

巻頭言

1 エネルギー総合戦略本部の設置を

田原総一郎

解説シリーズ

21 UNSCEAR2013 レポートの概要(3) 福島報告：ヒト及びヒト以外の生物種への影響

UNSCEAR レポートでとりあげられたヒト及びヒト以外の生物種への影響と、福島事故の長期的な影響を理解するために取り組むべき課題の提言を紹介する。

酒井一夫, 栗原 治

26 UNSCEAR2013 レポートの概要(4/ 最終回)子どもへの放射線影響

子どもは成人と比べて、同じような条件で被ばくをしても臓器吸収線量が異なるし、同じ吸収線量でも影響の程度が異なる。

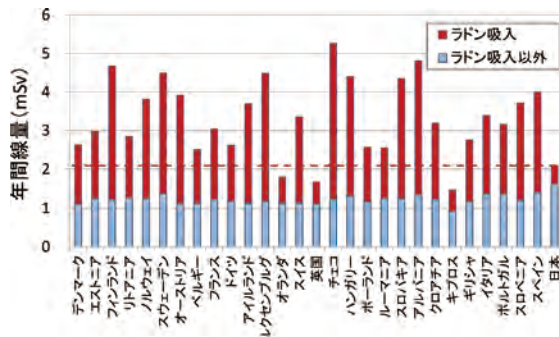
島田義也

解説

32 欧州諸国民の自然界からの年間被ばくの実態

欧州では自然放射線による国民の年間線量が日本人の倍以上になる国がいくつもある。欧州全体では年間7mSv を超える住民の総人口は2000万人を超える。どの程度の被ばくなら受忍可能だろうか。

河田東海夫



欧州諸国民の自然放射線からの年間線量

時論

2 今こそリスクガバナンス構築に向けた産業界のイニシアチブを

「原子力がもたらす便益に照らし、許容される範囲にリスクを抑えられているか」という問いへの答えを私たちはもっているだろうか。

香山弘文

4 原子力バックエンドを研究のフロンティアに!

避けることはできないバックエンドの課題。最先端の科学技術でこれに対応できないか。

大井川宏之

6 立地地域として、いま出来ること - Ene Cafe を通して

立地地域と消費地域が交流しながら、ともに考える。

武内貴年

報告

14 平成 23 年東北地方太平洋沖地震後の東海再処理施設の健全性に係る点検・評価の結果について

原子力機構の東海再処理施設では大震災で設計時の想定を超える地震動が観測されたが、施設の健全性に問題を与える影響はなかった。

中野貴文, 佐藤史紀, 福田一仁ほか



高放射性廃液貯槽の地震荷重による発生応力図

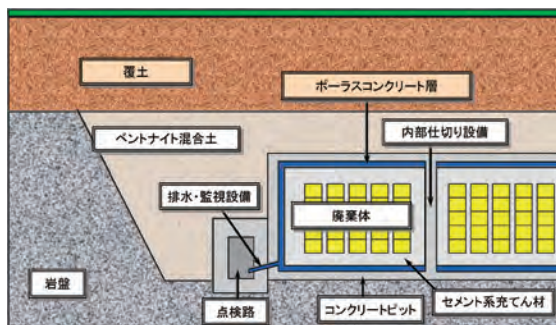
36 シミュレーションのV&Vの現状と課題 (2) 確率論的リスク評価分野のV&V

PRAのV&Vとは何か。そのためにどのようなことがなされうるかを紹介する。さらに、今後PRAの信頼性を一層高めていく上で役立つV&Vの可能性についても触れる。 村松 健

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

42 第5回 放射性廃棄物の処分

低レベルと高レベルの放射性廃棄物処分事業のうち、ピット処分、余裕深度処分および地層処分を中心に、処分方法、安全確保の考え方や技術的な課題・進展などを紹介する。 見付樹大, 後藤考裕



ピット処分における処分システムの構成

会議報告

47 何が合理的な伝え方か—福島第一原子力発電所事故の教訓から「第47回原産年次大会」

木下雅仁

From Abroad

48 Fukushima - The Response was Worse than the Event

福島事故では「誤った発信」が行われ、その後の対応を「安全サイドにしておく」ことで、結果的に住民が「何年も自宅へ戻れない」という「甚大な事故」となった。 M.Grimston

理事会だより

63 学会の福島復興へ貢献する活動について

8 NEWS

- 各党の選挙公約出そろそろ
- 参院, 中間貯蔵施設の関連法案を可決
- 国際原子力学会協議会が米国で会合
- COP21に向けた排出削減を検討開始
- 原賠条約加盟の法案を閣議決定
- 電中研がリスク研究センターを設置
- 経団連, 再稼働加速を提言
- 海外ニュース

SCIENCE READING

51 軽水炉被覆管の化学 —もっと知りたいジルカロイ-水反応

福島原子力発電所事故における原子炉建屋の爆発は、これまで「仮想」の域にあったジルカロイ-水反応による水素発生という事象の災禍を現実にした。熱・水素発生を基となる酸化反応を中心に、ジルカロイの開発や関連する研究の軌跡などを紹介する。

木戸俊哉

報告

56 今後の我が国における核燃料サイクル・プルトニウム利用をどのように考えればよいか—主にプルトニウムに係る核不拡散の観点から

久野祐輔

61 AESJ-Collaboration Task Force(CTF)の設立と活動—フォーラム21「イオンビームの物理と応用」と共催

上坂 充ほか

31 From Editors

64 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 寄贈本一覧, 学会事務局長就任のお知らせ, 新入会一覧, 英文論文誌 (Vol.52, No.1) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

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

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

エネルギー総合戦略本部の設置を

巻頭言



ジャーナリスト

田原 総一郎 (たはら・そういちろう)

早稲田大学文学部卒業。岩波映画製作所 テレビ東京を経て、1978年よりフリージャーナリストとして活動。2005年4月より早稲田大学特命教授。

“文芸春秋”誌で、約一年間原発を連載した。原発を動かす側の責任者たちにホンネを問いつづけたのである。

東京電力の廣瀬直己社長は、“東電の責任で廃炉をやり遂げる”と悲壮な表情で語り、数士文夫会長は“コスト意識を徹底させる”と改革への決意を見せた。

三菱重工の佃和夫相談役、東芝の佐々木則夫副会長、日立製作所の川村隆相談役という三人の原発メーカーの元社長は原発の安全性を強調し、原発の新設が難しい中、海外への輸出に活路を見出している。

原子力規制委員会の田中俊一委員長は、無駄な議論を繰り返す電力会社の態度に憤りの声を上げ、我々の責任で再稼働を判断すると硬い語調で繰り返した。

自民党を代表する原発推進の大島理森復興加速化本部長や細田博之幹事長代行らは“原発でいくしかない”“核のゴミは大したことない”とホンネを明かした。

しかし、一連の取材で強く感じたのは、自民党政権は、こと原発に関して、そのホンネとは裏腹に腰が引けているということだ。

私は、安倍内閣は、原発に対する覚悟を示すべきだと思う。

飛躍を恐れずにいえば、日本は“原発事故先進国”になるべきだと考えている。

現在、世界の31ヵ国で約430基の原発が稼働しており、約80基が建設中である。とりわけ中国やロシア、インドなどの新興国での建設が目立つ。いずれどこかで原発事故が起きるだろう。その時にどのように事故に対応すべきか。どのように住民を守ればよいのか。日本は原発事故を経験した国として、世界の国々をリードしていくべきだと思う。

そこで必要になってくるのは原子力政策の司令塔である。事故以後の日本では、経産省、文科省、環境省、そして内閣府など各省庁がバラバラに原発にかかわっている。そうではなく、たとえば、強力な権限を持つ“エネルギー総合戦略本部”のような組織をつくるべきではないか。

そのことを菅義偉官房長官にぶつけた。菅氏は、“その方向は正しい”といい切った。

総合戦略本部をつくるうえは本部長が必要だが、誰が本部長になるのか。

“本部長は総理大臣ですよ”

そして菅氏は、9月3日の内閣改造で同時に「まち・ひと・しごと創生本部」をつくったときのことを例にだした。

本部長には安倍首相が就き、副本部長に、担当大臣の石破茂氏と菅義偉官房長官が就いた。

それではエネルギー総合戦略本部の担当大臣には誰がなるのか。菅氏と、その担当大臣が副本部長に就くだけだ。

“経産大臣になるのか、あるいは内閣府の特命担当大臣になるのか”

と答えた菅氏に、私は、こういう組織はなるべく早くつくるべきだとせかした。世界は、深刻な原発事故を起こした日本の取り組みを危惧と期待を込めて凝視しているのである。

(2014年11月4日記)



今こそリスクガバナンス構築に向けた産業界のイニシアチブを

東京電力福島第一原発事故は、日本社会全体としての「想定外への備え」の欠如を露呈した。

規制当局は、design-baseの規制運用に終始し、シビアアクシデント(SA)対策を規制要件化していなかった。行政の無謬性に囚われ、規制の想定を超えた事態の発生と正面から向き合わず、津波リスクやテロ対策等新たな知見の規制運用への反映で遅れをとってきた。立地自治体や住民の方々からの「規制を満たしていれば事故は起きないのか」との問いに、「残余のリスク」への言及を避けてきた。(東電福島第一原発は規制要件を満たしていた)

東京電力も、社内に15mを超える浸水の可能性を指摘する分析があったにも関わらず、経営陣はそれを自主的な安全対策に生かさなかった。国内の原発でSAが発生していなかったことへの驕りから、東電に限らず全ての電力会社が、日本では深刻な事故は起こらないとの、いわゆる「安全神話」に囚われ、社内において、そして、地域住民を含めた社外との間で、リスクの存在を前提にした意思決定やコミュニケーションが成立していなかった。

ここから浮かび上がるのは、規制当局をはじめとする国、原子力事業者、原子力メーカー、さらには立地自治体をはじめとするステークホルダーそれぞれの組織において、また、相互のコミュニケーションの中に、適切なリスクガバナンスが存在していなかったという教訓である。この点については、政府事故調、国会事故調等あらゆる事故調査報告が一致するところであろう。

国は、2012年9月、原子力安全・保安院を推進当局から分離し、独立性の高い原子力規制委員会を設置した。同委員会は、SA対策の規制化、厳格なバックフィットルールの導入等徹底した規制水準の引き上げを図るとともに、「新規制基準に適合したとしても、それが絶対に安全であるということの意味しているわけではない」として、想定外の「残余のリスク」の存在を前提とした規制運用に徹している。これを受け電力会社が行ってきた追加安全投資も、総額2兆円を超えるとされている¹⁾。

これらが、我が国の原子力安全の「実質的向上」に繋がったことは確かであろうが、国民の原子力安全への「信頼回復」には繋がっていない。それは何故か。

①政府は引き上げられた規制水準について「世界で最も厳しい水準」という曖昧な表現しかできず、②規制当局は、原発を巡るリスクを俯瞰し優先順位付けすることなく、予想される(多くの場合、国民の関心が高い)事故シナリオを「確実に防止する」ことに注力した決定論的規



香山 弘文 (かやま・ひろぶみ)

経済産業省 資源エネルギー庁
原子力国際協力推進室長兼戦略企画調整官
東京大学法学部卒(1995)、米国コロンビア大学
ロースクール LL.M.、国際関係論修士了。
通商産業省(当時)入省後、原子力、石油開発、
企業税制等を担当。同省大臣官房総務課にて
3.11対応を担当。2011年7月より現職。

制運用に終始し、③電力会社は早期再稼働を最優先に規制当局の言いなり(場合によっては科学的な前提に基づかない規制水準の値引き交渉)に終始していると批判されている。いずれも的を射たものと言わざるを得ない。日本の原子力平和利用に関わる者の誰一人として、「可能な限りのリスク低減が実現されているか」、「発電所毎のリスク特性に応じ最適な形で安全投資がなされているか」、そして、「原子力がもたらす便益に照らし許容される範囲にリスクが抑えられているか」、といった本質的な問いへの答えを持ち合わせていない。それどころか、そうした課題設定すらできていないことが多い。

新規制の下で実質的に安全性が向上したといっても、絶対的な安全はないとの前提で国民や立地自治体と向き合う以上、原子力利用に携わる者は、一定のリスク低減目標に向かって継続的な安全性向上に取り組んでいることの説明責任を果たさなければならないのだ。

これは容易ではない。まず規制委員会は、原発ゼロを目指す方針を掲げる政権の下、厳格な規制を適用することのみを使命として設立された。この使命の下では、原発利用のメリットとの比較考量での「許容されるリスク」という発想や、原子力事業者の自発的な安全性向上を促す「インセンティブの付与」といった試みはなかなか許されない。同委員会は安全目標を示したが、あくまで東電福島第一原発事故時の放射性物質排出量と過去の安全目標を巡る原子力安全委員会の議論をベースにしたものに過ぎない。また、電力会社のリスクマネジメント向上への取組は、緒に就いたばかりだ。例えば、東電福島第一事故前からPRA(確率論的リスク評価)活用の重要性が謳われてきたが、リスク情報の整備が十分でない、リスク情報を整備しても規制運用が硬直的で稼働率向上のメリットがないといった理由で、活用が進まなかった。

15万人を超える方々に避難を強いる事故を経験した我が国が、社会全体として「許容できるリスク」という概念を受け入れるのには大きな壁がある。電力会社の多くがSA対策立案の基礎となる解析コード等リスク情報

の取り扱いをメーカーに依存し内製化してこなかった経緯もあろう。PRAの手法自体発展途上であり、計算結果の数値自体はまだ信頼に足るものではないことも事実だ。しかしながら、産業界は、こうした課題の大きさを理由に立ち止まってしまっていて良いのであろうか。

筆者自身、幸いにも原子力リスク研究センター(本年10月1日電中研内に設立²⁾)の立ち上げに関わる機会を得、トップを務めるアポストラキス所長(前米国規制委員会(NRC)委員であり、PRAの世界的権威)の知遇を得た。日本のリスクガバナンスの状況につき、所長から大変示唆に富むご指摘を受けた。「まずは電力会社を中心とする産業界が、技術的に優れたリスク情報のstudyをする必要がある。これに対し、規制当局を含む社会が欠点をあげつらうのではなく、共にその内容を吟味していく建設的関係が築かれなければならない。」

本年5月、経済産業省の下に設置された第三者委員会が、「原子力の自主的・継続的な安全性向上に向けた提言」を行った³⁾。その主旨は、「一義的に安全に責任を負うのは原子力事業者である。原子力事業者が自主的かつ継続的に安全性を向上させていく意思と力を備えることが必要であり、また、これを備えた存在として認識されなければ、国民の原子力事業への信頼も回復しない」というものだ。

提言は、あらゆる取組の基盤として、「適切なリスクガバナンスの下でのリスクマネジメントの実施」を掲げている。まず、各原子力事業者に対し、経営トップのコミットメントの下での抜本的な社内リスクマネジメント体制の改革を求めている。特に、PRA等のリスク情報を経営判断に生かすメカニズムの導入、多様な外部のステークホルダーとのリスク認識と課題の共有といった具体的な方策が求められている。また、JANSI(原子力安全推進協会)による米国INPO(原子力発電運転協会)並のリーダーシップの早期確立が謳われている。

こうした適切なリスクマネジメントの下で、①低頻度の事象を見逃さない網羅的なリスク評価の実施、②深層防護の徹底を通じた残余のリスクの低減、③外的事象に着目したプラント毎の事故シーケンスやクリフエッジの特定及び既存のシステムでは想定されていない事態への備えや回復を含むレジリエンスの向上、といった原子力事業者の具体的な取組の必要性が提言されている。これらは、政府やメーカーを含めた原子力産業に関わる者全ての自発的な行動をもって実現されるべきものとされ、そのためのロードマップの骨格も示されている。

本提言を受けた今後を展望するにあたり、提言の検討過程でも紹介されたスリーマイル・アイランド原発事故後の米国の取組は注目に値する。米国でも、当該事故を受けて規制当局は保守化した。こうした中、産業界は、海軍の規律を導入したINPOのリーダーシップで、ピアプレッシャー⁴⁾による自主的安全性向上の仕組みを構築

するとともに、リスク情報の整備とそれに基づく最適な安全対策の実施に努めてきた。こうした産業界のイニシアチブが規制当局との間での建設的な議論に繋がった。NRCは、1986年に安全目標声明を発出し、原発以外の社会的リスクとの比較の中で安全目標を定め⁵⁾、事故から16年後の1995年に「PRA政策声明」を発出した。これを受け、①原子炉監視プロセス(ROP)に基づき、リスク情報で発電所毎に評価される運転実績に応じて規制の関与にメリハリをつけるとともに、②一定レベル以上の公衆防護効果がある場合を除き、対象となる安全対策のコストとリスク低減効果とのコスト・ベネフィット分析を行った上でバックフィット適用の可否を決めるなど、「リスク情報に基づく規制運用」が導入されてきた。ROPの評価結果は、NRCによる公開ヒアリングでの説明に用いられるなど、地域住民をはじめとするステークホルダーによるリスクガバナンス(原子力事業者に対して、リスク情報に基づき、然るべきリスクマネジメントを求めること)の向上にも貢献している。

全ての原発が稼働停止する中、各原子力事業者にリスクマネジメント向上対策実施の余力が限られていることは事実だ。しかしながら、「想定外への備え」の欠如を明確な教訓として認識しながら、リスクと正面から向き合わないことは許されない。苦しい中でも、あくまで産業界側のイニシアチブとして、米国が15年以上をかけて実現した過程を、5年で成し遂げる覚悟が必要ではないか。これは事故を起こした当事国としての責務でもあり、また、こうした産業界のイニシアチブがなければ適切なリスクガバナンスの構築は加速しない。その下で、「原子力がもたらす便益に照らして許容される範囲にリスクが抑えられているか」といった適切な課題設定ができてはじめて、国民の信頼に立脚し自律的な安全性向上が実現する正常な原子力利用が実現するのだ。

まず必要とされるのは、リスク情報を正確に把握、積極的に活用し、安全性向上に向けた実際の行動に繋げる原子力事業者のリスクマネジメント向上に向けたイニシアチブだ。そのためには、原子力事業者のみならずメーカーを含む各々が貢献する形の産業界側全体としての取組が不可欠だ。適切なリスクガバナンス構築に向けた産業界の断固たる決意と行動が求められている。

(2014年11月6日記)

— 参考資料 —

- 1) : 日経新聞 2014年6月8日朝刊。その後も更に増加していることが見込まれる。
- 2) : <http://criepi.denken.or.jp/jp/nrrc/index.html>
- 3) : http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/anzen_wg/report_02.html
- 4) : CEO会議等の開催を通じ、他の電力会社の安全対策や運転管理に関する卓越した取組から自らの遅れや不備を知り、自らの改善に取り組む動機付けをもたらすこと
- 5) : 51FR28044, "Safety Goals for the Operations of Nuclear Power Plants; Policy Statement", Aug. 4, 1986.



原子力バックエンドを研究の フロンティアに！



大井川 宏之 (おおいがわ・ひろゆき)

日本原子力研究開発機構 戦略企画室
次長

1962年、大阪生まれ。京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻修士課程修了。博士(工学)。1987年、旧日本原子力研究所に入所、高速炉の臨界実験、核変換技術の研究などに従事。原子力基礎工学研究部門研究推進室長などを歴任。2014年より現職。

1. 廃棄物問題への継続的挑戦の重要性

原子力のバックエンドには、放射性廃棄物というネガティブなものをどう始末するかという実務のイメージが強い。ガラス固化体の処分、原子力施設の廃止措置と発生する廃棄物の取り扱い、福島第一原子力発電所(1F)事故で発生した汚染物の処置など、課題は山積している。

しかし、原子力のエネルギー利用を続けるなら、または原子力発電から撤退する場合でも、バックエンドの課題との格闘から逃げることは許されず、この格闘は短くとも数十年は続く。そこで、原子力バックエンドを原子力の研究開発の最も重要な課題と位置づけ、原子力以外の知見も取り込みながら最先端の科学技術で対応すべきではないか。この挑戦的な取り組みを「バックエンド・フロンティア」と称し、原子力の研究開発資源を集中的に投入することを提案したい。

バックエンドは「後端」、フロンティアは「最先端」を意味するので、バックエンド・フロンティアは矛盾をはらんだ造語であるが、逆転の発想で閉塞状況の打開を図りたい。

2. バックエンド・フロンティアの構成要素

高レベル放射性廃棄物(HLW)に関する分野と、原子力施設の運転や解体で発生する低レベル放射性廃棄物(LLW)に関する分野に大別しつつ、両者を結びつける。

HLWに関しては、以下の3つの要素で構成する。

- (1) 再処理に付加する群分離処理技術
- (2) 長寿命核種の核変換処理技術
- (3) 発生する新たな廃棄物の処分技術

LLWに関しては、以下の3つの要素で構成する。

- (4) 放射性廃棄物の発生を抑制する解体技術
- (5) 多種多様な廃棄物の廃棄体化処理技術
- (6) LLWの処分技術

以下、各構成要素の目指すところについて述べる。

3. HLWの減容化・有害度低減

平成26年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画は、使用済燃料問題について「将来世代に負担を先送りしないよう、現世代の責任として、その対策を確実に進めることが不可欠」とし、国が前面に立って最終処分に向けた取り組みを進めるとともに、放射性廃棄物の「減容化・有害度低減」の技術開発を進めることとした。

使用済燃料は、再処理によって、その95%程度を占めるウランとプルトニウムを回収して利用することで、大きく減容化および有害度低減が可能である。残った核分裂生成物(FP)とマイナーアクチノイド(MA)はガラス固化体として地層処分することが我が国のこれまでの方針であり、その安全性は確保し得るとの立場に変更はない。

一方、1F事故で我々は想定外を想定する必要性と、常に安全性向上に取り組むことの重要性に気づかされた。最近では、使用済燃料やガラス固化体の処分においては、「可逆性」と「回収可能性」を確保することが世界的な流れとなりつつある。地層処分の安全性向上や安全評価の信頼性向上に資する新たな知見の獲得に真摯に取り組んだ結果を処分事業の節目節目で確認し、社会とともにその時点での最適解を選択していくことが求められているのではないかと。そういった観点から、各要素の内容を考えてみる。

(1) 再処理に付加する群分離処理技術

FPとMAをさらにいくつかの群に分け、それぞれの群に最適な処理処分方法を適用する技術であり、核変換処理や合理化した処分に欠かせないプロセスである。現在はガラス固化している白金族やモリブデンは、これらを回収して有効利用したり、別途廃棄体化したりすることで、ガラス固化体の製造が容易になるというメリット

もある。ストロンチウムとセシウムは、半減期約 30 年でガラス固化体の発熱を支配するものであり、これらを分離して安定なセラミックスに閉じ込め、熱源や放射線源として利用しながら冷えるのを待って処分する。

(2) 長寿命核種の核変換処理技術

プルトニウムは各国の事情やその時々状況によって、貴重なエネルギー源であったり、厄介な廃棄物であったりする。当面は軽水炉での MOX 利用で需給バランスを保つが、持続的なマネジメントのためには、プルトニウムの多重サイクルが可能な高速炉の開発が不可欠であり、「もんじゅ」や国際協力で技術を獲得していく。

一方、MA の核変換については高速炉や加速器を用いた方法について技術開発することで、従来のガラス固化体の潜在的な有害度を大幅に低減できる可能性があり、今後 15 年程度を目標に、重点的に研究開発を進めたい。

長寿命の FP まで短寿命化するのにはチャレンジングであるが、原子核物理学と連携し、日本が世界に誇る RI ビームファクトリーや J-PARC といった最先端実験施設を使ったデータ取得が始まろうとしている¹⁾。

(3) 発生する新たな廃棄物の処分技術

群分離や核変換の結果、従来にない多様な廃棄物が発生する。HLW は減容化できたとしても、おそらく LLW はかえって増えることになるであろう。これらの廃棄物をいかに合理的に処分するのか、これによって将来世代のリスクは低減できるのか、目に見える形で示し、どのような概念を選択するのがよいかを国民の皆様が考えられるようにすることが重要であると考えます。

4. LLW の合理的な処理処分

我が国だけではなく、世界で本格化する廃炉時代に、いかに合理的に廃棄物を減らすかは、極めて重要な課題である。また、研究開発や 1F 事故で生じた多様な廃棄物の合理的な処理処分も追求することが必要である。

(4) 放射性廃棄物の発生を抑制する解体技術

原子力施設で使われている材料の不純物も含めた詳細組成、中性子や γ 線の分布、放射化断面積などが精度よく分かれば、原子炉の解体に先だって、廃棄物の発生場所と発生量を精度よく予測でき、過度に保守的な仮定による廃棄物管理の負担増大を抑制できる。あらかじめ放射性物質の分布が分かれば、解体作業も合理的かつ計画的に行える。

このため、中性子や γ 線の深層透過の解析精度向上

や、放射化反応に係る核データの評価など、合理的な解体に貢献できる研究は多い。

(5) 多種多様な廃棄物の廃棄体化処理技術

原子力発電所で生じる LLW はその素性が比較的良く分かっており、LLW の処理処分方法も確立している。一方、1F 事故ではこれまでになかった多様な廃棄物が生まれた。また、日本原子力研究開発機構をはじめとする研究機関や大学では、積年の研究開発の結果、溜まりに溜まった廃棄物があるが、処分のための廃棄体化は進んでいない。その理由は、多様な廃棄物の組成を品質保証するための方法論が確立していないことにある。このため、精密分析と簡便分析のための技術開発や非破壊測定技術開発のほか、廃棄物の多様性に応じた合理的な評価のためのロジック作りが必要である。また、廃棄体を減容化するために、固体廃棄物の溶融固化技術や洗浄技術、液体廃棄物の浄化技術などの開発も重要であろう。

(6) LLW の処分技術

LLW の処分は、浅地中処分から、余裕深度処分、地層処分と、様々な形態がある。多様な廃棄体について、最も合理的な処分方法を考えることは、処分技術の高度化に他ならない。使用済燃料の処理により生じる LLW も含め、我が国全体として最も合理的に安全確保が可能な方法を考案することが重要であり、処分技術から分離技術や廃棄体化技術にフィードバックして、最適なバックエンド体系の構築を目指す。

5. おわりに

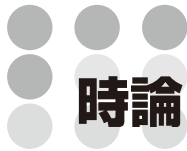
以上述べたように、原子力バックエンドは、まだまだ研究開発の余地が多く、かつ、原子力利用の経済性や安全性にも直結している。年限を区切って研究開発に投資し、チェックアンドレビューを経て実用化の可能性を見極めるような仕組みがぜひとも必要である。省庁や組織の垣根を越え、バックエンドの理想形を追い求めることは、原子力利用を進めている国、これから原子力利用を始める国、原子力から撤退する国などすべてに貢献するものであり、国際的な役割分担も含め、積極的に進めることが望まれる。

(2014 年 10 月 24 日 記)

- 参考資料 -

1) 革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)

<http://www.8.cao.go.jp/cstp/sentan/about-kakushin.html>



立地地域として、いま出来ること — Ene Cafe を通して



武内 貴年 (たけうち・たかし)

福井県原子力平和利用協議会 敦賀支部
青年部部長

1987年、(株)サンゲツに入社。1993年よりタケウチ室内装飾店代表。同年、福井県原子力平和利用協議会に入会。青年部副部長を経て、2013年4月から現職。

私が生まれたのは、1969年3月13日。そしてその1年後の1970年3月14日、日本原子力発電所敦賀1号機が営業運転を開始しています。言うなれば私は原子力発電所が身近に存在する環境で育ちました。その後1981年に、敦賀1号機の一般排水路からの放射性物質漏えい事故が発生しました。その当時を思い出すと、私の実家は海水浴場へ向かう県道沿いで、海水浴客の減り方は顕著なものでした。また、テレビ・新聞等では連日この事故を取り上げ、これにより敦賀市は風評被害を受けたと記憶します。当時小学生だった私は、地元住民の苦悩を目の当たりにし、同時に「原子力」に対する「複雑」な気持ちが芽生えました。その後も事故やトラブルが起きるたびに、このような思いが繰り返されてきたのです。

また一時期、私は愛知県で就職をしていましたが、「敦賀出身」ということで冷やかな目線を感じたこと。その後、地元へ戻り経営者となり1995年に高速増殖炉もんじゅのナトリウム漏えい事故が発生。ここでも私は、県外のある人物から心無い言葉を発せられました。私は「なぜ、敦賀出身ということ在这种目にか？」そして「一生、このような思いをしなくてはならないのか？」と同時に、次世代の福井県民が同じ思いをして欲しくない。と、感じるようになりました。

今回の福島事故により、福島県民の中でもこのような思いをしている方がいると推測し、特に子供達が影響しているかと思うと、立地地域のおかれる同じ立場においては本当に辛いことだと思います。

私はこの背景に、日本国内で「放射線」「原子力」の分野において、国民の理解が浸透しなかったため、「原子力」「放射線」という言葉に敏感になり、事故がある毎に「水が飲めない」「悪性リンパ腫多発」「がん患者が多い」等の立地地域への風評被害が発生したこと、またエネルギー源として、原子力の必要性が国民に十分理解されなかったため、「原発なしでもやっていける」「原子力は発電コストが高い」等の議論が発生し、福井県の場合は、関西圏との自治体を含め、住民同士の相互理解や交流が盛んではなかったことで、主張の衝突等があったと考えます。その結果、今日の原子力に対する議論が発生し、私

達福井県のような立地地域と大阪府のような消費地域との間に、原子力への見解に温度差が発生するものと考えられます。

では、原子力の「立地地域」はこの問題にどう向きあえばよいのか？どうすればこの温度差を解消できるのか？を、私は模索して参りました。そこで考えたことは「原子力」を地元の経済面だけではなく、日本の資源・歴史的背景・環境等から、もう一度日本のエネルギーの実態を考え、その中で「原子力はどうあるべきか？」を考えていくべきではないか。そして、それは我々の地域だけではなく、電力の消費地と共に考えていくべきであるということだったのです。

このような考えに至った経緯として、私が青年部長へ就任する1年前に、大阪府と東京都の方々へ御声掛けをして意見交換会を開催しました。しかしながら、そこへ集まったメンバーは原子力に一定の理解があり、かつ年齢層が30代～40代という老若男女の幅広い意見の集約ではありませんでした。それと同時に我々メンバーも相手の質問に対し返答する知識が乏しかったことが分かりました。

そこで、私が福井県原子力平和利用協議会敦賀支部青年部の部長へ就任後、幅広く一般市民の皆様と相互理解を深めること、メンバーの知識向上を図ること、日本のエネルギー問題に耳を傾けて頂く環境づくり、を我々の団体に模索をして参りました。そこから「日本のエネルギーについて、コーヒー等を飲んで頂きながら、気軽に会話できる空間の中で、エネルギーについて伝え考えて頂く」という発想が生まれ、「Energy Cafe」略して「Ene cafe」が誕生したのであります。しかしながら我々はあくまで民間のボランティア団体であり、原子力・放射線・エネルギーの専門的な知識はありません。果たして一般の方から踏込んだ質問が来たときに説明が出来るのか？という問題がありました。そこでまず、「日本のエネルギー事情と今議論すべき事」を、21世紀政策研究所の澤田裕氏をお迎えし学びました。そして次に「原子力

以外のエネルギー発電システムの現状」を理解するため、石炭火力(木質バイオマス混焼発電)・LNG火力(コンバインドサイクル発電方式)・太陽光・風力の発電所を視察研修し、エネルギー全般の知識向上を行って参りました。このような準備を行い、晴れて平成26年2月、大阪市の天神橋筋商店街「天三おかげ館」という空き店舗において、Ene Cafe が開催されました。

ここで心掛けたことは、まず「原子力だけに偏った説明はしない」「消費地の皆さんの声を真摯に聞く」「マスコミ等では取り上げられない真実を伝える」「エネルギーの事を真剣に考えて頂くきっかけづくり」です。展示パネルも、関西弁を取り入れ親密感を演出しました。それと同時にエネルギー自給率・現状の電源構成・化石燃料の輸入状況等のグラフを交え、当メンバーが来場頂いた皆様に、真摯に説明をさせて頂きました。大変労力の要る活動でしたが、大阪市民の皆様にもご理解を頂けたと考えています。また、来場者頂いた方のうち、107名の皆様がアンケートにお答え下さいましたので、ここに一部を紹介します。

【アンケート結果】

Q1 今後、原子力発電は必要だと思いますか？

A 必要 47 名、不必要 17 名、わからない 43 名

◆必要と答えた方の意見(一部)

- ・国全体の経済のことを考えると今は必要。(30代女性)
- ・日本はエネルギー自給率が低から、バランスをとった政策が必要。(40代女性)
- ・再生可能エネルギーでは需要を満たせず、化石エネルギーでは限界がある。(40代男性)

◆不必要と答えた方の意見(一部)

- ・大規模な自然災害や地殻変動が起こった時、地下処分に不安がある。(50代男性)
- ・原発なしで十分生活が出来ている。(70代女性)
- ・最終処分の行く末を未来の子供たちに押し付けるのはだめだと思う。(40代女性)
- ・便利で大事な発電だと思うが、安全じゃないから要らない。(40代女性)

◆わからないと答えた方の意見(一部)

- ・福島事故以来、ないほうがいいんじゃないかと思っていたが今日、話を聞いて必要性も感じた。(40代女性)
- ・必要性は理解したが、現実的に安全なのかどうかを知りたい。(60代女性)
- ・やはり怖い。でも停電が増えたり電気料金が上がるのもいや。(30代女性)
- ・化石燃料がいつ使い尽くすのかははっきりわからないから。(40代女性)
- ・賛成、反対どちらの意見も一理あって難しい。(60代男性)

Q2 エネカフェの展示パネルや説明の内容は、お役に立ちましたか？

A 役に立った 60 名、少し役にたった 43 名、あまり役に立たなかった 2 名、役に立たなかった 0 名、無回答 2 名

Q3 パネルや説明を通して新たに感じたことはございましたか？

- ・原発はいらないと思っていたが、必要性が良く理解できた。
 - ・原子力に反対をしていたが、もう少し考えます。
 - ・エネルギーの自給率の少なさに驚いた。現在と近い将来のあるべき姿の提案がほしい。
 - ・普段考えないことなので、きっかけを与えてくれた、このような活動は素晴らしいと思う。
 - ・今まで他人事だった。もっと考えなければならぬと感じた。
 - ・このように前向きな議論ができるように頑張ってください。わかりやすいパネルと説明でした。
 - ・日本には必要なことがわかった。ならばもっと最新の原発を開発して増やしてほしい。
 - ・自然災害時以外の原発の危険性とは何なのか。そこも知りたかった。
 - ・皆さまの熱意が伝わった。今後もこのような活動を続けて下さい。報道ではわからないことが多い。
- 以上のような回答を頂きました。

今回の Ene Cafe を通し、立地地域、消費地域が交流出来たことは大変有意義なことであり、相互理解や温度差の軽減としては有効な活動ではないかと考えます。

専門家ではない我々の活動には限界がありますが、今後共この活動を通し「日本のエネルギー問題」に対して、正しい理解を広めていきたいと考えます。それと今回の活動で、「高レベル放射性廃棄物の地層処分」に関する意見が多く聞かれました。これは今後、原子力政策を進めていく上で回避出来ないことです。そしてその候補地を選定していく上で、NIMBY 問題^{*}が発生します。その時には過去、我々の地元が原子力発電所を立地し、先程述べたような風評被害が発生しないよう、国を挙げ誠心誠意説明をして頂くこと。それには会場での専門用語が飛交う説明だけではなく、市民の身近なスペースでも説明をし、理解を深めていくこと、国民の皆様が意見を発しやすく、かつ真剣に考えて頂く環境作りが必要であります。そして二度と私が経験したようなことは避けて頂きたく、国を挙げての理解促進に期待を致します。

※ NIMBY 問題：Not In My Back Yard (自分の裏庭以外なら)の略。「施設の必要性は認めるが、自らの居住地域には建てないでくれ」と主張する住民達や、その態度を示す語。

(2014年11月11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。

各党の選挙公約出そろう

2014年12月14日実施の衆議院選挙を前に、各党の選挙公約が出そろった。

原子力政策をみると自民党は原子力について「安全性の確保を大前提に、エネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源」だと位置づけ、原子力規制委員会によって新規規制基準に適合すると認められた場合には、その判断を尊重し原発の再稼働を進めるとした。再稼働にあたっては国も前面に立ち、立地自治体等関係者の理解と協力を得るよう取り組むとしている。

