

巻頭言

- 1 内部被ばくゼロと震災関連死急増のジレンマ 中川恵一

時論

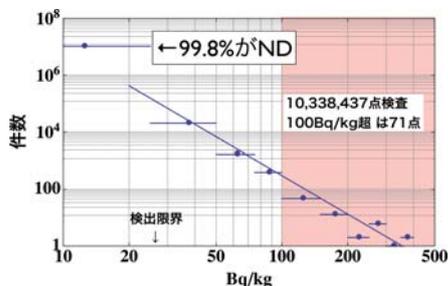
- 2 世界が求める「原子力環境安全産業」の創出を

政府は、我が国の原子力技術者が新たな「志と使命感」を抱くことのできる「国際的産業」を育成するべきである。 田坂広志

講演

- 30 福島の内被ばくと外被ばくー福島のリングテール

福島県に住む人たちの内部被ばく量を測定したところ、平均的な体内放射性セシウム量は、冷戦時代よりも少ないことが明らかになった。内部被ばく・外部被ばくの実測データを紹介し、今後を考える。 早野龍五



H24年度の福島県産米の全量全袋検査結果 (両対数グラフで表示)

解説シリーズ

高レベル放射性廃棄物の可逆性と回収可能性 (3)

- 43 R&R 国際会議内容の紹介(その1)

人文・社会科学分野の学者・専門家は、処分事業の実施段階における可逆性・回収可能性をどう見ているのか。今回は2010年の国際会議で発表された内容を紹介する。 田辺博三

表紙の絵(洋画)「群遊」 制作者 神保孝夫

【制作者より】雌雄の孔雀が自由に遊んでいます。突然左の鶏舎でシャモの争いが始まりました。おどろいたオスは振り向き、そして走り寄ろうとする。メスは素知らぬ顔だ。そんな日常の動物園の情景を黄・ピンク・紫の色調で力強くまとめてみました。

第44回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

特別寄稿

- 10 今後の原子力政策における重要課題

原子力界が当面、取り組むべき重要課題は原子力災害からの復興であり、事故炉の安定化である。また、国民と誠実に対話を続ける努力が必要なのは、言うまでもない。 近藤駿介

解説

- 15 「低線量放射線を超えて」に込めたる想いー福島は第二のチェルノブイリにはならない

過剰にリスクを言って怖がらせる方が、免疫力を下げてがんリスクをあげる。毎日発生する変異(がん)細胞の大多数は、免疫細胞が除去している。不安やストレスで免疫力が低下することを、過小に評価すべきではない。 宇野賀津子

解説

- 49 チェルノブイリ NPP 事故によるコンクリート構造物の状況調査ー熔融燃料とコンクリートとの反応の構造物への影響

チェルノブイリでは約200tの核燃料が溶解し、炉の下にある鉄筋コンクリート床版が1600°Cに達する高温によって侵食された。しかし、これがコアキャッチャーのような役割を果たし、事故の拡大を防いだ。 青柳征夫



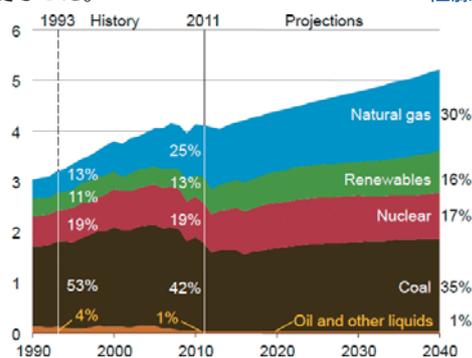
コリウム・コンクリート反応によるコンクリートの侵食実験のもよう (Argonne National Lab, USA)

解説シリーズ

世界の原子力事情 (3)

19 米国・カナダの原子力開発の動向

米国やカナダは、福島原発事故以降も原子力を引き続き利用していく方針である。一方、シェールガス革命と呼ばれる状況は原子力発電所の新規建設の環境を一変させた。佐藤一憲



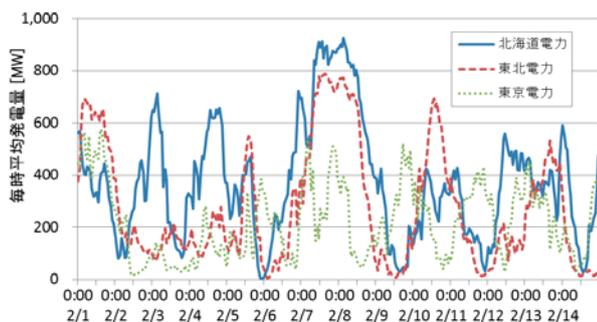
米国におけるエネルギー源別の発電量の推移と予測 (米国エネルギー情報局資料より抜粋)

解説シリーズ

出力が変動する再生可能エネルギー発電の大量導入と電力システムの進化 (1)

24 新たな課題と柔軟性向上の考え方

このシリーズ解説では、再生可能エネルギーの導入を含めた将来の電力システムの課題と対策を3回に分けて紹介する。今回は、大量導入した場合に発生するシステムの変動増加と柔軟性の低下と、それに対応する新技術の可能性について解説する。荻本和彦



3電力会社管内の風力発電による毎時平均発電量の例

4 NEWS

- 帰還後の被ばく線量管理は個人線量に
- 4号機から燃料を取り出し
- 原燃のガラス固化技術開発施設が竣工
- IAEA, 除染で現実的な対応を助言
- 原産協会, 「信頼回復」テーマにシンポ
- 原子力委の政策大綱は廃止へ
- 海外ニュース

解説シリーズ

モデリング・シミュレーションの高度化 (1)

37 我が国における国産コード開発プロジェクトの紹介

原子力施設プラントのモデリング・シミュレーション技術を開発し、その成果を反映した解析コードやソフトウェア開発と維持・活用体制について検討を行った。その検討結果を、シリーズで紹介する。最初に国内のソフトウェア等に関するニーズ調査結果とモデリング・シミュレーション高度化技術開発対象の検討結果について述べる。松本昌昭

会議報告

54 福島事故後の燃料研究・開発の新しい動き LWRFP2013 坂本 寛

ジャーナリストの視点

55 教訓にたどり着くためにも、真摯な研究と発信を 木村俊介

- 36 From Editors
- 42 新刊紹介「原子力発電システムのリスク評価と安全解析」 平野光将
- 56 会報 原子力関係会議案内, 共催行事, 平成26年度フェロー候補推薦募集, 英文論文誌 (Vol.51, No.1) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

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

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

内部被ばくゼロと震災関連死急増のジレンマ

巻頭言



東京大学医学部放射線医学教室准教授

中川 恵一（なかがわ・けいいち）

東京大学医学部医学科卒業後、社会保険中央総合病院、東京大学医学部専任講師を経て、2002年から現職。著書は「放射線医が語る 被ばくと発がんの真実」など多数。毎日新聞や週刊誌でコラムを連載中。

もともと、原子力にも電力業界にも何ら関係を持ったこともなかった私が、3.11以降は「御用学者」になり、自宅にまで活動家から電話が入る始末となった。何も、原子力業界を擁護するつもりなどはなかった。ただ、放射線影響やがんを知る臨床医（放射線治療医）として、事故後の政府や自治体の対応を座視することができず、思わず声を上げてしまっただけである。

現実には、一般住民の被ばく量は予想以上に少なく、とりわけ内部被ばくは驚くほど低く抑えられている。これは正直、「勝負あった！」と言えるレベルであり、「福島勝利」と言えるものである。たとえば、南相馬市内の小中学校に通う全ての生徒約3,000人を対象に行ったホールボディカウンターによる測定の結果、セシウムによる被ばく量は全員が検出限界以下であることが分かっている。現状の日常生活での慢性的な内部被ばくが非常に低く抑えられており、かつそれが維持されているわけである。南相馬市の小学生の99.9%、中学生の96.6%が受診しているため、ほぼ悉皆調査となっており、気をつけている人しか検査に来ていないといったバイアスも存在しない。外部被ばくは内部被ばくを上回るが、安全側に配慮したとしても、年間被ばく量が5ミリシーベルトを超える一般住民はほとんどないと言える。（だからといって、事故を軽視するつもりは毛頭ない。事故そのものは断じて許せるものではない）

一方、私が支援を続ける飯館村をはじめ、すでに人口200万人を割り込んだ福島で、15万人もの県民が避難を続けている。（福島の現状は避難ではなく、正確には「移転」）そして、避難に伴う「震災関連死」は県内ですでに1,500人以上になり地震や津波による直接的な死亡を超える勢いで、その数は増加の一途をたどっている。

私たち「チーム中川」は、飯館村に月2回程度入って支援を続けてきたが、避難生活は過酷であり、飯館村の村民約1,000名を対象として福島医大が行った健康調査では、糖尿病と高血圧が統計的有意差をもって増加していることが明らかになっている。とくに、学童の肥満や学力の低下が顕著であり、試練は長期戦になる。糖尿病患者ではがん罹患リスクが20%（肝臓がんや膵臓がんでは2倍！）も高くなることが分かっているから、「がんを避けるために避難をした結果、発がんが増える」という最悪のシナリオと言える。もちろん、それは被ばくによるものだと報道される可能性が高い。

リスクの大小を測る「モノサシ」を持つことが必要であることは、9.11同時多発テロ後の米国で、テロを心配して航空機による移動を自動車に切り替えたため、自動車事故が急増したことで明らかである。しかし、福島では、被ばくのリスクを喫煙や飲酒といった生活習慣と比較することはタブーとされている。しかし、医学的には、実効線量100ミリシーベルトは、発がんリスクとしては、野菜不足や受動喫煙レベルである。（喫煙は2シーベルト並のリスク！）そして、日頃の生活習慣も、被ばくのリスクも、避難生活を続けるデメリットも、一人ひとりが背負わねばならないものである。リスクも被ばくも「量」という認識は非常に重要である。

この8月からは、チームの一人が松川仮設で暮らして、昼間は飯館村の健康福祉課で勤務しているが、現在、核心は、放射線被ばくから、経済や感情の問題にシフトしている。一方、飯館村民はまだまだ収まらない怒りを抱いており、この怒りや不信がリスク認知にも大きな影響を与えることが我々の調査でも明らかになっている。つくづく、原発事故は起こしてはならないと感じるが、この経験をきちんとドキュメントすることも必須であろう。

（2013年10月31日記）



世界が求める「原子力環境安全産業」の創出を



田坂 広志 (たさか・ひろし)

多摩大学大学院教授

74年東京大学工学部原子力工学科卒業。81年同大学院修了。工学博士(核燃料サイクルの環境影響評価研究)。米国パシフィックノースウェスト国立研究所客員研究員等を経て現職。ユッカマウンテン計画にも参画。11年、内閣官房参与として原発事故対策に携わる。

安倍政権が掲げるべき「原子力環境安全産業」の政策

昨年来、福島第一原発の汚染水漏洩問題が世界のメディアの注目を集め、近隣諸国は、海洋汚染や水産物汚染への懸念を表明している。

これに対して、昨年9月8日、安倍総理はIOC総会において、福島第一原発の汚染水問題について、「状況はコントロールされている」と宣言するなど、国際社会の信頼を獲得するべく、問題解決への日本政府の強い姿勢をアピールした。

この未曾有の難題に直面した状況での安倍総理のリーダーシップは多としたいが、もし安倍政権が、真に国際社会の信頼を獲得したいのであれば、ただ「汚染はこれ以上拡げない」という対症療法的な政策だけでは限界がある。安倍政権が掲げるべきは、対症療法的な政策を超え、根本療法的な政策であろう。

では、根本療法的な政策とは何か。

それは、「原子力環境安全産業」と呼ぶべき新たな産業を、国の総力を挙げて「国際的産業」として育成するという政策である。

この「原子力環境安全産業」とは、従来の原子力産業の「負の側面」を払拭することを目的とする新たな産業であるが、それは、原子力産業が持つリスクから国民の生命と安全、健康と安心を守るための新たな産業であり、次の「五つの産業」によって構成される産業である。

第一は、「安全操業産業」と呼ぶべき産業。これは、原発と原子力施設の操業の「安全性」をさらに高める産業であり、例えば、安全対策技術を提供する産業や人材育成訓練などを行う産業である。

第二は、「安全解体産業」と呼ぶべき産業。これは、原発と原子力施設の「廃炉・解体」を安全に実現する産業であり、例えば、汚染計測技術や遠隔操作技術、ロボット技術や飛散防止技術などを提供する産業である。

第三は、「安全処分産業」と呼ぶべき産業。これは、原発や原子力施設とその廃炉・解体から発生する放射性廃

棄物を安全に処理・貯蔵・処分する産業であり、例えば、廃棄物の減容や固化、輸送や保管、貯蔵・処分施設の建設や操業、その安全評価などを行う産業である。

第四は、「環境浄化産業」と呼ぶべき産業。これは、放射性物質によって汚染された環境を除染、修復、浄化する産業であり、例えば、環境放射能の測定技術や分析技術、土壌除染技術や土壌固化技術、さらには固化土壌再利用技術などを提供する産業である。

第五は、「環境安心産業」と呼ぶべき産業。これは、放射性物質に対する国民の「不安」を取り除き、「安心」して暮らせる生活を実現する産業であり、例えば、環境モニタリングを行う産業、環境放射能情報を提供する産業、放射能についての教育啓蒙を行う産業などである。

では、なぜ、この「原子力環境安全産業」を育成することが、我が国にとって、極めて重要な政策になるのか。

それを、以下に「三つの理由」として述べよう。

「脱原発依存」に向かうとしても必ず求められる産業

第一の理由は、この「原子力環境安全産業」は、今後、日本のエネルギー政策が、原発維持に向かうとしても、脱原発依存に向かうとしても、必ず求められる産業だからである。

改めて言うまでもなく、政府が「脱原発依存」の政策を宣言しても、それによって、ただちに、すべての原発と原子力施設が無くなるわけではない。現存する原発や原子力施設の廃炉や解体を速やかに進めていくとしても、やはり何十年もの歳月を要する。さらに、その廃炉や解体の作業から膨大な放射性廃棄物が発生することを忘れてはならない。また、たとえすべての原発をいまずぐ止めても、すでに我が国には、一万七千トンの使用済み核燃料が、高レベル放射性廃棄物換算で二万四千本相当、存在しており、この使用済み核燃料や高レベル放射性廃棄物を、安全に処理・貯蔵・処分していかなければならない。

一方、福島第一原発事故によってメルトダウンを起こした三基の原子炉は、やはり数十年かけて廃炉にしていかなければならない。この廃炉作業は、「極めて厄介な高レベル放射性廃棄物の塊」を解体する作業でもあり、通常の廃炉技術とは全く異なった新たな技術開発が求められるものである。さらに、この原発事故の結果、周辺環境中には、大量の放射性物質が放出されており、これらの除染作業も、今後、極めて長期間にわたって続けなければならない。すなわち、福島第一原発の事故対策と廃炉、福島地域の除染作業の結果発生する膨大な放射性廃棄物についても、これらを安全に処理・貯蔵・処分しなければならないのである。また、この事故の結果、福島県周辺で生産される農水産物や食料品については、社会的不安を解決するために、長期にわたる適切なモニタリングと放射能検査、科学的・医学的説明を通じて、多くの国民の安全と安心を確保していかなければならない。

これらのことを考えるならば、「原子力環境安全産業」は、今後、日本のエネルギー政策が、どのような方向に向かうとしても、必ず求められる産業になっていく。

そして、安倍政権は、この産業を、我が国が直面する問題を解決するための産業としてだけでなく、世界が直面する問題を解決するための「国際的産業」として育成していかなければならない。

原発事故と放射性廃棄物のリスクは「世界的リスク」

なぜなら、世界全体を見渡すならば、これから中国やベトナムを始め、多くの新興国が「原発建設ラッシュ」に向かうからである。その結果、「原発事故と放射性廃棄物のリスク」は、たとえ日本だけが「脱原発依存」に向かっても、決して避けられない地球規模の問題として国際社会の前に立ちはだかるからである。

実際、もし中国で福島第一原発のような事故が起こったときには、それは中国国内での放射能汚染に留まらない。日本は中国から偏西風に乗って黄砂が飛んでくる国であり、同じ風に乗って、日本にも放射性物質が飛んでくることは明らかであろう。同様に、韓国が日本海沿岸に建設している原発も、同様のリスクがある。それは、佐賀県の玄海原発が事故を起こしたときと同じような環境汚染のリスクがある。さらに言えば、インドや中東諸国など、日本から遠く離れた国であっても、「一つの国での原発事故が、地球規模での環境汚染をもたらす」というリスクは、世界的問題として存在している。

従って、日本として、この「世界的な原発リスク」に処するためには、二つの政策を採らねばならない。

一つは、世界中の原発保有国が参加して、原発のリスクを最小化するための「技術やノウハウ」「人材や組織」「制度や文化」を学び合い、不断の改善努力を行う「国際的な原発安全保障体制」を確立することである。

そして、もう一つは、原発のリスクを最小化するための「技術やシステム」「ノウハウやサービス」を提供する「国際的な原子力環境安全産業」を育成することである。

もとより、日本は、前者の「原発安全保障体制」についても、世界各国に対して提唱・主導していく責任があるが、後者の「原子力環境安全産業」についても、国の総力を挙げて世界最先端の技術やノウハウを育てていくべきであろう。具体的には、世界最高水準の「原発安全対策技術」や「廃炉・解体技術」、「放射性廃棄物の処理・処分技術」や「環境モニタリング技術」、さらには、「環境除染技術」などを開発することであり、それらの技術を、これから原発導入に向かう途上国を始めとする世界各国に提供していくことである。

これが「原子力環境安全産業」を育成すべき、第二の理由である。

我が国の原子力技術者に新たな「志と使命感」を

「原子力環境安全産業」を国際的産業に育成するという政策が求められる第三の理由は、我が国の原子力技術者が、新たな「志と使命感」を抱き、原子力の仕事に「働き甲斐」を感じられるようにする必要があるからである。

実際、これまで原子力産業が育成してきた優秀な技術者の中には、今回の福島第一原発事故によって、将来への夢や希望を失い、働き甲斐を感じられなくなり、他産業へ転職したり、海外の原子力産業へ流出していく人材も増えている。この傾向が続くならば、我が国の原子力産業は、技術やノウハウの継承が難しくなり、原発の安全稼働はもとより、今後の廃炉や除染、放射性廃棄物の処理・処分などの事業も、円滑に進めていくことが極めて難しくなる。この「原子力技術者の流出」という問題は、政府が「脱原発依存」の政策を進めるとしても、その大きな障害になってしまうことは明らかである。

逆に、我が国が、世界でも最も高度な技術とノウハウを持つ「原子力環境安全産業」を育てることをめざすならば、これまで永年にわたって原子力産業が育ててきた優秀な技術者が、未来に向かって新たな「志と使命感」を抱き、「働き甲斐」を見出すことができるだろう。

この日本が「脱原発依存」をめざすとしても、その道のりは、数十年を超える歳月を要する極めて長いものである。そして、世界全体が「脱原発依存」を続ける限り、その安全性を確保するための「原子力環境安全産業」は、文字通り「歴史的使命」を持った国際的産業である。

安倍政権は、福島第一原発事故を起こした我が国の、その「歴史的使命」を自覚し、数十年の歳月をかけても世界最高の技術と人材を誇る「原子力環境安全産業」を育成していくべきであろう。

(2013年10月30日 記)

[tasaka@hiroshitasaka.jp]



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。

帰還後の被ばく線量管理は個人線量を採用

原子力規制委員会は11月20日の会合で、福島第一原子力発電所の事故によって避難した住民の帰還に際し、これまでの空間線量率から推定される被ばく線量ではなく個人線量を用いることを正式に決めた。空間線量率に比べ個人線量はより正確性が高く、空間線量率の数分の一になる場合が多い。

また規制委では住民帰還の判断のためにロードマップを策定することを決めた。具体的には住民の個人線量の

把握・管理のほかに、住民の被ばく線量等の提言に資する対策や放射線に対する健康不安に向き合った対策、放射線に対する健康不安に向き合ってわかりやすく応えるリスクコミュニケーション対策などを盛り込む。

さらに帰還の選択をする住民を総合的に支援する仕組みとして、健康管理策などの助言する相談員の配置や、相談員の活動を支援する拠点を整備する。

（原子力学会編集委員会）

4号機から燃料を取り出し

東京電力は11月18日、福島第一原子力発電所4号機の使用済み燃料プールから燃料集合体を取り出す作業を始めた。4号機には1,533体の使用済み燃料があるが、同社ではまず、未使用の燃料22体をキャスクに移動する作業を開始。19日には22体すべてをキャスクに収納。21日にはキャスクをクレーンで吊上げて地上に待機しているトレーラーに載せ、共用プールまで運ん

だ。また29日には、使用済み燃料22体を共用プールの建屋へ移動した。これにより、4号機プールに残っている燃料は未使用のものが180体、使用済みのものが1,489体となった。すべての作業が終わるのは来年12月の見通し。

（同）

日本原燃のガラス固化技術開発施設が竣工

日本原燃のガラス固化技術開発施設が10月15日に竣工した。日本原燃の六ヶ所再処理事業所敷地内に建設されたもの。今後、実機と同じ大きさの改良型モックアップ試験炉を設置し、模擬廃液を使って改良炉の性能確認を中心とした試験を実施し、再処理工場竣工後のガラス固化技術のさらなる信頼性向上を図ることにしている。

ガラス固化技術開発施設は六ヶ所再処理事業敷地内で11年より建設が進められており、再処理工場竣工後のガラス固化技術のさらなる信頼性向上を図るために、実規模試験での検証、遠隔操作による保守技術の開発・検証などを実施することを目的としている。東海村にもモックアップ施設(KMOC)があるが、六ヶ所村にこの

ような機能を集約し、溶融技術、遠隔保守技術、解体技術といったガラス固化技術の研究開発拠点として活用していく考えだ。

施設内には既に実機と同じ大きさのモックアップ試験炉の据付けも完了しており、11月以降は模擬廃液を使って、これまで開発を進めてきた改良炉の性能確認を中心とした試験を実施する予定。

六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉についてはB系列に続き、A系列におけるガラス固化試験が5月に終了し、使用前検査に向け必要な確認すべき試験はすべて終了している。

（資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ）

IAEA、除染で現実的な対応を助言

除染活動の支援や助言を行うため10月14日に来日した国際原子力機関(IAEA)の調査団は21日に環境大臣に中間報告書を提出し、レンティッホ団長が都内で会

見した。

レンティッホ団長は会見で、日本政府の掲げる除染の長期目標である年間追加被ばく線量1ミリシーベルト

について「必ずしもこだわる必要はない」との認識を示した。また「国際的な基準である年間1～20ミリシーベルトの範囲内で、利益と負担のバランスを考え、地域住民の合意を得て決めるべきだ」と現実的な対応をはかるよう助言した。

提出されたIAEAの報告書では「追加個人線量が長期の目標であり、例えば除染活動のみによって、短期間に達成しうるものではないことを説明する更なる努力をなすべき」とし、「この戦略の便益については、生活環境の向上のために不可欠なインフラの復旧のために資源の再

配分を可能としうるものであり、人々に入念に情報伝達されるべきである」と、地元住民等にていねいに説明をする必要があるとした。IAEAは、この難題に協力する姿勢も示した。また報告書は「日本は環境回復活動において十分な進捗を達成している」と評価し、「復旧及び復興と調整して実施される環境回復活動が、良好に進捗していることを確認した」と、総じて日本の取組みが成果を上げつつあるとの認識を示した。

IAEAはこの調査に基づいてさらに検討を進め、年内にも最終報告書を日本政府に提出する予定。

原産協会、「信頼回復」テーマに安全シンポ

日本原子力産業協会は10月22日、国民の信頼回復に向けた取組みをテーマに安全シンポジウムを東京都内で開催した。今回が2回目の開催で、2件の基調講演と内外の識者によるパネル討論が行われた。テーマは「原子力安全—国民の信頼回復につなげるには」。

基調講演では、前の国会事故調査委員会の委員で社会システムデザイナーの横山禎徳氏が、国会事故調という「人災」とは何かについて、社会システムの視点から課題を述べた。同氏は事故解明が専門家であるエンジニアの技術ロジック中心で縦割りの専門家の議論となっていることや、原子力発電の再稼働について国民合意のステップが不明確などと問題点を指摘し、国民共通の「考える

枠組み」を社会システムの視点で構築することが必要だとした。そのうえで同氏は国民が情報不足のままでは、日本の原子力システムに何の抜本的な改善も起こらない可能性があるとして警告し、政府が「文化」風土の中で機能する原子力発電のシステムを早急に作っていくことを求めた。

また、政策立案プロセスにおける科学的、技術的、工学的視点について基調講演した前英国議会科学技術部ディレクターのデビッド・コープ氏は、英国でも専門家の信頼向上に向け、現在も議論や取組みが続いているなどとし、政治家とその意思決定に助言する専門家の信頼性が政策決定に重要だと述べた。

原子力委の見直し基本方針取りまとめ、政策大綱は廃止へ

原子力委員会の在り方見直しのための第7回有識者会議が10月24日に開催され、「原子力政策大綱」を廃止することなどを含む見直し基本方針が了承された。

原子力政策大綱は長期計画時代を合わせて50年以上にわたり原子力政策の基本方針となってきたが、エネルギー基本計画や科学技術基本計画がある中での存在意義に疑問の声が多く出ていた。今回の見直し基本方針で原

子力政策については「基本計画での方向性に沿って必要に応じて検討」と明示した。

議論では、国際原子力機関などに対して日本側の受け手がワンストップで恒常的に対応する窓口が必要であり、原子力を担当する大臣を設置すべきとの声もあった。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【米国】

CB & I社が中国原発建設で投資会社と合併

米国のエンジニアリング・建設企業であるシカゴ・ブリッジ&アイアン(CB & I)社は10月1日、中国電力

投資集団(CPI)の発電エンジニアリング子会社と共同で中国に原子力発電所を建設するため、合併事業体を創設すると発表した。中国が中長期的な原子力発電開発計画で2020年までに新たに約30基の原子炉新設を検討していることから、次世代原子炉の建設市場における優位な立場を強化していくため、積極的に参加していく考え。

CB & I社は今年2月、エンジニアリング企業最大手のショー・グループを合併吸収。ショーはウェスチングハウス(WH)社と組んで米国で数十年ぶりの新設計画となったボーグル増設計画やV・Cサマー建設計画でエンジニアリング・資材調達・建設(EPC)契約を獲得していることから、CB & I社は世界でも最大規模のエンジニアリング会社となった。

一方、CPIは、中国の大手電力会社であるとともに、同国で原子力発電所の所有・運転を許された3つの電力会社の一つ。現在、山東省・海陽におけるWH社製AP1000の建設計画にも出資している。CB & I社は中国では同計画のほかに、浙江省・三門のAP1000建設計画にもエンジニアリングや資機材調達、起動、情報管理システム、プロジェクト管理サービスを提供している。

CPIとの今後の協力については、CPIが中国で計画・投資する新規原子力発電所のエンジニアリングや資機材調達のほかに、建設管理、起動、プロジェクト管理および技術支援サービスなどをカバーする計画だ。

【カナダ】

ダーリントン増設計画が頓挫

カナダ原子力協会は10月15日、オンタリオ州政府が州内のダーリントン原発サイトにおける原子炉2基の増設計画を保留すると発表した件について、産業界としての失望はあるものの、同サイト既存の4基とブルース原子力発電所の6基における改修を支援するという州政府の計画を良いニュースとして受け止めたいとの考えを表明した。

カナダ原子力安全委員会は昨年8月、ダーリントン原発サイトで2018年以降に2基・約200万kWを運開させるというオンタリオ・パワー・ジェネレーション(OPG)社の増設計画に対し、同国で四半世紀ぶりというサイト準備許可(SPL)を発給。ウェスチングハウス社とSNCラバリン社がOPG社との合意に基づき、それぞれ詳細な建設プランを今年6月に提出したばかりだった。

現地の報道によると、オンタリオ州のK・ウィン首相は10日、「州内では電力需要を賄う新たな発電設備を必要としない」と明言。同州のエネルギー大臣も「将来的に再考する可能性はあるが、現時点で原子炉新設への投資は不必要だ」と述べる一方、2016年からダーリントン1～4号機の改修に取りかかるとの政府計画を明らかにしたと伝えられている。

【英国】

マグノックス社、ウィルファ 1号機の操業延長申請

英国でウィルファ原子力発電所を操業するマグノックス社は10月9日、世界で唯一の旧型ガス冷却(マグノックス)炉である1号機(56.5万kW)の操業を15か月延長する申請書を原子力規制局(ONR)に提出した。

この申請は、10年毎にONRへの提出が義務付けられている定期安全審査報告書(PSR)に盛り込まれたもの。マグノックス社は昨年4月に2号機を永久閉鎖したが、その理由はマグノックス合金で被覆した専用燃料がすでに製造されておらず、2号機で部分的に使用した燃料を1号機に流用し、同炉で出来るだけ長期の運転を実現するためだった。

この手続きは「原子炉内の照射化燃料交換(IRX)」と呼ばれ、同型のオールドベリー原発ですでに実績がある。これにより、ウィルファ1号機の運転は認可期限の2014年9月末まで保証されたが、今回の申請が承認されれば15年12月末まで営業運転を継続することが可能になる。

ヒンクリー計画の買い取り価格で 合意、25年ぶりの新設計画が具体化

英国政府は10月21日、サマセット州でヒンクリーポイントC(HPC)原子力発電所の建設計画を進めるフランス電力(EDF)グループと、同計画の投資契約に関する主要項目で商業合意に達したと発表した。同発電所の発電電力を政府が買い取る際の行使価格が決定したものの。今後、この投資契約を欧州委員会(EC)が国家補助規則に照らし合わせて承認し、同計画に新たに加わった中国の2社を含めて建設・運営会社の株主が最終的な投資判断を下せば、同国で25年ぶりのサイト許可を得た原子炉新設計画が2023年の運開を目指して具体的に動き出すことになる。

この合意内容は同日、エネルギー・気候変動省(DECC)のE・ディビー大臣が議会下院に詳細を説明した。政府は昨年11月、原子力などのエネルギー開発プロジェクトで不確定要素を減じ、多くの投資家を惹き付けるため、低炭素電源からの電力を固定価格で差金決済(CfDs)する制度を電力市場改革法案に盛り込んでおり、HPCは同制度の下で建設される最初の原発となる。

【フランス】

ITER 計画で仏独企業と大規模契約

国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画を推進する欧州連合 (EU) の担当組織「フュージョン・フォー・エナジー (F4E)」は 10 月 29 日、トカマク複合施設の建屋設備について仏独の企業連合と総額 5 億 3 千万ユーロ (約 700 億円) の契約を締結したと発表した。フランス・南部カダラッシュの ITER 建設サイトでは現在、免震ピットの補強作業中。2020 年の運転開始を目指して、年内にもトカマク複合施設の土台となる同ピットでコンクリート打設が行われる見通しだ。

ITER 計画には日本と EU、ロシア、米、韓、中、印の 7 極が参加しており、2005 年に建設サイトをカダラッシュに決定。42 ヘクタールの敷地内に 39 の関連建屋を建設予定で、トカマク型実験炉の格納建屋と診断棟、およびトリチウム棟の 3 建屋等で構成されるトカマク複合施設の総容積は 9 万 7,200 立方メートルに達する。

今回の契約は F4E の発注額としては最大規模。フランスの大手ガス企業 GDF スエズ社の子会社として暖房・換気・空調 (HVAC)、電気工学機器、産業インフラ建設をそれぞれ担当する 3 社、およびドイツに本拠地を置く建設エンジニアリング企業である M+W グループが受注した。

今後 6 年の間に、トカマク複合施設の 3 建屋を含む 13 建屋について、空調管理や電気機器システム等の設備の設計・建築およびメンテナンスを行う。また、計装制御系や流体ネットワーク、最新型火災探知・防止システムの供給も含まれるとしている。作業は 1 年間のエンジニアリング段階を経て来年 9 月に開始予定。その後、5 年間の建設作業に入ることになる。

【ベルギー】

原研で未臨界炉のインフラ技術設計を発注

長寿命放射性核種の破砕研究を実施しているベルギー原子力研究センター (SCK・CEN) は 10 月 11 日、世界でも初の加速器駆動・未臨界炉となる「MYRRHA」に関し、設備インフラの技術設計を仏アレバ社の率いる企業連合に発注したと発表した。

MYRRHA は高経年化したベルギーの研究炉「BR2」のリプレースという位置付けで、熱出力は 5～10 万 kW。600MeV の陽子加速器を使って核分裂反応を維持し、冷却材として液体の鉛ピスマス合金を使用する。

ウラン・プルトニウム混合酸化物 (MOX) 燃料の装荷が可能で、未臨界という特性上、核分裂反応のコントロールが容易な多機能研究炉として、2024 年から 25 年にかけて本格運転に入る予定だ。高レベル放射性廃棄物に含まれるマイナーアクチニドなど半減期の長い核種の変換に有効であり、スイスや日本でも同様の加速器駆動システム (ADS) の開発研究が進められている。

原子炉本体の設計はすでに SCK・CEN の専門チームが実施中であることから、今回の契約は原子炉と粒子加速器を除くすべてのインフラ要素の技術設計に関するもの。過去 2 年ほどの選定期間を経て、原子炉と加速器の建屋や冷却系、および計装制御 (I & C) 系の設計作業をアレバ TA 社、イタリアのアンサル社、およびスペインのエンジニアリング企業集合体である EA に委ねることになった。

