

### 巻頭言

#### 1 令和の誓い：我が国の原子力平和利用と核物質管理の進展を!

千崎雅生

### 時論

#### 2 エネルギー政策のためのエビデンス：「生産」と「輸入」に関する一考察

杉山昌広

### 解説

#### 27 送配電設備に対する防災・減災対策の現状と課題

##### ―激甚化する台風災害への対応

気象災害が近年、激甚化している。ここでは台風災害を例として、電力流通設備の防災・減災対策の現状と電力レジリエンスについて解説する。

朱牟田善治, 石川智巳



樹木倒壊の例  
(2019年台風15号)

### 特集 深地層の研究施設におけるこれまでの成果と今後への期待

#### 10 原子力機構における深地層の研究施設計画の成果の概要

JAEAの北海道幌延町と岐阜県瑞浪市で深地層の研究施設計画に関するこれまでに得られた成果の概要を紹介する。

仙波 毅

#### 15 原環センターにおける深地層の研究施設を活用した研究開発について

原環センターでは深地層の研究施設を活用して、地層処分工学技術の開発と整備を進めている。

小林正人

#### 23 海外施設での共同研究例と今後への期待

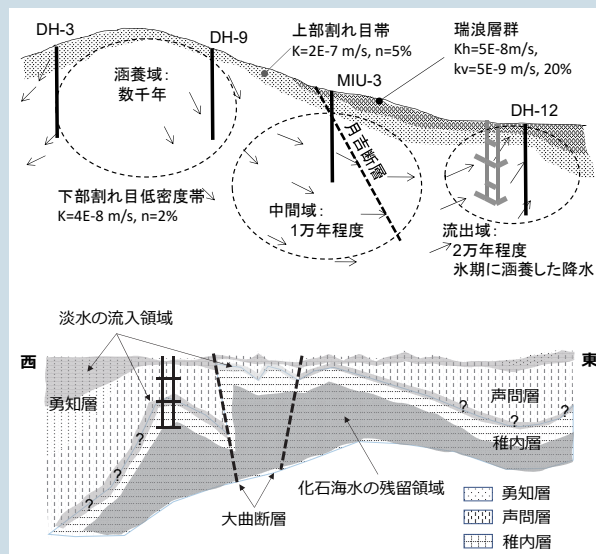
NUMOはグリムゼル試験場(スイス)における国際共同研究において、実測データ取得と数理モデルの妥当性確認に取り組んでいる。

澁谷早苗, 藤崎 淳

#### 19 電力中央研究所における深地層の研究施設を活用した研究開発について

電中研は瑞浪市と幌延町にあるJAEAの深地層の研究施設とその周辺で、地質環境分野の地層処分研究を進めてきた。

幡谷竜太, 田中靖治, 長谷川琢磨, 窪田健二



地下水流動の概念図(上は瑞浪, 下は幌延)

上は Hasegawa et al. に基づき作成, 下は Nakata et al. に加筆して作成

## 41 Column

- 「NIMBY なごみの行方」 井内千穂  
「立場の違いによって生じる相互理解の難しさ」 上野和花  
「広島高裁，伊方3号の運転を差し止め」 佐田 務  
「オーストリア，スロバキア，チェコ」 妹尾優希  
「原発三国志」 服部杏菜  
「知る・共有する・議論する」 服部美咲  
「[たれば] がふさわしからぬとき」

## 解説

### 32 新検査制度の本格運用に向けた大飯発電所の対応状況について

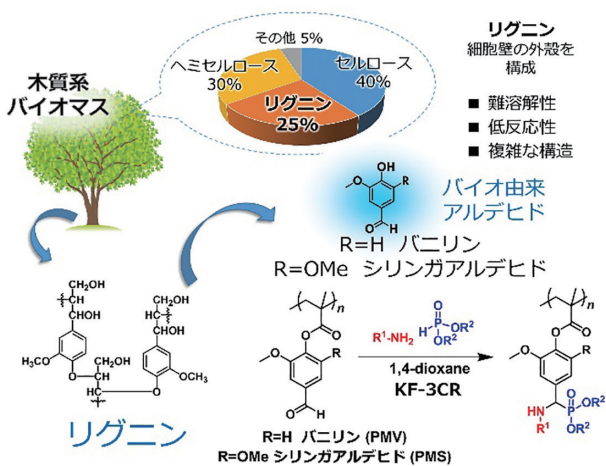
原子力規制検査の2020年4月からの本格運用に向け，これまでの試運用における事業者の取り組み状況として，特にパフォーマンスベース検査に対する対応状況およびマインドチェンジの必要性を紹介する。

榎本晋嗣

### 36 放射線を駆使したバイオマス由来機能材料の開発—放射線グラフト重合と多成分連結反応の融合による新潮流

近年高分子科学においては，多成分連結反応と放射線グラフト重合の融合による新しい材料改質の新展開が注目を集めている。ここではバイオマス由来ハイブリッド有機材料の合成もあわせて紹介する。

覚知亮平



## 談話室

### 56 リケジヨの思い (10) —新学科生に幸あれ

口町和香

## 連載講座 核セキュリティ入門 (1)

### 44 核セキュリティとは何か?

核セキュリティとは何か，原子力安全と核セキュリティとの関連，原子力研究の中での核セキュリティ研究の位置づけなどについて解説する。

宇根崎博信

## 連載講座 基礎から分かる未臨界 (7)

### 49 動力炉(BWR)での未臨界度監視手法の開発

原子炉の未臨界度を常時監視すれば，想定外の臨界到達を未然に防止できる。そこで，炉心シミュレーション技術と反応度計技術を組み合わせて，動力炉に適用しうる未臨界度の常時監視技術の開発を行った。

田代祥一

## Short Report

### 54 IAEA 総会に参加して —ブース展示と幹部懇談

総会の基本テーマは「Life, Safety and Prosperity」

Liu Daniel

## 日々是好日—福島浜通りだより (11)

### 57 ふくしまで遊ぶ

吉川彰浩

## 理事会だより

### 58 本年度の予算方針について

川村慎一

#### 4 News, 部会等の活動報告

- 59 会報 原子力関係会議案内，人事公募，次年度会費請求のお知らせ，2020年度新規フェロー，2019年度学会賞受賞一覧，各部会部会賞一覧，2019年度JNST賞受賞一覧，2019年度フェロー賞受賞者一覧，2020年度シルバー・永年会員一覧，英文論文誌 (Vol.57, No.4) 目次，主要会務，編集後記，編集関係者一覧

# 令和の誓い： 我が国の原子力平和利用と核物質管理の進展を！



日本核物質管理学会 会長

千崎 雅生 (せんざき・まさお)

元日本原子力研究開発機構 特別研究員  
核不拡散・核セキュリティ総合支援センター長

日本核物質管理学会(INMMJ)は、エネルギー資源の乏しい我が国が原子力の平和利用と言う基本理念の下、核燃料サイクル研究開発を本格的に開始していた1977年に、米国の核物質管理学会(INMM)の世界初の国際支部として設立された。現在INMMJは、PuやU等の核物質管理に係る独自の活動とともに、世界一の会員数を持つINMM国際支部として、米国の政府関係機関・研究所、我が国の原子力関係機関、産業界・学界、そしてIAEAやEC等と連携・協力し積極的な活動を展開している。当学会が設立された当時、我が国の原子力平和利用の将来を大きく左右する、厳しい東海再処理交渉が日米政府間で行われたが、現在再び我が国の原子力平和利用は大変な危機に直面している。当時は主に米国からの外圧であったが、今や最近の国際情勢を背景に我が国の核燃料サイクルについても一層の透明性のある開発が要請されるとともに、福島第一事故を教訓に制定された厳しい新安全規制等に適合させることが求められている。これらの要請を乗り越え、早期に原子力発電の再稼働と六ヶ所再処理施設等が運転開始することを強く期待したい。2018年に開催されたINMM年次大会において日本原燃(株)(JNFL)は、民間の原子力事業者として初となる「特別功労賞」を受賞した。これはJNFLの再処理等の核燃料サイクル施設に係る平和利用を保証するための、保障措置技術発展への多大な貢献によるものである。INMMは、米国を中心に世界の核不拡散/保障措置、核セキュリティ、核軍縮等の分野の政府関係者、研究開発・大学関係者等で構成されているところ、JNFLの保障措置に関する取組について、国際的に高く評価されたものと考えている。

今年にはNPT発効50周年であり、NPT運用検討会議が開催される年でもある。現在、NPTの3本柱である、原子力平和利用、核不拡散、核軍縮には大きな課題が直面している。原子力平和利用については、人類が発見した核物質は、遠い将来まで期待出来る大変貴重なエネルギー等の資源であり、その核物質の有効利用は「Atoms for Peace」演説から未だ60数年しか経ていない。我が国が主導した2008年のG8洞爺湖サミットおよび2014年の核セキュリティサミット(オランダ)で、原子力平和利用の推進にとって3S(Safety, Security, Safeguards)の重要性が首脳宣言に盛り込まれた。原子力平和利用について、人類が一層知恵を出して革新的イノベーションを行い、不幸な核兵器等ではなく3Sを一層高め、平和利用が今後も世界の平和と人類の幸福に貢献できることが必須である。日本原子力学会会員の皆さん、現在直面している我が国の原子力平和利用への数々の危機に対し、英知を結集して乗り切ろうではありませんか。

INMMJは、「今後も国内外の関係機関と一層の連携・協力を進める。特に核セキュリティ・保障措置技術等のイノベーション、若い世代の人材育成や学生部会の設置、豊富な知見と経験のあるシニアの活躍、アーカイブ・ライブラリーの作成等を進めるとともに、将来ビジョンやアクションプラン等の議論を活発に行い、正念場にある我が国の原子力平和利用・核燃料サイクルの進展、そして国内外の核不拡散・核セキュリティ等にしっかり貢献する」ことを令和時代幕開けの誓いとし、我が国の原子力平和利用の「好循環」を期待してその実現に微力ながら頑張りたい。(2020年2月1日記)





## エネルギー政策のためのエビデンス： 「生産」と「輸入」に関する一考察



杉山 昌広 (すぎやま・まさひろ)

東京大学未来ビジョン研究センター准教授  
米国マサチューセッツ工科大学にて Ph.D.  
(気候科学) および修士号(技術と政策)を取  
得。電力中央研究所社会経済研究所主任研究  
員を経て 2014 年 4 月より東京大学政策ビ  
ジョン研究センター講師, 2017 年 4 月より同  
准教授, 2019 年 4 月より現職。

現代社会の経済は知識により駆動され、データは 21 世紀の石油に相当するとされる。科学的知見は増加する一方であり、社会経済の複雑さは日々増している。これはエネルギー分野も例外ではない。脱炭素化、デジタル化、分散化など大きな流れがあり、これらはどれもすでに確立された化石燃料や原子力といった現在の主力エネルギーとは大きく異なる知見が求められる。

政策については世界的に科学的エビデンスに基づく政策形成 (evidence-based policymaking, EBPM または evidence-based policy, EBP) の機運が高まっている。実験・自然実験的手法に基づく政策効果の測定手法の進展および高度に複雑化する社会状況を踏まえて、科学的エビデンスをより一層適切に政策に活用していくべきという運動である。ポスト・トゥルースやフェイク・ニュースという言葉も政治で盛んに聞かれることから実践は難しいことはいうまでもないが、EBPM 自体に疑義を呈する方は少ないだろう。

一方、国際的に見たとき日本の科学のプレゼンスは長期的に低下傾向にあるとの指摘は多い。近年日本から毎年のようにノーベル賞受賞者が出ており、これ自体は喜ばしいことである。しかしこうしたノーベル賞受賞者が日本の基礎科学の状況について嘆くのは見慣れた風景になってきている。こうした話を聞くと物理や化学、生命科学といった自然科学を想像するかもしれないが、大学についていえば運営費の低減や大学教員の研究時間の軽減は分野を問わず進行している。従って日本の知的生産は減少傾向にあるだろう。

日本政府は 2018 年、第 5 次エネルギー基本計画をまとめ、脱炭素などの世界的な潮流の中でイノベーションの不確実性などを踏まえると、科学的レビューメカニズムを設けて、定期的に政策の方向性について点検が必要であると述べた。イノベーションが世界的に加速し、また中国やインドといった新興国も主要なプレーヤーになる中、科学的エビデンスに基づいた不断の見直しは必須ともいえ、エネルギー基本計画に明示的に盛り込まれ

たことは喜ばしい。ただ、長期的な日本の科学の趨勢を踏まえると、一つ質問が生まれる。科学的エビデンスは日本で十分に生産されているのであろうか。

仮に日本の科学的生産能力が減退していなくても、日本は大国ではないということを忘れてはならない。2018 年の日本の国内総生産 (GDP) は米国、欧州連合のそれに比べて約 3 分の 1 である。GDP の一定の割合が広義の科学に割り振られ、そのうちの幾分かがエネルギー技術やエネルギー政策などに割り振られるということを考えると、日本の知的生産は必ず欧米に比べて低くなる。

これは何も難しいことを言っているわけではない。スポーツのアナロジーを考えよう。近年、日本のスポーツの躍進は目覚ましい。例えば 2019 年に日本で開催されたラグビー・ワールドカップのベスト 8 達成は記憶に新しい。しかし、日本はすべての競技種目で金メダルや優勝を達成できるかといえば、それは難しい。過去のオリンピックのメダル数を見てもやはり人口・GDP の多い米国に比べて当然小さくなる。英国やドイツを見ても同様な傾向であり、日本が特異なわけではない。言い換えれば日本が金メダルを取れないスポーツ競技は多数ある。いや、むしろそちらの方が多いのだ。繰り返すが、日本人はスポーツが苦手というわけではない。日本人の国力から全ての分野では極められない、それだけだ。

同じような考え方をエネルギー政策にあてはめればどうなるのであろうか。エネルギー政策でも様々な知見が必要になるが、エネルギー政策の学問分野を細かくみたときに、日本に存在しない分野の方が日本に存在する分野より多くなるだろう。つまり、日本に専門家がいらない、もしくは十分に存在しない分野は多数存在することになる。

イノベーションはどうであろうか。脱炭素だけとっても日本における重要性は高まる一方である。日本政府が 2019 年に公表したパリ協定における長期戦略は 2050 年までの温室効果ガス 80% 削減を打ち出し、21 世紀後半の早い時期に脱炭素 (正味ゼロ排出) という方向性を示した。



その具体的な方策としては非連続なイノベーションが言及されている(ただ英語では discontinuous innovation ではなく disruptive innovation が使われているが disruptive の本来の意味は破壊的であり注意が必要である)。原子力でも小型モジュラー型炉など、新たなイノベーションが求められる領域は多い。

エネルギー技術イノベーションという学問領域がある。イノベーション研究 innovation studies や環境経済学に影響を受けて進んできた分野であり、(1)イノベーションをシステムとして理解することの必要性、(2)エネルギー産業は研究開発投資が他の産業に比べて小さく強化する必要があること、(3)技術プッシュのみならず需要プルも必須であること、(4)需要側の対策が歴史的に見て弱いこと、(5)granular な(生産単位が小さい)技術の方が技術革新のスピードが速いことなどを明らかにしてきた。こうした知見は今後益々重要になるが、残念ながらエネルギー技術イノベーションに関する専門家は日本には(ゼロではないが)十分に存在せず、コミュニティが形成できていない。

これはエネルギー政策に関連する他の学問領域、エネルギー・シナリオ/排出シナリオと比べると明らかである。日本では本学を含めて複数の研究大学、地球環境産業技術研究機構、国立環境研究所、日本エネルギー経済研究所、エネルギー総合工学研究所など国際的なプレゼンスを持つ優れた研究チームは枚挙にいとまがなく、研究成果は国際的なレポートでもしばしば参照される。

一方、エネルギー技術イノベーションは、少し古いデータになるが、2012年の国際応用システム分析研究所(IIASA)が刊行した総合的なエネルギーに関する報告書 Global Energy Assessment において、エネルギー技術イノベーションの第24章では、214篇ほどある参考文献のうち、(名前から判断される)日本人の論文は5篇ほどに限られる<sup>1)</sup>。

なぜ研究者コミュニティが必要か。それは冒頭で述べた EBPM で最もエビデンスの度合いが低いとされるものが、研究者個人の意見であるからである。EBPM では研究の積み重ね、またそれを専門家集団としてレビューして体系的にまとめていく仕組みが必要である。しかし、こうした取り組みには。研究者の厚みがない場合、ある研究者が発表した論文や研究資金の申請書をピアレビューする他の研究者を見つけることができない。また報告書を取りまとめるにしても、分担執筆することもできない。

日本ではエネルギー技術イノベーションに関する人材が不足しているが、何もこれは日本に限られた話ではない。欧州のほとんどの国は小さく、知見も圧倒的に不足している。ドイツや英国でもすべての分野をカバーできるわけではない。しかし、欧州の場合、近年多くの政策分野で統合が進み、エネルギー・環境分野も例外ではない。ドイツの国内政策を立案する際も欧州レベルでの政策との調整は必要であり、必然的に英語での情報が入ってくることになる。言い換えれば英語による科学的知見の「輸入」である。これは政策論議が日本語に限定される日本とは大きな違いである。日本でも、エネルギー情勢懇談会のような場で海外の有力研究者や有識者が招待され意見を陳述することがあるが、これはどちらかといえば箔付けの位置づけであり、実質的な情報収集にはなり切れていない。

アジアでも小国ながら英語での科学的知見の情報収集に長けている国がある。シンガポールである。筆者が以前調査したことがあるのはバイオメディカル分野のイノベーションであったが、政策の立案段階から海外の研究者に真摯に意見を求め、実際の研究能力の開発の際にも海外の力をフルに活用した。

シンガポールを真似しなくとも、海外の知見を有効に活用する方法は無数にある。人工知能や自動翻訳の機能が伸びる中、戦略的な翻訳も一例だろう。公務員や企業人の異動のテンポを遅くし、個々人の海外とのネットワーク強化をすることも考えられる。国際共同研究も一つの方策であろう<sup>2)</sup>。あくまでもポイントは世界で最も良質な科学的知見を、日本の価値や戦略的目標に従って活用することであって、海外に引きずられることではない。

2019年に活躍し、流行語大賞の「One Team」も生み出したラグビー日本代表は31人の選手のうち、15人が外国出身であった。審議会・研究会のメンバーはほぼ日本人で占められている。そのままというわけにはいかないだろうが、エネルギー政策もスポーツから学ぶことができるのではないだろうか。

#### － 参考資料 －

- 1) 杉山昌広(2016). 気候変動緩和策としてのエネルギー技術イノベーション政策. 環境経済・政策研究, 9(1) 103-107.
- 2) Sugiyama, M., Sakata, I., Shiroyama, H., Yoshikawa, H., & Taniguchi, T.(2016). Five years on from Fukushima. *Nature*, 531, 29-31.

(2019年12月29日記)



## 規制委、女川2号機の設置変更を許可

原子力規制委員会は2月26日の会合で、東北電力が申請していた女川原子力発電所2号機の設置変更は新規規制基準に適合すると判断した。東北電力では2013年12月に、同機の耐震性や津波対策を強化した対策をまとめて、規制委員会に審査を申請していたもの。規制委員会は176回の審査会合を経て昨年11月に審査書案をとり

まとめ、これに対して寄せられた979件の意見とそれに対する規制委の考え方も今回の会合であわせて示した。

新規規制基準に適合した原発はこれで16基となり、このうち9基が原子炉を起動済。このほか11基が審査中となっている。

(原子力学会誌編集委員会)

## チェルノブイリ森林火災跡地の「地表流」で放射性物質拡散

福島大学と筑波大学の研究グループはこのほど、ウクライナのチェルノブイリ原子力発電所周辺(半径30km圏内)で、土壌に浸透しきれなかった雨水が地表を流れる現象「地表流」を観測。森林火災跡地で放射性物質を含む土砂の移動が起きていることを明らかにした。

同研究では、放射性物質の再拡散に対する懸念をとらえた、ウクライナの研究機関との共同プロジェクト。2016年にチェルノブイリ原子力発電所から約2km離れた地点で発生した大規模森林火災の跡地と、火災の影響がなかった周辺の森林地のそれぞれに調査区を設け、「地表流」によって流出する放射性物質の量を比較した。その結果、森林火災跡地では火災の影響がなかった森林地と比べ「地表流」の流量は約2.7倍、さらに、「地表流」

に含まれて移動する放射性物質は約30倍にも上っており、放射性物質の大きな増加は、水中に溶けた状態ではなく、水中に浮遊する微細な土壌粒子などに付着して移動していることに関係するとされた。

研究グループでは、森林火災跡地において放射性物質の拡散を防ぐには「地表流」による土砂流出を抑えるのが有効と考えられるが、河川周辺で森林火災が発生した場合の影響評価・対策に向け、今回の研究成果を発展させていくとしている。

同研究は、科学技術振興機構と国際協力機構との連携プログラムにより実施された。

(資料提供：日本原子力産業協会)

## 海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

### 【国際】

## IEA 発表、2019年の世界のCO<sub>2</sub>排出量は「横ばい」

国際エネルギー機関(IEA)は2月11日、世界のエネルギー部門から排出されるCO<sub>2</sub>の量が2019年は過去2年続いた増加傾向が停止し、2018年実績とほぼ同レベルの約330億トンだったと発表した。

世界経済が2.9%拡大するなか、CO<sub>2</sub>排出量がさらに増加するとの予想に反して「横ばい」となったのは、主に先進経済諸国で発電にともなう排出量が減少したからだとの説明。これらの国では、風力や太陽光など再生可能エ

ネルギーの役割が強化されるとともに、石炭火力から天然ガス火力への転換、原子力発電所の高稼働などが功を奏した。

日本については特に、近年再稼働を果たした商業炉により原子力発電量が40%拡大し、石炭や天然ガス、石油による発電量を押し下げたと指摘。CO<sub>2</sub>排出量も対前年比4,500万トン(4.3%)減の10億3,000万トンになったが、これは2009年以降最速の削減ペースであるとともに、発電部門での最大下げ幅になったと強調している。

「横ばい」の他の要因として、IEAはいくつかの国で気候が穏やかだったことと、新興国市場の一部で経済成長が鈍化したことなどを挙げた。このような結果についてF.ピロル事務局長は、「CO<sub>2</sub>排出量の増加傾向が一時的

にただ停止したと言うよりも、2019年に決定的なピークを迎えたと後々に記憶されるよう、今こそ最大限の努力を傾注する必要がある」と明言。世界にはそのためのエネルギー技術が存在することから、それらはすべて活用しなければならない。IEAとしては、排出量の削減に向けて各国政府や企業、投資家、温暖化防止に純粋に取り組んでいるリーダー達との協力体制を構築中だとした。

同事務局長はまた、排出量の増加が止まったことは、この10年間で地球温暖化に立ち向かえんとする根拠になっていると説明。クリーン・エネルギーへの移行が進んでいる証であり、一層意欲的な政策や投資によってCO<sub>2</sub>の排出量に有意な変化をもたらすことができると示された。

このような目標の達成支援で、IEAは今年6月に「世界エネルギー見通し(WEO)特別報告書」を刊行する予定。2030年までにエネルギー関係のCO<sub>2</sub>排出量を3分の1削減し、世界を長期的な温暖化防止目標の達成に向かわせる方策を策定する。7月6日にはさらに、「クリーン・エネルギーへの移行サミット」をパリで開催し、主要各国の閣僚や関係企業のCEO、投資家などとともに意欲的な解決策を探るとしている。

IEAによると、先進経済諸国におけるCO<sub>2</sub>排出量の実質的な低下は、他の国で排出量が引き続き増加するのを相殺する結果になった。米国は国ベースの下げ幅が最大値を記録し、2019年は1億4,000万トン(2.9%)の削減となった。これにより、米国では2019年の排出量がピーク時の2000年から約10億トン削減されたことになる。欧州連合(EU)諸国の排出量も、2019年は発電部門の排出量が下がったため、全体で1億6,000万トン(5%)の排出量が削減された。原因としては天然ガスの発電量が初めて石炭火力を抜いたほか、風力発電量も石炭火力と肩を並べるまでに増加したとしている。

一方、残りの国々では2019年にCO<sub>2</sub>排出量が合計4億トン近くまで増大。増加分の約80%は、石炭火力発電量が引き続き上昇したアジア諸国のものだと指摘した。

先進経済諸国では各国ともに発電部門からの排出量が1980年代の後半レベルまで低下したが、この当時の電力需要量は現在の3分の1程度だった。これらの国々では、再生可能エネルギーや原子力による発電量の増加、石炭火力からガス火力への転換、電力需要量の低下などにもない、石炭火力の発電量が約15%低下している。

## 【EU】

### グリーンディール投資計画案、原子力への支援なし

欧州連合(EU)の執行機関である欧州委員会(EC)は昨

年12月、EU域内がクリーンで循環型経済に移行することにより資源の効率的な利用を拡大し、気候変動を食い止めることなどを目指した2050年までの工程表「欧州グリーンディール」を公表。1月14日にはこれに続き、欧州グリーンディールの実行を可能にするための投資計画案と、ポーランドのようにこのような移行から最も影響を受ける地域や部門に資金提供する「公正な移行メカニズム(JTM)」を公表した。

それによると、2050年までに欧州大陸を世界で初めて温室効果ガスの排出量実質ゼロ(気候中立)とするためには、EUと加盟各国の公的部門に加えて、民間からも相当額の投資が必要になる。今回の「持続可能な欧州への投資計画」では、まず公的な投資手段を結集。とりわけEUの複数の投資プログラムを統合した「InvestEU」など、EUの資金調達手段によって民間投資を引き出し、少なくとも1兆ユーロ(約122兆7,000億円)の投資につなげたいとしている。

ただし、この投資計画では原子力発電への言及が一切なく、フォーラム(欧州原子力産業会議)のY. デバゼイユ事務局長は翌15日、EC提案がこのような資金援助の対象から原子力を除外していることを憂慮すると発表。「低炭素経済への移行で社会が不利益を被ることはあってはならない」とした上で、EUによる資金割当が炭素集約型部門の従業員を低炭素産業に移行させる一助となるよう、全面的に支援したいと述べた。

ECが策定した「欧州グリーンディール」では、運輸、エネルギー、農業などすべての経済分野に加えて、鉄鋼、セメント、繊維、化学などの産業をカバー。あらゆる政策分野で気候と環境に関する課題を機会に変え、EU経済を持続可能なものに転換するとともに、この移行がすべての域内住民にとって公正なものとなることを目指している。

このためECは、2050年までにCO<sub>2</sub>排出量実質ゼロを達成するという政治的な目標を法制化するとしており、100日以内に初の「欧州気候法」を提示する方針である。また、気候と環境に関するEUの目標達成に向け、新産業政策や循環型経済行動計画、公害のない欧州に向けた提案も提示する。さらに、2050年までの目標達成に現実的な道筋を付けるため、EUによる2030年の温室効果ガス排出量削減目標の引き上げに向けた作業も開始する予定である。

＜「持続可能な欧州への投資計画」＞

ECは「欧州グリーンディール」を公表した際、「持続可能な欧州への投資計画」案も提示した。昨年11月にEC委員長に就任したばかりのU. フォンデアライエン委員長は、「2050年までに欧州で気候中立を達成することは前例のない移行計画であり、域内住民の誰1人として置



き去りにしないよう支援する」と明言。「欧州グリーンディール」の実施で重要となる投資の必要性を「投資の機会」に変えて、域内にグリーン投資の波を引き起こす方向性を示したいと述べた。

今回の発表で EC は、「持続可能な欧州への投資計画」は気候の中立やクリーンで競争力のある経済への移行に向け、官民の投資促進の枠組を生み出すとともに、必要な EU 資金を調達すると指摘。「欧州グリーンディール」で表明した財政イニシアチブを補完するため、「投資計画」は3つの特徴を持ったものになるとした。

それらはすなわち、(1)今後10年間の持続可能な投資として少なくとも1兆ユーロを調達、(2)官民の投資機会を開放するとともに、その適用を可能とするためのインセンティブを提供、(3)公的機関やプロジェクトのプロモーターに対し、持続可能なプロジェクトの計画・立案・実行に必要な実質的支援を EC が提供——など。(1)においては、欧州投資銀行が主要な役割を果たすとした。

＜EC 提案に対するフォーラムの見解＞

このような提案に対し、フォーラムの Y. デバゼイユ事務局長はまず、「石炭火力依存国の脱炭素化努力に財政支援を与えるという EU の目標には賛同する」とした。その一方で、過去18か月間に「国連・気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」や国際エネルギー機関(IEA)、および EC さえも「炭素を排出しない原子力は低炭素経済において不可欠」とする報告書を公表していた事実に言及。昨年末になると複数の EU 加盟国が、2050年までに脱炭素化目標を達成するには原子力発電への投資が必要になることを明確に示していたと述べた。

同事務局長は、「石炭産業の労働者を原子力産業に移行させるメリットについては、すでに仏国と英国が立証済みだ」としており、フォーラムとしては、今回のような EC 提案を正当とするのはなかなか難しいと指摘。「EU も結局のところ、石炭火力依存地域の人々を低炭素産業に移す支援に集中的に取り組むのだろうが、資金援助を受ける資格のある低炭素部門に制限をかけるのなら、誰1人置き去りにせずに今回の目標を達成することは非常に難しくなるだろう」と強調した。

同事務局長はまた、世界最大の会計事務所デロイト・トーマツの調べによると、欧州の原子力産業界は現在、110万人以上の雇用を域内で維持しており、域内総生産(GDP)のうち5,000億ユーロ(約61兆3,800億円)以上を原子力産業界が生み出していると指摘。原子力産業は発電部門の低炭素化と欧州域内の雇用創出という両面において、恩恵をもたらしていると訴えている。

## 【ロシア】

### 既存炉5基で運転期間を最長60年に延長

ロシアでは現在、海上浮揚式原子力発電所に搭載の小型炉2基も含め35基(合計出力約3,000万kW)の商業炉が稼働中だが、これらのうち5基について昨年12月から1月にかけてそれぞれ運転期間が延長され、最長のもので60年間になることが明らかになった。

ロシアで近年開発された最新鋭の第3世代+(プラス)のロシア型 PWR(VVER)は、運転期間が当初から60年に設定されているが、それ以前の VVER における運転認可期間は最大30年。この年数が経過しつつある商業炉については、連邦政府の原子力発電所開発プログラムと民生用原子力発電公社のロスエネルゴアトム社による「2013年～2023年までの運転期間延長プログラム」に基づき、運転期間が適宜10～25年の幅で延長されている。

ロスエネルゴアトム社は、高経年化した既存炉で改修工事を行い運転期間を延長することは、世界中で実行されている効果的な良好事例だと指摘。取替用の原子炉施設を建設する準備が整うまで、十分な時間を確保する上で非常に重要との認識を示した。2001年以降、昨年12月27日までに国内で27基の原子炉の運転期間が延長されたが、このうち3基についてはすでに運転が終了。現在、廃止措置の準備中だと説明している。

昨年12月17日には、1989年に送電開始したスモレンスク原子力発電所3号機(100万kWのRBMK)について、15年間の運転期間延長が承認され、同炉は2034年まで45年間の稼働が可能になった。同月の20日にはまた、連邦環境・技術・原子力監督庁(ROSTECHNADZOR)が、コラ原子力発電所2号機(44万kWのVVER)に対し、15年間の運転期間延長を許可。1974年に送電開始した同炉は、2004年時点ですでに1回、運転期間が15年延長されていたため、合計の稼働期間は2034年まで60年に達する。

同月27日にはさらに、極東地域のビリビノ原子力発電所で2号機(1.2万kW、EGP-6)の運転期間が6年間延長された。同炉も2004年に15年間の期間延長が許されており、最終的に2025年末まで合計51年間運転を継続することになった。30日になると、ROSTECHNADZOR がノボボロネジ原子力発電所4号機(41.7万kWのVVER)について2回目の運転期間延長を承認。1972年に送電開始した同炉の運転期間も、2032年までで合計60年に達する予定である。

このほか、年明けの1月10日、ROSTECHNADZOR はロストフ原子力発電所1号機(100万kWのVVER)

の運転期間を 2031 年末まで延長する新しい認可を発給したと発表した。同炉は 2001 年 2 月に送電開始したが、何らかの理由により当初の運転期間が 2020 年までに設定されていた模様。今回の延長より、同炉も標準的な VVER と同様、30 年間稼働することになった。

ロストフ発電所の 4 基(各 100 万 kW の VVER)は 2019 年中に目標値を超える合計約 340 億 kWh を発電しており、ロシア南部地方における信頼性の高い電力供給源となっている。その他の発電所も 2019 年の発電実績は良好で、コラ発電所の 4 基(各 44 万 kW の VVER)は 100 億 kWh を超える電力を発電。ノボボロネツ発電所では出力の大きいⅡ期工事 1, 2 号機(各 110 万 kW 級 VVER)が 2017 年と 2019 年末にそれぞれ送電を開始したことから、ロシアの原子力発電所による総発電量の約 10 %分に相当する約 210 億 kWh を発電したとしている。

