

# 最新の原子カプラント技術

## Forefront of Nuclear Power Plant Technology Development

飯倉 隆彦      橘川 敬介

■ IIKURA Takahiko      ■ KITSUKAWA Keisuke

安定したエネルギーを供給できる原子カプラントは、多くの技術から成り立っている。原子力リーディングカンパニーの東芝グループは、沸騰水型原子炉（BWR）と加圧水型原子炉（PWR）のプラント建設、保全サービスに加え、原子燃料サイクル、高速炉、核融合、加速器といった原子力にかかわる幅広い製品及びサービスを提供している。

これらの製品及びサービスを創出するため、東芝グループは長年培ってきた独自技術を根幹とし、原子カプラントを支える設計・解析技術、システム・機器技術、計装・制御技術及び材料・化学技術の開発を進めている。各技術分野の最先端技術を紹介する。

Nuclear power plants, which contribute to reliable energy supplies, incorporate a large number of technologies. As a leading nuclear company, Toshiba is promoting nuclear businesses in various fields including the construction of new light water reactors (LWRs), maintenance services for operating LWRs, nuclear fuel cycles, fast breeder reactors, nuclear fusion, and accelerators.

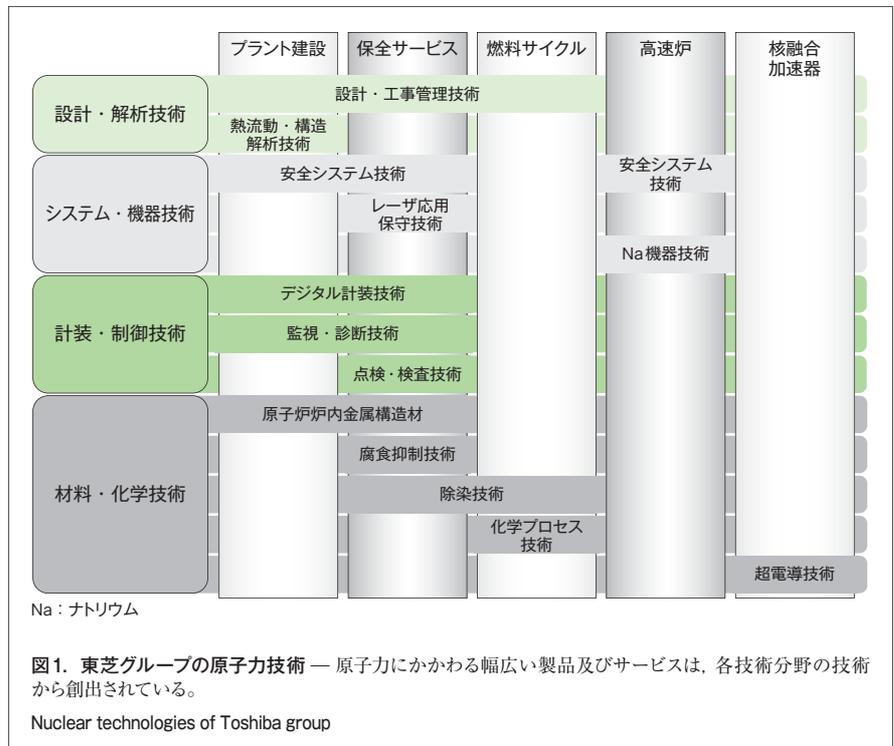
We have a strong sense of responsibility to lead the sustainable development of nuclear technologies based on our experience in construction and maintenance, plant design and analysis, system engineering and equipment technologies, instrumentation and control systems, and materials science and chemistry.

