

群分離・核変換技術評価について
(中間的な論点のとりまとめ)

文部科学省 科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会
群分離・核変換技術評価作業部会

平成25年11月

目次

はじめに.....	1
Ⅰ. 群分離・核変換技術評価における基本的考え方.....	1
Ⅱ. 群分離・核変換技術に関する研究開発状況.....	3
Ⅲ. 国際協力による研究開発の推進.....	7
Ⅳ. 群分離・核変換技術に関する研究開発への評価.....	9
Ⅴ. 基礎基盤研究の推進と人材育成.....	14
Ⅵ. 引き続き検討が必要な事項.....	15
添付資料 1 群分離・核変換技術とは.....	17
添付資料 2 分離変換技術の導入効果.....	18
添付資料 3 核変換技術体系について.....	19
添付資料 4 平成 21 年原子力委員会分離変換技術検討会でのチェックアンド レビュー (C&R) で提示したロードマップと現状.....	20
添付資料 5 平成 21 年原子力委員会分離変換技術検討会での指摘事項と対応 状況.....	21
添付資料 6 加速器駆動核変換システム (ADS) 実用化に向けたロードマップ	23
添付資料 7 核変換実験施設のイメージ.....	24
参考資料 1 群分離・核変換技術評価作業部会 構成員.....	25
参考資料 2 群分離・核変換技術評価作業部会 検討の経緯.....	26
参考資料 3 用語解説.....	27

はじめに

- 原子力委員会は、平成20年から21年にかけて、研究開発専門部会分離変換技術検討会（以下、「分離変換技術検討会」という。）において、本技術に関する研究開発の現状について整理するとともに、本技術の効果及び意義を分析し、それらを踏まえた研究開発の進め方等について検討した結果を報告書「分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方」（平成21年4月28日）（以下、「検討会報告書」という。）としてとりまとめた。同報告書には「概ね5年ごとに、基礎データの充足や、準工学・工学研究の進展等についての状況を評価することが適当」と指摘されている。
- 文部科学省は、これを踏まえ、本技術の研究開発の現状等を評価するため、科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会原子力科学技術委員会の下に「群分離・核変換技術評価作業部会」を7月9日に設置した。
- 本作業部会においては、これまで5回の会合を開催し検討を行ってきたが、今回、これまでの検討を通して明らかになった論点・課題を踏まえた研究開発状況の評価を示すとともに、当面の研究開発の進め方や今後検討すべき課題等について、中間的な論点のとりまとめとして整理を行った。
- 今後、原子力政策の検討状況や研究開発の進捗を考慮し、適宜、評価・検討を継続していくものとする。

I. 群分離・核変換技術評価における基本的考え方

1. 群分離・核変換技術と原子力政策との関係

- 現在、我が国のエネルギー政策に関しては、原子力の位置づけを含めて検討が行われている。群分離・核変換技術は主に核燃料サイクル技術の一環として取り組まれてきており、その評価を行うに当たっては我が国の原子力政策との関係が重要である。
- 原子力委員会では「核燃料サイクル政策の選択肢について」（平成24年6月21日 原子力委員会決定）において、原子力比率に応じた選択肢について評価した結果として、
 - ・将来の原子力比率が0%の選択肢以外は「再処理・直接処分併存」若しくは「全量再処理」の選択が有力であること。
 - ・いずれの選択肢を選ぶ場合でも、高レベル放射性廃棄物の最終処分場の選定作業は国がリーダーシップを発揮して強力に推進していく必要があること。
 - ・再処理が行われる場合は、廃棄物処理技術としての高速炉（FR）の位置づけや他の第四世代炉候補等案との比較について検討が必要。

- ・将来の不確実性に柔軟に対応できるよう、高度再処理、FR技術等の基礎・基盤研究は継続することが重要。

等についてとりまとめた。

- また、日本学術会議が原子力委員会の意見照会に応じて平成24年9月に提出した回答の中では、高レベル放射性廃棄物の処理について将来可能となる選択も視野に「暫定保管」という概念が提示されるなど、将来の政策的な柔軟性への対応が課題となっている。
- さらに、2013年3月末時点で、我が国の原子力発電の利用により発生した使用済燃料は約1万7,000トン存在しており、これらをすべて現在の技術で再処理すると、現在の貯蔵量を含めてガラス固化体約2万5,000本相当の高レベル放射性廃棄物が発生する。
- 高レベル放射性廃棄物の処分については、数万年にわたり人間の生活環境からの隔離が求められるなど、環境との調和において高いハードルを克服していくことが必要である。
- こうしたハードルを克服し、また、将来における政策的な柔軟性を確保するためには、放射性廃棄物の処理・処分に関する研究開発を着実に推進し、技術的なオプションを増やすとともに、より環境に調和しやすい形での処理・処分の方法を提示し、最終処分が円滑に進むように努めていくことが重要である。

2. 群分離・核変換技術評価に係る調査検討の観点

- 群分離・核変換技術は、高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種を、その半減期や利用目的に応じて分離するとともに、長寿命核種を短寿命核種あるいは非放射性核種に変換するための技術である。
- この技術が実現すれば、廃棄物の潜在的有害度の総量を大幅に低減することによる長期リスクの低減、発熱の大きい核種を分離してコンパクトに処分することによる処分場規模の縮小、白金族などの希少元素の利用による放射性廃棄物の一部資源化といった効果が得られる可能性がある。
- 群分離・核変換技術については、1988年のオメガ計画以降、最終処分の負担軽減等を図るために長寿命核種の分離変換技術の研究開発は着実に推進することが必要であると評価されてきている。
- これまで、群分離・核変換技術の取組については、マイナーアクチノイド(MA)含有燃料の高速炉での照射試験計画など、高速増殖炉サイクルの研究開発の一環としての実施が中心であった。
- 一方で、高レベル放射性廃棄物の処理・処分の社会的負担軽減を目指して、他の技術的選択肢でも社会受容性の高い新たなバックエンド概念が構築でき

- ることを示すことにより、将来の政策的な柔軟性が広がることが期待される。
- 高速増殖炉サイクルによる群分離・核変換技術については、「もんじゅ研究計画作業部会」において、高速増殖炉/高速炉システムを活用した廃棄物の減容及び有害度の低減等を目指した研究開発として、研究計画の中で重点分野の一つとして位置づけられたところである。
 - 本作業部会では、これまで実験室レベルにとどまっていた群分離技術及び加速器駆動核変換システム（ADS）を用いた核変換技術について、現時点において研究開発の中心となっている独立行政法人日本原子力研究開発機構（原子力機構）の取組を中心とした研究開発の進捗状況や、工学規模での研究開発を可能とする出力規模の高い核変換実験施設の整備の必要性や有効性、整備計画の妥当性等を中心に検討を行った。
 - また、群分離・核変換技術は、多様な分野の研究者・技術者の力を結集して、長期間にわたり取り組む必要がある技術であることを踏まえ、我が国の原子力関連分野における技術レベルの向上、人材育成の観点からの取組とともに、国際協力での取組の在り方についても、併せて検討を行った。

Ⅱ. 群分離・核変換技術に関する研究開発状況

1. 我が国における群分離・核変換技術の位置付け

- 昭和62年に決定された原子力委員会の「原子力開発利用長期計画」に従い、昭和63年に「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」（いわゆるオメガ計画）が策定された。
- 平成17年に閣議決定された「原子力政策大綱」では、この技術を基礎的・基盤的な研究開発活動に位置付け、その主要な活動の一つとして「放射性廃棄物中の長寿命核種の短寿命化等による放射性廃棄物処理・処分の負担軽減に貢献する分離変換技術」を挙げている。
- 平成20年に改訂された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」においては、「国及び関係研究機関は、最終処分の負担軽減等を図るため、長寿命核種の分離変換技術の研究開発について、国際協力、国際貢献の視点等も加味するとともに、定期的な評価を行いつつ、着実に推進することが必要である」と記述されている。
- 平成21年の原子力委員会の検討会報告書及び同報告書を受けた原子力委員会決定では、ADSを用いた核変換技術は、「高速増殖炉サイクルによるMAの均質リサイクル技術が所定の性能目標を満足することができないと判断されたとき」、あるいは、ADSを用いた核変換技術が「技術的成立性や開発に係る費用対効果の点で勝っていると判断されたとき」には、「開発