## 高速実証炉「BN-800」に初回取替用 MOX 燃料を装荷

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は 1 月 28 日、ベロヤルスク原子力発電所で 2016 年 10 月から営業運転中の高速実証炉「BN-800」である 4 号機(FBR, 88.5 万 kW)に、初回分の取替用ウラン・プルトニウム混合酸化物(MOX)燃料集合体装荷したと発表した。同炉は燃料交換を含む定期検査を終え、すでに運転を再開している。

運転開始当時、同炉の初期炉心はウラン燃料と MOX 燃料の両方が含まれる炉心であり、今回の取替により炉内の MOX 燃料集合体は合計 18 体となった。民生用原子力発電会社のロスエネルゴアトム社とロスアトム社の燃料製造子会社である TVEL 社は、今年中にさらに 180 体の MOX 燃料集合体を同炉に装荷し、2021 年末までには残りすべてのウラン燃料を MOX 燃料に交換。ロシアの歴史上初めて、フル MOX 炉心で運転を行うとしている。

高速炉用の MOX 燃料を産業規模で生産することは、2020 年までを展望した「ロシア連邦目標プログラム」の目標の 1 つに指定されていた。ここでは高速炉とクローズド核燃料サイクルの技術開発が最優先に行われており、ロスアトム社は「熱中性子炉と高速炉をセットで稼働」という 2 つの要素を持つシステムに原子力発電を移行させる戦略である。同社はこれらによって(1)原子力発電所の燃料物質の量を飛躍的に増加できる、(2)使用済燃料をただ貯蔵しておくのではなく、リサイクルが可能になる、(3)施設内に蓄積されている劣化ウランとプルトニウムを有効利用できる——など、様々な重要タスクが解決されるとの認識を示している。

ベロヤルスク 4 号機の初期炉心は、モスクワ州エレクトロスタリにある TVEL 社のエレマシュ工場で製造さ

れたウラン燃料集合体と、ウリヤノフスク州ディミトロフグレードの国立原子炉科学研究所(RIAR)で製造された MOX 燃料集合体で構成されていた。今回の MOX 燃料集合体は商業炉の使用済燃料から生成されたプルトニウム酸化物と、ウラン濃縮後の劣化 6 フッ化ウランから生成された劣化ウラン酸化物を材料に、クラスノヤルスク地方ゼレスノゴルスクにある鉱業化学コンビナート(MCC)で製造されたもの。MCC では 2013 年 8 月に BN-800 用の MOX 燃料製造施設(定格製造能力: 60 トン/年)が本格着工、2014 年 12 月から製造能力 6 トン/年の規模で運転が始まり、取替用 MOX 燃料一式については 2018 年後半から製造開始したとしている。

## 【エストニア】 SMR プロジェクトにフォータム社と トラクテベル社が協力

北欧バルト三国の 1 つ、エストニアのエネルギー企業であるフェルミ・エネルギア社は 1 月 28 日、同国初の原子力発電プラントとなる小型モジュール炉(SMR)の建設に向けた調査で、原子力発電所を運転するフィンランドの国営電気事業者のフォータム社、およびベルギーの大手エンジニアリング・コンサルティング企業であるトラクテベル・エンジー社の 3 者で協力覚書を締結したと発表した。

フェルミ・エネルギア社は第 4 世代炉の導入を目的に、エストニア原子力産業界で SMR 開発/建設を支持する専門家らが起ち上げた企業である。同国が加盟する欧州連合は(EU)2018 年 6 月、バルト三国とポーランドを 2025 年末までに旧ソ連・東欧圏をカバーする旧ソ連の総合電力システム「IPS/UPS」から切り離し、欧州 24 か国が共同管理する「大陸欧州送電網」に統合するという政策ロードマップに全関係国が調印したと発表。ロシアからの電力輸入停止まで期限が迫っていることから、同社は SMR の形で原子力発電を国内に導入して EU の「2050 年までに CO<sub>2</sub> 排出量実質ゼロ」目標の達成に貢献するとともに、エストニアのみならずバルト三国全体において、天候に左右されることなく信頼性の高い CO<sub>2</sub> 排出ゼロのエネルギーを供給する体制を確立したいとしている。

フェルミ・エネルギア社はすでに昨年 9 月、GE 日立・ニュークリアエナジー社が開発中の SMR「BWRX-300」を国内で建設するための可能性調査の実施で同社と協力覚書を締結した。このほか、英国のモルテックス・エナジー社、カナダのテレストリアル・エナジー社、米国のニュースケール・パワー社それぞれが開発する SMR についても、国内で建設する選択肢として検討中と伝えられている。

同社はまた、今回の発表のなかで使用済燃料の管理や SMR 建設のスケジュール、計画立案等について、詳細に検討するための了解覚書締結に向け、欧州の原子力企業 2 社と協議中だと表明。これらの調査検討を年内に完了し、2021 年初頭に公表する方針だ。

今回の 3 者の協力覚書で最も意義深い側面として、同社は原子力発電事業者との実際の共同作業を通じて相互理解が得られる点を挙げた。原子力発電を導入するには様々な要素を徹底的に分析し、他のエネルギーオプションより競争力が備わるよう開発する必要があるとした上で、同社はすでに最良の解決策を見つける作業の初期段階にあり、後の段階で相互理解は一層深まることになること述べた。

また、協力覚書の結果、同社は EU 域内で最初の SMR 建設プロジェクトを主導する企業となり、その建設ノウハウと能力でエストニアを支援する協力モデルが構築されると説明。SMR に適した許認可体制や軽水炉型 SMR の事前立地調査等についても、3 者で集中的に研究していく方針を明らかにした。

## 【英国】

### ロールス・ロイス社、2029 年までに SMR 初号機を完成

英国で小型モジュール炉(SMR)の開発企業連合を率いるロールス・ロイス社の P. ステイン最高技術責任者は 1 月 24 日、同国の公共放送局 BBC のインタビューに答え、2029 年までに同社製 SMR 初号機の完成と運転開始を目指していることを明らかにした。

同社の企業連合には、国内の大手エンジニアリング企業や建設企業であるアシシステム社やアトキンス社、レイン・オルーク社などが参加。発表によると、英国原子力産業界は SMR のような小型原子炉であれば、工場で大規模生産して設置場所までトラック輸送ができ、洋上風力発電のような再生可能エネルギーと競合できるレベルまで低コスト化が可能と認識している。

ステイン氏は、ヒンクリーポイント C 原子力発電所の大きさの 16 分の 1 程度という SMR を約 10 エーカー(約 4 万平方メートル)の敷地で建設できるとしており、カンブリア地方やウェールズ地方など、閉鎖済みの原子力発電所も含めた 3 地点で 10~15 基の SMR 建設を計画中だと述べている。

英国ではエネルギー気候変動省(DECC)(当時)が 2016 年 3 月、英国にとって最適な SMR 設計を特定するためのコンペを開始し、SMR 技術の開発業者や電気事業者、潜在的投資家等から関心表明(EOI)を募った。2017 年 12 月に同コンペの終了後、DECC を改組して発

足したビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)は、先進的モジュール炉(AMR)の実行可能性・開発(F&D)プロジェクトで改めてコンペを実施。2018 年 6 月に民生用原子力部門との戦略的パートナーシップとなる「部門別協定」を発表した際、BEIS は AMR の研究開発資金として 5,600 万ポンド(約 79 億 8,000 万円)を充てるとしたほか、同年 9 月にはこの中から 400 万ポンド(約 5 億 7,000 万円)をコンペの第 1 フェーズで選定した企業 8 社の実行可能性調査用に提供するとしていた。

この 8 社の中にロールス・ロイス社は含まれなかったが、同社はこれとは別枠で 2019 年 11 月、BEIS 傘下の戦略的政策研究機関「UK リサーチ・アンド・イノベーション(UKRI)」から、英国政府の「産業戦略チャレンジ基金」の中から初回の共同投資金として 1,800 万ポンド(約 25 億 6,000 万円)を受けることが決定。同社はまた、ヨルダンで同社製 SMR を建設するための技術的実行可能性調査実施に向け、2017 年 11 月にヨルダン原子力委員会と了解覚書を締結した。2018 年 2 月には、風力や太陽光よりも競争力のある英国型 SMR の実証モジュールを開発するため、ロールス・ロイス社が産業界側の窓口を勤める英国政府の「先進的原子力機器製造研究センター(N-AMRC)」と契約を結んでいる。

今回の発表でロールス・ロイス社は、「過去数年間に複数の大型炉建設プロジェクトが資金調達問題により凍結されたが、再生可能エネルギーのコストが急落するなか、SMR でコスト削減の可能性があることは、資金面で苦戦を強いられてきた原子力産業界にとって珍しく明るいニュースだ」と指摘。コスト削減の秘訣は、先進的デジタル溶接法やロボット組立等で予め製造したパーツを建設サイトで組み立てることであり、このように原子炉建設費を大幅に削減することで、電気料金を一層安く抑えることができると強調した。

同社はまた、SMR の輸出で大量生産によるスケールメリットを実現し、コスト面の障害を克服したいと表明。これに関しては地元メディアの情報として、2,500 億ポンド(約 35 兆 6,000 億円)規模の輸出市場で出力 44 万 kW の同社製 SMR の建設コストを約 17 億 5,000 万ポンド(約 2,500 億円)と試算した上で、これは 1 MWh あたり 60 ポンド(約 8,500 円)を下回ることで、すでに複数の外国政府から書面で関心表明があり、交渉中であると同社が述べたことが伝えられている。

## 【米国】

### GNF 社、事故耐性燃料入り試験集合体を装荷

米 GE 社と日立製作所の合弁事業体であるグローバ



ル・ニュークリア・フュエル(GNF)社は1月14日、ノースカロライナ州のウィルミントン施設で製造したBWR用事故耐性燃料(ATF)の先行試験集合体(LTA)を、イリノイ州にあるエクセロン社のクリントン原子力発電所(107.7万kWのBWR)に装荷したと発表した。

この燃料集合体には、クロムとアルミニウム鉄合金の燃料被覆材「IronClad」、および標準型ジルコニウム被覆管に「ARMORコーティング」を施すという2つの技術による先行試験燃料棒(LTR)が含まれているが、3種類の「IronClad」被覆管に酸化ウラン燃料を充填して装荷したのは今回が初めてとなる。

同社は2018年にも、これらのソリューションに基づくLTR入り集合体をジョージア・パワー社のE.I.ハッチ原子力発電所1号機(91.1万kWのBWR)に装荷したが、「IronClad」のLTRには酸化ウラン燃料を充填していなかった。

このようなATF開発は、米エネルギー省(DOE)が福島第一原子力発電所事故の教訓から、2012会計年度予算で開始した「ATF開発プログラム」の下で行われている。

GNF社のほかに、フラマトム社やウェスチングハウス(WH)社、ライトブリッジ社などが産業界から参加協力。2022年頃まで3段階でATFの開発・実証戦略を進めることになっている。

GNF社の「IronClad」技術はこれまでのATF技術との比較で、様々な条件下における一層優れた材料挙動と確実な耐酸化性の確保を目的としている。高温状態のなかで燃料や部材の酸化速度を抑えることができれば、安全性の限界マージンをさらに改善できると同社は指摘。クリントン発電所に装荷された「IronClad」燃料棒のうち、1種類についてはGE社の研究開発部門が開発に協力しており、燃料棒の製造に繋がるエンジニアリング支援や成形加工機器を提供中である。

GNF社はまた、「ARMORコーティング」によって燃料棒をデブリによる表面損傷からさらに防護することを目指しており、この技術で一層優れた材料挙動と確実な耐酸化性の確保することが可能であり、摩耗耐性や安全性マージンの改善に導く魅力的な技術になると強調している。

## 部会等の活動報告

今月号から部会等の主な活動報告を紹介します。詳細は各部会等のHPをご覧ください。なお本記事は年間に数回、掲載いたします。

**炉物理部会**：「炉物理教科書・初級編，同・中級編」をアップロード(2020.1, 2020.2)，炉物理部会報をアップロード(2020.3)

**バックエンド部会**：「NUMO 包括的技術報告書レビュー特別専門委員会レビュー報告書」を公表(2019.12)，「バックエンド研究 vol.26 No.2」を発行(2019.12)

**社会・環境部会**：「原子力発電事業者の役員等による社外からの不適切な金品の受領について」の声明を発表(2019.12)

**核データ部会**：「核データニュース No.124」を発刊(2019.11)

**材料部会**：“Nuclear Materials Letters”を発刊(2019.12)

**水化学部会**：「水化学ロードマップ 2020」を3月に発行予定

**再処理・リサイクル部会**：「部会セミナー—住民，地元との対話活動」を開催(2019.12)

**原子力安全部会**：「ソースターム評価に関わる諸課題と今後の取り組み」フォローアップセミナー資料を掲載(2020.1)

**新型炉部会**：「高速炉システム設計に関する講習会」を開催(2020.2)

**リスク部会**：「ワークショップ-リスク情報の活用と工学の融合」(2020.1)，「安全目標に関するシンポジウム Part2」(2019.11)を開催，「ニュースレター第2号」(ASRAM2019特集)を発行(2019.11)

**海外情報連絡会**：「会報第44号」を発行(2019.10)

**若手連絡会**：「学生と若手社会人の対話 2020 in 関西」(2020.2)，「若手討論会」(2020.1)，「学生と若手社会人の対話 2020 in 関東」(2020.1)を開催

**シニアネットワーク連絡会**：「2019年度SNWシンポジウム実施報告書」を掲載(2019.12)

**倫理委員会**：「倫理委員会へお寄せいただいた声(企画セッション，研究会等)に対する回答」を掲載(2019.12)

**東北支部**：「第43回研究交流会」を開催(2019.12)

**北関東支部**：「放射線オープンスクール」を開催(2020.2)

**中部支部**：「第67回原子力エネルギーシステム研究委員会」(2020.2)，「第27回原子力エネルギーシステム研究委員会公開シンポジウム」(2019.12)，「第51回中部支部研究発表会」(2019.12)を開催

**中国・四国支部**：「支部設立20周年記念講演会」を開催(2020.2)

**九州支部**：「第177回講演会」を開催(2019.12)

# 原子力機構における深地層の研究施設計画の成果の概要

日本原子力研究開発機構 仙波 毅

日本原子力研究開発機構は、地層処分を実施するために必要な技術や方法の信頼性を実際の地質環境において確認するため、地元自治体と協定などを締結し、北海道・幌延町と岐阜県・瑞浪市に設置した2つの深地層の研究施設計画を進めている。深地層の研究施設において地層処分事業の段階的な進展に先行して段階的に研究開発を進め、研究成果を発信している。本報告ではこれまでに得られた成果の概要を紹介する。今後とも地元自治体と締結した協定などを遵守し、地層処分の技術基盤の整備を目指して、研究開発に取り組んでいく。

なお、本稿は、日本原子力学会 2019 年秋の大会バックエンド部会企画セッションにおける講演内容に加筆したものである。

**KEYWORDS:** *underground research laboratory (URL) project, sedimentary rock, crystalline rock, Horonobe URL, Mizunami URL*

## I. はじめに

日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」)は、わが国の地層処分事業と国による安全規制上の施策などのための技術基盤を整備し提供するため、地元自治体と協定などを締結し、北海道・幌延町の「幌延深地層研究計画」(以下、「幌延計画」)と岐阜県・瑞浪市の「超深地層研究所計画」(以下、「瑞浪計画」)の2つの深地層の研究施設計画(以下、「URL計画」)を進めている。

本報告では、これまでに URL 計画で得られた研究成果の概要を示す。

## II. URL 計画の概要と進め方

### 1. URL 計画の概要

原子力機構では、わが国の地層処分事業とその安全規制の両面を支えるため、地層処分を実施するために必要な技術や方法の信頼性を支えるため、「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」および「地層処分システムの長期挙動の理解」を研究開発目標とした基盤的な研究開発を推進している。これらの研究開発目標を達成するための研究課題として、①「深地層の科学的研究」および②「地層処分研究開発(「工学技術の信頼性向上」, 「安全評価手法の高度化」)を設定している。幌延計画においては①と②の両方の研究課題、瑞浪計画においては①の研究課題に取り組んでいる。

原子力機構の2つの深地層の研究施設は、IAEA の分

*Overview of the Results of JAEA's Underground Research Laboratory Projects* : Takeshi Semba.

(2019 年 11 月 12 日 受理)

類による「Generic URL」(最終処分場としない場所で技術を磨く研究施設)である。幌延計画、瑞浪計画とも開始するにあたり地元自治体との間で、研究所に放射性廃棄物を持ち込まないことや使用することをしないこと、処分場にはしないことなどを記した協定を締結し、それを遵守して研究開発を進めている。

幌延計画と瑞浪計画の2つの URL 計画の違いとして、対象としている岩種の違いがあげられる。前者が堆積岩(泥岩)を対象とし、後者は結晶質岩(花崗岩)を対象としている。堆積岩は結晶質岩より軟らかく、地下水は割れ目とともに粒子の間隙も流れ、結晶質岩は緻密で硬く、地下水は主に割れ目を流れる。両者の違いを踏まえて研究開発を進め、わが国における幅広い地質環境を対象とした地層処分の技術基盤の整備を目指して、研究開発に取り組んでいる。

幌延計画は深度 350 m 以深まで到達する3本の立坑(2坑が 380 m, 残り1坑が 365 m)および深度 140 m, 250 m, 350 m に調査坑道を、瑞浪計画では深度 500 m までの2本の立坑および深度 500 m と 300 m に主要な水平坑道を整備している(図1)。

URL 計画は、上記①、②に関する地層処分技術を実際の地質環境に適用して確認する役割、わが国固有の地質環境を理解する役割とともに、深地層を体験・理解する場としての役割がある。

### 2. URL 計画の進め方

URL 計画では、地層処分事業の段階的な進展に先行して、第1段階:地上からの調査研究段階(ボーリング調査や地表物理探査などの地上からの調査により、地下深部の地質環境モデルの構築と、地下の地質環境の予測、



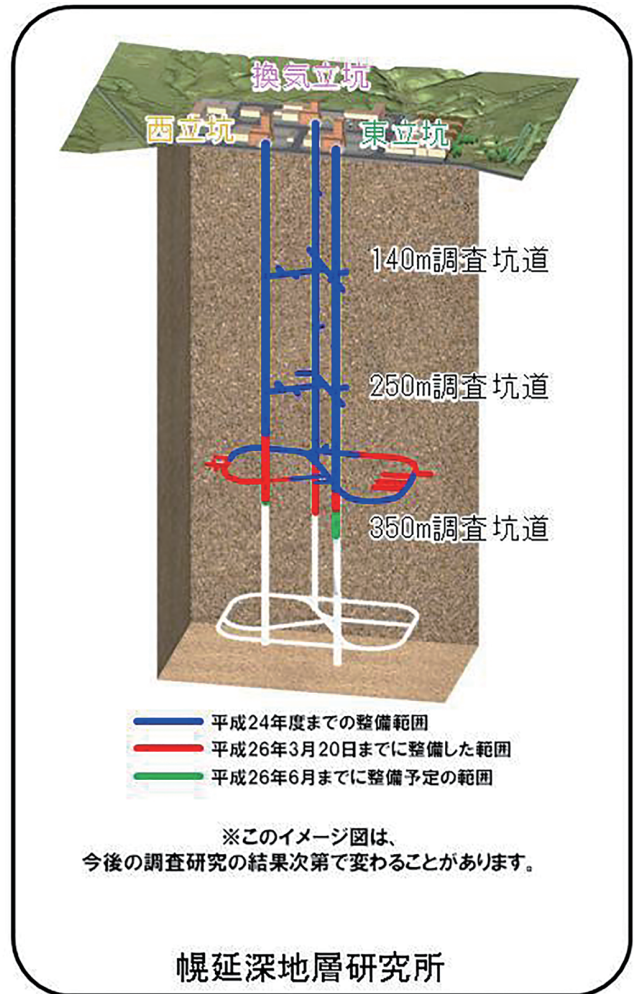
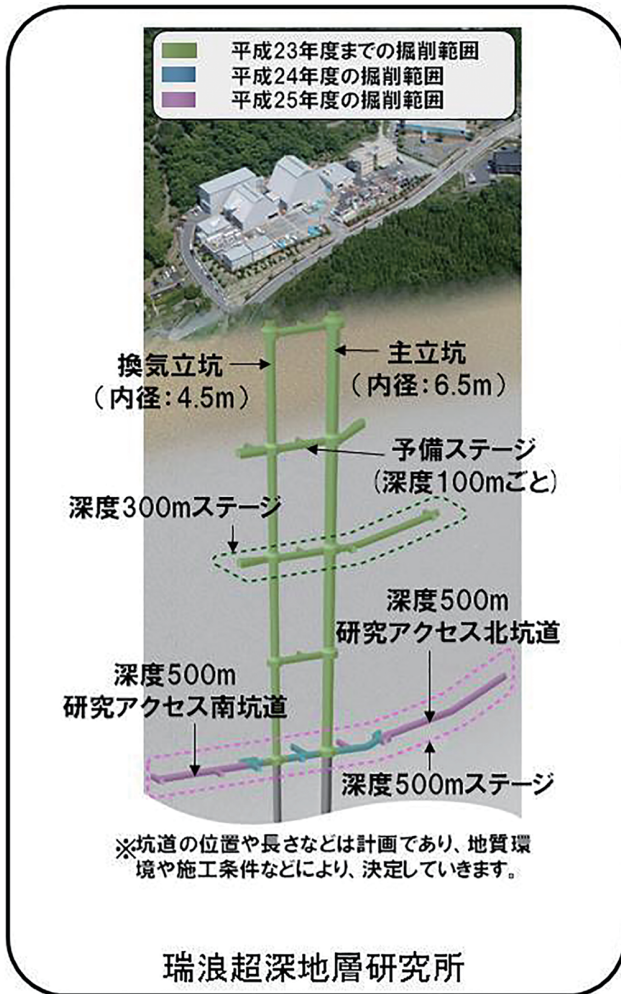


図1 坑道展開図

(出典)原子力機構, JAEA-Research 2015-007<sup>1)</sup>, p.1, 図1. 1-1より転載

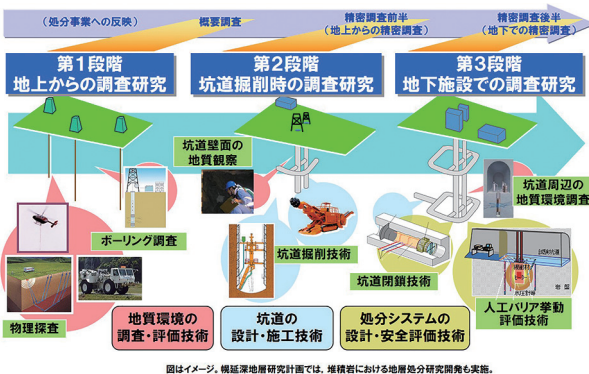


図2 深地層の研究施設設計書の進め方

(出典)原子力機構 HP,

[https://www.jaea.go.jp/04/tisou/houkokukai/pdf/nendo\\_h27\\_1\\_3.pdf](https://www.jaea.go.jp/04/tisou/houkokukai/pdf/nendo_h27_1_3.pdf), p.4より転載

地下施設を安全に建設・維持するための設計・施工計画の策定など), 第2段階: 坑道掘削時の調査研究段階(坑道を掘削しながら坑道掘削による周辺岩盤への影響の把握, 第1段階の予測の検証と, 掘削技術などの工学技術の有効性の確認など), 第3段階: 地下施設での調査研究段階(研究坑道を利用した地表からの調査では取得が困

難な地質環境特性を把握するための調査技術, 研究坑道内の研究環境を適切に維持管理し安全を確保するための技術の整備, 加えて幌延では堆積岩環境における処分場の設計・施工や操業・閉鎖に関わる処分技術, 安全評価手法などに関わる技術の開発など)と段階的に研究開発を進めている(図2)。

幌延計画では, 第1段階を平成13年に開始し, 現在第3段階の研究開発を実施している。瑞浪計画では, 第1段階を平成8年に開始し, 現在第3段階の研究開発を実施している。

現在実施している第3段階の研究開発は, 平成26年度に抽出した「必須の課題」<sup>2)</sup>を対象としている。

### III. URL 計画の成果の概要

#### 1. 第1段階と第2段階の成果の概要

第1段階においては, 調査からモデル化・解析, 評価を通して, 地層処分にとって重要な地質環境特性を把握し, 得られた技術的知見を踏まえて, 調査・評価のための方法論を示すとともに, 重要な調査技術や解析技術を



整備した。また、地下施設を安全に建設・維持するための設計・施工計画を策定した<sup>3-5)</sup>。

第2段階においては、研究坑道を掘削しながら、坑道壁面での調査や坑道から掘削したボーリング孔でのモニタリング調査などを行い、新規に取得した情報に基づいて繰り返しモデルの更新を行った。得られた結果と第1段階での予測結果を比較することにより、地上からの調査段階における調査項目・組み合わせや調査の限界などを例示的に明らかにした。加えて、坑道掘削に伴う水圧・水質などの変化の調査・評価手法を開発した。また、坑道掘削中に遭遇する事象(湧水、メタンガス発生など)に対応する既存技術の有効性評価とともに技術の高度化を実施し、地下での調査・試験に必要な坑道を安全・確実に掘削した事例を提示した<sup>1, 6, 7)</sup>。さらに、幌延計画においては、原位置において、人工バリアなどの工学技術の検証の一環として、低アルカリコンクリート施工確認試験や低アルカリ性セメントのグラウト試験などを実施し、前者については通常のコンクリート材料と同様に施工できることを、後者については十分な湧水抑制効果が得られることを明らかにした<sup>6)</sup>。

## 2. 第3段階の成果の概要

### (1) 幌延計画

Ⅱ.2. で述べた「必須の課題」として、以下の3つの課題を設定した。研究開発は、国内外の大学や研究開発機関などの協力を得ながら進めている。また、令和元年度末を目標として、平成27年度から令和元年度間の必須の課題の研究開発成果の取りまとめを行っているところである。

- ①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認
- ②処分概念オプションの実証
- ③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

①は、実際の地質環境において、人工バリアや周辺岩盤中での熱-水-応力-化学連成挙動や物質移行現象などを計測・評価するための技術を確認することを目的として<sup>2)</sup>、i)人工バリア性能確認試験、ii)オーバーパック腐食試験、iii)物質移行試験を行っている。

人工バリア性能確認試験については、幌延の地質環境を事例の一つとして、処分孔縦置き方式を対象として実規模の人工バリアを設置し、実環境下において人工バリア定置後の再冠水までの過渡期の現象を評価する事を目的としている。これまでに、人工バリアや埋め戻し材に関連し、掘削ズリ混合埋め戻し材(ベントナイト:40%, 掘削ズリ:60%)を製作し、転圧締固めおよび埋め戻し材ブロックによる原位置施工を実証した。埋め戻し材については管理基準を設けて品質管理し、設計仕様を満たす施工が行えることを明らかにするなど品質管理手法の実例を示すことができた<sup>8)</sup>。また、模擬オーバーバックを約100℃に設定した状態で、熱-水-応力-化学連成挙

動に関わる検証データを取得するとともに、連成挙動の評価手法の整備を進めている。この一環として、緩衝材の膨潤変形による密度変化に伴う熱特性、水理特性および力学特性の密度依存性を考慮できるようなモデルを改良した<sup>9)</sup>。

オーバーバック腐食試験については、幌延を事例として、塩水系地下水環境におけるオーバーバックの耐食性や腐食モニタリング手法の適用性を確認することを目的とした、工学的スケールでの原位置試験を実施した。約3.5年間にわたり炭素鋼腐食センサーなどによりモニタリングを行った後、試験体を取り出し、オーバーバックを分析したところ、オーバーバックの溶接部と母材で腐食挙動に有意な差は認められないことや、腐食深さの平均は3.5年間で約5μmで、炭素鋼腐食センサーによるモニタリングにより得られた腐食速度(約1~5μm)と概ね整合する結果であることが把握でき、既往のオーバーバックの腐食評価手法の保守性を確認した<sup>9)</sup>。

物質移行試験については、割れ目を有する堆積岩の物質移行特性評価手法を構築することと、泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法を構築することを目的としている。これまでに、例えば、溶存ガスが存在するなどの泥岩中で想定される地質環境条件における割れ目中の原位置トレーサー試験手法を提示<sup>10)</sup>するなどの成果をあげた。

②では、人工バリアの設置環境の地質環境条件や深度依存性を考慮しつつ、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証することを目的として、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションの整備を進めている。これまでに、実際の地質環境における一連の湧水抑制対策技術を実証するための研究の一環として、突発的な大量湧水を回避するための予測手法を開発した<sup>11)</sup>。また、地下環境での搬送定置・回収技術に関する研究として、原子力環境整備促進・資金管理センターとの共同研究として、処分坑道横置き・PEM (Prefabricated Engineered barrier system Module) 方式での地下環境での人工バリアの搬送定置・回収技術に関する研究を実施し、現場打設のコンクリート坑道面においてもエアベアリング方式で重量物(約36t)の搬送が可能であることを明らかにした。また、PEMと坑道間の隙間に対して下部狭隘部にはベレット方式で、上部空間には吹付け方式により隙間充填試験を実施し、全体として目標としていた密度(1.60 Mg/m<sup>3</sup>)を達成できた<sup>9)</sup>。

③では、堆積岩が有する地震・断層活動などの地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を評価し、堆積岩地域における処分場の立地選定や設計を、より科学的・合理的に行うための技術と知見を整備した。これまでに、再活動した断層の透水性を推定するための指標および透水性と当該指標の関係式を提案<sup>12)</sup>し、その妥当性

を明らかにするための原位置での試験を実施した。試験により新たにせん断変形が起こったり、有効応力が低下したとしても、断層帯亀裂の透水性は関係式から求められる値の範囲を超えないことが明らかにでき、当該経験式により将来的な断層運動に伴う断層の透水性の変化予測に適用できる見通しを得た<sup>9)</sup>。

また、深地層を体験・理解する場としての役割を踏まえ、国民との相互理解の促進に資するための活動を進めている。この一環として、定期的に報告会を開催するほか、施設見学会を開催するなど地下研究坑道を積極的に公開している。平成19年から平成31年3月までのゆめ地創館(幌延深地層研究センターで行っている高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究内容について紹介しているPR施設)への来館者数は約11万人、地下研究施設の入坑者数は約11,000人である。

## (2) 瑞浪計画

II.2. で述べた「必須の課題」として、以下の3つの課題を設定した。瑞浪計画においても幌延計画と同様に、国内外の大学や研究開発機関などの協力を得ながら研究開発を進めている。また、令和元年度末を目途として、平成27年度から令和元年度の間の必須の課題の研究開発成果の取りまとめを行っているところである。

- ① 地下坑道における工学的対策技術の開発
- ② 物質移動モデル化技術の開発
- ③ 坑道埋め戻し技術の開発

①の課題では、坑道への湧水量をプレグラウチングとポストグラウチングの組合せによって制御可能とするウォータータイトグラウト施工技術を実証することなどを目標に研究開発を進めてきた。これまでに、深度500mという高水圧環境下における湧水抑制技術を開発した<sup>13)</sup>。坑道掘削前後のグラウチング(プレグラウチングとポストグラウチング)を併用することにより、グラウチングを実施しない場合の予測値に対して、湧水量を約100分の1まで低減することができた。

②の課題では、花崗岩中の割れ目での物質の移動現象を理解し、モデル化するための調査解析を実施することと、割れ目の透水性および地下水流動・水質の長期的変化や地下水流動の緩慢さを明らかにすることを目標として、研究開発を進めてきた。これまでに、物質移動経路となり得る微小空隙の把握手法を整備するとともに、わが国の花崗岩健岩部においてもマトリクス拡散が生じる可能性を提示した<sup>14)</sup>。また、坑道閉鎖環境において、地下水および懸濁態粒子に含まれる希土類元素の挙動について調べた結果、地下水中に溶けている希土類元素が坑道壁面の吹付コンクリートに沈着したり、微細粒子に付着した希土類元素が粒子同士で凝集して沈殿することによって地下水から取り除かれ、濃度が低下することがわかった<sup>15)</sup>。

③の課題では、坑道の一部を地下水で冠水させることによって、地下水の水圧・水質および坑道周辺岩盤の化学的・力学的変化を観察し、地質環境の回復能力などを評価するとともに、地質環境に応じた埋め戻し技術の構築を目指すことなどを目標に研究開発を進めてきた。これまでに、深度500mの坑道に止水壁を設け、その奥側の坑道を、地下水による冠水と排水を繰り返し、地下施設の建設・操業により乱れた地質環境の変化を観測したところ、坑道掘削に伴う水理学的な擾乱は、坑道閉鎖に伴い初期状態まで回復する可能性を示すことが明らかになった<sup>16)</sup>。また、坑道の掘削に伴い変化した地下水の水圧や酸化還元状態は、坑道冠水以降、数か月程度で元の状態に回復することが確認されるなど<sup>17)</sup>、坑道の建設・維持管理時の化学環境の擾乱、坑道閉鎖後の還元環境のプロセスを推察することができた。

また、瑞浪計画においても国民との相互理解の促進に資するための活動として、定期的に報告会を開催するほか、同じく施設見学会を開催するなど地下の研究坑道を積極的に公開している。平成14年から平成31年3月までの入坑者数は約21,000人である。

## IV. おわりに

原子力機構は、わが国の地層処分事業とその安全規制の両面を支えるため、地層処分事業の段階的な進展に先行して、2つのURL計画を第1段階～第3段階と段階的に進めている。現在は第3段階の研究開発を進めている。この2つのURL計画で得られた成果はこれまで論文や技術資料としてとりまとめ発信してきた。今後とも地元と締結した協定などを遵守し、地層処分の技術基盤の整備を目指して、関係機関とのより一層の連携・協力を図りながら研究開発に取り組み、成果を発信していく。

加えて、URL計画には深地層を体験・理解する場としての役割がある。これまでも施設見学会を開催し、地下の研究坑道を積極的に公開するなど、国民との相互理解の促進に資する活動をしてきた。今後とも、施設の公開や各種イベントを通じて、国民との相互理解のさらなる醸成に向け努めていく。

### － 参考文献 －

- 1) 濱ほか, JAEA-Research 2015-007(2015).
- 2) 日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書—今後の研究課題について—, 平成26年9月30日,  
[https://www.jaea.go.jp/04/tisou/kenkyu\\_kaihatu/pdf/kenkyu\\_kadai.pdf](https://www.jaea.go.jp/04/tisou/kenkyu_kaihatu/pdf/kenkyu_kadai.pdf)
- 3) 太田ほか, JAEA-Research 2007-044(2007).
- 4) 三枝ほか, JAEA-Research 2007-043(2007).
- 5) 藤田ほか, JAEA-Research 2007-045(2007).

