

巻頭言

- 1 国民の信頼を回復するためには、われわれの総力の結集を 住田健二

新会長あいさつ

- 2 日本原子力学会が会員，社会から誇りを持たれる宝になれるように 田中 知

解説

- 10 福島第一原子力発電所事故から学ぶ
原子力学会の存在意義は何であろうか？
今こそ，福島を技術的に分析し，より安全な原子力を世界に提言しなくてはならない。
二ノ方壽，岡本孝司

- 16 ポスト3.11時代の科学技術コミュニケーション—社会は原子力専門家を信頼できるのか
科学に問うことはできるが，科学(だけ)では答えることのできない問題，すなわち「トランス・サイエンス」の課題として，原子力の問題をとらえ直す。
八木絵香

- 20 福島第一原子力発電所に何が起こったのか—炉心露出事故時の燃料のふるまい
炉心溶融を起こしたスリーマイル島原子力発電所事故や関連研究の知見を踏まえ，炉心露出事故時の燃料の崩壊から溶融までのふるまいを概説する。
藤城俊夫

- 25 軽水炉燃料崩壊熱のふるまい—福島第一発電所の崩壊熱挙動理解のために
福島第一発電所の冷温停止に向けての課題は崩壊熱との闘いにつきる。崩壊熱は，核分裂で生じた核分裂生成物のβ崩壊に伴うFP崩壊熱と，アクチノイド核の崩壊に伴い発生するアクチノイド崩壊熱に大別される。
吉田 正

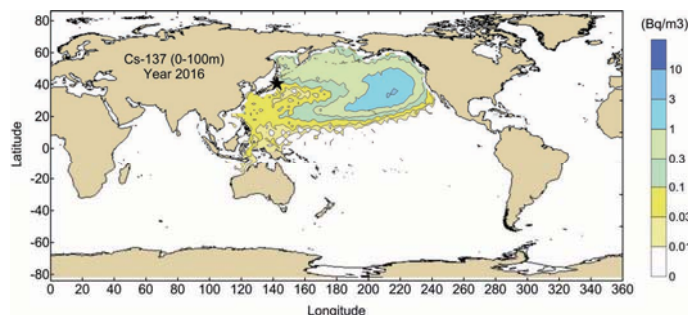
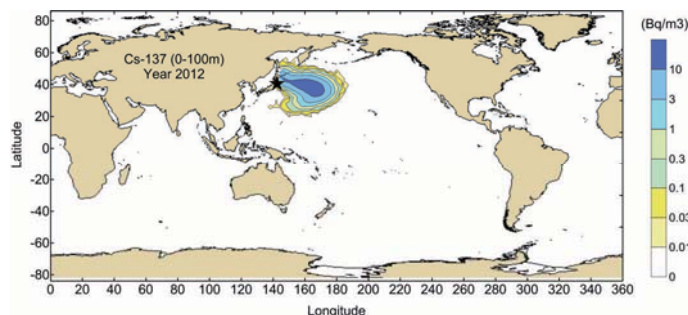
解説

- 34 福島第一原子力発電所事故に係わる放射線影響分科会の活動報告(I)
—放射線被ばくに係わる汚染状況に関する情報の整理と提言

放射線影響分科会は，環境と関係者への被ばく低減と放射線学的情報の整備，得られた情報の発信などの活動を始めた。
「原子力安全」調査専門委員会 放射線影響分科会

- 29 長期的な海洋環境影響は？
—福島第一原子力発電所からの放出放射能の長期的海洋拡散シミュレーションと海産物摂取による内部被ばく評価

原子力機構は，福島事故によって放出されたセシウム137などが，太平洋でどのように拡散するかをシミュレーションした。
中野政尚



海水中のセシウム137の濃度分布の予測結果 (上が1年後，下が5年後)

表紙の絵「夏の日に」 製作者 佐川 美都里

【製作者より】 夏の昼下がり，SLが来るのを心躍らせて待っていると，瞬く間に走り去って行ってしまった。沿線には夏の強い光を浴びてノカンゾウの花がスクッと咲いていました。

第42回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

解説

39 原子力推進を堅持する米仏、撤退するドイツ—福島事故後、情報共有と教訓反映を図る国際機関と欧米

福島発電所の事故は原子力政策をめぐってさまざまな議論を巻き起こしたが、各国の現実的な対応は分かれた。ここでは欧米と国際機関の事故後の動向を紹介する。

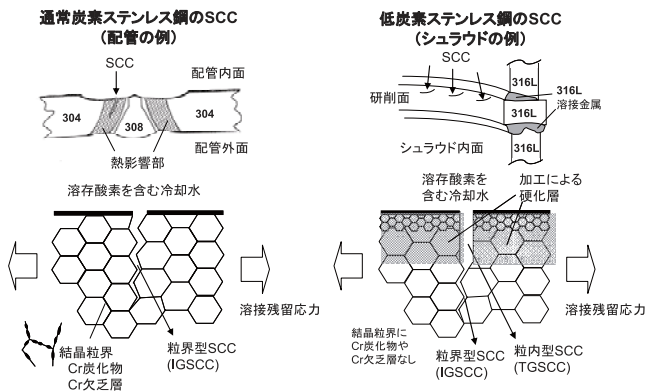
北村隆文、花井 祐、佐藤一憲

連載講座 第1回 材料が支える原子力システム

46 軽水炉用オーステナイトステンレス鋼

原子力システムを構成している各種材料は、特殊な使用環境に対応するために、特別な規格、規制の元に使用されている。この連載講座では原子力材料が、どのようにして選定され、どのようなトラブルを克服してきたかについて紹介する。第1回目では、軽水炉の構造物の多くに使われているステンレス鋼をとりあげる。

四電樹男、福谷耕司



BWRのステンレス鋼のSCCの機構の模式図

コラム

55 放射線の人体影響について Q&A

「放射線」は「被ばく量」が重要です。正しく理解し、過剰な心配は避けるべきです。岩崎民子

会議報告

57 Workshop on Decay Spectroscopy at CARIBU

河野俊彦

3 NEWS

- 東電、福島第一7・8号機増設中止を決定
- 校庭の被ばく線量「年1 mSv以下目指す」
- 福島原子力損害賠償で指針
- IAEA 調査団が事故暫定報告
- 安全委が福島災害廃棄物で方針
- 政府がIAEA 会議へ報告書
- 事故調査・検証委が初会合
- 滞留水処理の試運転を開始
- 政府、原賠支援機構法案を国会提出
- 海外ニュース

原子力外交シリーズ

52 包括的核実験禁止条約(CTBT)及び兵器用核分裂性物質生産禁止条約(FMCT)

武藤義哉

ATOMOS Special 世界の原子力事情(15) 東欧編

58 ルーマニア

—CANDU 炉で国内ウランを有効活用

杉本 純

ジャーナリストの視点

61 「言葉の備え」を問う

福井由紀子

62 追悼「元会長 山本 寛先生のご逝去を悼む」

鈴木篤之

63 会報 原子力関係会議案内、人事公募、平成23年度役員紹介、学会賞受賞候補者推薦募集、英文論文誌(Vol.48, No. 8)目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

WEB WEBアンケート

6月号のアンケート結果をお知らせします。(p. 60)

学会誌記事の評価をお願いします。 <http://genshiryoku.com/enq/>

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

国民の信頼を回復するためには、 われわれの総力の結集を



大阪大学名誉教授

住田 健二 (すみた・けんじ)

大阪大学理学部物理学科卒。日本原子力研究所、大阪大学工学部教授、原子力安全委員会委員長代理、日本原子力学会会長などを歴任。専門は原子炉工学、原子炉および核融合中性子工学。

本年3月11日に発生した東日本大震災による東電・福島第1原発での壊滅的な被害は、まさに前例のない結果をもたらした。大型軽水発電炉の3基に廃炉不可避の破壊を与え、数炉心分の入った4号炉使用済み核燃料プールが残置された。これまでに放出された放射性物質の量はチェルノブイリ炉の約10分の1程度との推定だが、破損された炉心とその周辺に残置された核燃料は単純な推定でも、これまでに体験された原子炉事故での最高値を楽に越える。

非常事態で使用された冷却水はすべて汚染水と化し、今後には並々ならぬ問題を残すことは自明である。幸いにして、現在までには放射線被曝による重篤な具体的被害事例は出ていないようだが、今後の推移は必ずしも楽観を許さない。精神的な打撃だけではなく、国家予算規模の経済的な打撃が関連分野全体に厳しくのしかかってくる、覚悟しなければなるまい。

このような世界でも前例のない厳しい非常事態に直面したからと、想定外であったと逃げ腰になり、これまでの数々の努力の成果を見捨て、一気に新エネルギーを頼るのは賢明とは思えない。その確実性や問題点を吟味しないまま、期待だけで転進するのは、いかにも安易である。しかるべき準備と努力を尽くした成果を背景に、その未来に期待をかけるのはよいが、すでにわれわれが手に入れている「本来のあるべき姿の原子力平和利用の穏やかな姿」の存在を無視するのは、情緒的かつ早計ではないだろうか。

既存の電力会社と政府組織の温存を前提とした「原子力発電」の実用化において、少なからぬ無理があり、そのための弊害が主として安全性確保に破綻を生み、今回の事態を生じたことは否定できない。だからといって、原子力そのものの持つエネルギー源としての重要性までを否定するのは、あまりにも拙速である。エネルギー資源の乏しい大工業国。1億を越す人口を抱えた狭い島国日本のおかれた特異な条件を考えると、それなりの進み方がある。隣国からパイプや電線でエネルギーを容易に入手しうるヨーロッパでの流れを、すぐに真似るのはあまりにも安易である。それよりも、すでにある程度まで手中に収めていたと思える原子力を、さらに賢く、より安全に使ってゆくという努力に、もう一度国民の供託を得たいと思うことは許されないことだろうか。

正直なところ、100日間に及ぶ政府側、設置者側、関係者の皆さんには、大変な努力があったと思うが、残念ながら、その努力は国民や地域社会の信頼を得たとはいえない。それは、広報活動の不備といった派生的な破綻が原因ではなく、もっと根源的な、指導者層の統治能力欠如に発すると思える。ただそれを今から追求して、是正の見通しが付くのを待っている、大事故の急速な収拾に間に合いそうにもない。

あえて私は、いまこそ原子力関係者の一致団結と協力体制をと提案したい。わが学会の会員であるほどの方々は、まず学識経験者としての立場から、種々の機会でも専門家としての見識ある発言をぜひ行ってほしい。組織的な活動も大いに期待したいところである。ほとんど専門的な知識もないままに、ムード的な迎合発言をしたがる人達との対決を恐れてはならない。そうした専門分野での冷静な筋の通し方は当然として、別の角度からの努力もお願いしたい。

すでに、学会のシニアGや原研OBのシニアGが立ち上がって、被災現地での除染作業に従事している。放射線計測の正確な知識をもって、被災地を回っているグループもある。こうした積み上げこそ、われわれがすでに手にしている原子力の基礎知識で、地元の人たちの信頼を回復できる第一歩であり、ピラをまき散らすような広報活動とは異なる面を持っている。こうした両面からの活動こそ、日本原子力学会会員のみが、なしうる寄与ではないだろうか。どうか皆さん、それぞれの身近な場で、期待されている活動や協力を進めましょ

(2011年6月29日 記)

日本原子力学会が会員，社会から誇りを 持たれる宝になれるように



第33代(平成23年度)会長
田中 知(たなか・さとる)

平成23年度日本原子力学会会長に選任されましたこと、身の引き締まる思いであります。平成23年3月11日に発生した東日本大震災による福島第一原子力発電所における事故は、我が国の原子力安全への信頼を揺るがし、経済活動およびエネルギー政策にも大きな影響を与える事態となっております。この原発事故に際して、日本原子力学会(以下、学会)は十分に機能し、専門家集団としての役割を果たすことができたのでしょうか。また、事故以前においても、原子力安全技術に関する提言を十分に行ってきたのでしょうか。いま、学会の在り方について、内外から様々な問いかけを頂いております。我々は、それらの声を真摯に受け止め、原発事故および事故以前における学会の取り組みについて総括を行い、改めるべき点は改めていく覚悟が必要です。

昭和34年の学会設立以来50有余年を経て、原子力界を取り巻く環境は大きく変化いたしました。近年、原子力エネルギーはクリーンエネルギーとして注目され、エネルギー政策の大きな柱となりつつありました。しかし、今回の原発事故が発生し、いまだ収束の道半ばであり環境修復などの課題山積するなか、まさに学会の在り方が問われているのです。

学生時代、そして若い研究者当時、学会誌を手に取り、研究成果を年会・大会の場で発表させていただくことに、喜びと誇りを感じたものです。そして、現在でも、学会会員として活動を展開することに誇りを持っております。学会の強みでもある会員皆様の学術的、技術的な専門知識が、社会貢献に適切に利用されるような組織の仕組みを整備し、実行力を伴って運営指揮をとることが、わたくしの使命でもあります。学会会員にしかできない活動により専門家として社会に貢献することができる、それが誇りある学会となる条件であると考えております。残念ながら、現在は専門家集団としての強みが必ずしも活動に活かされていないのではないのでしょうか。それは、自らの潜在能力を過小に評価し試みもせずに諦めてしまう内向き志向の体質にあるのかもしれない。

このような状況を打破するために、学会設立の目的や行動指針、倫理規程に立ち戻って、場合によればその修正も視野にいれ、ひとりひとりが己の行動の在り方を再確認するとともに、会員皆様の能力を活かす組織運営を再構築する必要があると考えています。学会は、原子力の利用に関する学術および技術の進歩を図ること、会員相互および国内外の関連学術団体等との連絡協力等を通じ原子力の開発発展に寄与すること、を目的として設立されました。行動指針に規定されている原則では、学術および技術レベルの維持・向上、公平・公正・透明な議論の場を通して信頼できる情報源たりうる、といった項目があります。トラブル発生時に迅速にプロジェクト組織を立ち上げて活動する、などの機動的な対応が可能な組織運営が必要であり、有事における緊急的活動においても高い倫理観と行動指針による責任ある行動が求められるのです。また、今年度4月より、我々のそういった活動が社会的にも信頼されるために、より運営に際してガバナンスが要求される一般社団法人へと移行いたしました。

現在、学会ひいては原子力界の置かれている状況はまことに厳しく、学会存亡の危機といっても過言ではありません。また、学会が果たすべき使命や役割について、自らが作った壁の中で考えるのではなく、社会や他分野専門家の意見にも耳を傾けて、積極的に取り組んでいく姿勢が必要です。わたくしも、皆様と協働しながら、日本原子力学会が会員からも社会からも誇りを持たれる学会になるよう、尽力致す所存でございます。

(2011年6月23日 記)



このコーナーは各機関および会員からの情報をもとに編集しています。お近くの編集委員(目次欄掲載)または編集委員会 hensyu@aesj.or.jp まで情報をお寄せ下さい。資料提供元の記載のない記事は、編集委員会がまとめたものです。

東電が福島第一 1～4号機廃止、7,8号機増設中止を正式決定

東京電力は5月20日の取締役会で、東北地方太平洋沖地震で被災した福島第一原子力発電所の1～4号機廃止および、同7,8号機増設計画の中止を決定した。大地震により、1～4号機には内外とも設備に著しい損傷が生じていることから、同社として4基を廃止することとした。

計画中の7,8号機については、今回の事故が社会に与えた影響を踏まえ、地域の理解を得ることは極めて困難との判断から、中止となった。両機は、いずれも138

万kW。福島県内で初のABWRとして計画され、01年度電源開発基本計画新規組み入れ予定地点に位置付けられ、10年度電力供給計画によると、いずれも12年4月の着工が見込まれていた。

なお、震災後、原子炉が冷温停止状態にある福島第一5,6号機と福島第二1～4号機については、詳細な調査実施には至っていないが、東京電力では当面、原子炉の安全を維持するために必要な措置を講じることとしている。

文科省が校庭での被ばく限度で「年1 mSv 以下目指す」

文部科学省は5月27日、福島第一原子力発電所事故に伴い、いままで「年間1～20mSv」としてきた学校での児童生徒などが受ける暫定的な放射線量限度について、「当面、年間1 mSv 以下を目指す」との新たな方針を打ち出した。年1 mSv は一般人の医療を除く放射線限度。

文科省では4月19日付けで、「福島県内の学校の校舎・校庭等の利用判断における暫定的考え方について」を示し、今後できる限り、児童生徒および幼児・園児の受ける線量を減らしていくことが適切としながらも、特に校庭・園庭で毎時3.8 μ Sv以上の空間線量率が計測された学校については、学校内外での屋外活動をなるべく制限することが適当であるとの考えを示していた。

その後、同省では5月11日に、校庭などの土壌に関して「まとめて地下に集中的に置く方法」と「上下置換法」の2つの線量低減策を教育委員会などに示していた。

今回、さらに対策を強化するため、以下の対策を追加した。

▽福島県内のすべての学校等に積算線量計を配布し、児童生徒の受ける実際の積算線量のモニタリングを実施する。

▽空間線量率が毎時1 μ Sv以上の校庭・園庭の土壌について、線量低減策を講じる設置者に対し、学校施設の災害復旧事業の枠組みで財政的支援を行う。

福島原子力損害賠償、避難者帰宅や風評被害で指針

政府は5月31日、福島の原子力災害に関する損害賠償判定の第2次指針を決定、先の1次指針で対象とならなかった政府避難指示に伴う帰宅費用、出荷制限指示に伴う損害、風評被害などの範囲について、基本的考え方が示された。文部科学省に設置された原子力損害賠償紛争審査会(会長＝能見善久・学習院大学法務研究科教授)で検討を行ってきたもの。

原子力災害発生に伴う避難生活に係わる補償については、「仮払補償金」の支払いが既に進められているが、第2次指針では、福島第一発電所から半径20km圏内の警戒区域住民に対し実施している1次立入りに伴う費用

や、屋内退避区域の指定解除に伴う帰宅費用について、賠償すべき損害とすることとなった。一方、避難生活による精神的損害については、引き続き検討していく。

また、政府による農産物の出荷制限指示により、その後の作付を断念することで生じた減収、同指示の解除後の減収も賠償の対象とすることとされた。

風評被害についても定義し、今回の事故と相当因果関係のあるものであれば、賠償の対象とすることとし、営業損害のほか、取引先の要求により実施した検査費用も損害項目に含めることとなった。

IAEA 調査団が事故暫定報告、「献身的最善のアプローチ」と評価

福島事故 IAEA 調査団は 6 月 1 日、日本政府に暫定報告を提出し、以下の概要を示した。

- ▽困難な状況下でサイト運転員の献身的で強い決意を持つ専門的対応は模範的で、非常事態を考慮すれば結果的に安全を確保する上で最善のアプローチとなった。
- ▽避難措置など日本政府の公衆保護のための長期的対応は見事で良く組織されている。被ばくに関する適切で時宜を得たフォローアップ計画および健康モニタリングも有益。
- ▽原子炉復旧計画のロード・マップは重要。状況に応じ修正が必要となるが、国際的な支援も受けられる。避難した人々が通常の生活の再開することを可能とし、放射線の放出により影響を受けた敷地外の地域の救済をもたらす可能性がある、より一層広範な計画の一部とみなされるべきである。極限的な原子力の事象に対応する上で、何を成し遂げ得るのかを世界に示すことになる。
- ▽原子力発電所の設計者や運転者は、あらゆる自然ハザードの危険性を適切に評価して防護措置を講じ、

新たな情報、経験や理解を踏まえた危険性評価と評価手法を定期的に更新すべき。

- ▽大洪水など共通性のある極限的な外部事象に対し、深層防護、物理的な分離、多様性、多重性が適用されるべき。
- ▽原子力規制の制度は、極限的な外的事象に対する定期的な見直しを含めて適切に対処でき、また、規制の独立性と役割の明確さが IAEA 安全基準に沿ってあらゆる状況において維持されるようなものとするべき。
- ▽適切な通信手段、重要なプラント・パラメータ、コントロールおよびリソースを十分に備えた敷地内の堅固な緊急対応センターは有用であり、すべての主要原子力施設に設けられるべき。シビアアクシデントに対し重要な安全機能をタイミングよく回復させられるよう簡易で丈夫な設備が利用できるようにすべき。

なお IAEA 調査団は 5 月 24 日から 6 月 1 日までの期間、訪日し、関係省庁との会合や現地視察などを行っていた。

安全委が福島災害廃棄物で方針、住民や作業員の被曝に配慮

原子力安全委員会は 6 月 3 日、福島原子力事故の影響を受けたがれき、汚泥などの災害廃棄物の処理処分に関して、当面の安全確保の考え方をまとめた。

安全委員会では、今回の考え方の中で、再利用、処理・輸送・保管、処分の 3 項目に分け、これまでに同委が原子力活動の安全規制に向け策定した指針類や事故に伴う助言を踏まえ、安全確保について適用すべき方針を示した。

再利用については、原子炉施設で既に適用されているクリアランスレベルの基準が準用できるとの考えを示した。処理・輸送・保管に関しては、処理等に伴い周辺住民の受ける線量が 1 mSv/年を超えないよう、また、焼却・溶融等の工程でも、比較的高い放射能濃度の廃棄物

の発生が考えられることから、作業者についても、可能な限り 1 mSv/年を超えないよう配慮すべきとした。また、処分に関しては、処分方法に応じたシナリオを設定し、安全委員会の指針に示す「めやす」を満たすよう適切な評価を行うものとしている。

一方、環境省の専門家会議では現在、福島原子力事故の災害廃棄物の処分に関する検討を進めている。仮置場の廃棄物は、再利用するには基準値を超えるものも相当量あると思われるが、国立環境研究所の検討によると、廃棄物焼却炉に特殊フィルタを用いた場合のセシウム 137 の挙動では、30 ベクレルの焼却飛灰の放射能を 0.03 ベクレルに落とせるとしている。

政府、IAEA 会議へ報告書、過酷事故対策を強化へ

政府・原子力災害対策本部は 6 月 7 日、「東京電力福島原子力発電所の事故について」と題する報告書を発表した。6 月 20 日からウィーンで開かれる IAEA の原子力安全閣僚会議に日本政府として報告する。本報告書は、対策本部下に組織された政府・東京電力統合対策室が中心となって進めてきた事故収束に向けた取組を踏まえ、これまでに得られた事実関係をもとに、事故の評価や教

訓を暫定的に取りまとめた。

事故の発生と進展に関しては、第一発電所で運転中だった 1～3 号機が地震によって自動停止、同時にすべての外部電源が失われ、非常用ディーゼル発電機が起動したものの、津波の影響を受けて、これらも停止したことから、原子炉圧力容器へ注水できない事態が一定時間継続し、炉心の核燃料が水で覆われずに露出、炉心溶融

(コア・マルチ)に至り、その一部が原子炉圧力容器の下部に溜まったと推移を説明。また1～3号機の炉心状態については、圧力容器の底部が損傷し、燃料の一部が格納容器のドライウェルフロアに落下して堆積している可能性も指摘した。

原子炉建屋やタービン建屋内部の汚染水、建屋外部の汚染水については、それぞれ作業性、環境への放射性物質の拡散を防ぐ観点から、管理が重要な課題となったとしている。

また今回事故を、国際原子力・放射線事象評価尺度(INES)に基づく暫定評価「レベル7」とした経緯も記述している。

報告書では、事故発生から約3か月が経過し、多くの周辺住民避難、地域内の産業への影響などから、「過去のスリーマイルアイランド事故やチェルノブイリ事故とは様相の異なる点が多くある」とした上で、現在までに得られた事故の教訓を、「シビアアクシデント防止策の強化」、「シビアアクシデント対応策の強化」、「原子力災害への対応の強化」、「安全確保の基盤の強化」、「安全文

化の徹底」の5グループに分類し、計28項目を掲げた。地震の影響については、詳細な状況がまだ不明なことから、さらなる調査が必要とする一方、津波については、シビアアクシデントを防止する観点から、再来周期を考慮した適切な発生頻度と高さを想定するよう要求している。

さらに、「今回の事故はシビアアクシデントに至ったもの」とし、92年の策定以来、見直しがなされていないアクシデントマネジメント対策を、事業者による自主保安ではなく、法規制上の要求とすることも含め対策強化を図ることを求めている。

また原子力安全・保安院は6月7日、シビアアクシデント対応の緊急措置として、①中央制御室の作業環境の確保、②緊急時における発電所構内通信手段の確保、③高線量対応防護服等の資機材の確保および放射線管理体制の整備、④水素爆発防止対策、⑤がれき撤去用の重機の整備——の実施状況を報告するよう各電気事業者に指示した。

福島事故調査・検証委が初会合、法規制など4チーム設置

畑村洋太郎・東京大学名誉教授が委員長を務める「東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会」は6月7日、都内で初会合を開催した。

9名の委員のほか、事務局長として小川新二・最高検検事、技術顧問として安部誠治・関西大学教授と淵上正朗・コマツ取締役が出席した。菅首相も出席し、冒頭で「政府から独立してしっかり判断してほしい」と言及した。

同委員会では、「事故原因等調査」、「被害拡大防止対策等検証」、「法規制のあり方の検討」、「社会システム等検証」の4つの作業チームを設置し、12月頃に中間報告、

来年夏までに最終報告を取りまとめる。海外への情報提供も行っていく。

畑村委員長は委員会後の記者会見で、今月中にも現地を視察し、地震や津波で電源を失ったケースの再現実験を行いたいと意欲を示した。

同委員会の設置は政府が5月24日の閣議で決定していたもの。事務局は内閣官房に設置。検証委員会は今後、菅首相が示していた基本的な考え方である、①従来の原子力行政からの「独立性」、②国民、国際社会に対する「公開制」、③技術的な問題のみならず制度的な問題まで含めた検討を行う「包括制」——を重視する方針だ。

福島第一原発で滞留水処理が試運転開始、セシウム吸着で性能確認

東京電力は6月14日、福島第一原子力発電所における高濃度放射性滞留水の処理システムの一部装置について、試運転を開始した。冷却のための注水に伴いタービン建屋等に滞留した放射線レベルの高い水を処理し、原子炉注水に再利用する「循環注水冷却」を確立し、同社が事故収束に向けた道筋に示した「冷却」と「抑制」を達成するもの。14日に実施したセシウム吸着装置の試運転では、セシウム137の濃度が処理前の約0.003倍に低下するなど、性能が確認された。

福島第一発電所では、高濃度の放射性物質を含む水が大量に滞留し、漏えいによる環境汚染、被ばくリスクが生じており、5月末時点の建屋内滞留水の量は、1～

4号機と汚染水を移送する集中廃棄物処理建屋で、約10万m³にも上っている。そのため、東京電力は5月上旬より、集中廃棄物処理建屋に移送・貯蔵された滞留水を処理し、原子炉への注入水に利用する設備の設置工事を、6月中の稼働を目指し進めてきた。

主要設備は、処理建屋に移送した水の油分を分離し、放射線レベルの低減と塩分除去を行う各装置から構成されている。油分分離装置で滞留水に含まれる油分およびスラッジを自然浮上分離により除去した後、放射性物質処理システムに移し、セシウム吸着装置(米国・キュリオン社)で3種類の吸着剤を充てんした吸着塔を通し汚染物質を除去、続く除染装置(フランス・アレバ社)で水

槽中の汚染水をかくはんしながら薬剤を注入し、浄化された上澄みを抜き取ることで汚染物質を除去して、1日当たり1,200トンの水処理を行う。放射性物質処理に続

く淡水化装置は8～10月に稼働する予定だ。

また、汚染水の処理が滞った場合を想定し、約1万m³の貯蔵設備を8月以降設置する。

政府、原賠支援機構法案を国会提出

政府は6月14日、原子力損害賠償支援機構法案を閣議決定、国会に提出した。福島原子力災害を含め、原子力事業に係わる巨額の損害が生じる可能性を踏まえ、政府支援の枠組みのもと、新たに組織を設立し、賠償金の支払いに備えるもの。

福島原子力事故によって、住民や産業界に甚大な損害が発生し、いまだ事態は収束しておらず、賠償総額の見通しが立たない状況下、政府として、①被害者への迅速かつ適切な損害賠償のための万全の措置、②発電所の事態の安定化・事故処理に係る事業者等への悪影響の回避、③電力の安定供給——を確保するため、「国民

負担の極小化」を基本に支援措置を講じる考えから、法制化する作業を進めてきた。

本法案では、将来にわたる原子力損害賠償の支払いに対応できるよう、相互扶助の考えに基づき、東京電力以外の原子力事業者も参加する「原子力損害賠償支援機構」を設置し、事業者からの負担金の収納、賠償を実施する上での資金交付、被害者からの相談対応などに当たる。一方、政府は機構に対し、国債の交付など、必要な援助を行う。

(上記の資料提供はすべて日本原子力産業協会)

海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[国際]

OECD/NEA が政策提言、RI の供給保証で「各国の協調必要」

経済協力開発機構・原子力機関(OECD/NEA)は5月2日、医療用放射性同位元素(RI)の長期的な安定供給を保証していくための政策提言を発表し、各国政府と産業界が共同歩調を取るなど、国際的に一貫した政策アクションを取る必要性を訴えた。

がんや心筋血流の画像診断などでテクネチウム製品の需要が世界的に増しているにもかかわらず、その生産はカナダのNRU炉など数基の古い研究炉に依存。ここ10年来、供給の信頼性は著しく損なわれてきている。

この問題の解決のため、NEAが2009年に創設した「RI供給の確保に関するハイレベル・グループ(HLG-MR)」は昨年、この業界で新規の投資が促されるよう、供給チェーンの経済構造改革を訴える報告書を発表。各国政府が採用すべき6つの原則に基づき、経済的に持続可能な供給チェーンの創出、およびその機能に適切な環境を作り出すための経済構造改革が必要となる政策アプローチを策定した。

NEAの運営委員会はHLG-MRのそうしたアプローチを正式に支持しており、それらを実行に移すアクションを取らなかった場合、今後10年間に供給不足は恒常的になると警告。供給の信頼性を根本的に脅かしている経済構造を適切に改革するよう各国政府や産業界に呼びかけている。

[米国]

NRC、国内事業者に電源喪失対応で情報要請

米原子力規制委員会(NRC)は5月11日、原子力発電所における緊急時の影響緩和戦略に関する文書を全米の原子力発電事業者宛てに発出し、深刻な事象発生後の全交流電源喪失への対応手順について情報を提供するよう要請した。福島原発事故の発生経緯を重く見、各発電所が従来から策定している過酷事故の收拾対応手順のみならず、要員の能力の確保や機器の維持管理が現実的であるか、NRCとして審査する必要性を認めた措置といえる。

米国では70年代後半から、原発における全交流電源喪失のリスクが対応を要する重要課題として浮上。80年代後半にNRCが公布した規則により、各原子力発電所では全交流電源喪失への対応が求められることになった。また、2001年の9・11テロ事件を受けてNRCは翌年、緊急時対応に関する指令を発出。その中の「B5b条項」で緊急時の影響緩和措置についても規定していた。

今回の措置はこのB5b戦略に基づくもので、NRCは通常の安全システムが損傷を受け、利用不能になった場合でも、炉心と使用済み燃料プールが確実に冷却されるよう、規制項目の遵守状況について事業者に包括的な確認を要請。このほか福島事故に鑑み、①追加の評価プログラムが必要であるか、②現行の検査プログラム強化の必要があるか、③さらなる規制アクションが必要か

——を確定するため、事業者から情報を求めたいと説明している。

[英国]

規制当局、福島影響評価で中間報告 既存炉の安全性を確認

英国では5月18日、保健安全執行部(HSE)のM・ウェイトマン原子力規制機関長が福島事故における想定外事象の影響と英国の原子力発電部門が安全強化上学ぶべき教訓について、「国内の既存炉や新設計画に影響なし」と結論づける中間報告書を取りまとめた。

この評価は福島事故直後の3月14日にエネルギー気候変動省(DECC)のC・ヒューン大臣が要請していたもので、すべての原子力施設をカバーした包括的な最終報告書は9月に提出することになっている。

ウェイトマン長官は4月1日付けでHSEに新たに設置された原子力規制機関(ONR)のトップ。国際原子力機関(IAEA)が24日から6月1日までの日程で福島原発に派遣した事故調査専門家チームの団長も務めた。

中間報告段階における結論として同長官はまず、「福島事故から学ぶべき教訓はあるが、国内原子力発電所の運転を縮小する必要はない」と断言。合理的で適切な対策により、原子力の安全性をさらに高めることが可能かを判断するため、産業界や政府、規制当局がレビューすべき25の勧告分野を特定した。

具体的には国内原発のレイアウトや緊急時対応の体制、電源喪失が長時間にわたった場合や洪水に伴うリスクへの対応を挙げている。そして、これらにどのように取り組むかの計画案を6月半ばまでに策定せよ、というのが26番目の勧告になるとしている。

[ドイツ]

脱原発への修正法案を閣議決定

ドイツのメルケル政権は6月6日、2022年末までに17基すべての原子炉を廃止するための原子力法修正案を閣議決定した。再生可能エネルギー開発の促進枠組み法案などとともに並行して議会審議にかけ、7月初旬にも成立させる方針だ。

同修正案は、原子力安全委員会の報告書と「エネルギー供給のための倫理委員会」による勧告に基づき、連立与党が5月末に取りまとめた内容で、17基の原子炉それぞれの閉鎖年を具体的に明記。ただし、ただちに閉鎖される古い7基のうち1基は、2013年春までの2度の冬季に停電を避けるため、火力発電所が手当不能だった場合のみ、再び稼働可能になるよう待機状態とする。

脱原子力にともなう不足電力の一部は再生可能エネルギー

の発電シェア拡大で補填。現在の17%を2020年までに35%まで引き上げるため、同電源の研究開発および同電源と接続する送電網の整備を急ピッチで進める。また、1次エネルギーを多量に消費する輸送と建物部門での省エネを加速するとしている。

原子力分野ではこのほか、放射性廃棄物を最終処分するため、一般的な地層の適性基準策定手段、および可能性のある処分オプションとしてゴアレーベン岩塩ドームでの探査を実施する。また、塩水の流入により処分が中止されたアッセⅡ処分場からの低・中レベル廃棄物回収経費の一部として、原子力事業者からの核燃料税を充てることになった。

[イタリア]

国民投票で9割が脱原子力を支持

6月12日と13日の両日、イタリア全土で行われた原子力発電の復活に関する国民投票で、投票に参加した国民54.79%のうち94.05%が原子力発電所の建設に関する規則の取消しに賛成した。「任期中に原子力の復活に道筋を付ける」ことを公約に掲げて選出された現政権だったが、ベルルスコーニ首相は「多くの国民が参加し意思表明した結果であり、政府と議会には真摯に受け止める義務がある」として、原子力復活の断念を表明、同国における脱原子力が確定した。過去に大規模な停電を経験した上で同国民が選んだ道とはいえ、火力80%の電力供給や欧州諸国中最も高い電力料金から逃れる方策は、依然として不透明なままだ。

今回の国民投票では原子力復活法のほかに、首相を含めた閣僚の訴追免除法など合計4件に関する賛否が問われたが、憲法改正以外で投票結果を有効とする「有権者の50%以上」が参加したのは1995年以来初めて。福島事故直後の、原子力に対する有権者の不安が最も高いタイミングで実施された。また首相自身が複数の裁判で訴追されていることや、連立与党が数週間前の地方選挙で大敗を喫すなど現政権の施策全体に国民の不満が募っていたことも投票への参加を促したと見られている。

イタリアはチェルノブイリ事故後の1987年に国民投票で既存原子炉の閉鎖と新規建設の凍結を決定したが、化石燃料資源に恵まれないためエネルギー自給率は15%程度。天然ガスなど輸入燃料による火力発電が全体の8割を占めるほか、フランス等からの電力輸入依存度も高い。2003年に2度の大規模停電を経験したことも現政権による原子力復活政策に弾みを付け、フランスから少なくとも4基の欧州加圧水型炉(EPR)を導入する協力覚書を交わすまでになっていた。

[スイス]

2034年までに5基を段階的に閉鎖

スイスの連邦参事会(内閣)は5月25日、今後「2050年までのエネルギー戦略」を改定し、2034年までに国内の原子力発電所すべてを段階的に閉鎖していく方針を固めた。福島事故後、ドイツに次いで脱原子力政策への回帰を決定したもので、既存の原子炉5基が約50年の運転期間を終え次第、順次閉鎖していく考え。この閣議決定は今後、国会審議に掛けられる予定で、今月中に最終的な判断が下る見通しだ。

今回の決定について参事会の7名は、原子力開発利用に伴う様々なリスクと複数の電力供給オプションを検討し、新たな安全基準の導入やそれに伴う改修、賠償責任の再評価などで財政負担が増大する点も考慮したと説明。古い3基のみ一足先に早期閉鎖、あるいは5基すべてを運転後50年を待たずに閉鎖するオプションも検討したとしている。

また、こうした方向へのエネルギー戦略改定において、参事会は、①エネルギーの効率化と省エネ、②水力その他の再生可能エネルギーのシェア拡大、および必要であれば電熱併給設備とガス・コンバインド・サイクル発電所も活用、③一時的な電力輸入——などを優先事項として、発電量の不足を補っていく方針。

