



高速炉燃料再処理用遠心抽出器の開発

鷲谷 忠博 荻野 英樹* 竹内 正行 菅沼 隆 青瀬 晋一

東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部
* 日本原燃株式会社 再処理事業部 建設運転事務所

Development of Centrifugal Contactor for FBR Fuel Reprocessing

Tadahiro WASHIYA Hideki OGINO* Masayuki TAKEUCHI Takashi SUGANUMA Shinichi AOSE

Advanced Fuel Recycle Technology Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works
* Plant Construction & Operation Office, Reprocessing Business Division, Japan Nuclear Fuel Limited

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究では、将来の再処理システムの候補技術の1つに湿式再処理技術が挙げられ、その抽出工程機器に遠心抽出器の適用が想定されている。遠心抽出器は、溶媒劣化の軽減、機器稼働率の向上、機器配置のコンパクト化、臨界安全に対する優位性等の観点から、プラントへの適用効果が大きく、湿式再処理技術の枢要機器となっている。サイクル機構では、1985年頃から遠心抽出器の開発に着手し、これまでに単機開発をほぼ終了し、抽出性能、流動性能、遠隔保守性等の基礎特性を把握してきた。また、高寿命化の検討として、耐久性試験を実施し硝酸ミスト対策の検討及び機器寿命の推定を実施してきた。現在、工学規模の遠心抽出器を用いた試験設備を整備し、ウラン試験を実施中である。これまでに抽出工程の標準フローシート試験及び1段異常停止を想定したマルオペレーション試験等を実施してきた。

In the Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems, the aqueous reprocessing technology is nominated as a candidate for future reprocessing system, which supposes to apply a centrifugal contactor in the extraction process. For the reprocessing plant, the centrifugal contactor has great advantages such as reducing solvent degradation, improving of equipment utilization rate, compact designing of equipment layout and critical safety domination. From these advantages, the centrifugal contactor is crucial equipment in the aqueous reprocessing process. Since 1985, JNC has been developing the centrifugal contactor. The single unit development has been accomplished and basic characteristics such as extraction performance, fluidic performance and remote maintenance performance have been determined. A durability test has been conducted for high longevity, with consideration given to the nitric acid mist and estimation of the equipment lifetime. System test equipment with centrifugal contactors of engineering scale was installed, and uranium test was conducted. Up to now, a standard flow sheet test in the extraction process and mal-operation test assuming the one stage shutdown condition have been performed.

キーワード

高速炉燃料再処理, 溶媒抽出, 遠心抽出器, RETF, 耐久性, システム試験, 軸受け, オーバーフロー, 遠隔保守, マルオペレーション

FBR Fuel Reprocessing, Solvent Extraction, Centrifugal Contactor, RETF, Durability, System Test, Bearing, Overflow, Remote Maintenance, Mal-Operation



鷲谷 忠博

機器開発グループ所属
総括チームリーダー
高速炉燃料再処理の機器開発に従事



荻野 英樹

機器開発グループ所属
高速炉燃料再処理の機器開発に従事
放射線取扱主任者



竹内 正行

機器開発グループ所属
高速炉燃料再処理の機器開発及び材料開発に従事
放射線取扱主任者
核燃料取扱主任者



菅沼 隆

機器開発グループ所属
サブグループリーダー
高速炉燃料再処理の機器開発及びプロセス開発に従事



青瀬 晋一

機器開発グループ所属
グループリーダー
高速炉燃料再処理の機器開発に従事

1. はじめに

サイクル機構では、国の「原子力開発利用長期計画」との整合を図りつつ「中長期事業計画」を策定し、その中で「高速増殖炉（FBR）サイクルの実用化戦略調査研究」を実施している。本研究は、安全性の確保を前提とし、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性及び核拡散抵抗性の観点から、FBRシステム及び燃料サイクルシステムの実用化候補概念を検討するものである。本研究の一環として、再処理システムの検討が実施され、その1つの候補技術として湿式再処理技術が挙げられている。また、この湿式再処理では、その要となる抽出工程の機器に、小型で高性能な遠心抽出器の適用を検討している。

高速炉使用済燃料は軽水炉使用済燃料に比べ燃焼度が高く、核分裂生成物（FP）も多く、加えて、燃料中のプルトニウム（Pu）含有率が高いといった特徴を有しており、高速炉使用済燃料を湿式再処理法（ピューレックス法）で再処理する場合、臨界安全形状の制限や溶媒劣化に関する課題等があげられる。

従来、溶媒抽出のような多段向流接触環境での水相と有機相の相分離操作は、セトラー部のような静置重力下での分離が使われていたため、相分離時間を長く必要とし、装置内の液ホールドアップ量が増大する傾向にあった。そのため、臨界管理、処理能力、溶媒劣化等の観点から滞留時間の短い抽出器の開発が望まれ、近年では遠心抽出器の適用が広く検討されるようになった。

現在、軽水炉使用済燃料再処理工程で採用される溶媒抽出器は、ミキサセトラとパルスカラムが主流であるが、フランスのラアーグUP-2再処理工場等、一部の再処理工場では遠心抽出器が適用され始めている。

サイクル機構では1985年頃から遠心抽出器の開発に着手し、これまでに単機の基本性能の確認とともに、遠隔保守の検討を行ってきた。現在では、抽出システムの安定性を総合的に評価するシステム試験、機器の高寿命化のための耐久性試験を実施している。また、将来の大型プラントを想定した改良型遠心抽出器の開発についても着手している。