- 6) 佐藤ほか, JAEA-Research 2016-025 (2017).  
 7) 野原ほか, JAEA-Research 2015-026 (2016).  
 8) 日本原子力研究開発機構, 幌延深地層研究計画 平成 26 年度調査研究成果報告 (2015).  
<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/disclosure/pdf/26seika.pdf>  
 9) 日本原子力研究開発機構, 幌延深地層研究計画 平成 30 年度調査研究成果報告 (2019).  
<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/assets/pdf/30seika.pdf>  
 10) 武田ほか, ガスが溶存した地下水を含む泥岩中の割れ目を対象とした原位置トレーサー試験条件の設定に関する検討, 原子力バックエンド研究, 25 巻, 1 号 (2018).  
 11) Ishii, E. and Furusawa, A., Detection and correlation of tephra-derived smectite-rich shear zones by analyzing glass melt inclusions in mineral grains, Engineering Geology, 228, pp.158-166 (2017).  
 12) Ishii, E., Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: preliminary results, Journal of Geophysical Research, 120, pp.2220-2241 (2015).  
 13) 亀裂から出る高水圧の湧水を抑制する技術を開発, <https://www.jaea.go.jp/04/tono/press/161209/index.html>, 平成 28 年 12 月 9 日.  
 14) 石橋ほか, 深部結晶質岩マトリクス部における微小移行経路と元素拡散現象の特徴, 日本原子力学会バックエンド部会, 23, pp.121-130 (2016).  
 15) Iwatsuki, T. et al., Characterization of rare earth elements (REEs) associated with suspended particles in deep granitic groundwater and their post-closure behavior from a simulated underground facility, Applied Geochemistry, 82, pp.134-145 (2017).  
 16) 西尾ほか(編), JAEA-Review 2017-042 (2018).  
 17) 石橋ほか, JAEA-Review 2017-026 (2018).

### 著者紹介



仙波 毅 (せんば・たけし)

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門  
 (専門分野/関心分野) 放射性廃棄物処分と環境



## 書籍販売のご案内

### ■『放射線遮蔽ハンドブック - 応用編 -』

一般社団法人日本原子力学会 「遮蔽計算の応用技術」研究専門委員会編

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

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

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

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





# 原環センターにおける深地層の研究施設を活用した研究開発について

原子力環境整備促進・資金管理センター 小林 正人

高レベル放射性廃棄物の地層処分の工学技術の開発・整備において、原環センターでは深地層の研究施設を活用した試験を実施している。地下研究施設はオーバーパックや緩衝材といった人工バリア材料の原位置における状態変遷を確認するだけでなく、操業に係る技術の実証試験の場としても有効である。その利点を最大限に発揮できるように、「地上/地下の特徴を生かした試験の組み合わせ」、「段階的な技術開発の一条件」、「技術整備状況の説明性の向上」などに留意して、試験計画の策定や試験を実施することが望ましいと考える。

**KEYWORDS:** *Underground research laboratory, Development of engineering, Corrosion of Carbon steel overpack, Large scale experiment, Actual underground environment*

## I. まえがき

地層処分研究開発第2次取りまとめ<sup>1)</sup>(以下「第2次取りまとめ」という)に示された高レベル放射性廃棄物の人工バリア構成および位置概念に対して、原環センターでは製作・施工、品質評価といった工学的観点から技術の整備を進めてきた。2013年度から日本原子力研究開発機構と共同研究契約を締結し、幌延深地層研究センター(以下「幌延 URL」という)の地下研究施設を活用した原位置試験を行っている。図1に幌延 URL 地下 350 m 調査坑道における試験の実施位置と項目を示す。

地下研究施設での試験をより効果的に実施するため、試験計画における地下研究施設の位置付けや内容の検討が重要となる。本報告では原環センターが幌延 URL を活用して実施した工学技術の試験について紹介する。

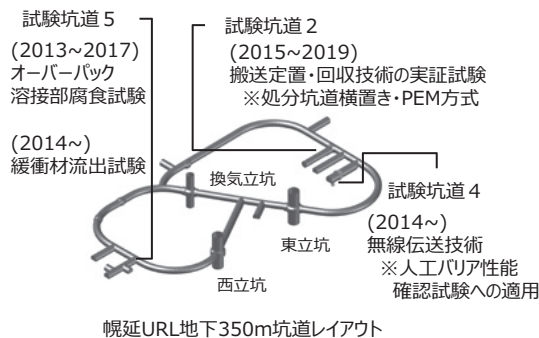


図1 幌延 URL における原環センターの取組み

## II. 地下研究施設における工学技術の試験

高レベル放射性廃棄物の地層処分のバリアシステムは、ガラス固化体/オーバーパック/緩衝材から成る人工バリアと、岩盤(天然バリア)で構成されている。工学技術の地下研究施設での試験をより効果的に実施するため、試験の位置付けを整理し、試験計画に反映した。

人工バリアに係るものとしては、例えば地上に設けられた施設でのオーバーパックの溶接封入、地下の岩盤内に建設された坑道内での人工バリアの搬送・定置のように地質環境に直接依存しない部分と、定置後のオーバーパックの腐食や緩衝材の浸潤・流出挙動のように定置された環境に依存するものが挙げられる。前者はある目的を達成するための技術と作業空間(場所)、後者は人工バリアの材料と定置環境との関係として整理することができる。これらは空間や環境という境界を設定し技術と場所を切り分けることで、試験の目的に合致した環境を人工的にでも構築すれば試験自体は地上施設でも可能となる。これは岩盤自体が試験の対象となる天然バリアに係る試験(例えば、岩盤物性値の取得、岩盤内での物質移行の挙動評価など)と大きく異なる点である。

さらに幌延 URL はジェネリックな地下研究施設であることから、この URL で整備した技術の実事業への適用や、炭素鋼製オーバーパックの腐食や緩衝材の流出などに影響する環境は実際に地層処分場となるサイトと異なる。

このような背景を踏まえ、地下研究施設を活用した工学技術の試験を実施した。

### Ⅲ. 地下研究施設における工学技術の試験

図1に示した幌延 URL における原環センターの取り組みは、地下環境での人工バリアの変遷挙動の把握(オーバーパックの腐食、緩衝材の流出)と、工学技術の実証(無線伝送技術、人工バリアの操業技術)の2つに大別される。以下では「オーバーパック溶接部の腐食試験」を例に、地上施設と地下研究施設の試験の繋がりを紹介する。

第2次取りまとめで示された炭素鋼オーバーパックは耐圧性、放射線遮へい性、腐食代を考慮して190mmの板厚を有する円筒型形状である。原環センターではオーバーパック製作技術や長期閉じ込め性の評価に資する腐食データの拡充を主とした研究開発を行ってきた<sup>2)</sup>。

閉じ込め性を確保したオーバーパックの封入手法として溶接技術を選定し、蓋構造を模擬した厚板狭開先の溶接試験を通して技術的な実現性を示した。溶接部はその作業による入熱や溶接ワイヤーの使用により金属組織や化学成分が母材と異なることから、容器の寿命評価に必要な腐食速度などの挙動が母材と異なる可能性がある。そこで溶接部に対してもオーバーパックの腐食代の設定根拠となった炭素鋼母材の腐食試験と同様の室内試験を実施し、腐食挙動が母材と同等であることを確認した。

室内試験の特徴として、以下の点が挙げられる。

- ・ジェネリックな環境を想定した2種類の模擬地下水海水系(SSW: ASTM D1141 相当)  
降雨系(SFW: 2.5mM-NaCl+2.5mM-NaHCO<sub>3</sub>)
- ・試験環境  
環境を簡易的に再現した水溶液環境  
チタン製カラムを使用した緩衝材共存環境  
大気開放/低酸素雰囲気(窒素脱気)
- ・試験片  
大きさ: 数~十数cm, 形状: 平板



図2 室内試験の試験片(チタンカラム試験)  
写真は還元性雰囲気での水素分析用試験片

室内試験は試験環境が既知、試験片が小型であるため数量を増やすことが容易、取出し時期を任意に設定することが可能などの利点があり、腐食現象を詳細に分析・評価することに適している。一方、チタンカラムを使用した緩衝材共存下の試験では、小型故に緩衝材が2週間程度で飽和し、試験片全体が速やかに均一な環境に移行する。オーバーパックの寿命評価の信頼性向上のためには、場の不均一性を含めた腐食挙動を把握する必要がある。このような室内試験での実施が難しい項目を、地下研究施設での腐食試験の目的とした。地下研究施設でのオーバーパック溶接部の腐食試験の狙いを以下に示す。

- ・室内試験の実施項目の妥当性の確認。
- ・人工バリアの定置から緩衝材の飽和までの環境の変遷を再現した試験系。
- ・試験系の大きさが腐食挙動に及ぼす影響の把握。

上記を実現するための試験設備を図3に示す。

試験体となる模擬オーバーパックは直径100mm、有効長1,250mmの円柱形状で、溶接部の腐食挙動を把握するため、長手方向にTIG(Tungsten Inert Gas)溶接線を2本付与した。緩衝材は内径110mm、外径300mm、厚さ100mmのドーナツ形状のブロックを基本として、模擬オーバーパック周囲に積み重ねることで、実際の緩衝材ブロックでも生じる隙間を再現した。またブロック内には種々のセンサーを埋め込んでいる。このような試験装置を地下試験坑道に掘削した裸孔に設置し、母岩から湧出する地下水を試験に利用した。

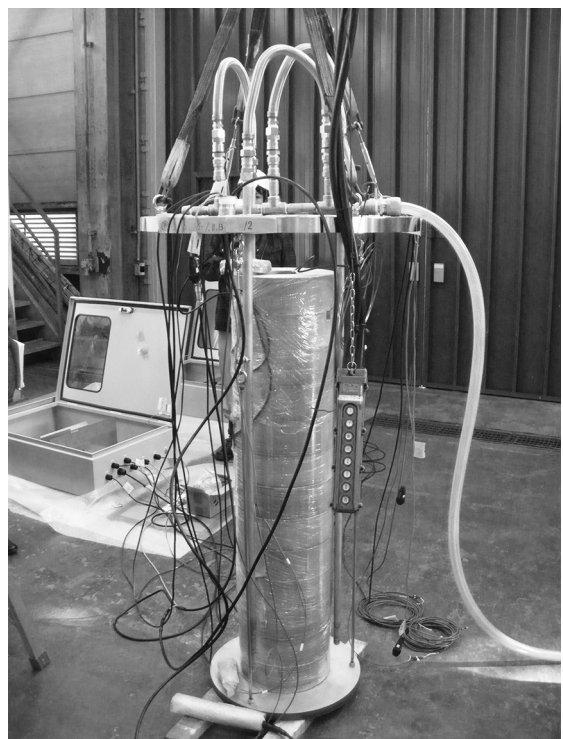


図3 試験設備全景(地上施設での仮組立ての様子)



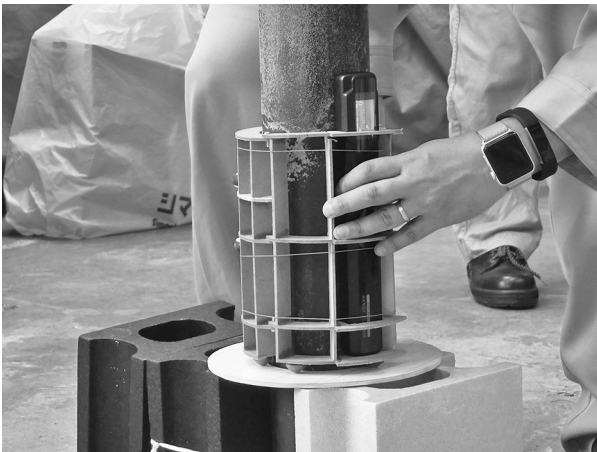


図4 模擬オーバーパックの外観観察の様子

この地下研究施設での腐食試験では、環境と寸法の2つの因子が室内試験に対して変化していることから、解体後の分析の際にどちらの因子が有意であるか判断することが難しくなる。そこで環境が制御できる地上施設にて、図3と同じ構成の試験設備を構築し、幌延 URL の地下水組成を模擬した脱気環境下での腐食試験を並行して実施することで、寸法の影響を確認できるようにした。

一定の期間経過後の試験片に対して腐食量や腐食の不均一性を取得するため、重量計測や表面形状計測などの分析を行った。室内試験では図2のように小型であるため、電子天秤による精緻な重量減少量の測定や、数百 $\mu\text{m}$ ピッチでのレーザーによる非接触の形状計測が可能である。一方、試験体は重量が100 kg超であり、精緻な計量は困難である。また試験体の表面積が大きいため、試験片と同様に数百 $\mu\text{m}$ で形状計測を行うと計測時間やデータ点数が膨大になり現実的ではない。場の不均一性による炭素鋼オーバーパックの腐食挙動の把握が地下研究施設での試験の主目的であるため、この目的に合わせて数cmピッチの形状計測(接触式)や表面の腐食状況のラインスキャナを改造した表面観察装置(図4)など試験体の大きさに合わせた分析方法を採用した。

試験体が円柱形状の為、写真撮影では正面を除く部位の表面性状が判別し辛くなるが、この工夫により側面の外観を展開写真として得ることが可能になった(図5)。

地下研究施設を活用した試験の詳細については当該年度の報告書<sup>3)</sup>に譲るが、大型試験体の表面に顕著な腐食の局在化が見られない、母材と溶接部で腐食挙動に有意な差が生じていないなど、試験点数1の結果ではあるものの、実際の定置後の状態変遷に近い環境下での腐食挙動が室内試験で取得した結果と大きな違いが無いことが確認できた。これにより定置から緩衝材の飽和までの変遷期間における炭素鋼および炭素鋼溶接部の腐食挙動が明らかになり、この変遷期間を酸化性雰囲気と還元性雰囲気の2つの条件とした室内試験はオーバーパックの寿命を評価するための試験として妥当であると言える。



図5 円柱形状の試験体表面 展開写真の一例  
縦線は180℃対向で付与したTIG溶接線

#### IV. 深地層の研究施設で得られる効果

原環センターが地下研究施設を活用して実施した工学技術の試験では、地下環境を試験の一条件として利用しており、地質構造や地下水の流れなど地下の環境自体を対象としていない。地下研究施設での試験の位置付けを以下の様に整理した。

##### 1. 地上/地下の特徴を生かした試験の組み合わせ

前述のオーバーパック溶接部の腐食試験は室内(地上施設)と地下研究施設の2カ所で実施した。室内試験は、試験条件を目的に合わせて設定したり、現象に対する要因を個々に評価するために単純化することができるため、現象の因果について精緻に把握することに向いている。一方で、実際の地下での環境条件やその変遷を再現することが困難である。これに対し、地下研究施設での試験は、その場で実際に生じる現象を把握可能だが、要因は複合的であり分離が難しく、また環境条件の把握は設置した計測器に依存する。室内と地下の特徴を踏まえたそれぞれの試験の役割りを設定し、試験計画に反映することが重要である。

##### 2. 段階的な技術開発の一条件としての活用

本報告では詳細を割愛したが、幌延 URL 試験坑道2において処分坑道横置き・PEM (Prefabricated EBS Module) 方式の搬送定置・回収技術の実証試験を実施中である<sup>4)</sup>。この試験の主目的は“地下環境でPEMを回収する技術がある”ことを示すことであるが、技術開発の程度を客観的に示すため技術の適用性評価に資するデータも併せて取得することにも主眼を置き、段階的に技術開発を進める方式を採った。まず、試験条件を設定し易い地上施設で要素技術の試験、続いて要素技術を統合した試験と段階を踏んで技術の実現性を確認した。地下環境での実証試験は“予め地上施設で実施した試験を試験坑道内に再現すること”とすることで、地上施設で得られた知見に基づいた試験となるとともに、成果を





図6 試験坑道内での動画撮影の様子  
(流体的方式による隙間充填材除去試験)

フィードバックすることで、今後の技術開発課題が明確になるように工夫している。

### 3. 技術整備状況の説明性の向上

地層処分事業に係わる技術や成果を発信する手段は検討や開発の進捗によって移り変わる。検討初期の概念的な段階では文章や模式図、技術開発が進むとエビデンスとなるデータ、装置の写真試験状況の動画などより現実的なものが拡充されていく。地下研究施設を活用した試験の実施および得られた成果は、地層処分事業の工学技術の整備状況を広く一般に伝える場面において、内容だけではなく地下で実現可能な技術が存在するというファクトを示すことによって、信頼性の高い説明に貢献すると思われる。先に述べた地下環境での搬送定置・回収技術の実証試験においても、この点に留意し様々な場面を動画として記録している(図6)。

### 4. 精密調査段階前の予行的な検討

1～3で述べたように、地下研究施設を活用した試験を地層処分事業に先駆けて実施し得られた成果は、精密調査段階後半に計画される地下調査施設での原位置試験・実証試験で取り扱う課題を明確にし、スムーズな調査施設の整備計画、試験の遂行に貢献すると思われる。

## V. あとがき

地下研究施設を活用した地層処分事業の工学技術の整備は、大きな効果を得ることができる。計画の立案、試

験の遂行においては、地下研究施設の特徴を把握し、目的に応じて地上施設(実験室)と併せて活用することが重要であると考えられる。今後も開かれた地下研究施設として、多くの技術開発の機会の提供、多くの機関・技術者の交流の場となることを期待する。

## VI. 付記

本報告における地下研究施設を活用した試験は、日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターと共同研究契約「人工バリア等の健全性評価および無線計測技術の適用性に関する研究」「搬送定置・回収技術の実証的検討に関する研究」を締結し、地下350m試験坑道で実施したものである。

本報告は経済産業省資源エネルギー庁委託事業「処分システム工学確証技術開発(平成25年度～平成29年度)」、「可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発(平成27年度～平成30年度)」の成果の一部である。

### — 参考文献 —

- 1) 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—, 1999.
- 2) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成24年度高レベル放射性廃棄物調査等事業(処分システム工学要素技術高度化開発)報告書(第2分冊(1/2)), 2013.
- 3) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(処分システム工学確証技術開発)報告書(第1分冊), 2018.
- 4) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成30年度高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する技術開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発)報告書(第2分冊), 2019.

### 著者紹介



小林正人 (こばやし・まさと)

(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター 地層処分工学技術研究開発部  
(専門分野/関心分野)地下環境における金属材料の変遷挙動、回収可能性に係わる工学技術

# 電力中央研究所における深地層の研究施設を活用した研究開発について

電力中央研究所 幡谷 竜太, 田中 靖治, 長谷川 琢磨, 窪田 健二

電力中央研究所は、2002年度より、日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所と幌延深地層研究センターおよびそれらの周辺において、地質環境分野の地層処分研究を進めてきた。その主な成果として、1)地下水年代測定手法の改良などによる高度化、2)割れ目が多い深成岩体(花崗岩類)の原位置でのトレーサー試験とその数値解析手法から成る物質移行特性評価手法の開発、3)地下深部に掘削された坑道周りの掘削影響領域の経時変化の把握などがある。これらの成果は、いずれも、地下深部の地層を直接見ることによって可能となったものである。

**KEYWORDS:** *geological disposal, underground research laboratory, groundwater dating, transport property, excavate damage zone*

## I. はじめに

一般財団法人電力中央研究所(以下、「電中研」)では、2002年度より、日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」)との共同研究として、瑞浪超深地層研究所と幌延深地層研究センターおよびそれらの周辺において、地下水流動、物質移行などの研究を展開してきた。本稿では、これらのうちの主なものについて紹介するとともに、深地層の研究施設を活用した研究開発の意義について触れる。

## II. 地下水年代

### 1. 研究の背景とこれまでの経緯

地下水シナリオにおいて、地下水の流速が重要になるが、流速が遅い場合、直接計測することが難しい。このため、電中研では、天然に存在する放射性同位体や希ガスをを用いた地下水年代(滞留時間)測定による地下水流速の評価法の開発を瑞浪超深地層研究所と幌延深地層研究センター周辺を研究対象として進めている。瑞浪では2万年程度で地下水が循環<sup>1)</sup>、幌延では深部に百万年以上前の地下水が残留しており<sup>2)</sup>、古い地下水年代測定手法の開発・適用の研究対象として適している。

### 2. 主な成果

#### (1) 瑞浪における地下水年代研究

瑞浪超深地層研究所を含む地域は、深部に花崗岩類が広く分布する。広域的には、2万年程度で地下水が循環

していると推定され、研究所は流出域に位置している<sup>1)</sup>。

流出域のボーリング調査における<sup>14</sup>Cを用いた年代測定では、<sup>14</sup>Cの前処理がうまくいかない(沈殿ができない)、<sup>4</sup>Heの原位置生成とフラックスの分離ができないなどの技術的な課題があり、適切に地下水年代が推定できず、バラツキの大きい結果となっていた。しかし、地下坑道からの採水では、品質の良いサンプルを比較的簡単に繰り返し採取することができた。このため、<sup>14</sup>Cの前処理方法を検討し、沈殿法からガス化法に変更し、これにより安定した測定を実現できるようになった<sup>2)</sup>。また、<sup>4</sup>He濃度についても、繰り返し計測を行うことにより、原位置生成とフラックスの分離ができることを示すことができた。さらに、温度による希ガスの溶解度の温度依存性から涵養温度を推定する希ガス温度計という方法についても適用することが可能となった。

この結果、流出域(地下坑道周辺)での地下水年代を2万年程度と推定できるようになった。また、希ガス温度計から、地下坑道周辺の地下水の涵養温度が6°C程度と推定できた。これは、周辺でのモダンアナログ法により推定されている氷期の気温とほぼ一致する。これにより、これまで水素・酸素同位体から定性的に推定していた氷期に涵養した地下水であることを希ガス温度計と地下水年代から確認できた(図1)。

このように、技術的な課題がいくつかあったが、立坑での調査で解決できた。

#### (2) 幌延における地下水研究

幌延深地層研究センター付近には、新第三系堆積岩類が広く分布する。ここでは、瑞浪超深地層研究所に比べて地下水の流れが遅く、立坑周辺では、非常に古い塩分の高い地下水(化石海水)が残留している可能性が示唆さ

*Research and development at underground research laboratories by CRIEPI: Ryuta Hataya, Yasuharu Tanaka, Takuma Hasegawa, Kenji Kubota.*

(2019年11月11日受理)

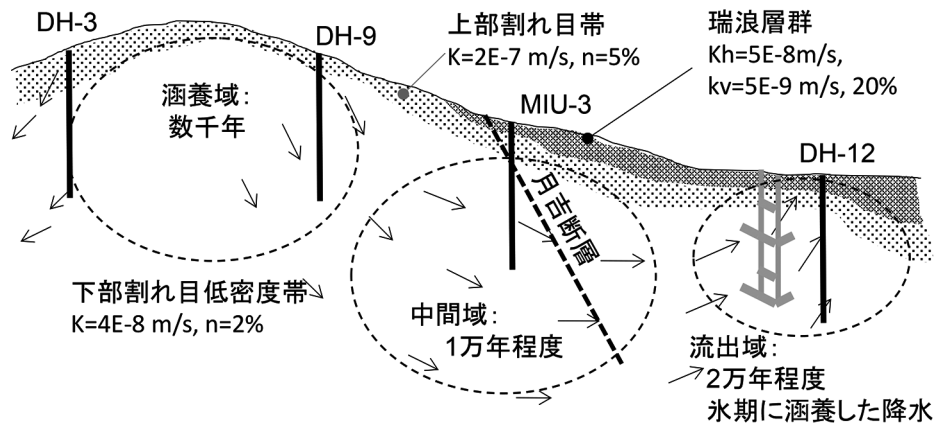


図1 瑞浪地域における地下水流動の概念図(Hasegawa *et al.*<sup>1)</sup>に基づき作成)

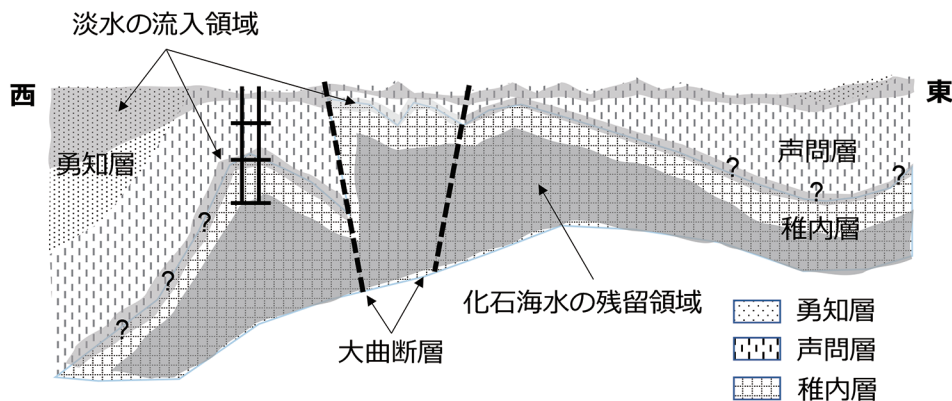


図2 幌延地区における地下水流動の概念図(Nakata *et al.*<sup>3)</sup>に加筆して作成)

れていた<sup>3)</sup>。しかし、流動性が低いため、ボーリング調査では、採水が困難であった。また、コアでの調査は、流れていない部分を調査している可能性(試料の代表性の問題)が懸念されていた。

これに対し、立坑内の調査では、深部の複数個所で地下水を採取することができた。この結果、地下水の<sup>36</sup>Cl/Clが放射平衡に達していることを明らかにした(100万年以上)。また、コア試料の分析で示唆された<sup>4</sup>Heの蓄積が、立坑の深部で採取した地下水でも同程度であること(数百万年程度に相当)を確認できた。これらのことから、コアと地下水の調査結果が同等であることを示すことができ、新第三系堆積岩中に古い地下水が残留していることを確認できた(図2)。さらに、幌延ではメタンガス濃度が高く、コア試料では地下水中のHeガス濃度の測定が難しいが、立坑では、相対的に多くの地下水試料が得られたことから、ガスの採取方法を検討することができた。

一方、立坑中の地層境界などに見られた高透水部では、降水の混合が進んでいる傾向がみられた。これらのことと、Cl濃度や水素・酸素同位体比の空間分布は非常に緩やかに変化することから、地下水の流動は、移流ではなく拡散が支配的な場ではないかと考えられた。

### 3. 今後の展開

瑞浪超深地層研究所では、今年度、更なる精度向上・確証を目指して、新しい地下水年代測定法(放射性希ガスの適用やデータを蓄積している。一方、幌延深地層研究センターでは、降水の輸送形態や地下水年代を調査するために、現在、拡散により分離する物質(ClとδD)やδ<sup>37</sup>Clの分別に基づく評価<sup>4)</sup>や、新しいトレーサーを用いた地下水年代測定を実施している。

## Ⅲ. 物質移行

### 1. 研究の背景とこれまでの経緯

原位置でのトレーサー試験では、地盤・岩盤の物質移行特性を直接的に評価・確認することが可能である。そのため、当所では、①試験孔内で蛍光染料の濃度を直接計測できる、②トレーサーと水の投入をシャープに切り替えることができる、といった特長を有する原位置トレーサー試験装置を開発した。また、試験結果から割れ目と岩石マトリクスを表現した3次元モデルを用いた数値解析により、岩盤の物質移行特性を評価する手法の開発も進めてきた。そして、当所の開発した試験装置と評価手法の有効性を検証するために、瑞浪超深地層研究所において、花崗岩類を研究対象として、原位置トレー



サー試験を中心とした物質移行試験研究を2010年より進めている<sup>5)</sup>。

2. 主な成果

トレーサー試験に先立ち、地下の研究施設の坑内でボーリング孔を複数掘削し、地質・地下水調査により、孔間距離数mに広がる単一の水みち割れ目を確認し、これを試験対象とした。

トレーサー試験では、トレーサーとして非吸着性物質である重水素とウラン、吸着性物質であるRbとBaの混合溶液をボーリング孔から対象割れ目に注入し、他のボーリング孔で揚水を行うことにより回収した。トレーサー試験の結果、吸着性物質が非吸着性物質に比べて遅れて回収され、回収濃度のピークも低くなることが確認された(図3)。また、3次元モデルを用いた数値解析(図4)により、非吸着性トレーサーの回収濃度からは試験対象割れ目の開口幅と分散長を、吸着性トレーサーの濃度からは割れ目周辺のマトリクスに対する分配係数を、それぞれ推定できた。推定された開口幅と分配係数の値は、それぞれボアホールTVカメラによる計測結果や室内吸着バッチ試験結果と同程度であった。また、縦分散長はトレーサー注入孔と回収孔の距離の約8%と推定されたが、多くの移行実験結果を整理し縦分散長は移行距離の1/10倍を中心に1/100~1倍の範囲に分布するとした先行研究<sup>6)</sup>と整合的である。

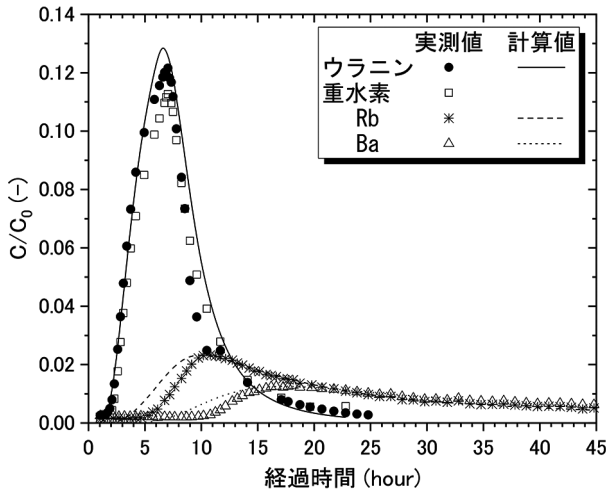


図3 トレーサー試験結果と解析結果の比較 (破過曲線の実測値と計算値)

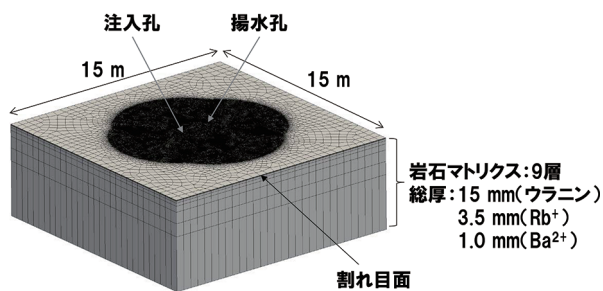


図4 数値解析に使用した3次元モデル

3. 今後の展開

今年度は、多数の水みち割れ目のネットワークを対象とした、より長い孔間距離での原位置トレーサー試験を実施している。これらの成果は、我が国に多く見られる割れ目密度の高い岩盤の水理・物質移行特性を調査・評価する手法の確立に資すると考えられる。

IV. 掘削影響

1. 研究の背景とこれまでの経緯

掘削影響領域では、地圧や岩盤の強度との関係による岩盤の損傷(掘削損傷領域)、間隙水圧の低下や脱ガスの影響などによる水飽和度の低下(不飽和領域)、坑道周辺の地圧分布の変化(応力再配分領域)など、岩盤に様々な変化が生じると考えられており、これらは放射性核種の移行に影響する可能性がある。そこで、電中研はJAEAと共同で、幌延深地層研究センターの深部に分布する新第三系堆積岩中に掘削された地下坑道の掘削影響領域の調査を2008年より実施している<sup>7,8)</sup>。