### 東芝グループの原子力技術

安定したエネルギーを供給できる原子カプラントは、設計・解析技術、システム・機器技術、計装・制御技術及び材料・化学技術など、安全性、信頼性を維持するための多くの技術から成り立っている。

原子力リーディングカンパニーの東芝グループは、改良型BWR（ABWR）などのBWRとAP1000<sup>TM</sup>などのPWRのプラント建設、保全サービスに加え、原子燃料サイクル、高速炉、核融合、加速器といった原子力にかかわる幅広い製品及びサービスを提供している。これらの製品及びサービスを創出するため、東芝グループは長年培ってきた独自技術を根幹とし、原子カプラントを支える多くの技術開発を推進している。

ここでは、プラント建設及び工事管理まで考慮した設計・解析技術、安全システムや保守技術に代表されるシステム・機器技術、プラントの安定運転を維持し管理する計装・制御技術、先進

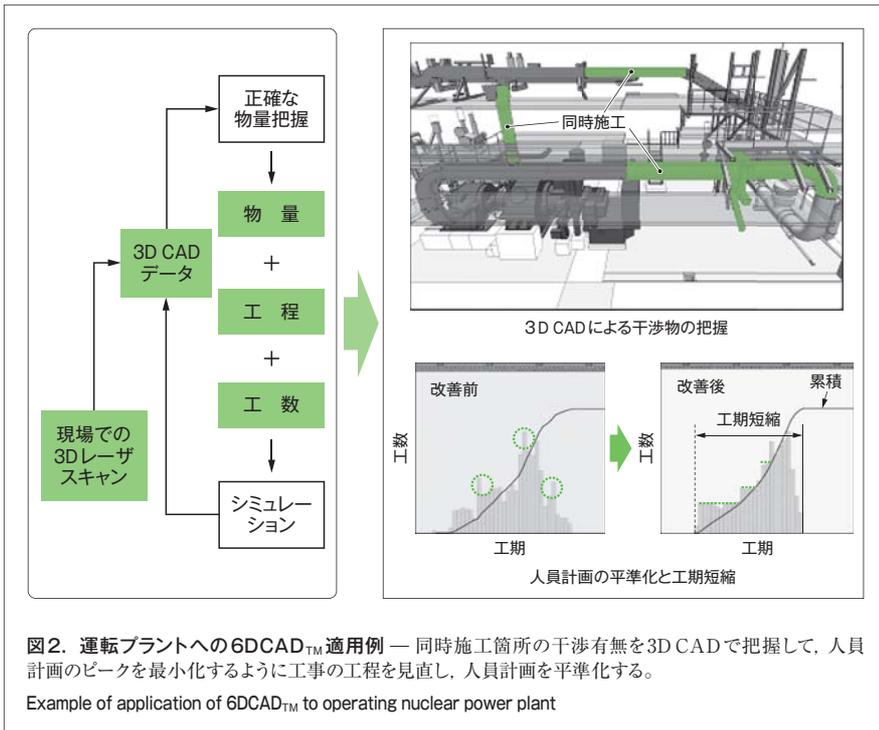


的な構造材料や化学プロセスに関する材料・化学技術に大別し、これらの最先端の技術について述べる（図1）。

### 設計・解析技術

#### ■ 設計・工事管理技術

プラント建設の工程及び定期検査の



品質・信頼性向上に貢献するため、情報技術 (IT) を活用した工事計画・管理技術の開発を進めている。機器及びそれをつなぐ配管、空調のダクト、電線を敷設するトレイ、電線を収納する電線管並びに仮設足場まで、工事に必要な設計情報を細部にわたり反映した3次元 (3D) CADデータに、工事物量、工事に掛かる工数、及び工事工程をリンクさせ、シミュレーションを行うことで現地工事の工程短縮や工数適正化などを可能にする6DCAD™を開発した。

この技術を現在建設中の電源開発(株)大間原子力発電所のタービン設備工事に全面適用し、あらかじめ計画された現地工事工程及び手順を実践するとともに、実績データを採取して6DCAD™データに反映し蓄積している。

