世界の高速炉サイクル技術開発の動向 第1回

加速する高速炉開発：2020年に商用炉の運転開始

福井大学 竹田 敏一,

日本原子力研究開発機構 佐賀山 豊, 日本原子力発電(株) 巽 良隆

燃料を消費しながらその燃料を効率よく生み出す高速炉の開発が、各国で加速してきた。ロシアとインドでは商用炉の運転開始目標を2020年に定め、中国は2030年頃、日本、フランス、韓国は2040～50年の実用化をめざしている。その中でもインドと中国は、今世紀半ばまでに200 GWeを超える高速炉を導入し原子力発電の主流とする国家戦略を打ち出した。この連載では、国際原子力機関(IAEA)が2009年12月に京都市と敦賀市で開催した国際会議(FR 09) “International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles—Challenges and Opportunities”での議論を中心に、各国の高速炉とその燃料サイクル技術(高速炉サイクル技術)の開発動向と技術開発の現状、そして各国がかかえる重要課題について、3回にわたって紹介する*。

年も押し迫った2009年12月、京都市と敦賀市で開かれた国際会議の参加者は、小さな興奮に包まれていた。IAEA主催で日本原子力研究開発機構がホストを務めて開いた高速炉システムに関する国際会議(FR 09) “International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles—Challenges and Opportunities”が、それである。この会議は1991年の第5回京都会議を最後に中断していたが、実に18年ぶりに再開された。

この会議が開かれた背景には、国内外での高速炉開発機運の高まりがある。そして、その会合で最も注目されたのが、ロシアと中国、そしてインドの動向だ。ロシアは建設中の実証炉 BN-800 (880 MWe) に続く商用炉 BN-1200 (1.22 GWe) の運転開始目標を2020年に定め、インドは2023年までに6基の商用炉を、また中国も2030年までに商用炉を運転開始させるという野心的な計画を打ち出すと、一部の参加者からは驚きと嘆息の声が上がった。FR 09での議論を中心に各国の高速炉サイクル技術

の開発動向を紹介していくこの連載では、今回の FR 09 の意義を IAEA から改めて紹介したうえで、まず、各国の動向の大きな説明から始めることとする。

FR 09の意義

エネルギーの未来に関して可能性のある多くのシナリオでは、原子力の重要な役割が予見されている。世界人口の増加する中で、先進国と発展途上国のエネルギー消費の著しいアンバランス、持続する世界的な経済発展、温室効果ガス排出への懸念、高騰する化石燃料価格、さらに、エネルギー供給保障への懸念は、いま高まっている原子力への期待の原動力となっている。

世界のエネルギーミックスの中へ原子力が大規模に受け入れられるかは、経済性、安全性、天然資源の見極め、廃棄物軽減、核不拡散および国民の支持の観点から、持続可能性を高める重要な推進力になれるかどうかによる。高速スペクトル炉(高速炉)とそのリサイクルシステムは、この持続可能性を大幅に増大させる。高速炉は、核分裂性燃料の生産や廃棄物発生量とその環境影響の軽減に柔軟に対応できるため、原子力の長期的オプションとして期待されている。

今回の連載記事に見られるように、高速炉および関連する燃料サイクル研究や技術開発は、多くの国々の研究・産業機関、および大学で再び重要課題となっている。持続的な発展のために原子力利用の恩恵を最大限に引き出すには、技術革新が重要である。高速炉の技術革

Trends of Fast Reactor Cycle Technology Development in the World No.1 ; Accelerating Fast Reactor Development : Start of Operation of Commercial Reactors in 2020 : Toshikazu TAKEDA, Yutaka SAGAYAMA, Yoshitaka TSUTSUMI.

