

### 巻頭言

#### 1 原子力は重力エネルギーの缶詰

佐藤文隆

### 座談会

#### 14 LNTは成立しない!? 低線量では細胞レベルで修復メカニズムが働く



低線量率では細胞の修復メカニズムが優位に働き、LNTからのずれが大きくなる。また同じ総線量なら、線量率が低ければ低いほど影響が少ない。これらをふまえると、預託線量の概念を見直す必要があるのではないかと考えられる。

坂東昌子, 真鍋勇一郎, 澤田哲生

### 報告 初等・中等教育における放射線・原子力教育の状況

#### 38 中高生のための原子力・科学技術教育プログラムの開発

##### — IAEA 専門家会議の動向

IAEA 会合では「はかる君の開発と普及に関する事業」「高校生を対象とした放射線等に関する課題研究支援事業」が、良好事例として紹介された。

飯本武志

#### 40 科学的に探究する放射線教育及び研究機関等との連携

「科学的に探究する力を育む放射線教育」という研究テーマを掲げ、従来行ってきた「放射線の知識を学ぶ」授業から「放射線で科学を学ぶ」授業への転換を図っている。

佐々木 清

#### 42 近畿大学原子炉を用いた教員向け原子炉実験研修会

近畿大学原子炉は熱出力1ワットの教育訓練用原子炉であり、原子力を専門とする学生だけでなく一般市民や学校教員が運転を体験できる貴重な施設として活用されている。

若林源一郎

### 時論

#### 2 文部科学省における原子力政策

我が国の未来のエネルギー政策を支えるための取組。

田中正朗

#### 4 学会の「知」を社会で活かすために

原子力学会としての社会的責任への向き合い方について提示した。

八木絵香

#### 6 エネルギー教育の「レディネス」を考える

本学では今年度から、「原子のエネルギーと私たち」という一般教養科目が始まる。

星野敦子

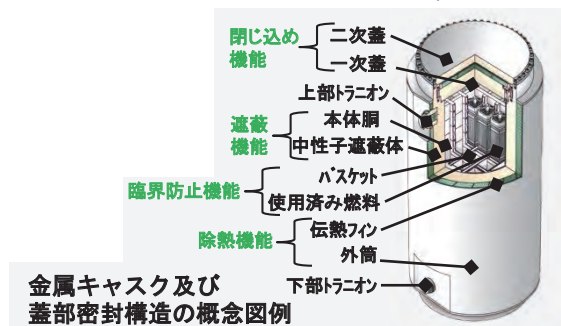
### 解説

#### 21 使用済燃料貯蔵技術の現状

##### — 長期貯蔵に対処する国際的動向

使用済燃料貯蔵の現状と計画を国内外の動向を踏まえて解説する。

三枝利有, 亘 真澄



#### 27 高レベル放射性廃棄物の処分に関するフォローアップ委員会 暫定保管に関する技術的検討分科会の報告について

暫定保管の技術的シナリオの検討と課題の整理を行った結果、いずれのシナリオについても技術的には実現可能性があると判断した。

田辺博三, 三枝利有

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

33 第7回 地層処分システムの安全評価

今回は地層処分システムの安全評価の一般的方法論と、それに沿った国際動向を解説する。

柴田雅博, 亀井玄人

報告

43 放射線防護における安全とは

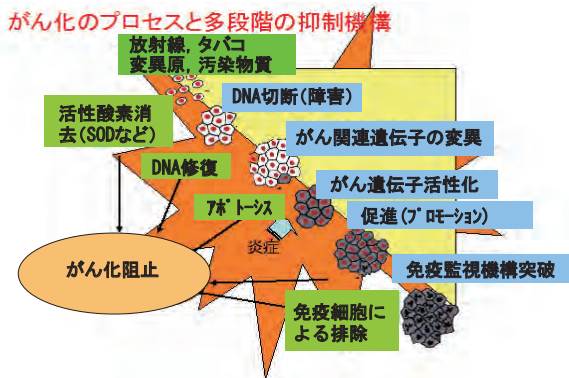
リスクはその大きさだけでなく、種類によっても受容限度が異なる。また、一つのリスクを避けることが、別のリスクをもたらすことがある。個人の選択と社会的な選択も様相も異なる。放射性防護における安全とリスクは、それらの複合的な関係の中にある。

神田玲子

46 低線量放射線の生体への影響と食の重要性

これまで延べ数千人の免疫機能を測定してきた。今の福島の放射線量ではがんリスクの上昇より、過剰に放射線の影響を心配して免疫機能が低下することや、避難に伴うストレスの方ががんリスクをあげる可能性がある。

宇野賀津子



50 放射線と子どもの健康

福島第一原発事故後、福島県民は不安と風評の中で暮らしてきた。不安の正体は先の見通しが見えないこと、何を信用すればいいのかわからないこと、の二つにつきる。その原因の多くは放射線の誤った情報を信じてしまったことにある。

市川陽子

福島からの風

60 生と死の狭間で

— 20km 圏への帰還に向けて

半谷輝己

8 NEWS

- 規制委, 高浜 3, 4 号機の設置変更許可
- 2015 年度の政府予算案まとまる
- エネ研, 「高コスト電源は経済損失」
- エネ調小委がエネミックスの議論を開始
- 医療被ばく線量の最適化システム稼働
- 海外ニュース

福島原発事故への各学会の取組

56 日本地球惑星科学連合の取組

日本地球惑星科学連合

会議報告

58 Water Reactor Fuel Performance Meeting 2014

—世界最高水準の安全性に向けて

安部田貞昭

59 原子力発電プラントの水化学に関する国際会議 2014 札幌

石原伸夫

理事会だより

61 平成 27 年度のスタートにあたり

- 37 From Editors
- 45 新刊紹介「原発とどう向き合うのか」 佐田 務
- 62 第 47 回(平成 26 年度)日本原子力学会賞 受賞一覧
- 63 会報 原子力関係会議案内, 共催行事, 人事公募, 寄贈本一覧, 次年度会費請求のお知らせ, 平成 27 年度日本原子力学会 新規フェロー, 平成 26 年度「日本原子力学会フェロー賞」受賞者一覧, 平成 27 年度「シルバー」・「永年会員」表彰, 2014 年度 JNST Article Awards 受賞一覧, 英文論文誌 (Vol.52, No.4) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「目安箱」(<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/>

# 原子力は重力エネルギーの缶詰



京都大学名誉教授

佐藤 文隆 (さとう・ふみたか)

京都大学理学部卒業。同大教授，日本物理学会会長，湯川記念財団理事長などを歴任。専門分野は理論物理，一般相対論，宇宙物理。著書は『宇宙論への招待』（岩波新書），『ビッグバンの発見』（NHKブックス）など。

輝く星のエネルギーは原子核同士の融合による。燃焼の化学反応のように，核融合の反応が進めば「燃料」が減少して「燃えかす」が蓄積する。太陽での「燃料」は水素原子核，「燃えかす」はヘリウム核である。原子核の核子当たりの結合エネルギーは原子番号とともに増大して鉄 56 核辺りで最高になり，それ以上になると再び減少する。実際ウラン核などは分裂してより安定な軽い核になる。原子核のこの大局的な性質から原子力には核融合と核分裂がある。ここまではこの雑誌の読者には言わずもがなであり，最近ではウランの起源が「星の最後の超新星爆発時に形成されて星間空間にばら撒かれた」という宇宙知識も普及している。ところがウラン形成の物理過程の理解となると普及度は急減する。「爆発なのだからいろんな反応が起こるだろう」という火事場泥棒的な発想でそれ以上追及されないのだ。

核の融合が進むと星の中心部には「燃えかす」の鉄が溜っていく。しかし「燃えかす」はもう融合しないからウランは融合では作れない。理化学研究所の加速器でも実験してるように，超重核は中性子照射で作られる。宇宙でも「燃えかす」に中性子を照射すればよいのだが，それには中性子が必要になる。宇宙過程でなく物理過程を理解するとはこの中性子製造がポイントである。一旦できた核をバラバラに融解してさらに陽子を中性子に変えるのだが，これは「燃えかす」にエネルギーをつぎ込んで「燃料」に戻すことだから，何処からそのエネルギーを調達するかが問題だ。

ここで核過程で無視してきた原子の電子が登場する。十分なエネルギーの電子を衝突させれば陽子は中性子に変わる。星のコアではこの逆  $\beta$  過程で原子の電子が原子核の陽子を中性子に変えて核をバラバラにする。この核融解と中性子化のエネルギーは電子が供給する。電子は量子統計のフェルミ粒子であり一量子状態に一個の粒子しか入らないというパウリの排他律に従う。普通この原理は原子の中での量子状態に電子を配置していく原理あるいは固体電子論での伝導電子のフェルミ・エネルギーとして学習する。このフェルミ・エネルギーで逆  $\beta$  過程が起こるのである。

星でフェルミ・エネルギーが大きくなるのは高密度になるからだ。核融合の燃料がなくなれば冷えるので熱圧力がなくなり，重力収縮でまず原子がびっしり詰まった固体状態になる。ところが固体状態の硬さで支えられる天体の質量は地球ぐらいまでで，太陽質量では原子は押しつぶされて原子に束縛されていない自由電子となる。電子波の運動量は閉じ込められた空間サイズに逆比例するから，高密になると大きくなる。従ってエネルギー準位に下から順に決まった数を詰めていった上限のフェルミ・エネルギーも増加する。これが核を溶解させ陽子を中性子に変えるのだ。すなわち中性子製造のエネルギー源は星の収縮であり，ウラン分裂で解放されるのは重力エネルギーなのである。

だから宇宙過程でいえば，地上での太陽エネルギーは宇宙での核エネルギーであり，太古の太陽光が育てた生物を起源とする石油の化学エネルギーは宇宙での核エネルギーの缶詰であり，地上での核分裂原子力は宇宙での重力エネルギーの缶詰なのである。  
(2015年1月15日 記)



## 文部科学省における原子力政策

田中 正朗 (たなか・まさあき)



文部科学省研究開発局長

1981年大阪市立大学理学部卒業、同年科学技術庁入庁。文部科学省科学技術・学術政策局基盤政策課長、大臣官房審議官(研究開発局担当)等を歴任し、2015年1月より現職。

現在、研究開発を含めた原子力政策は重要な岐路に立っています。平成23年3月11日の東日本大震災及びそれに伴う東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故(以下「東京電力福島第一原子力発電所事故」)は、日本の原子力政策の根幹を揺るがす事態であり、原子力政策に対する国民の皆様からの信頼は大きく揺らぐことになりました。文部科学省研究開発局は、原子力政策における科学技術に関する政策を所掌し、我が国唯一の原子力の総合研究開発機関である日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」)を所管しています。私は本年1月より、研究開発局で原子力政策を担当する大臣官房審議官を経て研究開発局長に着任し、研究開発局の原子力政策を主導する立場となりました。一人の原子力政策に携わる者として、私は原子力事故のことを常に念頭に置き、真摯な気持ちで原子力政策に取り組んでまいりました。

私が研究開発局において携わった原子力に関する重要な取組の一つに原子力機構の改革があります。平成24年末に発覚した高速増殖原型炉「もんじゅ」での保守管理不備や平成25年5月に発生した大強度陽子加速器施設(J-PARC)での放射性物質の漏洩事故を受け、文部科学省としては、原子力機構の組織体制・業務を抜本的に見直すことが必要であると判断し、平成25年5月に文部科学大臣を本部長とする「日本原子力研究開発機構改革本部」を設置しました。同年8月には「日本原子力研究開発機構の改革の基本的方向」を取りまとめ、原子力機構の抜本的な改革を進めることとしました。原子力機構は文部科学省の方針を踏まえ、安全を最優先とした組織体制及び業務運営の再構築のため、平成25年10月から平成26年9月末までの1年間を集中改革期間として改革に取り組みました。組織としての社会的使命を再認識するとともに、トップの指示・考えが現場まで確実に共有化できる仕組みの再構築を図るべく、理事長によるトップマネジメント強化のための支援組織の新設や、機動的な業務運営のため25の事業所等を重点化した事業別に6部門に再編するなど、抜本的な組織改革を行いました。また、東京電力福島第一原子力発電所事故対応等の重要分野への経営資源の重点投入や、核融合等の量子科学研

究事業、放射線医学総合研究所への分離・移管等、事業の重点化を進めました。同時に、職員の意識改革のため、理事長以下の役員が全事業所を訪れ、職員と直接対話を行い、安全意識の向上に努めました。改革の発端となった「もんじゅ」については、「もんじゅ」を理事長直轄の組織とするとともに、「もんじゅ」の運転・保守以外の業務を支援する組織を設置するなど組織体制の強化を図り、人材や予算等の経営資源の重点投入や電力会社等との人事交流を推進するなど、原子力規制委員会からの措置命令解除に向けて理事長の指揮の下、全力で取り組んでいるところです。文部科学省としても、これらの改革の成果を踏まえ、原子力機構が安全を最優先とした組織となるよう、引き続き指導してまいります。

文部科学省における原子力政策は、我が国の未来のエネルギー政策を支えるための取組と言えます。エネルギー資源を海外からの輸入に頼らざるを得ない我が国にとって、エネルギーの確保はまさに生命線です。我が国のエネルギー需給に関する長期的、総合的かつ計画的な推進を図るために定められる「エネルギー基本計画」は、平成26年4月に震災後初の改訂が行われ、その中で原子力は、エネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源と位置づけられました。また、同時に、東京電力福島第一原子力発電所の廃炉や環境回復、原子力の安全性の向上等、震災後に取り組むべき課題も明記されることとなりました。文部科学省でも原子力政策を科学技術の観点から支えるべく、これらの課題にしっかりと取り組んでいかねばなりません。エネルギー基本計画等を受け、平成26年度は文部科学省においてもいくつかの大きな動きがありました。まず、東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けては、平成26年6月に下村文部科学大臣自ら「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン」を発表しました。これは、事故発生時に炉内で溶融した燃料デブリの取り出し等のために、遠隔作業技術及びデブリの物性や形状の分析を行う技術等やそれらを扱う人材育成の必要性を大臣自らが現地での東京電力との対話などから認識し、国内外の英知を一カ所に結集させ、安全かつ確

実に廃止措置等を実施するために必要な研究開発と人材育成を加速することを目的としたものです。これらについては、平成27年度に原子力機構内に「廃炉国際共同研究センター」を立ち上げることとしており、福島における研究開発拠点として「国際共同研究棟」を整備するなどの計画の具体化を進めているところです。これらの活動で得られた技術や知見については、「エネルギー基本計画」にも示されている通り、各国の原子力施設における安全性の向上や防災機能の強化にも貢献するものであると考えています。

また、我が国の原子力政策において大きな課題となっている高レベル放射性廃棄物の処理処分について、長期にわたって安全かつ適切に処理処分を進めるべく、その減容化・有害度低減のための技術開発の一つとして、群分離・核変換技術への取組を進めています。平成25年7月に文部科学省の原子力科学技術委員会の下に、群分離・核変換技術評価作業部会を立ち上げ、群分離・核変換技術の現状等を評価し、今後の研究開発の進め方や検討すべき課題等について整理しました。加速器を用いた核変換技術については、現在の研究開発段階から効率性、経済性、及び廃棄物の減容効果等に係るデータ・知見を蓄積し、工学規模のステージに移行することが適切であり、既存施設を有効活用しつつ、新規施設を戦略的に組み合わせ、研究開発の効率的な推進を図ることが必要とされ、現在、加速器として大強度陽子加速器施設(J-PARC)を活用した核変換実験施設の整備を検討しています。

平成26年度においては、高温ガス炉が大きな注目を集めました。高温ガス炉は固有の安全性を有し、高温の熱を利用できることから、発電のみならず、水素製造等の多様な熱利用が可能であるため、新たな原子力システムとして注目されています。高温ガス炉自体は、昭和47年に「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」にその推進が明記されて以来、原子力機構及び関連の民間企業・大学等において長年取組まれてきました。我が国は今までの技術の蓄積により、高い技術的なポテンシャルを保持しています。現在、高温ガス炉については、諸外国で取組が加速しており、特に中国では商用炉を含めた研究開発が推進される等、国際競争が加速しています。そのような中、平成27年から新たに国際原子力機関(IAEA)において、高温ガス炉の国際安全基準の策定に向けて検討を行う等の取組も開始されることとなっています。高温ガス炉については、エネルギー基本

計画にも位置づけられ、文部科学省においても平成26年5月に新たに高温ガス炉技術研究開発作業部会を立ち上げ、高温ガス炉の今後の取組の方針について中間取りまとめを行いました。その中で、水素製造を含めた多様な熱利用を含めた研究開発に取り組むこと、その将来の実用化像については、産学官の協議会において議論していくことが提言されました。高温ガス炉については、原子力機構を中心として研究開発を推進しつつ、産学官の取組を深めていくことが必要であると考えています。

文部科学省研究開発局が所管する原子力機構は、我が国の唯一の原子力の総合的な研究開発機関として、原子力分野の研究開発の基盤を支えていくことが求められています。特に、試験研究炉等を活用した研究開発の推進や人材育成は原子力機構の重要な役割の一つです。東京電力福島第一原子力発電所事故以降、原子力機構は試験研究炉等を停止し、原子力規制委員会が定める新規制基準への対応準備をしてきました。平成26年9月には原子力機構が原子力規制委員会に対し、JRR-3の新規制基準への適合性確認のための申請を行い、同年11月には、高温工学試験研究炉(HTTR)の申請を行いました。そのほかの試験研究炉等についても順次取組を進めているところです。原子力規制委員会の審査が終了次第、安全確保を最優先とした上で早期の運転再開を果たし、我が国の原子力研究開発の基盤の強化に貢献していくことが必要です。また、東京電力福島第一原子力発電所事故後、原子力分野の人材育成基盤の脆弱化が懸念されている中、我が国の中長期的な原子力政策を支えるためには、絶えず人材を育てていかねばなりません。文部科学省においても、大学や研究機関、企業等を対象に原子力に関する人材育成の支援を実施しています。

今まで原子力政策に携わった中で、私が何より痛感したのは、原子力政策は、安全・安心を第一に、地元をはじめとした国民の方々の理解を得つつ進めて行くことが必要不可欠であるということです。原子力政策は、安全と信頼の下に推進していかねばなりません。そのためには、原子力政策に携わる職員一人一人が、日々の一つ一つの業務に対し、自らが日本の原子力政策を担うのだという気概を持って取り組むことが必要であると考えております。私は研究開発局長として、原子力の研究開発の観点から日本のエネルギー政策を支えるべく、今後とも文部科学省における原子力政策を主導してまいりたいと思います。(2015年1月22日記)



## 学会の「知」を社会で活かすために



八木 絵香 (やぎ・えこう)

大阪大学 コミュニケーションデザイン・センター 准教授

2005年東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 博士(工学), 専門は科学技術社会論。著書は『対話の場をデザインする』(大阪大学出版会, 2009), 『ポスト3.11の科学と政治』(ナカニシヤ出版, 2012)。

### 1. はじめに

東日本大震災以降, 原子力学会はいくつかの声明や見解を公開している。最初の声明は, 東日本大震災の発災から1週間後であった。筆者はその声明を批判的に検討し, 社会の声に耳を傾けることの重要性について論じた<sup>1)</sup>。しかしそれ以降に公表された学会声明や見解からは, 社会の側から遠ざかる原子力学会の姿が窺える。

### 2. 福島第一原子力発電所以降の学会声明・見解

#### (1) 個人の責任追及に偏らないことを求める声明

2011年7月に発表された「福島第一原子力発電所事故『事故調査・検討委員会』の調査における個人の責任追及に偏らない調査を求める声明」では, 「日本原子力学会としては, (中略)結果だけをみて直接関与した個人の責任を追及するのではなく, 設置者のみならず規制当局等も含めた組織要因, 背景要因などについても明らかにされ, 関係者間で共有されて再発防止に活かされることが重要と考える」との主張がなされた。

これに対し, 政府事故調メンバーであった柳田邦男氏が, 調査される側が調査・検証する側へ調査方法の枠組みを要請するというのは前代未聞と厳しく批判<sup>2)</sup>したように, この声明への社会的評価は厳しいものであった。もちろん, この内容は一般原則としては誤りではない。原子力事故に限らず, 個人の責任に帰着することを免れない国内の現行制度の存在が, 真の意味での事故調査・再発防止策の立案を阻害してきたことは, 福島事故以前から指摘されている<sup>3)</sup>。しかし問題は, 原子力学会がこの内容を責任当事者から一歩引いたところから, 社会に向けて広く主張する立場にあったのかである。この声明は内容の正当性以前に, 原子力学会に対する社会の信頼を損なう効果しかうまなかったのではないだろうか。

#### (2) 原子力安全規制に係る国会審議に向けての提言

同様の課題は, 2012年6月に出された「原子力安全規制に係る国会審議に向けての提言」にも読み取ることができる。この法案に「40年運転制限」が盛り込まれたことに対して学会提言では, 国際的な動向をふまえつつ, その運用方法を含めた採用見直しを主張している。

国際的には, 物理的な寿命を固定的・一律的な年数で

示す考え方から, 定期的に施設全体の経年劣化の状態を正確に把握し, 必要な改善措置を講じる方向に変わってきているという指摘は, 技術的な一般論に鑑みれば, その内容に大きな問題があるものではない。しかし前述の声明と同じく, 原子力学会がこのような提言を世に広く問うことの意味について, 十分な吟味が行われたのかについて疑問を感じざるをえないのである。

#### (3) 関西電力大飯原発3, 4号機運転差止め裁判の判決に関する見解

そして, 大飯原発3, 4号機運転差止め裁判の判決(2014年5月21日)の6日後に出されたこの見解である。

政府・国会・民間・東電の4つの事故調査報告書は, 被災設備の現地調査が不可能である現状では, 事故の直接的原因の認定は留保せざるをえないことを, 共通して示している。それにもかかわらず原子力学会は, 「事故原因が究明されていないとの指摘は事実誤認」であり, 「原子力学会は直接原因のみならず, 根本原因まで明らかにしている」と主張している。その上で, 「ゼロリスクを求める考え方は科学技術に対する裁判所の判断として不適切である」とし, 裁判所の判断は不適切であると述べている。

この見解についての詳細な言及は割愛するが, 原子力学会が自らの導いた結論を絶対的に正しいと主張している(逆の言い方をすれば, 他の調査報告書の結果を, 明確な論拠なしに否定している)ことだけをとりあげても, 開かれた討論を通じて, 真実にアプローチすべき学術専門家としての真摯さを読み取ることはできない。

### 3. 学会とは何か, 何をすべきなのか

#### (1) 学会の社会的意義

そもそも学会とはどのような組織なのであろうか。

研究者(学会員)にとっての学会は, 一義的にはピアレビューを通じた論文査読と成果公開の場であろう。その他にも学会の機能にはいくつかのものがあるが, 学会が示す提言や見解との関連で言えば, 日本学術会議が自らの憲章の第3項で示す「科学に基礎づけられた情報と見識ある勧告および見解を, 慎重な審議過程を経て対外的

に発信して、公共政策と社会制度の在り方に関する社会の選択に寄与する」という機能が、学会の大きな存在意義の一つであると言うことができよう。

これは原子力学会に照らし合わせるならば、学会からの情報発信は、自らの主張を世の中に通すためのものではなく、原子力に関する多様な選択肢の中で、社会の側が自分たちにとっての「正解」を選び取るために必要な「知」を、慎重な審議過程を経て発信することにこそ、その使命があると言い換えることができる。

#### (2) いま求められる原子力に関する「知」

現状で原子力発電が抱える大きな課題のひとつは、原子力規制委員会が出した安全審査の結果について、それが本当に正しいかどうかを、一般の人々が判断するためのオーソライズされたセカンドオピニオンが存在しないことである。原子力規制委員会への評価が専門家の間でも真っ向から対立するしかない状況では、極端な言い方をすれば専門家ではない人々は、規制委員会の審査結果を全面的に信じるか、全面的に否定するかの二つの選択肢しか持たない。過剰な信頼か、過剰な不信である。しかし専門家の意見を正しいと信じ込むのでも、頭から否定するのでもなく、その二択の「あいだ」について、意見の異なる専門家の議論を知りたいとする人も少なくない。原子力学会が、原子力に関する総合学問をあつかう学会ならば、このセカンドオピニオンを提供するに足る、社会の側からもそう信頼される組織になることを志向すべきである。

もちろんそのハードルは極めて高い。事故後の3年半でそのハードルはさらに高まった感もある。しかし業界団体の主張とは一線を画し、社会の公共財として「知」を提供するというスタンスを強く意識することが、今、原子力学会に求められる最大の改革ではないだろうか。

#### (3) 社会的意思決定における専門的知見の活用

学会組織としては、事故原因の総括のみならず、今後の原子力技術のあり様についても、慎重な審議過程を経て、対外的に発信することが肝要である。その意味でも、大飯発電所運転差し止め裁判の判決に関する見解は、大きな課題を残した。学会声明は、議論内容はもとより、その決定プロセスも含めて可視化されるべきである。

多様な意見をもつ専門家の主張をふまえて、十分な議論を行い、合意できる部分と合意できなかった部分を明示した上で学会としての知見を社会に提示する。熟議を通じて、輿論が形成される。それらをふまえた上で、政治的意思決定がなされる。すべての主張が受け入れられるわけではないが、どの主張がどのような理由で採用されたかを、後に確認することができる。

そのような社会に開かれたプロセスの中で、信頼に足るセカンドオピニオンを提示できる専門家集団のひとつとして、原子力学会が認知されるためには、具体的な社会的利害からは距離を置き、異なる主張に耳を傾け続け

る姿勢が何よりも重要ではないだろうか。これからのエネルギー政策のあり方を決めるにあたって、専門家の知見は不可欠である。その重要な知見が「知」として扱われない社会の意思決定は、私たちの社会にとって不幸としか言いようがない。それは、原子力を推進する知見であろうと、原子力を批判する知見であろうと同様である。

#### 4. 終わりに代えて

原子力学会が、福島第一原子力発電所事故以前から、積極的に改革に乗り出す努力をしてきたことは、筆者も認識している。特に原子力学会誌は、「原子力ムラ」とよばれがちな業界内部の体質変革を目指して、批判的な論陣の原稿を積極的に依頼・掲載してきた。これに対して、作家の高橋源一郎氏は朝日新聞の紙面<sup>4)</sup>において「内部と外部からの、厳しい意見を続けて掲載した誌面からは、誠実さが伝わってきた」と一定の評価をしている。事故から3年半が過ぎ、誌面の方向性にも変化が見られる現在、高橋氏の原子力学会誌に対する認識が同様であるかは、筆者には確認できない。しかし原子力に批判的な論者からであっても、原子力学会側の好ましい変化は、一定の評価を得ることができるのだ。

原子力発電に限らず、科学技術に関する専門知識の確固たる「正解」を、専門家ですら示しづらい時代である。それは原子力について言えば、判断に必要な知識が、過去に確定した知識ではなく、福島第一原子力発電所をとりまく様々な状況を含め、現在において生み出されつつある知識を対象としているからでもある。そしてその知識を生み出す主体の一つは、原子力技術の影響をうける社会でもある。その意味で、「正解」は専門家から社会に与えられるものではなく、ともに作り出すものへと変化している。そのような時代において、どのような姿勢で学会が社会的発信を行っていくのかは、これまで以上に厳しく問われることになる。

個人や小集団のレベルでは福島を中心とした精力的な活動が続いている。個人として信頼を得ている学会員も少なくないだろう。外部からは一枚岩ととらえられがちな原子力学会内でも、本稿で紹介した声明等については異論も耳にする。しかし、学会組織としての変革が目に見える形とならなければ、それは社会的責任への向き合い方が不適切であると言わざるを得ないのである。

#### — 参考資料 —

- 1) 八木絵香(2011)ポスト 3.11 時代の科学技術コミュニケーション 社会は原子力専門家を信頼できるのか、日本原子力学会誌, Vol. 53, No. 8.
- 2) 河北新報(2011年8月16日)
- 3) シドニー・デッカー(芳賀繁監訳), ヒューマンエラーは裁けるか〜安全で公正な文化を築くには〜, 東京大学出版会.
- 4) 朝日新聞(2011年7月28日)

(2014年12月26日記)



## エネルギー教育の「レディネス」を考える

星野 敦子 (ほしの・あつこ)



十文字学園女子大学 人間生活学部教授  
大学開放・地域連携推進センター長  
東京工業大学大学院博士課程修了, 博士(学術)。岐阜大学教育学部カリキュラム開発研究センター助手, 十文字学園女子短期大学専任講師などを経て現職。近著に『自ら学び考える教職教養-教育課程・制度・法規』, 『学習者とともに取り組む教育改善』など。

### 突然地域連携活動に引きこまれる

女子大の教員として, 地域貢献, 社会活動, ましてやエネルギー問題などに特段の興味も持たず過ごしていた私が「大学開放・地域連携推進センター長」というお役目を仰せつかることになったのは今から4年ほど前のことである。立場上, 地域で活動している様々な方たちと顔見知りになり, 市役所などにも頻繁に足を運ぶようになった。私が勤務している大学がある埼玉県新座市は, 環境問題に対して熱心に取り組んでいる方が多い。その理由の一つは, 市が市制施行30周年を記念して平成12年度から始めた「市民総合大学」という市民向け講座(1年間)の中に環境系の講座があり, その修了生が組織をつくり, またそこから小さな組織が派生する形で, 環境系の活動をする組織が増えていったことにある。「市民総合大学」の環境系学部は, 26年度にいたるまで, 設立から15年間継続して修了生を輩出している。

私が地域で活動を始めたころ, 地球温暖化問題に熱心に取り組んでいらっしゃる団体と知り合いになり, 高レベル放射性廃棄物の処理問題に関するワークショップに参加した。それを機に, 若い世代の人たちに, エネルギー問題を生活者の視点から, 自分自身のこととして考えてもらいたいという漠然とした思いが私をとらえていた。

### 学生の組織をどう作る?

学生を動かす方法としては, 学科やゼミなどを母体として正規の授業の一環として行うか, あるいはサークルのような形で全学からメンバーを募るかの2つが考えられる。教員の負担を減らし, 時間的にも比較的楽なのが前者であるが, 組織の継続性を考えると後者のほうが好ましい。ゼミ単位で社会的な活動をしているところがいくつかあるが, いずれも各年度のゼミ生の数や熱意の違いが活動に影響を及ぼし, 発展的継続を続けるのが困難となっている。

そこで23年度に, 学内で「子ども大学」という小学生向け講座のスタッフとして, 企画を作ってくれていた数名の学生に最初に声をかけて核となる組織を作った。さらにその年の「リーダーズキャンプ」(学内でリーダー的

な活動を志す学生のための宿泊型研修会)で参加者を募り, 十数名の学生メンバーで「地域連携ボランティアサークル ゾウキリンくらぶ」を立ち上げた。「ゾウキリン」というのは, 新座市内に「雑木林」が多いことに由来する市のイメージキャラクターである。「子ども大学」の企画を主に新座市と組んで進めていたこともあり, 地元密着型の組織であることをアピールするねらいもあった。

サークルを立ち上げてから3年が経過した現在, ゾウキリンくらぶの部員は90名を超えている。よく「どのように部員を増やしているのか」「学生のモチベーションを高めるにはどうしたらいいのか」という質問を受ける。ゾウキリンくらぶの運営にあたってポイントとなるのは以下の3点である。

- (1) 大学として地域連携に力を注いでいることから, ゾウキリンくらぶを, 地域と大学をつなぐ重要なファクターとして位置づけており, 活動に当たっては事務組織などが全面的に支援を行っている。
- (2) 国や県の補助金, 学内の活動支援費などを活用し, 原則として学生に経済的な負担をかけないようにしている。また謝金が出る活動も多く設定されている。
- (3) 部員を「運営部員」と「登録部員」に分けている。前者は定期会議を持ち, プロジェクトの企画, 運営を行い, 後者は希望する活動に参加する。

大学の協力を得られたのは非常にありがたかった。特にイベントや活動をする際の会場設営や音響設備の準備などは大きな助けとなっている。また経済的な面では, 一部の部署では事前に予算をとって, ゾウキリンくらぶの活動を前提とした事業を企画し, 交通費や謝金を準備している。

「運営部員」は希望者により構成されており, 各プロジェクトのリーダーはすべて「運営部員」が担当してい



る。「登録部員」は気楽に入って活動を体験できるので、負担も少なく、学生は入部しやすいが、活発に活動する学生には、直接声をかけて「運営部員」に推薦するようにしている。そのような学生は、自分の活動が認められたという自負を持つのでその後も活発に活動する場合がほとんどである。

生活者の視点からのエネルギー問題への取り組み  
サークル立ち上げ直前の、24年1月に最初のイベントである「みんなで考えてみませんか 放射線についてのワークショップ」を開催した。たくさんの方たちが協力してくださったこともあり、エネルギー政策に関する講演、放射線霧箱実験、高レベル放射性廃棄物に関するワークショップ、防護着用体験など、盛りだくさんの内容となった。東日本大震災の影響もあり、学生たちの放射線に対する興味は予想以上に高かった。また、イベントを開催して成功させることで得られる達成感が、より一層学習意欲を高めたということもあったように感じる。最初のイベントが「放射線ワークショップ」であったことから、学生たちの間では「放射線問題」をサークルの基本課題と位置づけるようになった。

24年度からは本格的な被災地支援活動が始まった。1年目が「福島の観光復興支援」、2年目が「福島の有機農業支援」そして今年度が「石巻における水産物の安全性」である。いずれもスタンスは一つで、「世間の評判やマスコミの報道に惑わされることなく、生活者の視点から放射線についての正しい知識を学び、冷静に現状を知り、また正しい知識を広めよう」というものである。首都圏の大学生や地域の商店会などとも連携を図り、現地での学びやワークショップを行い、その後さまざまなイベントを通して活動成果の発信を行っている。

ゾウキリンくらぶでは、これ以外にもたくさんの活動を並行して行っている。中山間部支援のための有機農業の実践、近隣地区の清掃活動(彩の国ロードサポート)、地域のボランティア団体との連携による駅前クリーンキャンペーン、商店会活性化支援、小学生のアウトドア教室の支援、被災地における植樹活動など、各々プロジェクトリーダーが中心となって活動を支えている。学生にとっては「エネルギー問題」もこれらの地域連携活動となら変わるところはなく、地域のニーズにこたえて自分たちができることに取り組み、また知らないことは学んでいこうという姿勢の表れである。

### エネルギー教育の「レディネス」

ゾウキリンくらぶが中心となって、学内で放射線関係のワークショップやイベントを積み重ねてきたところ、女子学生のためのエネルギー教育の必要性についての認識が自然と高まっていたようである。27年度からのカリキュラム改訂にあたって、原子力エネルギーに関連し

た科目を設定したいという相談があったことには正直驚いたが、これまでの活動が認められ、正規のカリキュラムの中に放射線やエネルギー関係の授業を取り入れてもらえるというのはうれしいニュースであった。

学校教育の中でエネルギー問題をきちんと教えていこうという声が高まっている。教材の整備や事例の紹介も進みつつあり、学習指導要領での位置づけは重要なことであると考えている。しかしながら、この3年間学生の取り組みをみてきて強く感じるのは、エネルギー問題を学び、それを自らの生活に根差して理解し、生活の中に活かしていくための「レディネス」の問題である。

「レディネス」とは教育用語で「準備性」ともいう。ある事柄を学ぶ際に、それを本当の意味で理解し、生活の中で応用できるだけの精神的身体的準備のことを指す。たとえば日本では学年ごとに学ぶべき漢字が定められている。漢字を単なる記号と考えれば、幼い子供に難しい字を教えても全く問題はない。一方、漢字を生活の中で利用することを考えると、脳や身体の発達段階だけでなく、生活経験なども考慮して教えるのに最適な学年を定める必要がある。

エネルギー問題を学ぶための時期についていえば、生活経験、自らの将来設計に対する認識の程度などを考慮して、高校3年以上、できれば大学生になってからが最適ではないかと思う。現代の子どもたちは、高度に情報化が進んだ社会の中で思いのほか経験値が不足しているように感じるからである。座学だけでなく、アクティブラーニングを取り入れた双方向型の授業であればより高い効果が望める。このような意味からも、来年度からスタートする本学の一般教養科目「原子のエネルギーとわたしたち」の成果が楽しみである。ぜひ学生たちの授業に対する取り組みの様子や意識の変化について、検証していきたいと考えている。