参事会としては、原子力によってスイスがこれまでに享受してきた確実な電力供給——すなわち、信頼性と質が高く価格競争力もあり、温室効果ガスの排出抑制も可能——を保証していきたい。しかし、福島原発を破壊した地震と津波を考慮した結果、スイス国民は原子力に付随する未解決リスクの低減を欲しており、政府も開発の継続に伴い予想されるコストの増大により、再生可能エネルギーに対する価格競争力も長期的には縮減していくと判断。したがって、既存の5基は安全な操業が確実と考えられる50年を目処に順次閉鎖し、新たな原子炉によるリプレースは行わないとした。

[ポーランド]

議会が原子力法修正案を可決、安全優先で原子力導入

ポーランド議会下院は5月13日、経済省と国家原子力庁が提出していた原子力法修正案を407対1(棄権2)の圧倒的多数で可決した。同国初の原子力発電所の設計技術選定や手続きなど、原子力関係活動の様々な側面の中で安全性を絶対的な優先事項とする条項を盛り込んだもの。福島事故の教訓を踏まえた上で、何としても2020年末までに初号機の完成を果たす考えだ。議会は同時に原

子力発電施設への投資準備と実施に関する法案についても可決しており、上院での審議の後、大統領が署名すれば、7月1日にも発効の運びとなる。

これらの一括法案では原子力施設における安全要求項目や核物質と使用済み燃料の取り扱いに関する基準、放射線防護と原子力損害への賠償責任に関する要求事項などを規定。原子力発電所建設のための法的基盤となるもので、原子力開発を担当するH・トロヤノフスカ経済省次官によると、国際的な勧告や規制に準じた最高レベルの安全要求項目を設定した近代的な法案となっている。

現在の開発スケジュールでは、法案が7月1日付けで発効することにより、実施主体であるポーランド・エネルギー・グループ(PEG)は2013年末までに採用原子炉メーカーを選定するための入札告知が可能となる。その後、2016年に初号機着工、2020年末までの完成という段取りだ。

[フィンランド]

原子力安全庁が安全審査で「緊急の改善は不要」と結論

フィンランドの放射線・原子力安全庁(STUK)は5月16日、福島事故後に実施した国内原子力発電所の安全審査の結果、「緊急に改善を要するような新たな危険要因や不備は認められなかった」ことを明らかにした。

雇用経済省(TEM)の3月15日付けの要請により、洪水その他の重大な自然現象に対して既存炉の機能がどの程度対処可能か、また、さまざまな故障や不具合が生じた際の電源確保体制について調査していたもの。TEMのペッカリネン大臣は「STUKによって我が国の原子力発電所の安全性が高いレベルにあることが確認された」とする一方、産業界は発生リスクの極めて低い事故についても、最小限に抑えるための開発を継続すべきだと強調している。

事業者が追加で調査すべき項目としてSTUKが勧告したのは、ロビーサ原子力発電所において、発生の可能性が物理的にも確率的にもほとんどあり得ないと考えられる洪水の影響。同時に、フィンランドでこれまで起こり得るとされていたどの地震よりも大規模な地震の際、発電所のシステムが十分機能するかどうかを調査すべきだとしている。STUKはまた、事故時の発電所で電力供給を確保する機能についても事業者による調査が必要だと強調した。

[イラン]

ブシェール原発が初臨界達成

ロシアのアトムストロイエクスポート(ASE)社は5月

10日、イランで建設していたプシェール原子力発電所(ロシア型PWR, 100万kW)が、8日に初臨界に達したと発表した。同炉では微少な金属片による炉心冷却ポンプの損傷により、2月にいったん、燃料集合体を取り外し、炉内構造物および主冷却系の洗浄と目視検査を終え、4月8日に燃料の再装荷を開始していた。

現在、最小レベルの出力で各種の機能試験を実施中で、約2か月後の送電網接続を目指す。

[パキスタン]

チャシュマ2号機が運開

パキスタンで3基目の原子炉となるチャシュマ原子力発電所2号機(C-2)(PWR, 32.5万kW)が5月12日に営業運転を開始した。

同1号機と同様、中国核工業集团公司(CNNC)の全面的な協力により建設されたもので、秦山I原子力発電所の設計をベースに開発されたCP300設計。今年2月22日の初臨界達成後、出力を徐々に上げ、3月14日に送電網に接続されていたもの。これにより同国の原子力発電設備は78.7万kWとなったが、チャシュマ発電所では3月5日から、CNNC傘下の上海核工程研究設計院(SNERDI)が設計した3号機のコンクリート打設が開始された。

またC-2の営業運転祈念式典に出席したパキスタンのY・ギラニ首相は、福島第一原発事故の発生をうけて、今後の開発計画には安全確保に最大限の注意を払うとした上で、「それでも原子力には利用を拡大するに足る確固たる理由があり、世界中でエネルギー需要を満たしていくだろう」と断言。同国が今後も国際原子力機関(IAEA)の保障措置に従いつつ原子力民生利用を継続していく決意を明らかにした。

[アルゼンチン]

4基目建設でロシアと覚書調印

アルゼンチンは5月24日、ロシアとの原子力平和利用

に関する協力覚書(MOU)に調印し、同国4基目の原子力発電所建設でロシアの総合原子力企業であるロスアトム社を潜在的な供給業者として予備段階の有資格企業に認定した。

調印はアルゼンチン計画投資サービス省のJ・デビド大臣によるモスクワ訪問に合わせ、ロスアトム社のS・キリエンコ総裁が行った。

アルゼンチンでは現在、エンバルセとアトーチャの両原子力発電所で加圧重水炉(PHWR)が2基稼働中のほか、アトーチャ2号機(70万kW級PHWR)が建設中だ。4基目となる同3号機の建設についてはすでに、中国やフランス、韓国、米国などと協力覚書を締結済みで、ロシアとは2010年4月にロシア型PWR建設可能性調査のための情報交換で合意。これらの国のメーカーを対象に入札が実施されると予想されていた。

[ブラジル]

今後の新設計画で再評価作業

ブラジル鉱物エネルギー省(MME)のE・ロバン大臣は6月1日、同国で検討していた新規原子力発電所4基の建設計画について、現在再評価作業中であることを明らかにした。

同国ではアングラ原子力発電所で2基が稼働中のほか、昨年新たに3号機が着工。これらに関してMMEは、福島事故後も「変更なく進めていく」方針を表明していた。しかし、5月末にドイツとスイスで脱原子力政策への回帰が決定したことから、ブラジルとしても3号機以降の原子力発電プログラムは一層慎重に進めていくことになったと見られている。

MMEが1月に公表したエネルギー見通しによると、同国の北東部と南東部で各2基の原子炉新設を検討中。出力および投資額や具体的な候補サイトなどは未定だが、国家エネルギー政策審議会が建設の担当企業設置を承認し次第、政府が年内にも同計画を承認することになっていた。

福島第一原子力発電所事故から学ぶ

日本原子力学会「原子力安全」調査専門委員会
技術分析分科会

二ノ方 壽, 岡本 孝司

福島第一原子力発電所事故から教訓を学び、世界で稼働中の原子力発電所の安全に反映することが必須である。日本原子力学会「原子力安全」調査専門委員会 技術分析分科会では、公開されている情報を基に、今回の事故とその対応を、12項目に整理して分析し5月9日にホームページで公開した。独自の立場から分析を行い、非常用冷却装置や、ベントラインの設計上の課題など新しい教訓も摘出している。また、事故直後だけではなく現在も情報公開が十分ではない政府に対して、改善を提言するとともに、より積極的な情報公開を期待したい。これらの教訓の多くは、原子力分野以外の一般的な人工物システムの安全性向上に役立つと考えている。

はじめに

福島第一原子力発電所の事故は、原子力安全にする信頼を根底から覆すとともに、原子力発電所の持つ潜在的な危険性を改めて浮き彫りにした。事故収束に向けて、懸命の努力が続けられている。今回の事故から教訓をくみ取り、世界で稼働中の原子力発電所で同じような事故を二度と起こさないようにすることが重要である。日本原子力学会「原子力安全」調査専門委員会 技術分析分科会では、公開されている情報を基に、今回の事故とその対応を、12項目に整理して分析し、その中から得られる教訓を36件にまとめ、考えられる対策の例を提言として、5月9日にとりまとめた。¹⁾

整理のためにまとめた12項目は、1.地震、2.津波、3.全電源喪失、4.全冷却系喪失、5.アクシデントマネジメント、6.水素爆発、7.使用済み燃料貯蔵プール、8.安全研究、9.安全規制と安全設計、10.組織・危機管理、11.情報公開、12.緊急時安全管理である。また、提言は合計70件に及ぶ。

なお、政府より6月7日にIAEA向けの報告書が発表され、その中にも5グループに分けて28件の教訓と対策が記載されている²⁾。学会の教訓にあって政府の教訓にないものや、その逆も多数あるが、おおむね同様の教訓を取り上げている。本稿では、学会の教訓を中心として、政府の教訓も参考に、考えるべき教訓とその対策を提示する。

また、福島第一原子力発電所(以下福島第一)だけではなく、福島第二原子力発電所(以下福島第二)、女川原子力発電所(以下女川)、東海第二原子力発電所(以下東海第二)で起きた事象についても参考にしていく。

Lessons Learned from Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant Accident : Hisashi NINOKATA, Koji OKAMOTO.

(2011年 6月17日 受理)

これらの教訓は、世界中の原子力発電所の安全性向上に役立つだけでなく、原子力分野以外の一般的な人工物システムの安全性向上に役立つ教訓も多いと考えている。

1. 地震の揺れに対する教訓

(1) 耐震設計

2006年改訂の耐震指針に関するバックチェックなどにより、基準地震動 S_s が見直され、さらには、耐震補強などが実施されていた。今回の地震の規模は、おおむね基準地震動 S_s の範囲内であったと推定されている。さらに、機器構造としての余裕が十分に見積もられていたこと、津波が来るまでの1時間は安定して冷却が継続されていたことから、重要度の高いSクラス機器についてはおおむね健全であったと推定される。なお、今後詳細な耐震評価を行う必要がある。一方、重要度の低いCクラス機器配管などについては、一部損傷していたものがあると推定され、今後、詳細な評価や、破損の影響についても調査の必要がある。

(2) 電源系の耐震

地震によって架線が揺れたり、鉄塔が損傷したり、外部電源が喪失したが、電源系が重要であることが再認識されている。また、女川において、安全重要度の低い電源盤が地震により火災を起こした³⁾。外部電源系や電源盤などの耐震重要度を見直すことも必要であろう。

2. 津波に対する教訓

(1) 津波の想定

設計で考慮していた高さ(5m程度)を大幅に超える津波(15m程度)が発電所を襲った。このことは、設計で考慮していた津波の規模が不十分であったことを意味している。

今回の知見に基づき、津波の設計基準想定を見直すことが必要であるが、やみくもに津波高さを決めるのではなく、リスク評価手法を取り入れるとともに、想定する

津波に対する考え方を見直すことが必要である。なお、ここで想定すべき津波高さは、考えうる最大高さではなく、あくまでも設計上想定する津波高さであり、リスクを考慮して合理的に決定することが必須である。

(2) 津波による安全上重要な機器の多数損傷

以下に述べるように、実際に来襲した津波に対する深層防護の層がなかったことが大事故に繋がった。5 m程度の津波高さを想定して海側に配置されていた海水ポンプやタンクなどが津波により破壊された結果、海水冷却式の非常用ディーゼル発電機が停止後、全交流電源喪失に陥った。また、海水冷却系の機能が失われ、後述のように全冷却系喪失に陥った。なお、福島第二では、海水ポンプ建屋があったため、その影響は若干緩和されたと思われる。さらに、標高10 m程度に設置されていた建屋の浸水防止が不十分であり、また、強力な津波の力によってシャッターなどが破壊されたため、多くの安全上重要な機器が水没した。特に電源盤が津波により水没し損傷したことにより電気系の復旧が困難となった。

津波が襲った場合にも、安全上重要な機器の損傷を防ぐため、これらが配置されている建物に海水が入らないようにするなどの、ハードウェア対応が必須である。また、女川ではトレンチやわずかな隙間を経由し建屋内に浸水したという事象も考慮して、十分な水密性強化を実施する必要がある。

具体的には、扉のシールを行う、ケーブルトレーや電線管のシール性を強化することがあげられる。また、トレンチなど地下構造物と建屋は水密性が考慮されていない状態であると予想されるので、建屋の水密性を確保する意味でも、漏洩可能な箇所をすべて考慮した水密性強化が必要と考える。

なお、海に近い位置にある海水ポンプなどは、必要に応じて、建屋や障壁などによって、津波の直接的な影響を避けることを考慮すべきである。

さらに、想定を超える津波を考慮したシビアアクシデント対策を行うことも必要である。例えば、防潮堤を超えた場合の排水手法や、水密性を破って浸水した場合の対策、さらには、電源系がなくなることまでを想定していく必要がある。

(3) 地下構造物の浸水

トレンチやピットなど、地下構造物に海水が大量に流れ込み、電源ケーブルや海水冷却系電気品が浸水するとともに、炉心溶融後の汚染水が混入することで、大量の汚染水が発生した。地下構造物への海水や汚染水の流入が復旧作業を妨げている。

安全上重要度が低いピットであっても、海岸に近いものについては水密性を高め、津波が侵入しないようにすることも必要である。必要があれば耐震性についても見直してもよいかも知れない。

3. 全電源喪失に対する教訓

(1) 安全審査の責任

原子力安全委員会の安全設計審査指針では、短時間の全交流電源喪失しか想定しないこととしており、指針が不十分であったと考えざるをえない。海外では、実際に全交流電源喪失事故を経験していた。また、より長期間の電源喪失を考えた設計評価もなされている。これらの最新知見を、規制に反映しにくい環境に規制当局や政府があったことも重要な教訓の一つである。

(2) 長期間の全電源喪失

交流電源である外部電源、非常用ディーゼル電源が喪失したに加えて、電源盤も機能喪失し、復旧が困難となった。また、電源車などの手配や電源車からのつなぎ込みに時間がかかり、電源の復旧に時間がかかった。3号機では直流電源が利用できたが、時間とともに枯渇し、制御盤や計測器に加え、タービン駆動給水系や各種弁を動かすことが困難になった。結果として安全上重要なシステムが十分に動かなかったと考えられる。特に、電源盤の機能喪失の影響が大きく、限定的なシステムしか復旧できていない。

対策としては、ガスタービン発電機など、多様な発電機を導入することが重要である。多様性は、単にシステムだけではなく、配置の多様性や、免震床など設置場所に関する多様性も重要と考えている。また、海水冷却に頼らない、空冷式発電機を準備することも多様性の一環と考えられる。また、予備の電源盤を準備するなど、電源盤の多様化も必要に応じて実施する必要がある。高圧分電盤などの浸水防止と、万一の場合に制御電源を速やかに切るなどの対応策の策定を行う。また、火災防止のため、十分な耐震性も考慮する必要がある。

(3) 原子炉内パラメータの計測不能

計測器の電源がなくなり、原子炉や格納容器の情報が十分に得られなくなった。交流電源がすべて喪失した場合を想定し、重要な機器および炉心の監視系への電力供給を行えるようにすることが重要である。これにより、最低限の情報が得られる。しかも、対応策に必要とされる電源容量はさほど大きくない。特に最終的なシビアアクシデント対策として考えられているアクシデントマネジメント対策で利用する計測器や弁などへの電源供給手段を、あらかじめ考えておくことが必須である。

(4) 電源重要性の再確認

電源が一部でも残っていれば、事象の進展を食い止められる可能性がある。空気冷却式ディーゼル発電機が動いたため、5, 6号機の原子炉および燃料プールは冷却ができた。また、福島第二では、海水冷却系は喪失したが、電源が使えたため原子炉の非常用冷却系を制御することで時間を稼ぎ、海水冷却系を復旧した後、安全に停止した。

(5) 非常用冷却装置の設計上の課題

電源喪失をした後の非常用冷却装置に設計上の課題があると推定される。駆動電源が不要であるタービン駆動ポンプは、2号機、3号機で炉心損傷の時間を遅らせることができた。しかしながら、制御に必要な直流電源がなくなったことなどにより、最終的には、タービン駆動ポンプも動作しなくなった。蒸気タービン駆動炉心注水ポンプは、炉心の蒸気によってタービンを回転させて注水するが、この回転エネルギーを利用して、小型の発電機を取り付けることで、注水と同時に、制御用バッテリーへの充電を行うことができる。このバッテリーを利用して電磁弁などの制御が可能になるので、電源が全くなくなっても、自立的に長期間の駆動が可能になる。

一方、1号機に設置されていた隔離時復水器は、津波による直流電源喪失を配管破断信号と誤認して、弁を自動的に閉じたと報告されている。格納容器内にある隔離弁(電動弁)にはアクセスできないため、これが閉まっている場合、電源がないと、この弁を開けることは不可能である。冷却材喪失事故を考えれば、Fail Close(何かあれば弁を閉じる)の思想は間違っていないが、安全審査で考慮している短時間の全交流電源喪失との整合性を評価すべきである。原子力安全・保安院解析によれば、隔離時冷却系不動作の場合、1時間で燃料棒が損傷を始めたと報告されており、安全審査での短時間全交流電源喪失時の事故シナリオを含めて、検討が必要である。なお、配管破断と電源喪失は、ロジック回路上で分離可能と考えられる。

4. 全冷却系損失に対する教訓

(1) 海水冷却は津波に対して脆弱

福島第一と福島第二では、海水ポンプが使えなくなったため、炉心除熱機能が喪失した。福島第一では、現在でも海水冷却が困難なため、空気冷却が検討されるとともに、一部、空気冷却で除熱をしている。

一方、福島第二では外部電源が使えたため、原子炉への注水を安定かつ継続的に行うことができた。この時間的余裕を活用し、海水ポンプモータを交換もしくは修理することで海水ポンプを復旧し、安全に冷却することができた。なお、女川、東海第二でも、津波によって、一部の非常用ディーゼル冷却系の海水ポンプが冠水し、非常用ディーゼルが停止するという事象が起きている。外部電源もしくは他の非常用ディーゼルが動いていたため、いずれも安全に停止している。

世界中の原子力発電所は、冷却水確保のため、海岸、川、湖沼などに隣接して建てられている。崩壊熱除熱のための、海水以外の冷却システムを検討しておくことが重要である。崩壊熱の発熱量は大きくないので、空気冷却が有効であると考えられる。なお、英国のサイズウエルB原子力発電所では、通常は海水冷却であるが、非常用の空気冷却器が準備されている。

5. アクシデントマネジメントに対する教訓

(1) AMのグッドプラクティス

あらかじめアクシデントマネジメント(AM)対策をしていたことにより、代替注水系が整備されており、消防車・消防ポンプによる淡水/海水注入が可能であった。この注入系統がなかった場合、事故はもっと深刻であったと推定される。

(2) AMのバッドプラクティス

全電源喪失を考慮したAMが不十分であった。淡水/海水注入による除熱と格納容器ベントによる格納容器破損防止を行うこととなっていたが、十分に実施できていない。具体的には、電源がなかったため、ベントラインの弁を開けるのに手間取り、大きな時間遅れが生じた。このため、水素が原子炉建屋に漏れ出して水素爆発を起こした。ベントラインの弁を開けるために必要な空気圧縮機や電磁弁には、多量の電源は不要だが、そのわずかの電源の準備に手間取ったようである。また、電磁弁の励磁を維持することができずに、たびたび、弁が閉じている。代替注水とベントに必要な電源は、さほど多くないため、これはどのような場合でも確保しておくことが必須であろう。繰り返しになるが、電源喪失によって原子炉や格納容器内のパラメータ計測が十分機能していなかったことも、AM策を十分に対応できなかった要因の一つと考える。

ベントラインについては、設計上の課題もある。4月に提出された島根原子力発電所の緊急対策報告書⁴⁾によれば、島根2号機ではベントラインが建屋空調系と繋がっており、その間の弁がFail Open(電源や駆動用空気がなくなると空く)になっている。島根1号機では、Fail Closeのため、停電時にはベントラインと空調系は隔離されるが、島根2号機では、停電時にベントラインと空調系が繋がる。このため、島根2号機では、ベントを行う際には、ベントラインと空調系の間の弁に空気と電気を供給して、弁を閉じる作業を行うこととなっている。

しかし、福島第一では、電気や空気が十分ではなく、たびたび、ベントラインが閉じ(Fail Close)ている。島根2号機では、リスクを評価して、必要があれば、この弁をFail Closeに変更するなどの対応を行うことも検討の価値はあると考える。なお、福島第一のベントラインの弁の設計については、一部、記者会見で発表はされているが、ほとんど公開されていない。

また、前項でグッドプラクティスとして挙げた代替注水についても、多くの課題がある。注水作業がタイムリーに行われず遅れてしまったこと、水源確保に手間取り注水を中断したこと、ミスによって注水が中断したことなど、事象の進展を食い止めるためには、反省すべき点も多数あり、これらを反映して、より良いアクシデントマネジメント策を構築していくことが重要である。

(3) 炉心損傷後の AM 対策

今回、代替注水と格納容器ベントは、いずれも炉心損傷後に実施された。このため、建屋内の線量が非常に高く、作業の大きな妨げとなっている。特に、中央制御室においても、線量が高くなり、作業を大きく阻んでいる。高線量下での AM 対策をあらかじめ十分に評価しておかねばならない。

なお、1～3号機のいずれでも、隔離時復水器や隔離時冷却系などが停止して、炉心が冷却できなくなってから、18～24時間程度で水素爆発が起きている。水素爆発を起こさない AM 対策を行うことは当然としても、時間的余裕がほとんどないことをしっかりと把握することが必要である。ただし、逆に言えば、18時間はあるので、その間にできる対策をあらかじめ考えておくことが重要ともいえる。

また、同一敷地内に複数立地している場合の AM 同時対応策についても課題があったと考えられる。指揮命令システムを含め、同時進行の AM をマネージする仕組みを考えることが必要である。

6. 水素爆発に対する教訓

(1) 水素爆発により原子炉建屋破損

閉じ込め機能の一部が損なわれ、また大量の高放射線量を持つ瓦礫が散乱し、復旧作業に支障が生じた。

(2) 格納容器外の水素爆発は未考慮

格納容器内の水素爆発については、従来から数多くの研究があるが、原子炉建屋内での水素爆発は考慮されていなかった。水素結合器や水素濃度計なども、電源喪失時は稼動していなかったと考えられる。電気がなくても、水素を再結合できるような、静的触媒再結合器の設置などが考えられる。

(3) 格納容器過圧・過温リーク

ベントラインからの漏洩、過圧・過温による格納容器ヘッドフランジやハッチなどシール部からの漏洩などがあったと考えられており、今後の検証が必要である。これらの検証結果を踏まえ、AM 対策に反映を行う。格納容器圧力・温度などの重要パラメータの把握が必須である。具体的には、格納容器圧力・温度などの重要パラメータは常にモニタできるように別電源ラインとしておき、圧力温度が過大となる前に、冷却やベントなどの措置を余裕を持って実施できるようなハードウェアとソフトウェアを整備する。

7. 使用済み燃料貯蔵プールに対する教訓

(1) 建屋破損後の使用済み燃料閉じ込め

水素爆発で建屋が破損しており、使用済み燃料貯蔵プールが、直接大気と連通している。万一、使用済み燃料が破損した場合、放射性物質が大気に直接放出される恐れがある。冷却、遮蔽、閉じ込めの意味から、プール水位を確保することが重要となる。

(2) 水素爆発後の冷却

水素爆発により、プール冷却用の既設配管などが大きく損傷した。コンクリートポンプ車などにより建屋開口部からの冷却水供給を実施しているが、長期的冷却に課題が残る。なお、建屋の損傷が少ない2号機の使用済み燃料貯蔵プールについては、空気冷却器による冷却システムが既に確立し安定な冷温停止状態にある。

従来、注目されていなかったがプールに対する AM を見直すことが重要である。具体的には、電源喪失直後に、消防車による注水ができるように準備する、あらかじめフレキシブルホースなどの専用システムを設置して地上からの注水が容易になるようにしておくことなどが考えられる。また、使用済み燃料貯蔵プールの発熱量は、さほど大きくないため、空気冷却で冷却が可能と考えられる。温度差による自然循環冷却システムを考案することで、電源がなくても崩壊熱除去が可能となる。

8. 安全研究の推進に対する教訓

(1) シビアアクシデント研究

シビアアクシデント解析コードによる炉心損傷状況の推定に、2～3ヶ月かかった。また、緊急時対策支援システム(ERSS)や緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム(SPEEDI)が、電源喪失によるデータ不足などがあったとはいえ想定していたほど活用できていない。日本原子力研究開発機構(JAEA)においては、文部科学省傘下であることもあり、将来炉への研究に集中するあまり、軽水炉に対する安全基盤研究が重視されてこなかった。

シビアアクシデントを含む安全研究、安全設計に係わる人材育成を体系的に実施することが重要である。また、原子力安全の高度化を担保するのはモデリング・シミュレーション技術であり、特に計算結果の品質を保証する V&V(Verification & Validation: 検証と妥当性確認)を国家戦略として進めることが重要である。

さらに、アクシデントマネジメント・シミュレータを作成し、運転員や所長などの訓練を実施するために、リアルタイムで炉内挙動や燃料挙動を評価するツール作成することも重要である。

(2) 無駄な国家予算の使い方

国家プロジェクトにより研究開発したものが、予算の関係から目的外使用を認めていないため、研究終了後に廃棄されることが多く、いざというときに使えなくなっている。災害時での活用を想定し、開発品の有効な活用が可能のように、重要な成果は維持していくことが必要である。

9. 安全規制と安全設計に対する教訓

(1) 外的事象に対する安全設計

津波など、影響が大きい、まれにしか発生せず、また不確実性の高い事象への対応が十分に考慮されていなかった。内的事象については、共通要因故障の原因とな

るのは、ヒューマンファクタなどソフト的な課題が主であり、これらに対する研究は、TMI以降大きく進歩した。また、研究の成果として、内的事象に対する深層防護思想は十分に確立されてきた。この内的事象に対する多重防護思想を、外的事象にも同様に適用してきたが、ここに共通要因故障への認識の甘さがあったと考えられる。

外的事象においては、ハード的な共通要因故障が主となりえる。また、外的事象は、発生確率は格段に低い、その確率の不確実性が大きい。このような場合は、従来の3層の多重防護では不十分であり、シビアアクシデントのアクシデントマネジメント(AM)、防災までを含めて十分な対策を取っておくことが重要である。

外的事象に対しては、定量的なリスクを中心とした確率的リスク評価(PSA)によって評価を実施することが必要である。ただし、PSAの不確かさに関する議論を行うことが必要になる。この不確実性をカバーするのは、やはりアクシデントマネジメントである。さまざまな天変地異を想定し、AMと防災を含めた、原子力発電所の安全論理を再構築する必要がある。定量的リスク評価を応用した効果的なAM対応策策定や、リスク評価をベースとした、安全重要度や多様性・多重性の見直しが重要である。

(2) 日本の安全規制の課題

プラントの現状設計を審査する仕組みがないことや、確率論的リスク評価の取込みが遅れたこと、新知見の反映が十分でなかったことなどが挙げられる。

なお、シビアアクシデントを規制に取り入れようとする動きが始まっていたが、間に合わなかった。さらに、今回の事故では、原子炉等規制法の規制範囲が狭く、直ぐに原災法の対象領域となった。

基本設計(設置許可申請)の審査が、運転管理との結びつきが弱く、また変更要件が本文事項の変更と形式的に定められ、変更された設置許可申請書がプラントの現状を反映していない。さらに、設置許可や工事計画認可と使用前検査において、構造強度規制に重点がおかれ、機能性能や解析/確率的リスク評価(PSA)が軽んじられた。

安全研究や諸外国の規制動向などの新知見の反映が遅れた。また、規制の無謬性にこだわるあまり、前例踏襲主義に陥り、安全性を常に追及するという規制の見直しに消極的であった。さらに、規制も事業者も、横並び主義であり、事業者ごとの自主的な安全の追求が行われにくい環境にあった。

これらのことから、法律体系を見直し、原子炉等規制法に電気事業法を統一するなど、安全規制を再構築する必要がある。原子炉等規制法の目的や許可の基準を、「国民を放射線障害から防止すること」と改め、シビアアクシデントを原子炉等規制法の規制範囲に取り込むとともに、

AM手順の実効性(組織、役割、多数号機への対応、手順の妥当性・実現可能性、訓練、資機材等)を確保する。設置許可に包括的安全解析書を導入し、運転管理の条件を前提とした解析を重視するとともに、その変更要件を原子炉安全の観点から定め、プラントの変更を包括的安全解析書に反映することにより、常にアズビルトされた図書とする。構造強度に関する工事計画認可や使用前検査に民間第三者認証制度を導入し、その実施状況および包括的安全解析報告書の遵守状況を監査的に検査する統合された検査制度を導入する。

10. 組織・危機管理に対する教訓

(1) 責任体制の課題

縦割り行政のため、原子力の各分野における専門的な知識を持った人材が分散し責任者がいない。法規制が分散化されており、全体を統括する専門組織がない。特に、放射線規制と原子力規制の組織が分離されている。また、専門家の活用が不十分であった。

このため、責任体制を統一化し、専門性を持った規制組織を作る必要がある。例えば、原子力安全委員会を三条機関化し、保安院、文科省に分かれた原子力および放射線規制を三条機関のもとに統合・一元化するとともに、原子力安全基盤機構(JNES)や核物質管理センターなどの専門家を要している機関も統合し、日本版NRC(米国原子力安全規制委員会)のような専門性の高い規制組織を作ることが必要である。

(2) 緊急時対応の課題

停電や情報伝達の問題などにより緊急時の円滑な対応がうまくいかなかった。例えば、緊急時対応要員の連絡や集合が遅れた。また海外の声が大きく、日本の優れた知識が使えていない(例えばロボットや水処理など)。緊急時対策支援システム(ERSS)が停電で動かなかった。

11. 情報公開に対する教訓

(1) 情報公開の遅れ

緊急時の情報公開が十分ではなかった。緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム(SPEEDI)の公開が遅れた。さらに、事故後3ヶ月以上たっても、まだ情報公開は十分ではない。一例として、米国NRCのホームページに、国内では未公開の情報が掲示されている⁵⁾。これらの背景から、統合本部が情報を隠していると見られており、その信頼性を失っている。

技術的な説明に関しても、データを羅列するだけでその評価がなされていない情報が提示されている。

(2) INESの無理解

国際原子力事故尺度(INES)は、地元住民など国民や海外への事故の深刻さの度合いと規模の伝達、避難などの行動を起こすためのものである。当初、レベル3やレベル4という緊急の避難を必ずしも必要としない低い暫定レベル値での公表は、実際に発動された半径3 km, 10 km, 20 kmの避難命令との間にはなんらの連携もなく、

また本来、事故発生時点で公表すべきであった、より現実的な予測レベルの発表が2ヵ月後と遅れ、国内外に無用の混乱と不信を引き起こしたことは重大で、INESの正しい理解と活用を怠った結果以外の何ものでもない。

(3) 放射線安全に対する説明性が低い

放射線安全に関しては、もともと考え方が複雑でわかりにくい。緊急時と通常時、線量率と線量さらには人に対する放射線の健康影響の考え方が正しく伝わっておらず、無用の混乱を招いている。

(4) 避難区域などの設定に関する自治体との連携不足

計画的避難区域や自主避難など、わかりにくい説明で自治体を混乱させた。一方、米国は80 km(50マイル)を設定し、これらの情報が錯綜することで、より混乱を増大させた。

(5) 自治体と災害本部の意思疎通がない

関連する自治体が多くなっているため、必ずしも十分な意思疎通ができていないとは思っている。

12. 緊急時安全管理に対する教訓

(1) 緊急時の構内放射線量情報一元化、共有化に課題

緊急時の従業員・作業員に対する、安全管理、労務管理、被ばく管理が不十分であったと考えられる。具体的には、3号機タービン建屋での電源復旧作業中の水たまりでの被ばく事故や、当初、個々の作業員が放射線量計を携帯できなかったことなどが挙げられる。緊急時だからこそ、安全に留意した作業が必要と考える。

(2) 内部被ばくへの対応の遅れ

免震重要棟の設計条件に放射性物質の流入は想定されていなかった。震災後2週間、免震重要棟内での放射性物質濃度を測定していなかった。免震重要棟での緩衝エリア設定(防護服を脱ぐところ)が遅れ、免震重要棟における女性職員の被ばくや、中央制御室運転員の被ばくなど、内部被ばくが外部被ばくより多かった職員が多い。

(3) 緊急事態作業環境の課題

緊急事態での従業員・作業員への健康等への影響の認識が不足した。衣食住の劣悪な状態が当初より相当期間継続した。健康(メンタル面を含む)上の不調への対応の不足や遅れが生じた。

おわりに

事故の教訓を国内で共有するとともに、世界で共有することが重要である。事故を受けて改めて振り返ってみると、「原子力安全」の姿は必ずしも望ましい形にはなっていなかったことがよく理解できる。数年前のIAEAによる規制レビュー(IRSS)で指摘された規制事項への改善も十分でなく、今回の教訓にも、同様の事項を改めて指摘することになった。今後は改めて改善が進められると信じている。その時、今の仕組みをどう変えていく

かではなく、あるべき「原子力安全」の姿をまず念頭に置いて改善していくことが重要である。今の仕組みをあるべき姿に当てはめて改善するとともに、足りない部分は新しく作ることになる。鍵は、「安全を見る規制」から「リスクを見る規制」への転換である。また、「事故を起こさない」だけではなく、「事故が起きる可能性があることを前提として対応ができる」ことが重要である。

なお、ハードウェア対応の鍵は「多様化」である。様々な装置の多様化を行うことで、いざというときの対応の幅は広がるが、通常運転時における誤動作というリスクは高まる。また、保守工数も増大し、ミスを導入する機会も増加する。したがって、目先にとらわれて、やみくもに多様化すればよいということではなく、全体のリスクを低減することが、本当の安全であることを、規制当局も事業者も確実に認識しておくことが重要である。

—参考資料—

- 1) 日本原子力学会「福島第一原子力発電所事故からの教訓」
「原子力安全」調査専門委員会技術分析分科会
http://www.aesj.or.jp/information/fnpp_201103/chousacom/gb/gbcom_kyokun_20110509.pdf(2011/5/9)
- 2) 「原子力安全に関するIAEA関係会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について」
http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html(2011/6/7)
- 3) 東北電力、東北地方太平洋沖地震およびその後に発生した津波に関する女川原子力発電所の状況について、
http://www.tohoku-epco.co.jp/news/atom/1183294_1065.html(2011/5/30)
- 4) 中国電力、島根原子力発電所における緊急安全対策に係る実施状況報告書
http://www.energia.co.jp/atom/notice/110422_a.pdf(2011/4/22)
- 5) NRC, Advisory Committee on Reactor Safeguards, Subcommittee on Fukushima,
<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1114/ML11147A075.pdf>(2011/5/26)

著者紹介



二ノ方 壽(にのかた・ひさし)

東京工業大学
(専門分野)原子炉工学, 高速増殖炉熱流動, 炉心安全, 数値流体力学



岡本孝司(おかもと・こうじ)

東京大学
(専門分野/関心分野)原子力安全工学, 原子炉熱工学, 可視化学など

ポスト3.11時代の科学技術コミュニケーション 社会は原子力専門家を信頼できるのか

大阪大学コミュニケーション
デザイン・センター 八木 絵香

3月11日以降、「社会に信頼されるためには何が必要か」と考える原子力専門家は少なくないだろう。しかし今は何を語っても、それだけでは信頼されないという前提からすべてを考え直すしかない。原子力の問題を、専門家主導の科学技術理解増進の観点でとらえるのではなく、科学に問うことはできるが、科学(だけ)では答えることのできない問題、すなわち「トランス・サイエンス(trans-science)」の課題としてとらえ直すという観点から、解説を加える。

I. 自省なき声明が社会に語りかけるもの

1. 原子力学会声明と当事者意識

東日本大震災発生後、数多くの研究者コミュニティ(学会)が、今回の震災に寄せてそれぞれの立場から声明を発表している。原子力学会も他学会と同様に、震災から1週間後の3月18日に声明を発表した。筆者はその声明を一読し、原子力学会員の1人として、違和感を感じずにいられなかった。特に下記の文章についてである。

(略)これらの活動を通して市民との対話や原子力に対する理解促進に努めてまいります。(中略)原子力が人類のエネルギー問題解決に不可欠の技術であることに思いをいたし、私たちの果たすべき役割を全うしつつ、これからも社会の発展に寄与するよう新たな決意で取り組んで参ります¹⁾。(※傍点は筆者による)