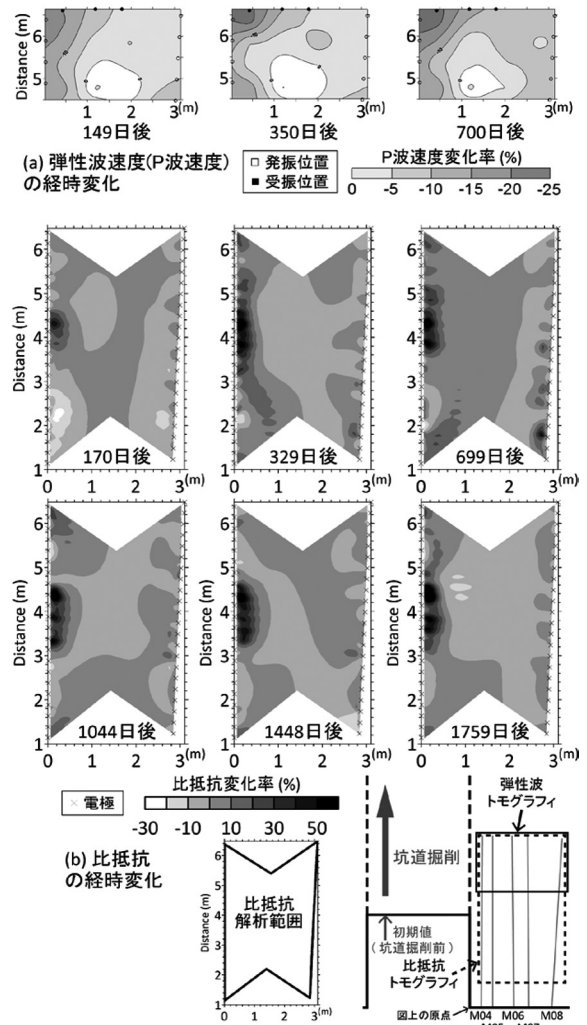


図5 140 m 坑道掘削に伴う弾性波速度(P波速度)と比抵抗の経時変化(窪田ほか<sup>7)</sup>)

## 2. 主な成果

これまでに、坑道掘削に伴う坑壁の周辺における割れ目の形成や弾性波速度、比抵抗の変化等が捉えられた(図5)。また、掘削影響の深度による違いも見られた。掘削損傷領域の範囲(坑壁からの距離)は、GL-140 mで最大約0.45 m、GL-250 mで最大約1 mと推察され、後者がより割れ目が進展していると推察された。一方、不飽和領域の範囲は、140 mでは坑壁から1 m以内、250 m坑道では不飽和領域はほとんど形成されていないと推察された。

## 3. 今後の展開

今後は、岩盤の力学特性や化学特性、透水特性に関する深度による違いを詳細に検討することで、両深度の掘削影響領域において生じた物理変化の要因を明らかにしていきたい。

## V. おわりに

深地層の研究施設では、ボーリング調査では得られない試料やデータを取得することができる。

欧米の楯状地(非常に古い地層)などと比べて割れ目の分布密度が比較的高い岩盤、比較的新しい堆積軟岩、といった我が国に特徴的な地層を地表の影響(風化など)が少ない状態で直接観察できる。

封圧採水や掘削水の除去は、地表からのボーリング調査で実施する場合には多大な労力を要するが、深地層の研究施設では相対的に容易であり、溶存ガスなどの地化学特性の品質の良いデータを提供してくれる。

掘削影響領域に関する調査では、深部の坑道周りの岩盤の経時変化についても10年以上にわたって調べてきたが、地層処分の深度相当の地質環境の経時変化を直接観察・計測して捉えられるという点でも施設の意義は大きい。

これらのメリットは、地質環境特性の調査・評価技術にとって、決定的に重要である。一方で、具体的には坑道間で、あるいは、坑道と地表間でなど、地表とは異なる条件下で、物理探査やトレーサー試験の深化といった調査・評価技術の開発にも期待がかかる。

## 付記

本稿で紹介した地下水年代と物質移行の研究は、経済産業省「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(岩盤中地下水移行評価確証技術開発)」, 同「高レベル放射性廃棄物等の地層処分技術に関する調査等事業(岩盤中地下水流動評価技術高度化開発)」の一環である。また、掘削影響の研究は、日本原子力研究開発機構と共同で実施したものの一部である。

## 引用文献

- Hasegawa T., Nakata, K., Tomioka Y., Goto K., Kashiwaya K., Hama K., Iwatsuki T., Kunimaru T. and Takeda M., Cross-checking groundwater age by  $^4\text{He}$  and  $^{14}\text{C}$  dating in a granite, Tone area, central Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 192, 279-294, 2016.
- Nakata K., Hasegawa T., Iwatsuki T. and Kato T., Comparison of  $^{14}\text{C}$  collected by precipitation and Gas-Strip methods for dating groundwater. *Radiocarbon*, 58, 491-503, 2016.
- Nakata K., Hasegawa T., Oyama, T., Ishii E., Miyakawa K. and Sasamoto H., An Evaluation of long-term stagnancy of porewater in the Neogene Sedimentary rocks in northern Japan. *Geofluids*, vol.2018, Article ID 7823195, 21p, 2018, doi.org/10.1155/2018/7823195.
- Hasegawa T., Nakata, K., A measurement method for isotope fractionation of  $^{35}\text{Cl}$  and  $^{37}\text{Cl}$  by a conventional through-diffusion experiment. *Chemical Geology*, 483, 247-253, 2018.
- 田中靖治, 宇田俊秋, 野原慎太郎, 岩盤割れ目を対象とした原位置トレーサー試験, 日本地下水学会 2018年秋季講演会講演予稿集, 150-153, 2018.
- Gelhar, L.W., Welty, C. and Rehfeldt, K.R., A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resources Research* 28(7): 1955-1974, 1992.
- 窪田健二, 中田英二, 大山隆弘, 杉田裕, 青柳和平, 幌延深地層研究施設における掘削影響領域の評価(その1)—深度140 mを対象とした試験—, 電力中央研究所報告, N17005, 57p, 2017a.
- 窪田健二, 中田英二, 末永弘, 野原慎太郎, 青柳和平, 幌延深地層研究施設における掘削影響領域の評価(その2)—深度250 mを対象とした試験—, 電力中央研究所報告, N17006, 73p, 2017b.

## 著者紹介

幡谷 竜太 (はたや・りゅうた)

一般財団法人 電力中央研究所  
(専門分野/関心分野) 地質/放射性廃棄物処分



田中 靖治 (たなか・やすはる)

一般財団法人 電力中央研究所  
(専門分野/関心分野) 地下水/放射性廃棄物処分



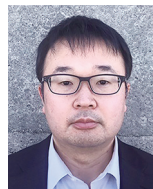
長谷川 琢磨 (はせがわ・たくま)

一般財団法人 電力中央研究所  
(専門分野/関心分野) 地下水/放射性廃棄物処分



窪田 健二 (くぼた・けんじ)

一般財団法人 電力中央研究所  
(専門分野/関心分野) 地盤(物理探査)/放射性廃棄物処分



## 海外施設での共同研究例と今後への期待

原子力発電環境整備機構 澁谷 早苗, 藤崎 淳

地層処分の実施主体である原子力発電環境整備機構は、現状において地下研究所などの研究施設を有していないため、国内外の研究機関との連携を強化することで技術力の向上を図っている。グリムゼル試験場(スイス)における国際共同研究においては、コロイドの生成と移行挙動、セメント中の核種移行挙動、結晶質岩中の核種移行挙動、金属材料腐食挙動、ベントナイトの高温影響に関するプロジェクトに参加し、地下研究施設での実測データ取得と数理モデルの妥当性の確認に取り組んでいる。こうした海外施設での共同研究に携わることで、事業実施に必要なマネジメント能力向上や現場経験を通じた人材育成のみならず、国際貢献にも寄与することが期待される。

**KEYWORDS:** *Radioactive waste, Geological disposal, Collaboration project, Grimsel Test Site, Colloid, Diffusion in granite and cement, Corrosion, T-H-M-C*

### I. はじめに

原子力発電環境整備機構(以下、「NUMO」)は、高レベル放射性廃棄物および TRU 等廃棄物の地層処分の実施主体として、

- ①技術課題に関わる技術力の獲得
- ②研究インフラを利用した包括的な人材育成
- ③プロジェクト管理技術の強化
- ④国際貢献

といった様々な目的から国際共同研究を積極的に進めている。表1に NUMO が参加している国際共同研究およびプロジェクトとその目的を示す。特に地下研究施設を利用したプロジェクトは、地層処分場を設置するような実際の地下深部の条件で現象の理解やモデル・データの開発、工学技術の実証という観点で重要な場と位置づけている。

地層処分場の閉鎖後長期の安全性の評価においては、処分場で生起する現象に関する知識や数理モデルを用いて処分場の状態変遷を考慮したシナリオを記述し、シナリオに対応した核種移行プロセスのモデル数値解析を行う。事業期間を通じて安全性の評価の信頼性を確保し、より高めていくために、現象に関する知識の蓄積や数理モデルの妥当性を絶えず確認していくことが重要である。このことから、室内試験および原位置試験における実測データの取得や、実測データとモデル計算の結果との比較・評価を行うための「場」が必要であり、その一つとして、NUMO はスイス放射性廃棄物管理組合(以下、

*Overview of International Cooperation at Foreign URL and Its Future Development* : Sanae Shibutani, Kiyoshi Fujisaki.

(2019年11月29日 受理)

表1 NUMO が参加する国際共同研究と目的

国際共同研究／プロジェクト		目的*
NWMO：銅コーティングオーバーパック		①
LBNL：断層の水理／力学的挙動		①, ②, ④
Nagra：地下水調査手法整備		①, ③, ④
Nagra：グリムゼル試験場における国際共同研究(Phase VI)	CFM(コロイド生成・核種移行試験)	①, ②
	CIM(長期変質セメント中の移行試験)	①, ②
	LTD(長期拡散試験)	①, ②
	MaCoTe(金属材料腐食試験)	①, ②
	HotBENT(ベントナイトの高温影響試験)	①, ②
SKB：エスポ岩盤研究所における国際共同研究	横置き定置概念 KBS-3H の実規模実証試験(解体)	①, ②, ③
	人工バリアタスクフォース	①, ④
OECD/NEA 国際プロジェクト	EGOS(操業安全性に関する検討)	①, ④
	Clay Club(堆積岩に関する検討)	④
	Crystalline Club(結晶質岩に関する検討)	③, ④
	FEP Database(国際 FEP データベース整備)	④
国際共同プロジェクト(ボーリング孔閉塞技術)		①, ④
国際共同プロジェクト BIOPROTA(生活圏モデル・データに関する検討)		①, ④
国際共同プロジェクト NAWG(ナチュラログに関する検討)		①, ④

\*表中の番号は左段の①②③④と対応

「Nagra」のグリムゼル試験場(以下、「GTS」)における国際共同プロジェクト(以下、「GTS Phase VI」)<sup>1~3)</sup>に2016年度から参加している。GTS Phase VIには、日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」)と共同で参加して



おり、原位置における試験データの取得・評価に協働して取り組むことによって、これまで研究開発機関として GTS Phase VI にも参加していた JAEA に蓄積されている知識や経験を NUMO へ円滑に移転することを併せて志向している。

## II. GTS Phase VI の概要と NUMO が参加しているプロジェクト

GTS はスイスアルプスの結晶質岩中に位置し、1984 年から Nagra が運営している。特筆すべき特徴として、試験場内の放射線管理区域 (IAEA Level B/C) としている坑道で放射性トレーサーを用いた試験の実施が可能であることがあげられる。GTS Phase VI では、現在 12ヶ国から 20 を超える機関が参加し、10 件の国際共同研究プロジェクトが進行中である<sup>2, 3)</sup>。NUMO はこれらの国際共同研究プロジェクトのうち、CFM (Colloid Formation and Migration), CIM (Carbon Iodine Migration), LTD (Long Term Diffusion), MaCoTe (Material Corrosion Test), HotBENT (High Temperature Effects on Bentonite) の 5 件に参加している (2019 年 11 月時点)。以下にこれらのプロジェクトにおける試験の概要を示す。

### 1. CFM (Colloid Formation and Migration)

本プロジェクトでは、人工バリア材料であるベントナイトが地下水との接触によりベントナイトコロイドを生成する挙動、生成されたベントナイトコロイドが母岩の割れ目を移行する挙動、および放射性核種の移行挙動に対するコロイドの影響の理解を目的として、原位置・室内試験の実施と解析モデルの構築、実測データと解析結果との比較によるモデルの検証を図る。

GTS では、坑道から母岩に掘削したボーリング孔に放射性核種の溶液を内包したベントナイトを設置し、坑道に設置した回収孔を通して亀裂中を移行したコロイドと放射性核種の量を計測した (図 1 参照)。本プロジェクトは 2004 年から継続されている。現在はコロイド移行試験を完了し、原位置から回収したベントナイト、母岩、

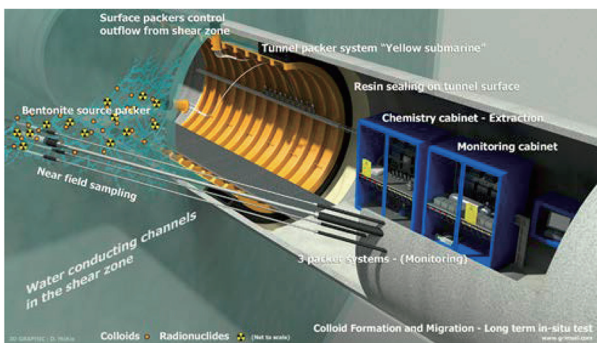


図 1 CFM における原位置試験の概念図  
(出典)参考文献 1), Figure 3 より転載

亀裂におけるコロイドや放射性核種の分布を分析している。

### 2. CIM (Carbon Iodine Migration)

本プロジェクトでは、セメント系材料中の C-14 と I-129 の移行遅延特性の理解を目的として、試験手法の開発と解析手法の高度化を図る。セメント系材料で埋め戻した過去の別プロジェクトで用いられたボーリング孔 (セメント系材料で埋め戻してから 14 年経過) 中に放射性トレーサー (C-14, I-129, H-3, Cl-36, Cs-134, Ba-133) を循環させ、セメント系材料中の移行挙動をモニタリングする試験を行う (図 2 参照)。

本試験は 2018 年までに試験条件を検討し、2019 年は試験装置類を設置している。日本においても、トレーサー循環用に掘削したセメント系材料試料を用いた物性分析、実験室内における拡散試験等を実施することを計画している。

### 3. LTD (Long Term Diffusion)

本プロジェクトでは、母岩中の拡散による核種移行挙動の理解を目的とし、坑道から掘削した 2 本のボーリング孔間で放射性トレーサー (HTO, Na-22, Cl-36, Cs-134, Ba-133) を用いて拡散試験を行う (図 3 参照)。

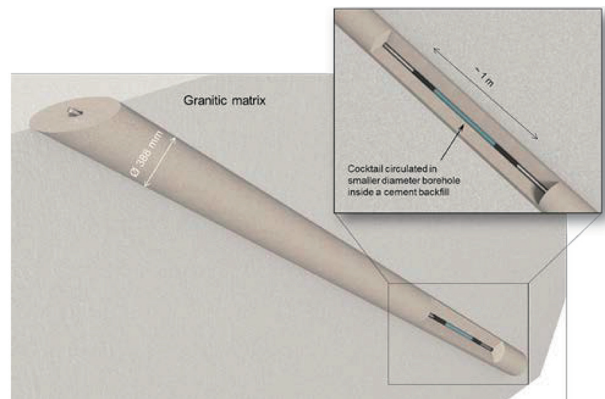


図 2 CIM における原位置試験の概念図  
(出典)参考文献 1), Figure 11 より転載

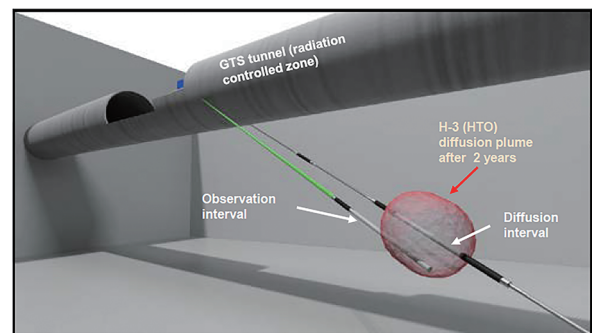


図 3 LTD における原位置試験の概念図  
(出典)参考文献 2), Figure 8 より転載

本プロジェクトは2004年から継続されており、図4のように原位置観測データと拡散モデルによる計算結果の良い一致が見られている<sup>4)</sup>。

#### 4. MaCoTe (Material Corrosion Test)

本プロジェクトでは、嫌気性環境下における圧縮ベントナイト中での、炭素鋼、ステンレス鋼および銅の腐食速度の確認、ベントナイト緩衝材による微生物活動の阻害および微生物による腐食への影響に関する情報の取得を目的として、圧縮ベントナイト中に金属片を埋設したモジュール試料を坑道から掘削したボーリング孔内に設置して腐食試験を行う(図5参照)。

本プロジェクトは2013年から始められており、2018年までに試験期間1年の試料分析を終え、データ解析を進めている。2018年からは、日本のオーバーパック材料候補である炭素鋼試料を試験モジュールに加え、試験が進められている。

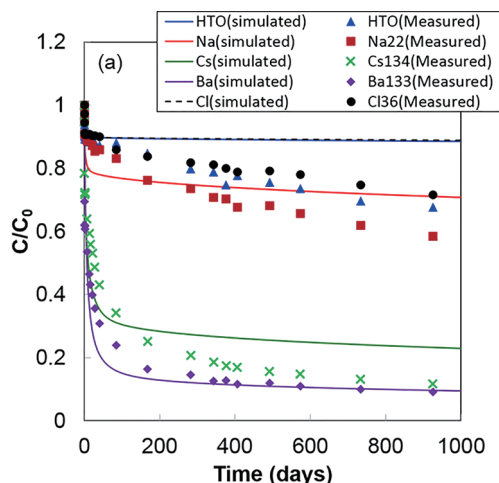


図4 原位置試験データとモデル計算結果の比較の例  
(出典)参考文献4) 図1(a)より転載



図5 MaCoTeにおける原位置試験の概念図  
(出典)参考文献2), Figure 4より転載

右: モジュール内のベントナイト中に試験片を設置した状態  
左: モジュールをボーリング孔に設置した状態

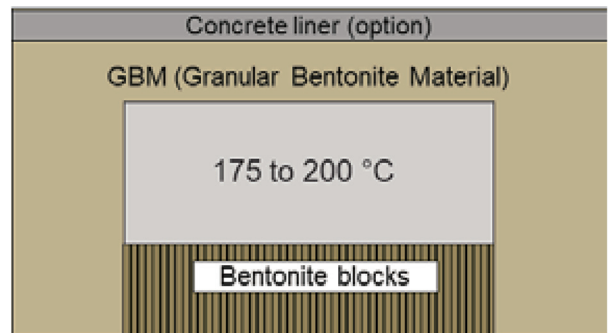


図6 HotBENTにおける原位置試験の概念図  
(出典)参考文献1), Figure 8より転載

#### 5. HotBENT (High Temperature Effects on Bentonite)

本プロジェクトでは、200℃までの高温環境における実規模試験を行うことで、人工バリア材料の性能に及ぼす熱の影響について理解を深めることを目的としている。主に高温下におけるベントナイト緩衝材の特性に対するデータベースの拡充を図り、室内試験で得られるベントナイト緩衝材の熱・水理・応力・化学連成現象の評価データやモデリング技術を実規模スケールで適用できるかについて実証的研究を行う。

原位置試験に関して、2018年より詳細検討が始められ、2020年から試験開始される予定である。図6に検討中の試験体モジュールの構成案を示す。ベントナイトブロックを土台として、その上に廃棄体を模擬したヒーター(図の中央部)を配置し、周りを粒状ベントナイト(granular bentonite materials; GBM)で埋め戻すという構成である。

ベントナイト緩衝材の材料として、MX-80(WyomingタイプNa型ベントナイト)とBCV(チェコ産Feの含有量が多いベントナイト)が候補とされている。ベントナイト材料、ヒーター温度、試験期間等の試験条件を変えた複数の試験体モジュールを坑道内に配置し、長期モニタリングを行う。試験開始後は、5年程度経過した時点でいくつかの試験体を回収して状態の分析を行い、その分析結果やモニタリングデータを基に他試験体の試験期間を検討する計画となっている。

### Ⅲ. 海外の地下研究施設への期待

NUMOは包括的技術報告書(レビュー版)<sup>5)</sup>において、これまでに蓄積されてきた科学的知見や技術を統合し、地層処分の実施主体として、わが国の地質環境に対して安全な地層処分を実現するための方法を説明するとともに、技術的信頼性をさらに高めるために今後取り組むべき課題について示している。地層処分事業に対するステークホルダーの信頼をより強いものとしていくために、引き続きこうした課題に取り組む。その中では、サ

イトが特定された場合の、深部地質環境条件を含むサイトの環境条件の調査や評価、サイトの条件に適した処分場の設計、建設・操業・閉鎖等を行うための技術の実証を進める。合わせて、安全性の評価のための技術の信頼性を向上させていくことも重要である。

こうした技術開発への取り組み、また、必要となる人材の育成、プロジェクト管理技術の強化、日本の国際貢献の場として、海外の地下研究施設には地層処分事業を支援する有効なインフラとして機能することが期待される。

#### － 参考文献 －

- 1) Vomvoris et al., Proc. IHLRWM 2019, Grimsel Test Site - Experimental Program 2019- 2023: On- Going and New Experiments, 159-27532, ANS, (2019).
- 2) Vomvoris et al., Proc. IHLRWM 2015, NAGRA's Activities at The Grimsel Test Site and The Mont Terri Project: Update and Outlook, 12378, ANS, (2015).
- 3) Nagra, Grimsel Test SiteI (GTS) News Letter, April 2019 Year 01, Vol.1., (2019).  
<http://www.grimsel.com/images/newsletter/GTS%20Newsletter%2001%20-%20April%202019.pdf>

- 4) 深津ほか, 原子力学会 2018 年秋の大会予稿集, 2F21, (2018).
- 5) 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—レビュー版, NUMO-TR-18-03, (2018).

#### 著者紹介



澁谷早苗 (しぶたに・さなえ)

原子力発電環境整備機構  
(専門分野/関心分野)核種移行, 生活圏  
評価/放射性廃棄物の処分



藤崎 淳 (ふじさき・きよし)

原子力発電環境整備機構  
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処分場  
の性能評価



### 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。





# 送配電設備に対する防災・減災対策の現状と課題 激甚化する台風災害への対応

電力中央研究所 地球工学研究所 朱牟田 善治, 石川 智巳

2018年、2019年に台風をはじめとする気象災害が立て続けに発生しており、激甚化する傾向にある。本論では、近年激甚化する傾向にある台風災害を例として、電力流通設備の防災・減災対策の現状について解説する。2019年に発生した台風15号、台風19号を含む既往の台風被害事例を紹介し、特に都市圏に敷設されている電力流通設備の被害の特徴を例示する。これを受け、送電設備と配電設備に着目した防災・減災対策として、近年、電力レジリエンスという考え方に注目が置かれていることを指摘し、その現状と課題について解説する。

**KEYWORDS:** *electric power transmission equipment, electric power distribution equipment, disaster mitigation, resilience, typhoon disaster, damage prediction, disaster restoration, transmission tower, indirect damage, flying object*

## I. はじめに

近年、台風に関連する災害が立て続けに発生しており、気候変動に伴う災害の激甚化が懸念されている。一方、都市機能を維持するうえで必要不可欠な基幹エネルギーである電力を供給するために必要な送電設備や配電設備は、電力流通設備と呼ばれ、膨大な数に上る設備が敷設されている。このような電力流通設備の災害対策は、大きく2つに大別できる。ひとつは、耐風設計や補強対策を行い、構造物を気象外力に対して物理的に強くするという視点からの防災対策(ハード対策)である。もう一方は、設計で想定する以上の未曾有の地震が発生することを前提として、ネットワーク多重化を含む応急復旧等に関わる対応の合理化・迅速化という視点からの減災対策(ソフト対策)である。多様な電力流通設備からなる電力系統全体のレジリエンスは、このハード対策とソフト対策をバランスよく総合的に勘案することにより実現されている。

本論では、近年、激甚化が懸念されている台風による送電設備と配電設備の被害に着目し、その防災・減災対策を例として、電力レジリエンス強化に向けた対策の現状と課題について解説する。

*Current status and issues of disaster mitigation measures for electric power transmission and distribution equipment:*  
Yoshiharu Shumuta, and Tomomi Ishikawa.

(2020年1月8日 受理)

## II. 既往災害事例

### 1. 送電設備の台風被害事例

台風による強風被害としては、支持物の倒壊、部材の変形が挙げられる。古くは1959年の伊勢湾台風により152基、および1961年の第2室戸台風により28基の鉄塔損壊が発生した。これらの被害を契機に、大型鉄塔の損壊原因および設計手法などが検討され、現行のJEC-127<sup>1)</sup>に反映された。その後、約30年は特に目立った被害はなかったものの、1990年台に入り基幹送電線路を含む設備被害が発生した。2000年代以降、大規模な災害は減少傾向にあったものの、2019年台風15号において、鉄塔2基の倒壊事故が発生した。以下、1991年台風19号、1999年台風18号および2002年台風21号、2019年台風15号による鉄塔被害事例を示す。

#### (1) 1991年台風19号<sup>2)</sup>

1991年台風19号により、九州地方、中国地方、四国地方において、計39基の鉄塔損壊、61条の電線断線被害が生じた。たとえば、四国地方では、愛媛県伊予三島地区における法皇山脈の尾根上で鉄塔損壊被害が生じた。ここは「やまじ風」と呼ばれる南よりの局地風の発生が知られている箇所であり、被害発生時、最大瞬間風速73.2 m/sが記録された。この事故を受けて、地形影響の重要性が改めて認識され、局地風の特長などに関する研究<sup>3)</sup>が行われることとなった。

(2)1999年台風18号<sup>2)</sup>

1999年台風18号により、九州地方において220kV(500kV設計)送電線路4基(熊本県八代市から天草上島に伸びる宇土半島中央稜線部のやや南側東西に走行、南側海岸線から約3km、標高約300m)を含め、15基の鉄塔損壊および電線の断線(6条)、がいし破損(12基)の設備被害が生じた。基幹送電線路である220kV(500kV設計)送電線路の損壊は、台風による強風が局所的に強まる「海岸付近の特殊地形」に位置し、地形による増速および大きな風力を受ける線路走行(風向に対してほぼ直角)により、設計を超える風荷重が作用したことが原因とされた。

(3)2002年台風21号<sup>2)</sup>

関東に上陸した2002年台風21号により、茨城県南部(潮来市)の275kVおよび66kVの東西に伸びる2線路において、鉄塔9基の損壊、1基での部材変形が生じた。当該地点は台風中心部進路の東側約50kmに位置し、最大旋衡風速半径の近傍にあったこと、風上は粗度の小さい水田・湖であったこともあり、被災地点近傍の送電用鉄塔頂部に設置された風速計で、最大瞬間風速56.7m/sが記録された。本損壊事故では、上部のみが損傷を受けた(1)、(2)の事例とは異なり、トリガー鉄塔とされる鉄塔基礎(井筒基礎)に大きな鉛直変位(引上げ方向に最大591mm)が生じており、この基礎の破壊による倒壊と考えられた。なお、その他の設備被害は、強い強風に加えてトリガー鉄塔倒壊による電線張力の増加が重なった2次被害であった。

(4)2019年台風15号<sup>4)</sup>

2019年9月9日に関東地方に上陸した台風15号は、記録的な暴風となり、建物被害や崖崩れ等、甚大な被害が発生した。台風15号の最大風速は、伊豆諸島と関東地方南部の6地点で最大風速30m/s以上の猛烈な風を記録し、関東地方を中心に19地点で最大風速観測史上1位の記録を更新した。また、千葉県を中心に最大停電戸数約93.5万件の大規模停電が発生し、全面復旧までに約2週間を要するなど、長期にわたる停電により国民生活や経済活動に甚大な影響を及ぼした。本台風により、千葉県君津市の東京電力管内の東西方向に伸びる66kV6回線の鉄塔2基の倒壊事故や1基の部材変形が発生した(図1)。

2019年台風15号の鉄塔被害を受け、2019年12月現在、経済産業省電力安全課電力安全小委員会のもとに設置された「令和元年台風15号における鉄塔および電柱の損壊事故調査検討WG」において、倒壊・損傷の事実関係の整理、事故原因調査、現行の技術基準の適切性、今後の対策などについて検討が進められている<sup>4)</sup>。本WGに報告された東京電力PGの原因調査結果によれば、気圧傾度の大きい台風が東京湾を通過することで千葉県において著しい強風が発生していたことに加え、数km風上



図1 2019年台風15号鉄塔被害状況  
(出典：経産省WG資料<sup>4)</sup>)

の地形による風の増速に、直近斜面の風の増速が重なったことで、設計風速以上の風速となり倒壊に至ったとしている。本台風で明らかとなった特殊地形は、1991年19号台風被害では認識されておらず、現在、再発防止策や技術基準への反映などが検討されている。

## 2. 配電設備の台風被害事例

表1は、2018年、2019年で多大な被害を発生させた台風による電柱被害と最大停電戸数を比較している。台風による電力設備被害のほとんどは、架空に設置されている電柱などの配電設備に集中し、電力供給支障の主な原因は配電設備の被害である。

これに対し、図2は、被害の発生した2018年台風21号と2019年台風15号における原因別の電柱被害の内訳を示す。配電設備被害の主要因は、風圧による直接被害よりも図3、図4に示すような飛来物や樹木倒壊による周辺施設の被害による2次被害である。飛来物による被害は、市街地ではトタン等の屋根材、郊外ではビニルハウスの飛来によるものが多い。一方、森林地域などの山間部に多発する配電設備被害は、配電設備に近接してい

表1 近年の配電設備被害概要<sup>5)</sup>

	被災電力会社	台風	電柱被害箇所数(箇所)	最大停電戸数(万戸)
2018年	関西電力	21号	1343	240
	中部電力	24号	206	180
2019年	東京電力	15号	1996	93
	東京電力	19号	683	52

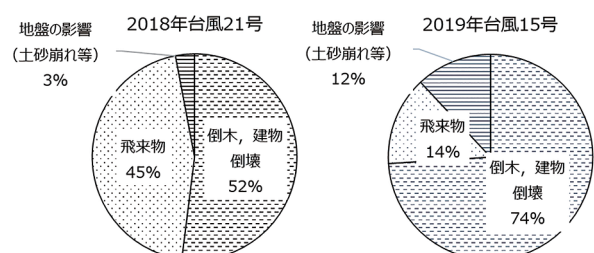


図2 近年、発生した台風による電柱被害の主要因<sup>5, 6)</sup>





図3 典型的な飛来物  
(2018年台風21号)



図4 典型的な樹木倒壊  
(2019年台風15号)

る樹木の倒壊や枝折れなどが発生し、損傷した樹木が電柱・電線などに接触することが主要因となっている。特に、上記2台風は、周辺施設被害による電柱折損・倒壊の多発した都市圏を含む配電設備被害であり、配電設備の台風対策を考えるうえで周辺施設被害による2次被害への対応は、大きな課題となっている。

### Ⅲ. 送電設備の防災・減災対策

#### 1. 送電用鉄塔の設計基準と台風による鉄塔損壊被害軽減対策

送電設備は、新規電源の遠隔化や用地取得事情等により、海岸部、山岳部など、地理、地形的に複雑な箇所建設する機会が多い。このため、様々な地域特有の自然の脅威に曝され、多様な自然災害に見舞われる。一方で、台風や地震などによる力学的作用により設備損壊が発生した場合には、物理的復旧は容易ではない。このため、設計時における地域の実情に合わせた適切な荷重の折り込みが重要となる。

送電用鉄塔の設計にあたっては、電気設備技術基準<sup>7)</sup>、送電用支持物設計標準<sup>1)</sup>、架空送電規程<sup>8)</sup>のいずれか、またはすべてが参照される。それぞれの風荷重に関する設計基準は以下のとおりである。

##### ①電気設備技術基準および解釈<sup>7)</sup>

- ・設計風速は、全国一律(高温季10分間平均風速40m/s)
- ・常時荷重(架渉線断線を考慮しない)は鉄塔部材の規格降伏点応力度の1/1.5に対応

##### ②送電用支持物設計標準(JEC127-1979)(電気学会標準規格)<sup>1)</sup>

- ・設計風速は地域毎に異なる風速(地上高10mにおける最大瞬間風速 $V_{G10}=40.8\sim63.2$  m/s)を設定
- ・強風時荷重(最大瞬間風速)は規格降伏点応力度に対応

