

最新の原子燃料サイクル技術

Latest Nuclear Fuel Cycle Technologies

飯倉 隆彦

豊原 尚実

中久木 功

■ IKURA Takahiko

■ TOYOHARA Masumitsu

■ NAKAKUKI Isao

東芝は、日本初の商業再処理プラントの操業開始に向け最終段階の試験に入っている日本原燃(株)六ヶ所再処理工場の、ウラン・プルトニウム混合脱硝設備、低レベル濃縮廃液処理設備、及び中央監視制御設備など重要設備の設計や建設を担当してきた。また、次世代再処理システムの開発を進め、将来にわたってエネルギーを安定供給できる次世代原子燃料サイクルの実現に取り組んでいる。更に、原子力プラントメーカーとして長期間培った技術を基盤とする高度な独自技術や導入技術を活用し、再転換や燃料検査などのフロントエンドから、放射性廃棄物の減容・安定化処理や処分搬出検査などのバックエンドに至る様々な技術開発を進めている。

The Rokkasho Reprocessing Plant of Japan Nuclear Fuel Ltd., which is the first commercial reprocessing plant in Japan, is now undergoing final commissioning tests with real spent nuclear fuels.

Toshiba has designed and manufactured major components of this plant including the uranium-plutonium mixture microwave-heated denitration system, low-level concentrated waste processing system, and large-scale instrumentation and control systems. We are also promoting the research and development of advanced reprocessing technology to realize the next-generation nuclear fuel cycle for sustainable energy. In addition, as a total nuclear plant supplier, we have been developing and supplying many front-end and back-end systems such as conversion systems; fuel pellet and pin inspection systems; and radioactive waste volume reduction, solidification, and inspection systems.

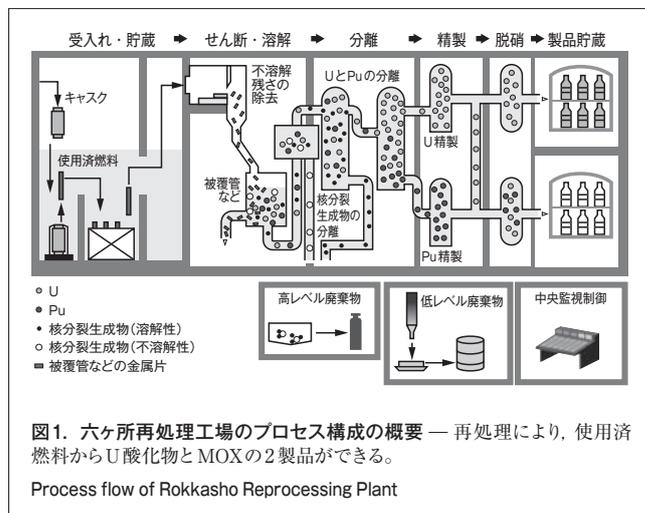
1 まえがき

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)などの燃料成分を回収・再利用する原子燃料サイクルを確立すること、及び廃棄物を削減し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)六ヶ所再処理工場の重要な設備の設計や建設を担当するとともに、次世代再処理として適合性の高い乾式再処理の開発を進めている。また、再転換や燃料検査などのフロントエンドから、放射性廃棄物の減容・安定化処理、処分搬出検査などのバックエンドに至る各種の技術開発を行い、主要な設備を納入している。ここでは、原子燃料サイクルに対する当社の取組みについて述べる。

2 六ヶ所再処理工場への納入設備

六ヶ所再処理工場は、国内の軽水炉型原子力発電プラント(沸騰水型原子炉(BWR)、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規模商用再処理プラントとして、2006年3月から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の溶媒