民主党は「福島事故原因の解明をさらに進めるとともに、避難計画について国の責任を明確にする制度を整備する。責任ある避難計画がなければ、原発を再稼働すべ

きではない」とした。

維新の党は「原発フェードアウト」と明記。安全規制や使用済燃料の総量規制や中間貯蔵、損害賠償についてルール化を行うとともに、「核のゴミ」の最終処分の解決がなされないならば原発の再稼働を認めないとした。

公明党は原発に依存しない社会・原発ゼロを提唱。原発の新設を認めず、原発の40年運転制限を厳格に適用するとした。再稼働については原子力規制委員会が策定した規制基準を満たすことを大前提に、国民、住民の理解を得て判断するとしている。

（原子力学会誌編集委員会）

参院、中間貯蔵施設の関連法案を可決

参議院は2014年11月19日、福島原発事故の除染で発生しがれきや土壌を保管する中間貯蔵施設をめぐる関連法案を可決した。中間貯蔵は国の責任で行い、施設の運営は「日本環境安全事業株式会社」を改称した「中間貯蔵・環境安全事業株式会社」が担う。同法では「中間

貯蔵開始後三十年以内に、福島県外で最終処分を完了するために必要な措置を講ずる」旨を明記。国の責任を明確化した。

採決では、自民、民主、公明、維新、次世代の各党が賛成し、みんな、共産、社民の各党が反対した。

政府審議会、COP21に向けた排出削減目標を検討開始

2015年のCOP21に向け、20年以降の温室効果ガスの排出削減目標について検討する中央環境審議会と産業構造審議会の合同会合が10月24日に始動した。去る9月の国連気候サミットで、日本は、できるだけ早期の約束草案提出を目指すことを表明している。

現時点、日本は、COP16（10年）の「カンクン合意」に基づき、新たな20年削減目標を05年度比3.8%減として国際的に登録しているが、原子力発電の活用のあり方を含めたエネルギー政策の検討を踏まえ、確定的な

目標を設定する方針としている。

初会合では、経済産業省が、新たなエネルギー基本計画の具体化のため立ち上げられた省エネルギー、新エネルギー、原子力に関する3つの小委員会における検討状況を説明した。委員からは日本の技術力への期待のほか、中小企業にとってのエネルギーコスト増の深刻さや、地域や暮らしの視点からも検討する必要などを訴え、より「現実的な目標」となるよう求める意見があった。

（資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ）

原賠条約加盟の法案を閣議決定

政府は10月24日、国際的な原子力損害賠償制度の構築を目的とする「原子力損害の補完的な補償に関する条約」(CSC)の国会承認案および関連法案を閣議決定した。

CSC参加については、早期に結論を出し、アジア地域における国際的な原子力損害賠償制度の構築に努めて

いくものとされ、関係省庁の副大臣会合で検討が進められていた。CSCは、裁判管轄権の事故発生国への集中、事業者への無過失での責任集中などが規定、国際ルールが整備され、拠出金制度で賠償資金が充実、被害者の迅速、平等な救済・賠償が図られる。

国際原子力学会協議会が米国アナハイムで会合

原子力の平和利用を進めるために各国の原子力学会によって設立された NGO である国際原子力学会協議会 (INSC:International Nuclear Societies Council) は 2014 年 11 月、米国のアナハイムで会議を開き、2015 年 11 月に開かれる米国原子力学会 (ANS) 冬の会議で、特別セッション Nuclear part of the solution to mitigate climate change (仮) を主催することを決めた。また、会合では各国の原子力の状況の報告があり、日本

からは断層問題などが紹介された。なお 2013 年から INSC の議長を務めていた二ノ方壽氏は 2014 年 12 月末に議長を退任し、後任には ANS 元会長の W. Burchill 氏が就任する。

INSC は 1990 年に設立され、現在は 38 カ国の原子力学会によって構成されている。

(原子力学会誌編集委員会)

電中研がリスク研究センターを設置、PRA 活用し総合的評価も

電力中央研究所は 10 月 1 日、事業者による自主的な安全性向上に必要な研究開発の拠点となる「原子力リスク研究センター」を設置した。福島第一原子力発電所事故を踏まえ、事業者が規制の枠組みに留まることなく持続的に安全性向上に取り組んでいくよう、これまで蓄積してきた関連分野の人材と研究基盤をより効果的に活用するため、センターとして組織化したもの。センターでは確率的リスク評価 (PRA) 手法なども活用した総合的なリスク評価にも取り組む。センター長には前米国

NRC 委員で、PRA の分野で業績のあるジョージ・アポストラキス氏が就任した。アポストラキス氏は同日会見し、「リスクマネジメントは一義的には事業者の責任」と繰り返し述べ、センターの役割があくまで事業者のリスク対策をサポートするものであることを強調した。

同センターは人員規模約 110 名、企画運営、リスク評価研究、自然外部事象研究の 3 チーム体制で、実質的な活動は、研究設備のある我孫子地区や狛江地区で行われる。

経団連、再稼働プロセスの最大限加速を提言

日本経済団体連合会は 10 月 7 日、昨今の燃料輸入費増加、経常収支黒字の連続的減少による経済影響への懸念から、「エネルギー問題はわが国として取り組むべき喫緊の課題」として、原子力発電再稼働プロセスの加速、エネルギーコスト低減策などを求める提言を発表した。

原子力発電については、「重要なベースロード電源として活用するための環境整備を進めるべき」とし、今後も停止が続けば、電気料金のさらなる上昇が避けられないと指摘。安全性の確保を大前提に、再稼働プロセスを最大限加速するため原子力規制委員会の人員体制強化などにより、審査の効率性や審査内容の予見可能性の向上

を図るよう求めている。また、政府には、立地地域が求める防災対策に万全を期すとともに、再稼働の必要性を明確に説明すべきとした上で、産業界としても、事業者による安全性向上に努めるものとしている。

さらに提言では、発電の過程で CO₂ を排出しない原子力は地球規模で気候変動問題の解決に貢献できるエネルギーとなると明記。15 年の COP21 に向け、政府においては、安全性、安定供給、経済性、環境適合のバランスがとれたエネルギー・ミックスを早期に策定し、これを踏まえた温室効果ガス削減目標が掲げられるよう訴えている。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【米国】 規制委、ユッカ山計画を科学的に「適地」と評価

米原子力規制委員会 (NRC) のスタッフは 10 月 16 日、

ネバダ州ユッカマウンテンにおける使用済み燃料と高レベル放射性廃棄物の深地層処分場の建設許可手続きで、安全評価報告書 (SER) の第 3 巻を発行した。

2013 年 8 月に連邦巡回控訴裁から残余予算の範囲内で審査を再開するよう指示されたのを受けたもので、同計画の安全性を認める内容。残りの 3 巻が完成し、NRC

委員が規制上の判断を下したとしても処分場計画の復活に直結するわけではないが、サイトとしての適性が科学技術的に証明されたとして共和党の賛成派議員や産業界は「状況を一変させる強力な追い風」と受け止めている。

SERの第3巻は処分場を永久封鎖した後の期間を安全性評価の対象としており、NRCが建設計画の是非を技術的に判断する上で中心的な部分だ。処分場設計は放射能を環境から隔離する多重バリアを備えるなど、同期間に適用される安全要件を満たしているとNRCスタッフは明言。人の介入や個人毎の防護、地下水の保全等に関するNRCの制限や基準にも準拠していると結論付けた。

ノースアナ原発バックアップ機器 貯蔵施設が完成

米国の鉄筋コンクリート製・防災ドーム建設業者であるABCドームス社は10月23日、福島第一原発事故の教訓を反映した緊急時バックアップ機器の貯蔵施設がバージニア州のノースアナ原子力発電所サイトに完成したと発表した。

同施設は直径約37m、高さ約12m、敷地面積が966平方メートルというドーム型で、同原発を保有するドミニオン社が2013年9月に発注した3つの貯蔵ドームの最初の一つ。エンジニアリング・システム・ソリューションズ(ES2)社の設計により、ABC社が同業のドーム・テクノロジー社と共同で建設した。

米原子力規制委員会(NRC)は福島第一原発事故後、想定外の外部事象による影響緩和戦略の具体的な要件を事業者に指示。これを受けた産業界は炉心冷却用の水と電源が失われた原発で安全性を確保する「多様かつ柔軟性のある対応能力を備えた戦略(FLEX)」をサイト毎に策定した。その主要策の一つが可搬式発電機やポンプ、蓄電池などをサイトに追加貯蔵しておくことで、常設の安全系やバックアップ機器が作動しない場合に備えて常に使用可能な状態に防護するのが目的。時速580kmの風やミサイル、地震動にも耐え得る堅固な仕様になる。

ドミニオン社の残り二つの貯蔵ドームは、コネチカット州のミルストーン原発、およびバージニア州のサリー原発サイトで年内にも完成予定。ABCドームス社ではこのほか、2社の事業者から合計7基の貯蔵ドーム建設を請け負っているとしている。

エネ省、先進的原子炉 R&D で 5 プロジェクトに補助金

米エネルギー省(DOE)は10月31日、B・オバマ大統領の「利用可能なすべてのエネルギー資源を使うエネ

ルギー戦略」、および気候変動に対するアクション計画の一環として、先進的な原子炉技術の開発支援に資する重要な研究開発プロジェクトを進める5グループの企業に補助金を授与すると発表した。

交付の方法や期間は明示していないが、産業界の設計・技術関連の専門家が特定した必要性に基づき、連邦政府は次世代原子炉の設計・建設・運転における重要な技術課題への取り組み支援のために2013年産業界と開始したコスト折半プログラムに合計1,300万ドルを投資することになる。

安全性や効率性および経済性の面で大幅な進展が見込めるとして選定されたのは次の5プロジェクト。すなわち、(1)仏アレバ社の北米子会社とテラ・パワー社、アルゴンヌ国立研究所(ANL)、大学1校による「液体金属冷却高速炉用燃料集合体の熱水力学的シミュレーションと実験調査」、(2)GE日立社とANLの「次世代型確率的リスク評価方法の開発と近代化」、(3)GA社と大学2校による「新型原子炉概念における複雑なシリコン・カーバイド構造物の製造と試験」、(4)NGNP産業連合とアレバ社、ウルトラセーフ・ニュークリア社、ウェスチングハウス(WH)社、および大学1校の「高温ガス炉における事故後の熱除去と試験」、(5)WH社とANL、大学1校による「ナトリウム冷却高速炉のための熱音響センサー開発」——である。

【欧州】

ECが英国のヒンクリーポイントC 計画を承認

欧州委員会(EC)は10月8日、EDFエナジー社のヒンクリーポイントC(HPC)原子力発電所建設計画に対する英国政府の財政支援策はEU競争法の国家援助規則に適合するとの判断を下した。1年間に及んだ徹底的な審査の結果、同原発から得られる収益を英国の消費者に還元するメカニズムの強化など、EDF社と英国政府が合意していた長期的な投資契約項目の一部修正版を承認したもの。英国で20数年ぶりとなる一連の新設計画で先駆けの2基が大きなハードルをクリアしたというだけでなく、日立と東芝が同国で出資する後続計画のためにも資金調達に関する良い先例を作ったという意味でその意義は計り知れない。

EDF社は英国・南西部のサマセット州で出力165万kWの仏アレバ社製・欧州加圧水型炉(EPR)を2基、2023年以降に運開させていく計画を進めている。同計画の投資リスクを軽減するため、2013年10月に英国政府と商業合意に達した投資契約上の主要項目では、HPCの発電電力1千kWhあたり92.5ポンド(約1万

6千円) (後続のサイズウェルC計画の実行が確定した場合は89.5ポンド)を固定買い取り(行使)価格に設定。市場の卸売価格がこれを上回ればEDF社が差額を、下回れば政府が支払うという差金決済取引(CfD)を35年にわたって適用。また、政府の信用保証制度である「UKギャランティ」をHPC計画に適用し、総工費の65%を保証するとしていた。

これに関してECは、これらの項目がEU競争法に規定された「EUの単一市場と両立しない違法行為」の国家援助に当たるかを、(1)国家財源の移転がある、(2)一定の事業者に優位を与える、(3)競争を歪める恐れがある、(4)加盟国間の貿易に影響を与える——の4点について詳細かつ厳密に審査。ECが介入したことで、同支援策による単一市場の競争原理への過度の歪みを抑え、英国国民にとっても大幅な負担軽減につながるよう修正が加えられたとしている。

GHGを30年に40%削減、EUが気候変動対策枠組で合意

欧州連合(EU)加盟各国の元首・政府首脳で構成される欧州理事会は10月23日、2030年までに温室効果ガス(GHG)の排出量を少なくとも1990年レベルの40%減にすることを、法的拘束力を備えた目標として盛り込んだEUとしての新たな気候・エネルギー政策の枠組を最終合意した。

2013年11月にワルシャワで開催された国連気候変動枠組条約・第19回締約国会議(COP19)での合意日程に基づき、遅くとも2015年の第1四半期中にEUとしてこの目標を提出予定。2015年末にパリで開催される会合(COP21)よりも前に、京都議定書に代わる2020年以降の世界的な気候変動枠組の締結を目指した意欲的な削減目標と政策を、時間的余裕をもって提示するようすべての国に求めていく考えだ。

この「2030年に向けた気候・エネルギー政策の枠組」は2014年1月にEUの任務執行機関である欧州委員会(EC)が政策文書として提案し、これを3月に検討した政治指針決定機関の欧州理事会が、結論として原則を特定していた。

欧州の原子力ロビー団体であるフォーラムはGHGの4割削減という排出目標が承認されたことを歓迎する一方で、EU全体のエネルギー消費に占める再生可能エネルギーの比率が30年までに少なくとも27%に引き上げられたことには「市場に歪みを生じさせ、すべての低炭素発電技術に公平な競争の場を生み出す事はできなくなる」と評価した。

また、EUの排出量取引制度(EU-ETS)で対象部門

の年間排出上限を現在の1.7%から21年以降は2.2%に引き上げ、非対象部門でも30%の排出削減を求めるとした強化策には、原子力産業界として支援していきたいと明言。

先頃、ECが英国のヒンクリーポイントC計画を承認したように、GHGの排出削減目標の達成に貢献できる原子力への投資にもっと重きを置くべきだと訴えており、原子力が欧州における発電電力の27%、低炭素電力の53%を賄っている事実を強調した。

【フランス】 議会在エネ移行法案可決、原子力シェア2025年に50%へ

エネルギー移行法案について審議していたフランスの国民議会(下院)は10月10日、総発電電力量に占める原子力発電のシェアを現在の75%から2025年までに50%に削減する条項を盛り込んだ1章から8章までの部分を可決した。法案全体の票決を経て、2015年にも承認されるとみられている。

F・オランド大統領が公約した原子力シェアの削減も含め将来のエネルギー政策の方向性を定めるため、フランスでは2012年から約2年間かけてエネルギー源の移行に関する全国討論を実施。その結果、エコロジー・持続可能開発・エネルギー省のS・ロワイヤル大臣は2014年6月、(1)原子力の設備容量を現状レベルの6,320万kWに制限する、(2)30年までに温室効果ガスの排出量を90年比で40%削減する、(3)30年までに再生可能エネルギーの発電シェアを40%に引き上げる、(4)国の最終エネルギー消費量を50年までに半減する——などの中長期的目標を盛り込んだフランスの新たなエネルギー・モデルを法案として提案していた。

オランド大統領は12年の当選当時、16年までに閉鎖する原発として最も古いフェッセンハイム原発のPWR2基(各92万kW)を特定していたが、同法案では、閉鎖設備は事業者の仏電力(EDF)が特定すると明記。設備容量の上限が設定されたことから、同国初の欧州加圧水型炉(EPR)として建設中のフラマンビル3号機(163万kW)が完成する頃には同程度の出力の発電所を閉鎖せざるを得ない状況だ。

審議の過程では、フェッセンハイム原発を技術的な問題以外で早期閉鎖させた場合、政府が支払う費用はEDFへの補償費を含め50億ユーロにのぼるとの報告書が公表されたと伝えられている。

【ベルギー】

2基の再稼働で安全審査の手順見直し

2012年6月に压力容器からヒビの兆候が検知されたベルギーのドール原子力発電所3号機とチアンジュ原子力発電所2号機の本格的な運転再開に向けて、同国の連邦原子力規制局(FANC)とその技術評価組織であるBelV社は10月29日、2段階の安全性審査プロセスの概要を発表した。

これまでに実施した検査の暫定結果で「専門家が予見し得ない結果」が出たことから、事業者であるエレクトラベル社が安全性報告書の作成に当たり、テスト結果を解釈するために提示した方法論の妥当性をまず規制当局側が審査。その結論次第で同報告書自体を審査対象とすべきかを両者が協議するとしている。

両炉の压力容器母材に毛状ヒビが検知された原因として、FANCは鍛造時に材料中の元素組成に偏りが生じ、水素が集まって発生した「白点」の存在を指摘。2013年2月に、再起動前の11要件と再起動後の5要件を満たすようエレクトラベル社に指示した後、「安全な再稼働のために要求した11要件は満たされた」として2013年5月に両炉の運転再開を承認した。

しかし、水素白点のある压力容器母材の試料に強い放射線を照射し、その後機械的耐性試験を行ったところ、理論モデルよりも強く放射線の影響を受けるとの暫定結果が出た。このためエレクトラベル社は、停止日程を前倒して2014年の3月から両炉で第2シリーズの試験を開始するとともに、その結果分析の完了までには数か月かかるとの見通しを6月に表明。また、2014年の夏からは第1、第2シリーズの試験の暫定結果を確認するため、第3シリーズの試験を開始していた。

【チェコ】

深地層処分場建設計画候補地の地質調査開始を承認

チェコ政府・環境省が10月24日付けで、原子力発電所の使用済み燃料と高レベル放射性廃棄物(HLW)の最終地層処分場建設候補となっている7地点すべてで初期段階の地質調査実施を承認していたことが明らかになった。1990年代から進められてきた地質の研究ステージを2000年代初頭に終え、サイト選定作業は、(1)研究、(2)調査、(3)詳細調査——の3段階に区切った地質の調査ステージに入っている。環境省の承認が有効になり次第、放射性廃棄物処分庁(SURAO)は2050年の着工、65年からの操業開始を目標に各地点で処分場建

設適性評価の準備作業を開始する。

ドコバニとテメリン、2つの原子力発電所で合計6基が稼働するチェコでは、これらの既存炉、および将来的に建設される新設炉からの使用済み燃料とHLWを安全に管理するには、深地層で最終処分するのが技術的および経済的にも受入可能な唯一の解決方法と判断。地震活動のない安定した花崗岩、もしくは変成岩の一種である片麻岩の岩盤中に埋設することを検討している。

現在の計画によると、処分場は総面積29.5ヘクタールの地上エリアと地下500mの処分エリアで構成されており、地上には廃棄物を取り扱うサービス建屋や鉄道分岐線などを建設。処分エリアには換気シャフトやトンネル、廃棄物が封入された容器を置く処分室などが整備される。

サイトの選定作業では廃棄物の隔離能力など岩盤特性に関する要件に加え、住民の受容性や利害の対立、地上施設建設の技術的可能性、サイトへのアクセスといった要件を満たすことに主眼を置いたという。地質研究所が複数の地質条件に基づき90年代初頭に提案した27地点の中から、原子力研究所は98年までに潜在的に最も適した13地区を選定。地層情報の収集と分析を通じて5地区に絞ったが、SURAOは2000年代初頭、国際原子力機関(IAEA)勧告に準拠する更なる地域研究により、新たな基準を満たした11地点を特定していた。

その後、2009年までに最も適性のあるとして選定した6地点に加え、かつての軍事エリアの中から一地点を追加。今回の承認を受けて、これら7地点で地表の計測や岩盤の健全性、データ収集、岩盤試料の採取といった地質調査ステージ・初期段階の作業が開始されることになった。具体的には、これら各地で深さ800～1,000mの穴を掘削する適地を特定するため、詳細な地球物理学的・地球科学的地図や地質地図を作成。作業が出来るだけ早急に始められるよう契約業者の選定もすでに進んでおり、2015年内にメインとサブの候補地2地点を絞り込む計画だ。

なお、これらの地点に存在する40の自治体は年間7,200万コルナ(約3億6千万円)にのぼる法定基金の中から、調査期間中を通じて補償金を受領する権利を取得。関連法規に従って、作業に関するすべての情報が伝えられることになるほか、作業を監視することや作業手続きにコメントし、介入する権利も与えられるとしている。

【ロシア】

欧州に拠点設置し、原発建設契約の機会模索

ロシアの原子力総合企業ロスアトム社は10月14日、

欧州で原子力発電所の建設契約獲得の機会を本格的に模索していくため、パリに地域センターを設置したと発表した。

名称は「ロスアトム・フランス」で、原子力発電開発の国際展開促進用マーケティング会社として2011年に立ち上げたロスアトム社の国際ネットワーク子会社という位置付け。同社がチェコのプラハ、ウクライナのキエフ、南アのヨハネスバーグ、およびシンガポールに設置した地域センター・ネットワークの一つとなる。

主要任務は欧州の原子力企業と互恵的な連携関係を構築し、新たな国際的事業チャンスを追求すること。顧客の期待と要件に応じていくため、可能な限り緊密な立場を確保していく考えだ。

ロスアトム社のK・コマロフ副総裁は、フランスでの地域センター設置は世界市場における同社のプレゼンス強化で重要な節目となるだけでなく、フランスおよびその他の欧州企業と協力的な関係を築くための論理的展開であると説明した。

ロスアトム社は2013年フィンランドで、プロジェクト会社の株式34%購入を提案して、ハンビピキ1号機の建設契約を獲得。これに続いてハンガリーでは2014年2月、100億ユーロの融資提供を条件にパクス原発5、6号機増設計画への参加を取り付けた。また、2013年9月には英国政府と原子力平和利用分野での協力了解覚書に調印。同時に、ロシア型PWR(VVER)を英国で建設する可能性評価で、同国のロールス・ロイス社と協力合意に達している。

ロスアトム、原子力エンジニアリング企業を統合

ロシアの総合原子力企業ロスアトム社のS・キリエンコ総裁は10月22日、国際的な原子力市場におけるロシアの競争力を一層強化するため、傘下のエンジニアリング企業の専門的知見を一つに統合すると発表した。原子力輸出を国策に据えた東アジアの新たな勢力の台頭を牽制し、今後一層本腰を入れて数多くの原発建設プロジェクトを国外で受注していく考えだ。

同社は2012年、海外での原発建設請負企業であるアトムストロイエクスポート(ASE)社と、エンジニアリング会社であるアトムエネルギープロジェクト(AEP)社のニジニ・ノブゴロド設計研究所(NIAEP)を合併させてNIAEP—ASE社を設立。今回はこのNIAEP—ASE社を親会社とし、モスクワ市内にあるAEP本社を下部組織に位置付けて、単一のエンジニアリング部門にするとした。

キリエンコ総裁はこの編成について「これら企業の設

計品質を比較して決めたわけではなく、原発建設プロジェクトにおける最終製品である発電設備の重要性を反映させた」と強調。AEPの作業品質と専門家数は相当なものだが、管理システムの効率性ではNIAEP—AEPが勝るとの判断に基づくとした。

同総裁はまた、原子力発電産業が直面する課題として①コスト、②建設期間——の二つを指摘。その上で、「これらに取り組むには効率的なエンジニアリング部門が必要」との認識を示した。中国や韓国がプロジェクト受注活動をかつてないほど積極的に展開するなど、世界市場での競争が激しさを増していることから、「エンジニアリング部門の競争力増強以上に重要なものはない」と断言。子会社同士の内部競争を避ける迅速な統合を指示するとともに、それらが一つのプロフェッショナル・チームになることを明言している。

【南ア】

フランスと原子力協力協定を締結

南アフリカ共和国のエネルギー省は10月14日、フランスと原子力協力に関する政府間の枠組協定に調印したと発表した。2030年までに新たに960万kWの原子力発電設備を建設するという計画の実現に向けた準備作業の一環。同国は9月にもロシアと原子力産業協力と戦略的パートナーシップに関する政府間協定に調印しており、今後も原子炉メーカーを擁する複数の国と同様の協定を結んでいくとしている。

協定では南アにおける原子力技術の国産化や人材の能力開発、研究開発などを明記。フランスとは既存のクバーク原子力発電所(90万kW級PWR2基)の建設を通じて40年来の協力関係にあることから、エネルギー相は新設計画でもそれを元に協力を継続する可能性に言及した。

仏アレバ社も同日、クバーク原発からは取替用蒸気発生器の供給契約を9月に獲得したばかりだとコメント。新設計画には同社製の第3世代+設計である欧州加圧水型炉(EPR)を供給したいとの意欲を示した。

エネルギー相は原子力計画の拡大により、発電に加えて産業化や技能開発など、温室効果ガス排出量の急激な上昇を抑えつつ極めて大きな恩恵に浴することができることを強調。その上、切望されていた質の高い雇用が生み出されるとともに、国家開発計画の成功に不可欠のエネルギー供給が保証された先進的な知識経済を南アにもたらすことになることを指摘している。



平成 23 年東北地方太平洋沖地震後の東海再処理施設の健全性に係る点検・評価の結果について

日本原子力研究開発機構 中野 貴文, 佐藤 史紀, 福田 一仁 ほか

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所 再処理施設(東海再処理施設)のある茨城県東海村において震度 6 弱の地震を観測した。本地震では、東海再処理施設の設計時の想定を超える地震動が観測されたが、建物・構築物および設備に与えた影響について詳細な点検や地震応答解析を踏まえて評価した結果、地震を経験した東海再処理施設の健全性は維持されたことを確認した。その結果について報告する。

I. 経緯, 実施計画

1. 地震時の施設の状況

東北地方太平洋沖地震では、東海再処理施設のある茨城県東海村において震度 6 弱の地震を観測した。その際、東海再処理施設は再処理運転を停止していたものの、施設内には使用済燃料、プルトニウム溶液、高放射性廃液等の放射性物質を貯蔵していた。地震後に実施した目視点検等の結果、設備の状態(負圧, 液位, 温度)に異常は認められず、施設外への放射性物質の漏れいもなかったことを確認した。

しかし、分離精製工場および高放射性廃液貯蔵場等に設置した地震計で東海再処理施設の設計時に想定した最大応答加速度を上回る加速度が観測された(第 1 図参照)。このことから、詳細に施設の健全性を確認することを目的に、各施設の健全性について、点検や地震応答解析および両者の結果を踏まえた健全性の評価(以下、健全性確認)を実施することとした。

なお、東海再処理施設の敷地の北側は新川に面しているが、東北地方太平洋沖地震に伴い発生し新川を遡上した津波の痕跡高は標高約 +4.0m ~ +5.2m であり、再処理施設(標高約 6m)には到達しなかった。

2. 地震観測記録

(1) 地震観測記録の概要

東海再処理施設では、地盤系 2 箇所および建家系 3 箇所に地震計を設置している。これらを含むすべての地震観測記録については、平成 23 年 8 月 30 日に公開¹⁾(平成 23 年 10 月 28 日に一部補正²⁾)している。

Integrity Check of Tokai Reprocessing Plant after the Tohoku Region Pacific Coast Earthquake: Takafumi NAKANO, Fuminori SATO, Hidetomo SHIROUZU, Ryuji NAKANISHI, Kazuhito FUKUDA, Ikuya TACHIBANA.

(2014 年 10 月 10 日 受理)

なお観測記録がない建物・構築物の健全性評価にあたっては、地盤系地震計の地震観測記録から表層地盤の影響を取り除き、解放基盤表面(T.P. -303.0m)における推定地震動(はざとり波)を算定し、これを入力地震動として地震応答解析を行った。算定したはざとり波の加速度応答スペクトルを第 2 図に示す。

3. 健全性確認の計画

健全性確認の実実施計画の概要を以下に示す。

(1) 点検・評価の対象

点検・評価は、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律に基づく認可申請の対象となる全ての建物・構築物および設備で、分離精製工場、高放射性廃液貯蔵場、プルトニウム転換技術開発施設など 35 施設について実施した。

(2) 点検・評価の手法

耐震重要度の高い建物・構築物および設備については、点検と地震応答解析を実施し、両者の結果を踏まえて健全性を評価、それ以外の建物・構築物および設備については、点検結果等により健全性を評価した。

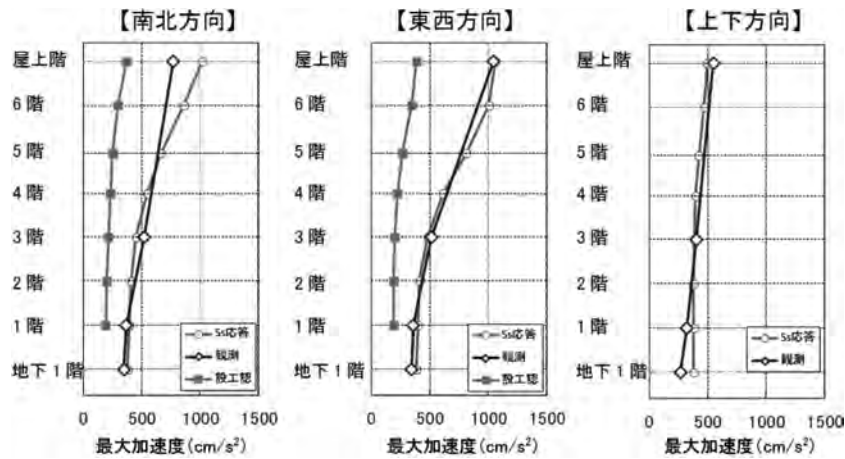
点検の方法については、対象とする建物・構築物の構造形式、設備の種類・設置方法等ごとに地震時に想定される影響を検討した上で決定した。目視点検、作動試験等を基本として行い、これらの点検により健全性が十分確認できない場合は、非破壊検査、分解点検等の点検を追加して実施することとした。

地震応答解析は、地震観測記録に基づき作成した入力地震動を用いて実施した。

II. 建物・構築物の点検・評価結果

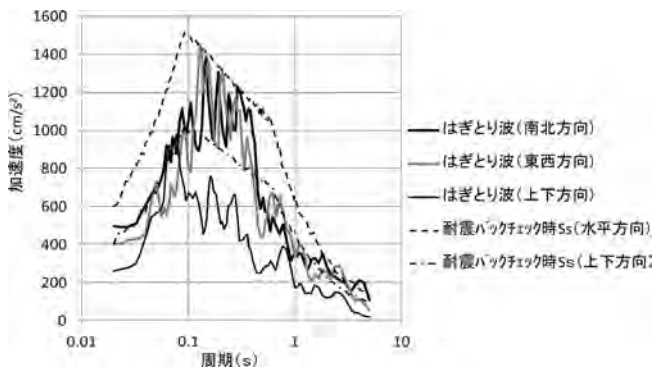
1. 点検・評価に関する基本的な考え方

本地震が東海再処理施設の建物・構築物に与えた影響について、詳細な点検や地震応答解析を行い、この結果



※ Ss 応答：H18 年に耐震設計審査指針が改訂されたことを受け実施した耐震バックチェック時に設定した基準地震動 Ss (解放基盤表面：水平 600Gal、上下 400Gal) に対する分離精製工場建家の応答結果

第 1 図 分離精製工場で観測された最大加速度分布

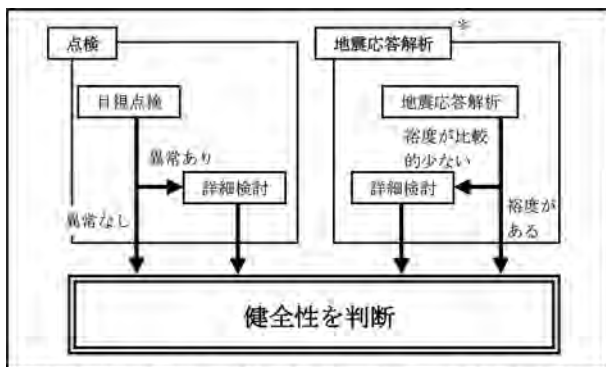


第 2 図 はぎとり波の加速度応答スペクトル

第 1 表 建物・構築物の点検結果(ひび割れ)

		地震によるひび割れ発生状況 ひび割れ長さ(m)	
		最大幅 1.0mm 未満	最大幅 1.0mm 以上
建 物	S クラス相当 (分離精製工場等)	合計 約 700m	分離精製工場 最大幅 1.0mm, 長さ 2.0m
	S クラス相当以外 (ウラン貯蔵所等)	合計 約 1,100m	なし
構 築 物	S クラス相当* (主排気筒等)	合計 約 3,100m	主排気筒 最大幅 1.0mm, 長さ 13.3m
	S クラス相当以外* (第一附属排気筒等)	合計 約 1,600m	トレンチ T6 最大幅 1.2mm, 長さ 0.7m トレンチ T18 最大幅 1.0mm, 長さ 2.0m

※：入溝して点検を行うことができないトレンチは、入溝できるトレンチの点検結果を代表とした代替点検により判断。



*点検の実施が困難なため、点検の代替として地震応答解析を行うとしたものについても対象とする。

第 3 図 点検・評価に関する基本的な考え方

を踏まえて健全性を判断した。点検・評価に関する基本的な考え方を第 3 図に示す。

2. 建物・構築物の点検

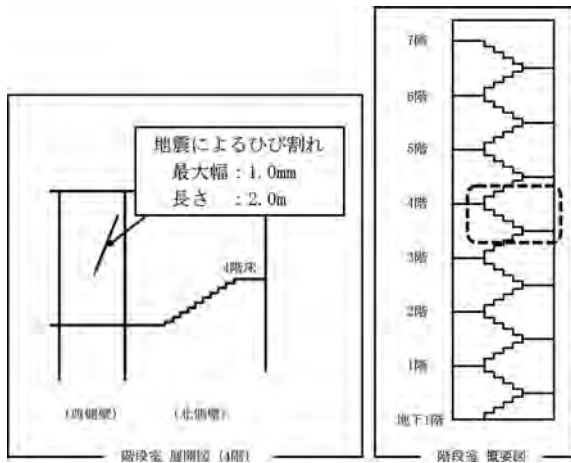
(1) 点検・評価の対象

点検・評価の対象は、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律に基づく認可申請の対象となる全ての建物・構築物とした。具体的には分離精製工場等の建物 35 棟、排気筒、トレンチ等の構築物 37 基である。

(2) 建物・構築物の点検方法および結果

点検・評価の対象とした建物・構築物のうち、鉄筋コンクリート構築物(鉄骨鉄筋コンクリート構築物を含む)については、ひび割れおよび剥離・剥落の有無について、コンクリート診断士等による目視点検を実施した。点検により把握した地震によるひび割れを第 1 表に示す。点検の結果、地震に起因すると考えられるひび割れが認められたが、いずれも微細なものであり、構造強度上問題となるものではなかった。以下に点検結果の概要を示す。

(a) 分離精製工場における最大幅 1.0mm 以上のひび割れは(第 4 図参照)、階段室の壁面に生じていたが、一般に、鉄筋コンクリート構造の建物への地震影響としては、最初に階段室や非構造壁にひび割れ等が発生することが知られており、この箇所は地震による影響を比較的受けやすかったものと考えられる。



第4図 ひび割れの発生状況
分離精製工場 階段室(4階)

- (b) 主排気筒における最大幅 1.0mm 以上のひび割れは、地上 70m 近傍に筒身全周にわたり生じて、一部が幅 1.0mm となっていた。これは地震により筒身に曲げ変形が生じたこと、筒身の構造が 70m 近傍で変化するため¹⁾、ここに応力が集中したことが原因と考えられる。
- (c) トレンチ T6 におけるひび割れは、ひび割れ発生場所の上部に配管が貫通する開口部があったため、地震時、開口部に局所的に応力が集中したことが原因と考えられる。
- (d) トレンチ T18 におけるひび割れについては典型的な地震によるひび割れとは特徴が異なることから、地震前から生じていた細かなひび割れ(乾燥収縮ひび割れ)が地震時に開いた可能性と考えられる。
- (e) コンクリートの剥離・剥落については、Sクラス相当以外となるトレンチ T17 内に 2 か所(縦 0.5m × 横 0.7m, 縦 0.1m × 横 0.1m)確認されたが、ジョイント部の端部に生じているもので、構造上は問題ないと判断した。

なお、今回の点検で確認した地震によるひび割れ、剥離・剥落については、全て補修済みである。

鋼構造物については、部材の変形・座屈・破断、溶接接合部のきれつ・破断、ボルト接合部の破断・緩み等の有無について目視点検を実施した結果、異常は認められなかった。

3. 建物・構築物の地震応答解析評価

(1) 解析評価の対象

分離精製工場など耐震重要度の高い建物・構築物(Sクラス相当)について地震応答解析、評価を実施した。

¹⁾主排気筒は、70m 近傍にて、筒身内の鉄筋がダブル(筒身内の外面と内面に二列設置)からシングル(筒身内に一列のみ設置)に切り替わる。

(2) 解析評価の方法

(a) 入力地震動の作成

a) 地震観測記録がある建物・構築物(基礎版入力)

