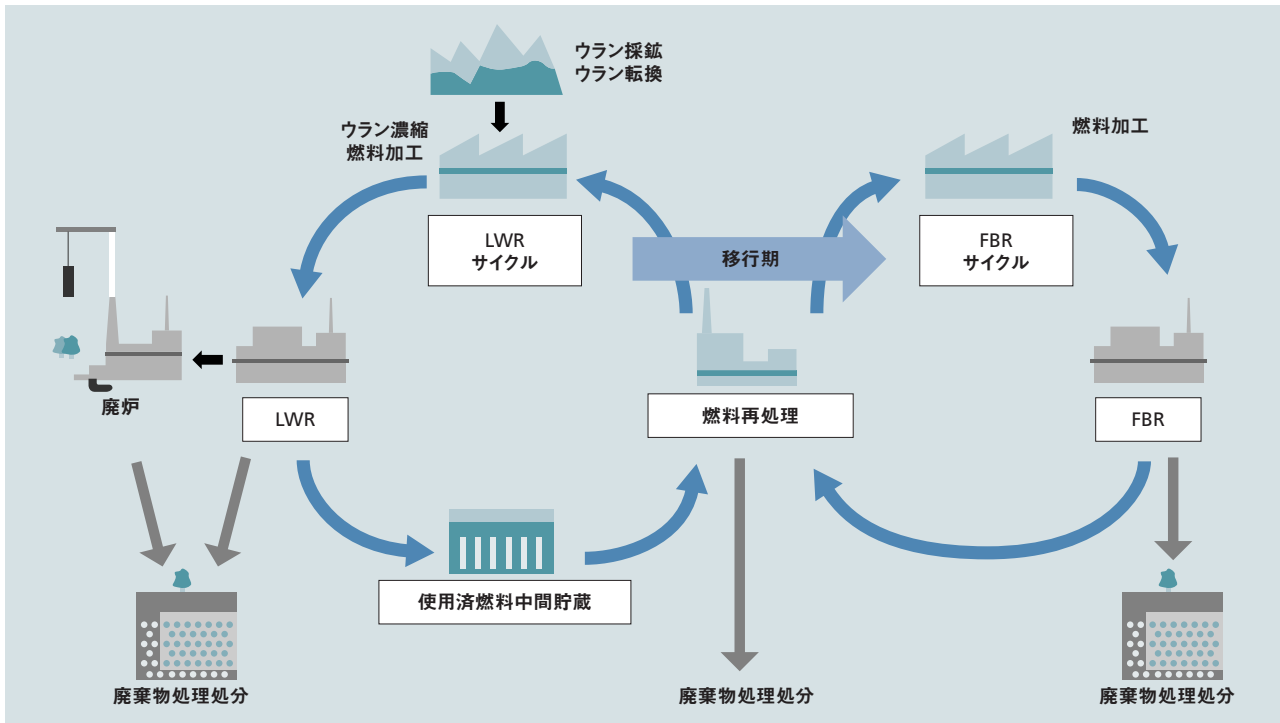


# 原子力エネルギーの長期安定供給を支える 燃料サイクル技術

Nuclear Fuel Cycle Technologies for Long-term Stable Energy Supply

深澤 哲生 Tetsuo Fukasawa  
澤田 周作 Shusaku Sawada

岡田 喜久雄 Kikuo Okada  
清水 仁 Masashi Shimizu



注:略語説明 LWR(Light Water Reactor:軽水炉), FBR(Fast Breeder Reactor:高速増殖炉)

図1 原子燃料サイクルの概要

燃料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FBRにリサイクルされる。LWRサイクルからFBRサイクルへ移行することにより、原子力エネルギーの長期安定供給が可能となる。