契約総額は 2,400 万ユーロで、具体的な作業項目は原子炉の投資・運転コストの見積りや性能目標の検証、運転認可手続きの準備、詳細なプロジェクト日程の確定など。同企業連合のリーダーであるアレバ社が技術調整、設計全体の管理、機器の設置や安全性、計装制御について調査を担当するため、契約額の半分以上を取得することになる。

【スイス】

ミューレベルク原発を前倒し閉鎖

スイスの BKW 社は 10 月 30 日、同社の操業するミューレベルク原子力発電所 (KKM) (BWR, 39 万 kW) を予定より 3 年前倒しの 2019 年で閉鎖する方針を発表した。長期運転に伴う事業リスクを軽減するために下した判断だと説明しており、今後は水力や風力などの設備拡大や新たな革新的技術によるエネルギーの生産・サービスに投資していくとの考えを示した。

KKM は 1972 年に運開していることから、連邦政府が福島事故後に決定した「国内 5 基の既存炉は運開後 50 年で順次閉鎖」という政策どおりに行けば 22 年まで運転が可能だった。しかし、周辺の反対派住民が KKM の炉心シュラウドにヒビがあるとして提訴。法的な争いが最高裁まで及ぶなど、同炉の運転期間は二転三転した。

こうした背景から BKW 社は同炉を長期間運転することに関して規制上の側面のみならず、技術的、経済的、政治的な面から熟慮。運転を続ければこれらの側面における不確定要素が経済リスクを増大させる可能性がある一方、閉鎖を早めることにより財政資源を新たな代替設備や革新的エネルギー技術に投入できるとし、6 年後の閉鎖を決めたとしている。

閉鎖までの期間、BKW社はKKMの設備改善計画を実施する考えで、運転・維持関連で投入する金額は約2億スイスフラン。このうち約1,500万フランを冷却水の供給や燃料貯蔵プールの冷却システム対策といった臨時の設備改善に投入する予定で、スイス連邦原子力安全検査局(ENSI)も同計画について審査することになる。

【ベラルーシ】 安全局がベラルーシの 建設許可を発給

ベラルーシ緊急事態省の原子力・放射線安全局(GOSATOMNADZOR)が原子力委員会(AEC)に対し、10月14日付けで同国初の原子力発電所の建設許可を発給していたことが明らかになった。これにより、フロドナ州オストロベツで出力120万kWのロシア型PWR(VVER)を2基建設する同計画は、年内にも1号機の最初のコンクリート打設に向けて正式に動き出した。

AECによると、安全局が建設を許可する判断を下したのは9月13日のこと。1986年のチェルノブイリ事故では最も甚大な被害を被った同国だが、エネルギー資源が乏しいという事情のため、同国政府は福島事故直後の11年3月15日に初の原発建設でロシアと二国間協力合意文書に署名していた。

昨年7月にロシアのアトムストロイエクスポルト社が請け負った一括ターンキー契約の総額は100億ドルで、1、2号機はそれぞれ18年と20年に完成予定となっている。

【ヨルダン】 ロシア製100万kW級PWRを 2基建設へ

ヨルダン国営のペトラ通信は10月28日、同国政府が初の原子力発電所建設の発注先としてロシアの原子力総合企業ロスアトム社を選定したことを伝えた。2020年代に国内電力需要の12%までを賄うため、100万kW級のロシア型PWR(VVER)を2基建設。三菱重工業と仏アレバ社の合併事業であるATMEA社も最終候補に残っていたが、100億ドルと言われる建設費の49%出資を約束したロシアの操業・資金調達提案が最終的な決め手になったとみられている。

建設サイトは首都アンマンから東に85kmの砂漠地帯に位置するザルカ地区のアムラを予定。ロスアトム社傘下のアトムストロイエクスポルト(ASE)社が原子力技術を提供するほか、ルスアトム・オーバーシーズ社が

戦略パートナーとして完成原発の操業を担当するが、建設に際しては原子炉の冷却に必要な水資源の確保をヨルダン側に要請している。

現地の報道によると、ヨルダン政府の担当大臣3名と原子力委員会のK・トゥカン委員長が同日に記者会見を行っており、2023年の初号機完成を目指してヨルダンとロシアの両政府はほどなく100億ドルの建設プロジェクトで協定を締結する段取り。最初の2年間でサイトの詳細な調査や送電網等のインフラ整備を行い、次の段階で両国は建設契約を結び、建設工事を開始する。ヨルダンとロシアの建設出資比率は51対49だが、最終的な資金調達オプションは今後の交渉により、トルコのアクク計画と同じく、「建設・所有・運転(BOO)」方式になると見られている。

ヨルダンは中東地域に位置しながら天然資源に乏しく、エネルギーの97%を輸入。原子力をエネルギー・ミックスの一部に加えることで国内経済の成長に役立てるとともに海水の淡水化にも活用する方針だ。

発電炉の建設に先立ち、熱出力0.5万kWの韓国製・研究訓練用原子炉をヨルダン科学技術大学内に建設するため、原子力規制委員会は8月に建設許可を発給。韓国原研と大宇建設が建設費の1億3千万ドルのうち7千万ドルを低金利融資することで合意に達していた。

【バングラデシュ】 原子力導入でロシアと 設計契約に調印

バングラデシュの原子力導入計画を請け負っているロシアの原子力総合企業ロスアトム社は10月4日、両国が原子炉建設のための技術契約に調印したと発表した。今後2年間で100万kW級のロシア型PWR(VVER)2基の基本設計を行うとともに、来年初頭からバングラデシュの首都ダッカから160km離れたルプールで準備作業を開始する見通し。15年に本格着工した後、5年後の完成を予定している。

今回の契約はロスアトム社のS・キリエンコ総裁とバングラデシュのS・ハシナ首相が見守るなか、ロスアトム社傘下のエンジニアリング企業であるNIAEP-ASE社総裁とバングラデシュ原子力委員会の委員長が建設サイトで調印。その後、発電所の礎石を据える式典が行われた。

両国は2011年2月の事前合意に基づき、同年11月にロシアのアトムストロイエクスポルト(ASE)社を主契約者に選定。今年1月に環境影響調査やエンジニアリング作業など、関連文書の作成準備を目的とする準備作業にロシアが5億ドルを融資することで政府間協定

を結んだのに続き、今年6月には同作業の実施契約を締結した。

今回、作業の開始が決まった基本設計は許認可手続きの基盤となるもので、15年10月に完了予定。今年11月には優先工事事項や設置作業に関する実施契約も調印されることになっている。

採用設計はAES-2006モデルを改良した第3世代プラスの原子炉。NIAEP社が実施するエンジニアリング調査の結果やガンジス河畔のサイト条件に応じて最終決定するとしている。

【ベトナム】

米と協定調印、原子力市場は500億ドル規模に

米務省(DOS)は10月10日、ベトナムと二国間の原子力平和利用協力協定(123協定)に調印したと発表した。両国間で原子力技術や核物質および関連機器の移転を可能とする法的枠組となるもの。米大統領と議会の承認をもって、ベトナムが2030年までに計画する千万kWの原子力発電設備建設に米国企業が参加していく機会が開かれる。

同協定への調印は、オバマ大統領に代わって東アジアサミットに参加するためブルネイを訪れていたDOSのJ・ケリー長官とベトナムのミン外相が同国の首都ハノイで行った。ケリー長官は調印直後の会見で「東アジアにおける原子力市場としてベトナムは中国に次いで大きい」と強調。現在100億ドル規模のベトナム原子力市場が、2030年には500億ドルまで拡大する可能性があるとして指摘した。

ベトナムは差しあたり2020年以降の初号機完成を目標に、南部ニン・トアン省の第1サイト(フォック・ディン)にロシア型PWR(VVER)を2基建設することで09年にロシアと正式な契約を締結。第2サイト(ビン・ハイ)に建設する2基については10年に日本政府と正式合意し、13年1月に訪越した安倍首相が同国への原発輸出を再確認している。

米国とは07年に米エネルギー省(DOE)とベトナム科学技術省(MOST)が原子力平和利用における情報交換・協力取り決めに調印。ベトナムは1982年に核不拡散条約(NPT)に加盟したほか、90年に国際原子力機関(IAEA)との包括的保障措置協定が発効、07年には同追加議定書に署名するなど、米国の123協定の要件をクリアする態勢が整ったと見られている。

【韓国】

欧州の2国と原子力協定

韓国は10月18日にハンガリーと、23日にフィンランドと相次いで平和利用分野における二国間の原子力協力協定を締結した。

2009年末にアラブ首長国連邦(UAE)から韓国の最新原子炉設計である改良型加圧水型炉(APR1400)を4基建設する契約を受注して以降、同国政府は原子力を代表的な輸出産業に育成していく政策を11年に確認。新たな原子炉の建設計画が浮上しているハンガリーとフィンランドにも積極的に売り込み活動を展開していく考えだ。

ハンガリーとの協力協定は同国のJ・マルトニ外相と韓国の尹炳世外相がソウルで調印。ハンガリーの原子力市場に韓国が参入するための法的、制度的な枠組が設定されており、原子力安全や先進技術の共同研究、および情報と人材の交換などで協力していく。

ハンガリーではロシア製の50万kW級PWR4基からなるパクシュ原子力発電所が唯一稼働中で、同国の規制当局は昨年12月、1号機の運転認可を32年まで20年間延長することを承認。同原発を所有する国営MVM社は同サイトに2基を増設するため、出力や資金の調達方法を再検討すると伝えられている。

一方フィンランドとは、同国のJ・カタイネン首相と韓国の鄭首相がヘルシンキで協力協定に調印した。同国ではテオリスューデン・ボイマ社(TVO)がオルキルオト原子力発電所4号機の建設計画で国際入札手続きを進めており、候補メーカー5社のうち韓国水力原子力(KHNP)の率いる韓国原子力産業チームが出力145万kWのAPR1400を提案中。韓国原発の安全性と技術力を立証するとともに、欧州の原子力市場に進出する足がかりを築くことを狙っている。

特別寄稿

今後の原子力政策における重要課題

原子力委員会 近藤 駿介

1. はじめに

2011年3月11日に東北地方太平洋沿岸を襲った巨大地震と津波は約2万人の人々の命を奪い、この地域に甚大な被害をもたらした。さらに、この地震と津波は女川、福島第一、福島第二の各原子力発電所を襲い、その結果、東京電力(株)福島第一原子力発電所は過酷事故を引き起こし、周辺に大量の放射性物質を放出した。そのため多くの人々が避難を求められ、広大な地域が放射性物質で汚染され、人々の生活基盤や生産活動拠点が利用できなくなり、現在も約15万人の人々が故郷に戻っていない。

原子力委員会はJCO事故等を踏まえて原子力長期計画等で原子力施設の安全確保に対する絶えざる気配りや万一の事態に備える防災対策の充実を関係者に要請してきた。にもかかわらずこの事態が発生したのはこれらを徹底させる執拗さを欠いた故であり、慚愧に堪えない。

委員会は、事故後直ちに政府と東京電力に対して被災者の生活支援、汚染された地域の復旧と復興、事故炉の廃止に向けての取組に万全を期すことを求め、原子力関係者に対しては、事故の教訓を踏まえて管理する原子力施設のリスク管理活動に万全を期す一方、有する知識を総動員して福島の復旧と復興に協力することを求めた。

一方、事故後定期検査入りした多数の原子力発電所は緊急にこのリスク管理対策を実施したが、規制基準の変更が予想されるとして定期検査は終了されず、電気事業者は供給責任を果たすべく多数の火力発電所を稼働させることを余儀なくされた。その結果、我が国の二酸化炭素の年間排出量が6,000万トン程度(5%程度)増加し、天然ガス等化石燃料の輸入代金が年間約3兆円増加して国際収支を悪化させた。これらは政府と民間がこれまでに形成してきた原子力発電所という資産により国民が享受してきた国益の大きさを示す数字といえる。

政府は、事故の再発防止策の有効性及びこの規模の国益を享受できる代替策の実現可能性、そしてそれに対する国民の意見も踏まえて今後のエネルギー政策を検討しているが、これには一定の時間がかかる。そこでこの間は、今後の原子力発電の動向がどうあれ必要な取組を着実に推進していくことが原子力界の責務と認識する。

以下は、日本原子力学会「2013年秋の大会」における講演でこの認識に基づき重要と思う取組を述べた原稿を一部修正したものである。なお、これは委員会の意見で

はなく、個人の意見であることを予めお断りする。

2. 当面重要な取組

(1) 原子力災害からの復興

政府は、事故後直ちに、放射性物質による環境汚染への対処に関する特別措置法を整備して、汚染への対処に関する施策を推進するために必要な費用についての財政上の措置等を明らかにし、対策の実施を開始した。2013年に入って、81,000人が避難した避難指示区域等を線量水準に応じて避難指示解除準備区域、居住制限区域及び帰還困難区域の3区域に再編し、避難指示解除準備区域では住民の帰還できる環境を早期に整備するためインフラ復旧を迅速に進めることとした。また居住制限区域では防犯・防災上不可欠な施設や広域の地域経済社会の復興のために早期復旧が強く要望されている施設の復旧に取り組み、帰還困難区域では避難指示解除準備区域における日常生活に必須なインフラ施設、生活関連サービス等を復旧するために不可欠な広域的に利用されている施設の復旧等に取り組みすることとした。そして、インフラの早期復旧や災害廃棄物等の処理の着実な実施等の取組を中心とする「早期帰還・定住プラン」を取りまとめ、原発避難区域等帰還・再生加速事業を創設した。

一方、長期避難者に対しては、生活拠点の形成が重要との認識に基づいて、コミュニティ復活交付金を創設するとともに、拠点形成の検討のための協議会を開催し、さらに、市町村の避難住民受入れ経費に係る特別交付税を包括的に措置するための抜本的な見直しを行った。また、7万人を超える自主避難者に対しては、「子ども被災者支援法」を踏まえ、「自主避難者等への支援に関する関係省庁会議」を開催し、「子ども元気復活交付金」を創設するなどの取組を開始している。

除染については、除染活動がある程度進んだのは避難をお願いした11自治体のうち3自治体にすぎないことを踏まえて、2014年3月末までという処理目標を改めた。今後は、個々の市町村の状況に応じ、復興の動きと連携した災害廃棄物等の処理を推進することを基本とし、除染の新技術の利用拡大や除染とインフラ復旧の一体的推進等、復興関連の政策目的を同時に達成するための具体的な方策を推進すると共に、中間貯蔵施設整備等に係る現地の連携体制を構築し、取り組んできている。

また、農産品等における福島ブランドの再生、農林水

産業の復興及び再生、中小企業をはじめとした産業活動の活性化、観光の振興等を実施するとともに、2011年度以降に牧草を含む農産物生産の中止を余儀なくされた避難区域や作付制限区域等の地域の営農再開を支援し、福島県において工場等を新增設する企業に対する補助等を実施している。また、福島県沖に浮体式洋上風力発電システムを設置し、我が国で利用可能な洋上風力発電技術を確立するべく、安全性・信頼性・経済性を評価することにしてきている。並行して、風評被害を含む放射性物質による影響の低減または克服に向けて、放射線モニタリングの結果等の国内外への発信、販路拡大支援等を推進している。また、食品安全委員会は関係行政機関や地方自治体の協力を得て、食品中の放射性物質対策に関する意見交換会を各地で開催してきている。

一方、東京電力は、国の設置した紛争審査会の指針（現在は、中間指針第三次追補「農林漁業・食品産業の風評被害に係る損害について」まで策定）に従って損害賠償の取組を進める一方、放射性物質により汚染された地域の復興を目指し、自治体に協力して除染を始め、産業活動の再開・継続、教育・子育て環境の整備、コミュニティ再建などに取り組んでいる。

現在、これらの取組の進捗が遅いという批判が少なくないので、国と東京電力には、自治体と協議しつつ誠意をもってこれに取り組み、被災者が今日よりは良い明日を迎えつつ復興が成るよう、創意工夫により取組の質の向上を図ることをお願いしてきている。原子力関係者にはこうした取組が迅速かつ効果的になされるよう、その知見をこれらに活かす取組を強化することを願う。

(2) サイトにおける取組

原子力委員会は2011年12月に事故炉の状態を安定化し、自然災害や人的ミスに対する頑健性を向上させつつこのための機能を維持し、この間に使用済燃料や燃料デブリを取り出し、廃棄物の処理・管理を行って廃炉措置を完了させるロードマップを作成し、これを実施するための課題を同定した。そして政府と東京電力に対して、そのうち困難な課題の解決に必要な研究開発については衆知を集めて早期に取り組むべきであると提言した。

この提言は現在の政府と東京電力の取組に活かされているが、サイトにおいては原子炉建屋とタービン建屋に流入する地下水が炉心冷却水と混合した結果発生する大量の汚染水を除染後貯蔵する取組を頑健なものとする取組が遅れ、関係設備の安全管理に不手際が頻発し、周辺地域社会に不安と風評被害を含む被害を与えているのみならず、世界各国の原子力を巡る国内世論に影響を与えかねない状況にある。このような状況が続くと地域社会の皆様にも多大の迷惑をかけ、更には国際社会において日本沈没を招きかねないから、政府と東京電力には、事態の根本原因分析を踏まえて、廃炉措置が完了するまでの間、サイト全体で海水汚染リスクを十分低く維持するべ

く、深層防護の哲学に基づき、重層な取組を着実に進めることを求めたい。

また、この取組を含む原子炉廃止措置を完了させる取組には前例のない技術も必要になる。そこで、そうした技術開発には国費も投じ、世界の叢智を結集して取り組むべきである。新設の国際廃炉研究機構(IRID)がこの取組を効果的に企画推進することを期待する。

(3) 原子力損害賠償の国際的スキームへの参加

福島事故後、国際原子力機関(IAEA)等の場でも原子力賠償に関する国際的枠組の構築の必要性が再認識されているが、我が国はG8諸国の中で唯一国際的原子力賠償スキームへの参加を決めておらず、事故当事国として姿勢が問われている。

また、上述のように、廃炉作業は国際社会に対して開かれた形で国際的な叢智を結集して進めていくべきであり、知見のある外国企業の参画を期待している。しかし、米国政府からは事業者責任集中、無過失責任、裁判管轄の集中、最低賠償措置等を規定した「原子力損害の補完的補償に関する条約(CSC)」が締結されないと、企業に参加を推奨できないとの認識が表明されている。

よって、我が国がこうした国際的な原子力損害賠償スキームに加入するべきは明らかであり、政府はこれに向けて各方面の調整を急ぐべきである。

(4) 原子力施設の安全の確保に関する取組

2012年9月に行政委員会である原子力規制委員会が環境省の外局として設置され、同時に、原子力基本法第2条に「安全の確保については、確立された国際的な基準を踏まえ、国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全並びに我が国の安全保障に資することを目的として、行うものとする。」という第2項が加えられた。この追加は、従来「安全の確保」の意味が未定義で不便を生じたこと及び安全の確保の取組において国際的な基準を適時・的確に取り入れてこなかったことを反省するとともに、海外では核セキュリティ、保障措置という国の安全保障に係る事柄も原子力安全規制行政組織が扱っている実情を踏まえて、我が国もそうすることを明らかにしたものである。原子力規制委員会がこの基本法の目的に絶えず立ち返り、比例原則、説明責任、一貫性、透明性を大事にして効果的で効率的な規制行政を行うこと、そのために正しい技術、経験、知識、態度を有する有能なチームを整備すること、国民・利害関係者とオープンで透明かつ正直な対話を行うことを期待したい。

2012年末に開催されたIAEA福島会議は、原子力安全の確保のためには、1)原子力発電所は、規模の大きな地震、津波等の外部事象が発生した際に、それにより引き起こされる複雑な悪環境においても機能する安全機能を整備し、いつでも対応できるようにしていること、2)原子力発電所は、初期事象がなんであれ、過酷事故が発生して社会の混乱や環境に対する悪影響を引き起こすこ

とのないようすること、3)原子力施設の運営者は、運営組織に強い安全文化を醸成するとともに、誤りを犯すことあるべしと自覚し、これを小さなものにとどめ、これから回復する道を絶えず考えている、復元力のある組織とすることに努めること、が必須であるとした。原子力規制委員会が2013年7月に公表した原子力発電所に対する新しい規制基準は、こうした教訓を踏まえていると評価する。

一方、施設の運転者は、安全確保の第一義的責任を有していることを自覚し、自らのプラントをこうした世界の叡智を踏まえてリスク管理の観点から絶えず革新することを決意し、そうできる仕組みを整備するべきである。IAEAの管理原則(No.GS-R-3)はこのため安全文化/リーダーシップ、事実(リスク)に基づく意思決定、知識管理、人的因子の重要性を強調しているし、ワイクとサトクリフはその著『Managing the Unexpected』において、リスクを小さくするために絶えず失敗・故障を気遣い、単純化を避け、現場にこだわり、復元力をもたせ、専門を尊重する組織文化を追求することの重要性を指摘している。

一方、『組織文化とリーダーシップ』の著者として有名なMITのシャイン教授は、経営層、研究者、運転者、補修員は各々の組織の身上ともいべきサブカルチャーを大事にするから、リーダーは各々のサブカルチャーに敬意を払いつつ、安全文化を優先する習慣を共有することを求めていくことが肝心としている。そこで、賢明な経営者であるリーダーは、自らの振舞には経営者のサブカルチャーがにじみ出てくることを自覚し、米国のINPOのような外部から経営者の振舞を安全文化に照らしてチェックする仕組みを求めることもある。新設のJANSIはその役割を担うべく整備されたと聞いた。活躍を期待したい。

(5) リスク管理能力の強化

原子炉安全研究(WASH-1400)の公表から37年が経過した。しかし、原子力安全の世界で確率論的リスク評価(PRA)が有効に活用されているとは、なおいえない。確率論議は官僚論理となじみが悪いので、深層防護されているシステムの場合、決定論的評価が保守的評価につながるとして、これで受け入れ可能な結果が出ていれば議論を終結させてしまうことになりがちだからである。

原子力規制委員会の議論においては、外から見ているだけだから間違っているかもしれないが、当初ややあれもこれも感があったので、あらゆることを一度にやるわけではないし、やらなくてはならないわけでもないから、折角、PRAへの言及もあるところ、これを活用して効果の高い取組から段階的に取組む方針をとるべきと思っていた。しかし、最近、深層防護を強化する規準を作ったので、リスク評価は後回しという方針を採用したようにみえる。短い時間にいろいろなものを行うこ

とを決めてしまったので、期限を切る以上、そうすることもありと考える。しかし、PRAを実施してみると分かることだが、プラントリスクはプラント毎に異なる様相を呈するし、PRAは決定論的評価が見落とししているリスク感度の高いシナリオを洗い出すことができる。だから、深層防護を強化するのは手段としては良いが、システムのもたらすリスクが受け入れ可能な程度に低いことはPRAを通じてそうした確かめ、それを通じてそうした強化の在り方を検討し、規制者と運営者とが共同決定していくのが正しい道である。関係者には、この作業を速やかに行えるよう、準備を始めることを期待したい。

(6) 人材育成

現在、原子力発電所が停止しているために、特に立地地域における原子力関連産業が苦境にある。これを放置することは将来に禍根を残すから、業界が中心となり、政府と手を携えて知恵を出し、対応するべきである。

また、大学教育を含む原子力人材育成の取組においては、引き続き高度な技術と高い安全意識を持った人材を供給できるよう、福島教訓を教育内容に反映させるべきである。そして、国際社会では原子力人材育成ニーズが増大しつつあり、各国の人材育成関係組織がネットワークを形成し、共同してこのニーズに対応しつつあることも念頭に、国際的にも特徴のある育成組織へと自己改革していくべきである。

一方、我が国原子力産業はサプライチェーンの全面にわたって高品質の供給が可能な人材を整備してきたが、2000年の原子力長期計画においては、新規建設量が今後減少すると予想されたので、企業間の合従連衡も視野に入れつつ、国際市場を開拓する努力を求めた。現在は、国内市場の展望が当時より厳しさを増している一方で、企業間の国際連携は当時より強化されている。

これらのことから、ここでは、2012年12月に英国政府と産業界が共同して取りまとめた「原子力サプライチェーンアクションプラン」も参考に、政府と産業界が協力してサプライチェーンを構成する企業群に市場機会やその参加要件を示して出処進退を検討させ、人材需給ギャップを予測し、我が国における今後の人材育成や産業支援のアクションプランを練り上げるべきと考える。

(7) 世界の原子力平和利用/核不拡散への貢献

福島のオフサイトやオンサイトの取組は、国際社会が様々な事故から学んだ知恵を動員して推進されており、また、福島事故の教訓が原子力安全に関するIAEA行動計画の取組に大きく寄与している。そこで我が国は、国際社会に対するこの事故に関する情報の提供を今後も充実し、過酷事故を防止できず、これを経験したことから学んだ教訓を踏まえて、原子力安全に関する新しい国際規範の形成に全面的に協力するべきである。

また、我が国は、自国における今後の原子力発電の消

長の如何に係わらず、国際社会における責任ある原子力利用国家として振る舞うべきことを忘れてはならない。特に、核燃料サイクル施設を幅広く有する我が国は、安全確保と並んで核不拡散や核セキュリティを確保する取組を絶えず高い水準に維持していくのみならず、高い水準の国際規範の形成をリードしていく義務がある。プルトニウム管理について独自に定めた「利用目的のないプルトニウムを持たない」原則を厳守していくことは、この観点から必須である。

さらに、アジア・アフリカにおいて原子力科学技術のもたらす利益を享受したいとする国や原子力発電の新規導入を図る国が増加している状況を踏まえ、これらの国における人材育成、産業技術育成、安全規制体制等の原子力インフラ整備等の取組を支援することも先進国の義務である。IAEA、IFNEC（国際原子力エネルギー協力フレームワーク）、FNCA（アジア原子力協力フォーラム）等の多国間取組を通じて行われている新規参入国との対話の取組や、安全・核不拡散・核セキュリティ確保の観点からより効果的な国際的枠組みの実現を目指す取組への貢献と併せて、これに積極的に取り組むべきであろう。国際対応には国際社会の資源を活用して自国のリスクを軽減する取組と自国の利益の増大をはかる取組とがあるが、こうした貢献は、noblesse oblige のみならず、“我が振り”を見直す機会をもたらす、我が国のリスクを最小化するためにもなると認識されるべきである。

一方、原子力産業・事業の国際展開は、基本的には国の利益を追求する取組であり、原子力産業界・研究開発機関等に加えて、政治や経済界等の関与を得て、対象事業の必要性・有効性を見極め、事業の主体や実施の分担等について決断していくべきである。その際には、福島事故の教訓を世界と共有する責任を片時も忘れず、既存技術の改良改善を図り、次世代技術を磨き上げ、取り組んでいかなければならない。

（８）放射性廃棄物の管理と処分

原子力サプライチェーンの最後にあたる原子炉廃止措置及びこれにより発生する放射性廃棄物の管理と処分の取組は、原子力発電から撤退するにしろ、その利用を持続するにしろ、必須の取組である。今後20年を展望すれば、この間に東電福島第一をはじめ、いくつかの原子力発電所の廃止措置活動を着実に進めるべき必要があることは明らかであるから、電気事業者は、この作業を専門的に推進する事業体制を整備するとともに、発生する有用資源の再利用システム、放射性廃棄物の浅地中処分及び余裕深度処分場の整備を急ぐ必要がある。また、放射性廃棄物の輸送に関する規準や処分場の敷地開放条件についてもリスクの的確な評価に基づいて合理化する一方、このための費用を明確化し、それを確実に確保していくべきである。

一方、使用済燃料の再処理に関する取組は、プルトニウム利用の進展が不確実な現在は、これを前述の原則を遵守しつつ限界的水準に止め、敷地内の使用済燃料貯蔵容量を乾式貯蔵法により確保することに注力するべきである。

ところで、原子力委員会は、今後必ず実現しなければならない高レベル放射性廃棄物の地層処分の実施に向けた取組が進捗しないことから、施設の立地可能性に関する調査を自治体に受け入れていただく取組の進め方について日本学術会議に意見を求めた。その結果、この処分行為の妥当性を国民と共有していないとの認識に基づく提言をいただいたので、国に対して、処分行為そのものの妥当性とそれに伴う不確実性の管理の在り方について国民と対話を重ねつつ一歩ずつ前進させることを基本とし、その第一歩として、実施主体が最新の科学的知見を反映した処分の安全評価書を整備し、専門家によるこの評価作業を通じてそこにある不確実さを整理し、まずは、これを踏まえて前進のための選択肢を用意し、いずれ取るかについて国民的合意を形成するべきとした。

（９）研究開発の推進

研究開発もまた、まずは福島オフサイト及びオンサイトの取組に貢献し得る課題に重点を置くべきである。具体的には、オフサイトの取組に関しては、事故で関心の高まった生体に対する低線量放射線影響を解明するために新しい発ガン機構、最新の放射線生物学のパラダイムやシステム生物学の知見を総動員する国際的取組に参加すること、除染技術の高度化やシステム化、中間貯蔵された汚染土壌の減容処理技術や廃棄物固化技術を高度化する取組、さらに、長期にわたるこれらの活動の計画・評価の基本になる森林を含む汚染地域における放射性物質の動態を把握・予測する取組などが重要である。

オンサイトの取組に関しては、IRIDを中心に、放射性廃棄物の減容固化技術、高放射線環境で作業可能なロボット及び遠隔操作技術の開発、過酷事故に関する理解を深めるための基礎・基盤的なデータの獲得やデータの不確実性の評価、モデリングとシミュレーション技術の高度化などがタイムリーに推進されるべきである。

ついで整備の急がれるのが、40年を経た原子力発電施設の運転継続可能性の判断技術である。各種の新知見を踏まえて60年間の運転を想定して施設のPRAを実施し、リスク感度の高い構造、システム、機器の信頼性、材料挙動、劣化現象を特定し、安全目標に適合させるために必要な構造、システム、機器の改修・補修方法を明らかにするべきである。さらに、原子炉運転に係るヒューマンファクター、炉心管理、水化学、廃棄物管理、放射線防護等の理解の深化、燃料の性能向上、廃棄物量の最小化方策、廃炉技術の性能向上を目指す研究開発も行われるべきである。

高速炉に関しては、これを含む燃料サイクル技術で超

ウラン元素を回収・利用できれば、資源の利用率が高まるほか、原子力発電の燃料サイクルに係る放射性廃棄物の処分体の発熱量が低下する利点が生じるから、これの原型炉「もんじゅ」とその燃料サイクル技術の開発実証の取組は着実に推進していくべきである。その際には、高速炉技術は第IV世代炉としても多くの国が注目しているから、その研究開発を国際社会と共同して推進していくべきである。

なお、「もんじゅ」の運転管理体制について、日本原子力研究開発機構（JAEA）が原子力規制委員会から厳しい指摘を受けたことは残念なことである。これを受けてJAEAが取り纏めた「日本原子力研究開発機構の改革計画」には適切な改革の方針が示されているので、これを不退転の決意で確実に推進することを強く期待する。

国民生活の水準向上に大きく貢献している放射線利用技術の研究開発や長期的観点から新たな非炭素エネルギー源の開発を目指す核融合研究開発は、多様な産業分野の技術革新を目指す取組と効果的に連携し、成果を共有しつつ、着実に推進されるべきであろう。

こうした研究開発活動には先駆的原理や基盤となるデータを産む基礎基盤的研究の推進が不可欠である。併せて、大型研究開発は社会ニーズを反映した技術評価を踏まえて推進されることが重要だから、人文社会科学分野における原子力に関する研究も推進すべきである。

3. 原子力政策の再構築を目指して

大震災後に政府は、短期的なエネルギー対策として再生可能エネルギーを導入する取組を加速する固定価格買取制度を導入すること、海外から輸入する化石燃料価格を引き下げるべく価格交渉力を強化すること、定期検査のために停止中の原子力発電所のうち、ストレステストに合格したものは再稼働していくこと、原子力安全規制行政組織を改編し、原子力規制委員会を整備することを掲げた。

福島事故を踏まえてエネルギー供給力の構成を変えらるるとしても、代替技術による供給力を原子力のそれまでに至らしめるには時間と資源を要し、しかも政策目標に対するその貢献には不確実性がある。エネルギーの持続的供給は必須の要件であることを踏まえれば、そこで取るべき策は、現在のエネルギー供給力を目標にそぐわない点を改良して活用する一方、目標達成に効果的と実証済みの新技術を代替技術として導入するべく必要な資源や制度を調達・整備する取組を中期的観点に立って推進し、実現した代替技術の姿が政策目標に照らして適切であるかを評価し、その結果を踏まえて導入努力を調節していくことである。この点からすれば、政府の決定は（体系としては）適切だったが、天然ガスの価格交渉力の強化は早期には実現できないので、国会は、原子力発電所の再稼働を供給安定性の確保手段としたことに配慮す

ることなく原子力安全規制改革のスケジュールを定めたので、悪化した交易条件のまま、国益上望ましくない供給システムに当面の供給を依存せざるを得ない状況が続いていることは指摘しておくべきだろう。政策変更には費用が掛かる。政策比較に際して代替政策にこの変更コストを負わせるのは適切ではないが、人間には将来計画がよさそうに見えると、そのリスクや手前のコストを過小評価してしまう習性があるので、政策選択の際にこれらの存在とその負担ルールを明示すべきは当然である。

