

巻頭言

- 1 次世代に福島の問題を先送りしない責任
万福裕造

時論

- 2 高レベル放射性廃棄物の地層処分
— NUMO の対話活動の取り組み
高橋徹治
- 4 一般人が見た北欧視察から見てきた
日本の課題
石原孝子

解説

- 16 ネット・ゼロ排出に向けたエネルギー
需給システムの展望

ネット・ゼロ排出達成に向け、ゼロ排出化が難しいセクターにおける技術オプションの可能性や、避けられない排出をオフセット、あるいは正味炭素排出を負とする場合に必要とされるネガティブエミッション技術のオプションを解説した。

加藤悦史



大気中のCO₂を回収するClimeworks社のDAC設備

- 20 技術開発に倫理を組み込むこと：
人工知能の事例から
— 倫理委員会セッション「技術の現場と
倫理との相互作用：AI技術を例に」

現在急速に発展している人工知能はどのような倫理的問題を引き起こし、どのような倫理指針が考えられているのか、それらはどのような意義を持っているのか。

久木田水生

解説

- 11 比較を含む定量情報とリスクコミュニケーション
— より良い意思決定を支援するために

リスクコミュニケーションは、多様なリスク情報をステークホルダー間で相互にやり取りしつつ、より良いリスク管理を目指す意思決定のプロセスである。本稿では定量的なリスク情報のやり取りに係る学術的知見を整理した。

桑垣玲子, 菅原慎悦



RCの発展段階と米国の歴史変遷

連載講座 基礎から分かる未臨界 (5)

- 35 1F 燃料デブリの臨界近接監視手法の開発

福島第一原子力発電所での燃料デブリの取り出し作業では、その臨界近接を監視する計画だ。本稿では、燃料デブリ取り出し作業における臨界近接監視の考え方と技術開発の状況を説明する。

林 大和, 加納慎也, 和田怜志



デブリ取り出し作業中の中性子計測のイメージ

23 Column

「地層処分先進地に学ぶ」 井内千穂
「HBO ドラマシリーズとチェルノブイリ」 妹尾優希
「「正しいこと」を凶器にしないために」 服部美咲
「GSS；大シソーラモデル」 坂東昌子

解説シリーズ

わが国の電力市場の全体像と今後の原子力発電
(3 / 最終回)

25 電力市場における原子力発電への支援策

海外では、電力市場における競争の中で収支が厳しい原子力発電に対し、政府が支援策を講じる例がある。

服部 徹

サイエンス

30 気候予測データを用いた太陽光・風力発電の資源予測

ー 2050年以降の発電資源

気象・気候分野では将来予測データがアーカイブされ、2100年頃までの気象・気候が予測されており、太陽光発電、風力発電資源量の予測に加えて電力需要量についても計算が行われている。将来の気候下での地球の自然の変化、注意すべき点についてもあわせて述べる。

大竹秀明

Short Report

45 OECD/NEA の TCOFF プロジェクトの概要

倉田正輝

私の主張

48 原子炉廃止措置の理想、解体せず再活用が最善

西村昭彦

日々是好日ー福島浜通りだより (9)

53 活かされている震災の繋がり

吉川彰浩

6 NEWS

- 政府、2020年度予算案決定
- 規制委、大飯の廃止措置計画認可
- 海外ニュース

報告

40 使用済燃料対策の IAEA 国際会議ー傾向分析と最優秀若手研究者賞受賞

IAEA が開いた使用済燃料対策に関する国際会議では、次の時代を見据えたフランスとロシアの存在感が強く印象に残った。

三枝利有, 岡村知拓, 朝野英一

談話室

50 気候変動と原子力の役割に関する IAEA 国際会議

尾本 彰, 日置一雅

52 リケジヨの思い (9) 冬の不調に対処する

口町和香

理事会だより

54 ホームページのリニューアルについて

小山正史

- 55 会報 原子力関係会議案内、共催行事、次年度会費請求のお知らせ、「2020年春の年会」見学会案内、英文論文誌 (Vol.57, No.2) 目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

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

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

次世代に福島の問題を先送りしない責任

巻頭言



農業・食品産業技術総合研究開発機構 上級研究員

万福 裕造 (まんぷく・ゆうぞう)

北海道大学大学院修了，博士(工学)。2011年から農研機構で農地除染実証事業による技術開発を担当。2012年に福島県飯舘村の復興対策課へ派遣。地域の営農再開や環境回復に従事。専門は分野は土木，粘土鉱物，環境回復，鋼構造コンクリート。環境回復に関連した環境省や南相馬市の委員を兼ねる。

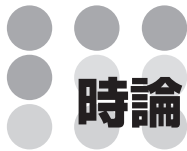
東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故により広範囲に放射性物質が飛散し，地表面に沈着した。放射性物質による汚染から環境を回復するため除染が実施され，約6年の期間を要して，帰還困難区域を除く，避難指示解除準備区域・居住制限区域において面的除染を完了した。私が震災直後に派遣された飯舘村では農地除染として主に表土削り取りを実施し，ここだけで約200万 m^3 の除去土壌が発生，村内96箇所の仮置場に保管した。除去土壌は，平成28年度より中間貯蔵施設への輸送を開始。その量は福島県全域で約1,400万 m^3 と推定されており，現在，中間貯蔵施設への運搬がなされている。中間貯蔵施設に保管後，「福島復興再生基本方針」(閣議決定2012.7.13)等において，「中間貯蔵開始後30年以内に，福島県外で最終処分を完了するために必要な措置を講ずる」旨が国の責務として記されているとおり，2045年までに福島県外での最終処分を完了させることが法律で定められている。一方，全量をそのまま最終処分することは，必要な規模の最終処分場の確保等の観点から実現性が乏しいとされる意見(例えば，NHK(2019))もある。実際に中間貯蔵施設に行くと，その膨大な面積と量に圧倒され，その責を次の世代へ先送りすることの問題意識が湧き上がってくる。

現在，環境省は「中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会」を開催し，「再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方を取りまとめた。「再生利用」とは，利用先を管理主体や責任体制が明確である公共事業等に利用し，人為的な形質変更が想定されない盛土材等の構造基盤の上に，覆土等の遮へい，飛散・流出の防止，記録の作成・保管等の適切な管理の下で，限定的な利用を行うことであり，実証的な検討が行われている。最終処分と再生利用は同じベクトルのものと判断できることを認識し，減容・再生利用に関する技術開発をより一層推進すると共に，安全性の確保・地元の理解を得て，最終処分と再生利用の仕組みを構築していくことが必要である。

環境省は，南相馬市，飯舘村で除去土壌の再生利用に関する実証事業を実施しているが，この2つの実証事業は，実証試験を受け入れた住民の理解と協力によるところが極めて大きい。再生利用の実証試験においては，安全性に関する科学的な検証は重要な要素であるが，30年以内の県外最終処分は全国的な課題であり正確な情報発信も極めて重要と認識したい。しかしながら，情報発信がホームページでの紹介や個別の説明会等だけでは情報伝達がなされる範囲は限定的となり，全国的な議論には及ばない。また，科学的な知見の蓄積があっても，安全の判断は個人の価値観や感覚に依拠するところが大きく，特に放射能の課題は，安全と安心を表裏とし安易に考えることはできない。専門家による丁寧でわかりやすい説明や，その人の立場に寄り添い理解される不安など，多面的な相互理解の展開が必要とされる。

中間貯蔵施設に運搬が開始されてから30年以内の県外移設に関して，福島復興に関わる各府省，関係地方公共団体，研究機関等の専門家はこの問題を次世代に先送りすることはあってはならない。自分自身の問題として捉え，全国的にボトムアップした情報共有や情報発信に努め，次世代の人材育成も進め，間も無く10年を迎ようとしている福島に残された課題に分野横断的に取り組まれることを提案したい。

(2019年12月25日記)



高レベル放射性廃棄物の地層処分 ～NUMO の対話活動の取組み～



高橋徹治 (たかはし・てつじ)

原子力発電環境整備機構(NUMO)
地域交流部長

愛知県生まれ。1983年 中部電力に入社。
支店広報課長、営業所長を歴任し、2013年
から NUMO に出向。2018年7月に転籍し、
現職。

I. はじめに

NUMO は「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」に基づき、2000年10月に経済産業大臣の認可を受けて設立された法人である。原子力発電により発生する使用済燃料を再処理した後に残る高レベル放射性廃棄物を、地下300m以上深い岩盤中に埋設する地層処分を実現することを使命としている。

本稿では、地層処分の早期の実現に向けて、現在、我々が取り組んでいる対話活動の状況と今後の方向性についてお話ししたい。

II. 対話型全国説明会の全国展開

2017年7月、国から「科学的特性マップ」が提示された。これは、地層処分に関する地域の科学的特性を、既存の全国データに基づき一定の要件・基準に従って客観的に整理したものである。

「科学的特性マップ」の公表を契機に、日本でも地層処分に適した地下環境が広く存在するとの見通しを共有し、この問題を社会全体で解決すべき課題として理解を深めていただくため、少人数のテーブルに分かれてのグループ質疑を行い、フェイス・トゥ・フェイスの対話活動を全国各地で展開している。

これまで100ヶ所以上の開催を通じて、参加者の皆さんの様々なご質問にお答えし、ご意見に真摯に耳を傾ける中で、以下に記す「不安」や「ご意見」が多いことが分かってきた。

その1 3.11大震災時の福島第一発電所の事故等による、国の原子力政策や電力会社、原子力全体に対する不安・不信心。

その2 日本の地質環境に対する不安。具体的には「日本の地層は、ヨーロッパの数億～10数億年と古い地層に比べてかなり新しいのに、できるのか」、「どこを掘っても大量の地下水が出てくるのに、できるのか」、「地震や火山の多い日本では、これまで大きな災害を繰

り返しているのに、できるのか」といったご意見。

その3 超長期の安全性を実証することができないのに、本当に大丈夫だと言えるのか、という不安。「長寿命の放射性核種を比較的短寿命の核種に変換する、核変換技術の実現に力を入れるべき」、「地上保管を継続すれば、将来的には地層処分に代わる技術が出現するのではないか」というご意見。

NUMOとしては、参加者から寄せられるこれらの不安やご意見に対して、どのようにお話ししたら安心・ご理解をいただけるかを説明会ごとに振り返り、説明資料や提供する情報等の工夫・改良に取り組んでいる。

まずもって、参加者の皆さんには、すでに高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)は存在しており、テロや予期せぬ自然災害によるリスクを考慮すれば、地上保管より地下深くの岩盤内に埋設の方が安全だということをお話ししたうえで、この問題の解決を将来世代に先送りすることなく、私たちの世代でしっかりと処分の道筋をつけていく必要があることをお伝えしている。

その上で、可能な限りのリスクを予測・検討し、放射性物質が地中深くから地上にやすやすと移動しないような多重防護の仕組みを構築することによって、リスクをできる限り小さくするという、安全確保の考え方を説明し、「なぜそう言えるのか」、「なぜそんなことが分かるのか」に対して丁寧にお伝えするようにしている。

そのためには、地層処分の安全性についての裏付けや論拠が科学的に妥当であり、超長期の将来の不確実性に対してもしっかりと対応できることを説明できることが重要と考えている。

2018年12月、NUMOは「包括的技術報告書(わが国のセーフティーケース)」を取りまとめた。この報告書は、地層処分の実現に向けてどのようにサイト調査を進め、処分場の設計・建設・操業・閉鎖を行い、閉鎖後の長期間にわたる安全性を確保するのかについて、これまで

蓄積した科学的知見や技術を統合して包括的に説明するものである。

12月20日、日本原子力学会からレビュー結果を受領した。より良い報告書とするための修正を加えた後、国際機関(OECD/NEA)のレビューを受ける予定である。今後は、これらの評価・確認結果を公表するとともに、多様な専門家等を招いたワークショップ等を開催、各分野からご意見をいただき、技術の改善を図っていく。

Ⅲ. 「より深く知りたい」関心層との対話(学習支援)

先に述べた「対話型全国説明会」等で地層処分の情報に初めて触れる段階から、さらにもっと深く知りたい、学びたいという関心をサポートするため、NUMOは、全国で地層処分事業に関心を持って活動していただけるグループに対して、地下研究施設等の見学会や勉強会の企画をお手伝いする「学習支援事業」に力を入れている。昨年度は、全国各地で50以上の団体に参加いただいた。

ここ数年、活動内容を深化させていく中で、参加団体の皆さんから「実際に地層処分場を受け入れた北欧の状況、地域の方々の思い」を知りたいという声が多く聞かれるようになった。

そのため、初めての試みとして、2018年度に参加された団体の代表者(一般・大学生 各3名)による海外先進地視察を9月に実施し、その成果報告会を10月に開催した。参加メンバーからは、「処分事業と地域がどのように共生していくのかを地域の方々としっかり議論することが重要だ」、「賛成の人も反対の人も議論の結果を尊重し、前を向いて一緒に歩んでいく姿に感動した」などの前向きな評価の声が聞かれた。

これらの気づきを、視察メンバーやNUMOからの情報発信によって、さらに多くの方に触れていただくことで、関心を持っていただける方々の拡大につなげていく。

加えて、NUMOは、処分事業を具体的に「自分ごと」として考えていただけるような情報提供を強化していく観点から、地域の発展ビジョンの策定に資するよう、処分事業に伴う地域発展のイメージが共有できるような情報についても、積極的に提供していく。

11月下旬に、地層処分に関心を持ったグループの一つが、福井県内で、団体独自の企画によるシンポジウムを開催し、50名を超える一般市民等が参加した。

このシンポジウムは「原子力発電の推進・反対の是非ではなく、すでに存在する高レベル廃棄物の処分問題について考えよう」と呼びかけたものである。ここでは、「自分ごととして考える」「みんなで対話を重ねる」ことが、この問題を解決する糸口になるのではないかと、という観点で、パネルディスカッション等が行われ、参加者は熱心に聞き入っていた。

NUMOはこうした関心を持ったグループが全国大・

地域別・ブロック別に集う情報交流・共有の取組みを応援していくとともに、グループの拡大・ネットワーク化を促すことにより、各地域でさらに新たなグループの活動の立ち上げにつながることを期待している。

Ⅳ. まとめ

これまで、NUMOが取り組む「対話活動」の状況についてお話しましたが、まだまだ我々のメッセージが届いていないと、感じるのは、10年後、20年後に日本を背負ってもらって中心世代となる、10代から20代の若者の皆さんへのアプローチである。

至近のデータでも、今年度5月～10月までに実施した対話型全国説明会23会場において、50歳以上の参加者が約8割を占めている。

現在、YoutubeやInstagram等の情報発信ツールの活用、情報コンテンツの工夫を凝らすことにより、情報に触れた若年層が関心を持っていただき、より深く知りたいと思っただけできるよう、取り組んでいる。

筆者は、今年度、資源エネルギー庁やNUMO等が企画し大学生や大学院生が参加する会合になるべく出席し、彼らに地層処分事業に係る情報提供を行うとともに、意見交換をする機会を作るように心がけている。

巷では「現代の若者は、高レベル放射性廃棄物の地層処分といった社会問題への関心が薄いのではないかと見る向きもあるかもしれないが、彼らとの意見交換を通して感じることは、我々が考える以上に、彼らの思考は柔軟であり、「すでに高レベル放射性廃棄物は存在するのだから、今から地層処分の検討を進めるのは当然だ」とか、「地層処分の受入れを是とすると、どうすれば地域の合意形成を進められるのかを議論すべき」等の積極的な提言をしてくれる学生もいる。

これまでNUMOが実施する対話活動に、なかなか若者が参加しないことについて、「人との関わり合いを好まないから」、「面倒な社会問題に対する関心が低いから」、「新聞をあまり読まないから」等、いわゆる若者気質を理由にして、若者が関心を示すような新たな仕掛けを打ち出す努力が足りなかったと反省している。では、何ができるのか、何を仕掛けることができるだろうか。

9月に学習団体のメンバーとフィンランド・スウェーデンを訪れた折、自治体の長や事業者から「地層処分事業は新しい環境プロジェクトだ」というコメントがあった。

我々も、地層処分を「問題」ではなく「これからの時代のプロジェクト」と位置づけ、若者たちに、自分ごととして一緒に考えてもらえるような、新たな取組みを打ち出していきたい。

(2019年12月24日記)



一般人が見た北欧視察から見えてきた日本の課題



石原 孝子 (いしはら・たかこ)

松江エネルギー研究会 代表
主婦。しまね環境アドバイザー、省エネルギーセンター派遣講師、島根県地球温暖化防止活動推進員、環境とエネルギーを考える消費者の会 通称えこはーもにい副代表

高レベル放射性廃棄物地層処分の先進地である、フィンランドのオンカロの地に、まさか私自身が立とうとは全くも想像などもしなかったのが、昨年夏、降って湧いて実現の運びとなった。

原子力や地層処分の専門家でも研究者でも大学関係でも企業関係者でもない一般人の私が、なぜ参加できたかという、原子力発電環境整備機構(NUMO)より、「海外先進地視察プロジェクト」として、2018年度 NUMO の学習支援事業に参加した団体を対象に、7月下旬に案内募集があり、書類審査の上、学生3人に一般人3人の6人の参加者が決定した。その後 NUMO の職員と関係者総勢12名で、バタバタと8月31日の事前打ち合わせを経て、9月1日より8日までの8日間のハードな旅が始まった。

私の応募動機は原子力発電所立地地域の住民として、「なぜ、地層処分地の合意形成ができたのか」「なぜ、小泉純一郎元首相がオンカロに行って反原子力になったのか」の二点であった。それを紐解く旅の始まりである。

今回の視察訪問先は、
フィンランド

- ①オルキオト ビジターセンター
- ②低中レベル放射性廃棄物処分場、オンカロリサーチギャラリー
- ③オンカロ地下岩盤特性調査施設
- ④エウラヨキ自治体(町長・議長・副議長)
- ⑤エウラヨキ一般住民反対派(元議長)
- ⑥エウラヨキ町内中学校(小中一貫校)

スウェーデン

- ⑦キャニスタ研究所、エスポ岩盤研究所
- ⑧低中レベル放射性廃棄物処分場、最終処分予定地
- ⑨エストハンマル自治体 市長

私が住んでいる松江市は、全国唯一県庁所在地に原子力発電所立地の県都である。しかし立地地域でありながら住民の原子力への共存意識は全く皆無である。私は市

民として、エネルギーや原子力の事を「いい」「悪い」ではなく正確に知ることを目的として会を立ち上げた。学生を中心に活動しているのが「松江エネルギー研究会」、女性層が対象の「環境とエネルギーを考える消費者の会」である。共に NUMO の学習支援事業で、岐阜県の瑞浪や北海道の幌延の超深地層研究所や、六ヶ所村、東海村などの視察を重ね、勉強をしている会である。

私は普段、学校で環境の授業をさせて頂いているが、その時に必ず話すのが、同じ山でも見る場所により見え方が違うという話をし、「それぞれの立場によって見え方が違うよ」と話す。

今回の北欧視察も、研究者でもない一般のおばちゃんが見てきた北欧視察であることだと言いたい。

一般人の私が原子力や、地層処分の事を詳しく説明する必要はないので割愛するが、視察中に思ったことを書かせて頂く。

まずフィンランド、オンカロの地に立って思ったのは、幌延や瑞浪と何ら変わらないことだ。変わるとすれば、坑道の広さと幅。車で15分かけて地下400m降りるのだが、途中何度かコーヒープレイクのための車とすれ違う。作業効率を考えて地下にトイレとキッチンが併設されているが、どこまで使用されるのかと思った。実際にオンカロに立って感慨一入となったが、小泉氏は「なぜ、このオンカロを見て反対」となったのか疑問が膨らんだ。のちに、正確な情報は得られなかったが、最初にフィンランドの大使館に到着した時点でも「反対」と言っていたと聞いた。

今回の視察では「信頼」という言葉を数多く聞いた。原子力発電所での事故がなかったことも合わせ、専門的知識のある日本の規制庁にあたる STUK への信頼は8割を超え、実施主体のポシヴァ社に対しても、30年間の細かな対話から信頼を勝ち得た賜物だと思った。

それは、エウラヨキの町長さんや議長さんたちの話を聞いて、住民の意識調査では当初地層処分に賛成は4割だったのが、EU加盟時に原子力の法律改正により、放

放射性廃棄物の輸入も輸出も停止となり、自国での処分になった。「公平性と責任」を元に、議会では立場の違う人がいるのが当り前のなか、冷静な協議が積重ねられ受け入れとなった。

受入れるとなると、雇用や税収という経済を切り離せない問題。

反対派の元議長さんの話では、反対はしていたが、元から STUK に対しては信頼している。そして決議の結果は尊重し、前を向いて進むと話された。それには良い情報、悪い情報をきちんと開示し、建設的な考え方が見受けられた。

女性の社会進出がままならない日本と違い、北欧ではクオータ制の導入から、今では女性の社会進出が当り前となっており、女性研究者や技術者からの説明を多数受けた。

また、エウラヨキでは小中一貫校での授業を拝見した。私はここでの視察が心に残り、「合意形成問題」の糸口があると感じた。

参観したのは中学2年生の科学の授業。「水兵リーベ僕の船…」を丸覚えされた方も多いただろうが、その元素記号についてカードを用いての勉強。隣同士でカードを好きなようにグループ分けをし、それをそれぞれが発表。考える力をしっかり養い、いろいろな考え方がある事が分かるが、それも受け入れ褒める。次に現物の元素とカードを結び付けるというクイズ。みんな真剣にそれぞれが考え、先生から正解発表となり、なるほどとなる。1人ずつ好きな元素記号を言えば、すかさず先生からその元素の特徴や有用性を説明。その子にとってその元素は一生忘れないだろうと思った。思わずもっと授業を受けていたいと思ったことと、小学校1年生からこんな好奇心を養う授業を受けられるのに嫉妬をし、宿題はなく遊びながら学ぶ授業だったら、考える力、生きる力が養えるのだと思えた。それと同時に、ふと思い出したのが、毎年学生を連れて視察に行くのだが、数年前に松江高専の学生を連れて東大内にあるタンデム加速器を見学した折、教授からいろいろな質問が出てきたのだが、タジタジとしながら数分後、学生が「あっ」と声を挙げた。「授業で習ったのはこの事だったのか」と。その場に合わなければ、丸覚えだった授業内容は現物と一致しなかったのだ。ふっと私たちの教育現場は「残念な国なのだ」と思えた。

校内見学で職員室を拝見。日本と違い大きなテーブルに、ソファがあるだけで開放的な事と、勤務時間が午後

2時や3時に終わること。

手工芸の部屋も拝見。伝統工芸の伝承を見据えた、手芸と木工教室はとても充実していた。

いろいろな教育関係者からフィンランドの教育について話題となる。PISA という OECD 調査 15 歳学習到達度調査では過去フィンランドは2位だった。その当時にはこぞって視察に行ったというくらい、教育の先進地でもあったのだが、現在は東アジアが上位を占め、フィンランドは下降気味である。ただ、競争社会で学力向上が強く求められているなか本来の学習意欲や創造性など、丸覚えで養えるものではないと思う。

教育には、学校教育もあれば、家庭教育、地域教育があるが、幼少時を思い出すと、地域のお兄さん、お姉さんに連れられ、考える力、応用する力が色々な面で学べた。家庭は大家族でわがままを言えるはずもなく、自分の立ち位置をいつも考えていたし、地域のなかでも、自分が今しないといけないことを常に考え、祭りやイベントの成功に導いていた。そう考えると、まだ今なら間に合うかもしれない。考える力を養えるのかと。

2018年12月にオープンしたヘルシンキ中央図書館「Oodi」に行ったが、イベントスペース、会議室、シネマ、カフェ、ゲームや3Dプリンター、ミシンに蔵書が自由に読める世界最高の図書館だった。この国の懐の深さ、自由な発想の国で、バックキャストिंग的思考だ。

スウェーデンでは実施主体のSKB社の紳士的な対応に感謝しながら、選定プロセスへの道のりを聞き、最終的には「信頼」と説明責任の重要性を感じた。フォルスマルク処分地予定のエストハンマルの市長さんからは、この処分地は最終決定ではなく、まだ拒否権があるという驚きの発言だった。次世代へ引き続く課題だから市長さんの悩む顔が浮かぶ。

今回の視察を通して、わが国で本当に「合意形成が出来るのか」を考えると、まずは「信頼」だ。そのためには関係者だけでなく、国民一人一人が本気で「自分ごと化」として捉えるため、何度も何度もダメ元で、住民への説明をし、やってダメなら、方向性を変えながら臨機応変に対応し、やる前から諦めるマイナス思考はもう辞めにして、「信頼」を得ながら前を向いて進む未来を見たいものだ。そして処分地の決定を一日も早く決定して欲しいものだ。

(2019年12月11日記)



政府、2020年度予算案を決定

政府は2019年12月20日の閣議で、来年度当初予算案を決定した。経済産業省のエネルギー対策特別会計は7,481億円(前年度比251億円増)で、このうち燃料安定供給やエネルギー需給高度化をめざすエネルギー需給勘定が5,754億円(同285億円増)、電源立地や原子力安全規制対策を行う電源開発促進勘定が1,675億円(同30億円減)。電促勘定のうち電源立地の促進を図る電源立地地域対策交付金は762億円(同47億円減)、原子力発電

施設等立地地域基盤整備支援事業は83億円(同20億円増)が計上された。

分野別にみると、福島復興・創生に向けた取組が1,080億円(うち廃炉・汚染水の対策が169億円、原子力損害賠償・廃炉等支援機構交付金が470億円)、エネルギー転換・脱炭素化に向けたイノベーションの推進が4,320億円、エネルギー安全保障・レジリエンスの強化が3,015億円となっている。(原子力学会誌編集委員会)

規制委、大飯1,2号機の廃止措置計画を認可

原子力規制委員会は2019年12月11日の定例会合で、関西電力大飯発電所1,2号機(PWR, 117.5万kW)の廃止措置計画の認可を決定した。同委では2018年11月に認可申請を受けているが、透明性確保の観点から廃止措置計画についても新規基準への適合性と同様に公開機会審査を行うこととなり、本件に関しては同年12月より計5回の会合で事業者から説明を求めるなどした。

審査結果では、廃止措置工事が運転中の同3,4号機に影響を及ぼさないよう定められた社内標準・体制などを確認したとしている。

大飯1,2号機とも、廃止措置は「解体準備」(第1段階)、「原子炉周辺設備解体撤去」(第2段階)、「原子炉領域解体撤去」(第3段階)、「建屋等解体撤去」(第4段階)の区分で並行して進められ、2048年度に完了する予定。今回、全工程のうち第1段階について審査が申請され認可となった。なお、1,2号機に貯蔵されている新燃料および使用済み燃料のうち、使用可能なものは3,4号機で使用することとなっている。

(資料提供：日本原子力産業協会)

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

IEAが年次報告、「将来エネルギーの確保で大規模な変革が必要」

国際エネルギー機関(IEA)は2019年11月13日、世界のエネルギー・ミックスに関する2040年までの見通しを3通りのシナリオで解説した最新の年次報告書「ワールド・エナジー・アウトック(WEO)2019年版」を公表した。

それによると、今日のエネルギー世界は現状と到達点に大きな差異が生じており、石油市場に十分な供給量があるにも拘わらず、生産国を巡る地政学的な緊張と不確実性は増大。かつてないほど大量の温室効果ガスが排出

される一方、国際的な温暖化防止目標に沿って排出量を削減するための現行政策は不十分である。また、世界中すべての人へのエネルギー供給を約束しながらも、今なお世界の8億5,000万人の人々が電気のない生活を強いられており、将来、持続的で確実なエネルギーが確保される方向に世界を向かわせるには、エネルギー・システムのあらゆる部分で、迅速かつ大規模な変革が必要になると報告書は訴えている。

WEOはIEAが発行する最も重要な刊行物の1つであり、最新版はこのような差異の広がりについて詳細に分析した。今日下された政策的な判断は、将来のエネルギー・システムに影響を及ぼすとの観点から、世界的に人口が増加する中、信頼性のある適正価格のエネルギー供給に今後も大きな重点を置きつつ、地球温暖化や大気

汚染の防止目標を達成するための道筋を示している。

WEOによれば、各国政府による決定事項は将来のエネルギー・システムにおいて、引き続き重要なものとなる。このことは、WEOが以下の3つのシナリオで示した今後数10年間の異なる道筋においても明白であり、政策立案者が現在推し進めている政策や投資、技術などがこれに相当する。

【現状政策シナリオ】：これは世界が今、正に進んでいる道筋で、各国政府が現状の政策を維持した場合、世界のエネルギー・システムがどのように発展するか、基本的な状況を描いたもの。このシナリオによると世界のエネルギー需要は2040年までに1.3%上昇し、結果としてエネルギー市場のあらゆる側面に緊張がもたらされる。エネルギー部門のCO₂排出量も、大幅に上昇し続けるとした。

【決定政策シナリオ】：これまで「新政策シナリオ」と呼称していたシナリオで、既存の方策に加えて、現時点の政策目標が盛り込まれている。現行計画による影響の説明を目的としたもので、このシナリオが描く将来のエネルギー像でもやはり、持続可能で確実なエネルギーという目標からは、かなり不十分なものになる。すなわち、2040年時点においても世界の何億もの人々がやはり、電気のない生活をしており、大気汚染で早死にする人の数は現状の高めのレベルに留まる。また、地球温暖化がもたらす深刻な影響も定着するとしている。

【持続可能な発展シナリオ】：世界各国の政策決定者が、地球温暖化やその他のエネルギー問題で設定した目標の全面的な達成に向け、それぞれについて何をしなければならないかの抜本策を示したものの。このシナリオはパリ協定の履行と完全に一致する道筋を示したもので、世界の平均気温の上昇を2℃以下に抑えることを目的としている。ここでは、エネルギー・システム全体で大掛かりな変更を迅速に行わねばならぬが、温室効果ガスの大幅な削減は複数の燃料と発電技術を組み合わせることで可能であり、効率的かつコスト面の効果も高いサービスの提供につながる。

IEAのF.ピロル事務局長は、今回のWEOが極めて明確に示した事実として、「世界のエネルギー・システムを変革する上で、ただ1つの単純な解決策というものには存在しない」という点を強調。複数の発電技術や燃料が各国経済のあらゆる部門でそれぞれの役割を担っていることから、各国政府は将来を形作るための幅広い視野を持ち、行動するという明確な責任を負う一方、政策立案者に強力なリーダーシップが求められると指摘している。