原子力を長期安定な電気エネルギーの供給源とする場合には、原子力発電の安全運転が最も重要だが、石油と同様にウラン資源も有限であるため、燃料サイクルは必須である。

天然に存在するウランは、採鉱・転換・濃縮・燃料加工を経て、現行のLWR(軽水炉)で核反応させて電気エネルギーを取り出す。この際に発生する使用済燃料は、一部中間貯蔵を経て、六ヶ所再処理工場で処理される予定である。燃料再処理で回収されたプルトニウムは、当面はLWRにリサイクルされ、将来的にはFBR(高速増殖炉)にリサイクルされる。FBRでは、消費されたウラン量以上のプルトニウムを生成することができるため、1,000年以上の長期にわたってエネルギーの安定供給が可能となる。

日立は、LWR以外にも、中間貯蔵、燃料再処理、FBR、廃棄物処理処分などの事業、および技術開発を積極的に推進している。

## 1. はじめに

2008年7月に開催された北海道洞爺湖サミットのG8北海道洞爺湖サミット首脳宣言で、「我々は、気候変動とエネルギー安全保障上の懸念に取り組むための手段として、原子力計画への関心を示す国が増大していることを目の当たりにしている。これらの国々は、原子力を、化石燃料への依存を減らし、したがって温室効果ガスの排出量を減少させる不可欠の手段と見なしている。我々は、保障措置(核不拡散)、原子力安全、核セキュリティ(3S:Safeguards, Safety, Security)が、原子力エネルギーの平和的利用のための根本原則であることを改めて表明する。」とうたわれた。

石油と同様にウラン資源も有限であり、原子力エネルギーの持続的な平和利用には、燃料サイクルは必須である。

ここでは、原子燃料サイクルの国内動向と、日立における関連事業および技術開発状況について述べる(図1参照)。

## 2. 原子燃料サイクルの国内動向

日立は、LWR(Light Water Reactor:軽水炉)のほかに、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事業および研究開発に取り組んでいる。

LWR使用済燃料は、発電所サイトのプールに貯蔵され、一部が青森県上北郡六ヶ所村にある日本原燃株式会社再処理工場(以下、六ヶ所再処理工場と記す。)の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接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については、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2009年1月までに1,140 tの燃料を処理し、年間最大処理能力800 t Uの六ヶ所再処理工場が近い将来の竣(しゅん)工をめざしている。また、LWRからFBRへの移行期およびFBR平衡期の再処理技術の検討・開発が進められている。

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」は近い将来再開される予定である。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、実用炉を念頭に設計中である。

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。

## 3. 使用済燃料中間貯蔵

青森県むつ市に建設が計画されているリサイクル燃料貯蔵株式会社リサイクル燃料備蓄センターは、2007年3月に事業許可が申請されている。日立は、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(図2参照)<sup>1)</sup>。

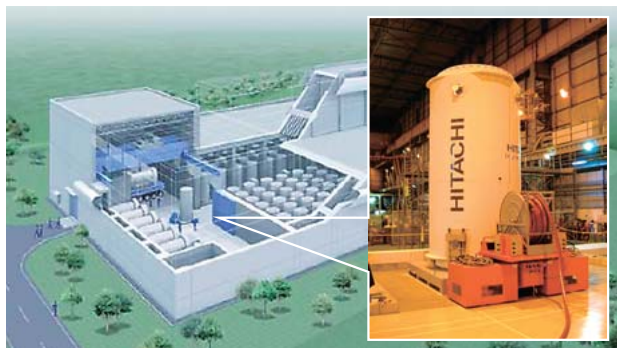


図2 リサイクル燃料備蓄センターと実規模キャスク・搬送装置

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(出典:リサイクル燃料貯蔵株式会社ホームページ)を左に、日立で試作した実規模キャスクおよび搬送装置を右にそれぞれ示す。



