

加速器による放射性廃棄物 低減に向けた研究開発

分離変換技術の現状と展望



独立行政法人日本原子力研究開発機構

原子力基礎工学研究センター 分離変換技術開発ユニット
 <http://nsec.jaea.go.jp/top.html>

J-PARCセンター 核変換セクション
 <http://j-parc.jp/Transmutation/ja/ads-j.html>



独立行政法人日本原子力研究開発機構

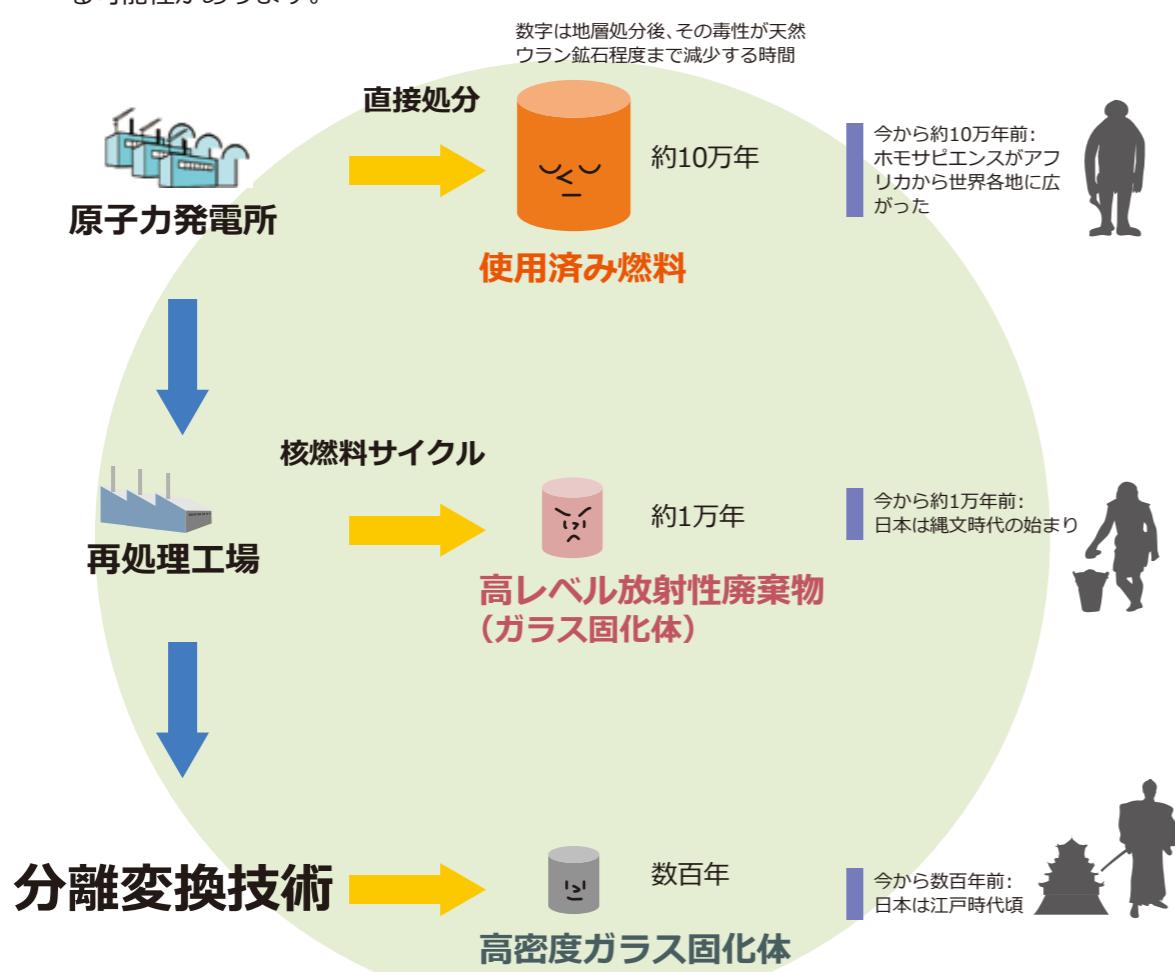
はじめに

私たち人類が健康で豊かな生活を享受するには、長期にわたって安定したエネルギー源を確保することが必要です。そのためには、化石エネルギー、再生可能エネルギー、原子力エネルギーなどをうまく組み合わせて利用することが重要です。

