

巻頭言

1 国際的視点から見るコロナとエネルギー政策

三浦瑠麗

時論

2 これからの原子力：発電・燃料供給・CO₂除去

堀 雅夫

座談会

4 1F事故をふりかえり、今後を展望する

1F事故から9年余。原子力全般を見る世論は依然として厳しい。事故後の反省とそこから得られた教訓は十分に反映されてきているのか。原子力をめぐるこれからの地平にはどのような姿が見えるのか。

井内千穂, 井上 正, 小出重幸, 佐田 務, 佐治悦郎, 滝 順一, 竹内純子, 田中治邦, 松浦祥次郎, 藤田玲子, 山口 彰, 澤田哲生

解説

35 福島第一原子力発電所廃炉作業環境における遠隔放射線イメージング技術の開発と実証—統合型放射線イメージングシステム iRIS の構築

目に見えない放射性物質の分布を可視化する技術を開発した。この技術を1Fの現場やオフサイトで適用した実例を紹介する。

佐藤優樹, 寺阪祐太, 鳥居建男

40 乾式再処理による照射済金属燃料からのマイナーアクチノイド (MA) 回収—高速炉サイクルによる MA 分離変換システムの確立に向けて

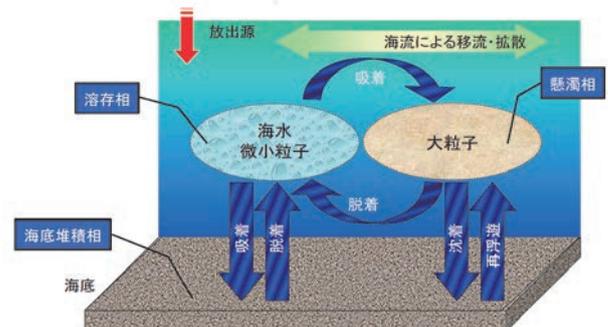
照射済 MA 含有金属燃料からの MA 回収を乾式法で初めて実証し、廃棄物処分に伴う環境負荷を低減する MA 核変換システムの成立性を示した。

村上 毅, 飯塚政利

25 緊急時海洋環境放射能評価システムの開発—海洋拡散の迅速な予測を可能に

原子力機構では、放射性物質の海洋拡散挙動を迅速に予測することができる緊急時海洋環境放射能評価システム (STEAMER) を開発した。その経緯とシステムの概要及び利用について解説する。

小林卓也, 川村英之, 上平雄基

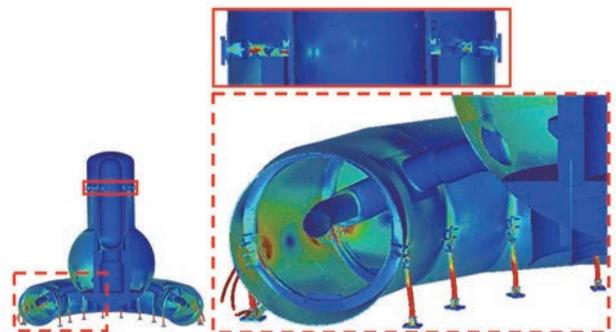


放射性物質の3相間の相互作用

30 3次元有限要素法による2011年東北地方太平洋沖地震本震時の東京電力福島第一原子力発電所1号機の応答解析

3次元有限要素法を用いて、東日本大震災時の1Fの地震応答を詳細に解析した。その結果、本震時の発生応力値は比較的低い値であったことが確認できた。

吉村 忍, 山田知典, 宮村倫司



時刻 118.58 秒における応力分布と変形の例 (青: 0MPa, 赤: 50MPa) (変位は 100 倍に拡大)

54 データを用いた不確かさの推定

確率論的リスク評価にはプラント固有のパラメータの適用や、プラント実績データから推定されたパラメータの不確かさの低減が重要となる。 桐本順広

FOCUS 原子力関連国際機関の最近の動向と日本からの期待 (2)

59 NEA 活動から見る原子力安全の国際動向

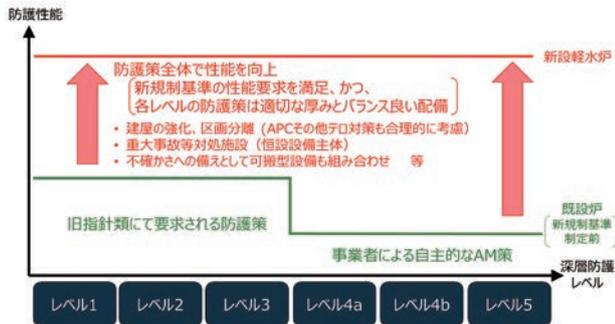
OECD/NEA の加盟国は、いわゆる原子力先進国から成り立っており、加盟国から提案された原子力安全を向上する取り組みを各国の第一線の専門家と共にやっている。 熊谷裕司, 齋藤智之

報告

64 新設軽水炉で実現すべき技術要件について— 新設でこそできる安全かつ合理的な設計を目指して

より安全でより合理的な新設軽水炉の技術要件をまとめた。鍵となるのはバランスの良い深層防護の実装である。

原子力発電部会「次期軽水炉の技術要件検討」WG



新設軽水炉の防護性能のイメージ

69 世代間対話を通じた原子力技術と文化の伝承

— 学生・教員とシニアとの対話活動

この事業は原子力界の事業に参画してきたシニアが、原子力の技術と文化を次世代の学生や小中高の教員に伝承する取り組みである。 石井正則ほか

45 Column

オンライン座談会の効用
震災を風化させないために
「命か経済か」じゃなくて「どちらも命」
勉強ができて良いこととは？
持続可能な社会を目指して
「バベルの塔」の後を生きる

井内千穂
小澤杏子
佐治悦郎
鳥居千智
野ヶ山康弘
服部美咲

解説シリーズ

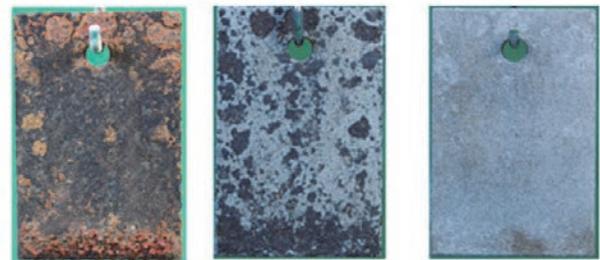
最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構 (6)

48 廃止措置と廃棄物の処理処分を目指して (1)

— 低レベル放射性廃棄物の処理処分とウラン鉱山閉山措置に関する技術開発

原子力機構ではバックエンド関連の研究・技術開発として、原子力施設の廃止措置や低レベル放射性廃棄物の処理処分技術開発と、地層処分の基盤的研究開発を進めてきた。その最前線を2回にわたって紹介する。

辻 智之ほか



除染前 → 試験経過
既設炉と新設軽水炉における地震 / 津波対策

理事会だより

74 学会における人材育成, 教育委員会の紹介

宇正正美

- 20 News
- 34 From Editors
- 75 会報 原子力関係会議案内, 「2021年春の年会」開催に関するお知らせ, 新入会一覧, 寄贈本一覧, 「2020年秋の大会」学生ポスターセッション受賞者一覧, 英文論文誌 (Vol.57, No.11) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

国際的視点から見るコロナとエネルギー政策

巻頭言



国際政治学者、山猫総合研究所代表

三浦 瑠麗 (みうら・るり)

東京大学大学院法学政治学研究科博士課程修了、博士(法学)。日本学術振興会特別研究員、東京大学政策ビジョン研究センター講師などを経て2019年より現職。『21世紀の戦争と平和—徴兵制はなぜ再び必要とされているのか』(2019年)、『シビリアンの戦争—デモクラシーが攻撃的になるとき』(2012年)など著書多数。

新型コロナウイルスとの戦いは長期戦となる一方、ウイルスについての知見も蓄積しつつあります。不確実性を言い出せば、世の中のあらゆること——それこそテロから天災に至るまで——には不確実性が伴います。不確実性は何が起こるかわからないということであり、もう少し予測可能になってくるとリスクとして認識できます。例えばコロナの場合、武漢での集団感染発生後の2週間は十分な情報が入らず不確実性が大きかった。しかし、中国からの報告やダイヤモンド・プリンセス号の検疫等のデータが蓄積した後は、〇〇のリスクという言葉で語るができる段階に達していました。「第一波」のデータが利用可能になると、そのリスクさえ大部分が定量化可能になった。リスクの大部分が定量化できれば、ウイルス抑圧策のコストと比較が可能になります。重要な点は、不確実性もリスクも永遠にゼロにはならないということ。慎重策の理由として引き合いに出される「まだわからないことがある」というのは研究者が明言を避ける姿勢としては正しいのですが、他分野とのコスト比較を避けるために用いられてはなりません。それは政策に責任を負う人の態度ではないということです。従って、政府は判断を専門家に任せにしてはならず、幅広い責任を伴う政治決断が必要です。いまやロックダウンを経験した国においても経済社会の持続可能性を考えたコスト比較の視点が導入され始め、当初の政策を見直す動きが出てきました。ゼロリスクを求めれば却って安全が損なわれる。不確実性から目を背けたりリスクをなかったことにするのではなく、持続可能性の観点からその両方を念頭に置いた施策が必要です。

パンデミックは国際政治において「新しい安全保障」と呼ばれる領域に属します。新しい安全保障領域においては、古い安全保障のように対立を基調とする国際関係ではなく、国際協調による問題解決が期待されてきました。しかし現実には国際協調は停滞し、排外主義や自国中心主義が蔓延しました。おそらく唯一例外的な動きは、欧州で高まる環境エネルギー分野における協調の議論です。そこには、持続可能性のための国際協調と投資を通じて国内経済を活性化させるという意味も込められています。それが、21世紀的な公共投資としてのグリーン・リカバリーの概念です。コロナからの回復の過程では需要が弱いままにとどまるため、公的資金による景気の下支えが求められます。いまの議論は、公的資金で需要を創出するのであれば、以前に存在した経済をそのまま立て直すのではなく、新しい社会への移行を後押しするような投資が行われるべきだということです。未来への投資は、将来世代を重視する、より健康でグリーンなものでなければなりません。それはエネルギー政策に置きなおせば化石燃料ベースの経済に戻らないということであり、米国のグリーン・ニューディールのように省エネ、再エネ、蓄電の技術を情報化と組み合わせたスマートグリッド、スマートシティの構想を大きく前に進めようということです。コロナ以前の世界においてもっとも注目を浴びていた国際問題は気候変動だったことを思い出してください。アフター・コロナでは、国際競争力の観点からも、人々の福祉の観点からも、環境エネルギー政策における持続可能性が大きなカギとなるでしょう。日本も立ち遅れてはなりません。

(2020年9月14日記)



これからの原子力：発電・燃料供給・CO₂ 除去



堀 雅夫 (ほり・まさお)

原子力システム研究懇話会

1957～1998 高速増殖炉の研究・開発(日本原子力研究所および動力炉・核燃料開発事業団)

1998～ 将来エネルギーシステムの研究

地球規模の温暖化が進み世界各地で異常気象が観測されている。温暖化の主因は温室効果のある気体、とくに二酸化炭素(CO₂)の大气中における濃度上昇と推測されており、CO₂の主な発生源であるエネルギー供給における対策が課題となっている。2020年初からの新型コロナウイルスの蔓延は世界のエネルギー需給にも大きな影響を及ぼしているが、長期的なCO₂排出削減の必要性は変わらない。

温暖化抑制のためのCO₂排出削減目標

IPCC「1.5℃特別報告書」には温室効果ガスの代表的排出4経路における気候の予測や影響の評価が示されている。気温上昇を1.5℃以下に抑えるには、いずれの排出経路でもCO₂排出量を2050年にほぼ正味ゼロに低下させ、それ以降の21世紀後半にはネガティブエミッション(負排出)すなわち大气中のCO₂除去が必要になる。2℃シナリオでも時期・大きさは異なるが21世紀後半には負排出が必要となっている。

このような大幅なCO₂削減目標を達成できるエネルギー計画を作成・実施していくことが世界・各国の喫緊の課題となっている。

世界のエネルギーシナリオにおける原子力

国際エネルギー機関(IEA)の「持続可能シナリオ」における電力セクターを見ると、全発電量は2018年26,603 TWhから2040年38,713 TWhへ46%増加するが、2018年にシェア64%の化石燃料は半減してシェアは21%になる。原子力は2018年2,718 TWhから2040年4,409 TWhに発電量は1.6倍に増加するがシェアは10%から11%への増加にとどまる。一方、再エネは2018年6,799 TWh(シェア26%)から2040年26,065 TWh(67%)へ3.8倍増加し、とくにこの中の変動型再エネの風力・太陽光は、発電量1,857 TWh(シェア7%)から15,503 TWh(シェア40%)へと8.3倍の大幅増加となる。

電源構成と原子力のフレキシブル運転

このように電源構成に占める太陽光・風力などの変動

型再エネの割合が増加していく近未来の電力システムにおいて原子力はどのような役割を担うのか？

脱炭素化電力システムは、①省燃料の太陽光・風力などの「変動型再エネ(VRE)発電機器」、②短期変動に対する電池や需要応答などの「即応型平準化機器・機能」、③長期変動に対する原子力・水力・火力(CCS付き)発電などの「司令可能な(Firm)発電機器」、から構成されるⁱ。

電力取引市場ではこれらの構成要素から成るシステムを競争的環境で運用していくことになるが、その場合原子力もフレキシブルな運転をすることにより収益を増す可能性が出ている。

フランスでは大型軽水炉の負荷追従運転が日常的に行われている。この技術・経験をもとに米国の電力取引市場において軽水炉のフレキシブル運転の経済性をシミュレーションで評価した例ではフレキシブル運転の方がベースロード運転より収益が向上している。

このように将来の電力市場では、原子力は容量市場での司令可能な発電能力(kW)のあるプラントの「kW」価値に「ΔkW」価値を加えることにより、「kWh」価値のマイナスより大きくなり得る。変動型再エネの割合が増えた市場では原子力のフレキシブル運転はその必要性に見合う対価を得ることができる。

既存軽水炉のフレキシブル運転利用に加えて、負荷追従が可能で経済的な新型原子力プラントの導入は重要となる。最近の検討ⁱⁱでは、上述の脱炭素化電力システムにおいてVRE発電とFirm発電からなるシステム全体のコストを最低にする条件では相互補完よりも相互に相手を置換する関係になるとしており、フレキシブル新型原子力プラントのコストダウンの達成はそのシェア拡大

ⁱ N.A. Sepulveda, J.D. Jenkins, F.J. de Sisternes, R.K. Lester “The role of firm low-carbon electricity resources in deep decarbonization of power generation” *Joule.*, 2 (2018), pp. 2403-2420

ⁱⁱ Mengyao Yuan, Fan Tong, Lei Duan, Jacqueline A. Dowling, Steven J. Davis, Nathan S. Lewis, Ken Caldeira, “Would firm generators facilitate or deter variable renewable energy in a carbon-free electricity system?” *Applied Energy*, Volume 279, 2020

に大きく反映されることになる。

高電力化率と原子力

エネルギー効率の向上のためには、熱需要などもヒートポンプを利用して電力で賄い電力化率を格段に向上させる方策は効果的である。

世界の電力化率(最終エネルギー基準)は現在約 20 %、2040 年 28 % (IEA 持続可能シナリオ)、日本の電力化率は現在 26 %、2050 年 46 % (RITE の 2℃シナリオ評価)となっている。(WEO2018 では世界の電力化率の技術的可能な最大として「2040 年 65 %」に言及)

このような高電力化率を指向する場合はこれまでの容量増加速度の実績から見て、変動型再エネよりも原子力が頼れる存在となる。

原子力による水素・燃料の供給

これまで原子力のエネルギー利用は発電用が主体であった。電力セクター以外にも原子力エネルギーの供給が可能になれば原子力の寄与は拡大する。そのためには、水素・プロセス熱・運輸などの非電力エネルギー分野へも原子力の供給を拡げていく必要がある。水素製造、合成燃料製造、製鉄などのプロセスへの熱供給、海水脱塩、運輸(船用)、地域暖房などについてはすでに一部で検討/採用されている。とくに高温ガス炉による高温熱供給が実用化すれば利用価値・範囲が格段に向上・拡大する。

最近、再エネ電力から電気分解で製造する「グリーン水素」が注目されている。水素単体、アンモニア、あるいは水素と CO₂ から製造する合成燃料(eFuel)として、化石燃料製品に代わって非電力エネルギー供給を行う構想である。

同じ電気分解で水素を製造する場合、軽水炉などの原子力プラントから製造する水素は再エネ起源の水素より設備利用率が格段に高く経済的に有利と目され、原子力は水素経由で燃料などの非電力エネルギー供給の中心的役割を担える。

CO₂ 除去への原子力の利用

IPCC などの評価によると 21 世紀後半には年最大 10Gt-CO₂ のオーダーの負排出(CO₂ 除去)が必要になってくる。CO₂ 除去の方法としては、IPCC ではバイオマス発電 + CCS (BECCS) を想定しているが、このほかに直接空気回収(DAC, Direct Air Capture)などさまざまな方法が試験・検討されている。これらの中には DAC

のように大量のエネルギー(電力・熱)を消費するプロセスがあり、CO₂ を出さない原子力はその重要なエネルギー源になる。

DAC などで大量の CO₂ を回収して地層に処分する場合、回収プロセスの大量エネルギー消費、CO₂ の貯留の規模の大きさ、社会的受容性などの課題があり、より難度の低い方式の検討も行われている。

その一つとして、バイオマスを炭化して炭(バイオチャー)にして、利用・貯留する方法がある。炭は、空气中に放置しても数百年~数千年間安定なので貯留が容易であり、また土壌改良材・工業材料・構造材料など農業・工業などの用途で安定的に使用できる。

また、炭化プロセスにおいて同時に生成される揮発性炭素化合物から合成燃料を製造し、これで化石燃料を代替すればその分 CO₂ 排出量を削減できる。

このプロセスに原子力からエネルギーを供給すると、大気中 CO₂ の除去と合成燃料供給の両方による CO₂ 除去効果はバイオマスのみを使用する場合に比べて 60 % 以上向上するⁱⁱⁱ。

今後、このような太陽光・風力・バイオマスなどの太陽エネルギーと原子力の協働のプロセスによってエネルギー供給をしながら地球規模の炭素循環を効果的にコントロールするシステムの構築・運用は必須と考える。

コロナ後のエネルギー政策

2020 年初から新型コロナ(COVID-19)ウイルスの蔓延を防ぐための制限措置などにより、世界的に GDP・エネルギー需要が大きく低下した。年半ばから経済活動の再開により成長率は漸次回復しているものの、エネルギー消費の減少はリーマンショック時よりはるかに大きく、今後エネルギー需給に不可逆的な構造変化を生じる可能性が出ている。

COVID-19 後の経済回復・温暖化対策・エネルギー政策に関しては、関係する国際機関(IEA, IMF, NEA, IAEA)、業界団体(WNA)などから各種の検討結果が出されている。その中で原子力が果たすべき役割と重要性を強調する見解が示されている。

今後 COVID-19 のパンデミックから世界が回復する過程において、エネルギー需給構造の変革に際してはリスク・ベネフィットに基づく科学的・合理的なシステム選択がなされることが望まれる。それによって原子力がその特長を生かして電力および非電力供給において相應の役割を果たしていくことを期待したい。

(2020 年 9 月 18 日 記)

ⁱⁱⁱ 堀雅夫「カーボンネガティブ・エネルギーシステム」(Amazon Kindle, B083G1278K, 205 ページ 2020.01)

座談会

1F 事故をふりかえり、今後を展望する

フリージャーナリスト	井内千穂
電力中央研究所	井上 正
日本科学技術ジャーナリスト会議	小出重幸
本誌	佐田 務
当会理事	佐治悦郎
日本経済新聞	滝 順一
国際環境経済研究所	竹内純子
日本原燃	田中治邦
原子力安全研究協会	松浦祥次郎
元東芝	藤田玲子
東京大学	山口 彰
東京工業大学	澤田哲生(司会)

* 50 音順掲載

福島第一原子力発電所事故から9年余。新規制基準などにより原子力発電所の安全性は向上したが、再稼働をはじめとして原子力全般を見る世論は依然として厳しい。事故後の反省とそこから得られた教訓は十分に反映されてきているのか。原子力をめぐるこれからの地平にはどのような姿が見えるのか。原子力関係者がこれから行うべき取り組みとは何か。

Keyword: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, COP21, COVID-19, renewable energy, accident investigation committee, integration of knowledge, crisis management, bureaucracy, strategic energy plan, LCOE, nuclear fuel cycle, regulation, safety goals

I. 3.11 から 10 年を俯瞰的に総括する

ビジョンがなければ、原子力産業は衰退する

澤田 2011年3月11日の福島第一原子力発電所(1F)事故(通称3.11)からやがて10年の節目を迎えます。この間を振り返り総括し、そして今後の展望をひらくのがこの座談会の目標です。原子力に対する社会からの要請や期待の話と、原子力政策、学術、そして事業者やメーカーを含めたビジネスを念頭に置いていただきたいと思います。いま言えること、言うべきことは何か、包括的視点からの振り返りを、まずはメディアのお二人、小出さんと滝さんからお願いします。

小出 エネルギーの問題を考えていく時には、原子力エネルギーを排除して現実的に成り立つのか。多くの市民は、原子力抜きでこれからの社会が成立することは難

しいということは理解していると思います。ただ、そのことは漠然と理解しているものの、そのことを信頼できる人が、きちんと明解に示してくれるということが十分ではないと思います。

次の問題が、1F事故対応後の議論が不十分だったこと、事故後の対応には多くの問題点がありました。それに対してどうすべきだったかという議論が不十分なままに、再稼働の話が進んでいます。このことにみんな、違和感を覚えていると思います。

あの事故それ自体とその後の対応で、信頼が失われました。それをどう回復していくか。そのためのコミュニケーションをどう構築していくか。これが大きな問題意識になると思います。さらに政界、原子力や科学を含めた学界、経済界が、さまざまな形で個別にメッセージを発信しています。その一方で市民の側からすれば、これからのエネルギー問題を考える上で、統合したメッセージ、信頼されるメッセージがないのです。そのことに市

民は困っています。

今のエネルギー政策の背景には、このような事実や考え方があるということ、信頼できる科学者たちのグループがまとまって、彼らなりの思想に裏付けられたメッセージが社会に繰り返し発信されれば、多くの人はそれを聞こうとする気になったのではないかと思います。

一方でメディアにも問題がありました。今回のコロナウイルス対応でも明瞭になったことがあります。それは情報汚染です。誤解に基づく情報提供や偽の情報、悪意を持った情報がSNSを含めて流通することがあります。それらが統合されると、社会全体が大きくミスリードされるという事態を招きます。福島これから、エネルギーのこれからを考える上でも、それらにどう対処していくかを考えることが、必要だと思います。

滝 この約10年間で一番気になっていることは、1F事故調査です。事故直後には複数の調査委員会が立ち上がって調査しましたが、どれも中途半端なままです。とりわけ国会事故調は報告書提出後もフォローが必要だとしていたものの、誰もフォローしていません。この問題にはきちんと決着をつけられないままに終わることが一番気になっています。事故に至るまでの歴史的過程と、事故で何が起きたか、事故時にどんなことをして結果的にどんなことが引き起こされたかということ、政府から独立し、調査権限のある組織をつかって、もう一度総合的に調査し直すということが必要だと思います。

メディアもまた、この10年を機に独自の調査をして、まだ隠れている事実を掘り起こして、もう一度この問題に光を当てる努力が必要だと思います。

それから、司会の澤田さんからは、原子力を続けていく上で必要な要件を求められましたが、私は、日本では原子力はこのままの状態だとおそらく減り去っていく産業、最低限の産業や研究基盤は残るでしょうが、これまでのような産業規模の何分の1しかない小さな産業になっていって、影響力も小さくなっていくというのは止められないと思います。それを仮にもう一度回復させたいのであれば、ビジョンが必要だと思います。

そのビジョンを示すのは政治だと思います。政治が、私たちのこの日本という国家をこういう方向にもっていきたくらいから、原子力が必要だということを明確に言えば政策やビジネスもついていく。国民もついていくかもしれません。この点では、政治のリーダーシップが足りないということが気になります。

一方で原子力は安いという利点が強調されがちですが、気候変動対策、CO₂を出さないという点で、明らかに石炭火力や天然ガス火力より優れています。化石燃料を燃やす発電は減らしていかなければならない。その代わりにベースロード電源としての原子力の再興というもの、それを合わせ技でやらないと、日本の電力供給はたちゆか

ないのでは。電力会社も化石燃料から、再生可能エネルギーと原子力への復興ということをもっと明確に出すべきです。もちろんそれは、簡単ではない。けれども政治とともに、そのことを明確に示していく必要があると思います。

もう一つ必要な要件は、安全保障です。これはエネルギー安全保障だけではなく、今は中国やロシアが途上国に対して原子力輸出をして、世界の原子力技術がこの両国が握っていく構造が見えてきている。アメリカもヨーロッパも日本も原子力に対する積極性はみられません。21世紀後半はそのような世の中になるのだけど、それでよいのかという問題があります。もし日米同盟がイコール原子力同盟でもあるというのであれば、もう一度アメリカと手を組み直して、途上国向けあるいは国内向けに原子力の重要性を訴えていくということが必要になると思います。その原子力とは次世代のSMR(Small Modular Reactor:小型モジュラー炉)かもしれないけれども、そういう研究開発面での取り組みが必要ではないでしょうか。中国が一带一路で原子炉を売り込むのであれば、日本はアメリカとともに、自由で開かれたインド太平洋という看板のもとに、途上国に対して原子炉技術を何らかの形で提供し、日本の原子力のリーチを伸ばしていく。これが安全保障上大事であるということ、国は言うべきですし、ビジネス界や学界でも賛同する方がいれば言うべきだと思います。

それから学界においては、高レベル放射性廃棄物の問題に真剣に取り組んでほしい。原子力発電環境整備機構(NUMO)だけでは進展しません。原子力学会や地質学会、地震学会、水文・水資源学会といった関係する多くの学会が今、わかっている事実を整理して議論のベースをつくる。ある程度、中立性があるアカデミアが議論の土台を用意して、かつ国民的議論を起こすような動きをしていかないと、いつまでたっても進まないでしょう。これが解決しないと原子力自体が進まないのは自明ですね。ここは事業者や行政だけではなくて学会の出番だと思います。

澤田 原子力が復興をめざすのであれば、政治的な決断やメッセージが必要だ。けれども、今の政治は全くこの問題に触れていないということですね。

滝 これだけ安定した安倍政権でさえも、この問題について何もなかったということからして、私はとても悲観的に考えています。

澤田 安倍政権発足当時は、インドなど海外へのビジネスに取り組んでいたけれども、だんだんと消極的になってきました。これに対しては産業界にも学会にも、不満の声がある。しかしながら、そこにテコ入れするべし何も持っていません。

滝 今後は気候変動問題が鍵だと思います。パリ協定と整合性を持つために、ヨーロッパでは2050年ぐらい

までに CO₂ の排出をゼロに、日本は 8 割減にするといっています。政府がもし、その約束を本当に守る必要があると認識しているのであれば、原子力なしではできないはずです。

澤田 それは結局、スウェーデンモデル(水力 47 %、原子力 35 %、風力 10 %、バイオマスなど 7 % [電源構成・2015 年実績])みたいにならざるを得ないということですよ。

滝 あるいはイギリスモデルと言いたいです。

澤田 電源構成では原子力に 3~4 割を負担させ、あとは水力などを含む再生可能エネルギーと…

滝 若干の化石燃料で賄う。これは世界的要請でもあります。気候変動問題というのは極めて重要な問題であるということ、政府や国民が認識し直さなければならぬと思っています。

