

巻頭言

1 科学技術と法の協働にむけて

中村多美子

時論

2 原子力災害と「いのちの保全」 —哲学の視点から

—ノ瀬正樹

特集 SMR をめぐる状況と課題

25 SMR 開発の展望

近年小型モジュラー炉 (SMR) の開発が活発に行われている。最近の開発の特徴は既存技術をもとに早期に市場投入を図ろうとしている点にある。今後新しい技術をどのように取り込むか SMR 実現の鍵となる。

小原 徹

27 東芝エネルギーシステムズ(株)における小型炉の開発

東芝では燃料無交換型ナトリウム冷却小型高速炉「4 S」(10～50MWe)での経験や知見を活用・反映し、300MWeクラスの高温ガス炉と3MWe級の超小型炉 (MoveluX™)を開発している。

浅野和仁

29 日立 GE ニュークリア・エナジーにおける取り組み状況

安全でクリーンかつ低コストというニーズに応える小型軽水炉 BWRX-300を開発している。プラントシステムを簡素化することで、大型原子炉を大幅に下回る建設単価の実現を目指す。

木藤和明

31 三菱重工における SMR 開発の取り組み

三菱重工は、既存の軽水炉の安全性・信頼性向上や長期継続利用に向けた技術開発に着実に取り組む一方で、将来に向けた取り組みとして SMR をはじめとした多様な革新的原子力技術開発を推進している。

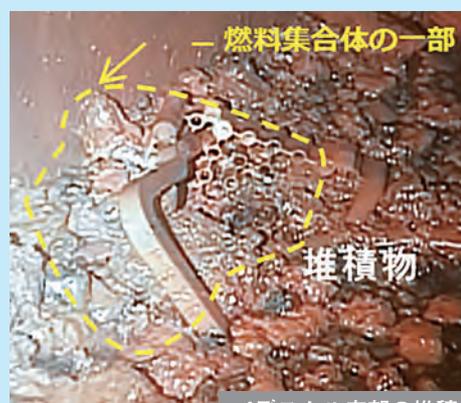
木村芳貴

特集 「1F 廃炉検討委員会」現地状況及び活動報告

9 福島第一原子力発電所廃炉作業の現状

1Fの廃炉取組の現状について紹介する。1～3号機では燃料デブリ取り出しに向けた内部調査が進み、原子炉格納容器内部の状況が次第に明らかになってきた。

鬼束俊一



ベデスタル底部の堆積物の状況

13 福島第一原子力発電所の廃炉のための遠隔技術

1F事故後、高放射線環境下でのさまざまな作業において、ロボットや遠隔操作機器が活用された。これまでの取り組みや事例を紹介するとともに、今後必要となる対策について述べる。

浅間 一

15 英知事業・国際協力の取り組み

JAEAとNDFは国内外の英知を結集し、1Fの長期的な廃炉に必要な基礎基盤研究に取組む体制を構築している。CLADSでは国際協力も展開しながら、国際社会に向けた情報発信を行っている。

岡本孝司

20 廃炉検討委員会の取り組み —活動と成果

1Fの廃炉は炉内の燃料・燃料デブリの取り出しに取組むまでに進展した。しかし技術的に解決しなければならない課題は多い。これまでにリスク評価、構造健全性、ロボット技術、サイトの活用を踏まえた廃棄物の予測と対応などについて、多分野の協力を経て検討を進めてきた。

宮野 廣

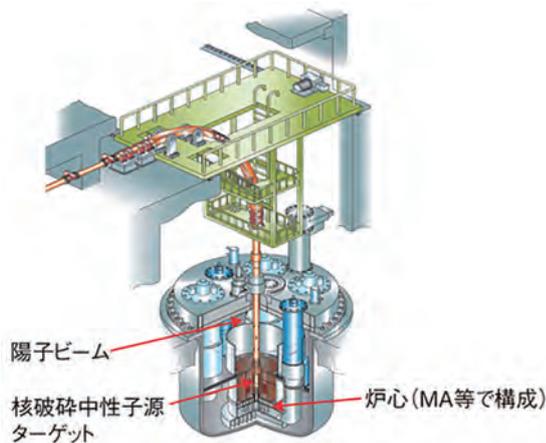
33 Column

- 「温暖化対策のもやもや」 井内千穂
 「HBO ドラマシリーズとチェルノブイリ (2)」 妹尾優希
 「福島処理水問題への“compassion”」 服部美咲
 「人生最大のプレゼント」 坂東昌子

連載講座 基礎から分かる未臨界 (第6回)

46 加速器駆動システムにおける未臨界度監視

加速器駆動システム (ADS= 下図) は長寿命核種であるマイナーアクチノイドを主な対象とした核変換専用の未臨界システムである。今回は ADS への適用性の観点から、従来の未臨界度測定手法をレビューし、従来法が持つ課題解決に向けた近年の取り組みについて紹介する。 方野量太, 山中正朗



談話室

54 「世界原子力大学 夏季研修(WNU-SI)」2020年日本開催 若手参加支援にむけて

桜井久子

ジャーナリストの視点

57 原発が使えるうちに新時代へ一歩を

村山知博

理事会だより

58 福島9年、福島への学会の取り組み

三倉通孝

報告

35 「安全目標」再考 我が国でのあり方を問う

「適切な安全」の姿から逸脱しないよう努めることがリスクマネジメントの要諦であり、それを行うためには安全目標を関係者が理解し共通のものとするのが不可欠である。

山口 彰, 菅原慎悦, 佐治悦郎

41 2002年地震本部の見解に信頼性はあったのか —三陸沖から房総沖の地震活動長期評価の功罪

2002年地震本部の見解は、福島第一原発を襲った津波を予見できたかを刑事裁判で争い、東京地裁は無罪判決を下した。当時の記録から、見解の信頼性を考察し、得られた知見を紹介する。 吉田至孝

談話室

51 THE BATTLE FOR FUKUSHIMA'S REPUTATION

Steve Terada

日々是好日—福島浜通りだより (10)

55 実り、味わう秋

吉川彰浩

視点 〈社会〉を語る (8)

56 国際比較調査の面白さと危うさ

齋藤圭介

- 4 News
- 19 From Editors
- 53 新刊紹介 「原子力発電世論の力学」 佐田 務
- 59 会告 2020年度新役員候補者募集のお知らせ
- 60 会報 原子力関係会議案内、「原子力学生国際交流事業」派遣学生募集、英文論文誌 (Vol.57, No.3) 目次、和文論文誌 (Vol.19, No.1) 目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

科学技術と法の協働にむけて

巻頭言



弁護士

中村 多美子 (なかむら・たみこ)

京都大学大学院法学研究科博士課程修了，博士(法学)。JST-RISTEX「不確実な科学的状況での法的意思決定」プロジェクト代表を務めた。著作は『現代法の動態第6巻 法と科学の交錯』岩波書店(共著)など。

原子力をはじめとして，現代社会に実装された科学技術には潜在的リスクが存在する。そのリスクの受容をめぐる社会的紛争は，時に裁判に持ち込まれる。原子力発電所の操業差止めをめぐる裁判はその一例である。そうした裁判の基礎となる科学的証拠は，高度に細分化・専門化されているため，法律家にとって理解するのは容易ではない。しかも裁判は，特定の主張を認めるか否かという対審構造によって争われるため，科学技術政策について社会の取り得る選択肢を多角的に論じることはできない。そのため，科学技術の専門家からしてみれば，法律家によって裁判の基礎とされた科学的証拠の質や理解に違和感を覚えることもある。司法判断は時にバランスを欠く極論に見えるかもしれない。では，裁判を担う法律家に，科学技術の正確な知識を学習させれば，科学的に正しく，万人が納得しうる判決に至るのかということ，残念ながらそうではないと思う。

まず，判断の基礎となる科学的証拠は，極めて学際的となることが多い。専門家になるために何年もの研鑽を要し，常にアップデートされる分野横断的知識を，法律家が網羅することは現実的ではない。次に，低確率だが破局的被害のリスクが指摘されるような問題にみられるように，法的議論の対象となっている争点について，科学技術の知見が十全な解を与えられない問題もある。最後に，司法判断とは，政策決定とは異なる規範的な営みである。科学的知見は価値の問題に解を与えるとは限らないところ，規範的な議論とは相互に対立する価値の問題に答えようとする試みである。法律家から見て，科学技術の専門家にもっとも伝わりにくいのは，価値をめぐる規範的議論である。多数者による政策決定に基づき，少数者にリスクを強制的に引き受けさせることは正当化できるか，正当化できる条件はいかなるものかといった問いは，科学技術の専門家をしばしば困惑させる。法律に則った活動がなぜ司法判断で覆るのか？しかし，制定法は完全な整合性を保った体系とは限らず，また，制定法だけが法規範ではない。また，科学技術の研究が絶えず進んでいくように，規範の議論も絶えず進んでいく。個別の裁判における一つの司法判断は，法的に終局的な結論であっても，規範そのものは必ずしも決定的なものではなく，新たな知見や社会状況を反映して揺れ動く。

科学技術でも法でも，到達した専門知の根底には，長年にわたる莫大な研究の蓄積があるうえ，暗黙知も少なくない。非専門家向けにわかりやすく噛み砕かれた説明では，結論に至る過程は省略されることが多いため，非専門家の無理解に対しては，互いに侮蔑の連鎖が生まれやすく，学際的な議論ではコミュニケーションコストが高くつく。特に，長く社会で対立してきた問題については，似通った考えの人々が集まりやすく，その考えが集団的に増幅されやすい結果，社会的な分断は深刻となる。

分断を乗り越え，科学技術を健全な形で社会に実装するためには，多角的な視野から将来の社会の有り様そのものを議論する必要がある。科学技術者と法律家もまた，互いに，よき Critical Friend となるために，自らの集団が作りがちな壁の外に一歩出て，根気よく，相手の視点から物事をみる機会を持っていくことが，これからますます必要となる。そのための恒常的なネットワークの構築にむけて，引き続き努力していきたいと考えている。

(2020年1月13日記)



原子力災害と「いのちの保全」 — 哲学の視点から —



一ノ瀬 正樹 (いちのせ・まさき)

東京大学名誉教授、武蔵野大学教授、
哲学専攻。

東京大学大学院修了。博士(文学)。オックス
フォード大学名誉フェロウ、日本哲学会会長。
編著に『福島はあなた自身』(福島民報社)、
論文に 'Normativity, probability, and meta-
vagueness' (Synthese 194:10) などがある。

福島問題は、3.11 から9年経ったいまでも、複雑な様相を帯びて立ちはだかっている。福島県では、震災直接死が1,600人強に対して、関連死が2,200人を超えてしまった。こうした津波震災そして原子力災害は世界中のどこでも、いつでも、起こりうる。ならば、たとえ後付け的になろうとも、この問題に全方位的な角度から向きあい、津波震災や原発事故の教訓を学び、それを将来世代へと伝えていくことは私たち世代の責務であろう。

最初に、災害や事故が発生した際の第一に優先すべきことは「いのちの保全」であること、これを確認しておきたい。この点を確認するだけで、「いのちの保全」を十分に果たせずに、死者数を増やしてしまった状況は最善ではなかった、よって、将来の教訓を導くには、果たしてそのような死者数の増大は不可避だったのか、という問いを提起すべきことが導ける。ここで私は、哲学研究者の立場から、死者数の増大を引き起こした「原因」は何だったのか、という切り口から論を進めたい。

まずは、福島問題について、その前提となる事実を押さえておこう。そもそも福島県の被災者が被害「被害」とは何だったのだろうか。直接死された方々や負傷された方々、そして原発事故に巻き込まれた方々、それらを振り返れば、その「被害」が何であるかは明らかではないか、と言われるかもしれない。たしかに津波震災の直接的被害は明らかである。けれども、原発事故に巻き込まれた「被害」とは果たして何なのか。2,200人以上の関連死などのことだろうか。たしかに福島県の関連死は、岩手県・宮城県に比して突出して多い。では、震災関連死というのは、どのような「被害」なのだろうか。この辺りから、混乱が始まる。福島第一原発事故によって放射性物質が一定量拡散されてしまった。この点が、他の被災二県と異なる条件である。ならば、原発事故による「被

害」とは、放射線被曝による放射線障害なのだろうか。それによって2,200人以上の方々が亡くなってしまったのだろうか。けれども、今回の事故で、放射線障害によって2,200人以上の人々が死亡してしまったというのは成立しえない理解であることが分かる。福島原発事故の放射性物質拡散規模は、チェルノブイリ原発事故のおよそ7分の1程度であり、実際に福島県に住み続けている90%程度の方々の追加的被曝の実効線量は年間1mSv以下である。多くの研究者の方々の綿密な調査によって、福島原発事故は、不幸中の幸い、放射線被曝という点では、健康影響はまず心配のないものであったことが判明している。事実、関連死は別として、現在福島県には約190万人の方々が普通に暮らしている。小学校の遠足や運動会も普通に行われている。この事実は、世界に正確に伝えていくべきだろう。たしかに放射線被曝は高線量ならば「いのち」に関わる深刻なものである。けれども、私たちの身体を取り巻く環境中の物質や現象が与える、人間の身体への健康影響というのは、ひとえに「量」に依存する。量が多ければ有害であり、量が少なければ影響はない。そして事実として、福島原発事故の放射性物質拡散量はたまたま少なく抑えられたのである。

けれども、このような事実を前にしても、依然として、まだ健康影響がないとは確言できない、と述べる方々がいるが、私は、こうした述べ方は、放射線被曝について自身で勉強して納得して被災地に暮らす方々に対して失礼なのではないかと感じる。いや、それ以上に、実は、論理的に破綻した物言いなのではないか。なぜなら、世界には、インドやイランになど、福島原発事故後に福島で暮らすよりもずっと多くの放射線被曝をする地域があり、そこに多くの人々が生活しており、そういう方々の健康調査(コホート調査)も近年詳細に行われてきて、他

の地域と比べて特段の健康上の問題も発生していないことが分かってきているからである。だとしたら、それよりも低い線量の被曝しかしていない福島の人々に健康影響が出る、というのは論理的につじつまが合わない。これに対して、自然放射線と人工放射線は異なる、というような言い方をする方もいるかもしれないが、それは誤りである。α線、β線、γ線、などによる放射線被曝は、線源が自然のものであろうと人工のものであろうと、同じである。コンロの熱と溶岩熱が熱として同じように。

では、にもかかわらず、なにゆえ2,200人以上の方々が亡くなってしまったのか。その「原因」は何なのか。それは果たして不可避な死だったのか。ここに哲学の因果論の視点が要請されてくる。一つの標準的なやり方は、いわゆる「but for テスト」であろう。反事実的な仮定による条件文の説得性によって、原因指定の適切性を測るという手法である。私は、このテストをパスしうる原因候補を三つあげたい。1)津波震災、2)原発事故、3)避難行動の弊害、の三つである。いずれの事項に対しても、「もしそれがなかったならば、これほどの震災関連死は発生しなかっただろう」と言えると思われるからである。1)と2)については明らかだろうが、3)についても、体育館などの避難所で長期に避難生活を送ることや、震災以前のコミュニティから引き離されて簡易的な仮設住宅に引きこもることなどが、とくに高齢者にとって「いのち」を脅かすことにつながることは、少し想像すれば理解できるはずである。実際、自立歩行のできない高齢者を無理に避難させて移動・避難中に多数の方が死亡してしまった「双葉病院の悲劇」といった痛恨の事例や、将来を悲観して精神的不調を被り自死に至ってしまった例、運動不足による糖尿病や高脂血症悪化による死亡例などが少なからずあったのである。

そして私は、この三つの候補に対して、どれが最も容易に、そして最も後の時点になっても予防可能であったかという視点、すなわち、法理学で言う「近因」の概念に似た視点を適用したい。そして、比較的に実行可能性が高かったという点、および後の時点でも予防可能性が高かったという点で、私は、避難行動の弊害を予防しなかったことに震災関連死多発の「原因」を求めたいと考える。実際、線量を適切に評価し屋内退避をして様子を見る、暫時屋内退避をして避難経路を確保する、あるいは仮設住宅のクオリティを上げる、といった避難行動の弊害を予防する方策は、津波震災や原発事故が起こった後でさえ、一定程度は実行可能だったはずだし、実際の線

量に鑑みて、そうした方策は「いのち」を守ることに一定程度貢献したはずである。少なくとも、そうした避難行動の弊害の予防は、津波震災そのものによる被害の予防や、原発事故そのものの予防に比して、比較的容易に実行できたと思われるし、後者二つの予防策よりもずっと後の時点になっても実行可能度が高かったことは明白である。事実、「いいたてホーム」のように、事故後も避難せず留まることを選択したことによって死亡率の上昇を防いだ例がある。

二点、追記する。一つは、「予防原則」についてである。不可逆的な被害の恐れがある技術や政策は、被害発生が確実でなくとも、そうした技術や政策の実施を控えるべし、という考え方のことである。事故当初、この予防原則を放射線被曝に適用して、ともかく避難すべし、と発言する方々がいた。けれども、これは痛恨の過ちであった。すでに述べたように、避難する行為自体にも重大な被害可能性があり、放射線被曝にのみ、予防原則を適用することは明らかな見過ごしだからである。放射線被曝による死と、避難行動の弊害による死とで、その悲劇性に差はない。それどころか、放射線被曝による死は将来の可能的な死であるにすぎないのに対して、避難行動の弊害による死は現実的な死である。後者こそが問題としては重い。予防原則云々という当初の言説は、かえって有害であった。「いのちの保全」という基本につねに立ち返るべきである。真には、両方の被害可能性について冷静に比較考量して最適な方針を採用することが理に適ったやり方だったのである。

第二は、放射性ヨウ素被曝と甲状腺がんの問題についてである。「スクリーニング効果」や「過剰診断」の指摘を真摯に受け取り、甲状腺の悉皆検査には慎重であるべきだった。もし悉皆検査が「いのちの保全」に関わりがないことなのだとしたら、本当に必要なことだったのか、かえって有害なことだったのではないか、という疑念は考慮の余地がある。

かくして、こう結論できる。すなわち、原子力災害が発生したときに、放射線被曝だけ、に注意を集中させ、「ともかく避難」という方針のみ、を採用することは、避難行動の弊害を深刻な形でもたらし、かえって「いのちの保全」という本来の目的に反して、被害を拡大させてしまうことがある、という重大な教訓を読み取るべきである、と。迅速かつ正確に線量を測定し、線量に応じた対策を実行すべきなのである。

(2019年12月10日記)



広島高裁、伊方3号の運転差し止めを仮処分で決定

広島高裁は1月17日、山口県内の住民が求めていた伊方原発3号機の運転差し止めの仮処分を認めた。山口地裁岩国支部は昨年3月に住民らのこの求めを却下していたが、高裁は原審を破棄した。伊方3号は現在、定期検査のために停止中だが、仮処分決定が司法手続きで覆らなければ、定検終了後も運転を再開できない。

高裁は、原発事故によって住民らに具体的な危険が存在しないことを相当の根拠によって説明(法律用語では「疎明」)する責任は事業者であり、この説明が尽くされなければ危険の存在が事実上推定されると判断。規制委員会の基準に適合したとしても、規制委の判断そのものにも不合理な点がない説明が必要だとした。

その上で、伊方原発近くの活断層調査は不十分であり、「これを問題ないとした規制委の判断には過誤なし欠落があった」と述べた。また、破局的な規模での火山噴火のリスクは極めて低く、それによる火砕流を理由として「立地不適とすることは社会通念に反している」としたものの、「降下火砕物の想定は過小であり、これを前提とした規制委の判断も不合理である」とした。

一方、四国電力は同日、「当社は、伊方原発は地震や火山事象に対する安全性を十分に有していると主張・立証してきており、決定には承服できない」とのコメントを発表した。

(原子力学会誌編集委員会)

更田規制委員長、新検査制度の着実な実施などを重点的に

原子力規制委員会の更田豊志委員長は1月8日の定例記者会見の中で、2020年の重点事項として、(1)新検査制度の運用開始、(2)福島第一原子力発電所の廃炉、(3)六ヶ所再処理工場の新規規制基準適合性審査——をあげた。

2020年度より本格運用を開始する新検査制度については、着実に機能するよう「被規制側との意思の疎通、相互の信頼関係が醸成されることが大きなポイント」と強調。福島第一原子力発電所については、特に処理水の取扱いをあげ「苦渋だが、早期に決断せざるをえない時期に差し掛かっている」との見方を示した。六ヶ所再処理工場の審査は申請から丸6年が経っているが、「様々な

審査案件の中でも大きな判断の対象」と、大詰めの段階にあることを示唆した。

12月末の中長期ロードマップ改訂を受けた質問では燃料デブリ取り出しについて、「まだまだ非常に難しい問題がある」と、収納・保管・移送方法も含め技術的課題が山積している現状を指摘。昨秋再開の事故分析で実施された3号機原子炉建屋内現地調査の映像に関しては、「まだ推測の域を出ないが、損傷状態を見ることができたのは大きな前進」と、成果を認める一方、「線量の高さが調査を阻んでいる。緊急時に備え原子力規制庁職員の被ばく管理も改めて考える必要がある」と述べた。

(資料提供：日本原子力産業協会)

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

WNA、「2019年は閉鎖基数が新規運転を上回る」

ロンドンを拠点とする世界原子力協会(WNA)は1月3日、2019年末現在の世界の原子炉開発動向を取りまとめて発表した。この時点で稼働可能な原子力発電設備容

量は1年前より低下して442基、3億9,240万kWになったほか、2019年中に永久閉鎖された原子炉基数が新規の運転開始基数を上回ったことを明らかにしている。

発表によると、世界では2019年に6基、524.1万kWが新たに運転を開始。内訳は中国の台山2号機と陽江6号機、韓国の新古里4号機、およびロシアのノボボロネジII-2号機と海上浮揚式原子力発電所の「アカデミック・ロモノソフ号」(出力3.2万kWの小型炉2基を搭

載)である。

これらの原子炉の多くが第3世代の原子炉技術を採用しており、台山2号機は2018年12月に世界初のフラマトム社製・欧州加圧水型炉(EPR)として営業運転を開始した同発電所1号機に続くもの。新古里4号機は韓国がアラブ首長国連邦(UAE)に輸出した140万kWの「APR1400」と同型で、韓国国内では2基目の運転開始となった。ロシアのノボボロネジII-2号機は同国が開発した最新鋭の120万kW級ロシア型PWR(VVER)「AES-2006」設計であり、運転開始した同型設計炉としては世界で3基目。「アカデミック・ロモノソフ号」についてはロシア国営原子力企業のロスアトム社が、「世界に先駆けての小型モジュール炉(SMR)技術に基づく原子力発電所」と強調している。

一方、2019年1年間に世界で正式に閉鎖された原子炉は9基、597.6万kWにのぼったとWNAは指摘。内訳はロシアのピリピノ1号機、台湾の金山2号機、日本の玄海2号機、スイスのミュレベルク発電所、ドイツのフィリップスブルク2号機、スウェーデンのリングハルス2号機、米国のピルグリム発電所とスリー・マイル・アイランド1号機、および韓国の月城1号機となった。月城1号機はすでに、2018年6月から営業運転を停止していたが、正式な閉鎖決定は2019年12月24日付けで発表された。

このほか、2019年中に新たに着工した原子炉建設プロジェクトとして、WMAはロシアのクルスクII-2号機とイランのプシェール2号機、および中国の漳州1号機を挙げた。クルスクII-2号機とプシェール2号機はいずれも、ロスアトム社とその傘下企業が建設工事を請け負っており、プシェール2号機には第3世代+(プラス)のVVER「AES-92」設計を採用。クルスクII-2号機では「AES-2006」設計をベースに技術面や経済面でパラメーターを最適化したという「VVER-TOI」が、世界で初めて採用された。

2019年10月に着工された漳州1号機では、中国核工業集团公司(CNNC)と中国広核集团有限公司(CGN)の第3世代設計を融合させた「華龍1号」設計が使われている。これらによって、世界で建設中の原子炉は54基、5,990万kWになったとWNAは説明している。

【ロシア】

世界初の海上浮揚式原子力発電所、 極東ペベクで送電開始

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は2019年12月19日、世界初の海上浮揚式原子力発電所(FNPP)「アカデミック・ロモノソフ号」が極東地域北東部のチュ

クチ自治区管内、ペベクの隔絶された送電網に送電を開始したと発表した。

同社のA.リハチョフ総裁は「これにより、このFNPPは世界で初めて小型モジュール炉(SMR)技術に基づく原子力発電所になった」とコメント。ロシアのみならず、世界の原子力産業界にとって記念すべき節目になったと評価、極東地域でペベクという新たなエネルギーの中心地を生み出す大きな一歩を踏み出したとしている。

FNPPは2018年4月、建設場所であるサンクトペテルブルクのバルチック造船所から、燃料を装荷しない状態で出港。同年10月に経由地である北極圏のムルマンスクで燃料の初装荷を完了し、運転開始前の包括的な試験を実施した。2019年3月、FNPPに搭載されている出力3.5万kWの小型炉「KLT-40S」2基で出力100%を達成し、同ユニットの主要機器と補助機器、および自動プロセス制御システムで安定した運転性能を確認。8月下旬には、砕氷船1隻と曳船2隻にとまわられて、最終立地点のペベクに向けてムルマンスクを出発しており、9月初旬に到着していた。

初併入に先立ち、連邦環境・技術・原子力監督庁(ROSTECHNADZOR)はFNPPに対して、運転許可と送電網への接続許可を発給している。また、これに至るまでにロスアトム社は、FNPPからチュクチ自治区の高圧送電網に電力を送る陸上施設を完成させたほか、熱供給システムの建設で膨大な作業を実施したと説明。このシステムにFNPPを接続する作業は、2020年に完了予定だと述べた。

ロスアトム社によると、「アカデミック・ロモノソフ号」は将来、一群のFNPPを陸上設備とともに建設するパイロット・プロジェクトに相当する。出力30万kW以下のSMRであれば、ロシア北部や極東地域における遠隔地、送電網の規模が小さい場所、あるいは送電網自体が来ていない場所であっても、電力供給が可能になるとした。

SMRはまた、燃料交換なしで3年~5年間運転を継続できるため、交換コストをかなり削減することができる。遠隔地でよく用いられる再生可能エネルギーの場合、出力の変動を高額で環境汚染度の高いディーゼル発電や燃料電池で補わねばならないが、SMRは電力多消費ユーザーに対しても途絶することなく、確実に電力の供給が可能。このような利点からロスアトム社は、SMRの輸出も視野に入れていることを明らかにした。

【韓国】

官民原子力使節団、ロシアの海外原子力事業に参加申し入れ

韓国の産業通商資源部(MOTIE)は2019年12月12日、官民合同の原子力貿易使節団が10日から12日までモスクワを訪問し、ロシアが世界中で展開する原子力事業のサプライ・チェーンに韓国原子力産業界が参加を申し入れたことを明らかにした。

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社と実施した「ハイレベル協議」、およびロシアと韓国双方の原子力発電企業約60社による「共同原子力発電協力セミナー」などを通じて、両国の原子力産業界がグローバルなサプライ・チェーン協力を強化することで、双方の産業競争力を高めることを呼びかけたとしている。

韓国の文在寅(ムン・ジェイン)政権は2017年6月、国内の原子力発電所を徐々に削減して2080年頃までに脱原子力を達成すると宣言する一方、原子力輸出については産業界を積極的に支援する方針を表明。国内で原子力の有望分野が廃止措置や放射線関係に限られていくなか、産業界と人材を維持する観点から政府は原子力輸出等への産業構造転換を促している。

原子力貿易使節団の派遣は、9月の「原子力発電輸出戦略協議会」でMOTIEが発表した「原子力発電の全段階における輸出促進案」のフォローアップ措置となるもの。すでに11月下旬にチェコ、今月初旬にはポーランドに派遣済みであり、今回のロシアへの派遣は3回目になると説明した。

発表によると、ロシアへの官民合同使節団はMOTIEの原子力発電産業政策官に加えて、韓国の原子力発電輸出産業協会(KNA)、韓国水力・原子力会社(KHNP)、斗山重工業、現代エレクトリック社、および原子力発電所資機材関連の中小企業19社の代表者で構成された。「原子力発電の全段階における輸出促進案」は、主要政策として(1)全ての段階で顧客の特別仕様の輸出戦略を取る、(2)「チーム韓国」方式で全方位の海外マーケティングを展開する、(3)輸出の支援環境で技術革新を図る——を打ち出しており、これに基づき11日にロスアトム社との「ハイレベル協議」を開催した。

同協議では、MOTIEのシン・ヒドン原子力発電産業政策官とロスアトム社側からK.コマロフ副総裁が出席し、双方の原子力輸出政策を共有したほか、ロシアの各種海外事業における協力案、協力体系の構築案などを議論。シン原子力発電産業政策官は、「業界間で実質的な協力を議論するため、官民すべてが参加する定例的な協力の機会の設定が重要だ」と述べ、双方がそのための実

務協議を進めていくとした。

また、双方の原子力産業界の約60社から合計150名以上が参加した「韓ロ共同原子力発電協力セミナー」と、「韓ロ原子力発電協力の夜」では、大規模な海外原子力事業を展開中のロシアに対し、韓国側は欧州と米国の両方で設計認証を取得した韓国製原子炉「APR1400」の安全性をアピール。高い技術力を持った韓国の原子力産業界は、ロシアの最適なパートナーであると強調した。ロシアの機器調達システムや参加企業、製品、技術なども紹介され、双方のサプライ・チェーンの連携に向けた情報交換と質疑応答を実施。これにともない、参加企業間で100件以上の事業協力相談が行われたという。

さらに、両国の企業同士、および韓国の原子力発電輸出産業協会とロシアの商工会議所の間で協力覚書を2件締結。MOTIEはこのような事業協力セミナーや使節団の派遣を2020年から定例化し、長期的観点の下で協力の基盤を構築しつつ、定例的な官民合同協議のチャンネルを早期定着させるために努力していくとしている。

韓国とサウジ、SMART炉の「建設前設計契約」を改定

韓国の科学技術情報通信部(MSIT)は1月3日、サウジアラビアで韓国製小型モジュール炉(SMR)「SMART」を建設する計画や同設計の共同輸出を促進するため、2015年9月に両国の担当機関が締結した「SMART炉の建設前設計(PPE)協力契約」を改定したほか、新たに「韓国-サウジアラビア・標準設計認可取得の共同推進協約」を締結したと発表した。

これらによって韓国水力・原子力会社(KHNP)を始めとする韓国企業、およびサウジ企業が参加するSMART炉の建設・輸出担当特別合併企業「SMART EPC社(仮称)」の設立と、同社におけるKHNP社の役割が明文化された。KHNP社はSMART EPC社が設立されるまで同プロジェクトを主導し、サウジ国内の標準設計認可をSMART炉で取得するとともに、ビジネス・モデルの設定や建設インフラの構築、第3国へのSMART炉輸出のための協議を進めていく。

SMART炉は海水脱塩と熱電併給が可能なシステム一体型モジュラーPWRで、熱出力と電気出力はそれぞれ33万kWと10万kW。韓国原子力研究院(KAERI)が中東諸国等の需要も想定して開発したSMRで、韓国とサウジアラビアは2015年に同炉のPPE協力契約を締結した後、韓国側が0.3億ドル、サウジ側が1億ドルを投資して、同年12月から2018年11月までSMART炉の設計をPPE事業として共同実施。これには原子力関係の研究者に加えて、韓国側から韓国電力技術(KOPEC)、韓電原

子力燃料(KNFC)、斗山重工業、鉄鋼大手のポスコなどが参加した。

今回の発表によると、SMART 炉事業への KHNP 社の参加は、同設計の初号機建設事業におけるリスクを軽減するためサウジアラビア側から要請されたもので、原子力発電所の建設と運転における KHNP 社の豊富な経験が買われたという。また、「標準設計認可取得の共同推進協約」は、建設許可審査におけるサウジ側の負担軽減と第3国への SMART 炉輸出の促進を目的としており、この作業で KHNP 社や KAERI、サウジ側の担当機関「アブドラ国王原子力・再生可能エネルギー都市公団(K. A. CARE)」それぞれが果たす役割範囲や財源分担案などが盛り込まれた。

MSIT はこれらにより、両国が SMART 炉の許認可段階から建設、インフラ構築など、原子力発電全般にわたって協力していく基礎が築かれたと指摘。両国の SMART 炉事業推進に一層の弾みが付くと強調した。サウジ側も、同炉の標準設計認可取得や国内の初号機建設を通じて技術やノウハウを蓄積し、同国が原子力発電技術で自立するための大きな資産として活用できると期待している。