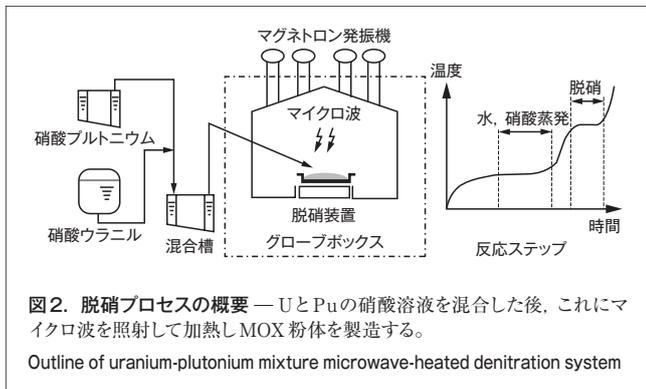
抽出法により、U(硝酸ウランの形態)とPu(硝酸プルトニウムの形態)を個別に抽出し精製する。更に硝酸分を除去し、高純度のUとPuを混合酸化物(MOX: Mixed OXide)などとして回収する(図1)。

当社は、六ヶ所再処理工場の重要な設備や機器を幅広く担当しており、納入した代表的な設備を次に紹介する。

2.1 ウラン・プルトニウム混合脱硝設備

硝酸ウラン溶液と硝酸プルトニウム溶液は、混合槽において約1:1の割合で混合、調整される。U・Pu混合脱硝設備

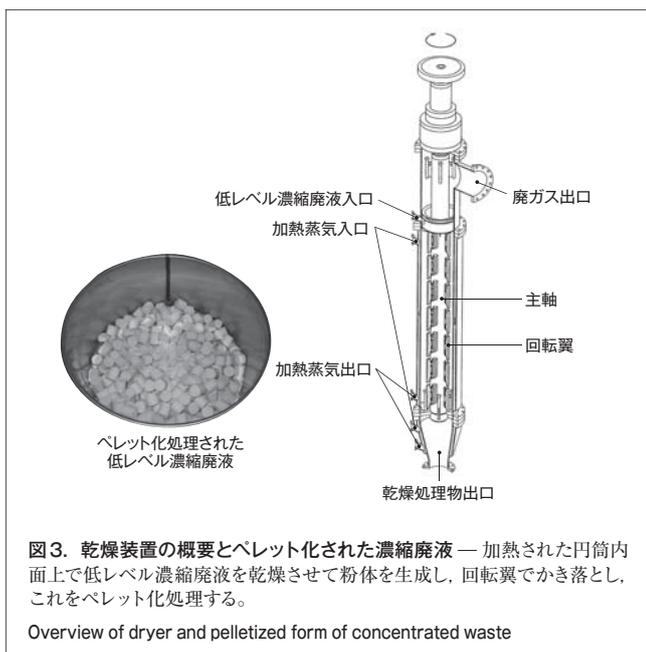
は、一定量の混合溶液を受け入れ、装荷した後、マグネトロン発振機から出力されるマイクロ波により加熱し、水と硝酸分を熱分解により蒸発、脱硝させ、脱硝粉体（MOX粉体：三酸化ウラン（ UO_3 ）と二酸化プルトニウム（ PuO_2 ）の混合物）を生成させる。脱硝の反応ステップは、温度変化や UO_3 の発光を検知することで制御している（図2）。



当社は、この技術に関して、動力炉・核燃料開発事業団（現 独立行政法人 日本原子力研究開発機構）の東海事業所での開発段階から参画し、六ヶ所再処理工場は東海事業所の試験装置に比べ処理量が約10倍のシステムを納入した。あらかじめUとPuを溶液として混合することで、核兵器に転用しにくい、いわゆる核拡散抵抗性が高く、燃料製造に直結したMOX粉体を得られる特長がある。既に試運転でMOX粉体が生産され、臨界安全上の条件を十分に満足することを確認している。