(2010年 5月31日 受理)

*本連載では、以下を予定している。

第2回 各国のナトリウム冷却高速炉サイクル技術開発の現状と展望

第3回 革新的なナトリウム冷却高速炉サイクル技術と開発課題

新は、幅広い科学技術分野(例えば、核データ、原子炉物理、工学設計、手法の評価・検証等)で進められている。日本の「もんじゅ」と「常陽」、インドの PFBR、中国の CEFR、ロシアの BN-800などが、今後二、三十年にわたって豊富な炉物理、炉工学的成果や運転経験のデータを生み出すであろう。これらのデータを活用し、将来の高速炉設計を改善するために必要なフィードバックを提供する国際的な共同研究および技術開発への取り組みは、必須である。特に、理論的および実験的ベンチマークを活用したデータとコンピュータコードによる信頼性評価・検証・的確化(V&V&Q)は、運転中あるいは運転予定の高速炉への国際協力が最も有益になる領域である。IAEA は、国際協力を不可欠なものとして捉え、専門知識を蓄積、活用して相乗効果を高めるための枠組みを提供し、高速炉開発に関わるメンバー国に利益をもたらすようにしている。

今回の会議では若者を含めて高速炉開発の位置づけ、課題や国際協力の重要性などについての認識を共有できた¹⁾。この日本での会議を端緒として高速炉システム国際会議を3年おきを目途に、IAEA 主催で関係国の間で開催していきたい。

(IAEA・Alexander Stanculescu)

先進的な位置を占めるロシア

高速炉開発に熱心に取り組んでいる国は現在、世界で6ヶ国ある。まず、それらの国々の高速炉開発計画の概要を整理しておこう(第1図)。この図からもわかるように、高速炉の開発に最も先進的に取り組んでいるのが、ロシア²⁾だ。

そのロシアは、環境問題と化石燃料への依存軽減の観点から、原子力を推進している。2030年頃には国内電力需要の約20%(52~62 GWe)を原子力で賄う計画を持つ。国家経済の近代化と技術革新については、大統領によって重点5課題が選定されており、その中に原子力開発が入っている。また2020年までを展望した「連邦特別プログラム」でも、軽水炉の海外展開とともに高速炉サイクルの活用が最も重要とされている。

これまでに世界で数多くのナトリウム冷却高速炉(SFR)が運転されてきており、その運転実績の累計は約400炉・年に達する。その中でロシアは、その約35%を占める140炉・年もの豊富な運転経験を有している。現在、SFR 実験炉 BOR-60(12 MWe)と原型炉 BN-600を

(注)インドの2050年の高速炉を含めた原子力発電設備容量は暫定値(海外からの軽水炉の輸入量を見込んで現在見直し中とのこと)

第1図 各国の高速炉開発計画の概要

運転している。BN-600は、1980年の営業運転開始以降、平均75%程度の安定稼働率を達成し、故障率の減少、信頼性向上に自信を見せている。建設中のBN-800用の混合酸化物燃料にはペレット燃料と乾式再処理とセットになる粒子振動充填燃料が考えられている。

また、並行して、将来の局地利用に可能な小型炉の開発にも力を入れている。原子力潜水艦で利用実績のある鉛ビスマス冷却の100 MWeの小型高速炉(SVBR-100)がそれである。さらに窒化物燃料鉛冷却高速炉(BREST)の開発も進めている。これらは、化学的に安定な冷却材の利用により、安全性を追求したものとなっている。高速炉の導入シナリオは、2020年の商用炉BN-1200の運転を皮切りに、燃料製造や再処理の技術を実証しながら積極的に推進するとしている。

(福井大学・山口勝久)

早期実用化をめざすインドと中国

世界第2の人口大国であるインド³⁾では近年、工業発展がめざましく、電力需要が急速に伸びている。その需要を賄う電源として、原子力発電、とりわけ高速炉が重要な位置を占めている。インドは3段階の原子力開発を進めており、まず天然ウラン燃料を用いた重水炉を運転する。その使用済燃料の再処理によりプルトニウムを回収し、第2段階の高速炉に使用する。この高速炉で増殖したプルトニウムや、海外から導入した軽水炉の使用済燃料から回収したプルトニウムを用いて、順次、高速炉を増設していく。最終的には、新型重水増殖炉を用いて、国内に豊富に存在するトリウムと核分裂性の²³³Uを燃料としたトリウム燃料サイクルに移行するというものである。なお、その移行期に必要な²³³Uは、高速炉のブランケットにトリウム燃料を装荷して生産される。