対象として採用が検討される可能性がある」とされ、また、「この技術を含む将来の原子力発電技術体系に要求される性能目標を満たして実用化できれば、原子力発電に伴って発生する放射性廃棄物の処分体系を一層合理的に設計できる自由度の増大が期待される」と記述されている。

- 平成24年9月、日本学術会議が原子力委員会からの諮問に対する回答として取りまとめた「回答 高レベル放射性廃棄物の処分について」では、最終処分候補地選定に係る仕組みの見直しが提言されるとともに、核変換技術が「放射性廃棄物処分の安全性における確実性を向上させる研究開発」として「関係する研究機関で積極的に技術開発に取り組み、成果を得ることが期待される」と記述されている。

2. 群分離・核変換技術の導入効果と将来のイメージ

- 分離変換技術検討会で示された分離変換技術の導入効果は、①潜在的有害度の低減、②地層処分場に対する要求の軽減、③廃棄物処分体系の設計における自由度の増大とされている。
- これらの導入効果に関する見解は現在も変わっておらず、長期的な潜在的有害度の低減、地層処分場面積の削減、廃棄物を処分するまでに貯蔵する期間の短縮、「廃棄物処分体系」をより合理的なものとして設計する自由度の増大などの可能性が期待されている。
- 群分離・核変換技術には、大きく分けて、高速増殖炉サイクルの中で実施する「発電用高速炉利用型」と、加速器駆動核変換システム（ADS）を用いた「階層型」の二つがあり、また二つを併用することも可能である。
- ADSを用いて潜在的有害度の高い長寿命核種であるMAを集中的に核変換する方法は、軽水炉再処理で生じるMA、軽水炉から高速増殖炉への移行期に生じるMA、高速増殖炉サイクルによる平衡期に生じるMAなどを、様々な局面に応じて効率的に核変換するポテンシャルを有している。例えば、0.27 GWeのADS1基で、10 GWeの軽水炉群で1年間に生じるMAを核変換可能と考えられている。
- ADSを用いた核変換技術は、将来の様々な状況に柔軟に対応できる可能性を有していることから、高速増殖炉サイクルの研究開発と並行して研究開発を進める有望な技術選択肢である。
- 今後、ADSを用いた核変換技術については、工学規模での技術的成立性の確認に取り組むことが必要であるが、今後の我が国における原子力政策の方向性が明確になっていく過程で、導入シナリオ等を再検討する必要があるとともに、我が国の原子力発電システムへの群分離・核変換技術の本格導入について検討する段階では、「発電用高速炉利用型」のサイクル概念と、ADS

による「階層型」サイクル概念について、技術的成立性や費用対効果の点に関し、相互比較評価を行った上で判断されることが適当である。

3. 群分離・核変換技術の研究開発状況

【群分離】

- 群分離技術については、原子力委員会の検討会報告書において「実験室規模でのホット試験、工学規模でのコールド機器開発、模擬高レベル廃液による試験等によって知見を蓄積し、実燃料、実液による試験の実施可能性を見極めた上で工学規模試験に移行するべきである」等と評価された。
- MAをランタノイドとともに高レベル廃液から回収する工程については、TDdDGA抽出剤による分離プロセスについて、トレーサー量のMAを含む模擬廃液を使用したフローシート試験が実施され、Amの回収率99.99%以上が達成されている。
- MAをランタノイドから分離する工程については、高い分離性能を有する新規抽出剤（ソフトドナー抽出剤及びハイブリッド型抽出剤）が開発されるとともに、水溶性錯化剤とTDdDGA抽出剤を組み合わせた抽出系による分離が確認されている。
- 核分裂生成物（FP）の分離については、抽出クロマトグラフ法や電解法の基礎データが取得されている。

【ADS】

- ADSについては、原子力委員会の検討会報告書において、技術課題として「ADSが実現する時代に発電システムに要求される安全性、信頼性、経済性といった性能目標の達成を妨げない、若しくは達成に寄与できる加速器の性能・コストが実現していること」、「ビーム窓の工学的成立性を確認すること」、「未臨界炉心の制御等の炉物理的課題を高い信頼度で解決すること」及び「鉛-ビスマス（Pb-Bi）冷却炉の設計及び安全性を高い信頼度で確認すること」等が挙げられた。
- ADS用加速器については、J-PARCリニアックの運転データから推定したデータを基に、加速器に求められる信頼性向上の方策が検討されている。
- ビーム窓の工学的成立性については、使用条件における外力、熱応力、除熱、腐食等の観点からの検討に基づき、成立の見込めるビーム窓の概念が提示されている。
- 未臨界炉心の炉物理的課題解決については、京都大学原子炉実験所の臨界集合体KUCAとFFAG陽子加速器を用いたADS模擬体系において、未臨界度を測定する技術開発を実施した。今後、KUCAの熱中性子体系で得た

知見の高速中性子体系への適用性について検討が行われる。また、新たに評価された核データライブラリ JENDL-4.0 及び誤差評価システムを基に核変換システムの核データ起因誤差が定量的に評価され、解析の不確かさを低減するために必要な炉物理実験が検討されている。

- Pb-Bi 冷却炉については、レベル1 PSA手法を用いて異常事象が系統的に整理され、高速増殖炉等の安全解析コードを用いた動特性解析が実施された。また、試験ループ群を用いて Pb-Bi 利用技術の開発が進められた。

【燃料サイクル及び燃料】

- ADS 用燃料及びそのサイクルについては、原子力委員会の検討会報告書において、技術課題として「窒化物燃料の乾式再処理による燃料サイクルシステムの実用性を示すこと」及び「所定の使用条件下での燃料性能及び高燃焼度を達成する窒化物燃料が製造できることを高い信頼度で確認すること」等が挙げられた。
- 燃料サイクルについては、乾式再処理プロセスデザインに不可欠な MA の基礎データベース、特にデータが不十分であった Cm のデータが整備された。また、窒化物燃料固有課題の陽極技術について、電解残渣からの Pu や MA の回収法が考案され、プロセス原理が確認されるとともに、周辺工程を含む実用的な乾式再処理プロセスフローの概念が構築された。
- 一般財団法人電力中央研究所（電中研）は、高速増殖炉サイクルの実用化研究開発（FACT）における副概念として、金属燃料高速炉-乾式再処理技術の研究開発を進めており、乾式再処理工学基盤技術の開発、及び、照射済みの MA 含有金属燃料を用いた乾式再処理の小規模ホット試験等を実施している。金属燃料の乾式再処理技術は、陽極溶解技術等の一部を除いて窒化物燃料にも適用可能である。
- ADS 用燃料については、実用条件での高均質性と低不純物濃度を実現できる、不活性母材含有 MA 窒化物ペレットの調製条件が確立され、Cm を含むペレット調製に成功した。また、ADS の燃料設計に不可欠な誤差評価を含む物性評価式の整備に着手し、最も重要となる熱物性と固溶度の評価式が開発されている。さらに、高 MA 含有燃料での固有課題である、自己照射損傷による格子定数変化や熱物性変化が定式化されている。

【FP核変換】

- FP の核変換については、高速増殖炉や ADS において I-129 や Tc-99 といった長寿命核種を核変換する方法が検討されているが、国内では概念検討にとどまっている。

