続的に実施された。

- ・アルファ放射体の体内線量評価法の開発とバイオドシメトリーに関する研究
- ・プルトニウム曝露動物の生涯発がんとその機構に関する研究
- ・キレート剤によるプルトニウム内部被ばくりスク低減化に関する研究

このうち、2番目の発がん機構に関する研究は、筆者と山田 裕主任研究官(現発達期被ばく影響研究グループチームリーダー)が担い、放医研が独法化して、研究部は内部被ばく影響研究グループとして2人だけの小所帯に再編されたのに伴い、2000年から2006年にかけて基盤研究「プルトニウム化合物の内部被ばく発がんに関する研究」として、以下の2つの研究小課題を実施することで研究が継続された。

- ・酸化プルトニウム吸入曝露ラットにおける肺がんの線量効果に関する研究
- ・クエン酸プルトニウム注射投与とマウスにおける発がんの特異性に関する研究

これらの研究成果は逐一、論文にまとめて公表したが、それらのデータは全てアーカイブ(Pathology Archives of Life-Span Animal Studies on Carcinogenesis Following Internal Exposures to Plutonium Compounds)として発刊し、発生した肺がんや骨肉腫等の標本(病理組織標本、抽出DNA試料等)は、全て内ばく棟内に保存・保管され、所内外の研究者が利用できるようにした。また、2006年には、Puの代謝・体内挙動及び生物影響に関する研究成果を中心に、「プルトニウム内部被ばく研究最終報告書」を発刊することができた。これら出版事業の取りまとめには、共同研究者の山田 裕博士の大いなる尽力があったことを、この場を借りて深謝したい。

V. 終わりに

我が国で初めて行われたPuの内部被ばく影響研究プロジェクトは、2006年に終了した。アメリカを始め、イギリス、ドイツ、フランス等、欧米諸国でもPuを含む超ウラン元素等アルファ放射体の内部被ばく影響に関する動物実験研究は終了している。携わった研究者のリタイア、この領域での研究予算の打ち切りなどで終結あるいは撤退を余儀なくされたためである。時代の趨勢でもあるが、多種類・多数の実験動物を使って生涯飼育する大規模実験研究は、やりにくくなっている。しかし、Puの内部被ばく影響に関しては、全てやり尽くされたわけで

はなく、標的細胞レベルでの微細線量分布とそれがどのような生物反応を引き起こして発がんに至るのか、低線量域での内部被ばく発がんの線量反応にしきい値は存在するのか、あるとすればその根拠あるいは理由は何か、内部被ばくと外部被ばくの発がんリスクは同じ実効線量レベルで考えられるのか等々、未解明の問題や疑問が多く残されている。最近、アメリカでデータの見直しと補完を行った再解析結果を掲載した論文が次々と発刊され、懐かしい著者名が散見されるのは、彼らも同じことを考えているのだろうと思う。Puだけではなく、チェルノブイリ事故や福島事故でも話題になった核分裂生成物のセシウム(^{137}Cs)、ストロンチウム(^{90}Sr)、ヨウ素(^{131}I)等 β - γ 放出核種による内部被ばくの影響(発がん)についても、それぞれに特有の取扱の困難性等もあって、動物実験によるデータは希少であり、どのような発がんがどれほどの摂取量・被ばく線量でどの程度発生するのかという基本的な線量反応についてすら明白な結論は出ていない。

今後、若い研究者、技術者がこれらの困難な研究課題に取り組む上で大切なことは、どんな研究プロジェクトでもそれに参画する個々人の研究に対するひたむきなパッション、合理的な方法論を確立するためのあくなき追求心、くじけず最後までやり遂げるという姿勢であり、これは時代と世代を超えて変わらないと思う。ここで述べたことは、原子力産業が右肩上がりであった時代のかなり特殊な世界の体験記であるかもしれないが、現在あるいは近未来にも通じる一種の精神論として、他の研究や技術開発の分野でも共有できるものを感じ取っていただけたら、望外の喜びである。

最後に、内ばく棟建設とPu内部被ばく影響研究プロジェクトに関わった全ての人々に、この場を借りて感謝を申し上げ、稿を終えることとしたい。

— 参考資料 —

- 1) 放射線医学総合研究所：プルトニウム内部被ばく研究報告書(NIRS-R-53/ISBN 4-938987-32-5) (2006年3月)。
- 2) Internal Radiation Effects Research Group/NIRS: Pathological Archives of Life-Span Animal Studies on Carcinogenesis Following Internal Exposures to Plutonium Compounds. (NIRS-M-186/ISBN4-938987-31-7) (Feb 2006)。

著者紹介

小木曾洋一 (おぎそ・よういち)



元 放射線医学総合研究所
(専門/関心分野)放射線生物学, 獣医病理学, 実験病理学, 腫瘍病理学, 免疫病理学, 神経・内分泌・免疫・代謝疾患の発病機構と放射線を含む環境ストレス要因との関係

連載
講座

放射性廃棄物概論

施設の運転および廃止措置により
発生する放射性廃棄物の対策

第8回(最終回) 将来展望

東海大学 大江 俊昭, 東北大学 新堀 雄一

I. はじめに

これまでの連載された講座でも述べられているように放射性廃棄物の対策は喫緊の課題である。我が国には、低レベル放射性廃棄物を対象とした浅地中処分が運用を開始しており、廃棄物が既に埋設されている。また、比較的放射能レベルの高い廃棄物を対象とする余裕深度処分と地層処分については、今後の実施が計画されているので、これらが今後どのように進展するかが廃棄物対策の上で重要な鍵となる。本稿では、連載講座の最終回として、放射性廃棄物の地層処分に焦点を合わせ、実施に向けた課題を整理するとともに、東京電力福島第一原子力発電所の事故(以降、福島発電所事故)に伴う廃棄物についての処分についての基本となる考え方について記述する。

II. 国民意識への対応

これまでの意識調査によれば、国民の意識は、放射性廃棄物が我が国に存在し、それを安全な形で処分しなければならないことについて、原子力に対する考え方の違いにかかわらず、その必要性を否定するものではないであろう^{1,2)}。しかし、福島発電所事故に由来する主に放射性セシウムが付着した焼却灰等(8,000 Bq/kgを超える指定廃棄物)を処分することに対して、候補地地元住民の方々から大きな拒否反応があった現実³⁾を踏まえると、これから余裕深度処分や地層処分を実施するのは容易なことではない。特に、指定廃棄物処分の安全確保の考えは、放射性廃棄物処分の研究開発で積み上げられて

きた技術に立脚しており、例えば、8,000 Bq/kgという数値の設定⁴⁾にも、廃棄物を放射性廃棄物として処分対象とするか否かの境界を決めるクリアランスレベルを設定した手法がほぼそのまま使われている⁵⁾。ところが、この結果を示して、安全だ、というだけでは合意が得られるような状況ではない。当然、そこには技術的要素の他にも、様々な要因が絡んでいると思われるが、少なくとも、8,000 Bq/kgという数値の持つ意味が十分理解されているとは言い難いし、また、理解されるような努力や工夫を、著者を含めた当該技術に携わる者が十分に行ってきたとも残念ながら言えない。

地層処分が一向に進展しない原因^{1,2,6)}については、議論の出発点となる「地層処分が最善の解決策である」という処分に係わる科学技術者の認識が前提となり、処分という選択の行為に社会の意思を十分反映していないことが根底にある。例えば、「廃棄できないものを「廃棄物」と呼ぶ世間常識からすればズレた感覚」や「片付ける先も決めないままに進むゴミ屋敷化」⁷⁾などの指摘は、まさに社会を十分意識して来なかった証拠と言えるであろう。つまり、廃棄物処分の問題とは、これまでの科学技術の進歩の上に立脚した方法論では解決が困難な、まさに、「トランスサイエンス」²⁾に科学者・技術者がいかに向き合うかが問われている課題である。残念ながら、今、我々科学者・技術者に、それに対する十分な準備があるわけではない。

III. 超長期の課題

1. 現状の取組に対して指摘される問題点

ここでは、地層処分の進展が硬直状態にあることを受けて、原子力委員会がその原因の分析を日本学術会議に依頼し、2012年に同会議から示された回答⁸⁾に触れ、超長期の課題に言及する。まず、回答の内容を筆者が要約すると次のようになる。

(1) 政策の抜本的見直し

長期にわたる安全性の確信が持てないために反対され

Introduction to Radioactive Waste – Management of Radioactive Waste from Operation and Decommissioning of Nuclear and Other Facilities (8) : View of the Future : Toshiaki OHE, Yuichi NIIBORI.