震災から1週間といえば、福島第一原子力発電所の水素爆発の記憶も新しく、福島県内はおろか日本国中が、福島第一原子力発電所の事態の進展について固唾をのんで見守っていた時期である。発電所近傍の人々は、取るものも取りあえずの避難を強いられただけでなく、自らや家族の被曝の不安を抱えられていたことだろう。また安否不明の家族の捜索をあきらめての苦渋の避難であった方も少なくなかった。その状況で、である。社会からは、事業者と同様の責任主体と見なされる立場にある原子力学会が、事態の収束の見通しも立たないうちに、また事態の十分な吟味もないままに、「原子力は不可欠の技術である」と断言しているのである。この声明に対する筆者の周りのアカデミアの反応は、自己責任への自覚

がなさすぎるというものが少なくなかった。そして、その批判は至極真つ当なものであると筆者にも感じられた。まして、震災から3ヶ月が過ぎようとする現在においても、事態の収束の見込みすらたない状況では、それらの批判は的を射たものであった言わざるを得ない。

2. 自省を吐露する専門家

一方で、専門家として自らの責任に言及した学会も少なくない。例えば日本物理学会会長は、3月22日付けで学会誌に寄せた文章²⁾の中で、次のように述べている。

こうした事態の下、物理学会としても、大きな課題に取り組まなければならない。その第一は、福島原発の問題に、遅まきながらも物理学会として、あるいは、物理学者として正しく取り組むことである。原子力の利用は、物理学者がその道を拓いた。その責任には重いものがある。福島原発の危機は、まさに今現在の課題であるが、物理学者としては、むしろ、中期のそして長期の課題を考えるべきであろう。原子力発電に、ともすれば目を閉ざしがちであった物理学者が、再度、ここで真剣に取り組むべき時期である。(※傍点は筆者による)

また、3月23日に発表された土木学会長・地盤工学会長・日本都市計画学会長の3学会共同緊急声明³⁾においても、次のような記述を確認することができる。

今回の震災は、古今未曾有であり、想定外であると言われる。われわれが想定外という言葉を使うとき、専門家としての言い訳や弁解であってはならない。このような巨大地震に対しては、先人がなされたように、自然の脅威に畏れの念を持ち、ハード(防災施設)のみならずソフトも組み合わせた対応という視点が重要であることを、あらためて確認すべきである。(※傍点は筆者による)

もちろん各学会がおかれた状況は異なるため、これらを一律に論じることはできない。しかし原子力学会声明

The Science and Technology Communication in a Post 3/11 World—How can the public have trust in nuclear experts? : Ekou YAGI

(2011年 6月2日 受理)

とこの2つの声明との大きな違いは、後者が自らの研究や言動に対して反省を明言しているところ、もっと踏み込んで言うならば、読み手の側がその文章に対して、専門家という前に一人の人間としての後悔や、苦悩に近い心情を感じとる手がかりがあるかどうかの違いである。

ポスト3.11においては、福島第一原子力発電所事故の環境影響の修復の場面においても、今後の原子力利用に関する社会的合意形成を行う場面においても、「原子力専門家の信頼」ということが、ひとつの大きなテーマになるだろう。しかしこれだけの未曾有の災害を経験してもなお、自らを省みることがない専門家集団を、社会の側が信頼することが果たして可能だろうか。

筆者が原子力専門家と立地地域住民の「対話」に長年かかわってきた中で確信してきたことの1つは、専門家も状況に応じて過去の言動を反省すること、その反省を非専門家である人々と共有することなしには、専門家が本当の意味で信頼される可能性は低いということである⁴⁾。揺るぎない真実を知るものとして非専門家を啓蒙する専門家ではなく、社会と共に悩みながら、よりよい科学技術の、原子力のあり様を模索する専門家こそが、この未曾有の災害を前にして、以前よりもなお求められているのではないだろうか。

「原子力が人類のエネルギー問題解決に不可欠の技術である」という信念を社会に押し付けるのではなく、自らの役割を「社会の発展に寄与する」とし、独善的に位置づけるのではなく、もしまだ社会から要請されるのであれば、その時には全身全霊をもって社会のお役に立ちたいという謙虚な姿勢で臨むこと、少なくとも3.11以降の専門家と市民の対話は、ここからしか始められないのではないだろうか。

3. 専門家の自己保身、その社会的評価

同様の課題は、原子力の分野に留まらない。今回の東日本大震災における未曾有の被害の責任は、原子力専門家だけに科せられているものではないからだ。

日本化学会を中心とした(原子力学会も含む)34学会会長声明⁵⁾「日本は科学の歩みを止めない～学会は学生・若手と共に希望ある日本の未来を築く～」では、(1)学生・若手研究者への支援、(2)被災大学・研究施設の早期復旧復興と教育研究体制の確立支援、(3)国内・国際的な原発災害風評被害防止のための正確な情報発信の3点が提言として発表されているが、これにも原子力学会声明と共通の課題を見いだすことができる。

34学会声明では、国内の多様な専門性をもつ専門家集団が、東日本大震災規模の揺れや津波が発生することを適切に予測し、具体的な対策(原子力発電所への対策を含む)を講じられなかったことについては、反省以前に全く言及していない。それどころか、(1)(2)においては、若手を含む科学者や科学研究そのものへの社会的支援の必要性についてのみを言及しており、公開された声明文

を読む側(社会の側)からすれば、自己保身と取られてもやむを得ない内容となっている。

もちろん、国内における科学技術研究環境の復旧・復興は重要課題の1つである。しかし、このような未曾有の災害を経験して、「科学技術研究とは一体何なのか、私達の社会のためにどのように役にたつ(たつた)のか」と、社会の側が研究そのものの存在意義を問うている時に最初に発せられる提言が、自己反省のない、むしろ自己保身的な内容であることの社会的インパクトは大きい。第一に優先されるべき提言は、少なくともこれではない。社会の側から見れば、今回の震災に際して科学技術の専門家は、政府や行政機関と同様に、この未曾有の災害、原子力について言えば未曾有の人災を引き起こした側にいるのである。その意味では、自ら「日本は科学(技術)の歩みを止めない」と言明する権利を専門家の側は、少なくとも今はもち得ない。むしろ「科学(技術)の歩みを一旦は止めて」この事態の收拾のために、そして被災地の真の復興のために、何が科学技術にできうるかを深い自省とともに問い直す。その上で社会の審判を受けなければ、何も始めることはできないのである。

4. 知識注入モデルの限界

34学会声明のもう1つの課題は、(3)風評被害に関する提言においても指摘することができる。そもそもこのような事態において「正確な」情報発信とは一体何なのだろうか。私達の社会はこの3ヶ月余の間に、正確と言われていた情報が何度も覆される事態を目の当たりにした。また、放射線被曝の健康影響について言えば、その「正確な知識とは何か」について、専門家と呼ばれる人の間でも意見が一致しないことも社会に広く共有された。

筆者は3月11日以前から繰り返し主張していることではあるが、一定の放射線知識は必要である一方で、放射線に対する不安は、「正しい(とされる)」知識を注入することだけでは払拭されない。まして、今回のように、人類が経験したことのないレベルの原子力発電所の事故が現実化した社会では、ある専門家が一方的に伝えようとする「正しい」知識を、盲目的に信頼することは極めて困難である。誰しもが、公的発表のみならず、その対抗的な位置づけにある情報(危険を警鐘する情報)も含めて総合的に判断しようとする事態においては、唯一無二の正確な情報提供ではなく、何が正確なのか判断するための材料として、詳細な根拠付きの情報を提示することこそが、専門家集団には求められるのだ。筆者が主催してきた立地地域における専門家と住民の対話の場で、ある一人の住民の方が言った「結局、専門家の意見は、正しい正しくないではなく、この人はこういう考え方、意見ということだと思う。そしてそれをもとに判断するのは自分だ。」と⁶⁾。3.11以降にリスクにさらされた人々はまさに、このようなスタンスで専門家の発言を取捨選択し、そして自ら判断をしていたのではないだろうか。

専門家は、自分の専門について十分な知識と自信を持たなければならない。しかしこの自信は、一步間違うと、科学技術(専門的知識)のみが人々のために「正しい」答えを導きだせる、正しい知識の啓蒙こそが不可欠であるという勘違いにつながりかねない。今回の福島第一原子力発電所をめぐる状況のように、事態の現状や進展に関して十分な情報が存在せず専門家への不信が募る状況では、知識の注入のみで不安を軽減することは不可能なのだ。

II. ポスト3.11時代の科学技術コミュニケーション

1. 社会の文脈に寄り添う専門家として

原子力に限らず科学技術分野全般において、「コミュニケーション」「対話」「双方向」というような言葉を用いて、専門家と市民のあいだの相互作用が重視されるようになって久しい。特に原子力の分野においては、1995年のもんじゅ事故、1999年のJCO臨界事故を経てこの傾向は大きく加速したとも言える。

しかし、これまでに紹介してきたいくつかの声明文に象徴されるように、そのコミュニケーションは、あくまでも「科学技術推進」が大前提であり、双方向性を重視するというスローガンを掲げつつも、科学技術に対する(原子力に対する)国民の理解を促進させることに主眼がおかれてきた。専門家の側は、社会の側がどのような状況にあるかを把握し、社会の側が科学技術に何を求めているのかを理解していないというよりは、そもそも、「社会の声を聴き、自分達も社会から学ぶ側である」という基本姿勢を欠いていたのではないだろうか。少なくとも今回批判的に取り上げた学会声明には、そのようなスタンスを一切感じることはできない。

筆者がこれまでかかわってきた原子力に関する対話、特に原子力に対する見解(賛否)が異なる人同士の対話⁶⁾において最も双方が相容れなかったテーマの1つが、まさにこれである。「社会の発展」や「豊かな生活の追求」を自明のこととする原子力推進派の主張に対し、常に反対派・慎重派から提示されてきた視点は、「そもそも電気やエネルギーを無尽蔵に使うという将来ビジョンの変更が必要」「成長モデルありきではなく、豊かさの在り方を見直すべき」という、まさに3.11以降に社会の中で急激に顕在化されてきた言説そのものであった。

2. PUS から PEST へ

その意味で、この10年で使い古されてきた感がある「科学技術(原子力)コミュニケーション」という言葉を再考してみる必要があるだろう。

冷戦以降、特に欧州においてひとつの流れとなってきた科学技術コミュニケーションが、大きなターニングポイントを迎えた契機は、いわゆる「BSE問題」である。問題発覚当初、人的被害は発生しないという宣言を公的な位置づけにある専門家集団が行ったにもかかわらず、

数年後には変異型クロイツフェルトヤコブ病が発見され、ヒトへの感染が顕在化した。このことにより、英国国内における政府や専門家に対する信頼は大きく崩壊した。この後の英国を中心とした欧州での科学技術コミュニケーションは、非専門家への知識注入を目的とした「PUS(Public Understanding of Science)」から、対話を通じて科学技術がもつ不確実性まで含めてそのリスクを共有し、科学技術の社会導入や規制の在り方に関する社会的意思決定への市民参加を重視する「PEST(public engagement in science and technology)」へ変容していく。失われた科学技術への信頼を取り戻すために、専門家が市民を啓蒙するモデルから、一般の人たちの良識から導かれた結論を重視する「専門性の民主化モデル」を目指すようになっていったのだ。

国内においても、社会基盤を揺るがすような大きな事故・事件(阪神・淡路大震災や地下鉄サリン事件、もんじゅ事故)が頻発した1995年を契機に、専門家の信頼が崩壊したと指摘される。そして、国内でも科学技術コミュニケーションの必要性が重視されるようになり、種々の活動が活発化してきたことは前述の通りである。しかし国内における科学技術コミュニケーションは、科学技術の素晴らしさや楽しさという、いわゆる科学技術のポジティブな側面に着目した活動が多く、その公的研究・事業のほとんどは、科学技術推進ありきの、いわゆる「PUS」に偏向する傾向があったことは否定できない。

しかし、3.11を経て顕在化したとおり、これから科学技術コミュニケーションに求められることは、専門家主導の科学技術理解増進ではなく、科学に問うことはできるが、科学(だけ)では答えることのできない問題、すなわち「トランス・サイエンス(trans-science)」の課題にどう立ち向かっていくのかということであろう。

福島県内における低線量被曝に係る諸問題に代表されるように、これが正しいとは誰も言い切れない、また専門家の間でもその解の提示に幅があるような科学の問題について、専門家はどのように情報を提供すべきなのか。社会の側は幅のある議論の中からある程度の相場観をもって、それらの情報をどう読み解いていくのか。そして社会としての解をどのように導きだしていくのかということが、今、問われているのである。

3. 原子力「ありき」の市民参加から、「選択肢」としての原子力へ

3月11日以降、「原子力の専門家が社会に信頼されるためには何が必要か」という問いかけを受けることがたびたびある。しかし厳しいようであるが、少なくとも今は「何を語ってもそれだけでは信頼されない」という前提にたつよりほかなないと筆者は考えている。

それでもあえて、信頼されるためにというのであれば、原子力専門家の側のドラスティックな変化を原子力専門家自らが示すしかない。

国内でも2000年以降、前述のトランス・サイエンスの実践の形として、コンセンサス会議に代表される市民参加型技術評価(pTA; participatory Technology Assessment)の実践が注目を集めるようになった。社会の中に新しい科学技術が導入される際に、さまざまな年代、職業、価値観をもつ一般市民が、相互に議論を重ねて科学技術がもつ可能性やリスクを総合的に評価する試みで、欧州においては、その結果を実際の施策に反映する枠組みも構築されている。また、国内においてもわずかずつながら、実践例が蓄積されつつある。

しかし原子力の場合、この種の取組みにトライするための障壁は高かった。それは言い換えるならば、原子力技術をインフラとする社会を前提とする推進側の主張と、原子力ありきとはせずゼロからの議論を前提とするべきという反対(慎重)派の主張が交わることがなく、議論のスタートにすらたてないという障壁でもあった。つまり、pTAの重要なポイントである科学技術の開発の出発点で評価を行う「上流アセスメント」が実施できない(できなかった)という宿命を原子力という課題は背負ってしまっていたのである。

もし今、原子力専門家が信頼されることを目指して、市民との対話を求めるのであれば、原子力専門家の側(原子力に係る政策決定者を含む)が、原子力ありきではなく、あくまでも原子力を1つの選択肢とおいた上で、この種の市民参加的な試みを実行することが不可欠である。すなわち「脱原子力」というシナリオの可能性や実効性についても、原子力専門家自らが、一たん白紙に戻って考え直すことこそが肝要ではないだろうか。もちろんpTAの結果を直接的に施策に結びつけるかどうかについては議論が残る。pTAという仕組みが内包する課題も少なからずある。その意味で一足飛びに解決する問題では決してない。しかし、この先私達の社会が、原子力を使い続けるにしろ、原子力を手離すにしろ、それは性急に決断してよいような種類の問いではないはずだ。その社会的意思決定のあり方まで含めて、どのようなエネルギー源を選択するのかという国民的熟議が、今、何よりも求められているのではないだろうか。

そして、原子力専門家は、その結論が仮に「脱原子力」であったとしても、市民の意見を真摯に受け止めるという覚悟を持つ必要がある。これができないのであれば、何を語っても、原子力専門家への信頼は、さらに失墜することにしかならないのではないだろうか。

4. むすびにかえて

この10年あまり筆者は、国内のさまざまな場所で、さまざまな立場の人々が原子力の問題について対話する場を企画してきた。その中で最も重視してきたことは、まだ解決を求めるのではなく(ある施設の立地を推進するか反対するかを決めず)、意見の異なる人々同士が対話するということであった。

3月11日を経て、私の中にもこの主張は悠長すぎたのではないかという深い自省がある。震災以後のさまざまなコミュニケーション不全を目の当たりにするにつけ、間に合わなかったという後悔の念に苛まれることも少なくない。しかし、やはりそれでもなお思う。今だからこそ、原子力を社会の中でどう取り扱っていくかを決める前に、「今はまだ決めない、直接的な結論を急がない」という前提の基に、異なる価値を持つ人々、3.11を経て異なる「事実」を見てきた人々同士の隔たりをすこしでも共有するための対話こそが必要なのではないだろうか。

筆者はその著書⁴⁾で「対話の場をつくる私達は常に、推進しようとする人々、反対しようとする人々の両方からの批判にさらされ、ある意味うとましく思われる存在であることにこそ意味がある。対話の場をつくる者は、常にどのような意見からも距離を置きつつ、どのような意見にも寄り添わなければならない。その意味で批判のひとつひとつを胸に刻みつつ新しい実践につなげていくことこそが、この種の問題にコミュニケーションという観点から携わる人間の責務だと思う。」と記した。その責務に改めて想いを寄せ、これまでも頂いてきた批判の言葉の重みを改めて噛みしめつつ結びの言葉としたい。

—参考資料—

- 1) 日本原子力学会 国民の皆様へ 東北地方太平洋沖地震における原子力災害について
<http://www.aesj.or.jp/information/tohokueq20110318.pdf> (2011年5月31日現在).
- 2) 永宮正治, 東日本大震災に際して(2011年3月22日), 物理学会誌, 66[5], 337(2011).
- 3) 土木学会長・地盤工学会長・日本都市計画学会会長共同緊急声明
<http://committees.jsce.or.jp/2011quake/taxonomy/term/74> (2011年5月31日現在)
- 4) 八木絵香, 対話の場をデザインする—科学技術と社会のあいだをつなぐということ, 大阪大学出版会, (2009).
- 5) 34学会会長声明「日本は科学の歩みを止めない～学会は学生・若手と共に希望ある日本の未来を築く～」
<http://www.ipsj.or.jp/03somu/teigen/seimei20110427.html> (2011年5月31日現在)
- 6) 双方向シンポジウム「どうする高レベル放射性廃棄物」
<http://www.enecho.meti.go.jp/rw/rikai/hlw-sympo/index.html> (2011年5月31日現在)

著者紹介



八木絵香(やぎ・えこう)
 大阪大学
 (専門分野/関心分野)科学技術社会論/
 ヒューマンファクター研究

福島第一発電所の原子炉燃料に何が起こったか 炉心露出事故時の燃料のふるまい

(財)高度情報科学技術研究機構 藤城 俊夫

福島第一原子力発電所の事故では、運転中であった1号、2号、3号炉のすべてで炉心溶融が生じ、炉心の大部分が溶融して原子炉压力容器の底に流下したと報じられ大きな衝撃を与えている。事故収束に向け、溶融炉心の長期冷却確立のための準備が鋭意進められているが、健全な炉心の冷却とは大きく異なることから、燃料の崩壊、溶融の状況を正確に認識した上で適切な対策が求められる。本稿は、この事故の炉心で生じた事象を理解するために、過去に経験した炉心溶融事故のスリーマイル島原子力発電所事故や関連研究の知見を踏まえ、炉心露出事故時の燃料の崩壊から溶融までのふるまいを概説したものである。

I. はじめに

福島第一原子力発電所についての5月24日の東京電力プレスリリースにおいて、原子力安全・保安院への提出資料¹⁾が公表され、事故直後の詳細記録とMAAPコード解析の結果とともに、1号、2号、3号炉のすべての原子炉で炉心が溶融し原子炉压力容器の底に流下する、いわゆるメルトダウンが生じたと発表され大きな関心を集めている。しかしメルトダウンの可能性は事故直後から指摘されていた。少なくとも炉心は長時間にわたって露出し、炉心溶融の発生が十分予想される条件になっていたことは推定されており、後日、原子炉压力容器内の水位が把握され、解析コードでの解析確認もされた結果、炉心崩壊の状態がより正確に認識されたものと理解すべきであろう。

現在、この溶融炉心の長期冷却に向けて各種の対策が進められつつある。崩壊熱はかなり低減しており、崩壊炉心はその上面を覆うくらいに冷却水が供給されている限りは、冷却は十分達成されると考えられる。しかし、溶融部分の体積が大きいほど、また、崩壊した炉心材が密度高く堆積するほど冷却効率は低下し、溶融炉心の内部は長期にわたり高温部分が残存することになるので、炉心状態の正確な把握と長期にわたる注意深い監視が求められている。

1979年3月に発生した米国スリーマイル島原子力発電所2号炉の事故(以下、TMI-2事故)は、事故原因は異なるものの、原子炉停止後数時間で冷却材が失われ、炉

心の約2/3が露出、溶融し、一部は原子炉压力容器底に流下するなど事故推移は福島第一発電所の事故(以下、福島事故)と類似する所が多く、原子炉燃料の崩壊、溶融過程を考える上では非常に参考になる。そこでTMI-2事故やこれを契機に広範に行われてきた重大事故研究での知見を参考に炉心露出時の燃料損傷や溶融炉心のふるまいの要点を整理し、福島事故での炉心状況を考察した。

II. BWR 燃料の構造

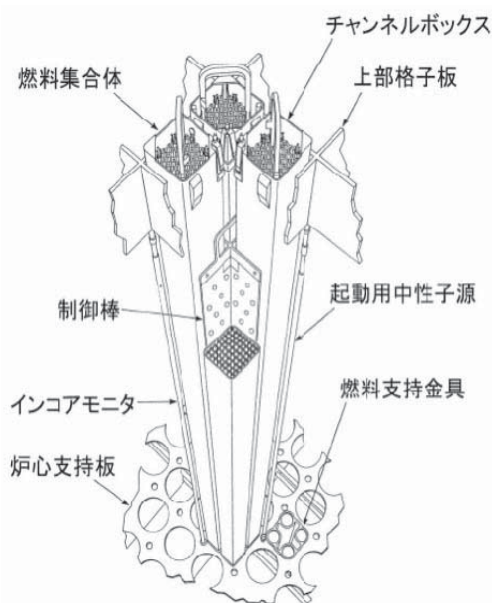
福島第一発電所では、9×9燃料集合体と一部8×8燃料集合体が使われていた。第1表に燃料集合体の主要諸元を、また、第1図に炉心への燃料集合体の配置状況を示す。TMI-2事故はPWRの事故である所から、これと比較する上では相違点を認識しておく必要がある。燃料棒の基本構造は同じであるが、燃料集合体や炉心の構

第1表 BWR 燃料集合体の主要諸元

	8×8燃料	9×9燃料
ペレット材	UO ₂ , UO ₂ -Gd ₂ O ₃	UO ₂ , UO ₂ -Gd ₂ O ₃
ペレット直径(cm)	約1.04	約0.96
ペレット長さ(cm)	約1.0	約1.0
ペレット密度(%)	理論密度の97	理論密度の97
被覆管材料	ジルカロイ-2	ジルカロイ-2
被覆管外径(cm)	約1.23	約1.12
被覆管肉厚(mm)	約0.86	約0.71
燃料集合体全長(m)	約4.47	約4.47
燃料有効長さ(m)	約3.71	約3.71
燃料棒配列	8×8	9×9
チャンネルボックス肉厚, 内幅(mm)	約2.5, 約134	約2.5, 約134
最高燃焼度(MWd/t)	50,000	55,000

What Happened in the Reactor Fuels of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants—Nuclear fuel behavior when core is exposed : Toshio FUJISHIRO.

(2011年 6月7日 受理)



第1図 燃料集合体の配置状況

造はやや異なっている。主な相違点としては、福島第一発電所では、単位集合体の寸法が小さいこと、各集合体がチャンネルボックスに納められ流路が仕切られていること、制御棒は集合体外のチャンネルボックス間の隙間に配置されていること、また、炉心構造では、炉心上部が気水分離器と蒸気乾燥器からなる上部構造で覆われ、炉心シュラウド外側にはジェットポンプノズルが配置され、循環ポンプが作動しない条件下では冷却材の自然循環が阻害される構造になっていることなどが挙げられる。したがってTMI-2事故の知見を適用する上では、これらの相違を配慮する必要はある。

Ⅲ. 福島事故で推定される炉心露出の過程

3月11日14:46の地震発生とともに原子炉は停止され、地震により外部電源は失われたものの非常用電源が起動、直ちに冷温停止に向けての対応が開始された。しかし、約50分後の津波到来により、非常用電源や所内配電システムが冠水して機能を失い全電源喪失の状態に至り、また、海水ポンプも破損、原子炉冷却のための海水を送る機能も失われた。このため1号炉では短時間は非常用復水器により、また、2号、3号炉ではより長く隔離時冷却系等により崩壊熱の冷却、注水が行われていたが、やがて機能を失って炉心の露出に至った。

東京電力の発表¹⁾では、1号炉は非常用復水器が不動作と仮定すると、地震発生後約3時間で炉心露出に至り、その約1時間後に炉心損傷が始まったと推定され、翌日5:46に消火系ラインからの注水が始まるまで長時間にわたって炉心冷却が失われていたとされている。

一方、2号、3号炉では压力容器内の蒸気駆動による隔離時冷却系を使った注水が行われていたため、早期の

炉心露出は防がれた。2号炉では地震発生から約75時間後の3月14日18:00頃に炉心露出が開始、その後、21:20に水位が回復したとされており、この間の約3時間は炉心露出が継続していたと考えられる。また、3号炉では13日2:42に高圧注入系による注水が停止、地震発生から約40時間後に炉心露出が開始、この後、消火系ラインによる注水が行われたものの注水量は十分でなく、炉心領域の約半分程度の冠水に止まって炉心損傷が進んだとされている。

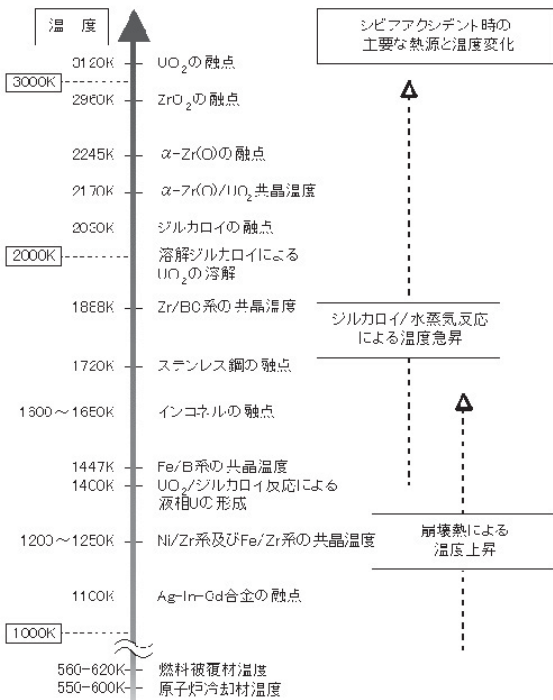
Ⅳ. 炉心露出事象時の燃料ふるまい

1. 燃料の過熱と損傷

原子炉停止後1時間から数時間後の時点での崩壊熱は定常運転時の1~1.5%であり、炉心が冠水している限り燃料過熱は生じない。また、炉心露出が始まっても炉心内に水位がある程度確保されている間は炉心内で発生する蒸気による冷却で温度上昇はかなり抑制されている。炉心露出が進行し、炉心内の水位が低下して蒸気発生量が少なくなった時点で除熱が急速に失われると考えられる。この時点での燃料温度上昇は、断熱に近い条件を想定すると、崩壊熱を1%として毎分20~30℃と推算できる。これから、炉心露出が継続すると燃料の初期温度を280℃としても約1時間で燃料被覆ジルカロイの融点1,850℃に達し、さらに30分~1時間で酸化ウラン燃料の融点2,800℃に達する温度上昇になると概算することができる。この間、ジルカロイ/水蒸気反応が生じジルカロイの酸化が進行する。この反応は発熱反応で反応速度は温度とともに増大し、約1,200℃を超えると崩壊熱と同じレベルの発熱となる。したがって、過熱がある程度に達するとほとんどジルカロイ/水蒸気反応による反応熱だけで自律的に燃料温度上昇が進み、過熱は急速に進行するようになる。

東電報告¹⁾の中には、上述の炉心露出過程を前提としたMAAPコード解析の結果が示されているが、炉心露出開始から1~2時間で燃料温度が酸化ウラン燃料の融点に達しており、短時間で燃料損傷が開始することを物語っている。

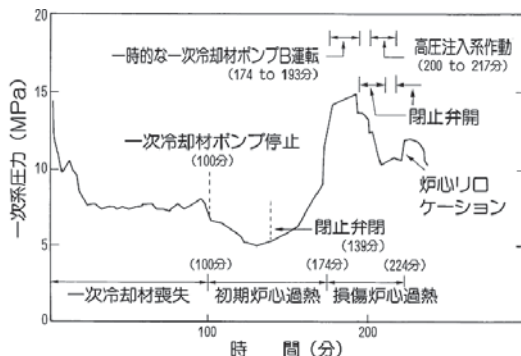
この燃料過熱の過程では、燃料被覆管ジルカロイ表面の酸化が進み厚い酸化層が形成され、また、内面にも UO_2 との反応で酸化層が形成される。ジルカロイの融点は1,760℃であるが、酸化ジルコニウム(ZrO_2)の融点は2,690℃と非常に高い。したがって、ジルカロイの融点を超えても酸化層は固体のまま残り、これが保護管の役割を果たして燃料棒はほぼ形状を保っている。一方、酸化層の内側や発生した水素雰囲気の中で酸化せずに残った金属ジルカロイは溶融とともに流下する。さらに被覆管内面でもジルカロイ/ UO_2 反応で金属ウランが生成され、また、燃料からの加熱で昇温した制御棒内でも鉄/ホウ素の共晶反応が生じ、これらは溶融物となり流下す



第2図 炉心構成物質に生じる現象²⁾

る。第2図は温度上昇に伴い生じる炉心構成材料の相互作用を整理したものであるが、炉心内ではここに示された各種の反応を生じながら温度上昇が進み、最終的には酸化ジルコニウムや酸化ウランも溶融、大規模な炉心溶融へと進展する。

以上の燃料過熱の過程は、TMI-2事故後の各種の研究によって解明されてきたものであるが、これをTMI-2事故の推移に沿ってたどってみる。第3図はTMI-2事故における事故開始から約3時間後までの原子炉圧力の変化と事故進展状況を示したものである。事故直後に原子炉は停止するが、原子炉容器逃し弁が開放されたままであったため冷却材が流出し原子炉圧力も低下していった。1次冷却材ポンプは稼働しており、流量は減少しながらも冷却材は炉心に送り込まれ、約100分までは燃料の冷却は行われていた。やがて圧力低下と冷却材温度上昇により循環ポンプにキャビテーション(気泡発生)が生じ震動が激しくなったため、循環ポンプが停止された。この時点から炉心露出と燃料過熱が始まり、被覆管

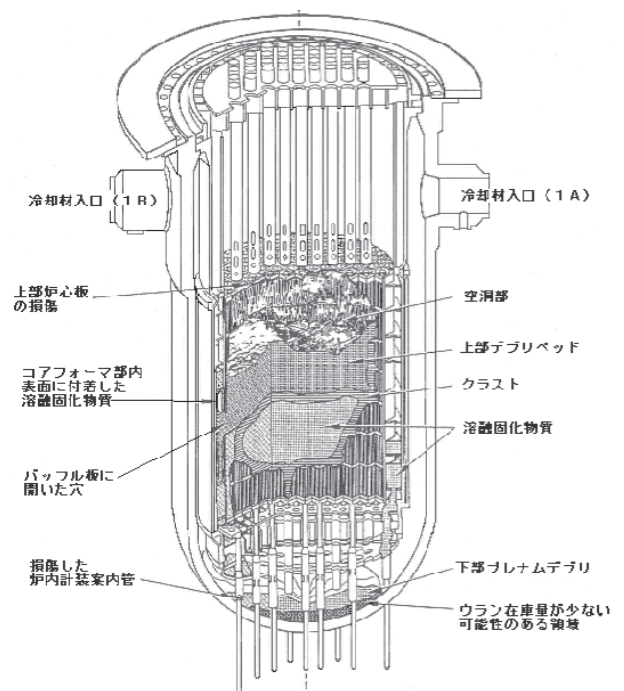


第3図 TMI-2事故時の一次系圧力の推移³⁾

ジルコイ/水蒸気反応が進行したとされている。ただし、上述のように、燃料被覆管の酸化は進んでも燃料集合体はほぼ形状を保っており、炉心下部で溶融金属が流下し固まって流路閉塞は生じていたが、炉心はほぼ元の形状を保っていたとされている。174分に循環ポンプの運転が再開され高温になった炉心に大量の冷却材が注入された時点で、酸化が進み脆くなった燃料が熱衝撃と冷却材の機械的な力により崩壊した。この結果、冷却材の流入がさらに阻害され、より大規模な損傷、溶融に進んだとされている。さらに、224分の時点で第2の大規模なリロケーションが生じ、溶融プールに溜まっていた溶融物が炉心を囲むバッフル板を溶融貫通し、压力容器の下部ヘッドに落下したとされている。

第4図は溶融炉心ボーリングを含む詳細な調査で判明したTMI-2炉容器内の最終的な状況を示したものである。炉心の上部には燃料ペレットや破碎した炉心構成材が積層してデブリベッドが形成され、その下にクラストといわれる固い殻に覆われた炉心構成材の溶融混合物が大きな塊となって残っている。この溶融固化物質は UO_2 、 ZrO_2 を主成分とするセラミックで、これから炉心温度は少なくとも $(U,Zr)O_2$ の融点の $2,500^{\circ}C$ は超えていたとされている。クラストは溶融物質の表面が固化したもので、熱伝導率が低いことから内部の溶融物質を包んで炉心構成材の溶融プールを維持する役割を持っていたとされている。さらに溶融固化物質の下には燃料集合体がほぼ原形を保っており、炉心の下部には水位があったと推定されている。

以上の知見を参考にして福島第一発電所での状況を推定すると、まず、1号炉は原子炉停止から数時間で炉心



第4図 TMI-2炉容器内の最終状態⁴⁾

露出が生じ、長時間給水がなかったことから、TMI-2事故の状態を越えて燃料溶融が進行し、炉心全体が溶融に至って压力容器の底に落下、压力容器を浸食した可能性が大きい。また、2号、3号炉では、3時間以上給水がされていないことから、TMI-2事故に見られた程度には炉心損傷、溶融が進展したものと想像される。ただし、BWRでは、燃料集合体がチャンネルボックスと制御棒で仕切られた構造になっているので、以上の過程は、各燃料集合体内で独立して進行し、これと並行する形でチャンネルボックス間にある制御棒内でも鉄/ホウ素共晶反応で溶融が発生、流路閉塞から炉心溶融へと進むものと考えられる。また、チャンネルボックスがある分PWRに比べジルコニウム量が多く、被覆管酸化で大量の水素が発生している中で加熱されると思われるため、セラミックスの融点よりも低温の溶融金属として落下している部分が多いと想像される。

2. 溶融炉心のふるまい

(1) 溶融炉心の発生

上述のように炉心露出の初期には、燃料被覆管の酸化が進行し融点の高い酸化ジルコニウムの層が形成され、燃料棒は自立した状態に保たれる。燃料形状が維持される限りは燃料集合体には内部まで冷却水が供給され、溶融炉心は形成されにくい。その後、ジルカロイ/水蒸気反応の進行とともに炉心内には大量の水素が発生し酸化が抑制される。この結果、融点 $1,760^{\circ}\text{C}$ で金属ジルコニウムの溶融物が形成される。また、燃料棒内面でのジルカロイ/ UO_2 反応で生じた金属ウランもさらに低い溶融温度で液化する。これらの溶融金属は粘性が低いので、いわば水のように急速に流下して集合体の下部に溜まり流路の閉塞が発生する。日本原子力研究開発機構のNSRR炉を使って行われた可視化実験では、酸化雰囲気の中での加熱では燃料棒は酸化膜に保護され自立しているが、ヘリウムガスを充填した不活性雰囲気では被覆管が溶融し急速に流下する様子が撮影されている。また、TMI-2事故後の溶融炉心コアボーリングでは、溶融部の下方から採取されたサンプルの中に原型を留めた燃料ペレットの間を溶融金属が埋めた状態のものが見つかり、流路閉塞の発生の証拠とされている。TMI-2事故においては、循環ポンプの運転再開で供給された冷却材による熱衝撃で酸化の進行した炉心上部の燃料集合体が崩壊、冷却材の侵入を阻害し、溶融部分が一体化した溶融プールが形成され、炉心溶融への急速な進行の原因になったと解釈されている。

東京電力の解析に使われたMAAPコードは、炉心、压力容器、格納容器を含む原子炉システム全体をモデル化し、炉心露出から格納容器破損までの過程を一貫して解析できる重大事故解析の代表的なコードの一つであり、炉心溶融進展のプロセスも考慮されている⁵⁾。報告

書の解析結果には压力容器内の残存水位の異なる2つの想定に対し、燃料損傷開始から溶融プールの発生や移動の様子が炉心部の断面で示されているが、このような解析からも福島事故においては長時間の炉心露出により溶融金属による流路閉塞や酸化した燃料集合体の崩落が生じ、冷却材の侵入が阻止され大規模な溶融炉心が発生、压力容器底まで落下する事態に至ったものと考えられる。

(2) 溶融炉心の原子炉压力容器底への落下と浸食

TMI-2事故では、OECD主催の下での国際協力でのTMI-2压力容器検査計画(TMI-2-VIP計画)として詳細な調査が進められた⁴⁾。TMI-2事故では溶融炉心の一部の約19トンが炉心バレルを溶融・貫通して原子炉压力容器の底に落下した。そして、压力容器底に止まり、部分的に炉内計測用の貫通配管の一部を浸食したが、压力容器底の溶融貫通は生じなかった。このように溶融炉心の移動が原子炉压力容器内で止まったことは安全上重要な事実であったため、固化した溶融物の調査や詳細解析が進められた。この結果、TMI-2-VIP計画の調査報告で結論とされているのは、溶融炉心の落下が2段階に進行し、最初は炉心下部の支持盤を通しての流下があり、支持盤の下の整流板を通過する際に比較的小さな塊に分散して压力容器の底に溜まり、これが冷却水を通し断熱効果もある保護層を形成、その後の炉心バレルを貫通流下した大量の溶融物に対する保護層の役割を果たしたとされている。また、解析においても、溶融物と压力容器との間に冷却材を通す薄い隙間があり、また、溶融物にも水が通るようなクラックがあって冷却材のコミュニケーションパスが形成されておれば、压力容器底の溶融貫通は防がれるとされている。ただし、このような好条件が常に実現するとは限らないので、冷却材のコミュニケーションパスが形成されなければ溶融貫通の可能性もあるとされている。

福島事故での状況は今後の詳細な調査を待たなければならないが、溶融物の落下の状況に依存することが想定され、もし初期に少量の溶融物が分散して落下し、これが保護層の役割を果たせば損傷は比較的限定されたものとなり、一方、大量の溶融物が一気に落下したとすれば損傷は大きくなると考えられる。BWRにおいては底部を制御棒駆動機構が貫通しており、この構造は溶融物を分散させる効果がある一方、これを納めている管(ハウジング)は比較的肉厚が薄く溶融物による影響を受けやすい箇所であり、溶融物や冷却水の漏洩パスとなっている可能性は大きい。

3. 溶融炉心の組成と長期冷却

TMI-2事故では全炉心の約45%が溶融、そのうちの約24%が炉心中央部に溶融物の塊として、また、約14%が原子炉压力容器の底に落下した形となった。これらの

再固化した溶融物から採取したサンプルの分析の結果、溶融物は元々の炉心構成割合よりもややウラン成分が多い、ウラン68~72 wt%、ジルコニウム12~15 wt%の酸化物(U, Zr)O₂を主成分とする均一な組成の再固化溶融物であることがわかっている。このような組成の混合体の熱伝導率は金属に比べてかなり低いため、溶融物が塊となって存在すると内部はなかなか冷却されない。TMI-2事故では、第4図に示したように、炉心中央部の溶融物は外側をクラスト(固体の殻)で守られ卵状になった溶融プールを形成していたため、冠水状態にあってもかなり長期間にわたり溶融コアが残っていたと考えられている。

福島事故でも特に1号炉は長時間にわたり炉心露出が続いたため、TMI-2事故を上回って炉心溶融が進み、かなり大きな溶融物を形成して原子炉压力容器の底に落下し、さらに一部は、制御棒駆動機構ハウジング等原子炉压力容器底の弱い部分を貫通し格納容器の底に落下しているものと推定されている。格納容器底に落下した溶融物は、底のコンクリート床を加熱して分解ガスを発生、また、コンクリートを溶融し溶岩状の溶融物を生成する。原子炉压力容器内の溶融物の組成は、BWR炉心の組成を考慮するとTMI-2事故よりもややジルコニウム成分が多いとは思われるが、類似したウラン・ジルコニウム酸化物((U, Zr)O₂)が主成分であると考えられる。また、コンクリートと反応すると、カルシウム、ケイ素、アルミニウム等の酸化物を多く含んだ溶岩状のものになることが知られている。

今後、できるだけ早い時期に循環システムによる冷却が整えられ長期冷却に移行することを期待するが、溶融炉心の表面は短期間に100℃以下に冷却できても、一度溶融プールを形成し一体化した状態で残っている場合には、内部はかなり長期間にわたって高温に保たれ、放射性物質放出に対する高いポテンシャルを持つものと考えられ十分留意する必要がある。

V. まとめ

主にTMI-2事故に見られた炉心燃料のふるまいを参考に、炉心露出事故における燃料損傷、溶融の進展を整理し、福島事故における溶融炉心の形成について考察を行った。過去の重大事故の経験や重大事故研究の知見に照らし、福島事故での炉心溶融は緊急冷却システムによる冷却や注水が失われてから数時間という短期間に進行し、やがて溶融炉心の流下に至ったものと考えられる。今後、長期冷却への対応が進められるが、通常の炉心の冷温停止とは異なり、表面温度は低くなっても内部は長期にわたり高温に維持される可能性があり、溶融物の原子炉内での分布や温度、形状の変化に十分注意を払った慎重な管理が求められる。

—参考資料—

- 1) 東京電力(株), 東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所運転記録及び事故記録の分析と影響評価について, 平成23年5月23日.
- 2) 原子力安全研究協会, 軽水炉燃料のふるまい, 平成10年7月.
- 3) *Nucl. Technol.*, 87[1], 1-334(1989).
- 4) J. R. Wolf, et al., *TMI-2 Vessel Investigation Project Integration Report*, NUREG/CR-6197, (1994).
- 5) *Approach and Tools for Severe Accident Analysis for Nuclear Power Plants*, IAEA Safety Reports Series No.56, (2008).