図3 六ヶ所再処理工場

六ヶ所再処理工場の外観(出典:日本原燃株式会社ホームページ)を示す。年間最大処理能力800 t Uで、フランス・英国・ドイツ・日本の技術が採用されている。

また、同センターの安全審査をサポートするなど、国内初の間接貯蔵プロジェクトの支援に取り組んでいる。

## 4. 燃料再処理

### 4.1 六ヶ所再処理工場

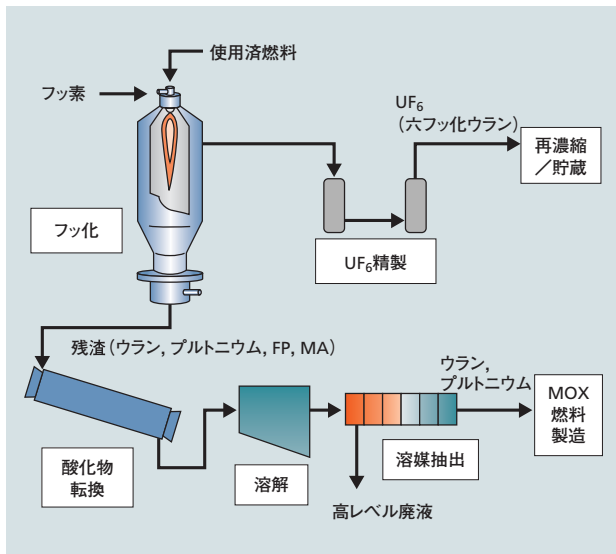
六ヶ所再処理工場では、主施設の分離建屋と低レベル廃液処理建屋の建屋幹事会社として建設を取りまとめ、せん断処理・溶解廃ガス処理設備や高レベル廃液処理設備・酸回収設備・低レベル廃液処理設備などの主担当会社として、設計・製作・建設・試運転を進めている(図3参照)。

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について、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<sup>2)</sup>。FLUOREX法の概略プロセスを図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UF<sub>6</sub>(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UF<sub>6</sub>として回収される。ウラン以外の元素は、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、ウランとプルトニウムの混合物を高純度で他の元素から



注:略語説明 FP(Fission Product), MA(Minor Actinides), MOX(Mixed Oxide), FLUOREX (Fluoride Volatility and Solvent Extraction)

**図4 FLUOREX再処理法のプロセスフロー**

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として回収する。また、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。

分離回収する。

この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、研究開発を進めている。

**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の概念として、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<sup>3)</sup>。

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再処理はウランの分別だけを行い、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。

**5. FBR(高速増殖炉)**

**5.1 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、地元の理解が得られた結果、2005年9月、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、早期の臨界をめざしている。

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、当社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**

日立はこれまで、実証炉の設計研究、実用炉の概念検討、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、システム概念構築や機器、熱流動、材料・構造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、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体検査技術を開発し、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、固化体強度や内部空隙(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、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、従来のバッチ式のも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。この設備はすでに三つのプラントに設置され、現在も一つのプラントで建設中である。

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・実用化した。この設備はすでに四つの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「地層処分技術等調査」の一部として、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、高強度高緻(ち)密コンクリート製TRU廃棄物処分用廃棄体容器の品質管理として、非破壊検査技術の開発を進めている。これは、製作された容器に生じたひび割れや空隙など、地下水の浸透による廃棄物との接触を避けるために、地下水の選択的浸入の経路となる恐れのある欠陥を検出する検査手法である。

また、高レベル放射性廃棄物処分に関しては、2004年から2007年にかけて、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に関係する機関・大学ともに行った。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<sup>4)</sup>。

## 7. おわりに

ここでは、原子燃料サイクルの国内動向と、日立における関連事業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たように、世界的に「原子カルネサンス」が進展している。地球温暖化を抑制し、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。特に、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燃料サイクルは非常に重要である。

日立は、安全と安心を第一優先に、今後も信頼性の高い機器製造、技術開発を進めていく考えである。

### 参考文献など

- 1) T. Hiranuma, et al.:Hitachi's Activity for Development of Interim Spent Fuel Storage, Proceedings of The 16th Pacific Basin Nuclear Conference, Aomori, Japan(2008.10)
- 2) A. Sasahira, et al.:Development of FLUOREX Process as a Progressive LWR Reprocessing System, Proceedings of Global 2007, pp. 1477-1483, Boise, Idaho(2007.9)
- 3) J. Yamashita, et al.:Transition Period Fuel Cycle from Current to Next Generation Reactors for Japan, Journal of Nuclear Science and Technology, pp. 257-263(2007)
- 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



#### 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)



#### 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



#### 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