- その他の長寿命 F P については、核変換に関連する基盤研究・技術開発がほとんど進んでいない状況にある。
- 放射性核種を同位体分離して単一核種の十分な厚さの標的にすることは困難であり、これまで中性子による核子放出、中性子捕獲、 γ 線吸収などの核変換に関連した反応断面積データはほとんど得られていない。
- 現在、独立行政法人理化学研究所が計画しているこれらの基礎データに係る研究の取組は、合理的な核変換法を生み出す契機になるとともに、F Pの核変換技術におけるエネルギー収支、経済性などを算出及び検討するのに重要となる。その成果は世界的に見ても未知の分野であり国際的にも優位性を持つことが期待される。

【J-PARC核変換実験施設】

- ADSに関する枢要課題の解決を目指し、原子力機構において、大強度陽子加速器施設 J-PARC の第 II 期計画として核変換実験施設の整備が検討されている。核変換実験施設は、大強度陽子ビームでの核破砕ターゲットの技術開発及び材料の研究開発を行う ADS ターゲット試験施設 (TEF-T) と、低出力で未臨界炉心の物理的特性探索と ADS の運転制御経験蓄積を目指す核変換物理実験施設 (TEF-P) で構成される。
- TEF-T については、既に稼働している J-PARC の物質・生命科学実験施設の知見・経験等を生かし、実用 ADS に相当する陽子ビーム条件での材料照射試験が実施可能な Pb-Bi ターゲット概念が提案されており、次のステージに向けた検討及び技術開発が進められている。
- TEF-T では、本来目的を阻害しない範囲で、材料照射、RI 製造、先端物理学研究等、核破砕反応から発生する中性子等を多目的に利用していく検討が進められている。
- TEF-P については、既存の高速炉臨界実験装置での知見・経験及び燃料等の資産を有効に活用し、MA 含有燃料の使用と小出力陽子ビーム (400 MeV、10 W) の導入が可能な施設概念が提案されており、次のステージに向けた検討及び技術開発が進められている。
- なお、核変換実験施設の建設経費 (設計費を含む) は約 220 億円と見積もられている。

Ⅲ. 国際協力による研究開発の推進

1. 国際協力状況

- 高レベル放射性廃棄物の処理処分の負担軽減は、原子力を継続して利用する

国、原子力から撤退する国、これから原子力を導入する国の全てで共通する課題である。また、本技術は極めて広範囲な技術が協働することで成立するものであることから、本技術の研究開発は、核不拡散の枠組みの下で国際協力によって推進することが適切である。

- 我が国は、この技術の基盤となる核燃料サイクル技術、高速増殖炉技術、大強度陽子加速器技術などを既に有しており、国際貢献の観点からも、この技術の研究開発を先導すべきである。
- ADSに関する国際協力では、8か国が参加する液体金属核破砕ターゲットの開発試験（MEGAPIE実験）により、液体Pb-Biを用いたMWクラスの核破砕ターゲットの4か月にわたる照射試験に成功しており、現在、ターゲットの解体を終え、使用材料の照射後試験を各国で分担して実施中である。
- また、原子力機構は、欧州14か国等が参加するADSの総合的な開発プロジェクトであるEUROTRANS等に参加し、実用及び実験炉級ADSの設計研究、加速器-未臨界炉の結合実験、核変換用先進燃料の開発（主に分散型酸化燃料）、材料と液体重金属技術、核データ等に関する貴重な知見を得ている。
- さらに、原子力機構はベルギー原子力研究センター（SCK・CEN）と協力取決めを結び、実験施設の設計研究、被覆管及びビーム窓の材料開発、Pb-Bi技術等に関する情報交換、人員派遣、共同研究等を実施している。
- OECD/NEAでは、1990年より隔年で情報交換会議が開催されるとともに、最近では、先進燃料の熱力学データベース整備の専門家グループを立ち上げる等、この分野の国際協力の推進に積極的である。

2. 工学実証に向けた国際協力での取組

- ベルギーのSCK・CENでは、熱出力50～100MW規模の照射試験用ADSであるMYRRHAの建設を計画している。MYRRHAはADSを用いた核変換技術の開発だけでなく、先進的な原子炉（特に鉛冷却炉）の開発、核分裂炉及び核融合炉のための高速中性子照射、加速器に基づく科学コミュニティへの貢献、Si照射やRI製造のための中性子照射施設といった多目的利用を念頭に置いた実験施設として検討されている。なお、燃料には通常のMOXを用いるため、核変換専用の照射施設ではない。
- ベルギー政府は、2016年（平成28年）頃の着工を目指し、総額9億6,000万ユーロ（1ユーロ130円として約1,250億円）の建設費の内の40%を拠出することを決めており、残りの負担を諸外国に呼び掛けている。
- 原子力機構は、本年2月にMYRRHAプロジェクトに対する関心表明を発

出し、プロジェクト参加の検討が進められている。MYRRHAはMA核変換専用の施設ではないものの、ADSの開発において必須となる実験炉級ADSの段階として、極めて有効な知見・経験を得ることが期待される。

- また、J-PARCの核変換実験施設との関係については、TEF-Tでは、将来の実用ADSに向けたビーム窓材料の開発・寿命評価に向けたデータを取得する施設として、MYRRHAの高度化に向けたデータも取得することが期待され、MYRRHAの本格運転までにビーム窓材料の試験データ等の提供が期待されている。また、TEF-Pは、核変換用ADSの炉物理試験や核データの積分検証などを通じて、将来の実用ADSや高速炉のためのデータを取得できると考えられる。
- したがって、J-PARCの核変換実験施設とMYRRHAの成果を相互に補完することでより効率的に核変換技術実用化に向けた課題の解決が可能になり、ADSに関する研究開発の加速を図ることが期待される。
- 本技術の研究開発に当たっては、海外の研究開発との連携や我が国の研究開発への海外からの参画等を積極的に進め、実炉規模の核変換実証施設の手前までの研究開発コストを、全て自国で進めた場合の費用と比較して低減できるように図るべきである。

IV. 群分離・核変換技術に関する研究開発への評価

1. 研究開発の課題と今後の取組

【群分離】

- 群分離技術については、前記Ⅱ3. のとおり、実験室規模でのホット試験、工学規模でのコールド機器開発、模擬高レベル廃液による試験等についてロードマップの課題に沿った成果が得られ、さらに、プロセス実廃液試験による適用性評価に向けた検討が行われているなど、概ね、原子力委員会「分離変換技術検討会」での指摘事項に沿った研究開発が進められている。
- 課題としては、MAをランタノイドとともに抽出する工程以外の工程の開発段階が低い状態にとどまっていることが懸念される。
- また、工学規模へのステップアップに向けた実験に移行するためには、トレーサー量を超える濃度のMA溶液を取り扱うデータの取得が課題である。
- 今後、実廃液試験によりデータの取得を進めるとともに、産業界と連携して工学規模への展開を見通すための技術開発を進めることが適当である。
- なお、高レベル廃棄物の潜在的有害度の有効な低減及び処分場面積の縮小の観点から、MA回収率の目標値を99.9%に設定しているのは適切であるが、それが実現できない場合も含めたシステム全体での適切な目標管理を行うべ

