

原子燃料サイクルと先進バックエンド技術

Nuclear Fuel Cycle and Advanced Back-End Technology

山口 伸一

■ YAMAGUCHI Shinichi

豊原 尚実

■ TOYOHARA Masumitsu

芝野 隆之

■ SHIBANO Takayuki

原子力発電を安定して推進するためには、原子燃料サイクルを早期に完結させるとともに、廃棄物に対しては、発生源から処理・処分に至るまで、一貫した整合性と経済性を持った対策が重要である。

東芝は原子力総合プラントメーカーとして、ウラン試験が開始された日本原燃(株)六ヶ所再処理工場の建設と試運転に積極的に参画するとともに、よりいっそうの資源の有効活用と環境負荷の低減を目指し、先進的な原子燃料サイクルの実現に向けたバックエンド技術の開発に取り組んでいる。

Completion of the nuclear fuel cycle and establishment of adequate and economical waste management technology are essential issues for the continuous stable promotion of nuclear power generation.

As a total nuclear plant supplier, Toshiba is actively participating in the construction and pre-operation activities of the Rokkasho Reprocessing Plant of Japan Nuclear Fuel Ltd., which has started uranium tests. We are also concentrating efforts on the development of back-end technology for realization of the advanced nuclear fuel cycle, aiming for further improvement in the utilization of resources and decreased environmental effects.

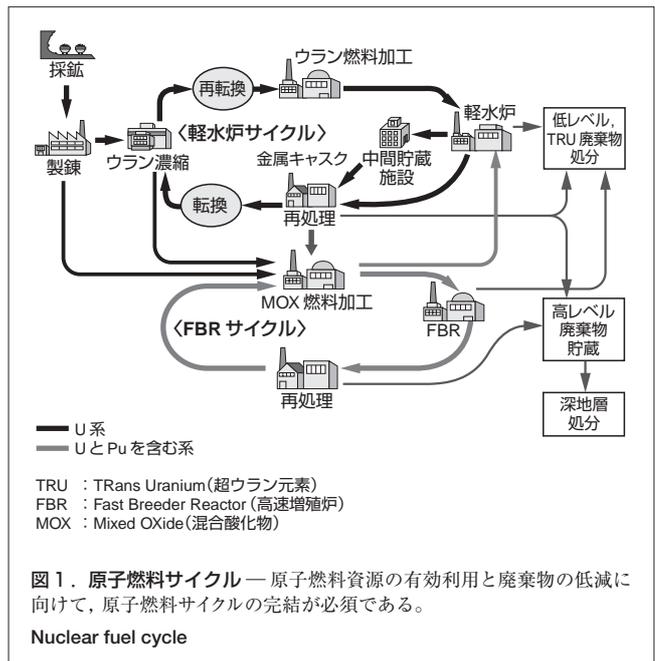
1 まえがき

原子力発電所や原子燃料サイクル施設などの原子力施設から発生する廃棄物対策技術、いわゆるバックエンド技術の基本は、最適な3R (Reduce, Recycle, Reuse)の実現であり、原子力発電を長期に安定して推進するために、当初より資源回収と再利用、及び環境負荷の低減の観点から開発が進められてきている。

使用済み燃料は再処理によってウラン(U)とプルトニウム(Pu)が回収(Recycle)され、原子力発電所で再利用(Reuse)されることで、資源が60~100倍に有効利用される。放射性廃棄物は、発生源対策や減容処理を行うことによってその発生量を徹底的に削減(Reduce)している。また、放射能濃度が極めて低く、放射性物質として扱う必要のないクリアランスレベル^(注1)以下の廃棄物については、回収(Recycle)し再使用(Reuse)することが計画されている(図1)。

原子燃料サイクルの完結に向けて、東芝は、日本原燃(株)六ヶ所再処理工場向けに最新の分離・精製・減容化及び安定化処理技術を開発して、重要な施設の設計・建設を担当している。また、建設計画中の使用済み燃料の中間貯蔵施設に向けた燃料貯蔵技術や、2010年ころから本格的に検討予定の第二再処理工場に向けて、いっそうの環境への負荷低減と経済性向上を目指した次世代再処理技術を開発中である。