政府の当面の方針を踏まえれば、エネルギーの安全で経済的かつ安定な供給、気候変動対策の観点から適切な規模の原子力発電を維持することに関して政府が国民に同意を求めていくことができるよう、原子力関係者は、原子力発電所を新しい安全規制要求を満たすものとする取組や福島の復興に向けてのオフサイト、オンサイトにおける取組、継続して成し遂げるべき原子力研究開発の取組等を、ハーバーマスの教示に従い、事実に基づくという『真理性』及び社会規範に合致しているという『規範妥当性』を備えているかどうかを吟味しつつ推進するとともに、そのことを国民に対して誠実に語りかけていくべきである。

4. 結論に変えて、国民への政策の説明

以上、当面する課題についていくつか述べたが、この間、絶えず国民との対話の重要性を指摘してきた。それは、政府の政策は国民と専門家の声の間にあり、これらとあまりに異なる政策は選択できないからである。

2003年にノーベル経済学賞を受賞した行動経済学者のカーネマンは、人間の思考を行うメカニズムは即断型の「システム1」と熟考型の「システム2」に分けられ、順序立てて考える能力はシステム2にあるが、システム2は立ち止まって考えなくてはという認識が生まれるまでは起動しないとしている。最近の世論調査は、事故後、原子力は社会にとって危険と考える人が多くなったことを示している。よって、再稼働を目指す原子力事業者は、事故の根本原因を深く認識してシステム改革を断行し、原子力発電のリスクを十分小さくする取組を誠実にやるべきは当然として、そのことを上述の方針に則って人々に説明し、人々に立ち止まって考えていただけるようにしないといけない。而して、そのために妙手はない。信頼の構築は「賽の河原で石を積む」のと同じであるといわれる。原子力関係者には、福島の被災者のご苦勞を片時も忘れず、本稿に述べたことを誠実に実行し、そのことに関して国民と誠実に対話を続ける地道な努力が大切であることを再度指摘して稿を閉じたい。

（2013年10月31日記）

解説

「低線量放射線を超えて」に込めたる想い

福島は第二のチェルノブイリにはならない

(財) ルイ・パストゥール医学研究センター 宇野 賀津子

2013年の7月末に、「低線量放射線を超えて」というテーマで書物を著して¹⁾、早、3ヶ月が経った。本を差し上げた福島の方からの「講演がより良くわかった」との声とともに、「元気づけられた」との声はうれしい限りである。また、京大の先輩の名誉教授の方々には、よく書いたね、よく勉強したねと、ほめられた。いつもは厳しい放射線生物学や分子生物学専門の名誉教授からのお言葉に力を得た思いである。また今回、思いがけず原子力を専門とする方や材料学を専門とする方々から、新しい視点で共感したとの声とともによく書かれましたねと、メールやお手紙をいただいた。私たちの分野では当たり前のことを書いたので、この反応は予想外であった。本稿では、この本に込めたる想いと、この間異分野の研究者との議論を通して私自身が、学び考えたことを紹介する。

I. なぜ、科学者の意見がわかるか

3.11 当時を振り返ってみると、地震、津波、原発事故の映像に釘付けの数日間を過ごしながら、何か出来ないかと、駆り立てられた。そのうちに、原発事故→放射線→がんリスクということが一番の不安要因であり、またその影響についての解説に首をかしげるものも多数見られた。福島から少なくとも子どもは逃げるべきであるというものも多かったし、東京の孫達も関西へ避難させるべきだと、言われたりした。

がんリスクとなれば、免疫学を研究してきた今までの知識が多少は活かせると思い、自分にも出来る事があると思った。ネットやテレビを見ていると、放射線があたって、変異細胞が出来る。増殖中の細胞の方が放射線感受性は高いので、子どもは大人の数十倍もがんになりやすく、このままでは数年以内にも福島の子も達、次々とがんになるように言う人が多数いた。人のがんの成り立ちから考えてそれはなかろうと、それまでにがんの生きがい療法の講演で使っていたスライドをベースに、がんの成り立ちや、なぜ放射線ががんリスクをあげるのかを説明するスライドを作り、所属するNPO法人「あいんしゅたいん」(坂東昌子理事長、元日本物理学会会長)のホームページから発信した。「過剰にリスクを

言って怖がらせる方が、免疫力を下げたがんリスクをあげる」とは、私の信念でもあり、これは声を出して言わねばと思ったのである。

確かに事故後の福島の放射線量は高かったが、それでも、タバコの方ががんリスクは高いというのが、医学・生物学関係者の多い、私周辺の意見だった。ある医療関係者の多いネットワークのメイリングリストには、東京の医師が、「患者から放射能汚染が心配で眠れないから睡眠薬を処方してほしいと言われた、タバコを吸いながら何を言うかと思いつつ処方した。」などの書き込みも流れていた。実際、がんの原因の1/3は喫煙であり、後の1/3は食事などに由来している。その他にはウイルスや職場、地域環境などがあるが、放射線・紫外線の割合は全体の2%程度である。

ところが、友人の物理学者達は、なぜ、タバコと放射線の害を同列に扱うのか、不謹慎ではないかと言った。どちらも活性酸素が出るからといって中々理解されない。放射線が遺伝子(DNA)を傷つけるのは、大部分が水に放射線があたって出来た、いわゆる活性酸素によるものであること、活性酸素は生体が呼吸する中で日常的に出来ている物であり、生体は殺菌作用などにこれを利用して一方、これによって傷ついていることを説明した。そして活性酸素の害を克服するためのシステムを、今地球上に生きている生物は獲得していること、放射線や紫外線、呼吸で傷ついた遺伝子の大半はすぐに修復されることなどを説明した。従って、放射線やタバコの害も「活性酸素」というキーワードを挟めば、同じ土俵

Preventing a Second Chernobyl: The results of efforts to eliminate the effects of Fukushima's low-dose radiation contamination : Kazuko UNO.

(2013年 10月17日 受理)

で議論可能なことを理解してもらったのである。

II. 低線量放射線の影響とその克服法

1. がんを防ぐ食事

低線量放射線の影響を克服する生活はがんや成人病を予防する食事が有用と思った。有名なものとしてアメリカのマクガバンレポート、そしてデザイナーフーズ計画がある。1977年に出されたマクガバンレポートはアメリカの食生活を「諸々の慢性病は肉食中心の誤った食生活がもたらした食原病であり、薬では治らない」とし、大量の脂肪、砂糖、食塩が心臓病、がん、脳卒中など命を奪う病気に直結していることを指摘した。デザイナーフーズ計画では、植物由来の化合物「フィトケミカル」を特定して、これらの摂取を推奨し、アメリカのがんによる死亡率減少に貢献した。実際、活性酸素による害を消去する成分は野菜や果物に多く含まれていて、特にカロテノイドやポリフェノールまたビタミンのC,E等が強い抗酸化作用を持っている。これらはがんの抑制にも重要な役割を果たすことが明らかにされている。

福島県は抗酸化能の高い野菜や果物の産地である。私自身、現在の福島の皆様に何を提案できるかと考え、結局は「放射線量を測って、特に問題のない福島の野菜・果物は大いに食べよう」ということになった。この話をすると福島日赤の医師の方は、「それは私達が推奨している成人病予防の食事ではないですか?」と言われた。そう、抗酸化食は放射線によるがん予防だけでなく、成人病予防にも繋がる食事である。福島県は、心疾患の有病率の高い県なので、減塩とこのような食事の実践で、10年後には福島はむしろ長生き県に変わるということも可能である。

2. キーワードは活性酸素

活性酸素ということになれば、物理系の方もなるほど、ということになり、その結果、お互いの理解が深まった。実際、活性酸素の影響というのは多様で、抗加齢医学の分野では、身体の「さび」の原因として一番の悪者扱いされている。動脈硬化、心筋梗塞、アルツハイマー、がん、糖尿病、胃潰瘍、白内障、等々、老化に伴い増えてくる多くの病気に活性酸素が関わっていることが明らかにされている。そして今や、ネット上では活性酸素を消去するサプリメントの宣伝があふれている。だが生体にとって活性酸素は全て「悪」といえば、そうではない。たとえば、私達の血液の中にある白血球のなかの好中球や単球は、細菌を殺すのに、この活性酸素を使っていて、必須のものなのである。

「生物屋」は、陸上に生き、酸素呼吸をするようになった生物は、進化の過程でこの危険な酸素を利用し、またその害を克服するシステムを獲得してきたと聞くと、すんなり理解できる。実際、生体は放射線やタバコや発が

ん物質により、また自ら呼吸することによって出てくる活性酸素によって、傷つき修復を日夜行っていることも事実である。このような議論を通して放射線だけが特別なものでなく、身近なものとの理解が深まったのである。

3. がんの自然史

がんは一夜にしてできるものではない。何段階かの突然変異が重なって初めてがん細胞となるし、更にそれが臨床的に見つかるサイズのがんになるには、白血病や甲状腺がん等一部のがんを除くと、固形がんでは20～30年の時間が必要である。原発事故以降1～2年以内に見つかったがんは、事故の影響とはいえず、事故以前にそのがんの芽はあったと考えるのが自然である。事故後がんの成り立ちを知らない研究者が、福島100km圏では10年以内に10万人ががんになるとおどし、多くの方を不安に陥れた。自らの身体の中に出てきたがん細胞排除の最後の砦は、ナチュラルキラー細胞などの免疫細胞である。そして、恐怖や不安はこの免疫力の低下に繋がる。実際、日夜出来てくる変異(がん)細胞の圧倒的な部分は、免疫細胞が除去しているので、不安やストレスで免疫力が低下する方がもっとがんリスクを上げると私は心配する。

III. 福島での活動

1. 2011年学振放射線計測説明班(1stステージ)

2011年10月から12月にかけて、7月に京都で私がお話した講演会に聞きこられた、志水隆一阪大教授にさそわれて日本学術振興会産学協力研究事業に係る説明会チーム(通称:学振—放射線計測・説明会チーム)の一員として、福島県白河市の学習会に行った。学習会は、白河市からの要請を受けて放射線から健康を守る正しい知識を知ってもらうため地域単位で開催、夜6時から9時ぐらまで開かれた。我々チームの特徴はなんといっても、単に講演をするだけでなく、この学習会に先立って、昼間に地区を回り、車内および学校や集会所などでは降りて特に念入りに線量の計測をしたことにある。測定された空間線量は0.1～0.7 μ Sv/h程度、学校のグラウンドは0.2～0.5 μ Sv/hの範囲にあり、特にグラウンドの除染効果が現れていることを、計測時に私達は実感していた。(ただ、都会の学校と違って、周りが山に囲まれたグラウンドは、雨が降るたび少しずつ、放射線量は上がってくる。)校庭の汚染土は運動場の中央に埋めたとのこと。子ども達にとって一番放射線量の低いところはグラウンドともいえ、しいていえば、「おおいにグラウンドで遊ぶのがいいですね」となった。学習会で計測チームは、実際に測定した結果を報告。グーグルマップの上に、計測値、小学校の校庭や、雨樋の下のホットスポットなどの数字と写真が表示されて、住民の方々に

としては身近な場所だけに、納得という様子だった。この講演会后以降、冷静な話し合いが出来るようになったと、白河市から感謝状を頂いた次第である。

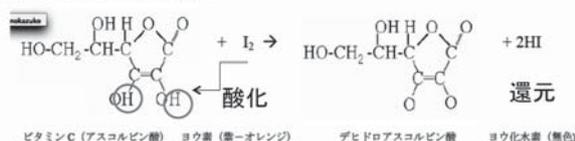
2. 2012年 リラクゼーションと抗酸化実験 (2nd ステージ)

夜の学習会が一番聞いてほしい子どもをもつお母さんの参加が難しいと、2012年はお母さんを対象に保育体制とセットにした学習会が必要と思った。ところが、4月に福島県庁に行き、女性県会議員に協力を要請すると、「今は、お母さん方、かなりストレスが溜っています。えらい先生に来ていただくより、アロマテラピーの方が歓迎です」と言われた。そこで、以前高齢婦人を対象に化粧品療法を行い、免疫機能の指標であるナチュラルキラー細胞活性やIFN- α 産生能が化粧品後に上昇することを確認していた²⁾、化粧品療法の導入を提案したところ、学振の方は「化粧品療法？うーん!」。ちょうど日赤の講演会にも呼ばれていたため、リラクゼーションをセットにした学習会を提案、日赤の方々は、足湯やリラクゼーションが効果的なことを実感されていたので、被災者のためになるならなんでもOKとのこと。さらに、化粧品療法を共に行ったナリス化粧品が大阪市福島区にあることから、「福島」つながりもあり万人分の化粧乳液を用意して協力してくれ、この企画が実現した。化粧乳液を使っただけのハンドマッサージは、コミュニケーションにも役立ち、講演に対する理解もこれまでより深まったように感じた。男性研究者にはできない企画ではなかろうかと思っている。

3. 2013年 ピアエデュケーター育成 (3rd ステージ)

2012年秋から、単にがんを予防する食事＝抗酸化能の高い野菜、果物と言うだけでは不十分だと思い、抗酸化能を実感する実験を取り入れた。イソジンうがい液(消毒液としても使われ、また酸化還元滴定にも使用可能)を希釈して、そこに野菜や果物の絞り汁を入れ、色の変化を見るという簡単な実験であるが、緑茶、ニンニク、ピーマンなどでイソジンの茶色が時には瞬時に透明になることから、抗酸化作用を実感することが容易である。お母さんのための学習会では、一緒に来た子どもにこれからはピーマンも食べようねと言っておられる方もいて、評判も上々だった。

ビタミンCとヨウ素の反応



福島から京都へ避難してきた被災者の一人が、2011年6月に「あいんしゅたいん」を訪ねてこられ、ホールボディ検査と甲状腺検査を受けたいと、協力を求められた。ホールボディ検査は、体内から発する放射線量を測る検査で、福島県にお願いしたものの、まずは福島にいる人ということで、今しばらく関西には来れないとのこと。関西では調べてみると京大原子炉と関西電力の美浜発電所にあることがわかり、協力を得て私達は被災者と共に熊取の京大原子炉と美浜発電所に行った。その前に、ホールボディカウンター検査というものはどんなものか、何を測る機械か、福島のホールボディ検査の結果はどうか、被災者と共に学習会を開き、貸し切りバスの中で学習会を開き、現地でも担当者に測定についてお話を聞いた。その結果、同行した研究者に加えて勉強した被災者が、初めて参加した方の説明に回ることが出来た。これらの経験を通じて、同じ被災者の説明は、研究者以上に不安を抱えて検査に来られた人に、安心感をもたらすことを確認したのである。

また、福島では2012年にも保健師さんを対象とした研修会を数回行ったが、2013年は特に保健師さん、公立学校の先生方を対象とした講演・学習会に力を入れている。何よりも研修を受けた方が、自信を持って地域の方と接することが出来るようになることが重要である。まだまだ福島には、不安を抱えた方々がおられる。いくら私が毎月のように福島に行っても、伝えられる方の数は限りがある。講演を聞いた人が、自信を持って周りの人に話をしていただけると、少しずつ不安感は払拭され、前向きに生きていく方々も増えると期待される。

IV. クライシスコミュニケーション

1. ネットワークの力

今回の事故対応の問題として、シビアアクシデント時の科学者のコミュニケーション能力の問題が大きいと思った。特に事故後数ヶ月の、低線量放射線の生体影響についての情報発信のいろいろを、個人的には苦しい思いで見ている。この程度の放射線量なら心配ないという、御用学者というレッテルが張られ、放射線影響についても、試験管内の実験の話、数十年前のデータから単なる症例報告に尾ひれのついた内容等、いろいろな説が飛びかっていた。そしてどちらかという「危ない」という人が良心的な人と、評価されていた。そのころ私は坂東さんと議論しながら、ちまたに出回っている内容を、原著にあたり確認するという作業を繰り返していた。その結果、これらの危険をおおる記述の多くは、原論文の全体を見ることなく部分を切りとって、さらにもとの主張よりもリスクを過大評価しているものが大半であること、多くは単なる症例報告で、お世辞にも学術的評価の対象とならないものであるとわかった。また疫学研究においては、一つの論文をもって全体とすること

は、判断を誤ることもあると知った。同じような影響について、他にも報告がないか、違う地域でも同じような報告が出ているかなど確認が必要であると認識した。

事故後、「あいんしゅたいん」には物理、放射線生物学、医学、原子力工学など、いろいろな分野の研究者が集まってきて、連日議論がなされた。

2. 科学者の役割

先端科学・巨大科学の進歩の中で、サイエンスコミュニケーションという分野ができ、それを専門とする人たちが出てきた。しかしながら、今回、その方達が活躍したとはとても思えない。私の知る限りは、むしろ中途半端な知識をもとに、低線量放射線の影響を過大に言って混乱を巻き起こしたか、だんまりを決め込んでしまったかである。一方、市民の高意識層の方が、各分野の専門家が少しサポートすれば、勉強して、かなりの確な判断をしようと思った。福島からの避難者の中にも、そのような方々を見いだすことができた。サイエンスコミュニケーターとの違いは、現場と繋がっている生活感覚であると考えられる。

今回シニア研究者が特に活躍した。現役世代は組織に縛られて動けなかったという側面もあるが、その学問を立ち上げてきた世代に比べて、視野が狭かったとも言える。福島を乗り越えるには、サイエンスコミュニケーターの育成よりも、シニア研究者がピアエデュケーター(仲間同士で正しい知識・スキル・行動を共有し、普及する中心となる人)の育成に力をいれる方が、効率的ではないだろうか。

実際、エイズの世界では、ピアエデュケーションに力を注いで来て、一定の成果をあげている³⁾。

3. チェルノブイリと福島

福島事故後に続々と出されたチェルノブイリ関連の本は、チェルノブイリの子どもたちがいかにいろいろな病気で苦しんでいるかというものだった。これらの本を読むと、心配性の人にはさらに不安になる。特に、『自分と子どもを放射能から守るには』で示されている野菜や肉の放射能を減らす方法などは、事故直後ならともかく、今は無意味どころかむしろ栄養分や微量元素が流出して、別の健康影響が生じるといった。チェルノブイリやその周辺での食品の検査体制などは学ぶべきであり、福島でもその体制が整い、地域の公民館等に測定器が設置されているので、家庭菜園の野菜を持って行って、測定してもらうことが可能となっている。他の県ではとてもこんなことはできないので、そのうちに福島の方がきめ細かく測れているだけ、より安心だということになると期待する。

結論として言えば以下の理由から、福島は第二のチェルノブイリにはならないと私は考える。

- (1) 福島第一原発事故で放出された推定放射線量は、チェルノブイリ事故と比較すると1/10程度である。
- (2) 福島では事故後早期に、ヨウ素で汚染された牛乳の流通を止めた。
- (3) 大陸のヨウ素不足の地域と異なり、日本人は、元々ヨウ素をよく摂取している。
- (4) コープ福島の陰膳調査(毎食1人分余計に食事を作り、2日分をミキサーで均一に混ぜ込み、放射線量を測定)でも明らかのように、流通している食品を食べている限りは、食品からの放射性物質の摂取を心配する必要はほとんどない。
- (5) 冬場になると(抗酸化能の高い)緑黄色野菜、果物の入手困難なチェルノブイリ周辺地域に比べ、日本ではこれら野菜果物は常に入手可能である。
- (6) チェルノブイリ事故の被害を受けた白ロシアやウクライナ草原地帯の土壌は、ミネラル分が少なく、より放射性物質で汚染しやすかったと言われている⁴⁾。また土地改良材の添加は農産物の汚染レベルを減らすことはできたが、一方では生体維持に必要な微量元素、例えばコバルト、亜鉛、銅、鉄、マンガン、カリウムなどの土壌からの元素吸収をも低下させてしまったとも言われている。福島ではかなり土質が違っているようで、ウクライナで起こった程の食品の放射能汚染は、福島では起こっていない。
- (7) 福島ではホールボディ検査でも大半の人に、問題となるようなセシウム量は検出されていない。一方、チェルノブイリでは10年から20年経った時点もなお、住民の多くに20から70ベクレル/kgの放射線量が検出されている。

— 参考資料 —

- 1) 宇野賀津子,「低線量放射線を越えて」,小学館新書,(2013).
- 2) 宇野賀津子, 谷都美子, 他, 高齢女性に対する化粧療法の効果, 日本=性研究会議会報, 第13巻, 11-19(2001).
- 3) 高村寿子,「思春期の性の健康を支えるピアカウンセリング・マニュアル」,小学館,(2005).
- 4) 白石久二雄,「放射能と栄養」,ミヤオビパブリッシング,(2011).

著者紹介



宇野賀津子(うの・かずこ)

(財)ルイ・パストゥール医学研究センター, 基礎研究部, インターフェロン・生体防御研究室室長, 理学博士
(専門分野) インターフェロンシステム加齢と疾患発症の影響, 癌, 肝炎, リウマチ患者の免疫機能の研究, 性差・女性のライフサイクルの研究
(関心分野) 人体への放射線影響とリスクコミュニケーション

解説シリーズ

世界の原子力事情

第3回 米国・カナダの原子力開発の動向

日本原子力研究開発機構 ワシントン事務所 佐藤 一憲

米国およびカナダにおいては、福島第一原発事故以降も原子力を温室効果ガスのほとんど出ないクリーンエネルギーと位置付け、エネルギー・ポートフォリオの重要な要素として引き続き利用してゆく方針である。一方、数年前には予測されていなかったシェールガス革命と呼ばれる状況は原子力発電所の新規建設の環境を一変させている。このような環境下での両国での原子力開発や発電等の動向について解説する。

I. 米国の動向

1. 米国のエネルギー政策

二期目を迎えたオバマ大統領は“*All of the above*”（以上の全て）の表現で代表されるエネルギー政策の中で、原子力エネルギーを温室効果ガスのほとんど出ないクリーンエネルギーと位置付け、福島第一原発事故後も一貫してその利用を推進している。このような一貫した政策の背景には米国民の原子力エネルギー利用に対する高い支持があり、このような国民の支持はスリーマイルアイランド原発事故を経て積み上げられてきた米国の原子力規制への信頼を反映したものである。

米国原子力規制委員会は福島第一原発事故の直後から情報収集にあたり、米国内の原発運転者に対してさまざまな命令や要請を行ってきたが、短期的には2001年の9/11テロを踏まえて実施していた全交流電源喪失事象（SBO）に対処するルールの徹底によって安全性は確保できると考えた。そして福島第一原発事故の教訓をもとに、米国の原発の安全性を更に高める方策をその緊急性の程度に応じて実施することとし、最長5年を目途に全ての対策を完了させる計画である。

オバマ大統領は2013年6月25日、ワシントンDCのジョージタウン大学構内で、強い日差しの中、ワイシャツの袖をまくり上げ、気候変動への対処を訴える演説を行った。大統領は気候変動はもはや科学によって裏付けられた事実であり、これに対処する勇気を持つかどうかの問題だとして、CO₂排出削減への強い決意を示した。

Current Trends in Nuclear Energy (3) ; Trend of Nuclear Development in the US and Canada : Ikken SATO.

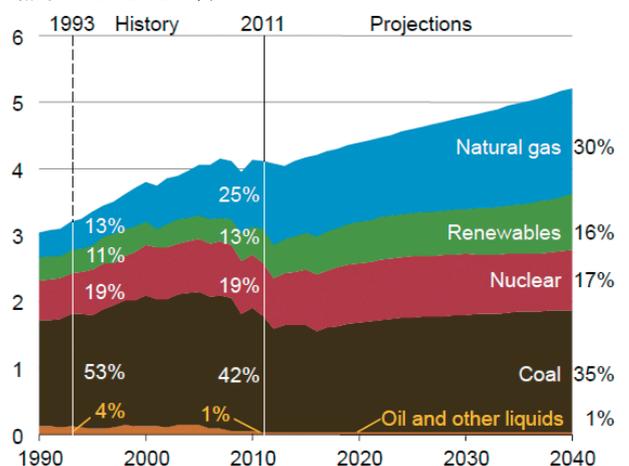
(2013年 10月18日 受理)

■前回タイトル

第2回 英国の現状と新規プロジェクト

そして、環境と経済の二者択一ではなく、これらを両立させる道があるはずだとして、石炭火力から単位発電量あたりのCO₂排出の少ない天然ガス火力への代替、再生可能エネルギー利用の拡大、省エネルギー促進などを訴えた。この中では30年ぶりとなるジョージア州、サウスカロライナ州での新規原発建設について僅かに言及がなされたものの、原子力に関わる発言はあまり目立たなかった。その背景には安価な天然ガスが原子力の競争力を削いでおり、今後顕著な新規原発建設が望めない米国の状況がある。しかしながら原子力は現在、全発電量の約20%を占めており（第1図参照）、米国エネルギー情報局の試算では2040年においても約17%を占めるものになっている。このように、米国のエネルギー・ポートフォリオの中で原子力はこれまでどおり重要な位置付けにあり、既存原発の維持を主体として利用を継続するものと考えられる。

(縦軸は10¹²kWh/年)



第1図 米国におけるエネルギー源別の発電量の推移と予測 (米国エネルギー情報局資料¹⁾より抜粋)

2. シェールガス革命とその原子力開発への影響

米国における原子力開発の主体は民間企業であり、エネルギー省(DOE)はその支援および中長期的な技術開発に重点を置いている。そして、原子力発電所の建設や運転は市場原理に支配される。米国の現在のエネルギー市場を考える上では、シェールガス革命と呼ばれる新たな採掘手法の実用化による天然ガス可採埋蔵量の爆発的な増加が欠かせない要素である。今から5~6年前には予想されていなかったこの革命で、安価な天然ガスが電力市場における発電コストを支配し、電力価格は低く抑制されている。現在進行中の新規原発建設など多くの原子力開発プロジェクトは今から5~6年前までに計画されたものであり、コスト上昇が予想されていた天然ガス火力に対する経済的優位性を前提としていた。これらの計画はシェールガスの状況が明確になる過程で一部は見直され、既に相当段階まで進んでいたプロジェクトは建設完了に向けて動いている。このようなシェールガス革命の影響により、新規原発建設の動きは抑制され、既存原発の維持に重点が置かれている。以下に、新規原発建設や一部原発の廃炉に関わる状況について示す。

(1) 新規原発の建設

昨年、米国で34年ぶりとなる新規原発建設プロジェクトの建設・運転一括許可(COL)がVogtle-3, -4号機(ジョージア州)およびV.C.Summer-2, -3号機(サウスカロライナ州)に対して相次いで発行された。これらは既存原発に対する増設プロジェクトであり、いずれもウェスティングハウス社のAP1000設計である。一方、やはり計画の進んでいたSouth Texas Project-3, -4号機(テキサス州)の増設計画では、近年の市場動向と福島第一原発事故を踏まえ、出資企業の一部が出資を取りやめ、プロジェクト継続が不透明な状況となっている。この他、デューク社によるレヴィ郡(フロリダ州)の新規原発建設計画(AP1000×2基)では2008年にウェスティングハウス社などに設計・調達・建設の契約発注がなされていたが、2013年8月にはこの契約が解除された。これらの計画ではCOL取得は予定通りに実施することとしており、今後の市場動向を踏まえた建設の選択肢を確保しようとしている。

この他、米国内には1970年代に建設に着手した後、電力需要が予想ほどに伸びずに1988年に建設が中止されていたWatts Bar-2号機(バブコック&ウィルコックス社のPWR)、Bellfonte-1号機(ウェスティングハウス社のPWR)について、これらを進めるテネシー峽谷開発公社(TVA)は2007年に建設を再開した。しかし、TVAは近年の市場動向を踏まえて、建設の経済リスクを抑制するためにWatts Bar-2号機の炉心に燃料を装荷するまではBellfonte-1号機建設再開に着手しないこととした。このように、米国内での原発建設は現在進行中の5基を除き、当面の進展は見込めない状況にある。

しかしながら、海外の動きについて見ると、AP1000は中国での建設が米国よりも早く進んでおり、2009年にHAIYANG-1, -2号機およびSANMEN-1, -2号機の4基の建設が開始されており、米国での4基と並行して建設が進められている。このようにウェスティングハウス社では国内外で8基のAP1000建設を進めている。この他にも米国の原子炉メーカー等では海外への原子力輸出に向けて政府との連携を図っている。

(2) 既存原発における廃炉の決定

電力価格の低迷を背景として、Kewaunee原発(PWR×1基、ウィスコンシン州)およびVermont Yankee原発(BWR×1基、バーモント州)の廃炉方針の決定が最近相次いでなされた。これらの原発は運転上の問題はなく、共に20年間の運転延長許可を最近受けたばかりであったが、経済的な理由から廃炉が決定された。これらは共に1ユニット構成で運用コストの低減が困難な側面が天然ガスとの競合を更に困難なものとしていた。これらの廃炉決定に際して原子力産業界からはベースロードとしての原子力、エネルギー源の多様性といった視点でのエネルギー政策が不備であるとの批判が寄せられた。このように既存原発の一部については、熾烈な市場競争の中で運転停止に追い込まれるものも出ているが、大部分の原発は福島第一原発事故を踏まえた安全対策を施しながら運転を継続している。

なお、San Onofre原発(PWR×2基、カリフォルニア州)とCrystal River原発(PWR×1基、フロリダ州)についても最近廃炉が決定されたが、これらはそれぞれ蒸気発生器伝熱管の問題、および格納建物のコンクリートのひび割れの問題など、修理費用が膨大になると予想されたことからの廃炉決定である。

3. 注目を集めるSMRと原子力輸出

上記のように、米国内での新規原発建設は一部を除き停滞しているが、小型モジュール炉(SMR)の実用化に向けた動きは活発化している。米国においてSMRは電気出力300MW以下のモジュール型炉と定義される。SMRの代表的な特徴としては(1)原子炉容器などを工場生産することで製造コストを低減、(2)固有の安全特性を生かした運転方法の採用で運転コストを低減、(3)半地下式の構造を採用して対テロ対策などセキュリティコストを低減、(4)1基当たりの建設コストが小さくなり投資リスクを抑制、などが挙げられる。

米国では電力自由化の中で個々の電力会社の持つ資本力が減少しており、従来のような大型炉の新規建設が困難になっている。また、多くの石炭火力発電所が老朽化し、その代替としてもSMRのような規模のプラントは優位性を持つ。更にはSMRを海外に展開することで、原子力産業界のみならず、サプライチェーンを構成する一般産業界を巻き込んだ経済効果が期待できる。このよ

うな背景から DOE では SMR の実用化を重点テーマと位置付け、公募型の民間支援計画を実施している。

このプログラムの具体化にあたり、DOE はシカゴ大学の研究者らに SMR のコスト予測を含む評価を依頼している。このシカゴ大学の研究者らの報告書²⁾によると、目標コストの達成には多数基の建設を通じた学習効果が必要とされている。このように、SMR とは既存の軽水炉技術を基に小型化のメリットを生かしてコスト低減を図るものであり、想定通りにコスト低減が達成できるかどうかは実際のプラント建設を通じてのみ確認でき、ある意味実験である。

DOE では昨年、SMR を 2022 年までに配備し得る民間の SMR 実用化計画を支援する公募プログラムを発表し、軽水炉技術を基本とした 4 つのグループが応募した。DOE は当初、2 つの設計を選定して共に 2022 年のプラント稼働に向けて支援してゆくものと見られていたが、昨年 8 月に発表された選定結果ではバブコック & ウィルコックス社の関連企業である mPower 社のみが選定された。この背景にはもう一つの当選候補とされていたウェスティングハウス社の設計が mPower 社の設計に類似しており、同様の設計に全ての政府支援を注ぎ込むことは避けたいとの意思があったものと思われる。この結果、DOE は SMR 支援の 2 次募集を行うこととし、その選定基準に固有の安全特性などを含む「革新性」を要求する姿勢を打ち出した。この 2 次募集では配備時期を 2025 年とすることで、新たな技術開発要素への対応の観点からの配慮がなされた。しかしながら、SMR の当初の狙いがコスト低減であったことを踏まえると、2 次募集で採用される設計が何を指すものかが不明確になっており、その選定における判断が将来の成果を左右するものと思われる。2 次募集には 1 次募集で選にもれたウェスティングハウス社を含む軽水炉技術に基づく 3 グループと、ヘリウム冷却による高温ガス炉設計の 3 グループが応募しているが、2 次募集については「革新性」の捉え方に依存して今後の方向性が定まるものと思われる。

一方、コスト低減という「実験」の最初のデータを提供するのは mPower 社のグループである。mPower 社では電力会社である TVA との強い連携をはじめとして、多くの関連企業体と連携して 2022 年の初号機配備を目指した活動を実施しており、これまでに約 1 億ドルの DOE 資金が提供された。しかしながら、SMR のコストが目標レベルに到達するまでには半ダース規模のプラント建設が必要と考えられ、DOE の現行予算に盛り込まれている 4 億 5,200 万ドルの支援で到達できるレベルには限界がある。この長期的な資金を誰が負担するべきかが今後議論されるものと考えられるが、DOE 長官の諮問委員会である SMR 小委員会は昨年 11 月、当時の Chu 長官に対して、国内に SMR 産業を構築するため

には現状の 5 年間の支援プログラム終了後も追加の財政的支援が必要であると答申した。同委員会では、活力ある SMR 産業を構築してゆくには政府による追加支援が必要であり、中途半端なものでは無駄に終わるとして、支援を実施すると判断するのであれば成功を約束する十分なものでなければならず、融資保証、固定価格電力買い取り制度など十分な規模の支援が必要であるとした。また米国の SMR 産業が成熟すれば、米国は原子力開発において主体的にふるまうことになり、核不拡散分野における米国の影響力確保にも役立つと付け加えている。