(2014年8月5日 受理)

■前回タイトル

第7回 地層処分システムの安全評価

ており、従来の政策を一たん白紙に戻す覚悟で見直す。

(2) 安全性に関して再検討

現代の科学・技術的能力では、千年・万年単位で危険性を完全に除去できないことを認識し、開かれた討論の場を設ける。

(3) 暫定保管と総量管理

対処方法を検討する時間を確保するために、数十年から数百年に限りて厳重に保管する。原発稼働をゼロとすることによって廃棄物を増やさないようにするか、継続する場合でも毎年の増加分を抑制する。

(4) 負担の公平性

受け入れをお金の力で説得するような方法は不適切で、電力の負の遺産である放射性廃棄物の処分を、恩恵を受けてきた皆が公平に引き受ける仕組みを作る。

(5) 合意形成

様々な関係者が討論に参加することはもとより、公正な立場にある第三者が討論過程に係わりを持ち、最新の科学的知見を共有しつつ議論が行われるように工夫する。

(6) 長期的な取組みとの認識

高レベル放射性廃棄物の影響が消えるまで千年・万年の時間軸で考えなければならず、学校教育を通じて次世代を担う若者の間でも理解を高めていくよう努力する。

この回答は、高レベル廃棄物処分に対するこれまでの取組み全般の問題点を指摘したものである。制度や教育にまで広範に言及されているが、ここでは、技術的に深いかかわりを持つ(2)と(3)の暫定保管について述べるとし、それ以外は他の議論^{8,9)}に譲る。

2. 処分と貯蔵

「暫定保管」の意図は、現代の科学・技術能力では千年・万年という長期的な時間単位で処分の危険性を完全に排除できないとの懸念から、拙速に進めるのではなく、安全性を再検討するための時間的裕度をとることにあると思われる。これまでの安全性に関する検討経過が十分に受け入れられていないと理解すべき⁹⁾であろう。

ところで、経済協力開発機構の原子力機関(以降、OECD/NEA)では「可逆性」と「回収可能性」という2つのキーワードに象徴される議論を長年にわたって継続して行っている。「可逆性」は決定を元に戻す能力であり、「回収可能性」は廃棄物を取り出す能力を意味する¹⁰⁾。つまり、処分というプロセスの中に、廃棄物を取り出す能力を保持し、必要な場合に、それを行使できるようにすることである。その理由としては、

(1) 処分の事業期間が1世紀近くに及び、処分後の安全性を評価する時間スケールが数万年以上と長いこと、

(2) 時間スケールが長いこと、技術的、社会的に不確実な点が現れること、

の2つが考えられる¹¹⁾。このような議論がなされたのは、遠い将来の不確かさに対して、今の時点で行う「処分」という行為の妥当性を判断することの難しさが根底にあるからである。「暫定保管」と「貯蔵」では、その意味合いに違いがあるが、「処分」を開始するまでに猶予を持つという点では同じであり、不確かさがある故に、信頼性を確保するのが困難であるという、根底に横たわる背景も同じである。

もともと、処分という行為は廃棄物の回収を意図しないもの¹²⁾とされ、「貯蔵」は処分とは相いれないものであると考えがちであるが、OECD/NEAによれば、「貯蔵」は、後にそれを回収するという明確な意図をもって貯蔵施設に保持することであって、処分の代替措置として無限に継続するのではなく、最終処分につながる管理方針の一つとしている。我が国の地層処分の実施主体である原子力発電環境整備機構(以降、NUMO)の検討によれば、処分施設における建設、操業から閉鎖に至るまでの事業の期間は100年近くに及ぶ¹³⁾ので、その間は回収可能な状態にあり、技術的な側面から見れば、地層処分の事業そのものに「保管」の意味合いが包含されていると言える。

「処分」の状態に至るまでの時間的余裕の中で、安全性を再検討し、地層処分が責任ある対処方法として社会が認知するということが可能なはずである。

では、なぜ「貯蔵」の考え方が我が国の社会では共有されていないのだろうか。それは、処分という選択の行為に社会の意思が反映されていないことが根底にあるとの指摘があることを既に述べた。一たん処分場に廃棄物が持ち込まれると、その後は既成事実化して、なし崩しに閉鎖に至り、合意形成が形骸化するのではないかという疑念は当然残る。そのため、利害関係者(ステークホルダー)が事業全体を十分理解し、合意を形成する過程を実現することが極めて重要^{1,2)}になる。と同時に、科学技術に携わる者には、ステークホルダーの十分な理解に役立つ情報の提供が求められることとなる。

3. 不確実性への対処

貯蔵と処分のところでも述べたように、超長期の評価に対する信頼性に対する懸念は古くからあり、OECD/NEAの報告¹⁴⁾では、意思決定において、安全性の根拠となる情報(セーフティケースという)を常に整理し、情報や経験の蓄積に応じて、それを繰り返して準備することが不確実性への対処方法であると述べている。また、処分の段階が進展しても、すべてのことがわかるわけではなく、ある事象に対する理解が進まない部分も残り得るので、その場合も、精緻な議論は不可能であるにしても、その事象に対してシステムがどの程度の頑健性を具備しているかを議論することは可能であるとしている。例えば、特定の機能を著しく過小に設定(または本

来の機能の完全喪失を仮定)した場合の感度解析などが、それに当たる。そして、その評価を繰り返し行って、自ら技術的な自信を深める行為と、同時に、それをわかりやすく示して、技術者以外の人々の判断材料として提供することが大事であるとも述べている。

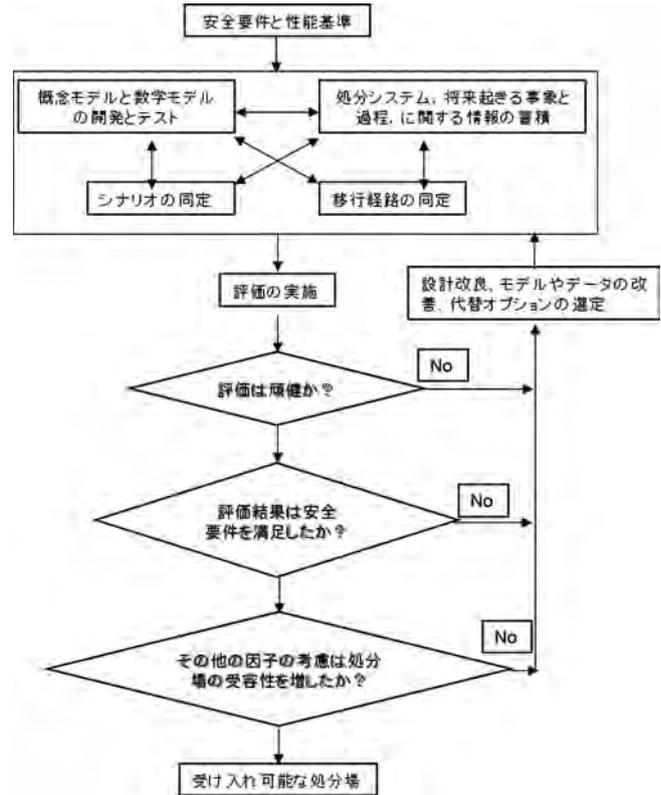
(1) セーフティケース

セーフティケースとは安全性の根拠となる広範囲の論拠の集積であり、安全評価もその中の要素の一つに含まれる。処分の段階が進むにつれて様々な情報が加えられ、それとともに論拠が確かなものに近づき、その論拠をよりどころとする評価にも信頼性が増すことになる。

