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。

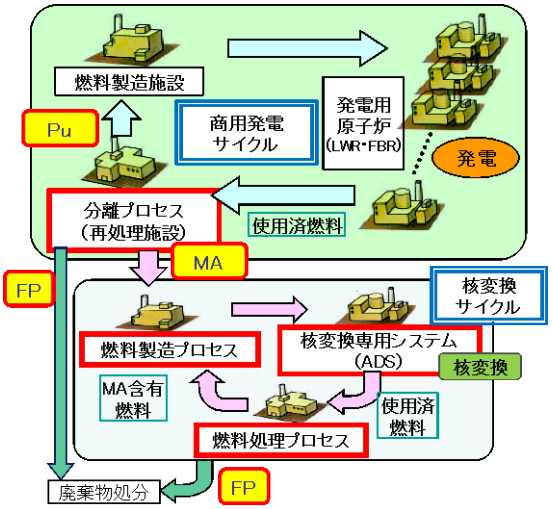

図１　ADS階層型のMA核変換システムの概念

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、より工学的成立性の見込める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、条件を改良した MA・Ln 回収のためのフローシートによる連続抽出試験（フローシート試験）を実施し、ホットセル内での実廃液を用いた連続抽出試験条件を決定することを目的とした。これまでに実施したフローシート試験では、ネプツニウムの原子価調整等のために添加した過酸化水素(H_2O_2)からの気泡生成による影響の可能性が示唆された。そこで、模擬廃液を用いたフローシート試験を H_2O_2 添加系および無添加系で実施した結果、化学的に不安定な過酸化水素を添加しなくても MA を高回収率で分離・回収できるプロセスを構築することができ、実廃液試験でのプロセス条件を確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、これまでの試験結果で有効性を示した抽出剤である、ヘキサオクチルニトリロ三酢酸トリアミド (HONTA) を使用し、トレーサーを添加した模擬溶液による連続抽出試験を実施した。連続抽出試験に先立ち、まずトレーサー量の放射性金属イオンを含む硝酸を水相とし、HONTA を含む n-ドデカン溶液を有機相とするバッチ法による抽出分離試験を実施し、試験結果を基にフローシート試験条件を決定した。HONTA による金属イオンの分配比と硝酸濃度の関係を図 2 に示す。決定した試験条件により、向流式ミキサセトラを用いたフローシート試験を実施した結果、Nd(III)との相互分離にやや課題を残すものの、Am および Cm に対しては高い回収率を得ることができ、HONTA の高い実用性を実証できた。

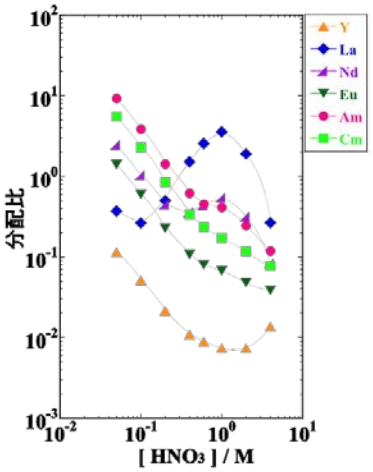

図 2　HONTA による MA および Ln(III)の分配比と HNO3 濃度の関係

(3) ADS 用 MA 試料の分離回収

MA･Ln 回収プロセス開発において確定したプロセス条件により、日本原子力研究開発機構原子力科学研究所内の NUCEF 施設内に設置されたαγセルにおいてセル内に保管されている再処理ラフィネート溶液実液をフィード液として、MA･Ln 一括回収プロセスの実液試験を実施した。その結果、目的とする Am(III)、Cm(III)の全量回収を達成することができた。

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次年度以降に予定しているウラン・鉛ビスマス(Pb-Bi)燃料体を炉心中心領域に装荷した ADS の炉物理実験を行うための準備作業を行った。