このうち原子力エネルギーの利用については、安全性の向上はもちろん使用済み燃料に代表される放射性廃棄物を適切に処理・処分する技術の開発が不可欠です。これは原子力エネルギーを利用している全ての国に共通した課題です。

現在、多くの国では使用済み燃料もしくは放射性廃棄物を地下に埋める地層処分の方針をとっていますが、地層処分後、数千年から数万年の間、これらを安定的に閉じ込めることが求められており、原子力エネルギー利用における大きな課題・負担となっています。

分離変換技術は、この地層処分の負担を軽減する技術であり、これにより地層処分後、その放射性毒性が天然ウラン鉱石程度まで減少する時間が数百年程度に短縮できる可能性があります。

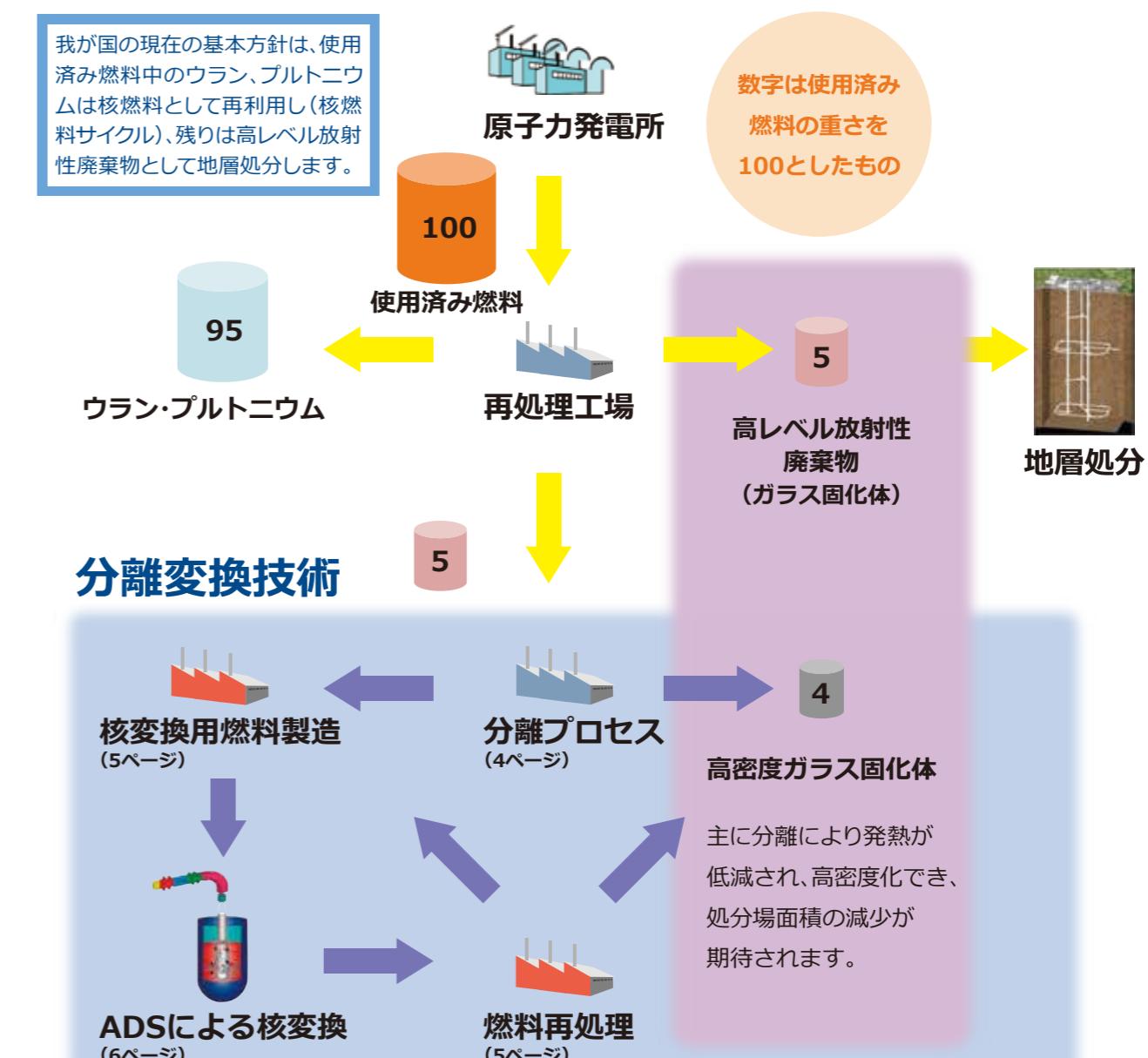


