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

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

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

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

I. 会議概要

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

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

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

II. 発表概要と傾向分析

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

1. 使用済燃料対策の国家戦略

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

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

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

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

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

表1 本会議で報告された海外の傾向と日本の現状分析

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

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

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

2. 貯蔵とその後の輸送

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

と直接対応せず、効果的な全体的対策が要求されている。

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

3. バックエンドにおける輸送

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

フランスからは、SF の年間約 200 件の輸送経験によ

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

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

(執筆担当：三枝利有(電力中央研究所))

4. 使用済燃料対策としてのリサイクル

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

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

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

(執筆担当：朝野英一(原環センター))

5. 先進核燃料サイクル

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

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

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

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

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

(執筆担当：岡村知拓(東京工業大学))

6. 処分

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

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

7. バックエンドへの統合的方策の挑戦

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

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

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

(執筆担当：朝野英一(原環センター))

Ⅲ. YGE と最優秀若手研究者賞受賞

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

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

The Winner of Winners is

図 1 The Winner of Winner の表彰

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

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

Ⅳ. まとめ

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

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

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

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

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

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

著者紹介

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

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

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

書籍販売のご案内

■『放射線遮蔽ハンドブック—基礎編—』

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

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

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

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

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

ご購入は日本原子力学会ホームページ
書籍販売のページよりお申し込みください