

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 (案))

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 年〇月

## 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・CO<sub>2</sub> 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中間とりまとめでは、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。

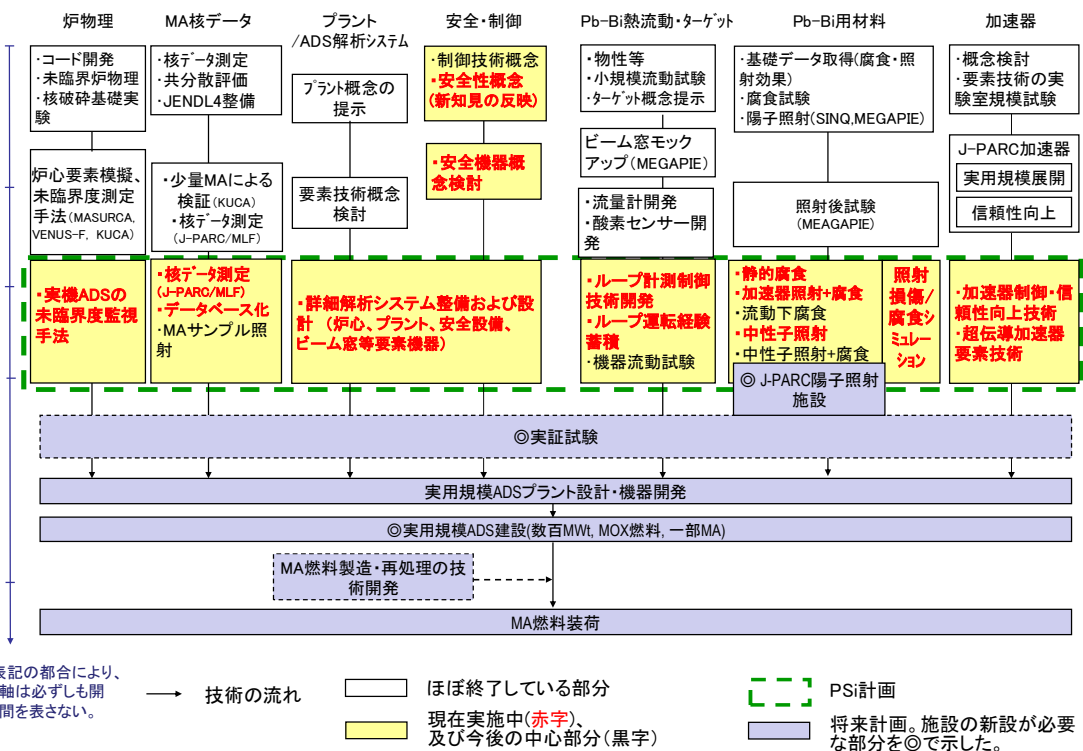
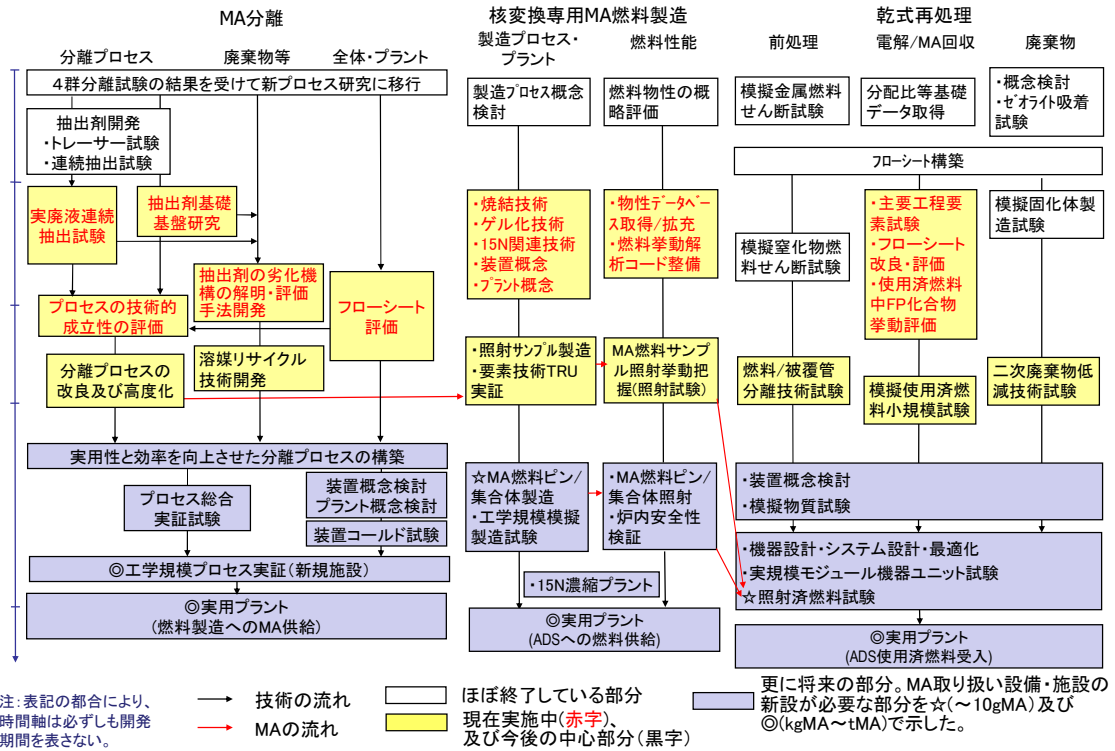


図1 群分離・核変換技術研究開発ロードマップ(タスクフォース見直し版)