(注1) 放射性物質として取り扱う必要があるか否かを分ける放射能の境界レベル。



更に、各種原子力施設向けに放射性廃棄物の浄化・減容化処理、安定化処理、処分搬出前検査などの設備を数多く開発し、納入しているほか、近く法律案が審議される見込みの廃棄物クリアランスレベル検認用計測装置の開発などを積極的に進めている。

ここでは、最適な3Rの実現に向けて当社が取り組んでいる主要なバックエンド技術について述べる。

2 六ヶ所再処理工場建設への取組み

六ヶ所再処理工場は、国内の軽水炉型原子力発電所で発生した使用済み燃料から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、2004年12月からUを使用した本格的な試運転を行っている。この工場では、ピューレックス法と呼ばれ、各国の最新の再処理工場で使用されている湿式の溶媒抽出法が用いられている。使用済み酸化燃料を硝酸溶液で溶かした後、有機溶媒を使ってUとPuを個別に抽出し精製する。更にマイクロ波などにより加熱して硝酸分を除去し、UとPuを混合酸化物として回収する。軽水炉型原子力発電所から発生する使用済み燃料を年間最大800tU（金属U相当）処理できる容量を備えている。主要なプロセス構成を図2に示す。

当社は、1970年代後半に技術調査や設計検討に着手し、1988年以降日本原燃サービス(株)（現 日本原燃(株)）が推進する設計と建設に積極的に参画してきた。1999年12月に先行して完成した使用済燃料受入れ・貯蔵施設では、プール水冷却・浄化系、安全冷却水系、放射性廃棄物処理設備や、使用済み燃料の燃焼度計測装置などの重要な設備を開発し、順調に運転中である。

また、現在試運転中の再処理施設本体では、永年の実績に基づく当社の原子力施設向け化学プロセス技術を駆使し、他社納入設備も含めた施設全体の中央監視・制御施設、清澄^(注2)・計量設備、U・Pu混合脱硝設備、高放射性アルカリ廃液の濃縮設備、廃溶媒処理設備、低レベル放射性廃棄物

の処理・貯蔵施設など主要設備の設計・建設のほか、精製建屋などの設計・建設の取りまとめ(建屋幹事会社)などを含め、重要な施設を幅広く担当するとともに、建設計画中のハル・低レベル廃棄物処理施設の基本設計を推進中である。

3 先進原子燃料リサイクル技術の開発

次世代の燃料リサイクル技術として注目されている乾式再処理技術は、使用済み燃料を熔融状態の塩に溶解させ、電気分解によりUとPuを同時に回収するものである。湿式法と比較して処理プロセスが単純で、設備の小型化と分散設置が可能なので、初期建設投資を大幅に抑制できる。また、廃棄物の発生量が少ないので環境負荷が小さい。更に、使用済み燃料中に少量含まれる放射性のアメリカウム(Am)やキュリウム(Cm)などのマイナーアクチニド元素も同時に混合回収するので、回収したPuの核兵器への転用が困難であることから、核拡散抵抗性の高い技術として世界各国で開発が進められている。