本報では、遠心抽出器の開発経緯及び基本性能試験の概要について報告する。

2. 遠心抽出器の原理と特徴

2.1 原理

ピューレックス法では、使用済燃料溶解液中のウラン（U）やPuをFPから分離する際、核物質（UやPu）が選択的に溶媒と結びつく性質を利用した溶媒抽出操作が用いられている。遠心抽出器は水溶液と溶媒を混合し、核物質を溶媒に抽出させたのち相分離を遠心力下で行うものである。図1に遠心抽出器の原理図を示す。

遠心抽出器では、水相及び有機相がそれぞれの入口から供給され、下部の混合部ではロータの回転力により両相が激しく混合され、核物質等の抽出又は逆抽出が行われる。混合液はロータの下部からロータ内に吸い込まれ、ロータ内ではロータ回転により生じる遠心力により強制的な相分離が行われる。分離された各相はそれぞれのコレクターに排出され、配管を介して次段に移送される。この混合・分離操作が繰り返されることで高い抽出効率を得られる。

2.2 特徴

遠心抽出器は、遠心力を使って強制的に相分離を行うため、他の抽出器と比べて以下のような利点を有している。

接触時間が短く溶媒劣化が軽減される。

抽出器内のホールドアップが少なく、起動・停止時間が短いため設備稼働率が高い。また、フラッシングに必要な洗浄液量が減少する。

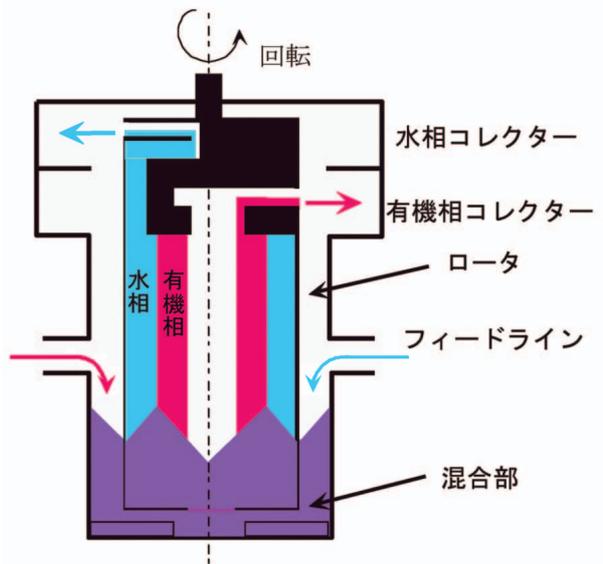


図1 遠心抽出器の原理

小型で高処理能力を有するため、コンパクトな抽出システムの構成が可能である。

形状管理による臨界安全設計が容易である。

一方、遠心抽出器は駆動部を有するため、モータ等の故障時を想定した対応が必要となるが、JNC型の遠心抽出器では、モータ部の遠隔交換が可能ないように遠隔保守対応の設計を導入するとともに、単段停止時においてもシステム全体の運転に大きな損傷を与えないような設計が図られている。

3. 開発経緯

サイクル機構における遠心抽出器の開発は、1975年頃から文献情報をもとに諸外国の調査を始め、1985年より高速炉燃料再処理用の抽出器開発として遠心抽出器の自主開発を開始した。1987年にはロータ径が約4 cmのプロトタイプ機によるウラン試験を実施した。また、その後、遠心抽出器工学試験装置を東海事業所の応用試験棟工学試験室内に設置し抽出工程の定常特性、過渡特性の評価試験及び溶媒洗浄試験等を実施してきた¹⁾。

また、1987年から1993年に米国オークリッジ国立研究所(ORNL)との再処理技術に関する日米共同研究が実施され、その中でORNL側の遠心抽出器情報の一部を参考にしつつ、リサイクル試験施設(RETF)用の遠心抽出器(ロータ径、約8 cm)の詳細設計を実施した。また、この間、JNCの独自技術として、マグネットカップリング構造²⁾、サンプリング構造及び内部循環型遠心抽出器³⁾の開発を実施した。1994年以降は遠隔保守性能及び液流動性能の評価を実施している。

さらに、2000年以降、遠心抽出器の寿命評価のための耐久性試験及び工学規模の抽出システム性能を評価するためのシステム試験を実施している。また、将来的な大型プラントへの適用を狙った円環状抽出器の構造検討⁴⁾及び大幅な耐久性の向上を目的とした磁気軸受け型遠心抽出器⁵⁾の開発にも着手している。