澤田 環境省は、原子力の問題にまともに向き合う気がないですね。

滝 これは環境省というより、経産省の問題です。

澤田 小出さんと滝さんの見立てに対するコメントを、フリーランスのジャーナリストである井内さんにいただきたいと思います。

井内 小出さんからは「統合されたメッセージが必要だ」というお話がありました。誰が、どのように統合したメッセージを発信するのでしょうか。「信頼できる科学者たちのグループ」とは誰のことでしょうか。滝さんは、「ビジョンを示すのは政治だ」と指摘されました。仮に政府が何らかのビジョンを示したときに、国民がどれぐらいそれを信頼してついて行くのか疑問です。また、気候変動問題は大変重要ですが、その問題に原子力がどれぐらい貢献できるのか、諸外国ではどのように議論されているのでしょうか。少なくとも日本国内では、気候変動問題に原子力が貢献するというイメージがなく、再生可能エネルギー一辺倒の印象があります。なぜ、原子力の貢献にあまり言及されないのか私は疑問に思います。

藤田 2015 年の COP21 の前に、パリの原子力学会が世界に向けて、原子力は地球温暖化に非常に効果的だというメッセージを 60 か国の原子力学会長のサインで出しました。ただし、それがしっかりと効を奏したとまでは言い切れません。

澤田 そういう決議は政治、政策レベルの話で一般の人々には伝わっていませんね。

井上 僕は、原子力学会誌を読んでも面白くないと感じています。それは、とにかく対極意見に触れずエネルギーセキュリティ上原子力は必要だという論調が優勢だからです。学会誌の読者は会員だけでなく一般の人でもあるのであれば、そうした議論には一般の人についてこないでしょう。原子力を進めるためには、一般社会との価値観の共有が必要です。それができていない。IF 事

故以降、日本で何が変わったのか明確になっていない。IF でも片付けるにはまだ数十年はかかる。そして高レベル放射性廃棄物の処理、処分については地層処分の技術的視点の話ばかりで、社会が何に不安を感じているのか、何を求めているのかといった議論がほとんどありません。これでは社会と価値観の共有ができません。

また、学会誌の座談会で、高速増殖炉(FBR)の議論もしています。けれども FBR は、核燃料サイクルを同時にやらなければ意味がないのに、それに関する議論がありません。私はその分野にずっと関わって来ていますが、高速炉サイクル技術はまだ実用化できる段階に至っていません。そのことも国民に情報を提示した上で、議論を進めていかないといけないでしょう。また、私もこのままだと既存炉の再稼働までで、その後の原子力は技術面、社会的な面からみても続かないと思っています。あと付け加えますと、残念ながら今の日本の国立研究所や大学で、原子力の新しい技術を開発していけるような技術力をもっているところはありません。

澤田 価値観を共有するためには、どうすればいいですか。

井上 そのためにはまず、原子力分野でこれまでどういうことをやってきて、どういう成果を得たのかきちんと説明すべきです。原子力分野にはこれまでの 40 年間、相当の資金が投入されてきました。でもその結果は社会でほとんど実装されていません。そこでの反省は何か。まずその総括を行い、わが国の研究開発戦略、体制を抜本的に変えていく必要があると思っています。それらも含めて社会への説明が必要だと思っています。

澤田 もっと近場の話で言うと、1F 事故後に事故調査委員会がいくつかできました。学会にもできましたね。けれども、その最終的な決着の結果でさえも、人々に伝わっていません。一般社会と価値観が共有できていませんね。その努力は誰がすべきだったのでしょうか。

井上 それはわれわれ、業界にいる者全員です。皆さんは政治に期待するという話ですが、そんなことではいつまでも国民の信頼は回復できません。

藤田 原子力学会でも事故調査委員会を立ち上げ、報告書をまとめました。原子力学会がほかの事故調査委員会と違って唯一ポイントとして挙げたものが、最後の成果報告会の時には発表されませんでした。その内容は何かという、2002 年ぐらいまでは原子力白書で深層防護という言葉がきちんと入れられていました。これは国際原子力機関(IAEA)の深層防護基準の INSAG-10 という報告書に基づいたもので、ヨーロッパだとフィルターベントが代表的なものです。それからアメリカだと、原子力プラントを稼働するためには避難計画が必要ですが、日本ではその両方を実は無視して深層防護に対する備えをしなかった。そのポイントをきちんと事故調査報告会の時に言っていれば、また事故調査報告書に対する評価

も違ったと思います。そういう意味で、学会は発信が上手ではない。学会の事故調査報告書にしても、他の事故調査報告書と異なる新しい知見を恐れずに報告会で強調すべきだったと考えています。学会としての独立性が担保されていないことも大きな問題だと思っています。

滝 さきほど、政治がビジョンを示しても、国民がついていかなければ意味がないという指摘がありました。その通りです。けれども気候変動というのは、おそらく多くの人が大切だと思っていることなので、そのことで価値観を合わせていけば、そして2050年に脱炭素化しようと思ったら、どういう電源構成が考えられるかということ突き詰めれば、おのずから今の時点よりも原子力は多くなければいけないということが明らかになります。そうであれば、その時点で新設やリプレースといった話が出てきて、少しは展望が開けてくると思います。それは決して、原子力を進めるための話ではありません。あくまで気候変動対策を日本がまじめにやるということであればということです。

IAEAなどの報告での将来見通しでは、原子力は増えてはいるものの、再生可能エネルギーに比べたら増加の割合がとても少ない。2050年以降に世界でゼロカーボン達成させるためには、一定程度の原子力発電が必要だというシナリオは共有されやすいと思います。

原子力の価値をみきわめる

澤田 竹内さんは政府のグリーンイノベーション戦略推進会議委員でもありますし、ビジネスの世界も良く分析されています。ここまでの話を念頭に意見を。

竹内 最初の話に戻りますが、一番大事なのは、原子力が提供する価値というのは何かということを変更できちんと考えることだと思っています。

原子力発電は当初、豊富で低廉、かつ安定的な電気を供給できるということで開発が進められました。ある発電所が一生に必要なすべてのコストを運転期間中に生み出す総発電量で除して算出する発電原価(Levelized Cost Of Electricity: LCOE)で考えれば、基本的には原子力は「安い電気を供給するポテンシャルのある技術」です。ただ、日本では残存稼働期間がどれくらいかわからない原子力発電所に莫大な安全対策投資を行っており、そうした状況では、原子力が本当に豊富低廉な電気を供給する技術といえるのかは疑問で、過去に原子力のメリットと言われていた話と異なるところが出てきているのも事実です。今まで提供するといっていた価値とは異なる価値を提供できるのか、今後分散電源の拡大が続く中で、どのような価値を提供できるのかを問い直す時期だと思います。

澤田 竹内さんは毎年COPにも足を運んでいますよね。温暖化対策としての価値があるのではないですか？

竹内 温暖化への貢献は、一つ整理としてはあるでしょう。パリ協定が求める2℃あるいは1.5℃目標(*産業革命前からの温度上昇の幅を2℃もしくは1.5℃以内に抑制するという長期的な目標)を達成するには、原子力の活用も当然必要です。ただ、IEA(国際エネルギー機関)の見通しでは、再生可能エネルギー(再エネ)の増加割合が大きく、原子力の割合はそれほど期待されていません。これは、特に先進諸国での原発新設コストが上昇していく一方で、再エネのコストがどんどん下がっていることが背景にあります。既存の原発の運転延長はかなり有力ですが。とはいえ、これは原子力技術のコストと言うより、自由化による資金調達コストや新型炉に対する規制の不慣れさなどもあるわけで、原子力技術の使い方の話という面もあります。原子力を社会にとって役に立つ技術として活用するには、制度設計も整える必要がある。例えば安価な資金調達が可能なような制度や、規制と事業者の適切な連携がないと実現できません。

話をもとに戻して、温暖化対策として原子力技術を活用することを社会が選択するのであれば、社会が覚悟を決めて、原子力技術の活用に向けた制度整備も行わなければなりません。

澤田 では今後、どうすればいいのでしょうか。もう少しヒントを提示していただけますか。

竹内 社会にどんな価値を提供できるかを関係者が突き詰めて考えるべきだと思っています。今までの延長線での安い電気や安定供給ではなく、改めて原子力は何かできるのかをゼロベースから考える。逆に社会の側も、どんな価値を必要とするのかということ冷静に評価できる軸を持っているかということも大切です。人間はやはり、直近に見たりリスクに、より拘泥しがちになります。

例えば、千葉県では昨年、長期間の停電がありました。それを経験して太陽光発電や分散型電源や強靱化という話になったのですが、その分散型電源が今回の九州の長雨のときにリスク対策として機能したかといえば、全然完璧ではない。自分が直近に経験したリスクが過大に評価されてしまう。社会の側も、どんな価値をどういうバランスで持つことが必要なのかというようなことを、突き詰めて考える必要がある。これをリードするのは、政治だと思います。

藤田 そういう政治の状態を議論する際にはやはり、学会が議論して科学的な情報を提示していかなければならないと思います。

澤田 それを、どうやってやるのですか。

藤田 一例をあげますが、以前に滝さんから核燃料サイクルの成立性について討議した方が良いのではという指摘をうけて、学会の研究専門委員会では今、2050年以降の日本の原子力にとって核燃料サイクルはどうあるべきかという議論を3年以上にわたって検討しています。

高速炉をめぐる話にしても、いろんな意見がある。科学的な根拠にしても一つではなく複数のものがあり、それらが収斂していない中で、政治に判断しろと言っても無理があります。データベースは学会が学術的にまとめたいかなければならないのですが、そういう取り組みが核燃料サイクルについてはあるものの、ほかの分野についてもやっていくということが、学会の本来あるべき姿だと考えています。

澤田 議論するのはよいのですが、例えば学会事故調にしても、議論してまとめた報告が社会に役立っていない。その先をどうするのかについて、しっかりと責任を持って進めていこうとする人がいないのではないですか。

滝 調査報告の話にしても、一度公表して社会にそれが伝わらなかつたら、忍耐強く繰り返して発信しなければならぬと思います。その継続的な努力が、役所もメディアも学術界も苦手です。この問題は長い時間かけて取り組んでいく話だと思います。

井上 私も長く原子力に携わっており、原子力は必要だと思います。ただし、それを理解してもらうには時間がかかる。今は、エネルギーといえば再エネ一辺倒です。私は福島によく行きますが、福島では脱原子力ということで太陽光や風力の設備を至るところに作っています。ただし、それでよかったかどうかという答えが出るには20年かかる。全国大でも寿命がきた太陽光パネルは大量の廃棄物になる。その時にやっと原子力も必要だなという意識になると思います。だから今、私たちがいる時間軸の間に何をやっておくかが大事だと思いますけれどもね。

滝 確かに再エネが本当に主力電源になるためには時間がかかると思います。けれども、2050年時点で脱炭素化するという世界の流れに従うのであれば、今から30年後にはこういうエネルギー構成にしなければいけない。だったら今、何をしていくべきか、石炭を減らすのであれば原子力はもう少し戻すとか、今から先取りして政策を実施していかなければいけない。その議論をすれば、おのずから考えざるを得ないと私は思います。それを国の審議会だけでやるのではなくて、全国各地でやる、そこでいろんな意見を出し合って、一定の納得が得られるようなプロセスを経ることが必要だと思います。それをこの10年間やってこなかったということが、悔いが残るところではないでしょうか。

澤田 30年前といえば1990年に国際原子力事象評価尺度(INES レベル)の運用が始まり、翌年には美浜や浜岡でINES レベル2の事故が発生しました。おそらく今後30年もあれよあれよという間に進んでいきますね。いま着手しておかなければ手遅れになることが多々あるのではないのでしょうか。

ここまでの話を聞いて、松浦さんはどのような考えで

しょうか。

松浦 原子力を使うことが社会にとってどういう価値があるか。どのような文明の成果も社会にとって良いことと悪いことが必ずあります。どちらが大きいかわかりませんが別にして。原子力について考えてみると、原子力というのがエネルギーを生産する技術としてはあまりにも強過ぎるので、これが軍事に悪用されれば人類は滅亡してしまう。軍事に絶対悪用されないという条件つきでなら、これは人類が必要とするエネルギーのすべてを賄うほどの可能性を持っています。最初に価値観をすり合わせる時に、軍事利用面を無視するかどうかで、選択がひどく難しいままになっています。現時点ではその選択を留保し、原子力に頼るかどうかとも決めないでやることだけやっていこうとするのが実際的なのであろうかという気がします。

澤田 佐田さんはリスクと便益などについてはいかがでしょうか。

佐田 4点、指摘します。一番大きな問題は、便利だけれども、万一の事故リスクがある原子力と、私たちの社会はどう付き合っていくかという真剣な議論がまだ行われていないということ。2つ目は、いくつかの事故調で指摘された原子力ムラの特別意識や独善性の問題。それが技術過信につながり、過去に学ぶ、他者に学ぶという視点を欠如させたことです。この反省はきちんと反映されているのか。3つ目は、コミュニケーション不足です。事業者と規制機関、事業者と自治体や地域社会との関係がいびつであり、そのために必要な知見が反映されなかったことが、各事故調で指摘されています。最近の関西電力の事案にしても、事業者と地域社会との関係やコミュニケーションが本当に適切なものになっているかどうか、電力会社と規制機関、原子力を推進する側と反対する側との関係やコミュニケーションが、より適切なものへと改善されているのかどうかということ。4点目が知の統合の話ですが、これをめざすには、二つの概念が必要です。一つは分析・認識科学。何かを突き詰め極める学です。もう一つは設計科学。これはあるべき姿を極める学です。原子力関係者においては前者の「分析」は割と進んでいるのですが、どうあるべきかという設計科学に関する議論、これに関わるようなトランスサイエンスや領域横断的研究が、全く手薄です。原子力学会の「福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会連絡会」(ANFURD)にしても相応の意義があるとはいえ、基本的に関連分野のそれぞれの学がもつ知識の寄せ集めのレベルでしかない。ANFURD に社会科学系の学会が入っていないことからしても、新たな知の体系をめざすという知の統合にはほど遠いと思っています。

II. 包括的ふりかえりから、個々の重要課題へ

危機管理、知の統合、温暖化、 新たなる神話、安全目標、パワハラ規制…

澤田 以上、みなさんからは包括的視点からのふりかえりを行っていただきました。ここからは、個々の重要課題に切り込んでいきたいと思います。

今の世の中は新型コロナの話に席卷され、9年前の原子力災害の話は忘れ去られつつあるかもしれません。3.11に起きた原子力災害という国内の危機を乗り越えられず、対応は混乱を極めた。けれどもコロナをめぐる政治や政策現場の実態は、原子力災害の時と同じことを想起させます。

そこで当時、いろいろ苦勞された松浦さんにお聞きしますが、日本人には危機管理能力が欠けているのでしょうか。かつて内閣の危機管理を担当していた佐々淳行氏は、危機管理監が関連するすべての権限を委譲されることで霞が関と一体となり、すべてがうまくいくと述べていました。9年前の原子力災害の時には民主党政権の政治家が口を出し過ぎた。当時の菅直人首相が出過ぎたということ、佐々さんはしばしば批判されています。民主党政権を散々批判してきた自民党を軸にした安倍政権は今回のコロナ対応で、どう鼻疽(ひいき)目に見てもうまく機能していません。今井尚哉首相補佐官のような経産官僚出身者が霞が関を束ねていてもこの体です。危機管理がうまくいかない点で、原子力災害と共通する本質は何でしょう。松浦さんは、遅くとも JCO 事故(1999年)の頃には、この国の原子力事故という危機管理に関与されてきましたね。

危機時には、政治家の決心と覚悟が必要

松浦 1F 事故の前に、原子力施設で大きな事故が起きた時の対応は、米国 TMI 事故を参考にして、また JCO 事故を反省してそれ相応に考えられていました。原子力災害対策特別措置法が制定され、それに基づいた訓練も行っていました。しかし、実際にそれが起こってみると、その訓練をやったことを生かさなければいけないという強い決心をする人が、政治の中にいなかった。それが一つのポイントだと思います。また、事故直後の3月末に私は住田健二さんや田中俊一さんらとともに、事態の対応に向けた20人程の専門家の考えをまとめ、有志の緊急建言として公表しました。その後、当時の民主党からの要望をうけて、説明もしました。けれども、その説明は聞かれただけで放置され、私たちが説明したことが実行されることはありませんでした。必要だったのは、見通しを定めて決心するという当然のアプローチが取られなかったことです。

今回のパンデミックの場合は、専門家の意見を聞いて政治家が決心を述べているようですが、こうしなければならないという強い軸がぶれている。ある時は経済が重要とされ、ある時は人命、あるいは医療のシステムが、という話が錯綜しています。全体を貫徹する論理がないはずはないと思うのですが、それを見極めて決心し実施しようという、その決心がされていないのです。その点では3.11 当時も今も、同じことが続いているのではないかと思います。

澤田 原子力の将来についてはどのように考えますか。

松浦 原子力をこれからどうするかということについても、今の世の中をめぐる状況をしっかりと把握すれば、僕は比較的簡単に答えは出てくると思っています。それでは、自分自身はどういう決心をしているのだと問われれば、皆さんと一緒に決心する前には議論を十分しないと、とんでもない方向に行ってしまう可能性があります。一人が考えたことでは限界があるけれども、全員で考えても絶対、答えは一つにはなりません。だから、ある力を持った、ある見通しを取った人たちが必死になって議論して答えを出す、出した答えをとにかく実施するように動いていく、これが大切なことではないでしょうか。

ただ、先ほど井上さんがおっしゃったように、それは時間がかかる。まさにそのとおりで、私自身の経験からしても、ちょっとしたプロジェクトでも最初の提案から始めて予算を取り事業にして、それが動き出すまでには、どれも20年以上かかっています。そのくらいは最初から覚悟してやったほうがいいのです。そういう覚悟を持ってやるということで、道はおのずと見えてくるのではないかというのが私の個人的見解です。

澤田 藤田さんは ImPACT という原子力の将来像を拓く統合的プロジェクトをリードされていますね。原子力の知には当然ですが社会科学知も入ってきます。どのようにお考えですか。

藤田 一つはさっき申し上げたように事故調の中で深層防護の点と言われたのがその後、議論されていなかったこと。もう一つはなぜ安全神話に陥ってしまったのかということ、きちんと議論する必要があります。これがきちんと分析できていないと、次も予測できないトラブルへの非対応という同じ愚を繰り返すことになる。

さらにもう一つ、事故から10年近くたった今、原子力はまた国策民営でトップダウンで決める体制に戻りつつあると感じます。2050年に原子力はどのような姿を、複数のオプションとして明確に示す。そのためには広く議論しなければならないですね。そこでの研究開発のテーマは常道である、トップダウンではなくボトムアップで、ニーズからシーズに落とし込んで、それを社会実装にまでつなげていくのがあるべき姿のはずです(そうでない

研究開発は成功していません)。

2050年まではあと30年あるので、ビジョンをきちんと立てて、複数の戦略に基づいた研究開発をボトムアップで進めていく体制、それをしていくことによって変わっていくことができる。その一つの問題が高レベル放射性廃棄物で、それがこれからも増えていく。次世代炉のニーズとしてはプルトニウムを有効利用でき、マイナーアクチニド(MA)を減らせるような炉が考えられます。私はこれまで、革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)という“従来の枠を超えた新たな加速器・分離回収技術”を使った国のプロジェクトに挑戦してきましたが、新たな研究開発の成果は原子力以外の分野では10年か20年で実用化しています。従来型の原子力界への提言として、最初から放射性物質を扱わなければそれほど時間はかからないし、外からの意見を聞きながらボトムアップで研究開発をしていくというのが原子力界には必要ではないかと考えています。

ImPACTでは、一部成果が出た段階で社会科学的の専門家にパネリストをお願いしてシンポジウムを開催し、意見を取り入れながら研究開発を進めました。

必要な知を動員し、普遍化する

佐田 知の統合というのは異なる研究分野の手法や知を持ち寄って、より普遍的な知の体系を作り上げることです。各論ではそのことによってリスクを最小化し、社会のメリットを最大化することにも、ひいてはつながる。それは原子力を進めるために使おうとする考え方でもありません。原子力業界では知の統合のうちの認識科学にあたる分析は各論で相応に行われているものの、社会のあるべき姿とそれを実現するためにはどういった知を導入しなければいけないか、そのためにはどのような普遍的な知があるのかという取り組みが欠けている。それは日本のアカデミア全体においてもそうだと思います。

原子力のことに立ち戻るならば、一番大切なことは価値観を調整するということが一番大きな問題で、そのためにはどういった知や学を動員しなければいけないか、倫理学や社会科学全般の知を動員する必要があると思います。もう少し下のサブシステムの話としては、例えば原子力村の人たちにある独善性の問題、あるいは社会セクター間の対立やコミュニケーション不足という問題が各論としてはあると思います。

澤田 そもそもどういった経緯で知の統合の話がでてきたのですか。また、今のコロナ対応では『パラサイト・イブ』を書いた作家の瀬名秀明さんが産経新聞で、このような事態の時には統合知が必要だと指摘していました。だから、これは何か事があるたびに誰かがそういうふうに言うだけなのかなという気もしますが。

佐田 日本で知の統合を本格的に提案したのは日本学術会議で、福島原発事故が起こる前の2007年のことです。いろんな多面的な知を持ち寄ることによって、より普遍的な知の体系をつくろうということです。

知の統合は大き過ぎる概念なので、原子力学会事故調ではその言葉を使わず、俯瞰的な視点の欠如という記述にとどめています。なお、1F事故前の地震や津波を想定する時に、他者に学ぶとか過去に学ぶとか外国に学ぶとか、そういう知見の持ち寄りや反映が少なかった。だから、いろんな知を動員して反映しなければならないという反省自体はとても重要なことですが、それは物事に対処するために必要な知を動員するという、知の統合を狭い意味でとらえられたものです。

澤田 私は、自然科学の知と社会科学の知をうまく統合して同じフレームみたいなものをつくり、それでより高位の知識レベルを獲得しようという発想だと理解しています。10年前の時点では、そのような知の統合がなかったから、あの困難をうまく切り抜けられなかったという風に考えている人々がいると解釈しているのですが。実はそれって虚妄じゃないでしょうかねえ。

佐田 知の統合の各論の代表例が文理連携や融合です。もう少し大きな話をするならば、科学はかつての哲学から派生したもので、文字通り「学」を「科」に細分化することで、急速に進展してきました。かつては哲学の範疇の中で何とか全体性が把握しようとしていたものが、「科学」は細分化と専門化によって、全体をとらえることができなくなった。その全貌をとらえようと挑戦した最後の人たちが百科全書派と呼ばれる人たちでしたが、彼らとて全体を俯瞰し全体性を回復することはできなかった。とはいえ、細分化し専門化した学では、さまざまな問題に対応できない。部分最適ではなく全体最適をめざすためにも、また、近年の複雑で大きな問題に対処するためにも、学の連携や融合の必要性がますます増加してきた。知の統合は、その流れの中にあると理解しています。

滝 知を本当にすべて統合することは不可能です。だから、私の理解では、さまざまな諸科学の価値というもの人間社会の中でどうやって生かしていくのかということを考えるというのが知の統合だと思います。個々の科学を束ねるという意味ではなく、諸科学がどういう価値をわれわれに与えるのかという観点から科学を見ていくということが知の統合であると思います。

井上 IAEAの会議では、ナレッジマネジメントというテーマで議論をすることがあります。ナレッジにはいろいろな知が必要であり、それをいかにマネージしていくか。それに対して僕に回答を求められたことがありとまどったことがあります。けれども1Fの事故を見ると、これを収束させるためには、必要な知の動員というナレッジマネジメントが重要だと感じます。

澤田 ナレッジマネジメントはSECIモデル(Socialization-Externalization-Combination-Internalization Model)を開発した野中郁次郎さんらが深化したもので、さまざまな知見を共有してマネージることによって新たな価値が生み出されるものだと理解しています。

ではここからは、脱炭素と原子力の再構築の話題にうつります。竹内さんからお願いします。

エネ市場を支配する「神なる官僚」

竹内 エネルギー政策は3Eのバランスと言われますが、最近では環境のEが最優先であるかのような議論も多く聞かれます。各国政府だけでなく、金融・投資関係者なども気候変動問題を判断軸に入れるのが当たり前になってきています。あらゆる場面・手段で気候変動対策が考慮されるのは、20年近くこの問題と付き合い合っている立場としては嬉しい部分もある反面、なんだかごちゃごちゃになっているという感もあります。

例えば、最近の石炭廃止論などをトータルで見ていると、電力事業に対する規制の哲学がわからない。発電事業は自由化されていますが、再生可能エネルギーは「究極の総括原価方式」とでも呼ぶべき固定価格買取制度(FIT)で導入を進め、石炭火力からの発電電力量を絞るといった形の計画経済化が火力発電にも導入されるとなると、市場に一定程度任せるという制度設計をしておきながら、その一方で再エネも火力も計画経済的にコントロールしている。自由化市場と最も食べ合わせの悪い原子力だけが放置されている状況に見えます。温暖化の外部性評価も仕組みがバラバラで、基本的には大幅なCO₂削減には、徹底した電化の促進と電源の低炭素化の掛け算が必要ですが、再エネの賦課金は電気だけにかかる炭素税のようなもので、電化の阻害要因になっています。これだったら、全てスクラップして、大型の炭素税を導入した方が、シンプルかつ効率的にエネルギーの低炭素化を進められるはずです。

さらに温暖化では環境などに配慮したESG(Environment-Social-Governance)投資は非常に盛んになってきているのですが、ESG投資関係の方で原子力のことを正面から議論する人はほとんどいない。温暖化のリスクを言うのであれば、原子力をどう考えるのかももっと議論されてしかるべきだと思います。ESG投資はきれいなイメージで終わる話ではないはずです。

滝 竹内さんのご指摘はとても的を射た本質的な質問だと思います。電力自由化をうたいながらも、エネルギー基本計画でエネルギーミックスを決めていること自体が非常に計画経済的です。日本のCO₂排出量の削減目標と、経済性と安全保障、安定供給の話を掛け合わせるとい議論の流れになっている。これは明らかに自由市場と矛盾したトップダウンのエネルギーミックスを考

えていることとなります。

梶山経産相は7月3日に、石炭火力のフェードアウトに向けた検討を始めると会見で述べました。石炭火力を減らすこと自体に問題があるというのではなく、突然トップダウンで政策が変わって決めていくというのは、市場や民間企業、ビジネスのあり方を全く無視している。結局、経産相や周りにいる官僚たちがすべてを決めて、行政主導をしていく、そのような方法で事業活動を制限するというのは、問題のある話だと思いました。

本来は民間のビジネスの方々がもっと自由に発言して、自由に事業判断をしてほしい。けれども、エネルギーミックスが前提としてあり、石炭火力は2030年に26%まで認められている。だから、そこまではビジネスができると思い、新設の計画をたてる。すべてはエネルギー基本計画だと思います。もちろん自由市場だけに任せておけば、CO₂削減が進むとは思えない。それをやるためには産業界の方が嫌いなカーボンプライシング(炭素価格付け)をやって、CO₂削減に対してインセンティブを与えないといけない。それにしても、あまりにも数字を盾にした行政主導のあり方というのは、極めて不健全なことだと思います。

今後は、外部性を内部に取り込んでカーボンプライシングをやっていくということになっていくのではないかと思います。これは日本ではまだ議論を尽くしていないし、抵抗はあると思いますが、最終的にそういう議論になっていかないと、官僚コントロールという世界がいつまでたっても続くのではないかと思います。

一方的な政策決断はエネ投資を阻害する

竹内 一番悪いのは、これで結局、日本のエネルギー全体には投資が怖くてできないということになることです。例えば石炭火力を廃止するとなったら、新電力は大きな影響をうける。2011年に自由化されて、これから安い電力で勝負してください、市場で調達するだけでなく自主電源を持つべきです、と推奨してきた政府の責任をどう考えるのか。私が自由化後に小規模石炭火力発電を建設したとしたら、さきほどの石炭フェードアウトの件は、訴訟を起こすことを真剣に考える話です。日本の原子力事業者も電気事業者も、政府を対等なカウンターパートとみなして、納得できない規制・行政にはきちんと物申すということをこれまでやらなかったことが、両者の歪んだ関係の根本にあると思います。これは規制の話にも通じると思います。

当初の制度設計が急きょ変更になり、例えば新電力さんの財産権が毀損されたとして訴訟が起こった時に、どう判断するのだろう。その議論を見てみたいという気もあります。

話を戻しますが、規制がコロコロ変わる、自由化と言

いながら日本のエネルギー市場は政治や官僚によってコントロールされている、と捉えられてしまえば、日本のエネルギー事業への投資を縮小させてしまいます。海外からの投資も来なくなるでしょう。制度設計がいったい、どこに向かおうとしているのか。その精神が全く見えてこないのです。