著者紹介



藤城俊夫(ふじしろ・としお)
(財)高度情報科学技術研究機構 参与
(専門分野/関心分野)原子炉の安全評価,
原子炉事故時の燃料ふるまい

軽水炉燃料崩壊熱のふるまい 福島第一発電所の崩壊熱挙動理解のために

東京都市大学 吉田 正

福島第一発電所の冷温停止に向けての課題は崩壊熱との闘いにつきるといえよう。崩壊熱は、核分裂で生じた核分裂生成物の β 崩壊に伴うFP崩壊熱と、核燃料であるウランより重いアクチニド核種の α 崩壊または β 崩壊に伴い発生するアクチニド崩壊熱に大別される。崩壊熱の計算にはいくつかの方法があり、かつその信頼性も高い。計算に当たっては、その方法を吟味し、停止後の原子炉の状況を見極めた評価・計算を行う必要がある。

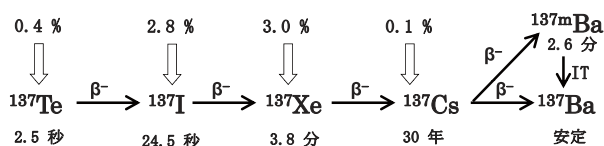
I. はじめに

核燃料が化石燃料と異なるもっとも重要な点は、燃焼、つまり原子炉の運転が停止ししたあとも、一定の割合で発熱を続ける点にある。そのまま冷却されなければ破損や熔融にいたる。原子炉停止後も残るこの発熱は、原子炉の運転中に生成される不安定な原子核の時間遅れを伴う崩壊、つまり α 崩壊ないし β 崩壊に伴って発生するもので、崩壊熱と呼ばれる。原子炉停止後あるいは燃焼停止後の時間経過を冷却時間と呼び、これは崩壊熱に関わる最も重要なパラメータである。崩壊熱は、核分裂で生じた核分裂生成物(Fission Product: FP)の β 崩壊に伴うFP崩壊熱と、核燃料であるウランより重いアクチニド核の α 崩壊または β 崩壊に伴い発生するアクチニド崩壊熱に大別される。

II. FP 崩壊熱

1. FP 崩壊熱の由来と特性

原子核は陽子と中性子から構成される。陽子数を Z 、中性子数を N とすると、軽い核では $N/Z=1.0$ で安定である例が多いが(^4He , ^{10}B , ^{12}C など)、原子核が重くなるにつれ、この比は次第に大きくなり(^{93}Nb で1.3, ^{133}Cs で1.4)、ウランでは $N/Z=1.6$ に達する。つまり、重い原子核ほど中性子数の割合が高い。したがって、重い ^{235}U が核分裂し、中位の重さのFP2つに分かれると、2つのFPはそれぞれ中性子過剰になる。中性子過剰であるため不安定なFPは時間遅れを伴いつつ β 崩壊を繰り返す、中性子を陽子に変えながら安定核を目指す。この過程を第1図に例示する。過剰な中性子が陽子に変わる



第1図 β 崩壊連鎖の例(質量数137)

ただだから、質量数 $A=N+Z$ は変化しない。このため、このような β 崩壊連鎖はmass chainとも呼ばれる。

この例は質量数が137の場合で、上方からの白抜き矢印が核分裂による発生を表し、数字はそれぞれの核種の発生割合を示す(数値は ^{235}U 熱中性子核分裂に対するもの)。この割合は200%に規格化されており、独立収率(independent yield)と呼ばれる。生成した各核種は質量数 A を一定に保ったまま、安定な ^{137}Ba ($N/Z=1.45$)に達するまで、核種名の下に記した半減期で β 崩壊を続ける。そしてこの間、放出される β 線と γ 線の全エネルギーが崩壊熱となる。FP崩壊熱では $A=75$ あたりから始まる100本程度のmass chainを考える必要がある。問題にされることの多い ^{137}Cs の累積の収率は、上流(図で ^{137}Cs より左)の核種および自分自身の独立収率をすべて足した値である6.3%となる。累積収率のこの値は、全FP中でも最も大きな部類に属する。なお β 崩壊に際しては、 β 線や γ 線と同程度のエネルギーを持ったニュートリノ $\bar{\nu}_e$ も発生するが、これは周辺の物質とほとんど全く相互作用することなく、宇宙のかなたに飛び去る。FP崩壊熱に関与するFPは約800核種に及ぶ。照射終了直後には、多数の短寿命FP核種がFP崩壊熱に寄与するが、冷却時間とともに寄与するFP核種の数は減ってゆく。

2. FP 崩壊熱の総和計算

FP崩壊熱の計算法としては、総和計算という方法がほとんど唯一のやり方である。冷却時間 t における崩壊

熱 $f(t)$ は

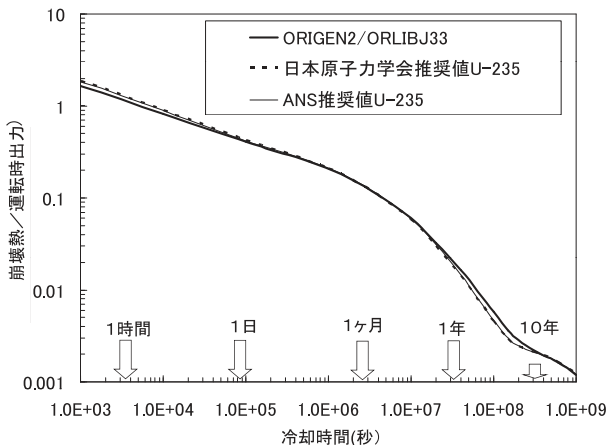
$$f(t) = \sum_i \lambda_i \cdot (E_\beta^i + E_\gamma^i) \cdot N_i(t) \quad (1)$$

で与えられる。全FP核種について総和をとるので総和計算(Summation Calculation)と呼ばれる。ここで、 λ_i は核種 i の崩壊定数、 $N_i(t)$ は核種 i の時刻 t における存在量である。また、 E_β^i 、 E_γ^i は核種 i が1回の β 崩壊を起こす際に放出する β 線および γ 線の平均エネルギーである。これら λ_i 、 E_β^i 、 E_γ^i を詳細な崩壊連鎖に関する記述とともに網羅的にまとめたのがJNDC FP崩壊データライブラリー¹⁾を始めとするFP崩壊データライブラリーである。

3. FP崩壊熱時間挙動

第2図は²³⁵UのFP崩壊熱を示す。説明を簡単にするため、後に述べる燃焼中に生成されるプルトニウム生成・燃焼の効果、MA(Minor Actinide)崩壊熱は考慮せず、²³⁵Uだけを一定出力で2年間継続して燃焼した後のFP崩壊熱を、燃焼時(運転時)出力に対する比として表した。日米の推奨値はよく一致している。燃焼停止直後のFP崩壊熱は、運転時出力の約6.5%であり、始めは急速に、しかしその後は次第にゆっくりと減少してゆく(対数軸であることに注意)。発熱が燃焼停止直後の1/10になるのは8時間後、1/100になるのは4ヶ月後、1/1000になるのは3年後となる。更に燃焼停止後10年を経てもFP崩壊熱レベルは燃焼停止直後の1/2000にしかならない。後に述べるが、停止後10年にもなると、ウラン燃料であっても、MAのうち²⁴⁴Cmと²³⁸Puからの発熱が無視できなくなる。

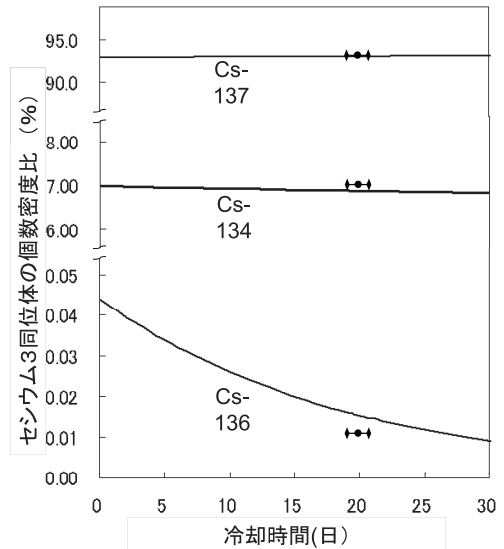
最後に、燃焼期間の違いがFP崩壊熱に及ぼす影響に触れておこう。燃焼停止直後では1年燃焼と5年燃焼の間で崩壊熱レベルにほとんど差はないが、120日後には約2倍、1年後で約3倍、3年後で4倍強と、次第に差が開いてゆく。もちろん、いま述べたように、崩壊熱レベルそのものは、冷却時間とともに減少してゆく。



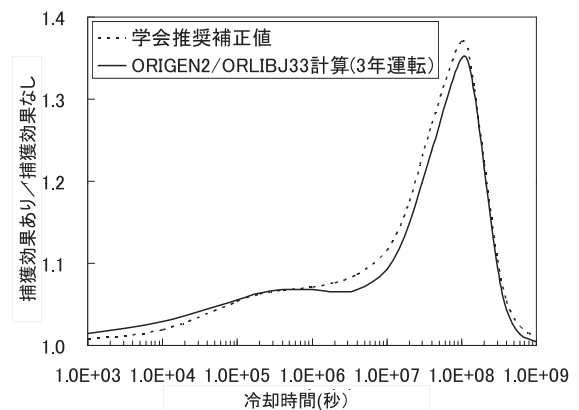
第2図 ²³⁵UのFP崩壊熱(2年照射)

4. FP核種の挙動と崩壊熱

II-2節で述べたFP崩壊熱総和計算の副産物として得られる(1)式中の $N_i(t)$ は極めて重要な情報を含んでいる。一例を挙げる。第3図は東京電力が3月に発表した福島第一発電所2号機タービン建屋の滞留水セシウム同位体ベクレル数から同位体個数密度比を算出し、後に述べるORIGN2コードで計算した $N_i(t)$ から求めた同位体比と比較したものである。計算と実測値はよく一致している。このうち¹³⁷Csは第1図にも現れた典型的なFP核種であるが、¹³⁴Csはこれと全く素性を異にする。¹³⁴Csの²³⁵U熱中性子核分裂での累積収率は $7 \times 10^{-6}\%$ で実質的になきに等しい。実はこの同位体は原子炉運転中、 $A=133$ のmass chainにおいて β 崩壊連鎖の末端の安定同位体として蓄積した¹³³Cs(累積収率6.7%)が、炉内で中性子を捕獲して生成したものである。いわば寝た子を起こすようにして生成され、冷却時間1~4年でのFP崩壊熱を何割か押し上げる。このような挙動をする核種は他にも何核種もあり、この効果は中性子捕獲効果と呼ばれる。第4図に見られる冷却時間10⁸s(約3年)前後に



第3図 2号機タービン建屋滞留水中のCs同位体個数密度比(ORIGN2/ORLIBJ33計算)



第4図 ²³⁵UのFP崩壊熱における中性子捕獲効果

現れる大きなピークが¹³⁴Csによるもので、崩壊熱を3割以上も押し上げていることがわかる。

本節をおえるにあたり、本稿の掲載時点(8月1日を想定)で、停止(2011年3月11日)から約140日になる福島第一の1~3号機で、²³⁵UのFP崩壊熱に効いている上位10核種を第1表に示す。つまり(1)式の総和のうち、上位10項に対応する核種である。このうち、¹⁴⁴Pr, ⁹⁵Nb, ¹⁰⁶Rh, ⁹⁵Zrの4核種だけで²³⁵U全FP崩壊熱の76%を、10核種全部で96%を占める。ちなみに、トップの¹⁴⁴Prの半減期は17.3分しかない。このような短半減期核が炉停止後5ヶ月もして効いているのは、質量数144のmass chain上、¹⁴⁴Prの直前に半減期が285日と長い¹⁴⁴Ceがあり、これが¹⁴⁴Prの生成を遅らせているからである。

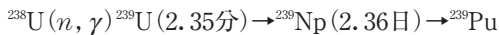
第1表 ²³⁵U崩壊熱に寄与の大きなFP核種(140日冷却)

順位	核種	寄与(%)
1	¹⁴⁴ Pr	34.0
2	⁹⁵ Nb	17.8
3	¹⁰⁶ Rh	13.7
4	⁹⁵ Zr	10.1
5	⁹¹ Y	4.9
6	¹³⁴ Cs	3.7
7	¹⁴⁴ Ce	3.0
8	⁸⁰ Sr	2.8
9	¹⁰³ Ru	2.0
10	⁹⁰ Y	2.0

Ⅲ. アクチニド崩壊熱

1. プルトニウムの生成

軽水炉でもウラン燃料の燃焼中には²³⁸Uの中性子捕獲反応が継続して起きている。生成した²³⁹Uは次のように2回のβ崩壊を経て²³⁹Puとなる。

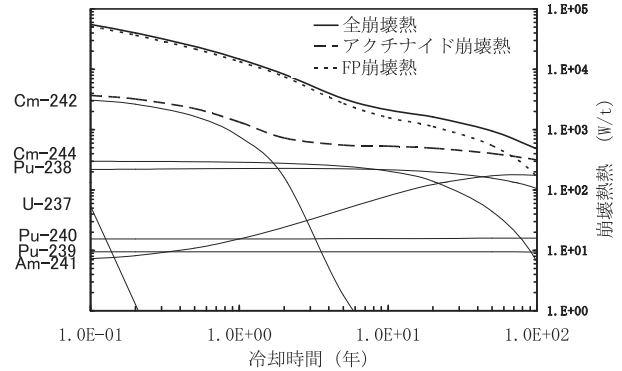


核種に付した時間は両核種の半減期である。この2回のβ崩壊も時間遅れを伴うから、崩壊熱の一部として考慮する必要がある。この過程から生じる崩壊熱を、次節で述べるMA崩壊熱と区別するため、U-Np崩壊熱と名づけておく。

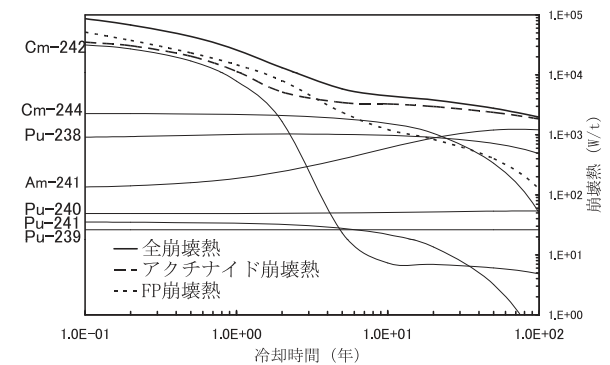
2. MA崩壊熱

軽水炉でも長期間運転すると²³⁸Pu, ネプツニウム, アメリカシウム, キュリウム等のMA(Minor Actinide)が蓄積し、これらの核種のα崩壊あるいはβ崩壊に伴って生成するMA崩壊熱が無視できなくなる。第5, 6図に、ウラン燃料およびMOX燃料崩壊熱のFPおよびMA崩壊熱の内訳を示す。なお、ここには前節で述べたU-Np崩壊熱は含めない。

使用済みウラン燃料の場合、冷却時間数年までFP崩壊熱が支配的で、アクチニド崩壊熱はほぼ1桁小さい。しかし冷却時間百年弱で両者の大小関係は逆転する。軽水炉MOX燃料では始めから両者の差異は小さく、冷却時間数ヶ月で両者は同程度になる。さらに数年でアクチニド崩壊熱が支配的になってゆく。



第5図 ウラン燃料の燃焼停止後のFPおよびアクチニド崩壊熱



第6図 MOX燃料の燃焼停止後のFPおよびアクチニド崩壊熱

Ⅳ. 崩壊熱の計算・評価

本章では、崩壊熱を実際に計算・評価する方法を具体的に述べておく。

1. 公的機関の推奨値

(a) 日本原子力学会推奨値²⁾: 日本原子力学会「原子炉崩壊熱基準」研究専門委員会の推奨値である。瞬時照射後のFP崩壊熱が、冷却時間 t の指数関数多項式(33項)として表現されている。文献3)に、燃料核種ごとに、式中に表れるおのおの66個(33×2)の定数値が与えられている。一定出力で一定時間運転後の崩壊熱は、瞬時照射後の崩壊熱を運転時間について積分すれば得られるが、その結果もまた簡単な指数関数多項式となる。したがって、EXCEL等の関数計算機能を用いて容易に計算が可能である。これが指数関数多項式を用いる利点のひとつである。第Ⅱ-4節で述べた中性子捕獲効果については補正係数が、また、第Ⅲ-1節で述べたU-Np崩壊熱については評価式が与えられている。MA崩壊熱は別途計算しなければならない。

(b) 米国原子力学会推奨値⁴⁾: これは米国原子力学会 Standard Committee の ANS 5.1ワーキンググループが、総和計算結果と核燃料サンプル照射実験結果を勘案し評価したものである。瞬時照射後のFP崩壊熱曲線が

23項の指数関数で表されている。中性子捕獲効果, U-Np 崩壊熱, MA 崩壊熱については上記(a)と同様である。この推奨値は数年に一度見直し, 改定が行われており, よくメンテナンスされている。

2. 総和計算コードと付随するライブラリーを使用する方法

(a) ORIGEN2 コード⁵⁾を使用する方法: ORIGEN2 コードは入力 of 簡明さと網羅的な出力など, 使い勝手が良く高い利用価値があるため, 世界で広く使われている。付随する核データライブラリーにより計算結果は変わるので注意が必要である。わが国で評価済み核データライブラリー JENDL-3.3 と JNDC FP 崩壊データライブラリー¹⁾を元に作られた ORLIBJ 33⁶⁾の使用をお勧めしたい。この ORLIBJ 33 を使用して, 計算条件を厳密に合わせれば, FP 崩壊熱については IV-1 で述べた日本原子力学会推奨値が再現される。IV-1(a)や(b)の方法では容易には評価できない MA 崩壊熱も自然に計算に入ってくる。なお, ウラン燃料でも燃焼後期になると, プルトニウムによる核分裂発熱が全核発熱の 3~4 割を占めるようになる。したがって, FP 崩壊熱も ²³⁵U だけが核分裂に寄与しているとした場合とは異なってくる。ORIGEN2 ではこの効果も簡単に計算に反映させることができる。

V. 崩壊熱の測定

崩壊熱の実測データは多数存在する。典型的な例として東京大学の秋山らの測定および米国 Oak Ridge 国立研究所の Dickens らの測定の 2 例を紹介しておく。ともに ²³⁵U, ²³⁹Pu 等の純粋なサンプルを実験炉炉心で照射して取り出し, プラスチックシンチレータで β 線成分を, NaI(Tl) シンチレータで γ 線成分をそれぞれ測定し, エネルギーで積分して FP 崩壊熱の β 線成分, γ 線成分としている。両者とも, 瞬時照射後の冷却時間 t の関数として測定結果を整理している。これらの測定結果は前章 IV-1 で述べた公的機関による推奨値の作成時に十分に参照・反映されている。なお第 2 図で見たように日米の推奨値はよく一致している。この 2 つは互いに独立に評価されたもので, その 2 つがよく一致していることは推奨値の信頼度を高めていると考えてよい。しかし両者がここに例示したような同じ測定結果に依拠している点は忘れるべきではない。両者とも同じ測定結果を通じて同じ系統誤差を内包している可能性は捨てきれないからである。このようなサンプル照射実験データは, 残念ながら冷却時間が最大でも 6 時間(東大の測定)までしかない。長時間冷却後の数少ない測定データとして, 青山らによる高速実験炉「常陽」での測定がある。青山らは

炉心燃料集合体を, 特別に作られたカロリメータに封入し, 燃焼終了後 24~258 日たった後の崩壊熱の直接測定を行った。しかしながら, JENDL-3.2 と JNDC FP 崩壊データライブラリーに基づいた詳細な解析計算にも関わらず, 測定値と計算値の一致は十分でない。計算が 10% 程度の過小評価となると報告されている⁷⁾。長期冷却後の崩壊熱計算値に対しては, 当面, 10% 程度の予測誤差は生じるものであると理解しておくべきであろう。このような実測データ不足のため, 長い冷却時間での崩壊熱評価は, 総和計算に過度に依存せざるをえないという問題が残る。

VI. おわりに

原子炉崩壊熱の計算は比較的容易である。かつその信頼性もかなりの程度保障され, 誤差評価結果も刊行されている。崩壊熱の評価・計算を行うにあたっては, 計算方法をよく吟味し, 必要な精度が達成されているか考える必要がある。MA 成分は入っているのか。あるいは FP の中性子捕獲効果はどう扱われているのか。場合によっては Kr や Xe といった希ガス成分, I や Cs といった水に溶けやすい成分の多くがすでに燃料から抜けてしまっているかもしれない。停止後, 原子炉の状況を見極めた評価・計算を行う必要がある。

終わりに本稿作成にわたり全面的に協力してくれた東京都市大学 M2 学生松本裕人君に深く感謝する。

— 参考資料 —

- 1) K. Tasaka, *et al.*, JNDC Nuclear Data Library of Fission Products, JAERI 1287, (1983).
- 2) 日本原子力学会「原子炉崩壊熱基準」研究専門委員会, 原子炉崩壊熱とその推奨値, (1989).
- 3) 日本原子力学会「原子炉崩壊熱基準」研究専門委員会, 崩壊熱の推奨値とその使用法, (1990).
- 4) American National Standard, Decay Heat Power in Light Water Reactors; ANSI/ANS-5.1-2005, (2005).
- 5) A.G. Croff, ORNL/TM-7175, (1980).
- 6) J. Katakura, *et al.*, JAERI-Data/Code 2002-21, (2002).
- 7) 青山卓史, 他, 日本原子力学会誌, 41, 946-953 (1999).

著者紹介



吉田 正(よしだ ただし)
東京都市大学 原子力安全工学科
(専門分野/関心分野)核データ, 炉物理,
原子炉工学

長期的な海洋環境影響は？ 福島第一原子力発電所からの放出放射能の長期的海洋拡散 シミュレーションと海産物摂取による内部被ばく評価

(独)日本原子力研究開発機構 中野 政尚

2011年3月11日の東日本大震災大津波による福島第一原子力発電所の事故に伴い、環境へ放射性物質が放出された。原子力機構が開発した計算コードLAMERを用いて、地球規模の長期的海洋拡散計算を行い、その海水中濃度および海産物摂取による被ばく線量を推定した。

8.45 PBqの¹³⁷Cs放出を仮定した場合、2012年4月以降の海水中の¹³⁷Cs濃度は最大でも約23 Bq/m³と計算され、大気圏内核実験に起因する事故前の濃度の14倍程度だった。その後、最大濃度は減少を続け、2023年には核実験起源と同レベルになる。一方、海産物摂取による¹³¹I、¹³⁴Cs、¹³⁷Csからの内部被ばくは2012年4月以降、最大でも年間1.8 μSvと計算され、大気圏内核実験に起因する過去の年間線量程度であると試算された。

I. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴って発生した大津波により、東京電力(株)福島第一原子力発電所が被災した。その後、環境へ放射性物質が放出されたことから、その環境影響が心配されている。

事故がいまだ収束していない状況ではあるが、本稿では執筆時点における海洋モニタリング状況、海洋への放出量の推定、海洋拡散シミュレーションの実施状況について概観する。

特に、今後の長期的な環境影響予測については、日本原子力研究開発機構(原子力機構)が開発した計算コードLAMER(海洋環境放射能による長期的地球規模リスク評価モデル)¹⁾を用いて、地球規模の年オーダーの海洋拡散計算を行い、その海水中濃度および海産物摂取による被ばく線量を推定した。

II. 海洋モニタリング等の実施状況

1. 海洋モニタリング

文部科学省および東京電力は、2011年3月21日から海水の採取分析を行っている。施設寄与として検出された核種は⁵⁸Co、^{99m}Tc、⁸⁹Sr、⁹⁰Sr、¹³¹I、¹³²I、¹³⁴Cs、¹³⁶Cs、¹³⁷Cs、¹⁴⁰Ba、

¹⁴⁰Laであるが、これらのうち、濃度が線量告示別表第1に定める排水中の濃度限度に比べて比較的大きいのは¹³¹I、¹³⁴Cs、¹³⁷Csであった。第1表に5月末までに得られた海水中放射性物質の最高濃度を示す。発電所からの距離が遠くなるとともに濃度は減少する傾向が見られた。海水濃度の¹³⁷Cs/¹³¹I比は当初、発電所からの距離が大きくなるに伴って減少傾向が見られた。沿岸での分配係数(平衡状態における海水に対する海底土濃度比)はCs、Iについてそれぞれ4,000、70であること²⁾から、Iに比べてCsが選択的に海底土へ移行していると考えられる。一方で、日を追うごとに海水濃度の¹³⁷Cs/¹³¹I比は上昇しているが、半減期約8日の¹³¹Iが物理的崩壊によって減少しているためと考えられる。

2. 海洋拡散シミュレーション

5月末現在、文部科学省(海洋研究開発機構)、フラン

第1表 海水中放射性物質の最高濃度(単位：Bq/cm³)

地点	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
発電所近傍 (極近傍除く)	~180 (1F南放水口付 近, 3月30日)	~67 (1F5~6放水口 北側, 4月7日)	~68 (1F5~6放水口 北側, 4月7日)
沿岸域	~3.8 (2F北側放水口 付近3月28日)	~1.4 (2F岩沢海岸付 近4月5日)	~1.4 (2F岩沢海岸付 近4月5日)
沖合15km	~0.18 (岩沢海岸沖合 15km, 4月5日)	~0.31 (岩沢海岸沖合 15km, 4月5日)	~0.32 (岩沢海岸沖合 15km, 4月5日)
沖合30km	~0.161 (地点4, 4月15日)	~0.166 (地点4, 4月15日)	~0.186 (地点4, 4月15日)
告示に定める 水中濃度限度	0.04	0.06	0.09
事故前の濃度	検出されず	検出されず	0.0000017 (福島沖, 2009 年の平均値)

Long-term Impact on the Marine Environment—Simulation of the marine dispersion of released radionuclides from Fukushima-daiichi nuclear power plant and estimation of internal dose from marine products : Masanao NAKANO.

(2011年 6月13日 受理)

スの研究グループが沿岸域に着目して拡散シミュレーションを行い、その計算結果をインターネットで公開している。放出初期の挙動については差があるものの、最終的にはどちらも北東～東方向に移動しながら拡散していく予想になっている。

3. 海洋への放出量の推定

(1) 大気放出から海面への沈着

天津波襲来以降、ベント、水素爆発等によって、大気中に放射性物質が放出されている。6月6日の経済産業省原子力安全・保安院(以下、保安院)発表によると、3月11日から16日の間の大気への放出量は¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Csがそれぞれ160 PBq, 18 PBq, 15 PBqである。また、原子力安全委員会が3月23日に発表したSPEEDI(緊急時迅速放射能影響予測)ネットワークシステムによる甲状腺内部被ばく量の試算値による分布図では、海方向と陸方向の線量が45:55に分布している。以上から筆者は、海洋へは全大気放出量の5割が移行したと考え、¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Csはそれぞれ80 PBq, 9 PBq, 7.5 PBqが海面に沈着したものと仮定した。なお、量的には少ないものの、3月16日以降も大気放出は継続している。

(2) 高濃度汚染水

2011年4月2日の保安院発表によると、同日2号機取水口付近のピット内に1 Sv/hを超える高濃度汚染水があり、海に放出されていることを発見した。また、同日採取された2号機スクリーン流入水の¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs濃度はそれぞれ、 $5.4 \times 10^6 \text{Bq/cm}^3$, $1.8 \times 10^6 \text{Bq/cm}^3$, $1.8 \times 10^6 \text{Bq/cm}^3$ と非常に高濃度であった。4月21日の東京電力発表によると、流入水の放出は4月1日から6日の5日間で流量は約520 m³, ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs放出量は、それぞれ2.8 PBq, 0.94 PBq, 0.94 PBqと推定している。

さらに、5月21日の東京電力発表によると、5月10日から11日にかけて、3号機から¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs濃度がそれぞれ $3.4 \times 10^3 \text{Bq/cm}^3$, $3.7 \times 10^4 \text{Bq/cm}^3$, $3.9 \times 10^4 \text{Bq/cm}^3$ の高濃度汚染水が250 m³流出した。¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs放出量は、それぞれ0.85 TBq, 9.3 TBq, 9.8 TBqと推定している。

一方、3月25日以降、放水口付近で採取した海水から、100 Bq/cm³前後の¹³¹Iが継続して検出されていることから、別の高濃度汚染水が3月下旬にも海水に漏れ出している可能性がある。なお、4月7～8日以降、海水中濃度は減少し続け、4月9日には¹³¹I, ¹³⁷Csともに10 Bq/cm³程度、4月末には¹³⁷Csで0.1 Bq/cm³程度となった。しかし、5月中の¹³⁷Cs濃度には大きな減少傾向は見られない。

(3) 低レベル滞留水等

保安院発表によると、4月4日から10日にかけて集中廃棄物処理施設から低レベルの滞留水約9,070 tを、5・6号機サブドレンから低レベルの地下水約1,323 tを放

出した。低レベルの滞留水などの放出量は、合計で150 GBqとされており、II-3(1), (2)項と比較すると67万分の1程度である。

(4) 今回の事故に伴う海洋への総放出量

今回の事故に伴う¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Csの海洋への放出は、5月末現在において、II-3(1)～(3)項に示す3つの経路があり、その合計は第2表のとおりである。

Ⅲ. 長期的海洋拡散シミュレーション

1. 計算方法

(1) 計算モデル

本予測の目的は、海水への地球規模拡散に関して、1年以上後の全体像を把握することであり、沿岸域での予測をする目的ではないことから、LAMER広域モデルを使用した。計算条件を第3表に示す。年平均の3次元流速場は、海洋大循環モデルを用いて、診断的手法(水温・塩分の観測値を逐次計算値に復元させる方法)により求めた。また、海水中放射性物質濃度の計算においては、粒子拡散モデル(仮想的に放射性物質を持たせた多数(本計算では15万個)の粒子を流速場に乘せて移流させるとともに、乱数を用いて不規則に移動させて拡散を表現するモデル)を用いた。II-1節の海水モニタリング等の結果から、対象核種は¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Csとした。

沿岸域では大洋域に比べ、セシウムの分配係数が若干大きくなるものの、ヨウ素およびセシウムは重金属元素に比べて比較的海水中に溶存しやすい元素である²⁾。よって、沖合海水中の濃度予測には、スキヤベンジング過程(海水中の放射性物質が懸濁粒子に吸着し、重力でより深部へ輸送される過程)等は考慮していない。沿岸部においては、海水からセシウムが堆積し、その後、再浮遊

第2表 海洋への放出量の推定値(2011年6月6日現在)
単位: PBq

経路	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
(1) 大気放出からの海面沈着 (3/11-16)	80	9.0	7.5
(2) 高濃度汚染水(4/1-6) (5/10-11)	2.8 0.00085	0.94 0.0093	0.94 0.0098
(3) 低レベル滞留水等(4/4-10)	0.000066	0.000042	0.000042
合計	82.8	9.95	8.45

第3表 LAMER広域モデルの計算条件

モデル	項目	条件
海洋大循環モデル ¹⁾	格子サイズ 水温・塩分 ・風応力	緯度・経度方向2度、鉛直方向15層 年平均データ
粒子拡散モデル ¹⁾	表層混合層 水平拡散係数 鉛直拡散係数 その他	緯度に応じて100~300m (北緯40度では200m) $1.3 \times 10^4 \text{m}^2/\text{s}$ $3 \times 10^3 \text{m}^2/\text{s}$ 海底への堆積、海底からの再浮遊、粒子態との吸着などは考慮しない。 河川からの流入は考慮しない。
モデル全体	大気圏内核実験データを用いた妥当性の検証	¹³⁷ Csの場合、観測値の1/2~2倍に計算値の82%、1/5~5倍に計算値の93%が含まれた ³⁾ 。よって、計算値に安全裕度(2倍)をかけた観測値の約90%が含まれるものと考えられる。