【米国】

エネ省、オクロ社の小型高速炉建設用にアイダホ研の敷地使用を許可

エネルギー省(DOE)は2019年12月10日、カリフォルニア州を本拠地とする超小型原子炉の開発企業、オクロ(Oklo)社が設計した小型高速炉「オーロラ」を、傘下のアイダホ国立研究所(INL)敷地内で建設することを許可すると発表した。

これは、先進的原子力技術の商業化支援イニシアチブ「原子力の技術革新を加速するゲートウェイ(GAIN)」の一環となる措置。DOE はこれまでにユタ州公営共同電力事業体(UAMPS)に対しても、INL の敷地を使ってニュースケール・パワー社製・小型モジュール炉(SMR)の初号機を建設することを許可している。

オクロ社は、「非軽水炉型の先進的原子炉設計として、INL サイトの使用許可が下りたのは初めて」と強調しており、2020年代初頭から半ばにかけての「オーロラ」着工を目指す。同社は今のところ、「オーロラ」の設計認証(DC)審査や建設・運転一括認可(COL)などを申請していないが、その商業化に向けた重要な一歩になったとしている。

オクロ社によると、「オーロラ」は電気出力0.15万kWのコンパクト設計で、米国でこれまでに開発・実証されてきた先進的な金属燃料を使用。冷却水が不要であり、

少なくとも20年間は燃料交換なしで熱電併給を続けることが可能。また、究極的には燃料をリサイクルしたり、放射性廃棄物からクリーン・エネルギーを取り出したりすることもできる。

米原子力規制委員会(NRC)はすでに2016年から、X-エナジー社の「小型モジュール式・高温ガス炉(Xe-100)」やテレストリアル・エナジー社の「小型モジュール式・一体型熔融塩炉(IMSR)」などと同様、「オーロラ」設計に対して「認可申請前活動」を適用。許認可申請のガイダンス提供や、潜在的な課題の事前の指摘などで、オクロ社が申請書を提出する準備作業を支援していた。

今回、DOE が発給したサイト使用許可は「オーロラ」が運転を終了するまで有効なもので、着工前にオクロ社がクリアしなければならない様々な要件や許認可手続きを明示。使用したサイトは最終的に元の状態に戻して返還しなければならないが、DOE は同許可の発給により、新しいクリーン・エネルギー技術、中でも特に、先進的核分裂技術の商業化という誓約を明確にしたとオクロ社は評価している。

規制委、TVA の SMR 建設用クリンチリバー・サイトに事前サイト許可発給

米原子力規制委員会(NRC)は2019年12月17日、テネシー峡谷開発公社(TVA)がテネシー州オークリッジ近郊で管理しているクリンチリバー・サイトについて、原子炉建設の「事前サイト許可(ESP)」発給を承認したと発表した。

この ESP は、TVA が2016年5月に NRC に申請していたもので、2基以上の小型モジュール炉(SMR)で合計の電気出力が80万kWを越えないものの建設を同サイトで想定。採用設計は特定しておらず、ニュースケール・パワー社製の SMR「ニュースケール・パワー・モジュール」、ホルテック・インターナショナル社の「SMR-160」、ウェスティングハウス社製 SMR など、4種類の軽水炉型 SMR 設計のパラメーターを技術情報として活用する「プラント・パラメーター・エンベロープ(PPE)」方式を取っていた。

TVA は現時点で原子炉建設の具体的な計画を立てていないが、ESPの有効期間である20年間(延長することも可能)に、「将来のエネルギー需要に備えて柔軟なオプションを取ることが可能になった」とコメントした。地元メディアのインタビューでは、TVA の総裁兼 CEO が「今後2年以内に採用設計を選定する」と答えた模様。実際の原子炉建設に際しては、NRC に別途、建設・運転一括認可(COL)を申請する必要がある。

ESP を取得する主な狙いは、電力会社が原子炉の建設

で資金投入を判断する前に、サイト特有の安全性や環境影響、緊急時計画について NRC から事前承認を得ることにある。ESP 取得後に COL を申請した場合、サイト関係の審査期間が短縮されるが、ESP を取らずに直接 COL 審査を受ける場合は、ESP 審査と同等の情報を NRC に提出しなければならない。

これまでにイリノイ州のクリントン、ミシシッピ州のグランドガルフ、バージニア州のノースアナ、ジョージア州の A.W. ボーグル各原子力発電所の敷地内サイト、およびニュージャージー州で立ち並ぶセーレムとホーククリーク両原子力発電所の隣接区域に対して ESP が発給されている。

NRC は 2016 年 12 月に 8 千ページもの TVA の申請書を正式に受理しており、2017 年 1 月から ESP 審査を開始した。2019 年 4 月に環境影響声明書の最終版 (FEIS) を発行した後、同年 6 月に安全性評価報告書の最終版 (FSER) を発行。8 月にはこれらの文書に関する公聴会を開催し、NRC スタッフによる申請書の審査結果は妥当との判断を下していた。

SMR 建設を想定したクリンチリバー・サイトの ESP は、NRC が緊急時対応で規制を実施する際の分析方法の承認など、いくつかの追加条項を明記。これにより同サイトで将来、原子炉の建設・運転を申請する事業者は、従来の大型原子力発電所用の緊急時計画区域 (EPZ) よりも小さい区域の適用を要請することが可能になるとしている。

ニュースケール社、同社製 SMR でカナダのベンダー審査開始

米オレゴン州のニュースケール・パワー社は 1 月 7 日、同社製の小型モジュール炉 (SMR) について、カナダ原子力安全委員会 (CNSC) が 2019 年 12 月から全 3 段階で構成される「許認可申請前設計審査 (ベンダー審査) (VDR)」を開始したと発表した。

同社が開発した「ニュースケール・パワー・モジュール (NPM)」は現在、米原子力規制委員会 (NRC) による全 6 段階の設計 (DC) 認証審査を SMR 設計としては初めて、また唯一 2017 年 3 月から受けている。同審査は 2019 年 12 月にフェーズ 4 まで終了し、フェーズ 5 と 6 に進展中。技術面の審査がほぼ完了したことを示しており、同社は 2026 年までに初号機の運転開始を目指している。

ニュースケール社はカナダでも同様に「NPM」を建設する考えで、ベンダー審査を実施する CNSC に対して 12 月 10 日付で最初の情報文書を提出した。同審査は建

設・運転許可など正式な申請手続に先立ち、カナダの規制要件に対する対象設計の適合性をメーカー側の要請に基づいて評価するサービス。法的に有効な設計認証や関係認可が得られるわけではないが、カナダの顧客が将来「NPM」の建設許可を CNSC に申請する際、ベンダー審査が完了していれば技術面の審査を最大限効率的に実施することができる。

ニュースケール社はカナダでの「NPM」建設に関して、オンタリオ州で原子力発電所の運転を担当するブルース・パワー (BP) 社と 2018 年 11 月に覚書を締結しており、同設計をカナダ市場で売り出す際の投資対効果検討書の作成や許認可活動などの面で協力を得ている。また、カナダの商業用加圧重水炉 19 基のうち 18 基を所有するオンタリオ州営電力会社 (OPG) 社は、ニュースケール社の諮問組織に参加。カナダにおける SMR の許認可手続や「NPM」建設、および VDR 等について、ニュースケール社に助言を提供している。

【フランス】

EDF、2020 年から 1 億ユーロで原子力機器の品質向上で行動計画

フランス電力 (EDF) は 2019 年 12 月 13 日、原子力産業界において最高レベルの基準をクリアできる高品質の機器製造や人材の能力向上を実現するため、2020 年から 2021 年まで 1 億ユーロ (約 122 億円) の特別予算をかけた「エクセル (Excell) 計画」を実施すると発表した。

仏国では、フラマトム社製・欧州加圧水型炉 (EPR) を初めて採用したフラマンビル 3 号機の建設工事が、原子炉容器鋼材の品質問題や配管溶接部の欠陥等により 10 年以上遅延している。コストも 3 倍以上の 124 億ユーロ (約 1 兆 5,200 億円) に増大していることから、PSA (プジョーシトロエン) グループの J.-M. フォルトツ元会長は 2019 年 10 月、「度重なる計画の遅れとコストの超過は EDF の失策」とする監査報告書を公表。これを受けて B. ル・メール経済・財務相も、EDF に対して問題解決に向けたアクション計画を 1 か月以内に提示することを求めている。

EDF の J.-B. レビィ会長兼 CEO はエクセル計画について、「フォルトツ報告書が指摘した課題に取り組むためのものであり、仏国原子力産業界が信頼を取り戻す基盤になる」と説明。「目指しているのは、カーボン・ニュートラルなエネルギー源である原子力発電が、今後も地球温暖化との闘いで中心的な役割を全面的に果たし続けられるよう保証することだ」と強調している。

福島第一原子力発電所廃炉作業の現状

東京電力ホールディングス(株) 鬼束 俊一

福島第一原子力発電所では、2011年3月11日の事故発生から8年以上が経過し、廃炉作業にも一定の進展が見られる。汚染水対策は、3つの基本方針に基づいた予防的・重層的対策の効果により、汚染水発生量は事故当初と比較すると大幅に減少している。使用済み燃料プールからの燃料取り出しは、2014年に取り出しを完了した4号機に引き続いて、2019年4月から3号機において取り出しが開始された。また、1～3号機では、燃料デブリ取り出しに向けた内部調査も進んでおり、原子炉格納容器内部の状況も少しずつではあるが明らかになってきた。本稿では、廃炉に向けた福島第一原子力発電所における取組の現状について紹介する。

KEYWORDS: *Fukushima-Daiichi, decommissioning, contaminated water, spent fuel pools, fuel debris*

I. はじめに

福島第一原子力発電所は、福島県浜通りの大熊町と双葉町に立地している。発電所には6基の原子炉があり、総出力は469.6万kWで約1,000万世帯が使用する電気を発電する能力を有していた。

2011年3月11日の地震発生時、1～3号機は運転中、4～6号機は定期点検中であった。地震の発生を受けて運転中の1～3号機は制御棒の挿入により原子炉を止めることには成功した。しかし、地震や津波の影響により電源が喪失し、原子炉を冷やす機能が喪失したことから、1～3号機では原子炉内燃料の溶融、1, 3, 4号機では原子炉建屋で水素爆発が発生することとなった。

事故発生以来、東京電力では、政府や協力企業と共に、原子炉や使用済み燃料プールの冷却、汚染水の浄化や海洋への漏えい防止に取り組んできた。

また、2011年12月には、今後30～40年にも及ぶ廃炉作業の進め方や必要となる研究開発などを示した「東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃炉措置に向けたロードマップ」(以下、中長期ロードマップ)を政府と共に取りまとめた。中長期ロードマップはこれまでに4回の改定を行っており、最新の第4回改定は2017年9月26日に廃炉・汚染水対策閣僚等会議で決定されている。

福島第一における廃炉作業は、基本的にはこの中長期ロードマップに沿って様々な取り組みを実施しているところであり、本稿ではその内容について紹介する。

II. 1～4号機の状況

1～3号機は、原子炉格納容器内に燃料が溶融して固まった燃料デブリが存在するとともに、使用済み燃料プール内に燃料が格納されている。4号機は事故発生時には使用済み燃料プール内に1,500体以上の燃料が格納されていたが、2014年12月に全ての燃料の搬出が完了している。

1～3号機については、格納容器や燃料プールに冷却のための注水を継続しており、表1に示すように季節変動の範囲内で安定して冷温停止状態を継続している。

III. 汚染水対策

原子炉建屋内には、高濃度の汚染水が滞留しており、その汚染水が外に漏れないように建屋内の汚染水水位は、周辺地下水水位よりも低くなるように水位をコントロールしている。そのために周辺地下水が建屋内に流入し、その地下水が汚染水と混ざり合うことで新たな汚染水が発生することになる。

汚染水の発生量は、事故当初と比べると大幅に減少しているが、それでも日々発生し続けており、多核種除去

表1 1～3号機の状況(2019年8月28日)

	圧力容器 底部温度	格納容器内 温度	燃料プール 温度
1号機	約27℃	約27℃	約32℃
2号機	約32℃	約32℃	約33℃
3号機	約30℃	約30℃	約31℃

Present status of Fukushima Daiichi nuclear power plant decommissioning : Syunichi Onitsuka.

(2019年11月14日 受理)

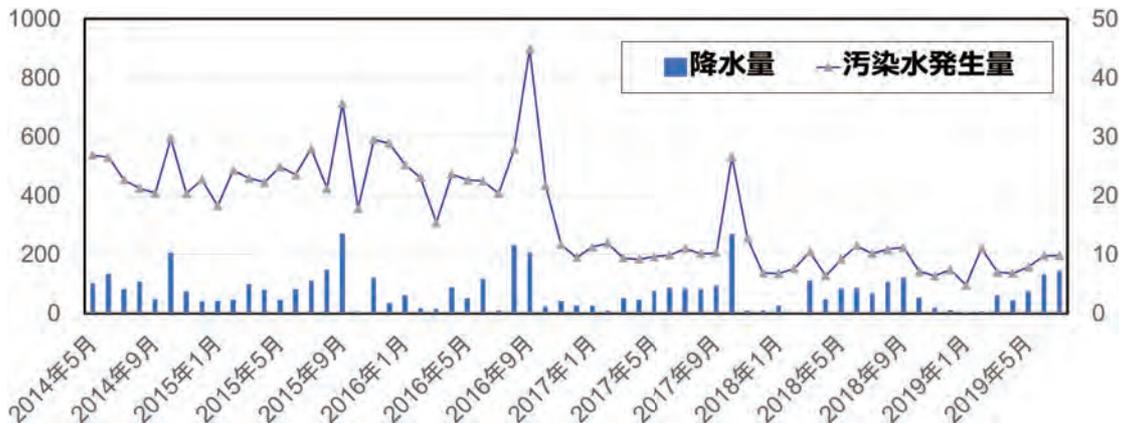


図1 汚染水発生量の経時変化

設備等で処理された後に発電所構内のタンクに貯留されている。タンクを設置するスペースも限られていることから、汚染水対策を継続的に実施し、発生する汚染水の量を抑制することが必要とされている。

汚染水対策は、「汚染源を取り除く」、「汚染源に水を近づけない」、「汚染水を漏らさない」の3つの基本方針に基づいて予防的・重層的に対策を実施している。

例えば、「汚染源に水を近づけない」対策としては、地下水が建屋内に流入しないように建屋周辺の地下水を汲み上げる井戸であるサブドレーン、雨水が地中に浸透して地下水とならないように地表面をアスファルト等で被覆するフェーシング、建屋周辺への地下水の供給量そのものを減らすための凍土方式の陸側遮水壁等を重層的に実施している。

これらの汚染水対策を継続的に実施することで、図1に示すように発生する汚染水量は徐々に減少している。1日当たりの汚染水発生量は、2014年度は平均470 t/日だったものが、2018年度には平均170 t/日まで減少している。今後は、2020年以内に1日当たりの汚染水発生量を150 t/日以下とすることを目標として、建屋屋根からの雨水流入対策や建屋周辺のフェーシング等の追加的対策を実施していく予定である。

IV. 使用済み燃料プールからの燃料取り出し

ここでは、1～3号機の使用済み燃料プールからの燃料取り出しについて述べる。

なお、4号機については、先述のとおり2014年12月に取り出しが完了している。

1. 1号機

1号機については、2018年1月からオペレーティングフロア(以下、オペフロ)のガレキ撤去に着手して、北側エリアのガレキはほぼ撤去が完了している。

一方、使用済み燃料プールのあるオペフロ南側は、図2に示すようにガレキがうず高く積み重なっている状況と

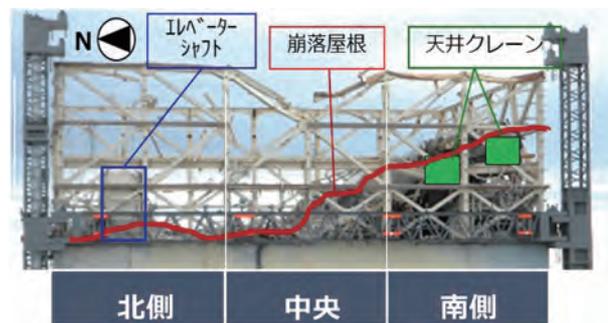


図2 オペフロ西側立面

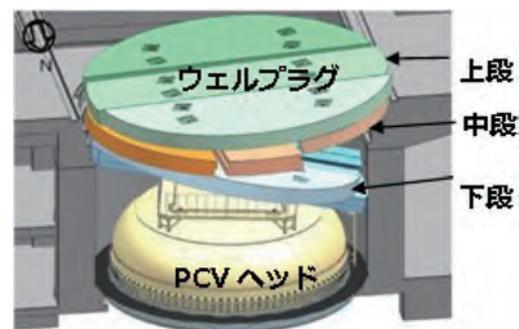


図3 ウェルプラグの状況(イメージ図)

なっている。このような状況の中で、ダストの飛散を防止するとともに、ガレキがプールに落下して燃料等を損傷しないように慎重に作業を進めていく必要がある。

そのために、まず燃料プールの養生を計画しており、2019年8月からプール内の状況を確認するためにカメラを用いた調査に着手したところである。

また、1号機では水素爆発の影響で図3に示すように、ウェルプラグが正規の位置からずれていることが分かっている。今後、燃料取り出し工法を検討する上で、ウェルプラグの状況を把握することが重要であることから、2019年8月から遠隔ロボットによる調査に着手した。

2. 2号機

2号機については、2017年に原子炉建屋西側に設置した前室の中にオペフロに入るための開口部を設け、

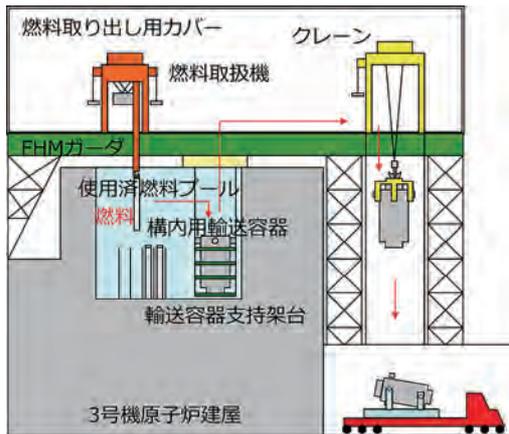


図4 3号機燃料取り出しの流れ

2018年からオペフロ内の空間線量率等の調査やガレキ等の撤去に着手した。

空間線量率調査の結果、2011～12年に実施した結果と比較すると線量率が大幅に低下しており、限定的な作業であればオペフロ内でも実施できることが分かった。そのため、燃料取り出し工法としては、従来から検討していたオペフロ上部を撤去する工法ではなく、ダスト飛散抑制等の面で優位となるオペフロ上部を残置する工法を採用することとした。

3. 3号機

1～3号機の中では3号機の作業が最も進んでおり、2018年2月に燃料プール上にドーム屋根の設置が完了し、2019年4月から燃料の取り出しを開始した。

燃料取り出しは図4に示すように、プール内に設置した構内用輸送容器に燃料取扱機でつかんだ燃料を1体ずつ装填し、そのまま輸送車両に積載し共用プールへ輸送するものである。

3号機については、中長期ロードマップにあるように2020年度中にプール内に保管している566体全数の取り出しを完了させる予定である。

V. 燃料デブリ取り出しに向けた取組み

これまでに実施した調査の結果、1号機では溶融した燃料のほぼ全量が格納容器底部に落下していると推定している。2号機では、溶融した燃料のかなりの部分は圧力容器底部にあるが、一部は格納容器底部に落下している。3号機は1号機と2号機の間期的な状態にあり、他の号機と比べると格納容器内の水位が高い状態にある。中長期ロードマップでは、2019年度に燃料デブリ取り出しの初号機と取り出し方法を決定し、2021年度から取り出しを開始する予定となっている。

ここでは、最も内部調査が進んでいる2号機における取組み状況について述べる。

1. 2018～2019年に実施した内部調査結果

(1) 2018年1月の内部調査

2号機では、溶融した燃料の一部が格納容器底部に落下していることが分かっており、1月の調査では主にペDESTAL内部の状況を確認した。

伸縮式のガイドパイプの先端に取り付けた調査装置を用いてペDESTAL内部の状況を確認した結果、既設設備には大きな変形・損傷がないこと、図5に示すようにペDESTAL底部全体に燃料デブリを含むと思われる堆積物があることが確認できた。なお、堆積物にはいくつかの小山のような盛り上がりが確認されたことから、燃料デブリが溶け落ちたルートは複数あるものと推定される。

(2) 2019年2月の内部調査

2019年2月の調査では、調査装置の先端に物を把持する機能を持つ器具(フィンガ)を取り付けて、ペDESTAL底部の約400mm×約350mmの範囲内において6箇所接触調査を実施した。

調査の結果、5箇所では図6に示すように小石状の堆積物を動かすことができ、このような場所では今回のような装置でデブリを取り出す可能性があることが分かった。

一方、動かすことのできなかった硬い場所では、デブリ取り出しのために削ったり、穴を空けたり、何らかの加工が必要になるものと思われる。



図5 ペDESTAL底部の堆積物の状況

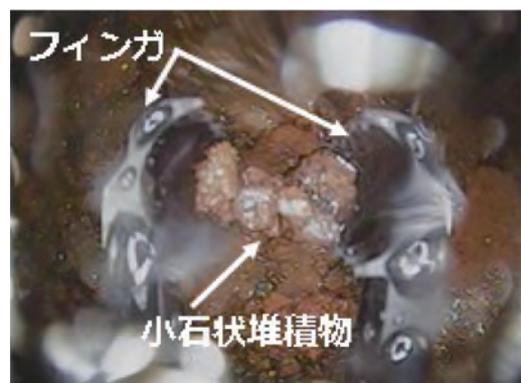


図6 堆積物との接触状況(No2)

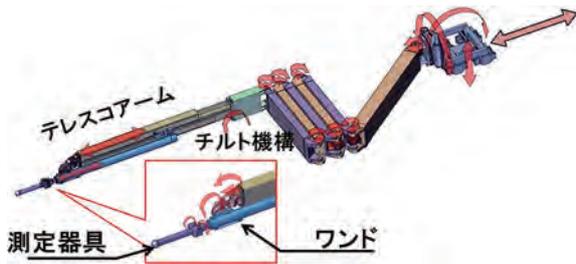


図7 アーム型装置の概要

2. 2019年度から予定している内部調査計画

2021年度からの燃料デブリ取り出しに向けて、2019年度から1・2号機で内部調査と少量のサンプリングを予定している。ここでは2号機の調査計画の概要について述べる。

2号機の内部調査においては、主にペDESTAL内部における構造物の状況や堆積物の分布等を把握するために、図7に示すアーム型装置を開発中である。

調査装置の先端には、計測器具を取り付けるワンドが設けてあり、調査内容に応じて必要な計器を付け替えることができる構造となっている。

今回の調査では、カメラによる詳細目視調査の他に、レーザー光を用いた3次元形状の測定ならびに線量率の測定を予定している。

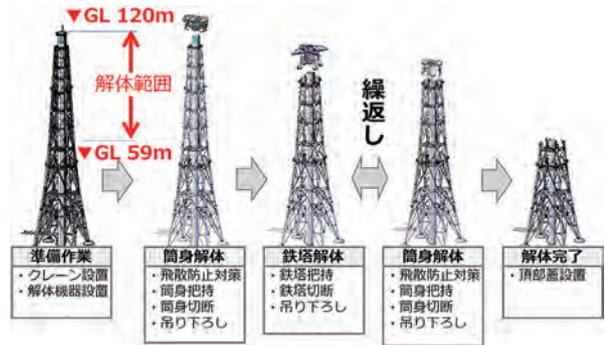


図8 排気筒解体手順



図9 モックアップの状況

VI. 最近のトピック

1. 1/2号排気筒解体

1/2号排気筒は、1号機原子炉建屋の水素爆発により損傷していることが分かっている。評価の結果、地震等により崩壊する危険性はないものの、リスクを更に低減するという観点から、燃料取り出しに先立って、図8に示す解体手順により半分程度の高さまで解体することとした。

図9に示すように、発電所構外ヤードに排気筒を模擬した試験装置を設置し、開発した解体装置のモックアップ試験を実施した後、2019年8月から解体作業に着手し、10月末段階で23ブロック中3ブロックの解体が完了している。

2. 2019年台風19号対応

台風19号による福島第一原子力発電所での降雨量は約270mmであり、2017年台風10号と同程度の豪雨であった。

事前に土嚢の設置や風対策を実施しており、法面の一部で表層の崩れは発生したが、汚染水の漏えいや主要設

備に影響を与える被害は発生しなかった。

また、台風の雨により発生した汚染水量は、これまで実施してきた重層的な汚染水対策の効果により、2017年台風10号の半分程度(約600t/日)であった。

VII. さいごに

事故当初は火事場のような状況の中、目の前のリスクや課題に対応することに傾注していたが、この8年間で汚染水対策やプールの燃料の取り出しが進捗し、燃料デブリの状況も少しずつ分かってきて、ようやく将来を見据えながら戦略的・計画的に廃炉作業が進められる状況になってきた。

これから長く続く廃炉作業を安全・着実かつ遅滞なく進めるためにしっかりと体制を固めて行きたい。

著者紹介



鬼束俊一 (おにつか・しゅんいち)
東京電力ホールディングス(株)福島第一廃炉推進カンパニープロジェクト企画部
(専門分野/関心分野)土木工学

福島第一原子力発電所の廃炉のための遠隔技術

東京大学 浅間 一

東京電力福島第一原子力発電所の事故後、高放射線環境下でのさまざまな作業において、ロボットや遠隔操作機器の活用が求められた。本稿では、その事故対応などにおいてこれまでに導入されたロボットや遠隔操作機器について紹介するとともに、これまでの取り組みを評価し、失敗した事例の分析を行う。さらにこれらの分析結果に基づき、その対策について述べるとともに、燃料デブリの取り出しをはじめとする今後の廃炉の工程を考え、今後必要となる遠隔技術・ロボット技術の対策などについて述べる。

KEYWORDS: *Remote technology, robot technology, human interface, decommissioning, investigation, sampling, fuel debris retrieval, rubble removal, decontamination*

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(1F)の事故からすでに8年半が経過した。事故直後の緊急対応やその後の廃炉においては、高放射線環境下での様々な調査や作業が多く、遠隔技術・ロボット技術の活用が必須である。すでにこれまでに50種類以上の遠隔操作機器やロボットが現場に投入され、多大な貢献を果たしている^{1, 2)}。しかし、廃炉には30~40年かかると考えられており、今後も廃炉を進めるうえで、さらなる遠隔技術・ロボット技術が長期にわたり必要となる。

本稿では、1Fでこれまでに用いられたロボット技術について概観するとともに、今後廃炉を進めていく上で必要となる遠隔技術・ロボット技術の対策などについて述べる。

II. 事故対応および廃炉における遠隔技術の活用

1Fの事故直後は、冷却、封じ込め、サイト内の環境線量低減等が緊急のミッションであった。このような緊急対応期では、時間の余裕がない中で、無人化施工システム、Packbot(iRobot社製)など、すでに実績のある既存の機器やシステムが調達され、現場に投入された。

その後の応急対策期では、システムの再構築、余震対策などの取り組みが行われる一方、原子炉建屋などの内部の様子の詳細がわからず、汚染水が漏れている状況のなか、様々な調査ミッションが開始された。調達可能な既存のロボットや遠隔操作機器では限界があるために、入手可能な様々な機器やシステムを改造することによって対応した。千葉工大や東北大などの研究者が開発した

Remote technology for decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station : Hajime Asama.

(2019年11月19日 受理)

Quinceなどがその例である。

その後の廃炉においては、使用済み燃料プールからの燃料や燃料デブリの取り出しなどが主たるミッションとなっている。燃料デブリの状態などが必ずしも明確になっておらず、汚染水も格納容器外に漏洩している状況の中で、汚染水の漏洩箇所を特定したり、建屋内の除染を行ったり、格納容器の内部の状況の調査を行うための新規のロボット開発が行われている。国際廃炉研究開発機構(IRID)が開発したPMORPH、サソリロボット、ミニマンボウなどのロボットがその例である。

今後の開発を戦略的に行う上で、これまでの遠隔技術・ロボット技術を用いた取り組みを振り返り、評価することが重要である。

調査、計測などに関しては、カメラによる撮影、環境量の測定、ガンマカメラなどを用いた線量分布の測定、3Dレーザースキャンなどによる3次元データの取得などに成功しており、比較的良好な成果が得られていると言えよう。また、瓦礫の除去に関しても、無人化施工システムによる敷地内瓦礫や、水素爆発によって破壊されたオペレーションフロアの瓦礫の除去、様々なロボットなどによる建屋内瓦礫の除去、ROV(Remotely Operated Vehicle)とクレーンなどを用いた使用済み燃料プール内の瓦礫の除去などは、ほぼ順調に達成できている。

一方、除染に関しては、床面除染に対して、ATOX社製RACCOON、Pentek社製Mooseなどが使用され、またIRIDによって低所(床面、低所壁)用、高所用、上部階用の高圧水除染装置、ドライアイスブラスト除染装置、吸引/ブラスト除染装置なども開発されているが、いずれも除染の効果はまだ限定的と言わざるを得ない。除染の効率を飛躍的に向上させるような技術開発が今後さらに求められる。サンプリングに関しては、ダストのサンプリング、オペレーションフロアのコアサンプル採取などには成功しているが、さらに今後は、格納容器内の汚

染水のサンプル採取，燃料デブリのサンプリングという困難なミッションが控えており，これを実施するための技術開発が不可欠となっている。

Ⅲ. 遠隔技術に関する今後の対策

これまで，様々なロボットや遠隔操作機器が現場に投入され，多くのミッションを達成した一方で，回収不能になっているものもある。これらの状況について分析を行い，今後の遠隔技術開発や運用にフィードバックすることも重要である。

失敗した事例を分析してみると，①通信不良による制御不能，②空間認知の不良性による操作ミス，③放射線による故障が主な原因であることが明らかになった。これらの対策として，①については有線と無線の組み合わせ，無線インフラの構築，②についてはオペレータのトレーニング，ヒューマンインタフェースの改良(空間認知性改良)，③については耐放射線性デバイス・メカニカルシステム(半導体不使用)，頑健なシステム設計，冗長性・機能縮退性の活用などが考えられる。

また，廃炉では，時間的，コスト的な制約から，いずれも製品レベルではないプロトタイプ(試作品)の遠隔技術を使わざるを得ない。それを用いてミッションを成功に導くためには，設計時にリスクアセスメントを可能な限り実施し，生じ得る状況や故障などに対する対策をできるだけ事前に講じておく必要がある。また，モックアップ(模擬環境)などを構築し，実証試験を様々な条件で繰り返し行い，事前にリスクとなる要因をできるだけ取り除いておくことが重要である。

さらに，もう一つの廃炉での遠隔技術活用における困難な問題は，ロボットを現場に導入するまで動作環境が未知で，タスクも確定しないということである。そのような状況でシステムを設計することは容易ではない。その対策としては，予め動作環境をできるだけ調査しておくとともに，起こり得るあらゆる状況を想定し，そのような状況が生じた際にも対応できるようにシステムを設計しておくことが肝要である。

Ⅳ. おわりに

本稿では，1F でこれまでに用いられた遠隔技術・ロボット技術について紹介するとともに，今後廃炉を進めていく上で遠隔技術・ロボット技術に求められる要件や課題への対策などについて述べた。

今後，1F の廃炉には長期の時間を要することから，世代を超えた取り組み，そのための人材育成も極めて重要である。分野を超えた学際的な知識を有し，ソリューションを導出できるような人材の育成が求められる。また，原子力施設の事故後の廃炉やクリーンアップなどの課題を抱えているのは日本でだけではない。原子力施設の事故は減多に起こるものではないが，米国，英国をはじめ，同様な課題を抱え，様々な取り組みを行っている国も多く，それぞれが独自の技術や知見を有している，これらの国とも連携することで，国内外の希少な英知を結集し，今後の研究開発と人材育成を行いながら，廃炉に取り組むことが重要である。

— 参考文献 —

- 1) 浅間一：“福島原子力発電所の事故対応および廃炉のための遠隔操作・ロボット技術”，日本原子力学会誌 ATOMOS, vol. 56, no. 5, pp. 313-317 (2014).
- 2) 日本ロボット学会：“原子力ロボット記録と提言”，日本ロボット学会東日本大震災関連調査研究委員会最終報告書(2014).