滝 エネルギー高度化法や省エネ法で、効率目標やCO₂排出の原単位目標はつくっています。それに従ってわれわれは規制をしているという話なので、ちゃぶ台返しとは簡単に言えないところが日本の官僚の賢いところで、布石が置いてある。だから日本では訴訟にはならないと思いますが、おっしゃるとおり欧米だったら訴訟が起きてもおかしくないような状況だと思います。

再エネだけで賄えるという「再エネ神話」

澤田 田中さんは再エネと原子力との関係をどのように見えていますか。

田中 今の議論のテーマである脱炭素と原子力の再構築をどうやっていくかというのは、次のエネルギー基本計画(エネ基)をどう書くかということしかありません。今の日本は縮原発の政策を取っている。それをエネ基で閣議決定し、さらにパリ協定にもとづく成長戦略としての長期計画も閣議決定し、国連のIPCC(気候変動に関する政府間パネル)に日本は原子力を可能な限り減らして、再エネをやっていきますということを堂々と提出しました。

その代わりにどうやって脱炭素するかというと、再エネで100%やることしかありません。このため経産省は必死に再エネ拡大のためのあらゆる政策を打とうとしている。それが成功すればよいのですが、原子力の安全神話と言われたように、そこには再エネ神話があるのではないのでしょうか。本当に再エネ100%で日本がやっていけるのか。それは絵に描いた餅だということが、まず1つ目に重要なことだと思います。

本当に脱炭素しようとするのであれば、そこで使えるのは再エネと原子力と排ガスからCO₂を回収し利用するCCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)付きの火力しかない。その3つを組み合わせるやっつけようとする時に、再エネを100%にしてほかは不要だというのは不可能です。再エネ拡大には限界がある。その数値をはっきりと示して、その上でCCUS付きの火力と原子力もやっていかないといけないということを論理的に国民に説明し、政治家に説明して納得してもらおうという材料を提示するということが重要です。

また、LCOEの発電原価で比較すると、原子力はコスト高になり、再エネ、特に太陽光が一番安くなる。その際にはLCOEだけでなく、外部性まで加味できるかどうか。これは外部性の定義にも関わりますが、トータル

としての電力、エネルギー供給コストを見る必要がある。LCOE単独で見ても再エネが安いからといっても、全体が本当に安くなっているかどうかを示した上で、再エネに限界があることを定量的に示していく。そういう材料があればいいと思っています。

澤田 原子力の将来についてはどうでしょうか。

田中 原子力の再構築については、原子力を使うことが日本に必要なだということを国民全部が納得することは無理でしょうが、理解できるようにするためには3つの要素が関わります。一つは原子力をなくして再エネをやるようとしても、再エネには限界があるという定量的、定性的説明、二つ目は規制委員会の基準を通った今の原子力発電所の安全性は圧倒的に向上しており、他の社会リスクと比べても相当優位にあるという説明です。三つ目は高レベル放射性廃棄物処分がいまだにきちんと解決していない。この問題の解決には時間がかかる。当面は最初の二つのことがらを説明することで、日本の将来のエネルギー供給をしっかりとデザインできるようになっていくことを期待しています。

澤田 中盤の話を少し整理すると、脱炭素と原子力の再構築というこれまでの議論の中で、竹内さんが指摘されたことで印象に残ったのは、電力事業は今、計画経済化している。再エネ、特に火力はそういう傾向があって、自由化と非常に折り合いの悪い原子力だけ放置されている。だから今、電力事業は非常に投資しにくいような状況になっている。エネ基では再エネ重視で石炭火力はなくす方向、一方で自由化の波を食らって原子力というのは一体どこに落ち着くのかよく分からない。そういう環境では投資しにくい。原子力は歴史的に見ても社会的責任投資(SRI: Social Responsibility Investment)の観点からはネガティブスクリーニングされている。だから原子力はCO₂削減には有利なのですが、投資環境から見ると扱いにくい存在になっている。

さて、ここで小出さんにここまでの議論について、意見を伺いたいと思います。

1Fの最終的な姿をどうするか

小出 エネルギーや原子力問題の原点に戻れば、私たちが「ナショナル・セキュリティ」に、どう向き合うのか、それを明確にし、共有しなければならぬという問題があると思います。セキュリティには、「防衛」面もありますが、エネルギーのナショナル・セキュリティを冷静に考えれば、日本の現状では原子力エネルギーなしには、産業や社会を維持できない。多様な再生エネルギーが開発されていますが、電源系統と供給を考えれば、これだけで全部を賄うことはできない。ある期間は現在の軽水炉を使わざるを得ないと思うのです。これを前提に、原子力界からも技術的課題とリスク、最新の試算に基づく

経済性などを、オープンな場で議論し、「リスクはあるけれども活用してゆくプログラム」を提示してほしいと思うのです。

「事故はありません」、「万一の事故を起こさないために……」——というレトリックでは、もう人々の心には届きません。「事故はありうる、そのリスクとベネフィットを両面から考えて下さい」という前提に立ったコミュニケーションなしには先に進めないと見えています。

こうしたなかで、残念な例もあり、「失敗から最大限の教訓を引き出す」という視点でお話します。

1Fの廃炉問題で、その最終プロセス設計は重要な課題ですが、具体的に提示されていない。汚染されたデブリを取り出し、原子炉も全部撤去して、更地にするという方法もありますが、一方では、炉心など放射線量の大きいコア部分だけは、鉄やコンクリートで固めて数百年間現場で管理し、線量が落ちた後に処理するという方法もある。取り出しに伴う作業員や環境へのインパクトを考えれば重要な選択肢です。

この手法には「石棺」方式の呼称がつけられていたことが、2016年、原子力損害賠償・廃炉支援機構(NDF)の技術戦略プランに「石棺方式」の表現が出ていたことから、地元の福島県知事らが「石棺の表現は県民の復興への意欲を著しく削ぐ」と反発。経産省、NDFへ抗議しました。

このとき、高木陽介副大臣と山名元・NDF理事長は、「石棺方式は考えていない、全量撤去の方針は変わらない」と返答しています。石棺方式のメリット・デメリットを含め、きちんと説明しなければならなかったところ、あっさり否定してしまったのです。

これは、「石棺」というデリケートな“技術用語”を不用意に使うという配慮の無さと同時に、虚偽にしか感じられないメッセージを平気で発するという両面で原子力界の信頼を著しく落とした失敗例でした。

原子力技術は、何を考え、どこに向かおうとしているのか、こころざしと全体的なメッセージを市民の心に届くよう発信していただきたいと思えます。

滝 使用済核燃料についての国の姿勢は、法律で全量再処理ということに固まっています。でも実際には、さきほど井上さんがおっしゃっていたようにオプションはいろいろある。そういうものを今、国は考えようとしていません。法律ができて体制ができているので、彼らは思考停止にならざるを得ない。そうであれば学会が、全量再処理以外のものも含めたメニューを示す。あるいは藤田さんがやっておられたMAの短寿命化も考えてもいいのかもしれない。短期のものから長期のものまで放射性廃棄物の処理については、これだけいろんな選択肢があるということをみんなに知ってもらって、その議論をしてもらう。これは役所ではできないことで、学会の

使命として考えてもらいたい。

澤田 学会への課題の投げかけがありましたが、理事である佐治さんのリアクションをお願いします。

佐治 学会はいろいろな専門家や知見を集めて、言わばデータベース化やアーカイブ化する、それをもとに政策などの意思決定をしようとする人たちが利用するための客観的な存在としての学会なのか、もしくはアメリカのANS(American Nuclear Society)とNEI(Nuclear Energy Institute)の連携にみられるように、ロビー活動に近いようなこと、要するに政策に対して積極的に提言していくような、そういう立場というのも学会としてあり得るなど思っていて、自分の中で実はまだ答えが出ていません。

1Fの事故後に阪大の八木絵香氏が、学会の在り方について批判的に述べていたのは、学会が政治的メッセージを発信し過ぎるということです。世間が期待している学会とは、もっと客観的にいろんな知見やデータベースとかを提供し、(意思決定の)材料として信頼できるアーカイブとして存在すべきだという指摘でして、これは悩ましいなと思っています。

当時はまだATENA(原子力エネルギー協議会)はなく、米国のNEIの日本版をつくろうと言いつつも実現できなくて、学会としては日本版NEI的な組織の代わりとしての機能も果たすべきと考えた人がいても不思議ではありません。八木さんの批判も分かるのですが、日本版NEIがないところでは学会がやむにやまれずそういうような立場を取ったというふうにも感じていたところでした。

ともあれ、学会に世間が期待しているのは、やはり客観的にそういう知見、データベースみたいなものをきちんと整備し、意思決定者に対して信頼できる情報を提供することなのかなと、私は感じています。

井上 核燃料サイクル関係で私がかつて主査を務めていた委員会では、今までの日本の政策に一切とらわれず、今後原子力をどのように利用していくかによってどういう戦略や技術が必要か議論しています。さらに、そのためにはどんな問題があり、何を解決しなければならぬかということも議論してきています。学会としてそういう役割は非常に重要だと思います。

井内 いま井上さんがおっしゃったような、核燃料サイクルについてのゼロベースの議論は学会としての重要な役割だと思います。しかし、そういった議論の内容が残念ながらなかなか伝わってきません。世間の人は、そういうことが議論されているということ自体を知らず、一方で、反対派から「核燃サイクルはすでに破綻している」と言われたら、ああ、そうなんだなという受け取り方をしがちです。

核燃料サイクルの技術的な点に興味を持ってみずから情報を取りに行くような人はそんなにいないと思います

が、高レベル放射性廃棄物を何らかの形で処分しなければいけないという認識は、一般市民もある程度持っています。今の核燃料サイクルの考え方で処分するのが最も適切なのかどうか、疑問に思う人たちのためにも、学会でのゼロベースの議論をもっと伝える必要があります。

もう一点。冒頭、政治がビジョンを示し、もっと統合されたメッセージを出すべきであるというお話がありました。先ほどは脱炭素で石炭火力をやめていきましょうというときの大臣のトップダウンはけしからんという話があり、その整合性がとても気になります。トップダウンは駄目だけれども、ビジョンは示さなければならぬという二つの話の関係が今一つわかりません。もっと長期的なビジョンを示してから石炭火力をやめていきましょうという話をするべきだという趣旨でしょうか。

信念と決意をもった政治がない

滝 そうです。ビジョンを示す必要がある。20年後、30年後の日本はどのような国でありたいのかということ。政治家は示して、そのために政策を打っていく必要があるし、気候変動についても日本は何年までにゼロカーボン達成する、あるいは達成しないといったビジョンを示す必要がありますね。それを示した上で、国会や市民レベル、あるいは学会レベルなどいろんなところで議論をすべきだと思います。それでビジョンがよくないという話であれば、それは選挙などを通じて修正できます。そこでは政治や国民や社会との間でのやり取り、コミュニケーションをやるべきです。先ほどの石炭火力で出てきたような話は目標が決まっています、政府としてこれは動かさないと決めていくというプロセスとは違うと思うのです。

本来であれば発電所を持っている人たちが、このままだと将来、石炭火力は使えなくなるかもしれないから、そろそろ轉換しようかということ。を自然に考えるような環境をつくるべきです。政府が本当にCO₂削減を本気でやりますと言っているならば、当然何年か先にはいずれ自分たちの発電所は時代にそぐわなくなる可能性があるの、自主的にやめられるはずだし、早い段階から経営判断ができます。それを突然、石炭火力は規制しますと言うのは問題が多い。そういうやり方ではなくてビジョンとしてCO₂削減を何年までにやります、原子力はその中でこれくらい要りますとあって、文句があるのであれば選挙で洗礼を浴びる。でも、僕らは原子力が必要だと信じているからやるのだというようなやり取りがあるべきなのですが、そういうことを安倍さんですらできない。

澤田 井内さんの指摘を私なりに解釈すると、いくらビジョンを出して政治にそれを投げたところで、政権は何もできないのではないかと。

井上 井内さんが、今の燃料サイクルは破綻しているのにとこのようなことをおっしゃられました。私たちが検討しているシナリオの中では原子力をやめるという選択肢もあります。そのときにはどういう問題が起こって、どういうことになるのかも含めて検討し、指摘するようにしています。

規制は安全目標を前提にすべき

澤田 規制の話に移りたいと思います。今は厳しすぎる規制が原子力を駄目にする、体制の劣化を招いているように思います。発電用原子炉と研究用原子炉では、その構造や出力、内蔵する放射性物質の量が異なるので、規制の取り組み方(アプローチ)を段階的にすべし(graded)というのが“グレーデッド・アプローチ”ですね。これはIAEAが強く勧告していることです。ところが日本の規制では、130万kW級の大型商用軽水炉も1Wの近大原子炉も同じグレードの規制を受けている。この実態はいまでもなら改善がなされていません。つまり、現実には一向にグレーデッド・アプローチに向かっている。何が問題なんですか。

佐治 グレーデッド・アプローチだけではないのですが、規制の問題の一つは、トップの人たちが公の場で述べるメッセージと、規制官の現場での規制行為とのギャップが大きい。グランドデザインを示した後、それを規制の実務に落とし込んでいくというようになればよいのですが。

澤田 そうはなっていない。

佐治 そもそも、大きな話では規制が厳し過ぎるという議論をする前に、日本の規制は何のためにあるのかというところで、社会のコンセンサスができていない。さきほどの統合的なメッセージという話と近くなりますが、政府のエネルギー基本計画の中で原子力への依存度を可能な限り低減していくとされているので、原子力はフェードアウトするというメッセージとして受け取る人が多い。そうすると、今の規制というのは利用を継続するための規制というより、電気事業者が動かしたいなら動かせるものは動かしていいけれども、最終的にはなくすための規制だと受け取る人もいます。であるならば、それは今の規制が厳しいかどうかという以前の話になります。そもそも今の日本の規制行為というのは何のためにやっているのかというところで社会的合意ができていないのです。

われわれのように原子力の安全に関わる人間としては、このような時に常に意識し議論するのは安全目標の問題です。どれぐらいのリスクならば許容できるのかという問題、利用によって得られる便益とそれに伴うリスクを自分たちがはかりにかけて、このぐらいのレベルのリスクまでなら許容できる、あるいはここからは許容で

きないので、そこには規制をかけるという判断の目安としての安全のレベルというのは本来、決まっているべきです。しかしながら、今はそういう状況になっていません。安全目標に対する今の規制委員会の態度は棚上げ、放置であり、私はそのことにはとても不満です。

利用を前提として規制するならば、この程度までならリスクを許容していいというレベルが必要で、それがなければ、結局はリスクゼロに向かう。規制行為の現場においては、リスクゼロに向かうようなことが行われることがある。

どのぐらいのレベルで規制すべきなのかということをもまずグランドデザインとしてきちんと決めていないところが、問題だと思います。厳し過ぎるという人もいるかもしれませんが、そもそもどれぐらいにするかという社会からの負託を受けていない状態では、厳し過ぎるのかどうかの判断さえもできない。

私はメーカーなので、事業者や産業界にとって現在の規制は厳しいなどは思いますが、それは一般社会にとっても本当に厳しいと言えるのか。更田委員長は実際の規制を行う規制官に比べると、非常に俯瞰的なもののおっしゃり方をされ、それを聞いている限り、厳しいだけではない感じもしますけれども、一方で国会の場で野党の方からの厳しい質問に答えなければならない立場を考えると、厳しい規制を望む国民の負託に応えているともいえる。このように考えていくと、一様に今の規制が厳しいと言う産業界の非難が的を射ているかどうかは、だんだんわからなくなってきます。まずはそもそも論のところ規制がどうあるべきかというところがきちんとしていないことが、気持ち悪い。

けれども、その違和感は、規制委員会自身が最も感じるべきだと思います。だから、安全目標なるものを体系化して決めてくださいと彼らが発信すべきなのに、なぜ彼らはそれを棚ざらしにするのかわからない。

澤田 利用を前提とした規制にはなっていない、廃止に向かう規制であるから、グレーデッド・アプローチは一向に進まず放置されているし、安全目標も曖昧なままグレーにして棚上げにされているという含意ですね。

つまり俯瞰的に見れば、政府が“原子力への依存度を限りなく低くする”と言っている、これは段階的に原子力をゼロにすると言っているようにも解釈できますが、まさに原子力規制委員会・規制庁は規制の立場で実行しているとするのが正しいということですね。彼らは実に忠実に政府の政策に従っている。そういう視点で見ると、合理的に作業をしているということですね。要するに規制という名の脱原子力に向かっているというのが正しい見方なのですね。

佐治 正しいかどうかは分かりませんが、結果的にそうなるのではないかと。それだと滝さんがおっしゃっていた「このままだと原子力が終わる」ことにもな

ります。

一方で、原子力発電所が立地している自治体の知事さんの苦勞も分かるのですが、彼らは限りなく安全サイドのことを言っていれば、自分たちの社会的地位が脅かされることもない。日本のエネルギー政策に対してどうかという話に、自分たちがコミットしなければならないとは思っていないから、今のような形にしかならない。

現場での規制行為は「パワハラ劇場」

澤田 田中さんはどのように考えておられますか。

田中 佐治さんの発言に賛成です。ただ、規制委員会は、今やっている規制の基準や規制行為を安全目標と比較することはしてはいけなと言っています。つまり彼らは、世界と同水準の安全目標ができて、それをもとに今の規制委による規制行為と比較されると、自分たちの行為がやり過ぎであることが明白になる。だからあえて、逃げてるように思います。

私が懸念するのは、過剰な規制が安全文化の劣化を招いているということです。その最大の証拠が、高速増殖炉「もんじゅ」だったと思います。現場の人たちのモラルを低下させるようにしたのは誰か。私は規制当局のやったことが、その原因のかなりの部分をつくっていると思います。東電のシュラウド問題の時に明らかになったように、過剰な規制をやるのがかえって安全文化を劣化させるということは証明されている。そのことを規制当局は反省し、その結果として基準をつくったのですが、本質的な規制の改善には結局なっていなかったのだと、「もんじゅ」の時には思いました。

今の原発の安全審査はかわいそうです。安全審査の現場は、パワハラ劇場ですさまじい。許認可権限を利用して何でも言うことができる、それに対して事業者は絶対に反論できない。反論した瞬間に安全文化がない、安全意識が落ちてしまうとやられてしまう。だから、事業者は言われるがままに反省の弁を述べるしかないというパワハラがまかり通っています。私は、規制は欧米のようにきちんと理性的なやり方に直していただかないといけなと思っています。一方で、今規制の悪口を言うということは国民全体を敵に回すことになり、ますます原子力に対する理解を妨げてしまうことになる。だから事業者は、今は歯を食いしばって、あらゆるパワハラに対して下につむいて耐えるということしかできない。耐え抜いて許認可をもらうということしか今はできないと思っています。理性的にやれるようになるのは、次の時代だと考えています。

澤田 1F事故後の2012年の民主党政権時代に、原子力の再構築に向けたベースを作られた松浦さんに伺います。更田委員長は事あるごとに、規制当局と事業者との審査の場、どんどん意見を言ってほしいと言って

います。けれども、田中さんの言葉を借りると現場はバワハラ劇場になっていて、権力を背景にした極めて歪な非対称な関係になっている。

松浦 規制委員会での議事録を読んでいる限りでは、更田さんは規制をより实际的、現実的なものにしたという意向を持っていると思います。けれども、規制委員会と規制庁との間で、その意識が共有されていない。規制庁にある種の官僚的な壁のようなものができあがって、委員会の意思や意図するところを規制庁がきちんとフォローしようとしていないのではないかなと思われるのがかなりたくさんあります。

もう一つは事業者がもう少し先読みをして、委員会にいろいろ話を持ちかけるのが必要ではないかと思います。更田さんからすると、どうして事業者はこんなことぐらい考えておかないのだと思うことをかなり指摘していますので、そここのところはより本音でお互いに意見交換しながら、合理的に話を進めていくというスタイルになるのが、本来のあり方だと思います。規制委員会は当初は安全目標を決め、それに従って規制の体系をつくっていきこうという意識を持っていたようですが、今はそちらの方向に一向に動きそうにない。であるならば、現実的に対応していくしかない。なお、安全目標を作ること自体が、日本では非常に難しいと思います。

澤田 それ松浦さんの口から出るとは意外です。なぜですか。

安全目標は死亡確率をめぐる議論で紛糾

松浦 私が安全委員会にいたときに安全目標を策定しようとして、リスク論で論理を進めていきました。その際の安全目標の基準にしたのは人の死亡確率です。しかし、これは安全委員会の中でも議論が生まれて、とても結論には至りませんでした。どういうことかという、工学的施設においてその安全を人の死で測るといのは何事かと、そういうような議論はどうにも答えが出てこなかった。

なぜそうなるのかを私なりに考えたのですが、歴史的にみて日本人が害を受けてたくさんの方が死んだ例は、圧倒的に自然災害が多い。戦争もありましたが、数で見ると自然災害の方がはるかに多い。その自然災害に人間の力で対抗しようとしても無理で、そういう局面においては諦めるというのが、日本人の安全に対する基準の一つとしてあると思います。

けれども自然ではなく人がもたらす害については対抗できる。要するに自然災害については問わないけれども、人間がもたらす害、人工リスクについてはほとんど問うという基準が、心のあり方としてあると思います。

ヨーロッパでの災害による死者は、外国や異民族から攻められた戦争によるものが圧倒的に多い。もちろんパ

ンデミックも時々ありましたが、数では戦争の方が多。戦争で死なないようにするには防衛力を高める、要するに人の力で対抗しようとしてきた。全ての安全の基準は、人の力で対抗してきたということがベースにあるわけです。それによってデジタルに基準を決めることが当たり前になる。欧米では人間がすることに対して、人間の考えでその基準を決めるという考えがベースにあるのではないか。だから、それなりに数値化した目標をつくることができたと思っています。

それからもう一つ、問題を非常にややこしくしているのは、安心の問題です。安全と安心は違う話ですが、安全と安心をセットにしてしまいがちです。安全でも安心できないことや、安心していても安全でないことは山ほどある。その矛盾に日本人は関心がない。

安心はもともと仏教用語でして、悟りに至った心の状態を言います。これはサイエンスやテクノロジーの範囲に入れられるものではない。だから、私が安全委員長の時安心の話は一切しないということにしていました。

田中 松浦さんが委員長だったときに安全目標を最終的に委員会決定できなかったとはいえ、安全目標策定を真剣に検討されたということは価値のある重要なことだったと思います。事業者では、それに合うようにいろんな設計をしていました。例えば ABWR(改良型沸騰水型軽水炉)の設計や保安規定の修正は安全目標、特に性能目標を念頭に行っていました。安全目標は案のままですが、それでも事業者はそれを守るようしてきたというのが事実です。

そして今こそ、安全目標は絶対に必要だと思います。工学的に際限なくリスクをゼロにしようということをめざすのであれば、その工学の社会応用をやめてしまったほうが一番早い。けれどもそういうわけにはいかない。人の死が評価材料になっているのは事実ですが、それが他の社会リスクと比べる最も客観的な方法なので、私はそれをを用いることでよいと思っています。

実際に薬や化学物質、農薬や肥料、あるいは自動車事故、飛行機事故にしても、それらのリスクについては10万人当たりの死者は何人以下にすべきという水準がある。その点で原子力はとても高い安全水準が求められていて、原子力の場合は公衆の死亡リスクが10のマイナス6乗以下とする安全目標が世界共通です。これをさらにずっと下回るような実績を、原子力の世界では積み重ねている。そんな目標を原子力分野で使えないという方が、異常ではないか。

原子力発電所の運転の是非などをめぐって裁判所が判断の際に使う言葉は、原子力が持っているリスクが「社会通念上許容されているかどうか」ということ。けれどもその許容水準について、裁判官で判断が分かれる時がある。安全目標があれば、裁判所が理性的に他の社会リスクと比べて安全かどうかの評価基準にすることができ

る。そうすれば司法リスクも回避できるのではないかと思います。事故で放出されるセシウム 137 が 100 テラベクレル以上になるものは 10 のマイナス 6 乗以下という、規制委員会の今の安全目標は他の社会リスクと比べられないし、一般国民には全くわからない。やはり人の死の確率で評価する安全目標を正式に使っていきべきだと思っています。

相場観のない中で基準を作ることは難しい

松浦 安全委員会で人の死を安全目標の基準にしたのは、当時専門部会の会長であった近藤駿介氏のアイデアですが、人の生涯に関するリスクで、死亡統計よりも確かな統計はない。医薬品などでも人の死が基準になっています。けれども、例えば薬や自動車事故にしても、それらのリスクがどんなものかとみんなが知っている、一つの相場観を持っていて、その上で基準がつけられるので、皆さんが納得しやすい。

ところが、原子力の安全に関する安全基準は、社会のいろいろなリスクよりも、さらに 2 桁ぐらい少ないところでの議論となっている。人々がもつ相場観が全く得られないような世界で基準を決めなければならない。これは放射線の被ばく防護基準も同じなのですが、それに対してなかなか納得が得られていない。これは人々が、放射線の障害に対して経験することがほとんどない。このために放射線障害の相場観が社会で得られにくい、これが最大の原因だと私は理解しています。

ともあれ、安全目標を策定しようとするならば、人の死を基準にする、かつ一般社会のリスクより何桁か低い値に設定するのが最も合理的だと思います。

小出 死をめぐる日本の特異性は、新型コロナウイルス感染症の対応でも欧米との違いをみせます。

適切な対応をとらなければどのくらいの死者がでるか、各国政府は数理疫学に基づいた予測を示して行動変容を求めました。しかし、日本政府は一切死者数を発表しませんでした。そのまま危機を迎えることを心配した、数理疫学の専門家である、西浦博さん(現京大教授)が、4月15日に「今の状態を放置すると42万人の死者が予測される」という試算を発表しました。官邸はこれを「政府は関知しない」と否定。西浦さんへの批判も起りましたが、現実的には、この発信がなければ、日本のCOVID-19対策はさらに混乱し医療崩壊などの事態を迎えたと思います。

敗戦後日本が失った最たるものが「死生観」だという指摘がありますが、直視しなければならぬものをきちんと社会に示す。こうしたコミュニケーションの大切さは、原子力の世界でも同じだと思います。

核燃料サイクル政策の劣化

澤田 安全目標と死亡数の話が日本人に馴染みにくいとするなら、それはとても困った話ですが、そのまま放置はできないでしょう。

さて、この座談会のもう一つの重要テーマは、政策の劣化なんです。先ほど「もんじゅ」に関しては田中さんからいくつか指摘がありました。「もんじゅ」後」に、とりわけ核燃料サイクル政策が混迷しているということに関してもう少し補足的なコメントをいただきたいのですが。

田中 経済産業省は核燃料サイクルを推進する方針なので、2030年断面では混乱や破綻はないと思っています。ただし、きちんと再処理工場を竣工させないといけない。もう一つは経済性ですが、巷間に言われるような破綻しているということは全然なくて、直接捨てるよりもリサイクルしたほうが高くなるというのは全ての製品について同じです。要はリサイクルして高くなっても、それがまだ競争力を持っているということ。これが原子力の特徴です。

政策の劣化は、プルトニウムの問題です。原子力委員会がプルトニウム削減を言ったことで、すごく困っています。六ヶ所の再処理工場では現在、ヘビメタルで60トン、プルトニウムで30トンの貯蔵容量を持っていますが、それに対してこれまでのアクティブ試験の結果としてまだ3トンしかたまっていません。一方、MOX燃料の加工工場が六ヶ所で動き出すと毎年7トン必要になる。だから、圧倒的にプルトニウムが足りない。MOX燃料工場が動く頃にはプルサーマルの対象炉もみんな動き始めているでしょうから、そうなると全然足りなくなります。今の在庫が過剰だからプルトニウムを削減せよと原子力委員会が言ったことに大変困っています。そんな政策をいったい誰が考えたのか。