## 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。

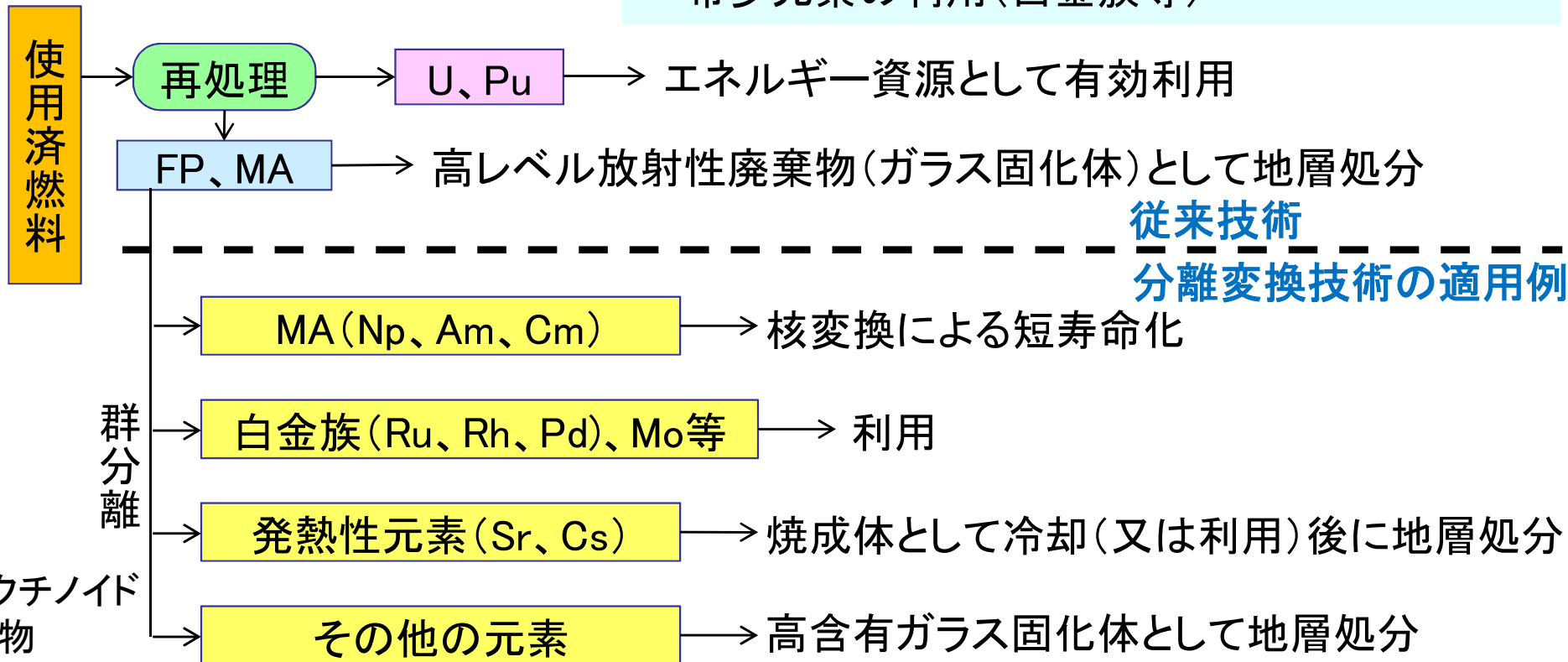
# 群分離・核変換技術とは

## 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(白金族等)



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

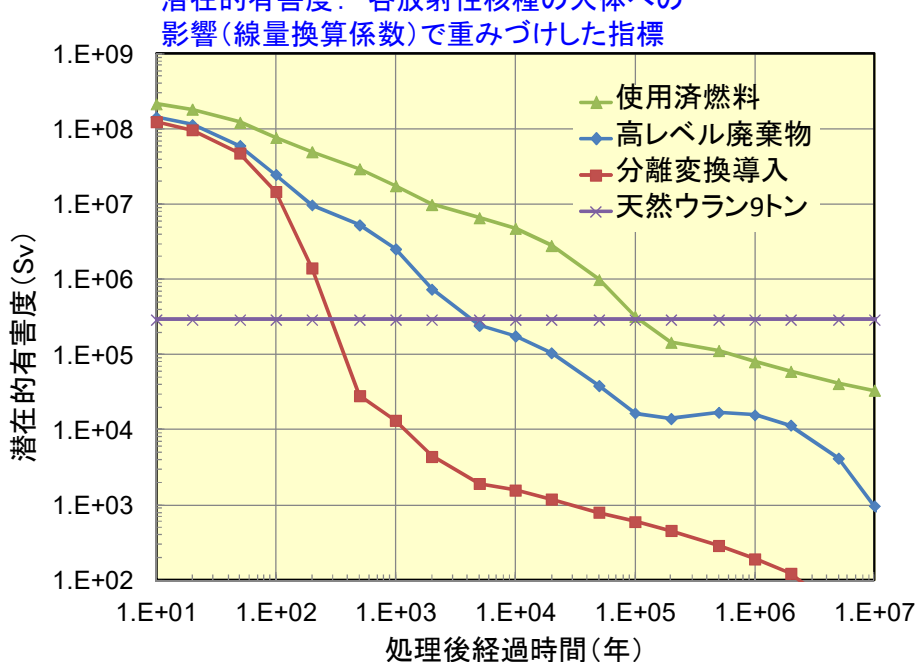
## ■ 地層処分場実効的な容量増大

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)