【カナダ】 原研、SMR 開発支援イニシアチブの 候補企業 4 社を選定

カナダの国立原子力研究所(CNL)は2019年11月15日、同国内で小型モジュール炉(SMR)の研究開発と建設を促進するため、2019年7月に設置した「カナダの原子力研究イニシアチブ(CNRI)」の候補となる企業4社を選定したと発表した。

CNRIは世界中のSMRベンダーに対し、CNLの専門的知見や世界レベルの研究設備を提供する新しいプログラム。対象分野としては市場分析や燃料開発、原子炉物理、モデリングなどを指定しており、これらに関するプロジェクトの提案企業を毎年募集することになっている。参加企業はCNLが提供する資源を最大限に活用するとともに、技術的知見を共有。開発中のSMR技術の商業化に向けた支援を、出資金あるいは現物出資の形でCNLから受けることができる。次回の募集についても、CNLは2020年初頭を予定していることを明らかにした。

同イニシアチブで最初の受益者に選ばれたのは、(1)英国の原子炉開発企業モルテックス・エナジー社のカナダ支社、(2)米カリフォルニア州のKairosパワー社、(3)米ワシントン州のウルトラ・セーフ・ニュークリア社(USNC)、(4)カナダを本拠地とするテレストリアル・エナジー社。CNLは今後、研究開発費の分担等について、これら4社との最終交渉を開始する。

モルテックス社は現在、カナダのニュー・ブランズウィック大学と共同で、カナダ型加圧重水炉(CANDU)の使用済燃料をピン型溶融塩炉(SSR)の燃料に転換する試験装置について、建設と合理化を進めている。また、Kairos社の提案プロジェクトは、高温のフッ化塩で冷却する「KP-FHR」設計を実現するため、トリチウムの管理戦略を策定するというもの。片やUSNCは、同社製「Micro Modular Reactor(MMR)」の開発で浮上する様々な技術的課題について、解決に向けた作業プロジェクトを提案した。テレストリアル社は、同社製「一体型溶融塩炉(IMSR)」等に対して、安全・セキュリティや核不拡散関係の技術を適用する可能性を評価したいと提案。CNLが保有する設備の中でも特に、「ZED-2原子炉」の利用機会を得たいとしている。

CNLのM.レジンスキー所長兼CEOは今回の選定について、「CNLが実施した市場調査の結果や、カナダのSMR開発ロードマップの判明事項からも、原子力産業界がCNLの知見や設備を一層必要としていることが明確に示された」と説明。CNLのCNRIプログラムは、そのような利用機会を実現する方法として設置されたと強

調した。

CNL の K. マッカーシー科学技術担当副所長も、「カナダを SMR 研究のハブとするため、CNL が過去 3 年間に実施した作業は大きく前進した」と指摘。SMR に共通する主要な技術分野で、CNL が膨大な知見を蓄積してきたという事実に言及した。

SMR 開発について CNL は、2017 年 4 月に公表した今後 10 年間の「長期戦略」の中で、2026 年までに CNL の管理サイト内で少なくとも 1 基、実証炉を建設するという目標を明示した。2017 年中に SMR の開発企業から 19 件の関心表明を受けており、2018 年 4 月に開始した全 4 段階の審査プロセスにより、提案企業の募集と選定作業を進めている。2019 年 2 月には、USNC が開発した MMR 設計が同審査で唯一フェーズ 3 に進んだほか、テレストリアル社の IMSR もフェーズ 2 に移行している。

MMR については、エネルギー関係のプロジェクト開発企業グローバル・ファースト・パワー(GFP)社が 2019 年 4 月、CNL のチョークリバー・サイト内で建設するため、SMR としては初の「サイト準備許可(LTPS)」をカナダ原子力安全委員会(CNSC)に申請した。CNL の審査プロセスは、CNSC の許認可プロセスから完全に独立していることから、許認可段階に進展した建設プロジェクトには法的規制要件が課され、提案企業は一般国民や先住民コミュニティなどとプロジェクトの重要事項に関する協議を行わねばならない。

3 州の首相が SMR 開発で協力覚書

カナダ・オンタリオ州の D. フォード首相、ニュー・ブランズウィック州の B. ヒッグス首相、およびサスカチュワン州の S. モー首相は 2019 年 12 月 1 日、出力の拡大・縮小が可能で革新的技術を用いた、多目的の小型モジュール炉(SMR)をカナダ国内で開発・建設するため、3 州が協力覚書を締結したと発表した。

3 人の首相はともに、原子力発電は炭素を出さず信頼性が高く、安全で価格も手ごろな発電技術と認識しており、SMR は遠隔地域などを含むカナダ全土において、経済面の潜在的可能性を引き出す一助になると明言した。同覚書に法的拘束力はないものの、今後は 3 州のエネルギー大臣が 2020 年 1 月から 3 月の間に冬季会合を開催して、最良の開発・建設戦略を議論。国内の主要な発電事業者には、費用対効果検討書も含めたフィージビリティ報告書の作成で協力を求める方針であり、2020 年秋までに SMR の戦略的開発計画を策定するとしている。

SMR の利点について 3 首相は具体的に、送電系統とつながっていないコミュニティに対してモクリーンで低

コストなエネルギーを供給できるとしたほか、鉱山業や製造業などエネルギー多消費産業に対して便宜を図るなどと指摘。また、SMR 技術がカナダのみならず世界中で採用されれば、カナダの経済成長を促すとともに輸出機会を拡大することにもつながるとした。

こうしたことから、3 州の政府はそれぞれに特有の必要性や経済面の優先事項に見合う方法で経済を成長させ、温室効果ガスの排出量を削減するために協力体制を敷く方針。力を合わせて革新的なエネルギー・ソリューションを開発し、地域の雇用や成長促進に向けた最良のビジネス環境を創出していくと述べた。

今回の覚書によると 3 州は、カナダ連邦政府の天然資源省が 2018 年 10 月に公表した「カナダにおける SMR の開発ロードマップ」とともに、付託された「行動要請文」の策定に貢献した。カナダは原子力産業の全領域を備えるなど最上位に位置する原子力国家であり、SMR 開発で先駆的国家となることにより、このように高度な革新的技術分野で戦略面や経済面、および環境面の利益が得られるとした。

3 州は世界でも有数の原子力企業が多数所在する地域であり、3 州それぞれが州内で SMR を導入することに関心を抱いている。このような背景から、3 州は以下の点について合意し、相互協力を行うことになったもの。

- (1)地球温暖化や州内のエネルギー需要、経済開発などに取り組むため、それぞれの必要性に応じた SMR の開発と建設を 3 州が協力して進める。
- (2)SMR 開発における重要課題——技術的な準備状況、規制上の枠組整備、経済性と資金調達、放射性廃棄物の管理、国民および先住民との関わり合い——などに一致協力して取り組む。
- (3)「原子力のようにクリーンなエネルギーは地球温暖化への取組みの一部として必要」という明瞭明解なメッセージが発せられるよう、3 州が連邦政府に積極的に働きかける。
- (4)3 州内のオンタリオ・パワー・ジェネレーション(OPG)社、ブルース・パワー社、ニュー・ブランズウィック・パワー社、およびサスク・パワー社の CEO から要請されたように、開発ロードマップで特定された SMR 開発への支援提供を、3 州が協力して連邦政府に働きかける。
- (5)原子力や SMR が有する経済面や環境面の利点について一般国民に情報提供するため、3 州が協力する。——などである。

【フランス】

EDF, 米国で保有する 3 原子力発電所の所有権売却へ

フランス電力(EDF)は2019年11月20日、所有していた米コンステレーション・エナジー・ニュークリア・グループ(CENG)の株式49.99%を、共同保有者であるエクセロン・ジェネレーション社に売却する方針を表明した。これにともない、CENGが米国内で保有する3サイト・5基(約400万kW)の商業炉についても、両者の今後の交渉次第ですべての所有権がエクセロン社に渡ることになる。

CENGはコンステレーション・エナジー(CE)社の原子力発電子会社であり、EDFが2009年にCE社株を購入した際、CE社とEDFの合併事業体として設立された。エクセロン社は2011年にCE社を買収しており、CENGに関しては、CE社が確保していたCENG株の50.01%をエクセロン社が引き継いだ。また、5基の商業炉(ニューヨーク州のR.E. ギネイ発電所とナインマイルポイント発電所1, 2号機、およびメリーランド州のカルバートクリフス発電所1, 2号機)についても、エクセロン社が2014年にEDFと結んだ「共同運転サービス協定」に基づき、同率の所有権に加えて運転認可がエクセロン社に譲渡されていた。

一方のEDFは、4億ドルの特別配当金を受け取ることになったほか、2016年1月1日から2022年6月末までの期間、CENG株を市場の適正価格でエクセロン社に売却できる権利「プット・オプション(売付け選択権)」を得ていた。

EDFは今回、このオプションを行使するとエクセロン社に伝えたもので、理由としては「中核部分を除いた資産売却計画」の一部であると説明。取引価格は同オプションの契約条項に沿って後日決定されるが、取引を完了するにはニューヨーク州公益事業委員会、連邦エネルギー規制委員会(FERC)、および原子力規制委員会(NRC)の承認が必要になる。

このためエクセロン社は、規制関係のこれらの手続で1~2年、あるいはそれ以上の期間を要する可能性があるとして説明。同社のC. クレーン社長兼CEOは、「これら5基の運転を引き継いで以降、当社の管理モデルによって全体的な運転効率と実績が向上するなど、EDFと当社には多くの利益がもたらされたが、今後はEDFが保有する株式の購入プロセスで同社と連携していきたい」と述べた。また、取引価格の交渉で両者が合意に至らなかった場合、第三者の調停により決定されるとしている。

なお、EDFは2007年、CE社との折半出資による合併

事業体「ユニスター・ニュークリア・エナジー(UNE)社」を設立しており、仏アレバ社(当時)製の欧州加圧水型炉(EPR)を北米市場で販売することを計画していた。UNE社は、同設計を採用したナインマイルポイント3号機、およびカルバートクリフス3号機の建設計画について、建設・運転一括認可(COL)をNRCに申請したほか、米国企業と共同で進めていたキャラウェイ2号機とベルバンド1号機の建設計画についても、同様の申請を行った。

しかし、2010年にUNE社からCE社が撤退し、外国資本であるEDFの100%出資企業となったのに加え、2014年に巨額の損失を計上した仏アレバ社の米国法人が、EPRの米国版の設計認証(DC)審査について一時停止を2015年2月にNRCに要請。これらのCOL申請は2016年9月までにすべて、取り下げられている。

【ブルガリア】

米国と原子燃料供給など 原子力分野の協力拡大で合意

米国のD. トランプ大統領と同国を訪問していたブルガリアのB. ボリソフ首相は2019年11月25日に共同声明を発表し、原子力を含む様々なエネルギー分野で両国間の協力を一層拡大する方針を表明した。

ブルガリアにおけるエネルギー供給保障を強化するため、米国製原子燃料をブルガリア唯一の原子力発電施設であるコスロドイ発電所5, 6号機(各100万kWのロシア型PWR)で使用可能となるよう、許認可手続の迅速な進展を両国政府の協力により支援。その際は、発電所の安全性やエネルギーの多様化に関する欧州連合(EU)の厳しい要件を満たすことになるとしている。

共同声明の中で両国首脳は、「エネルギーの安定供給確保こそ、国家の安全保障そのものである」との認識で一致。エネルギー源の多様化は、その供給保障や自給、国家経済の競争力を保証することになると強調した。ブルガリアはまた、国内のエネルギー源を一層効率的かつクリーンなものに移行させたいと考えていることから、両国は信頼性の高い様々なソースから天然ガスの供給量を拡大するとともに、ブルガリアの原子力部門で(燃料の調達先等の)多様化で協力していく。協力拡大の可能性を模索するために、米国はブルガリアに技術チームを派遣することも計画している。

ブルガリアでは1989年に共産党の独裁政権が崩壊した後、1991年に民主的な新憲法を採択して民主制に移行。2004年に北大西洋条約機構(NATO)に加盟したほか2007年にはEUにも加盟したが、加盟条件としてこの年までに、西欧式の格納容器を持たないV230モデ

ル]のロシア型 PWR(VVER)であるコスロドイ 1~4 号機(各 44 万 kW)をすべて、閉鎖させている。

現在のポリソフ政権は同首相による第 3 次内閣で、2009 年に発足した第 1 次内閣時には、前政権がロシアとの協力で進めていたベレネ原子力発電所建設計画は「コストがかかりすぎる」として 2012 年に中止を決定。親欧米派として知られる同政権は、ベレネ発電所の代わりにコスロドイ発電所 7 号機として、ウェスチングハウス(WH)社製「AP1000」を建設する案も、一時期検討していた。

現在は、再びベレネ発電所を建設する案が浮上しており、ブルガリア電力公社は 2019 年 3 月、建設の再開を目指して戦略的投資家を募集。完成した発電所からの電力購入希望も含めて、8 月下旬までに 13 件の関心表明があったと公表した。採用設計は第 3 世代の 100 万 kW 級 VVER「AES-92」に決まっており、2012 年に同計画が中止された際、倉庫に保管した 1 号機用の長納期品や 2 号機用の一部機器を最大限に活用するとしている。

今回、米国とブルガリアの協力案件に取り上げられた原子燃料に関しては、東欧諸国からの VVER 用燃料の需要拡大にともない、米国籍の WH 社が 2016 年にスウェーデンのバステラスにある原子燃料製造加工工場を拡張済み。ウクライナで稼働する VVER には、すでに複数の原子燃料を納入した実績がある。

【チェコ】

首相、「2036 年までに ドコバニ発電所で新規原子炉完成」

チェコの A. バビシュ首相は 2019 年 11 月 13 日、自らが議長を務める「原子力発電所の建設に関する常設委員会」の第 2 回会合後に記者会見を開き、ドコバニ原子力発電所(51 万 kW のロシア型 PWR × 4 基)で 2036 年にも新規原子炉を完成させる方針を明らかにした。

同国にとってエネルギーの供給保障は最優先事項であることから、首相は今回の会合で、エネルギーの自給を維持するために増設計画の具体的な日程が示されたことは喜ばしいとコメント。ドコバニ発電所Ⅱ期工事の最初の 1 基について、供給企業の選定を 2022 年末までに終え、遅くとも 2029 年までに建設工事を開始、2036 年までに同炉の運転開始を目指すとしている。

新規原子炉の増設に踏み切った理由の 1 つとして、バビシュ首相は近年、欧州で地球温暖化防止と CO₂ の排出量削減に関心が高まっている点を指摘。50 基以上の原子炉で総発電量の 75 %を賄う仏国の例を挙げ、同国

は 2050 年までに CO₂ 排出量の実質ゼロ化を目指すリーダー的存在であるとした。一方、チェコの原子力発電シェアは 30 %台に留まっており、2040 年までに少なくとも 40 %に引き上げることが目標。首相は、「我々は地球温暖化を深く憂慮しており、チェコ政府にはこれに対応する明確な計画がある」と強調した。

同首相はまた、国営送電会社(CEPS)が 2019 年 10 月にまとめた「(国内の発電システムに関する 2040 年までの)中期的適性評価予測報告」に言及した。この報告書は、国内で既存の石炭火力発電所が閉鎖されるのにもない、チェコは 2030 年代初頭から徐々に電力を輸入し始めると指摘。新規電源を増設しなかった場合に、供給力不足に陥る時間数の予測値も提示していた。

これらのことから、同首相は「石炭火力に代わる新規の電源が必要だ」と述べる一方、再生可能エネルギーでは国内すべての電力消費量を賄うことは出来ないと説明。K. ハブリーチェク副首相兼産業貿易大臣も、チェコの原子力発電レベルは世界的にも認められていることから、「原子炉を増設するのが論理的選択だ」と述べた。

同首相はさらに、ドコバニ発電所Ⅱ期工事について 2019 年 7 月、国営電力の CEZ 社グループが 100 %子会社を通じて資金調達するという投資家モデルをチェコ政府が承認した事実に触れた。新規原子炉の建設協議は、これを持って具体的な準備段階に移行しており、政府が 2015 年に承認した改定版の「国家エネルギー戦略」は徐々に実行に移されつつあるとした。

このことは、チェコの原子力発電開発にとって非常に重要であり、地球温暖化の防止目標を達成する上でも大きな影響があると首相は指摘。差し当たりドコバニ発電所を優先するものの、投資資金の回収問題で 2014 年に頓挫したテメリン原子力発電所増設計画についても、協議をいずれ再開することになると強調した。

なお、現地の報道によると、記者会見に同席した CEZ 社の D. ベネシュ CEO は「2020 年 6 月までに新規原子炉の入札準備を進め、2021 年に最大で 5 社から提案を申し受ける」と発言した。市場の見積価格として 1 基あたり 1,400 億~1,600 億チェコ・コルナ(約 6,500 億~7,500 億円)を予想していると述べた模様。これまでに 6 社が入札に関心を示しており、それらは中国広核集团有限公司(CGN)、ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社、韓国水力・原子力会社(KHNP)、仏電力(EDF)、米国のウェスチングハウス(WH)社、三菱重工業を含む仏 ATMEA 社の企業連合であると伝えられている。

比較を含む定量情報とリスクコミュニケーション —より良い意思決定を支援するために—

電力中央研究所 桑垣 玲子, 関西大学 菅原 慎悦

リスクコミュニケーション(Risk Communication)は、多様なリスク情報をステークホルダー間で相互にやりとりしつつ、より良いリスク管理を目指す意思決定のプロセスである。本稿では、定量的なリスク情報のやりとりに係る主要な学術的知見や米国における実践経験から、わが国の原子力分野において留意すべき点を解説する。解説にあたり、定量的なリスクの大きさを他のリスクとの相対的な比較情報とともに示すことで、情報の受け手の解釈や判断に資することを旨とする、「リスク比較」の説明手法の先行研究に着目する。

KEYWORDS: *Risk communication, risk comparison, risk-informed decision making, probabilistic risk assessment*

I. はじめに —放射線のリスク比較—

福島第一原子力発電所事故(以下、福島原子力事故)後、放射線リスクの説明場面で「リスク比較」が用いられ、これに対して賛否さまざまな反応が寄せられたことは記憶に新しい。放射線医学総合研究所の「放射線被ばくの早見図」や、国立がんセンターの「がんのリスク(放射線と生活習慣)」は、評価指標が一致する身近なリスクとの比較を表現したわかりやすい情報として、マスメディアの報道やリスクコミュニケーション(以下、RC)の説明素材として普及した。その一方で、影響を被る当事者にとって不可抗力的に負担させられた非自発的な事故によるリスクと、便益があり自己決定ができる自発的なリスクの違いを踏まえられていないという違和感も指摘された。

ここで、放射線と喫煙のリスクを比較することへの受け止め方に言及した2つの例を紹介する。福島県立医科大学の村上らが、飲食物中の放射性物質の受け止め方を検証した調査(福島原子力事故から5年後の2016年に福島・東京・大阪でネットアンケートを実施)によると、喫煙との比較は、リスク認知が高い人々でも信頼を損ねることなく直感的なリスク認知を下げ、統計的に得られているリスク値との乖離を埋める方向で理解を促したという結果を示している¹⁾。また、大阪大学の平川らは、福

島県郡山市の保健師や学校職員等を対象に東京大学の研究グループが実施したアンケート調査で、放射線リスクを喫煙などと比較した説明に嫌悪感がある理由(自由記述)から、①誰にとってのリスクなのか、②リスクの「上乘せ」ではないのか、③科学の不確実性を軽視していないか、④説明者の意図は説得的なものか、といったリスクの持つ社会的な文脈を人々が重視していることを指摘し、「リスク比較」は慎重に行うよう注意を促している(平川・奈良『リスクコミュニケーションの現在』2018)。

一見すると、安易な扱い方への警鐘を鳴らす後者と、バランスのとれた判断のために「リスク比較」の効果的な利用を推奨する前者とは、矛盾しているように読めるかもしれない。しかし著者は、双方ともに、リスクに向き合う人々の心情を明らかにした実証知見であると考えられる。元来、人間の認知は多面的なものである。個人や社会の複雑さ、多様さをありのままに受け止めながら、より良いリスク管理を目指すために最善の努力をすることこそが、RCの真骨頂である。「リスク比較」を含む定量情報は、影響の大小を明らかにする効果的なツールとして、受け手の理解の「正確さ」や「わかりやすさ」に寄与するものの、「隠蔽」や「ごまかし」などの不信感につながる弊害もある。こうした相剋に向き合いながら、より良い意思決定に至るプロセスを模索してきたのがRCの歴史といえる。

本稿では、「リスク比較」を含む定量情報提示を題材に、わが国の原子力分野のRC実装への留意点を解説する。

Quantitative information and risk communication : Reiko Kuwagaki, Shin-estu Sugawara.

(2019年10月23日受理)

II. 失敗を踏まえた社会的な学び

米国では、実践の失敗やリスク認知研究の蓄積等を踏まえ、数値情報を用いて人々のリスク受容を促そうとするアプローチを転換し、コミュニケーションに参画する主体(情報の主な送り手・受け手を問わず)が相互に、十分に情報を得た状態で意思決定することを重視する形へと発展してきた。米国にならってリスク情報を活用した意思決定を確立しようとするわが国においても、直接的に参照すべき内容が含まれていると思料する。

1. 確率論的リスク評価(WASH-1400)の公表をめぐる教訓

WASH-1400「大規模原子力発電所における重大事故の理論的な確率および影響」(通称：ラスマッセン報告)は、定量化が不可能と当時信じられていた原子力発電所のリスクに対し、重要なあらゆる事故シーケンスを解析することを試みた、確率論的リスク評価(Probabilistic Risk Assessment：PRA)技術の嚆矢となった研究である。

同報告(1975)の要旨では、計算により得られた原子炉100基あたりの年間事故発生頻度を他のリスクと比較して、飛行機事故と比べると2桁小さく、隕石による偶発的死亡と同程度と説明された。しかし、こうした「リスク比較」の説明に対し、多くの批判が噴出する。同報告の本体部分、つまりPRAの技術的方法論の先駆性は一定の評価を得たものの、要旨の内容は「大きな不確かさのあるWASH-1400の確率と、それに比べてかなり根拠のある確率を比較するのは不適切」、「要旨の表現は過度に楽観的」といった批判を外部専門家等から受け、紆余曲折の末、新設の原子力規制委員会(NRC)は要旨の撤回を余儀なくされる(NRC, NUREG/KM-0010, 2016)。

NRCの公式歴史家 Wellock (2017)は、WASH-1400が原子力の安全性を強調する政策目的と接続した結果、批判と論争を生み、同報告の持つ技術的な意義や洞察にも関わらず、一時的ではあるが定量的リスク評価の取組み自体に対する社会的・政治的な評判を損ねてしまった経緯を、まざまざと描いている²⁾。「リスク比較」を用いて原子力安全の公衆理解の向上に資したいという広報上の思惑が、意図しない政治的・社会的な逆機能を生むという事態を、米国はPRAの黎明期から経験してきたといえよう。

2. リスクコミュニケーションの発展段階

RCがたどる発展の過程を端的に整理した著名な知見として、FischhoffによるRCの8つの発展段階を、米国における歴史の変遷に当てはめた Leiss (1996)による3つのフェーズがある³⁾。(図1を参照)

フェーズ1の目的は「情報開示」である。正しい数字を把握し【第1段階】、人々にその数値を提示する【第2段階】。だが、送り手の専門家と受け手の人々との間の理



図1 RCの発展段階と米国の歴史変遷

解には差があり、定量化したリスクの大きさを伝えれば当該リスクが受容される、ということにはならなかった。ここから、それまでは非合理だとして見過ごされがちだった主観的なリスク認知のあり方にも焦点を当てた、認知心理学の研究が進んでいく。

フェーズ2の目的は「ニーズと信頼」である。数字の意味を説明し【第3段階】、既に同じようなリスクが社会に受け入れられていることも示す【第4段階】。だが、知識提供や教育活動のみでは限界があったため、利益と損失のバランスを説明する手法を取り入れて人々にメリットを示し【第5段階】、さらに、人々に接する態度や姿勢を重視し、敬意を払いながら丁寧に扱うよう心を砕く【第6段階】ことで信頼を得る。両面提示の考え方は、放射線防護の「正当化」の原則(ベネフィットがリスクを上回らなければならない)や、Starrの「社会的便益対技術リスク」研究(1969)などを契機に定着している。また、説得ではなく傾聴による受け手の信頼獲得も重視されたが、この頃の実践場面ではテクニックとしての改良に偏ってしまう傾向があり、失敗も多かったという。

そこで、成功の鍵を探った結果が、「相互作用」を目的としたフェーズ3である。相手をリスク情報や方針を伝える受け手とするのではなく、リスクに関する意思決定を共に行うパートナーとしての関係構築を目標とし【第7段階】、十分な情報共有を経て意思決定を行うという姿に至る。そのために第1から第7までの全てを行う【第8段階】。

人々の関心事を尊重し公正な判断を促すRCという考え方は、RCの歴史が長い米国であっても、理念としては広く共有されたが具体的・実践的場面では困難も伴ったことから、フェーズ2から3への移行時期には、リスク情報の送り手が留意すべき点を盛り込んだガイドラインが多数作られた。原子力分野でも、1991年に米国電力研究所のマニュアル、2004年にNRCによる内部向け・外部向けの2種類のRCガイドラインなどが作られた。

その後、現在までRCの実践が進む中で、場面に応じた目的設定が重視されるようになった。医療などセルフコントロールできる場面での①リスクとその対処法に関する教育・啓発、緊急時などリスク回避が必要な場面での②訓練と行動変容の喚起、リスク・管理者に対する③信頼の

醸成、不確かさが大きく社会全体で意思決定が必要な場面での④ステークホルダーや公衆の参加と紛争解決、の4類型である⁴⁾。原子力のRCは、①～③の教育・信頼醸成にとどまることなく、相互作用に踏み込むか否かにより真価を問われる④の類型にも組み込まれている。

Ⅲ. 失敗しない「リスク比較」は可能か？

1. リスク比較ガイドラインの意義

定量的リスク情報を伝える際、送り手がリスクの「客観的な比較」に有用であると考えて「リスク比較」を用いようとしても、受け手側は、当該リスクに対する送り手側の認識(例：リスクが無視し得るほど小さい)への同調を求める説得的な意図の存在を感じ取ったり、リスクを矮小化して見せようとしていると受け取ったりする場合があります。こうした「リスク比較」の誤用・濫用を避けるための具体的な手掛かりとして、「リスク比較ガイドライン」がある。これは、米国の著名なRC研究者・コンサルタントであるCovelloとSandman、リスク認知研究の第一人者であるSlovicらが1988年に出版した、プラントマネージャー向けの実務マニュアルに、リスクに関する数値や統計の提示と説明のためのガイドラインの1つとして掲載されたものである⁵⁾。

「リスク比較ガイドライン」は、化学工場のリスク評価結果を説明する場面を例に、14種類の「リスク比較」の望ましさをランキング形式で示したものである(表1参照)。例えば、「異なる時期に起きた同じリスクの比較」や「基準との比較」は最も許容されやすいとされる一方で、「性質の異なるリスク間の比較」は通常許容できないとされる。ここからは、人々がリスクを認知するときに重視する要素に相反するような比較は用いるべきでない、との警告的な示唆が読み取れる。

上記の内容を検証するため、RC研究者らは、「性質が異なっても、馴染みのあるリスクとの比較であれば受け入れられやすいのではないか?」、「受け手の心理状況によって受け止め方には差が生じるのではないか?」という観点から複数の実証研究を行った。結果として、「リ

スク比較」の受け入れやすさは個人差が大きく、受け手の心理状態によっても変化することが明らかとなった。上記のランキング自体も文脈依存性が強く、あらゆる場面、あらゆる情報の受け手に共通して当てはまる「リスク比較」の方法が存在するとは言い難い。

2. 「リスク比較」が機能する条件

実証研究によれば、人々は未知のリスクを判断する際に関連する既知のリスクと結び付けることが検証されている。また、リスクの数値を馴染みのあるものとの相対比較で示すことにより、「自発的/非自発的」の違いがあっても、定量的リスク評価結果とリスク認知とのギャップを埋められる可能性も示されている。著名な例では、非自発的なラドンのばく露量を身近な喫煙(自発的)と関連付けて「リスクの梯子」という形で提示することにより、数値処理能力の高低に関わらず啓発効果を示すという研究結果がある(Kellerら、2009)。あるいは、リスクの大きさに関する判断を促すための統一的な「ものさし」として、異種間でのリスクの比較を提案する研究もある(中谷内『リスクのモノサシ』2006)。

これら先行知見を概観すると、人々が比較を受け入れるか否かは、比較対象のわかりやすさ(身近さ、想起しやすさ)、適切さ(妥当性、類似性)に影響を受けるといえよう。ただし、いずれにおいても、「リスク比較」が適切に機能する上では、受け手の自己決定を促すこと、比較の評価基準が明確であること、第三者が作成したものであること等の形で「公正さ」を担保することが、前提条件として強調されている点が肝要であろう。

また、定量的リスク情報の認知には、数値の大小のみならず、組織の仕組みやリスク管理者に対する信頼、リスク評価・管理プロセスにおける不確かさの扱い方、リスク評価に対する異なる立場からの検証可能性といった様々な要因が影響することも知られており、「リスク比較」の活用の際にこうした視点を踏まえることが不可欠といえる。具体的には、人間が認知活動(見る、聞く、覚える、考えるなど)の際に頭に浮かべているイメージをメンタルモデルと呼ぶが、リスクに関連する一般の知識体系を特定するために、人々のメンタルモデルを調査して専門家のモデルと比較した上で、メッセージ作成に反映するメンタルモデル・アプローチの手法が研究され、汎用されはじめている。著者の一人が2001年に米国の原子力事業者を訪問した際には、同手法が地域のアウトリーチ活動において実際に活用されていた。

いずれにせよ、あらゆる場面に万能な「リスク比較」はなく、実践での活用を考える際には、「公正」な情報と受け止められるものになっているか、リスクを取り巻く社会的文脈や対象者の関心や認知への影響はどのようなものかを、実証的に確かめた上で、慎重なコミュニケーションデザインを行うことが望ましい。

表1 Covelloらのリスク比較ガイドライン

比較の次元 (14種類)	
I	①異なる時期に起きた同じリスクの比較 ②基準との比較 ③同じリスクの異なる(評価者による)推定値の比較
II	④何かをする場合としない場合のリスクの比較 ⑤同じ問題に対する代替解決法の比較 ⑥異なる地域で発生した同じリスクの比較
III	⑦平均的なリスクと、特定の場所・時間における最大リスクの比較 ⑧ある影響についての一つの経路に起因するリスクと、同じ悪影響を及ぼす他の全要因のリスクの比較
IV	⑨コストとの比較、コスト・リスク比による比較 ⑩リスクと便益の比較 ⑪職業リスクと環境リスクの比較 ⑫同じ原因に由来する別のリスクとの比較 ⑬同じ病気や怪我を生じさせる他のリスクとの比較
V	⑭性質の異なるリスク間の比較 例) 大気汚染物質と、喫煙、自動車事故の比較など