4. 遠心抽出器構成

遠心抽出器の外観及び断面図を写真1、図2に示す。遠心抽出器は抽出分離を行うロータ及びその駆動部、ロータと液を内包するためのハウジングから構成される。

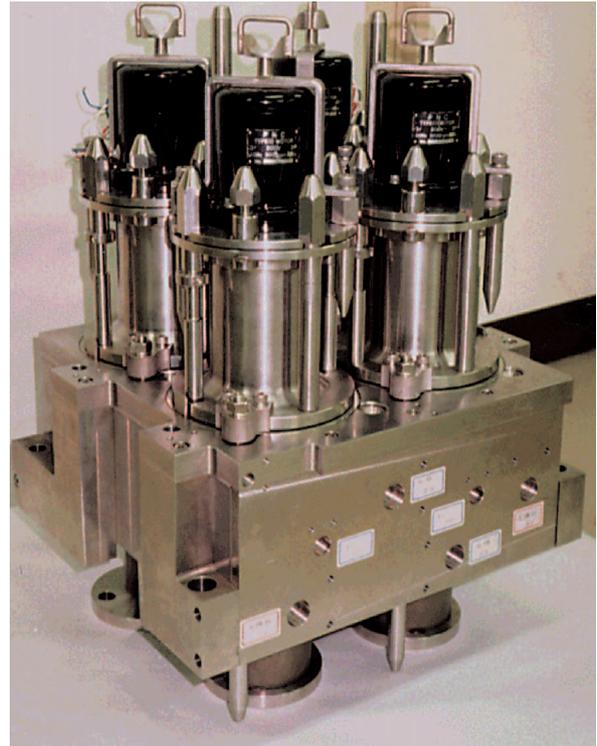


写真1 遠心抽出器（4段ユニット）外観

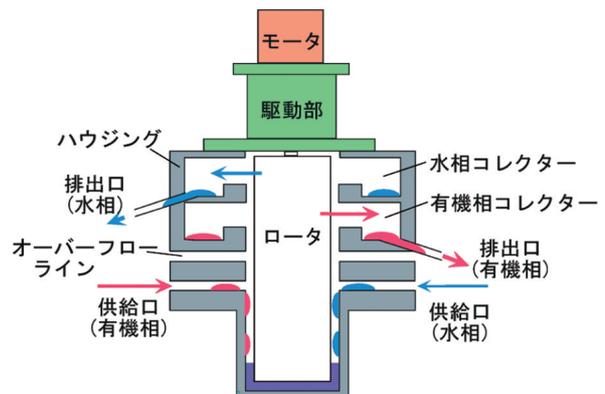


図2 遠心抽出器断面図

4.1 ロータ構造

ロータは上部を回転軸で支持する円筒構造の回転体であり、底部に吸い込み口、上部に水相と有機相の排出口が設けられている。また、ロータ内部には水相/有機相を分離する堰が設けられ、約3,000~3,500rpmの高速回転によりロータ内部に遠心力が働き、水相/有機相が分離される。

4.2 駆動部構造

駆動部は、駆動用モータとロータの間にマグネットカップラを設置し、その間を仕切り板で隔離

することにより、分割保守が可能な構造としている。また、軸受け部は、抽出器内で発生する硝酸ミストからモータを保護するための硝酸ミスト対策が図られている。

4.3 ハウジング構造

遠心抽出器のハウジングは、ステンレス製のブロック材を削り出すことで複数段のユニット構造を形成している。このハウジング構造は写真1に示す4段ユニットの構造を基本としている。このブロック構造を採用することで、各段間の配管スペースを大幅に削減することができる。これにより、配管溶接箇所の削減による耐食性が向上し、複数の遠心抽出器を密に配置することが可能となった。このハウジング構造は、4段ユニットを基本構造とするが、ほかに2、6、8段の構造も可能であり、各工程の運転条件に応じてユニット構成を選択できるようになっている。

5. 遠心抽出器の性能評価

5.1 抽出性能の評価

遠心抽出器の基本性能である抽出・逆抽出の性能は、応用試験棟内に設置された工学試験機(ロータ径5 cm)を用いたウラン試験により確認している。図3に抽出・逆抽出工程のウラン濃度プロファイルの一例を示す。また、図中にはミキサセトラー用の抽出計算コード(MIXSET)の計算結果を合わせて示した。試験結果とMIXSETの計算

結果は良く一致しており、MIXSETにより遠心抽出器の濃度プロファイルを精度よく予測できることが分かる。また、このMIXSETの計算により抽出工程の段効率(95~97%)、逆抽出工程の段効率(85%)が確認された。なお、本試験結果から求めたウラン分配係数は、分液ロートを用いたバッチ抽出法で得られる結果⁶⁾と良く一致しており、遠心抽出器の抽出性能がバッチ法とほぼ同等であることが分かった。

5.2 流動性能の評価

もう一つの遠心抽出器の基本性能は、液の流動性能であり、水相と有機相の相分離性能及び混合部液位の安定性によって評価される。相分離性能は、水相及び有機相への異相間の混入を示すものであり、エントレイメントと呼ばれる。また、混合部液位の安定性は、遠心抽出器におけるオーバーフロー等の異常な流動現象を防止し、遠心抽出器の安定運転を維持する上で重要な指標である。以下にオーバーフロー及びエントレイメントの発生原理を示す。

(1) オーバーフローの発生原理

遠心抽出器はモータ等の故障に備えて、単段停止時でも抽出工程の全体運転に即座に影響を与えないようにオーバーフローラインが設けられている。オーバーフローラインは各段間を結ぶ配管で作られ、有機相コレクターとフィードラインの間に設置されている(図2参照)。従って、モータの