1985年には炭化物燃料SFR実験炉FBTR(13 MWe)が運転を始めている。その運転経験をもとに、自主開発の酸化物燃料SFR原型炉PFBR(500 MWe)を2003年から建設中で、2011年の臨界、2012年の運転開始を目指す。インディラ・ガンジー原子力研究センターを中心とした精力的な研究開発や将来計画には大いに興味が引かれる。今回の会議では、PFBRよりも経済性と安全性を向上させた酸化物燃料商用炉のツインプラントを、2023年までに合計3セット(6基)運転開始させることを明らかにした。そのうちの2基をPFBRに隣接して燃料サイクル施設と併設して建設し、2020年に運転開始する。その後は、1 GWe出力でより増殖性に重点をおいた金属燃料炉を建設していくという。原子力委員会が現在検討中とのことであるが、2050年頃には、約290 GWeの全原子力発電設備容量のうち、約240 GWeを高速炉で担いたいとのことである(第2図)。

第2図 インドの高速炉導入シナリオ³⁾

第3図 中国の高速炉導入シナリオ⁴⁾

一方、世界第2位の経済大国になった中国⁴⁾では、2050年頃の原子力エネルギーを240~250 GWeとする計画が政府から発表されている。原子力エネルギーの中で高速炉の比率を増すことが期待されており、2050年頃には約200 GWeを目標としている(第3図)。酸化物燃料(当初は濃縮ウラン)SFR実験炉CEFR(20 MWe)を2010年に臨界させ、その後、2018~20年に実証炉CDFR(600~900 MWe)、2030年に商用炉CCFR(800~900 MWe)を運転開始する計画だ。並行して、より高増殖の金属燃料実証炉CDFBR(1~1.5 GWe)を2028年に、その商用炉CCFBRを2030~32年に運転開始するとしている。

上述のように、インド、中国は、最終的には金属燃料を用いた高速炉を指向し、2020~30年からの早期の高速炉サイクル実用化という点で共通している。両国とも2050年以降には化石燃料への依存度を低減し、高速炉を原子力発電の主流とする計画である。中国では、実験炉から実証炉への移行にあたり、自国による研究開発に加え、ロシアとの技術協力で開発を加速したい意向である。そのために、中ロ両国は2009年10月、商用高速炉BN-800を2基、中国に建設する事前プロジェクトと設計作業に関するハイレベル協定を締結した。ロシアの高速炉の輸出の可能性、アジアが高速炉開発の一大中心となる可能性が予感される。

(日本原子力研究開発機構・佐藤浩司)

フランスは2020年にプロトタイプ炉を運転開始

19サイトに58基の軽水炉をもつ原子力発電大国、フランス⁵⁾は、実験炉ラプソディ、原型炉フェニックス、実証炉スーパーフェニックスの開発経験を持つ世界有数の高速炉開発国でもある。2006年、シラク大統領(当時)は第4世代プロトタイプ炉(付録参照)の建設を明言した。現在、SFRプロトタイプであるASTRID(Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration)、長期的オプションとしてのガス冷却高速実験炉ALLEGROの開発を推進している。SFRであるASTRIDはフランスの高速炉開発の本命ともいえるもので、商用炉に採用する候補技術および安全性の実証を主要な目的とした500~600 MWeの実証炉である。フランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)、AREVA、フランス電力(EDF)といった官庁・研究機関、企業、電気事業者が一体となり研究開発を進めている。その開発計画は、まず2012年に技術仕様を選定し概念設計を行い、2015年から基本・詳細設計を実施し、フェニックス炉に隣接して建設し、2020年頃に運転を開始するというものである。

燃料サイクル技術の開発では、EPR(欧州加圧水型炉)などの第3プラス世代炉の使用済燃料をウランとプルトニウムの共抽出(COEX)技術で再処理し、第4世代炉の燃料としてウラン、プルトニウム、マイナーアクチニド(MA)を一括回収するGANEX(Group ActiNide EXtraction)技術を開発している。

フランスは、2040年頃からの高速炉サイクルの実用化を目指している(第4図)。高速炉と軽水炉を並存させることが特徴で、これは第3世代炉の寿命延長とEPRの設置を反映したものとなっている。

(日本原子力研究開発機構・遠山伸一)

