

原子燃料サイクルへの取り組み

Activities Related to Establishment of Nuclear Fuel Cycle

芝野 隆之

成瀬 克彦

市川 長佳

■SHIBANO Takayuki

■NARUSE Katsuhiko

■ICHIKAWA Nagayoshi

東芝は、わが国での原子燃料サイクルの確立に向け、原子力発電プラントメーカーとして使用済燃料を再利用するために必要な中間貯蔵施設の設計及び製作と再処理施設の設計及び建設に携わってきた。また、環境負荷低減のために、国内初の商業用再処理施設向けの廃棄物処理施設や貯蔵施設など、増設施設の開発及び設計を行ってきた。更に、将来の軽水炉から高速炉への移行期に向けて次世代再処理システムの開発を進めており、現在から将来にわたってエネルギーを安定供給できる原子燃料サイクルの実現に取り組んでいる。

As a total nuclear power plant supplier, Toshiba has designed and constructed many of the major components of the Rokkasho Reprocessing Plant of Japan Nuclear Fuel Ltd., Japan's first commercial reprocessing plant, for the establishment of a nuclear fuel cycle in Japan. To reduce the load on the global environment, we are now engaged in the design and development of new facilities for the plant, including a waste treatment facility and a storage facility. We are also promoting the research and development of advanced reprocessing technology to realize the next-generation nuclear fuel cycle, in order to secure a stable energy supply in the future.

1 まえがき

原子力発電により将来にわたってエネルギーを安定的に供給するためには、使用済燃料を再処理し、ウラン (U) やプルトニウム (Pu) などの燃料として使える成分を回収し再利用する原子燃料サイクルの確立が求められている。また、再処理などに伴って発生する廃棄物を適切に処理し処分することによって環境負荷を低減することが重要である。

東芝は、日本原燃(株) 六ヶ所再処理事業所の重要な設備の設計や建設を担当するとともに、今後建設が予定されている国内で初の再処理などからの商業用廃棄物処理施設や増設施設の開発と設計に取り組んでいる。また、使用済燃料の中間貯蔵設備の設計や、次世代再処理として湿式法と乾式法を融合させたハイブリッド再処理技術の開発を進めている。

ここでは、これらに関する当社の取り組みについて述べる。

2 六ヶ所再処理事業所への取り組み

六ヶ所再処理事業所は、国内の軽水炉 (沸騰水型原子炉 (BWR) 及び加圧水型原子炉 (PWR)) の使用済燃料から、U と Pu を回収する国内初の大型商用再処理プラントであり、現在使用済燃料を用いた操業前最終段階の試運転を行っている。この工場では、使用済燃料を硝酸溶液で溶解した後、ピューレックス法と呼ばれる湿式法により、U (硝酸ウラニルの形態) と Pu (硝酸プルトニウムの形態) を個別に抽出し精製する。更に硝酸分を除去し、高純度の U と Pu の混合酸化物

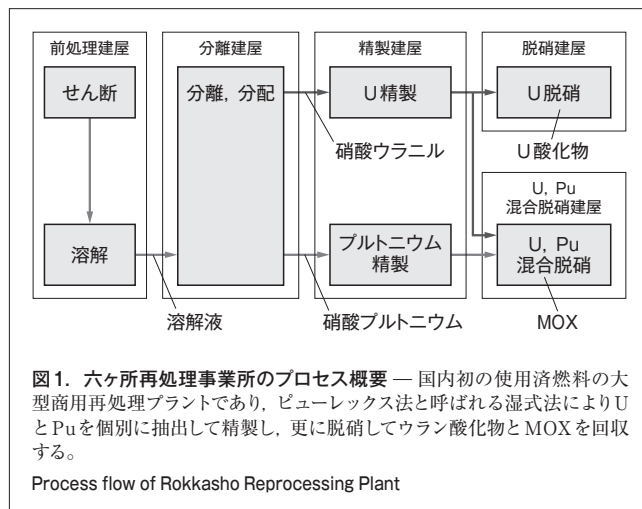


図1. 六ヶ所再処理事業所のプロセス概要 — 国内初の使用済燃料の大型商用再処理プラントであり、ピューレックス法と呼ばれる湿式法によりUとPuを個別に抽出して精製し、更に脱硝してウラン酸化物とMOXを回収する。