建家に設置した地震計により地震観測記録が得られている建物・構築物については、基礎版上の地震計の観測記録と基礎版の伝達関数より建家入力位置である基礎下端での地盤応答波を求め、解析モデルの入力地震動とした。

b) 地震観測記録がない建物・構築物(はざとり波入力)

建家に地震観測記録のない建物・構築物については、I.2(1)で算出した解放基盤表面における地震動(はざとり波)を用い、1次元波動論による地盤応答解析を行い、建家入力位置である基礎下端での地盤応答波を求め、解析モデルの入力地震動とした。

(b) 地震応答解析モデル

地震応答解析は大別して以下の解析モデルにより実施した。

a) スウェイロッキングモデル(SRモデル)

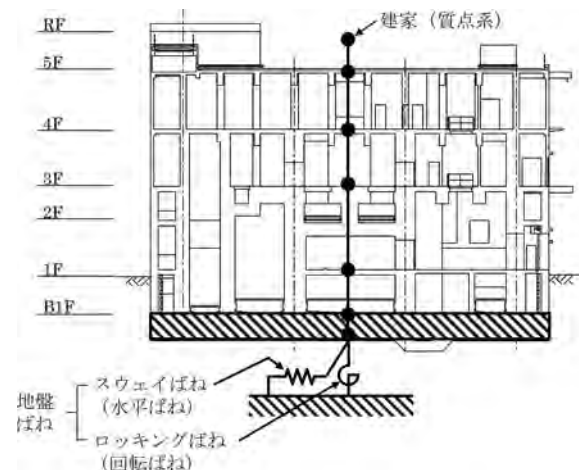
構造物の荷重を支持地盤に直接伝える基礎形式、すなわち直接基礎である分離精製工場、高放射性廃液貯蔵場、ガラス固化技術開発棟、主排気筒、第二付属排気筒等について、SRモデルを用いた解析を行った。

SRモデルを採用した解析モデルの例として高放射性廃液貯蔵場水平方向の解析モデルを第5図に示す。

SRモデルは基礎底面下の地盤を等価な地盤ばね(スウェイばね、ロッキングばね)に置換したモデルであり、上部建家については基準床レベルに質量を集中させ、その間を曲げ、せん断要素で連結してモデル化した。

地盤ばねの算定については、原子力発電所耐震設計技術規程³⁾に基づき、基礎底面の地盤ばねは底面下の地盤を等価な半無限地盤とみなして振動アドミタンス理論に基づき評価することを基本とした。

b) 2次元FEMモデル



第5図 質点系SRモデルを用いた解析モデルの例
(高放射性廃液貯蔵場 水平方向)

基礎形式が杭基礎であるガラス固化技術管理棟、中間開閉所、第二中間開閉所等については建家－杭－地盤相互作用効果を考慮するため、2次元 FEM モデルを用いた解析を行った。

2次元 FEM モデルを採用した解析モデルの例として中間開閉所水平方向の解析モデルを第 6 図に示す。

建家を質点系、杭を梁要素、地盤を 2 次元有限要素とした地盤－杭－建家連成モデルである。地盤のモデル範囲は建家幅の 2.5 倍以上とし、鉛直方向は建家幅の 2.0 倍以上として地表から解放基盤表面とする。建家のモデルは水平方向を等価なせん断要素で連結し、鉛直方向を軸ばねで連結した質点系モデルとする。

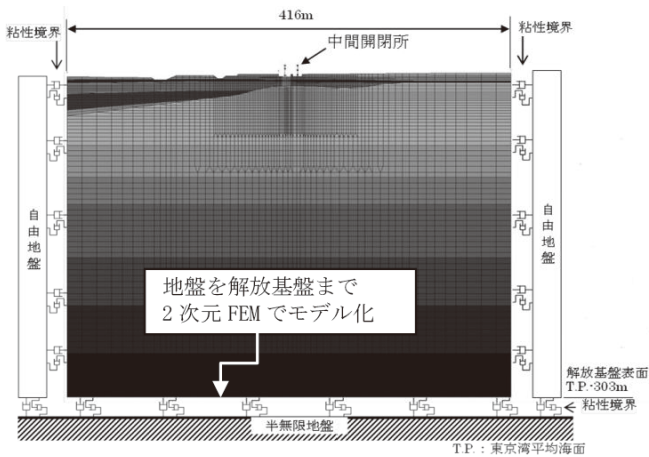
(3) 地震応答解析結果

(a) 地震観測シミュレーション

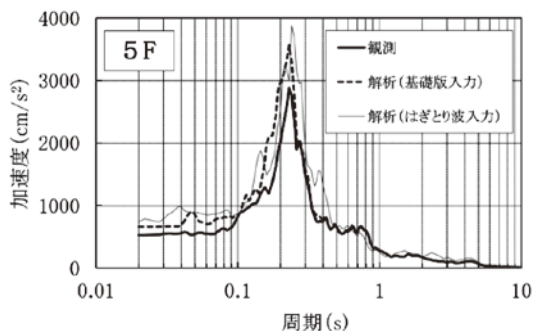
解析モデルの妥当性を評価するために、建家系地震計を設置している施設に対して、地震観測シミュレーションを実施し解析結果と観測記録の比較を行った。

建家系地震計の観測記録がある高放射性廃液貯蔵場の 5F における加速度応答スペクトルについて基礎版入力およびはぎとり波入力の解析結果ならびに観測記録の比較を第 7 図に示す。加速度応答スペクトルは基礎版入力、はぎとり波入力の両手法とも観測記録とおおむね整合しており、解析モデルの妥当性を確認した。

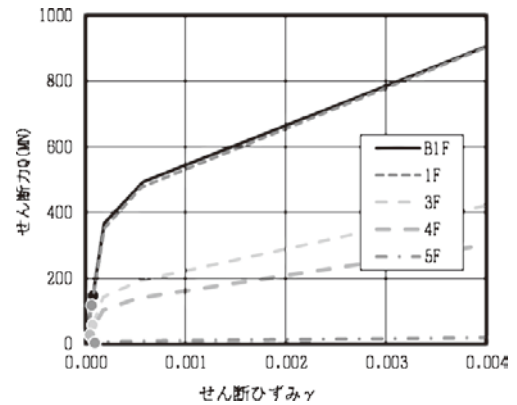
(b) 評価結果



第 6 図 2 次元 FEM モデルを用いた解析モデルの例



第 7 図 加速度応答スペクトルの比較
(高放射性廃液貯蔵場 NS 方向)



第 8 図 評価結果の例(せん断スケルトン曲線)

評価結果の例として、第 8 図に高放射性廃液貯蔵場の地震応答解析による評価結果を示す。

中間開閉所以外の高放射性廃液貯蔵場等の建物については、せん断ひずみ(変形)が小さく、最大でもせん断ひずみはせん断スケルトン曲線(せん断力とひずみの関係を表した曲線)の第 1 折れ点から第 2 折れ点の間に位置しており、大きく塑性変形する領域に達しておらず、おおむね弾性範囲にあることを確認した。

中間開閉所については、せん断ひずみ(変形)が大きく、弾性範囲を超える結果が得られたことから、追加点検等を実施し、構造強度上問題となるひび割れが無いことを確認した。

なお、その他構築物(主排気筒、トレンチ等)についても、評価基準を満足することを確認した。

4. 建物・構築物の健全性評価

点検の結果、全ての建物・構築物において構造強度上問題となるひび割れや異常は確認されておらず、健全性が確保されていると考える。

S クラス相当の建物・構築物を対象に実施した地震応答解析では、中間開閉所を除く建物・構築物について、おおむね弾性範囲にあることを確認しており、これらの建物・構築物については、解析結果からも健全性が確保されているものと評価した。中間開閉所については、地震応答解析にて弾性範囲を超える結果が得られたが、追加点検等で構造強度上問題となるひび割れがないことを確認した。解析結果および現地状況に差異が生じた理由は、採用した解析モデルおよび解析手法(コンクリート強度、減衰、相互作用効果等)に保守性が含まれているためと考えられる。

なお、中間開閉所については、耐震補強工事を計画している段階で本地震を受けたが、その後、耐震補強工事を実施済み(平成 24 年 9 月完了)であり、耐震強度はさらに向上している。

以上のように、点検および地震応答解析の結果から、全ての建物・構築物において、健全性が確保されているものと判断した。

Ⅲ. 設備の点検・評価結果

1. 点検・評価に関する基本的な考え方

本地震が設備に与えた影響について、建物・構築物と同様に詳細な点検や地震応答解析を行い、この結果を踏まえて健全性を判断した。

2. 設備の点検

(1) 点検・評価の対象

点検・評価の対象は、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律に基づく認可申請の対象となる全ての設備であり、約 18,000 設備である。

(2) 点検の方法

点検・評価の対象とした設備については、各設備が地震を受けたことを考慮し、地震の影響が及ぶ可能性のある部位に着目した点検を行う必要があるため、点検対象設備を地震による機能・構造への影響が類似していると考えられる機種に分類した。

地震の影響が及ぶ可能性のある部位に着目した点検方法を策定するにあたっては、機種毎に要求される機能の整理と設備への地震力付加によって地震応答が過大となった場合に考えられる損傷要因の想定を行った。そのうえで、それに起因して生じる現象、損失する機能、損傷形態、損傷状況が判断できる有効な点検方法を損傷形態として整理し、各設備の特徴に応じて、目視点検、漏えい試験、作動試験等の所定の点検方法を策定した。

なお、同一機種の場合であっても、損傷要因、損傷形態等が異なるものについては、さらに詳細な分類を設け、それぞれについて損傷形態を整理（全 287 種類）した。また、再処理施設では施設特有の設備が多数あるため、基本となる設備（ポンプ、送排風機等）の損傷形態を基に、各施設に熟知した技術者がそれぞれの設備の損傷形態を整理した。

点検の実施にあたっては、設備の設置状況等を踏まえ、点検方法の工夫、合理化を図りながら点検を実施した。以下に具体的な点検方法を記す。

- (a) 再処理施設では、設備がセル内に設置されている等、施設特有の状況が多数あるが、可能な限り作業員がセル内等に入域し、直接目視点検を行うことを基本とした。
- (b) 高線量下に設置されている等、設置状況等により目視点検等が困難な設備については、カメラによる遠隔目視や構造が類似している設備の点検結果を代替とし、これらが適用できない場合は地震応答解析の結果を代替とした。
- (c) 設備の一部の部位の点検が困難な場合は、構造強度等を考慮し、他部位の点検結果を代替とした。
- (d) 配管およびダクトのように類似設備が多数存在する場合は、設計時の余裕度、仕様、使用条件等から、地震時に発生する応力と許容応力の比が最も厳

しくなるものを代表として選定し、点検の合理化を図った。

- (e) 点検・評価対象設備のうち、一般高圧ガス保安規則、ボイラおよび圧力容器安全規則等に基づき休止中の設備の漏えい試験や作動試験等については、使用再開時に法令に基づき実施することとした。

(3) 点検結果

点検対象の約 18,000 設備について、目視点検、漏えい試験、作動試験等の所定の点検を実施した結果、12 件の不具合が認められた。これら 12 件の不具合は、全て耐震 B,C クラス相当設備に生じたものであり、S クラス相当設備に不具合はなかった（第 2 表参照）。

当該 12 件の不具合のうち 11 件は、地震直後の点検で確認された不具合であり、工業用水および呼吸用圧縮空気配管の損傷や屋外に設置されている硝酸貯槽の基礎の傾き等である。

地震後の点検で新たに認められた 1 件の不具合は、スラッジ貯蔵場のスラッジ貯槽の据付ボルトがベースプレートから浮き上がった事象であり、当該貯槽はセル内に設置されているため、地震直後の点検では確認されなかった。

(4) 不具合事象のまとめ

12 件の不具合事象は、全て耐震 B, C クラス相当設備に生じたものである。

そのうち地震直後の点検で確認された 11 件は、地盤沈下や地震による揺れにより、主に屋外や屋上に設置されている設備や配管に傾斜や損傷が生じたものであり、地震の際に一般の家屋や施設で生じたものと同様の事象であった。このうち 9 件の不具合については、すでに復旧を完了している。残り 2 件の不具合は、ウラン脱硝施設の脱硝運転時に使用する冷凍機（2 機）の付属配管等に損傷が生じたものである。現在は、閉止等の措置を行っており、今後の施設の運転計画に合わせ、計画的に復旧していく予定である。

健全性確認で確認されたスラッジ貯槽の不具合は、地震による揺れによりスラッジ貯槽の据付ボルトが浮き上がったものであるが、これは、当該施設が昭和 40 年代に竣工された古い施設であり、当時想定していた地震力では垂直方向の力を考慮する必要がなく、水平方向の力のみを考慮して施工していたため、今回の事象が生じたものと考えている。現在は復旧が完了している。

水平展開としては、スラッジ貯槽と同様に水平方向の地震力のみを考慮して施工された設備について詳細点検

第 2 表 設備の内訳および不具合事象の件数

	設備数	不具合事象の件数
S クラス相当設備	約 1,500	0
B, C クラス相当設備	約 16,500	12

を実施し、問題のないことを確認している。

3. 設備の地震応答解析評価

(1) 解析評価の対象

地震応答解析評価の対象は、耐震重要度の高い設備 (Sクラス相当設備で約 1,500 設備) および設備点検において目視点検等の実施が困難なため代替として地震応答解析を行うとした設備 (B,Cクラス相当設備で約 100 設備) である。具体的な設備例としては、高レベルの放射性廃液を内蔵する高放射性廃液貯槽やプルトニウム溶液を内蔵するプルトニウム製品貯槽、さらにこれらの放射性物質の外部放散を抑制するためのフィルタ類や排風機等がある。

(2) 解析評価の基本的な考え方

解析評価においては、地震によって各設備に生じる応力評価を通して構造強度評価を実施した。また、非常用発電機等の地震時または地震後においても正常に稼働することが要求されている動的機器については、設備の機能維持という観点から動的機能維持評価も併せて実施した。

(3) 解析評価の方法

(a) 構造強度評価

設計時の余裕度の比較的大きいものについては、応答倍率法 (設計時に用いた加速度と本地震の観測記録に基づく加速度との比を設計時の応力に乗じて発生応力を簡易的に求める方法) を適用した。その他については、原子力発電所耐震設計技術規程³⁾に基づき、簡易モデル (1 質点系梁モデル等) による評価または有限要素法による詳細評価を行った。解析条件については、より現実に近い応答が得られるよう、被災時の設備の状態 (本地震発生時における保有液量、圧力、温度) を考慮した。入力地震動については、地震計を設置している建家は本地震の観測記録を基に、地震計を設置していなかった建家は建家応答解析結果を基に設定を行った。解析で得られた発生応力については、原子力発電所耐震設計技術規程³⁾における評価基準値 (おおむね弾性範囲に留まる許容限界) と比較して評価の判定を行った。

(b) 動的機能維持評価

動的機能維持評価は、地震時または地震後に動的機能が要求される動的機器 (非常用発電機、排風機等約 90 設備) を選定し、選定した動的機器の応答加速度と原子力発電所耐震設計技術規程³⁾ およびブルーツプロワの地震時の動的機能維持評価に関する研究⁴⁾ における機能確認済加速度を比較して評価の判定を行った。

(4) 解析評価の結果

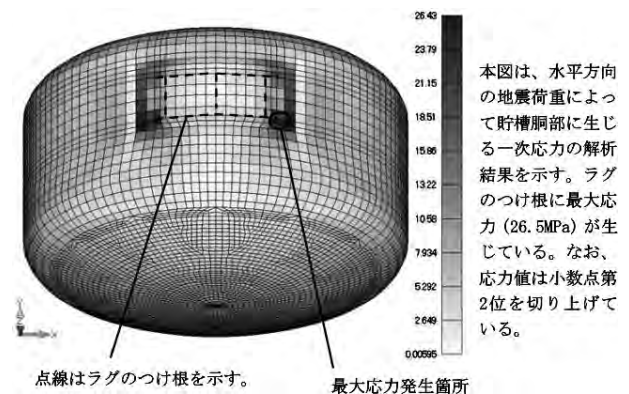
(a) 構造強度評価結果

構造強度評価を行った結果、全ての評価対象設備で本地震における発生応力が評価基準値内に納まることを確認した。

構造強度評価結果の例として、高放射性廃液貯蔵場に設置されている高放射性廃液貯槽について紹介する。当該貯槽については、FEM 解析にて評価を実施した。当該貯槽は、直径約 6.8m、総重量約 143t の貯槽であり、周囲 4 箇所のラグで建家の梁に据付ボルト (M48 × 4 本 / ラグ) で固定している。通常状態で貯槽へ生じる応力は、自重荷重 (内包液による水頭圧含む) によるものと、内圧荷重 (崩壊熱除去のため、冷却ジャケットに約 0.3MPa の内圧が負荷されている) によるものがある。地震発生時には、これらの荷重に加え、地震荷重 (水平方向成分および鉛直方向成分) による応力が生じることとなる。解析においては、これらの各荷重についての応力をそれぞれ算定し、それらの応力を組合せて設備に生じる総合的な応力を求め、評価基準値と比較している。各荷重における解析結果の例として、水平方向の地震荷重によって貯槽の胴部に生じる応力図を第 9 図に示す。また、各荷重における解析結果の組合せ例を第 3 表に示す。

(b) 動的機能維持評価結果

動的機能維持評価では、非常用発電機等を含め、全ての動的機器で本地震における応答加速度が機能確認済加速度を下回り、動的機能維持について問題がないことを確認した。



第 9 図 高放射性廃液貯槽の地震荷重による発生応力図

第 3 表 各荷重における発生応力とその組合せ例

評価部位	応力分類	発生応力 (MPa)				組合せ応力 ※	評価基準値 (MPa)	判定
		自重荷重 (水頭圧含む)	内圧荷重	地震荷重				
				水平方向成分	鉛直方向成分			
a	b	c	d					
胴 (冷却ジャケットを含む)	一次	25.7	25.2	10.0	3.3	62	175	良
	一般膜	32.4	52.6	26.5	4.2	112	262	良
据付ボルト	引張	8.7	0.0	3.5	1.3	13	136	良
	せん断	3.1	0.1	45.4	0.5	49	118	良

※：地震荷重は水平方向成分と鉛直方向成分を SRSS 法にて合成。他の荷重は絶対和とした。a+b+ $\sqrt{c^2+d^2}$ 小数点第 1 位を切り上げ。

4. 設備の健全性評価

点検対象の約 18,000 設備について所定の点検(目視、漏えい、作動等)を実施した結果、12 件の不具合が確認されたが、いずれも耐震重要度の高い設備ではなく、再処理施設の安全を阻害する可能性のない事象であった。12 件の不具合のうち、10 件の不具合についてはすでに復旧を完了している。復旧が完了していない 2 件の不具合(冷凍機の不具合事象)については、当該設備が設置されている施設は現在運転を停止しているため、系統内の冷水の抜き出しや関連施設への波及防止措置を行っている。上記の点検に加えて地震応答解析を実施した耐震重要度の高い設備(点検が困難なため代替として地震応答解析を行うとした設備を含む)については、解析の結果、全ての設備について評価基準を満足していることを確認した。

以上のように、点検および地震応答解析の結果から、設備について、健全性が確保されているものと判断した。

IV. まとめ

本地震では、東海再処理施設の設計時の想定を超える地震動が観測されたが、建物・構築物および設備への影響について詳細な点検や地震応答解析を行い、両者を踏まえて評価した結果、地震を経験した東海再処理施設の健全性は維持されたことを確認した。

また、再処理施設は、発電用原子炉施設と比較して対象施設、設備数が多く、セル内に設置されているためアクセスができない機器が存在する等、困難な点が多数あったが、施設特有の状況を踏まえ、点検方法の工夫、合理化を図りながら、全ての健全性を確認することができた。

なお、復旧が完了していない 2 件の不具合については、今後、施設の運転開始までに計画的に復旧する予定

である。

今回の健全性評価結果については、今後の地震・津波対策のために活用する。

— 参考資料 —

- 1) <http://www.jaea.go.jp/02/press2011/pl11083002/san01.pdf>
- 2) <http://www.jaea.go.jp/02/press2011/pl11102801/be.pdf>
- 3) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術規程：JEAC4601-2008.
- 4) 日本原燃 日立製作所：ルーツプロワの地震時の動的機能維持評価に関する研究：平成 6 年.

著者紹介

中野貴文 (なかの・たかふみ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 原子力安全工学, 耐震工学, リスク評価, 計装システム

佐藤史紀 (さとう・ふみのり)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 燃料再処理, 廃棄物処理

白水秀知 (しろうず・ひでとも)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 耐震工学, 燃料再処理

中西龍二 (なかにし・りゅうじ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 耐震工学

福田一仁 (ふくだ・かずひと)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 燃料再処理, 高経年化対策

立花郁也 (たちばな・いくや)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 原子力安全工学, 耐震工学

解説シリーズ

UNSCEAR2013 レポートの概要

第3回 福島報告：ヒト及びヒト以外の生物種への影響

放射線医学総合研究所 酒井 一夫, 栗原 治

東京電力福島第一原子力発電所事故に関する UNSCEAR2013 レポート¹⁾では、放射性核種の放出・拡散・沈着および線量の評価に引き続き、第VI章でヒト(公衆および作業員)に対する影響を取り上げている。また、第VII章では、ヒト以外の生物種について線量と影響が評価されている。本稿では、これらに加え、福島事故の長期的な影響を理解するために取り組むべき課題の提言(第VIII章)を合わせて紹介する。

I. はじめに

ヒトへの影響については、まず報告書取りまとめの時点ですでに観察されていた影響について述べている。次いで、将来にわたって予想される健康影響を取り上げている。将来にわたる健康影響の検討にあたっては、本報告書において評価された線量(報告書第IV章および第V章。本解説シリーズ第2回参照)に基づき、線量と影響の関係に関するリスクモデルを用いて推定している。また、今後の健康状況のフォローアップ体制についても触れている。

ヒト以外の生物種については、放射性核種の沈着に係るデータ(報告書第III章。本解説シリーズ第1回参照)に基づいて線量の評価を行ったうえで、これまでに蓄積されている線量と影響との関係に照らした検討をしている。

II. 一般公衆への影響

1. 健康影響の現状

一般公衆においては、放射線被ばくを原因として生じうる急性の健康影響は見られていない。このことは、一般公衆の被ばくが、被ばく後、早期に現れるような健康影響が生じる線量(しきい線量)を大きく下回っていると本報告書の評価と一致する。

2013年7月末までに福島県に居住する約17万5,000人の小児が高感度の新型超音波機器を使った甲状腺検査

を受けた²⁾。調査対象者の約40%において甲状腺嚢胞(液体がたまった袋状の構造)が見つかり、約1%で甲状腺結節(しこり。嚢胞の内部が液体ではなく、中身が詰まったもの)が見つかった。類似の高性能の機器を使用し、約4,000人の小児及び青年期の人を対象とした調査が、事故の影響をほとんど受けていない長崎、青森、山梨でも行われ³⁾、観察された甲状腺嚢胞及び結節の発生率は福島県で観察された発生率よりも高かった。これは、当該調査での嚢胞と結節の高い発見率は、検査が集中的で、使用機器の感度が高いことが原因であり、事故によって付加された放射線被ばくによるものでないことを示唆している。

また、精神的な健康の問題と平穏な生活が破壊されたことが、事故後に観察された主要な健康影響を引き起こした。これは、地震、津波、原発事故の多大な影響、及び放射線被ばくに対する恐怖や屈辱感への当然の反応の結果であった。公衆においては、うつ症状や心的外傷後ストレス障害などの心理的な影響が観察されており、健康に深刻な影響を及ぼす可能性がある。

さらに、本報告書の検討対象外ではあるが、放射線とは関係のない健康への影響も見られた。たとえば、50人以上の入院患者が、低体温症や脱水症状、基本的な医療上の問題の悪化により、避難中又は避難直後に死亡したと報告されている⁴⁾。多くの人は地震、津波、原発事故を原因とする困難な状況に苦しみ、さまざまな危険にさらされることにより、身体の疾患症状が強まった可能性がある。

2. 将来の健康リスクの推定

UNSCEARでは、日本の一般住民における固形がんの生涯ベースラインリスク(放射線を受けない場合のリスク)は約35%であり、全身吸収線量100 mGyを急性

Outline of UNSCEAR 2013 Report (3) : Health implications on humans and assessment of dose and effects on non-human biota : Kazuo SAKAI, Osamu KURIHARA.

(2014年9月1日受理)

■前回のタイトル

第2回 福島報告：公衆及び作業員の線量評価

被ばくした場合には、生涯リスクが約1.3%高まると推定している⁵⁾。事故後、1年の間に成人避難者が受けた平均実効線量と、避難区域外で最も影響を受けた地域の成人の平均生涯実効線量は、いずれも最大で約10 mSvと推定された。このような低い線量でのがんや遺伝性疾患のリスクは、リスクが線量と直線的に比例するというモデルを適用すれば、計算することはできるが、その値はベースラインの統計的ばらつきに比べると小さいとしている。小児において線量の推定値が高いことを考えても、被ばく集団での全固形がんの発生率は、ベースラインリスクに比べて識別できる (discernible) ほど上昇するとは考えられない。

放射線によりがんが発生しやすい臓器および感受性の高い年齢層についての個別のリスク推定は次の通り。

(1) 甲状腺がん

事故後、1年間の成人の平均甲状腺吸収線量は数十 mGy の範囲内であり、甲状腺がんのリスクは低いと考えられる。

日本の10歳の小児と1歳の乳児で生涯の間に甲状腺がんが発症するベースラインリスクは、約200人に1人だが⁶⁾、非常に感度の高い超音波検査では発見率が数倍上昇することがある。UNSCEARでは事前に、10歳で被ばくし、その甲状腺吸収線量が200 mGyと仮定した場合、リスクはほぼ倍増すると推定した⁵⁾。

事故による被ばくについては、避難した1歳児の平均甲状腺吸収線量は最大で約80 mGy、避難区域外の乳幼児については最大で約50 mGyと推定した。甲状腺吸収線量のほとんどは、疫学的な研究で甲状腺がんの過剰な発生率が観察されない範囲内だった。ただし、線量が推定の幅の上限に近い場合には、線量とリスクの間に直線的な関係を仮定し、かつ集団が大きければ、甲状腺がんの発生率が識別できるほど上昇する可能性はある。実際には、線量分布に関する情報が不十分であり、比較的高い甲状腺線量を受けた幼児および小児について識別可能な程度に甲状腺がんの発生率が上昇する可能性について確固たる結論を導くことはできないが、線量が大幅に低いため、チェルノブイリ原発事故後に観察されたような多数の甲状腺がんの発生を考慮する必要はない。

(2) 白血病

日本における白血病の生涯発生率のベースラインは約200人に1人(0.5%)であり、小児白血病については約1,500人に1人(0.07%)である⁷⁾。UNSCEARは事前に、日本の一般公衆について放射線照射による白血病のリスクを評価しており⁵⁾、1 Gyの赤色骨髄吸収線量を受けた0～9歳の小児の被ばくによる生涯リスクは、0.11%から0.85%の範囲になると推定している。福島事故では、避難した乳幼児と避難区域外の乳幼児のいずれの場合も、事故後1年間の赤色骨髄吸収線量が最大で約10 mGyと推定されており、線量や被ばくした集団が小

さいことを考慮すれば、小児白血病の増加が識別できるとは予想されない。

(3) 乳がん

日本人女性における乳がんの生涯ベースラインリスクは約5.5%である⁶⁾。放射線によるリスクの増加は、100 mGyあたり0.3%とされている⁵⁾。避難前および避難中の女性の平均乳房吸収線量は10 mGy未滿と推定されており、放射線による乳がん発生率の上昇が識別可能レベルに達するとは予測されない。

(4) 出生前被ばくの影響

福島事故による出生前被ばくが原因で、流産、周産期死亡率、先天的な影響又は認知障害の発生率が上昇するとは考えにくい。小児白血病などの小児がんの発生率の識別可能な上昇につながるとは予測されない。

3. 福島県民健康管理調査

福島県民健康管理調査⁸⁾は、「県民の被ばく線量の評価を行うとともに、県民の健康状態を把握し、疾病の予防、早期発見、早期治療につなげる」ために開始された。この中には、事故発生時の福島県の住民200万人全員の外部放射線被ばくを推定するための調査のほか、小児の甲状腺超音波検査、精神健康生活習慣調査、妊娠・出産調査などが含まれている。この調査は、30年間継続するよう計画されている。

甲状腺超音波検査は、2011年3月11日に18歳以下であった福島県民全員(約36万人)を対象として実施されている。第1回目の検査は3年で(2014年3月までに)完了し、対象者が20歳になるまでは2年ごとに、その後は5年ごとに検査を受ける。

福島県での継続的な超音波検査では比較的多くの甲状腺異常(がんを含む)が発見されると見られるが、これは通常、このように集中的な検診がなければ検出されないものと考えられる⁶⁾。甲状腺がんは、臨床的な疾患のない対象者でも検死解剖で見つかることがよくあり、当該調査でも、このようながんが見つかる可能性が高い。事故の影響を受けていない地域における集団の甲状腺がん発生率の調査は、そのような集中的な検診の影響を推定するのに有用な情報を提供することとなる。

III. 緊急時作業員への影響

1. 健康影響の現状

緊急時作業に従事した作業員について、放射線被ばくが原因で生じた可能性のある急性の健康影響(急性放射線症や他の確定的影響)や死亡は確認されていない。

元請業者の作業員3人が2011年3月、足と下肢の皮膚がタービン建屋の放射能汚染水に曝露された後に入院した。線量は皮膚に何らかの傷害を起こすとされるしきい線量を大きく下回っていたことが確認されており、当該作業員は4日後に退院した。長期的にも大きな影響が

生じるとは考えられない。

放射性ヨウ素の甲状腺への取り込みを予防するため、緊急時作業に従事していた約 2,000 人の作業者に約 1 万 7500 錠のヨウ化カリウムが投与された⁹⁾。14 日を超えて長期にわたってヨウ化カリウム錠を繰り返し摂取した作業員および 20 錠を超えて大量に摂取した作業員約 230 人が健康診断を受けたが副作用の報告はなかった。

当初の観察では、緊急時作業に携わった福島第一原発作業員の間で重篤な心理的影響が認められた¹⁰⁾。このような影響は、地震、津波、非常に過酷な作業環境、家族の死亡、家族との別離、緊急時作業中の困難な住環境、将来における放射線の影響の可能性に対する懸念、放射線作業員であることに関連した差別と屈辱感の影響による苦痛と不安など、数多くの原因が考えられる。

2. 将来の健康リスクの推定

(1) 確定的影響のリスク

13 人の作業員が¹³¹I の吸入により 2～12 Gy の範囲で甲状腺吸収線量を受けたと見られている(平均線量約 5 Gy)。線量推定に伴う不確かさと人数を考慮すれば、被ばく線量の高い作業員での甲状腺機能低下症の可能性を排除できないが、その可能性は低い。被ばく量の最も高い作業員でも放射線被ばくによる心血管疾患のリスクは非常に低い。また、作業員の眼水晶体のベータ線の被ばくに関する情報は不十分であり、白内障のリスクについては評価できない。

(2) 発がんのリスク

ほとんどの作業員では(2012年10月31日現在、2万4832人の99.3%)、実効線量は低く(100 mSv未満)、平均して約 10 mSvであった。推定値に伴う不確かさを考慮に入れても、大多数の作業員の線量は、疫学的にがんのリスクが上昇すると実証されている線量を下回っている。直線的なリスクモデルを適用すれば、このような線量でもリスクの増加が示唆されるが、その程度は小さく、このグループの作業員で、放射線被ばくを原因とする健康影響が識別可能なほど大きくなることは予測されない。

2012年10月31日現在、作業員のうち約0.7%に相当する173人が100 mSv以上の実効線量を受けた(平均線量は約140 mSv)。このグループでは、がんのリスクが少し高まると予測される。この被ばく作業員集団の場合、ベースラインリスクが約40%であることから、自然発症的に生じるがんが約70症例あることになる。それに対して被ばくによるがんの発症は約2～3症例増すと推定される。ただし、このような予測には大きな不確かさが含まれる。がん発生率や他のリスク要因などに関する疫学的不確かさを考慮すれば、被ばくによるがんの発生率上昇が識別できるようになるとは予想されない。ただし、甲状腺がんと白血病に関しては注意を払う必要

がある。

(3) 甲状腺がん及び白血病

約2,000人の作業員が100 mGyを超える甲状腺吸収線量を受けた。しかしながら、推定されるリスクの規模では、この作業員グループ内での甲状腺がんの発生率上昇を識別できる可能性は低い(放射線被ばくによる発生率の上昇は、ベースライン発生率に伴う統計的ばらつきに比べて小さい)。

甲状腺がんのリスクは、2～12 Gyの範囲で甲状腺吸収線量を受けた13人の作業員グループでは特に高いが、かかる線量で被ばくした作業員の人数が少なすぎるため、甲状腺がんの発生率上昇を識別できない。白血病リスクに関わる赤色骨髄吸収線量は、これらの作業員で最大100 mGyになると推定されたが、当該作業員の数が少ないため、白血病の発生率上昇を識別できるとは予測されない。

3. 長期健康管理

厚生労働省は2011年8月、「東電福島第一原発作業員の長期健康管理に関する検討結果」を発表した¹¹⁾。福島第一原発サイトでの緊急時及び復旧時の管理に従事した作業員の被ばく・健康記録を含むデータベースが構築され、被ばくレベルが最も高い作業員に対しては、年次眼検査(水晶体混濁)と甲状腺、胃、大腸そして肺におけるがんに関するモニタリングを含む特別な健康診断が実施される。超音波検査によって必然的に甲状腺がんの発見率の上昇が見込まれるが、検出される症例のほとんどは、放射線被ばくとは関係なく生じたものと予測される。

IV. ヒト以外の生物種への影響

ヒト以外の生物種への影響について、UNSCEARではすでに、1996年及び2008年に取りまとめを行い、100 µGy/h未満の慢性的な線量率は、ほとんどの陸生生物群集の個体群に重大な影響を及ぼす可能性は低く、400 µGy/h未満の線量率は水生生物群集レベルでは有害な影響を及ぼす可能性が低いとしている¹²⁾。

1. 陸生生物種への線量と影響

2011年6月に測定された動物体内の放射性核種濃度から、陸生哺乳類と鳥類は¹³⁷Csが沈着した地域で1.2～2.2 µGy/hの線量率で被ばくしたと推定された。この線量は、環境内で自然に存在する放射性核種からの線量率に比べて約1桁大きい。事故後2ヶ月未満の時点では、大熊町など沈着密度の高い地域の土壌生物で300 µGy/hの線量率が推定された。極めて短い半減期の放射性核種¹³²Te及び¹³²Iが含まれているため、短期間(数時間から数日)に一部の生物で線量率が最大で1 mGy/h(1,000 µGy/h)に達したことが示唆される。これらの線

量は、100 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ という基準レベルより1桁高いものの、被ばくは一過性であり、観察できるほどの影響を集団に及ぼす可能性は低い。

事故後、沈着密度の比較的高い地域で特定の種(特に哺乳類)の個体への潜在的な影響のリスクがあった可能性はあるが、陸生生物相の個体群集団への観察可能な影響が出た可能性は低い。

放射性核種の放出の影響を受けた地域における調査で鳥類の個体数減少¹³⁾やチョウの形態学的、遺伝的異常¹⁴⁾などが報告されている。これらの報告では、被ばくと影響の関係が明確にされておらず、津波の影響による可能性も視野に入れた今後の検証が必要である。

2. 水圏生物種への影響

淡水魚で計算された線量率は、自然のバックグラウンドレベルを1桁以上回ることもあるが、慢性的な被ばくの影響に関する基準レベルには達しなかった。

生物試料を入手できる海岸地域では、2011年5月10日から2012年8月12日までの期間の線量率は基準レベルに比べて低かった。あらゆる生物群に対してまとめられた線量率は、0.10～0.25 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ の範囲にあり、海洋環境のバックグラウンド線量率と同程度であった。