運転プラントの改造工事にあたって、建設時の3D CADによる設計データがない場合は、3Dレーザスキャン技術を用いてデータを採取し、6DCAD™技術を取り入れることで、事前に工事に伴う干渉物のチェックやエリア調整などが可能になり、工程短縮、工数適正化、及び被ばく低減が図れる。大型改造工事が計画さ

れている日本原子力発電(株)敦賀発電所1号機の定期検査に6DCAD™の適用を開始した(図2)。

今後は、6DCAD™を新規プラントの建設工事及び運転プラントの大型改造工事、並びに廃止処置プラントの工事計画へ展開し、工事の品質及び信頼性の向上を図っていく。

### ■熱流動・構造解析技術

新規建設プラントに対する安全規制の要求の見直しに対応するため、シビアアクシデント(過酷事故)時のプラント挙動を的確に評価し、配置設計やシステム設計に反映するための流動・過渡安全解析技術の高度化を進めている。

シビアアクシデント時の炉心燃料内の流動様式である遷移を伴う二相流動を解析で評価するためには、小さい気泡の挙動から大きな気泡の界面変化挙動までを考慮する必要がある。このため、二流体モデルとVOF (Volume of Fluid) 法をカップリングしたハイブリッド二相流解析手法を開発した。

また、構造物への衝撃荷重解析をシビアアクシデント評価手法に導入し、放

射性物質を閉じ込める原子炉格納容器の健全性評価を航空機落下時の衝撃荷重に対して行い、配置設計や原子炉格納容器設計などの安全設備設計に展開している。

更に、これまでは異なる物理事象として別々に解析されてきた熱流動事象と構造変件事象を連成させたマルチフィジックス解析の実用化も進めている。

## システム・機器技術

### ■安全システム技術

炉心燃料が高温発熱により熔融することを想定するシビアアクシデント対策として、熔融した炉心燃料を原子炉格納容器内に閉じ込め、確実に冷却保持することができるコアキャッチャを開発している。熔融した炉心燃料を冷却する能力を熱水力解析コードにより評価し、材料選定及び構造設計を行うとともに、実機の大きさを模擬した自然循環熱伝達試験装置を用いて熱伝達特性を取得した。これらにより欧州の安全規制要求に対応したABWRプラント概念の成立性を確認した。

