

新型炉部会セッション

新型炉の国際協力の現状と今後の研究開発課題（イノベーションの創出）

Current status of international cooperation in advanced reactor development and future R&D issues
(Innovation creation)

(1) 高速炉の国際協力の現状

(1) Current status of international cooperation in fast reactor development

*大島 宏之¹

¹日本原子力研究開発機構

1. はじめに

高速炉サイクルは、プルトニウム等の長寿命 TRU 核種を燃料として活用出来るため、ウランの利用効率を飛躍的に向上させ、廃棄物（使用済燃料）の減容化・潜在的有害度低減に繋がることから、世界的に開発が進められている。高速炉の中には、ナトリウム冷却高速炉（SFR）、鉛冷却高速炉（LFR）等、冷却材別に幾つかの種類があるが、以下では、原子力機構が国際協力を進めている SFR を取り上げて紹介する。

世界各国での SFR の開発状況を図 1 に示す。ロシアは、閉じた燃料サイクルを伴う軽水炉と高速炉を並行して運転し、原子力発電設備容量を段階的に拡大する「2 炉型（2 Component System）戦略」を進めている。2015 年末に実証炉 BN-800 の送電を開始しており、現在 2030 年までの建設を目途に商用炉 BN-1200 の設計が鋭意進められている。中国も、ロシアからの導入技術と独自開発技術を織り交ぜて、2010 年には実験炉 CFR600 の送電を開始し、次の実証炉 CFR600 の建設を 2017 年 12 月に開始した。インドでは、SFR は天然ウラン燃料重水炉とウラン 233（トリウム起源）燃料新型重水炉の中間炉として位置づけられており、フランスからの導入技術を用いた実験炉 FBTR に続く原型炉 PFBR の今年中の運転開始に向けて努力している。フランスは、原型炉フェニックス、実証炉スーパー・フェニックスの建設・運転経験を有している。現在は稼働中の SFR は無く、次期炉 ASTRID 設計作業の今後の動向が注目されている。米国は、現在複数の企業が SFR を