第1図には、OECD/NEAの示すセーフティケースの概要¹⁴⁾を整理した。しかし、セーフティケースが準備されても、最新の知見を取り込んだ評価を常に更新するという繰り返しプロセスが伴わなければ、信頼性の向上にはつながらない。第2図は、IAEAの示す安全評価の繰り返しアプローチの流れ¹⁵⁾であり、処分システムの設計、安全評価、代替オプションなども常に要件を満足するまで更新することが、受け入れ可能な処分場の構築につながるとしている。

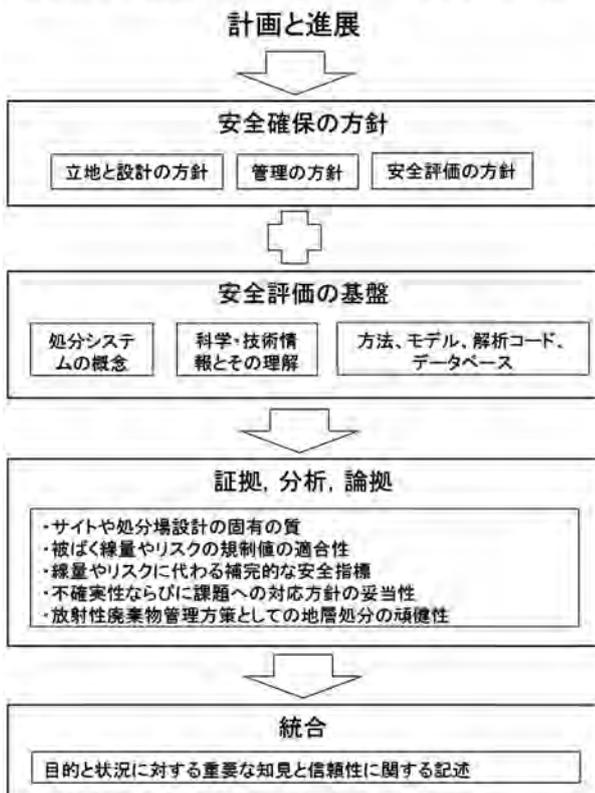
(2) 我が国での継続的な見直し

我が国においてセーフティケースに相当するものが存在するとすれば、核燃料サイクル開発機構(1999年当時)が提出した、いわゆる「第二次とりまとめ」と呼ばれる報告¹⁶⁾であろう。処分地を特定せずにジェネリックサイ



第2図 IAEA 報告書の繰り返し安全評価の流れ

処分システムのある段階におけるセーフティケース



第1図 OECD/NEA のセーフティケースの各要素の関係

ト(特定の地点を想定せず、我が国の代表的な条件を仮定した仮想的な地点)を設定し、そこに、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材からなる人工バリアを施すというもので、平成12年の原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会では、我が国における地層処分の技術的信頼性が示され、処分予定地の選定と安全基準の策定に資する技術的なよりどころが示されたと判断している¹⁷⁾。問題は、それ以降、継続の見直しが行われてきたのかどうか、もし、そうであれば、それは何かということである。日本原子力研究開発機構(以降、JAEA)は「第二次とりまとめ」以降の進捗について、平成17年に報告書¹⁸⁾を公開しているが、これは、先の第二次とりまとめで課題として挙げたものを取り出した、いわば、進捗報告の性格のものといえ、個々の課題に進捗があるものの、総合的に処分の安全論拠を示すセーフティケースの更新とは性格が異なる。その後、原子力発電環境整備機構(以降、NUMO)が2011年に「地層処分事業の安全確保(2010年度版)」¹³⁾を公表し、技術の進展について整理しているが、調査、設計、評価技術について、主に机上における方法整備が中心である。処分候補地を公募しているものの、応募がない^{a)}ために具体的な調査地点がなく、ジェネリックサイトの枠を超える情報収集は進んでいないため、報告書の中でも述べているように、セーフティケースの構築は計画段階である。そのため、社会と

^{a)} 高知県東洋町が一時応募したが、その後撤回した。

の議論を進める上でも、早急に更新することが求められる。なお、「第二次とりまとめ」以降の最新知見を反映した再評価¹⁹⁾が2014年5月に総合資源エネルギー調査会によって示され、研究課題があるものの、好ましい地質環境とその長期安定性を確保できる場所を我が国で選定できる見通しがある、としている。

「第二次とりまとめ」は、あくまである必要条件の下での成立性を述べているのであって、必ずしも十分性が示されているわけではない。NUMOの地層処分計画では、十分性を確認するために、わざわざ概要調査、精密調査、処分場建設という3段階を踏むのであって、この点も充分な理解が得られているとは言い難い。社会合意を得るための十分なプロセスを欠いていたことは確かであるが、科学技術の側が社会合意を得るための情報を適切に発信することの重要性は明らかであろう。

(3) 核変換技術

高レベル放射性廃棄物等への核変換技術の適用が検討されている。本技術において短寿命化が期待できるのは主にマイナー・アクチナイド(MA)であり、中性子断面積の比較的小さい長寿命のFP核種の大部分は残される。例えば、高レベル放射性廃棄物におけるCs-135(半減期230万年、因みにCs-137の半減期は30年)やTRU廃棄物のうち地層処分相当の廃棄物に含まれるI-129(半減期1,570万年)などのFPが、将来の被ばく線量の評価に大きく寄与すると考えられるので、これらを処分する上で、地層処分そのものが不要になることはない²⁰⁾。むしろ、この技術は核種分離との組み合わせにより、廃棄物を減容化することが期待できるであろう。

IV. 福島第一原子力発電所事故に伴う放射性廃棄物の処分

1. 現状の認識

福島第一原子力発電所の廃炉に伴う放射性廃棄物の処分について関連する詳細な議論は、原子力学会「福島第一原子力発電所事故により生ずる放射性廃棄物の処理・処分」特別専門委員会の報告書²¹⁾や同学会事故調査委員会の報告書²²⁾にある。前者は、放射性廃棄物の性状の解明についての科学的・技術的な議論も含まれ、また、後者は、通常プラントと事故プラントとの廃止措置の観点からの相違点に言及している。ここでは、これらの議論の根底にある基本的な考え方を整理することを試みる。

事故廃棄物は、①主に水素爆発時に外気に放出された核種が起因するもの、②滞留水に起因するもの、そして、③保管されていた燃料や燃料の溶融物となる。さらに、その形態によって次のように区分される。すなわち、①については、土壌、伐採樹木、コンクリート等瓦礫、機器類があり、②については、コンクリートや機器類に加え、汚染水の処理に伴う廃棄物として吸着塔、スラッジ

および濃縮された塩水などがある。また③についてみれば、プールに保管されていた燃料、放射化された炉内構造物および燃料デブリに区分される。これらの処分への道筋を考える際にまず重要なことは、①や②の放射性物質を含むものが、限られた敷地内に多く存在するため、その安定な保管を実現させることに課題があり、その解決には、「保管場所を確保すること」と「物量を増やさないこと」を基本とし、地下水の建屋への流入を防ぐことについてのより恒久的な対策や、放射性物質の含有量が少ない瓦礫の再利用の検討が重要となる。また、ある程度物量が増加したとしても、汚染水の分析を進めることが、③の特に燃料デブリの化学的性状を把握する貴重な情報になることも念頭に置く必要がある。③については①や②に比較して物量に限りがあるものの、特に炉内構造物や燃料デブリに関する化学的な形態に関する情報に制約がある。これまでの運転履歴、燃料の仕様や構成、取替えに関する情報は存在するため、事故時に含まれる放射性物質の量はおおそ推定できるものの、その化学的形態は不明となっている。③の最終的な処分システムを考えるには、長期にわたってそれらを生活圏から隔離する観点から、含まれる放射性物質の化学形態が重要な情報の一つとなる。