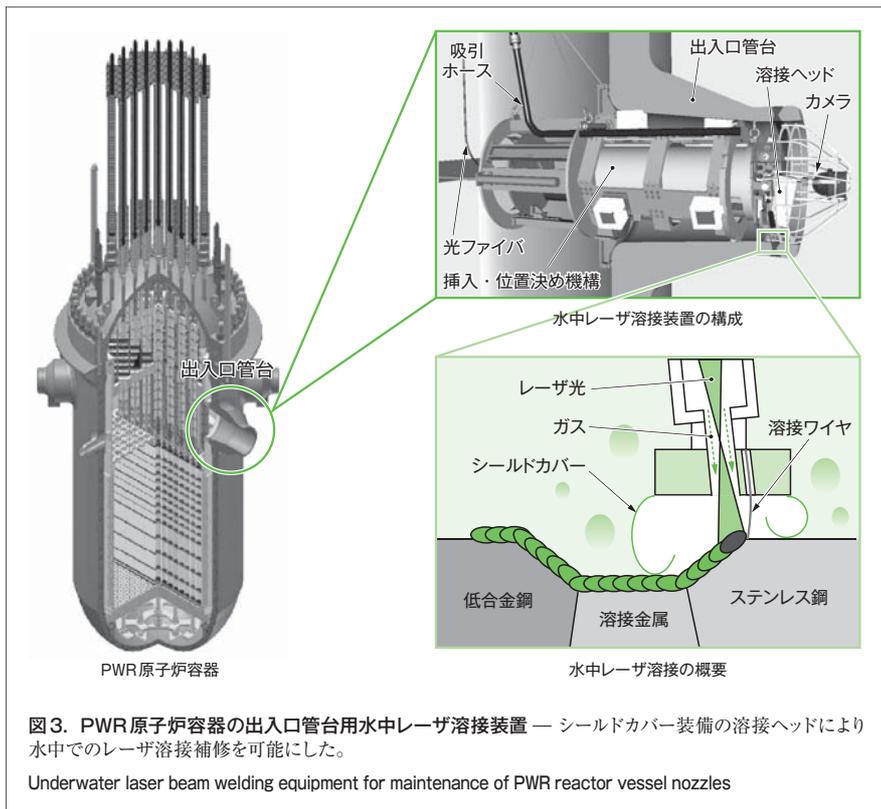
### ■レーザ応用保守技術

原子炉内金属構造物の応力腐食割れ(SCC)を予防する技術として、金属表面にパルスレーザを照射し、残留引張応力を圧縮応力に変えるレーザピーニング装置を世界で初めて(注1)開発し、既に、実機10基に適用してきた。更に適用範囲を拡大するため、レーザピーニングシステムをポータブル型とする画期的な小型化を達成した。

検査技術では、レーザにより発生する超音波を利用したレーザ超音波探傷(UT)検査装置を開発し、実機2基に適用した。また、補修技術への応用として、水中レーザ溶接装置を開発し、BWR原子炉内補修工事に世界で初めて(注2)適用した。更にPWR原子炉容

(注1) 1999年3月時点、当社調べ。

(注2) 2006年2月時点、当社調べ。



器出入口管台用水中レーザー溶接装置も開発が完了した(図3)。

レーザー溶接装置は、特別な密封排水構造物が不要で、ガスを噴射しながら溶接ヘッドを移動することで連続的に溶接が可能である。施工の際、原子炉内の水を抜く必要がないことや、施工対象部位に直接アクセスできることで短工期施工、作業時の被ばく抑制効果がある。