最も高い線量率は、福島第一原発サイトに近い北側排水口の付近において、2011年5月10日より前の時点で、生じていたことが、海水中の推定濃度から計算された。魚類では、最大推定線量率(約140 $\mu\text{Gy}/\text{h}$)が事故後1ヶ月目に生じ、1年間にわたる積算線量は約0.32 Gyであった。主要な核種が¹³¹Iであったため、同じ場所の大型藻類で計算された線量率は事故後23日で最大値(20 mGy/h超)に達したが、その後、急速に減少した。1年間にわたる大型藻類の積算線量は約7 Gyであった。計算されたこの線量は、放出地点に非常に近い場所における大型藻類の一過性の被ばくを除けば、個体群への観察可能な影響が予測されるレベルを大きく下回っていた。

2012年8月現在、海水魚では、販売と消費にかかる日本の基準値(100 Bq/kg, 新鮮重量)を上回る放射性核種濃度レベルの個体がまだ見つかっている。このようなレベルは公衆の放射線防護に関わるものではあるが、海水魚群集に影響を与えるレベルではない。

3. ヒト以外の生物種への影響のまとめ

以上のような評価を踏まえれば、陸圏及び水圏(海洋及び淡水)環境の双方について、ヒト以外の生物種への影響の可能性は限定的である、と結論できる。ただし、放射性核種の海洋環境への放出が2013年12月末の時点で継続していることに鑑み、今後も被ばくの推移について調査を継続する必要がある。

V. 今後の課題

報告書では、(1)今後数十年にわたり、さまざまな情報が蓄積されるであろうこと、(2)原発サイト内の作業者の集団実効線量が増加していること、(3)放射能汚染水が原発サイト内で引き続き漏えいしていることなどを認識した上で、今後継続して取り組むべき科学的課題を挙げている。

- (a) 事故の進展や放出中の気象条件に関する理解と、大気輸送、拡散及び沈着のパターンを再構築するためのモデル計算に基づき、放射性核種の大気中への放出量とその特性の時間的変化の推定を改善すること。
- (b) 放射能汚染水の漏えいと水域環境(地下水及び最終的には太平洋を含む)への放出に関し、測定を継続して特性評価を改善するとともに、放出された放射性核種の長期的な輸送と混合、水圏の経路からもたらされる被ばくを予測して定量化すること。
- (c) 降下物からの外部被ばくによる線量の測定を継続し、時間の経過に伴う変化を予測し追跡して、環境修復対策の影響も定量化して反映させること。
- (d) 確率的なアプローチ、利用可能なあらゆるデータ、適切なモデルを活用し、公衆が受けた線量の分布の特徴を個人間のばらつきや不確かさを含めて、よりよく把握すること。
- (e) 人々の体内の放射性核種の測定をさらに行い、線量の推定値と分布の精度を向上させ、現在及び将来の被ばくレベルを推定すること。
- (f) 現行進められている手順に従い、福島県での健康調査及び小児の継続的な超音波検査を続けること。福島県で検出された甲状腺がんの発生率について当該検査手法を採用したことによる影響を解析し定量化すること(この点に関しては、事故の影響を受けていない地域での甲状腺がん発生率の調査が有用である)。また、疫学的な調査研究のために、個人線量が適切に評価できている調査対象集団の設定を検討すること。
- (g) 事故早期の各作業者の作業履歴、放射性核種の時間変動レベル(短半減期放射性核種を含む)、作業・休憩場所での周辺線量当量率、個人線量計の共有に基づく線量推定の信頼性、各作業者による防護対策を考慮に入れながら、報告された作業者の線量における不確かさを定量化する。原発サイト内の軽減活動に従事した作業者の水晶体吸収線量(及び関連する不確かさ)を推定し、白内障のリスクを評価するとともに、元請業者から報告されている実効線量推定の質を確認するため、さらなる調査を行うこと。

- (h) 将来のさらなる解析に備え、被ばくしていない作業者と実効線量が100 mSvを超えた作業者についての組織バンクの設立を検討すること。
- (i) ヒト以外の生物種につき典型的な環境からの被ばくを測定評価すること。本報告書の評価と一致しない報告事例について、放射線被ばくが原因であったか否かをさらに解析すること。

VI. おわりに

ヒトに関しては、福島原発事故由来の放射線による健康影響は見られておらず、将来にわたっても認識可能なほどの健康リスクは生じるとは考えにくい、というのが本報告の結論である。一方で、放射線とは関連しない影響や心理的な影響についての言及は見逃せない。今後事故の影響に関する分析を進めるにあたり、事故由来の「放射線による影響」と「事故そのものによる影響」とを区別して取り扱うことの重要性が示唆されている。

事故後3年半以上が経過した。今般の事故について最終的な評価に至るまでの長い道のりを考えると、いまだ3年半ということもできよう。この時点で入手可能な情報に基づいてさまざまな側面について記載し、追求すべき科学的課題を提言した本報告書は、今後の長期にわたるフォローアップの貴重な道しるべとなるに違いない。

— 参考資料 —

- 1) UNSCEAR: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2013 Report to the General Assembly with Scientific Annexes Volume I Scientific Annex A, United Nations, New York (2014).
- 2) Fukushima Medical University. Results of thyroid ultrasound examination (as of March 2013). Proceedings of the 11th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey. Department of International Cooperation, Radiation Medical Science Center. [Internet] Available from (http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/11-2_Thyroid.pdf) on 4 June 2013.
- 3) N. Taniguchi, N. Hayashida, H. Shimura, et al., Ultrasonographic thyroid nodular findings in Japanese children, *J. Med. Ultrasonics*, 40 (3), 219-224 (2013).
- 4) K. Tanigawa, Y. Hosoi, N. Hirohashi, et al., Loss of life after evacuation: lessons learned from the Fukushima accident. *Lancet* 379 (9819), 889-891 (2012).
- 5) UNSCEAR. Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B. UNSCEAR 2006 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.08.IX.6. United Nations, New York, 2008.
- 6) WHO. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami, based on a preliminary dose estimation. World Health Organization, Geneva, 2013.
- 7) IARC. Cancer incidence in five continents, Vol. X. IARC Scientific Publications No. 164. (D. Forman et al., eds.). International Agency for Research on Cancer, Lyon, 2013.
- 8) S. Yasumura, M. Hosoya, S. Yamashita, et al., Study protocol for the Fukushima Health Management Survey, *J. Epidemiol.*, 22 (5), 375-383 (2012).
- 9) H. Kikuchi, Iodine prophylaxis for emergency workers in Fukushima Daiichi NPS of TEPCO. Officially submitted to the UNSCEAR secretariat. Tokyo Electric Power Company, 2013.
- 10) J. Shigemura, T. Tanigawa, I. Saito, et al., Psychological distress in workers at the Fukushima nuclear power plants, *J. Am. Med. Assoc.*, 308 (7), 667-669 (2012).
- 11) MHLW. Review meeting on the long-term health management of emergency workers at the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, 26 September 2011. (Grand design of the long term health management system). Ministry of Health, Labour and Welfare. [Internet] Available from (<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001plbx.html>) on 1 October 2011. (Japanese).
- 12) United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume II : Effects. Scientific Annexes C, D and E. UNSCEAR 2008 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.11.IX.3. United Nations, New York, 2011.
- 13) A.P. Møller, A. Hagiwara, S. Matsui, et al., Abundance of birds in Fukushima as judged from Chernobyl. *Environ. Pollut.*, 164, 36-39 (2012).
- 14) A. Hiyama, C. Nohara, S. Kinjo, et al., The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly. *Sci Rep* 2: 570 (2012).

著者紹介

酒井一夫 (さかい・かずお)

放射線医学総合研究所
(専門分野/関心分野) 放射線生物学/放射線防護



栗原 治 (くりはら・おさむ)

本誌, 56 [12], P.41 (2014)参照.

UNSCEAR2013 レポートの概要

第4回(最終回) 子どもへの放射線影響

放射線医学総合研究所 島田 義也

子どもは成人と比べて、同じような条件で被ばくをしても臓器吸収線量が異なるし、同じ吸収線量でも影響の程度が異なる。UNSCEAR2013 レポート(以下、本報告書と記す)は、子どもに対する放射線影響についての疫学調査をレビューしたものであり、放射線防護学、放射線生物学、疫学、その他の健康科学、そして規制当局の専門家を対象にしている。

I. はじめに

放射線の影響を受けやすい集団がいる。胎児や子ども、遺伝的にDNA修復力を欠損した人たち、他の疾病や傷害、ストレスを併せ持っている人などである。その中でも、集団として最も大きく、認識しやすいのが、「子ども」である。子どもへの放射線影響は、社会学的、公衆衛生的、科学的そして医学的に非常に重要な問題である。

子どもが成人よりも放射線の被ばくの影響を受けやすいというのは部分的に正しい。しかし、影響の全てについて当てはまるわけではなく、いくつかの影響については、子どもは成人と比較して抵抗性を示す。本報告書は、子どもの解剖学的・生理学的特徴、被ばく線量の違いや健康影響(がんリスクと確定的影響、そして遺伝的影響)について網羅的に紹介している。

II. 領域と方法論

本報告書は、放射線の影響とリスクが子どもと成人でどのように違うかに焦点を当て、以下の質問への回答を目的としている。

- ・現在そして将来において、最も重要な子どもの被ばく線源は何か？
- ・子どもと成人の線量評価の違いは何か？
- ・子どもと成人の放射線影響の違いは何か？
- ・放射線感受性の違いを決めている要因は何か？
- ・子どもは、全ての線源に対してもどんな影響においても感受性が高いのか？

Outline of UNSCEAR 2013 Report (4) ; Effects of radiation exposure of children ; Yoshiya SHIMADA.

(2014年9月29日 受理)

■前回タイトル

第3回 福島報告：ヒト及びヒト以外の生物種への影響

- ・子どもの被ばくによる影響に関し、どのような知見が足りないか？

「子ども」ならびに「小児期」の定義は、一定しているわけではない。本報告では20歳未満を対象とし、乳幼児(infant)、子ども(children)、そして思春期(adolescents)に便宜的に分ける。

参照した調査は、事故、放射線を用いた診断や治療、原爆、核兵器実験からのフォールアウト、原子力施設からの放射性核種の放出による被ばくである。それぞれの調査には、長所・短所がある。CTの発がんリスク調査は始まったばかりで追跡期間が短い。小児がん治療患者の放射線影響は有用であるが、他の治療との併用(複合)効果を考慮する必要がある。原爆生存者の調査は60年の長期間にわたるものだが、それでも子どもの時に被ばくした人の大半は存命中で、生涯リスクを決めるには至っていない。フォールアウトは、線量が極めて低く、不確実性や大きなバイアスを伴っている。チェルノブイリ事故後の¹³¹Iによる甲状腺がんについても、長期影響についてはこれからの問題である。なお、本報告では胎児期被ばくと動物実験は扱っていない。

III. 線源

1. 自然放射線

自然放射線は、世界的には最も大きな線源である。宇宙、大地、食物、そして最も大きな被ばく源はラドンである。線量は土壌や食物に含まれる放射性核種の濃度に依存するが、宇宙放射線とラドンの被ばく線量に年齢差はほとんどない。自然放射線の世界の平均年間実効線量は、約2.4mSvである。

2. 医療

医療被ばくは、自然放射線について2番目に大きな被ばく線源である。各種診断における撮影の頻度や部位は

国によってばらつきがあるが、約3～10%は子どもに対して行われている。頭部や腹部などのX線撮影の頻度が高い。インターベンション治療は子どもの脳、水晶体、心臓に高い線量を与えることもある。核医学の検査は、成人の場合は、心臓やがんが対象となるが、子どもでは腎臓が多い。一般に子どもへの投与量は成人に比べ少ない。また、母親のRI検査後の授乳や、放射性核種を投与された人の近くにいと被ばくすることになる。米国では600人の子どもに1人の割合(全がんの1%)で小児がんを発症する。放射線治療患者の総数の870,000人のうち、年間2,500人は小児がん患者である。

3. 核兵器

年齢に関する情報を与える最も大きな集団は、広島・長崎の原爆生存者である。全集団86,661人のうち、0～9歳が17,833人、10～20歳が17,563人である。マーシャル諸島やセミパラチンスク、マヤックの調査もある。マヤックは、「子ども登録簿」が整備され、約90,000人が調査されている。

4. 事故

原子力発電所の事故からの被ばくは大きな線源である。チェルノブイリ原発事故では、ロシア、ウクライナ、ベラルーシ3国の総人口9,790万人のうち、10.3%が就学前、11.2%が就学児、5.3%が思春期である。福島第一原子力発電所事故では総人口の約13%が0～14歳であり、県民健康調査と甲状腺の線量評価と健康調査が行われている。

IV. 解剖学的発達と生理学

線量や影響の評価に、年齢、特に体重や体格とともに変化するいくつかの重要な要因がある。内部、外部被ばくによる線量は、成長とともに大きくなる種々の臓器による遮蔽効果を考慮する必要がある。放射性核種の摂取量あたりの吸収線量は、臓器が小さい子どもほど大きくなる。

子どもの線量評価とリスク評価にあたり、考慮すべき以下の要因がある。

- ・個人や臓器のサイズや形、重量
- ・臓器や組織の成長パターン
- ・物質の摂取と吸収
- ・代謝量
- ・内分泌系の変化や発達
- ・食事の摂取
- ・運動

ヒトの成長期間はほ乳類の中では異常に長く、寿命の1/4を超えている。これは主に骨格、内分泌系の成熟が遅いことによる。成熟は女子の方が男子に比べ早い。発達は身体の下部より上部で早く進む。骨盤部の成長が遅

いので、膀胱は幼児の時は腹部器官であり、6歳までは成人と同じ位置と形状に達しない。

臓器によって成長速度は様々である。体重あたりの骨格の重さは、成熟するまでに20倍になる。中枢神経系(脳)は、出生時には、体重の15%であるのが、成人では2～2.5%に減少する。リンパ系の成長割合は、幼児後期に最も大きい。脳は、出生時までにかなり発達し、骨格筋は小児期と思春期の2つの時期に成長し、生殖腺は思春期後半まで発達しない。また、骨髄は、年齢とともに骨内分布を変化させる。体の大きさと体の各部分の大きさは一様には成長しない。これは、外部もしくは内部被ばく線量の分布が発達段階によって異なることを意味している。

1. 消化器系

消化管は、口腔、口、咽頭、食道、胃、小腸、結腸、直腸、肛門から構成されている。関連する器官は、肝臓、膵臓、唾液腺である。発がんリスクの高い臓器は胃や結腸であり、直腸や膵臓はリスクが低い。

子どもの消化管被ばく経路の特徴は、成人より多くのミルクを飲むことと、土を食べることもある。

物質の通過時間は食道、胃、小腸で年齢による差がほとんどない。胃では、液体で30～60分、固体は75～100分、結腸は、子どもで8～11時間、大人で12～16時間と長くなる。ヨウ素は、口と胃からも取り込まれる。1歳以降は成人と類似した吸収値となる。吸収されたヨウ素は一部唾液腺から、セシウムは胆汁中に分泌される。分泌過程について年齢による差はなさそうである。

2. 呼吸器系

呼吸器は、鼻、口、咽頭、気管、気管支と細気管支の気道、肺胞からなる。2歳までに肺の構造はできあがる。誕生時に2千万個の肺胞は、2歳時には4億個になり、その後サイズが大きくなっていく。1日の呼吸量も年齢とともに増加する。呼吸器系内での物質の沈着量は子どもの方がやや多い。沈着は呼吸数につれて増加する。

3. 神経系

脳は他の臓器と比較して、相対重量が大きい。大人が2%であるのに、子どもは体重の10%である。脳の成熟には10年以上かかる。大脳皮質の灰白質はほぼ1歳でピークであり7歳までは高いままであり、16歳に約40%減少する。前頭皮質は12歳でピークになる。

4. 骨格系

骨格系は、骨、骨髄、骨膜、軟骨および血管から構成されている。骨は体を支え、保護し、赤血球や白血球を生産し、ミネラル(カルシウムなど)を備蓄する。骨は軟

骨組織中の前駆細胞から形成され、骨化は出生前に始まる。骨の成分であるハイドロキシアパタイトは、様々なイオンと結合する能力がある。この結合力が核医学検査での骨スキャンを可能としているが、ストロンチウム、ラジウム、プルトニウムなどの長寿命放射性核種を取り込む理由でもある。

骨髄は、造血機能が活発な赤色骨髄と造血機能を失い脂肪化している黄色骨髄がある。活発な骨髄は年齢にかかわらず体重の2～3%である。幼児では骨髄は全て赤色骨髄だが、年齢とともに黄色骨髄へと転換する。

5. 泌尿生殖器系

泌尿生殖器系は、腎臓、尿道、膀胱、子宮、膣、卵巣、前立腺および陰茎からなる。尿の1日の排泄量は、水分摂取量に比例し、年齢や体格とともに多くなる。尿中に排泄された放射性核種からの膀胱及び周辺臓器の被ばく線量は、膀胱の大きさと排尿頻度に依存し、年齢別の線量評価に大きな違いをもたらす可能性がある。子どもでは膀胱が腹部の深い位置にあるので、周辺器官に高い線量を生じる。

精巣は出生時と成人では大きな差がある。その体積は思春期の間に6倍以上になる。卵巣は思春期前の約3倍になる。子宮の体積も思春期に5倍以上になる。思春期に、精巣からはテストステロンが、卵巣からエストロゲンとプロゲステロンが分泌される。出生前後に卵巣は30～100万個の卵胞を持っているが、生後年齢とともに減少する。

6. 内分泌系

放射線影響に関係する内分泌系は、甲状腺と成長ホルモンと生殖ホルモンである。胎児は、妊娠10～12週からヨウ素を蓄積し始める。甲状腺刺激ホルモン、甲状腺ホルモンは生後最初の年に最も高く、成人までに20～40%に低下する。成長ホルモンは、子どもの身長を伸ばすことで知られ、その他にも、カルシウムの保持、筋肉量やタンパク合成の促進、脳以外の全ての臓器の成長を刺激する。視床下部から生殖腺刺激ホルモン放出ホルモンが放出されると思春期が始まる。女子は、思春期にエストラジオールの上昇によって、急激な成長、骨の変化、乳腺の発達、脂肪組織の増加、子宮や子宮内膜の発達が刺激される。

7. 乳腺

乳腺は、妊娠前に完全に発達する。思春期にエストロゲンの作用によって、結合組織中の脂肪が成長し、乳管構造が発達し始める。その後2年で成熟したサイズと形になる。排卵が始まると、乳管の端に分泌腺が成長し、月経とともに腺組織の密度や大きさが周期的に変化する。

V. 線量評価の観点

1. 外部被ばく

外部被ばくには、空気中や土壌に蓄積した環境中の放射性核種からの被ばくと、診断や治療における医療被ばくがある。子どものからだは成人よりも小さく、臓器による遮蔽効果が少ないので、線量は高くなる。さらに子どもは身長が低いので、地面からより高い放射線量を被ばくする可能性がある。幼児で1.4倍、子どもで1.1～1.2倍の線量になる。医療においては、同じ照射条件では子どもは成人に比べ多く被ばくする。

2. 内部被ばく

子どもは、それぞれの臓器が小さくお互い近くに位置することや、代謝も異なるため、摂取量あたりの吸収線量は核種によっては10倍大きくなる可能性がある。しかし、子どもは摂取量が少ない。食事の種類や運動量のちがいなども成人との被ばく線量の差の原因となる。

幼児は代謝活性が高いことから、¹³¹Iの線量は成人に比べて8～9倍高くなる。吸入被ばくの場合は2倍、ミルク摂取による線量は20倍も高くなる。しかし、¹³⁷Csについては、子どもの生物学的半減期が短い(排泄が早い)ことから成人と差はほとんどない。⁹⁰Srの場合、食事摂取による骨表面や骨髄への線量は、小児や思春期が高くなる。吸入では呼吸量が小さいので、実効線量、吸収線量ともに成人より低くなる。²²⁶Raは、主に骨への被ばくになる。同じ空気中の濃度であれば、呼吸量が小さい子どもの被ばくは小さくなるが、食事摂取からの線量は成人に比べ、数倍高くなる。ラドンは、肺がんリスク要因である。吸入による肺の線量係数は5倍を超えないが、子どもは吸気量が少ないため、実効線量は成人と同レベルとなる。

VI. 健康影響

1. 悪性腫瘍

被ばく時年齢依存性に関する情報の多くは原爆被爆者の調査に依存する。ある腫瘍においては年齢依存性を示すデータが多数あるが、別の腫瘍については、中程度か、少ないか、あるいは存在しない。

リスクは、絶対リスクと相対リスクで表現されることが多い。一般に過剰絶対リスク(excess absolute risk: EAR)と比べて過剰相対リスク(excess relative risk: ERR)は因果関係の強さを表すのにより指標であると思われる。一方、EARは被ばくによる症例数を示すので、疾病の重みを示す指標としてはよい。若いときにはがんの罹患数が少ないので、子ども被ばくのEARは限られた年数のフォローアップでは成人に比べて小さくなるが、生涯の罹患・死亡リスクは余命が長いので大きくなる。「到達年齢」はもうひとつの変数である。これ

は、継時変化を記述するのにはよい。リスク解析に、「one size fits all」モデル(バックグラウンドの発がんリスクにかかわらず、ある時点もしくは生涯のリスクを推定できるモデル)はなく、どれを使っても問題や不一致がでてくる。

2006年の報告書で、子ども被ばくの生涯がんリスクの推定値は、不確かであるが、全年齢グループの推定値より2～3倍高い可能性があると説明した。これは、全ての腫瘍の種類を合わせた生涯予測モデルに基づいている。国連科学委員会は、子ども被ばくの発がんリスクは、腫瘍の種類、年齢、性別に依存していることに注目し、今回23部位の腫瘍を調査した。その結果、腫瘍の種類25%は、モデルにかかわらず子どもは感受性が高いと判断した。白血病、甲状腺がん、皮膚がん、乳がん、脳腫瘍である。15%(膀胱がんなど)は成人と同じ感受性であり、10%(肺がんなど)については成人より感受性が低い。20%の腫瘍(食道がん)については被ばく時年齢依存性の結論を出すほどのデータはない。約30%(ホジキンリンパ腫、前立腺がん、直腸がん、子宮がん)については放射線によるリスクの増加はほとんどないか、全くない。以下、いくつかの臓器について、説明する。

全がん：原爆被爆者のがん死亡率に関するデータは、被ばく時年齢が10年高くなるにつれて過剰相対リスクが29%減少することを示す。しかし、これは全てのがんを含めた場合であって、本来、放射線で誘発されない腫瘍(前立腺がんや直腸がん)も、リスクがあるように見えるので注意が必要である。

白血病：慢性リンパ性白血病以外の白血病は、最小潜伏期2年で誘発される。急性の白血病は慢性骨髄性白血病より多く、早く発生する。線量効果関係は線型2次モデルが合う。小児の被ばくは成人に比べ3～5倍リスクが高い。

脳及び中枢神経系腫瘍：脳腫瘍は高線量の放射線治療や、小児期の被ばくによって誘発される可能性がある。感受性の時期は5歳以下で高く、20歳ではリスクがなくなるようだ。被ばく後20年間は神経膠腫が多く、それ以降は髄膜腫が多くなる。

甲状腺がん：子どもは成人より放射線による発がん感受性が高い。治療では10～30Gyで最もリスクが高く、それ以上は、標的細胞の死によってリスクは減少する。成人のリスクは小さくて、評価できない。

乳がん：年齢依存性は使用するモデルによって異なる。低線量被ばくの研究では、子どもの被ばくのリスクは成人に比べ3～5倍で高い。放射線治療で被ばくした場合は、思春期での被ばくのリスクが最も大きいという報告もある。

肺がん：低LET放射線とラドンからの被ばくが肺がんリスクを増加させる。原爆被爆者の肺がんによる死

亡リスクは、被ばく時年齢の影響がないか、高齢ほどリスクが高い可能性がある。ラドンの場合は被ばく時年齢の差が見られていない。

胃がんによるリスク：原爆被爆者のデータは、ERRは年齢が若い時の被ばくほど高いが、死亡率のEARには年齢差がない。

結腸がん：罹患率も死亡率もERRモデルでは到達年齢70歳で被ばく時年齢の影響はないが、EARでは若いときの被ばくでリスクが大きくなる。

膀胱がん：膀胱がんは放射線で誘発されるが、子どもが感受性であるというデータはない。

皮膚がん：放射線によって、悪性黒色腫以外の皮膚がんが誘発される。主に基底細胞がんであるが、扁平上皮がんもある。子どもが、2～5倍リスクが高い。

肝がん：肝がんは放射線でリスクが増加するが、死亡リスクで見ると、被ばく時年齢については有意な影響はなさそうである。肝がんの原因であるC型肝炎ウイルスの感染率が高いことが放射線の影響の評価を難しくしている。

骨と結合組織腫瘍：骨腫瘍は数十Gy未満では誘発されない。しかし原爆被爆者の最近の調査は、0.8Gyのしきい値があることを示している。軟部組織腫瘍は放射線で増加するが、被ばく時年齢による変動はない。

2. 確定的影響

「有害な組織反応」と呼ばれる確定的影響にはしきい値があり、線量とともに、頻度も重傷度も増加する。多くの組織は数Gy程度の線量の被ばくでは、確定的影響は見られない。

発症原因：細胞死、細胞機能の不良、細胞内外のシグナル伝達の攪乱、繊維化が確定的影響の主要因である。成長期の分裂の盛んな臓器の感受性が高い。組織障害の発生に幹細胞の放射線感受性は重要であるが、各年齢での幹細胞の放射線応答は不明である。若いときには幹細胞がたくさんあるので、代償機構によって、放射線の影響は小さくなり、反対に、年齢とともに細胞の補充能力が低下して感受性が大きくなることがある。確定的影響は、線量、被ばく組織の体積や種類、放射線の線質、被ばくを受けた時間、被ばく後の時間、年齢に依存する。

急性と晩発影響：急性影響は、増殖活性の高い幹細胞や前駆細胞の枯渇による成熟細胞の一時的もしくは永久的な不足による。遅延的な障害は、進行性線維症、血管の狭窄、細胞シグナルの攪乱、免疫そして遺伝的な因子などの複雑なプロセスによる。

確定的影響に関する最も有益で包括的な研究は、小児がん生存者調査研究(Childhood Cancer Survivor Study: CCSS)である。14,370人の5年以上生存して

いる小児がん患者をフォローし、その結果を兄弟と比較している調査である。もちろん、原爆被爆者のデータも有益である。発がんと同様に、子どもの被ばくで影響が大きな臓器がある(脳、白内障、甲状腺結節など)し、同じ程度のもの(神経内分泌系や腎臓)、逆に子どもの方が抵抗性を示すものもある(肺、骨髄、卵巣)。

神経学的影響：若い時期の脳は特に感受性が高い。治療における抗がん剤などの同時投与によって影響は増加する。脳は2歳までが最も感受性が高い。高線量(20～30Gy以上)では、脳体積の縮小が起こることもある。その結果、無気力、学校での成績不振、運動失調、痙攣、進行性痴呆、死さえ引き起こす。

神経認識への影響：脳に放射線治療(54Gyの分割照射)を受けた時の知能指数の低下は、5歳以下の子どもでは15～35%の低下が認められるが、12歳以上では認められない。

神経内分泌系への影響：視床下部の被ばくによって成長ホルモンの分泌が低下し、治療を受けなければ、小人病になる。その他のホルモンにも影響を与え、体重の増減、第2次性徴^{a)}の変化、生殖腺の萎縮、体温調節障害などになる場合がある。

白内障と水晶体混濁：子どもは、被ばくによる水晶体の混濁の感受性が高い。眼窩に治療で5～15Gy被ばくすると白内障になる可能性がある。

口腔と咽頭：口腔粘膜と咽頭は、皮膚より感受性が高い。反応性は子どもの方が高いが、回復も早い。

甲状腺：対象となる疾患は甲状腺機能低下症、自己免疫性甲状腺炎、結節形成である。結節に関しては年齢が若いほど放射線による影響は大きくなるという報告があるが、機能低下に関しては意見が分かれる。1Gy未満の外部被ばくによる甲状腺機能低下は認められていない。

乳房：成人の乳腺は確定的影響に対して極めて放射線抵抗性であるが、新生児や子どもの被ばくでは乳腺の発育が不良になる。

心臓血管疾患：心臓血管系の疾患の被ばく時年齢を評価できる研究はわずかである。原爆被爆者の結果は、0.5Gy以下ではリスクが増加しないし、被ばく時年齢による差も見られていない。小児がん治療患者では、15Gy以上の線量でいろんな心臓の障害のリスクが増加し、若いとリスクはわずかに高くなる。アントラサイクリンを用いた化学療法の併用は、放射線の影響を増大させる。

肺疾患：放射線被ばくによって新たな肺胞の形成が阻害される。全体として、子どもの呼吸器系への影響は成人に比べてやや小さい。子どもは既往の病気が少なく、組織修復能力が高いからであろう。

消化管：小児期・思春期の被ばくで放射線治療後の急

性の合併症が引き起こされる。興味深いことに、3歳未満でがんと診断された子どもは、年上の子どもより、消化管の合併症のリスクが小さいと報告されている。

膵臓：10Gy以上の被ばくをした子どもならびに若い成人はインシュリン抵抗性や糖尿病のリスクが上がる。2歳以下の子どもは、年上に比べリスクが高くなる。

精巣：生殖細胞の放射線感受性は最も高い。完全な不妊化が2～4Gyの分割照射後に起こる可能性がある。
卵巣と子宮：卵巣と受胎への影響については、子どものほうが影響が小さい。原始卵胞は出生後減少するので、被ばく時年齢が高いと受胎できる卵胞細胞は少なくなる。放射線治療において2.5～5Gyの被ばくでは、40歳以上の患者は90%が不妊症になるのに対して、14歳未満の患者は不妊症を発生しなかった。少女の子宮への高線量被ばくは、自然流産や未熟分娩のリスクを増加させる。

受精と生殖：受精と生殖は、精巣、卵巣、子宮、脳下垂体・視床下部の内分泌異常などの要因で低下する。卵巣そしておそらく精巣も若いほど抵抗性であるかもしれない。

皮膚：湿性落屑^{b)}の影響については、皮膚細胞の早い修復能力のために、子どもは成人よりも感受性が低いようである。組織反応については、年齢依存性はほとんどないと思われる。

筋骨格系：成人では極めて抵抗性だが、発達期は感受性である。小児期の放射線治療は、骨と筋の発達を阻害し、小人病、脊柱側弯症、骨折などの晩発影響を起こすことがある。6歳未満と思春期の被ばくは最も大きな障害になる。

3. 遺伝的影響

生殖腺に数百mGyから20Gy被ばくした小児がん、思春期がん治療生存者の子どもにおいて、染色体の不安定性、継世代ゲノム変異または先天異常が増加したという証拠はない。CCSSの調査は、卵巣の被ばく(平均1.19Gy)でも精巣への被ばく(平均0.48Gy)でも先天奇形発生との相関はないし、原爆被爆者においても、被ばくした両親からの子どもに、染色体異常や死亡率の増加やがん罹患率の増加は認められない。高レベル自然放射線地域に住んでいるインド、ケララの住民においても遺伝

^{a)}第2次性徴：思春期になって、性腺から産生されるホルモンによって体の各部分にあらわれる男女の特徴(例えば、女性の初経や乳房の発達、まるみをおびた体つきになってくること)

^{b)}落屑(desquamation, らくせつ)：角化した表皮が剥離して脱落すること。表皮の基底層の細胞が死滅することにより、表皮が形成されない状態を湿式落屑という。重傷の場合、感染、脱水を併発して、潰瘍になる。

的影響は見つかっていない。

つまり、ヒトの場合、継世代影響は見つかっていない。遺伝的影響は被ばく後、比較的短い期間に受胎した場合に可能性があるため、ヒトの場合、被ばく後すぐ受胎することはなかったことが理由として考えられる。

VII. 今後の研究

国連科学委員会は、成人と比較して、子ども被ばくの影響、影響発生のメカニズム、放射線感受性の違い、リスクの相違を明確にするに研究が重要であることを認識している。原爆生存者、チェルノブイリ事故時のヨウ素に暴露した子ども、CT スキャンを受けた子どもの調査も、生涯リスクが完全に解明されていないため継続が必要である。

また、ERR, EAR 推定は、到達年齢と被ばく後の期間の微妙な違いを的確に把握できていないので、新たな

^{c)}オミックス：生体分子についての網羅的な情報を研究。ゲノムの場合をゲノミクス、タンパクの場合をプロテオミクス、代謝物に関するものをメタボロミクスと呼び、生命を分子情報ネットワークのシステムとして理解する学問。

生涯リスク予測の開発も必要である。

今後の重要分野は、(a) 高いラドンと自然バックグラウンドの被ばく、(b) CT スキャンとインターベンショナル透視、(c) 放射線治療(他の治療との潜在的な相互作用も含む)である。長期的に追跡できる子どもに関する線量データベースの構築、年少者の臓器に特徴的な影響や部分的な被ばくによる体積効果に関する線量評価と被ばく影響の研究も有用である。さらに、分子、細胞、組織そして若齢の動物を用いた個体レベルの研究は有益であり、それには組織の細胞構築、組織や細胞の放射線応答、発がんの標的細胞(幹細胞)の特定が含まれるべきである。利用可能なプロテオミクス、ゲノミクス、メタボロミクス^{c)}を応用することが、有益である。

著者紹介



島田義也(しまだ・よしや)
放射線医学総合研究所
(専門分野/関心分野)
放射線発がんメカニズム、
特に、小児被ばく



From Editors 編集委員会からのお知らせ

—最近の編集委員会の話題より—
(12月1日第5回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・11月期に英文誌は25論文、和文誌は2論文が投稿された。5月号入稿済み。
- ・今年度決算見込みおよび来年度予算申請について報告があった。
- ・賛助会員への英文誌アクセス権配布にかかる費用について理事会へ報告することとした。
- ・審査結果報告書の書き方について編集委員へ注意を促すこととした。
- ・JNST Article Awards 内規について検討した。

【学会誌関係】

- ・理事から、理事会、予算関連の報告があった。

- ・編集長から、今年度の収支見込、来年度の予算について報告があった。
- ・YGN 連絡会、学生連絡会会長から、活動状況の説明を受け、学会誌記事になりそうなテーマについてディスカッションを行った。今後、2～3か月に1回程度の編集委員会への参加を両連絡会に依頼した。
- ・福島事故関連の記事で、以前より編集委員会が特に公開が望ましいとする記事についてはHPに掲載している。今後HPに掲載する記事については、編集幹事会で確認することとし、編集委員長が必要に応じ理事会に報告する手順を踏むことにした。
- ・目次・巻頭言・時論を発行1ヶ月後にHPで公開しているが、学会誌を受け取っても開封しない読者向けに、学会誌の目次や注目記事をAESJ-Newsで配信してはどうか、という意見があった。今後、実施する方向で方法など検討していくことにした。

編集委員会連絡先 < hensyu@aesj.or.jp >

欧州諸国民の自然界からの年間被ばくの実態

河田 東海夫

欧州では自然放射線による国民の年間線量が日本人の倍以上になる国がいくつもある。欧州全体では、年間 7mSv を超える住民の総人口は 2,000 万人を超え、13mSv を超える総人口は約 600 万人と見積もられる。そうした環境下でも、欧州では高度に文化的な生活が連綿として営まれてきたという事実は、原発事故の避難住民が「1mSv の呪縛」を克服し、どの程度の被ばくなら受忍可能かを考えるうえで、重要な示唆を与える。

I. 迫られる 1mSv の呪縛からの決別

原発事故から 3 年以上を経過した今なお、福島県では約 13 万人が避難生活を続けている（うち約 8 万人が避難指示区域からの避難者）。福島県では今年 3 月末までに「震災関連死」と認定された死者数は地震や津波による直接死者数を超え、宮城県や岩手県に比べ突出している。避難生活の長期化や、将来が見通せないことから来るストレスなどの悪影響がきわめて深刻なことを物語っている。こうした状況の解消のためには、除染を行っても数年以内に年間 20mSv（ミリシーベルト）未達成が見込めない地域の住民の集団移住の早期決断と、年間 20mSv 未達成ではあるが汚染が残留する地域への早期帰還を実現する必要がある。大変残念なことに、いわゆる「1mSv の呪縛」がそれらの実現への大きな障害要因となっている。「年間 1mSv 以下でないとは安全ではない」との誤った認識が社会的に広く浸透してしまったためである。

国の「除染モデル実証事業」の結果からは、高線量地域の面的除染の線量率低減効果は 4～6 割程度であることが明らかになっている。この結果を見る限り、避難指示区域からの避難者約 8 万人のうち 1 万人弱は、除染を行っても 5 年以内の帰還が見込めない。国が避難解除の要件としている年間 20mSv 以下達成が困難なためである。残り約 7 万人については、5 年以内に年間 20mSv 以下達成が見込まれる（既に年間 20mSv のところも多い）。しかし実際に何人が帰還できるかは、これらの人々がどれだけの追加被ばく線量を受け容れることができるかによって決まる。年間 20mSv 以下がそのまま受け容れられるのであれば全員が帰還できるが、年間

10mSv なら約 1 万人が帰れなくなる。年間 5mSv ならその数は倍増し、年間 1mSv にこだわるのであれば、大半が帰れないことになる。避難指示区域外の地域からの避難者も同様の問題を抱える。避難住民自身が年間 1mSv の呪縛を克服し、年間 5mSv や 10mSv といったレベルでの帰還を真剣に検討しなければならない時に来ている。

低線量被ばく影響に関する「100mSv 以下の被ばく線量域では、がん等の影響は、他の要因による発がんの影響等によって隠れてしまうほど小さく、疫学的に健康リスクの明らかな増加を証明することは難しい」との公式見解¹⁾は、学術的には正しい表現ではあるが、歯切れが悪く、「要するに専門家でもわかっていないのだ」と言っているようにさえ聞こえる。一部のマスメディアや SNS の世界では低線量被ばくの不安を煽る情報が溢れており、こうした情報混乱の中で避難住民が年間 20mSv 以下なら安全と確信できる状況にはとても至っていない。こうしたギャップを埋めるためには、学術的に正しい情報提供に加えて、実経験に基づく常識的、直観的理解が可能な情報の提供が重要である。

本稿では、そうした情報の一つとして、欧州諸国民の自然放射線からの被ばくの現状を整理してみる。

II. 欧州諸国民の自然放射線からの年間線量

1. 欧州では、ラドン吸入が最大の被ばく要因

自然界の土や岩石には微量のウランが含まれており、花崗岩などではその含有量が相対的に高い。地中のウラン (²³⁸U) が何回か崩壊をすると放射性ガスであるラドン (²²²Rn) が発生し、やがて大気中に移行する。欧州では、地域的に地中のウラン濃度が高いところがあるほか、伝統的に石造りの家が多いことや、北欧では家屋の気密性が高いことなどから、我が国に比べ一般的に屋内のラド

Natural Radiation Exposure in European Countries : Tomio KAWATA.