や溶解によって海水中濃度が若干上昇することがありうる。今回の計算では代表核種として、人工放射性核種で半減期が長い¹³⁷Csを想定し、¹³⁷Csの半減期が30年であることから、今回の計算期間は30年とした。¹³¹I、¹³⁴Csについては、放出量および物理的崩壊を考慮して海水中濃度を補正した。拡散モデルの詳細については、既報を参照されたい¹⁾。

(2) 海洋投入量

海洋投入量については、II-3節の海洋への放出量推定の結果から、¹³¹I、¹³⁴Cs、¹³⁷Csについて、それぞれ82.8 PBq、9.95 PBq、8.45 PBqが福島第一原子力発電所の沖合から、2011年4月1日に一度に放出したものと仮定して計算した。この¹³⁷Cs投入量は、これまでの大気圏内核実験で地球上に放出された¹³⁷Cs(948 PBq)の約0.9%に相当する⁴⁾。

なお、現実の大気経路では、大気により太平洋上に輸送された後に海面に沈着する。その場合には、本計算結果よりも拡散のスピードはより速いと考えられる。大気からの降下量の水平分布は現段階では考慮せず、大気からの放射性物質は、汚染水として直接海洋に投入された場所に全量沈着するものとして取り扱った。

(3) 海産物摂取による内部被ばく線量算出

海産物摂取による内部被ばく線量の算出に必要な濃縮係数、摂取量、実効線量係数を第4表に示す。

また、海水中濃度については、後述する全海洋表層における最高濃度部分の海水中濃度を使用した。なお、放出後1年未満の期間については、年平均場を使用する本モデルの適用範囲外であるため、濃度および線量の計算は実施しない。

2. 計算結果および考察

(1) 海水中濃度分布

海洋放出から1~30年後(2012~41年)4月1日における表層(0~100 m)海水中¹³⁷Csの濃度分布を第1図に示す。福島県沖へ放出された¹³⁷Csは、しばらくすると黒潮によって、拡散しながら東方へ移行し、全海洋表層における最高濃度部分は約5年後(2016年)に北米大陸西海岸沖に達する。その後の拡散により、20年後(2031年)には北太平洋全体の濃度はほぼ均一になり、目立った濃度差は見られない。

IAEAが5月5日に発表したスライドでは、1~2年以内に北米に到達するとの予測を発表しているが、LAMERでは、海洋大循環モデルの水平分解能(2度)の

関係で、局所的な流れが平滑化されるため、見かけ上の流速が遅く、北米西海岸沖合への到達に3~5年程度を要する計算となる。¹³⁷Csを含む水塊の一部が1~2年で北米大陸西岸に到達する可能性があるが、¹³⁷Csの多くの部分については3~5年程度を要するものと考えられる。

全海洋における2012年以降の最高濃度の経年変化を第2図に示す。2012年以降の最高濃度は表層で約23 Bq/m³と計算された。一方、2009年に福島県沖で採取された大気圏内核実験起源の海水中¹³⁷Cs平均濃度は、環境放射線データベース⁶⁾により検索された43個の有意データの平均値で約1.7 Bq/m³だった。よって、2012年4月における福島起源の濃度は核実験起源の濃度の約14倍となる。その後の表層の最高濃度は減少し、12年後(2023年)には1 Bq/m³未満になる。同時に、表層から下方への拡散も進むため、水深300~400 mにおける最高濃度は徐々に上昇し、約10年で表層と同程度になり、その後、表層と同様に減少していく。水深900~1,000 mでは、2026年まで徐々に上昇するが、その後はほとんど変化しない。30年後の2041年には、表層から水深1,000 mまでの最高濃度がすべて0.2 Bq/m³程度になる。

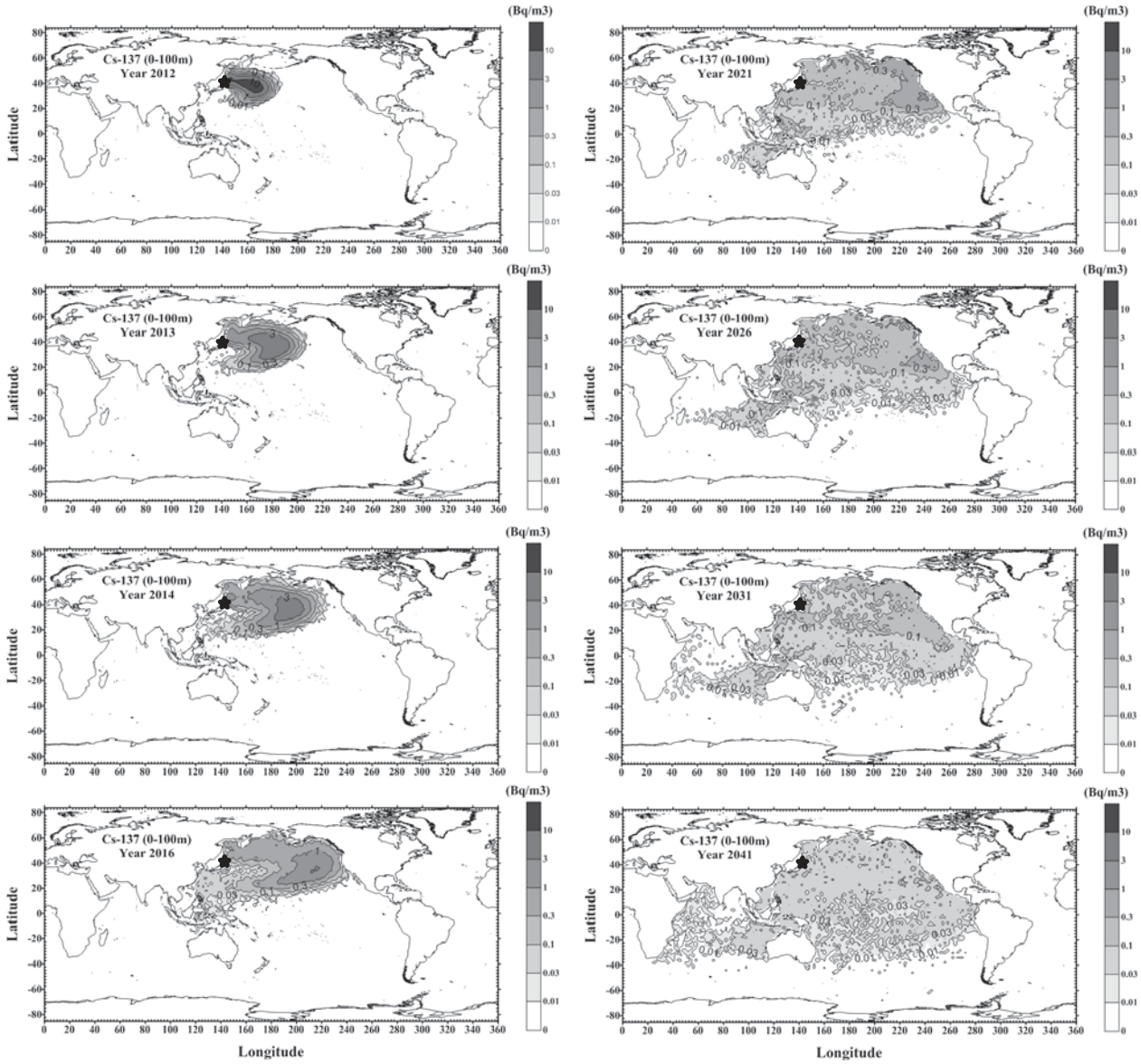
大気圏内核実験起源の茨城沖での海水中¹³⁷Cs濃度計算値³⁾との比較図を第3図に示す。2012年では核実験起源の約17倍の濃度であるが、1960年頃における核実験起源の¹³⁷Cs濃度と同程度である。福島起源は減少が早く、2023年には同レベル、2031年には約半分まで減少する。

一方、海洋投入量(Bq input)を海水中最高濃度(Bq/m³)で割った数値を「最小希釈倍率」と定義すると、放出量の大小に依存しない値となり、最低限どの程度希釈されるかを示す指標となる。最小希釈倍率の経年変化を第4図に示す。表層での最小希釈倍率は1年後で最も小さく約3×10¹⁴であるが、その後、上昇(希釈)を続け、30年後には約5×10¹⁶となる。これより深い水深では、最初は最小希釈倍率が大きいものの、30年後には表層と同程度の倍率となる。

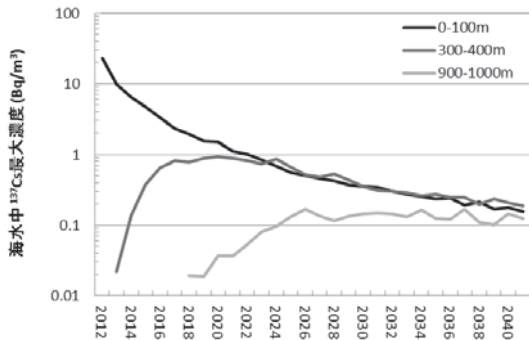
2001年に中野らが東海再処理施設からの仮想放出に関するシミュレーションを行った結果では、再処理施設保安規定に定める¹³⁷Csの年間放出限度55 GBqの約100倍である6 TBqの¹³⁷Csの仮想放出に対し、放出1年後に最大でも0.1 Bq/m³未満になると報告した⁷⁾。その場合、最小希釈倍率は6×10¹³以上となる。当時の計算は、水平拡散係数は文献値によって、現在よりも安全側に若干低め(2×10³m²/s)に設定されていたため、やや小さな計算結果となった。その後、実測値に合うよう現実的な水平拡散係数を設定した³⁾。それを考慮すれば、福島沖からの放出でも茨城沖からの放出でも、1年後の最小希釈倍率、言い換えると単位放出量に対する最大濃度はほぼ同じ計算結果が得られた。

第4表 濃縮係数, 摂取量, 実効線量係数

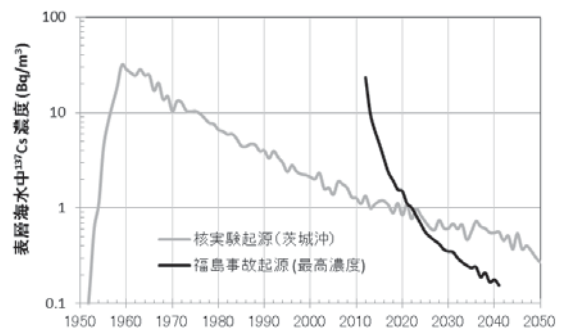
	1日摂取量 (g/d) ⁵⁾	濃縮係数 (Bq/kg生 per Bq/kg水) ²⁾		
		¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
魚類	64	9	100	100
甲殻類	5.4	3	50	50
頭足類	5.5	-(3)	9	9
貝類	3.5	10	60	60
海藻類	10	10,000	50	50
実効線量係数 (Sv/Bq)		2.2E-8	1.9E-8	1.3E-8



第1図 海洋放出から1~30年後(2012年[左上]~2041年[右下])における表層海水中¹³⁷Cs濃度分布



第2図 全海洋における最高濃度の経年変化



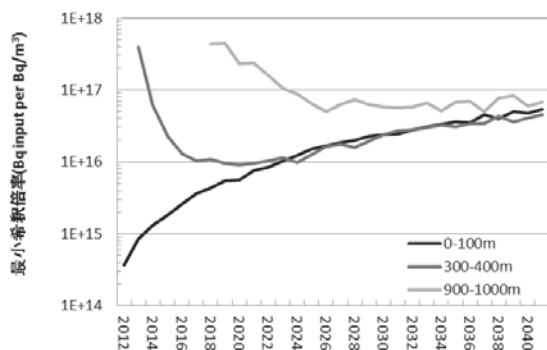
第3図 大気圏内核実験起源の表層海水中¹³⁷Cs濃度との比較

L O C C S

前述のとおり、最高濃度および最小希釈倍率は、そのとき世界海洋で最も厳しい値をとる場所の数値であるため、それ以外のすべての場所では、濃度はより低く、希釈倍率はより高い。¹³⁷Csの計算結果を半減期補正して得られた1年後の最高濃度を水中の濃度限度とともに第5表に示す。

(2) 海産物摂取による内部被ばく線量

2012年4月以降、世界で福島起源の濃度が最も高い海水中(第5表に示す最高濃度)に生息している海産物のみを1年間食べ続けたと仮定した場合の内部被ばく線量を第6表に示す。生物種を合計した1年あたりの内部被ばく線量は、¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Csでそれぞれ $3.8 \times 10^{-12} \mu\text{Sv}$, 1.0



第4図 全海洋における最小希釈倍率の経年変化

第5表 全海洋における1年後の海水中最高濃度

	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
海水中最高濃度(Bq/m ³)	4.7E-12	20	23
水中の濃度限度(Bq/m ³)	40,000	60,000	90,000

第6表 海産物摂取による内部被ばく線量(単位: μSv/年)

生物種	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	合計
魚類	2.1E-14	0.89	0.70	1.6
甲殻類	6.1E-16	0.037	0.030	0.067
頭足類	6.2E-16	0.0069	0.0054	0.012
貝類	1.3E-15	0.029	0.023	0.052
海藻類	3.7E-12	0.069	0.055	0.12
合計	3.8E-12	1.0	0.82	1.8

μSv, 0.82 μSvであり, 合計は1.8 μSvと計算された。

大気圏内核実験に起因する日本人の海産物摂取による内部被ばくは最大の1963~73年で平均値として年間約1.7 μSvであったことから⁸⁾, 今回の放出量を仮定すれば, 最大に見積もっても大気圏内核実験と同程度の内部被ばくを与えると考えられる。

3. まとめ

LAMERを用いて, 福島第一原子力発電所からの放出放射能に関する海洋拡散計算を実施し, 1年以上経過した後の広域的な濃度分布を30年後の2041年まで予測し, 海産物摂取による内部被ばく線量を試算した。ただし, 冒頭に記したとおり, 沿岸域および1年以内の濃度等については, LAMERの適用範囲外である。

8.45 PBqの¹³⁷Cs放出を仮定した場合, 2012年4月以降の海水中の¹³⁷Cs濃度は最大でも約23 Bq/m³と計算され, 現在の大気圏内核実験起源の海水中濃度の14倍程度であるが, 1960年頃の同程度の濃度である。その後, 最大濃度は減少を続け, 2023年には核実験起源と同レベル(1 Bq/m³未満)になると計算された。

一方, 海産物摂取による¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Csからの内部被ばくは2012年4月以降, 最大でも年間1.8 μSvと計算され, 大気圏内核実験に起因する海産物摂取からの過去の線量と同程度であると計算された。

今後, 海洋投入量の空間分布, 時間分布が確定すれば, 海水中放射性核種濃度および海産物を摂取した場合の内部被ばくのより詳細な線量評価が可能となり, 今後の海産物の安全性確認に貢献できると考えられる。また, 海水中濃度の実測値を用いて放出量を逆に推定することも, 本シミュレーションを用いて, ある程度は可能であると考えられる。

—参考資料—

- 1) 中野政尚, LAMER: 海洋環境放射能による長期的地球規模リスク評価モデル, JAEA-Data/Code 2007-024, (2008).
- 2) IAEA, Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment, Technical Report Series No.422, (2004).
- 3) 中野政尚, “海洋環境放射能による長期的地球規模リスク評価モデル(LAMER)—広域拡散モデルの開発と検証”, サイクル機構技報 No.22, (2004).
- 4) UNSCEAR, “Exposures to the Public from Man-made Sources of Radiation. In: Sources and Effects of Ionizing Radiation”, United Nations, New York, (2000).
- 5) 厚生労働省, 平成20年国民健康・栄養調査報告, <http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/eiyou/h20-houkoku.html>, 2011年4月22日閲覧。
- 6) 文部科学省, 環境放射線データベース, <http://search.kankyo-hoshano.go.jp/>, 2011年4月22日検索閲覧。
- 7) 中野政尚, “地球規模の海洋環境における放射性物質移行モデル”, サイクル機構技報 No.11, (2001).
- 8) 中野政尚, “海産物摂取による大気圏内核実験からの実効線量の算出”, 保健物理, 42(4), 329-341(2007).

著者紹介



中野政尚(なかの・まさなお)
(独)日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)環境モニタリング,
環境影響評価

福島第一原子力発電所の事故に係わる 放射線影響分科会の活動報告, (I)

放射線被ばくに係わる汚染状況に関する情報の整理と提言

「原子力安全」調査専門委員会 放射線影響分科会

日本原子力学会「原子力安全」調査専門委員会の放射線影響分科会は、福島第一原子力発電所の事故の影響を広い視点から検討するために、保健物理・環境科学部会、放射線工学部会、社会・環境部会の3部会の協力のもとに設置された。この分科会は、(1)環境および周辺住民と災害対応に当たる防災関係者の被ばくを合理的に達成できるかぎり低減すること、(2)長期的な視野から、引き続き対応すべき諸課題の検討に寄与し得る客観的な放射線学的情報を整備しておくこと、(3)原子力災害の特殊性を考慮し、得られた情報をわかりやすい形で国民および世界に発信すること、を主な目的として活動している。

I. はじめに

放射線影響分科会は、当面取り組むべき課題として、①放出率、拡散状況の評価、②環境中の放射性物質および放射線情報の収集、分析、評価、③福島第一原子力発電所の事故対応に関する提言、④緊急時下の放射線測定の実態と課題、⑤住民および防災関係者の被ばく管理の実態と課題、⑥関連学協会との連携をとりあげた。本稿では5月の「原子力安全」調査専門委員会の緊急シンポジウムで報告した項目について報告する。

II. 災害対応の在り方に関する提言

放射線影響分科会では、災害対応の在り方に関して、以下の緊急提言を行った(本提言は5月20日に詳細説明とともに学会HPに掲載したものを一部修正)。

- (1) 放射性物質の異常な放出が収まった段階以後の環境回復措置と避難解除に向けた工程表を早急に作成して周知すること。
- (2) 空間線量率や放射性物質の土壌濃度等のマップを早急に作成し、住民に理解しやすい形で公開すること。情報の公開にあたっては、住民の不安や社会的影響に配慮し、情報の理解のための丁寧な説明を加えるとともに、今後の対応方針等について、あらかじめステークホルダ(住民、地元自治体等の関係者)

と十分に協議すること。

- (3) 今後、環境への放射性物質の放出を可能な限り低減することが最重要である。万一、追加の放射性物質を放出せざるを得ない場合や計画外の放出があった場合は、防災指針の基準に従い、大気中の放射性物質が到達する可能性のある地域に対して事前に屋内退避等の防護の勧告を行うこと。
- (4) 海水、海底土および海産物中の放射性物質濃度の調査を詳細かつ継続的に実施するとともに、海洋起源の放射性物質による被ばく線量を評価し、その結果を周知すること。
- (5) 新たな放出が懸念される状況の長期化および放射性物質に対する不安から、住民や作業員には健康面あるいは精神面で大きな負荷が生じている。作業員の被ばく管理を確実にを行うとともに、放射線、医療、心理の各専門家を避難所等に配置し、住民の被ばく管理を含めた健康管理、精神的・心理的ケアを十分にを行うこと。
- (6) 日本原子力学会を始めとする関連学会との連携を強化し、応急防護対策の実施および各種防護対策の解除に向けた活動に全日本で取り組む体制を整えること。

原子力緊急時の放射線情報は、災害応急対応組織の活動を円滑に進めるためだけでなく、地域住民をはじめ広く国民が災害の現状を知るうえで重要な役割を果たす。したがって、一般に公開される放射線情報の伝達に当たっては、その内容が正確であることに加えて、わかりやすく誤解を生じないものになるよう留意する必要がある。しかし、同時に、単に空間線量率や土壌汚染の情報

を数値として公開するだけでは、逆に住民に不安を抱かせたり、風評被害等の社会的な混乱を招く危険性があることにも注意する必要がある。当分科会では、放射線情報の公開が住民の生活に直接影響を与えることを考慮し、公開に当っては、災害対策本部の主導のもとに防護措置等の対応方針等をステークホルダーと十分に協議したうえでそれらの情報もあわせて提供すべきと考えている。

Ⅲ. 汚染状況に関する情報整理

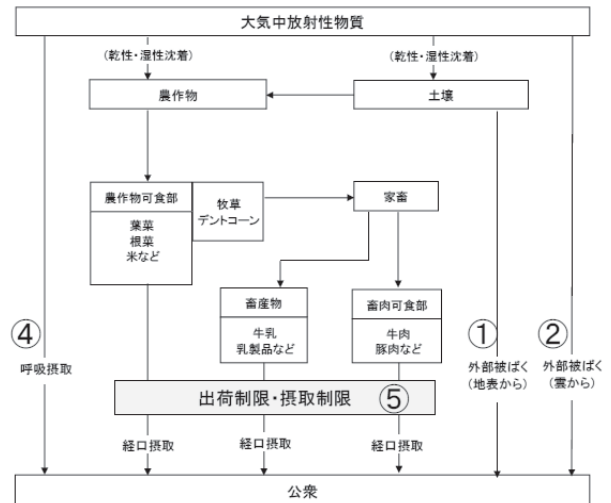
1. 被ばくの観点からの情報整理

福島第一原子力発電所の周辺における環境影響評価のためには、事故後、気圏および水圏に放出された放射性物質の分布情報が不可欠である。その分布情報は、文科省や福島県などから発表されており、その種類は、空間線量率($\mu\text{Sv/y}$)や核種別土壤濃度(Bq/kg)など様々である。ここで、これらの情報を、周辺住民の被ばくの観点で整理し、代表的な被ばく経路について線量を試算し、どの被ばく経路に注目することが重要なかを調べることにする。

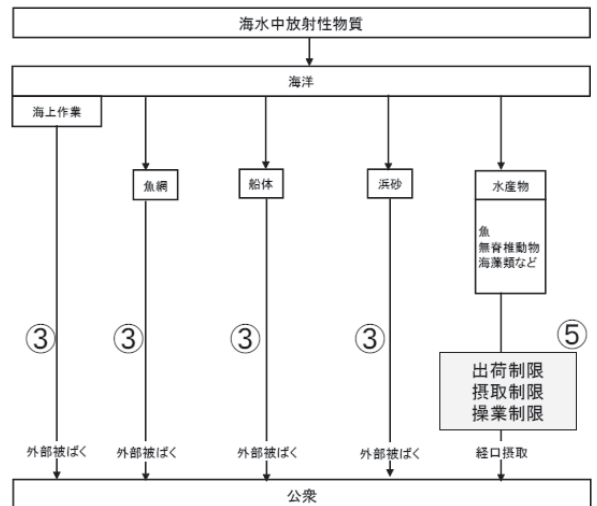
第1図(a), (b)に、原子力安全委員会指針「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について」¹⁾で採用されている被ばく評価経路を示す。このうち、⑤の食品・飲料水・海産物等からの経口摂取は、出荷制限・摂取制限・操業制限等により抑制されるため、今回の評価対象外とした。また、②と④の大気起源の初期の大気中の放射性物質による線量評価は、大気拡散の状況を踏まえた正確な評価が不可欠なため、今回の評価対象外とした。

一方、土壤が風で巻き上げ(再浮遊)られ、これを吸入することによる内部被ばくと幼児が土壤で遊んでいて土壤を経口摂取することによる内部被ばくについては、第1図の原子力安全委員会指針が採用した被ばく経路ではなかったが、評価を試みた。その結果、校庭等の利用判断における暫定的な目安である 20 mSv/y となる地表沈着からの外部被ばくを100%とすると、再浮遊した土壤の吸入摂取による線量は約2~4%、幼児による土壤の経口摂取による線量は $0.04\sim 0.3\%$ であり、大気起源の内部被ばく経路の評価結果は十分小さいことがわかった。

また、③の海洋起源の外部被ばくについては、文科省ホームページの「福島第一原子力発電所周辺の海域モニタリング結果」に基づき、I-131, Cs-134, Cs-137の30 km以遠での5月8日現在の最近1週間程度の平均値をもとに評価を行った。海洋中濃度(Bq/m^3)から線量への換算は、日本原子力学会標準「原子力施設の廃止措置の計画と実施：2006」に拠った。I-131の評価パラメータは同標準になかったため、海浜砂および漁網からの被ばく経路について、遮へい計算コードQAD-CGGP2Rにより実



(a) 大気起源の被ばく経路



(b) 海洋起源の被ばく経路

第1図 大気および海洋起源の放射性物質から受ける一般公衆の被ばく経路

効線量換算係数を算出して評価した。海水面、海中、船体からの被ばく経路については、Cs-134およびCs-137のみについて評価した。その結果、海洋起源の放射性核種による外部被ばくについては、漁業の操業が可能な30 km以遠の最近のモニタリング期間内の平均濃度が、1年間継続するという保守的な仮定のもとで、外部被ばくの合計値は 0.90 mSv/y で、公衆の線量限度を下回る量であった。しかし、その後、さらに汚染水が放出された経緯もあることから、今後も、海洋の十分な監視を継続していくことが重要である。

以上の結果から、住民の被ばく低減の観点から重要な被ばく経路は、初期の大気中の放射性物質(プルーム)の吸入による内部被ばくを除くと、大気起源および海洋起源の外部被ばくであることがわかる。

2. 線量・土壤濃度マップ

次に、重要な被ばく経路である①大気起源で地表沈着

した放射性核種からの外部被ばく線量を検討する。

地表沈着の外部被ばくを評価するためには、線量マップや土壌濃度マップを作成することが必要となる。そこで、まず5月11日までの公開データをもとに、空間線量率($\mu\text{Sv/h}$)、積算等価線量、積算実効線量(mSv)、土壌濃度(Bq/m^2)の情報整理を行った。その結果、次のことが明らかになった。

空間線量率($\mu\text{Sv/h}$)：

- ・空間線量率は、外部被ばく線量を評価する際、最も重要な基礎情報であり、測定点は多いものの、核種別の情報がない。
- ・市町村境界がなく地域名がわからない場合がある。

積算等価線量、積算実効線量(mSv)：

- ・広域の評価結果ではない。

土壌濃度(Bq/m^2)：

- ・測定点は少ないが、核種別の情報があり、土壌濃度から核種別に空間線量率を評価できる。
- ・一方、土壌濃度は、土地の利用形態によって濃度のばらつきが大きく、土壌濃度マップは、外部被ばく線量評価に資する場合には、少量の採取土壌データの地域の代表性の吟味が必要である。

上記のこれまでの線量マップや土壌マップの特徴を考慮した上で、学会からの提言をまとめるための参考にするため、空間線量率マップを作成した。作成にあたっては、次の方針に則った。

- ・福島県に隣接する他県も対象とする
- ・福島県は地域名がわかるよう市町村境界をいれる
- ・高さ1mの空間線量率のデータを基本とし、下記のデータを使用する

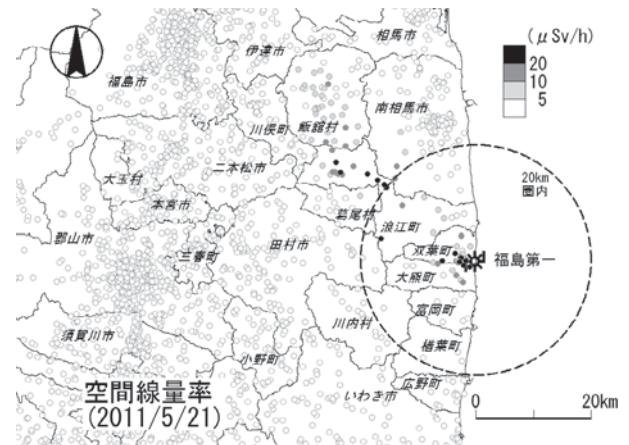
- 1) 文科省 HP の空間線量率と土壌濃度を同地点で測定した結果(4月5～8日(29点), 4月12～16日(38点))
- 2) 文科省 HP の福島第一原子力発電所20 km 圏内の空間放射線量率の測定結果(3月30日～4月2日(50地点))および土壌濃度の測定結果(4月2日(2点))
- 3) 福島県が4月5～7日に実施した小中学校等の校庭の空間線量率の測定結果(1,642地点)および土壌濃度の測定結果(4月5～6日(20点))
- 4) 福島県が4月12～16日, 29日に実施した店舗, 集会場, 生活道路等および高校, 都市公園等の測定結果(計2,693地点)
- 5) 福島隣接県の測定結果(87地点)

- ・核種の空間線量率への寄与分(寄与割合)を評価する
- 6) 上記のデータ1)について、I-131, Cs-134およびCs-137の土壌濃度の測定値と、Cs-136, Te-129m および Te-132の土壌濃度についてはCs-137の土壌濃度と ORIGEN 計算結果に基づいた推定値から、高さ1mの空間線量率に換

算し、各核種の空間線量率への寄与分(寄与割合)を算出する

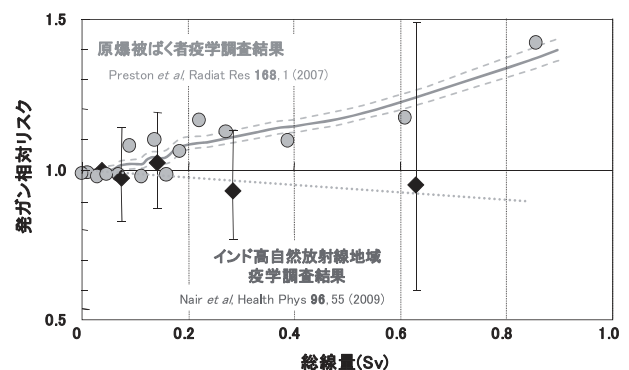
- 7) 土壌濃度から高さ1mの空間線量率への換算は、文部科学省放射能測定シリーズ No.33「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法」を参考にして、土壌密度を $1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ として行う
- 8) 上記6)で得た各地点の核種の空間線量率への寄与割合を、データ2)～5)の各地点の空間線量率のうち、最寄りの空間線量率に対して適用し、核種別に半減期補正を行い、平成23年3月15日～平成24年3月14日までの空間線量率を推定する

上記によって作成した緊急シンポジウム当日の5月21日の空間線量率マップの一部を拡大して第2図に示す。



第2図 5月21日時点の空間線量率マップ

空間線量率の区分に関しては、国連科学委員会(UNSCEAR)²⁾によると、インドのケララ州における地表からの空間線量率はおよそ $0.2 \sim 4 \mu\text{Sv}/\text{h}$ であり、そこに居住する住民の発ガン相対リスクは、第3図に示すように有意な増加を示していないことから、第2図の $5 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 以下の凡例は社会的影響に配慮して白抜きで示した。



第3図 高自然放射線地域住民の健康調査の結果^{3,4)}

3. 情報整理のまとめと提言

住民の被ばくの観点から汚染情報を整理した結果、初

期の大気中の放射性物質(プルーム)の吸入による内部被ばくを除くと、重要な被ばく経路は、大気起源および海洋起源の外部被ばくであった。海洋起源の放射性核種については、今後も継続的なモニタリングが重要であることを提言した。また、公表されたデータをもとに、大気起源で地表沈着した核種からの外部被ばくについて線量マップの一例を示した。これらの一連の作業から、このような線量マップを公開するにあたっては、住民の不安や社会的影響に配慮して、情報の理解のための丁寧な説明を加えるとともに、今後の対応方針等について、あらかじめステークホルダーと十分に協議することが重要であると提言した。

IV. 大気拡散の状況と放出率の推定

本章に関するシンポジウムで述べた具体的内容については、本誌の解説として別途まとめている⁵⁾。ここでは重複を避けるため、データ等の内容についてはその概要を述べるにとどめ、大気経路の汚染状況把握および事故初期での緊急時対応上での問題点と放射線影響分科会からの提言との関連を取り上げる。

1. 大気拡散の概要

大気中に放出された放射性物質の影響は、(1)まだ十分に把握されていない20 km 圏内、(2)北西方向の線量率の高い地域、(3)その他の県内外の広域と大別される。文部科学省、原子力安全委員会等の防災に関わる機関から公開された SPEEDI、WSPEEDI-II の計算および発表者らの独自の大気拡散計算により、放射性物質の拡散状況の概要が以下の通り把握されている。

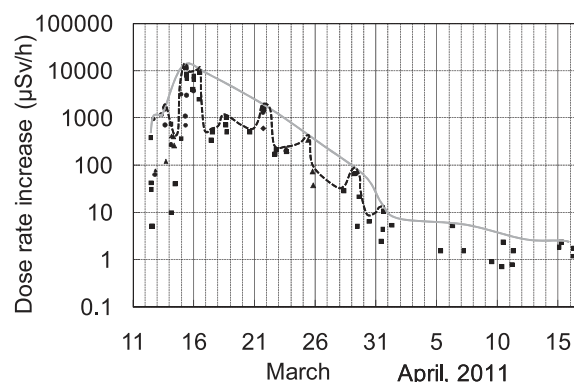
北西方向および福島県中通りへの影響は主に3月15日に放出された放射性物質が同日夜から翌日未明の降水により湿性沈着したものに起因すると考えられる。一方、関東地方等への広域の影響は主に3月15、16日および20～22日に放出された放射性物質が主因で、21、22日の降水により顕著な湿性沈着が起こったものと評価される。これら以降にも継続した放出による影響もあるが、以下で述べるように、3月末以降は放出率が低下し、大きく汚染を拡大したとは考えにくい。

2. 放出率の推定

原子力安全委員会から SPEEDI 等を用いた環境モニタリングデータからの放出率値が公表された。それによると、I-131については3月15日に事故期間中最大の10 PBq/h 程度の放出が数時間あり、その後、数日間は0.1 PBq/h 程度の放出が継続し、3月下旬にかけて最大値から3、4桁小さい値まで減少したとされている。また、3月末に一たん減少した放出率が一時的に0.1 PBq/h 程度まで増加したとされている。15日の放出率が特に大きい時間帯の詳細はいまだ明らかにされていない。Cs-137

放出率についても、対 I-131 比が 1/100～1 の間で変動があるものの、おおむね同様の経過であったと推定されている。

これらの値は、実測で得られた I-131、Cs-137 等の放射性核種の大気中濃度を SPEEDI 等の大気拡散計算で再現するために必要な放出率として逆推定されたものである。大気中濃度の測定値の数が少ないことや大気拡散計算に含まれる仮定および不確かさにより、かなり大雑把な推定とならざるを得ないが、敷地境界での線量率測定結果(第4図)と全体としてはほぼ同様の傾向でありもっともらしい。今後、施設内での事故進展や敷地境界等での線量率測定結果等と総合することによる詳細な検討が必要である。



第4図 敷地境界付近でのプルーム通過時と考えられる時間帯の線量率の上昇幅とその包絡線(東京電力の測定値から抽出)

3. 問題点と提言

オフサイトの緊急時対応については、今後、多角的な検証がなされることになる。ここでは3月末頃までの事故初期についての問題点の一部として、①事故規模把握の遅れと、②事故影響の総体的説明の欠如および情報公開の遅れを指摘する。

敷地境界でのモニタリング等の極めて限定的な情報を除き、施設内の情報、スタックモニタ情報、敷地外の常設モニタリングポスト情報等の大気放出を推定し、環境影響面での事故規模を見積もるために役立つと考えられていた情報が得られていない。特に、緊急時モニタリングによる放射性物質の大気中濃度の測定データが事故発生後1週間以上も得られていないのは大きな欠陥である。

前述の大気拡散の概要は、事故初期から SPEEDI 等により得られており、特に北西方向の汚染域については、放出が大きかったと考えられる3月15日未明には当日午後には北西方向に向かうことが把握されている(現地原子力災害対策本部の計算、第3項⁶⁾)。敷地境界付近での線量率モニタリングから、同日には現に極めて大きな放出があったものと容易に認識されたはずである。また、16日早朝には、北西方向に沈着による汚染が生じて

いることを示す SPEEDI 計算結果が得られている(原子力災害対策本部の計算, 第41項)⁷⁾。これは、北西部で高い線量率が継続していることを示す測定データ(福島県)と符合するもので、得られている情報を総合して環境影響の総体を把握しようとする見方をすれば、概略の状況把握は困難ではない。しかし、このような状況把握がなされたかは不明である。

一方、緊急時対応として、3月12日夕方の段階で20 km 圏内に避難指示が出され、15日午前には20~30 km 範囲に屋内退避が指示されていた。これに対し、SPEEDI 予測結果等の既に得られていた情報に基づく状況把握の上で、何らかの判断がなされたのかも不明である。もし状況把握が適切になされていれば、別途の対策があり得た可能性が否定できない。

さらに、把握されている情報が適宜公開されなかったことも問題点として指摘される。放出率が把握できていない状況では、SPEEDI 予測結果の図のみを公開しても緊急時対策上の意義は少なく、かえって混乱の原因となるという説明には理があり、現状のように単に図のみの公開といった方法は適切ではないのは明らかである。本来は、たとえ概要であっても上記のような各時点で把握されている事故影響に関する総合的状況の一部をなすものとして公開されるべきである。そのような説明を含めた情報公開であれば、危惧される社会的な混乱を上回る便益が得られた可能性もある。事故の環境影響の総体について、影響範囲の住民、農業関係者、自治体等のステークホルダーに、詳細なモニタリング結果が出るのを待たず、過去の各時点において説明がなされるべきであったし、現時点においても直ぐにでもなされるべきと考える。

放射線影響分科会では、上記の認識に基づき、系統的に整理したわかりやすい情報公開のあり方、また SPEEDI 等を最大限利用した適宜な情報公開と防護対策の立案・実施を提言した。

V. おわりに

これらの調査および提言は、事故後の比較的早い段階(4月中旬)に提案されたものを取りまとめたものである。公開できるまでの間に、事故や災害に対する災害対策本部等の対応にも多くの改善が見られたが、特に災害発生直後から1ヶ月程度の初期対応においては教訓とすべき事項が少なくない。本稿にまとめられたものはその教訓の一端に過ぎない。当分科会では、事故と災害の直接の被害者である地域住民の皆様が安心して暮らせる生活環境に早期に復帰することを目指して、今後も災害対応の現状の把握とその改善のための努力を継続する必要があると考えている。分科会の活動に対して、関係各方面からの積極的なご助言、ご意見を頂ければと期待している。

—参考資料—

- 1) 「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について」, 原子力安全委員会了承, (平成元年3月27日(一部改訂:平成13年3月29日)).
- 2) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, UNSCEAR 2000 Report Vol. I, (2000).
- 3) D. L. Preston, *et al.*, "Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958-1998", *Radiat. Res.*, **68**, 1-64 (2007).
- 4) Raghu Ram K. Nair, *et al.*, "Background Radiation and Cancer Incidence in Kerala, India-Karunagappally Cohort Study", *Health Phys.*, **96**[1], 55-66(2009).
- 5) 山澤弘実, 平尾茂一, "福島第一原発事故の大気を介した環境影響", 日本原子力学会誌, **53**[7], 15-19(2011).
- 6) 原子力安全・保安院,
http://www.nisa.meti.go.jp/earthquake/speedi/ofc/speedi_ofc_index.html
- 7) 原子力安全・保安院,
http://www.mext.go.jp/a_menu/saigaijohou/syousai/1305747.htm

(執筆担当: 占部逸正(福山大学),
服部隆利(電力中央研究所), 山澤弘実(名古屋大学))

原子力推進を堅持する米仏、撤退するドイツ 福島事故後、情報共有と教訓反映を図る国際機関と欧米

日本原子力研究開発機構 北村 隆文、花井 祐、佐藤 一憲

欧米からは遠い国である日本。そこで起きた福島第一原子力発電所の事故はまたたく間に世界中の国々に伝えられ、爆発の映像は各国で繰り返し放映された。この事故は原子力政策をめぐってさまざまな議論を巻き起こしたが、米国やフランスが原子力推進姿勢を堅持する一方で、ドイツやイタリアは原子力からの撤退を明確にするなど、各国の現実的な対応は分かれた。本稿では国際機関やフランス、米国などを中心に、同事故への対応や動向を紹介する。

I. 事故からの教訓反映を図る IAEA と欧米

福島第一原子力発電所で原子力災害が発生すると、国際原子力機関 (IAEA) や欧州連合 (EU) は事故に関する情報共有と、事故から得られる教訓の反映を積極的に行いはじめた。国際機関や各国が事故後にとった対応と、この事故が将来に向けてのエネルギーの確保の方針にどのような影響を与えていくかについて述べる。

1. 国際原子力機関の取組み

(1) 頻繁に行われたブリーフィング

天野之弥 IAEA 事務局長は151の加盟国と各国プレスに向けて、事故発生の日翌週15日から9日間連続、事故状況とその進展についてブリーフィングしている。技術的説明と質疑応答が主で、その数は6月中旬までに10数回に及んだ。アンドリュウ科学・技術特別補佐官、フロリ原子力安全・セキュリティ (NSS) 局長が議長となり、同局の原子力施設安全部や事故・緊急時センター (IEC: Incident and Emergency Centre)、さらに原子力科学・応用部やモナコの海洋研究所の担当部長クラスが担当している。加盟国への説明後は、同じプレゼンテーション資料で各国プレスにも説明と質疑応答を実施し、最新情報を基にIAEAの体制を総動員して、時間とともに変化していく事態と日本の対応の状況を世界に向けて発信してきた。

説明のもととなる情報は、原子力安全・保安院から

Effect of the Fukushima accident to Europe and the United States—The United States and France firmly keep nuclear power generation and Germany decided to gradually exit. International organizations promote sharing of information and lessons from Fukushima : Takafumi KITAMURA, Tasuku HANAI, Ikken SATO.