許容される、望ましい比較
↑
許容されにくい、要注意

(資料5を参考として、筆者が作成)

IV. 定量的なリスク情報提示に関する 認知心理学の知見

ここまで、「リスク比較」を中心に紹介してきたが、リスク情報には、確率、頻度、濃度、量などの数値や統計、さらに定量と定性で表現できるリスク評価の結果なども含まれる。一般に、定量的なリスク情報はどのように認知されるのだろうか。リスク情報に対する認知心理学には学ぶべき多数の先行知見がある。

1. 数値に付随する文脈情報の重要性

一般に、言語表現よりも数量表現を用いるほうが、解釈や認知の個人差が少なく、リスクの大きさが適切に理解されやすいとされる。例えば、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、将来予測に伴う定量的な不確かさを表現する際、確率に応じて“extremely likely”や“very unlikely”といった形容詞による言語表現を用いている。その検証実験では、言語表現は個人差が大きく、一定の限界があることが示されている(Budescuら, 2009)。

また、人々の生活経験から類推しやすい数値は伝わりやすいものの、極めて小さい数値はイメージがつかみにくいため、手掛かりとなる相対比較等の文脈情報を加えることで、受け手のリスク認知に影響をもたらすことが知られている。加えて、表現の違い(例えば、自然頻度と条件付き確率)や当該リスクをめぐる受け手の感情・態度(例えば、当該リスクやそれを扱う組織に対する否定的感情や信頼の程度)等、数値の提示方法や付随する文脈情報が受け手の解釈に与える影響も小さくない。特に、強い感情を引き起こしている場合や信頼が低い場面では、発生確率が小さいなどの数量表現を用いて技術的な説明をしてもあまり効果がなく、信頼研究ではむしろ、価値を共有していることを強調すべきとされる。

2. 数値の由来や性質、不確かさにも敏感

確率の概念には、性質のかなり異なる、2つの側面があり、その二元性がしばしば論争をもたらす(ハッキング=広田訳『確率の出現』2013)。統計データから導かれる死亡率は、集団のランダムな性質を表す頻度論的な確率である。多くの仮定やモデルを積み重ねた工学的リスク評価により得られる確率(例えば、PRAの結果)は、評価者の信念の度合を反映する認識論的確率といえる。

一般に、人々が心を動かされるのは、具体的な個人としてどのような状況にあるのかという情報であり、統計情報から、わが身に関わるリスクの情報を提供されたとは認識されにくい。RCの場面において人々は、文脈から確率情報の性質の違いをくみ取って、重要か否かを判断している可能性がある。例えば、中立的に見える確率情報が情報源の知識や能力、態度に依存している情報(評価者による認識論的確率)を含んだものである場合に

は、信頼に影響を与えることなどが指摘されている⁷⁾。このため、由来や性質が異なる確率を比較する際には、それを明示するなど細心の注意を払う必要がある。

上記からは、人々が確率の精度、確からしさに敏感であるとも言換えることができる。不確かさについて、規範的には、リスク評価・管理を支える専門的知見がどの程度確固たるものであるのかに着目し、そこに含まれる不確かさを丁寧に伝えることが望ましいとされる。一方で、不確かさを伝えても受け手の信頼への寄与は大きくない、両者にはトレードオフがある、とする心理学の実験結果も報告されている。最新の研究では、全ての不確かさを網羅的に示す必要はなく、評価結果の理解や意思決定に際して重要な「鍵となる不確かさ」をリスク情報に加えることが推奨されている(Kasperson, 2014)。

V. 実務場面への示唆

1. 対話を開くツールとしての「リスク情報」

日本の原子力分野における現状に鑑みると、福島原子力事故前は、規制要求に遵っていることがほぼ「安全」という説明に終始し、「それでも残るリスク(residual risks)」について明示的に語ってこなかった、と言う反省がある。事故後は、確率論的リスク評価の結果を記載した安全性向上評価届出書が規制当局を通じて公開される。図1のフェーズ1「情報開示」のみをスタートさせた状態である。

こうした中、原子力事業者は、規制要求への適合に留まらず、自律的な安全性向上のマネジメントを目指すリスク情報を活用した意思決定(Risk-Informed Decision Making: RIDM)に取り組みはじめた。米国のRIDMの背景を分析した菅原(2018)によれば、RIDMの実現には、PRAの結果を考慮するだけでなく、内外のステークホルダー間の議論を通じて対立する証拠や根拠も踏まえながら、オープンな形式で意思決定を行っていくことが極めて重要である⁷⁾。RCによる「相互作用」(図1のフェーズ3)を前提とした仕組みといえよう。

前述したように、RCにおける「より良い」意思決定とは、参画する主体(情報の送り手・受け手を問わない)が、「的確に判断できる十分な情報があると満足できる」プロセスを経る(National Research Council, Improving Risk Communication, 1989)ことで、意思決定の質が高まることを目指すものである。自らが十分な情報を得て意思決定できると感じるか否かによって、リスクの受け止め方は異なる(例えば、社会学者のルーマンはリスクの定義そのものをこの受け止め方の違いで区分することを提案する)。「公正」な決定の手続きを作ることは、決定過程への満足度を高め、当事者間の信頼を構築すると同時に、決定の「質」自体も高まる可能性に道を開く。その核となる「情報」には、リスクの持つ多面性に応じ、多様な観点を含むことが必要とされている。実際の場面で情報

の受け手が欲するリスク情報は、「定量的な」リスク情報に限らない。定量化できないような観点が重視されるということも想定しておかなければならない。

著者の一人が所属する電力中央研究所と中部電力は、2019年1月に共同研究としてグループインタビュー調査(首都圏在住の調査会社モニタ男女が対象)を実施した。異なるリスクとの比較(自動車事故や自然災害と比較しながら原子力事故のリスクの大きさを推測させた)情報提示では、比較対象が適切ではないという感覚が不信感につながる事が確認された。一方、原子力発電所の安全対策(フィルタベントを例示)実施効果を数値で示した情報提示では、「リスクが低減したと思う」とする回答が多く、理解を促す効果がみられた。だが同時に、数値の意味合い、具体的な影響の変化(効果)や、想定外の発生時に何が起るか(残ったリスク)などの質問が寄せられ、十分に安全か否かを判断するには数値の大小だけではなく、個々人の懸念事項への説明が必要であることが示唆された。他方、同実験の中では、説明者側がリスクを認める姿勢を示すこと自体が、リスク低減の大前提として信頼を高めることも明らかとなった。強い不安感を漠然と有する人々との関係を再構築するためには、リスク情報を活用することこそが、リスクの大きさや対策などの具体的な対話を開くという見方ができよう。「それでも残るリスク」の対話方を模索するために、現場ベースの実証的な研究を続けていく必要がある。

2. 「リスク比較」をリスクの小ささを強調するために用いるべきではない

定量的リスク情報に対する受け手の理解や信頼を得るための簡便な方法として、「リスク比較」は、実務者にとって魅力的に映りがちである。しかし、繰り返し強調してきたように、「リスク比較」は相当に注意深く設計しなければ失敗しやすい方法であることが、国内外のRC研究者や実践者の間では既に広く共有されている。例えば、福島原子力事故後の2012年にIAEAがまとめた原子力および放射線緊急事態のコミュニケーションの報告書は、“Risk comparisons are risky.”と記載し、数値情報は決定的なものとしてではなく、人々の意思決定を支援するツールの1つとしてのみ使うべきとする。

これらの経験に鑑みれば、実務者にとって「リスク比較」とは、リスクの小ささを定量的に強調するためではなく、利害関心を持つ人々を「共にリスクと向き合うパートナー」と認めて対話を行うという、RCを実践するためにこそ活用すべきもの、と理解することが有益である。このような目的に沿う限りにおいて、例えばRIDMにおいて鍵となる数値情報の根拠や意味合いに関して受け手から問いかけが発せられた場合、対策の実施前後での効果を示す、あるいは安全の指標となる目安とともにリスクの大きさを示す、といった形で「リスク比較」を活

用することは、人々が自ら判断を下す際の一助となりうる。ただし、広報資料の作成等に際しては、「リスク比較」が上述のようなRCの目的から逸脱して利用されてはならないし、また定量的なリスク情報それ自体が、多面性を持つリスクの一側面を切り取って表現したものであることをつねに念頭に置いておくことが欠かせない。

VI. おわりに

公共政策や経営上の効果的な資源配分のためのツールとして、リスク評価情報の利用は望ましいこととされる。良い面・悪い面でのインパクト、コストなど多様な観点から数値指標を用いることで、より説明性の高い意思決定が可能となる。だが、数値は、評価者の判断や評価範囲・目的、データのとり方にも依存する。定量情報のみを切り取って「安全」を強調するのは不完全であり、背景や前提をあわせて示すことが重要である。その際、意志決定の鍵となる不確かさをどう示すのか、リスク情報に付随する課題として引き続き検討していきたい。

— 参考資料 —

- 1) M. Murakami, J. Nakatani, & T. Oki, Evaluation of risk perception and risk-comparison information regarding dietary radionuclides after the 2011 Fukushima nuclear power plant accident, PLoS One 11, e0165594, 2016.
- 2) T.R. Wellock, A figure of merit: Quantifying the probability of a nuclear reactor accident, Technology and Culture 58, No.3, 2017.
- 3) W. Leiss, Three phases in the evolution of risk communication practice, American Academy of Political and Social Science, 545(1), 1996.
- 4) International Risk Governance Council, Risk Governance: Towards an integrative approach, IRGC White Paper No.1., 2005.
- 5) V. T. Covello, P. M. Sandman, P. Slovic, Risk communication, risk statistics, and risk comparisons: A manual for plant managers, Chemical Manufacturers Association, 1988.
- 6) 広田すみれ, リスクコミュニケーションにおける確率を用いた不確実性伝達の心理学的課題, 心理学評論, 54(2), 2011.
- 7) 菅原慎悦, 米国におけるガバナンスのあり方から見た原子力発電のRisk-Informed Decision Makingに関する一考察, 電力中央研究所報告 Y17007, 2018.

著者紹介



桑垣玲子 (くわがき・れいこ)
電力中央研究所 社会経済研究所 兼
原子力リスク研究センター
(専門分野/関心分野) 環境およびエネルギー分野のリスクコミュニケーション



菅原慎悦 (すがわら・しんえつ)
関西大学 社会安全学部
(専門分野/関心分野) リスク・ガバナンス

ネット・ゼロ排出に向けたエネルギー需給システムの展望

エネルギー総合工学研究所 加藤 悦史

パリ協定の長期目標である世界的なネット・ゼロ排出達成に必要なエネルギーシステムの転換に重要となる技術について概説した。その目標であるネット・ゼロ排出とは、人為的な温室効果ガスの排出を、人為的な温室効果ガスの吸収も利用して正味でゼロにすることを意味している。ゼロ排出化が困難であるセクターを挙げ、そのセクターにおける技術オプションの可能性、さらにはどうしても避けられない排出をオフセットするため、あるいは、正味炭素排出を負とする場合に必要とされるネガティブエミッション技術のオプションを解説した。

KEYWORDS: Paris Agreement, Energy Systems, Net Zero Emissions, Negative Emissions Technologies

I. パリ協定とネット・ゼロ排出

1. パリ協定とネット・ゼロ排出目標

2015年に開かれた国連気候変動枠組み条約 (UNFCCC) 第21回締結国会議 (COP21) においてパリ協定が採択され、その後の各国の速やかな批准により2016年11月に発効がなされた。この協定では、産業革命以前からの地球の平均気温上昇を2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求することを長期的な気温目標としている(第2条1項)。また、気温目標の達成のため、出来る限り早期に世界の温室効果ガスの排出量をピークアウトし、今世紀後半には人為的な温室効果ガスの排出と吸収による除去の均衡を達成することを緩和に関する長期目標としている(第4条1項)。この長期目標は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次報告書(2014)の科学的知見、つまり気温上昇を21世紀にわたって2℃未満に維持できる確率が66%以上である排出シナリオと整合的なものとなっている。さらに2018年に公表されたIPCC 1.5℃特別報告書では、1.5℃および2℃の気温上昇が起きた場合の影響およびリスクの違いを評価し、1.5℃に抑えるための排出経路の類型も分析している。1.5℃特別報告書の政治的な位置づけは各国の状況によって異なるものの、2019年9月の国連気候行動サミットにおいては、1.5℃目標を念頭におき、今世紀半ばまでにネット・ゼロ炭素排出を達成する

Perspectives on energy supply and demand systems toward net-zero emissions : Etsushi Kato.

(2019年10月31日 受理)

ことを長期戦略とすることを公表した国は65カ国に上った。ただし、いずれの温度目標にせよ、世界全体の平均気温の上昇を安定化させるためには、将来的にCO₂排出量がネット・ゼロに向かう必要があり、場合によってはその後にネット・ネガティブのCO₂排出量が求められることになる。

このように、政治的な長期目標として温室効果ガスあるいはCO₂排出量をネット・ゼロすることが潮流となりつつあるが、世界的かつ長期的なネット・ゼロ排出の達成には、エネルギーシステム全体の大きな転換が必要となる。これまで検討されてきた低炭素化に向けたエネルギーシステムへの転換では、発電部門では再生可能エネルギー利用・化石燃料利用と炭素回収貯留 (CCS) 利用・原子力利用といった方策、需要部門では電化促進および省エネルギー、産業部門では生産プロセスの変更など、部門ごとの個別検討が主であった。しかし、エネルギーシステム全体でのネット・ゼロ排出達成のためには、システム全体での統合した低排出エネルギーキャリアやエネルギー貯蔵の利用といった転換に加え、排出削減が非常に難しい部門(炭素を材料とする素材生産部門、運輸部門のうち長距離輸送・船舶・航空、農業部門など)からのどうしても避けられない排出をオフセットすることが必要となり、大気中からCO₂を取り除く技術、いわゆるネガティブエミッション技術の考慮も必要となる。

2. ネット・ゼロ排出達成に必要なエネルギーシステム

エネルギーシステムのネット・ゼロ排出に向けた転換

の検討において、Davis ら¹⁾は、排出削減が難しいセクターとして、負荷追従可能な発電、鉄鋼およびセメント産業、船舶輸送、航空、そして長距離輸送トラックなどの大型運輸を挙げている。

まず運輸部門に関してみると、乗用車に関しては電気自動車あるいは燃料電池自動車と比較的に現状のシステムからの変更が可能となるであろう。しかし、長距離輸送トラック、船舶、航空機では貨物や旅客の容量確保や重量の制約により蓄電池などの利用が厳しく、重量あたりのエネルギー密度が高いカーボンニュートラルあるいは低炭素なエネルギーキャリアの利用が将来においても必要となる。もちろん自動運転化や運輸の分散化によって、需要側での低炭素化も期待できるが、それでもエネルギー密度の高い液体燃料利用は長距離輸送にとって有利となる。これらの候補として、水素キャリアとしての液化水素、高圧水素、アンモニアなど、正味で低炭素排出となりえる炭化水素液体燃料としてはバイオ燃料、合成燃料が挙げられる。合成燃料に関しては、原料の炭素として大気中から回収した二酸化炭素を利用し、かつ合成燃料製造プロセスにおいて非化石燃料によるエネルギーを利用した場合にはカーボンニュートラルな燃料となり得る。このような水素キャリアおよび合成燃料製造プロセスにおいては、二酸化炭素を排出しない水素製造コストの低下がいずれにとっても大きな技術課題となる。この点において、ゼロ排出かつ低コストである電力の利用が鍵である。また、電力システムにおいても変動性再生可能エネルギーのエネルギー貯蔵として、水素および合成燃料製造には大きな役割もあり、運輸部門と発電部門のシステム協調といった面でも重要なオプションといえる。

次に、産業部門での鉄鋼、セメントといった素材生産部門をみてる。鉄鋼においては、高炉において鉄鉱石の還元のためにコークスが用いられ、その過程でCO₂が排出される。さらに高温熱が必要とされるため化石燃料由来のエネルギーが利用される。鉄鋼部門の低炭素化はこれまでも多く検討がなされてきたが、ゼロ排出に向けた鉄鋼産業の検討は、スクラップ利用の電炉利用以外は一般にハードルが高い。ただし、高炉によらない鉄鉱石の直接還元も検討がなされており、化石燃料由来の炭素を使わない直接水素還元製鉄、電気分解(溶融酸化物電気分解)による還元製鉄の実証も始まりつつある。セメント製造におけるCO₂排出は、炭酸カルシウムの煨焼プロセスにより約6割、キルンへの高温熱供給のための化石燃料利用による排出が残りの約4割となっている。現在のセメント製造プロセスにおいて、炭酸カルシウムの煨焼は必須であるため、この分野のゼロ排出化を行うには排出ガスのCO₂分離回収が重要となる。セメント製造における排出ガスのCO₂濃度は、化石燃料発電の排気ガスよりも比較的高いため、回収コストの面か

らも有利であるといえる。また、セメントはその利用のライフサイクルにおいてCO₂を吸収するため、熱源のゼロ排出化と硬化時におけるCO₂有効利用などを組み合わせることによってゼロ排出に近づける検討もされている。

負荷追従可能な電力、つまり非常に信頼性の高い電力は現代の文明に必要な不可欠な要素である。太陽光発電、風力発電といった変動性再生可能エネルギーの割合が増えるにつれ、負荷追従可能な電力の重要性は当然高くなる。一般にガスカービンによる柔軟な発電により負荷追従が行われ、また、揚水発電などエネルギー貯蔵や原子力発電の負荷追従運用も重要な要素となる。さらに需要側のエネルギーマネジメントの統合も必要となる。供給側の柔軟な負荷追従技術は、その設備利用率が非常に低くなるため、ゼロ排出化に向けては経済性の検討が最も重要である。そのため、蓄電池の新技術、電力を水素や合成燃料として貯蔵する技術など、蓄エネルギー技術の低コスト化、スケールアップ、およびCCS技術の柔軟性対応といった技術課題も大きい。その他の蓄エネルギー技術としては、圧縮空気を利用したエネルギー貯蔵(CAES)システムや蓄熱発電の技術なども蓄エネルギー必要期間に応じた利用も期待されている。

II. ネガティブエミッション技術

1. ネガティブエミッション技術とは

今世紀後半、あるいは2050年でのネット・ゼロ排出達成には、上述したエネルギーシステム全体での大幅な転換とともに、排出削減が難しい部門からの排出量を打ち消すために、さらにはより野心的な温度上昇抑制目標に対応するために、大気中からCO₂を取り除く必要がある^{2,3)}。IPCC 1.5℃特別評価報告書に示された代表的な4つの排出経路では、その必要量は社会イノベーションの度合いによって異なるとしているが、緩和・適応の観点から中位的な社会経済シナリオでは21世紀末に約16 GtCO₂ yr⁻¹、気温上昇のオーバーシュートを許容する(一時的に目標温度を超えることを許容するが21世紀末には1.5℃目標に抑える)シナリオでは約24 GtCO₂ yr⁻¹、イノベーションによりエネルギー需要を極端に抑える社会シナリオでも約5 GtCO₂ yr⁻¹の年間CO₂除去量となっている。大気中からCO₂を除去あるいは隔離するために検討されている技術として、陸域生態系を活用する「大規模植林」、「農地土壌への炭素蓄積増加」、陸域生態系と工業的技術の複合による「バイオエネルギー利用によるCCS(BECCS)」と「バイオ炭」、工業的技術による「直接空気回収(DAC)によるCCS」、鉱物を利用した「風化促進」および「鉱物化」、海洋生態系を利用した「海洋肥沃化」、海洋による化学反応を利用した「海洋アルカリ化」、沿岸生態系の回復を利用した「ブルーカーボン」などが挙げられる。これらの技術はその炭素隔離時

間の違いによって、生態系に十年から100年のオーダーで一時的に大気中のCO₂を移動するものと、地質・鉱物的により長い時間スケールで炭素を隔離するものに分類することができる。前者としては、大規模植林、土壤炭素蓄積、海洋肥沃化、ブルーカーボンがあり、後者としては、BECCS、バイオ炭、DAC、風化促進、海洋アルカリ化に分けることが可能であろう。

それぞれの技術は直接的あるいは間接的にエネルギーシステムに関わるものがあり、エネルギーシステムへの統合の検討も必要となる。例えばBECCSはバイオエネルギーを発電に利用するとともに排気ガスからCO₂を回収するシステム、あるいは、液体およびガス燃料をバイオマスから転換製造するプロセスにおいてCO₂を回収し隔離するシステムであり、ネガティブエミッションを実現する上でエネルギーサービスも供給する。バイオ炭もバイオマスから炭を製造する上で熱供給が可能な技術である。逆にDACシステムは大気中のCO₂を分離回収するために、外部の電力・熱といったエネルギーを大量に利用する技術となる。その他にも、ライフサイクルでのエネルギー分析が重要であり、例えばBECCS、バイオ炭ではバイオマスの運搬、風化促進では岩石の採掘、粉碎、運搬といったプロセスでのエネルギー利用や排出の考慮が必要となる。また、持続可能性の観点から、水・エネルギー・食料のネクサスの考慮が特に陸域生態系が関与するネガティブエミッション技術では重要となる。

これらネガティブエミッション技術は現在大規模に利用されていない技術であるため、そのポテンシャルと実現可能性の精査、およびスケールアップとコスト低下に向けた研究開発、実証、さらには社会実装に向けた政策展開が今後10年で急務となっている。全米アカデミーズ(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine)は、2019年に「ネガティブエミッション技術と信頼できる隔離：研究課題」⁴⁾と題した報告書を出版した。この報告書では、現状での各技術による大気中CO₂の除去ポテンシャルとその制約、およびコストをまとめ、必要な研究分野の特定と研究開発につき込むべきリソースに関し提言を行っている。その中で、現状のポテンシャルとコストに関しては次のようにまとめている。

- 1) 土地利用に基づく4つの技術(再植林、森林管理、農耕方法変更による土壤蓄積増加、BECCS)は、現時点においても広範囲に実施可能で緩和戦略としてもコスト的にも見合う。
- 2) ただし土地利用に基づく技術は、食料生産や生物多様性への悪影響をもたらさないレベルでの実施が必須であり、その制約の中ではこれらの技術だけでは世界全体で10 GtCO₂ yr⁻¹といったパリ協定達成に必要なCO₂除去量に達しない。
- 3) DACと鉱物化のCO₂除去ポテンシャルは大きく、革

新的な技術となりえる。前者はコスト低下が課題、後者はメカニズムの解明も必要。

- 4) ブルーカーボンによるCO₂除去ポテンシャルは他のネガティブ技術と比較すると小さい。ただし生態系回復や沿岸域の気候変化への適応といった面からの実施が期待されるため、CO₂除去の観点からは低コストとなりえる。

このように、副作用をもたらさないレベルでの陸域生態系利用と、DACや風化促進・鉱物化の研究開発によるスケールアップが重視されてきており、今後は地域ごとに適したネガティブエミッション技術の実施に向けたポートフォリオを探索することが必要である。一方、海洋を利用したネガティブエミッション技術の可能性に関しては、実態の把握が遅れているため、今後も基礎的な研究の継続が必要であろう。

2. DACの研究開発動向

米国アカデミーズの報告書でも見たように、単一のネガティブエミッション技術、特に陸域生態系を利用した技術のみを利用した場合の問題点に対する指摘の増加とともに、化学工学的に大気中のCO₂を直接回収するDAC技術に対する期待が高まりつつある。DACは潜水艦や国際宇宙ステーションのような特定の分野で用いられる技術であったが、現在は数社のベンチャー企業も設立され、研究開発および商用化(図1)も進みつつある⁵⁾。

ただしCO₂の現在のマーケットは非常に小さく、DACによって回収されたCO₂は温室での植物栽培向け、あるいは炭酸飲料水向けなどに少量利用されているのみであった。しかし最近になり、Power-to X(P2X)として合成燃料製造に向けたDAC実証設備の製造や、石油増産に向けたCO₂利用(CO₂-EOR)向けの大規模設備建設が予定され始めた。DACの今後の動きとしては、こういった低炭素燃料製造でのDAC利用の増加とコスト低下と、クレジット等インセンティブの付加によるDACで回収されたCO₂の地質的および鉱物的隔離によ



図1 Climeworks社DAC商用設備

るネガティブエミッション技術としてのスケールアップが望まれる。現状でも、米国のCO₂回収貯留に関する税額控除45Qや、カリフォルニア州の低炭素燃料規制(low-carbon fuel standard: LCFS)がDACをクレジットするなど、経済的に成り立つDACの条件も整備されつつあるが、CO₂除去量の定量化に関する標準化など、ガバナンスに向けた動きの加速も必要である。

現在商用化されているDAC技術は、化学吸収液システムと固体吸着材システムに大きく二分される。化学吸収液システムは既存の工業プロセスがベースであり、強塩基性の水溶液を大気と接触させCO₂を回収し、さらにCa(OH)₂水溶液と混合することにより炭酸カルシウムとして取り出す。ただし炭酸カルシウムからCO₂を分離するための煅焼に900℃程度の高温の熱を必要とする点で大きなエネルギーが必要となる。一方、固体吸着材システムでは、広範囲な材料が研究されているが、商用化されている設備ではアミン材料が用いられているものが多い。固体吸着材システムでは、CO₂の吸着と再生に加熱・冷却を用いるものと乾燥・湿潤を用いるものがあるが、どちらも70~100℃程度の比較的低温な熱を利用するため、システムとして排熱利用可能でありエネルギーコストが低いが、材料開発のさらなる進展とスケールアップが必要である。

III. おわりに

世界的なネット・ゼロ排出に向けた必要性の理解と政治的目標の形成がなされつつある中、エネルギーシステム全体のゼロ排出化実現の困難さとそれを克服するための技術展望を概観した。このような転換に向けては、ゼロ排出電力とエネルギー貯蔵システムの統合、需要側の可能な限りの電化とエネルギーマネジメント、素材産業での新規プロセスや素材開発およびCO₂再利用による素材製造とCCSの活用、大型運輸でのゼロ排出水素キャリアやバイオマス利用も含むCO₂循環を通じた低炭素燃料の拡大が鍵になると考えられる。また、このような大幅な排出削減技術の実装に並行して、ネガティブエミッション技術のスケールアップも必要となる。

現実には、現在利用可能な技術に関しても、コスト的

および制度的な課題により社会実装へのバリアが大きく存在している。さらに排出削減がどうしても困難なセクターにおいては、社会および技術イノベーションによる新規技術の展開が必要であり、イノベーションを通じたコスト低下と利用可能なオプションの幅広い選択肢の拡大が求められる。そのためには、個別技術のイノベーションに向けた研究開発投資と、システム全体のネット・ゼロ排出に向けた低コストとなりえる統合化への研究開発投資といった2軸が現在必要と考える。

— 付記 —

本稿は環境再生保全機構の環境研究総合推進費(2-1704)「日本における長期地球温暖化対策経路の複数モデルを用い評価と不確実性の分析」の成果、および、エネルギー・資源学会の研究委員会「2050年に向けた日本のエネルギー需給」での議論を反映したものである。

— 参考資料 —

- 1) Davis, S. et al., Net-zero emissions energy systems, *Science*, 360, eaas9793, 2018.
- 2) 黒沢厚志, 加藤悦史, 杉山昌広, 増田耕一, “パリ協定と気候変動対策技術”, 化学工学論文集, 第43巻, 第4号, 171-177, 2017.
- 3) 加藤悦史, “2℃および1.5℃目標に向けた大規模ネガティブエミッション技術の実現”, 環境情報科学, 第46巻, 第3号, 41-45, 2017.
- 4) NASEM, Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Washington, DC: The National Academies Press, 2019.
- 5) 石本祐樹, 杉山昌広, “CO₂直接空気回収技術の研究動向”, エネルギー・資源, 第38巻, 第6号, 309-313, 2017.

