

巻頭言

- 1 堂々と逆風に立ち向かい原子力の前進を！
宮崎慶次

時論

- 2 今こそ深層防護の安全哲学の深耕を
ストレステストの真のねらいは、深層防護(Defense in Depth)の安全哲学の再徹底にある。
諸葛宗男
- 4 福島第一原発事故を受けて—反省と今後の在り方
日本学術会議がこれまで行ってきた原子力との関わりについて反省をこめて紹介する。
木村逸郎
- 6 データの奔流の中での“間合い”
原子炉事故や放射線に関する膨大なデータがあふれる中で、真の「知力」が問われている。
岩田修一

東日本の巨大地震に学ぶ(3)

- 14 地震と噴火と津波の国
地震国である日本には、長期間にわたる地震資料があり、その分析の成果がまとめられている。
尾池和夫

解説

- 17 東京電力福島第一原子力発電所の事故による衣服の放射性汚染—汚染状況の測定と簡易除染法の検討
放射性物質で汚染された衣服は、市販の装置や洗剤による洗濯によって、9割が除染されることがわかった。
中里一久, 北 実, 松田尚樹
- 29 福島第一原子力発電所事故時の災害初期対応の教訓—放射線情報の把握と活用に関連して
福島事故時の緊急事態宣言発出後の放射線情報の把握状況を概観し、緊急時モニタリング等の在り方を検討した。
占部逸正

解説

- 21 福島第一原子力発電所事故による放射性物質により汚染した廃棄物—廃棄物に含まれる放射性物質の数量と関係法令
福島事故により、放射性物質によって汚染された廃棄物が大量に発生した。これに対処するため「がれき処理特別措置法」が成立したが、処理・処分の具体的方法はまだ明らかではない。ここでは廃棄物と関係法令における関係について解説する。
ニッ川章二
- 25 福島原発事故で汚染した野菜はどれくらい放射能除去できるのか？—日本放射線安全管理学会が汚染除去をテーマに研究報告
放射性物質により汚染した野菜を水や煮沸で洗浄しても、放射能はあまり除去できなかった。しかし亜硫酸ナトリウム系の還元剤を使えば、ヨウ素131は80%まで除去することができた。
柴 和弘



放射能で汚染されたキャベツ(左)と、ふつうのキャベツ(右)。下の写真は放射能画像解析システムにより、放射能汚染分布を画像化したもの。

表紙の絵「白い函館」 製作者 樋口 洋

【製作者より】北海道函館山麓、坂と教会の町として知られる元町、ゴシック建築の元町カトリック教会は造形の美しさと雪がよく似合う。遠くに海峡も望め、雪晴れの北の教会が凜とした風景で迎えてくれる。

第42回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

解説

34 原子力安全規制庁の組織および職員に関する要件—福島第一原発事故の再発防止のために

原子力規制行政を改革するためには、規制機関の上級職員の専門性向上が緊急の課題である。原子力安全庁の長官および上級職員については、能力主義に基づく任命と欧米諸国と遜色ない在任期間とする必要がある。

森本俊雄, 澤田哲生

39 欧州型発電所の非常時電源と事故緩和ベント—原子力の信頼性向上策と福島国際センター設立の提案

全電源喪失事故の際には必要に応じて手動操作ベントを用いることにより、放射性物質の放出量を最小限にすることができる。ここでは欧州で採用されている電源とベント設備を紹介する。

杉山憲一郎

44 福島事故に対する欧米の対応—欧州の中間報告と米国で緊急対応必要なしの報告

EUに加盟している14ヶ国は9月に、ストレス・テストを実施。その結果、原子炉閉鎖が必要となるような深刻なプラントはなかったとの中間報告を発表した。

水町 涉

49 原子力協定の下で高速炉協力を行うための要件とは—日本とカザフスタンの高速炉に関する取極を例に

日本とカザフスタンとの2国間原子力協定には、高速炉の協力分野は含まれていない。協力の必要性、核不拡散性、平和利用等の要件を確保することによって、今年4月に高速炉の取極を締結することになった。

河口宗道

ATOMOS Special

世界の原子力事情(19) 東欧編

58 リトアニア

—4ヶ国で新原子力発電所建設計画

同国ではラトビアやエストニア、ポーランドとともに2基を建設する計画が進められている。

杉本 純

会議報告

60 中国で開催された軽水炉燃料の専門家会合の概要

坂本 寛, 杉山智之

【お知らせ】

ヒューリスティックな最適化手法とモデリング第2回は、お休みします

8 NEWS

- 野田首相が所信表明
- 政府が追加報告書をIAEAに提出
- 放医研 放射線教育用動画を公開
- 原子力委・新政策大綱が審議再開
- 概算要求, 事故をうけ安全対策強化
- 周辺五市町村の避難準備区域を解除
- 海外ニュース

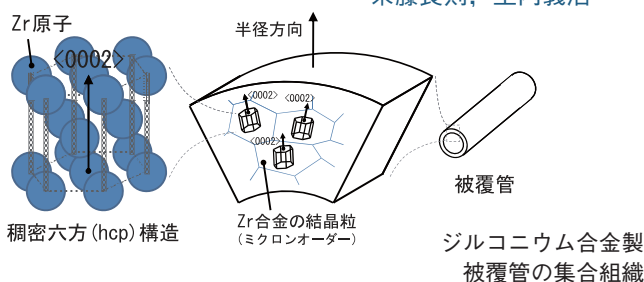
連載講座 第5回

材料が支える原子力システム

53 軽水炉燃料部材に用いられるジルコニウム合金

燃料被覆管の材料として使われているジルコニウム合金。過酷な環境下でも健全性を保ち続けるために、どのような研究開発が行われてきたのか。今後の展開がどうか。

栄藤良則, 土内義浩



ジャーナリストの視点

62 鳴らせなかった警鐘

大崎要一郎

48 From Editors

63 会報 原子力関係会議案内, 主催・共催行事, 人事公募, H24年度フェロー候補推薦募集, 訂正, 英文論文誌(Vol.48, No.12)目次, 和文論文誌(Vol.10, No.4)目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

65 編集委員会からのお知らせ

「英文論文誌 Taylor & Francis 社からの出版について」
後付 総目次・著者名索引(vol.53, NOS 1~12)

学会誌ホームページはこちら

<http://www.aesj.or.jp/atomos/>

WEBアンケート

10月号のアンケート結果をお知らせします。(p.61)
学会誌記事の評価をお願いします。

<http://atomos.aesj.or.jp/eng>

堂々と逆風に立ち向かい原子力の前進を！



大阪大学名誉教授・
大阪科学技術センター顧問

宮崎 慶次(みやざき・けいじ)

大阪大学大学院原子力工学専攻博士課程単位
取得退学，工学博士。大阪大学教授，雇用・
能力開発機構滋賀職業能力開発大学校長，
原子力委員会や経済産業省の委員会委員を歴
任。専門は原子炉工学とエネルギー変換。

原子力は長い冬の時代を終えて春が来たかと思いきや，3.11で再び厳寒の時代に逆戻りかと思わせる脱原子力が声高に叫ばれる昨今の状況であり，一部には原子力は本当に人間が制御可能な科学技術なのかと根源的な疑問を抱かせるに至っている。また，多くの原子力容認派に失望感を持たせ，脱原発を必然の将来方向とする風潮を生んでしまっている。北九州の学会では，議論と反省の弁で，報道にはおおむね好意的な論調がみられたのは幸いである。自然災害絡みの事故で放射能の広域拡散により地区に多大の被害を与えたが，放射線による重篤な健康被害はないとみられる。学会の議論では，なぜ津波が予測できなかったのかという疑問に対して「想像力の欠如」ということで収まった。しかし，背景には安全設計の成功体験にとらわれ，減価償却の済んだ旧式炉を長く使おうとする電気事業者の経営姿勢もある。せつかく，過酷事故に対する設備対応を取りながら，ソフト面での対応が不十分であったと筆者は認識している。東京電力はもっと情報開示に努めなければならない。もちろん，安全審査に携わる専門家は社会的責任を自覚し覚悟を決めて当たる必要がある。また，規制に品質保証が導入されて，さまつな文書文言に拘泥し，過酷事故対策がなおざりに付されてきた感がある。

事故調査・検証委員会(畑村委員会)は，発足にあたっての基本方針として，責任追及ではなく，原因究明に重きを置くとの趣旨表明がなされていた。なのに，当学会側が「個人に対する責任追及を目的としない」という立場を明確にすることが必要」と求め，委員が反発したとされる。当然であろう。私見を述べれば，組織といえど個人の集合体であり，それぞれの守備範囲があり，個人がその所掌分担を守るのが「レスポンシブル・ケア(responsible care)」の概念である。問題があれば個の責任を明確にしなければ全体像の解明や再発防止には繋がらない。

一方，日本のエネルギー状況は，脱原発や自然エネルギーへの転換など簡単にできるべくもない。神奈川県新知事が選挙公約の太陽光発電計画を撤回したのが証例だ。筆者は大学でエネルギー変換論の講義もしたし，生まれ故郷の岸和田市で教育委員の傍ら，省エネ委員・新エネ導入委員などを務め，各地の施設を見学し調査・検討した経験もある。将来的には自然エネルギーの比率を増す努力には賛成である。しかし，発電に関しては建設費が高くても燃料費が安価で経済合理性に富む原子力によって原資を稼がねばならない現実がある。定期検査済みの原発は即稼働させるのが本筋である。電力が逼迫または高騰すれば，日本は経済力と雇用を喪失し，経済格差が社会不安を招くリスクをもっと重視すべきだ。

安全性と経済性が優れた「次世代軽水炉」の研究開発が進んでおり，例えば，HP(High Performance)-ABWR及びHP-APWR(エネルギー総合工学研究所評価報告：2010年)は，炉心損傷・格納容器破損低減など過酷事故対策も設計上考慮，耐震・津波への裕度向上，航空機落下や対テロ安全防护にも対応，米欧のユーザ要件並びに安全規制に適合可能な国際標準となり得る設計で，将来のリプレースに備えている。幸い，野田政権のもとで「もんじゅ」は減速されても継続されそうな雰囲気ではあるが，次世代高速増殖炉の研究開発は足踏みとなる。ロシアはBN-600を30年間74%の稼働率で運転し，昨年，運転延長に入っている。筆者は30周年式典で2度目の訪問の機会をえたが，隣の敷地ではBN-800の建設が着々と進んでおり，今後，BN-800をロシア国内に2基と中国福建省に2基程度の建設の計画があるという。折から北京では高速実験炉の臨界達成も報ぜられた。また，フランス側から次期高速炉 ASTRID 計画(50~60万 MWe，タンク型)の説明を聞いた。「もんじゅ」で先行しているはずが，ふと気が付けば立遅れとなっている事態を憂慮する。原子力に理解を得るためには，原子力学会・専門家の安全追及の使命と社会的説明責任は大きい。失敗から学ぶ教訓は宝の山，各自が自覚を新たに堂々と論陣を張って，信頼性の回復に努めることが肝要と考える。

(2011年 10月13日 記)



今こそ深層防護の安全哲学の深耕を



諸葛 宗男(もろくず・むねお)

東京大学特任教授

1970年東大原子力工学科卒。同年(株)東芝入社。同社で約36年間燃料サイクルプロジェクトに従事。2002年同社原子力事業部技監。2006年より東大公共政策大学院特任教授となり、2007年より原子力安全規制法制の研究に取り組み現在に至る。

はじめに

欧州諸国で実施しているストレステストの調査のため、9月中旬に欧州各国及びEU本部の規制機関を訪問し、各国の安全規制機関の幹部と意見交換する機会を得た。それらの会談で得た印象は、安全裕度の確認が目的とされているストレステストの真の狙いが深層防護(Defense in Depth)の安全哲学の再徹底にあることであった。実施要領にも「深層防護手段の堅牢性と現状の自己管理体制の妥当性を評価するとともに安全上の改善点を特定する」と書かれており、深層防護の堅牢性を確認することが明示されている。福島事故で全交流電源喪失と最終ヒートシンクの喪失により、深層防護の守りが破られ、大量の放射能を放出してしまったことに対する反省から深層防護の点検に重点を置くことにしたのは当然といえる。我が国もこの際、深層防護の考え方を、「深層」と呼ばれるだけ各層が「堅牢性」を有しているのかという観点から検証する必要がある。世界で最も安全性の高い原子炉を目指すというためには国際基準に合致しているのか、という観点からの検証も不可欠である。

なお、「Defense in Depth」のことを「多重防護」と訳されることがあるが、これは5重の壁を意味する「多重障壁」と混同される恐れがあるので、本稿では一貫して「深層防護」を用いる。原子力界が統一して「深層防護」を用いることを提案したい。

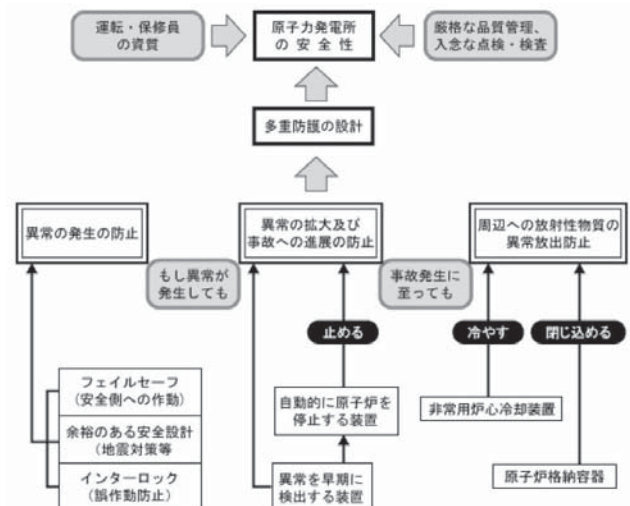
深層防護とは何か

深層防護は5層の防護障壁で構成されている。1層目は「異常の発生防止」(通常系)、2層目は「異常の拡大防止」(防止系)、3層目は「異常の影響緩和」(緩和系)、4層目は「過酷事故対策」、5層目は「防災対策」である。この深層防護の安全哲学はIAEAの安全原則8に次のように記されている。「ひとつの防護障壁が万一機能し損なっても、次の防護障壁が機能する。各防護障壁が適切に機能する場合、深層防護は、単一の技術的故障、人為的あるいは組織上の機能不全だけでは有害な事故は生じず、複数の原因が重畳して有害な事故が発生する確率も非常に低くすることができる。複数の防護障壁が独立性を持って機能することが深層防護の不可欠な要素である。」

すなわち、それぞれの層が独立して防護の役割を果たすことが深層防護の不可欠な要件なのである。もし、複数の層が“合わせ技”でなければ防護できないのでは深層防護とはいえず、IAEAの安全原則8の要求を満たしていないことになる。EUのストレステストでは「安全裕度」を確認するだけでなく、深層防護の1層1層の機能が独立して機能しているのかどうかを確認するという重要な目的も併せ持っているのである。この確認を通じて深層防護の安全哲学の再徹底を図ろうということである。止める、冷やす、閉じ込めるの深層防護

原子炉停止の最も重要な機能は止める、冷やす、閉じ込めるの停止操作である。どのような場合にもこの停止操作によって安全に停止できることが最も基本的な安全機能である。この基本機能に対して、深層防護の安全哲学がどのように適用されているのかを原子力安全・保安院のホームページで確認したものを第1図に示す。(http://www.nisa.meti.go.jp/genshiryoku/sekkei/anzen.html#sekkei)

第1図では「止める」が2層目、「冷やす」「閉じ込める」は3層目に位置づけて説明されている。停止操作が3層目まで使った“合わせ技”で行われるという説明になって



第1図 NISA ホームページの深層防護説明図

いる。もし、本当にこのような設計になっているのであれば、停止操作が通常系を飛び越していきなり防止系や緩和系まで動員しないと実施できない設計になっていることになり、IAEAの安全原則8に明白に違反していることになる。実際の停止操作は1層目の通常系だけで行えるようになってはいるはずであり、図の説明は正しくない。止める、冷やす、閉じ込めるのそれぞれに対して、通常系、防止系、緩和系の3層の深層防護対策を記載すべきである。実は、この図の間違いは単独のケアレスミスでない。同じ説明が過去の原子力安全白書にも、あるいは各種委員会での政府の説明資料にも繰り返し使われている。この図により多くの関係者に「深層防護は合わせ技で成り立っている」との誤解を与えてきたのではないかと懸念される。早急な改善が望まれる。

深層防護は規制当局にどう説明されてきたか

では、我が国の安全設計の指針や基準類では深層防護をどのように説明されているか。「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」に59項目の指針が掲げられているが、深層防護のことはどこにも書かれていない。技術基準にも書かれていない。多くの設計者が理解していないのも無理ないことである。原子力安全委員会の図書では原子力安全白書に書かれているだけである。それも5層の深層防護のうちの3層の記述しか書かれていない。「異なる防護レベルの独立した有効性」については全く記述がなく、独立性については既述のとおり、第1図と類似の説明がされている。

原子力安全・保安院の方はどうか。ホームページの説明は第1図だけしかなく、深層防護についての解説は全くない。関係者に問い合わせたところ、内規に記載されているとのことである。ネットを検索したら平成18・03・23原院第3号「原子炉設置(変更)許可申請書に係る安全審査内規」が見つかり、ここに「通常系」「防止系」「緩和系」の3層についての説明がされていることが判明した。一般の人がこれを探し当てるのは至難の業である。「異なる防護レベルの独立した有効性」については全く記載がない。原子力発電所の最も基本的で重要な安全哲学である深層防護についての説明がこのような取扱いになっていることは大きな問題である。福島事故を受けて「安全思想が風化していた」といわれているが、風化したのではなく、もともと徹底していなかった疑いが濃厚である。

重要度分類の説明

設計指針や技術基準に深層防護の説明がないのに、その考えに基づいて作られたはずの重要度分類の設計指針は存在する。原子力安全委員会の「重要度分類に関する審査指針」がそれである。ここには深層防護の「防止系」と「緩和系」の設備、系統が具体的に示され、それらの設

備、系統は分離及び隔離の原則が適用され、異なる防護障壁、異なる重要度の機能的隔離及び物理的分離を適切に考慮しなければならないことが定められているが、「異なる防護レベルの独立した有効性」やその確認手順は全く記載されていない。

訴訟での裁判所への説明

安全審査の妥当性が争われる訴訟で政府が裁判所に提出した資料には、既述の内規より詳しい説明がされている。「防止系」については「第一の対策にもかかわらず、仮に異常状態が発生した場合においても、その異常状態が拡大したり、更には放射性物質を環境に異常に放出するおそれのある事態にまで発展することを防止できるもの」そして「緩和系」については「第一及び第二の対策にもかかわらず仮に放射性物質を環境に異常に放出するおそれのある事態が発生した場合においてもなお、放射性物質の環境への異常放出という結果を防止し公共の安全を確保できるもの」である。これらの記述であればそれぞれの防護障壁が「異なる防護レベルの独立した有効性」を有しているとも読み取れるが、この説明は残念ながら裁判官向けのものであり事業者向けでない。

IAEAの説明

IAEAの図書では既述の安全原則8の他、1996年に我が国を含む各国の規制機関の代表が集まって「Defense in Depth in Nuclear Safety」(INSAG-10)が取りまとめられ、ここに深層防護の考え方が詳しく記載されている。

結言

福島事故の最大の教訓は深層防護の障壁が余りにも軟弱だったことである。その原因のひとつは本稿で検証した通り、深層防護の考え方が十分徹底していなかったことである。我が国もEUにならってまずはストレステストの中で深層防護の堅牢性を検証し、現状設計の妥当性を評価し改善点を抽出することが望まれる。その際、特に「異なる防護レベルの独立した有効性」を重点的に検証することが求められる。安全障壁の各層が「合わせ技」でなく、単独で事故の発生防止の機能を有していることを確認することである。安全設計の3つの障壁はその独立した安全障壁3つにより事故を防いでいることの確認である。さらに第4の障壁である過酷事故対策の検証も重要である。万一、今回の事故のように、第1、第2、第3の障壁が破られた場合は第4の障壁によってなんとかしても外部への放射能放出を食い止めなければならない最後の砦だからである。この過酷事故対策は単にハードウェアの対策だけでは不十分である。なによりも混乱状態でのマネジメントが重要である。これは訓練によってのみ得られる技術であろう。この面の対策強化も早急に実施することが求められる。(2011年10月24日 記)



福島第一原発事故を受けて—反省と今後の在り方



木村 逸郎(きむら・いつろう)

大阪科学技術センター・顧問、
京都大学名誉教授
京都大学原子炉実験所、工学部、大学院工
学研究科・教授、原子力安全システム研究
所技術システム研究所長を経て、現職。日
本学術会議会員、本学会副会長等を歴任。

1. はじめに

本年3月11日に発生した東京電力福島第一原子力発電所(福島第一原発)の事故から7ヵ月を過ぎ、関係者の懸命の努力により冷温停止状態に近づいた。周辺地域の放射性物質による汚染は大きな社会問題となっているが、9月末には緊急避難準備区域が解除された。そして本格的な放射性物質の汚染除去作業が始まっている。

日本原子力学会(本学会)は、この事故発生直後から積極的に対策に取り組み、報告や提言を出し、本誌にも掲載されている。筆者は2001年から5年間、本学会の推薦を得て日本学術会議(学術会議)会員に選ばれ、またその後、本年9月末まで連携会員を務めてきた。そこで学術会議の立場で、これまでの反省を込めながらこの事故と今後の対応について考察する。

2. 学術会議初期の原子力平和利用および放射線障害防止に関する活動

1949年の発足以来、学術会議では物理学の会員の一部が原子力平和利用に取り組み、1953年秋の総会に「原子力問題の検討について」という提案をしたが、反対多数で取り下げとなった。ところが、翌年春に原子力平和利用予算が突如国会で成立したのを受け、学術会議の春の総会で、「原子力の研究と利用に関し、公開、民主、自主の原則を要求する声明」が採択された。この内容が翌年成立した原子力基本法に取り入れられたのは周知のことである。しかし後述するように、現在、学術会議の中では、原子力の平和利用を先導したことをまず反省すべきでないかという声さえある。

その後、学術会議は原子力平和利用のための学術(原子力学)の推進を図った。ただ学術会議における原子力学の推進において、自らを縛り活動範囲を狭めたのは、いわゆる「矢内原原則」であった。ここでその詳細は省略するが、大学の原子力研究は国の研究開発とは一線を画すというこの原則が学術会議の審議対象にも準用され、学術会議では大学における原子力学の推進に重点が置かれた。それでも内外の原子力施設等で事故が発生した場

合には、シンポジウムを開催したりした。しかし、原子力発電や核燃料サイクルの本質に迫り、またその安全性を厳しく追及することはほとんどなかった。また高レベル放射性廃棄物の処分の問題なども取り上げなかった。ただ、最近ようやくこの問題に対する取り組みが始まっている。

学術会議が原子力平和利用の方針を打ち出したすぐ前の1954年3月、太平洋ビキニ海域でわが国のマグロ漁船「第五福竜丸」が米国による水素爆弾実験の死の灰を浴び、乗組員が被ばくした。これを受けて学術会議では秋の総会で「国立放射線基礎医学研究所の設置について」の申し入れを採択し、これが放射線医学総合研究所の設立につながった。一方、原子爆弾の影響については、戦後間もなく米国科学アカデミーが広島と長崎に原爆傷害調査委員会(ABCC)を設置していたが、閉鎖的であり、広島大と長崎大に原爆医学の研究所と施設が設置された。学術会議としては、より基礎的な研究は大学において進めることが必要だとして、1968年11月に「放射線影響研究の推進について」という勧告を出した。これを受けて、京都大と金沢大にそれぞれ放射線生物研究センターと低レベル放射能実験施設が設立された。その後、学術会議は保健物理学研究センターの設立を要望したが、これは実現していない。福島第一原発の事故への対応からすれば、このセンターもどこかに設置されていたらよかったと思われる。

3. 原子力学に関する教育と研究およびこれに関連した学術会議の活動

わが国で原子力平和利用を推進するために、まず1955年に日本原子力研究所(原研)が設置され、研究が開始した。一方、教育と研究のため、その翌年から大学に原子核(力)工学の大学院の専攻と学部の学科が次々と設置された。とはいっても、いわゆる旧帝大、東京工業大、神戸商船大と私立大学の数校に限られた。米国の大学の原子核工学科では、多くの場合、研究炉を併設して教育訓練と研究に用いたのに対して、わが国では、国立大学

では京都大と東京大、そして私立大学では近畿大、立教大と武蔵工業大だけが研究炉を保有するに過ぎなかった。このため学術会議では、原研や私立大学の研究炉の共同利用(学生実験を含む)を進め、さらに1971年には大学共同利用の臨界実験装置の設置を勧告し、これは京都大に設置された。しかしその後、大学の研究炉は次々に廃止され、現在では京都大の2基(上記臨界実験装置を含む)と近畿大のものを残すのみとなっている。両大学とも全国の原子核(力)工学の学生に対する実験・実習のため努力されているが、それでもこれで十分か懸念される。

さて大学に原子核(力)工学専攻や学科が設置された当初は、もともとそれを専門とする教官はいなかったもので、工学部の機械工学、電気工学、冶金学、応用化学などの学科はもちろん、理学部の物理学科や化学科からも教官が集まった。しかし、土木・建築系学科や理学部の地球物理学科等からの参加はほとんどなく、地震や耐震の教育と研究は取り上げられなかった。一方で医学部に放射線健康管理(放射線障害の防止)の講座が設置されて、原子核(力)工学の教育を支援した。これは素晴らしいことであったが、専攻や学科内で放射線障害の防止に取り組むことが少なくなった。

各大学とも原子核(力)工学科は人気が高くなり、入試の難しさと医学部と並ぶところさえあった。こうした学科や専攻を履修した優秀な人材がわが国の原子力平和利用をリードしてきたといえよう。しかし、やがて自分達の学科や専攻を出た人材ばかりを次々に教官に採用して、他の学科との人事交流は減り、学問的にも閉鎖的になったのではないかと。さらに電力業界、推進と規制の官庁とのつながりが増え、いわゆる原子力ムラが形成されたという指摘が多い。矢内原原則とは逆に、大学の原子核(力)工学の教官・教員は、他の専攻や学科の人達よりも、はるかに多く官庁などの委員などを請け負ってきたのではあるまいか。原子力の安全規制を標榜する官庁の方は、自らは物事を決められず、大学の教官・教員団に頼り過ぎてきたように思うので、現在検討が進められている原子力安全規制庁ではもっと自らやるのがよい。

学術会議の会員として、筆者は2003年3月に「人類社会に調和した原子力学の再構築」という対外報告をまとめた。その中では、(1)原子力の安全を広く安全学の枠組みで強化、(2)放射性物質による環境汚染の予防等の研究の重視、(3)放射性廃棄物の処理処分などバックエンド対策研究に重点、(4)広く開かれた枠組みの中で原子力学の教育と人材養成を再建、(5)原子力の研究開発における産学官の連携と協力を謳った。このうち、(1)~(3)は現在の問題そのものである。(5)は上述のように、原子力ムラとして指弾されているので反省が要る。ただ、筆者として現在最も心配なのは(4)であり、危機に瀕した原子力学の教育を今後いかに再建するかということである。しかし

これについては、まず大学の現役の方々にお任せするしかない。ただ今後の原子力の安全性強化のためにも、本学会や学術会議でもこの問題にはしっかりと取り組むべきであろう。

4. 学術会議の東日本大震災対策と今後の課題

本年3月18日、学術会議では東日本大震災に対する緊急集會が開催され、東日本大震災対策委員会および関連する分科会が設置された。筆者も緊急集會に出席し、福島第一原発事故について、針のむしろに座る気持ちながら、その対応に微力を尽くしたいと訴えた。その後、上記委員会と分科会において審議が進み、いくつかの緊急提言などが出されている。とくに、原子炉の事故そのもの、放射性物質による周辺環境の汚染などに対しては、総合工学委員会に原子力事故対応分科会(委員長・矢川元基会員)が設置された。これは本学会および機械学会と土木学会からも応援を得ている。

ここでは、より広く上記委員会と分科会の提言や記録を通覧し、福島第一原発事故と原子力学に関係する事項を取りまとめた。主なものは次のとおりである。

(1)原子力平和利用の道を開き、基本方針を示した学術会議として、自己点検が要る。(2)学術会議として、このような事故と災害発生の可能性を検討できなかったか。(3)学術会議としてもこの事故の原因の調査と検証が必要である。(4)原子力の安全性について、第17期(1997年7月~2000年7月)に提唱された安全学が活かされていない。(5)危機管理体制や情報公開の在り方を検討すべきである。(6)周辺区域での精密な放射線量の調査。(7)高放射線下でのロボット技術の開発。(8)作業員の確保、きちんとした雇用関係の確認。(9)これ以外の原発について安全性総点検。(10)より安全な原発の研究開発。(11)地震学などの成果が原発の安全確保に十分生かされなかった理由。(12)放射性廃棄物の安全な処理体制の確立。(13)放射線被ばくに関する基準の周知と独立した調査機関の設置。(14)食品への放射性物質の移行と汚染の研究。(15)汚染された土壌の回復の研究。(16)避難者の救援、生活環境の回復と住民の健康管理。(17)低線量放射線の人体影響研究、とくに子どもに対する影響に重点。(18)ヒト以外の生物に対する放射線影響調査。(19)原子力エネルギーの利用について学術会議としてしっかりと議論し、その上で、改めて意見を表明。(20)これまでの原子力開発と地域社会の関係の調査。(21)広範囲にわたる放射性物質の挙動の調査と解明。(22)原子力行政の在り方、原子力ムラの問題。

ここでは個々の課題については述べないが、今後、本学会も学術会議や他学会と協力して、これらの課題に真摯に取り組んでいただきたい。そうした努力こそが原子力学の再構築につながるものと信じている。

(2011年10月21日記)



データの奔流の中での“間合い”



岩田 修一(いわた・しゅういち)

東京大学 新領域創成科学研究科教授
核燃料工学, 合金設計, 材料設計, 人工物
工学, 設計科学, ライフサイクル工学, 環
境デザインと視点とアプローチを変えなが
ら, 現在はデータ科学を基軸にして活動
中。Editor-in-Chief, Data Science Journal/
CODATA。

人文学の学生達に福島第一の状況についての講義をしてくれと旧知の友人に頼まれ、アムステルダムから日本への帰途で寄り道をしてポーランドに立ち寄ることにした。日本人の一人の学徒として、今、何を考え、反省しているか未来を託すべき若者に話さなければいけないと感じたからである。

ポーランド滞在の半日は極めて濃密な時間となった。出迎えに来てくれた老ジャーナリストが語ってくれたマンハッタン計画直後の科学が技術を先導した頃の空気や約30年前の同地での高品質のデータを手掛かりにした気候変動の議論などを思い出しているうちに小高い丘の上のホテルに着いた。時計の針は既に夜の9時を回っていた。遅めの夕食会があって、「講義時間を明日に変更したので今晚はゆっくり休んでくれ」と解放されたのは零時に近かった。

翌朝は浅い眠りのところを想定外の蚊の襲撃に会い早朝の散歩となったが、そこは別世界だった。工業製品が皆無で、川の流れ、虫の声、鳥の声、小舟で静かに釣り糸を垂れる釣り人と古城ホテルとが完璧に融けあった静止画のような空間で、脳の中は完全にリセットされ浄化されたような気分になった。散歩しながら携帯のGPSで場所を確認し、ワルシャワの北約70 kmに位置するブルツスクという小さな町にいたことが分かった。街角の観光ガイドの看板には、ここはナポレオンが帝政ロシアと戦った古戦場で、戦勝後に伯爵夫人マリア・ヴァレフスカと過ごした場所との記載があった。約200年余の歴史の経過を感じさせない空間を1時間ほど堪能した後、朝食をとり、馬車ではなく車で大学へと向かった。

半日遅れの講義は予定通り人文学の教室で実施された。教育プログラム：エラスムプロジェクトで選抜されたロシアやCIS諸国の俊英とプログラム担当の学長、指導教員、ジャーナリストが聴衆であった。講義では、貞観地震からの天災の歴史、今回の予兆としてのカルパッカムへの津波、人工物としての原子炉の設計方法の見直し、福島第一からの教訓、低線量被曝に関連する基本的人権や人間の安全保障などについて私見を述べた。最後のスライドにはポーランド出身のキューリー夫

人の肖像のある旧20,000ズロチ紙幣を使い、キューリー夫人達が拓いてきた「核」という価値のキャリアを人類全体の共有する公共的な財産として利用するための総合的な技術の完成に私達は努力すべきであるとして約2時間の講義をまとめた。

人文学(humanities)は人間が考えることをまとめ始めた頃からの長い歴史のある学問分野で、自然科学が学問的対象とする自然(nature)に対して、人工物工学(research into artifacts)の学術アジェンダであった人間・人為の所産(arts)を研究対象とする学問であり、またそれを可能にする人間本性(human nature)を研究する学問で、そうした場での講義を依頼されたのを知ったのは迂闊にも講義が終わってからの学長との懇談の場でのことであった。ブルツスクの北には1755年のリスボンの震災に大きな精神的影響を受けたカントが暮らしたカーニングラードがあり、その地域には人文学という学問の豊かな土壌が形成されていて、だからこそチェルノビリ事故後25周年を機に「核と人間」の問題を考えるセミナーを企画できたのだと想像した。オイルピーク、ガスピークに関連した社会的リスクを和らげるため「核」との関係をしっかり考え始めているのである。そこには先端的な専門技術の母胎となる「学問」の真の基礎への探求が存在するのである。学問的な「連帯」へのお礼としてもらったのはコペルニクスの顔と太陽系のレリーフが鑄込まれた特製メダルだった。ショパンのCDの売り上げによる東日本大震災のため募金運動についての件の老ジャーナリストの話とカップリングして、美と品格に満ちた文化が体中に拡散した。

空港への帰路は、ポーランド「連帯」NSZZの元闘士がエスコートしてくれ、車中で1980年代前半のポーランドの苦悩を歴史の証人から直接に聴く機会に恵まれた。社会運動としての「連帯」の意味について議論するだけの思索ができていないので、これ以上、言葉を連ねることができないが、石油文明に支えられた産業革命パラダイムがほころびを見せ始めた時代だったのだらうと想像しながら、ブルツスクの時空と福島の時空とを重ね合わせ、新たなビジョンを創出するための素養—例えば人文学の

ような学問の基礎の必要性を強く感じた。

では、素養だけで問題は解決するのであろうか？ 1 mSv, 20 mSv, 100 mSv…という議論はフランス革命以前の地方権力の象徴であった地方度量衡の際限のない複雑さを思い出させ、パリ工芸博物館に収蔵されているラボアジェが使用した圧巻の物理天秤、「正しい実験と精密な測定」という信念、そして技術への執念を連想させる。ラボアジェ達が「何をそこまで正確に測る必要があるのか」という当事の人々の常識を超えて、「正しい実験と精密な測定によってこそ、科学という学問に強固な基礎が与えられるものである」こと、そして「科学は価値中立である」ことを実証したシンボルである。そしてアルシーヴのキログラム原器の作製から約200年余かけて最近ようやく達成した普遍的な論理による重さの定義は、同様に科学と技術の方向と価値を見事に示している。

生体の機序が複雑だからといって放射線被曝に関する安全基準が専門家によって異なり社会が混乱するのは科学・技術が未熟なためだと言わざるをえないが、未熟さを前提としながら社会に秩序と安定性とダイナミズムを与えるための例えば人文学の勉強が不足しているためでもある。科学としての不確実性の徹底的な議論は価値中立の科学の土俵の上で徹底的に行い、技術としての価値、リスクの評価は技術的な想定と評価の基準で行い、社会としての意思決定については決め方の論理についての合意を通して実施されるべきである。それぞれの専門領域の徹底的な深堀り、分節化と共に、それぞれ密接に関係する科学と技術、科学と社会、技術と社会、そして社会と人間の間の程よい間合いが必要である。長さの基準を不変と考えられた地球の大きさに求め、物理的に定義することに成功していなかった重さの基準を相対的な違いに求めて社会的な混乱を克服し基準を確立したフランスの歴史は、現在約70億人が直面するグローバルな課題の解決のための範例である。

ところで21世紀はメディアやインターネットを通してゼタ Z (10^{21}) バイトの多種多様なデータが奔流のように世界を駆け巡る時代である。ある学説によれば、人間はエクサ E (10^{18}) バイトのデータを蓄積する能力があるというが、脳の処理能力にも限界がある。人間はこの奔流に耐え、必要なデータを着実に抽出して合理的な判断を継続できるであろうか？ 刺激的なデータだけが Copy & Paste され強調されて品質の悪いデータが社会を席卷し、そうした風評を介して社会全体を間違った方向へと導くことになりはしないだろうか？ 3.11以降の原子炉事故関係のデータのライフサイクルと流通を観察してみると、1次データの発生から意思決定にいたるプロセスで特定のデータだけが強調されて全体像を見失い社会的な混乱が加速され増幅しているように見える。

