

将来の低炭素社会を実現するための 原子燃料サイクル技術

Nuclear Fuel Cycle Technologies to Realize Future Low Carbon Society

深澤 哲生

Fukasawa Tetsuo

岡田 喜久雄

Okada Kikuo

澤田 周作

Sawada Shusaku

清水 仁

Shimizu Masashi

CO₂をほとんど排出しないエネルギー源の長期的な確保や、現状ではきわめて低い日本のエネルギー自給率の向上のためには、使用済燃料から有用な燃料物質を回収し、再び原子炉で使用する原子燃料サイクルの確立が不可欠である。高速増殖炉原型炉「もんじゅ」は2010年度に再起動する見通しで、六ヶ所再処理工場や使用済燃料中間貯蔵施設も、近い将来に完成予定である。また、第二再処理工場に関する議論が2010年度中には開始されるとみられ、高速増殖炉の実証炉は2025年ごろに実現し、経済性などの条件が整うことを前提に商業用高速増殖炉の導入が2050年ごろと予想されている。

日立グループは、将来の低炭素社会を実現するために、現在進行している再処理「もんじゅ」、中間貯蔵などのプロジェクトに取り組むとともに、高速増殖炉、先進再処理など将来技術の開発を進めている。

1. はじめに

国際的な気候変動に対する懸念の高まりから、地球温暖化の原因とされるCO₂を発電時に排出しない原子力発電に関心を示す国が増えている。太陽光発電や風力発電も、原子力発電と同様に発電時にCO₂を排出しないが、広大な面積を必要とし、天候の影響を受けるという特徴を有している。

日本のエネルギー自給率は、原子力を国産とした場合には約18%、国産としない場合には約4%となり、諸外国のエネルギー自給率と比べ、きわめて低い。特に、エネルギー資源の中でも石油は約90%を中東地域からの輸入に依存しているため、エネルギーセキュリティの向上が望まれている。

