

群分離・核変換技術評価について

(タスクフォースとりまとめ)

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

原子力研究開発・基盤・人材作業部会

群分離・核変換技術評価タスクフォース

令和3年12月

目次

はじめに	1
Ⅰ. 群分離・核変換技術の現況	2
Ⅱ. 群分離・核変換技術の研究開発の今後の進め方	6
Ⅲ. 引き続き検討が必要な事項	11
添付資料 1 群分離・核変換技術とは	13
添付資料 2 分離変換技術の導入効果	14
添付資料 3 核変換技術	15
添付資料 4 核変換専用サイクル型の MA 核変換（加速器駆動未臨界システムを用いた核変換）ADS : Accelerator Driven System	16
添付資料 5 ベルギー : MYRRHA 計画	17
添付資料 6 J-PARC における核変換実験施設計画	18
添付資料 7 P <i>S</i> i 計画について	19
添付資料 8 JAEA の第 3 期中長期目標・計画（平成 27 年度～令和 3 年度）	20
参考資料 1 群分離・核変換技術評価タスクフォース 構成員	21
参考資料 2 群分離・核変換技術評価タスクフォース 検討の経緯	22
参考資料 3 用語解説	23

はじめに

- 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。
- 群分離・核変換の対象は、マイナーアクチノイド(MA)及び核分裂生成物(FP)であるが、群分離・核変換による効果・効率及び技術レベルから、MAの群分離・核変換の実用化に重点を置いた研究開発が実施されている。
- また、群分離・核変換技術には、大きく分けて、高速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(Accelerator Driven System:ADS)を用いた「階層型」の2つがあり、日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構という)等において研究開発が進められている。
- 群分離・核変換技術については、内閣府原子力委員会が、研究開発専門部会分離変換技術検討会を設置し、群分離・核変換技術の研究開発の状況や効果、意義を整理し、研究開発の進め方等について、平成21年4月に「分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方」(以下、検討会報告書という)をとりまとめている。
- また、上記の報告書を踏まえ、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において、ADSを中心に群分離・核変換技術について検討し、平成25年11月に「群分離・核変換技術評価作業部会中間的な論点のとりまとめ」(以下、「中間とりまとめ」という)を行っている。
- 中間とりまとめでは、ADSは将来の様々な状況に柔軟に対応するための有望な技術選択肢であると指摘し、今後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を検討し、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、「発電用高速炉利用型」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効果を比較することとしている。
- さらに、ADSの研究開発については、実験室レベルの段階から、工学規模の段階に移行することが可能な研究開発段階にあるとし、大強度陽子加速器施設「J-PARC」の核変換実験施設の整備を開始することへの期待を示した。
- これを踏まえ、原子力機構の第3期中長期目標・計画(平成27年度～令和3年度)においても核変換実験施設の建設着手を目指すことが明記されている。
- 令和4年度からの新たな原子力機構の中長期目標・計画策定にあたり核変換実験施設の再評価等が必要なことも踏まえ、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 原子力研究開発・基盤・人材作業部

会の下に群分離・核変換技術評価タスクフォースを設置した。

- 本タスクフォースでは、ADS を中心とした群分離・核変換技術について、我が国の現在の技術レベル、国際的な研究開発の状況、関連分野の技術の進展や産業界の動向等を踏まえ、必要な研究開発について検討を行い、報告書としてとりまとめた。