2050年前の商用炉導入をめざす日本

日本⁷⁾では、高速炉サイクル技術は「第3期科学技術基

第4図 フランスの高速炉導入シナリオ⁶⁾

本計画」(2006~2010年度)で国家基幹技術の1つとして位置づけられている。その実用化に向けたマイルストーンは「原子力政策大綱」、「エネルギー基本計画」で示されている。すなわち、原子力機構は「高速炉実用化研究開発」(FaCT プロジェクト)により高速炉サイクルの実用化像を2015年頃に提示し、オールジャパンの体制で2025年に経済性と安全性を高めた実証炉(500~750 MWe)の実現、2050年前からの商用炉の導入を目指す。FaCTプロジェクトでは、酸化物燃料SFRの開発に重点化し、設計研究と要素技術開発を進めている。「常陽」や「もんじゅ」の運転・開発経験がそれに反映される。

今年5月に14年ぶりに「もんじゅ」は試運転を再開した。その間、ナトリウム漏えい事故の原因究明と対策工事、安全総点検、プラント確認試験、耐震強度の確認や設備の不具合の改修などが実施された。今後は、発電プラントとしての信頼性の実証と運転経験を通じたナトリウム取扱技術の確立という所期目的の達成に取り組む。そして、SFRの炉心や高温ナトリウム機器などの設計技術を検証し、FaCTの開発成果の技術的信頼性を向上させるとともに、実機でしか得られない運転・保守・補修経験に基づくプラント技術の確立を目指す。また、所期目的の達成後は、高性能化に係わる研究開発を実施するとともに、「もんじゅ」を国際的な研究開発の拠点として整備していくことが表明されており、国内外から大きな期待が寄せられている。

日本は、フランスとほぼ同時期の2050年前からの高速炉の実用化を目指している(第5図)。軽水炉燃料サイクルの進展やウランの需給を見て、漸次、軽水炉および次世代軽水炉を高速炉に置き換える計画だ。資源エネルギー政策の見直しにより原子力設備容量の増大も期待される。なお、2010年4月、経済産業省は「エネルギー基本計画」の見直し案を提示した。その中では、地球温暖化防止対策の一つとして2030年までに少なくとも14基以

第5図 日本の高速炉導入シナリオ⁷⁾

上の原子力発電所の増設が提示されている。原子力エネルギー全体への期待を示すものである。

(佐藤浩司)

使用済燃料の保管を懸念する韓国

韓国⁸⁾では、使用済燃料の保管が大きな課題として原子力開発の行く手を阻んでいる。使用済燃料を含む放射性廃棄物の安全管理のため、2008年に放射性廃棄物管理法が成立した。現行のままでは2016年までに使用済燃料発生量がサイト貯蔵容量の限界を迎えるため、原子力エネルギー利用の継続上、大きな課題となっている。当面は、中間貯蔵施設の建設により対応しようとしているが、その解決の切り札が高速炉の開発だ。金属燃料SFR実証炉 KALIMER-600 (600 MWe) の概念設計を実施しており、乾式処理技術開発などを進め、2028年までに運転開始する。さらに、1.2 GWe の商用炉 KALIMER-1200 を燃料サイクル施設と一体型で建設し、2040年ごろ運転開始という長期的展望が示されている。あわせて、金属燃料開発を進めており、U-TRU-Zr 系金属燃料集合体を2025年から生産する計画としている。

韓国の高速炉の商用化時期は日仏とほぼ同時期である(第6図)。やはり、高速炉と軽水炉を並存させ、使用済燃料のサイト貯蔵問題を解決し、放射性廃棄物量を低減しつつ原子力エネルギーの拡大を狙う。高速炉の持つウラン資源の有効利用の利点に加え、MA の効率的燃焼による廃棄物量およびその毒性低減の可能性を追求したものである。高速炉が全原子力発電設備容量に占める割合は、2100年頃にはおよそ40%になると推定されている。

(電力中央研究所・井上 正)

米国の動向

一方、一時再処理リサイクル路線に回帰した米国⁹⁾は、2009年の政権交代後、ユッカマウンテン最終処分場の中止の動きもあり、原子力政策が不透明な状況にある。しかし、高速炉を含む燃料サイクルの研究開発に関して