(2011年 6月29日 受理)

時々刻々、伝達される情報であり、IECがその受け皿として24時間体制で機能している。ちなみに、多くの情報が日本語で来るため、IAEAで働く日本人職員は担当職務に関係なく、英語への資料化に協力されたとのことである。

説明は、被災した6つの原子炉と使用済燃料プールの状況、IAEAモニタリングチームおよび日本政府による空間と地表面の放射線測定状況、食物・飲料水の汚染有無と出荷・流通制限の状況、福島沖海水の汚染濃度や大気や海洋への拡散シミュレーションの紹介などから構成されている。これらの情報はIECがIAEAのホームページに開設した「福島原子力事故アップデートログ」に掲示されている。IECは、原子力事故早期通報条約に基づくIAEAの役割の一つとして、加盟国の要請に応じて迅速な支援を調整する役割を有している。以下はIAEAでの各国の関心事を大まかに分類したものである。

- A. 事故の初期段階の進展に関するもの
- B. 使用済燃料プールの状況に関するもの
- C. 水素爆発とその後の状態に関するもの
- D. 放射能の拡散に関するもの
- E. IAEAのモニタリングに関するもの
- F. 食物汚染に関するもの
- G. 被ばくに関するもの
- H. 電源喪失に関するもの
- I. 事故後のマネジメントに関するもの

起こった事象に対する各国の関心が非常に高いのは、現状がより正確に把握されているのかとの問いともいえる。さらに、そのことにより今後自国への影響がどのようになるかとの問いでもあると推定される。

(2) 6月下旬に閣僚会議を開催

天野事務局長の提唱により6月20～24日に、各国の閣僚級が参加して「原子力安全に関するIAEA閣僚会議」

が実施される。全体セッションで、福島第一事故を踏まえた自国の原子力利用の状況や将来に向けた政策等について、各国閣僚が声明を述べる予定である。さらに3つのワーキングセッション(①福島事故の予備的評価と安全向上に向けた行動、②緊急時の準備と対応、③全世界の原子力安全枠組み)が開催される。

IAEAは本会議の論点提供のため、5月下旬に福島第一および第二発電所等にファクトファインディングチームを送っており、各国の専門家の目から見た所見と教訓等を取りまとめて報告する。我が国には、事実関係の詳細報告が期待されており、事故の発生・進展に関する事実経緯、原子力災害対応や環境への放射性物質の放出、これに伴う被ばく、さらに得られている教訓等について報告を行う。

本会議には、原子力発電の利用に関してそれぞれの事情が異なる諸国が一堂に会するため、どのような結論が導き出されるか予断は許されないが、福島第一原子力発電所での原子力災害を事実として踏まえての議論となる。そこには、原子力発電の潜在的危険性がゆえに利用に消極的な国から、原子力発電の持つ利点がゆえに積極的な国までの、各国の立場の違いを横方向分布とすれば、安全設計基準、安全規制体系、緊急時対応措置、それぞれの現状、これを踏まえた改善・向上の到達目標という縦方向分布がある。これに加えて、各国の原子力発電に関する科学的・技術的な知見と熟達度の差異が全体的に存在するという、複雑な様相の中の討議となると考えられる。

なかでもIAEAの大きな役割の一つである安全基準シリーズの該当文書のレビューやIAEAの役割の強化等が、論議の一つとなると予想される。

2. 欧州連合はストレステストを実施

欧州原子力安全規制機関グループ(ENSREG)によれば、事故発生の2日後に、政治家から欧州の原子力発電所は安全かどうかを決定するとの主旨で、ストレステストの実施が創案された。しかしながらそこでは、どのようなテストであるべきかのアイデアはなかった。ちなみに、ストレステストの用語は金融市場の不測の事態に備える管理手法である。

そのストレステスト実施は、15日のEUエネルギー委員会にて多数の支持を獲得。EU各国のエネルギー大臣は21日の声明でストレステストを実施すべきだとし、ENSREGと西欧原子力規制者会議(WENRA)が主導的立場を取ることとなった。さらに25日に行われた欧州理事会(European Council)の要請に基づき、ENSREGと欧州委員会(European Commission)が検討を進めた。

その結果、福島第一原子力発電所事故で得られた教訓に照らして、欧州の原子力発電所を対象とする“包括的かつ透明性のあるリスクと安全の評価(comprehensive

and transparent risk and safety assessment “ストレステスト”)を行うことで24日に合意した。

25日付けのシュトリター ENSREG 議長の声明によれば、合意された文書の付録Iは、欧州の「ストレステスト」の仕様(EU “Stress tests” specifications)を定め、付録IIは各国の原子力安全当局が引続き本プロセスに関与し、予防、管理および緩和の観点で全体的に筋の通った対応(overall coherent response)を促進し、どのような推奨も ENSREG 内で共有することや報告書にも記述することを要求している。声明で示されている合意の要点は以下のものである。

- (1) 福島事故に鑑みて、各国の事業者による評価(規制当局の監督の下、遅くとも6月1日より開始)は、WENRA がまとめた技術仕様に基づく。これは、地震と津波のような異例のトリガー事象と、シビアアクシデントマネジメントを要するような安全機能の複合的喪失に潜在的に至るその他の起因(initiating)事象の結果を含む。
- (2) セキュリティへの脅威のリスクは、ENSREG への負託ではなく、悪意・テロでの事象の予防と対応は種々の当局が絡むので、理事会は加盟国とEU委員会が集う特定のWGを設置し、本件を扱うことを提案する。
- (3) 上記(1)と(2)はストレステストに寄与するものである。

また技術仕様によれば、ストレステストは「福島で起こった事象=プラント安全機能を脅かし(challenging)、さらにシビアアクシデントにつながるような厳しい自然事象=の見地からの、原子力発電プラントが持つ安全マージンについての対象を絞った再評価(targeted reassessment)」と定義された。

ストレステストは、各国の進捗報告の提出期限が9月15日、最終報告が12月31日である。12月9日開催の会合で、委員会は欧州理事会に対して進捗状況を報告し、来年6月には最終的な報告を行う。短期間の評価であるため、工学的判断も使用できるとしている。

原子力発電所を現在運転している14カ国の報告書は、参加を表明している隣国も入ったピアレビューに諮られ、合意された手法により結論が導かれる。

ピアレビューのチームの編成は7名で、議長1名、報告者1名、常時メンバー2名、EC委員(含む専門家)3名で構成される。常時メンバー以外は自国施設の評価には加わらない。評価の際には厳正と客観性を期すために、各国はチーム員の人物チェックを条件として、必要なすべての情報を提供することとなっている。レビューは来年4月末までに終える。透明性を確保するため、報告書はENSREGの原則に従って、他の利益、特にセキュリティを損なわない範囲で公開される。

福島事故で起こったことを考慮して、ストレステスト

には次のような技術的なスコープが定義されている。

- (a) 起因事象(地震, 洪水)
- (b) プラントサイトで考え得るいかなる起因事象に端を発する安全機能の結果的な喪失(全交流電源喪失(SBO)を含む電源喪失, 最終除熱源(UHS)喪失, 以上の組合せ)
- (c) シビアアクシデントマネジメントの課題(炉心冷却機能喪失の防止方策および冷却機能喪失時の対応方策, 使用済燃料プールの冷却機能喪失の防止方策および冷却機能喪失時の対応方策, 閉じ込め健全性喪失の防止方策および健全性喪失時の対応方策)

(b)と(c)は津波に限らず, 洪水や悪天候も含まれる。また配電網の不安定, 森林火災や航空機落下などの, 間接的な起因事象で上記のような事象が誘発される場合も, 評価の対象となる。(c)については, 被許可者の準備に焦点があてられ, 安全機能維持のためのサイト外支援も含まれるが, 住民保護のための緊急時措置はストレステストの範囲外とする。

ここには, ストレステストで行うべき事項が簡明に仕様として記述されている。わかりやすく言えば, 原子力発電所で深層防護として講じられている数々の安全措置や対策がすべて, 機能しなかった場合でのプラントの性能を評価することが求められている。また, 付録-IIが作成された背景は, 前述(2)にもあるように, 悪意やテロを厳しい自然事象と同等に扱うべきかという議論が今後必要であると認識されたため, このような扱いとなったと考えられる。

3. ドイツは原子力から撤退へ

原子力発電を実施する東欧等諸国には, ブルガリア, チェコ, スロバキア, ルーマニア, ハンガリー, スロベニア, リトアニア, ウクライナがあり, 現状で原子力発電大国であるロシアやドイツなどがこの地域に存在する。このうちドイツは6月, 原子力からの撤退を2022年には完了する旨の政府決定をしているが, 他の諸国はむしろ原子力を今後とも必要とするとの立場を取っている。

一方, 各国レベルでは, 福島事故が原子力発電のイメージに対して消極的な影を落としていることは否定できず, これらの国のみならず, 世界各国の原子力発電利用に関する当面の動向からは目が離せない。

II. 原子力推進姿勢を堅持するフランス

原子力大国, フランス, 実に75%以上を原子力が賄っており, 国のエネルギー政策の柱となっている。3月に起きた福島第一原子力発電所の事故は, フランスからすれば遠い国で起こった出来事だ。けれども政府は, この事故が同国のエネルギー政策に大きな影響を与えかねないと判断。事故発生直後から大統領をはじめ複数の大臣が, この事故によっても原子力を進める政策に変わり

ないことを国民に訴え続けている。一方で世論調査の結果は, 国民の間に「原子力を段階的に廃止する」意見が, 次第に増えていることを示している。今後の原子力政策の行方を左右する大統領選挙は, 来年4月から5月にかけて行われる。

1. 大統領の確たる姿勢で, 原子力政策の議論は行われず

3月11日に, 日本のFukushimaで大地震が発生。その直後からフランスのメディアは, ほぼリアルタイムで放送を流し始めた。内容は時間が経つにつれ, しだいに原子力発電所の事故に関するものが増加していく。翌12日午前7時36分(フランス時間)に起こった1号機の水素爆発は衝撃的で, テレビ局は何度も繰り返して爆発の映像を流し続けた。

水素爆発が起こったその日, 政府ではエリック・ベッソン産業エネルギー相, ナタリー・コシウスコ・モリゼ環境相が記者会見を実施し, 海外県を含むフランス国内で, 現時点で放射能による影響が出ていないことを強調した。同席したフランス原子力安全局(ASN)のアンドレ・クロード・ラコスト局長は今後, 大気中の放射能の有無の観測を強化していくことを発表し, 国民に十分な情報伝達を行うことを約束した。

14日になると, ドイツやスイスから原子力政策の変更を示唆するニュースが流れ始める。野党からは原子力からの撤退, 公開での議論, 国民投票の実施, 全原子炉の監査など様々な要求や提案が出され始めた。そんななかでフランスの大統領, 首相, 大臣らは, フランスが原子力利用を推進する政策は不変であるとの発言を繰り返した。

翌15日, 政府は国内すべての原子力施設の監査を行うことを表明した。野党である社会党からの提案を受け入れたもので, 隣国の原子力からの撤退政策が, 国内に影響しないように最大限の努力を行う姿勢で状況を見守ったといえる。

そして地震発生から5日後の16日。大統領は, 原子力政策を維持するコメントを発表する。しかし, このコメントを最後に, 表立った政治の場での原子力の話題は, 急速に影を潜める。(第1表)

なぜか。その第1の理由は, 大統領, 首相, 大臣が原子力推進の姿勢を堅持する発言を繰り返し, 福島の教訓をもとにフランス国内にある全原子力発電所の監査を行うことで, 政策に一つの区切りがついたためだ。第2の理由は, 野党第一党である社会党の党としての結束力が弱かったため。社会党には原子力政策に対して様々な意見を持つ議員が集まっており, 事故を踏まえた党としての原子力政策を強く打ち出すことができなかった。第3の理由は, 日本での被災状況に重大な変化が見られなくなったこと。第4の理由は, 中東民主化運動がリビアに

第1表 地震発生後の政府を中心とした動き

月日	動 き	日本, フランスの近隣諸国の動き
3月 11日(金)		・地震発生(フランス時間6:36頃)
12日(土)	<ul style="list-style-type: none"> ・ベッソン産業エネルギー相, モリゼ環境相が, 記者会見の席で現段階においてニューカレドニアを含めたフランスの海外県, 本土で, 福島第一発電所事故が原因となる放射能雲を心配する必要はないと述べる。 ・ラコスト ASN 局長, ビュザン IRSN 局長が, 記者会見で, フランスは大気中の放射能検査を強化する措置を取ると述べる。 	・1号機で水素爆発(フランス時間7:36)
13日(日)	<ul style="list-style-type: none"> ・外務省が危機対策室を立ち上げる。日本への渡航自粛を勧告する。 ・首相府は, 記者コミュニケで, 「長年に渡り, フランスは原子力発電所の建設と運営で常に安全を優先課題としてきた。日本で起きている事象から有益な情報を得る。」と発表する。 	
14日(月)	<ul style="list-style-type: none"> ・サルコジ大統領は, 与党(UMP:国民運動連合)議員の前で, フランスの原子炉は安全性が高いことを強調し, 原子力利用から撤退することは問題外であると発言する。 ・オプリー第一書記(PS:社会党)は原子力発電所の監査と公開協議の開催を提案する。 ・セシル・デフロ書記(EEV:ヨーロッパ環境緑の党)は, 原子力からの撤退の議論と代替エネルギーについて公開協議と国民投票の実施を提案する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・3号機で水素爆発(フランス時間3:01) ・ドイツ, 原子炉の耐用年数延長計画を3ヵ月凍結することを言及する。 ・スイス, 原子炉の更新計画の凍結について言及する。
15日(火)	<ul style="list-style-type: none"> ・首相府で, フィヨン首相, ゲアン内務大臣, ベッソン相, モリゼ相らが緊急招集会議を行う。モリゼ相は, 状況を「非常に心配」と述べる。 ・フィヨン首相は, 下院での答弁の機会に福島原子力発電所事故についての見解を述べる。放射能防御の専門家を日本に派遣すること, 国内の全58基の原子炉について監査を行うことを述べ, 原子力エネルギーに将来がないという意見はおかしいと発言する。 ・大統領は, よそで生じたことに学び, 国民に原子力の安全を保証することが肝要であると述べる。 ・EDF が人的および物的に支援する準備を行っていること, またアレバ社が事故対策用の物品を日本に輸送中であることを発表する。 	
16日(水)	<ul style="list-style-type: none"> ・大統領府は, 大統領の発言として, 1960年代にフランスが原子力エネルギーを選択したことは適切であったと述べ, 原子力政策の変更を否定する。 ・パロワン報道官は, 環境派政党が要求している国民的議論や国民投票を行う考えはなく, 発電所の監査や放射線検査の実施で国民の懸念を払しょくする考えを示す。 ・Opecst(科学技術の評価のための議会オフィス)の呼びかけで, ベッソン, モリゼの両相の参加の下, CEA, ASN, EDF, アレバ社等の原子力関係機関代表が国会で対策会議を行う。 ・夜, 大統領は, 状況は「極めて重大」と発言する。モリゼ相は, 「最悪のシナリオは可能であるだけでなく, 可能性が高い」と述べる。 	
17~31日	<ul style="list-style-type: none"> ・20日, 27日とフランス国内で地方圏選挙が行われる。原子力利用は全国的な大きな争点にならずも, 大統領の支援母体である国民運動連合は苦戦する。 ・ドイツとの国境近くのフェッセンハイム原子力発電所周辺で約1万人が抗議集会(20日:反核連合 ATPN 主催) ・パリ国会前で約1,000人が抗議集会(20日:脱原子力の会主催) ・福島第一発電所起源と考えられる極微量の放射性核種(ヨウ素131)を, フランス国内(ピュイ・ド・ドーム県)で採取した大気試料で確認する(24日) ・大統領が, 事故後, 最初の外国の国家元首として日本に向けて出発する。(31日) 	・イタリア, 原子力発電再開計画を1年間停止することを閣議決定する。(23日)
4~6月	<ul style="list-style-type: none"> ・日本への渡航自粛を解除する。(4月16日) ・チェルノブイリ事故25周年の集会在, フランスの各地の原子力発電所周辺で行われる。(4月25日) ・サルコジ大統領が, グリンピースなどの環境保護団体の代表らと会談し, フランスが原子力から撤退する考えがないことを確認する。(5月2日) ・G8 が開催され, 原子力安全がテーマの一つになる。(5月27, 28日) 	<ul style="list-style-type: none"> ・東京電力が終息に向けた工程表を発表する。(4月17日) ・米海軍が日本から引き上げを行う。(5月3日) ・ドイツの連立与党, すべての原子力発電所を2022年までに停止することで合意する。(5月29日) ・イタリアで, 国民投票が行われ, 原子力発電利用の再開を否決する。(6月13日)

飛び火し、軍事情勢がにわかには緊迫したため。チュニジアで始まった、いわゆる「アラブの春」と呼ばれる運動が拡大し、欧州連合や米、アラブ連盟はリビアへの空爆の協議を始め、フランス空軍は19日にリビア空爆を始めた。さらに4月4日になると、フランスは旧植民地国であるアフリカのコートジボワールに軍事介入を始めた。

なお主要紙は、地震が発生した11日の夕刊から18日までの間、ほぼすべてが東日本大震災に関連したニュースを1面トップに掲載した。けれども19日を境に、それ以降は中東やアフリカ情勢に関するニュースがトップを占めるようになる。人々の関心は遠い国の原子力発電所の事故から、自国にとって身近な話題へと移っていったのである。

2. 建設中のプロジェクトは継続、原子炉の寿命延長検査結果発表は延期に

フランスには、現在58基の原子力発電所があり、電力生産で原子力発電が占める割合は75.2%(2009年:WNA)となっている。この比率は、隣国ドイツの28.3%などと比べても格段に高い。テレビ・ラジオは、フランスの原子力について報道する際に、たびたび枕言葉として、「世界一原子力化した国」という言葉を使う。

政府は、風力発電などの再生可能エネルギーの開発に力を入れつつも、新規原子炉の建設プロジェクトも進めており、現在、国内には2つの新規原子炉の建設プロジェクトが進んでいる。

フランマンビル3号機(出力160万kW)は、フランス北部にあるシェルブール市の南西約20kmに位置し、フランス国内で最初に建設されているEPR(欧州加圧水型炉)である。建設工事は2007年に始められ、運転開始は2014年とされている。ラコストASN局長は福島第一原子力発電所事故発生後の3月30日、国会の科学技術選択評価局(OPECST)に対し、建設の一時中断の可能性を示唆する発言をしたが、建設は結局、中断されることなく、現在(6月中旬)も進められている。またフランス北部のディップ市の東部で計画が進められているパンリ3号機は、当初、意見公聴の手続きが6月1日から7月15日に実施される予定だった。ところが5月31日になると、パンリ発電所の地方委員会委員長が手続きの開始延期を発表した。その背景には、福島第一原子力発電所事故の影響があると見られる。

フランス東部にあるフェッセンハイム原子力発電所は、ドイツの国境まで約1.5km、スイスのバーゼル市からは35kmに立地し、1977年から稼働を始めている。同発電所は、フランス国内で初期に建設された原子力発電所であり、また地震発生地帯に位置していることから、福島第一原子力発電所事故発生後に閉鎖を求める動きが活発になっている。3月20日には発電所近くで開かれた抗議集会に、運転停止を求める約1,000人(主催者発

表)が集まった。また3月23日にはスイス地方政府(バーゼル=シュタット準州とバーゼル=ラント準州)が、3月30日にはスイス・ジュラ州が同発電所の閉鎖を要求し、4月6日には、欧州議会の「緑の党」に所属する議員が、発電所の解体を欧州のパイロットプロジェクトに位置付けることを提案している。

フェッセンハイム原子力発電所1号機は稼働開始後30年が経過したため、2009年10月17日から2010年3月14日まで定期検査を受検している。その結果は当初、4月中にASNから出される予定だった。この受検結果の公表は、福島第一原子力発電所事故後に行うフランス当局の最初の「踏み絵」として注目されていた。けれども同発電所の所長は4月29日、1号機の運転継続に関するASNの見解は夏までに示されるとして、決定の延期を公表した。

3. 原子力政策の議論は、2012年の大統領選へ

スイス政府は5月25日、今後、既存原子炉の更新を行わず、2034年までに全廃するという閣議決定を行った。またドイツのメルケル首相は5月31日、2022年までに国内の全原子力発電所を停止するという政策に連立与党が合意したと発表している。

ドイツの原子力からの撤退のニュースは、フランス国内においても大きく報道された。これをうけてベッソンエネルギー産業相は、ドイツの動きは世界の流れではなく、米国や英国を始め日本を含めた多くの国々が、福島第一原子力発電所事故後も原子力を推進する政策を変えていないとコメントした。またフィヨン首相もラジオのインタビューに答えて、京都議定書の約束を果たす現実的な方法は原子力利用であると述べ、国内世論への影響を抑えるための発言を行っている。

事故発生直後の3月15~17日にIFOP社が行った世論調査結果によると、フランスでは原子力の段階的廃止に賛成する意見が51%だった。ところがドイツが原子力から撤退するという連立与党の合意を発表した直後の6月2~3日に、同社が行った世論調査では、段階的廃止に賛成の意見が62%に上昇し、段階的廃止派が少なからず増えていることがうかがえる。

サルコジ大統領は国のエネルギー独立、二酸化炭素排出削減を考えた場合に、原子力発電は重要であると強調している。同氏が2012年5月までの任期中に、現在の原子力政策を変えることは考えられず、原子力政策の議論は、次期大統領選挙まで持ち越された感がある。

大統領選挙については、ここでは深入りしないが、社会党は4月2日、次期大統領選のためのmanifestoを公表している。その中でエネルギー政策については、全30項目のうち10番目に、「石油、原子力依存からの脱却、省エネの推進と再生エネルギーの強化」と説明している。社会党からの統一候補者は、大統領選挙レースで有利な位置にいるとの世論調査もあり、今後のフランスの

第2表 2012年の大統領選に出馬が予想される候補者の原子力に関する発言

ニコラ・サルコジ (現大統領)	エネルギー独立、二酸化炭素削減の観点から、原子力利用は不可欠と強調する。福島第一原子力発電所の事故を教訓として多くを学び、フランス国民に原子力発電の安全を保障することが肝要と説明する。
ジョン・ルイ・ボルロー (急進党：元国民運動連合所属)	フィヨン内閣で4年間閣僚を務める。2020年までに再生可能エネルギーの比率を23%まで高め、結果的に原子力依存を下げると発言している。
マルティヌス・オプリー (社会党第一書記)	一朝一夕で原子力から撤退することはできないことは周知であり、20年か30年は必要となるだろう、また将来的には原子力依存の割合を変えて、ミックスエネルギー体制を作り上げていかなければならないと発言している。
フランソワ・オランド (社会党：前同党第一書記)	福島第一原子力発電所の事故発生以前は、原子力推進の立場を取り、「社会党からの大統領候補者は原子力からの撤退を主張すべきでない」と発言していたが、事故発生後はドイツをモデルに、15年間(2025年まで)で原子力への依存比率を75%から50%まで下げると発言している。
ジャン・リュック・メラシオン (左の党：元社会党所属)	原子力からの撤退は必要不可欠であり、時間はかかるかもしれないが、今こそ決断すべきと発言している。
ニコラ・ユロ (元テレビ司会者)	氏が設立したニコラ基金は、エネルギーの節約と温暖化などの気候の変化に重点を置き、原子力利用に対しては長い間、曖昧な姿勢をとってきた。チェルノブイリ原子力発電所事故の25周年の集会の際に、原子力からの撤退を支持する宣言を行う。ヨーロッパ環境緑の党からの出馬を模索中である。
エヴァ・ジョリイ (EELV：ヨーロッパ環境緑の党)	段階的な原子力撤退に関するディベートの実施を主張している。省エネ実施に加え、再生可能エネルギーに巨額の投資をすれば20年後には原子力から撤退できると主張する。
ドミニク・ド・ビルバン (団結共和党党首)	原子力依存の割合を現在の8割から将来的には5割にすべきと発言している。エネルギー方針検討会(グルネル会議)の実施、国民投票の実施を考えている。
マリヌ・ル・ペン (FN：国民戦線)	事故直後は、国民戦線が歩んできた伝統的な原子力推進の姿勢を守り、石油資源の枯渇が見えている現在は、逆に原子力事業を強化すべきと主張していた。しかしながら、6月14日のフランスアンテルラジオ局のインタビューでは、原子力からの撤退政策を進め、再生可能エネルギー研究に資金を投入すべきと発言している。

原子力政策は、2012年に節目を迎えることが考えられる。(第2表)

ちなみに大統領選挙は、4月22日に第1回投票が行われ、最上位者が過半数を得票できなかった場合には、上位2名による決選投票が5月6日に行われる。

Ⅲ. 米国、推進姿勢に変化なし

1. テロ対応等で全交流電源喪失は織り込み済み

温室効果ガス排出削減を目標に掲げるオバマ政権は、原子力を太陽エネルギーや風力と並ぶクリーンエネルギーと位置付け、2011年1月25日に行った一般教書演説では2035年までに「電力供給の80%を原子力を含むクリーンエネルギーで賄う」とする新しい目標を掲げた。原子力を重要なエネルギー源と考えこれを推進していくとのオバマ大統領の立場は、福島第一原子力発電所事故の前後で変わることがなく、事故直後の3月14日には大統領報道官を通じ、今後とも原子力を米国のエネルギーミックスの一部として推進することを表明した。

一方、NRC(米原子力規制委員会)やDOE(米エネルギー省)が事故直後から日本に専門家を送り、原子力安全・保安院などと情報を共有して事故対応を支援したことはよく知られているが、この間の日本側から米国側への情報開示の透明性について、多くのNRCやDOEの

スタッフが「極めてよかった」と述べている。このようにして情報収集を進めたNRCは事故発生から1週間後の3月18日、米国内の全原子力発電所運転事業者および新規原子力発電所建設申請事業者に対して情報文書(Information Notice)を渡し、福島第一原子力発電所事故状況の概要を伝えるとともに、2001年の9/11テロを踏まえて米国内の原子力発電所運転者に対して実施していた指示の内容を再周知した。

米国では1988年に全交流電源喪失事象(SBO)に対処するためのルールが制定されており、9/11テロを踏まえた指示にはSBOの影響緩和を目的とした設計や対応の考え方も含まれている。その後NRCは3月23日、福島第一原子力発電所事故を受け、国内の原子力発電所の安全性レビューと必要に応じて改善勧告を行うためのタスクフォース(TF)を新たに結成し、30日ごとの報告を含む90日間の短期レビューおよびその後6ヵ月間の長期レビューを行うことを決定した。

このTFにおける短期レビューの途中経過は5月12日に公開され、「これまでのところ、米国内の原子力発電所について、継続的な安全と緊急時計画に対する信頼を損なうような問題は明らかにされていない」と発表された。その一方で「安全性をさらに高める知見の取得と勧告が今後なされるものと予測している」とした。なお、

同日行われた本 TF から 5 人の NRC 委員への進捗報告の冒頭、W. マグウッド委員は NRC の有する高い専門知識に言及し、米国における原子力安全規制の信頼性を強調したが、これは米国の原子力安全分野における自信を示すものである。

このように NRC の対応は、米国内の原子力発電所が SBO ルールや 9/11 テロを受けた指示への対策が既に取られていることを背景として、従来の規制内容を基本とし、TF のレビュー結果を踏まえて更なる安全性の向上を検討するとの方針を早期の段階で定め、これに基づいて進められている。

この間の産業界の動きには強い危機感を背景とした積極的な活動が見られる。福島第一原子力発電所事故の直後には事故のリスクを大きく伝える傾向が多くメディアに見られた。しかし原子力エネルギー協会 (NEI) やこれを構成する企業が福島第一原子力発電所事故の状況についての積極的な情報収集と発信を行い、事実に基づいた客観的な情報を一般民衆に提供することにより、事故の状況や影響を冷静に伝えることに大きく貢献した。

ただし、産業界では現実的には安全対策の強化が今後必要になり、建設等のコストが上昇するとの見方がある。NRG エナジー社はサウステキサスプロジェクト 3, 4 号機建設計画に更なる投資はしないことを決定。またテネシー峡谷開発公社は、ベルフォンテ 1 号機の完成に向けた建設再開計画決定を延期した。

このような逆風の中、米国原子力産業界では 6 月 9 日、福島第一原子力発電所事故への対応を組織化し強化するための新機構を発足させた。これは NEI, 原子力発電運転協会 (INPO) および電力研究所 (EPRI) が中心となり、米国における既存原子力発電所の性能維持、福島第一原子力発電所事故の教訓の発信、世界的な原子力事故への対応能力強化などの実現に向けて独自に展開するものであり、米国における原子力産業界の強い危機感を反映したものである。

2. 事故後も米国人の意識に大きな変化なし

福島第一原子力発電所事故の後、一般の米国人の意識調査が数多く実施されている。その結果によると、事故によって原子力発電への支持の低下は見られるものの、ほとんどの調査において原子力発電の必要性和今後の継続利用を肯定する意見が多数意見となっている。このような原子力に対する米国人の許容性は世界各国の同様の調査結果と比較しても顕著に高く、事故の影響によってそれほど大きな変化を生じていない。

一方、事故を契機として、原子力に反対の立場での活動も活発化している。従来から原子力に否定的意見を持つ E. マーキー下院議員 (民主、マサチューセッツ) は特に活発に活動しており、大規模な自然災害に対する原子力発電所の安全性確認、規制強化などを求めたオバマ大

統領への書簡提出、議会での公聴会の開催要求、福島第一原子力発電所事故の教訓に関する見直しが完了するまで NRC の許認可を停止する法案の提出などを行っている。しかしながら、このような反原子力の動きは原子力政策の根幹には及んでいない現状にある。

このような状況にあり、総じて見ると、米国においては福島第一原子力発電所事故の後も原子力発電の継続を支持する意見が多数を占めており、オバマ政権、共和党議員および原子力を支持する民主党議員、並びに産業界は今後も原子力を推進する意向である。このような米国の状況を支える民意の背景には、原子力開発のパイオニアとしての米国の技術力並びに 9/11 テロを踏まえた独自の安全対策に対する信頼感、NEI の擁する原子力専門家の効果的な情報発信、エネルギー・セキュリティに対する危機感、米国土の広大さ、そして強い反原子力政治勢力の不在があるものと考えられる。

このほか、今回の事故は米国における放射性廃棄物の長期的保管や最終処分に対する議論を加速させる側面を持つ。事故の直後から米国では使用済燃料の貯蔵プールの状況に対する懸念が、限られた情報の中でのヤッコ NRC 委員長の過剰な懸念の指摘などによってクローズアップされ、結果として使用済燃料の貯蔵プールでの保管に問題意識がもたれるようになった。

このような中、4 月 26 日に公開されたマサチューセッツ工科大学 (MIT) のグループによるレポート“核燃料サイクルの将来”は、使用済燃料の乾式キャスクによる集中中間貯蔵および放射性廃棄物処分の長期戦略の重要性を指摘している。また、7 月にはオバマ大統領の指示で使用済燃料の処分政策を検討しているブルーリボン委員会も同様の戦略に関わる中間答申を行う予定である。これらの報告や答申は今後の議論を促進すると考えられるものの、長期戦略について短期的な前進が期待できる状況にはない。

著者紹介



北村隆文 (きたむら・たかふみ)
日本原子力研究開発機構
ウィーン事務所長



花井 祐 (はない・たすく)
日本原子力研究開発機構
パリ事務所長



佐藤一憲 (さとう・いっけん)
日本原子力研究開発機構
ワシントン事務所長

連載講座「材料が支える原子力システム」の 開始にあたって



四竈 樹男(しかま・たつお)

東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター長・教授，
原子力学会材料部会長

原子炉や再処理プラントなどの原子力システムは、様々な分野の知識やノウハウを結集した総合プラントである。その中でも、システムを構成している各種材料は、その用途に応じて取捨選択されているだけでなく、原子力プラントとして、格別の安全性を確保するために、特別な規格、規制の元に使用されている。

今回から始まる連載講座では、原子力プラントで用いられている原子力材料について、それぞれの特殊な使用環境に対応するために、原子力システムのどのような要求に対して、どのように選定されたか、また、どのようなトラブルを経験・克服してきたか、今後どのような研究開発が必要かを、実際にこれらの材料の研究開発に携わっている研究者、技術者の視点から解説する。

本連載講座では、現在、原子力システムで使用されている、「軽水炉用オーステナイトステンレス鋼」、「高速炉用改良型ステンレス鋼」、「ニッケル基合金」、「低合金鋼」、「ジルコニウム合金」、「機能性材料」の6種類の材料について、毎号、1つ取り上げて解説する。

さらに、材料研究開発に欠かすことのできない「照射技術」および「材料評価技術」を取り上げて解説する。

今回の連載講座では、主に、現行の原子力システムで使用されている材料についての紹介を行うこととしているが、材料開発の現場では、次世代システムや将来炉のための新しい材料の開発も数多く進められている。本連載講座の後には、このような最先端の材料開発に関する状況をご紹介したいと考えている。

本連載講座で読者の皆様には、原子力の分野では、安全、安心を確保するために、より信頼性の高いシステムを構築すべく、材料性能の向上や、材料劣化を抑制するための研究を日夜積み重ねていることと、そのような材料研究、材料開発の現場の状況を少しでもお伝えできればと思っています。

(背景は高密度・超微細粒タンゲステン合金の微細組織の写真)

連載
講座

材料が支える原子力システム

より高い信頼性のために

第1回 軽水炉用ステンレス鋼

(株)原子力安全システム研究所 福谷 耕司

軽水炉では主要な構造物のほとんどに性能と実績と優れた材料としてステンレス鋼が使われている。ステンレス鋼は、溶接の際の高熱、製造や建設時の加工、使用中の放射線照射の影響によって発生する応力腐食割れに対応するため、多くの実炉データや研究開発により組成の改良や使用条件の改良が進められてきた。また、高経年化対策として、各使用環境での特性予測を可能とするための材料劣化メカニズム解明も進んでいる。本稿では、応力腐食割れへの対応を時系列的に紹介し、軽水炉でのステンレス鋼を取り巻く技術の変遷と課題を紹介する。

I. 軽水炉でのステンレス鋼

ステンレス鋼とは、鉄にクロム(Cr)を約11%以上添加した鉄鋼材料の総称であり、錆びない鋼という意味である。もっとも単純な鉄鋼材料である炭素鋼(FeとCの合金)は酸素や水のある環境では錆びる(腐食/酸化する)が、Crを含むと表面に緻密なCr酸化物の層ができ、酸素の侵入やFeの溶け出しが抑えられ錆びの進行が非常に遅くなる。ステンレス鋼は十分な量のCrを添加して高温でも腐食が進行しないようにした材料である。ステンレス鋼は大きく分類すると、主成分がFe-Crのフェライト系と、Fe-Cr-Niのオーステナイト系の2種類があるが、軽水炉で使用されるのはほとんどがオーステナイト系である。

軽水炉の構造材には、強度や伸びなどの機械的性質が十分に高いこと、加工性や溶接性が良好であること、組織が長期間安定であること、腐食などの耐環境に優れること、産業利用の実績が十分であること、が求められる。ステンレス鋼はこうした要求をすべて満たすことができるため多用されており、特に冷却水に接する部位に用いられている。

第1表には、軽水炉で使用されている主なステンレス鋼の組成を示す。18%Cr-8%NiのSUS304はオーステナイト系ステンレス鋼の基本となる鋼種である。高温強度と耐食性を改善するためにMoを添加したのがSUS316、炭素量を減らしたのがSUS304LとSUS316Lである(Lは低炭素Low-carbonのL)。原子力用SUS316は低炭素で窒素が添加されている。その他にNbかTiを添加したSUS347とSUS321があり、類似鋼がヨ-

Materials for Nuclear Energy Systems—Towards High Reliability(1); *Stainless steels for Light Water Reactors*: Koji FUKUYA.