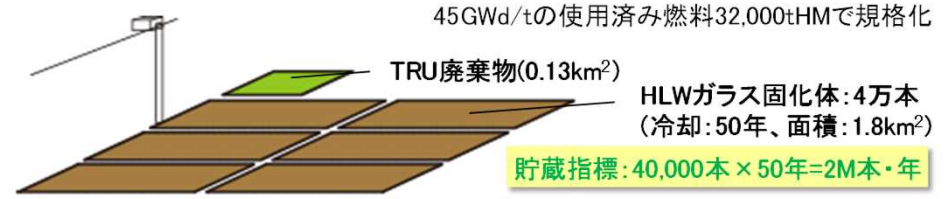
### 高レベル放射性廃棄物の地層処分の負担軽減

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

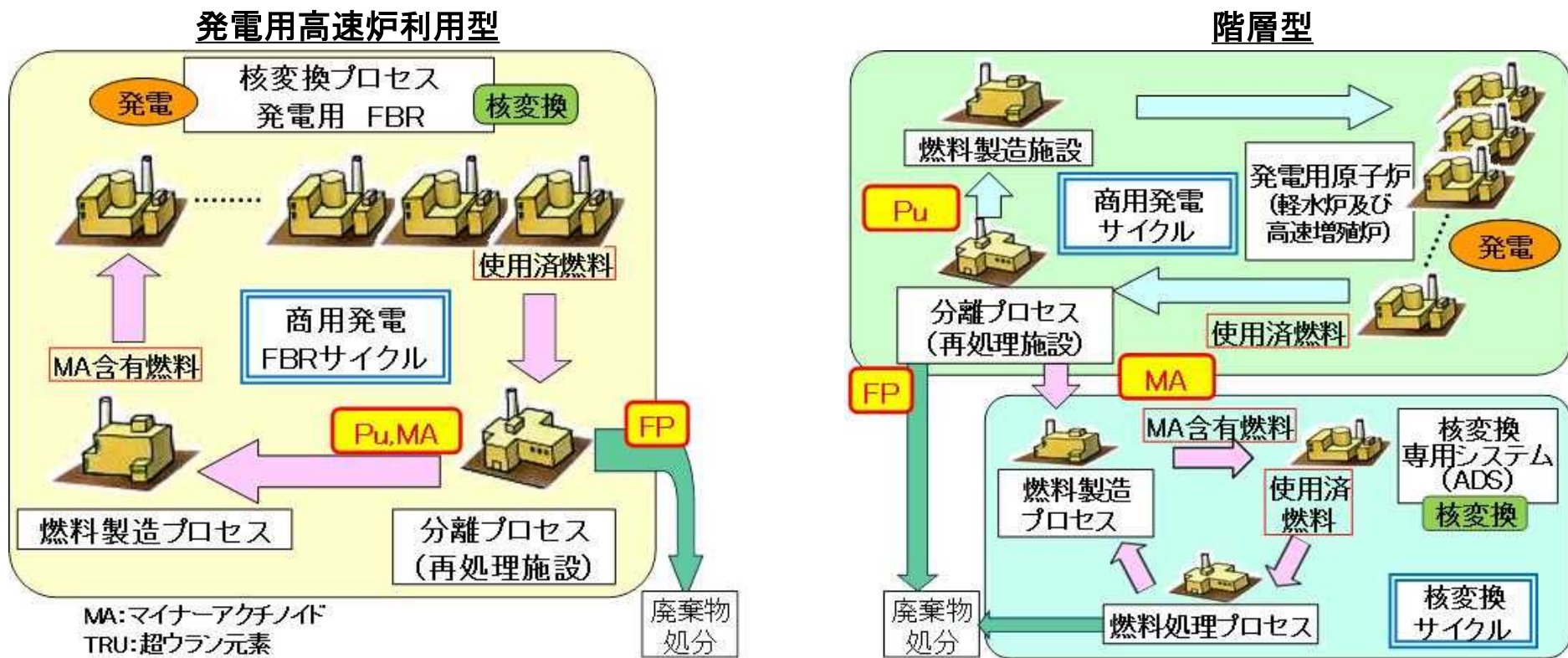
Sr-Cs焼成体: 5,100本  
(冷却320年、面積: 0.005km<sup>2</sup>)





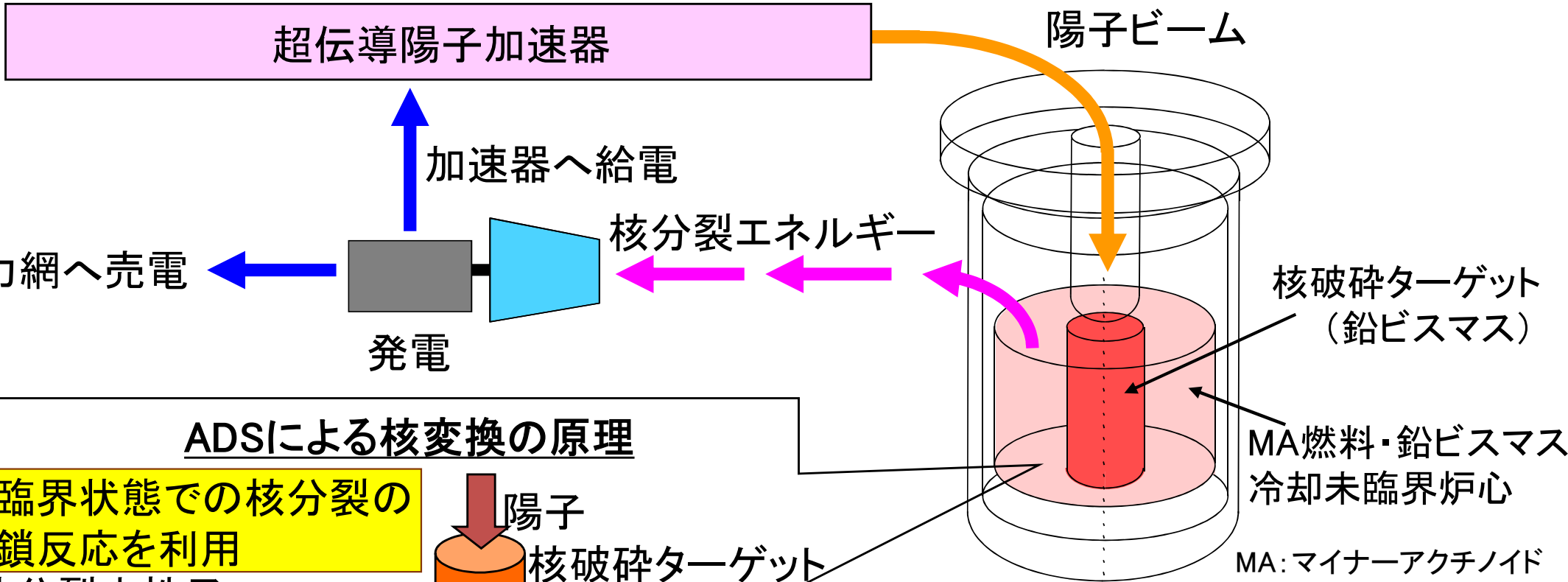
# 核変換技術

- **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



# 核変換専用サイクル型のMA核変換

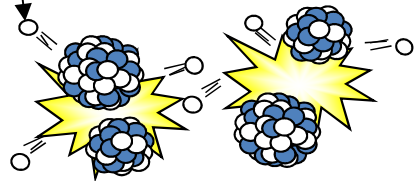
(加速器駆動未臨界システムを用いた核変換) **ADS: Accelerator Driven System**