(2014 年 9 月 10 日 受理)

ン濃度が高い。このため、大半の欧州諸国では、ラドン吸入が自然界からの被ばくの最大要因となっている。鉱山労働者の経験などから、過剰なラドン吸入は、肺がん誘発要因になることが知られており、欧州では1980年代から各地で屋内ラドン濃度の調査が始まり、その後、規制に向けた動きも開始された。なお、地中のトリウム(²³²Th)からもトロン(²²⁰Rn：トリウム系列の崩壊で生まれるラドンのことで、トロンはその通称)が発生するが、半減期が短いこともあり、大気中濃度はラドンよりも小さく、被ばくの影響も小さい。

欧州委員会(EC)の共同研究センター(Joint Research Centre：JRC)は、2004年から2005年にかけて、欧州各国の屋内ラドン濃度の総合的な調査と取りまとめを行った(以下、JRC報告という)²⁾。この取りまとめは、自然界からの被ばくに関する欧州全体マップ作成活動の一環として行われたもので、その結果を第1表に示す。自然界と人為的要因からの被ばくに関する全世界的な平均年間線量は、原子放射線に関する国連科学委員会の2000年報告書(UNSCEAR 2000)で公表されており、2000年以前に行われた欧州での屋内ラドン濃度測定結果はそこに反映されている³⁾。したがって、第1表は、UNSCEAR 2000の採用データと多くの部分で重複するが、一部その後の測定結果や評価が反映されている。こ

の時点では、ラドン濃度の測定方法や、測定にあたっての地域分割の方法などが各国まちまちで、統一性に欠ける点には留意する必要があるが、欧州全体の傾向を把握するうえでは大変有益なデータである。ECでは、1990年2月に屋内ラドン濃度に関し、新築家屋では200Bq/m³以下、また既設の家屋については400Bq/m³以下とすることが望ましいとの勧告を出しており⁴⁾、第1表には、これら2つの管理目標値を超える家屋の割合も示されている。

2. 欧州諸国民の年間線量の概略評価

第1表の屋内ラドン濃度データと、UNSCEAR 2000に報告されている大地などからのガンマ線量データから、欧州諸国民が自然放射線から受ける年間の被ばく実効線量(年間線量)の概略評価を行った。食品摂取やトロン吸入による内部被ばくと宇宙線による外部被ばくについては国別データが入手できないので、UNSCEAR 2000に報告されている世界平均値を一律に用いた。こうした代用は評価の厳密性を損なうことにはなるが、欧州ではラドン吸入による影響が最も大きく、その大小が各国国民の年間線量の大小を実質的に支配する。したがって、このような概略評価でも、欧州における自然界からの被ばくの全体傾向はおおむね正しく把握できる。

ラドン吸入による年間被ばく線量の計算に当たっては、UNSCEAR 2000に従い、屋外ラドン濃度Q₀を屋内濃度Q₁の1/4と仮定して屋内及び屋外のラドン吸入による被ばく線量D₁及びD₀を次式により求めた。

$$D_1 \text{ [mSv/y]} = Q_1 \text{ [Bq/m}^3\text{]} \times 0.4 \times 9 \text{ [(nSv/h)/(Bq/m}^3\text{)]} \times 7,000 \text{ [h]}$$

$$D_0 \text{ [mSv/y]} = Q_0 \text{ [Bq/m}^3\text{]} \times 0.6 \times 9 \text{ [(nSv/h)/(Bq/m}^3\text{)]} \times 1,760 \text{ [h]}$$

また、UNSCEAR 2000では、吸入されたラドンの一部が血液中に溶解し体内に広がることによる被ばく量を次式で評価しており、ここでもその分を加算した。これらは前者の3～4%に相当する。

$$D_1 \text{ [mSv/y]} = Q_1 \text{ [Bq/m}^3\text{]} \times 0.17 \text{ [(nSv/h)/(Bq/m}^3\text{)]} \times 7,000 \text{ [h]}$$

$$D_0 \text{ [mSv/y]} = Q_0 \text{ [Bq/m}^3\text{]} \times 0.17 \text{ [(nSv/h)/(Bq/m}^3\text{)]} \times 1,760 \text{ [h]}$$

評価結果を第1図に示すが、欧州では、ラドンによる年間線量は国家間で大きく変動し、3mSvを超える国もある。その結果、全体の年間線量が4mSvを超える国が7ヵ国あり、チェコ共和国では5mSvを超える。欧州における自然界からの年間線量は、多くの国で日本よりも高く、倍以上の国もいくつかあることがわかる。

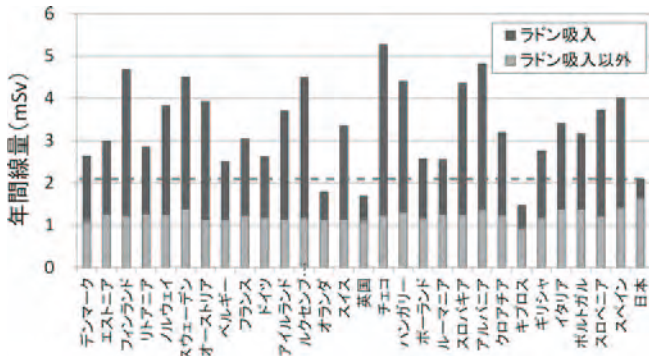
3. 欧州における高ラドン濃度家屋居住者総人口

前述のように、第1表には、屋内ラドン濃度が1990年のEC勧告で出された管理目標値を超える家屋の割合

第1表 欧州各国の屋内年間平均ラドン濃度

国	屋内年間平均ラドン濃度 (Bq/m ³)	高ラドン濃度家屋割合 %	
		200~400 Bq/m ³	400 Bq/m ³ 以上
オーストリア	97	8	4
ベルギー	48	1.7	0.3
クロアチア	68	5.4	1.8
キプロス	19	0	0
チェコ	140	10-15	2-3
デンマーク	53	2.7	0.2
エストニア	60	2-2.5	0.3-0.5
フィンランド	120	8.7	3.6
フランス	63	6.5	2
ドイツ	50	2.5	<1
ギリシャ	55	2	1.1
ハンガリー	NA	5.1	0.8
アイルランド	89	6	1.5
イタリア	70	3.2	0.9
リトアニア	55	2.5	0.3
ルクセンブルグ	115	NA	3
マルタ	40	0	0
オランダ	23	0.3	0
ノルウェー	89	6	3
ポーランド	49	1.6	0.4
ルーマニア	45	NA	NA
セルビア・モンテネグロ*	144	18	4
スロバキア	108	14	11
スロベニア	87	5.5	2
スペイン	90	4	2
スウェーデン	108	6-7	3-4
スイス	77	10	7
英国	20	0.4	0.1

* Vojvodina 県のみ
NA: Not Available



第1図 欧州諸国民の自然放射線からの年間線量

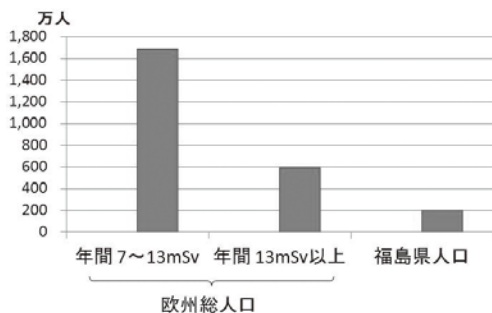
が示されている。この家屋割合が、人口割合に相当すると仮定すれば、当時の欧州各国の人口から、2つの管理目標値を超える総人口を推算することができる。この仮定は、やや乱暴な仮定ではあるが、オーダー的にはおおむね正しい値を与えると考えられる。推算結果を第2表に示すが、ラドン濃度 200Bq/m^3 はラドン以外の寄与も含めた年間線量に換算すると 7mSv に相当し、 400Bq/m^3 は 13mSv に相当する。欧州では年間 7mSv 以上の被ばくを受ける住民の総人口は約 2,300 万人であり、福島県人口約 200 万人の 10 倍以上にのぼることがわかる。年間 13mSv 以上被ばくを受ける住民の総人口は福島県民の約 3 倍に相当する。

屋内ラドン濃度の規制に関しては、その後 2009 年に WHO が発行した「ラドンハンドブック」⁵⁾ では、国の管理目標値を 100Bq/m^3 とすることが望ましく、これが難しい場合でも最大 300Bq/m^3 以下とするべきであるとの勧告がなされている。EC ではこれを受けて、既設家屋に関する管理目標値を従来の 400Bq/m^3 から 300Bq/m^3 に引き下げる一方で、新設家屋に関する管理目標値は当面 200Bq/m^3 に据え置くとの方針を示している。なお、ラドン濃度 300Bq/m^3 は 10mSv の年間線量に相当する。

JRC では現在、欧州の人間生活圏を 10km 四方の格子

第2表 欧州における高ラドン濃度家屋居住者総人口

200 ~ 400Bq/m ³ の家屋の居住者 (年間線量 7 ~ 13mSv)	400Bq/m ³ 以上の家屋の居住者 (年間線量 13mSv 以上)
約 1,700 万人	約 600 万人



第2図 年間線量 7mSv 以上の欧州住民の総人口

に分割し、各国共通の手法で測定とデータ処理を行うことでより信頼度の高い屋内ラドン濃度マップを作成する計画が進行中である⁶⁾。

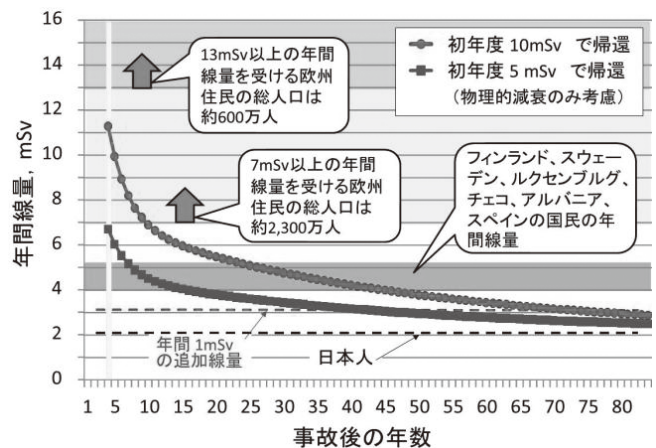
Ⅲ. 欧州の実情を踏まえた福島問題に関する考察

1. 年間 10mSv での帰還勧告は決して非人道的ではない

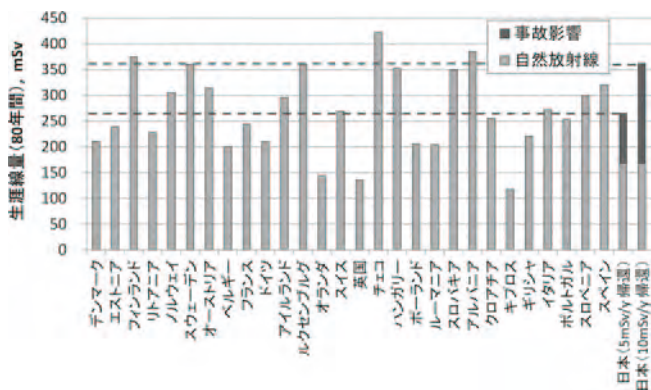
事故後 4 年目に、初年度年間 5mSv および 10mSv の追加線量で帰還するとした場合の住民の年間線量の変化を、前述した欧州諸国民の自然界からの被ばく状況に関する情報と重ね合わせて第3図に示す。

この図から、年間追加線量 5mSv (空間線量率で約 $1\mu\text{Sv/h}$ に相当) で帰還する住民の被ばくは、はじめの3年を除けばチェコやフィンランドなどの国民並みで、15年以上経過すれば自然減衰でそれを下回るようになることがわかる。年間追加線量 10mSv (空間線量率で $1.9\mu\text{Sv/h}$ に相当) で帰還する場合でも、帰還住民の被ばくは、屋内ラドン濃度 $200 \sim 400\text{Bq/m}^3$ の家屋に住む欧州住民並みであり、時間が経過すればそれを大きく下回るようになる。

これまで見てきたように、欧州では、日本に比べはるかに高い自然放射線環境下で生活する人が大勢いる。そうした被ばく環境にもかかわらず、妊婦や小児を含む大勢の国民が健康で文化的な生活を連綿として営んできた。こうした事実を冷静に見れば、年間 10mSv を若干上まわるような環境も、決して人類と相いれない環境ではなく、その中で人類が文化的発展を遂げてきた自然環境の一部なのである。確かに、今日では、WHO の「ラドンハンドブック」の勧告やその後の EC の対応を見れば、永続的に年間 10mSv を超えるような被ばく環境は好ましいものではなく、無理のない範囲での低減努力が促される環境とみなされている。しかしながら事故によるセシウム汚染の場合は、自然崩壊による線量率低減が確約されている。したがって仮に、初年度年間 10mSv



第3図 年間追加線量 5mSv および 10mSv で帰還する住民の年間線量の推移



第4図 生涯線量の比較

の追加線量という条件下で帰還勧告を行ったとしても、それは決して非人道的勧告にはならない。

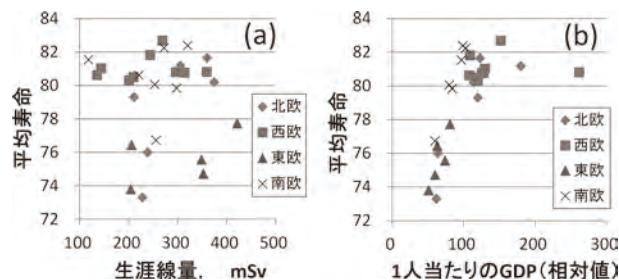
2. 事故影響を含めても、帰還住民の生涯被ばくは欧州国民並みにとどまる

汚染が残留する地域での生活を考える場合は、帰還初年度の年間線量のほか、生涯住み続ける場合の累積線量(生涯線量)も重要な考慮因子である。

第4図は、欧州諸国民の自然放射線による生涯線量(80年で計算)を示したもので、あわせて日本人の生涯線量を、事故影響による被ばくの増分を上乗せして示した。

図から明らかのように、欧州諸国民の生涯線量は約100から400mSv強と大きな変動幅を持つ。その影響が各国民の平均寿命に及ぼす影響を見るため、両者の相関をプロットして第5図(a)に示した。欧州諸国民の平均寿命も大きな幅があり、西欧と東欧の間では顕著な差が認められるが、その一方で生涯線量への依存性は全く認められない。第5図(b)には平均寿命を1人当たりのGDPに対してプロットして示すが、GDP相対値100以下では寿命低下が顕著で、100を超えると頭打ちになる傾向が明らかに見て取れる。これらのことは、国の豊かさ、すなわちその国の保健福祉システムの充実度(貧困さ)は寿命への大きな影響因子であるが、生涯で400mSv程度までの累積被ばくは健康に実害をもたらさないことを雄弁に物語っている。このことは、「累積線量600mSvでもがん死亡リスクの上昇は認められない」というインド高線量地域疫学調査結果とも一致する⁷⁾。

日本人の場合、自然放射線からの生涯線量は約170mSvであり、これに事故影響を加算すると、初年度年間5mSvの追加線量で帰還の場合は約270mSv、また10mSvで帰還の場合は約360mSvとなり、後者の場合でも「欧州の高い国並み」とどまる。図中の事故影響では半減期による減衰のみが考慮されているが、実際には「風化効果」による減衰加速や、帰還後の追加除染で、生涯線量はもっと低くなる。10mSvで帰還の場合でも生涯の累積線量が欧州並みにとどまるということは、具体的かつ有力な安心材料として考慮されるべきである。



第5図 欧州諸国民の平均寿命の生涯線量およびGDPへの依存性

IV. おわりに

放射線影響については日常生活のなかで相場観を持つことは不可能であり、過度に防御的になるのは人間の自然な反応である。しかし、低線量被ばくを恐れるあまり、欧州諸国並みの被ばく環境をも拒絶し、結果的に故郷を死の町として放棄してしまうような不幸はぜひ避けなければならない。そのためには、避難住民自身が「1mSvの呪縛」から脱皮しなければならないが、それは容易なことではない。

避難住民が故郷への帰還を考える際には、どのレベルの残留汚染レベルなら良しとするかという難しい判断が求められる。ここで紹介した欧州における自然放射線からの被ばく状況に関する情報が、その判断を現実的かつ合理的な方向に導く参考指標として利用いただければ幸いである。

— 参考資料 —

- 1) 原子力規制委員会、「帰還に向けた安全・安心対策に関する基本的考え方」, 平成25年11月20日.
- 2) G. Dubois, An Overview of Radon Surveys in Europe, EUR 21892 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg (2005), http://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/publications/EUR_RADON.pdf
- 3) UNSCEAR 2000 Report ANNEX B Exposures from natural radiation sources, (2000).
- 4) Commission Recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon (90/143/Euratom), http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/doc/legislation/90143_en.pdf
- 5) WHO handbook on indoor radon: a public health perspective, (2009).
- 6) V. Gruber, et al., "The European Indoor Radon Map and Beyond", Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, Vol. 8, No. 2, (2013).
- 7) 電中研 震災対応報告会資料, 平成23年11月10日.

著者紹介



河田東海夫 (かわた・とみお)
元原子力発電環境整備機構
(専門分野)核燃料サイクル工学,
バックエンド工学

シミュレーションの V&V の現状と課題

第 2 回 確率論的リスク評価の V&V

東京都市大学 村松 健

確率論的リスク評価 (PRA) の V&V という新概念を紹介する。PRA の V&V という概念は、PRA の関係者の間でさえほとんど議論されたことのない概念である。このため、本稿ではまず PRA の V&V とは何か、不確かさ評価との関連を含めて著者の理解を述べた上で、そのような V&V として現状でどのようなことがなされるかを日本原子力学会の標準を参考にして紹介する。さらに、今後 PRA の信頼性を一層高めていく上で役立つ V&V の可能性についても触れる。

I. はじめに

原子力施設のリスク評価 (Probabilistic Risk Assessment; 以下 PRA と略す) とは、対象施設が有するリスクを、発生しうる事故のシナリオ、その発生頻度及び影響の大きさの組み合わせとして評価する作業である。

原子力発電所の PRA は、米国原子力規制委員会 (NRC) により 1975 年に発表されたラスムッセン報告 (WASH-1400)¹⁾ ではじめて適用され、その後、機器故障や人的過誤の重畳により発生した米国のスリーマイル島原子力発電所 2 号機事故によりその有用性が認識され、世界的に手法の整備と適用が進んだ。我が国でも旧原子力安全基盤機構を中心に、電力、メーカー、日本原子力研究開発機構などにおいて広範な手法整備・適用研究がなされた。またその成果は日本原子力学会の PRA 実施手順に関する多数の標準として体系化されてきた。しかし原子力発電所での本格的な活用は 2000 年代にアクシデントマネジメント (AM) の整備の一環として内的事象 (ランダムな故障や過誤) に関するレベル 1.5 の PRA (格納容器の破損頻度までの評価を行う PRA) が実施されたことにとどまっていた。

その後、2011 年 3 月の東京電力福島第一原子力発電所の事故 (福島第一事故と略す) を教訓として原子力規制委員会が定めた新規制基準では、重大事故の発生防止及び緩和のための対策 (重大事故対処手段) の導入を求める

と共に、対策の有効性を確認するために、PRA に基づいて重要な事故シーケンス (事故のシナリオを起因事象と緩和設備の成功・失敗の組み合わせで表現したもの) を選定し、それによる大規模な放射性物質の放出を防止できることを決定論的評価で示すことを要求した。また、再稼働後においても継続的な安全性向上努力が重要であるとして、PRA の適用範囲を継続的に拡大しつつ、それを活用した総合的な自主的安全性向上評価について報告することを求めている。

新規制基準の制定により、PRA は、我が国の安全規制及び事業者における自主的安全性向上において明確な位置づけを与えられることとなった。また、今後は設計や保守管理などの分野で様々な活用が予想される。

PRA の結果は、そもそもどれほど信頼できるものかという問いに対して、V&V (Verification and Validation; 第 II 章参照) という観点で考えることは、価値がある。

この問いへの一つの説明は、PRA ではその一部として感度解析や不確かさ評価を行っており、意思決定ではそれを参考にすることが重要であるというものである。

PRA の最大のメリットは、人類が経験したことのない仮想的な事故までを含めて起こりうる事故のシナリオを体系的に検討し、事前に予測して対策を立てることができることである。従って、その結果を実験や統計で確認することははじめから期待されていない。しかし WASH-1400 の結果が安全性の説得に使われたことから、結果の不確かさには当初から高い関心がもたれた。WASH-1400 に対して不確かさ評価が不十分と指摘されたことを踏まえて、NRC がリスクの再評価として 1985 年に刊行した NUREG-1150²⁾ では、事故発生頻度から環境影響評価にいたる広範な解析項目をカバーする総合的

Current Status and Issues of V&V for Simulation (2); A discussion on V&V approach for PRA: Ken MURAMATSU.

(2014 年 10 月 22 日 受理)

■前回タイトル

第 1 回 格納容器内挙動の V&V データベース

な不確かさ評価が実施されている。

このようにPRAでは、不確かさ評価によって前述の間に答えようとしてきたのであるが、「PRAのV&V」という観点で見ることにより、可能な限り実験や運転経験など現実のデータと比較して確認することも必要ではないかとの発想が得られる。

以下では、このような観点から、第Ⅱ章でPRAのV&Vの考え方について説明した上で、第Ⅲ章ではPRAのV&Vの一環と考えることのできる活動を紹介する。また、今後のPRAのV&Vの可能性についても触れることとする。

なお、PRAには、対象とする事象の種類や評価するリスクの範囲により多くの分野があるが、ここでは原子力発電所の内的な事象に起因する炉心損傷頻度(CDF)を評価するPRAに限って述べることとする。

Ⅱ. PRAにおけるV&Vとは？

1. V&Vの定義

一般的に言われているシミュレーションのV&Vの考え方を参考に、PRAにおけるV&Vの意味を考えたい。今回の解説シリーズの第1回³⁾では笠原により過酷事故解析コードに適用できるモデリング及びシミュレーションのV&Vのフローが示されている。それによれば、まず物理現象の概念モデルに基づき数学的モデル化を行い、コードのVerificationを実施し、同様に概念モデルを実現する実験(物理的モデル化)を行って、そのデータとシミュレーション結果との比較によってコードのValidationを行い、モデルの予測性能を判断し、要求が満足された場合に実機を対象に予測評価を行い、その不確かさを定量化する。

また、文献3)では、「過酷事故の評価では、概念モデル段階でのモデル化や現象間の相互作用の考え落とし、また、試験と実現象との間のスケール効果等が大きいことに留意する必要がある」として、実機と実験との違いへの配慮を促している。

Verificationは通常、「検証」と訳される。上の説明によれば、現象の数学的なモデルが計算に正しく反映されているか、すなわち計算コードのプログラミングや入力データの作成に誤りがないかを確認することである。この定義をPRAに援用するならば、PRAのVerificationとは、あらかじめ定められた実施手順書等に忠実に従ってPRAがなされていること、及びPRAで使用する計算コードの利用において上述の意味でのVerificationがなされていることなどを確認することと言える。

Validationは、「妥当性確認」と訳される。上記の説明によれば、Validationでは、データとシミュレーション結果との比較によって、モデルの予測性能を判断し、要求が満足された場合に実機を対象に予測評価を行い、その不確かさを定量化する。これをPRAに当てはめて考

えれば、PRAで用いる評価手法や計算コードなどについて、実験や運転経験などと比較して、予測性能がPRAの目的に沿って十分かを判断するとともに、その比較から得られた知見を実機のPRAにおける不確かさ評価に反映することがPRAのValidationであるということになる。

2. V&Vの要件はPRAの使用目的に依存する

PRAには多様な使用目的がありうる。基本的な使用目的として次のようなタイプが考えられる。

- (1) 重大な影響を及ぼしうる事故のシナリオとその発生可能性の情報を得て、安全性向上に役立てる。
- (2) 個別の系統又は機器の非信頼度、人間の失敗確率などのリスクへの影響度を評価し、安全設計や保守計画、AM方策などの強化や最適化に役立てる。
- (3) 事故の発生頻度及び影響の大きさの定量的評価結果を安全目標や事業者が自主的に定める管理目標などと比較することにより、安全確保活動の達成度の総合的な目安として活用する。

福島第一事故の教訓から、設計の想定を超える自然現象や多重故障による事故のシナリオについて重要な見落としがないか見直すことが重要であるが、上の(1)は、これに対応する使い方である。新規基準において、PRAによる重要事故シナリオの分析が要求されたのは、このタイプの利用方法と考えられる。この目的に対しては、PRAの数値の精度よりも、大きい見落としをなくす体系的な分析がなされることが重要である。従って、V&Vでもそのような点に注目すべきであろう。

(2)は、例えば系統又は機器のレベルでの相対的な重要度の情報を得て保守計画での優先度付けに反映するといった活用である。このような応用では系統間の重要度を比較するのに比べて、機器間での重要度の比較をするPRAはより高い精度が必要とされている⁴⁾。(3)のタイプの代表は、定量的安全目標を安全性の判断基準の一部として用いることである。このためには不確かさの評価方法や意思決定での不確かさの扱いについて、十分な検討が必要になる。

このように具体的な適用目的によってV&Vの要件は変わってくる。重要なことは、PRAの一部として感度解析や不確かさ評価を行って、不確かさの要因が意思決定にどの程度影響しうるかを理解して使うことである。

3. 評価手法のV&Vと対象施設への適用に関するV&Vが必要である

原子炉事故のシミュレーションでは、例えば熱伝達率の計算式のようなモデルそのもののV&Vに加えて、対象プラントをどれほど細かなボリュームに区分するかといった対象施設のモデル化に関するV&Vが必要になる。内的事象のレベルIPRAにおけるCDFの評価では、

イベントツリー(ET)手法やフォールトツリー(FT)手法を使うが、一般的な手法としてのET手法やFT手法のV&Vにはあまり意味がない。重要なのは作成されたET/FTモデルが対象施設のシステム構成や運転手順を適切に表現しているかであるとか、FTを定量化する際に対象施設に適用可能な故障率データベースを使っているかである。これは学会標準等の手順書に沿っているかを確認することで部分的にはチェックできる。これは適用に関するVerificationと考えることができる。一方、Validationのためには、このET/FTモデルが対象施設のリスク特性を全体として正しく表現しているかを確認する必要がある。これを個別プラントについて統計データとの比較によって行うのは無理である。ただし、類似プラントが多数あれば、CDFのレベルでは不可能としても、系統レベルの失敗確率(非信頼度)のレベルであれば不可能ではない。この点については次章で再度触れる。

4. 評価項目ごとのV&Vと全体的評価に関するV&Vが必要である

PRAは、次章に示すように多数の評価項目から成る。この具体例はⅢ章で示す。評価項目ごとに評価手法のV&Vと対象施設への適用のV&Vが必要であり、さらにそれを統合した全体的評価のV&Vも必要である。

ここで留意すべきことは、各評価項目に必要な精度は、全体を統合した定量化結果への影響度に依存することである。例えば、人間の失敗確率の評価は大きい不確実さ要因と思われがちだが、原子力発電所では、事故時に短時間での起動が必要な安全設備は自動化されているので、常に支配的な要因になるとは限らない。

5. 不確実さ評価はV&Vの作業を統合化する枠組みと考えることができる

以上述べたように、PRAには多様な使用目的があり、それに応じて要求される精度が異なる。さらに、個別項目の評価で必要な精度は全体結果への影響度に依存する。これらを考えれば、個別評価項目ごとにV&Vの要件を定めて合否を判定することには難しい面がある。現時点で考えられる現実的なアプローチは、個別作業段階及び全体的な定量化段階のV&Vを統合化する枠組みとして、次のような不確実さの伝播解析の手法を用いることである。

このアプローチでは、個別項目ごとのV&Vとして、各項目の評価が所定の手順で実施されたことを確認するとともに、出力パラメータに関する不確実さ評価(例えば個別の系統又は機能ごとの失敗確率の不確実さ評価)を行うこととする。次いで、全体的評価のV&Vとして、個別項目ごとの不確実さ評価結果を入力として、全体的な定量化のプロセス(例えばETを定量化してCDF

を求めるプロセス)での不確実さ評価を実施する。このような解析を不確実さ伝播解析と呼んでいる。そして、PRAの最終結果には常に不確実さ評価結果を沿えて提示することとする。

以下では、このようなアプローチをとるとした場合に、どの程度までV&Vがなされたことになるかを考えて見る。

Ⅲ. PRAのV&Vはどこまでなされているか/なされうるか?

1. 日本原子力学会の標準におけるPRAのV&Vに関連する事項

現状でのPRAで、どの程度のことが一般的になされているかについては、学会標準の記載が参考となる。以下では、日本原子力学会標準委員会⁵⁾の軽水型原子力発電所に関するPRAの標準を参考とする。

(1) PRAの品質確保に関する一般的事項

PRAのVerificationには、用いた評価手法や計算コード、データ、解析上の仮定、評価の過程で用いた専門家による判断、それらの根拠などが、個別の評価項目を含めて、明確に記述されていることが大前提である。

文献6)には、PRAの品質確保に必要な一般的事項として次が述べられている。

(1) 品質保証活動

JEACAC4111-2009⁷⁾に基づいて品質保証活動を行うこととし、特に実施すべきこととして、a)実施者の責任分担、b)文書管理、c)データ等の更新管理、d)PRA実施者の技術能力、e)先行PRAからの知見や最新の技術的知見の反映の仕組み、f)文書化におけるトレーサビリティの確保が挙げられている。

(2) 専門家判断の活用

専門家判断の活用については、a)対象となる技術問題の明確化、b)専門家の選定、c)専門家判断の集約と活用、d)文書化に関して、それぞれの要件が示されている。なお、地震PRAの標準⁸⁾では、主として地震ハザード評価での活用のために、対象とする技術問題がPRAの結果に及ぼす影響の重要度に応じて手法を選択する場合の方法が、不確実さの扱い方を含めて示されている。

(3) ピアレビューの実施

ピアレビューとは、当該のPRAが、定められた標準に則って適切に実施されているかどうかを専門家がチェックすることである。ピアレビューに関しては、a)ピアレビューの実施目的・範囲・実施期間の設定、b)ピアレビューチームの構成、c)レビュー項目の明確化、d)実施手順、e)報告書作成、f)PRA実施者側におけるピアレビューでの指摘事項への対応について、要件が示されている。

以上の(1)~(3)のことが適切になされれば、少なくとも

Verification は実施可能と考えられる。

(2) 具体的な PRA 実施手順における V&V に関する事項

具体的な PRA 実施手順として文献9)を参考とする。レベル 1PRA の手順は、以下の 10 項目に区分される。項目ごとに、特に V&V に関連していると考えられる事項を示す。

(1) プラント情報の調査

プラントの現状を適切に反映した PRA を行うために設計や運転手順に関する文書を集集し活用する。また、それを補うためにプラント訪問(プラントウオークダウン)やプラント職員へのインタビューを実施する。

(2) 起回事象の選定及び発生頻度の推定

起回事象とは炉心損傷に至る事故シナリオを ET で分析する際の初期状態を分類したものである。起回事象には、放置すれば炉心損傷に至る可能性のある事象を漏れ落ちなく同定して、含める必要がある。そのためにブロックダイアグラム手法や故障モード影響解析(FMEA)等の体系的手法に加えて運転経験や近年の PRA 結果に基づく知見を併用して起回事象の選定を行う。

(3) 成功基準の設定

成功基準とは、各起回事象発生時に炉心損傷を防止するために必要な安全設備や操作の組み合わせであり、それを決めるために、広範な解析が必要となる。文献9)では、「対象とする事故シナリオを精度よく解析できることが検証されている解析コードによって、評価対象プラントの状態に対応したモデル及び入力データを用いて実施し、最確推定を原則とする。ただし、PRA の目的及び評価結果(CDF など)への影響を考慮し、その適用性が説明できる場合には、保守的な解析条件を用いてもよい」とされている。これはまさにコード及びその適用方法の V&V が要求されていると解釈できる。

(4) 事故シーケンスの分析

事故シーケンスの分析とは事故のシナリオを分類する作業である。一般には、起回事象からはじめて、事象の進展に沿いつつ、緩和設備成功/失敗でツリーを分岐させ展開していく ET 手法が用いられている。成功確率の時間依存性の考慮など、ET 手法が得意でない事項もあるので、適用性が説明できる場合は他の方法も許容される。

(5) システム信頼性解析

ET の分岐確率は、緩和設備に関するシステム信頼性解析を行って、その失敗確率として算出する。一般的には FT 手法が用いられているが、適用性が説明できる場合は他の方法も許容される。また、文献9)では「システム信頼性モデルの妥当性確認」の方法として、システムを機能喪失に至らせる要因の組み合わせとして、プラントの特徴を反映した主要かつ適切な要因が抽出されている

かなどについて考察するという方法を示すとともに、その適用性が説明できる場合には、別の手法によって妥当性を確認してもよいとしている。

(6) 人間信頼性解析

人間信頼性解析とは、起回事象の発生や緩和設備の作動失敗の原因となる人間の失敗の発生確率を推定する作業である。このためには THERP 手法¹⁰⁾を用いるが、適用性を説明できる場合には他の手法でもよいとされている。さらに「人的過誤確率の一貫性の確認」として、プラント履歴(運転、保守等の履歴)、手順書、運転実績及び経験に基づく知見と、算出した人的過誤確率との間の一貫性を確認するとされている。これは現時点で可能な Validation の方法を示したものと見ることができる。なお、文献10)には専門家判断に基づく不確実さ幅も示されており、通常はこの値が不確実さ評価に用いられる。

(7) パラメータの作成

パラメータの作成とは、運転経験データに基づいて機器故障確率や起回事象発生頻度を設定する作業である。文献11)には、我が国のプラントの運転から得られたデータに基づいて、これらのパラメータとその不確実さを評価する方法が示されている。従って、この手法に沿って適切に作業がなされれば、現実のデータを反映したパラメータができることになる。