(2011年 2月16日 受理)

第1表 軽水炉に使用される代表的ステンレス鋼

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	8.00 ~10.50	18.00 ~20.00	—	—
SUS304L	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	9.00 ~13.50	18.00 ~20.00	—	—
SUS316	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	10.00 ~14.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00	—
SUS316L	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	12.00 ~15.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00	—
原子力用 SUS316	≤0.02	≤0.75	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.00 ~14.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00	N≤0.12 C+N≤0.13

ロッパの軽水炉で使用されている。

ステンレス鋼は板や管としてだけでなく、溶接やクラッド、鋳物としても使用される。低合金鋼製の大型容器である原子炉压力容器や蒸気発生器などでは、冷却水に接する内面は厚さ数mmのステンレス鋼のクラッドで被覆される。厚肉の配管や形状が複雑なポンプや弁の本体にはステンレス鋼の鋳物が用いられている。これらの規格は、溶接金属ではSUS308/SUS308L(SUS304/304L相当)とSUS316/SUS316L、鋳物ではSCS13A(SUS304相当)とSCS14A(SUS316相当)が主な規格である。鋳物や溶接金属は、溶けた金属が凝固するときの割れを防ぐため、体積比で数%~20%程度のフェライト相と呼ばれる相を含むように成分が調整されている。材料規格は国ごとに異なるので、海外のことも含める場合はSUS等を省いて単に304鋼、316L鋼などと書くこととする。

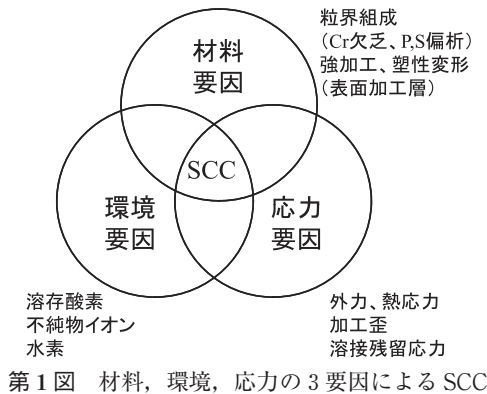
II. 溶接熱鋭敏化によるSCC

1. 溶接熱影響部のSCC

1970年代以前に建設された沸騰水型原子炉(BWR: Boiling Water Reactor)では、ステンレス鋼には主として304鋼が使用されていた。1974年に米国Dresden発電所2号機の冷却水再循環配管の304鋼製バイパス配管溶

接部で漏れが見付かり、その後、世界中の類似の溶接部で漏れや割れが見付かった。調査により、溶接時の高熱の影響を受けた熱影響部と呼ばれる部位の粒界型応力腐食割れ(IGSCC: Intergranular SCC)であることがわかった。第1図のように、SCCは材料、応力、環境の3つの要因が重なった時に発生する。材料試験などを通じてそれぞれの要因について次のことが判明した¹⁾。

溶接金属はアークの加熱で約1,500℃以上となり溶け、熱源が離れると急速に凝固する。溶けた部分の近傍(溶接熱影響部と呼ばれる)は1,000℃以上に加熱された後ゆっくり冷えていく。熱影響部では冷える間に炭素とCrが反応してCrの炭化物(Cr₂₃C₆)が結晶粒界の上などにできる。このときCrは周囲から拡散して集まるので、炭化物のまわりにはCrの濃度が10%を下回るような低い領域(Cr欠乏層と呼ばれる)ができる。ステンレス鋼が十分な耐食性を保つには、約12%といわれる十分なCrを含むことが必要なので、Cr欠乏層があるとその部分は腐食されやすくなる。Cr欠乏層ができ腐食しやすくなることを鋭敏化と呼ぶ。また、溶接金属が凝固すると体積が縮むので周囲の金属を強く引っ張り、溶接部の周囲には残留応力と呼ばれる引張応力が残ることが多い。



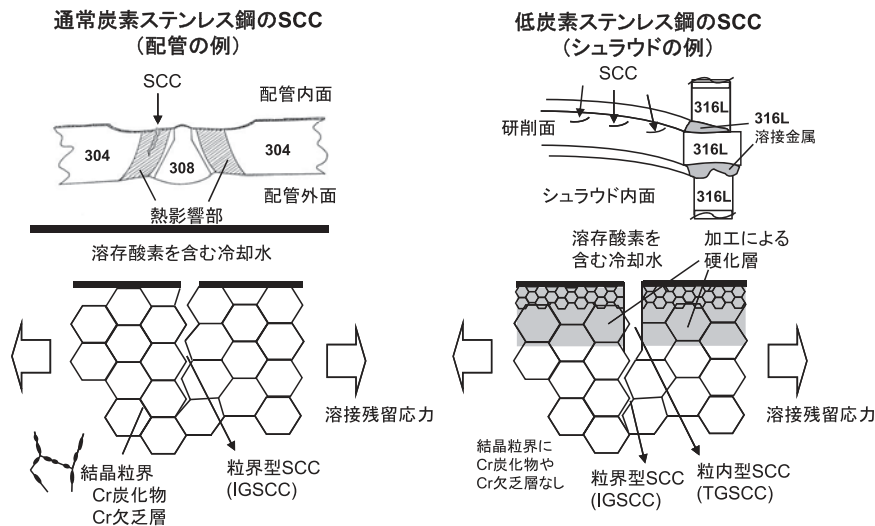
BWRの冷却水には塩素イオンなどの不純物を徹底的に取り除いた純水が使用されるが、定期検査後の起動時には大気に触れて酸素が含まれる。また、運転中は原子炉炉心での水の放射線分解で発生した酸素を含んでおり、鋭敏化した材料では腐食が進みうる。BWRの溶接熱影響部のSCCは、第2図の左側のように、通常炭素量のステンレス鋼で、Cr欠乏による材料の耐食性の劣化、引張の溶接残留応力、冷却水の溶存酸素の3つの要因が重なりIGSCCが発生したものであった。

SUS 304/316製構造物の溶接熱影響部のSCCは冷却水配管だけでなく、冷却水に接する様々な部位で発生している。国内では1990年に福島第一原子力発電所2号機のSUS 304製炉心シュラウドでもSCCが見付かっている。実際にSCCが起こるかどうかは鋭敏化の程度や範囲、起動停止や運転中の応力、冷却水の水質などに依存する。鋭敏化の程度はステンレス鋼中の炭素量が高いほど高いこと、厚い配管ほど溶接パス数が大きく残留応力が高くなること、溶存酸素量が多いほどSCCが起こりやすいことなどが系統的に解明された。

2. 溶接熱鋭敏化によるSCCへの対策

溶接熱鋭敏化によるSCCはBWRの稼働率低下の原因となり、大規模に対策技術の開発と実証試験が行われた。

材料面の対策として耐SCC材の開発が行われた。鋭敏化によるSCCはCr欠乏層が主因であるので、普通の溶接ではCr炭化物ができない組成として、炭素量を0.02%以下に抑えた低炭素ステンレス鋼(SUS 304L/316Lなど)でその成分を最適化することが検討された。原子炉の構造物を設計するときには、材料の種類ごとに定められた設計降伏点と許容引張強さを使用する。ステンレス鋼は炭素量を減らすと強度が低くなるので、設計強度はSUS 316L < SUS 316となっている。設計強



度は SUS 316 の規格で、なおかつ鋭敏化を防止するため炭素が 0.02% 以下となるように開発されたのが、原子力用 SUS 316 である。炭素を減らすことによる強度の低下を窒素の添加で補い、窒素の入れすぎによる悪影響(窒化物の生成)を避けるため、窒素量に 0.12%、炭素と窒素の合計量に 0.13% の制限を設けたものである。原子力用 SUS 316 は、SUS 316(LC) あるいは SUS 316 NG (NG は Nuclear Grade) とも書かれる。

この開発が成功し、SCC 発生が抑制されることが実証試験で確認されて以降は、SUS 316 と同等な強度が必要な部位には原子力用 SUS 316 が使用され、低炭素ステンレス鋼の強度で十分な部位には SUS 316 L が使用されることとなった²⁾。1984 年以降に建設された BWR では 1 次系配管には原子力用 SUS 316 が、その他の構造物には SUS 316 L が使用された。それより古い BWR では SUS 304/316 から SUS 316 L/原子力用 SUS 316 へ取替えが継続して行われた。1997 年には世界で初めて炉心シュラウドの交換 (SUS 304 製から SUS 316 L 製へ) が行われた。1990 年代になると、鋭敏化した材料を元に戻す方法として、表面にレーザー光をあてて約 1,000°C 以上に加熱し表面付近の Cr 炭化物を分解して Cr 欠乏層をなくする表面処理法が開発され適用された。

応力面の対策としては高周波誘導加熱応力改善工法 (IHISI: Induction Heating Stress Improvement) が開発され 1980 年代初めには適用された。配管の中に水を流しながら外面を高周波で加熱し、加熱を中断して急冷することで内面に圧縮の残留応力を作る方法である。

環境面の対策では、原子炉起動時の冷却水中の酸素を追い出すため脱気運転が採用された。また、運転中に水の放射線分解で発生する酸素などを低減するため冷却材に水素を注入する方法 (水素注入)、酸素と注入した水素の結合を促進する触媒となるパラジウムなどの貴金属を構造物に付着させる方法 (貴金属注入) が開発された。

溶接熱影響部の熱鋭敏化による SCC 対策では、割れの発生原因として Cr 欠乏層が特定され、その対策材料の開発が成功した。このため、対策材料さえ使用すれば SCC による割れは起きないとの考えがあったことは否めない。しかし、1990 年代に入ると、あまり注目されていなかった別の要因による SCC が対策材料に現れた。

Ⅲ. 低炭素ステンレス鋼の SCC

1. 加工部からの SCC

低炭素ステンレス鋼は BWR の構造材の標準材料として広く使われるようになっていたが、1990 年代に入ると海外の BWR で 304 L 製の炉心シュラウドの溶接部近傍に割れが見付かるようになり、347 相当材を使用したシュラウドでも割れが見付かった。そのような事例は年とともに増加し、国内では 2001 年に福島第二原子力発電所 3

号機の SUS 316 L 製のシュラウドの溶接部で最初の割れが見付かり、再循環配管の原子力用 SUS 316 の溶接部でも割れが見付かった³⁾。

割れた部分の調査から、結晶粒界に Cr 欠乏層はなく熱鋭敏化による SCC ではないことが確認された。国内の例では、溶接後の仕上げ工程でグラインダ仕上げを行った部位や、強い研削加工した材料の溶接部の近くに発生している。強い機械加工を受けてできた表面加工層に粒内型 SCC が発生しており、その表面加工層を抜いた下の母材では IGSCC のき裂が進んでいることがわかった。母材は溶接の時に繰返し変形を受けて硬くなっており、引張の溶接残留応力があることが確認された。海外のシュラウドの例では、やはり溶接部に近く強い変形を受け硬くなり、引張の残留応力が高い部分で起こっていることがわかっている。こうした知見から、BWR で低炭素ステンレス鋼にみられる SCC は、第 2 図の右側のように、強い加工 (塑性変形) を受けて硬くなった部位に、溶存酸素を含む冷却水中で引張応力が作用して起きた現象であると理解されるようになった。

ステンレス鋼の SCC に対する加工や硬さの影響は以前から知られていたが、BWR の水環境での影響を示すデータは断片的であった。加工の影響はその後の研究で確認され、加工度が大きいほどき裂の発生と進展が起りやすいことが確認されている。加工には冷間圧延のように比較的均一に材料全体が硬くなっている場合から、グラインダや研削により極表層にナノサイズの結集粒が発達しているような場合までである。材料組織の特徴と SCC の発生や進展の関係、その物理的原因についてより深い理解に向けた研究が進められている。

2. 加工による SCC への対策

低炭素ステンレス鋼の SCC の対策では、熱鋭敏化による SCC への対策が進められた時期とはやや異なった状況がある。ひとつは、発電所の保全方法として、すべての割れを直ちに除去するのではなく、進展を監視して健全性を確認しながら運転を継続し、健全性に問題が生ずると予想されるときに事前に補修や取替えを行う方法 (維持基準) が採用されていることである。また、SCC 現象の理解が進み、どんな環境や応力条件でも SCC を起こさない完璧な耐 SCC 材料はなく、材料を取り替えただけでは完全な対策にはならないと考えられるようになったことがある。

このため、現時点でこの SCC に対する対策は、応力要因を取り除くことを基本とし、環境面から発生や進展を抑制する方法がとられている^{2,3)}。溶接残留応力が小さくなる形状や方法の溶接を採用するとともに、配管では必要な場合に溶接後の IHISI が行われる。表面加工層がある場合は取り除き、IHISI などができない炉内構造物などではピーニング処理が用いられている。ピーニング

処理は、材料の表面に外部から衝撃力を加えて塑性変形させることにより、表面に圧縮応力を作り出す方法である。衝撃力を加える方法として、小さな鋼球をぶつけるショットピーニング、高速の水流を吹き付け泡が潰れるときの衝撃力を使うウォータージェットピーニング、パルスレーザーを金属表面に当てて発生するプラズマが潰れるときの衝撃力を使うレーザーピーニングが用いられている。条件にもよるが、数100 μm の範囲に数100 MPa の圧縮の応力を与えることができる。環境面の抑制策としては水素注入や貴金属注入が使用される。

材料面からの対策は研究段階であり、粒界の性質の制御が試みとして提案されている。粒界をはさむ結晶の対称性が良い対応粒界を多くすると SCC の進展が抑制できることが示されている⁴⁾。

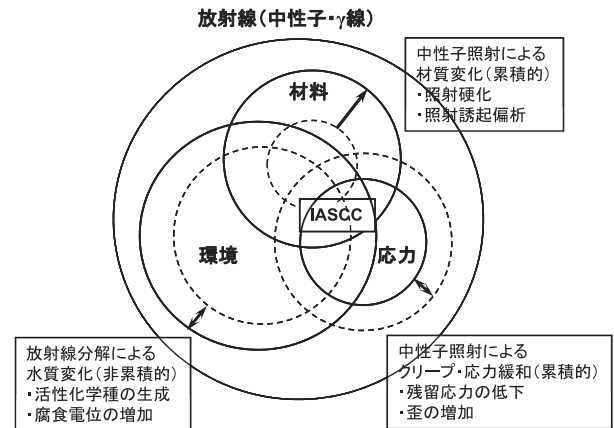
IV. 炉心構造物の SCC

1. 照射誘起応力腐食割れ (IASCC)

IASCC (Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking) は、原子炉圧力容器の内部で燃料に近い位置にあるステンレス鋼製構造物で、多量の中性子照射を受けることが誘因となって発生する粒界型の SCC である⁵⁾。中性子照射量が約 1 dpa を超えると発生するようになり、材料の組成によらず、BWR でも PWR でも知られている (dpa: displacement per atom は材料が受ける損傷の単位)。BWR では1970年代から制御棒の部品などで応力が高い部位で発生している。PWR では1989年に炉内構造物のボルトで割れの最初の事例が海外から報告されている。PWR の1次系は水素が30 cc/kg 添加されているため酸素がほとんどない還元性の水質であり、BWR の酸化性の水質とは異なる。ちなみに、PWR の1次系での SCC は、酸素が滞留した溶接部のような特殊な条件で知られているが、加工を受けた部位でも割れの例は非常に少ない。

中性子照射されたステンレス鋼の SCC 試験データから、照射量が増加すると進展速度が増加し発生までの時間が短くなり、その傾向は数 dpa 以上では飽和する傾向があること、水環境の溶存酸素や溶存水素が高いほど発生や進展をしやすいことがわかっている。

強い放射線のある原子炉炉内では、第3図のように、SCC の3要因の材料、環境、応力のいずれもが変化する。ステンレス鋼では、結晶粒界の組成の変化(照射誘起偏析)と、材料の強度の増加(照射硬化)が起こる。照射誘起偏析は、照射でできた格子欠陥が元素の粒界方向の拡散を助長しておきる現象で、ステンレス鋼では Cr と Mo が減少し、Ni, Si, P などが増加する。組成変化の幅は10 nm 程度ときわめて狭い。照射硬化は、照射でできた格子欠陥が集合体をつくり塑性変形の障害となるためにおこる現象であり、集合体は10 nm 程度ときわめ



第3図 SCCの3要因に対する照射の影響

て小さい。IASCC は粒界偏析や照射硬化の程度が大きいほど起こりやすく、こうした材料の変化は IASCC を加速する方向である。

照射でできる格子欠陥は材料内部の格子の歪を解消するように再配置されるので、応力と歪のかかった状態で照射を受けると、一定の応力で歪が増加する照射クリープ現象、一定の歪で応力が低下する応力緩和現象が起こる。これにより構造物の残留応力や歪が変化し、応力緩和は IASCC を抑制する方向にもなる。

冷却水では水の放射線分解により活性な化学種が生成する。BWR のような溶存酸素のある環境では過酸化水素濃度が増加して酸化性の高い水質(腐食電位の増加)となり、IASCC を加速する。溶存水素の高い PWR の冷却水では生成した化学種は還元されるので水質の変化はほとんど無視できる。

IASCC の要因として材料の変化が強い要因と考えられているが、機構の詳細には諸説ある。Cr 欠乏と照射硬化は、熱鋭敏化や加工による SCC と類似の役割が想定される。粒界組成では、Si の氧化物溶解、P や S による粒界結合力低下なども考えられている。照射硬化では、照射材特有の塑性変形をになう変形組織が粗大化して粒界に応力が集中しやすい状態となることが考えられている。

2. IASCC への対策

IASCC 対策も他の SCC と同様、材料、環境、応力の各要因を考慮して、取替えや対応がとられている。

PWR のバップルフォーマボルトは、多数のき裂が発見された場合やき裂発生の可能性が高い場合には交換される。その際、ボルト首下部の曲率半径を大きくしたり、首下とネジ部の間(シャンク部)を長くしたりして、首下部に作用する応力を小さくするような構造変更が採用されている。材料面では SUS 347 から冷間加工 SUS 316 に変更される。また、初期の PWR でシャンク部に冷却水を流す孔がない場合、炉内構造物の取替えの時に孔を設けてシャンク部の温度を低くすることが行われている。

BWRの制御棒等の炉内機器の交換では、製造時の残留応力や使用中に発生する応力を低減するような構造や溶接の改良がとられている。材料はSUS 316 Lが使用されている。シュラウドではSCC対応として採用されているピーニング、環境面からの水素注入や貴金属注入はIASCCにも有効と考えられる。

耐IASCC性に優れた材料の開発は、IASCCが知られるようになった1980年代初めからメカニズムの解明と並行して開始された。1980年代には、照射材の粒界腐食を促進するP, S, Siの粒界偏析がIASCCの原因と考えられ、これらの元素を実用的な範囲(0.01%以下)で極力低減した高純度ステンレス鋼が検討された。当時の論文には高純度を意味するHP(high purity)を冠したHP 304などの材料がみられる。しかし、中性子照射試験では期待したほど大きな改良効果は見られなかった。その後、BWRでは照射後の延性が高いほどIASCCが起りにくいことがわかり、PとNを低減したSUS 316 Lが検討されている。PWRではNi基合金のSCC機構との類推から、P, Siを低減し、粒界に炭化物を析出させる熱処理を行ったSUS 316、照射による粒界の低Cr化を回避するため30Cr-30Niの高Crステンレス鋼が提案されている。

V. 現在および今後の課題

1. 高経年化対策

1970年に国内最初の軽水炉が稼働して40年が経過したが、軽水炉は高速炉が主流となるまでは引き続き利用される。既存炉では60年あるいはそれ以上の長期運転を想定して健全性を確保する必要がある、産官学共同で高経年化対策が進められている⁶⁾。SCCに対しては、検査によりき裂が発見された構造物では、SCCの進展評価と進展後の構造物の破壊力学的健全性評価を行い、運転の継続か補修かを判断することとなっている。このためには、信頼性の高い進展速度の予測式が求められ、材料条件(強度、組成など)、応力条件(応力レベルなど)、環境条件(温度、水質など)をパラメータとした質の良いデータベースの構築とメカニズムを考慮した予測式の検討が重要となる。

き裂を有する構造物の健全性評価には材料の強度と破壊靱性値が必要となる。運転中に強度などが変化するような場合はそれを正しく予測する必要がある。そのような場合として熱時効と中性子照射による脆化が知られている。熱脆化は、1次系配管(PWRのみ)やポンプのケーシング(BWRとPWR共通)などに使われる鋳造ステンレス鋼が長時間使用されると破壊靱性値が低下する現象である。これはCr濃度の高いフェライト相でCrが分離してCr析出物を形成するために起こるもので、より長時間の予測が重要となる。

中性子照射を受ける炉内構造物では、硬化に伴う破壊靱性値の低下、一定歪状態で照射された場合には応力緩和現象が起こる。また、照射量が高いPWRの炉内構造物では体積膨張(スエリング)が起こる場合があり、ボルトの作用する応力が徐々に高くなる。SCCやIASCCの発生と進展と健全性を評価するには、こうした時間に依存した変化を正しく予測する必要がある。

2. 次世代軽水炉開発

2008年から国のプロジェクトで開発が開始された次世代軽水炉は、ABWRとAPWRを発展させた出力170~180万kWの大型炉であり、24ヶ月運転で設備利用率97%、プラント設計寿命80年为目标とされている⁷⁾。現在、研究開発が進行中であるが、燃料や構造材には優れた材料の開発が求められている。その中でステンレス鋼の開発が取り上げられているのは、BWRの炉内構造物用の耐IASCC性に優れたステンレス鋼と、PWRの燃料被覆管に適用できる耐食性に優れたステンレス鋼である。いずれも最大中性子照射量が増大するため、現在使われているSUS 316 LとZircaloy-4よりも高い耐久性が要求される。BWRの炉内構造物用としてTi添加し微細粒化したステンレス鋼が有望とされており、今後の開発が期待される。

VI. おわりに

ステンレス鋼は原子力装置全般にもっとも広く使用されているが、軽水炉の構造材に限定し最大の課題といえるSCC対策を中心に解説した。高経年化対策として、特性を予測する場合も次世代軽水炉用に新材料を開発する場合も、使用環境に応じた劣化機構の理解が重要である。地道な分野であるが、軽水炉利用を基盤から支える分野であり、人材と施設両面から維持発展させることが必要である。

—参考資料—

- 1) 小若正倫, 金属の腐食損傷と防食技術, アグネ, (1983).
- 2) 山下裕宣, 他, 保全学, 3[3], 45(2004).
- 3) S. Suzuki, *et al.*, *EJAM*, 1, 1(2009).
- 4) 粉川博之, ふえらむ, 15[12], 749(2010).
- 5) 福谷耕司, 他, INSS MONOGRAPHS No. 4, (2009).
- 6) 関村直人, 他, 保全学, 7[2], 9(2008).
- 7) 次世代軽水炉開発の中間評価, 経済産業省, (2010).

著者紹介



福谷耕司(ふくや・こうじ)
 (株)原子力安全システム研究所
 (専門分野/関心分野)原子炉材料, 照射損傷

原子力外交
 第5回②

 包括的核実験禁止条約(CTBT)及び兵器用
 核分裂性物質生産禁止条約(FMCT)

外務省 軍縮不拡散・科学部審議官 武藤 義哉

1. はじめに

NPTは、核不拡散及び核軍縮の双方を追求しており、NPTの下で大多数の国が核兵器保有を放棄する義務を負う一方で、核兵器国は、NPTの核軍縮義務の下で、核兵器廃絶に向けたコミットメントを表明してきた。包括的核実験禁止条約(CTBT)及び兵器用核分裂性物質生産禁止条約(FMCT)は、このようなNPTを基礎とする核不拡散・核軍縮体制を補完し、強化するための法的枠組みであり、その重要性は、NPT運用検討プロセスでも確認されてきた。また、これらの法的枠組みはNPT非締結国(インド、イスラエル、パキスタン)を国際的な核軍縮・不拡散体制に取り込んでいくうえでの重要な受け皿となり得る。

以下に、CTBTとFMCTのそれぞれについて、概説する。

2. CTBT

CTBTは、CTBTの下で世界中に設置される監視網の下で、宇宙空間、大気圏内、水中、地下を含むあらゆる空間における核兵器の実験的爆発及び他の核爆発を禁止することにより、既存の核保有国による核兵器の更なる開発・質的改善を阻止し、また、新たな核保有国の出現を防止することに資する重要な法的枠組みである。CTBTは、既に成立しているにもかかわらず、いまだに発効していない。以下に、CTBTの経緯及び現状と関連する我が国の取組を見ていく。

(1) 経緯及び現状

核実験の停止をめぐる交渉は1950年代末に始まり、1963年には部分的核実験禁止条約が締結されたが、これは地下における実験を禁じていなかった。その後、長らく核実験の包括的禁止のための交渉は開始されなかったが、冷戦終了後の1994年、軍縮会議(CD)^(註1)において条約交渉が開始され、2年半に及ぶ困難な交渉を経て条約草案が完成した。しかし、CDにおいてはインド等の反対により採択できなかったため、オーストラリアが中心となって条約案を国連総会に提出し、1996年9月、圧倒的多数で採択されるに至った。2011年3月現在、CTBTの署名国は182か国、批准国は153か国にのぼる。我が国は1996年9月に署名、1997年7月に批准した。

それにもかかわらず、いまだCTBTが発効していな

いのは、条約の発効条項(第14条第1項)が極めて厳格なことによる。すなわち、発効には原子炉を有するなど、潜在的な核開発能力を有すると見られる特定の44か国(一般的に「発効要件国」^(註2))と言われる)すべての批准が求められているが、このうち現在、米国、中国、インドネシア、エジプト、イスラエル及びイランが批准しておらず、インド、パキスタン及び北朝鮮は署名もしていない^(註3)。

(2) 発効促進を巡る状況と我が国の取組

我が国はCTBTを「核兵器のない世界」を実現するための最も重要で実践的な措置として極めて重視し、二国間会談や国際的・地域的フォーラム等様々な機会をとらえてCTBT早期発効の重要性を呼びかけるとともに、未批准国への働きかけを実施している。昨年9月には、ニューヨークの国連本部において第5回CTBTフレンズ外相会合をオーストラリアやカナダ等とともに共催し、前原外務大臣(当時)から発効要件国の政治指導者に対し、早期署名・批准に向けたリーダーシップを発揮するよう呼びかけた。

CTBT発効の見通しについては決して楽観視できないものの、最近の発効要件国の動向には明るい兆しも見られる。まず、昨年には、エジプト及びインドネシアの関係者を日本に招聘し、CTBT及びその批准プロセスへの理解促進を図った。このような中、インドネシアは、昨年5月のNPT運用検討会議で、CTBTの批准プロセスを開始する旨表明し、近く批准手続きが完了することが期待されている。また、インドは核軍縮の大幅な進展を同国のCTBTに対する立場の見直しの要件としていたが、2009年末の日印首脳会談において、シン首相が「もし仮に米国及び中国がともに批准するのであれば、新たな状況が生まれるであろう」旨述べ、統一進歩同盟(UPA)政権になってから初めて、従来の立場の転換を示唆した。

米国は、CTBTを支持するクリントン政権下の1999年に上院においてCTBT批准法案が否決されており、また、2009年に誕生したオバマ政権は前ブッシュ政権の反CTBTの政策を大きく変更し、CTBT批准を追求する立場を鮮明にしたが、昨年11月の中間選挙において上院の構成が変わった^(註4)ことから、批准の見通しは不透明である。CTBT批准に際しての米国における最大の

論点は、核実験なしに現在の「備蓄管理計画(Stockpile Stewardship Program)」の下、現存核兵器の安全性及び信頼性を十分に維持できるか否かである。米国の批准が実現すれば中国、続いてインドが批准する可能性が高く、さらにインドが批准すればパキスタンの批准も見込まれる。残るエジプト、イスラエル、イラン及び北朝鮮については予断を許さないものの、いずれにしても米国の批准が極めて重要である。

(3) CTBT 検証制度と我が国の取組

CTBT の発効促進と同様に重要なのが、CTBT 検証制度の整備である。CTBT は、条約の遵守について検証するため、①国際監視制度(IMS)、②協議及び説明、③現地査察(OSI)、④信頼醸成についての措置の4つから成る検証制度を発効までに整備する旨規定しており、また、このうちIMSを支援する組織として、技術事務局の中に国際データセンター(IDC)が設立される旨規定している。現在、CTBT 機関準備委員会と暫定技術事務局^(註5)は、IMS、IDC及びOSIの整備を精力的に進めている。

IMSは、地震、放射性核種、水中音波、微気圧振動の4つの技術を用い、世界各地321か所の監視観測所において核実験の探知を行うシステムである^(註6)。これら監視観測所で探知されているデータはすべてウィーンにある IDC に送付・処理され、それらはすべて締約国に提供される。現時点でIMSの監視観測所は80%が完成し、暫定運用の中で、そのデータは IDC に送付・処理されるが、CTBT 検証制度はいまだ整備段階であるにもかかわらず、2006年及び2009年に北朝鮮が核実験の実施を宣言した際にその事象を探知し、有効性が確認されている^(註7)。

条約発効後、疑わしき事象が発生した場合、条約違反か否かの最終決定は締約国の責任であり、各締約国は IDC からのデータと国内の検証技術によって得た情報を使用し、条約遵守に関する技術的判断に基づき、執理事務会における決定に参加することとなる^(註8)。したがって、CTBT 検証制度が効果的に運用されるためには、各締約国の技術的基盤が整備される必要があり、かかる観点から我が国は、CTBT 国内運用体制を整備するとともに、途上国に対しても、核実験探知のための地震観測研修を15年にわたり実施しているほか、未批准国の関係者を日本に招へいし、監視観測所の整備の重要性を訴えている。

3. FMCT

FMCT は、兵器用核分裂性物質(兵器用高濃縮ウラン及びプルトニウム等)の生産を禁止することにより、これ以上の核兵器用の核分裂性物質の量の増加を防ぐとともに、新たな核兵器保有国の出現を防止することに資する。すなわち、CTBT が核兵器を質的に制限するのに

対し、FMCT は核兵器を量的に制限すると言われている。また、非国家主体による核物質の入手が懸念されている現在の安全保障環境下においても、FMCT は核物質の厳格な管理を通して核セキュリティの強化にも資する。FMCT は、未だ条約も交渉されていない。以下に FMCT の経緯及び現状と関連する我が国の取組を見ていく。

(1) 経緯及び現状

冷戦直後の核軍縮の機運の高まりの中で、1993年にクリントン米大統領が、国連総会で、兵器用核分裂性物質の生産禁止のための条約の交渉開始を訴えた。その後、1994年に CD で交渉開始に向けた議論が始まった。この議論では、条約の対象が主要な争点となり、NPT 上の核兵器国とインドは、兵器用核分裂性物質の新たな生産の禁止のみを対象とすべきとする一方、パキスタンを含む非同盟運動(NAM)諸国等の多くの国は、過去に生産されたストックの規制も含めるべきとした。こうした中で、1995年に CD は、(1)交渉のためのアドホック委員会を設立する、及び(2)交渉されるべき条約は「非差別的、多数国間及び国際的なもの、ならびに実効的に検証可能なもの」とする、としたシャノン・マンデート(当時の軍縮会議の議長であるシャノン加大使が取りまとめたマンデート)に合意し、ストックの問題も交渉の中で提起できることとなった。しかし、NPT の下で核軍縮が進展しないことに不満を持つ NAM 諸国が、核軍縮の具体的前進を FMCT 交渉に向けた進展の条件とし、核兵器国がこれを受け入れなかったため、進展は見られなかった。

1998年のインド、パキスタンの核実験を受け、同年8月に CD において、シャノン・マンデートに従ったアドホック委員会が設立された。しかし1999年以降、特に、米国のミサイル防衛政策の推進を懸念し、FMCT と同時に宇宙空間における軍備競争の防止(PAROS)の交渉を強く求めた中国及びロシアと、これに反対する米国が対立し、また、ブッシュ政権下で米国が FMCT における検証は不可能との主張を行ったため、CD の作業計画に合意できず、CD は停滞することとなった。

2009年にオバマ大統領が就任し、米国が検証可能な FMCT を支持する立場をとり、また、中国及びロシアが PAROS の交渉の同時開始という条件を取り下げたこと等により、2009年5月に CD は、FMCT の交渉開始(シャノン・マンデートを踏襲)を含む作業計画に約10年ぶりに合意した^(註9)。しかし、その後、コンセンサス・ルール(全会一致)という CD 手続規則の下で、パキスタンが同計画を実施するための決定に反対した。現在もパキスタンは、インドに対する安全保障の懸念から、ストックを対象とする保証がない状況での FMCT の交渉開始に強く反対している。

(2) 我が国の取組

我が国は、CDにおける最優先の課題として、FMCTの早期交渉開始とその妥結を求め、また、条約発効までの間、すべての核保有国が兵器用核分裂性物質の生産をしないこと(生産モラトリアム)を一方向的に宣言するよう求める^(注10)等、FMCTの早期交渉開始に向けた国際的な努力を主動してきた。

CDが停滞し、FMCTの交渉が開始できない中で、国連事務総長が、2010年9月、国連本部において、CDハイレベル会合を主催したが、この会合には、我が国の前原外務大臣(当時)を始め、CD加盟国を含む多くの国連加盟国から外相級が参加し、CDがFMCT交渉開始を含め実際の作業を早期に開始すべきことを訴えた。特にFMCT交渉については、我が国を含めた西側諸国を中心に、CDでの交渉入りに向けた議論に一定の期限を設け、現状が続く場合には、CDでの交渉の代替策を検討すべきと主張する一方、一部核保有国や多くの途上国はCDで交渉を行うべきと主張し、交渉の場を巡る立場の違いも明らかになった。

現在、我が国は、CDハイレベル会合のフォローアップとして、本年2月からジュネーブにおいて専門家会合を豪州とともに主催した。これは、CDにおいてFMCT交渉を開始できない状況の中で、専門家によるFMCTに関する実質的な議論の進展を目指すために、FMCTの技術的側面(兵器用核分裂性物質の定義、検証措置といった問題)に関する検討を行う会合である。会合の結果がCD公式本会議に報告されることにより、将来のCDにおける交渉の議論に資することが期待される。また、昨年9月に日豪両国が他の8か国とともに立ち上げた、「核リスクの低い世界」を目指す地域横断的な新たなグループを通じて、FMCT交渉の開始に向けた進展を図るための取組を主導していく方針である。