2.2 低レベル濃縮廃液処理設備

低レベル濃縮廃液処理設備は、再処理工場から発生する低



レベル濃縮廃液を乾燥装置へ連続供給して乾燥し、生成した粉体を圧縮成型して固化する設備である。乾燥装置は、回転翼により円筒状の伝熱面上に廃液の薄膜を形成させ、円筒外面からの加熱蒸気により伝熱面を介して間接的に加熱し、蒸発乾燥処理するものである（図3）。乾燥処理された粉体は無機バインダと混合し、中間貯蔵に適した形態としてペレット化処理する。この設備により、低レベル濃縮廃液は1/3以下に減容される。既に試運転で発生した低レベル濃縮廃液約1,500 m³を安定処理している。

2.3 中央監視制御設備

再処理工場における各施設のプロセス運転を監視するために、機能上6ブロックで構成する大規模な中央監視制御設備の設計と建設を担当した。生産系の運転監視はデジタル分散形制御システムで行い、安全上重要な計測制御系は、ハードスイッチや指示計などから成る直立形制御盤で構成した、分離・独立系の監視制御方式を採用している。

また、中央制御室の構成を模擬し、代表的な異常事象に対応した訓練ができる保安訓練シミュレータを納入した。更に、運転員の技量向上及び安定運転確保のために、模擬範囲拡張などの技術開発を進めている。

3 次世代再処理技術の開発

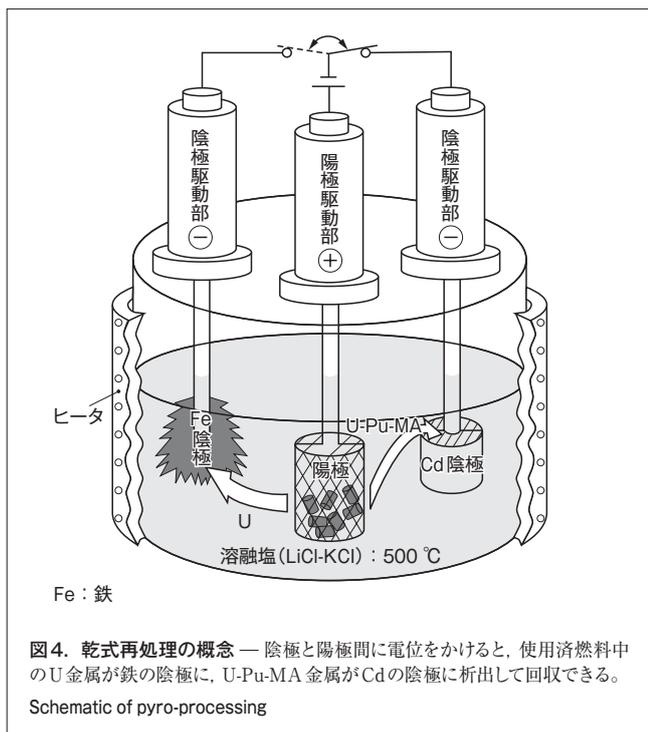
次世代炉である高速炉（この特集のp.28 - p.31参照）についても、使用済燃料を再処理し、再利用する原子燃料サイクルを実現することが不可欠であり、それに向けた技術開発を進めている。

3.1 乾式再処理システム

使用済燃料の再処理により発生する高レベル廃棄物（HLW）には、マイナーアクチニド（MA）と呼ばれる長半減期の放射性核種であるネプツニウム、アメリシウム、キュリウムなどが含まれることから、環境負荷低減のために長期間にわたる管理が必要となっている。

高速炉ではMAを燃料として燃焼させることができるため、MAをUやPuとともに回収して燃料とすることで、資源の有効活用とHLW量の低減が可能となる。

当社は、このような条件を満足し、かつシンプルな次世代再処理システムとして、乾式再処理技術（財）電力中央研究所や独立行政法人 日本原子力研究開発機構などと協力して20年以上にわたり開発している。乾式再処理技術の特長は、現行の再処理プロセスで必要な使用済燃料の溶解、燃料成分の分離、精製、脱硝、回収といった複数工程を、単一の工程で処理できる点にある。500℃に加熱して溶融させた溶融塩（LiCl（塩化リチウム）-KCl（塩化カリウム））に、使用済燃料を入れたバスケットを浸漬して陽極にし、カドミウム（Cd）を陰極にすると、U、Pu、及びMAが同時に回収される（図4）。ピューレッ