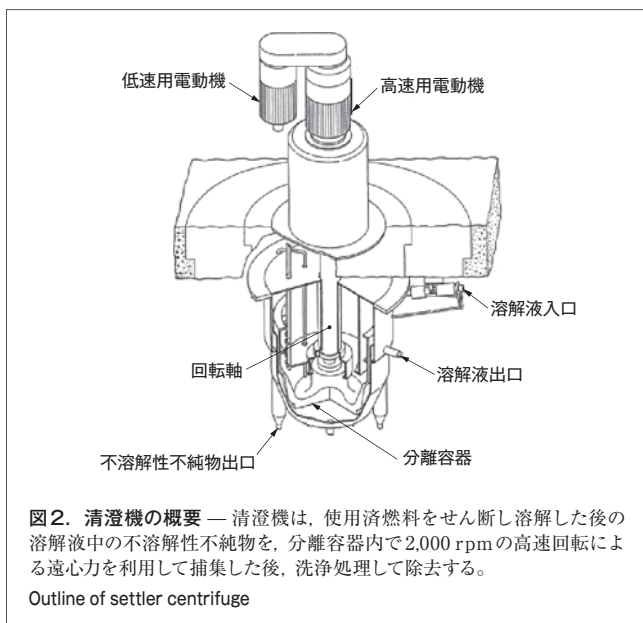
Process flow of Rokkasho Reprocessing Plant

(MOX : Mixed Oxide) として回収する (図1)。

当社は、複数のプロセス設備や中央監視制御設備など、以下に代表される重要な設備の設計と建設を行ってきた。

2.1 清澄機

清澄機 (図2) は、使用済燃料をせん断し溶解した後の溶解液中の不溶性不純物を、2,000 rpmで高速回転する分離容器内で遠心力を利用して捕集した後、洗浄処理により除去するものである。この装置はフランスの技術を導入したものであるが、プロセス性能を模擬液により実規模スケールで検証したうえで、国内規格に準拠した溶接構造と耐震構造への設計見直しを行い、実規模の加振試験での機能検証を実施している。試運転では、既に六ヶ所再処理事業所の年間処理量の

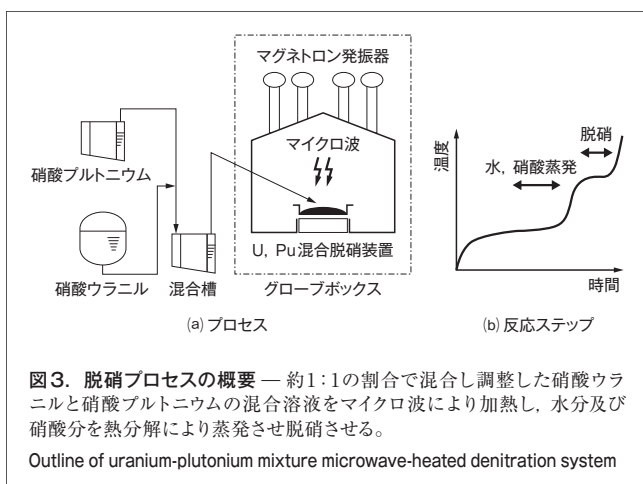


約半分である使用済燃料約310 tU相当(2010年8月時点)の溶解液を安定に処理している。

2.2 U, Pu混合脱硝装置

U, Pu混合脱硝装置は、約1:1の割合で混合し調整した硝酸ウランと硝酸プルトニウムの混合溶液をマイクロ波により加熱し、水分及び硝酸分を熱分解により蒸発させ脱硝させることで、MOX粉体を生成させるものである。この生成過程は、水と硝酸の蒸発と脱硝の二つの反応ステップによるものであり、温度変化やウラン酸化物の発光を検知することで制御している(図3)。

当社は、国内での開発段階から参画し、六ヶ所再処理事業所では処理量が1日当たり約100 kgのシステム全体を納入した。あらかじめUとPuを溶液として混合することで、Puを単独で取り扱わないという高い核拡散抵抗性を持ち、その後の燃料製造に直結したMOX粉体を得ることができる特長がある。