I. 群分離・核変換技術の現況

1. 政策的な位置付け

- 群分離・核変換技術の政策的な位置付けについては、中間とりまとめ策定時から大きな変化はない。
- 平成 26 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」では、「国及び関係研究機関は、幅広い選択肢を確保する観点から、使用済燃料の直接処分その他の処分方法に関する調査研究を推進するものとする。また、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着実に推進する」と記述されている。
- 令和 3 年 10 月にまとめられた「第 6 次エネルギー基本計画」においては、「高速炉や、加速器を用いた核種変換など、放射性廃棄物中に長期に残留する放射線量を少なくし、放射性廃棄物の処理・処分の安全性を高める技術等の開発を国際的な人的ネットワークを活用しつつ推進する」との方針が示されている。
- また、第 6 次エネルギー基本計画の議論では、2050 年カーボンニュートラル達成に向け、原子力・CO₂ 回収前提の火力発電で 30～40%程度の発電を参考値として示しつつ、様々な課題があり、2050 年に向けて複数のシナリオを検討する必要性を指摘している。
- 高速炉開発については、平成 28 年 12 月の「高速炉開発の方針」（原子力関係閣僚会議）において、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減や資源の有効利用等の観点から、核燃料サイクルの推進を基本的方針とし、高速炉開発に取り組むことが確認され、これにもとづき平成 30 年に策定された「戦略ロードマップ」では、10 年程度の開発作業を特定するとともに、「例えば 21 世紀半ば頃の適切なタイミングにおいて・・・現実的なスケールの高速炉が運転開始されることが期待される」、「高速炉の本格利用が期待されるタイミングは 21 世紀後半のいずれかのタイミングとなる可能性がある」としている。

2. 海外の動向

- 諸外国においても、群分離・核変換関連技術については、放射性廃棄物の深

地層処分の負担軽減、あるいは、代替となり得る技術として研究開発が進められている。

- 中間とりまとめにおいて今後の研究開発協力の必要性が指摘されたベルギーの照射試験用 ADS である MYRRHA については建設が進んでいるほか、中国やウクライナ、ロシアにおいても ADS やその関連技術の研究開発が実施されている。
- ベルギーの MYRRHA 計画は、ベルギー原子力研究センター(SCK CEN)が中心となって進める ADS による多目的照射炉プロジェクトであり、2018 年 9 月にベルギー政府がプロジェクトの前段部分について 5 億 5800 万ユーロの支出を決定、2026 年に 100MeV までの加速器の運転を開始する予定である。
- また、OECD/NEA では、2021 年に廃棄物の処理技術に関して工業化に向けた研究開発課題を検討するタスクフォースとして、TF-FCPT(Task Force on Demonstration of Fuel Cycle Closure including Partitioning and Transmutation (P&T) for Industrial Readiness by 2050)を立ち上げ、2022 年度末までに、各国の既存研究のレビュー、技術成熟度レベル (TRL) の整理と必要な研究開発、2050 年工業化までの長期ビジョンと 2030 年までに優先的に実施すべき活動の提示、経済性評価等を取りまとめた報告書を作成する予定である。

3. 研究開発の進捗状況

- 原子力委員会の検討会報告書では、「発電用高速炉利用型」、「階層型」のそれぞれについて、複数の技術課題を示しており、中間とりまとめでは、技術課題毎に進捗の評価や今後の進め方の提示がなされた。
- 要素技術の開発については着実に進められており、個別の項目についての現時点での原子力機構における進捗状況については、以下のとおりである。

【群分離】

- 原子力委員会の検討会報告書においては「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べきである」等と評価された。
- 群分離・核変換技術評価作業部会の中間とりまとめでは、「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」等と指摘された。
- MA 分離の候補技術として、原子力機構では、溶媒抽出法と抽出クロマトグラフィの研究開発を進め、どちらも主工程については小規模実廃液試験まで実

施し、いずれもグラムスケールでの MA 回収に成功しており、国際的にも我が国の技術は高いレベルにあると評価できる。

- 具体的には、溶媒抽出法では画期的な抽出剤開発に成功するとともに分離プロセス構築まで実施し、二次廃棄物の発生量が低い MA 分離プロセスを開発、実廃液試験によって約 0.3 g の MA を回収して技術的成立性を示した。
- 抽出クロマトグラフィでは、実廃液試験により約 2 g の MA を回収することに成功するとともに、溶媒抽出法における新規抽出剤の成果を反映した分離フローシートの検討やカラム内の安全評価を実施した。