クス法と異なり、Puを単体分離することが原理的に困難で、核拡散抵抗性に優れている。

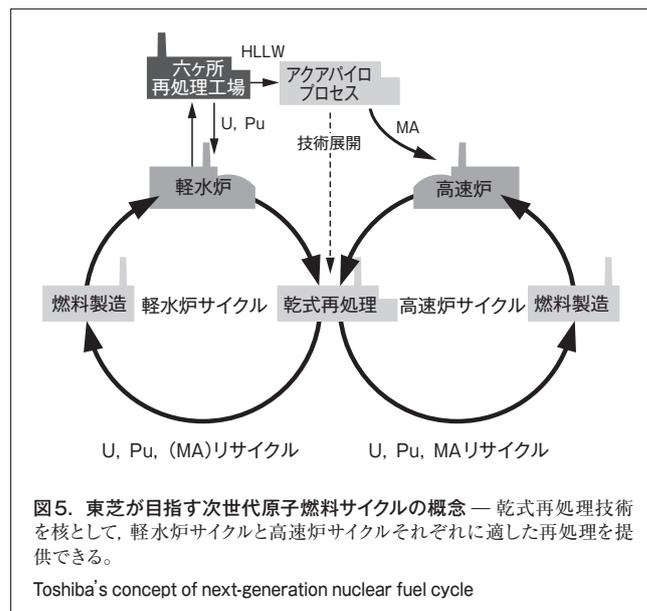
乾式再処理の確立により、次のことが実現できる。

- (1) MAを原子燃料サイクルの中で有効活用することによる環境負荷の低減
- (2) Puを単体分離できないことによる高い核拡散抵抗性
- (3) シンプルなシステム

3.2 次世代原子燃料サイクルの概念

原子力政策大綱（2005年10月）に示されるように高速炉の本格導入が2050年以降になると、少なくとも2100年頃までは高速炉と軽水炉が共存する。当社は、高速炉の導入期から本格的な高速炉時代まですべての原子燃料サイクルに適用できる、乾式再処理技術に基づく再処理プロセスの開発を進め、次世代原子燃料サイクルの実現を目指している⁽¹⁾（図5）。その実現のために、現行の再処理システムから順次導入する技術展開を計画している。

まず、六ヶ所再処理工場の稼働に伴って発生する高レベル放射性廃液（HLLW）から、乾式再処理で培った電解技術によりMAを回収する、アクアパイロプロセスを提案している⁽²⁾。次に、アクアパイロプロセスで実証した電解技術を現行の再処理プロセスに適用し、Puの単体分離を困難にする再処理法を確立し、HLW量を低減するとともに核拡散抵抗性の高い軽水炉燃料の再処理を実現する。そして、高速炉燃料の再処理には電解技術による乾式再処理技術を適用する。このように、高速炉と軽水炉が共存する時代から高速炉時代までを共通技術を核として展開し、軽水炉と高速炉それぞれに適した燃料



サイクルを順次提供できる。

高い核拡散抵抗性と環境負荷の低減が可能な次世代原子燃料サイクルの概念は、米国の国際原子力エネルギーパートナーシップ（GNEP: Global Nuclear Energy Partnership）の“地球環境の維持、原子力でのエネルギー安定供給、核拡散リスク低減の同時実現”という構想に一致する。当社はEnergy Solutions社をサポートして、ウェスチングハウス社やShaw Group Inc.とともにGNEPへ参画し、次世代原子燃料サイクルの概念をGNEPの統合核燃料取扱センター（CFTC: Consolidated Fuel Treatment Center）、更にはその先の革新核燃料サイクル施設（AFCF: Advanced Fuel Cycle Facility）へ適用することを検討している。