##### ③架空送電規程(JEAC6001-2018)(民間の自主規定)<sup>8)</sup>

- ・電気設備技術基準の補足、および実運用面での詳細解説として制定

Ⅱに示したように台風による鉄塔被害の多くは、設計で想定した以上の風が作用した場合であり、地形の影響による風の増速がその主要因であった。架空送電規程では、1991年台風19号での被害をうけ、被害箇所の特徴を以下のように整理している。

- ・従来から強い局地風の発生が知られる地域における稜線上の鞍部等、風が強くなる箇所
- ・主風向に沿って地形が狭まる湾の奥等の小高い丘陵部にあって収束した風が当たる箇所
- ・海岸近くで突出している斜面傾斜の大きな山の頂部等、海からの風が強まる箇所
- ・岬・小さい島等、海を渡る風が吹き抜ける箇所

台風の襲来頻度が多く、強風の発生が懸念される地域においては、上記の特徴を参考に風速が増大する特殊地形箇所の把握に努め、極力このような箇所を回避するルートを選定するよう努めることが推奨されている。具体的には、特に重要なルートについて気象統計資料の収集、気流解析による増速の有無などを検討し、これに基づき送電ルートの設定、設計風速の割り増しなどの事前対策を実施するようになった。また、既設の設備に対しては、台風の襲来頻度や海岸からの距離、地形条件、線路走行により一層配慮して風荷重を精査し、必要に応じ部材および部材接合部の強度向上対策が実施されている<sup>4)</sup>。

#### 2. 送電用鉄塔の近年の耐風設計合理化・実用化への取り組み

1991年台風19号による送電設備被害を契機として、全電力会社と電中研により送電用鉄塔の耐風設計に関する研究がすすめられ、特に地形の影響を受けた風況推定手法や鉄塔・架渉線の動的効果を考慮した風荷重評価法などが整備された。その成果は、「送電用鉄塔の風荷重指針・同解説(2005)」(以下、風荷重指針<sup>9)</sup>)としてとりまとめられた。さらに、2015年に電気学会「送電用鉄塔設計標準」JEC-TR-00007(JEC-127-1979の改正案。以下、JEC-TR)<sup>10)</sup>が刊行され、風荷重指針の考え方が全面的に導入された。なお、現在、JEC-TRの試用を踏まえた「送電用鉄塔設計標準」の本改正が進められており、今後設計実務に本格的に適用される予定である。

JEC-TRの風荷重の特徴として、地域別風速(風向別基本風速マップ)や地形による風の割り増し係数が導入された点にある。特に、地形による風の割り増し係数は、過去の被害事例で明らかとなった特殊地形に具体的に対応するものである。本割り増し係数については、図5に例示した増速率図により算定できる。本増速率図は、風洞実験により精度が検証された数値流体解析を用いて、種々の傾斜角に対して評価され、データベースとして提供している。

風速の割り増し係数は、風上側10km程度前方から建設地点までの地形の状況から、斜面の高さ $Lz$ 、斜面の水平距離 $Lx$ 、算定高さ $z$ 、および算定水平距離 $x$ を読みとり、増速率図を用いて算定される。なお、2019年台風19号の鉄塔被害原因とされている、風上側増速地形による風の増速と直近斜面の風の増速の重畳現象については、



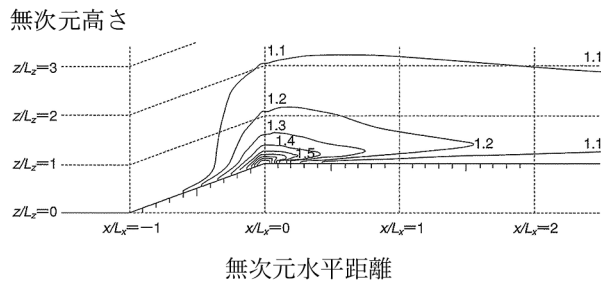


図5 増速率図の例(崖状地形, 斜面勾配 20°)

今回の台風によって明らかとなった今後の課題である。

#### IV. 配電設備の防災・減災対策

##### 1. 配電設備の耐風設計法の基本的考え方<sup>11)</sup>

配電設備の設計は、「電気設備に関する技術基準を定める省令」(以下、省令)<sup>12)</sup>「電気設備の技術基準の解釈」(以下、解釈)<sup>12)</sup>および配電規程<sup>13)</sup>で規定されている。1997年3月の省令の全面的な改正により、必要な性能のみを省令で定める性能基準化が行われ、「電線等による引張荷重、風速40m/秒の風圧荷重および当該設置場所において通常想定される気象の変化、振動、衝撃その他の外部環境の影響を考慮し、倒壊のおそれがないよう、安全なものでなければならない」とされた。また、解釈は、省令で定める技術基準の技術的要件を満たす技術的内容の一例として、具体的な材料の規格、数値、計算式等を定めている。

一方、配電規定は民間規格であり、解釈に定められた内容をより具体的に規定している。たとえば、本論で主な対象とする台風などによる災害の場合、配電規定では次の3つの風圧荷重が規定されている。

- (1) 甲種風圧荷重:高温季(夏季・秋季)において、40 m/sの風があるものと仮定した場合に生ずる荷重
- (2) 乙種風圧荷重:低温季(冬季・春季)において、架渉線に氷雪が付着した状態(架渉線について、その周囲に厚さ6 mm、比重0.9の氷雪が付着した状態)で甲種の場合の1/2の風圧により生ずる荷重(一般的にこの季節に強風はなく、氷雪の多い地方を対象とする)
- (3) 丙種風圧荷重:甲種の場合の1/2の風圧により生ずる荷重(人家が連なっている場所および低温季において、強風がない氷雪の多くない地方を対象とする。)

そのほか、地域性を踏まえた防災対策として、支線対策や根かせなど補助的な対策を行っている<sup>11)</sup>。

##### 2. 配電設備のレジリエンス強化策

配電設備の場合、2017年現在で、約2,179万本という電柱(電力会社管轄分のみ)が敷設され、需要家設備にも近接している設備を多く含み、広域にネットワークを形成している設備である。また、施設条件が多様で、IIで示したように周辺施設被害による間接被害が多発する。

このため、想定される外力を設計で規定することには限界があり、需要家設備や周辺施設の被害をある程度前提としたレジリエンス(回復力)という観点、すなわち、停電時間をいかに少なくするかという対策に、近年、特に重点が置かれている。

一般に、電力の早期供給支障解消を目的とする応急復旧は、①災害情報の収集、②系統切り替え、および③物理的修復というプロセスをたどる。

このうち、①災害情報の収集に関しては、無線、携帯電話、FAX、社内LAN等による情報連絡体制により、被害情報や地震など各種ハザード情報が災害対策本部等に集約され、復旧関連部署に配信される。また、近年、巡視結果などのオフライン情報を携帯型情報端末装置(タブレット端末)や携帯電話などを活用して、迅速に広域な被害情報が収集されるようになってきている。

これに加え、ヘリコプター、衛星などのリモートセンシングデバイス、および自治体などにも自社施設を含む周辺施設の広域な被災情報を補間情報として収集する方法にも注目が集まっている<sup>5)</sup>。ところが、復旧効率に大きな影響がでる初動対応において、必要な災害情報とそれら情報を取得できるまでの時間にはタイムラグがある。被害が広域化・大規模化すればするほどその時間的ずれは一般に大きくなる。このため、電力会社では、復旧に必要な人員・資材を事前に配備し、強風による電柱折損や倒壊およびそれらに起因する停電等の被害に備えるために、風速と被害発生箇所・規模の予測情報を積極的に実務で活用するようになってきた。特に、電力中央研究所の開発した配電設備の台風被害予測システム(Risk Assessment and Management system for Power lifeline Typhoon:RAMPT)<sup>14)</sup>は、近年、電力各社の復旧実務で実践的に活用されている復旧支援ツールとして、電力レジリエンスワーキングでもその活用例<sup>15)</sup>が紹介されている。

2019年に発生した台風15号および台風19号を受けて、電力レジリエンスワーキングでは、上記①~③に関連して、激甚化する災害に対処するための課題として、以下を指摘している<sup>5)</sup>。

- (1) 被害状況の迅速な把握・情報発信、国民生活の見通しの明確化
- (2) 被害発生時の関係者の連携強化による事前予防や早期復旧
- (3) 電力ネットワークの強靱化によるレジリエンス強化
- (4) 復旧までの代替供給・燃料の確保
- (5) 地域間連系線の増強、電源等の分散化によるレジリエンス強化

#### V. まとめと今後の課題

本論では、近年激甚化する傾向にある台風災害を例として、電力流通設備の防災・減災対策の現状について解

説した。特に、2019年に発生した台風15号、台風19号では、都市圏の災害脆弱性が課題としてとりあげられており、電力レジリエンスの強化対策が国家レベルで検討すべき課題となっている。また、合同電力レジリエンスワーキンググループでも、以下のような台風被害を踏まえた喫緊の対策を中長期的課題として指摘している<sup>5)</sup>。

#### (1) 2019年台風15号被害を踏まえた対策

政府における対策として、技術基準<sup>7)</sup>の見直しを行うこととしている。具体的には、送電用鉄塔については、①現行の基準風速40m/sを維持、「10分間平均風速」を明確化、②地域の実情を踏まえた地域別風速の設定、③特殊地形を考慮(従来の3類型に加え、台風15号の被害発生個所の地形を追加)の3点について規定する方向性を示している。また、今回の被害発生個所と類似の地形について全電力大で総点検を行い、状況の把握と今後の更新等に向けた計画の策定が明記されている。配電柱については、技術基準において連鎖倒壊防止に関する留意事項が示される予定である。

#### (2) 電力システムの分散化と電源投資

地理的制約により復旧が困難なケースにおいては、あらかじめ分散型電源(再生可能エネルギー、蓄電池、コージェネ、電動車等)を活用することにより、災害時・緊急時のレジリエンスを向上させる方策について検討の必要性を指摘している。

#### (3) 遠隔分散型グリッドの導入

台風による停電復旧の課題や電力需要の変化を踏まえれば、山間地などの一部においては、特定の区域を独立システム化して地域分散電源による電力供給を行う方が、災害への耐性(レジリエンス)も高まるエリアが出てくることを指摘している。

#### － 参考資料 －

- 1) 電気学会：送電用支持物設計標準 JEC-127-1979, 電気書院, 1979.
- 2) 日本風工学会風災害研究会：強風災害の変遷と教訓第2版, 2011.
- 3) 大熊武司ほか：特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究(その1)～(その4), 日本風工学会論文集, 第82号, 第83号, 2000.
- 4) 経済産業省電力安全課：令和元年台風15号における鉄塔および電柱の損壊事故調査検討WG資料  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan\\_shohi/denryoku\\_anzen/tettou/index.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/tettou/index.html)
- 5) 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会電力・ガス基本政策小委員会/産業構造審議会保安・消費生活用製品安全分科会電力安全小委員会合同電力レジリエンスワーキンググループ：台風15号の停電復旧対応等に係る検証結果取りまとめ(案), 2019.
- 6) 関西電力台風21号対応検証委員会報告(平成30年12月13日), 2018.
- 7) 電気書院編：電気設備技術基準とその解釈2020年版, 電気書院, 2019.
- 8) 日本電気協会送電専門部会：架空送電規程 JEAC6001-2018, 日本電気協会, 2019.
- 9) 電気協同研究会：送電用鉄塔の設計荷重～現状と将来展望～, 電気協同研究第62巻第3号, 2006.
- 10) 電気学会電気規格調査会：送電用鉄塔設計標準(JEC-127-1979改正案)JEC-TR-00007-2015, 電気学会, 2015.
- 11) 石川等：配電設備における強風災害低減への取り組み, 日本風工学会誌, Vol.33, No.1(No.114)pp.30-35, 2008.
- 12) 経済産業省：電気設備技術基準・解釈, オーム社, 2002.
- 13) 日本電気協会：配電規程(低圧および高圧)第8版 JEAC 7001-2017 JESCE0004, 2017.
- 14) 石川智巳, 朱牟田善治, 増川一幸：配電設備の台風被害予測手法の提案とシステム化, 電力土木, Vol.357, pp.17-26, 2012.
- 15) 東京電力パワーグリッド株式会社：停電復旧に向けた対応等について(報告), 2019.

#### 著者紹介



朱牟田 善治 (しゅむた・よしはる)  
電力中央研究所 地球工学研究所  
(専門分野/関心分野)地震工学, 信頼性工学, リスクマネジメント/電力流通設備の災害リスク評価・レジリエンス強化および維持管理に関わる研究開発



石川 智巳 (いしかわ・ともみ)  
電力中央研究所 地球工学研究所  
(専門分野/関心分野)構造工学, 風工学/送電設備の耐風・耐震設計, 維持管理研究, 配電設備の台風被害予測・復旧支援に係る研究開発

# 新検査制度の本格運用に向けた大飯発電所の対応状況について

関西電力 榎本 晋嗣

原子力規制検査の2020年4月からの本格運用に向け、これまでの試運用における事業者の取り組み状況として、特にパフォーマンスベース検査に対する対応状況およびマインドチェンジの必要性を紹介する。今回の検査制度見直しの特徴の一つであるパフォーマンスベースの検査への見直しは事業者としてもパフォーマンス向上への良い契機であると考えている。

**KEYWORDS:** ROP, Reactor Oversight Process, nuclear regulation inspection reform, CM, Configuration Management, SDP, Significance Determination Process, CAP, Corrective Action Program

## I. はじめに

2020年4月から本格運用が開始される原子力規制検査に向けて、'18年10月から各発電所にて試運用が実施されている。本稿では当社での試運用を踏まえた現状の課題認識として、特に「パフォーマンス」をキーワードとした事業者のマインドチェンジに関する状況を紹介する。

本解説は日本原子力学会2019年秋の大会での発表予稿<sup>1)</sup>に加筆・補足を行ったものである。

## II. 試運用フェーズ1, 2の当面の課題

### 1. パフォーマンスベースの検査

新検査制度の特徴として、リスク情報を活用したパフォーマンスベースの検査を志向しており、規制庁検査官がフリーアクセス(事業者に頼らずに事業者図書を確認し、事業者エスコートなしで現場を観察)の仕組みにより、実際の事業者活動に原子力安全上の問題がないかどうか(パフォーマンス)を効果的に検査できるよう、試運用が実施されている<sup>2, 3)</sup>。

- ・試運用フェーズ1(2018年度):検査ガイド内容確定、フリーアクセスの実践/習熟
- ・試運用フェーズ2(2019年度上期):全プラントで日常検査、代表プラントでチーム検査
- ・試運用フェーズ3(2019年度下期):フェーズ2を継続し、チーム検査を可能なプラントで実施

なお、リスク情報活用の試運用の現状としては、図書

や現場観察の検査対象選定において、事業者のPRAモデルを活用して原子力安全の観点からリスクが高いものを抽出する計画とされているが、現状は事業者側のPRAモデルが整備途上であるプラントが多く、また、提供済みの大飯発電所のPRAモデルについても規制庁で内容確認中であることから、検査対象の選定は定性的な判断によって安全系機器やシステムが選定されている。

パフォーマンスベースの一つの観点としては事業者のパフォーマンスとして安全実績指標(パフォーマンス指標, PI)を確認されるとともに、PIでは確認できない範囲を対象として「検査」により安全上の問題の有無を確認される。検査ガイドは規制庁サイトで公表されており、規制庁検査官が日常検査、チーム検査の2種類の方法により、事業者活動について確認(検査)がされることとなる。本格運用後はフリーアクセスの運用により検査官の活動(どの機器を検査しているか等)をその時点では基本的には事業者は感知しない状況で検査が遂行される状況となる。

現在の試運用フェーズ2までは、そのフリーアクセスの成立性確認(特に事業者図書の確認方法)に注力されている。その成立性の確認も必要ではあるものの、一方で、実際の安全上の影響の有無を確認するという観点のパフォーマンスベースの検査の成立性や運用性も確認すべきである。現時点では、規制側と事業者の双方同席の振り返り会議(面談)において、試運用の結果が共有され、意見交換が実施されているものの、安全上の影響の有無を確認するというパフォーマンスベースの観点からは、検査指摘となる新たな気付きなしという簡潔な内容となっており、事業者意見としてもフリーアクセスの運

*Efforts at Ohi Power Station (KEPCO) for Introduction of Nuclear Regulation Inspection: Shinji Masumoto.*

(2019年12月25日 受理)



表1 現行検査との比較(発電用原子炉施設)

実施者	現行	2020年4月以降
国	保安検査	原子力規制検査 ・検査に合格しないと使えないという強制力はなし。(米国の検査制度:ROPと同じ)
	施設定期検査	
	定期安全管理審査	
	溶接安全管理審査	
	使用前検査	
事業者	燃料体検査	原子力規制検査 ・確認を受けないと使えない強制力(法定確認)は維持。
	適合性確認検査	使用前事業者検査
	溶接事業者検査	使用前事業者検査
	定期事業者検査	定期事業者検査

用に対する意見提示に留まることが多い<sup>4)</sup>。本来、制度設計の観点からは、制度の変更点を網羅的に確認することで本格運用が円滑に進むように試運用期間を活用することが求められる。

試運用期間では、特に米国の検査制度である ROP (Reactor Oversight Process: 原子炉監視プロセス) を参考とし、事業者側は自身が保証すべき原子力安全上のパフォーマンスが何であるのかを明確化(見える化)し、検査官はそれをどう確認したのか(確認できる見通しが得られたのか)を共有することが理想的である。その際、事業者活動を従来からのコンプライアンスベースの視点のみの確認に留まったのか、あるいはパフォーマンスベースの検査として事業者活動を確し安全に影響を与えるようなパフォーマンスが十分に確認できたのか、換言すれば、安全上の観点から事業者活動に不足がなかったのかを確認し、本格運用の円滑な開始に向けた共通認識を醸成することが出来れば、有益な試運用になると考える。現時点では、事業者側からの意見提示(パフォーマンスの明確化の一助となる設計ベースの提示や確認の質疑)が不十分のため、共通認識の醸成には至っていない。設計ベース自体は、複数の図書(設置許可、工認、保安規定、あるいは建設当時の多くの社内資料等)に分散された情報であり、また再稼働前の審査対応者やベテラン社員等の知識や経験にも依存している情報である。設計ベース図書(DBD)はこれらを体系的に整理して理解しやすくするための文書であり現在、順次作成している途上であるが、試運用においては仮の事例や過去事例等を題材に議論することで、検査指摘の重要度判断の相場観および検査対象とすべき事業者活動が何かという共通認識を醸成することで有益な試運用になると考える。

## 2. 試運用で醸成すべき事業者のマインドチェンジ

事業者としては検査制度見直しの有無に関わらず、従来から事故時に必要となる活動を含めてプラントの安定・安全運転(パフォーマンス)を維持および向上させるために継続的に活動している。一例としては事業者活動を外部機関からレビュー(WANO, JANSI ビアレビューや他電力の独立オーバーサイト)を受けて事業者のパ

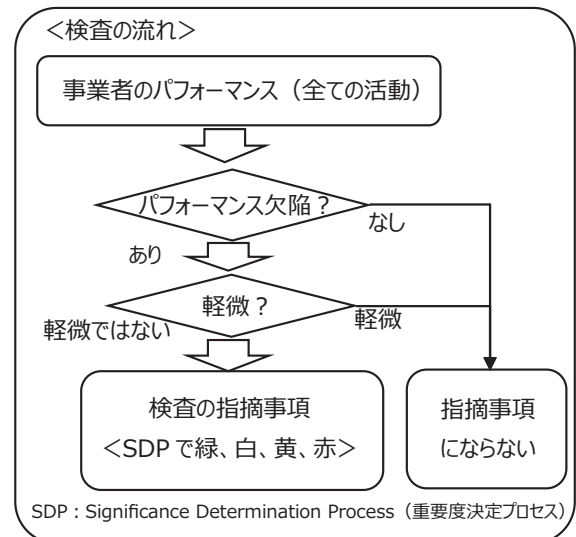


図1 原子力規制検査の指摘事項抽出の概略フロー

フォーマンスを向上させる活動として、いわゆる世界のエクセレンスとの差分を埋める取り組みを行ってきている。また、当社としてCAP(是正処置活動)を見直しており、先例の米国事業者を手本として広く情報(CR, Condition Report)を収集し、プラントのパフォーマンスを改善させるための試運用を開始している。

一方で今回の原子力規制検査では、原子力安全、放射線、核物質防護の観点(7つの監視領域、いわゆる米国ROPのコーナーストーン)を念頭において、事業者が安全上保証すべき状態が不足している場合(パフォーマンス欠陥あり、かつ、マイナーを超える場合)に、当該の事業者活動の状態が検査の指摘事項となる。

原子力規制検査において検査の指摘事項となる事象は、パフォーマンス欠陥であって軽微を超えるものであるが、パフォーマンス欠陥とは規制要求事項または事業者の自主ルールに抵触している状態かつ予見および予防可能なものであり、軽微を超えるものとは、監視領域の一つである原子力安全を例にすれば、プラントの事故等が発生した時の停止操作(炉心損傷防止、格納容器破損防止のための操作)が行えない状態等であれば指摘事項となる。ここで重要な点は、「事故等が発生した時の状態」を想定した場合において必要なパフォーマンスが発揮できるかという点である。換言すれば、非常用発電機(DG)や安全系ポンプ等の機器が「今」動作していることを確認するだけでなく、「事故時等の状態で必要な性能を発揮できるかどうか、いわゆるパフォーマンスが維持できているか」を常に自問自答することが重要であり、この点において事業者のマインドチェンジが必要である。

例:『プラント運転中、非常用 DG の月例定期試験に伴い、DG 室の冷却ファンを起動したが、「冷却ファン風量低」警報が発信。運転員が調査したところ、ファンの外気取入口が塗装作業用のシートで養生されていた

た。警報発信から養生撤去まで数十分の短時間で完了したため、DGの機能喪失はしておらずオペラブルであったと判断。今後の分析にも用いるため、本事象をCAPに登録した。』

この例の場合、事業者としてCAPに登録する際に考慮すべき事項の例示を下記に挙げる。

- ・要求事項は何か。(この例では「ファンの風量」ではなく、「DG室の温度が一定以下」と考えられる)
- ・夜間や週末の人手が少ない時間帯、あるいは最も過酷な季節においてLOCA等が発生してDGの機能が要求された場合にも同じように短時間で対応可能か。
- ・機能喪失していない(オペラブルであった)と判断した自身の技術的評価は妥当か。
- ・他のDGの待機状態は問題ないか。等

このように「要求事項」や「事故を想定した場合にもオペラブルであったと判断をしたこと」が分かる情報をCAPに登録しておくことで、効率的にプラントのパフォーマンスの把握が出来るを考える。

### Ⅲ. 事業者におけるCAP試運用

#### 1. CAPによるパフォーマンスの理解状況

当社はCAP会議を従来から実施してきているが、今回の新検査制度に併せて、CAP会議の見直しを行っており、その特徴としては、広く情報を収集し、重要度に応じた原因分析および是正処置を行うこととしている。

見直し版のCAP会議として、大飯発電所で2018年10月から社員を対象に開始し、高浜および美浜発電所は2019年から開始し、現在は3サイトともに協力会社からも情報収集するように対象を拡大して試運用を行っている。具体的にはCAPシステム試運用データベースを構築し、CR(Condition Report)をCAPシステムDBに入力し、スクリーニング会議で安全への影響度(CAQ高/中/低、Non-CAQ)の分類案および処置担当課の割り当て案を議論し、CAP会議にて重要度および処置担当課を決定する。スクリーニングメンバーの職位は品質保証室(責任者)、発電室、機械系および電気系の役職者であり現在6名で試運用を行っている。'19年5月末までの大飯サイトでのスクリーニング実施件数は2,600件/8か月、CAQ/Non-CAQ比は1/50程度であった。

今後の改善策は、前述のように、当該系統や設備に対する要求事項は何か、それに反している状態および問題は具体的に何か、重要度を踏まえた処置期限になっているか等のCAP情報の記載を拡充していく。また、検査官が直接CAPシステムDBへアクセスして検査対象を選定すると想像しているが、米国同様にCAPの情報閲覧のみで検査指摘の重要度が判定されることはなく、事

表2 米国事業者のスクリーニング要員の力量維持

事前確認資料(例)	
社内資料	パフォーマンス改善の実施、CAP概要(CAQ、Non-CAQ分類)、パフォーマンスの傾向監視、セルフアセスメント/ベンチマーキングのプロセス、運転経験(OE)プログラム、オペラビリティの決定と機能性の評価、通知/報告性の評価、保守規則プログラム等
社外資料	INPO-12-009 (ICES Reporting Requirements and Standards), INPO 12-012 (Traits of a Healthy Nuclear Safety Culture), INPO 14-004 (Conduct of Performance Improvement), NEI16-07 (Improving the Effectiveness of Issue Resolution to Enhance Safety and Efficiency)
法令	10CFR 50 Appendix B(品質保証)等

理解度確認の項目
1.CR起票の閾値、2.オペラビリティ、3.報告の適切性、4.保守規則、5.即時の是正処置、6.重要度レベル、7.評価レベル、8.CAP/Non CAPの分類、9.経験に基づく傾向分析、10.スクリーニング時の意見、11.責任者、処置、実施期限

業者への聞き取り等の事実確認も経て判定されるものと考えている。

#### 2. 米国事業者のCAPスクリーニング要員の養成例

米国のある事業者はスクリーニング要員を社内資格制度で管理および養成し、CAPスクリーニングのパフォーマンスを一定に維持させているため、参考に紹介する。要員候補者は、事前に資料および関係法令を理解し、実際のスクリーニングおよびCAP会議を観察し、先行有資格者との議論を経て、役務の理解度を確認した上で資格が付与される。理解度確認の項目で重要なものは、「オペラビリティとは何か、また、それを維持しているか」である。

### Ⅳ. 事業者のパフォーマンス意識の向上

#### 1. SDP要員育成計画および実施状況

一言で「パフォーマンス意識」と表現しているが、「維持すべきパフォーマンスは何か」を意識、理解するためにSDP(重要度決定プロセス)が活用できる。SDP自体は検査官が検査指摘となる可能性がある気付き事項(軽微を超えると判断した事項)の重要度を判定する(緑白黄赤の色判定する)ための簡易かつ技術的評価ツールである。日本版SDP「原子力規制検査における個別事項の安全重要度評価プロセスに関するガイド」は米国SDP(IMC609)を参考に作成されており、IMC609にはプラント安全上の観点から管理が必須である項目が具体的に記載されており、IMC609の理解は事業者としても安全確保のためのパフォーマンス向上のためにも得策である。

当社は'18年度下期から米国SDP(IMC609)を理解するための教育を自主的に行っている。具体的には'18年度は本店の検査対応事務局(6名)が講師となり米国

表3 米国 SDP 事例の社内教育実績(2018年度)

米国事例(件数)	米国 SDP (IMC609 App.)	米国の検査ガイド
荒天前の不十分な点検他(7)	A(運転中), M(定性的)	IP71111.01 自然災害防護
ISI 検査期間の不適切な延長他(3)	A	IP71111.08 供用中検査
作業連絡不備で保守時リスク評価せず他(4)	K(保守リスク)	IP71111.13 メンテナンスリスク評価
溢水対策リストの漏れによる RHR 機能喪失リスク増加他(7)	A, G(停止中)	IP71111.15 オペラビリティ判断および性能評価
D/G リレーの不適切な保守他(3)	A, G	IP71111.19 メンテナンス後試験
弁の誤操作で SFP 水位低下他(4)	A, F(火災防護)	IP71111.20 停止中操作
不適切な放射線管理による計画外の内部被ばく他(4)	C(従業員被ばく), D(公衆被ばく)	IP71124.04 放射線被ばく管理, IP71124.06 放射性廃棄物管理

NRC のウェブサイトに乗っている検査報告書から指摘事項の実例を抽出し、試運用フェーズ1の分野に限定して発電所の関係課(約20名/3サイト)に対し、約30事例の簡易な教育を実施した。

本年度('19年度)は更なる充実方策として、発電所にSDP要員を育成すべく、教育受講者を拡大(約60名/3サイト)かつ明確化(責任者およびキーマンを選定)して教育を開始している。

## 2. コンフィグレーション管理の充実に向けた一時的な構成変更管理の試運用

発電所の運用においてコンフィグレーション管理のうち、一時的な構成変更(TCC: Temporally Configuration Change)の管理も必要である。一時的な変更管理とは、発電所の設計時(建設時)には明示的には考慮されていない資機材、仮設足場、鉛遮へい、計測器、ベント・ドレンホース、車両等を発電所構内に一時的に設置する場合にも、本設機器・配管等の機能(設計ベース)を損なうことがないように管理するものである。仮設足場について

は、米国ではNRCから注意喚起文書が発行され、仮設足場が安全系機器等に影響を与えないように管理することを求めている<sup>5)</sup>。これら米国先行事例も参照しながら、当社発電所のパフォーマンスを一定レベルに維持および向上させるため、既存手順書の見直しおよび新たな手順書を制定し、現在、感度を高めて試運用を行っている。

## V. まとめ

今回の検査制度見直しの特徴の一つであるパフォーマンススペースの検査への見直しは、事業者としても原子力安全(パフォーマンス)をより一層向上させる良い契機である。保証すべきパフォーマンスとして、原子力安全、放射線安全、核物質防護の観点(7つの監視領域)を念頭に、事故の発生防止および事故時に発揮すべき原子力安全の性能を維持し、平常時の被ばく量を低減し、核セキュリティ対策を確実に行うことが重要である。ここで、「実際のパフォーマンスに問題がないか」を常に自問自答するマインドチェンジが必要であり、先行する米国事業者の実例も参考にしながら、原子力規制検査の本格運用の円滑な開始および運用定着に向けた改善活動を継続的に実施していく。

### — 参考資料 —

- 1) 日本原子力学会 2019年秋の大会 予稿 30-PL01.
- 2) 検査制度見直しに関する試運用実施のための説明会資料, 原子力規制庁, 平成30年8月20日.
- 3) 検査制度の見直しに関する試運用実施のための説明会資料(フェーズ2), 原子力規制庁, 平成31年2月5日.
- 4) 検査制度見直しに関する関西電力株式会社との試運用に関する面談 議事要旨, 原子力規制庁, 令和元年5月8, 9, 14日, 6月4日他.
- 5) NRC Information Notice (IN 2007-29, Temporary Scaffolding Affects Operability of Safety-related Equipment), NRC, 2007年.