【ADS】

- 原子力委員会の検討会報告書においては「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」、「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」等が技術課題であると評価された。
- 群分離・核変換技術評価作業部会の中間とりまとめでは、「陽子ビーム窓の成立性の検証に向け、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」、「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 の核変換実験施設の下、TEF-P が提案・・・次のステージに移行することが適当」、「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、・・・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」と指摘されている。
- 加速器の開発については、信頼性・経済性向上のため、高エネルギー一部に加え低エネルギー部まで超伝導化した線形加速器を設計し、加速空洞を試作するとともに、J-PARC の加速器（常伝導）では、ビームトリップの頻度が ADS にとって過大であることを明らかにした。
- ビーム窓の工学的成立性については、陽子ビーム入射部の粒子輸送、熱流動、構造を統合して解析するシステムを構築し、これを用いた解析を行い、この結果を踏まえたビーム窓設計を実施した。また、既存の照射場を用いて、ビーム窓材料の照射特性を予測する試験を実施している。
- 炉物理的課題については、米国との連携等により、既存の臨界実験装置を用いた炉物理実験を実施し、未臨界度監視手法の開発や核データの精度の検証を行った。
- Pb-Bi 冷却炉の開発については、未臨界度調整により未臨界度の変化を最小

化し、加速器・ビーム窓設計条件を緩和するとともに、自然循環を用いた崩壊熱除去により、受動的な安全性を向上するなどの概念検討を実施した。また、大型の Pb-Bi 試験ループの運転を通じて、Pb-Bi を安全に利用するための技術及び腐食抑制技術の開発を進めた。

- 炉物理及びビーム窓分野の開発に必要な核変換実験施設 (TEF) については、TEF-P (核変換物理実験施設) および TEF-T (ADS ターゲット試験施設) 両施設について、建設着手に必要な研究開発や施設設計を実施し、建設着手の準備を整えた。

【燃料サイクル及び燃料】

- 原子力委員会の検討会報告書においては、「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」、「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」等が技術課題として掲示された。
- 群分離・核変換技術評価作業部会の中間とりまとめでは、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を進めること等が指摘されるとともに、乾式再処理については海外も含めた他機関と協力しつつ更なる開発を進める必要性が示されている。
- 窒化物燃料については、MA 含有燃料の物性データを測定し、燃料ふるまいコードへ反映するとともに、MA 含有窒化物燃料の製造技術開発を実施した。
- 乾式再処理については、再処理プロセス目標 (99.9%回収、希土類元素 (RE) 濃度 5%以下) を満たすプロセスフローを提示するとともに、各工程のコード試験を実施した。

4. 計算科学技術の進展

- 計算科学技術を用いた研究手法は、多くの分野で実験、理論と並ぶ重要な方法となっている。近年では、コンピュータの計算能力の飛躍的な向上に加え、複合現象をモデル化しデジタル空間に再現するデジタルツインなどシミュレーション技術の高度化、人工知能 (AI) の活用などデータの解析手法の多様化が進んでいる。
- 原子力分野においても、高額な経費を要する工学規模の実証試験や実験的に直接検証することが困難な事象の数値シミュレーションでの代替が進められるなど計算科学技術の活用が進んでいる。
- 例えば、原子炉の設計や安全性の検証においては、炉内の核・熱・流動現象を詳細に模擬したマルチフィジックス統合解析技術の活用が始まっている。
- また、燃料サイクル施設についても、近年発達した数値流体力学シミュレー