既に試運転でMOX粉体が生産され(図4)、臨界安全などの条件を十分に満たした高品質であることが確認されている。

3 六ヶ所再処理事業所増設施設への取組み

六ヶ所再処理事業所から発生する低レベル廃棄物は、現在、当社が担当した低レベル廃棄物処理建屋において、性状に応じて乾燥や、焼却、圧縮成型などの処理がなされた後、貯蔵管理されている。

今後、更なる減容及び将来の埋設処分に適した安定化処理を行うために、第二低レベル廃棄物処理建屋の増設が計画されている。増設施設の処理対象物は、燃料集合体を切断し溶解した後の残被覆管(ハルエンドピース)、及びそのほかの不燃物、難燃物、可燃物である。これらを圧縮・焼却・溶融処理により減容した後、容器に収納して固化し、将来の処分に適した廃棄物を製作する。

当社は、この増設施設の基本設計を担当し、再処理工場から発生する廃棄物仕様を精査し、設計仕様を定めてきた。また、ハルエンドピース圧縮設備、焼却設備、溶融設備などの主要処理装置の機能・安全性の検証を実機サイズの試験装置で実施してきた。更に、処理対象物は放射線レベルが比較的高く、装置の多くは遠隔操作で保守を行う計画であることから、遠隔保守の標準化設計と検証試験を実施している。これらを基に、各設備の設計と建屋配置設計などの最適化を進めている。

第二低レベル廃棄物処理建屋で処理される廃棄物や、海外で処理されて日本に返還されてくる廃棄物は、半減期が長く、一般公衆から長期間にわたって隔離する地層処分が必要になる。これらの廃棄物を地層処分するまでの間に、適切に管理、保管する低レベル放射性廃棄物貯蔵管理施設が計画されている。この施設は、廃棄物を天井より懸架した長さ約15 mの円筒状収納管へ、縦方向に複数段積んだ状態で保管する構造であり、また、廃棄物から発生する熱を効率的に除去する

ため、収納管どうしは一定の間隔を設けて配列している。

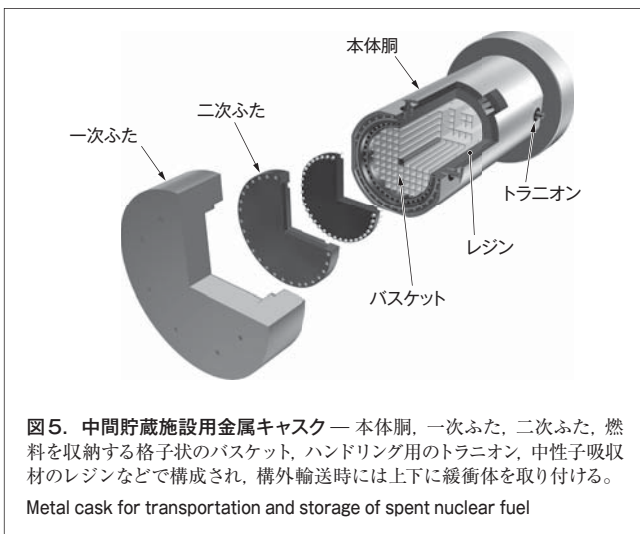
当社は、この施設の基本仕様の検討を進めており、廃棄物を安全に取り扱うための遠隔自動機器をはじめ、廃棄物から発生する熱の冷却能力や、耐震成立性、廃棄物落下時の衝撃力低減といった評価を行い、安全で合理的な設備構成を目指している。

4 中間貯蔵施設用キャスクへの取組み

原子力発電所で発生する使用済燃料は、再処理施設で処理して、再利用されることが原子燃料サイクルの基本である。しかし現状は、再処理施設で計画されている処理量に比べて使用済燃料の発生量が多く、余剰の使用済燃料を適切に管理、貯蔵する使用済燃料中間貯蔵施設の設置が進められている。当社は、高信頼性かつ低コストの使用済燃料中間貯蔵システムの提供を目指して、金属キャスク（輸送又は貯蔵用容器）による中間貯蔵を提案している。

金属キャスクは、使用済燃料による放射線や崩壊熱の発生を考慮して、貯蔵前後の輸送を含めて中間貯蔵中に周辺公衆及び放射線業務従事者の安全確保が求められる。このため、遮へい、臨界防止、除熱、密封の各安全機能とともに、これらの安全機能を満たす構造強度を持つ設計としている。中性子遮へい材などの材料開発や1/3スケールモデル落下試験などの機能検証や、輸送用、貯蔵用のキャスクの設計、製造で得られたノウハウを生かして、落下衝撃に強く、長期間の密封健全性を確保できる中間貯蔵施設用金属キャスクを開発した（図5）。今後発生する使用済燃料は高燃焼度型が主流となることから、更に高度な金属キャスクの開発に取り組んでいる。