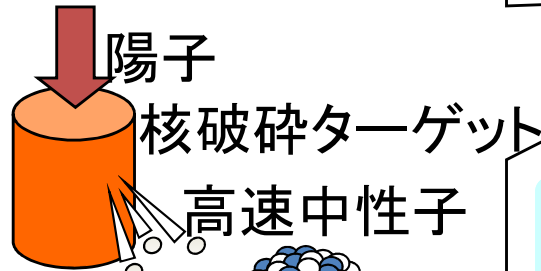
## ADSによる核変換の原理

未臨界状態での核分裂の連鎖反応を利用

核分裂中性子



短寿命の核種



長寿命の核種

## ADSの特徴:

- ・加速器を止めれば連鎖反応は停止  
→ 核反応の暴走の心配が無い。
- ・MA濃度の高い燃料が使用可能
- ・Pb-Biは化学的に不活性。

# ベルギー: MYRRHA計画

## □ SCK・CEN が中心となって進める ADS による多目的照射炉

- 加速器: 陽子Linac, 600 MeV, 2.4 ~ 4 mA (max. 2.4 MW)
- ターゲット: 鉛ビスマス共晶合金 (LBE)
- 炉心: 65 ~ 100 MW<sub>th</sub>, MOX,  $k_{\text{eff}} = 0.95$ , LBE冷却
- 目的: 材料照射, ADS実証, 核変換研究, LFR開発, 医療用RI製造



The MYRRHA reactor

- プロジェクト全体を Phase 1 ~ 3 に分割。**2018年9月に、ベルギー政府が558M€の支出を決定(100MeVまでの加速器建設・運転費とR&D費)**
- 2024年に Phase 1 の達成状況を評価し、Phase 2(加速器を600MeVに増強)及び Phase 3(炉心建設)に進むかどうかを判断。

2019

Phase-1 (100 MeV加速器+陽子ターゲット施設) (287 M€)

2026 2027

運転 (156 M€)

2038

Phase-2 (加速器600 MeV増強), Phase-3 (未臨界炉心) のための設計と R&D (115 M€)

▲Phase-2+3 建設許可取得

# J-PARCにおける核変換実験施設計画

## 核変換物理実験施設:TEF-P

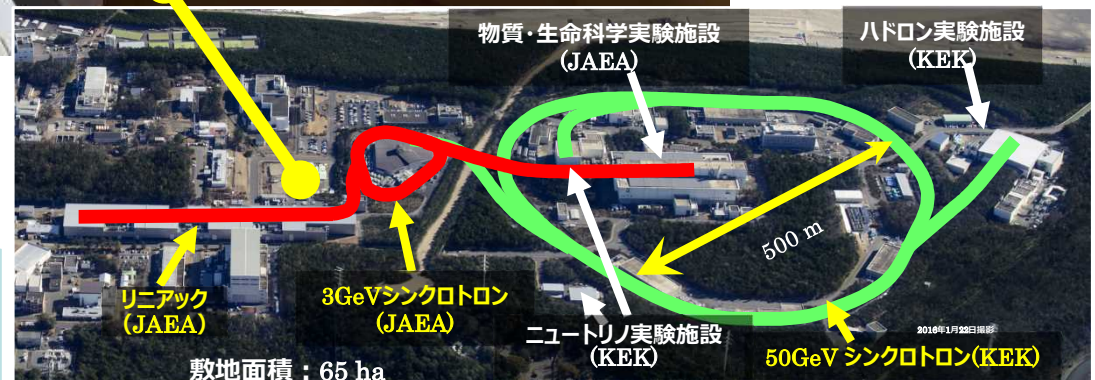
目的： 低出力で未臨界炉心の物理的特性探索とADSの運転制御経験を蓄積  
 施設区分： 原子炉（臨界実験装置）  
 陽子ビーム： 400MeV-10W  
 熱出力： 500W以下

## 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 (LBE)



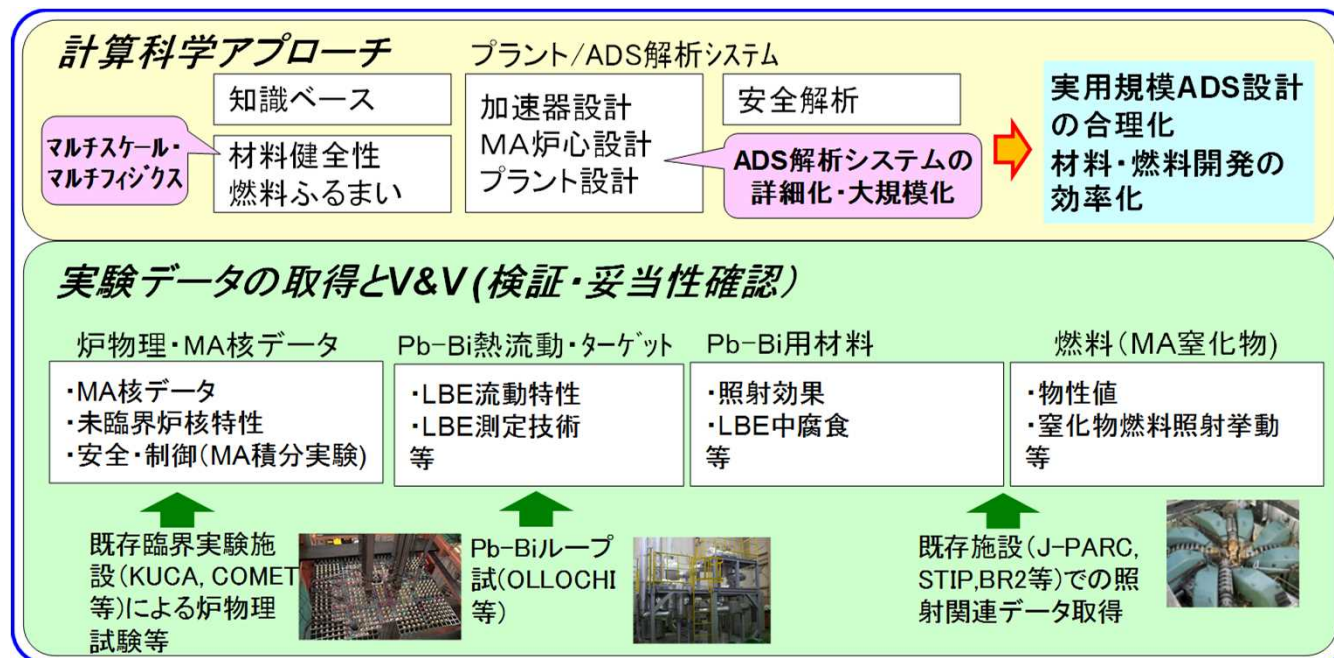
大強度陽子加速器施設  
(J-PARC, 茨城県東海村)



# PSi計画について

- 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、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(PSi計画)**を検討した。
- 新たな**PSi計画**では、**計算科学技術を活用した新たな計算シミュレーション手法の開発を目指す**。新たに開発する計算機シミュレーション手法については、これまでの実験解析データを取り込むとともに、**国内外の既存実験施設を最大限活用して実験的検証を進めながら開発を進める**。