最後に、石巻の活動に参加した1年生の学生の感想を紹介したい。石巻では被災から現在に至る経緯についての講演や放射線に関する講義、また最新のシステムを含む放射線検査システムの見学などを行った。帰りのバスの中で、感想を漢字1文字で表し、なぜその字を選んだのかについて一人ずつ話をしてもらった。この学生が選んだのは「調」という字である。

「私はただ漠然と、放射線は危ないと思っていました。しかし今回の活動を通して、両親やメディアの受け売りを何も考えずに受け入れていた自分の無知さに気づかされました。お話をしてくださった方々を含め、石巻の皆さんはとて大変な努力や苦勞をされています。放射線を学び、どうすれば良いのかと知恵を絞っています。そんな方たちの姿を見ても、自分たちも調べ、ちゃんと知らなければならないという思いからこの字を選びました。」(生活情報学科 1年)

(2014年12月5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。

## 規制委、高浜3, 4号機の設置変更を許可

原子力規制委員会は2月12日、関西電力が申請していた高浜原子力発電所3, 4号機の設置変更を許可した。新しい規制基準に基づいて安全性を審査したもので、関西電力では同発電所の基準地震動を700ガルと想定した耐震対策や重大事故時の対策、対処能力について、関西

電力が提出していた申請内容は基準に適合していると判断した。

再稼働に向けては今後、工事計画や保安規定変更の認可手続きと、地元自治体の同意が焦点になる。

(原子力学会誌編集委員会)

## 2015年度の政府予算案まとまる、福島特定交付金を新設

原子力委員会が1月21日に取りまとめたところによると2015年度の原子力関係経費政府予算案は総額3,162億円(対前年度比3.4%減)で、うち文部科学省が1,671億円(対前年度比2.2%減)、経済産業省が1,425億円(対前年度比5.2%減)となった。

文科省では福島第一原子力発電所の廃止措置研究開発加速プランで38億円が新規に計上されたほか、高温ガス炉の研究開発が13億円、加速器を用いた放射性廃棄物の減容・有害度低減の取組が11億円と、いずれも前年度より拡充となった。

経産省では資源・エネルギー関係として、「第4次エネルギー基本計画」の実現に向けた取組を確実に実施していくことを掲げ、エネルギー対策特別会計で7,965億円

が計上された。原子力災害復興関連では、福島県に対する原子力事故という特殊事情に鑑みた交付金として、「福島特定原子力施設交付金」93億円が新規に盛り込まれている。

環境省では、放射性物質により汚染された土壌の除染実施で前年度より大幅増となる4,153億円を計上。中間貯蔵施設の整備では758億円計上されているが、前年度からの繰越予定額と合わせると実質的に1,200億円程度の予算規模となる見込みだ。

原子力規制・防災対策では原子力規制委員会と内閣府とを合わせ、前年度より微減の計713億円が計上された。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

## 高コスト電源は経済損失、エネ研が将来の需給像分析

日本エネルギー経済研究所は1月16日、電源構成に着目した4つのシナリオに基づく30年のエネルギー需給像に関する定量分析を発表した。

今回、設定したシナリオ(1)~(4)は、いずれも30年の総発電電力量として近年の水準に相当する約1兆kWhを想定。原子力発電についてはシナリオ(1)が稼働なし(電源構成比率0%)、シナリオ(2)が40年運転(同15%程度)、シナリオ(3)、(4)が運転期間延長(同それぞれ25%程度、30%程度)となっている。

そのほか再生可能エネルギー、火力の電源構成比率も設定し、エネルギー需給全般、経済、環境への影響について評価。発電関連コストはシナリオ(1)~(4)の順に、21.0円/kWh、19.0円/kWh、16.4円/kWh、14.8円/kWhとなった。電力価格の影響などにより、実質

GDPは30年時点でシナリオ(1)とシナリオ(4)とで最大10兆円の差が生じるとしており、高コスト電源への依存を強めるシナリオでは経済への悪影響が顕著に表れるなどと分析している。

ゼロエミッション電源の再生可能エネルギーと原子力で半分の電力を賄うシナリオ(3)、(4)では、エネルギー起源CO<sub>2</sub>が最小水準となると同時に、エネルギーセキュリティも最も確保されるとしている。

今回の分析では将来のエネルギーミックスの選択に向けて、技術革新の速度や、物理的・社会的・政策的な制約などを踏まえた上で、実現可能性があるものを策定し、国際情勢も鑑みつつ適宜見直しを行うべきなどと述べている。

## エネ調・需給見通し小委がエネミックスの議論を開始

総合資源エネルギー調査会の長期エネルギー需給見通し小委員会の初会合が1月30日、経済産業省庁舎内で開かれた。去る4月に閣議決定された「第4次エネルギー基本計画」の方針に基づいて議論を行ってきた「省エネルギー」、「新エネルギー」、「原子力」の3小委員会の経過も踏まえ、現実的かつバランスの取れたエネルギー需給構造の将来像について検討が開始された。エネルギー基本計画では「原発依存度については、省エネルギー・再

生可能エネルギーの導入や火力発電所の効率化などにより可能な限り低減させる」とうたわれている。

会合では委員から、将来の電源構成に向けた具体的な数値を伴う提案がなされた。また、熱利用やバイオマスの可能性、再生可能エネルギー導入によるコスト増への懸念、原子力に関しては使用済み燃料の問題、国民感情とのギャップを埋めるために数値的エビデンスを示す必要などを述べる意見があった。

## 放医研、病院と連携し医療被ばく線量の最適化システム稼働

放射線医学総合研究所は1月30日、放射線診断による医療被ばく線量を低減するために医療機関やメーカーと連携し、CT装置などの画像診断装置から医療被ばくに関する情報を自動収集しデータベース化するシステムを稼働させたと発表した。

放医研ではこのほど、同所とGEヘルスケア・ジャパンのそれぞれが開発した情報収集ツールを用いて、東北大学病院と大阪警察病院のデータ収集を開始。さらに3機関からも情報収集を行い、1施設ごとにおよそ4,000検査分、半年後には計2万件余りのデータ収集を見込んでいる。放医研による情報収集ツールは接続先となるメーカーや製品に依存せず対応できる仕様で、イメージ

化されている被ばく線量に関する情報をデジタルの数値情報に変換できる機能を有するため、情報を数値データとして収集・解析することができる。

診断に影響を与えない範囲でできるだけ放射線量を低減して医療被ばくを最適化するための目標値として、ICRPでは、診断参考レベル(DRL)を使用することを勧告している。今回の取組により客観性あるデータを大量かつ一元的に収集することが可能となり、DRLの設定に貢献することが期待される。

放医研では今後、患者個人の医療被ばく線量の管理体制へ発展させることを視野に、15年度以降は対象医療機関を20施設程度に拡大していくこととしている。

## 海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

### 【国際】

## 「中・長期的見通し、明るい」、IEAとNEAが原子力ロードマップ発表

国際エネルギー機関(IEA)と経済協力開発機構・原子力機関(OECD/NEA)は1月29日、世界の原子力発電開発の現状や2050年までの将来像、低炭素エネルギー・システムの中で原子力が果たす役割などの見通しについて共同作成した「技術ロードマップ=原子力エネルギー」の最新版を公表した。OECD諸国の中では最大の低炭素エネルギー源である原子力の将来性は中長期的に明るいとす一方、地球の温度上昇を2℃以下に抑えるシナリオ達成のために、原子力設備を2050年までに現状の2倍以上に拡大する必要があると訴えている。

同ロードマップの中でIEAらは2010年に前回版を発表して以降、福島第一原発事故や世界的な財政危機が工

ネルギー部門や原子力の将来見通しに大きな影響を及ぼしたと指摘。その上で、このような課題の出現にもかかわらず、原子力はベースロード用の確証済み低炭素電源技術として留まり、多くの国がエネルギー戦略上の重要性を再確認しているとした。

こうした背景からIEAらは、ロードマップの最新版編集にあたり原子力の開発利用が直面する近年の課題を考慮。具体的な目的として、(1)原子力開発の現状に加え、安全要件の増加や経済性の改善に取り組む追加の研究開発の必要性を概説、(2)ロードマップ・ビジョンの達成に必要な原子力開発を加速する際の障害と行動を特定——を含めた4点を明記した。2015年版の原子力ロードマップでIEAらが示した主な分析結果は以下の通り。

原子力はOECD諸国の中では最大、世界でも第2位という規模の低炭素電源である。エネルギー供給保証を改善しつつ燃料の多様化を支援、多量の電力を安定した発電コストで提供するとともに、発電部門の温室効果ガ

ス削減で重要な役割を果たすことが可能だ。

「2℃シナリオ」の目標達成に際しては、世界の原子力設備を現在の3億9,600万kWから2050年までに2倍以上の9億3,000万kWに拡大する必要があり、その時点で原子力発電シェアは17%になる見込みだ。原子力の将来見通しを短期的に見ると、多くの国が福島第一原発事故の影響を受けており、安全性に対する懸念から国民の信頼が低下し、いくつかの国ではエネルギー政策が変更された。

しかし、中長期的には原子力の見通しは明るく、2014年初頭に建設中だった72基という基数は過去25年間で最高の数値。もちろん、安全性の確保は原子力部門の最優先事項であり、規制当局はすべての原発操業で最高レベルの安全性の保証に大きな役割を担う。また、安全文化の促進はサプライ・チェーンを含めた原子力部門の全構成員に不可欠であり、新規導入国ではとりわけ重要となる。

各国政府にも資本集約型プロジェクトの進展を可能にする安定かつ長期的な投資インフラの保証という役割があり、安全性の向上や先進的な燃料サイクル、廃棄物管理、革新的設計などに関する研究開発を支援し続けるべきだ。

原子力は成熟した低炭素技術であり、スケールメリットの恩恵を受けるための出力増強や安全レベルの向上という軌跡を辿ってきた。その帰結として第3世代炉設計はコスト面で割高になったが、小型モジュール炉(SMR)であれば大型炉が適さない隔離地や送電グリッドの容量が小さい市場への電力供給など、原子力市場を拡大することが可能。モジュール方式という特徴もまた、資金調達という課題解決の一助となるかもしれない。

## 【米国】

### 高稼働で2014年の平均利用率は91.9%

米原子力エネルギー協会(NEI)は1月22日、米国内100基の商業炉による昨年1年間の暫定的な運転実績を取りまとめ、平均設備利用率が過去最高レベルの91.9%に達するなど、同国の原子力発電所が電力供給の信頼性と安定性に寄与するとともに、国家経済に貢献していることを改めて実証したと発表した。

国内の31州で稼働する原子炉は昨年末に1基閉鎖されて99基になったが、NEIによると100基が昨年中に発電した電力量は7,984億kWhと過去6番目を記録した。

NEIのM・ファートル理事長は、「こうした実績は米

国原発の良好な稼働が国のエネルギー供給保障と経済、および国民の生活の質向上にいかにか重要であるかを明確に示した」と指摘。これらの原発が高い安全レベルで運転を続け、米国社会と経済が頼りとするに足る十分な電力を生み出している点を強調した。

NEIはまた、原発の価値は異常気象時に一層拡大すると指摘。8日に寒波が東部地域を冷え込ませた折、原発は設備容量をはるかに超えるレベルで当該地区の電力市場で電力需要の相当量を賄ったとした。実際、ワシントンDCおよび北東部5州の人口密集区域において、原発は総発電設備の19%しか占めていないにもかかわらず、同地区の電力市場で需要量の27%を供給したとしている。

NEIはさらに、米国原発がその良好な利用率により、国内全体の設備容量に占める割合は10%程度に過ぎなくても、過去20年間にわたって国内の年間総発電量の5分の1を発電してきたと強調している。

## 【英国】

### セラフィールド・サイト、NDAに全体的管理責任

英国のエネルギー気候変動省(DECC)は1月13日、カンブリア地方にある英国最大の原子力複合施設セラフィールド・サイトの管理方式を変更し、原子力デコミッションング機構(NDA)の管理下に戻すとの方針を発表した。

現在、サイト認可会社(SLC)として同サイトの管理運営・廃止措置業務にあたっているセラフィールド社をNDAの所有とする一方、セラフィールド社の親会社組織(PBO)となるために民間企業連合の「ニュークリア・マネージメント・パートナーズ(NMP)社」がNDAと2008年に結んだ契約が打ち切られることになる。

NMP社は仏アレバ社とAECOM社、AMECフォスター・ウィーラー社による合弁事業体で、総額90億ポンドといわれる17年間のPBO契約をNDAの競争入札で獲得した。過去6年間の同サイトにおける業務の進展状況は良好と評価されており、DECCはNDAが昨年4月から同契約の第2期間に入ることを了承していた。

しかし、同サイトは再処理工場や廃棄物貯蔵施設、廃止措置中の軍用原子力施設も多く立地することから、その複雑さと技術的な不確定要素は他のNDAサイトより一層大きな課題を露呈しているとNDAは指摘。PBOを通じて同サイト全体の管理責任を民間部門に移しておく方式は、あまり適切ではないとの結論に達していた。

このようにNDAとセラフィールド社との関係を簡素化すべきだとするNDA勧告に基づき、政府は同サイト

を安全かつ経費に見合った最良の方法で廃止措置と浄化を行うという目的を果たすため、民間部門から親会社としてではなく、サプライヤーをセラフィールド社の戦略的パートナーとして選定する。それはセラフィールド社によるサイトでの全活動の管理に必要な助言と支援を得るのが目的。作業の全レベルでサプライ・チェーンと連携、主要な作業プログラムは民間部門が競争意識を持って継続していくことになるという。

DECCのE・ディビー大臣は、ロンドン・オリンピックやクロスレール鉄道などの複雑なインフラ・プロジェクトで同様の方式が成功したことから、セラフィールドでも同様の結果を確信しているとコメント。NDAとセラフィールド社が関係各社と緊密に協力して、今後12~15か月の間に新たな体制への移行を完了するとの見通しを示した。

## ABWR が最初の手続きをクリア、 英ホライズン社の新設計画前進

日立製作所が出資する英国のホライズン・ニュークリア・パワー社は1月28日、日立GE社が供給予定の英国仕様のABWR設計が放射線利用規制上の正当性評価手続きを無事完了したと発表した。

同設計について進展中の包括的設計審査(GDA)と並んで、英国で新たな型式の原子炉を建設する際、必要となる手続きの一つ。同社は、ウィルファとオールドベリーでの新設計画を前進させる上で初めて得られた重要な認可だとして歓迎の意を表明している。

この手続きは欧州連合(EU)指令により、加盟国に実施が義務付けられている。新たな種類と形式の電離放射線利用が国内に導入される場合、それによる社会経済的な利益全般が放射線の潜在的健康影響などの不利益を上回るかを包括的に判定する。

ホライズン社によるとABWRの正当性評価手続きは、他の設計の場合と同様、政府要請を受けた英国原子力産業協会(NIA)が同社と日立GE社に代わって2013年12月にエネルギー気候変動省(DECC)に申請した。2巡の公開諮問期間を経て昨年12月にDECCのE・ディビー大臣が「正当性を肯定的に評価する」と明記した法定文書案を議会上に上程。議会の上下両院は全会一致でこれを承認したとしている。

### 【ベルギー】

## ドール1, 2号機の運転を10年延長

ベルギーで稼働中の原子炉7基を操業するエレクトラベル社は2014年12月18日、営業運転開始後40年目の

今年中に閉鎖が決まっていたドール1, 2号機について、政府が運転期間を2025年まで10年延長する方針を表明したと発表した。

ベルギーでは03年に緑の党を含む連立政権が原子炉の運転期間を40年に制限するなど、2025年までに脱原子力を達成する政策を決定。その後の政権は09年、拠出金の支払いという条件付きでドール1, 2号機とチアンジュ1号機の運転期間の10年延長を認めたが、福島第一原発事故を受け、前政権は「延長を認めるのはチアンジュ1号機のみ」との裁定を下していた。

昨年10月に発足した現政権は、電力安定供給の観点から安全要件の遵守を条件にドール1, 2号機についても運転期間の延長を検討した。現地の報道によると、エレクトラベル社は「技術的には可能だが7億ユーロの大規模投資が必要だ」と述べた模様。また、法的な枠組調整の必要性を指摘したと伝えられている。

なお、同社は12月19日、蒸気タービンからの潤滑油喪失で昨年8月から停止していたドール4号機(PWR, 106万kW)について、規制当局が課した追加対策を施した上で運転を再開した。3月までの厳寒期の電源確保に備えた措置。

### 【スイス】

## 深地層処分場候補地を2エリアに絞る

スイスで放射性廃棄物の処分事業を担当する放射性廃棄物管理共同組合(NAGRA)は1月30日、使用済み燃料など高レベル放射性廃棄物(HLW)と低中レベル廃棄物(L/ILW)両方の深地層処分場建設要件を最も満たした候補地として、チューリッヒ北東部とジュラ東部の2エリアに絞り込み、これらに対して立地選定プログラム・第3段階で予定されている詳細調査の実施を提案した。

スイスではHLWとL/ILWすべてを深地層処分する方針で、発電事業者と連邦政府は改正原子力法に従い、NAGRAを設立した。NAGRAは2008年に3段階で構成される立地選定プログラムを策定し、11年11月までの第1段階で6つの候補エリアを連邦政府に提案。現在の第2段階では候補地を高レベル用と低中レベル用で各2か所に絞り込むため、スイス連邦原子力安全検査局(ENSI)の定めた安全要件に沿って、各エリアの安全性を純粋に科学技術的な基準で詳細に比較していた。

NAGRAによると、今回提案した2エリアは廃棄物の安全な閉じ込めに適した不浸透性の岩盤が適切な深さに存在。浸食から防護されているため、長期的な安定性が見込めるとともに、十分な大きさもあるとした。

提案書は昨年12月末にすでに連邦政府エネルギー庁(SFOE)に提出済みで、現在、ENSIが審査を行っているところ。連邦政府はこの提案をベースに、17年にも第2段階における最終判断を下す予定だ。6エリアのうち残りの4エリアは、安全上明確な欠点が認められなかったことから、予備地点として温存されることになる。

## 【カザフスタン】

### 軽水炉導入で原子力法改正

軽水炉の導入計画を進めているカザフスタン政府は1月15日、15年前に制定された既存の原子力法を改正し、原子力発電分野における政府や所管官庁、企業間の相互関係を明確に規定するなどの方針を明らかにした。

改正法案の内容はエネルギー省副大臣が議会下院で説明しており、原子力の平和利用における適切な安全レベルや一般大衆と環境の効果的な保護と保全を保証するのが目的。現行の原子力法が制定されて以降、原子力利用関連の技術・安全要件、その他の重要要件が更新されてきたのに加えて、新たに参加した関連国際条約と国内規制との不整合を是正する必要性が生じたとしている。

具体的にはまず、放射線障害のカテゴリーを設定。これにより、原子力施設のタイプ毎に危険の度合いに応じた要件を制定するとともに、その要件区分の範囲を正確に特定する。また、人材の認証制度を導入して、原子力施設における事故の発生を防止し、安全性の改善を図る考えだ。

カザフでは旧ソ連邦時代に建てられた電熱併給・海水脱塩用の商業高速増殖炉「BN-350」(出力15万kW)が1999年まで稼働していた。今後は生産量で世界第1位という豊富なウラン資源を背景に、出力30万~120万kWのロシア型PWR(VVER)を建設するロシアとの協力覚書を昨年5月に調印。10月には建設と運転に関する政府間協力協定案に仮調印した。

## 【ロシア】

### ロスアトム社、ハンヒキビ計画契約企業を公表

ロシアのロスアトム社傘下の国際展開促進・マーケティング会社であるルスアトム・オーバーシーズ社は1月21日、フィンランドのフェノボイマ社から受注したハンヒキビ原子力発電所建設計画について、昨年末に締結した主な供給契約の概要を発表した。

入札の末にTITAN2(T2)社が請け負った作業は多岐にわたる。すなわち、(1)サイト準備、(2)建設と据え付け、(3)長納期品目を除く原子炉系統と発電機関係用の

すべての資機材・機器の設計・調達、すべての補助施設の設置、(4)建屋と道路の建設、(5)公共インフラとエンジニアリング・ネットワークの整備、(6)計装制御(I&C)系機器の設計納入、(7)サイトの景観改善——だ。

一方、ロスアトム社の機器製造部門であるアトムエネルギーゴマシ社は、原子力蒸気供給系機器など主要な長納期品目を供給する。同社の複数の子会社も機器製造や詳細な設計書作成、機器の設置・起動の監視サービス等に責任を担う。

また、ロシア型PWR(VVER)の中心的な設計開発企業であるギドロプレス社は原子炉系統機器の基本設計および関連サービスを担当。ただし、フィンランド放射線・原子力安全庁(STUK)から認可を得るために作成する最初の設計書一式については、昨年10月にアトムブロエクト社に作成契約を発注している。

ルスアトム社によると、同プロジェクトでは地元フィンランドのみならず国際的な原子力関係企業からの参加も歓迎している。T2社は、ハンヒキビに採用される120万kW級VVERシリーズ「AES-2006」の参照設計炉であるレニングラード原発Ⅱ期工事建設に携わるなど、ハンヒキビで要求される高度に技術的な作業も実施が可能。そこでルスアトム社はまず同社に対し、出来るだけ早急に地元の潜在的な候補企業と直接交渉を始めるよう要請。これらの企業について収集した情報をT2社と共有していく。

T2社は現在、これら企業の選定手続きの準備を進めており、フィンランドとロシアの法制に準じた入札要項を作成している。完成文書は3月初旬にT2社のウェブサイトに掲載予定で、同月末には建設サイトのピュハヨキにT2社事務所を開設。関心のあるフィンランド企業向けに第1回目の説明セミナーを開催することになる。

## 【インド】

### クダンクラム1号機が営業運転開始

インド原子力発電公社(NPCIL)は2014年12月31日、同国で21基目の商業炉となるクダンクラム原子力発電所1号機(ロシア型PWR)が同日付で営業運転を開始したと発表した。

これまで最大でも50万kW級の国産加圧重水炉が中心だった同国で、同炉は初のPWRであるとともに、初の100万kW級原子炉。福島第一原発事故に伴う地元の反対運動激化により、2013年10月に約2年遅れで送電網に接続されていた。

同国最南端に位置する立地点のタミル・ナドゥ州を始め、南部の5州に電力を供給している。

## 米印首脳、民生用原子力協力実施で合意

インドの N・モディ首相と米国の B・オバマ大統領は 1月25日、インドのニューデリーで会談した後に共同記者会見を行い、2008年に米印原子力協定を締結して以降、具体的な進展がなかった両国間の民生用原子力協力を本格的な実行に移す見通しが立ったと明言した。10年にインドで成立した原子力損害賠償法はサプライヤーにも一定の賠償責任を盛り込んでおり、米国企業が原子炉を輸出する上でネックとなっていた。今回、そうした責任を限定する仕組みで両国は合意に達した模様。モディ首相は、米国製商業炉が早急にインドのエネルギー供給保証に貢献することへの期待を表明した。

モディ首相は会見のなかで、「民生用原子力協力合意はお互いへの新たな信頼がはっきり示された両国関係における最重要項目であり、新しい経済機会を生み出すとともに、クリーン・エネルギー開発のオプションを拡大する」と強調した。原子力協力を実行に移すために両国が昨年9月に設置した交渉グループは、その後の4か月間に3回の会合を実施。両国がこの問題を前進させるという目的意識を持って作業に当たった結果、二国間協定締結後6年が経過してようやく、インドの法制と国際的な法的義務、および戦術的・商業的な実行可能性に即した商業協力に向かって動き出したことを喜ばしく思うと述べた。

両首脳ともに解決策の詳細に関する言及は避けたが、現地の報道によると、現行の原賠法を覆すことに慎重なインド政府は原子力サプライヤーの全面的な免責という米国側の提案を一蹴する一方、事故時に事業者とサプライヤーを保護するため、数十億ルピーの政府系保険プールの設置に同意した模様。米国側も、インドに販売した核燃料が核兵器に転用されるのを防ぐ監視要請を取り下げたと伝えられている。

インドでは09年に内閣が西海岸グジャラート州のミティビルディをウェスチングハウス(WH)社製の100万kW級PWR6基用、東海岸のアンドラ・プラデシュ州コバダをGE日立社製の100万kW級BWR6基用に暫定指定。今回の両国首脳声明を受けて、WH社は同サイトでのAP1000の建設支援で13年にインド原子力発電公社と初期作業協定に調印した事実と言及。インドの原子力市場は世界でも最大規模であり、同社としては世界で最も安全かつ高効率なAP1000を提供していきたいとの抱負を述べた。

## 【中国】 高速実験炉、フル出力で72時間 発電に成功

中国で高速炉開発を進めている原子能科学研究院(CIAE)は2014年12月19日、北京南部の同研究院内に建設した高速実験炉(CEFR)がフル出力で72時間、安定的に発電することに初めて成功したと発表した。

同炉は熱出力6.5万kW、電気出力2万kWのナトリウム冷却・プール型高速実験炉で、国務院が1992年に国家ハイテク研究促進重要事業「863計画」の一事業として開発することを決定。94年からロシアと共同で設計が始まり、2000年に着工した後、10年7月に初臨界を達成していた。

## 主席が原子力産業60周年で声明、 「海外市場での存在感を」

中国の習近平国家主席は1月15日、同国が民生用原子力産業の開発に乗り出してから60周年を迎えた記念の式典で声明文を発表した。産業界全体のさらなる競争力改善を促すとともに、国内の原子力機器メーカーに対しては使用技術の絶対的な安全性を確保しつつ、世界の主要原子力企業となるべく海外市場でのプレゼンスを一層強化するよう指示している。

同国国務院は昨年11月、深刻な大気汚染問題を解決するという観点から、2020年までに大型PWRを中心に5,800万kWの原子力設備開発を目標に掲げた戦略行動計画を発表。昨年末現在で、同国の商業用原子力発電設備は22基、2千万kWの大台に乗った。国外ではパキスタンへの輸出実績に加えて、英国やルーマニア、トルコ、南アで新設計画への参加を目指すなど、海外展開も着実に進展。習主席は中国が原子力供給国として世界市場に本格的に参入していく決意を明確に示したと見られている。

声明の中で習主席は、中国の原子力産業を大きく成長させた数世代の核科学者による技術革新と労働者達の労をねぎらうとともに、原子力産業は先端の戦略的な産業であり、中国の国家存立の重要基盤だと明言。今後も原子力の平和利用と安全な開発、技術革新を続け、新たな時代を開くべきだと訴えた。

また、中国が独自の原子力産業を開発する方針を定めてから60年が経過したが、原子力の大規模な平和利用は同国の社会経済の発展に寄与するとともに国力全般を強化し、エネルギー供給保障を促進したと評価。また、国民の生活水準の向上に多大な貢献を果たしたと称賛している。

# 座談会

## LNT は成立しない!?

—低線量では細胞レベルで修復メカニズムが働く—



NPO あいんしゅたいん 坂東 昌子  
 大阪大学 真鍋勇一郎  
 東京工業大学 澤田 哲生

2011年3月11日の福島第一原子力発電所事故。引き続き事故の余波は、福島県浜通りなどから今なお避難を強いられている12万人の皆さんに止まらない。福島に住み続けることを選択した多くの人々をも心配させている。事故後4年を経ても「いつまで続くのかも分からない事故の影響」のことが多くの人々の心にひっかかっているという状況である。そんななか、それまで放射線被ばくの生体影響というテーマに取り組んだことのなかった物理学者が、“なにかしなければいけない”との思いで学の境界線を気に留めず、乗り込んで来た。学術の越境が知の統合を生み、ここに新たな叡智が生まれようとしている。80年以上続いて来た放射線防護の基本概念が覆される可能性を秘めた研究成果である。

Fukushima Daiich Nuclear Power Plant Accident happened on March 11 in 2011 (3.11), which is still forcing about 120 thousands residents to take refuge outside of their hometowns. Even those who accept staying in Fukushima still do fear the effect of the radioactivity even now, worrying about when such situation will come to the end. In the aftermath of 3.11, some physicists, who sincerely thought “we have to do something that is useful for such refugees and residents”, came into the field of the estimation of the effect of radiation exposure beyond the border of scientific field. It brings about knowledge integration and is inventing a new wisdom. They have come to conclude that there exists a possibility that the concept of radiation protection, which has been lasting more than 80 years, may be be disproved.

### 積算線量だけでは意味がない

澤田 東京電力福島第一原子力発電所の事故は今も福

島の人々のみならず、多くの人々を苦しめ続けています。放射線による影響については必要以上に怖がる必要はないという人もいますが、そのことがうまく伝わっていない。そのために、無用な恐怖が増している。あるい



は、専門家や政府に対する不信感が募っていく。これは放射能恐怖症(radioactive-phobia)とも言える。

なぜ、必要以上に怖がらなくていいのか?—その手ばかりが坂東さん、真鍋さんたちが執筆されたATOMOS 11月号の解説記事“LNT再考 放射線の生体影響を考える”にあります。ところが、この記事に対しては“よくわからない”という反応が多い。読者はどうやら、この記事で紹介された数理モデルでつまづいているようです。

坂東さんたちによる今回の画期的な発見の鍵となるのが「モグラたたき」モデルです。このモデルは放射線被ばくの影響に“しきい値”があるのかないのかという議論ではなく、天井があることを指摘したものです。特に福島で今、問題になっている超低線量率であれば、放射線被ばくの影響を気にする必要はないということになります。

まず、「モグラたたき」の説明からお願いします。

坂東 学会誌の記事では、水道の水の例を挙げました。下部に穴が空いている容器があるとします。水を上から注ぐと、水がある程度たまると管の下側では圧力が高くなって穴から水はたくさん出ていくようになる。一見すると、管の中の水はじーっと停まっているように見えるけど、実は上から入ってきて、下から出ていっている。こういう例はたくさんあります。入口だけを見るのではなく、インプットとアウトプットを両方見ないといけない。放射性物質もキロあたり何ベクレルの食物を取り込んでも、身体の中にずっとたまっているわけでない。放射性元素の半減期で減衰するし、体内から体外にも排出される。そのバランスで体内の放射線量が決まるのですが、そういう認識はされにくい。今は、低線量でも放射性物質を取り込むと体内の放射線量がどんどん蓄積され、それに伴って放射線による細胞の変異やがん細胞へ変化が起こると思っている人が多い。その考え方の裏付けとなっているのが、LNTだと思います。これによってトータルの線量でどれくらいの生体リスクが起こるかという見方が定着したのではないのでしょうか。

真鍋 LNTは放射性物質が体内にひたすらたまるだけで、体外へ出ていかないという誤った見方です。

澤田 本当はそうではないことが、放射線を怖がっている方々に伝わるといい。

坂東 そうです。一生涯たまっていくという考え方のもとに、放射線防護では預託線量という考え方を取り入れていました。これを支えているのがLNT仮説です。入る量と出る量の収支で考えるのは算数だったら当たり前で、ダイナミカルにとらえていないと、いつまでも増えていくということになる。それが今までの常識になっていた。これは生体の中で起こっていることをきちんと見ていない。

澤田 ということは、預託線量という概念が消えていく!これは放射線防護のパラダイムシフトではないですか。

## 預託線量の概念がなくなる?

真鍋 だから放射線防護の考え方が変わります。積算線量という考え方はそれだけでは意味がない。つまり、フィルムバッジも意味がない場合がある。

坂東 私は2014年春に米国の物理学会(APS)で、このことを発表してきました。発表後に米国の人がすぐに手を挙げて、「だったらフィルムバッジは意味がないですね」と発言されました。もちろん毎日点検すれば、1日にどれだけ被ばくしたかが分かるので、被ばく線量率が分かる。ただし、翌日は仕切り直して測るべきです。一方的に溜まるというのは出ていく方を考えていない。身体には防護作用があり、それを抑えるダイナミズムがある。これがモグラたたきモデルです。だから、放射線から受けるダメージはどんどん大きくなるわけではない。

真鍋 総線量で管理するのは、その方が簡単だからででしょうね。

澤田 これは驚くべき話しですね。

坂東 医療現場で、点滴バッグから液を少しずつ落とすと、最初は途中のチャンバーと呼ばれる太くなった部分に液がたまっています。ある一定の量に達すると、それ以上はチャンバーにはたまらないで、出ていく量と上から落ちてくる量とが釣り合います。低線量の放射線も同様で、被ばくした体内ではどこかのレベルまではたまっていくけれど、一定量になったらそれ以後は増えません。

## LNTはショウジョウバエだけに有効?

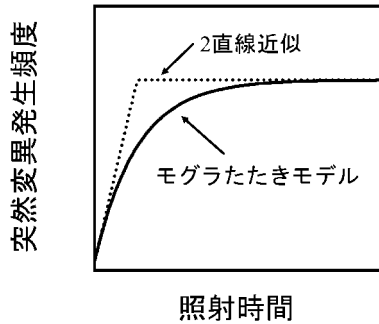
坂東 マラーがショウジョウバエの精子にX線を当てる実験で、照射した放射線量の合計と突然変異の発生が正比例するというイメージのモデルを発表しました。また、当時の論争の中心は、“しきい値があるかないか”という点にありました。放射線というエネルギーを細胞に当てて細胞が反応する程度は、注入したエネルギー量に比例すると考えるのは当然でした。けれどもそこでは、身体の修復のメカニズムが働くことを無視してしまった。

澤田 そのメカニズムが「モグラたたき」ですね。

坂東 そうです。放射線によるエネルギーによって細胞が損傷を受ける。生体はこれに対抗して、ダメージを元に戻す。修復する場合もあれば、細胞自身を殺す(アポトーシス)場合もある。

真鍋 そのようなものがどこかで釣り合って一定になる。治す・殺す……つまりモグラたたきをやって、どこかの一定量でおさまります。

坂東 だから、照射し始めた直後の間は、最初は線形にダメージが増えていきます。つまり、しきい値はない



第1図 モグラたたきモデル(実線)とその2成分近似(点線)  
横軸は照射時間、縦軸は突然変異発生頻度。

ように見えます。しかし、低線量率だとすぐに修復過程と釣り合い、天井にぶつかります。だから、いくら一定値で照射し続けても、それ以上は増えない。単純化していうと、2直線で近似ができる。

真鍋 第1図の点線のようなイメージです。最初は伸びるが、そのあとで一定値になる。つまり、天井がある。

坂東 より正確にいうと、複雑な過程を経て、第1図の実線のようになだらかになります。

真鍋 この図の横軸は一定の線量で受け始めてからの経過時間で、縦軸は突然変異率を表します。これはやがて飽和します。

澤田 つまり、放射線のエネルギーで突然変異(モグラ)がポコポコでてきても、たたく(修復する)能力とバランスして(飽和)、それ以上増えない。だから、低線量の場合は大丈夫だということですね。

坂東 低線量だとすぐに飽和します。実際、我々はバックグラウンドで常に刺激を受けていますので、ゼロでないところから出発しますが、線量率が低いと、このバックグラウンドのすぐ近辺で横ばいになる。毎時 $1\mu\text{Sv}$ でも1年たてば $8,760\mu\text{Sv}$ ( $\equiv 10\text{mSv}$ )、10年たてば累積量は $100\text{mSv}$ になります。しかし、生体への影響は、そうはならない。

澤田 なるほど。それは分かりやすい。放射線防護の世界では年間 $100\text{mSv}$ でも問題ないというのが常識ですが、線量率でみれば年間の積算量はもっと高くても良いともいえる。バックグラウンドは年間 $10,000\text{mSv}$ ( $=10\text{Sv}$ )程度でしたか？

坂東 そうです。

澤田 インドのケララ( $10\text{mSv}/\text{年}$ )やブラジルのガラパリ( $30\text{mSv}/\text{年}$ )でなら健康影響がないというのが、当たり前のように思えますね。

真鍋 マラーのショウジョウバエの実験でも、もっと線量率が低いところで実験すれば、LNTからずれているのが見えたはずです。なお、ごく低線量率で実験した論文があります<sup>1)</sup>。