コンピュータの処理能力はペタ P (10^{15}) フロップスの領域での競争に突入し、機器分析の能力の進歩は、人類のデータ・知識をアト a (10^{-18}) からナノ n (10^{-9}) で表現される時空間へと大きく拓きつつある。人口の増大、市場の拡大、経済成長、工業製品の大量生産、エネルギー・資源の大量消費が連動し、安価な CPU やメモリー、計測機器は大量で多様なデータを吐き出す。たたき込まれるデータの量が私達の脳の情報処理能力を超えそうになると、脳は棄却、強調、単純化、抽象化、統計、汎化、類推、分節化、専門化、構造化、標準化、体系化、Copy & Paste、モデリング、並列化等々の様々なデータ処理のテクニックを駆使して知的資源の再利用を図り、思考プロセスを最適化しようとする。脳は基本的に“怠け者”なので、全体像を獲得するための素養と修練が必要である。

「気候変動」や「格差」といった因果関係の錯綜した難しい課題の解決には既往の専門分野の知識だけでは対処できない。事実関係の推移を直視し、状況の変化に適応してプロアクティブに行動する能力が求められている。そして「核」の管理と活用においては、問題の複雑さとともにその潜在的な可能性とリスクの高さゆえに、広い視野と問題の本質を迅速に理解し解決するための確かな判断力/決断力/実行力が必要となる。多様な個性、能力、履歴、価値観をもつ個人の可能性を最大限に引き出し、9.11以降の世界に顕在化した亀裂、断絶や軋轢のある不均質で多様な地政学的空間の特徴を理解し、様々な違いを乗り越え、ていねいで大胆な活動計画を共考し、共働する知力が必要である。

国内では、3.11以降、メディアを通して国民全体が地震、津波、原子炉事故や放射線に関する膨大なデータや知識を獲得し、低線量被曝についても自分でデータを獲得して考え行動するようになってきた。社会全体でリスク、セキュリティ、安全や富の維持・生産、価値の創成について真剣に議論する土壤が形成されつつある。今こそ、私達は専門家集団として社会への適正なデータ、知識提供をし、日本社会全体の知力が世界から評価を得られるような結果を出すことに貢献しなければならない。

国家の存亡を決めるものは人材である。約200年前とは格段に異なる豊富なエネルギーに支えられた現代社会を論じる時、事をもう少し冷静に、データと歴史を踏まえて多元的に考え、何が大切かを論ずる必要がある。データの奔流に飲み込まれず、流されず、間合いが取れ、社会を先導する本質的な議論ができる人材の輩出が期待されている。東大入試に象徴されるような伝統的なコンテクストに依拠した日本の教育システム、教育コンテンツの抜本的な見直しが必要である。

(2011年11月3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。資料提供元の記載のない記事は、編集委員会がまとめたものです。

野田首相が所信表明、安全性確認して再稼働を

野田佳彦首相は9月13日、衆院・参院各本会議で所信表明演説を行い、「大震災がもたらした国難に立ち向かう重責を全力で果していく決意」を強調し、国民の理解と協力を求めた。

同首相は9月8日に同原子力発電所の敷地内を視察し、「2,000人を超える方々がマスクと防護服に身を包み、被曝と熱中症の危険にさらされながら、事故収束のために黙々と作業を続けている」とし、除染作業にあっている自治体職員なども含め、さまざまな現場で働く人々に「もっと思いを致す必要があるのではないか」と訴えた。また、「忘れてはならないのは被災者、とりわけ福島の方々の抱く故郷への思い」であり、原発事故の収束を「国家の挑戦」と捉え、「福島の再生なくして、日本の信頼回復はない」と決意を語った。

エネルギー政策については、「2030年までをにらんだ

エネルギー基本計画を白紙から見直し、来年の夏を目途に、新しい戦略と計画を打ち出す」方針で、今後、幅広く国民各層の意見を聞きながら、冷静に検討していくとしている。

原子力発電については、「『脱原発』と『推進』という二項対立で捉えるのは不毛」としながらも、「中長期的には、原発への依存度を可能な限り引き下げていく、という方向性を目指すべきだ」と主張した。

一方で、既存の原子力発電所の再稼働については、安全性を徹底的に検証・確認した原子力発電所については、「地元自治体との信頼関係を構築することを大前提として、定期検査後の再稼働を進める」と明言。安全規制の組織体制については、環境省の外局として、「原子力安全庁」を創設して「規制体制の一元化を断行する」と述べた。

日本政府が追加報告書を IAEA に提出

政府は9月11日、福島原子力発電所事故に関するIAEAへの追加報告書を取りまとめた。野田内閣発足後、初めて開かれた原子力災害対策本部のほか、震災関連の3対策本部合同会合で決定されたもの。さる6月開催のIAEA閣僚会議に提出した報告書以降の事故収束、被災者対応、同報告に示した28項目の教訓への取組状況のほか、安全強化に向けて追加的に実施した取組についても整理した上、引き続き、世界への透明性確保、情報提供を図る。追加報告書はIAEA総会へ提出された。

前回の報告書公表以降、福島第一発電所の原子炉と使用済み燃料プールの安定的冷却が達成されるなど、事故収束に向けたロードマップのステップ1が終了し、ステップ2が進みつつある。さらに安定的な冷却の実現には数か月を要するため、追加報告書では、6月以降の取組状況を取りまとめたほか、被災者に対応する「オフサイト対応」と、事故収束後の現場における中長期的計画を示した「オンサイト計画」について、独立した項目を立てて述べている。

放医研、放射線教育用動画を公開

放射線医学総合研究所は9月20日、同研究所の研修課程で実際に使用している「放射線教育用アニメーション」の一部を同研究所ホームページで一般公開した。今後コンテンツを追加していく。

東京電力福島第一原子力発電所事故により、放射線のことを知りたいというニーズが高まっていることを受けて、放射線についての正しい知識と測定法を習得してもらうことを目的としている。

原子力委・新政策大綱、半年ぶりに審議再開

福島第一発電所の事故以来、約半年間中断していた新大綱策定会議が9月27日、再開された。今後1年を目途として、新しい原子力政策大綱を取りまとめる。

会合ではまず、福島事故後の政府や東京電力等の対応

についてそれぞれ説明。その後の議論では、「電力供給不足に経済活動が妨げられており、早期の解決が必要である(大橋忠晴・日本商工会議所副会頭)」、「国民の考えは今混乱しており、原子力の必要性について改めて意見

を共有していく方法を考えていくべき(山名元・京都大学原子炉実験所教授)などの意見が出された。

また細野・原発事故担当相は、原子力に対する国民の

概算要求, 事故受け安全対策強化

政府の2012年度予算概算要求が、9月30日までにまとまった。経済産業省では概算要求にあたり、(1)原子力事故・震災からの立ち直り、(2)従来のエネルギー政策の反省・聖域なき見直し、(3)急激な円高・空洞化への対応、(4)内需活性化・グローバル化・イノベーションによる新たな成長——を4本柱に据えた。

資源・エネルギー関連では、原子力事故の収束・原子力安全の強化に向けて510億円を要求。立地自治体の防災体制強化を図る「原子力発電施設等緊急時安全対策交付金」に前年度より大幅増の95億円を復興対策経費として計上したほか、「発電用原子炉事故対応関連技術基盤整備委託費」(20億円)、「発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備委託費」(40億円)、「発電用原子炉等安全対策高度化技術開発費補助金」(32億円)等を新規要求にあげた。原子力の広聴・広報は風評被害対策に、研究開発は安全性向上に特化したものとなっている。エネルギー対策特別会計は8,174億円(対前年度比11.1%増)で他に復旧・復興対策枠として121億円が計上している。

原子力安全・保安院関連では383.3億円(同21.4%増)を要求。原子力安全規制部門に関わる部分は12年4月に新設される原子力安全庁での執行を見据え、今後、改革準備室とも調整を図る。

文部科学省では、原子力災害からの復興として166.8

億円を要求しているほか、イノベーション推進、基礎研究の振興、人材育成などに資するよう所要の予算を計上した。原子力災害対応関連では、福島県および全国での環境モニタリング強化として55億円、除染技術・事故収束の研究開発・人材育成強化として44億円の計上などとなっているほか、復旧・復興対策枠として原発対応関係で計209億円を要求している。高速増殖炉サイクル技術は326億円(同18.9%減、復興・安全確保関係を除く)と、前年度より減額しており、12年度は維持管理などを除き研究開発は凍結する方向だ。ITER計画は、建設段階への移行を踏まえ、226億円(復旧・復興対策枠除く)とほぼ倍額計上となっている。

環境省では、災害廃棄物の処理、除染、その他の有害物質対策等を含む復旧・復興対策枠の8843億円によって大幅に押し上げられ、計1兆1,338億円と、11年度当初予算額の約5.5倍に膨れ上がった。放射性物質により汚染された土壌等の除染および汚染廃棄物の処理に関しては、関係省庁の協力で行うが、中間貯蔵施設の整備や高濃度汚染地域の対策費用を除き、1兆数千億円程度の経費が見込まれている。このため約2,500億円を11年度第3次補正予算に、4,536億円を12年度当初予算にそれぞれ計上し、約2,300億円の13年度負担分を国庫債務負担行為によりあらかじめ確保することとしている。

周辺5市町村の避難準備区域を解除, 帰還へ準備

政府・原子力災害対策本部は9月30日、福島原子力事故に伴う「緊急時避難準備区域」の解除を決定、同日に公示した。これにより同区域は4月の設定以来、約5か月ぶりに解除された。

「緊急時避難準備区域」は福島第一原子力発電所の事故状況が安定していないころ、住民が緊急時に屋内退避や自力避難ができるよう喚起すべく、同所から20km圏外の広野町、楢葉町、川内村、田村市、南相馬市の5市町村にわたる区域が指定されたもので、約2万6,000人が避難を行った。その後、7月中旬の事故収束ロードマップのステップ1終了により、発電所の状況が著しく改善したことから、原子力災害対策本部は8月9日、同区域解除の妥当性を確認できたとし、当該市町村による復旧計画策定が完了した段階で、一括解除を行う方針を示した。これを踏まえ、当該5市町村から原子力災害対策本部へ復旧計画が提出され、首長との意見交換、原子力安

全委員会の助言などを経て、今回の解除となった。

政府では各自自治体の復旧計画を踏まえ、引き続き、環境モニタリングや除染を推進するなど、住民帰還の実現に向け万全の対応を図ることとしている。

復旧計画では国に対して、学校、病院・福祉施設、生活インフラ、除染、その他の関連で多くの要望事項が挙がっており、指定が解除されたものの、今後の住民帰還スケジュール確立に向けたヒアリング、除染実施の技術面、財政面での支援など、課題も多く、避難住民の帰還が本格化するには、まだ時間がかかりそうだ。

なお、「緊急時避難準備区域」解除により、原子力災害に伴う国の応急対策区域の指定は、「警戒区域」と「計画的避難区域」となったが、これらについては、ロードマップのステップ2完了後に、縮小の可否など、所要の見直しが行われることとなっている。

(以上の資料提供は日本原子力産業協会)

海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[米国]

NRCが地震対策で全基に耐震解析要求

米原子力規制委員会(NRC)は9月1日、全米の商業用原子炉104基における地震危険度の再検証の実施、およびその解析結果の提出を事業者に求める「一般書簡(GL)」の草案を連邦公報に公表した。地震対策として同委が追加で取るべきアクションを特定するのが目的で、同案を年末までに発行するため、10月末まで一般からのコメントを募集。同月半ばには同GL案に関する公聴会も開催する段取りだ。

NRCは、巨大地震が引き金となった福島事故や8月にノースアナ原発を停止させたバージニア州地震が発生する前の2005年から、新規原子炉建設申請に含まれる耐震解析や関係プログラムにより、地震の発生頻度が低いとされる米国東部と中央部における最新の地震災害情報の詳細な影響評価を進めてきた。

また、地震を含めた外部事象に起因する過酷事故への耐性については、原子炉ごとに状況報告を求める補足GLを1991年に発行。昨年9月には「既存の原子力発電所では発生し得る地震への安全対策が施されている」と結論付けた「情報通達」を発行している。

したがって、今回のGL案は、現在進行中の最新の地震災害情報・検証作業における次のステップという位置付けになる。

GLは規制要件や指針を事業者に通達するためにNRCが発行する書簡で、データ等の要求については法的強制力を伴う。このため、事業者らは正式なGL発行後、1～2年以内に要求された耐震解析の実施とNRCへの結果情報提供が義務付けられることになる。

ユッカ処分場計画が年度末で活動を終了

米原子力規制委員会(NRC)は9月13日、米エネルギー省(DOE)によるユッカマウンテン放射性廃棄物処分場計画の許認可申請について、3種類の技術評価報告書の最後の一つを発行した。

2011会計年度が9月30日で終了するため、NRCではこれをもって同申請の審査活動は予算の制約によりすべて終了するとしており、同計画の安全性に関する結論を出さないうまま、25年以上にわたった審査手続き関連の情報すべてについて保存措置が取られることになった。

また、ネバダ州で賃貸確保していた公聴会用の施設や

設備などがすべて解約となるほか、コンピュータといった機材もNRCの別支部に移送、ネット上の関連文書サービスも閉鎖となる。

オバマ政権によるユッカマウンテン計画中止の方針に伴い、DOEは2010年3月に同計画の許認可申請を取り下げる申請をNRCに提出した。しかし、NRCの原子力安全・許認可委員会(ASLB)は同年6月、この取り下げ申請を認めないとの裁定を下しており、これに対するNRC委員4名の判断は賛否同数に分かれている。

このため、委員長を含めた委員5名は今年9日にこの件に関する「覚書と指示」を作成。ASLB裁定に関する経緯を明記するとともに、本会計年度の終了に伴い、ペンディング事項も含めて同申請に関わる管理活動のすべてを終了するようASLBに指示していた。

同計画に強硬に反対しているネバダ州のH・リード上院議員は、「ユッカマウンテンを巡る長編物語が完結に近づいた」と歓迎。10月から始まる2012会計年度で上院が同計画に予算を付けていない点に言及し、同計画に替わる廃棄物処分方法を検討している有識者(ブルーリボン)委員会により、一層安全で現実的な管理戦略が策定されるはずだと強調した。

一方、下院では歳出委員会が7月に承認したエネルギー・水資源支出法案の中で、ユッカマウンテン計画活動経費として認可申請書の審査経費1,000万ドルを含めた合計3,500万ドルを復活させた。

昨年11月の中間選挙以降、下院では共和党が多数派となり、エネルギー・商務委員会のF・アプトン委員長や環境経済小委員会のJ・シムカス委員長が中心となってユッカマウンテン計画の継続を後押し。ASLB裁定に対するNRCの賛否が拮抗したままになっている点から、「ユッカマウンテン計画認可申請の取り下げが了承されたとは言えない」と断言。同認可申請が現在も法的に保留状態にあるとしており、NRCによる今年度内での活動終了指示についても、同認可申請が有効であることを意味しているとの見方を示した。

また、分析家の間でも「状況ははまだ不透明であり決定権は議会に移った」とする意見があり、今後の議会審議の成り行きを見届けるのが重要だと指摘している。

[フランス]

マルクール廃棄物処理施設で爆発事故

フランスのガール県マルクール市近郊にある放射性廃棄物集中処理センター(CENTRACO)で、現地時間の9月12日正午直前に爆発事故が発生し、作業員1名が死亡

したほか、4名が負傷(うち1名は重度の火傷)した。爆発直後に発生した火災は13時6分に鎮火しており、同事故による施設外への放射性物質放出はなかった。12時半頃に緊急時対策センターをパリで設置した原子力安全規制当局(ASN)も16時過ぎには収束を宣言している。

同施設はフランス電力(EDF)の子会社で放射性廃棄物の処理事業を専門とするSOCODEIの所有。ASNによると爆発したのは低レベル放射性廃棄物処理・調整施設の金属廃棄物溶融炉と見られており、爆発の起きた建屋に損傷はなかったほか、負傷した従業員にも放射能汚染はなかった。また、周辺住民に対する防護活動は必要ないとしており、今後、事故原因を特定するため、綿密な調査を実施する予定だ。

同事故の詳細把握のため、同日17時過ぎに現地に到着したN・コシスコ・モリゼ環境エコロジー相は今回の事象を「原子力サイトで起きた産業事故」と形容。事故の影響を心配する理由は全くないと述べたと伝えられている。

[英国]

SSE社、原子炉新設計画から撤退

英国セラフィールドで最大360万kWの原子炉新設を計画しているイベルドロラ社とGDFスエズ社は9月23日、共に合併事業体を形成していたスコティッシュ&サザン・エナジー(SSE)社が同計画から撤退したと発表した。

これにより、3社で分担保有していたニュー・ジェネレーション(ニュージェン)社の株式はイベルドロラ社とGDF社で折半することになるが、両社は「技術力や経験、知見などを過去数年間で適切に確保しつつある」として同計画の順調な進展を強調。今年の年末までに予備的なサイト特性評価を開始するため、9日に計画承認申請書を地元の審議会に提出したことを明らかにした。

また、SSE社の撤退によりニュージェン社の計画やスケジュールに影響が及ぶことはなく、23年にも新しい原子炉の営業運転を開始するため、2015年頃に最終投資決定を下す予定だとしている。

SSEの説明では、2010年11月時点の半期の決算報告により、新たな原子炉建設への投資を確約する以前に、コストや開発課題、スケジュール、その有効性などの面で最大限の精査が必要と判明。今年5月の年間決算でも、ニュージェン社への投資が可能な状況にないことが改めて示されたという。

このため、SSEはニュージェン社の持ち株25%を残りの2社に売却し、手持ちの資源は当分、これまでに経験と実績を積み重ねてきた分野の事業活動と技術に投入すべきと判断。すなわち、ガス火力や英国政府が原子力

とともに開発拡大を考えている再生可能エネルギーに投資していくことになったとしている。

同社はまた、残りの2社と同様、英国の原子力開発に重要な国家政策としての弾みが付いているのは明らかだと考えており、将来、投資家が電力購入者として、再びニュージェン社に関わる可能性も否定していない。

[ドイツ]

シーメンス社、原子力事業から撤退

ドイツ最大手の総合電機メーカーとして、かつて同国で稼働する17基の原子炉すべてで建設工事を手がけたシーメンス社が原子力事業における最終章を迎えた。

同社のP・レッシャーCEOが9月18日に独シュピーゲル誌のインタビューで、原子力事業から完全撤退する方針を明らかにしたもので、「我々にとってこの章は終了した」と言明。福島事故後、A・メルケル政権が2022年までにすべての原子炉の廃止という脱原子力政策に逆戻りしたことから、「ドイツ社会と政治の明確な姿勢に対する企業としての回答だ」と説明している。

今後は、同政権が総需要の35%までの発電シェア拡大を目指す再生可能エネルギーの分野で活動を拡大していくことになる。

ドイツでは2000年6月に、当時の政府が既存炉の段階的な閉鎖と新規原子炉の建設禁止で電力業界と合意。これを契機に、シーメンス社は翌7月にフラマトム社と原子力部門を統合してフラマトムANP社を設立した。その後、同JVはアレバの傘下に入りアレバNP社となったが、シーメンス社の出資比率は34%と少数であったため、企業戦略において十分な発言権を行使することはできなかった。

このため、シーメンス社は09年1月に同JVにおける技術提携を解消し、持ち株すべてをアレバ社に売却する方針を発表。3月にはロシアの原子力総合企業であるロスアトム社と対等な立場での協力覚書に調印し、2030年までに世界中で400基と見積もられていた原子炉新設計画への参画を目指すことになった。

しかし、アレバ社はこの行動が株主協定における競争禁止義務条項に反するとして、シーメンス社を国際商業会議所・仲裁裁判所に提訴。同裁判所は今年5月、2013年9月までシーメンス社が原子力発電部門でアレバ社と競合することを禁じるとともに、6億4,800万ユーロの支払いを命じている。

このような背景からレッシャーCEOは原子力事業からの撤退を決意。ロスアトム社とは原子力以外の分野での共同事業を希望している。また、原子力も含めて火力発電所でも利用可能なタービン発電機の製造は継続していく方針だ。

[スイス]

上院が脱原子力動議を承認，原子力技術研究は継続へ

スイス議会上院は9月28日、新規原子力発電所の建設を禁止するなど、脱原子力に向けた主要な動議3件を、いずれも3対1の賛成多数で承認した。新設の禁止を「既存世代の原子力発電所」に制限するよう勧告した上院エネルギー環境委員会の修正文言が取り除かれた一方、「すべてのエネルギー技術について、スイスは教育、訓練および研究を継続実施すべきだ」の部分に原子力が含まれることを明確化。これにより、脱原子力政策に消極的な議員も妥協票を入れたと見られている。脱原子力に関する議論は今年23日の総選挙後に下院で再審議され、最終案が採択される予定。原子力支持派の中道右派議員らは、後継議員が今後、原子炉の新設に道を残す可能性に一縷の望みを託している。

スイスの連邦参事会(内閣)は福島事故後の5月、国内の既存原子炉5基は約50年間の運転寿命を終え次第、「2034年までに段階的に閉鎖していく」方針を決定。議会上院がこれを受けて、原子力法の改正により、原子炉新設計画に認可を与えない、内閣が脱原子力政策のシナリオ策定——などの動議を6月に採択していた。

上院の議決内容も、(1)原子力法改正により原子炉の新設に許可を与えない、(2)安全基準を満たさない原子炉は直ちに閉鎖、(3)再生可能エネルギーの利用やエネルギーの効率化を推進、(4)総合的なエネルギー戦略は原子力に頼らない電力供給を保障するとともに、海外からエネルギーを輸入せずにスイス経済を維持できる内容とする——などの部分は下院案と同様。これに加えて、(5)すべてのエネルギー技術について、教育、訓練、研究、国際協力を継続する——などとなっている。

これについて、スイス電力協会は「原子炉の閉鎖までに解決策を探す時間的猶予がある」とし、即座に止めずに済む点を歓迎したが、スイス事業経済連合会は「無責任な判断だ」として反発。環境エネルギー省のD・ロイター大臣は(スイスの電力需要の4割を賄う)原子力の廃止に疑問を抱くのも無理はないと理解を示しながらも、「重要なのは今始めることであり、政府は将来のために正しいことをするのだと信頼して欲しい」と要請した。

[スペイン]

アストゥリアス皇太子賞、「福島の英雄」に授与

スペインのアストゥリアス皇太子財団は9月7日、平

和部門の皇太子賞を福島原子力発電所事故現場で英雄的な働きをした東京電力とその協力会社の作業員、消防隊員および自衛隊に贈ると発表した。

アストゥリアス皇太子賞は世界中の科学、技術、文化、社会などの分野で国際的に活躍し、人類に貢献していると思なされた個人や機関、組織に対して年毎贈られるもの。日本人としては過去にNEC特別首席研究員の飯島澄男氏や、青色発光ダイオード開発で知られる中村修二氏が科学技術研究部門で、また女性宇宙飛行士の向井千秋氏が国際協力部門で受賞している。

授賞理由について同財団は「自らを犠牲にして原子力災害を防ごうとした行為は人として最高の価値を示す」と説明。原子力発電所での緊急事態という不確かな状況の中、彼らは高い放射線や絶え間なく続くローテーション、短時間の休息に限られた食糧といった極限の環境下で数週間にわたって働き、不整脈や過呼吸などの慢性疾患に罹ることも厭わなかった。このような行いは、日本の社会に深く根付いた大儀のための自己犠牲や義務感、逆境下での尊厳、謙虚さ、勇敢さ、高潔さを具現化していると讃えた。

授賞式は10月21日にスペインのオビエドで催された。

[イラン]

ブシェール原発が送電開始

イラン国営の学生通信(ISNA)によると、今年5月に初臨界を達成したイランのブシェール原子力発電所(ロシア型PWR、100万kW)が9月3日、国内送電網に接続された。中東で唯一の商業炉となった同炉の現在の出力は6万kW程度で、様々な試験を実施中。

ブシェール原子力発電所は1975年の建設開始当初は独シーメンス社が契約を受注したものの、79年のイラン革命により建設工事は停止。95年にロシアのアトムストロイエクスポルト社が完成工事を請け負った。昨年8月には、国際原子力機関(IAEA)が封印していた同炉用初装荷燃料が発電所敷地内に搬入されるも、炉心ポンプの損傷等により、運開は遅れていた。

同炉の燃料は、今後少なくとも10年間はロシアから供給されると見られるほか、同炉はナタンズにあるパイロット濃縮工場および商業規模の濃縮施設とともにIAEAの保障措置下にある。しかしイランは今後、100万kW級商業炉を少なくとも10基建設すると明言しており、2009年にIAEAに通達したコム市近郊の濃縮工場など、核兵器への転用が疑われる濃縮施設の規模拡大の可能性が懸念されている。

[国際]

IAEA, 「行動計画」実行のため原子力安全チーム

国際原子力機関(IAEA)は9月26日、年次総会で採択された福島原発事故後の原子力発電所安全対策強化に向けた「行動計画」を早急に実行に移すため、専門の所管組織となる原子力安全行動チームを設立した。天野事務局長のリーダーシップの下、同事故の教訓から打ち出された様々な対応策が直ちに効力を発揮するよう、最善を尽くす方針だ。

同チームはIAEAの原子力安全・セキュリティ局のD・フローリ事務局長をトップに同局内に設置。原子力施設安全部のG・カルソン規制活動セクション長を特別調整官に任命しており、事務局長の政策事務室と緊密に連携しながら、12の分野にわたる行動計画を実施していく。その一環として、すでにIAEAによるストレス・テストの実施要目を策定中で、10月中にも準備が整う予定だ。

IAEAはこのほか、9月21日に、既設の「事故・緊急事態対応センター(IEC)」における新たな情報コミュニケーション手段として、「事故および緊急時の統合情報交換システム(USIE)」を福島事故後の6月からウェブサイト上に立ち上げたと発表した。

IECは2005年、原子力事故時に加盟国の要請に応えるとともに、加盟国間の仲介・調整を行うため、IAEAが本部に設置した支援調整組織。緊急時対応の調整には詳細かつ信頼性の高い情報の持続的な流通が欠かせないとこの観点から、IECは09年からUSIEの開発に着手した。

USIEでは既存の2つの連絡システムを統合・簡素化することにより、緊急時に情報交換の効率化を図るのが狙い。これまでのシステムが異なる種類の事象ごとに分かれていたのに比べて、USIEでは登録ユーザーが放射線源の紛失から本格的な原子力事故に至るまで、すべての事象についてモバイル機器や電子メール、FAXなどを通じて警報を得られる。

また、複数の事象に関する情報の追跡が可能で、事故発生国が確認した信頼性の高い情報が提供されるとしている。

[EU]

14か国がストレス・テストの中間報告を提出

福島事故を受けて6月から欧州連合(EU)加盟各国の全原子力発電所143基で行われていた安全性再評価(スト

レス・テスト)の中間報告書が出そろった。欧州原子力規制者グループ(ENSREG)の定めた実施要目に従い、事業者が実施している同テストの進展状況を各国規制当局がまとめて欧州委員会(EC)に提出したもの。10月末までに最終結果がまとめ次第、規制当局がそれらをレビュー、年末までに欧州理事会に提出する。

中間報告書の締め切りは9月15日で、EU域内で原子炉を保有する14か国——ベルギー、ブルガリア、チェコ、フィンランド、フランス、ドイツ、ハンガリー、オランダ、ルーマニア、スロバキア、スロベニア、スペイン、スウェーデン、英国——の規制当局が公表した。

フランス原子力安全規制当局(ASN)やドイツ連邦環境・自然保護・原子力安全省の中間報告は、主に同テストがENSREGの要目に沿って適切に行われている点を確認する内容で、現段階で結論を導き出すのは時期尚早としている。ただしドイツ原子力省の報告書は、これまでに実施済みのストレス・テストや原子炉安全委員会(RSK)が別途実施した安全審査結果から、「さらなる改善を考慮中であるものの、国内原発全体で見た限り高いレベルの頑健さが示された」との概評を明記した。

また、英国原子力規制庁(ONR)は、「これまでのところ、設計ベース事象あるいはそれらに対する安全系の耐久性に根本的な弱点は見られなかった」と強調。設計ベースを超える事象からの修復措置の改善、小さなパラメータの変化により事態が急激に変化するクリフ・エッジ効果の軽減といった教訓については、今後、適宜適用されることになるとしている。

同テストは福島事故直後の3月15日、ECのエネルギー委員会で実施の方針が示された後、25日のEU首脳会議で「包括的で透明性のあるリスクと安全性の評価」を実施することで正式に合意。福島第一原発では大規模な自然災害により発電所の安全機能が損なわれ、深刻な事態に陥ったことから、そうした事象に対する発電所の挙動、および安全機能喪失対策の妥当性を再評価することになった。

西欧原子力規制者連合(WENRA)がまとめた実施要件の仕様書案を元に、パブリック・コメントも聴取しながらENSREGとECが同テストの詳細な評価スコープや手順を作成。「技術的なスコープ」では、福島事故から想起された事象を想定している。

具体的には、(1)起因事象＝地震と洪水、およびその他の大規模な自然災害、(2)続いて発生する安全機能の喪失＝所内停電を含めた電源喪失(SBO)、最終的な熱逃し場所の喪失(UHS)、およびこれらの併発、(3)過酷事故対策＝炉心冷却機能と使用済み燃料プール冷却機能、格納容器の健全性の喪失防止対策、および喪失後の対応策——などとなっている。

連載 東日本の巨大地震に学ぶ(3)

地震と噴火と津波の国

(財)国際高等研究所 尾池 和夫

I. 1500年の歴史資料

太平洋プレートやフィリピン海プレートの潜り込む境界には巨大地震が起こる。太平洋プレートが潜り込む日本海溝に沿って、2011年3月11日の巨大地震が起こり、フィリピン海プレートが潜り込む南海トラフで、2040年ごろ次の巨大地震が起こる。そのような日本列島の地震活動を見るため、まず理科年表から歴史資料を見ることにしたい。

地震学と名のつく学会は、世界で初めて日本で生まれた。地震がたくさん起こる日本に比べて、例えばイギリスでは地震はほとんど起こらない。明治の初め、日本は西洋の文明に追いつこうと、欧米から多くの「御雇外国人」を招いた。その中に、イギリス人のジョン・ミルンとジェームス・アルフレッド・ユーイングという2人の物理学者がいた。

彼らが来日して間もなく、1880(明治13)年2月22日、横浜で中規模の地震が起こって、煙突が折れるという程度の軽微な被害があったが、地震を知らないイギリス人の物理学者にとっては大事件に思えたのであろう、この自然現象を研究しなければと、日本地震学会が生まれた。これが、世界ではじめて「地震」という言葉が使われた学会である。こうして日本は「地震学」誕生の地となり、まず地震を観測するための地震計が発明され、地震観測が開始された。

一方、日本には長い歴史資料があり、その中に地震現象も詳しく書き残されている。昔の地震の日時、場所、大きさを古文書の記載から数値化し、時刻を換算し、今の暦法と合わせ、また、発生場所や大きさを被害分布などをもとに推定する。

このような日本の史料と地震観測で得られたデータは貴重であり、世界的に見てもきわめて長期間の比較的均質なデータを日本は持っていると言える。

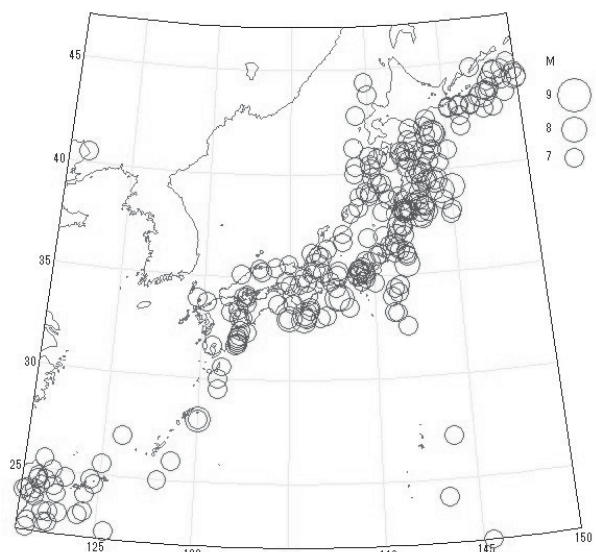
気象庁の最近の観測ネットワークの発展には著しいものがあり、地震の検出能力が高くなって、非常に小さい地震までも連続的に観測できるようになっている。さらに将来の巨大地震に備えて、海洋研究開発機構(JAMSTEC)の海底観測システムが南海トラフなどの地域の海底に展開されようとしている。

このように、さまざまな手法で日本には長期間にわたる豊富な地震資料が残され、その分析ができていて、そ

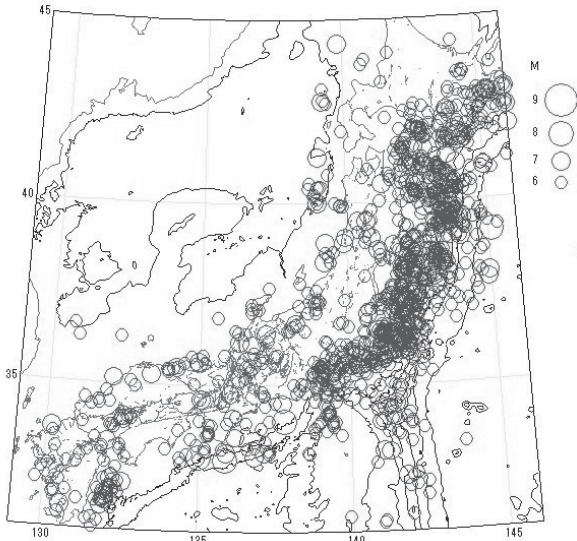
の成果が理科年表に収められている。日本の歴史上、最初に登場する地震は、『日本書紀』に、ただ「地震」とだけある、416年8月23日(允恭5年7月14日)の地震である。理科年表では遠飛鳥宮付近(大和)と推定されている。続いて知られているのは、599年5月28日(推古7年4月27日)のやはり『日本書紀』にある大和の地震であるが、これは倒壊家屋の記録があり、マグニチュード(M)7.0とされ、歴史上最初の地震被害の記述がある地震である。南海トラフの大規模地震の最初の記録は、684年11月29日(天武13年10月14日)、M8・1/4の地震で、土佐その他南海・東海・西海地方に被害があった。震源の緯度、経度が推定されている最古の地震は、715年7月4日(霊龜元年5月25日)のもので、M6.5~7.5、遠江の地震である。この地震から以後の記録によって、日本列島の地震分布図が作成できる。

それらのデータと近代の地震観測によるデータとが、できるだけ質的に連続性を保つように工夫されているので、日本列島の地震活動の時間的、空間的な分布特性を論じることができる。日本列島に起こった地震の分布図を、地震の大きさや深さなどで分類しながら描いてみると、さまざまな地震活動の特性が浮かび上がる。規模の大きな浅い地震の分布図(第1図)からは、プレート境界や活断層帯に大地震が起こっているという、日本列島の基本的な性質が見える。

また、第2図には、プレート境界がわかるように、海



第1図 浅い大地震の分布(715~2011年7月, M7以上)

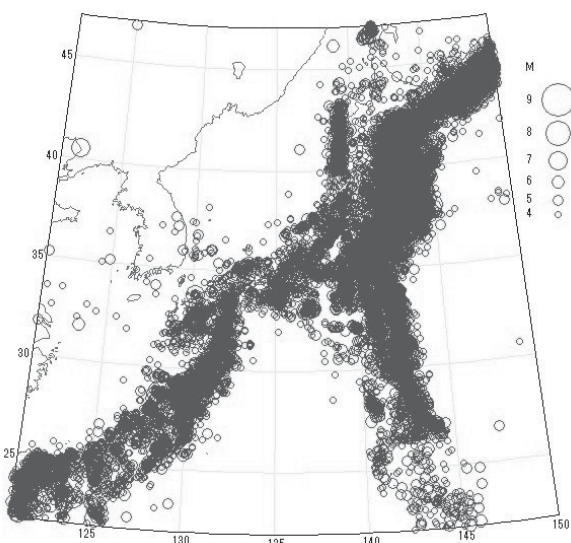


第2図 近年の地震分布(深さ0~100 km, 1801~2011年7月末, M6以上), 海底地形(コンターは2000 mごと), および陸上の主な活断層

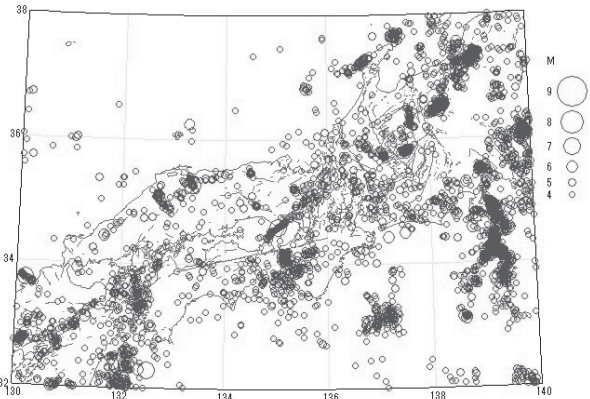
底地形をコンターで示し, 陸の主な活断層帯を描いて, それらと, 比較的近年の大地震との関係を示した。

