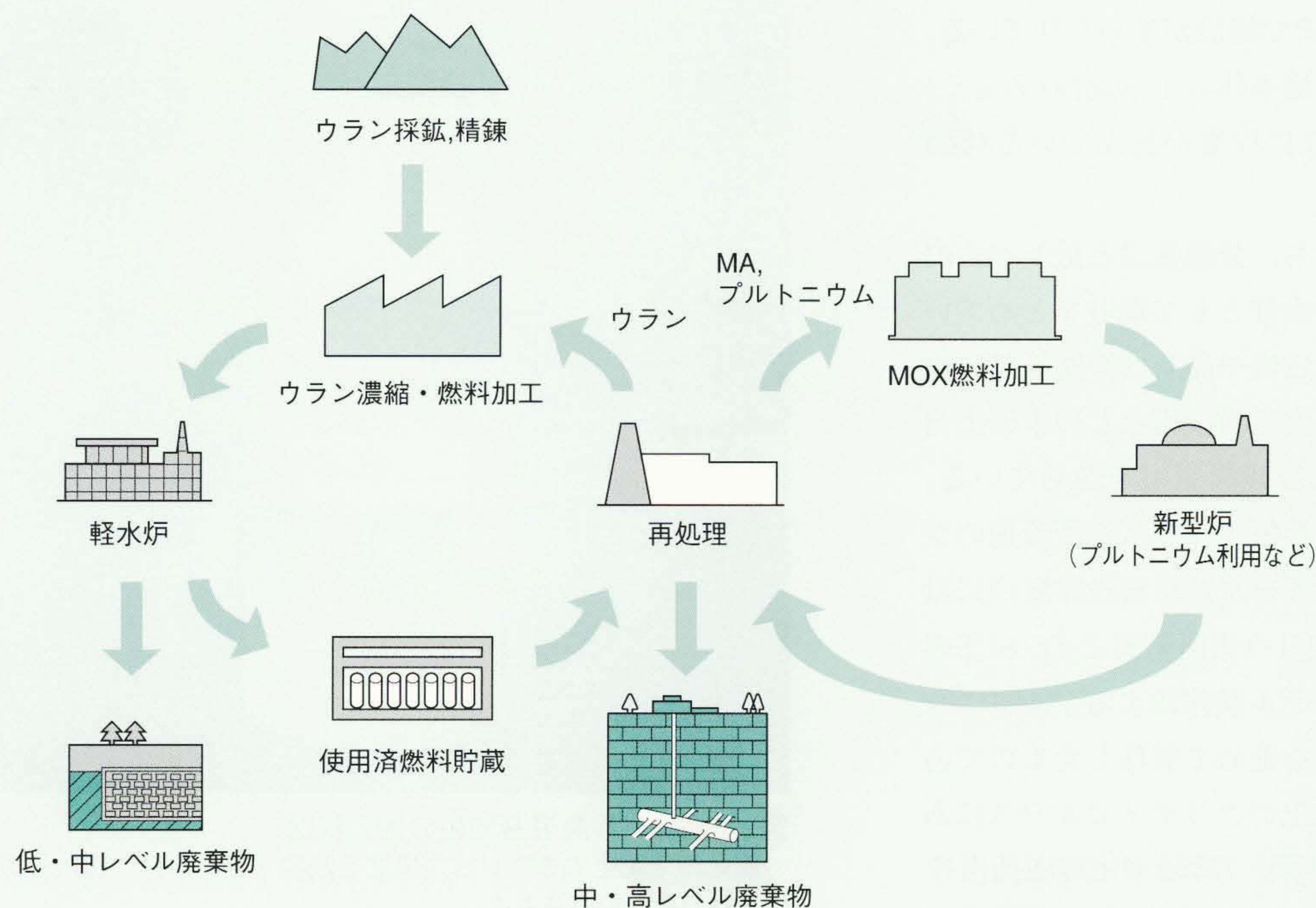


エネルギーの長期安定供給を支える燃料サイクル技術

Nuclear Fuel Cycle Technologies for Long-Term Stable Energy Supply

深澤哲生 Tetsuo Fukasawa 大月 惇 Atsushi Ôtsuki
梅原 肇 Hajime Umehara 松田将省 Masami Matsuda



注：略語説明

MA (Minor Actinides)

MOX (Mixed Oxides)

原子燃料サイクル

資源小国であるわが国では、燃料をリサイクルするシステムの構築は、エネルギー自給率の向上のために不可欠である。日立製作所は、種々の技術の開発により、原子燃料サイクルの確立に貢献している。

わが国は、原子力発電の燃料であるウランの供給を輸入に頼らざるをえない。また、世界のウラン資源には限りがあり、現状では約70年分の埋蔵量が確認されているにすぎない。一方、原子燃料サイクルを確立し、使用済燃料中の燃え残りのウランや新たに発生したプルトニウムを回収、リサイクルすることにより、燃料の利用効率は飛躍的に向上する。プルトニウムは国内産のエネルギー源であり、輸入に依存しない資源と考えることができる。

原子燃料サイクルの再処理以降の技術開発は、わが国では核燃料サイクル開発機構が実施しており、商業規模での再処理施設の本格運転も、今世紀初頭に開始される予定である。

このような状況下で現在求められているのは、商用再処理施設を安全に立ち上げて原子燃料サイクルを完結させ、信頼性の高いエネルギーを安定に供給することである。また、原子燃料サイクル施設から発生する放射性廃棄物を、安心できる状態で処理、処分することが必要である。

1 はじめに

原子燃料サイクルは、ウラン濃縮・燃料加工、原子炉、使用済燃料貯蔵、再処理、発電所廃棄物処理・処分、再処理廃棄物処理・処分、およびサイクル施設廃止措置で構成している。