坂東 この論文のデータでは、直線近似からずれているのが見えます。でも、ほとんど引用されていない。LNTという固定概念がずっとこの分野を支配していた

のかもしれませんが。

## マラーは放射線の影響に固執しすぎた

澤田 マラーに対する評価を。

坂東 マラーは、少しでも放射線を浴びれば危険だと主張し、それをノーベル賞講演でも強調しました。米国科学アカデミーが1956年に発行した「原爆放射線の生物学的影響委員会(BEAR)」のレポート1も、LNTの原則が基調になっています。けれども本当は、線量率依存性があるという話も紹介すべきだった。なお、マラーがノーベル賞を受賞した時にはすでに、LNTの反証となる実験結果がかなり出ていました。しかし、政治情勢が悪かった。放射線の影響をできるだけ少なく見積もるといふ政治的圧力が働いていたことも事実で、かえってそのためにマラーのような科学者が反発して、反対側の意見を持った傾向も否定できません。核兵器廃絶運動にも意欲的だった彼には、核兵器廃絶を達成するために、放射線の影響を強調しておいた方がいいという思惑があったのかもしれませんが。これは、今の反原発運動の一部にも、あてはまります。

## 放射線への認識は、時代とともに変化した

坂東 私は、放射線の基準値はガマン量であり、ALARAの原則が大切だと思ってきました。それが核兵器廃絶の道につながると感じていました。今度の福島第一原発事故が起こるまでは。

澤田 ガマン(我慢)量。うまい言い方ですね。しきい値が仮にあるなら、しきい値以下は我慢しなくてよい。

坂東 福島発電所事故が起こって、私は毎日のように生物分野の人たちと議論し、そこに大きな認識のギャップがあるのを知りました。それは、この20~30年の間に生体の防御機構というのが急速にわかってきたということです。物理分野の人の多くは私も含め、こんな知見の発展を全然知りません。

澤田 それは修復機能やアポトーシスの話で、武谷三男氏の『死の灰』や『原爆症』の言説が普及定着した後の発見ですね。

坂東 そうです。放射線の専門家である菅原努さんは放射線と人間との関わりを、いくつかの時代に分けました。第1の時代は有頂天の時代。チョコレートにラジウムを入れて売っていたり…。

真鍋 それを食べると元気が出るという話さえあったようですね。

坂東 X線の発見は、医療にとっては福音でした。身体の中が切らずに見えるのですから、大騒ぎになりました。

真鍋 それが少し行き過ぎて、マリー・キュリーでさえも助手たちに放射線障害の影響が出ていたものをなか

なか認めなかったこともあったようです。

坂東 ピエール・キュリーも、ベクレルが『放射性物質をポケットにいれていたなら、そこが赤くなって紅斑点が出来ていた』と話したら、腕にラジウムを貼りつけて自分でも確かめたいらしい。でも、その後がすごい。「それならガン細胞やっつけるのに使える」と言って、プロジェクトを提案し立ち上げた。

一方、ウランは蛍光物質なので、かつては時計の蛍光盤に使われていました。当時のラジオペインターたちは舌で舐めて描いていたので、それで舌ガンになる人もいた。そのようなことがらが起きた結果、放射線の悪影響がはじめて認識されるようになり、のちの防護の原則確立につながっていきます。BEARがまずLNTの原則を確認し、放射線防護のALARAの原則が定着した。これが第2の時代です。

そして、20世紀の終わりの20年は、生物の修復機能が分かってきた第3の時代です。さらに第4の時代は、放射線のもつ功罪をうまく使い分けるものになります。

澤田 3・11後の混乱に直面しているわれわれの責任がそこにある。

坂東 菅原努さんのもとで育った放射線生物分野に携わった先駆的研究者たちにとっては、生物学がこういう時代に入っていることは、常識になっていたのです。それにも関わらず、一般にはこのことが知られていない。それに科学者も他分野のことは勉強不足で、放射線を悪者と決めつけている人がたくさんいる、特に物理学者に多いと指摘されています。

### 「同じ総線量なら、線量率が低ければ低いほど影響が少ない」

坂東 ラッセルのデータがあまり知られていないのは、マラーがノーベル賞を受賞したせいかもしれません。マラーが実験で示したように、ショウジョウバエの精子に、かなりの強い線量率で当てると、たしかにLNTが成立します。しかし、繰り返しになりますが、低い線量率の場合だと、修復力の弱いショウジョウバエでさえ、やはりLNTにはならないはずなんです。さらにそのあとにラッセルの実験結果が出てきて、LNTはハエでは成立しても、マウスやヒトに当てはめるのは無理ではないかとわかった。

真鍋 その後、より人間に近いマウスでやることになった。

坂東 マウスでやるにあたって、ラッセルはマラーに相談しています。

澤田 マラーにですか？

坂東 そうです。ラッセルはこの難しい実験を始め、30年かかって80年代に結果をまとめました。すごく息の長い実験で、こんな実験はもう二度とできないでしょう。でも、その結果が出たときに、研究者たちはそれま

でマラーの実験結果しか知らなかったから、仰天したらしいんです。放射線量率の効果があるのか！ということですね。

澤田 ラッセルのメガマウス実験の意義を再度、整理させてください。50年代から始まったラッセルのメガマウス実験の意義は何でしょう。また、メガマウス実験の成果は現在の放射線防護に活かされていない？

真鍋 この実験結果が示すところは、同じ総線量であれば、線量率が低ければ低いほど影響が少ない。多ければ多いほど、大きいということです。

坂東 要するに“線量率の効果がある”っていうことを、はっきりさせたのです。

真鍋 それまでは総線量が同じであれば、線量率が異なっても影響が同じ、つまり被ばくした“総線量”でみておけばよいということでした。しかし、この線量率の重要性は、今の放射線防護の世界には全然いかされていない。どうやら線量率効果をいれるのには、ICRPのなかにも抵抗があるそうです。

坂東 全然考慮しなかったというのは言い過ぎでしょうね。一応、線量・線量率効果係数(DDREF)という不完全な形で、高線量率と低線量率で2倍の違いがあるというようにはなっています。

澤田 DDREFは総被ばく線量が同じなら、時間をかけて浴びた場合の方が瞬時で浴びた場合に比べて、影響が半分であるというものです。

坂東 ただ、そのメカニズムが科学的に解明されていない。生物学者は、ハエは精子だから修復力がないけど、マウスは精原細胞に照射したからそのせいで修復機能が働いたという言い方はしています。けれども、それはとても定性的で、定量的な議論は行われていない。

### LNTの洗脳が解けはじめる

坂東 ラッセルの実験結果を何とか反映しようと思ったのは、日本では菅原努さんです。けれども、それを数量的に明らかにするまでには至っていない。

澤田 次のステップに進んだ人はいないのですか？

真鍋 近藤宗平、Maurice Tubiana, Ludwig E. Feinendegenの各氏が、定性的にLNTがダメということを明言しています。

澤田 あくまで定性的にね。定量的な分析をしたのは坂東さんたちが初めてですね。

真鍋 Feinendegenらは、LNTは完全に間違っていると2009年の論文で書いています。けれども定量的に分析してはいない。ましてや防護の世界でこれを取り入れようというのは全くなされていない。

坂東 防護の世界ではなぜ、こういう固定概念が支配してきたのか、私たちには謎です。

澤田 放射線防護の世界に、“ムラ”の側面があるから

ではないですか？自己保身と先輩先生方のやってきたことは踏襲するしかなかった。

坂東 生物の人はほとんど、LNTはおかしいとずっと思っていたようですけどね。

真鍋 原子核の実験をしている人も、経験からなんとなく線量率効果に気づいていると思います。

坂東 湯川秀樹先生、朝永振一郎先生、武谷三男先生ら先進的な先生方も、ずっとLNTの原則が正しく、その方向で放射線防護を考えていたことは事実です。私もそうでした。3・11事故までは。

澤田 私自身、ラッセルの実験なんか一度も聞いたことがなかった。

坂東 なんでそんな乖離が起こったのか。生物ではきちんと科学的な知見が得られているのに、放射線防護では全然知られていない。

澤田 総線量が軸にある限り、線量率依存性というパラダイムシフトは起こらない。その不運が今の福島の放射線汚染地域に影を落としたままだとすると、なんとかしないとイケない。

真鍋 メガマウスが始まったのは50年代からで、論文になってデータが出揃うのは80年代に入ってからです。

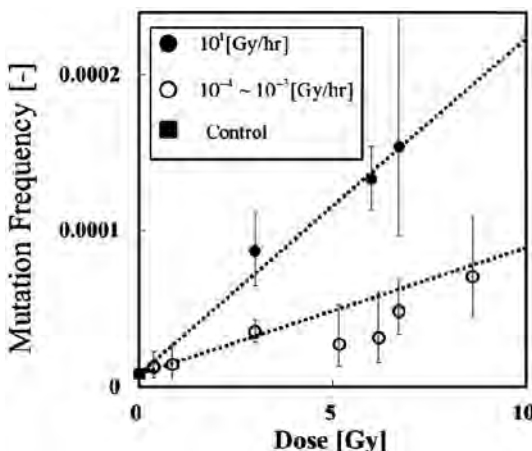
坂東 2004年のBAIR VIIレポートも、広島疫学データもLNTになっている。

澤田 メガマウスの結果が出ているのに、ヒトの広島疫学データではLNTが出ていると言っている訳ですね。

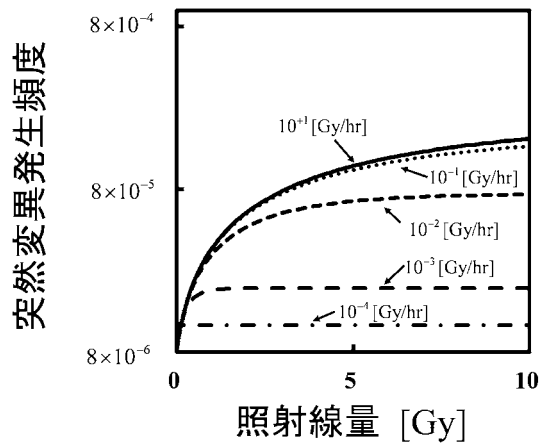
坂東 ヒトの被ばくデータの場合、線量率はきちんと調べられていない。しかも、広島や長崎は一瞬ですから線量率は最高に高いのです。

真鍋 線量率による違いを推定している人たちはいます。ただ、それを数量的に表すまでには至っていない。ラッセルでさえ、高線量率と低線量率との平均のところまで2本線を引いて、勾配はこのように違うという、もっと本質的なところまでは発想できていない。

澤田 ではラッセル自身も、自分の行ったメガマウス



第2図 ラッセルのメガマウス実験の結果



第3図 WAM(モグラたたき)理論による線量率による突然変異発生頻度の違い

の実験結果を正しくは理解しきれていなかったということでしょうか？

坂東 この2つのグループに分けて、2本線を引いて、勾配が違うと指摘しただけなんです(第2図)。その2本の間にもいろいろあるとは思ってはおらず、低いところと高いところに線を2本引いているだけなんです。線量率が変わるというのは、どんどん直線が連続的に変わるんです。でも、線量率がどんどん大きくなって、どんどん大きくなるかというそうでもない。

澤田 そこが重要なのですね。

坂東 私たちのモデルでそうになっている。それも、天井があるのです。線量率を変えて計算すると、勾配をこうとっていくと、はじめこの辺からこうなって……。つまり修復量が追い付くあたりから、直線からずれてくるのです。

真鍋 第3図では横軸が総線量にとって、縦軸がmutation frequency(突然変異の頻度)です。線量率ごとにグラフを書いたら、線量率が低いところで(黒線)ではほとんどバックグラウンドと変わらない。ただ、高線量率になるにつれて、低い線量のところの勾配が急になって、高い線量でSaturate(飽和=横ばい)していく。きつくなっていく。結果的に $10^{-1}$ Gy/hより線量率を上げても高線量で到達する量は変わらなくなる。

坂東 線量率変えても天井があるんですよ。式を見たらわかります。ラッセルが大ざっぱに2本線だと思ったのも、無理がない面もある。ラッセルも、LNTの固定概念には毒されていたのかもしれない。

真鍋 総線量でみていると、我々の理論で出せるようなこういう曲がったグラフは全然でてこない。

澤田 皆さんのモデルでは非線形な項があるということですね。

坂東 総線量だけに依存して直線で突然変異の頻度が増えていくとすると、大変ですよ。それだと変異細胞で満杯になることさえあるわけで、そうはならないと実はみんな思っています。(笑)

真鍋 第2図も、よく見ると低線量率のところでも正確にいうと $10^{-4}\text{Gy/h}$ と $10^{-3}\text{Gy/h}$ で線量率が違って、実は違う傾きで取らないといけないはずなんです。そこを彼は一本でまとめてしまった。だからほんとは良く見れば分かったはずですよ。

坂東 とにかく、直線を引いて出た結果の式を、彼らは「モデル」と呼んでいます。それに補正を入れたのがLQモデル(直線と2次式の補正を入れた式 Linear Quadratic model)。けれども我々なら、これをモデルとはいわない。近似式というだけで、モデルとは違う。

真鍋 それは統計的な相関だと思います。物理モデルとの区別がついていない。

坂東 そこには学問の断絶があります。もっと交流していたら、違った展開があったのではないのでしょうか。メガマウスという、あれほどの膨大な実験をしていながら、それが整理できていないというのは残念なことです。

澤田 でも坂東さんや真鍋さんたちが再発見して整理した。3・11の功名といえなくもない。

坂東 というより、他分野のことを知らなかった科学者たちが、この深刻な事態を前にして、真剣に議論しあい、何と現状を理解しようとした結果、ここまで見えてきたといえるでしょうね。でも、かといっても、我々のモデルの意味を充分にわかってもらって、科学者の間で、「なるほど」と理解してもらって、初めて科学者の合意となるのです。3つや4つの論文を書いたからといっても、それはまだ、「そういう考え方もあるのか」という程度です。そのためにプロジェクトを立ち上げ、徹底的に議論すること、それも国際的な討論の場をもって、納得してもらう努力が必要です。物理の人は割合簡単に理解してくれるのだけど、数式が苦手な生物関係の人たちにわかってもらうための工夫も必要です。生物学の人たちは、生物は多様だから個別にデータが出ればそれで満足だとするところがありますが、横断的な理解の中でヒトの放射線のリスクも考えることが大変有効なのだと思います。だって、生物は同じ機能を持つ「細胞」からできているのですから、そこには共通してメカニズムがあるはずですよ。

真鍋 実験結果を集めて統一的な法則を作ろうという発想が生物屋さんには少ない。少なくとも定量的にしようという発想がない。一方で茨城には、ガンマフィールドの農場があります。そこでは中心に線源が置いてあり、その距離を変えながら植物に照射する実験をしています。ということは距離によって線量率を推定できることになります。通常の実験装置だと、線量率を変えるのはなかなか大変ですが、ガンマフィールドならできる。そこでの実験データを使ってWAM理論で説明できることを証明し、それを踏まえて我々から本格的な実験を提案しないといけないかなと思っています。

坂東 ラッセルの時代はまだDNAの構造がわかって

いなかった。最近の研究では、DNAの二重鎖切断が起こると、修復酵素が集まって来て、傷の修復にかかる。その修復にあたった酵素を光らせて、実験ではそれを見えています。これからは、そんな知見をもとにした分子生物学の知識と動物実験をつなぐモデルをつくるのが大事で、そういう意味では私たちのモデルが有効ではないかと思っています。

真鍋 放射線防護についてもリスクを時間や線量の連続関数で出せば、将来のリスクはこうなるということもわかるはずですよ。そうなれば、福島第一原子力の現場で働く人にも貢献できるかもしれない。

坂東 放射線治療の方でも、このモデルを活用すれば、その効果は大きいと思います。線量率を変えて、どのくらいの時間間隔で当てたら、細胞にどういう変化が起きるかなど……。

真鍋 それはすでに、医学物理士たちと議論を始めています。

坂東 昨年春にアメリカ物理学会に行き、幅や層の厚さを感じました。私の発表に対して的確な質問が出たし、関心をいただきました。

真鍋 原子力学会でもこれについて話そうかと思っていたのですが、セッション案内をみても、これにあてはまるものがない。結局、放射線影響学会しかないと思いました。

坂東 保健や看護の分野には、情緒的なところがあります。またお医者の世界だと、患者さんにはできるだけ安心してほしいと思っているので、「大丈夫ですから」と言うことがある。だから福島に行って「こんなぐらいは大したことはない。だから、がんばって生きて下さい」というようなことを言われたのかもしれない。けれども、そうすると、とんでもない誤解をされる。

真鍋 少なくとも我々のモデルで考えると現在人が住んでいる地域の線量や線量率は確かに大したことないのですけれども。

坂東 それをきちんと数値的に言わないといけないわけですよ、「大したことはない」というのも、「もし仮に、 $0.1\mu\text{Sv/h}$ の中で被ばくしたら、1年間で $0.88\text{mSv}$ になりますから、それでどの程度の突然変異率が増えるかということかですね。

澤田 「年間 $1\mu\text{Sv}$ 死守」とか「どんなに低線量でも危険だ」という主張がどれだけのリスクを意味しているかということが違ってくるのですね。

坂東 今まで話したように、私たちの計算は、生物が持っている修復機能や放射線による細胞死を取り入れているので、変異する細胞の数は、増えるほうと減るほうの釣り合ったところとどまるのです。そうすると、ごく少量の線量、福島の実状ではほとんどのところがそうなのですが、常日頃、体の中で起こっている細胞の変異に対しておよそ1,000分の1程度の余分の放射線に被ばく

しても、せいぜいほとんど1万分の1ぐらい余分に普遍に細胞が増えますが、すぐに天井にいきついて、それ以上増えないのです。その増え方は $10\mu\text{Sv/h}$ つまり年間ほぼ $90\text{mSv}$ ぐらいの場合で0.9%ぐらい変異細胞が増えるという計算になります。でも、そのときでも、それ以上増えるわけではありません。10年たっても同じく0.9%程度ということです。

澤田 しきい値はないのですか？

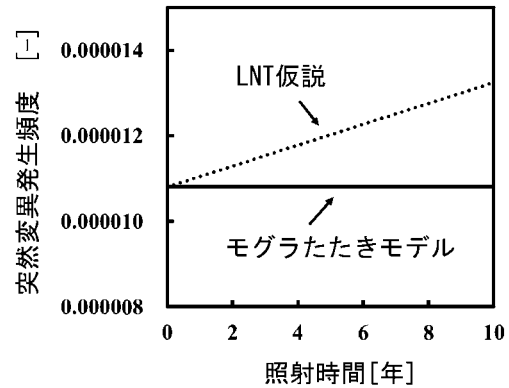
坂東 しきい値のあるなしで議論していると肝心のことが見えません。Leaは最初にヒット理論を出したのですが、それは細胞の中のDNAの情報をかく乱するという意味では放射線が当たっただけ変異が起こります。むしろそれを修復したりアポトーシスで細胞死を起こしたりするので、それとの競争で、どこかでいくら線量をあてても変異細胞の増える方と減る方で釣り合うのです。線量率が少ないと時間的に間に合うのでそれだけ釣り合うのが早くなるのです。だって、考えてみてください。いつも自然から受けている刺激が、ほんのちょっと、例えば1,000分の1増えたとして、それってどんどん変異細胞が増えるわけではないです。だって、そもそも、人工照射をゼロしても変異は起こっているわけで、それってどんどん増えていけば、もうすでに放射線に当たる前に増えているはずですよ。

澤田 さて、最後に本論での「天井がある」から「しきい値がある」といえるのかどうか。そして、いまの福島第一の期間困難地域でいわれている、特に年間 $50\text{mSv}$ 地域をどう解釈すればいいのでしょうか。

坂東 ヒトのリスクを計算するのに幾段階か必要です。哺乳類であるネズミのデータが一番近いと考えられますが、きちんと比べる必要があります。それに、がんや死亡率のような場合は変異細胞、あるいはそれががん化して一定の疾病が発生するにはしきい値があるはずですよ。そこをしっかりとらえておくことが必要です。

ただ、どの場合も、変異細胞は細胞死・アポトーシスで消えていく方もあるので、作られるのと釣り合ったところからはそれ以上増えません。ネズミの例を取ると、線量率にもよりますが、ほぼ数週間で天井に行きつきます。それで、福島の今ぐらいの線量率だと、遅くとも1年ぐらいたてば、もう天井に行きついています。ですから、来年になると、総線量が2倍になるなどと思う必要がないわけです。もうすでに同じ線量率でいくら浴びてもそれ以上増えないのです。ここがLNTと決定的に違うところですよ。10年たてばLNTだと10倍のリスクを担いますね。一方で我々のモデルで計算するともうこれ以上増えないのです。もっとも線量率自身も下がってきますので、ですから線量率が下がると天井の値が少し小さくなりますので下がります。当たり前ですね。線量率を大変小さくすると、元に戻るってことですからね。

真鍋 これをグラフで表すと、LNTの予想と比べて



第4図  $10^{-6}\text{Gy/hr}$ で10年間照射し続けた場合の突然変異発生頻度の推移のモグラたたきモデルとLNT仮説との比較

みると、「モグラたたき」ではずいぶん違ってきます。第4図は $10^{-6}\text{Gy/h}$ で照射し続けた場合のマウスの突然変異発生頻度をLNT仮説とWAMモデルで推定したものです。

正直10年たっても、普段、人工放射線以外から受けているリスクの誤差の範囲に入ってしまう見えないのです。しかし、LNTだと蓄積される一方ですので、10年後にはものすごい差になります。

澤田 これはネズミの場合ですね。人間の場合、どれだけ違うかわからないのではないですか？

坂東 おもしろいことに、もともと持っているリスクと比べて「どれくらいリスクが増えるか」という比で表していますが、これは、結構、ハエであろうとネズミであろうとほぼ同じようなリスク増加率となります。変わらないのです。ですので、割合を取ることによってネズミのデータから決めたパラメーターでほぼ推定できるのではと思われます。まあ、これもだんだん確かめられると思いますが。これが検証できるとぐっと応用範囲が広がります。

どんな種で考えても、同じふるまいをするということこそ、生物の「生き続けている」共通のメカニズムが働いていることの証拠なのです。比べるときに「比」でとると、そういう種による違いが分子と分母で割り算できて、結果的に相殺されて消えるので、同じような値になるのです。ただ、まだまだWAMはこれからいろいろところで検証していく必要があります。変異率は一般に動物より大きいので、検証しやすいです。まだ出発したばかりですので、これからウイルスや酵母など対象を広げていきたいです。

(編集協力：佐田 務)

#### — 参考文献 —

- 1) Purdom, C. E. and Mcsheehy, T. W. Radiation intensity and the induction of mutation in *Drosophila*, *Int. J. Rad. Biol.*, 3(6), 579-586 (1961).

## 解説

## 使用済燃料貯蔵技術の現状

## 長期貯蔵に対処する国際的動向

電力中央研究所 三枝 利有, 巨 真澄

原子力発電所の再稼働後、使用済燃料の貯蔵問題が顕在化する。使用済燃料貯蔵の現状と計画を国内外の動向を踏まえて解説する。まず、わが国における金属キャスク貯蔵の現状、計画、試験研究及びコンクリートキャスク貯蔵の必要性、動向、試験研究を紹介する。一方、海外では、近年、貯蔵期間が長期化した場合の安全性への関心が高まっている。このような検討は、わが国にとっても、より一層の安全裕度の確認につながるため、IAEA、米国、ドイツにおける使用済燃料貯蔵の経年劣化管理に向けた動向例を紹介する。

## I. わが国における使用済燃料貯蔵の現状

## 1. 使用済燃料とは

使用済燃料とは、原子炉で照射後、核分裂性物質が消費され、反応毒物が蓄積され、照射損傷されているため、そのままでは、もはや使用不可能な原子燃料を指す（IAEAの安全用語集 2007）。

使用済燃料の安全な輸送や貯蔵上、影響の大きい核種には、次のようなものがある。密封評価上は、気体の核分裂生成核種のトリチウム ( $^3\text{H}$ ) やクリプトン ( $^{85}\text{Kr}$ ) などである。遮蔽評価上は、ヨウ素 ( $^{131}\text{I}$ )、セシウム ( $^{137}\text{Cs}$ )、ストロンチウム ( $^{90}\text{Sr}$ ) などである。加えて、燃料集合体構成部品の放射化により生成されるコバルト ( $^{60}\text{Co}$ ) もある。臨界防止評価上は、核分裂性のウラン ( $^{235}\text{U}$ ) やプルトニウム ( $^{239}\text{Pu}$ ) である。

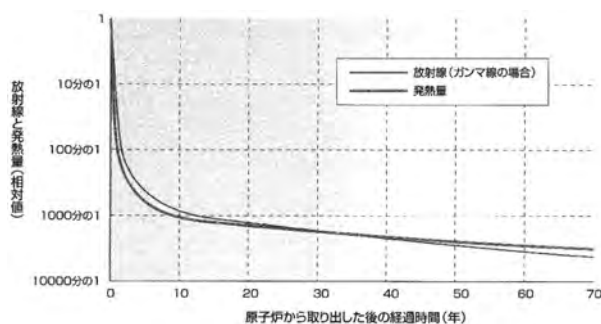
使用済燃料の放射線の大部分は核分裂生成物から発生しており、また放射能と発熱量は時間とともに減少していく（第1図参照）。

## 2. 貯蔵の必要性

わが国では現在、使用済燃料は国内で再処理までの間、各発電所及び日本原燃(株)再処理工場の燃料プールで貯蔵されている。各発電所の貯蔵状況をみると、再稼働後、約3年で貯蔵容量を超過する発電所が複数ある。このような状況で、エネルギー基本計画(平成26年4

*Current Status of Spent Fuel Storage Technology : International Trend for Long-Term Storage : Toshiari SAEGUSA, Masumi WATARU.*

(2014年11月27日 受理)



第1図 使用済燃料の放射線と発熱量の時間変化(例)  
(出典：経済産業省 資源エネルギー庁  
パンフレット 使用済燃料(平成18年))

月)では、使用済燃料の中間貯蔵施設や乾式貯蔵施設等の建設・活用を促進する、としている。

平成26年6月の経済産業省 総合資源エネルギー調査会原子力小委員会においては、中間貯蔵施設や乾式貯蔵施設等の建設・活用等、使用済燃料の貯蔵能力の拡大を促進するための施策の具体化に向けた検討を必要としている。

なお、日本学術会議が平成26年9月に報告した「高レベル放射性廃棄物の暫定保管に関する技術的検討」には、使用済燃料の長期保管も対象にしており、参考されたい。

## 3. 金属キャスク貯蔵

## (1) 設計概念と実用施設

金属キャスクは本来、放射性物質の輸送容器として開発されたもので、輸送中の事故を想定した衝撃や火災に耐える堅固な性能を有しており、それ自体で臨界防止・

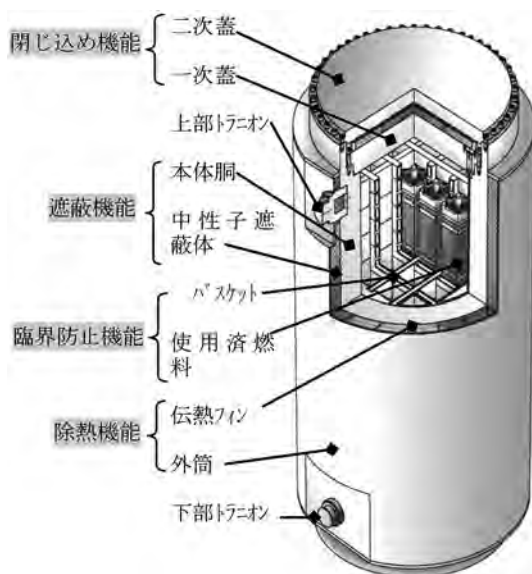
密封・除熱・遮蔽の4つの安全機能を有している(第2図参照)。金属キャスクを貯蔵に用いる場合、除熱及び酸化防止の2つの観点から、通常はキャスク内にヘリウムガスを充填し、さらに密封性に耐久性と監視機能を持たせるため、金属ガスケットを用いた二重蓋構造を採用している。

日本原子力学会では、使用済燃料の中間貯蔵施設の操業開始に向けて、「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準」を制定・改訂してきた。これまで、2002年6月標準制定、2004年1月標準改訂、2008年5月標準改訂、2010年7月標準改訂が行われた。一方、日本機械学会では、日本原子力学会で定めた金属キャスクの安全設計及び検査の考え方に基づいて、「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスクの構造規格」を定めた。これまで、2001年に初版制定、2007年に改訂が行われ、現在は2014-15年版改訂作業中である。

わが国には、2013年現在までに、2つの発電所敷地内に金属キャスク貯蔵施設が設置された。一つは、東京電力(株)福島第一原子力発電所内の貯蔵施設で、1995年から貯蔵専用金属キャスクによる乾式貯蔵が行われていた。この施設は、もともと海上輸送前のキャスク保管庫として設置された経緯から、キャスクは横置きである。

もう一つは、日本原子力発電(株)東海第二発電所内の貯蔵施設で、2001年から貯蔵専用金属キャスクによる乾式貯蔵が行われている。キャスクは縦置きである。この他、中部電力(株)浜岡原子力発電所にも、輸送・貯蔵兼用金属キャスクによる乾式貯蔵施設の設置計画がある。

一方、発電所敷地外の貯蔵施設として、東京電力(株)と日本原子力発電(株)が共同で設立したリサイクル燃料貯蔵(株)(RFS)が青森県むつ市に中間貯蔵施設を建設し



第2図 金属キャスク及び蓋部密封構造の概念図例  
キャスクの直径約2.5m、高さ約5m、全質量約120トン(使用済燃料約10トン含む)。  
(出典：電中研トビックス Vol. 14, 2012)

た。3,000トンの使用済燃料を輸送・貯蔵兼用キャスクで貯蔵可能である。最終的には5,000トンの使用済燃料を最長50年間貯蔵する計画である。

## (2) 金属キャスク貯蔵の試験研究

わが国における金属キャスクの確証試験として、次の各分野で必要な解析・試験研究や検討が行われた<sup>1)</sup>。

### ① 除熱性能

キャスク及び貯蔵建屋の除熱試験・解析

### ② 密封性能

キャスク蓋部の金属ガスケットの長期密封性能試験

### ③ 臨界防止

ホウ素添加のバスケット構造材の材料試験及びホウ素分布の均一性確認試験

### ④ 構造健全性

実物大鋳鉄キャスク試験体の落下試験・解析、キャスク落下中の瞬時漏えい試験・解析、建屋倒壊による実物大キャスク試験体上への重量物落下試験

### ⑤ 耐震性

固縛なし貯蔵中のキャスク及び搬送中の貯蔵架台付キャスクの地震時安定性試験

### ⑥ 使用済燃料の健全性

高燃焼度使用済燃料の核種組成試験、通常時健全性(クリープ、水素再分布、水素化物再配向)試験、異常時健全性(クリープ、空気酸化)試験、経年劣化非破壊検査手法の開発

### ⑦ シビアアクシデント評価

建屋倒壊によるキャスクの埋没試験、航空機エンジンのキャスクへの衝突試験

### ⑧ 輸送と貯蔵の相互作用

輸送時の振動が貯蔵時密封性能に及ぼす影響、貯蔵中の経年変化が輸送時密封性能に及ぼす影響、貯蔵後輸送の総合的安全評価手法

## (3) 乾式貯蔵の安全性確認の実績

東京電力では、福島第一原子力発電所内において、1995年から、施設内乾式貯蔵キャスクによりBWR燃料を貯蔵している。同様に、日本原子力発電では、東海第二発電所内において、2001年から施設内乾式貯蔵キャスクによりBWR燃料を貯蔵している。これらの使用済燃料のうち、前者については、貯蔵から5年及び10年を経過した2000年及び2005年に、また、後者については、貯蔵から7年を経過した2009年に、それぞれ一部のキャスクを開封して内部の使用済燃料の健全性調査を行った。この時に、キャスク内部のガスを確認した結果、クリプトンガスは検出されず、最大約10年間の貯蔵期間中、燃料被覆管の破損はなかった。また、燃料集合体の外観に貯蔵開始時と比して、有意な変化はなかった。

さらに、福島第一原子力発電所内で貯蔵されていた乾式貯蔵キャスクは、東日本大震災時に津波に襲われ水没



したが、大きな損傷はなかった。また、キャスク内部の使用済燃料の健全性も維持されていた。これらキャスクは現在、敷地内の仮保管設備に移動・保管されている。

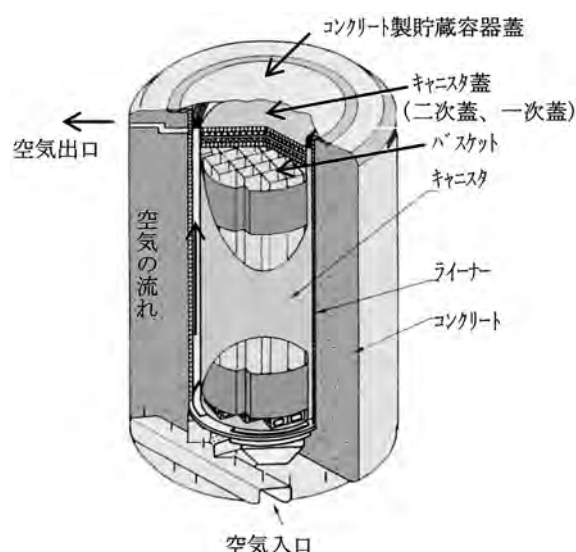
#### 4. コンクリートキャスク貯蔵

##### (1) 設計概念と実用施設

わが国では今後、使用済燃料貯蔵のニーズが増大していくと、金属キャスクの調達に間に合わなくなり、貯蔵のニーズに対応できなくなるおそれが生じる。コンクリートキャスク貯蔵は、経済性に優れ、製造に際しては、地元の地域振興に寄与するなどのメリットがある。さらに、米国でのコンクリートキャスクの実用化が金属キャスクを上回っている現状等も勘案すると、わが国でも金属キャスク貯蔵だけではなく、複数の貯蔵技術としてのコンクリートキャスク貯蔵を実用化しておく必要がある。

コンクリートキャスク貯蔵では、使用済燃料をキャニスタと呼ばれる薄肉円筒容器に入れ、そのキャニスタを貯蔵容器(コンクリート製)に垂直姿勢で入れて貯蔵する(第3図参照)。

この方式では、発電所の燃料プールで使用済燃料をキャニスタ内に挿入した後、蓋を溶接して密封性を確保するところが金属キャスクと比較して異なる。キャニスタ内雰囲気は金属キャスクと同様に、通常、ヘリウムガスである。キャニスタは一旦輸送キャスクに入れられて、貯蔵施設まで運ばれ、貯蔵容器内に入れ換えられる。貯蔵容器には通常、給気口と排気口があり、給気口から流入した空気がキャニスタ表面に沿って流れ、キャニスタ内の熱を除去して排気口から外に出ていく。コンクリートキャスクも、除熱は自然空冷である。遮蔽機能は



第3図 コンクリートキャスクの概念図例  
キャニスタは直径約1.7m、高さ約4.6m。貯蔵容器(コンクリート製)は直径約4m、高さ約6m。全重量は、約180トン(使用済燃料約10トン含む)。  
(出典：使用済核燃料貯蔵の基礎、電中研、2014年)

キャニスタ及びコンクリート(貯蔵容器内面の鋼鉄製の内張(ライナー)も含む)で確保する。

日本原子力学会では、世界的な動向を踏まえて、コンクリートキャスクが金属キャスクと並んで主流となる貯蔵方式と考え、「使用済燃料中間貯蔵施設用コンクリートキャスク及びキャニスタ詰替装置の安全設計及び検査基準：2007」を制定した。一方、日本機械学会では、「使用済燃料貯蔵施設規格 コンクリートキャスク、キャニスタ詰替装置およびキャニスタ輸送キャスク構造規格(JSME S FBI-2003)」を2003年12月に定めた。