### 著者紹介



榎本晋嗣 (ますもと・しんじ)

関西電力株式会社 原子力事業本部  
発電グループ

(専門分野/関心分野) 機械工学, 新検査制度見直し対応



# 放射線を駆使したバイオマス由来機能材料の開発 放射線グラフト重合と多成分連結反応の融合による新潮流

群馬大学 覚知 亮平

近年高分子科学において注目が集まっている多成分連結反応による高分子合成と放射線グラフト重合との組み合わせにより、材料表面の新しい修飾反応が可能になりつつある。放射線グラフト重合の優位性を活用し、合成ポリマーのみならず、バイオマス由来ポリマーの表面修飾反応も実現可能になっている。以上、本稿は多成分連結反応と放射線グラフト重合の融合による新しい材料改質の新展開ならびにそれに立脚したバイオマス由来ハイブリッド有機材料の合成を紹介する。

**KEYWORDS:** *multi-component reaction, surface chemistry, radiation-induced graft polymerization*

## I. 緒言

本解説では、多成分連結反応と放射線グラフト重合の組み合わせを活用したポリマー材料表面の新しい修飾法の開発、最終的にはバイオマス由来ハイブリッド材料の合成ならびにその表面修飾を紹介する。このため、はじめに要素技術である多成分連結反応ならびにポリマー材料の表面修飾法に関する概要を解説し、新しい研究の潮流を紹介したい。

### 1. 多成分連結反応とは？

前述のように、はじめに多成分連結反応に関して紹介する。多成分連結反応とはその名の通り、三種類以上の反応基質が一度に反応し、単一の生成物を与える反応群を指す。通常の化学反応の多くが単分子反応や二分子反応であることを考えると、多成分連結反応は複雑な反応系と言っても差し支えないであろう。このため、有機化学と距離がある読者の中には、“最新鋭”の化学反応という印象を与えうる。ところが、有機化学の歴史を紐解くと、正反対な歴史的経緯である。実際には、最も重要な多成分連結反応である Strecker 反応は有機化学のまさに黎明期に発見されている。Strecker 反応はアミン、ア

ルデヒド、およびシアン化物間から  $\alpha$ -アミノ酸を与える。この反応はアミノ酸の人工合成における最も重要な反応であり、現代的には三成分連結反応として分類される。さらにこの発見を契機として、20 世紀中盤までには、多くの多成分連結反応が発見され、創薬化学などの分野で活躍している。

ところで、本報ではポリマーならびに材料表面の修飾が重要なテーマとなる。ポリマー合成における素反応の多くは有機化学からヒントを得ている。このため、有機化学における研究の新しい潮流は高分子合成にも大きな影響を及ぼす。このような観点から、多成分連結反応も高分子合成において活用されたいらうとお考えの読者も多いかと思われる。ところが、遠藤らが Pd 触媒による三成分連結反応を重縮合反応に適用した報告が数例あるものの、その適用例は非常に限定的である。これは、高分子合成が事実上 100% の化学選択性と反応性を要求するため、多成分連結反応の複雑性がその適用を躊躇させた背景が推察される。多成分連結反応と高分子合成との最も重要な出会いのは、2011 年の Meier らの報告である。Meier らは、Passerini 三成分連結反応が高分子合成に有用な反応である事を実験的に証明した<sup>1)</sup>。この報告を契機とし、多成分連結反応を活用した数多くの研究が報告され始めており、高分子合成の新しい潮流となり始めている<sup>2-4)</sup>。合成高分子化学での地位を築きつつある多成分連結反応であるが、その材料表面修飾反応への展開は未だに限定的である。続いて、表面修飾反応と合成高分子化学の現況に関して触れる。

*Toward a biomass-derived organic hybrid material based on the utility of radiation technology ; A new trend in material chemistry by the combination of radiation-induced graft polymerization and multicomponent reaction : Ryohei Kakuchi.*  
(2019 年 10 月 31 日 受理)

## 2. 表面修飾反応

有機材料の多くは、その由来にかかわらず、高分子化合物である。例えば、ポリエチレンやポリスチレンなどは代表的な石油由来ポリマーであり、セルロースやキチンなどは代表的な天然由来高分子である。このため、有機材料の表面修飾反応は原理的に高分子合成化学と密接に関連している。とりわけ、材料の表面特性を制御するために、表面開始重合であるグラフト重合は重要な技術である。グラフト重合は固相・液相の異相間での反応であり、溶液反応と比較すると、合成的難易度は高い傾向にある。現状、最も重要な表面開始重合は表面開始リビングラジカル重合であろう。例えば、表面開始原子移動ラジカル重合(以下、SI-ATRP)や表面開始可逆的付加脱離リビングラジカル重合(以下、SI-RAFT)は ATRP ならびに RAFT 技術の進展と進歩を共にし、21 世紀に入り様々な材料応用へと展開されている。SI-ATRP や SI-RAFT は非常に優れたグラフト重合技術であるが、一方でその限界や弱点も認識され始めている。はじめに、SI-ATRP や SI-RAFT を行うためには、有機材料の表面にあらかじめ重合開始剤を化学的に導入する必要がある。このために、SI-ATRP や SI-RAFT の前段階で数ステップの化学処理が必要になり、さらに用いる基材ごとに異なる前処理が必要になるなど、グラフト重合の前段階が煩雑になる。さらに、SI-ATRP や SI-RAFT の重合過程の均一性も問題になる。繰り返しになるが、SI-ATRP や SI-RAFT は異相間での重合反応であり、重合がすべての開始剤から均一に開始される保証は無い。このため、基材とモノマーとの相性次第では、不均一な重合になる可能性が指摘され始めている。

以上のような背景から、著者は放射線グラフト重合に着目した研究を展開している。放射線グラフト重合は SI-ATRP や SI-RAFT 開発以前から知られており、材料修飾という意味では“温故知新”であるが、SI-ATRP や SI-RAFT と比較した優位性がある。前述のように、SI-ATRP や SI-RAFT が複雑な前処理が必要な一方、放射線グラフト重合は放射線の照射のみでグラフト重合を実現可能であり、簡便性や普遍性という観点から大きな利点がある。さらに、一般的にどのような材料に対しても適用可能である。

## 3. 多成分連結反応と放射線グラフト重合の組み合わせによる新潮流

上述のように、本報では二つの要素技術の融合に関して、最新の技術動向を解説する。つまり、最近になり高分子科学に取り入れられ始めた多成分連結反応と表面修飾の温故知新である放射線グラフト重合との組み合わせである。本解説では、初めに筆者が開発している多成分連結反応による高分子合成を解説した後に、放射線グラフト重合との融合によるバイオマス由来材料を含む有機

材料の改質へと軸足を移す。

## II. 放射線グラフト重合と多成分連結反応の組み合わせによる表面修飾

### 1. Kabachnik-Fields 三成分連結反応(KF-3CR)を活用した高分子合成

はじめに、筆者が開展している多成分連結反応による高分子合成に関して、簡単に紹介したい。Meier らの報告から、高分子合成においても多成分連結反応が用いられ始めている。現状高分子化学において多用されている多成分連結反応は Passerini 反応と Ugi 反応が挙げられる。これらの反応はイソシアニドを反応剤とした効率的な反応系であるが、有機イソシアニドの多くは悪臭を放つことが知られている。このため、上記反応の実際的な応用展開の制限となり得る。上記の状況を考慮し、筆者はイソシアニドを反応剤としない多成分連結反応として Kabachnik-Fields 三成分連結反応(KF-3CR)に着目した。KF-3CR は Strecker 三成分連結反応と類似した特徴を有した有機反応である。具体的には、アルデヒド、アミン、およびフォスファイトから対応する  $\alpha$ -アミノリン酸を効率よく生成する反応であるが、高分子合成においては、ほとんど活用されてこなかった。ここで、KF-3CR による高分子合成を簡単に解説する(図1)<sup>5,6)</sup>。

著者は KF-3CR が重縮合反応ならびに高分子反応の素反応として適用可能かどうか試みた。ここで図1を参照しながら、高分子化学と距離がある読者のために解説するが、重縮合反応は高分子の鎖を形成する重合反応のことである一方、高分子反応とは高分子の変換反応を指す。詳細は割愛するが、KF-3CR による重縮合<sup>5)</sup>ならびに高分子反応の両方が達成された<sup>6)</sup>。以上より、これまで高分子科学において未活用の KF-3CR が、高分子合成に有用な反応系であることを実証した。さらに、高転化率で高分子状  $\alpha$ -アミノリン酸エステルが得られることは本合成法の大きな特徴であり、材料応用においても重要な点である。

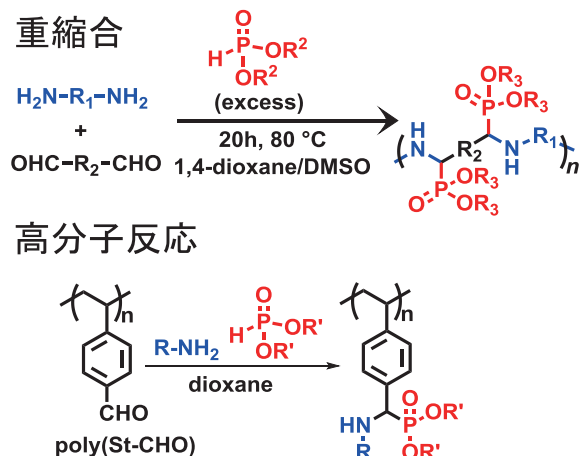


図1 KF-3CR による重縮合ならびに高分子反応

## 2. 放射線グラフト重合との融合による表面修飾反応への展開

上述のように、筆者は KF-3CR が高分子合成においても効率的な反応となることを明らかにし始めている。緒言でも言及したように、高分子に有用な反応系は材料表面の修飾反応への展開が期待される。このため、筆者は KF-3CR に立脚した材料表面の修飾反応の開発に軸足を移す。KF-3CR による表面修飾を実現するためには、アルデヒド基を材料表面に導入する必要がある。ここで、筆者は放射線グラフト重合の活用に着目した。繰り返しとなるが、放射線グラフト重合の活用により、様々な有機材料への展開が普遍的に可能になる。この点は後述のバイオマス由来材料への展開において非常に重要であり、放射線グラフト重合を用いる動機でもある。以上を考慮し、筆者ははじめに放射線グラフト重合と KF-3CR の組み合わせによる有機材料の表面修飾を行った<sup>7)</sup>。本修飾反応の優位性を示すため、はじめにフッ素系ポリマーである四フッ化エチレン・エチレン共重合樹脂(以下, ETFE)を膜材料として選択した。これは、ETFE 等のフッ素系樹脂はフッ素の特異的性質のために通常の化学反応を受け付けないことから、放射線グラフト重合の優位性を活かせるためである。さらに、筆者らは本法の優位性を示すため、クラウンエーテルの表面導入を目指した。クラウンエーテル類はカチオン種の選択的補足能が知られており、吸着・分割材料において重要な官能基であるが、その両親媒性のために表面導入は通常困難を伴う。以上を実現するために、はじめにアルデヒド含有ビニルモノマー(4-ビニルベンズアルデヒド、以下 St-CHO と略す)のグラフト重合を行った(図 2)。放射線グラフト重合は、Tween 20 を乳化剤としたエマルジョン重合を選択した。重合反応を行う前に、不活性ガス下で ETFE 膜に対して 50 kGy の電子線照射を行った。続いて、得られた ETFE 膜を 3.3 wt% の St-CHO のエマルジョン溶液中、60 °C でエマルジョン重合を行った。その結果、グラフト率(元の基材からの重量増加率)が約 30 % となり、ETFE 膜からの St-CHO のグラフト重合の進行が強く示唆された。さらに、放射線グラフト重合前後での FT-IR スペクトルを測定した

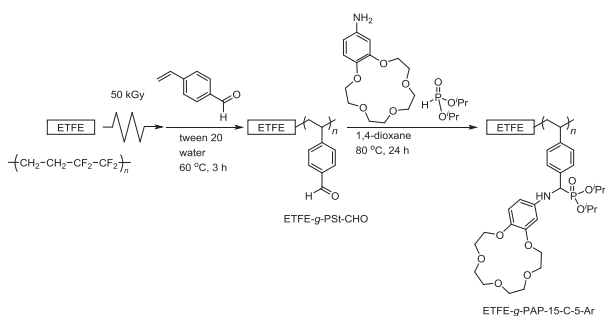


図 2 放射線グラフト重合と KF-3CR によるフッ素系樹脂の修飾反応

結果、重合前には観測されなかったアルデヒド由来の強いピークがグラフト重合後には  $1,698\text{ cm}^{-1}$  に観測された。このことから、ETFE 膜上にポリ(4-ビニルベンズアルデヒド)(以下, PSt-CHO と略す)がグラフトされたことが判明し、ここで得られたグラフト膜を ETFE-*g*-PSt-CHO と略す。つづいて、ETFE-*g*-PSt-CHO に対する KF-3CR を行った。上述のとおり、本研究ではクラウンエーテルの導入が目的なため、アミン基質として市販の 4'-アミノベンゾ-15-クラウン-5-エーテル(15-C-5-Ar-NH<sub>2</sub>)を用い、フォスファイト基質としてジイソプロピルフォスファイトを用いた。ETFE-*g*-PSt-CHO に対する KF-3CR を上記のアミンおよびフォスファイトを用い、1,4-ジオキサン中、80 °C で表面修飾反応を行った。反応評価は FT-IR 測定により行い、KF-3CR の進行に従いアルデヒド由来のピークが消失し、一方でリン酸エステル基に由来するピークが強く観測された。以上の結果から、KF-3CR は ETFE 膜表面でも高効率に進行し、クラウンエーテルが表面に固定化された ETFE 膜(ETFE-*g*-PAP-15-C-5-Ar)が得られた。

上述のように、放射線グラフト重合と多成分連結反応の組み合わせにより、クラウンエーテルが固定化された ETFE 膜である ETFE-*g*-PAP-15-C-5-Ar が得られた。続いて、ETFE-*g*-PAP-15-C-5-Ar のゲスト吸着能を評価した。通常、ETFE 膜はフッ素原子の存在により、イオン性の物質を寄せ付けない化学的特徴がある。表面上でのクラウンエーテルのゲスト補足能を評価する目的で、得られた ETFE-*g*-PAP-15-C-5-Ar をゲスト水溶液(4-アミノアゾベンゼン塩酸塩; 以下, azo-NH<sub>3</sub>Cl)に浸潤した(図 3)。azo-NH<sub>3</sub>Cl 水溶液に浸した後は、ETFE-*g*-PAP-15-C-5-Ar の色が劇的に変化することが分かった。対照実験として、元の ETFE 膜と ETFE-*g*-PSt-CHO に対しても同様の実験を行ったが、予想通り膜の色調変化は観測されなかった。従って、放射線グラフト重合と KF-3CR の組み合わせにより導入されたクラウンエーテルと azo-NH<sub>3</sub>Cl とのホスト-ゲスト錯体の形成が強く示唆された。以上のように、放射線グラフト重合と KF-3CR の融合により、困難なフッ素系樹脂の表面修飾反応が可能となった。この結果は、フッ素系樹脂以外の様々な有機材料の表面修飾反応に応用可能

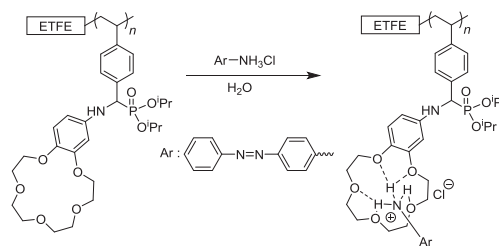


図 3 表面改質 ETFE 膜上でのアンモニウム塩との表面ホスト-ゲスト相互作用



であることを示している。

### Ⅲ. バイオマス由来材料の有効利用を指向した応用展開

前項までに示したとおり、放射線グラフト重合とKF-3CRの融合により高分子合成のみならず、様々な有機材料に適用可能な表面修飾反応への展開が可能になった。この結果を受け、筆者は更なる研究の展開を指向した。具体的には、喫緊の課題であるバイオマス成分の高度活用に本研究手法が適用可能であると着眼した。繰り返しとなるが、KF-3CRはその反応基質にアルデヒドを用いる。ここで、木質系バイオマスであるリグノセルロースの構成に着目した。リグノセルロースの主要成分は、主に三種類である。つまり、芳香族ポリマーであるリグニン、ならびに多糖であるセルロースおよびヘミセルロースである。ここで興味深いことに、リグニンはその分解物として芳香族アルデヒドであるバニリンおよびシリングアルデヒドが知られている。これらのリグニン誘導体はアルデヒド基を有しているため、KF-3CRの反応試剤となりうる事が期待される。一方、セルロースは歴史的にも重要な膜材料である。このため、膜材料であるセルロースの表面からリグニン分解物を放射線グラフト重合により固定できれば、リグノセルロースの化学構造を人工的に組み替えられる。さらに、得られるバイオ由来有機ハイブリッド材料の膜表面にはバイオ由来アルデヒド基が存在することから、KF-3CRによる表面修飾反応が可能となる。これにより、バイオマス由来であり、かつ任意の機能性を付与可能な有機ハイブリッド材料が合成可能になる。

上述の仮説を実験的に実証したので、以下に紹介する。はじめに、リグニン分解物であるバニリンおよびシリングアルデヒドがKF-3CRに適用可能か検証した(図4)<sup>8)</sup>。このため、バニリン誘導メタクリレート(MV)およびシリングアルデヒド誘導メタクリレート(MS)のフリーラジカル重合により、それぞれ対応するポリメタク

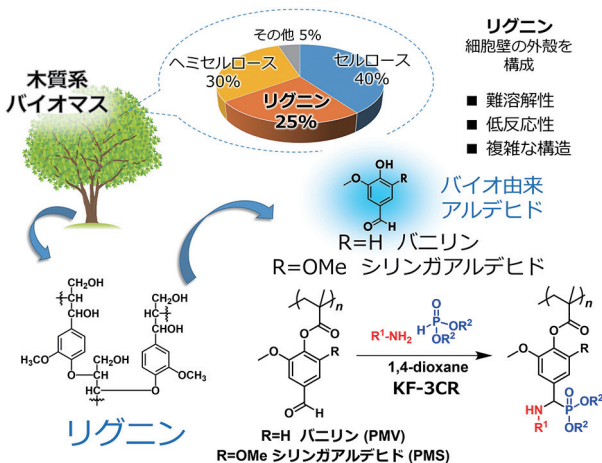


図4 バイオマス由来物質と多成分連結反応との組み合わせ

リル酸誘導体であるPMVおよびPMSを合成した。つづいて、PMVもしくはPMSを1,4-ジオキサンに溶解させた後、アルデヒド基に対して過剰量の芳香族アミンおよびフォスファイトを加え、80℃で反応を行った。前項までの反応と同様に、KF-3CRによりPMVおよびPMSは対応する高分子状 $\alpha$ -アミノリン酸エステルへと変換された。以上のことから、リグニン誘導物質であるバニリンおよびシリングアルデヒドが多成分連結反応の反応場として有用である事が判明した。

以上のように、リグニン分解物であるバニリンおよびシリングアルデヒドがKF-3CRに対して非常に高い親和性を示したことから、つづいてバイオマス由来有機ハイブリッド材料の合成ならびにその表面修飾反応による機能化に軸足を移したい(図5)。具体的には、セルロースを膜材料とし、リグニンから誘導可能なMVをビニルモノマーとした放射線グラフト重合を試みた<sup>9)</sup>。セルロースが高極性であることから、放射線グラフト重合は、メタノールを溶媒とした溶液重合を選択した。重合前に、不活性ガス下でセルロース膜に対して50 kGyの $\text{Co}^{60\gamma}$ 線照射を行った。続いて、得られたセルロース膜をMVのメタノール溶液中、60℃でグラフト重合を行った。その結果、グラフト率が約57%となり、セルロース膜からのMVのグラフト重合の進行が強く示唆された。さらに、放射線グラフト重合前後でのFT-IRスペクトルを測定した結果、重合前には観測されなかったアルデヒド由来( $1,692\text{ cm}^{-1}$ )およびエステル由来( $1,753\text{ cm}^{-1}$ )の強いピークがグラフト重合後には観測された。このことから、セルロース膜上にPMVがグラフトされたことが判明し、ここで得られたグラフト膜をCell-g-PMVと略す。つづいて、Cell-g-PMVに対するKF-3CRを行った。具体的には、アミン基質として $p$ -アニシジンを用い、フォスファイト基質としてジイソプロピルフォスファイトを用いた。Cell-g-PMVに対するKF-3CRを上記のアミンおよびフォスファイトを用い、1,4-ジオキサン中、80℃で表面修飾反応を行った。反応

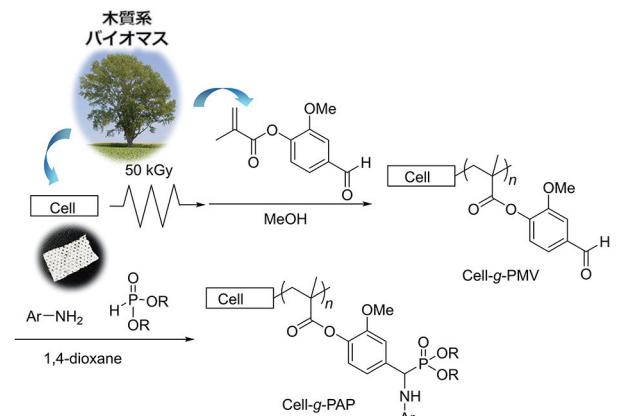


図5 バイオマス由来物質と多成分連結反応との組み合わせによるバイオマス由来有機ハイブリッド材料の合成

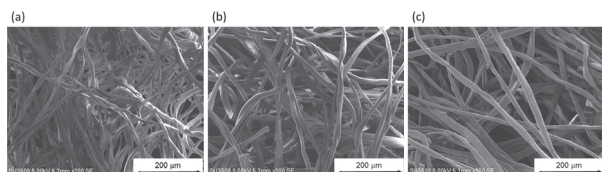


図6 反応前後でのセルロース膜のSEM画像

(a: セルロース膜, b: Cell-PMV, c: Cell-g-PAP) Reprinted with permission from ref. 9. Copyright 2019 American Chemical Society.

の進行はFT-IR測定により行い、KF-3CRの進行に従いアルデヒド由来( $1,692\text{ cm}^{-1}$ )のピークが消失し、一方でリン酸エステル基( $979\text{ cm}^{-1}$ )に由来するピークが強く観測された。以上の結果から、KF-3CRはセルロース膜表面でも高効率に進行し、 $\alpha$ -アミノリン酸エステル基が表面に固定化されたセルロース膜(Cell-g-PAP)が得られた。セルロースはその化学構造からもわかる通り、表面構造は親水性である。一方、セルロースに対して放射線グラフト重合ならびに続くKF-3CRによる表面修飾を経ることで、膜表面が疎水的になることが実験的に判明した。表面の物性が変化した一方、セルロース膜の繊維構造が維持されることも併せて判明した(図6)。このことは、放射線グラフト重合と多成分連結反応との組み合わせにより、バイオマス由来材料の材料特性を制御可能であることを萌芽的ではあるが示している。

#### IV. 展望

本稿では、放射線グラフト重合と多成分連結反応による新しい材料の表面改質を紹介した。放射線グラフト重合ならびに多成分連結反応は共に長い歴史を有する反応形式である。しかしながら、その融合は意外にも最近になり実現された。Strecker三成分連結反応が1850年代に発見されたことを考慮するに、多成分連結反応と放射線グラフト重合との融合はまさに夜明けである。繰り返しとなるが、放射線グラフト重合はどんな材料に対しても基本的に適用可能である懐の深さがあり、表面開始リビングラジカル重合の発展に伴い、その実質的な優位性が改めて脚光を浴びている。とりわけ、持続可能な開発目標(SDGs)の実現が求められる昨今、上記の観点は今後重要性が増すと考えられる。さらに本稿で示した通り、放射線グラフト重合と多成分連結反応との融合はバイオマス由来材料の高機能化にも道筋を示しうると考えている。従って、今後は放射線化学者のみならず、高

分子化学者や材料化学者の参画により、真に放射線グラフト重合と多成分連結反応との融合の特徴を引き出しうる材料創成の開拓が望まれる。

#### — 参考資料 —

- 1) Kreye, O.; Tóth, T.; Meier, M. A. R., Introducing Multicomponent Reactions to Polymer Science: Passerini Reactions of Renewable Monomers. *J. Am. Chem. Soc.* **133** (6), 1790-1792, (2011).
- 2) Kakuchi, R., The dawn of polymer chemistry based on multicomponent reactions. *Polym. J.* **51** (10), 945-953, (2019).
- 3) Kakuchi, R., Multicomponent reactions in polymer synthesis. *Angew. Chem. Int. Ed.* **53** (1), 46-8, (2014).
- 4) Kakuchi, R., Metal-Catalyzed Multicomponent Reactions for the Synthesis of Polymers. In *Advances in Polymer Science*, Springer Berlin Heidelberg; 2015; pp 1-15.
- 5) Moldenhauer, F.; Kakuchi, R.; Theato, P., Synthesis of Polymers via Kabachnik-Fields Polycondensation. *ACS Macro Lett.* **5** (1), 10-13, (2016).
- 6) Kakuchi, R.; Theato, P., Efficient Multicomponent Postpolymerization Modification Based on Kabachnik-Fields Reaction. *ACS Macro Lett.* **3** (4), 329-332, (2014).
- 7) Omichi, M.; Yamashita, S.; Okura, Y.; Ikutomo, R.; Ueki, Y.; Seko, N.; Kakuchi, R., Surface Engineering of Fluoropolymer Films via the Attachment of Crown Ether Derivatives Based on the Combination of Radiation-Induced Graft Polymerization and the Kabachnik-Fields Reaction. *Polymers* **11** (8), 1337, (2019).
- 8) Kakuchi, R.; Yoshida, S.; Sasaki, T.; Kanoh, S.; Maeda, K., Multi-component post-polymerization modification reactions of polymers featuring lignin-model compounds. *Polym. Chem.* **9** (16), 2109-2115, (2018).
- 9) Hamada, T.; Yamashita, S.; Omichi, M.; Yoshimura, K.; Ueki, Y.; Seko, N.; Kakuchi, R., Multicomponent-Reaction-Ready Biomass-Sourced Organic Hybrids Fabricated via the Surface Immobilization of Polymers with Lignin-Based Compounds. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **7** (8), 7795-7803, (2019).

#### 著者紹介



覚知亮平 (かくち・りょうへい)

群馬大学 理工学府 分子科学部門  
(専門分野/関心分野) 高分子合成/多成分  
連結反応, 放射線グラフト重合, 超分子化学

## NIMBY なごみの行方

フリージャーナリスト 井内 千穂

人間が活動すれば必ずごみが出る。日頃ホイホイごみを捨てながら、その行き先をほとんど意識することもない我が身を省みると、NIMBY(Not In My Back Yard)という言葉が胸に突き刺さる。

東京都が主催する「お台場埋め立て地見学会と周辺海域無料クルーズ」に参加してみた。東京港界隈には、時代と共にごみで埋め立てた土地が増え、中には緑あふれる「海の森」に生まれ変わって、来たるオリンピックの馬術競技場になるごみの山もある。その脇にボートやカヌーの競技会場になる水路があり、橋を渡ってバスは中央防波堤外側処分場に入った。広大な敷地に東京23区のごみが焼却・破碎などの中間処理を経て運び込まれ、埋められ、覆土され、その上にさらに埋め立てられていく。可燃ごみでも資源ごみでもない不燃ごみの中には、ゴマ油のびんやツナの空き缶のように食品にまみれたものもある。あちこちにパイプが立っているのは、そういうごみから発生するメタンガスを抜くためだとか。捨てた時の袋ごと破碎されるので、埋め立てられた斜面の端をよく見ると、色とりどりのビニールの断片がヒラヒラ飛び出していてゾッとした。あれは私が捨てた袋の切れ端かもしれない。

かつての夢の島の惨状や江東区と杉並区との間で起きた激しいごみ戦争の話を書くにつけ、各区にごみ清掃工場を建てて中間処理したごみを集約して東京港に埋め立てるという「解決」にどうにか到達した先達の努力に頭が下がる。中央防波堤外側処分場はあと50年ぐらいで満杯になるそうだ。隣接して埋め立てが進む新海面処分場もいずれは満杯になるだろう。その後はどうすればいいのか？バスを降りてクルーズ船に揺られていると、西の空に夕陽が沈み、大井コンテナふ頭に並ぶガントリークレーンのシルエットが、未来の東京湾にできるごみのサバンナに行くキリンの群れのように見えた。

## Column

### 立場の違いによって生じる相互理解の難しさ

京都教育大学附属京都小中学校9年生 上野 和花

私が以前参加した科学技術振興機構交流事業で、「いくら科学的に数値で安全を示しても、国民の心には響かない」「これは文系の人と理系の人(科学者)の考え方の違いだ。」と大人達が白熱した討論をしているのを見たことがある。私は当時まだ原発に対する知識が殆ど無かったため特に気にかけることはなかったのだが、学びを深めていくうちにこの時の討論を思い出し興味を持つようになった。

「最終処分場が決まらない」「全量全袋検査がやめられない」など解決の糸口が見つからない現実がある。その原因は、「全て政府の政策や最先端の科学技術、様々な数値データといったものに対する国民の不信感に起因している」という意見を色々な場面で耳にしている。その「一般の人々の不信感」はとても複雑で、データを提示しただけでは決して解決しない問題であるようだ。

実際に私もテレビからの情報や沢山の方々から話を聞く中で、「0だから大丈夫」「基準値を超えていないから大丈夫」との声を聞くことが多い。しかし、その「大丈夫」という言葉に問題解決への糸口、説得力があるのか？一般の人々の不信感が払拭できるのか？と考えるようになった。科学者の提供するデータを元に未来に向かって行動する、その為にはそれぞれの立場に寄り添いながら現状を知ることや未来を考えることの大切さを訴える人も欠かせない…

それが先述の討論で聞いた文系の人という意味なのだろうか。この春私は高校生になりほどなくして文理選択を迫られる。将来どのようにこの課題に取り組むのか立ち位置をよく考えていきたい。



## 広島高裁，伊方3号の運転を差し止め

本誌 佐田 務

広島高裁が伊方3号機の運転を差し止める仮処分を認めた。高裁は、敷地近くの活断層調査が不十分であり、噴火による火山灰量の想定も過小であると評価。当該発電所が基準に適合したとした規制委の判断そのものも、不合理であるとした。

福島原発事故以降、原発の運転停止を求める司法判断がすでに5件に達している。国や電力会社は、新規制基準によって原発の安全性は大幅に向上した結果、そのリスクは許容範囲にあり、再稼働は合理的だと見ている。しかし、それに異を唱える今回のような司法判断では、原発の事故リスクは今も許容範囲を超えるとし、その結論を裏付けるための理由を強引に列挙している印象をうける。

かつての司法は、原発のような専門性が高い分野の問題に対する判断の根拠を、当該分野の専門家による知見に委ね、それによって判断にともなう複雑性を縮減させてきた。けれども福島原発事故は、そのような司法の姿勢に内省を迫るできごととなる。別の言い方をすれば、裁判官の中には福島原発事故の衝撃を強く受け、この事故を防ぐことができなかったことや、事故の影響を軽減させることができなかったことに対する悔悟の念をもっている人がいることは、想像に難くない。

さらに、この問題の本質は、今回の高裁決定のような司法判断と科学技術の知見が食い違うことにあるのではない。科学技術をめぐる問題の中でも、原発や遺伝子組換のようなテーマは対立的な論争になりがちだ。それらの受容をめぐる問題は客観的なデータで決着がつく話ではなく、価値の調整を含む問題である。このようなテーマについて、今の日本においては多様な意見を調整する社会的な回路がないことに、構造的な問題がひそんでいる。

## Column

### オーストリア，スロバキア，チェコの原発三国志

コメニウス大学医学部英語コース 妹尾 優希

プラハよりこんにちは。2020年元旦は、列車で4時間のチェコの首都プラハにきました。本稿では、スロバキアとチェコとオーストリアの原発事情について触れたいと思います。以前も紹介しましたが、2016年のスロバキアのエネルギー発電量のうち原子力発電が占める割合は57%で、反原発国である隣国のオーストリアとの間で30年にも及ぶ争いの種となっています。対して同じくオーストリアに隣接するチェコの原子力発電比率は、約35%と国際的に見て決して低くはありません。

そもそも、チェコは欧州きっての原発推進国です。2011年の福島第一原子力発電所事故後に、様々な国で原子力発電への懸念が高まる中、チェコ産業相は2011年10月に、2060年までに原子力発電率を80%にするとの推進方針を示しています。また昨年11月13日には、チェコ首相のアンドレイ・ハビシュが2036年までにドコバニ原子力発電所に新規原子炉を建設すると発表しました。同原子力発電所は、チェコの南側に位置し、プラハまで約180km、オーストリアの首都ウィーンまで約120kmの場所にあります。対して、オーストリアより新規原子炉の増設に対して提訴されているスロバキアのモホフツェ原子力発電所は、ウィーンまで180kmの位置にあります。

原子力発電を巡る争いにより、オーストリアとスロバキアの間には国際送電網は繋げられておらず、オーストリアは代わりに【原子力発電からではない保証書付き】の電力をチェコやハンガリーより輸入しています。名目上は、原子力発電を支援せずに、100%原子力発電フリーの国内給電をしていると主張するオーストリアですが、チェコの原子力発電の開発が進む中、今後の両国の電力事情をめぐるダブルスタンダードの観察が楽しみです。

## 知る・共有する・議論する

福島県立安達高等学校 3年 服部 杏菜

昨年の台風 19 号の影響で、福島第一原発事故後の除染で出た廃棄物を入れたフレコンバックが一部、福島県内の仮置き場から河川に流出したらしい。私が住む市でも 15 袋流出した。環境省が言うには、回収地点周辺の水質や空間線量に影響は確認されていないそう。それが本当ならばひとまず安心だ。しかし、問題は結果としての悪影響の有無以前にあると思う。まず 1 つに、なぜ対策が出来なかったのか。仮置き場を設置した時点で、実際にリスクが高くなる条件を満たす状況にならなくても、起こりうるリスクを考えることは出来たはずだ。ましてや今回の事は前例があった。それなのにそのリスクをヘッジしようとしなかったのは甚だ疑問だ。とはいえ、私はこうしてただ疑問に思うことしか出来ない。そこで 2 つ目の問題だ。この出来事が家庭や学校、その他私が属するコミュニティで話題に上らなかったのだ。知らなかった人、知ってはいた人、知っていてかつそれについて考えた人、それぞれいると思う。知らないことは罪と言うが、知っていたにも関わらずそれを共有したりそれについて議論したりしないことも罪だと思う。その意味で私も罪人であるので偉そうには言えないが、「知る・共有する・議論する」ことの難しさと重要性を再確認した。

昨年したことなど何を今更、と思う。しかし「何を今更」な事を掘り返し、時空を超え世代を超え議論することで、改めて知ることや新たに気付くことがあるのではないか。少なくとも私はそう信じているし、それが出来る人間でありたい。

## Column

### 「たれば」がふさわしからぬとき

フリーライター 服部 美咲

JR 常磐線が 9 年ぶりに全線で再開する。沿線では、東京電力福島第一原発事故による帰還困難区域の避難指示解除も始まる。周辺地域に人家の明かりが増え始めた。変化を受け、廃炉の工程が変更された。放射性物質飛散を抑制する。記者会見で、芸人の女性が「周辺環境が変わらなかつたら、廃炉工程に変更はなかったのか」と訊いた。廃炉の指揮を執る東電の小野明氏が制し、「この件に“たれば”はない」と語気を強めた。

福島県川内村は、モリアオガエルの群生地知られる。一時全村で避難した。翌年の帰村宣言と共に、村の商工会長はひとり帰宅した。その夏、「蛙が鳴かなかった」という。蛙の村に根差して生きる人に、蛙の声が届かない——。川内村の人口は、原発事故前の 8 割以上にまで回復した。孤独を忍んだ人の覚悟と無関係ではないはずだ。一方で、家族の就学や就職などのために、帰還を望みながらも別天地で新たな生活を始めた人もいる。いずれも、考え抜いた決断だ。他者が安易に口のできる“たれば”があろうはずもない。

福島第一原発の構内では、日々数千人が廃炉作業を続ける。作業環境が大きく改善されたとはいえ、厳しい作業が続く。原発周辺地域に再び日常が築かれることを願う作業員の声も聴く。周辺地域の復興は廃炉作業の最大の目標である。「もし避難指示解除がなければ」「もし住民の帰還がなかったら」。配慮に欠く「たれば」への回答を拒む小野氏の脳裏を、住民や現場の人々の顔が過ったのではないのか。

## 核セキュリティ入門

## 第1回 核セキュリティとは何か？

京都大学 宇根崎 博信

連載講座「核セキュリティ」を始めるにあたって、核セキュリティとは何か、原子力安全と核セキュリティとの関連、原子力研究の中での核セキュリティ研究の位置づけなどについて解説する。

**KEYWORDS:** Nuclear Security, Nuclear Safety, Physical Protection

## I. はじめに

本号より、新たな連載講座「核セキュリティ入門」を始めることとなりました。本連載講座は、日本原子力学会の「核セキュリティ・保障措置・核不拡散連絡会」のメンバーが主たる執筆者となり、核セキュリティについて、読者の皆さんにできるかぎりわかりやすく、かつ興味を持っていただくように解説することを目指してスタートしたものです。そして、第1回目では、そもそも核セキュリティって何？ということについて、あえて「ですます」表現を使って、核セキュリティという少し仰々しいコトバについて、親しみを感じていただけるように解説を試みることにいたしました。

「核セキュリティ」という言葉、読者の皆さんはどこかで耳にしたことがあるかと思います。その一方で、みなさんがもし「核セキュリティって何？」と問われたら、どのように答えれば良いでしょうか？

そもそも「セキュリティ」という言葉、実は日本語でぴったりのコトバがなく、「ホームセキュリティ」とか「インターネットセキュリティ」というように、そのままカタカナで使われていることがほとんどいいと思います。

まず、セキュリティについて考える上で、私たちの暮らしに最も身近なセキュリティであるホームセキュリティについて考えてみましょう。私の暮らしているK町では、昔ながらの近所付き合いがいまだに健在で、地元の方々はお出かけするときもご自宅は開放したまま、近所の皆さんが自由に行き来していることもしばしばです。

一方で、残念ながらこのような良き時代の名残があるところは少なくなってきており、今日では「ホームセ

キュリティ」という言葉が生まれてきました。見知らぬ者が入ってこないようにご近所さん同志がお互いを見守る、お宝が盗まれないようにするために戸締まりを厳重にする、火災を引き起こさないようにガスコンロをきちんと消す、見回りを行って監視を強化するとともに賊に対する抑止力を高めるなど、基本的でシンプルな「戸締まり用心、火の用心」に加えて、近年の社会情勢の変化を踏まえて、火災や侵入者を検知し、在宅していない時でもメールによる自動通知を行うなど、最新のテクノロジーを導入することで身近に存在する脅威に対抗している。これが今日のホームセキュリティであると言えます。

さて、本講座の主題である核セキュリティについても、ますます増加してくる脅威と、それに対する対策という観点で整理をして考えると、話が分かりやすくなると思います。脅威とは何か、その脅威によってもたらされるリスクは何か、対策としてどのようなものがあるのか、その対策をより効果的なものとするためにはどのような技術が必要となるのか。そして、それらのための制度はどのようになっているのか、国際的な動向はどのようになっているのか。これらについて、これからの連載で解説していくことにいたします。

## II. 原子力安全と核セキュリティ

## 1. 原子力安全と核セキュリティとの関係

本誌2019年4月号の原子力学会60周年記念特集において、筆者は、核セキュリティと核不拡散・保障措置の観点から今後の原子力学会に期待することについて寄稿いたしました。その中で、3S(Safety, Safeguards, Security)の中で、特にセキュリティについて書かせていただいた文章<sup>1)</sup>に若干の手を加えて、原子力安全と核セキュリティとの関係について紹介いたします。

原子力の安全は、工学的な安全、核セキュリティ、核不拡散・保障措置の3本柱(以降、「3S」と呼びます。)か

*Introduction to Nuclear Security (1) ; What is Nuclear Security?* : Hironobu Unesaki.