著者紹介



浅間 一 (あさま・はじめ)

東京大学大学院工学系研究科
(専門分野/関心分野)自律分散型ロボットシステム，空間知能化，サービス工学，移動知，サービスロボティクス，ヒューマンインタフェース。

英知事業・国際協力の取り組み

日本原子力研究開発機構 岡本 孝司

東京電力福島第一原子力発電所(1F)事故は、複数の原子炉で同時に事故が起こり、世界的にも類のない事故となっており、その廃炉は困難を極めると想定される。30年から40年かかる廃炉を着実に遂行するためには、新たな技術の開発と人材の育成が不可欠である。そのため、日本原子力研究開発機構(JAEA)では、文部科学省、原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF)等と協力して、国内外の英知を結集し、長期的な廃炉に必要な基礎基盤研究に取り組む体制を構築している。また、1Fの廃炉は世界各国から強い関心が寄せられている。このため、国際協力も展開しながら、廃炉の課題解決に取り組むとともに、国際社会に向けた情報発信を行っている。

KEYWORDS: *Decommissioning, Research Strategy Map, International Cooperation*

I. 廃炉、それは未知への挑戦

福島第一原子力発電所(1F)事故は世界的にも極めて重大な事故である。事故から8年経った現在では、原子炉やサイト内の状態は安定し、内部調査によって格納容器内の状況が少しずつわかり始めた。30年から40年かかる廃炉作業の中でリスクを低減しつつ、廃炉を安全、着実に進めるためには、多くの英知と新たな知見を結集する必要がある。溶け落ちた燃料デブリの取出しや保管、廃棄物の処理処分等の困難な課題が山積している。

1Fからの燃料デブリのサンプリングは、はやぶさ-2によるリュウグウでの石のサンプリングと同様の作業である。しかし、1Fの高い放射線環境や厳しい作業環境は、はやぶさ-2にも勝るとも劣らないものである。そこには、既存技術では対応できない、過酷な環境がある。また、長期にわたる廃炉を完遂させるためには、人材の育成が極めて重要であり、日本および世界の英知を結集して、この難関に取り組む必要がある。1Fの廃炉は、それは極めてチャレンジングなプロジェクトである。

II. 廃炉国際共同研究センターの役割

1. 廃炉国際共同研究センターの目指す姿

日本原子力研究開発機構(JAEA)の廃炉国際共同研究センター(CLADS)は、名前に「国際共同」が入っているように、福島第一原子力発電所の廃炉に関する世界との連携を行うハブ(HUB)を目指した組織である。国内の他の研究機関や大学などと連携して研究を進めること

World Intelligence project and international cooperation initiatives : Koji Okamoto.

(2019年11月12日 受理)

で、廃炉に必要な基礎基盤研究のネットワークを形成し、長期的な廃炉に必要な人材の確保を図る。

CLADSの英語名称の後半の3字はAdvanced Decommissioning Science(先端廃炉科学)の頭文字である。1Fの廃炉は、今まで人類が経験した事の無い、極めて困難でチャレンジングなものである。この経験を世界と共同しながら、人類に貢献する事を目的としている。

2. 英知を結集する場の整備

2015年4月、JAEAはCLADSを設置し、2017年4月には中核となる国際的な研究開発拠点「国際共同研究棟」を福島県双葉郡富岡町に整備した。国際共同研究棟では、国内外の大学、研究機関、産業界等の人材が交流できるネットワークを形成し、産学官による研究開発と人材育成を一体的に進めながら廃止措置を推進している。また、文部科学省公募事業採択者等とともに設置した「廃炉基盤研究プラットフォーム」を活用し、基礎基盤研究分野におけるシーズを廃炉へ応用する検討を進めている。

3. 廃炉研究の現状

CLADSでは、大学や国内外の機関と連携して、4つの分野(燃料デブリ、炉内状況把握、放射性廃棄物の処理・処分、遠隔技術)の研究を実施している。

燃料デブリの研究

1F廃炉では燃料デブリの取出しが最大の課題である。そのためには、まず燃料デブリの特性を理解する必要がある。しかし、実際の1Fの燃料デブリのサンプルは未だ採取されていない。そのため、過去の過酷事故研究の知見等を基に模擬燃料デブリを製造し、その特性を評価し、1Fの燃料デブリの性状を推定している。また、燃料デブリ取出しでは、燃料デブリの破碎時に生じる放射性

微粒子の挙動評価，燃料デブリ取出し時の放射線計測技術の開発，燃料デブリの保管時等における水素安全の対策の検討等の研究を行っている。

炉内状況把握の研究

燃料デブリ取出しや，その後の原子炉の廃止措置を円滑に進めるために，損傷した炉内状況を把握する必要がある。そのため，計算コードによる解析や各種の模擬燃料集合体による実験，1Fサイトの現場情報を基にして，事故進展の経緯を推定し，そこから現在の炉内状態を推定している。また，長期にわたる廃炉では，損傷した原子炉構造材の健全性の評価やそのような特殊な環境下での腐食研究等を行っている。

放射性廃棄物の処理・処分の研究

1Fの廃炉では，水素爆発による放射性物質の原子炉建屋外への飛散により発生した放射性廃棄物に加え，燃料デブリの冷却水の供給に伴い発生する汚染水等，多種多様な廃棄物が発生している。本分野では，これらの事故由来の多種多様な廃棄物を適切に処理するために，1F廃棄物試料を分析し，その性状把握を行っている。これらの成果も反映して放射性廃棄物の保管，処理および処分に関する研究開発を進めている。

遠隔技術開発

1Fの建屋内は未だに高い放射線環境下にあり，人が容易に近づくことは困難である。このため，廃炉作業には遠隔技術は必要不可欠である。本分野では，高い放射線量領域における放射線分布の可視化技術やレーザーを用いた迅速な分析技術として，レーザー誘起発光分析(LIBS)の開発等を行っている。

Ⅲ. 廃炉研究の基礎基盤研究マップ

廃炉の研究は，汚染水除去からはじまり，遠隔操作技術，燃料デブリの特性，デブリ取出し手法，放射性微粒子拡散防止，水素管理，放射性廃棄物処理・処分，放射線計測，耐放射線機器，社会的合意形成など，極めて幅広い分野に及ぶ。それぞれの研究が，さまざまにリンクしており，原子力だけではなく，土木から化学，機械，電気など，ほとんどの工学分野にまたがっている。

このため，CLADSでは，廃炉研究の基礎基盤研究マップを取りまとめてホームページで公開している(図1)。黄色や青がアカデミアに期待される基礎基盤研究であり，赤は応用開発に近い研究分野である。赤と青が混在する研究領域もある。ホームページでは，それぞれの研究領域をクリックすると，より詳細なニーズが示され，関連する研究がリストアップされる。現在のマップは，廃炉の工程に沿ったまとめ方としているが，今後改良を加えて廃炉研究全体を俯瞰し，それぞれの研究のリンク構造を明確にして，推進すべき研究を明らかにして行く。

Ⅳ. 国内外の英知の結集

文部科学省では，「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン(2014年6月文部科学省)」等を踏まえ，2015年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」(以下，「本事業」)を立ち上げ，「戦略的原子力共同研究プログラム」，「廃炉加速化研究プログラム」および「廃止措置研究・人材育成等強

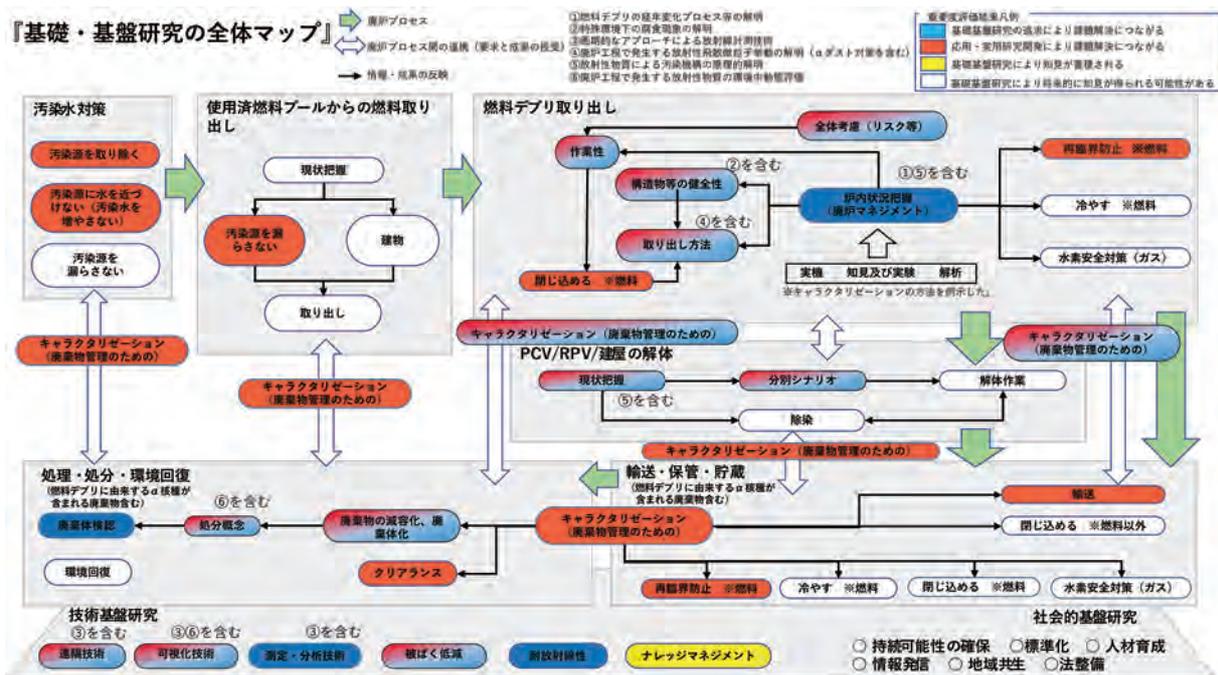


図1 廃炉研究の基礎基盤研究マップ
 (https://fukushima.jaea.go.jp/hairo/platform/map_2019.html)

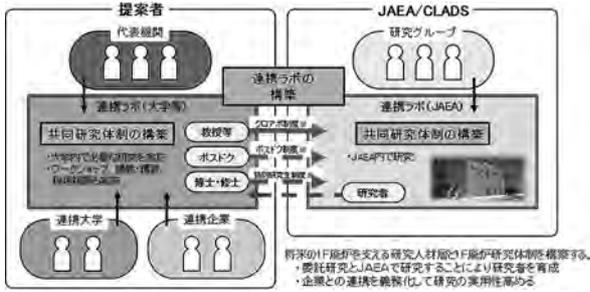


図2 連携ラボの概要
(研究人材育成型廃炉研究プログラム)

化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることで、原子力の課題解決に資する基礎基盤研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

本事業は、2018年度の新規採択課題からは、実施主体を文部科学省から JAEA に移行し、従来のプログラムを次の4つに再編した。

- ① 共通基盤型原子力研究プログラム
- ② 課題解決型廃炉研究プログラム
- ③ 国際協力型廃炉研究プログラム
- ④ 研究人材育成型廃炉研究プログラム

(2019年度より新設)

これにより、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的、かつ、継続的に実施できる体制を構築する。なお、上述の廃炉研究の基礎基盤研究マップを念頭に、必要な研究を公募し、廃炉の具体的課題とのリンクを重視している。

2019年度から開始した研究人材育成型廃炉研究プログラムでは、JAEA における人材派遣制度(クロスアポイントメント制度、博士研究員制度等)を活用して、大学と JAEA の間に“連携ラボ”と呼ばれる共同研究室を構築し、緊密に連携して研究を行うこととしている(図2)。

V. 廃炉における国際協力

1. 海外における事故処理および廃止措置の事例

海外における原子炉事故処理の事例として、1979年のTMI-2事故、1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故、1957年のウィンズケール原子炉事故等がある。1Fの事故は、これらの事故とは事故発生時の環境や経緯が異なるが、事故時の対応、燃料デブリや廃棄物の保管理等については1Fの廃炉にも参考となる点も多い。また、米国、英国、仏国、露国などでは、核燃料や放射性物質に関する長年の経験を有している。例えば、英国の

セラフィールドでは、使用済み燃料をボンドと呼ばれる屋外プールの中水中に保管していたが長年の劣化により燃料棒の損傷が発生している。仏国マルクール研究所や米国サバンナリバー研究所では、核燃料の再処理施設の解体経験がある。これらの施設の廃止措置は、1Fの廃炉に共通する部分も多いと考えられる。

2. 国際協力の必要性

1Fの廃炉を加速するためには、国際協力の活用が有効である。特に、日本では実施が困難な研究である核燃料を使った新規の研究、大規模な研究(Molten Core Concrete interaction (MCCI)試験、等)については、知見と施設を有する海外機関との共同研究が有効である。

国際協力は、一方的に日本が知識を吸収するというものではない。1Fは未来に向けたチャレンジであり、その経験は世界にも共有すべきである。1F廃炉で得られる知見を世界に発信し、次世代の原子炉の安全性の向上や廃止措置の検討に貢献することも大いに期待されている。

3. 国際協力の現状

CLADSでは、これまでに、欧州、米国、露国、カナダ、韓国と、燃料デブリの性状把握、廃棄物の処理・処分、過酷事故解析、放射線計測技術等の廃止措置に必要な研究開発について国際協力を実施している。また、国際機関のIAEA、OECD/NEAのプロジェクトへも参画している。

国際協力の一例として、以下に、代表的な共同研究を紹介する。

放射性微粒子の挙動解明に関する国際協力

英国ブリストル大学と連携して、1Fオフサイトで検出されたCsを含む放射性微粒子の解析を共同で実施している。同大学が保有する実験室CTシステムや英国の放射光施設であるDiamond Light Sourceを利用し、放射性微粒子の組成や内部構造(図3)などを分析し、放射性微粒子の1F事故時の発生メカニズムの解明を行って

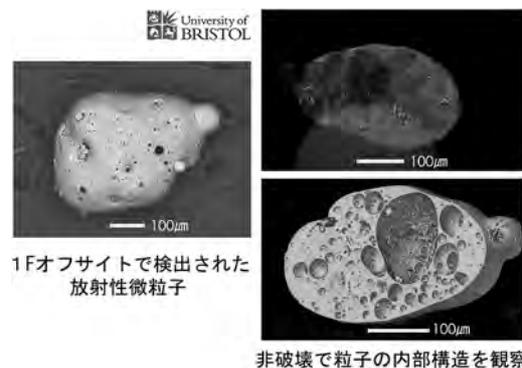


図3 英国ブリストル大学保有の実験室CTシステムによる放射性微粒子の内部構造の分析¹⁾

いる。

燃料集合体の破損メカニズム解析に関する協力

独国の KIT と連携して、BWR 燃料集合体の破損メカニズムの検討を実施している。1F の事故時を想定して、水蒸気雰囲気異なる環境で、制御棒ブレードやチャンネルボックスの破損メカニズムの解明(図4)と現象のモデル化を検討している。

放射線の可視化技術に関する協力

米国のローレンスバークレイ国立研究所(LBNL)と連携して、放射線の可視化技術の開発を行っている。1F の高線量領域での放射線を可視化し、3次元の映像データと融合(図5)することで、廃炉作業の効率化に繋げることを目標としている。

燃料デブリの特性把握に関する協力

仏国の CEA と連携して、高温の燃料デブリがコンクリートと接触した際に起きる MCCI 反応とその際に生成する MCCI 生成物の特性把握に関する協力を行っている。模擬燃料材料(酸化ウラン、酸化ジルコニウム、鉄

等)を 2,000℃ 以上の高温で熔融しコンクリートと反応させることで、生成した燃料デブリの特性を評価(図6)し、デブリ取出し装置の設計に反映している。

国際機関との協力

IAEA の損傷燃料や廃棄物に関する共同研究プロジェクト、OECD/NEA の TCOFF, TAF-ID, SAREF, PreADES 等の共同研究プロジェクトに参加し、事故時の材料科学的な知見の集積、燃料デブリの特性と分析に関する知見の収集等を行い、廃炉および基礎研究の知見の向上に貢献している。

また、2018 年度からは、国際的な人材育成プログラムとして、OECD/NEA の研究者育成プロジェクトである NEST(Nuclear Education, Skills and Technology)に参加し、活動を開始した。本プログラムでは、国内外の大学、研究機関等の研究者を交換し、専門的な知識を提供することで、将来的な人材の育成を国際的に加速する。

VI. まとめ

1F の廃炉は、必ず遂行するべき課題であるが、非常に困難な課題である。そのため、国内外の英知を結集して長期的に対応する必要がある。CLADS では、福島県富岡町の国際共同研究棟を拠点として、廃炉に必要な英知の結集を図ると共に、世界と連携するハブを目指して、各種の研究を実施している。また、国内外のアカデミアと連携し、人材の育成と基礎基盤研究の促進に力を入れており、2018 年度からは「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」に着手した。また、2019 年度より開始した「研究人材育成型廃炉研究プログラム」では、研究課題毎に連携ラボを構築し、JAEA が大学と緊密に連携した体制を構築しつつある。また、廃炉の全体を俯瞰し、基礎基盤研究と廃炉ニーズのマッチングを促進する観点から、廃炉研究の基礎基盤マップをとりまとめている。また、このマップは研究や廃炉作業の進捗に応じて、今後も改良を図って行く予定である。なお、来年度公募も予定されており、随時ホームページに掲載予定である。日本原子力学会の皆様の積極的な応募を期待したい。

一方、1F の事故は世界的に類を見ないものであり、その廃炉には世界各国より強い関心が寄せられている。1F の廃炉のリスクを低減するには、国内外の英知を結集して技術開発や改善を行い、課題を解決して行く必要がある。CLADS では、廃炉の課題解決に向けて、燃料デブリ、炉内状況把握、放射性廃棄物の処理・処分、遠隔技術の研究を国際協力も展開しながら推進している。JAEA と世界の研究所が協力する事で、1F の廃炉を安全かつ着実に遂行する事が期待されている。また、1F 廃炉の知見を国際的に共有し、次世代の原子炉の安全性の向上や廃止措置の検討に貢献することも期待されている。



図4 模擬燃料集合体の損傷挙動試験の比較^{2,3)}

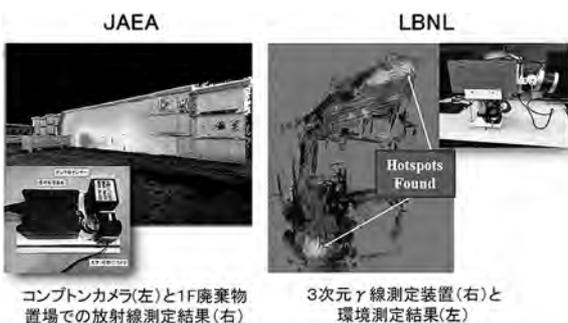


図5 放射線の3Dイメージング技術の連携

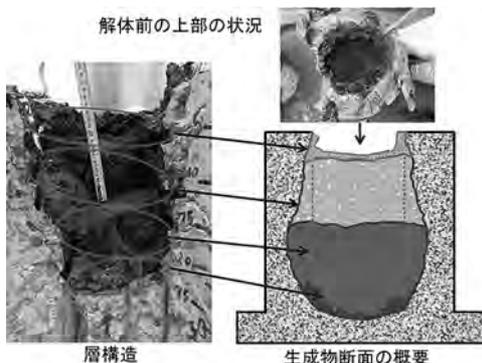


図6 MCCI 試験後の燃料デブリの状態

－ 参考文献 －

- 1) P. G. Martin, Y. Satou, et al., Provenance of uranium particulate contained within Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit 1 ejecta material NATURE COMMUNICATIONS, (2019) 10:2801
- 2) Quoted from H. Shibata et al., presented at TOPFUEL2016, Sep. 2016 @Boise, ID, USA.
- 3) Quoted from M. Steinbrueck, presented at FRC in July 2017 @Tomioka, Japan.

著者紹介



岡本孝司 (おかもと・こうじ)

日本原子力研究開発機構 廃炉国際共同研究センター, 東京大学 大学院工学系研究科

(専門分野)原子力工学 廃止措置

 From Editors 編集委員会からのお知らせ

－ 最近の編集委員会の話題より －

(1月14日 第6回 論文誌編集幹事会)

- ・11月16日から12月15日までに英文論文誌に10報, 和文論文誌に6報の新規投稿があった。
- ・英訳公表に関する監査からの指摘事項への対応が報告された。
- ・英訳出版事業の進捗状況が報告された。Vol.2の翻訳が終了し, 校閲中である。
- ・若手編集委員からの英文誌の今後に対する意見聴取の進行状況が報告された。
- ・論文誌 Special Issue 刊行に関する手順書の改訂案を承認した。
- ・福島廃止措置研究特集号の募集要項を検討した。
- ・国会図書館で公開された博士論文内容に関する論文受付の不可が確認された。

(2月4日 第7回 論文誌編集幹事会)

- ・12月16日から1月15日までに英文論文誌に26報, 和文論文誌に1報の新規投稿があった。
- ・英訳公表事業の進捗状況が報告された。Vol.2の翻訳が終了し, 校閲中である。Vol.3の翻訳会社を決定した。
- ・JNST Most Popular Article Awards 2020 を選考した。

- ・英文論文審査・査読要領の改訂案を検討した。審査の長期化を避けることをより明確に指示することとした。
- ・英文誌の Open Access 論文の著者からは当面は掲載料を免除することとした。

(1月14日 第7回 学会誌編集幹事会)

- ・「福島原発事故から10年」の企画素案を検討。今夏までに企画内容を確定させる。
- ・巻頭言, 時論, その他の記事企画の進捗状況を確認し, 掲載予定について検討した。
- ・2020年春の年会企画セッションから記事候補選出のため, セッション内容の確認をした。

(2月4日 第8回 学会誌編集幹事会)

- ・「福島原発事故から10年」の企画素案を検討。
- ・特集号発行に伴う校閲委員1名増員について説明があり, 承認された。
- ・記事種別一覧を現状に合わせて見直しを行い, 修正案で承認された。
- ・部会の活動を3カ月ごとHP等でチェックし, 学会誌に掲載することとした。5月号から掲載予定。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

廃炉検討委員会の取り組み—活動と成果

法政大学 宮野 廣
日本原子力学会廃炉検討委員会

福島第一原子力発電所の廃炉は9年目に入った。いよいよ炉内の燃料・燃料デブリの取り出しに取り組むまでに進展した。しかし課題は多い。技術的に解決しなければならない課題も多く、学会の役割は重要である。リスク評価、構造健全性、ロボット技術、サイトの活用を踏まえた廃棄物の予測と対応などについて検討を進め報告する。難しい課題については他の分野、ロボット工学や宇宙工学の分野からの協力も得て解決策を議論した。社会に向けては、公開のシンポジウムを中心に課題の解説と取組の例示を紹介して日本機械学会(JSME)との協働での国際会議を開催し、世界の原子力発電所の安全への貢献と福島第一の廃炉技術への貢献を議論した。

KEYWORDS: Fukushima-daiichi, Decommissioning, Committee of AESJ, Outcome and Future Contribution

I. はじめに

福島第一原子力発電所(1F)の廃炉は、かつて経験のない技術的な挑戦を伴いつつ、極めて長期にわたり継続される事業である。日本原子力学会(AESJ)としてこの問題に長期に取り組む、事故炉の廃炉が安全かつ円滑に進むよう技術的・専門的な貢献を行うため、平成26年度に福島第一原子力発電所廃炉検討委員会(以下、「廃炉委」と称す)を設置した。

設置5年目となった平成30年度は、個別検討課題に取り組む分科会の活動は下記の通り進展した。

- ・リスク評価分科会は3号機使用済み燃料取り出しを例に廃炉作業のリスク評価手法を検討した成果報告書¹⁾をとりまとめ活動を終了した。廃炉作業のリスク評価については、原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF)からの依頼もあり、新たに燃料デブリ取り出しのリスク評価結果のレビューを行なう「廃炉リスク評価分科会分科会」を平成30年8月に設け、活動を進めた。
- ・「建屋の構造性能検討分科会」は3号機原子炉建屋の耐震性を評価した中間報告書を取りまとめ、発刊した²⁾。
- ・「ロボット分科会」は廃炉に貢献できるロボット技術開発のあり方を検討した中間報告書を取りまとめた³⁾。
- ・「廃棄物検討分科会」は廃棄物処分の最終的なプラント・サイトの達成目標(いわゆる「エンドステート」)を見据えた検討を進めた。

廃炉委の情報発信、コミュニケーションのための活動が拡がり、学会内では秋の大会、春の年会にて定期的な

Periodic from Review Committee on Decommissioning of the Fukushima Daiichi NPS, Efforts of Review Committee on Decommissioning of the F-1NPS : Hiroshi Miyano.

(2019年10月31日 受理)

報告を行うとともに、春には定例の一般向けのシンポジウムを開催し、現状の廃炉の課題を報告した⁴⁾。

新たな取り組みとしては、日本原子力研究開発機構(JAEA)の協力を得て、JSMEの動エネ部門およびロボメカ部門と連携しての国際会議を開催した。本年5月にJビレッジにおいて、第1回の廃炉国際シンポジウムFDR2019(International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research)を開催した。

また、福島第一での廃炉作業が本格化する中で、支援を強化していかなければならない。廃炉委では、新たな検討グループを設定して、さらなる活動の展開を図っていく。

II. 廃炉委の分科会の活動と成果

平成30年度の活動を中心に以下にまとめる。廃炉委では、平成30年5月に新たに「廃炉リスク評価分科会」を設け、令和元年5月には「強度基準検討会」を設けた。新たな体制を図1に示す。

1. 既存分科会の活動

(1) リスク評価分科会

福島第一原子力発電所の事故が発生して8年を経過する中、様々な対策が実施された結果、燃料デブリは現在、一定の安定状態を維持していると考えられる。しかしながら、中長期的には安定状態からの逸脱や施設の劣化等の可能性があるため、燃料デブリを取り出して、より安定で安全な状態で保管することが計画されている。

燃料デブリを取り出す作業は、長期にわたることが予想されている。一部の従来の構造を残した燃料や一度溶融し再度固まった燃料デブリなどは、未だ压力容器内に

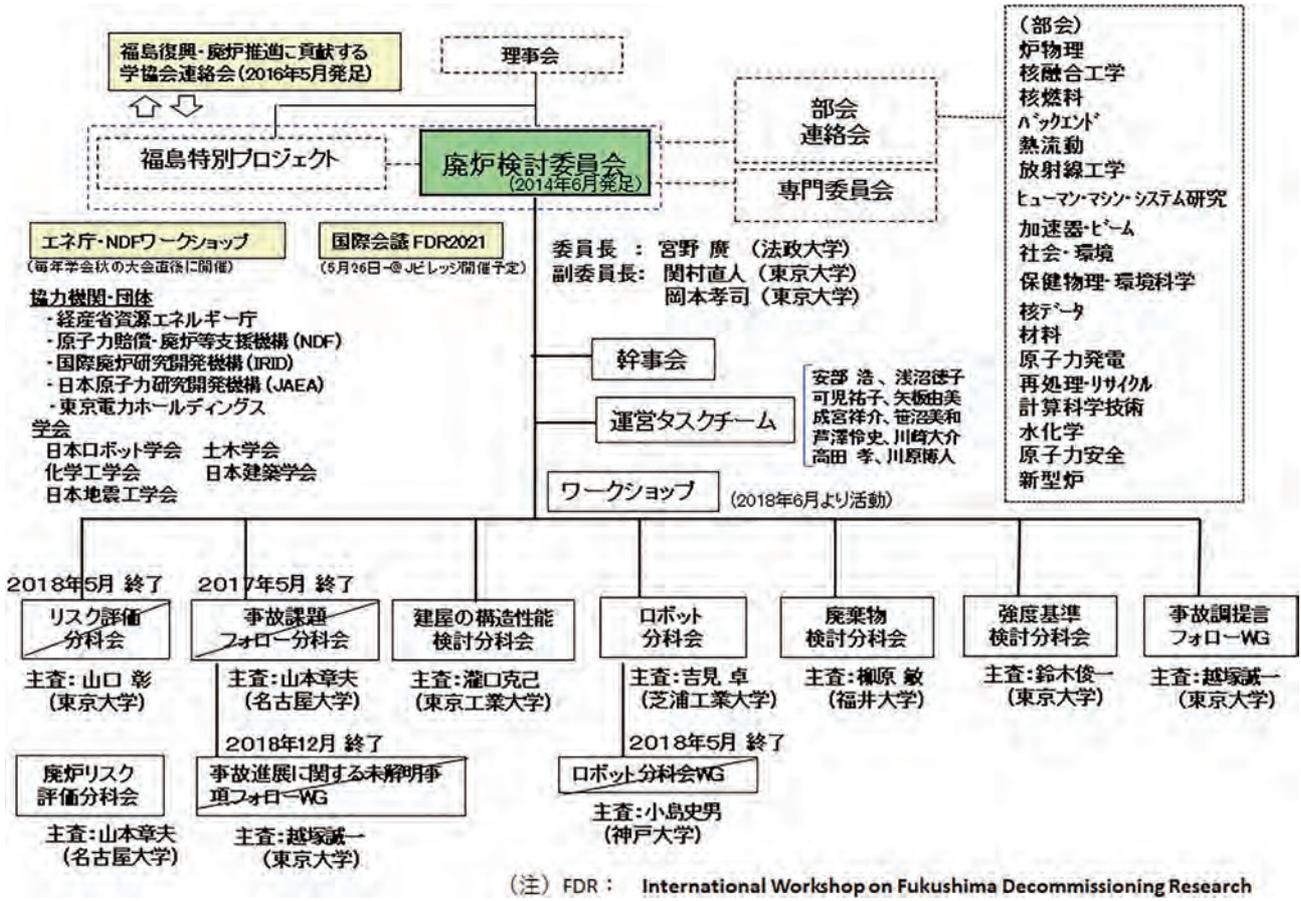


図1 原子力学会の福島第一の廃炉に係る体制

多く存在し、格納容器や原子炉建屋などの構造の健全性の確保は重要な課題であり、長期にわたり要求される。しかし、事故炉は多くの構造部分に従来求められていた健全性は失われている。だが、事故炉として福島第一の1号機、2号機、3号機の主要構造が、どこまでその健全性を確保すればよいかについては、これまでは議論はない。

本分科会では、損傷を受けて一部機能を失っている構造物に対しての適切な安全にかかわる管理目標を議論し、適切な基準に対する考え方をまとめて提言すること、また、福島第一の廃炉において、安全性(放射線に係る安全と労働安全)、環境の保全、およびプロジェクトの管理(廃炉プロセスの滞りなく進捗に係る課題の解決)に資するための、定量的リスク評価とリスクマネジメントに関する提言を行うことを目的とした。まず、安全に関する管理目標について議論し、報告書を取りまとめ発刊した⁵⁾。

リスクにかかわる構造物の健全性を評価する強度基準は様々な構造評価や組織に関連するものであり、広く議論を進めて、コンセンサスを作ることが望ましい。

福島第一の廃止措置は、リスク情報を用いた意思決定(RIDM)を慎重かつ適切な迅速さで行っていくことが必要であると考え。施設内における作業の円滑化、安全確保にリスク情報を役立てるだけでなく、社会とのコミュニケーション、社会からみた指標導入、などの社会

とのつながりを意識したRIDMにも大いに役立てることが重要である。廃炉のプロセスにおけるリスクマネジメントが適切に行われなければ、技術開発そのものは順調であったとしても社会からの信頼が劣化しかねない。特段の対応を必要としないトラブルと、重要で的確に対処すべきトラブルを峻別し、そのリスクマネジメント上の意味と影響評価を社会に発信し、円滑な廃炉プロジェクト遂行に資することを期待する。

今後、デブリの取出しのステージに移っていくと考えるが、この方法論をすぐにデブリ取出しに応用することは難しいので、新しい体制の中で、デブリ取り出しの各ステップの技術面のリスク評価だけでなく、全体(社会影響)をみた方法と指標を考えることが必要である。

(2) 建屋の構造性能検討分科会

福島第一原子力発電所の建屋構造の健全性評価では、大規模地震時に荷重が集中する部位-原子炉圧力容器本体基礎、サブプレッションチェンバ等の構造健全性や原子炉圧力容器(RPV)および原子炉格納容器(PCV)の損傷による汚染水の閉じ込め機能が要求される。

本検討では、原子炉建屋の耐震性評価の検討対象事象として、使用済燃料の冷却中断、燃料デブリの閉じ込め、地下滞留水の漏えいの3項目に着目した検討対象事象に対して、考慮する地震動、地震応答解析手法、解析結果の評価等の妥当性について、技術指針および規定、既往

の知見から総合的に評価した。代表例として3号機を取り上げた。

結果、燃料取り出し開始までの期間において、使用済燃料プール損傷、生体遮へい壁損傷および地下外壁損傷に係わる原子炉建屋の想定する地震動に対する耐震安全性は、確保されていると評価することができることを確認した。今後の耐震性の評価については、燃料デブリ取り出しの段階以降においては、廃炉完了までの期間が非常に長いことを前提として以下の課題が挙げられる。