ここでは、この原子燃料サイクルで重要視されているさまざまな技術のうち、2005年運転開始予定で現在建設の最盛期にある日本原燃株式会社の六ヶ所再処理工場の

状況、電力会社と核燃料サイクル開発機構が中心となって研究を進めている、フッ化物揮発法を中心とした先進的再処理技術について紹介する。また、再処理以外の原子燃料サイクル技術として、遠心法を中心としたウラン濃縮、FBR(高速増殖炉)や低減速軽水炉などの新型炉、金属キャスクなどを用いる使用済燃料貯蔵、原子力発電所や再処理施設などから発生する放射性廃棄物の処理・処分、原子力発電所やウラン濃縮施設の廃止措置に関する技術開発状況について述べる。

2 再処理技術の開発

2.1 六ヶ所再処理工場の建設状況

日本原燃株式会社が青森県六ヶ所村に建設中の軽水炉燃料再処理工場(年間処理能力:800 tU)では、2005年7月のしゅん工に向けて急ピッチで建設が進められている。2000年9月末時点の再処理工場本体の工事進捗(ちよく)率は50%を超え、計画どおりに作業が進んでいる(図1参照)。

日立製作所は、主施設のうち、分離施設と低レベル廃液処理施設の全体を建屋幹事会社として取りまとめている。また、溶解オフ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設備担当会社として、設計、製作および建設工事を進めている。1998年秋には、せん断処理・溶解オフガス処理設備のジルコニウム製ヨウ素追い出し塔を前処理施設建屋内に設置した。この装置は、高性能ヨウ素吸着材とZr/SUS爆着異材継手の開発、実規模モデル試作によるジルコニウム加工・溶接技術の確立などを進めて製作したものである。1999年夏には、建設工程上のクリティカルパスにある環状形の一時貯留処理槽(通称「アニュラベッセル」)を設置した。また、2000年秋には、再処理施設の重要機器の一つである高レベル廃液濃縮缶の分離施設建屋への搬入、設定を予定どおり完了した(図2参照)。この装置は、放射性核種除去性能確証試験や硝酸高耐食性ステンレス鋼の開発、実液腐食試験などによる技術開発と実証の成果によって実現したものである。