は、長期的視点に立って基礎研究を着実に進める方針を表明している。現在計画している研究は、地層処分の方法や核変換など将来の選択肢を充実させるための研究、鍵となる物理現象の解明とそれに必要な実験やモデリング・シミュレーションの技術蓄積である。これらは、将来の高速炉サイクルの実用化にも必要な技術を開発するためのものであり、会議でも活発な研究開発の紹介があった。

2010年1月、米国の核燃料サイクルのバックエンド政策の検討のためにブルーリボン委員会¹⁰⁾が設立された。米国のサイクル戦略が早期に明確になることが待ち望まれる。

(遠山伸一)

知見の共有をめざす国際的な取組みも

高速炉導入シナリオを見てもわかるように、各国での取組みは、その国が抱えるエネルギー情勢や高速炉の開発経験によってさまざまである。一方で、2000年に米国が提唱した第4世代原子力システムに関する国際フォーラム(GIF: Generation IV International Forum)や、2001年からIAEAが進めている INPRO(International Project for Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles: 革新的原子炉および燃料サイクル国際プロジェクト)といった国際的な取組みも盛んになっている。会議でも、GIFの安全性・信頼性、経済性、持続可能性(省資源性と廃棄物の最小化)、核拡散抵抗性・核物質防護という4つの性能目標に関する議論が頻繁に聴かれた。

IAEAは、他にも、高速炉作業部会(TWG-FR)や材料・燃料サイクルの作業部会(TWG-NFCO)を設置し、世界の高速炉サイクルの技術情報交換を促進し、また国際共同研究を企画し活動している。EUは、2008年の理事会会で「欧州エネルギー技術戦略構想」を承認し、SFRを第1候補としつつ、ガス冷却高速炉(フランス主導)あるいは ELSY と呼ばれる鉛冷却高速炉(EU 主導)を欧州に建設することも検討している。OECD/NEAでは、GIFの推進とともに、核データライブラリーの作成や地層処分の負担の軽減のための分離・変換の情報交換を1990年以来実施している。SFR以外にも、重金属炉(鉛、鉛ビスマス冷却炉)、加速器駆動システムについての研究も推進している。

このようにSFRの研究開発は、各国の知見を国際的に共有し、革新炉システム技術を含むさまざまな研究開発を融合しつつ、幅広く推進されている。長い期間と多大な人的資源や資金を必要とする一方で、早期の実用化が期待されている。よって、仕様の決定、基準の標準化、共通の解析ツールの開発などの分野で、各国の協調と競争が今後ますます重要になっていくであろう。

第6図 韓国の高速炉導入シナリオ⁸⁾

—参考資料—

- 1) 城 隆久, “FBR 実用化にむけた国際協調の在り方について—高速炉システム国際会議(FR 09)ヤングジェネレーションイベントにて”, 日本原子力学会誌, 52[4], 235(2010).
- 2) IAEA-CN-176/FRP-06, (2009).
- 3) IAEA-CN-176/FRP-03.
- 4) IAEA-CN-176/FRP-01.
- 5) IAEA-CN-176/FRP-02.
- 6) FR 09パネル 2 での P. Frigola の発表資料.
- 7) IAEA-CN-176/FRP-04.
- 8) IAEA-CN-176/FRP-05.
- 9) IAEA-CN-176/FRP-07.
- 10) <http://brc.gov/>

著者紹介

竹田敏一(たけだ・としかず)

本誌, 52[2], 97参照.

佐賀山 豊(さがやま・ゆたか)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)機械工学, 原子力発電工学, 国際原子力開発

巽 良隆(たつみ・よしとか)

日本原子力発電(株)

(専門分野/関心分野)原子炉工学, 高速炉, 保守, 放射性廃棄物処理・処分

○第3世代プラス炉は、近未来の導入をにらんで経済性向上を目指した革新的な設計を採用した炉
 ○第4世代炉は、2030年頃の実用化を目指し、安全性、経済性、持続可能性、核拡散抵抗性などを総合して、他のエネルギー源に対して十分な優位性を持つ原子炉。

付録 原子炉開発の進展