きである。

【ADS】

- 前記Ⅱ3.にあるとおり、原子力委員会「分離変換技術検討会」での指摘事項に沿って、J-PARCリニアックの運転データから推定したデータを基にしたADS用加速器に求められる信頼性向上策の検討、成立の見込めるビーム窓の概念の提示、未臨界炉心の炉物理的課題解決に向け京都大学原子炉実験所の臨界集合体KUCAの計測手法に係る成果の活用、Pb-Bi冷却炉に関する動特性解析等の取組が進められている。
- ADSの大きな技術課題である陽子ビーム窓の成立性検証に向け、J-PARCの核変換実験施設計画の下、TEF-Tが提案されており、次のステージに移行していくことが適当である。
- なお、TEF-Tでの材料照射試験は、目標とする照射量への到達への時間とともに、照射後試験までの冷却及び試験片への加工が必要であり、照射後試験に要するインフラの維持・整備も含めて、照射計画と試験計画を綿密に立案することが必要である。
- また、ADS特有の特性やMA含有炉心の炉物理的課題克服のため、J-PARCの核変換実験施設計画の下、TEF-Pが提案されている。同施設は原子炉施設として提案されているが、新規制基準にのっとりた安全審査が行われることになるため、そうした点についても考慮しつつ、次のステージに移行することが適当である。
- なお、TEF-Pが、原子炉施設として、加速器等のRI施設とは異なる基準での安全確保、核不拡散、核物質防護や核セキュリティの確保が求められることを踏まえ、それらに十分対応した研究開発計画や施設計画、管理体制の構築についても合わせて検討を行うことが必要である。
- 核変換実験施設の建設に当たっては、研究開発に係る課題の達成状況等についてレビューを行っていく必要がある。
- Pb-Bi冷却炉の工学的な開発を効率よく進めていくためには、TEF-Tでのビーム窓材料の開発等やTEF-Pでの未臨界炉心特性試験及びMA燃料特性試験等の成果を得つつ、ADSの実証炉的な位置づけがあるMYRRHA計画に対し、産業界と連携して参画することを通じ、相互に研究成果を補完しあうことが有効である。
- MYRRHA計画については、国内での研究開発の取組状況も踏まえつつ、適切な規模での参画、我が国の取組と相互の国際協力について、ベルギー等、関係国との調整を進めることが適切である。

【燃料サイクル及び燃料】

- 前記Ⅱ 3. のとおり、原子力委員会「分離変換技術検討会」での指摘事項に沿って、乾式再処理プロセスデザインに不可欠なMAの基礎データベースの整備、電解残渣からのPuやMAの回収法等のプロセス原理が確認されるとともに、周辺工程を含む実用的な乾式再処理プロセスフローの概念が構築されている。さらに、高速炉用金属燃料再処理技術開発として、電中研によって、乾式再処理工学基盤技術の開発、及び照射済みのMA含有金属燃料を用いる乾式再処理の小規模ホット試験などが実施されている。
- ADS用燃料については、MA窒化物ペレットの調製条件が確立され、Cmを含むペレット調製に成功するとともに、ADSの燃料設計に不可欠な誤差評価を含む物性評価式の整備に着手し、最も重要となる熱物性と固溶度の評価式が開発されるなど、一定の成果が上がっている。
- しかし、MA高含有窒化物燃料については、燃料挙動評価に不可欠な燃料ふるまいコードの開発に未着手であり、詳細な燃料健全性評価とそれに基づくピン照射の道筋を見通せていないことが懸念される。また、原理実証段階に移行するには、MAの調達、MA燃料製造設備の整備、実用燃料ピン設計において多くの課題がある。
- ADSの導入シナリオを考えた場合、初期炉心を全てMA高含有窒化物燃料で構成することは現実的ではなく、ウランを相当程度含む燃料が装荷されると考えられることから、高濃度でMAを含有する酸化物燃料等も視野に、高速増殖炉の取組や欧州と連携して、幅広い可能性に柔軟に対応できるように研究開発を進めるべきである。
- 上記のような取組を進めるには、相当量のMAを使用して、物性測定やサンプル照射試験等を進める必要があり、既存施設の有効利用と、新規施設の戦略的な整備を有効に組み合わせて、研究開発の効率的推進を図ることが重要である。
- 核変換用燃料の乾式再処理については、金属燃料乾式再処理に関して多くの知見を有する電中研及び米国をはじめとする国外との協力が必要不可欠である。また、乾式再処理関連技術において近年進捗が著しい韓国、インド、中国等の動向を注視しておく必要がある。

【全体】

- 原子力利用に伴う高レベル放射性廃棄物の処理・処分については、国内的にも、国際的にも重要な社会的・技術的な課題である。将来の原子力政策や技術の不確かさに対して、有望と考えられる技術的なオプションを提示し、将来における選択枝の広がり柔軟性を保証するべく最大限の努力を払うこと

が大切である。

- 我が国には、群分離・核変換技術のポテンシャルや人材、関連の研究開発インフラが蓄積されており、課題の解決に向けて着実に進めていくことが求められる。
- 群分離、ADS、燃料サイクル及び燃料の各分野について技術成熟度の検討を行った結果、概ね、概念開発段階から原理実証段階に移行することが可能な研究開発段階にあり、工学規模の次のステージに移行することが適当である。
- 高速増殖炉サイクルによる核変換技術は、既に原理実証段階にあり、より実用化に近いが、将来の政策的柔軟性への対応を可能とするための技術的オプションとしての成立性を判断するためには、ADSを用いた核変換技術についても、原理実証段階に移行し、効率性、経済性、また廃棄物の減容効果等に係るデータ・知見を蓄積していくことが必要である。
- 工学規模の次のステージに移行するに当たっては、相当量のMAを用いた実験について、既存の施設だけでの実施は困難であることから、今後、本技術の研究開発を進めるに際しては、既存施設の有効利用と、新規施設の戦略的な整備を効果的に組み合わせて、研究開発の効率的推進を図ることが重要である。その際、高速増殖炉サイクルを用いた方法とADSを用いた「階層型」サイクル概念で共通の課題については、一体的に取り組むことが必要である。

2. ロードマップ

- 群分離・核変換技術の研究開発は、各分野が整合性を保ちながら進めることが必要である。また、一つの分野のブレークスルーが技術全体の飛躍的な進捗に結び付く可能性もあるため、分野間の連携を緊密に保つことが求められる。このような観点から、原子力機構より下図のロードマップが示された。平成21年の分離変換技術検討会において原子力機構が示したロードマップが、現状を踏まえて適切に更新されており、妥当と判断する。
- 今後の施設整備計画等の具体的な策定に当たって、今後の研究開発の取組状況を適切に反映していくとともに、図中の「更に将来の部分」の取組については、今後の原子力政策の見直しや高速増殖炉サイクルによる核変換技術等他の分野も含めた研究開発の進捗状況を踏まえつつ、適切なタイミングで実施について判断されるべきである。その際には、それまでの研究開発の達成状況を確認するための適切な判断基準を設けることが必要であり、今後の研究開発では、そのような判断に資するデータの取得等を中心に進めることが望まれる。
- また、将来、我が国の原子力発電システムへの群分離・核変換技術の本格導

入を検討する段階において、「発電用高速炉利用型」のサイクル概念と、ADSを用いた「階層型」サイクル概念について、技術的成立性、費用対効果、社会受容性等の観点からの比較評価を行うことが必要となると考えられるため、その際の判断基準も考慮した研究開発を進めるべきである。

- さらに、研究開発を進めるにおいては、ビーム窓なし概念等のその他の概念を含めて最新の知見を活用するとともに、技術的要件と社会的な要請を絶えず見直し、リスク管理を含んだ適切なチェックアンドレビューなどのプロジェクト管理を行うべきである。