また、原子力の燃料となるウランも、全量を輸入に依存

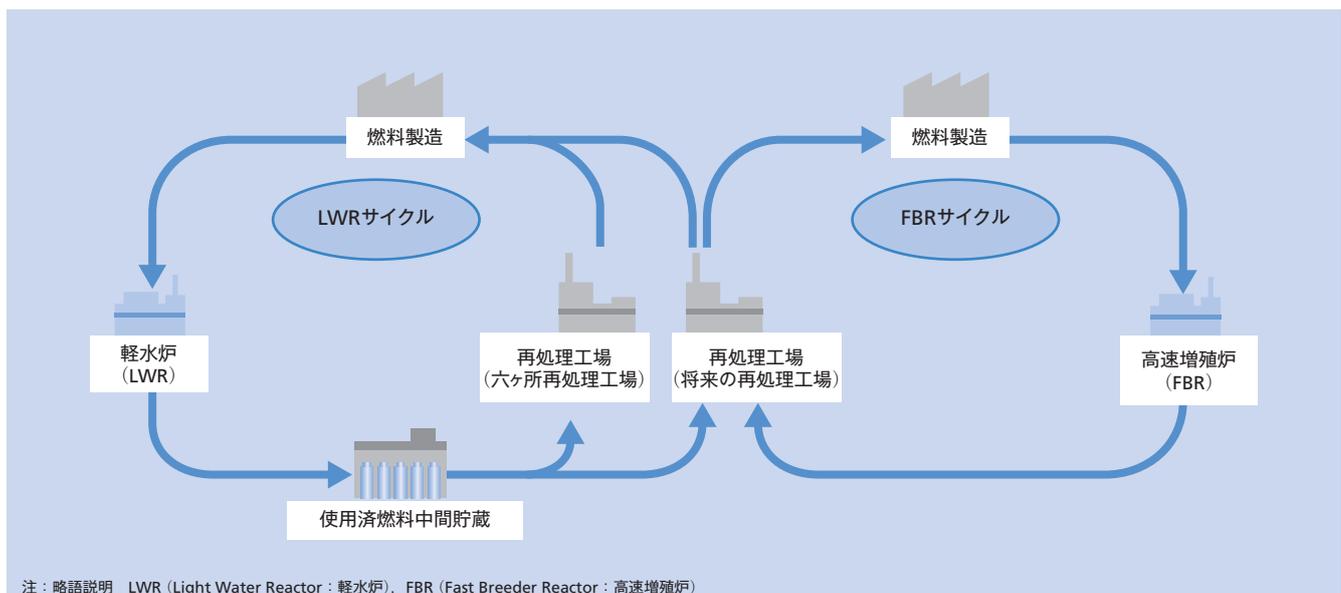


図1 | 原子燃料サイクルの概要

軽水炉 (LWR) 使用済燃料の再処理で回収されるプルトニウムは当面LWRにリサイクルされ、将来的には高速増殖炉 (FBR) にリサイクルされる。将来のFBRサイクルによって、原子力エネルギーの長期安定供給が可能となる。

している。世界のウラン資源量は有限であり、現状100年程度と予想されているウラン資源量を10倍以上の長期間にわたって有効活用するためには、原子燃料サイクルの確立が必要となる。海外においても、フランス、ロシア、インド、中国、韓国が早期の高速炉サイクル実現をめざしている。

ここでは、原子燃料サイクルの国内外の動向と、日立グループにおける燃料サイクルへの取り組み、および技術開発の状況について述べる（図1参照）。

2. 燃料サイクルの国内外動向

日立グループは、燃料サイクル分野において、使用済燃料中間貯蔵、使用済燃料再処理、FBR (Fast Breeder Reactor: 高速増殖炉)、放射性廃棄物処理処分の研究開発・事業化を進めている。

現在、国内で原子力発電しているLWR (Light Water Reactor: 軽水炉) の使用済燃料は、発電所サイトのプールで貯蔵され、一部が青森県上北郡六ヶ所村にある日本原燃株式会社の六ヶ所再処理工場貯蔵プールに移送されている。また、青森県むつ市にサイト外の間貯蔵施設が建設される予定である。

LWR使用済燃料の再処理の状況を見ると、独立行政法人日本原子力研究開発機構の東海再処理施設が、1997年9月から2010年3月までに約1,140 tの燃料を処理している。また、年間最大処理能力800 tUの六ヶ所再処理工場が2010年10月の竣(しゅん)工をめざし、建設が進められている。さらに、寿命40年の六ヶ所再処理工場に続く第二再処理工場建設の検討が、2010年度中に開始される予定である。

FBRは、日本原子力研究開発機構が実験炉「常陽」と原型炉「もんじゅ」を所有し、「もんじゅ」は2010年度に再開される見通しである。また、実用炉の研究開発も推進されており、2025年の運転開始をめざしている実証炉は、実用炉を念頭に置いて設計中である。

FBR実用炉は、種々条件が整うことを前提に、2050年ごろの導入開始が予想されている。これは第二再処理工場の運転開始時期と一致し、第二再処理工場回収されるプルトニウムを用いてFBRを導入していくことになる。このため、LWRからFBRへの移行に関する研究開発も、経済産業省と文部科学省を中心に進められている。

廃棄物処理処分は、種々の処理技術が実用化済み、あるいは開発中である。処分については、低レベル廃棄物の処分が六ヶ所村の低レベル放射性廃棄物処理センターで事業化済みであり、高レベル廃棄物の処分候補地を公募しているところである。

海外では、フランス、ロシア、インド、中国、韓国が、日本と同様に、2020年ごろからの高速炉導入をめざしており、特にインド、中国では2050年までに数10基の高速炉を建設するという壮大な計画を有している。米韓原子力協定で再処理が禁止されている韓国は、独自の高速炉燃料サイクルの研究開発を推進中である。また、米国も大量に発生するLWR使用済燃料の貯蔵量を低減するため、燃料サイクルに関する研究開発を再開している。