著者紹介



加藤悦史 (かとう・えつし)

エネルギー総合工学研究所
(専門分野/関心分野) 地球規模の炭素循環, エネルギーシステム分析, ネガティブエミッション技術

技術開発に倫理を組み込むこと：人工知能の事例から 倫理委員会セッション「技術の現場と倫理との相互作用—AI 技術を例に」

名古屋大学 久木田 水生

現在急速に発展している人工知能は社会や人間に対して様々なネガティブな影響を与えることも懸念されている。そういった懸念を反映して、国内外で、そして様々なセクターで、人工知能の開発と活用に関する倫理についての議論が活発に行われ、倫理指針や倫理原則が策定されている。本発表では、人工知能がどのような倫理的問題を引き起こしているのか、それに対してどのような倫理指針が考えられているのか、そしてそれらはどのような意義を持っているのかを、具体的な事例に即して論じる。

KEYWORDS: *Ethics, Artificial Intelligence*

I. はじめに

近年、人工知能の発展が著しく、その活用の場面は、産業、運輸・交通、通信、医療・介護、軍事、警察、娯楽、家事など、多岐にわたっている。人工知能は産業や経済を大いに活性化させ、私たちの生活をより便利なものにするのが期待されている一方で、社会や人間に対して様々なネガティブな影響を与えることも懸念されている。そういった懸念を反映して、国内外で、そして様々なセクターで、人工知能の開発と活用に関する倫理についての議論が活発に行われ、倫理指針や倫理原則が策定されている。本発表では、人工知能がどのような倫理的問題を引き起こしているのか、それに対してどのような倫理指針が考えられているのか、そしてそれらはどのような意義を持っているのかを、具体的な事例に即して論じる。

II. 人工知能の倫理的問題

「人工知能」は一般的には様々なデータに基づいて予測、推測、計画、意思決定を自動的に行うシステムと考えられる。ではこのようなシステムがなぜ倫理的に問題になるのであろうか。ここでは人工知能に関して懸念されている倫理的問題の代表的なものを挙げよう。

第一に、安全性、制御可能性についての懸念がある。人間の監督なしに意思決定を行うシステムが、予測でき

ない挙動を示して、それが大きな被害を生み出す可能性がある。特に現在のように社会のシステムがテクノロジーに大きく依存しており、そして多くの異なるテクノロジーが相互作用している状況では、そのような被害がどれほど広範囲かつ甚大なものになるかは計り知れない。例えば株式などの取引にはコンピュータープログラムが使われているが、複数のプログラムが相互作用した結果として、急激な株価の暴落を引き起こすことがある。同じようなことが例えば交通、電力、医療、軍事などに応用された自律的システムに生じたら、果たしてどのような被害が生じるかは計り知れないⁱ。

第二に、人工知能の判断をどのように検証するか、という問題がある。例えばディープニューラルネットワークのような複雑なシステムを利用した人工知能に関しては、その判断の根拠・理由が人間には理解できないものになるという問題がしばしば指摘される。ということは人工知能が誤った判断を下した時、なぜそのような判断を下したのかが検証できないということである。

第三に、人工知能の判断に関する責任の問題がある。一つの人工知能システムには多くの人々が関与している。システムの開発者、システムを製造・販売する企業、システムが学習するためのデータの提供者、ユーザーなどである。それゆえに人工知能が何か危害を引き起こした時、こういった多くのステークホルダーの誰が責任を取るべきかという問題が生じる。

*Embedding ethics in the process of development of technology ;
The examples from Artificial Intelligence : Minao Kukita.*

(2019年10月30日 受理)

ⁱ ウェンデル・ウォラックとコリン・アレン¹⁾の序章には、そのようなカタストロフ的なシナリオが描かれている。

第四に、プライバシーの問題がある。多くの人工知能システムは、不特定多数の人間から収集したビッグデータに基づいて学習を行っている。その場合、人工知能の成功は、いかに多くの質の良いデータを手に入れるかにかかっている。そのためIT企業は人々のデータを収集することに貪欲である。しかしこういったデータの収集が個人のプライバシーの権利を侵害することが懸念されている。

第五に、人工知能によって引き起こされる格差や差別の問題がある。人工知能の判断は、しばしば人間と違って偏りがなく、公平だ、客観的だ、と宣伝されるが、これは間違いである。アルゴリズムにはそれを設計した人間の見解や先入観が反映される。また学習の過程で利用したデータには社会の持つバイアスが反映される。結果として人工知能の判断はしばしば不公平で差別的なものになり、社会の不公平さを固定化、あるいは助長することになるⁱⁱ。

第六に、軍事への応用の懸念がある。現在、いくつかの国が、自動的に標的を探して攻撃する、いわゆる致死自律型兵器システムの開発を進めている(ただし現在のところ、実用化されているものは存在しないと一般には考えられている)。このような兵器が戦争に関する規則を定めた国際法に抵触するものであるかどうか、あるいは機械が人間の生死に関する決定権を握ることが人間の尊厳のような普遍的な道徳原理に反するかどうか、国際的に盛んに議論が行われているⁱⁱⁱ。

こういった懸念を背景にして、人工知能の倫理についての議論が活発に行われ、そして様々な倫理指針、倫理原則が策定されている。

III. 倫理的指針の策定

前節で紹介した様々な懸念に対して、適切な倫理的指針を定める動きが、国内外で、そして様々なセクターで行われている。本節ではその一部を紹介する。

倫理指針の先駆けの一つはアメリカのNGO、Future of Life Institute (FLI)が発表した「アシロマ AI 原則」である。FLIは「命を守り、未来についての楽観的なビジョンを発展させるための研究とイニシアティブを促進し支援する」ことをミッションに掲げる団体^{iv}であり、2017年2月3日に人工知能の研究課題、倫理と価値、長期的な課題に関するガイドラインとして「アシロマ AI 原則」を発表した。Research Issues, Ethics and Values, Long-term Issuesの三分野に分かれて、全部で23の原則がある。Ethics and Valuesの分野では安全性、透明性、責任、価値との調和、プライバシー、自由、利益の共有、人間による制御、社会的市民のプロセスの尊重、

ⁱⁱ この点についてはキャシー・オニール²⁾が詳しい。

ⁱⁱⁱ 例えば川口礼人³⁾を参照。

^{iv} <https://futureoflife.org/>

AI軍拡競争などに関する原則が挙げられている^v。

アカデミックでは、IEEE Global Initiative for Ethical Considerations in Artificial Intelligence and Autonomous Systemsがある。IEEEは“Ethically Aligned Design”⁴⁾という文書を2019年に発表した。その中で「人工知能自律システム」のための包括的な倫理原則を提示している。それには「人権」、「福利」、「データの主体性」、「効率性」、「透明性」、「アカウントビリティ」、「濫用に対する注意」、「安全で効果的な利用のための能力」が挙げられている。

日本では人工知能学会の倫理委員会が2017年に9条からなる「倫理指針」を発表している^{vi}。そこでは「人類への貢献」、「法規制の遵守」、「他者のプライバシーの尊重」、「公正性」、「安全性」、「誠実な振る舞い」、「社会に対する責任」、「社会との対話と自己研鑽」、「人工知能への倫理遵守の要請」が挙げられている。

総務省情報通信政策研究所は2016年からAIネットワーク化検討会議/AIネットワーク社会推進検討会議を2016年から開催している。「2040年代を見据え、AIネットワーク化の進展を通じて目指すべき社会像や基本理念の整理」、「AIネットワーク化が社会・経済にもたらす影響およびリスクの基礎的な評価や検討すべき課題の整理」を進めた^{vii}。同年6月には報告書「AIネットワーク化の影響とリスク—智連社会(WINS ウインズ)の実現に向けた課題—」^{viii}が、2017年7月にも報告書「AIネットワーク化に関する国際的な議論の推進に向けて」が提出された^{ix}。

IV. 何のために倫理指針を作るのか

上記のような動きの多くにおいて、工学者、法学者、倫理学者、哲学者など多様な分野の専門家や、市民、行政などが長期間にわたる議論を行なって原則や指針の策定に至っている。特に人工知能研究者、エンジニアが率先して人工知能の倫理に関する議論をリードしようとする姿勢が顕著である。もちろん人工知能研究者の中には倫理指針といったものを、彼らの研究を束縛するものと考えて警戒する人々もいる。しかし筆者の経験から言えば、多くの人工知能研究者が倫理に関する議論に対して積極的である。同じことはロボット工学者についても言える。

現在は三度目の人工知能ブームと言われている。しかし前の二回のブームと異なり、今回は人工知能が予想を上回るような大きな成果を上げ、ビジネスとしても巨額

^v <https://wba-initiative.org/2522/>に和訳がある。

^{vi} <http://ai-elsi.org/archives/471>

^{vii} http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/iict/

^{viii} http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01iicp01_02000050.html

^{ix} http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01iicp01_02000067.html

の利益を生んでいる。しかしその反面、世間の人工知能に対する警戒心も大きい。これには人工知能の進歩のスピードがあまりにも速く、将棋や囲碁など高度な知性を要求すると思われる領域で人工知能が次々に人間を凌駕するようになってきていること、レイ・カーツワイルなどが「数十年後には人工知能が人間の知能を遥かに超えるようになる」と喧伝していること、ビル・ゲイツ、イーロン・マスク、スティーブン・ホーキングなどが「人工知能は人間を滅ぼす可能性がある」、「核兵器よりも危険」などという言葉で危険性を強調したこと、「人工知能が仕事を奪う」といった予想がなされていること、人工知能が軍事に応用され致命的自律型兵器システムの開発が進められていることなどが影響しているだろう。そしてまた実際に人工知能が犯罪予測、保険やローンの審査など、人間を対象としたリスク評価のために利用されているという、多くの人にとってより現実的で差し迫った問題もある。

人工知能研究者を中心とした、倫理指針策定の動きはこういった世間の不安や警戒に呼応してのものだと思われる。彼らは人工知能という大きなポテンシャルを持ったテクノロジーの発展が、不安や警戒心のために阻害されてしまうことを危惧している。多くの不安は必要以上に強調されているきらいがある。研究者は人工知能のポテンシャルとリスクを正しく社会に伝える必要があると同時に、彼らが社会に対して持っている責任を自覚していることを示す必要がある。倫理指針はそのためのものなのであろう。

もちろん人工知能の悪用や濫用は現実的な懸念であり、それを抑制する必要はある。しかしそれは倫理では

なく法律や規制によって対処すべき問題である^x。工学者や法学者、倫理学者、科学技術社会論研究者、市民、政策決定者、企業などの多様なステークホルダーが議論を重ねて作っていく倫理指針は、将来においてどのような社会を作っていくかというヴィジョンをともに作り上げ、その実現に向けたお互いのコミットメントを示す過程の一部である。

－ 参考文献 －

- 1) ウェンデル・ウォラックとコリン・アレン著『ロボットに倫理を教える』、岡本・久木田訳、名古屋大学出版会、2018年。
- 2) キャシー・オニール、『あなたを支配し社会を破壊する AI・ビッグデータの罠』、久保尚子訳、インターシフト、2018年。
- 3) 川口礼人「今後の軍事科学技術の進展と軍備管理等に係る一考察—自律型致死兵器システム(LAWS)の規制等について—」、『防衛研究所紀要』第19巻第1号、2016年、pp. 213-231。
- 4) The IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems. Ethically Aligned Design: A Vision for Prioritizing Human Well-being with Autonomous and Intelligent Systems, First Edition. IEEE, 2019.
<https://standards.ieee.org/content/ieee-standards/en/industry-connections/ec/autonomous-systems.html>

著者紹介



久木田水生 (くきた・みなお)
名古屋大学大学院情報学研究所
(専門分野/関心分野) 哲学

^x EUでは2018年にEU一般データ保護規則(GDPR)が施行され、EU内に居住する人々のデータの収集や利用に関して厳しい規制が課されることになった。これは直接的に人工知能を対象にしたものではないが、上述の通り、多くの人工知能のアプリケーションにおいてはデータからの学習がキーとなるため、GDPRは人工知能の運用に大きな規制をかけることになる。Cf. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2016.119.01.0001.01.ENG

地層処分先進地に学ぶ

フリージャーナリスト 井内 千穂

地層処分の取組が進む「海外先進地」と言えばフィンランドとスウェーデン。原子力発電環境整備機構(NUMO)は、9月に両国への現地視察会を実施し、10月には都内でその報告会を開催した。所用のため、メインプログラムの視察報告に間に合わなかったのは痛恨の極みだったが、SKB(スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社)を代表して来日していた2人の幹部の講演を聴き、その後の「ひざ詰め談義」セッションなどで彼らと直接言葉を交わす貴重な機会となった。

最終処分場選定までに30年余りの年月を要したというスウェーデン。1980年代には自治体や市民からの理解がまったく得られず、反対運動の激化で候補地の掘削調査が中止に追い込まれた例もあったという。その反省から住民との対話と情報公開を積み重ねること20年、2009年にエストハンマル自治体にあるフォルスマルク原子力発電所の隣接地を最終処分地に選定するに至る。2011年には建設許可を申請、目下、政府の許可を待つ段階まで来ている。2013年以降の調査では「SKBを信頼する」「最終処分場をフォルスマルクに建設することに賛成」と答えた人がいずれも8割に迫るという驚異的な数字のグラフを見た。どのようなコミュニケーションによって、ここまでの信頼と賛同を得られるようになったのか。いつ頃から支持率が上がったのか? SKBの試行錯誤の過程や支持率の変遷をもっと知りたいものと思った。

もちろん、スウェーデンにも反対派は存在する。しかし、学校へのアウトリーチをはじめ理解促進活動が定着し、メディアの報道もバランスが取れている由。この問題への拒否反応が根強い日本の諸事情について、SKB側としては、「難しい問題ですね。それについては、役に立つようなことは何も言えません」と答えるほかないようだったが、「先進地」の実践に少しでも希望を見出したいものである。

Column

HBO ドラマシリーズとチェルノブイリ

コメニウス大学医学部英語コース 妹尾 優希

スロバキアよりこんにちは。米国の年間最優秀テレビ作品に贈られるエミー賞を受賞し、話題となったHBO(米国ケーブル・衛星テレビ局)の短編ドラマ『チェルノブイリ』は、スロバキアにも影響を与えています。2002年より観光名所として公開され始めたチェルノブイリ原子力発電所の周囲の街は、2004年時点では1,000人未満であった観光客数は2010年では約10倍の1万人以上が訪れています。HBOのテレビシリーズが2019年5月に放送された後、さらに観光客の数が爆発的に増加し、2019年5月の時点で、前年2018年全体の7万2,000人を上回る8万7,000人が訪れています。スロバキアの旅行会社もチェルノブイリ観光ツアーを扱っており、ウクライナへの直行便がある首都ブラチスラバで米国人やドイツ人観光客の姿をよく見かけました。

その他にも、HBOのドラマはスロバキアの人々が、原発事故について関心を持つきっかけとなったようです。9月にスロバキアの全国紙である『SME』にて、福島第一原子力発電所のトリチウムを含む処理水の対処について報道された際には、このところ福島関連のニュースがSNSでシェアされることが殆ど無かった中、Facebookを中心に記事がシェアされ、新聞公式サイトにも様々な意見が寄せられていました。コメントの内容は、日本で議論されている内容と大きな差はなく、トリチウムは人体への影響が他の放射性物質に比べ小さいこと、以前から日本だけでなく他国でも海域に放出されてきた事を説明するものもあれば、二度と魚を食べないなど、身体への影響を懸念するもの、スロバキアやヨーロッパ諸国のように他国のためにも発電していたわけではない国が、世界に迷惑をかけている事を非難する内容などが寄せられています。

「正しいこと」を凶器にしないために

フリーライター 服部 美咲

正しいことを言うときは
少しひかえめにするほうがいい
正しいことを言うときは
相手を傷つけやすいものだと
気付いているほうがいい
(吉野弘「祝婚歌」より)

東京電力福島第一原子力発電所の事故の後、人々が福島で納得して生活するために、放射線の知識が欠かせなくなった。特に、避難指示が出て解除された地域では、帰還した住民が、様々なリスクを知り、比較しながら暮らしている。飯舘村の友人は「福島に住むために科学が役立った」と語った。一方、科学的根拠に裏打ちされた正しさが、むしろ人を傷つけることもある。

福島で、様々な境遇の人から、放射線への不安を聞く。中には、感情的な口調で語られる「放射線への不安」もある。そこには、国や東京電力への怒りや、大切な故郷を奪われた悲しみが含まれているようにも感じる。失われた日常を悼む心を「放射線への不安」として表現する人が、「放射線の影響を心配する必要はない」と科学的な正しさだけを語る言葉を聞けば、悲しみを否定されたと感じても不思議はない。逆に、放射線への不安を「今さら相談できない」と口にしかねている人もいる。放射線の知識を伝えようとする人を十把一絡げに「科学棒を振るうな」と罵り、住民の学びの機会を奪うのも、また暴力だろう。

原発事故後の福島には、本人でさえ把握しきれないほど、複層的に交じり合う痛みを抱える人がある。科学的な知識を伝えるときも、そして逆にそれが凶器になると指摘するときも、逸りや侮りを退け、丁寧に相手の心に耳を傾ける人でありたい。

Column

GSS；大シーソー模型

NPO あいんしゅたいん 坂東 昌子

放射線の生体影響研究の基礎である「標的理論」の起源はキュリーたちの時代にさかのぼる。マリーは「細胞には感度の高い部分があり、そこにX線がヒットすると細胞死を起こす」という物理描像から、細菌のX線被ばくに対する生存率を算定、数量評価して「dose response relationship」のグラフもある。DNAの構造も未知だった1929年だ。1927年、マラーがハエに人工放射線を照射して「遺伝子変異頻度」を初めて出した直後だ。突然変異が人工的に誘起されたことは人々を驚かせた。劣性致死遺伝子座はハエの第2染色体上におよそ1,000、遺伝子座当たり直すと、ほぼのちに行われたメガマウスの特定遺伝子座変異(SLT)とほぼ同じオーダーだ。標的の対象を明確にすれば物理過程だからほぼ同じ現象だ。それは間違いなかったのだが、細胞死と特定遺伝子座が標的の場合とはかなり話が違う。標的の規模が違くと感度(reaction rate)は異なる。さらに、モノと違って細胞は増殖するし、変異細胞にはアポトーシスなど排除機能が働き、変異細胞数は時間とともに減少する。これこそ、生き物のなす業であり、この効果を標的理論に基づくヒット模型は取り入れられない。照射した総線量だけでヒット確率が決まるので線量率効果はでてこない。瞬間的に高線量を当てるのなら時間依存性は近似的に取り入れなくてもいいが、一般には、増殖や細胞死などのインプットとアウトプットは時間との競争だから、時間変化が重要になる。それが「モグラたたきモデル」の提案だった。一方、がんは増殖力が無視できないがん治療に適用するには、モグラでなく、大小がバランスするシーソーだな。我々は、GSS(Grand Sea Saw)と名付けた。がん治療計画の抜本的改革にお役に立ちたいな。

わが国の電力市場の全体像と今後の原子力発電

第3回/最終回 電力市場における原子力発電への支援策

電力中央研究所・社会経済研究所 服部 徹

海外では、電力市場における競争の中で収支が厳しい原子力発電に対し、政府が支援策を講じる例がある。自由な競争が行われるはずの市場において、政府が特定の電源を支援することは避けるべきと考えられているが、電力市場の制度設計が完全である保証もない。その場合、エネルギー政策の目標をより効率的に達成できる手段を政府が提供しうる可能性は否定できない。市場メカニズムを活用するメリットをできる限り損なわずに、原子力の新增設や既設炉の維持を促していくことが模索されている。

KEYWORDS: *Market Mechanism, Early Closure, Government Support, New Investment, Low Carbon Generation, Cost of Capital, Risk Mitigation, Resilience*

I. はじめに

電力システム改革で創設される様々な市場における競争の中で、原子力発電には様々な収益獲得の機会も与えられているものの、その収支は厳しくなるリスクが大きく、今後、着実に新增設を進めたりすることが困難になる可能性がある。場合によっては、既設の発電所についても早期閉鎖を余儀なくされることもありうる。

しかし、想定しうる将来において、電力市場が完全に整備され、有効に機能しているという保証はなく、そうした中で、本来失われるべきではない電源が失われることになれば、社会にとって大きな損失となりかねない。また、原子力発電を維持することで、同じエネルギー政策の目標をより安価に達成できる可能性があるならば、政府が何らかの対応策を検討する意義はあるといえる。ただし、市場への介入という側面が強ければ、競争を歪める危険性があり、その弊害にも留意する必要がある。

以下では、市場における政府の役割について基本的な考え方を振り返った後、競争が進む電力市場において、原子力発電が一定の役割を果たすべく、新增設を促したり、既設炉の維持を図るために、海外で導入ないし導入の検討がなされたりしている制度について紹介し、それらの意義や課題について整理する。

II. 市場メカニズムと政府の役割

市場で競争が働いて、効率的な資源配分が実現しているとき、更なる効率化のために政府が果たすべき役割はほとんどない。ただし、市場が何らかの理由で機能しない場合には(「市場の失敗」と呼ばれる)、政府による適切な資源配分が必要とされる。例えば、通常の市場取引において社会的な便益や費用が発生しているにも関わらず、それが市場の取引において認識されない「外部性」が存在する場合である。電力の分野では、「環境価値」がそれにあたる。その場合、政府がその価値を認識して、課税をしたり、その価値を取引する市場を創設して市場参加者に費用を負担させたりすることは、社会全体の便益の観点から正当化される。また、電力のネットワーク部門など、規模の経済性が働くような「自然独占性」のある産業においては、競争が有効に機能しないため、政府が参入や価格を規制することは正当化される。他にも、国防などの「公共財」の供給は、市場ではなく、政府の役割とされる。

こうした明確な根拠がなく、市場における競争が働く場合には、政府がある特定の技術に対する支援を行うことは控えるべきとされる。それは公平な競争環境を損ない、市場を歪め、その結果、効率性が犠牲になるためである。市場の制度設計や運用において、技術中立的であることが重視されるのもそのためである。電力市場においてどのような電源が生き残るかは、市場が決めることであり、あらかじめ生き残るべき電源を政府が決定して

Government Support for Nuclear Power Generation in Electricity Market : Toru Hattori.

(2019年12月4日 受理)

しまうことは、市場メカニズムを活用するメリットを損なうものといえる。

もっとも、現状あるいは想定しうる将来において、電力市場が完全に整備され、有効に機能しているという保証はない。海外では、長い期間をかけて成熟してきた面もあるが、再生可能エネルギーの導入を政策的に支援するようになってから、様々な問題を抱えるようになり、市場の設計においては今も試行錯誤を繰り返している状態である。わが国でも、様々な市場が創設されていくが、極めて短期間で市場の設計を進めてきた上に、経過措置や激変緩和措置、非対称規制、価格の上限・下限の設定など、市場としては制約の多い「移行期」の状態がしばらく続くことが予想される。

また、電気事業における設備形成は長期間を要し、効率性も長い目で考える必要があるが、将来の不確実性を考慮して、市場が中長期的に最適な資源配分のためのシグナルを発することができるかどうかについては疑問視されることもある。仮に、電力市場が発電分野での競争を促し、その効率性を高めるとしても、そのために必要な送配電ネットワークの増強の費用を考えると、発電と送配電を合わせた費用の負担はかえって大きくなる可能性もある。送配電事業が規制部門であることに加え、電力システム改革の第3段階で予定されている発送電分離により、そのような傾向が強まる可能性は高まっている。

このような状況の下で、原子力発電を維持することによって、送配電部門も含めた電力供給の総費用を低下させることができるのであれば、市場メカニズムを尊重しつつも、政府が何らかの対応策をとることは検討の余地がある。特に近年は、世界的に脱炭素化の機運が高まっており、一定の期限内に、着実に排出削減を進めていくことが求められる中、低炭素電源としての原子力発電の役割に改めて注目する動きもある¹⁾。問題は、市場メカニズムを活用するメリットをできる限り損なうことなく、社会にとって必要な原子力発電をいかにして維持していくかということである。

Ⅲ. 新設炉向けの支援策—英国の事例

市場競争においては、長期にわたって安定的な収入は保証されない。特に、固定費の割合が高い原子力発電にとって、収支リスクが大きくなることは、第2回で述べた通りである。リスクがあることで、企業に効率化を促す面があり、それ自体が問題とは言い切れないが、原子力発電の場合は、投資の規模が極めて大きく、投資家の負担するリスクも大きくなるために、資金調達ができずに新增設が進まないことが明らかになってきた。こうした資金調達の問題への対応策については、例えば、欧州では以前から議論が進められていたが²⁾、投資家のリスクをいかに軽減できるかが課題であった。

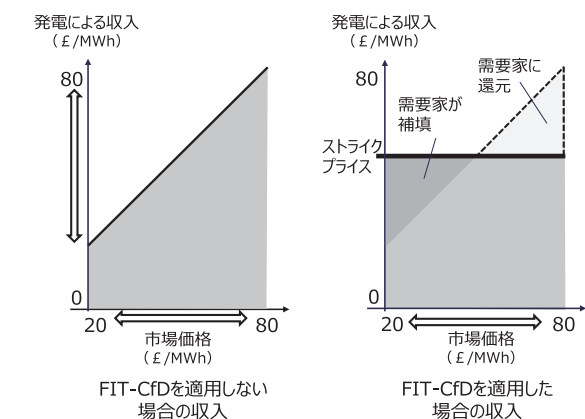
以下では、電力自由化を進めた諸外国の中で、政府が原子力発電の新增設に積極的な姿勢を示す英国で、導入しないし導入の検討が進められている制度について紹介する。ちなみに英国では、卸電力市場に加え、容量市場が創設されており、カーボンプライスが導入されている。

1. FIT-CfD

英国では、電力の安定供給と低廉な電気料金を維持しつつ、野心的なCO₂排出削減目標を達成するため、2013年に政府が「電力市場改革 (Electricity Market Reform, EMR)」と呼ばれる一連の政策プログラムを導入した。この中で、新規の低炭素電源を対象とする差額契約型固定価格買取制度 (Feed-in-tariff Contract for Difference, FIT-CfD) が導入され、その対象に、再生可能エネルギーと原子力発電が含まれることとなった。

FIT-CfDは、低炭素電源が発電した時の卸電力の市場価格と、あらかじめ定められた買取価格(ストライクプライス)の差額を精算することにより、発電による収入が一定となるような制度である。図1の左側は、単純に卸電力市場に電力を売る場合、横軸の卸電力価格の変動が、そのまま縦軸の収入の変動につながることを示している。しかし、図1の右側に示すように、FIT-CfDの下では、市場価格が、事前に定めたストライクプライスを下回った場合には、需要家が差額を補填し、逆に市場価格がストライクプライスを上回った場合には、事業者は利益の超過分を還元する。結果的に発電事業者は、発電している限り、ストライクプライスに相当する収入を受け取ることができる。

これは、発電電力量に対して常に一定の補助金を支払うのではなく、あくまで市場の価格変動リスクを回避する手段である。また、原子力発電に適用されるFIT-CfDの契約期間は35年間で、これは運転年数の60%に相当する年数であり、60%という比率は再生可能エネルギー電源に対する条件と同じである。こうして長期にわたって収入を安定化させることで、原子力発電への新規



出所：筆者作成

図1 FIT-CfDによる収入の安定化

投資を促すことができると考えられたのである。ただし、需要家の負担が一方向的に増えないようにするため、FIT-CfD で低炭素電源を支援するための費用負担には上限が定められている他、建設費の削減や借り換えなどで生じた超過収益が一定水準を超えた場合には需要家にも還元することとなっている。一方で、事業者が管理できない要因によって費用が変化した場合にストライクプライスを見直す他、政府が廃炉を命じた場合には補償するなどの取決めもある。

新設原子力向けの FIT-CfD は、EDF Energy の Hinkley Point C (HPC) に適用された。そのストライクプライスは英国政府と EDF Energy との交渉により、2013 年 10 月に 92.5 ポンド/MWh に決定した。それは、当時の市場価格の 2 倍近い水準であった。将来的に卸電力価格がストライクプライスを上回る水準となる可能性もあるが、当面は需要家が差額を補てんする必要があり、結局は原子力発電に対する補助金ではないかとの批判が少なからずあった。

このようにストライクプライスが高くなった要因は、それがあらかじめ固定されてしまう一方で、費用の上振れリスクが大きかったためと考えられる。FIT-CfD は、卸電力価格の変動リスクを回避して、収入を安定化させるものであり、原子力発電の費用が変動しなければ、結果的に利益も安定化し、投資家はそれほど大きなリスクを負うことはない。しかし、ストライクプライスは建設開始前に合意するものとなっており、建設開始後に建設費が増加して利益が減るリスクは、投資家が負う必要がある。実際、事業者が建設費の管理を十分にできずに、当初の見積もりを超過するリスクが大きかったと考えられる。そのリスクと引き換えに投資家が求める収益率が高くなり、資金調達コストが膨らんだと考えられている。

その後、洋上風力などの再生可能エネルギーの発電コストが低下し、英国政府としても、HPC の後に続く新設の計画については、ストライクプライスをかなり引き下げる必要があった。そのためには建設費そのものを抑制することに加えて、資金調達費用を抑制する必要があり、FIT-CfD に代わる資金調達手法が検討されることとなった。

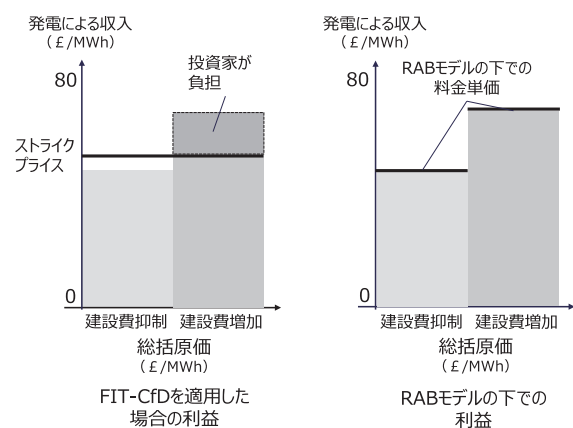
2. RAB モデル

英国政府が、原子力発電の新設を促すために新たに導入を検討している資金調達手法が、規制資産ベース (Regulated Asset Base, RAB) モデルである。RAB モデルとは、規制当局が認可した投資の回収を利用者(需要家)が支払う規制料金を通じて行う仕組みである。効率化を前提に必要な投資を規制資産ベースに算入し、規制当局が定めた報酬率を乗じて得られる適正報酬に、減価償却費や運転維持費を加えた総括原価を規制料金で回収

するものである。英国では、従来から、様々なインフラ公共事業において導入されてきた仕組みで、いわば、投資プロジェクトに対して総括原価方式の報酬率規制を適用するものである。英国で民営化された公益事業の分野ではよく知られた資金調達手法であり、最近の適用事例としては、RAB モデルの成功例として引き合いに出されることも多い、ロンドン市内の下水道整備事業「テムズ・タイドウェイ・トンネル (Thames Tideway Tunnel; TTT) がある。TTT は、今回、英国政府が原子力への RAB モデルの適用を検討するのに際しても参考にしたと考えられている。

図 2 の左は、先に説明した FIT-CfD の下での収支リスクを示している。ストライクプライスが固定されているため、建設費の増加はそのまま投資家の損失につながるリスクがある。一方、RAB モデルの下では、図 2 の右に示す通り、建設開始後に投資額が増加しても、規制資産ベースに算入されれば、料金の上昇を通じて需要家から回収することが可能となる。その結果、利益が安定することになり、投資家のリスクが軽減され、資金調達費用を抑えることが可能と考えられている。また、RAB モデルでは、建設期間中から投資の回収が可能とされており、建設が終わって発電するようにならないと投資の回収ができない FIT-CfD と比べて、投資家のリスクはさらに軽減されている。また、建設が順調に進めば、需要家も安く抑えられた費用で、低炭素電源の電力を利用できるというメリットが得られる。しかも、投資額が想定以下に抑えられた場合には、需要家の負担はさらに軽減されることになる。

しかし、RAB モデルは、全ての需要家で新設の原子力発電の費用を負担することが前提であり、英国が脱炭素化の目標を達成するために原子力が必要であるということについて需要家の理解を得ることが重要となる。原子力発電を必要とするかどうかを社会が決めることが前提となるということである。その前提の下で、原子力の新



出所：筆者作成

図 2 FIT-CfD の下での収支リスクと RAB モデルにおける料金設定

設を安価に実現する、望ましい資金調達の方法がRABモデルということになる。RABモデルの下で、原子力の新設に資金を提供することについては、長期にわたって安定的な収益を求める年金基金などの機関投資家が関心を示しているとされている。

一般に、RABモデルに対しては、総括原価方式に対する批判と同様に、投資家や事業者側に、効率化インセンティブが働かず、結果的に過大投資などによる非効率性が生じる可能性が問題点として指摘されている。