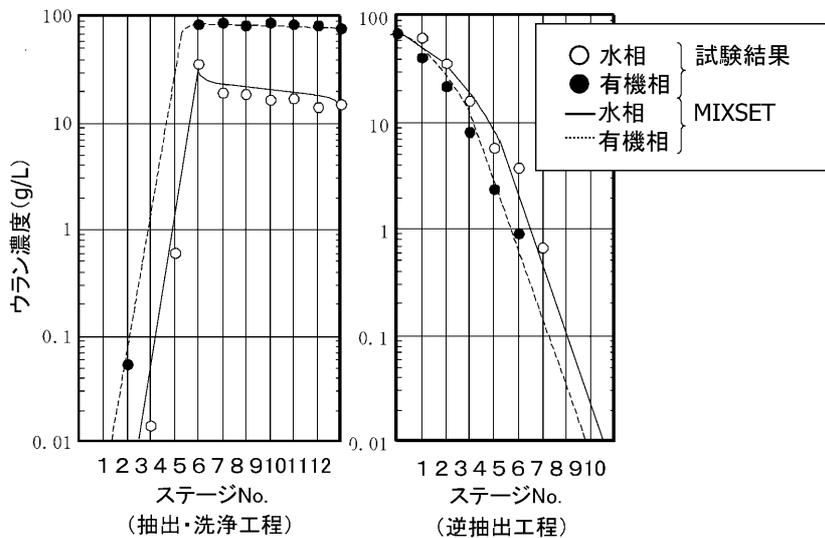


図3 抽出・洗浄及び逆抽出工程のウラン濃度プロファイル

故障や著しい流量の増加により混合部の液位が上昇し、オーバーフローラインまで達すると、混合液が隣接段へ流れる構造となっている。この時、オーバーフローが発生する流量を最大処理流量という。

(2) エントレイメントの発生原理

遠心抽出器では、ロータ内の遠心力により有機相と水相の相分離が行われるが、有機相と水相の流量比(O/A比)や供給流量が大幅に変化すると、ロータ内の相分離が不十分となり、混合液の状態でロータ排出口から排出される。このため、各相の排出液には異相流が混入することになる。有機相出口への水相の混入を水相エントレイメント、水相出口への有機相の混入を有機相エントレイメントと呼ぶ。なお、1%のエントレイメントが発生する境界を遠心抽出器の最大処理流量の範囲として設定している。

(3) 遠心抽出器の運転範囲

遠心抽出器でオーバーフローやエントレイメントが発生しない安定した運転条件を把握するため、水相及び有機相の流量をパラメータとして流動性確認試験を実施している⁷⁾。

この結果、遠心抽出器は、図4に示す広範囲の領域(黄色の部分)で安定に運転できることを確認した。オーバーフロー及びエントレイメントは、両相の合計流量が約300L/hrの条件で発生するが、O/A比が1未満ではエントレイメント、1以上ではオーバーフローが支配的となることが分

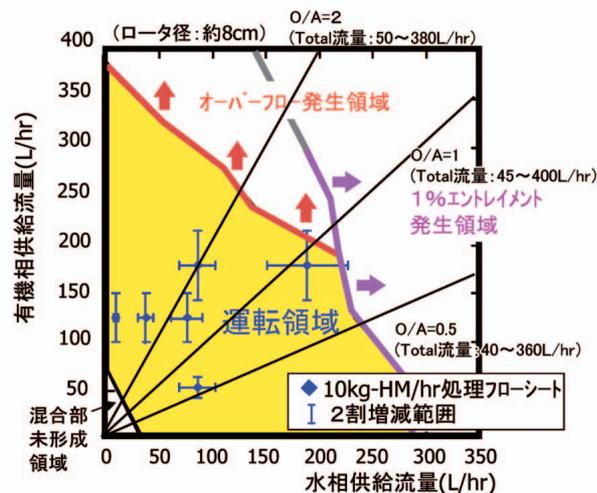


図4 遠心抽出器の運転領域

かった。また、混合部未形成条件は、水相流量が0L/hrに対して有機相流量が60L/hr、あるいは有機相流量が0L/hrに対して水相流量が60L/hrの範囲であった。

なお、図中のプロットはRETF*の標準フローシート条件(処理能力:10kg-HM/hr)の各工程(抽出、分配、逆抽出、希釈剤洗浄、溶媒洗浄)の流量条件を約2割の変動幅を踏まえて示したものである。これより、本遠心抽出器の設計はRETFの10kg-HM/hrの処理能力の条件を十分に満足していると判断できる。

5.3 遠隔保守性の評価

JNC型の遠心抽出器は、初期から遠隔保守を設計に取り入れ、両腕型マニプレータ等の遠隔保守機器を想定してホットセル内で故障部位の遠隔交換が可能な構造としている。このため、遠心抽出器はモータ、ベアリング駆動部及びハウジングの3段階の分割構造とした。また、それぞれの脱着部分には遠隔保守用のガイドピン等を設置し、遠隔による脱着を容易にしている。一方、モータと駆動部間の動力伝達部には、マグネットを用いた非接触式のカップリング機構を採用することで、遠隔による脱着を容易とした。

図5に両腕型マニプレータを用いた遠心抽出器の遠隔保守の着脱概念を示す。本操作はモックアップ機を用いた模擬遠隔保守試験により、設計の妥当性を評価している⁸⁾。この結果、各パーツの着脱操作が30分以内に実施可能であることを確認した。

5.4 耐久性の評価

遠心抽出器内部は混合部で硝酸ミストが発生し易い構造であるため、硝酸ミストに対する腐食対策が不可欠である。また、長期安定運転に対する高耐久性を確保するためには、軸受け部の材質及び構造の検討が必要である。