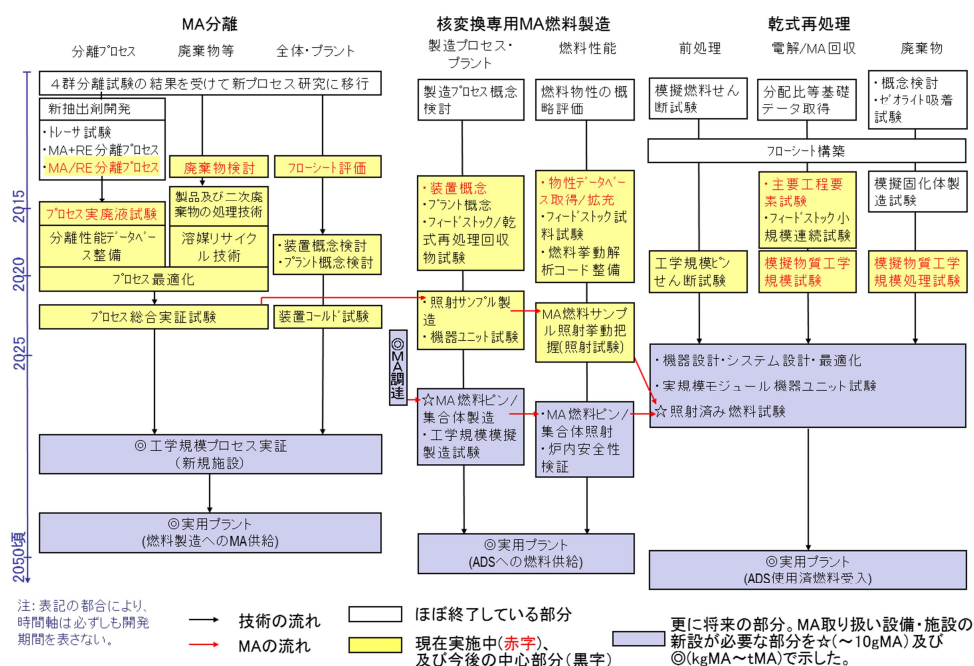


図1 群分離並びに核変換用燃料及び燃料サイクルに関するロードマップ

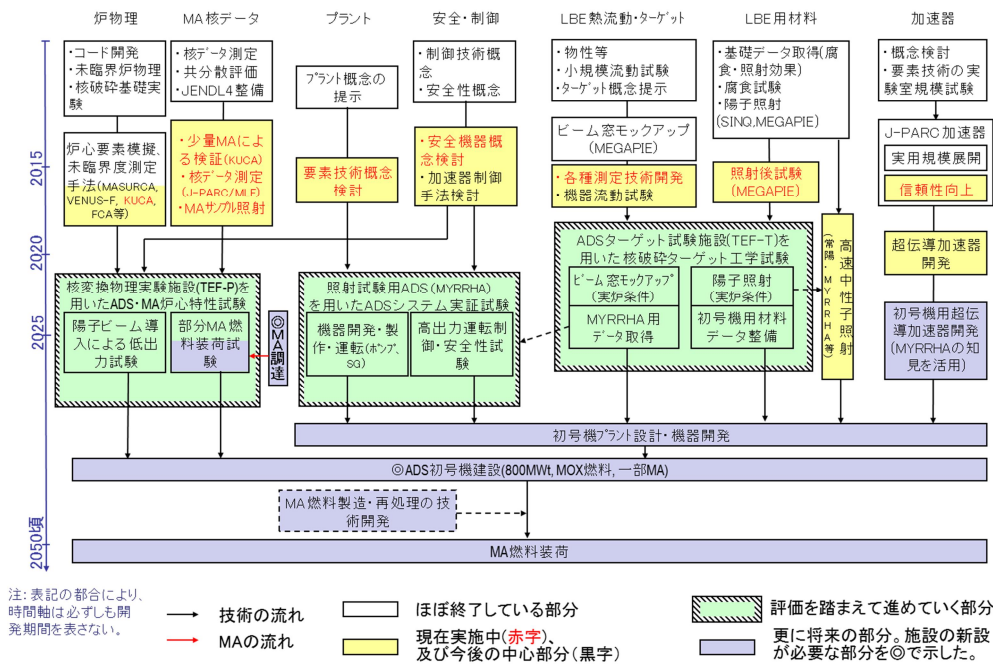


図2 ADSに関するロードマップ

V. 基礎基盤研究の推進と人材育成

1. ユーザーコミュニティ

- TEF-Tの多目的利用について、ユーザーコミュニティ構築のためのワークショップが開催される等の活動が行われており、実験施設の最大限の有効利用を図る観点から適切に取り組まれていると認められる。また、TEF-T及びTEF-Pについては、実験提案を広く国内外から募集する取組がなされている。
- TEF-Pについては学会の関連する部会で横断的に実験施設のあるべき姿を検討する活動が行われている。世界的にも貴重な高速中性子系臨界実験装置として、大学あるいは産業界を含むより多くの研究者が参画できるような取組の検討を今後も継続していくべきである。

2. 基礎基盤研究の充実と人材育成

- 群分離・核変換技術は、概念検討段階から原理実証段階に移行する過程にあり、また、更なる研究開発が見込まれることから、基礎研究を行う大学等から、プラント技術開発を行う産業界まで、原子力機構を中心に、連携を強化する必要がある。この際、長期の開発期間を必要とすることを踏まえ、核データや基礎物性等の基礎基盤研究の充実を図るとともに、原子力工学・核物

理等の理学系をはじめとする幅広い分野の研究者との連携や、基礎基盤研究と工学技術開発の連携の構築が極めて重要である。

- MAを集中的に核変換する概念では、高発熱性、高放射性で、かつ、化学的にも活性なMAの取扱いに高い技術的なハードルがある。これに、産業界等の協力を得ながら積極的に取り組むことで、国内に、世界をけん引する先進基礎科学的な知見を蓄積するだけでなく、従来に類を見ないレベルでの応用工学的な技術力を醸成できる。これは、人材育成を含む、我が国の今後の原子力技術開発に大きく貢献する。
- 本技術は、高レベル放射性廃棄物の処理処分の負担軽減という人類共通の課題への挑戦であり、若い世代にアピールできる原子力の研究開発課題の一つと言える。また、本技術の実現には、長期間にわたる広範囲な科学技術分野の横断的な連携が必要であり、より多くの若い研究者・技術者が活躍できるように人材育成の仕組みを強化する必要がある。
- 国は、原子力機構と連携し、若い世代の挑戦に応え得る環境を整備していくことが必要である。

VI. 引き続き検討が必要な事項

- 本技術を実用化する際には、将来に向けて、相当量のMAを取り扱える施設の整備が必須であり、引き続き、MAの調達を含めたMA取扱い施設の整備の在り方について、検討が必要である。
- 前述のように、J-PARCの核変換実験施設については、次のステージに向けて進むことが適当と考えるが、今後、施設整備計画の策定等に当たっては、前提となる成果の達成状況、運用・保守も含めた技術の実現性、規制等への対応に係る検討等、段階に応じて進捗状況をチェックすることが必要である。
- 群分離・核変換技術については長期の取組が必要なため、FPの核変換技術を含めた技術的進歩や全国的な推進体制の構築について、今後、広く検討することが重要である。
- また、加速器による研究開発についてアジア諸国と連携する可能性を模索するなど、国際協力のより一層の活性化に努めるべきである。
- ベルギーのMYRRHA計画への参画は、原子力機構だけでなく、大学や産業界も含めた国としての対応が重要であり、貢献に関する交渉の状況等について、適宜報告を受けることが必要である。
- 群分離・核変換技術評価作業部会としては、これらの進捗状況について、必要に応じて報告を受けるとともに、技術評価について、引き続き、調査、検