第3図に示した, 浅くて小さい地震を含む地震の分布は, 火山の活動, 活断層の状況, 最近の大きな地震の起こった後の余震分布, 場合によっては前兆的な活動など, 地震が群がって起こっている場所があり, それらはさまざまな意味を持っている。しかし, 日本列島全体の図を描いても, 島の形が見えないほどに地震で埋め尽くされてしまう。言い換えれば, 地震の起こるところに島が発達すると思って第3図を見てほしい。

このような小さい地震の分布が活断層の存在を示すという例として, 近畿地方を中心に拡大して示すと第4図のようになる。これを見ると, 山陰海岸から北陸に沿う活断層帯で起こった1943年の鳥取地震や1948年の福井



第3図 浅い地震(深さ0~100 km, 1964~2011年7月末, M4以上)



第4図 活断層帯と地震の分布(深さ0~100 km, 1964~2011年7月末, M4以上)

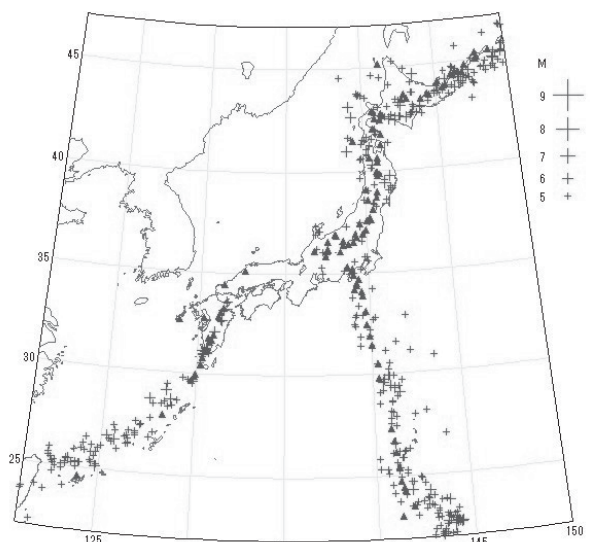
地震などの余震が今でも続いていることがわかると同時に, 長期間活動していない中央構造線活断層の紀伊半島部分や, 兵庫県の山崎断層帯などに中小規模の地震が集中して起こっている様子を見ることができる。

Ⅱ. 日本の活火山

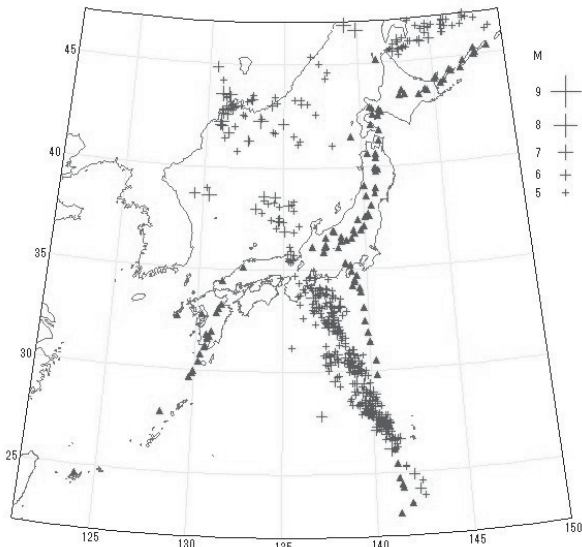
やや深い地震の分布図からは, プレーートの潜り込んでいく方向と, 活火山のできる地域との対応が見える。潜り込んだ海のプレートが, 深さ100 kmあたりに達すると, プレートから絞り出された水の作用で周りのマンテルの岩石が溶けてマグマができる。それが上昇してマグマ溜まりを形成する。その上の地表に活火山ができていく。

第5図に, やや深い地震の分布図を示す。この図で地震分布の右寄りが深さ100 km付近の地震であり, ▲印は気象庁が選んだ日本の活火山の位置である。

さらに深い地震の分布(第6図)からは, プレートが潜り込んだ長期間の歴史を理解するための情報が得られ,



第5図 やや深い地震(+)(深さ101~300 km, 1964~2011年7月, M5以上)と活火山(▲)



第6図 深い地震(深さ301~700 km, 1964~2011年7月末, M5以)と活火山(▲)

現在, 太平洋プレートがアジア大陸の東端の地下にまで達していることがわかる。

気象庁では, 過去1万年程度以内に噴火した火山と現在活発に噴気活動している火山を活火山としている。その中には, 活動中のものもあるが, 長期にわたって静かな山もあり, それらがランク分けされている。最も活動的な火山がAランク, 次に活発な火山がBランク, 残りがCランクである。情報不足の海底火山や北方領土の火山は分類していない。

ランクAの火山は13火山, ランクBの火山は36火山, ランクCの火山は36火山で, ランク分けされていない火山は23火山である。これらの火山のうち多くの火山の活動の監視が, 気象庁や大学の観測所で行われており, 気象庁と火山噴火予知連絡会が協力して情報を分析して, 提供している。気象庁では, 常時観測火山として47火山(平成23年6月現在)を定め, 活動状況を監視している。

気象庁は, 居住地域や火口周辺に影響が及ぶ噴火が予想されると, 噴火警報を発表する。警報を解除する場合や火山活動の静穏な状態を知らせる場合には噴火予報を発表する。

最近では例えば, 霧島山(新燃岳)の噴火警報(火口周辺)が, 2011(平成23)年3月22日17時00分, 福岡管区気象台と鹿児島地方気象台から出された。それによると, 噴火警戒レベル3(入山規制)が継続となっている。

噴火警戒レベルは, レベル5(避難)(危険な居住地域からの避難等が必要)が最高で, レベル4(避難準備), レベル3(入山規制), レベル2(火口周辺規制), レベル1(平常)(火口内への立入規制等)となっている。

例えば, 噴火警報を発表中の火山(2011年6月20日更新)は, レベル3(入山規制)が霧島山(新燃岳)と桜島, レベル2(火口周辺規制)が三宅島, 薩摩硫黄島, 諏訪之

瀬島である。

火山噴火予知連絡会は, 気象庁が事務局を担当しており, 学識経験者と関係機関の専門家から構成されている。この連絡会は, 全国の火山活動について総合的に検討を行い, 火山噴火などの異常時には, 臨時に幹事会や連絡会を開催して火山活動について検討し, 必要な場合は統一見解を発表するなどの活動をする。

日本の象徴である富士山に関しては, レベル5の場合の想定として, 大規模噴火が発生し, 噴石, 火砕流, 溶岩流が居住地域に到達(危険範囲は状況に応じて設定)とされている。宝永(1707年)噴火の事例では, 大規模噴火によって大量の火山灰などが広範囲に堆積した。貞観噴火(864~865年)では, 北西山腹から噴火, 溶岩流が約8 kmまで達した。延暦噴火(800~802年)では, 北東山腹から噴火し, 溶岩流が約13 kmまで到達した。

宝永(1707年)噴火の前兆は, 噴火開始前日~直前, 地震が多発して, 今の東京など広域で揺れた。現在, 富士山の地下には大量のマグマが貯まっているが, 貞観の巨大地震のときのように噴火した場合の, 原子力発電所などの設備に対する対策は, 想定外にならないように進めておいてほしいと思っている。

Ⅲ. 津波の情報

気象庁では, 2011年3月11日の巨大地震直後に発表した大津波警報で, 波高の予想が実際を大きく下回ったことなどから, 情報の出し方を改善する策を議論してきた。2011年9月7日に, そのための基本方針の最終報告が発表された。

M8を超える大地震が起きたと判断された場合, 地震と津波の規模を小さく見積もらないようにしようという方針である。地震発生からすぐには最大規模の警報を発表するという。このような方針の該当する巨大地震が想定されており, 今回の巨大地震の震源域とその周辺, 東海地震と東南海・南海地震が同時に起きる3連動地震, 北海道の根室沖・釧路沖の巨大地震, 根室沖から十勝沖までの震源域で, ほぼ500年間隔で同時に起きる巨大地震という例示があった。

さらに, 警報や注意報の波高の区分を, 8段階から5段階に減らす。避難を呼びかける表現は簡潔で分かりやすいものに改めることとした。このような警報を受信して活用することが重要であるが, 万一情報が受けられなくても, 海の近くにいて強い揺れを感じたら, まず津波の可能性を考える知恵を持つ人を増やすことも重要である。津波は繰り返しくること, 最初が引き波とは限らないこと, 第1波が最大とは限らないことなどの知識を持つことが何よりも大切である。(2011年9月15日 記)

著者紹介

尾池和夫(おいけ・かずお)

本誌, 53[10], 675(2011)参照。

東京電力福島第一原子力発電所の事故による衣服の放射性汚染

汚染状況の測定と簡易除染法の検討

慶応義塾大学 中里 一久, 鳥取大学 北 実, 長崎大学 松田 尚樹

福島第一原発の事故により、環境に放出された放射性物質に起因した衣服への汚染状況を解析した。また、衣服の汚染の市販洗濯機による除染の効果を調べた。その結果、事故原発周辺では事故直後には衣服に核分裂物質による汚染が検出された。しかし、3ヶ月経過すると、衣服には、通常の放射線測定器では検出が困難な極めて微量の汚染しか検出されなかった。衣服の汚染は、市販の装置および洗剤による一般的な洗濯により、約9割除染されることがわかった。

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(福島原発)の事故によって多量の放射性物質(Radioisotope:RI)が一般環境に放出された。これにより、事故直後の即時対応のために待機した作業員が着用したり、あるいは事故直後および3~4ヶ月経過後に周辺地域において一般住民および環境の汚染状況を調べた研究員等が着用した衣服からRIが検出される事態が発生した。この汚染事態に対する安全対策を講じるために、着衣の汚染状況を解析するとともに、一般住民が各人の家庭において実行できる洗濯による除染とその効果等について検討した。

II. 試料および方法

1. 分析試料

分析に供した試料は、事故原発の復旧作業に直接従事した者ではなく、(1)事故原発から20 km 圏内の警戒区域内に事故直後に一時的に滞在した者、(2)事故直後から4月までの間に緊急時避難準備区域内外において住民のRIによる汚染測定等に従事した者、(3)事故後3ヶ月以上経過した6~8月に上記(2)と同様の作業に従事した者が着用した衣服類等である。

調査した衣服類は、ズボン、上着、シャツ、靴下、手袋のほか、5種類の衣料品であり、計10品目について調査した。そのうち、上着、ズボンの一部は、福島市内で

Analysis of Radioactive Pollution on the Public's Clothes caused by Disaster of Fukushima Daiichi Nuclear Plant ; Effect of Wash on Decontamination : Kazuhisa NAKAZATO, Makoto KITA, Naoki MATSUDA.

(2011年 10月19日 受理)

3月15日午後以降、屋外において降雨あるいは降雪に直接曝された経歴を有している。

2. 使用機器等

(1) 測定器

衣服試料の放射線等の測定に供した装置は、以下の通りである。スクリーニング測定には①広窓型のGM管式サーベイメータ(TGS-146, Aloka 製)(以下、GMサーベイと略)、精密測定には②Ge半導体検出器(MCA 7700, SEIKO EG&G 社製)(以下、Ge検出器と略)、③イメージングプレート(BAS-IP MS 3543, 富士フィルム製)(以下、IPと略)、IP解析用フルオロイメージングアナライザ(FLA-5000, 富士フィルム製)等を使用した。

(2) 洗濯機・洗剤・漂白剤等

衣服類に付着したRIの除染効果を調べるために使用した洗濯機は、市販品であり、渦巻き式(ASW-T 3型, 三洋電機製)および回転ドラム式(BD-V 1300, 日立製)ほかを使用した。洗濯時間は約10分であった。使用した洗剤等は、粉末洗剤(アタック, Kao 製)および液体洗剤(アタック neo, Kao 製)ほかであった。

3. RIによる汚染状況の測定

(1) サーベイメータによる直接汚染測定

第1図は、GMサーベイにより衣服類の汚染状況を直接測定している状況を示している。衣服に接触しないようにならずに離して測定した。これは、衣服との接触によるGMサーベイへのRI汚染の移行を防止するためである。このため、GMサーベイによる測定はRI汚染の有無の判定に主眼を置いている。



第1図 GMサーベイによる汚染測定

(2) Ge 検出器による精密測定

衣服試料をプラスチック製の容器(U-8容器など)に詰め、Ge 検出器の上に置いて、RIを測定した。

(3) IP による汚染の画像化測定

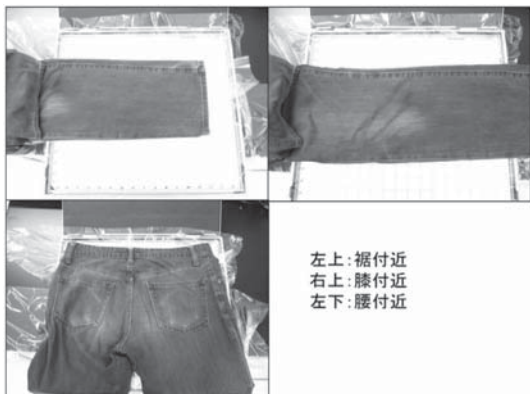
衣服上の2次元的な汚染状況を調べるため、衣服を面状IPの上に置き、IPを長時間露光した。その状況を第2図に示す。露光時間は24hとした。

III. 結果

1. GMサーベイによるRI汚染測定

(1) 事故直後の3月に入手した衣服類

衣服一品ごとの最大計数値を集計した結果を第1表に



第2図 IPによるズボンの露光状態

第1表 GMサーベイによる測定の統計

品名	計数率	上着	ズボン	靴下裏	作業手袋	ベスト・セーター
サンプル数		8	9	10	6	7
最大値	(cpm)	1,700	5,430	14,700	4,500	250
最小値	(cpm)	100	130	330	200	100
平均値	(cpm)	453	1,347	6,203	2,600	156
中央値	(cpm)	235	910	5,050	2,900	140
品名	計数率	シャツ	防護衣	靴	帽子	マスク
サンプル数		4	1	6	2	3
最大値	(cpm)	520	600	500	240	260
最小値	(cpm)	130	600	100	100	100
平均値	(cpm)	283	600	260	170	153
中央値	(cpm)	240	600	250	170	100

示す。各品目の汚染の中央値は、靴下が5,050 cpmであり、手袋で2,900 cpm、ズボンで910 cpm、その他の衣服では600~100 cpmであった。また、最大値は靴下において14,700 cpmであった。これらの汚染は、原子力安全委員会が定めたスクリーニングレベル(100,000 cpm)以下であった。

(2) 事故後3ヶ月経過後に入手したズボン

この時期に得たズボンにおいては、GMサーベイによる測定では計数は、いずれも認められなかった。

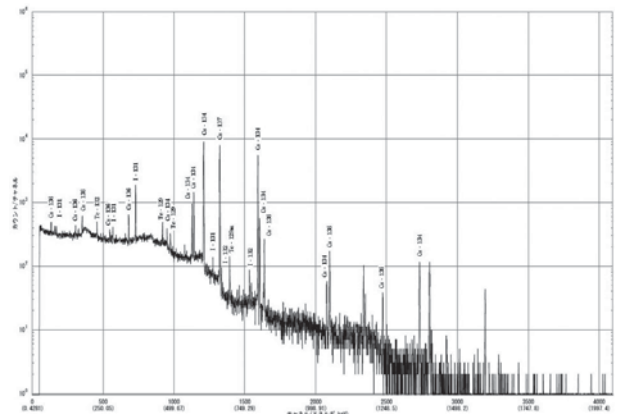
2. Ge 検出器によるスペクトル測定

GMサーベイによる測定において、汚染の大きかった手袋と靴下をスペクトル解析した。

第3図は、靴下において検出されたスペクトルである。図から、測定日時点(4月13日)で汚染核種として、I-131およびCs-134, Cs-137, Cs-136, Te-132等が検出されていることがわかった。

次に、第3図を解析し、各核種の量を求めた。第2表は、I-131, Cs-134およびCs-137の比放射能を調べた結果である。

汚染核種I-131の比放射能は、半減期が8.02日であるから、汚染発生直後の3月15日時点にさかのぼると、第2表に示された値の17.3倍になる。このため、例えば、ゴム手袋の比放射能は、27→468 Bq・g⁻¹であった。

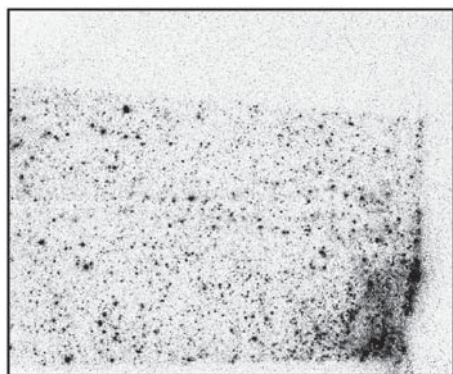


第3図 Ge 検出器によるスペクトル

第2表 汚染衣服類の比放射能

調査品目	放射性同位元素濃度(Bq・g ⁻¹)		
	I-131	Cs-134	Cs-137
ゴム手袋	27	254	296
インナー手袋 No.1	48	242	286
インナー手袋 No.2	35	109	128
靴下 黒	11	106	125
靴下 白	18	173	203

測定日: 手袋 —— 2011/4/13
靴下 —— 2011/4/15



第4図 ズボンのIPによる2次元画像

3. IPによるRI汚染の2次元分布状況の測定
RI汚染計数が高く、汚染面が大きいズボンについて、IPにより汚染の2次元イメージングを実行した。その結果を第4図に示す。図から、RI汚染が衣服試料に均一に付着しているのではなく、スポット状に点在して付着していることが明らかとなった。

4. 洗濯による除染効果

(1) GMサーベイでの測定による除染効果の判定

衣服試料を一般家庭に普及している洗濯機により除染を試みた。その結果、靴下と手袋を除き、いずれの衣服試料においても洗濯後は、汚染が検出(バックグラウンド計数値の2倍以下)されなくなった。

(2) IP画像による除染状況の2次元測定

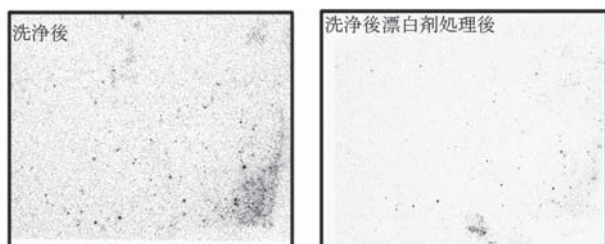
上記の第4図の汚染状況であったズボンを洗濯した後、さらに漂白剤処理した。洗濯および漂白剤処理後の各段階で、IPにより2次元汚染状況の変化を調査した。第5図は、洗濯および漂白剤処理後のイメージング画像である。第5図から、漂白剤処理後においても、わずかながらスポット状に汚染が残存していることがわかった。

(3) Ge検出器による除染率の測定

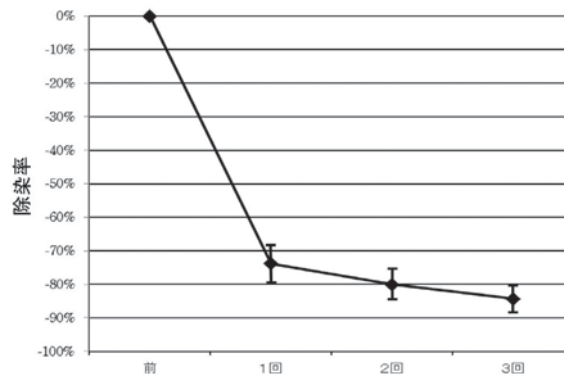
(a) 3月度に入手した靴下の除染効果

GMサーベイによる測定により、最大の汚染を示した靴下について、洗濯を3回繰り返した。第6図は洗濯ごとの除染率をGe検出器により調べた結果である。除染率は、1回の洗濯後に74±8%となり、2回目に80±6%、3回目に84±5%となることがわかった。

次に、第5図に示したズボンの漂白剤処理後にも残留



第5図 洗濯後の2次元画像



第6図 洗濯による除染効果

しているRI量をGe検出器により定量した。その結果、Cs-134が $0.009 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ で、Cs-137が $0.106 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ であった。

(b) 6月以降に入手したズボン

上述したように、6月以降に入手したズボンにおいてはGMサーベイによる測定ではRIは検出されなかった。しかし、放射線安全の観点から、Ge検出器による精密な測定と除染率の調査を試みた。その結果、2本のズボンあたり、洗濯前には、Cs-134が 0.034 および $0.011 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ であり、Cs-137が 0.037 および $0.011 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ であった。洗濯後、Cs-134が 0.004 および $0.001 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ となり、Cs-137が 0.004 および $0.002 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ となった。Csの除染率は平均89%であった。これは、上述の靴下において得られた除染率(3回後で平均84%)と近似していた。

IV. 考察

1. 洗濯の一般住民の放射線防護上の有効性

事故直後に20 km圏内の警戒区域内で得られた高レベル汚染衣服も、6月以降20~30 km圏(緊急時避難準備区域)内で得られた低レベル汚染衣服も、一般家庭用の洗濯機により洗浄すると、RI汚染が約87%除去された。これにより、洗濯は一般住民が特別な除染機器を用いることなく実行できる有効で簡単な除染行動であることが明らかとなった。また、洗濯は、一般住民が着用衣服に対するRI汚染の不安を取り除くのに極めて有用な方法でもある。洗濯された清潔な衣服を着用できることによる一般住民の安心感も、放射線防護上重要な一面である。しかし、洗濯しても付着RIの約13%が残留するともいえる。この原因は、空気中を浮遊したCs化合物が衣服にスポット状に付着したため、中には繊維と堅固に結びつく特性を持つ汚染も混在していたためであろう。

また、6月以降に入手したズボンの汚染は、GMサーベイでは検出されずに、Ge検出器での測定により極めて微量のRIがわずかに検出される程度であった。このため、GMサーベイによる測定だけでは衣服に微量のRIが付着・残留しているの見落とす可能性があることも

明らかとなった。そこで、残留 RI 量を追跡したところ、洗濯後の残留 Cs-137 および Cs-134 汚染量はいずれも $0.01 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下であると判定できた。

ところで、微量の RI が付着した衣服の着用による被ばく線量の評価基準は明示されていない。そこで、皮膚全面に RI が付着した場合の被ばく線量評価の近似事例として、プールにおける水泳時の線量算定法を参考にして評価の一例とする。Cs 水溶液に全身が浸されたときの人体の実効線量率係数は、米国 Federal Guidance Report No.12(1993)により、Cs-137 の場合 1.49×10^{-20} 、Cs-134 の場合 $1.60 \times 10^{-16} \text{ Sv} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ とされている。そこで、全身の皮膚表面が上述の汚染濃度の衣服により覆われ続けたと仮定すると、実効線量は、Cs-137 起因量が 4.7×10^{-3} となり、Cs-134 起因量が減衰を考慮しないで $50.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{y}^{-1}$ とそれぞれ推定される。この推定線量の合計は、一般公衆に対する年線量限度 1 mSv の約 $1/20$ 以下であるから、安全であると判定できる。

原発事故により環境中に放出された RI が降下するなどの原因により、土壤の汚染が報告されているので、今後、土壤の付着による衣服の汚染が発生すると予想される。衣服に付着した汚染土壌は通常の洗濯により除去できるので、この面からも、洗濯は一般住民の無用の被ばくの低減および被ばく不安に起因した精神的ストレスの解消に有効であろう。

2. 一般住民が福島で今後も住み続けていく上で衣服の観点からの問題点

洗濯された清潔な衣服の着用を心がけることにより、放射線被ばくの防護を特別に意識することなく、放射線防護が結果的に達成できるであろう。また、洗濯された衣服の繰り返し着用により、汚染衣服を主たる内容物とした放射性固体廃棄物の発生の減容化が図られるであろう。この面からも洗濯は有用な除染法である。

洗濯による洗浄液は、排水溝、下水道等を経て下水処理場に集積される。あるいは、排水溝から漏れて一般河川に流出するかもしれない。この観点では、洗濯により RI の大部分が衣服から除去されたが、RI は下水処理場や環境をわずかに汚染させることになるかもしれない。この問題は、福島県および地域環境全域における放射線防護問題として捉え、長期的に研究していく必要がある。

3. 福島県における初期段階の汚染の実態と洗濯による除染の効果。

福島県による緊急被ばくスクリーニングの結果では、初期(3月31日まで)において、100人を超える一般住民の衣服表面で $100,000 \text{ cpm}$ 以上の汚染が検出されていると報じられている。一方、福島県の被災現場では地震直後より断水が続いており、その復旧は早くとも3月18日

以降であったため、地震後、約1週間あるいはそれ以上にわたって、洗濯による除染は不可能であった。

以上の断水事態を考慮すると、震災後初期に住民が屋外において汚染した衣服の RI は、屋内の生活環境に接触移行することにより希釈、拡散し、さらに人や車の移動とともに広域に広がったものと推察される。その後、断水状況が解消され洗濯が可能となってからは、生活環境全体の汚染が徐々に低減の方向に向かう中で、衣服の洗濯による除染の効果が大きかったと推察される。

筆者らは、本研究の遂行にあたり、日本放射線安全管理学会 放射性ヨウ素・セシウム安全対策アドホック委員会による支援と、同委員会長の西澤邦秀名古屋大学名誉教授のご指導に深謝します。また、ご協力頂いた鳥取大学の木村宏二博士および慶応義塾大学の菊地裕純、片岡賢英の両氏に感謝いたします。

—参考資料—

- 1) 厚生労働省健康局総務課地域保健室, 放射線の影響に関する健康相談について(依頼), 事務連絡(平成23年3月21日), (2011).
- 2) 森 剛, 前島秀幸, “東日本大震災 被ばく医療調査活動報告”, 日本放射線技術学会東京部会雑誌, No. 119, p.51-53(2011).
- 3) 松野良穂, “福島第一原発の事故とサーベイメータを用いた放射能汚染測定について”, Isotope News, No.690 (Oct.2011), p.20-24, (2011).
- 4) K. F. Eckerman, J. C. Ryman, *External exposure to radionuclides in air, water, and soil*, Federal Guidance Report No.12, (EPA-402-R-93-081), (1993).
- 5) 日本放射線安全管理学会 放射性ヨウ素・セシウム安全対策アドホック委員会野菜班(柴和弘他), 福島第一原発事故によって汚染された野菜に付着した放射性物質の除去法に関する中間報告書, (2011).
http://www.jrsm.jp/shinsai/0520_vegetables.pdf

著者紹介



中里一久(なかざと・かずひさ)
慶応義塾大学
(専門分野/関心分野)放射線防護学・衛生学・安全管理学/環境放射線・放射能, 安全安心科学



北 実(きた・みのる)
鳥取大学
(専門分野/関心分野)放射線施設管理/放射線法制度



松田尚樹(まつだ・なおき)
長崎大学
(専門分野/関心分野)放射線生物学・安全管理学/放射線リスク認知

解説

福島第一原子力発電所事故による放射性物質 により汚染した廃棄物 廃棄物に含まれる放射性物質の数量と関係法令

(社)日本アイソトープ協会 ニツ川章二

福島第一原発事故により計画外の放射性物質が大量に環境に放出され、放射性物質によって汚染された廃棄物が発生した。このような事態に対処するため、8月26日「がれき処理特別措置法」が成立し、放射性物質に汚染されたがれきや土壌の処理の道が開かれた。しかし、処理・処分の具体的方法はいまだ明らかではない。廃棄物対策は時々刻々と進行しており、今後、復旧に向けた合理的で実現性のある方法が示されるものと思われる。現時点における、福島第一原発事故による放射性物質により汚染した廃棄物と関係法令における関係について解説する。

I. 廃棄物の発生

3月11日に発生した未曾有の東日本大震災により引き起こされた東京電力福島第一原子力発電所事故(以下、「福島原発事故」)により計画外の放射性物質が環境に放出された。放出された放射性物質は、地形、気象条件等により広範囲の地域に沈着し、土壌、作物、水等を汚染し、放射性物質によって汚染した様々な廃棄物を発生させた。福島原発事故まで、計画外の放射性物質が大量に放射線施設の敷地外に放出されることは想定されておらず、対処すべき法令等は整備されていなかった。8月26日、原発事故が原因の環境汚染に対処する初めての法律「原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」(以下、「がれき処理特別措置法」)が成立、今回の放射性物質に汚染されたがれきや土壌の処理の道が開かれた。しかし、処理・処分の具体的方法はいまだ明らかではない。

1. 廃棄物処理法と災害廃棄物

一般の廃棄物の管理の法律は「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」(以下、「廃棄物処理法」)である。同法では、「廃棄物とは、ごみ、粗大ごみ、燃え殻、汚泥、ふん尿、廃油、廃酸、廃アルカリ、動物の死体その他の汚物又は不要物であって、固形状又は液体状のもの(放射性物質及びこれによって汚染されたものを除く。)をいう」とされ、「放射性廃棄物」はこの法律の規制対象から

除外されている。廃棄物処理法によると、廃棄物は自区内処理を原則として市町村に処理責任のある「一般廃棄物」と事業者自らが処理することを原則とし、多くは産業廃棄物処理業者に委託され処理されている「産業廃棄物」に区分される。産業廃棄物がほとんどで、一般廃棄物が少しだけ入っている場合は「総体として産業廃棄物」、逆の場合は「総体として一般廃棄物」と考えることとなっている。

地震や津波、洪水などの災害に伴って発生する倒壊・破損した建物等のがれきや木くず、コンクリート塊、金属くず等で屋外に放置された廃棄物は、「災害廃棄物」と呼ばれる。処理責任は、発生した市町村にあるが、1995年の阪神・淡路大震災では、800万トンを超える災害廃棄物が発生、置き場や搬送ルートの確保、地方自治体間の連携など多くの課題が残された。災害廃棄物の処理には多くの費用が必要で、被災自治体だけで処理することは難しく、国や地域全体で対応する必要があるとされた。

なお、廃棄物処理法は一般法であるため、特別法の立場にある法律により規制される廃棄物は、特別法の規定によって措置されるものとされている。

2. 放射性廃棄物

放射性廃棄物は、原子力発電所や核燃料サイクル施設、放射性同位元素(RI)を使用する大学、研究所、病院等における原子力のエネルギー利用及びRI利用に伴って発生する。使用済核燃料の再処理に伴って発生する高レベル放射性廃液をガラス固化したものを「高レベル放射性廃棄物」、それ以外の放射性廃棄物を「低レベル放射性廃棄物」という。主として核原料物質、核燃料物

Waste Contaminated with Radioactive Material from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident : Shoji FUTATSUKAWA.

(2011年 9月12日 受理)

第1表 福島原発事故による放射性物質により汚染された廃棄物

発生場所	対象廃棄物	規制法令
原発敷地内	放射性廃棄物	原子炉等規制法
警戒区域及び計画的避難区域内	特別な管理が必要な程度に汚染されたおそれがある廃棄物	がれき処理特別措置法
警戒区域及び計画的避難区域外	一定基準を超える廃棄物	がれき処理特別措置法
区域指定なし	福島原発事故からの汚染レベルの低い廃棄物	廃棄物処理法
放射線施設	福島原発事故からの汚染レベルの低い放射性廃棄物	原子炉等規制法または放射線障害防止法(がれき処理特別措置法に規定なし)

質及び原子炉の規制に関する法律(以下、「原子炉等規制法」)又は放射性同位元素等による放射線障害防止に関する法律(以下、「放射線障害防止法」)によって規制される。

3. 福島原発事故によって汚染した廃棄物

福島原発事故に起因する放射性物質によって汚染した廃棄物をその発生形態により区分し、第1表に示す。

東京電力福島第一原子力発電所敷地内で発生した放射性廃棄物は、原子力発電所の運転に伴い発生する放射性廃棄物であり、原子炉等規制法によって規制される。がれき処理特別措置法によれば、警戒区域及び計画的避難区域内で発生し、特別な管理が必要な程度に放射性物質によって汚染された廃棄物は環境大臣が処理等に関する計画を策定し、国が処理する。警戒区域及び計画的避難区域外で発生し、含まれる放射性物質が一定の基準を超える廃棄物は国が処理する。それら以外の汚染レベルの低い廃棄物は廃棄物処理法の規定を適用して処理する。すなわち、市町村または事業者自らが処理することとなっている。がれき処理特別措置法を準用すると、放射線施設内で発生し、福島原発事故に起因した放射性物質の汚染レベルの低い放射性廃棄物は「総体として放射性廃棄物」とも考えられるが、がれき処理特別措置法に明確な規定はない。

II. 廃棄物に含まれる核種と数量

1. 福島原発事故に起因するもの

福島原発事故により、大気中へ放出された放射性物質の総放出量は、原子力災害対策本部が平成23年6月にまとめた「原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書」によれば、 ^{131}I について約 1.6×10^{17}

Bq、 ^{137}Cs について約 1.5×10^{16} Bqと推定され、4月初旬以降は、 ^{131}I のみでみた放出量については 10^{11} Bqから 10^{12} Bqまで減少してきているとされている。

当初は、雨、雪等とともに放出された放射性物質が落下し、表面に付着した作物等の汚染が問題であり、測定対象となる放射性物質としては、放出量の多い ^{131}I であった。しかし、 ^{131}I の半減期は8日間であるため、現在、問題となる測定対象放射性物質は ^{134}Cs と ^{137}Cs である。形態としては、放射性物質が集積しやすい場所の放射性物質が比較的高濃度となった落ち葉及び土壌、下水汚泥または一般廃棄物を焼却することによって放射性物質が濃縮した焼却灰等である。環境省が平成23年8月29日に公表した「一般廃棄物焼却施設における放射性物質に汚染されたおそれのある廃棄物の処理について」に掲載されている平成23年8月24日までに環境省に報告された「16都県の一般廃棄物焼却施設における焼却灰の放射性セシウム濃度測定結果一覧」では、各都県の ^{134}Cs と ^{137}Cs 濃度の最大値は196~95,300 Bq/kgと報告されているが、地域によって大きな幅がある。同報告書から、16都県ごとの8,000 Bq/kg及び100,000 Bq/kgを超える本数並びに最大濃度を第2表に掲載する。表土の除染等による

第2表 一般廃棄物焼却処理施設における焼却灰の放射性セシウム(レベル別本数・最大濃度)
($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$)

	8,000 Bq/kg 超える(本)	100,000 Bq/kg 超える(本)	最大値 (Bq/kg)
岩手県	なし	なし	30,000
宮城県	なし	なし	2,581
秋田県	なし	なし	196
山形県	なし	なし	7,800
福島県	23	なし	95,300
茨城県	10	なし	31,000
栃木県	3	なし	48,600
群馬県	2	なし	8,740
埼玉県	なし	なし	5,740
千葉県	8	なし	70,800
東京都	1	なし	12,920
神奈川県	なし	なし	3,123
新潟県	なし	なし	3,000
山梨県	なし	なし	813
長野県	なし	なし	1,870
静岡県	なし	なし	2,300
計	49	0	

(「一般廃棄物焼却施設における放射性物質に汚染されたおそれのある廃棄物の処理について」より)

第3表 農地土壤中の放射性セシウムの分析値
(6月14日に補正した放射性セシウム濃度)

	測定対象数	Bq/kg ($^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$)
宮城県	65	24~2,215
福島県	361	ND~27,981
茨城県	62	ND~632
栃木県	48	ND~3,971
群馬県	13	55~688
千葉県	30	19~777

(「文部科学省による放射線量等の分布マップ(放射性セシウムの土壤濃度マップ)の作成について」より)

ND:「検出されない」であり、「なし」ではない。なお、それぞれの検出限界値は示されていない。

り放射性物質が濃縮された土壤等の取扱いについても問題となっている。平成23年8月30日に文部科学省から発表された「文部科学省による放射線量等の分布マップ(放射性セシウムの土壤濃度マップ)の作成について」に示されている各県の農地土壤中の放射性セシウムの分析値を第3表に示す。

2. 規制濃度

放射線障害防止法では、「放射性同位元素」とは数量及び濃度がその種類ごとに文部科学大臣が定める数量を超えるものとする。」と定義され、複数の放射性同位元素の場合は「種類ごとの数量の規制数量に対する割合の和」が1を超えるものが規制の対象となる。数量は1事業所における総量が対象となる。この規制値は様々なシナリオを想定し、通常の使用で年間10 μSv 、事故時で1 mSv以下となるように計算された値である。 ^{134}Cs と ^{137}Cs の規制濃度はいずれも10 Bq/gである。