このため硝酸ミスト対策としてバージガス吹込み、ロータ軸のラビリンス構造等の対策を図り、高耐久性の観点からステンレス製軸受け及びセラミックボールを採用することで対策を図ってきた。また、これらの効果を確認するため、耐久性試験装置(図6)を製作し長時間連続運転試験に

* RETF: リサイクル機器試験施設

装置仕様:ロータ径約8cm(10kgHM/h規模)

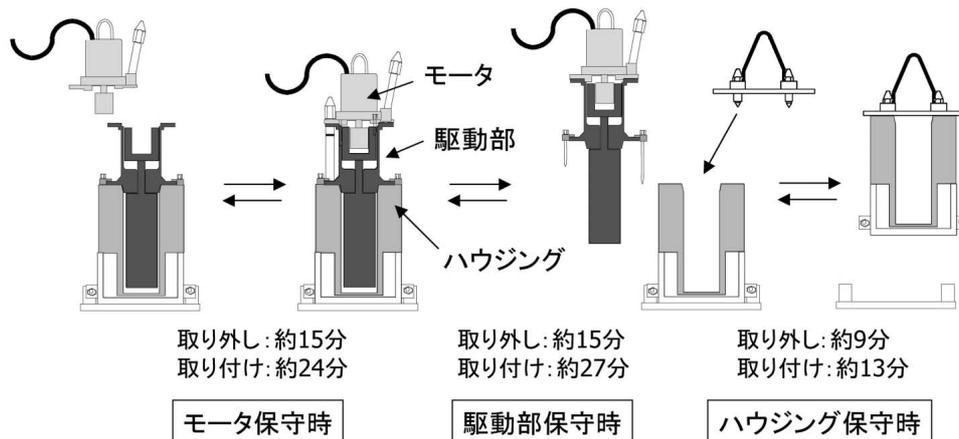


図5 遠心抽出器の遠隔保守操作時間

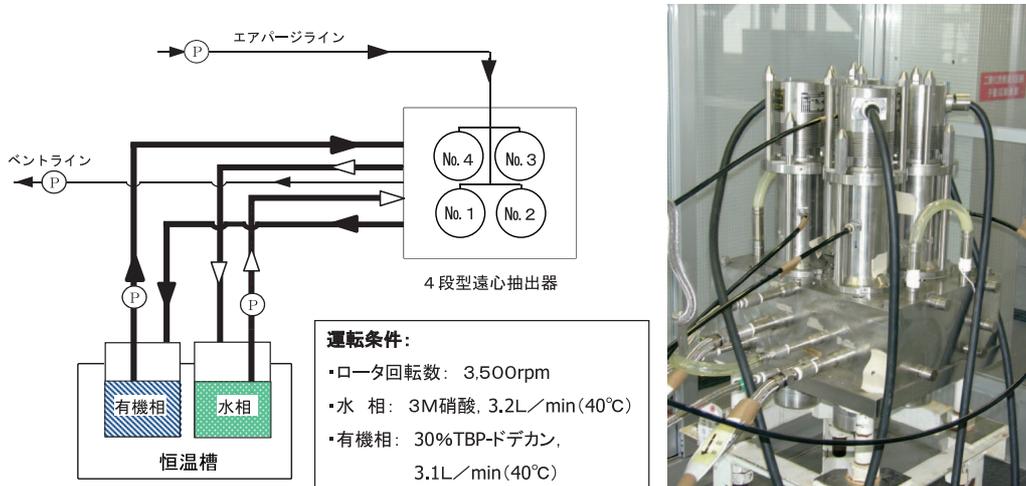


図6 耐久性試験装置概要

よって、駆動部の耐久性評価を実施してきた。耐久性試験装置は4基の遠心抽出器をブロック状のステンレス製ハウジングに組込んだものであり、硝酸及びTBP/n-ドデカンを循環供給しながら連続運転できる構造となっている。

これまでの耐久性試験の結果から、硝酸ミストに対する腐食対策としてロータ軸部へのパーティガスの吹き込み、ラビリンスの設置及びセラミック軸受け等の有効性を確認した⁹⁾。写真2に硝酸ミストの対策前(旧型駆動部)と対策後(改良型駆動部)の軸受け内輪部の腐食状況を示す。旧型駆動部では1,200時間で継続使用が不可能であったが、対策により5,000時間以上の継続使用が可能となった。さらに、軸受けボール部にセラミック材を用いた場合、5,000時間後(写真3)においても

軸受け内部には腐食等の異常は見られず、健全な状態が維持されていた。また、連続運転時のモータ表面温度の変化傾向から、モータ表面温度が上限値(70 : 溶媒への引火を考慮した値)に達するまでの時間を推定し、駆動部の寿命評価を実施してきた。その結果、駆動部の推定寿命は、運転時のモータ温度等の推移から推定して、約28,000時間以上と評価された。

現在、セラミック軸受けの更なる寿命向上を図るため、軸受け構造の改良を実施している。また、将来的な超高寿命を目標とした非接触方式の磁気軸受け型遠心抽出器の開発にも着手している。

5.5 システム性能の評価

商業用プラントへの遠心抽出器の適用を想定し

<p>改良型軸受け (材質: SUS製) 使用時間: 5,031時間 継続使用可能</p>	
<p>旧型軸受け (材質: ベアリング鋼) 使用時間: 1,200時間 継続使用不可能</p>	