##### (2) コンクリートキャスク貯蔵の試験研究

わが国におけるコンクリートキャスクの確証試験として、次の各分野で必要な解析・試験研究が行われた<sup>1)</sup>。

###### ① 除熱性能

コンクリートキャスクの通常時及び異常時の除熱試験・解析

###### ② 遮蔽性能

コンクリートキャスク給排気口からのストリーミング試験

###### ③ 構造健全性

キャニスタの溶接部破壊靱性、同超音波探傷試験、キャニスタの落下試験・解析、コンクリートの温度ひび割れ試験

###### ④ 耐震性

コンクリートキャスクの耐震試験

###### ⑤ 長期健全性

キャニスタの応力腐食割れ、実物キャニスタの経年劣化外観検査、キャニスタからのヘリウム漏洩試験、コンクリートの経年劣化

## II. 長期貯蔵に対処する国際的動向

使用済燃料貯蔵は海外でも実用化されているが、近年、貯蔵期間が長期化した場合の安全性に対する評価・実証への関心が高まっている。このような検討は、貯蔵期間を概ね50～60年としているわが国にとっても、より一層の安全裕度の確認につながるため、その動向には注意しておく必要がある。通常、貯蔵期間を長期化する場合、貯蔵期間延長の申請を繰り返し、その都度最新のデータで評価を行っていく(これを許認可更新と呼ぶ)。

### 1. 国際原子力機関(IAEA)の動向

IAEAの「使用済燃料貯蔵の安全指針(SSG-15(2012年))によると、50年貯蔵を短期貯蔵と呼び、100年貯蔵を長期貯蔵と呼ぶ。さらに100年を超える貯蔵(超長期貯蔵)について、技術文書策定や国際プロジェクトが動いている。

#### (1) 使用済燃料貯蔵の経年劣化管理手法

米国のユッカマウンテンプロジェクトが頓挫するなど、世界的に処分場の立地や再処理工場の操業が遅れて

いる。IAEA では使用済燃料の貯蔵期間が長期化する場  
合を想定した検討を「輸送・貯蔵兼用キャスクのセーフ  
ティケース指針」や「超長期貯蔵－不確実な貯蔵期間への  
挑戦－」の技術文書作成作業の中で行っている。

経年劣化管理の基本的な手法(Plan-Do-Check-Act のサ  
イクル)は、原子力発電所を対象として広く一般的に適  
用されており、同じ手法が使用済燃料貯蔵施設の貯蔵許  
認可の更新にも適用可能である。適切な経年劣化管理計  
画により、長期貯蔵施設の安全性を脅かす予想外の状況  
を排除できると共に、経年劣化管理活動の中に研究開発  
のニーズがある。さらに公衆や政策決定者が相対的なリ  
スクを理解するための情報をもたらす。以下に使用済燃  
料貯蔵施設の経年劣化管理計画の工程を示す。

#### Plan(計画)

使用済燃料貯蔵施設のシステム・構造・構成部品  
(SSC: System, Structure, and Components)の経年劣化  
を予防・発見・軽減する効果的な計画を、使用済燃料貯  
蔵施設の操業・維持・モニタリング・検査・保全計画に  
組み込む。例えば、キャスク内部やボルト穴の乾燥によ  
り、乾式長期貯蔵中の腐食を軽減する。

#### Do(実施)

SSC の機能は、Plan 段階で作成された計画・手法に  
従った慎重な操業や維持により確保される。効果的な操  
業と維持計画により、安全機能が失われることのないよ  
うに、安全関係の SSC を維持・補修し、必要に応じて交  
換する。

#### Check(点検)

効果的なモニタリングや検査計画により、貯蔵中の  
SSC の劣化を適時に発見・評価することができる。SSC  
の連続的な計測(モニタリング)、定期的な観察、測定、  
試験、検査を行う。モニタリングのパラメーターや検査  
間隔は、劣化が将来のハンドリングや輸送を阻害し、安  
全機能・条件を喪失するよりも十分前に発見されるよう  
決定すると共に、過去の傾向、検査結果、他産業での教  
訓を考慮して、貯蔵中に定期的に見直す。進化する規則  
や技術に対する使用済燃料貯蔵施設の設計を定期的に見  
直し、その旧式化を防ぎ、貯蔵期間を通じて、貯蔵認可  
の基礎に適合していることを確認する。

モニタリング計画には、次のように状態モニタリング  
と性能モニタリングがある。

状態モニタリング：SSC の経年劣化の存在と程度を調  
査するものである。キャスク貯蔵においては、外観が対  
象となる。例えば、キャスクの表面の劣化状態や蓋間圧  
力センサーなどケーブル類の劣化状態、貯蔵施設のコン  
クリート床の劣化状態などである。

性能モニタリング：SSC の機能を確認するものであ

る。例えば、

- a. 遮蔽性能：実際の線量測定値と計算結果との差異  
が認められれば、遮蔽性能の劣化の可能性がある。
- b. 閉じ込め性能：金属キャスクでは、蓋間圧力のモニ  
タリングにより金属ガasketの漏洩を検知でき  
る。コンクリートキャスクでは、キャニスタの底部  
－頭部の温度差モニタリングにより、キャニスタか  
らのヘリウムガスの漏洩を検知する手法が開発され  
ている<sup>2)</sup>。
- c. 使用済燃料の健全性：金属キャスク貯蔵におい  
ては、キャビティ内の使用済燃料カバーガスの採取に  
より、破損燃料の存在を検知する方法が用いられて  
いる<sup>3)</sup>。一方、コンクリートキャスクでは、キャ  
ニスタが溶接による密閉構造でガス採取が困難なこ  
とから、キャニスタ内に破損燃料から漏洩した<sup>85</sup>Kr  
からのガンマ線を非破壊的に検知する手法が開発  
されている<sup>4)</sup>。ここで、<sup>85</sup>Kr の半減期は 10.7 年であ  
ることから、貯蔵期間が長期化すると、検査時間が  
長くなることに留意しなければならない。
- d. 貯蔵施設のコンクリート構造物の経年劣化：コン  
クリートキャスクのコンクリート部分の強度変化  
や密度変化は、シュミットハンマー法や弾性波速度  
測定により、検知が可能である<sup>5)</sup>。

#### Act(補修)

検知された劣化部分の評価を行い、適切な補修を行  
うとともに、劣化軽減の措置を策定し、安全機能の喪失  
のないようにする。

PDCA サイクルは、関連操業経験からの情報、自主  
的な評価や研究開発の結果、関連産業界からの教訓など  
から、将来の経年劣化管理の課題を確実に特定・検討す  
るためのものである。乾式貯蔵システムに影響する経年  
劣化現象の理解は、これまでの適切な経年劣化解析によ  
って、許認可申請者や規制当局による問題の認識と必要  
な対策に役立ち、使用済燃料貯蔵許認可の更新に活用さ  
れてきた。適切な設計、操業、規制の枠組みの策定に役  
立つ知見自体は、使用済燃料貯蔵施設の経年劣化評価と  
共に成長・進化していくものである。

#### (2) 超長期貯蔵における燃料と貯蔵システムの性能 実証に関する IAEA の国際共同プロジェクト

ここでは、次の 6 つの領域における課題について、各  
国が研究計画・成果を持ち寄り情報交換している。

- ・キャニスタの応力腐食割れ
- ・使用済燃料の長期健全性
- ・コンクリートキャスク等構造物の経年劣化
- ・金属ガasket等、蓋部密封部品の長期健全性
- ・中性子遮蔽材の長期健全性
- ・貯蔵システムの長期健全性実証

## 2. 米国の動向

### (1) 長期貯蔵研究プログラム (Extended Storage Collaboration Program: ESCP)<sup>6)</sup>

米国では、ネバダ州ユッカマウンテンでの処分場建設計画がオバマ大統領により中止され、各電力会社は、原発敷地内にコンクリートキャスクや金属キャスクを使った乾式貯蔵施設を建設し、貯蔵容量の増大を図っている。コンクリートキャスク等を使った貯蔵は、米国内ですでに数多くの実績がある(第4, 5図参照)。

2013年には、1,865基のキャスク(およびボルト貯蔵方式(地下に垂直な収納管を設置し、その中に使用済燃料容器を入れて貯蔵する方式)等を含む)に、79,381体の



第4図 米国におけるコンクリートキャスク貯蔵例  
上：NAC社提供，下：Holtec社提供



第5図 米国における横型コンクリートサイロ貯蔵例  
(使用済燃料の入ったキャスクを横型のコンクリートサイロに装荷する作業(TN社提供))

燃料集合体が貯蔵されている。エネルギー省のレポートでは、2021年までに中間貯蔵施設のパイロットプラント、2025年までに大容量集中中間貯蔵施設の建設が計画されている。

米国電力研究所(EPRI)では、貯蔵期間の長期化を念頭に、ESCPを2009年に立ち上げた。このプログラムでは、米国外も含めた貯蔵に関する情報共有、課題の洗い出し、将来の開発研究の提案を行うことを目的としている。

EPRIのプログラムは、3つのフェーズで実施されている。第1フェーズでは、ギャップ解析と呼ぶ課題の洗い出しが行われた。課題の中で、重要な課題と位置づけられたものは、キャニスタの応力腐食割れ(SCC)、燃料被覆管(特に、高燃焼度燃料)の水素化物再配向および水素遅れ割れ、ボルトの経年劣化、温度・応力分布評価、容器内乾燥(乾燥時の残留水分)、劣化モニタリング、燃焼度クレジット、燃料再取り出し性(Retrievability)である。第2フェーズは、これらの課題に対する試験研究で、現在、この第2フェーズである。主な研究は、試験片を使ったSCC試験、実貯蔵施設でのキャニスタ検査(外観観察、温度測定、塩分測定)、高燃焼度燃料被覆管のリング圧縮試験、燃料集合体の輸送時振動試験である。第3フェーズでは、高燃焼度燃料の実証試験が計画されている。実証試験では、実機の金属キャスク1体を使い、その中に高燃焼度使用済燃料を入れ、燃料被覆管の健全性を定期的にガス採取することで確認するプログラムである。試験は2017年に開始し、2028年にキャスクの蓋を開け、中にある燃料の健全性を確認する予定である。

### (2) 貯蔵期間更新のための審査

米国では、1980年代から商用原子炉の使用済燃料のサイト内乾式貯蔵が開始された。当初、許認可での貯蔵期間は20年間であったため、すでに、許認可更新が必要になり、貯蔵期間の延長を行ったサイト(サリー、HBロビンソン、オコニー)が存在する。許認可更新に際し、貯蔵機器の経年劣化評価を行うことが申請者に求められる。米国原子力規制委員会(NRC)では、許認可更新を何度か実施した後、その経験を活かし、許認可更新のための指針(NUREG-1927)を2011年に作成した。NUREG-1927が作成された後、最初の許認可更新を迎えたサイトがカルバートクリフ原発の貯蔵施設であった。このサイトは、比較的海岸に近く、キャニスタ表面に海塩が付着する環境であったため、経年劣化評価でキャニスタのSCC評価が必要になった最初のサイトである。カルバートクリフ原発を管理するエクセロンジェネレーション社では、貯蔵されたキャニスタの中から、SCCに対して厳しい条件にあるキャニスタを選定し、そのキャニスタに対し、カメラによる表面観察、付着塩分の測定、温度測定を実施した。これらのデータを使って、許認可更新が行

われた。NRC では、前記 ESCP で課題の洗い出しや研究を実施する中で、経年劣化評価の重要性を再認識し、NUREG-1927 の改訂や経年劣化評価書(過去の知見で得られた経年劣化事象をまとめたもの)の作成作業を進めている。

### (3) Waste Confidence Rule 対応で NRC が示したシナリオ

NRC は、使用済燃料を原子炉の許認可期間を超えて貯蔵することに対し、環境影響評価書を作成して、広く国民に安全性を説明する義務がある。この考え方は、廃棄物信頼性規則(Waste Confidence Rule)と呼ばれるもので、1984年にNRCが最初の解釈を示してから、2012年に裁判でNRCが敗訴したことを受け、2014年中に対応を終わらせることを目指して、作業を進めたものである。環境影響評価書は、公衆審査を経て、最終版(NUREG-2157)が発行された。

環境影響評価では、貯蔵期間を Short-term, Long-term, Indefinite に分けて、貯蔵の安全性を評価している。Short-term は、原子炉の許認可期間を過ぎて60年間、Long-term は Short-term の後、さらに100年間、そして、Indefinite は処分場が建設できないことを想定し永久的に貯蔵を続けるというものである。これらのシナリオ検討では、以下を仮定している。

- ・組織(会社)による管理がなされていること。
- ・キャスクおよびキャニスタは、約100年毎に交換する。
- ・貯蔵施設および乾式移送システム(貯蔵施設から使用済燃料を運び出すため、乾式で貯蔵容器から輸送容器に詰め替えるシステム)も、約100年毎に交換する。
- ・原子炉の許認可期間を超える場合には、使用済燃料は乾式貯蔵に移行する。

NRC では、貯蔵期間毎に、環境に与える影響を、大中小に分けて評価している。

### 3. ドイツの動向

米国と並んで乾式キャスク貯蔵の歴史を有するドイツでは、通常の貯蔵許認可期間は40年であり、その延長審査の準備が行われている。ドイツ ESK(国の諮問委員会「廃棄物管理委員会」)では、「容器貯蔵された使用済燃料及び発熱性廃棄物の乾式中間貯蔵における経年劣化管理に関する勧告」を策定した(2012年)<sup>7)</sup>。経年劣化管理の

基本的考え方は、IAEA の原子力発電所に対する考え方と同じである。特徴的なのは、経年劣化管理の対象として、技術的設備のほかに非技術的な人員、文書資料、業務管理システムなどを特定していることである。これは、貯蔵期間が長期化した場合に、残されたデータが継続して利用できるようなするための措置である。

### － 参考資料 －

- 1) 電力中央研究所, 「使用済核燃料貯蔵の基礎」, ERC 出版, (2014).
- 2) H. Takeda, M. Wataru, K. Shirai, T. Saegusa, Development of the detecting method of helium leak from canister, Nuclear Engineering and Design, 238, 1220-1226 (2008).
- 3) 笹原, 三枝, 「米国アイダホ研の乾式貯蔵使用済燃料の長期健全性評価－金属キャスクのカバーガス分析評価－」, 電力中央研究所 研究報告 L10017, (平成 23 年 7 月).
- 4) T. Matsumura, A. Sasahara, Y. Nauchi and T. Saegusa, Development of Monitoring Technique for the Confirmation of Spent Fuel Integrity during Storage, Nuclear Engineering and Design, 238, 1260-1263(2008).
- 5) 白井, 三枝, 笹原, 服部, 松村, S. Morton, P.L. Winston, 「15年間貯蔵された VSC-17型コンクリートキャスクの経年変化実測試験」, 電力中央研究所 研究報告 N08057, (平成 21 年 8 月).
- 6) B. Hanson, et. al., Used Fuel Disposition Campaign-Gap Analysis to Support Extended Storage of Used Nuclear Fuel, FCRD-USED-2011-000136, (2012).
- 7) ESK 25/Info-AM “Alterungsmanagement bei der trockenen Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Warme entwickelnder Abfälle in Behältern” 18. 01. 2012.

### 著者紹介



三枝利有 (さえぐさ・としあり)

電力中央研究所  
(専門分野)放射性物質の輸送・貯蔵, 材料科学



巨真澄 (わたる・ますみ)

電力中央研究所 地球工学研究所  
(専門分野)放射性物質の輸送・貯蔵, 伝熱流動

## 解説

# 日本学術会議 高レベル放射性廃棄物の処分に関するフォローアップ委員会 暫定保管に関する技術的検討分科会の報告について

## 暫定保管の技術的検討内容とシナリオ想定

原子力環境整備促進・資金管理センター 田辺 博三, 電力中央研究所 三枝 利有

日本学術会議は、2010年9月に原子力委員会より「高レベル放射性廃棄物の処分に関する取組みについて」と題する審議依頼を受け、2012年9月に「回答 高レベル放射性廃棄物の処分について」(以下、「回答」という)を提出した。この「回答」の考え方に立脚してさらに対処の方策を前進させるべく、2013年5月に「高レベル放射性廃棄物の処分に関するフォローアップ委員会」(以下、「フォローアップ委員会」と)、その分科会として「暫定保管に関する技術的検討分科会」(以下、「技術分科会」と)「暫定保管と社会的合意形成に関する分科会」(以下、「社会分科会」)が設置された。2014年9月、2つの分科会より報告が行われた。本稿では、技術分科会で検討された暫定保管の技術的検討内容について解説する。

### I. 暫定保管の検討の経緯

日本学術会議は、「回答」において、(1)政策の抜本的見直し、(2)科学・技術的能力の限界の認識と科学的自律性の確保、(3)暫定保管および総量管理を柱とした政策枠組みの再構築、(4)負担の公平性に対する説得力ある政策決定手続きの必要性、(5)討論の場の設置による多段階合意形成の手続きの必要性、(6)問題解決には長期的な粘り強い取組みが必要であることへの認識、よりなる6つの提言を行った。このうち、(3)の暫定保管については、「暫定保管という管理方式は、いきなり最終処分に向かうのではなく、問題の適切な対処方策確立のために、数十年から数百年程度のモラトリアム期間を確保することにその特徴がある。」としていた。今回、技術分科会では、「回答」において提案した高レベル放射性廃棄物の暫定保管の具体的技術的方法について検討を行うこととした。また、「回答」に対して原子力委員会が2012年12月に発表した見解「今後の高レベル放射性廃棄物の地層処

分に係る取組について」の中で暫定保管の考えに対応すると思われる概念として地層処分施設における回収可能性に言及したことも視野に入れて、使用済燃料と再処理後のガラス固化体の双方を対象として暫定保管技術を検討することとした。検討結果は「報告 高レベル放射性廃棄物の暫定保管に関する技術的検討」<sup>1)</sup>(以下、「技術分科会報告書」としてまとめられた。

### II. 技術分科会報告書の構成と概要

技術分科会報告書の構成は以下のとおりである。

#### ① 暫定保管施設の技術の現状

50年間程度の保管期間の高レベル放射性廃棄物の保管施設等は既に実用化され供用されている。それらの事例を調査し保管方式毎に技術の現状を整理するとともに、地層処分施設における回収可能性を確保する技術について国際機関や各国での議論や技術開発を踏まえて整理している。

#### ② 暫定保管施設の安全性確保技術の現状

使用済燃料の金属キャスク貯蔵を対象に、安全性確保技術について整理しており、その他の保管方式やガラス固化体の保管施設についても基本的には同様であるとしている。また、これらの保管施設において保管期間が長期化する場合および、地層処分施設における回収可能性

*Explanation of the Report on Temporal Safe Storage of HLW submitted by Technical Examination Subcommittee of Science Council of Japan (unofficial translation):* Hiromi TANABE, Toshiari SAEGUSA.

(2014年11月26日 受理)

を確保する場合の留意事項がまとめられている。

### ③ 暫定保管施設立地に求められる地盤・地質条件

暫定保管施設の立地場所として地上立地と地下立地に区分して整理している。また、保管期間が長期化した場合のリスクを整理し、リスクの観点からは暫定保管の期間は可能な限り短くすることが望ましいとしている。さらに、暫定保管中に進めるべき、地層処分の地質環境調査・評価技術の最重要課題を指摘している。

### ④ 暫定保管の技術的シナリオ検討

シナリオを構成する要素として、保管対象、保管期間、保管施設容量、立地点の4項目を要素として検討し、使用済燃料の場合は4シナリオに、ガラス固化体の場合は3シナリオに各々絞り込み、各シナリオにおける課題を整理している。また、これらのシナリオはいずれも技術的には実現可能性がある結論している。シナリオ検討の前提としての、高レベル放射性廃棄物の発生量の現状や総量管理の課題についても言及している。

## III. 各章の解説

### 1. 暫定保管施設の技術の現状

#### (1) 使用済燃料保管施設

使用済燃料の貯蔵施設は、1950年代に始まった核燃料の利用施設(原子炉施設等)に併設された燃料プール(湿式貯蔵技術)で始まり、その後、敷地内外の独立した燃料プールが建設される等、各国で既に数十年の実績がある。貯蔵容量も最大で8,000トンU(ウラン)のプール貯蔵施設がスウェーデンで稼働している。一方、燃料プールに遅れて、金属製あるいはコンクリート製のキャスクを利用した貯蔵技術(乾式貯蔵技術)が開発され実用化されている。これは輸送用キャスクの技術にもとづくものである。キャスク1基毎の貯蔵容量は10トンU程度と小さいが、必要に応じて簡単に増設できるモジュール性が特徴である。また、輸送後に貯蔵施設に移し替える必要のない輸送・貯蔵兼用キャスクも実用化されており、さらに簡便になっている。これらの他に、乾式のボルト貯蔵技術が実用化されている。プールとボルトの貯蔵技術は大容量貯蔵に適している。

経済性に関しては、1万トンUの貯蔵容量までの比較評価例が紹介されており、小容量ほどプール貯蔵の貯蔵単価が金属キャスク貯蔵に比べて高いという結果であった。また、貯蔵期間が長くなるとプール貯蔵は運転維持費が加算されて貯蔵費用が増加するが、キャスク貯蔵ではメンテナンスフリーのため貯蔵費用はほとんど増加しない結果であった。キャスク貯蔵に関しては、長期貯蔵に対処する国際的動向(参考資料2))も参照されたい。

数百年の暫定保管に対する考え方としては、米国、カナダの検討結果が引用されており、約百年毎にキャスクや貯蔵施設をリプレースして対応する考えが紹介されている。

#### (2) ガラス固化体の保管施設

使用済燃料からウラン、プルトニウムを抽出する再処理の主流は湿式(ピューレックス法)であり、高レベル放射性廃液が発生する。この廃液の固化処理方法として各国が開発した技術はガラスと混合して固化するガラス固化技術であり、その結果、高レベル放射性廃棄物はガラス固化体として発生する。ガラス固化技術は仏英独日米等で開発され、フランスではCOGEMA社(現AREVA社)が1978年より操業を開始している。一般的に、ガラス固化体は地層処分を行う前に冷却のための数十年の貯蔵を行う。貯蔵技術は乾式のピット貯蔵(前述のボルト貯蔵と類似)とキャスク貯蔵が採用されてきた。キャスク貯蔵では使用済燃料と同様に、輸送・貯蔵兼用キャスクが実用化されている。

ガラス固化体の貯蔵技術について特筆すべきこととしては、300年間程度の長期貯蔵技術開発がフランスで行われたこと(中止している)、および100年間程度の長期貯蔵に対応する施設がオランダで操業されていることである。

経済性に関して、日本の事例(日本原燃㈱のピット貯蔵施設とリサイクル燃料貯蔵㈱のキャスク貯蔵施設)の建設費の比較より、ガラス固化体1万本以下の保管容量では、キャスク貯蔵のほうが安価なことが類推されるが、それ以上になるとピット貯蔵と逆転する可能性があるとしている。この傾向は、使用済燃料の貯蔵技術の傾向と同様である。

以上を踏まえれば、使用済燃料、ガラス固化体のいずれにおいても、日本学術会議が「回答」の中で示した数十年から数百年の暫定保管に対して、技術的に対応することが十分可能であると判断できるとしている。

#### (3) 地層処分施設における回収可能性を確保する技術

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設は、まだ操業開始されたものはない。一番進んでいるスウェーデン、フィンランドでは既に建設許可申請が行われ、審査中であり、フランスでは2014年中には申請される予定であるが、わが国を含む他の多くの国で、研究段階あるいはサイト選定段階にある。これらの国の多くで、地層処分施設の閉鎖までの回収可能性・可逆性を議論している。これは、地層処分において地下施設の閉鎖の判断が非常に重要であること、すなわち閉鎖時点では長期安全性の最終的な判断が求められること等が背景にあると思われる。現状想定されている処分概念においても回収可能性はほぼ備わっていると思われるが、地層処分の可逆性を求める公衆の要望を考えるならば、処分の目標である長期安全性を損なわない範囲で、どこまで回収可能性を確保しておくかについて、経済性、技術的限界、公衆の受入れ等を考慮して検討する必要があると指摘している。

回収可能性を確保するための技術的な対応としては、

回収のための設計面での対応、回収技術開発、回収可能性を確認するための監視・計測技術が取り上げられている。回収可能性に関するコスト評価としては、確保するためのコストと実際に回収する場合のコストの評価が必要であるが、詳細な検討は今後の課題である。また、回収可能性を確保することによる長期安全性や作業安全性への影響やリスクには十分注意して検討する必要がある。地層処分場の開発において、回収可能性・可逆性が果たす役割は多くの国で認識されており、それらは主に地元住民等との対話や政治的判断の結果出てきた要求にもとづいていた。しかしながら、回収可能性・可逆性の取り入れの程度は国によって異なっている。この差異は、各国の母岩となる地層の違いや処分場の設計の違いといった技術的な理由のほか、処分場開発の異なった歴史、各国特有の社会的、文化的、法的な環境等に依拠しているようである。回収可能性・可逆性の国際機関や各国での検討状況は、本誌、55[9]、p.507(2013)、55[11]、p.670(2013)、56[1]、p.43(2014)、56[2]、p.86(2014)にも詳細な解説を載せており参照されたい。

なお、再処理を行う場合は、ガラス固化体のほかに地層処分対象低レベル放射性廃棄物が発生するので、これらについても暫定保管、回収可能性を検討する必要があるとしている。

## 2. 暫定保管施設の安全性確保技術の現状

### (1) 使用済燃料保管施設

わが国の使用済燃料保管施設の安全性確保は、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえて平成25年12月6日に施行された「使用済燃料貯蔵施設の性能に係る技術基準に関する規則」等にもとづいている。本項では、金属キャスク貯蔵技術を対象に、安全性確保の考え方が説明されており、その他の保管方式についても基本的な考え方は同様としている。安全機能としては、閉じ込め、遮蔽、臨界防止、除熱の4つの機能が必要であり、施設はそれぞれを満たすように設計されている。また、それらが満たされていることをモニタリングによって監視・計測している。その他、自然現象、外部人為事象、電源喪失を考慮して安全対策を施している。また、使用済燃料貯蔵施設には、厳格な保障措置の適用が求められており、必要な対策が講じられている。

なお、安全性確保の実績例として、福島第一原子力発電所のキャスク貯蔵施設が東日本大震災時に水没したが、安全機能が損なわれなかった事例を紹介している。

### (2) ガラス固化体の保管施設

わが国のガラス固化体の保管施設の安全性確保は、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえて平成25年12月18日に施行された「廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」等にもとづいている。わが国では実績がないが、キャスク方式の貯蔵施設に対して

は使用済燃料の金属キャスク貯蔵と同様の安全性確保方策が適用できる。日本原燃(株)の高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターはピット貯蔵方式である。基本はキャスク方式と同じであるが、閉じ込め機能はガラス固化体の容器(キャニスタ)が第一義的な役割を果たしており、遮蔽機能は貯蔵施設の遮蔽壁が担う点が異なっている。なお、いずれの場合も、使用済燃料と異なり、臨界防止機能の考慮は不要となるとしている。

### (3) 暫定保管期間の長期化における留意事項

これまでの原子力施設の寿命は40～50年程度の供用期間を想定して建設しており、100年を超える期間を想定したものは、前述のフランスの研究例やオランダの貯蔵施設のように例が少なく、わが国では前例がない。長期化に対応する技術としては、機器の交換や建物の建て替えによることが現実的であり現状でも対応可能な技術と思われる。実現しようとする場合には、技術基準や規制制度の整備が必要であり、長期化に対する地元の理解が前提になるとしている。

### (4) 地層処分施設における回収可能性を確保する場合における留意事項

地層処分施設の場合、作業中の安全性確保は処分施設としての安全対策の中で対応される。万一、回収作業が実際に行われる場合は、放射線作業の規制の対象として、その時点の環境条件や作業内容に応じて、許可を受けて実施することになるとと思われる。

使用済燃料の地層処分施設に対して、作業期間を対象とした保障措置が適用される。計量管理は処分容器に封入するまでとの考えが示されている。ガラス固化体は保障措置を終了できる形態と認められている。核セキュリティ対策(核物質の防護)は使用済燃料とガラス固化体のいずれの場合も適用される。2001年9月に発生した米国同時多発テロ事件による核テロの脅威の高まりを背景として、わが国でもガラス固化体への適用が検討された結果<sup>4)</sup>、防護要件が相対的に低い防護区分Ⅲの物質を取り扱う原子力事業者に従来課されているものと同様の防護措置を課することが適当とされ、また、埋設終了後は廃棄物へのアクセスが現実的に不可能となること等から核物質防護規制の義務を解除することが適当と考えられる、とされた。使用済燃料に関してはわが国では未検討であるが、ガラス固化体処分の場合に比べより堅牢な対策が求められ、さらに閉鎖後も引き続き何らかの対策が求められる。

## 3. 暫定保管施設立地に求められる地盤・地質条件

### (1) 暫定保管の前提

本項では、暫定保管施設の立地に求められる地盤・地質条件を整理している。その前提として、施設から放射性核種の漏出がないことを前提としている。地層処分は

移行する可能性がある場合には、地層・岩盤はバリアの一つ(天然バリア)であり、放射性廃棄物や漏出した放射性核種を、長期にわたり生物圏から隔離する、閉じ込める等の安全機能を満たす条件も必要となる。

## (2) 暫定保管のタイプと地盤・地質条件に対する考え方

### ① 地上保管

地上保管の場合に考慮すべき立地条件は、他の原子力施設の立地条件と同じであるとしている。

### ② 地下保管

地下保管は、地下数十 m から数百 m の地下空洞中の保管を想定している。この場合に考慮すべき立地条件は、地上保管の場合と同じ条件に加えて、空洞の掘削性、安定性、アクセス性、冷却機能(換気孔)維持性等を考慮する必要がある。一般的に、地下に立地するほうが地上の擾乱を受けにくい、地震動が地上よりも小さい等のメリットがあるとされているが、建設コストが大きくなる等のデメリットもあるので、どちらにするかは総合的に評価して選択する必要がある。

### ③ 地層処分前段階としての暫定保管

回収可能性を確保した地層処分の場合であっても、立地条件は地層処分の場合と同じである。(参考資料 4, 5))に詳しく記載されているので参照されたい。

### (3) 暫定保管の期間とリスクに対する考え方

暫定保管の期間が長期になると、地震、火山噴火等の自然現象の発生の可能性が高くなることが想定されることが指摘されている。また、地下保管あるいは地層処分では、このような影響を緩和する可能性があるが、地下保管では地下空洞の岩盤の緩みや風化による劣化を評価する必要があり、地層処分を前提にするとさらに地下水・地化学環境の変化を評価する必要があることが指摘されている。これらの指摘を考えると、保管あるいは回収可能性の期間における影響を出来るだけ少なくする方策を考えるとともに、期間を可能な限り短期にすることが望ましい。

### (4) 保管期間中のモニタリング

安全性確保技術で述べたように、暫定保管施設では、保管期間中、安全確認のために必要なモニタリングが行われる。地下保管の場合はそれらに加えて空洞安定性を確認する等のモニタリングが必要となる。地層処分に移行する場合はさらに、処分の長期安全性に関わる地下水・地化学環境条件等のモニタリングが必要である。

### (5) 暫定保管中に地層処分の地質環境調査・評価技術について進めるべき研究

「回答」では、処分場立地選定について、処分場の長期安定性を確保できる地域を探す科学・技術的信頼性が高まるまで待つべき、としている。本項では、指摘された科学技術的信頼性の高低は立地の場所と評価する期間によって異なるので、全国一律に判断できないことを指摘

している。そのうえで、「地層処分に関係する研究項目は非常に広範であるが、暫定保管の間に、社会的合意を得た処分場立地選定のために何が最重要なものとして残っているのか特定し、それを解決するための研究を進めることが必要である。」と指摘している。また、具体的な課題として、「放射性核種が地下水によって人間環境に運ばれるかも知れないことは大きな不安要因であり、これらの地質事象の地下水への間接的な影響評価も重要な課題である。しかしながら、これは容易ではなく、地層処分場立地選定の段階的調査にあたって、評価困難な問題として最後まで残る可能性が高い。」ことを指摘し、それを回避するためには地下水の通路である割れ目の少ない岩盤が望ましいので、「岩盤内の割れ目を探す技術－特に非破壊の物理探査－の高度化と適用限界の明示が必要であり、さらに、地質履歴から割れ目の少ない岩盤を探す論理立てを確立することが必須である。そのためには、現有の地球科学的見解から、上記の地質事象の直接的影響が小さいと判断され、かつ、割れ目も少ないと推定される複数地域において、実際の割れ目の分布性状等の調査と評価を行う必要がある。」ことを指摘している。

## 4. 暫定保管の技術的シナリオ検討

### (1) 対象となる高レベル放射性廃棄物の物量

現在のわが国の使用済燃料とガラス固化体の総量は、ガラス固化体換算で約 2 万 5,000 本、今後の発生量は 100 万 kWe 級原子炉 1 年間当たり使用済燃料が約 20 トン、ガラス固化体換算で約 25 本が発生するとしている。また、ガラス固化体の発生本数は仏英と日本とで幅があることを指摘し、この理由として、「ガラス固化体は、ガラスへの核分裂生成物の混入率設定、キャニスタ容量、燃料の燃焼度にもよるが、使用済燃料 1 トンの再処理で 0.7~1.3 本程度発生する。」としている。このことから、長期間の暫定保管を行うことで使用済燃料やガラス固化体の発熱量が減少することから、ガラス固化体の発生本数や処分場の容積を減らすことが出来るかどうか検討する価値があると指摘している。

また、高レベル放射性廃棄物の有害度を低減する技術(群分離・変換技術<sup>6)</sup>)の開発に関しては、処分時のリスクの低減効果や分離作業にともなうリスクの増加の可能性を指摘している。

これらは、「回答」の中で提言された総量管理に関わる指摘と思われる。

### (2) 数十年以上の長期の暫定保管に適した技術

上記Ⅲ-1 節の貯蔵技術とⅢ-2 節の安全性確保技術の検討結果より、数十年から数百年の暫定保管は、技術的に対応可能であると結論している。すなわち、数十年の保管技術はすでに実用化されており、数百年までの長期化に対しても、適合性のレビューを定期的に行い、必要



に応じて施設・設備の更新を行うことで対応可能であるとしている。保管技術としては、使用済燃料貯蔵の場合は湿式貯蔵技術と乾式貯蔵技術が、ガラス固化体の場合は乾式貯蔵技術が実用化されているが、より長期間の保管には、経済性、安全性確保の観点から乾式貯蔵技術が適切としている。なお、数百年を超える暫定保管は自然現象や外部人為事象に対するリスクの増大や施設管理体制維持の不確実性等を考慮すると安全性確保が困難になる可能性があることを指摘している。

また、地層処分施設で回収可能性を確保する技術による保管期間については、操業期間から閉鎖を判断するまでの期間を中心に数十年から百年程度を想定することが適切であるとしている。詳しくは前述の本誌の解説も参照されたい。

### (3) 暫定保管シナリオを構成する要素

暫定保管の技術的イメージを明確にするため、保管対象、保管期間、保管施設の単位容量、保管施設の立地点の4項目を要素としてシナリオを構成している。各項目の検討範囲は以下としている。

- ①保管対象は使用済燃料とガラス固化体の2ケース。
- ②期間は50年、100年、300年の3ケース。
- ③容量は実績や計画を参考にして、使用済燃料数百トン、ガラス固化体数百本(以下、同様)、数千トン(本)、数万トン(本)の3ケース。
- ④立地点は原子力発電所(使用済燃料)、再処理工場(使用済燃料、ガラス固化体)、処分場(使用済燃料、ガラス固化体、回収可能性を確保する地層処分も含む)、独立立地点(使用済燃料、ガラス固化体)の4ケース。

なお、保管施設を地上あるいは地下に建設する選択肢があるが、それぞれ長所と短所があり、要素としては取り上げていない。また、保管施設の数については、廃棄物の量と保管施設の容量で決まるが、立地点として原子力発電所、再処理工場、処分場への付設を考える場合には、それらの数に制約されることから、要素として取り上げていない。