4. 米国における原子力研究開発

前述の SMR に関わる民間支援のほか、DOE の原子力に関わる研究開発は、既存炉の継続運転を支えるもの、革新的将来炉設計やシビアアクシデント耐性向上に関わるものなどからなっている。

米国ではほとんどの既存原発が当初許可の 40 年に加えて 20 年間の運転延長許可を取得しているが、DOE は「軽水炉持続可能性プログラム」において 60 年を超える運転延長を支える科学的根拠の整備を目指している。

革新的将来炉については、多種多様な燃料サイクルの可能性を念頭に設計研究を主体とした長期的な研究が継続されている。そして、最近この分野で DOE が民間支援に乗り出している。すなわち、DOE では「次世代の革新的原子炉の設計、建設、運転に関わる民間技術開発支援プログラム」を公募しており、ジェネラル・アトミクス、GE-日立、Gen4 Energy (旧 Hyperion Energy) およびウェスティングハウスの 4 社に合計 350 万ドルの資金を提供することを本年 6 月に発表した。この支援額は SMR に比べるとはるかに小さいものであるが、このような新型炉分野において DOE が民間企業を支援するのはこれまでにないことであり、DOE の新たな取り組みとして注目される。

この他、DOE では使用済み燃料および高レベル放射性廃棄物への対応戦略を支える研究として、中間貯蔵施設の設計概念の創出、中間貯蔵施設および最終処分施設に関わる評価研究を進めている。この対応戦略とは昨年、「米国における原子力の将来に関わるブルーリボン委員会 (BRC)」がまとめた報告書に記された地元の理解をベースとした廃棄物対応方策を具体化するための素案であり、本年 1 月に DOE がまとめたものである。しかしながら、議会下院ではこれまでもユッカマウンテン廃棄物処分場計画の復活を強く主張する共和党議員らが、廃棄物処分場をゼロベースで募集する現在の戦略案に反対しており、BRC 勧告に即した戦略の具体化は短期的には望めない状況となっている。

5. 再生可能エネルギーとの関連

第 1 図に示したように、今後 30 年間の標準的な電力

需給予測では、原子力はほぼ現状の比率を維持して発電量は若干増加する。一方、現在米国では再生可能エネルギー発電に対して向こう10年間の生産税額控除(PTC)を与えており、風力発電の設備容量が急激に増加している。このようなPTCを受けた風力発電は安価な天然ガス火力に匹敵する採算性を有しており、これが原子力発電の競争力を低下させている。しかしながら風力は電力の需給バランスを困難にし、スマートグリッドと呼ばれる電力融通システムやバックアップ発電の整備が電力網の安定性維持に欠かせない。現在米国では多くの地域でこのような電力網の安定性維持のコストをだれが負担するかが議論となっており、更なる再生可能エネルギーの利用拡大への大きな制約となりつつある。なお、長期的には低コストのエネルギー貯蔵技術が開発されれば、抜本的な対策となり得る。例えば、蓄電池や燃料電池といった分野では急速な技術革新が進んでおり、こういった技術革新によって10年、20年といった時間スケールでエネルギー貯蔵コストが大幅に低減される可能性がある。そのような可能性が再生可能エネルギーの本来の意味での経済性を左右するものと思われる。

このように、原子力は既に再生可能エネルギーに関わる政策によって影響を受けているが、今後見込まれる再生可能エネルギー利用の拡大の中ではその政策によってより大きな影響を受け、また技術革新によっても大きな影響を受け得るものと思われる。

6. 米国のまとめ

米国の原子力開発に対しては、福島第一原発事故の影響は顕著でないものの、シェールガス革命の結果として新規原発建設の動きは限られ、ここ10年程度は既存原発の維持が主体になるものと考えられる。この間、SMRについてはDOEの支援の下で実用化に向けた動きが進むものと考えられる。特に今後予想されるCO₂排出規制強化の中での石炭火力発電所の更新はSMR需要を具体的なものとする可能性を持つ。米国ではこのようなSMRの国内での実用化とこれを踏まえた海外展開を目指しており、官民の力を合わせた開発が展開されようとしている。

II. カナダの動向

カナダにおける原子力開発の状況は概略、米国に類似したものである。カナダにおいてもシェールガスの可採埋蔵量は増加しており、開発と生産が進められている。そして、原子力を重要なエネルギー源と位置付けて既存原発の維持を主体にその利用を継続する政策や、海外への原子力輸出によって産業の振興を図ろうとしている点においても共通と言える。ただし、カナダにはいくつかの米国と異なる環境があり、そのような内容を中心にカナダの動向について以下に紹介する。

1. 原子力に関わるカナダの特徴

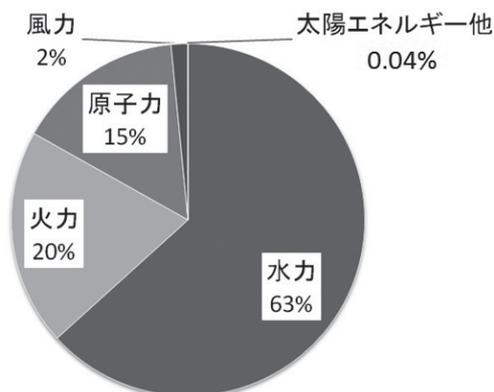
カナダでは水力発電が60%を超えており、原子力は火力に次いで3番目の約15%のシェアを占めている(2012年)。ただし、カナダの電力構成は州ごとに極めて大きな差があり、ケベック州とブリティッシュコロンビア州はそのほとんどが水力発電によるのに対し、オンタリオ州は約半分が原子力によっている。(第2図)

カナダでは現在19基の原発が稼働しているが、その大部分(18基)がオンタリオ州にある。また、同州の原発は構成ユニット数が多いのが特徴であり、Bruce原発8基、Pickering原発6基(かつて8基あったが現在2基は廃止中)、Darlington原発4基となっている。なお、オンタリオ州の水力発電は北部に偏っており、電力需要の大きな南部では火力発電と原子力が地域的な需給バランスをとる上で極めて重要な役割を担っている。

この他、カナダはウラン資源が豊富であり、その生産量の約9割を輸出している。また、天然ウランの燃料を使用し重水を冷却材とするCANDU炉を独自開発してきており、国内の全ての原発に導入するとともに、アルゼンチン、中国、インド、パキスタン、ルーマニアおよび韓国に輸出している。更に、カナダでは医療用に用いられる⁹⁹Moなどのラジオアイソトープの生産が盛んで、世界の国々に供給している(⁹⁹Moは世界におけるシェアが約4割)。

2. 福島第一原発事故の影響

カナダ原子力安全委員会は福島第一原発事故後、タスクフォースを組織して対策を検討し、2011年10月に短期、中期、長期(最長2015年末まで)の対策を勧告しており、これらの勧告に即した安全規制が進められている。このようなカナダにおける安全対策は米国のアプローチと類似性を持つ。一方、国民の原子力エネルギー利用への支持は米国ほどに高いものではなく、特に福島第一原発事故以降は原子力に反対する声も強まっている。



第2図 カナダにおける2012年の発電量のエネルギー源別構成(Statistics Canada³⁾より作成)

3. 既存原発の運転と新規原発の建設計画

前述のように、カナダの原子力発電所はオンタリオ州に集中しており、オンタリオ州政府の政策が原子力の行方に大きく影響する。現在、カナダ連邦政府やオンタリオ州政府は米国同様に、温室効果ガスの排出抑制を重視するとともに原子力を重要なエネルギーと位置付け、現状の原子力発電の割合を将来的にも維持する方針を打ち出している。そして水力と原子力をベースロード電力とし、天然ガス火力をピーク電力への対応に使用する計画である。

近年、Bruce, Pickering の各原発では大規模な設備更新が完了し、運転が再開されたが、今後とも Darlington 原発の設備更新が必要となっている。そこで、ベースロード電力としての需要を満たすために、Darlington の4つのユニットを順次設備更新してゆくことで同時に2つ以上のユニットが停止しないように計画している。また、オンタリオ州では今後の電力需要増加に備えるため、Darlington 原発に最大4基の増設を検討していた。この新規建設計画の主体となる州政府の出資によるオンタリオ・パワー・ジェネレーション (OPG) 社では AP1000 あるいは CANDU 炉の改良型である CANDU-6 のどちらか一方をまず2基建設することを検討していた。この計画では既に環境影響評価がなされており、カナダ原子力規制委員会は昨年、原発サイト準備許可を与えた。この種のライセンス発行はカナダでは25年ぶりである。本年6月、ウェスティングハウス・エレクトリック・カナダ社と Candu エナジー社はそれぞれの設計による2基の増設設計案を OPG に提出しており、今後 OPG はどちらかの設計を選択して建設許可の申請を行うことになると見られていた。しかし、オンタリオ州政府は10月上旬、最新の電力需要見通しや原発建設コスト見積もりを踏まえて、この2基の増設計画を本年末にまとめるオンタリオ州の長期エネルギー計画には含めないことを発表し、この増設計画は当面凍結された。この他にもカナダにはいくつかの原発建設の

案があるものの、あまり具体性を帯びていない。

4. 原子力輸出

カナダでは CANDU 炉を広く海外に輸出した実績があり、これらの原子炉の維持管理分野でのノウハウを生かして既存プラントに対する技術サービスはもとより、CANDU 炉の改良型設計を新たに輸出するべく取り組んでいる。また、中国やインドへの燃料供給に向けても協定類を整備するなど、準備を進めており、更にはラジオアイソトープの輸出についても継続してゆく見込みである。

5. カナダのまとめ

以上のように、カナダではオンタリオ州を主体として、温室効果ガス排出のほとんどない原子力を今後ともベースロード電力として重視しており、既存原発の設備更新を行いながら今後とも従来のレベルで維持する方針である。そして、今後の電力需要見通しに応じて新規原発の建設も考えられる。また、カナダでは原子炉、燃料、ラジオアイソトープなどの輸出を今後とも継続する計画である。

— 参考資料 —

- 1) U.S. Energy Information Administration : Annual Energy Outlook 2013 Early Release Overview.
- 2) R. Rosner, S. Goldberg, "Small Modular Reactors—Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S.", Dec. 2011.
- 3) Statistics Canada:
<http://www.statcan.gc.ca/start-debut-eng.html>

著者紹介



佐藤一憲 (さとう・いっけん)

日本原子力研究開発機構(2013年9月まで
ワシントン事務所長)

(専門分野 / 関心分野) 高速炉の安全研究

出力が変動する再生可能エネルギー発電の 大量導入と電力システムの進化 (1)

新たな課題と柔軟性向上の考え方

東京大学 荻本 和彦

世界そして我が国で、持続的なエネルギーシステムの構築に向け、再生可能エネルギーへの期待が高い。再生可能エネルギー導入の大きな割合を占める太陽光発電や風力発電など、出力の変動する再生可能エネルギー電源の導入を含め、将来の電力システムの課題と対策について、技術面、制度面に分けて紹介する(3回シリーズ)。

第1回(Part 1)では、変動する再生可能エネルギーの大量導入による電力システムの変動(variability)の増加とそれに対応する柔軟性(flexibility)の低下は、電力システムの需給調整の課題の解決をこれまで以上に難しくする状況とそれに対する対策の可能性を解説する。

I. 電力システムの新たな課題

1. 電力システムの展望^{1,2)}

持続可能で安定なエネルギー需給をめざし、今後の日本そして世界の電力需給には、着実な変化が想定される。需要においては、住宅/業務用ビルで、既存の省エネルギーの進展と並行して、ヒートポンプ空調・給湯・加熱などの温冷熱分野、電気自動車(EV)に代表される輸送分野を中心に、新たな電力需要の増加や生活の質(QOL)を高める電力利用の進展により、エネルギーの最終消費に電力が占める割合は着実に増加する。住宅に設置される太陽光発電を含む各種の分散電源の導入・普及も加わり、住宅/業務用ビルの電力需給の形態は大きく変化すると考えられる。産業においても、低温の加熱や乾燥にヒートポンプがより広く用いられるようになるなど、一段の電力化が進むと考えられる。我が国では、福島第一発電所原子力事故以降、電化の抑制、電力需要の省エネルギーなど、将来の電力需要を引き下げる意見が多く見られる。しかし、欧米のビジョン、ロードマップ(例:2011年12月の欧州委員会報告書 Energy Roadmap 2050)³⁾では、低炭素化を含む持続可能なエネルギー需給の実現には、上記の熱需要、輸送部門の電化が不可欠であり、全般的な省エネルギーの進展において

High Penetration of Variable Renewable Generation and Evolution of a Power System (1): Emerging issues and technical measures: Kazuhiko OGIMOTO.

(2013年 10月9日 受理)

も将来の電力需要には大きな低下を見込まない例が多い。

これに対して供給側では、低炭素化に向け、火力発電は、天然ガス複合サイクル発電のガスタービンの高温化、石炭ガス化複合発電の導入などにより一層の高効率化が図られ、原子力発電は安全に一層配慮した着実な利用が求められる。そして再生可能エネルギー発電は、エネルギー需給の持続可能性の向上のため、今後更なる導入・普及が期待される⁴⁾。

2. 再生可能エネルギーへの期待

再生可能エネルギーとは、太陽光・熱、風力、海洋、バイオマス、水力など、太陽や地球のエネルギーを起源とする、人間の時間スケールにおいて持続可能なエネルギー源である。再生可能エネルギーの中で、水力、太陽光、風力による発電や、太陽熱、地熱、バイオマスによる発電と熱供給などはすでに大規模な利用が行われており、また、バイオマスによる燃料供給なども始まっている。潮汐発電、潮流発電、海洋温度差発電などの海洋エネルギーについては、初期段階での導入、技術開発、新たな導入検討が行われているなど、今後展開が期待される分野も多い。さらに、欧州連合(EU)の2009年6月施行の「再生可能エネルギー推進に関する指令」では、ヒートポンプが利用する空気熱、地中熱、水熱を「自然界に存在する永続的に使用可能なエネルギー」として再生可能エネルギーと定義している。一口で再生可能エネルギーといっても、様々な定義があることには注意が必要

である。

中緯度に位置し、一定の湿度や降雨量がある日本においてはこれまで水力開発が進められてきた。今後は、太陽光発電が、全国的に偏在性が少ないエネルギー源として導入が進められ、風力、中小水力、地熱などは、それぞれのエネルギー賦存量や土地利用の条件により成立すると考えられる。再生可能エネルギーの導入は、日本ばかりではなく、国際的な流れである。EUは2020年までの温暖化ガス削減の中期目標の中で、域内のエネルギー消費に占める再生可能エネルギーの割合を現在の約2倍に当たる20%に高める計画を発表している。米国は、連邦政府レベルで様々な研究開発を含めた導入促進政策を進めるとともに、州政府を中心に再生可能エネルギーの導入促進施策が実施されている。多国間の取り組みとしては、国際エネルギー機関(IEA)に加え国際再生可能エネルギー機関(IRENA)などが活動するとともに、「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」は、「再生可能エネルギー特別報告書(SRREN)」を2011年5月に発表した。

日本では、太陽光発電を始め、再生可能エネルギーに関する技術開発が、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)を始めとする様々な機関によるプロジェクト、産官学の協力、各企業の活動など多様な形態で行われている。また再生可能エネルギー導入のための調査や政策検討は、環境省、資源エネルギー庁を始めとする機関において行われている。特に、環境省においては、「我が国における中長期の温室効果ガス削減目標を実現するための対策・施策の具体的な姿(中長期ロードマップ)」の検討を目的とし、再生可能エネルギーの導入・普及について、資源量、導入可能性、導入施策などの体系的な検討が行われた。この検討は、「2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会(2011年8月～)」により継続されている。

2010年6月に資源エネルギー庁が発表した現行のエネルギー基本計画では、一般水力を含めた再生可能エネルギーによる発電を現状の約800億kWh(全発電電力量の8%)から、2030年には2,140億kWh(同約20%)に増やす計画である。2010年12月、環境省の中長期ロードマップ小委員会の中間整理では、2020年に1次エネルギー消費の10%を再生可能エネルギーで供給するとされ、エネルギー・環境会議のコスト等検証委員会では、再生可能エネルギーを含め電源のコストの見通し、再生可能エネルギーのポテンシャル、導入可能量などが取りまとめられ、現在行われているエネルギー基本計画の議論の行方が注目されている。

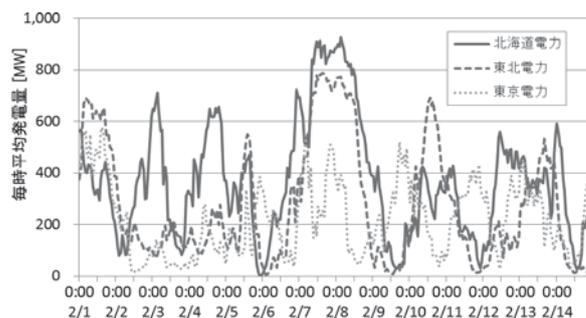
海外での太陽光発電や風力発電の導入状況と、国内の原子力発電に関する信頼低下のため、国内における再生可能エネルギーに対する期待は大きい。しかし、再生可能エネルギーにより、現在日本が必要とする極めて多量

のエネルギー需要の一定部分を賄うことは容易なことではない。太陽エネルギー、風力エネルギーなどは、再生可能ではあっても密度が低く、発電量が変動するエネルギーであり、その発電出力は天気や時間の変化により大きく変動する。このため、これらの発電設備は利用率が比較的低く、一定の発電量を得るためには大きな設備容量(太陽光発電の場合、我が国では利用率が12%程度と低く、発電電力量のシェア6%を実現するためには既存の発電設備の20%にあたる5,000万kW程度)が必要である。このため、2030年に5,000万kW程度の太陽光発電、3,000万kW程度の風力発電の導入を想定した場合、我が国の電力システムの需給構造、運用特性が大きく変わり、それに伴う技術的課題を解決する必要がある。また、再生可能エネルギーの利用の拡大に向けては、今後の技術開発の成果を適用しても、経済性をはじめとして、立地制約、土地利用、地元の理解、送配電網の整備など、解決すべき課題は多い。再生可能エネルギーの導入・普及に向けてはこれら多様な課題を解決してゆく必要があるが、本稿では、再生可能エネルギーの発電利用における電力システム安定運用の課題と諸施策について述べる。

3. 再生可能エネルギーの変動性による需給調整の課題

日本の再生可能エネルギーの中で最も大きなエネルギー量が期待される太陽光発電と風力発電は、いずれも電力の形でエネルギーを得る。そしてそれらの発電出力は、日射や風速の変化に伴い大きく変動する。第1図に北海道、東北、東京の3電力会社管内の風力発電出力の変動の例を示す。

変動性を考える上でまず考慮すべきことは、発電出力変動の空間的な「ならし効果(smoothing effect)」である。「ならし効果」とは、太陽光発電や風力発電は多数の小規模システムが広域に分散設置されるために、地域的な広がりによりそれぞれの気象条件が異なり、そのため個別の発電量の変動が相殺し合計の発電量の変動が緩和されるというものであり、それ自体に費用や手間はかからない。ならし効果を活用するためには、気象条件が異なるできるだけ広い面積に太陽光発電や風力発電を分布させ



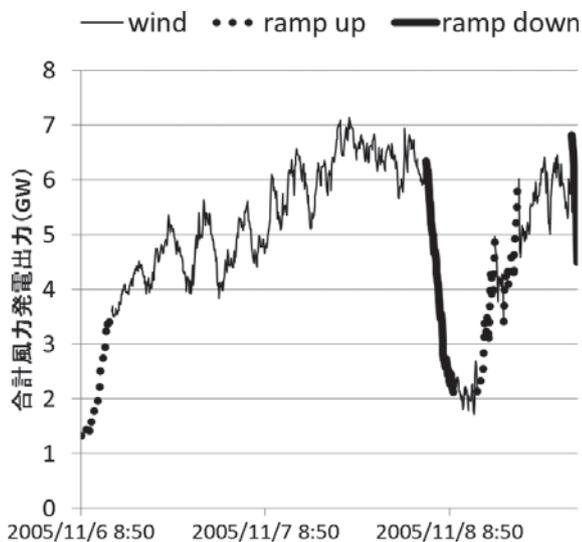
第1図 毎時平均発電量(1,000MW 導入相当, 2/1 ~ 2/14)

ることが必要である。ヨーロッパの場合、北海、バルト海側と地中海側など、遠く離れた場所の風力発電を組み合わせるといった考え方が提案されている。

また、太陽光発電と風力発電が異なる変動を示すように、変動する再生可能エネルギー発電であっても、太陽光発電や風力発電のほか、潮汐発電や潮力発電など異なる技術を組み合わせることで、再生可能エネルギー発電の発電電力量を確保して、変動を低減することができる。これは「技術的ならし効果」と呼ばれ、欧米では、各種の再生可能エネルギー発電にまたがる導入ビジョンや導入計画が、変動の緩和という点にも着目して検討されている。

しかし、ならし効果を想定しても太陽光発電の時間による変動、太陽光発電、風力発電の大きな天気の変化による変動は残り、早い周期の変動もすべてが解消されるわけではなく、これらの変動は導入量の増加とともに拡大してゆく。さらに、第2図に示すような大きな気象の変化で稀に起こる可能性のある地域全体の発電出力が一定時間継続して上昇あるいは低下するランプ現象(点線部は通常部で、実践部は ramp-up は増加方向、丸点部は ramp-down は減少方向のランプを示す)は、再生可能エネルギー発電の導入量が増加し、その出力変動の幅が大きくなると、これまでにはない電力システム運用への脅威となる。

これらの大きな発電出力の変動は、電力システムにおいて不可欠な瞬時から年間など様々な時間レンジでの需給調整を困難にするため、その対策は再生可能エネルギー導入の究極かつ最大の課題となる。電力システムではシステム全体での需要と供給が毎時、毎分、毎秒バランスしていることが求められる。需要バランスが崩れると周波数が変動し、本来の値である 50Hz や 60Hz から大きく外れてくると、発電機やモーターが安定した運転を続けることができず、大停電を引き起こす原因となる。



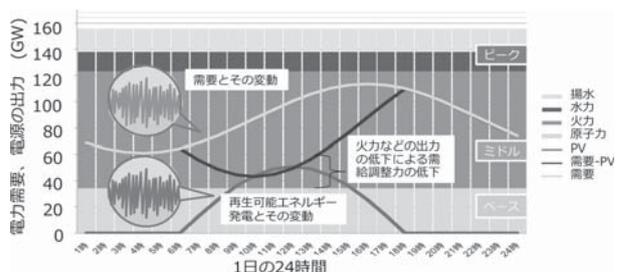
第2図 風力発電ランプの例

この電力システムの需給調整の対策を考える場合、家一軒など部分的なシステムの需給の変動ではなく、需給調整が行われる電力システム全体、あるいは連系して需給調整が行われる複数の電力システム全体での合計の需給変動を対象とすることが本質的である。

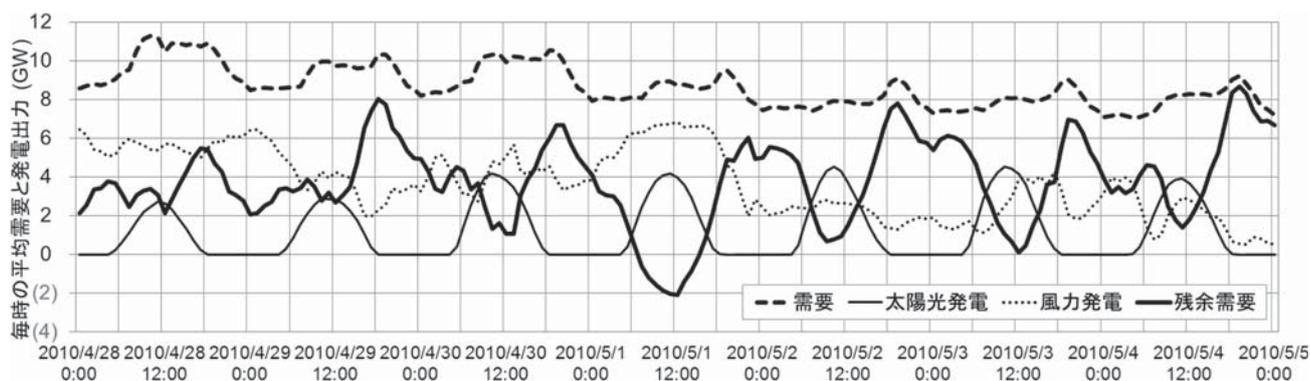
電力システムでは、従来、需要や電源事故による変動があっても安定した運用を続けるために、火力発電、水力発電を中心に、ガバナーフリー(各発電機の自律的な制御)、負荷周波数制御(中央からの集中制御)、経済負荷配分などの複数の発電の制御や運用による需給調整機能が備わっており、システム全体の柔軟性(flexibility)を形成している。しかし、再生可能エネルギー発電の導入量が増加すると、発電量の変動の増加に加え、みかけの需要(残余需要と呼ぶ)の減少のため需給調整可能な発電所の運転台数が減ることによる柔軟性の低下という2つの理由により、電力システムの需給調整の課題が顕在化する。第3図の太陽光発電の場合に示すように、従来の需要の変動に太陽光発電の変動が加わり需給変動が拡大することに加え、需要-PVで示される残余需要が小さくなることで、「ミドル」のゾーンで示される火力発電の運転量が少なくなり、火力発電を中心に賄われる電力システムの柔軟性が減少する。再生可能エネルギーの導入の進展に伴い、最初は、周波数調整など短時間の柔軟性が不足するが、再生可能エネルギーの導入量の更なる増加に伴い、昼と夜の変動、季節による変動、さらには年によるムラ(水力の場合の渇水年と豊水年など)など、次第に長い時間領域の変動性に起因する需給調整の課題が顕在化してゆく。第4図に、東北電力管内に7GWの太陽光発電と9GWの風力発電の導入を想定した場合の、毎時の需要、それぞれの発電量、需要から両者の発電量を差し引いた残余需要の変動例を示す⁵⁾。

このような状況は、風力発電の導入が進んだヨーロッパや、米国の一部で実際に発生している。

(なお、柔軟性は、狭義には有効電力の調整力として議論されることが多い。しかし、広義には、送電網の潮流の変化に対応する電圧・無効電力制御、送配電網の事故時の系統切り替えなど、より広い領域を含む場合もある。)



第3図 太陽光発電の大量導入時の電力システムの需給イメージ



第4図 最小残余需要の発生日とその前後3日間の需要・太陽光発電量・風力発電量・残余需要

II. 柔軟性向上のための技術的施策

電力システムの柔軟性を向上する技術的施策としては、(1)従来の需給調整を担ってきた負荷調整可能な集中電源の更なる活用、(2)再生可能エネルギー発電の出力調整、(3)需要の能動化、(4)新しいエネルギー貯蔵技術の導入、(5)送電網の拡充と連系線の活用が考えられる。

1. 負荷調整可能な集中電源の更なる活用

従来、需給調整を担ってきた負荷調整可能な集中電源とは、天然ガス、石炭、石油などを燃料とする火力発電、水力発電(貯水池式)、揚水発電などである。

火力発電は、起動時間(通常、コールド状態からは数時間)、停止時間、負荷変化速度などの技術特性をさらに高めることが望まれる。また、第3図で示した運用可能な台数の減少に対応し、より多くの発電機を運転し需給調整力を増加するためには、最低運転電力の低減も課題となり、それらの運用においてトレードオフとなる効率低下の対策、劣化の低減も求められる⁶⁾。

水力発電は、停止から数分で最大出力に到達する良好な起動時間、負荷変化速度の特性を持つ。2つの貯水池の間で水を上げ下げする揚水発電は、発電時の水力発電の技術特性に加え、再生可能エネルギー発電の余剰分を揚水運転で吸収して火力発電などの負荷調整可能な電源の最大活用を可能とすることができる。さらに新しい励磁方式を用いた可変速揚水であれば、揚水運転中に入力を広い範囲で調整ことができ、さらに効果的な調整力となる。

既に風力の大量導入が進み、需給調整力の不足に「現実には」悩んでいる欧州では、Flexible Generation⁷⁾などのキーワードのもとで既設および新設の発電所の仕様、設計に関する具体的な検討が行われている。また、米国においては、風力発電の変動に対応するために、起動特性、調整力特性に優れた火力発電の設置が行われている。

熱供給と組み合わせた熱併給発電(Combined Heat and Power)も、小規模で多数の電源の調整方式を、経

済性を含めて確立することで、需給調整に活用できる可能性がある。しかし、これを利用するためには、オンサイト設備として余力が必要である、一般に熱の貯蔵が難しく1次エネルギーの利用効率が低下する、規模の小さな設備に対し制御設備の費用が発生するなどの課題があり、熱併給発電の需給調整への適用には今後の検討が必要である。

2. 再生可能エネルギー発電の調整力

太陽光発電では系統連系用インバータの制御で、風力発電では羽根のピッチ角制御により、発電電力を抑制方向に調整することができる。この機能を使って需要の小さい季節や時間帯など一部の期間で発電を抑制することで、より多くの設備の導入を可能とし、全体としてより多くの再生可能エネルギー発電量を、経済性を損なわずに利用することができる。実際、既存の水力の場合でも、梅雨期や台風の到来などによる流量の大幅な増加の際にはダムに貯水することができず、我が国の水力発電では年間発電量の数%に相当する水が利用できず放水される。発電できるはずのエネルギーを捨てるのは「もったいない」という意見もあるが、水力の場合のダムからあふれる水と同様、太陽光発電や風力発電の電力を無理に利用しようとする電力システムの安定性が損なわれるという危険が生じる。自然を利用するためにはエネルギー利用の場合も適切な管理が必要である。

また、必要に応じて通常行われる最大電力制御ではなく一定の抑制をした点で運転しておき、出力の増加方向の調整を可能とすることができる。この場合を含め、抑制することにより、発電電力の上振れの一部が失われることはデメリットである。しかし、抑制により、短い周期の発電電力の変動を効果的に低減することができ、発電電力の一部が利用できないとしても、抑制により大半のエネルギーを安定に利用できるという効果も期待できる。今後、風力発電や太陽光発電について、変動の特性分析、出力予測技術に加え、抑制される電力量を最小にして、電力システムに与える変動影響を最小化するような風力発電や太陽光発電の抑制方式の研究、技術開発が

重要である。

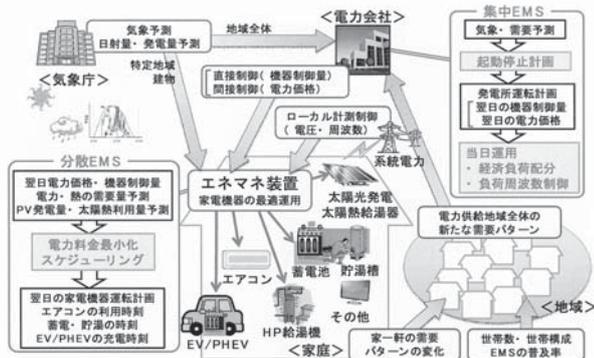
3. 需要の能動化

近年、従来のデマンドレスポンスから進化し、ICT (Information and Communication Technology: 情報通信技術) の応用により需要調整を自動化する、需要の能動化 (人間を介さない自動デマンドレスポンス、いわゆるスマートグリッドのコア技術) が注目されている。需要の能動化の核となる技術は、住宅用向けの HEMS (Home Energy Management System) やビル向けの BEMS (Building and EMS) などの分散型のエネルギー管理 (xEMS) である。

ヒートポンプ給湯、電気自動車への充電といった電力の使用時間の自動調整、個別の電力使用状況やシステム全体の需給状況の見える化による省エネ・節電行動やライフスタイルの変化、太陽光発電や家庭用コジェネレーションなどの分散電源や蓄電池の利用など、需要の能動化の適用範囲は今後拡大すると考えられる。

3.11 東日本大震災後、個別のエネルギー源の確保、さらには節電の実施に向け、HEMS や BEMS への政策的な導入支援⁸⁾が行われ、その導入と更なる技術開発は加速している。今後、情報通信の分野を含めた様々な関連分野の規格化とそれに基づく製品開発が進むと考えられる。さらに、分散エネルギー管理は、省エネルギーや節電に需要の能動化を加え、さらに住宅などの建物の快適性の追求、蓄積データの活用など、大きな付加価値の創出が期待される。

再生可能エネルギーの発電電力の変動による需給調整の課題の解決に向け、分散エネルギー管理を活用した集中/分散のエネルギー管理の協調運用 (以下「協調運用」) が期待されている⁹⁾。また、次項で述べる 2 次電池やその他のエネルギー貯蔵技術の技術開発も進められており、経済性の優れた理想的な貯蔵技術が実現すれば、電力システムの需給調整の課題の最終的な解決となる。しかし、それらの基礎となる視点が「協調運用」である。