2. 処分の形態と既存方法との整合性

さて、これらの廃炉に伴う廃棄物処分の安全性は、従前の、事故由来以外の放射性廃棄物の処分のそれと整合性を持って説明されなければならないだろう。その際に「クリアランスレベルの適用」と「処分システムの閉じ込め(核種の移行抑制)性能の評価」が鍵となる。まず、合理的に処分を進めるには、安定に保管した後に、当該物質に含まれる放射性物質濃度がクリアランスレベル以下になるようにするとともに、放射性廃棄物自体の物量を減らすことが重要である。一方、処分形態を考える際、各核種の濃度上限値と処分システムとを直接結び付けて議論することは、処分形態の大枠を理解する上で有用であっても、安全審査上の実効性はないことに留意すべきである。つまり濃度上限値は、線量換算係数等の値が変更されても規制の継続性の観点からその値を頻繁に変更することがないように適度な余裕を見込んで設定されている。一方、安全審査では濃度上限値とは別に、申請書にある対象廃棄物の放射能濃度を前提に詳細な安全評価を行った上で安全性を判断するので、濃度上限値を下回れば処分可能であるという単純な図式は成立しない。昨年施行された新規規制基準²³⁾に準拠すれば、基本シナリオにおいて10 μ Sv/y、変動シナリオにおいて300 μ Sv/yを超えないこと、これらシナリオ以外の自然事象および人為事象に起因するシナリオを想定し、その安全評価を行うこと、などが当然求められるようになるであろう。また、評価の期間は線量の最大値が現れるまでとなる。さ

らに、廃棄物の処分施設は、処分事業の終了後、環境関連法令の体系下²⁴⁾に置かれることになる可能性があるため、事故廃棄物においてもこれらを考慮した上で、処分形態を定めることとなる。

3. 燃料デブリと処分

燃料デブリの地層処分は、これまでの使用済燃料とは大きく異なる形態のため、スウェーデンやフィンランド²⁵⁾で処分が実施されようとしている方法をそのまま流用することは難しい。まず、事故時の高温に曝された燃料がどのような形状や組成に変貌しているのかわからなければ、処分システムの設計を進めることが難しい。具体的には、単位体積当たりの発熱量、熱伝導度がわからなければ、熱解析ができず、処分場の大きさが決められない。また、熔融した燃料の化学形態がわからなければ地下水中への溶解度がわからず、核種漏洩時のソースタームが決められないことから、安全評価の結果に大きな不確実性を伴う。これは、最終的に従来の人工バリアと異なる設計要求や、処分深度と安全性との関係についての議論へとつながっていくことになる。地層中での臨界の有無は、これまで我が国において検討された報告²⁶⁾が極めて少なく、そこに至るウランやプルトニウムの濃縮過程が現実的なものか否かを十分議論する必要がある。現在、これらの問題を含め直接処分に関する研究開発が国のリーダーシップのもと平成25年から5ヶ年の計画で進められている²⁷⁾。

V. おわりに

地層処分¹³⁾や余裕深度処分²⁸⁾では定期的な総合安全レビューを必要とすることが想定されてきたが、新規制基準でも、現在埋設中の浅地中処分に対しても定期的な評価の見直しを求めるようになった。このことは、セーフティケース構築と、繰り返し評価の継続がもはや廃棄物処分全てに課せられたタスクとなることを意味している。そして、この過程が信頼性の向上に不可欠であることは、改めて述べるまでもない。

地下を利用した放射性廃棄物の管理・処分は、放射性物質を生活圏から隔離する現実的な方法であるとの主張は、たとえ技術的にみて妥当であっても、社会は唐突な感覚を持つことを肝に銘じるべきである。技術に携わる者は、常に技術の向上を目指し、社会からの信頼を得ていこうとする姿勢を持ち続けることが重要であり、そのためには、個人のレベルではなく、大学、研究機関、メーカー、国などによる息の長い継続的な人材育成が不可欠であろう。そして、処分の問題は社会科学をも含めた多くの分野を横断することから、人材育成の裾野を拡げることや、そこに携わる人材の安定した雇用を図っていくこ

とは、当分野の将来を展望する上でも重要なことになろう。

— 参考資料 —

- 1) 朽山修：廃棄物地層処分の実施に向けて進むべき道，日本原子力学会誌，55(1)，57-60 (2013)。
- 2) 寿楽浩太：求められる「価値選択」の議論，原子力安全，高レベル廃棄物処分，そして原子力学会の役割，日本原子力学会誌，55(10)，582-586 (2013)。
- 3) 例えば新聞報道，矢板に最終処分場案「突然決め打ち，なぜ」地元 強烈な拒否反応，東京新聞 2012年9月4日付記事。
- 4) 環境省：福島県内の災害廃棄物の処理の方針，平成23年6月23日。
- 5) 日本原子力研究開発機構，安全研究センター：福島県の浜通り及び中通り地方(避難区域及び計画的避難区域を除く)の災害廃棄物の処理・処分における放射性物質による影響の評価について，平成23年6月19日。
- 6) 原子力委員会：今後の高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る取組について，平成24年12月18日。
- 7) ヤエキタミヤコ：ターニングポイント 廃棄できない廃棄物，日本原子力学会誌，55(9)，(2013)。
- 8) 日本学術会議：回答 高レベル放射性廃棄物の処分について，平成24年9月11日。
- 9) 原子力委員会：今後の高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る取組について，平成24年12月18日。
- 10) OECD/NEA：Reversibility and Retrievalability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel, Final Report of the NEA R&R Project (2007-2011), Nuclear Energy Agency, Paris, (2011)。
- 11) 田辺博三：高レベル放射性廃棄物処分の可逆性と回収可能性，第1回可逆性と回収可能性はどういうことなのか，日本原子力学会誌，55(9)，507-514 (2014)。
- 12) IAEA：IAEA Safety Standards Series No.SSR-5, Disposal of Radioactive Wastes, Specific Safety Requirements, International Atomic Energy Agency, Vienna,(2011)。
- 13) 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保(2010年度版) - 確かな技術による安全な地層処分の実現のために - , NUMO-TR-11-01, (2011)。
- 14) OECD/NEA：Post-Closure Safety Case for Geologic Repositories, Nature and Purpose, NEA No.3679, (2004)。
- 15) IAEA：Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. WS-G-1.1, International Atomic Energy Agency, Vienna, (1999)。
- 16) 日本原子力研究開発機構：我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価，JNC TN1400 99-020, 99-021, 99-022, 99-023, (1999)。
- 17) 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会，我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価，平成12年10月11日。
- 18) 日本原子力研究開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—，JNC TN1400 2005-014, 2005-15, 2005-16, 2005-20, (2005)。
- 19) 総合資源エネルギー調査会，電力・ガス事業分科会，原子力小委員会，地層処分WG：最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価 地質環境特性および地質環境の長期安定性について，平成26年5月。
- 20) 大井川宏之：加速器駆動核変換技術による廃棄物処分の負担

- 軽減 核変換専用の核燃料サイクルの技術開発で不透明な将来に備える, 日本原子力学会誌, 54(5), 315-317(2012).
- 21) 日本原子力学会「福島第一原子力発電所事故により生ずる放射性廃棄物の処理・処分」特別専門委員会: 平成 24 年度報告書 平成 25 年 3 月, および, 平成 25 年度報告書, 平成 26 年 3 月.
- 22) 日本原子力学会東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会: 福島第一原子力発電所事故, その全貌と明日に向けた提言-学会事故調最終報告書-, 丸善, 平成 26 年 3 月.
- 23) 例えば, 原子力規制委員会: 実用発電用原子炉及び核燃料施設等に係る新規基準について - 概要 - (<http://www.nsr.go.jp/>).
- 24) 例えば, 黒木亮一郎, 高橋邦明: 放射性廃棄物に含まれる有害物質等に関する検討, JAEA-Research 2007-082 (2008).
- 25) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について 2014 年版, 平成 26 年 2 月.
- 26) 安俊弘, Ehud Greenspan, Paul L. Chambré: 地層処分された高レベル廃棄物による臨界現象発生メカニズムとその可能性, 原子力バックエンド研究, 4(2), 3-20 (1998).
- 27) 地層処分基盤研究開発調整会議: 地層処分基盤研究開発に関する全体計画 [研究開発マップ] (平成 25 年度~平成 29 年度), 平成 26 年 3 月.
- 28) 原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会: 余裕度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する技術資料, 平成 22 年 8 月 5 日.