また、RABモデルでは、投資家のリスクを軽減するために、費用の上振れリスクを需要家(消費者)に負わせているにすぎず、自ら費用を管理する術を持たない需要家に過大なリスクを負わせることへの懸念も大きい。また、自由化されている市場の中で、他の電源との競争はもとより、他の低炭素電源との公平な取り扱いが損なわれる可能性があることについて、批判的な見解もある。

RABモデルの制度設計の概要については、英国政府が7月にコンサルテーション³⁾(意見募集)を行い、10月14日まで意見を受け付けていた。本稿執筆時点では、英国政府が、集まった意見の内容を分析中であり、今後、どのような形で導入に向けた議論が進むのか注目される。

IV. 既設炉向けの支援策—米国の事例

競争的な市場の中で、価格が低下してくると、原子力発電の新増設がなかなか進まないという問題に加えて、既設の原子力発電の収支が厳しくなり、規則で定められた運転期間の満了を迎える前に閉鎖せざるを得ない状況も考えられる。既設の原子力発電所で、減価償却も済んでいけば、そうしたことは起こりにくいようにも思える。しかし、第2回で見たように、米国では、シェールガス革命により天然ガス価格が下落したことで、卸電力価格が低下し、市場からの収入が発電所を維持するのに必要な費用すら下回るケースも出てきており、早期閉鎖も現実には起きている。早期閉鎖が相次げば、短期的にはCO₂の排出量が増加し、立地地域の雇用が失われて、地元の経済にも大きなダメージを与えると考えられる。そのため米国では、州レベルで、低炭素化の手段としての原子力発電に、その価値を認め、経済的に支援しようという動きがある。また、連邦レベルでも、原子力発電のレジリエンスに貢献する価値に基づく対応策が議論されてきた。以下では、こうした米国の事例を紹介する。

1. ゼロ・エミッション・クレジット(ZEC)

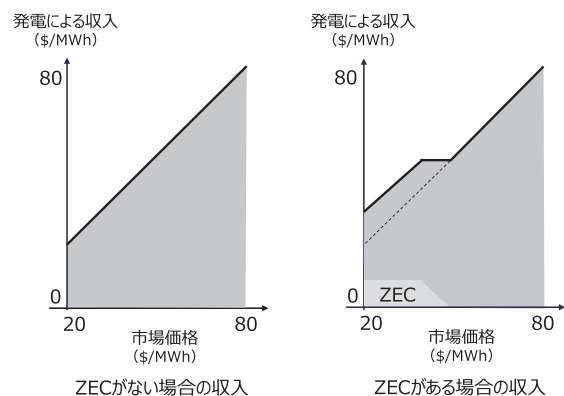
電力市場を自由化しているニューヨーク州、イリノイ州、ニュージャージー州、オハイオ州では、原子力発電のゼロ・エミッション電源としての価値を補償する制度を導入し、早期閉鎖のリスクがあった原子力発電所の維持につなげている。同様の維持策は、ペンシルバニア州

でも検討されているⁱ。基本的には、米国政府の推定する炭素の社会的費用に基づく価格(卸電力・容量市場の価格変動分は調整)で、小売事業者にゼロ・エミッション・クレジット(ZEC)の買い取りを義務付けることで、低炭素電源である原子力発電に追加的な収入を与える制度である⁴⁾。ZECを通じた収入によって、早期閉鎖の可能性があった原子力発電所の一部が、閉鎖をとりやめ、運転の継続に至っている。

ZECによる追加的な収入のイメージは図3に示すとおりである。図3の左側は、図1の左側と同じで、発電した電力をすべて卸電力市場で売する場合、卸電力価格の変動がそのまま収入の変動につながることを示している。ZECがある場合、卸電力価格が低いときには、炭素の社会的費用に基づいて計算されたZECの単価を満額で受け取ることができ、その分、収入は増えることになる。ただし、卸電力価格が一定の閾値を超えると、ZECの単価は徐々に引き下げられ、さらに高くなった段階でゼロになる。すなわち、その時はZECがない場合と需要家の負担は同じである。

原子力発電の発電シェアが約30%のニューヨーク州では、Clean Energy Standard(CES)という制度で2016年8月にZECが導入されている。州内の既設原子力発電所は州のエネルギー研究開発機構と12年の契約を結び、最初の2年間は発電電力量1MWhあたり\$17.48を受け取る。その後、この単価は卸電力市場や容量市場の価格変動を考慮して2年ごとに見直しされる。なお、ニューヨーク州では再エネ普及策は別途講じられており、ZECは既設の原子力発電所のみが対象である。

原子力発電の発電シェアが50%弱のイリノイ州では、2016年12月に可決されたFuture Energy Jobs Billの下で、ZECが付与される。州の電力調達機関と10年



出所：NEI(2018)⁴⁾

図3 ZECによる原子力発電所の追加収入

ⁱ なお、コネチカット州では、ZECではないが、州内の既設の原子力発電所に対して、政府が10年間の電力購入契約(Power Purchase Agreement, PPA)を結んで支援することを決めている。

の契約を結び、最初は発電電力量 1MWh あたり \$16.50 を受け取り、2023 年からは \$1 ずつ加算されることになっている。ただし、ZEC による小売料金の上昇は 2009 年比で 2.015 % に抑えることとなっている。また、イリノイ州の ZEC は再生可能エネルギーも対象となっている。

2018 年の 5 月には、ニュージャージー州で、州内の 3 つの原子力発電所に対し、ZEC を付与する法案が可決された。2019 年の 7 月には、オハイオ州でも、州内の原子力発電所に ZEC を付与する法案が可決されている。

既設の原子力発電所に対する ZEC の付与は、個別の州のエネルギー政策の実現のためではあるが、米国では、発電事業者は州を跨いだ卸電力市場での競争に晒されるため、ZEC はそのような競争を歪めるとの批判がある。このことは、実際に裁判でも争われてきたが、これまでのところ、州政府による原子力発電に対する ZEC の付与は認められている。

2. レジリエンスへの貢献

米国では、連邦レベルでも、原子力発電を含むベースロード電源が持つとされる、系統のレジリエンスに貢献する価値に基づいて、費用の回収を認めるような制度を導入する試みがあった。これは、米国で急速に増加しているガス火力発電が、パイプラインで供給されるガスに依存しており、2014 年に北東部が大寒波に見舞われ、その供給が途絶するリスクが顕在化した一方で、構内に燃料を備蓄できる原子力発電所などが、そのような事態においても運転可能な状態にあったことを評価すべきではないかとの認識が広まったことが背景にある。

米国エネルギー省(DOE)は、構内で 90 日間の燃料を備蓄できるという要件などを満たす発電所は、その発電原価を回収できるといった内容を含む制度の提案を連邦エネルギー規制委員会(FERC)に求めた。しかし、FERC はそのような提案を行わずに検討を中止した。現在の市場のルールの下での価格の決定が不合理あるいは不公正であるとはいえないためとしている。

確かに DOE の提案は、十分な根拠に乏しく、また、燃料供給の確実性については、既に現行の市場の運営において対応がなされている面もあり、FERC の決定は妥当であったといえる。しかしながら、昨今、深刻な自然災害に見舞われているわが国でまさに議論が進められているように、電力系統のレジリエンスをいかに高めていく

かということ自体は、今後も様々な角度から検討されるべき重要な課題である。その中で、原子力発電がどのような形で貢献しているのかが明らかにされれば、その価値が正当に評価されるような制度の必要性について再び議論される可能性もある。

V. まとめ

わが国の電力システム改革に先行して、電力市場の整備を進めてきた諸外国で、原子力発電の新增設や既設炉の早期閉鎖の回避のために、導入されたり検討されたりした政府の支援策を見てきた。競争の促進とそれを通じた経済効率性を追求する立場からは、批判的な見解もあるが、脱炭素化の目標達成を重視する立場からは、中長期的には経済効率性をも達成しうる見通しがあれば、市場において原子力発電が直面するリスクを政府が軽減することについて理解を得られる可能性もある。

しかし、市場メカニズムの活用が根底にあることに変わりではなく、様々な電源との競争の中で、原子力発電が優位に立つ状況とならなければ、中長期的にその維持を図っていくことは難しくなる。海外では、低炭素電源である再生可能エネルギーによる発電の費用も低下しつつあり、それらに対する政策的支援も徐々に縮小していく方向である。安全性の確保を大前提としつつ、原子力発電を競争力のある電源としていくには、様々な規制の見直しなど、国が取り組むべき課題も多いと考えられるが、さらなる費用の削減や新たな価値の創造に向けた事業者自身の挑戦もまた不可欠である。

今回の連載が、読者にとって、電力市場の全体像と、その中で原子力発電が置かれている状況について理解を深めるために少しでも役立てば幸いである。

— 参考資料 —

- 1) IEA, "Nuclear Power in a Clean Energy Systems," 2019.
- 2) European Nuclear Energy Forum, "Sub Working Group 'Financing,'" WG Opportunities, 2012.
- 3) BEIS, "RAB Model for Nuclear," Consultation on a RAB model for new nuclear projects, 2019.
- 4) Nuclear Energy Institute, "Zero-Emission Credits," 2018.

著者紹介

服部 徹 (はっとり・とおる)

本誌, 61[12], p.31(2019)参照.

サイエンスよみもの

気候予測データを用いた太陽光・風力発電の資源予測 — 2050年以降の発電資源 —

産業技術総合研究所 大竹 秀明

気象・気候分野では気候モデルといった物理モデルを用いた2050年から2100年程度先までの将来予測の研究が進んでおり、データがアーカイブされている。気候モデルは仮想の地球全体の大気・海洋を模擬したシミュレーションツールであり、日射量や気温、風向風速などの気象要素の予測情報がある。太陽光発電、風力発電資源量の予測に加えて電力需要量についても研究が行われている。発電資源量の地域変化、季節性、変動の要因などについて最近の研究事例を紹介する。将来気候下での地球の自然の変化、注意すべき点についても述べる。

KEYWORDS: *renewable energy, energy resources, climate change, climate model, solar power, wind power, power demand*

I. はじめに

近年、太陽光発電や風力発電が大量に導入されてきており、現在の国内の太陽光発電については設備容量にして約49.5 GW (2019年3月末時点)¹⁾のシステムが導入されてきている。エネルギー基本計画の中では再生可能エネルギーは主力電源化に向けて位置付けられている。国内外では低炭素化に向けた取り組みも必要であり、再生可能エネルギーに期待される場所も大きい。また、将来の地球気候を考えた場合には、地球温暖化や極端気象の顕在化によって、これまでの気象とは異なった状況にも変わりつつある。

将来の気候変動の中で、太陽光発電や風力発電は安定したエネルギー資源が確保できるのか、科学的根拠に基づいたデータ分析・検討が必要である。将来の電力エネルギーとしての再生可能エネルギーの資源量の予測・把握については最近研究成果が出てきたところである。気象・気候分野では地球全体をモデル化した気候モデルといった物理モデルを開発している。本稿では、2050年から2100年先といった将来の地球の姿を物理モデルから計算した結果をもとに、太陽光発電や風力発電の資源量予測について最近の研究成果を紹介する。

II. 気候モデル

1. 数値予報モデルの概要

気象分野では天気予報などを行う基礎技術として気象予報モデル(数値予報モデル)、気候分野では気候モデルといった物理モデルを開発している。気圧や風、温度といった気象(物理)パラメータに対して、運動方程式を立て、時間に関する微分方程式を解くことで、将来の大気状態の予測計算を行っている。図1は気象予報モデルの概要を示している。大気の運動は流体力学で記述できるため、基本方程式はナビエ・ストークスの運動方程式に基づく。実際、大気中には水蒸気が凝結し、雲が発生し、雲粒同士が衝突・併合するなどして雲粒子が大きく成長

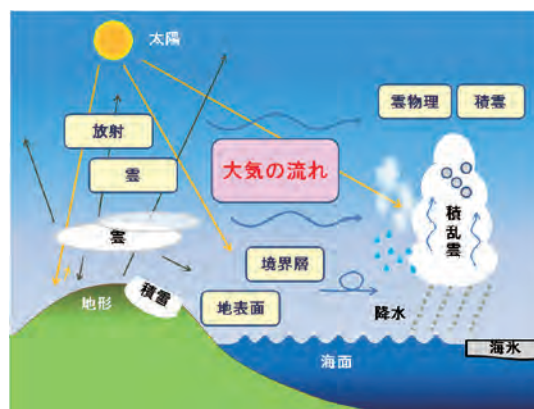


図1 気象予報モデルの概要
(気象庁数値予報課研修テキスト²⁾より転載)

Future prediction of solar power and wind power resources of using climate models for 2050 : Hideaki Ohtake.

(2019年10月31日受理)

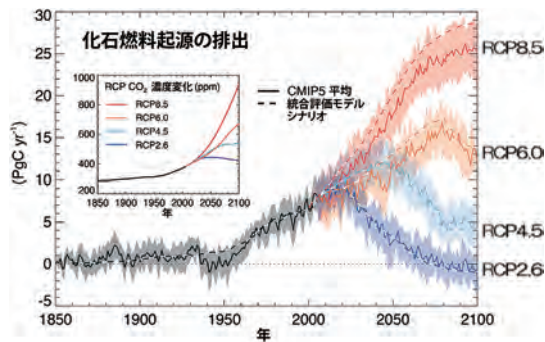


図2 RCPシナリオに対応する化石燃料からの二酸化炭素排出量

(出典：文部科学省ホームページ <http://www.mext.go.jp/> から転載し、著者が一部加筆した)

すると、雨粒・雪片などを形成する。雲の中には上昇流があるが、雨粒や雪片が重力によって落下し、降水や降雪をもたらす。このような過程を雲物理過程で表現する。また、日射量の計算は放射過程の中の短波放射過程の中で行われ、雲によって日射が遮られることがあるが、モデルの中でも雲によって日射量が減衰するよう表現されている。

計算時には、地球大気を水平、鉛直方向の3次元の格子点に分けて、気象庁では地球全体を予測する全球モデル(水平解像度 20 km)、日本付近に領域を絞ったメソモデル(水平解像度 5 km)、局地モデル(水平解像度 2 km)など複数の予測モデルを用いて、数時間から最大 11 日先までの予測計算を行っている。気候モデルでは水平解像度をやや粗くし、数十年先などの長期予測計算を行う。

図2は、将来の温暖化シナリオに沿ったCO₂排出シナリオ(RCP4.5, RCP8.5, ※RCPシナリオは、代表濃度経路シナリオ(Representative Concentration Pathways)のこと)による気温の将来変化を示している。CO₂(温室効果ガス)排出シナリオによっては、気温に与える影響も大きい。気温が高くなると、大気中に含まれる水蒸気量が多くなり、大気中に含まれるエネルギーも変化する。将来の気候における台風の変化については、第IV章において、研究事例を紹介する。地球温暖化が進むと同時に、極端な気象現象も発現しやすくなり、干ばつや集中豪雨、洪水、豪雪といったこれまで経験がないような気象現象を経験しやすくなる傾向がある。その意味では、過去の気象観測データのみならず、物理モデルをベースとした気候モデルの予測情報をもとに分析し、将来どのような地球の姿になっているのか議論していく必要がある。再生可能エネルギーなどのエネルギー分野での気候モデルの活用は、ここ数年で国内外から研究成果が報告されてきている。

2. CMIP

ここで、気候モデルを用いた気候予測データを紹介します。

る。各国の気候モデルを持ち寄り、統合したデータセットが作成、公開されている。第5期結合モデル相互比較プロジェクト(Coupled Model Intercomparison Project CMIP5 <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>)の中では、米国や欧州、日本(気象研究所、東京大学、海洋研究開発機構)なども含めてさまざまな気候モデル、将来シナリオを設定して気候予測データを計算・集約し、予測結果のモデル間比較が行われている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書の基礎データとしても用いられている。データについては、データ統合・解析システム DIAS (Data Integration and Analysis System <https://diasjp.net/>)から取得することが可能である。今年からはさらに新しいバージョンであるCMIP6が公開された。

3. d4PDF

地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース、database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF <http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/>)も文部科学省の気候変動リスク情報創生プログラムの中で大規模計算が行われ、データがアーカイブされている。高解像度全球大気モデルおよび高解像度領域大気モデルを用いて複数の予測実験を行うアンサンブル実験を行い、極端な気象現象について注目した分析に活用されている。d4PDFについては、Mizuta *et al.* (2017)³⁾に詳細が記載されている。このプロダクトは2050年から2100年先までの気候予測アーカイブである。地球温暖化を加味して温暖化していないケースの実験から全球平均温度が4℃上昇した仮想の地球のシミュレーション実験を実施している。

III. 資源量予測

1. 太陽光発電量資源予測

気候モデルからの出力パラメータには日射量や気温などの気象要素があるため、将来の気候変動(将来気候のシナリオ)の中で太陽光発電電力量(以下、発電量)資源の予測を地球全体で計算することが可能である。Jerez *et al.* (2015)⁴⁾は欧州における2080年までの太陽光発電の出力推定をRCP4.5, RCP8.5のシナリオ別に計算し、欧州を9つのエリアに分けて、その将来予測の傾向について分析、報告している(図3)。その結果、2080年に向けて若干太陽光発電の出力は低下する見込みであることを示しているが、特に北欧では太陽光発電の出力の低下が著しい。これは気候変動が進むと北極付近の雲量が増える傾向があることから、日射量が遮られてしまい、太陽光の発電量も低下すると分析されている。一方で、スペイン・ポルトガルにおいては、2080年代でも現状と同程度の太陽光発電の出力が期待されることを述べている。同じ欧州であっても地域によって将来の雲の出現の

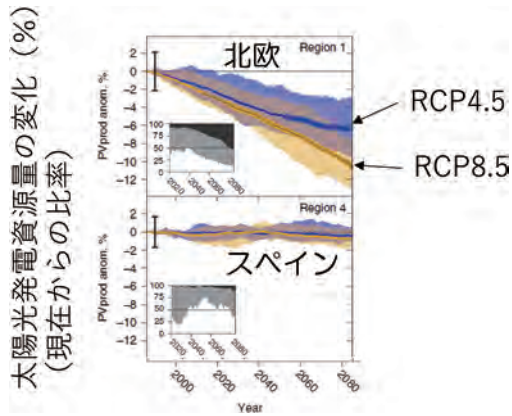


図3 CMIP5によって予測された欧州各国の将来の太陽光発電資源量の推定結果 (Jerez *et al.* (2015)⁴⁾より転載し、一部著者が加筆・編集したもので、ライセンスはCC BY 4.0に基づく.)

変化により太陽光発電資源量の影響が異なる。

2. 風力発電量資源

同様に、風速などの計算結果も得られることから、将来の風力発電資源量を予測することも可能である。Ohba *et al.* (2019)⁵⁾では d4PDF を用いた地球温暖化が加速した場合の風力発電の資源量の予測を分析した。日本における風力発電資源量は地域、季節的にも変化することを示している(図4)。冬季は北日本を中心に風力発

電資源が増加する傾向があるが、夏季においては逆に日本全体で風力発電の出力が減少する傾向を示している。図4からは、特に秋における国内の風力発電資源量は顕著に減少することが指摘されている。将来の気候状態が変わることで、風力発電資源量の季節的、地域的な変動傾向が異なる様相を示している。d4PDF は最近、日本の研究機関によって作成された気候プロダクトであるため、これから多様な分析が求められる。

3. 電力需要予測

将来の気候においては、地球温暖化が指摘されているが、気温の変化は電力需要と相関が高い。気候モデルにおいては、気温の将来の予測値も計算可能であるため、電力需要の想定を地域毎に計算することも可能である。地球温暖化の環境のもとでは、電力需要に与える影響も把握する必要がある。Auffhammer *et al.* (2016)⁶⁾においては、複数の全球気候モデルの結果より RCP8.5 の環境下で、米国の将来の電力需要量は南部ほど高くなる傾向(現在に比べて全体で約 18 % 程度増)があることを示している(図5)。将来においては、電気設備の省エネ化も進むであろうが、オール電化の住宅が増加する地域もある。また人口が増加、減少する地域があることなども考慮することでより、多様なシナリオによって需要予測の分析もできるであろう。

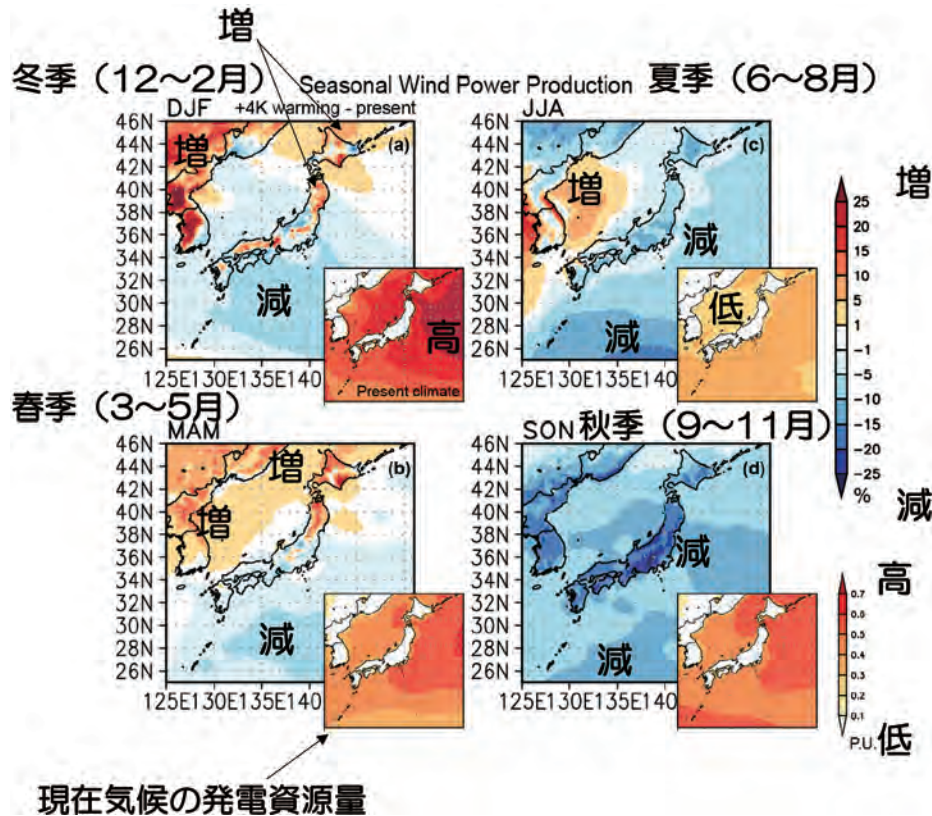


図4 d4PDF を用いた将来の風力発電資源量の変化の推定(現在気候からの偏差)．季節別に結果を表示．

(Ohba *et al.* (2019)⁵⁾より転載し、一部著者が加筆したもので、ライセンスはCC BY 4.0に基づく.)

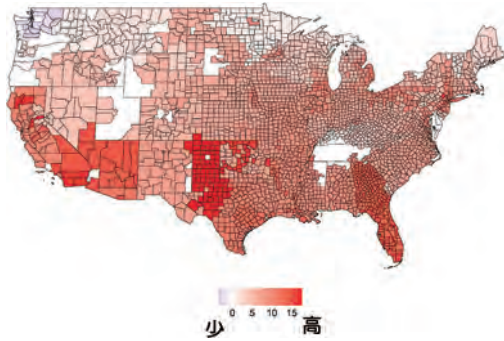


図5 米国におけるRCP8.5環境下の21世紀末の現在に対する電力需要の変化割合 (Auffhammer *et al.* (2016)⁶より転載、一部著者が加筆したもので、ライセンスはCC BY 4.0に基づく。)

IV. 将来のエネルギー資源分野の諸課題

1. スーパー台風

2019年9月には台風第15号が関東地方に上陸し、特に千葉県においては太陽光発電設備の損傷の他、送電設備の倒壊なども生じ、長期間にわたって停電が発生したことは記憶に新しい。また、台風第19号が2019年10月12日19時には伊豆半島に上陸し、直前の中心気圧は955 hPa(18時)であった。国内は死者80名以上を出す大きな被害を受けた。関東地方では最大瞬間風速40 m/sを超える地点が7箇所あった。最近では、スーパー台風⁷⁾といった新しい用語も現れている。これは1分間平均風速130ノット(67 m/s)を超える最大地上風速を持つ台風のことであり、ハリケーンの最強クラスに相当する。

図6は名古屋大学が将来気候を想定して、気象予報モデルCReSSを用いて、将来(2070年代)における台風の姿を予測したものである。図中の実線は地上気圧を示しているが、中心気圧が880 hPaといった現在気候に比べて、気圧の低い(勢力が強い)台風が表現されている。1 hPaの気圧が下がると気圧が海面を押し出す力が弱くな

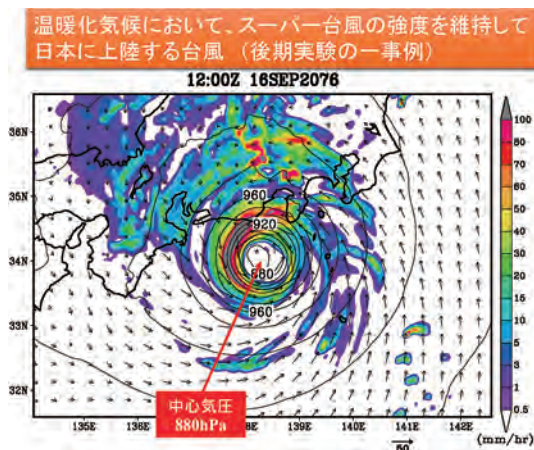


図6 温暖化気候におけるスーパー台風 (名古屋大学 坪木和久教授提供)

り、海面が1 cm 高くなる(吸い上げ効果)。1000 hPa から880 hPa となるだけで海面が120 cm 高くなり、台風の強風と合わせて波が高くなり、高潮になる危険性が高まる(吹き寄せ効果)。

温暖化によって気温が上昇するとそれによって大気中に含み得る水蒸気量が増え、台風のエネルギーが大きくなり、また降水量も多くなるであろう。より強い台風が日本に接近することが想定される中、太陽光発電設備、風力発電設備、送電設備の風などへの耐性、設備設計を改めて考える必要も今後求められそうである。

2. 人材の活用

気象・気候データなどの分析は、近年データ・サイエンティストが活躍しているが、データの性質や癖を理解した活用は、その分析の有用性を高める上でも重要である。単にデータがあるものとして使うより、データが作られたバックグラウンドや品質管理、データの癖(推定誤差や予測誤差など)のメタ情報を知って使うのでは意味や生産性、価値も異なってくるであろう。

また、国内では認定登録された気象予報士(国家資格)が1万人程度いるものの、実際の予報事業に携わっている割合はかなり少ない。気象予報士の活用の際は、天気予報だけではなく、それに関連した太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの分野でもニーズはあると考えている。しかし、気象予報士はデータ・サイエンティストのようにデータ解析が必ずしもできるわけではない。気象予報士+ α の技術・専門性(データ解析ができることや異なる分野の知識習得)を持ち合わせることで、さらなる活用の場が広がる可能性もある。異なる分野で人材を有効活用する上でも、当事者の技術・知識的な向上も必要である。

将来の気候、2050年以降のエネルギー需給の姿では科学的根拠に基づいたデータを基礎として議論を進める必要がある。国内ではまだ気象・気候研究者とエネルギー分野、政策分野との連携は多くの余地がある。実際に、気候予測データを使いやすい形で提供されることもデータ利用の促進、議論の発展性にも効果的であろう。将来のエネルギー政策を議論する上で、気象・気候分野の研究者を含めた議論が促進されることが望まれる。

V. まとめ

本稿では2050年以降のエネルギー資源を考える上で、気候モデルを用いた太陽光発電や風力発電資源量の予測について記載した。国内では、気候モデルデータを用いた資源量予測研究は新しい展開を迎えたばかりで、多様な分析の基礎データとしても重要となってくるであろう。

最後に、国内の将来のエネルギー資源についての研究動向について2件紹介する。最近では、将来のエネル

ギー資源に関する議論において、エネルギー・資源学会では、2018年より研究委員会「2050年に向けた日本のエネルギー需給」⁸⁾を設立し、エネルギーの安定供給、再生可能エネルギーの導入、省エネルギー、民生や産業の冷温熱供給や運輸の電化・低炭素化、太陽光発電や風力発電の大量導入と電力需給の柔軟性の確保に関する議論を進めている。将来の新たなエネルギー貯蔵などを、技術の他、市場制度整備、政策維持などにも視野を広げた議論を行っている。「2050年に向けた日本のエネルギー需給」研究委員会では「第5回 ESI (Energy System Integration) シンポジウム 温室効果ガス低減に向けた長期発展戦略の策定のための情報と視点の整理と方法論」なども開催⁸⁾され、多様な視点から議論を進めている。

また、科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業(CREST)の再生可能エネルギーを含めたエネルギーマネジメントに関する研究課題「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論および基盤技術の創出と融合展開」において、気象、電力需給、電力需要、送電、配電、電力市場の専門家のほか、制御理論、数理学といった電力システムとはこれまで関連が少なかった分野との連携を図った研究が進められている。将来100~300 GWといった大量な太陽光発電システムが導入された中でも、安定でロバストな電力システムを設計するシステム理論の構築を議論している⁹⁾。これまで電力システムとは関連が少なかった研究領域と融合することによって、異分野連携からイノベーションを興し、諸課題の解決に向けた取り組みが進められている。

— 付記 —

本研究は国立研究開発法人 科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業(JST CREST)「太陽光発電予測に基づく調和型電力系統制御のためのシステム理論構築」(研究代表者 井村順一教授(東京工業大学), グラント番号JPMJCR15K1)において実施された。

— 参考資料 —

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁:「固定価格買取制度 情報公開用ウェブサイト」<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfo/Summary> (2019/10/29 アクセス確認)
- 2) 気象庁, 第10世代数値解析予報システムと数値予報の基礎知識, 気象庁数値予報解説資料(数値予報研修テキスト), 159頁, (2018).
- 3) R. Mizuta, A. Nurata, and M. Ishii, Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, pp.1383-1398, (2017).
- 4) S. Jerez, I. Tobin, R. Vautard, J. P. Montavez, J. M. Lopez-Romero, F. Thais, B. Bartok, O. B. Christensen, A. Colette, M. Deque, G. Nikulin, S. Kotlarski, E. van Meijgaard, C. Teichmann, M. Wild; The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe, *Nature Communications*, 6, 10014, (2015).
- 5) M. Ohba; The Impact of Global Warming on Wind Energy Resources and Ramp Events in Japan. *Atmosphere*, 10-5, 265, (2019).
- 6) M. Auffhammer, P. Baylis, and C. H. Hausman; Climate change is projected to have severe impacts on the frequency and intensity of peak electricity demand across the United States, *PNAS*, 114-8, pp.1886-1891, (2017).
- 7) 坪木和久, 2018, 新用語解説「スーパー台風」, *天気*, Vol.65, No.6, pp.455-457.
- 8) 第5回 ESI シンポジウム 温室効果ガス低減に向けた長期発展戦略の策定のための情報と視点の整理と方法論 <http://www.esisyab.iis.u-tokyo.ac.jp/symposium/20190821/sympo20190821.html> (2019/10/29 アクセス確認).
- 9) 太陽光発電のスマート基幹電源化 IoT/AIによるスマートアグリゲーションがもたらす未来の電力システム. 日刊工業新聞社, (2019.3).