ション等を活用し、工学規模の実証試験を縮小あるいは省略して実機設計に進む可能性を検討している国もある。

II. 群分離・核変換技術の研究開発の今後の進め方

1. 今後の研究開発の方向性

- 高レベル放射性廃棄物の処理・処分の社会的負担を軽減するため、廃棄物の減容・有害度低減を進めることは重要であり、我が国においても群分離・核変換技術の確立に向けた研究開発は引き続き着実に進めるべきである。
- 研究開発を実施するうえでは原子力システムの今後について様々なシナリオを考慮することが必要であり、ADSによる「階層型」サイクル概念は、引き続き、技術選択肢の一つであり、今後も国内外の機関と連携・協力しつつ、着実に技術の確立を進めるべきである。
- 具体的には、原子力機構の次期中長期目標期間中には、国内外の既存施設を最大限活用して、原理実証（実験室規模、準工学規模）に必要な課題（TRL4～6に相当）に対応した研究開発を実施する。特に、性能実証段階（工学規模、TRL7以上）に引き上げるための課題の特定や、技術の絞り込みを判断するために必要な知見、データの取得を進めることが適当である。
- 研究開発手法について、様々な工学分野においてシミュレーション等の計算科学技術の活用による研究開発の効率化・迅速化が進んでいることを踏まえ、群分離・核変換技術に関しても、最新の計算科学技術を取り込んだ研究開発を積極的に進め、研究開発成果の最大化を図る必要がある。
- また、計算科学技術の結果を実際に応用していくためには、シミュレーション結果と実現象との乖離を実験データの活用により埋めるデータ同化が不可欠であり、このための新たな実験方法、計測器の開発等にも取り組むべきである。
- 国際協力については、海外研究機関（特に MYRRHA 計画による ADS 実験炉の建設を目指すベルギー SCK CEN）との研究協力を引き続き積極的に進めていくべきであり、現在検討中の OECD/NEA の廃棄物処理技術に関する検討も踏まえつつ、日本が先行する技術については国際的な貢献を行うことが望ましい。

2. 重点的に取り組むべき研究開発項目

- 前段の研究開発の方向性に従い、次期中長期計画期間中に実施すべき内容を以下のとおり分野毎に示す。

【群分離】

- MA 分離に係る研究開発については、「発電用高速炉利用型」サイクル概念と ADS による「階層型」サイクル概念の共通の研究開発課題であり、また、分離については核変換より先に導入が進むことが想定され、我が国の技術による国際的な貢献という観点からも、着実に研究開発を推進すべきである。
- これまでに小規模実液試験により原理実証が行われたが、今後、実機の成立性の検討を実施するにあたっては、実スケールへの拡大の課題を整理するとともに、数値シミュレーションや既往プラントの経験の活用、小規模試験の拡充とデータ同化による工学規模試験の代替の可能性を検討することが重要である。また、この過程で、溶媒抽出法と抽出クロマトグラフィのどちらを選択するかの評価を進めることが重要である。
- 現在、99.9%としている MA 回収率については、実スケールを検討する過程において、ガラス固化体本数や処分場面積の低減化への効果、分離プロセスで発生する二次廃棄物量等を評価した上で適切な回収率を設定することが求められる。
- また、MA 分離の研究開発は、再処理研究の一環として研究開発を実施し、大学や再処理・廃棄物処理施設の開発・運用に経験のある国内外プラントメーカー等との連携・協力を積極的に推進することが重要である。

【ADS】

- 多くのリソースが必要な施設建設に代わって、合理的かつ効率的に研究開発を進めるために、既存の施設を有効活用しながら、計算科学などの最新の技術・知見を活用した研究開発計画として、原子力機構が提案している P*S*i 計画 (Proton accelerator-driven Subcritical virtual system) を進めることは妥当である。
- 具体的には、ADS 概念検討において、成立性に大きく関わるビーム窓等の ADS 機器について解析の詳細化・高度化（核・熱・構造を連成させた詳細解析やビーム窓材料の照射損傷モデルの構築等）を進める必要がある。
- 炉物理・核データ分野では、運転時等の未臨界度監視概念を確立するとともに、ADS 核設計の信頼性向上を目的とした核データの測定および検証実験のデータベース化を進める必要がある。
- Pb-Bi 熱流動・材料の分野では、既存の Pb-Bi ループを用いて計測や制御技術の開発を進めるとともに、国内外の施設を活用してビーム窓候補材の照射試験を実施し、照射損傷解析モデル構築を進める必要がある。
- 加速器開発では、ADS 用超伝導加速器開発を継続するとともに、ビームトリップ低減策の検討を進める必要がある。