まず、平成 25 年度に KUCA-A 架台で実施された鉛または鉛ビスマスの置換反応度測定実験を対

象とした核データ起因の不確かさ解析を実施した。その結果、熱中性子体系の KUCA を用いた実験データを使用しても、様々な種類の実験を組み合わせた解析により、高速中性子体系の実用規模 ADS の核特性解析の不確かさを合理的に低減し、解析の信頼度を向上させることが可能となることを示した。また、^{237}Np 及び ^{241}Am の反応率測定実験に関する予備実験として、京都大学原子炉実験所の電子線加速器 KURRI-LINAC で ^{237}Np 箔の照射実験を行い、解析において低エネルギーの中性子による反応率を解析できるように箔を十分に大きくする必要があるとの知見を得た。

(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

ADS 用加速器について、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ために、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超伝導空洞の形状検討を行った。超伝導空洞内の電磁場を評価し、設計指標の一つである電極表面での電場強度の最大値(E_p)と加速電場強度の最大値(E_{acc})の比を比較検討し、スポーク型が最も E_p/E_{acc} の値が小さく加速効率が高いことが分かった。また、低エネルギー加速部に超伝導空洞を用いた場合の加速器内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、超伝導空洞に陽子ビームを衝突させることなく、陽子ビームをビーム窓まで輸送できることを確認し、ADS 用加速器としての成立性を確認した。

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対象とするが、特に駆動機構等の検討が必要な制御棒を用いる場合の概念検討を行った。制御棒駆動機構の構造概念の構築とともに、制御棒駆動機構と炉上部機器との干渉度の調査を通して、炉上部の機器配置を検討した。その結果、図 3 に示すように回転プラグを常時搭載する方式が作業規模の観点から現実的であることを示した。

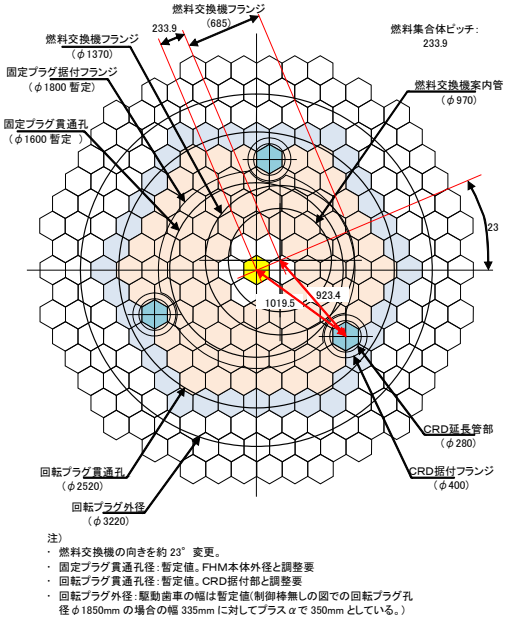

図 3　制御棒導入 ADS の炉心上部機器配置

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することで、より安全性の高い ADS 概念を提示することを目的に、一次主流路内に熱交換器を設置した PRACS (Primary Reactor Auxiliary Cooling System) を対象に崩壊熱除去系の概念検討を実施した。PRACS を設置する場合には、崩壊熱除去系の熱交換器を蒸気発生器に設置することが最適であると判断し、蒸気発生器の LBE 入口部に熱交換器を設置することとし、これをもとに PRACS 全体の概念結果を取りまとめた。

④ ADS プラントの概念設計

未臨界度調整機構の導入によって加速器のピーク電流値が低減される見通しが得られたため、新たな設計条件に対応したビーム窓の概念設計及び構造成立性評価を行った。運転期間中の最大陽子ビーム電流値が従来の 20mA から 10mA に半減することができる可能性が示されたことから、陽子ビーム電流値 10mA の条件で、陽子ビーム輸送、熱流動解析、構造解析の連成解析を実施した。その結果、従来と同じビーム窓外半径（r=23cm）の場合、窓部の最高温度が約 60℃低下し、座屈耐性が向上し、より成立性の高いビーム窓概念が得られることが分かった。

３．今後の研究

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αγ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)