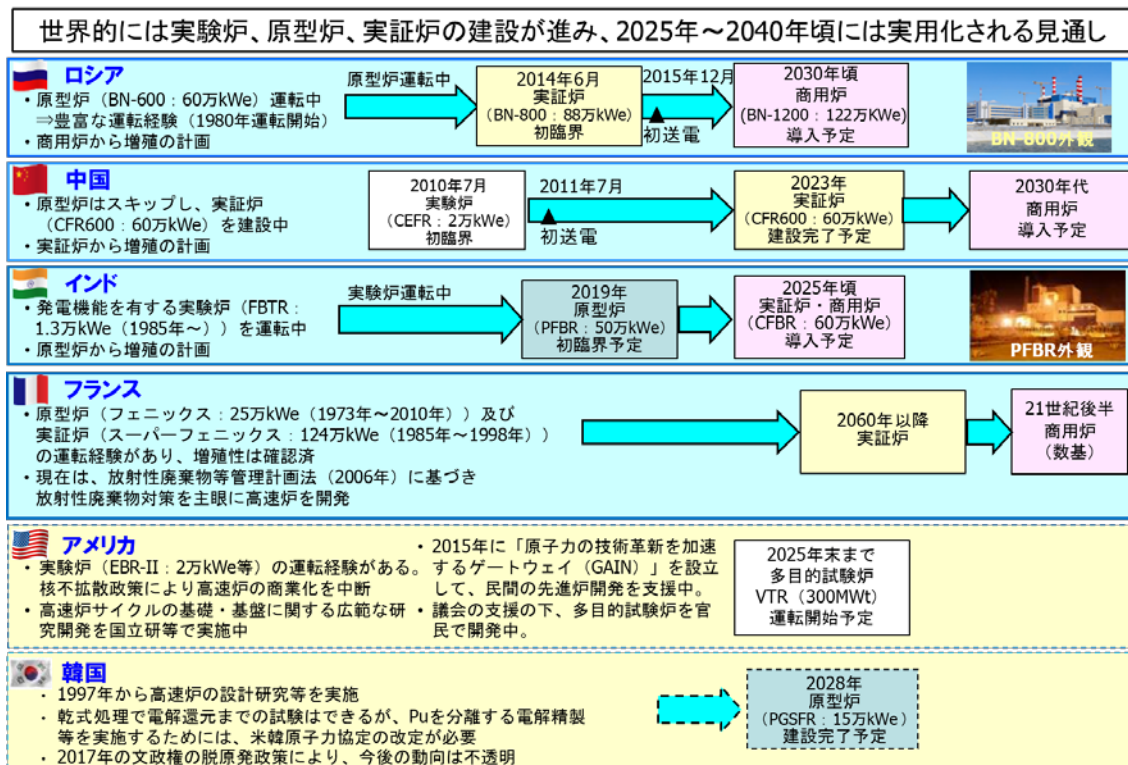


図 1 世界におけるナトリウム冷却高速炉（SFR）の開発状況

含む先進炉の設計作業を進めており、これらの支援のため GAIN（国立研の資源活用）や SFR 多目的試験炉 VTR(Versatile Test Reactor)の開発が官民で進んでいる。韓国は、原型炉計画を有していたが、政権交代による影響があり、今後の動向が注目されている。

各国が SFR 研究開発を進める中、我が国もエネルギーセキュリティの確保等を目的として、国際協力を活用しつつ実証炉の設計研究段階まで進めてきた。昨年 12 月には原子力関係閣僚会議において高速炉開発に関する戦略ロードマップ（RM）が決定され、「これまで培った技術・人材を最大限活用し、多様な高速炉技術の競争を促進」、「民間の創意工夫を取り入れ、各ステークホルダーが適切な役割を果たし国内外の動向を想定して技術開発を推進」などの基本的な考え方、今後 10 年程度の開発ステップ（技術間競争促進→絞り込み・重点化→今後の開発課題・工程検討）、国際協力の活用（二国間や多国間でのネットワーク活用）などが示された。