- 上記の成果等を活用し、柔軟性や経済性の観点を考慮し、高速炉との比較や ADS 導入シナリオ検討が可能な実現性の高い ADS の概念を提案することが求められる。
- 概念の検討にあたっては、福島第一原子力発電所の事故後の安全設計思想の深化を踏まえた議論を十分に行い、深層防護の実装、過酷事故対策、外部事象対策（特に耐震設計）の検討を行い、基本的な安全設計思想を確立する必要がある。
- また、初号機の熱出力などの目標値は、段階的で現実的な実用化が進められるように適切な設定をする必要がある。

【燃料サイクル及び燃料】

- MA 含有燃料の製造については、高線量環境を踏まえた遠隔での燃料製造の観点から、成立性について十分な検討を行うことが必要となる。
- 固溶型燃料に関して、燃焼のふるまい解析の精度向上には照射試験が必須であるため、照射試験用燃料の作製に着手するとともに、燃料製造技術については MA 等を用いた実証試験を目指した研究開発を進める必要がある。
- また、遠隔での操作性の観点から、粒子分散型燃料の検討は重要であるため、そのふるまい解析を行うとともに、燃料設計と ADS 炉心性能への影響についても評価しておくことが望ましい。
- 乾式再処理については、使用済 MA 含有窒化物燃料を模擬した試料を用いて、アクチノイドを分離回収する技術の原理実証を目指し、要素技術試験を継続する必要がある。
- また、乾式再処理については金属燃料高速炉等にも必要な技術であり、類似プロセスが実現している米国アイダホ国立研究所の事例を参考に実スケール化の課題について検討することや、一般財団法人電力中央研究所等と連携するなど研究開発体制の確保を図っていくことが重要である。

3. J-PARC 核変換実験施設の在り方

- TEF-P、TEF-T による実験については、PSi 計画により、計算機シミュレーションの高度化や既存施設の活用を進めることで代替を目指す。既存施設における実験で十分な信頼性や精度が得られるのか、また、実験データを用いたデータ同化手法等について十分に検討する必要がある。
- 具体的には、TEF-T で予定していた陽子照射下、かつ高温 Pb-Bi 流動環境下におけるビーム窓材料の実証試験は、照射損傷シミュレーションと既存施設での照射試験だけでは代替困難である可能性が高く、上記の取り組みによる実験項目の絞り込みや施設の合理化を検討する必要がある。

- また、TEF-P で予定していた未臨界炉心の物理的特性試験も、既存施設やシミュレーションのみでは代替困難と考えられるが、使用を想定していた原子力機構保有の核燃料の一部（高濃縮ウラン、プルトニウム）が米国へ移送されたため、TEF-P で実施予定であった炉物理研究項目が大幅に制限される。
- このため、TEF-T の機能を優先した試験施設として検討することが妥当である。
- 検討にあたっては、PSi 計画による実験項目の絞り込みや国際協力による役割分担も含めた合理的な研究開発の進め方に留意するとともに、施設に求められる役割を確認し、施設概念の構築を進めることが必要である。
- また、ADS の工学的課題解決に加え、多様なニーズへの対応の可能性を含め、既存の J-PARC の陽子加速器を利用可能な利点を最大限活用する施設仕様を検討することが望ましい。

4. 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ため、群分離・核変換技術評価作業部会の間とりまとめでは、原子力機構におけるロードマップが示された。ロードマップは研究開発の全体像を示すものであることから、適時に更新し、公表すべきである。
- 本タスクフォースでは、上述の研究開発の進め方を踏まえたものとして、原子力機構より図1のとおり更新されたロードマップが示された。
- 本ロードマップについては必要な研究開発が網羅されているが、今後、クリティカルパスの特定や優先順位を研究開発状況に応じて設定していく必要があり、原子力機構において、外部有識者から意見を聞きつつ、検討することが求められる。