第 5 図 需要の能動化による集中/分散エネルギー管理の協調

協調運用とは、これまで需給調整に活用してこなかった需要側の無数の設備を需要の能動化により電力システム全体の需給変動に協調して調整する新たな電力システム運用の考え方である。第 5 図に示すように、電力システムの集中管理システムから各需要に電力システム全体の需給状況を反映した制御信号、情報を送り、住宅など各需要を管理する分散エネルギー管理が一定の判断のもとで需要を制御する。協調運用に向け、エネルギー管理装置、情報・通信を始め様々な技術、制度の検討が加速している。協調運用の例としては、現状電気料金の安い夜間に固定した運転をしているヒートポンプ給湯機による沸き上げや、今後の電気自動車やプラグインハイブリッド自動車への充電を、需給状況に応じたダイナミックな電気料金を前日に決定し分散エネルギー管理に伝えることで、電力需給の状況に合わせて最適な時間帯に行うよう調整することが検討されている¹⁰⁾。また、先に述べた太陽光発電や風力発電のランプ現象による継続した大きな出力減少あるいは増加に合わせて機動的に需要を調整することができれば、需給調整を担う発電所への負担を軽減し、電力システム運用の経済性の向上が期待される。

協調運用にあたっては、再生可能エネルギー発電と需要の予測¹¹⁾のもと、電力システム全体の需給調整の観点から個々の需要あるいはアグリゲーターが束ねた需要を調整する方法¹²⁾について、現状電力会社の中央給電指令所が担っている集中エネルギー管理側の技術を含め、全体を整合させる技術も不可欠である。

我が国の原子力発電所の再稼働がなく全基停止という想定のもとで、2012 年夏の節電目標の検討の基礎となる電力需給の見通しを検証した「需給検証委員会」が、揚水を含む需給調整の詳細を検討するとともに、「より合理的なピーク時の電力不足解消策」として需要の活用等にも可能性を見出したことは、ここで述べた協調運用、需要の活用の端緒と言える。

4. 新しいエネルギー貯蔵技術の導入

変動する再生可能エネルギーの導入量の更なる増加による電力の余剰に対しては、これを貯蔵することが最終的な対策となる。しかし揚水発電所の貯水量には新規を含めても限りがあり、新しいエネルギー貯蔵技術が期待される。

新しいエネルギー貯蔵技術とは、リチウムイオン電池などの 2 次電池、圧縮空気電力貯蔵、超伝導エネルギー貯蔵などであるが、電力システムの汎用的な電力貯蔵用に導入が期待される技術は、電気自動車などへの適用で技術開発が進んでいる 2 次電池である。また、より再生可能エネルギーの導入が進み、日間を越え季節間の需給調整あるいは異常気象による長期間の再生可能エネルギー発電の出力変動に備えるために電気エネルギーを貯

蔵可能な燃料に転換することも考えられる。

2次電池は、揚水発電同様、一定の損失が発生するが、起動時間、調整速度などの運用特性は優れており、さらに2次電池の場合、中規模、小規模など様々な容量が経済性を落とさずに実現でき、発電所や変電所に加え、業務用建物、住宅など、需要側に設置することもできる。2次電池の運用は、揚水と同様の日間から週間の需給調整を行うことが想定されるが、初期段階には周波数調整やramp-downの対応など、短期変動の補償に特化することで、経済性を高める活用も考えられる¹³⁾。

電力から燃料を生産する考え方は、過去、我が国では大量のエネルギーの輸送・貯蔵を行うためのWeNETプロジェクトとして実施され、液体水素および水素から転換される複数の燃料あるいは水素を吸収、放出できる媒体を用いたエネルギーの輸送・貯蔵システムの技術開発が行われた。風力発電、太陽光発電の導入が進み、余剰電力が大きな課題となりつつあるドイツにおいては、エネルギー庁 DENA により、余剰電力を用いた水電解で水素ガスを生産し、既存の天然ガスネットワークに注入して従来の需要で活用する Power to Gas プロジェクトが発表され¹⁴⁾、我が国でも新たな取組が開始されつつある。この電力からの燃料の生産・利用は、変動する再生可能エネルギーの導入が進み、電力システムの需給調整の制約から2次電池などを活用しても使いきれない電力が大量に発生した段階からは、不可欠な技術になると考えられる。今後、燃料生産・貯蔵・利用の技術開発と並行して、電力、エネルギーシステム全体として燃料製造が必要となる時期の検討が重要と考えられる。

5. 送電網の拡充と連系線の活用

電力システム内の送電線を拡充し、複数の電力システムをより送電容量の大きな送電線で連系することで、連系線の運用の限度の中でより広い範囲の「ならし効果」を活用し、また連系された電力システム全体での柔軟性の資源の最大活用が可能となる。

我が国では、50Hz系の北海道、東北、東京の3電力会社管内、60Hz系の中部、北陸、関西、中国、四国、九州の6電力会社管内において、既設の連系線の活用と風力発電出力制御技術の組み合わせにより、風力発電の連系容量拡大の実証試験が検討されている¹⁵⁾。新たな送電線の建設にはルートの確保に時間がかかり建設費も大きいこと、連系線の事故を含めた安定供給の視点が重要であることから、再生可能エネルギー発電など電源の配置と併せた検討が重要である。

まとめ

本稿 (Part 1) では、今後の多くの電力システム共通の状況として新たな変動の増加とこれによる柔軟性不足の課題の実態と、それに対して変動性を低減し、柔軟性を向上するための技術的対策の全体像について解説した。(次回に続く)

— 参考資料 —

- 1) 資源エネルギー庁：長期エネルギー需給見通し(再計算)，2009. 8.
- 2) 荻本和彦：電気学会誌，Vol.87, No.10, 特集解説，pp.16-19 (2008).
- 3) EU：COM (2011) 885, Roadmap 2050
http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index_en.htm
- 4) 荻本和彦：日立環境財団環境研究，第165号，pp.126-133 (2012).
- 5) 片岡和人，他：電気学会新エネルギー・環境メタポリズム社会・環境システム合同研究会，HE-12-052, M田—12-023 (2012).
- 6) 荻本和彦，他：電気学会全国大会講演論文集，6-028, pp.49-50 (2013).
- 7) Eurelectric ホームページ：
<http://eurelectric.org/RESAP/Genetation.asp>
- 8) エネルギー管理システム導入促進事業 (HEMS 導入事業) 補助金制度のご案内
<http://sii.or.jp/hems/file/hojokin.pdf>
- 9) 荻本和彦，他：電気学会平成23年電力・エネルギー部門大会講演論文集，16, pp.08_7-08_12 (2011).
- 10) 池上貴志，他：電気学会論文誌，Vol.130-B, No.10 (2010).
- 11) 岩船由美子，他：電気学会論文誌 B, Vol.131, No.7, 542-549 (2011).
- 12) 池上貴志，他：電気学会論文誌 B, Vol.133, No.6 pp.5620574 (2013).
- 13) 荻本和彦，他：エネルギー・資源学会第29回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集，1-2 (2013).
- 14) German Energy Agency: Promotion of power to gas storage solution, press release on 13th June. (2012).
- 15) 北海道電力，東北電力，東京電力：北海道地域内，東北地域内における風力発電導入拡大に向けた実証試験の実施および風力発電事業者の募集について，プレスリリース (2011. 9. 30).

著者紹介



荻本和彦 (おぎもと・かずひこ)

(現職) 東京大学 生産技術研究所

(専門分野) エネルギーシステム，電力システム/特にエネルギーシステムインテグレーション

講演

福島の内被ばくと外被ばく

福島のロングテール

東京大学 早野 龍五

東京電力福島第一原発の事故により、福島県を中心とする地域の土壌は高濃度に汚染され、住民が内部被ばくと外部被ばくのリスクに曝された。特に、チェルノブイリ事故の経験に照らすと、平均的な内部被ばくは数 mSv に達すると、当初予測された。しかし、実際に大規模なホールボディカウンター測定を行ったところ、住民の平均的な体内放射性セシウム量は、冷戦時代よりも少ないことが明らかになってきた。福島における内部被ばく・外部被ばくの実測データを紹介し、今後を考える。

I. はじめに

1. 背景—特に給食検査

私は、ジュネーブの CERN 研究所で反物質を研究している実験物理学者ですが、2011年3月11日の東日本大震災、それに続く東京電力福島第一原発の事故に関して、ツイッターを用いた情報発信を行っておりました。最近の東北大学の研究によれば¹⁾、当時7番目に影響力のあったアカウントだったそうです。

ツイッターには、多くの方々が何を考えておられるか、リアルタイムでフィードバックがあるという、従来メディアには無い特徴を持っています。その中で、2011年の6月頃に、多くの方々が内部被ばく、特にお子さんの内部被ばくを心配しておられました。しかし当時、内部被ばくの実態を明らかにするデータはありませんでした。

そこで、私は、大勢のお子さんの内部被ばくを低コストで明らかにするやり方として、給食の測定を文科副大臣に提案いたしました。給食で出されたものを全部ミキサーにかけて、ゲルマニウム半導体検出器(以下、ゲルマと略記)で測る。これを長期に継続し、給食で摂取したセシウムの総量を知ろうという提案です。

この提案は、平成24年度、文科省の給食のモニタリング事業として予算化され、福島県及び周辺県で、測定が始まり、今年度も復興庁が引き継いで測定が行われています。

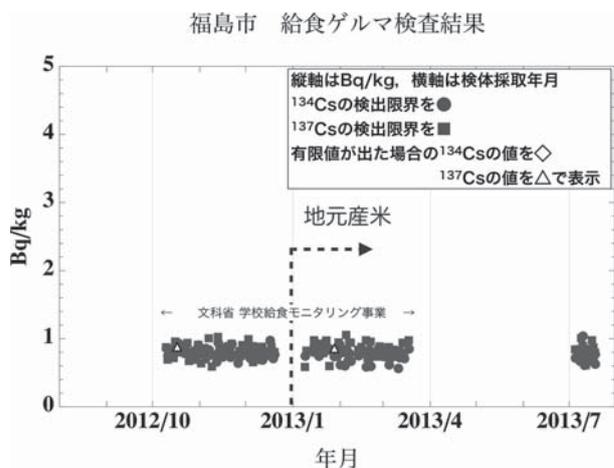
現在までにすでに多くのデータが蓄積されているのですが、その一例として、第1図に、福島市における測

定例を示します。給食に含まれる放射性セシウムは検出限界(約1Bq/kg)未満で、検出されたとしても限界ぎりぎりの値です。福島県内の他の市町村のデータも、同様な結果になっています²⁾。

福島市では今年1月から、地元産の米を使うようになり、内部被ばくのリスクが高まるのではないかと心配された方も多かったと聞いていますが、第1図のデータを見ると、1月以降の放射性セシウム濃度に変化は見られません。このようなデータは、今後も長期的に測定・公開していく必要があります。

2. ホールボディカウンター(WBC)

給食検査を提案した、2011年の夏、県内のお医者さんから、ホールボディカウンター(WBC)検査結果が



第1図 福島市の学校給食まると検査の結果
 (^{134}Cs の有限値◇は検出されなかった)
 福島県教育委員会発表資料より作成²⁾

Internal and External Radiation Exposures of Fukushima Residents: Ryugo HAYANO.

(2013年10月15日 受理)

おかしいので、助けてくださいというメールをいただきました。そこで、現場に伺い、病院だけではなく、市民測定所などのデータも拝見し、WBCの測定精度の確立、結果の読み方、伝え方などを、現場の方々と一緒に考えてまいりました。

II. 福島の内被ばく

1. 議論のベースライン

最初に、議論のベースラインとして、自然放射線による日本人一人あたりの年間実効線量を見ておきましょう。「新版・生活環境放射線(国民線量の算定)」³⁾によると、内被ばく(経口摂取)は、鉛210、ポロニウム210から0.80mSv/年、炭素14から0.01mSv/年、カリウム40(⁴⁰K)から0.18mSv/年、合算で約1mSv/年とされています。

一方、成人が長期的に¹³⁷Csを食べ続けて1mSv/年に達した場合、その通年摂取は約70,000Bq(1日の平均摂取は約190Bq)、その方をWBCで測定すると、約27,000Bq/全身(体重あたりの濃度にするると約400Bq/kg)になります。差分の43,000Bqは、尿などから排出される分です。

これらは、目安として覚えておいていただくと良いと思います。

2. ホールボディカウンターの特長

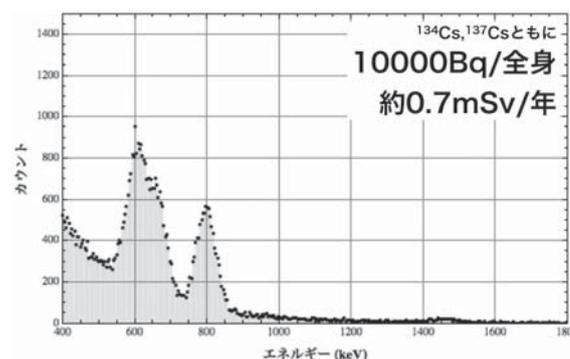
内被ばくされている方を実測すると、どんなデータが見えるか、およその感覚をつかんでいただくために、第2～5図を用意しました。これらは福島県内で最も設置台数の多いWBC—FASTSCAN—の実測に基づいてシミュレートしたWBCスペクトルです。

まず、第2図は¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに10,000Bq/全身という方のスペクトルです。預託実効線量にすると、1mSv/年に近い。¹³⁴Csの2つのピーク(約600keVと800keV)、¹³⁷Csのピーク(約660keV)がくっきり見えます。これだけはっきりしていれば、少々遮蔽等に問題があるWBCで測定しても、見落とすことはありません。

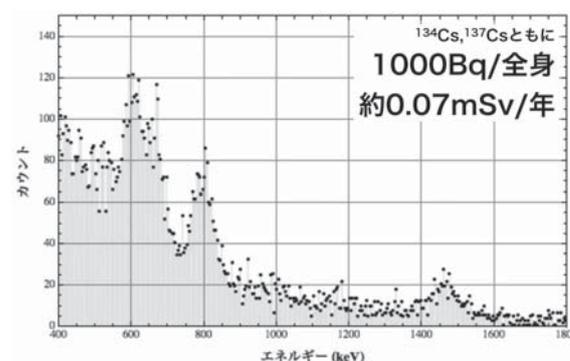
次の第3図は¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに1,000Bq/全身、年に0.1mSv弱ぐらいの方のスペクトルです。約1,500keVのところに⁴⁰Kのピークも見えます。

次の第4図は、¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに300Bq/全身、0.02mSv/年程度で、先に述べた⁴⁰Kによる年間の被ばく量の10分の1ぐらいに相当します。FASTSCANでこういう方を測定すると、ピークが見える時もあるし、見えない時もある。このあたりが、FASTSCANで2分測定した場合の検出限界です。

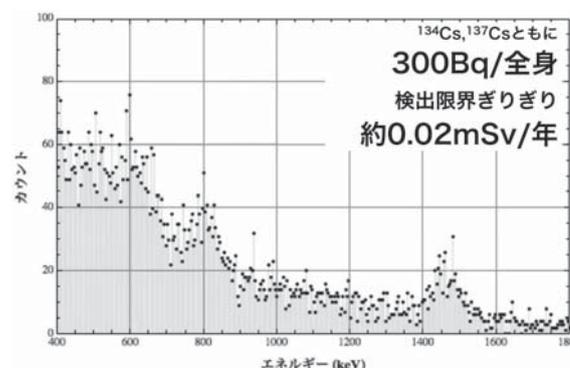
シミュレーションですから、もっと値が低い場合のスペクトルも作ることができます。第5図は100Bq/全身が実際に入っているシミュレーションですが、スペクトル



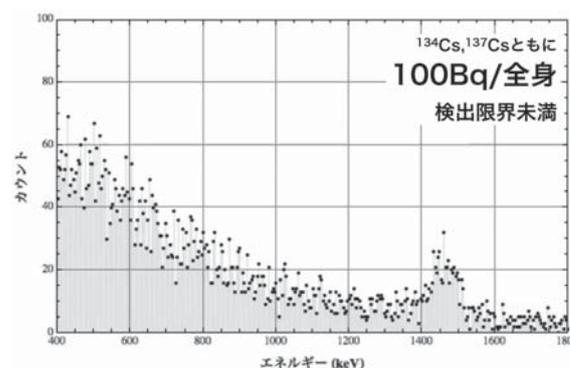
第2図 ¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに10,000Bq/全身の場合 (WBCカウンターのシミュレーション結果)



第3図 ¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに1,000Bq/全身の場合 (WBCカウンターのシミュレーション結果)



第4図 ¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに300Bq/全身の場合 (WBCカウンターのシミュレーション結果)



第5図 ¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに100Bq/全身の場合 (WBCカウンターのシミュレーション結果)

ルにピークは見えない。検出限界未満です。福島県内で現在 WBC 測定すると、ほとんどがこのスペクトルのように見えます(ゼロですかと言われると、ゼロではないかもしれないと答えるしかないのですが)。

3. 福島県内の土壤汚染

福島県内の土壤は、不幸なことにかかなり高濃度に汚染されました。福島市や郡山市などの人口密集地でも、 ^{137}Cs だけ見ても、典型的に $100,000\text{Bq}/\text{m}^2$ あります⁴⁾。

チェルノブイリの事故の2年後に出された国連の科学委員会(UNSCEAR)の報告書⁷⁾には「 ^{137}Cs が $1,000\text{Bq}/\text{m}^2$ ある土地に住んでいる方は、汚染食品由来の内部被ばくが、 $20\mu\text{Sv}/\text{年}$ になる。」と書いてあります。それに従って計算すると、福島市、郡山市の平均的な内部被ばくは年に 2mSv ぐらい、事故後、数年は ^{134}Cs の寄与も足さねばなりませんから、 $5\text{mSv}/\text{年}$ に達するのではないかと、世界中の専門家が心配されたはずです。

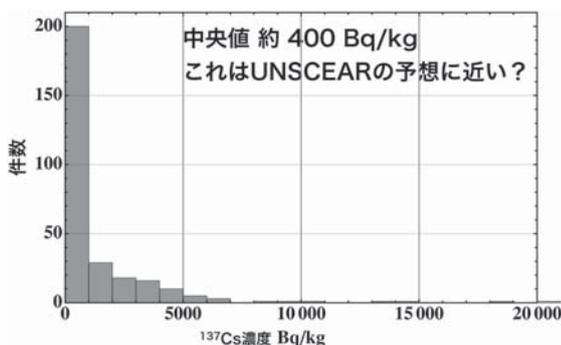
(1) 土壤汚染と比例するような実測データ

実際に、福島で実測されたデータ、第6図を見てみましょう。

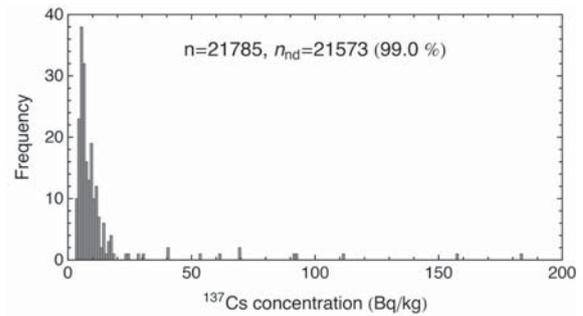
この分布の中央値をとりますと、大体 $400\text{Bq}/\text{kg}$ で、先に示した UNSCEAR の予想に近い値ですが、これは、人間を測ったデータではありません。福島のイノシシを測ったデータです。もちろん、食物も生物学的半減期も人間とイノシシと違いますので、単純な比較はできませんけれども、確かに土壤は汚染されていて、そこに暮らしている生物は、かなり内部被ばくがあります。

(2) 福島の住民の大規模 WBC 測定結果

それでは住民の WBC 測定結果はどうか。福島県が発表している WBC による内部被ばく検査⁵⁾を見ると、2013年8月までに検査を受けた方 149,592 人中、149,556 人 (99.98%) が預託実効線量 1mSv 未満となっており、先に示した数 mSv という予想よりも低いことがわかります。しかし、公表されている統計が 1mSv 刻みというかなり粗いものなので(先に述べたように、 $1\text{mSv}/\text{年}$ は $70,000\text{Bq}$ 摂取に対応)、この統計だけから



第6図 福島県内で捕獲されたイノシシ肉のセシウム濃度 (注: 食生活も生物学的半減期が異なるので、住民の内部被ばくと単純比較は出来ない)



第7図 ひらた中央病院での WBC データ
セシウム検出者の体内セシウム濃度分布⁶⁾

は、福島県内の内部被ばくの実態を十分に読み取ることはできません。

そこで我々は、2012年の春から2012年の冬にかけて、福島県内の約22,000人を測定し、最近論文で公表しました⁶⁾。FASTSCANを用いた測定で、セシウムが有為に検出されたのは約1%、子供に限ると0%です。第7図は、検出者の体内セシウム濃度のグラフで、横軸のスケールは、先ほどのイノシシのグラフの100分の1です。

グラフの右端あたりが、 ^{134}Cs も考慮して $1\text{mSv}/\text{年}$ に相当。ピークがおおよそ $10\text{Bq}/\text{kg}$ ぐらいにありますが、これは大気圏内核実験の結果として、1964年に日本人の成人男性にあったセシウム濃度⁸⁾とほぼ同じです。

論文6)では、この他に、2012年の秋に三春町の小中学生ほぼ全員(95%)を WBC で測定したところ、セシウム検出者が一人も出なかったということも示してあります。内部被ばくのレベルが低いことが、サンプリング・バイアスによるものでないことを示す重要な結果です。

このように、今の福島の内部被ばくというのは、大多数の人は検出限界未満で、検出される方も、第7図の程度ということがわかってきました。先に述べたように、WBCの検出限界が、おおよそ ^{40}K による内部被ばくの10%程度のレベルだということを、リスクの判断に使っていただければ良いと思います。

III. 福島のロングテール

1. 内部被ばくのロングテール

第7図は、福島の内部被ばくが平均的に低いことを示しているのですが、その一方で、平均よりもかなりかけ離れて高い数値を示す方もおられることを示しています。このような「はずれ値」の分布のことを、一般的にロングテールと呼びますが、実は、福島の内部被ばくに関連するデータを見る場合は、ロングテールに注目することが大事です。

最初の例として、平成24年度福島産玄米全量全袋検査の結果を第8図に示します。データは、「ふくしまの恵み安全対策協議会」が公表⁹⁾しており、2012年度は、

約1,000万袋の玄米を測定し、99.8%が不検出、100Bq/kg超が71袋でした。それを、第8図のように、両対数で表示してみると、ロングテールがある様子がよく分かります。

一般食品についても同様です。2012年4月に、一般食品の基準値が100Bq/kgと定められて以来、全国の自治体で測定された食品のセシウム濃度を、厚労省が連日ホームページで公開しています(全国の自治体で2013年9月までに約40万件以上—ほとんどは非流通食品—を測定し、基準値を超過したのは0.7%)。それを、第9図のように両対数で表示してみると、やはりロングテールが見えます。

内部被ばくを考える上で、もう一つ重要なのは、基準値を超過したのは、どういう品目かということです。2013年度になって、肉類で100Bq/kgを超えたものはイノシシ、シカ、ツキノワグマ、ヤマドリだけです。これを常食される方はほとんど居られないでしょう(第1表)。農産物で100Bq/kgを超えているのは、主として山菜で、これも1年を通じて、非常にたくさん食べるというものではありません(例外として大豆があります)。

WBCの検査というのは、これらの食品を摂取した結果、人体にどれだけセシウムが取り込まれているかを見

第1表 平成24～25年の食品検査で100Bq/kgを超えた品目(非流通品：平成25年8月末まで)

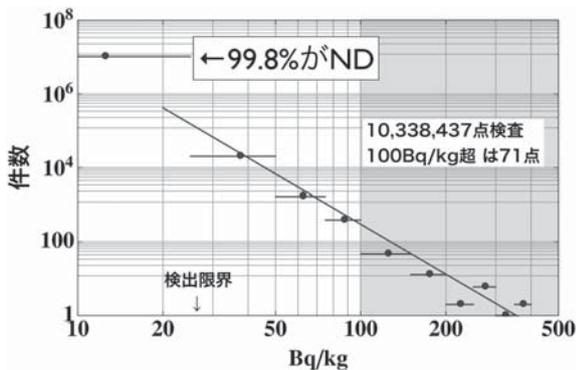
畜産物、鳥獣、卵				農産物			
H24 件数		H25 件数		H24 件数		H25 件数	
イノシシ	373	イノシシ	64	シイタケ	281	コシアブラ	46
ツキノワグマ	95	シカ	15	乾シイタケ	90	大豆	37
シカ	56	ツキノワグマ	10	米	84	タケノコ	32
ヤマドリ	18	ヤマドリ	1	タケノコ	61	タラノメ	25
牛	8			コシアブラ	55	ワラビ	13
キジ	3			干し柿	35	クサソテツ	10
マガモ	3			大豆	23	ゼンマイ	6
カルガモ	3			チチタケ	22	ウワバミソウ	4
ノウサギ	2			クサソテツ	22	乾シイタケ	2
クマ	2			あんぼ柿	21	フキ	2
馬	1			タラノメ	19		
豚	1			ナメコ	15		
				ソバ	14		
				ゼンマイ	12		

ているわけですので、第7図のデータを両対数グラフにしてみると、第10図のように、ロングテールの存在が明らかになります。

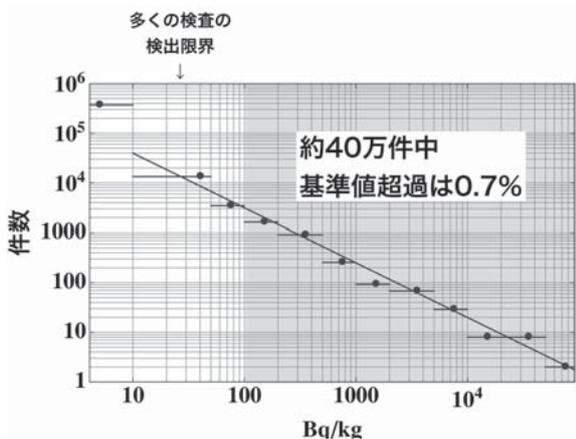
第7図の横軸は体内セシウム濃度(Bq/kg)ですが、図の上には、それに対応した1日平均摂取量も示しました。1日に100Bqも食べる方というのは、本当に稀であることが分かります。

この一年半ばかりの間に、内部被ばくに関してよく分かってきたことは、高い数値になる方は、必ず何か食べているということです。1日に平均10Bqぐらい食べている方は、ほとんどの場合、原因特定が可能です。問診や、その方の食材をゲルマで測定することで、原因が明らかにできます。WBCでセシウムが検出される方は、すでに出荷制限されているような非流通食材を、未検査で沢山食べておられる。そうでない限り、福島で毎日10Bqの放射性セシウムを食べるのはほとんど考えられない。流通食品の中には、そんなにセシウムが入っていないのです。

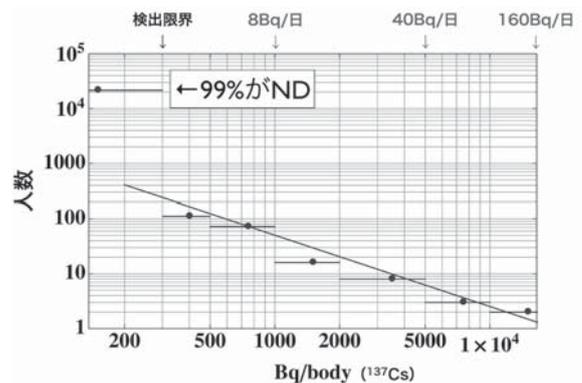
第10図の一番右側の点は、70歳の男性で、実効線量で0.8mSv/年と推定されました。自宅にあった食材を送っていただいて、検査をしてみたら、14万Bq/kgの浪江町原木シイタケを常食しておられたということが分かりました。



第8図 平成24年度の福島県産米の全量全袋検査結果を両対数グラフで表示



第9図 厚労省HP掲載：食品のセシウム検査結果(平成24年4月～)を両対数グラフで表示



第10図 ひらた中央病院におけるWBC検査結果を両対数グラフで表示

問診票などから、どういう水を飲んでいるか、スーパーマーケットで産地を選んで買うかどうかは、内部被ばくの有無と無相関であることが分かっています。上記のように、特殊なものを食べていたことが、内部被ばくの要因になっています。

このように、内部被ばくのロングテールは、原因も、対処法も明らかになってきました。やるべきことは、とにかく大勢測って(それも、だいたいどういう方々かが分かっているので、測定する必要もない)、テールにいる人を見つけて、その人の食事の指導をするという、それに尽きています。

IV. 福島の外部被ばく

実は、外部被ばくにもロングテールがあるのですが、それを論じる前に、モニタリングポストと個人線量の比較例を示します。

1. モニタリングポストと個人線量

第 11 図は福島市のテレビ局、テレビユー福島 (TUF) の社員 34 人が、2011 年 5 月から丸 1 年間、積算線量計を持ち、毎週 1 回ずつ読み出して記録していたという貴重なデータです¹¹⁾。

34 人の 1 年の積算線量は、バックグラウンドを含んで 1.3mSv でした。都市生活者ではありますが、取材で線量の高いところへ行かれた方も多く含まれています。

当該期間に、福島市のモニタリングポスト (県北保健福祉事務所) の公表数値を積算してみると、約 9mSv/年という結果です。国が示す「追加被ばく線量年間 1 ミリシーベルトの考え方」¹⁰⁾ に倣って、屋外に 8 時間、屋内に 16 時間 (遮蔽効果 0.4 倍) で計算をすると、追加被ばく線量は 5 ~ 6mSv 程度と計算されますが、TUF 社員の方々の積算線量は、それよりもかなり低いという結果です。



第 11 図 TUF 社員 34 名が 2011 年 5 月から 1 年間携行した積算線量計データ

2. ガラスバッジ

2011 年の秋~冬には、多くの自治体がガラスバッジを配布し、その結果(多くは子どもと妊婦)が公表されるようになりました。第 12 図は、それらのデータを、1 年分の線量に引き延ばし、横軸のスケールが同じになるように表示したものです。スケールの最大値が 10mSv/年です。2011 年の冬の段階で、福島県内の多くの場所で、外部被ばく線量が 2mSv/年未満になっていたことが分かります。

第 13 図は、福島市の、2011 年の冬と 2012 年の冬の結果の比較です。これは、第 12 図と異なり、両対数で表示してあります。太線が 2011 年、破線が 2012 年で、2012 年のほうが分布が左に寄っております。2011 年冬の測定で 1mSv/年と推定された割合は 51% でしたが、2012 年には 89% に増えました。この変化の主な要因は半減期 2 年の ¹³⁴Cs の崩壊ですが、一部には除染の効果もあったと考えられます。

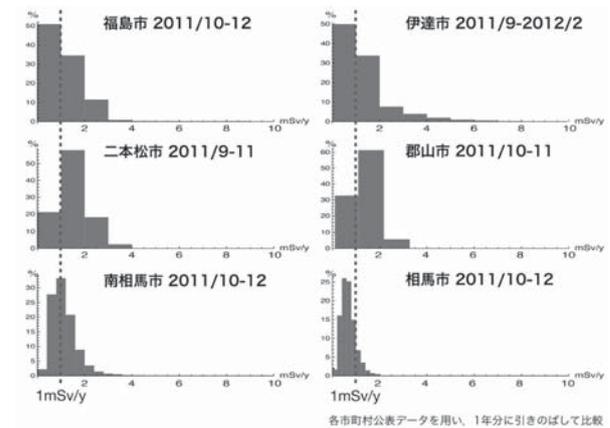
このように、2012 年冬には、90% 近くの方が、年間の追加被ばく 1mSv 未満と推定されたのですが、第 13 図で明らかなように、外部被ばくにもロングテールがあります。内部被ばくの場合と同様、今やるべきことは、どうすればこれらの方々の線量を下げられるかということです。そろそろ、個人線量測定に基づいて、個別対応が必要なフェーズに入っているのです。

3. 1 時間ごとの積算線量測定の威力

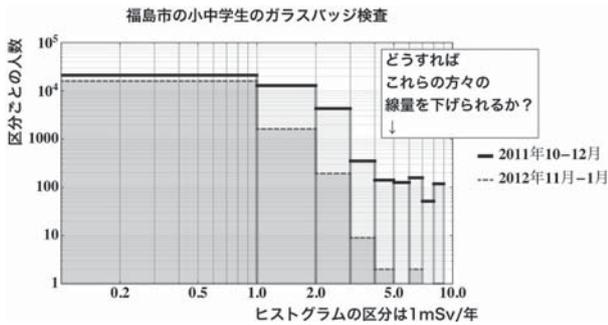
ガラスバッジは、2 ~ 3 カ月間ずっと携行するので、その間の積算線量だけ見ても、一体何が原因でその値になっているか、住民の方が理解するのが困難です。

そこで、最近我々が利用させていただいているのが、産総研開発・千代田テクノル製の個人積算線量計 (通称 D-シャトル)¹³⁾ です。これは、PC に接続した読み取り機に挿入すれば、過去の任意の期間の、1 時間ごとの積算線量を読み出すことが可能です。

内部被ばくについては、WBC を使った内部被ばく検



第 12 図 ガラスバッジの結果 2011 福島県の自治体公表データを用いて著者が作成



第13図 福島市のガラスバッジの結果
2011冬と2012冬を両対数グラフで表示¹²⁾

査結果を、スペクトルを見ながら説明することが、測定を受けられた方に結果を理解していただく上で非常に大事だったのですが、外部被ばくについては、これに対応するツールがこれまで存在しませんでした。私は、まさにその問題を解決できるツールがD-シャトルであることに気づき、最近さまざまな場面で活用しています。