3. 使用済燃料中間貯蔵

青森県むつ市に2012年の操業開始を操業開始をめざしているリサイクル燃料貯蔵株式会社のリサイクル燃料備蓄センター(図2上の画像参照)は、2007年3月に事業許可申請が行われた。日立グループは、一貫した品質管理・保証の下で製作される自社開発の輸送貯蔵兼用金属キャスクを納入予定であり、同センターで使用される搬送装置の実用性を確認している¹⁾。金属キャスクは、十分な強度、密封、臨界防止、遮蔽(へい)、除熱の各機能を有しており、 $\frac{1}{3}$ モデルを用い、9 mの高さからの落下試験などを行い、安全性・信頼性を確認した。また、同センターの安全審査をサポートするなど、国内初の間貯蔵プロジェクトの支援にも取り組んでいる。さらに、日立グループでは、貯蔵用金属キャスク(図2下の画像参照)も製造している。



図2 | リサイクル燃料備蓄センターと実規模キャスクの外観
青森県むつ市に建設が計画されているリサイクル燃料備蓄センターのイメージ(画像提供:リサイクル燃料貯蔵株式会社)を上、日立グループで製造した貯蔵用金属キャスクを下に示す。

4. 再処理

4.1 六ヶ所再処理工場

六ヶ所再処理工場では、主施設の分離建屋と低レベル廃液処理建屋の建屋幹事会社として建設を取りまとめ、せん断処理・溶解廃ガス処理設備や高レベル廃液処理設備・酸回収設備・低レベル廃液処理設備などの主担当会社として、設計・製作・建設・試運転を進めてきている(図3参照)。

機器類が所定の機能を発揮し、安全かつ安定に運転できるかどうかについては、取り扱う物質を段階的に操業状態に近づけて確認するための試験を実施した。2001年4月からの「通水作動試験」では水・蒸気・空気を、2002年11月からの「化学試験」では放射性物質を含まない化学薬品を、2004年12月からの「ウラン試験」ではウランを、2006年3月からの「アクティブ試験」では使用済燃料をそれぞれ用いて、各設備の機能や性能を確認している。

現在、主施設の「アクティブ試験」はほぼ終了しており、日立グループが担当する設備においても所定の性能が確認されている。

4.2 次世代再処理技術開発

LWRからFBRへの移行期における再処理施設への適用をめざし、フッ化物揮発法と溶媒抽出法を組み合わせた再処理技術FLUOREX(Fluoride Volatility and Solvent Extraction)法の開発を進めている²⁾。

FLUOREX法の開発試験装置を図4に示す。この再処理法は、LWR使用済燃料中の約96%を占めるウランの大部分をフッ化工程で分離することにより、後続の溶媒抽出の設備規模を縮小し、同時に回収ウランを再利用するシステムである。

フッ化工程で揮発性のUF₆(六フッ化ウラン)は、吸着材を用いた精製工程で不純物元素から気体として分離され、高純度のUF₆として回収される。ウラン以外の元素は、



図3 | 六ヶ所再処理工場

六ヶ所再処理工場の外観を示す(写真提供:日本原燃株式会社)。年間最大処理能力は800 tUで、フランス・英国・ドイツ・日本の技術が採用されている。

大部分が不揮発性なのでフッ化残渣(さ)として固体となって残り、酸化物転換(フッ素回収)工程を経て、溶解後、溶媒抽出法により、高純度のウランとプルトニウムの混合物を他の元素から分離回収する。

FLUOREX法は、経済産業省や文部科学省の公募研究、国内外機関の協力などにより、研究開発が進められている。フレーム炉を用いたフッ化試験や、小規模ではあるが実使用済燃料を用いたフッ化試験などによって成立性の確認が行われ、今後は実用化に向けた開発が進められる。