平成23年6月16日に原子力災害対策本部の「放射性物質が検出された上下水処理等副次産物の当面の取扱いに関する考え方」によれば、「脱水汚泥等の保管、仮置き及び輸送に当たって留意すべき事項」として、脱水汚泥等の保管、仮置きまたは輸送を行うに際しては、電離放射線障害防止規則(電離則)の関連規定を遵守することとされている。電離則では、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の規制濃度はいずれも10 Bq/gとなっている。

放射性廃棄物が、規制から除外されるものに陽電子断層撮影用放射性同位元素(以下、「PET核種」)によって汚染されたPET廃棄物がある。2分から110分とごく短半減期核種である ^{15}O 、 ^{18}F 等のPET核種によるのみ汚染された廃棄物は、その対象核種の原子数が1を下回ると放射性廃棄物から除外できる。放射線障害防止法によれば、「PET核種又はPET核種によって汚染された物については、保管廃棄後7日間を経過した後は、放射性同位元素等ではないものとする。」とされている。保

管廃棄施設において減衰保管のみで放射性廃棄物を規制対象から除外できる。

原子炉等規制法においては、放射性廃棄物に含まれる放射性物質が減衰、除染等により一定の基準を下回った場合、放射性廃棄物から除外できるというクリアランス制度が実施されている。クリアランス制度を実施することにより、放射性廃棄物を資源として再利用することが可能となるとともに、再利用等ができない、あるいは再利用等が合理的でない場合には、放射線防護の観点を考慮する必要のない廃棄物として処理できる。クリアランスの基準は、どのような使われ方をしても、どのように廃棄されたとしても、年間10 μSv (発生確率の低いシナリオの場合には1 mSv)を超えないレベルが設定されている。 ^{134}Cs と ^{137}Cs のクリアランス基準濃度はいずれも0.1 Bq/gである。なお、原子炉等規制法によれば、クリアランスを実施するためには、原子力事業者が廃資材等の放射能濃度がクリアランス基準を超えないことを判断し、さらに国等の規制機関による確認が必要である(検認制度)としている。すなわち、クリアランスの確認には、原子力事業者自身と国等の規制機関の両者の判断が必要である。放射線障害防止法においても同様なクリアランス制度が実施されることとなっている。

福島原発事故に関係する基準濃度として、食品に含まれる放射性セシウムの暫定基準値がある。年間被ばく線量を5 mSvとし、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の合計が飲料水及び牛乳・乳製品で200 Bq/kg、野菜類、穀類及び肉・卵・魚・その他で500 Bq/kgとなっている。また、水田土壤中の放射性セシウムの米への移行の指標を0.1とし、作付可能土壤中放射性セシウム濃度の上限値が5,000 Bq/kgとなっている。 ^{134}Cs と ^{137}Cs に関する規制濃度及び今回の福島原発事故に関係する濃度を第4表にまとめる。

3. 廃棄物の処分

前述「放射性物質が検出された上下水処理等副次産物の当面の取扱いに関する考え方」に以下の方針が示されている。 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の合計の濃度が100,000 Bq/kg以下の脱水汚泥等は、跡地を居住等の用途に供しないとした上で長期に適切な措置を講じる条件下で埋め立て処分した場合、跡地からの周辺住民の被ばく線量が10 μSv を下回ると試算される。一方、個々に条件が異なる埋め立て処分された場所については長期的な管理が必要であり、環境保全のあり方について検証が必要なことを鑑み、当面、埋め立て作業が受ける線量が1 mSv/年を超えないと試算されている ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の合計の濃度が8,000 Bq/kg以下の脱水汚泥等は、土壤層の設置、防水対策等の適切な対策を講じた埋め立て処分(管理型処分場への埋立処分)を可能とする。また、管理型処分場の跡地利用の安全性が確保できるまでの期間、モニタリングや施設の管理等、必要な措置を講じることとされて

第4表 放射性セシウム濃度の比較

		¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
放射線障害防止法	規制濃度	10 Bq/g	10 Bq/g
電離則	規制濃度	10,000 Bq/kg ^{*1}	10,000 Bq/kg ^{*1}
原子炉等規制法	クリアランス基準値	0.1 Bq/g	0.1 Bq/g
食品暫定基準値	飲料水	200 Bq/kg ^{*2}	
	牛乳等	200 Bq/kg ^{*2}	
	野菜類	500 Bq/kg ^{*2}	
	穀類	500 Bq/kg ^{*2}	
	肉・魚等	500 Bq/kg ^{*2}	
作付可能土壌	上限値	5,000 Bq/kg ^{*2}	
放射線障害防止法	PET 廃棄物の除外基準	原子数 1 以下 (¹⁵ O, ¹⁸ F 等 PET 核種のみ)	

*1「放射性物質が検出された上下水処理等副次産物の当面の取扱いに関する考え方」より

*2 ¹³⁴Cs + ¹³⁷Cs

いる。なお、¹³⁴Cs 及び¹³⁷Cs の合計の濃度が8,000 Bq/kg 超、100,000 Bq/kg 以下の脱水汚泥等については、安全な処理の考え方が示されるまでの期間、濃度ごとに敷地境界から一定の距離をとり、管理型処分場に仮置きすることとされている。しかし、前述「一般廃棄物焼却施設における放射性物質の汚染されたおそれのある廃棄物の処理について」によれば、平成23年8月時点においては、これらの措置が順調に実施されていないと報告されている。

原子力安全委員会の平成19年5月21日付「低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について」は、濃度上限値は、埋設による処分が可能な低レベル放射性廃棄物の範囲を処分の方法別に明確化することを意図して定められるものであり、埋設事業許可申請を行うことができる低レベル放射性廃棄物中の放射性核種濃度の最大値とされている。核種ごとに低レベル放射性廃棄物レベルの3種類の処分方法(トレンチ処分、ピット処分、余裕深度処分)に応じて、その濃度が定められている。埋設による「めやす」被ばく線量は10 μSv/年とされている。処分する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の種類と数量等の内容物の確認と埋設後のモニタリング等の管理が必要とされている。比較的浅い地下に埋設する処分方法であるトレンチ処分及びピット処分の濃度上限値と浄水発生土の処分における濃度を第5表に示す。

Ⅲ. 今後の展開

福島原発事故により大量の放射性物質が環境に放出さ

第5表 ¹³⁷Cs 濃度の比較

		¹³⁷ Cs
濃度上限値 ^{*1}	トレンチ処分	1 × 10 ⁸ Bq/t
	ピット処分	1 × 10 ¹⁴ Bq/t
浄水発生土の処分 ^{*2}	遮蔽できる施設に保管	>100,000 Bq/kg ^{*3}
	管理型処分場に仮置き	≤100,000 Bq/kg ^{*3}
	管理型処分場に埋立処分	≤8,000 Bq/kg ^{*3}

*1「低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について」より

*2「放射性物質が検出された上下水処理等副次産物の当面の取扱いに関する考え方」より

*3 ¹³⁴Cs + ¹³⁷Cs

れ、放射性物質に汚染された災害廃棄物をはじめとして、様々な種類の大量の廃棄物が発生している。今までの関係法令は、このような廃棄物の発生する事態は想定されていなかった。そのため、事故の緊急時及び収束時として様々な方策が示され、実施されている。しかし、今後実施される放射性物質によって汚染された廃棄物の処分においては、対象となる主な核種が¹³⁷Csであり、長期の管理が必要となる。放射線防護の観点からは、「放射性廃棄物」の処分とこれらの処分の方策の整合性を図ることが必要であり、そのことがより国民の理解を得ることにつながると思われる。合理的で、実効性のある廃棄物対策が求められる。

— 参考資料 —

- 堀口昌澄, 廃棄物処理法・虎の巻, 日経 BP 社, (2010).
- 環境省, 一般廃棄物焼却施設における放射性物質の汚染されたおそれのある廃棄物の処理について, 平成23年8月29日.
- 原子力災害対策本部, 放射性物質が検出された上下水処理等副次産物の当面の取扱いに関する考え方, 平成23年6月16日.
- 原子力安全・保安院, 原子力施設におけるクリアランス制度について, 平成16年8月(平成21年5月改訂).
- 原子力安全委員会, 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について, 平成19年5月21日.

著者紹介



二ツ川章二(ふたつかわ・しょうじ)
 (社)日本アイソトープ協会
 (専門分野/関心分野)RI 利用, 放射線管理
 /安全取扱・放射性廃棄物, PIXE 分析

解説

福島原発事故で汚染した野菜はどれくらい放射能除去できるのか？

日本放射線安全管理学会が汚染除去をテーマに研究報告

金沢大学 柴 和弘

福島第一原発事故により、放出された大量の放射性物質で汚染した野菜を洗浄により、放射能除去率を高める工夫が検討された。その結果、水洗浄や手洗い洗浄、煮沸洗浄等による物理的工夫ではあまり差は見られず、放射能除去率は ^{131}I で $37 \pm 9\%$ 、 ^{137}Cs で $62 \pm 7\%$ であった。特に、 ^{131}I は放射能除去率が低く、ばらつきも大きかった。そこで、亜硫酸ナトリウム系の還元剤を使い、 ^{131}I を水に溶けやすいヨウ素イオン(I^-)にすることにより、 ^{131}I の放射能除去率が約80%まで高くなった。

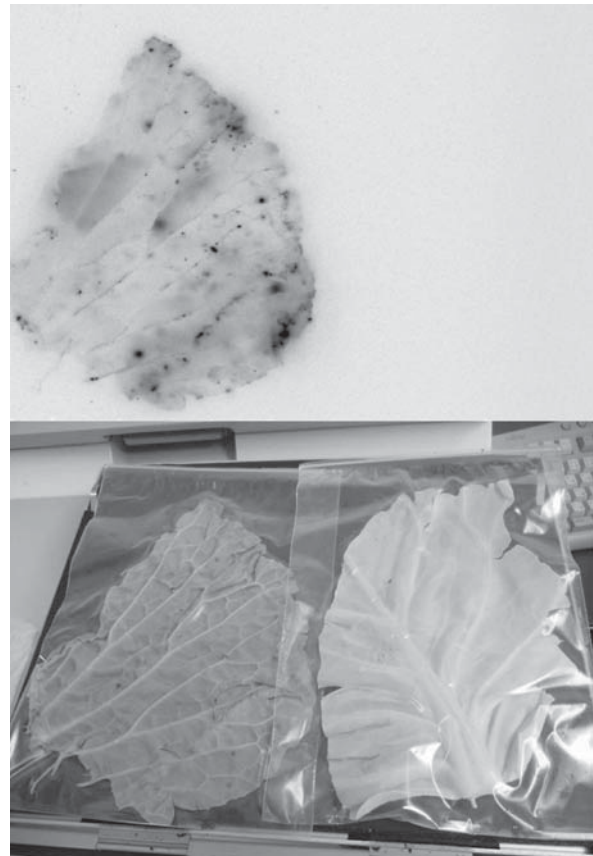
I. はじめに

平成23年3月11日に東日本大震災(M9.0)で発生した津波により、福島第一原子力発電所事故が起き、大量の放射性ヨウ素 ^{131}I 及び放射性セシウム ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 等が大気中に放出され、広い範囲に拡散し、土地、水、農畜産物等が汚染した。その結果、福島県の農作物だけでなく近隣の県の一部農作物まで、暫定基準値以上の放射能が検出され、出荷制限や摂取制限の対象となった。日本放射線安全管理学会の放射性ヨウ素・セシウム安全対策アドホック委員会では、すぐに野菜分析班を立ち上げ、出荷制限の対象となる農作物の放射能汚染の低減化並びに家庭での安全・安心確保を目指し、放射性物質で汚染した農作物の簡単かつ効率的な除去方法の検討を行った。

II. 汚染野菜の放射能分布と状態

1. イメージングプレートによる視覚的検討

汚染した野菜類の放射能汚染の分布はイメージングプレート(IP)を用いて、放射能画像解析システム(BAS-5000, フジフィルム社製)により画像化した(第1図)。その結果、野菜の放射能汚染には空気中のダストに付着した放射性物質が原因とみられるスポット汚染と雨に溶けた放射性物質が葉の表面に広がった面汚染があることがわかった。また、野菜に傷がある場合、放射性物質が傷から内部に侵入しやすく、採取してから時間が経った野菜は傷みが多くなることから、放射能汚染を取り除く



第1図 野菜(キャベツ)の放射能分布
(左図: 福島県南相馬市産汚染野菜(3月23日採取)
(約4 Bq/cm²), 右図: 石川県産野菜)

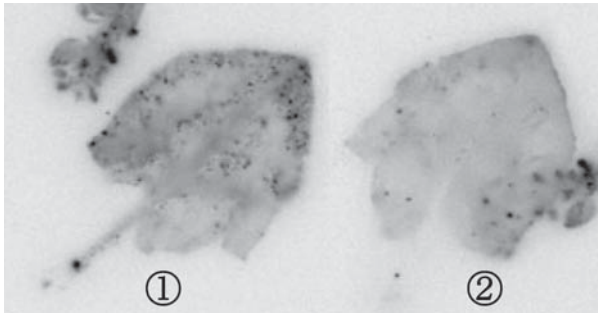
ことが困難になると思われた。

2. 葉の分画

葉を表皮、細胞壁、液胞、その他と分画し、それぞれ

How much Radioactivity from Contaminated Vegetables by Fukushima Nuclear Power Plant Accident can be removed? : Kazuhiro SHIBA.

(2011年 9月14日 受理)



第2図 ホウレンソウの放射能分布画像
(①:葉の表側, ②:葉の裏側)

の放射能を測定した結果、放射能の80%以上が表皮に存在していた。また、画像からも葉の表側のほうが裏側よりも放射能分布密度が高いことが明らかであった(第2図)。

Ⅲ. 物理的方法による放射能除去の検討

1. 基本的な測定と洗浄手順

(1) 洗浄手順

洗浄操作について、同じ条件になるようにあらかじめ決めた。すなわち、10分間水中に浸した後、流水下、手で葉を軽くこすりながら5分間洗浄し、その後、各条件(物理的方法や化学的方法)で除去操作を行った。放射能測定はGe半導体検出とNaIサーベイメータにより、洗浄前と洗浄後で、試料の位置や距離が同じ条件になるように注意して行った。特に、野菜をそのままの形で測定するので、葉の位置に気を付けるとともに、Ge半導体検出器の場合は野菜試料の表側と裏側の2回、NaIサーベイメータは試料の上下左右の4方向から4回測定した。

(2) 測定手順

測定器はGe半導体検出とNaIサーベイメータを使用した。一定の測定容器に野菜を入れ、洗浄操作前後で同じ条件になるように、野菜の位置・方向や検出器までの距離が同じになるように注意して測定を行った。Ge半導体検出の場合は表と裏の2方向で2回測定し、NaIサーベイメータの場合は試料の上下左右の4方向から4回測定した。得られた測定値(Bq, cps)から放射能除去率を次式より求めた。

$$\text{除去率(\%)} = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100$$

A_0 : 洗浄前の放射能(Bq, cps)

A : 洗浄後の放射能(Bq, cps)

2. 流水洗浄と手洗い洗浄の除去効果

基本的洗浄手順のうち、手で葉を軽くこすって洗う方法と流水下でつけておく方法について比較検討を行った。その結果、流水洗浄と手洗い洗浄の放射能除去率に差はみられず、また、 ^{131}I の除去効果は低かった(第1

第1表 流水洗浄と手洗い洗浄の放射能除去効果

	放射能除去率(%)	
	^{131}I	^{137}Cs
流水洗浄	38.4 ± 10.6	59.1 ± 8.1
手洗い洗浄	37.0 ± 8.8	62.3 ± 6.6

表)。

流水洗浄と手洗い洗浄で放射能除去率に差がみられなかった理由として、手でこすることにより、ホウレンソウの柔らかい葉の表面を傷つけてしまい、その傷にダストに付着した放射性物質が入り込んでしまったため、物理的な洗浄による効果と相殺されてしまった可能性が考えられる。ただ、今回は研究班で条件を統一するため、手洗いを基本的洗浄法とした。

3. 煮沸および超音波洗浄による除去効果

野菜を煮沸することにより、野菜の表面に付着した放射性物質がどれくらい除去できるか、水洗浄と比較した。その結果、煮沸による効果はさほどなく、水洗浄とあまり変わらなかった。(財)原子力環境整備センターから出されている冊子「食品の調理・加工による放射性核種の除去率(1994年)」¹⁾では、葉菜類で煮沸することにより、 ^{131}I や ^{137}Cs の放射能除去率が50~80%と報告している。しかし、 ^{131}I の場合は実験の条件により、放射能除去率のばらつきが大きく、30%以下の場合もあったことが報告されている。また、超音波洗浄器を使った洗浄による放射能除去効果を検討したが、 ^{131}I と ^{137}Cs のいずれの放射性核種においても、水洗浄の場合と放射能除去率に差はみられなかった。

以上のことから、野菜表面の汚染の場合は、水洗浄で十分であると考えられる。しかし、葉菜類における ^{131}I の水洗浄での放射能除去率のばらつきが大きく、また30%程度と低かった。それは一般的にヨウ素(I)は吸着性、浸透性が高いためと考えられた。実際に、汚染後から早い時期に洗浄を行った場合、放射能除去効果が50%と高い値を示した。また、原発事故により放出される ^{131}I の化学形として、ヨウ素分子(I_2)、ヨウ化メチル(CH_3I)、HOI等が考えられる²⁾。これらの化学形は水に溶けにくいいため、通常の水洗浄では除去できなかったものと考えられる。そこで、化学的な工夫により、 ^{131}I を効率的に除去する洗浄法をみつける必要がある。

Ⅳ. 化学的方法による放射能除去の検討

物理的方法による洗浄ではあまり汚染除去効果はみられなかった。特に、 ^{131}I の放射能除去が水洗浄だけでは難しいことがわかった。そこで、同位体交換、脂溶性溶剤、酸・アルカリ剤、有機溶剤及び還元剤等の化学薬品を利用した化学的除去法を検討した。同位体交換、界

第2表 1%ヨウ化カリウム, 1%食塩, 食器洗剤の除去効果

	放射能除去率(%)			
	蒸留水	ヨウ化カリウム	食塩	食器洗剤
¹³¹ I	26	44	26	20
¹³⁷ Cs	71	79	49	76

第3表 1%クエン酸, 1%重曹, 25%エタノールの除去効果

	放射能除去率(%)			
	蒸留水	クエン酸	重曹	エタノール
¹³¹ I	37	29	44	36
¹³⁷ Cs	66	50	65	60

面活性剤, 脂溶性溶剤, 酸・アルカリ剤としてヨウ化カリウム, 食塩, 食器洗剤, エタノール, クエン酸, 重曹を用いた。第2, 3表に食器用洗剤, ヨウ化カリウム, 食塩, クエン酸, 重曹, エタノールの放射能除去効果を示す。

ヨウ化カリウムや食塩を使った同位体交換による¹³¹I除去, エタノールによる脂溶性¹³¹I成分の除去や酸・アルカリの除去効果を調べた結果, 1%ヨウ化カリウムで¹³¹Iの放射能除去率が44%と蒸留水の26%に比べて, 若干放射能除去効果が見られた以外はあまり効果がなかった。また, 酸・アルカリやアルコールも蒸留水と変わらず放射能除去効果はみられなかった。

次に, ヨウ素分子(I₂), ヨウ化メチル(CH₃I), HOI等の水に溶けにくい化学形を還元し, 水に溶けやすいヨウ素イオン(¹³¹I⁻)に変え, 水洗浄効果を高めることを考え, 食品用の酸化防止剤として使用されている亜硫酸ナトリウム系の還元剤である1%チオ硫酸ナトリウム(Na₂S₂O₃・5H₂O), 1%次亜硫酸ナトリウム(Na₂S₂O₄), 1%二亜硫酸ナトリウム(Na₂S₂O₅), 1%亜硫酸ナトリウム(Na₂SO₃)および1%アスコルビン酸(ビタミンC)の放射能除去効果を検討した。その結果を第4, 5表に示す。

また, ホウレンソウの葉1枚について, 二亜硫酸ナトリウムとアスコルビン酸による化学的洗浄の前と後でイメージングプレートによる画像化を行い放射能除去効果の様子を視覚的に観察した(第3, 4図)。

ホウレンソウ1束を使って酸化防止剤による放射能除去効果を調べた結果, 第4表に示すように, 明らかに¹³¹Iの放射能除去率が蒸留水に比べて, 高くなった。特に, 二亜硫酸ナトリウムは¹³¹Iの除去率が78%と蒸留水の49%に比べて, 1.6倍放射能除去率が高くなった。また, ビタミンCであるアスコルビン酸も¹³¹Iの除去率が67%と優位に高かった。

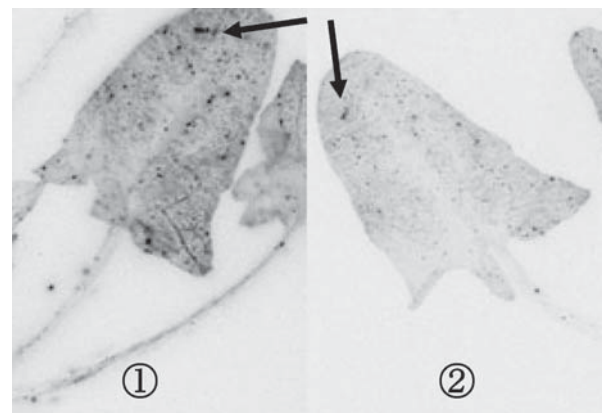
次に, ホウレンソウの葉1枚を使って酸化防止剤による放射能除去効果を調べた。その結果, 第5表に示すよ

第4表 酸化防止剤による汚染野菜の放射能除去効果
ホウレンソウ1束(Ge 半導体検出器測定)

	放射能除去率(%)	
	¹³¹ I	¹³⁷ Cs
1%チオ硫酸ナトリウム	72	80
1%次亜硫酸ナトリウム	66	79
1%二亜硫酸ナトリウム	78	84
1%亜硫酸ナトリウム	69	81
1%アスコルビン酸	67	80
蒸留水	49	68

第5表 酸化防止剤による汚染野菜の放射能除去効果
ホウレンソウの葉1枚(NaI サーベイメータ測定)

	放射能除去率(%)
1%チオ硫酸ナトリウム	71
1%次亜硫酸ナトリウム	66
1%二亜硫酸ナトリウム	81
1%亜硫酸ナトリウム	60
1%アスコルビン酸	69
蒸留水	44

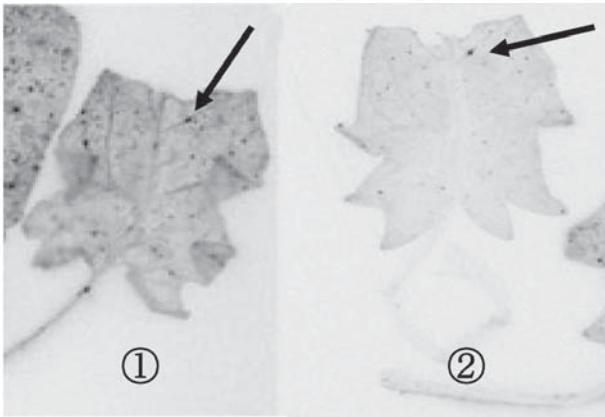


第3図 二亜硫酸ナトリウムによる化学的洗浄前①と後②の放射能分布画像
(矢印は野菜の傷などに入り込んだ放射性物質)

うに, 同じく二亜硫酸ナトリウムの放射能除去効果が最も高く84%と, 蒸留水の44%に比べて, 1.9倍であった。アスコルビン酸も放射能除去効果が80%と高かった。

第3, 4図に示すように, 酸化防止剤による放射能除去の様子を視覚的に観察した結果, 矢印に示すように傷の部分の放射性物質は葉の傷の中に入り込んでしまっているため, 洗浄後でも除去できず残っているのが観察できる。

また, 面汚染のように雨に溶けた放射性物質は酸化防止剤処置後の水洗浄により, 除去されやすいと思われた。しかし, 今回の酸化防止剤に浸した時間が24時間と長かったため, 野菜(ホウレンソウ)がしおれてしまった



第4図 アスコルビン酸による化学的洗浄前①と後②の放射能分布画像
(矢印は野菜の傷などに入り込んだ放射性物質)

ものが多く、食するという点から問題であると思われる。これについては、酸化防止剤の還元効果は即効的であり、また長時間持続するものではないので、もっと短時間でも同じ効果が得られるものと考えられる。また、チオ硫酸ナトリウム洗浄を行った野菜は比較的外見が保たれていた。これは、チオ硫酸ナトリウムだけが結晶水を含んでいたため、実際の濃度が約0.6%であったためと考えられる。今後、低濃度の還元剤の使用や浸しておく時間を短くすることによる放射能除去率及び鮮度の影響を検討する必要がある。

V. まとめ

- (1) 野菜の葉の放射能汚染にはスポット汚染と面汚染の2種類があった。
- (2) 野菜の葉の汚染は葉の裏側より、表側に汚染が多かった。
- (3) 野菜の葉の表面の傷が原因で放射性物質が内部に入り込み、除去しにくくなると考えられた。
- (4) 水洗浄だけの場合、個々の野菜により放射能除去率にバラツキ(^{131}I (12~50%), ^{137}Cs (32~70%))がみられた。
- (5) 水洗浄だけの場合、 ^{131}I の放射能除去率が ^{137}Cs に比べ低かった。
- (6) 流水洗浄と手洗い洗浄で放射能除去率に差は認められなかった。
- (7) 物理学的工夫(熱湯、超音波等)では、除染効果を上げることは難しいと思われた。
- (8) 化学的工夫による洗浄では、酸、アルカリ、塩、アルコール等による除去率の向上はみられなかった。
- (9) 1%ヨウ化カリウムは ^{131}I の除去率が水洗浄に比べて若干高かった。
- (10) 食品中に使用される酸化防止剤の ^{131}I の除染効果を調べた結果、いずれの酸化防止剤も除染効果があ

ると思われた。特に、1%二重硫酸ナトリウムは ^{131}I で除去率が約78%と高い値を示した。また、ビタミンCであるアスコルビン酸も ^{131}I の除去率が67%と蒸留水に比べて高かった。

以上、汚染野菜の放射能除去は還元剤により、水洗浄では落ちにくい ^{131}I の除去率を高めることが可能であると考えられた。しかし、野菜の放射能汚染はその汚染部位の状態、例えば、キズの部分、枯れた部分に汚染した場合、除染は難しくなると思われた。野菜の出荷を考える場合、野菜の傷んだ部分を丁寧に取り除くことが大事になると考えられた。

野菜分析班の班員

(○：班長)

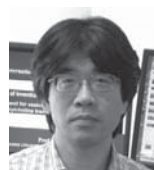
- | | |
|-------|-------------------------|
| 榎本 和義 | (高エネルギー加速器研究機構) |
| 末木 啓介 | (筑波大学アイソトープ総合センター) |
| 廣田 昌大 | (東京大学大学院工学研究科) |
| 野川 憲夫 | (東京大学アイソトープ総合センター) |
| 桧垣 正吾 | (東京大学アイソトープ総合センター) |
| 矢永 誠人 | (静岡大学理学部) |
| 西澤 邦秀 | (名古屋大学名誉教授) |
| ○柴 和弘 | (金沢大学学際科学実験センター) |
| 清水喜久雄 | (大阪大学ラジオアイソトープ総合センター) |
| 三好 弘一 | (徳島大学アイソトープ総合センター) |
| 佐瀬 卓也 | (徳島大学アイソトープ総合センター) |
| 阪間 稔 | (徳島大学大学院ヘルスバイオサイエンス研究部) |

班員の皆様並びに班員の研究にご協力いただきました、東京大学大学院新領域創成科学研究科の桧垣 匠氏、大阪大学工学研究科の飯田敏行氏、村田 勲氏、大阪大学環境安全研究管理センターの矢坂裕太氏、大阪大学安全衛生管理部の齊藤 敬氏、金沢大学学際科学実験センターの北村陽二氏、小阪孝史氏、徳島大学アイソトープ総合センターの入倉奈美子氏、坂口由紀子氏に深く感謝いたします。

—参考資料—

- 1) 食品の調理・加工による放射性核種の除去率, 原子力環境整備センター, (1994).
- 2) 原子力百科事典 HP より
(<http://www.rist.or.jp/>)

著者紹介



柴 和弘(しば・かずひろ)
金沢大学
(専門分野/関心分野)放射性医薬品化学,
放射線安全管理学

解説

福島第一原子力発電所事故時の災害初期対応の教訓 放射線情報の把握と活用に関連して

福山大学 占部 逸正

福島第一原子力発電所事故時の初期の段階に、環境放射線モニタリングや SPEEDI による放射線情報の把握の活動がいかに行われたかを検証するために、実際に得られた環境放射線モニタリングの結果と事故・災害に対する対応の時系列を同時進行的に検討した。その結果、災害対策本部としての緊急時モニタリングの体制の確立にかなりの時間を要したこと、事業者および福島県の環境放射線モニタリングおよび SPEEDI 計算結果を関連付けて検討することにより、緊急時モニタリング計画の立案と実行が大幅に改善された可能性があることなどが明らかとなった。

I. はじめに

国は、JCO 事故の経験を踏まえ、原子力災害対策特別措置法の制定や防災基本計画・原子力災害対策編などの見直しを行い、災害初期対応の迅速化や国と地方公共団体の連携強化など、防災機能の充実のための体制の整備に努めてきた。なかでも、被害拡大の防止のための緊急事態応急対策に関しては、緊急時モニタリングの実施、原子炉の状態把握などを行う緊急時対策支援システム (ERSS) や大気中の放射性物質の挙動を予測する緊急時迅速放射能影響予測システム (SPEEDI) の整備、原子力保安検査官等による原子力事業所における事故情報等の放射線情報の収集を、特に重要な業務と位置づけその実効性の向上に努めてきた。

3月11日に福島第一原子力発電所で生じた原子力事故は世界最大級であり、予測を超えるものであったが、現在、わが国で整備している原子力防災システムがいかに機能したのかを検討することは、「事故は起こりえるもの」として取り組んできた当該システムの有効性や改善点を検証する意味で重要である。施設の周辺環境は、現在もなお緊急事態宣言下で種々の防護対策が進行中であり、総体としての防護システムのあり方を検討するのは時期尚早であるかもしれない。しかし、一方、原子力災害では、災害発生の初期段階に多量の放射性物質が環境中に放出されることから、この時期にどのような放射線情報を入手し、いかなる対策をとったのかを検証することは被害の実相を知るうえで重要な意味を有している。

Lessons Learned from the Initial Response to Nuclear Disaster caused by Fukushima Nuclear Power Plants Accident : Itsumasa URABE.

(2011年 9月14日 受理)

今回の事故での放射線情報の把握は全交流電源喪失の状況下での実施を余儀なくされ、さらに余震の続く中で実施され、多くの困難を伴ったといわれている。本稿では、こうした困難な作業環境下であったことを考慮しながらも、今回のような災害が生じた際に初期の放射線情報の把握を効果的に行うために、事故発生以降の災害対策本部等の動きと緊急時モニタリングの実施状況との関連を明らかにし、そのあり方を検討する。

II. 緊急時の放射線情報の把握

1. 緊急時モニタリング

放射線情報の把握は、緊急事態が宣言された段階で、避難等の防護対策を講ずる際の基礎として、また、放射性物質または放射線の周辺住民への影響評価を目的として行われる¹⁾。その実施方法は、初期段階の防護対策の策定の重要性から2段階に分け、第1段階は緊急事態の発生直後から速やかに開始され、第2段階は放射性物質または放射線の放出が確実に減少してきた段階で、周辺地域への全般的影響を把握するために行われる。第1段階では迅速性が、第2段階では迅速性より正確性が重視される。それぞれの段階の測定項目、測定地点または試料採取地点、測定方法等は環境放射線モニタリング指針に詳しいが、第1段階のモニタリングでは、放射性希ガス等による空間線量率のほか大気中放射性ヨウ素濃度の測定、環境試料中の放射性ヨウ素濃度の測定、大気中のウランまたはプルトニウム濃度の測定、環境試料中のウランまたはプルトニウムのアルファ線表面汚染密度または濃度の測定などが示されている。

また、第2段階のモニタリングでは、測定項目の環境試料中の放射性物質の濃度について、土壌、作物、農畜産物、原水(河川、浄水場等)、魚介類(河川または海洋

への放出がある場合)を追加している。このように、緊急時モニタリングは災害対応の効率性や迅速性を考慮して、評価対象となる放射性物質を特定して段階的に実施することを基本としている。

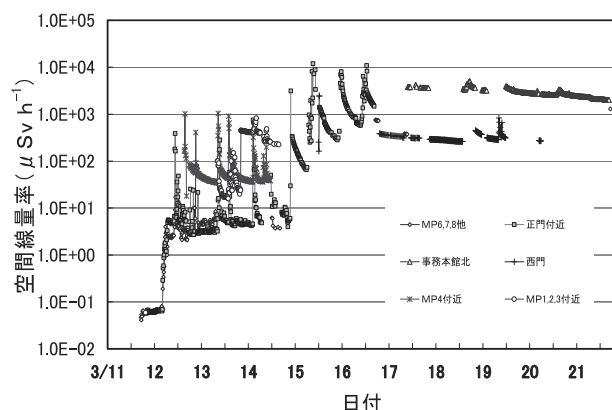
2. SPEEDI ネットワークシステム

緊急時には、防護対策の決定にあたり、まず計算等により周辺環境で予測される放射性物質の濃度や周辺住民の被ばく線量を推定し、これらと実測されたモニタリング結果を踏まえ、現実的な放射性物質の濃度や空間線量率の評価を行う。SPEEDIは大気中に放出された放射性物質の周辺環境での放射性物質の濃度や予測線量等の情報を得る方法として、国や地方公共団体に整備されている。環境放射線モニタリング指針では、原子力緊急事態が発生した場合、防護対策を迅速に講ずる観点から、予測線量等の推定のためにこのシステムを活用することを原子力災害対策本部や現地対策本部の放射線班の業務のひとつと位置づけている。しかし、災害の発生の初期段階には、放出源情報を定量的に判断することが困難な場合も少なくない。そのような場合には、単位放出による予測図形を基に監視を強化すべき方位や場所、モニタリング項目の設定など緊急時モニタリング計画の策定に資することを求めている。また、同時に、SPEEDIによる計算結果は予測の気象条件と現実との違いにより計算結果が常に適切であるとは限らないことから、現実の気象データを用いて繰り返し結果が適切かどうかの確認が必要なことも述べている。

Ⅲ. 災害初期の環境放射線モニタリング

1. 事業者の環境放射線モニタリング

第1図に東京電力により災害発生直後からモニタリング車(MC)によって測定された空間線量率の変化を示す²⁾。空間線量率は、津波の襲来の直後から12日の早朝まではバックグラウンド(BG)の値を示しており、12日早朝から徐々に上昇を開始し、10時30分に最初のピーク386 $\mu\text{Sv/h}$ を正門付近で観測している。それ以後、数百 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の変動を繰り返しながら、3月15日9時には同じ正門前で約12 mSv/hの高線量率を観測し、16日



第1図 発電所敷地境界付近の空間線量率の変化²⁾

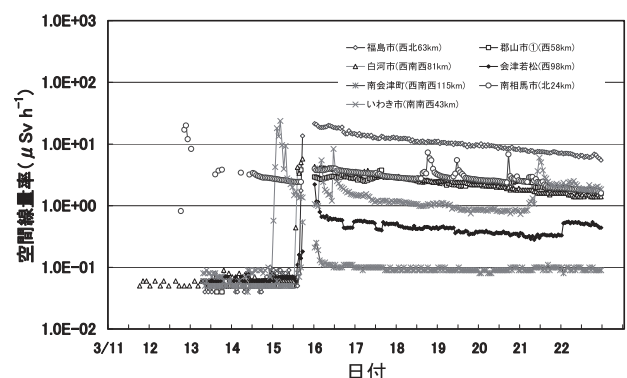
12時30分には再度約11 mSv/hの空間線量率を観測している。こうした敷地境界付近の空間線量率の急激な変動は、地震発生後のプラント事象および気象条件との関連で検討がなされている。また、この第1図に示された測定結果から、ほぼ同じ時間帯に複数の方位での空間線量率の変化が確認できる。例えば、3月14日にはモニタリングポスト(MP)2, 4, 正門前で空間線量率が同時に変動しており、複数の方位に放射性物質が飛散した可能性を示している。このことは、敷地境界付近ではかなり広域にわたって放射性物質による汚染が同時に進行した可能性を示している。

2. 福島県の環境放射線モニタリング

第2図に福島県の7箇所の地域(7方部)で得られた環境放射線モニタリングの結果を示す³⁾。この結果では、3月12日の21時前後に南相馬市で約20 $\mu\text{Sv/h}$ を観測し、3月15日の4時前後にいわき市で約24 $\mu\text{Sv/h}$ を観測している。前者は12日の夕刻の南風に起因し、後者は、前日(14日)より吹き続けていた北風に起因すると考えられる。続いて白河市の線量率が上昇し、さらに続いて郡山市、福島市が急激な増加を示している。これらは、15日の昼ごろ吹いていた東風が短時間のうちに変化し、しだいに南東~南南東の風に変化したことによると思われる。16日以降は、南相馬市といわき市で大きな変動が見られる以外空間線量率は漸減傾向にある。