これらの活動を通して、国際的な協力・協調に積極的に取り組み、原子力発電の発展によるグローバルなエネルギーの安定供給に貢献できると考えている。

4 フロントエンドからバックエンドまで

準国産エネルギーの実現を目指し、ウラン濃縮、再転換、燃料成形加工から再処理、MOX燃料製造に至る一貫した原子燃料サイクルの整備が進められている。当社は原子力プラントメーカーとして、これらフロントエンドからバックエンドに至る各施設の設計や建設に積極的に参画するとともに、各種技術開発を行っている。

4.1 フロントエンドへの取組み

日本原燃（株）六ヶ所ウラン濃縮工場に新型遠心機の導入が計画され生産量増加が予定されることや、MOX燃料工場建設にあたり濃縮工場から出る劣化ウランを再転換してMOX燃料製造の原料に使う必要が出てくることから、再転換工場

の新規建設に向けた検討が開始されている。スウェーデンや英国で安定した運転実績があるウェスチングハウス社の再転換施設の技術と、当社のプラントエンジニアリング及び建設技術を基に、これらの検討に積極的に取り組んでいく。

また、燃料成形加工工場向けの燃料ペレットや燃料棒の画像検査装置を開発している。従来は検査員に頼っていた外観検査を、独自の画像データ処理により寸法検査と同時に実施でき、客観的な数値データを提供できる。

4.2 バックエンドへの取組み

原子力発電プラントや再処理施設などからは多種多様な放射性廃棄物が発生する。当社は、原子力発電プラント向けに廃棄物の減容・安定化処理や検査、検認などの設備を数多く開発、納入しているほか、六ヶ所再処理工場から発生する低レベル廃棄物を埋設処分に適した形態に減容・安定化するための処理施設や、貯蔵管理施設の基本設計、各種技術開発を担当している。

4.2.1 廃棄物の減容・安定化処理技術

廃棄物の減容技術として、高温・高圧の超臨界水などを用いた処理技術の開発を進めている。原子力発電プラントの一次冷却水浄化装置から発生する使用済イオン交換樹脂の有機物を短時間で無機物に分解し、固体として沈殿する放射性物質だけを分離する技術や、使用済燃料の再処理で発生する硝酸又は硝酸塩中の硝酸根を還元分解することで、埋設処分の際に問題となる硝酸ナトリウム廃棄物の発生量を極小化する窒素酸化物クローズドシステムなどを開発している。

安定化処理技術では、低レベル廃棄物の埋設処分への適合性を向上させた、いわゆる高機能セメント固化技術を開発し実用化した。この技術は、独自開発の特殊流動化剤を添加した高流動性セメントを使用し、濃縮廃液、廃樹脂、及び焼却灰を直接固化できる。薬剤添加により、セメントの固化を妨害するホウ酸を含む濃縮廃液の固化も可能となり、BWRのほかPWRにも適用されている。

また、比較的放射能レベルの低い低レベル廃棄物(L2廃棄物)の固化に用いられてきた高炉セメントなどの材料に代えて、比較的放射能レベルの高い低レベル廃棄物(L1廃棄物)向けにアルミナ系セメント材料を開発した。低含水、低pHで強度及び耐食性に優れるアルミナセメントに骨材などの無機成分を添加することで、水の放射線分解による水素ガス発生や、高pHセメント成分による埋設処分施設のベントナイト劣化などの課題を解決する。

4.2.2 廃棄物の検査・検認技術

原子力発電プラントで発生したL2廃棄物は、ドラム缶に均一固化あるいは充てん固化され、検査後に搬出され、日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センターでコンクリートピット処分される。当社は、L2廃棄物固化体の搬出検査装置(外観検査、表面汚染検査、放射能濃度測定、ラベリングなどの各装置)を開発、実用化し

ている。また、フィードバック制御でスミヤパッドの押付け力が一定になるよう高機能化した、スミヤロボットによる表面汚染自動検査装置を開発し、遠隔搬出検査装置などへの適用を検討している(図6)。