このような国内外情勢の中で、我が国が進めている SFR 研究開発に関する主な国際協力関係を図 2 に示す。本稿では、これらの国際協力の現状を紹介する。

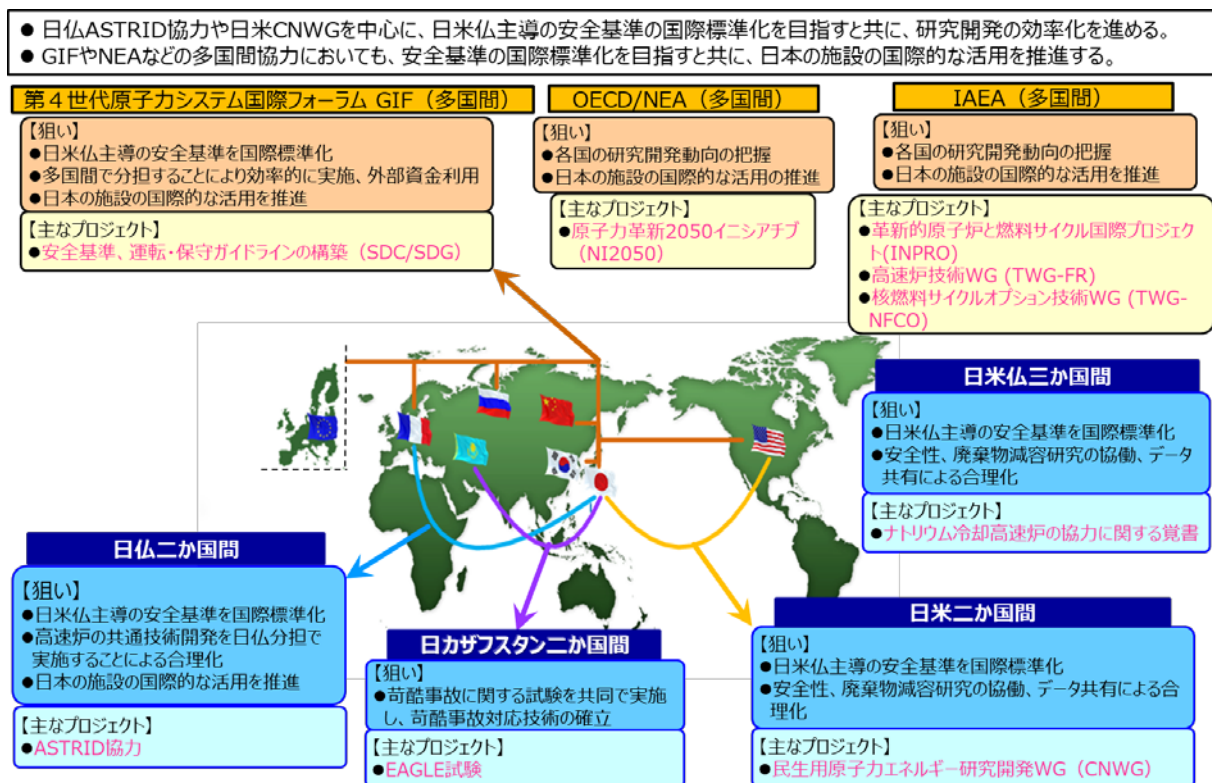


図 2 高速炉サイクル技術開発に関する日本の主な国際協力関係

2. 多国間協力

2-1. 第4世代原子力システム国際フォーラム(GIF)における高速炉協力

2006年に、日本、フランス、米国、EU、韓国の間で、第4世代原子力システム国際フォーラム（GIF：Generation IV International Forum）を通じた SFR システム取決め（Phase I）が署名された。その後、中国、ロシアの参加を経て、2016年2月には10年間延長するための取り決めが6か国1国際機関の間で署名され（中国、EUは、他5ヶ国より遅れて署名）、Phase IIとして活動が継続されている。

現在、①先進燃料、②機器・BOP、③安全・運転性、④システム統合・評価の各プロジェクトについて、参加国による署名が行われ共同研究が実施されている。また、第4世代炉の“安全設計クライテリア(SDC)”と“安全設計ガイドライン(SDG)”の検討を日本主導のタスクフォースとして実施している^[1]。各プロジェクトの最近の動向は以下のとおりである。

- ① 先進燃料プロジェクト：日本、フランス、米国、韓国、EU、中国、ロシアが参加し、ドライバー燃料、MA含有核変換燃料、及び高燃焼度燃料の3分野において、評価、最適化、及び実証を目指した協力を

実施している。対象となる燃料形態は、酸化物、金属、窒化物、及び炭化物であり、燃料物性、燃料製造、照射試験・照射後試験、被覆管材料、その他の各分野について情報交換が行われている。2007年3月に開始された本プロジェクトは、2018年4月にPhase2に係る研究協力を開始したところである。

- ② 機器・BOPプロジェクト：日本、フランス、米国、韓国が参加し、ISI&R、先進エネルギー変換技術、ナトリウム漏えい及び漏えい後の事象評価、蒸気発生器、ナトリウム運転技術及び新規ナトリウム試験設備の各分野について情報交換を実施している。中国及びロシアが新規参加を希望しており、両国のプロジェクトプランの審議が進行中である。
- ③ 安全・運転性プロジェクト：日本、フランス、米国、韓国、EU、中国、ロシアが参加し、炉心安全、崩壊熱除去系・自然循環、シビアアクシデント、外部事象、炉停止系、格納設備・ソースターム、コード検証、PRA、ナトリウム・水・コンクリート反応、安全設計、安全解析の各分野について情報交換が行われている。米国・FFTF炉で実施された2次系除熱喪失時の固有安全性確認試験結果を用いたベンチマークが提案され、ベンチマーク参加国を募集中である。
- ④ システム統合・評価プロジェクト：日本、フランス、米国、韓国、EU、中国、ロシアが参加し、参加国が提案するプラント概念の評価を実施している。また、提案概念に基づき、R&D ニーズの検討を実施している。