3. 災害対策本部等の災害応急対策

第1表に地震の発生以後の応急対策、施設での異常事象等、環境放射線モニタリング関連事項を示す⁴⁾。表より、地震直後は敷地境界のMPの機能は維持されていたが、津波による全交流電源の喪失とともにモニタリング機能が失われている。また、ERSSの機能が地震直後に失われたことによりSPEEDIによる定量的な計算も困難になっている。その後、緊急事態宣言と災害対策本部および災害対策現地本部が設置されるが、このときは施設周辺環境の空間線量率はBGとほとんど変わっていない。12日の早朝には、県、日本原子力研究開発機構(JAEA)、放射線医学総合研究所(放医研)等の職員は福島県原子力センター(大熊町)に参集できたものの、関係



第2図 福島県の7箇所の地域(7方部)の環境放射線モニタリング結果³⁾

第1表 地震発生直後に実施された災害対応および環境放射線モニタリング⁴⁾

	応急対応等	施設での異常事象等	環境放射線モニタリング
11日 14:46	地震発生	原子炉停止, 緊急時対策支援システム (ERSS) 機能せず	周辺監視区域のモニタリングポスト (MP) 等異常なし
15:30	津波到来	直後, 全交流電源喪失	
15:42	経産省原子力災害(現地)警戒本部の設置	MP機能せず, モニタリング車 (MC) による測定	県MP24台中23台使用不能
16:36 17:00	官邸対策室の立ち上げ 経産省副大臣緊急事態応急対策拠点施設 (OFC) に向け出発	非常用炉心冷却装置による注水不能 緊急時迅速放射能影響予測システム (SPEEDI) 定量的な予測が行えず	
19:03	緊急事態宣言, 災害対策(現地)本部の設置, 現地本部長代行を置く	停電, 非常用電源の不具合によりOFCの通信手段利用不可, 事務所長等はOFCから隣接する県原子力センター(大熊町)に移動	
20:50	県知事2km圏内居住者に避難指示		
21:23	3km圏内避難, 10km圏内居住者に屋内退避指示	1号機冷却が困難	
12日 00:00	副大臣県原子力センター(大熊町)に到着 県, JAEA, 放医研等職員到着	関係省庁等の初動の参集割合は低調, 緊急事態応急対策員の現地派遣も直ちにはなされなかった	
03:20	現地対策本部OFCにもどる	OFC非常用電源復旧, 通信システムも衛星回線が利用可能	
05:44	半径10km圏内の居住者等に避難のための立ち退きを指示	格納容器内圧力上昇OFCではプラント情報, ERSS, SPEEDI等の使用が困難	敷地境界付近空間線量率上昇
		OFC代替施設の南相馬市庁舎は地震・津波災害対応で使えず	
15:36		1号機水素爆発	
18:25	半径20km圏内の居住者等に避難のための立ち退きを指示	他の原子炉事故による災害発生を考慮	20時 南相馬空間線量率上昇
13日			最初の緊急時モニタリング情報(一部地域で>30 μSv/h)
14日 07:30	原子力安全・保安院からモニタリング結果の公表	11:01 3号機水素爆発	MCの1次(3台), 2次派遣(4台)
15日	OFCから関係職員引き上げ	4号機爆発 2号機爆発的現象	表土, 植物から高濃度放射性ヨウ素とセシウムを検出
	福島原子力発電所事故対策統合本部の設置		MC15台(文科省(JAEA) 県, 警察庁, 防衛省, 電力会社)による測定
11:00	20km以上30km圏内の居住者等への屋内退避の指示 現地対策本部を福島県庁に移転		土壌, 植物採取(地震の影響等により現地対策本部で十分なモニタリング活動を行えず)
20:40			浪江町周辺3地点で測定(330 μSv/h)
16日	文科省浪江町周辺線量率測定結果公表		県緊急時モニタリング開始
	政府部内(文科省, 原子力安全委等)の役割分担の整理		原乳の放射能測定開始 水道水の放射能調査
17日	文科省より毎日環境モニタリング結果を公表		野菜類の放射能調査開始
18日	積算線量計または測定頻度の増加を要請		ダスト, 環境試料, 土壌の採取分析
20日			北西40kmで土壌, 雑草の汚染確認
21日	文科省「福島原子力発電所の20km以遠のモニタリング計画の充実について」		土壌のプルトニウム分析
23日		SPEEDIによる試算結果公開	海域モニタリングの開始

省庁の初動の参集割合は低調で, 原子力安全委員等の現地派遣も直ちにはなされていない。この時期に, 一時的に移転をしていた現地対策本部は緊急事態応急対策拠点施設(OFC)に戻ったが, 敷地境界付近の空間線量率はすでにBGの数倍の値となっている。12日の午後, 1号

機の水素爆発が起こるが, このときの敷地境界付近の空間線量率は, BGの100倍を超えている。同夕刻には空間線量率がBGの千倍を超え, 20km圏内の住民に対して避難指示がなされている。

13日になり, 現地の対策本部で放射線モニタリングが

行われ、一部の地域で30 $\mu\text{Sv/h}$ を超えるところが発見され、14日早朝、原子力安全・保安院がその結果を報告している。災害対策本部からの環境放射線モニタリングに関連する数値はこの段階で始めて示された。このとき敷地境界付近では0.9 mSv/h 程度の空間線量率が観測されている。この日以降、災害対策本部においてもMCを数台手配し、環境放射線モニタリングの強化に努めている。14日、15日には3号機、4号機、2号機と爆発が続き、多数(15台)のMCによる放射線測定や表土や植物の測定が開始され、15日には緊急時モニタリングのための土壌や植物の採取も行われたが、この段階では地震の影響等により現地対策本部での十分なモニタリング活動は行えなかったとしている⁴⁾。さらに、15日の夕刻には浪江町で330 $\mu\text{Sv/h}$ の線量率が観測されている。こうした状況を踏まえて、16日には環境放射線モニタリングに関する政府内部の役割分担が行われ、緊急時モニタリングの実施と取りまとめおよび結果の公表を文科省が分担することとしている。21日には文科省により「福島原子力発電所の20 km 以遠のモニタリング計画の充実について」が決定、公開されている。以上の経緯を踏まえると、測定場所の選定等でいまだに系統性に欠けるものの、この時期にようやく緊急時モニタリング体制の確立が図られたと考えられる。

IV. 考察と教訓

1. 放射性物質放出までの時間的余裕

これまで原子力施設で異常が発生した場合、放射性物質や放射線の周辺環境への異常な放出が生じるまでには、ある程度の時間的余裕があると考えられてきた。今回のモニタリングデータでは、地震発生から13時間余りを経過した12日午前4時頃から、敷地境界付近での空間線量率が上昇し始め、以後、同測定点では数 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の線量率が続き、時折、数百 $\mu\text{Sv/h}$ の値に達している。このことは異常通報による警戒本部の設置から施設での放射性物質の放出までの間に時間的経過が存在していたことを示している。しかし、防護対策を実施する観点からは、1号機爆発以前の比較的早い段階で生じた敷地境界付近の空間線量率上昇と炉内事象とをより正確に関連付けることが重要である。このことは周辺環境に影響を及ぼす炉内事象の制御の可能性を見極め、確実な災害応急対策を検討するうえで重要である。

2. 緊急時モニタリングの開始

原子力防災では、緊急事態の判断は、①敷地境界付近の放射線量、②事象(原子力発電所等で外部への大量の放出に至る兆候を示す事象の発生など)によってなされる。今回の緊急事態宣言は後者の基準に基づいて発出されている。緊急事態宣言が発出された場合、指定行政機関および指定地方行政機関の長などは、緊急事態宣言があった時から、緊急事態応急対策を実施すべき責務を有

している。それは、今回のように敷地境界付近での空間線量率がBG程度に低くても当てはまるものである。したがって、緊急事態が発生した場合には、原子力災害対策本部および原子力災害現地本部では、直ちに緊急時モニタリングの体制を組織し実施に移す必要がある。こうした視点から今回の動きを見ると、第1図では13日には敷地境界付近で数十 $\mu\text{Sv/h}$ (時折 mSv/h) の線量率が観測され、第2図の南相馬市でも数 $\mu\text{Sv/h}$ の線量率が観測されているにもかかわらず、表のように、13日までは、原子力施設に起因する放射性物質または放射線の周辺住民等への影響評価に資する目的で緊急時モニタリングが計画、実施されたとは考えにくい状況にある。

また、第1, 2図と第1表から、13日の夕刻に最初の緊急時モニタリングの結果が得られ、15日に福島県環境放射線モニタリングの観測値がほぼ同時に異常に上昇し(敷地境界付近では昼ごろに数 mSv/h が観測されている)、同日夕刻に浪江町で330 $\mu\text{Sv/h}$ が観測されるなど事態が急速に変化しているのがわかる。国は、こうした状況下で緊急時モニタリングの体制の確立に努めるが(16日に国の関係機関で緊急時モニタリングにかかわる組織の役割分担を行い、その後、文科省は「福島原子力発電所の20 km 以遠のモニタリング計画の充実について」を決定し公開している)、その方向性が見えるのが緊急事態宣言の発出後約10日間を経た後となっている。緊急事態宣言下での緊急時モニタリング体制の構築にこのように時間を要した原因のひとつとしては、地震と津波による生活基盤の喪失や通信手段の途絶によるOFCの機能不全、継続する余震なども考えられるが、発電所の敷地境界付近や福島県の環境放射線モニタリングの結果が異常に高い値を示しているにもかかわらず、それを緊急事態と直ちには認めることができない人の認知特性(正常化の偏見)に起因する可能性も否定できない。今後は、こうした視点からの緊急時モニタリングのあり方を検討する必要がある。

3. 放射線モニタリングの段階的实施

緊急時モニタリングは、そのモニタリングの意味合いを明確にする意味で2段階に分けて実施される。21日前後に実施された放射線モニタリングは、実質的には、いわば緊急時モニタリングの第1段階に相当するものといえる。第1段階と第2段階を分ける明確な指標はないが、原子炉等の安定的な冷却が可能になった段階をひとつの区切りとするなら、今回の場合、第1段階に相当する期間は相当長く数ヶ月に及んだことになる。しかも、実質的には原子炉の安定的な冷却が達成される以前の段階で緊急時モニタリングという第2段階のモニタリングも実施されており、従来からいわれてきた第1段階、第2段階のモニタリングの区分は災害の進行状況と必要とされる情報を考慮して、これまでとは違った観点からとらえなおす必要が生じている。

また、第1段階でモニタリングの対象となる核種を希ガス、放射性ヨウ素、ウランまたはプルトニウムに限ることも、住民の被ばく線量の推定や災害の規模を推定するうえで適切とはいえない。今回の場合、放射線モニタリングの早い段階で想定された核種以外の放射性核種(放射性セシウム)に関する情報が求められている。また、放射線モニタリング情報と住民の被ばく線量評価の不可分の関連性から被ばく線量を最終段階の評価項目とするのは適切ではない。特に、防護対策が実施される前の放射性物質の吸入による被ばくは初期の段階の放射線情報にその精度が大きく依存するので、早い段階から被ばく線量評価を目的とする緊急時モニタリングを実施すべきである。すなわち、緊急時モニタリングは、施設からの放射性物質の放出の制御が困難な状況と放射性物質の放出の不確実性が大幅に減少した状況に分け、それぞれの状況下で防護対策の実施と被ばく線量の評価を目的として計画、実施する必要がある。

4. SPEEDI 情報の活用

緊急事態の初期の段階において、環境放射線モニタリングとともに、SPEEDIは適切な防護対策を実施し、住民の被ばく線量を推定するうえで重要な役割を果たす。しかし、今回の場合、震災の直後にERSSの機能が失われ、本システムによる定量的な評価が不可能になり、初期においてはまったくその機能が応急対策のために活用された形跡がない。一方で、環境放射線モニタリング指針では、放出源情報が得られない場合でも放出源情報を仮定してSPEEDIを緊急時モニタリングや防護対策の実施に役立てることを期待している。3月12日の正午前後から施設境界付近のモニタリング結果が極めて大きな数値を示している。また、同じ日の夕方からは南相馬のモニタリング結果も急激な変化を示している。これらの12日以降の放射線モニタリングの結果を踏まえると、たとえ放出の事後の評価であっても、放射線モニタリングの結果をSPEEDIの結果を用いて解釈できていれば、施設から遠く離れた広い地域の放射性物質の動態の概略が把握でき、緊急時モニタリング計画の立案、実行が大幅に改善された可能性が高い。

災害の状態を限られた放射線モニタリング情報からしか推定できない状況下で、放出源情報を得ることは、災害の規模や特徴を知り、応急対策のみならず、災害対応全般を円滑に効果的に遂行するうえで重要である。SPEEDIによる放出源情報の推定についても初期の段階に検討された形跡がない。環境放射線モニタリング指針にはSPEEDIのこういった応用を明記していないが、何が起るわからない状況下ではマニュアル化された技術のみならず、先端技術の応用の可能性も試みられてしるべきであり、それが本来の緊急時対応のあり方といえる。後に、原子力安全委員会によって公開されたSPEEDI計算に基づく最初の線量マップは、放射線モニ

タリング結果からの逆推定に基づく放出率を仮定してのものである。結果の精度については誤差を考慮せざるを得ないが、ここで示された推定結果は、放出された放射性物質の影響の全体像を見極めるうえで効果的であり、以後の防護対策の決定に重要な役割を果たすことにもなった。

V. おわりに

以上の検討の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 施設の異常事態の発生から放射性物質の環境への放出には時間的経過があった。しかし、防災の観点から、早い段階で生じた敷地境界付近の空間線量率上昇と炉内事象との関連を明らかにすることが重要である。
- (2) 原子力緊急事態宣言の発出から緊急時モニタリング体制の確立までに長時間を要している。原因としては、複合災害の影響も無視できないが、災害の初期対応に人の認知の特性である正常化の偏見に起因した遅れが生じた可能性も考えられる。
- (3) 現在の環境放射線モニタリング指針では、初期の段階では放射性物質の種類に関する情報の把握や住民の被ばく評価の業務が明確にされていない。災害の初期の段階を国際機関等という緊急被ばく状況ととらえ、放射線情報の取得、被ばく線量評価、防災対策と系統的にとらえなおす必要がある。
- (4) 原子力緊急時に影響の概略を空間的、時系列的に把握する方法としてSPEEDIは重要な役割を果たす。緊急時モニタリング計画の立案は、放射線モニタリング情報と点としての測定情報を補完するSPEEDI情報を組み合わせることが不可欠である。放出源情報を含めて、SPEEDIを柔軟に活用できる体制を整備すべきである。

—参考資料—

- 1) 環境放射線モニタリング指針、平成20年3月(平成22年4月一部改定)、原子力安全委員会。
- 2) 福島第一原子力発電所のモニタリング状況(3月11日～21日)、東京電力ホームページ。
- 3) 県内7方部環境放射能測定結果について、福島県ホームページ。
- 4) 原子力災害対策本部、原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について、平成23年6月。

著者紹介



占部逸正(うらべ・いつまさ)
福山大学
(専門分野)放射線防護、環境放射線計測、
情報処理

原子力安全規制庁の組織および職員に関する要件 福島第一原発事故の再発防止のために

(株)ニューファクト 森本 俊雄, 東京工業大学 澤田 哲生

2011年3月の福島第一原子力発電所事故の反省から, 政府は環境省の外局として原子力安全庁を設立することを目指して検討を進めている。日本の原子力規制行政を改革するためには, 規制組織の枠組みよりも組織の中身, 特に規制機関の上級職員の専門性向上が緊急の課題である。原子力安全庁の長官および上級職員を, 能力主義に基づき任命し, その在職期間を欧米諸国と遜色ないものとする必要がある。そしてIAEAのレビューを再度受けることが, 我が国の原子力安全規制を国際レベルに引き上げる上で有効である。

I. スウェーデン SKI の反省

1. バースベック発電所の想定外事象

1992年7月, スウェーデンのバースベック原子力発電所で安全逃し弁が誤って開き, 噴出した蒸気により断熱材が剥離し, 緊急炉心冷却系ポンプの吸込み側ストレーナが一部分閉塞した。当時の安全審査ではこのような事態の発生と進展はどこの国でも想定されていなかった。

しかし, 安全審査を実施したSKI(当時のスウェーデン原子力規制機関)の長官は, 安全審査において, このような事象の可能性を指摘できなかったことを深刻に受け止め, 国際的な委員会によるSKIの審査能力のレビューをスウェーデン政府に強く求めた。その結果, スウェーデン政府は, SKIの安全審査上の問題点を検討するため, 国内外の有識者を招集し, レビュー委員会を結成した。委員にはNRCの元幹部をはじめフランスやフィンランド等の原子力規制関係者, スウェーデンの航空安全関係者等が任命され, 1994年から95年にかけてレビューが実施された。レビューの結果, 「SKIの規制活動は適切で品質も高い。しかし手順等で文書化されていないものが多い」との指摘がなされた。そのことが, SKIの品質マネジメントシステム(QMS)開発の契機となった。

2. スウェーデンから学ぶこと

バースベックの事象は重大事故に至ったものではない。しかし審査の不十分性を深刻に受け止め, 審査能力について外部のレビューを受け, その勧告を実施している。規制機関のトップが先頭に立って謙虚に反省する姿勢を

Requirement for Qualification and Expertise of Nuclear Regulatory Body : Toshio MORIMOTO, Tetsuo SAWADA.

(2011年 10月15日 受理)

示し実践した点を, 我が国は大いに学ぶべきである。

我が国の原子力規制機関である原子力安全・保安院は, その規制体制について2007年にIAEAのレビュー(IRRS)を受けている⁵⁾。しかしその範囲は限定的であり, その後受けるべきIAEAによる再レビューをいまだに受けていない。原子力安全庁の下で, 原子力安全規制に対するIAEAのレビューを謙虚に受けることが, 国際的な義務でもあり信頼確保の礎である。

II. 日本の反省

2011年3月の福島第一原子力発電所事故(福島事故)の主な原因は, 津波と全交流電源喪失事故(SBO)の想定が不十分であったことである。許認可の条件内で安全性を確保する第一の責任は事業者にある。しかし, 許認可条件の設定は規制機関の責務であり, 今回の福島事故の責任は第一義的には規制機関にあると基本的に考えられる。現行の法令に基づき事業者にも責任があるとする論議も可能であろう。しかし, 現在必要とされていることは規制に関わる機関, 特に原子力安全・保安院の謙虚かつ客観的事実に基づく反省である。また同時に規制機関に対して, SBO等についての的確な指針を示せなかった原子力安全委員会の問題認識の甘さも看過できない。

福島事故の根本原因として, 少なくとも下記の3点が挙げられる。

(1) 新規規制課題への取組みの遅れ: 津波の想定水位をどの程度とするか, また想定水位により冠水する安全関連の系統や建屋に対して, いかなる防護対策を講じるべきか等について, 規制機関としての見解が充分定められていなかった。津波に関する新知見や海外の設計対策を調査して規制上の見解が定められていたとしても, 今回の津波が想定され, 実効的な対策が立てられていたかは不明である。我が国では, 新規な規制課題に対

する取組みが常々遅れがちであった。その推進が今後は今まで以上に重要である。さもなくば、規制への信頼は回復できない。かつて国内に原子力発電所が数基程度しかなかった時代には、個別課題としての都度対応も止むを得なかったともいえる。しかし50基以上の原子炉が設置されている現状においては、未着手の様々な規制課題に対する規制方針を規制機関が提示することが、規制の安定化と国民の合意形成のために欠かせない。

(2) 既存の安全規制方針の定期的な見直しの遅れ：

日本では1977年の安全設計審査指針改定にて短時間(30分程度)のSBOの想定が要求された。その後、米国では1988年に、より長時間の設計対応が要求され、全プラントが4時間以上の耐久時間を有するようになった。これを受けて日本でもSBOの耐久時間について論議がなされたが、我が国は外部電源の信頼性が高い等の理由から、指針内容の改定はなされず、長時間のSBO発生時の対策は事業者の自主的措置として位置づけられた。

その後、炉心損傷事故を防止する上でSBO対策が重要であるとの認識が世界的に広まった。これを受けて、IAEAは非常用電源の設計指針⁴⁾の中で、外部電源や非常用電源の信頼性が高いとしてもSBOの可能性は考慮すべきであるとしている(2.14項)。

長時間のSBO対策を自主的措置でなく規制要件としていても福島事故が回避されたとは限らない。しかし、SBO発生時の対応がより確実なものになっていた可能性はあると考えられる。

一度設定した安全規制方針を定期的に見直す体制が定まっていれば、SBOに対する規制機関の姿勢がより一層厳しくなった可能性がある。その結果、SBO対応作業に対する検査もよりの確でありえたかもしれない。

(3) 専門家の異論検討プロセスの欠如： 現行の津波の想定条件については、一部の専門家から異論が出されていたとのことである。原子力安全規制に関する専門家からの異論を正式に取り上げるプロセスが定められていけば、津波に対する設計条件等の見直しが、より早く実施されていた可能性がある。

Ⅲ. 今後の規制アクション

本章では、前記Ⅱ章に記した3つの根本原因への対策について、海外の事例を参照しながら述べる。

1. 新規規制問題への体系的取組み

IAEAは規制機関が規制要件を制定する際には、原子力発電所の運転経験や研究開発の成果も含め幅広い情報収集を行うべきとしている³⁾(3.24項)。我が国においても海外規制機関の動向も含め、様々な情報収集を行い検討が実施されてきた。しかしその検討は、規制担当者の個人的努力に負う部分が多く、体系的ではなかった。

TMI事故後に米国においてみられたように、福島事

故を踏まえた安全性向上のための対策案が数多く提起されることが予想される。それらの提案には重要性の高いものや低いものが含まれ、かつ安全性向上の効果が重複しているものも見られるであろう。米国NRCは、TMI事故以前からの安全性検討課題とあわせ、規制方針が定まっていない課題を一般問題プログラム(GIP)としてまとめ上げ、安全上の効果や必要なコスト等を考慮して検討の優先順位を定め、規制方針を順次制定した⁶⁾。GIPでは、重要な安全問題に対してはNRCスタッフによるプロジェクトチームが結成され、そこには初期の段階から法律担当者が参加している。また、GIPの検討状況は定期的に米国連邦議会に報告されている。人事異動の影響をあまり受けないプロジェクト制による取り組み、そして検討の初期段階からの法律担当者の参加、という方式は我が国においても大いに参考となると考えられる。そして、この取組みを確実なものとするために、進捗状況の国会への定期的な報告を義務づけることが重要である。

2. 既存規制要件の定期的見直し

規制要件を一たん定めたとしても、その後の運転経験や新知見に応じて見直すことが必要となる。米国NRCでは数多くの規制指針を制定しているが、これらは5年ごとに見直すことを基本としている⁷⁾。安全規制が常に有効かつ合理的なものであるためには、既存の安全規制の定期的な見直しが鍵になる。我が国の原子力規制では、古い規制は残しつつ新たな規制を重ねるといふ愚を冒してきている。規制要件のスクラップアンドビルドを進める上でも定期的な見直しは必須である。闇雲な規制強化は発電所の現場を疲弊させ、規制要件に対する信頼性の低下、ひいては安全文化の低下を引き起こす可能性が高い。このことを、原子力の安全規制行政に携わるものは肝に銘じるべきである。

3. 専門家の異論検討プロセスの確立

米国NRCは、NRCの規制上の見解に対し、NRCスタッフが異論を有する場合の検討処理プロセスを制定している⁸⁾。異論がある者はまず所属部門の局長に書面で申し出て、局長の下での検討委員会で異論の妥当性が検討される。その検討結果に満足しない場合、異論提出者はNRC委員またはNRC運営総局長に異論を提出し、再度審査される。審査の結果は当人が希望すれば公表される。なお、異論の提出文書には、NRCと当人の見解の相違点とともに、当人の見解が採用されなかった場合の影響に関する評価も記載することが要求されている。また、専門家の異論であると認められるための条件の一つとして、浅薄な考えでないことが挙げられている。

原子力の安全性の評価は高度な専門知識を必要とし、かつ専門家の間でも意見が一致していない場合もある。

しかし専門家の見解が統一されていない場合でも、規制機関は行政上の判断を下すことが必要となる場合が多々ある。このような場合の論議と行政の判断を積み重ねてゆくことが規制の安定化と透明化のためには重要であり、米国 NRC の方式はこのための一つの参考となると考えられる。なお、行政上の判断は法的根拠に基づいてなされるものである。そのために、日本の原子力安全規制において安全目標等の規制の枠組みを具体的に定めておくことが急務であると考えられる。

IV. 人的資源の確保

1. 求められるコンピテンシー

上記Ⅲ章に述べたおのおのの対策はいずれも規制方針に関わるものであり、かつ、持続的な取り組みが必要とされるものである。これらを実施する上で重要な役割を担うのは規制機関のトップおよび上級の常勤職員であり、彼らはその職務を全うするに十分な専門性を有していなければならない。原子力安全規制を担当する以上、原子力安全に関する専門知識を有することはその前提となる。しかし、単に知識を有しているだけでは不十分であり、課題の解決に向けた指導力や管理能力の発揮(コンピテンシー)はもちろんのこと、その人間性が重要となる。

スウェーデンの SKI では職員のコンピテンシーを下記の5つの視点から評価している¹¹⁾。なお、これら5つの視点のうち、専門性が最も重要とされ、他の4つは補完的なものと位置づけられている。

専門性：原子炉物理、熱水力学、PSA 等の専門性の発揮

個人性：倫理的判断、創造性の発揮、強い責任感等

社会性：同僚等との協力、ネットワーク形成能力等

戦略性：全体的視点から長期的展望で判断する能力

機能性：複数の次元をまとめて職務を遂行する能力

これらは SKI の全職員に要求されるものであり、職位が上がるほど、要求されるレベルも高くなる。なお、局長クラスに対しては下記が要求される¹¹⁾。

—原子炉安全の分野における豊かな知識および経験：技術面並びに人および組織とのやりとりにおいてゼネラリストとしてのコンピテンシーが要求される。

—政府機関がどのように機能するかについての知識、

—原子炉安全の分野における国際的進展に関する知識、

—科学的/技術的に高度な専門家達のマネージャーおよびリーダーとしての良好な業績。

なお、望ましいリーダーシップコンピテンシーには以下が含まれる。

- ・スタッフの志気を高め、彼らにフィードバックする能力
- ・スタッフの能力を活用および開発できること
- ・計画策定、優先度の決定、評価などの管理スキル
- ・俯瞰的視点を開発し、長期にわたる戦略的展望で判

断する能力

- ・分析スキル

- ・健全な判断、人に自信を持たせること、高度の人格的健全性、見栄を張らないこと

- ・不必要な遅れを生じることなく、事実に基づいて判断を下す能力

なお、これらの能力をすべて有する者は稀であり、不足しているコンピテンシーの向上が局長就任後の課題として当人に言い渡されるとのことである。

2. 諮問機関等との関係

IAEA は、規制機関と諮問機関や外部コンサルタントとの関係について下記を要求している¹⁾。

「規制機関は、外部コンサルタントが実施した作業の品質と結果を評価する能力を有する経験豊かな専門家を擁すること」(4.3項)。

「規制機関は、外部有識者によってなされた安全評価又は事業者によってなされた評価だけに依存してはならない。それゆえに、規制機関は、規制のための審査及び評価を行ったり、または外部有識者によってなされた評価の適切さを評価したりする能力を持つ常勤の職員を持たなければならない」(4.8項)。

そして、諮問機関や専用技術支援組織の助言が規制機関の決定に伴う責任を免除するものではないと明記している(4.4項および4.9項)。

我が国の原子力規制行政は、原子力安全委員会や顧問委員会等に大学関係者等の学識経験者を任命し、これからの答申を受けることにより規制機関の専門性の不足部分を補ってきた面が強い。歴史的な経緯も一因であるが、原子力安全・保安院が安全審査で用いている審査基準のほとんどは諮問機関である原子力安全委員会が制定したものである¹⁰⁾。欧米諸国でこのような国を筆者らは寡聞にして知らない。行政上の意思決定の効率化と迅速化、そして公衆への説明能力を高めるためにも、我が国の規制機関は、原子力安全に関する専門知識の豊富な常勤職員を増強すべきであると考えられる。

3. トップの任期と選任プロセス

上記Ⅲ章に掲げた対策を一定の方針の下で着実に実施していくためには、規制機関のトップが短期間で交代することは避けるべきである。IAEA の政府組織に対する要件の中には、規制機関トップの選任等に関する規定は特には見当たらない。筆者らが把握している範囲での、欧米諸国の規制機関のトップの任期を次ページに示す。

原子力安全・保安院の歴代院長の就任時期を以下に示す。

佐々木宜彦：2001年1月、松永和夫：2004年6月、
 広瀬 研吉：2005年9月、薦田康久：2007年7月、
 寺坂 信昭：2009年7月、深野弘行：2011年8月。

このように、院長は約2年ごとに交代しており、欧米諸国との差は歴然である。国際水準の安全規制に早急にキャッチアップすべき我が国において、規制機関トップのこのような短期交代人事の再現は、国際的な視点からも、もはや許されるものではないと考えられる。

国	トップ	任期	人数等
米国 NRC	NRC 委員会	5年	委員は5人。連邦議会の同意の下で大統領が任命
フランス ASN	ASN 評議会	6年	5名。大統領が3名、国民議会議長が1名、上院議会議長が1名を指名
フィンランド STUK	長官	終身 (67歳 まで)	
スウェーデン SKI	長官	平均7年	最高の意思決定機関は8名からなる理事会。理事長はSKI長官。2005年当時の理事は3人が国会議員、1人が最高裁判事。理事の在籍年数は平均6年

現在、政府は環境省の外局として原子力安全庁を設置する方針とのことである。通常は外局の長はそれが属している省の大臣が任命する。政治的な中立性と安定性を確保なものとするために、原子力安全庁の長官を国会の承認人事とし、かつ、フランスやスウェーデンのように原子力安全庁に長官をサポートする理事会(もしくは評議会)を設置すべきであろう。

4. 上級職員の選任プロセス

米国NRCでは、NRR(原子炉規制局)局長等の幹部はNRC委員会の承認の下で委員長が任命する⁹⁾。2005年時点の調査によると、過去退任した4名の局長の在任期間は3～7年であり、全員が局長就任前に20年以上の原子力安全分野の業務経験を有している¹¹⁾。

上記Ⅲ章に示した対策を着実かつ安定的に遂行するためには、原子力安全庁の上級職員として、適切なコンピテンシーを有する者を任命し、少なくとも5年程度の期間にわたり同じポジションに在任することが必要と考えられる。このためには上級職員の任命権を有するもの(長官もしくは理事会等)の任期を欧米諸国並に5年程度以上とし、上級職員の任命が形式的な人事考課に基づくローテーション人事とならないようにする必要がある。

5. 原子力安全庁による直接採用の実施

IAEAの指針²⁾では、「規制機関は技術的専門能力を有するスタッフを採用する権限と責任を有すべき」(2.9項)と規定しており、米国やスウェーデン、フィンラン

ドにおいても原子力の安全規制に携わることを目指した者を規制機関が直接雇用している。原子力安全庁においても、国家公務員試験合格者の中から、環境省経由でなく、直接雇用することが原子力規制機関としての専門性を維持向上させる上での基本である。原子力安全庁が環境省の外局であれば、その権限が与えられていると考えられる。環境省職員として雇用した者を原子力安全庁に配属することは、原子力安全庁としての専門育成上望ましくないばかりか、当人にとっても大きな不幸となる可能性がある。

6. 他省庁からの人材の確保

規制業務の継続性および一貫性を維持するために、原子力安全庁には多くの原子力安全・保安院の人材が移籍すると予想される。これらの移籍職員の一部、特に原子力安全規制の専門家になることを志していない者が出向元の経済産業省等に戻ることは止むを得ないであろう。しかし、IAEAは原子力規制機関が、原子力技術の推進を任務とする組織や団体から効果的に独立していることを要求¹⁾している(2.2項)。

原子力安全庁の職員の専門性を維持向上させ、かつ、IAEAの要求を満たすために、原子力安全庁の管理職は他の省庁からの出向人事の受け皿とすべきではない。管理職職員の補充には原子力安全庁の職員を充てることを基本とするべきであろう。さらに、主要な管理職に対しては出向元に戻らないことを原則とすることが重要と考える。

このような原則、すなわちノーリターンルールは、金融監督庁(現金融庁)が設立された際に、「金融と財政の分離原則」に基づき大蔵省(現財務省)との間で適用された例がある。今回は、「原子力の安全規制と推進の分離原則」に基づき、原子力安全庁と経済産業省等との間に適用すべきと考える。

7. 民間からの人材の確保

国家公務員試験合格者の直接採用・育成は基本であるが、即戦力を確保するためには、公務員試験を経ずに民間の専門家を雇用することが必要であろう。国家公務員法36条ではそのような採用が認められており、人事院規則1-24「公務の活性化のために民間の人材を採用する場合の特例」が定められている。また、期限付き採用を認めた「一般職の任期付職員の採用及び給与の特例に関する法律」も定められている。これらの法令に基づき、民間の人材を原子力安全庁に採用することも大切と考える。ただし、その場合には、国家公務員試験合格者との差別を排し、民間からの採用者も能力主義に基づき管理職に積極的に任命することが、人材の確保と組織の活性化のために必要と考える。

V. 品質マネジメントシステムの構築

上記ⅢおよびⅣ章の施策の実施をより確実なものとするために、原子力安全庁が品質マネジメントシステム(QMS)を制定し実施することが重要である。QMSにより、原子力安全庁の使命(ミッション)が具体的に展開され、使命達成のための活動とそのための人材の育成確保方針が定められる。そして実施状況について自己評価と第三者評価が要求され、必要な軌道修正が実施される。規制機関がQMSを構築することはIAEAの規制組織に関する指針⁹⁾でも要求されている(3.9項)。

原子力安全・保安院は2007年にIAEAの審査を受けた際に、QMSの構築活動の継続をIAEAから勧告されている⁵⁾(勧告R10)。

原子力安全庁によるQMSの構築と実施は、我が国の原子力安全規制を国際的なレベルに引き上げるための必須要件の一つであると考えられる。

VI. IAEAによる全面的なレビュー

IおよびV章で述べたように、原子力安全・保安院は2007年にIAEAのIRRSを受けているが、その範囲は限定的なものであり、かつ、その後当然受けるべきフォローアップレビューもいまだに受けていない。これは国際的にも響^{ひんしゅく}を買^かうものであり、我が国の原子力安全規制に対する国際的な不信感を一層高めていると考えられる。最初に述べたスウェーデンの例にならうまでもなく、規制機関とその職員が自己に対し謙虚となり、IAEAのレビューを受けることが必要である。

VII. おわりに

現在、政府は原子力安全規制を改善するために、環境省の外局として原子力安全庁を設置する方針で検討を進めている。規制と推進の分離の観点から、このような組織変更は大切であろうが、それ以上に重要なのはその中身であり、規制機関の専門性の向上である。組織の枠組みが変更されても2～3年の定期的な異動や出向を基本とした人事制度では、原子力安全のために必要とされる規制機関幹部職員の専門性は到底確保されない。主要な欧米諸国の原子力規制機関では、幹部職員の専門性が高く、専門的な判断を外部有識者に委ねることは稀である。日本における原子力の安全規制の原則は「災害防止

上支障のないこと」であるが、この原則の具体的な展開がなされていない。安全目標の設定等、具体的な原則を設定し、個々の安全課題に対する行政上の決定を規制機関の職員が専門家として下すことが、安全規制の安定性、迅速性、効率性そして透明性の向上のための基本と考える。

本稿は原子力安全庁のあり方についての政府内で検討に参考となることを願いまとめたものである。論拠が不十分な事項も多々あると思う。本稿を読まれた皆様の批評ならびに意見をお寄せいただきたい。

—参考資料—

- 1) GS-R-1, "Legal and Governmental Infrastructure for Nuclear, Radiation, Radioactive Waste and Transport Safety", IAEA, (2000).
- 2) GS-G-1.1, "Organization and Staffing of the Regulatory Body for Nuclear Facilities", IAEA, (2002).
- 3) GS-G-1.2, "Review and Assessment of Nuclear Facilities by the Regulatory Body", IAEA, (2002).
- 4) NS-G-1.8, "Design of Emergency Power Systems for Nuclear Power Plants", IAEA, (2004).
- 5) IAEA-NSNI-IRRS-2007/01, "Integrated Regulatory Review Service (IRRS) to Japan", IAEA, 6 July 2007.
- 6) MD 6.4, "Generic Issues Program", NRC, Nov. 2009.
- 7) MD 6.6, "Regulatory Guides", NRC, April 2011.
- 8) MD 10.159, "Differing Professional Views or Opinions", NRC Dec. 1999.
- 9) Energy Reorganization Act of 1974 (USA).
- 10) 「原子炉設置(変更)許可申請書に係る安全審査内規」, 保安院審査課, 2006.4.3.
- 11) 澤田哲生, 他, 「警告の価値の評価方法に関する研究」 JNES 向け最終報告書, 2006年2月.