以下に、当社が核燃料サイクル開発機構、(財)電力中央研究所及び電力共通研究の下で開発に取り組んでいる2種類の乾式再処理技術を詳述する。

3.1 乾式再処理技術(1)：酸化物電解法

酸化物電解法は、ロシア原子炉科学研究所(RIAR)が基本原理を開発したもので、使用済み酸化燃料から、熔融塩

(注2) 使用済み燃料の溶解液中から不溶性の不純物を除去すること。

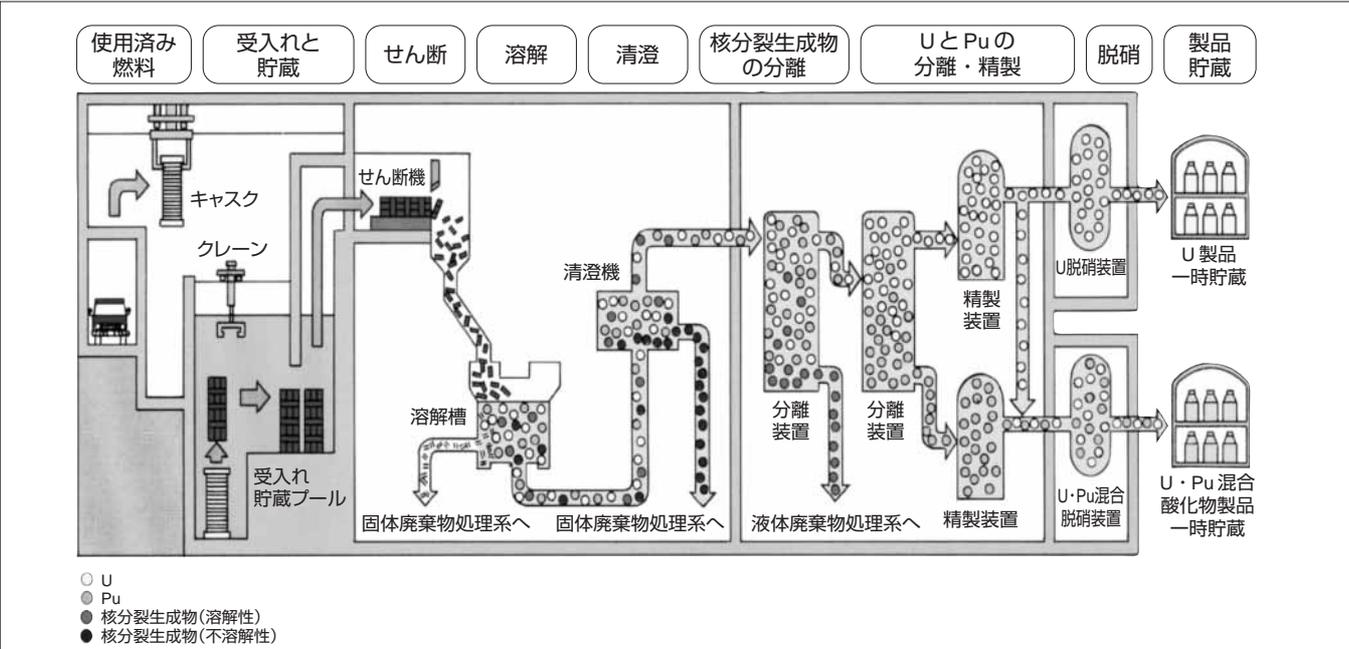


図2. 六ヶ所再処理工場のプロセス構成の概要 — ピューレックス法と呼ぶ湿式プロセスは、多数の工程から構成されている。
Outline of Plutonium Recovery by Extraction (PUREX) reprocessing process at Rokkasho Reprocessing Plant

中の電気化学的特性の差を利用してUとPuを酸化物として回収する技術である。RIARの技術が、被覆管を除去した使用済み燃料をナトリウム(Na)とセシウム(Cs)の塩化物の溶融塩中に溶解した後、陰極にUとPuを析出させて回収するのに対して、当社は電力共通研究にてこれを改良し、溶融塩への溶解と陰極への析出・回収を同時に行う技術を開発した。この同時析出法による酸化物電解法の乾式再処理プロセスの概要を図3に示す。このプロセスでは陰極への二酸化ウラン(UO₂)の析出と回収を行った後、溶融塩中に酸素ガスを吹き込みつつ残存するUO₂と二酸化プルトニウム(PuO₂)を陰極に共析させる。当社は、1kg規模のUO₂回収試験装置による同時析出試験を行い、RIARの約2~3倍の