井上 政策の劣化は、社会との価値観が共有されなくなってきているからです。社会と原子力村、そして政策担当者のギャップが広がってきている。これが社会的な問題。もう一つ、技術的な問題としては、例えば、プルトニウムを高速炉で回せば、今度はMAマネジメントで大きな課題がある。これに対する答えはまだできていません。だから、こういうものも社会的に議論をオープンして、その上で日本としてどういう政策を取るべきかということを議論していく必要がある。これは原子力学会場でやるのが妥当だと思います。

「伝える」ではなく「伝わる」ことをめざす

澤田 これからの10年を俯瞰した上で、学会への提案や期待を。

井内 松浦さんが、原子力をエネルギーで使うメリットと、それが軍事に使われるおそれについて、原理的なところまで含めてきちんと話をしなければならないとおっしゃったことに共感しました。確かに、その原点を抜きにして、社会との価値観の共有がありうるでしょうか。軍事利用のおそれがあるのだから使わない方がいいという考えの人も少なからずいると思います。原発と原爆は同じであると。そういう、そもそも論を放置したまま、核燃料サイクルや高レベル放射性廃棄物や再稼働の話をして、ただ拒絶反応を持ってしまう人がいるでしょう。また、先ほどおっしゃった「再エネ神話」のようなものがあるというのは、本当にその通りだと思っています。再エネ100%でいけると、願望も込めて素朴に信じている人たちがかなりいるのではないのでしょうか。

私は原子力を推進する側の見解も反対する側の意見も入ってくる機会がありますが、中には今日のこの議論全体に拒否反応を示す人もいるだろうと思いつつ聞いていました。

井上 「伝える」と「伝わる」とは違うと思います。今まで原子力利用についてはほとんど「伝える」だった。政策を決めて社会にはこれが一番いい方法だと。また、例えばFBRサイクルを回すと、放射線が非常に強いMAがかなり発生します。これを廃棄物にすることを社会が受け入れることはかなり難しいと思います。この方法しかないという方針をあらかじめ決めた上で説得するという方法を、原子力は今までやってきたのですが、これからはいろいろなオプションを示してそれに対応できる技術開発をするということが必要だと思います。そのような議論の場を設定すべきだと思います。

澤田 情報提供じゃなくて情報共有の努力ですね。

佐治 国や政治家のリーダーシップに期待したいのですが、彼らは結局、民意に寄り添い過ぎるところがあると思います。この長期政権である安倍政権でさえ、長期的に国益を見据えた視点で取り組んでくれないということが分かってきましたから、彼らには期待できないという気がしています。そうすると、われわれができるのは、今まさに井上さんがおっしゃったような「伝わる」ということ、もう少し言えばわれわれのコミュニティが信頼できるということが分かっているためにはどうするのか。そのために原子力学会は何かできないかという視点で考えてみたいと思います。

澤田 ぜひ具体案を出してください。

国民が、原子力は必要だと思うようになれるかが鍵

田中 井内さんが指摘されたように、国民が原子力はやっぱり必要なんだなというふうに見えるかどうか、勝負のすべてです。そう思えるようにならないと政治家もやってくれない。原子力は必要であり、その原子力は

安全性が高まっていますということを一生涯懸命いろんな機会を利用して訴えていくことがわれわれの義務だと思っています。

小出 原子力学会へのお願いです。IF事故に関してもいろんなレポートを出していますが、基本的にはインナーサークル(部内者)のために発信をしている。送ってこられるプレスリリースにしても、内向きです。

コミュニケーションというのは何を誰に伝えるのかという点が一番の原点です。テーマや相手も、それぞれの場合で違うと思いますが、多くの国民は割と冷静にものを考えるという土壌もあります。基本はエネルギー面における国家の安全保障で、その視点でこの国をどうするのかという議論が根底にないと成り立たない。その枠の中で原子力のことをいろいろ伝える、届けるという方法論をこれから考えていかなければいけないし、そういう方面での人材の育成も必要になってくると思います。これは10年、20年という長いスパンも考えながらの計画とをお願いしたいと思います。

松浦 再度原子力の価値についてですが、もし世界中の人が将来、今われわれが使っているぐらいの生活のレベルをするための電力量を供給しようとしますと、地球では原子力を使わない限り可能ではありません。そういう点では、もう原子力の価値を議論する必要がないくらいははっきりしています。しかし、もし核兵器が使われるような可能性が高くなるようなら、人類として核エネルギー利用を断念すべきと考えます。現在の国際情勢の推移を見ていると懸念が増してきます。

澤田 それは極端な話で、中庸を取っていくのがやっぱり人間の英知であり、これまで経験してきたことだと思います。ヒトが人になる過程で火や言葉を使うようになった。その火に近いものが原子力にあるのかもしれないと思います。松浦さんのおっしゃる二択ではなく、バランスを取る方法があると思います。特にサイクルの実用化においてそのことを日本が世界に向けて規範を示すべきなのではないですか。

井内 安全性の話になると、原子力だけが特別に高い安全性を求められていることがこれまでも不思議でした。東日本大震災にしても、多くの方が亡くなられた津波という自然災害の中で、なぜ、原子力発電所の事故だけは突出して許されないこととされるのか。もちろん、原発事故はあってはならないものですが、原子力だけはゼロリスクが求められると、がんじがらめで何も動かない状況が続くのではないかと感じております。危険なのは原子力だけなのか。原子力だけでなく、化学物質、遺伝子工学、AIなど人間が開発したどんな技術にもリスクはあるということを広く共有して、フラットに議論していける土壌を何とか作れないかと思っております。

佐田 原子力政策は今まで国や専門家が決めて、それで国民を説得するという手法でしたが、それを再考しま

せんか。いっそ住民の人と一緒に決めてはどうでしょうか。例えば1Fの廃炉の最終的な姿は、国や専門家が最適な方法を決めるのではなくて、はじめから住民のみなさんを含めて一緒に決めたらどうか。あるいはもっと広くは原子力の政策そのものの全体をみんなで決めたらどうでしょうか。

さて、今日の1F事故をめぐる話題はとても広範囲にわたるものであり、今日の座談会は全体を考える際の切り口やアジェンダの提示と、その少し先までの展開までという設定で行いました。さらなる展開については別の機会を学会誌ではこれからも数回にわたって企画していきます。

澤田 本日はこの他にも東電裁判、関電問題などを取り上げる予定でしたが、予定された時間が尽きました。本日はみなさん、長時間の座談を有難うございました。学会内外に向けての貴重なメッセージがたくさん得られたと思います。

今回の座談に関して読者の方々の反響を期待したいと思います。

(2020年7月28日、オンライン会議で実施)

井内千穂 (いうち・ちほ)

フリージャーナリスト, 元ジャパンタイムズ

井上 正 (いのうえ・ただし)

電力中央研究所

小出重幸 (こいで・しげゆき)

日本科学技術ジャーナリスト会議, 元読売新聞

佐治悦郎 (さじ・えつろう)

当会理事

佐田 務 (さた・つとむ)

本誌

滝 順一 (たき・じゅんいち)

日本経済新聞

竹内純子 (たけうち・すみこ)

国際環境経済研究所, U3 イノベーションズ

田中治邦 (たなか・はるくに)

日本原燃

松浦祥次郎 (まつうら・しょうじろう)

原子力安全研究協会, 旧日本原子力研究所

藤田玲子 (ふじた・れいこ)

元東芝, 元科学技術振興機構

山口 彰 (やまぐち・あきら)

東京大学

澤田哲生 (さわだ・てつお)

東京工業大学

緊急時海洋環境放射能評価システムの開発

海洋拡散の迅速な予測を可能に

日本原子力研究開発機構 小林 卓也, 川村 英之, 上平 雄基

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構では、放射性物質の海洋拡散挙動を迅速に予測することができる緊急時海洋環境放射能評価システム (STEAMER) を開発した。本稿では、STEAMER を開発するに至った経緯とシステムの概要および利用について解説する。

KEYWORDS: STEAMER, oceanic dispersion prediction, nuclear accident, SEA-GEARN, oceanic dispersion model, predictability, high resolution model

I. はじめに

原子力施設で万一の事故により放射性物質が環境中に放出されると、放射性物質は大気・陸域経由または直接海洋へ放出され、海洋汚染を引き起こす。海洋環境の汚染状況を把握して緊急時対策を検討するために、事故により放出された放射性物質の分布と移行過程を予測することは、日本国内のみならず近年原子力発電所の立地が進む東アジア諸国を包囲する海域において重要である。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)では、放射性物質の海洋拡散モデル(SEA-GEARN)の開発を進めてきた¹⁾。(株)東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所(以下、1F)の事故では、開発したSEA-GEARNを福島沖の海域に適用し、海水中における放射性物質の移行過程を詳細に再現することに成功した²⁾。しかし、これらは事故が発生してから数週間後に過去の海流場を用いて計算を実施したものであり、「将来の汚染状況を把握する」即時予測ではなかった。また、計算に必要な海流場等の入力データの作成や妥当な計算条件の設定に数週間程度の時間を必要とする等、多くの問題を抱えていた。そこで、2014年8月から配信が開始された気象庁の海象予測オンラインデータの活用等によりこれらの課題を解決し、日本を含む東アジア諸国の周辺海域における放射性物質の拡散挙動を迅速に予測することができる緊急時海洋環境放射能評価システム(STEAMER: Short-Term Emergency Assessment

system of Marine Environmental Radioactivity)を開発した³⁾。

筆者らはSTEAMERで実行される海洋拡散予測の精度を定量的に評価するとともに、アンサンブル予測手法を導入することで予測精度が向上することを示した⁴⁾。さらに、領域海洋モデリングシステムを用いたダウンスケーリング手法により、原子力施設周辺の沿岸域を対象とした高分解能モデルを導入し、潮汐を含めた沿岸域の詳細な海象を考慮することに成功した⁵⁾。これら一連の研究成果は学術的に活用できる技術が高く評価され、「第52回日本原子力学会賞技術賞(2019年度)」を受賞した。そこで、本稿ではSTEAMERを開発するに至った経緯とシステムの概要および利用について解説する。

II. システム開発の経緯

STEAMERは原子力機構で培ってきた海洋シミュレーションの技術を統合したものである。そのため、本章ではSTEAMERを開発する以前に原子力機構で実施した主な研究成果について述べる。

1. 下北海域における海洋拡散予測システムの整備

(株)日本原燃が所有する青森県六ヶ所村の使用済燃料再処理施設が本格的に運転される際には、少量ではあるが放射性物質を含む排水が計画的に海洋へ放出される。施設の安全性を確保し、周辺住民への影響を評価する上で、使用済燃料再処理施設の平常運転時および緊急時に海洋へ放出される放射性物質が周辺の下北海域に及ぼす影響を事前に把握しておく必要がある。

このため、原子力機構は、平成7年度から下北海域における海洋拡散予測システムの基盤となるSEA-

Development of Short-Term Emergency Assessment system of Marine Environmental Radioactivity: Takuya Kobayashi, Hideyuki Kawamura, Yuki Kamidaira.

(2020年7月28日受理)

GEARN を整備する事業を公益財団法人日本海洋科学振興財団(以下、海洋財団)から受託してきた。この事業において、海洋財団および原子力機構は当該海域におけるSEA-GEARN のパラメータを最適化し、シミュレーション結果の妥当性を検証した。本事業は現在も継続しており、予測システムの高度化や影響評価解析を実施している。

2. 東日本大震災における対応

(1) 1F 事故に伴う海洋汚染

1F 事故では、放射性物質の海洋放出量が不明な状態が継続し、事故の規模の把握や海産物摂取に対する線量評価のため、放出量を評価することが喫緊の課題であった。そこで、筆者らは、環境影響および線量評価上最も重要な I-131 と Cs-137 の放出量を海水モニタリングデータから推定した。この結果は、その後発表された他の推定結果とも概ね一致し、海洋放出データが全く入手できない状況下でも、海水モニタリングデータから放出量を推定できることを実証した。

海洋拡散シミュレーションを実施するにあたり、福島沖の海流場を詳細に計算することが課題であった。そこで、筆者らは国立大学法人京都大学(以下、京大)、国立研究開発法人海洋研究開発機構(以下、海洋機構)および海洋財団の協力を得て、前述した下北海域における海洋拡散予測システムを福島沖に適用し、事故後数週間福島沖の海流場の計算ができる体制を整備した。前述の海洋への直接放出量と世界版緊急時環境線量情報予測システム第2版(WSPPEEDI-II)⁶⁾による大気拡散シミュレーションで計算した海洋表面への沈着量を放出源として、I-131 と Cs-137 の海洋拡散シミュレーションを実施した。シミュレーション結果は、観測された I-131 と Cs-137 の海水中濃度を良好に再現した。また、シミュレーション結果から、大気放出量が3月15日に増大したことに伴い、福島と宮城の沿岸域および宮城の北東方向の海域で高い濃度の放射性物質が沈着したことや、黒潮続流域に到達した放射性物質は活発な渦活動によって希釈されながら東方向に輸送されたこと等を示した。

(2) 洋上漂流物シミュレーション

STEAMER の基盤である SEA-GEARN は、放射性物質を対象とした海洋拡散シミュレーションだけではなく、一般の環境問題にも適用されてきた。その一例として、SEA-GEARN は、東日本大震災により流出した洋上漂流物のシミュレーションに適用された。洋上漂流物は、海洋環境を汚染するだけでなく、航行船舶へ被害を与え、付着した生物により生態系へ悪影響を与えることが懸念された。そのため、洋上漂流物の国内外への漂着の可能性や太平洋上の分布状況を把握し、関係諸国への適切な情報提供を検討するため、洋上漂流物シミュレーションが実施された。このプロジェクトは、環境省の

下、京大、海洋機構等により実施され、原子力機構は研究協力機関として参加した。洋上漂流物シミュレーションは、SEA-GEARN に海上風と海流のデータを入力して実施された。シミュレーション結果は、観測された洋上漂流物の分布を良好に再現し、アリューシャン低気圧、北太平洋高気圧、黒潮続流等が洋上漂流物の分布に大きな影響を与えることを示した。さらに、数年先までの予測を実施し、将来の洋上漂流物の北太平洋周辺諸国への漂着時期や場所等を予測した。

III. システムの概要

1. STEAMER の構成と計算機能

STEAMER は、気象庁と米国海洋大気庁の海象予測オンラインデータを基に、放射性物質の海洋放出量の情報と SEA-GEARN を用いることで、将来の海水中および海底堆積物中の放射性物質の濃度を予測することができるシステムである(図1)。また、WSPPEEDI-II と結合して用いることで、大気を経由して海洋へ沈着する放射性物質の分布を予測することもできる。本章では、STEAMER で用いる海象データと海洋拡散モデルおよび STEAMER の計算機能について解説する。

(1) 海象データ

STEAMER では、気象庁のシステム(MOVE/MRI.COM)⁷⁾と米国海洋大気庁のシステム(Global RTOFS)⁸⁾で予測される海象データを毎日自動受信している。MOVE/MRI.COM には、全球、北太平洋および北西太平洋を対象としたシステムがあるが、STEAMER では

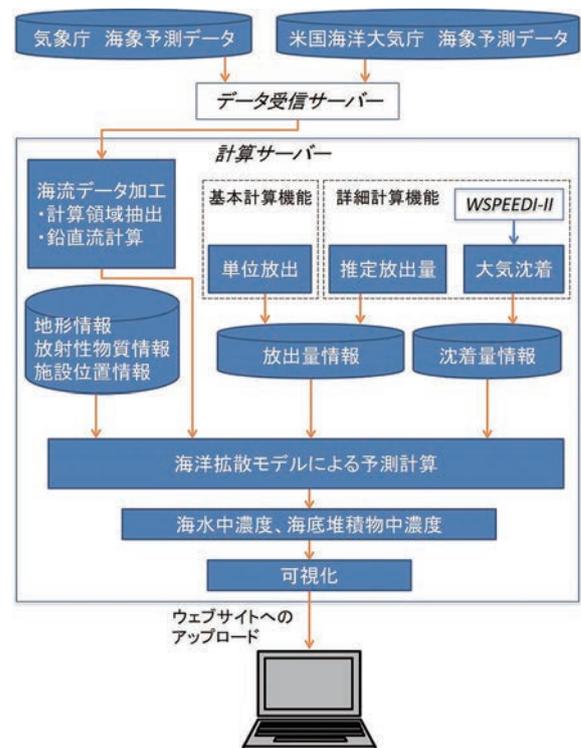


図1 STEAMER のシステム構成

北太平洋版(MOVE/MRI.COM-NP)と北西太平洋版(MOVE/MRI.COM-WNP)で予測される海象データを受信している。MOVE/MRI.COM-NPでは、東西南北方向ともに $1/2^\circ$ の水平分解能で30日先までの海象を予測している。MOVE/MRI.COM-WNPでは、日本周辺海域を東西南北方向ともに $1/10^\circ$ の水平分解能で30日先までの海象を予測している。一方、Global RTOFSは、全球を対象とした東西南北方向ともに $1/12^\circ$ の水平分解能を有するシステムであり、8日先までの海象を予測している。

(2) 海洋拡散モデル

SEA-GEARNは、放射性物質を模擬した多数の粒子群をランダムウォークモデルで追跡することで放射性物質の移流・拡散を計算する手法を採用している。また、SEA-GEARNでは溶存相、大粒子相および海底堆積相の放射性物質の交換過程を計算することができる(図2)。各相の定義は、海水中の放射性物質および現場濾過器のフィルターを通過する沈降速度を持たない微小粒子に吸着した放射性物質を溶存相、沈降速度を持つ大粒子に吸着した放射性物質を大粒子相、海底に堆積した放射性物質を海底堆積相としている。各相間における放射性物質の移行は、速度定数を用いた吸脱着、堆積、再浮遊によって可逆的に行われる。

(3) STEAMERの計算機能

現在のシステムは、筆者らのグループ内で構築したクラスターマシンにおいて運用している。システムの計算機能として、基本計算機能と詳細計算機能を整備した。

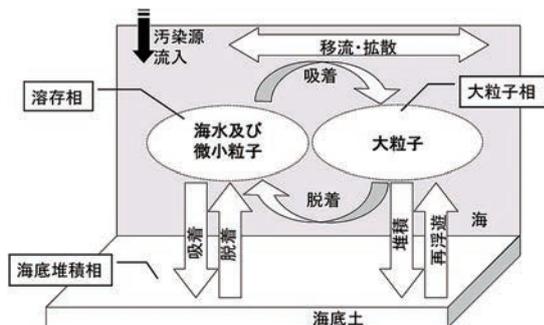


図2 放射性物質の3相(溶存相, 大粒子相, 海底堆積相)間の相互作用。

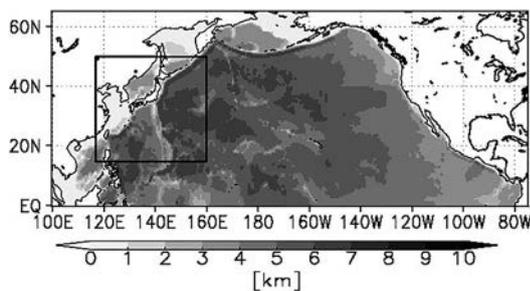


図3 STEAMERの海洋拡散シミュレーションの対象海域である北太平洋域と北西太平洋域(四角内)。数値は水深(km)を示す。

両計算機能ともに、北太平洋と北西太平洋を対象とした海洋拡散を計算することができる(図3)。基本計算機能では、日本を含む東アジア諸国の原子力施設と米国の原子力艦船の停泊港の位置情報が登録されており、これらの施設で事故が発生した際には、単位放出条件(1 Bq h^{-1} の放出)を用いて迅速に海洋拡散予測を実施することができる。また、登録された施設から海洋への直接放出を想定した事前予測を毎日自動で実施する機能も備えている。筆者らは、2014年9月から現在に至るまで自動計算機能を用いて、1Fを含む複数の原子力施設から放出される放射性物質を想定した事前予測を継続しており、システムの安定性や堅牢性を確認している。

登録地点以外で事故が発生した場合、大気を経由して海洋へ沈着する放射性物質を考慮する場合、放射性物質の放出量情報が事故の進展に伴い明らかになった場合等は、計算条件の変更が必要となる。そのため、詳細計算機能として、放射性物質の種類、放出海域の位置、放出形態(海洋への直接放出, 大気から海洋への沈着), 放出量情報等の計算条件を詳細に設定した海洋拡散予測を実施することができる。

2. STEAMERの性能評価

STEAMERは、開発当初から原子力機構内で試験運用され、安定性や堅牢性を有する実用的なシステムであることが実証された。ここでは、STEAMERの性能に関して、海洋拡散予測の精度と高分解能モデルについて述べる。

(1) 海洋拡散予測の精度検証

STEAMERが受信する海象データには、予測データに加えて、受信する当日の海象場に相当する初期値データ(再解析データ)が含まれる。再解析データは、予測開始日までに得られた観測データをシミュレーションに融合させることにより、高い精度を有している。そのため、STEAMERの開発当初から蓄積された日々の再解析データは、事後解析等を行うのに最適なデータと考えることができる。海洋拡散予測の精度は、海象の再解析データを入力した海洋拡散シミュレーション(再解析シミュレーション)の結果を真値として、海象の予測データを入力した海洋拡散シミュレーション(予測シミュレーション)の結果を真値と比較することで検証した⁴⁾。海洋拡散シミュレーションは、1Fから仮想的に放出されたCs-137を対象とし、2015年1月から2017年12月までの各月初日から30日間の再解析シミュレーションと予測シミュレーションを実行した。再解析シミュレーションと予測シミュレーションの相違は、平均的には予測期間が長くなるとともに大きくなったが、シミュレーションの対象期間により予測精度は異なっていた。このことは、予測精度は対象期間の海象に依存し、例えば低気圧等に伴うような海象の変動が激しい期間では、正確

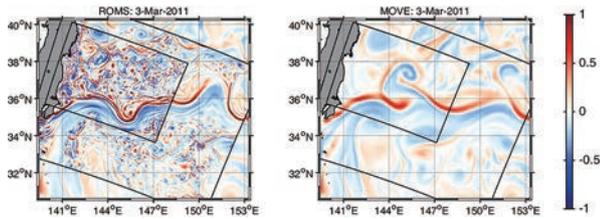


図4 2011年3月3日の海表面の渦運動の大きさ。左：高分解能モデルによる計算結果，右：MOVE/MRI.COM-WNPによる計算結果。

な予測は困難になると考えられる。

現在運用している STEAMER では、同一の計算条件に対して、1 ケースの海洋拡散予測を実施している。一般的には、1 ケースの予測では正確な予測は困難であり、複数の予測の平均や分散等で評価するアンサンブル予測は、予測精度を向上させる有効な手段である。そのため、一定の時間間隔を持つ複数の初期値からアンサンブル予測を実施するラグ平均予測法を適用し、アンサンブル予測による精度が単一予測の精度を上回ることを定量的に示した。今後は、検証したアンサンブル予測手法を STEAMER に導入する予定である。

(2) 高分解能化

海洋拡散シミュレーションの予測精度は入力する海象データに大きく依存するため、高精度な海象データが必要である。STEAMER が受信する海象データのの一つを計算する MOVE/MRI.COM-WNP は、さまざまな観測データをモデルに同化し、モデルの力学的整合性を保持しながら現実に近い海象を再現して予測を行うシステムである。その水平分解能は日本周辺海域で $1/10^\circ$ であり、沿岸域の複雑な流れや微小な渦等の局地スケールの海象を考慮することは困難であると考えられる。このような局地スケールの海象をモデルで考慮するには、一般的に $1/100^\circ$ 程度の水平分解能が必要とされている。

そこで、ダウンスケーリング手法を適用し、福島沿岸域を対象とした約 $1/100^\circ$ の水平分解能を有するモデルを開発した⁵⁾。これにより、計算領域は限定されるが、原子力施設周辺の沿岸域における詳細な海象を計算することが可能となり(図4)、海洋拡散予測の精度が向上することが期待できる。今後は、ダウンスケーリング手法による高分解能モデルを STEAMER に導入する予定である。

IV. システムの利用

STEAMER の基本計算機能を用いた即時予測と事前予測により得られる海洋汚染状況の予測情報および詳細計算機能を用いた解析は、原子力事故が発生した際、以下のような緊急時対策の検討および事故の状況把握に役立つ。

—実際の汚染海域を調査するための緊急時海洋モニタリング測点の設定

—海洋拡散モデルと海洋モニタリングデータを用いた放射性物質の海洋への放出量推定

—大気拡散モデル、海洋拡散モデルおよび大気/海洋モニタリングデータを用いた放射性物質の大気への放出量推定

—上記の推定放出量を用いた海洋汚染状況の事後解析と将来予測

—海産物および脱塩水の摂取に伴う内部被ばくを防ぐための禁漁海域および航行禁止海域の設定

なお、Ⅲ章1節で述べた自動計算機能を用いた事前予測による原子力施設からの放射性物質の仮想放出計算の結果は、すでに2,000パターン以上得られている。これらのシミュレーション結果を解析することにより、対象施設の周辺海域における放射性物質の移行について、主要な移行パターンや季節変動等の特徴を抽出することができる。このように、各施設の周辺海域における放射性物質の移行を事前に把握しておくことは緊急時対策の備えとして有効である。

1Fの廃炉作業の一環として、多核種除去設備等で処理した水、いわゆる「ALPS処理水」の処分について、政府がALPS処理水の処分方法を決定するための判断材料を専門的な見地から提供する「多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会」(以下、小委員会)では、『前例のある水蒸気放出および海洋放出が現実的な選択肢である』ことを報告した⁹⁾。また、小委員会では、『事前に拡散シミュレーション等を行い、周辺環境の安全性に関して問題のないことも示していくべきである』とも報告している。現在、政府でALPS処理水の処分について議論されているが、地元を始め幅広い関係者の意見を聞く中において、ALPS処理水の処分による風評への影響を抑えるためのわかりやすい情報発信が必要と指摘されている。そのために、拡散シミュレーションを用いて環境に放出されたALPS処理水の濃度が十分に低いことを可視化し、安全性を示すことは一つの選択肢となり得る。このように、STEAMERは1Fの廃炉対策に活用されることが期待できる。

V. おわりに

本稿では、筆者らが開発した STEAMER について解説した。現在は、スーパーコンピュータにシステムを移植し、計算の高速化および大規模化を目的とした作業を進行している。今後はシステムの高度化として、Ⅲ章2節で述べたアンサンブル予測手法や高分解能モデルを STEAMER に導入する予定である。

システムの社会実装として、シミュレーション結果の参照を希望する省庁に対して Web 閲覧が可能となる体制整備を実現させたが、今後は自治体や1F廃炉対策等への情報配信も可能となるようにシステムの高度化を継続し、情報を発信する予定である。

— 参考資料 —

- 1) T. Kobayashi, S. Otsuka, O. Togawa, K. Hayashi, Development of a non-conservative radionuclides dispersion model in the ocean and its application to surface cesium-137 dispersion in the Irish Sea. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 44, 238-247 (2007).
- 2) H. Kawamura, T. Kobayashi, A. Furuno, T. In, Y. Ishikawa, T. Nakayama, S. Shima, T. Awaji, Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of ^{131}I and ^{137}Cs discharged into the ocean because of the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 48, 1349-1356 (2011).
- 3) T. Kobayashi, H. Kawamura, K. Fujii, Y. Kamidaira, Development of a short-term emergency assessment system of the marine environmental radioactivity around Japan. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 54, 609-616 (2017).
- 4) H. Kawamura, Y. Kamidaira, T. Kobayashi, Predictability of a short-term emergency assessment system of the marine environmental radioactivity. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 57, 472-485 (2020).
- 5) Y. Kamidaira, H. Kawamura, T. Kobayashi, Y. Uchiyama, Development of regional downscaling capability in STEAMER ocean prediction system based on multi-nested ROMS model. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 56, 752-763 (2019).
- 6) H. Terada, H. Nagai, A. Furuno, T. Kakefuda, T. Harayama, M. Chino, Development of worldwide version of system for prediction of environmental emergency dose information: WSPEEDI 2nd version. *Trans. At. Energy Soc. Jpn.*, 7, 257-267 (2008) (in Japanese with English abstract).
- 7) N. Usui, S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda, M. Kamachi, Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: some early results. *Adv. Space Res.*, 37, 806-822 (2006).
- 8) Z. D. Garraffo, H.-C. Kim, A. Mehra, T. Spindler, I. Rivin, H. L. Tolman, Modeling of ^{137}Cs as a tracer in a regional model for the western Pacific, after the Fukushima-Daiichi nuclear power plant accident of March 2011. *Weather Forecast.*, 31, 553-579 (2016).
- 9) 多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会報告書, 2020年2月10日, <https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/takakusyu/report.html>, (参照 2020-08-17).