著者紹介



大竹秀明 (おおたけ・ひであき)
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター
(専門)気象予報技術, 太陽光発電量予測

基礎から分かる未臨界

第5回 1F 燃料デブリの臨界近接監視手法の開発

東芝エネルギーシステムズ 林 大和, 加納 慎也, 和田 怜志

福島第一原子力発電所において計画されている燃料デブリの取り出し作業においては、燃料デブリの臨界近接を監視する計画としている。本稿では、燃料デブリ取り出し作業における臨界近接監視の考え方と技術開発の状況を説明する。

KEYWORDS: *Subcriticality, Criticality, Fuel debris, Criticality safety, Monitoring Subcriticality*

I. はじめに

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「1F」という)の1/2/3号機では、燃料が構造物と共に溶融して燃料デブリとなって格納容器内に存在していると考えられている。1Fの廃炉作業では、この燃料デブリを取り出す作業が計画されている。現状の燃料デブリは未臨界と判断されているが、今後の取り出し作業に伴う燃料デブリの加工・変形や、格納容器内の水量の変化によって、臨界になる条件が揃う可能性を排除できない。このため、燃料デブリの臨界を防止し、万一臨界が生じた場合でも一般公衆および作業員に過度の被ばく影響が生じないようにするための臨界管理が必要となる。現在、そのための技術開発が、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(以下「IRID」という)で進められている¹⁾。IRIDは臨界管理の要素技術として、臨界評価手法、臨界近接監視、再臨界検知、臨界防止、の各技術開発を進めているが、本稿では臨界近接監視について紹介する。

「臨界近接監視」の意図するところは、燃料デブリの中性子増倍率が未臨界状態から臨界状態に近づく兆候をとらえることである。これによって、臨界発生を未然に防ぐための対処を可能とすることが目的である。

臨界近接監視の課題は、燃料デブリの中性子増倍率の変化をどのような方法で監視することができるのか、そのためにはどのような計測装置が必要になるのか、とい

う点である。特に未臨界度の測定が重要であり、IRIDは炉雑音法、および中性子源増倍法に着目して中性子計測装置を試作し、京都大学複合原子力科学研究所の共同利用研究として臨界集合体実験装置(KUCA)²⁾を用いて燃料デブリを想定した未臨界度測定の試験を行った⁴⁾。さらに、この試験結果をベンチマークとして、中性子汎用輸送モンテカルロ計算コードMVP³⁾で未臨界度測定をシミュレートする解析手法をJAEAの協力で開発し、燃料デブリに対する未臨界度測定の適用方法を検討した。本稿では上記の概要を説明する。

II. 臨界近接監視の必要性

通常のBWR型原子炉では、炉心内の燃料集合体と燃料集合体の間に十字型の制御棒が挿入されている場合、制御棒中のB-10が中性子を吸収するため原子炉は未臨界である。また、炉内には構造物としてステンレス鋼(SUS)が用いられている。1Fの炉心溶融過程において、燃料が構造物や制御棒を巻き込みながら溶融したと考えられている。このため、燃料デブリは酸化物形態や金属形態など様々な化合物が混合した状態であることが想定され、健全時から大きく変化している。燃料デブリ中に上記のB-10やSUSが含まれれば、燃料デブリは通常の燃料よりも臨界になりにくい組成と言える。

仮に燃料デブリが臨界になり得る組成であったとしても、中性子を減速するための水が無いと臨界にはならない。通常の燃料集合体は、燃料棒と燃料棒の間に存在する水が中性子を減速するため、臨界になり易く設計されている。溶融固化した燃料デブリは、このように最適に水を含む形状とはならないため、臨界になりにくいと言える。

しかし、燃料デブリ取り出し作業の際に、溶融固化した燃料デブリを水中で加工して、細片となったデブリと

Subcriticality-from basics to applications (5) ; Criticality approach monitoring for the fuel debris in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants : Yamato Hayashi, Shinya Kano, Satoshi Wada.

(2019年9月26日 受理)

■前回のタイトル

第4回 臨界安全と未臨界

水が偶然、適切に混合すると、臨界になる条件が揃う可能性がある。そのような条件が揃う可能性は現実的には非常に小さいと考えられるが、安全を確保するために、デブリ取り出し時の臨界近接を監視する必要がある。

Ⅲ. 臨界近接監視の方法

燃料デブリ取り出しを開始する前に、燃料デブリが十分未臨界であることをあらかじめ確認する必要がある。これには、中性子増倍率(k_{eff})が1より十分小さい(例えば $k_{eff} < 0.8$)ことを確認する必要がある。また、燃料デブリ取り出しを開始した後は、デブリ取り出し作業の進展に伴い、燃料デブリの状態が臨界に近づいていないか、監視する必要がある。これには、中性子増倍率(k_{eff})が初期状態からどれだけ増加したか、を監視して、 k_{eff} が1に近づいた状態(例えば $k_{eff}=0.95$)を検知する必要がある。この概念を図1に示す。

このような監視を行うために、炉雑音法と中性子源増倍法の2つの方法を組み合わせた監視の概念を提案している。図1の概念は、中性子増倍率の初期値の推定(測定①)と、中性子増倍率の相対変化の把握(測定②)に分けられる。測定①には炉雑音法、測定②には中性子源増倍法で対応する方法である。

どちらの方法も燃料デブリ近傍に配置するのは中性子検出器だけであり、中性子源などの機器を原子炉格納容器(PCV)内に持ち込む必要がない。PCV内は放射線量が高いために遠隔操作で機器を持ち込まなければならない。また、PCV内には破損した構造物があるため、こうした干渉物を回避しながら燃料デブリにアクセスする必

要がある。このため、PCV内に持ち込む機器構成を最小にすることが制約条件となる(図2)。なお、中性子検出器には、高ガンマ線環境で中性子を識別する能力(n/γ 比)が高いこと、検出感度(計数率/中性子束)が高いこと、が求められる。

炉雑音法(Feynman- α 法)は、定常状態の中性子を計測することによって、即発中性子減衰定数 α を求め、(1)式より中性子実効増倍率を推定することができる。(ただし、一点炉動特性パラメータ(即発中性子寿命 l 、実効遅発中性子割合 β_{eff})を別途、数値解析で求めておく必要がある。)しかし、ある程度の時間幅で中性子の計測データを蓄積した後、分析するため、実時間監視の観点で難がある。

$$k_{eff} = \frac{1 - \alpha l}{1 - \beta_{eff}} \quad (1)$$

一方、中性子源増倍法は、短時間で中性子計数率を測定するだけで未臨界度を推定できるため、実時間監視に優れている。しかし、 k_{eff} の基準値が既知として与えられなければならない。このとき、炉雑音法で求めた k_{eff} を中性子源増倍法の基準値とすれば、中性子源を評価しなくとも、中性子計数率の相対変化で k_{eff} を求めることができる。したがって、両者の短所を補うために、炉雑音法と中性子源増倍法を組み合わせ使用することが有効である。

なお、炉雑音法と中性子源増倍法の特徴については、本連載第3回「未臨界度測定のいろは」に詳しく説明されているため、そちらを参照されたい。

図1においてk-alarmを設定するためには、測定手法の不確かさ、取り出し作業中の中性子増倍率の変動の大きさ・速さ、作業中断して中性子増倍率が静定するまでの時間遅れ、等を考慮する必要があり、k-alarmの値の決め方が課題になる。

こうした炉雑音法と中性子源増倍法を組み合わせる監視方法については、燃料デブリを大規模に取り出す段階に向けて開発を進めている。燃料デブリの調査やサンプリング等の初期の段階においては、簡易的に中性子計数率の監視から始めて、現場状況の変化や取り出し規模の段階的拡大に併せて、最適な監視方法を投入していく。

炉雑音法で燃料デブリを測定するには、どのような課題があるだろうか。これまで、炉雑音法は研究のための「クリーンな」実験室条件で使用されてきた。測定対象となる燃料の組成はあらかじめわかっており、燃料配置は臨界近傍となるように慎重に構成されていた。しかし、燃料デブリの組成や形状は不明である。このため、以下の課題が考えられる。

- ・推定した一点炉動特性パラメータの不確かさによる影響はどの程度か。
- ・測定可能な未臨界度の範囲はどの程度か。現実の燃料

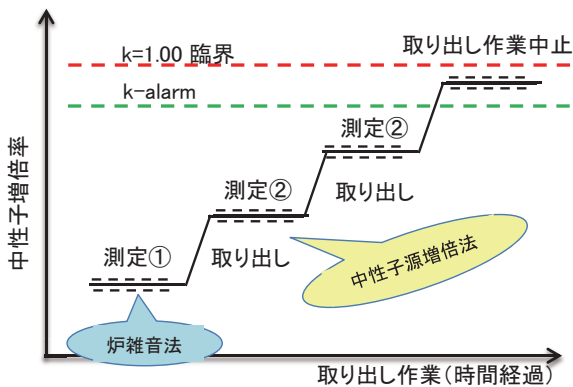


図1 デブリ取り出し時の臨界近接監視の概念¹⁾



図2 デブリ取り出し作業中の中性子計測のイメージ¹⁾

デブリは実験室とは異なり、十分深い未臨界と考えられる。

- 燃料デブリの不確かさによる影響はどの程度か。臨界となる要因の主な一つは、燃料デブリと水との混合状態であり、これは中性子スペクトルを大きく変化させる。こうした中性子スペクトルの不確かさによる影響はどの程度か。
- 燃料デブリにどれだけ中性子検出器を近づければ測定できるか。
- 現場の高ガンマ線バックグラウンドによる中性子計測への影響を如何に低減するか。
- 中性子検出器の大きさ(～十数 cm)に比して大きなサイズの燃料デブリ(～数 m)をどのように測定すればよいか。

IV. 臨界実験による検証

こうした課題を解決するため、IRIDは京都大学複合原子力科学研究所の共同利用研究としてKUCAを用いて燃料デブリを想定した未臨界測定の実験を行った⁴⁾。

KUCAの概要を図3に示す。KUCAの炉心は、断面が約5 cm×5 cmのアルミニウム製角筒中に濃縮ウラン・アルミニウム合金の燃料角板(以下、燃料板という)や種々の厚さのポリエチレン板を重ねて詰めたもの(以下、燃料体という)から構成されており、燃料板とポリエチレン板の組合せや、燃料体の配置を変更することにより、炉心の k_{eff} や水素対ウラン比(H/U)等を調整することができる。

燃料デブリの組成は不定であるため、KUCAで使用可能な燃料板とポリエチレンの組み合わせにより、中性子スペクトル($H/^{235}U=50\sim300$)と未臨界度($k_{eff}=0.7\sim0.95$)が広範囲に異なる炉心を設定した。また、燃料デブリに対する中性子検出器の配置を検討するため、燃料要素と中性子検出器の距離を離れた測定を実施した。図4にKUCA試験体系の一例を示す。図中に示す1つのセルの大きさは5 cm×5 cmであり、一部のセルに燃料要素が配置されている。ID 11で示すセル(ら14-16)が中性子検出器の位置である。

試験のために試作した測定システムの構成を示す(図5)。今回の試験では中性子検出器としてB-10比例計数管を採用したが、1Fに適用する際には、現場のガンマ線量に応じて十分な中性子検出感度が得られるように、適切な中性子検出器を選定する必要がある。電流アンプで増幅された信号は、デジタルパルスに変換され、100nsecの時間分解能でパルスの発生時刻が記録され、中性子検出時刻歴データ(タイムリストデータ)として収集される。タイムリストデータはPCに転送され、炉雑音法(Feynman- α 法)による分析評価が行われ、中性子

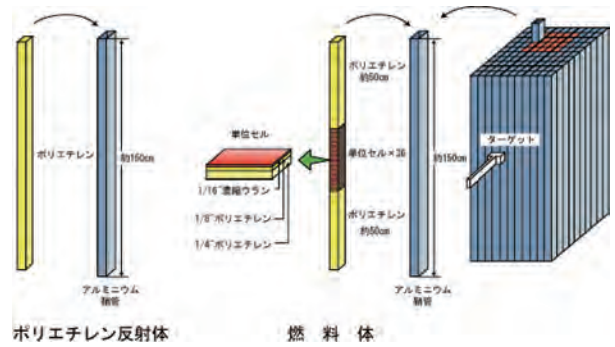


図3 KUCA 固体減速架台炉心の概要²⁾

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	ID説明 23 燃料体(減速過多) PEブロック体 V ボイド 6 調整棒①～③ 9 安全棒①～③ 10 AmBe線源 11 検出器(Feynman- α 測定用) 16 検出器(中性子源増倍法)	
た													
れ		6						9					
そ													
つ		9		23	23	23		6	V	10			
ね	16	23	23	23	23	23	16						
な			6	23	23	23	9						
ら													
む				11	11	11							

図4 KUCA 試験体系の例⁶⁾

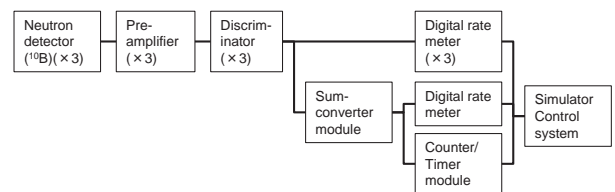


図5 試作した未臨界測定システムの構成⁶⁾

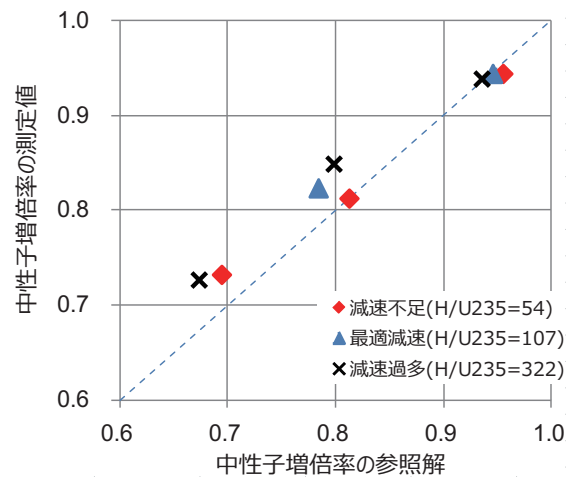


図6 KUCA 実験による測定精度の検証結果(試験による α から得た k_{eff} とMVPの固有値計算で得た k_{eff} の比較)⁶⁾

相関量 Y 値が得られる。Y 値を理論式でフィッティングすることにより、即発中性子減衰定数 α が得られ、別途求められた一点炉動特性パラメータを用いて換算することにより、中性子増倍率 k_{eff} が求められる。

試験の結果として得られた中性子増倍率の測定値を参照解(MVPコード³⁾による固有値計算の結果と比較して図6に示す。図7の右上に示す臨界近傍の領域では、

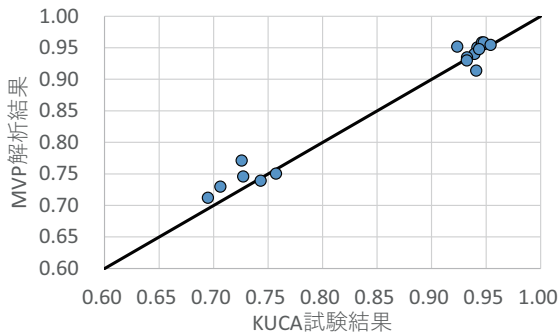


図7 試験による α から得た k_{eff} とMVPによる α から得た k_{eff} の比較⁷⁾

測定値は参照解と良く一致する結果が得られた。図6の左下に向かって未臨界度が深くなるにつれ、測定値と参照解の差は拡がる傾向を示すが、 $k_{\text{eff}}=0.7$ における推定誤差は8%程度であった。また、H/Uの違いが k_{eff} の推定精度に与える影響は、 k_{eff} の値そのものに比べて小さいことが分かった。

これまでに上記を含む41ケースのKUCA試験が行われ、Feynman- α 法による未臨界度測定について、以下の知見が得られた。

- ・測定可能な中性子増倍率の下限は $k_{\text{eff}}=0.7$ 程度であり、このときの誤差は10%程度である。臨界近傍の $k_{\text{eff}}=0.95$ であれば誤差は1%以下である。(ただし、換算に用いた、一点炉動特性パラメータの不確かさを考慮する必要がある)
- ・燃料デブリと水の混合状態が不明であり、中性子スペクトルの不確かさが大きいとしても、測定への影響は小さい。
- ・水中において測定するためには、燃料デブリ表面から20 cm以内に中性子検出器を近づける必要がある。気中においては35 cm以内となる。
- ・検出器の背後など、測定対象の燃料デブリとは異なる方向から中性子が飛んでくる場合には、誤差が大きくなる。このようなバックグラウンド中性子の影響をカットするための遮蔽が必要になる。
- ・燃料デブリが検出器に比べて大きい場合、燃料デブリ全体の k_{eff} を測定することはできないが、検出器の近傍の局所的な情報を得ることはできる。燃料デブリを加工する範囲を検出器近傍に限定することによって、局所的な監視が可能と考えられる。

V. 数値シミュレーションの検証と活用

研究炉や臨界集合体は商用炉と比較して自由な条件の体系を構築することが可能である。しかし、燃料の種類や形状、減速材の条件、配置方法等には制限がある。そのため、燃料デブリの特性をすべて既存の研究炉や臨界

集合体で再現することは困難である。そこでモンテカルロシミュレーションによる燃料デブリからの中性子の検出器応答の再現と炉雑音法の適用性の検証、未臨界度測定システム仕様へのフィードバックが重要となる。また、シミュレーションを用いたシステムへのフィードバックが信頼しうるものか、の問いに答えるために、条件の既知である試験結果とシミュレーションによる結果の比較で妥当性を確認する必要がある。

1. モンテカルロシミュレーションの結果は妥当か？

この問いに答えるには、試験で取得したデータとモンテカルロシミュレーションで得たデータを比較して確認することが簡単であろう。もちろん理論的な検証も重要であるが、使用するモンテカルロコードMVPそのものの実効増倍率 k_{eff} の計算精度に関する検証は、ICSBEPなどの臨界実験データベンチマークを通じて、既に実施されていることから⁵⁾本稿では割愛する。妥当性確認もこれまで実績が多数あるが、燃料デブリで想定されるような深い未臨界(臨界から遠い状態)に対しての例は少ない。そこで、MVPによる炉雑音シミュレーションで得られた α から k_{eff} に換算した結果と、実験の炉雑音測定結果で得られた α から k_{eff} に換算した結果を比較した(図7)。なお、JAEAの協力によりMVPコード³⁾については、Feynman- α 法をシミュレートできるように中性子検出時刻歴データ(タイムリストデータ)を模擬する機能を追加した。得られた比較結果から、MVPを使用することによって試験結果を再現することが可能であるといえる。このことから、試験で実施することが困難な条件において、MVPコードを活用しシステムへのフィードバックを実施することが妥当であるといえることがわかった。

2. システムへのフィードバック

ハード面へのフィードバック等、試験でしか得られないものが多数ある。一方で、1Fの燃料デブリは試験では再現しきれないものもある。

では、試験では再現しきれないものとは、どのようなものであろうか。それは例えば、以下3つの条件である。

1. 広範囲に広がった燃料デブリ
2. 燃料と構造材、制御材が混合した状態
3. ^{239}Pu 等の ^{235}U 以外の核分裂性核種の存在

これらの条件は、研究炉・臨界集合体の試験領域や幾何形状の制限、取り扱える核種の制限から再現することや、任意に条件を組み合わせたことができない。そこで、これら条件に対する未臨界度監視の精度への感度をシミュレーションにより求めることが必要である。

また、未臨界度を決定するのに必要となる測定値以外のパラメータ(即発中性子寿命 l 、実効遅発中性子割合

β_{eff} 等)の影響把握と要求精度の決定, 具体的なパラメータの決定方法の提案が数値シミュレーションに求められる。

そこで, 今後行われる内部調査で得られる知見をもとに, 事前に想定できる限りのシミュレーションを実施し, 臨界近接監視システムの使用パラメータを最適な状態に更新することが重要である。例えば, 遅発中性子割合については, 大きい方が中性子増倍率を大きめに評価するため(1)式より), 燃焼初期組成の条件に基づき設定することが保守的と考えられる。また, TRU核種の影響を検討するのであれば, 炉心シミュレータによる tracking データを反映することができる。

VI. まとめ

燃料デブリ取り出し時の臨界近接を監視するために, IRID は中性子計測に基づく炉雑音法と中性子源増倍法を組み合わせた監視技術の開発を進めてきた。不確かさの大きな燃料デブリの未臨界度を測定することは, 難易度の高い課題である。しかし, 多くの KUCA 試験とシミュレーションによって得られたデータを着実に蓄積することにより, 燃料デブリの未臨界度測定が実用的に成立する条件が徐々に明らかになってきた。この条件は, 中性子検出器の性能向上のみによって達成されるものではなく, 燃料デブリ取り出し工法や測定手順と組み合わせることにより, 統合された手段として成立することを目指す。このため今後の課題は, ロボットアームなどのデブリ取り出し装置に中性子検出器を実装する方法の開発が重要になる。今後得られるデブリおよび内部の状況に関する情報を適宜反映しつつシステム構成を継続して見直していく。また, 燃料デブリの現場状況の変化や取り出し規模の段階的拡大に併せて, 最適なシステムを投入していくことが重要と考えられる。また, システムとしての実績が十分でないうちは, 十分未臨界と見なせる状況で使用実績を積み, 現場における実測データの採取と現場状況を模擬したシミュレーション評価を積み重ねることにより, 設計の検証を継続して信頼性を向上することが重要と考えられる。

— 付記 —

本稿に記載した内容は, 経済産業省/平成 29 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金の成果を含みます。

— 参考資料 —

- 1) 平成 29 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化(臨界管理方法の確立に関する技術開発))」平成 30 年度実施分最終報告, 国際廃炉研究開発機構(IRID), 令和元年 7 月.
<http://irid.or.jp/research/20180000/>
- 2) 京都大学複合原子力科学研究所
<https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/facilities/ca>
- 3) MVP/ GMVP Version 3 : General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations Based on Continuous Energy and Multigroup Methods, Yasunobu NAGAYA, Keisuke OKUMURA, Takeshi SAKURAI and Takamasa MORI, JAEA-Data/Code 2016-018
- 4) 和田怜志, 加納慎也, 三澤毅, 北村康則, KUCA を用いた臨界近接監視システムの成立性確認試験, 日本原子力学会 2018 年秋の大会 岡山大学, 2018 年 9 月 5 日~9 月 7 日.
- 5) 奥村, et al., JENDL-4.0 に基づく連続エネルギーモンテカルロコード MVP 用の中性子断面積ライブラリーの作成と ICSBEP ハンドブックの臨界性ベンチマーク解析への適用, <https://doi.org/10.11484/jaea-data-code-2011-010>
- 6) S.Wada, S.Kano, T.Misawa, and Y.Kitamura, “Sub-criticality monitoring system for the retrieval of fuel debris in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants,” Proceedings of ICNC2019, Paris, France, 15-20 September, 2019.
- 7) 和田怜志, 加納慎也, 三澤毅, 北村康則, 臨界近接監視システムの開発(2)MVP2.0.33 Time-list モードの検証, 日本原子力学会 第 7 回炉物理専門研究会, 京都大学, 2018 年 11 月 26~27 日.

著者紹介



林 大和 (はやし・やまと)
IRID, 東芝エネルギーシステムズ
(専門分野/関心分野)炉心設計, 臨界安全



加納慎也 (かのう・しんや)
IRID, 東芝エネルギーシステムズ
(専門分野/関心分野)炉心設計, 臨界安全



和田怜志 (わだ・さとし)
IRID, 東芝エネルギーシステムズ エネルギーシステム技術開発センター
(専門分野/関心分野)原子炉物理, 核燃料サイクル

使用済燃料対策の IAEA 国際会議(教訓を活かす) —傾向分析と最優秀若手研究者賞受賞—

電力中央研究所 三枝 利有, 東京工業大学 岡村 知拓,
原子力環境整備促進・資金管理センター 朝野 英一

2019年6月24日(月)~28日(金)にIAEA本部で開催された使用済燃料対策に関するIAEA国際会議(International Conference on the Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling the Future(以下, SFM2019))の概要紹介と傾向分析を行う。また, 当会議中に開催された若手研究者向けの研究イベントである, Young Generation Event Challenge(以下, YGE)の紹介と, 最優秀賞受賞に関する報告を行う。

KEYWORDS: *Spent Nuclear Fuel, National strategy, Storage, Transport, Recycle, Advanced nuclear fuel cycle, Disposal, Integrated nuclear fuel cycle, Young generation event challenge, IAEA*

I. 会議概要

IAEAでは, 4~5年ごとに, 使用済燃料(以下, SF)対策の国際会議(SFM2019)をOECD/NEAと共催している。今回は, 45か国から258名の参加があり, 92件の口頭発表, 31件のポスター発表, 14件のEポスター発表(内, 日本から各々, 9, 4, 2件)があった。前回(2015年)までは, SF貯蔵が主であったが, 今回は, SF対策に関する政策・貯蔵・輸送・処分・再処理・保障措置・経済性など広範囲にわたり, 行政・規制・産業・研究等の各界から発表があった。なお, 核燃料サイクル(以下, NFC)のOpen/Closedに関わらず, 処分の必要性について強い切迫感があり, フィンランドの先駆的な地層処分の推進が印象的であった。

会議の運営面では, 女性の活躍が目立った。即ち, 本会議の全体議長を女性が務め, 各セッションの議長・副議長には原則として, 男・女1名ずつが務めた。発表にも, 女性(日本からは, 東工大院生 三成 映理子)が多かったし, IAEA事務局は女性がリードした。

また, 新たな試みとして, 国連の決議を受けて, 若手研究者を育成する表彰制度への応募が35件あり, その最優秀若手研究者として, 東工大院生 岡村知拓が選ばれたことが特筆に値する。さらに, 二重投稿を禁止する論文審査, 会議中オンラインでの質疑応答やEポスターの採用なども, 進化した国際会議¹の様相であった。

Outline, Trend Analysis, and Young Generation Challenge of IAEA International Conference on Spent Fuel Management:
Toshiari Saegusa, Hidekazu Asano, Tomohiro Okamura.
(2019年10月23日 受理)

II. 発表概要と傾向分析

表1に本会議で報告された海外の傾向と日本の現状分析結果を示し, 各トラックの概要を以下に記述する。

1. 使用済燃料対策の国家戦略

本トラックでは, 原子力先進国から新規参入国にわたる17編の発表が行われた。各国のSF対策は多様化しているが, これらはそれぞれの技術的・社会的要因から生じている。SF対策には, 原子炉からの発生から再処理・処分までのすべての活動が含まれる。

新規参入国は, 原子力発電所を建設する前にバックエンド対策に意識的に取り組んでおり, 発電終了前には包括的なバックエンド対策を講じると計画している。そのような計画は技術的に実行可能であり, そして多くの原子力先進国が直面する世代間の公平性問題に取り組むものである。一部の新規参入国では, 最終判断を差し控え, SFを中間貯蔵しながら, より成熟したプログラムからの教訓を引き出すなど, 柔軟な対策戦略を講じている。

一貫した政策, 効果的な公衆の関与と教育, 強力な規制, および商業主導の供給の組み合わせが, 様々な国で健全なSF対策システムの方策となりつつある。原子力先進国でも, 高速炉をベースとしたClosedサイクルの実用化が遅れる傾向があるが, 高速炉および関連するNFCの必要な開発は継続しており, 将来的に展開していくと考えられる。一方, フランスとロシアは, 現在の単一MOXサイクルより天然ウラン利用率が向上し余剰

¹ 会議資料等の参照先 <https://www.iaea.org/events/management-of-spent-fuel-conference-2019>

表1 本会議で報告された海外の傾向と日本の現状分析

Track	海外の傾向	日本の現状
1. 戦略	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料対策としてのリサイクルの意義(環境負荷低減) ・マルチリサイクル実用化促進する国と、中間貯蔵で様子見する国 ・新興国のサポート体制の構築 	<ul style="list-style-type: none"> ・福島事故以降の研究開発に遅れ、政策として停滞、後退か ・福島および新規制基準への対応が最優先 ・アジアにおけるプレゼンスの低下(インド、中国の台頭)
2. 貯蔵	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートキャスクが主流 ・長期貯蔵と不確実性リスクの下、モニタリングを重要視 	<ul style="list-style-type: none"> ・再処理までの間、金属キャスク貯蔵 ・貯蔵施設は新規制基準対応中
3. 輸送	<ul style="list-style-type: none"> ・再処理工場が動いている国は燃料が活発的に循環(仏、露) ・直接処分を計画している国では、処分地の立地が停滞により、燃料輸送も停滞(米) ・国際共同研究により実務に備えている(米、韓、西) 	<ul style="list-style-type: none"> ・サイクル施設未稼働により、燃料の輸送が停滞 ・輸送再開に備えて、教育・訓練中
4. サイクル	<ul style="list-style-type: none"> ・Open/Closed サイクルの二極化 ・仏と露のマルチサイクル実用化への取組み ・産業規模での実用化を見据えた研究開発の連携 	<ul style="list-style-type: none"> ・もんじゅ廃炉、六ヶ所再処理工場未稼働(竣工準備中) ・研究開発と実用化の連携が不透明・停滞 ・日本からの再処理に関する発表は今回無し
5. 先進	<ul style="list-style-type: none"> ・環境負荷低減を目指した核種分離・変換技術の開発 ・実用化に向けた国際共同研究 ・高速炉核変換の実用化に向けた研究開発を推進 	<ul style="list-style-type: none"> ・Puの使い道の方策優先 ・分離・変換技術の研究開発を細々と推進
6. 処分	<ul style="list-style-type: none"> ・SF輸送・貯蔵の次の地層処分実施への期待と切迫感 ・ステークホルダー、特に一般公衆、地元との関係構築を重要視 ・オプションとしての国際共同処分場の構想 	<ul style="list-style-type: none"> ・国と実施主体による地層処分場立地に向けた活動の継続 ・実施主体と国の連携による研究開発、技術開発の実施 ・国際組織への参加と活動の牽引
7. 統合	<ul style="list-style-type: none"> ・統合対象の多様性に応じた対応(キャスク、サイクル、原子力利用とバックエンド対策) ・多様な要求を見据えた技術の高度化、実用化 ・原子力先進国による新興国へのアプローチ ・国際的/地域的視点によるサイクル・バックエンド問題の解決 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子力利用全体を俯瞰した研究や戦略、思考が欠如 ・分野間の連携が希薄 ・分野間連携よりも個別領域を改善、深化 ・今後の原子力利用における不透明感、不確実性