著者紹介



大江俊昭(おおえ・としあき)

東海大学

(専門分野/関心分野) 廃棄物環境科学 廃棄物処分/特に, ガラス固化体の長期健全性評価手法開発, 処分システムの化学反応性に関する評価手法開発



新堀雄一(にいほり・ゆういち)

東北大学

(専門分野/関心分野) 原子力地質工学/特に, 放射性廃棄物処分システムのバリアおよび性能評価手法の向上

新刊紹介

生命科学の欲望と倫理 科学と社会の関係を問いなおす

棚島次郎著, 186p.(2014.12), 青土社.
(定価 2,052 円) ISBN 978-4791768424

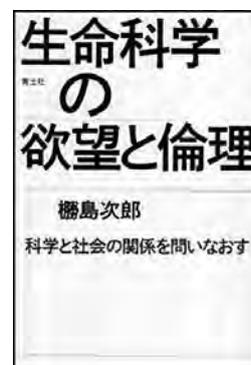
昨年 1 月, 理研・再生医学総合センターが STAP 細胞発見を大々的に発表したが, やがてそれが捏造による不正であったことが発覚した。科学技術に携わる者として, これに関与した女性研究者とその指導者達の極めて不健全な行動に呆れるとともに, 現在, 国のプロジェクト等として進められている「再生医療につながる生命科学」研究にさえ疑問の念を抱くようになった人も少なくなかろう。本書はこうした状況の中で発刊された。著者は東大大学院で社会学を専攻した後, 民間の研究所などで生命科学・医学研究と臨床応用を中心とした科学政策に取り組み, 今ではその第一人者である。

まず序章において, 理研における不正を簡単に説明するが, それよりも科学としての本質こそ重要であるという。そして本書の表題にある「欲望」は, 応用と産業振興さらに倫理からも離れた, 科学そのものへの欲望を意味するとしている。第 1 章では, 研究倫理について論じ, ここで有用性はその基準にならず, むしろ研究の自由に関連して相互批判の重要性を強調し, 理研の STAP 細胞研究ではこれが欠けていたという。そして現在わが国の科学政策は役に立つ研究, 特に産業や医療に应用できる研究に偏していると指摘する。第

2 章では, 生命倫理について論じている。すなわち, 生殖医療, 移植医療, 遺伝子の解析と組換えに関するわが国の議論の進展を辿るとともに, 先行しているフランスの生命倫理法が詳しく紹介されている。第 3 章は研究倫理の応用問題として, 京大の山中伸弥教授が開発した iPS 細胞の意義やノーベル賞の立場などを説明する。さらに今後の再生医療の在り方から, 生命合成にまで話が及ぶ。終章では, 研究の自由に関連して原子力研究の場合を取り上げているが, とくに本会の倫理規程を詳しく調べ, 研究の自由に関連して議論しているのが注目される。

現在, 政府が中心となって進められている再生医療につながる生命科学に関連して, そこに起こった不正, 科学そのものの重要性, 生命倫理に関する諸課題など多くの話題を盛り込んだ好著であり, さらに原子力学と通じる課題もあり, 会員に一読を勧めたい。(参考: 棚島次郎「憲法の学問の自由と原子力・生命科学研究」日本原子力学会誌 Vol. 52(2010)No. 8, p. 2~3)

(京都大学名誉教授・木村逸郎)





ISCN-WINS 共催ワークショップ開催報告 ～核セキュリティと原子力安全のインターフェース～

日本原子力研究開発機構 中村 陽

核不拡散・核セキュリティ総合支援センター(ISCN)は、世界核セキュリティ協会(WINS)との共催により、核セキュリティと原子力安全のインターフェースをテーマにしたワークショップを東京で開催した。安全とセキュリティのインターフェースは INFCIRC/225/Rev. 5 で指摘されているだけでなく、核セキュリティ・サミットでも議題に上るなど、喫緊の課題である。

1. はじめに

核不拡散・核セキュリティ総合支援センター(ISCN)は、2014年10月14～15日に世界核セキュリティ協会(WINS)との共催により、核セキュリティと原子力安全のインターフェースをテーマにしたワークショップを東京(浅草橋、ヒューリックホール)で開催したので、その結果を報告する。

WINSは、核セキュリティのベスト・プラクティスの共有等を目的として設立された国際NGO機関であり、ISCNは、2010年12月に日本原子力研究開発機構(JAEA)内に設立され、アジア諸国を中心に核不拡散・核セキュリティに関する人材育成支援事業を実施している機関である。

本ワークショップは、2010年の核セキュリティ・サミットでの我が国のコミットメントに基づき、国内外の核セキュリティ対策強化に関する活動の一つとして、2012年よりISCNが主体となってWINSとの共催により実施しており、今回はその第4回目である。国内の原子力事業者を中心に、規制当局、警備当局及びその他関係機関等から延べ43名が参加し、核セキュリティと原子力安全における関係者間の連携・協力の重要性に焦点を当てて、2日間にわたり議論を行った。

2. ISCN-WINS 共催ワークショップのテーマ選定

近年、これまでに長い年月をかけて築かれた高度な原子力安全の分野に加え、核セキュリティ強化も必須とされるようになった。9.11テロ以降、核セキュリティ・サミットが開催されるなど、核セキュリティに対する注目は高まっているが、原子力発電所に関する核セキュリティ体制の確保は、原子力安全に関する確保体制に比べれば、かなり遅れた進捗状況にある。原子力安全と核セキュリティは、人や環境を護るという最終的な目的は一

緒であるが、両方の分野を熟知した専門家が少ないことや、核物質防護を担当する部署と安全を担当する部署が別であることも少なくないため、共にシナジーを考えることが難しい状態にある。核セキュリティも原子力安全も、施設の安全な運転による職員・環境・公衆を護ることが究極の目的であり、事象発生後の対応に着目しても共通点が多い¹⁾。核セキュリティに関する事象は、治安当局による捜査が入る点において原子力安全とは異なるが、施設側の対応(放射能漏れを防ぐ)、消防、救急・医療、自治体の役割等は同じである。以上のことから、原子力安全と核セキュリティの間でうまく調整がとれていないと重大なトラブルにつながる可能性が考えられる。

また、2012年に行われた第2回ソウル核セキュリティ・サミットや、2014年に行われた第3回ハーグ核セキュリティ・サミットにおいても、原子力安全と核セキュリティの対策が、整合性があり調整のとれたやり方でとられるよう、立案し対処する必要があると述べられており、安全性とセキュリティのインターフェースに係る国際原子力機関(IAEA)の役割について言及するなど、喫緊の課題となりつつある^{2,3)}。

更に、日本も規制に一部取り入れている「核物質及び原子力施設の物理的防護に関するIAEA勧告文書の最新改訂版(INFCIRC/225/Rev. 5)」⁴⁾においても原子力安全と核セキュリティのインターフェースの重要性について指摘しているなど、重要な課題であることが分かる。東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故の発生により、国内の核セキュリティ強化への取組みが加速しているが、安全に関する非常事態が発生している中で、どのようにセキュリティを確保すべきか、安全とセキュリティ担当部署・機関がどのように連携すべきか等について議論を行い、関係者間の連携の深化・促進を目指し、核セキュリティ強化に関する事業者や関係者の取組みの一助となることを目的としてワークショップのテーマに取り上げた。

ISCN-WINS Workshop on Nuclear Security - Safety Interface : Yo Nakamura.