著者紹介

森本俊雄(もりもと・としお)

(株)ニューファクト

富士電機製造(株)にて安全設計、安全評価等に、日本エヌ・ユー・エス(株)にて欧米諸国の原子力規制等の調査に従事

澤田哲生(さわだ・てつお)

東京工業大学

(関心分野/専門分野)原子力工学

解説

欧州型発電所の非常時電源と事故緩和ベント 原子力の信頼性向上策と福島国際センター設立の提案

北海道大学 杉山 憲一郎

発電所の事故防止のためには非常時電源の多様性・冗長性が最も重要である。全電源喪失事故では欧州型手動操作ベントが放射性物質の放出量を最小限にし、周辺住民の安全を守る。福島第一事故以降、定検を終了した発電所の再稼働が進まない。国民の理解を得る安全性向上・事故緩和策の検討のために、欧州型電源・ベント設備を紹介する。加えて、国外、国内に事故現場の新知見・汚染除去技術の最新情報を継続発信していくことが、原子力技術の信頼回復のために重要である。この具体策として、福島国際センターの設立を提案する。

I. はじめに

定期検査後の再稼働ができない。島国日本の原子力発電に対する信頼回復を早急に図る必要がある。そのためには信頼性向上に係わる情報の提供が重要である。この観点から、義務教育課程の教師、教育大学の教員など約200名が参加した日本エネルギー環境教育学会全国大会で、地域熱供給を行う原子力発電所の非常時電源・手動操作可能なベントに対する北大生の反応を紹介した¹⁾。また、基調講演では、リスク予測・コントロール教育の観点で、事故防止・緩和・除染技術に関する情報を提供した²⁾。いずれの報告でも参加者の高い関心を集めた。

本稿では、学生・教師・教育大教員へ提供した情報を整理し、国の緊急安全対策と対比できる、スイス、スウェーデン、ドイツの非常時電源・手動操作可能なベントとTMI事故後に開発された除染技術の一端を紹介する。この情報提供により、福島第一事故以降の国の緊急安全対策の妥当性と今後の目標が各会員の立場で検討できると考える。加えて、福島第一発電所事故サイトを活用する、世界で初の事故時・事故後対応技術開発 福島国際センター(仮称)の設立を提案する。事故サイトとその周辺を活用した国際センターができたとすれば、福島の地から21世紀が求める研究成果が発信され、資源・環境制約のため原子力発電の導入を目指すアジアの国々にも感謝されるであろう。

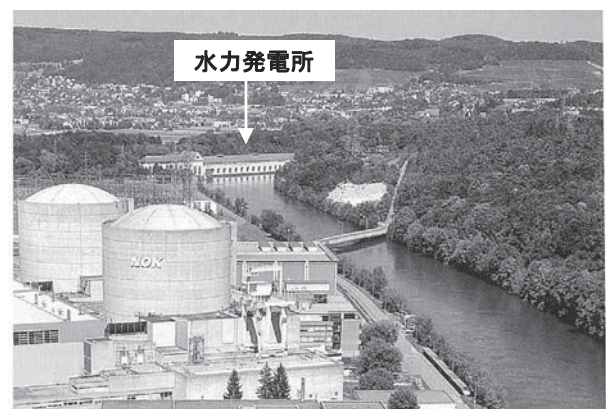
また、国内・国外モデルとなることを目標に、耐震・耐津波性能と、非常時電源・電源不要ベントでレベルアップされた福島第一発電所5,6号機の再稼働が、福

島県民・発電所周辺住民の理解を得て実現できたとすれば、福島国際センターの付加価値は一層高まる。発電所周辺住民が事故後の立ち位置を検討していく上でも、このようなモデルの提案は重要であり学会の役割と考える。

II. スイスの非常時電源とベント設備

最初に、約10 km 四方の2万人弱に原子力地域熱供給を行い、MOX燃料も利用しているウェスティングハウス製PWRベツナウ発電所³⁾の非常時外部電源の多様性を紹介する。第1図に、発電所、流れ込み式水力発電所および地域熱供給を利用する住宅街の一部を示す。水力発電所の容量は19 MWeで、11台の発電機を2系統に分離し信頼できる8 kV非常用電源として利用している。ライン河に流れ込むアアレ川下流に設置されているこの水力発電所の歴史は古く、ベツナウ発電所は既存水力発電所と既存幹線送電網の信頼性に着目しこの地に設置された。日本の消去法により選定されたサイトと初期条件が異なる。

第1図には見えていないが、水力発電所の隣に40 MWe容量の非常用ガスタービン発電所が設置されてい



第1図 1969年操業スイス ベツナウ原子力発電所³⁾

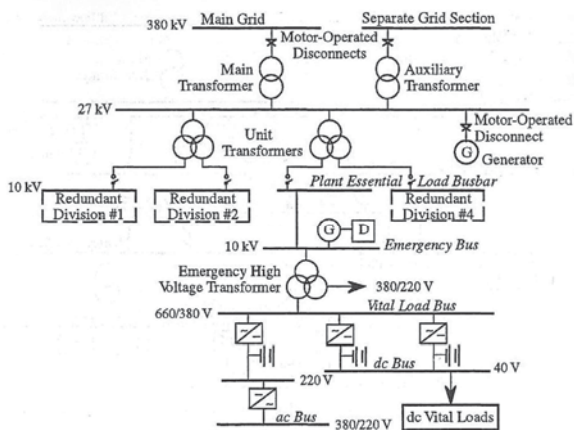
*European Type NPP Electric Power and Vent Systems ;
For Safety Improvement and Proposal of International
Center* : Kenichiro SUGIYAMA.

(2011年 9月1日 受理)

る。設置位置を原子力発電所近接地とすることにより、原子力地域熱供給を利用する周辺住民に対して、多様な非常時外部電源の見える化を図っている。このガスタービン発電所は、経済合理性の観点から、ベツナウ発電所の1, 2号機が同時に停止した場合の原子力地域熱供給ネットワークのバックアップの役割も担っている。

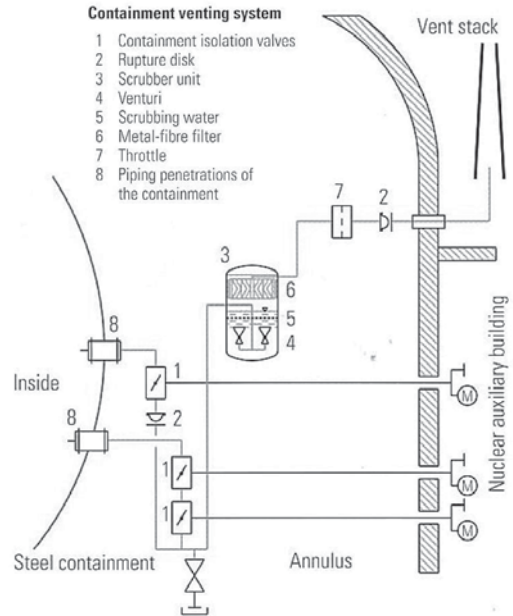
通常の米国型PWRの全電源喪失事故では、炉心冷却を維持するため、崩壊熱により発生する蒸気の一部でタービン駆動の補助給水ポンプを作動させ蒸気発生器2次系へ給水し、崩壊熱で生じた残りの蒸気を大気へ放出する。この発電所では、流れ込み式ダムの落差と流水量のみで発電用蒸気タービン復水器の冷却ができる。それゆえ、補給水を大気へ捨てることなく崩壊熱をアアレ川へ放出できる。福島第一発電所に比べて、全電源喪失時の崩壊熱放出方法でも優れたプラントである。水力発電で優れた技術を持つスイスと米国の協力による設計思想が見て取れる。なお、この発電所のTMI事故以降の安全性向上プロジェクトと、放射性ヨウ素・セシウム の溶解・保持を目的とする手動操作可能なベント設備に関しては、本誌6月号⁴⁾で紹介した。

次に、ベツナウ発電所同様、MOX燃料も利用し、再生紙工場と工場群へ原子力地域蒸気・熱供給を行っているシーメンス製PWRゲスゲン原子力発電所⁵⁾を紹介する。この発電所も、アアレ川下流の既存流れ込み式水力発電所と既存幹線送電網の信頼性を活用し、外部電源の見える化を図っている。第2図に、シーメンス製PWR発電所の一般化された所内電源系統図を示す⁶⁾。日本と異なり、分離された4系統(4 Redundant Divisions)に非常用ディーゼル発電機(D-G)と非常用バッテリー(電池記号で表示)が用意されている。非常時に、1系統は修理あるいは定期検査中、別の1系統は故障を想定し、2系統が常に健全であることを基本として利用率向上にも貢献している。ゲスゲン発電所の所内非常用ディーゼル発電機も6kV-3,550kVA容量で4系統が用意されている。さらに、このプラントでは380V-750kVA用D-G



NOTE: Buses are identified in italics; not all breakers and interlocks are shown.

第2図 ドイツのシーメンス製PWR電源系統図⁶⁾



第3図 ドイツ製手動操作可能なベント設備⁵⁾

が2系統用意されており、日本に比べて冗長性が大きい。

第3図に日本にはない、ヨーロッパで一般的な電源不要で手動操作可能なベンチュリーノズル方式のベント設備の系統図を示す⁵⁾。1993年に設置され、99.5%以上の放射性ヨウ素・セシウム・エアロゾルの溶解・保持が可能と評価されている。万が一、事故が発生した場合でも、環境への放射性物質の放出を極力小さくする設備であり、周辺住民に対して十分な配慮が行われている。

スイスの地震強度は日本に比べて十分低いが、ヨーロッパの中では地震国である。スイスでは、多様性の観点から原子力発電所と水力発電所を組み合わせ、周辺住民に信頼感を与える内部・外部電源の構成を取っている。加えて、事故が発生した場合を想定し、手動操作可能なベント装置を設けた。地震に対して信頼できる隣接外部電源と電源なしで放射性物質を除去できるベントの設置による安全性・信頼性向上の見える化は、日本の児童・生徒・父母も理解でき、福島事故以降の地震・津波大国日本では、信頼性回復の観点から特に重要と考える。

なお、スイス原子力安全検査局は、福島事故を受けて、5月に国内にある4原子力発電所で実施した安全審査の結果を公表し、スイスの原子力発電所には緊急の危険性はないと報告している。

Ⅲ. スイスの脱原発の背景

スイスの原子力地域熱供給システムの実現には、ベツナウ発電所に近い国立ポール・シェラー研究所のリーダーシップが大きく貢献した。コミュニティーでの継続的な住民対話でも、その結果に基づく住民投票でも研究所員の正確な情報提供が方向を決めた。一方、スイスでは各州が教育に責任を持っているため、国民は系統的な原子力の知識を身に付けていない。グリーンピース・緑

の党の情報が行き渡っている。このためチェルノブイリ事故以降の国民投票により、1990年から10年間、原子力発電所の建設が凍結された。また、使用済み燃料の再処理も2006年以降10年間のモラトリアムが継続している。

人口750万人のスイスは、原子力による電力が45%前後を占めている。スイスの脱原子力政策は、「高効率エネルギー利用、再生可能エネルギーの利用拡大、天然ガスと隣国フランスの原子力利用により、稼働する原子炉5基を50年の運転寿命を終えた順に閉鎖する」というものである。この政策決定に基づけば、ベツナウ1号機は2019年、2号機は2022年に閉鎖される。発電所を所有するAXPOグループは、「このような性急な決断は、事実の慎重な検証に基づいてなされたものではない」と糾弾し、「政策決定には、低い電力消費シナリオに基づくなど幾つもの欠点があり、天然ガス火力の利用促進に至っては、気候変動対策からの180度Uターンする政策で、将来のスイスの電力供給を危機に陥れる」と警告している⁷⁾。

IV. スウェーデンの非常時電源とベント設備

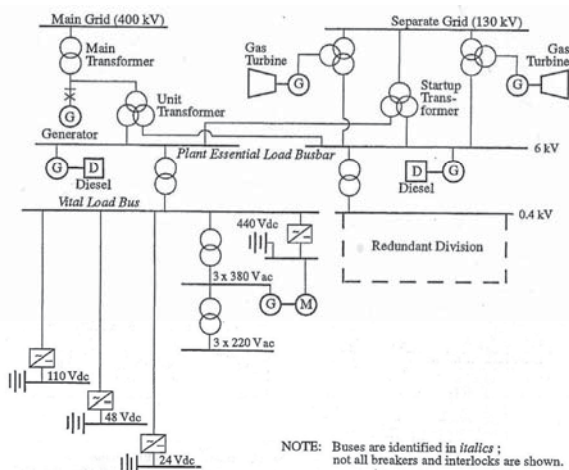
約50%の電力を原子力で賄うスウェーデンは、TMI事故後の1980年の国民投票の結果を受けて、2010年までに12基の原子力発電所を全廃する国会決議をした。しかし、代替電源の見通しが立たず、1999年のバーセベック発電所1号機の閉鎖、2005年の同2号機の閉鎖にとどまった。スウェーデン国内では人口密度が高く、デンマークの首都コペンハーゲンに近い場所にこの発電所サイトがあり、そのことが閉鎖理由とされたようである。2006年の総選挙で12年ぶりに中道右派4党による連立政権が成立した。政府は09年に脱原子力政策の撤廃を盛り込んだ長期エネルギー戦略を公表し、10年6月に脱原子力政策の撤廃法案を僅差で可決した。この結果、稼働中の原子炉10基に限り、既存サイトで建て替えが可能となった。

第4図にスウェーデンのアセア-アトム製BWR発電所の電源系統図を示す⁶⁾。福島第一発電所と同様に、分

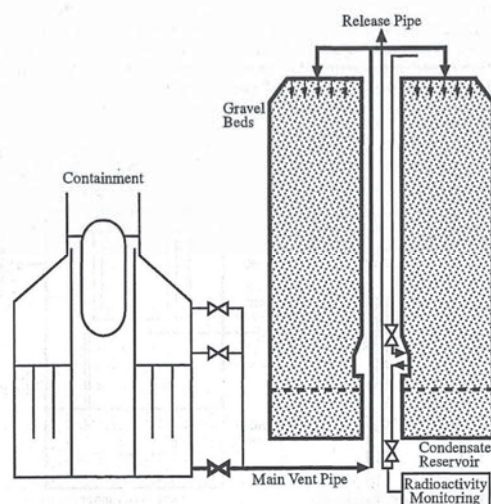
離した2系統(2 Redundant Divisions)にディーゼル発電機(D-G)とバッテリー(電池記号で表示)が用意されている。加えて、直流式モーター発電機(M-G)も装備されている。ただし、福島と異なり隣接して非常用外部電源が用意されている。すなわち、ガスタービン発電機2台が主送電線から分離されている130 kV送電線と6 kVの所内ケーブルに直接接続されている。福島第一事故のように主送電線の機能が損なわれ、内部電源が機能しない場合でも、自動的にバックアップができる。これら2台のガスタービン発電機は、電力需要ピーク時対応としての役割も担っている。原子力発電所に隣接して置かれているため、発電所の非常時バックアップ体制が一目瞭然である。多様性の観点も含め、この発電所の外部電源の備えは、大人はもちろんのこと、児童・生徒の理解も得やすい。日本が地震・津波大国であることに配慮し、福島第一発電所の陸側高台に同様のガスタービン発電機が耐震設計で設置されていれば、今回の事故推移は異なっていた。

実は、第4図の電源系統図は、閉鎖されたバーセベック発電所1,2号機のそれである。福島第一事故以降に原子力安全・保安院が各電力会社に求めた電源補強の観点で見れば、非常時外部電源の備えはそれ以上である。1985年に設置されたスウェーデン初のバーセベック発電所1,2号機共用のFILTRA(直径20 m, 高さ40 m)と呼ばれるベント装置を第5図に示す⁶⁾。事故時に放射性ヨウ素・セシウム等を99.9%溶解保持し、発電所近傍でバックグラウンドの2倍以下、チェルノブイリ事故時のスウェーデン北東部の汚染レベル以下の放射性物質保持性能を持つと評価されている。

以上の説明からわかるように、バーセベック発電所1,2号機の閉鎖は、安定した北欧圏の電力網を持つスウェーデン政権と党の政治戦略によるものであった。孤立列島日本と事情が異なる。以上のような経過をたどったスウェーデンの脱原発の歴史を紹介したのは、福島事故以降のドイツ政府の決定が、30年前のスウェーデン政



第4図 スウェーデンのアセア-アトム製電源系統図⁶⁾



第5図 スウェーデン製手動操作可能なベント設備⁶⁾

府の決定を彷彿させたからである。

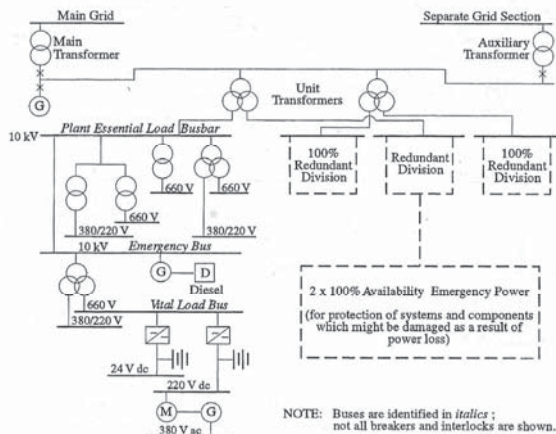
V. ドイツの非常時電源と脱原発政策

ドイツ国内の原子力発電所はすべてシーメンス製である。シーメンス製 PWR の最大の特長は、二重球型格納容器と原子炉容器下部ヘッドに中性子束計測用の貫通孔がないことである。また、シーメンス製 BWR では、日本の ABWR より20年早く、70年代後半からインターナルポンプを採用している。シーメンス製 PWR の特長である非常時ディーゼル発電機4系統の紹介は、第2図で済ませた。

第6図に示すシーメンス製 BWR では、分離された3系統(3 Redundant Divisions)に非常用ディーゼル発電機(D-G)、バッテリー(電池記号で表示)と直流式モーター発電機(M-G)が用意されている。加えて、プラントの利用率(Availability)向上を目的とする2系統の非常用ディーゼル発電機がある。さらに、外部電源の信頼性を上げるため、主送電線から分離している送電線(Separate Grid Section)は近隣の火力発電所に接続されている⁶⁾。信頼できる外部・内部電源に加えて、ドイツの原子力発電所には、第3図と同様な金属ファイバフィルターと除染プールがあるベント装置が追加装備されている。

福島第一発電所事故以降、ドイツ原子力安全委員会は、洪水、緊急時の冷却性能、およびテロ攻撃に対して「どの原子炉も堅固であり、ただちに運転を停止する必要はない」との技術評価結果を示した。

メルケル政権の脱原発政策は、「海上風力、水力、地熱への優遇措置を改善して、再生可能エネルギーを大幅に拡張する。送電網整備を急ぎつつ、インテリジェントネットや蓄電設備の開発もすすめ変動幅の大きい再生可能エネルギー電力の供給力を平準化していく。併せて、新建築物のエネルギー効率基準を大幅に引き上げ、既存建物のエネルギー面の改善を促進する経済的インセンティブを導入する」⁸⁾というものである。メルケル首相の選挙区があり、バルト海に面するメクレンブルク-フォ

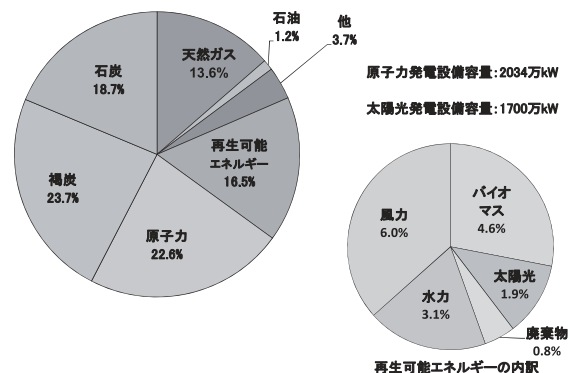


第6図 ドイツのシーメンス製 BWR 電源系統図⁶⁾

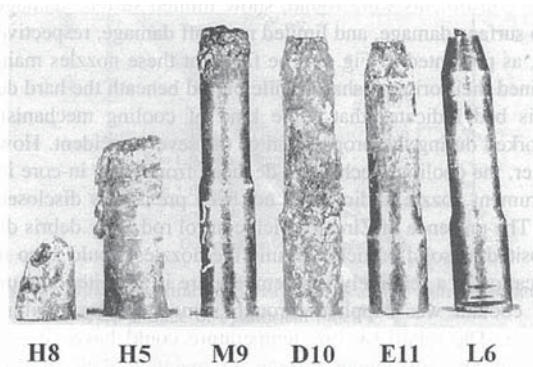
アポンメルン州を含めて、旧東ドイツ6州の失業率は依然非常に高い。この政策は旧東ドイツ6州の雇用促進とインフラ整備を約束し、今後の選挙にも影響を与える。また、EU指令に基づき、今後進む東欧圏エネルギーインフラ整備事業でもドイツ企業を優位にする可能性がある。ギリシャ等へ財政支援ができるEUリーダー国の原子力大国フランスを意識した戦略も見て取れる。ストックホルムで開催された欧州電気事業連合会年次大会で、連合会長は「これまでNIMBY(私の裏庭には駄目)に悩まされてきたが、福島以降はNIMTO(Not in my term of office: 私の政権中は駄目)になった。政権と距離を置いた長期的視野での投資が必要」と訴えた。

ドイツの電源別発電電力量割合を第7図に示す⁸⁾。近年、膨大な補助金をつぎ込んだことにより、2011年初旬に太陽光発電の設備容量は約1,700万kWに達した。しかし、その発電電力量は総発電電力量の1.9%(暫定値)に止まっている。一方、ドイツの17基の原子力発電所の設備容量は太陽光の設備より約1.2倍大きい2,034万kWである。その発電電力量は22.6%を占めており、太陽光の値の約12倍である。再生可能エネルギー発電では風力・バイオ・水力の割合が大きく総発電電力量の13.7%を占めている。この比較からも太陽光の実力がわかる。また、国内資源の活用・雇用維持という統一ドイツ以前からのドイツの政策に基づき、二酸化炭素放出源である褐炭と石炭による発電電力量が42.4%を占めている。

この現状から脱原発に方向転換するため、現在建設中の最新鋭火力発電所1,000万kW以上を2013年までに迅速に完成させる。更に、2020年までに最大1,000万kWの安定した発電設備容量を追加建設するとしている⁸⁾。EUでは、EU圏のエネルギー安定供給・経済競争力・気候変動防止の観点から、総合的なエネルギー・気候変動政策を定めている。2007年EU指令等では、2020年までに二酸化炭素削減率20%、エネルギー効率向上20%、および再生可能エネルギーのエネルギーシェア率20%および電力シェア率35%を課している。2008年の戦略的エネルギーレビューでは、2020年までに低炭素電力で全電力の2/3を賄い、2050年までに100%近くを賄うとする目



第7図 ドイツの電源別発電電力量



第8図 TMI-2号機から取り出された損傷ノズル¹⁰⁾

標を掲げた。2009年のEUの低炭素発電電力量の実績は、原子力28%、再生可能エネルギー16%、合計44%である。LEDなど高効率な電気製品を積極的に利用して総電力量を減少させ、原子力・再生可能エネルギーにより2020年の目標を実現する。二酸化炭素捕獲・貯蔵(CCS)技術の実用化を待ち、2050年の目標にチャレンジするとしている。それゆえ、ドイツの政策は、2020年までに「原子力を含む低炭素電力で全電力の2/3を賄う」という目標に逆行している。

Ⅵ. 福島第一サイトの国際センター化

福島第一事故の大きな教訓は、事故が起き放射性物質を多量に環境に放出してしまえば、賠償金、除染費用、風評被害補償金等の金銭的負担がきわめて大きくなることである。既存原子力発電所では、水素対策を含めた電源強化に加えて、全電源喪失事故が発生しても避難が不要となる手動ベント設備の追加を検討すべきである。新設の発電所では、加えて、原子炉圧力容器内での事故収束と合理的コストで除染可能な設計が目標となる。また、福島以降は、日本の技術力の信頼を取り戻すために、除染技術の開発と実績の情報発信が重要である。

第8図は、炉心熔融事故を起こした米国TMI発電所2号炉下部ヘッド内部から取り出したインコネル製損傷ノズルである¹⁰⁾。遠隔操作で炉内から損傷燃料集合体、熔融炉心凝固物、下部ヘッド底部鋼材などを取り出す技術は、日本も参加し米国が主導した国際協力研究ですべてに開発されている。福島第一サイトとその周辺を活用した国際センターを開設し、BWR既存炉・新設炉への反映を目標に、事故事象の推移を明らかにし、併せてPWRの蓄積技術を参考に、BWR発電所の除染技術の開発を図る。原子力発電導入を進める国の若手リーダーを招き、事故事象の理解と事故緩和と操作・作業の追体験をして頂く。加えて、新たな事故防止・緩和・世界が未経験の格納容器内を含めた除染技術の開発研究にも参加して頂く。この目標が達成できれば、原子力発電が事故後の除染も含めた成熟技術となる。また、原子力発電導入を進める国が原子力技術に対して一層の信頼を寄せる。未曾有の福島第一事故を経験した技術立国日本が歴史的使

命として掲げる目標と考える。

大気中の二酸化炭素濃度は400 ppmを超える寸前である。気候変動に基づく発展途上国の社会・経済リスクを低減させる具体的戦略を描くためにも、事故サイトを活用し放射性物質の放出口リスクを大幅に低減させる研究成果が期待されている。また、福島県民のためにも、世界から人が集まる国際センターの開設を進めるべきである。

Ⅶ. あとがき

優れた発電実績を持つスイス、ドイツが政治的に脱原発を決め、その前後から日本の首相も日本の将来像を提示することなく、同様の発言を始めた。改めて、3/11以降続けている国内外の学生、義務教育課程の教師、教育大学の教員等への具体的な情報提供の重要性を再認識した。その後、日本原子力技術協会最高顧問の石川迪夫氏から、事故サイトを国際センターとし、事故サイトの知見に基づく除染技術・安全性向上技術の情報発信を続けられれば、福島第一サイトが先端研究の場として世界に貢献でき、世界からも人が集まる旨のお話を伺った。事故後の我が国の重要な戦略と考え、本稿でも同様の提案をさせて頂いた。

世界から技術力で信頼され続けなければ生きていけない日本。それを支える技術者・研究者は、原子力発電技術の信頼回復のために、常識ある国民に積極的に発言していく必要がある。既存原子力発電所の安全対策向上や、福島県民との信頼回復の糸口を検討する場で、活用して頂ける内容があれば幸いである。

—参考資料—

- 1) 金崎高子, 他, “スイスにおける原子力発電所の廃熱利用の教材に対する福島事故前後の北大生の意識調査”, 日本エネルギー環境教育学会第6回全国大会論文集, 甲府, 140-141(2011).
- 2) 日本教育新聞, 第5843号, (2011.8.22).
- 3) 杉山憲一郎, “原子力地域熱供給, スイスの実績”, 日本原子力学会誌, 48[2], 119-124(2006).
- 4) 奈良林直, 杉山憲一郎, “東日本大震災に伴う原子力発電所の事故と災害; 福島第一発電所の事故の要因分析と教訓”, 日本原子力学会誌, 53[6], 387-400(2011).
- 5) Kernkraftwerk Geosgen-Daniken AG, Gosgen NPP Technical Information, 1999 Edition.
- 6) M. Gavrilas, et al., *Safety Features of Operating Light Water Reactors of Western Design*, CNES, (2000).
- 7) 原産新聞, 第2576号, (2011.6.2).
- 8) 原産新聞, 第2578, 2579号, (2011.6.16, 23).
- 9) 電気新聞, 第26881号, (2011.7.27).
- 10) L.A.Neimark, “Insight into the TMI-2 Core Material Relocation through Examination of Instrument Tube Nozzles”, *Nucl. Technol.*, 35[2], 280-287(1994).

著者紹介



杉山憲一郎(すぎやま・けんいちろう)
北海道大学
(専門分野/関心分野)高速炉・軽水炉シビアアクシデント事象, 水蒸気爆発, 熔融燃料 In-Vessel Retention

福島事故に対する欧米の対応

欧州の中間報告と米国で緊急対応必要なしの報告

原子力安全基盤機構 水町 渉

ヨーロッパでは、EU加盟国の27ヶ国のうち、原子力発電所を導入している14ヶ国が、ストレス・テストの中間報告を9月15日に発表した。これは、福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、同程度の事故が起きると仮定して、コンピュータ上でシミュレーションを実施したものである。結果として、原子炉閉鎖が必要となるような深刻なプラントはなかった。12月までに規制機関が評価を行う予定である。来年の夏までにIAEAに報告され、最終評価が行われる予定である。

一方アメリカでは、ヨーロッパで行われている、このストレス・テストは行わず、NRCが独自に発表した勧告によって、各プラントが対応を進めることにしている。この結論として、福島事故に関する短期評価では、アメリカの原子力発電所は安全に運転できるとし、運転しながら、電源喪失等への安全対策を強化する長期的評価を行う方針を決定した。

ここに、ヨーロッパとアメリカの最新情報をまとめておく。

1. ヨーロッパのストレス・テストの結果

ヨーロッパでは、福島事故を受けてストレス・テストが実施しているが、電力会社による中間報告が9月15日に報告された。EU加盟国の運転中の原子力発電所の基数は143基である。ストレス・テストには、スイスが参加したため、その5基を加えて、148基が対象となっている。9月15日の報告では「洪水や地震への耐久性を確認したところ、原子炉の閉鎖が必要となる深刻なプラントはなし。」という結果であった。反対派からは、早くも査定が甘すぎるとの批判も出ている。

ヨーロッパにおけるストレス・テストの内容は、

- (1) 起回事象として、地震と洪水
- (2) 起回事象の結果として考えられる安全機能の喪失、すなわち、電源喪失(SBO)および最終所内熱源の喪失、並びに両者の組合せ
- (3) 過酷事故マネージメントの問題として、炉心冷却機能喪失の防止および管理方策、使用済み燃料貯蔵プールの冷却機能喪失の防止および管理方策、格納容器健全性喪失の防止および管理である。

2. ヨーロッパの対象プラント

ヨーロッパの報告書の対象プラントの基数は次のとおりである。

- ・フランス 59基(建設中のフラマンビル3号機を含む)
- ・ドイツ 18基(廃止されたオブリッヒハイム1号機を含む)
- ・イギリス 28基(廃止処置中も含む)
- ・ベルギー 7基
- ・フィンランド 5基(建設中のオルキルオト3号機を含む)
- ・スウェーデン 10基
- ・スペイン 9基(廃止処置中の1基を含む)
- ・オランダ 1基
- ・スロバキア 6基(建設中のモホフチェ3,4号機を含む)
- ・スロベニア 1基
- ・チェコ 6基
- ・ハンガリー 4基
- ・ブルガリア 4基(廃止処置中のコズロドイ3,4号機を含む)
- ・ルーマニア 2基
- ・リトアニア 2基(廃止処置中のイグナリア1,2号機)

The Countermeasures on Fukushima Accident by EU and USA : Wataru MIZUMACHI

(2011年 10月 5日 受理)

3. フランスの対応

58基が運転中のヨーロッパ最大の原子力大国であるフランスでは、建設中のフラマンビル3号機や研究施設を含めて、150ヶ所の安全性を調査した。その結果として、迅速に緊急的な対応を採る必要はないと結論付けている。その理由として、福島事故では地震と津波が引き金となっており、フランスでは気象条件が異なっており、同程度の現象が起きることは基本的にないと結論付けている。

4. イギリスは追加策が必要

イギリスでは、同様の結論であるが、追加の対応は必要という結論で、他の国とニュアンスの差が出ている。イギリスでは、洪水から原子力発電所を守る手段や、原子炉の冷却機能およびバックアップ電源を確保するための追加策は必要と指摘した上で、基本的にイギリスの原子力発電所に、根本的な弱さは認められないと結論付けている。これらの追加策は中長期的な課題として扱っている。

5. オランダのみは異例のやり直し

原子力発電所が1基のオランダでは、「事業者からの中間報告は不十分であり、評価できない。」として、中間報告をやり直すなどの異例な対応となった。ただし、提出内容が不十分であったため、規制側のリクエストや、事業者側との協議により、今後は10月末提出予定の最終報告書に向けて、十分な内容にするべく努力するということで、中間報告の出し直しということはない。

6. その他の国の中間報告の質もバラバラ

今回のストレス・テストは、原子力発電所にとって初めての試みであり、各国の中間報告の質には大きな差があり、今後の問題となろう。

例えば、原子力発電所がクルシュコ原子力発電所1基しかないスロベニアはまじめに、177ページの報告書をまとめたが、原子力発電所が6基あるチェコでは、わずか7ページの報告書であった。

筆者はチェコのドコバニー原子力発電所を訪れているが、最も印象深いのが、このクルシュコ原子力発電所である。スロベニアは人口200万人の小さな農業国であり、この1つの原子力発電所により、全電力の30%を賄っている。1983年にウェスチングハウス(WH社)が建設した、当初66.4万kWのPWRであったが、2000年に蒸気発生器を交換し、70.7万kWとした。その後、2006年にWH社製の低圧タービンが応力腐食割れを起こし、三菱製に交換しただけで、72.7万kWと電気出力を2.8%向上させた。三菱の初の3次元翼が、この快挙につながったのである。このことも含めスロベニアの人々は

変な親日家である。

ストレス・テストの話に戻ると、各国の取組みに大きな相違があり、今後の最終報告書から、その後の原子力発電所の結論にも影響を与えることとなろう。

7. スイスのミュレベルグ原子力発電所のみ改造

以上のように、ヨーロッパ各国では、迅速に緊急的な対応を採る必要はないと結論付けているが、唯一、スイスのミュレベルグ原子力発電所が、福島事故対応として改造を行った。これは取水をしているアーレ川の1万年に一度の洪水を考慮した対策である。アーレ川の洪水により、既存の取水口が漂流物や泥により閉塞される恐れがあるという指摘から、新たな取水管をアーレ川に設置した。この対策により、洪水に対する耐性が証明され、運転を再開する条件が満たされた。この工事は防御構造物を固定するためのボーリング重機を搭載した浮体式プラットフォームを設置し、6本の支柱を設置する作業を水中でダイバーによって行われた。

この新取水口の設置により、海外で唯一、福島事故により運転停止していたミュレベルグ原子力発電所の運転再開が認められた。

8. そもそもストレス・テストとは

そもそもヨーロッパで行われているストレス・テストは現在、日本で行われている原子力発電所の再立ち上げの条件とは全く異なるものである。ヨーロッパで行われているストレス・テストとは、極限状況において、あらゆる潜在的な条件を評価し、必要な時は改善を行うというものである。金融界ではブラック・マンデー、リーマン・ショックなど過去に実際に起きた金融危機を想定して、シミュレーションのプログラムを作成して実施する。今回の福島事故対応のストレス・テストは、福島のような地震や洪水での安全尤度(マージン)の再評価が目的で、次の2点を行う。

- (1) 極限状態に直面した際(水の堤防越え、全電源喪失時のバッテリー枯渇等)の原子力発電所の応答
- (2) 深層防御(初期事象、安全機能喪失、過酷事故時のマネージメント等)の論理によって選定された防止および緩和処置の検証

これは、あくまで原子力発電所の尤度をコンピュータ上で検証する作業である。

9. 今後の予定

3月11日の福島事故に関し、3月15日にEUの原子力安全規制機関は、臨時会議を開催し、EU内の全原子力発電所のストレス・テストを2011年末までに共同で行うことを決定し、3月25日の欧州理事会で決議された。5

月25日に西欧原子力規制者協会(WENRA)が作成したテストの内容および仕様に合意し、6月1日から、近隣のスイス、ロシア、ウクライナ、アルメニアも参加してストレス・テストを開始した。

今回の国別の中間報告は9月15日が期限のものである。今後、10月末までに事業者の最終報告が出され、12月31日までに国別の最終報告書が提出される予定である。2012年4月末までに各国の専門家によるピア・レビューが実施され、6月に欧州理事会に報告され、8月にIAEAに正式に報告される予定となっている。そこで尤度が低く、追加の改善が必要とみなされた場合は、次期の燃料交換時などに追加工事等を施すとしている。これは長期的な視野のプログラムであり、日本の再立ち上げの条件とは全くの次元が違う話である。