処理速度が得られることを確認している。現在、当社は核燃料サイクル開発機構の下で、このプロセスの改良研究を進めている。

3.2 乾式再処理技術(2)：金属電解法

金属電解法は、米国アルゴンヌ国立研究所(ANL)が基本原理を開発した高速炉向けの金属燃料用再処理技術である。リチウム(Li)とカリウム(K)の塩化物の溶融塩中で、固体陰極に大部分のUを、液体カドミウム陰極にU、Puを金属の形態で析出させ回収する。金属電解法の再処理プロセスの概要を図4に示す。当社は、1987年から(財)電力中央研究所の下でUを使った電解精製試験を開始し、その後、装置規模

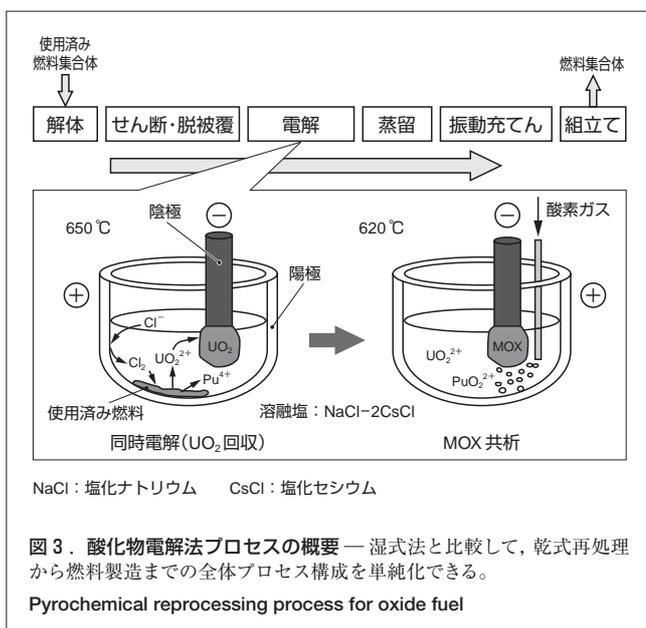


図3 酸化物電解法プロセスの概要 — 湿式法と比較して、乾式再処理から燃料製造までの全体プロセス構成を単純化できる。

Pyrochemical reprocessing process for oxide fuel

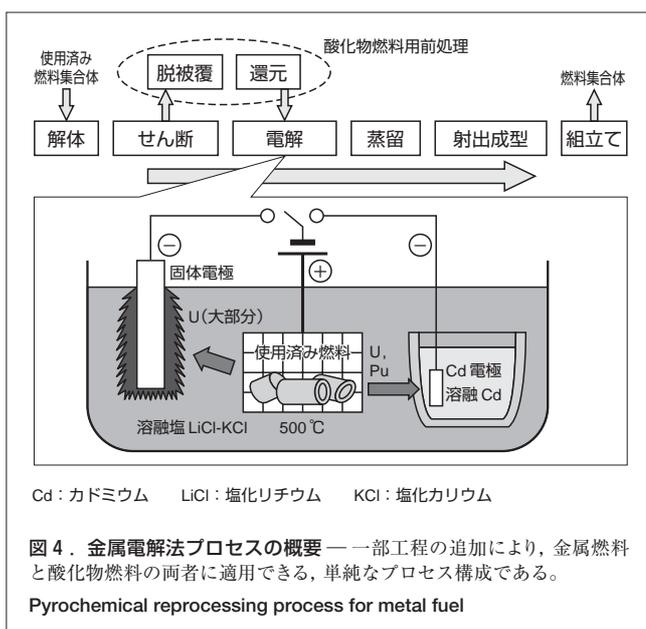


図4 金属電解法プロセスの概要 — 一部工程の追加により、金属燃料と酸化物燃料の両者に適用できる、単純なプロセス構成である。

Pyrochemical reprocessing process for metal fuel



図5 固体陰極表面に析出した約1kgの金属U — 灰色の部分電極表面に析出した金属ウランである。

View of 1 kg of uranium metal deposited on solid cathode

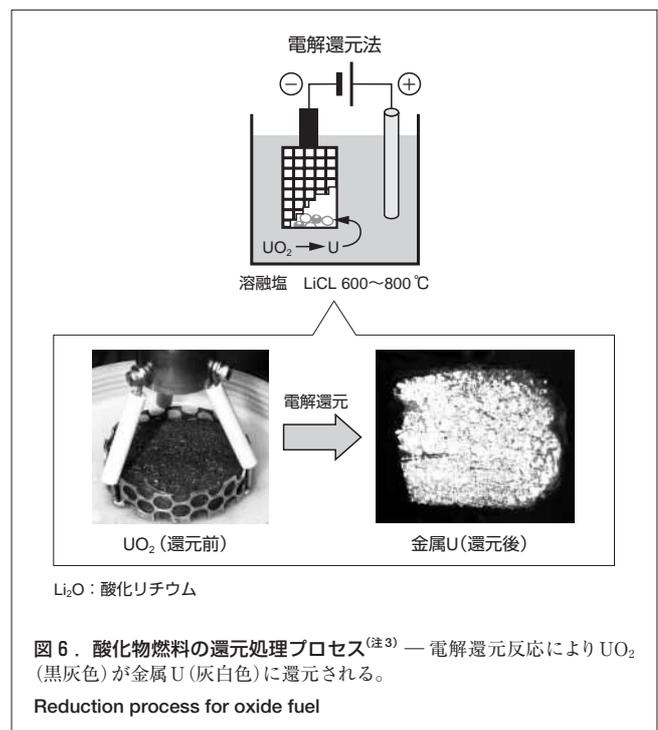


図6 酸化物燃料の還元処理プロセス(注3) — 電解還元反応によりUO₂(黒灰色)が金属U(灰白色)に還元される。

Reduction process for oxide fuel

の拡大を重ねて1バッチ当たり約1kgUの回収に成功した(図5)。更に現在、U回収速度の向上を目指した高速電解装置を開発中である。また、酸化物燃料を金属電解法で処理する際に必要となる電解前の酸化物還元方法として、当社は(財)電力中央研究所の下で、電解還元法の工学規模試験を実施中である(図6)。