著者紹介



小林卓也 (こばやし・たくや)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)環境放射能, 海岸工学



川村英之 (かわむら・ひでゆき)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)環境放射能, 海洋物理学



上平雄基 (かみだいら・ゆうき)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)海洋物理学, 海岸工学

3次元有限要素法による2011年東北地方太平洋沖地震 本震時の東京電力福島第一原子力発電所1号機の応答 解析

東京大学 吉村 忍, 山田 知典,
日本大学 宮村 倫司

著者らがスーパーコンピュータ「京」向けに機能と性能の向上を図ったFEM解析システムADVENTURE_Solid Ver.2およびプリ・ポスト処理用付帯システムを用いて、東北地方太平洋沖本震時の東京電力福島第一原子力発電所1号機の地震応答を詳細に解析した。集中質量モデルと本3次元FEMモデルの解析結果は、巨視的な地震応答解析性能に関して概ね良好に一致し、相互に解析精度を検証できた。3次元FEMモデルの解析から同1号機の地震応答の様子を詳細に捉えることができ、発生応力値は比較的低い値であったことも確認できた。

KEYWORDS: *three-dimensional finite element method, seismic response analysis, parallel calculation, K computer, BWR, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, lumped mass model, model construction, visualization*

I. 研究動機

日本のような地震多発国において、原子力発電所を設置し安全に稼働させる上で、耐震設計は大変重要である。特にその重要性が再認識されたのが、2007年7月16日に発生したマグニチュード6.8の新潟県中越沖地震であった。この地震によって、震央から約16km地点にある東京電力柏崎刈羽原子力発電所では敷地内で震度7を記録し、被害が発生した。地震発生時、全7基のプラントのうち3, 4, 7号機は100%出力で運転中であり、観測された最大加速度が設計時の基準地震動から予測された最大応答加速度を超え、観測記録の加速度応答スペクトルが広い振動数範囲で設計時の基準地震動の加速度応答スペクトルを大幅に上回った。中越沖地震においては、安全上重要な機器・構造物に損傷はほとんどみられなかったものの^{1, 2)}、地震後の安全性の点検や地震対策のためにプラントが長期間停止することとなった。

吉村らは、中越沖地震時の柏崎刈羽原子力発電所の原子炉の地震応答の様子を詳細に再現すべく、同発電所の

沸騰水型原子炉(BWR)5号機および改良型沸騰水型原子炉(ABWR)7号機の解析を、3次元有限要素法(以下FEM)を用いて行った。加振条件としては、観測地震波および改訂された設計地震動を用いた。その結果の一部であるBWR5号機を対象とし観測地震波を加振条件として用いた解析結果を2012年に日本原子力学会和文論文誌³⁾に、2015年に同英文誌⁴⁾に発表した。上記の解析は2008年から2010年にかけて行われ、その結果は日本原子力学会の講演会などで発表されてきたが、それを論文にまとめる作業を行っている最中の2011年3月11日に、マグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。この巨大地震の発生により、同地域沿岸に立地する4か所の原子力発電所(東京電力福島第一原子力発電所、同第二原子力発電所、東北電力女川原子力発電所、日本原子力発電東海第二発電所)の14基(総電気出力1,237万KW)のプラントのうち当時稼働中であった11基すべてにおいて制御棒が挿入され自動停止(スクラム)し、そのうち8基は冷温停止し安定した状態になった。しかし、地震の後に発生した津波により被災した東京電力福島第一原子力発電所の6基のプラントのうち、第1~4号機で原子炉や使用済み燃料プールの冷却機能の喪失により重大な事故が発生した。さまざまな事故調査報告書において、上記事故の主要因は設計想定を大幅に超える津波による全電源喪失とそれに伴う全冷却機能の喪失といわれている^{5~9)}。また、同発電所の耐震評価について

Seismic Response Analysis of Unit 1 of Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant During the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Using Three Dimensional Finite Element Method: Shinobu Yoshimura, Tomonori Yamada, Tomoshi Miyamura.

(2020年7月4日 受理)

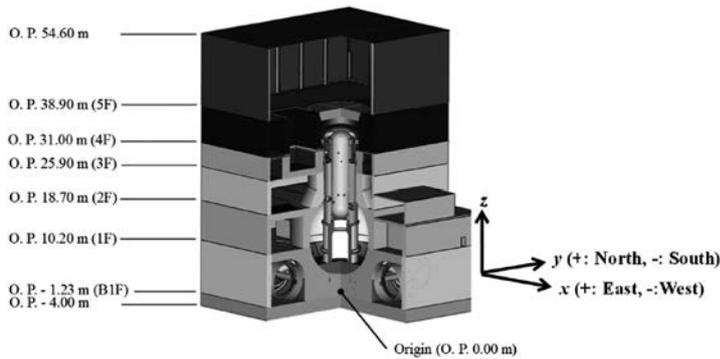


図1 1/4をカットした建屋および圧力バウンダリー部のCADモデルの鳥瞰図

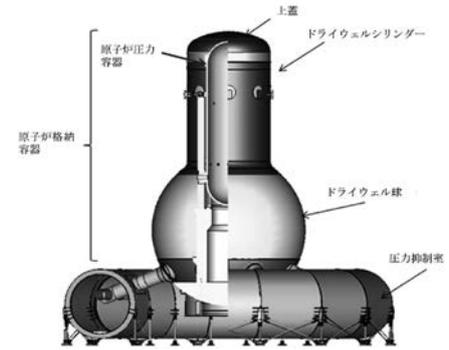


図2 圧力バウンダリー部のCADモデル

は、事故前にも事故後にも標準的な集中質量系モデルに基づく耐震モデルを用いた評価が行われ公表されている^{10, 11)}。

しかしながら、今後も大きな地震の発生は予想される場所であり、原子力発電所の今後の耐震安全性への高度化要求を考えると、上記の地震発生時に福島第一原子力発電所がどのような応答をしていたのかについて3次元FEMによって詳細に把握することは、設計地震動を越える地震力に対する原子力発電所の状態を詳細に把握する上で大変有用であると考えます。また、3次元FEMを原子力発電所の詳細耐震解析に適用する上での技術的課題を明らかにしておくこともその実用化を図る上で大変重要と考えます。

そこで、本研究では、前報^{3, 4)}で発表した3次元FEMに基づく解析手法を、解析モデルの構築、解析、解析結果のポスト処理の各プロセスにおいて、それぞれさらに発展させ、2012年から稼働を開始していたスーパーコンピュータ「京」を活用し、東北地方太平洋沖地震本震時の東京電力福島第一原子力発電所1号機(1F1)の応答を解析した^{12, 13)}。

II. フルスケール3次元FEMモデルの概要

本研究では、原子炉圧力容器、原子炉格納容器、サブレーションチェンバ(圧力抑制室)、ベント管などの主要な圧力バウンダリー機器と原子炉建屋およびそれらの接続部をすべて3次元FEMにより詳細にモデル化(このモデルをフルスケール3次元FEMモデルと称する)した。図1と図2にCADモデルの一部を示す。そして、図3の右部分に示す集中質量系モデルによる原子炉-建屋-地盤連成モデルに基づく耐震解析から得られた建屋下部への並進および回転の加速度時刻歴を入力し解析を行った。4面体1次要素に基づく約2億自由度規模モデル(1次要素モデル)を用いて65秒間(観測記録の80秒から145秒まで)の地震応答解析を陰的時間積分法であるNewmark β 法により行い、時間刻み幅として $\Delta t=0.01$ 秒を用いた。また、この解析の検証のために同

一メッシュ分割の4面体2次要素に基づく約15億自由度規模モデル(2次要素モデル)を用いて4.6秒間(観測記録の80秒から84.6秒まで)の地震応答解析も行った。

III. 集中質量系モデル、小規模3次元FEMモデルと比較したフルスケール3次元FEMモデルの特徴

わが国の重要構造物や施設の耐震設計評価には長年集中質量系モデルが使われてきており、東京電力福島第一原子力発電所の耐震評価においても、事故前、事故後共に標準的な集中質量系モデルに基づく評価が行われ公表された^{10, 11)}。一方、欧米では3次元FEMモデルを用いた耐震解析が行われているものの、採用されているFEMモデルは原子力発電所の巨大さや複雑さと比べて、詳細度の低い小規模モデルに留まっている。わが国の集中質量系モデルにしても、欧米の小規模3次元FEMモデルにしても、耐震設計規格に基づき設定される安全裕度を適切に考慮しながら使用されるため、原子力発電所の設計時における巨視的な地震応答挙動の評価には十分であったと言える。しかしながら、既設原子力発電所が設計想定を超えるような大きな地震力に晒される場合には、各機器の詳細な細部の耐震実力評価を行うには必ずしも効率的ではないのではないかと考えている。今後も設計想定を超える大きな地震の発生は予想される場所であり、原子力発電所の耐震安全性のより一層の高度化を目指すためには、東北地方太平洋沖地震発生時に福島第一原子力発電所がどのような応答をしていたのかについてフルスケール3次元FEM解析によって詳細に把握することが、原子力耐震工学という学問的観点から本質的に大変有用であると考えている。

IV. 計算力学・計算科学の学術的観点

計算力学・計算科学の学術的観点から見ると、IIIで述べた原子力耐震工学の本質的課題に立ち向かうことは、一般に用いられている汎用FEMコードに実装されているアルゴリズムを並列化し、並列計算機上で稼働させればよいという単純な話ではない。実機の極めて複雑な形

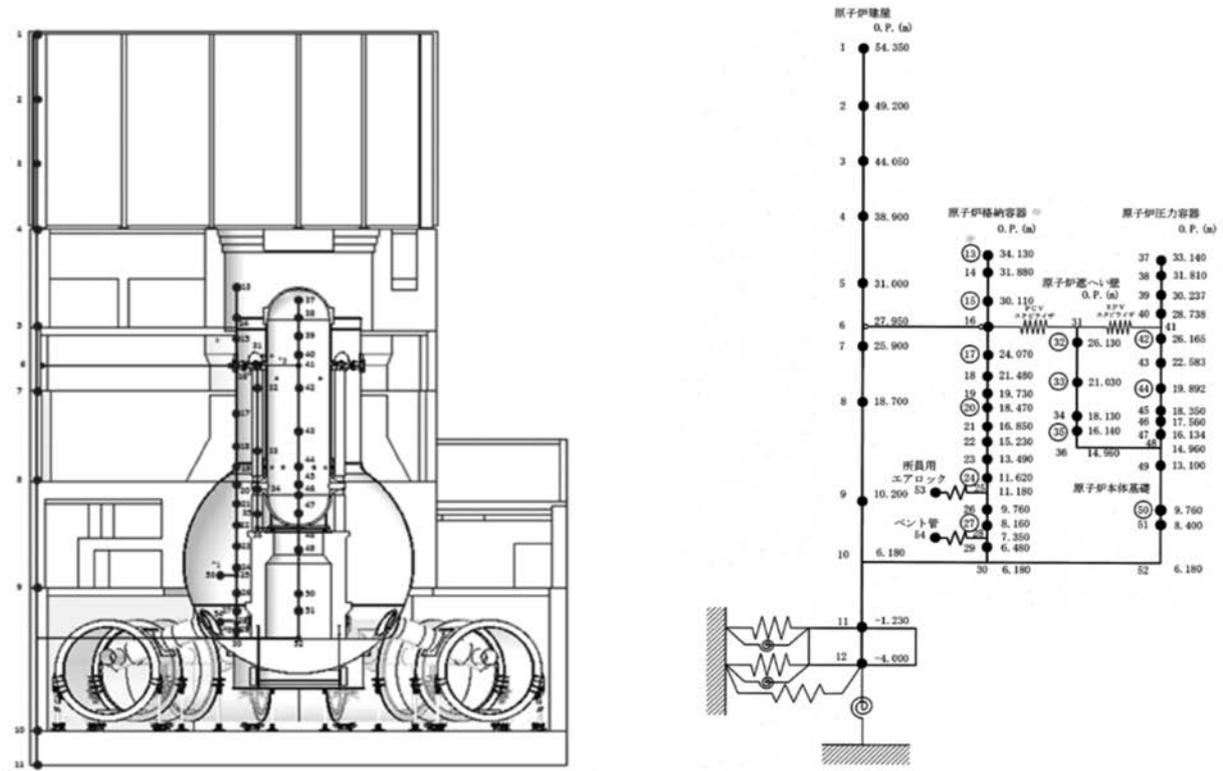


図3 CADモデル(左)と集中質量系モデル(右)

状を扱いかつ億を超える大自由度のモデルを用いたFEM解析を、安定して高精度かつ高速に解けるようにするということが挑戦的課題となる。そのためには、それを実現する革新的な理論・アルゴリズムと実装技術が必須であり、本研究で用いた解析技術には、著者らが長年研究開発を行ってきた階層型領域分割法(HDDM)、BDD前処理法等の複数の卓越した独創的な研究成果が統合実装されている。また、過去にこのような超大規模モデルを用いたフルスケール3次元FEMによる耐震解析の事例が存在しなかったことから、本研究においては、実機の細部のモデル化法、メッシュ構築、各種物性値や解析条件付与等について、さまざまな試行錯誤と新規の工夫が必須であった。また、ポスト処理に関しても、V&V(Verification&Validation)を念頭においた解析結果の抽出や自動分析を実現する新規の理論・アルゴリズムと付帯システムの研究開発が必須であった。

本研究の着手から本論文発行までに8年以上にわたる長期の研究の取り組みが必要であったが、解析、モデル構築、結果の処理等に関する技術的課題を一つ一つクリアしてここに辿り着いたことにより、フルスケール3次元FEM解析に基づく原子力発電所の耐震解析技術の実用化に向けた扉が開かれたと言える。

本研究で示した手法は、建屋-原子炉格納容器-原子炉圧力容器-サプレッションチェンバーベント管等の連成系の相互作用をフルスケール3次元FEMモデルにより詳細に表現するとともに、各機器や機器の接続部の詳

細変形挙動も同時に解析する手法となっている。この結果、種々の仮定や過度のモデルの簡略化が排除されているために、定量的にも視覚的にも耐震性能の実力に関して大変に詳細な情報を得ることができる。論文¹³⁾中には、解析結果の静止画のみしか掲載できなかったが、実際にはさまざまな視点からの動画も作成しており、動的応答に関し有用な情報を得ることもできた。

V. 主要な結論

本研究から得られた主要な結論の要点を以下に記す。

- ①原子炉圧力容器-原子炉格納容器-原子炉建屋-地盤連成系の集中質量系モデルによる解析から得られた質点位置における最大加速度の高さ方向分布およびさまざまな部位における床応答スペクトルと、フルスケール3次元FEM解析から得られた同じ標高位置における節点に対する最大加速度分布と、床応答スペクトルをそれぞれ比較した。その結果、最大加速度の高さ分布に関しては、鉄骨構造であり重量以外は正しくモデル化していない建屋最上階部分を除いて、3次元FEMモデルと集中質量系モデルの解析結果は概ね良好な一致を示した。また、床応答スペクトルに関しては、集中質量系モデルの各質点位置に対応する3次元FEMモデルの複数節点における水平方向の床応答スペクトルは、どの節点においても概ね同じ結果となった。また、原子炉圧力容器の床応答スペクトルについては、すべての周期において定量的にもよく一致した。以上

の結果から、巨視的な地震応答解析性能に関して、原子炉压力容器-原子炉格納容器-原子炉建屋連成系の集中質量系モデルと、本研究で開発したフルスケール3次元FEMモデルを相互に検証することができた。

②3次元FEM解析結果をポスト処理し、各コンポーネントの応力分布や時間変動を可視化した。その結果から、東日本大震災本震時の地震応答の様子をより詳しく捉えることができた。図4に一例として時刻118.58秒における応力分布と変形の瞬間値を示す(カラー図は目次ページ参照)。同図より炉容器や格納容器のスタビライザ・サポート部やサプレッション・チェンバやその支柱に相対的に高応力部が確認される。

さらに、図5に示すように各機器に生じた最大相当応力を求めることもできた。スタビライザーおよびサプレッションチェンバの支柱やブレースについては、一部で瞬間的に局所的に応力が高くなったが、細部でモデルを簡略化しているため、全体としての剛性は良好に表現できていると考えられるものの、そこに生じる局所的な応力値等については参考値とするのが妥当であると考えている。一方、それ以外のコンポーネントにおいては、現状においてベストエスティメートに近い値が得られたと考えている。その結果を見ると東日本大震災時の本震時に東京電力福島第一原子力発電所1号機に生じた応力値は比較的低い値であったことが確認できた。

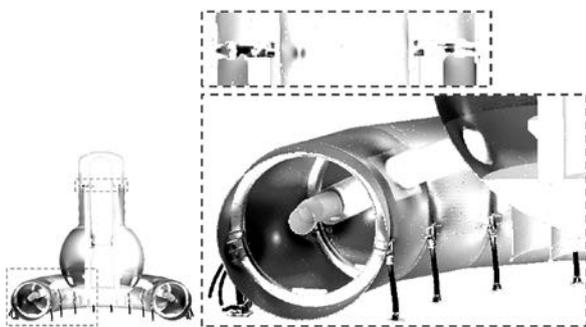


図4 時刻118.58秒における応力分布と変形の例
(白：0 MPa, 黒：50 MPa) (変位は100倍に拡大)

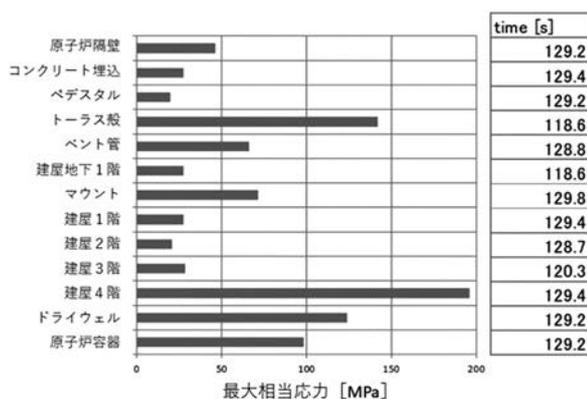


図5 機器毎の最大相当応力とその発生時刻

VI. 今後の展望

現状においては、現実の原子力発電所のフルスケール3次元FEMモデルを構築することはもちろん、解析にもポスト処理にも多大な計算機資源と労力を必要とする。しかし、スーパーコンピュータ「京」のようなペタスケールの演算性能を有するコンピュータが活用できるようになり、その上で十分な計算性能を発揮する汎用FEM解析システムADVENTUREが登場したことにより、そうした解析が実現でき、大変に複雑で大規模な原子力発電所の地震応答挙動を細部にわたって詳細に検討できることも実証された。この規模のフルスケール3次元FEM解析は、集中質量系モデルと比べて比較にならないほど膨大な計算機資源と労力を要するため、現時点では設計段階で活用するには不向きかもしれない。しかし、既設原子力発電所が設計想定を超えるような強い地震力を受ける際の耐震性能に関する実力を評価する大変有用なツールとなる。また、東北地方太平洋沖地震と津波によって大きな被害を受けた福島第一発電所の現状の耐震安全性を評価する上でも大変有用なツールになるだろう。

著者らは、文部科学省フラッグシップ2020ポスト「京」重点課題⑥「革新的クリーンエネルギーシステムの実用化」プロジェクト(2015.12-2020.3)および、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用」プロジェクト(2020.4-2023.3)を推進しており、その中でADVENTURE_Solidコードの「富岳」向けチューニングを遂行中であり、「京」と比べて35倍以上の性能向上を達成できる見込みである。そうすると、本研究において示した計算時間は大幅に短縮されることとなり、その実活用が現実のものとなってくる。

— 参考資料 —

- 1) Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA), *Report on the Facility Soundness Evaluation of Unit 7 of TEPCO's Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station*, NISA (2009), [in Japanese].
- 2) Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA), *Report on the Aseismic Reliability Evaluation of Unit 5 of TEPCO's Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station*, NISA (2010), [in Japanese].
- 3) S. Yoshimura, K. Kobayashi, H. Akiba, S. Suzuki, M. Ogino, "Seismic response analysis of full-scale boiling water reactor using three-dimensional finite element method," *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, **11**[3], 203-221 (2012), [in Japanese].
- 4) S. Yoshimura, K. Kobayashi, H. Akiba, S. Suzuki, M. Ogino, "Seismic response analysis of full scale boiling water reactor using three dimensional finite element method," *Journal of*

- Nuclear Science and Technology*, 52[4] 546-567 (2015).
- 5) Report of Investigation Committee of the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company, (Interim Report, 26 December, 2011) (Final Report, 23 July, 2012).
 - 6) Report of National Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Committee, 5 July, 2012, [in Japanese].
 - 7) Report of Independent Investigation Commission on the Fukushima Daiichi Nuclear Accident, 11 March, 2012, [in Japanese].
 - 8) TEPCO Report on Fukushima Nuclear Accident, 20 June, 2012, [in Japanese].
 - 9) AESJ Report on Fukushima Daiichi Nuclear Accident - Its Actual View and Proposal to Tomorrow, Maruzen, March, 2014, [in Japanese].
 - 10) TEPCO Interim Report on Re-evaluation Results of Seismic Safety of Fukushima Daiichi and Daini Nuclear Power Stations Following the Revision of the Seismic Design Regulatory Guide for Nuclear Power Reactor Facilities, March, 2008, [in Japanese].
 - 11) TEPCO Report on Seismic Response Analysis Results of Building and Important Components and Piping in Fukushima- Daiichi Nuclear Power Stations Utilizing Observed Data during the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, 28 July, 2011, [in Japanese].
 - 12) S. Yoshimura, T. Miyamura, T. Yamada, H. Akiba, H. Kiyoura, "Seismic response analysis of Unit 1 of Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake using three dimensional finite element method (1st report: Development of analysis method, model construction and

verification of analysis performances)," *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, 18[3], 135-159 (2019).

- 13) S. Yoshimura, T. Miyamura, T. Yamada, H. Akiba, H. Kiyoura, "Seismic response analysis of Unit 1 of Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake using three dimensional finite element method (2nd report: Results of eigen analysis and seismic response analysis)," *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, 18[3], 160-190 (2019).

著者紹介



吉村 忍 (よしむら・しのぶ)

東京大学大学院工学系研究科
(専門分野/関心分野)ハイパフォーマンス
知的シミュレーションの研究開発と、
工学・社会・環境分野への適用



山田知典 (やまだ・ともりの)

東京大学大学院工学系研究科
(専門分野/関心分野)計算力学, ハイパ
フォーマンスコンピューティング, マルチ
フィジックスシミュレーション, 機械学習



宮村倫司 (みやむら・ともし)

日本大学工学部情報工学科
(専門分野/関心分野)大規模並列有限要素
法, 固体・構造解析, 重要構造物の高精細
な地震応答シミュレーション



From Editors 編集委員会からのお知らせ

ー最近の編集委員会の話題よりー

(10月6日 第4回論文誌編集幹事会)

- ・テレビ会議システムを使ったりリモート会議を実施した。
- ・8月16日から9月15日までに英文論文誌に23報, 和文論文誌に5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. 3の翻訳が終了し最後の記事の校閲中。Vol. 1と4の製版を開始している。
- ・学会賞論文賞への応募のための推薦書内容を確認した。
- ・政府系事業の公開報告書および学位論文に関する投稿論文の新規性に関して, 意見が交換された。
- ・2021年が福島事故10年に当たり, 関連 Review を依頼することとした。また, Virtual Issueとして事故関連の10数編の論文を無料公開する。
- ・福島廃止措置特集号への投稿状況が報告された。
- ・計算科学分野を独立の投稿区分とはしないこととした。

(10月6日 第4回学会誌編集幹事会)

- ・テレビ会議システムを使ったりリモート会議を実施した。
- ・委員長から理事会報告があり, 河出編集顧問の後任として, 伊藤秋男氏(京大名誉)が承認されたという報告があった。
- ・「福島事故から10年」の1月号特集の自治体首長の依頼状況と2月号特集の有識者の依頼状況について, 編集長から報告があった。
- ・新企画案「原子力の未来を予測する, 創る」について佐治理事より進捗状況の説明があった。
- ・学会誌電子化調査内容について最終案の説明が編集長からあった。委員長, 副委員長に理事会で報告していただく予定。
- ・学会誌9月号アンケート回答結果を確認した。
- ・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。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

福島第一原子力発電所廃炉作業環境における 遠隔放射線イメージング技術の開発と実証

統合型放射線イメージングシステム iRIS の構築

日本原子力研究開発機構 佐藤 優樹, 寺阪 祐太, 鳥居 建男

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉作業を円滑に進めるにあたり、作業環境に飛散・沈着した放射性物質の分布を“見える化”して把握することは、作業者の被ばく線量の低減や詳細な作業計画の立案を行う上で重要である。ここでは私たちが福島第一原子力発電所やその周辺で行なってきた放射線イメージング技術の開発および現場における実証例を紹介する。

KEYWORDS: *Radiation imaging, Remote sensing, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident*

I. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所(以下、「東京電力HD」、「1F」という)の事故から9年の歳月が流れた。1Fの構内は現在、フェーシングによる舗装や構内除染などで空間線量率の低減化が進み、そのほとんどが一般作業服で作業可能なエリアとなっている。しかし一方で、原子炉建屋をはじめとした建屋内には作業者の立ち入りが困難または長時間の作業が実施できない高線量率のエリアが少なくなく、さらには詳細な放射性物質の分布が把握されていないエリアも依然として存在する。このようなエリアにおいて、作業者の被ばく線量の低減や作業計画の立案を実施しつつ除染や解体を進めるためには、放射性物質の分布を把握することが重要である。

放射性物質が飛散・沈着した1F建屋内では、床面や壁面、多数の機器や瓦礫といった複数個所に放射性物質が分布している。このような高線量率な環境の中で主要な汚染源を含む放射性物質の分布を把握することができれば、除染対象を決定することができるだけでなく、ど

の汚染源を除去すれば周囲の空間線量率を低減することができるのか、複数ある汚染源についてどの順番で汚染源を撤去していけばよいのか、といった事柄を検討できるようにする。

こういった背景を踏まえて、著者らは1F原子炉建屋内のような高線量率環境において放射性物質の分布を“3次的”に可視化することができるシステムの開発を進めている。本稿では、その技術開発および測定例を紹介する。

II. 統合型放射線イメージングシステム iRIS の構築

1F原子炉建屋内のような高線量率環境において放射性物質の分布を3次的に可視化するためには、いくつかの要素技術を組み合わせる必要がある。はじめに、広範囲に飛散した放射性物質の分布を測定することが可能な放射線測定器が必要となる。さらに、作業者の立ち入りが困難な高線量率エリアにおける測定を遠隔にて実施するために、放射線測定器を遠隔操作ロボットへ搭載することが望まれる。併せて、作業環境の3次元構造計測を同時に実施し、放射線測定器で取得した放射性物質の分布情報を作業環境の3次元モデルに統合することによって、放射性物質の3次的な分布図を作成することを目指している。放射線測定技術に加えて、ロボットを用いた遠隔操作技術ならびにデータ可視化といった複数の要素技術を統合させた放射線イメージング技術とし

Development and demonstration of remote radiation imaging technology in the decommissioning work environment of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station : Yuki Sato, Yuta Terasaka, Tatsuo Torii.