写真2 軸受け内輪部の腐食状況比較

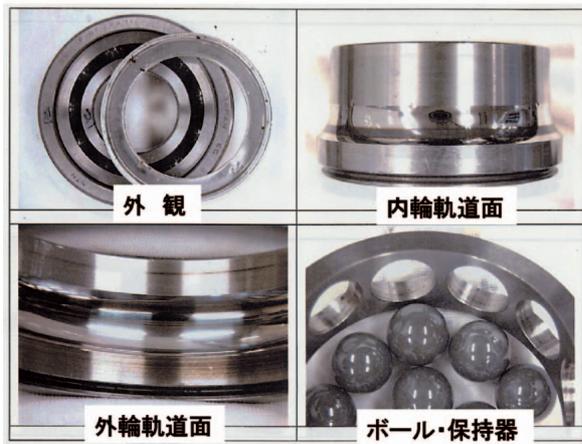
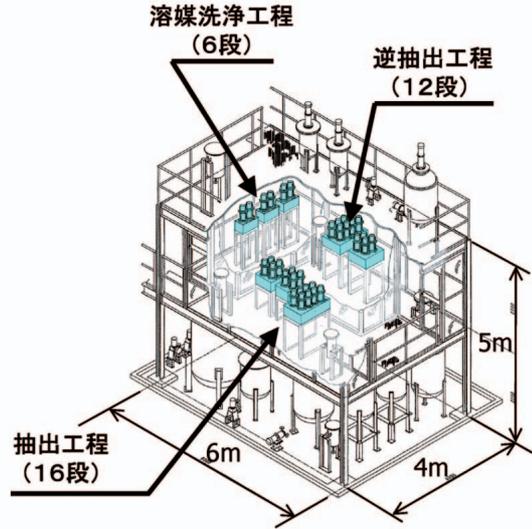


写真3 セラミック軸受けの外観 (5,000hr運転後)

た場合、複数段の遠心抽出器からなる抽出工程をいかに安定に運転するかが大きな課題である。遠心抽出器は滞留時間が短く、応答性が速いことが大きな特徴であるが、その一方で、応答性の速さから抽出工程の運転制御が難しいと考えられている。このため、工学規模の抽出システム試験装置を製作し、遠心抽出器システムの特性を把握することとした。本装置では、将来的な実プラントにおける遠心抽出器からなる抽出システムの安定性を評価することを目的とし、定常時及び非定常時の抽出システムの特性を把握することとした。

抽出システム試験装置の鳥瞰図を図7に、また、外観(抽出工程)を写真4に示す。抽出システム試験装置はRETFの基本設計を基に製作し、1999年に応用試験棟工学試験室に設置、2000年よりウラン試験を開始した。処理能力はRETFとほぼ同等の10kg-HM/hrであり、ウランを用いた抽出、



(抽出システム試験装置 (ACT): Advanced Centrifugal Contactor Test System)

図7 抽出システム試験装置鳥瞰図

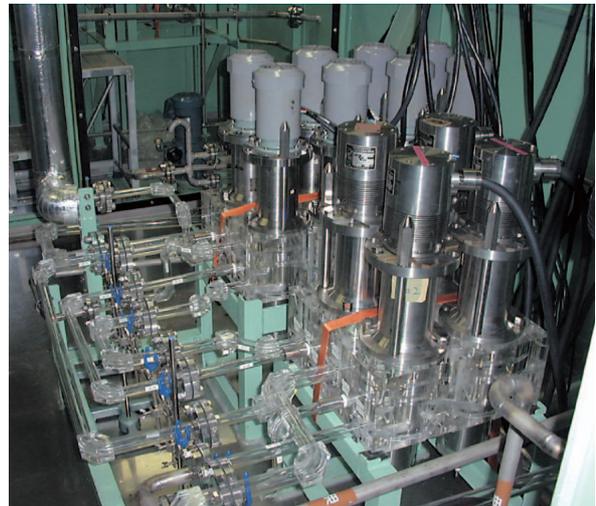


写真4 抽出システム試験装置の外観 (抽出工程)

逆抽出及び溶媒洗浄の各工程の試験が可能である。現在、抽出工程及び逆抽出工程におけるシステム評価を実施しており、通常時のフローシートデータ及び異常時(マルオペレーション時)の挙動データ等を取得している。以下に抽出試験及びマルオペレーション試験の結果を示す。

(1) 抽出試験結果

抽出工程のフローシート条件及びウラン濃度プロファイルを図8及び図9に示す。試験結果から、ウランの平衡到達時間は10分以内と非常に速いことが分かり、遠心抽出器を使った抽出システムの性能が確認された。また、定常状態のウラン濃度プロファイルの結果は抽出計算コード(MIXSET

