

加速器駆動未臨界システムによる核変換サイクルの 工学的課題解決に向けた研究開発

(受託者) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(研究代表者) 辻本和文

(再委託先) 国立大学法人京都大学

(研究期間) 平成25年度～28年度

1. 研究の背景とねらい

高レベル放射性廃棄物中に含まれる長寿命核種であるマイナーアクチノイド(MA)を分離・回収し、短寿命核種あるいは安定核種に変換する分離変換技術は、高レベル放射性廃棄物処理・処分
の負担軽減に寄与し、国土の狭隘な我が国において種々の廃棄物処分方法の組み合わせで構成される廃棄物処分体系をより合理的なものにする技術として期待されている。分離変換技術を導入したMAリサイクルシステム概念として、発電用核燃料サイクルとは別に小規模の核変換専用サイクルを設けて、その中で加速器駆動システム(ADS)を用いてMAの核変換を行う方法(ADS階層型、図1参照)が考えられている。ADS階層型概念は、発電用核燃料サイクルと核変換システムを切り離すことで、発電用核燃料サイクルの状況から独立して着実に高レベル放射性廃棄物処分に貢献できることが大きな特徴となる。

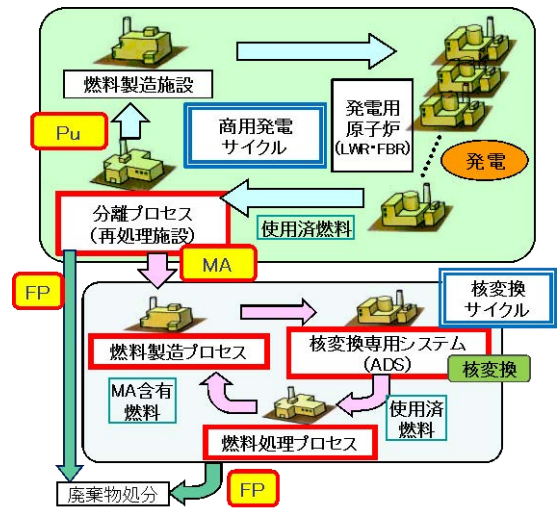


図1 ADS階層型のMA核変換システムの概念

ADS階層型概念は、我が国では日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)を中心として研究開発を実施してきたが¹⁾、実現には多くの技術課題がある²⁾。本研究開発プログラムでは、ADS階層型概念の技術的課題のそれぞれでボトルネックとなる重要課題を解決し、ADS階層型概念を「基礎研究」から「準工学研究」へ移行するための工学的見通しを得ることを目的として研究開発を実施している。

具体的には、MA分離に関しては、工学的プロセス実証にいたる最初のステップである「ベンチスケールホット試験」を実施する。MA分離は、MAと化学的性質が似ているランタノイド(Ln)を共抽出するMA・Ln回収プロセスとMA/Ln分離プロセスで構成される。これらを組み合わせたプロセスについて、軽水炉使用済み燃料を処理した実廃液を使用し、実廃液から100mg程度のMA試料の回収を行い、提案するMA分離プロセスが実用的な水準を満たすことを示す。また、ADSに関しては、比較的長期間の研究が必要なビーム窓材料等の照射試験を除いた研究開発を実施する。ADSの炉物理的課題に対しては、ADS模擬実験が可能な京都大学(以下、京大)臨界実験装置(KUCA)において、鉛ビスマス冷却を想定した炉物理実験を実施する。また、加速器の信頼性向上のための構成要素の並列化及び並列化に伴う未臨界炉心への影響評価、ビーム窓運転条件緩和のための未臨界度調整機構の設置、安全上の最も重要な課題である長期間の電源喪失事象時の燃料冷却性能確保のための機器設計を実施し、より工学的成立性を見込めるADS概念を構築する。

2. これまでの研究成果

2. 1 ADS 用 MA 分離回収技術の開発

(1) MA・Ln 回収プロセスの開発

TDdDGA を抽出剤とした MA・Ln 回収プロセスについて、実廃液試験の条件確定のためのフローシート試験を図 2 に示す条件で実施した。これまでのフローシート試験において抽出時に沈殿が生じたことから、沈殿成分のガスクロマト質量分析を実施し、抽出剤である TDdDGA の分解生成物の硝酸錯体を主成分とし、金属錯体が混在したものであることを明らかにした。この沈殿を抑制する方策を検討し、有機相に 2-エチル-1-ヘキサノールを 20 vol% 添加することで抑制可能であることを見出した。沈殿抑制のための高級アルコールの他に、逆抽出段数、逆抽出段の水相流速、フィード液の希釈割合等の見直しを行ってフローシート試験を実施した。その結果、Am の回収率 99.99% 以上、Np の抽出率 99.9% を達成し、実廃液試験条件候補を決定することができた。