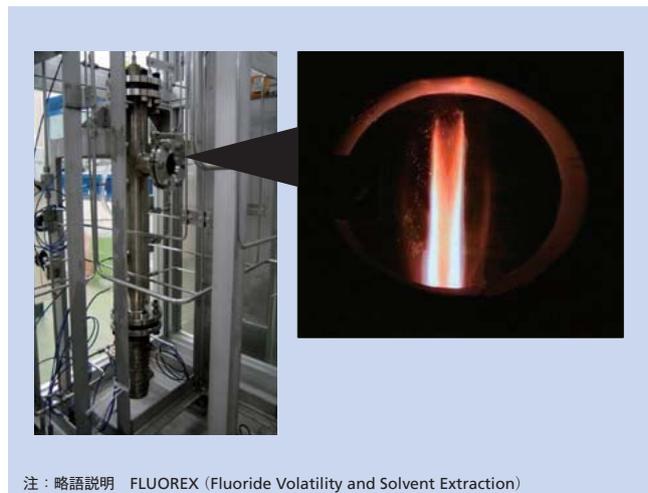
4.3 柔軟な燃料サイクルシステムの開発

移行期の燃料サイクルシステム概念として、FFCI(Flexible Fuel Cycle Initiative:柔軟な燃料サイクル)の研究開発にも取り組んでいる³⁾。

LWRからFBRへの移行期においては、再処理施設はLWRとFBR両方の使用済燃料を処理し、両方に燃料を供給する必要がある。特に、FBR導入に必要な初装荷プルトニウムはLWR使用済燃料から回収することになるため、炉や燃料製造も含めたサイクルの柔軟性が重要である。FFCIでは、まずLWR使用済燃料からウランの大部分を分別除去し、FBRの導入が順調であれば残りの物質をそのままFBRサイクルへ送り、遅延する場合は一時貯蔵してFBRの導入再開に備える。

FFCIにおけるLWR再処理はウラン分別だけを行い、プルトニウム/ウラン回収とFBR燃料製造はFBR再処理と共用する。このため、LWR再処理施設規模の低減が可能であり、LWR使用済燃料を確実に削減することができる。FFCIについても、公募研究で開発中である。

FFCIのウラン分別技術としては、溶媒抽出法、晶析法、



注:略語説明 FLUOREX(Fluoride Volatility and Solvent Extraction)

図4 | FLUOREX法の開発試験装置

FLUOREX法では、LWR使用済燃料から大部分のウランをフッ化物揮発法で分別して高純度UF₆として回収し、フッ化残渣(さ)から溶媒抽出法で高純度のウランとプルトニウムの混合物を回収する。フッ化物揮発法の試験装置とフッ化状況を示す。