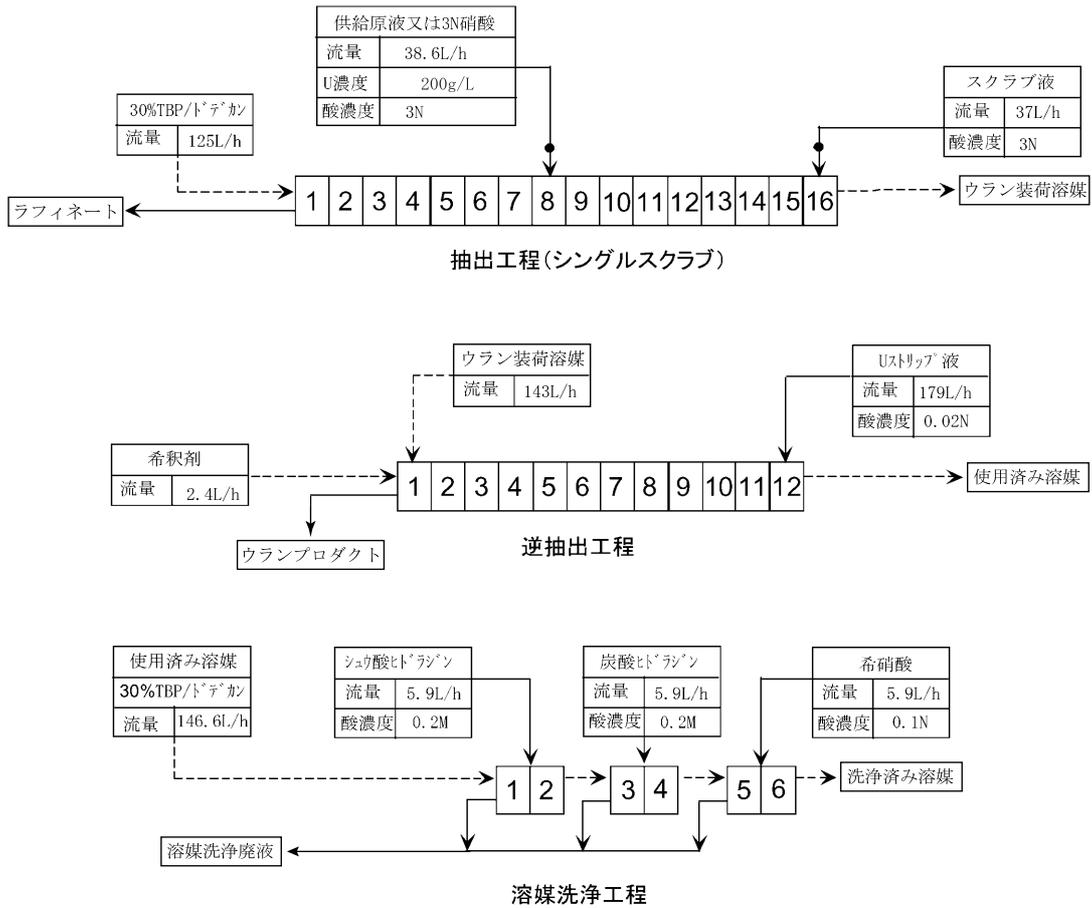


図8 抽出システム試験における標準フローシート

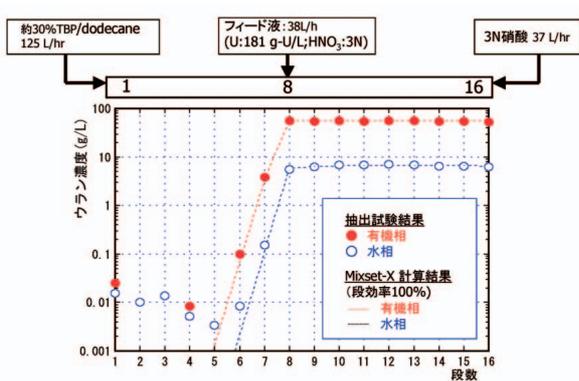


図9 抽出工程のウラン濃度プロファイル

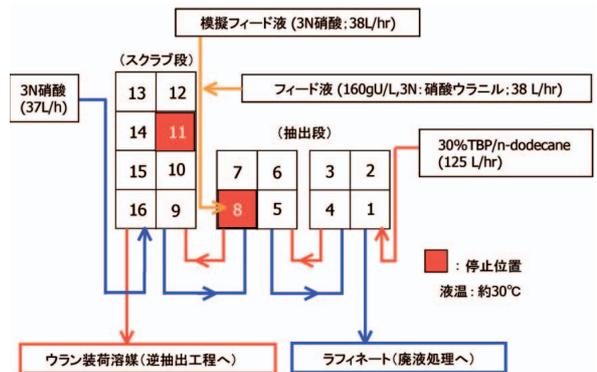


図10 1段停止を想定したマルオペレーション試験条件

X) による解析結果と良く一致し、MIXSET X による抽出プロファイルの推定が可能であることが確認された¹⁰⁾。

(2) マルオペレーション試験結果

ここでは、抽出工程における遠心抽出器の1段停止を想定したマルオペレーション試験を実施し

た¹¹⁾。図10に本試験の条件を示す。停止段はウラン濃度プロファイルへの影響を評価するため、フィード段である8段目とスクラブ段の中間段である11段目とした。

図11に8段目停止時の結果を示す。停止後の変化は速く、約5分後にはウラン濃度プロファイル

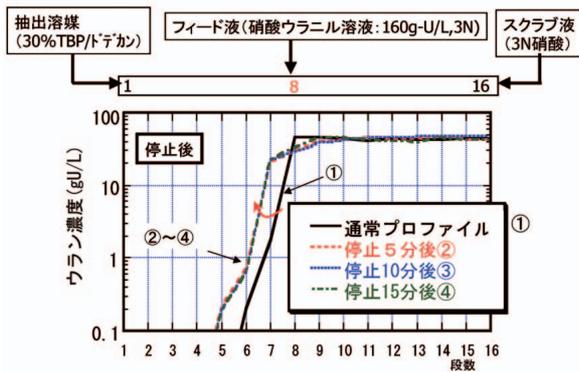


図11 1段停止時の濃度プロファイル変化（8段階目停止）,（有機相ウラン濃度）

は通常時のプロファイルに比べて溶媒供給側に約1段階移行した状態で再平衡に達した。また、この停止段を再起動したところ、5分以内に通常のウラン濃度プロファイルへ復帰した。