## PSi 計画 (Proton accelerator-driven Subcritical virtual system)



計算科学アプローチを導入し、ADS設計の合理化、材料・燃料開発の効率化を図る。

# JAEAの第3期中長期目標・計画(平成27年度～令和3年度)<sup>(添付資料8)</sup>

## 中長期目標:放射性廃棄物の減容化・有害度低減の研究開発より抜粋

具体的には、MA分離のための共通基盤技術の研究開発をはじめ、高速炉や加速器駆動システム(ADS)を用いた核変換技術の研究開発を推進する。特にADSについては、国の方針等を踏まえ、J-PARC核変換実験施設の設計・建設に向けて必要な要素技術開発等を進めるとともに、ADSターゲット試験施設に関しては目標期間早期に、核変換物理実験施設に関しては目標期間内に、施設整備に必要な経費の精査や技術課題解決の達成状況等を評価した上で、各施設の建設への着手の判断を得る。

## 中長期計画:放射性廃棄物の減容化・有害度低減の研究開発より抜粋

### ・MAの分離変換のための共通基盤技術の研究開発

MAの分離技術に関する複数の候補技術のプロセスデータ、高レベル放射性廃液を用いた試験による分離回収データ等を取得し、MA分離回収に関する技術的成立性を評価する。幅広い組成のMA燃料の基礎データを取得するとともに、ペレット製造等の機器試験等を進め、MA燃料製造に関する技術的成立性を評価する。

MA分離変換サイクル全体を通じた技術情報を得るため、既存施設を用いたMAの分離、ペレット製造から高速中性子照射までの一連の試験から成る小規模なMAサイクルの実証試験に着手する。

### ・加速器駆動システム(ADS)を用いた核変換技術の研究開発

J-PARC核変換実験施設の建設に向けて必要な要素技術開発、施設の検討や安全評価等に取り組む。ADSターゲット試験施設に関しては、早期に施設整備に必要な経費の精査や技術課題解決の見通し等について外部委員会による評価を受けた上で、目標期間半ばを目途に同施設の建設着手を目指す。核変換物理実験施設に関しては、施設の設計・設置許可に向けた技術的課題解決の見通し等について外部委員会による評価を受けた上で、目標期間内に設置許可を受けて建設着手を目指す。

また、ADS概念設計、ターゲット窓材評価、MA燃料乾式処理技術開発等を行うとともに、国際協力によりADS開発を加速させる。

(参考資料1)

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 構成員

主査 中島 健 京都大学複合原子力科学研究所教授

主査代理 小山 正史 一般財団法人電力中央研究所首席研究員

小竹 庄司 日本原子力発電株式会社開発計画室担任

竹下 健二 東京工業大学 科学技術創成研究院  
ゼロカーボンエネルギー研究所長

辻本 和文 日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター  
副センター長

長谷川 晃 東北大学大学院工学研究科教授

藤田 玲子 日本原子力学会福島特別プロジェクト代表

山本 章夫 名古屋大学大学院工学研究科教授

(参考資料2)

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 検討の経緯

第1回 令和3年7月30日(金曜日)

- (1) 群分離・核変換技術評価タスクフォースの設置について
- (2) 群分離・核変換技術のこれまでの経緯・研究開発状況について
- (3) その他

第2回 令和3年9月3日(金曜日)

- (1) 第1回タスクフォースの主なご意見について
- (2) 今後の研究開発の方向性について
- (3) 基礎基盤的な研究開発について
- (4) その他

第3回 令和3年10月5日(火曜日)

- (1) 今後の研究開発の方向性について
- (2) タスクフォースとりまとめ(素案)について
- (3) その他

第4回 令和3年12月20日(月曜日)

- (1) タスクフォースとりまとめ(案)について



## 用語解説

### 【カ行】

#### ・「階層型」サイクル概念

商用発電炉サイクルを第一階層とし、第二階層である群分離・核変換サイクルを付加した概念。群分離・核変換サイクルでは、売電を主目的とせず、商用発電炉の使用済燃料から分離した長寿命核種の効率的な核変換を行う。

#### ・外部事象(外部ハザード)

地震・津波・航空機落下等の原子炉施設の外部からの脅威を指す。これに対し、原子炉施設内部の浸水、火災などを内部事象(内部ハザード)という。福島第一原子力発電所事故後に策定された新規規制基準では、これらの脅威に対する基準を強化し、対策を十分に行い安全性を確保することが要求されている。

#### ・核データ

種々の核反応の起こる大きさ(確率)を表すデータや、放射性同位元素(RI)から放出される放射線の種類やエネルギー、原子核の励起状態を表す核構造データなどを指す。

#### ・核燃料サイクル

原子力発電で使い終えた核燃料から核分裂していないウランや新たに生まれたプルトニウムなどをエネルギー資源として回収(再処理)し、再び原子力発電の燃料に使うしくみのこと。資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の低減、高レベル放射性廃棄物の有害度(放射能レベル)低減が可能となる。

#### ・核分裂生成物(FP: fission product)

ウラン・プルトニウム等の原子核の核分裂によって生じる生成物。核分裂生成物には安定核種、短寿命の放射性核種、長寿命の放射性核種(LLFP: long-lived fission product)が含まれる。

#### ・核変換

広義の核変換は、原子核に何らかの働きかけを行い、異なる元素や異なる同位体に変換すること。群分離・核変換技術においては、長寿命核種を核反応によって短寿命核種あるいは安定核種に変換することを指す。

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

加速器駆動核変換システムの研究開発を行うことを目的に、日本原子力研究開発機構が J-PARC に建設を計画している実験施設の名称。施設は ADS ターゲット試験施設(TEF-T)と核変換物理実験施設(TEF-P)で構成される。TEF-T では、液体鉛ビスマスターゲットに大強度陽子ビームを入射することにより核破碎ターゲットの技術開発及び材料の研究開発を行う。TEF-P は零出力の臨界集合体であり、未臨界炉心及び核変換システムの物理的特性の探索と加速器駆動核変換システムの運転経験蓄積を目的とする。

・加速器駆動システム(ADS: Accelerator-driven System)

陽子加速器を用いて陽子を高エネルギーに加速し、未臨界状態の原子炉の中心に設置された核破碎ターゲットに投入することで得られる核破碎中性子を用いて、未臨界炉心を駆動するシステム。