2-2. 経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）を通じた国際協力

OECD/NEA では、Nuclear Innovation 2050 (NI2050) – A Roadmap to a Carbon-free Energy Future^[2]を2015年7月に立ち上げ、米国、フランス、ロシア、日本を始めとする18か国、EU、IAEA等が参加してキックオフ会合(Workshop)が開催された。今後の世界的なエネルギー需要の高まりと地球温暖化への対応のため原子力の果たすべき役割がますます大きくなる中で、放射性廃棄物の管理や環境適合性、経済性向上など次世代原子力技術の開発を促進することがその目的である。2030年頃までと2050年を見通した長期課題に分けて核分裂原子炉と燃料サイクルの技術課題について、研究開発とこれを支えるインフラの整備を始めとする国際的な研究協力プログラムの立ち上げに向けて議論がなされた。2015年から2018年秋にかけてアドバイザーパネル会合、専門家会合を重ね、9つのR&Dプログラムがまとめられた。SFR関連では、Advanced Components for Generation IV: DHRS to foster safety and economics という件名でシビアアクシデントを含む事故時の崩壊熱除去の安全性向上について、様々な体系での試験、解析評価を含む計画が原子力機構から提案されている。2018年末までで活動に一区切りがつけられ、成果をまとめたレポートの作成が進んでいる。今後は、提案された各プログラムの具体化が、OECD/NEAを始めとする様々なチャンネルで展開されることになる。

この他、SFRに関連した活動として、各国における新型炉の開発動向のサーベイ、これに基づく炉心材料及び構造材料開発やその規格基準化における炉型共通技術課題の摘出、その解決の方向性に関する議論及びレポート作成等の活動が専門家会合において継続されている。

2-3. 国際原子力機関（IAEA）を通じた国際協力

IAEAにおいては、協力研究計画等を審議する高速炉技術ワーキンググループ（TWG-FR）を通じて、各国の高速炉技術に関する研究開発動向等の情報交換、国際協力研究の調整等を行っている。毎年開催されているTWG-FR会合は、直近では2018年5月に中国で開催された。また、TWG-FRの元で、米国EBR-IIや中国CEFRでの試験データを用いたベンチマーク解析、ナトリウムに関するデータベース構築(NAPRO)など共同研究プロジェクトが進められるとともに、各種情報交換（知識データベース、ナトリウム試験施設のブックレット作成等）が行われている。

この他、革新的原子炉及び燃料サイクルに関する国際プロジェクト（INPRO）を通じて、評価手法の開発や改良、サイクル諸量評価を実施、さらに、核燃料サイクルオプション技術ワーキンググループ（TWG-NFCO）を通じて、毎年燃料サイクル諸活動への提言及び各国の核燃料サイクルに係る情報交換を行っている。

3. 二か国間協力

3-1. 米国との協力

日米二か国間協力は、日米政府間の「民生用原子力協力に関する二国間委員会」の下に発足した日米民生

用原子力研究開発協力作業部会(CNWG)の一環として実施されている。CNWGは、1) 新型炉、2) 核燃料サイクル・廃棄物管理、3) 軽水炉の分野における研究開発の協力から構成され、SFRに関わる協力は1)の枠組みで実施されている。

具体的には、SFR 構造材料、モデリング&シミュレーション、金属燃料炉心・安全評価に関わる協力が進行中である。2018年5月24日に行われた第6回CNWG本会議では、日米双方の原子力政策や研究開発動向について紹介があった後、日米間の共同研究を通じて、研究施設の相互利用を促進する方策について議論がなされたほか、各分野における協力の進捗状況の報告が行われ、日米二国間協力関係をより一層強化することが合意された。

3-2. フランスとの協力

平成26年5月、日仏両政府はフランスの第4世代SFRの実証炉であるASTRIDに関して、研究開発を実施する主体や協力期間、意思決定の枠組み等を規定する「第4世代原子炉ASTRID計画及び高速炉協力に係る日本当局とフランス共和国原子力・代替エネルギー庁の間の取決め」に署名した。さらに、平成26年8月には、日仏両国の実施機関間で「日本原子力研究開発機構、三菱重工株式会社、三菱FBRシステムズ株式会社とフランス共和国原子力・代替エネルギー庁、AREVANPとのASTRID計画及びSFRの協力に関する実施取決め」を締結した。これら取決めに基づき高速炉分野での系統・機器の設計や、関連する解析・試験等に係る協力を着実に進めてきた^[3]。