3.3 乾式再処理技術の課題と今後の展望

乾式再処理技術は、実用商用化段階を迎えた軽水炉燃料再処理技術に続く次世代技術としておおいに期待されている。

当社は、熔融塩電解精製技術などのコア技術により、国及び各種研究機関と協力、連携し、酸化物電解法及び金属電解法の開発に取り組んでおり、これまでに、乾式再処理技術に関する基本技術はほぼ実証してきている。

今後、実用化に向けた工学規模での技術実証などが必要であり、照射済みの実燃料を使用したプロセス挙動試験などが国レベルで実施されることが期待される。更に、米国が推進するAFCI(Advanced Fuel Cycle Initiative:先進的燃料サイクルイニシアティブ)計画やフランスなどとの国際的な協力の枠組みが拡大されることも期待される。

次世代再処理技術の開発には、原子炉技術の開発動向との整合性が重要であり、将来の軽水炉及び高速炉(酸化物燃料、金属燃料、窒化物燃料)のいずれの開発炉型に対しても対応可能なよう、酸化物電解法と金属電解法の並行開発が必要である。当社は、酸化物電解法及び金属電解法という二つの乾式技術の開発実績を持つ国内唯一の原子力総合プラントメーカーとして、今後とも乾式再処理技術の実用化に向け、積極的に開発に取り組んでいく。

4 放射性廃棄物による環境への負荷低減

4.1 発電所廃棄物対策

原子力発電所の運転や保守に伴い発生する、放射能レベルの比較的低い廃棄物(以下、L2廃棄物と略記)は、現在、各発電所で適切に処理されてドラム缶充てんされ、青森県六ヶ所村にある日本原燃(株)の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が行われている。

一方、低レベル放射性廃棄物ではあるが、原子力発電所の運転や廃止処置・解体などに伴って発生する、比較的高い放射能レベルの放射性廃棄物(以下、L1廃棄物と略記)は、一般的な地下利用に十分な余裕を持った深度(約50~100m)の地下へ処分される計画である。L1廃棄物の主要な組成は、原子力発電所の一次冷却水浄化装置から発生する放射性の使用済みイオン交換樹脂(廃樹脂)や、放射化した炉内構造物