また、金属キャスク貯蔵建屋を低重心・コンパクト化することにより、金属キャスクでの中間貯蔵の効率化と最適化を図っている。更に、海外で実績のあるコンクリートキャスクなどの



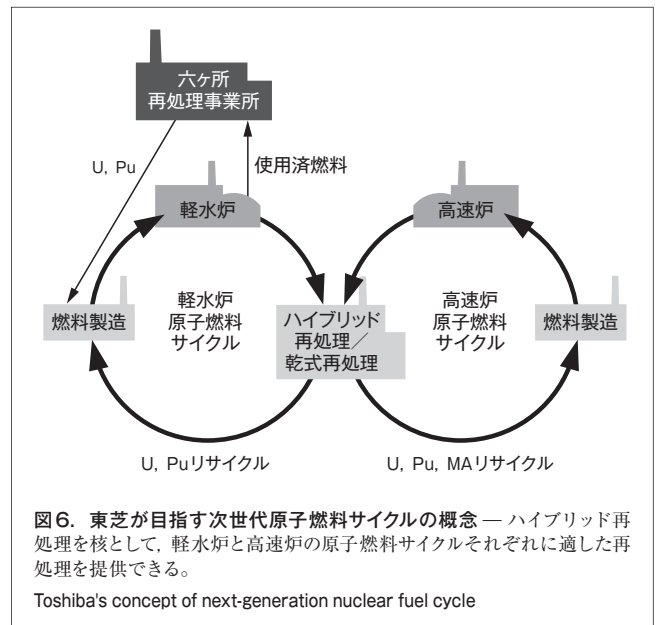
中間貯蔵システムの国内導入についても、次世代の中間貯蔵を視野に入れて検討を進めている。これらの技術の活用により、発生する使用済燃料の仕様と設置場所に応じた、最適な中間貯蔵施設用キャスクを提供していく。

5 次世代再処理技術開発への取組み

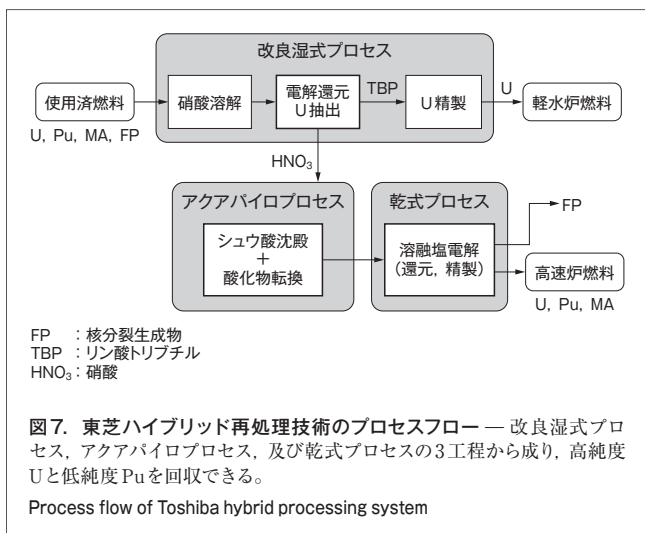
高速炉の国内本格導入は2050年以降になると見込まれており、少なくとも2100年ごろまでは高速炉と軽水炉が共存する“移行期”が続くと予想される。そのため当社は、ハイブリッド再処理を核とした移行期に対応できる次世代原子燃料サイクルの概念を提案している（図6）。軽水炉原子燃料サイクルでは、不純物を含まない高純度のUを回収し、軽水炉へのリサイクルを行う。高速炉原子燃料サイクルでは、回収するPuを容易に核兵器に転用できないよう高い核拡散抵抗性を持つマイナーアクチニド（MA）^{（注1）}などとともにリサイクルする。