- ・ 溶融燃料により高温となったRPV ベDESTAL
- ・ 熱影響を受けた生体遮へい壁
- ・ 塩分の影響を受けた鉄筋コンクリートの経年変化

(3) ロボット分科会

福島第一原子力発電所に適用するロボットは重要な技術の一つである。ロボットへの提案活動は様々に行われているが、廃炉委ではロボット学会との共同で貢献を模索している。視点を広げ、多彩な視野での取り組みを行い、成果を報告書にまとめ発刊した。概要を以下に示す。

福島第一原子力発電所の廃炉に向けた廃炉のための斬新なロボット技術を求めて、「あなたの技術・アイデアに基づく新しい廃炉のためのロボット技術提案」の公募とコンペを行った。斬新なアイデアについて各方面より積極的な提案があった。頂いた案件については、日本ロボット学会廃炉に向けたロボットの調査研究および社会貢献に関する研究会、日本原子力学会廃炉検討委員会ロボット分科会を通して、開発を進めている国際廃炉研究開発機構(IRID)を中心に現場に活用されるよう配慮して行きたい。提案されたものの中で注目されたものは、「ミミズ・アメンボ等の生物規範ロボットの協力作業による廃炉システム(中央大学)」、「デブリサンプリングのための複数ロボットシステム(芝浦工業大学)」、「Twin-tube 構造による柔軟レール仮設式流体駆動ロボット(東京工業大学)」、「ワイヤーロープ吊り下げ式デブリサンプル採取装置(オキノ工業株式会社)」、「エンドエクスペローラ(芝浦工業大学)」、「ヘビ型ロボットによる狭隘空間、水中の移動および弾丸燃料デブリ粉砕吸引回収(芝浦工業大学)」などである。

(4) 廃棄物検討分科会

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に係る中長期ロードマップでは、2021年から残存燃料および燃料デブリの取り出しを予定している。

これは1Fを放射能汚染の拡散を防止する管理状態から解放し、新たな活用のための目標とする状態の達成を目指すゴール(達成目標)に向けた第一歩である。

但し、発生する大量の放射性廃棄物を着実に処理・処分することが必須の要件となる。また、ゴールに至る過程には様々な選択肢(シナリオ)がある。

そこで、国際機関における廃炉・サイト修復に係る検討内容の調査、わが国の廃棄物管理に係る現状の整理、

これまでに発生した廃棄物の物量、性状、処理・保管状況の調査を進めるとともに、今後発生すると予想される廃棄物量の推定結果などにに基づき、達成目標を視野に入れた廃炉とサイト修復の方針および廃棄物管理シナリオを検討した。

「放射性廃棄物をできるだけ発生させない」ために、以下の視点が重要である。

- ・ どこまで解体するのか(「建屋解体まで(地下構造物残存)」、「全て解体撤去」など)。
- ・ どこまで除染するのか(「サイトの除染・修復の程度」)など、いくつかの選択肢がある。

これらの選択肢を考慮した上で、代表的なシナリオを抽出して、廃棄物発生量を半定量的に試算しシナリオの特性を分析した。

この検討の目的は、将来、1Fの廃炉・サイト修復の最適なシナリオ決定を行うための検討に供する情報を提供することにある。すなわち、1Fサイトの利用方法、廃棄物の行先などに係るステークホルダーを含めた議論は必須の課題であり、原子力の専門家集団は必要な情報を提供していかなくてはならないと考える。

1Fサイトを元の状態に戻す、又は有効に利用するためには、世代を超えた取り組みが必要であり、達成目標を決定する上で、将来の施設や土地の利用、その周辺で活動する様々な立場の人々を含めた議論が重要である。

1Fサイトおよびその周辺の土地が利用できる状態に持つていくには事故から40年以上の長い期間を要することを考えると、早急に議論を進めることが必要である。

これらの廃棄物の取り扱いが世代を超えた長期に亘ることが予想される。今の世代が実施すべきこと、次の世代に託すことを明らかにして、今の世代で実施すべきことは十分な計画検討の下に、達成目標を目指して早期に取り組むことが重要と考える。

2. 新たな分科会の活動

(1) 廃炉リスク評価分科会

福島第一原子力発電所の事故が発生して8年を経過する中、様々な対策が実施された結果、燃料デブリは現在、一定の準安定状態を維持していると考えられる。しかしながら、中長期的には準安定状態からの逸脱や施設の経年劣化等の可能性があるため、燃料デブリを取り出して、より安定で安全な状態で保管することが計画されている。作業は、「リスク」を見ながら判断して進める計画である。従って、廃炉作業時のリスクを評価する手法が重要な役割を持つ。分科会を立ち上げて、検討を進めてきた。

燃料デブリを取り出す作業は、現在の準安定状態に手を加え、格納容器に開口部を設けて燃料デブリにアクセスし、準安定状態に変化をもたらす行為であり、作業に伴って放射線リスクが増加する可能性がある。そこで、

このようなリスクの変化を考慮しつつ燃料デブリに起因するリスクを速やかに低減するための燃料デブリの取り出し作業を進めなければならない。このリスク低減戦略を検討するにあたっては、これらのリスクをできるだけ定量的に評価することが重要となってくる。

このような観点から、燃料デブリ取り出し時のリスク評価方法を確立しなければならない。廃炉リスク評価分科会は、検討されているリスク評価手法について、各分野の専門家の観点で、レビューを実施することを通じて、その改善と手法として確立することに資することを目的に検討を進めてきた。リスク分析手法を中心に中間報告をとりまとめ発刊した。

(2)強度基準検討分科会

福島第一原子力発電所の事故が発生して8年を経過する中、様々な対策が実施された結果、燃料デブリは現在、一定の安定状態を維持していると考えられる。しかしながら、中長期的には安定状態からの逸脱や施設の劣化等の可能性があるため、燃料デブリを取り出して、より安定で安全な状態で保管することが計画されている。

燃料デブリを取り出す作業は、長期にわたることが予想されている。一部の従来の構造を残した燃料や一度溶融し再度固まった燃料デブリなどは、未だ圧力容器内に多く存在し、格納容器や原子炉建屋などの構造の健全性の確保は重要な課題であり、長期にわたり要求される。しかし、事故炉は多くの構造部分に従来求められていた健全性は失われている。だが、事故炉として福島第一の1号機、2号機、3号機の主要構造が、どこまでその健全性を確保すればよいかについては、これまでは議論はない。そこで、本分科会では、損傷を受けて一部機能を失っている構造物に対しての強度基準の在り方を議論し、適切な基準に対する考え方をまとめて提言することを目的とする。また、強度基準は様々な構造評価や組織に関連するものであり、広く議論を進めて、コンセンサスを作ることが望ましい。

3. 廃炉委での検討ワークショップの活動

(1)位置づけと活動の概要

廃炉委として、全体をカバーする課題について、特に自由に意見交換、議論する場として、「廃炉委ワークショップ」を始めた。毎回、多くの外部団体の方、専門家の参加を得て、下記のテーマで活発な議論を行った。

- ・第1回テーマ：廃炉のロードマップ
- ・第2回テーマ：廃炉の安全に関わる管理目標とは
- ・第3回、5回テーマ：廃炉の“廃棄物の取り扱い”について
- ・第4回テーマ：事故炉廃炉における放射性物質/放射線の閉じ込めのためのバウンダリーの考え方について
- ・第6回テーマ：事故炉廃炉における自然事象(外的事象)に対する備えを議論する上での前提条件

- ・第7回テーマ：宇宙・衛星の信頼性技術と事故炉廃炉向けロボットへの展開

各会約20人の参加で議論を進めている。報告は、それぞれのテーマの報告書に反映するとともに、国、NDF、東電に情報を提供する。

(2)論点の概要

議論した概要を以下に示す。

- ・廃炉のロードマップ

廃炉には新技術開発が必要、既存の技術と組み合わせるマネジメントも重要であり、長期的視点の政策が必要である。福島第一廃炉のリスク管理において時間的、俯瞰の見方が必要であり、戦略マップに繋がる研究開発を行うべきである。

- ・廃炉と管理目標

事故炉には「管理目標」-目指すゴールから定量管理の性能目標を設定する必要がある。追加の危険性(潜在リスク)を減らすように作業を行う、と同時に、現状のリスクを避ける。誰が責任を持って、管理目標を設定し監視して進めるのか、の仕組みが必要である。

- ・廃炉での廃棄物の取り扱い

エンドステートの議論の前に、理念、考え方-住民への対応、技術の将来など-を示し、エンドの位置づけ、最終、中間、などの設定も考えて、敷地と廃棄物量との関係を考え、リスクとの関係を踏まえ、作業を検討するBackCastの考え方を取り入れて議論しなければならない。1F廃炉は廃棄物を中心に考えるべきであり、各ステップでは廃棄物を念頭に置いて、選択しなければならない。その結果として、最終的にサイトをどの様にするのか(エンドステート)、という観点は重要である。どこまで取り組むべきかでは、シチュワードシップの考え方-適切な時期まで管理しながら適切な保管を行うことを指す-も必要になる。

- ・放射性廃棄物の閉じ込めのバウンダリーの考え方

バウンダリーの考えは安全管理と共に考える。安全とは何かを念頭に、管理目標は住民との合意も視野に決めて行かなければならない。グレーデッドアプローチの考え方が必要であるが、リスク評価、管理と合わせて決めなければならない。

- ・外部ハザードにどこまで対応すべきか

福島第一の廃炉でも新基準を適用すべきではないかと言う指摘に対して、そのままでは適用できないことをとらえて議論を進めるべきである。福島廃炉でも「廃炉での深層防護」の構築の検討が必要である。

- ・ロボットの信頼性をどのように考えるか

厳しい環境、条件は宇宙も原子力も共通である。Unknownが多い原子力の方が厳しいのではないかと、言う意見もある。実物・実地での実証が難しい中で、品質を確保しなければならない。他分野の取り組みを取り入れた評価が必要である。

ゴール(途中で変わらない目的)を明確にして、ニーズ(ステークホルダーの明示的・非明示的要望)と要求(実現の手段、ものつくりの規格・基準やその検証の内容)が一致していることをステップステップでタイピングすること(確認する)、検証目的に即したコンフィギュレーション管理が重要である。これらは、作業実施の関連部門で、それぞれが認識して進めることが必要であるが、特に作業全体の責任者が認識して実行することが重要である。

Ⅲ. 情報の発信

平成30年度と令和元年上期の活動を以下にまとめる。

1. 2019年春のシンポジウム

福島第一事故後ほぼ8年が経過した3月9日に、機械振興会館にて、一般向けのシンポジウムを以下の内容で開催した。

テーマ:「東京電力福島第一原子力発電所の廃炉—第4回: 確実な廃炉のために今すべきこと—」と題して、「事故炉の廃炉の全工程とホールドポイント」、「事故炉の安全確保と管理目標」、「廃炉とサイト修復の最終の姿に向けた廃棄物の取り扱い」、「自然現象に対する事故炉の安全性評価」、「新技術への挑戦—国の補助事業による研究開発」、「国際協力への提案」について報告、議論を行った。

約120名の参加を得て活発な議論が行われた。現状のロードマップは不十分であり、十分な議論ができていない。原子力学会はこの充実に協力し、確実に廃炉を進めていくため貢献していく。

2. 福島第一原子力発電所の廃炉に係る国際研究者会議

—「International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research FDR2019: May24-26, 2019, J-Village, Naraha, Fukushima, JAPAN」を開催

40年にも及ぶとされる東京電力福島第一原子力発電所の廃炉について、国内外の技術者や研究者が最新の研究成果などを報告する国際会議⁶⁾を福島のJビレッジで開催した。JSMEからは、ロボ・メカ部門、動エネ部門が参加し、AESJからは廃炉が参加、両学会として初めての協働の国際会議の開催となった。JAEAをはじめとする関係機関、学会から多くのボランティアによる支援を受け運営された。

各国の技術者や研究者など180人余りが参加した。特に海外からの論文の投稿も多く(40%超)、各会場で常時50人程度が参加する有意義なものとなった。

会議の冒頭のプレナリーで、NDFの山名理事長から、福島第一原発の廃炉の現状を説明し、世界中の研究成果と技術の結集が重要であること、資源エネルギー庁の新

川審議官からは、福島第一の廃炉は福島の復興につながるものでなければならないことが訴えられた。

三日間の会議では、遠隔操作の技術や廃棄物管理、過酷事故解析の高度化、デブリの特性、放射線計測など5つの分野に分かれて発表と議論がなされた。合計104件の論文が発表され、熱心な議論が行われた。廃炉の現状は、「燃料デブリの取り出しなど、これからいよいよ難しい段階に入る」、「難しいチャレンジになる。世界の技術者の英知を結集し、連携を深めていく必要がある」が共有された。

Ⅳ. 今後の活動

福島第一の廃炉作業は、難しい段階に入る。

○2021年の10年目に向けた“廃炉委”の提言のフォローの活動を始める。特に、背後要因のうち組織的なものに関する事項の分析や専門家集団としての学会・学術界の取組みの在り方の検討がどこまで進んだのか重要な論点である。

○課題解決型のWSの開催を継続する。

例えば、トリチウム水への対応、風評被害、計量管理、弁別の考え方、クリアランスの評価法などがあげられる。

「風評被害」への対応は、最大の課題となりつつあるが、学会としてどのように対応すべきか、議論を進め、できる貢献を行わなければならない。

— 参考文献 —

- 1) 「リスク評価分科会の活動のまとめ～廃炉の過程におけるリスクの評価とマネジメント」、2018年発刊、廃炉委HPに掲載。
- 2) 「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会・建屋の構造性能検討分科会・中間報告書(2017年度版)—燃料取り出し開始までを対象とした原子炉建屋の耐震安全性について」、2019年発刊、廃炉委HPに掲載。
- 3) 「ロボット分科会中間報告—ロボット技術への期待」、2018年発刊、廃炉委HPに掲載。
- 4) 日本原子力学会 廃炉検討委員会活動報告PPT2017年、2018年、2019年の春の廃炉委シンポジウムおよび学会年会、秋の大会での企画セッション報告、廃炉委HPに掲載。
- 5) 「福島第一原子力発電所の廃炉作業に関わる管理目標の考え方について」、2019年発刊、廃炉委HPに掲載。
- 6) 日本機械学会学会誌2019年10月号、Vol.122, No.1211, P4-P23.

著者紹介

宮野 廣 (みやの・ひろし)

法政大学

(専門分野/関心分野)システム安全、機械工学、保全学



SMR 開発の展望

東京工業大学 小原 徹

近年小型モジュラー炉(SMR)の開発が活発に行われている。小型炉の研究はすでに長い歴史があり、様々な炉型に対して研究が行われてきた。最近の開発の特徴は、十分確立された技術をもとにして早期に市場投入を図ろうとしている点などが挙げられる。様々な工学分野では新たな技術革新がもたらされており、また原子力利用を取り巻く環境も大きく変わってきている。新たな技術をうまく取り込み、社会のニーズに応えることがSMR実現の鍵となると思われる。

KEYWORDS: SMR, Small Modular Reactor, Light Water Reactor, Fast Reactor, Gas Cooled Reactor, Molten Salt Reactor, Innovation, Reactor Physics

I. はじめに

近年小型モジュラー炉(SMR)に関心が集まっている。一般に動力炉は小型になると発電単価が高くなるため、発電コストを下げるために原子炉を大型化し一基あたりの出力を大きくすることがこれまで行われてきた。一方で小型の動力炉は、建設時の初期資本が小さくてすみ投資リスクを小さくできる、受動的安全性能の高い原子炉を設計しやすい、送電コストが高くなる遠隔地での利用に適する、地域の熱供給といった地域のニーズに合わせたエネルギー供給が可能といった利点を持っている。小型動力炉の高コストの問題を解決するための方法としてSMRという概念が考案された。SMRの概念は、原子炉の設計を規格化して型式認可をとり、同じ設計の原子炉を工場で多数製造し、さらに建設サイトでの工程は出来るだけ少なくすることで、量産効果により製造・建設コストをできるだけ小さくしようとするものである。さらに、受動的安全性能を出来るだけ生かし、シンプルなデザインとすることでコストの低減をはかることが行われる。SMRの概念自体は以前から存在したが、最近の動向の特徴として、海外のベンチャー企業が独自のSMR設計概念を提示し、ライセンスを取得した上で市場投入しビジネスとして成功させようとしていることがあげられる。これらの開発ではすでに十分に確立された技術を用いて短期間で開発を行い市場投入を図ろうとしている点の特徴と言える。

II. 30年前の小型炉研究

SMRを含む小型炉の研究は30年以上前から行われてきた。1991年には東京工業大学でInternational Specialists'

Meeting on Potential of Small Nuclear Reactors for Future Clean and Safe Energy Sources (SR/TIT)が開催されている^{1,2)}。小型炉に特化した国際会議としては日本国内ではじめてのものであった。会議のプロシーディングス³⁾から当時はどのような議論がなされていたか振り返ってみたい。この約30年前の会議のプロシーディングスには様々な小型炉の概念の論文が掲載されている。炉型別にみると、軽水炉では、小型PWR、小型BWR、動力用TRIGA炉の概念が紹介されている(10件)。高速炉では、10件の小型高速炉概念に関する論文が掲載されており、冷却材はナトリウム冷却または鉛・ビスマス、燃料は酸化物もしくは窒化物に加えて鉄プラトニウム合金による液体金属をピンに封入した燃料による設計例も示されている。ガス冷却炉(3件)では、小型プリズム型高温ガス炉、小型ペブルベッド型高温ガス炉の概念が示されている。さらに、小型炉の利用に関する論文(7件)もあり、遠隔地でのエネルギー供給、宇宙、地域熱供給、海洋(船用、海底)、医療利用が挙げられている。これらの小型炉の設置については、都市の地下に設置する概念も提示されている。また、小型熔融塩炉概念に関する論文(1件)も掲載されている。さらに本プロシーディングスには、小型炉の導入の意義や導入計画に関する論文(10件)も収録されている。この中には、小型炉のメリットとして、小型であるためシステム全体の把握・理解が容易で安全性評価も容易になる、工場で製造することによって安定した品質が期待できる、機器や部材がすべて小型であるため設計裕度が確実に把握でき不要な裕度が省ける、メンテナンスや点検が容易になる、小型炉を複数同時に運転することで原子炉停止による電力供給の不安定化を回避できる、実験炉、原型炉、実証炉のように段階を踏んで大型化する必要がないので開発ステップを簡素化できる、事故予防的な運転停止の躊躇がなくなる、比較的少人数のチームによる効率的な

Outlook for SMR development : Toru Obara.

設計・製造ができるなどを挙げる一方、タービン等の熱系を小型化するとデメリットが大きいため小型炉とどのように整合させるかといった課題や安全規制が小型炉に対応する必要があるという点も指摘されている。一方でCO₂放出抑制への貢献についての言及は少なく、現在のような脱炭素の大きな動きは予見できていない。

この当時の研究は概念検討の段階の研究であるのに対し、現在は実際の導入を見据えた研究・開発が行われているといえると思う。当然ながら思いつきで炉概念を決めて開発を進めても実を結ぶ可能性は低い。SR/TITの後にも様々な小型炉概念の研究が多角的に行われてきた。これまで行われてきたSMR研究で得られた知見を十分に生かすことが今後のSMR開発成功の鍵と思われる。

Ⅲ. これからの SMR 研究

筆者の専門が炉物理なので、SR/TITで示されている原子炉概念を炉心構造という観点から眺めてみたい。提示されている炉心概念は熔融塩炉を除いて、すべてピンセルを用いた軽水炉・高速炉あるいは被覆燃料粒子を用いた黒鉛減速炉であり、当時すでに実用化されたあるいは実用化に近い段階まで開発された大型炉の炉心構造と大きな違いはない。炉心解析手法については明確に記載されていない論文もあるが、大型炉の設計のために開発された決定論的解析コードを用いていたと見られる。このため用いられていた炉物理手法は基本的に大型炉のものと同じであったといえる。このような状況は約30年経ってもほとんど変わっていないように思われる。近年公表されているSMRの多くはモジュラー化、工場生産と現地での設置、受動安全性能を生かしたシンプルなデザインを強く強調しているものの、その炉心は基本的には大型炉のそれと同じである。これを炉心解析という観点から見るとSMRだからと言って特別な炉物理解析手法が必要という状況にはない。原子炉工学のほかの分野でも同様なことがいえるかもしれない。

しかしSR/TITが開催された後30年間の間、様々な工学分野において技術革新が起こっている。例として挙げれば、最近注目を集めている技術として金属の積層造形技術(Additive Manufacturing, AM)がある。これは言ってみれば金属用3Dプリンターで様々な部材を作成する技術であり、近年その技術は急速に向上し、さまざまな金属でより複雑で大型の部材を安定した性能で作成できるようになってきた⁴⁾。AMを用いると、これまで製造できなかった形状の部材を容易に作成することが可能であり、また一度プログラムができれば何を作っても製造コストは変わらないため、複雑な形状で多種多様な

ものを小數ずつ作る場合でもコストが高くないという利点がある。小型炉では炉心が小さいため中性子の漏れが多くなり、熱炉の場合は装荷燃料の濃縮度を高くする必要があり、また高い燃焼度を期待することは難しくなる。また高速炉の場合は燃料の転換等の効果を期待することが難しくなる。AMを用いることでピンセルや粒子以外の形状の燃料要素やさまざまな形状の炉内構造物が低コストで製造可能となれば、中性子の漏れが少なく除熱性能の良い炉心が実現できる可能性も考えられる。炉心解析の観点から見るとこのような場合、今までに無い全く新しい形状・構造・組成の燃料要素・炉心に対しても、解析が精度よくかつ高速に行えることが必要になってくることになり、炉物理解析も新しい手法が必要になってくるかもしれない、新しい研究開発のニーズが発生する。ここでは、AMを取り上げてみたが、これは最近の技術革新の単なる一例として取り上げたに過ぎず、現在の他の様々な分野の革新的技術がSMR開発に生かせる可能性は十分にあるものと考えられる。

約30年前のSR/TITのころから原子力利用を取り巻く状況は大きく変化した。それは例えば、安全性要求の高度化であり、巨額投資リスクへの警戒であり、世界的な脱炭素化への大きな動きであり、再生可能エネルギーの積極的利用を求める社会である。同時に、この約30年間の間に、さまざまな分野で当時は想像できなかったような新しい技術が開発され実用なものとなっている。新しい技術をうまく取り込み社会からの要求にこたえられるものが提示できるかどうか今後のSMR実用化の鍵となるものと思われる。

— 参考文献 —

- 1) 関本博, 「小型炉のポテンシャル専門家会議」, 日本原子力学会誌, Vol. 34, No.2, pp.135-136 (1992).
- 2) 小原徹, 「SR/TIT -会議の概要と運営の裏話」, 炉物理の研究, 第41号, 41項-44項, 日本原子力学会炉物理部会, 1992年3月.
- 3) Hiroshi Sekimoto (Editor), Potential of Small Nuclear Reactors for Future Clean and Safe Energy Sources, Elsevier (1992).
- 4) T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, et al., "Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties," *Progress in Materials Science*, Vol.92, pp. 112-224 (2018).

著者紹介



小原 徹 (おばら・とおる)

東京工業大学科学技術創成研究院先導原子力研究所
(専門分野/関心分野)原子炉物理学, 革新炉工学, 臨界安全

東芝エネルギーシステムズ(株)における小型炉の開発

東芝エネルギーシステムズ 浅野 和仁

当社では、燃料無交換型ナトリウム冷却小型高速炉「4 S」(10 MWe, 50 MWe)¹⁾での経験や知見を活用・反映し、300 MWe クラスの高温ガス炉と 3 MWe 級の超小型炉(MoveluXTM: Mobile-Very-small reactor for Local Utility in X-mark)²⁾の開発を進めている。高温ガス炉は蓄熱システムを組み合わせることで、再生可能エネルギーの電力需給変動に対応可能なベースロード電源としての 600 MWt 級の発電プラントを指向し、国内技術として確立した技術をベースとした開発を進めている。並行して原子力イノベーションを追求した新たな概念として 10 MWt 級の超小型炉(MoveluXTM)の概念設計を進めている。本稿ではそれぞれの特徴について紹介し、今後の取組み方針ならびに課題について概観する。

KEYWORDS: HTGR, micro reactor, economics, passive safety

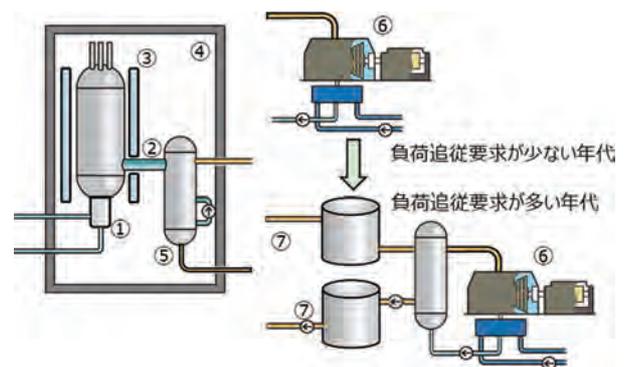
I. 高温ガス炉

優れた安全性と多目的利用に応え得る次世代炉として高温ガス炉の開発を進めている。高温ガス炉は発電だけでなく水素製造や産業プラント熱供給などへの用途に対応可能なポテンシャルを有する。当社は日本原子力研究開発機構の高温工学試験研究炉(HTTR)³⁾の設計、建設などにより得られた知見を基に経済合理性と安全性を兼ね備えた商用炉の開発を進めており、同機構ならびに富士電機株式会社、原子燃料工業株式会社等と連携し、2030 年代の上市を目標とする概念設計活動を進めている。高温ガス炉は 750 °C 以上の熱供給が可能であることから、適切な蓄熱システムを組み合わせることで再生可能エネルギーの電力需給変動に対する調整力を有したベースロード電源としての発電プラントを構成できる。国内技術として確立した高温ガス炉と蒸気発電技術に、実現性のある蓄熱システムを組み合わせることで、早期実用化と社会的要請に応える 600 MWt 級の高温ガス炉の開発を目指している。主要仕様を表 1 に示す。

安全性に関しては高温ガス炉固有の安全性の最大限の活用と最新知見に基づく安全性の向上を図り、社会的受

容性と経済性の両立を目指す。図 1 に技術概要と主な特徴を示す。

今後は 2030 年代に実現可能と考えられる商用高温ガス炉プラントおよび蓄熱システムの設計条件の検討を通じて全体システム構成の設定を進めるとともに、高温ガス炉の特徴を踏まえた安全シナリオ構築や確率論的リスク評価ツールの整備を通じて、規制側による安全性評価に向けた基本方針の策定を進める予定である。



- ① 原子炉压力容器：低合金鋼(Mn-Mo 鋼)によるコストダウン
- ② サイド・バイ・サイド配置：高温配管短縮、およびスリーベッセル構造概念による信頼性向上
- ③ 炉容器冷却設備：パッシブな自然循環冷却方式による事故時の崩壊熱除去
- ④ コンファインメント：被覆燃料粒子の高い閉じ込め機能と組み合わせた格納容器を不要とする閉じ込め機能概念
- ⑤ 蒸気発生器(He-蒸気)：負荷追従要求が少ない年代
中間熱交換器(He-溶融塩)：負荷追従要求が多い年代
- ⑥ 蒸気タービン発電：確立済み技術による早期実用化
- ⑦ 蓄熱槽：太陽熱発電で実用化されている高温・低温蓄熱システムと組み合わせることで負荷に応じた発電を行う

表 1 高温ガス炉の主要仕様

炉型	ブロック型
冷却材	ヘリウムガス
熱出力/電気出力	600 MWt / 約 240 MWe
一次系温度/圧力	750 °C (原子炉出口 / 4 MPa)
燃料	セラミック製被覆燃料粒子
運転サイクル	約 2 年

Development of SMR by Toshiba Energy Systems and Solutions : Kazuhito Asano.

(2019 年 11 月 21 日 受理)

図 1 高温ガス炉の技術概要と特徴

II. 超小型炉 (MoveluX™)

イノベーションを追求した原子力プラント開発の一環として、多様なエネルギー源と共存する 10 MWt 級多目的超小型炉の概念構築を進めている。本プラントはヒートパイプ採用による原子炉冷却系の動的機器排除および炉心の受動的除熱の実現、中性子減速には水素化カルシウムなどの固体減速材の適用により高温で受動的炉停止が可能な固有安全性を主たる特徴としており、約 700 °C の熱供給が可能な多目的かつ可搬性に優れた原子炉である。主要設計仕様とシステムイメージを表 2、図 2 にそれぞれ示す。

表 2 超小型炉 (MoveluX™) の主要設計仕様

出力	10 MWt / 約 3 MWe
運転期間	> 10 年
減速材	水素化カルシウム (CaH ₂)
一次冷却システム	ヒートパイプ
炉心圧力	大気圧
濃縮度	5 wt% 未満
受動的崩壊熱除去	ヒートパイプ及び炉壁面からの空冷自然循環

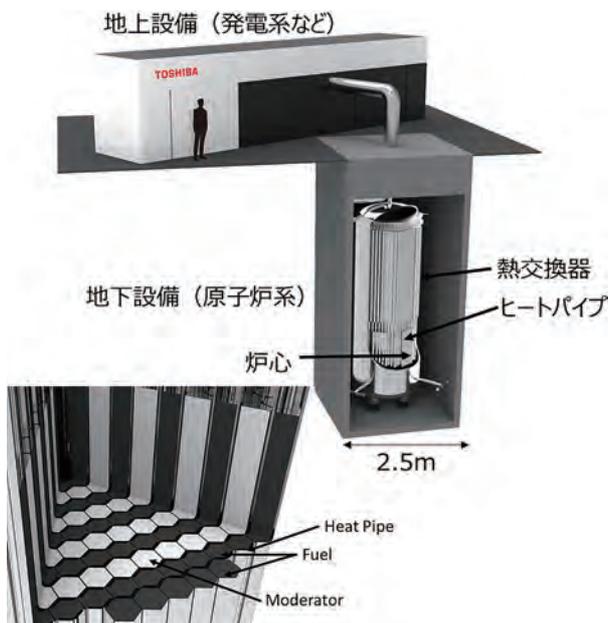


図 2 MoveluX™ の設置イメージ

課題となる経済性については、ヒートパイプの採用によるポンプレスな原子炉システムの実現とそれに伴う原子炉システムの簡素化・小型化を図るとともに、濃縮度 5 wt% 以下のウラン燃料を用いることによる燃料コスト低減などを通じて原子炉システムの設置・運転コストの低減を目指す方針としている。今後は最新の需要や顧客要望の調査・整理とそれに基づくシステム構成、炉心・除熱および安全システム・利用可能な材料候補選定など原子炉システム自体の成立可能性、分散型原子炉特有の規制・核セキュリティ・保障措置上の課題、潜在市場の調査を進める予定である。

III. まとめ

高温ガス炉はモジュールによる共通化、簡素化と習熟効果を狙いつつ、高温や固有安全の利点を便益にどのように取り込めるのか、その経済性評価に挑戦していく。超小型炉は、4S でも目指した砂漠緑化電源、地域分散電源や資源開発熱源にも活用できるポテンシャルを有する。ニーズの多様化がすすむ中、これまでにない一層多くのユーザーニーズに応えるべく、原子力イノベーションの追求に向け、宇宙開発用、大深度地下開発用、災害時対策用など、これまでの制約条件を一切取り払った柔軟な発想が求められるであろう。

— 参考文献 —

- 1) Y. Tsuboi, K. Arie, N. Ueda, T. Greci "Design of the 4S Reactor" Nuclear Technology, vol.178, No.2 201-217, 2012.
- 2) R. Kimura, et al, "The Conceptual Design of Heat-Pipe Cooled and Calcium Hydride Moderated vSMR", Proc. ICAPP2019, Juan- les- pins, France, May 12- 15, 083, ICAPP2019, 2019.
- 3) <https://htrr.jaea.go.jp/>

著者紹介



浅野和仁 (あさの・かずひと)
東芝エネルギーシステムズ(株)
原子力先端システム設計部
(専門分野/関心分野) 安全解析, 新型炉
プラント開発

日立 GE ニュークリア・エナジーにおける取り組み状況

日立 GE ニュークリア・エナジー(株) 木藤 和明

安全でクリーンな原子力発電が市場競争力を高めるには、他電源より低い発電コストと、資本費および資本リスクの低減が必要である。このようなニーズに応えるため、米国 GE Hitachi Nuclear Energy 社と共同で、BWR の特長を生かし、安全性と経済性を両立した小型軽水炉 BWRX-300 を開発している。BWRX-300 は小型原子炉のスケールメリットを克服し、大型原子炉を大幅に下回る建設単価の実現を目指す。本報では、BWRX-300 の特長や、実用化に向けた技術開発について記載した。

KEYWORDS: *Small Modular Reactor, BWR, BWRX-300, Plant Concept*

I. 日立の原子力ビジョン

日立 GE ニュークリア・エナジー(以下、日立 GE)では、BWR 建設経験と燃料サイクル技術を元に、初期投資リスク低減、長期的な安定電源確保、放射性廃棄物有害度低減を実現する新型炉の開発を目指している。これらを実現する新型炉として、小型化・簡素化により安全性と経済性の両立を目指した次世代小型軽水炉 BWRX-300、実績豊富な軽水冷却技術を用いた高速炉 RBWR、固有安全性を追求した金属燃料・液体金属冷却の革新的高速炉 PRISM の3つの炉型について、オープンイノベーションを活用した国際共同開発を進めている。

本報ではこの内、小型軽水炉 BWRX-300 について、その特長や、実用化に向けた技術開発について記載する。

II. 小型軽水炉開発の必要性

安全でクリーンな原子力発電が今後の世界市場で競争力を高めるには、ガス火力発電等の他電源より低い発電コストと、資本費および資本リスクの低減が必要である。このような世界情勢を背景に、経済性が高い小型原子炉のニーズが高まっている。こうした原子力発電需要に対し、中・露・韓等、国を挙げて原子炉の開発/輸出を目指す国々に対抗するため、日米((日立 GE-GE Hitachi Nuclear Energy 社(以下、GE 日立))間協調の下で、直接サイクルであり、シンプルな構造が可能な BWR 技術を活用して、安全性と経済性を両立可能な、新たな小型軽水炉 BWRX-300 の開発に取り組んでいる。

日立 GE-GE 日立の日米共同開発体制を柱に、電力事

業者、ゼネコン、アカデミア等と連携して開発を進め、2030 年頃に北米に初号機を建設することを目指す。GE 日立と協力関係にある米国電力 Dominion Energy 社が開発資金拠出に合意する等、外部資金調達も進めている。開発には、Bechtel Corporation 社、Exelon Generation 社、マサチューセッツ工科大の専門家チームも加入を検討中である。

III. BWRX-300 の概要と特長

BWRX-300 の主要仕様を表 1 に、概念図を図 1 に示す。BWRX-300 は、シンプルな BWR のプラントシステムをさらに簡素化することで、高い安全性を維持しつつ、初期投資リスクおよび発電コストの大幅な低減を目指す。プラントシステムの簡素化は機器点数削減による信頼性の向上や、廃炉時の廃棄物量の低減にもつながる。また、近年、欧米でニーズが高まっている負荷追従にも対応する予定である。

プラントシステムの簡素化を実現するため、BWRX-300 では、原子炉一次冷却材圧力バウンダリの信頼性を高め、原子炉の主要な事故想定である大・中 LOCA (Loss of Coolant Accident) の想定を設計基準事故から不要(以下、大中 LOCA 想定不要化)とする革新的な概念を採用した。この結果、安全性を高めつつ、ECCS (Emergency Core Cooling System) ポンプ等の大型機器やサブプレッションプールを削除するとともに、原子炉建屋および原子炉格納容器を大幅に小型化し、出力あたりの原子炉建屋物量を大型原子炉の半分程度に削減できる見通しである。

大中 LOCA 想定不要化に必要な機器を除き、原子炉系は実績のある機器で構成する。原子炉圧力容器や燃料、気水分離器や蒸気乾燥器等の炉内構造、制御棒駆動機構等の主要な機器は国内で運転・建設実績が豊富な、ABWR や BWR と同じであり、自然循環技術や静的

Activities on New Plant Development in Hitachi-GE Nuclear Energy : Kazuaki Kito.