(2) MA/Ln 分離技術の開発

MA/Ln 分離プロセスについては、これまでの成果として選定した TPDN と PTA の 2 種類の抽出剤候補の他に、新たな知見を取り入れて検討を行った。有望な抽出性能が示された EDTA アミド疎水化誘導体、TPEN 疎水化誘導体、およびアミン系アミド基誘導体を用いて、MA・Ln 回収プロセスのプロダクトの模擬溶液を用いたバッチ試験を実施し、抽出剤の MA/Ln 分離特性データを取得した。さらに、MA・Ln 回収プロセスのプロダクトの模擬溶液に対するバッチ試験結果から、NTA アミド(oct) が MA/Ln 分離に対する実用的な抽出剤であることを確認できたことから、NTA アミド(oct) をフローシート実験に使用する抽出剤として選定した。NTA アミド(oct) の抽出特性を図 3 に示した。

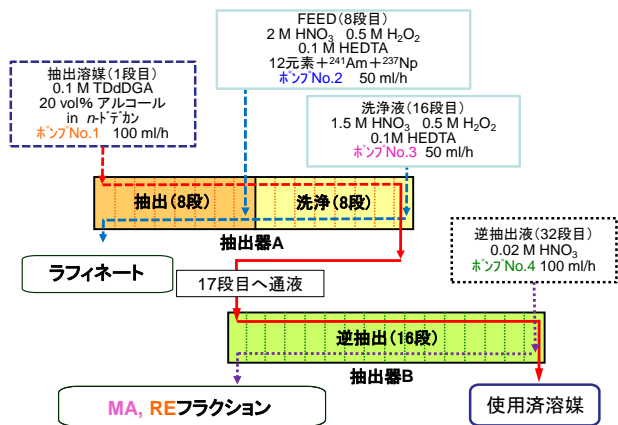


図 2 MA・Ln 回収プロセス連続抽出試験プロセスフロー

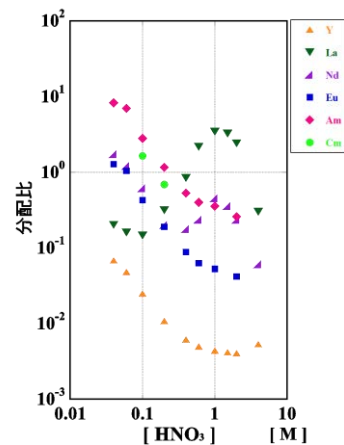


図 3 NTA アミド(oct) による Am(III), Ln(III) および Y(III) の分配比と硝酸濃度の関係

2. 2 加速器駆動未臨界システムの開発

(1) FFAG-KUCA を用いた ADS 模擬炉物理実験

鉛ビスマス冷却 ADS の核特性予測精度向上のために、鉛ビスマス冷却 ADS を模擬した実験体系

を KUCA において構築して炉物理実験を実施することを目的に、平成 27 年度以降に予定している FFAG 加速器とウラン・鉛ビスマス (Pb-Bi) 燃料体を炉心中心領域に装荷した体系での炉物理実験を行うための準備作業を行った。まず実験で使用する FFAG 加速器から得られる陽子ビームを安定化させるための方策を検討するとともに、未臨界体系における動特性パラメータの測定に使用する BF_3 検出器の性能検査を行った。

(2) 工学的成立性の高い ADS プラント技術開発

① 信頼性を向上した ADS 用加速器の開発

ビームトリップ頻度を低減させて信頼性を向上させた ADS 用加速器の提案を目的に、ビームを並列化してビームトリップ頻度を低減するために、平成 25 年度に加速器全体を並列化した ADS 用加速器概念を提示した。平成 26 年度は、この ADS 用加速器について、加速器内 (低エネルギー加速部、高エネルギー加速部) 及び最終ビームラインにおけるビーム軌道のシミュレーションを実施し、ADS 用加速器としての成立性を確認した。さらに、陽子ビームの軌道安定性を向上させて加速器の短尺化を図ることを目的とし、加速エネルギー 100MeV 以下の低エネルギー加速部の空洞を超伝導化するために必要なスポーク型共振空洞の形状を得た。

② 未臨界度調整機構の概念設計

ADS の燃焼反応度を補償して炉心出力を一定に保つために必要な未臨界度調整機構の概念設計を行うことを目的に、未臨界度調整機構を導入した ADS 概念の検討を行った。未臨界度調整機構としては、制御棒および可燃性毒物を用いた概念を検討した。これらの概念について、平成 25 年度に整備した三次元核特性解析コードシステム ADS3D を用いて核特性解析を行った。解析の結果、燃焼サイクル中の実効増倍率の低下を抑え、最大陽子ビーム電流値を、従来の 20mA から制御棒概念では 10mA まで (図 4)、可燃性毒物集合体概念では 15mA 程度まで低減できる見込みを得た。