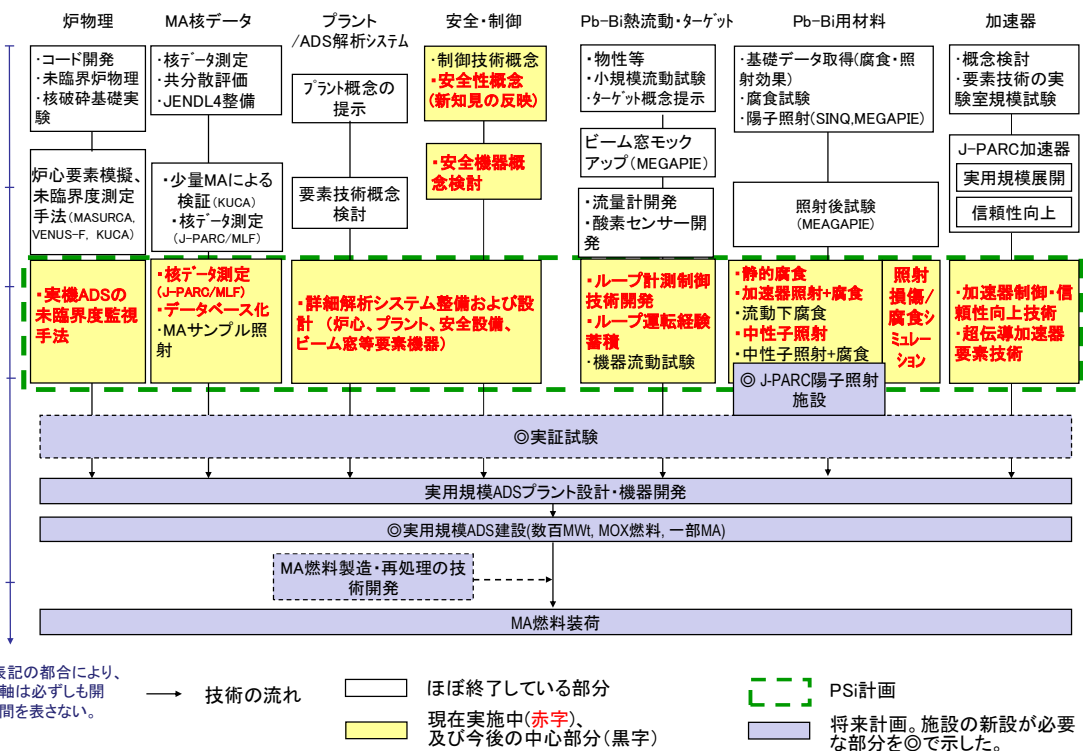
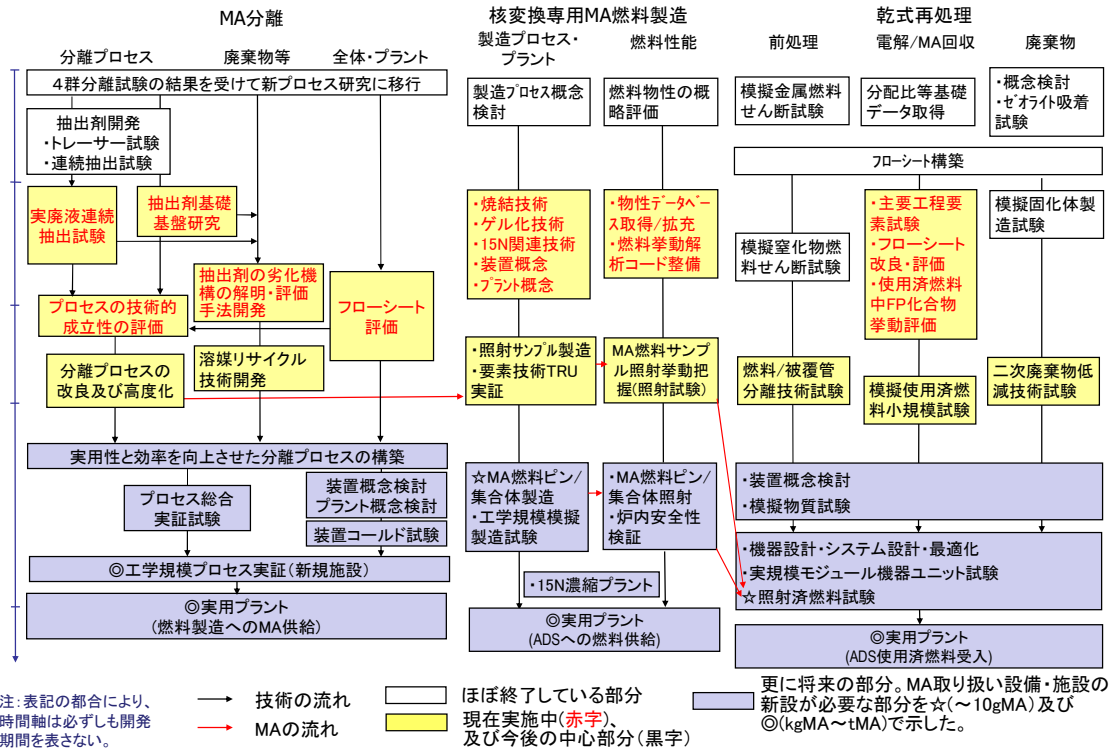