10. アメリカの対応

福島事故後の3月17日にオバマ大統領は声明を発表し、「日本の原子力発電所の事故から教訓を学び、アメリカの原子力発電所の安全性につき、包括的なレビューを」指示した。

これを受けて原子力規制委員会(NRC)は早速、タスク・フォースを編成し、NRCの規制システムの改善が必要かについての体系的なレビューを指示した。またNRCは、5月13日までに、アメリカの全104原子力発電所に対し、NRCの検査官が、設計基準事象を超える事象につき、ハイレベルで見た検査結果を報告するように指示した。

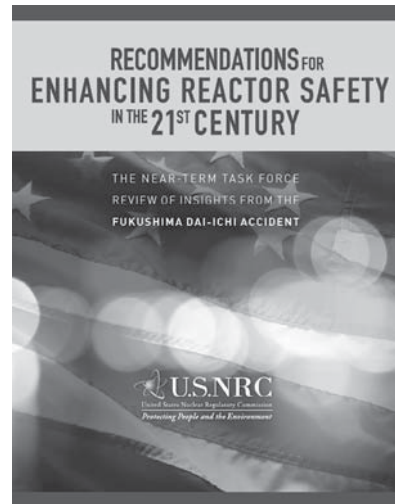
7月12日に、「21世紀の原子炉の安全性を目指した勧告」をNRCが発行した。この結論として、福島の事故に関する短期評価では、アメリカの原子力発電所は安全に運転できるとし、運転しながら、電源喪失等への安全対策を強化する長期的評価を行う方針を決定した。このタスク・フォースの第1回報告会は6月15日に行われ、第2回は7月19日に行われた。

オバマ大統領は、この方針を支持し、ヨーロッパで行われているストレス・テストを拒否して、NRC流のプログラムを支持した。ここでヨーロッパの方針とアメリカの方針が分かれることとなった。

11. 21世紀の原子炉の安全性を目指した勧告

まずこの福島の事故対応のNRCの勧告のタイトルに、21世紀の原子炉の安全性を目指した勧告というのは、まさにあのような福島の悲劇を、むしろ21世紀の安全性への教訓としようという積極的な勧告である。

また最初のページにDedication(献辞)という聴いたことのない言葉で始まっており、感動させられた。そこには、「この報告書を、日本の人々、福島で原子力事故に果敢に立ち向かった人々に捧げる。」とあり、このような技術図書の巻頭言としては全く異例の文章で、日本人こ



NRC発行 21世紀の原子炉の安全性を目指した勧告

そ、このような感覚で規制図書を作るべきであると心酔した次第である。

12. 勧告の結論

この勧告の内容は次章で述べるが、まず結論が書かれている。短期対策タスク・フォースは、NRCの指示により、福島の事故を踏まえ、NRCの規制体系の各プロセスを体系的にレビューし、NRCの規制体系の更なる改善事項を勧告するものである。

アメリカの原子力発電所では、福島事故の一連の事象に対し、炉心損傷、放射性物質の放出の可能性を低減させる緩和処置が既に講じられており、運転継続は差し迫ったリスクとはならない。ただし、NRCの深層防護の原理を、よりバランスよく適用することで、論理的に一貫性のある、また理解しやすい規制の枠組みが出来上がるであろう。

以上、実に明快な論理である。

13. 21世紀の原子炉の安全性を目指した勧告12項目

この勧告には、12項目の提案がある。そのうち、重要な勧告を以下にまとめておく。

- (1) 設計基準地震および洪水に対する防御機能を再評価し、必要なら改良を行う。また設計基準に関しては10年ごとに再確認する。
- (2) 外部電源喪失および所内交流電源なしで、8時間炉心溶融(Melt Down)しないこと、および核燃料と使用済み燃料は72時間冷却状態を保てること。
- (3) 全電源喪失および複数の原子炉が巻き込まれる事態に対する緊急時計画の策定。
- (4) 使用済み燃料プールの冷却設備の追加(冷却水、計装)。
- (5) Mark IおよびII型BWRの格納容器に対する信頼性のあるベント・システム的设计。

- (6) 所内緊急時の対応能力の強化・統合。
- (7) 格納容器内および他の建屋の水素制御および緩和対策を施すこと。

14. 新基準

今回の勧告では、従来規制していなかった項目が注目される。これは、福島事故で初めて経験した事象に関するものである。

第1点は、設計基準事象の10年ごとの再確認である。福島では、津波の高さにつき、貞観地震などの新知見が存在しながら見直しが行われなかったことへの反省である。

第2点は、8時間の炉心損傷なしと、72時間の燃料の冷却を明記したことが挙げられる。

第3点は、複数の原子炉の規定であり、従来考えていない事象である。

第4点は、使用済み燃料プールの冷却系の追加である。福島では、使用済み燃料プールの冷却の問題が発生した。現在の設計は、使用済み燃料プール冷却系に多重性は要求されているが、多様性は規定されていない。

第5点は、ベント・システムの信頼性の強化である。福島でもベント・システムは設計されていたにもかかわらず、訓練も操作マニュアルもなかったと報道されており、室の持ち腐れの反省である。

第6点は、格納容器および建屋の水素対策である。福島では、原子炉建屋が水素爆発により無残な姿をさらしており、大きな反省材料である。

以上のように福島の事故に対し、謙虚な反省をアメリカがしており、これを21世紀の原子炉の安全を目指した勧告と名付けているのは立派な態度である。日本こそが、このような、しっかりした指針を早急にまとめるべきである。

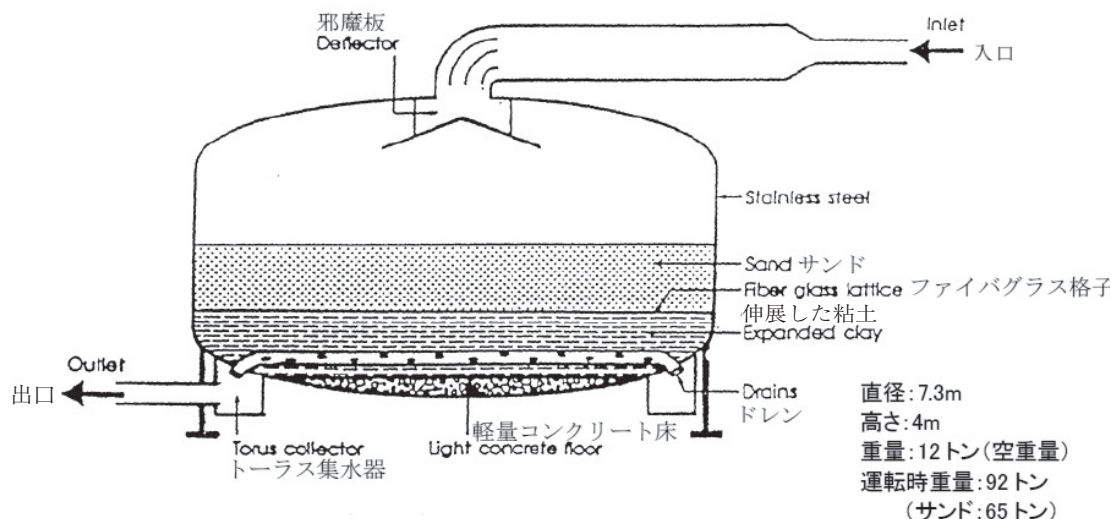
15. 日本の原子力発電所の再稼働に向けて

以上、欧米の福島事故への対応について書いてきたが、日本で定期検査を終了し、過酷事故時の炉心への給水、新たな電源の確保などの対策が取られた原子力発電所では、福島のような大事故の繰り返しは考えにくく、運転を再開すべきである。ただし、中期的には格納容器に、いわゆる PCV ベント・システムを設置することが必要である。

このたび、44年前にフルブライト留学生として学んだ筆者の母校であるミシガン大学院に招かれ、講演をしてきたが、福島で PCV ベントに手間取ったことに関心が持たれた。アメリカでは、格納容器の設計圧力でラプチャー・ディスクが自動的に開き、ベント・システムが自動的に稼動することになっている。福島では、電気がなく電動弁が開かない、ケーブルが届かないなどで時間を費やした。過酷事故時のためのベント・システムであり、電動弁設置などともないことである。福島でも、アメリカのような PCV ベント・システムであったら、水素発生後、格納容器が設計圧力になれば、自動的にベントされ格納容器が壊れることなく、水素が原子炉建屋に充満することはなく、爆発も避けられた。したがって、早期に PCV ベント・システムを追加すれば、過酷事故時にも格納容器は健全であり、放射能を外部に漏らす事態は避けられ、大変効果のあるシステムである。

16. 結論

欧米では、福島事故の対応を早急に行っている。ヨーロッパでは、すべての原子力発電所のストレス・テストの中間報告を9月15日までに終了した。10月末までに最終報告書を提出し、2011年末に国別の最終報告書が提出される予定である。2012年4月末までに、各国の専門家によるピア・レビューが実施され、6月に欧州理事会に



フランスの PCV ベント・システム

報告され、8月にIAEAに正式に報告される予定となっている。

そこで尤度が低く、追加の改善が必要とみなされた場合は、次期の燃料交換時などに追加工事等を施すとしている。

一方、アメリカでは、9.11のニューヨークの世界貿易センター・ビルなどへの対応として、原子力発電所のテロ対策、非常用の電源の確保、炉心への注水の確保、格納容器の設計圧力によるPCVベント・システム等の対策が既になされており、福島事故に関する短期評価では、アメリカの原子力発電所は安全に運転できるとし、運転しながら、電源喪失等への安全対策を強化する長期的評価を行う方針を決定した。しかし、オバマ大統領は声明を発表し、「日本の原子力発電所の事故から教訓を学び、アメリカの原子力発電所の安全性につき、包括的なレビューを」指示した。これを受けて、NRCは「21世紀の原子炉の安全性を目指した勧告」を発行した。そこには福島事故による新たな教訓として、12項目の勧告を

まとめて電力に対応を求めている。

一方、日本も福島事故後に短期的な対策を指示し、電源車による電源確保や消防ポンプ車による炉心注水等、一連の対応は終了し、防波堤の工事等、中長期的な工事に入っている。また現在はストレス・テストと称する計算を実行中で、その結果により再稼動を決定することになっているが、日本の経済には電力は必須のものであり、安全性を確認された原子力発電所から順次、運転を再開し、中長期的な対策も追加していくことが肝要である。

著者紹介



水町 渉(みずまち・わたる)
(独)原子力安全基盤機構, IAEA,
OECD/NEA ISOE 委員会第7代議長
(関心分野/専門分野)原子力安全

From Editors 編集委員会からのお知らせ

○学会誌記事執筆者のための

テンプレートを用意しました
執筆要領と合わせてご利用下さい



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

○「投稿の手引」「和文論文テンプレート」を
改定しました。

<http://www.aesj.or.jp/publication/ronbunshi.htm>

—最近の編集委員会の話題より—
(11月4日第5回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・原発事故関連論文の受理・審査・掲載状況が報告された。
- ・英文論文誌の新出版社移行の進捗状況が報告された。学会誌12月号にお知らせを掲載する。また、著作権移譲書類を検討し、出版社提示のものに変更することとした。1月号は入稿済み。
- ・審査要領、PNST出版要領等の改正を承認した。また、PNST

の編集委員会表示は、Vol.1と同様とすることを確認した。
・審査区分の再編に関しての調整がほぼ終了したので、次回までにメールにより最終案を確認することとした。
・投稿論文審査関係についての報告と懸案論文の対処について検討した。

【学会誌関係】

- ・原子力と他エネルギー利用に関する誌上討論を企画してきたが、1月号、2月号に各二編の解説を掲載の予定。(紙面左上に論点「原子力を考える」と見出しが付く)
- ・海外の原子力事情、「ATOMOΣ Special」は12月号で終了の予定であったが、引き続き掲載の要望が多いことから再検討することになった。
- ・今後の記事企画として「ファンデメンタルな放射線の生物学的影響、低放射線の影響」の要望があり、引き続いて検討していくことになった。
- ・書評はよく読まれる記事の一つであり、取り扱う範囲等について議論があった。

編集委員会連絡先<<hensyu@aesj.or.jp>>

解説

原子力協定の下で高速炉協力を行うための要件とは
日本とカザフスタンの高速炉に関する取極を例に

文部科学省 河口 宗道

国際協力の下で高速炉の研究開発を実施することにより、研究開発コスト、リスクの低減、及び研究開発期間の短縮化を図ることは重要である。しかしながら、通常の2国間原子力協定(以下、原子力協定と呼ぶ)には、高速炉の協力分野は含まれていない。このため、原子力協定に高速炉の協力分野を追加するためには、その必要性、核不拡散性、平和利用という要件を確保する必要がある。これを満たすことによって、日本とカザフスタンは今年4月に高速炉の取極を締結した。本稿ではそれを事例として、原子力協定の下で高速炉協力を行うための要件と課題について解説する。

I. 緒言

独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構と呼ぶ)は、高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究(以下、FSと呼ぶ)及び高速増殖炉サイクル実用化研究開発(以下、FaCTプロジェクトと呼ぶ)において、平成12年からカザフスタン共和国国立原子力センター(NNC: National Nuclear Center)と高速炉の炉心溶融事故に関する調査、研究を行ってきた¹⁾。この研究は、ナトリウム冷却高速炉において、仮に炉心溶融事故が発生した場合に、溶融した燃料及び炉心構造物(以下、炉心溶融物と呼ぶ)が集合して再臨界する可能性を回避し、あるいは再臨界の影響を低減するために実施されてきたものである。この炉心溶融事故の発生確率は極めて小さいと考えられるが、安全上重要であるため模擬試験を実施し、炉心溶融事故における温度等の炉内の状態や炉心溶融物の移動等のデータを取得し、かつ事故の影響の低減及び再臨界の回避のための設計について、確認の試験を行うものである。以下、この研究計画をEAGLE(Experimental Acquisition of Generalized Logic to Eliminate recriticalities)プロジェクトと呼ぶ。

このEAGLEプロジェクトで扱う「炉心溶融事故」は、原子力発電所の過酷事故の中で極めて重要である。例えば、福島第一原子力発電所で起きた事故について、東京電力は5月24日に、原子炉内で炉心溶融事故が発生したことを示唆するプレスリリース²⁾を行っている。事故の詳細調査は今後さらに進められるものと考えられる。

Exchange of Notes on Fast Reactor under Bilateral Agreements on Cooperation in the Peaceful Uses of Nuclear Energy : Munemichi KAWAGUCHI.

(2011年 7月29日 受理)

一方で、カザフスタンはウラン確認埋蔵量世界第2位(全世界の約5分の1、第1位はオーストラリア)である。今後、日本はカザフスタンと核物質や原子力関連品目及びその関連技術の移転が予想されたため、平成19年6月から「原子力の平和的利用における協力のための日本国政府とカザフスタン共和国政府との間の協定(以下、日カザフスタン原子力協定と呼ぶ)」の協議を行ってきた。日カザフスタン原子力協定は、およそ2年半の協議の末、平成22年3月2日に東京で署名され、同年5月19日に日本国内において国会承認、平成23年4月8日に官報にて日カザフスタン原子力協定、及び高速炉取極ほかの交換公文の発効が掲載された。本記事は、我が国において初めての高速炉取極である「原子力の平和的利用における協力のための日本国政府とカザフスタン共和国政府との間の協定の協力分野に関する交換公文」を例として、高速炉取極の枠組みや協力の要件等を解説するのである。

II. 高速炉取極の枠組み

1. 我が国の原子力協定

平成23年6月までに我が国が締結した原子力協定は7か国(カナダ、フランス、オーストラリア、中国、アメリカ、イギリス、カザフスタン)と1共同体(欧州原子力共同体(以下、EURATOMと呼ぶ))であり、その他4か国(ロシア、ヨルダン、韓国、ベトナム)と原子力協定の署名を済ませている。この署名済みの原子力協定は、今後、両国の国会審議等の国内手続きの終了後、批准書を交換することで発効することになる。第1表に日本と主な国との原子力協定について簡単にまとめる。

通常、原子力協定は相手国と一定の範囲内で包括的に原子力の平和利用に関する協力を実施するための国際条

約であり、原子力協定には協力の範囲や協力における「核物質(nuclear material)」、「資材(equipment)」、及び「技術(technology)」等の定義等が定められている。そのため、原子力協定を締結していない国との協力では、個々の協力について関係省庁で確認し(例えば、資材の移転を伴う協力の場合は「外国為替及び外国貿易法」等の法的枠組みとの整理や核不拡散性等を確認する)、相手国と口上書を用いて原子力の協力が平和利用の目的のみで実施されることを約束しなければならない。つまり、原子力協定は実施可能な協力の範囲・要件をあらかじめ明確にすることで、口上書の交換なしに「核物質」、「資材」、及び「技術」の移転を伴う協力を平和利用の目的の下で実施できるのである。

次に、原子力協定は協力の範囲という観点で2種類に分類できる。協力の範囲の記述の有無については、協定の締結時期や相手国の原子力開発の状況に依存するが、比較的早期に締結した原子力協定には協力の範囲が明記されていないことが多い。ただし、協力の範囲が明記されていない原子力協定の場合もすべての原子力の範囲の協力ができるという訳ではない。例えば、日米原子力協定には核拡散の懸念のある「20%以上の濃縮・再処理技術」は機微技術として、政府間の事前の同意が必要であると記載されている。このような協力の範囲が明記され

ていない原子力協定を締結している国は、フランス、アメリカ、EUARATOM、カナダ、オーストラリアがある。

もう一方の種類の原子力協定とは、協力の範囲が明記されているものである。この種類の原子力協定を署名あるいは締結している国には、中国、ヨルダン、カザフスタン、ロシアがあり、比較的最近、署名あるいは締結した国が多い。明記される協力の範囲は既に実施している協力、あるいはこれから実施するために計画中の協力で、かつ核拡散等の懸念がないものである。ただし、協定の協力の範囲には必ず最後に、「両締約国政府により合意されるその他の分野(日カザフスタン原子力協定の場合)」といった協力の範囲を追加できる記述になっている。追加される協力は、

①新しく計画される重要な協力

②協力の内容を特定することで核拡散等の懸念がなくなる協力

になる。ここで、例えば高速増殖炉の燃料の協力の場合を考えると、高純度のプルトニウムを増殖させる技術情報が使われる可能性があり、軍事利用を完全に否定することは困難である。そのため核拡散の懸念が残るとして、現在では原子力協定の下で高速炉の協力を行う場合は、個別の協力内容を確認し、高速炉取極に協力内容を

第1表 主な国との原子力協定の概要(仏国³⁾、中国⁴⁾、米国⁵⁾、EURATOM⁶⁾、カザフスタン⁷⁾、露国⁸⁾)

国名	署名年月/ 発行年月 (改正年月)	存続期間	協力の分野	機微情報あるいは技術
仏国	1972年2月/ 1972年9月 (1990年7月)	・45年 その後は、いずれの締約国政府も、他方の締約国政府に対しこの協定を終了させる意図を通告することができる。その場合には、この協定は、その通告が行なわれた後6箇月で終了する。	・記載なし	「機微な技術」とは、濃縮、再処理又は重水生産の設備又は施設的设计、建設、運転又は保守にとつて重要なものとして両締約国政府が合意により指定する有形の資料をいい、公衆が入手することのできる資料を含まない。
中国	1985年7月/ 1986年7月	・15年 この協定は、いずれか一方の締約国政府がそれぞれの期間の満了の日の少なくとも六箇月前に他方の締約国政府に対してこの協定を終了させることを文書によって通告しない限り、自動的に五年の間づつ延長される。	(a) 放射性同位元素及び放射線の研究及び応用 (b) ウラン資源の探鉱及び採掘 (c) 軽水炉及び重水炉の設計、建設及び運転 (d) 軽水炉及び重水炉の安全上の問題 (e) 放射性廃棄物の処理及び処分 (f) 放射線防護及び環境監視 (g) 両締約国政府が合意するその他の分野	記載なし
米国	1987年11月/ 1988年7月	・30年 いずれの一方の当事国政府も、6箇月前に他方の当事国政府に対して文書による通告を与えることにより、最初の30年の期間の終わりに又はその後いつでもこの協定を終了させることができる。	・記載なし	「機微な原子力技術」とは、公衆が入手することのできない資料であつて濃縮施設、再処理施設又は重水生産施設的设计、建設、製作、運転又は保守に係る重要なもの及び両当事国政府の合意により指定されるその他の資料をいう。
EURATOM	2006年2月/ 2006年12月	・30年 この協定は、いずれか一方の締約者がこの協定の有効期間の満了する日の遅くとも六箇月前までに他方の締約者に対してこの協定を終了させる旨を書面により通告しない限り、自動的に五年間づつ延長させるものとする。	・記載なし	記載なし
カザフスタン	2009年5月/ 2011年4月	・10年 いずれか一方の締約国政府がこの協定の有効期間の満了する日の遅くとも六箇月前までに他方の締約国政府に対し、外交上の経路を通じて、この協定を終了させる意思を書面により通告しない限り、自動的に五年間づつ延長されるものとする。	(a) ウラン資源の探鉱及び採掘 (b) 軽水炉及び高温ガス炉の設計、建設及び運転 (c) 軽水炉及び高温ガス炉の安全 (d) 放射性廃棄物の処理及び処分 (e) 放射線防護及び環境監視 (f) 放射性同位元素及び放射線の研究及び応用 (g) 両締約国政府により合意されるその他の分野	記載なし
露国	2009年5月/ 未発行	・25年 いずれの一方の締約国政府も、第十五条5の規定の適用を妨げることなく、六箇月前に他方の締約国政府に対して書面による通告を与えることにより、最初の二十五年の期間の終わりに又はその後いつでもこの協定を終了させることができる。	(1) ウラン資源の探鉱及び採掘 (2) 軽水炉の設計、建設及び運転 (3) 放射性廃棄物の処理及び管理 (4) 原子力の安全(放射線防護及び環境の監視を含む。) (5) 放射性同位元素及び放射線の研究及び応用 (6) その他の分野であつて両締約国政府の間の別個の書面による取極において合意するもの	記載なし

具体的に記述することで、協力の範囲を特定する必要があると整理されている。

2. 高速炉取極に必要な要件

高速炉取極は前述した位置づけのため、以下の3つの要件が主に必要と認められる。

①協力の必要性及び重要性

②核不拡散性

③平和利用のみの協力であること

③に関しては、可能であれば協力に使用する施設がIAEAの保障措置リストに含まれる施設(適格施設あるいは選択施設)であることが望ましい。各要件について日本とカザフスタンの高速炉取極を例として解説する。

(1) 協力の必要性及び重要性

EAGLEプロジェクトは、高速炉の炉心溶融事故といった過酷事故の可能性を回避し、またはその影響を低減するための安全性に関する実験研究である。本プロジェクトは、高速炉の実用化に向けてFS及びFaCTプロジェクトにおいて安全上重要な研究として継続されている。原子力機構の技術評価⁹⁾の抜粋を以下に示す。

(技術評価の抜粋)

さらに頻度は低いが影響が懸念される炉心損傷事故について、想定されるスクラム失敗事象から全炉心規模の炉心損傷に至った場合にも、内部ダクト付き燃料集合体の採用等により、即発臨界の超過や再臨界に至ることがなく(いわゆる、再臨界回避)、事故影響が原子炉容器外へ進展せずに原子炉容器内で終息(いわゆる、炉容器内終息)するように、炉心損傷事故対策を構築し、その妥当性の確認を進めている。以上のような事故対策を取り入れたことから、敷地外緊急時対応が発動されるような事態は実質的に回避可能と評価した。

(2) 核不拡散性

高速増殖炉の増殖性とは、高速中性子をブランケット燃料(主にウラン238)に照射することで燃料として消費する核物質以上の量のプルトニウムを生産することである。この点が特に高速増殖炉分野の海外との研究開発協力における核拡散性について注意が必要となる。特に、公知の技術より極端に高いプルトニウムの増殖性が得られるような炉心設計等の技術情報を提供することや、プルトニウム単体を抽出する技術(再処理)を提供することは注意が必要である。EAGLEプロジェクトについてはカザフスタンにある燃料を使用するため、日本からの核物質の移転はなく、提供する技術は実験方法の情報程度である。さらに、その技術は協力に必要な高速炉の安全性に関する実験方法の情報のみであり、プルトニウムを極端に増殖させる技術ではなく、核不拡散性に重大な抵触はないと考えられる。

(3) 平和利用のみの協力であること(可能であれば協力に使用する施設が適格施設、あるいは選択

施設であること)

平和利用のみの協力であることは、日カザフスタン原子力協定に明記されている。第四条1に「この協定の下での協力は、平和的非爆発目的に限って行う」、第四条2に「この協定に基づいて移転された核物質、核物質ではない特別な資材、設備及び技術、技術に基づく設備並びに回収され又は副産物として生産された核物質は、平和的目的以外の目的で使用してはならず、また、いかなる核爆発装置のためにも又はいかなる核爆発装置の研究若しくは開発のためにも使用してはならない。」と記述されている。高速炉取極が原子力協定の協力の範囲に追加するものである以上、協定本文に従い、平和利用のみの協力でなければならない。

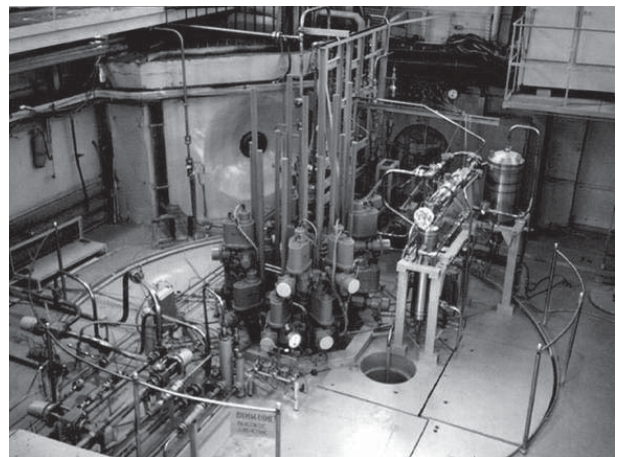
また、核兵器保有国と今後高速炉の協力をする場合は、協力の施設が適格施設あるいは選択施設であることが望ましい。その理由は、適格施設あるいは選択施設であることは、その施設が軍事施設ではなく、第三者機関であるIAEAの査察を受け入れる用意がある施設であることを示しているからである。

なおEAGLEプロジェクトは、高速炉の炉心溶融事故の回避あるいは事故の影響を低減するために、炉心溶融物を集合させないようにして再臨界を防ぐ設計を考え、かつ高温の炉心溶融物が冷温状態になるための熱移行等を測定するものである。再臨界を防ぐ設計は燃料集合体に内部ダクトを設置すること等が考えられている。

このEAGLEプロジェクトは、高速炉取極に具体的に記載されている。協力の内容が記載されている部分を抽出すると次の通りである。

(高速炉取極の訳文の抜粋)

独立行政法人日本原子力研究開発機構とカザフスタン共和国国立原子力センターとの間の関連する契約に基づいて実施される高速炉の安全性に関する実験事業(再臨界の可能性を排除し、及び軽減することを目的として、炉心崩壊事故の発生を仮定し、そのような状況における溶融した燃料及び溶融したステンレス鋼の再配置及び相



第1図 IGR¹⁰⁾の炉心上部外観

相互作用挙動を評価するためのもの)は、協定第二条2(g)に規定する協力とみなす。

この高速炉取極の記載について、以下の2点により追加される協力の範囲を限定していることが分かる。

- ・協力の実施機関を記載することで、実質的に原子力機構とNNCの2機関間の契約の協力となっている。
- ・高速炉の安全性に関する実験事業(再臨界の可能性を排除し、及び軽減することを目的とした研究)であることを記載することで、核拡散に係わる協力は行えないことになっている。

Ⅲ. 結論と今後の課題

本解説では日カザフスタンの高速炉取極について、原子力協定の位置づけや高速炉取極について考慮すべき必要な要件等を説明した。原子力協定は協力の範囲が明記されているものと明記されていないものに分類でき、前者の協定の下では高速炉の協力を行うために具体的な協力内容を記述した高速炉取極を締結する必要がある。これは、高速炉の協力には高純度のプルトニウムを極端に増殖させる技術(ブランケット燃料の炉心設計情報等)が含まれる可能性があるためであり、高速炉の協力はしっかりと核不拡散性を持ち、かつ平和利用のみに限定された協力でなければいけないためである。そういう観点で、日本とカザフスタンの間で高速炉取極は要件を満たしている。以下の2点は、高速炉取極締結にあたって筆者が考える課題である。

(課題1)

原子力協定が締結されるまでの原子力の協力は、口上書により平和利用を約束した上で行われる。原子力協定は包括的な記載であるため、核不拡散上懸念のある協力に関しては、例えば「再処理の技術は移転してはならない」あるいは「事前の同意が必要」等と記載されている。しかし、仮に再処理の協力を行う条件に、我が国から相手国に移転する情報等は公知の実験方法等の情報と資金のみで、相手国から我が国に移転される情報等は実験結果(技術)である場合で、かつ、そのことについて相手国が特に問題意識を持っていないときは、協力を実施する方が我が国の国益になると考えられる。なぜなら、我が国では核物質等の規制が大変厳しいため、海外で実験をした方が安価で短期間に実施できる場合があるためと、原子力協定に再処理等の技術の移転が規制される主な理由が、我が国から移転された技術が軍事利用されることを規制するためだからである。相手国がこのような条件で問題がなければ、我が国が問題提起する理由はないのではないか。

(課題2)

原子力の協りに当たって、使用する施設はIAEAの保障措置リストに含まれることが望ましいと述べた。もちろんすべての施設がリストに入ることが、移転された

技術が軍事利用されないという点で最も良い。しかし、使用する施設をすべてではなく、例えば原子炉のような核物質が生成される施設だけ、IAEAの保障措置リストに入るだけで十分ではないか。なぜなら、最も管理しなければいけないことは派生核物質(移転した技術等を用いて発生した核物質)が軍事利用されないことであり、照射後試験施設等の施設では派生核物質が発生する恐れは小さく、照射後試験施設等を保障措置リストに入れると費用がかかってしまうためである。照射後試験施設等の施設は原子力協定に必ず記載される「協定の下での協力は、平和的非爆発目的に限って行う」で十分ではないだろうか。

—参考資料—

- 1) K. Konishi, J. Toyooka, K. Kamiyama, I. Sato, *et al.*, "The Result of a Wall Failure In-Pile Experiment under the EAGLE Project", *Nucl. Eng. Des.*, **237**[22], 2165-2174 (2007).
- 2) <http://www.tepco.co.jp/cc/press/11052401-j.html>
- 3) http://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/anzenkakuho/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2009/04/23/s_470922_09.pdf
- 4) http://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/anzenkakuho/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2009/04/23/s_610710_06.pdf
- 5) http://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/anzenkakuho/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2009/04/23/s_630702_05.pdf
- 6) http://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/anzenkakuho/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2009/04/23/h_181122_14.pdf
- 7) http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/pdfs/shomei_55.pdf
- 8) http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/pdfs/shomei_56.pdf
- 9) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/kaihatu/008/shiryo/__icsFiles/afieldfile/2010/12/28/1300643_2.pdf
- 10) http://jolisfukyuu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyuu/mirai/2010/1_3f1_5.html

著者紹介



河口宗道(かわぐち・むねみち)

文部科学省

(専門分野/関心分野) 高速炉の供用期間中
検査/原子力における国際協力

連載
講座材料が支える原子力システム
より高い信頼性のために第5回 軽水炉燃料部材に用いられる
ジルコニウム合金

日本核燃料開発(株) 栄藤 良則, 原子燃料工業(株) 土内 義浩

燃料ペレットを包みこみ、放射性物質を閉じ込める「第二の壁」の役割をもつ燃料被覆管には、この50年来、ジルコニウム合金が用いられている。被覆管は炉心の過酷な環境下で健全性を保ち続ける必要がある、このため長くにわたって研究開発が行われてきた。本稿では、沸騰水型原子炉と加圧水型原子炉それぞれにおけるジルコニウム合金について、これまでの開発経緯と今後の展開について述べる。

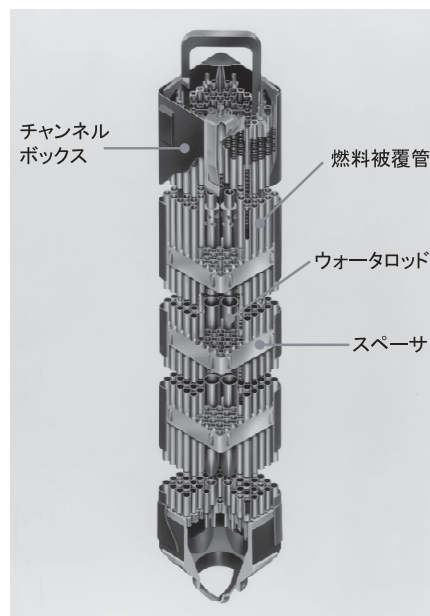
I. 沸騰水型軽水炉で使用される Zr 合金

沸騰水型軽水炉(BWR)では、1960年にドレスデン-1が運開に達して以来、現在に至るまで燃料被覆管にはジルカロイ-2が使用され続けている。この50年間でBWR燃料の設計は6×6型から10×10型へと被覆管サイズが細径化し、取出し燃焼度は大幅に増加したが、ジルカロイ-2は安定して優れた性能を発揮し続けており、BWR環境に適合した非常に優秀な合金である。BWR用の燃料集合体では第1図に示す部材にジルコニウム合金が用いられているが、本章では、燃料被覆管が経験したトラブルとその対策の一例について紹介する。

1. ジルカロイ-2の開発^{1,2)}

(1) ジルコニウムの採用

1946年に始まった米国のマンハッタン計画の中で、原子力潜水艦ノーチラス号と SHIPPING PORT 原子力発電所の開発が進められた。炉型として有力だった加圧水型軽水炉(PWR)の炉心に使用する構造材料には、①長期間にわたる高温水中での耐食性が良好であること、②放射線場での健全性に優れること、③熱中性子吸収断面積が小さいこと、④適正な価格で量産可能なこと、などの条件が求められており、ジルコニウムは候補材の中の一つにすぎなかった。高純度のジルコニウム(クリスタル



第1図 BWR燃料集合体とジルコニウム合金部材
(9×9タイプの例)

パージルコニウム)は、耐食性に優れていたが、高価で量産化も実現していなかった。また、ジルコニウム中には1~3%程度のハフニウムが共存していたため、ジルコニウムの熱中性子吸収断面積は2.5バーン程度と認識されていた。しかし、ジルコニウムとハフニウムの分離技術が進歩するとともに、ジルコニウムの熱中性子吸収断面積はもっと小さいことがわかり、海軍の原子炉開発の責任者であったリコーバ提督が、炉心材料にジルコニウムを使用することを決断した。その結果、ジルコニウムの製造技術、加工技術、試験技術の開発が精力的に進められ、ジルコニウムの物理的、機械的データが蓄積され、純ジルコニウムの量産化が進み、経済性も向上した。

Materials for Nuclear Energy Systems—Towards High Reliability(5); *Zirconium alloy in Light Water Reactor*: Yoshinori ETOH, Yoshihiro TSUCHIUCHI.