(2020年6月30日受理)

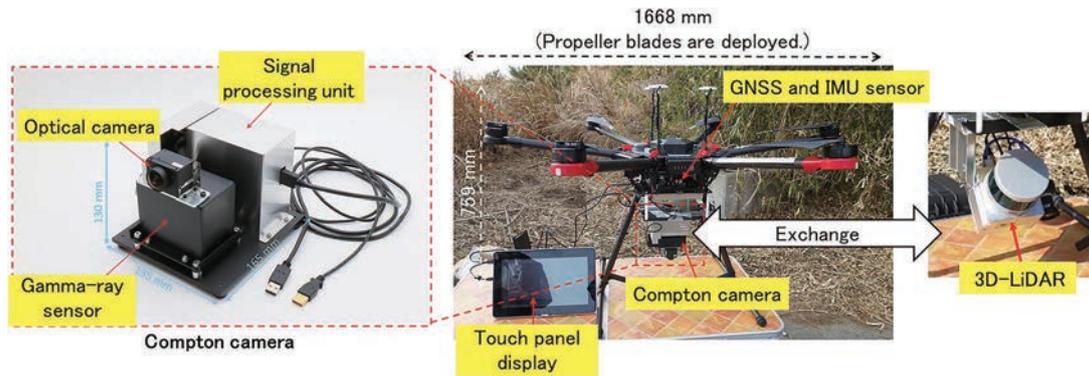


図1 ドローンを基盤とした遠隔放射線イメージングシステム。搭載した(左)小型軽量コンプトンカメラと(右)3D-LiDARを示す。参考資料4より転載。

て、われわれは本構想に基づくシステムを統合型放射線イメージングシステム iRIS (integrated Radiation Imaging System) と呼称している。

放射性物質の分布を可視化するための装置として、ガンマ線イメージャが有望視されている。これは、従来のサーベイメータを用いた“点”での測定ではなく、装置視野内に存在する放射性物質の分布を“面”的に捉えることを可能とするものである。ガンマ線イメージャにはピンホール方式、符号化開口方式、およびコンプトンカメラ方式といくつかの種類があり、国内外を問わず多くのグループにて開発が進められている。著者らは、1Fの過酷環境において作業者が取り扱いやすく、かつ遠隔操作ロボットに搭載するという観点から、小型軽量を達成しやすいコンプトンカメラ方式に着目した。

コンプトンカメラは原理上遮蔽体を必要とせず、放射性物質から放出されるガンマ線を測定するための2層のガンマ線センサーから構成され、1層目(散乱体)と2層目(吸収体)で、各々相互作用した位置と、付与したエネルギーから、ガンマ線の飛来方向を特定するデバイスである。小型・軽量のコンプトンカメラの開発は、早稲田大学と浜松ホトニクス(株)によって共同で開発されたものを基盤としたものが、すでに(株)千代田テクノ(以下、「千代田テクノ」という)により販売されている¹⁻³⁾。原子力機構ではこの技術をベースに、現場に持ちこみ易く、ドローンやクローラーロボットに搭載することが可能な小型・軽量のコンプトンカメラをいくつか製作し、iRISシステムへの実装を進めている。具体的には、小型・軽量コンプトンカメラをドローンやクローラーロボットに搭載するとともに、レーザー光を用いた測域センサ(3D-LiDAR)や写真立体復元技術(フォトグラメトリ)で取得した作業環境の3次元モデルに、コンプトンカメラで取得した放射性物質イメージを描画することによる放射性物質3次元可視化の技術開発および実証試験を進めている。

Ⅲ. 福島県帰還困難区域における測定の実施例

遠隔操作ロボットを用いることにより、作業者の被ばくやケガのリスクを低減しつつ、放射性物質の分布を測定可能となることが期待される。著者らは、1F廃炉作業環境および福島県内の帰還困難区域の屋外環境に飛散・沈着した放射性物質の分布把握を目的とした取り組みとして、コンプトンカメラをドローンに搭載した遠隔放射線イメージングシステムを千代田テクノと共同で開発している。

図1は開発したイメージングシステムの外観である。本システムでは、はじめに3D-LiDARをドローンに搭載して、あらかじめ設定したルートを自律飛行させることにより、測定環境の3次元モデルを自動取得する。次に、コンプトンカメラをドローンに搭載して再度飛行させ、取得した放射性物質の分布イメージを3次元モデル上に重ね合わせることを実施する。コンプトンカメラは、千代田テクノが販売するガンマ・キャッチャーと同型のものを利用した³⁾。

図2は福島県帰還困難区域における実証試験の結果である⁴⁾。図2(a)は、3D-LiDARで取得した測定環境の3次元モデルに、航空写真を貼り付けたものである。この3次元モデルに、コンプトンカメラで取得した放射性物質分布のイメージ図を重ね合わせたものが図2(b)である。周囲に比べて線量率の高いホットスポットを黄色から赤色で示す仕様としており、図中右側のアスファルトの道路上および図中下側の小道が、その他のエリアと比較して高強度で結像している。併せて、図2(c)は比較のためにサーベイメータを用いて作成した線量率マップである。図中右側のアスファルトの道路上および図中下側の小道は、休耕地の内側(図2(c)の白点線内)と比較して線量率が高いことが示されており、開発したシステムが周囲に比べて線量率の高いホットスポットを可視化できていることが分かる。なお、このシステムを用いることにより、サーベイメータを用いた測定では1日以上を

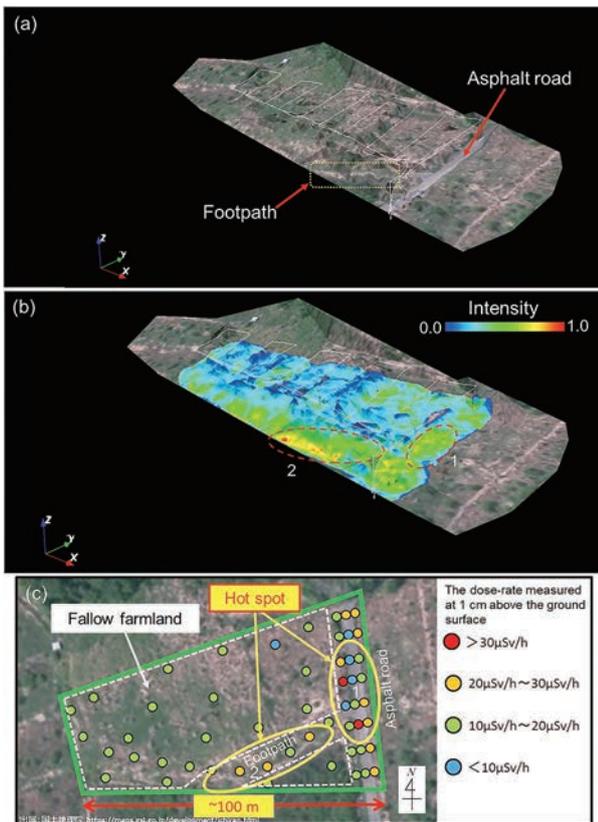


図2 (a)3D-LiDARで取得した測定環境の3次元モデルに航空写真を貼り付けたもの。航空写真は国土地理院の公開する地図を使用した (<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>)。 (b)コンプトンカメラで取得した放射性物質のイメージを3次元モデルに投影したもの。青色から赤色に変化するに従って、放射性物質の蓄積が大きいことを示す。 (c)同エリアにおいて、サーベイメータを用いて作成した線量率分布マップ。これらの図について、参考資料4より転載。

測定に要したが、本システムでは30分未満の測定時間で、ホットスポットの可視化に必要なデータを取得することができ、測定時間の大幅な短縮が達成されている。

遠隔操作ロボットを用いた放射性物質分布測定の新たる利点として、作業者のアクセスが困難な場所を測定できる点が挙げられる。今回実証試験を実施した帰還困難区域屋外環境では人の手入れがなされず草木が生い茂ったままのエリアが、一方で1F作業環境では原子炉建屋のオペレーティングフロア等、物理的・放射線レベル的に作業者のアクセスが困難な場所が多々存在する。これらの環境においては、サーベイメータを用いた測定では被ばくや怪我のリスクが大きく、そもそもアクセスが困難である場合もある。一方で、空から遠隔にて測定可能な本システムを用いることにより、短時間にて安全な測定を実施することができる。現在、本システムの1F廃炉作業環境への導入に向けた研究開発を進めている。

IV. 1F 建屋内における測定の実施例

著者らは、東京電力HDの協力のもと、1Fのいくつかの建屋内部にてiRISシステムを用いたホットスポット

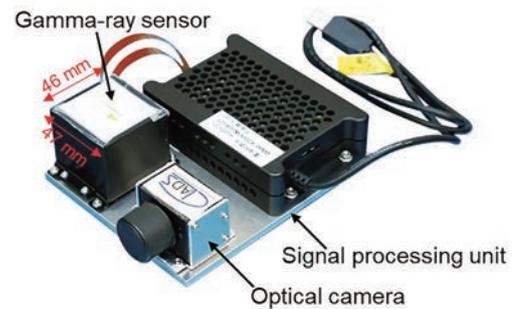


図3 1F 建屋内における測定で使用したコンプトンカメラの写真。

検知の実証試験を進めてきた。図3は、これまでに1F建屋内の測定で使用したコンプトンカメラの外観写真である。千代田テクノロが販売するガンマ・キャッチャーをベースとして、15×15ピクセルのCe:GAGGシンチレータ(1ピクセル当たりのサイズは散乱体、吸収体についてそれぞれ1.5mm×1.5mm×5.0mmおよび1.5mm×1.5mm×10.0mm)とシリコン受光素子の組み合わせから成るガンマ線センサー、センサーから出力される信号を処理するための信号処理基板ならびに光学画像を取得するための光学カメラから構成されるシステムを製作した。3号機タービン建屋内における実証試験では、この小型・軽量コンプトンカメラを使用することにより、空間線量率が0.4~0.5mSv/hといった従来のコンプトンカメラでは動作が困難な高線量率エリアにおいて、ホットスポット表面が最大で3.5mSv/h程度の汚染源を検知することに成功している⁵⁾。さらに、3D-LiDARを用いて取得した作業環境の3次元モデル上にホットスポットのイメージを重ね合わせることにより、作業環境中におけるホットスポットの位置を3次元的に可視化した。

加えて、この小型・軽量コンプトンカメラを東京電力HD所有の小型クローラーロボット(米国iRobot社、パックボット)に搭載し、遠隔操作にてホットスポットを検知する実証試験も実施した⁶⁾。図4に示すように、コンプトンカメラ、デジタルカメラおよびLEDライトをロボットに搭載し、1号機原子炉建屋内部のホットスポットの遠隔検知を試みた。なお、ロボットおよびコンプトンカメラの操作は、1Fの免震重要棟から遠隔にて実施した。

図5は、測定エリアの写真と、ここにコンプトンカメラで取得したホットスポットのイメージを重ね合わせた結果である。正面奥にある遮蔽板右側の隙間に強い結像が見られたが、これは原子炉建屋の深部からのガンマ線に起因するものと考えられる。このように本結果は、作業者の容易な立ち入りが困難な高線量率のエリア(>1mSv/h)において、遠隔にてロボットを操作し、かつホットスポット検知を実施した例である。

また本測定では、複数の写真をもとに作業現場の3次

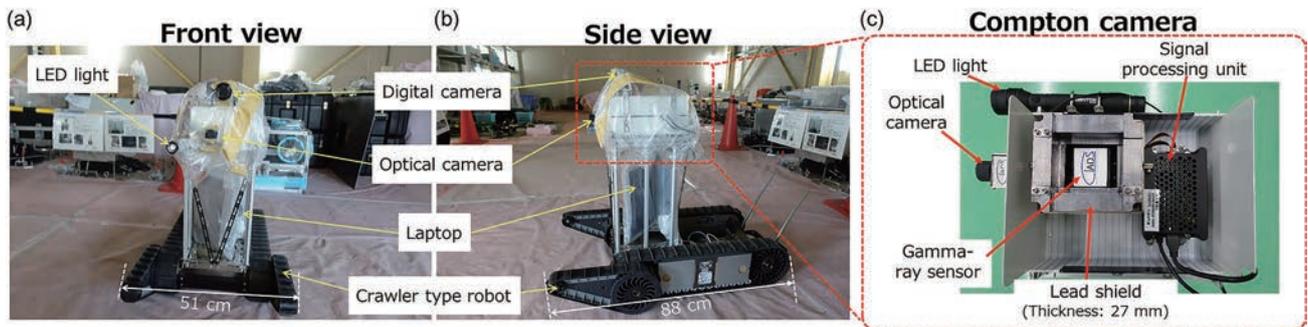


図4 クローラーロボットにコンプトンカメラを搭載した遠隔放射線イメージングシステム。(a)および(b)はシステムの正面および側面からの撮影写真。(c)搭載したコンプトンカメラの外観。コンプトンカメラのガンマ線センサーには前後、左右、上下に厚さ27mmの鉛遮蔽を設けた。図は上部の遮蔽を外している。参考資料6より転載。

元モデルを復元し、ここにホットスポットのイメージを描画した。図6は、ホットスポットを含む作業環境の3次元モデルを仮想現実(Virtual Reality: VR)システムに導入し、ステレオ表示したものである。このようなVR可視化は、ホットスポットの位置を3次的に把握できるだけでなく、機器や瓦礫の状態といった作業現場のコンディションを作業者が把握しやすくなるという利点も兼ね備えている。1Fの建屋内部は線量率が高く、作業者の作業時間が限られているため、作業を実施する前に作業現場の状況やホットスポットの位置を作業者が体感可能なVRシステムは、作業者の危険回避や作業手順の確認を含む事前トレーニングに役立つと期待される⁷⁾。

V. おわりに

原子力機構では、1Fの廃炉作業現場に飛散・沈着した放射性物質の分布を簡便かつ迅速に測定することを目的とし、放射線測定技術に遠隔操作技術や3次元環境モデリングといった異分野技術を組み合わせた統合型放射線イメージングシステムiRISの構築を進めている。本稿では、ドローンを用いて空から福島県帰還困難区域を測定した結果や、1F建屋内部におけるクローラーロボットを用いた測定を紹介した。

今後、1F建屋内部におけるより高線量率な環境(例えば10 mSv/h以上)において3次的なホットスポット調査を実施するにあたり、そのような環境に対応可能なガンマ線イメージャの開発が必要となることは明らかである。また、瓦礫等が散乱した複雑なエリア内に侵入するとともに、システムが“自分がどこを測定しているのか”を把握可能とする自己位置推定が必要となるなど、放射線測定以外の観点からも性能向上に対する要求は多い。

これらを踏まえて現在、より高線量率な環境でも動作可能なガンマ線イメージャを組み込んだiRISシステムの構築を進めるとともに、ガンマ線イメージャで取得される放射性物質イメージを、3D-LiDARやフォトグラメトリで取得される作業環境の3次元モデルや自己位置推定情報と容易に統合可能なソフトウェアの整備を進めている。併せて、現場で利用する作業者が簡便に利用・操

作できることに主眼を置いたユーザーインターフェースの改良も進めており、引き続き、作業現場のニーズを意識してシステム開発を実施していく。ひいては、1F建屋内部における実証試験を通して、これまでに測定がなされていなかったエリアの汚染状況に関する知見を東京電力HDに提供したいと考えている。

本成果を得るにあたり、コンプトンカメラの小型・軽量化に際し早稲田大学の片岡淳教授、岸本彩氏、ならびに浜松ホトニクス(株)の中村重幸氏、平柳通人氏の協力があった。加えて、コンプトンカメラ搭載ドローンシステムの共同開発において、千代田テクノルの小澤慎吾氏、新宮一駿氏は、システム構築および帰還困難区域における実証試験を共同で実施した。また、(株)ヴィジブルインフォメーションセンターの根本誠氏、峯本浩二郎氏、田村智志氏は、放射性物質分布イメージの可視化ソフトウェアの作成に貢献した。最後に、東京電力HDの宇津木弥氏、仲元樹氏、菊地弘幸氏、清岡英男氏、高平史郎氏は、1Fにおける実証試験に対して、協力があった。

付記 本成果の一部は、地域復興実用化開発等促進事業費補助金採択課題「無人飛行体をプラットフォームとする放射線分布の3D可視化技術の開発」のもとに得られた成果です。

— 参考資料 —

- 1) 浜松ホトニクス株式会社, 早稲田大学, 科学技術振興機構(JST), プレスリリース, “放射性物質の除染作業を効率化するガンマ線撮像用コンプトンカメラを製品化”, 2013年9月10日.
- 2) Kataoka J, et. al., Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays, Nucl Instrum Methods A. 732, pp. 403-407, 2013.
- 3) 株式会社千代田テクノロ, ガンマキャッチャー, https://www.c-technol.co.jp/nuclear_power/power09
- 4) Sato Y, et. al., Remote detection of radioactive hotspot using a Compton camera mounted on a moving multi-copter drone above a contaminated area in Fukushima, J. Nucl. Sci. Technol., 57, pp. 734-744, 2020.

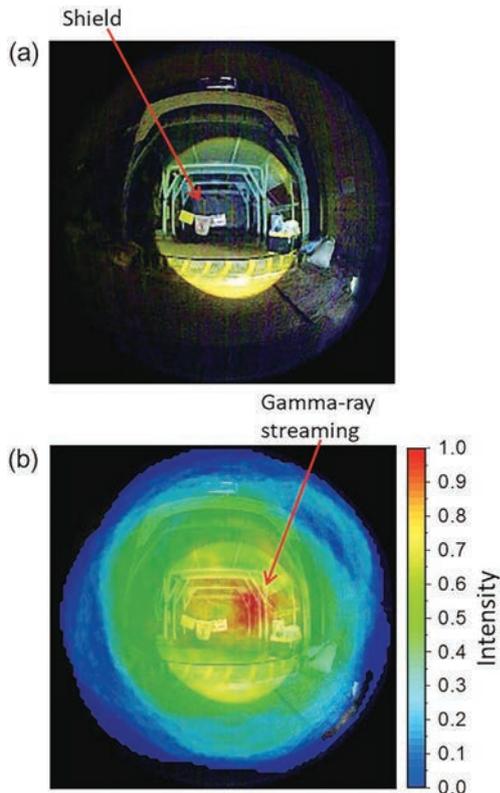


図5 (a)光学カメラで撮影した測定エリアの写真。(b)コンプトンカメラで取得したホットスポットのイメージを光学写真に重ね合わせたもの。

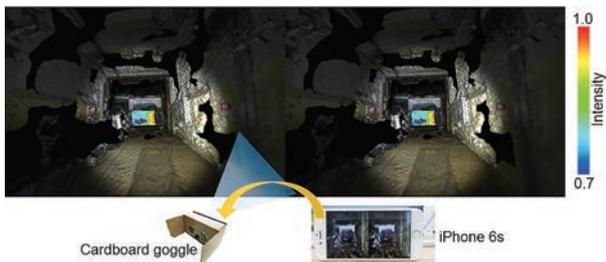


図6 フォトグラメトリにより構築した1F原子炉建屋内の3次元モデルに、コンプトンカメラで取得したホットスポットのイメージを描画し、ステレオ表示したVRモデル。左右の図の中央付近にコンプトンカメラで取得したホットスポットのイメージを投影した。参考資料6より転載。

- 5) Sato Y, et. al., Radiation imaging using a compact Compton camera inside the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station building, J. Nucl. Sci. Technol., 55, pp. 965-970, 2018.
- 6) Sato Y, et. al., Radiation imaging using a compact Compton camera mounted on a crawler robot inside reactor buildings of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, J. Nucl. Sci. Technol., 56, pp. 801-808, 2019.
- 7) Sato Y, et. al., Construction of virtual reality system for radiation working environment reproduced by gamma-ray imagers combined with SLAM technologies, Nucl. Instrum. Methods A, 976(2020), 164286.

著者紹介



佐藤優樹 (さとう・ゆうき)

日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センター
(専門分野/関心分野)放射線計測・放射線測定器とロボットおよび環境認識デバイスを統合した放射線イメージングシステムの開発と実証



寺阪祐太 (てらさか・ゆうた)

日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センター
(専門分野/関心分野)放射線計測・放射線防護



鳥居建男 (とりい・たつお)

日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センター(現・福島大学環境放射能研究所)
(専門分野/関心分野)放射線計測・環境放射線・大気電気

乾式再処理による照射済金属燃料からの マイナーアクチノイド回収

高速炉サイクルによるマイナーアクチノイド分離変換システムの 確立に向けて

電力中央研究所 村上 毅, 飯塚 政利

高レベル放射性廃棄物処分の環境負荷を低減するための分離変換システムでは、軽水炉使用済燃料や高レベル廃液から分離回収した長半減期のマイナーアクチノイド(MA)を高速炉等で照射して、短半減期又は安定核種に核変換する。このとき、実効的なMAの低減には、照射済燃料からMAを回収し、再び高速炉等で照射することが不可欠である。電力中央研究所では、実用化を見通せる高い燃焼度の照射済MA含有金属燃料からのMA回収を初めて実証した。これまでの高レベル廃液からのMA回収プロセス開発やMA含有金属燃料の照射実績と合わせて、金属燃料によるMA分離変換のシステム全体の技術的成立性が確認された。

KEYWORDS: metal fuel, pyroprocessing, minor actinides, electrorefining, partitioning and transmutation, fast reactor

I. マイナーアクチノイドの分離変換

使用済燃料や使用済燃料を再処理した際に発生する高レベル廃液は、マイナーアクチノイド(MA)等の長寿命核種を含むため、数十万年にわたり放射性毒性が高い。そのため、使用済燃料や高レベル廃液を長期にわたり安全・確実に管理する体系を確立することは、今後の原子力利用の在り方にかかわらず必須であると考えられる。

使用済燃料や高レベル廃液から分離回収したMAを高速炉等で照射して、短半減期又は安定核種に核変換すれば、毒性を有する期間を数十万年から数百年に短縮できると評価されている¹⁾。このシステムをMAの分離変換(図1)といい、高レベル放射性廃棄物の長期的な有害度を低減し、さらにその処分の環境負荷低減も期待できることから、毒性や処分負担の見地から処分方策を検討する際の有望なオプションの一つとして考えられている。ただし、1回の照射では全てのMAは核変換されず、またUやPuが共存する場合には中性子吸収によるMA生成も進む。そのため、MA分離変換のメリットを

Recovery of minor actinides from irradiated metallic fuel ; Toward the confirmation of the feasibility of partitioning and transmutation for minor actinides in fast reactor fuel cycle :
Tsuyoshi Murakami, Masatoshi Iizuka.

(2020年6月30日 受理)

実効的に享受するためには、高速炉等のより一層の安全性確保を大前提としつつ、照射後に燃料中に残留するMAを分離回収し(リサイクル)、再度照射を行うことが不可欠である。しかしながら、MAを含む氧化物燃料や金属燃料の照射試験は過去に実施されているものの、それらの照射済MA燃料のリサイクルに関しては試験例が少なく、MA分離変換のシステム全体としての成立性は十分に確認されていなかった。

II. 金属燃料高速炉を用いたMA分離変換技術開発

電力中央研究所(以下、電中研)では、MAの核変換に有利な金属燃料高速炉に注目し、金属燃料によるMA分離変換システム構築を目指した研究開発を行っている

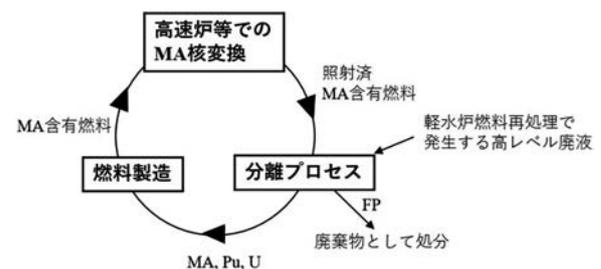


図1 MAの分離変換システム概念図。MA:マイナーアクチノイド, FP:核分裂生成物。

る。その中で、JRC-Karlsruhe (欧州共同研究センター (旧超ウラン元素研究所), ドイツ)との共同研究として、MA 含有金属燃料を用いた小規模実証プロジェクトを1988年から約30年にわたって実施してきた。これは、JRC-KarlsruheでのMA含有金属燃料の製造、フランスの高速原型炉フェニックスへの燃料輸送と照射、JRC-Karlsruheへの照射済燃料の再輸送と照射後試験および照射済燃料を用いた再処理試験など、MA分離変換サイクル概念の一連の要素を包含した国際的なプログラムである。電中研から延べ10名以上の研究者がJRC-Karlsruheに滞在し、上記機関の専門家と共に研究開発を実施した。以下II章では本プロジェクトの成果概要を、III章では特に照射済MA含有燃料の再処理試験により得られた成果について述べる。

1. 実高レベル廃液からのMA回収²⁾

軽水炉燃料の再処理で発生する高レベル廃液に含まれるMAを、金属燃料によるMA分離変換に適した化学形態で回収する乾式分離プロセスを開発した。このプロセスは、高レベル廃液の脱硝・酸化・塩素化およびMA回収工程からなる。MA回収工程では、乾式再処理プロセス(II.3で詳細を述べる)で用いる熔融塩や液体金属を溶媒として、MAの核分裂生成物(FP)からの分離も行われる。軽水炉照射済MOX燃料を再処理して得られた実高レベル廃液を用いた乾式分離試験では、廃液に含まれるほぼすべてのMAを回収することに成功した。

2. MA含有金属燃料の製造・照射および照射後試験^{3,4)}

U-Pu-Zr合金および3種類のMA含有合金を製造し、これらの合金からなる燃料ピン(図2)を高速炉フェニックスで燃焼度約2.5 at.%, 約7 at.%あるいは約10 at.%まで照射した。

照射後試験の結果から、金属燃料の照射健全性を確認するとともに、金属燃料によるMA核変換が燃焼解析による予測通りに進んでいることを実証した。

3. 乾式再処理による照射済金属燃料のリサイクル
高速炉フェニックスで照射された金属燃料(U-19Pu-10Zrおよび、U-19Pu-10Zr-2MA-2RE)からのMA回収試験を実施した。次章でその試験結果詳細を述べるように、これまでに実証されていなかった照射済MA含有金属燃料からのMAリサイクルに初めて成功した。

MAリサイクルには、乾式再処理⁵⁾を適用した。乾式再処理とは、水を含まない熔融塩(塩化リチウム(LiCl)と塩化カリウム(KCl)の共晶組成混合塩を約500℃で熔融したもの、以降は熔融LiCl-KClと表記)や液体金属を溶媒に用いる高温化学プロセスである。溶媒として水や有機物を使用しないため、耐放射線性が高く、MA分離

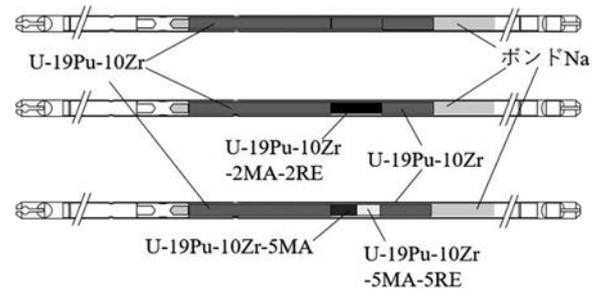


図2 金属燃料ピンの概略図。図内の数字はwt.%。MA: Np, Am, Cm, RE: Y, Ce, Nd, Gd。

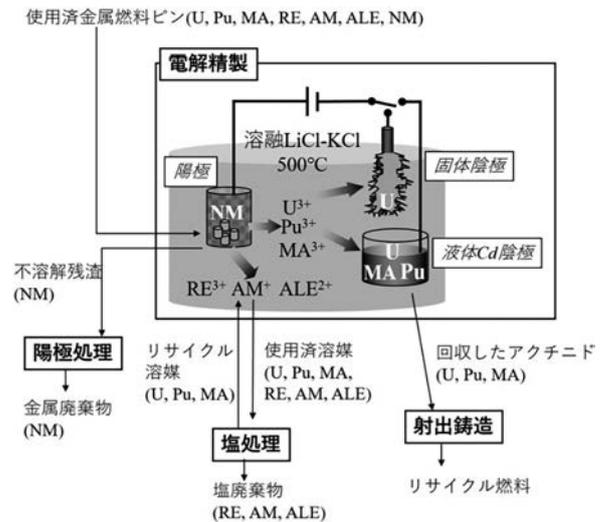


図3 乾式再処理プロセスの概念図。MA:マイナーアクチノイド, RE:希土類 FP, ALE:アルカリ土類 FP, AM:アルカリ FP, NM:貴金属 FP。

変換システムで想定されるような線量の高い燃料(高燃焼度燃料, 高MA含有燃料)のリサイクルにも適する。また、PuにはUやMAが常に随伴するため、MA回収・核変換に好適であり、かつ核拡散抵抗性が高いことも大きな特長である。乾式再処理プロセスでは、複数の工程を経て、照射済金属燃料からリサイクル燃料を製造するとともに、FPを安定な廃棄体に閉じ込める(図3)。