(8) 事故シーケンスの定量化

事故シーケンスの定量化とは、ET 及び FT で表現された事故シナリオの論理モデルに、上の人間信頼性解析やパラメータ作成で設定された数値を代入して、事故シーケンスや炉心損傷の発生頻度を計算することである。文献9)には、「検証された計算コードの使用」として、事故シーケンスの定量化を行う機能に対して必要な評価精度を有することが検証された計算コードを使用することとされている。我が国では、複数の計算コードが公開または市販されており、プログラミングについては開発機関による Verification がなされている。実用上は計算時間の制約もあるので近似計算が必要になることが多いが、近似法の精度については研究がなされており、また PRA 実施者が計算オプションを変えて近似の影響を調べることも容易にできる場合が多い。また、最終的な結果については、「事故シーケンスの定量化結果をレビューし、計算結果の妥当性を確認すること」とされており、そのレビューの着眼点として、類似プラントとの比較、モデルとシステム設計や運転方法との整合性など7項目が例示されている。これも V&V の一環と考えることができる。

(9) 不確実さ解析及び感度解析

PRA の最終結果については、CDF の不確実さ及び PRA の結果に影響する因子の感度を把握するために感度解析と不確実さ解析を行うこととされている。不確実さ解析は、事故シーケンスの定量化のための計算コード

を用いて行う。通常は、入力データのうち、起因事象発生頻度、機器故障率、人的過誤確率、共通原因故障割合を確率変数とし、モンテカルロ法などにより不確実さ伝播解析を行い、CDFの不確実さを評価する。また、評価結果に有意な影響を与えると考えられるモデル、データに関する不確実さの要因又は解析上の仮定、条件、機器故障、人的過誤等の因子を選定して結果への潜在的な影響を把握するため、感度解析を実施する。

(10) 文書化

文書化については、V&Vの観点ではトレーサビリティの確保が重要であり、文献9)でも評価手法やデータについて追跡可能な詳細さで記載することが指摘されている。

以上のように原子力発電所のレベル1PRAにおいては、評価の作業の個別項目ごとにV&Vに対応する作業がなされ、さらにその結果を反映して最終評価結果に関する不確実さ解析がなされる。また、不確実さ解析で確率変数として扱わないパラメータについても、結果に重要な影響を与えうる因子については感度解析でその影響を把握する。PRAのValidationとは不確実さの評価であると考えれば、CDFまでの不確実さ伝播解析及び感度解析の実施によりV&Vは完結できる。従って、PRAでモデル化できている事項についてはV&Vの仕組みはあるとよいと考える。

2. PRAの全体的な評価に関するValidation

PRAの最終結果(CDFなど)を統計的に確認することは無理としても、PRAの品質を継続的に高めていく意味では、最終結果に近いレベル、例えば系統や機能のレベルでの非信頼度評価結果のValidationを追求すべきであろう。

その方法としては、次のような研究が考えられる。

- 1) 安全に関連する設備について系統又は機能レベルでの失敗の運転経験データを収集し、これに基づいて系統や機能の非信頼度の計算モデルや共通原因故障のパラメータの妥当性を検討する。
- 2) 運転経験事象を継続的に分析し、起因事象、システム間の相互依存性、人間の過誤などのモデルに反映すべき事項がないか検討する。
- 3) 運転訓練シミュレータによって実験を行い、運転員の過誤確率を評価するモデルの妥当性を検討する。

3. PRAにおいてモデル化されていない事項の影響

内的事象のレベル1PRAに限っても、PRAで明示的にモデル化できていない事項も少なくない。例えば、圧力容器破損事故の発生頻度、機器故障率や人的過誤確率への組織的要因の影響、機器故障確率や冷却材喪失事故

発生頻度への経年劣化の影響、デジタルシステムにおけるソフトウェアの信頼性などである。テロのように本質的に扱いにくい因子もあるが、上述の項目については、それぞれごとにモデル化を試みる研究が多数なされており、いくつかについてはOECDを通じた国際協力研究も行われている。そのような研究を継続することは重要である。また必要があれば、感度解析によってどのような影響をもたらさうかを検討することも可能と考えられる。こうした因子があることを意識してPRA結果を使うことが重要である。

IV. おわりに

PRAの最終結果を統計データで直接に確認することはできない。しかし、PRAのValidationとは不確実さの評価であると考えれば、モデル化された事項については、現在でもV&Vの方法は存在すると言える。

PRAにはモデル化されていない事項も多く認識されており、これらについては優先度を議論しつつ研究を継続し、適切な評価手法を構築していくことは重要である。しかし、そのような残された課題については、それを明確に意識し、配慮してPRAを使うならば、現在でも、PRAが有効に活用できる分野が数多く存在する。重要となり得る重大事故のシナリオを体系的に探索することなどは、有効な使い方の例である。

現状でのV&Vに不十分な点があるとしても、それを理由にPRAを活用しないならば、それは危険である。PRAの欠点によるリスク増加よりもメリットを活かすことによるリスク低減の方が大きくできると信じるためである。著者は、PRAのV&Vがより活発になされ、V&Vの知見が共有されPRAに反映されることにより、PRAの品質が向上していくことを期待している。

本稿がPRAの活用に関心を持つ方々に少しでも参考になれば幸いである。

— 参考資料 —

- 1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, The Reactor Safety Study, Wash-1400, (1975).
- 2) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants, NUREG-1150, December 1990.
- 3) ASME, Standard for Level 1/ Large Early Release Frequency Assessment for Nuclear Power Plant Applications, American National Standard, ASME/ANS RA-S-2008 (Revision of ASME RA-S-2002), 2008.
- 4) 笠原文雄, シミュレーションのV&Vの現状と課題「第1回 格納容器内挙動のV&Vデータベース」, 日本原子力学会誌, 56 [11], 49 (2014).
- 5) 日本原子力学会標準委員会ホームページ <http://www.aesj.or.jp/sc/index.html>
- 6) 日本原子力学会標準委員会, 日本原子力学会標準原子力発電所の確率論的リスク評価の品質確保に関する実施基準: 2013 (AESJ-SC-RK006: 2013), 2013.

- 7) 日本電気協会, 原子力発電所における安全確保のための品質保証規程, JEAC4111-2009.
- 8) 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.
- 9) 日本原子力学会標準委員会, 原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的リスク評価に関する実施基準: 2013 (レベル1PRA 編) (AESJ-SC-P008:2013), 2013.
- 10) A. D. Swain, H. E. Guttman, Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, Final Report, USNRC, 1983.
- 11) 原子力発電所の確率論的安全評価用のパラメータ推定に関する実施基準: 2010 (AESJ-SC-RK001: 2010), 2010.

著者紹介



村松 健 (むらまつ・けん)
 東京都市大学
 (専門分野/関心分野) 原子力安全工学,
 リスク評価

日本原子力学会誌 ATOMOS 広告のご案内

一般社団法人 日本原子力学会

「日本原子力学会誌」は、特集・解説・講演等、広く原子力に関わる記事を掲載し、我が国原子力研究、産業の発展に資するべく、努力しております。学会誌は毎月約8,000部が発行されており、電力、メーカー、大学、研究機関を中心とする会員および賛助会員の原子力関係者はもとより、広く原子力関係機関、市町村、マスコミ等にわたっております。本誌への広告掲載は、発展の一助になるものと信じておりますので、ぜひ、広告の掲載をお願い申し上げます。

■賛助会員料金(消費税別)

表2	150,000円	前付	110,000円
表3	140,000円	後付	100,000円
表4	190,000円	差し込み	230,000円

■一般料金(消費税別)

表2	160,000円	前付	120,000円
表3	150,000円	後付	110,000円
表4	200,000円	差し込み	240,000円

※差し込みは本誌に同封となります。

■上記の金額は、1ページあたりのモノクロの料金です。カラーの場合、1ページあたり120,000円追加となります。

■過去1年以上毎月出稿された機関につきましては10,000円引きとなります。

■連絡先 105-0004 東京都港区新橋2-3-7新橋第二中ビル3F, 一般社団法人 日本原子力学会, 学会誌編集担当 富田, 野口

TEL 03-3508-1262, FAX 03-3581-6128, E-Mail: hensyu@aesj.or.jp

■詳細 <http://www.aesj.or.jp/atomos/atomoskoukoku.html>

放射性廃棄物概論

施設の運転及び廃止措置により
発生する放射性廃棄物の対策

第5回 放射性廃棄物の処分

日本原燃(株) 見付 樹大, 原子力発電環境整備機構 後藤 考裕

I. はじめに

低レベル放射性廃棄物の埋設処分は、浅地中のトレンチ処分が1995～1996年に、ピット処分が1992年より20年あまりにわたって、それぞれ安全に実施されている。また、浅地中処分に係る安全規制が見直されたこと等を踏まえ安全性向上への取組みを継続している。さらに、原子力発電所の廃止措置や再処理工場の運転に伴い発生する廃棄物のピット処分や余裕深度処分について、処分施設の概念検討や調査が行われている。

一方、高レベル放射性廃棄物の最終処分については、平成12年に制定・公布された特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律に基づき原子力発電環境整備機構(NUMO)が設立され¹⁾、全国の市町村を対象に、処分地選定の第一段階の文献調査を行う地域の公募を行っている。しかし、いまだ文献調査の実施には至っておらず、2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、国が前面に立って問題解決に向けて取り組む必要性が示された²⁾。

本稿では、低レベルと高レベルの放射性廃棄物処分事業のうち、ピット処分、余裕深度処分および地層処分を中心に、処分方法、安全確保の考え方や技術的な課題・進展などを紹介する。なお、地層処分の場となる地質環境については第6回で、地層処分システムの安全評価については第7回で、それぞれ述べる。

Introduction to Radioactive Waste - Management of Radioactive Waste from Operation and Decommissioning of Nuclear and Other Facilities (5) ; Disposal of Radioactive Waste : Tatsuhiro MITSUKE, Takahiro GOTO.

(2014年5月29日受理)

■前回タイトル

第4回 放射性廃棄物の処理

II. 低レベル放射性廃棄物の処分

1. 低レベル放射性廃棄物処分の概要

本連載講座第1回³⁾で紹介されたように、低レベル放射性廃棄物の埋設処分は廃棄物に含まれる放射性物質の種類や濃度に応じてトレンチ処分、ピット処分、余裕深度処分を行う。

(1) トレンチ処分

低レベル放射性廃棄物のうち、放射能レベルの極めて低いものについてはトレンチ処分を行う。これは浅地中にコンクリートピット等の人工構築物を設置せず廃棄物を埋設処分する方法である。

日本原子力研究開発機構(JAEA)では、動力試験炉(JPDR)の解体により発生したコンクリート等の廃棄物を1995～1996年にトレンチ処分しており、約1,670トン埋設している⁴⁾。

(2) ピット処分

低レベル放射性廃棄物のうち、放射能レベルが比較的低いものについてはピット処分を行う。これは浅地中にコンクリートピット等の人工構築物を設置して廃棄物を埋設処分する方法である。

青森県六ヶ所村の日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センターでは、原子力発電所の運転に伴って発生する廃棄物を1992年からピット処分しており、2014年3月末までに200ℓドラム缶約26万本(約5.2万m³)を埋設している⁵⁾。

(3) 余裕深度処分

低レベル放射性廃棄物のうち、放射能レベルが比較的高いものについては余裕深度処分を行う。これは住居建設などの一般的な地下利用のほか、高層建築物の建設、地下鉄、上下水道、共同溝などの利用を想定しても十分に余裕のある深度(法律⁶⁾では地表から50m以深)に処分する方法である。

余裕深度処分は、原子力発電所の廃止措置や再処理工場の運転に伴い発生する廃棄物を処分するため、処分施設概念検討や調査が行われている⁷⁾。

2. 安全確保の考え方

(1) 安全確保の概要と安全規制

低レベル放射性廃棄物の埋設後の安全確保には「管理型処分」の考え方が適用される。管理型処分は、放射性廃棄物の放射能による人間への影響が安全上支障のないレベル以下になるまでの間、人工構築物(人工バリア)や土壌等(天然バリア)から成る処分システムにより、放射能の減衰に応じた管理を行う。また、自然過程や人為的な過程により将来起こり得ることを想定したシナリオに基づく安全評価を行い、その結果示される被ばく線量が基準を下回することで、管理を終了した後も長期的に安全性が確保される見通しであることを確認する。

埋設事業に係る安全規制は、旧原子力安全委員会の「安全審査の基本的考え方」⁸⁾が1988年3月より示されていたが、現在は、原子力規制委員会が2013年12月に制定した「新規制基準」^{6,9)}の適用を受けるよう見直されている。新規制基準では埋設事業の安全性を向上するため地震、津波などの自然現象への対応や評価が強化されたほか、主に以下の点が見直されている。なお、余裕深度処分は新規制基準の対象外であり、別途検討がなされる。

(1) 管理期間の考え方

基本的考え方では第1段階～第3段階に分類した段階管理の考え方を示していた。新規制基準では管理期間を「放射性廃棄物の受入れの開始から埋設の終了まで」と「埋設の終了から廃止措置の開始まで」に大別した。

(2) 管理期間終了後の安全評価シナリオ

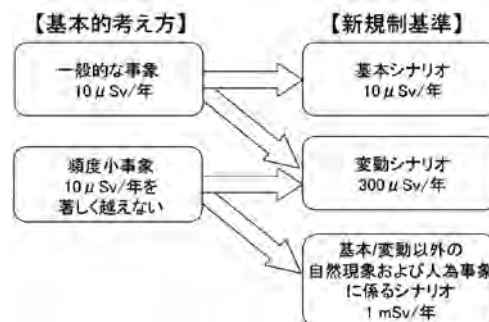
基本的考え方では管理期間終了後のシナリオを「一般的事象」と「頻度小事象」とに分類して評価することを示していた。新規制基準では埋設施設の長期状態設定のもと自然現象と人為事象による影響を①科学的に発生の可能性が高いと考えられるシナリオ(「基本シナリオ」)、②基本シナリオの不確かさを網羅的に考慮したシナリオ(「変動シナリオ」)、③「基本/変動以外の自然現象および人為事象に係るシナリオ」に大別し評価することを示している。新旧規制でのシナリオ区分と基準線量の比較を第1図に示す。安全評価は被ばく線量の最大値が出現する時間まで行う必要がある。

(3) 定期的な評価の実施

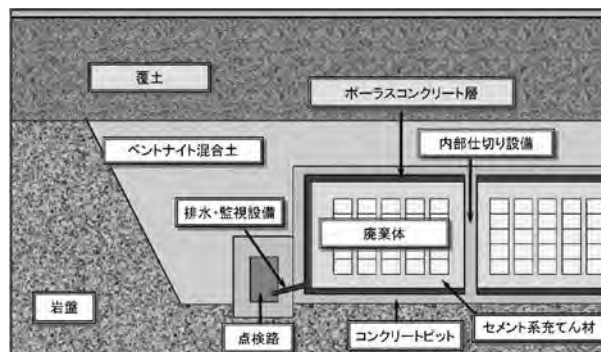
見直された事業規則では10年を超えない期間で定期的な評価の実施が要求されている。この評価では、処分システムの機能に係る地下水モニタリング結果や国内外の研究・技術開発成果などの最新知見を反映し、安全評価の不確かさの低減を図りつつ、長期的な安全性の見通しを確認していく。

(2) ピット処分の安全確保

ピット処分の処分システムに要求される機能は放射線の遮へい、放射性物質の閉じ込めおよび移行抑制であり、管理の段階に応じた要求を満たすように設計される



第1図 新旧規制でのシナリオ区分と基準線量



第2図 ピット処分における処分システムの構成

(第2図)。

「放射性廃棄物の受入れの開始から埋設の終了まで」の段階では放射線の遮へい、放射性物質の閉じ込めが要求され、人工バリアにより担保する。鉄筋コンクリート造のピットは外周仕切り設備、内部仕切り設備および覆いから構成される。ピットは内部仕切り設備で区画し、区画内は廃棄体を定置後、セメント系材料で充てんし、上部に覆いを設置する。これにより放射線を遮へいするとともに、ピット内部には多孔質のポーラスコンクリートを設置して、仮に水が浸入しても廃棄体に達する前に排水される構造とすることで、放射性物質を人工バリア内に閉じ込める。

「埋設の終了から廃止措置の開始まで」は主に放射性物質の移行抑制が要求され、ピット等の人工バリアと土壌等の天然バリアにより担保する。ピットは低透水性の岩盤を掘り下げて設置し、ピットの周囲には周辺の岩盤よりもさらに透水性を低くするため、ベントナイトを混合した覆土を行う。また、上部を土砂で覆って締め固めを行う。これにより地下水の浸入を抑制するとともに、人工バリアや天然バリアへの放射性物質の吸着を期待することで放射性物質の移行を抑制している。

埋設開始以降、管理期間中は埋設地の保全を行うとともに、地下水等のモニタリングを実施し、放射性物質の漏出や移行に伴い濃度の監視を行うほか、定期的な評価に必要な人工バリアや天然バリアの機能に係るデータの取得を行う。地下水モニタリングでは長期の実施方法、バリア機能に係るデータを取得するための方法や観測項

目の検討が課題となる。

管理期間終了後の安全評価は、前述のシナリオ分類に基づき、自然過程のシナリオでは放射性物質が地下水によって移行するシナリオを中心に評価し、隆起・侵食作用によって処分施設が地表に接近するケースなども考慮する。人為事象は廃棄物埋設地の再利用などが埋設された廃棄物に意図せずに接近するシナリオを評価する。安全評価ではこれらのシナリオを考慮しても、被ばく線量がシナリオごとの基準線量を下回ることを確認し、事業廃止まで定期的な評価を繰り返す。

3. 今後の処分施設の検討

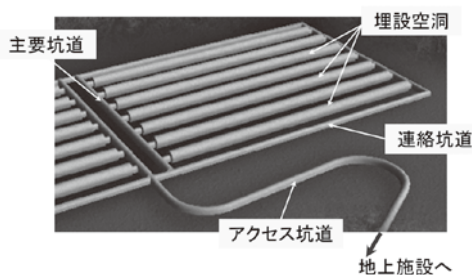
原子力発電所の廃止措置や再処理工場の運転に伴う廃棄物の発生が見込まれる。日本原燃ではこれらを処分する施設概念の検討や調査を実施している。

ピット処分では、原子力発電所の運転に伴って発生する廃棄物に比べ、大型で表面線量率が高い廃棄物を効率的かつ安全に処分することが課題となる。そこで、施設概念としてボックスカルバート(箱型の構造物)を並設したピット構造を志向している¹⁰⁾。施設は従来の上部開閉型から横入型とすることで廃棄物移動中や定置作業中に放出される放射線を遮へいする。

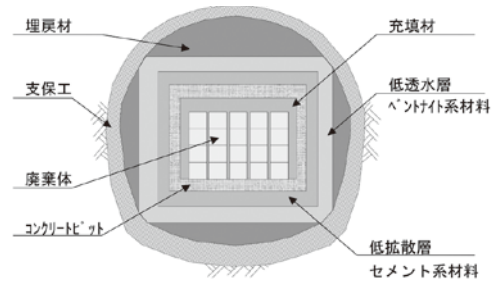
余裕深度処分では、処分施設の検討に必要な、地質・地下水・地盤に関する詳細な情報を得ることを目的として、2002～2006年に同社敷地内で調査を実施した⁷⁾ほか施設の概念設計を実施している。

施設は地下約100mに設置し、地上から地下に廃棄物を輸送するアクセス坑道、処分空洞、処分空洞を連絡する主要坑道および連絡坑道から構成される(第3図)。処分空洞は直径約18mのトンネル型を想定している。施設の構成(第4図)における人工バリアの特徴は、ベントナイトを用いた低透水層により地下水の浸入を抑制し物質の移動が拡散で行われる場を形成することに加え、高緻密なモルタルを用いた低拡散層により拡散で移動する物質の流量を抑制していることである。

余裕深度処分については安全規制などの整備が進められており、国際動向等を踏まえた制度化がなされることが望まれる。



第3図 余裕深度処分施設レイアウトイメージ¹¹⁾



第4図 余裕深度処分施設の構成¹²⁾

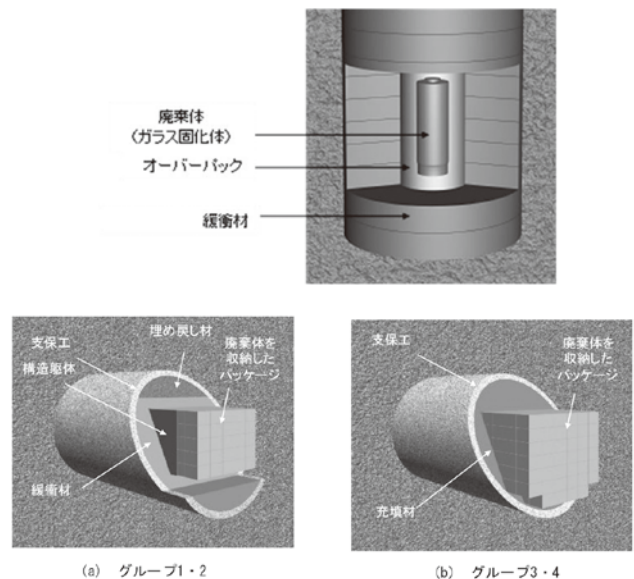
III. 高レベル放射性廃棄物の処分

1. 地層処分の安全確保策と事業の進め方

本連載講座第1回³⁾で紹介されたように、高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物の一部(以下、TRU放射性廃棄物)については地層処分を行う。地層処分は、閉鎖後長期の安全確保という目標を達成するために、放射性廃棄物を地下深くに閉じ込め、人間の生活環境から隔離することを基本とする。この隔離と閉じ込めを確保するために、300m以深の安定な地質環境を選定し、人工バリアと天然バリアによる多重バリアシステムを構築した上で放射性廃棄物を埋設する。

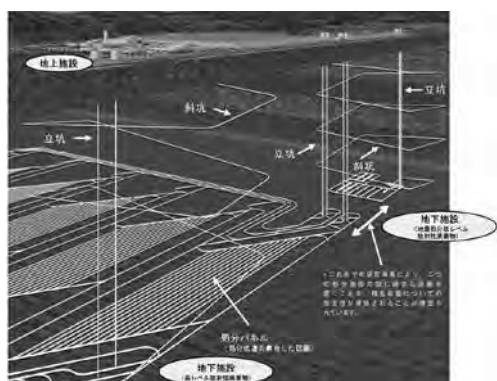
高レベル放射性廃棄物およびTRU放射性廃棄物の地層処分における人工バリアシステムを第5図に示す。TRU放射性廃棄物は、放射性核種の種類・濃度や発熱の有無および含有化学物質などの観点からグループ1～4の4種類に分類され¹³⁾、それぞれ異なる人工バリアシステムを構築する。

高レベル放射性廃棄物処分場とTRU放射性廃棄物処分場を併置する場合の地下施設のイメージを第6図に示す。高レベル放射性廃棄物処分場の規模は、廃棄体4



第5図 人工バリアシステムの基本的なバリア構成¹⁴⁾

(上:高レベル放射性廃棄物, 下:TRU放射性廃棄物)



第6図 処分場の地下施設の例
(処分場の概要 分冊-1¹⁵⁾を編集)

万本を収容できる5～6km²を想定している¹⁵⁾。また、TRU放射性廃棄物処分場の規模は、19,000m²程度を想定している⁹⁾。

地層処分事業は、処分施設建設地の選定、建設・操業、閉鎖の順に進める。

処分施設建設地の選定は、地層処分の安全機能に著しい影響を与える天然事象を回避し、さらに地層処分を行う上で好ましい地質環境特性が長期的に大きく変化しない場所を見出すことを目的に実施する。その選定は、概要調査地区選定段階、精密調査地区選定段階、最終処分施設建設地選定段階の3つの段階を経て、国の承認や地域住民の理解を得ながら行う^{14,15)}。

次に、建設・操業について述べる。地上・地下施設の建設は、原子力施設やトンネルの建設に用いられている技術を応用して行う¹⁵⁾。その際、新たに取得される地質環境特性、各種モニタリングに関するデータに基づき、地層処分システムの安全性を再確認する¹⁴⁾。操業段階には、地上施設での廃棄体の受け入れ・検査、オーバーパックへの封入や緩衝材の製作などを行う。地下施設では廃棄体の搬送、定置、埋め戻しを行う。

最後に、閉鎖について述べる。閉鎖は、事業期間中の人的な管理に依存した安全性確保から、管理に依存しない受動的な安全確保に移行する行為である¹⁴⁾。NUMOは原子炉等規制法に従い、予め閉鎖措置計画を定め、原子力規制委員会の認可を受けたのちに¹⁶⁾、閉鎖措置を開始する¹⁴⁾。

2. 東日本大震災を踏まえた地層処分における安全確保の取組み

NUMOは上記の地層処分の安全確保の考え方や進め方、それに必要な技術の整備を進めてきたが、東日本大震災により、地震や火山など自然災害や、将来にわたる地層処分の安全性に対する国民の不安の声が高まった。このため、地層処分における操業の安全性、とくに放射線安全の確保について、設計想定を超える事象に対する安全対策の裕度の確認を行った¹⁷⁾。ここでの放射線安

全とは廃棄物からの放射線の漏えいの防止(遮へい)と、放射性廃棄物からの放射性物質の漏出の防止(閉じ込め)の2つを指す。

検討の流れとしては、まず操業手順を前提条件として設定し、地震や津波など天然事象により発生する起因事象を設定した。さらに、起因事象が発生した場合の施設の異常の発生防止策、異常が発生した後の拡大防止策、放射性物質の遮へい・閉じ込めの対策について検討し、それでも廃棄体が破損した場合の事故後の対応策についても設定した。操業期間中の起因事象の発生から異常事態が進展する様子を第7図に示す。

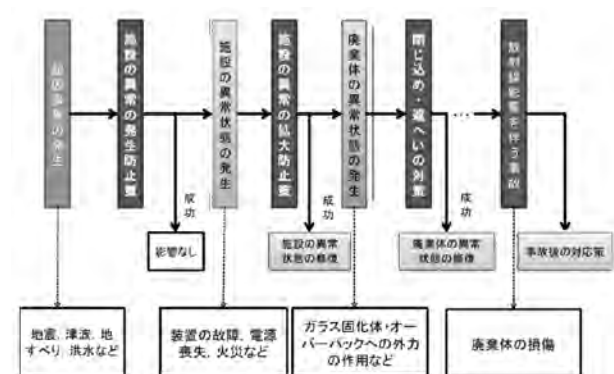
検討の結果、起因事象からの影響の伝播として、安全対策がすべて無効化した場合に到達する異常状態は、ガラス固化体またはオーバーパックに外力が作用した状態、ガラス固化体またはオーバーパックの温度が上昇した状態の2項目が挙げられた。

さらに、地上施設における異常状態に対する裕度を検討した結果、ガラス固化体が落下したとしてもキャニスタが対衝撃性を有するため、ガラス固化体が飛散することはないことを確認した。また、長期間換気が停止したとしてもガラス固化体の表面温度は200℃程度までしか上昇せず、キャニスタの閉じ込め機能が損なわれることはないことを確認した。

地下施設においても同様に検討した結果、アクセス坑道における搬送車両の逸走、メタンガスの爆発、積替え中・定置中の落下が発生したとしても、オーバーパックに貫通亀裂が発生しないことを確認した。このため、放射性物質の閉じ込めの機能は維持されると考えられる。

さらに、異常状態発生後の廃棄体回収・点検、操業の再開のための修復策について検討した結果、既存技術を組み合わせることで修復が可能となる見通しが得られた。

また、操業段階における地震動(地震の揺れ)に対しては、処分施設建設地が決まっていないことから保守的な評価をするために設定したマグニチュード8クラスの地震が耐震設計上もっとも厳しい条件を与えると考えてい



第7図 操業期間中の異常事態の進展

たが¹⁸⁾、震災後、マグニチュード9クラスの超巨大地震に対する影響検討の必要性を認識した。そのため、東日本大震災の際に観測された多くの地震動記録を基に、既往の検討¹⁸⁾と同じ坑道モデルに対して地震応答解析を行い、耐震性について検討した¹⁹⁾。

その結果、坑道周辺岩盤の最大せん断ひずみや局所安全係数の分布形状は常時と地震時ではほとんど変化が見られない等の理由から、坑道周辺岩盤の安定性や支保工の安全性に与える地震の影響は小さいことを確認した。

今後も継続的に検討を進め、安全確保上の課題を把握するとともに、課題に対応して、技術開発を実施し、継続的に改良を実施することで安全性を向上させる。

IV. おわりに

以下に各事業のまとめと今後の方針について述べる。

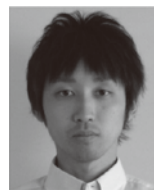
低レベル放射性廃棄物の処分について概要と安全確保策、今後の処分施設の検討を中心に述べた。埋設事業では安全確保を最優先に考え、事業者自らその責任を十分認識し、規制への適切な対応を行うとともに、埋設事業の特徴である長期の不確かさへの対応、処分システムの信頼性向上に日々取り組む。また、原子力発電所の円滑な運営や、廃止措置で発生する廃棄物の処分を見据え、計画的に事業を推進する。さらに地域の理解を得て、六ヶ所での原子燃料サイクルの確立の目標のもと、世界をリードする埋設事業者を目指していく。

高レベル放射性廃棄物およびTRU放射性廃棄物の地層処分について、安全確保策と事業の進め方、さらに東日本大震災後の取組みについて述べた。地層処分事業については、今後も国の動向も踏まえながら、国民の理解が得られるように透明性の高いサイト選定を進めていく。また、東日本大震災を踏まえた安全性の再確認については、今後も最新の知見を取り込みながら継続していく。

— 参考資料 —

- 1) 法律：「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」, 平成12年6月7日法律第117号.
- 2) 資源エネルギー庁：「エネルギー基本計画」, 2014.
- 3) 長尾誠也, 山本正史：「バックエンド連載講座 放射性廃棄物概論第1回」, 日本原子力学会誌, 56 (10), (2014).
- 4) 日本原子力研究開発機構原子力科学研究所：「埋設実地試験」
http://www.jaea.go.jp/04/ntokai/backend/backend_01_04_01.html (最終アクセス：2014年4月23日).
- 5) 日本原燃株：「低レベル放射性廃棄物埋設センターの操業状況」
http://dailydb.jnfl.jp/daily-stat/cgi/pub_preview.cgi?d&4&20140401 (最終アクセス：2014年4月23日).
- 6) 原子力規制委員会：「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」, 平成25年12月6日原子力規制委員会第16号.
- 7) 日本原燃株：「低レベル放射性廃棄物の次期埋設に関する本格調査の結果について」, 2006年9月1日
<http://www.jnfl.co.jp/press/pressj2006/pr060901-1.html> (最終アクセス年月日 2014年4月23日).
- 8) 原子力安全委員会：「放射性廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方」, 昭和63年3月17日, 原子力安全委員会決定.
- 9) 原子力規制委員会：「第二種廃棄物埋設施設の位置, 構造及び設備の基準に関する規則」, 平成25年12月6日, 原子力規制委員会規則第30号.
- 10) 濱中孝之, 他：「新規廃棄物を想定した処分施設の概念検討」, 日本原子力学会「2014年春の年会」予稿集, I03, p.357.
- 11) 京谷修：「放射性廃棄物処分施設の設計検討状況」, 土木学会平成17年度全国大会研究討論会, コンクリート構造物の超長期耐久性評価—1万年コンクリートへの挑戦—資料, (2005).
- 12) 電気事業連合会：「余裕深度処分に関する検討状況について」, 原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会 (第17回)資料, (2007).
- 13) 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構：「TRU廃棄物処分技術検討書—第2次TRU廃棄物処分研究開発とりまとめ」, (2005).
- 14) 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).
- 15) 原子力発電環境整備機構：「公募関係資料 処分場の概要分冊-1」, (2009).
- 16) 法律：「核原料物質, 核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」, 昭和32年6月10日法律第166号.
- 17) 鈴木覚, 他：「東日本大震災の教訓を踏まえた地層処分の安全確保の取り組み」, 原子力バックエンド研究, Vol. 20, No.2, 97-100 (2013).
- 18) 原子力発電環境整備機構：「地層処分施設の耐震性評価」, NUMO-TR-10-13, (2011).
- 19) 窪田茂, 他：「地層処分施設における処分坑道の耐震性検討」, 土木学会67回年次学術講演会, 2014年.

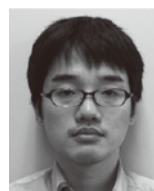
著者紹介



見付樹大 (みつけ・たつひろ)

日本原燃株

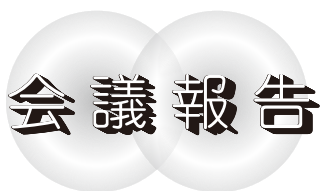
(専門分野/関心分野) 放射性廃棄物埋設施設の安全評価



後藤考裕 (ごとう・たかひろ)

原子力発電環境整備機構

(専門分野/関心分野) 放射性廃棄物処分



何が合理的な伝え方か—福島第一発電所事故の教訓から

「第47回原産年次大会」

2014年4月15日、16日（東京）

日本原子力産業協会は2014年4月、「信頼回復に向けた決意」を基調テーマに「第47回原産年次大会」を開催した。国民からの信頼回復を目指し、福島への復興に向けた課題や世界における原子力の役割を認識し、産業界の決意につなげる議論を交わすことが開催趣旨であった。

原子力への信頼回復のため原子力産業界がなすべきことや、国民の不安の解消に向けたコミュニケーションのあり方を議論したセッションには、M.グリムストーン氏（英国インペリアル・カレッジ・ロンドン名誉上級研究フェロー）、A.リーシング氏（世界原子力協会事務局長）が参加。海外原子力関係者の視点から、国民とのコミュニケーションを巡り、極めて示唆に富んだ話を披露した。本稿では両氏の講演概要を紹介する。

グリムストーン氏は「原子力への公衆の理解、科学だけの問題ではない」と題し、原子力界のいわばコミュニケーション失敗事例を挙げ、社会に対する「合理的な伝え方」とは何かを問題提起した。発表の概要は以下の通りである。

- ・福島第一原子力発電所事故は3つの重要な点を提起した。つまり、①1970年代の古いプラントにも関わらず、原子力技術の施設としてはあれだけの巨大自然災害に対しても堅牢であった点、②放射性物質は放出されたが人体に影響を及ぼしていない点、③「誤った発信」が行われてしまった点。つまり、その後の対応を「安全サイドにしておく」ことで、結果的に住民が「何年も自宅へ戻れない」という「甚大な事故」となり、原子力の怖いイメージがより増幅されてしまった。
- ・様々なエネルギー源がある中で、なぜ原子力だけが危険なものと思われることになってしまったのか。原子力界が「二度と事故を起こさない」と強調することで、原子力だけは「特殊」であると、自らを縛っているようなものだ。
- ・福島第一発電所サイトでは、汲み上げた地下水は処理し、国際的な飲料水の基準値以下まで下げない限り放出しない方針と聞いた。しかし、そうすれば住民が安心するのだろうか。住民にしてみれば、それでは「国際社会の基準は信用できないのか」と考える一方、「日本は国際社会に協力を求めているではないか」と、日本の態度に矛盾を感じてしまう。
- ・事故後、安全基準はより厳格になった。加えて産業界は基準要求以上の対策を講じているが、それでは「規制当局の基準では不十分」と考えているのか。産業界

が言っていることはある意味正しくても、その伝え方に合理性がない。合理的な範囲を超えて「プラスアルファの対応」でリスクを減らそうとするあまり、かえって「信頼を失う」という新たなリスクを生じてはいないか。

- ・原子力産業界は、「技術的合理性」と公衆の「心理的合理性」は違うことを理解すべきである。

他方、リーシング氏は「放射線防護の観点からの考察」を講演し、放射線への過度な反応がもたらす社会的リスクに目を向けるよう訴えた。発表の概要は以下の通りである。

- ・福島事故を受け様々な議論が行われてきているが、その中心にあるのは放射線への恐怖だ。しかし、福島での放射線量は、2011年11月と2013年9月を比較すると約50%減少している。重要なのは、自然の放射線であれ人工の放射線であれ、人体にとっては区別がないこと。
- ・福島の放射線量は一般の人々が普通に暮らせるレベルだが、住民の多くが避難中である。避難生活による心理的影響の方が、放射線よりよほど有害ではないか。
- ・2013年11月の福島県の世論調査では、復興に向けて知りたいこととして、「食品の安全」、「放射線の健康影響」がともに60%を越え上位に挙げられている。事故から3年近く経過するのに、公衆がこのように不安を感じているのは、いまだ明確な情報伝達がなされていないからだ。
- ・原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）が最近公表した報告書の中で最も重要な指摘は、「社会的な健康」が損なわれるということだ。事故発生から3年が経過し放射線量は大幅に下がったが、避難生活での環境の変化や精神的ストレスなど、事故に起因した「行為」による影響に対するケアが必要であるということが教訓である。

以上、共に、社会的視点から原子力・放射線を巡るコミュニケーションにおいて「何が合理的なのか」の問いを原子力関係者に投げかけているものであった。

なお、グリムストーン、リーシング両氏の講演用資料は、原産協会「原産年次大会」のウェブサイト (http://www.jaif.or.jp/ja/annual/47th/47th-annual_presentation.html) で閲覧が可能。

（日本原子力産業協会 木下雅仁、

2014年10月24日記）

From Abroad

Fukushima - The Response was Worse than the Event

Malcolm Grimston

Honorary Senior Research Fellow

Imperial College

London SW7 2AZ, UK

In physical terms Fukushima was a middle-ranking industrial accident of the kind that happens perhaps eight or ten times each year round the world. The response, and especially the irrational prevention of people from returning to their homes in areas where there was hardly any contamination, turned it into a serious human tragedy. Authorities need to recognise that there is no such thing as 'erring on the side of caution' – any counter-measure that is not justified by the best scientific understanding of real risks will create human misery and should be steadfastly resisted.