一方、2000年10月には日本原燃株式会社が、この再処理工場への使用済燃料の本格搬入にかかわる安全協定を



図1 六ヶ所再処理工場建設の進捗状況

電力安定供給のため、商業用原子燃料サイクル施設の建設が急ピッチで進められている。

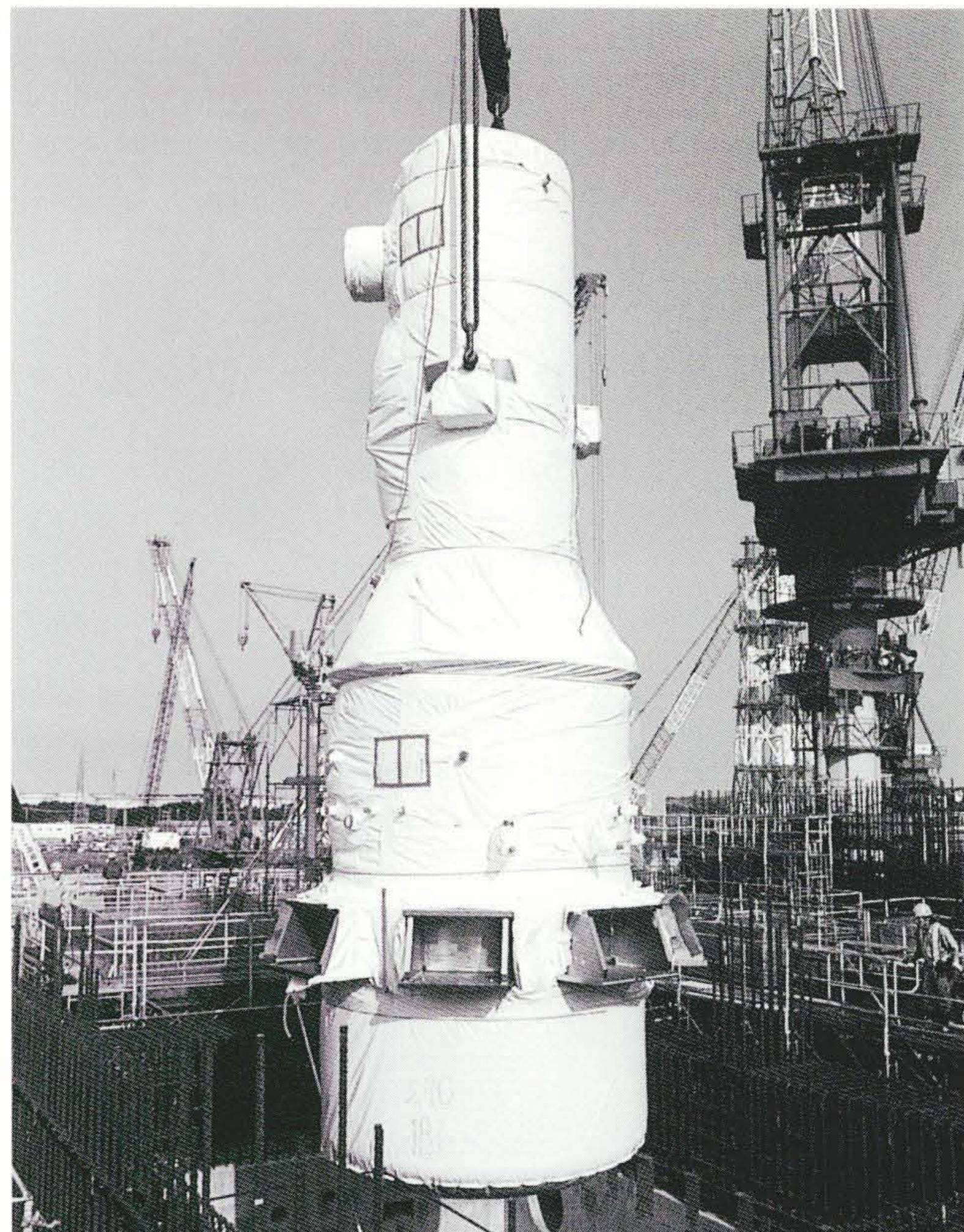


図2 高レベル廃液濃縮缶の搬入状況

再処理で発生する高レベル廃液を減容するために、国内外の高耐食性技術が駆使された。

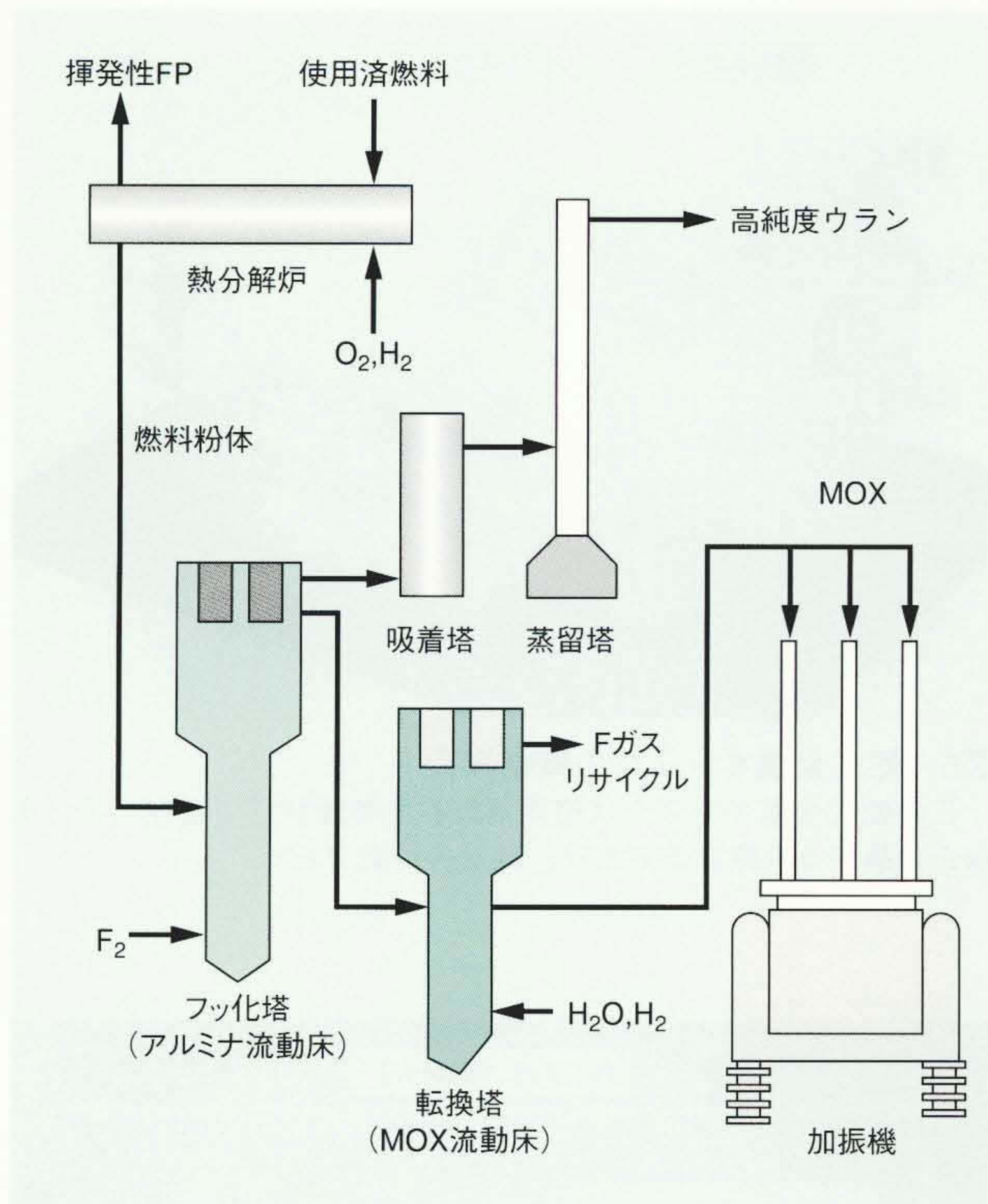
青森県および六ヶ所村と、また、同年11月には隣接6市町村とそれぞれ締結した。これにより、日立製作所が建屋幹事会社として全体を取りまとめてきた使用済燃料受け入れ・貯蔵施設に2000年12月、東京電力株式会社福島第二原子力発電所ほかから使用済燃料が搬入された。

2.2 先進的再処理技術の開発

電力会社各社と核燃料サイクル開発機構は、FBRサイクルの実用化戦略調査研究を推進中である。日立製作所は、合理的再処理技術として、簡素化溶媒抽出法やイオン交換法、フッ化物揮発法などの開発でこれに参画している。

フッ化物揮発法は、ウラン、プルトニウム、およびFP(核分裂生成物)のフッ化物の揮発性の差を利用することにより、ウランとプルトニウムを回収する技術である(図3参照)。

軽水炉からFBRサイクルへの移行期間では、多量の余剰ウランが発生する。再処理工程では、安全性、核不拡散性、環境負荷低減といった要件を満たしつつ余剰ウランを高除染(高純度)で回収できれば、中間貯蔵または処分を含めた全体サイクルとして高経済化が図れる。この