### (4) シナリオの絞込みと各シナリオにおける課題

上記の要素のケースを組み合わせると膨大な数のシナリオが設定できるが、実現可能性を考慮し、さらに技術的特性の点から同様のものは統合するという考え方で、シナリオを絞り込んでいる。また、既に実用化された施設と同様の場合もシナリオから除外している。結果は以下に示すように、使用済燃料保管の場合は4シナリオ、ガラス固化体の場合は3シナリオとなっている。なお、これらのシナリオは今後の議論を整理するための例示であり、社会分科会での議論の過程においてはその他のシナリオもあり得るとしている。

各シナリオの課題はそれぞれに整理されているが、共通的な課題として安全性確保と核セキュリティ、保障措

置への対応が挙げられ、後者は使用済燃料の場合により高度な対応が必要になると指摘している。

#### ①使用済燃料の場合

ア 原子力発電所に立地、保管容量は数百トンから数千トン程度、保管期間は50年から100年程度

技術的課題はほとんどない。主要な課題は、保管後の搬出先を決めずに貯蔵施設を立地することが地元を受け入れられるかどうかであろう。発電所の運転終了後も保管を続ける場合があり得るが、その場合も地元の了解が必要になる。

イ 再処理工場に立地、保管容量は数千トンから1万トン程度、保管期間は50年

技術的課題はほとんどないが、貯蔵後は再処理が前提になると想定され、貯蔵技術は湿式のプール貯蔵が主体になるだろう。貯蔵期間も湿式貯蔵の技術経済的特性および再処理との連携を考慮すると50年を超えることは想定しがたい。

ウ 独立立地点、保管容量は数千トンから数万トン、保管期間は最長300年

50年を大幅に上回る保管期間になることも想定されるが、その場合には、長期にわたる安全性確保に技術的見通しをつけるための研究開発が必要になり、立地点の選定も処分場の立地と大きくは変わらない困難が予想される。また、地元と合意して決めた保管期間後は確実に搬出することを保証する必要がある。

エ 使用済燃料の処分場で回収可能性を確保、保管容量は数千トンから数万トン、保管期間は100年程度まで、回収しない場合は処分に移行

回収可能性を確保する技術の研究開発が必要であり、最終処分場の有力候補としての立地選定を行うことになる。また、回収することになった場合には新たな保管施設を建設しなければならない。なお、ガラス固化体の暫定保管の場合も同様であるが、処分場において回収可能性を確保するシナリオでは、その立地の社会的合意に関しては最終処分場立地と同様の困難が予想される。

#### ②ガラス固化体の場合

ア 再処理工場に立地、保管容量は数万本、保管期間は50年から100年程度

50年程度の保管期間については現在の六ヶ所再処理工場で行われているものと技術的には同じである。保管期間を100年程度に延ばすためにはオランダの貯蔵施設で行われているように定期的に本格的な安全性のレビューを行い、必要に応じて改修等を行う必要がある。100年を大幅に超える保管期間は、再処理工場としての立地を受け入れた地元との関係を考慮すると困難と思われる。

イ 独立立地点、保管容量は数万本、保管期間は最大300年程度まで

課題は独立立地の使用済燃料保管のシナリオの場合と

ほとんど変わらないと思われる。

ウ 高レベル放射性廃棄物処分場で回収可能性を確保、保管容量は数千本から数万本、保管期間は100年程度まで、回収しない場合は処分に移行

課題は使用済燃料の同様のシナリオの場合とほとんど変わらないと思われる。

上記の暫定保管シナリオは、いずれも技術的には実現可能性があるかと判断されている。また、高レベル放射性廃棄物処分場で回収可能性を確保する場合には今後の研究開発が必要であり、また他のシナリオにおいても50年を大幅に超える保管期間を想定する場合には安全性確保について更なる検討が必要であること、社会的制約を考慮すれば、搬出先を特定せずに保管施設の立地が可能かどうかなど検討を要する多くの困難な課題が想定されること、を指摘している。

#### IV. おわりに

技術分科会報告書では、「回答」で提案した暫定保管に関して、使用済燃料とガラス固化体の貯蔵技術の調査、安全性確保技術の現状調査と長期化した場合の課題の整理、暫定保管施設の立地に求められる地盤・地質条件の整理を行い、その結果を踏まえて暫定保管の技術的シナリオの検討と課題の整理を行った。その結果、いずれのシナリオについても技術的には実現可能性があるかと判断している。「回答」にはなかったが、技術分科会が独自に判断して加えた高レベル放射性廃棄物処分場で回収可能性を確保する技術は、暫定保管の考えに対応するものの、研究開発段階であり、技術実証と経済性評価が課題であるとしている。さらに、再処理を行う場合には、ガラス固化体以外に地層処分対象低レベル放射性廃棄物も対象になることが言及されている。

高レベル放射性廃棄物処分場で回収可能性を確保する技術に関して、「回答」では、「暫定保管という管理方式は、いきなり最終処分に向かうのではなく、問題の適切な対処方策確立のために、数十年から数百年程度のモラトリアム期間を確保することにその特徴がある。この期間を利用して、技術開発や科学的知見を洗練し、より長期間を対象にした対処方策を創出する可能性を担保する

メリットがもたらされる。」としている。社会分科会では、地層処分において回収可能性を確保する技術に関しては検討を行っていない。この取り扱いについては、2つの分科会の報告書で分かれた内容となっている。

これら2つの分科会報告を受けて、親委員会であるフォローアップ委員会は、2014年度中には提言をまとめることとしており、今後も注目していく必要がある。

#### — 参考資料 —

- 1) 日本学術会議高レベル放射性廃棄物の処分に関するフォローアップ検討委員会暫定保管に関する技術的検討分科会、報告書「高レベル放射性廃棄物の暫定保管に関する技術的検討」, 平成26年(2014年)9月19日(2014).
- 2) 三枝利有, 亘 真澄, 使用済燃料貯蔵技術の現状, 日本原子力学会誌, 57, p. 259-264 (2015).
- 3) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会原子力防災小委員会, 放射性廃棄物の埋設事業に係る核物質防護の在り方について, 平成19年10月5日(2007).
- 4) 原子力発電環境整備機構, 「概要調査地区選定上の考慮事項(分冊-2)」, 2009年(2009).
- 5) 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術WG, 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価—地質環境特性および地質環境の長期安定性について—, 平成26年5月(2014).
- 6) 文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会原子力科学技術委員会群分離・核変換技術評価作業部会, 群分離・核変換技術評価について(中間的な論点のとりまとめ), 平成25年11月(2013)等.

#### 著者紹介



田辺博三 (たなべ・ひろみ)

原子力環境整備促進・資金管理センター  
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物の特性調査と処理・処分工学, 規制制度



三枝利有 (さえぐさ・としあり)

電力中央研究所  
(専門分野/関心分野)放射性物質の輸送・貯蔵, 材料科学

連載  
講座

## 放射性廃棄物概論

施設の運転および廃止措置により  
発生する放射性廃棄物の対策

## 第7回 地層処分システムの安全評価

日本原子力研究開発機構 柴田 雅博, 亀井 玄人

## I. はじめに

地層処分の対象となる高レベル放射性廃棄物の特徴は、放射性核種の濃度が高く、かつ長寿命の放射性核種も含まれていることである。その処分方針は30~50年間貯蔵冷却した後、安定な地下深部(地下300m以深)に搬入・埋設し、廃棄物の周りに人工的に設けられる複数の障壁(人工バリア)とこれらを長期にわたって固定する働きを備えた天然の地層(天然バリア)とを組み合わせた多重バリアシステム(地層処分システム)によって物理的に生活環境から隔離し、その中の放射性核種からの放射線が人間とその生活環境に影響を及ぼさないようにすることを基本としている<sup>1)</sup>。(地層処分システムの構成や機能等については、本連載講座第1回「放射性廃棄物対策の概要」及び第5回「放射性廃棄物の処分」を参照)

そのような地層処分システムの安全性を長期にわたって確保するためには、適切な地質環境を有する処分地を選定し、そこに人工バリアや処分施設を適切に設計・施工するとともに、処分事業の各段階でそれぞれの安全確保対策の妥当性について確認すること(安全評価)が必要である。

## II. 安全評価の目的と考慮すべき特徴

地層処分システムの安全評価の目的は、処分場が設置されるサイトの地質環境や、安全確保のために施される工学的対策を条件とし、人に健康影響を及ぼす可能性のある種々の現象を考慮して設定したシナリオに基づいて行った評価結果を、予め定められた放射線防護上の基準

*Introduction to Radioactive Waste - Management of Radioactive Waste from Operation and Decommissioning of Nuclear and Other Facilities (7) : Safety assessment of Geological Disposal System* : Masahiro SHIBATA, Gento KAMEI.

(2014年8月29日 受理)

■前回タイトル

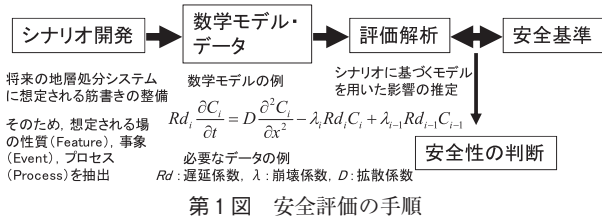
第6回 わが国の地質環境

等と比較して安全性を確認することである。この安全評価は、対象とする領域が処分場から人間の生活環境に至るまでの広範なものであることと、核種の寿命ゆえに対象期間が長いことが特徴である。坑道掘削や廃棄物の埋設といった処分場の操業の期間については、常に事業者等の管理下に置かれることから、一般労働安全の考え方や通常の原子力施設における放射線管理の方法に準拠して安全の確保が可能であろう。

このような管理期間が過ぎれば、処分坑道も埋め戻され、閉鎖されることとなる。閉鎖後の地層処分システムは、制度的管理など人の関与なしに、長期の安全性確保が期待できる、いわば受動的な安全システム(Passive Safety System)でなければならず、また、そのように設計されていなければならない。そして、そのようなシステムの安全評価を行うにあたっては、試作品を実際に作動させてその安全性を実証するという直接的な方法をとることができないので、予測解析的な方法によることとなる。

## III. 安全評価の一般的方法

閉鎖後長期の安全評価とは、シナリオ、シナリオを表現する数学モデル及びモデルに必要となるデータを用いて将来のシステム挙動を評価することである<sup>2)</sup>。ここでシナリオとは、放射性廃棄物が人間と環境に及ぼす放射線影響を評価する観点から、閉鎖直後の地層処分システムの状態を基点として、長時間のうちにその状態を変化させる可能性のある一連の現象を想定し、これらを組み合わせた地層処分システムの長期挙動とそれに応じた核種の挙動を描いたものである。シナリオには自然過程を介して人間の生活に影響を及ぼすシナリオと、人為過程を介するシナリオとがある<sup>3)</sup>。安全評価ではシナリオ設定に続き、シナリオに従ってシステムの長期的な挙動と核種の移行挙動を定量的に評価するために、物理・化学法則や実験結果等に基づいたモデルの開発と必要なデータの整備が行われる。次に、モデルとデータを用いた解析を行って放射線影響を推定し、この結果を安全規制の



指針や基準等と比較して安全性を評価する。このような一連の安全評価手順を第1図に示す。

#### IV. シナリオ開発

シナリオ開発においては、システムの安全性を損なうような重大なシナリオが抜け落ちなく抽出されていることが重要となる。その開発のためには、第1図のようにシステムの挙動に関する情報として場の性質 (Feature)、事象 (Event) 及びプロセス (Process) (以上をまとめ、頭文字をとって FEP と呼ぶ) を抽出、整理し、個々の FEP の内容とともに FEP の相互関係について記述がなされる。OECD/NEA は国際 FEP リストを作成し、各国のプロジェクトにおける個々の FEP の記述とともにこれらをデータベース化<sup>4)</sup>、また、各国の FEP の整備や利用状況について情報収集と分析を進め、同リストの見直しを行っている<sup>5)</sup>。

近年、シナリオ開発については、より効率的に行う方法として、期待されるシステムの安全機能に視点を置き、安全機能に影響を及ぼす可能性の高いプロセスや条件に特に留意する手法や、これと従来からの FEP に基づく手法とを組み合わせる手法が主流となってきている<sup>6)</sup>。

安全評価を効率的に行うためには、シナリオの適切な分類が不可欠である。一例を挙げれば、核燃料サイクル開発機構<sup>7)</sup>は、シナリオを、①地下水によって放射性核種が処分場から人間の生活圏に運ばれることを想定した“地下水移行シナリオ”と、②放射性廃棄物と人との物理的距離が接近することに伴う影響を想定した“接近シナリオ”に大別した。“地下水移行シナリオ”は、処分場が地下水面に設置されることが想定されるような場合においては安全評価上、最も重要である。また、同報告書<sup>7)</sup>では、地下水移行シナリオはさらに分割され、現在の地質環境条件が将来まで安定に継続し、システムの安全機能が期待通りに発揮されることを想定したシナリオを“基本シナリオ”、他方、天然現象や将来の人間活動による影響を考慮するシナリオは“変動シナリオ”として定義された。

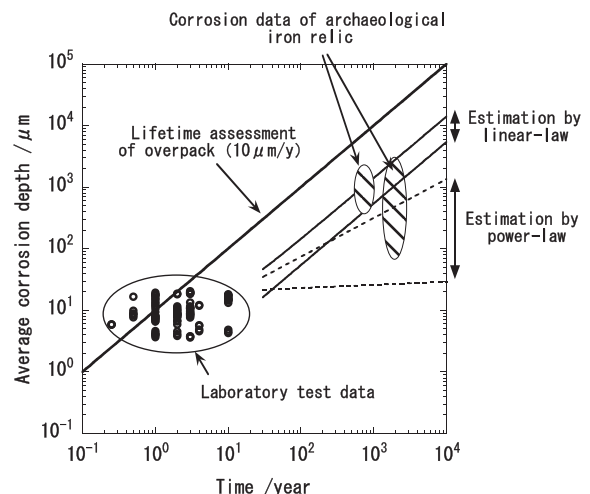
近年の各国の性能評価では、発生の可能性を考慮したシナリオ分類が進められている<sup>6)</sup>。すなわち、発生することの蓋然性が高いシナリオを“基本シナリオ”としている。日本においても、原子力安全委員会<sup>3)</sup>は、安全評

価における不確実性の扱い方として、国際放射線防護委員会 (ICRP)<sup>8)</sup>の提案に基づき、シナリオの発生可能性を勘案したリスク論的考え方が有効であるとしている。

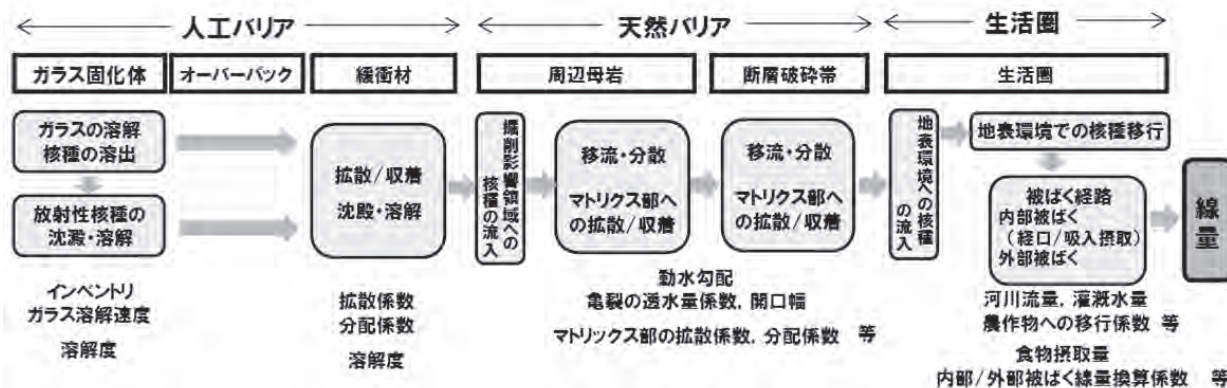
また、このほかの分類として、“What-if シナリオ”がある。これは、合理的には想定しにくい現象や状況を取って設定することにより、処分システムのロバスト性や性能限界を確認することを目的としている<sup>6,9)</sup>。

#### V. 安全評価モデル

安全評価の次の段階として、シナリオに基づき、安全評価モデルが必要となる。評価モデルの開発は、概念モデルの開発、数学モデルと計算プログラムの開発、検証 (Verification)、確証 (Validation) というステップを繰り返して行われる<sup>6)</sup>。概念モデルとは、シナリオにおいて考慮すべき主要なプロセスや相互作用を、現象の科学的理解に基づいて説明する定性的な記述である。概念モデルについては、これを数学的に定式化し (数学モデルの作成)、計算プログラムが作成される。この計算プログラムが数学モデルを数値的に正しく解いていることを確かめることが検証であり、具体的には解析解との比較やベンチマーク計算等によって行われる。また、確証とは、モデルが実際の現象を正しく表現できていることを示すことであり、モデルによる解析結果を実験や現地調査の結果と比較することにより行われる。しかし評価において速度論モデルで扱われるプロセスの中にはきわめて遅い反応もある (例えば還元条件下での金属製廃棄物容器の腐食やガラス固化体の溶解等)。このような場合には、これらの評価に用いる速度論モデルの確証のためにナチュラルアナログ (処分後に想定される現象に類似していると考えられる天然現象) の事例を利用する場合もある。一例を挙げれば、炭素鋼製廃棄物容器 (オーバーパック) の腐食挙動評価モデルの長期適用性が、数



第2図 ナチュラルアナログにより炭素鋼製廃棄物容器の腐食挙動評価モデルの長期適用性が確認された事例 (谷口, 他<sup>10)</sup>より転載)



第3図 地下水移行シナリオに基づく安全評価モデルでのプロセスと必要となるデータの例

百年以上にわたって遺跡に埋没していた鉄製遺物の腐食調査結果との比較により確認されている(第2図)<sup>10)</sup>。

第3図には、地下水移行に基づいた安全評価モデルで取り扱われているプロセスと、そこで必要となるデータの例を示している<sup>7)</sup>。

### VI. データベース整備

安全評価モデルを用いた解析には、モデルに対応した様々なデータが必要である。

ガラス固化体の溶解に伴う核種(元素)の放出において、その溶解度は、熱力学に基づく平衡計算により、溶液の化学組成に応じて設定される。このために、対象元素の固相と溶存化学種の熱力学データが必要となる。熱力学データの整備の重要性は国際的にも認識され、OECD/NEAは1984年より熱化学データベース(TDB)プロジェクトとして、元素ごとに科学的に信頼性の高い熱力学データの選定を進めている(<http://www.oecd-nea.org/dbtdb/>)。日本では、原子力機構が元素の網羅性の観点から対象元素を拡大し、OECD/NEAのデータベースも参照しつつ、データの品質を確認して熱力学データベースを整備している<sup>11)</sup>。緩衝材と岩石を対象とした収着分配係数、拡散係数については、既報の実測値が収着データベース<sup>12)</sup>及び拡散データベース<sup>13)</sup>として整備されている。この整備の過程では、個別のデータごとに、実験条件等、情報の十分性、実験方法・条件の適切性等の観点からデータの信頼度評価が行われている<sup>12)</sup>。

これらのデータベースは、原子力機構のウェブサイトで開催されている(<https://migrationdb.jaea.go.jp/>)。

### VII. 安全指標と防護基準

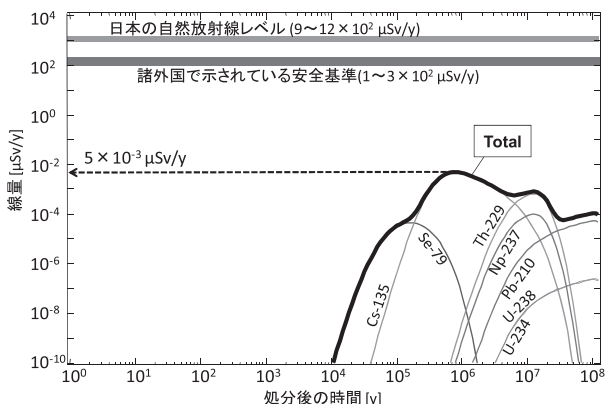
地層処分システムに対する安全評価モデルによる解析の結果は、適切に設定された指標と比較される。人への放射線影響を示す指標は、線量やリスクである。

第4図は核燃料サイクル開発機構<sup>7)</sup>による評価事例

(40,000本のガラス固化体を対象)である。

ICRPは、放射線防護の観点から、放射性廃棄物の処分に関する勧告を行っており、ICRP Pub. 81<sup>8)</sup>において、自然過程(個人の被ばくに至る人間侵入以外のすべての過程)に対して、線量拘束値として、0.3mSv/年を勧告し、これは $10^{-5}$ /年のオーダーのリスク拘束値に相当するとしている。この基準は、IAEAの安全要件(SSR-5)<sup>14)</sup>においても踏襲されている。一方、諸外国の規制当局が示している放射線影響についての安全基準については、それぞれの考え方に依存するものの、いずれもICRPが示している拘束値よりも低い線量やリスクが設定されている。

指標と評価期間について、日本では、「一般公衆に対する評価線量が最大となる時期においても、あらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないこと等を確認することが基本」とされている<sup>1)</sup>。評価期間については、スウェーデンでは少なくとも10万年、または氷期1サイクルに当たる期間を含み、最大でも100万年としているが<sup>15)</sup>、同時に、時間とともに不確実性が増加するという、地層処分システムの安全評価の特徴を考慮して、安全基準の設定において、時間枠の考え方を導入し、処分場閉鎖後の1,000年までとそれ以降で異なる評価の考え方あるいは指標を適用している<sup>15)</sup>。同様に、フィンランドにおいても十分に予測可能な期間(少



第4図 線量を指標とした地層処分の安全評価事例 (核燃料サイクル開発機構<sup>7)</sup>を一部改変)

第1表 フィンランドの安全指針(YVL D. 5<sup>16)</sup>)における被ばく線量及び放射性核種の放出率の拘束値(経済産業省資源エネルギー庁<sup>17)</sup>より引用)

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| 十分予測可能な期間(少なくとも数千年間)において人間の被ばくする可能性のある線量        |                                   |
| 公衆の中で最も被ばくした人の1年間あたりの実効線量                       | 0.1mSv 未満                         |
| ほかの大きな集団の公衆に対する平均の1年間あたりの実効線量                   | 0.1mSv の 1/100~1/10 以下            |
| 数千年後に使用済み燃料から放出され、環境に移行すると予想される放射性核種の長期間にわたる平均値 |                                   |
| 処分から生じる放射線影響                                    | 最大でも地殻内の自然の放射性物質から生じるものに相当する程度    |
| 放射性核種別の環境に放出される1年間あたりの量                         | 個別の規制値以下で、かつ各核種の放出量/規制値の比率の合計が1以下 |

なくとも数千年間)とそれ以降の期間で、異なる指標を適用している(第1表)<sup>16)</sup>。なお、両国とも対象廃棄物は使用済み燃料である。

このほか、環境への影響評価として人間以外の生物種への放射線影響についての議論も行われている<sup>18)</sup>。

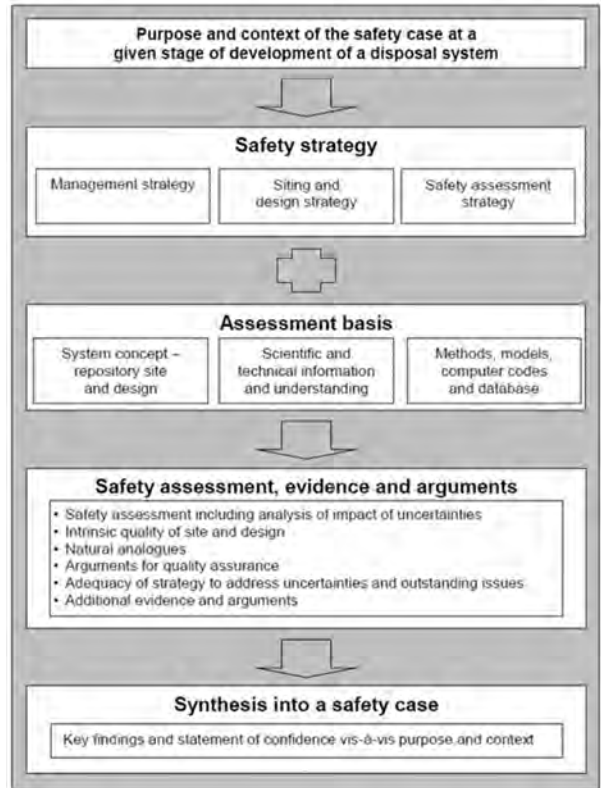
## VIII. セーフティケースと安全評価

地層処分システムの長期安全性の信頼性を高めるためには、単に安全評価の結果だけでなく、「セーフティケース」の提示が重要であると考えられている<sup>14, 19)</sup>。セーフティケースとは、さまざまな証拠、解析、論拠等に基づいて地層処分システムが長期的に安全であることを体系的に説明するものである。セーフティケースの中での安全評価(Safety Assessment)の位置づけはOECD/NEA<sup>19)</sup>により、第5図のように示されている。

セーフティケースは処分事業者が事業の種々の段階で作成するものとされており、事業の進展に伴って更新され、精緻化が進んでいく。セーフティケースにはその作成段階における不確実性と、それが安全性に及ぼす影響、及びその対応策についても示すものとされている<sup>14)</sup>。セーフティケースの役割は、多様なステークホルダー間に対話のプラットフォームを提供し、段階的に進められる地層処分計画の意思決定の材料となるものである<sup>19, 20)</sup>。

## IX. おわりに

本稿では地層処分システムの安全評価の一般的方法論とそれに沿った国際動向などを解説した。安全評価は、地層処分システムの将来のさまざまな状況を考慮したとしても、適切なレベルの安全性が達成されているかを推



第5図 セーフティケースの構成と安全評価の位置づけ<sup>19)</sup>

し量るための手法であり、また、セーフティケースの中でも、その役割は重要である。一方、安全評価には、単に地層処分システムの安全性を示すのみならず、システムの長期安全性をより確実なものとするため、サイト調査、処分システムの設計等に対する要求事項の提示や取り組むべき研究開発課題の抽出など、地層処分プログラム全体を統括していく上でも重要な役割がある。

処分事業の長期性を考慮すれば、安全評価の技術について、科学的理解の進展、計算機技術の発展、蓄積される関連データなどの最新の情報を踏まえて、見直し、改良を継続的に進める必要がある。

日本原子力研究開発機構の若杉圭一郎氏及び匿名の査読者より原稿について貴重な意見をいただいた。謝意を表す。

### — 参考資料 —

- 1) 原子力安全委員会, “高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告)” (2000).
- 2) OECD/NEA, “Disposal of Radioactive Waste: Review of Safety Assessment Methods”, (1991).
- 3) 原子力安全委員会, “放射性廃棄物処分の安全規制における共通の重要事項について”, (2004).
- 4) OECD/NEA, “Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste, An International Database”, (2000).
- 5) OECD/NEA, “Updating the NEA International FEP List, An

- Integration Group for the Safety Case (IGSC) Technical Note”, (2014).
- 6) OECD/NEA, “Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Outcomes of the NEA MeSA Initiative”, (2012).
- 7) 核燃料サイクル開発機構, “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性, -地層処分研究開発第2次取りまとめ-”, 分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, (1999).
- 8) ICRP, “Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste”, ICRP Publication 81, (1999).
- 9) 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)”, NUMO-TR-11-01 (2010).
- 10) 谷口, 他, “低酸素濃度下での模擬地下水の飽和した圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食挙動”, 材料と環境, Vol. 59, pp.418-429 (2010).
- 11) Kitamura, et al., “Update of JAEA-TDB: Update of Thermodynamic Data for Palladium and Tin, Refinement of Thermodynamic data for Protactinium, and Preparation of PHREEQC Database for Use of the Brønsted-Guggenheim-Scatchard Model”, JAEA-Data/Code 2014-009, (2014).
- 12) Tachi, et al., “Development of JAEA Sorption Database (JAEA-SDB): Update of Data Evaluation Functions and Sorption/QA Data”, JAEA-Data/Code 2010-031, (2011).
- 13) 栃木, 他, “緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備”, JAEA-Data/Code 2008-035, (2009).
- 14) IAEA, “Disposal of Radioactive Waste”, SSR-5, (2011).
- 15) SSMFS, “The Swedish Radiation Safety Authority’s Regulations concerning the Protection of Human Health and the Environment in connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste”, SSMFS 2008:37, (2009).
- 16) STUK, “Disposal of Nuclear Waste”, Radiation and Nuclear Safety Authority, GUIDE YVL D.5, (2013).
- 17) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部 放射性廃棄物等対策室, “諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について(2014年版)”, (2014).
- 18) POSIVA, “Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto Dose Assessment for the Plants and Animals in the Biosphere Assessment BSA-2012” POSIVA-2012-32, (2014).
- 19) OECD/NEA, “The Nature and Purpose of the Post-Closure Safety Cases for Geological Repository”, (2013).
- 20) IAEA, “The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste”, SSG-23, (2012).

### 著者紹介



柴田 雅博(しばた・まさひろ)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処分



亀井 玄人(かめい・げんと)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処分



## 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－  
(3月3日第8回編集幹事会)

### 【論文誌関係】

- ・1月期に英文誌は22論文, 和文誌は6論文が投稿された。
- ・英文誌の出版社からの入金状況が報告された。
- ・英文誌の引用を向上させるための方策を引き続き検討することとした。
- ・JNSTの編集委員として熱流動分野へ韓国の委員に委嘱することを内定した。
- ・次年度編集委員の分野別総数を決定した。

### 【学会誌関係】

- ・理事より, 会員サービス委員会で実施したホームページアンケートの結果

について報告があった。学会誌記事の電子化やPDFの閲覧などに対しての要望が特に多かったので, 会員サービス委員会で引き続き, 公開場所, 方法等について検討していくこととなっている。

- ・編集委員会のSNS活用について, 編集長より前回の会議で出席者からの意見を踏まえた結果, SNSを開始するにはまだ時期が早いという判断に至った, という報告があった。今後, 理事会からSNS活用の要請があれば, また改めて検討することとした。
- ・春の年会企画セッションからの記事候補を確認した。
- ・5月号以降の巻頭言の記事企画の確認, 検討を行った。5月号巻頭言の執筆依頼を急ぎ進めていく。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

## 報告 初等・中等教育における放射線・原子力教育の状況(その1)

# 中高生のための原子力・科学技術教育プログラムの開発 IAEA 専門家会議の動向

東京大学 飯本 武志

日本原子力学会・初等中等教育小委員会は2014年秋の大会で「初等・中等教育における放射線・原子力教育の状況」と題するセッションを開催した。本稿では、同セッションでの3件の講演を紹介する。1件目は、アジア・太平洋地区の中高生を対象とした、IAEAによる原子力・科学技術教育プログラムの開発(2012~2015年)に関する講演である。ここではこの活動の背景と動向、良好事例として紹介された日本の実績例(放射線教育に関する文部科学省の代表的な事業「はかるくんの開発と普及に関する事業」「高校生を対象とした放射線等に関する課題研究支援事業」)について整理する。

### 1. IAEA 専門家会議の概要

第1回「中高生のための原子力・科学技術教育プログラム及びツールの開発に関する専門家会議(RAS0065 TC Project: Specialist Advisory Meeting for the development of a portfolio of extra-curricular activities for secondary schools on nuclear science and technology)」が2013年11月19~22日の日程で、IAEA本部(ウィーン)で開催された。この活動は、2012~2015年の4年プロジェクト「アジア／太平洋地域における持続性と国立原子力研究機関のネットワーク化の支援活動(RAS/0/065-Supporting Sustainability and Networking of National Nuclear Institutions in Asia and the Pacific Region)」の一環として位置づけられている。本会議への日本人専門家派遣について、原子力人材育成ネットワーク(JN-HRD)共同事務局である原産協会にIAEAより照会があり、文部科学省等による小中学校・高等学校における放射線教育事業に長年参画してきた筆者に出席の要請があった。韓国、インド、豪州、英国、米国、イスラエル、フィンランドからの専門家もこの会議に参加している。

この会議の主たる目的は原子力分野の長期的な視野での人材育成とされた。原子力科学技術(NST)に限ることなく、科学技術・工学・数学(STEM)の全体に魅力と興味を感じる、中高生を対象とした教育プログラムの策定、ツールの開発を目標とした。各国からは、政府系研究機関や産業界等が主催する教育実践、展示物の事例が紹介された。我が国からは福島第一原子力発電所事故後に発行された放射線副読本の編集事業や、四半世紀にわたって実績を積んできた簡易放射線測定器「はかるく

ん」の開発と貸出普及の事業、これらを霧箱実験等と組み合わせた出前授業としての教育プログラム、などを具体的な事例として紹介した。さらに、原子力や放射線に関する高校生による自主的な研究活動を支援する事業<sup>1)</sup>の概要も紹介し、IAEA事務局および各国メンバーから大きな興味を得た。このほかJN-HRD、FNCA(アジア原子力教育フォーラム)による関連の活動にも触れることができ、今回の第1回会合は、官学産民それぞれによる、または協働によるわが国の放射線教育に関する経験と現況を伝えるよい機会となった。この専門家会議の今後の具体的な活動方針としては、①各国で実践されている魅力あるSTEM/NST教育プログラムやツールをさらに持ち寄り、その特徴を整理、②太平洋地区のいくつかの国を教育プログラム適用のモデル国として選定し、教育パッケージの事例を試験的に実施、③IAEAとしてのSTEM/NST教育パッケージを策定し、各国に提供、することが予定されている。次回会議は2014年10月14~17日の開催が予定されている。昨年に続き2回目の参加となる日本、豪州、米国、英国の他に、モデル国として現時点ではインドネシア、マレーシア、フィリピン、アラブ首長国連邦がノミネートされており、いよいよ②のステージに入る予定である。

### 2. 良好事例として紹介されたわが国の経験

#### (1) 簡易測定器「はかるくん」の開発と普及事業

2008年に学習指導要領が改訂され、関連指針に「放射線」の用語が約40年ぶりに復活、いわゆる義務教育における放射線教育が再開された。また、2011年3月、東電・福島第一原発事故が起これ、放射線影響や放射線がもつ特性について、人々の関心が高まった。この2つの大きな背景が重なり、昨今の放射線教育界を取り巻く社会的環境が劇的に変わったといえる。文部科学省はこれ

*Development of NST Education Program for Secondary School Students : Activity of IAEA Expert Meeting : Takeshi IIMOTO.*  
(2014年11月4日 受理)



までわが国のエネルギー政策の一環としての位置づけで、放射線教育事業を展開してきた。その一例として、1988年から環境放射線が計測できるハンディタイプの簡易放射線測定器「はかるくん」を設計、開発、製作し、改良を重ね、それらをいくつかの実験キットと組み合わせ、全国の学校教育の現場に貸し出してきた。歴代のはかるくんはすべてCsI(Tl)シンチレーション検出器を用いており、一部ベータ線測定のための小型シリコン半導体検出器も併せて搭載しているものがある。対光子感度はいずれも $10\text{cpm}/0.01\mu\text{Sv h}^{-1}$ 以上( $150\text{ keV}\sim 3\text{ MeV}$ )、 $0.001\sim 9.999\mu\text{Sv h}^{-1}$ を観測線量率の範囲としている。放射線に関する知識の普及と定着を目指し、はかるくん事業の活性化、すなわち8,000台の保有機材の有効利用と貸出数の増加を目的として、2011年度まで、例年「はかるくんコンテスト」を開催してきた。放射線教育活動におけるこの装置の利用方法や測定結果の考察など、だれでも、どんな題材でも、はかるくんを用いた成果を発表できる場の提供である。たとえば2011年度には、児童生徒、教諭や大学の教授等、幅広い層から4,305件の応募があり、そのうち15作品が厳正な審査に基づき賞を受け、その成果はホームページ上で公開されている。このコンテストの開催は児童生徒のみならず、現場の先生方にも自然放射線に慣れ親しむ機会をつくるモチベーションの向上に大いに役立ったといえる。2014年度に入り、一部を除き国が保有するほとんどののはかるくんは希望する都道府県に分配され、この事業の理念と実施そのものが各都道府県の判断にゆだねられた形となっている。

## (2) 高校生対象の放射線に関する課題研究支援事業

この支援事業も、広い意味での科学技術教育やエネルギー教育の一環として、文部科学省が主催してきた放射線等に対する理解の促進を目的とした活動のひとつである。課題研究活動を成功させるためには、高校生等の思考力、判断力、表現力を育成するための適切な環境と情報を提供する支援も重要で、文部科学省はこれまで7年間(2006年度～2012年度)にわたり、関連の支援事業を用意し、関係者をサポートしてきた。今、まさに活動が軌道に乗り、全体の枠組みが定着してきた矢先、2013年4月の省庁再編の動きを受け、本活動の経済的支援が打ち切られることが正式に決まった背景をもつ事業である。7年間で延べ171校、2,237人の参加があった。年間の活動の概要は、およそ以下のとおりである。

「文部科学省によって提示される大きな活動テーマの中から、高校生たちが自主的に研究課題を設定し、学術・研究機関、業界団体、専門家、事務局等のサポートを受けながら、調査・研究活動を展開。数か月の短い期間で得られた研究成果を壁新聞やレポートとして取りまとめる。全国の参加校から提出された研究成果は、厳正な審査を経て優秀な作品としていくつかは絞られ、こ

で選抜された優秀校が年末頃に東京に集って成果発表会を開催する。この場で、高校生同士による忌憚のない意見の交換、知見の交換、交流を深める」が大筋の課題研究活動の流れである。

活動のモチベーションや成果の質を上げるための工夫も毎年なされてきた。研究活動の予算の中で、高校生が施設の見学会やヒアリング、専門家による講演会を自主的に企画、実施できるのはもちろんのこと、たとえば、報告書作成や口頭発表をより効果的にするためのプレゼンテーションテクニックに関する講演会、話術を学ぶための落語による専門知識の講演会、国際化の流れを感じるための英語による専門知識の講演会、放射線等を専門とする大学院生との交流会の開催など、事務局企画による活動のサポートも大きな役割を果たした。高校生の活動を教育の現場で、後方から支援する各校の先生方も、この種の活動を安定的に継続するための重要な役割を担っている。先生方からの要望を直接にヒアリングするための会合、先生方に対する専門性の高い講演会、活動の成功例、失敗例などに関する先生同士の情報交換会なども、高校生の研究活動と並行して企画されてきた。

高校生による自主的で枠組みにとらわれない、研究的な側面をもつこの種の活動の教育効果はきわめて大きい。高いレベルでの「教育」を継続するには、現場を任された先生方の存在と意識、役割も重要となる。知識と経験、スキルをもつ現場の先生方のモチベーションこそが、質の高い教育の基盤になっていることも忘れてはならない。これらの意見は前述に代表されるわが国の経験を具体的に紹介することで、参集したメンバーらに強く共感いただいた部分である。最後に2013年度より、産学連携の枠組みで同様の理念をもつ全く新たな事業が開始されたことを紹介させていただきたい<sup>2)</sup>。

## — 参考文献 —

- 1) 飯本武志, 藤本 登, 中村尚司: 「高校生を対象とした放射線等に関する課題研究活動」支援事業の意義と今後の課題: RADIOISOTOPES: 63(2), 93-102(2014).
- 2) 飯本武志, 主原 愛, 伊藤通子, 石黒陽子, 大島義人: 産学連携での次世代層リスク教育に関する新たな活動と挑戦～NPO 法人 REHSE「高校生による環境安全とリスクに関する自主研究活動の支援事業」の紹介～: FBNews No.452 (2014).