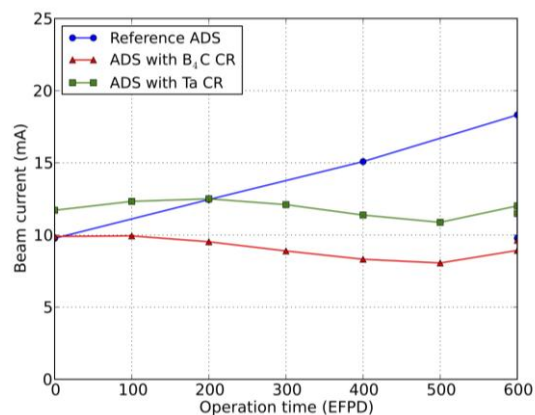


図 4 制御棒導入 ADS の陽子ビーム電流値の変化

③ 受動的崩壊熱除去システムの概念設計

長期間の電源喪失事象時にも燃料の崩壊熱を受動的に除去できる装置の概念設計を実施し、より安全性の高い ADS 概念を提示することを目的に、平成 25 年度に整備したプラント動特性解析コードの入力データについて、各要素の圧損条件等を見直し、除熱源喪失事象の解析を行った。その結果、崩壊熱除去系 (DHRS) が作動することで適切に除熱が行われることを確認した。これらの結果をもとに、DHRS として DRACS を想定して概念設計を行った。その結果、DRACS の 1 次系熱交換器における LBE 出口温度の与条件 450°C に対し、これを 400°C にすることで、他の機器との取り合いを満足する熱交換器の設計条件を示した。

④ ADS プラントの概念設計

工学的成立性を高めた ADS プラントの概念設計を行うことを目的に、プラント動特性解析コードを用いて、プラントの起動・停止時に加速器のビーム仕様をパルスモードから連続(CW)モードに切り替える際の炉心材料への熱的な影響を評価し、影響がないことを確認した。また、平成 25 年度に提案した加速器並列化概念に基づき、加速器のビーム出力が 100%から 50%、50%から 0%に変化する場合について過渡解析を行った。これらの解析結果と以前に評価されているビームトリップ頻度評価の結果を踏まえ、加速器並列化概念のビームトリップ頻度を再評価した結果、加速器並列化概念であれば許容トリップ頻度を満足することを示した。

3. 今後の展望

3. 1 ADS 用 MA 分離回収技術の開発

TDdDGA 抽出剤による MA・Ln 回収プロセスの成果を基に、再処理ラフィネートからの MA 回収率は 99.9%以上を目標とし、MA・Ln 回収プロセスを確立する。MA/Ln 分離用抽出剤について、有望な候補の MA/Ln 分離特性に関する基礎データを取得してプロセス開発に適した抽出系を選定し、MA/Ln 分離プロセスを確立する。さらに、NUCEF の α γ セルにおいて、MA・Ln 回収プロセスと MA/Ln 分離プロセスを組み合わせたフローシート試験を実施し、実廃液から 100mg 程度の MA を回収する。

3. 2 加速器駆動未臨界システムの開発

(1) FFAG-KUCA を用いた ADS 模擬炉物理実験

KUCA において ADS で冷却材として想定される鉛ビスマスを用いた燃料体を使用して炉心中心領域に鉛ビスマス冷却材模擬ゾーンを構成し、FFAG 陽子加速器と結合した ADS のモックアップ実験を実施する。実験では、核破砕中性子が入射されたときの炉心制御性や中性子増倍等の基本的な炉物理特性を測定し、未臨界炉の核的挙動に関する知見を得るとともに、 ^{237}Np および ^{241}Am の反応率測定を実施し、MA の核変換特性に関する基礎的知見を得る。

(2) 工学的成立性の高い ADS プラント技術開発

ビームトリップ頻度を低減させ、信頼性を向上させた ADS 用加速器を開発するため、主要な加速器要素に冗長性を持たせる並列化と低エネルギー部を超伝導化する概念設計を行い、ADS 用加速器システムの仕様を提示する。また、ADS の燃焼反応度を補償して炉心出力を一定に保つために必要な未臨界度調整機構の概念設計の概念設計を行う。さらに、これまでに開発したプラント動特性解析コードを使用して得た解析結果を基に、炉停止後の長時間の電源喪失に対する冷却性能を確保するための機器仕様の概念設計を実施する。最終的に、これらの実施内容を反映した工学的成立性を高めた ADS プラントの概念設計を行う。

4. 参考文献

- (1) 日本原子力研究開発機構、「日本原子力研究開発機構における長寿命核種の分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方」、JAEA-Review 2008-074 (2009)
- (2) 原子力委員会研究開発専門部会分離変換技術検討会、「分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方について」(2009)