注：略語説明 MOX (Mixed Oxides；混合酸化物)

図3 フッ化物揮発法再処理のプロセスフロー

簡単なプロセス構成により、高純度のウランと低純度のMOXが回収される。

ねらいを実現するために、日立製作所は、ウランを高除染(FPの除染係数 10^5 以上)で回収できるフッ化物揮発法の特徴を生かすことによってプルトニウムの高効率回収と単離回避(低純度回収)、および回収プルトニウムの直接MOX顆(か)粒燃料製造を図った先進的再処理プロセスを開発している^{1), 2)}。

フッ化物揮発法は、数十年前に米国、フランス、ベルギー、旧ソビエト連邦および日本(原子力研究所)で、パイロットプラントまで開発された技術である。当時は高純度のプルトニウムを単独回収しようとしていたため、実用化が困難であった。日立製作所が現在開発している改良フッ化物揮発法は、核不拡散性の観点から高純度のプルトニウムを回収しない方式であることから、当時の困難さは回避できる。

改良フッ化物揮発法では、まず熱分解炉で酸化還元を繰り返すことによって使用済燃料を粉体化し、粉体となった燃料をフッ化塔に供給する。フッ化塔では、最初は穏やかな条件でフッ素(F_2)を反応させることによってウランを揮発させ、フッ化塔内のウランとプルトニウムが所定比率になった時点で条件を切り替え、ウランとプ

ルトニウムを同時に揮発させる二段階フッ化プロセスとしている。最初にフッ化して揮発したウランは、吸着塔と蒸留塔で精製し、軽水炉でリサイクルするために再濃縮される。二段階目で揮発したウランとプルトニウム混合フッ化物は精製せずに転換塔に供給し、高温加水分解によって直接MOX顆粒に転換する。これを加振機によって被覆管中に振動充てんし、燃料ピンを製造する(図3参照)。

改良フッ化物揮発法の特徴的プロセスである二段階フッ化と酸化物転換について、以下の化学・工学的検討と課題摘出を行った。

(1) 二段階フッ化：ウランやプルトニウムの酸化物のフッ化速度定数を基に、フッ化塔内の挙動を速度論的に評価した。ウランのフッ化反応速度は速く、フッ化塔からの UF_6 の発生速度は F_2 の供給速度で律速される。実験によって明らかにすべき課題として、従来のフッ化操作との差異に起因する F_2 利用率変化とFP移行挙動の評価があげられる。

(2) 酸化物転換：再転換工程などでは、ペレットや振動充てん燃料製造用の酸化物粉末製造のために、高温加水分解法を用いた実績がある。酸化物顆粒製造の場合は、振動充てんに適した顆粒径に制御することが課題である。

上記の課題を解決するために、日立製作所は、試験装置を設計、製作し、環境に優しく経済性に優れた先進的再処理・燃料製造技術の確立を図っている(図4参照)。



図4 フッ化物揮発法の試験装置

この試験装置では、改良フッ化物揮発法の技術的成立性、安全性、環境負荷低減性を確認することができる。

3 原子燃料サイクルへの取組み

3.1 ウラン濃縮関連技術の開発

遠心法ウラン濃縮については、青森県六ヶ所村で日本原燃株式会社のウラン濃縮工場が操業中である。日立製作所は、多数の遠心機を配管で接続するカスケード設備などをこの工場に納入した。

一方、使用済となった遠心分離機については、放射性廃棄物の発生量を合理的に低減する必要がある。日立製作所は、これまで約20年にわたって核燃料サイクル開発機構による使用済遠心機処理技術開発に参画しており、1999年には、人形峠環境技術センターに化学除染法による遠心機処理設備を納入した。また、日本原燃株式会社のウラン濃縮工場で将来発生する大量の遠心機を処理するため、除染技術の検討、遠心機処理設備の設計検討に参画している。

遠心法に代わる次世代のレーザー法ウラン濃縮については、レーザー濃縮技術研究組合が技術開発を進めており、今後、濃縮試験などが実施される計画である。現在、日立製作所は、試験に使用する回収機構などの製作を進めている。

3.2 使用済燃料貯蔵技術の開発

原子力発電所から発生する使用済燃料は、再処理することを基本としている。しかし、使用済燃料の発生量は着実に増加しているため、再処理するまでの間、リサイクル燃料資源として適切に貯蔵、管理する必要がある。現在、2010年をめどに発電所外での中間貯蔵が計画されている。

中間貯蔵施設では、実績のある輸送用金属キャスクに貯蔵機能を持たせた「乾式金属キャスク」が経済的に有力とされ、現在、指針や基準などの策定が行われている。

日立製作所は、この乾式金属キャスクの実用化に向けて開発を推進中である。また、将来的にさらに高経済化が期待できるコンクリートキャスク方式とボルト方式の貯蔵技術の開発も進めている。

乾式金属キャスクの概略構造を図5に示す。輸送と貯蔵を兼用する乾式金属キャスクの実用化に向けて、バスケット伝熱試験や緩衝材の各種データの取得、金属ガスケットの密封性能試験などにより、実機信頼性を検証中である。