Puの発生を抑制する熱中性子炉における複数回リサイクルを前提にした燃料とNFCの開発を進めている。これらの国々と日本は、NFCを推進している。日本はPu蓄積量を減らし、核不拡散について国際社会の理解を得る考えである。

多くの国家戦略は、SFの発生と地層処分施設の操業との間のギャップを埋めるために十分なSF貯蔵容量を必要としている。産業界は、長期にわたる燃料貯蔵のための安全な技術を開発し続けている。

2. 貯蔵とその後の輸送

本トラックでは、最多の43編の発表が行われた。SFと高レベル廃棄物貯蔵およびその後の輸送は、湿式貯蔵および乾式貯蔵システムの両方に関連する現在の長期および中間貯蔵活動における重要事項である。欧米では、コンクリートキャスク貯蔵が主流になりつつある。また、長期貯蔵は世界的な傾向であるが、SF貯蔵システムの構成部品と材料は劣化のリスクがある。したがって、監視と検査を備えた経年劣化対策プログラムは、運用経験と性能の劣化メカニズムに基づく長期貯蔵に不可欠である。例えば、乾式貯蔵におけるキャニスタからのヘリウムガスの漏洩について、キャニスタ表面温度の測定から検出する新しい方法が提案されている。一方、大容量のキャニスタによる貯蔵システムは現在の処分概念

と直接対応せず、効果的な全体的対策が要求されている。

福島事故では、SFプールと乾式貯蔵キャスクに負荷がかかったが、プールや乾式貯蔵のSFに損傷はなかった。短期的にはプールが必要とされるのに対し、長期的には動力を必要としない受動的な安全性を有する乾式貯蔵が選択される。

3. バックエンドにおける輸送

本トラックでは16編の発表が行われた。米国からは、原子力発電所(14サイト)の閉鎖後の輸送に関する経験と教訓が報告された。例えば、サイトに残された破損燃料の特定と専用キャニスタの必要性、サイト閉鎖後の人員削減により必要な情報が集まりにくいことの認識などである。さらに、スペインより米国への3体の模擬PWR燃料集合体の複数の輸送手段による国際共同輸送(54日間で7か国通過)が報告された。これは、通常の輸送中の振動や衝撃に、SFが耐えられることの実証試験であった。最大ひずみと加速度は鉄道貨車の連結時に発生したが、降伏ひずみ以下であった。また、高燃焼度(平均燃焼度45GWd/MTU以上)のSF被覆管には、水素化物再配向現象が懸念され、その機械的性質への影響を調べる大規模な試験をNRCとDOEで実施中である。

フランスからは、SFの年間約200件の輸送経験によ

る教訓として、関係機関との緊密な連携による緊急時対策、想定内外の輸送制約条件の事前検討・準備、継続的な組織体制の向上、訓練の必要性が報告された。

スペインでは、中間貯蔵施設の建設を、現在一時停止中である。SFの輸送は燃焼度を45 GWd/MTU未滿に制限している。この制限を解除するために、米国NUREG-2224を参考に、水素化物再配向による被覆管の脆化問題への対処法策を非公開で検討評価している。また、破損燃料の輸送に向けて、破損の程度に応じて破損燃料を隔離する方策を検討している。

(執筆担当：三枝利有(電力中央研究所))

4. 使用済燃料対策としてのリサイクル

10件の発表中、フランス5件、ロシア4件と両国の活動を象徴するトラックとなった。La Hague再処理施設での溶解および抽出工程での目詰まりや蒸発缶の腐食への対応、コールドクルッシブル誘導炉のFPや不溶解残渣固定化への応用は、産業規模での実用化というフランスの研究開発姿勢が現れている。Mayak再処理施設では、高速炉を含む多様なSF再処理の実績に基づき、炉の大型化や燃料の多様化に備えた設備の改良と処理量の増加(2025年から2030年にかけて400 tHM/年を600 tHM/年へ)が計画されている。

軽水炉MOXに関して、フランスではより均質なMOX燃料ペレット製造法として Cr_2O_3 をドープするCHROMOX燃料や多重サイクルを前提としたCORAIL-A(MOX/UO₂非均質)とMIX(MOX均質)の2つの燃料集合体の実用化研究が進んでいる。ロシアでは、ウラン濃縮と再処理後のU、Puの再利用方法の組合せに基づくREMIX燃料が提案され、サイクル数増加による新燃料の発熱、放射線、Pu/U同位体の蓄積の評価を踏まえた同燃料の開発が進行中である。高速炉MOXでは、フランスがPuの高回収を念頭に、SFの溶解技術に関して、燃料ペレット中のPuのミクロスケールの偏在とその燃焼影響を考慮して、Puの回収残渣削減のためにAg(II)を用いた硝酸溶解後残渣の酸化分解(oxidizing digestion)により99.9%以上のPu回収が可能とした。ロシアからは、SFと再処理後の廃棄物の放射線を基に、燃料供給国との間で、SFの返還・再処理・廃棄物の再返還の等価化に関する研究報告もあった。

これら2か国からは、常に次の時代の再処理を見据えた産業技術として、国際展開を含めて発展させる展望と戦略が感じられた。なお、残る1件は、サイクル条件多様化でのガラス固化体地層処分における負荷低減評価のための分野横断研究が日本から紹介された。

(執筆担当：朝野英一(原環センター))

5. 先進核燃料サイクル

NFCの確立を目指す日本、中国、インド、ロシア、フランスに加えて、多国間で研究・開発を推進するベルギーとイギリスから計20編の発表があった。その多く

は放射性廃棄物の減容と有害度低減を目的とした先進的な原子炉やSF対策についてであった。

フランスでは、CEAを中心に、欧州のパートナーと共同でGENIORSプロジェクト(革新的な再処理技術と、第4世代原子炉で実施される将来のリサイクル戦略の研究開発プロジェクト)が進行中である。さらに、Minor Actinide(MA)分離による廃棄物減容・有害度低減研究の高度化・最適化に挑戦している。

ロシアからは、Na冷却高速炉から生じるSFの再処理と軽水炉から生じるMA燃焼用溶融塩炉開発に関する2件があった。高速炉SFの再処理についてはRT-1(Mayak)で実燃料の再処理が成功したことを報告した。溶融塩炉については、材料の適合性、塩の物理的、化学的特性などの開発に係る重要項目の試験が完了したことを報告した。溶融塩炉の今後の開発計画としては、2033年に10 MWの試験炉の運転開始とフルスケールの詳細設計開始を目指している。

インドは将来のThサイクルの実現を視野に、軽水炉SFの先進再処理技術の開発にも精力的である。高レベル廃液からのMA、Cs、Sr、白金族元素分離を目指している。分離した核種の処理・処分方法として、MAは高速炉または加速器駆動型未臨界炉(ADS)による核変換、FPは概ね医療に利用する。例として、分離Csは既にCs glass pencilとして輸血血液への放射線照射に用いられており、既に200本の製造実績がある。

(執筆担当：岡村知拓(東京工業大学))

6. 処分

処分先進国と国際的組織から11件の発表があった。前者では処分実施主体と多様なステークホルダーとの関係構築の重要性が指摘された。フランスでは段階的な知見と実績の積み重ねによりパブリック、規制当局を含む広範な関係者を取り込んで長期に亘る事業が着実に進捗している。フィンランドとカナダでの地域居住者との対話や関係構築の仕方は、理解促進への着眼点、対処法に独自性と共通性が見られ、好対応例とされる要因が理解できた。処分場建設認可における原子力施設としての共通性と独自性の考慮や新規性、状況変化への柔軟な対応を進めるフィンランド規制当局の活動からは、現在の処分場建設段階から次の操業段階を見据えた方法論としての説得性が感じられた。一方、立地が切迫する米国から、一般公衆により立地が受け入れられることが最優先事項であり、政治が絡むと立地が困難になると報告された。

放射性物質環境安全処分国際協会(EDRAM)の活動からは様々な分野の情報共有により処分の実現を目指そうとする強い姿勢が、国際原子力エネルギー協力フレームワーク(IFNEC)からは少量の廃棄物を単独で処分する場合の経済的負担を解決する方策として多国間処分場の位置付け、実現に向けた見解が示された。

7. バックエンドへの統合的方策の挑戦

12件の発表があった。米国DOEの統合型廃棄物管理プログラムで開発中の実行戦略分析(ESA)ツールは、国内発生のSF管理計画のクリティカルパス、意思決定事項、リスクを比較評価するもの。NRCはSFの貯蔵期間長期化を念頭に、乾式貯蔵キャスクの統合的な経年劣化対策を、指針(NUREG-2214)や手順書(TI 2690/011)として整備している。フランスでは、発電～処分を担う事業者によるサイクルインパクト(既存のNFCシステムに基づく中期的視点からの将来選択肢)の規制当局への提示により、産業界の選択とそこでの規制との関りを先行的に把握、評価する試みが継続されている。ロシアにおいても産業界の実績に基づくインフラ統合とその高度化として、VVERから生じるSFのwet/dry貯蔵、第3世代の高度化再処理、高速炉用MOX燃料製造、熔融塩炉開発、軽水炉用MOX燃料開発などを1サイトに集約、連携するNFCの完成形構築へ向けた計画が進められている。

世界原子力協会(WNA)は、産業界の国際的視野と問題意識から、今後増大するSF対策に関して、政策、社会、環境、核不拡散などを見据えた上で、地層処分計画の遅れを前提にしたリスク低減とイノベーションに取り組む必要性を指摘した。

このように統合的方策の解釈は様々であるが、世界的な原子力利用の拡大を見据えて、原子力新興国を含めたSF対策と地層処分の課題を、Multi-site Multi-national Approach(MSMNA)の仕組みで対応すべきとの米国立研究所LLNLからの発表が印象的であった。フランスやロシアはこの概念の一部を既に実施しているとも言え、統合をキーワードとする現有システムの高度化の議論は廃棄物処分の計画を含めて世界スケールで今後さらに進んでいくように感じられた。

(執筆担当：朝野英一(原環センター))

III. YGEと最優秀若手研究者賞受賞

会期中、若手研究者用のYGEが開催された。YGEは国連が提唱する「持続可能な開発目標(SDGs)」の実現に向けて、原子力およびSF対策の観点から貢献する若手研究者の育成を目的としたイベントである。原子力、特にSF対策の分野は非常に長い期間を要する産業であり、継続的な人材育成や技術継承が必要である。IAEAが当イベントを企画した理由は、国際的にSF対策に関する注目度が向上している中で次世代を担う人材を国際的に育成していこうという機運が高まっていることが背景にある。

会議開催前に提出した論文を事務局と専門委員会が評価を行い、YGEに応募した37歳以下の若手研究者35人の中から4人のファイナリスト(The winner)を選出した。この選出された4人のファイナリストは①旅費支

The Winner of Winners is

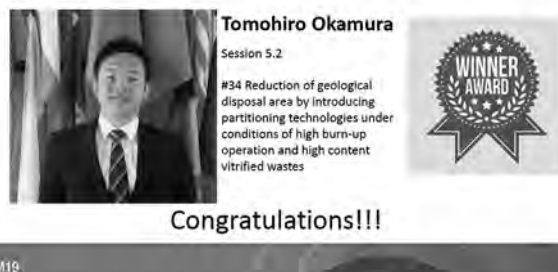


図1 The Winner of Winnerの表彰

援、②口頭発表、③セッションの座長の機会が与えられた。さらにファイナリストによる口頭発表後、会議に参加している専門家全員が投票を行い、特に優れた研究発表に対して最優秀賞(The winner of winners)が与えられた。最終的に東工大院生(岡村知拓)が最優秀賞を受賞した。

The winner of winners on YGEという名誉ある賞が与えられ、“放射性廃棄物処分負荷低減の観点からNFCの高度化研究”の意義が多くの専門家に伝わったと実感した。実際、SFM2019への参加を通じて、“廃棄物の減容”や“処分場面積の削減”に関する発表が多く見受けられた。国際的にも廃棄物処分負荷低減は1つのトレンドであることが明白であり、このトレンドと受賞者の研究内容が一致したことが今回の受賞に繋がったのではないかと感じられた。(執筆担当：岡村知拓(東京工業大学))

IV. まとめ

本会議の副題は“Learning from the Past, Enabling the Future”であり、SF対策に関する知見を国際的に共有し、それを教訓にして、自国の原子力の現状と将来を改めて考えさせられる会議であった。

フランスとロシアの存在感が強く印象に残った。次の時代を見据えたSF対策の国際的な展望と戦略等の両国からの発表には、グローバルスケールでの原子力の先導という強い意識が現れていた。アジアではThサイクル構築を目指すインドと発電炉運転(45基)と新規導入計画(10基)の下でSF対策を展開する中国の勢いを強く感じた。日本からは政策、規制、国際活動、先進NFCに関して一通り発表されていたが、フランス、ロシア、インド、中国と比較して存在感、迫りに欠けていた。これは原子力利用計画が動いている国との違いかもしれない。

本会議議長Ms. S. Pickering(米)はClosing Remarksで、①NFCのOpen/Closedに関わらず、処分を成功裡に実施する必要性に対する非常に強い切迫感、②参加者の多様性(専門領域と職種)の2点を前回会議(2015年)との違いとして強調した。この指摘は、本会議からの教訓として、有効なSF対策を推進するためには、フロン

トエンドとバックエンドを統合した原子力利用全体の連携が必要との示唆であると考えられる。

日本の原子力利用は、福島事故とその後の現状を鑑みれば停滞していると言わざるを得ないが、福島事故から10年弱が経った今、原子力発電所が徐々に再稼働すると共に、六ヶ所再処理工場の竣工が見込まれている。また、高速炉戦略ロードマップが閣議決定される等、新たな動きに向けた機運も高まりつつある。一方、国際的なトレンドは、廃棄物処分を念頭に置いたSF対策をNFC構築の一環として統合的に検討するように変化している。このことから現在の日本は、国際的な潮流を意識しながら自国に適応する新たなNFCの未来戦略を熟慮、立案する時期にあるといえる。その確立に向け、先行する国々の技術戦略について学ぶと同時に、これまで以上に原子力利用における各分野間の連携を促進させ、イノベーションを実現する必要がある。この実現のためには、今回の会議の特徴と云えるフロントエンドとバックエンドの統合を強く意識することがポイントであるとの教訓を得た。

(執筆担当：三枝利有(電力中央研究所)，岡村知拓(東京工業大学)，朝野英一(原環センター))

著者紹介



三枝利有 (さえぐさ・としあり)
電力中央研究所
(専門分野/関心分野) 使用済燃料貯蔵、
放射性物質輸送、材料科学・工学



岡村知拓 (おかむら・ともひろ)
東京工業大学
(専門分野/関心分野) 核燃料サイクル、
地層処分、諸量評価



朝野英一 (あさの・ひでかず)
原子力環境整備促進・資金管理センター
(専門分野/関心分野) 原子力システム、
核燃料サイクル、廃棄物処理処分



書籍販売のご案内

■『放射線遮蔽ハンドブック—基礎編—』

一般社団法人日本原子力学会 「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会編
A4判 370ページ CD ROM付 ISBN978-4-89047-161-4,
定価 5,000円(税別・送料別)

20年前に刊行されました『ガンマ線遮蔽設計ハンドブック』、『中性子遮蔽設計ハンドブック』の改訂版『放射線遮蔽ハンドブック—基礎編—』を2015年3月16日に刊行いたしました。

ガンマ線、中性子を一体として扱い、『放射線遮蔽ハンドブック』としています。内容は計算の方法論を説明した基礎編で、特にモンテカルロ計算、核データ、加速器遮蔽などの項目を大幅に加筆いたしました。

販売後、ご好評により増刷しております。この機会にぜひご購入をご検討ください。

なお、放射線工学会 HP で表紙、目次、はしがき、概要を公開しております。<http://www.aesj.or.jp/~rst/>

ご購入は日本原子力学会ホームページ
書籍販売のページよりお申し込みください



OECD/NEA の TCOFF プロジェクトの概要

日本原子力研究開発機構 廃炉国際共同研究センター 倉田 正輝

本稿では、東京電力福島第一原子力発電所(1F)の廃炉に向けた国際協力として、経済協力開発機構原子力エネルギー機関(OECD/NEA)で進められている TCOFF (Thermodynamic Characterization of Fuel Debris and Fission Products Based on Scenario Analysis of Severe Accident Progression at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station)プロジェクトの概要を報告する。TCOFF は、シビアアクシデント研究の専門家だけでなく、基礎基盤研究の専門家の英知も幅広く結集し、1F 廃炉の着実な推進と加速化を目的に、NEA の原子力科学委員会(NSC)の下で、2017年6月に立ち上がった。10カ国+ECから18機関が参加し、燃料デブリやFPの基礎科学について様々な検討を行っている。2019年12月でプロジェクト終了する見込みであり、その主な成果を報告する。

I. TCOFF プロジェクトの立上げ

東京電力福島第一原子力発電所(1F)の廃炉に向けて、国外でも様々な取組みが進められている。経済協力開発機構の原子力エネルギー機関(OECD/NEA)においては、原子力安全研究の専門家の参集する原子力安全設備委員会(CSNI: Committee of Safety Nuclear Installation)の下で、1F事故進展に係るシビアアクシデント(SA)解析コードのベンチマーク解析(BSAF/BSAF2: Benchmark Study of Accident at Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station), 1F燃料デブリの取扱いや分析に向けた予備的研究(PreADES: Preparatory Study on Analysis of Fuel Debris), 1F現場で取得される各種データの分析(ARC-F: Analysis of Information from Reactor Building and Containment Vessel and Water Sampling in Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station)の3つのプロジェクトが実施されている(このうち、BSAF/BSAF2は既に終了)。他方、1F廃炉の加速化を目的に、基礎基盤研究の専門家の英知も含めて幅広く結集して燃料デブリやFPの化学特性の評価を行うことを目的に、原子力科学委員会(NSC: Nuclear Science Committee)の下で、2017年6月にTCOFFプロジェクトが立ち上がった。TCOFFでは、文科省がプロジェクト運営費はNEAに対して拠出し、NEAがプロジェクト運営を担当している。原子力機構の廃炉国際共同研究センター(CLADS)は、テクニカルアドバイザーとして、TCOFFへの1F関連情報の提供とTCOFFで得られた知見の1F廃炉研究への反映を担当することとなった。プロジェクト実施期間は2019年12月末までである。初回会合において、報告者(倉田)が、TCOFFの議長に選出された。

II. 参加機関と活動内容

図1にTCOFFのプロジェクト構成を示す。前述のように、TCOFFはOECD/NEAのNSCの下にファンド拠出型プロジェクトとして設置され、プロジェクト運営はNEA、テクニカルアドバイザーはJAEA/CLADSがそれぞれ担当している。TCOFFに参加している研究機関は、in-kind貢献として、それぞれが所有する知見(試験・解析データ等)を提供することでプロジェクトに参加している。立上げ当初は9カ国+ECから16機関が参加していたが、2年目から、米国原子力規制委員会(NRC: Nuclear Regulation Committee)のサンディア国立研究所(SNL: Sandia National Laboratory)とロシアのサンクトペテルブルグ大学(PSU: St. Petersburg State University)が加わり、10カ国18機関となった。プロジェクト内には、熔融燃料(コリウム)と燃料デブリ、およびFPに関する2個のタスクフォース(TF)が置かれ、

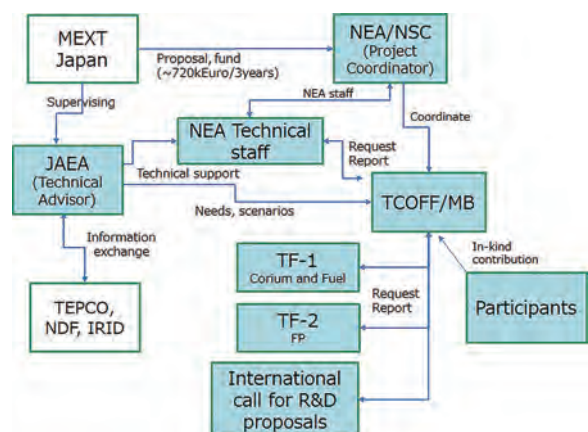


図1 TCOFFのプロジェクト構成

それぞれのタスクリーダーには、スイスポールシラー研究所 (PSI: Paul Scherrer Institute) の S. Nischenko 博士と東工大の小林能直教授が選出された。

また、ユニークな試みとして、文科省拠出金の一部を TCOFF 研究基金としてプールし、大学等の研究機関 (複数) に、それぞれ毎年約 15,000Euro から 60,000Euro を提供し、燃料デブリや FP の基礎データの取得を実施している。

以下に、国名のアルファベット順で、TCOFF 参加機関を示す。CVR (チェコ), JRC-KA (EU), CEA, IRSN (仏), KIT (独), CRIEPI, JAEA, Tokyo Tech (日), KAERI (韓), TUDelft (蘭), IBRAE, KRI, NITI, SpSU (露), KTH, SSM (スウェーデン), PSI (スイス), NRC/SNL (米)。

それぞれのタスクフォースでは、以下に示す合計 10 個の研究活動 (アクティビティー) を進めている。

(TF1: コリウムと燃料デブリ)

- 熱力学データベースのベンチマーク解析
- U-Zr-O 系の熱力学データベース
- その他の系の熱力学データベース
- In-vessel corium に関する要素モデル
- Ex-vessel corium に関する要素モデル
- 1F 事故進展, 1F サンプル

(TF2: FP)

- Cs と鋼材の反応
- Cs 系複合化合物の熱力学データベース
- 中揮発性物質の熱力学データベース
- FP 浸出

TCOFF の活動概要は、OECD/NEA の URL¹⁾ でも確認することができる。

III. 主な成果

TCOFF には、基礎基盤的な材料科学・熱力学の専門家と SA 解析コードや SA 模擬試験の専門家が参集している。1F 事故の教訓の一つが、実際に事故が起きてしまった場合の事故進展やデブリ特性に係る材料科学的な知見の不足であるが、TCOFF では研究分野を横断して有用な意見交換が進んでいる。そのいくつかを以下で紹介する。

一つめは、 UO_2 燃料と Zry 被覆管の溶融現象の理解の深化である。従来、SA 解析では、 UO_2 と Zry の共晶溶融モデル (共晶温度: 1,900 °C) が提案されている。図 2 に共晶溶融モデルの基礎である UO_2 -Zr(O) 擬似二元系の状態図を示す。しかし、共晶溶融モデルには基礎と応用双方の観点で課題がある。基礎科学としての課題は、 UO_2 と Zry の相互作用は実は共晶反応ではないという点である。正確には、Zr による UO_2 の還元で形成される U-Zr-O 三元系メルトへの UO_2 や ZrO_2 の溶融現象というべき現象である²⁾。約 1,900 °C 以上で (実際にはも

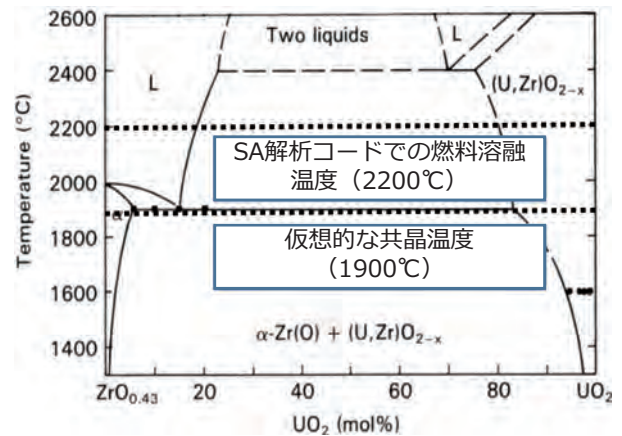


図 2 UO_2 -Zr(O) の擬似二元系状態図³⁾

う数 10 °C 高い温度で)、U-Zr-O メルトへの二酸化物の溶融速度が急速に増加する。他方、応用面の課題としては、様々な模擬試験 (Phebus 等) で SA 解析コードの解析結果を検証したところ、共晶溶融温度を約 2,200 °C に設定しないと燃料溶落現象をうまく説明できないという点である²⁾。現状の SA 解析コードでは、十分な理論的根拠なしに、仮想的に共晶温度 2,200 °C に設定しなおし解析を行っている。TCOFF では、新たな基礎試験データなどにに基づき、機構論的な燃料溶融の要素モデルの整備とその適切な簡素化の検討を進めている。

二つめは、溶融コリウムと鋼材の反応モデルである。1F 2号機では、格納容器ベダスタルに未溶融の燃料集合体部材が崩落しているのが見つかった。このことは、压力容器底部の側面で、この集合体部材を通過させるに十分なサイズの開口部が形成されたことを示唆している。TCOFF では、その有力なメカニズムとして、熱力学的な検討で予想されるコリウムと鋼材の発熱反応の解析を進めている (反応化学式: $U-Zr-O+Fe \rightarrow -Zr-Fe-O+(U,Zr)O_2$)。これは、U-Zr-O メルトが Fe (鋼材の主成分) を溶解することで化学平衡状態が変化し二酸化物が析出する反応であり、熱力学的には大きな発熱をともなう。この反応が実際の炉内体系で起こる場合には、压力容器を破損させる有力なメカニズムとなる可能性がある。

三つめは、Cs, Sr, Ba 等の複合酸化物の蒸気圧等の熱力学データの拡充である。これらの化合物は、事故時のソースタームの評価において重要であり、事故時の炉内化学環境 (酸素ポテンシャル, 温度等) によって、化学的な安定性が変化する。また、FP の化学状態は、それぞれの FP 元素・核種単独では決まらず、相互の化学状態が影響し合う。TCOFF では、Cs, Sr, Ba 等の基礎データを拡充しつつ、得られた新たなデータに基づく、事故時の I や Mo の化学状態への影響の評価を進めている。

TCOFF の成果は、OECD/NEA の他プロジェクトに知見が提供され活用されている。例えば、コリウムの化学特性の知見は、PreADES で進められている燃料デブ

り特性カタログの整備に提供された。また、FP 化学データは ARC-F で進められている FP ソースタームの検討に基礎データとして提供された。

IV. ワークショップの開催

材料科学的な知見を拡充し、SA 解析においてどのように活用するかを専門家意見交換を行うのが、TCOFF の役割の一つになっている。これまでに、TCOFF 参加機関以外にも呼びかけて、3 回の国際ワークショップを開催している。直近では、2019 年 7 月 10～12 日に福島県 J-village 等で、Materials Science for Severe Accident and Fukushima-Daiichi Decommissioning Workshop 2019 を開催した。TCOFF メンバーの CEA が企画し、TCOFF プロジェクトが主催し、JAEA の FRC: Fukushima Research Conference が共催する形式で行われた。21 カ国から 134 名の参加者があり、29 件のオーラル発表と 43 件のポスター発表が行われ、材料科学と SA 解析のシナジーに関するパネルセッションも行われた。

本ワークショップでは、このような異分野交流の場の重要性が指摘され、いくつかの重要課題の具体的な検討が進んでいることが確認された。また、材料科学と SA 解析だけでなく、近年研究が進んでいる軽水炉事故耐性燃料分野との連携も有用である等の意見も出された。また、多くの専門家から、TCOFF は、専門家意見交換のプラットフォーム、シナジーの場として機能していると

高く評価され、2019 年 12 月で終了した後も、その役割を引き継ぐような場の必要性があることが提唱された。

V. 終わりに

材料科学や熱力学は、様々な研究開発において基礎となる分野である。しかし、きわめて多岐にわたるため、そのいっそうの活用のためには、基礎と応用の専門家と認識を共有しつつ、理想論的な総論ではなく、具体的な課題を抽出しこれを解決していくことが有効である。TCOFF では、1F 事故の解析や燃料デブリの特性評価等において、国内外の専門家を結集することで一定の成果を上げることができていると認識している。今後も、我が国が主導しつつ、このような国際的な情報交換の場を維持していくことは、次世代研究者・技術者に高いモチベーションをもってもらいつつ、研究力・技術力を維持・継承・拡充していくのに貢献できると思われる。

－ 参考資料 －

- 1) OECD/NEA/TCOFF,
<https://www.oecd-nea.org/science/tcoff/>
- 2) M. Kurata et al., J. Nucl. Mater. 500(2018)119-140.
- 3) P. Hofmann, D. Kerwin-Peck, J. Nucl. Mater. 124(1984)80-105.