・超伝導加速空洞

超伝導線形加速器の主要な加速部である。超伝導状態となるひょうたん型の空洞であり、内部に蓄えられる高周波電力により荷電粒子を加速する。加速される荷電粒子の速度により形状が異なる。質量の軽い電子の場合はほぼ一定速度(光速)に加速されるため構造は簡単となり、これまでも各国で実用化されている。一方、質量の重い陽子を加速する場合には速度がエネルギー毎に変化し、低エネルギー側では扁平な空洞形状となる。

・ガラス固化体

使用済燃料の再処理で発生する高レベル放射性廃液をガラス状の媒体の中に固定化した廃棄物。ガラス固化体中には、極めて高い放射能を有しかつ長寿命の放射性核種等が含まれる。

・乾式再処理

塩化リチウム、塩化カリウム等の熔融塩や、カドミウム、ビスマス、鉛等の液体金属を溶媒とした水溶液を用いない再処理法の一つ。六ヶ所再処理施設で採用されている湿式再処理と比べ、施設を小型化できることから、小規模の核燃料サイクルに適している。また、水溶液を使用しないため臨界に対する安全裕度が大きい、有機溶媒を使用しないため放射線損傷に対する影響が少ない、原理的にPuの単離が困難なため核拡散抵抗性に優れる等の特長がある。

・技術成熟度レベル(TRL: Technology Readiness Level)

体系的な分析に基づいて、新技術の開発のレベルを客観的に評価するために使用する基準。9段階で用いられることが多く、この場合、TRL1 が最も基礎的な研究、TRL9 が最も商

業化に近い。

・希土類元素 (RE)

原子番号 57 から 71 までの 15 元素、ランタン (La)、セリウム (Ce)、プラセオジウム (Pr)、ネオジウム (Nd)、プロメチウム (Pm)、サマリウム (Sm)、ユウロピウム (Eu)、ガドリニウム (Gd)、テルビウム (Tb)、ジスプロシウム (Dy)、ホルミウム (Ho)、エルビウム (Er)、ツリウム (Tm)、イッテルビウム (Yb)、ルテチウム (Lu)に加えて、これらに性質が極めて類似したスカンジウム (Sc)、イットリウム (Y)を加えた 17 元素のこと。化学的な性質が類似しており、相互の分離が難しい。

・金属燃料

金属ウランや金属プルトニウムなどにジルコニウムを添加して合金とした原子炉用の燃料。

・群分離

高レベル放射性廃棄物中に含まれる様々な元素を、それぞれの特性に応じて幾つかの元素群に分離すること。群分離した後の各元素群に対して、それぞれの特性に応じた処理処分や有効利用を行う。

・高速炉 (FR: Fast Reactor)

液体金属であるナトリウムなどを冷却材に用いて、中性子を減速させずに臨界を維持する原子炉。高速増殖炉では、劣化ウランを炉心外周に配することで燃料の増殖が可能となる。高速中性子によってマイナーアクチノイドが核変換しやすいため、廃棄物処理 (核変換)に適する。

・コールド機器開発

放射性物質を含む試料を用いず、再処理プラント等において用いられる実用規模の機器を、模擬物質を用いて開発すること。

・高レベル放射性廃棄物 (HLW: High Level Radioactive Waste)

核燃料を再処理した後に残る高放射性・高発熱の廃棄物。ガラス固化体などにして安定化する。

・固溶型燃料

同一の結晶構造内に複数の金属元素が配置し、均質な固相となっている燃料。核変換用窒化物燃料の場合、超ウラン元素 (TRU) 窒化物と窒化ジルコニウム (ZrN) の固溶体を指す。(U,Pu)O<sub>2</sub> 混合酸化物燃料 (MOX 燃料) も UO<sub>2</sub> と PuO<sub>2</sub> の固溶体。

## 【サ行】

### ・最終処分

放射性廃棄物を以降の取扱いが不要な形で処分すること。最終処分は、放射性廃棄物を廃棄物の性状、放射能レベル、核種濃度等により適切に区分し、生活圏からの隔離（処分深さ、生活圏との距離）と放射性物質の封じ込め性能等を考慮し、浅地中（トレンチ処分）、浅地中（ピット）処分、中深度処分、地層処分の四つの方法に分類して行われる。

### ・実液、実廃液

核燃料再処理で発生する高レベル放射性廃液（HLLW: High-level liquid waste）の実物を表す用語。核分裂生成物、マイナーアクチノイド、再処理で回収しきれなかったウラン、プルトニウムを含む。分離技術のプロセス試験では、HLLW 組成を模擬した模擬廃液を使用した試験を行った上で、実際の HLLW である実廃液を使った試験に移行する必要がある。

### ・受動的安全性

液体の自然循環あるいは大気 of 自然対流通風、水の蒸発、物質の熱膨張あるいは重力落下等、単純な物理原理に基づいた安全機能をもつ特性。動的機器や交流電源によらず安全性を確保できるため、福島第一原子力発電所事故以降、特に重要性が増している。

### ・照射試験

原子炉、加速器等を用いて物質に中性子、電子線、γ線などの放射線をあて、放射線照射に伴う物質の特性変化を調べるための試験。

### ・照射損傷

材料が中性子や γ線などエネルギーを持った放射線の照射を受けることにより、その材料の構造が乱され、構造欠陥が造成されることによっておこる損傷をいう。

### ・深層防護

原子力施設の基本的な安全思想であり、原子力施設の多様な安全対策が多段階にわたって設けられていることをいう。

## 【タ行】

### ・窒化物燃料

金属元素の窒化物からなる核燃料。金属燃料に近い熱伝導率を有し、金属燃料では均一に混合することが困難なアメリカシウムとネプツニウムを広い範囲で固溶できるという特長があ

る。マイナーアクチノイド核変換のための加速器駆動システム燃料の有力候補であり、超ウラン元素の窒化物を窒化ジルコニウム(ZrN)または窒化チタン(TiN)の不活性母材で希釈して燃料ペレットとする。これまでに実験室規模でのマイナーアクチノイド含有燃料ペレット製造に成功しており、照射試験の実現と工学規模での製造プロセス開発が課題である。

#### ・抽出クロマトグラフィ

円筒であるカラムに吸着体を充填し、吸着体に対する吸着のしやすさの違いを利用した分離法。溶液を供給すると、最も吸着しやすい成分がカラム上部の吸着体に吸着し、その下の吸着体には次に吸着されやすい成分が吸着する、というように上部から順に成分ごとに分かれて吸着される。抽出クロマトグラフィは、吸着体に抽出剤を含浸させた樹脂を使用することで、抽出剤の選択性を有する吸着体とし、高度な分離を実現させるものである。