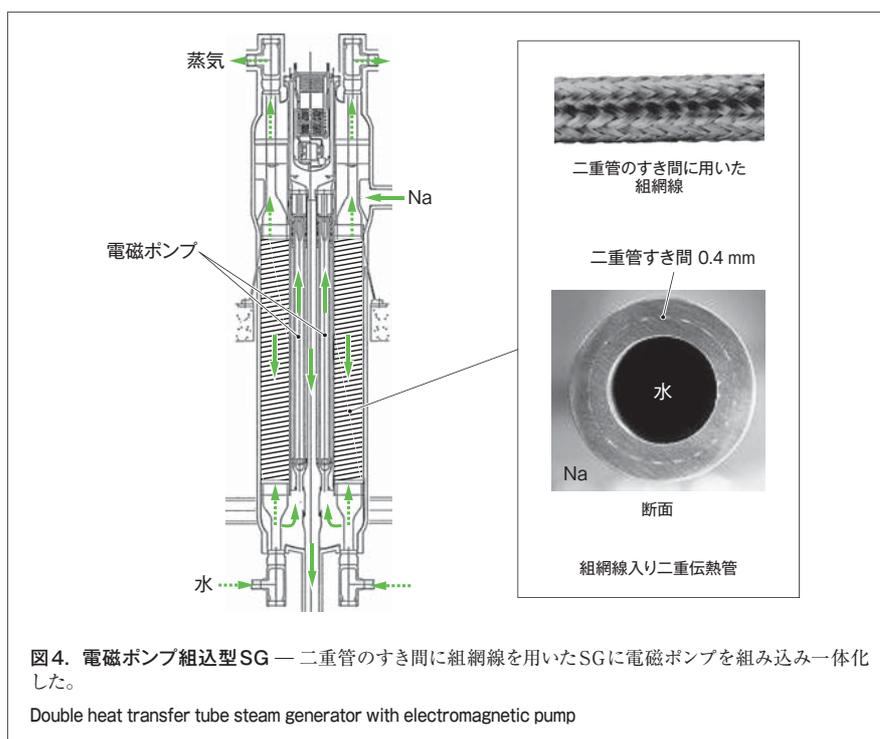
### ■Na機器技術

業界では最大級のナトリウム(Na)ループ試験設備を用いて、大口径(3.3(直径)×1.2(高さ)m)電磁ポンプの性能試験を行い、設計の妥当性を確認した。

また、Na冷却高速炉プラントで熱交換を行う水とNaの接触を避けるため、二重伝熱管蒸気発生器(SG)を開発している。内管と外管の間に独自の網目構造を採用し、0.4mmのすき間を確保した二重伝熱管の製作と、溶接接続法を確立した。点検・保守用の電磁気探傷検査装置も開発し、これまで困難であった直径1mmの傷を高速に検出

できるようにした。

電磁ポンプと二重伝熱管を組み合わせた電磁ポンプ組込型SG(図4)をNa冷却高速炉プラントに適用することに



よって、必要とされていた2次系配管を削減してシステムを単純化できることから、今後、Na冷却高速炉プラントの新概念として提案を進めていく。

これら機器技術の開発成果は、Na冷却小型高速炉4S(Super-Safe, Small & Simple)の設計に取り入れられている。

## 計装・制御技術

### ■デジタル計装技術

計装と制御に用いられるマイクロプロセッサや周辺デジタル・アナログ回路部品などの急速な進歩や改廃が進んでいる。このため、原子炉の監視計装の中核となる核計装や安全上重要な放射線計装システムなどのプラント監視計装システムの設計と、保守、管理の信頼性を向上するため、FPGA(Field Programmable Gate Array)を適用した新型原子炉計測専用デジタル装置(FPGA型TOSDIA™)を開発し、ラインアップを完了した。

FPGAは、単純なロジック回路で構成されるため、設計検証が容易で長期間の製品供給が可能であり、ドリフトを

抑制できる特長を持つ集積論理素子である。これにより米国をはじめとした安全規制の要求の見直しに対応できることから、信頼性の高い原子炉計測専用デジタル装置の提供が可能になった。

### ■監視・診断技術

監視・診断技術は、プラントの稼働率向上に貢献している。

計器の測定データを統計的に解析することによりオンラインでループ精度を超えるドリフトを検知し、長期サイクル運転における計器の健全性と校正周期の適正化を効率的に評価する計器ドリフトオンライン監視診断装置を開発した。また、ポンプの回転軸の運転に伴う振動を、ポンプケーシングの外側から超音波を用いて直接測定し診断するシステムを実機に導入し、ポンプの運転状態の診断精度を向上させている。

設備の振動、ひずみ及び温度データを、光ファイバセンシング技術により一括して計測し伝送する計測監視システムを構築した。また、自己給電と無線伝送機能を持ち、ケーブルレスで配管の振動と減肉データなどを計測可能にする監視ハーベスタスマートセンサを開発している。

更に、今後の長期サイクル運転の確実な実現を目指して、状態監視データや点検記録などの多様なデータを統合的に管理し、機器状態の診断結果をカルテ形式で提示する保全有効性評価システムや、定期検査での保全作業の管理を効率化する工程管理システム (Artemis Sugar<sup>TM</sup>(注3)) を開発した。

### ■検査・点検技術

プラント寿命を延長して安定運転するためには、規定された時期に検査を行い、その結果に基づく健全性評価を行っていく必要がある。

金属表面の割れを検査する表面検査

(注3) Artemis Sugarは、アルテミスインターナショナル(株)の登録商標。

技術として、水中カメラを用いた目視検査に加え、レーザ超音波探傷技術、渦流探傷技術の開発を行っている。カメラによる目視検査映像に超解像度技術や3次元性状確認技術を適用することで、割れの検知性を向上させている。