討を行っていく。

以上

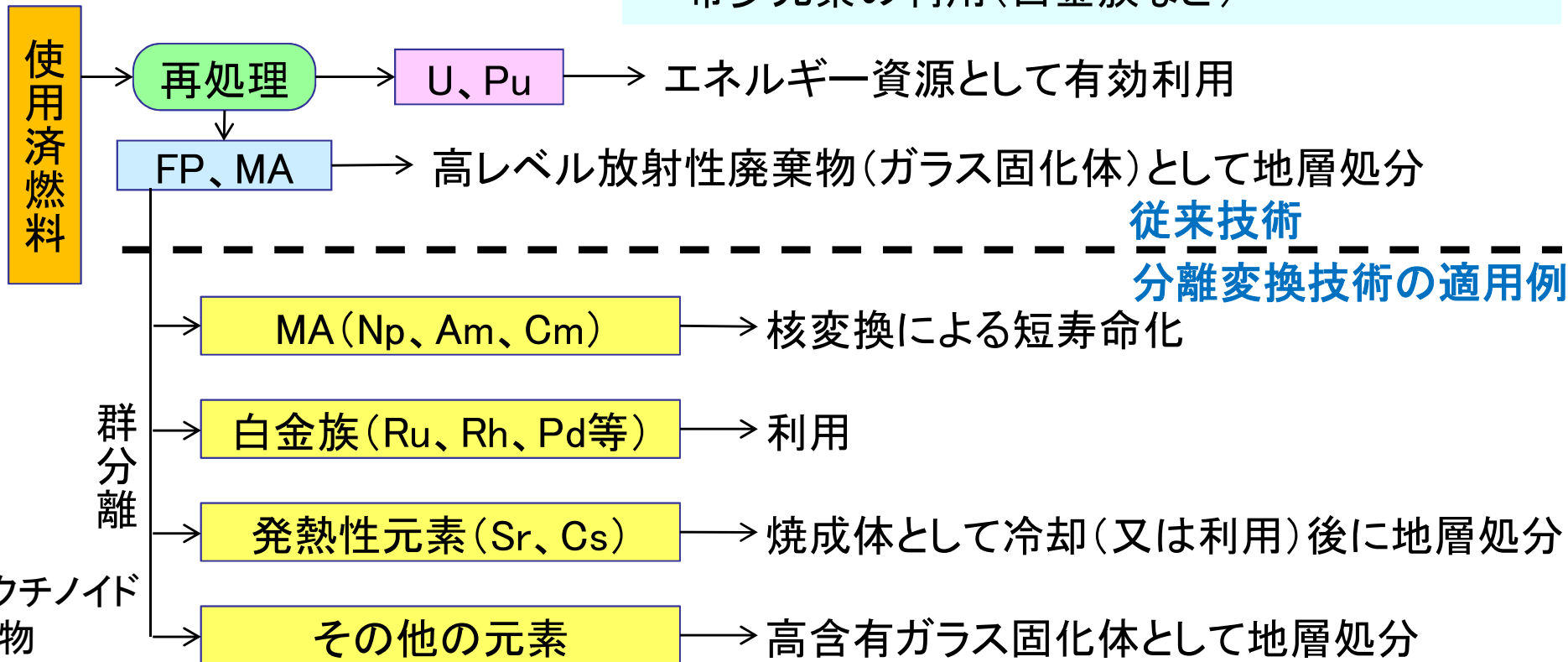
群分離・核変換技術とは

群分離・核変換技術(分離変換技術)

高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種を、その半減期や利用目的に応じて分離する(分離技術)とともに、長寿命核種を短寿命核種あるいは非放射性核種に変換する(変換技術)ための技術

目標

- ・長期リスクの低減:
廃棄物の潜在的有害度の総量を大幅に低減
- ・処分場の実効処分容量の増大:
発熱の大きい核種を除去してコンパクトに処分
- ・放射性廃棄物の一部資源化:
希少元素の利用(白金族など)



MA: マイナーアクチノイド
FP: 核分裂生成物

分離変換技術の導入効果

■ 長期リスクの低減

高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度の低減

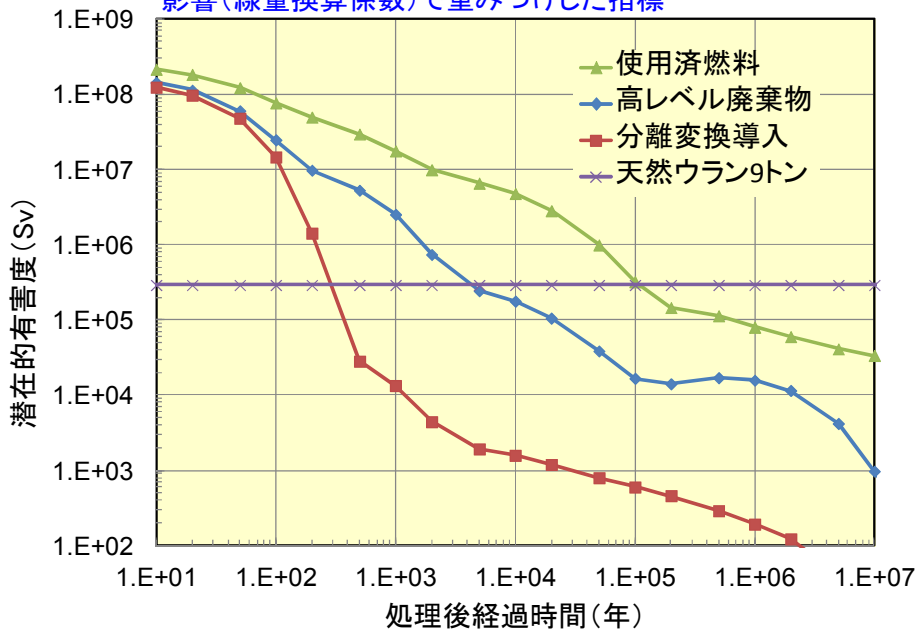
■ 地層処分場実効的な容量増大

MA核変換及び発熱性核種であるSr-Csの分離貯蔵の組み合わせにより集積処分が可能
(ただし、現存するガラス固化体や現行技術からのガラス固化体は従来通りの処分が必要)



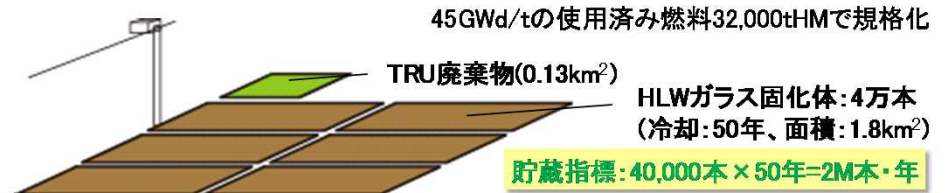
高レベル放射性廃棄物の地層処分の負担軽減

潜在的有害度：各放射性核種の人体への影響(線量換算係数)で重みづけした指標



燃焼度43GWD/t、5年冷却後の再処理でUとPuを99.5%除去。
分離変換ではさらにMAを99.5%除去

従来の地層処分



分離変換導入

MA核変換は超長期の潜在的有害度削減と長期発熱核種(Am-241)の除去に有効



さらに長期貯蔵

Sr-Cs焼成体: 5,100本 (冷却320年、面積: 0.005km²)