(2014年12月8日 受理)

3. ISCN-WINS 共催ワークショップの概要

本ワークショップでは、特長として「演劇型セッション」と呼ばれる WINS 独自のディスカッション・セッションを採用している。「演劇型セッション」とは、海外の役者がワークショップのテーマに応じた様々な課題を包含した特定のシーン(特定の国・施設ではなく、架空の空間を設定)を芝居の形で演じ、それをもとに参加者が課題を抽出し、議論を行うものであり、WINS に特有のセッションである。通常の講義形式や、ディスカッション形式とは違った切り口からアプローチするため、参加者の記憶によく残り、また、活発な議論を促すことができる。また、本ワークショップにおける演劇シナリオは、ISCN と WINS が共同で作成し、英国の演劇プロダクションが実演した。

(1) 冒頭セッション(WINS)

冒頭に WINS のロジャー・ホズリー代表から、核セキュリティ・サミットにおける各国のコミットメントならびに取り組みなど、核セキュリティをめぐる最新の動向の紹介があった。また、2014年8月にベルギーの原子力発電所で発生したタービン故障による原子炉停止事故(テロを目的とした破壊工作の可能性が高いとされており、現在調査中)等の事例を挙げて、核セキュリティの重要性の説明があった。また、WINS が開発している教育プログラムである「WINS ACADEMY」が核セキュリティの分野にどう貢献できるかの紹介もあった。

ディスカッション時にも取り入れている電子投票システムを用いて、原子力安全と核セキュリティの統合に関する参加者の意識調査も行われた。

(2) 基調講演

冒頭セッション後に、2名の基調講演者から以下のテーマについてプレゼンテーションが行われた。

「日本の核セキュリティの強化への取組」

(原子力規制庁)山口 寛峰 室長

原子力規制委員会、原子力規制庁の役割や核セキュリティへの取り組み、事業者に求められること、国際核物質防護諮問サービス(IPPAS)等の様々な課題について

言及された。特に福島事故からの教訓として、核セキュリティ分野において、想定外を想定すること、現場を重視する視点から実地訓練を通じて具体的な対応を共有すること、絶対的な安全がないように核セキュリティにおいても常に改善に取り組むべき点という3点について強調された。会場からは、保障措置データの核セキュリティ深化への適用等、複数のコメント、質問が寄せられた。

「原子力安全と核セキュリティ」

(東京工業大学)尾本 彰 特任教授

福島第一原子力発電所の事故に見る深層防御概念の適用における脆弱性、安全とセキュリティに求められる協力について言及された。

安全とセキュリティのインターフェースに関し、「安全」や「セキュリティ」といった個々の要素から多角的にアプローチした講義であり、内容に対し、講義時間が短すぎたという声も聴かれるほど内容の濃い講義であった。結論として、セキュリティなくして安全なしとの考え方のもと、外因事象への対処が強調され、安全と核セキュリティの協調、設置者と関係機関の連携の重要性が示された。

(3) 演劇セッション・グループ討論

今回は核セキュリティと原子力安全のインターフェースをテーマとしており、定期点検のため停止中の原子力発電所で火災が発生し、セキュリティと安全の連携、発電所と外部機関(消防等)の連携の課題が次々に露呈するシナリオを用いて、議論を行った。例えば、安全側の担当者は、原子力発電所で火災が起きた場合、従業員の命を優先し、直ちに避難させようとする。他方、セキュリティ側の担当者は核物質等の持ち出しを防ぐための退域業務を通常通り行おうとするため、避難が思うように進まない。以上のような事例を複数、シナリオの中に組み込んだ。

各10分程度の演劇を観た後、参加者は、ファシリテーターのリードによってグループ・ディスカッションを行い、演劇の中に含まれていた課題や改善点につき、自分の組織では起こりうるのか、どうすれば防げたのか、



第1図 演劇の様子(初期対応時)



第2図 ディスカッションの様子

自分たちの役割は何か等について議論を行った。

具体的に討議された課題としては、舞台上で演じた担当者(セキュリティや安全に関する)が核セキュリティや安全に係る判断を下した際に、この場面での責任は誰にあると思うか、自分たちの施設ではどうか、また、どの時点で何をすべきだったかという点についてディスカッションし、様々な意見が発表された。事故が発生し、放射線が検出されたシナリオに対しては、いち早く施設内外の関係個所と情報共有を行う必要があったとの指摘があった。また、避難に係るシナリオに対しては、職員の安全を考慮すると、セキュリティ側の責任者が行った判断が好ましくない、など実際の緊急時対応についても有益な意見を複数得ることができた。

他にも、施設の外(オフサイト)の消防等の機関との連携はどう行われるべきだったかという設問に対しては、実際に自分たちが対応する時にはどうするのが良いのか自分の境遇に置き換えて考え、問題を指摘し考えることができた。

参加者からは、一般的な講演やプレゼンテーションと違い、より現実的な内容で危機感を覚えた、臨場感があり非常に良かった、この分野でこれほど分かりやすいワークショップはない等のコメントが寄せられた。また、同時に、演劇の環境設定(上記で述べた消防の対応等)が日本と異なるといった意見も得ることができたので次回以降、同様のワークショップを実施する際の改善に生かしたい。

また、本ワークショップのように、核セキュリティについて事業者や警備当局、規制当局が一同に議論する機会は非常に珍しく、貴重な機会を提供できていると考えている。

4. 最後に

本ワークショップは原子力安全と核セキュリティ双方について考えることの重要性を伝える意味で非常に有用であったと考えている。一参加者としてディスカッションに参加したが、原子力安全や核セキュリティについて単独で考えることはできず、両者でどう対処すべきかを、どのようなプロセスで結論を出していくかなど、学ぶところが多かった。安全や核セキュリティについて

個々に着目し、強化していくことが多いが、実際の事故・事案が起きた場合には両者で対処を考えていかなければならず、そのためにどのように準備をしなければならないかを考える大変良い機会になった。

今回のワークショップのように、諸関係機関(事業者や警備当局、規制当局)が一つのテーマについて意見を交換し合う場を増やすことは、それぞれの意見を共有できる良い機会となり、実際の対応の際の連携強化にも非常に効果的である。特に、原子力安全や核セキュリティの分野では関係する省庁や関係者が多いため、関係者間のインターフェースを平時から強固なものしておく必要がある。

ISCNは、核セキュリティに関する人材育成支援事業をアジア諸国中心に実施しているだけでなく、IAEAやWINS、米国サンディア国立研究所(SNL)、欧州委員会(EC)の共同研究センター(JRC)など様々な機関との連携により多くの知見と経験を有している。従い、ここで得られた知見を生かし、核セキュリティ強化支援を担う国内のステークホルダーとして、核セキュリティ分野のキャパシティビルディング強化という基盤部分から、原子力安全とのインターフェース強化へ資するよう今後も努めていきたい。

— 参考文献 —

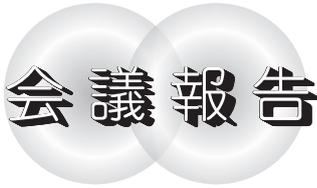
- 1) The International Atomic Energy Agency, International Nuclear Safety Group (INSAG)-24: The Interface between Safety and Security at Nuclear Power Plants.
- 2) http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kaku_secu/2012/
- 3) http://www.mofa.go.jp/mofaj/dns/n_s_ne/page22_000967.html
- 4) The International Atomic Energy Agency, Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Revision5).

著者紹介



中村 陽 (なかむら・よう)

日本原子力研究開発機構 核不拡散・核セキュリティ総合支援センター
(専門分野/関心分野)核セキュリティ, 分子生物学, 化学, 核不拡散, バイオセキュリティ



各国原子力分野の若手との議論で得た経験

2014 年度世界原子力大学夏季研修に参加して

2014 年 7 月 5 日～8 月 16 日(オックスフォード, 英国)

世界原子力大学(WNU)とは、世界原子力協会(WNA)、国際原子力機構(IAEA)、世界原子力発電事業者協会(WANO)、経済協力開発機構原子力機関(OECD-NEA)によって創立された、原子力業界で働く人材の育成を目的としたプロジェクトである。夏季研修(Summer Institute)はWNUの中心的な活動であり、若手のリーダーシップ醸成と参加者同士の世界的なネットワーク形成を目的としている。今回、日本原子力産業協会の「向坊隆記念国際人育成事業」による参加費用助成を受け参加したことから、研修について紹介するとともに、この研修を通じて得た経験を共有すべく報告する。