(2019 年 10 月 31 日 受理)

表1 BWRX-300の主要仕様

項目	仕様
炉型	沸騰水型軽水炉(BWR)
熱出力/電気出力	900 MW/300 MW 級
燃料	UO ₂ (MOX 適用可)
運転サイクル	12~24ヶ月
目標建設単価	\$2,250/kW
プラント寿命	60年

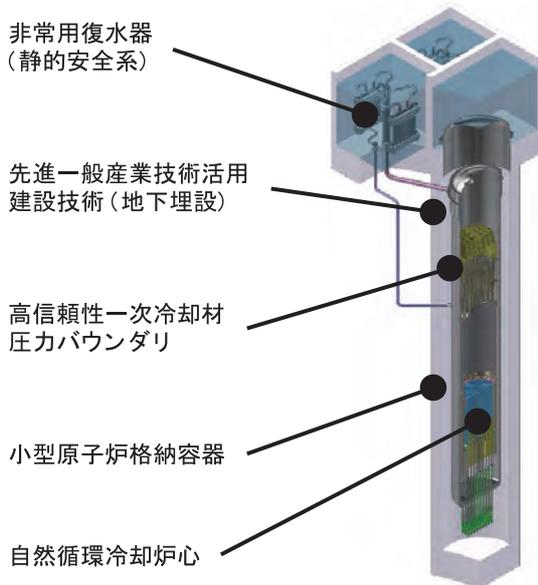


図1 BWRX-300概念図

安全システム(非常用復水器)は、米国規制局(NRC)から設計認証を取得している ESBWR で採用済みの技術である。これら、実績のある技術を採用することで、開発リスクおよび許認可リスク低減と、信頼性、安全性向上を両立する。

近年の大型炉建設においては、長期間にわたる建設工事が、建設費と建設リスク増加の要因の一つとなっている。BWRX-300では、モジュール化率を向上した工場完成型一体据付建設手法による建設リスクの低減といった、小型炉特有のメリットを追求するほか、周辺機器や工法には先進一般産業技術を積極的に採用し、建設工期や費用の低減を図っている。

また、原子炉建屋の小型化により、上述した先進一般産業技術を活用した掘削技術が適用でき、完全地下設置が合理的なコストで可能になると考えている。完全地下設置により、外部ハザードリスクの低減、建屋コンクリート物量の最小化、セキュリティの強化等を図る。

安全性や社会的受容性の観点での、新たなメリットも検討する予定である。一例として、小出力炉心(炉内放射性物質量少)、静的安全系採用による長期グレースピリオド等の特長を活かした緊急時計画区域(EPZ: Emergency Planning Zone)縮小についても検討する計画である。

IV. BWRX-300 実用化に向けた開発

BWRX-300のプラントコンセプトを実現するため、以下に示す技術開発を実施する計画である。

- 1)一次冷却材圧力バウンダリの高信頼性化：
大中 LOCA 想定不要化を実現する原子炉システムの構築，非常用復水器による原子炉压力容器過圧防護対策等。
- 2)小型炉特有のメリット最大化
工場完成型の一体据付建設手法，系統数削減の検討等。
- 3)先進一般産業技術の徹底活用によるコスト低減：
高強度コンクリートの採用，垂直掘削工法，空冷式発電機の採用等。
- 4)その他原子力技術の応用研究：
原子炉压力容器の小型化，完全地下埋設式建屋の耐震評価等。

今後、2020年を目標に概念設計を完了させる。その後は米国での先行安全審査(LTR: Licensing Topical Report)，実証試験，サイト選定を進め、2030年頃に北米での初号機運開を目指す。また、並行して国内、欧米諸国のプロジェクトに参画し、BWRX-300の市場開拓を進めていく。

V. 結論

日立 GE は米国 GE 日立と共同で、実証済みの BWR 技術に基づき、安全性と経済性を両立する革新的な小型軽水炉 BWRX-300 を開発し、2030 年頃に北米に初号機を建設することを目指している。BWRX-300 のターゲットは、世界最高水準の安全性と、最も経済的な軽水炉の実現であり、BWR の特長であるシンプルなプラントシステムを更に簡素化することで、これを達成する計画である。今後は、日米共同開発を軸に、原子力政策の反映、ユーザー意見の取り込み等、社会的受容性を高め、クリーンエネルギーの投資喚起を念頭に技術開発を実施していく予定である。

著者紹介



木藤和明 (きとう・かずあき)

日立 GE ニュークリア・エナジー 原子力計画部
(専門分野/関心分野)伝熱流動、軽水炉の安全設計・安全解析

三菱重工における SMR 開発の取り組み

三菱重工業(株) 木村 芳貴

近年、米国やカナダ、英国などにおいて SMR (Small Modular Reactor) の開発、導入に向けた動きが活発化している。また、国内では、第 5 次エネルギー基本計画 (2018 年 7 月閣議決定) において、「多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションの促進」や、「安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求に向けた技術開発に取り組む」という方針が示された。三菱重工は、既存の軽水炉の安全性・信頼性向上や長期継続利用に向けた技術開発に着手に取り組む一方で、将来に向けた取り組みとして SMR をはじめとした多様な革新的原子力技術開発を推進している。

KEYWORDS: SMR, PWR, HTGR, SFR

I. はじめに

三菱重工は、半世紀以上にわたり加圧水型原子炉 (PWR) メーカーとして PWR 発電プラントに係る技術を発展させてきた。また、高速炉や高温ガス炉開発においても日本原子力研究開発機構 (JAEA) を中心とした国産技術開発への参画を通じて開発知見や、設計・製造に係る技術・ノウハウを蓄積してきた。今後もこれまでの経験、技術をベースとして、将来の社会・顧客ニーズや国の政策動向も踏まえて、幅広い技術開発を推進していく予定である。本稿では、当社の SMR 開発の代表例として、多目的軽水小型炉 (PWR)、高温ガス炉コジェネプラント、小型ナトリウム冷却高速炉開発の取り組みについて紹介する。

II. 多目的軽水小型炉 (PWR)

当社の軽水小型炉開発は、原子力船「むつ」(1967 年～1972 年；日本原子力船開発事業団) の原子炉開発に始まり、近年では小型一体型モジュール炉の開発を実施してきた。当社は、これらの経験をもとに PWR の特性を最大限に活かしつつ、小型炉特有の安全設計やモジュール設計などを用途に応じて反映することにより、小規模グリッド電源としての発電用炉だけでなく、離島・島しょ地域など極小グリッド向電源や災害地域への一時電源、船用動力などのモバイル利用も可能な船舶搭載炉への展開も見据えて、将来の電源ニーズの多様化/分散化にできる多目的軽水小型炉 (図 1) の開発に取り組んでいる。

多目的軽水小型炉の共通コンセプトとして、従来

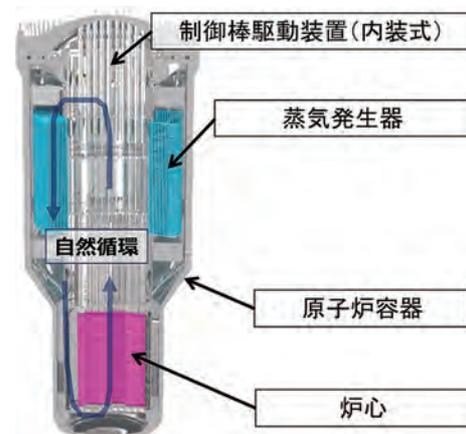


図 1 多目的軽水小型炉(発電用小型炉の概念図)

PWR の一次冷却材ループおよび主機 (蒸気発生器や一次冷却材ポンプ、加圧器など) を原子炉容器内に統合する一体型原子炉を採用し、一次冷却材配管の破断に伴う冷却材喪失事故 (大破断 LOCA) などの事故リスクを原理的に排除するとともに、小型炉特有の安全対策を取入れることで安全性・信頼性の向上を実現する。また、これらの安全概念に基づく設備合理化や、格納容器の小型化、モジュール設計、先進工法採用による建設合理化・工期短縮などにより、大幅な建設コスト低減を図る予定である。

発電用炉では、一次冷却材ポンプを削除して炉内自然循環冷却方式を採用し、受動的崩壊熱除去システム (パッシブ SG/CV 冷却)、二重格納化、溶融炉心対策 (IVR; In Vessel Retention) などにより、万一の過酷な事故発生時にも住民避難を実質不要とするプラントの実現を目標とする。また、小型炉の特徴に基づく合理化設計によって経済性向上を目指す中においても、外部ハザード対策や厳しい耐震要求など、国内の新規制基準にも適合する設計を反映していく。

SMR Development of Mitsubishi Heavy Industries : Yoshitaka Kimura.

(2019 年 11 月 6 日 受理)

船舶搭載炉では、発電用炉よりもさらに小型化した原子炉容器に内装する小型一次冷却材ポンプによる強制循環冷却方式を採用する。また、PWR の特性を活かして海上運用に特有の揺動/傾斜などを想定した環境条件への対策とともに、メンテナンスの最少化を可能とする長期間燃料交換不要な新型燃料の開発にも取り組む予定である。

Ⅲ. 高温ガス炉コジェネプラント

高温ガス炉は、一般に炉心溶融や水素爆発の恐れのない固有の安全性を特長とし、また、原子炉から高温の熱が取出せるため高効率な核熱利用を可能にする原子炉と言われる。その一方で、軽水炉と比べると出力密度が大幅に小さく、そのため、同出力規模の炉心に対して原子炉が相対的に大きくなり、経済性の観点から大型化には不向きとされる。

当社では、JAEA の高温工学試験研究炉 (HTTR) をはじめとした国内研究開発において実証されてきたブロック型炉心技術を採用し、固有の安全性を確保しつつ、かつ経済性とのバランスを考慮した出力規模の高温ガス炉をベースとして、水素製造と発電を両立するコジェネプラント概念を開発する。当社が開発する高温ガス炉コジェネプラント (図 2) は、原子炉出力は一定運転としたまま熱利用と発電のバランスを制御することにより電力需要変化に追従し、再生可能エネルギーとの共存にも柔軟に対応する。また、950℃ の超高温ヘリウムガスによる水素製造システムと直接ガスタービンサイクルによる高効率発電システムとを組み合わせることで、プラント全体のエネルギー効率を向上させて経済性を確保しつつ、ユーザの需要に応じて付加価値の高いカーボンフリーのエネルギー供給を可能とする。将来的には、水素還元製鉄などの産業プロセスに適用することで、非電力分野における CO₂ 排出量の大幅削減に貢献するとともに、脱炭素化・水素社会の実現に寄与することが期待される。

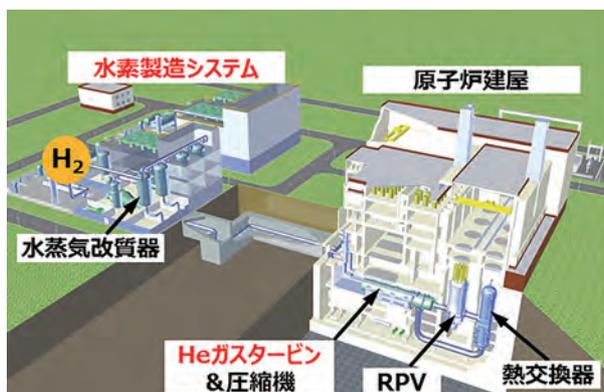


図 2 高温ガス炉コジェネプラント鳥観図

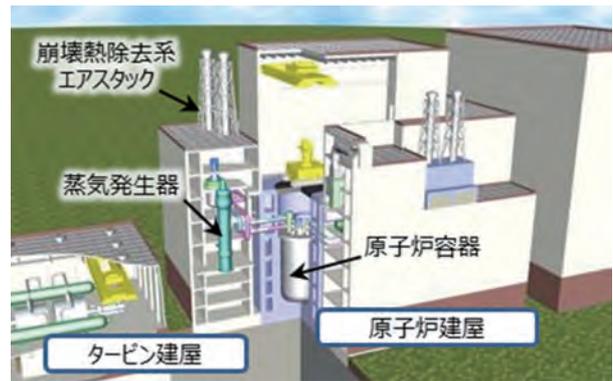


図 3 小型ナトリウム冷却高速炉プラント鳥観図

Ⅳ. 小型ナトリウム冷却高速炉

我が国における高速炉開発戦略ロードマップ (2018 年 12 月 21 日閣議決定) では、ウラン需給状況や政策環境・社会情勢の変化を踏まえ、高速炉の意義の多様化を指摘するとともに、21 世紀半ばの適切なタイミングにおいて現実的なスケールの高速炉が運転開始されることが期待されるとの提言が示された。

当社では、従来の大型炉概念開発に引き続き取り組むとともに、多様化する将来の社会ニーズに柔軟に対応すべく、資源の有効利用 (柔軟な燃料増殖比の確保) や放射性廃棄物低減 (マイナーアクチニドの核変換) を可能とし、かつ初期投資リスクを低減可能な小型高速炉概念を開発する。これまで日本国内で経験を積み重ねてきた実証性の高いナトリウム冷却高速炉技術をベースに、大型炉概念への展開も見据えつつ技術開発を進めていく予定である。具体的には、受動的な安全特性やナトリウム安全性向上に寄与する革新的技術の適用性を検証するとともに、柔軟に出力アップが可能な小型高速炉概念を構築し、高い安全性・信頼性および経済性を有する小型ナトリウム冷却高速炉プラント (図 3) の実現を目標とする。

Ⅴ. おわりに

当社は、引き続き既存の軽水炉の安全性・信頼性向上や長期継続利用に向けた取り組みを進めるとともに、これまで蓄積してきた技術と経験および開発知見をベースに、社会・顧客ニーズや国の政策動向も踏まえながら事業者やユーザ、研究機関などと連携し、将来に向けた多様な革新的原子力技術の開発を推進していく。

著者紹介



木村芳貴 (きむら・よしとか)
三菱重工業株式会社 パワードメイン原子力事業部
(専門分野/関心分野) 化学工学, 材料工学/
原子力技術動向

温暖化対策のもやもや

フリージャーナリスト 井内 千穂

地球温暖化を「でっちあげ」と言い「パリ協定」からの離脱を国連に通告した大統領と、温暖化非常事態を訴え「パリ協定」の目標では手ぬるいと主張する16歳の環境活動家。どちらの極論にも与する気にならない一市民は温暖化にどう向き合えばよいのか？ もやもやした気持ちを抱えて原子力関係者のシンポジウムに行ってみると、「2050年エネルギーミックス」というパネル討論の中で、思いがけず、温暖化について複数の異論を聴くことができ、刺激を受けた。

気候変動の機構そのものが十分には解明されておらず、温室効果ガスとしては水蒸気の寄与がはるかに大きく、関連因子が他にも多数あるだろうから、人為的なCO₂の排出削減策は科学的根拠が乏しいという見解。また別の論者は、温暖化は確かに起きており化石燃料燃焼によるCO₂の排出がその要因の一部であることは確かだが、どの程度なのかはよくわかっておらず、温暖化の被害は誇張され気味であると述べた。CO₂倍増時の温度上昇予測には1.5℃～4.5℃まで幅があり、国際気候変動パネル(IPCC)による気候のシミュレーションは科学的不確実性が大きいとIPCC報告書の執筆陣の一人であったその論者自身が言う。

地球レベルの壮大な仮説の正否を判断するのは難しいが、少なくとも、CO₂排出削減の量的な効果(それで気温が何度下がるのか?)がはっきりしない中、ヨットで海を渡るような脱炭素化が社会経済的に賢明だとは思えない。温暖化を大義名分にした極端な推進や排除ではなく、「化石賞」を獲得した世界トップレベルのクリーンな石炭火力発電も続け、せつかくの技術力を結集して、原子力も再エネも蓄エネも、やれることは何でもやって「ベストミックス」を探っていくことがエネルギー安全保障を維持し、結局はCO₂排出も多少削減されるのではないかと地球よりもまず自分の頭を冷やしたい。

Column

HBO ドラマシリーズとチェルノブイリ(2)

コメニウス大学医学部英語コース 妹尾 優希

スロバキアよりこんにちは。先月号では、米国や英国、ドイツを中心に社会現象を起こしたHBOの短編ドラマ『チェルノブイリ』がスロバキアに与えた影響について、現地での様子を紹介させていただきました。本稿では、ドラマの内容を簡単に紹介したいと思います。

このドラマシリーズは、1986年4月26日の深夜に、チェルノブイリ原子力発電所で爆発が起こった直後の、事故現場や医療現場で情報が錯綜した様子や、旧ソビエト政府に任命され現場の対応を任された科学者や議長がさらなる被害拡大を防ぐ為に葛藤する様子が描かれています。当時の混乱を再現する反面で、内部被ばくや外部被ばくの違いや、実際に急性放射線障害で亡くなった人数の詳細、急性放射線障害と外傷や火傷の区別などの解説は特にありません。印象に残っているのは、原子力発電所の消火活動を最初に行った消防士の夫に、妊娠している妻が触れた際に、放射性物質により汚染される恐れがあるため看護師や原子核物理学者が妻を叱咤するという描写です。これを見て「被ばくした人に触ると無条件に放射線が【うつる】」と勘違いした視聴者も多かったようです。その他にも、チェルノブイリゾーンで作業をした労働者の健康管理や記録が残されなかったと暗喩する部分など、疑問の残るシーンが幾つかありました。ドラマに関する問い合わせは、かなりあったようで原子力工学科のある大学や、American Nuclear Society、ニュースサイトなどの公式ページで事実と異なる箇所についての解説がなされています。

チェルノブイリ原発事故当時の情報が混沌としている様子を題材としたドラマによって、印象に強く残る形で間違った放射線の健康への影響に関する情報が、世界的に広がってしまったのはとても皮肉に感じました。

福島処理水問題への“compassion”

フリーライター 服部 美咲

チベット仏教の指導者ダライ・ラマ 14 世は、compassion (snying rje, 共苦) が、現代人を孤独から救う鍵であると説いた。compassion は、目の前の人の苦しみ (passion) を我がこととして共に負いたいと願う心である。

東京電力福島第一原発では、日々汚染水を処理して構内に貯めている。処理水は増え続け、2022 年夏頃に貯蔵の限界を迎えるという。処理水中に主に残るトリチウムは、微弱なエネルギーしか持たない。原発事故に関わらず環境中に存在し、国内外の原子力施設からも排水として日々放出されている。科学者による検討の結果、処理水の処分法は海洋放出が科学的には理に適うという。しかし、風評などの社会的影響を含めた検討は難航し、議論の見通しは悪い。

福島県沖に処理水を放出するならば、最大のステークホルダーは福島県の漁業者である。福島県漁連代表の言動が度々注目される。心中の複雑さを思う。

福島の漁業は、東日本大震災の津波と原発事故により、深刻な打撃を受けた。漁業者が風評被害を懸念するのは当然だ。その上、一部メディアが、処理水放出による海洋汚染を過剰に仄めかし、漁業者や消費者を攪乱する。一方、処理水の処分ができなければ、廃炉作業は停滞する。廃炉作業を身近にして生活する福島の人々や、東電管内で廃炉費用を負担する次世代がいる。

漁業者のリーダーであり、福島の浜に住む県漁連代表には、相反する苦しみが届いているはずだ。その苦悩はいかばかりか。関係者の苦悩に想いを寄せ、我がこととして処理水に関わる問題に目を向けていたい。

Column

人生最大のプレゼント

NPO あいんしゅたいん 坂東 昌子

投稿論文にレフリーの筋違いの批判で、憤りを感じて取り下げようかと思っていた私に、T さんが「没にしないで」と再検討を共同でやろうと提案して下さい。「終点ですよ」と言われ、新幹線車中、T さんとの話に夢中で気付かず、京都はとっくに過ぎていた事もある。T さんの的確な質問は次の発展に繋がり、時を忘れた。新発見に感激したり批判したり、ワクワクし、徐々に本質が見えてきた。生物や医学の知識は S さんや T さんに教えてもらった。歩いていても、自転車に乗っていても、阪大から帰る途中の電車の中でも、いつも頭はこのテーマで一杯、もやもやの霧が晴れてくる。「忘れないうちに今考えたことを書きます」というメールが飛び交う。好奇心の虜になって、感激や発見を共有できることこそ元気の素で、共感し前進できる。3・11 以後始めた放射線の生体影響研究、細胞変異の生起と排除の動的過程を考慮した「もぐらたたき模型」の提唱以後、生物の種を超えた統一描像が見え、さらに大きな枠組みとして放射線治療に適用可能な「シーソー (SS) 模型」モデルが完成。T さんは原子核理論、私は素粒子論専門、だが、T さんは電磁ノイズ理論、私は交通流理論と、物理思考を他分野に適用した理論を提出した経験がある。権威者に叩かれたり無視されたりして、評価されるまで苦労を重ねた。「科学者には、一定の前提、枠組みなど、既存の枠内で問題の解決をはかる傾向がある。それを突破するのは外部あるいは若手研究者だ」(トマス・クーン)。この世界に飛び込んでまた巡り合った研究仲間は人生最大の贈り物、楽しい時間を過ごしている。次は防護と医療をつなぐ大シーソーモデルに向けて突進している。

「安全目標」再考 我が国でのあり方を問う

東京大学 山口 彰, 関西大学 菅原 慎悦,
MHI NS エンジニアリング 佐治 悦郎

「適切な安全」の姿から逸脱しないよう努めることがリスクマネジメントの要諦であり、それを行うためには安全目標を関係者が理解し共通のものとするのが不可欠である。また、安全目標は「社会との約束事」でもあり、その社会がもつ価値観と無関係に科学技術的知見のみをもって客観的に導き出せると解すべきものではない。そうした認識を踏まえ、わが国での安全目標のあり方をあらためて考察する。

KEYWORDS: *Safety goals, How safe is safe enough?, As Low As Reasonably Practicable, Contested Values, Clumsy Institution, Legitimacy, Societal Risk, Hierarchical Structure*

I. はじめに

わが国の安全目標に関する公的な検討は2001年、原子力安全委員会(原安委)での安全目標専門部会の設置に端を発し、その検討内容は2003年に「中間とりまとめ」¹⁾として公表されたが、原安委決定とはされず、リスク管理の意思決定で活用されるには至らなかった²⁾。

安全目標専門部会が提案した安全目標は、以下のとおり、定性的目標案と定量的目標案で構成されている。

“定性的目標案：原子力利用活動に伴って放射線の放射や放射性物質の放散により公衆の健康被害が発生する可能性は、公衆の日常生活に伴う健康リスクを有意には増加させない水準に抑制されるべきである”

“定量的目標案：原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによる、施設の敷地境界付近の公衆の個人の平均急性死亡リスクは、年あたり百万分の1程度を超えないように抑制されるべきである。また、原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによって生じ得るがんによる、施設からある範囲の距離にある公衆の個人の平均死亡リスクは、年あたり百万分の1程度を超えないように抑制されるべきである”

「中間とりまとめ」に至るまでになされた深い議論は、多くの原子力関係者にも、また社会にも十分に伝わらないまま、2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故(1F事故)に至った。2013年には原子力規制委員会(規制委)が「安全目標を定めた」とし、上記「中間とりまとめ」を実質的に追認するとともに、同委員会は今後も継

Safety Goals: Revisited ; How should they be in Japan? : Akira Yamaguchi, Shin-etsu Sugawara, Etsuro Saji.

(2019年12月5日 受理)

続的に議論するとした。然るに継続的議論がなされることがないまま、安全目標の重要性が広く理解されているとは言い難く、原子力安全における根源的な問いである“*How safe is safe enough?*”について考察を深めることが求められている。

1F事故は、従来の安全確保の枠組みに何らかの欠陥があったことを示している。本質的な問題は、安全確保とは何をすることなのかを、深く理解していなかったことではないか。よかれと思ったことが屋上屋を架したり、的を射ぬ結果をもたらしたりしていなかっただろうか。著者らはそれを、「滑稽な安全」(“irrational”な安全)と自戒をこめて敢えて表現した³⁾。はたして1F事故の後、我々は改善の方向に進んでいると言えるだろうか。「滑稽な安全」に陥らないためには、長きにわたって問われてきた“*How safe is safe enough?*”, 即ち、安全目標はいかなるものかという問いに改めて立ち還ることが必要と考える。本稿では、著者らの考える安全目標の姿を明らかにしつつ、どのように安全確保を実践するのか、そのようなプロセスが適切であることを確認するにはどうすればよいかを、我が国の現状を踏まえて議論したい。

II. 適切な安全の姿(Safe enough)を求めて

「不足でも過剰でもなく『適切な安全』の姿を保ち続けること」が、“*How safe is safe enough?*”に対する著者らの回答である。安全確保の努力が不足した「不適切な安全」は許されないが、「対策はやればやるほど良い」という立場を深慮なくとることもまた、「滑稽な安全」に陥る可能性がある。戦略なしに過大な資源を投じ、様々な対策をとり続けることが、実施的な安全向上につながる

いばかりか、不確かさが増し二次リスクを誘発する可能性をもたらすとすれば、それは「滑稽な安全」と言わざるをえない。ALARP(As Low As Reasonably Practicable)の原則をよく理解し、理に適うリスク管理がなされている状態こそ「適切な安全の姿」であり、その依拠するところが安全目標であると著者らは考える。

1978年に米国原子力規制委員会(NRC)は、格納容器のあるべき姿について検討した⁴⁾。TMI-2事故の後、原子力発電所は隔離された地下立地とすべきとの裁判所への申し立てを受けての研究である。現状の設計に加え、9種類の代替概念(地下立地、浅地下立地、二重格納容器、格納容器強化、ベント専用容器設置、フィルタードベント(FV)、基礎版薄肉化など)のValue-Impact分析を行った結果、FVが最もリスク低減効果と費用対効果が高いことを定量的に示した。Value-Impact分析を支えたのは、1975年に発行された原子炉安全研究(WASH-1400)のリスク支配要因やシナリオの分析結果、即ちリスク情報であった。確率論的リスク評価の結果と実効性の評価、ALARPの考え方をもち、[適切な安全]の姿を検討した好事例である。

1980年には、NRCの諮問をうけて、ACRS(Advisory Committee of Reactor Safeguards)が安全目標の要件をとりまとめた⁵⁾。その要件とは、(1)将来原子炉の社会的リスクは競合技術(主に石炭火力)より低いこと、(2)個人(住民と従事者)に及ぼすサイトリスクは十分小さいこと、(3)事故やがんの死亡リスクを有意に増加させないこと、(4)公平性の問題が生じないこと、(5)安全設計は事故の防止と影響緩和を重視すること、(6)シビアアクシデントの確率が極めて低く大規模炉心溶融事故においても周辺に住む個人の死亡確率が極めて低いこと、(7)特定の安全目標をリスクが下回るようALARAのコスト-便益基準により適切な対策を取ること、等である。なお、汚染等による地域資産喪失も議論されたとのことである。上記のようなリスクの公平性やコストとの関係等も含めた「適切な安全」に関する幅広い考察が、1986年の安全目標政策声明⁶⁾につながっている。安全目標は何を防護するのか、それを何によって実現するのか、安全設計にどのように反映するのか、という議論を踏まえて安全目標の論理が構築されている点に注目すべきである。

図1には、著者らの考える「適切な安全」と「滑稽な安全」の概念を示す。不適切でもなく滑稽でもない安全、その両者に挟まれた幅のある領域を逸脱しないようリスク管理を行うのである。下位目標である定量的安全設計水準(例えば炉心損傷頻度)を決めることに満足せず、目指すべき安全の姿の議論を深める必要がある。リスクの意味合いも、事故の発生頻度や個人々の定量的健康リスクのみにとどまらず、社会全体の関心、懸念といった概念も含め広義に捉えるべきである。許容しうるリスクな

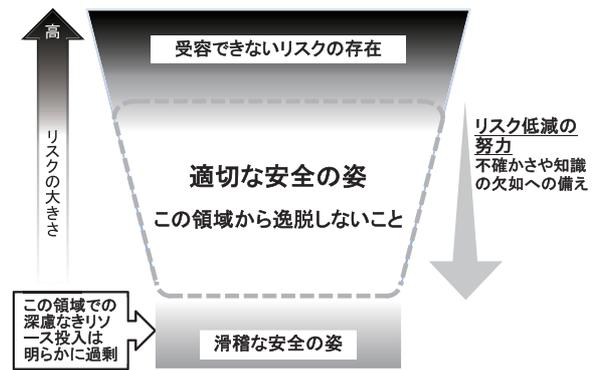


図1 目指すべき安全の姿の概念³⁾

るものを定め、判断の定量的基準とすることは一見、魅力的に見える。しかし、安全を二値的に判断できるとする誤解を与え、安全か不安全かということにこだわるあまり、ゼロリスクを望む姿になっては元も子もない。

国際原子力機関の基本安全原則は、人(個人と集団)と環境を放射線の有害な影響から防護することが原子力安全の目的であり、原子力利用を不当に制限することなしにそれを達成しなければならないとする。その実現のために、放射性物質の放出と公衆の被ばくを管理し、放射性物質等の制御喪失事象の発生を頻度に関して制限するとともに、そうした事態が発生した場合の影響緩和を求めている。即ち、安全の目的を原点とし、原子力利用を不当に制限することなくそれを達成するために人と環境の防護の実現のための工学的・政策的方策を定めるのである。安全目標は不可欠と言わざるを得ない。