## 著者紹介



飯本武志 (いひもと・たけし)

東京大学

(専門分野)放射線防護, 放射線計測/線量評価, 放射線管理。安全管理分野の専門家育成のみならず, 環境・安全・リスクをキーワードに, 学校教員育成, 児童生徒への教育にも力を入れている。

## 報 告 初等・中等教育における放射線・原子力教育の状況(その2)

### 科学的に探究する放射線教育及び研究機関等との連携

郡山第六中学校 佐々木 清

甚大な被害をもたらしている東京電力福島第一原子力発電所事故。当初は放射線の知識や授業プログラムのない状況の中で、2011年度から「放射線教育元年」と位置づけ、試行錯誤しながら原発事故による災害の現状を踏まえた独自の放射線教育を進めてきた。さらに、毎年放射線授業の研究公開を行い、実践研究論文にまとめ発表してきた。

昨年(2013年)は、放射線教育3年目にあたり、「科学的に探究する力を育む放射線教育」という研究テーマを掲げ、従来行ってきた「放射線の知識を学ぶ」授業から「放射線で科学を学ぶ」授業への転換を図るとともに、研究機関等との連携を図りながら、放射線教育を深めてきた。それらの実践内容をここに報告させていただく。

#### 1. 科学的に探究する放射線教育をめざして

##### (1) 「科学的に探究する力」とは

中学校学習指導要領解説理科編の教科目標に基づき、「科学的に探究する力」を次のように定義した。

放射線に関する現象の中に問題を見つけ出し、課題意識を持って、放射線に関する観察、実験、計測などを主体的に行い、得られた結果を分析して解釈するなど、科学的に探究しようとする能力と態度

この「科学的に探究する力」を育む放射線教育が科学的リテラシーの育成にもつながり、原発事故災害による現状を取り入れた放射線授業を毎年行ってきた。

##### (2) 「めざす福島の生徒像」とは

福島第一原子力発電所の廃炉作業が難航し、また除染活動が遅れている状況の中、放射線の知識だけの伝達では、震災に対して「自ら考え、判断し、行動する福島県民」を育てることができない。そこで、自ら空間線量率を測定し、他の情報と照らし合わせながら科学的に探究して判断し、共に手を取り合って行動できるように、「めざす福島の生徒像」を以下のように設定した。

自ら放射線量を測定し、  
自らデータを分析して判断し、  
互いに助け合って行動する生徒

##### (3) 「生徒が主役の放射線授業」をめざして

これまで各地に赴いて研修を積み重ね、目の前の子どもたちが目を輝かす教材を収集し、改良しながら、中学校3年間を見通した理科放射線教育計画を作成し、放射線に関する授業プランを練り上げてきた。

また授業を展開する際に大切にしてきたことは、

*Radiation Education to Explore Scientifically and Cooperation with Relevant Research Institutes* : Kiyoshi SASAKI

(2014年11月4日 受理)

##### ①「見取る」-子どもたちの考えを引き出す

##### ②「褒める」-子どもの良さを見つけ出す

##### ③「思いやる」-子どもの心をケアする

の3つである。これが「生徒が主役の授業」の礎であり、まさしく教育の原点となった。その結果、教師にとっても子どもたちにとっても自己達成感を持ちながら、互いに優しさ・温かさを共有し合い、信頼関係を築き上げるリスクコミュニケーションの土台になった。この3つを意識した授業の積み重ねによって、今後震災が発生した際に生徒たちは、目の前の困難に対して「自ら考え、判断し、行動する福島県民」として、共に手を携えながら、前向きに乗り越えることができると確信している。

#### 2. 科学的に探究する力を育成する放射線授業の実践

##### (1) 放射線を探究するコース別遮へい実験

**【実践例1】** 金属板や水、土壌による放射線の遮へい実験を行い、結果を分析し、解釈させ、科学的に探究させた授業の実践

放射線を科学的に探究する第一歩は放射線の測定である。福島第一原子力発電所の汚染水を貯蔵する地上タンクが鉄鋼製で側面壁の厚さが12mmしかないことから、生徒たちは「地上タンクから放出される放射線は高いのか？安全なのか？」と驚きを隠せない様子だった。

福島第一原子力発電所から流出している汚染水への対策および地上タンクの材質と厚さの問いを切り口にして、他の金属板では遮へい効果はどうか(Aコース)。水は遮へい効果が高いか(Bコース)。校庭に埋めてある放射線量の高い表土から放出される線量は安全なのか(Cコース)という課題が出された。そこで、金属板や水、土壌による放射線の遮へい実験を準備し、3つのコースから最も興味のある実験を選択させ、実験結果を分析・解

積しながら、どの材質が最も遮へい効果があるか、科学的に探究していく授業を行った。また考察する際、科学的な根拠に基づいた思考の練り上げを行わせ、ホワイトボードにまとめて発表させ、実験結果を共有した。

## (2) 養護教諭との Team Teaching 授業の実施

**【実践例 2】** 養護教諭との Team Teaching 授業を展開して、放射線による人体への影響と防護について理解を深めた授業

生徒たちが放射線授業で最も学びたい内容は放射線による人体への影響と防護法である。そこで、生徒の健康管理の啓発活動を行い、専門的な研修を受けている養護教諭と Team Teaching 授業を行った。まず、理科教諭から放射線による細胞の DNA 損傷、修復・細胞死および変異細胞やがん細胞の発生過程について説明した。次に養護教諭から、変異細胞やがん細胞を除去するためには免疫力を高めることが最も大切であることを、掲示物を駆使し説明して頂いたので、生徒たちは真剣になって聞いてワークシートに記入していた。また、放射線から自分の体を防護する方法として「バランスの良い食事・十分な睡眠と休養・適度な運動」が重要であることがわかり、生徒自身の日常生活を見直すきっかけとなった。

## 3. 研究機関等と連携した放射線授業の実践

### (1) 生徒の質問に応える放射線シンポジウムの開催

**【実践例 3】** 研究機関の支援のもと、生徒の質問に応える放射線シンポジウムを開催して、放射線を探究的に学ぼうとする態度を育てた実践

総合的な学習の時間を活用して生徒と専門家による対話式の全校生「放射線シンポジウム」を開催した。2012年度は大学教授を招へいし、放射線についての講義を全校生で視聴した。しかし、内容が中学生には難しく、また日頃放射線で不安に思っていることも質問できず、十分な成果が上げられなかった。そこで2013年度から、生徒の質問に対して専門家が応えるような対話式を進める全校生「放射線シンポジウム」を企画し、日本原子力研究開発機構(JAEA)福島環境安全センターの絶大な協力のもとで実現した。事前に放射線に関わる質問を各学年毎に取りまとめてJAEAに送った。当日は、汚染水問題や放射能による人体の影響など、質問が多岐にわたるため、5名の専門家が出校し、Power Pointを駆使して中学生にもわかるようにていねいに説明して頂いた。

### (2) 「放射線教育推進委員会」の発足と情報の共有

**【実践例 4】** 放射線教育推進委員会を発足させ、ともに手を取り合いながら、探究的な放射線授業を開発してきた実践

中学校教育研究会郡山支部理科部会では、2012年度に放射線教育推進委員会を発足させ、毎年放射線推進委員の先生が積極的に放射線授業の研究公開を行っている。また年度毎の放射線授業実践をまとめ、学習指導案やワークシート、Power Point教材などを集約したCDを作成し、会員全員に配布している。このように会員同士が共に手を取り合うことで、放射線授業の具体的な情報が共有できるようになり、実験を取り入れた探究的な放射線授業が多く展開されるようになってきた。

### (3) 「放射線教育職員セミナー」共催と出前授業

**【実践例 5】** 文部科学省委託事業「放射線教育職員セミナー」との共催による放射線授業づくり教員研修会および小・中学校放射線出前授業の実施

2013年度文部科学省委託事業である「正しく理解する放射線」教育職員セミナーと共催で「理科の学力向上のための放射線教育」教員研修会を実施した。まず、いわき明星大学教授 東之弘氏から「理科の学力向上につなげるエネルギー・放射線教育のあり方」という演題で、福島第一原子力発電所事故後におけるエネルギー復興プランについて、特に詳しく講義をいただいた。次に「理科の学力につなげ、科学的に探究する放射線教育のあり方」というテーマで、福島県が抱える課題を実際に取り上げた放射線授業について実践発表した。最後は、放射線測定器をどのように授業に組み入れていけばよいかという視点で、授業構想を練り上げた。なお、南相馬市立太田小学校からの研修会の依頼があり、放射線の基礎内容を講義し、簡易霧箱による放射線の飛跡観察を行った。今年2014年度は、文部科学省委託事業である「科学的な理解をすすめる放射線教育セミナー」が全国規模で展開され、福島県における放射線教育の現状と授業実践についての講演および郡山市内の小学校・中学校で放射線教育の出前授業を実施してきた。

## — 参考文献 —

- 1) 佐々木清, 生徒が主役の放射線教育2年間の歩み, 放射線教育, Vol.16, No.1, 21-30(2013).
- 2) 佐々木清, 中学校理科放射線教育の歩み～科学的に探究する力を育む～, JAPI ニュース, 2014年4月号.

## 著者紹介



佐々木 清 (ささき・きよし)  
福島県郡山市立郡山第六中学校  
理科教諭・自然科学部顧問  
(実践分野)放射線教育, 環境教育, 理科カリキュラム開発, 授業評価。

## 報告 初等・中等教育における放射線・原子力教育の状況(その3)

### 近畿大学原子炉を用いた教員向け原子炉実験研修会

近畿大学 若林 源一郎

近畿大学原子炉は熱出力1ワットの教育訓練用原子炉であり、原子力を専門とする学生だけでなく、一般市民や学校教員が運転を体験できる貴重な施設として活用されている。近畿大学では、昭和62年から教員向けの原子炉実験研修会を毎年開催しており、これまでに数多くの教員の皆様にご参加いただけてきた。最近では、中学理科に放射線に関する項目が導入されたことを受け、原子炉運転体験とともに放射線教育にも力を入れている。本稿では、近畿大学原子炉を用いた原子炉実験研修会について概要を紹介する。

#### 1. 近畿大学原子炉を用いた研修会の概要

近畿大学原子炉は、教育訓練用に設計された熱出力1Wの極低出力炉であり、学生が自ら操作・運転できる原子炉として国内外の多くの大学の学生実習に活用されてきた。教員向けの「原子炉実験研修会」は、昭和62年(1987年)から開始されたもので、日本原子力産業協会及び関西原子力懇談会との共催により現在まで続けられてきた。平成21年(2009年)からは近畿大学が開講する教員免許更新講習の一部としても実施されている。最近では定員20名、1泊2日の研修会を年に8回程度実施している。

#### 2. 原子炉実験研修会の内容

研修会の目的は、「原子炉を実際に見て、触れて、運転し、さらに放射線に関する基礎的な実験を体験することによって、原子炉・放射線について正しい知識と判断力を習得し、実際の教育現場で役立てること」であり、特に最近では中学理科に放射線に関する項目が導入されたことを受けて、放射線教育のプログラムの充実化を図っている。研修会スケジュールの一例を第1表に示す。

一日目は、原子炉見学と講義によって原子炉の基礎知識を学んだ後、研究所スタッフの指導の下で参加者自らが制御棒を操作し、原子炉の起動から臨界、出力変更、停止に至る運転を体験する。中性子ラジオグラフィ実習

では、参加者が様々な被写体を選び、中性子線とX線で撮影した透視画像を比較することにより、放射線と物質の相互作用や応用技術について学ぶ。撮影した画像は持ち帰って教材として活用していただく。二日目は、放射線教育に重点を置いたプログラムとなっており、放射性壊変、半減期等の基礎知識、放射線利用や健康影響についての講義のほか、実習として $\gamma$ 線の遮蔽実験や距離の逆二乗則に関する実験、簡易測定器で大学構内の環境放射線を測定するフィールドワークを行っている。さらに最近の取り組みとして、放射線教育を精力的に行っている理科教員をお招きして現場での実践例を紹介していたき、参加者と意見交換を行う時間を設けている。

#### 3. 今後の取り組みについて

試行錯誤を繰り返しながら続けてきた研修会であるが、終了後のアンケートをみると、自らの手で原子炉を運転し、放射線を使う実験を行った実体験が、教育を行う上での自信につながったとのご意見を多くいただいている。平成25年12月に試験研究炉の新規制基準が施行されたことにより、残念ながら適合審査に合格するまでの間原子炉の運転を停止せざるを得なくなった。そのため、平成26年度は放射線教育のみの内容で研修会を実施した。これからも原子炉の運転再開に向けて努力するとともに、内容を改善しながら原子炉実験研修会を続け、原子力・放射線教育に貢献していきたい。

第1表 研修会スケジュールの例

|    | 第1日目                              | 第2日目  |
|----|-----------------------------------|---|
| 午前 | 保安教育<br>【見学】近畿大学原子炉<br>【講義】原子炉の基礎 | 【講義】放射線の基礎<br>【実習】放射線の性質<br>【講義】放射線の利用            |
| 午後 | 【実習】原子炉の運転<br>【実習】中性子ラジオグラフィ      | 【実習】環境中の放射線測定<br>【講義】放射線の健康影響<br>放射線教育の実践例紹介・意見交換 |

#### 著者紹介



若林源一郎 (わかばやし・げんいちろう)  
近畿大学  
(専門分野/関心分野)医療分野における放射線計測、放射線教育、研究炉の運転管理

Reactor Experiment Workshop for School Teachers at the Kinki University Reactor : Genichiro WAKABAYASHI.

(2014年11月4日 受理)

## 報告

## 放射線防護における安全とは

放射線医学総合研究所 放射線防護研究センター 神田 玲子

日本原子力学会では、8月30日にコラッセ福島において、女性のためのフォーラム「低線量放射線の生体への影響と食の重要性」を開催した。周辺住民の方々の中には、これまでに多くの講演会やフォーラムに参加され、放射線に関する豊富な知識を持たれている方も多い。このフォーラムでは、特に、子供の母親である女性の視点で疑問や不安にお答えするということを踏まえ、3名の女性の登壇者に講演いただいた。本稿では、このうち、放射線防護における安全とリスクについて、演者であった神田玲子氏より講演内容を紹介いただいた。

(藤田保健衛生大学・横山須美 記)

## 1. 放射線防護における安全の概念

1895年にレントゲンがX線を発見し、放射線は医療の領域ですぐに利用されるようになったが、それと同時に、医療従事者に放射線による障害が観察されている。そこで、医療従事者を放射線の害から守るための方策がとられるようになり、英国ではX線取扱者の防護のための勧告が出された。1928年には「国際X線ラジウム防護委員会」が創設されたが、のちに医学分野以外での使用も考慮するための組織として国際放射線防護委員会(ICRP)に発展する。このような経緯で放射線防護は考えられ、日本に輸入された。また安全規制における「安全」の概念も海外からの輸入品である。国際標準化機構(ISO)及び国際電気標準会議(IEC)が示した国際的な安全側面一規格への導入指針、すなわちISO/IEC Guide 51(1999)<sup>1)</sup>によると、安全とは「受容不可能なリスクがないこと(freedom from unacceptable risk)」である。

安全の尺度が「人が受容可能かどうか」であるとする、同じリスクを受けていながら、ある人にとっては受容できる(=安全)、ある人は受容できない(=安全ではない)、という状況もありうる。そこで多くの方が受容できる(だろう)リスクレベルになっている状態を専門家は「安全」と呼び、その状態にすることを国や地方自治体は「安全の確保」と呼んで、目指している。

## 2. リスクの受容を左右する要素

少しでもリスクがある場合、それが受け入れられるかどうかは、単にリスクの大きさで決まるものではない。社会心理学研究は、リスクの感じ方は「自分で制御管理できるか」「よく知っているリスクか」等の要因で左右されることを明らかにした<sup>2)</sup>。放射線の専門家は、今原発事故由来で受けている放射線被ばくは、放射線検査で受

けているものよりも少ない(ので安全)という説明をしがちである。しかしリスクの受容という点では、片方は自分に何も利益がないので受け入れにくい、片方は利益があるので受け入れやすい。そのため、「線量が小さい、イコール安全」とは認識されないことも多い。同様に、好きで吸っているタバコのリスクは受け入れられても、原発からのリスクは受け入れられないというのも、社会心理学的には当然の認識なのである。

## 3. 線量限度が「受容可能」である根拠

ICRPは、被ばく量が計画的に管理できる状況の被ばくには線量限度を適用すること、その値として公衆被ばくは年間1mSv、職業被ばくは平均で年間20mSvを勧告している。前者には被ばくした個人に直接の利益がないのに対し、後者には収入を得るなど個人に利益があるので、線量限度に違いがあることは、国際的安全規格の考え方や社会心理学の知見とよく合っている。

では年間1mSvが受け入れ可能として、公衆の被ばくの線量限度に定められた根拠は何だったのか。その一つは自然放射線との比較である。国連科学委員会2008年報告によると、自然放射線による年間被ばく線量は世界平均で2.4mSvであるが、地域差が大きく、土壌にラジウムやトリウム、ウランを含む地域では大地からの被ばく量が数倍高くなる。しかし今までのところ、こうした高自然放射線地域住民の疫学調査ではがんリスクの上昇は認められていない。また米国においては、生涯死亡確率が $4 \times 10^{-3}$ を超える化学物質を規制対象としているが、年間1mSvはほぼこのリスクに相当している。こうした理由から公衆被ばくの線量限度として、年間1mSvは妥当と判断された(ICRP1990年勧告)。

一方、職業被ばくの線量限度(年平均20mSv)の根拠は、「就労期間中(18歳から65歳)、年間20mSvを受け続けても、75歳になるまでのどの年の年間がん死亡率も

Radiation Protection and Safety : Reiko KANDA.

(2014年12月8日 受理)

10<sup>-3</sup>を超えない」という点にある。ICRPは、10<sup>-3</sup>の年死亡確率レベルを「もしリスクにさらされている個人がその状況について知っており、結果としてリスクに匹敵する恩恵を受けていると判断し、リスクを低減するための合理的なすべての手段がすでに講じられていることを理解している場合には、まったく容認できないとは言い切れない」と判断している(ICRP1990年勧告)。

#### 4. 受け入れ可能なレベルは欧米と日本では同じか

ICRPが勧告した放射線の制限値の多くを、日本の法令では取り入れている。しかし欧米人の受容可能なリスクレベルと日本人のレベルが同じという保証はない。「制御可能性」「便益の有無」などリスクに及ぼす要素は比較的万国共通であるが、放射線を「制御可能」あるいは「便利」だと思っているのかどうかは国民性によって違いがある。

日本人は放射線についての知識が不足していると言われている。確かに過去30年間、義務教育から放射線は消えており、放射線の性質や放射線の被ばく量に関する誤解、あるいは影響に関する漠然とした恐怖心を持っている人も少なくない<sup>3)</sup>。しかしアジアの高校生を対象とした調査の結果によると、日本の高校生の放射線に関する知識レベルは平均レベルである<sup>4)</sup>。

また日本人は放射線を危険視していると言われている。放射線医学総合研究所では、1983年から2007年にかけて、酒やたばこ、自動車といったリスク30項目について、被験者に自分が危ないと感じる順に並べてもらうアンケート調査を実施した。この結果からは、確かに過去25年にわたり、日本人が原子力を30項目中最も危険なものとして認識し続けてきたことがわかる<sup>5)</sup>。しかし海外のリスク認知調査でも、特に成人女性が原子力を危険視しているという報告が多数存在している。

では、日本人の放射線観は海外と同じと言ってよいのだろうか。先ほど紹介したアジアの高校生を対象とした調査の結果<sup>4)</sup>によると、どの国でも8~9割の高校生が放射線を危険であると認識している。その一方で、多くの国の高校生が「役に立つ」「管理できる」「身近である」と感じているのに対し、日本の高校生では、これらの項目をYESと答えた率が格段に低い。放射線が管理できると思うと答えた高校生は実に2割である。この高校生のアンケート結果を日本人全体の認知傾向であるとみなすと、事故前から日本人が受容可能な放射線のリスクレベルは海外よりも低かったのかもしれない。

#### 5. 日本特有の放射線安全規制

わが国の放射線規制において、ICRP勧告とは異なる独自のルールが適用されているものがある。その一つが職業人女性の線量限度である。職業人の線量限度は年間20mSvであるが、妊娠可能な女性に関しては3か月ご

とに5mSvを超えないようにという追加ルールを適用している。こうすることにより、妊娠に気づかない時期の胎児に対して、一般公衆の構成員とほぼ同等の防護がなされるようにするためである。この追加ルールの理由は、「胎児への5mSv以上の被ばく=危険」だからだと誤解されがちであるが、その主な理由は、妊婦は職業人でも胎児は公衆なので、公衆被ばくの線量限度を適用すべきだという考え方に依る。リスクの受容に影響を及ぼすものの一つに「子どもへの影響」があることを考えると、胎児を守る追加ルールは我が国の放射線観に合っている。

また食品中の放射性物質の規制値は、国による違いが大きい。福島原発事故直後、厚生労働省は暫定規制値を設定し、食品の出荷停止や摂取制限といった措置がとれるようにした。この暫定規制値は国際的に比較しても十分低いものであったが、かなり安全側に線量を見積もると年間5mSvに相当するとあって、多くの国民が規制値の引き下げを希望するパブリックコメントを提出した。こうした声の後押しされ、年間1mSvをベースとして放射性セシウムの新基準値1kgあたり100ベクレルが設定され、平成24年4月から施行された(乳児用食品には1kgあたり50ベクレルが適用)。この値は輸出基準となっているコーデックス委員会やEUの規制値に比べ、桁違いに小さい。

この基準値の引き下げには、放射線防護の専門家から反対の声もあった。これは厚生労働省の調査により、食品からのセシウムによる被ばく量が十分下がっていることが分かっていたためである。むしろ福島の漁業の再開が遅れるなど影響が懸念された。事実、新基準値による被ばく量の低減の効果は顕著ではなかったが、食品の放射性汚染を心配する声はかなり減少した。

国民の多くが受け入れ可能と判断したレベルに規制値が引き下げられたという意味で、食品中の新基準値設定はエポックメイキングの事例である。今後、安全規制において一層ステーキホルダーの関与が重要となることから、基準値の科学的根拠に関する情報を広く共有する文化を形成する必要がある。

#### 6. 被ばく線量や総合的健康リスクの低減

放射線防護における安全は、集団での安全であって、個人全員に対し「あなたはがんになりません」と保証するものではない。よって国や専門家が今の状況を安全と称しても、できることなら自分自身で被ばく量を少なくしたいと考える人は多い。しかし既に放射線がある程度コントロールされている現状においては、誤った被ばく低減策により、かえって線量を上げたり、総合的な健康リスクを増加させることもある。

例えば、福島原発事故直後、窓を閉め、エアコンを止め、家屋の換気を行わないようにした家庭や学校が多

かった。これは原子炉から排出され、屋外にただよっている放射性物質を屋内に入れたいための方策としては正しい。しかし現時点では、室内の換気を行わないと室内のラドンによる被ばく線量を高め、かえってがんリスクを上昇させることになる。

また小さなリスクを回避することがより大きなリスクやコストをもたらす、あるいは便益を損なうこともある。生物学的な面からだけ言えば、放射線を受けないにこしたことはないので、X線検査を受けない、飛行機に乗るのもやめる、ということも可能であるが、その代わり疾患の早期発見ができなかったり、生活が不便になったりする。

このように、適切な線量の低減方法は、被ばくの状況によって変わることがある。よって今あるリスクを受け入れられない(=安全な状況とは思えない)ので、線量を低減したいという場合は、放射線防護の専門家に相談することをお勧めする。(放射線医学総合研究所では、福島原発事故直後から放射線被ばくの健康相談窓口(電話相談)を開設している)

放射線事故が起こった場合、不安を感じる事が普通であり、特に親が子供の健康を心配することは当然のことである。放射線の被ばくを減らそうという前向きな行為は、不安低減に効果があるが、ある程度の放射線防護措置が取られている状況では、個人が行う線量低減策の一つ一つの効果はさほど大きくない。しかし子どもに

とってはわずかずつだが着実な健康の貯金となっている。よって総合的に健康を維持することを考えながら、無理せず、続けることが重要である。

#### — 参考文献 —

- 1) ISO/IEC Guide 51:1999, Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards second version.  
なお Guide 51 は 2014 年に改訂され、安全の定義は「耐えられないリスクがないこと (freedom from risk which is not tolerable)」と変更された。
- 2) Fischhoff, B., S. Lichtenstein, P. Slovic, S. L. Derby., R. L. Keeney: Acceptable Risk. New York: Cambridge University Press, (1981).
- 3) 辻さつき, 神田玲子: 日本人の原子力・放射線観に関する調査研究, 日本リスク研究学会誌, 18, 33-45, (2008).
- 4) 日本原子力産業会議: FNCA 各国高校生の放射線についての知識, 関心等に関する合同アンケート調査」報告書, 平成 15 年 3 月.
- 5) Kanda, R., Tsuji, S., Yonehara, H: Perceived risk of nuclear power and other risks during the last 25 years in Japan. Health Physics, 102(4), 384-390 (2012).

#### 著者紹介



神田玲子 (かんだ・れいこ)  
放射線医学総合研究所  
(専門分野/分野)放射線影響学

## 新刊紹介

### 原発とどう向き合うのか 科学者たちの対話 2011～'14

澤田哲生編, 235p.(2014.8), 新潮社.  
(定価 760 円(税別)), ISBN978-4106105838

福島の事故から 4 年近くたった今、原発をめぐるさまざまな問題が、宙ぶらりんのままに放置されている。「脱・反」の声に振り回されるエネルギー政策、過剰なまでに厳しい「1 ミリシーベルト」基準、「ゼロリスク」を求めるばかりの安全規制、科学より感情論に走るメディア、そして見通せない復興と住民の帰還。いったい何が問題なのか。このままでいいのか――。

この本は、そんな問題意識から生まれた。『週刊新潮』の座談会シリーズ「御用学者と呼ばれて」に掲載された内容を採録したこの本では、澤田哲生氏を司会に科学者たちが意見を交わす。科学的論拠に基づいた議論が楽観論と受け取られ、そのような言葉を発信した者には「原子力ムラ」というレッテルが貼られる。

その一例として、本書は民主党政権下で定められた「追加被ばく線量は年間 1 ミリシーベルト」という基準を取り上げ

る。フランスのように年間自然被ばく量が 5 ミリシーベルトで生活している国もある。なのに年間 1 ミリシーベルトを求めるこの基準は、明らかに過剰で厳しすぎるものだ。それをもとに施策が実施された結果、福島県の人々に対してはかえって健康を損ねたり、避難生活のストレスを高めたりしている面があると本書は指摘する。

ひとつのリスクを避けようとして、そのあげく、それ以上のリスクを招いてしまう。福島事故後にはリスクマネジメントにおいて、さまざまな失敗があった。とりわけ 1 ミリシーベルトを求めたこの失敗は、住民の人たちの帰還に今も大きな影を落とす。

本書では全編を通して、傾聴すべき議論が展開されている。

(編集委員会・佐田 務)




 報告

## 低線量放射線の生体への影響と食の重要性

公益財団法人 ルイ・パストゥール医学研究センター 宇野 賀津子

2011年3月11日の東日本大震災に端を発した福島第一原発事故の影響は、3年以上を経過した今なお12万人以上の方が県内外に避難を余儀なくされている。事故後3年半を経て、事故直後に騒がれた低線量放射線の子供達への健康影響については、懸念されたような大きな影響はほとんどなかったとほっとする人がいる一方、長期的影響についてまだまだ不安を持っている人が多数いる事も事実である。そして、今なお福島で生きようとする方々の生活に放射線は大きくのしかかっている。既に昨年、本学会誌に「低線量放射線を越えて」に込めたる想いを寄稿したので、一部の重複はご容赦願うとして、日本原子力学会シンポジウム 女性のためのフォーラム「低線量放射線の生体への影響と食の重要性」でお話した内容および、この間思いがけず免疫を専門とする人間が、放射線・福島の問題に深く関わり考えたことについて、特に他の研究者があまり触れていない事を中心に、私自身の専門分野との関連から紹介する。

### 1. 科学的に考えることの重要性

(1) がんリスクに一番影響する因子は？：低線量放射線より、恐怖で免疫力が低下する方が、がんリスクが上昇？

3.11以降、思いがけず低線量放射線の影響についてお話しだして、今に至っている。私自身は、事故後、低線量放射線の影響として多くの方が問題としているのががんリスクとなれば、これまで自分が研究してきた免疫機能を上げるライフスタイルの紹介も役立つと考え、それまでは専らがん患者さん等を対象にお話してきた内容を、NPO法人あいんしゅたいんのホームページから発信しました。

私が発言してきた内容は、これまで延べ数千人のがん患者や健康な人、肝炎、糖尿病など種々の疾患患者の免疫機能を測定してきた研究に基づいている。私は免疫機能をいくつかのパラメーターで測定してきた。そのなかでも試験管のなかでウイルス感染を疑似的に起こして、産生されるインターフェロン(IFN)の量を測るIFN産生能については膨大なデータが蓄積されている<sup>1)</sup>。また毎日のように体内に出現するがん細胞を、1個ずつ摘み取っていくのに働くナチュラルキラー細胞の活性の測定や、がん患者のがん部位で免疫応答が起こっているか否かを推測できる測定法を開発して測定もした。その結果、T細胞が活性化されている方が、予後が良い事、がんの大きさ、ステージ(病期)はもちろん、患者の免疫機能に影響するが、それ以上に重要なのは患者の

パフォーマンス・ステータス(Performance Status: PS, 生活の質)であった<sup>2)</sup>。元気で活動しているか(PS0)、寝たり起きたりか(PS2)、寝たきりか(PS4)といった患者の全身状態である。

このようなデータや、その後、詳細に調べた放射線と発がんのデータからは、今の福島の放射線量で(避難地域の特に線量の高いところは別として、2011年の時点でも)がんリスクが大きく上昇するとは私には考えられなかった。むしろ過剰に放射線の影響を心配して免疫機能が低下することや、避難に伴うストレスの方がもっとがんリスクをあげるのではないかと思われた。また事故1ヶ月後には食品の放射能汚染を心配するあまり、首都圏で給食の野菜を残す率が急上昇したとも聞いた。野菜不足もがんリスクをあげるよと、これまでの研究を背景に、がんと免疫機能の関係や、がんを予防する食事やライフスタイルの紹介をお話しだして今に至っている。

### (2) 放射線の影響と活性酸素

低線量放射線の影響は直接、核の中の遺伝子に放射線があたって遺伝子が傷つくよりも、体内の水に放射線があたって、スーパーオキシドやヒドロキシラジカル、いわゆる活性酸素が間接的に遺伝子を傷つける方が多いと理解したときから、自身の研究の延長線上にあり、自分にできる役割があると思った。近年がんを含め、成人病といわれている種々の疾患は、活性酸素の影響、即ち酸化ストレスの影響が大きいことが示されている。元気に長寿抗加齢医学の分野では、身体の「さび」の原因として酸化ストレスが一番の悪者とされていて、動脈硬化、心筋梗塞、アルツハイマー、がん、糖尿病、胃潰瘍、白内障、等々、老化に伴い増えてくる多くの病気に活性酸素

*Low-dose Radiation Effects to Humans and the Importance of Eating Wisely* : Kazuko UNO.