(2019 年 11 月 4 日 記)



書籍販売のご案内

■ 『原子力のいまと明日』 出版：丸善出版株式会社，B5 判 329 ページ，定価 2,200 円(税込)

日本原子力学会では、原子力と放射線についてのわかりやすい解説書『原子力がひらく世紀』を 20 年前に刊行し、好評のうちに現在「改訂 3 版」を発売中です。

その後、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえた新たな解説書を刊行すべく教育委員会を中心に検討が進められ、2019 年 3 月「原子力のいまと明日」を上梓いたしました。

本書は、事故の推移と現状、原子力利用状況の変化、研究開発状況と廃炉への道のり、放射線の人体、生活、産業、経済への影響、あわせて福島県における風評被害の実態や原子力分野の人材育成について取り上げています。

本書は、丸善ネットストア、Amazon、そのほかオンライン書店などでお買い求めいただけます。日本原子力学会事務局からの直販は行っておりませんので、ご了承ください。
[2020 年春の年会]の会場では販売予定です。



私の 主張

原子炉廃止措置の理想，解体せず再活用が最善

日本原子力研究開発機構 西村 昭彦
福井大学附属国際原子力工学研究所

1985年に当時の日本原子力研究所に研究者として職を得た。これまで原子力学会には育てて頂いた思いが強い。最初の業務は、原子力のフロントエンドと云えるレーザーウラン濃縮プロジェクトの基礎研究である。併せてJRR-2を利用した核融合用トリチウム増殖ブランケット材料の中性子照射実験にも携わった。JT-60ファーストプラズマ、大強度陽子加速器プロジェクト(後のJ-PARC)の立ち上げ、高温ガス炉臨界など、多くのプロジェクトが目白押しであった。当時の科学技術庁の原子力局に設けられていた原子力開発機関監理官室に派遣され、行政実務研修員として現在の量子科学技術研究開発機構の一部となった関西光科学研究所の設立に関わった。

ところが現在では原子力研究は廃止措置に関する研究開発が主となってしまった。特に3/11大震災による福島第一原子力発電所の事故以後、原子力カルネサンスとばかりにアクセルを深く踏み込んでいた軽水炉拡充路線は冷や水を浴びせられ、高速炉計画は退潮し、核燃料サイクルは暗礁に乗り上げている。そして何より福島第一原子力発電所の廃止措置の実施を優先しなければならない現実がある。ここでは高速増殖原型炉「もんじゅ」の廃止措置を例にとり、地方自治体に受け入れられ、且つ、国にも貢献できる廃止措置の在り方を考えたい。

「もんじゅ」を「常陽Ⅱ」に

汚染し半壊した事故炉とは異なり「もんじゅ」は綺麗である。廃止措置において原子炉を解体しドラム缶詰めに埋設すること以外にやれることがある。廃棄物発生を最小にして原子力の知識と経験を未来に繋ぐこと、そのための予算と国策の立案が喫緊の課題と想う。

「もんじゅ」については、プルトニウムの増殖は止め発電も行わない。但し、これを活用し高速中性子照射研究炉として活用する。原子力機構には「常陽」があり、MARICO-2と称するキャプセルを炉心に挿入することで高速中性子の材料照射実験炉として役立つ。この前身は、原子力機構の原科研で長年稼働していた高速中性子を扱う臨界集合体「FCA」である。「FCA」は高速中性子による核反応断面積測定に活用され、現在に至る高速炉の設計のための基礎データを生み出した。「FCA」では熱を発生させることは出来ない。このためレーザーによる核燃料を光ファイバ伝送により遠隔加熱を行い、核反応断面積の減少いわゆる高温ドップラー効

果の計測に成功した。「もんじゅ」を改装し「常陽Ⅱ」として活用することが出来れば、高速中性子の照射研究の流れを未来に繋ぐことが出来る。

長半減期核種を短寿命化する

「常陽Ⅱ」ではプルトニウム増殖ブランケットの照射は行わない。その代わりに消滅処理ブランケットの照射を行なう。消滅処理とは高速中性子による長半減期 α 放出核種の短寿命化処理である。以前の科学技術庁ではオメガ計画と呼ばれたプロジェクトであり、現在のJ-PARCに継承されて加速器駆動未臨界原子炉の研究となった。

現在、J-PARCでは、大強度陽子加速器により発生させた高エネルギー陽子ビームを高速循環する水銀に照射し、核破碎中性子を発生させている。計画では使用済み燃料を溶融させた大型坩堝のような炉本体に高エネルギー陽子ビームが上部から打ち込まれ、これにより発生する中性子が長半減期 α 核種を燃焼させる。

「常陽Ⅱ」では、炉心のどの部分に消滅処理ブランケットを装荷するか、これには炉心内の中性子分布の計算と計測が重要である。最初の照射実験はブランケットと呼ぶような大型の照射体ではないかもしれない。ささやかであっても焼結ペレットから開始することが現実的である。運転において使用する燃料交換機を活用して、炉心の中心付近に消滅処理用に成分調整した焼結ペレットを封入した燃料集合体を装填できる。現在この種の研究を行える総合的な放射性取り扱い施設、いわゆるホットラボを有するのは茨城県だけである。「常陽」もホットラボも老朽化が進んでいる。福井県も試験研究炉を望むなら、試験研究炉に先立って使用済み燃料を扱えるホットラボの建設が不可欠である。

事故リスクは圧倒的に小さくなる

「常陽Ⅱ」では発電は行わない。すなわちナトリウムと水の間の熱交換は行わない。これによりナトリウム・水の化学反応事故は起こらない。大事故のリスクは圧倒的に小さくなる。また、長年の「常陽」での保守保全経験が活きる。すなわち「常陽Ⅱ」では「常陽」と同じく炉心とナトリウム1次系は空冷とする。従って、ナトリウム2次系、蒸気発生器、タービン、受変電設備は中間熱交換器で切り離し、蓄熱プラントとして活用する。

蓄熱プラントとは、碎石や熔融塩に熱の形態でエネルギーを蓄え、必要な時に電力に変換する発電プラントで

ある。地球では、特に低緯度の年間日照量の大きい諸国には広大な砂漠が広がっている。ここで太陽熱を利用して溶融塩を融点以上に加熱し、日中は熱エネルギーを蓄え夜間は熱交換機を経て発電し、直流高圧により遠距離送電を行う方式が進められている。これは Concentrated Solar Power (CSP) プラントとして、途上国支援としても進められている。CSP は貯水池の位置エネルギーとして電力を蓄える揚水発電所の役割を熱で担う。

我が国でも 2017 年に九州地方では太陽光パネルの電力の供給が需要を上回り、緊急に大口の供給者からの電力を制限する事態に陥った。これにより風力・太陽光(熱)等の出力変動を平準化することが可能である。蓄熱プラントも総てのカルノー熱機関と同じく、高温側と低温側の温度差が大きいほど効率が高まる。海外のプラントでは硝酸塩混合塩が蓄熱材料に使われることが多いが、これは黒色火薬の原料の一種でもあり高温で熱分解を生じる懸念がある。日本では消防法の観点からは硝酸塩の加熱は困難である。このため、若干の腐食性の対策を施したうえで炭酸塩混合塩を利用するのが合理的である。

A 系統は蓄熱プラントに、B 系統では基礎実験を

「常陽 II」では、1 次系と 2 次系は切り離されている。新たに加熱ヒータを組み込み 2 次系をループとして閉じることで蓄熱タンクとなる。従って、熱交換器伝熱管においてピンホール等の漏洩事故が生じて、この影響は炉心には影響しない。しかしながら、国民がナトリウムと水の反応を危険と感じ許容できないならば、ナトリウム 2 次系の ABC3 系統の内、A 系統は前述した炭酸塩などの熔融塩に置換すればプラントの安全性は遥かに高まる。すなわち A 系統は、Anti-Explosion Loop である。

しかしながら、敢えて B 系統は十分な防護対策を施した上で金属ナトリウムのままで循環させ、次世代のナトリウム高速炉の実証ループとして最新の保守保全技術開発を継続するのはどうだろうか。何故なら、建設当時には導入できなかった様々な遠隔計測技術が現在では利用可能だからである。

まずは、漏洩事故の原因となった熱電対温度計の撤去である。現行では、事故後もナトリウム中心部分の温度計測のために、流れの中央部まで温度計が差し込まれている。流れに起因する振動対策を施した熱電対となっているが、極めて熱を伝えやすい金属ナトリウムが乱流で流れているわけであるから、流れの中心も壁面も温度は同じと見なせる。既設の熱電対を撤去し、撤去した部分の配管壁に銅製プラグで施栓した上で配管外部から放射温度計で非接触測定すればよい。

また、現在では 500 度を超えるセンシング技術も開発が進んでいる。これを活用し超音波振動を流れに加え、ナトリウム中の音響波の伝搬速度を測定することにより

そのドップラーシフトから流速も測定できる。また、高温配管の熱膨張による歪計測には耐熱光ファイバ歪計が利用できる。レーザードップラー振動変位計を活用すれば、配管に設けたダイヤフラムの微小変形を非接触で計測することが可能であり、これらの技術はナトリウム流動の圧力ゲージの開発にも繋がる。さまざまな基礎実験を実規模のナトリウム循環ループを活用して実施できる。従って、B 系統は Basic Research Loop である。

C 系統はスターリングエンジンに大改造

C 系統は、100 kW 級スターリングエンジンへの大改造を行なう。スターリングエンジンは外燃機関であり、シリンダーを外部から加熱冷却する。従って熱源は何でもよい。作動ガスはヘリウムが高効率であるが漏洩防止の観点からはアルゴンでも代用できる。低効率ではあるが、熱源に高レベルガラス固化体を利用して、空気でピストンを往復動作させることも可能である。このスターリングエンジン開発は将来の宇宙炉を見据えた準備である。

米国 NASA では宇宙での恒久的な動力として、ナトリウム冷却炉のスターリングエンジンの地上実験を進めている。ここでは断熱技術や作動ガスのシーリング技術が重要となる。火星以遠の惑星探査には日射量の低下のため太陽電池は使えない。このためボイジャーやパイオニアなどの探査機にはプルトニウム 238 を熱源とする原子力熱電池(ゼーベック効果)が用いられた。将来、高速炉の超高温と宇宙背景放射の 3K の温度差から機械的な回転動力を取り出せるスターリングエンジンは慣性航行中の宇宙船の人工重力発生に役立つかもしれない。最も夢のある C 系統は Cosmic Application Loop である。

まとめにかえて

著者は、原研から原子力機構を通じてレーザー応用技術の原子力応用を実施してきた。また、福井大学附属原子力工学研究所で客員教授も務めている。ここでの主張は大学からの視点が強いかもしれない。なお、2019 年 9 月末に 2 名の実習生を伴って原子力機構敦賀総合研究開発センターにおいて、レーザー遠隔計測の実習を行った。実習後のディスカッションの機会に、彼ら若手にここで述べた夢を語った。その時の彼らの眼は輝いていた、

原子炉廃止措置の理想、すなわち解体せずに再活用を行うことが「もんじゅ」を活用すれば可能である。炉心溶融し廃止措置の選択肢が限定されている福島第一原子力発電所 1~3 号機とは異なる未来が福井県にはある。プルトニウムの増殖を止め、発電も行わず、人類の活動範囲の拡大に貢献する研究開発へ利用することは、原子力反対派にも受け入れられるであろうと考える。

(2019 年 10 月 15 日)

東京工業大学 尾本 彰, 日本原子力研究開発機構 日置 一雅

題記の会議がウィーンで2019年10月7~11日に開催され、79カ国から500人以上が参加し多数のプレゼンテーションと論議が行われた。筆者はそれぞれプレナリーセッション2およびセッション3aの議長として参加したので、会議の論点である期待される原子力の役割と目標、そのためになすべき事、再生可能エネルギーとの関係などについて私見を交えつつ紹介する。

I. 気候変動に関して持続可能な発展の立場から達成すべき目標とその中で期待される原子力の役割

温暖化抑制の目標と現状の抑制策について多くの発表があった。2015年のパリ協定は京都議定書と異なり、一部先進国(Annex I国)がGHG放出削減目標に向けて努力するのではなく、批准した全ての国が2050年までに1.5℃の温度上昇に抑制が可能な様にゼロエミッション達成を目標としている。このために批准国はNDC(Nationally Determined Contribution「各国が自主的に決定する約束草案」)を2020年から5年ごとに提出することが求められているが、国連の報告¹⁾によればNDCによるCO₂放出削減値は1.5℃達成のためのその半分程度でしかない。

持続可能な発展に関するエネルギー領域の最大の課題は電力需要増と脱炭素化の同時達成。エネルギーはセクター別で見たGHG放出の2/3を占め、さらに電力化の

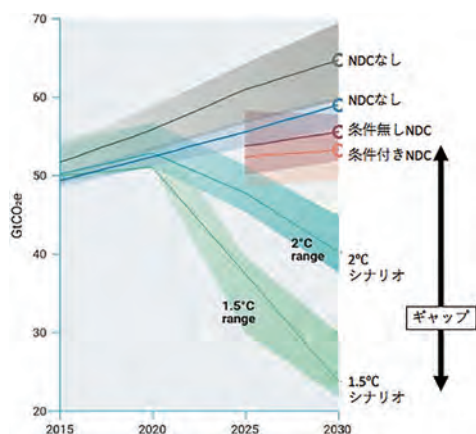


図1 UN Emission Gap 報告で示されたNDCと1.5℃目標との間の年間CO₂放出量の差

進行が予測される場所、CO₂放出が風力について少ない²⁾原子力容量の伸張が期待される。勿論、どこまでのシェアと容量が原子力に期待されるかは、エネルギー節約・再生可能エネルギーのシェア増加・電化の程度・技術進歩(例えば、蓄電池や高温炉による水素生産など)の他、どのような制度がこれを支援するかに大きく依存する。例えば、WNA(World Nuclear Association)は既に以前よりハーモニー計画³⁾により2050年1,000GWe(電力の25%シェア)を目標とし、これに向けて標準化やカーボンニュートラルな立場で特定電源への肩入れを避ける等の政策が必要と発表していた。ここでの容量はしばらく前のIPCCによる予測値の中庸値に基づくものだが、2050年1,000GWeを達成するには、多数の方策が求められる。会議では1)資本費の高い原子力発電の建設費低減(とりわけ、長期に亘り新規建設のなかった欧米でのAP1000, EPRのFOAK建設で詳細設計の修正や建設マネジメントの失敗の教訓を活かす)、2)現在の市場の多くで適正に認知されて居ない原子力の非市場的価値(セキュリティと環境価値)を政策的に認め制度を変えること、少なくともCO₂放出という観点から再生可能エネルギーと原子力を同等に扱いFIT(Feed-In-Tariff)/PTC(Production-Tax-Credit)による政策的偏りを避けること(あるいは世界的に増加のゼロエミ100などFITなしの事業モデル推進)、3)第四世代炉による高温化学反応でエネルギーキャリアである水素生産など「電力供給を超えた原子力化」を計ること、4)事業者が革新的なファイナンス方策を考え出すこと、5)SMR(Small & Modular Reactor)の分散立地によるグリッド容量やインフラの脆弱な開発途上国を含めた原子力容量増加などが論議された。(因みにIPCCによる1.5℃報告⁴⁾の中庸シナリオP3では2050年に現状の6倍に当たる2,244GWeの原子力容量を予測している。なおP1シナリオは大幅なエネルギー需要低下で原子力発電容量は大幅減である)

II. SMR への期待

IAEAを含めて発表者の多くがSMRが今後市場を大きく変えるとの見方を示していた。とりわけ、SMRの持つ「小さな系統容量しかない開発途上国での設置可能性」「需要増加に見合う形で順次発電容量を追加することで

資本投下リスクの低減「熱・電気・エネルギーキャリア（例えば水素）を地域に供給する分散エネルギー源」[立地と運転における柔軟性]を論じるものが多かった。例えば、既に米国アイダホ州での12基のNuScale設置計画ではJUMPプロジェクトとしてハイブリッドエネルギー供給を打ち出している。ただ、水素生産や産業界への熱供給には軽水炉であるNuScaleでは電力による追加加熱を要するなど苦勞がある。筆者はSMRは、分散立地可能を前提とし、大型炉の規模の経済に対抗する「標準化された原子炉のシリーズ設置」「自然現象に対する多数基の共通原因故障対策」「緊急事計画変更」など多数の課題があると見ていて、今回の会議の様な課題への対策提示と議論を含まないSMR賞賛は些か疑問だった。

III. 再生可能エネルギー，原子力との相補性

2019年5月に出されたOECD/NEAによる再生可能エネルギーのシステムコスト評価⁵⁾では後備電源を含むことによるプロファイルコストをはじめとしたグリッド関係の追加コストが再生可能エネルギーのシェア増加に伴い急激に増加するのこれらが市場での電力価格評価に含まれないとの問題(市場ではkWh追加生産に伴ういわゆるマージナルコストが重視される)に制度的改革を求める意見が相次いだ。いくつかの発表者が、「給電指令可能なクリーン電源」すなわち原子力・水力・バイオマスのシェアが多い国が、電力からのCO₂放出(gCO₂/kWh)がもっとも少なく、かつ電気代が安く(スウェーデン、フランス)、再生可能エネルギーのシェアを高めようと多大な努力をしている国(ドイツ、デンマーク)が実はgCO₂/kWhが高いことを間歇性再生可能エネルギー(太陽光・風力)の後備電源問題として示していた。日本(500gCO₂/kWhを超え50以下のスウェーデン・フランスをはるかに超える高い値)を含むこれらの国の炭素指標比較はエネ庁委員会資料⁶⁾でも提示され、持続可能な発展の指標であるGHG放出低減・安価なエネルギー供給という観点からの6カ国の比較で「給電指令可能なクリーン電源」シェアの重要性が指摘されている。間歇性再生可能エネルギーと原子力との相補的利用⁷⁾が双方にwin-winを齎す件にて米国、ブラジル、カナダが触れたが、原子力発電所での蓄熱等の技術に触れた発表は無かった。

IV. 公衆とのコミュニケーション

電力だけでなく輸送や産業用熱利用を含めた原子力利用が気候変動削減役割を高める上で重要と言っても、これを達成する上の根本課題は、技術と制度の革新・ファイナンス・公衆の支持。公衆とのコミュニケーションのセッションでは、infographics, YouTubeを用いた現代的な情報流布の方法等が紹介されていた。我が国でも

IAEA “Climate change and Nuclear Power 2018” を図を中心に簡潔なパンフレットにした資料などにより、原子力を脱炭素かあるいは地球温暖化対策というコンテキストで考えて貰うことが重要であろう。放射線影響研究で有名で、福島事故に際しての避難に伴う死亡例や避難者の心理的影響からリスク全体を見るべき事を常々訴えている事で有名な英国インペリアルカレッジのG. トーマス教授が登壇して放射線と原子力のリスクに関する公衆の反応を論議した。映画「パンドラの箱」のロバート・ストーン監督は「原子力の公衆との対話は原子力の齎す便益(脱炭素化はその最たるもの)を軸におこなわれるべきで、安全を主軸にすべきではない。なぜなら、これを聞いた人は“原子力には安全に関して問題がある様だ”と勘ぐるから」と述べていたのを記憶しているが、トーマス教授も全く同じことを言っていたのは興味深い。

V. 終わりに

IAEAの活動では何をしたか(output)ではなく、加盟国にどんな変化を齎すか・齎したか(outcome)が重視される。今回の会議はタイムリーなoutputを出したが、これが加盟国にどんな変化を齎すのか・加盟国や地域(例:EU)でどの様に「カーボンニュートラルに向けた原子力拡大活動」「原子力容量・シェア目標値」「再生可能エネルギーとの協調活動」が今後とも進められるか、あるいはIAEAがこれらをどの様にコーディネートしてゆくのかについては論議や提言がほとんどないまま会議が終わったのは物足りなかった。また、NET(Negative Emission Technology)との関係も論議がなく、発表も玉石混交であった。中国からの発表・参加者が多く日本人の参加はその1/4。日本では建設された60基の原子力発電所のうち既に24基が廃炉を決定している。現在建設したら20兆円はするだろう残る36基の原子力発電所の運転で年間1億トンの温室効果ガスの排出を抑制(総排出量12億トンの1割を削減)し、年間2~3兆円の化石燃料輸入費用(消費税1%相当)の削減が可能になる事、少なくとも原子力を脱炭素化のコンテキストで考える事を知って貰わねばならない。

－ 参考文献 －

- 1) UN Emissions Gap Report 2018.
- 2) IAEA “Climate change and Nuclear Power 2018”.
- 3) WNA “Harmony programme”.
- 4) IPCC Special Report “Global warming of 1.5°C”, 2018
- 5) OECD/NEA “Cost of Decarbonization”, 2019.
- 6) https://www.enecho.meti.go.jp/committee/studygroup/ene_situation/pdf/report_02.pdf p29.
- 7) MIT-J study report, 2016 April & 2017 Sept (MIT-ANP-TR-171).

(2019年10月24日記)

談話室

リケジョの思い(9) 冬の不調に対処する

いよいよ冬がやってきました。私は毎年冬になると、寒さと暗さにやられています。寒さに耐えるために体力と精神力を使っているところに、仄暗い空を見て気持ちがどんより…。結果、特に悲しい出来事もないのに、心身ともに余裕がなく、自信を失い、混乱してしまいます。

これまでそうした苦しい状況になるたび誰かに助けをもらい、自分なりの対処法を編み出してきました。私がよく実行している対処法は3つ、「よく休む」「人に話す」「ノートに書く」です。

まずはよく休みます。心身に余裕を取り戻すためです。何もしない日を作り、自分の部屋でよく寝て静かに過ごします。ご飯をしっかりと食べお風呂にもゆっくり入

ります。また、SNSを見ないようにします。SNSでの感情的なコメントや、他人の進捗状況がストレスの原因になることが多いからです。

次に苦しい状況を人に話します。自分の状態を整理し、助けを得るためです。信頼できる人や学生相談室のカウンセラーの方に連絡を取り、今の状況について聞いてもらいます。話すだけでも気が楽になります。また、客観的な視点を得て自分の良いところを思い出し、少し自信を取り戻すことができます。

そして自分の状況をノートに書きます。混乱した状況を言語化し、対処法を見つけるためです。今自分が困っていること、その原因、それに対する具体的な対策を書き、できる対策を実行します。苦しい状況の中でも具体的な対策があることは「自分はこの状況をなんとかできる」という希望になります。

この3つを一部だけでも実行します。すると、気持ちの浮き沈みはありつつもだんだん余裕や自信が戻ってきて、冷静に物事を考えられるようになってきます。また調子が崩れたら、同じ対処を繰り返します。

ときには「忙しくてそんなことをする暇はない!」「自分はダメだ、頑張らなくてはならない!」と思うこともあります。しかし、心身に余裕がないままでは良い成果も得にくくなります。苦しいときはできる限り作業の手を休め、早めに対処をするようにしています。

冬は寒さと暗さとでなかなか苦しい季節です。一方で雪景色が美しく、鍋やアイスが美味しい季節でもあります。余裕ができれば冬の風物詩を楽しみたいですね。これから本格的に寒くなる地域もあると思います。皆さま、どうぞご自愛ください。(今回書いたのは私の自分なりの対処方法です。辛いときには専門家に相談しましょう。)

著者紹介

口町和香 (くちまち・わか)
北海道大学理学院物性物理学専攻、修士1年です。統計物理学と研究を学ぶ傍ら、科学コミュニケーションを手掛けています。





～福島浜通りだより～(9)

活かされている震災の繋がり

一般社団法人 AFW 吉川 彰浩



透き通り心癒す清流が台風19号により多くの水害被災地域を生んだ 写真は双葉郡川内村

2019年10月12日、東日本全体を襲った台風19号は、福島県浜通り地方にも甚大な被害をもたらした。

普段は透き通り川底を見せる清流が、一斉にこの日は荒れ狂い、濁流となり、阿武隈高地から太平洋と流れていった。

浜通り一帯に、ある地域は家屋を飲み込む水害が起こり、ある地域では浄水場の浸水被害により広域での断水が起きた。一見どこもかしこも、2011年3月11日の震災が頭をよぎるような、正に被災地と呼ばれる雰囲気溢れている。

しかし、あの頃の様子に、誰を頼ってよいのか、何を信じたら良いのか、絶望に満ちた雰囲気ではない現象が起きた。13日にもなれば、SNSを通じて驚くほどのスピードを持って、被害状況の情報が各地で広まり、またそれに応じて助けようと個々人たちが一斉に動き始めた。

私自身も12日から数日の間、眠れぬ状態が続いた。必死になりメディアでは追いきれない情報を、SNSを通じて拾い続けた。みな同様に動いている。どの町では水が出ない。どこの道路が通れる通れない。支援物資の体制を整えよう。地域の被害状況が逐一アップされ、それに対しての処方箋が一斉にコメントされていく。

震災と水害は別物だ。だとしても一次情報をより迅速に拾い、想定される問題を解決するための手段は共通していることが多い。

具体的に動き出した個人がいる。何をすれば良いのかが分っているからだ。支援物資をかき集める者。支援物

資の受け入れ態勢を作る者。子供たちへの精神的ケアに動き出す者。それぞれが民間として出来ることを僅か数日で動き出した。

浜通り地方は南北に約100kmもある。他県で言えば、隣り合う県を複数またぐほどの距離だ。この距離間において、なんと地域間連携も数日で起きた。

例えば、いわき市と南相馬市以北では甚大水害地域が生まれた。それに伴い、超広域での断水が起きたが、それら地域に挟まれた双葉郡においては、幸いにして断水は起こらなかったため、いち早く「いわき市」または「南相馬市」への給水支援が起きている。

断水で困るのは生活用水(風呂、洗濯、トイレ)だ。双葉郡内で震災後再開した入浴施設を、いわき市・南相馬市へと無料で開放している。

こうした自治体を越えた支援体制の背景には、いわき市や南相馬市には原発事故により、働く場所は双葉郡にありながら、生活実態がその両市にある避難経験者への思いがあるのだろうし、災害からのいち早い回復には自治体を越えた連携必要であることはもとより、震災時の支援の恩返しという思いがあるに違いない。

今、この状況を全員の力で乗り越えていこうとする気運は、震災を経験した大人達だけの中で収まらず、各地で震災教育を受けてきた、もしくはその震災を乗り越えていくことを経験した若者達にも生まれていった。

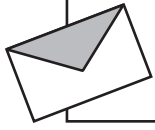
地元の高校生たちがグループを作り、災害ボランティアの受付体制が始まる前に、出来ることとして水害被災地域に入り、泥かきやゴミ捨てをしている。浜通りから遠く離れた場所でも、学校内で呼びかけ、水や食料をかき集め、届ける姿もあった。助け合うことの文化が若者達にしっかりと受け継がれている。

このような事が、加速度的に広域で起きている背景には震災でもって生まれた新しい縁が大きい。東日本大水害そして原発事故で苦しむ地域を、社会が支えていこうと、その繋がりには震災・原発事故から8年半を超える時の中で、あらゆるところに生まれていった。

支援したいと訪れた人達の縁は、日ごろから心通わす縁と変わり、遠くにいながらもお互いを思いやれる関係性にまで醸成している。いわば友人であり、家族のようなものだ。我が内に確かに遠くの隣人がいる。

(2019年10月18日記)

理事会だより



ホームページのリニューアルについて

日本原子力学会のホームページは、現在のホームページとなって長く、様々な問題が出てきているのは会員の皆様ご承知の通りです。もともと、「欲しい情報がどこにあるのかわからない!」あるいは、膨大な情報が奥の奥に潜んでいて「直ぐに欲しい情報に行きつけない」といった構成上の問題のご指摘が多かったのですが、最近さらには、「関係のない広告のページに飛んでしまう」、「セキュリティが低く会社のPCからアクセスできない」、「ホームページがアクセスできなくなった」などといった問題が出てくるようになってきました。理事会ではホームページ改訂の必要性を早くから認識し、会員サービス委員会が中心になって議論を深めてきたのですが、中々リニューアルに至っていない状況でした。筆者は先期から関わっていますが、この間、上記のセキュリティ問題が顕在化するなど、ホームページリニューアルは待ったなしの状態となっています。このため、前会員サービス委員会委員長やホームページに詳しい会員にもご協力頂きつつ、今期中のリニューアルを目指して現在改訂を進めているところです。公開までにはもう少しかかりますので、本稿では途中段階として、現状のホームページの課題と、リニューアルの方向性をご紹介します。

○複雑なサイト構造

当会ホームページはこれまでの積み重ねにより、多岐多様で膨大な専門情報を共有できる『宝庫』に育っています。しかし、継ぎ足しを続けてきた結果、大変複雑なサイトとなっており、欲しい情報へのアクセスが難しくなっています。そのため、現状の情報量に相応しい、サイト構成とシステム構造に改訂する必要があります。

サイト構成については、タブのプルダウンメニューやバナーのタイトルからコンテンツが推定しにくいものがあったり、さらにコンテンツが下層も含めて異様に大きいものと逆に小さいものが対等に配置されていたりします。そこで、コンテンツの仕分けとタイトルについて、できるだけ多くの人にとって分かり易いことを重視して、修正を進めています。

また、システム構造も、古いコンテンツをそのままに残しているため複雑化しています。トップページを含む「aesj.net」に、年会・大会ページの「confit.atlas.jp」、支部部会（炉物理部会「rpg.jaea.go.jp」等）、和文誌「jstage.jst.go.jp」、論文誌「tandfonline.com」等の外部のドメインにリンクする構造となっています。ところが、「aesj.or.jp」というもう一つのドメインが共存しており、英文ホームページや旧ページだけでなく、多くの支部や部会がこちらのサブドメインにページを作っています。ドメインはインターネットの住所であり、同一組織のホームページが2つのドメインを持っているのは不自然ですので、今回のリニューアルでどちらか一つのドメイ

ンに統合したいと考えています。

○CMSとPlug-in

当会ではホームページは事務局で管理しており、各々担当するコンテンツを自分で書き込んでいます。これは、現ホームページはブログでも使われているWordPressというオープンソースのCMS(コンテンツ管理システム)で作っており、HTML/CSSやPHPといった専門知識が無くても、記事を作成したり更新したりすることが簡単にできることが理由です。また管理画面から直接サーバーにアクセスしてコンテンツを編集できるため、特に専任者を設けなくて複数人で運営している当会に向いているとも言えます。一方でWordPressは非常にシンプルな構造のため、できることが限られています。それで、Plug-inと呼ばれる機能拡張ソフトウェアを後付けで加えて、ホームページにいろいろな機能を追加したり、編集を効率的にすることができるようになっていることが特徴です。当会ホームページでも、書籍販売のショッピングサイト機能、表作成やバナー設定などのエディター機能、サイトマップの自動作成機能などを様々なPlug-inで追加して利用しています。なお、このように運営の簡単なWordPressですが、サーバーへの設定には専門知識が必要なため、当会ではWordPressが既にインストールされているレンタルサーバーと契約しています。

○セキュリティの強化

WordPressは世界で最も多くのサイトで使われており、その分、ハッカーにも狙われやすいこととなります。そこで、セキュリティの脆弱性を防ぐための保守が重要で、バージョンアップも適切に実施することが大事です。WordPressのアップデートは管理画面から1クリックで操作できるのでとても簡単なのですが、Plug-inのバージョンが新しいWordPressに適用していないと、正常に作動しなくなる可能性があります。そこで、バージョンアップのたびにきちんと確認・対応する必要があります。このためWordPressのバージョンアップが遅れているホームページが良く見られます。当会の新しいホームページでは、セキュリティの向上が重要な改善点と考えており、その観点で、CMSの選定やSSLの導入などを検討しています。

ホームページは、時代やニーズに応じ変化を続けるものですから、今回のリニューアルについても最終形ではなく、新しい始まりと考えて、より良い姿を目指して改善を継続していきたいと思えます。新しいホームページへの会員の皆様からの忌憚のないご意見を期待しております。

(電力中央研究所・小山 正史)