III. 安全目標は「社会との約束事」

1. 形容詞付きの「安全」

ここで、著者らが「適切な安全」というとき、「適切な」という形容詞がついていることに留意されたい。形容詞とは一般に、話者の主観的評価・判断・感情を表現する語である。もし仮に、「安全」が科学的・客観的に定まるとするならば、主観性を含む表現は排除されるべきであるが、筆者らはそうした立場をとらない。即ち、「安全」とは、科学的・客観的に定まる性質のものではなく、我々の認識や判断の領域に属するものである点を強調したい。ある状態が「安全」であるか否かは、没個人的・機械的に決まるものではなく、ある個人・ある組織・ある社会が当該の状態を「安全」と考えるかどうか、という判断過程を経て初めて定まるものである。米国の原子力安全を構成する基本概念である“adequate protection”や、英国におけるALARP(As Low As Reasonably Practicable)も同様に、“adequate”や“reasonably practicable”という主観を表す形容詞が付随している。「安全」とは、それを判断する主体と不可分の関係にあり、常に主語を伴う形式の言明なのである。前述の格納容器に係るNRCの検討からも明らかなように、どのような姿が「適切な安全」

であるかどうかは、深層防護、リスク評価、費用便益分析といった様々な観点から吟味を行った上で、主体的・主観的に選び取られるものである。

では、いったい「我々」は、どのような状態を「適切な安全」と呼びうるだろうか。これを“リスク”という媒介を用いて表現すると、“「我々」はどのような性質・程度のリスクを「許容可能/受忍可能」と判断しうるか”という問いとなる。この根源的・本質的な問いに対し、国や社会が答えようという営みこそ、米国をはじめとして検討・確立されてきた安全目標に他ならないと考える。このように考えれば、「許容可能なリスク」が客観的に外在しており科学的手続きによってそれを発見すればよいという考えは、正当性を持たない。否、安全目標の策定とは、科学的・技術的な専門知を踏まえるのと同時に、「価値」の次元にも深く関わるものである。

もっとも、「安全」が主観に属するからといって、リスク管理者がそれを完全なる恣意の下に決めてよいということにはならない。複雑な現代社会においては、科学技術のリスクに関わる「価値」の判断がリスク管理者に暗黙裡に委任されている場合も多く、それは専門家や行政に対する信頼により支えられている。しかし、我が国の実態は必ずしもそうとは言えず、それゆえに「社会的な約束事」としての安全目標が重要であると主張したい。いわば、リスクに関する「我々」—個人・組織・社会のあらゆるレベルで—の価値判断を練り上げ、本来は主語付きの「安全」に可能なかぎり客観性を持たせることが、安全目標をめぐる社会的議論の意義と言えよう。

米国の安全目標は、現存するリスクに対して0.1%という「数字」がしばしば強調され、我が国ではこれが科学的・客観的な装いをもって提示されることもあるが、その策定過程を見れば、多くの技術的検討や統計データ等を参照しているのに加え、幾度もの公聴会等を通じ、人文・社会科学を含む広範な専門家や被規制者、環境団体等の見解も踏まえ、NRCとしての「価値判断」が明示されている。無論、こうした努力を積み重ねても意思決定者の恣意性を完全には排除できないし、実際にそのような批判もあるが、少なくともNRCが安全目標を「科学」ではなく「価値」に係わる問題と認識し、それゆえに社会的議論を経ようとする努力を行ってきた点は、注目に値する。

要すれば、安全目標を定めることとは、「安全」という概念が価値判断を伴うものであることを認め、その価値判断をめぐる関係主体が議論を尽くした上で、「我々」にとっての「安全」とは何かを定義することに他ならない。そのため、安全目標を定め運用しようとするリスク管理者は、科学的・技術的な専門知を参照するのみならず、社会が示す様々な価値の相克に向き合う役割を引き受けることが必要であり、これを体現しようとするならば、社会的議論に自ずと踏み込まざるを得ない。

2. 価値の相克に向き合う

我が国での近時の議論に目を転ずれば、安全目標を、「安全」に関する価値判断の社会的な練り上げとしてではなく、規制や司法のプロセスにおける科学的・客観的な定量的参照値として捉えている例が見受けられる。特に、安全目標の代替目標(surrogate)である炉心損傷頻度や、新たに追加すべきと提案されている放射性物質の大規模放出頻度といった定量的な値のみに議論の焦点が当たっており、「価値」に関する側面が等閑視されている点が気懸かりである。それは、「社会的受容性やコストとのトレードオフとの観点から安全目標を設定したものではない⁷⁾という規制当局の発言からも推察される。IF事故では、放射線による直接的健康影響は他の要因と識別が困難な程度に小さいと見積もられているが、長期避難に伴う健康被害やコミュニティの破壊等、事故に由来する社会的影響はこれまでの認識を超えるものである。このような被害の実相に鑑みれば、原子力技術の利用に際して、「我々」はどのような害から何を護り、リスク管理のエンドポイントをどこに設定するのかを、改めて議論することが不可欠である。然るに、surrogateに関する技術的議論は、より上位の目標に関する社会的議論を後景化させ、リスクをめぐる価値の相克を置き去りにしてしまう。安全目標を「社会との約束事」たらしめる上で、多様な価値に向き合うことは必須要件なのである。

ここで、多様な価値に向き合うとは、如何なることを意味するのだろうか。リスク認知研究の分厚い蓄積が示すように、重視する価値は個人や社会によって大きく異なり、それらは互いに相克し合うし、科学的・技術的専門知からの示唆と矛盾することもしばしばである。これらの相克に向き合いながら意思決定を行うことは、非常に困難な営みとならざるを得ない。リスク認知等を全く考慮せず限られた専門知のみに基づく技術中心主義的な意思決定は、現実社会において円滑な機能を期待しがたく、関心の高いリスクの見過ごしを是正する回路も働きにくい。逆に、社会的選好や人々の感情をリスク管理に直接反映しようとすることは、専門知から見て非合理・非効率な状態を招き、護られるべき価値が却って損なわれる可能性もある。多様な社会的価値と専門知とを適切に融合させることこそ、安全目標の策定にあたり向き合うべき重要な課題と言える。

3. Clumsy institution: 英国の事例から

リスク管理行政においては先駆的とされる英国においても、この種の困難や葛藤を経験している。2011年まで原子力安全規制を担っていた英国保健安全執行部(HSE)は、“Tolerability of Risk”⁸⁾や“Reducing Risks, Protecting People”⁹⁾の枠組みにおいて、科学的・技術的専門知とともに、社会的リスク(societal risks)や社会的

関心事(societal concerns)をも踏まえたリスク管理の実施を宣言しているが、その両立に取り組む上では多くの悩みと議論を経験してきた。また、リスクに関する王立協会ワーキンググループの議論では、人文・社会科学系のリスク研究者と工学系のリスク研究者や実務者らとの間で激しい議論となり明確な合意に至らず、その報告書は王立協会名ではなく個々の著者による見解の集合体という形での出版を余儀なくされている¹⁰⁾。

こうした経緯を踏まえ、2002年にHSEは、社会的関心事を考慮する上で“clumsy institution”を目指すべき、との姿勢を示した¹¹⁾。同概念の初出はSchapiro(1988)であり、“clumsy”とは“不器用な”“ぎこちない”という意味を持つ¹²⁾。この概念は、社会的なリスク管理を担う規制者は科学の論理的に美しい領域のみを対象とするのではなく、たとえ不器用で美しくないリスク管理行政になろうとも、社会的関心事という重要だが不定形で厄介なものに向き合うことが不可欠との含意を有する。

このように、現代社会におけるリスク管理者には、利用可能な専門知の適切な活用と、リスク問題をめぐるフレーミングや価値観の複数性・多元性の尊重とを、高い次元で両立するという困難な作業が要請される。社会の示す様々な価値はしばしば定量化や共約が困難であるし、科学的・技術的な専門知と様々な価値との両立に当たり、何らかの公式や重み付け係数が確立されているわけではない。そのような困難さを前にしても、リスク管理を担う組織は、科学的・技術的専門知の領域のみに自らの役割を限定すべきではない。様々な相克や矛盾にもがき苦しみ、ぎこちない姿を晒すことになったとしても、そのような「一筋縄でいかなさ」に正面から向き合う責務を引き受けることが、リスク管理者の重要な責任となる。とりわけ、public authority、即ち「社会としてのリスク管理者」たる規制当局は、上記のような公共性に対する責任が強く求められよう。安全目標には、「我々」が何を「安全」と判断するのかをめぐって「科学」と「価値」を架橋する役割があり、そのためにリスク管理者はclumsyになることを厭ってはならないのである。

IV. 我が国でのあり方について

今まで述べてきたことを踏まえ、わが国の現状と課題、今後のあるべき姿について考える。

1. 我が国の現状と課題

1F事故以前、我が国の安全目標(案)は原安委専門部会での検討過程において「土地が汚染して人々の生活空間が制限されるなどの影響」を「社会的リスク」として認識していたものの、「さらなる研究の進展が必要である」として、結果的には人の健康影響のみに着目し明文化はされなかった。

1F事故後、この社会的リスクこそが問題という認識

が一般的となり、規制委は「環境への影響をできるだけ小さくとどめる」観点から、事故による放射性物質の放出量とその頻度に関する定量的な目標(=事故時のCs¹³⁷の放出量が100 TBqを超えるような事故の発生頻度は、100万炉年に1回程度を超えないように抑制されるべきである(テロ等によるものを除く)こと)を原安委の安全目標(案)に追加すべきであると提案した¹³⁾。

安全目標は社会全体の関心、懸念といった概念も反映した「社会との約束事」という重要な側面を有している。然るに、規制委が提示した放射性物質の放出量やその頻度という専門用語で構成された目標は、施設の設計や運転管理において参照される「性能目標」¹⁴⁾に相当すると解されるが、それがいかなる「性能」を代替するものかが示されないため、社会とのコミュニケーションは困難である。また、その定量値の根拠も明確には示されていない。こうした課題はすでに原子炉安全専門審査会および核燃料安全専門審査会からも同様の指摘がなされているが¹⁵⁾、現状、これに対する規制委の動きは見られない。一方で、事業者が自らの決意としての安全目標を社会に向けて表明することが望ましいとの意見もあるが、「社会との約束事」という性格を有する安全目標は、正統性(Legitimacy)の観点からも「社会としてのリスク管理者」たる規制当局こそが主体性を発揮し、先導すべき問題であると考ええる。

2. 我が国が有すべき安全目標の基本構造と定性的上位目標

安全目標の基本構造としては、「社会との約束事」であり、一般社会とのコミュニケーションが可能な定性的目標を上位目標におき、実際の施設の設計、運転管理において評価可能な指標として参照される性能目標を上位目標実現のための代替目標(Surrogate)として下位に位置付ける階層構造¹⁶⁾を有することが適切であると考ええる。原安委の案は、健康影響についてのみではあるが、定性的目標⇒定量的目標⇒性能目標と順に導かれており、上述の階層構造を有していると考えてよい(NRCも同様)。

1F事故発生後は、社会的リスクを踏まえた安全確保活動の「深さと広さ」(原安委「中間とりまとめ」¹⁾より)を一般社会が理解できる形で表現した新たな定性的上位目標が必要となっており、具体的には以下の2つの観点が必要と考える。

(1)放射性物質の拡散による土地汚染によって生じる周辺住民の長期避難の必要性や経済的損失を実質的に回避することが肝要である。しかし、土地汚染の有無にかかわらず、事故の発生によって周辺社会は混乱し、経済的な損失や(被ばくによらない)健康影響が生じる可能性も考慮に入れるべきではないか。

(2)上記のリスクをどの程度まで抑制すべきかの目安を定性的かつ具体的に表現する必要がある。規制委が用い

た「できるだけ小さく」¹³⁾はゼロリスクを求めているかのようであり、より適切な表現で示すべきではないか。

以上を踏まえ、「社会的リスク」を対象とした新たな定性的上位目標として以下を提案する。

「放射線の放射や放射性物質の拡散により環境を害し、あるいは広範囲にわたる社会的混乱をもたらすリスクは、他の原因による事故や自然事象がもたらす同様のリスクの合計を有意に増加させない水準に抑制されるべきである」

(1)については、より広い概念として「社会的混乱」という表現を用い、「環境を害し、あるいは広範囲にわたる社会的混乱をもたらすリスク」(=社会的リスク)を抑制する目標とした。また、(2)については、一般社会が晒されている同種のリスクを「有意に増加させない」という表現で具体化した。これは原安委の健康リスクに対する定性的目標の表現を踏襲したものである。

次にこの定性的目標と性能目標をつなぐ定量的目標についてであるが、これは「有意に増加させない水準」の上限を定量化することに他ならない。原安委の定量的目標は、現存する死亡リスクを統計データより評価したうえで、それを十分に下回る値として「年あたり百万分の一程度」という絶対値で与えた。一方、NRCは、現存する死亡リスクの0.1%という相対値として与えている。後者の方が「有意に増加させない」の定量化という点では直接的で分かりやすいが、実用に供するためには、現存するリスクを評価する必要がある、それを前もって評価したうえで絶対値としての定量的目標に内包した原安委の数値の与え方が実用性は高い。

現存する「社会的リスク」の定量評価については今後の関係諸機関の検討に期待したいが、いずれにせよ、「社会的リスク」を何で測るのか(例えば、経済的損失¹⁷⁾)という議論が必要であり、簡単ではないが、規制委が提案したような性能目標の妥当性を検証する上では避けて通れない課題と考える。なお、この課題は規制委の専門性の範囲を超えるとの指摘もあろうが、かつて原安委が行っ

たように多方面の専門家の協力を仰ぎつつ検討を進めることは不可能ではない。そうして策定した安全目標が行政府または立法府にて是認されることが理想ではあるが、たとえそれができなくとも、「社会としての(原子力)リスク管理者」たる規制委が「適切な安全の姿」を目指して規制行政を行っていく際の「よって立つ」目標を社会に示すことは、その行政権限行使の正当性(Justness)の説明責任を、たとえ、clumsyであるとしても、果たしていく上で極めて重要である。

3. 階層構造試案

前節の議論を踏まえ、階層構造の試案を表1に示す。最上位は国内外で定着している「原子力安全の目的」とし、「人と環境を防護」から上位目標(2段目)右側の社会的リスクに対する目標をも導き得るとしたが、「社会的混乱」の回避は「環境を防護」より広い概念と考えられるので、上位目標をこのように定義することで、逆に最上位目標(「原子力安全の目的」)そのものの議論に遡及する可能性がある。係る論点は重要と考え、今後の広範な議論を喚起したい思いであえて提案した。

原子力発電所の中下位目標(定量的目標および性能目標)と上位目標との関係も図中に例示した。重大事故時の目標のみならず通常運転時や設計基準事象に係る決定論的安全(規制)基準も、「適切な安全の姿」を具体化する構成要素との整理で安全目標体系の一部に位置付けた。社会的リスクの定性的上位目標に対する中下位目標として規制委が制定/提案した定量的規制基準および性能目標を配したが、後者については上位目標との間に前節で触れた定量的目標が必要であるとした。

V. まとめに代えて

原子炉等規制法(炉規法)第一条には、「原子力基本法
の精神にのっとり、」とあり、原子力基本法第二条には、「安全の確保については、確立された国際的な基準を踏まえ、」とある。原安委安全目標専門部会の部会長を務め

表1 安全目標階層構造試案

最上位目標 (原子力安全の目的)	原子力の施設と活動に起因する放射線の有害な影響から人と環境を防護する				
上位目標	放射線の放射や放射性物質の拡散による公衆の健康リスクは、公衆の日常生活において現存する健康リスクの合計を有意に増加させない水準に抑制されるべきである			放射線の放射や放射性物質の拡散により環境を害し、或いは広範囲にわたる社会的混乱をもたらすリスクは、他の原因による事故や自然事象がもたらす同様のリスクの合計を有意に増加させない水準に抑制されるべきである	
中位目標	通常運転時 安全基準	設計基準事 象に対する 安全基準	重大事故時の健康リスク に対する確率論的定量目 標	重大事故に対す る安全基準 (Cs ¹³⁷ 放出量 100 TBq 未満)	重大事故時の社会的リスクに対す る確率論的定量目標
下位目標 (Surrogate)			性能目標 (CDF/CFF 目標)		性能目標 (CDF/CFF 目標, Cs ¹³⁷ 放出量 100 TBq 超頻度 < 10 ⁻⁶ /炉年)

られた近藤駿介元原子力委員会委員長(現 NUMO 理事長)は、「(以上を踏まえると)『確立された国際的な基準を踏まえ、原子炉による災害の防止を図るために、(中略)必要な規制を行い、』という指導原理を(炉規法は)提示していると言える。確立された国際基準とは IAEA の原子力安全原則にある『原子力利用を不当に妨げることなく、合理的に達成できる限り最高水準の安全性を達成すること』を指すと解される」と述べられた¹⁸⁾。これは本稿で述べてきた「適切な安全の姿」であると解する。安全目標の必要性が共有され、論理性、説明性を有した安全目標体系が我が国において整備されること、そしてそれらが原子力利用の大前提としての安全確保活動に適切に活かされていくことを筆者らは願ってやまない。

(付記)本稿の内容は、東京大学弥生研究会「安全目標に関する研究会」での議論に基づくものであり、筆者らの他、浦田茂氏、竹内純子氏、千歳敬子氏、前原啓吾氏の多大なる貢献があったことを付記しておく。

－ 参考資料 －

- 1) 「安全目標に関する調査審議状況の中間とりまとめ」, 原子力安全委員会安全目標専門部会, 平成 15 年 12 月.
- 2) 菅原, 稲村, “我が国の原子力分野における安全目標の活用—2003 年安全目標案の背景とその実際から学ぶ—” 電力中央研究所報告: Y15016, 平成 28 年 4 月.
- 3) 山口, 竹内, 菅原, “「安全目標」再考—なぜ安全目標を必要とするのか?—” 東京大学弥生研究会, 安全目標に関する研究会, UTNL-R-497, 2018 年 3 月.
- 4) D.D. Carlson, J.W. Hickman, “A Value-Impact Assessment of Alternate Containment Concepts,” NUREG/CR-0165 (1978).
- 5) D. Okrent, “The Safety Goals of the U.S. Nuclear Regulatory Commission,” *Science*, 236, 296 (1987).
- 6) USNRC, “Safety Goals for the Operation of Nuclear Power Plants; Policy Statement,” 51 Federal Register 30028 (1986).
- 7) 伊方発電所環境安全管理委員会原子力安全専門部会議事録 (2015.08.19).
- 8) UK Health & Safety Executive, *The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations* (1992).
- 9) UK Health & Safety Executive, *Reducing risks, protecting people* (2001).
- 10) Royal Society, *Risk: analysis, perception and management* (1992).

- 11) UK Health & Safety Executive, *Taking account of societal concerns about risk: Framing the problem*, Research Report 035 (2002).
- 12) M. Schapiro, *Judicial selection and the design of clumsy institutions*, *Southern California Law Review*, 61, 1555-1569 (1988).
- 13) 「安全目標に関し前回委員会(平成 25 年 4 月 3 日)までに議論された主な事項」, 原子力規制庁, 平成 25 年 4 月 10 日.
- 14) 「発電用軽水型原子炉施設の性能目標について—安全目標案に対する性能目標について—」, 原子力安全委員会安全目標専門部会, 平成 18 年 3 月 28 日.
- 15) 「原子力規制委員会が目指す安全の目標と、新規制基準への適合によって達成される安全の水準との比較評価(国民に対するわかりやすい説明方法等)について(平成 29 年 2 月 1 日付の指示に対する回答)」, 原子炉安全専門審査会, 核燃料安全専門審査会, 平成 30 年 4 月 5 日.
- 16) “Hierarchical Structure of Safety Goals for Nuclear Installations,” IAEA-TECDOC-1874 (2019).
- 17) R.S. Denning and R.J. Budnitz, “Impact of probabilistic risk assessment and severe accident research is reducing reactor risk,” *Progress in Nuclear Energy*, 102, 90 (2018).
- 18) 近藤, 「安全目標に期待すること」, 原子力学会リスク部会安全目標に関するシンポジウム (Part2), 2019 年 11 月 9 日. <http://risk-div-aesj.sakura.ne.jp/seminar.html>

著者紹介



山口 彰 (やまぐち・あきら)
東京大学大学院
(専門分野/関心分野)原子力工学, 安全工学, リスク学



菅原慎悦 (すがわら・しんえつ)
関西大学社会安全学部
(専門分野/関心分野)リスクの社会科学



佐治悦郎 (さじ・えつろう)
MHI NS エンジニアリング
(専門分野/関心分野)原子炉物理, 炉心設計, 確率論的リスク評価, リスク情報活用

報告

2002 年地震本部の見解に信頼性はあったのか —三陸沖から房総沖の地震活動長期評価の功罪—

福井大学 吉田 至孝

刑事裁判において、三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価が、東京電力福島第一原発を襲った東北地方太平洋沖地震津波を予見できたかが争われ、東京地方裁判所は無罪の判決を言い渡した。裁判官は、地震本部の長期評価は具体的な根拠を示さず、そのため専門家、実務家、内閣府によって疑問が示され、客観的に信頼性、具体性があったと認めるには合理的な疑いが残るとした。本報告では、原子力学会誌 2018 年 1 月号の中で示したわが国の地震・津波研究に関して、当時の会合記録や関係者の回顧録を用いより深く掘り下げ、2002 年の地震本部の見解に信頼性があったのかどうか考察するとともに、得られた知見を紹介する。

KEYWORDS: *Fukushima Dai-ich nuclear accident, Tohoku region Pacific coast earthquake, Tsunami height, flooding, new Knowledge*

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(福島第一原発)は、東北地方太平洋沖地震津波によって甚大な被害を受け、原子力災害を引き起こした。このような事態は、従前の津波対策では防ぐことはできなかったのか、何が不足していたのかについて検討し、2018 年 1 月号に検討結果と得られた知見を紹介した。この中で、地震調査研究推進本部(地震本部)より 2002 年に出された三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価¹⁾は、福島第一原発の敷地に津波が遡上し、建屋が浸水する可能性を示唆するものであり、建屋の溢水に係る運転経験ならびにその影響の深刻さから、深層防護の考え方に従い建屋が浸水した場合の対応を準備すべきであったことを示した。

しかし、地震本部が社会に成果を活かす部会を設置して、長期評価のあり方を検討してきたことに鑑みると、2002 年の長期評価がわが国の防災対策に取り入れられなかったことは、地震本部が真に社会に成果を活かそうとしていたのか疑問が残る。

本報告は、主として当時の地震本部および中央防災会議における議事録や資料、ならびに事故後の関係者の陳述や回顧録から、議論の経緯を時系列で整理し、当時わが国で主流であった学説はどのようなものであったか、地震本部の見解でどこでも発生すると考えた学術的意味

は何であったか、地震本部が成果を社会に活かしていくためにどのような活動を進めていたか、中央防災会議では地震本部の見解はどのように取り扱われたか、日本学術会議報告「我が国の原子力発電所の津波対策—東京電力福島第一原子力発電所事故前の津波対応から得られた課題—」で示された金森論文の指摘は何故見落とされたかの観点から考察し、得られた知見を示す。

II. 地震本部と中央防災会議の対応の分析

1. 東北地方太平洋沖地震の状況

東北地方太平洋沖地震は、2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分、牡鹿半島の東南東約 130 km の三陸沖海底で発生したマグニチュード 9.0 の超巨大地震である。勿論、日本観測史上最大で、1900 年以降世界で 4 番目に大きな地震であった。東北地方太平洋沖地震は、日本海溝に沈み込む太平洋プレートと陸側のプレートの固着によって、蓄積したひずみが一気に開放されて発生したもので、過去に観測された他の超巨大地震のすべりよりも遥かに大きい。巨大な津波を発生させた原因は海溝軸まで及んだ海底の変位で、変位量は海溝陸側が東南東方向に 50 m の水平移動と、7 m から 10 m 隆起したことにあると推定されている。

2. 当時の主流であった学説

日本で始まった比較沈み込み学では、地震の起こり方の特徴から、M 9.5 のチリ地震が発生したチリ型の沈み込み帯と、巨大地震が発生しないマリアナ型の両極端とする考えがあった。千島海溝はチリ型的で、伊豆・小笠原海溝とマリアナ海溝はマリアナ型、日本海溝では北部

Was the 2002 Opinion of Headquarters for Earthquake Research Promotion reliable?; Merits and demerits of long-term evaluation of seismic activity off Sanriku to Boso: Yoshitaka Yoshida.

(2019 年 10 月 25 日 受理)

より南部の方がマリアナ型に近いと考えられていた²⁾。

プレートの沈み込みが緩い角度で沈み込んでいくチリ型に対して、プレートが急角度で沈み込むマリアナ型は、陸側プレートとの間でしっかり固着しておらず、摩擦も小さいため、巨大地震は起きにくいと考えられていた³⁾。

また別の考え方として、若い海側プレートは浮力が働いて、陸側プレートとの固着が強くなって大きな地震を生じやすいが、東北地方南部のように1億年以上もの古い太平洋プレートは冷たくて重いので沈み込みやすく、陸側プレートと強く固着できないと考えられていた⁴⁾。

これらは何れも、日本海溝は北部と異なり、南部の陸側プレートは固着しておらず、ひずみはゆっくりと開放されていると考えたものであった。

3. 地震本部の考え方

(1) 地震本部の見解(どこでも発生)の根拠

地震本部は、1611年の慶長三陸地震、1677年の延宝房総沖地震、1896年の明治三陸地震を津波地震とし、慶長三陸地震、明治三陸地震は日本海溝北部で、延宝房総沖地震は日本海溝南部で発生しており、これらの間を含め、どこでも発生すると考えた¹⁾としている。しかし、日本海溝沿いでどこでも発生しうるとする根拠となる観測データや学術研究成果は示されていなかった。詳細を分析するため会合の議事録や資料を調査したが、地震本部地震調査委員会および下部組織である長期評価部会とその分科会の議事録や資料は一切公開されていないため、審議内容を把握することはできなかった。

そこで、やむを得ず当時の地震本部長期評価部会長が政府事故調の聴取⁵⁾で陳述された内容を分析すると、「津波地震というのは、当時はプレート間の固着が弱いため海溝沿いで起きると考えられていたので、別に福島沖だろうが茨城県沖だろうが構わない。我々は誤解していたが、津波地震というのは“ぬるぬる地震”ⁱと呼ばれ、プレートの固着がパリッと割れる地震ではないという認識を持っており、海溝沿いのどこでも起きると思っていた。(中略)津波地震に対する我々の考え方はまるっきり180度間違っていた。(中略)プレートが50mもずれたということなので、実際にはプレートは固着していた。」と証言されている。

しかし、当時の文献では、この“ぬるぬる地震”が日本海溝沿いの南北を問わずどこでも発生するとした観測データや科学的知見を示した学術論文は見当たらない。

ⁱ 海洋プレートが陸側プレートの下に沈み込む際に海洋底堆積物が陸側に押し付けられ、くさび状に堆積物が厚くなっている場所(付加体)で、付加体が地質学的時間で徐々に成長することで大陸地殻が形成され、プレートのゆがみがゆっくり開放される際に付加体が大規模崩壊するという考え方ではないかと推察される。

(2) 研究成果の社会への活用の努力と信頼度評価⁶⁾

地震本部政策委員会は、1999年8月27日第15回会合において、「成果を社会に生かす部会」を設置することを決定した。

成果を社会に活かす部会は、地震調査研究の成果を国民や防災関係機関等の具体的な対策や行動に結び付く情報として提示するための方策を検討することとされ、地震調査委員会の現状評価および長期評価の現状、地震調査研究推進本部等の広報の現状、防災関係機関の地震防災対策の現状等を踏まえ、提示のあり方について検討結果の報告書がまとめられている。

2000年8月3日にまとめられた検討状況報告では、長期評価の現状と課題、確率評価の導入と課題、今後の進め方が述べられている。これを受け、地震調査委員会は活断層に起因する地震活動の長期評価の提示方法の改善を行い、以後公表された長期評価では、データの精度・信頼度に関する記述ならびに今後の研究課題を述べている(例えば、京都盆地-奈良盆地断層帯南部の評価)。2001年8月22日に「地震調査研究における長期評価を社会に活かしていくために」をとりまとめ、前述の検討状況報告の反映状況を踏まえた今後の改善点についてまとめられている。ここでは、現状評価や海溝型地震についての長期評価についても課題としてとりあげられている。

このような検討経緯を踏まえ、地震本部は2001年9月27日に「南海トラフの地震の長期評価について」を公表した際に、予測精度の向上と観測体制の強化ならびに新たな技術開発や学術的知見の蓄積の必要性を述べ、2003年度の地震本部予算案「平成15年度の地震調査研究関係政府予算案の概要=地震調査研究推進本部とりまとめ」に反映されていた。

しかし、翌年に公表された2002年7月31日の「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について」¹⁾は、歴史地震の統計処理の課題等を述べただけで、地震本部の見解である日本海溝沿いにおける“ぬるぬる地震”の仮説に対する調査研究課題は一切示されなかった。そこで急遽、地震本部は「なお、今回の評価は、現在までに得られている最新の知見を用いて最善と思われる手法により行ったものではあるが、データとして用いる過去地震に関する資料が十分でないこと等による限界があることから、評価結果である地震発生確率や予想される次の地震の規模の数値には誤差を含んでおり、防災対策の検討など評価結果の利用にあたってはこの点に十分留意する必要がある。」と本文に追記して発表¹⁾した。

同日内閣府は、地震本部の公表を受け、「今回発表された評価結果については、津波対策関係省庁連絡会議等において、評価結果の内容、信頼度を吟味した上で、必要な防災対策を検討し、関係道県と相談して必要な対策を推進していくこととしています。」と発表⁷⁾した。

成果を社会に活かす部会は、長期評価を公表した約2

か月後の2002年10月9日に第10回会合を開き、当時の地震本部長期評価部会長より長期評価部会における長期評価の確実度(信頼度)に関する検討状況の説明を受け議論が行われた。その後、2003年2月5日に第22回政策委員会において、当時の地震本部地震調査委員長より長期評価の信頼度について報告され、了解された。地震本部は、2003年2月20日に第17回本部会議を開催し、当時の地震本部地震調査委員長より長期評価の信頼度について報告されている。

これを受け、2003年3月24日に発表された「千島海溝沿いの地震活動の長期評価について」ではA~Dのランクに分けた信頼度が記入されることとなった。引き続き異例であるが、地震本部は、2003年7月14日に前年に発表済みの長期評価¹⁾についても、A~Dのランクに分けた信頼度を記入した「プレートの沈み込みに伴う大地震に関する長期評価の信頼度について」を公表した。その結果、三陸北部から房総沖の海溝寄りのプレート間大地震(津波地震)は発生領域の評価の信頼度C(やや低い)、規模の評価の信頼度A(高い)、発生確率の評価の信頼度C(やや低い)とされた。

2009年から始まった「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価の一部改訂について」においても地震本部の見解である日本海溝沿いにおける“ぬるぬる地震”の科学的なデータや学術的知見を含め新たな調査研究成果や知見は加えられなかった。さらに、「地震本部10年の資料集」および「地震本部20年の資料集」からも、速やかに観測技術の開発や観測体制の構築を行うような動きはなく、地震本部の見解に対して、科学的データや学術的知見の充実のために必要な予算措置が行われた形跡は見当たらない。

4. 中央防災会議における議論⁸⁾

中央防災会議は、地震本部の「プレートの沈み込みに伴う大地震に関する長期評価の信頼度について」を受け、2003年7月28日に開催された第8回中央防災会議において「日本海溝周辺の地震に関する専門調査会」の設置を決定した。

2003年10月27日に開催された専門調査会の第1回の会合において、地震本部地震調査委員会事務局より三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのプレート間大地震(津波地震)について発生確率と地震の規模が説明された。2004年2月19日に開催された専門調査会の第2回では、検討対象とする地震の考え方として、「大地震発生の過去事例がなく、近い将来地震発生のおそれがあるとは肯定されないが、大地震発生の可能性を否定できない領域については、今後の調査研究の成果を踏まえて、必要な時点で適宜追加と見直しを行うこととする。」ことが議論され、専門調査会の第3回(2004年5月12日)では、①大きな地震が繰り返し発生している領域、②繰り返し

は確認されていないが、大きな地震が発生した領域、③大きな地震の発生が確認されていない領域(この中に日本海溝南部の地震空白地帯が含まれる)について分類し、取り扱いが議論された。その結果、2004年9月6日に開催された専門調査会の第4回の会合において、検討対象とする地震が①と②に絞り込まれ、③は今後の調査による知見の進展に基づき必要に応じて検討の対象に含めていくこととなった。これら4回の会合には当時の地震本部長期評価部会長も委員として参加されていた。