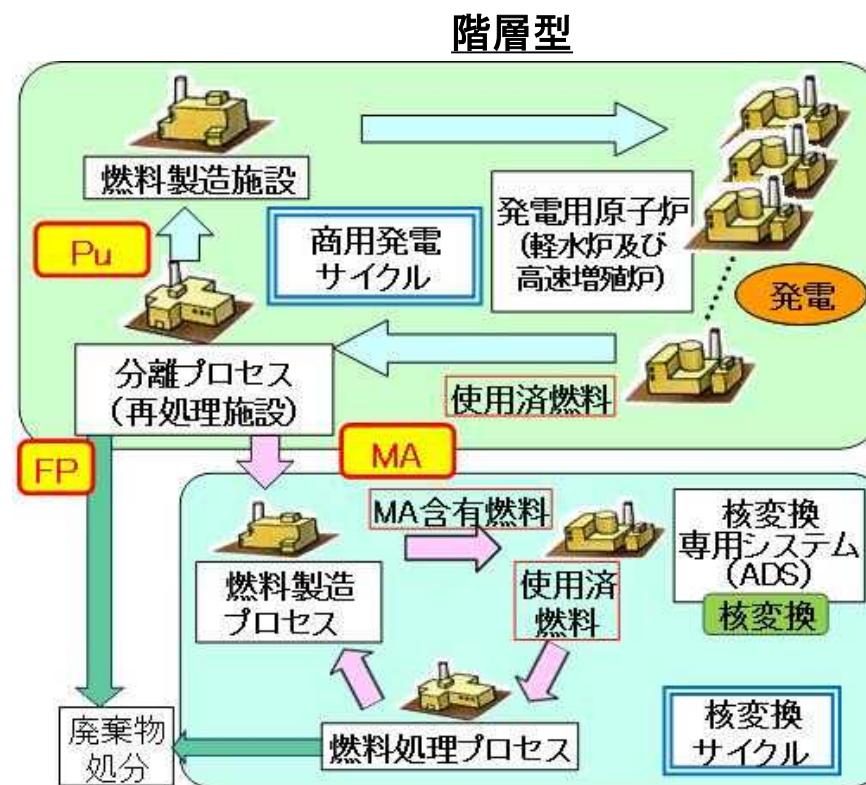
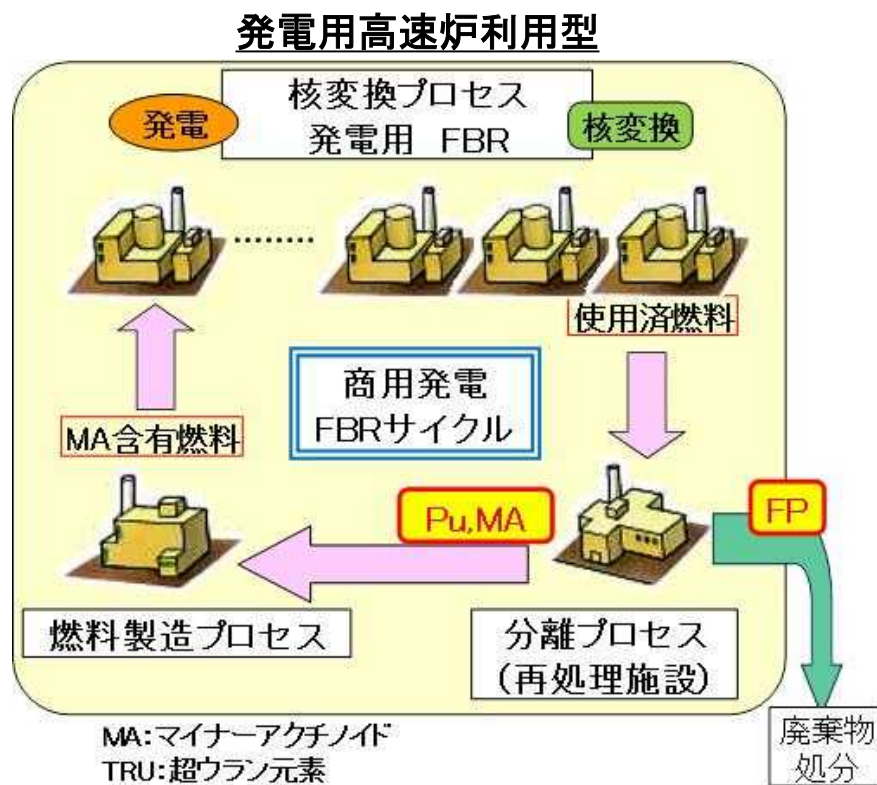
核変換技術

■ **核変換技術**: 使用済燃料中のMAを回収し、主に核分裂反応により短寿命核種に変換する技術

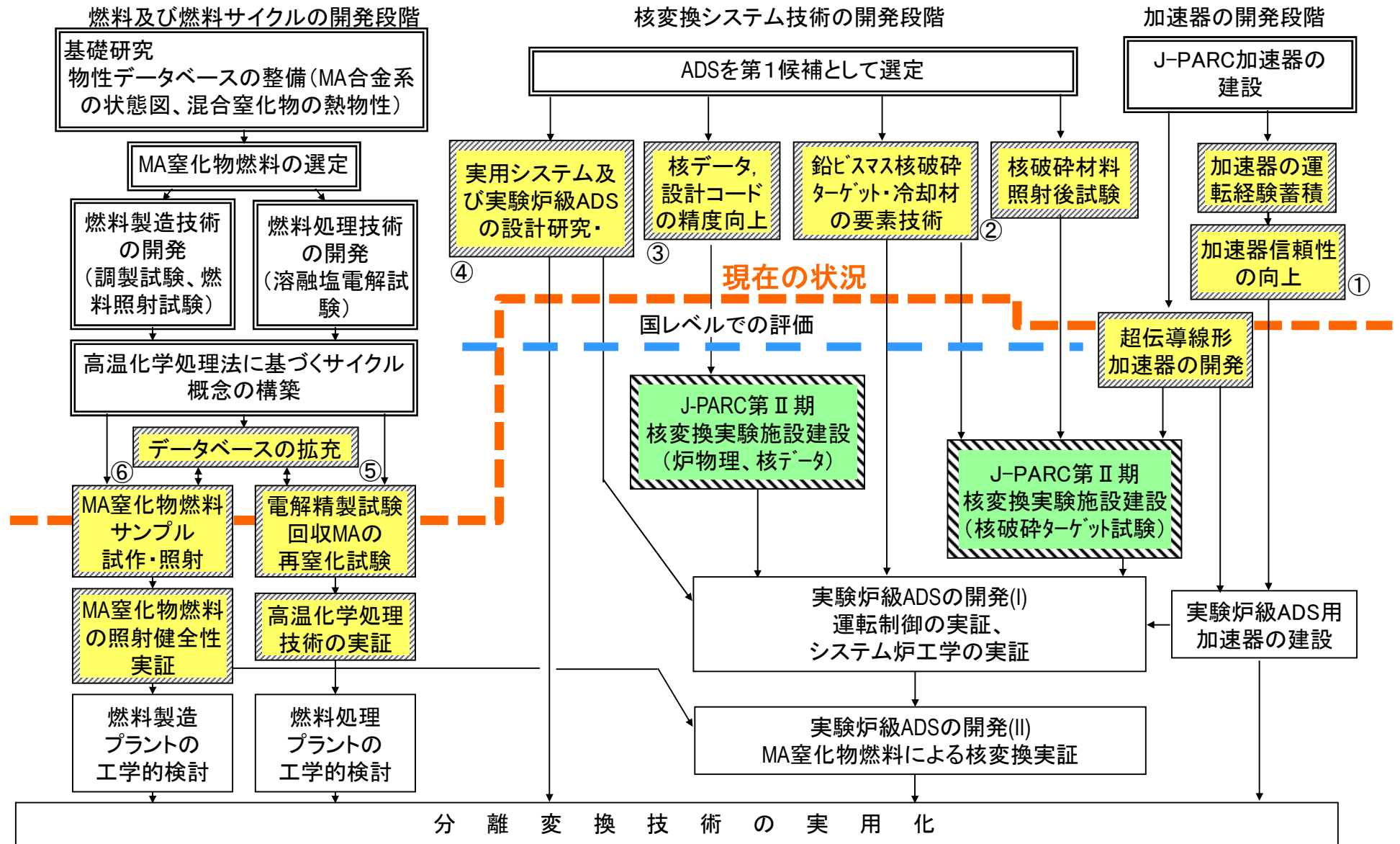
■ **主な核変換システム**

■ **発電用高速炉利用型**: 発電用高速炉(FBR・FR)における均質または非均質燃料によるリサイクルを目的として、発電用高速炉と一体的に研究開発を実施

■ **階層型**: 発電用サイクルから独立した、加速器駆動システム(ADS)を中心とした核変換専用サイクルを構成する階層型概念に基づく研究開発を実施



2. 平成21年原子力委員会C&Rで提示したロードマップと現状 (加速器駆動核変換システム関連)