(2014年11月26日 受理)



が関わっていることが明らかにされている。

事故以前から老化と炎症について興味を持っていた私は、とりわけ弱い慢性的な炎症の亢進が色々な疾患、いわゆる成人病の多くと関係していると考えていた<sup>3)</sup>。実際、老化に伴って、IL-6という慢性炎症の時に特に産生される炎症性サイトカインの一つが上昇傾向にあること、一方、このIL-6は、被ばく線量依存的に上昇傾向にあることも明らかにされている<sup>4)</sup>。

また近年、放射線の影響を受ける疾患として、がん以外の疾患影響についてもデータがそろいつつある。特に循環器疾患については、原爆被爆者が高齢化するにつれてデータも蓄積され、放射線の影響を受けてリスクが上昇する事が明らかにされている。広島・長崎の被爆者の寿命調査によると、追跡期間が長くなるにつれその影響がより明らかになっていて、1950年から1965年の調査では1Gy以下では線量依存性は認められなかったが、1966年から2003年の調査では線量依存性がより低線量でも明らかにされている<sup>5)</sup>。

循環器系疾患の場合、1Gyあたりの過剰相対リスクは、固形がんが0.47と比較して0.11とさほど大きくはないが、1950年から2003年までに亡くなった50,620人の死亡原因を調べてみると、胃がん、大腸がん、乳がんなどの固形がん全体(全固形がん)での死亡が10,929人、対して循環器疾患による死亡は19,054人で、がんの約2倍の方がこの疾患で亡くなっていて、調査期間が長くなるにつれてより低線量でも、過剰の線量依存性が認められている。

また近年、放射線だけでなくタバコや肥満や色々な環境要因も、感染を繰り返す事も活性酸素が発生し、種々の疾患の原因となることが明らかにされている(第1図)。

活性酸素が生体にとって、すべて悪かといえそうではなく、私たちの体に必須のものでもある。実際、この地球上で生きる多くの好気性生物は、生命維持に必要なエネルギーを得るため、ミトコンドリアで酸素を使い、代謝過程において活性酸素を発生させている。発生した活性酸素は細胞に損傷を与えるために、がんのみなら

ず、色々な疾患、いわゆる成人病の元となっていると指摘されている。一方、生体は、その活性酸素を殺菌・解毒にも使っているし、現在、地球上で生きている生物、とりわけ陸上生物はその害を消去するシステムを獲得して、今を生きている。

### (3) 生体のしたたかさへの理解

3.11後に、「DNA(遺伝子)の二重鎖が切れたらもうだめなのです。間違いが蓄積して、がんとなります」という説を、特に物理系の方が言った。これには「そんな簡単にがんは生じない、実際のところたとえDNAの二重鎖が切れても大半は治しているのに」と思った。最近の生物学の成果を理解していない研究者の戯言とも思った。

生体は、たとえ遺伝子の変異が起きたとしても、すぐには命をおびやかすようながんとはならない。最初の砦が、生体のもつ抗酸化物質、グルタチオンや抗酸化酵素である。これらは活性酸素を受け止め、無害化する。次に遺伝子が傷つくとその変異を即判断して修復するシステムが働く。傷が深く修復不能となれば、その細胞を自爆させる、そのチェックに重要な役割を果たすのがp53と言われる遺伝子、代表的がん抑制遺伝子である。さらにそこをくぐり抜けた変異細胞は、免疫系の細胞による排除の対象となる。このように、私自身は多段階のがん防護システムについて紹介した。ただ、多段階の防護システムとして、放射線防護のために特別に獲得されてきたものというよりは、酸素呼吸をし、さらには陸上で生活するようになった生物が、漏れ出る酸素の害から自身を守り、陸上生活していくために獲得してきたシステムというべきだろう。

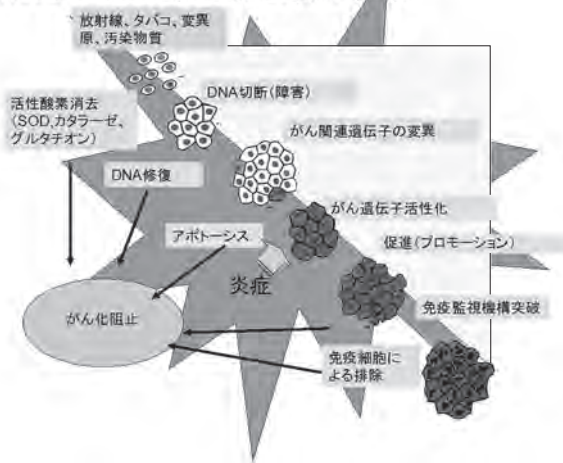
生物屋は、危険なものがくれば消去すればよい、遺伝子が壊れたら直せばよい、治せないとなったらその細胞を捨てればよい、それでもだめならその細胞はやつけるというような多重防護システムを進化の過程で獲得してきたからこそ、生物は今この地球上で生きていると考える(第2図)。何よりも酸素呼吸する生物は、日常的に活性酸素による障害をうけていることを、理解してほしいと思った。ほんのわずかな量の放射線で傷ついて、修復が不可能であれば、人間80年もとても生きていくことは出来ないことも、理解してほしいと思った。また、事故後マスコミに登場した医師の多くが、タバコの方が、がんリスクが高いと言った。私にとっては当たり前のことだが、比較できないものを比較していると物理学者から反発する声が出た。そこで、低線量放射線の影響は、かなりの部分は放射線が水にあたって出来た活性酸素によること、タバコや色々な変異源も活性酸素を出す原因となることを説明した。

地球の歴史から紹介し、生命誕生の最初の段階では地球上では遊離の酸素がなかったこと、その後、光合成生物が出現し、地球上に酸素が増加、酸素呼吸をする生物



第1図 活性酸素と疾患

## がん化のプロセスと多段階の抑制機構



第2図 がん化のプロセスと多段階の抑制機構

の進化してきたことを説明した。酸素呼吸をする生物というのは、常に活性酸素の害を受けるのだから、それを克服するシステムを備えていること、進化のなかでそれを克服するシステムを獲得してきたからこそ、今、地球上で生きているのだと説明し、理解を得た。

放射線教育のなかで、細胞が、遺伝子が傷ついたら終わりではなく、「傷ついて、治して、傷ついて、治して」生きているのが生物であるということを理解しないことには、低線量放射線の問題を克服できないと思った。

### (4) 放射線の影響と防御能

放射線の影響を語るとき、高線量放射線の影響はどの人にも同じように現れるから確定的影響、一方、低線量放射線の影響は、影響の出る人と出ない人があるから、確率的影響と説明されていた。しかしながら、これでは健康教育には繋がらないと思った。実際、同じ線量を浴びてもがんになる人もいれば、ならない人がいるわけで、すべて確率の問題で決定されるわけでないことも事実である。本当のところは、遺伝的背景に加えて、変異源の量と防御力のバランスが重要なので、防御能をあげるライフスタイルを提唱することは大事なことだと思った。「これからの生き方で、20年先、30年先が変わる、変えていかなければならない」と訴えた。

防御能をあげるライフスタイルとは何かと考えたときに、恐怖やストレスは免疫機能を下げる、一方、生き甲斐や笑いは免疫機能をあげることもまた私はこれまでに見てきた。私がこれまでに行った取り組みで、化粧療法やがん細胞を自分の免疫細胞が攻撃しているといったイメージを描くようなイメージ療法で、ナチュラルキラー活性が上昇することを確認していた。この応用として、福島では講演会の導入に専らハンドマッサージを取り入れた。ハンドマッサージにより、手の血流は良くなり指先まで暖くなる。また、予備的ではあるが、ハンドマッサージ前後で唾液アミラーゼ活性を測定すると、マッサージ後では低下していて、ストレスが低下してい

ることも明らかにされた。何よりも会場が和む。過剰に心配するより、放射線の影響について正しく理解して付き合う方法を理解する方が、免疫力も上がるということが、実感として理解いただけたように思う。

3. 11の福島第一原発事故から3年半が経過し、福島のホールボディカウンター検査や、一人分の食事を余分に作りその2日分を検査センターに送って精密に放射線量を測定したコープ福島の陰膳調査の結果をみるかぎり、当初心配した食品の放射能汚染はほとんど心配しなくともよいだろう。近い将来、子どもたちに放射能による健康影響が出るとは、私自身は考えられないと確信している。これまでは、放射線による障害を克服する食生活として紹介していた抗酸化食も、今はがんや成人病予防の健康食として紹介していこうと考えている。

現実的な問題として、今後の福島でむしろ心配すべきは、子どもたちの肥満であり、避難者のストレスや運動不足による肥満傾向である。

## 2. 低線量放射線の影響の科学的説明を超えたもの

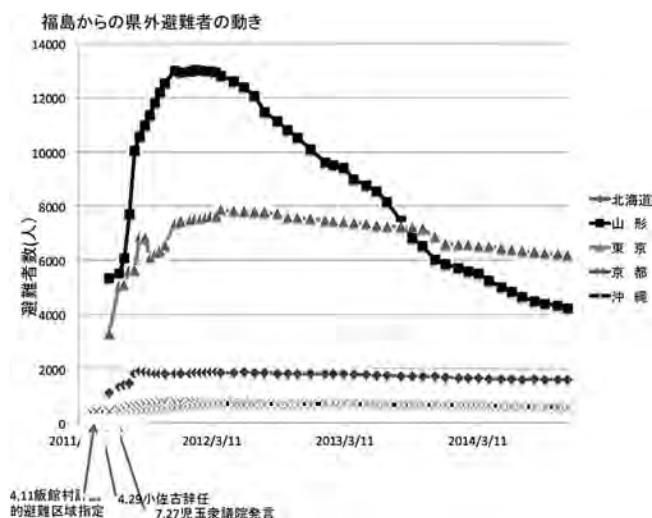
### (1) 放射線の影響とクライシスコミュニケーション

福島の県外避難者の動きをグラフ化して愕然とした。実際、2011年3月の避難者については、データは整理されていないので事故直後の避難については把握できていないが、2011年夏頃から、2012年はじめにかけて、県外への避難者が増加しているのが一目瞭然である(第3図)。特に隣の県の山形への避難者の動きが顕著である。

考えてみると、2011年夏の時点では、福島第一原発の状況も、一定の落ち着きを取り戻していたはずだ。2011年4月29日、小佐古内閣参与の「校庭利用基準の年間20ミリシーベルト」が受け入れられない発言や、7月27日の児玉龍彦東大教授の国会証言などが影響していることは間違いない事実と思うが、私が事故直後ではなく一定時間が経ってから避難した方々に聞いたところでは、飯館村避難が事故1ヶ月後に決まったことで、政府の言うことが信じられなくなり、避難を決めたという。ほんの2週間前までは飯館村は直ちに避難指示ではないといながら、事故から1ヶ月後に避難指示となった混乱で、政府が信じられなくなったという指摘が多かったのだ。このように、多数の県外避難者を生み出した原因は今後詳細な検討がなされるべきだろう。

更に科学者の間での低線量放射線に関する情報の混乱の影響もまた無視することはできない。事故直後に私自身が京都で経験した、同じ放射線という言葉聞いたときの物理と生物・医学系の研究者間の感覚の相違が、事故直後にマスコミで発言する科学者の間にもあった。ことクライシス時には、分野横断的な科学者の徹底した議論を直後に行い、相違点を抽出し問題点を整理してから、外に対して発言する必要があるだろう。

今回、特に物理系研究者と医学生物系研究者の間の



第3図 福島から県外への避難者の推移

「放射線」や「遺伝子が傷つく」ということに対する認識の違いが大きく、混乱をまねいたと考える。物理系研究者の間では「アララ (ALARA) の原則 (As Low As Reasonably Achievable)」が浸透していて、少し余分に被ばくすることに対して、大きな抵抗があった。対して生物・医学者では、治療で使っている放射線量は桁違いに大きいものであること、「遺伝子が傷ついて、治して今、生きている」という感覚があった。

事故後3年半が経ち、避難することによる問題点もより明らかになってきた。何でも少しリスクを過大気味で判断しておいた方がよいと言った考えは、クライシス時には混乱の原因となる。避難が短期間ならともかく長期間に及ぶと、そのマイナス影響も無視できないレベルに達することも表面化してきた。特に、福島原発からの距離ベースの避難指示は、避難弱者と言われる病人や高齢者には悲惨な結果をもたらした<sup>6)</sup>。現在、日本赤十字社では、「原子力災害における赤十字活動のガイドライン」の検討がなされている。原子力災害時には、他の災害とは異なり、現場に止まり立てこもって転出先を決めてから避難するという対応も、犠牲者を最小限にするためには必要だろう。世界レベルで見るとスリーマイル事故やチェルノブイリ事故の教訓をもとに、フィルターユニットの設置など原子力発電所からの流出放射線量を軽減するような対策もなされていたものの、日本では広域にわたる原子力災害を想定した議論がなされていなかったという点こそ反省する必要があるだろう。

### (2) 放射線教育と原爆、原発

原爆を経験した国というのが、むしろ冷静な放射線影響を考え議論するのを、止めてしまっていた可能性も否定できない。時として原爆と原発がほとんど同じような

イメージで語られるのを見るとき、過去40年聞きちつとした放射線教育がなされてこなかったことの弊害を感じた。原爆と原発事故だけで放射線教育を終わらせないように、科学としての放射線をまず学んでほしいと考えている。線量を見極め、科学的に評価するという当たり前のことから出発する必要があるが今後ますます問われていくだろう。

### (3) 科学では解決できないこと

夜逃げ同然で逃げた、とりあえずの避難が、長期化するという問題点、家は特に崩れてもいない、直接的に破壊されたものはない、でも立ち入り禁止区域で、今や家の中をネズミが走り回っている事実が避難者の心に重くのしかかっている。南相馬市では、作っても売れない米なら作らない、補償金もあるし、という声も聞いた。また福島は米は風評被害もあり、売れない、それにつけ込んで外食業者が安く買ったとき、どうせ差額は賠償金で補填されるだろうと言いついていくとも聞いた。単に線量やその科学的影響だけを説明しても納得できない福島の方々が抱えている、諸々の問題を見た気がした。

### — 参考文献 —

- 1) Uno, K., Nakano, K., Maruo, N., et al. (1996) The determination of IFN(- $\alpha$ ) producing capacity in patients with various diseases and healthy persons using whole-blood cultures. *J. IFN Cytokine Res.* 16, 911-918.
- 2) Uno, K., Setoguchi, J., Tanigawa, M., et al. (1998) Differential interleukin 12 responsiveness for interferon gamma production in advanced stages of cancer patients correlates with performance status. *Clin Cancer Res.* 4: 2425-2432.
- 3) 宇野賀津子 (2011) 免疫のアンチエイジング. *総合臨床* 60: 343-350.
- 4) Kusunoki, Y., Hayashi, T. (2008) Long-lasting alterations of the immune system by ionizing radiation exposure: implications for disease development among atomic bomb survivors. *Int J Radiat Biol* 84: 1-14.
- 5) Ozasa, K., Shimizu, Y., Suyama, A., et al. (2012) Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases. *Radiat Res.* 177: 229-243.
- 6) 相川祐里奈著 「避難弱者」, 東洋経済社, 2013.

### 著者紹介



宇野賀津子 (うの・かづこ)

(公財)ルイ・パストゥール医学研究センター

(専門分野/関心分野)IFN・サイトカインシステムの加齢と疾患発症の影響, 癌, 肝炎, リウマチなどの免疫機能の研究, 性差・女性のライフサイクルの研究


 報告

## 放射線と子どもの健康

いちかわクリニック 市川 陽子

東日本大震災に伴う東京電力福島第一原発事故後、放射線被ばくによる健康影響について実にさまざまな情報が錯綜し、福島県民は不安と風評の中で暮らしてきた。不安の正体は、先の見通しが見つからないこと、何を信用すればいいのかわからないことの2つにつきる。その原因の多くは放射線の誤った情報を信じてしまったこと、正しい情報を正しく理解できないことにあると考える。

福島の子どものための健やかな成育のためには、私たち大人が放射線について正しい情報をきちんと理解することが不可欠であり、不安や風評に負けない毅然とした心で自信を持って、この地で子育てする強さが必要である。これまでの保護者の方々とのかかわりの中で、放射線に対する誤解や不安がいまだに消えないことを感じている。その解消にはどのような工夫が大切かをまとめてみた。

## 1. これまでの経過

原発事故直後、政府の「直ちに健康への影響はない」という文言が負の憶測を生んだ。直ちにはないが将来なんらかの影響が出るに違いない、という解釈があたかも真実のように流布されたのである。緊急時対応としての「年間 20mSv を越えない範囲での被ばく」も、ずっとその線量の被ばくを強いられるかのような誤解を生んだ。また、将来にわたる健康影響は少ないという専門家の意見と、いずれ健康被害が出るに違いないのだから福島の子どもたちは全員疎開すべきという識者と称する方々の意見が相対した。さらにメディアやネットによる多くは誤った情報が錯綜し、健康被害は少ないと唱える専門家たちは御用学者と激しく批難され、このために福島県内の多くの医師たちは口をつぐんでしまった印象がある。また、原子力利用の是非と今回の事故による放射線被ばくによる健康影響とが、同じ土俵で論じられることがあり、福島県の一般市民は誰の何を信用すればいいのかかわからない不安の中で暮らしてきた。

## 2. 放射線の誤解

福島市健康推進課と福島市医師会母子保健委員会とで協力して、子育て中の保護者の不安解消を目的に、平成 23 年 10 月から現在まで、福島市内各地で「放射線と子どもの健康」に関する講演会を開催してきた。それらの講演会や日常外来で受けた質問から、放射線に関する誤解がいくつかあることがわかった。

## (1) 浴びた放射線が体内に蓄積して健康被害をもたらす？

浴びた放射線の積算量を把握することは放射線がから

Radiation and Children's Health : Yoko ICHIKAWA.

(2014 年 12 月 27 日 受理)

だに与える影響を知る上で大事であるが、この積算量が体内にとどまり、つまり外部被ばくを受けるとそれが体内にとどまって被ばくすると思っている人たちが少なからずみられた。特に高齢者にこの誤解が多かった。年間 20mSv の被ばく云々の情報が「体内にとどまると危険」という誤解を生んだと思われる。外部被ばくと内部被ばくが混同されていた。

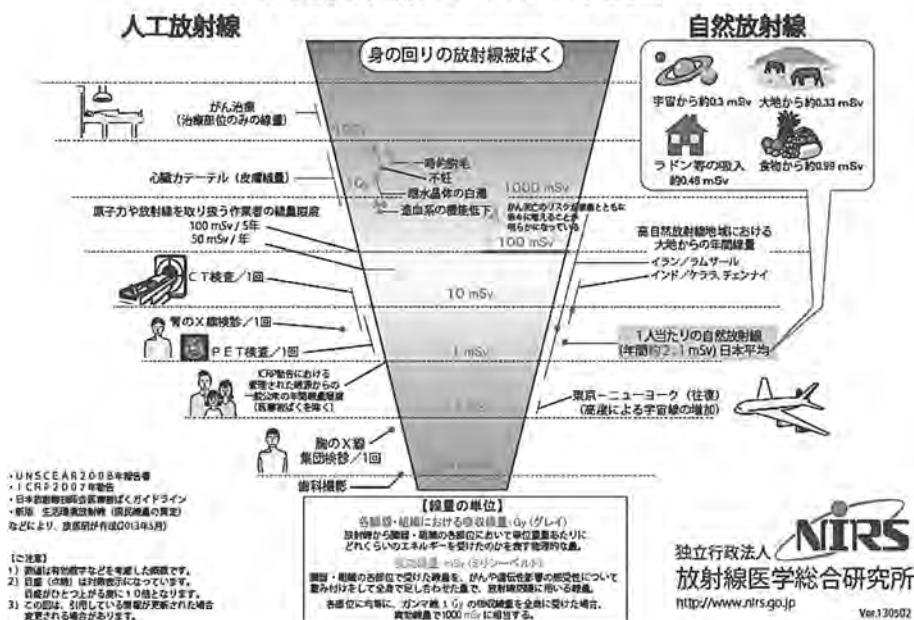
## (2) 福島の子どもたちに低線量被ばくの影響が出ている？

低線量被ばくのために福島の子どもたちに異変がみられているというブログやツイッターをいまだに見かける。最近では「鼻血マンガ」が物議をかもし、あらためて誤解の大きさを実感した。事故後に福島県内で鼻血の子どもが増えたのは放射線被ばくが原因というのは明らかな誤解である。放射線被ばくによって鼻出血をきたすのは、骨髄での造血機能が抑制されるぐらいの高線量 (500~2,000mSv) を一度に浴びた場合、すなわち確定的影響の症状である (第 1 図)。福島県内で一般市民が生活している地域でこのような高線量被ばくは事故当時でさえも起こり得ず、被ばくによる鼻出血は医学的にありえない。

今回の原発事故による放射線被ばくで懸念すべき健康影響は、長期間にわたる低線量被ばくによるがんや白血病の増加の有無であり、これは確率的影響である (第 2 図)。これまでの県民健康調査からはその可能性はきわめて低いことが明らかになりつつあるが、それにもかかわらず確定的影響と確率的影響がいまだに混同されることが多く、福島では健康被害を隠しているなどという誤ったネット情報も見受けられるのが現状である。

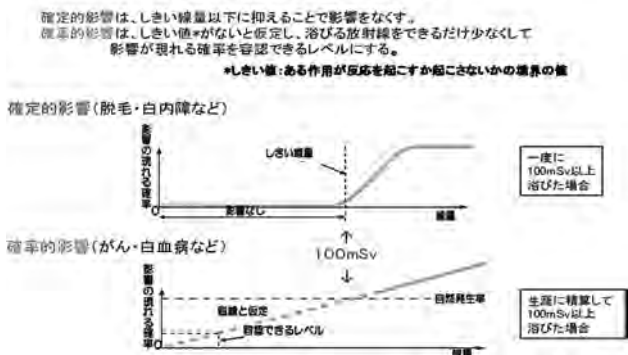
このような誤解が後を絶たない原因のひとつに、「放射線は遺伝子を傷つける」ことが挙げられる。だから放

## 放射線被ばくの早見図



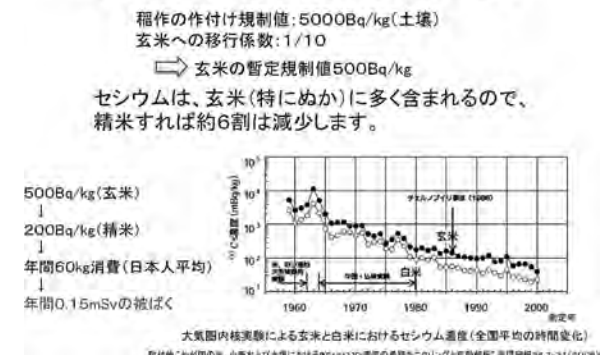
第1図 放射線医学総合研究所ホームページより

## 放射線防護の考え方



第2図 日本原子力研究開発機構「放射線に関するご質問に答える会」より

## 米に含まれるセシウムの影響は？



第3図 日本原子力研究開発機構「放射線に関するご質問に答える会」より

放射線は恐ろしい、ほんのわずかでも浴びてしまったら遺伝子は傷ついてその細胞は将来、がんになるのだというイメージがある。この放射線による遺伝子損傷は、放射線そのものが遺伝子を切断するのは約3分の1程度で、放射線により細胞内に発生した活性酸素によって損傷されるほうが多いのである。また、活性酸素が発生する原因は放射線だけではなく、喫煙やストレスなど、生活習慣や精神状態などの影響によって増えることがわかっている。このように、全ての細胞の遺伝子は放射線だけで損傷されるのではなく、自然発生的に細胞の遺伝子は体内で発生する活性酸素によって毎日7万個ほど損傷されており、その都度修復されていることは一般にあまり知られていない。

## (3) 日本の食品の暫定基準値は高すぎる？

平成23年度に国が定めた放射性セシウムの暫定基準値は、飲料水・牛乳・乳製品が200Bq/kg、野菜類・穀類・肉・卵・魚・その他の食品が500Bq/kgと定められ、

この基準を越える食品は出荷できなかった。しかし、この年度は米の出荷で全袋検査をしていなかったため、福島県産の米の一部から500Bq/kgを超えた米が出荷されてしまい、これがニュースとなり、風評被害に拍車をかける結果となってしまった。仮に500Bq/kgの米を日本人の成人が1年間(約60kg)食べたとして内部被ばくを計算すると、年間0.15mSvにしかならないのである(第3図)。もちろんこれは「仮定しての計算」であって、暫定基準値上限の米を積極的に摂取してもいいというものではない。

基準値は平成24年4月からさらに下げられ、現在に至っている。暫定基準値も含め現在の日本における基準値は、チェルノブイリ原発事故当時の旧ソ連及び事故から5年後以降のロシア・ウクライナ等の国々やEUの基準値と比較しても、かなり低い基準値である(第1, 2表)。

食品安全委員会による基準値の決め方は、「健康影響

第1表 原子力安全委員会および消費者庁「放射線と食品 Q&A」より

旧ソ連～ロシア等の飲食物摂取制限レベルの変遷

表: 食品中のセシウムの対策レベル(Bq/kg)

|     | Codex | EC*  | USSR, TPL |           |          | ベラルーシ   | ウクライナ   |
|-----|-------|------|-----------|-----------|----------|---------|---------|
|     | 1989  | 1985 | 1985      | 1985      | 1991     | 1999    | 2001    |
| 牛乳  | 1000  | 370  | 370       | 370       | 370      | 100     | 100     |
| 乳児食 | 1000  | 370  | -         | 370       | 185      | 37      | 40-60   |
| 乳製品 | 1000  | 600  | 3700      | 370-1850  | 370-1850 | 50-200  | 100-500 |
| 肉   | 1000  | 600  | 3700      | 1850-3000 | 740      | 180-500 | 160     |
| 野菜  | 1000  | 600  | 3700      | 740       | 600      | 40-100  | 40-120  |
| パン  | 1000  | 600  | 370       | 370       | 370      | 40      | 40-60   |

\*チェルノブイリ事故に起因した輸入食品に対する対策レベル 平成19年4月24日、日本原子力安全委員会より

日本での放射性セシウムの摂取制限の基準値の変更

平成24年3月31日まで

|           |     |
|-----------|-----|
| 飲料水       | 200 |
| 牛乳・乳製品    |     |
| 野菜類       | 500 |
| 穀類        |     |
| 肉・卵・魚・その他 |     |

平成24年4月1日以降

|          |     |
|----------|-----|
| 飲料水      | 10  |
| 牛乳・乳児用食品 | 50  |
| 一般食品     | 100 |

(Bq/kg) (Bq/kg)

第2表 消費者庁「食品と放射能 Q&A」より

海外における食品中の放射性物質に関する指標(Bq/kg)

| 核種                | 日本       | コーデックス       | EU         | 米国          |
|-------------------|----------|--------------|------------|-------------|
| 放射性セシウム           | 飲料水 10   |              | 飲料水 1,000  | 全ての食品 1,200 |
|                   | 牛乳 50    |              | 乳製品 1,000  |             |
|                   | 乳児用食品 50 | 乳幼児用食品 1,000 | 乳幼児用食品 400 |             |
|                   | 一般食品 100 | 一般食品 1,000   | 一般食品 1,250 |             |
| 追加線量の上限定値         | 1mSv     | 1mSv         | 1mSv       | 5mSv        |
| 放射性物質を含む食品の割合の仮定値 | 50%      | 10%          | 10%        | 30%         |

※ 基準値は食品の摂取量や放射性物質を含む食品の割合の仮定等の影響を考慮してありますので、数値だけを比較することはできません。コーデックス、EUと日本は、食品からの追加線量の上限は同じ1mSv/年です。

の可能性が見られるようになるのは、自然放射線(日本では2.1mSv/年)や医療被ばくなど一般生活で受ける被ばくを除き、生涯における追加被ばくとして積算100mSvを超えた場合」との判断をもとに、食品を摂取することで受ける追加被ばくが年間1mSvを超えない範囲になるよう計算されている。

また、セシウム137についても、物理的半減期と体内での生物学的半減期が異なることも一般にはあまり知られていなかった。セシウム137の物理的半減期は30年であるが、体内では1歳までの乳児で9日、9歳までは38日、30歳までは70日、50歳では90日で生物学的半減期を迎える。つまり代謝の早い小児であるほど体内での生物学的半減期は短く、同じBq/kgの食品を同じ量摂取しても、成人よりも小児の方が短期間で体内から排泄されるのである。

現在流通している福島県産の農産物のほとんどは検出限界以下のものであるにもかかわらず、放射線の感受性は小児の方が強いとされていることから、内部被ばくに関しても誤解が生じており、福島県の農産物を摂取することに抵抗を感じている方々がいまだにおられることは残念である。

(4) 将来、福島の子どもの多くに甲状腺がんやその他の健康被害が出る？

事故直後から専門家と称する方々が盛んにこの意見を述べ、そのために自主避難した母子も多い。しかしその懸念は極めて低いことは後述する県民健康調査その他の調査で明らかになりつつある。しかし現実には、当初のこの誤った情報のために、将来、自分たちは結婚しているのか、子どもを産んで大丈夫かとひそかに不安を抱えている若い世代がいまだにいる。

では、なぜ福島の子どもの多くがこのように言われなければならないのだったのだろうか。大きな原因の一つにチェルノブイリ原発事故によって子どもの甲状腺がんが増加したことが考えられる。また、東電福島第一原発事故が事故から1ヶ月後に国際原子力事故評価尺度(INES)によってチェルノブイリと同じレベル7とされたことも原因のひとつである。すなわち、福島でもチェルノブイリと同じことが起きるに違いないという憶測を生んでしまった。

しかし、実際には事故の規模も事故直後の国の対応・対策も異なり(第3表)、さらに当時の旧ソ連やその後のロシア・ウクライナ・ベラルーシと現在の日本とでは医療や経済的背景や、住民の食事も含めた生活習慣も異なっている。

甲状腺ホルモンはヨウ素から作られるため、甲状腺には常に一定の割合でヨウ素が蓄えられている。海藻にはヨウ素が多く含まれるが、内陸部の旧ソ連地域では海藻を食べる習慣がなく、地域住民は慢性的なヨウ素欠乏状態が多い。ヨウ素が欠乏している甲状腺には放射性ヨウ素が入りやすく、また、放射性物質を吸収しやすいキノコ類を多く食べる習慣があったことがさらに放射性ヨウ素を多く取り込んでしまったと考えられている。

これに対し、日本人はヨウ素を多く含む海藻を食べる習慣があり、慢性的なヨウ素過剰傾向にあるため、ヨウ素過剰の甲状腺に放射性ヨウ素は入りにくいと考えられている。そして事故後の国の対応も、旧ソ連では3日間

第3表 岡崎龍史「基礎から学ぶ緊急被ばくガイド」より

|               | チェルノブイリ<br>1986年4月26日   | 東電福島第一<br>2011年3月11日              |
|---------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 原子炉           | 黒鉛減速沸騰軽水圧力管型            | 沸騰水型                              |
| 格納容器          | なし                      | あり                                |
| 初期状態          | 制御棒抜いたまま                | 制御棒挿入された                          |
| 放射性物質排出量      | 520万TBq                 | 57万TBq                            |
| 爆発後発表         | 3日間発表せず<br>大統領公式発表は1週間後 | 即日                                |
| 事故直後空間線量最高値   | 3306 μSv/h              | 170 μSv/h                         |
| 放射性ヨウ素を含む牛乳   | 出回る                     | 出回っていない                           |
| 放射性ヨウ素による被曝線量 | 50-100mSvから2kmSv        | 0.01から0.1 μSv/h※<br>(1149人のうち45%) |
| 甲状腺がん         | 6848人<br>(事故当時18歳未満)    | ?                                 |
| 甲状腺がんによる死者    | 15人(0.22%)              | ?                                 |

※ 3月24～30日、いわき市と川原町、飯沼村で0～15歳の子どもの甲状腺線量計による甲状腺線量計測定結果。0.01 μSv/hは10 μSv/hの1/1000、30 μSv/hは30 μSv/hの1/1000

事実が伏せられ一般住民はその間普通に生活していたが、福島では付近住民は即日避難している。一部地域住民はやや高めの線量で暮らしていたが、これもチェルノブイリ事故による環境汚染に比較するとはるかに低く、その後の調査でも健康影響が出るほどではなかったことがわかっている。福島県産の農畜産物も全て出荷停止となった。

これらの違いを考慮せずにチェルノブイリ原発事故における健康被害と福島第一原発事故による健康被害を同等であるかのように論じるのは誤りであり、福島で今までもこれからも生活する一般住民に不安と混乱を招くだけである。

### 3. 県民健康調査

これまでの健康調査の結果から、内部被ばく・外部被ばくともに、子どもたちの将来の健康被害の影響は極めて低いことが明らかになってきた。

#### (1) 外部被ばく

県内各自治体で行ったガラスバッジによる外部被ばく調査では、住民の90%以上がICRPの勧告を基に国が許容追加被ばくの長期的目標としている年間1mSv未満であった。平成23年当初、一部住民にこれを超える数値がみられたが(しかしその数値も健康影響をきたすほどの線量ではない)、全て成人で、原因は戸外での農作業に長時間従事していたためと考えられている。

#### (2) 内部被ばく

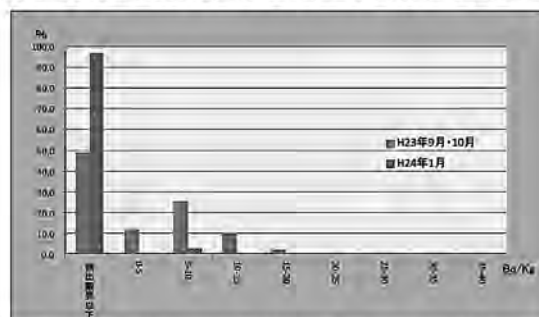
平成23年度から県内各自治体でホールボディカウンタ(WBC)による内部被ばく検査が行われている。各自

治体での検診結果の総計では、平成26年10月に行われた7,204名全員の預託実効線量は1mSv未満であった。預託実効線量とは、体内に取り込まれた放射性物質による内部被ばくの実効線量をおよそ一生分について積算したもので、成人であれば今後50年間、小児では70歳までの年数を、最初の1年で受けたとして計算されている。外部被ばく同様、平成23年当初は一部住民にやや多めの内部被ばくが見られたが(これも実際に健康影響が出るレベルではない)、測定していない野菜や野生のイノシシ等を摂取していたことが原因と考えられている。

第4図は南相馬市に住む子どもたちを対象に南相馬市立病院で平成23年度に行われたWBCの結果である。平成23年9月、10月に南相馬市内の子ども527名、平

### 南相馬市での内部被ばく検査

Cs-137 体内放射能別被検者数  
小児対象 H23年9月10月(n=527)、H24年1月(n=386)施行

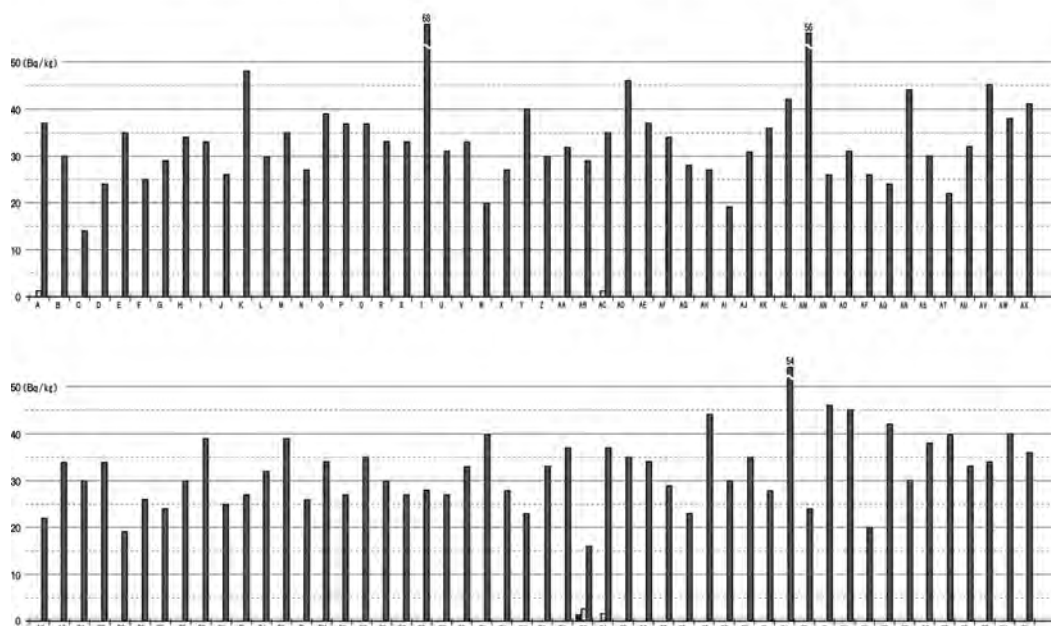


2011年9月、10月に検診を行った527名と2012年1月に検診を行った386名を比較すると、今年1月では検出限界以下の割合が90%以上に増えています。再検結果と合わせて、現在のところ小児では、食物による内部被ばくは、ほぼ無いと推測されます。