(2019年10月1日 受理)



ら成り立っており、どの「柱」が欠けても、原子力の安全はその礎から崩れ去ってしまうことは言うまでもありません。

しかしながら、これまでの状況や動向を振り返ってみると、3Sのうち、核セキュリティと核不拡散・保障措置に係る学術的な活動への総合的な取り組みは必ずしも古くから充実していたとはいえないのでは、と感じています。振り返ってみると、これらの方面での本格的な取り組みがなされるに至ったのは、特に平成に入ってから大きな動き、すなわち、原子力に関連する社会科学分野の重要性の認識の高まりを受け、社会科学と自然科学との接点の好事例としての核セキュリティと核不拡散・保障措置の認識があったものと考えています。

この点において、まず、原子力安全と核セキュリティとの関係について述べることにいたします。ここでは、私たちが普段実感する「セキュリティ」の代表として、空港におけるセキュリティ措置を例にとってみます。

皆さんもご経験のとおり、空港では、搭乗口に向かう途中の保安検査場で、搭乗券の確認・手荷物検査・携帯品検査等のチェックが行われ、それをパスすると、搭乗口で再度搭乗券の確認が行われます。また、近年では、搭乗予定者が全員指定された座席に搭乗していることを再度確認することもしばしばです。到着地においても、機内預け荷物の受け取り場所に入ると逆戻りできない、といった動線管理が行われています。加えて、空港内の各所には監視カメラが設置されており、不審な行動が監視されています。機内においても、操縦席は厳重な施錠管理がされています。

筆者が子供の頃に飛行機に乗るときは、搭乗券確認と手荷物検査、携帯品検査はあったものの、機内では希望すれば操縦席を見学できました。今では考えられないことですが、極めて単純な整理をすると、航空安全の世界では、近年の社会情勢の変化を踏まえ、セキュリティ面での脅威の想定が従前の(単純な)ハイジャックから広域な物理的・社会的被害を生じうる組織的なテロ行為へと格上げされている、そして、そのことが、セキュリティ措置の強化につながっている、ということが出来ます。

このような情勢の変化を受けて、セキュリティ技術の面でも、従前のX線透過法による手荷物検査と金属探知機によるボディチェックから、ボディースキャナーや3D手荷物検査システムなど、後方X線散乱やミリ波技術を応用したより高度な検知装置が導入されると共に、多重の本人確認、なりすましや不正な荷物持ち込み防止のための動線管理などのソフト的防護措置が強化されるに至っています。当然ですが、筆者が子供であった50年前のセキュリティ措置が全く通用しないのが現状です。

さて、原子力安全の世界のうちの核セキュリティや核不拡散・保障措置についても、このような流れは全く同

様です。9.11テロをはじめとする社会的脅威の顕在化、社会情勢の変化を受けた想定脅威の変化があり、それに対応するための制度的・技術的措置の改革と高度化、そして、そのニーズを受けた技術開発の進展は目覚ましいものがあります。これからの連載で詳しく述べることにいたしますが、例えば技術面では、核物質検知における小型加速器技術の応用や放射線検出システムの高度化、核鑑識(nuclear forensics)における物質分析技術の高度化や画像処理技術の応用など、学際的かつ横断的な取り組みが活発に行われています。また、制度面においても、内部脅威者(インサイダー)に対する規制上の対策としての信頼性確認制度の導入や情報管理・鍵管理措置の強化、原子力施設のデジタル化の進展を踏まえたサイバーセキュリティへの対応の強化など、国際的な視点をも考慮して、社会的・技術的な変革、進展を踏まえた制度強化が進められています。

このように、核セキュリティは、工学的な安全に対するものと同様もしくは場合によってはそれ以上に社会的な要請を踏まえた早いペースでの変革が要求されるものということができ、それに呼応して関連する技術を開発して、それを適切な制度の下で適時かつ確に社会にインプリメントすることが要求される分野であるといえます。言い換えると、核セキュリティは、社会と科学技術のインターアクションの好事例として、これからの原子力研究の中でより一層の進展が望まれる分野であり、魅力ある横断的な分野と考えている次第です。

このような考えのもと、これからの連載では、核セキュリティと原子力研究との深いつながりを様々な視点から紹介していきたいと思えます。

## 2. 核セキュリティの基礎：何を、何から守るのか？

さて、セキュリティを考える上では、「何を、何から守るのか？」ということが最も基礎的なものとなります。この観点は、セキュリティだけではなく、様々な「安全」のあり方を考える上でも共通するものです。この点において、有意な損害を引き起こしうる脅威と、それに対する対抗措置という観点で整理をすることにより、原子力安全、保障措置、核セキュリティの関係をよりスッキリとした形で理解できると考えます。

脅威はどこにでも存在します。これを、外部からの脅威なのか内部からの脅威なのか、意図しないものなのか意図されたものなのか、という観点で分けていきましょう。

まず、システムの境界の外から襲ってくるものとして一番わかりやすいものは地震や竜巻等の自然災害でしょう。これらは、人間の意図が介在せずに襲ってきます。また、機器の故障は、システムの内側で発生しますが、自然災害と同じく、人間の意図とは関係なく生じるものと考えることができます。これらに対して、(極端な例

ではありますが)例えばシステムにミサイルを撃ち込むという行為は、システムの外部からの脅威ですが、人間の意図が介在しています。また、システムの中からわざと機器を故障させる、システムにとって重要なモノを盗み出すということも人間の意図が介在しています。

このような観点から整理すると、(工学的な)原子力安全は「人為的/意図的でない脅威」に対する措置であることとらえることが可能だといえると考えます。ということは、これの反対である「人為的/意図的な脅威」については3Sの残り二つ、すなわち核セキュリティと保障措置で担保するもの、と整理することができます。核セキュリティと保障措置との間にはオーバーラップする領域が存在するのですが、簡単にいうと、核兵器開発につながり得る(国家レベルを含む)組織的な行為を阻止するための様々な措置が保障措置であり、施設の破壊と核物質の盗取を意図した組織・個人の行為(特にテロ行為や社会的騒乱)を阻止するための措置が核セキュリティである、と整理できます。非常に乱暴な整理ではありますが、次のように考えるとわかりやすいのではないのでしょうか。

「ある国家のある原子力施設Aにおいて、申告された量や種類、使用目的の核燃料物質が存在し、申告された内容に沿って利用されている」というケースを考えましょう。加えて、この施設では、核燃料物資が第三者によって盗まれないような(上述した核セキュリティ)措置が施されていると仮定します。

さて、その組織を運営管理する最高主体である国家が、組織的にかつ意図的に核燃料物質を申告外の目的で使用し、秘密裡に核兵器開発を行っている場合は、核セキュリティ措置ではその行為を防ぐことはできません。仮に核セキュリティ措置で核燃料物質の不審な取り扱いを検知できたとしても、国家が組織的に意図的にそれらの検知結果を無視して何事もなかったことにする、ということすら可能かもしれないからです。このような不法行為を阻止するためには、この国家そのものが信頼できないという前提に立って、その国家からは独立している第三者機関が客観的に状況を分析し、評価して確認するというプロセスが不可欠です。この役割をはたしているのがIAEAであり、施設や国家から提出される情報の信ぴょう性を分析するとともに、施設現場において核燃料物質の実在庫状況や利用状況を検査し、申告内容との整合性を確認することで、国家による組織的かつ意図的な犯行に至っていないことを確認する(IAEAの査察官は、“We trust you, but we have to verify.”という言葉をしばしば使います)。そのことで、世界における核兵器の拡散を防止するという役割を持っている機関です。

一方で、例示した同じ施設に対する個人・小組織による悪意をもった核燃料物質の盗取や原子炉施設の破壊による放射性物質の放散や社会的騒乱の展開については、完全に核セキュリティの世界での課題であり、例えば秘

密裡の核燃料物質の盗取は、万が一核セキュリティ措置で検知できなかったとしても、保障措置検査における実在庫検認で検知できる可能性があります。このように、核セキュリティと保障措置とは前提としている脅威に異なる点がありますが、お互いが相補的に機能できる可能性も大いにあることがお分かりいただけるかと考えます。

### 3. 核セキュリティの二つのターゲット： 盗取と妨害破壊行為

ここまで原子力安全、核セキュリティと保障措置との関連を説明してきましたが、以降、核セキュリティについてももう少し踏み込んでいきます。

先の例の中でもすでにふれたとおり、核セキュリティで想定される不法行為は「核燃料物質に対する盗取(Theft)」と「施設に対する妨害破壊行為(Sabotage)」の二つに大別されます。この二つは、前者が核燃料物質を、後者が施設を対象としているという点で大きく違っており、セキュリティ面では異なったアプローチが要求されます。

まず、盗取は、核燃料物質を意図的に盗み、それを放射性物質飛散装置(いわゆるダーティボム)や核兵器に転用することを目的とした不法行為で、また、RIセキュリティにおいては、盗取した放射性物質を用いた被ばく事故を引き起こすための材料として用いるというリスクも考える必要があります。一方の妨害破壊行為は、原子力施設等を人為的・意図的に破壊することによって、人為的に原子力・放射線事故を引き起こして環境に悪影響を及ぼすことを目的としたものです。さらに、これらの不法行為を達成することにより、社会的な混乱が引き起こされることもリスクのうちを含めて考えるのがふさわしいと考えています。

さて、核セキュリティの同意語として我が国の法令等で用いられている「核物質防護」という言葉からも推察できるように、歴史的には、核セキュリティは、第一義的には核物質を防護することによる核兵器拡散の防止策として産まれた、すなわち、上述した2つの不法行為のうち、盗取が主なものと想定されていたと理解することができます。このことは、現在、核セキュリティの要求レベルを示す「区分(Category)」が、核兵器転用の蓋然性の観点から核物質の種類と量から決められていることからもうかがい知ることができます。区分表においては、高濃縮ウランやプルトニウムなど、核兵器の材料となりうる蓋然性の高い物質については、低濃縮ウラン、天然ウラン等のそれ以外の物質に比べ、はるかに少ない量でもより上位の区分(=より厳格な措置が要求される)に区分されます。また、照射済みであって、表面線量が一定値を超える核燃料物質(使用済み燃料等)については、表面の放射線量が高いために賊がそれを盗取できないとい



う、自己防護機能というべき性質を有するという一方で、区分が1ランク下がる、という扱いになっています。

それに対して、妨害破壊行為については、工学的な原子力安全における各種の事故解析結果をも参照しつつ、安全性に係るシステム機器が人為的に無条件で破壊されたときに、システム全体としてどのような挙動を示すのかということを分析し、その機器の破壊が有意な環境影響につながり得るか否かで、防護すべき機器・施設を特定し、適切な防護措置を施す、という流れです。すなわち、核燃料物質そのものという観点ではなく、原子炉施設としての安全設計と密接に関連したものであると言えます。

このように、核セキュリティの対象が核燃料物質と施設の二つであることを明確にするため、IAEAの核セキュリティ関連文書等では、“Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities”と書かれています<sup>2)</sup>。

核セキュリティの目標である盗取と妨害破壊行為は根本的に見ているものが違っているため、核セキュリティ措置といっても、様々なハード、ソフト両面の対策・措置を組み合わせ、この二つの目標を同時にかつ効果的に達成する必要があります。

ハード的な措置は、強固な壁で対象となる核燃料物質を守る、不法者の侵入を検知する、主要な出入口やフェンス等をカメラ等で監視する等の措置が代表的なものとして挙げられます。核セキュリティの上では、まずハード的(「物理的」)に核物質を防護することが肝要であり、核物質防護の意味で“Physical Protection”(直訳すると「物理的防護」)という言葉が一般的に使われている所です。また、原子力規制上の核物質防護措置以外でも、核燃料物質の盗取が発生した後に如何にしてそれをトレースして検知するかという核物質検知技術や核鑑識技術も、核セキュリティをより幅広い視点から強化するための重要なハード対策であると位置づけることができます。

一方で、ソフト的な措置は、ヒトに対する措置と情報に対する措置に大別され、前者については立入許可証の発行と主要な境界での出入管理や、その個人が核セキュリティ上十分な信頼性を有することを確認する「個人の信頼性確認」等が、後者については核セキュリティ措置に影響を及ぼし得る各種情報の適切な管理・保管が代表的なものとして挙げられます。

ハード的な措置をいくら施しても、その効果を存分に発揮するためには緻密なソフト的な措置が必要であり、逆に、いくら厳密なソフト的な措置を施しても、万が一の外部からのアタックに対してハード的な措置が脆弱であれば核セキュリティを維持することはできません。このことは、工学的な原子力安全の確保において、工学的な安全機能の充実と、それを適切に運用できるソフト的なシ

ステムの充実を両立させることと全く同一の考え方であると言えると思います。

核セキュリティと工学的原子力安全が、特に妨害破壊行為の面において密接に関連したものであるという点は、原子炉施設の設計段階において、核セキュリティ措置を考慮して設計するという“Security by Design”の考えや、工学的原子力安全のための措置と核セキュリティ措置がお互いに悪影響を及ぼさないことを十分に担保するというセーフティ-セキュリティのインターフェース<sup>3)</sup>という概念に繋がっています。

### Ⅲ. 核セキュリティにまつわる話題： これからの連載に向けて

以上、核セキュリティという考え方を理解する上で、脅威とは何か、その脅威によってもたらされるリスクは何か、対策としてどのようなものがあるのか、ということを書いてきました。

これからの連載においては、核セキュリティに関連する様々な話題について、それぞれの専門家の方々から解説いただきます。

第2回では、核セキュリティの強化に向けた取り組みについて、これまで国際的にどのような取り組みが行われてきたのかという点について、制度の発展の経緯を含めて紹介いたします。歴史的な経緯から始めて、特に近年における国際的な核セキュリティ強化の動きを紹介することにより、なぜ核セキュリティが今日重要なトピックスとなっているのかということをお話いただけます。

第3回および第4回では、核セキュリティに関連した技術的な取り組みの一環として、核物質検知に関わる技術開発と、核鑑識(Nuclear Forensics)に関わる技術開発に関する最新の研究開発動向を紹介いたします。この分野は、保障措置とも密接に関連したものであり、また、技術的には加速器開発、放射線計測等さまざまな原子力・放射線関連分野の進展と歩みを共にしている、総合工学として近年注目を集めている分野です。読者ご自身の専門分野が、核セキュリティ技術とつながっていることを発見いただけることもあるのではないのでしょうか。

第5回では、本稿でも触れた原子力安全と核セキュリティのインターフェースについて詳しくご紹介いたします。原子力安全と核セキュリティのインターフェースは、我が国原子力規制に対して平成28年にとりおこなわれたIAEAの総合規制評価サービス(IRRS)においても、原子力安全とセキュリティに対する規制がより一層統合された形で行われるような仕組みの構築が課題として明らかとなっており、以来、原子力規制の中でも重要課題として取組が進められているものです。工学的安全設計や安全対策において、核セキュリティという視点が



如何に重要なものであるかということについて、より一層の理解を深めていただけることを期待しています。

最終回となる第6回では、次世代炉・次世代燃料サイクルにおける核セキュリティについてご紹介いたします。工学的な原子力安全と核セキュリティの関係が、次世代の原子力システムにおいてどのような重要性を持つのか、そのために要求される技術開発、学術的取り組みはどのようなものなのか、特に原子力工学を志す学生の皆さんにとって興味深い解説となることを期待していません。

#### IV. おわりに

本稿では、核セキュリティ入門として、核セキュリティそのものの説明、原子力安全とのかかわりからスタートして、制度・技術の両面から学術的な発展が期待できることがらを紹介いたしました。次回以降は、それぞれの各論について、より専門的な観点から、最先端の状況を紹介します。本連載講座を通じて、普段は別世界のもののように感じられるかもしれない核セキュリ

ティが、実は様々な研究テーマと密接にかかわっていること、そして何よりも、核セキュリティが原子力安全にとって欠かせない重要な柱であることをお伝えできることを祈念しています。

#### — 参考資料 —

- 1) 宇根崎博信, 3Sの協働プラットフォームとしての原子力学会への期待, 日本原子力学会誌 2019年4月号, 日本原子力学会, 2019.
- 2) IAEA, "Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities - Implementation Guide", Nuclear Security Series No.27-G, STI/PUB/1760, 2018.
- 3) IAEA, "The Interface Between Safety and Security at Nuclear Power Plants", INSAG-24, 2010.

#### 著者紹介



宇根崎博信 (うねさき・ひろのぶ)  
京都大学複合原子力科学研究所  
(専門分野/関心分野)原子炉物理学, 原子力工学, 核燃料管理, エネルギー政策, エネルギーセキュリティ



### 書籍販売のご案内

#### ■『東日本大震災における原子力分野の事例に学ぶ技術者倫理』

一般社団法人日本原子力学会 倫理委員会編, B5判 73ページ, 定価 1,000円(税別・送料別)

本事例集は、2011年3月11日に発生した東日本大震災における原子力発電所に係わる活動を事例として、今後遭遇するかもしれない事象に対してどのように向かい合ったらよいのか、今、備えておくべきことは何なのかを倫理的側面から考える教材として作成したものである。

倫理問題は、ある日突然やってくるものである。そのときに冷静な判断ができなければ技術者としての責務を果たせない可

能性があり、結果として大きな災禍にみまわれることも考えられる。そのような観点から今回の事例を通じて、さらに倫理観を向上させることは重要である。事例はいずれも実際に起こったことであり、リアリティをもって読み進んでもらえるものとする。そうすることで、より効果的に理解が促進されるものと思われる。(本書「事例の活用について」より抜粋)

○ご購入は日本原子力学会ホームページ 書籍販売のページよりお申し込みください○

<http://www.aesj.net/publish/shopping>



## 基礎から分かる未臨界

## 第7回 動力炉(BWR)での未臨界度監視手法の開発

グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン 田代 祥一

原子炉の未臨界度を常時監視すれば、想定外の臨界到達を未然に防止でき、原子力の安全性向上につながる。そこで、炉心シミュレーション技術と反応度計技術の二つの既存の技術を組み合わせることで、動力炉(とくにBWR)に適用しうる未臨界度の常時監視技術の開発を行った。第7回では上記の監視技術について、周辺技術と共に紹介する。

**KEYWORDS:** subcriticality, reactor physics, microscopic burn-up model, AETNA, noise filter, reactivity meter, BWR, SRNM

## I. はじめに

原子力発電所は、大量の放射性物質を取り扱っていることから、ひとたび事故が発生し、これらの放射性物質が環境中に放出されると、周辺環境に重大な影響を及ぼすことになる。そこで、各種の設計で、十分な安全余裕を持たせることで、万一の場合でも、重大な事故への進展を防止することが重要である。

BWRの炉心設計は、熱水力設計と核設計などから構成されている。この炉心設計における燃料装荷位置や制御棒パターンなどの違いによって、原子炉周りの安全余裕の大小が著しく変わり得るため、必要な運転条件を満たした上で、いかに安全性の高い炉心を設計するかが、炉心設計の重要事項となっている。

運転中の炉心特性に係る評価指標は、安全性にとりわけ重要度が高いため、原子力発電の黎明期から現在に至るまで盛んに評価精度向上のための技術開発が行われている。それに対して停止中は、炉心全体が常温程度の冷水に浸かっていることと、多数本の制御棒が挿入されていることなどから、熱的にも核的にも余裕が比較的大きい。このような事から停止中の炉心特性は、運転中に比べると注目を浴びにくい技術開発分野であり、“未臨界度”は、停止中の炉心特性として特に重要な指標であるにも関わらず、発電用原子炉で常時監視に至っていないのが現状である。

さて、東日本大震災の大きな教訓は、想定外への備えが重要である、ということであった<sup>1)</sup>。停止中の炉心の

安全性に当てはめてみると、制御棒を誤って引き抜いたり、燃料を誤った位置に装荷したりしたまま作業を続けた場合、想定外の臨界に至ることも考えられる<sup>2)</sup>。このような背景から、新規制基準の策定段階で、未臨界度の常時監視技術が話題に挙がった。未臨界度の常時監視によって、誤操作などによる未臨界度の異常変化を検知し、それを運転員に知らせ、作業を中断させれば想定外の臨界到達を未然に防止できることが期待される。そこで、発電用原子炉に適用しうる未臨界度の常時監視技術の開発を、文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業において行った<sup>3)</sup>ので、周辺技術と共に紹介する。

## II. 発電用原子炉の反応度測定

## 1. BWRの炉物理試験

発電用原子炉では、試験結果と計算結果とを比較することで、炉心設計が妥当であること、すなわち、運転期間を通じて十分な安全余裕が維持されることを確認する必要がある。このために炉物理試験とよばれる試験が実施されている。ここでは、BWRの炉物理試験として代表的な、停止余裕試験と冷温臨界試験について紹介する。

## (1) 停止余裕試験

停止余裕とは、全ての制御棒が完全に挿入された状態での未臨界度であり、原子炉の停止能力の大きさを示す指標である。極論すれば未臨界( $k_{\text{eff}} < 1$ )でありさえすれば良いが、炉心設計では、炉心の様々な状態変動、不確かさなどを考慮した上で、いつでも未臨界にできる事を設計上の要求事項にしている。具体的には、減速材(水)の密度が高く、核分裂が起こりやすい冷温状態で、最も停止能力の高い1体(又は1組)の制御棒(以下、“最大反応度価値制御棒”という。)が挿入されなくても、

*Subcriticality - from basics to applications (7) ; Subcriticality monitoring in power reactors* : Shoichi Tashiro.

(2019年9月26日 受理)

■前回タイトル

第6回 加速器駆動システム(ADS)

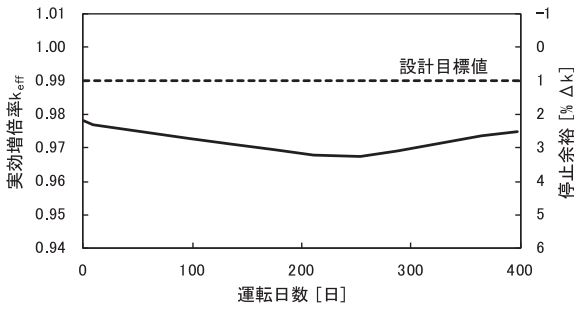


図1 停止余裕の設計例

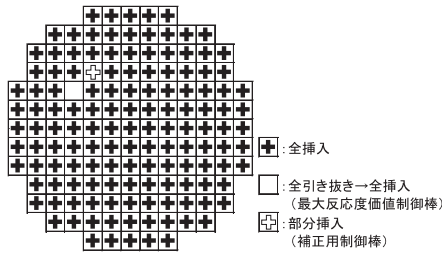


図2 停止余裕試験の制御棒パターン例

$k_{eff} \leq 0.99$  (1%  $\Delta k$  以上の停止余裕)となるように設計される(図1参照)。

停止余裕試験では、全ての制御棒を挿入した状態から、最大反応度値制御棒のみを全引き抜きし、更に近接する制御棒を後述する反応度補正量だけ引き抜き、未臨界であることを確認する(図2参照)。発電用原子炉は、運転に入ると次の定期検査まで運転を止めないため、停止余裕試験は、運転開始前のみで実施し、運転期間を通じて停止余裕があることを示す必要がある。そこで、反応度補正量には、運転期間中の最大反応度値制御棒の値の変化、停止余裕解析の基準温度と試験時の炉水温度の差、燃料および制御棒の製造公差、解析値のばらつきなどが考慮されている。

(2) 冷温臨界試験

冷温臨界試験は、冷温状態で原子炉をわずかに臨界超過とし、炉心の反応度を評価する試験である。その目的は、反応度特性が特異な挙動となっていないこと(例えば臨界超過領域の計数率が、図4のように指数関数的に増加していること)を確認することと、試験結果に対する計算結果のずれを見積もり炉心設計の精度向上を図ることなどである。そのために、様々な制御棒パターンで冷温臨界試験を行っている(図3参照)。

BWRの冷温臨界試験ではペリオド法が用いられている。臨界超過で出力が指数関数状に増加している時に、出力が $e$ (自然対数の底)倍になる時間がペリオド $T$ であり、臨界超過中の任意の二つの測定値から評価できる。評価したペリオド $T$ と、炉心解析による炉心定数( $\beta$ : 遅発中性子割合、 $\lambda$ : 遅発中性子先行核の崩壊定数)から反応度 $\rho$ が求まる(図4参照)。安全保護系などの様々な監視を受ける制約の中で、試験ケース毎に制御棒パター

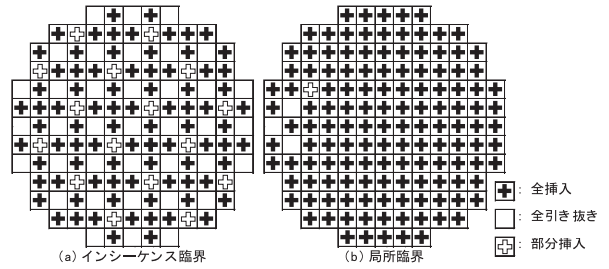


図3 冷温臨界試験の制御棒パターン例

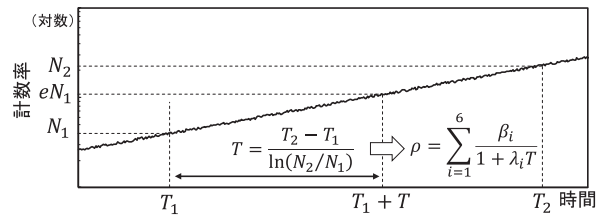


図4 ペリオド評価の概念図

ン調整、ペリオド測定、制御棒挿入を慎重に行う必要があるため、対応の時間が掛かるのが難点である。

2. リアルタイム反応度評価技術

(1)式は、逆動特性法(IPK; Inverse Point Kinetics)と呼ばれる第3回目に紹介した反応度の評価手法であり、中性子の動特性方程式を反応度 $\rho(t)$ について解いた式である。

$$\rho(t) = \beta_{eff} + \Lambda \frac{d}{dt} (\ln n(t)) - \frac{\Lambda S}{n(t)} - \frac{1}{n(t)} \sum_{i=1}^6 \beta_i \left\{ n(0) e^{-\lambda_i t} + \lambda_i \int_0^t n(\tau) e^{-\lambda_i(t-\tau)} d\tau \right\} \quad (1)$$

$\beta_i$ : 第 $i$ 群の遅発中性子割合 ( $\beta_{eff} = \sum \beta_i$ )

$\lambda_i$ : 第 $i$ 群の遅発中性子先行核の崩壊定数

$\Lambda$ : 中性子生成時間

$S$ : 外部中性子源強度

$n(t)$ : 中性子計数率

$\beta_i, \lambda_i, \Lambda, S$ などの定数は、予め評価しておく必要があるが、中性子計数率 $n(t)$ の入力から、反応度 $\rho(t)$ をリアルタイムに評価できることから、炉物理試験に要する時間の短縮が期待できる。PWRではこの手法を用いた反応度計がシステムとして実用化されている<sup>4)</sup>。

BWRでも実用化に向けた取り組みが行われており、その一環で3次元炉心シミュレータAETNA<sup>5)</sup>を用いた仮想ABWRを対象に制御棒反応度値測定試験のシミュレーションを行い、反応度計の適用性を検討した<sup>6)</sup>。シミュレーションでは、測定対象制御棒周りの制御棒を段階的に引き抜き臨界超過とした後、対象制御棒をスクラム挿入した。解析によるスクラム挿入前後の起動領域中性子モニター(以下、“SRNM”という。)の計数率を反応度計モデルに連続的に与え、反応度を評価した。この結果、リアルタイムに反応度を評価できていることに加えて、スクラム挿入前後の反応度の差をとることで、容



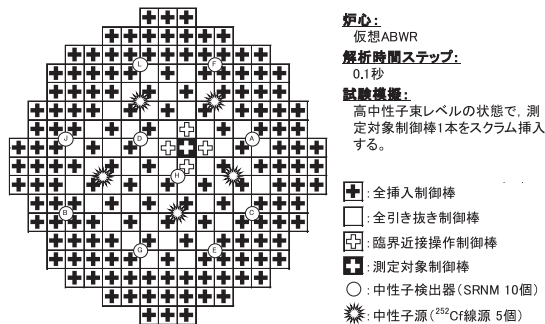


図5 反応度計のBWR適用性検討の解析条件

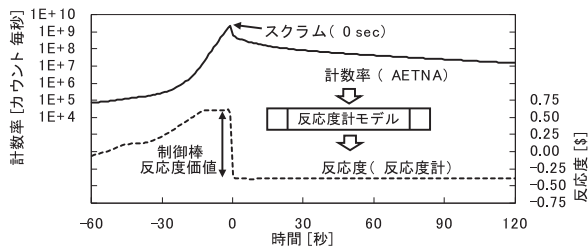


図6 制御棒反応度値測定試験のシミュレーション例

易に制御棒反応度値を求められることも確認できた(図5,6参照)。なお、通常のBWRの制御棒反応度値測定試験では、前述のペリオド法又は制御棒落下法が用いられるが、いずれも相応に時間を要するため、BWRでも反応度計を導入するメリットは多分にある。