4. 最後に

核兵器廃絶に向けた取組は、長い道のりを必要とする。そのような取組の中で、CTBTとFMCTは、最も現実的で、実現に近い措置と見られている。逆に言えば、CTBTとFMCTが実際に効力を持ち得ない状況が続けば、核兵器廃絶という目標はいつまでたっても現実味を帯びない夢となってしまうのではないかと恐れる。かかる観点から、我が国としては、核兵器のない世界に向けて着実に前進するためにも、引き続きCTBTの早期発効とFMCTの早期交渉開始・妥結を目指していく。

(2011年3月25日 記)

(注1)唯一の多数国間軍縮交渉機関であり、核兵器国及びNPT非締約国を含む65か国から構成される。

(注2)CDの構成国で、かつ動力炉または研究炉をもつ国。我が国も含まれる。

(注3)なお、NPT上の5核兵器国は、1991年にソ連、1992年に米国及び英国、1996年にフランス及び中国が自発的に核実験のモラトリアムを宣言した。また、インド及びパキスタンは1998年の核実験以降、核実験のモラトリアムを行っている。

(注4)現在の米国上院の構成は、民主党53議席に対し、共和党47議席。条約案の採決には3分の2(67票)の賛成が必要である。

(注5)CTBT機関準備委員会は、CTBTが発効し第1回締約国会議が完了するまでの間、この条約の実施(検証制度の整備等)のための準備を行うことを目的として設立された。CTBT機関準備委員会の事務局が暫定技術事務局である。

(注6)我が国においては、地震監視観測施設を6か所、放射性核種観測施設を2か所、微気圧振動監視観測所を1か所整備し、暫定運用を開始している。

(注7)2006年10月の核実験の際は、22か所のIMS地震学的監視観測所において地震波を検知したのみならず、カナダのイエローナイフにおいて核爆発起源の放射性核種(キセノン)が検知された。また、2009年5月の核実験では、世界61か所のIMS地震学的監視観測所において地震波を検知したが、放射性核種は最終的に検知されなかった。

(注8)執行理事会は地理的配分の必要性に考慮を払い、51の理事国によって構成される。条約違反の有無については、理事国の3分の2以上の多数決による議決により決定される。

(注9)2009年5月、CDは①核軍縮の情報・意見交換、②FMCTの交渉、③消極的安全保証の実質的議論、④PAROSの実質的議論を内容とする作業計画にコンセンサスで合意。

(注10)現在、兵器用核分裂性物質の生産禁止については、NPT上の核兵器国5か国のうち、中国を除く米、露、英、仏が一方向的に宣言している。

放射線の人体影響についての Q & A

地震・津波による今回の東日本大震災により、福島第一原子力発電所が大きな被害を受け、いまだに事故は収束しておらず、環境中に放射能が出ている状態です。なお、大量の放射能放出により環境を汚染し、人々の健康に悪影響をもたらしたチェルノブイリ原発事故は、今回の事故における被ばくの状態、健康影響、対処の仕方等で、教訓となっています。本稿では放射線の人体影響について、Q&A形式で紹介します。

NPO 法人放射線教育フォーラム 岩崎 民子

Q 今回の原発事故で大量の放射性物質が環境中に出たので怖ろしい。

A 「放射線」と聞くと、とにかく怖い、それは五官に感じないので不安をつのらせる人が多いようですが、実は放射線は適当な測定器を使えば、簡単に非常に低いレベルまで測ることができます。公害物質といわれている環境中の有害化学物質よりもはるかに容易に検出できるし、どのくらい被ばくしたか、健康に影響がある量なのかすぐにわかります。

測定器には、環境中に漏れ出た放射能を測る軽量で小型の携帯型サーベイメータ、放射線の数を測ることのできる GM サーベイメータ(ガイガーカウンタ)や、リアルタイムで線量率を測れる NaI シンチレーション式サーベイメータがあります。また、個人が放射線をどれだけ被ばくしたかを測る個人線量計(放射線作業に従事する人達は全員これを胸などにつける)があります。

これらはいずれも身体の外にある放射線を測る(外部被ばく)もので、身体の中に入った放射性物質から出る放射線(内部被ばく)の量を測るのは特殊な大型装置や分析機器などが必要となります。GM サーベイメータはそれほど高価ではないので学校等に備えていると、平常時でも身の回りに放射線があることを知り、また今回のような事故時にも役に立つでしょう。

放射性物質は放射線を出してどんどん壊れていきますが、1秒間に1個の原子が壊れることを1ベクレル(Bq)といいます。人体にこれがどのくらいの影響を及ぼすかを表す時には、シーベルト Sv(あるいは mSv, μ Sv)という線量で表します。こうして得られた数値がどのような意味を持つのか、そのデータの意味するところを正しく理解し、認識することが重要で、わずかな変動で一喜一憂する必要はありません。

Q 放射線を受けるとどんな影響があるのですか？

A 放射線を身体の外から(外部被ばく)一度に全身に 500 mSv 程度被ばくするとリンパ球の減少が起こり、1,000~2,000 mSv 以上では嘔吐、下痢、頭痛、発熱、皮膚の火傷等の「急性障害(確定的影響)」が起こります。これらの症状は線量が大きいほど早く現れ、症状も

重いです。なお4,000 mSv 以上被ばくすると半数の人が、7,000 mSv 以上ではほとんどの人が死亡します。

身体の一部に受けるか、長期間にわたって受けるかで影響の出方は違います。急性障害が起こらなくても、被ばく後、数年から数十年経ってからがんになることがあります。被ばく線量が高いほど、この可能性は大きくなります。100 mSv の被ばくを受けると0.5%発がん率が高まるといわれています。

例えば1,000人が100 mSv 被ばくすると、自然発がんの発生率300人が305人に増えることとなります。しかし、喫煙など他の要因でもがんになるため、このわずかな増加分を放射線が原因であると明確にはいえません。100 mSv 以上になると線量に伴いはっきりとリスクが高くなります。今回の事故では一般公衆の被ばく線量は100 mSv よりはるかに低い線量なので、被ばくが原因でがんになる心配はありません。

Q 政府発表の「ただちに健康に影響が現れる線量ではない」、「レベル7」の意味は？

A この発表通りに解釈すると、「ただちに」健康に影響が現れる線量ではないが、後になって、例えば「がん」になるのではないかと受け取れます。しかし、被ばく線量から判断して急性症状が出るような線量ではありませんし、またがんについても上述の理由から、その心配は不要です。

IAEA では、原子力発電施設等で発生した事故・故障等の影響の度合いを8段階(0~7)「国際原子力事象評価尺度(INES)」で表すこととし、いずれに相当するかを当事国の政府がIAEAに報告することになっています。今回の事故では大気中への放射性物質の放出量を基にして「レベル7」と決めました(チェルノブイリ事故は最悪な事故でレベル7ですが、今回の放出量の約7倍もありました。JCO事故はレベル4)。

Q 放射性物質の健康影響について教えてください。

A チェルノブイリ事故では、原子炉が爆発したため原子炉の中に溜まっていた二十数種類もの放射性核種が環境中に放出されました。中でも健康影響に重要な核

種はヨウ素131とセシウム137でした。

ヨウ素131は物理学的半減期が8日と短いのですが、セシウム137は30年と長い(体内に入ると代謝などで排泄され、3か月で半減します：生物学的半減期)。これらの放射性核種は呼吸や飲食物を通じて体内に取り込まれ、体の中から放射線を出します(内部被ばく)。とくに子供では牛乳や水などを通じ体内に入ったヨウ素131は甲状腺に集まりやすく、数週間以内に数Svを甲状腺に受けたのです。その結果、約6,000人の子供が甲状腺がんにかかり、その中の15人が死亡しています。

幸い放射性セシウムが原因で病気になったという報告はありません。

今回の福島第一原発事故ではまだ全放出核種の種類や量についてはわかりませんが、やはりこれら2つの核種が注目されています。したがって事故発生直後から牛乳や水、食物に含まれるこれら放射性核種の摂取規制が行われ、かつ毎日環境中の放射能の測定がされています。

Q 環境の放射能汚染について教えてください。

A ヨウ素131は事故の初期に環境中に放出された量は多かったのですが、5月下旬にはごく僅かとなり、現在はセシウムがそのほとんどを占めています。なお、初期に放出されたヨウ素131は半減期が短いので、今では環境中にはほとんど残っておりません。現在は放射性核種としてセシウムが問題となっています。

セシウム137は半減期が長いので、放出されたものが地上に落ちて水を汚染したり、長期にわたり土壌を汚染します。子供は成長期にあるため成人より放射線に3倍ほど感受性が高いこと、将来、長い人生があることから、厳しい管理が必要です。そのため学校のグラウンドで遊ぶ子供達の被ばくする可能性を減らすため、規制値を設けたり、表面の汚染された土を入れ替えるというような措置をとっています。

農作物は放射性物質を根から吸収し汚染される可能性があるために、汚染の程度によっては農業に対する規制も必要となるかもしれません。また、海洋への汚染水の放出による魚介類への放射能にも注意すべきでしょう。

Q 発電所周辺の住民はなぜ避難したのですか？

A 国際的に平常時では、一般人は年間1mSvの被ばくが認められていますが、緊急時には年間20~100mSvに被ばく目安程度の引き上げが許されます。政府は20mSvの値をとりました(緊急時が終わればもとの1mSvに戻します)。

例えば、ある時点での千葉県線の線量は毎時0.000047mSv、1年間の推定積算量は0.412mSvと低い値でしたが、その日の浪江町では0.0089mSv、1年間の推定

積算量は78mSvとなり、20mSvよりはるかに高い値になると推定されました。

政府は周辺住民の安全確保のため、発電所から半径20km圏内を災害対策基本法に基づき「警戒区域(立ち入りには市町村長の許可が必要)」, 20km以遠を「計画的避難区域(約1か月を目途に避難を求める)」と「緊急時避難準備区域(緊急時に屋内待避や自力での避難を求める)」を設けました。対象者はそれぞれ、78,200人、10,010人、58,500人です。

浪江町では2か月後の5月11日までの推定積算線量が50mSvを越えていました。もし避難せずにそこに留まっていたら、かなりの線量を被ばくしたことでしょう。避難については、精神的心理的ダメージ、社会的ストレス等による健康影響も見逃せません。

最後に、今回の事故においては早い時期に避難措置や食物摂取制限措置がとられたので、住民の被ばく線量は、障害の出るような線量ではありません。けれども事故が未収束であるため、今後の大気や海水をも含めた環境放射線量を厳しく測定・監視する必要があります。

「放射線」は何でもかんでも怖いというのではなく、「被ばく量」が重要であることを念頭に、正しく理解し、過剰な心配は避けるべきです。取り越し苦労の結果、ストレスとなって健康を害するほうが大きな障害となる場合が多々あることをよく知ってほしいと思います。

(2011年5月30日記)

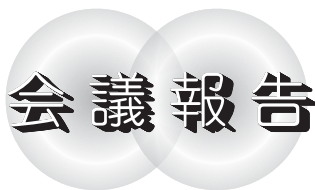
■「NPO法人放射線教育フォーラム」とは？

「NPO法人放射線教育フォーラム」は、放射線・原子力の専門家と学校教育関係者の有志により1994年に発足し、2000年にNPO法人の認証を受けたボランティア組織で、エネルギー問題や放射線・原子力に関する正しい知識を普及させる活動を行っています。当フォーラムは、知識レベルの高い方々も放射線や放射能に対して過剰の不安感をもっており、そのことが原子力の平和利用を大きく妨げている現状の改善に努力しています。

これまでの活動の重点は、小・中・高の学校教育における放射線教育の充実において、文部科学省等にたびたびの政策提言を行い、また教員向けのセミナーの開催などを行ってきました。その努力の結果、2011年度から実施される中学校の新学習指導要領で30年ぶりに放射線が取り上げられることになりました。そこで、教員向けの指導資料「放射線・放射能の基礎—学校における放射線に関する学習指導の手引き—」そのほかの教育用資料を完成させて、ホームページで公開しています。最近の情勢を考慮して、今後は一般社会人に対する放射線の知識普及の活動をも積極的に開始しようとしています。

放射線・原子力に関する質問があれば、フォーラム事務局(TEL 03-3433-0308)にお問い合わせいただければご回答いたします。

(放射線教育フォーラム理事長・松浦辰男)



Workshop on Decay Spectroscopy at CARIBU

Advanced Fuel Cycle Applications, Nuclear Structure and Astrophysics

2011年4月14~16日 (Argonne National Laboratory, USA)

米国物理学会が発行する Physical Review シリーズ, その中でも特に注目度の高い雑誌である Physical Review Letters に, 原子炉の崩壊熱に関する論文 [A. Algora, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 202501 (2010)] が掲載されて話題になった。「世界の電力の中で原子力が占める割合は大きい」という文章で始まるこの論文は, 一瞬, 原子力学会に投稿されたものかと戸惑うが, 紛れもなく物理学会誌のものである。原子力研究分野の中でも核データは特に原子核物理との関連が強く, 原子核の構造や核反応の理論的・実験的な研究の成果が多く取り入れられている。逆に原子力工学でのデータの需要が核物理研究の動機にもなりうる例ともなっている。

今回のワークショップの名前に付いているトナカイを連想させる奇妙な名前 CARIBU は, アルゴンヌ国立研究所 (ANL) の加速器施設 ATLAS に新たに設置された ^{252}Cf のイオン源であり, 自発核分裂によって生じる短寿命核分裂生成物を加速して原子核研究を行うことを目的としている。このワークショップでは, CARIBU を利用した研究の計画, 関連する研究の現状, さらに新たな研究の可能性が議論された。発表件数30余, 参加者は80程度の小規模な会議であったが, 原子核構造データについての深い議論がなされていたと思う。

ワークショップでの発表や参加者はやや原子核物理寄りではあったが, 最初の講演は ANL の R.N.Hill 氏による Advanced Fuel Cycle (AFC) の概要であり, 学際的研究が AFC において重要な役割を果たすことを印象づけている。AFC では使用済み核燃料の再処理と高速炉による消滅処理を目的としており, そのための基礎研究から技術開発まで幅広くそこに包括される。AFC の立場からは崩壊熱計算のための基礎データが特に重要となる。原子炉停止後の発熱は, 主に核分裂生成物が β 崩壊を繰り返して安定核種へと変化する際に放出する崩壊エネルギーであり, その見積もりには核分裂で生成される放射性同位体の半減期と放出される放射線のエネルギーが必要である。このような数値はデータベース化されて利用者に供せられるが, 測定の困難な核種の崩壊データはその誤差も大きくなりがちである。実際, ある核種に対する β 崩壊に伴う γ 線平均エネルギーの新しい測定値が, データベースに記載されている数値と数倍異なっていたという例もある。核燃料サイクルが拡大さ

れば, ^{235}U や ^{239}Pu のような主要アクチノイドのみならず, Am のようなマイナーアクチノイドの核分裂後の崩壊熱推定や遅発中性子取率の必要も出てくるであろう。 ^{252}Cf からの核分裂生成物収量は U や Pu からの物とはやや異なっているので, CARIBU を線源とする実験がデータ精度向上に役立つ可能性もある。

CARIBU は β 崩壊する放射性同位体を生成する部分であるが, その β 線 γ 線の全エネルギーを測定するのは TAS (Total Absorption Spectrometer) と呼ばれるシンチレータである。シンチレータは Ge 検出器と比較して分解能に劣るため個々の γ 線を分離することは難しいが, すべての放射線のエネルギーを積分的に捕捉できる利点がある。実際, 過去に Ge 検出器が見落としていた γ 線が全崩壊熱を求める際に問題になっていたのである。同様の実験設備は国外にも存在し, このワークショップを通じて崩壊データの重要性に対する国際的な認識とネットワークを垣間見ることができる。

原子核構造データは天体核物理にとっても重要なものであり, 崩壊熱と並んでワークショップの主要なスコープとなっていた。天体における元素合成, 特に r-process と呼ばれる超新星爆発時に重たい元素が合成される過程では, 中性子過剰原子核の構造と β 崩壊, 並びにそれらの中性子捕獲過程の理解が欠かせない。しかしながらその研究の基礎となる原子核実験データは限られており, 半減期や原子核質量に対する理論的予測が今でも主要な役割を果たしている。CARIBU のような不安定原子核ビームを用いれば, 中性子過剰原子核の性質を実験的に調べることが容易になり, r-process へ一歩近づくことができるだろう。それが原子核構造理論の検証と改良に繋がれば, より実験の困難な原子核に対する理論計算の合理性・外挿性も上がるはずである。天体核物理で重要な核種として ^{132}Sn が取り上げられ, この核構造と β 崩壊に関する講演がいくつかあったが, 非常に不安定な元素に関連した理論的研究は, 今後さらに重要になっていく。また原子核での工学と理学の境界も, 今以上に曖昧になっていくと思われる。CARIBU が設置されているのは ANL の物理部門であるが, TAS を用いた測定を行うのは原子核工学のグループである。

(ロスアラモス国立研究所・河野俊彦,
2011年4月18日 記)

ATOMOS Special

東欧編

世界の原子力事情 第15回

ルーマニア—CANDU 炉で国内ウランを有効活用

京都大学 杉本 純

ルーマニアはバルカン半島の北側に位置し、東はモルドバ・黒海、南はブルガリア、西はハンガリー、北はウクライナに接し、ブルガリアとの国境に沿って欧州有数の国際河川、ドナウ川が流れている。面積は中東欧諸国の中でポーランドに次ぐ第2位、本州とほぼ同じ大きさである。人口は約2千万人、首都ブカレストの人口は約2百万人である。2007年にはEUへ加盟し、経済改革、司法改革を進めている。ルーマニアは、かつては石炭・石油・天然ガスをはじめ、鉄鉱石等の地下資源に恵まれ、ウラン資源も有する資源輸出国であったが、既存資源の枯渇化と設備投資不足から生産量は減少し、現在はエネルギー供給量の約1/4を主にロシアからの輸入に頼っている。

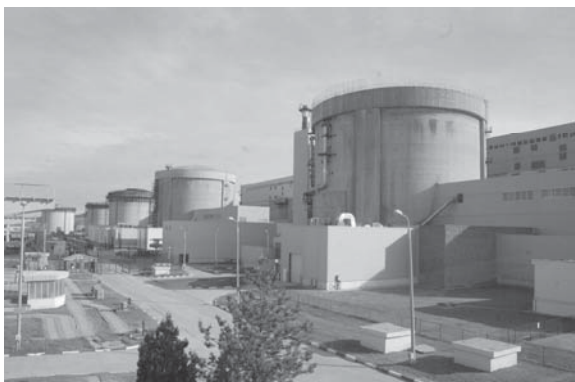
もともと化石資源が豊富だったため、原子力の導入を切実には必要としなかったが、将来のエネルギー需要を見越して1960年代半ばから原子力導入の検討が進められた。国内ウラン資源の有効活用を図るため、ドナウ川沿いのチェルナボータにカナダ製の加圧重水炉(CANDU炉)を5基建設する計画を70年代後半に策定した。この炉を採用した理由は、天然ウランを燃料として使えるため、濃縮ウランが輸入できない場合でも国内のウラン資源を利用できること、他の炉型に比べて建設費が安いこと、設備稼働率が平均80%と高いことなどである。

ルーマニア原子力国家委員会はカナダ原子力公社と契約を結び、80年からチェルナボータ1号機(出力65.5万kW、第1図参照)の建設を開始したが、財政的・技術

的な問題に直面した。89年12月、チャウシェスク大統領夫妻の処刑という形で共産党一党独裁を廃止し、民主化・市場経済化を推し進める革命が勃発したのである。翌90年、国際原子力機関(IAEA)の調査団がチェルナボータ原子力発電所の再評価を行った結果、同発電所は最新の西側技術を導入するものであり、安全基準も満足のいくものとの結論に達した。しかし、資材の不足、工期の延長、建設および作業員の質の低下が見られると指摘された。2～5号機は82年に建設を開始したが、1号機の完成に集中するため91年に建設を中断した。その後、1号機は96年12月に営業運転にこぎ着け、電力だけでなく、チェルナボータ市に地域暖房として熱も供給している。

2000年、政府は2号機完成の優先度は高いとして建設事業に公的資金を提供した。さらに、2002～2003年にかけて、政府の追加資金およびカナダ政府からの資金提供があり、2004年にはECによるローンが2号機の完成と安全性向上を条件に認められた。こうして2号機は2007年に営業運転開始にこぎ着けた(第2、3図参照)。

ルーマニアの原子力発電では、国内ウランの有効活用として、CANDU炉燃料の製造プラントがピテシュチにある。2007年には燃料製造能力を倍増し、チェルナボータにある2基の原子炉に必要な燃料を供給することが可能となっている(第4図参照)。燃料以外にもCANDU



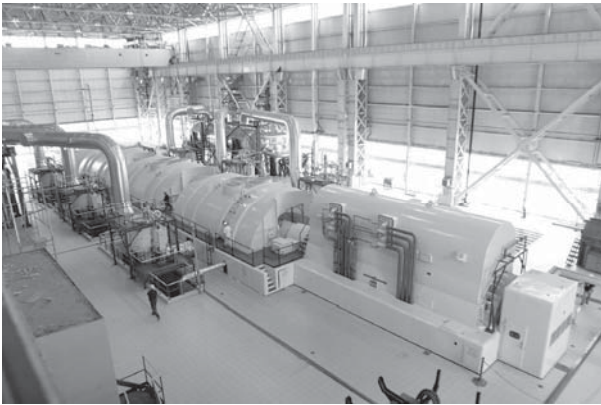
第1図 チェルナボータ原子力発電所 ©SNN

Romania—Effective Use of National Uranium with CANDU Reactors : Jun SUGIMOTO.

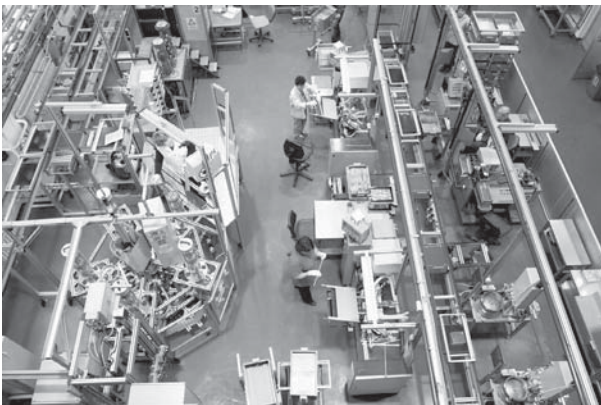
(2011年 5月27日 受理)



第2図 同原子力発電所2号機 ©SNN



第3図 同原子力発電所のタービン ©SNN



第4図 CANDU 炉用の燃料製造施設 ©SNN

炉の減速材である重水も国内に製造施設を有しているため、CANDU 炉の運転・保守に必要な技術・経験を有する人材と併せて、原子力発電に関する自給自足体制を整えている。

建設を中断している3～5号機のうち、3、4号機については現在、主契約者を選定中である。政府は同国の火力などの発電システムが老朽化していることから、3、4号機建設により発電システムを活性化させたいとしている。また、原子力がエネルギー確保と二酸化炭素放出低減に大きな役割を果たすので、2020年以降に2～4基で構成される第2の原子力発電所の建設を検討している。

ルーマニアにおける総発電量に占める原子力の割合は約20%、スペイン、米国に次ぐ世界18位である(2010年)。2008年から2010年の平均稼働率は約94%と我が国の63%より高く、フィンランドに次いで世界2位の水準にある(IAEA データより)。2009年には、チェルナボーク1号機は、世界のCANDU 炉(カナダ18基、ルーマニア2基、韓国4基、中国2基、アルゼンチン・パキスタン各1基の計28基)の中で稼働率第1位である100.1%を記



第5図 ルーマニア原子力研究所 ©SNN

録した(稼働率=実稼働時間/スケジュール上の稼働時間、のため100%超もある)。

2010年に実施された原子力安全に関するルーマニアの世論調査によれば、原子力の利点として、化石燃料への依存の減少(45%)、低価格(65%)、環境の質の向上(57%)などを挙げており、ルーマニア人の56%が将来は原子力の割合を現在と同程度か増大させるべきと考えている。福島事故後の4月20日にも、同国の経済相は、チェルナボーク3、4号機を2020年までに完成させることを再度明言している。

余談であるが、筆者は2008年5月にハンガリーのブダペストで開催された原子力人材育成に関する国際会議に出席した際、ピテシュチにあるルーマニア原子力研究所(第5図参照)から出席していた研究者と知り合いになった。この研究所では、14 MWの研究炉を有しており、原子炉、リスク、セキュリティ、材料、廃棄物処分、放射線防護、計測など幅広い分野における研究開発を実施しており、特に、CANDU 炉の照射燃料・材料に関する研究開発を実施しているとのことだった。また、IAEAに勤務する日本人職員からは、ブカレスト工科大学の教授を紹介して頂いた。今回のルーマニアの原子力事情に関する情報や写真は彼らを通じて入手することができたものである。こうした知的ネットワークは重要で、かつありがたいものであることを身に沁みて感じたことを付記する。

参考：World Nuclear Association Web.

著者紹介

杉本 純(すぎもと・じゅん)
 京都大学大学院工学研究科
 (専門分野/関心分野)原子炉システム安全、シビアアクシデント、原子力人材育成

原子力学会に叱咤激励の声が

世界に向けた情報発信に多くの期待

(6月号の Web アンケート結果)

「原子力学会誌」6月号に対して寄せられた Web アンケートの結果をご紹介します。今回は90名の方から、回答がありました。

1. 高く評価された記事

Web アンケートでは、各記事の内容及び書き方について、それぞれ5段階で評価していただいています。6月号で高く評価された記事について、「内容」、「書き方」に分けてそれぞれ上位4件をご紹介します。

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	FOCUS	解説 東日本大震災に伴う原子力発電所の事故と災害	4.43
2	FOCUS	時論 福島第一原発事故とコミュニケーション	4.39
3	アーカイブ	チェルノブイリ事故の医学的影響	4.33
4	アーカイブ	チェルノブイリ事故の環境影響	4.29
4	ジャーナリストの視点	農業と原子力	4.29

第2表 「書き方」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (書き方)
1	FOCUS	時論 福島第一原発事故とコミュニケーション	3.94
1	ジャーナリストの視点	農業と原子力	3.94
3	FOCUS	時論 放射線影響の説明の難しさ	3.89
4	表紙	藤のころ	3.88

こんな時だからでしょうか、「藤」の美しさに心が癒された方が多いようです。

2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 「FOCUS」に関して、迅速に情報を発信しようという姿勢が見える。解説記事はわかりやすくまとめられ、また、チェルノブイリの影響についてのアーカイブは、今後を予測するうえで参考になる。
- (2) 「FOCUS」に関して、読者の知りたいことに留意して、事実と根拠、分析、判断、意見は分けてほしい。また、福島第一で懸命に取り組んでおられる方の意見も取り上げてほしい。
- (3) 「FOCUS」に関して、日本の原子力学会が今回の福島の事故に対しても、世界に先駆けて取り組んでいるという記事を載せてほしい。
- (4) 学会誌アーカイブ「チェルノブイリ事故後の環境影響」の記事は、学会 HP で公開すべきである。

3. 編集委員会からの回答

「FOCUS」やその他の記事に寄せられたさまざまなご意見を参考にして、今後の記事企画を進めていきたいと思えます。なお「チェルノブイリ事故後の環境影響」などの学会誌アーカイブ記事は、学会 HP で公開しました。

また FOCUS の主要記事は学会 HP の学会誌 ATOMOΣ に掲載しています。

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

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

「言葉の備え」を問う

日本テレビ報道局 福井 由紀子

災害時、「曖昧である」ということは、混乱を意味する。震災からの3か月、「炉心損傷とは何か」、「溶融とは何か」、「メルトダウンとは何か」、「メルトスルーとは何か」どこにも明確な定義がないままに、言葉が独り歩きを続けた。

東京電力は「溶融という言葉に定義はない」と言う。そうかもしれない。普段の業務でその言葉を使うことはないだろう。しかし、「溶融の可能性はある」と公にすると、併せてその定義についても詳細な説明がなされるべきではなかったか。

福島第一原子力発電所の事故後、これまで原子力に何のなじみもなかった人たちが、原子炉の中で何が起きているのか息を殺して想像している。世界が耳を澄ましている。しかし、語られるのは、市民にとって「知らない言葉」ばかりだ。

特に、「メルトダウン」という言葉は、今回の事故報道のキーになったと思う。私たちは、メルトダウンとは何かを理解して、わかりやすく視聴者に説明する責任があると思った。会見のたびに記者から質問が飛んだ。しかし、東電の説明と原子力安全・保安院の説明は、どうも一致していないように見えた。大学の教授も技術者も、解説の内容はまちまちだ。私たちは混乱した。

原子力の専門家であるみなさんからは、「なぜメディアがメルトダウンに固執するのか分からない」というご指摘をいただく。しかし、そこにこだわるのも当然のことではないだろうか。

人はパニックの時、聞き取れる言葉にすがら。そして、その言葉が重大な危険を知らせるものであればあるほど、耳に響く。「知らない言葉」があふれる中で、メルトダウンという「象徴的で、自分にも想像しやすいような言葉」に、多くの人がこだわったとしても、仕方がない。

ただ、やっかいなのは、曖昧な危険信号はパニックを助長するだけだということだ。

原子力報道を担当する者として、この点にはずっと留意してきたつもりだ。事故発生直後から「メルトダウン」という言葉を多用しないよう気をつけた。「燃料にひびが入ったり穴があいたりする損傷が起きている」「燃料の一部が高温で溶けている」「被覆管が溶けて中の燃料が露出している」など、何がどうなっているのか具体的に、平易な言葉でおきかえるように苦心した。

というのも、事故以前に「メルトダウンという言葉はスリーマイル事故以来メジャーになったものの、学術的に明確な定義があるものではない」ということを多くの人たちから聞いていたからだ。

だからこそ、東京電力の会見で「メルトダウンが原子炉の炉心の形状を維持しなくて、圧力容器の下に崩れ落ちているという定義なら、それで結構です。」という投げやりな言葉が出たとき、脱力した。内心、「東電にそう言われたら、どうしようもない。我々の苦労は何だったのか」と思った。

この日から、政府も東電もメディアも、なしくずし的に「メルトダウン」という言葉を多用し始めた。しかし、個々の思い描く「メルトダウン」が果たして同じものを指していたのかどうか、互いに確認することはできなかった。

災害に対する備えは、なにもプラントサイトにだけあるのではない。言葉の備えは十分だっただろうか？原子力安全・保安院や原子力安全委員会が定義のすりあわせをしたのは、地震から1か月以上が経った4月18日。しかし、いまだに何をすりあわせ、言葉をどう定義したのか詳細な説明はない。多重防護の施設や非常用の電源と同様に、検証されるべきと思う。

そして、今回たいへん困ったのは、「この言葉の意味は何か？」ということをおソライズしてくれる機関がどこにもないということだ。災害に備えるために原子力の専門家にできることは何か？を考えると、「言葉を用意する」ということもぜひ考慮に入れていただきたい。

今からでも遅くはない。避難を続ける住民に、不安な生活を続けるすべての人に、「届く言葉」で丁寧な報道をしていきたい。
(2011年6月20日 記)



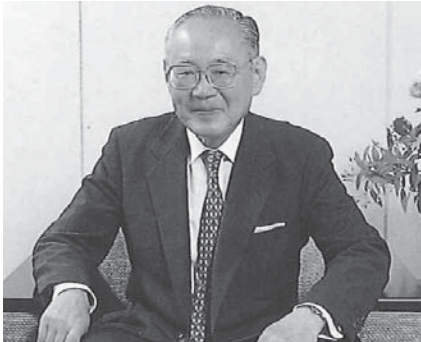
福井由紀子(ふくい・ゆきこ)

日本テレビ報道局記者

2005年入社後、社会部、外報部、政治部。北朝鮮の核問題やSTART後継条約、核セキュリティの企画を担当したほか、オバマ大統領の原子力政策を現地で取材した。一番印象に残っているのは、六ヶ所村で現役のIAEA査察官にインタビューしたこと。

元会長 山本 寛先生の ご逝去を悼む

鈴木 篤之



当学会の第14代会長であられた山本寛先生は平成23年6月13日、ご自宅でご家族の方々に看取られつつお亡くなりになりました。行年95歳でした。ご遺族のお話では、お苦しみになられることもなく安らかに眠りにつかれたとのことでした。まさに温厚篤実な先生のお人柄そのままだったようです。先生のご冥福を心よりお祈り申し上げます。

先生は、昭和13年に東京帝国大学工学部応用化学科をご卒業後、住友化学に入社されましたが、大戦中は海軍廠にご勤務でした。戦後すぐに東京大学生産技術研究所の助教授に任ぜられ、29年に教授になりました。35年に東京大学に原子力工学科が設立されるとほどなく原子力化学工学講座の担当教授として同学科に迎えられました。生産研時代には旧原研の室長も兼務されました。

爾来、先生は、日本における原子力化学工学の嚆矢として、同分野の研究教育を主導されました。昭和電工で活躍された1期生の小野寺さん、三菱原燃の副社長をされた2期生の中島さん、放射性廃棄物処理で業績を挙げた3期生の元日立の故竹島さん、千代田化工での経験をもとに海外の技術支援に勤しんだ同じく3期生の千原さん、4期生でもんじゅの建設にかかわった元動燃の柳沢さんと元東芝の川上さん、彼らの同期で、家業の東北工業を継いだ故兼子さんなど、先生のご

薫陶を得た人は多士済々です。不肖、わたしも、竹島、千原の両君と一緒に先生の警咳に接する幸運に恵まれました。

名古屋大学の副学長である山本先生は8期生です。当学会の現会長、田中先生は9期生で先生の最後の直弟子、秘蔵っ子です。原子力機構理事の三代さんと東京大学特任教授の諸葛さんは大学紛争時代の7期生です。呉羽化学からエネルギー総合工学研究所に移った6期生の松井さんは、先生との繋がりがとくに長く、原子力化学工学のいわば申し子です。

先生のご専門はイオン交換法をはじめとする分離工学と単位操作論で、化学工学の中核領域です。正統派の化学工学者であった先生は、その該博な学殖をもとに、原子力とくに核燃料サイクルという新領域を開拓されました。

日本の核燃料サイクル分野はすべて先生がその種を播かれたといっても過言ではありません。とくに、再処理に係る技術の複雑さを熟知されていた先生は、六ヶ所村の状況を最後まで気に掛けていらっしゃいました。日本の再処理が今日のような事業になるまでには長い年月と議論があったのですが、先生は、一貫して、科学技術的判断の重要性を説かれていました。竣工を待たずに先生が逝かれてしまわれたことは返す返す残念でなりません。今となっては同事業を成功に導くことしか先生への恩返しは道はありません。日本原燃の皆さんへ、先生に代わって声援を送りたいとおもいます。

ご人徳から先生は多くの人に慕われていらっしゃいました。化学工学協会の会長にも推されてなられました。協会長として世界化学工学会議を主宰されましたが、当時はそのような大きな国際会議を日本で開催することは非常に珍しかったように記憶しています。私がお手伝いしたことがあるの

は、原子力教育に関する日米科学者の会合でした。昭和40年代後半のことで、来るべき原子力時代に備え優秀な人材の養成が両国の共通的課題であったところから活発な意見交換がありました。国際的論議の有用性を肌で感じ貴重な体験をさせていただきました。

東京大学をご退官後は、エネルギー科学技術全般について産官学の連携による研究がしたいという若手現役の熱意に応えられ、研究室を私費で立ち上げられました。初代の理事長になられたエネルギー総合工学研究所はその研究室から発祥したものです。

同研究所の創立は昭和53年ですが、先生は、醸金集めなど設置に向けた準備を陣頭指揮され、ご人脈をもとに優秀な研究員を各所から糾合されました。2代目の理事長は、先生とともに設立時から研究所の運営に関わっていた故 秋山 守先生でした。縁あって私はその3代目を仰せつかったのですが、わずか2ヵ月で辞任せざるを得ない羽目に陥りました。しかし、両先生のお築きになった強固な基盤のお蔭で研究所は着実に成果を上げています。先生の学恩は研究所の沿革に深く刻まれています。我々はこのご恩に報いるためにも、未曾有の原子力事故に際会している中、研究所が社会にいつそ役立つことを祈ってやみません。

先生は旧制中学ではサッカーの選手、俊足のウィングでした。ゴルフにご熱心でお住まいの地名に因んで久が原マスターズという私的コンペがありました。マージャンもお好きで負けないう主義とのことでした。ドライブがご趣味で、お昼にうなぎを食べに車で遠出したこともあります。

先生のご温顔はわれわれの脳裏に焼き付いています。天国に召された先生のご慈悲に与えられる我々は幸せです。

合 掌。

(2011年6月22日 記)