第14図は、少し特殊な例ですが除染組合の方々数十人が装着されたうちの典型例です。1時間ごとの積算線量を示してあります。図の上の方は、除染作業中の線量が高く、1 μ Sv/hぐらいになるとありますが、自宅の線量は低く、1年分の追加被ばくの推計は、0.8mSvでした。

一方、図の下の方は、除染作業中の線量は余り高くないのですが、自宅の線量が高く、1年分の追加被ばくの推計は1.4mSvとなりました。

田村市都路地区(特例宿泊地域)では、このようなグラフを使って対面で結果を説明する試みが成果を上げています。外部被ばくの分布のテールに含まれる方々について、このような測定をし、対面で結果を説明し、どうやったら下げられるか、自治体の方々も交えて対策を考えることが、そろそろ可能になってきたのではないかと

考えています。

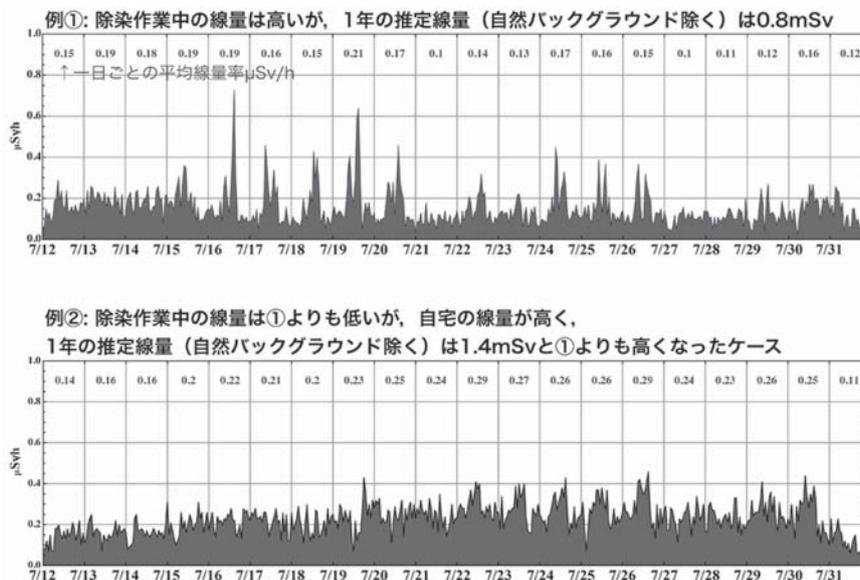
V. まとめ

事故から2年半を経過し、実測データも揃ってきたので、内部被ばくについても、外部被ばくについても、事故当初とは異なるアプローチが可能になってきたと考えられます。

- (1) 個人ごとの内部被ばく+外部被ばくの線量を把握し、それに基づいた対策を考えることが重要¹⁴⁾。
- (2) 放射性セシウムを摂取することによる内部被ばくが、⁴⁰Kの実効線量の10%を超える方は非常に稀で、流通食材を買って、水道の水を飲んでいて問題はない。
- (3) したがって、相対的には外部被ばくのリスクの方が高いのだが、アンケートなどからは、住民の方々の多くが、内部被ばくを心配しておられることが読み取れる。
- (4) 内部被ばくも外部被ばくも、分布にはロングテールがある。したがって、
 - (a) 大勢の測定が重要(そうしないと、テールの方が発見できない)
 - (b) 「平均」だけで論じてはいけない
 - (c) (テールの人には)個人的なフィードバック・対策が必須
- (5) 幸い、テールに属する人数は少ない。個人線量を把握し、個別対策することが可能だし、それが必要な段階にきたのではないかと。

— 参考資料 —

- 1) 東北大学工学研究科 乾・岡崎研究室, Project311
<http://www.clecei.tohoku.ac.jp/index.php?Project%20311/>
 トレンド分析より (last accessed 2013年10月1日)。



第14図 浜通りの山沿いで除染作業従事者の1時間毎の積算線量グラフ(約3週間分)

- 2) 福島県教育委員会の HP
<http://www.kenkou.fks.ed.jp/kyushoku/monitoring/monitoringpagetop.htm> より (last accessed 2013 年 10 月 1 日).
- 3) 公益財団法人原子力安全研究協会刊行新版 生活環境放射線 (国民線量の算定) 2011 年 12 月 (表 1.4.1 および 2012 年 12 月の正誤表).
- 4) 文部科学省による航空機モニタリング結果
<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/258/list-1.html> (last accessed 2013 年 10 月 1 日).
- 5) 福島県によるホールボディーカウンターによる内部被ばく検査
http://www.cms.pref.fukushima.jp/pcp_portal/PortalServlet?CONTENTS_ID=26211&DISPLAY_ID=DIRECT&NEXT_DISPLAY_ID=U000004.
- 6) RS. Hayano, *et al.*, *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, Vol.89, 157-163 (2013).
- 7) UNSCEAR 1988 REPORT, ANNEX D "Exposures from the Chernobyl accident". United Nations, ISBN 13: 9789211422801.
- 8) M. Uchiyama, *et al.*, *Health Phys.*, Vol.71, 320 (1996).
- 9) 福島県内の玄米 (H24 年度産) の検査結果
<https://fukumegu.org/ok/kome/year/12> (last accessed 2013 年 10 月 1 日).
- 10) 例えば「平成 23 年 10 月 10 日 災害廃棄物安全評価検討会・環境回復検討会第 1 回合同検討会資料」

- http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=18437&hou_id=14327 (last accessed 2013 年 10 月 1 日).
- 11) データ提供: テレビユー福島, データ解析: 早野龍五.
- 12) 福島市のガラスバッジ測定結果
<http://www.city.fukushima.fukushima.jp/soshiki/71/hkenkou-kanri13051601.html> (last accessed 2013 年 10 月 1 日. 注: 2011 年のデータは, 福島市の HP にはすでに掲載されていないようである).
- 13) 産総研「日々の線量を記録できる個人向け放射線積算線量計」
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20120213/pr20120213.html (last accessed 2013 年 10 月 1 日).
- 14) 福島県内のほとんどの自治体で, 内部被ばくと外部被ばくのデータを名寄せすることが出来ないという問題点があります。

著者紹介



早野龍五 (はやの・りゅうご)
 東京大学大学院理学系研究科教授
 (専門分野) 原子核物理学, 特に CERN 研究所における反陽子原子の研究。2008 年度に反陽子ヘリウム原子の研究により仁科記念賞を受賞。



From Editors 編集委員会からのお知らせ

— 最近の編集委員会の話題より —
 (12 月 2 日第 6 回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・ Progress in Nuclear Science and Technology の新規申請を承認した。
- ・ 英文誌の出版状況が報告された。11 月期に 24 論文が投稿された。1 月号電子版公開済み, 2 月号入稿済み。Editorial Summary は無料公開となった。
- ・ 論文の機関リポジトリについて取り扱いを確認した。
- ・ 和文論文数減少の原因を検討し, 部会等に投稿勧誘依頼することとした。
- ・ Physor2014 の JNST 特集号の編集小委員会を承認した。
- ・ 論文誌関連規定類の見直し検討経過が報告された。
- ・ JNST 50 周年記念 Review の進捗状況が報告された。

【学会誌関係】

- ・ 海外情報連絡会会長から, 活動状況の説明を受け, 学会誌記事になりそうなテーマについてディスカッションを行った。年 4 回開催されている連絡会の講演情報の活用, ANS との連携について今後相談しながら進めて行くことになった。
- ・ 経営改善特別小委員会, 理事会と編集委員会との意見交換の結果ついて, 編集長から報告があった。
- ・ 2014 年 3 月号は, 3・11 特別号として「福島原発事故とその後」というテーマで記事企画を行うこととし, 企画内容と進捗状況について報告があった。
- ・ 今後の時論記事, 巻頭言の執筆者候補の選出について検討した。

編集委員会連絡先 < hensyu@aesj.or.jp >

解説シリーズ

モデリング・シミュレーションの高度化

第1回 我が国における国産コード開発プロジェクトの紹介

三菱総合研究所 松本 昌昭

経済産業省資源エネルギー庁では、平成24年度から発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業を開始した。本事業の中で、原子力施設プラントのモデリング・シミュレーション技術の開発や高度化に向けて、わが国の原子力施設の安全を支える重要な技術基盤として、我が国独自のモデリング・シミュレーション技術を開発し、その成果を反映した解析コードやソフトウェア開発、それを継続的に活用していくための維持・活用体制について検討を行った。

本稿では、「モデリング・シミュレーションの高度化」解説シリーズの第1回として、上記検討結果の一部を紹介する。

I. はじめに

経済産業省資源エネルギー庁では、平成24年度から発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業を開始した。本事業は、東京電力(株)福島第一原子力発電所事故の経験や、事故から得られた経験を踏まえ、既設原子力発電所について、シビアアクシデント対策を中心に安全対策の高度化に向けた基礎基盤となる部分について、国が主導して研究開発を進め、技術基盤を整備することを目指したものとして位置付けられる。特に、モデリング・シミュレーション技術¹⁾は、シビアアクシデントの発生時をはじめとする様々なフェーズで起きている事象を高い精度でシミュレーションする等、安全対策高度化に当たっての重要な基盤の一つである。

米国やフランスでは、解析コードやデータベースを含むソフトウェアの開発と検証に長期的に取り組んできており、標準化されたものとして、メーカーや事業者と規制組織が共に利用しているほか、外国にも提供されてきた。一方、わが国ではこれまで主に米国で開発されたソフトウェアを利用してきたが、最近では一部の重要なソフトウェアがブラックボックス化される動きが出てきており、今後の利用に関して何らかの制約が生じ、安全対策高度化に支障が出るのが強く懸念されることから、中国や韓国ではこれに対抗するべく、国を挙げて独自のソフトウェア開発プロジェクトが進められている。

こうした状況を踏まえ、本事業の中で「モデリング・

Improvement of Modeling and Simulation (1) ; Introduction of national code development project in Japan : Masaaki MATSUMOTO.

(2013年10月10日 受理)

シミュレーションの高度化」を(株)三菱総合研究所が受託し、原子力施設プラントのモデリング・シミュレーション技術の開発や高度化に向けて、我が国の原子力施設の安全を支える重要な技術基盤として、我が国独自のモデリング・シミュレーション技術を開発し、その成果を反映した解析コードやソフトウェア開発、それを継続的に活用していくための維持・活用体制について検討を行った。本稿では検討結果の中で、共有する価値の高いものと思われる以下の2点について紹介する。

- ・国内のソフトウェア等に関するニーズ調査結果
- ・モデリング・シミュレーション高度化技術開発対象の検討結果

II. 国内のソフトウェア等に関する
ニーズ調査結果

1. 調査の概要

新たに開発あるいは改良するソフトウェアに関して、そのユーザが求める機能要件把握のためのアンケート調査を実施した。本アンケートは、先行する類似のアンケート²⁾も参考にしつつ、国産の原子力ソフトウェアの将来像を国、関係機関に提言するための基礎データ収集を目的として実施した。本アンケート調査において収集したニーズ情報は以下の3点である。

- ・原子力メーカーでの原子力ソフトウェアの利用状況
- ・国産で開発すべき原子力ソフトウェアの重要度
- ・開発した国産の原子力ソフトウェアを多くのユーザに利用していただくための保守・管理体制

調査対象機関は、わが国の原子力メーカーである日立GEニュークリア・エナジー(株)、(株)東芝、三菱重工業(株)の3メーカーを対象とした。回収できた調査票の

数は、全部で59であった。以下、アンケート回答を集約・整理した結果を記述する。

2. 調査結果

(1) コードの改良について

現在利用しているコードを、「改良せずにそのまま利用」しているのか、それとも「改良して利用」しているのかを質問した。その結果、「改良して利用」している方がやや多い結果となった(第1図)。

(2) 利用分野

現在利用しているコードの利用分野について、コードそれぞれにつき、調査票の選択肢で示した利用分野の中から最大3つまでを選択回答してもらった。その結果、最も利用の多い分野は、「核(炉心)設計・安全解析」分野であった。「熱流動解析・安全解析」, 「遮蔽解析・安全解析」分野がこれに続いた。

アンケートに回答いただいた担当部署の業務内容によるところが多いが、総じて設計や安全解析業務では、コード利用が不可欠であることが分かる(第2図)。

(3) コードの課題

現在利用しているコードの課題について、コードそれぞれにつき、調査票の選択肢で示した課題を選択してもらった(複数回答)。その結果、最も多かった課題は「コーディングが古い」であり、全回答数の半数近くで課

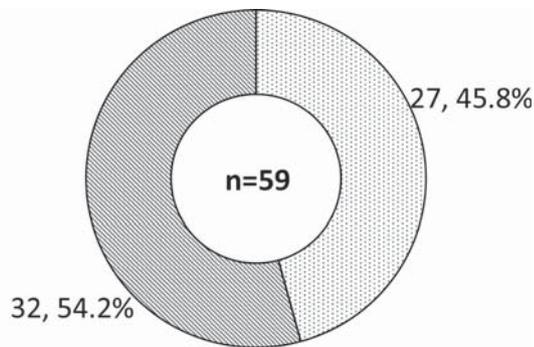
題として挙げられた。古いコードは少ないメモリーを効率よく使用するために特殊な技術を利用することがよくあるため、内容が理解しづらく、移植性が低いことなどが具体的な課題の一つになると考えられる。次点は「利用可能な地域が限られている」であった。これは、例えば米国オークリッジ国立研究所放射線安全情報センター(RSICC)から配布されているコードは配布及び使用可能な国が限られていることが挙げられ、プラント輸出等に影響を与えるものと考えられる(第3図)。

(4) メンテナンス面の課題

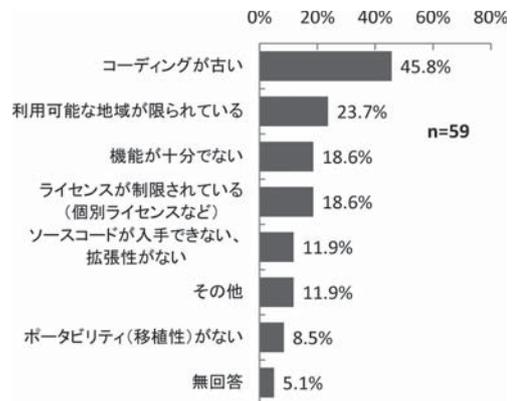
現在利用しているコードのメンテナンス面の課題について、コードそれぞれにつき、調査票の選択肢で示した課題を選択してもらった(複数回答)。その結果、最も多かった回答は「その他」であったが、具体的な記述内容を集計してみると、ほとんどが「特になし」であった。「その他」を除く回答では、「保守サービスがない」が32.2%, 「いつまで利用できるかわからない」が27.1%と比較的高い回答率となった(第4図)。

(5) 期待している分野

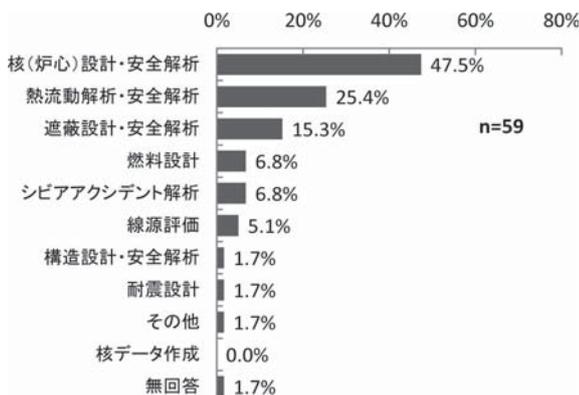
原子力分野のソフトウェア開発で期待している分野について、調査票で示した選択肢の中から回答してもらった。無回答を除いた回答数は18であった。結果、「核(炉心)設計・安全解析」と「熱流動解析・安全解析」, そして、「シビアアクシデント解析」での期待が比較的高い結果となった(第5図)。現在のコード利用分野で高い



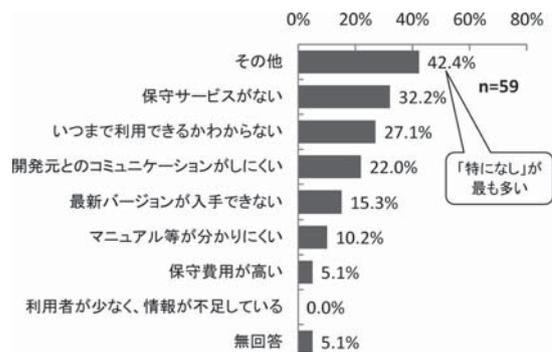
第1図 コードの改良



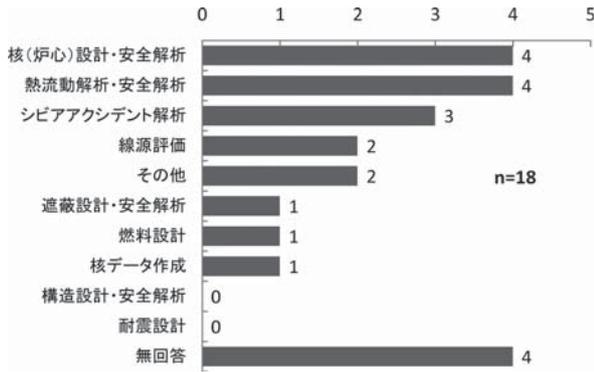
第3図 コードの課題



第2図 コードの利用分野



第4図 コードのメンテナンス面の課題



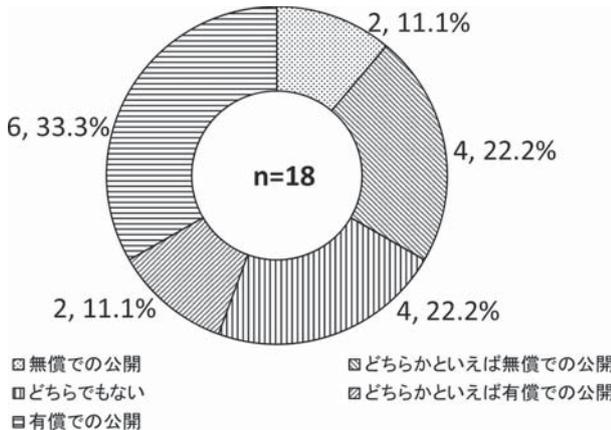
第5図 期待している分野

ニーズを示す傾向となった。

本設問では、期待している分野について、国産で開発することの必要性和緊急性の度合いについても質問した。必要性和緊急性を比較して調べた結果、高い相関性が得られた。また、高い必要性和緊急性を示す分野としては、「シビアアクシデント解析」が挙げられた。

(6) ソフトウェアの公開方法

原子力ソフトウェアにおけるあるべき公開方法について質問した結果、「無償」、「どちらかといえば無償」を合



第6図 ソフトウェアの公開方法

計した回答は33%を占めた。一方、「有償」、「どちらかといえば有償」を合計した回答は44%を占めた(第6図)。

(7) ソースコードの公開

原子力ソフトウェアにおけるソースコード公開の必要性について質問した結果、必要性を示唆する回答が圧倒的多数を占めた(第7図)。

(8) ソフトウェアに対する規制機関のエンドース

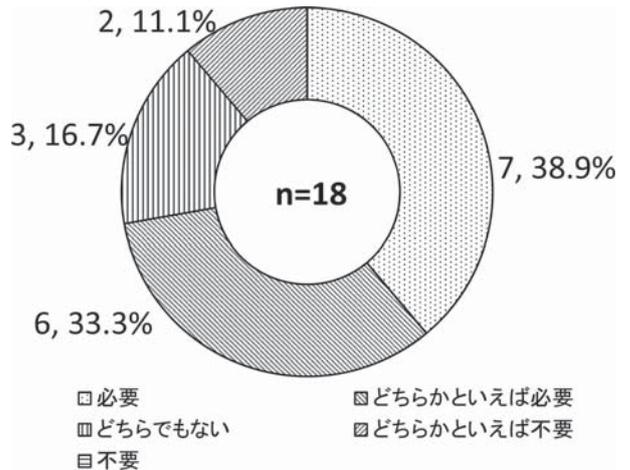
原子力ソフトウェアに対する規制機関のエンドースの必要性について質問した結果、必要性を示唆する回答が大多数であった(第8図)。規制機関におけるエンドースには、強い必要性がうかがえる。

(9) ソフトウェアに対する学会の承認

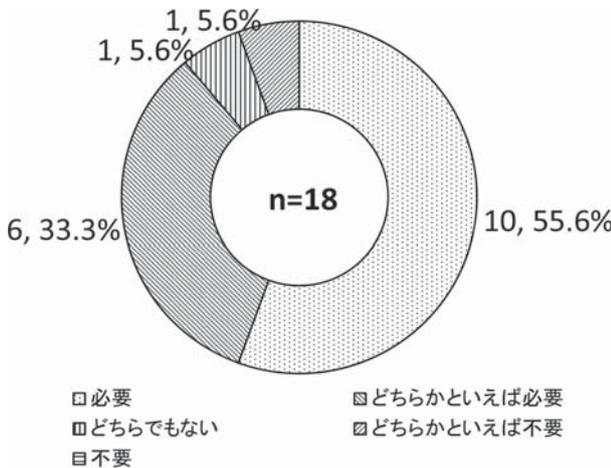
原子力ソフトウェアに対する学会承認の必要性について質問した結果、必要と不要を示す回答数はほぼ同数を示した(第9図)。学会承認については、規制機関のエンドースほどは強い必要性が要求されていないことがうかがえる。

(10) 保守・管理・サービス体制への期待

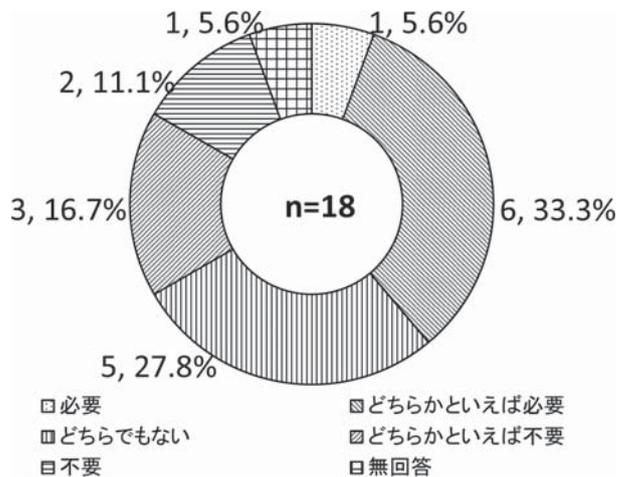
原子力ソフトウェアの保守・管理・サービス体制について、期待される具体的な内容を調査票で示した選択肢



第8図 規制機関のエンドース



第7図 ソースコードの公開



第9図 ソフトウェアに対する学会承認

の中から回答してもらった(複数回答可)。「分かりやすい利用マニュアルの配布」や「修正バージョン/最新バージョンの配布」、「技術サポートの充実(電話、E-mailなど)」、「FAQサイトへのアクセス」で高い回答率を示した。ユーザーライクな保守・管理サービス体制が望まれていることがうかがえる(第10図)。

好事例として、RELAP/SCDAPSIM コードを開発しているISS社(Innovative Systems Software, L.L.C.)のユーザ会が挙げられる。ユーザから資金を集め、開発の継続と維持・活用がうまく機能しているようである。

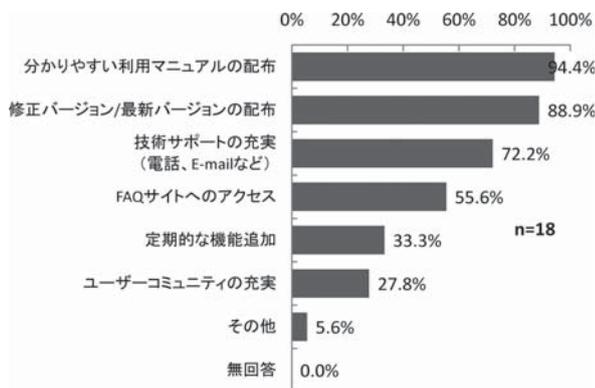
(11) 保守・管理のための支払い可能金額

原子力ソフトウェアに対して、保守・管理のために支払ってもよいと考える金額を、数字を自由に記述いただく方法で回答してもらった。調査にあたっては、参考情報として、RSICCにおける1本あたりのコード提供額\$849.37を掲載した。

アンケートの結果を第1表に示す。数万円のオーダーから500万円まで幅広い額の回答が集まったが、中でも10万と100万で最も多い回答数を得た。該当するコードの持つ機能により、保守・管理のための費用の相場観が各ユーザで異なることが予想される。また、特定の機能に対して調査したわけではないために、回答の幅が広がったと考えられる。

3. ニーズ調査のまとめ

国内の原子力ソフトウェア等に関するニーズ情報の取



第10図 保守・管理・サービス体制への期待

第1表 保守・管理のために支払ってもよいと考える金額 (単位:円)

支払ってもよいと考える金額	回答数
数万	2
10万	4
50万	1
10～100万	2
100万	4
500万	3
不明・ノーアイデア	2

集を目的に、わが国の原子力メーカー3社に対してアンケート調査を実施した。本調査により、3メーカーの原子力ソフトウェアの利用状況とともに、国産で開発すべき原子力ソフトウェアに対する要望や、開発した国産の原子力ソフトウェアを多くのユーザに利用していただくための保守・管理体制のあるべき姿を検討するための基礎データを取得することができた。

原子力メーカーにとって、コード利用は不可欠であり、特に炉心や熱流動といった安全解析業務でニーズが高いことが分かった。また、各コードには、全般的にユーザーライクな機能やサービスが期待されている。キーワードとしては、可視化やデータベース、分かりやすいマニュアルである。

一方で、既存のコードにおける課題としては、コード自体の古さとともに、米国製であるがゆえの利用制限やソースコードの入手困難さを挙げた回答が多かった。この課題を解決するため、国産の原子力コード開発を着実に進めていく必要があると言える。

Ⅲ. モデリング・シミュレーション 高度化技術開発対象の検討結果

別途実施したM&S(モデリング・シミュレーション)に関連する国内外の動向調査結果を踏まえ、安全対策高度化の技術基盤の一つとして今後取り組むべきM&Sの高度化技術の全体像についてまとめるとともに、技術開発対象の評価視点、開発対象の案について検討した結果をまとめる。

1. M&S技術の全体像

国内外の動向調査結果を踏まえるとM&Sとして今後必要と考えられる技術の全体像を第2表の通りにまとめた。

2. 開発対象の評価視点とその指標化

開発対象の評価の視点とその指標化事例として、以下をまとめた。

(1) 新知見への対応

福島事故の教訓を踏まえた30の安全対策事項、各事故調査報告書の指摘事項、シビアアクシデント対策規制など、事業者側、規制側による安全性・信頼性向上に関わる今後の取り組みに寄与するものであること。

⇒福島事故を踏まえた対策における必要性が：高/中/低/不要

(2) 従来技術の改良

既存の計算コードにおいて不足していたモデルの追加や既存モデルの精度の向上につながるものであり、事業者側、規制側による安全性・信頼性向上に関わる今後の取り組みに寄与するものであること。

第2表 M&Sとして必要とされる技術の全体像

区分	必要な取組み
核データ及び断面積処理	・NJOYの各モジュールあるいは既存の断面積処理コードを基として、保守性・拡張性・柔軟性を持つコードの開発
炉心(燃焼)解析	・我が国の標準となる炉心計算システムの開発
炉心動特性解析	・利用側・規制側で標準として用いることのできる動特性解析コードの開発
臨界安全解析	・臨界安全解析に関してSCALEの機能を含み、利用・規制側が共通に用いることのできる、精度評価がなされた計算システムの開発
放射線遮蔽解析	・近代的な決定論的手法に基づく輸送計算コードの開発 ・PHITSを基としたレファレンスとなりうる計算コードの整備と精度検証 ・現在の計算機環境に即した点減衰核法計算コードや一回散乱法コード
放射能拡散解析	・福島事故の教訓を活かしたSPEEDIシステムの改良 ・3次元放射能拡散計算コード ・最新の知見に基づいた環境影響評価システム
燃料挙動計算	・FEMAXIの精度検証と利用側・規制側の共通技術基盤としての整備 ・米国で取り組まれている燃料棒の熱力学的、力学的、物理的、化学的な挙動のモデル化
熱流動解析	・我が国の標準となるシステム解析コードの開発 ・CFD(数値流体力学)を活用し、多成分系の多次元の熱水力計算システムを開発する。原子炉容器、格納容器、原子炉建屋、使用済燃料プール等に適用する。
シビアアクシデント解析	・PIRT分析、実験研究、実験データに基づく計算モデル開発 ・我が国の標準となる総合解析コード、個別現象解析コードの開発 ・リファレンスデータベース(試験データ、プラントデータ)の開発 ・SET(個別効果試験)解析、CET(結合効果試験)解析、IET(総合効果試験)解析、プラント解析、ベンチマーク解析の実施 ・海外の知見や人材を活用したベンチマーク解析、研究ネットワーク構築
リスク解析	・代表シーケンス選定手法、SA(過酷事故)対策設備の信頼性評価手法、ソースターム評価手法、プラント総合評価手法(living PRA(確率論的リスク評価))などPRA手法のリスク評価用の標準ツールの整備 ・地震・津波を含む外部事象のリスク評価手法の開発。
データベース	・V&V(検証と妥当性確認)データベースシステムの整備 ・モデルプラントデータの整備 ・試験データ整備において、海外の知見や人材を活用
周辺技術	・VR(仮想現実)技術を活用したプラント状態の可視化ツールの開発 ・データベース、計算コードなどを統合化した計算プラットフォームの整備

⇒既存リソースの利用可能性が：なし(新規)/改良困難/改良容易/そのまま利用可能

(3) 最新技術への対応

既存の計算コードに対して機能(詳細度など)の大幅な向上につながるものであり、事業者側、規制側による安全性・信頼性向上に関わる今後の取り組みに寄与するものであること。

⇒安全基盤高度化における必要性が：高/中/低/不要

(4) ソフトウェア・セキュリティ

米国原子力ソフトウェアのソース公開制限、海外における国産コード開発等の動きを背景に、当該分野における国産技術の強化が課題であり、M&S技術の国産化に寄与するものであること。

⇒これまで用いられてきた海外リソースの利用可能性がなくなるおそれがある／ない

(5) 人材育成と知識伝承

原子力安全解析コードの開発・改良、解析評価などのM&Sに関わる人材育成と知識伝承に寄与するものであること。

⇒技術基盤の維持・人材育成への貢献が：高/中/低

(6) 緊急性

事業者側、規制側による安全性・信頼性向上に関わる取り組みにとして緊急性が高いものであること。

⇒開発対象が必要とされる時期が：短期(5年以内に開発完了)/中期(10年以内に開発完了)/長期(将来的に開発着手)

専門家(本プロジェクト評価のために開催した委員会に出席した大学、財団、国立研究機関、メーカーからの参加者11名)の意見を踏まえ、開発対象候補の優先順位付けを行った。開発対象候補の優先順位付けの結果は、第3表に示す通りである。

また、開発優先度Aとして判定されたテーマは、以下の4テーマである。

(1) 核データ処理コードNJOYを国産技術に置き換えるための技術開発

⇒重要性が高く、ただちに取り組むべきテーマと考えられる。

(2) 放射線輸送計算コードMCNPを国産技術に置き換えるための技術開発

⇒重要性が高く、ただちに取り組むべきテーマと考

第3表 開発対象候補の優先順位付けの結果

開発優先度	件数	補足
A	4	重要度が高く、早期の取り組みが必要と考えられる。
B+	5	重要度は高いが、緊急性は低いと考えられる。
B	6	緊急性は低いと考えられる。
C	1	重要度は低いと考えられる。

えられる。

- (3) 炉心解析と熱流動解析を先進技術に置き替えるための技術開発(日本版のCASL (Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors)³⁾)
⇒重要性が高く、ただちに取り組むべきテーマと考えられるが、CFD技術(商用, オープンソース)などの技術調査やコード構想を固めていくためのフェーズが必要である。CFD技術による既存熱水力コードの置き換え, 炉心解析と熱流動解析の統合などの技術開発が考えられる。
- (4) モデリング・シミュレーションを知識基盤化していくための技術開発(日本版バーチャル・リアクタ)
⇒重要性が高く、ただちに取り組むべきテーマと考えられるが、V&Vデータ, 実験データベースシステム, VR技術などの調査や知識基盤のシステム構想を固めていくためのフェーズが必要である。熱流動実験データ等のV&Vデータベースシステム, ユーザインターフェースにVR技術を利用したシミュレーションプラットフォーム等の技術開発が考えられる。

IV. まとめ

本稿で紹介した成果は調査・検討段階のレベルであり, 今後は, 検討を深化させるとともに, 開発優先順位の高いものからモデリング・シミュレーションの高度化の具体化に着手し, 事業者やメーカーのみならず, 研究者や人材育成までに役立つ安全基盤整備に早急に取り組むことが肝要であると考えられる。

— 参考資料 —

- 1) <http://csed.sakura.ne.jp/archives/456>
- 2) 高度情報科学技術研究機構, 「原子力利用を支えるソフトウェアの状況と開発に関する調査」報告書, 新技術振興渡辺記念会 科学技術調査研究助成。
- 3) <http://www.casl.gov/>

著者紹介



松本昌昭 (まつもと・まさあき)
(株)三菱総合研究所
(専門分野/関心分野) 原子力システム安全, 放射性廃棄物処分, 計算科学

新刊紹介

原子力発電システムの リスク評価と安全解析

John C. Lee, Norman J. McCormick 著,
西原英晃(監訳), 杉本 純, 村松 健(翻訳), 581p.
(2013.6), 丸善出版, (定価 18,000 円).
ISBN978-4-621-08631-5 C 3053

本書は, ミシガン大学の原子力工学・放射線学科の4年生と前期課程大学院生を対象とした教科書であるが, 原子力発電システムの安全評価やそれに基づく安全確保対策に携わる実務者が, 確率論的リスク評価(PRA: Probabilistic Risk Assessment), シビアアクシデント解析等の原理, 方法論を, 豊富な例題や演習問題(略解付き)を解きながら, 職場や自宅で学び, 自分のものとするのに適した参考書でもある。

書名『原子力発電システムのリスク評価と安全解析』にひかれた。多くの安全評価に関する本が, 従来の設計基準事象を柱とする安全規制を踏まえて, 決定論的安全解析に多くのページを割き, その後, PRAを稀事象対策として取り上げているのに対し, 本書の構成には, リスクの全体像を把握し, リスク支配シナリオを同定して, その詳細な安全解析をするという基本思想が感じられる。

まず信頼性解析, リスク解析に関する原理について述べ, 次に複雑な工学システムに対するPRAの応用と原子力発電所の決定論的安全解析を丁寧に説明している。さらに, 「ど

こかで起こった原子力事故は, あらゆるところでの原子力事故だ」という認識のもとに, 過去30年間に起こった原子力発電所の主要な事故や事象についてレビューし, 現在開発が進められている先進原子力システムの受動的安全性について論じている。

世界各国でリスク情報を活用した規制が進められてきているが, その基盤となるPRA技術に関しては, 故障率算出のためのバイズ法, システムの状態変化に関するマルコフモデル, フォールトツリーの作成と定量化, 厳密解を得るための2分決定グラフ(BDD: Binary Decision Diagram)法, 多様な事故進展のシナリオをモデル化するためのダイナミックイベントツリーなど, 実務上の必要から理解したいと思っても, 良い解説資料がなかった事項を含めて, 基本的な概念及び公式の丁寧な説明があり, 実際にどのように計算すればよいかまで理解できるようになっている。

我が国においても「3.11」事故以降, 世界最高の安全性を有する原子力発電所の構築が求められているが, 本書は安全性向上を志す実務者にとって最適な工学書である。やや価格が高いが, じっくり読めば, リスク評価と安全解析の広い分野について, 自分で原理を理解し計算できるようになるので, 割高感は一掃される。

(原子力安全基盤機構・平野光将)



解説シリーズ

高レベル放射性廃棄物処分の可逆性と回収可能性

第3回 R&R 国際会議内容の紹介(その1)

原子力環境整備促進・資金管理センター 田辺 博三

処分事業の実施段階における可逆性・回収可能性(R&R)が各国で取り上げられ、議論が行われるなど関心が高まっている。第3回と第4回に分けて、R&Rプロジェクトの一環として開催された国際会議より、事業、政策、規制の関係者以外の人文・社会科学分野の学者・専門家からの見方(第3回)やNGO組織などからの発表概要(第4回)を紹介する。

I. はじめに

本解説シリーズでは、OECD/NEA(経済協力開発機構/原子力機関)が2007年より2011年まで行った国際プロジェクト「放射性廃棄物の地層処分場における可逆性と回収可能性」¹⁾(以下、R&Rプロジェクトという)の成果を中心に解説を行ってきた。本解説シリーズの第1回目では、高レベル放射性廃棄物(以下、高レベル廃棄物という)の地層処分において議論されている可逆性と回収可能性(R&R)について全般的な解説を行った。第2回目では、回収可能性について技術的側面からの解説を行った。第3回目では、R&Rの最新の議論について、2010年12月に開催された国際会議「可逆性と回収可能性国際会議と対話」²⁾(以下、R&R国際会議という)から、会議の概要紹介と、事業、政策、規制以外の人文・社会科学分野の学者・専門家からの発表を紹介する。

II. R&R 国際会議の概要

1. 背景・目的

R&Rプロジェクトでは、以下の目的でR&R国際会議を開催した。

- ・R&Rに関するより多くの観点での議論。
- ・R&Rに関する各国の共通点と異なる点の議論およびより良い理解。
- ・R&Rプロジェクト報告書ドラフトの吟味と成果の洗練。
- ・NEAのR&Rプロジェクトで開発された対話ツールとしてのInternational R-scale(第1回参照)の吟味。

Reversibility & Retrievability (R&R) for Geological Disposal of High-level Radioactive Waste (3) ; Sociological Discussion about R&R in R&R Conference (1) ; Hiromi TANABE.