また、表面検査で見つかった割れの深さを調べる体積検査技術では、独自に開発したプローブを用いて非接触で正確な探傷を高速で行うフェーズドレイ超音波探傷 (PAUT) 技術を提供している。更に、複雑な形状部位を単純なプローブ走査で立体的に探傷する3次元PAUT技術の開発も行った。定期検査期間に実施する検査や保全作業は、高速化や並行作業化により定期検査期間への影響を可能な限り小さくすることが重要であり、そのための技術開発にも注力している。

## 材料・化学技術

### ■原子炉内金属構造材

原子炉炉内構造物に用いられるオーステナイト系ステンレス鋼は、運転年数が長くなるほど炉心付近で中性子照射を多く受け、照射誘起応力腐食割れ (IASCC: Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking) の感受性が高くなることが知られている。そこで、プラントの寿命延長に向け、耐中性子照射性の高い金属構造材料の開発を進めている。

ステンレス鋼の結晶粒径は通常50 $\mu\text{m}$ から100 $\mu\text{m}$ であるが、製造過程の冷間加工と熱処理の改良により、結晶粒を1 $\mu\text{m}$ 程度に微細化し耐中性子照射性を大幅に向上させた。また、微細化材の耐中性子照射性を阻害しない接合技術を開発し、微細化材の実機適用への見通しを得た。

### ■腐食抑制技術

原子炉内の金属構造材の健全性を維持するため、原子炉内を循環する水に光触媒として知られる酸化チタンの微粒子

を混ぜて炉内の金属構造材料表面に付着させ、チェレンコフ光<sup>(注4)</sup>を利用して腐食を抑制する技術を東京電力(株)とともに開発した。東京電力(株)福島第二発電所1号機で世界初<sup>(注5)</sup>となる酸化チタン微粒子の注入を行い、金属構造材料表面への付着を確認した。

### ■除染技術

機器や配管に付着した放射性物質を化学反応を用いて除去 (化学除染) し、定期検査時の作業員の被ばくを低減する技術として、T-OZON (Toshiba Ozone Oxidizing Decontamination for Nuclear Power Plants) 法を開発し、高い除染性能と少ない二次廃棄物発生量を実現した。

ウェスチングハウス社は、BWR及びPWR 1次系の化学除染技術を発展させ、NP/AP (Nitrate Permanganate/Alkaline Permanganate) 法やLOMI (Low Oxidation-state Metal Ion) 法など、プラントニーズに応じた幅広い化学除染技術を提供している。また、プラント廃止措置時の高い除染性能を達成するためのDfD法 (Decontamination for Decommissioning) や、PWR 2次系をキレート剤 (EDTA) を使用して洗浄する技術についても実機への適用経験を豊富に持っている。