1. Introduction – A Fairy Tale

One day a Japanese family was sitting at home taking tea. In their own homes several of their neighbours were doing the same thing. Suddenly there was a power surge in the area, caused by an earthquake damaging equipment. A 50W light bulb in the room came on all by itself. The same thing was happening in their neighbours' houses.

The local authorities responded quickly. They forced the families out of their rooms and moved them many miles away to strange rooms where no tea was served. Even though the authorities quickly managed to find a way of dimming the light bulbs so much that they could hardly see them glow any more, the rooms were locked and the families were told they could not go back. This lasted for three and a half years.

This made the family very unhappy – they had lost their homes, lost their friends, lost their jobs. They found themselves smoking more, drinking more, crying more. The authorities explained that they were just being careful over the family's health – 'erring on the side of caution' as they put it – as light could be dangerous, even causing skin cancer.

The families started to worry. Obviously the light coming from their bulbs must be very dangerous indeed to cause such a reaction from the authorities. How much harm had they come to before they were forced out of the rooms? Would it ever be safe to go back?

Then a scientist from the light bulb company came round to their new temporary homes. He explained to them that their fear was irrational. The light from the light bulbs was no different to the light from the sun. So they should stop worrying and wait patiently to be allowed to go back onto their own rooms to finish their (by now rather

cold) tea.

Wait a minute, thought the families. If the light from the bulb is no different to the light from the sun then why are we still allowed to go out in the sun? In fact, when we think about it, we know there are areas of Japan which are far sunnier than our home town, where people get much more light on their faces than we get even when we include the light from the 50W bulb. Why aren't those people removed to a less sunny area of the country? But by now the scientist had gone to tell another set of families that they were ignorant and irrational for being scared of a 50W light bulb.

So the families didn't know what to make of it. Perhaps the authorities were lying about the amount of light coming from the bulbs – maybe it was much much more than 50W? Or perhaps the authorities had gone mad or had an evil plan to cause the families so much misery over something that was not worth worrying about. Or, most likely, artificial light is more dangerous than natural light and the scientist was either badly informed or making it up. They couldn't think of any other explanation for the misery they had suffered over the previous three and a half years.

One thing was for sure – whatever the truth, these authorities could not be trusted. And this scared the family far more than the 50W light bulb had done.

Just a fairy tale. Yet in effect this is what has happened in Japan after Fukushima. Ionising radiation can be looked at as a rather less dangerous version of sunlight. We know that if we spend too long in sunlight without proper protection it can cause cancer – typically some 1500 people die in Japan each year from skin cancer. However, we do not presume that a walk in the park on a normal day is anything to be worried about.

2. Irrational Actions, Irrational Communications

At the JAIF Conference in April 2014 one of the speakers bemoaned the fact that people in Japan do not know that natural and man-made radiation are the same thing. (The audience laughed at such extraordinary ignorance.) Correcting this misconception would put their minds at rest over the hazards associated with the exclusion zone (and by implication smooth the way to nuclear plants reopening).

This concept – that the problem with the public is that they don't know enough nuclear physics – has a long and as far as I can tell almost completely unsuccessful history in nuclear communications. To develop the above analogy, it has been known for a very long time that considerable parts of the 20km exclusion zone had very low levels of contamination. The 2013 UNSCEAR report into the accident, *Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami*¹⁾, shows that after just one year the 1 mSv 'contour' excluded much of the exclusion zone to the south and southwest of the plant, for example. A dose of 100 mSv per year is a known health risk.

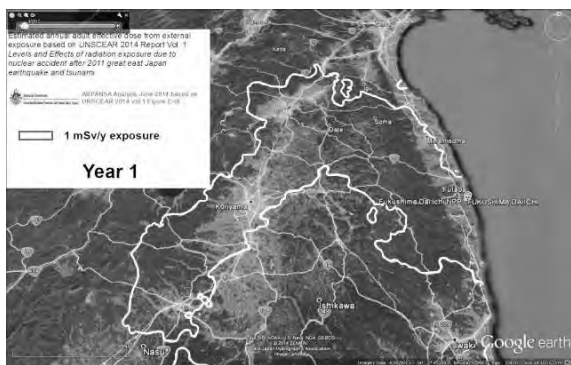


Fig. 1 The 1 mSv contamination contour 1 year after the Fukushima accident – levels of contamination outside this contour would be below 1 mSv and in some areas undetectable.²⁾

While it is difficult to get precise figures, natural background in Japan varies as it does in all countries. Doses are higher in areas like Kyushu than they are in the northeast of Japan. Total dose (natural plus contamination) in parts of the exclusion zone will be less than natural dose alone in the higher background areas. Of course there are other areas of the world where background doses are dramatically higher than any found in Japan.

What do the high background areas have in common? One thing is that nobody has suggested they should be evacuated, any more than anyone suggests we should block up all our windows and never leave the house to avoid sunlight.

So the intelligent non-specialist in Japan is faced with a conundrum. They know the entire zone remains evacu-

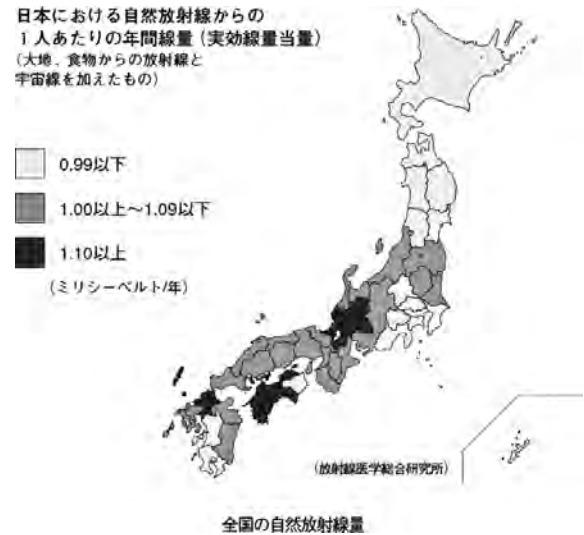


Fig. 2 Variations in natural background radiation levels in Japan³⁾

ated after three and a half years (with the exception of a few hundred people allowed back in recent weeks). They know the authorities say that total radiation levels in some of the zone are lower than natural levels elsewhere in Japan and the world. The most obvious conclusion is that natural and man-made radiation must be different.

If they could be persuaded that this is not the case then they would be left with two other possibilities: systematic lying by the authorities as to levels of radiation in the zone; or a cruel and unnecessary destruction of entire whole lives by forcing them away from their homes for such a long period for no significant health benefit. Indeed, if health were the aim it would make much more sense to evacuate the population of Tokyo into the exclusion zone, helping them to avoid the airborne pollution that kills over 2 million people every year in the world's major cities, than the opposite.

Let us take another example – the decision to siphon off water from the hills above the plant, decontaminate it to stricter levels than apply to drinking water, then release it to the ocean. What is the intelligent layperson to make of this? For this hugely expensive policy to make sense it must mean two things: that the permitted levels of radioactivity in drinking water are dangerously high (so the regulators clearly cannot be trusted); and that what has already been released into the ocean must be vastly more damaging than anyone has yet 'admitted'.

The irony, I suspect, is that these measures have been taken in the mistaken belief that they will put people's minds at rest. In reality they are more likely to stir up a great deal of entirely unnecessary fear and anxiety. The concept of 'erring on the side of caution' is a dangerous one when one takes no account of the negative effects of measures such as excluding people from their homes and homelands. Tragically, it is well established that evacua-

tion for any reason has a number of adverse consequences for the health of the population involved.

3. Subliminal Messages

The tone of discussions that I took part in or observed in my visit to the JAIF Conference was worrying. They appeared to include two major messages. First, it was recognised that the mantra that major nuclear accidents were impossible – the ‘nuclear myth’ – has to be abandoned. The second was what steps needed to be taken to make sure that another nuclear accident would be impossible.

The three major civil nuclear accidents so far – Three Mile Island in 1979 (USA), Chernobyl in 1986 (Soviet Union) and Fukushima – all happened for different reasons. With the benefit of hindsight none should have happened – operators ‘should’ have realised that a valve was stuck open at TMI and not made things worse; Chernobyl ‘should’ never have been operated below 25% of its normal output; anti-tsunami measures ‘should’ have been installed at Fukushima. But almost all major accidents are like this. Once a particular accident has happened measures can be taken to prevent it recurring. The next major release of radioactivity will not, I suspect, be caused by poor instrumentation, positive void coefficients or flooding. It will be something else, something which with the benefit of hindsight ‘should’ have been recognised

The nuclear myth was and is harmful not only because it is patent nonsense (a negative can never be proved) but because of what it implies. No other industry talks about making sure a major accident ‘never happens again’, despite accidents on the scale of the Benhixu Colliery (1942, China, coal, 1550 deaths), Banqiao (1975, China, hydro, 170000 deaths) or Bhopal (1984, India, chemical plant, 4000 – 20000 deaths). The underlying, subliminal message is not that nuclear companies are especially responsible and take safety very seriously indeed; it is that a nuclear accident would be in a different league from any other accident that could befall mankind. When such an accident does happen, then, it is very difficult for people to accept the truth – that there are unlikely to be any discernible deaths from radiation at Fukushima. So the ground is very fertile for those with political or quasi-religious objections to nuclear power to feed on fears which have been nourished by the actions and words of the ‘nuclear family’ itself. Continuing to talk about radiation as though it is very dangerous (rather than a constant and not very interesting feature of the natural world) by going on and on about measures being taken to protect people inevitably

creates deep-seated fears. Of the many irrational beliefs that seem to be held by the nuclear family, not just in Japan but worldwide, perhaps the worst is the idea that if a great deal of publicity is given to something being made a little safer, people’s minds will be put at rest. A more rational human response would be to suspect that the activity was more dangerous than had first been admitted and that therefore to become even more anxious.

4. Conclusions

To retrieve the situation will not be easy but a few first steps should include the following.

- Giving people a realistic assessment of how dangerous the various areas of the exclusion zone might be – perhaps comparing them to the hazards of Tokyo city air – and then allowing residents to decide for themselves whether they wish to return to their homes, supporting them whether they choose to do so or not.
- Abandoning any indefensible policies, such as decontaminating what is effectively clean water or banning food containing low levels of contamination, which are being pursued with the sole aim of ‘putting minds at rest’ – in reality they achieve the precise opposite.

Ultimately, far from being irrational, the Japanese public will be trying to make sense of the conflicting information it is being given. In particular, they will be trying to square the complacent verbal and written messages that are being promulgated with the overblown and exaggerated actions that are being taken. They may come to an incorrect conclusion but that is because the policies being followed are irrational. No amount of clever communication or education will overcome that problem.

– References –

- 1) UNSCEAR, Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami, United Nations (2013).
- 2) W. Weiss, The UNSCEAR 2013 report: major findings and the way forward, World Nuclear Association Annual Symposium (2014).
- 3) Online at <http://1.bp.blogspot.com/-uuzaaAfzkLE/TeNi6jjJtzI/AAAAAAAAADcs/H4OUMxxmS5k/s1600/Natural+radiation+in+Japan.jpg>



Malcolm Grimston is an Honorary Senior Research Fellow working on energy and nuclear policy at Imperial College London, having previously worked at the UK Atomic Energy Authority. He is a prolific author and media commentator.

サイエンスよみもの

軽水炉被覆管の化学

もっと知りたいジルカロイ-水反応

ニュークリア・デベロップメント(株) 木戸 俊哉

福島第一原子力発電所事故における原子炉建屋の相次ぐ爆発は、これまで「仮想」の域にあったジルカロイ-水反応による水素発生という事象の災禍を、衝撃と共に現実のものたらしめた。一般には、なじみの薄いジルカロイという合金、高温では活性な金属としての特性を有するものの、軽水炉での使用においては、長年にわたり十分な信頼性が確保されている。本稿では、熱・水素発生のもととなる酸化反応を中心に、ジルカロイの開発や関連する研究の軌跡などを紹介する。

I. ジルカロイという合金

1. ジルカロイは偶然の産物？

(1) 被覆材ジルコニウムの選定

1955年、米国原子力委員会(AEC, NRCの前身)により編纂された“The Metallurgy of Zirconium (Zr 冶金学)¹⁾”には、次のようなエピソードが載せられている。

「マサチューセッツ工科大のKaufmannは中性子吸収断面積の表に、ジルコニウム(Zr) 0.25バーンという値を見つけ、期待とともに疑問を抱いた。他では、2.5バーンとされていたためである。結局、0.25はミスプリントと判明したが、この問合せに興味を抱いたオークリッジ国立研究所(ORNL)では国立標準局と共同でハフニウム(Hf)を含まないZr試料を準備して再測定を行い、1948年に0.4バーンかそれ以下、との結果を得た(一部、筆者意訳)。」

Hfは、Zrと同族元素であり分離されにくい。熱中性子吸収断面積こそZrの数百倍だが、不純物としてはZrの諸特性にあまり影響せず、当時のZrに多く含まれていた(現在でも原子炉級Zr以外は同様)。結果、大きく見積もられた吸収断面積により、Zrは普通の遷移金属の一つとして扱われていたと推測される。工業製品としてのZrは、上記のORNLでの発見の翌年、1949年の米国海軍Rickover提督による原子力潜水艦ノーチラス号計画での被覆材への採用決定を契機として急速に発展

したが、前年のミスプリントに端を発した熱中性子吸収断面積の測定結果がなかったならば、果たしてZrは原子炉材料としての日の目を見たのか、続く軽水炉開発にいかなる影響を及ぼし得たのか、今日に至って知る術はない。

(2) ジルカロイの誕生

被覆材として採用された当時のZrは、クリスタルバーと呼ばれる高純度・高価格な原料を使用し、量産実用化には不向きであった。このため、現在でも工業的に用いられている「クロール法」と呼ばれる製法で製造される安価なジルコニウムスポンジ(多孔質のため、こう呼ばれる)を原料とした合金開発が行われた。安価だが不純物が多いジルコニウムスポンジの高温水中での耐食性改善が課題であったが、製造時に混入する窒素が耐食性を損ねること、対策に錫が有効であることが解明され、Zr-2.5wt%Sn(ジルカロイ-1)を経て、ジルカロイ-2が、1952年に誕生した。その組成は、Sn:約1.5wt%、Fe+Cr+Ni:約0.3wt%であり、錫以外はステンレス鋼の成分である。試作時に偶然混入したステンレス鋼が良好な結果を与えたとされる。

その後、ジルカロイ-2は、最初の商業用沸騰水型原子炉(BWR)であるドレスデン炉の被覆管材料として1960年より使用され、それを皮切りに、製造面などで種々の改良を施されながら、今日までほぼ一貫してBWR被覆管として使用されている。

一方、加圧水型炉(PWR)では、最初の原子力発電所である Shippingport 炉燃料にジルカロイ-2が採用されたが、しばらく304型などのステンレス鋼被覆管が用いられた。しかし、経済性などの観点から、1960年

Chemistry of Nuclear Fuel Cladding in Light Water Reactors: A Curiosity on the Zircaloy-Water Reaction: Toshiya KIDO.

(2014年9月30日 受理)

代半ばよりジルカロイに置き換えられた。この際、PWRでは、冷却水側から被覆管への水素の吸収、吸収した水素による被覆材の機械特性の劣化が懸念されたため、ジルカロイ-2からNiを除くことで水素吸収への懸念を減らし、Ni減をFe、Crで補ったジルカロイ-4が採用された。

2. ジルカロイ以降の進化

軽水炉開発の初期から今日に至る半世紀の間に、燃料の使用条件は、許容される燃焼度の伸長を中心として、被覆管への負荷が増加する方向に推移してきている。このため、PWRでは、当初からの水素吸収・腐食量への懸念を低減すべく開発が続けられ、1990年頃より、米国を中心にジルカロイ-4に替わる耐食性および水素吸収特性に優れたZr合金(本稿では、ジルカロイ以外のジルコニウム基合金をZr合金と表記する)が適用されている。現在、国内を含む大半の、特に高い燃焼度に対応した燃料には、ジルカロイとは異なる複数種のZr合金が使用されている。主成分はZr-0~1wt%Sn-0.1~1wt%Nb(ニオブ)であり、Nbが添加されていることが、その主な特徴である。

一方、BWRでは、ジルカロイ-2について、主に鉄の含有量を増やす組成改良が行われているが、添加する元素に変更はなく、PWRの現状と比較すると変化の程度は穏やかである。(詳述は本誌関連記事²⁾参照方)

なお、話は前後するが、Zr合金の開発は、旧ソ連でも1950年代に盛んに行われ、1958年のジュネーブ会議³⁾等で多くの成果が報告された。旧ソ連型原子炉被覆管の主たる組成はZr-1.0wt%Nb材である。現在、PWRで使用される複数種のZr合金には、旧ソ連の開発した組成に端を発したものも多い。

II. ジルカロイ-水反応

金属Zrが水または水蒸気と反応する際の反応式は下式で表される。



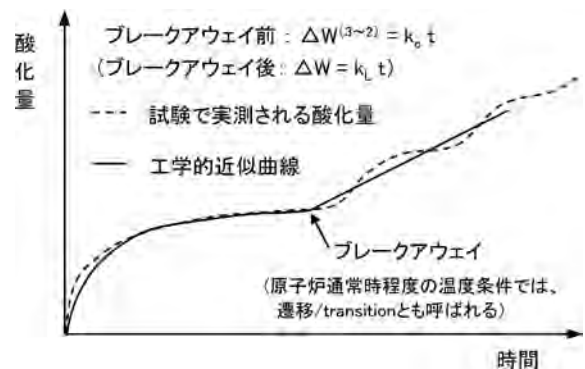
Zrは活性な金属であり、常温でも表面に数nm程度の酸化膜が形成されている。水との反応では、酸化膜表面(または内部)で水分子が解離し、酸素(イオン)が酸化膜内を移動、酸化膜-金属界面でZrと反応する。酸化膜内の移動は拡散が主たる因子と考えられるため、一般にZrの酸化速度は、温度が高いほど速くなる一方で、酸化膜が厚くなるほど緩慢となる傾向を示す。加えて、酸化膜は、厚さの増加に伴いその性状や下地金属との密着状態などに変化が生じ、その結果、酸化速度に変化が生じる場合がある。この現象は、ブレイクアウェイ(Breakaway: 離脱)と呼ばれ、酸化膜の酸化反応に対する保護性を判断する上で重要である。

軽水炉被覆管の場合、次のような酸化反応が検討の対象である。

- (1) 通常運転時の冷却水との反応(温度: 300~400℃程度, 時間: ~数年間)
- (2) (設計基準)事故時の冷却水(水蒸気)との反応(~1,200℃, ~数分~数十分)
- (3) 貯蔵・廃棄時の環境水との反応(主として100℃以下, >~数十年)

ジルカロイ-水反応、特に(1)程度の温度条件での酸化量の推移を第1図に示す。ジルカロイ-2と-4の酸化挙動は、前記した水素吸収とは異なり、一般に、ほぼ同等とみなすことができる。

ジルカロイおよび酸化膜の状態と酸化速度則の概略を温度に対して第2図に示す。酸化速度則の欄に「線形」とある温度条件では、ブレイクアウェイが確認されている



第1図 ジルカロイ酸化反応の概略

温度 °C	ジルカロイ[主な状態]	ZrO ₂	酸化速度則
室温			
300	[通常運転時]	単斜晶	対数
400	α-Zr相(六方晶)		立方-線形
550	[再結晶] [照射損傷回復]	単斜晶+ 正方晶	放物線
820	α+β-Zr相		
970			立方-放物線 放物線-線形
1000	β-Zr相(立方晶)	正方晶	放物線
1200	[→酸化に伴うZr中 酸素濃度の増加 に伴いα-Zr相 へ変態する。 同時に融点も 上昇する]		
1525		正方晶 + 立方晶	(加速的) 放物線
1710 [1850]	[融解]	立方晶	
2285			
2710		融点→	

第2図 相状態と水蒸気酸化速度則 (Leistikow⁴⁾による整理に筆者にて[]を追記・修正)

る。立方/放物線とは、酸化量が時間の $1/3 \sim 1/2$ 乗に比例することを示している。

対象とする酸化反応量の目安は、 $0.6 \sim 0.7\text{mm}$ 程度の被覆管の肉厚に対し、(1)では10%程度である。酸化に伴い、Zrは1.6倍ほど体積膨張するため、相当する酸化膜厚さとしては $\sim 100\mu\text{m}$ 程度となる。(2)では15%が、国内での軽水炉の非常用冷却系(ECCS)指針での基準として採用されている。

Ⅲ. 通常運転時の酸化挙動

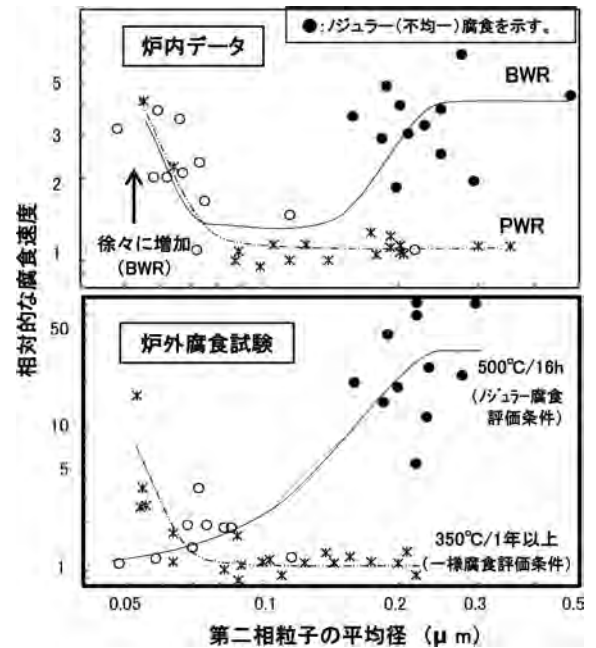
1. 水質と腐食形態

ジルカロイは、通常運転時相当の温度で炉外での腐食試験を行うと、約 $2\mu\text{m}$ 程度の酸化膜厚さでのブレークアウェイを伴って、立方-線形則により近似される腐食挙動を示す(「酸化」と「腐食」は同義であるが、通常運転時挙動については後者が主に使用される)。形成される酸化膜は一様である。原子炉内に場所を移すと、照射の影響を受け、BWRでは、断面がレンズ状で不均一な酸化膜が、通常腐食量の推移とは無関係に形成される場合がある。この腐食形態は、酸化膜の形状からノジュラー腐食と呼ばれる。一方、PWRでは、炉外と腐食形態は同様であるが、線形則領域での酸化速度が炉外に比べ数倍程度まで加速される。このため、ジルカロイの改良は、BWRではノジュラー腐食、PWRでは一様腐食を低減することが主な目的であった。

2. 微細組織と腐食形態

ジルカロイに添加されるFe、Cr、Niは、Zr母材にはほとんど固溶せず、サブミクロン程度の第二相粒子となって存在する。被覆管の製造方法を工夫すると、第二相粒子の大きさを制御でき、同時に腐食特性も変化する。第3図は、第二相粒子の大きさと炉内外腐食特性の関係を示したものである。炉外での腐食試験結果を示す図(下図)において、2つの曲線が交差している点がミソである。腐食特性の改良を目的として、炉外での腐食試験を行うと、BWRでのノジュラー腐食対策には第二相粒子径を小さくする方向が、一方、PWRでの一様腐食対策には逆に大きくする方向が、良好な結果を与えることが分かる。

ノジュラーと一様腐食での傾向の違いは、溶存酸素、照射下では O^{2-} などの水の放射線分解による活性種の存在などで説明されているが、第3図に示したような第二相粒子径と腐食特性の関係の全貌が解明されるまでには、多くの研究者を惑わせた。また、更に、炉外ではノジュラー対策として有効な第二相粒子の微細化は、炉内に場所を移した際には一様腐食特性を低下させることが、BWR、PWR双方の炉内データ(上図)に示されている。ジルカロイという合金の単純そうで気まぐれな特性を見る思いである。



第3図 ジルカロイの耐食性と第二相粒子径の関係 (Garzarolli⁵⁾による整理に一部加筆)

BWRとPWR環境では相反する腐食特性が得られる事象は、Zr-Nb合金についても確認されている。1970年代初期には、既に一部で推奨されていたZr-Nb合金のPWR被覆管への適用は、その影響もあって20年ほど遅れた。

Ⅳ. 事故時の高温酸化挙動

1. 高温酸化の温度条件

通常運転時よりも高温での興味は、主に約 $900 \sim 1,000^\circ\text{C}$ 以上での酸化反応である。この温度域では、(1)ジルカロイの表面に酸化膜が形成されるのみならず、下地金属部にも酸素が拡散・浸透して全体に脆くなりやすいこと、また、(2)酸化反応に伴う発熱で自発的に温度が急上昇する懸念があること、更に、(3)水との反応により発生する水素の量が顕著となること、など、ジルカロイ-水反応により、事故時およびそれ以降の燃料の状態や炉心内外への影響が大きく左右され得るためである。

2. 高温でのジルカロイの状態

第2図に示したように、約 $1,000^\circ\text{C}$ 以上では、ジルカロイは、高温で安定な相(β -Zr相と呼ぶ)に変態している。 β -Zr相は、他の元素を固溶しやすく、第二相粒子は存在しないため、高温での酸化反応は、ほぼZr自体の特性で決定され、ジルカロイと純Zrは同等に扱われる場合が多い。照射損傷などの組織は回復するため、実際に原子炉で照射された被覆管材を試験する必要性は高くない。ただし、通常運転中に形成された酸化膜や最大 \sim 数百ppm($100\text{ppm} = 0.01\text{wt}\%$)程度まで吸収される水素の影響については後述のとおり確認されている。

3. 高温酸化反応のあらまし

事故時のジルカロイに関する情報は、参考文献⁶⁾にはほぼ集約されている。ここでは酸化反応に関する主な事項を紹介する。

(1) 酸化速度

高温でのジルカロイ-水反応は、放物線則に従うことから、反応量を W とすると、

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta^2}{W}$$

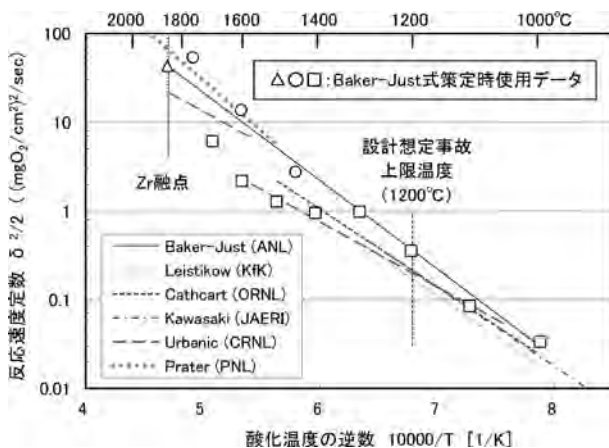
で表される。反応速度定数 $\delta^2/2$ に関するこれまでの主な実験データは、第4図にほぼ集約される^{6,7)}。1,500～1,600°Cに温度依存性の不連続部が認められるが、第2図に示されたように、表面の酸化物の性状が変化する温度に対応している。

図中の Baker-Just (B-J) 式(アルゴン国立研究所, 1962年発表)は、国内外の ECCS 指針で引用されるなど、安全評価の世界では有名な評価式である。導出に使用された個別データをあわせて図示したが、1,000°Cから融点近傍 1,850°C 程度の範囲で、他の評価式を包絡するようにデータがばらついている。これまで、同式は被覆管温度 1,200°C 以下を対象とした安全評価に使用され、常に安全側の評価値(大きい酸化量)を与えることとされて来たが、それ以上の温度範囲では、概ね妥当な酸化量を与えることが分かる。ちなみに、同式を用いて被覆管の肉厚程度が全て酸化されるに掛かる時間を単純計算すると、1,200°Cで数時間程度となる。

なお、近年の安全評価では、設計基準事故で対象とする～1,200°Cの温度範囲において、より妥当な酸化量を与える ORNL 式の使用も推奨されている。

(2) 反応熱

ジルカロイ-水反応の反応熱は、約 -600 kJ/mol-Zr とされる。酸素と Zr の酸化反応による反応熱と比較すると、半分程度であり、両者の差は水分子の分解に必要な熱量である。反応速度が放物線則に従い時間と共に変化するため、一概には表現しにくいだが、B-J 式から予想される発熱量は、1,200°C 付近の被覆管で～数 W/cm 程



第4図 酸化反応速度定数の温度依存性

度(時間と共に減少)と見積もることができる。

米国で行われた初期の解析によれば、燃料溶融を伴うような事故の場合、ジルカロイは、ステンレス鋼に比べて1桁程度大きなエネルギーを放出するとされる⁸⁾。

(3) 圧力の影響

第4図に示された酸化速度は、ほぼ大気圧条件下で取得されたものである。事故時の炉心内が大気圧となるか否かにはいろいろな条件や議論があろうが、高温酸化が放物線則を示す拡散律速な反応であることから、酸化速度は圧力の影響を受けないことが想定される。加えて、高温高圧下での実験は困難であるため、報告例は少ない。ORNL の実験によれば、1,100°Cで6.9MPaの水蒸気圧力であっても酸化速度への影響は認められないとされる。なお、1,000°C以下の温度では圧力の影響が認められる場合もあるが、第2図に示したように酸化速度則も変化する領域に対応しており、酸化膜性状の変化が影響している可能性が考えられる。

(4) 水素の発生

高温水蒸気との反応において、被覆管の外表面酸化で発生した水素は、通常運転時のようにジルカロイ内に取り込まれることはなく、そのまま環境中へ放出される。従って、酸化反応により発生する水素量は、基本的に酸化反応量に比例する。実際、第4図に示したB-J式策定に使用された高温酸化データは、ジルカロイ(またはZr)の反応量を、反応により発生した水素量で評価している。

ただし、事故時の被覆管には、内圧により膨れ、破裂するものもある。破裂口からは内部に水蒸気が侵入し、被覆管内面を酸化する。このような状況下では、被覆管の内部に発生した水素は停留し、内部では開口部から離れるにつれ水蒸気が消費され、水素の分圧が増す。この場合、水素は環境に放出されるよりも被覆管に吸収されることが知られている。

(5) 水蒸気量の影響

再び第4図に示された酸化速度であるが、これらは実験上、反応に十分な水蒸気が供給される条件で得られたものである。一方、事故時の炉心内では、炉水は酸化反応に消費され、水素が発生するため、十分に炉水が供給されない場合、前記の被覆管内部と同様、水蒸気が不足し、水素分圧が上昇する条件が成立し得る。

水素/水蒸気の混合雰囲気条件下でのジルカロイの酸化反応は、水素吸収との競合反応となり、水分子のジルカロイ表面への供給速度が挙動に影響すると考えられるため、定量的な表記は難しいものの、これまで報告されている試験結果では、30～50%程度水素が混在すると酸化反応は低減され、更に90%以上の水素分圧下では酸化反応は1/10程度となることが示されている。また、酸化速度が低減された条件下では、酸化膜は保護性を失い、多孔質となるなどの変化が見られ、水素の吸収も顕

著となる。相対的に増加した水素により、酸化膜やZr母材内での酸素の正常な移動が阻害された格好である。

(6) ブレークアウェイ

第1図に示したブレークアウェイ、すなわち酸化速度則の変化は、1,030℃程度以下で相対的に長時間の高温酸化時にも認められている。ブレークアウェイ後には、顕著な水素吸収を伴い、急激な被覆管の脆化が起こる懸念があるため、海外では安全評価の基準に採用される方向にある。酸化速度が変化する酸化量は、数~数十 μm 程度であり、温度と共に増加する。機械的なキズなど、表面状態の影響も発生条件を左右する。

(7) 水蒸気量以外の影響

水蒸気、水素以外に、空気や窒素の影響を確認する試験も行われている。窒素は、ジルカロイ開発の初期に通常腐食挙動へ悪影響を及ぼす元素とされたが、高温での酸化挙動についてもジルコニウム窒化物の生成反応を通して、高い窒素分圧条件での影響が認められる。Zrの窒化による反応熱は酸化の1/3程度、水蒸気酸化に比べると若干小さい程度であり、熱的な影響は大きくないが、ブレークアウェイ的な影響が報告され、挙動が複雑で課題が多いとの指摘がある⁹⁾。

(8) 材料因子

通常運転を経た被覆管は、最大で、外面に~数十 μm の酸化膜、内部に~数百ppmの水素を保持しているため、それらの高温酸化反応への影響が検討されている。

酸化膜については、酸化反応に対する保護膜的な挙動を示し、特に初期の酸化速度を低下させる効果を示すが、1,200℃程度の高温になると、その効果はあまり認められなくなる。一方、母材中の水素は、酸化速度にはほとんど影響しないことが確認されている。

なお、ロシア製のZr-1wt% Nb被覆管では、1,000℃程度を中心にブレークアウェイに類似した急激な酸化・水素吸収挙動を示すことが報告されている。ジルカロイでは発生しない条件での挙動であり、製造方法の違いによりCa、Alなどの不純物が含まれないこと(酸化膜の安定性に影響)、ロシアでは最終表面仕上げ用に使用されるフッ素の残留などが原因とされる。

4. まとめ

事故時を想定した高温でのジルカロイ-水反応に関する

研究の歴史は古く、合金誕生以来、事象把握の努力が継続されてきている。PWRを中心に耐食性に優れた新しいZr合金の適用も進められており、軽水炉燃料の更なる安全性維持・向上のため、事故進展の解明に向けた努力も含め、継続的な検討が望まれる。

V. おわりに

新たな材料は新たな技術を創る。震災後に活性化された事故耐性燃料開発の流れにおいて、ジルカロイに替わる材料への期待は大きい。安心・安全のため、より優れた被覆管材料が望まれる中、開発の負担を乗り越えるには、関係する者の相当なエネルギーと決断が必要である。本稿執筆の機会を頂き、改めて原子炉開発初期における米国の基礎を含めた総合力と熱意を痛感した。矜持ある協調により新たな視界が開けることを望みつつ、足元の課題整理と対応の必要性にも思いを巡らせている。

— 参考資料 —

- 1) B. Lustman, F. Kerze, Jr., "The metallurgy of zirconium", McGraw-Hill, (1955).
- 2) 栄藤良則, 土内義浩, "連載講座: 材料が支える原子力システム: 第5回 軽水炉燃料部材に用いられるジルコニウム合金", 日本原子力学会誌, 53(12), 845-849 (2011).
- 3) Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Volume 5 Properties of Reactor Materials, UNITED NATIONS, Geneva, (1958).
- 4) S. Leistikow, G. Schanz, Nucl. Eng. Des., 103, 65-84 (1987).
- 5) F. Garzarolli, *et al.*, ASTM STP 1295, pp.12-32 (1996).
- 6) OECD Nuclear Energy Agency, NEA/CSNI/R (2009) 15, NEA No. 6846, ISBN 978-92-64-99091-3.
- 7) J.T. Prater, E.L. Courtright, NUREG/CR-4889, PNL-6166, (1987).
- 8) R.C. Liimatainen, *et al.*, ANL-6250, (1962).
- 9) C. Durieux, *et al.*, J. Nucl. Mater., 380, pp.30-45 (2008).