伝熱試験では、試験装置で、半径方向を精密にモデル化したバスケット格子に燃料集合体を模擬したヒータを装荷し、温度分布を測定している(図6参照)。また、輸

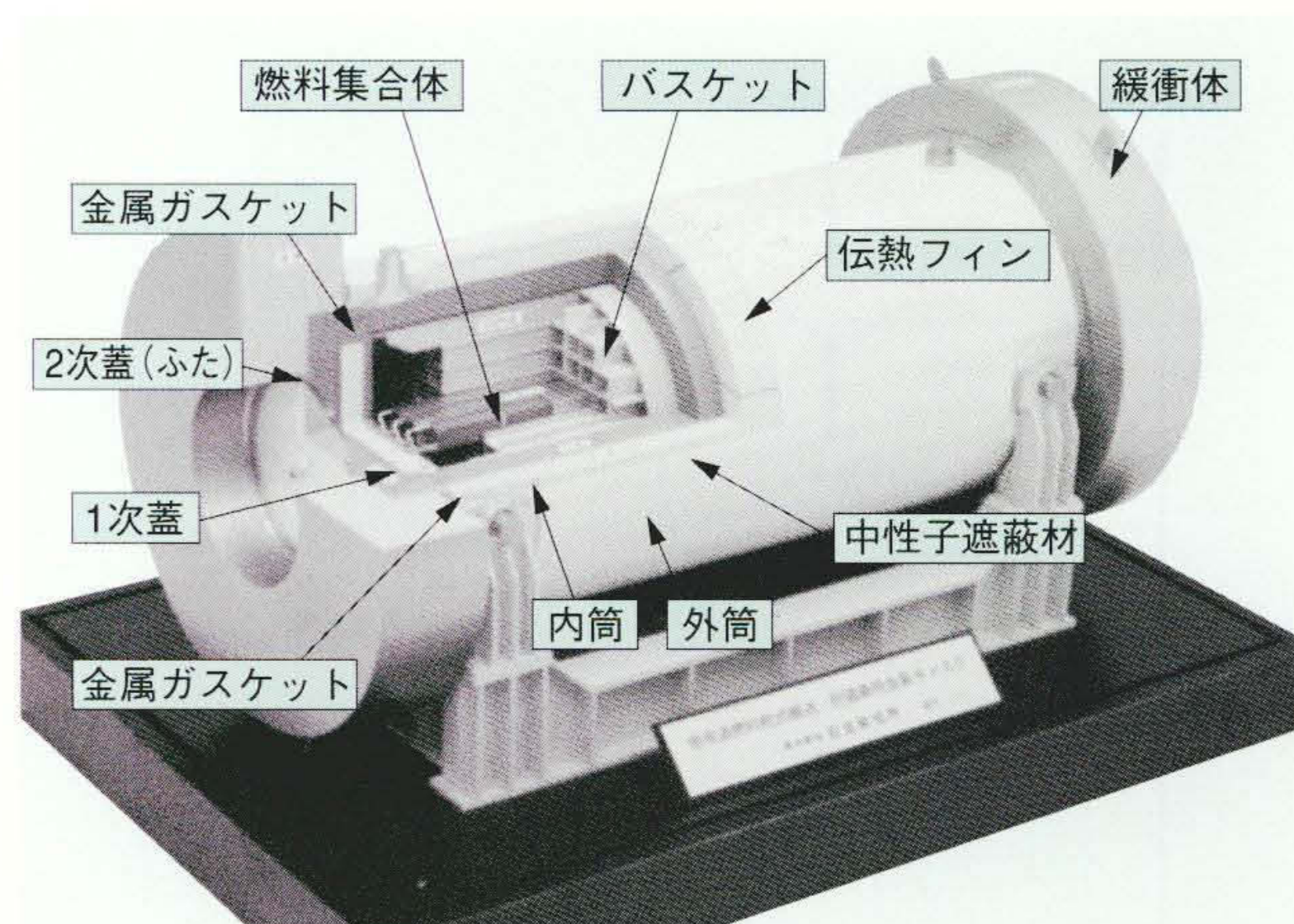


図5 乾式金属キャスクの概略構造

この乾式金属キャスクは使用済燃料を乾燥状態で密閉して放射線を遮蔽する貯蔵容器であり、輸送も可能である。

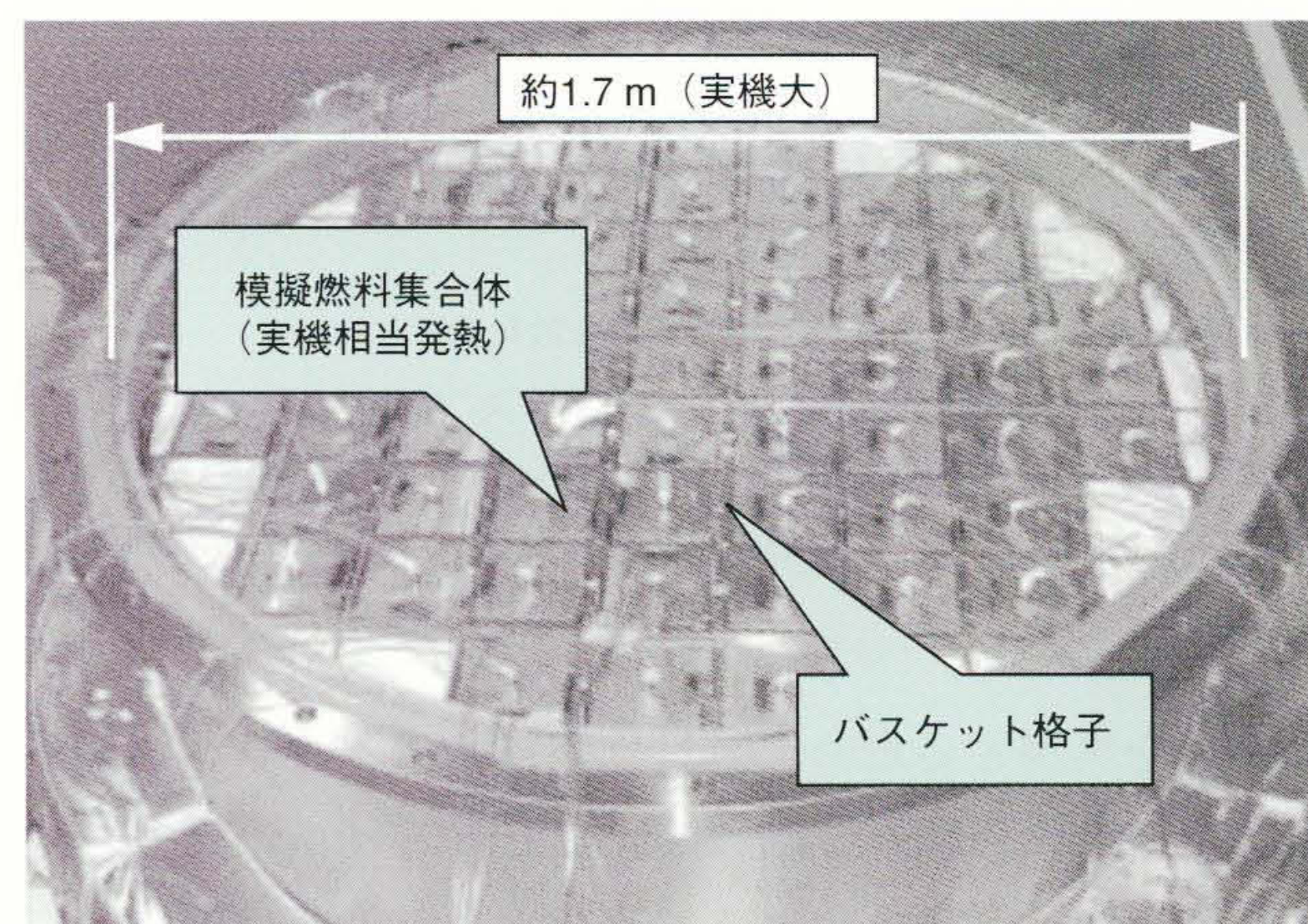


図6 乾式金属キャスク伝熱試験装置

半径方向が実機のサイズと同じバスケットに使用済燃料を模擬したヒータを装荷し、伝熱特性を確認する。

送時と貯蔵時を考慮した姿勢での試験も実施している。

3.3 廃棄物処理技術の開発

日立製作所は、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、(1)処分費低減のための減容技術、(2)安全に埋設処分するための固化処理技術、および(3)核種の放出低減を目指す環境負荷低減のための処理技術を開発した。

(1)の減容技術としては、従来の乾燥粉体化ペレット固化またはアスファルト固化に代わるホウ酸超濃縮固化と、黒鉛誘導加熱方式による溶融固化技術を開発した。ホウ酸超濃縮固化は、従来技術以上の減容比と処分に適したセメント固化を達成するものである。溶融固化は、加熱源として黒鉛誘導加熱方式を採用しており、水蒸気爆発のポテンシャルをなくすとともに、コンパクトな設