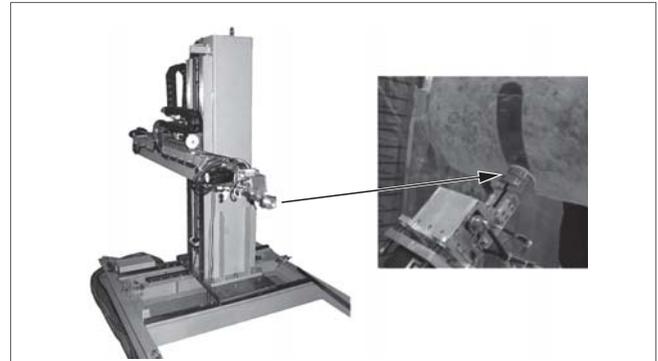


図6. スミヤロボットによる表面汚染検査装置 — スミヤアームに6軸力センサを採用し、フィードバック制御による安定したふき取り動作を実現している。
Inspection system for radioactive waste

ドラム缶などに収納し保管されている各種廃棄物を減容・安定化処理する際には、分別や有害物除去などの前処理作業が必要となる。当社独自のカラー I.I.TM (Image Intensifier) 技術を用いて、廃棄物収納容器を開梱しないで内容物を識別できる検査装置の開発を行っている(図7)。



図7. カラー I.I.TMを用いた廃棄物容器の検査装置 — 独自のX線センサであるカラー I.I.TMに高画素ラインカメラを組み込むことで、ドラム缶を高解像度で透視撮影できる。
Waste container identification equipment using color X-ray image intensifier

放射線管理区域で発生する廃棄物であっても、放射能濃度が極めて低いものは放射性物質として扱う必要がない。わが国でも廃棄物クリアランスレベルの放射能濃度基準が2005年に法制化されたのを受けて、発電プラントの廃棄物に含まれる極微量の放射能(β 線、 γ 線)を正確かつ短時間に計測する3タイプ(トレイ型、バスケット型、可搬型)のクリアランスレベル検認用測定装置を開発、実用化している。

また、 α 線計測が必要なウラン廃棄物やTRU(超ウラン)廃棄物にも対応するため、従来のように α 線を直接捕えるので



図8. α 線クリアランス検認装置 — α 線により電離した空気を高速回収してイオン電流を計測することで、 α 線核種の放射能を高感度で測定できる。
 α -ray measuring system

はなく、 α 線が空気をイオン化する作用に着目し、検査対象物周辺のイオン化した空気を高速回収して測定する技術を開発した(図8)。

5 あとがき

六ヶ所再処理工場では、使用済燃料を用いた操業前最終段階の試運転を行っており、わが国での原子燃料サイクルが確立されようとしている。当社は原子力プラントメーカーとして、放射性廃棄物の減容・安定化処理などの開発を先行して実施してきており、今後も、原子燃料サイクルのフロントエンドからバックエンドに至る様々な技術開発を推進し、各施設の設計や建設に積極的に参画していく。

また、高い核拡散抵抗性と環境負荷低減性を持つ原子燃料サイクルが可能な再処理技術は、原子力発電の発展によるグローバルなエネルギーの安定供給に貢献できると考えている。

文 献

- (1) Arie, K., et al. "A Strategy for Advanced Fuel Cycle Deployment", International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP '06), Reno, Nevada, USA, 2006-06, American Nuclear Society. 2006, p.1922 - 1932.
- (2) FUJITA, R., et al. Development of trans-uranium elements recovery from high-level radioactive liquid waste. J.Alloys Compd. 271-273, 1998, p.563 - 567.



飯倉 隆彦 IIKURA Takahiko

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, 日本機械学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



豊原 尚実 TOYOHARA Masumitsu, 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 化学システム開発部長, 工博。原子力施設における化学技術の研究・開発に従事。日本原子力学会, 化学工学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



中久木 功 NAKAKUKI Isao

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グループ長。六ヶ所再処理工場のシステム設計に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.