最も主要な工程である電解精製工程では、熔融LiCl-KCl中でのアクチノイドやFPの電気化学的特徴(溶出や析出しやすさの違い)を利用して、照射済金属燃料からのアクチノイドの回収とFPからの分離を次のように達成する。照射済金属燃料から熔融LiCl-KCl中に溶出したアクチノイドは、固体陰極と呼ばれる鉄製陰極や液体Cd陰極に回収される。この時、アクチノイドよりも溶出しにくい貴金属FPは不溶解残渣となるため、アクチノイドとは分離される。アクチノイドよりも陰極に析出しにくいアルカリFP、アルカリ土類FPおよび希土類FPは、アクチノイドと共に照射済金属燃料から溶出した後、陰極に析出するアクチノイドとは分離され、熔融LiCl-KCl中に蓄積していく。陰極に回収されたアクチノイドはリサイクル金属燃料製造の原料となる。金属燃料は、燃料合金を溶融させた溶湯を鋳型内に

流しこむ射出成型法により製造される。射出成型法は遠隔運転性に優れ、MA分離変換システムで想定される高MA含有燃料の製造にも適する。

Ⅲ. 照射済金属燃料の電解精製試験^{6~8)}

MA分離変換システムでは、高レベル廃液からの混入分に核変換のための照射による生成成分が加わるため、照射済燃料中のFP濃度が高くなる。さらに、照射済金属燃料内にはZr濃度の高い合金相ⁱが形成することが知られており、リサイクル時には、このような合金相からアクチノイドが溶出した後にZr構造体が残留することとなる。この残留物により、アクチノイド溶解が継続的に進行するために必要な、燃料中への溶融塩のしみ込みや溶出したアクチノイドの拡散が阻害される懸念がある。そのため、照射済MA含有金属燃料のリサイクルを実証するためには、特徴的な燃料構造、多種多量のFPの存在、かつ高線量という諸条件がリサイクルに与える影響を、照射済金属燃料を使用した試験により明らかにする必要がある。具体的には、①アクチノイド高溶解率とともに、高FP濃度環境下での②アクチノイドの回収とFPからの分離を③高い物質収支において示すことが課題となる。

上記3点を示すことを目的として、高速炉フェニックスで照射された金属燃料の電解精製試験を実施した。試験に供した燃料の照射前合金組成は、表1に示す通り、U-19Pu-10Zrおよび、高レベル廃液からの回収MAと混入する希土類(RE)を含む燃料を模擬したU-19Pu-10Zr-2MA-2REである。また、燃焼度は約2.5 at.% (低燃焼度)あるいは約7 at.% (実用を見通せる燃焼度)である。照射後の燃料ピンから電解精製試験用に燃料片(図4)を、長さが5~6 mm程度になるように切り出した。燃料片1個の重量は被覆管も含めて約2 g、直径は6.55 mmである。この燃料片をRUN1では8個、RUN2では5個、RUN3では2個使用した。本試験は、高線量の照射済燃料を高温下で取り扱うだけでなく、活性の高い金属や吸湿性の高い溶融塩を使用する。そのため、酸素や水分を含まない高純度不活性雰囲気を保てるホットセルおよび、多種多様な操作を遠隔で実施可能な試験装置を新たに設計・製作した。電解精製試験中または、試験後に回収した以下のサンプル(溶融LiCl-KClの一部、試験後の照射済金属燃料、電解槽底の堆積物、固体陰極析出物、液体Cd陰極回収物)をICP-MS(誘導結合プラズマ質量分析装置)により定量分析した。得られた試験結果の概要は以下の通りである。

ⁱ 照射中には燃料内部の温度勾配により、燃料構成成分(U, Pu, Zr)の再分布が起こる。その結果、照射済燃料では照射前組成よりもZr濃度が高い合金相や低い合金相が同心円状に分布する。

表1 電解精製試験に供した燃料の照射前合金組成(wt.%)および燃焼度(at.%)

	照射前合金組成(wt.%)	燃焼度
RUN1	71U-19Pu-10Zr	約2.5 at. %
RUN2	67U-19Pu-10Zr-2MA-2RE	
RUN3		

2MA : 1.2Np-0.6Am-0.2Cm

2RE : 1.4Nd-0.2Y-0.2Ce-0.2Gd

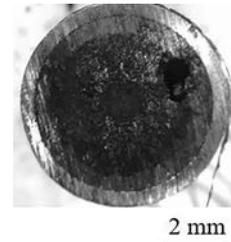


図4 照射済U-Pu-Zr-2MA-2RE合金燃料片(燃焼度約2.5 at.%)の断面写真

表2 照射済金属燃料からのアクチノイド溶解率*

	溶解率*(%)				
	U	Pu	Np	Am	Cm
RUN1	98.9	99.8	99	98.9	-**
RUN2	99.1	99.7	99.7	98.8	98.7
RUN3	95.7	99.6	98.3	97.5	97.1

* 溶解率(%) = $(m_{ini} - m) / m_{ini} \times 100$

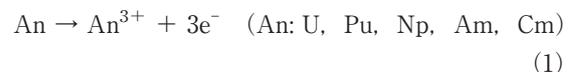
m_{ini} : 照射済燃料中初期アクチノイド量(燃焼計算コードORIGENによる計算値)

m : 不溶解残渣中アクチノイド量

** 分析未実施

①アクチノイド溶解率

1式で表される照射済金属燃料中から溶融LiCl-KCl中へのアクチノイド(U, Pu, Np, Am, Cm)溶解に関して、高い溶解率が達成されたことを確認した(表2)。



②アクチノイドの回収とFPからの分離

鉄製の固体陰極上に生成した、デンドライト状析出物(図5)の分析結果から、2式に従って金属Uが選択的に析出したことを確認した。



また、液体Cd陰極を用いることで、MAがUやPuとともにCdとの合金として回収された(3式)ことを確認した。



FPからの分離の指標である分離係数(定義を4式、結果を図6に示す)を評価した結果、アクチノイドと希土

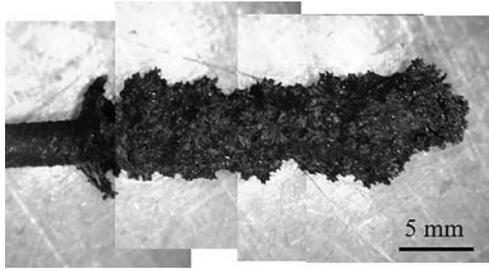
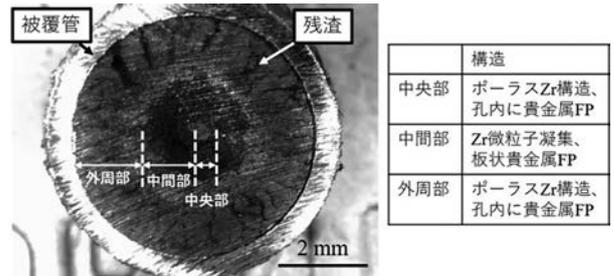


図5 鉄製固体陰極上に析出したデンドライト状U金属



	構造
中央部	ポーラスZr構造、孔内に貴金属FP
中間部	Zr微粒子凝集、板状貴金属FP
外周部	ポーラスZr構造、孔内に貴金属FP

図7 照射済U-Pu-Zr合金(燃焼度約2.5at.%)の電解精製試験(RUN1)後に得られた不溶解残渣の断面写真

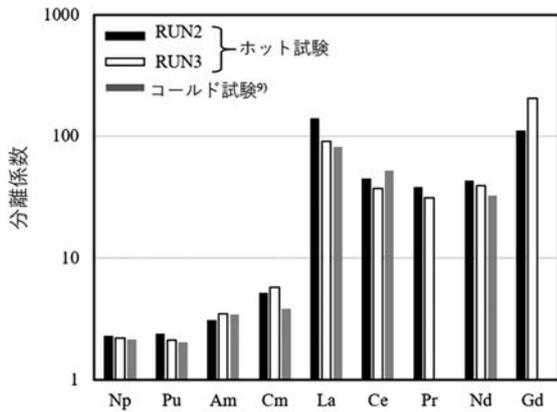


図6 アクチノイドおよび希土類の分離係数(ウランの分離係数を基準(=1)として比較)

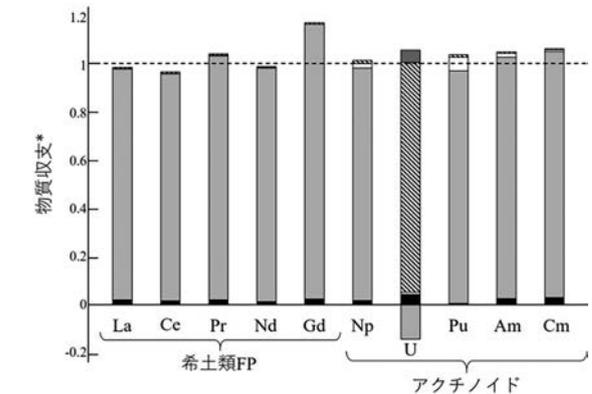
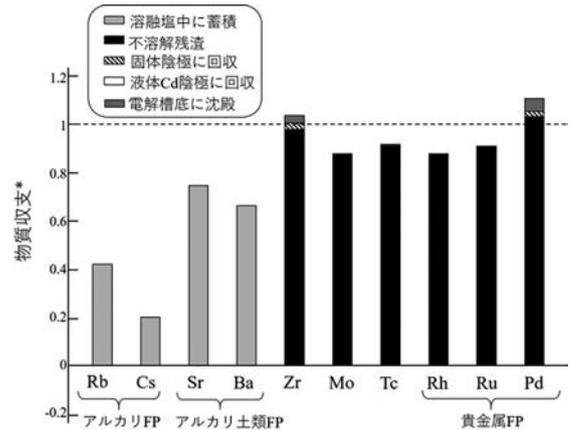


図8 照射済U-19Pu-10Zr-2MA-2RE合金(燃焼度約7at.%)の電解精製試験(RUN3)における各元素の物質収支*。

*照射済燃料中初期量(燃焼計算コードORIGENによる計算値)に対する割合。

類FP(La, Ce, Pr, Nd, Gd)の分離係数には大きな差があり、希土類FPから十分に分離してアクチノイドが回収されたことも分かった。

(Uを基準とした元素Mの分離係数)

$$= (\text{溶融塩中のM/U濃度比}) / (\text{液体Cd中のM/U濃度比})$$
 (4)

なお、アルカリFP(Rb, Cs)およびアルカリ土類FP(Sr, Ba)は液体Cd中には検出されず、溶融LiCl-KCl中への蓄積のみが確認されたことから、アクチノイドがこれらのFPとも分離して回収されたことが分かった。

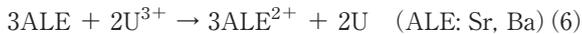
大部分のZr, Mo, Tc, 貴金属FP(Pd, Ru, Rh)は、不溶解残渣として被覆管内に残留し、溶融LiCl-KCl中に溶出したアクチノイドと分離されたことを確認した。この不溶解残渣の構造は、照射済金属燃料が持つ特徴的な構造ⁱを反映していることが分かった。つまり、照射により照射前よりもZr濃度が高かった中央部および外周部はポーラスZr構造、Zr濃度が低かった中間部はZr微粒子が凝集した構造を持つことが分かった(図7)。さらに、貴金属FPはこのようなZr構造内に保持されることで電解精製装置内に散逸しなかったことも確認された。

③アクチノイドおよびFPの物質収支

電解精製において各元素がどのような挙動を示したかを、照射済燃料中初期量(燃焼計算コードORIGENによ

る計算値)で規格化して定量的に検討した。例としてRUN3における結果を図8に示す。図8より、上記①および②で述べたアクチノイドやFPの挙動は、高い物質収支で明らかにされたことが分かる。ただし、アルカリFPおよびアルカリ土類FPに関しては、照射中にこれらのFPの一部がボンドNaと共に燃料ピン上部のプレナム部に移動し電解精製試験には持ち込まれなかったため、ORIGENにより計算された照射済燃料中初期量に対する割合としては、低い値となっている。一方、アルカリFPおよびアルカリ土類FPの溶融LiCl-KCl中濃度は、電解精製試験初期に急激に増加し、その後の濃度増加は緩やかであった。このことから、電気化学的に溶出

するアクチノイド(1式)とは異なり, これらのFPは次の化学反応式に従って溶融 LiCl-KCl 中に溶出したと考えられた。



①, ②, ③の結果から, 照射済 U-19Pu-10Zr-(2MA-2RE)燃料のリサイクルに乾式再処理プロセスが適用可能であると示された。また図6に示すように, 分離係数は, 照射済燃料を使用した試験(ホット試験)と未照射燃料を使用した試験(コールド試験)で大きな違いが見られなかった。つまり, 溶融塩と液体金属間におけるアクチノイドや希土類の分配平衡等の重要な化学的・電気化学的挙動が, 高線量かつ全FP元素が高濃度で共存する条件から受ける影響は無視できる程度に小さいことが分かった。このことは, 照射済燃料を用いた試験を実施して初めて明らかになったことであり, 溶融塩や液体金属溶媒が放射線に対して非常に安定であるという乾式再処理プロセスの特長が改めて明示された。

IV. まとめ

乾式再処理プロセスを適用することにより, 照射済 MA 含有金属燃料のリサイクルが可能であると初めて実証された。これにより, これまでの MA 含有金属燃料の照射実績や高レベル廃液からの MA 回収試験結果と合わせて, MA 分離変換システムの技術的成立性が十分に示された。この成果は, 高速炉導入の効果の一つとされている MA 分離変換による放射性廃棄物処分の環境負荷低減効果の信頼度を向上させ, 将来の原子力利用シナリオの多様性確保と議論の活性化に大いに貢献すると期待される。

— 参考資料 —

- 1) 分離変換技術総論, 「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会, (一社)日本原子力学会, 2016年9月.
- 2) K. Uozumi, M. Iizuka, M. Kurata, T. Inoue, T. Koyama, M. Ougier, R. Malmbeck and J. - P. Glatz, "Recovery of Transuranium Elements from Real High-Level Liquid Waste by Pyropartitioning Process", J. Nucl. Sci. Technol., 48 (2011) 303-314.
- 3) H. Ohta, T. Ogata, D. Papaioannou, M. Kurata, T. Koyama, J.-P. Glatz and V. V. Rondinella, "Development of Fast Reactor Metal Fuels Containing Minor Actinides", J. Nucl. Sci. Technol., 48 (2011) 654-661.
- 4) H. Ohta, T. Ogata, S. Van Winckel, D. Papaioannou and V. V. Rondinella, "Minor actinide transmutation in fast reactor metal fuels irradiated for 120 and 360 equivalent full-power days", J. Nucl. Sci. Technol., 53 (2016) 968-980.
- 5) T. Koyama, Chap. 6 Innovative separation technology: Pyrochemical process to treat spent nuclear fuel, K. L. Nash, G. J. Lumetta ed., Advanced Separation Techniques for Nuclear Fuel Reprocessing and Radioactive Waste Treatment, Woodhead (2010).
- 6) T. Murakami, T. Kato, A. Rodrigues, M. Ougier, M. Iizuka, T. Koyama and J.-P. Glatz, "Anodic dissolution of irradiated metallic fuels in LiCl-KCl melt", J. Nucl. Mater., 452 (2014) 517-525.
- 7) T. Murakami, A. Rodrigues, M. Ougier, M. Iizuka, T. Tsukada and J.-P. Glatz, "Actinides recovery from irradiated metallic fuel in LiCl-KCl melts", J. Nucl. Mater., 466 (2015) 502-508.
- 8) T. Murakami, A. Rodrigues, M. Iizuka, L. Aldave de las Heras and J.-P. Glatz, "Electrorefining of metallic fuel with burn-up of ~7 at% in a LiCl-KCl melt", J. Nucl. Sci. Technol., 55 (2018) 1291-1298.
- 9) K. Kinoshita, T. Koyama, T. Inoue, M. Ougier and J.-P. Glatz, "Separation of actinides from rare earth elements by means of molten salt electrorefining with anodic dissolution of U-Pu-Zr alloy fuel", J. Phys. Chem. Solid., 66 (2005) 619-624.

著者紹介

村上 毅 (むらかみ・つよし)

電力中央研究所 原子力技術研究所
(専門分野/関心分野)電気化学, 原子燃料
処理



飯塚政利 (いづか・まさとし)

電力中央研究所 原子力技術研究所
(専門分野/関心分野)原子燃料処理, 燃料
サイクル技術



オンライン座談会の効用

フリージャーナリスト 井内 千穂

原子力学会誌の座談会に「フリーな立場から素朴な疑問などを挟む」役で参加されたしというご依頼をいただき驚いたが、こういう機会を断ってはいけないという人生訓と、「東日本大震災から10年を振り返り、今後10年を俯瞰する」という壮大なテーマに心惹かれてお引き受けすることにした。

原子力関係のエキスパートばかりの参加者一覧を見ると、改めて場違いな自分にいたたまれなくなるがもう遅い。Zoom画面を開くと錚々たる顔ぶれが並んでいた。世間から見れば今なお謎のベールに包まれた「原子力村」の一端を自室のPCから覗き込むなんて、コロナ禍前にはあり得なかったことだ。直接お会いしているわけではないが、表情や語り口にも、音声が乱れた時のとっさの対応にも、その人となり画面越しににじみ出る。謎のベールがほんの一部はがれ、心理的な距離がほんの少し縮まった。話に聴き入るうちに、自分の無知を恥じるより好奇心のほうが勝ってくる。時折急に「素朴な」発言を求められるので気が抜けない。我ながら驚くべき集中力で過ごした3時間だった。

印象に残ったのは、細かい技術の動向ではなく、さる重鎮が「そもそも両刃の剣である原子力」への葛藤を吐露されたことだった。原子力村内では「それを言い出すと進まない」話かもしれない。しかし、そもそもの原子力の是非こそは、立場の違いや専門知識の有無にかかわらず共有している問ではないか。長年の「村人」の発言に耳を傾けながら、この心情を世間の人々にも聞いてもらいたいと思った。せっかくのオンラインを生かして、全国各地の一般市民も視聴可能な座談会を企画することはできないものだろうか。

Column

震災を風化させないために

東京学芸大学附属国際中等教育学校3年 小澤 杏子

近年の小学校や中学校において、東日本大震災に関する授業はどれほど掘り下げられているのか。

私は小学2年生だった当時、東日本大震災を経験した。幸い、震源地から離れていたところにいた私は物理的ダメージは受けなかったが、画面越しの中継で見た恐ろしい津波の光景は今でもはっきりと思い出出すことができる。小学生の頃に経験したほとんどのイベントの記憶は無いというのに。

あの恐ろしい震災から、あっという間に9年が経過した。今の小学生は、震災を経験していても覚えていない人の方が多いと伺った。実際に現在の小学2年生は、年齢で言うと7~8歳にあたる。つまり、私が衝撃を受けたあの東日本大震災を経験していないのだ。経験していない世代、覚えていない世代にとって震災の恐ろしさに共感するのは非常に難しい。その中で、いかにして当時の出来事や感情を風化させないようにするのか。

私は、机上の教育だけでは足りないと考えている。これは東京都内に住む私の妹の情報だが、妹は「東日本大震災=教科書の内容」だと感じたようだ。もちろん、多くの社会科の学びは教科書のみで完結されてしまう。しかし、地震大国である日本は特にこの教育には力を入れるべきなのではないか。福島に足を運べる機会を作ったり、避難経験をされた方々とコミュニケーションをとれるような機会を設けたりすれば、少しでも当時の出来事を「自分ごと化」できる。とにかく工夫していかなければならない、そして風化が加速する前に実行に移すべきだ。

「命か経済か」じゃなくて「どちらも命」

本会理事 佐治 悦郎

東京電力福島第一原子力発電所事故のあと、停止していた他電力会社の原子力発電所を再稼働させることに対して、「命より経済を優先させるのか」との批判をよく耳にした。経済活動も結局、命を守ることにつながるのに、そのように人々の生命や健康と経済活動を対峙させて論じることに違和感を覚えたものだ。そして、今(7月下旬)、新型コロナウイルスの感染拡大が第2波とよばれるような様相を呈し始めている状況にあって、“Go To トラベル事業”が開始された。まさに「命か経済か」問題である。しかし、これについては政府の迷走ぶりやそもそも時期尚早ではないかという批判はよく聞かれるものの、「命より経済を優先させるのか」という強いトーンの批判はあまり聞こえてこない。それは、当該分野の経済活動の停止が、そこで働く人々の健康や生命を脅かすという事実を、一般社会の人々が自分事として理解できているからだ。経済活動の再開はたとえさまざまな感染拡大防止策をとったとしても確実に感染者数を増加させ結果として死亡者も増やしてしまう。こうした予見性が極めて高い「死」を目の前にしても、経済活動を優先させるという選択を社会は迷いながらも認めているのである。それは「命か経済か」ではなくて「どちらも命」の問題と分かっているからだ。翻って原子力は、使うことによる「命のリスク」の増加は心配しても、利用をやめることによるリスクの増加を心配する人は社会の少数派であろう。コロナ禍を機に広く一般の人々が直面したリスク認知と社会の選択という難しい問題は、原子力も同じなんだと分かってもらうためにはどうすればよいのだろうか。このことが頭からずっと離れないⁱ。

ⁱ 佐治悦郎, 「原子力施設はないのが一番安全?」, “Safety and Dialog(原子力安全委員会だより)”, Vol.4, 25(2003), <https://warp.da.ndl.go.jp/infondljp/pid/9483636/www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/s-d/04.pdf>.

Column

勉強ができて良いこととは？

大阪市立大学 鳥居 千智

最近、ペーパーテストで高い点を取れて良いことはあるのか、あるとすれば何なのかと考えるようになった。学校で点数をつけられるのはペーパーテストと運動だ。運動ができて良いことは思いつく。足が速ければ不審者から逃げられる可能性が高くなることや、危険な場所から早く離れられることなどだ。そして自分の思うように体やボールを操ることができるのは非常に楽しい。また運動自体が健康に良い影響を与えるという利点もある。

しかし勉強ができて良いことは思い浮かばないのだ。「良い大学や良い会社に入れる」という声は聞くが、それには賛同できない。「良い」とされる大学や会社に入ろうが入れなからうが、基本は本人次第で楽しくもつまらなくもなると思うからだ。また、ペーパーテストができたからといって調査や研究も上手いくとは限らないのではないかと、仕事の能力が高いとも限らないのではないかととも思う。「将来の選択が広がる」という意見もある。選択肢が多くなるのは良いと思う。ただしここでまた気付く。勉強ができることと直接的に繋がる利点が思い当たらないのだ。その割に勉強というのは社会においてかなり重点を置かれていると感じる。しかし個人的にはただ一つの指標にしか過ぎないと思う。これからの人生でその考えは変わるかもしれないが。

今年から物理学を学び始める私だが、そこでは物理を学ぶだけでなくこれまでになかった学びをしようと思う。

持続可能な社会を目指して1 ～土壌づくり～

京都教育大学附属京都小中学校 教諭 野ヶ山 康弘

近年、教育現場で注目されているのは「society5.0」や「SDGs^{*1}」であり、この中にエネルギー問題も含まれている。この問題を扱う教科は、一般的に理科や社会、総合的な学習の時間である。学校現場では「エネルギーミックス」が基本の視点であるが、「原子力はリスクが高くなくした方がよく、太陽光のような再生可能エネルギーを増やした方がよい」という「原子力エネルギー＝悪、再生可能エネルギー＝善」の印象が強いように感じる。

この背景には「原子力＝原子力発電」のイメージが強く、「福島原発事故」が根強くあるように感じる。さらに、放射線・放射性物質・放射能・原子力などの言葉の持つ意味の違いが理解されていないために、医療・工業・科学などでは必要不可欠なものとして利用されている放射線が原子力エネルギーとは別のものであることすら十分理解されていないのではないだろうか。原子力に関わるさまざまな事実があまり身近でないために、そのことを積極的に「知ろうとしない」ということが現実ではないだろうか。原子力から再生可能エネルギーに移行し、「原子力」に頼らない社会を目指すことは大切である。しかし、すでに存在している「核のゴミ」の処理をどうするのか、この議論は絶対に忘れてはならない。

これに対して太陽光エネルギーは、二酸化炭素を出さないクリーンなイメージが強いが、広大な土地が必要であり天候や自然災害に影響を受けやすい。どんなエネルギー源においても「リスクとベネフィット」が存在する。リスクを限りなく減らす方策を考え、さまざまなエネルギーを組み合わせることが必要である。

では教育現場がすべきことは何か。まずは科学的・経済的・社会的・歴史的な事実を子どもたちに伝えることではないだろうか。子どもたちがそれぞれのエネルギーの「リスクとベネフィット」を考えるための土壌づくりが必要である。その上で持続可能な社会について考えさせていくことがよいのではないだろうか。

*1 Sustainable Development Goals(持続可能な開発目標)

Column

「バベルの塔」の後を生きる

フリーライター 服部 美咲

昔、人が驕り、天に届く高い塔を建て始めた。神は怒り、ひとつだった彼らの言葉を乱した。人々は意思疎通が図れなくなり、塔の建設を諦め、離散した。旧約聖書が伝える「バベルの塔」である。一説によると、齋^{もたら}された言葉の混乱は、一見同じ言葉が異なる意味を持ち、会話に齟齬を起すという類のものだったらしい。

「健診」と「検診」は、同音でかつ意味も似る。健診は、病気に罹る前の一次予防、検診は、罹った病気を早期発見する二次予防の策である。健診は、不安解消や生活習慣改善の動機づけなどの目的を含む。検診には過剰診断などの害があり、導入には慎重な検討を要する。

原発事故後に福島で始まった甲状腺検査の実態は、甲状腺がんを早期に発見する検診である。この検査を健診と呼び、「甲状腺検査が住民の不安軽減に役立つ」と主張する人もいるが、そう単純ではない。

放射線被ばくに関係なく、がんのリスクは加齢とともに上がる。したがって検査を重ねるほど、がんと診断される可能性も高くなる。がんと診断されれば当然不安解消どころではない。まして原発事故による放射線被ばくの影響を知るためにと受けた検査でがんと診断されれば、「放射線被ばくの影響でがんになった」と感じ、強いショックを受けるだろう。

われわれは「バベルの塔」以降を生きる。似た言葉を使い分けて物事を伝えるためには、細心の注意が必要だ。故意に混乱を招くのはもってのほかだろう。われわれはもうこれ以上、散り散りになる必要はないのだから。

最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構

第6回 廃止措置と廃棄物の処理処分を目指して(1)

低レベル放射性廃棄物の処理処分とウラン鉱山閉山措置に関する技術開発

辻 智之ほか

日本原子力研究開発機構ではバックエンド関連の研究・技術開発として、原子力施設の廃止措置や安全で環境負荷低減につながる低レベル放射性廃棄物の処理処分技術開発と、地層処分の基盤的研究開発を進めてきた。これらバックエンドに関する原子力機構の研究・技術開発の最前線を2回にわたって紹介する。

KEYWORDS: *Decommissioning, Clearance, Radioactive waste, Disposal, Waste processing, Decontamination, Cement solidification, Mine closure*

I. はじめに

日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」という。)では、バックエンド関連技術の開発を大きく二つの分野に分けて進めてきた。一つは、これまで原子力研究・技術開発を担ってきて、役割を終えた原子力施設の廃止措置と、研究開発活動および今後の廃止措置で発生する低レベル放射性廃棄物(以下「廃棄物」という。)の処理処分に関するものである。原子力施設の廃止措置においては安全を確保しつつ、合理的、効率的な施設解体プロセスやクリアランス制度の適用等、廃棄物の処理においては廃棄物の最小化(減容処理等)や処分に向けた安定化等の処理プロセス、廃棄物処分においては埋設する廃棄物の技術基準への適合性に係る確認を含めた処分プロセスに関する技術開発等である。

もう一つは地層処分に関する研究開発として、実際の地質環境での人工バリアの適用性の確認や地質環境の長期安定性に関する研究のほか処分場の設計や安全評価に必要な技術開発等に取り組んでいる。また、2019年度末に幌延および瑞浪での深地層の研究施設計画における成果のとりまとめを行い2020年度以降の計画を策定した。

Frontline of R & D for decommissioning and waste disposal (1) : Tomoyuki Tsuji, Noritake Sugitsue, Fuminori Sato, Ryotatsu Matsushima, Shoji Kataoka, Shota Okada, Toshiki Sasaki, Junya Inoue.