まず、夏季研修について紹介する。2014 年度の世界原子力大学夏季研修(WNU-SI)は、7 月 5 日～8 月 16 日の 6 週間の期間で英国オックスフォードのクライストチャーチカレッジにて開かれた。原子力発電所を持つ国、持たない国合わせて世界 30 カ国から、規制組織、メーカ、電力会社などから若手の技術者や研究者 71 名が参加した。日本からは、原子力産業協会の「向坊隆記念国際人育成事業」による参加費用助成を受けた私を含む 3 名と原子力規制委員会(NRA)の独自派遣による 2 名の計 5 名が参加した。

夏季研修は、講義、グループワーク、テクニカルツアー(原子燃料製造工場や原子力発電所等の見学)から構成される。講義は各国、各界の原子力リーダーによって行われ、講義内容は原子力分野の専門的な内容以外にも、世界のエネルギー需給や気候変動といった原子力分野の必要性に係る内容やリーダーシップについてなど多岐にわたる。参加者は 10 人前後のグループに分けられ、グループ毎に集まり講義内容について議論することで相互理解を深め、講義内容に関する課題を解決するための案を出し合い、まとめたうえで発表をするといったグループワークを行う。

次に研修を通じて得た経験について述べる。

私は毎日のように英語で講義を受けるという経験がなく、また英語が得意ではなかったため、日々の講義のための準備に苦労した。講義後は他の参加者との夕食や、各国のカントリーパーティーがあったため、夜遅くに宿舎に戻ってから翌日の講義内容の予習と議論のための準備をする必要があり、体力的に大変厳しかった。また、予習のために資料を読む中で、英語が母国語のように使

うことができると、はるかに多くの情報が得られることを改めて認識し、日本人が世界水準の原子力安全を手に入れるには英語力が必須であることを痛感した。体力的に辛く準備不足を実感することもあったが、反省はその晩、そして翌日に生かすことが可能であり、準備の成果が実感できる貴重な経験であった。

また、英語で議論することが研修の主な内容であるため、英語が母国語の参加者が一方的に自身の意見を主張し、非母国語の参加者とは議論が成立しないのではないかと不安に思っていた。しかし、各国の参加者は研修の目的を理解しており、他の参加者の意見を聞くことを重視していたため、私もグループ内で積極的に発言することで有意義な議論を行うことができた。このとき、英語力も当然ながら必要だが、積極的に参加する姿勢が何よりも重要であることを実感した。グループディスカッションで自身の意見を伝えるとき、適切な単語が浮かばないのであれば別の言葉で説明をすることで、正確に意思疎通を図ることができるため、積極的な姿勢によって英語力を補えると感じた。

最後に、原子力安全について議論した際の経験について触れる。

原子力発電に直接関わる業種の参加者同士で自主的にミニフォーラムを開いた際に、日本からの参加者として福島原子力発電所事故後の取り組みについて紹介した。私は発表の中で、今回の事故を教訓として想定外を想定する姿勢とは、「安全のための機能を喪失させる起回事象について、経験を踏まえてより多く想定する姿勢」だけではなく、「起回事象を想定しかねる場合でも機能を喪失した場合から想定を始める姿勢」が重要だと説明した。発表を聞いた海外の参加者は、私が伝えたかった想定外を想定する姿勢を理解した上で、私の意見に賛同してくれた。

世界原子力大学夏季研修で得た人間関係は私の貴重な財産であり、今後も安全な原子力利用のため共に歩んで行きたい。夏季研修への参加は私にとって非常に挑戦的なものであったが、得られた経験は想像を上回るものであった。本報告によって一人でも多くの原子力業界の若手の方々が世界原子力大学夏季研修に興味を持ってもらえることを願う。

(関西電力(株)・西内嗣浩, 2014 年 12 月 25 日 記)

連載・福島からの風 第2回

民間ボランティアの使命

NPO 法人ハッピーロードネット 吉田 憲一

東日本大震災から間もなく4年の歳月が流れようとしている。3.11あの瞬間から福島県沿岸部の被災地は全く違う姿へと変貌を遂げ、今なお震災前とは明らかに違う灰色の景色がふるさとを覆う。そんな中、そこに暮らす人々の感情は様々だ。

私は、震災当時、いわき青年会議所の理事長を務め、物資の供給基地「いわき基地」にて物資の受け入れ配給などの采配を振るっていた。当時の支援活動の中で一番印象的に透けて見えたものは人の腹の中である。支援する人、される人の優しさや思いやり、そして醜さ、汚さ、情報に翻弄され右往左往している姿が発災時のどさくさに紛れ吹き出しているのがはっきりと見えた時期であった。こんな非常時こそ人は普段見せない腹の中を曝け出すものである。我々はその後も、民間のボランティアとして本当の意味での心の復興を目指し、放射能を勉強する講演会等々様々な事業を行い続け、地域の人々も時間が経過する中で、放射能などへの見識も高まり、心の奥に行き場のないストレスをくすぶらせながら少しずつ平穏を取り戻していく。

そんな震災当初からのストレスはどこに向かっていったのだろうか。幾つかの例があるが、その中の一つが震災後の首長選挙であった。発災時同様、人の噂はひとり歩きし事実ではないことが当然のように事実としてまかり通り、その矛先に当時の首長の皆さんはさらされていた。そして、発災当時の国や行政のあり方への不満が、結果として明確に表れることになる。復興に向かううえで、本来望ましくない負の意識の膿出しのようなものである。民主主義である日本は、多数決国家であり致し方ないことだが、そんな人々の民意が逆に復興への歩みの妨げとなることもあるのだ。

では、これから福島県沿岸部の民意はどこへ向かって行けばよいのであろうか。当然、廃炉へ向けその高い技術力を集結し成果を導き出し、日本の誇りにしていかなければならない。そして官・民一体となり、現在の巨大な作業場という現状から生活の場を取り戻し、その実績と目に見えるかたちで、世界へ誇れる「ふくしま」を発信していくことが使命であることは誰の目から見ても明らかである。ただそこへたどり着く過程での地元の民意は簡単なものではない。震災当時から燻っている失われた信用を取り戻すのは容易なことではなく、それにはある程度の時間や心の中にこびり付く失われた信用を前向き

なプラスの要素で転換させるきっかけが必要である。願わくば誰かを悪者にしての膿出しではなく、明るく前向きな内容であって欲しいと思うが、一度失われた民意はそれを感じる状況には置かれることは少ない。

震災当初、神戸の方々から阪神大震災の話聞く機会があった。行政的な復旧は完了しているにもかかわらず、口を揃えてまだ復興を果たしていないという。その地域に住まう人々が、復興をハードでなく分かりやすい身近なもので共有していくという過程を踏まなければ、長き時を経ても住民の満足度は得られないようである。

特に、福島県沿岸部の被災地では、複数の町村の集合体である双葉郡の集約された最終的なビジョンが見えてこない限り、現状の延長線上に未来像を描くことは甚だ困難といわざるを得ない。だが、日本人は数多くの困難を乗り越えてきた。それは実際に、発災当初の最悪の状況から現在に至るまで自分の身をもって感じてきたことでもある。

「まち」をつくるのが「人」であれば、そのまちをつくる「人」が希望を持てるビジョン、それを官・民が協力し、住民と希望を持てるビジョンへと昇華していき、一人でも多くの賛同者を集め、共有しながらやり遂げてこそ本当の復興が成就されるのではないだろうか。そこにこそ我々のような民間ボランティアの活動の存在意義があるのだと思う。

現在、私は福島県浜通りの国道6号線を2万本の桜並木でつなぐ「ふくしま浜街道・桜プロジェクト」に参画している。そこには分かりやすい復興した「まち」の未来が見えるからだ。当面の目標は5年後に迫った東京五輪であろう。世界の注目を集め桜が舞い散るふくしま浜街道を聖火ランナーが通過する時、我々は心から復興したと地域の人々と共鳴できるのであろうか。戦いはまだ道半ばである。未来を担う子供たちへ明るい未来を残してあげるためにも着実に歩みを進めて行きたい。

(2015年1月30日記)

著者紹介

吉田憲一 (よしだ・けんいち)
 尼子タクシーグループ 専務取締役
 元2011年度 公益社団法人いわき青年会議所 理事長
 NPO法人ハッピーロードネット 理事(企画・広報)