(2013年9月30日 受理)

■前回のタイトル

第2回 回収可能性を中心にした各国の検討状況

各国の実施主体、規制機関、政策決定機関、研究開発機関、社会科学専門家、国際機関、NGO組織、候補地域の団体など16カ国、約180名が2010年12月14日(火)～17日(金)にフランスのランスに集まった。OECD/NEA主催、共催はIAEA(国際原子力機関)、EC(欧州委員会)、EDRAM(放射性物質環境安全処分国際協会)であり、フランス Andra(放射性廃棄物管理機関)、スウェーデン原子力廃棄物評議会(元KASAM(放射性廃棄物国家評議会))、日本原子力安全委員会などが支援した。

2. 会議の全体概要

会議の開催にあたり、会議座長の Claude Birraux 氏(フランス国会議員であり、OPECST(議会の科学技術選択評価委員会)の委員長、2006年の法律^a制定に貢献)をはじめとして、NEA、Andra、EC、IAEAの各代表者より、受動的な方法で安全に廃棄物を処分することが原則であるが、R&Rは処分場の開発にとって重要な役割を果たす可能性があること、R&Rが安全のための要件であってはならないこと、フランスでは最低でも百年間のR&Rを義務付けていること、R&Rプロジェクトが提示するR&Rのレファレンスコンセプトが各国の方針に適切に反映されることを期待していること、ECでもR&Rを重要課題と認識していること、使用済燃料の処分では保障措置とR&Rが矛盾する面があり保障措置と長期安全の調和が必要なこと、などの発言があった。

(1) 全体セッション

「会議の背景」として、会議座長よりフランスにおける地層処分場開発の経緯の紹介、2016年にR&Rの法律を制定する予定であること、そのためにフランス議会のメン

^a放射性廃棄物及び放射性物質の持続可能な管理に関する計画法。

バーには R&R を定義するための情報が必要であり、さまざまな領域間で活発な議論を期待するとの話があった。

NEA の R&R プロジェクトマネージャの Claudio Pescatore 氏より、プロジェクトの経緯の紹介とともに、可逆性は処分計画の議論と一体であること、廃棄物はいつでも回収可能であるがいつまでも同じレベルの回収ではないこと、WIPP^b は安全性ではなく品質保証の理由でパッケージを回収したこと^c、回収を容易にする手段として接近可能性や記録保存などがあげられること、回収可能性の要求は国ごとに異なっていること、可逆性は意思決定であることなどの説明があった。

(2) 個別セッション

以下のテーマについて発表と討論が行われた。

- (1) 「各国における政策レベルでの状況」
- (2) 「政治研究・社会科学からのキーメッセージ」
- (3) 「実施主体などの R&R の展望」
- (4) 「地元のステークホルダーと NGO 組織からの期待」
- (5) 「将来世代に対する最適な選択と義務」
- (6) 「規制方針における R&R の位置付け」
- (7) 「International R-scale とリーフレット」

処分と R&R に関する多様な意見のうち、今回は第 III 章で上記の(2)の概要を紹介し、シリーズ第 4 回では、(4)と(5)で発表された概要を紹介する。

(3) 「会議要約」案

全セッションの終わりに、Claudio Pescatore 氏より以下の「会議要約」案が示された。

- ・回収可能性は回収と同じではない。2つの言葉と概念を混同する危険がある。
- ・共通の定義を行うことへの要望/ニーズがある。
- ・R&R は長期安全性のためではなく、倫理的義務と予防義務に答えるものである。
- ・いくつかの国々では、可逆性の規定が法律に盛り込まれており(米国 WIPP^d、米国 NWPA^e、スイス原子力法、フランス 1991 年法律^f・2006 年法律)、まず政治家によって支持されていることは興味深い。
- ・可逆性は意思決定プロセスの中で判断されるべきである。プロセスの外で意思決定の逆転が生じた場合、衝動的、独断的なものと見なされるかもしれない。

^b WIPP: 廃棄物隔離パイロットプラント、米国の国防活動から発生する TRU 廃棄物の地層処分場。

^c WIPP は規制により回収可能性要件が規定されている。2007 年と 2008 年に各 1 体の廃棄物が回収され廃棄物発生者のもとに戻された。これは WIPP の受入れ基準への不適合が理由であり、安全性には影響しないものであったが住民の懸念に答えたものである。

^d EPA, 40 CFR Part 194: WIPP の 40 CFR Part 191 処分規則との適合性の承認基準。

^e 放射性廃棄物政策法。

^f 放射性廃棄物管理研究に関する法律。

- ・何が最終的な廃棄物であるか、という定義は大変重要である。それを決めるのは誰なのか。
- ・フィンランドとスウェーデンでは回収可能性が処分オプションの評価のための判断基準の 1 つであった。
- ・各国の政府などによる処分計画の進捗度の定期的なレビューは、可逆性に備えるための重要な要素の 1 つとなり得る。
- ・市民に向けた議論に、難しすぎるトピックスというものはない。ベルギーで市民会議が出した結論は、フランスの 2006 年法律の規定とあまり変わらない結果となった。
- ・可逆性は処分坑道を開けたままにしておくことを要求するものとは限らない。スイスでは試験施設とパイロット施設を用いることによって可逆性の目標を達成する。
- ・実施主体が回収可能性に関して信用されるためには、その研究に取り組んでいることを示す必要がある。
- ・操業中になんらかの失敗があるだろうと想定することは現実的である。
- ・R&R は、セーフティケース (SC)^g と同じように定期的にレビューされるべきである。
- ・安全性が信頼されるための第 1 の条件は、当局が信じられることである。当局が人々の前に出て自らの意思決定について説明するのであれば、当局は信頼を得ることができる。EU (欧州連合) の世論調査の結果は、当局がそのような取り組みを行うことを提案している。
- ・処分場を早期に閉鎖するとその地域の便益を損なうかもしれない。しかし、今から遠い将来において起こるであろう行動を、今日避けることができるだろうか。
- ・処分は安全性のためだけにあるのか、あるいはセキュリティのためでもあるのか。
- ・International R-scale は R&R に関する人々との対話を支援するものと思われる。
- ・R&R はフランスの処分概念に組み込まれている。それらは政策的な討論の中心となっている。
- ・R&R は非常に洗練されたトピックスとなっている。また、各国の重要な研究資源が注入されつつある。
- ・R&R を取り入れる以下の新たな理由を見出した。
 - －もし今日可逆性を主張しなければ、可逆にするという解決策のための資金を必要とする時に入手できなくなる可能性がある。
 - －R&R に関する議論は、処分場操業段階の作業を注意深いものにするという利点を有している。
 - －最終閉鎖までの間は、技術的あるいは科学的な失敗の修復が可能でなければならない。
 - －思慮深さや謙虚さの象徴的なメッセージとなる。

^g 地層処分の安全を裏付ける論拠および証拠を収集したもの。地層処分の場合、開発段階に応じてあるいは定期的に、SC の開発・レビューを行うことが考えられている。

Ⅲ. R&R 国際会議における人文・社会科学分野の学者・専門家からの発表

本章では、「政治研究・社会科学研究からのキーメッセージ」で発表された、人文・社会科学分野の学者・専門家からの発表概要を紹介する。

1. 「政治研究・社会科学研究からのキーメッセージ」

(1) フランス Andra の発表—「ハードとソフトの知識に橋を架ける：可逆性に関する Andra の社会・技術的アプローチの協働」—

実施主体の Andra は 2006 年の法律に基づき、少なくとも百年間の可逆性のある地層処分場を開発するため、それまでの専門家、市民、政策決定者の枠組みに加えて、2008 年から科学プログラムの中に人文・社会科学研究を取り入れ、R&R に関する学際的な研究を開始した。研究の中での協働の重要な成果の 1 つとして “Making Nuclear Waste Governable: Deep Underground Disposal and the Challenge of Reversibility (放射性廃棄物を統治可能にする：深地層処分と可逆性へのチャレンジ)” (2010) を作成した。貯蔵とは対照的に深地層処分は最終的な解決策であると考えられていることから、可逆的な深地層処分施設という概念は直感的には理解しにくい。そこで、Andra は意思決定プロセスのための科学技術の開発に関連する可逆性のある地層処分という定義を適用している。科学、R&D、モニタリングプログラムに支援されて、Andra の概念(第 2 回参照)では、将来世代が操業段階において少なくとも百年間は意思決定を行うことができる。

(2) スウェーデン原子力廃棄物評議会の発表—「モード 2 の知識生産の下での R&R」—

1989 年に設立された原子力廃棄物評議会は、人文・社会科学と自然・技術科学に関するアカデミックな学者で構成されており、人文・社会科学の立場から、知識と理論的な考え方の構築に貢献してきた。最新の報告書として、 “Radiating Prospects for Research? An Overview of Nuclear Waste Issues in Social Scientific Research” (2007) がある。実施主体の SKB 社(スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社)は 2004 年から地域の意思決定プロセス、地域の社会経済性因子、核廃棄物問題に対する考えに焦点をあてた社会科学研究を実施してきた。しかし、この研究の重要性にもかかわらず、より大きな民主主義的、経済的な観点から核廃棄物の課題を分析する研究が欠けていた。このため、人文・社会科学の観点からのより理論的な考え方が必要とされ、次の 2 つの関連する理論にもとづいて考察した。

1 つめは、Gibbons ら(1994, 2001)の科学と社会に関

する “モード 2” 理論のアイデア^{4,5)}である。この理論によれば、1 つの重要な変化は、科学システムを特徴付け、社会規範を生んでいる集産主義の衰退である。その結果、公衆が社会から分離することが少なくなり、より一体化する。“モード 2” の知識生産の下では、R&R に対する公衆の圧力、原子力発電の受容、資源管理の自覚および将来世代の自治権への関心が増大することになる。

2 つめは、Wenger (1998) の “実践のコミュニティ” 理論⁶⁾である。この理論によれば、関連する人々は相互に影響しあい共通の努力をすることで、言語、スタイル、価値などを分かち合う。それによってそのグループのメンバーとしての帰属意識を表す。“実践のコミュニティ” によって KBS-3 概念(スウェーデンで実施された使用済燃料の最終処分に関する研究報告書(1983)で提示された地層処分概念)に対する代替法への関心が相対的に欠如していることを説明できるかもしれない。また規制機関の健全性を弱めることによって、地層処分場の許可プロセスに問題を生じさせることになるかもしれない。

スウェーデンの規制枠組みの中では R&R は実質的に無視されている。回収可能性の軽視は KBS-3 概念においてそれが重要ではないことと関連しているのかもしれない。

(3) フランス研究チーム(BETA,CNRS (国立科学研究センター), ストラスブール大学)の発表—「放射性廃棄物処分における可逆性の経済性解析とリアルオプション理論」—

処分における意思決定は、人・環境の防護と処分インフラコストの最小化とのバランスをとるという困難な仕事である。両者の目標は、意思決定に影響する複雑な一連の変数にもとづき、適切な処分段階を選択する最適化の問題の中で相互に関連している。新たに得られる情報を取り入れることによって技術的進展を考慮する可能性を維持するため、および廃棄物の処分に関して将来世代が自ら意思決定を行えるようにするため、処分場の開発プロセスの各段階に可逆性を持たせることを検討している。さらに、可逆性の概念を定義する場合には例外的で一時的な局面が重要であり、意思決定プロセスにおいて考慮されなければならない。

リアルオプション理論は、意思決定の段階で不確実性と柔軟性が不可欠な要素として働く場合に、プロジェクトの評価や意思決定のためのより良い方法を提供する。それは将来、新しい情報を取り入れることを可能にし、はじめの時点では決定できないような重要ではない、あるいは不可能なものであるが、将来は非常に重要なものになるかもしれない決定を考慮することを可能にする。そのためには現在の意思決定者あるいは将来世代が入手可能なオプションを評価する必要があり、それらは処分プロセスの新しい評価(例えば、より安全なあるいはよ

り空間を節約することができる新技術), 新しい情報により正当化される廃棄物の回収(廃棄物の新しい利用方法の発見)あるいは計画通りの継続といった可能性がある。

地層処分場は他の利用に転用することが難しいため, 初期投資は“埋没費用”と呼ばれる不可逆なものとなる。投資したコストがどの程度回収可能かどうかは, 処分場開発の柔軟性に強く関連している。望ましくない条件の場合にコストを“回収”するような選択肢が存在するのであれば, その柔軟性はプロジェクトの追加的な価値とはなる。

リアルオプション理論がうまく適用できる場合は少なくとも2つある。1つめはダイナミックな革新の特徴, より一般的には長年にわたり蓄積された情報を考慮することが許される場合である。割引率と将来の収益分布だけが評価の中心ポイントではなくなる。2つめは次の質問に答えられる場合である。将来の決定においてより幅広い柔軟性を維持するために, 今日支払うべき対価は何か。この対価には技術的なコストと制約だけでなく社会的制約も含むことができる。

処分の場合, もし意思決定者が処分場の最終的な閉鎖を決定すると, 将来, 処理およびリサイクルの新しい技術が得られたとしても, 処分場を開けて最終的な廃棄物に含まれる放射性物質を回収することをあきらめることになる。そうすることで, オプションを捨てることになる。解析においては, 意思決定プロセスにそのようなオプションを反映できることをコストに置き換えて評価することになる。

本研究の目的は, フランスの処分プロジェクトの特徴を踏まえて問題を解析し, 異なる処分プロセスを評価するために, リアルオプション理論をいかに利用することができるかということを示すことである。段階的な決定と1つの決定ポイントにおけるさまざまなオプションの存在は, 単純なオプションを持つ決定の枠組みに比べて, 経済性の計算をより複雑なものにする。事実, 可逆性のある処分プロジェクトは複数の関連するオプションを含んでおり, それらは将来の選択の機会を与えることができる。

(4) スイス EKRA (放射性廃棄物の処分概念に関する専門家チーム)の発表—「EKRA の研究とスイスの“監視付き長期地層処分”概念の公式化”—

概念は UVEC (環境・運輸・エネルギー・通信省)が 1999 年に設置した EKRA によって開発された。

スイスの原子力法では, 放射性廃棄物の処分方針として, 国内の地層処分場あるいは例外的に海外の処分場への処分, 望ましい条件を持ったサイトへの処分, 閉鎖までの間の“合理的な努力”の範囲での回収可能性の実証, 閉鎖まで処分場と環境をモニタリングする“観察段階”および閉鎖後もモニタリングを継続することを政府が命令

可能であることを規定している。法律の基本となっている EKRA の報告書から, “監視付き長期地層処分の EKRA 概念”, 可逆性オプションなどについて紹介する。

(a) EKRA の勧告

① 技術的な勧告: EKRA 概念は次の3つの施設で構成されている(第2回参照)。

- ・試験施設: サイトが選定されてから主施設の操業期間中に, サイト固有条件で安全性実証研究を行うための岩盤研究施設である。
- ・主施設: ほとんどの廃棄物がここに処分される。施設は廃棄物の回収が技術オプションとなるように建設, 埋め戻しされなければならない。施設の埋め戻しと密封の時期は政府が決定する。
- ・パイロット施設: モニタリングと可逆性のキーとなる施設である。処分される廃棄物の代表が定置され, 長期予測の検証と, 安全バリアの機能不全の初期兆候の把握のために, 工学バリアと処分場付近の地質媒体の長期変遷のモニタリングを行う。また, 長期安全性の評価に用いる予測モデルの検証を行い, 試験施設と主施設の埋め戻し後も長期間管理する実証施設である。

パイロット施設に関連して以下の活動計画がある。

- モニタリング用計測機器の開発, 経年劣化と技術発展にともなう計測機器の交換。
- 工学バリアの修復, 改善方法の開発。
- 処分場付近への予期しない放射性核種の放出があった場合のクリーンアップ方法の試験。
- 廃棄物の回収方法の開発。

②その他の勧告

- ・問題解決のための持続的な公衆討論。
- ・モニタリングと可逆性オプション。
- ・プログラムの明確なスケジュール化とフォローアップ。
- ・処分プログラムと実施主体 Nagra (放射性廃棄物管理共同組合)を廃棄物発生者から独立させること。
- ・プログラムを科学的にフォローアップすることを保証するための独立した研究, ノウハウの維持など。

(b) 報告されたキーメッセージなど

- ・可逆性は 1990 年代のスイス社会の大方の要求であり, 2003 年に原子力法に組み入れられた。
- ・可逆性を構成する主要な要素は, 処分場の適切なレイアウト, 主施設の密封あるいは廃棄物の回収の決定が将来世代に開かれたものとするための, 処分場と環境の長期モニタリングである。
- ・処分を実行するためには, 廃棄物処分に関する持続的な公衆対話と, 公衆参加のための適切なメカニズムが必要である。また, 処分のノウハウの維持のために, 開かれた研究・教育プログラムが保証されなければならない。

・EKRA 概念は公衆によって幅広く支持された。しかし、その概念で示したいいくつかの要素は実行されているが、一部はまだ検討されずに未決問題となっている。

(5) ベルギー KBF (ボードゥアン王立基金) の発表
—「可逆性に関する市民の見方：ベルギーにおける高レベル廃棄物と長寿命放射性廃棄物に関する市民会議からの観察結果」—

ベルギーでは 30 年以上にわたり粘土層への地層処分の研究を行ってきた。しかしながら現在も公式な方針はない。2006 年 2 月 13 日の法律^h (EC 指令 2001/42 と 2003/35 にもとづく) では廃棄物管理計画ⁱ と組織されるべき協議会の手続きを課する枠組みを提示した。

この手続きと併行して、実施主体の ONDRAF (放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関) も廃棄物管理計画の必要性が生じた時点で、社会との対話を開始するためのイニシアティブを始めていた。ベルギーのように公衆参加の慣習が少ない国では、このようなイニシアティブは注目すべきことであった。2009 年春に、ONDRAF はステークホルダーと市民の懸念を特定する独自の公衆協議プロセスを構築し、独立機関である KBF に意思決定手続きと決定範囲に関する参加型協議プロセスを調整することを依頼した。このために KBF は、「市民会議」の方法を利用することを選択した。以下に「市民会議」の方法・議論の命題および議論の概要を示す。

(a) 方法：「市民会議」は、デンマークの技術委員会が 1987 年に開発した参加型の科学技術評価の手法であり、カナダ、スイス、オランダなどの国で採用されている。全国から無作為に選定された 32 人の市民代表を集め、2009 年 11 月から 2010 年 2 月までの期間中に 3 回の議論を行った。この間市民は核物理、地質、環境、倫理、政治学、議会メンバーなどの専門家と会合を持った。

市民会議の特徴は、ONDRAF から独立していること、学際的専門家からなる運営委員会が KBF に助言したこと、大学の外部専門家が公平性、透明性、適格性、効率性の要件から市民会議を評価したこと、市民会議の最終報告書を最終廃棄物管理計画とともに連邦政府に引き渡すことを ONDRAF が約束したことである。

(b) 議論の命題：高レベル廃棄物と長寿命放射性廃棄物の長期管理の方針決定を行う際に、どのような価値、規準、議論および考察が重要だと思うか。

^h 環境に関連する特定の計画及びプログラムの環境への影響の評価ならびに環境に関連する計画及びプログラムの作成における公衆の参加に関する法律。

ⁱ 高レベル放射性廃棄物及び長寿命・低中レベル放射性廃棄物の長期管理に関する国家廃棄物計画。2011 年 9 月 23 日に ONDRAF から連邦政府に提出された。今後、連邦政府が方針決定を行う予定。

議論のための情報として、ONDRAF はゼロオプション(現状のまま)、貯蔵の継続、永久貯蔵、地層処分、国際共同処分の 5 つのオプションを提示した。R&R についてはほとんど情報がなかった。

(c) 議論の概要：1 回目の議論では問題の枠組みが議論され、上記 5 つのオプションに限定しないこととなった。議論の中で可逆性が出てきたが、突出したトピックスではなく、さらに情報と議論が必要とされた。

2 回目の議論では、専門家への質問の策定、専門家の特定などを行った。可逆性は先進技術の開発に関する議論の付随的な扱いであった。

3 回目の議論では、専門家との議論、勧告の策定、報告書の発表が行われた。可逆性は合意形成の中心課題になった。先進技術は既存の廃棄物の解決にはならないこと、ベルギーには粘土層への地層処分以外の代替がなくその方針を決定することが合法的であること、実現可能な国際共同処分がすぐには出てきそうにないことが理由であった。

(d) 市民会議の主な勧告の要約：

- ・処分後、少なくとも百年の期間は可逆性があると政府が保証するのであれば、ONDRAF が提案した粘土層への地層処分が妥当である。
- ・可逆性によって、将来、技術的、財政的に異なる廃棄物管理方法を選択することができるものと理解している。
- ・専門家へのヒアリングによって、粘土層がよい防護となることを信頼したこと、地層処分は悪意のある人の接近を容易にしないこと、もし将来世代が処分した廃棄物を回収する決定を行わなければ再び動かす理由がないことから地層処分を支持する。
- ・将来世代が解決方法を選択する自由を残すこと、社会がモニタリングと処分問題に取り組み続けなければならないけれども可逆性は頑健で安全な解決策であること、より柔軟でより高い操業安全性を必要とすること、もしわれわれが今日可逆性を要求しなければその後に必要な時に可逆性のための財政資源が入手できなくなること、将来の研究によって現在の方法が正しい解決策ではないことが証明された場合に代替策を選択することができることから、可逆性の保証を要求している。

これらの「市民会議」の議論の結果、廃棄物管理計画ドラフトにおける R&R の取り扱いは次のようになった。

- ・ONDRAF が設立した市民会議の結果は、R&R の必要性を明確に強調するものとなった。
- ・処分施設を設計し実施する際に R&R を取り入れた柔軟で段階的な意思決定プロセスを採用する。
- ・R&R は無制限の制約とはならない。
- ・人々が処分プログラムに組み込むことを望む R&R の条件の明確化が必要である。

法令による公衆協議プロセス以降の動きとして、ONDRAF は、ある程度の管理可能性 (controllability) と可逆性、可能な限り長期にわたる記憶の管理・保持を、地層処分の補完的な要求として方針案に取り入れることを検討している。このため、科学技術および安全性と資金に焦点をあてた分析を行うとともに、社会協議プロセスが必要と考えている。

KBF は結論として以下のようにまとめた。

- ・無作為に選定された市民が倫理／技術／環境／経済性の重要な側面から議論し、勧告をまとめることができた。すなわち、市民会議は具体的／本質的な結論を出した。
- ・ONDRAF は可逆性と社会的記憶に関する市民の意見に配慮した。
- ・ベルギーでも地層処分は社会的に繊細な問題であり、可逆性は公衆の支持を得るために必須の条件になると思われる。準備段階と実行段階において、社会との協議と対話は不可欠なものであろう。

(6) NEA の FSC (ステークホルダーの信頼性に関するフォーラム) の発表—「R&R : FSC の見解とレビュー」—

NEA の RWMC (放射性廃棄物管理委員会) の FSC は、放射性廃棄物管理における社会的側面を検討するために 2000 年に設置された。機関を超えたメンバーとステークホルダーおよび技術専門家と非技術専門家の間で、信頼と相互敬意の雰囲気のもとでの開かれた議論を促進することを目的として、10 年間にわたり共同作業を行ってきた。その間、年次会合と各国でのワークショップの開催、処分関連自治体への訪問を行った。それらの活動を通して得られた R&R に関する所見と、R&R プロジェクト報告書のレビュー結果の概要を述べる。

(a) R&R に関して得られた所見：

- ・段階的意思決定は実用性の制限範囲内で可逆的であり、政治的社会的な信頼を得ることを促進し、公衆参加を容易にする。
- ・すべての決定が完全に可逆可能というわけではない。また、閉鎖の決定を行う時には、廃棄物を回収する技術的・社会的理由がないことが確認されていることが必要である。
- ・処分プログラムを見直して再スタートしなければならなくなった場合、ほとんどの国では反映—決定—実行—レビューという段階のプロセスを選択しており、そのことは柔軟性と適応性が重要であることを証明している。

(b) R&R プロジェクト報告書のレビュー：

- ・R&R が技術的な問題だけではないことが明確になった。
- ・R&R に関して語る時に提起される多数の質問やト

レードオフに対して、普遍的に答えることのできる唯一最善の答えはないということも示された。

- ・FSC の議論の結果として出てきた原則や最善の実行 (実行可能なより良い技術の適用) の考え方と R&R プロジェクト報告書は一致していた。

IV. 中間まとめ

本稿では、「政治研究・社会科学研究からのキーメッセージ」から、6 件の発表の概要紹介を行った。内容を区分すると、その国の放射性廃棄物管理方針と R&R の取り扱いに直接関わった活動 (スイス EKRA, ベルギー市民会議)、実施主体の社会科学研究成果 (フランス Andra), R&R への態度形成と経済性評価の理論的なアプローチ (スウェーデン政府諮問委員会, フランス研究チーム), 包括的な国際活動 (NEA FSC) ということになる。このうち、スイス EKRA とベルギー市民会議からの発表は、国の付託により、実施主体から独立した専門家チームあるいは市民が、その国の放射性廃棄物管理方針と R&R の取り扱いに直接関わった活動について述べており、専門家チームだけでなく市民会議によっても有意義な結論が導かれることを示している。これらの成果は国の方針に反映された。フランス Andra の発表は、実施主体が行った人文・社会科学研究である。その成果は Andra の処分概念の構築に反映された。また、可逆性は当初、定置した廃棄物を取り出すための技術的、財政的な能力と受け取られていたが、次第に段階的な意思決定プロセスであることが受け入れられてきた。

わが国での R&R の議論はまだ十分に成熟したものであるとは言えない。これらの発表やその背景にある活動を知ることが、今後の参考になるだろう。

(以下、第 4 回に続く)

— 参考資料 —

- 1) OECD/NEA, Reversibility and Retrievalability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel, (2011).
- 2) OECD/NEA, Proceedings of the “R&R” International Conference and Dialogue, (2012).
- 3) OECD/NEA, Summarised Reasons to Retrievalability and Reversibility (R&R) Questionnaire Issued to NEA Member Countries in May 2008, (2010).
- 4) M. Gibbons, *et al.*, The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies, Sage, London, (1994).
- 5) H. Notny, *et al.*, Rethinking Science: Knowledge in an Age of Uncertainty, Polity, Cambridge, (2001).
- 6) E. Wenger, Communities of Practice: Learning, Meaning, and Identity, Cambridge University Press, (1998).

著者紹介

田辺博三 (たなべ・ひろみ)

本誌, 55 [9], p.507 (2013) 参照。

解説

チェルノブイリ NPP 事故によるコンクリート 構造物の状況調査

溶融燃料とコンクリートとの反応の構造物への影響

コンクリート調査会 青柳 征夫

チェルノブイリ NPP4 号炉では約 200t の核燃料の溶解によって発生したコリウム^aとコンクリートの反応によって炉下区画^bの鉄筋コンクリート床版が 1,600℃ に達する高温によって侵食された。しかし、これらが崩壊することなく、コアキャッチャーのような役割を果たし、溶岩状燃料含有物質を受け止め、更なる事故の拡大を未然に防ぐことができた。本稿では、コリウム・コンクリート反応の経緯とコンクリート構造物の損傷の状況をロシアで出版された報告をもとに解説した。

I. はじめに

1986 年 4 月 26 日未明、当時ソ連邦に属していたウクライナ共和国の首都キエフの北方約 130km に位置するチェルノブイリ原子力発電所 4 号機が暴走事故を起こし、大量の放射性物質が環境に放出された。事故の経緯や放射線の住民への影響についてはすでに詳細な報告¹⁾がなされているので、ここでは触れない。溶解した約 200t の核燃料は被覆管のジルコニウムをも混合しコリウムを生成し、さらに生体遮蔽用の砂約 900t、コンクリート、鋼材なども巻き込み、溶岩状燃料含有物質 (Lava-Like Fuel Containing Material, 以下 LFCM と標記する) が原子炉下の 4 階層からなる区画に流れ込み、鉄筋コンクリート構造物を高熱作用によって損傷させた。しかし、構造部材が崩壊に至ることはなく、サブレーションプールの水が水蒸気爆発を誘発するのを防ぎ、さらなる惨事の拡大を未然に防ぐことができた。

福島 1 号機でも炉心溶融が起り、溶融燃料が压力容器の底を破り、鋼板製格納容器の底部を被覆する厚さ 2.5m のコンクリートを深さ約 70cm まで侵食したことが推定されている。

コリウム・コンクリート反応による構造物への影響がどのようになるかという問題が注目されることは少ないが、過酷事故に対する安全対策に万全を期すためにも看過できない課題であると思われる。

以下ではロシアで刊行された研究報告^{2,3)}に基づき、LFCM が炉心下の鉄筋コンクリート床版に及ぼした影響について述べる。

II. コリウム・コンクリート反応

一般にはコア・コンクリート反応という言葉がよく使われるが、実際にはコリウムとコンクリートの反応であるので、コリウム・コンクリート反応と呼ぶのが適当であると思われる。コリウム・コンクリート反応は模擬核燃料を使って実験室で発生させることができるが、長時間反応を持続させることはできない。1 トンの UO₂ を使用した大規模なコリウム・コンクリート反応の実験が米国のアルゴンヌ国立研究所で行われた。第 1 図はこの実験によって侵食されたコンクリートの状況を示している。しかし、実際の発電所で起こり得る数十トンから数百トンの核燃料とコンクリートの反応を再現させることは不可能である。このため、解析によって侵食深さを予測せざるを得ない。ロシアで開発された解析プログラムによれば、コリウムの発熱が持続し、その温度低下がないと仮定した条件においても、約 30 時間の反応持続時間である一定の深さに収束するという結果になっている。解析の結果を実験の結果と合わせて第 2 図に示す。

侵食深さは、コンクリートの耐熱温度 (高温溶解した後、冷却硬化しても強度を回復できないと考える限界温度) によって異なり、耐熱温度が 1,400℃ の通常の構造用

Structural Damages of Concrete Structures caused by Chernobyl NPP No.4 Plant Accident ; Effects of Corium-Concrete Reaction on Reinforced Concrete Slabs : Yukio AOYAGI.