専門調査会は2006年1月25日に報告書を取りまとめ、繰り返し発生している大きな地震と近い将来発生する可能性が高い地震として8種類を選定(地震本部の見解は取り入れられなかった)して被害の様相と実施すべき対策を2006年2月17日に開催された第16回中央防災会議に付議し、了承された。

中央防災会議専門調査会では、地震本部の見解である日本海溝沿いにおける“ぬるぬる地震”については今後の調査による知見の進展を踏まえることとされたが、地震本部は、2006年の第16回中央防災会議に付議されるまでの間、専門調査会に対して調査研究成果や知見を提供した形跡はない。

5. 2006年金森論文の指摘

2006年金森らは、2004年の西村らのGPSによる観測結果⁹⁾から、プレート運動で蓄積されたひずみのうち3/4は地震で開放されておらず、①非地震性のすべりによって開放されているか、②プレート境界は100%固着していて将来巨大地震や巨大津波地震などで開放される可能性を指摘¹⁰⁾し、プレート境界の状況を科学的に観測するよう警鐘を鳴らした。すなわち、プレート運動のひずみの蓄積は膨大な量であり、地震空白地帯であった部分も含め日本海溝沿いのプレート境界は固着しているという仮説に基づけば巨大地震により津波が発生する可能性はないのかの警鐘である。

地震本部は、「地震本部20年の資料集」の中に寄稿を掲載⁶⁾した。

金森は寄稿1の中で、「仮説は、新しい観測結果が得られるたびに改訂されるべきものである。仮説を立てることは研究者にとって重要な知的活動でありそれがときには当たらないからといって非難されるべきものではない。(中略)しかし、仮説はあくまで仮説であって、それを直接防災に用いることは危険で、仮説を防災に用いる場合、特にその社会的影響が大きい場合には、その意味を不確実性を含めて正確に理解した上でほかの仮説も考えあわせて用いることが重要である。要するに、仮説の修正は、学界では、日常茶飯のことであっても、一般社会に発表する予測は、その社会的影響を考えて、慎重に行うべきと考える。」と述べている。

さらに、宮沢は寄稿7の中で、「GPSによる観測結果

からプレート境界が広域で固着していることが推定されていた。そして長期間大地震が起きていない領域が広い事を踏まえれば、そのような東北沖での広域のひずみの蓄積は、巨大地震、津波地震、スローイベント等で解放されなければ収支が合わないことも推察されていた。これらの研究はその後の2011年に東北沖地震が発生したことに対して矛盾しておらず、つまり東北沖地震が発生する理由が理解可能な状態まで地震調査研究が進んでいたと思われる。しかし学术界でコンセンサスを得ることは一般に難しく、プレート境界の状態に関する概念を共有し得なかったことは、大いに反省すべき点である。」と述べている。

2006年の金森論文の指摘は、規制機関、事業者、学术界、研究機関いずれからも注目されることは無く、見落とされてしまった。

6. 当時の日本海溝沿い地震研究の考察

金森論文の指摘は、地震本部の見解である日本海溝沿いにおける“ぬるぬる地震”とは異なり、東北地方太平洋沖地震を引き起こしたプレートの固着についても指摘していた。しかし、2009年から始まった「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価の一部改訂について」の中に、この論文に関する地震本部の言及はない。さらに、規制機関、事業者、学术界、研究機関も見落としていた。何故、研究者が日本海溝沿いの研究成果に関心を持たなくなったのであろうか。

地震本部の役割として、①総合的かつ基本的な施策の立案、②関係行政機関の予算等の事務の調整、③総合的な調査観測計画の策定、④関係行政機関、大学等の調査結果等の収集、整理、分析および総合的な評価、⑤上記の評価に基づく広報の5つがあげられている。

地震本部成果を社会に活かす部会は、国民や防災関係機関等の具体的な対策や行動に結び付くよう提示のあり方の検討結果をまとめている。

2001年の南海トラフの長期評価では、長期評価にあたっての課題が提起され、地震本部から各省庁に観測・

研究のための予算が配分されている。研究機関や大学は観測・研究の成果をまとめ、地震本部は④の役割に沿って結果の分析を行い、最終的に長期評価へフィードバックされる(図1左参照)。

一方、2002年の三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価では、“ぬるぬる地震”の仮説を伏せ課題を示さなかったため各省庁に予算配分されず、研究機関や大学は、資金が得られないため日本海溝沿いの地震観測・研究から離れていったものと推察される(図1右参照)。その結果、観測・研究の成果は得られず、長期評価へフィードバックがかからないばかりか、研究機関や大学等も金森論文に関心を示さなかったのではないかと推察される。

III. まとめと得られた知見

地震本部が2002年に示した見解は、結果的に見れば間違った仮説に基づくものであったが、東北地方太平洋側の原子力発電所に敷地高さを超える津波の可能性を示唆した点で先見性であった。しかし、東電は福島第一原発の敷地に津波が遡上して建屋が浸水する試算を行っていたにもかかわらず、建屋の溢水に係る運転経験や影響の深刻さを踏まえた深層防護の考え方に基づく対応を準備しなかった。

地震本部は、地震調査委員会および下部組織における会合の議事・資料を公開せず、地震本部の見解である日本海溝沿いにおける“ぬるぬる地震”の仮説を伏せ、中央防災会議が調査研究成果を踏まえて検討するとしたことへも対応しなかった。その結果、地震本部は2002年地震本部の見解に対する信頼性を低下させてしまったものと考えられる。

金森論文は、地震本部の見解の中で課題が提示されていない領域の学術論文であったことから注目度が低く、当時のわが国の規制機関、事業者、学术界、研究機関はこの指摘を見落としたものと考えられる。

これらの結果、日本海溝プレート境界における科学的知見の充実が図られず、東北地方太平洋沖地震に備える

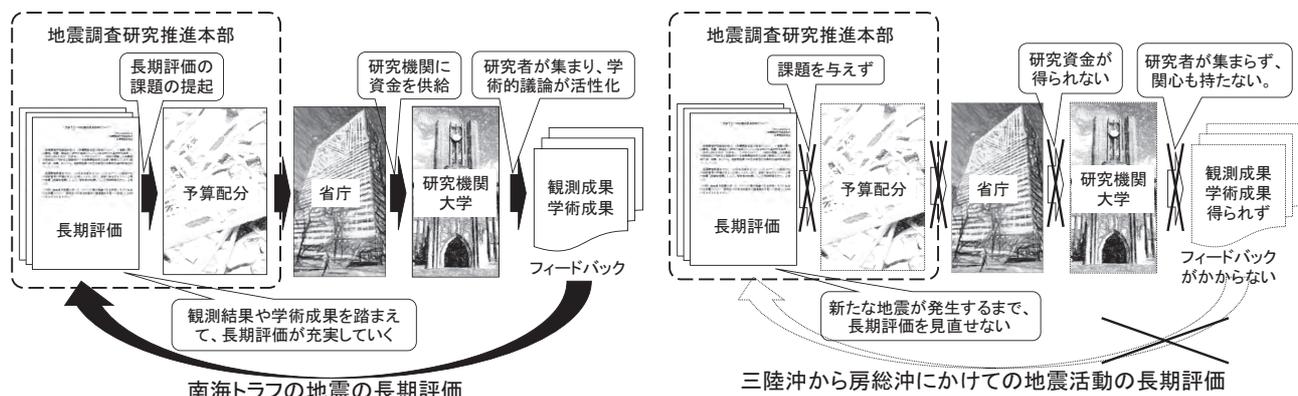


図1 南海トラフの地震の長期評価と三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価のPDCAサイクルの比較

防災対策が強化されなかった一つの要因となったものと考えられる。

以上より得られた知見は、以下の3点である。

- ①地震本部などの自然現象の調査研究推進機関は、評価を行う際の審議の経過を公開し、活用しようとする者に対して技術的背景を提示するべきである。
- ②地震本部などの自然現象の調査研究推進機関は、地震本部の見解である日本海溝沿いにおける“ぬるぬる地震”のような仮説に基づく評価を加えた場合は、観測・実証すべき課題を明示して、科学的知見の充実に努めるべきである。
- ③規制機関、事業者、学術界、研究機関は、2002年地震本部の見解のように課題が提示されない分野において、小さな研究コミュニティから発信される学術論文に対しても、きめ細かく精査して新知見の取得に努めるべきである。

上記③は、原子力関係学協会によって既に取り組みが開始されていることであるが、原子力関係者は、慢心と想像力の欠如から脱却し、不断の努力によって、安全と深層防護への意識を高めていかなければならないと考える。

－ 参考資料 －

- 1) 地震本部地震調査委員会、三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について、2002/07/31.
- 2) 島崎邦彦，“超巨大地震，貞観地震と長期評価，”科学 81, 5,

pp.397-402, (2011).

- 3) 古村孝志，“東北地方太平洋沖地震－どこまで分かったかその実態と課題，”日本災害情報学会，第13回災害情報勉強会（詳録），2011/07/22.
- 4) 松澤暢，“2011年東北地方太平洋沖地震が与えた衝撃，”水路新技術講演会，東京都，2012/02/24.
- 5) 政府事故調事務局，聴取結果書 514, 2012/01/31.
- 6) 地震本部ホームページ，<https://www.jishin.go.jp/>
- 7) 内閣府(防災担当)，地震調査研究推進本部による三陸沖から房総沖にかけての地震活動の評価の公表に対する防災機関の対応について，2012/07/31.
- 8) 中央防災会議過去の会議・検討会のホームページ，<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/past.html>
- 9) T. Nishimura, et. al., “Temporal change of inter-plate coupling in northeastern Japan during 1995-2002 estimated from continuous GPS observations,” Geophysical Journal International, 157, 901-916, (2004).
- 10) Hiroo Kanamori et. al, “Investigation of the earthquake sequence off Miyagi prefecture with historical seismograms,” Earth Planets Space, No.58, pp.1533-1541, (2006).

著者紹介



吉田至孝（よしだ・よしたか）

福井大学附属国際原子力工学研究所
(専門分野/関心分野)

原子力防災，シビアアクシデント



書籍販売のご案内

■『放射線遮蔽ハンドブック－応用編－』

一般社団法人日本原子力学会「遮蔽計算の応用技術」研究専門委員会編

A4判 420ページ(予定)，CD-ROM付 ISBN978-4-89047-173-7，価格 5,500円(税込・送料別)

「遮蔽計算の応用技術」研究専門委員会では、4年の歳月をかけて「放射線遮蔽ハンドブック－基礎編－」の続編出版にこぎつけました。内容は以下の通りです。

1章「概要」、2章「設計手順および計算の選択ならびに注意点」、3章「高度な計算手法」、4章「ベンチマーク実験と解析」、5章「原子力施設の遮蔽設計例」、6章「RI、加速器施設の遮蔽設計例」、7章「施設の放射化」、付録1～5には各種データ、コード利用のための検証問題集などを収録しています。

ご購入は日本原子力学会ホームページ
書籍販売のページよりお申し込みください
<http://aesj.net/hp/>



基礎から分かる未臨界

第6回 加速器駆動システムにおける未臨界度監視

日本原子力研究開発機構 方野 量太,
京都大学複合原子力科学研究所 山中 正朗

加速器駆動システム(ADS)は一定の出力を得るために、未臨界炉心と外部中性子源が組み合わされた原子力システムである。我が国ではマイナーアクチノイド(MA)を主な対象とした核変換炉として JAEA で研究が進められている。JAEA が提案する ADS では核燃料物質として Pu と MA が装荷されるため実効遅発中性子割合が小さく、安定な出力運転を実現させるために適切な未臨界度が設定される。万が一臨界に近づいた場合にはそれを検知し安全に停止できるように未臨界監視手法が求められている。第6回では、ADS の概要と従来の未臨界度測定手法の適用性およびその精度を検証し、従来法が持つ課題解決に向けた近年の取り組みについて紹介する。

KEYWORDS: Accelerator-Driven System, Monitoring of subcriticality, Pulsed-neutron source experiment, Feynman- α method, Extended-Kalman filter, Linear combination method

I. 加速器駆動システム(ADS)

1. 背景

ADS は、一定の出力を得るために、未臨界炉心と外部中性子源が組み合わされた原子力システムである。我が国では、再処理によって使用済み燃料からプルトニウムとウランを分離した後に高レベル放射性廃液中に残るマイナーアクチノイド(MA)を主な核変換対象とした核変換専用システムとして ADS を導入する構想のもと、高レベル放射性廃棄物の処分に係る負担軽減を目指している¹⁾。1988 年には原子力委員会によって策定された「群分離・消滅処理研究開発長期計画」(通称オメガ計画)以来、分離変換技術の研究開発を通して、MA 核種の短寿命化・安定化による長期的な放射線リスク低減および地層処分場面積抑制を担う核変換システムの一つとして ADS 研究が進められている。

2. JAEA が提唱する ADS²⁾

現在、JAEA が考案している ADS は炉心熱出力 800 MW で、加速器には大電流の高エネルギー陽子(1.5 GeV 程度)を連続ビームで加速する超電導線形加速

器を用いる(図 1)。陽子ビームを入射する核破砕ターゲットおよび冷却材には、液体鉛ビスマス(LBE: 融点 124 °C, 沸点 1,670 °C)の使用が想定されている。冷却材の入口温度は 300 °C で、流速は 2 m/s である。燃料は、Pu と MA を主成分とするウランフリー窒化物を想定している。初装荷 MA 窒化物燃料量は約 2.5t であり、核変換量は年間 250 kg である。1 サイクル 600 日の運転期間において、実効増倍率 k_{eff} はサイクル初期の 0.97 から燃焼に伴いサイクル末期において 0.95 程度まで低下する。ADS は通常の原子炉と異なり制御棒を持たず、

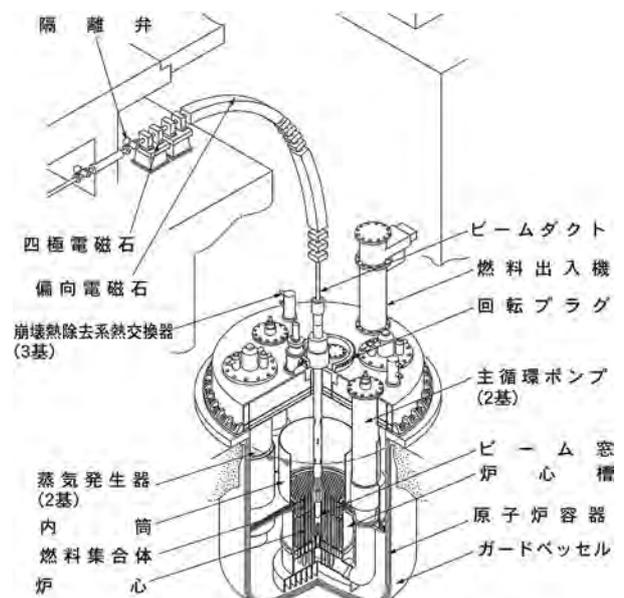


図1 ADSの鳥観図

Subcriticality - from basics to applications (6) ; Subcriticality Monitoring in Accelerator-Driven System : Ryota Katano, Masao Yamanaka.

(2019年9月2日 受理)

■前回のタイトル

第5回 1F燃料デブリの臨界近接監視手法の開発

炉心出力を一定に保つために、燃焼に伴う k_{eff} の低下を補うように陽子ビーム加速器の出力をサイクル初期の 15 MW から末期にかけて 30 MW まで増加させる。実効遅発中性子割合 β_{eff} は初装荷炉心において約 0.19 % であり、10 サイクル目には約 0.17 % となる。ADS の燃料集合体は高速炉と同様に六角集合体(炉心の燃料領域の軸長は 1 m, 外半径は約 1.2 m)を用いることを提唱しており、炉中心から中性子源を供給するために炉心中央にはビームダクトと核破砕ターゲットが配置される。

3. 未臨界度の監視と課題

MA を多量に装荷する炉心では β_{eff} が小さく(0.2 % 未満)即発臨界までの余裕が小さくなる上、ドップラー反応度が小さいことから、臨界状態の運転では精密な反応度制御と大規模な安全系が必要になる。そこで、未臨界状態で運転する ADS を導入することで安全性を高めている。ADS の未臨界度は、温度変化、燃焼、および事故で反応度が投入されても、未臨界が常に担保されるよう設定される²⁾。一方で、一般に炉心の未臨界度が浅いほど中性子源から発生した中性子の利得が良く、同じ中性子源強度でもより効率的に核変換が可能となるため経済性が高まる。ADS では MA の核分裂反応を利用した中性子経済の効率化を加味した核変換を狙っているため、安全性と経済性を考慮した最適な未臨界度範囲が設定される。未臨界度の設定には、投入され得る反応度と設計精度(1.0 % dk/k)および測定精度(0.5 % dk/k)が考慮されている。

ADS は未臨界で運転するため、運転前に未臨界度測定によって所定の未臨界度に近接させる(この試験を未臨界度校正と呼ぶ)。未臨界度校正には、未臨界度の精密な測定が可能なパルス中性子源(PNS)法のような手法が望まれる。一方、パルス中性子源を用いた出力運転では、パルス状の発熱が材料に悪影響を与えかねないため、定格出力運転時には定常中性子源による駆動が想定されている。定格出力運転では動的手法による未臨界度の測定ができないが、万が一臨界に近づいた場合にも中性子源の供給を断つことで炉心を安全に停止できるよう、未臨界度の変動が設計値を満足しているかを監視する手法の選定が求められる。また、核分裂反応率の空間分布は中性子源が燃料領域外にあるために中性子源に強く影響を受けた形状となり、測定した未臨界度は検出器の位置に依存する。そのため、基礎研究として検出器の位置依存性ならびに監視値のゆらぎの把握が求められる。

そこで、基礎研究として我が国で唯一 ADS 実験ができる京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)において、核破砕中性子源および 14 MeV 中性子源の異なる中性子源を外部から供給して零出力で未臨界度測定実験を実施し、従来手法の精度・信頼性および中性子源依存性を検証した。第 II 章では KUCA における従来手法の検証結

果について紹介する。また、第 III 章では KUCA での基礎実験で明らかになった従来手法の課題解決に向けた取り組みについて紹介する。第 IV 章には本稿のまとめを記述する。

II. 未臨界監視手法の適用性

未臨界度の測定手法とその特徴については、本連載講座の第 3 回「未臨界度測定のいろは」で広く紹介された。本節では、従来手法が ADS における未臨界度測定にどのように適用できるかを実際の未臨界炉物理実験で得られたデータを例に挙げて紹介し、従来手法を ADS に適用する際の問題点の抽出にも焦点をあてる。

1. パルス中性子(PNS)法

PNS 法は、外部中性子源としてパルス中性子を使用し、中性子計数の時間変化から未臨界度を推定する手法である。PNS 法では Simons-King 法(α -fitting 法)⁴⁾および面積比法³⁾が代表的である。Simons-King 法では、未臨界体系にパルス中性子を打ち込んだ後の中性子計数の減衰の時定数 α (即発中性子減衰定数)を指数関数によるフィッティングで求め未臨界度に換算する。面積比法では、中性子計数の即発中性子に起因する計数と遅発中性子に起因する計数の比によりドル単位の未臨界度が測定できる。面積比法は未臨界度の絶対測定が可能で、Simons-King 法も数値計算によってあらかじめ α から未臨界度への換算係数を評価しておけば未臨界度校正が可能である。

KUCA での実験で PNS 法は、検出器が中性子源の近くにある場合を除いて 8 % dk/k までの未臨界度に対し約 10 % の相対誤差で未臨界度を測定できることがわかった⁶⁾。

未臨界度測定において PNS 法による恩恵は大きく未臨界度校正での適用が期待される。本手法は検出器を制御棒などの近くに設置しても体系全体での核分裂連鎖反応に起因する中性子が検出できれば良いが、中性子源に近い位置では中性子源の影響を大きく受けるため、未臨界度測定精度が悪化することが課題として抽出された。

2. 逆動特性法

外部中性子源を用いた未臨界度監視における逆動特性法では式(1)を使用し、ある時刻 t_j (j : 時間幅のインデックス)で得られた中性子計数率 $P(t_j)$ を測定することで未臨界度を求めることができる。ただし、あらかじめ計算によって、第 i 群の遅発中性子先行核数 C_i とその崩壊定数 λ_i ならびにその相対収率 a_i , β_{eff} , および、生成時間 Λ をそれぞれ決めておく必要がある。

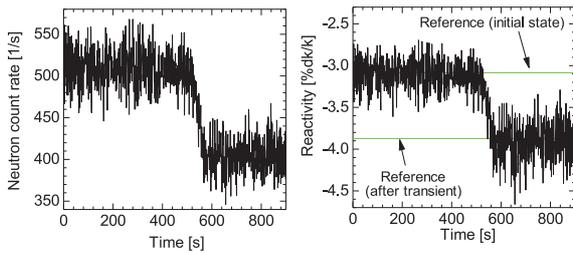


図2 KUCAでの過渡実験で測定した計数率と推定された反応度

$$\rho(t_j) = \frac{P(t_j) - P(t_{j-1})}{t_j - t_{j-1}} \frac{\Lambda}{P(t_j)} + \beta_{\text{eff}} - \frac{\Lambda}{P(t_j)} \times \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i}{1 + \lambda_i(t_j - t_{j-1})} \left\{ \frac{a_i \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} P(t_j) \Delta t + C_i(t_{j-1}) \right\} - \frac{\Lambda \epsilon S}{P(t_j)} \quad (1)$$

ここで、測定開始時において体系が未臨界定常状態であれば、遅発中性子先行核数の初期値 $C_i(t_1)$ と実効中性子源強度 ϵS は以下のように書き表される。

$$C_i(t_1) = \frac{a_i \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} P(t_1), \quad (2)$$

$$\epsilon S = -\frac{\rho(t_1)}{\Lambda} P(t_1), \quad (3)$$

式(2)および(3)より定常中性子源によって運転される未臨界炉心の未臨界度の監視には、未臨界度の初期値が必要なことがわかる。

式(1)を用いた未臨界度の Online 監視の一例を図2に示す。図2(左)には、燃焼に伴う未臨界度変化の監視を念頭に、ADS実炉で想定されている運転初期の k_{eff} が約0.97における過渡実験の計数率変化を示す。本図では約520秒で制御棒(価値: 約800 pcm)がモーター駆動によって未臨界炉心に挿入され、計数率が減少した。図2(右)は計数率を式(3)に代入して推定された反応度の推移である。本図から、制御棒が挿入されると反応度が負に大きくなっており、得られた反応度も参照値付近を推移したため、ADSの起動・運転時の未臨界を監視できる可能性を示した。しかし、本実験から、未臨界度が大きくなると推定値が約1% dk/k ばらつくことが判明した。この推定値のばらつきは、低計数率ほど計数のばらつきが大きいことに起因している。測定の目標精度が0.5% dk/k であるので、運転時に検出器の損傷を防ぐために炉心から離して設置することも念頭に、監視値のばらつきが低減される推定手法の開発が本実験を通じて課題として抽出された。

3. Feynman- α 法

Feynman- α 法は核分裂連鎖反応に起因した中性子のゆらぎがポアソン分布とは異なることに着目して、中性子計数の分散と平均の比(分散/平均)から1を引いた量を $Y(T) \equiv \sigma^2(T) / \langle C(T) \rangle - 1$ として定義する(T : 統計処理を行う時間幅)。KUCAにおける一連のADS模擬実

験⁶⁾では、中性子源付近を除き、測定値 α に対する検出器の位置依存性はほとんど見られないことが実証された。さらに、パルス中性子法における α -fitting 法と比較しても手法間での α の差異は5%程度であり、また、BF₃検出器とLiCAF光ファイバー検出器⁶⁾の検出器の種類による α の差異も4%以内であり、ADS運用時の炉物理試験において本手法は未臨界度校正に十分な精度を有するという知見を得た⁷⁾。検出器の場所を工夫することで本手法も起動前の未臨界度校正において重要な役割を果たすことが期待される。

III. 研究開発状況

II章で取り上げられた従来手法の課題に対して、本章ではADSでの未臨界度監視の信頼性向上を目指した研究開発状況について紹介する。なお、検出器および信号処理に必要な機器はII章と同様のものを用いているため、手法を改善することで信頼性が大きく向上し、新たな装置開発の必要がないことを強調したい。

1. 最適検出器位置探索

II章で述べた通り、未臨界度の測定結果は検出器の位置に依存することが課題であった。そこで、面積比法では、(ドル単位未臨界度の計算値) / (面積比の計算値) を補正係数として測定結果に乗じることにより、空間依存性が補正できる。この補正係数により検出器位置依存性を大幅に低減できるが、補正係数を数値計算によって求めているため、理論モデル、幾何形状、製造公差、核データ等に起因する不確かさが混入し、かえって測定精度を悪化させてしまう可能性がある。そこで、補正係数を乗じる必要の無い(補正係数がちょうど1となる)位置に検出器を置けば、補正係数による不確かさは混入せず、高精度な測定が期待できる。先行研究では、補正係数が1となる位置近傍では核データに起因する補正係数の不確かさが小さくなることが示されている⁸⁾。つまり、補正係数が1となる検出器位置では数値計算による不確かさの影響を受けにくく最適な検出器位置が決定できるということである。実際には、幾何形状をより忠実に再現し中性子と物質の相互作用も可能な限り厳密に扱うことが可能である連続エネルギーモンテカルロ計算コードを用いて最適検出器位置を探索すれば、不確かさを極力低減した高精度未臨界度測定が期待できる。

また、Simons-King法についても高精度な未臨界度測定が可能な検出器位置の探索法が提案⁹⁾されており、未臨界度測定の信頼性向上に資すると考える。

2. 拡張カルマンフィルタ

カルマンフィルタは、時刻に対して一階連立線形微分方程式で表されるシステムの状態の最尤値(もっともあ

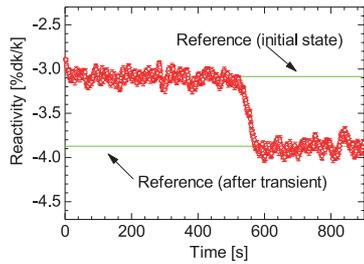


図3 図2(左)の計数率を入力データとしたときの拡張カルマンフィルタによる反応度のオンライン監視¹⁰⁾

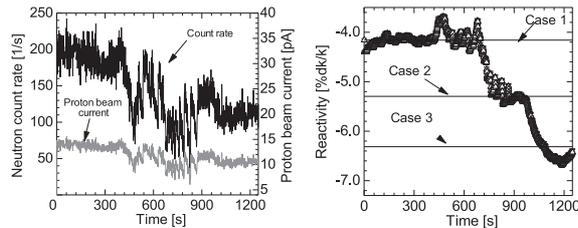


図4 中性子計数率と陽子ビームの電流値(左)および拡張カルマンフィルタによる反応度のオンライン監視(右)¹¹⁾

りそうな値)を、観測値とそのシステムを支配する方程式を用いた最尤推定法によって推定する手法である。動特性を示す状態空間モデルである式(1)および(2)が非線形であるため、テイラー展開で1次までの微少項を取り扱うことができる拡張カルマンフィルタに注目し、II-2節で逆動特性法によって推定された未臨界度のゆらぎ低減に取り組んだ。

図3に図2(左)の計数率を観測データ、観測データの不確かさを計数の平方根を観測データの不確かさとしてそれぞれ入力したときの反応度の推定値を示す。本図より、推定値が参照値と良い一致を示しているだけでなく、逆動特性法による推定値(図2(右))と比較すると推定値のばらつきが約1% dk/kから約0.3% dk/kまで低減されることが実証でき、拡張カルマンフィルタが未臨界度オンライン監視に適用可能であることがわかった。

制御棒挿入による基礎的な過渡実験から拡張カルマンフィルタが未臨界度のオンライン監視に適用できる可能性が示されたので、計数率が200 cpsと低い(図4(左))中で中性子源が加速器の不安定性によって激しく変動したときの厳しい条件において本手法によるオンライン監視を試みた。本過渡実験では、制御棒の挿入によって4.2% dk/k(Case I)から6.3% dk/k(Case III)まで未臨界度を変化させた。図4(右)に反応度の監視結果を示す。図4(左)の計数率からは一見しても反応度の変化を確認することができないが、図4(右)から拡張カルマンフィルタによって低計数率で外部中性子源強度が大きく変動している中においても反応度は参照値付近を示した。これらの実験から、拡張カルマンフィルタが実際のADSにおける未臨界度監視にも適用できる可能性を示

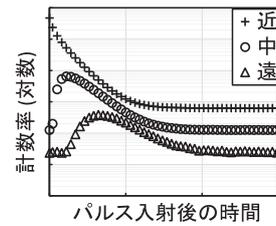


図5 PNS法におけるパルス入射後の中性子検出の様子

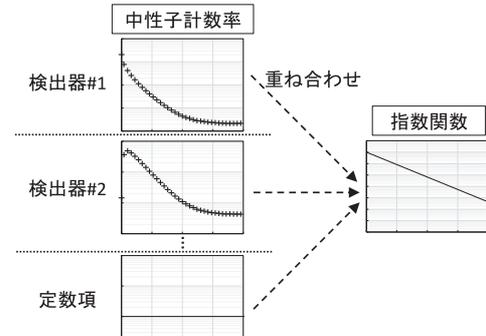


図6 線形結合法の概念図

すことができた。

3. 線形結合法

PNS法において、パルス入射後の中性子計数は、中性子源からの距離に応じておおよそ図5のようになる。中性子源から近い検出器では、中性子源から発生した中性子が一斉に検出器になだれ込むためパルス入射直後の計数は大きく、その後急峻に減衰する。対して、中性子源から遠い検出器では、中性子が体系内を飛行して検出器に至るまで時間がかかるため、計数の立ち上がりパルス入射から遅れる。Simons-King法では、中性子計数が単一の指数関数で減衰すると仮定してフィッティングを行うため、中性子源と検出器の位置関係に応じて即発中性子減衰定数 α が過大/過少評価される。

パルス入射からしばらく経つと、中性子計数は単一の指数関数で減衰し、準定常状態に至る。この状態は、体系内の中性子は核分裂連鎖反応によってのみ生じたものであり、この時の減衰の強度が未臨界度に対応する。しかし、外部中性子源からの影響は中性子検出器の位置により異なるために準定常状態に至るまでの時間が異なることから、検出器の位置依存性による不確かさが残る。

線形結合法は、体系内に広く分散させた複数の検出器における中性子計数を適切な重さによって重ね合わせ(線形結合させ)、パルス入射直後の外部中性子源の影響を相殺させることで、準定常時の指数関数を抽出する手法である(図6)。この手法はKUCAでのパルス中性子法実験に適用され、基本モードの指数関数を抽出し、従来のSimons-King法と比較して検出器の位置の効果による不確かさ低減の可能性を示した¹²⁾。この手法によってPNS法で課題となっていた検出器の位置依存性

に関する課題が解消される可能性があり、未臨界度校正において信頼性向上に資すると考える。

IV. まとめ

我が国では、MA を集中的に核変換するためのシステムとして ADS の導入が検討されている。ADS は臨界に達することがないように設計されるため、起動前においては絶対測定が可能な手法によって所定の未臨界度に近接させる。また、運転時には定常中性子源を用いることが検討されている。従って、運転時に万が一所定の未臨界度から逸脱した場合にも動的手法に頼らずにそれを検出できるような未臨界度監視手法の選定が求められる。

本稿では、II 章において従来の未臨界度測定手法の ADS への適用性について議論し、加えて、III 章では未臨界度測定の信頼性向上に資する研究について取り上げた。未臨界監視について、現状は炉心スペクトルを高速炉に近づけた燃料にウランが装荷された零出力(熱的なフィードバックや燃焼による核種組成の変化が無視できる出力レベル)炉心で測定精度および信頼性が確認できたという基礎段階である。

今後も、実機 ADS での未臨界度監視精度のさらなる向上のために、KUCA など得られた実験データを活用して新たな未臨界度監視手法を継続的に開発し、その信頼性を検証することが重要であると考え。また、実機 ADS では燃料に MA が多量に含まれるため、ウラン燃料に比べ γ 線レベルが高くなり、測定場の中性子スペクトルも KUCA のものと比べて硬くなる。このことから、実際に高速スペクトルの実証炉心を用いて未臨界度校正および燃焼に伴う燃料および MA 核種組成変化に応じた大幅な未臨界度変化のなかで、中性子計測技術および提案手法が未臨界度監視の要求精度を満足するかの実証研究にも重点が置かれると考える。

— 参考資料 —

- 1) 放射性廃棄物減容化・有害度提言の技術開発：核種分離・転換, NSA/COMMENTARIES, No. 22, 日本原子力産業協会原子力システム研究懇話会, (2016).
- 2) T. Sugawara, et al., "Impact of impurity in transmutation cycle on neutronics design of revised accelerator-driven system," *Ann. Nucl. Energy*, 111, pp. 4490459 (2018).
- 3) N. G. Sjöstrand, "Measurements on a subcritical reactor

using a pulsed neutron source," *Arkiv för Fysik*, 11, pp. 233-246 (1956).