新刊紹介 プラズマ物理の基礎

宮本健郎著, 322p.(2014.10.10), 朝倉書店.
(本体価格 5,600 円 + 税) ISBN 978-4-254-13114-7

本書の出発点は、1976 年に出版された「核融合のためのプラズマ物理(岩波書店)」である。当時は Artsimovich の提唱によるトカマクの性能が認められ、世界的に多くの中型トカマクが運転を開始した時期であり、その後のトカマクを中心とした核融合研究の進展は目覚ましいものがある。本書はこのような状況に基づき、最新の理論・シミュレーションによる成果、実験研究の進展に合わせて書き換えられている。

有限抵抗値を有する実際のプラズマの不安定性やプラズマ乱流研究の進歩に合わせて、それぞれ「抵抗不安定」と「乱流によるプラズマ輸送」が独立した章として記述されている。プラズマ閉じ込めも「トカマク」、「逆転磁場ピンチ」、「慣性閉じ込め」に三分され詳述されている。新たな章立てをせずとも、新規に記述されたあるいは詳細化された部分は多い。

プラズマ物理学は種々の物理の統合的性格を有しているため、初学者に対するプラズマ物理の講義はアラカルト的な

りがちである。著者は、恐らく教育者としての経験から、より理解しやすくするために、導入部分を3つの章に再構成している。

本書は前書と同様、式が多用されている。式はプラズマパラメータに対する依存性を明示し、現象の把握に役立つと同時に、数値を代入しての定量的な評価に有効である。ただし式が多用されていると言っても、導出過程が全て記述されている訳ではない。自分自身で導出してみることは、現象の理解の深化に役立つ。著者はこのことを期待しているのではないだろうか。

評者は14章の「核融合研究の発展」を楽しく読ませていただいた。初学者は先人の研究の歴史を学ぶため、古くからの研究者は過去を再認識(懐かしむもよし)するため、本書をひも解いたならば、なるべく早い段階で読むことをお勧めしたい。

(東芝原子力エンジニアリングサービス・新谷吉郎)



意見交換の広場

日本学術会議の「HLW 処分」について

豊田 正敏

本誌2月号に掲載されている山地氏の日本学術会議の「HLWの暫定保管」に関する提案に反論する。

HLWの処分の基本的考えは、HLWを天然バリアと人工バリアによる多重バリアによって、地下数百メートルの地層に埋設することにより、人間環境から隔離することである。しかるに、HLW処分場の立地確保に対する努力をしないで、暫定保管などにより問題を先送りし、後世にツケを回すようなことは避けるべきである。しかも、暫定保管期間が最大300年とは、問題放棄にならないだろうか。

◇

また、HLWである使用済み燃料の中間貯蔵は、六ヶ所再処理工場が稼働しないため、原子力発電所の使用済み燃料プールに貯蔵されている使用済み燃料があふれる

のを避けるため行うのであって、HLWの処分時期とは全く関係がない。

使用済み燃料の中間貯蔵方法としては、山地氏ご指摘のように、ドライキャスクと使用済み燃料プールの増設が考えられる。

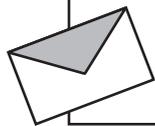
ドライキャスクは原子力発電所敷地内か、別の中間貯蔵施設に保管されるが、自然空冷式で安全に保管できる。また、そのまま輸送容器として使用できる。

使用済み燃料プールの増設は、多くの原子力発電所では、原子力建屋のスペースがないため、別の建屋を作って保管することになるので建設費が高くなる。従って、各原子力発電所ごとに個別に保管するよりも、六ヶ所再処理工場に3,000トン程度の容量のプールを増設してまとめて保管した方が安くなる。

学術会議としては、このような問題の検討は専門に検討している電力関係者に任せ、学術会議に諮問されているHLW処分を進めるための具体的方策を提案してはどうか。

(2015年3月5日記)

理事会だより



学会の経営健全化に向けた取り組み

経営改善特別小委員会の活動と成果

日本原子力学会(以下「学会」)では、平成23年3月11日に発生した東京電力福島第一発電所の事故後の原子力界を取り巻く環境の激変に伴い、財務状況の急激な悪化が懸念される事態となりました。このため財務改善WGを設置して、外部の専門家による財務診断も含めた収支バランス改善策を実施し、当面の収支を改善しました。

さらに、平成23年度下期に制度検討タスクを設置し、根本的な財務改善策を制度面から検討し、事務局長公募、理事事務局長の設置、学会運営の基本方針、事務局改革の方針を取りまとめました。

これを受けて、平成24年1月の理事会で、「経営改善特別小委員会(以下「小委員会」)」の設置を決定しました。

小委員会では、平成24年度には、公認会計士および社会保険労務士とコンサルタント契約を結んで、具体的な改革案の提案を受け、それに基づき順次、改善策を進めました。以下にその主な内容について示します。

1. 事務局員の給与体系の見直し

原子力学会は社団法人であったことから事務局員の給与体系、雇用形態は、国家公務員のそれを参考に定められていました。平成23年度から一般社団法人に移行したこともあり、事務局職員の理解を得て、給与体系、働き方を民間並みに変更し、関連する規程類の改定、人事考課システムを更新しました。

2. 事務局業務の合理化

1. 項の改革は、事務局経費の削減をその目的の一つとしていますが、抜本的には事務局が担う業務そのものを削減することが必要との認識のもとに、経理書類の簡素化、外部委託によるさらなる合理化、会員管理システムの更新等を検討し、実行可能なものから順次とりいれました。

3. 学会誌編集委員会の経費節減

このところ、学会誌 ATOMO Σ の表紙の変化にお気づきの方も多いと思いますが、学会誌の印刷の競争入札化や、表紙デザインの簡素化等で、印刷費を削減した結果です。また、編集管理や記事校閲に携わって頂いている方々への報酬支払いの制度も見直しました。

4. 組織のガバナンス強化

一般社団法人としての学会の諸活動に関して、日常的な活動の責任は総会において選任された理事会に託されていますが、そのためには必要な情報が理事会に提供される必要があります。一方、諸活動の活性化のために

は、大きな経営上のリスクを伴わない活動については、各組織が自主的に判断したり、得られた収益を次の活動に柔軟に活用したりできることも重要です。このため、諸規定を見直して、締めるところと任せるところのメリハリを持たせました。一例として、各組織へ配分されている予算の使い道、次年度への繰り越しに柔軟性を持たせたことが挙げられます。

5. 会員増強策、収入増加策

正会員については、会員の年齢構成、今後の新規加入者の予測から、非常に厳しい状況にあることを認識しつつも、残念ながら有効な対策はまだとれていません。賛助会員も厳しい状況にありますが、今後は除染や廃炉関連事業で新しい企業の参入も予測されるため、OB会員に業務委託して会員開拓を進めています。

6. 標準活動運営委員会の設立

学会標準の制定・改定を中心とする標準活動は、その性格上、中立性が求められることから、理事会の係わり方は他事業に比べ弱いものでした。しかし、学会としての活動の一貫性も重要であり、理事会と標準活動の連携を深めるため、本小委員会を発足させました。

7. 新規事業の開拓

学会に相応しい新規事業の開拓の検討も進めており、翻訳の際の専門用語監修の支援等を始めています。

8. 魅力ある学会に向けて

発足以来、ホームページの改善を課題として議論を重ね会員サービス委員会に引き継ぎました。

さらに、学会の最大行事である「春の年会」、「秋の大会」を一層魅力的にする方策の検討を始めました。具体化は関係組織にお願いすることになりますが、問題提起と方向性の提示は、当小委員会で進める所存です。

以上、列举してみました。諸施策の結果、間接経費といえる管理費は、平成23年度の9,000万円強から平成25年度には6,500万円強へと、大きく削減することができました。また、学会全体の収支に関しても、年会等の参加費の改定、部会費制度の変更等で会員の皆様のご協力を得た結果、黒字基調が定着しつつあり、今後は諸事業の活性化に向けた取り組みが必要と考えています。

(理事・経営改善特別小委員会委員長 百々 隆)

「理事会だより」へのご意見、ご提案の送り先
rijikaidayori@aesj.or.jp