このように1段停止時の抽出器システム内の流動状況を模式的に示すと図12のようになる。つまり、停止段では前後段から供給される水相、有機相により液位が上昇し、オーバーフロー穴からの流出が発生する。このオーバーフロー流は水相と有機相がほぼ半分の割合であり、両相は本来の方向に流れる。また、停止段の前後段では流量増加が生じ、混合部液位が上昇する。この時、増加後の流量が抽出器の相分離性能の範囲であれば、この遠心抽出器の工程は、継続して運転が可能である。

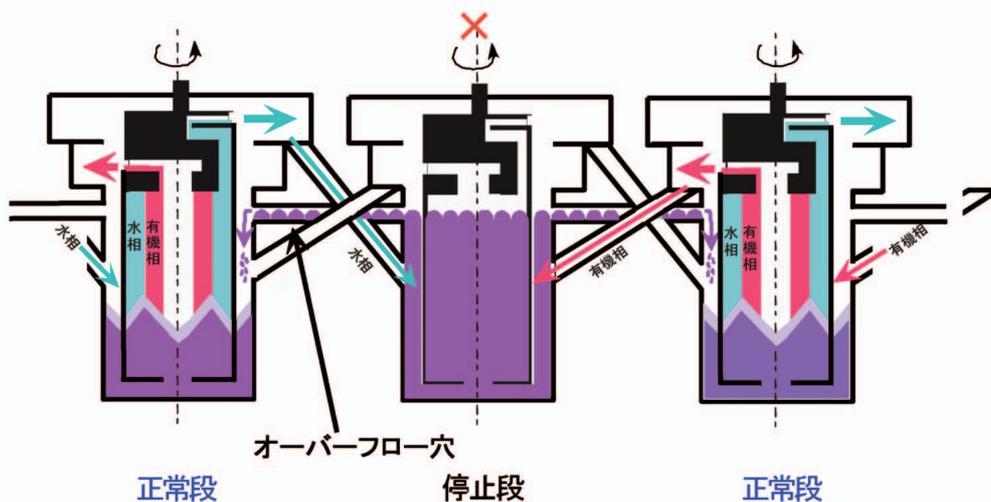


図12 単段停止時の流動状況（模式図）

6. おわりに

遠心抽出器はミキサセトラーやパルスカラムと異なり多数の駆動部を有するとともに応答時間が速いことが、実プラントにおける保守性、制御性の点から課題とされてきた。しかし、サイクル機構ではこれまでに、遠隔保守対応の遠心抽出器の開発を実施し、遠心抽出器の単体開発をほぼ完成しつつある。

また、現在、サイクル機構では遠心抽出器の単体開発からシステム開発に重点を移し、抽出システム試験設備を用いた工学装置のシステム安定性の評価を実施している。また、遠心抽出器の耐久性検討として、セラミックボール軸受けを用いた耐久性評価と並行し、磁気軸受け型遠心抽出器を開発中である。今後は、更に将来の大型プラント用の遠心抽出器構造についても検討を実施する予定である。

参考文献

- 1) 林正太郎, 武田宏他: “遠心抽出器の開発”, 動燃技報, No. 70 (1989).
- 2) 林正太郎, 根本慎一: “遠心抽出器”, 特願平1 - 35827.
- 3) 根本慎一, 清水亮, 武田誠一郎: “内部循環型遠心抽出器”, 特願平2 - 403017.
- 4) 荻野英樹, 鷲谷忠博: “遠心抽出器”, 特願2002 - 225769.
- 5) 荻野英樹, 鷲谷忠博: “非接触軸支構造の遠心抽出器”, 特願2002 - 365075.
- 6) Donald S. Webster: “Hydraulic Performance of a 5-inch Centrifugal Contactor”, DP-370, Aug. 1962.
- 7) Tadahiro Washiya, Hideki Ogino: “Development of a

centrifugal contactor for fast reactor spent fuel re-processing”, Atarante2000, Oct.2000.

- 8) 高田岳, 上田吉徳他: “高速炉燃料用遠心抽出器の開発(), 遠隔保守”, 日本原子力学会, 2000年秋の大会, (2000).
- 9) 藤咲和彦, 荻野英樹他: “遠心抽出器耐久性試験(2) セラミック軸受の適用性検討”, 日本原子

力学会, 2002年秋の大会, (2002).

- 10) 荻野英樹, 鷲谷忠博他: “遠心抽出器システム試験(1) - 装置概要と抽出試験結果 -”, 日本原子力学会, 2002年春の年会, (2002).
- 11) 荻野英樹, 鷲谷忠博他: “遠心抽出器システム試験(2) - 1段停止時における運転評価 -”, 日本原子力学会, 2003年春の年会, (2003).