### ■化学プロセス技術

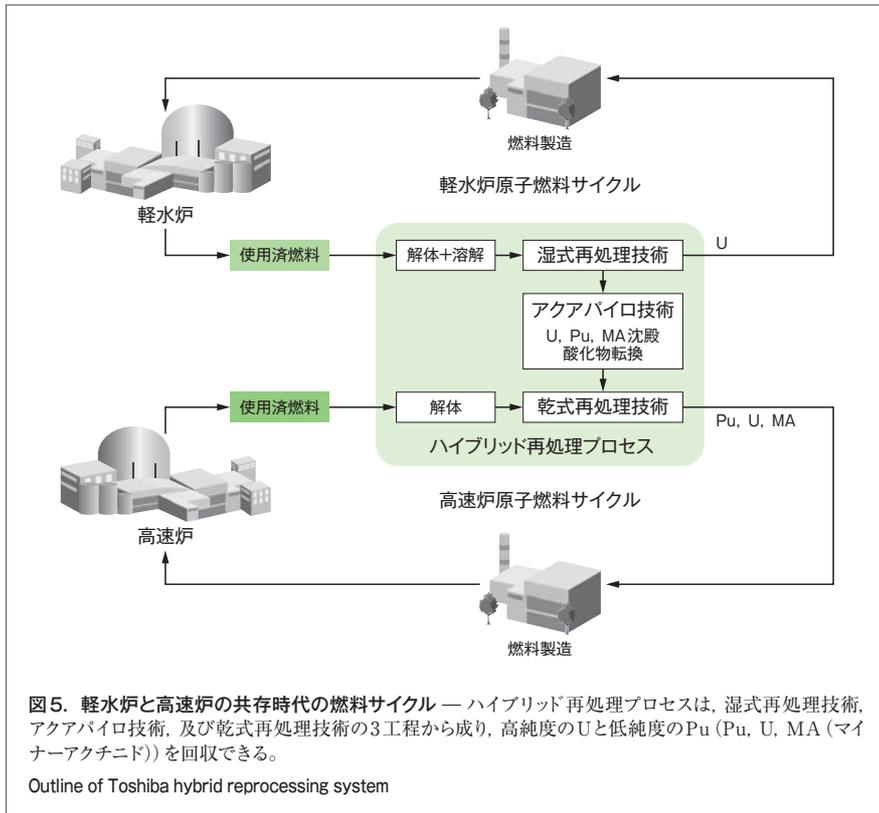
軽水炉に続いて、今世紀中ごろに高速炉が導入されると、軽水炉と高速炉が共存する時代が今世紀末ごろまで続くと思われている。そのため、共存時代にふさわしい原子燃料サイクルの確立を目指して、(財)電力中央研究所や独立行政法人日本原子力研究開発機構と協力して進めてきた乾式再処理技術と湿式再処理技術を組み合わせた東芝ハ

(注4) チェレンコフ光  
水のような透明の物質中を荷電粒子が通過する際、物質中の光速を超えた荷電粒子から放出される光のこと。

(注5) 2010年6月時点、当社調べ。

## 原子力最先端技術で貢献

東芝グループは、原子力リーディングカンパニーとして、将来にわたるエネルギーの安定供給を目指し、信頼性の高い原子力プラントを提供する。プラント建設をはじめ、運転・保守サービス、原子燃料サイクル、バックエンド、次世代の高速炉、核融合、加速器など、原子力全般にわたる最先端の技術を開発し、原子力技術でイニシアチブを取り続け、地球環境の保全とエネルギーの安全供給に貢献していく。



ハイブリッド再処理技術を開発している(図5)。

使用済燃料から湿式再処理技術によりウラン(U)を純度99.9%以上で直接回収して軽水炉へ提供し、その後、プルトニウム(Pu)などの有用元素を熔融塩電解技術(乾式技術)により一括回収して高速炉へ提供する。

使用済燃料を溶解した工学試験で、純度99.9%以上のUの直接回収を確認し、核不拡散に有効な再処理プロセスの成立性を確認した。

一方、U鉱物の抽出後の溶液に含まれる有用なレニウムなどのレアメタルを回収するため、これまでに培った電気化学的還元技術の適用を行っている。

## 超電導技術

核融合機器や加速器などの開発を通して、そのコア技術である超電導技術の開発に長年にわたって取り組んできた。伝導冷却方式で冷却するイットリウム(Y)系高温超電導マグネットコイルの開発を完了し、世界最高<sup>(注6)</sup>の中心磁場4.7 T(テスラ)の発生に成功した。

Y系高温超電導マグネットコイルを適用した重粒子線の発生装置、スキャンニング装置、及び回転ガントリの開発を進め、原子力技術を用いたバイタル&ヘルスケア分野として重粒子線治療装置の開発にも取り組んでいる。

(注6) 2010年11月時点、当社調べ。



飯倉 隆彦  
IIKURA Takahiko

電力システム社 原子力技師長。  
日本原子力学会、日本機械学会会員。  
Power Systems Co.



橘川 敬介  
KITSUKAWA Keisuke

電力システム社 軽水炉技師長。  
日本機械学会会員。  
Power Systems Co.