(注3) この研究は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの委託事業として、電力中央研究所が実施した平成15年度「酸化物燃料の電解還元処理に関する技術開発」の研究成果の一部である。

などの解体廃棄物である。現在、日本原燃(株)の低レベル放射性廃棄物埋設センターにおける埋設の可否の確認と調査・検討が進められている。

当社は、L1廃棄物の処分費用の低減と処分後の長期リスクの低減に向けて、減容化と安定化固化技術の開発を進めている。

減容化技術としては、廃樹脂を超臨界水により完全に完全分解する技術開発を進め、実用化した。この技術は、有機物である廃樹脂を、コンパクトな反応容器内で高温高压の超臨界水により短時間に無機物の二酸化炭素と水、硫酸、アンモニアに分解し(図7)、固体として沈殿する放射性物質だけを分離するものであり、廃樹脂を分解・減容しないで直接固化処理して処分する方法と比較し、L1廃棄物の量を1/20以下に低減できる。

また安定化固化技術としては、高流動性と高閉込め性のいわゆる高機能セメントを開発し、実用化した。この高機能セメントは、独自に開発した無機混和材の添加効果で廃棄物製作時には流動性が高く、ドラム缶内に高密充てんした廃棄物間相互の狭いすき間にも浸入しやすい特性があり、かつ固化後は、放射性核種を固定化する高い閉込め性(高分配係数)を備えている(表1)。

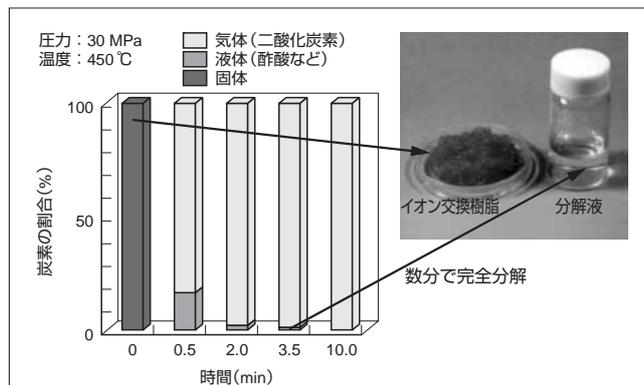


図7. 超臨界水処理試験の結果—超臨界水反応により、イオン交換樹脂を10分ではほぼ完全に無機の気体に分解する。

Results of waste decomposition test with supercritical water

表1. 東芝高機能セメントの核種閉込め性能(分配係数)

Nuclide confinement performance (coefficient of distribution) of Toshiba advanced cementization process

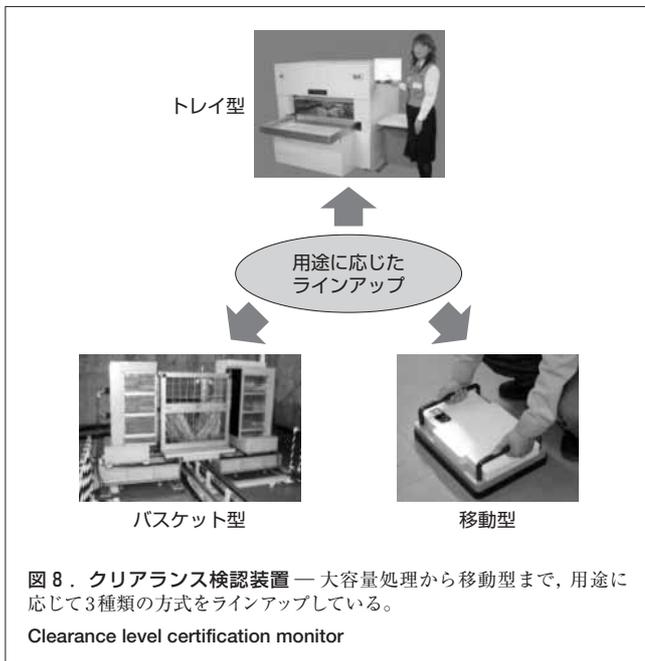
核種	東芝高機能セメント	通常のセメント
Cs ¹³⁷	60	1
C ¹⁴ , Ni ⁵⁹ , I ¹²⁹	10	1
Tc ⁹⁹	5	1
α核種 (Pu)	4	1
Co ⁶⁰	1	1