ほぼ終了している部分
 今後10年間の中心部分
 国レベルでの評価を踏まえて進めていく部分

①～⑥: 次ページ対応状況の該当箇所

3. 平成21年原子力委員会分離変換技術検討会での指摘事項と対応状況

ADSの技術課題

原子力委員会分離変換技術検討会での指摘事項	対応状況
ADSが実現する時代に発電システムに要求される安全性、信頼性、経済性といった性能目標の達成を妨げない、もしくは達成に寄与できる加速器の性能・コストが実現していること	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ADS用加速器に求められる信頼性向上の方向性について、J-PARCリニアックの運転データから推定したデータを基にした検討を実施。【①】
ビーム窓の工学的成立性を確認すること	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ビーム窓の工学的成立性について、使用条件における外力、熱応力、除熱、腐食等の観点から検討し、成立の見込めるビーム窓の概念を提示。【②】
未臨界炉心の制御等の炉物理的課題を高い信頼度で解決すること	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 未臨界炉心の炉物理的課題解決に向けて、新たに評価されたJENDL-4.0及び誤差評価システムを基に核変換システムの核データ起因誤差を定量的に評価し、解析の不確かさを低減するために必要な炉物理実験を検討。【③】
Pb-Bi冷却炉の設計及び安全性を高い信頼度で確認すること	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pb-Bi冷却炉の安全性検討に資するため、レベル1PSA手法を用いて異常事象を系統的に整理。炉心損傷事故に至る可能性のある事象に対して、高速増殖炉等の安全解析コードを用いた動特性解析を実施。【④】
窒化物燃料の乾式再処理による燃料サイクルシステムの実用性を示すこと	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 窒化物燃料の乾式再処理に実用性提示に向けて、MAの基礎データベースの整備、窒化物燃料固有課題の陽極技術に関するプロセス原理の確認を実施し、周辺工程を含む実用的な乾式再処理プロセスフローを設計。【⑤】
所定の使用条件下での燃料性能及び高燃焼度を達成する窒化物燃料が製造できることを高い信頼度で確認すること	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 窒化物燃料の製造技術の実証に向けて、不活性母材含有MA窒化物ペレットの調製条件の確立、ADSの燃料設計に不可欠な熱物性と固溶度の評価式の開発等を実施。【⑥】

3. 平成21年原子力委員会分離変換技術検討会での指摘事項と対応状況（参考）

酸化物燃料FBRサイクル(MA均質サイクル)技術の重点課題

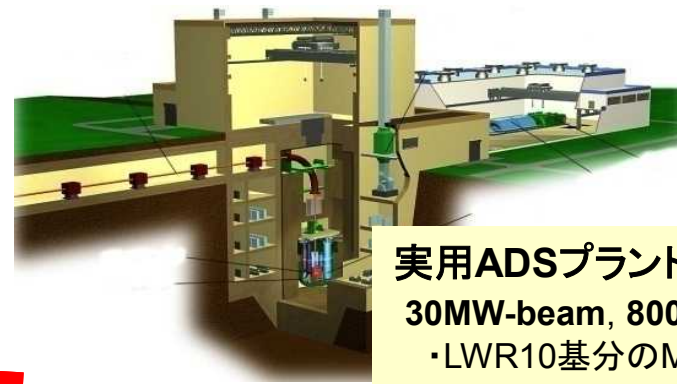
原子力委員会分離変換技術検討会での指摘事項	対応状況
高い信頼性を有する湿式分離法によるMA核種の分離回収システムを構築すること	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2つの湿式分離法(抽出クロマトグラフィ法と溶媒抽出法)を開発対象として、MA回収率及び除染係数の向上と発生廃液量低減を目指した抽出剤選定、フローシート構築を進め、湿式分離法の選定のための比較評価に必要なデータを取得中。
MA核種を含むMOX燃料をMA核種による強い発熱・高い線量に阻害されずに実用的に製造できるプロセスを構築すること	<ul style="list-style-type: none"> ➤ MA核種の発熱・線量の影響防止に有効な簡素化ペレット法の開発を進め、主な製造工程設備概念の開発・試験、転換工程からペレット焼結に至る一連の製造プロセスに対する小規模MOX試験等を実施するとともに、安定した燃料品質を得るためのMOX製造基盤技術開発を実施中。
炉心に対する安全要求を満足してMA核種を5%まで装荷できる炉心を実現すること	<ul style="list-style-type: none"> ➤ FaCTフェーズ1において、炉心に対する安全要求を概ね満足してMA核種を5%程度まで装荷できる炉心設計概念を構築したが、東京電力福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、シビアアクシデント対応も考慮した炉心に関する設計検討を実施中。
所定の使用条件の下で、高い燃焼度を高い信頼度で達成できる燃料が製造できること	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 長寿命被覆管材料の酸化物分散強化型鋼(ODS)被覆管について、世界に先駆けて実施した燃料照射試験の結果、素材の化学成分制御が品質安定性確保上重要であることが明らかとなったことから、製造方法を改良し、試作によりその有効性を確認。照射試験による最終確認を計画中。

施設概要と位置づけ:

ADS実用化に向けたロードマップ

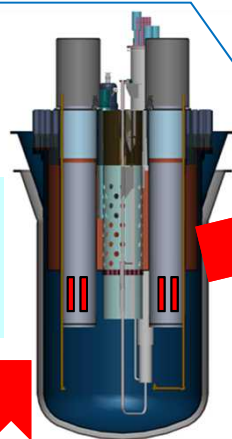
出力規模

MA燃料の無いADSの技術
(Pb-Bi炉心、加速器、運転経験)



実用ADSプラント
30MW-beam, 800MW_{th}
・LWR10基分のMA核変換

実験炉級ADS⇒MYRRHA
~2.4MW-beam, 50~100MW_{th}
・ADS技術の実証と燃料照射



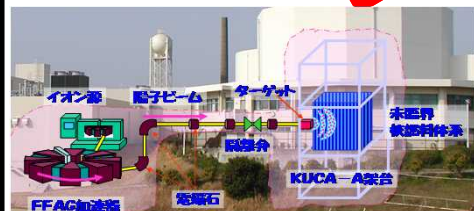
MA燃料の炉物理とターゲット材料開発

ビーム窓材料の高度化



	J-PARC核変換実験施設	ベルギー-MYRRHA
目的	要素技術開発 (ターゲット技術、物理)	照射試験、 未臨界炉運転経験蓄積
出力	陽子ビーム250kW 未臨界炉熱出力: 500W	陽子ビーム2.4MW 未臨界炉熱出力50~100MW
MA	大量に用いて 核変換システムを模擬	少量の照射試験のみ

J-PARC核変換実験施設
250kW-beam
・Pb-Biターゲット技術
・核変換の炉物理



ループ実験、KUCA実験などの基礎試験

・**J-PARCとMYRRHAが連携**し、世界における核変換技術の開発・実証・高度化を先導
・2030年代に実用規模へ展開できる知見・経験を得る

2010

2020

2030

2050

年

施設概要と位置づけ:

核変換実験施設 (TEF: Transmutation Experimental Facility)

核変換物理実験施設:TEF-P

目的： 低出力で未臨界炉心の物理的特性の探索と
ADSの運転制御経験を蓄積
施設区分： 原子炉（臨界実験施設）
陽子ビーム： 400MeV-10W
熱出力： 500W以下

ADSターゲット試験施設:TEF-T

目的： 大強度陽子ビームでの核破砕ターゲットの技術
開発及び材料の研究開発
施設区分： 放射線発生装置
陽子ビーム： 400MeV-250kW
ターゲット： 鉛・ビスマス合金