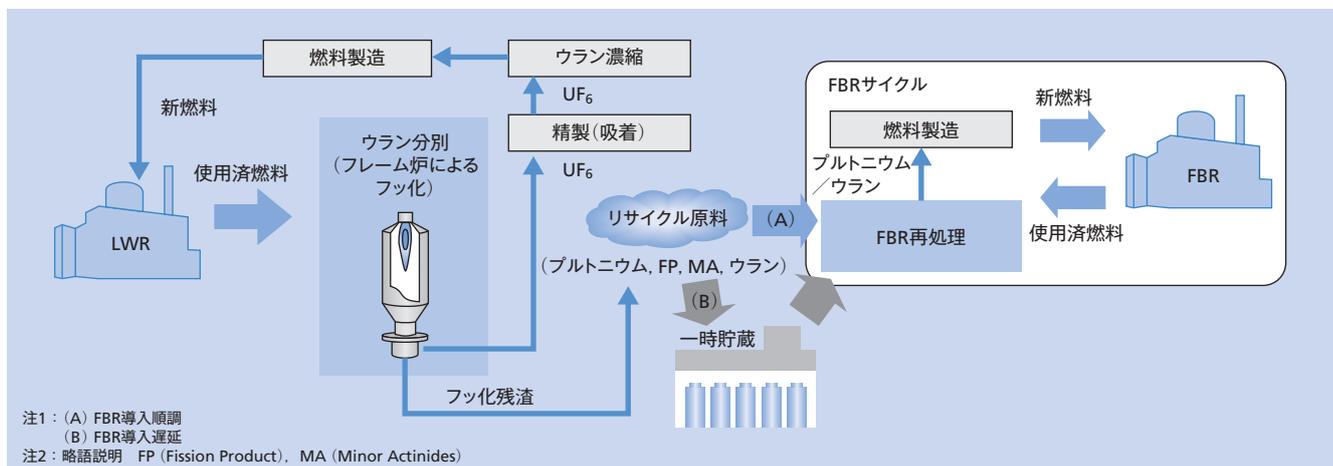


図5 | フッ化法を適用したFFCIのプロセスフロー

LWR使用済燃料から大部分のウランを分別して高純度のフッ化物 (UF_6) として回収する。フッ化残渣 (リサイクル原料) は、FBRの導入状況に応じて、ただちにFBR再処理でウランとプルトニウムの混合物を回収するか、一時貯蔵する。一時貯蔵オプションによりFBR導入速度の変化に柔軟に対応することができる。

沈殿法、フッ化物揮発法などを適用できる。フッ化物揮発法を組み込んだFFCIシステムのプロセスフローを図5に示す。

5. FBR

5.1 FBR原型炉「もんじゅ」

日本原子力研究開発機構のFBR原型炉「もんじゅ」は、部分出力試験中の1995年12月の二次冷却系ナトリウム漏洩 (えい) 事故以来、停止中である。事故後、安全性の総点検やナトリウム漏洩対策などの安全審査、設工認 (設計および工事の方法の変更にかかわる認可)、福井県「もんじゅ安全性調査検討専門委員会」での審議を経て、地元理解が得られた結果、2005年9月に設備改善工事に本格着工し、2007年5月に全工事を完了した。その後、その工事の妥当性を確認する試験を2007年8月に完了し、ナトリウム漏洩事故前の設備健全性が維持されていることを確認する試験が引き続き実施され2009年8月に終了、2010年度の再開をめざしている。「もんじゅ」の外観を図6に示す。

改善工事の概要は、(1) 二次冷却系温度計の交換・撤去工事、(2) ナトリウム漏洩に対する改善工事、および、(3) 蒸気発生器の一つである蒸発器ブローダウン性能の改善工事である。日立グループは、(2) の一部である一次系ドレン弁電動化と二次系室壁・天井への断熱材の設置、総合漏洩監視システムの設置などを担当した。また、その後の確認試験では、納入設備である一次冷却系を中心に、試験計画の立案や結果の評価を実施している。

5.2 実証炉・実用炉技術開発

これまで実証炉の設計研究、実用炉概念検討ならびに、炉心・安全、耐震・構造、熱流動、材料、機器、計測・制



図6 | 高速増殖炉原型炉「もんじゅ」

「もんじゅ」の外観を示す (写真提供: 日本原子力研究開発機構)。実用炉に至る中間規模の原子炉で、電気出力28万kWのわが国で初めての発電設備を有する高速増殖炉である。

御などの要素技術開発に取り組んできた。それらの経験や一次冷却系を中心とした「もんじゅ」までの実機器開発・製作・据付け・メンテナンス経験を生かし、実証炉は2025年ごろ、実用炉は2050年ごろの運転開始をめざして、機器のコンパクト化や統合化などを目標としたシステム概念検討や機器、熱流動、材料・構造などの技術開発に積極的に参画している。

6. 放射性廃棄物処理処分

6.1 廃棄物処理

原子力発電所や再処理施設などからの放射性廃棄物処理技術として、放射性廃棄物を安全に埋設処分するための固化処理技術と、その安全性を確認するための廃棄物検査技術を開発し、実機で運転中である。

固化処理技術では、液体状および粉体状の放射性廃棄物の充填 (てん) 量を増やして、固固体強度や内部空隙 (げき)

率などの陸地での処分基準に適合した「インドラム固化処理技術」を開発した。この技術は近々に実機での運転に適用される見通しである。また、固体状の放射性廃棄物を対象として、従来のバッチ式のモルタル混練方式と比較して設備構成を簡素化した「連続混練設備」を開発した。

廃棄体検査技術は、放射性廃棄物をドラム缶中に安定化処理したものを、ドラム缶外部から非破壊でドラム缶中に存在する放射性物質の種類と量を測定評価するものであり、その放射能評価方法として「スペクトル補正方式」を開発し実用化した。この設備はすでに4プラントに設置されている。