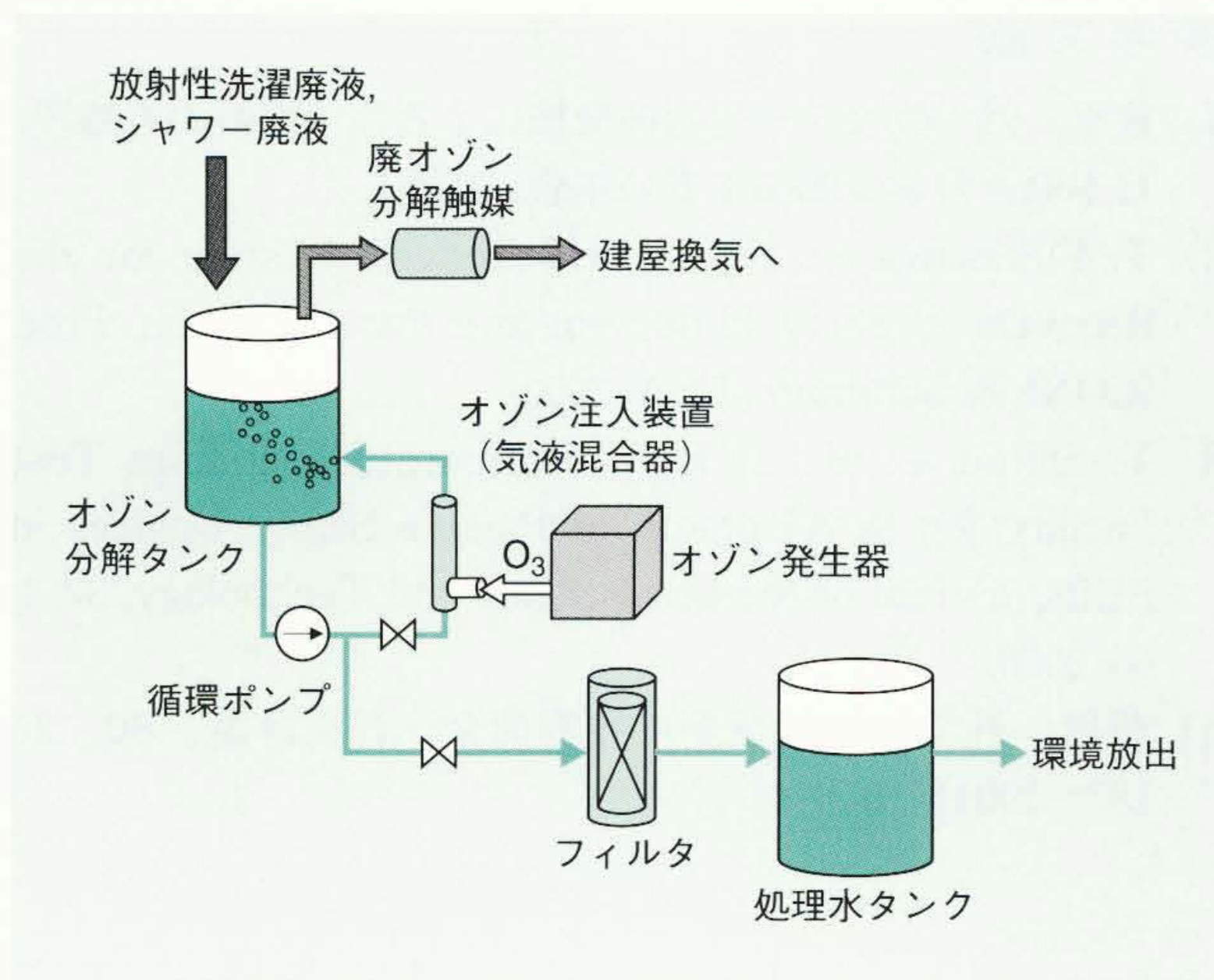


図7 オゾン分解法による廃液処理システム

このシステムでは、循環ラインにオゾンを注入し、未反応オゾンは分解触媒で処理する。放射性クラッドは、簡易フィルタで汙過する。

備構成を実現した。(2)の固化処理技術では、強度や内部空げき、核種分配係数などで陸地埋設基準に適合した高性能セメントを開発した。炭素繊維や核種吸着剤などを添加したこの高性能セメントにより、多種類の廃棄物に対して埋設基準に適合した固化体製作が可能となった。

(3)の環境負荷低減技術として、洗濯廃液・シャワー廃液中の有機物をオゾンによって分解すると同時に、放射性クラッドを汉過によって処理するシステムを開発した。一般に、オゾン分解処理は、上下水の消毒・脱臭などで低濃度の有機物処理に適用されている。このシステムでは、従来のばっ気方式ではなく、タンク循環ラインに連続注入方式を採用することにより、洗濯廃液などの高濃度有機物処理への適用を可能にした。

このシステムは、廃液中の洗剤成分や人あかなどの有機物をオゾンガスで二酸化炭素にまで分解し、かつ簡易なフィルタで放射性固形分を処理することにより、二次廃棄物量を従来の活性炭方式の $\frac{1}{20}$ 以下に低減できる画期的なものである(図7参照)。

3.4 廃止措置技術の開発

1998年3月の日本原子力発電株式会社東海発電所の停止、2002年度末の核燃料サイクル開発機構ふげん発電所の停止計画、初期軽水炉の30年経過など、廃止措置に対する内外の関心が急速に高まってきている。

廃止措置は、既存の技術を組み合わせることにより、現在でも十分に実施が可能である。しかし、さらに安全に経済的に実施するため、日立製作所は、計測、安全評価、除染、遠隔解体、廃棄物処理などさまざまな研究開