図1 群分離・核変換技術研究開発ロードマップ(タスクフォース見直し版)

5. 基礎基盤研究の充実

- 群分離・核変換技術については、原子力機構や大学等において基礎基盤的な研究開発が継続して実施されており、量子ウォークによる同位体分離技術や小型円形加速器開発など新たな手法やコンセプトにつながる日本発の成果も創出されている。今後も基礎基盤研究を充実していくことが必要である。
- 群分離・核変換の実用化に向けては様々な可能性を検討する必要があることから、新たなアイデアが創出され続けるとともに、技術の実現性が適時に検証できる環境を醸成することが不可欠である。
- そのためには、今後は、群分離・核変換研究者以外の原子力分野の研究者の知見の活用を積極的に図っていくことや異分野融合を促進していくことが重要である。

Ⅲ. 引き続き検討が必要な事項

- 今後、将来の原子力システムの見通しが示されていく過程では、ADS 導入のシナリオについても開発、実運用コストを含めて明確化し、これらを踏まえ、研究開発の方向性も再検討する必要がある。本タスクフォースの議論では、軽水炉の活用が比較的長く続くシナリオも考えられ、MA 核変換における ADS の重要性は増加しているとの意見があった。一方で、限られた予算の中で効率的・効果的に原子力に係る研究開発を進めるという観点から「発電用高速炉利用型」と「階層型」との比較検討を行い、今後実用化に向けてリソースを投下していく概念を選定すべきとの意見もあった。今後、大規模な研究開発投資を行う際には、高速炉との比較も含め ADS の開発意義を定量的に示していく必要がある。
- なお、将来の原子力システムの在り方や技術の進展によっては、MA に加えて FP やプルトニウムを核変換の対象とすることや、MA 等の燃焼を主な目的とする高速炉の概念を検討することも考えられる。
- また、本タスクフォースでは ADS に関する直近（7年間程度）の研究開発の方向性を中心に議論を行ったが、今後、将来の再処理シナリオについて定量的なデータに基づき検討し、これを踏まえた群分離・核変換全体の研究開発の在り方を示していくことが求められる。
- 群分離・核変換についても実用化にあたっては、産業界を中心に開発を進める必要があるため、産業界の研究開発への参画を進め、次のステップである性能実証・工学規模試験をどのように進めるかについても関係者との議論や意見交換を進めていくことや実用化のための研究開発マネジメントの在り方も検討しておくことが望ましい。
- さらに、高レベル放射性廃棄物の処分方法については、最終的にはメリット

やデメリットを踏まえ、国として判断するものであることから、群分離・核変換技術について、社会一般の理解が得られるよう理解増進活動も着実に実施すべきである。

以上