(2020年8月26日 受理)

本稿では、これらバックエンドに関する原子力機構の研究・技術開発の最前線を今後2回にわたり紹介する。今回は前半でクリアランス制度の適用に向けた除染および廃棄物の処理処分等に関する技術開発を、後半では人形峠のウラン鉱山の閉山措置に関する技術開発を紹介する。

II. 原子力機構のバックエンド対策への取り組み

原子力機構では、東海再処理施設の廃止措置に約70年を要することなどを踏まえ、廃棄物の処理処分を含めた原子力機構全体のバックエンド対策の長期にわたる見直しおよび方針である「バックエンドロードマップ」を策定した¹⁾。

バックエンドロードマップでは、バックエンド対策を推進するため、約70年の期間を第1期(約10年)、第2期(約20年)、第3期(約40年)に区分し、廃止措置および発生する廃棄物の処理処分、施設内に存在する核燃料物質の管理に係る個別の方針等を施設ごとに整理した。

また、長い期間と多額の資金を要するバックエンド対策を着実に遂行するため、前述したように廃止措置、処理処分に係る技術開発を計画的に進めるとともに、国内外の知見も踏まえつつ、効率化・最適化に向け、技術開発、マネジメント体制、人材の確保・育成、資金の確保・活用等に継続的に取り組むこととしている。

なお、バックエンドロードマップは、バックエンド対策の進捗状況等を踏まえ、必要に応じて見直すこととし

ている。

一方、保有する原子力施設の安全強化と研究開発機能の維持・発展を目指し、バックエンドロードマップを具体化した計画として、継続利用する施設の「集約化・重点化」、「施設の安全確保」および「バックエンド対策」を三位一体で進める総合的な計画である「施設中長期計画」を策定した²⁾。

以上を踏まえ、原子力機構では、バックエンド対策全般をマネジメントするバックエンド統括本部を新設するとともに、廃止措置の本格化に向け、マネジメントの改善等について検討している。

Ⅲ. 廃止措置、クリアランスに係る技術開発

廃止措置においては、施設の系統内に残留している放射性物質の回収技術、機器等に付着した放射性物質を取り除く(以下「除染」という。)技術、高線量環境下で解体作業等を進めるための遠隔技術等の開発ニーズがあり、廃止措置中においても放射性物質を漏えいしないよう安全を確保しつつ、合理的、効率的に廃止措置を行うための技術開発に取り組んでいる。人形峠環境技術センターでは、廃棄物の発生量を低減するため、機器等を除染し、クリアランス制度への適用を目指している。本章では、ウランの除染技術開発の取り組みを紹介する。

1. 廃棄物の発生量を低減する除染技術を開発

人形峠環境技術センターの製錬転換およびウラン濃縮の研究開発に使用した大型ウラン取扱施設は、すでに廃止措置段階にある。これらの施設の解体からは、約13万トンの解体物が発生し、そのうち、すでにクリアランスした約50トンのアルミニウム材を含む、約1.7万トンは、表面にウランが付着した金属解体物と推定している。

ウラン取扱施設の廃止措置では、ウラン廃棄物の発生量をできるだけ低減するため、設備等の解体により発生する金属解体物をクリアランスレベル以下まで除染し、資源として再利用または一般廃棄物として処分することが、環境負荷低減や経済的合理性の観点から重要になる。

代表的な金属解体物である遠心分離機(以下「遠心機」という。)には、主に炭素鋼が使われており、解体時に大気中の水分と接触すると、表面に酸化鉄(Fe_2O_3)や、炭素鋼表面に残留したフッ素化合物の影響による β -オキシ水酸化鉄($\beta\text{-FeOOH}$, $\gamma\text{-FeOOH}$)等の腐食層が生成される。運転中に炭素鋼表面に付着したウランの多くは、この過程で腐食層に移行するが、例えば、表面に微細な凹凸がある状態では、母材表面にもわずかながらウランが残留する。

このため、クリアランスレベルまで除染するために

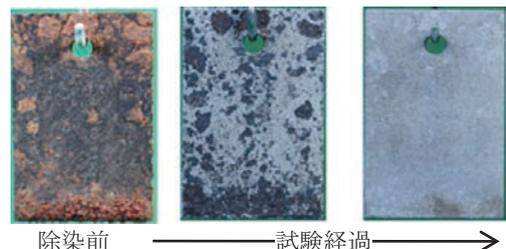
は、腐食層と合わせて母材表面をわずかに除去する必要があるが、金属解体物の除染で一般的に用いられている希硫酸等を用いると、酸化被膜である腐食層の除去に時間を要し、この間に必要以上に母材が溶解することで、希硫酸に溶解した鉄イオンに由来する二次廃棄物量が多くなるという課題があった。この課題は広く認識されており、例えば、有機酸を除染液に用いた研究³⁾等が行われている。このような諸外国の研究開発動向も踏まえ、酸化被膜である腐食層の溶解速度を高め、母材の溶解量を最小化することが可能な除染液として、酸溶解と合わせて、酸化力による酸化溶解効果が期待できる液性を、 $\text{Fe-H}_2\text{O}$ 系のプルベ線図を参考に探索した。

この結果、酸化還元電位 = 1,000 mV, pH=2.5程度となる酸性機能水を選定し、除染性能確認を行った。なお、酸性機能水は、塩化ナトリウム(NaCl)を電気分解することで得られる次亜塩素酸(HClO)と、次亜塩素酸濃度が高まることで二次的に生成される微量の塩酸(HCl)を含む液体で、容易に生成することができる安全な液体である。

図1に表面に腐食層が生成した模擬試験片を用いた除染試験の経過を示す。また、図2に試験結果として、水素イオン(H^+)の消費量から推定した鉄(Fe)の溶解量と模擬試験片重量減量の関係を示す。

図2から、酸性機能水は、希硫酸(pH2.6)や希塩酸(pH2.6)と比較して、模擬試験片表面に生成した腐食層の溶解速度が相対的に大きいことが分かる。

一連の試験結果から、酸性機能水の腐食層溶解速度は、希硫酸や希塩酸を用いた場合に比べ、約2倍程度と



除染前 → 試験経過 →

図1 除染試験での模擬試験片表面の変化

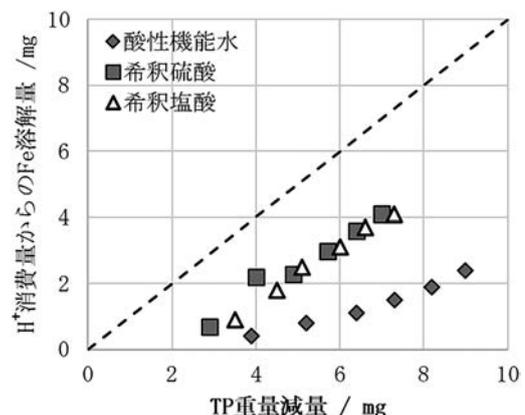


図2 模擬試験片(TP)の溶解特性比較

なっている。このことから、酸性機能水を用いることで、腐食層溶解と同時に進行する母材溶解時間が約 1/2 となり、効率的に腐食層を除去できることを確認した。

また、実際にウラン濃縮に用いられた遠心機から採取した試験片を用いて、酸性機能水浸漬と超音波洗浄を組み合わせた除染試験により、従来の希硫酸を用いた技術では、目標とする表面汚染密度(0.04 Bq/cm²)まで除染するのに、約 100 分程度を要していたが、この時間を約 1/2 に短縮できる見通しが得られた。また、二次廃棄物発生量を約 2 割削減できることを確認した⁴⁾。

酸性機能水を用いた除染技術は、人形峠環境技術センターのウラン取扱施設の廃止措置によって発生する金属解体物の除染に用いる主要技術と位置付け、遠心機への適用に向け、炭素鋼以外の材質への適用性や多様な形状への適用性等についての確認試験を実施していく。

IV. 廃棄物の処理処分に係る技術開発

原子力機構では、令和 11 年度の埋設事業の操業を目指し、現在立地活動などに取り組んでいるが、廃棄物の処理処分においては、性状や汚染の状況がさまざまな廃棄物を処分に適した形態(以下「廃棄体」という。)にするべく、材質や汚染の状況に応じて廃棄物を分別し、容器に固型化する等の安定化処理をして、トレンチ処分やコンクリートピット処分することを想定している。廃棄物処理においては、新規固化材料による固型化技術、砂充填技術、廃棄物容器外部からの非破壊検査技術、AI を利用した廃棄物分別技術等の開発に取り組んでいる。核燃料サイクル工学研究所にある東海再処理施設では、発生した低放射性廃液をセメント固化処理する技術の開発や、埋設事業センターでは、埋設処分する廃棄物の受入基準への適合性確認試験を行っている。また、埋設施設の受入基準に適合しないと考えられる、過去に発生し保管されている廃棄物の合理的な処理方法の検討を行っている。本章ではこれらの取り組みを紹介する。

1. 低放射性廃液をセメント固化する

核燃料サイクル工学研究所の低放射性廃棄物処理技術開発施設(LWTF)では、東海再処理施設で発生した低放射性濃縮廃液やリン酸廃液をセメント固化する計画を進めている。このうち低放射性濃縮廃液はスラリー廃液と硝酸塩廃液に分離し、硝酸塩廃液は硝酸根分解処理によって炭酸塩廃液とした上でセメント固化する計画を進めている。一方、原子力発電所におけるセメント固化で 사용되는普通ポルトランドセメント(OPC)は、炭酸塩廃液の固化に用いる場合には硬化が早過ぎるため適用が困難であった。そこで、新しいセメント材を見つけるため、実規模混練装置を用いて水セメント比や塩充てん率(固化した際の固化体に含まれる塩の割合)等の各種条件における固化可能範囲や長期保管時の圧縮強度について調

査した。その結果、高炉スラグ微粉末(BFS)と OPC を混ぜたセメントを用いた試験で、十分に固化が可能であるとともに、目標である圧縮強度(8 MPa 以上)を満たすことを確認した。さらに、得られた固化体は、製造後 1 年間に強度が増加する傾向があることを確認した⁵⁾。現在、得られた結果をもとに、セメント固化設備の設計を進めている。

LWTF へセメント固化設備を導入するにあたり、設備の設計(安全性評価)において、セメント固化体に含まれる放射性物質から生じるγ線により、固化体中の水分が分解されて発生する水素ガス量を評価する必要がある。一般に、水素ガスの発生量は水素生成 G 値(以下、「G(H₂)」)を用いて算出されるが、セメント固化体の G



【施設概要】
低放射性の液体廃棄物及び固体廃棄物の減容安定化処理を行う
【建家概要】
主要構造：鉄筋コンクリート造
(地下 2 階、地上 5 階)
建築面積：約 2,400 m²
延床面積：約 15,000 m²

図 3 低放射性廃棄物処理技術開発施設(LWTF)の概要

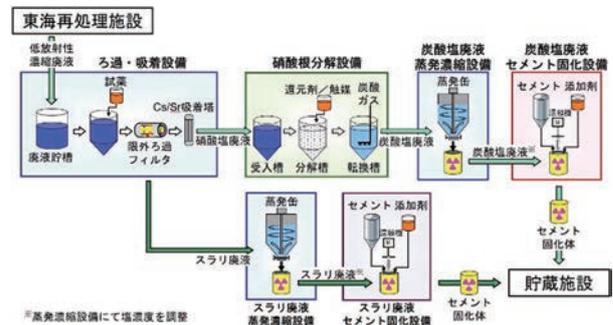


図 4 LWTF における低放射性濃縮廃液の処理工程



■模擬固化体組成(重量 300kg)
・塩：51kg
 [Na₂CO₃/NaNO₃=4.5/1 (mol 比)]
・純水：107kg
・セメント：142kg
 [BFS/OPC=7/3 (重量比)]
■製造条件
・混練温度：50°C
・混練時間：約 20 分

図 5 実規模セメント固化試験の概要

(H₂)は、固化する廃液成分や使用するセメント材の組成等によって異なると考えられる。このため、炭酸塩廃液のセメント固化体の模擬試料を作製した上で、量子科学技術研究開発機構の高崎量子応用研究所にあるCo-60 γ 線照射施設にて γ 線を照射し、発生した水素ガスを定量することでG(H₂)を求めた。

試験の結果、原子力発電所で作製するセメント固化体を想定したOPCと純水を混練した模擬試料のG(H₂) (0.08~0.15 n/100 eV)と比較して、炭酸塩廃液のセメント固化体の模擬試料は比較的小さなG(H₂) (0.02~0.06 n/100 eV)を持つことが分かった⁶⁾。現在、得られた結果をもとに、セメント固化設備の設計(安全性評価)を進めている。

2. 廃棄物容器内の空隙を低減する

原子力機構では、研究施設等から発生する廃棄物のトレンチ処分において、対象となる廃棄物を金属製の角型容器に入れて埋設処分する計画である。過去に実施されたコンクリート廃棄物をフレキシブルコンテナに収納して埋設したトレンチ処分と異なり、金属製の容器を用いることにより、容器内に空隙が残存しやすい。容器内の空隙が大きいことは、トレンチ埋設施設の上部覆土が陥没する等、施設への有害な影響につながる可能性があるため、容器内の空隙を砂で充填し、空隙が20 vol%以下となるような砂の充填方法の確立を目的とした基礎試験を実施した(図6)。

細管状の廃棄物は、内部への砂の充填が難しいと予想されたため、金属細管を模擬廃棄物として選定し、小型土槽の中に金属細管を水平方向(0°)から9°まで傾斜をつけて配置し、土槽を水平に振動させながら砂質土を充填する試験を実施した(図7)。

試験の結果、金属細管の長手方向に土槽を振動させた場合、金属細管が水平(0°)に配置されていれば、金属細管内に一定の締固め度で砂質土が充填されることを確認した。また、土槽内を均一に締固めることができ、有害な空隙とならないことも確認した。一方、乱雑な配置を模擬して9°まで傾斜をつけて配置した場合は、傾斜が大きくなるほど未充填部が多く、充填性が悪くなることを確認した(図7)。

得られた結果から、金属廃棄物を振動方向に対して水平に収納すれば充填性の悪い細管でも砂質土を充填できる見通しが得られ、鋼製角型容器の実規模サイズ(1 m³程度)における試験での試験条件を明らかにした。

今後は、実規模試験を行い、トレンチ処分において、金属廃棄物の容器への収納方法や砂質土の充填方法に係る標準的な手順を設定することを検討していく⁷⁾。

3. 廃棄物処理の加速に向けた対策

原子力機構では、研究開発活動や施設の廃止措置によって発生した廃棄物をドラム缶等の容器に収納し保管

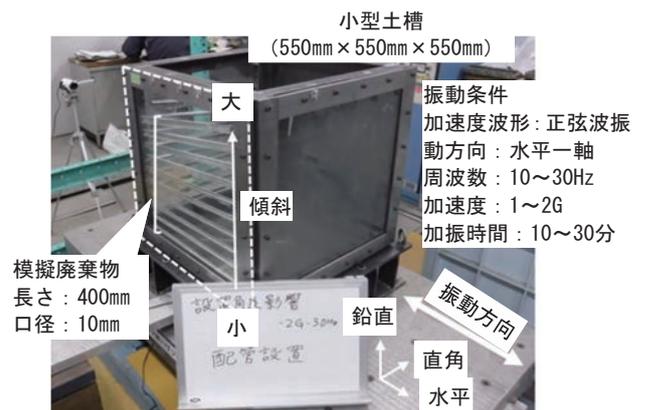


図6 基礎試験に用いた小型土槽および加振機

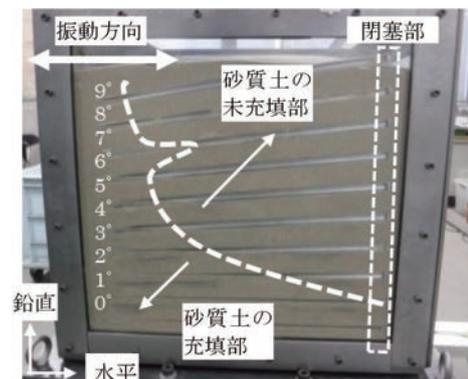


図7 砂質土の充填試験の結果

している。2019年度末時点で約35万本(200リットルドラム缶換算)の廃棄物を保管しており、これらのうち約10万本は、複数の施設から発生した廃棄物が混合されており、放射能濃度評価手法の確立が必要な状況である。また、このうちの一部の廃棄物にはすでに圧縮または固化されている廃棄物があり、埋設施設の健全性を損なう可燃物、有害物等の分別処理が必要である。しかし、分別処理は、現在は主に作業員による目視と手作業により行われているため、多くの時間とコストが必要となっていることが課題である。そこで、多くの廃棄物を対象として合理的に分別処理を加速するため、総合的な対策の検討を行った。そのうち、可燃物と有害物の分別に関する対策の例を以下に示す。

対策検討の前提として、廃棄物はトレンチ処分対象とし、埋設施設への廃棄物の受入基準を検討した。また、検討に際しては、埋設施設の健全性に影響を及ぼさないような対策を講じるといった埋設施設の構造の高度化も含めた。

まず、廃棄体に含まれる可燃物に対しては、(1)可燃物分解に伴う将来の埋設施設上部覆土の陥没量をあらかじめ見込んだ覆土対策、(2)可燃物分解によるガス発生量に応じたガス抜き管の設置、(3)外周仕切り設備と同等の掘削抵抗性を有する覆土構造の設置といった、埋設施設の健全性に影響を及ぼさないような対策を講じた埋設

施設構造の高度化について検討した。その結果、これらの埋設施設の対策により、埋設する廃棄体中の可燃物は20 vol%まで許容可能であるとした。

次に廃棄体に含まれる有害物に対しては、低レベル放射性廃棄物処分における放射性物質の濃度上限値の試算方法と同じ手法を用いて、一般的な環境条件下での廃棄体中の許容可能な含有量の試算値を示した⁸⁾。また、アルミニウム等からのガスの発生による埋設施設等への影響、被ばく線量への影響がないことも確認した。

これらの埋設施設への受入基準の検討を踏まえ、ボトルネックとなっている可燃物、有害物等の分別作業の加速対策を検討した。

可燃物への対策は、埋設する際に埋設施設内での廃棄体の定置管理を適切に行い、埋設施設全体として廃棄体中の平均可燃物割合を20 vol%以内とすることで、可燃物の分別を不要とすることとした。すなわち、小型加速器を使用して高いエネルギーのX線を発生させ、CT画像を取得する高エネルギーX線CTを利用することで、廃棄物中の可燃物の体積を非破壊で評価し、可燃物や空隙のほとんどない廃棄体を適切に混合して定置する管理を行う。

有害物への対策は、開削調査により、約9割の廃棄物には有害物が含まれていないことが明らかになっていることから、有害物を含んでいる約1割の廃棄物を高エネルギーX線CTにより確認し、確認された有害物を含む廃棄物のみ分別処理を行うこととした。

これらの対策により、処理に時間がかかる約10万本の廃棄物の分別処理を大幅に加速できる見通しを得た。今後、埋設施設の設計、CT画像から有害物を判断する技術の構築等を進め、対策の実現を目指す⁸⁾。

V. 人形峠のウラン鉱山の閉山措置

人形峠環境技術センターにおいては、ウラン鉱山の探鉱・採鉱・選鉱・製錬の活動を終了し、露天採掘場跡地、坑道、発生した捨石や鉱さいのたい積場などの鉱山施設の閉山措置を進めており、鉱山施設から発生するウランやラジウムなどを含む坑水の処理、覆土や地下水の組み上げによる坑水の発生源対策および鉱さいのたい積場の覆土措置に取り組んでいる。

これらの取り組みにおいては、坑水に含まれるウラン、ラドンなどの除去技術、地下水流動、地中での放射性物質の挙動などの研究開発テーマがあり、このうち、地下水流動は、環境影響評価、鉱水の発生源対策、地中の物質移動に大きく関与しており、直接観測することができない地下水の流況を把握する手段としてのシミュレーション技術は重要な開発テーマとなっている。

本章では、地下水流動のシミュレーション技術開発における新たな成果を報告する。

1. 直接に観測ができない地中の透水係数分布を決定する逆解析プログラムを開発

地下水流動のシミュレーションに用いる解析コードは、検証により妥当性および信頼性を確認した上で、閉山措置に関わる環境影響評価などに利用されるが、シミュレーション解析の信頼性に関わるもう一つの要素として、解析対象の地下領域における物性値および境界条件を計算条件として適切に取り入れることが重要である。

特に、地中の透水係数分布や、地下水の流入出力、降雨による地中への浸透量などの境界条件は地下水流動に大きく作用するため、信頼性の高い解析結果を得るには、シミュレーションの対象領域にこれらのデータを精度良く反映することが求められる。しかし、実際に取得できるデータは、ボーリングポイントやモニタリングポイントにて得られる離散的な試験データや観測データに限られ、インプットデータとして計算対象領域全体に適切な物性データ分布を設定することが、地下水流動シミュレーションの信頼性に関わる課題となっている。

多くの場合、文献や観測データを基に推定されたデータセットの中から、試行錯誤的なシミュレーションを経てインプットデータを決定しているが、この方法によるインプットデータには不確かさが含まれ、また、計算者の主観に影響されやすくなる。

人形峠環境技術センターでは、閉山措置に関わる各所において地下水位や坑道排水量を測定しており、上述の課題に対応するため、地下水流動シミュレーションでのアウトプットに相当するこれらの測定データに基づいて客観的に透水係数分布や境界条件を同時に求める逆解析プログラムを開発した。

ここで、透水係数分布や地下水などの境界流量をインプットデータとして、地下水圧変動を求めるシミュレーションを順解析と呼ぶ。これに対し、逆解析では、地下水圧や流量データを基に、順解析のインプットデータである透水係数や境界流量を求める。(図8)

雨水の浸透過程を含めた地下水シミュレーションでは、完全に水に浸っていない不飽和領域における地下水流れも取り扱う必要があるが、これまで飽和・不飽和領域を対象とする逆解析は行われてこなかった。

また、逆解析では求めようとする未知パラメータ(順解析のインプットデータ)数に比例して計算時間が増加する時間コストや、未知パラメータを推定するための指標となるモニタリングデータ(地下水位や流量)が求めたい未知パラメータ数に比べて少ない場合、一意の解が得られない逆問題の不適切性が問題となる。そのため、計算の安定性を確保しつつ、計算時間の効率化や、逆問題の不適切性を改善する適切化手法が特に重要となる。

単相流(地下水流動においては飽和領域)の逆解析においては、時間コストに関して、準ニュートン法とAdjoint法を組み合わせた手法が有利であることが知られており、

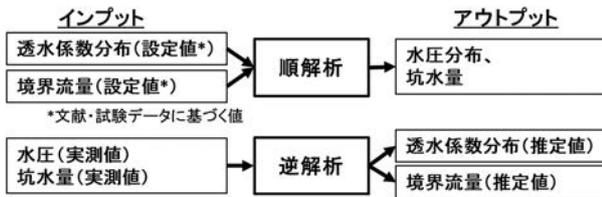
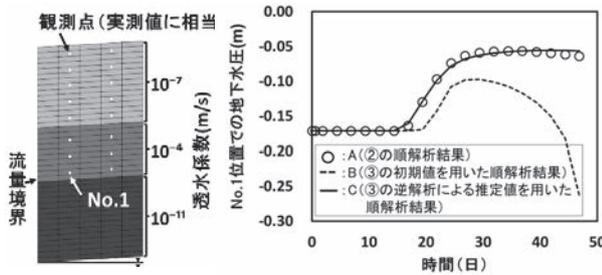


図8 順解析および逆解析の入出力データの関係



(a) 数値実験モデル (b) 数値実験結果例

図9 逆解析の数値実験概要

また、解の一意性を保証する手法としては、ノルム最小法を用いることで、ボーリングやモニタリングによる実測データを反映して透水係数などの未知パラメータを推定できることがわかっている。

本プログラムでは、これらの手法を飽和・不飽和領域の地下水流れを扱う逆解析に適用し、種類の異なる複数パラメータを同時にかつ高速に推定することを狙った。

検証のための数値実験として、①：図9(a)に示す3層からなる多層傾斜地盤(各層の透水係数および境界流量が逆解析における未知データに相当)を想定し、②：観測データに相当する水圧分布を順解析により算出(図9(b)のプロットA)した後、③：逆解析により未知データが適切に推定されることを確認するために、敢えて①とは異なる透水係数分布および境界流量を初期値として②で得られた水圧分布を用いて逆解析で透水係数分布および境界流量の推定値を求め、④：改めて③の初期値を用いた順解析および逆解析で求めた推定値を用いた順解析によりそれぞれ水圧分布を算出した(図9(b)の曲線B,C)結果、曲線Bが算出されるような初期値からでも、逆解析により、観測データに相当するプロットAに十分近い曲線Cを算出できる推定値を求めることができおり、逆解析プログラムによる入力値の推定が適切に行われていることを確認した。

これにより、不飽和領域を含む地下水流動シミュレーションの逆解析において、前述の計算手法を取り入れたプログラムが、透水係数分布の算出に有効であることを確認した。

本手法によるインプットデータの算出は、実測が困難な計算対象領域の物性値設定に関する課題への有力な対応策であり、地下水流動シミュレーションの信頼性向上に寄与するものである。

今後、坑水の発生源対策の有効性を評価するための地下水流動シミュレーションに本手法を適用する予定である^{9, 10)}。

— 参考文献 —

- 1) https://www.jaea.go.jp/about_JAEA/backend_roadmap/
- 2) https://www.jaea.go.jp/about_JAEA/facilities_plan/
- 3) A. J. FRANIS et al. "Decontamination of Uranium-Contaminated Steel Surfaces by Hydroxycarboxylic Acid with Uranium Recovery", Environ. Sci. Technol. 2005, 39, 5015-5021.
- 4) https://rdreview.jaea.go.jp/review_jp/2019/j2019_8_2.html
- 5) 高橋, 他, "東海再処理施設における低放射性廃液の処理技術開発(24)実規模大における炭酸塩廃液のセメント固化の検討②", 日本原子力学会 2019 年秋の大会 3I04(2019).
- 6) 佐藤, 他, "東海再処理施設における低放射性廃液の処理技術開発(20)実機適用に向けたセメント固化体からの水素生成に係る検討", 日本原子力学会 2018 年秋の大会 3J02(2018).
- 7) https://rdreview.jaea.go.jp/review_jp/2019/j2019_8_3.html
- 8) <https://www.nsr.go.jp/data/000299467.pdf>
- 9) https://rdreview.jaea.go.jp/review_jp/2019/j2019_8_4.html
- 10) 井上, 他, "不飽和帯を考慮した傾斜多層地盤の浸透特性と境界流量の逆解析数値実験", 土木学会論文集 A2(応用力学)74 巻 2 号 pp.I_55-I_64, 2018.

著者紹介

所属は、すべて日本原子力研究開発機構

辻 智之 (つじ・ともゆき)

専門分野・関心分野 廃棄物分析, 放射能濃度評価, 放射性廃棄物処分

杉杖典岳 (すぎつえ・のりたけ)

専門分野・関心分野 ウラン取扱施設廃止措置, オペレーションズ・リサーチ, 時系列解析

佐藤史紀 (さとう・ふみのり)

専門分野・関心分野 放射性廃棄物処理

松島怜達 (まつしま・りょうたつ)

専門分野・関心分野 放射性廃棄物処理

片岡頌治 (かたおか・しょうじ)

専門分野・関心分野 放射性廃棄物処理

岡田翔太 (おかだ・しょうた)

専門分野・関心分野 放射性廃棄物処分, 廃棄体特性の評価, 廃棄体の受入基準

佐々木紀樹 (ささき・としき)

専門分野・関心分野 放射性廃棄物処理

井上準也 (いのうえ・じゅんや)

専門分野・関心分野 地下水流動解析, 逆解析, 並列計算