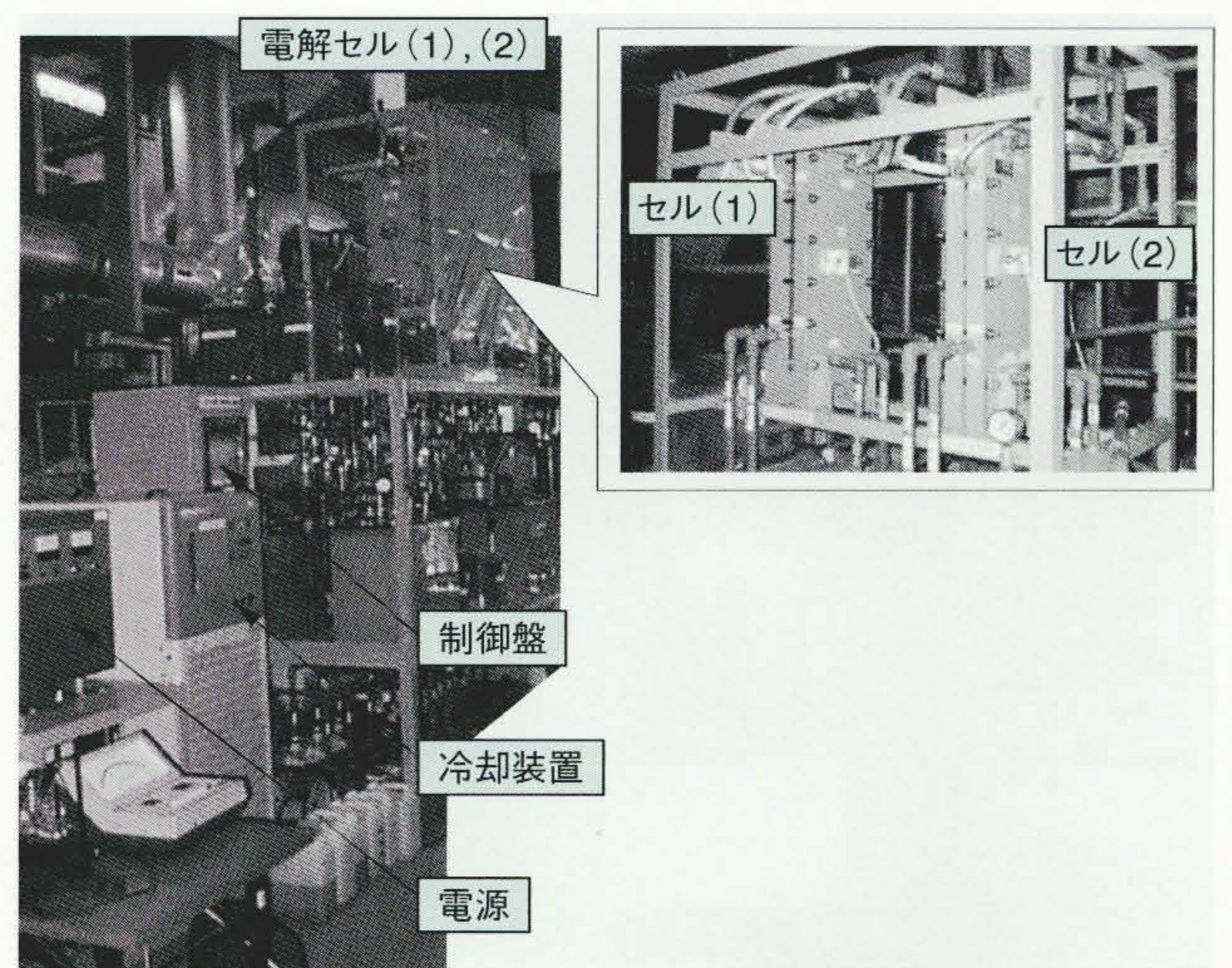


図8 除染剤の電解再生システム

イオン交換膜を内蔵した電解セルにより、除染廃液から高効率で塩酸を回収する。

発を進めてきている。

特に、廃止措置では廃棄物の発生を低減することが重要である。除染時の廃液の再生について以下に述べる。

除染法としては、塩酸を主成分とした除染効率の高い塩酸除染法の開発を進めている。この除染法での除染廃液量を低減するために、除染廃液中の塩酸を回収して、除染剤として再利用するシステムの開発を進めている。

除染剤の再生システムとしては、電解再生方式を採用し、小型の電解セル(膜面積30 cm²、処理量500 mL/h)を用いた回収再生試験を実施した結果、塩酸回収率75%(目標70%以上)を達成し、回収した塩酸中の腐食生成物も除染係数1,000以上(目標10以上)の効率で除去できた。さらに、実機適用性について試験的に検討し、廃棄物発生量を $\frac{1}{10}$ 以下に低減できる見通しを得た(図8参照)。

3.5 新型炉の技術開発

主にナトリウム冷却FBRの技術開発について以下に述べる。

日立製作所は、わが国で最初にナトリウム機器の開発に取り組み、ナトリウム取扱技術を長年培ってきた。この経験を踏まえ、核燃料サイクル開発機構の実験炉「常陽」と原型炉「もんじゅ」の建設に参画するとともに、「常陽」Mk-III計画では、一次冷却系改造工事を担当している。また、敦賀市に2000年5月に開所した核燃料サイクル開発機構FBRサイクル総合研修施設ナトリウム取扱研修棟内に設置されているナトリウム取扱消火訓練設備は、日立製作所が設計、製作したものであり、ナトリウム消火訓練などに広く活用されている。この設備では、



写真提供：核燃料サイクル開発機構

図9 ナトリウム取扱消火訓練設備

この訓練設備では、ナトリウム燃焼状況の観察と、消火器を使った消火訓練を行う。

直径8 m、高さ6 mのセル内で空気を旋回させて壁や見学窓へのナトリウムエアロゾルの付着を抑制し、外部からの視界を確保することにより、ナトリウム燃焼状況を観察する(図9参照)。

日本原子力発電株式会社が中心となって開発を進めてきたFBR実証炉開発でも、日立製作所は、設計研究や要素試験研究に参画し、所有する高温ナトリウム試験施設³⁾を活用してFBR特有の設計評価技術や機器開発を行ってきた⁴⁾。現在、FBR実証炉の開発は、さらに経済性に優れた実用化概念を広く模索するため、核燃料サイクル開発機構と電力会社が進める「FBRサイクル実用化戦略調査研究」に引き継がれ、ここではいっそうの安全性と経済性に優れたFBR概念構築を目指している。

さらに、沸騰水型軽水炉の特徴である軽水-蒸気泡を冷却材として活用することにより、通常の軽水炉よりも転換比を高くした低減速型軽水炉の設計研究も進めている。

4 おわりに

ここでは、原子燃料サイクル技術の開発状況について、再処理を中心に述べた。

商業再処理施設の運転開始を控え、この分野の活動はますます盛んになってくる。日立製作所は、電力会社などと協力して、今後も安価な電力の安定供給を継続できるように、総合力を発揮して優れた技術の開発に取り組んでいく考えである。

参考文献

- 1) 笹平，外：改良フッ化物揮発法による原子燃料の再処理，日本原子力学会2000年春の年会，III-6
- 2) T. Fukasawa, et al.: Hybrid Recycle System for the Recovery of Dirty Plutonium and Pure Uranium, Proc. ICONE-8, Baltimore, USA (2000)
- 3) Y. Saitou, et al.: A High Temperature Sodium Test Facility for Development of Passive Safety Devices in FBRs, Journal of Nuclear Science and Technology, 37, 1, 66 (2000)
- 4) 柴田，外：FBR実証炉の技術開発，日立評論，80，2，187～190(平10-2)

執筆者紹介



深澤哲生

1981年日立製作所入社，電力・電機グループ 原子力事業部 燃料サイクル部 所属
現在，原子燃料サイクルの技術開発取りまとめに従事
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
E-mail: tetsuo_fukasawa @ pis. hitachi. co. jp



梅原 肇

1978年日立製作所入社，電力・電機グループ 原子力事業部 JNFL再処理施設建設推進部 所属
現在，六ヶ所再処理工場の建設，運転にかかわるエンジニアリング取りまとめに従事
日本原子力学会会員
E-mail: hajime_umehara @ pis. hitachi. co. jp



大月 惇

1970年日立製作所入社，電力・電機グループ 原子力事業部 所属
現在，原子燃料サイクルシステムのプロジェクト取りまとめに従事
日本原子力学会会員
E-mail: atsushi_ootsuki @ pis. hitachi. co. jp



松田将省

1979年日立製作所入社，電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 原子力・産業第二部 所属
現在，原子力システムの研究開発取りまとめに従事
工学博士
日本原子力学会会員，応用物理学会会員
E-mail: masami_matsuda @ pis. hitachi. co. jp