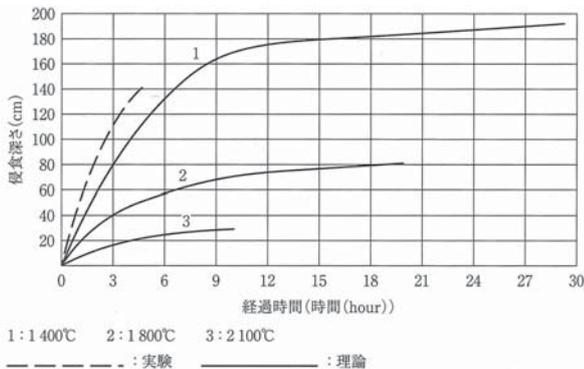
(2013 年 7 月 12 日 受理)

^aコリウム (corium), 二酸化ウラン UO₂ と燃料被覆管のジルコニウムや鋼材などの金属溶融物。

^b炉下区画, 下部遮蔽盤の下にある原子炉建屋底面までの 4 階層からなる高さ約 12m の区画。



第1図 コリウム・コンクリート反応によるコンクリートの侵食, UO₂ 1 トン使用, Argonne National Laboratory, USA³⁾



第2図 コリウム・コンクリート反応による経過時間と侵食深さの関係(参考資料2)の図-1.10より引用)

コンクリートでは、約 200cm, 耐熱温度が 1,800°C の耐熱コンクリートでは約 100cm, 耐熱温度が 2,100°C の超耐熱コンクリートでは 30 ~ 40cm という結果となった。すなわち、耐熱温度を高めるほどコンクリートの高温侵食の抑制に効果があるといえる。また、侵食がどこまでも持続するという、いわゆる“チャイナシンドローム”のような現象は起こりえないことがわかる。

Ⅲ. チェルノブイリ 4 号炉での溶岩状燃料含有物質(LFCM)の流動状況

原子炉の異常が検出されてから数十秒以内で水蒸気爆発が起こり、引き続いて水素爆発が起こった。これらの爆発によって重量 3,000t に達する直径 17m, 厚さ 3m の鉄筋コンクリート製の上部遮蔽盤が数 m 傾いた状態で吹き上げられ、建屋の梁に引っかかって止まった。下方でも直径 14.5m, 厚さ 2m の下部遮蔽盤を傾いた状態で押し下げた。爆発は炉下区画にも伝播し、厚さ 1m の鉄筋コンクリートの壁に大穴を空け、頑丈な鋼製の扉を引きちぎり、反対側の壁に衝突させた。

高熱で溶解した核燃料と被覆管のジルコニウムからなるコリウムは、炉心周囲に貯蔵されていた約 900t の砂並びに鋼材、コンクリートなどを巻き込み、LFCM が

生成された。LFCM は一時的に 1,900°C に達した。この LFCM は、下部遮蔽盤上のコンクリートを約 45 時間で溶解させ、さらに下部遮蔽盤の上下鋼板と蛇紋岩充填物を 6 時間で溶解させ、炉下区画最上階(4 階)の厚さ 2m のプレキャスト・現場打ち合成鉄筋コンクリート床版上に流れ下った。このときの LFCM の温度は 1,600 ~ 1,700°C と推定されている。LFCM の流動状況を第 3 図に示す。

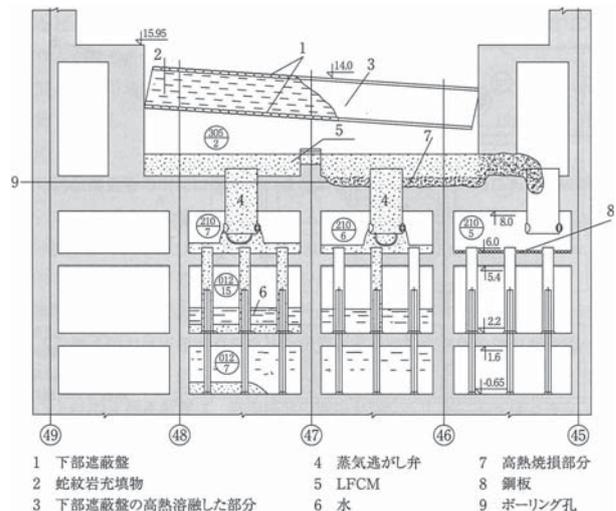
LFCM は直径 140cm の蒸気逃がし弁を通過して下階(3 階)の高さ 60cm のプレキャスト鉄筋コンクリート床版上に滞留した。さらにその一部は、直径 42.5cm の蒸気管を通過して 2 階および 1 階のサブレーションプールの中に落下して急冷され、一部は軽石状になり水に浮かんだ。プールの水の温度は 100°C を超え沸騰したが、蒸気爆発を誘発することにはなかった。爆発後約 80 時間経過したところで LFCM の温度が低下し始め表面から凝固が始まったが、内部の温度は 1,600°C を保ち、流動を続けた。炉下区画の室内の温度は 500°C を超えることはなかった。

水平面上での LFCM の流動速度は毎時 3 ~ 7m であり、比較的ゆっくりしたものであった。LFCM の内部と表面の温度がそれぞれ 1,400 および 300°C 以下にまで冷却が進んだ時点で流動が完全に止まり、安定な状態になるまで爆発後約 10 日間を要した。

LFCM の元素分析の結果によれば、ケイ素約 30%, ウラン 4 ~ 10%, ジルコニウム 2 ~ 6%, マンガン 2 ~ 5%, カルシウム 5% となっている。ケイ素が最も多いのは生態遮蔽用の石英砂の主成分が SiO₂ であることによるものである。

Ⅳ. コンクリートおよび鋼材の強度に及ぼす高温加熱の影響

鉄筋コンクリート構造材料は、コンクリートと鋼材



第3図 炉下区画における LFCM の流動分布状況 (参考資料2)の図-1.6より引用)

(鉄筋)で構成された複合材料であり、圧縮応力をコンクリートが、また引張応力を鉄筋が分担するようになっている。以下にコンクリートと鋼材の強度に及ぼす高温加熱の影響を述べる。

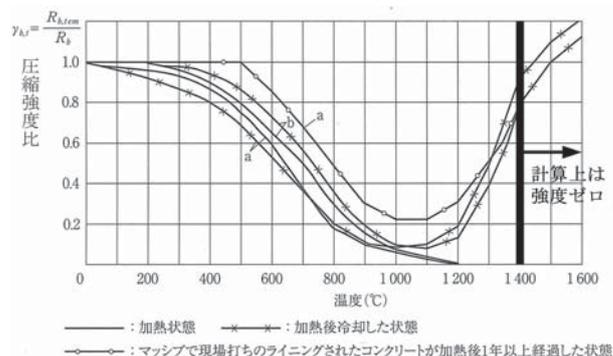
1. コンクリート

コンクリートもまたセメント、骨材(砂利と砂)、水および気泡で構成された複合材料である。1,000℃を超える高温加熱がコンクリートの諸性質に及ぼす物理・化学的影響については必ずしも十分な説明がなされているとはいえない。セメントペーストは骨材を結合する接着剤の役割を果たし、その性質の変化はコンクリートの強度に大きな影響を及ぼす。一方、骨材はコンクリートの体積の70～80%を占め、コンクリートの強度や変形特性を支配する構成材料である。粗骨材(砂利)として用いられる主な岩種は、花崗岩と石灰岩であるが、高温の作用によって異なった挙動を示す。花崗岩の主成分である石英は、575℃において α から β に形態が転換し、その際に体積が2.4%増大し、強度が低下する。一方、石灰岩は、800℃前後で主成分である炭酸カルシウム CaCO_3 が酸化カルシウム CaO と炭酸ガス CO_2 に分解し、大量の炭酸ガスを発生する。

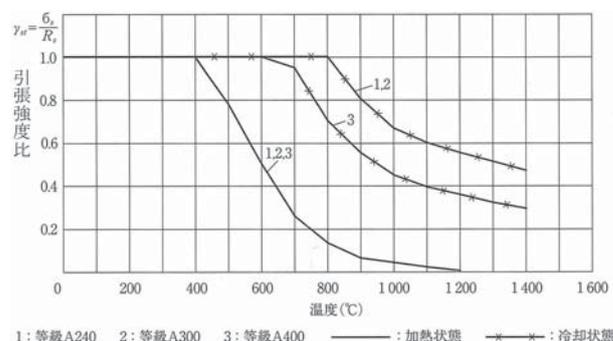
コンクリートを製造する際に混入される水の一部はセメントと結合しないで自由水としてコンクリート中に残留するが、100℃までの加熱でほとんどが蒸発してしまう。化学的に結合した水の大部分は350℃までの加熱で遊離する。高温下でのコンクリートの固相、液相、気相の変化ならびに化学的な反応がコンクリートの強度と変形特性を決定するが、そのメカニズムには不明な点が多い。

加熱時および加熱後冷却された状態での鉄筋コンクリート構造材料の耐力を評価するためには、加熱中および冷却後における加熱時の最高温度と強度の関係を定義する必要がある。

いくつかの実験研究の結果を考慮した加熱温度とコンクリートの強度の関係を第4図に示す。骨材が花崗岩と石灰岩の場合で若干異なるが、加熱中では温度が1,200℃で強度はゼロとなる。この温度に達するとコンクリートは完全に軟化し、荷重を負担することができなくなる。冷却後の強度は1,000～1,100℃で極小値をとり、その後は加熱温度が高くなるのに従って強度が増大する。これは、一旦軟化や液状化したコンクリートが冷却によってガラス化やセラミック化を起し、強度を回復するからである。通常のコンクリートの耐熱温度は1,400℃とされているので、実際にはこれ以上の加熱温度でも冷却後の強度は増大するが、構造材の耐力評価に際しては、1,400℃を限界温度に設定し、これ以上の温度まで加熱された場合、冷却後も強度を失うものとするのが妥当であると思われる。



第4図 岩種の異なる骨材を用いたコンクリートの加熱温度と圧縮強度の関係(参考資料2)の図-2.5より引用)



第5図 鉄筋(鋼材)の温度と引張強度の関係(参考資料2)の図-2.9より引用)

2. 鋼材(鉄筋)

鋼材の加熱温度と引張強度の関係は第5図に示すとおりである。

降伏棚^cのある軟鋼の場合、200～300℃で青熱脆性^dを起し、300℃を超えると降伏棚が完全に消滅する。400℃を超えると引張強度が急速に低下し始める。これは450～600℃で炭化鉄が黒鉛に分解するためである。鉄筋に使用される軟鋼は1,200℃で完全に強度を失い、1,540℃で溶解する。

加熱後冷却した状態では降伏点の低い鋼材(普通鋼)では加熱時の最高温度が800℃までであれば元の強度を回復するが、降伏点の高い鋼材(高強度鋼)では強度が回復する限界の加熱温度は600℃である。1,400℃の加熱履歴温度では、普通鋼および高強度鋼でそれぞれ50%および30%の強度が回復する。ただし、鋼材はコンクリート中に埋設され、高熱を受けて軟化しても形状を保持していることが条件となる。

なお、LFCMが発する放射線のレベルでは、イオンビームによる温度の若干の上昇はあるが、放射線がコン

^c降伏棚、応力・ひずみ曲線において応力が降伏点に達した状態で応力を維持しながらひずみが増加(塑性流れ)を起こす領域。

^d青熱脆性、200～300℃で鋼材の引張強度や硬さが常温に比べて増加し、伸びと絞り減少して脆くなる現象。青色の酸化皮膜が表面に形成される。

クリートと鋼材を軟化や脆化を助長することはない。

V. 高温加熱を受けた鉄筋コンクリート床版の耐力評価

下部遮蔽盤を溶解させて流れ込んだ炉下区画最上階の厚さ2mの鉄筋コンクリート床版が高温で長時間のLFCMの作用によって最も大きな損傷を受けた。この床版は、第1表に示すように径間5.3mの4径間連続構造⁶として設計され、1,100t mの曲げモーメントに耐える構造となっていた。1,600℃の厚さ80cmのLFCMが床版上に65時間滞留するという仮定の下に、構造部材内の温度分布を計算した。

温度分布計算に必要な熱伝導率および熱伝達率は実験結果に基づき温度に依存する値として定義した。1,600℃のLFCMによる上から下に向かう熱伝導および蒸気逃がし弁を充たす1,400℃のLFCMによる放射状の水平方向の熱伝導が合成された温度分布の計算結果を第6図に示す。下面が接する空気は270℃としている。

加熱状態では1,200℃を超えるコンクリートの圧縮部の強度はゼロであるので、断面の有効高さが2mから1.15mに減少するものとし、蒸気逃がし弁による水平方向の加熱で1,200℃を超える部分の影響を断面幅が2mから1.4mに減少するものとして考慮した。加熱時の断面内の温度分布に基づき、第4図の関係から、圧縮部の強度分布を第7図に示す。加熱時の引張鉄筋の温度も計算し、この温度に対応する引張強度を第5図から求めた。高さで60cmのI型鋼は曲げモーメントを負担することはできない。温度は1,350℃に達しているの、加

⁶連続構造、梁や版構造などに用いられる構造形式で、支点上でもモーメントを負担できるようにし、径間中央に作用するモーメントを低減するようにしたもの。版厚や鉄筋量を減らし、経済的な設計ができる。チェルノブイリでは支点上の上側の鉄筋が高温に熱せられたため強度を失い、支点上で不連続な単純支持構造に変化した。

第1表 厚さ2mの鉄筋コンクリート床版の諸元と耐力評価

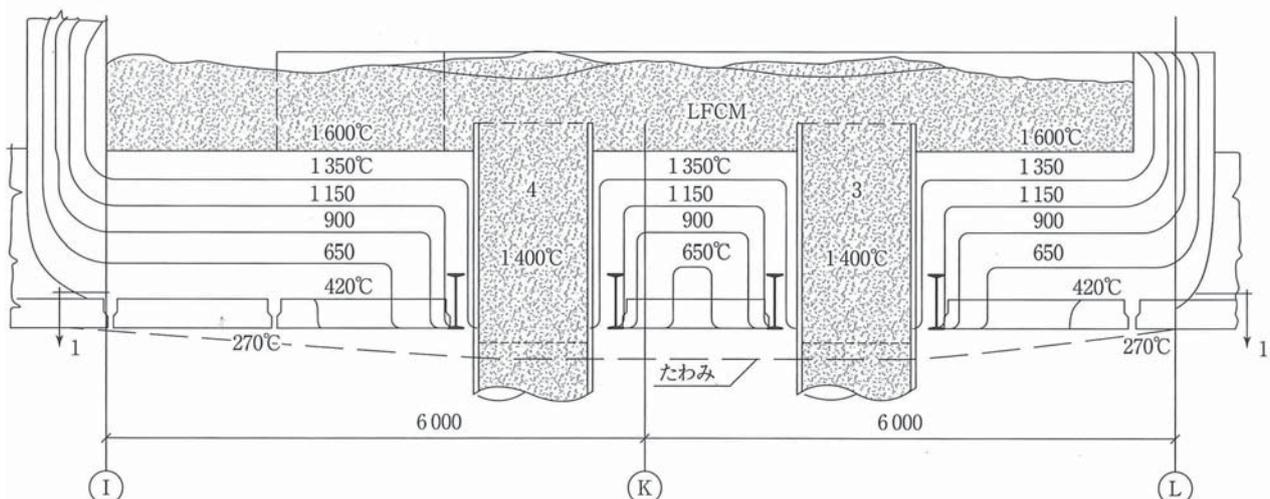
部材諸元	プレキャスト・現場打ち合成床版, 設計径間5.3m, 高さ2m (プレキャスト0.3m, 現場打ち1.4m, 断熱コンクリート0.3m), 4径間連続床版, 設計モーメント = 1100tm	
高温侵食	蛇紋岩耐熱コンクリート0.3m + 現場打ちコンクリート0.4m, 1600~1700℃のLFCMが65時間滞留, 堆積高さ0.8m	
加熱時状態	断面高さ2.0m → 1.15m, 断面幅2.0m → 1.4m, 高さ0.6mのI型鋼耐力喪失 連続床版 → 単純支持床版	
耐力モーメント	加熱時	強度低減率 コンクリート圧縮部 $\gamma_{bt} = 0.12$, 引張鉄筋 $\gamma_{st} = 0.2$, $Muc = 133 \text{ t m}$, 安全率約1.5
	冷却時	計算高さ1.3m, 計算幅2.0m, $\gamma_{bt} = 0.28$, $\gamma_{st} = 0.68$, I型鋼強度50%回復58 t m, $Muc = 58 + 528 = 581 \text{ t m}$, 安全率約6.5

熱状態冷却後は1,400℃までの履歴温度であればコンクリート、鋼材とも強度の一部が回復している。例えばI型鋼は50%の強度が回復したとしている。

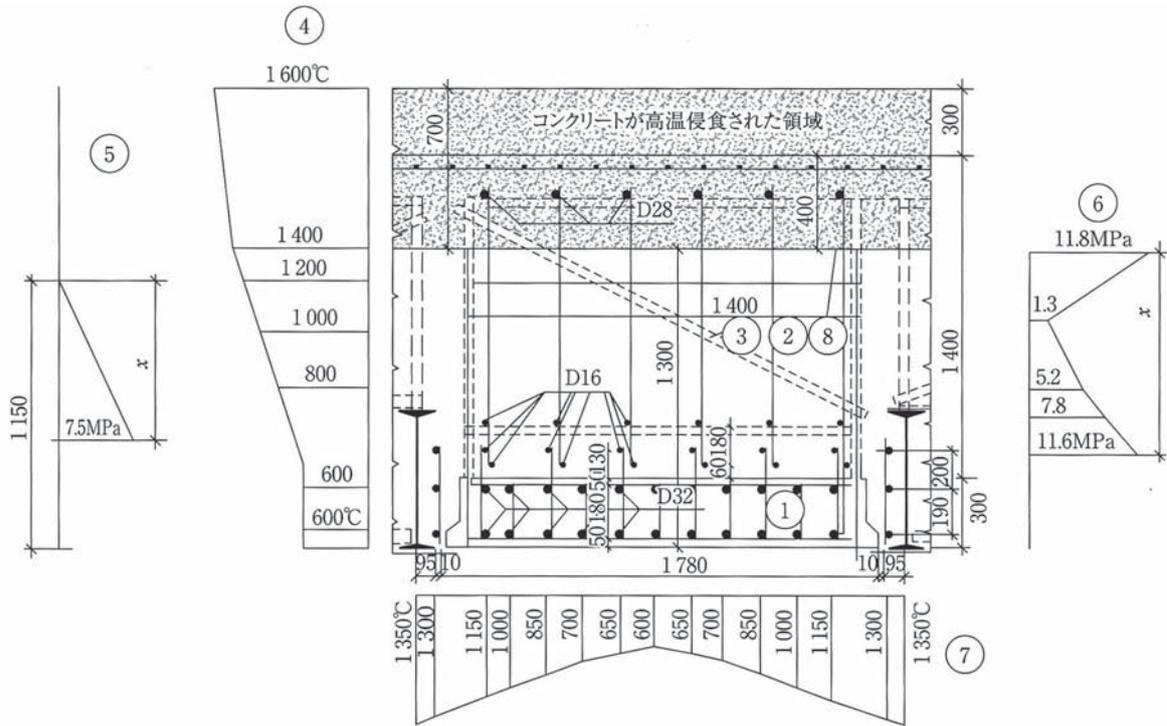
耐力評価の結果は第1表に示すとおりである。耐力評価において用いた荷重は床版の自重および上載されている厚さ80cmのLFCMである。加熱時の安全率は約1.5, また冷却後の安全率は約6.5に増加している。支点上の上側の鉄筋の強度喪失と大きなひび割れのために支点上でモーメントを伝達できなくなり、連続構造が単純支持構造に変化し、大きなたわみが加熱時に発生し、冷却時にもそのまま残留した。大きな損傷を受けたにもかかわらず、最上階の床版は崩壊を免れることができた。

3階の厚さ60cmのプレキャスト鉄筋コンクリート床版の加熱時および冷却時の安全率はそれぞれ5.2および8.2で十分な安全余裕があった。

上述のように、約2,000トンを超えるとされるLFCMの大部分を炉下区画の鉄筋コンクリート床版が受け止



第6図 炉下区画最上階の厚さ2mの鉄筋コンクリート床版の断面内の温度分布(参考資料2)の図-3.2より引用



① プレキャスト鉄筋コンクリート版 ② 現場打ちコンクリート ③ 鉄筋組み立用枠組み(山形鋼 75×6)
 ④ 断面高さ方向の温度分布 ⑤ 事故時の圧縮域におけるコンクリートの強度 ⑥ 事故後の圧縮域におけるコンクリートの強度
 ⑦ 水平方向の加熱による床版内のコンクリートと鉄筋の温度 ⑧ 加熱時の計算断面の境界

第7図 炉下区画最上階の鉄筋コンクリート床版の温度と強度の分布(参考資料2)の図-3.4より引用)

め、下階のサプレッションチェンバーへ流下する時間を遅延させ、流下量を大幅に削減できたといえよう。これによって隣接する3号炉の1年半後の再稼動が可能になった。

(5) 1,400°Cを超える温度に長時間耐えられる耐熱コンクリートの開発と施工方法についての実用化研究が望まれる。

VI. チェルノブイリ事故から得られたコンクリート工学上の知見

以上に述べたように、チェルノブイリ事故はコンクリート工学の観点から見て貴重な情報を提供しているといえよう。これらを要約すれば、

- (1) コリウム(コア)コンクリート反応の進行は約30時間ではほぼ収束し、通常のコンクリートの場合、その侵食深さの限界は2m程度である。
- (2) チェルノブイリ4号炉では4階層からなる炉下区画の鉄筋コンクリート床版構造物が大量の溶岩状燃料含有物質(LFCM)を受け止め、コアキャッチャーのような役割を果たした。
- (3) コンクリートおよび鋼材は1,200°Cの加熱で完全に強度を失うが、冷却後は加熱履歴温度が1,400°C以下であれば強度の一部を回復する。
- (4) 1,000°Cを超える加熱が想定される部位にある鋼材はコンクリートあるいは耐火材で被覆する必要がある。

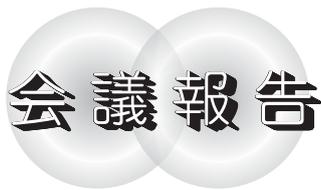
— 参考資料 —

- 1) 石川秀高, 佐藤一男, 長滝重信, 他: 特集「チェルノブイリ事故から15年 - 私たちが学んだこと」, 日本原子力学会誌, Vol.44, No.2, pp.18-95 (2002).
- 2) A. Ф. Милованов, В. В. Соломонов, З. М. Ларионова: 「Высокотемпературный Нагрев Железобетонных Перекрытий при Аварии на Чернобыльской АЭС」, Москва Энергоатомиздат, 2000.
青柳征夫訳: 「チェルノブイリ原子力発電所の事故—鉄筋コンクリート構造物に及ぼした影響」, 技報堂出版, (2013. 4).
- 3) インターネットサイト, Nuclear Reactor Severe Accident Experiments No.4, Argonne National Lab. Nuclear Engineering Division.

著者紹介



青柳征夫 (あおやぎ・ゆきお)
 コンクリート調査会代表, (元(財)電力中央研究所)
 (専門分野) コンクリート工学/特にエネルギー・電力施設のコンクリート構造物の材料と構造の研究



福島事故後の燃料研究・開発の新しい動き

Light Water Reactor Fuel Performance Meeting 2013
2013年9月15～19日 (ノースカロライナ州シャーロット市, 米国)

米国ノースカロライナ州のシャーロット (Charlotte) の Westin ホテルで「LWR Fuel Performance Meeting 2013」(以下、LWRFPM2013と称す)が開催された。本国際学会は、米国(米国原子力学会(ANS)主催で会議名はLWRFPM)⇒アジア地域(日中韓のいずれかの国の学会が主催で、会議名はWater Reactor Fuel Performance Meeting: WRFPM)⇒欧州(欧州原子力学会(ENS)主催で会議名はTopFuel)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る。

開催都市であるシャーロットは巨大な高層オフィスビルが林立する商業都市で、原子力産業の企業をはじめとする大手企業の本拠地として機能しており、会場となったWestinホテルも25階建の高層ビルであった。また、シャーロットは自動車競技のNASCAR (National Association for Stock Car Auto Racing)の聖地としても有名であり、バンケットは会場ホテルから歩いて5分程度の距離に位置するNASCAR 殿堂(NASCAR Hall of Fame)で開催された。

LWRFPM2013には米/欧/アジアの17ヶ国の規制当局・電力・メーカ・大学・研究機関より300名を超える参加(日本からは、10機関から合計14名の参加)があり、口頭発表151件、ポスター発表31件など活発な議論が交わされた。発表では6つの技術トラックが設定され、燃料使用経験関連(トラック1)、過渡及び過酷事故時の燃料挙動関連(トラック2)、先進的な燃料設計、材料、製造関連(トラック3)、モデリング関連(トラック4)、使用済燃料の貯蔵および輸送関連(トラック5)、次世代燃料概念および設計関連(トラック6)と幅広い領域を網羅する情報量の多い学会であった。ただし、3日間に151件の口頭発表(3会場でのパラレルセッション)と31件のポスター発表(夕食時に同時開催)を詰め込んだため、興味を持った発表の発表時間が重なってしまった点は残念であった。

今回の学会(LWRFPM2013)の特徴として、特に米国から福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえた事故耐性燃料(Accident Tolerant Fuel: ATF)の発表が多くなされたこと、ATFの研究開発の活性化に伴ってArgonne National Laboratory (ANL), Oak Ridge National Laboratory (ORNL)等の米国国立研究所や大学からの発表が顕著に増加したことが挙げられる。特に、米国エネルギー省(DOE)が中心となったものや、産業界や米電力中央研究所(EPRI)が中心になった研究・開発プログラムに関連する発表が多く見られた。た

だし、ATF関連の研究開発の発表全般について、プロジェクトが開始されて間もないものも多く含まれていることから、今後の取り組みや研究開発のコンセプトを述べるに留まるものが多いという印象を受けた。しかしながら、例えばDOEが中心となったプロジェクトでは、2020年までにATFの商用炉への試験導入を開始する計画を立てており、今後は急速に研究・開発が加速されていく可能性がある。ATF関連以外の発表については、比較的、福島第一原子力発電所事故発生前からの研究・開発テーマが多く、事故後も丁寧に幅広い基礎試験、検証試験(炉内照射等)などが継続して取り組まれているとの印象を受けた。特に、フランスを中心とした欧州やアジア(日韓)からは、照射試験を含めた物性評価やメカニズム研究等、学術的にも興味を持たれる発表が多くなされ、燃料設計・開発関連に留まらず学術的な議論も行える良い機会であった。

さて、人材という点からLWRFPM2013での参加状況を見てみると、日本は多少危惧すべき状況にあるのではないかというのが、報告者の率直な印象である。米国からはATF関連で大学からの発表も多くなされたこともあり、多くの学生や博士研究員も参加していた。欧州からも研究機関の若手や大学の博士研究員が比較的多く参加していたのに対し、日本からは学生や博士研究員の参加が皆無であった。産官学の共同研究開発等を通じて若手研究者の参加を積極的に進め、今後はより多くの軽水炉燃料研究の将来の担い手が本国際会議に参加できる状況になることを期待する。

次回は、日本原子力学会(AESJ)主催でWRFPM2014として、2014年9月14～17日に宮城県仙台市の仙台国際センターで開催される予定である。報告者はその実行委員の一員としてその準備に携わっているが、WRFPM2014では過酷事故を特別プログラム「Core melt and relocation in severe accidents」で取り上げ、過酷事故に関する活発な議論も行う予定である。また、より学術的な発表に焦点を合わせたアジア内での核燃料に関する国際会議「Asian Nuclear Fuel Conference (ANFC2014)」がWRFPM2014に引き続き、同じ仙台市内の東北大学片平キャンパスにて2014年9月18～19日で開催される予定である。中堅・ベテラン研究者、技術者に加え、軽水炉燃料研究の将来の担い手となる学生や博士研究員の積極的な参加をお願いしたい。

(日本核燃料開発(株)・坂本 寛,
2013年11月11日記)

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

教訓にたどり着くためにも、真摯な研究と発信を

朝日新聞 木村 俊介

東京電力福島第一原子力発電所の事故以降、日本原子力学会は何をしてきただろう。事故調査委員会を立ち上げたものの、残念だが独自の切り口や見解は少ないと思う。学会には、もともと商用原発には関わりがないという研究者が多いかもしれない。だが、学会が存在意義を示す場面が乏しいのではないか。

非公開で会合が続く事故調でほぼ唯一、「功績」と言えるのは、学会幹部経験者へのアンケートだと思う。先鋭的な意見を恣意的に取り上げたという回答には「ああ、やっぱりか」と感じる記述があった。

「電力会社がかなり強い力を持っていて、意見できない雰囲気や風土があった」「原発の安全性への言及は自己の足を崩すというような認識があり、原子力村の一員として電力会社に遠慮があって、あえて思考の範囲外に置いた」「安全研究の予算はわずかだった。電力会社にも、安全性に問題があると思われては困るとのことで、安全性研究を歓迎しない雰囲気があった」

電力会社への配慮で、言うべきことを自ら封じてきたのか。それとも、学会そのものの雰囲気が指摘を遠ざけてきたのか。

もちろん、こういった回答が主流だったわけではない。事故調によると、アンケートの対象者の選定方法や調査手法が万全であったわけでもないという。

実際のところ「原発は電力会社が責任を持って運用しているとの認識があり、日本の原発の実情、特に安全性を直視することを学会の役割の外に置いていた」「研究者にあっては、個別分野の研究テーマが最大の関心事であり、事故対策につながるような議論場自体が少なかった」という回答もあった。

原発事故とのそれぞれの向き合い方なのだろう、回答の中には「今さらこんなアンケートは不要と思う」「日本では、学会の影響力は、国や電力・産業界を動かすほどには大きくない」という意見もあった。

事故の遠因は学会にもあるのではないかと問うアンケートの設問。回答しなかった、あるいはできなかった幹部経験者には、回答することそのものに反発があったかもしれない。だが少なくとも、これまで学会の中に電力会社にも申しない雰囲気があったことは確かだろう。

雑談の中である大学の研究者が「安全研究は結果が出

にくいから、自分の学生の就職先としては躊躇する」とつぶやいていたことを思い出す。原発事故前は私も含めて、ぬるま湯にいたのだと思う。

たぶん今、日本原子力学会に求められているのは「一枚岩であること」ではないと思う。大事なものは、多種多様な意見を持ち、自由に外部に発言していくこと。そして誰に対しても「不都合な真実」を明らかにすることをためらわないこと。そこで電力会社などへの配慮から発言を控えるようなら、研究とはいったい何のためにあるのかと考えたくなる。長いものに巻かれる研究者ばかりなのか。「そうではないぞ」という多くの研究者が声を上げることを期待する。

最後に私ごとで恐縮だが、福島県は社会人になって初めて赴任した場所だ。右も左も分からぬ若造を社会人にしてくれた。原発事故の後、2011年9月に再び戻り、2013年4月まで1年半勤務した。

雰囲気が一変していた福島では「専門家」の語る言葉が住民に届いていなかった。「原発は安全だ」という主張を信じて来た住民に届く言葉がなかったという方がより正確かもしれない。少なくとも当初は、国や専門家の説明と、住民の知りたいと思うこととの間には大きな隔たりがあった。何もかもがチクハグで、本当にこの事態が「想定外」だったのだなと感じた。

原発事故は今も続いている。第一原発の敷地の中も、外も。原発事故は東京電力の不作為で起きたかもしれない。だが学会は、正面から自らのこととしてとらえなければいけないと思う。この事故を収めることで、ようやく何らかの教訓にたどり着くことができるのではないかと思う。

(2013年 11月5日 記)

【著者プロフィール】

木村俊介 (きむら・しゅんすけ)

朝日新聞科学医療部兼福島総局

1975年生まれ。2002年入社。同4月に福島支局に赴任。名古屋本社報道センター、大阪本社科学医療グループをへて、2011年9月に再び福島総局。2013年4月から東京本社科学医療部との兼務。