第4図 南相馬市立病院ホームページより

■セシウム134 ■カリウム40  
■セシウム137 ■評価下限(1Bq/kg)以下

### 陰膳方式放射能調査結果(2014年3月7日発表)



第5図 コープふくしまホームページより

成 24 年 1 月に同じ集団の子ども 386 名の結果を比較すると、9 月・10 月では検出限界以下が 60% 弱だったのに対し、3 ヶ月後の 1 月では検出限界以下が 90% に増加しており、セシウムが体内から排泄されていることがわかる。

食の安全の確認と内部被ばくへの不安解消のために、生活協同組合コープふくしまでは、平成 23 年 11 月から組合員の協力で陰膳方式で調理した食事に含まれる放射性物質を継続して測定している。この陰膳方式は、家族人数分より 1 人分余分に毎食作り、その 2 日分の食事 1kg に含まれる放射性物質を測定するというものである。検査に協力した 100 家庭中 9 割以上の家庭で福島県産の食材を使っていた。

平成 23 年度下半期では 1kg あたり 1Bq 以上のセシウムが検出されたのは 10 家庭だった。このセシウムが検出された家庭で仮に測定されたのと同じ内容の食事を 1 年間摂取したとしてセシウムの実効線量を計算すると、年間約 0.02~0.14mSv 以下にしかない。平成 25 年度下半期では 100 家庭中 4 家庭でセシウムが検出され、同様に 1 年間同じ内容の食事を食べたとして実効線量を計算すると、最大でも 0.04mSv であった。グラフ上に検

出されているのはほとんどがカリウム 40 である(第 5 図)。

このことから、福島県産の農産物を摂取しても内部被ばくによる健康影響の懸念はほとんどないに等しいことが推測される。

(3) 甲状腺検査

平成 23 年 11 月から福島県では事故当時出生していた県内全ての 18 歳までの子どもを対象に超音波による甲状腺検査を行っている。結果の判定は甲状腺がん学会の基準に基づき、以下のようにされている。

A：正常範囲と思われるもの

A1：嚢胞や結節を認めないもの

A2：5.0mm 以下の結節 or/and 20.0mm 以下の嚢胞

B：5.1mm 以上の結節 or/and 20.1mm 以上の嚢胞

C：直ちに精査が必要と思われるもの

これを他県と比較するために、青森・山梨・長崎の 3 県でも同様の検査を行った。結果は福島県内と他県では、A1、A2 の割合に差はなかった(第 6 図)。

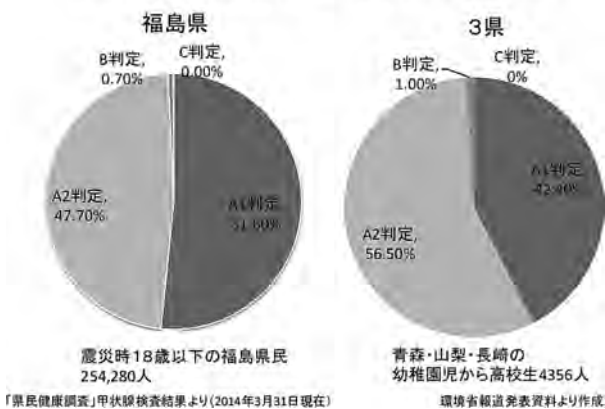
B、C 判定については、平成 26 年 11 月 11 日現在の結果で、悪性ないし悪性疑いが 109 人(このうち手術例 85 人で、その内訳は良性結節 1 人、乳頭がん 81 人、低分化がん 3 人)、男女比は 38 対 71、平均年齢は 17.2 ± 2.7 歳(8~21 歳)、震災当時 14.8 ± 2.6 歳(6~18 歳)、平均腫瘍径は 14.1 ± 7.3mm(5.1~40.5mm)であった。チェルノブイリ原発事故による小児甲状腺がんは事故後 4~5 年から増加したとされ、その発症年齢の多くは乳幼児であるのに対し、今回福島県で行われた甲状腺検査の結果では、悪性ないし悪性疑いの多くが 10 代後半である(第 7 図)。

現在、福島県で行っている甲状腺検査によって検出された甲状腺がんが原発事故による放射性ヨウ素被ばくが原因であれば、被ばく量が高かった地域の子どもたち及び、被ばくの影響を受けやすいとされる乳幼児に多く検出されるはずであるが、浜通り・避難区域・中通り・会津地方の子どもたちの中で発症率には差がない。

また、第 3 表に示したようにチェルノブイリの事故と比較すると福島での被ばく量はかなり少ない。従って、現在検出されている甲状腺がんは被ばくの影響によるものではなく、もともと存在していたものがスクリーニングによって早期に検出されたものと推量するのが妥当と考える。

甲状腺がん、なかでも乳頭がんは進行が遅く、他疾患で亡くなった症例の剖検例でたまたま発見される潜在性の甲状腺がんは日本でも 3~10% 存在するとされており、その多くは直径 5mm 以下の乳頭がんである。最大径 10mm 以下の甲状腺がんは微小がんといわれ、そのほとんどが乳頭がんであり、臨床的には甲状腺腫瘍として触知されるほどにはならず、潜在がんとしてとどまっているのではないかと考えられてきた。近年の超音波診断

甲状腺一時検査:福島県と他県の比較

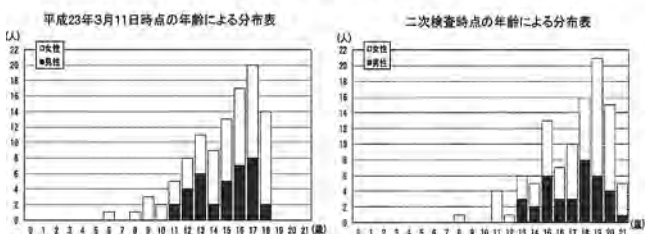


第 6 図 福島県と他県との比較

福島県での甲状腺検査の結果概要

平成 23~25 年度合計  
 ・悪性ないし悪性疑い 109 人(手術 85 人: 良性結節 1 人、乳頭癌 81 人、低分化癌 3 人)  
 ・男性: 女性 38 人: 71 人  
 ・平均年齢 17.1 ± 2.7 歳(8~21 歳)、震災当時 14.8 ± 2.6 歳(6~18 歳)  
 ・平均腫瘍径 14.1 ± 7.3mm(5.1~40.5 mm)

細胞診で悪性ないし悪性疑いであった 104 人の年齢・性分布



第 7 図 福島県ホームページより



による画像解析の飛躍的な向上に伴い、微小がんの検出率も高まった。韓国で乳がん検診とセットで超音波による甲状腺検診を行ったところ甲状腺がんが増えたことはよく知られている。福島県で行われている甲状腺検査も同様に、検査症例が増えれば微小がんの検出率が増加する可能性は指摘されていた。

平成 23 年から行われた一巡めの検査に続いて、平成 26 年 4 月から二巡めの検査が行われているが、本年 12 月 23 日に 4 人の子どもに甲状腺がんが見つかったとの報道があった。この 4 人は一巡めで A 判定とされていた子どもたちである。福島県によれば、4 人のいずれも事故当時の住まいには偏りがなく、チェルノブイリと比較しても被ばく線量ははるかに低いため、福島原発事故による影響は考えにくいとのことである。

福島県では子どもたちが 20 歳になるまで 2 年ごとに検査を行い、20 歳を過ぎてからは 5 年ごとに行うこととしている。この検査については過剰診断とのとらえ方も一部にはあるが、福島県の子どもたちに放射線被ばくの影響があるかないかの証明は今後の県民の不安解消にも大切なことであり、これからの子どもたちの健康を守るためにも、引き続きフォローアップが必要と考える。

#### 4. これからの生活の工夫

流通されている福島県産の食品は全て安全が確認されたものであり、また、一般市民が生活している地域の環境放射線レベルも健康影響はほとんどないに等しいと考えられる。これからの福島の子どもの健やかな成育のためには、旬の食材の本当の味・美味しさを知り、からだを使って遊び、土や草木や水などに直接接触することで自然を肌で感じる体験を重ね、五感を養う暮らしを取り戻すことである。

そのためには、わたしたち大人がベクレルやシーベルトの意味を正しく理解し、自然環境から受ける放射線量に追加して受けている現在の被ばく量は、今後の健康影響がほとんどないに等しいことも認識することが必要である。そして、がんその他の疾患の原因の多くは喫煙や飲酒・偏食・不安やストレスなどの生活習慣の影響を強く受けることを知り、放射線以外のこれらの原因をできるだけ少なくする生活を心がけ、不安をおおるような情

報に惑わされない強い心と穏やかな愛情で子どもたちを育てていくことが大切である。

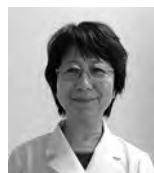
#### 5. まとめ

まだ言葉を発しない赤ちゃんでも、子どもたちは大人の会話を聞き、大人の不安定な心理状態を察知する。それは決して子どもの心に良い影響を与えない。将来起こるかどうかわからないようなわずかなリスクに怯えて暮らすよりも、生活習慣を整え、毎日を明るく前向きに暮らすことこそが、子どもたちの健やかな成育につながり、ひいてはそれが復興の一端を担うことになると思われる。

#### — 参考文献 —

- 1) 日本原子力研究開発機構「放射線に関するご質問に答える会」.
- 2) 岡崎龍史：「基礎から学ぶ緊急被曝ガイド」, 医療科学社, 2012.
- 3) ウラジミール・マツコ, 今中哲二：「ベラルーシにおける法的取り組みと影響研究の概要」.  
チェルノブイリ事故による放射能災害－国際共同研究報告書：技術と人間, (1998).
- 4) 消費者庁「食品と放射能 Q&A」.
- 5) 田代 聡：「放射線の小児への健康影響」.  
日本小児科医会会報, 42: 51 - 54, (2011).
- 6) 中川恵一：「被ばくと発がんの真実」, ベスト新書, (2012).
- 7) 高嶋成光：「潜在性甲状腺癌の臨床病理学的研究」, 岡山医学会雑誌, 89(3・4), p333-360, 1977-04.
- 8) 木下誠一：「甲状腺微小癌」, 愛媛県立医療技術大学紀要, 第 7 巻, 第 1 号 P.1-3(2010).
- 9) 日本保健物理学会「暮らしの放射線 Q&A」.
- 10) 宇野賀津子：「低線量放射線を越えて」, 小学館新書, (2013).

#### 著者紹介



市川陽子 (いちかわ・ようこ)  
福島市・いちかわクリニック副院長・  
小児科医

## 福島原子力発電事故への 各学会の取組

### 日本地球惑星科学連合 (JpGU) の取組

日本地球惑星科学連合会長 津田敏隆  
環境災害対応委員会 田中賢治, 松本 淳

#### 災害直後の対応

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、単一学会では対処できない、環境と災害が密接に関係した問題が現実起こることを示した。翌日の2011年3月12日には、連合ホームページ内に東北地方太平洋沖地震情報特設ページ (<http://www.jpгу.org/whatsnew/110312EQ/>) を開設し、連合会員及び加盟学協会会員などの被害状況、関連機関及び大学などにおける被害状況、所属学会・連合加盟学協会における活動状況(Webでの情報提供など)、関連する科学的調査に関する情報の収集・共有に努めた。

3月16日に環境・災害対応委員会から出された「現地調査についてのお願い(No.1)」では、過去の津波緊急調査における研究者の活動が復興・復旧作業を阻害していた一面があったことを踏まえ、被災地の救命活動および行方不明者の捜索活動の規模が縮小し、復旧フェーズに入ること、調査者自身がレンタカーや宿泊の手配を行うことができること、など5つの条件からなる「学術調査実施時期のガイドラインについて(岩手・宮城・福島)」が提示された。これは被災地の状況が落ち着くまでは、個人的には調査をせず、組織的かつ効率的に調査を実施することが目的である。これ以降しばらくは、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの事務局では現地調査に関する調整を行った。4月7日に同委員会から出された「現地調査についてのお願い(No.2)」では、情報共有サイトで公開されている調査結果などを参照しつつ、被災地への負担を最小限にする調査計画を立て、4月11日以降は原則、各自の判断で現地調査を実施していくこととした。

大気海洋・環境科学セクション(現:大気水圏科学セクション)では、地球表層圏科学の専門家が放射性物質の専門家と協力して得た、問題の実態把握と対策に必要な科学的知見の共有と情報交換の場所として「福島第一原子力発電所事故に関わる環境問題フォーラム」ホームページを立ち上げた。福島第一原子力発電所の事故で地球環境中に放出された人工放射性物質が、大気、降水、土壌、地下水、海洋、植生などの環境中にどれだけの量存在し、どのように運ばれているのかを明らかにするこ

とを目的として結成された「日本地球惑星科学連合・地球化学会・放射化学会連携緊急放射性物質調査研究チーム」による大気中および降水中の放射性物質濃度の速報値情報やスギ花粉による放射性物質飛散情報等が共有されている。

連合のニューズレター JGL (Japan Geoscience Letters) でも東日本大震災や福島第一原子力発電所事故に関する話題を度々取り上げてきた。特に、2012年2月号、5月号ではそれぞれ3ページにわたる特集記事「福島第一原子力発電所事故による放射性物質の環境への拡散」、「放射性物質の大気拡散-原発事故影響の計算予測はどこまで可能か-」が掲載されている。

#### 学協会横断型のユニオンセッション

2011年の連合大会期間中(5月25日)に日本学術会議地球惑星科学委員会との共催で、緊急ユニオンセッション



地球表層圏における放射性物質の拡散過程  
地球表層圏における放射性物質の拡散過程

「東日本大震災、今、地球惑星科学のあり方を考える」を開催し、「何が起ったか」、「何をなすべきか」と同時に「何をなし得なかったか」の模索と議論が続いた。これを受けて6月30日には地球惑星科学関連学協会の多くの賛同を得て、共同声明「自然災害に向き合う強い日本社会の復興のために」を公表した。

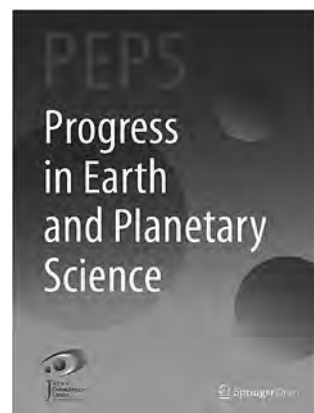
2012年の連合大会期間中の5月20日にユニオンセッション「東日本大震災からの復興にむけて－地球惑星科学と社会との関わりを考える－」、5月24日に国際シンポジウム「The Tohoku Earthquake and Fukushima Nuclear accident」を開催した。巨大津波の被害予測、地震の発生メカニズム、大気モデルの役割、放射性物質の陸域での移動、海底活断層、津波堆積物調査、防災教育など多岐にわたる話題提供があり、幅広い分野の専門家と市民が垣根を越えて研究成果と意見を本音でぶつけ合う場となった。

2014年5月の連合大会において環境災害対応委員会主催により学協会やセクションからの推薦による招待講演で構成されるユニオンセッション「連合は環境・災害にどう向き合っていくのか?」を開催し、大震災時における連合や各学協会の活動を総括した上で、他の災害や環境問題を含めて、連合が今後いかに環境と災害の問題に取り組んでいくかについて議論した。なお、本セッションの全18件の発表要旨は環境災害対応委員会のホームページ (<http://www2.jpgu.org/n-dis/sessionreports/>) で公開されている。災害対応は、時間がないため、平常時に対応すべき災害規模などに関するプロトコルを事前にきちんと決めておくべきであるとの意見も出された。連合として、独自に調査隊を派遣することは現実的でなく、環境災害対応委員会が各学協会とのパイプ役を果たし、学協会の連携の下での調査の調整や現状把握に努めることが求められている。原子力事故が事前には想定されていなかったために、政府含め初動時の対応には混乱があった中、多くの関係者の努力の集積により、放射性物質のマッピングやモニタリングを含めた研究が早期に立ち上がった。しかし、長期的な予算措置がなくなりつつある事態は大きな問題である。将来の国際機関からの検証に耐えるデータの蓄積は極めて重要であり、モニタリング調査の継続の必要性を連合としても訴えていきたい。また、学協会間の連携に加えて、行政や生活者とどう向き合っていくかについても引き続き議論が必要である。

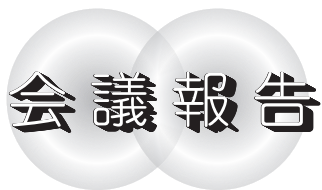
2015年の連合大会でも同様のセッションを企画し、東日本大震災やその他の大規模災害時における各学協会の活動について情報共有をはかり、複数の学協会にまたがる環境と災害の問題に対して各学協会の枠を超えた実質的な連携を促進する上で連合内にどのような体制を築いていくべきかについて議論する予定である。

### 日本地球惑星科学連合公式ジャーナル 「Progress in Earth and Planetary Science (PEPS)」

日本地球惑星科学連合(JpGU)は、地球惑星科学関連の50の学協会が参加する公益社団法人です。地球惑星科学は複雑で、そこで生起する現象は多様です。地球惑星科学的現象を分野横断的かつ多角的に解析した内容などを議論する場として、「Progress in Earth and Planetary Science (PEPS)」を2014年に創刊しました。日本のコミュニティとして「学問の自由・独立」といった観点から独自のジャーナルをもつことは重要です。現在、年會を毎春に開催しており、8,000名以上の参加者、4,000以上の発表があります。この年會では、地球惑星科学的現象を分野横断的かつ多角的に解析した内容が議論され、「多角的側面からの研究成果発表あるいは統合的な概念の創出」を目標としています。そして、この「PEPS」で誌上発表の形で公表できればと考えています。「PEPS」の特徴は、①オープン・アクセス+電子ジャーナル、②参加学協会が協力・共同する発行、③地球惑星科学における世界の一画を担えるジャーナルを目標としていることです。この意図する所が、日本学術振興会の「科研費成果公開促進費」の趣旨とも合致するため、現在、科研費での補助を受けています。出版に際しては、SPRINGER社という国際的な会社と協力しており、オープン・アクセスなので、図書館経費などが削減されたとしても、「読者はお金を支払わずに自由に閲覧できる」ので、地球惑星科学に関する論文を、世界中の人々が何らの制限なく購読できます。「PEPS」はレターは扱わず、通常のトピックスとともに30%以上の総論(review)の掲載を促進しています。分野外の方が学問の全体像を把握しやすくなり、広範囲の知識の整理につながればと期待するからです。「PEPS」編集委員会は半分以上が海外の研究者で、最終的に国際科学ジャーナルの一流誌として認識されるよう努力しています。



詳細 [http://progearthplanetsci.org/index\\_j.html](http://progearthplanetsci.org/index_j.html)



## 世界最高水準の安全性に向けて

### Water Reactor Fuel Performance Meeting 2014 (WRFPM2014)

2014年9月14~17日(仙台市)

軽水炉燃料に関する国際会議「2014 Water Reactor Fuel Performance Meeting」(WRFPM2014)は、アジア(日本、韓国、中国)、欧州、米国の各原子力学会の共催により、各国の研究機関、電力、メーカー、大学、規制当局から236名(内、日本から120名)が参加し、プレナリー講演8件、口頭発表85件、ポスター発表36件と盛況であった。

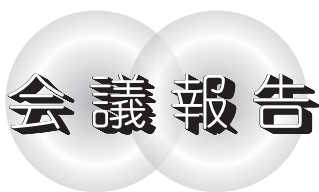
プレナリーセッションでは福島第一原子力発電所(以下、1F)に係わる講演などがあった。米国電力研究所(EPRI)のフェローであるR. Yang博士は、原子力はCO<sub>2</sub>排出削減と大気汚染防止の点でクリーンかつ安価なエネルギー源として重要であるとし、EPRIによる1F事故の原因分析の結果として、炉心損傷に対する備え、格納容器の健全性確保、環境放出低減による事故影響の緩和、訓練などが重要である、と述べた。東京大学の関村教授は、学会事故調に基づく1F事故の教訓、統合的なリスクインフォームド決定プロセス(IRIDM)に基づく継続的安全性向上の重要性などを説明した。さらに、1F事故以前に作成した燃料高度化技術戦略ロードマップを紹介した上で、今後の研究戦略の方向性として、レジリエントな原子力技術のための安全研究ロードマップの考え方を紹介した。東京電力福島第一廃炉推進カンパニーの鈴木バイスプレジデントによる1F廃炉に向けた活動に関する講演では、1F1~4号機の現況として、1Fサイト内の汚染状況と線量分布、廃炉作業の進捗状況などが説明された。この中で、建屋内の調査・観察、汚染水処理・貯蔵、固体廃棄物貯蔵などの現状が示された。国際廃炉研究開発機構(IRID)の劔田理事長の講演では、IRIDの組織と構成、他機関との連携、1F廃止措置に関する研究開発の状況が説明された。研究開発の例として、ミューオンによるデブリ検知など炉内状況把握のための技術開発、模擬デブリによる燃料デブリの硬さ等の特性予測、格納容器を冠水させない場合も含めた燃料デブリ回収方法の検討などの状況が紹介された。原子力規制委員会の更田委員は、1F事故の教訓に対応した新規制基準における対策として、構造・システム・機器の破損防止、共通要因故障防止対策、炉心損傷防止、シビアアクシデントの影響緩和、緊急時に対する備え、継続的安全性向上、確率論的リスク評価、1F事故後の規制の8項目を挙げて説明した。

次に、1F事故を踏まえた特別セッションとして、シビ

アアクシデントにおける炉心溶融などの講演を設け、会議初日にシビアアクシデント一般に関わる報告、2日目に1F事故の評価に直接関わる報告があった。招待講演の1件目では、欧州で進められているシビアアクシデントに関するSARNET(Severe Accident Research Network of excellence)プロジェクトの現状をフランス放射線防護原子力安全研究所(IRSN)のG.Repetto氏が紹介した。招待講演の2件目では、韓国原子力研究所(KAERI)のH.Y.Kim氏が、シビアアクシデント対策研究について報告した。招待講演に引き続き、欧州超ウラン元素研究所(ITU)から、溶融コリウムの特性研究および溶融炉心-コンクリート相互作用(MCCI)を含むデブリ特性研究の成果が紹介された。IRSNから、シビアアクシデントの際に想定されるデブリ再冠水の模擬試験の現状と今後の計画が紹介された。ついで、日本原子力研究開発機構(JAEA)より発表が行われ、経済産業省事業で進めている制御棒ブレードの崩落試験に関する報告があった。2日目には、エネルギー総合工学研究所(IAE)より、SAMPSONコードを用いた1Fの解析に関する最新の成果が発表され、BWRの燃料破損過程の解析精度を向上させるために新たに組み込んだ制御棒ブレード崩落解析手法が紹介された。JAEAから、デブリ取出しに向けたデブリ特性評価研究の現状が紹介された。

続いて、5つのトラックでの講演があった。トラック1(燃料のふるまい、信頼性、使用実績)では、3つのセッションに分かれ合計12件の講演があった。トラック2(核燃料技術の進展と革新)では、改良燃料や新しい概念の燃料に関して、ペレット関係6件、被覆管関係5件、事故耐性燃料関係11件の合計22件の発表があった。トラック3(過渡時および事故時関連の課題)では、冷却材喪失事故(LOCA)時のペレット挙動に関し4件、反応度事故(RIA)時挙動およびRIA試験に関し4件、過渡時のペレット-被覆管相互作用(PCI)等に関し3件、被覆管の高温酸化に関し5件の発表があった。トラック4(燃料サイクル、中間貯蔵、輸送)では、スペインENUSA、台湾の清華大学、東北大学などから7件の発表があった。トラック5(科学と基盤技術)では、被覆管、照射後試験技術、モデリングの分野で13件の発表があった。今回は欧州原子力学会主催で、TopFuel2015が来年9月13日からスイスのチューリッヒ市で開催される。

(取りまとめ：JANSI 安部田貞昭、2014年12月5日記)



## 原子力発電プラントの水化学に関する国際会議 2014 札幌

## Nuclear Plant Chemistry Conference (NPC) 2014 SAPPORO

2014年10月26～31日(札幌市 ロイトンホテル)

## 1. はじめに

NPCは1977年に英国ボーンマスで開催されて以降、23年毎に開催される原子力水化学分野で最も権威ある国際会議であり、今回は日本原子力学会(AESJ)主催により、日本としては4回目、16年ぶりの開催となった。通常でも250名程度の大きな会議であるが、今回、福島第一発電所事故への関心もあり、28か国から約360名の出席があり、発表230件を超える大会議となった。

今回は、福島第一発電所事故を踏まえた特別セッションを設けて、事故収束に果たした水化学技術の成果と教訓等を広く世界に発信した。また、発表件数が非常に多くなる中で、これまでの開催期間6日を保持しながら発表をこなすために、ポスター発表の割合が高くなると共に、これまで全聴講可能とするために堅持してきたシングルセッション進行から、1日のみパラレルセッション進行を行ったことが、会議の特徴となった。

冒頭には、これまで原子力発電と関連する水化学を先導してきた米、仏、日本の代表者から、それぞれの国の水化学の現状と、今後の活動について基調講演がなされた。会議は11のセッションから構成され、燃料、メンテナンス、将来技術など多くを取り扱い、原子力学会水化学部会ホームページ(<http://www.aesj.or.jp/~wchem/>)に詳細を掲載するが、ここでは、以下の技術トピックスの観点から整理する。

## 2. 技術トピックス

## (1) BWR水化学関連

BWRの水化学としては米国を中心にオンライン貴金属注入(OLNC)の適用がさらに拡大を続けている。これに関連して水素注入、貴金属注入及び亜鉛注入適用後の再循環系配管の線量率や、関連水質に関するプラント実績データの紹介、それに基づいた配管表面における酸化物組成変化の面からの定性・定量的な観察・評価結果についての報告が多数あり、SCC対策としての環境緩和技術の適用と線量率低減が中心的なテーマとなっていた。新しい取り組みとしては、化学除染後の放射能再蓄積抑制を目的とした炭素鋼への白金付着等による表面処理の適用効果についての報告があった。国内からは浜岡5号機での系統内海水流入後の内部機器について、分解・開放点検の結果等、プラントへの影響評価の検討状況が紹介された。

## (2) PWR水化学関連

1次系では、被ばく低減を主な目的として亜鉛注入関

連のプラント実績やラボ試験の発表が多く見られた。日米では亜鉛注入効果が確認されて適用が拡大する一方、フランスでは実機で明確な結果が得られておらず限定運用となっており、適用に関しては日米が進んでいる。燃料被覆管の腐食やクラッド付着の発表は、欧米で引き続き精力的に進められており、高pH化と合わせた評価が進んでいる。溶存水素濃度管理については、米国で材料健全性のリスク低減のために高めに管理する方向で進んでいる一方、日本からは被ばく低減のために低めの運用を目指した試験が紹介された。

2次系では、日本では問題となっていないSG2次側のスラッジ堆積問題の発表が海外から多くあり、また、SG2次側の化学洗浄を改良した手法がいくつか発表され、注目を集めた。また、プラントの長期保管、その後の起動での水質管理の発表も目立った。

## (3) 福島特別セッション

海外からの関心も非常に高かった。経産省や環境省からは中長期ロードマップや除染活動報告、東京電力からは事故教訓、汚染水処理対策、設備の腐食抑制対策などが報告された。米国のTMI-2事故対応の経験者からは、復旧・除染の取り組み状況の総括的な報告があり、チェルノブイルの最新状況も交えての講演となった。TMI-2に関しては、別の詳細報告で、汚染水処理だけでなく、デブリの取り出しや輸送、トリチウム処理、廃棄物処理など、多岐にわたる紹介があり、いずれも大きな関心を集めた。事故進展及び汚染水処理工程に大きな影響を与える水素挙動について、基礎実験から材料腐食まで照射試験による検討例が報告され、モデル解析と合わせた検討状況が示された。また、事故時の公衆被ばくへの影響が大きいヨウ素挙動については、その酸化プロセスを解明することの重要性が示された。

## 3. おわりに

活発な質疑応答で情報交流がなされ、過去最大規模の会議が開催できたことは、現状、稼働中のプラントがなく、運転での情報更新がない日本にとっては、大きな収穫になったと思われる。さらに、福島特別セッションは、日本から総括的な情報発信がある一方、海外からも事故経験、国内外を問わず放射線、除染、腐食関連の発表があり、本セッション開催は非常に大きな意義があった。

次回は2016年秋に英国での開催が予定されており、国内からも積極的な参加が望まれる。

(三菱重工業(株)・石原伸夫、2014年12月12日記)

## 連載・福島からの風 第1回

## 生と死の狭間で — 20km圏への帰還に向けて—

(有)BENTON 地域メディエーター 半谷 輝己

2015年1月2日、初めて浪江町の仮設住宅の集会所を訪問した。20名ほどのお年寄りがあつまった。初対面だったが、私は一瞬にして身近な存在へと変わった。亡くなった父や母を知る同郷の方たちが集まっていたからだ。イベントの支援として、予告なしに参加した小さな集会なのに、だ。

手作りクッキーにミカン。コーヒーを飲みながら、自己紹介を始めた「私は、浪江町の西病院でオギャーと生まれました。」すると、みなさんは一瞬驚きそして笑顔へ。偶然、西病院で働かされていた看護師さんも参加されていて、驚きの声が上がった。「母はふじパーマという美容室の」とすぐに、母似のご婦人が「筆筒屋さんのお隣のだな」と。「その通り」と私は感激。「筆筒屋って、どこの？」と別のご婦人。「マツバ屋さんの隣だ」「マツバ屋さんって駅前なの？」「引越す前のマツバ屋さんだ」「ああ、あっちが、ずいぶん昔の話だ」

もう五十数年前の記憶のはずが、ついこの間のように語る。まるで母がそこに生きているかのように。

「そうがい、埼玉で亡くなったのが、ふじさん。遠くだな」母を知る人にとって、正にこの瞬間に母が死んだのだ。「半谷さんは、双葉町の6号線沿いにある半谷工務店で、実家は大堀相馬焼で、長男は事故で亡くなられていて」と区長さんが私の親兄弟を語り始めた。まるでタイムマシンのようだ。

「大堀の半谷さんというと定巳(さだみ)さんのことかい」「私は、定巳さんの同級生だわ」私は父の同級生にはたぶん生まれて初めて会った。

そんな中、上品なご婦人が「今頃なんだ、あんた？もう4年経ったべしたは」とやや嫌味に囁いた。

「色々あって、やっとここにたどり着きました」と頭を下げた。するとそれを聞いていた若いご婦人が、私の母

と仲良しで母をふじさんと呼んでいたと話しかけてきた。そして、はっと何かに気付かれ「もしかして、帰ろうと考えていますか」と周りに聞かれないうようにじっと私の目を見つめた。

「はい。私にその役目を務めさせてください」と、つい答えてしまった。しまった怒られるかな。すると意外にも「やっ、帰ると言う人が来たんだ！」と涙ぐんでいた。そして机の上の手帳を急いでバックにしまい、「あなたのことを、直ぐに知らせたい人がいるの、こうしては居られない。ごめんなさい。今日はこれで帰らせて」と、私の手をぎゅっと握り仮設集会所から出て行ってしまった。

福島事故からもうすぐ4年。4年もかかった。

私自身の帰るという決意があやふやなままでは浪江町や双葉町の人の前に立てなかった。決意のために4年も必要だったのかと自問自答が続いた。

母や父と同世代で同じ土地で生きて来た方々の笑顔は、私の意志を支えてくれる。

たくさんの記憶の中で生きていた父と母に会えた。だから、父や母を記憶する方々を故郷に帰らせなくてはならない。記憶にある街を生き返らせ、新しい街と未来を作らなくてはならないと誓った。

(2015年1月25日記)

## 著者紹介

半谷輝己 (はながい・てるみ)

BENTON SCHOOL 校長。20年の塾経営後、平成24年度から伊達市の放射能健康相談員。

福島県双葉町生まれ、福島県田村市に在住。

近著は「ベントン先生のチョコボール」。

## 理事会だより



### 平成 27 年度のスタートにあたり

#### 平成 27 年度学会予算案

本会財務状況は、学会員の皆様のご協力もあり、ここ数年は経営改善による収支の安定化が図られてきておりますが、原子力復興の道は途上であり、今後も厳しい状況が続くと見込まれます。しかしながら、社会に貢献できる魅力ある学会を目指し、新しい地平を拓いていくための活動に挑戦する予算を確保することも重要です。

こうした観点に立ち、平成 27 年度予算案は、各組織単位での収支均衡運用の方針を継続し、各組織は学会本部からの配分金と受託等の外部資金で活動費を賄うことを原則として編成を行っています。

#### 1. 平成 27 年度予算案編成方針

収入については会費の減少傾向は続いていますが、平成 26 年度の実績ではその減少規模が予想を下回っており、他方、賛助会員増加のための取り組みが一定の効果を挙げてきていることから、平成 25 年度の実績並としました。大会参加費は昨年度の収入レベル、部会費は部会員の若干の減少を反映したレベルを見込んでいます。

支出については、大会事業の収支の大幅改善と経営合理化による収支改善を踏まえ、学会にとって重要な会員サービス向上、新たな活動分野への挑戦に予算を振り向けることとしました。このため、常置委員会と支部には、昨年度同様、節約予算での活動をお願いしています。

なお、セミナーは独立採算を原則としていますが、学会活動の活性化を図るため、繰越金の活用を認める方向で平成 26 年度に規程を改定しました。また、繰越金のみでは不足の場合には配分金の活用も認めるとともに、活動資金の前借と、複数年にわたる配分金からの返済も可能とする改定を行っています。

#### 2. 平成 27 年度予算案の内容

各組織から出された予算申請額は当初の理事会予想を上回りましたが、各組織の経営努力に期待し、また活動をさらに活性化して頂くことの必要性に配慮し、不足分は繰越金を充当することとして、各組織からの申請をほぼそのまま認めて計上しました。

収入に関しては、受取会費 11,920 万円、受託事業や大会事業等の事業収益 11,249 万円を見込んでいます。受取補助金、寄付金などを含めた経常収益は総額 24,265 万円としています。

支出に関しては、受託研究、大会、部会、常置委員会、「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」、「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会、「福島特別プ

ロジェクト」の活動費などの事業費に総額 16,791 万円、会計管理システム更新費、会員増強のための委託費、平成 27 年度重点課題である会員サービス向上のための会員管理システム改良などへの IT 化基金からの支出などを含めた管理費として総額 7,248 万円を計上し、経常支出総額は 24,040 万円としています。

この結果、学会の平成 27 年度予算は 478 万円の赤字となります。理事会としては、学会活動の活性化のためには繰越金などを取り崩しても対応する必要があると判断いたしました。各組織には、実際の予算執行にあたって活動の重点化や効率化をさらに進め、学会活動の費用対効果の改善にご協力いただきますよう改めてお願いいたします。(予算は平成 27 年 2 月 2 日現在の値。総会報告時には若干の変更があり得ます。)

(理事・財務担当 梅木 博之)

#### 「ご意見を聞く会」報告

本会は科学技術の社会応用を図る工学系分野の組織であり、世の中に役立ってこそ存在意義があります。福島原発事故を契機にわが国の原子力を取り巻く環境は大きく変化しましたが、本会からの情報発信を、学術団体としての信頼感を持って国民に受け止めて頂くためには、本会の成果や社会への発信の仕方など、学会活動のあり方を常に見直す必要があります。

そこで理事会では、学会が行う活動、学会に期待する役割などについて、忌憚の無いご意見を拝聴し、今後の活動の方向性を検討する参考とさせて頂くために、昨年 9 月 26 日には河原暉氏(元会長)と木村逸郎氏(元副会長)を、11 月 17 日には内山洋司氏(エネルギー資源学会長)と神津カナナ氏(文筆家、ETT 代表)をお招きして、ご意見を伺いました。

4 人の方々から、主に次のような提言を頂戴しました。

- ・科学技術に関する裁判の問題も議論が必要
- ・時代の推移に伴い、18 ある部会の再編も検討すべき
- ・図書館的に利用できる DB の整備が必要
- ・リスクコミュニケーションによるコンセンサス作り
- ・聞き手の感性、感情を考慮すること
- ・Myths and facts(虚構と現実)を丁寧に説明し、原子力関係者が変わった、という姿を見せる活動

理事会としては、今後これらの提言を学会活動の中にもどのように反映すべきか、検討していきます。

(理事・企画担当 田中治邦)