- 4) B. E. Simmons, et al., "A pulsed neutron technique for reactivity determination," *Nucl. Sci. Eng.*, 3(5), pp. 595-608 (1958).
- 5) R.P. Feynman, et al., "Dispersion of the neutron emission in U-235 fission," *J. Nucl. Energy*, 3(1-2), pp. 64-69 (1956).
- 6) K. Watanabe, et al., "Development of an optical fiber type detector using a Eu: LiCaAlF₆ scintillator for neutron monitoring in boron neutron capture therapy," *Nucl. Instrum. Methods A*, 802, pp. 1-4 (2015).
- 7) 山中正朗ら, "加速器駆動システムによる核変換処理の実現に向けた基礎研究(7)動特性パラメータの実験解析" 日本原子力学会 2018 年秋の大会, 2M 03, 岡山大学津島キャンパス, 2018 年 9 月 5 日~9 月 7 日.
- 8) T. Kimura, et al., "Uncertainty quantification of spatial correction factor for Sjöstrand method due to cross-section data," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 115, pp. 1081-1084 (2016).
- 9) S. H. Jang, et al., "Determination of an effective detector position for pulsed-neutron-source alpha measurement by time-dependent Monte Carlo transport simulations," *Sci. Technol. Nucl. Install.*, 2018, Article ID 2350458 (2018).
- 10) M. Yamanaka, et al., "Subcriticality Estimation by Extended Kalman Filter Technique in Transient Experiment with External Neutron Source at Kyoto University Critical Assembly," *Eur. Phys. J. Plus* (2019) [to be submitted].
- 11) M. Yamanaka, et al., "Applicability of Extended Kalman Filter Technique to Reactivity Monitoring at Kyoto University Criticality Assembly," *Proc. Reactor Physics Asia 2019 (RPHA19) conference, Dec. 2-3, Osaka, Japan* (2019) [accepted].
- 12) R. Katano, et al., "Application of linear combination method to pulsed neutron source measurement at Kyoto University Critical Assembly," *Nucl. Sci. Eng.*, (2019) [in print].

著者紹介



方野量太 (かたの・りょうた)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 原子炉物理学, 未臨界度測定/不確かさ定量評価



山中正朗 (やまなか・まさお)

京都大学複合原子力科学研究所
(専門分野/関心分野) 原子炉物理学, 原子炉物理学実験/未臨界度測定, 動特性パラメータ

THE BATTLE FOR FUKUSHIMA'S REPUTATION

Steve Terada

Volunteer Disaster Risk Communicator

Abstract – Fukushima Prefecture has a negative reputation. People everywhere continue to believe that Fukushima is unsafe due to high radiation levels and that its locally grown foods should not be eaten. This negative assessment is not based on the prefecture's current status, but from perceptions formed after the March 2011 nuclear accident. Fukushima residents asked me to tell the world the truth about Fukushima and to help them overcome their negative reputation. I agreed, and in 2019 I moved from Hawaii to Fukushima City to accomplish that mission.

1. Introduction

I am a third-generation Japanese American whose grandparents emigrated from Kumamoto, Japan to Hawaii. I went to Fukushima for the first time in June 2011 with Rotarians on a humanitarian mission. Unfortunately, I had to leave after only one day but I promised Rotarians that I would someday return. I went back seven years later and learned the prefecture was still considered unsafe from nuclear radiation. Residents asked me to help dispel the prefecture's negative reputation by telling the public the facts about Fukushima. They said that since I had no family in Fukushima and I came from the United States, I would be considered objective when I spoke to people.

My wife and I moved from Hawaii to Fukushima City in 2019. It was a difficult decision to relocate because Japan is not an easy place for foreigners to live. My mission was unprecedented and I created a unique strategy to solve a difficult and uncommon problem: I became a self-appointed volunteer who did not work for the government or other organization and I would tell the world Fukushima's story. My volunteer status helped me to be seen as objective and that was very important for my mission. I was cautioned by residents, however, that they found it difficult to change negative perceptions of Fukushima and it would also be difficult for me.

2. The Situation

The Government of Japan was criticized for its post-disaster management but it made several decisions that positively affected the health of residents. Residents were evacuated and people were prevented from eating locally grown foods. The government also decided that the nuclear plant would not be entombed like Chernobyl but would be decommissioned, and evacuated areas would be revitalized to create new towns and industries. The large-scale industrial revitalization, if successful, could also become a model and help other regions in Japan to create a better future.

In 2018 I learned that most Fukushima people lived normal lives and except for the evacuated areas, I saw no physical reminders of the 2011 disaster. I was surprised to learn that people globally still believed that Fukushima was unsafe because of radiation, and they did not know that Fukushima had made tremendous progress in its disaster recovery, or revitalization. The lack of knowledge was, in my opinion, the basic reason Fukushima was viewed negatively. Non-stop media coverage of the nuclear disaster in 2011 had badly stigmatized Fukushima as an unsafe place, and seven years of revitalization progress was not transparent so people around the world did not know Fukushima's current condition.

I studied what may have caused Fukushima's negative reputation and the explanations included lack of trust in TEPCO and the government, fear and

misunderstanding of radiation, concern for evacuated residents, uncertainty for the future of evacuated areas, improper management of nuclear waste and “Tritium water,” and the decommissioning of Daiichi Nuclear Power Plant. I strongly believed that information related to these topics was the key to overcoming the negative perceptions of Fukushima.

3. My Strategy

I had to explain how Fukushima had improved since the nuclear accident. The government was informing the public about Fukushima’s status by promoting its food products and the 2020 Tokyo Summer Olympic Games. However, people wondered how and why Fukushima went from a dangerous place in 2011 to a safe place seven years later. I wanted to help them understand by explaining the facts of revitalization progression. I worked with government offices to obtain current information but I was not a government spokesperson. I was a volunteer observer of conditions in Fukushima who then explained to others what I had learned. I gave speeches to Rotary Clubs and other groups¹⁾, in newspaper columns and articles²⁾, and on interviews on TV, YouTube and radio programs³⁾. This strategy was successful and people told me that my presentation or article helped them to open their minds and to appreciate what Fukushima Prefecture has accomplished.

I assembled an energetic team of volunteers to execute the mission. I started with a few people in Hawaii and Washington D.C. and added Fukushima team members. I am not fluent in Japanese so team members helped me with interpreting and translation. Our team currently has over 30 people.

My research about Fukushima’s revitalization focused on radiation risk, agriculture and marine product radiation safety, evacuated areas, decommissioning, business revitalization, and health monitoring. My sources of information included residents, newspaper articles, online sites, engineers, university professors, doctors, NPOs, civilian associations, national government officials, and prefectural and municipal officials. It is difficult to understand Fukushima’s revitalization because there are many separate and interconnected parts and information about them is located in many different places (*). A great deal of online information about Fukushima is outdated or not believable. All this explains the public’s lack of understanding of revitalization progress such as in

one survey where 47% of respondents “see scant progress in reconstruction after 2011 disaster⁴⁾.”

I highly recommend four places where residents and foreigners can learn about Fukushima’s revitalization: Environmental Regeneration Plaza in Fukushima City, Commutan Fukushima in Miharu, TEPCO Decommissioning Archive Center in Tomioka, and the Fukushima Innovation Coast Framework – Fukushima Innovation Promotion Office in Fukushima City. The Fukushima International Association has a multi-language site with extensive online resources.

4. Conclusions

The world does not know Fukushima Prefecture’s current situation. Fukushima is not well known because foreign people historically and today do not come to the prefecture. Its post-disaster revitalization program is complex and hard to understand. Accurate media coverage is lacking. All of these together create a difficult barrier for people to understand Fukushima today, but the Tokyo 2020 Summer Olympic Games present a large and timely media platform for updating global perceptions about Fukushima. Recent, highly publicized, multi-country objections to serving Fukushima-grown food to Olympic athletes is a painful reminder of the extensive misunderstanding about Fukushima’s level of danger. I have been successful in informing people about Fukushima’s current status but much more is needed. A major information campaign by the world media is needed before the Olympics arrive, and if this does not happen there is a great possibility that past negative media messages about Fukushima will be recycled in 2020.

(* Useful Information Sites/Sources

Environmental Regeneration Plaza, Commutan Miharu, TEPCO Decommissioning Center, Fukushima Innovation Coast Promotion Organization, Fukushima Medical University, Nagasaki University, Fukushima International Association, International Affairs Division – Fukushima Prefectural Gov’t, Fukushima River & National Highway Office – Ministry of Land Infrastructure, Transport & Tourism, NPO Global Mission Japan, Rotary International, and Radio Fukushima.

References

- 1) Rotary Club of Fukushima, May 7, 2019.
- Rotary Club of Mililani Sunrise, Sep 25, 2019.

Hiroshima/Yamaguchi Heritage Club, Sep 28, 2019.
Global Seminar at JICA Nov 24, 2019.

2) Hawaii Nikkan San, Aug 20, 2019, Sep 24, 2019, Oct 23, 2019,
Nov 27, 2019.

Hawaii Pacific Press, Nov 1, 2018, May 1, 2019.

Hawaii Star Advertiser OP-ED, Jul 22, 2019.

3) TUF TV, May 16, 2019.

Radio Fukushima, Aug 31, 2019.

ThinkTech Hawaii Law Across the Sea, Sep 30, 2019.

4) The Japan News(online), March 11, 2019.

Author

Steve Terada

Volunteer Disaster Risk Communicator
Past Work: US Army Corps of Engineers
US Department of State



新刊紹介 「原子力発電世論の力学」

北田淳子著, 402p. (2019.10), 大阪大学出版会
(定価 3,500 円 + 税) ISBN978-4-87259-690-8

世論調査とは乱暴な代物だ。原発をテーマにした調査にしても、一般の人はこの問題にそれほど関心をもっているわけではない。けれどもあえて「原発の再稼働についてどう思うか」などと聞かれれば、回答者は意識をいやおうなしに顕在化させなければならない。しかも回答は、そこで示されたわずかな選択肢から選ばせられるのだ。社会学者ブルデューの言葉を一部借りるならば、それは対象者に対する皮相的で強制性をもった介入にはかならない。

世論調査にはもともと、そんな制約や限界や暴力性がある。しかし、それをふまえた上で、長年の調査結果を集大成した書籍が出た。標記の書籍がそれである。

この書籍では、データが表す対象者の意識の変化の推移を賛否といった二分法的ではとらえない。回答として示される表面的な意識ではなく、その意識の根底にある価値観の相違や変化に焦点をあてる。その際に筆者が注目したのは、「リスク」「効率性」「脱物質主義」という三つの要因だ。

一つ目のここで言う「リスク」とは、「被害の重大性×確率」の積で表される「客観リスク」とは別物で、対象がもつリスクの種類や社会状況などで左右される「主観リスク」である。なお、これまでの原発事故では事故直後に原発への不安感が増

したが、その後の経過とともに不安感は低下した。しかし、福島原発事故では事故前より高い水準で下げ止まったままで、戻る気配がない。原発への「リスク認知」は高止まりしたままだ。

二つ目の効率性の要因は、原発がもつ利点や有用性を重視する視点である。原発推進派の人はこれを過大に、そして反対派はこれを過少に評価する傾向がある。

三つ目の脱物質主義は、どのような社会の実現をめざすかという、個人の価値観に関わるものである。

この書籍では、これらの三つの要因が原発世論に影響を与えるとみる。このうち「リスク認知」と「脱物質主義」が高ければ、原発世論は原発に対して否定的な方向へ向かい、「効率性」の意識が強ければ肯定的な方向へ作用すると分析する。さらにそれらの要素は原発をめぐる事故や不祥事のあるなし、さらには社会状況の変化を受けて、さまざまに変わると同書は言う。

本書の著者は市民のうつろいやすい意識と、その根底にある信念や価値観にもとづく変わりにくい意識とを見事に切り分けて、見据えようとしている。

(日本原子力研究開発機構・佐田務)



談話室

「世界原子力大学 夏季研修(WNU-SI)」 2020年日本開催 若手参加支援にむけて

日本原子力産業協会 桜井 久子

世界原子力大学(WNU)夏季研修(Summer Institute : SI)が、2020年6月15日～7月20日の約5週間、初めて日本で開催されることとなった。兵庫県(神戸市)、福井県(敦賀市他)、福島県(双葉郡)の3か所にて開催予定である。日本原子力産業協会、日本原子力研究開発機構、原子力国際協力センターが共同事務局を担当している「産官学連携の原子力人材育成ネットワーク」は、WNUと2019年7月に協力覚書を締結し、現在、日本開催にむけた協力支援を進めているところである。なお、WNU-SIを主催するWNUは、世界原子力協会(WNA)、国際原子力機関(IAEA)、経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)、世界原子力発電事業者協会(WANO)が中核となって2003年に設立され、若手社会人を対象とした国際的な教育プログラムを実施している。

WNU-SIは、原子力発電国や新規導入国のほか、放射線利用国、その他の開発途上国を含む世界30数か国から約70名の30歳前後の実務経験者(管理者、研究者、技術者、学識者等)が集まる、合宿形式の約6週間の英語による有料研修である。原子力に関連する国際機関や各国の現役リーダーから直接課題を聞き、少人数での議論を経て、自らの結論を皆の前でプレゼンテーションを行う。知識修得の場ではなく、課題解決能力向上と同世代間のネットワーク構築が目的である。各国行政官、各企業の次期リーダーの育成として有効な研修であり、2005年度より実施されている。研修は講義および講演、グループワーク、テクニカルツアー、グループプロジェクトで構成される。参加者、講師、メンター間での議論や交流に重点が置かれており、講義後や週末も含め、朝食時から夕食後まで異文化交流が続くプログラムである。

日本では、(一社)日本原子力産業協会が、国内外で活躍できる若手リーダーの育成を目的とした「向坊隆記念国際人育成事業」(以下、向坊事業)の一環として2009年度よりWNU-SIへの日本からの研修生(フェロー)派遣を支援するため、主に参加費助成と事前研修を実施している。

向坊事業からの支援者数はルーマニアとスイスで開催された2019年SIまでで、45名となった。なお、日本からの参加者は原子力規制庁などの独自参加者を含めると67名となる。一方、支援者数の内、女性は6名に留まり、大学の若手教員の参加者もないのが現状である。WNUはジェンダーバランスを重視しており、向坊事業としても女性の参加を歓迎するとともに、大学の若手教員の積極的参加を呼び掛けている。なお、向坊事業では大学の若手教員の参加にあたっては、参加費の全額助成を実施している。

日本からのWNU-SI参加者は、異なる立場や考え方を持つ多くの国からの研修生や講師陣との5～6週間もの交流を通じて、多くの学びを得ている。参加者は、研修で得た知識や人脈を業務で活かし、日々の自己研鑽や後継の育成に励みながら、原子力産業界全体のレベルアップを図りたいとする意欲に溢れている。これまでの参加者の声を以下のとおり紹介する。

「WNU-SIはオープンマインドでフレンドリーな参加者が多く、非常に貴重な人脈形成の場である」、「ファシリテート力、巻き込み力、傾聴力、俯瞰力、吸収力が必要な国際チームマネジメントを学ぶことができた」、「WNU-SIは日本の原子力の海外アピールの場として有効で積極的に利用されるべきである」、「世界の原子力界のリーダーから学んだ、リーダーの心得や自己成長の条件を、職場のモチベーションアップやチームワーク、健全な安全文化の醸成に活かしたい」、「日本の原子力関連の情報を世界に正確に発信できるように自己研鑽に励み、自身の体験を後進に伝えながら自他成長をしていきたい」。

向坊事業担当の筆者としては、2020年のWNU-SIの日本開催が成功するために、同事業の支援による過去の日本からの参加者も協力・支援に集ってもらい、将来が期待される若手人材の国内外・世代間のさらなるネットワークが強化されるようにサポートしたいと考えている。

(2019年12月20日記)



～福島浜通りだより～(10) 実り，味わう秋

一般社団法人 AFW 吉川 彰浩

すっかりと日が短くなった。農作業に明け暮れ、暑い日差しに日焼けした腕も、気が付けば、普段日にする風景が秋模様となっていく中、すっかりと白く戻っている。

たわわに実り、頭を垂れていた稲穂が織りなす黄金の絨毯は刈り取られ、跡には新しい芽が芽吹き始めている。

この時期の浜通りはとても過ごしやすくなる。日中のぼかぼかした陽気に誘われ、つつい出かけたくなる思いにかられていく。

そんな思いを受け止めるかのように、土日ともなれば、秋の実りを分かち合おうという収穫祭、いわゆる秋祭りが身体一つでは周りきれないほど各地で開催される。

私は毎年、双葉郡広野町の収穫祭に出店者として参加をしている。広野町の人達に混ぜてもらってオリーブの栽培をしてきた。オリーブの葉っぱを使ったリースと陶器を販売している。普段話すことのない人と話せるのは大きな魅力だ。

婦人会の皆さんが野菜を売っている。顔を出す。あら吉川さん久しぶりと声をかけてくれる。

玉ねぎ、新米、ジャガイモ、大根、えごま、地元のお母さんたちが育てた野菜たちが並ぶ。自分が育てた野菜を説明する顔はとても嬉しそうだ。

これはお母さんが作ったの？と声をかければ、今年の出来のあれこれについて話してくれる。一つ買えば、一つおまけがついてくる。この時期は誰もがきつぷがよい。気が付けば、袋いっぱいの野菜を手にしていく。

とても長閑で心地よい。分かち合う喜びに溢れている。雲一つない秋晴れの日。会場からは海を見おろすことが出来る。青い空、青い海が遠くかなたまで広がっている。

手にした野菜たちは食卓に並ぶ、秋の味覚を満喫する日々が過ぎていく。

友人たちと双葉郡檜葉町で手掛けている米も収穫を迎えた。今年植えた品種は「こしひかり」と「天の粒」どちらも自然の恵みを受けてしっかりと育ってくれた。

米作りの最後は少々切ない。脱穀のためにコンバインを入れるのだが、あっという間に刈られていく。

毎日のように水を管理し、カメムシがわからないように畦に生い茂る草を刈り、台風の襲来の際には横倒しになった稲穂を丁寧に起こした。イノシシの被害に遭わないよう電柵を、汗をたらしつづ張ったりもした。蛙の合



唱、飛び立つトンボたち、手間暇をかけて育てた日々と、育てる中での自然の風景が頭をよぎる。

コンバインによる脱穀が終わると、次は粃すりへと移る。その頃には切ない思いは消え、誰かが口にしてくれる姿を笑顔で想像しながらの作業になる。

粃すりを終えた米を袋に詰めていく。30 kgの玄米が入った袋が山積みになっていく、出来上がったパレットに積まれた米袋たちは、まるで壁のようにそびえ立つ、その姿を眺めながら誇らしい気分になる。

放射性物質の含有量を測る「全量全袋検査」を受ける。初めて作った際には緊張したものも、今はお守りのように感じている。安心のお墨付きといった意味でだ。

早速出来上がった新米を食べることにした。仲間内と一緒に夕食を食べようと声をかける。イノシシの肉を手土産に県外の友人がちょうどよく訪ねてきた。

声をかけた友人は、ヒラメとイシナギの切り身を持って来てくれた。

新米を味わいつくそうと、準備に取り掛かる。記憶を頼りに牡丹鍋を作る。ヒラメとイシナギは刺身にして丁寧に皿に盛る。余ったシシ肉は漬けにし、焼き肉用に、ヒラメはホイル焼きにもした。

あっという間に、新米を彩る贅沢なおかずが揃って行く。友人たちとお酒も飲みながら、贅沢な時間も過ぎていった。

この地域での実りは、自然がもたらす恵みだけではないようだ。多くの困難を共に越えてきた人の「実り」がある。土を丁寧に作っていく農作業の日々に似ている。二つの実りを味わっている。

(2019年11月11日記)

視点

〈社会〉を語る

第8回 国際比較調査の面白さと危うさ

岡山大学 齋藤 圭介

世の中には国際比較ランキングというものがあります。世界経済フォーラムが公表しているジェンダー・ギャップ指数や、国連開発計画(UNDP)が公表しているジェンダー不平等指数は、みなさんも聞いたことがあるでしょう。ちなみに2018年の日本の順位は、前者が110/149位、後者が22/163位です。ほかに有名どころでは、イギリスの高等教育専門誌であるTimes Higher Educationが公表しているTHE世界大学ランキングがあります。2019年のデータでは、日本のトップ2は東京大学(36位)と京都大学(65位)でした。

こうした世界のなかでの日本の順位をみて、あれこれ語ることが好きな人は多いと思います(かくいうわたしもランキング形式が大好きです)。国際比較の結果は、尺度(ものさし)が一元化されており、なにより結果が分かりやすいです。そのためデータに基づいた議論の根拠として、そうした順位が用いられることもあります。

男女平等や高等教育にかぎらず、同一テーマのもと、複数の国で社会調査を実施し、その結果を比較することは日常的に行われています。国際比較調査は、他国との関係をとおして自国の特徴を浮かび上がらせることができ、かつ国際的な全体的趨勢を把握できる点で、興味深い知見をもたらしてくれます。

しかし、よくよく考えると、言語も文化も異なる国々を、どのような尺度で測ってランク付けしたものか気になりませんか。国際比較調査は結果が分かりやすいからこそ、結果が導出されるまでの手続きに目を向ける必要があることを、自戒を込めて指摘したいと思います。

これはどういうことか。わたしが現在進めている社会調査を例に説明します。わたしは日本、アメリカ、オーストラリアの3カ国の男性性(男らしさ)の比較調査を進めています。じっさいに3カ国でインタビューと質問紙調査を実施して、とくにブルーカラーの男性たちがいかに男らしさを経験しているのかを明らかにしようとしています。国際比較を前提とした社会調査を進めるなかで非常に多くの困難が発生しましたが、なかでも一番わたしの頭を悩ませたのは、言語/文化をまたぐ社会調査はいかに可能かという方法的なことでした。この悩みには2つの側面があります。

1つは、社会調査を複数の国でおこなうさいに生じる、

言語/文化の翻訳(不)可能性の問題です。言語/文化が異なる国々で実施した結果を同一の尺度で比較することはものすごく大変です。わたしの調査でいえば、日本語と英語の2言語でさえ、まったく同じ質問をすることができません。ある質問を日本語で日本人にしていたとして、今度はそれを単純に英訳して英語が母語の男性にそのまま聞けばよいとはならないからです。これはわたしの語学力や異文化への理解度といった水準の問題ではなくて、社会調査の国際比較が不可避に内在している方法的な困難です。

もう1つは、ランキングの尺度をいかに作れるのかという問題です。冒頭の男女平等指数にせよ、大学ランキングにせよ、多様な文化や価値観がある諸外国の状況や制度を、なんらかの尺度で測ることはじめてランク付けすることができます。では、どのような尺度を使うべきなのか。誰/どの国であれば、〈正しい〉尺度を作れるのか。現在の国際比較は、おうおうにして欧米の価値観のもと社会調査をして、その結果を並べているといつてよいでしょう。たとえば冒頭のランキングでtop10に入っている国々をみてください。もし日本が主導して同様のランキングを作成したら、現在の尺度とは異なるものを用いることになり、そのランキング結果は現在のものとはまったく異なる様相を呈するはずですよ。

社会調査の国際比較の結果をみると、わたしたちはなんとなくわかった気になって納得してしまいがちです。しかし、異なる言語/文化をまたぐ多様な価値観を、ある特定の言語/文化の尺度で測るその暴力的な手続きにこそ、本来はもっと目を向けるべきなのかもしれません。

国際比較調査は、自国の立ち位置を俯瞰的に捉えることができ、学問的にも非常に有効な方法です。ただし、非常に分かりやすく面白い反面、単純化にともなう危うさも同時に孕んでいます。国際比較の調査結果を並べる手続きが、いかなる尺度を用いて行われたのかを精査すること抜きに、結果だけを解釈すること——ましてや自説の根拠にすること——には慎重になるべきでしょう。国際比較調査の解釈のさいには、どのような尺度を用いたものなのかを毎回精査することが、わたしたちに求められていることは間違いありません。

原発が使えるうちに新時代へ一歩を

朝日新聞 論説委員 村山 知博

2018年7月に閣議決定された「第5次エネルギー基本計画」(エネ基)は、原子力発電について次のような長所があると述べている。

- ・燃料投入量に対するエネルギー出力が圧倒的に大きい
- ・数年にわたって国内保有燃料だけで生産が維持できる低炭素の準国産エネルギー源として、優れた安定供給性と効率性を有している
- ・運転コストが低廉で変動も少なく、運転時には温室効果ガスの排出もない

こうした長所を踏まえて、エネ基は「(原子力は)長期的なエネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源である」と結論づけている。2030年度の電源構成における「20~22%」も維持した。

以前の私なら、「まあ、そうでしょうね」と同意していただろう。

各地の原発を訪れるたび、敷地の広さや建屋の大きさに圧倒される。セキュリティ体制や放射線防護対策が厳しいこともあって、やや大げさにいえば要塞を訪れているように錯覚しそうにもなる。原発の威容を一度でも目の当たりにした経験があれば、そのパワーを利用しない合理的な理由を見つけるのは難しい。

しかし、東京電力・福島第一原発の事故を境に、私の原子力発電に対する考え方は大きく変わった。あのような事故は二度と起こしてはならない、だから将来的には原発に依存しないようにしていくべきだ、と。事故現場を見れば、多くの人がそう思うはずだ。

実は、エネ基にも福島の事故を意識した記述が随所にある。

「安全性の確保を大前提に……」

「いかなる事情よりも安全性を全てに優先させ……」

「(事故の)リスクを最小限にするため、万全の対策を尽くす」

日本の原発は安全なので事故は起きない、というかつての姿勢を思えば隔世の感がある。ただ、原子力発電を続けていくという姿勢そのものは、いささかも変わっていない。

それでいいのだろうか？

日本列島の周辺には複数のプレート境界があり、大地には無数の活断層が走っている。もし、大きな地震や津波に再び襲われて深刻な原発事故が起きたら、何万人も

の人たちが住み慣れた我が家を追われ、放射性物質による健康被害におびえなければならない。事故の後始末には、何十年もの長い年月と兆円単位の膨大な費用がかかる。それが福島事故の教訓である。

たとえ事故が起きなくても、安全対策に費用がかかるため原発の発電コストは膨らんでいるし、放射性廃棄物の処分地をどこにするのかという難問を解決できる見通しもない。3基の原子炉で同時にメルトダウンを起こしてしまった国として、原発に頼らない社会づくりこそ、進むべき道だ。

こういうことを言うと、「化石燃料もダメ、原子力もダメでは、電力をまかなえない」とお叱りを受けるに違いない。おっしゃる通りで、いままぐ原発をなくしてしまったら、電力の安定供給と地球温暖化対策を両立することは難しくなってしまう。だから当面の間、いまある原発を使っていかなければならないのは確かだ。

だからといって、目の前の現実から目をそらすわけにはいかない。原発の新規立地が難しい一方で、既存の原発はやがて古くなって引退せざるをえない。「20~22%」を実現するどころか、このままでは原子力発電の割合は徐々に減っていくのだ。そして将来、電気が足りなくなったとしても、福島の事故直後のように化石燃料に頼ることはできない。パリ協定にもとづく温室効果ガスの削減目標の達成がおぼつかなくなるからだ。

そうなってから慌てても遅い。いまのうちに、再生可能エネルギーを育てておく必要がある。

再エネは天候に左右されて不安定だとか、風車や太陽光パネルの設置場所の確保が容易ではないなどの課題がある。だが、コストや安全性など、短所を補ってあまりある長所がある。国は思い切った目標を掲げ、政策的に支援するべきだ。これまで、国策として原発を手厚く育ててきたように。

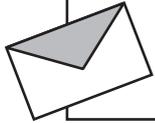
著者紹介

村山知博(むらやま・ともひろ)

1989年、朝日新聞社入社。アエラ編集部、アメリカ総局、GLOBE副編集長、朝日新聞デジタル編集長、科学医療部長などをへて現職。



理事会だより



福島9年、福島への学会の取り組み

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故から9年が過ぎ、この間、事故の収束と原子力に対する国民の信頼回復に努力が払われてきた。福島県内においてはオンサイトの汚染水対策や使用済燃料プールからの燃料取出し等が進められ、オフサイトでは除染の終息とともに、除染廃棄物の中間貯蔵施設への搬出が開始された。一方で、燃料デブリの取出しのような長期にわたる課題や、避難指示解除後の復興・再生については道半ばという状態である。国内の原子力発電所の再稼働は一部であり、より一層の取り組みが求められている。

日本原子力学会は事故後の対応として事故一か月後には「原子力安全調査専門委員会」に関連分科会を発足。事故の情報収集・分析・評価、環境修復、放射線影響に特化した分科会を立上げた(2011年4月クリーンアップ分科会、放射線影響分科会等)。翌年には現地の活動支援や、学会内の組織連携と活動強化のため、理事会直轄の組織横断的プロジェクトとして「福島特別プロジェクト」を創設(2012年6月)。また、この活動と並行して、「東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会」を発足させ(2012年8月)、事故について学術的立場で整理、最終報告書としてまとめ出版した(2014年3月丸善より)。引き続き廃炉に向けた対応として「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」を設立し活動を進めている(2014年6月)。更に、接点のある学協会との相互情報交換や、福島復興および廃炉推進活動の一層の効果的・効率的な推進を図るため、「福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会」を関連学協会と協力して設置した(2016年5月)。

「福島特別プロジェクト」, 「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」, 「福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会」は現在も継続、理事会直結の組織として連携を取りながら活動が進められている(これら3組織の活動についての詳細は昨年の原子力学会誌, 2019年4月号で紹介されている^{1~3)})。

福島県および関連する地域の環境修復、福島第一原子力発電所の廃炉の完遂に向けての努力がはらわれているものの、一般の方々の理解は必ずしも十分に得られていないのが現状である。2019年12月に再処理・リサイクル部会は『住民、地元との対話活動/リスクコミュニケーション』をテーマにセミナーを開催。この中で理解活動に参考になるお二方の講演があったので紹介したい。

『コミュニケーションの基本』について青山学院大学

岸田一隆教授が講演された。この中で、コミュニケーションを取るうえで重要なことは、受け手が理解・共感し、内面が変化することであり、受け手について考え、更に伝え方に気を配る必要があるとのこと。加えて、説明する側は自らが“変わる準備があること”を伝えることが重要とお話しされた。“変わらない意見”の例として、原子力関連の事業者の説明会や原子力反対運動が上げられた。これらは分裂された共同体であり、理解しあうことがなく、理解を得るために必要な、「意見が食い違っても同じように考える」いわゆる“一つのチーム”となっていないとの指摘である。関係者を運命共同体とし、課題を「自分ごと(他人ごとではない)」として考えるようにすることで全体に対する責任感を各自が得られるようなコミュニケーションが必要であることが述べられた。但し、「自分ごとである」ような気持ちに導くことは大切であるが非常に時間がかかり難しいことであることも説明された。

パネル討論の基調講演として福島プロジェクト前代表である電中研井上正名誉研究アドバイザーが「福島での住民とのかかわりや対話について学んだこと」を説明された。大切なことは住民の方々との対話で、対話の前にまず必要なこととして、現地(場)の状況と問題・課題の把握、住民が何を求めているかという点や心配な点を把握しておくことが重要であると述べられた。オフサイトにおける除染をはじめ、仮置き場の設置や中間貯蔵、管理型処分場の設置が急激に進んだ点に関しては、昼夜を問わず住民と対話してきた環境省や住民との繰り返し対話を行った地方行政の努力、長崎大学のチームをはじめとする専門家が住民との相談に乗った点がうまくかみ合っていたと説明されていた。パネル討論では「社会との価値観の共有」が重要であると力説されていた。

両先生ともに、原子力の平和利用について専門家として説明側に立つ際には、まずは専門知識以上に説明者である我々自身を知ってもらい信頼を得ることが重要であると述べられていたと思っている。非常に難しい課題である。少しでも信頼を得られるように努力し、活動していきたいと考えている。

- 1) 宮野廣, 日本原子力学会誌, 61, 353(2019).
- 2) 佐藤修彰, 三倉通孝, 布目礼子, 日本原子力学会誌, 61, 358(2019).
- 3) 宮原要, 中山真一, 日本原子力学会誌, 61, 360(2019).

(東芝エネルギーシステムズ(株)・三倉 通孝)