再処理は、湿式法と乾式法に大別される。六ヶ所再処理事業所には湿式法が採用されている。湿式法は、Uを高純度で回収するのに適しているが、Puを単独で分離できるため潜在的に核拡散抵抗性が低い。乾式法は硝酸や有機溶媒を使用せず、熔融塩を用いた電気分解（熔融塩電解）を利用して再処理する方式で、Uを高純度で回収するのは困難であるが、原理的にPuを単独で分離できず、MAとともに低純度で一括回収するので核拡散抵抗性が高い。

そこで両者の利点を生かし、高純度Uと低純度Puを回収できる技術として、当社は、改良した湿式法と乾式法を融合させた図7に示す東芝ハイブリッド再処理技術を提案、開発している。



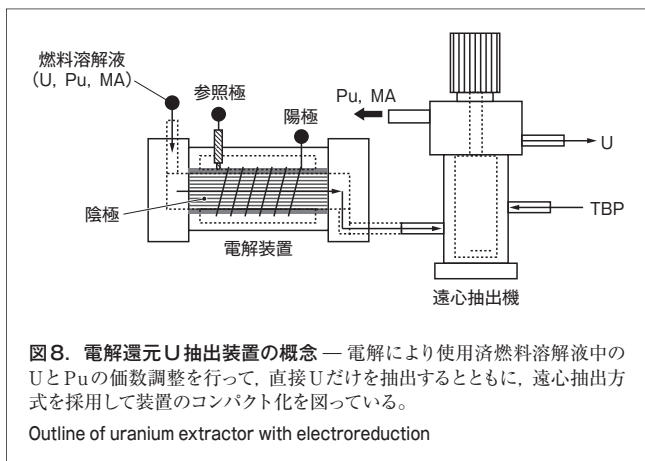
（注1） ネプツニウム、アメリカシウム、キュリウムなどの長半減期の放射性核種。



東芝ハイブリッド再処理技術は、改良湿式プロセス、アクアパイロプロセス、及び乾式プロセスの3工程から成る。

改良湿式プロセスでは、電解により使用済燃料溶解液中のUとPuの価数調整を行って、直接Uだけを抽出するとともに、抽出には遠心抽出方式を採用して装置のコンパクト化を図っている(図8)。これにより、ウラナス(U⁴⁺)やヒドラジン(N₂H₄)などの薬剤を使用する必要がなく、廃棄物発生量を抑えることができる。このプロセスは、既に実際の使用済燃料を用いた試験でその成立性を確認している。

アクアパイロプロセスでは、Uを抽出した後の残溶液にシュウ酸を加えPuとMAを沈殿させて回収し同時に酸化物へ転換する。このプロセスについても、実使用済燃料を用いた試験を実施中である。



乾式プロセスでは、熔融塩電解によりPuとMAを核分裂性生成物から分離する。このプロセスは、国内で20年以上にわたり開発されており、現在は工学規模の確認段階にある。

東芝ハイブリッド再処理技術は、核拡散のリスクを低減できる、世界が求める3S (Safety (原子力安全), Security (核セキュリティ), Safeguards (核不拡散)) を満足した次世代再処理に適合した技術であり、開発を推進している。

6 あとがき

当社は、使用済燃料の再利用という原子燃料サイクルの確立に向けて、中間貯蔵設備の設計及び製作から、現在最終段階の試運転を行っている六ヶ所再処理事業所の設計及び建設に携わるとともに、同事業所からの廃棄物処理や貯蔵にかかわる様々な技術の開発と設計に積極的に取り組んでいる。また、将来の原子燃料サイクルに貢献するため、次世代再処理技術として東芝ハイブリッド再処理技術の開発を推進している。

当社は、以上のような開発、設計、及び製作に携わり、原子燃料サイクルの実現に取り組むことにより、世界の1,000年以上のエネルギー安定供給に貢献できるものと考えている。



芝野 隆之 SHIBANO Takayuki

電力システム社 原子力事業部 原子力化学システム設計部長。
原子力施設のシステム設計及び機器設計に従事。日本原子力学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



成瀬 克彦 NARUSE Katsuhiko

電力システム社 原子力事業部 原子力機器設計部長。
原子炉構成機器の設計及び保全業務に従事。日本機械学会、日本原子力学会、日本保全学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



市川 長佳 ICHIKAWA Nagayoshi, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 化学システム・プロセス開発部長、工博。原子力施設の化学関連技術の開発に従事。日本原子力学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center