#### ・抽出剤

溶媒抽出法や抽出クロマトグラフィで用いられる、溶液中の特定成分を取り出すための試薬。再処理工場で主に採用されているPUREX法では、抽出剤としてTBP(リン酸トリブチル)が用いられており、使用済燃料を溶解した硝酸溶液から、n-ドデカン溶媒で希釈したTBPでウランやプルトニウムを抽出する。

#### ・超伝導加速器

超伝導体で作った加速空洞を極低温まで冷却し、超伝導状態にして粒子ビームを高効率に加速する方式を用いた加速器。加速器駆動システムで必要とする大電流陽子ビームを高効率に得るために必要となる。

#### ・データ同化

数値シミュレーションに実測データを取り入れシミュレーションの予測精度を向上させる手法のこと。

#### ・デジタルツイン

デジタルデータを基に、サイバー空間内に物理空間の環境を再現すること。デジタルツインの環境を活用することで、物理空間のモニタリングを行えるほか、将来の故障や変化を予測できる。

#### ・同位体分離

複数の同位体が混ざった状態の物質を対象として、特定の同位体の組成を変化させる作業を言う。同位体は化学的性質が同じであるため異種元素や異種化合物の分離と比べて難しく、質量のわずかな違い、化学反応における同位体効果(結合エネルギーの違いによる反

応速度の差)、原子の電子エネルギー準位の違いや分子の振動エネルギー準位の違いによる光の選択吸収波長の差などを利用して行う。

## 【ナ行】

### ・鉛-ビスマス(Pb-Bi)

加速器駆動システムのターゲット及び冷却材として注目されている合金。鉛とビスマスは、いずれも重い核であり、陽子による核破砕反応で発生する中性数が多く、しかも、鉛は陽子数が魔法数(原子核が特に安定になる陽子と中性子の個数)である 82、ビスマスは中性子数が魔法数である 126 であるため中性捕獲反応断面積が小さく、核破砕中性子ターゲット材としても、冷却材としても優れた核的性質を持っている。また、鉛とビスマスはいずれも金属であるため熱伝導率が高く、各々を 44.5%と 55.5%で合金とすると、低融点(125°C)、高沸点(1670°C)の共晶合金を作るため、冷却材としての優れた熱的性質も有している。

### ・二次廃棄物

元来原料中に含まれている廃棄物(核分裂生成物や被覆管廃材など)を一次廃棄物と言うのに対し、処理過程で使用した試薬、器具などが汚染されて廃棄物となったものを二次廃棄物という。処理で使用する試薬・器具類が多いほど、またこれらの試薬と一次廃棄物の分離(除染)が困難なほど二次廃棄物は増加する。

### ・燃焼度

核燃料の燃焼程度を示す量で、MWd/t や at%などの単位であらわす。燃料内の核分裂性物質の濃度を高くし、燃料集合体当たりの取り出す総熱量を大きく(高燃焼度化)することで、運転サイクル期間の延長、プラントの燃料費の削減、使用済燃料の発生量の低減が可能となる。

### ・燃料ふるまい

原子炉の中で燃料が燃焼していくにつれて、燃料棒にも燃料集合体にも変化が生じてくる。この変化の総称を燃料ふるまいと呼び、燃料棒の内側で発生する力や、燃料棒を構成する燃料ペレットと被覆管の温度、燃料棒内部での FP の動きなどにより原子炉の安全性が損なわれないよう、燃料ふるまい解析により燃料設計の妥当性を確認する必要がある。

## 【ハ行】

### ・「発電用高速炉利用型」サイクル概念

発電用高速炉を使用してマイナーアクチノイドの核変換を行う核変換システムの概念。マイ

ナークチノイドを全ての燃料に均質に混ぜる均質サイクル概念と、核変換用ターゲット燃料を炉内・炉心外周部に装荷した非均質サイクル概念がある。

#### ・ビームトリップ

加速器は高電圧部の放電等によりビームの不意の停止(ビームトリップ)を起こす。ADS ではビームトリップにより未臨界炉心の出力が下がるため、この頻度が多いと機器が熱サイクル疲労で損傷する可能性がある。また、数分を超えるような加速器の停止時には発電系までを含めた再起動が必要となり、設備稼働率が極端に悪くなる可能性がある。

#### ・ビーム窓

加速器駆動システムにおいて陽子加速器のビームダクトと核破砕ターゲットの境界をなす構造機器。陽子ビームはビームダクト終端部に位置する本機器を通過して核破砕ターゲットに入射するため、陽子ビームによる発熱、ビームの変動に伴う熱衝撃、冷却材である鉛-ビスマスによる静圧と腐食、陽子ビーム及びターゲットや炉心からの中性子による照射損傷などに耐える設計が要求される。加速器駆動システム特有の構造機器であり、重要な開発課題である。なお、欧州では冷却材の自由界面を加速器との真空境界とする「窓なし」のシステム概念も提案されている。

#### ・不活性母材

核変換用燃料において、Pu とマイナーアクチノイドを適切な濃度に希釈するための母材であり、中性子との核反応が少ないこと(不活性)、熱伝導率や高温安定性が良好なこと、被覆管材料との両立性が良好なこと、再処理に適応可能なこと等の観点から材質を選択する。窒化物燃料の場合、遷移金属窒化物である窒化ジルコニウム(ZrN)と窒化チタン(TiN)を不活性母材の候補としている。

#### ・腐食抑制技術

鉛-ビスマスは鋼材に対する腐食性が高く、微量の酸素を鉛-ビスマスに添加して鋼材表面に酸化皮膜を形成し腐食を抑制することや、耐腐食性材料の開発等の対策が検討されている。

#### ・フローシート

ミキサーセトラや遠心抽出器などの抽出機器を多段で使用する複雑な分離プロセスにおいて、抽出機器の段数や接続法、溶液や抽出溶媒の流量比、供給段などの条件を決めたものの。

- ・崩壊熱除去

原子炉の炉心は炉停止後も核分裂生成物の崩壊により、持続して熱が発生する。これを崩壊熱といい、原子炉運転停止後も一定時間冷却系の一部を用いて、この崩壊熱を除去する必要がある。