### III. 未臨界度監視の技術開発

#### 1. BWRの未臨界度監視手法

未臨界度の評価手法には様々なものがある(第3回“未臨界度測定のいろは”を参照)。それぞれに特徴があるので、状況や目的に応じて使い分ける事が重要である。BWRの未臨界度監視に適切な手法を考えてみる。通常、BWRには加速器は併設されていないため加速器が必要な手法は適用できない。また、中性子相関の分析に基づく手法では、1 kHz程度のデータサンプリングが必要であるが、BWRで一般的な起動領域中性子モニター(以下、“SRNM”という。)のサンプリング周波数は10 Hz程度と低いため、やはり適用できない。ここでは挙げなかった他の多くの手法についても、それぞれに適用が困難な理由が挙げられる。(1)式の逆動特性法は、炉心内の空間依存性を考慮しない1点炉近似であることと、中性子計数率 $P(t)$ 以外の変数は定数であるため評価中の大きな変化は許容されないことに留意が必要だが、評価される反応度は正だけではなく、原理的には負(すなわち未臨界)も取り扱えるため、未臨界度監視が出来るようである。

さて、II章で述べたように発電用原子炉で反応度を測定する炉物理試験では、炉心を臨界又は臨界超過状態にしている。この時の炉心内の中性子の殆どは核分裂連鎖

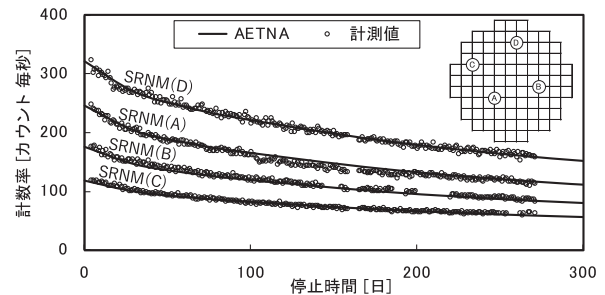


図7 中性子計数率予測と測定値の比較

反応に由来しており、外部中性子源に由来しているものは僅かである。すなわち(1)式の外部中性子源強度を含んだ項は無視することができ、現に反応度計ではこの項を無視している。一方、未臨界炉心では、核分裂反応が少ないため、外部中性子源に由来した中性子の影響が大きくなる。そのため、外部中性子源強度を含んだ項は無視せず、正確に評価することが重要である。また、停止中は中性子束レベルが低いため、検出信号にノイズの影響が大きくなる。ノイズ要因は様々であるため、様々な状態に柔軟に適應できるノイズ対策が重要である。

#### 2. 中性子源強度の評価

中性子源の核種および反応は様々あるが、照射済みBWR燃料中では、次の三つが主である<sup>7)</sup>。

- $^{140}\text{La}$  の  $^2\text{H}(\gamma, n)^1\text{H}$  反応
- $^{242}\text{Cm}$  の自発核分裂および  $(\alpha, n)$  反応
- $^{244}\text{Cm}$  の自発核分裂および  $(\alpha, n)$  反応

これら核種の半減期はそれぞれかなり異なっている。 $^{140}\text{La}$ はその親核種である $^{140}\text{Ba}$ と過渡平衡状態にあり、 $^{140}\text{Ba}$ の半減期に支配されるため、半減期は約12.8日である。 $^{242}\text{Cm}$ と $^{244}\text{Cm}$ の半減期はそれぞれ約163日と約18.1年である。これらの核種を考慮した適切な燃焼チェーンに基づき、炉心を空間的に分割した小領域毎に、運転履歴と停止時間を考慮した燃焼計算(個々の核種の個数密度の変化を追跡するマイクロ燃焼計算)を行うことで、原子炉停止中のこれらの核種の量と分布の評価が行える。3次元炉心シミュレータAETNAには、マイクロ燃焼計算に基づく中性子源強度評価機能と中性子計数率の予測関数が組み込まれており、停止中の中性子計数率を正確に予測することができる(図7参照)<sup>8)</sup>。

#### 3. ノイズ対策

反応度計の基本モデルは、(1)式で示した逆動特性法である。この式自体には信号に含まれているノイズ成分を低減する機能(ノイズフィルタ機能)がないため、IPKを用いる際は、ノイズフィルタと併用されている。この時、反応度計の実績に基づいて、実用的なノイズフィルタを設計している。しかし、未臨界度監視は反応度計よりも、適用すべき範囲が非常に広いため、実績に基づく

設定は困難であり、何らかの工夫が必要である。

その工夫の一つが拡張カルマンフィルタ法 (EKF; Extended Kalman Filter) を適用した反応度計である<sup>9)</sup>。反応度の評価モデルは、IPK と同様に、中性子の動特性方程式に基づいている。IPK ではこれを反応度について解き、計数率に対する反応度で表現している (単入力単出力系)。一方、EKF では計数率を含む諸変量間の関係をそれぞれ一次微分方程式で表現している (多入力多出力系)。これら諸変量を逐次的に予測し、観測値を用いて予測値の修正を行うが、炉心の状態に応じて、自動で理論的に最適な修正を行える特徴がある。ただし、煩雑な行列計算を行うため計算量が多いことや、条件によっては値が発散することが課題である。

そこで、提案されたのが簡易フィードバック法 (SRE; Simple Reactivity Estimator) である<sup>10)</sup>。SRE でも、予測を行い、観測値を使って予測値の修正を行う点は EKF と同様である。しかし、修正量の見積もり計算で、理論的な最適性を犠牲にする代わりに計算量を大幅に削減すると同時に、値の発散も防いでいる。さらに計数率の高低によって、修正量のゲインを補正することができることから、未臨界度監視の広範な適用範囲に耐えうるロバスト性を備えている特徴がある。

#### 4. 未臨界度監視手法の検証

##### (1) 炉心シミュレーション (燃料移動作業: シャフリング)

AETNA を用いて ABWR の燃料シャフリングシミュレーションを行い、各シャフリングステップの SRNM 計数率 (10 個: A, B, C, D, E, F, G, H, J, L) と未臨界度を求めた (図 8 参照)。未臨界度と 10 個の SRNM 計数率は、遠目では連動しているように見えるが、よく見るとそれぞれの連動は弱くバラバラに変化している箇所がたくさんあることが分かる。これは未臨界の場合には中性子計数率の検出器空間依存性の影響が強いため、反応度が変化しても体系全体の中性子束の大きさが全体的に増減する効果よりも (中性子生成率・吸収率が局所的に変化した領域の近傍で) 中性子束分布が局所的に変化する効果が大きく現れやすいためであり、局所的な反応度変化 (中性子検出器が調べることができる局所的な領域で考えた“(中性子生成率 - 中性子吸収率) ÷ 中性子生成率”の量) の影響が炉心の全体的な反応度特性に殆ど影

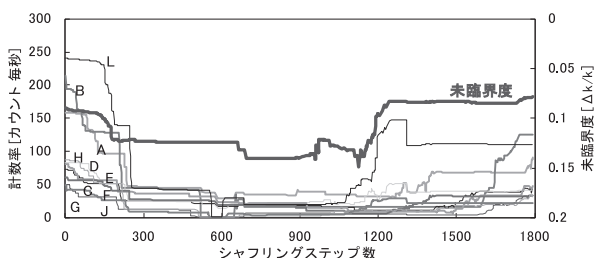


図 8 燃料シャフリングシミュレーション結果

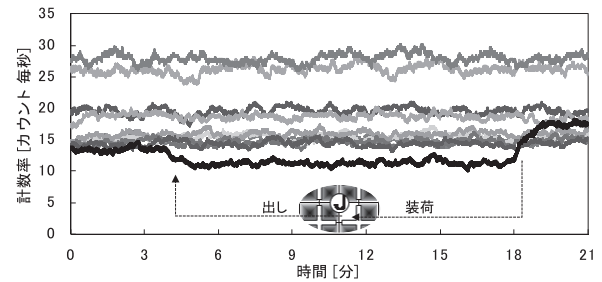


図 9 燃料置き換え作業時の計数率の例

響を与えていないからである。すなわち、燃料の取出しなどを行った付近の検出器は変化を検知するが、遠くの検出器は検知が難しい事を意味している。未臨界度は炉心で一つの値であるが、10 個の検出器でそれぞれ未臨界度を監視した場合、シャフリングの進行に伴って、測定された未臨界度にばらつきが発生する (したがって、何が正しい測定か分からなくなる)。そのため、シャフリングがある程度進行したら、解析などで求めた未臨界度を元に各検出器の外部中性子源強度を校正する事が必要である。例えば 1 日 1 回程度の少ない補正ならば負担はそれほど増えないし、実用的な精度で未臨界度を評価できる見通しを得ている。

##### (2) 実機信号 (燃料取出し)

北陸電力株式会社志賀原子力発電所 2 号機で、燃料の炉心内から燃料貯蔵プールへの移動が行われ、作業中の信号を採取した。作業中でも保安規定で定められた最小計数率 (3cps) を上回ることができるように、作業の初めに SRNM 周りの燃料を燃料貯蔵プール中の燃焼が進んだ燃料に置き換えて、計数率測定を実施した (図 9 参照)。この時、燃焼が進んだ (核分裂を起こしにくい) 燃料によって囲まれた SRNM では、中性子源強度の変化によって計数率が変動しているが、他の検出器は一定値を保っていた。これにそのまま IPK を適用すると、中性子源強度の変化の影響を受けた検出器のみ未臨界度の変化があったと評価され、検出器毎で異なる評価結果になってしまう。計画的な燃料 1 体の操作では、経験的に最も近い一つの SRNM しか応答変化がないことが分かっている。そこで、単一検出器のみ一定以上の未臨界度の変化を検知した場合は、炉心の未臨界度が変化したのではなく、当該検出器の実効的な中性子源強度が変わったものと判定し、当該検出器の未臨界度を維持するように中性子源強度を調整することで妥当な結果が得られることを確認している。燃料置き換え作業以外にも、停止中の貴重なデータを幅広く採取できたため、この調整方法の妥当性などに関して、引き続き検証を行う。

#### 5. 複数信号による縮約

Ⅲ章の 4 節で示した通り、停止中の未臨界度評価では、検出器ごとに未臨界度評価結果が大きく異なるのが当たり前の事である。検出器それぞれの評価結果は、各

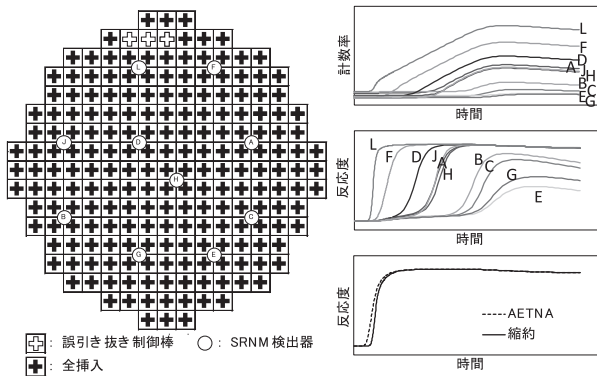


図10 複数信号による縮約

検出器周りの局所的な未臨界度特性に対応しており、局所的な反応度変化を調べるのに役に立つ。一方、未臨界度は本来、炉心で唯一の値として定義された大局的な量であるため、複数の検出器信号から一つの尤もらしい未臨界に縮約する事も重要である。そこで、制御棒誤引き抜き解析のシミュレーション解析を行い、それぞれの計数率を足し合わせた合計値(縮約)から反応度を評価し、AETNAによる反応度と比較した(図10参照)。検出器毎の反応度は、誤引き抜き制御棒に近い検出器から順番に増加したが、また縮約に基づく反応度とAETNAの反応度との比較においては、立ち上がりなどに違いは確認できるものの、実用上は問題なく、一つの尤もらしい反応度を評価できているといえる。

#### IV. 今後の展開

既存の二つの技術(マイクロ燃焼モデルを備えた炉心シミュレーション技術およびノイズフィルタ機能を備えた反応度技術)を組み合わせることで、BWRに適用できる未臨界度監視技術を開発した。

将来的には、この開発手法を搭載した未臨界度監視装置を実機プラントに適用することで、原子力発電所の安全性向上および研究成果の社会還元に貢献できると考えている。実機プラントに適用すべく、未臨界度監視装置の信頼性向上に関する取り組みを継続するとともに、原子力発電事業者に採用に向けた提案を行っていきたい。

#### — 参考資料 —

- 1) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会、最終報告。(2012).
- 2) T. P. McLaughlin, et al., "A Review of Criticality Accidents: 2000 Revision," Los Alamos National Laboratory Report LA-13638, (2000).
- 3) 原子力発電所等における停止時未臨界監視手法の開発成果報告書平成28年度文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業, GNF-J, (2017).
- 4) 島津洋一郎, 他, "デジタル反応度計と炉物理データ処理装置の使用経験", 日本原子力学会誌, 32 [3], 285(1990).
- 5) 株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン「炉心核熱水力解析システム 燃料集合体核特性計算コードAETNAについて」, GLR-005 AETNA 編.
- 6) S. Tashiro, "Development of reactivity meter with novelty neutron source intensity evaluation model for BWR application", Proc. of PHYSOR2014, (2014).
- 7) M. Watanabe, et al., "Measuring the Photoneutrons Originating from D ( $\gamma, n$ ) H Reaction after the Shutdown of an Operational BWR," J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 46(12), pp. 1099-1112, (2009).
- 8) M. Tojo, et al., "Development of the neutron source evaluation method and predictor of SRM/SRNM count rate in BWR simulator," J. Nucl. Sci. Technol., Vol.52(7-8), pp. 970-978, (2014).
- 9) T. U. Bhatt et al., Estimation of sub-criticality using extended Kalman filtering technique, Annals of Nuclear Energy 60 (2013) 98-105.
- 10) Y. Shimazu, "A simple procedure to estimate reactivity with good noise filtering characteristics," Annals of Nuclear Energy, Vol. 73, pp. 392-397, (2014).

#### 著者紹介



田代祥一 (たしろ・しょういち)

グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン

(専門分野/関心分野)核熱水力安定性、熱水力設計、原子炉計装監視



## IAEA 総会に参加して～ブース展示と幹部懇談～

日本原子力産業協会 Liu Daniel

毎年9月にオーストリア・ウィーンにある国際原子力機関(IAEA)で年次総会が開催され、世界中から計171の加盟国代表団が集まり、核不拡散や原子力安全について議論する。IAEAのキーマンである日本からは、一週間にわたる会合やサイドイベントに政府代表をはじめとする幅広い分野から原子力関係者が参加し、日本における原子力平和利用の取り組みを積極的にアピールしている。ここでは今年の総会で原産協会担当者として主に関わった活動を紹介する。

### I. 参加概要

第63回IAEA総会は2019年9月16日(月)～20日(金)の期間にウィーンのVienna International Centre(VIC)で開催された。当協会理事長等はIAEA総会のオブザーバーとして参加するとともに、政府および民間関係機関との連携協力のもとでの日本ブース展示をとりまとめ、日本の原子力についてアピールを行った。また、IAEA幹部との会談も積極的に行い、日本の原子力の現状や今後の展望についての発信に努めつつ、サイドイベントへの出席や他国の参加者との交流を通じて情報交換を行った。

### II. 総会

今回は、去る7月に天野之弥事務局長が逝去してから初めての総会で、冒頭、出席者一同が同氏に対する黙とうを捧げ哀悼の意を表した。日本の政府代表である竹本直一科学技術政策担当大臣は代表演説で、福島第一原子力発電所(以下、福島第一)の廃炉に向けた取り組みを継続していくと強調するとともに、対外的な説明努力に関しては、とくに事故発生後から継続して行ってきた外交団向け説明の実績にも言及し、今後も国際社会に対して透明性をもって説明していく姿勢を強調した。竹本大臣は、最近の事例を踏まえ、廃炉・汚染水対策に関し事実や科学的根拠に基づかない批判を受けているとしたうえで、日本が公表している情報をもとに、すべての国が公正で理性的な議論を行うよう訴えた。

### III. 展示会

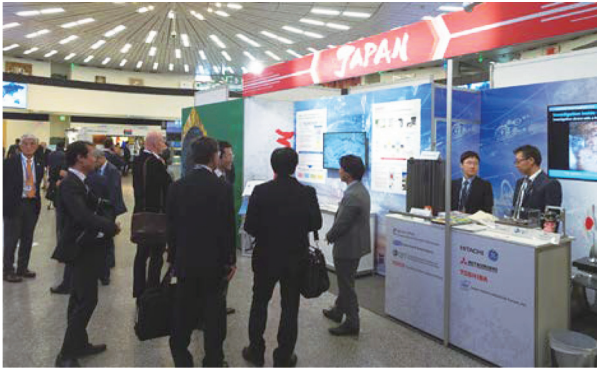
毎年Rotundaという丸型のビルロビーで開催される展示会には申込先着順で18か国が出展する。多くの出展国でそれぞれの担当機関が一つの明確なテーマで展示を行うが、日本ブースでは参加機関が多く、一つのテーマに絞ることは毎年の課題となっている。例えば今年

は、実際に展示コンテンツを提供したかどうかに限らず、準備段階から参加した機関は、内閣府、外務省、経済産業省、文部科学省、環境省、日本原子力研究開発機構(JAEA)、量子科学技術研究開発機構(QST)、国際廃炉研究開発機構(IRID)、東京電力HD、東芝ESS、日立GE、三菱重工と事務局の当協会であった(計13機関)。

近年同様、基本テーマを「Life, Safety and Prosperity」とし、総会参加者およびIAEA職員に対し「日本は人々のくらしと安全を守り繁栄するために原子力の平和利用を進める」ということを訴求するほか、原子力イノベーションを促進する政策的取り組みや、各機関の「従来型から革新している」技術を紹介するなど、次のような様々な展示物の組み合わせにより「イノベーションを目指す姿」をアピールした。

1. 模型：①高温ガス炉燃料体模型(JAEA)、②量子メス・PET模型(QST)
2. パネル：日本のエネルギー政策、原子力イノベーション推進事業(NEXIP)の紹介(経産省、文科省)
3. 映像：①福島第一関連映像(経産省、JAEA、東京電力HD、三菱重工、東芝ESS)、②各機関からの関連映像
4. 特設ウェブサイト：紙資料の配布は必要最低限とし、日本ブース資料をダウンロードできる特設ウェブサイトを設けた。(https://www.jaif.or.jp/IAEA2019/)。

ブースへの来訪者数は延べ約700名となり、主な来訪者は、竹本大臣、岡原子力委員長、ほか主要原子力発電国や新規導入国、その他開発途上国の各国代表団、IAEA職員・コンサルタント・専門家等(N.モクタールIAEA事務局次長やアフガニスタン大使)であった。実際に展示した模型も注目を集めたが、来訪者に一番関心を持ってもらったことは福島の現状であった。福島第一事故が発生して8年以上経っている今も外国の方に廃炉進捗、汚染水対策、放射線による住民や食品への影響、再稼働状況などの海外向けの情報を発信することは何よ



日本ブース風景



M. チュダコフ DDG との懇談の様子

りも重要だと強く感じた。その一方で、アフリカなどの開発途上国の来訪者は農業や医療といった発電以外の原子力利用について非常に興味を示した。

#### IV. IAEA 幹部との懇談

今回の総会参加にあわせ、4名のIAEA事務局次長(DDG)と懇談を行い、当協会幹部からはエネルギー基本計画、再稼働状況と特定重大事故等対処施設(特重施設)問題、福島第一の廃炉状況、原子力エネルギー協議会(ATENA)の設立、世論調査、人材育成活動などについて紹介し、意見交換を行った。

M. チュダコフ原子力エネルギー局 DDG と J.C. レンティッホ原子力安全・セキュリティ局 DDG の両者は、原子力発電所における特定重要事故等対処施設(特重施設)の建設遅延の問題に懸念を示し、特にレンティッホ DDG からは、これまで原子力規制庁に対して規制評価を実施してきたことや福島県に対しても助言を行ってきたこと、今後も要請に応じて(寿命延長の審査実施も含めた)安全規制面での専門的助言をしていく用意があるとの発言があった。また、福島第一の処理水問題で、基準値以下のトリチウムの放出は世界的にも一般的に行われているため、何年もタンクに貯めて置くような状況が続いている状況に懸念を示していた。

モクタル原子力科学・応用局 DDG からは、IAEA と日本は原子力科学・応用の分野で大きな協力関係を築いているほか、日本の11大学・研究機関と核医学教育に関する協定を締結したことが紹介された。また、コストフリーエキスパートとして働く日本人職員のIAEAに対する多大なる貢献にも感謝の意が表明された。

M.A. ヘイワード管理局 DDG からは、次世代を惹きつけるために、小型モジュール炉(SMR)は今後の日本が注力していく一つの選択肢になるとの発言があった。また、IAEA は2020年に日本で開催される世界原子力大学・夏季研修(WNU-SI)を強くサポートしており、ホストである日本からも多くの若者が参加し、今後の政策決定を担う人材や将来の顧客となり得る世界各国からの参

加者とのコネクションを広げて欲しいとのコメントがあった。

#### V. 所感

筆者は、IAEA 総会展示の事務局担当となり今年で4回目となるが、今まで大変お世話になった天野事務局長の逝去は大変残念であった。ここ数年、展示ブースに必ず足を運んで頂いたことを鮮明に記憶しており、そのような中で今回も現地での活動に臨むことができ感慨深いものがあった。また、国際機関における多様な人種構成を肌で感じることができ、改めて良い経験をさせて頂いた。

日本ブースは、例年と同様、多くの参加機関・企業で構成されているため展示内容も発電分野から医療分野まで多岐にわたった。当協会の役割は、政府機関や国内参加機関、ウィーン現地業者とのリエゾンでもあり、半年以上の期間で事前の準備調整や、現地運営、事後処理まで全てに関わっている。担当者としては精神的にも体力的にも負担は大きいですが、自身の語学力や国際経験を生かしてこのプロジェクトを成功させることができた達成感やここで得た国内外の人脈、経験は何にも代えがたい貴重な財産となった。

展示内容については、公募中であった原子力イノベーションに関する日本の取組みの一つであるNEXIPといったタイムリーな内容を、公表のタイミングが難しい中、パネルとして展示できたことは良かった。2020年は、福島の実況紹介以外にも、日本の原子力産業界の停滞がある中で、一層「イノベーション」について、具体的な事例・情報が発信できることを期待する。

(2019年12月25日記)

#### 著者紹介



Liu Daniel (リユー・ダニエル)

日本原子力産業協会  
(専門分野/関心分野) 異文化コミュニケーション、エネルギーと国際社会情勢

# 談話室

## リケジョの思い(10) 新学科生に幸あれ

お久しぶりです。口町です。お元気ですか。今年は気温の上下も激しく、体調を崩しやすい冬だったと思います。北海道も少しずつ春に近づき、新入生を迎える時期になりました。

私は普段少しだけ、物理学科の広報のお仕事もしています。物理学科でのイベントを宣伝したり、先生方の研究成果を発信したりするお仕事です。

最近ホットな話題は学部・学科紹介。北海道大学では多くの学生が1年生の終わり頃に学部・学科を選び、2年生から配属されます。そのため、この時期は各学部・学科が1年生にカリキュラムや研究を紹介しています。私たちも、1年生に向けてSNSで投稿することになりました。今日は投稿作成中です。

さて、何を書きましょうか…「物理学科へようこそ！こんな研究があります。こんなところが楽しいですよ」…うむ、悪くないけれど、なんだかきれいな感じがします。もちろん、物理学を学ぶ中で楽しい瞬間はあるけれど、恥ずかしながら辛いこともありました…。何度やっても計算が合わなかったり、議論が収束しなかったり…演習問題を解ききれなかったり…。「楽しいですよ」とだけ宣伝してしまうと、きれいなものだけ見せている罪悪感があります…！

では、少し角度を変えて自分が物理学科に進学したきっかけを考えてみます。テレビの科学番組かな。高校の先生が嬉しそうに授業してくれたことかな。大学の先輩が真剣に議論していたのも、ワクワクしたな…。

ああ、物理学者、寺田寅彦先生のエッセイもそうだな。科学を身近におもしろく書いてくださっていた。思い出すと、きっかけは物理学を楽しそうに、熱く語ってくれる人たちでした。

その時も、苦労があることは予想できていました。それでも時間をかけてもいいと思えたのは、先生や先輩たちが見ている景色を共有したくなったからです。どんな思考回路で、どう楽しんでいるのか、この目で見てみたくなったからです。

そう思うと、私も後輩さんには物理学の楽しいところを、熱心に伝えたほうが良いのかな。それに私たちの発信する「物理学の楽しさ」に魅力を感じた人は、実際に物理学を学ぶこと、研究することを楽しめるかもしれない。

ああ、全ての新2年生に幸あれ。新2年生たちが、学びの楽しさを凝縮した一瞬をもつことができますように。その時間ができる限り長くなりますように。そのように私も広報したいです。

推敲続行です。後輩さんにも意見を聞いてみようと思います。



### 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2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～(11) ふくしまで遊ぶ

一般社団法人 AFW 吉川 彰浩

東京で暮らす友人から電話がかかってきた。馴染みの仲間たちと福島に遊びに行きたいと。

普段かかってくる連絡は「被災地」を学びたいという連絡が常だ。もうそれは何年も続いている。

東日本大震災・原子力発電所事故という出来事を語り残していくこと、そしてその出来事によって新しく生まれた、これまでの生き方や暮らしの在り方を問い直していくということの、教訓は必要性和重要性があると私も思っている。

その一方で、浜通りに暮らす一人の人間としては、「被災地」ではない関わり合い方を求めている。

多くの人が「被災地」だから訪れる理由が続くなか、ただ遊びに行きたいのだけど、といった連絡は心地良さを感じた。

困りもした「遊ぶ」といってもだ。どんな遊び方があるのだろうか。震災をきっかけに自分に生まれてしまった過剰な清く正しくなくてはならない、この地域で遊ぶなど持ての他など…という生真面目さが邪魔をする。

ホストであるというのに困り果ててしまい、その友人に何がしたいかと聞いてしまった。あっけらかんと、美味しい魚があるじゃないか、酒も美味しい、美味しいものを友人と食べる、それだけで立派な遊びだとかえってきた。

なるほどと思った。気の合う友人たちと何も掲げずに、ただ飲んで、食べて、くだらない会話をし自由に時間を使う。ふと、そんなことは震災の前には当たり前に行っていたのではないかと思い出した。

それではと、早速その一日はどうしようかと考えてみる。美味しいものとはなんだ、出来ればそれは自分達で調達できるとその時間も楽しかろうと、こんな時、今では釣りが出来るようになった海は心強い。知り合いの漁師もいる。船を貸し切りにすることにした。そしてそこで釣った魚で美味しいものを食べようと。

せっかくの機会だ、友人のシェフにも声をかける。より美味しいものが食べたいなら、調理のプロにお願いしてみようと。福島で釣りがしたかったと二つ返事で快諾ももらった。

自分達で作った新米もふるまうことにした。低農薬で育てあげ、天日干しをしたコシヒカリを、みんなで食べようと。

平日に休みを合わせ、さあ今日は遊ぶぞ!とその日を迎えた。遊びだ、自由なものだ。友人たちには釣りに



行ってもらい、私は迎える家の掃除やらを始めた。

先ほどまで福島沖を元気に泳ぎ回っていた魚達を誇らしげにもって現れた。どうだと言わんばかりだ。

早速、調理にかかる。といっても、シェフの友人が凄まじい手際の良さで、どんどん切り身を作っていくものだから、周りにはちょっとした手伝いをしながら、買い込んできたビールに手を伸ばし、話に華を咲かせていく。

積みあがったアラは鍋にいれられ、しばらく流水にさらし、そこから煮込み始める、しばらくしてちょい一つまみの塩が入る。飲んでみて!と促された。味わったことのない透き通った臭みのない、何種類もの野菜を煮込んだようなダシが出来上がっていた。思わず唖ってしまう。これで新米を炊くからまってね!ワクワクが止まらないことを言ってくれる。

ブリの子供、イナダを刺身にし、香味野菜とあえてシェフならではのソースがかけられたサラダが出てくる。これまた美味しい!酒も話も進む。

しまいにはパエリアまで出てきた。土鍋の蓋を開けると、ぶわっとう汁の効いた香が立ち上がった。イナダのお頭をほぐしていく、待ちきれないと大の大人達が土鍋をのぞき込む。

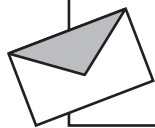
自分の暮らしの中に、美味しいと楽しいが溢れ、あっという間に時間が過ぎていった。

その時、自分の中にあった「被災地としての福島」は吹き飛び、「遊びの場としての福島」が存在していた。肩の荷を自然と降ろしていた。

終電で帰る彼らを見送った。ホームには自分一人がいる。軽くなった身体に心地良く荷を担いだ。より楽しく遊べるようにと。

(2019年12月16日記)

## 理事会だより



### 本年度の予算方針について

#### はじめに

昨年6月に理事に就任しました。どうぞ、よろしくお願ひします。今回は財務を担当する立場から、理事会からのメッセージとして、学会を取り巻く状況や近年の学会財務状況を踏まえて、本年度の予算方針について説明いたします。

#### 学会を取り巻く状況 これまでの学会予算

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故から9年が過ぎ、この間、事故の収束と原子力に対する国民の信頼回復に努力が払われてきました。福島県内においては福島第一原子力発電所オンサイトでの廃炉に向けた作業や、オフサイトにおける環境修復が進んでおり、安全を第一に更なる進展が期待されます。一方、日本国内における原子力発電所の再稼働は、未だ一部に留まっています。こうした状況のなかで、より一層の取り組みが求められています。

このような中で、学会員の皆様には、学会の重要性、役割を認識され、学会活動を積極的に推進いただいております。

さて、学会の財務状況は、数年来続いている会員数の減少や賛助会費の減少等により、収入に当たる経常収益が減少傾向にあることから、厳しい情勢にあります。経営改善の努力により収支の安定化が図られ、数年前までは正味財産も増加しておりましたが、一昨年度より収支が赤字傾向になってきています。このような状況下においても、社会に貢献する、より魅力ある学会を目指して新しい地平を拓いて行くための活動に挑戦する予算を確保することが重要と認識しています。

#### 本年度予算の基本的考え方

学会の事業環境は大きな好転が見込めない情勢ですので、引き続き常置委員会については、予算を効率的に運用する方針としました。

また、各組織単位での収支均衡運用の方針を継続し、学会本部収入の一定割合を各組織に割り振るとともに、これまでと同様、各組織の受託等の外部資金を加えて各組織の収入としました。

一方、各組織の支出に関しては、ここ数年来続いている申請予算と予算執行実績額との乖離が無くなるように、過去3年の実績を支出目安とすることを基本としました。そのうえで、支出目安を超える予算については、

活動実施計画を明確にして、独自収入により活動費をまかなうことを原則としました。

また、会員獲得・国民の原子力理解を継続するため、この活動には正味財産を活用することにしました。

#### 本年度の予算方針

収入については、福島第一原子力発電所事故以降の直近5年間に注目し、会費収入の減少傾向が継続していることや、受託事業収入の変動が著しいことなどを考慮して、昨年度と同様に堅く見積もることとしました。なお、会員獲得・原子力理解活動については、2017年に決定した方針を継続し、これまでと同様に蓄積した正味財産を財源として有効活用します。

一方で支出に関しては、学会の健全な財政運営のために、収入に見合った予算とする必要があります。2019年度の会費収入は依然として減少傾向です。このような状況ですが、大会事業の収支改善と、経営合理化による収支改善を踏まえて、学会にとって重要な専門委員会や支部などの活動費、会員サービス向上、新たな活動分野への挑戦に予算を振り向けることにしました。

シンポジウム・セミナー等の開催については、これまでと同様に独立採算を原則としています。但し、学会活動の更なる活性化の趣旨で、予算編成時に計画されて理事会の承認を得た場合には、繰越金の活用が認められる仕組みになっています。また、繰越金のみでは不足の場合には、配分金の活用も認めることとしています。

基本は収支均衡であるものの、特に保有する繰越金が増加傾向にある組織には、単年度収支均衡に固執せず、繰越金も活用した活動の活性化を推奨しました。

#### おわりに

学会全体の予算運営を行っている総務財務委員会では、実情に合った予算執行によって学会活動が推進されるように、制度を適宜見直す検討も行っています。

今後もこの活動を通じて、学会活動がより活発になるようにして行きたいと思ひます。学会員の皆様も本学会の活動がより活発になるようにご協力いただきたく、お願ひいたします。

(日立 GE ニュークリア・エナジー(株)・川村 慎一)

「理事会だより」へのご意見、ご提案の送り先  
rijikaidayori@aesj.or.jp