著者紹介

木戸俊哉 (きど・としや)

ニュークリア・デベロップメント(株)

(専門分野/関心分野)燃料材料の炉内外挙動





今後の我が国における核燃料サイクル・プルトニウム 利用をどのように考えればよいか

主にプルトニウムに係る核不拡散の観点から

国際保障学研究会(東京大学大学院) 久野 祐輔 (代表執筆)

エネルギー基本計画の議論においては、原子力発電依存度をできる限り低下させるとする基本方針と共に、核燃料サイクルは堅持するということが表記されており、今後の使用済燃料やプルトニウム(Pu)の取扱いについての方向性は必ずしも明らかでない状況にある。本課題について、国際保障学研究会では、そこにおけるPu蓄積可能性の問題について、いわゆる「余剰Pu」を持つことなく、均衡のとれた核燃料サイクルを実現し維持するためにはいかにすればよいかについて、我が国の立場や特徴を踏まえ、国際社会に示すべき柔軟性のある方向性について検討したので報告する。

1. はじめに

政府は、2014年2月25日、国の中長期的なエネルギー政策の方向性を決める「エネルギー基本計画」の原案をまとめ、4月11日に閣議決定した。ここでは原子力発電を「重要なベースロード電源」という位置付けとし、再稼働を進めると共に、一定規模の原子力を活用していく方針を明記した。また、国内の原子力発電所などで保管されている約1万7,000トンの使用済核燃料の問題では「国が前面に立って取り組む」とした。さらに、高速増殖原型炉「もんじゅ」、核燃料サイクルについても「推進」の方向を維持するとした。

このようにエネルギー基本計画の議論において、燃料サイクルや高速炉路線維持が明記されたことは、すなわち我が国のエネルギーセキュリティにおけるプルトニウム(Pu)利用政策の重要性が少なくとも認識されたものとする。しかし一方で、原子力発電依存度をできる限り低下させるとする政府の基本方針は変わらず、また、必ずしも発生する原子力利用残存物、すなわち放射性廃棄物だけでなく、使用済燃料やPuをどのように扱っていくかについては的確な解は見出せていない。特に蓄積が懸念されるPuについては、当面回収される分離Pu(但しMOXとして)や使用済燃料の取扱いについて、安全・核不拡散・核セキュリティ(3S)を含め明確な戦略プランを示していくことが重要な課題と思われる。

他方、福島第一原子力発電所事故の前後において、我が国を取り巻くエネルギーセキュリティにおける厳しい環境に変わりはなく、原子力発電依存度の低下に伴い、エネルギー供給上、不確定要素の高い、またCO₂排出量の多い化石燃料への依存度が上がっている。現時点で

Pu利用のエネルギー経済性は高くないものの、既に長年にわたり核燃料サイクル技術開発に携わってきた我が国が、長期のエネルギー供給策としてPu利用を堅持し続けていこうとすることは順当な考え方であろう。以下、今後のPu取扱いに関する本研究会の検討結果について紹介する。

2. 核燃料サイクル継続に係る核不拡散の議論

(1) 我が国の核燃料政策継続に対する懸念

これまで国際社会は、非核兵器国として、唯一、我が国が推進するPu利用を容認してきたと考えるが、その背景には、次の6つの点が有効に働いてきたものと考えられる¹⁾。

- 1) 徹底した平和利用(国際社会への宣言)
- 2) 長期にわたる国際的な核不拡散レジーム遵守および良好な実践
- 3) 原子力プログラム・活動の透明性
- 4) 核燃料サイクルの明確な必要性
- 5) 国際核不拡散強化への貢献
- 6) 強固な日米同盟

今般、我が国は、2014年3月に開催された核セキュリティサミット(オランダ・ハーグ)にて、核セキュリティリスク回避の観点から高速炉技術開発に使用されていた高フィッサイルのPu(日本原子力研究開発機構FCA施設)を米国に返還することを宣言したが、その際、中国は、我が国に対し「兵器級の核物質保有の説明を要求する、また核拡散防止の義務を守り、同物質をいち早く返還するとともに、国際原子力機関(IAEA)の要求に応じて国内の供給のアンバランスをどのように解決するのか、国際社会に対し説明すべきだ」とした。中国はIAEA文書INFCIRC/549(Pu管理ガイドライン)を引用していると考えられるが、ここでは、1)核不拡散と

How should we think about Japanese future nuclear fuel cycle and utilization of plutonium?: Yusuke KUNO.

(2014年9月11日 受理)

国際保障措置, 2) 核物質防護, 3) 計量管理, 4) 国際移転, 5) 情報の公表, そして6) Pu 管理に関する政策についての指針が示されており, これらの中で, 6) について, すなわち「可能な限り早期に需給をバランスさせること」の指針を問題視していると考えられる。本文は次のとおりである: 「各国政府は, 核燃料サイクルに関する国家決定に合致し, 平和的使用又は安全かつ永久的処分を保証する方法で Pu を管理することをコミットする。その方策の策定に当たっては, 核拡散, 特に Pu が燃料として照射される前あるいは永続的に処分される前の貯蔵期間中の核拡散の危険を回避する必要性, (中略) 可能な限り早期に受給をバランスさせることの重要性を考慮する」

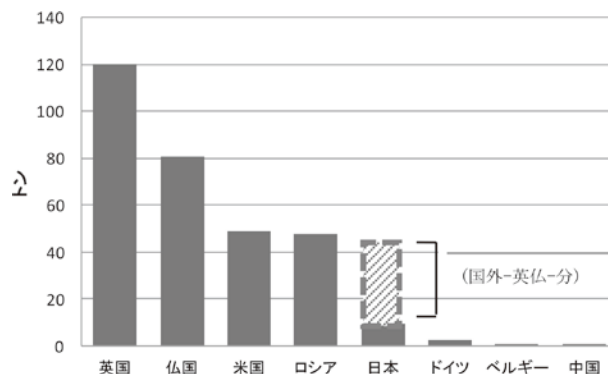
本文書は合意文書ではなく指針であるとともに, 我が国としては, これまでの確な保障措置下で Pu が管理され, その利用状況や計画について透明性をもって国際社会に示してきたという経緯からすれば, 中国が, 急きょ批判するような状況にはないことは明白である。しかし, Pu バランスについての国際社会への説明の必要性については否定されるものではない。他方, 閣議決定された新エネルギー基本計画においても, その核燃料サイクル政策(再処理, Pu 利用)が従来通り維持されたことに対して, 米国のシンクタンクなどからも批判の声が上がっている²⁾。上記, 中国や一部のシンクタンクが国際社会全体の意見を代表するものではないかもしれないが, 少なくとも, これまで我が国が示してきた Pu 利用政策の背景のうち, 4) 「核燃料サイクルの必要性」に関する懸念が大きいことだけは明らかであろう。

(2) 「余剰」プルトニウムのインプリケーションおよび「利用」のタイムフレーム

我が国の場合, 今後 Pu を, 軽水炉 MOX も含め使用していくという目的を国際社会に示しているため, 本来「利用目的のない Pu」に該当しないのは明白であろう。問題は, タイムフレームを含めた利用計画が示されないことに起因して, 諸外国が, そのような Pu を「余剰」と捉えるところにあると思われる。この点については, 核兵器国であっても民生用と位置付けられた Pu の取扱に対しては, 同じ視点で議論されるべきであろう³⁾。

核兵器国を含む民生用分離 Pu 蓄積状況を第 1 図(上-INCIRC549に基づき作成)に示す。いわゆる民生用 Pu の利用のタイムフレームについても, 基本的に核兵器国, 非核兵器国の違いはないはずであり, 米国の軍縮から発生した民生用 Pu は 2040 年を目途に消費するとされている。英国では, セラフィールド地区に, Pu を大量に長期間保管できる倉庫が建設された。1つのオプションとしてここに国内にある Pu すべてを集め, 安定的に保管しながら, 時間(20~40年)をかけて利用等を考える, としている⁴⁾。

これらの例で明らかのように, 重要なことは, 「蓄積」



第 1 図 民生用分離プルトニウム国内保有量(2012年度末)

を回避できる「消費」の解決策をタイムフレームとともに示すことであると言える。よって, 我が国の Pu についても, 再処理が稼働することによる短期的な Pu 貯蔵量の増加の可能性を問題と捉えるのではなく, ある程度長期的な観点(例えば 20~30年)に立った, Pu 利用(削減)方向を示すことが, 国際社会の懸念を下げるために有効であると考えられる。今回の問題は, アジア地域において, 一時的であれ日本の Pu 蓄積がもたらす核不拡散上の観念的な懸念の増大であり, これにより, 地域の緊張を高める材料にもなりうる可能性を秘めている。この点, 国外に保管されている Pu については, その量の大きさ(約 36 トン)から, 今後さらに返還されればそれに係る観念的なインパクトは小さくない。2014年のオランダ核セキュリティ・サミットにおいても, 高濃縮ウラン及び分離 Pu の最小化について各国が協調する状況下にある。こうした中, 日本が保有する Pu について, 例えある程度の不確実性を伴っても, タイムフレームとともに消費プランを明示することは, 近隣諸国の観念的な懸念を払拭するための説明としての意味合いだけでなく, 核セキュリティ強化を推進する国家としての責任を全うする上でも重要であると言えよう。

(3) 日米原子力協定への影響

米国はこれまで, 1978年の核不拡散法(NNPA)に基づき, 二国間原子力協力協定に規定された, 相手国の再処理や形状・内容の変更(MOX 燃料の製造等)に関する同意権という形で, 他国の Pu 利用に関する米国の事実上の拒否権を担保してきたが, 日本の Pu 利用に限っては, 包括的に再処理を行うことに同意するような立場を採ってきた。米国が日本に対して Pu 利用を認めた最大の理由は, 同盟国である日本の核拡散リスクは極めて少ないとする安全保障の観点からの見方があるものと考えられるが, その前提として, エネルギー資源が少ない日本による, 原子力の潜在的可能性を最大限に活用する核燃料サイクルの確立を目指す政策への理解があったと考えられる。

この点, 我が国の前民主党政権の政策変更で, 原子力発電稼働ゼロを目指すとしたことは, この前提が大きく

変わることを意味し、現政権の原子力依存度を出来る限り低下せしめるとする政策についても、2018年に30年という当初の期限を迎える日米原子力協力協定に関し、場合によっては包括的事前同意の継続的確保に影響を与える可能性を秘めている。

我々は、先人の努力によってなし得た「再処理の包括的事前同意」の重みについて再確認する必要があると考える。(詳細については遠藤による本誌解説⁵⁾参照)

(4) 直接処分および燃料サイクルの核不拡散性

福島第一原子力発電所事故を契機にクローズアップされた使用済燃料の取扱であるが、2010年時点での世界の使用済燃料累積発生量は約334,500tHMで、約100,000tHM(約30%)が再処理され、残りの234,500tHM(約70%)が原子炉サイト内・外に湿式・乾式貯蔵されている。2020年には、累積使用済燃料発生量が約450,000tHMに達し、うち約25%が再処理、残りの約75%が貯蔵されると見込まれている⁶⁾。

使用済燃料の直接処分と核燃料サイクルを用いた場合のそれぞれのPuについて、核不拡散性を比較すれば次のように考えることができる。再処理の核拡散リスクは、PuがMOXであれ分離されたPuであるため一般に高いとされる。また、直接処分の核拡散リスクは、高放射性の核分裂生成物と共に存在するため、一般に低いとされる。しかし、回収したPuを燃焼により消費していく核燃料サイクルでは、最終的に廃棄・処分すべき残存Pu量は直接処分に比べ大幅に小さく、またその燃焼により、Puの質(フッサイクルPuの割合)も低下するため、長期的にみれば全体として核不拡散性を高めることに繋がる。一方、使用済燃料の直接処分における核拡散懸念は、核分裂生成物の消失によりPuへの接近性が容易になり、時間とともに増大する。

ここで、再処理における拡散リスクについて、国際社会は保障措置などで十分に回避できることを我が国の過去50年にわたる経験などを通し確認してきた。一方、直接処分について、Puが自然消失するまでの長期にわたる核拡散の防止を、制度で保障することは容易でない。現在の保障措置の考え方からすれば、そのような長期(数十万～百万年)にわたり何らかの形で監視やモニタリング等管理を続けなければならないことが推定される。この観点からすれば、使用済燃料の処分に先立ち、何らかの技術的な核不拡散対策を採ることは一つの重要な取組みと言える。

3. プルトニウム取扱いの方向性

以上の論点を基に、今後、我が国として考慮すべき核燃料サイクル・Pu取扱いの方向性について以下に議論を展開する。最近の議論の中心にあるオプションとしては、1)クローズドサイクル、2)オープンサイクル(ワンスルー)、3)長期貯蔵の3つが挙げられるが、上述の

議論や、さらなる可能性を含めれば、当3オプションに加え、次の2つのオプションを併記すべきと考えられる。すなわち、4)回収したPu(MOX)の燃焼とそれにより発生する使用済燃料を最終廃棄物とする形態(MOXの発電利用後の量と質が低下したPuを含むもの)、そして、5)MOXの国際管理である。以下、これらPuの取扱オプションについて議論する。

(1) 軽水炉MOX燃焼によるプルトニウム増減のケーススタディ

これまでの文脈から、六ヶ所再処理を稼働させ、長期的な観点で使用済燃料を処理していく政策をとる場合、再稼働する軽水炉によるMOXの利用状況次第で回収量を調整する、すなわち分離Puの増加は極力少なくするという方向性を採ることが考えられる。既述のように、現在、すでに国内に10.8トン(日本原燃、MOX燃料を扱う4つの軽水炉、日本原子力機構に存在)、国外(英仏)には36.3トンのPuを保有する[合計約47トン/25年末]。

軽水炉MOXについては、福島第一発電所事故前では、16~18基で8~10トン/年のPu燃焼とされていた。短時間での多原子炉でのMOX利用開始の可能性は高くないものの、ここでは(国外分返還を前提)、14基程度(および大間炉)の軽水炉MOX炉が稼働することを想定しケーススタディを行う(8~9トン/年、以下8.5トン/年と仮定⁷⁾)。本ケースで、六ヶ所再処理施設をフル稼働した場合のPu回収を6.5トン/年と仮定すれば、軽水炉MOX炉が全て同時に稼働した場合の単純収支計算では、約22年で国内外すべての分離Puがゼロになる。国内のPuを優先的に利用するオプション(海外返還を考慮に入れないオプション)では、約4~5年で国内の分離Puがゼロになる(ただし、ここではJMOX燃料加工施設の稼働までの時間的ギャップ、六ヶ所再処理工場の立上げ時の低稼働率などは考慮していない)。一方、軽水炉MOX利用が10年おくれ、さらにMOX利用炉が予想の半分強程度とした場合(消費Puが5トン/年)、六ヶ所再処理工場の稼働率を、例えば30%程度(約2トン/年)と仮定すれば、最初の約10年で約65トンの蓄積、その後の約22年で、国内の分離Puがゼロになる計算となる。本ケースについて、国内のPuを優先的に利用するオプションでは(海外返還考慮なし)、初期の10年で29.3トンの蓄積となるが、次の約10年で国内の分離Puがゼロになることになる。(第2再処理については、本検討では再処理の継続として扱う)

以上、単純な仮定の下でのケーススタディ例を示したが(詳細および他のケーススタディは「国際保障学研究会」報告書を参照いただきたい⁸⁾)、現実には、軽水炉MOX運転が当初の期待通り運転されないことを想定しておくことも必要であり、その場合でも、再処理工場の

稼働率を下げるという運転を状況に応じ併用することが、核拡散上の不必要な懸念を払拭する上で重要であろう。

なお、上記のケーススタディに示す国外のPuの扱いであるが、我が国が保有するPuの約80%は欧州にあり、欧州ではPuのMOX利用が進んでいる。Puがエネルギーセキュリティ上の資産であることは既に議論したとおりであるが、その輸送コストの高さや、今後国内再処理でPuが十分回収できることを鑑みれば、欧州との協力による解決(例えば売却)の可能性も有力なオプションとして今後の視野に含めることも必要ではないかと考える。

(2) プルトニウム(MOX)の燃焼および最終廃棄物としての使用済燃料処分3S向上策

Pu問題に係る解決策としては、これまでのような短期的な軽水炉MOX利用の提示だけでは不確定要素が高く、上記ケーススタディにて示す通り、20～30年といったタイムフレームでの解決策を示すとともに、その他のPu消費や管理オプションを併行して検討していくことが重要と思われる。

基本的には、軽水炉MOXによるPu利用に限らずどのようなサイクルを採った場合でも最終的には使用済燃料が生じるわけである。よって、処分における3Sの向上、具体的には毒性の低減、フィッサイル量の低減が重要となる。すなわち、核物質の量(ネプツニウム等マイナーアクチニド(MA)を含む)の低減、およびPuにおけるフィッサイルの割合の低減(抵抗性の高い状態の実現)が、使用済燃料処分での3S向上に貢献するという考え方である。燃焼後に残るフィッサイルをどこまで低下させれば、核不拡散上十分なのかという議論がありいまだ結論はなく、使用済燃料処分に代表されるPu廃棄におけるPuの「質」の違い(すなわち核兵器転用の観点では、同じPuにおいても現実的にはフィッサイル率の違いによりその魅力度に差があること)について、今後国際的な議論を進める努力が必要である。こうした議論や関連する研究開発を通し、処分におけるPuへの将来的な3Sの扱いについて国際社会の理解を求めることが重要である。Puの燃焼としては、例えば、プルトニウムTRISO燃料による高温ガス炉、高速中性子Pu専焼炉や加速器駆動未臨界炉、軽水炉によるPu岩石燃料燃焼、等の研究が行われている⁹⁾。これらは共通して、まだ技術が開発段階であり、これらPu専焼技術を軽水炉MOXと併用すべき技術と位置付けるには時期尚早であるが、近未来のPu消費ニーズに応え、かつ核不拡散性の高いオプションとして技術開発に取り組んでいく意志を国際社会に示すことが、Puに係る海外からの懸念の払拭へ貢献するものと考えられる。

(3) プルトニウムの国際管理

我が国だけでなく人類のエネルギーセキュリティ上、

重要な資源について、単一国家においては、核拡散懸念を生む源となる「蓄積」であるが、多国間で管理するとした場合は、資源の「貯蔵」という認識に変わることが期待できる。国際的にPuを貯蔵する提案として、国際Pu貯蔵(IPS: International Plutonium Storage)が議論された。これは、INFCE(1977～80年)を受けて、IAEA憲章の規定に基づき再処理により抽出されたPuのうち余剰なPuをIAEAに預託し国際的な管理の下で貯蔵するものである。加盟国は自国内または他国に設置される「国際プルトニウム貯蔵庫」に当該Puを預託する、用途がはっきりし必要が生じたときにはそのPuを引き出して使う、引き出す際には国際IPS委員会の承認を得るというような内容である¹⁰⁾。当時は核燃料サイクルへの保障措置の導入期であり、方法論において意見が対立したことも重なり実現されなかったが、核不拡散に係る国際制度が確立された現在においては、この国際貯蔵の考え方が再浮上しても当然といえるのではないかとと思われる(ただし、核セキュリティの充実に前提)。実際に長期MOX保管が現実的に英国で検討される中、我が国を中心として当オプションが実現できれば、高速増殖炉のような本来的なPu利用へ向け、時間的裕度をもって国際協力で技術開発を進めることも可能となる。なお、貯蔵に際し、技術的には、将来加工の容易性やアメリカシウム除去への対処など考慮し、また核拡散抵抗性の観点から、MOX粉末やその他のバルク的な化学形状での貯蔵が望ましい。貯蔵場としては、日本国内でのMOX国際貯蔵場、または核兵器国でのMOX国際貯蔵場が考えられる。

4. まとめ

かつて描いていた近未来のPuの高速増殖炉発電利用は、現時点で現実性に乏しい。一方で完成に近づく再処理工場については、これまでの経済的投資を考慮しつつ、中長期的な視野から、総合的に我が国として国益に資する方向性を考えることが重要である。この観点から、Pu利用政策の連続性確保のために、当面は軽水炉MOX利用(燃料サイクルを含む)を中心としたPu利用・消費という方向を継続的に追及していくべきと考えられる。

我が国がこれまで進めてきた、唯一の被爆国として、厳に平和利用に限った原子力利用の姿として、NPT加盟はもとより、世界最高レベルの保障措置の導入など国際社会の模範となる核不拡散政策を採ってきた。さらに核セキュリティ政策についても、近年の核テロ防止条約や改正核物質防護条約への対応強化に加えて、核セキュリティ・サミットにおける総理ステートメント等、世界的に見ても高い水準での核セキュリティへの取組みを行っている。現在、顕在化しつつある保有Puの増大問題は、我が国における兵器転用リスクという面での問題

ではなく、むしろ Pu 利用計画が具体的に明確に示せない状況下での今後の再処理施設稼働による保有量増加の可能性が、国際社会、特に近隣諸国へ不必要な懸念もたらすところにあると考える。

我が国では再処理による便益は、将来の資源確保という意味合いのみならず、使用済燃料の処分における 3S の向上という点でも大きい。よって再処理工場の稼働と回収 Pu が引き起こす近隣諸国への懸念払拭のために、Pu 取扱いに係る状況について更なる透明性を向上させるとともに、国際社会が許容する時間軸(例えば 20～30 年)で現実性のある当面の Pu 消費計画を示すことが不可欠と考える。

これには、軽水炉 MOX 利用について近未来の稼働率の最大・最小オプション、再処理施設の供用期間や稼働率を踏まえた分離 Pu (MOX) 量、また、種々の Pu 専焼技術を併用した場合の可能性や取組みの提示、使用済燃料の中間貯蔵キャパシティ増加や Pu の国際貯蔵を考慮したケースなどについても可能性を追求したオプションを提示すべきと考える。

なお、本 Pu 取扱いの議論において、MA についても同様に検討すべきところであるが、本研究では、当面の Pu の取扱いに焦点を当てた。

国際保障学研究会：グローバル COE-GoNERI (東京大学大学院；2007～2012年)開始に際し、産業界/電力界/研究開発機関/大学等からなる参加者により、核不拡散の観点から原子力の将来の方向性等について自由な発想に基づく議論を展開することを目的に設置した研究会(ここに示した考え方は、参加者が所属する企業・団体を代表するものではない)

メンバー(五十音順)：稲村智昌(電中研)、岩本友則(日本原燃)、内田光彦(三菱重工)、喜多智彦(日本原産協)、久野祐輔(東大院)、後藤 晃(中部電力)、齊藤暢彦(東京電力)、三倉通孝(東芝)、志賀道憲(日立 GE)、鈴木克之(GNF-J)、須田一則(JAEA)、田崎真樹子(東大院)、田邊朋行(電中研)、玉井広史(JAEA)、西川進也(関西電力)、稗田恭久(原燃工)、彦坂淳一(丸紅)、深澤哲生(日立 GE)、干場静夫(海洋研究機構)、宮本直樹(核管センター)

－ 参考文献 －

- 1) JAEA-Review 2010-040, ただし 6)は含まず.
- 2) Center for Public Integrity (米国非営利調査報道 NPO) : Japan reaffirms its plan to produce plutonium (CPI の HP)
- 3) <http://isis-online.org/isis-reports/detail/civil-separated-plutonium-in-the-infirc-549-states-taking-stock/>
- 4) 仏国・英国の Pu 管理, 原子力委員会
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siry02012/siry056/siry01.pdf>
- 5) 遠藤哲也「日米原子力協定(1988年)の歴史と今後の課題」, ATOMOΣ, (Vol.56)の No.8, No.9, No.10, (2014).
- 6) <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/hatukaku/siry0/siry08/siry03-1.pdf>
- 7) 泊, 女川, 東京電力の原子力発電所, 浜岡, 高浜, 大飯, 島根, 伊方, 玄海, 東海, 大間等での MOX 装荷を想定.
- 8) 国際保障学研究会報告書
<http://www.esl.t.u-tokyo.ac.jp/security/download.htm>
- 9) 久野祐輔：Pu のトリレンマに如何に対処するか, 原子力学会誌(ATOMOΣ), Vol.55, No.2, (2013).
- 10) <http://www.gepr.org/ja/contents/20130826-02/>

著者紹介

久野祐輔 (くの・ゆうすけ)
東京大学大学院原子力国際専攻・日本原子力研究開発機構, 国際保障学研究会主査代行
(専門分野/関心分野)核不拡散・核セキュリティ・保障措置


 報告

AESJ-Collaboration Task Force (CTF)の設立と活動 フォーラム 21「イオンビームの物理と応用」と共催

東京大学 上坂 充

日本原子力学会，特に若手・学生の活性化，さらに学会誌の内容充実に貢献すべく，AESJ Collaboration Task Force (CTF)を立ち上げた。学会内，場合によっては外の様々な組織・活動を横断的に融合できることも可能とする。メンバには日本人以外も可能で，国際化も視野に入れている。具体的には，大学，高専，高校等での，啓発的研究会・シンポジウムを企画・実行し，その報告や講演内容を，適時，学会誌で公開していくこととする。今回は第1回企画として，平成26年1月9日，奈良女子大で行われたフォーラム21（関西近隣の大学・院の放射線物理学関係の研究会）にて企画セッションを行った。その内容，今後の活動予定について報告する。

1. AESJ Collaboration Task Force 活動について
第1回企画としての，フォーラム21（関西近隣の大学・院の放射線物理学関係の研究会）の企画セッションを今回報告する。第2回目活動として若手・学生がより学会発表しやすくするための，部会連絡会への提案をした。第3回目として，Japan-IAEA Nuclear Energy Management School（平成26年度6月9～24日東大本郷・いばらき量子ビーム研究センター）にて，そのAlumuni Association, YGN (Young Generation Network)，学生連絡会と合同セッションを企画・実施した。第4回目として，リスクコミュニケーションに関する若手シンポジウムを男女共同企画研究会と共同で検討中である。

2. フォーラム21について
フォーラム21 —イオンビームを用いた物理とその応用— は，年に一度，関西近隣の放射線物理学関係の研究に携わる研究者・大学院生・学部学生が一同に会して行う研究会である。日本物理学会との差別化を図る目的もあり，発表者は原則，大学院生とし，その研究内容は，一定の成果が得られた研究テーマに限らず，現在進行中のテーマや，構想段階にあるテーマ，場合によっては失敗談も含め，ざっくばらんに議論をしてもらうことを目的に始められた。特に，学生達に活発な議論をしてもらいたい，というのも研究会の中心的な目的のひとつである。会場は，参加大学の中で輪番としている。

この研究会は，岡山理科大学の金子敏明氏と奈良女子大学の故・坂本直樹氏による提案のもとに始まった。

今回は，特別講演を併せて計12件の発表があった。特別講演を除いてすべて学生による発表であり，研究成果のみならず，装置開発状況，研究背景や測定原理も含めて詳細を報告するといった形式であった。発表内容はイオンビームと物質の相互作用に関するものが多く，阻止能，2次電子放出といった基礎的な現象のほか，クラスターイオンの照射効果，液体との相互作用，金属箔の照射誘起変形など，新しい物理現象の探索やそのメカニズムについての報告がなされた。また，PIXE，RBS，PIGEなどのイオンビーム分析を利用した研究の発表もあり，基礎から応用まで幅広く扱っていた。イオンビーム研究という繋がりはあっても，学生自身の研究とは直接関連しないものも含まれる中，学生による質疑応答が終始活発に行われた。時に自分の研究テーマにばかり傾注しがちな学生にとっては，イオンビーム研究の幅広さを知り，視野を広げることのできる，有意義なフォーラムであった。

さらに，フォーラム後は同大学にて懇親会が行われた。学生にとっては，他大学の先生や学生と知り合う貴重な人材交流の場となり，研究についてだけではなく進路についても忌憚のない意見交換が行われた。また，フォーラムに引き続きYGNの活動紹介と入会方法について説明がなされ，原子力業界への若手参入を呼びかけた。

3. フォーラム21でのAESJ Collaboration Task Force セッション

関西の加速器ビーム利用学生が集まる研究発表会，フォーラム21において，Collaboration Task Force

Establishment and Activity of AESJ-Collaboration Task Force(CTF): Forum 21 Physics and Application of Beam ; Mitsuru UESAKA, Sumi YOKOYAMA, Akio ITO, Hidemi OGAWA, Takako SHIRAKI, Shinichiro SATO.

(2014年9月19日 受理)

(CTF)の始動開始第1弾となる講演会において、「医学物理・保健物理研究分野における今後の展開」として、医療現場での放射線利用に関する現状と進展しつつある研究の概要について藤田保健衛生大学 横山須美准教授が講演していただいた。

講演の内容としては、まず、「日本原子力学会」を知ってもらうということで、医療にも貢献している加速器・ビーム科学分野や放射線工学、保健物理・環境科学分野などの研究者も所属しており、幅広く原子力利用(放射線利用も含め)に関する応用分野を網羅していることを述べている。

続いて、X線の発見後、放射線の医学利用が進展した歴史について紹介した。今も16列CT(検出器が16列並んでいる)が健在な中、日本が誇れる技術として、320列CTが登場しており、0.3秒程度の1回のスキャンで15cmほどある心臓を撮影することができる。2次元の断層画像から3次元化、さらには動的特性を可視化するような手法も取り入れられつつあり、高精度かつ高速化が進められている。また、核医学検査では陽電子断層撮影(PET)とCTを組み合わせて、小さな病巣の位置を高精度で特定できるようになっていることや血管塞栓術や狭窄の拡張の治療に放射線による血管透視が行われていることなど、具体例を挙げて紹介した。

放射線治療については、特に、理工学系の学生にも関連が深く、関心も高いと思われたため、陽子・重粒子線治療、そして、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)を中心に紹介した。粒子線治療は、線量分布が良く、正常組織へのダメージが少ない。このため、深部のがんにも効果を発揮するが、陽子線治療においては、スポットスキニングという細いビームを個々のがんの形状に合わせて、なぞるように照射することでさらに正常細胞へのダメージを少なくする技術の臨床現場での適用が近く開始される。心臓の拍動により標的(がん)が動くことを考慮して標的を追跡して照射する方法等も将来的には現実化するであろう。一方、BNCTについては、これまで原子炉で発生した中性子を利用してきたため、実施できる施設が限られていた。近年、加速器利用による中性子発生技術が確立され、さらに小型化された。将来は、陽子線治療と同様に、地域の基幹病院に併設されているといった身近な存在になるのではないかと、期待を込めてこれらの技術について紹介した。

さらに、放射線防護という観点から、国際的に関心が高まっている水晶体の放射線影響とその防護といった課題とともに、医療スタッフの被ばく線量評価や陽子線治療施設での放射性物質の空気中濃度の測定など、これらの診断・治療にどのように関わっているかを話された。

人の命を預かる現場に立ち入ることは理工系の人間にとってしきいが高い。しかし、装置・解析技術は高度化の一途をたどっており、技術進展においては、分野間の

融合は必要不可欠の時代である。医療系分野での理工系研究者・技術者の活躍を期待する声も高い。これからの世代の人たちには、一つの分野にとどまることなく、さまざまな分野の研究者と協力して研究・開発の活路を切り開いてほしい。まだまだ模索中ではあるが、手助けが出来るよう努力したいと思う。

4. これからの展開

フォーラム21との共同企画を定例化していきたい。正直、現状の参加者のほとんどは日本物理学会等会員で本学会員は多くなかった。早速、部会絡めと協議し、彼らを取り込むべく、学会発表分野細目の再検討を始めた。直後に新たに数名のYGNへの入会があったと聞く。

Japan-IAEA Nuclear Energy Management SchoolでのAlumuni Association, YGN(Young Generation Network)、学生連絡会と合同セッションについては次の機会に報告する。本SchoolもIAEA、世界での参加者派遣機関の賛同が得られ、来年度以降も定例化できる見込みである。上記も毎年行われ、若手の国際ネットワーク構築の場にしていきたい

第4回目リスクコミュニケーションに関する若手シンポジウムを男女共同参画研究会と共同で実施したい。

各企画は適時学会誌にて報告する。

著者紹介

上坂 充 (うえさか・みつる)

東京大学

(専門分野/関心分野) 先進小型加速器開発, 可搬型ライナックの医療・原子力応用, 人材育成

横山須美 (よこやま・すみ)

藤田保健衛生大学

(専門分野/関心分野) 放射線防護, 線量評価

伊藤秋男 (いとう・あきお)

京都大学

(専門分野/関心分野) 量子ビーム科学, 原子衝突物理学, 医学物理

小川英巳 (おがわ・ひでみ)

奈良女子大学

(専門分野/関心分野) 放射線物理学

白木貴子 (しらき・たかこ)

三菱重工業㈱

(専門分野/関心分野) 炉心・遮蔽設計

佐藤真一郎 (さとう・しんいちろう)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野) 量子ビーム科学, 半導体物理学

理事会だより



学会の福島復興へ貢献する活動について

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会

会員の皆様がよくご存じのとおり、福島第一原子力発電所の廃止措置は、かつて経験のない技術的な挑戦を伴いつつ、極めて長期にわたり継続される事業です。予想される技術的な困難さから、世界がその進展に関心と懸念を示す中、世界の英知を集め、事業を進めることとされており、原子力分野の専門集団として、本学会も積極的な貢献を行うことが求められています。

本会では事故炉の廃止措置支援等の活動について、本会としての体制を整え、この問題に長期に取り組む観点から、新たに特別な委員会として理事会直轄の「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」を設置しました。(委員長：宮野廣，副委員長：関村直人，岡本孝司)

この委員会では、「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」(学会事故調)での提言のフォローも併せて実施します。特に、事故進展の更なる解明のために今後の廃炉の過程で必要となる調査・検討事項についてのフォローを行っていく予定です。

既に委員会を、2011年8月29日と10月23日の2回開催し、以下のような検討の方針が決まりました。

- ・学術組織としての特性を活かした活動を行い、廃炉の安全かつ円滑な実施に貢献しうる提言等を取りまとめ、政府、関係機関に伝える。(このため、廃炉の当事者が行っているような現場対応的な検討は行わず、より長期的・俯瞰的な視点で検討します。)
- ・新たな分野での知見が得られてくる状況の中で、それらを効果的に活用すべく、学会での規格基準化、標準化の活動に役立てる。課題の中で、規格基準化すべき項目の選定と原案策定などの必要な処置を行い、標準委員会に基準化を提言する。

なお、個別課題に対して掘り下げた検討を進めるため、随時、分科会を設けることとしています。既に事故調の提言フォローのための分科会の設置が決まりました。

また、本検討委員会の関連部門の成果を会員に広く知っていただくため、「春の年会」では諸活動の現状と今後の活動の方向性の議論を、「秋の大会」では研究経過や成果を議論することとします。一般向けのシンポジウムを福島で開催することも考えております。会員の皆様も、ぜひ関心を持って、これらの活動にご参加ください。(理事・廃炉検討委員会幹事 田中隆則)

福島特別プロジェクト

福島特別プロジェクトでは、クリーンアップ分科会と放射線影響分科会を設け、再処理・リサイクル部会や社会・環境部会の協力を得て、専門家集団の立場から福島県の環境修復、復興に協力しています。住民の方々への直接の発信として、①住民の方々への情報提供、②除染と放射線影響に関するシンポジウムの開催、③除染推進活動、④除染講習会アドバイザー業務を行っています。また、学会員自らの試験として稲への放射性セシウムの移行を調べています。今年度の主な活動は次の通りです。

住民の方々への情報提供としては、福島県が実施している「福島県大学連携リスクコミュニケーション事業」に協力しており、最近では昨年10月に郡山女子大学で行われた学園祭「もみじ会」で、同大ナチュラルライフスタイル部の学生が学んできた「放射線と除染について」の発表展示に協力しました。また、事故以来、避難住民や市町村職員などを対象として、環境修復、放射線影響、福島第一原子力発電所の廃止措置の進捗についての説明を福島県の協力も得て実施しています。最近では住民の方々も除染や放射線影響についての知識が豊富になってきており、学会の対応としても除染だけでなく福島県の環境修復に関する幅広い知見が必要となってきています。シンポジウムは一般の方を対象として福島市で年2回開催しており、2014年1月には「東京電力福島第一原子力発電所事故後の環境回復への取り組み ―住民被ばくの現状と環境動態―」、また8月には「除染のためのフォーラム ―低線量被ばくと健康影響について―」と題して、外部識者も招聘して開催しました。参加者は80～150名程度あり、終了後のアンケートでは「よい知見が得られた」とおおむね好評でした。また、除染推進活動の中で、環境省と福島県が共同で設置した除染情報プラザ(福島駅横)に毎土曜、日曜日と祝日に専門家を派遣し、来場者の質問への対応を行っています。2014年は10月末までに延べ100名の学会員を派遣しました。

水田土壌から稲への放射性セシウム移行試験は、学会員が実施している貴重な試験研究であり、JA そうまの協力のもと南相馬市の水田を利用して行っています。この試験は3年間継続しており、移行率の経年変化を評価しています。この試験で玄米への移行率は0.8%以下と低いことが明らかになっており、この成果は国際会議でも発表しました。

(理事・福島特別プロジェクト代表 井上 正)