また、建設後数十年経過した放射性廃棄物処理設備の高経年化対策として、経年劣化機器や生産中止品の代替品とのリプレースを推進中である。

6.2 廃棄物処分

日立グループは、TRU (Transuranium：超ウラン核種) 廃棄物処分技術開発の一環として、株式会社太平洋コンサルタントと共同で、1999年度から経済産業省の委託事業「地層処分技術調査等委託費 (TRU 廃棄物処分技術)」の一部として、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターから研究を受託している。この中で、TRU 廃棄物処分用廃棄体を想定した高強度高緻 (ち) 密コンクリート製容器製作時の品質管理として、ひび割れなどの欠陥の検出、サイジング (ひび割れの長さ測定) を目標に、超音波法による検査技術の開発を行っている。

高強度高緻密コンクリート製の小型試験体で確認した結果、固定斜角・端部エコー法およびTOFD (Time of Flight Diffraction) 法において、ひび割れの検出、サイジングの可能性が確認できた。今後は、適用性の確認を進めていく。

また、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関しては、2004年から2007年にかけて関係する機関・大学とともに、経済産業省の「革新的実用原子力技術開発費」の助成を受け、岩盤中の物質移行特性や水質を原位置のボーリング孔内で計測する地質環境診断用マイクロ化学プローブの技術開発を行った。2008年1月には、日本原子力研究開発機構が所有する深層ボーリング孔を用いた試験を実施し、深度約112 mの地点において、岩盤の拡散係数と分配係数の原位置同時測定を世界で初めて成功させた⁴⁾。

7. おわりに

ここでは、原子燃料サイクルの国内外の動向と、日立グループにおける燃料サイクルへの取り組み、および技術開発状況について述べた。

米国が30年ぶりに原子力・燃料サイクルへの回帰を始

め、インド、中国が増大するエネルギー需要を原子力発電で対応しようとしているように、世界的に「原子カルネサンス」が進展している。地球温暖化の原因とされるCO₂の排出を大幅に抑制でき、気象条件などに影響されない基幹エネルギーとして、原子力への期待は大きい。諸外国に比べてエネルギー自給率の低いわが国においては、海外資源への依存度を軽減できる原子力発電および原子燃料サイクルはきわめて重要である。

日立グループは、安全と安心を第一優先に、今後も信頼性の高い機器製造、技術開発を進め、環境・エネルギー問題の解決に貢献していく。

参考文献

- 1) M. Shimizu, et al.: Hitachi's Activity for Development of Interim Spent Fuel Storage (1), (2), Proceedings of The 16th Pacific Basin Nuclear Conference, Aomori, Japan (2008.10)
- 2) Y. Kani, et al.: New Reprocessing System for Spent Nuclear Reactor Fuel Using Fluoride Volatility Method, Journal of Fluorine Chemistry, 130, pp. 74-82 (2009)
- 3) T. Fukasawa, et al.: Transition Period Fuel Cycle from LWR to FBR, Proceedings of Global 2009, Paper 9129, pp. 2626-2632, Paris, France (2009.9)
- 4) 大江, 外: 地質環境診断用マイクロ化学プローブに関する技術開発, 日本原子力学会「2008年秋の大会」, M14~M18 (2008.9)

執筆者紹介



深澤 哲生

1981年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 燃料サイクル部 所属
現在、燃料サイクル分野の技術開発に従事
工学博士
日本原子力学会会員、ヨーロッパ原子力学会会員、米国原子力学会会員



澤田 周作

1980年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 燃料サイクル部 所属
現在、燃料サイクルの設計開発の取りまとめに従事
技術士 (原子力・放射線)
日本原子力学会会員



岡田 喜久雄

1983年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社 原子力技術本部 燃料サイクル技術部 所属
現在、燃料サイクル関連プロジェクトの取りまとめに従事
技術士 (原子力・放射線)



清水 仁

1983年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力計画部 所属
現在、使用済燃料貯蔵の技術開発に従事
日本原子力学会会員