(2011年 6月1日 受理)

第1回 軽水炉用ステンレス鋼

第2回 高速炉炉心用改良ステンレス鋼

第3回 Ni基合金

第4回 低合金鋼

(2) ジルカロイ-2の開発

リコーバー提督のエンジニアリングジャッジによりジルコニウムが日の目を見、一方、そのころクロールが開発していたスポンジジルコニウムの製造方法(クロール法)が量産に適した経済的な製法として確立されていた。しかし、スポンジジルコニウムはクリスタルバージルコニウムほどの耐食性はなく、強度も不十分であったため、ジルコニウム合金の開発が進められた。スポンジジルコニウムの耐食性は特に不純物として存在する窒素の影響により劣化するが、スズの添加により窒素の悪影響を抑制でき、かつ、強度も改善されることがわかってきたが、クリスタルバーのレベルまで耐食性を向上させることはできなかった。ただし、スポンジジルコニウムに不純物として含まれている鉄濃度が高いほど加速腐食が生じにくいこと、スズの添加により酸化膜の剥離が生じにくくなることなどがわかってきた。非常に多くのジルコニウム合金に対して腐食試験が実施された中に、偶然少量のステンレス鋼が混入したインゴットも混ざっていたが、この結果、鉄、ニッケル、クロムが耐食性改善に有効なことがわかった。

材料はまだ開発途上の段階であったが、ノーチラス号の建設が進んでいたために、リコーバー提督は炉心材料の決定をせまられており、開発に携わっていた研究者や技術者がそれまでのデータを基に推奨した組成の合金を採用することにした。1952年8月のことで、このとき選定された合金が後にジルカロイ-2と呼ばれることになるが、ジルカロイ-2の試験データはおろかインゴットも存在していなかったそうである。リコーバー提督の決断によりジルカロイ-2が生まれ、その後60年間を経ていまだ世界中のBWRで使用されていることに驚きと畏敬の念を禁じえない。

2. ジルカロイ-2被覆管の改良

ジルコニウム合金はBWR炉心構造材料として、燃料被覆管、スパーサ、ウォータロッド、ウォータチャンネル、チャンネルボックスなどに使用されている。本稿では、被覆管に使用されてきたジルカロイ-2が直面した、いくつかの問題とその対策について述べる。

初期のジルカロイ-2被覆管には冷間加工材が使用されたが、運転中に応力が開放され、被覆管に曲がりが生じた。その対策として、応力除去焼きなまし材が用いられるようになった。

燃焼度が増加すると、ペレットの熱膨張による応力と腐食性核分裂生成物(FP)であるヨウ素等による腐食が重畳して、ペレット-被覆管相互作用(PCI)が生じ、燃料破損に至る例が発生した。この対策として、被覆管の延性がより大きい再結晶化焼きなまし材が用いられるようになり、現在でも使用されている。また、PCI対策として燃料棒の出力変動を緩やかに行う、ならし運転も採

用されたが、これを撤廃し、さらに自由な負荷追従運転を可能にするために燃料のPCI対策が1978年ごろから検討された。銅バリア被覆管、ジルコニウムライナ被覆管、中空ペレットなどが検討され、JMTRでの出力急昇試験などの結果から、ジルコニウムライナ被覆管が最も優れていることが確認され、現在もほとんどのBWRで使用されている。

1988年、スウェーデンのオスカーシャム3号機でFPの漏えい率が急激に増加した³⁾。これは、微小な漏えいが生じた燃料の運転をそのまま継続していたところ、漏えい孔から侵入した水がペレットや被覆管内面を酸化し、その際に発生した水素を被覆管が吸収したために2次水素化が発生し、燃料棒軸方向に長いき裂が進展する2次破損が発生したことが原因である。この対策として、漏えい燃料位置の制御棒を全挿入して漏えい燃料の出力を抑制した状態で運転する、出力抑制運転が実施されているが、材料側の対策としては、被覆管内面酸化による水素発生を抑制するため、ジルコニウム中の鉄濃度を高めた高鉄ライナや、ジルコニウム-スズ合金ライナなどが実用化されている。

ジルカロイ-2はBWRの炉心環境で非常に優れた耐食性を示しているが、炉水中の不純物(クラッド)などの影響が重畳したときには、局部的に異常腐食が発生し、被覆管の肉厚全体が酸化され、燃料漏えいを生じた経験がある。1979年に複数のBWRで被覆管の局所腐食による燃料漏えいが発生した⁴⁾。原因は高濃度の銅を含む厚いクラッドが燃料棒表面に付着して熱抵抗となり、被覆管の温度が上昇したために酸化反応が促進されたと考えられている。冷却材中の銅は銅合金製の復水器や復水浄化系から混入したもので、対策として銅合金製の設備を交換した。また、被覆管側の対策として、当時のジルカロイ-2で発生していたノジュラー(塊状)腐食を抑制して耐食性を改善する努力がなされた。主な対策は、素管以降の段階での熱処理による合金元素分布の均一化と、規格範囲内での合金元素濃度の調整(スズを低めに、鉄、ニッケルを高めに調整)である。これらの対策によりノジュラー腐食はほとんど発生しなくなった。

1997年、スイスのライブシュタットでシャドー腐食による燃料漏えいが発生した⁵⁾。シャドー腐食とは、ジルコニウム合金よりも耐食性に優れているステンレス鋼やインコネル製の材料が、ジルコニウム合金と近接(非接触)して放射線場の水中に存在している場合に起こるガルバニック腐食の一種で、貴な材料の影(シャドー)がジルコニウム合金表面に映っているように見えることから名づけられた。ライブシュタットの場合はインコネル製のスパーサの影響で、スパーサ位置の被覆管の腐食が進行し、燃料破損に至った。一因として、被覆管の耐食性が十分でなかったことが挙げられ、ジルカロイ-2中の鉄濃度を規格範囲内の高いところに設定し、ジルカロイ-2

母材中に析出している金属間化合物のサイズを適切な範囲に制御するなどの対策が講じられた。

2000年前後には、米国の複数のプラントで被覆管の腐食による燃料漏えいが発生した。原因はいまだ明確になっていないが、亜鉛注入、水素添加、貴金属注入などによる水質変化との関係が検討され、亜鉛注入の濃度を高くしすぎないなどの対策が取られている。

3. 今後の材料開発

ジルカロイ-2はBWR環境で非常に優れた耐食性を示しているが、燃料の信頼性向上や高性能化を目指すときに、これからの被覆管材料に求められるのは、水素吸収量の低減である。水素吸収量の増加は被覆管の水素脆化による延性低下をもたらすので、さらなる高燃焼度化や冷却材の水質変更を進めた場合に、燃料健全性に影響を及ぼす可能性があると推定される。このためジルカロイ-2の耐食性を維持しつつ水素吸収量を低減できる合金のニーズが高まっており、日本ではGNF-ZironやHiFi[®]と呼ばれるジルカロイ-2の鉄濃度を現行の規格以上に高めた合金が開発されている(第1表^{6,7)})。

今後も、さらなる燃料の信頼性および経済性向上を達成するための材料開発を継続し、被覆管材料に関する技術力の維持・発展を図る必要がある。

II. 加圧水型軽水炉で使用される Zr 合金

加圧水型軽水炉(PWR)では、1957年に SHIPPING PORT 原子力発電所が運開してから1960年代半ばまでの初期の被覆管はステンレス鋼製であったが、その後は中性子吸収の少ないジルカロイ-4が採用されることとなる。PWRの燃料被覆管は、50年近くジルコニウム合金が使われ現在に至るが、その間、冷却材による被覆管外面の酸化を抑えるための合金組成や製造時熱処理の改良が主に進められてきた。被覆管以外に支持格子、制御棒案内管、計装案内管といった燃料部材にもジルコニウム合金が用いられている(第2図)。本章では、これらPWR燃料部材に用いられるジルコニウム合金について紹介する。

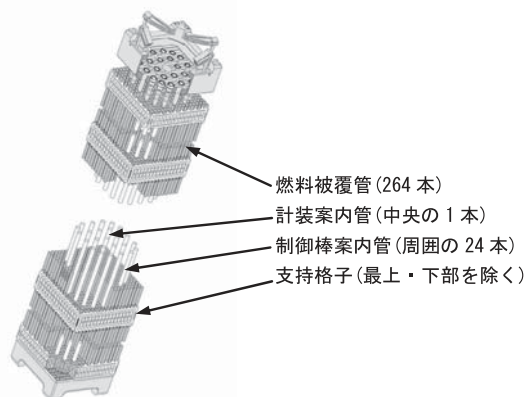
1. 被覆管等のジルコニウム合金燃料部材

PWRではプラントのタイプによって、14×14、15×

第1表 主なBWR燃料用のジルコニウム合金

合金	Sn	Fe	Cr	Ni	Zr
ジルカロイ-2	1.20	0.07	0.05	0.03	balance
	~1.70	~0.20	~0.15	~0.08	
GNF-Ziron ⁽⁶⁾	1.46	0.26	0.1	0.05	balance
HiFi ⁽⁷⁾	1.5	0.4	0.1	0.08	balance

注 ジルカロイ-2の組成は規格の範囲、他は文献に記載されている組成を示す。



第2図 PWR燃料集合体とジルコニウム合金部材 (17×17タイプの例)

15もしくは17×17型等の対応する燃料のタイプが決まっており、BWRのように、同一プラントに装荷する燃料集合体を6×6から7×7、8×8、9×9、10×10型へと徐々に燃料棒を細径化していくような熱的負荷の緩和策をとることは難しい。このため、例えば1体の燃料からより多くのエネルギーを取り出せるようにする(高燃焼度化)ために炉内滞在時間が伸長する場合の対応策として、耐食性向上を狙った被覆管材料の改良が積極的に行われてきた。

当初、PWR燃料被覆管用のジルコニウム合金としては、外面酸化のみならず、水素吸収を抑える観点からニッケルを添加しないジルカロイ-4が採用された(ニッケルは耐食性を向上させるが、水素吸収が増加する)。また、冷間加工後に応力除去焼きなましを加えた材料が用いられた。応力除去焼きなまし材は再結晶化焼きなまし材に比べ、強度が高いという特徴を持つ。ジルカロイ-4は良好な耐食性を有し、PWRの冷却材と接触する被覆管外面では安定した不動態酸化膜を生成するため、酸化の進行は低く抑えることができる。1体の燃料集合体が炉内に装荷される3~4年の間に、酸化膜は数十ミクロン程度の厚さにしかならず、金属母材も肉厚全体の数%しか侵食されない。ところが、1990年頃には、いわゆる「表面荒れ」という現象が多く見られるようになった⁸⁾。PWRでは、冷却材は燃料棒の間を上昇するに従い温度が上昇していくため、被覆管の外面に生じる酸化膜は燃料棒の比較的上方でより厚くなる傾向にある。このような位置で厚くなった酸化膜が局所的にはがれ、小さなクレータ状のはがれが無数に分布したものが表面荒れである。特に燃料の健全性を損なう事象ではなかったが、その抑制策として酸化の進行を抑えることが有効であったことから、1990年代は被覆管の耐食性向上に関する取組みが積極的に行われた。

ジルカロイ-4の成分仕様は、ASTMやJISにおいて規格化されており、スズについては1.2~1.7wt%と規定されている。それまでは1.5wt%程度含有したジルカロイ-4が用いられていたが、スズ濃度の低減によってさ

らに耐食性向上が見込めることから、ジルカロイ-4の規格の範囲内で1.3 wt%程度を狙うように見直された。しばしば前者が「従来スズジルカロイ-4」、後者が「低スズジルカロイ-4」と呼ばれる。また、被覆管製造時の焼きなまし温度を高め管理することでも耐食性向上が図られた。ジルカロイ-4にはジルコニウムと鉄やクロムの添加元素からなる金属間化合物の粒子が微細に析出しているが、高い温度で焼きなますと析出物の粒径が大きくなることが耐食性向上に関係していると理解されている⁹⁾。

その後も、高燃焼度化のカギを握る被覆管改良は進められ、さらなる耐食性向上のために新たな合金の開発も行われた。被覆管と冷却水の相互作用としては、外面酸化に加えて水素吸収も課題であった。金属母材に過剰に吸収された水素は、ジルコニウムの水素化合物として微細に析出し被覆管の延性低下を招くことから、水素吸収の抑制も重視されるようになり、ニオブ含有合金が有効策の1つとされた。燃料・被覆管メーカーは、スズを抑え、ニオブを添加した高耐食性のジルコニウム合金をそれぞれ独自開発し、現在、国内外でNDA, MDA, ZIRLO[®], M5[®]といった合金が被覆管材料として実用化されている。

耐食性向上をめざした被覆管開発は国内外で現在も行われており、有望な合金としてはJ-Alloy[™], M-MDA[™], Optimized ZIRLO[™]が開発中もしくは一部導入されているところである(第2表)。

燃料の健全性確保のために、被覆管には耐食性以外にも種々の性能が求められる。1970年頃には海外で燃料棒が冷却材圧力によって扁平化して損傷する(コラプス)事例が見られた。この主因は燃焼初期の燃料ペレットの焼きしまりが大きかったことであり、ペレットの品質を高めることで解決されたが、被覆管側の対策としても強度確保や真円度管理が必要である。

燃料の燃焼が進むと、被覆管外径は徐々に減少し燃料ペレット外径は増加するため、ペレットと被覆管のギャップが閉塞する。この状態で何らかの原因で出力が急激に上昇すると、BWR燃料と同様に、PCIにより燃料破損が生じる可能性がある。PCIによる燃料破損の原

因は、ペレットからの機械的作用と、FP(ヨウ素)による化学作用が重畳した応力腐食割れ(SCC)と理解されている。PWRでもジルコニウムライナ管の採用等が検討されたが、現在導入には至っていない。耐PCI性能を確保する方策として、ジルコニウム合金の金属結晶における稠密六方構造(hcp)の特定の方位<0002>を、被覆管の半径方向に配向させること(集合組織調整)が有効とされている(第3図)。被覆管メーカーでは、このような被覆管を製造するために工程を工夫している。

燃料が健全に運用され、また適切に取り扱われるためには、燃料棒や燃料集合体の寸法安定性も重要である。実際に、海外では集合体曲がりが増大し燃料取扱いの課題となったり、集合体が軸方向に異常に伸びたことで上部炉心板と著しい干渉が生じたりする事例が見られる。これらは、主にジルコニウム合金部材の照射成長に関係する問題である。これらの対策としては、単に照射成長の程度を抑えるような合金組成や熱処理の検討を行うだけでなく、特性を正確に把握し適切に設計に反映することが重要である。

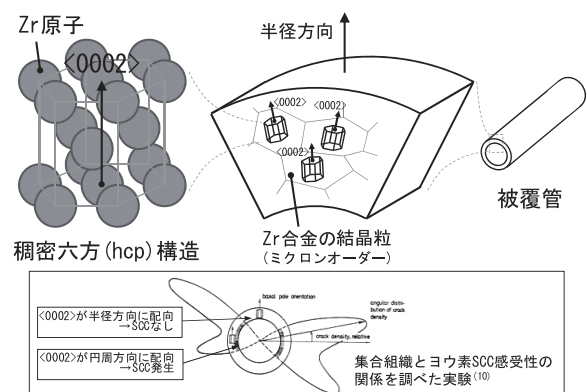
PWRの燃料集合体において燃料棒を保持する支持格子には、当初はニッケル基合金が用いられてきたが、昨今、一部のタイプの燃料集合体については、中性子吸収を抑えるためにジルカロイ-4(再結晶化焼きなまし材)が導入されている。ジルカロイの強度はニッケル基合金より低いことから、支持格子は剛性確保のためにサイズが大きくなる傾向にある。また、被覆管と同様に、過度の酸化が生じないことが重要であるとともに、寸法安定性も重要な課題である。

制御棒案内管や計装案内管にもジルカロイ-4の再結晶化焼きなまし材が用いられているが、他の部材同様、酸化と照射成長が重要な課題である。PWR燃料集合体の構造部材である制御棒案内管は、十分な機械特性を維持するためには酸化や水素吸収を抑えられることが望ましい。また、制御棒案内管の照射成長は、前述の燃料集合体の軸方向寸法変化の支配因子であり、その特性を適切に燃料の設計に反映することが重要である。

第2表 主なPWR燃料被覆管

(単位:wt%)						
合金	Nb	Sn	Fe	Cr	Ni	Zr
ジルカロイ-4	—	1.2 ~ 1.7	0.2	0.1	—	balance
NDA *	0.1	1.0	0.27	0.16	0.01	balance
MDA *	0.5	0.8	0.2	0.1	—	balance
ZIRLO [®]	1.0	1.0	0.1	—	—	balance
M5 [®]	1.0	—	—	—	—	balance
Optimized ZIRLO [™]	1.0	0.67	0.1	—	—	balance
M-MDA [™] *	0.5	0.5	0.3	0.4	—	balance
J-Alloy [™] *	J1	1.8	—	—	—	balance
	J2	1.6	—	—	0.1	balance
	J3	2.5	—	—	—	balance

* 主に日本で開発



第3図 ジルコニウム合金製被覆管の集合組織

国内の現行のPWR燃料では、支持格子や案内管にジルカロイ-4が用いられている。しかし海外では、被覆管と同様に新合金が採用されるようになってきている。これは燃料の炉内滞在が延長されても腐食を低く抑えることが目的である。

2. 今後のプラント運用と合金開発

将来の国内PWRプラントの運用動向としては、長期サイクル運転や炉出力向上(アップレート)等の導入が考えられる。海外に比べ国内プラントへの導入は慎重に検討されているが、限られたプラントを効率的に運用していく上では必要な施策と考えられる。

PWRの冷却材には反応度制御のためホウ素が添加されており、またpH維持のためにリチウムも添加されているが、長期サイクル運転ではこれらの濃度管理が見直されることが考えられる。一方、PWRのアップレートでは冷却材温度の上昇が想定される。リチウム濃度や冷却材温度はいずれもジルコニウム合金の酸化に影響する因子である。このほかにも、被ばくの低減や、プラントの高経年化対策としての炉材料の腐食やSCCの抑制を目的として、水化学の改良が検討されている。冷却材の水質の変更は、ジルコニウム合金の酸化や水素吸収挙動に何らかの影響を及ぼす可能性が考えられる。

高燃焼度化やプラント運用高度化に関する施策のいくつかは、健全性確保を前提としたジルコニウム合金の被覆管やその他の燃料部材にとって厳しい方向となるものである。新たな技術の導入にあたっては、海外等の先行事例を参考としつつ、メカニズム検討や試験炉等で得られる知見を十分に踏まえながら進めていくことが重要である。また、原子力発電の安全性と公益性の両立を図るためにも、高い性能の材料を見出し活用していくことが望まれる。

—参考資料—

- 1) H.G. Rickover, L.D. Geiger, B. Lustman, "History of the development of zirconium alloys for use in nuclear reactors", United States Energy Research and Development Administration, 1975.
- 2) B. Lustman, F. Kerze, Jr., "The metallurgy of

zirconium", McGraw-Hill, (1955).

- 3) A. Jonsson, *et al.*, "Failure of a barrier rod in Oskarshamn 3", *Proc. 1991 Int. Meeting on LWR Fuel Performance*, Avignon, (1991).
- 4) M.O. Marlowe, *et al.*, "Nuclear fuel cladding localized corrosion", *Proc. ANS Topical Meeting on LWR Fuel Performance*, Orlando, (1985).
- 5) H.U. Zwicky, "Enhanced spacer shadow corrosion on SVEA fuel assemblies in the Leibstadt Nuclear Power Plant", *Proc. 2000 ANS Int. Meeting on LWR Fuel Performance*, Park City, (2000).
- 6) S. Ishimoto, *et al.*, "Improved Zr alloys for high burnup BWR fuel", *Proc. 2006 Int. Meeting on LWR Fuel Performance*, Salamanca, (2006).
- 7) K. Ohira, *et al.*, "Recent experience and development of BWR fuel at NFI", *Proc. 2005 Water Reactor Fuel Performance Meeting*, Kyoto, (2005).
- 8) K. Baur, *et al.*, "Fuel Behaviour in High Performance PWR's", *Proc. Int. Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance*, West Palm Beach, (1994).
- 9) F. Garzarolli, *et al.*, *Behavior and Properties of Zircalloys in Power Reactors: A Short Review of Pertinent Aspects in LWR Fuel*, ASTM STP 1295, (1995).
- 10) M. Peehs, *et al.*, "Out-of-Pile Testing of Iodine Stress Corrosion Cracking in Zircaloy Tubing in Relation to the Pellet-Cladding Interaction Phenomenon", ASTM STP 681, (1979).

著者紹介



栄藤良則(えとう・よしのり)
日本核燃料開発株
(専門分野/関心分野)ジルコニウム合金の
炉内挙動



土内義浩(つちうち・よしひろ)
原子燃料工業株
(専門分野/関心分野)燃料の機械設計, 燃料材料特性

ATOMOS Special

東欧編

世界の原子力事情 第19回

リトアニア—4ヶ国で新原子力発電所建設計画

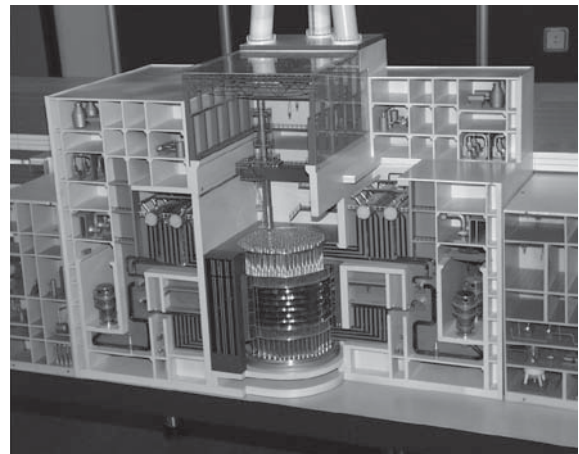
京都大学 杉本 純

バルト三国のうち最も南に位置し、東はベラルーシ、南はポーランドと接するリトアニアは、東北全県を合わせたよりもやや小さい面積を有し、人口は約330万人、首都ヴィリニユスの人口は約55万人である。バルト地域は、昔から欧州文化を受け入れ、西欧的な伝統を有し、反ロシア意識が強いと言われている。1991年9月に旧ソ連邦から独立し、2004年5月には他の東欧諸国とともにEUに加盟している。

リトアニアは、ソ連の中央統制経済のもとで資源や燃料の供給を受け、家電製品や工作機械の製造を分担してきた。また、歴史的に、石油、天然ガスなどの供給をソ連に依存してきたため、エネルギー基盤は脆弱である。国土の大部分が平坦な低地で山が少なく、総発電量で水力発電の割合は1～3%に過ぎないため、電力源を原子力に依存せざるを得ない。ヴィリニユスから北東約130kmのベラルーシとの国境近くにあるイグナリナ原子力発電所には、旧ソ連製の電気出力150万kWの大型原子炉が2基あり、それぞれ83年及び87年に運転を開始した(第1～3図)。それにより、リトアニアの総発電量の約8割が原子力で賄われ、ラトビアやエストニア、ベラルーシなどへ電気を輸出していた。後述するように、2004年末に1号機が閉鎖され電気輸出は激減したが、それでも2号機だけで、2009年でも、原子力が占める割合はフランスの75.2%に対し、リトアニアは76.2%と世界第1位



第2図 同原子力発電所の中央制御室 ©Ignalina NPP



第3図 同発電所の縮小モデル ©Gudowski



第1図 イグナリナ原子力発電所 ©Gudowski

Lithuania—New Nuclear Power Plant Project among Four Countries: Jun SUGIMOTO.

(2011年 10月13日 受理)

を占めた(IAEAによる)。

しかし、この原子炉は黒鉛減速軽水冷却型という86年に大事故を起こした旧ソ連のチェルノブイリ原子炉と同型であるため、安全に対する強い懸念がEU側より示され、発電所の閉鎖への支援とEU加盟を引き替えにすることで合意した。その結果、1号機が2004年末、2号機は2009年末に停止された。2010年からは電気のほとんどを輸入に頼らざるを得ず、電力料金は3割以上の値上げとなった。なお、同原子力発電所の操業停止に関しては、2008年10月に国民投票が行われ、「私は技術的に安全である期間において、また新たな原子力発電所の建設が完了するまでの間、イグナリナ原子力発電所が操業を続行することに賛成します」に対して賛否を求めた。投票では賛成が90%以上を集めたが、投票率が48.4%にと

どまり、規定の50%に満たなかったため無効となった。

このような状況下、ロシアへのエネルギー依存が80%に及ぶとの高まりを危惧する声も上がり、ラトビアやエストニア、ポーランドとともに、2020年をめぐりにイグナリナに隣接するビサギナス(第4図)に新原子炉を2基建設する計画が進められ、2010年から原子力発電所の建設事業の入札に外国企業の参加を呼びかけていた。この計画を巡っては、日立と東芝がそれぞれ米国のメーカーと組んで受注を目指してきたが、今年の7月になってリトアニア政府は日立に優先交渉権を与えることを決めた。日立は米国のゼネラル・エレクトリックとともに最新型の原子炉(ABWR)の建設を提案しており、福島原子力発電所事故を受けて、緊急時の代替電源の確保などの点で一段と安全性を向上させるとしている。建設計画は、約4,000億円規模になる見通しで、日立は年内の正式受注を目指してリトアニア政府側と詰めの協議を進めることとしている。

今回もIAEAに勤務する日本人職員から、かつてヴィリニウス(第5図)に住んでいたリトアニア人の同僚を紹介してもらった。2010年に実施された新原子炉の建設に関する世論調査では、賛成58%、反対28%、意見なしが14%であったが、福島事故により人々の信頼感が揺らいでおり、特に明確な意見を持っていなかった一部の人は新原子炉の建設に否定的な立場を取っているという。しかし、新原子炉に対する一般公衆の肯定的で支持する傾向は福島事故後も保たれているとのこと。最近開催された公聴会では、参加者の66%が新原子炉の建設に関する国民投票の実施に賛成し、12%が政府ないし国会が決定すべきとし、21%が意見なしとなっている。

リトアニア政府は新原子炉プロジェクトを公式にスケジュール通りに進めており、10月中旬にはEUのルールに従って、新原子炉の建設計画をEUに正式に提出している。リトアニアにも緑の党があって原子力に反対していたが、福島事故後でさえも緑の党に特段の動きはないという。大国ロシアの陰でエネルギー自立を模索する小国リトアニアの必死の努力と国民レベルの原子力への理解の進展に感嘆した。

余談であるが、リトアニアといえは忘れてはならない話がある。日本は戦前にカウナス市(当時のリトアニア首都)に領事館を設置していたが、そこにはポーランド等からのユダヤ系避難民に対して日本通過ビザを発給し、多くの命を救ったことで知られる杉原千畝副領事が



第4図 ビサギナスの建設予定地 ©Ridikas



第5図 ヴィリニウス市内の風景 ©Ridikas

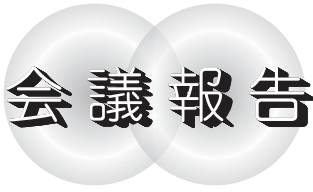
勤務していた。この話は広く知られていることもあり、我が国とリトアニアの関係は現在に至るまで良好である。2001年10月には、杉原生誕百周年を記念し、ヴィリニウス及びカウナスで桜の記念植樹が行われ、式典にアダムクス大統領も出席した。また、ヴィリニウス市内には、杉原の母校、早稲田大学が寄贈した杉原記念碑があり、桜が寄贈された辺り一帯は杉原千畝桜公園と命名されている。2007年5月には天皇・皇后両陛下がヴィリニウスをご訪問され、記念碑もご視察された。リトアニアの新しい原子力発電所の受注で日立が最終的に決定すれば、原子力分野でも両国の友好関係が大いに発展することが期待される。

参考：World Nuclear Association Web.

著者紹介

杉本 純(すぎもと・じゅん)

本誌, 53〔8〕, 589 (2011) 参照.



中国で開催された軽水炉燃料の専門家会合の概要

2011 Water Reactor Fuel Performance Meeting (WRFPM 2011)

2011年9月11～15日(四川省成都, 中国)

中国四川省の成都(Chengdu)で「2011 Water Reactor Fuel Performance Meeting」(以下、WRFPMと称す)が開催された。本国際学会は、アジア地域(日中韓のいずれかが主催で会議名はWRFPM)⇒欧州(欧州原子力学会(ENS)主催で会議名はTopFuel)⇒米国(米国原子力学会(ANS)主催で会議名はLWR Fuel Performance Meeting: LWRFPFM)の持ち回りで毎年開かれている軽水炉燃料に関する学会であり、今回はアジア地域が担当で、中国核学会(CNS)が主催した。なお、アジア地域での担当は、2005年(AESJ主催, 京都(日本)), 2008年(KNS主催, ソウル(韓国))に続いて3回目である。アジア/欧/米の20ヶ国の規制当局・電力・メーカ・大学・研究機関より240名程度が参加した(日本からは10機関から合計20名参加した)。福島第一事故後であったが、基調講演6件、口頭発表90件、ポスター発表49件と盛況であり、活発な議論が交わされた。

今回の学会(WRFPM 2011)は従来、ほとんど参加がなかった中国からの参加が劇的に増加したことが大きな特徴である。また、学会の運営の面からは、中国が本学会を初めて主催することから、AESJとKNSからサポートを行うというアジア地域での協力関係のもとに運営された点も特徴として挙げられる。学会の開催場所である成都是、三国志時代の蜀の首都としても有名であり、市街地には劉備、諸葛亮などを祀った武侯祠があるなど、歴史的にも見るべき場所が多い都市であった。

基調講演では、主催者(CNS)の開会挨拶に続き、IAEA、CNS、日本原子力学会(AESJ)、韓国原子力学会(KNS)、米国原子力学会(ANS)、欧州原子力学会(ENS)の各代表による講演が行われた。講演では、福島第一事故にも触れられたが、各国でその影響が異なった。日本は東大の岩田教授から、福島第一事故発生から現在までの簡単な経緯が紹介され、福島第一事故の引き金となった大震災はあらゆる地域で起こり得ることであり、未来を見据えた議論を国境を越えてするべきとの提案がなされた。中国、韓国では、より一層の安全対策を施しつつ、従来の原子力拡大路線を継続することが表明された。米国では使用済燃料プールがリスク評価の観点で格上げされるなど、リスク評価の考え方に影響が出たことが紹介された。一方、欧州(ENS)は福島第一事故には触れなかったが、様々な原子力政策を持つ国々が集まるため、統一的な見解を示さなかったのではないかと推測した。

技術セッション(口頭発表)とポスターセッションは5

つのトラックで構成され、3日間開催された。発表は革新的な燃料設計、炉心設計技術の向上、核燃料サイクル、基礎科学等、幅広い分野からなされたが、各トラックを見渡しても炉心溶融等の過酷事故に関する研究発表は数件にとどまり、燃料の高燃焼度化・高性能化、解析技術の高度化が主流であった。

多くの発表がなされた例として、次の(1)～(4)が挙げられる。

(1)フレットング事象：PWR(加圧水型原子炉)燃料で主に問題となる事象であり、依然としてPWR燃料の破損原因で大きな割合を占めている。振動の周期と冷却材の流速との関係等が実験的、解析的に評価され、それらを反映させた燃料設計の変更が各燃料メーカから発表された。解析技術の高度化、高速化が著しく、より精密な検証が行えるように改良が加えられている。

(2)チャンネル・燃料集合体の曲り事象：BWR(沸騰水型原子炉)ではチャンネルの曲りが、PWRでは燃料集合体の曲りが装荷上の問題となる事象である。チャンネル曲りは、中性子束の傾斜による照射成長量の差に加えて、シャドー腐食(炉内で異種金属が対向した場合に、電気化学的に卑な金属側の対向部が異常に腐食する現象)等により制御棒対向面と非対向面で腐食・水素吸収量に大きな差が生じて曲る事象であり、短期、長期での対策が各燃料メーカによって行われている。各社とも低水素吸収材料への変更、炉内での配置位置の見直しなどの短期的な対策はほぼ終わり、新材料の開発などの長期的な対策に取り組んでいる。燃料集合体の曲りは設計、製造の面からの改良が加えられ、曲りを抑制する取組みが紹介された。

(3)被覆管材料の開発：ジルコニウム合金では韓国のHANA合金の照射後試験結果の紹介や、目新しいところでは上海大学からN18合金(Sn-Nb-Fe-Cr)合金の開発など、各国から基礎研究から照射後試験までの広い範囲で発表がなされた。この分野でも、中国の技術的な追い上げが見込まれる。

(4)RIA(反応度事故)・LOCA(冷却材喪失事故)：米国の新LOCA基準および暫定RIA基準に関する発表が多く、新基準への適合性などが幅広く議論された。

次回はENS主催でTopFuel 2012として英国マンチェスターで、次々回はANS主催でLWRFPFM 2013として米国ノースカロライナ州シャーロットで開催の予定。

(日本核燃料開発(株)・坂本 寛, 日本原子力研究開発機構・杉山智之, 2011年10月14日記)

「分かりやすい」「正確な」情報が重要

原子カムラとの批判に対する学会からの発信にも期待

(10月号の Web アンケート結果)

「原子力学会誌」10月号に対して寄せられた Web アンケートの結果をご紹介します。今回は91名の方から、回答がありました。

1. 高く評価された記事

Web アンケートでは、各記事の内容および書き方について、それぞれ5段階で評価していただいています。10月号で高く評価された記事について、「内容」、「書き方」に分けてそれぞれ上位4件をご紹介します。

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	解説	福島原発事故と放射線健康リスク	4.35
2	時論	緊急被ばく医療から健康リスク評価へ	4.33
3	巻頭言	本音の議論を	4.13
3	連載	東日本の巨大地震に学ぶ(1) プレート収束域にできた日本列島	4.13

第2表 「書き方」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (書き方)
1	時論	緊急被ばく医療から健康リスク評価へ	4.17
2	時論	南相馬の放射線教育	4.13
3	巻頭言	本音の議論を	4.00
3	解説	原子力の研究開発機関におけるメンタルヘルス	4.00

今月号は巻頭言、時論が上位を占めています。

2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 今後、掲載を希望する記事として、放射線の何が、何を傷つけ破壊し、その結果どういう障害がでるのかについて、専門的解説を希望する。
- (2) 今後、掲載を希望する記事として、誰でもできる除染のしかた、How to 除染のような素人でもできる除染方法の記事をお願いしたい。
- (3) 連載「東日本の巨大地震に学ぶ」に関して、シリーズものとして今後に期待している。

3. 編集委員会からの回答

本年10月号より半年間、ジュンク堂書店池袋本店、内幸町プレスセンター店で、原子力学会誌を店頭で陳列販売することになりました。一般の方にも興味を持って読んでいただけることを期待しています。

学会誌ではこれからも、会員の皆様により質の高い情報を送りたいと考えております。記事に対する評価はもとより、さまざまな提案もぜひ、Web アンケートでお寄せ下さるようお願いいたします。

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

鳴らせなかった警鐘

NHK 報道局 大崎 要一郎

9月19日から北九州市で開かれた日本原子力学会の秋の大会取材した。初日のシンポジウムを始め、多くの会場で東京電力福島第一原子力発電所事故をテーマに議論が交わされ、NHK入局以来、10年近く原子力を取材してきた私にとっても、事故の背景となった原子力を取り巻く事情について考えさせられるとともに、なぜもっと原子力の課題を適切に指摘してこられなかったのかと、悔恨の情を強くさせられた。

発表では、欧米におけるシビアアクシデント対策の先進事例を引き合いに、日本の安全規制や安全対策の問題点が次々に指摘された。たとえば炉心損傷時にも放射性物質をできるだけ出さないためのフィルター付きベントの設置や、近くに発電用ダムを備えるなど徹底した電源の多様化、それにテロ対策としてのアクシデントマネジメントの強化など。TMI事故以降、世界的にシビアアクシデント対策の必要性が認識され、チェルノブイリ事故の後には順次実施に移されて、いまや規制にも取り入れられているとのことだった。こうした世界の取り組みを横目に、日本の「専門家」は、いずれも日本は事情が違ふと言いつけてきたという。ベントにフィルターが必要になるような事態は確率的にほぼ起きないとか、電源の信頼性は非常に高いとか、テロの脅威は切迫していないといった調子だ。

そうした事実を、私は知らなかった。ここ数年、多くのシンポジウムや学会発表の場に足を運んできたが、少なくとも私の耳には、安全対策で日本が遅れをとっているという事情は聞こえてこなかった。日本の規制制度が時代遅れだとか、稼働率が著しく低く、集団被ばく線量は大きいといった個別の課題は知っていたが、重大な事故につながるような事態だとは思っていなかった。

安全を妄信していたわけではない。確率論的な事故解析や、事故時の防災対策などについては、しばしば専門家にも取材して、いざというときに備えようとしていた。しかし同時に、設計上の配慮がいかに厳重になされていて、事故の確率が低く抑えられているかといった説明に接すると、事故が明日にも起きるのでは

という認識には至らなかった。私は原発の潜在的な危険性について少しは知った気になりながら、問題の本質を突き詰められなかったのだ。

社内の他部署からは「危険性を指摘できなかった理由は取材不足であり、原発報道の敗北だ」と言われた。言い訳はできない。津波が原因かどうかは別として、共通の要因で一度に多くの機器が壊れればどうなるか、考えるべきだった。現に耐震の議論は活発だったし、慎重派の方々からは、そうした重大な事態こそ考えなければならぬと指摘されることもしばしばだった。しかし私には過酷事故の発生を現実的に想像し、取材によって課題を把握して、警鐘を鳴らすことができなかった。

今回の大会では事故を防ぎ得なかった背景として、想像力の欠如や、自由に物が言い出せない空気、島国ゆえの均一的な価値観への安住といった多くの指摘が出された。だが大会全体を通して、客観的な指摘に終始し、この事故を一人ひとりがどう受け止めたのかが伝わってこなかったという印象だ。

ここからは私の取材実感だが、原子力関係者の多くは、自らが人生を傾けてきた技術が社会に重大な損失を与えたことに、深く心を痛めているのだと思う。一方で、「放射線による急性障害では一人も死んでいないではないか」とか、「津波さえ想定できていれば問題はなかった」といった声が聞こえてくるのも事実だ。

認識の是非を論じるつもりはないが、「こんな事故は二度と起こしてはならない」という意識が希薄になることが心配だ。私はそれを許さないために何ができるのだろうか。自問する日々が続いている。

(2011年10月28日 記)



大崎要一郎(おおさき・よういちろう)

NHK 報道局科学文化部記者

2003年入局。佐賀放送局を経て、2008年から現職。原子力・核問題を担当。東京大学教育学部卒