Tc: テクネチウム
*有機混和剤を使用した場合の分配係数を1として相対値で表現。

4.2 クリアランスレベルの廃棄物対策

放射線管理区域から出され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、として、1996年に国際基準（クリアランスレベル）が国際原子力機関（IAEA）により定められている。わが国でも、循環型社会に適合した重要な取組みとして、クリアランスレベルの放射能濃度基準が近々法制化に向けた審議の見込みである。

当社ではこれに対応し、クリアランスレベルの不定形状な廃棄物中の放射能を短時間で正確に計測する3タイプの測定装置を開発し実用化している（図8）。バスケット型測定装置（単機能・大容量型）は、容器単位で一度に多量の廃棄物を測定する場合、とりわけ解体物が大量に発生する原子力施設の廃止措置での使用に適している。トレイ型測定装置は、様々な種類と形状の廃棄物が主な対象となる場合に適しており、原子力施設の通常運転時の物品搬出検査にも兼用可能である。また、移動型の密着走査測定式大面積検出器は、建物や大型機器の表面汚染検査に適しており、効率よく表面サーベイを行うことができ、バックグラウンドの放射能の変動補正も可能である。これらの装置を用途別に使い分けることにより、廃止措置における廃棄物処理と分別・回収作業を大幅に効率化できる。



更に当社は、原子力発電所内に保管されている金属廃材をクリアランスレベルによって選別し、資源の有効活用の観点から、クリアランスレベル以下の金属を廃棄物処分容器などに再利用する総合リサイクルシステムを開発中である。

5 あとがき

わが国におけるエネルギーセキュリティ確保の観点から、原子燃料サイクル及びバックエンド技術の確立と最適化は最重要課題の一つである。当社は、原子力総合プラントメーカーとして、数多くの設計や建設の経験及び長年の研究開発を通じて蓄積した技術に基づき、先進的なリサイクル・バックエンドシステムの実現に向けた技術開発を推進していく。

文 献

- (1) 斎藤健弥, ほか. 再処理およびウラン濃縮技術開発. 東芝レビュー. 47, 11, 1992, p.848-851.
- (2) 中村雅博, ほか. 再処理工場 使用済燃料の受入れ施設および貯蔵施設の建設と試運転実績. 東芝レビュー. 54, 9, 1999, p.60-64.
- (3) 山田和矢, ほか. 超臨界水を用いた廃棄物処理システム. 東芝レビュー. 56, 9, 2001, p.58-61.
- (4) 山口伸一, ほか. 放射性廃棄物処理技術 — 東芝コンパクトRW. 東芝レビュー. 57, 4, 2002, p.23-26.
- (5) 芝野隆之, ほか. 東芝のバックエンド関連技術の開発. デコミッションニング技報. 28, 2003, p.30-46.



山口 伸一 YAMAGUCHI Shinichi

電力・社会システム社 原子力事業部 原子力化学システム設計部長。原子燃料サイクル施設及び放射性廃棄物処理システムの開発と設計に従事。日本原子力学会, 日本機械学会, 火力原子力発電技術協会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



豊原 尚実 TOYOHARA Masumitsu, D.Eng.

電力・社会システム社 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。原子力施設の化学システム開発に従事。日本原子力学会会員。
Power & Industrial Systems Research & Development Center



芝野 隆之 SHIBANO Takayuki

電力・社会システム社 原子力事業部 原子力化学システム設計部グループ長。サイクル・バックエンドシステムの設計に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.