本協力では、日仏共通の設計技術として、特に重要性の高い安全性向上技術やタンク型炉の原子炉構造関連技術に着目した10項目の設計分野(崩壊熱除去系、受動的炉停止機構、免震技術、過酷事故緩和設備(コアキャッチャ)等)について協力を進めている。例えば、崩壊熱除去系に関しては、仏のタンク型炉における知見と日本の信頼性の高い技術を組み合わせることにより、タンク型炉に適合した信頼性の高い強制循環方式の崩壊熱除去系の設計概念を補助系や配置を含めて構築した^[4]。R&D分野においては、炉心燃料、炉技術、シビアアクシデントに着目した計26項目の分野について、データや技術オプションを拡充しつつ日仏の役割分担を通じたコスト低減・開発リスク低減を図り、合理的な研究開発を進めている。本協力を通じ、フランスの経験から得られたタンク型炉特有の知見を獲得し、国内タンク型炉に係る系統設計や機器設計に資する知見を蓄積している。また、共通R&D項目の継続及び拡大に向けた日仏実証炉の仕様共通化について、ワーキンググループを設置して日仏間で協議を進めており、現実施取決め期間(~2020年)以降の協力については、現ワーキンググループでの評価結果を踏まえて今後協議することとしている。

3-3. カザフスタンとの協力

高速炉分野におけるカザフスタン共和国との協力は、1998年より本格的に開始された。この協力はEAGLE(Experimental Acquisition of Generalized Logic to Eliminate recriticalities)計画と称され、SFRでの炉心損傷事故(CDA: Core Disruptive Accidents)時に生じる再臨界の問題を対象に、同国の国立原子力センター(カザフNNC)が所有する試験用原子炉施設IGR(Impulse Graphite Reactor)等を用いた試験研究を展開してきた。IGRでは燃料集合体規模の燃料を溶かす試験を実現させ、これまで核加熱により燃料ピン束を溶融させて熔融燃料の移行挙動に関わる様々なデータ・知見を蓄積するとともに、熔融燃料を炉心領域から流出させる設計方策が再臨界問題の排除に有効であることを確認してきた。現在は第3期EAGLE計画が進められており、再臨界が防止された後の長期的な燃料の再配置と冷却を主要課題とした試験研究を展開している。本計画の実施により炉心損傷事故の影響が原子炉容器内に格納できることが示され、高速炉の安全性向上に大きく貢献することが期待される。

3-4. その他の国際協力

・日独仏SIMMER開発協力

SIMMERはSFRにおけるCDAの高精度シミュレーションを目的とした核熱流動の総合安全解析コードである。原子力機構は本コードの開発を主体的に進めるとともに、1995年から20年以上にわたって欧州研究機関と共同で改良および実験的検証を進めてきた。この協力により、欧州各機関で蓄積された安全試験データを用いたコード開発、体系的かつ計画的に実施した検証研究の分担実施、および各機関におけるSFR安全解析への適用研究、を通じてSIMMERをSFRの安全評価における国際的な標準的手法として整備するとい

う成果を得てきた。今後も各国における高速炉開発状況に対応しつつ、国際的な安全研究分野の技術・人材を最大限に活用し、高速炉実用化のための安全評価技術基盤の確立に貢献することを目的として、国際協力体制を維持・強化する。

4. おわりに

本稿では、我が国の SFR 研究開発における国際協力の現状を紹介した。研究開発における国際協力は、評価手法や規格基準類の整備・国際標準化、インフラの共同利用や試験データの相互補完による研究開発自体の合理化・効率化、そして人材育成の観点から有効である。他電源との競争の激化など原子力を取り巻く社会環境は大きく変化していることから、世界的にもリソースの共有を促進する動きが活発化している。今後は、原子力関係閣僚で決定された RM に基づき我が国の研究開発を進め、実用化のための技術基盤の確立とイノベーションの促進に取り組んでいくことになるが、その際には各国の政策状況の変化に柔軟に対応しながら、米国やフランスを中心とした二か国間協力や GIF 等の多国間協力をさらに戦略的に活用することで、効果的かつ効率的に高速炉サイクルの実用化に向けた研究開発を展開していくことが肝要である。

参考文献

- [1] https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_93020/safety-design-criteria
- [2] <https://www.oecd-nea.org/ndd/ni2050/>
- [3] Frédéric VARAINE, et al., “The Collaboration of Japan and France on the Design of ASTRID Sodium Fast Reactor”, Proceedings of ICAPP 2017 (2017)
- [4] Edouard HOURCADE, et al., “ASTRID Nuclear Island design: update in French-Japanese joint team development of Decay Heat Removal systems”, Proceedings of ICAPP 2018 (2018)

*Hiroyuki Ohshima¹

¹Japan Atomic Energy Agency