- ・ホット試験、コールド試験

前者は、放射性物質を含む試料を用いた試験。これに対し、後者はホット試験に先立ち、その手順の確認、プロセスの模擬試験などとして、放射性物質を用いずに行う試験。

## 【マ行】

- ・マイナーアクチノイド(MA: minor actinide)

アクチノイド系列の元素のうち、使用済燃料に含まれるウラン及びプルトニウム以外の元素。主にネプツニウム、アメリシウム、キュリウムの 3 元素を指す。原子炉中のウランやプルトニウムに対し、量が 1/10 程度であることからマイナーアクチノイドと呼ばれる。なお、核変換用燃料に添加する Pu と MA を併せて超ウラン元素(TRU: transuranium elements)と呼ぶこともある。

- ・マルチフィジックス統合解析

流体-構造連成や電気-熱-構造連成など、異なる支配方程式で表される複数の物理現象を、統合的に解く解析を指す。現実世界では複数の物理現象が同時に作用しており、統合的な解析により、現象をより正確に捉えることができる。

- ・未臨界度(監視・調整)

未臨界度とは、「臨界からどれだけ余裕があるか」を定量化した指標であり、ADS の未臨界度は事故等で反応度が投入されても、未臨界が常に担保されるよう設定される。一方で、臨界に近いほど中性子経済性がよく、安全性と経済性、設計・測定精度を考慮し未臨界度が設定される。ADS の定格出力運転中に万が一臨界に近づいた場合にも中性子源の供給を断つことで炉心を安全に停止できるよう、未臨界度の変動が設計値を満足しているかを監視・調整する必要がある。

## 【ヤ行】

- ・陽子加速器

陽子を、電場を用いて加速する装置。電場の種類により、バンデグラーフ型加速器のような静電加速器、サイクロトロン、シンクロトロン、リニアックなどのような高周波加速器がある。静



電加速器では、数 MeV 程度が加速の上限であるが、高周波加速器はそれ以上のエネルギーへの加速が可能であり、シンクロトロンでは CERN の Large Hadron Collider のように数 TeV までの加速ができる施設もある。

#### ・溶媒抽出法

有機溶媒を用いて水溶液中の混合物を分離する方法。抽出剤を含む有機相によって処理対象の廃液から目的成分を有機相に抽出し、次のステップにおいて有機相から水相に逆抽出することで分離を達成する。

### 【ラ行】

#### ・粒子分散型燃料

核変換用窒化物燃料においては、超ウラン元素窒化物固溶体の球状粒子(直径 200 $\mu$ m 前後)を窒化チタン(TiN)の不活性母材に分散させて焼結した燃料ペレットを指す。均質に分散させることで、核分裂片による照射損傷領域を粒子近傍に限定し、アクチノイド元素再分布の抑制、FP 保持性能向上等が見込まれ、一度の燃料装荷で効率的な核変換が可能となる。一方で、母材に粒子を均質に分散させる工学的技術開発が必要である。酸化物燃料においては、プルトニウムとアメリシウムの二酸化物固溶体粒子を酸化マグネシウム(MgO)や金属モリブデン(Mo)の不活性母材に分散させる概念がある。

#### ・量子ウォーク

酔っばらのふらふら歩きのように、左右どちらに進むか定まらない運動の確率論的モデルをランダムウォークと呼び、量子ウォークはランダムウォークの量子版として、近年本格的に研究され始めた。ランダムウォークは、拡散現象、ノイズを含む問題等に広く使われている。ランダムウォークの確率分布(確率測度)が 2 項分布で表され、出発点の確率が高い単峰型であるのに対し、量子ウォークの確率分布は、出発点の確率が最も低く、2 つの端点に近い場所の確率が高い逆釣鐘型となる。この特性に着目した同位体分離技術の研究開発が行われている。

#### ・臨界実験装置

炉心構造を容易に変更することができる原子炉の総称で、核燃料物質の臨界量等の原子炉の核特性を測定するのに用いられる。炉心設計においては、各種の計算コードにより設計し、臨界実験装置によってその妥当性を検討する。

#### ・ループ試験(鉛-ビスマス)

鉛-ビスマスを循環させる配管ループ装置内での鉛-ビスマスの流れや温度バランスの

説明、また鉛-ビスマスによる鋼材の腐食・壊食の影響の把握のために行う、配管ループ装置を用いた流動試験のこと。

- ・炉物理

狭義には原子炉における中性子の振る舞いおよびその及ぼす効果を予測する物理学の一分野であるが、それだけでなく、中性子による核反応によって増減する物質の量の変化も対象とする。伝熱流動とともに炉心の設計に欠かせない分野である。具体的には、臨界質量、出力の空間分布、反応度係数、燃焼特性などの核設計の基礎となる学問分野である。

### アルファベット順

- ・ADS

加速器駆動システムの項を参照。

- ・FR

高速炉の項を参照。

- ・HLW

高レベル放射性廃棄物の項を参照。

- ・J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)

日本原子力研究開発機構(JAEA)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)とが共同で運営している大強度陽子加速器施設群の総称。2008年にJAEA 東海の原子力科学研究所内に第一期施設が完成した。

- ・MA

マイナーアクチノイドの項を参照。

- ・MA 含有燃料

使用済燃料の再処理後に回収されるMAを混入した原子炉燃料。高速炉やADSではMAを燃料に一定量混入し、燃焼(核分裂)、転換反応によって消滅させることができる。MA含有燃料自体の基礎物性の知見取得や、MA含有により生成量が大幅に増加するHeの燃料中の挙動の把握、MAの表面線量が高いことによる遠隔での燃料製造技術の確立などの課題がある。

・MYRRHA

ベルギー原子力研究センター(SCK CEN)が中心となって開発を進めている照射試験用加速器駆動システム(ADS)の名称。老朽化した研究炉及び照射炉の代替として建設が計画されている。MYRRHA は出力 50-100 MWt の鉛ビスマス冷却型 ADS であり、ADS の実証、重金属冷却高速炉の実証、燃料・材料照射、医療用アイソトープ製造、基礎研究等を目的とする。

・OECD/NEA(経済協力開発機構/原子力機関)

原子力発電を安全で環境に調和した経済的なエネルギー源として開発利用することを、加盟諸国政府間の協力によって促進する経済協力開発機構(OECD)傘下の国際機関。

・TEF-P

核変換実験施設の項を参照。

・TEF-T

核変換実験施設の項を参照。

・TRU

マイナーアクチノイドの項を参照。