分離変換技術の導入により、放射性廃棄物の毒性低減の時間を、とてつもない長期間から数百年に短縮できる可能性があります。

分離変換技術とは

分離変換技術は、使用済み燃料の再処理工程で発生する高レベル放射性廃棄物中の元素を、利用目的に応じて**分離**し、そのうち放射性毒性が強く半減期の長い核種を短寿命核種あるいは安定核種に**核変換**する技術です。

核変換については、発電用高速炉を利用する方式と、加速器を用いた核変換専用のシステム ADS(加速器駆動核変換システム: Accelerator-Driven System)を利用する方式が検討されています。ここではADSを用いた分離変換技術に焦点をあてます。

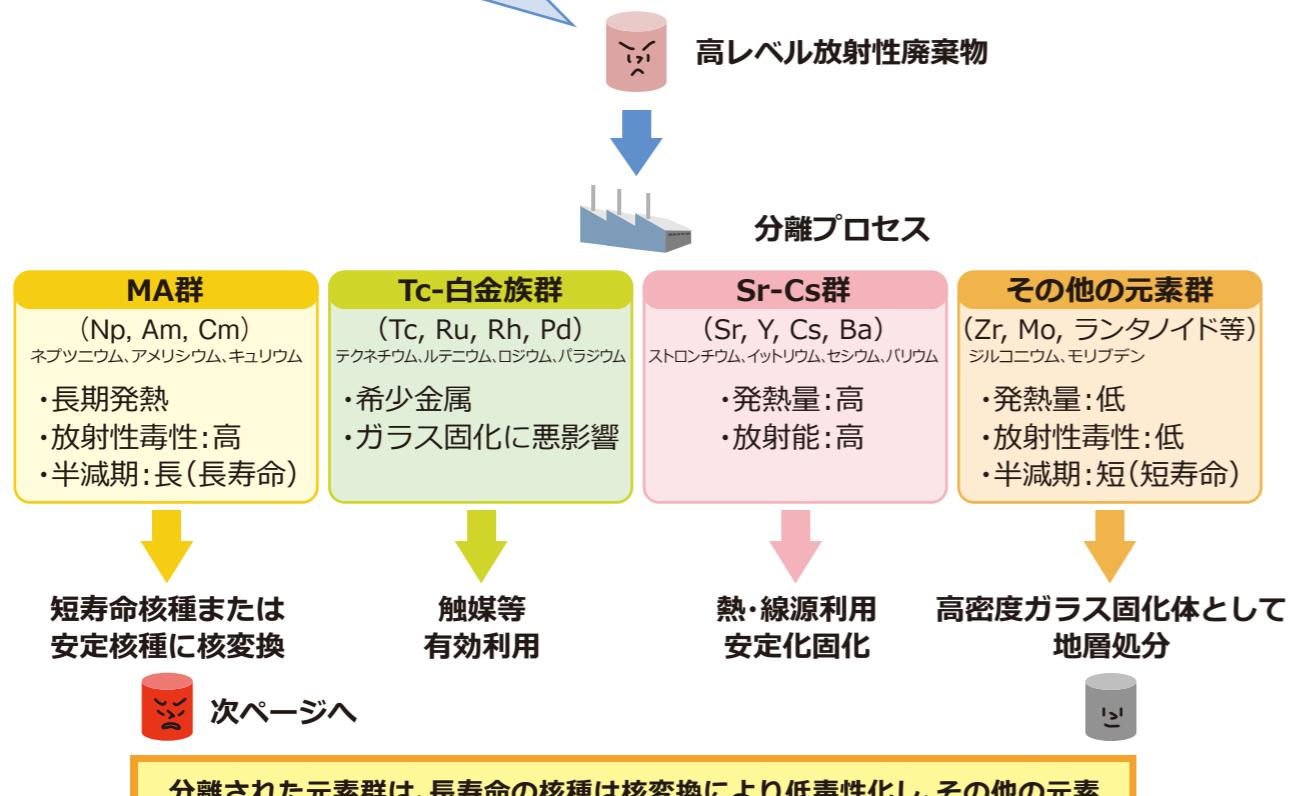
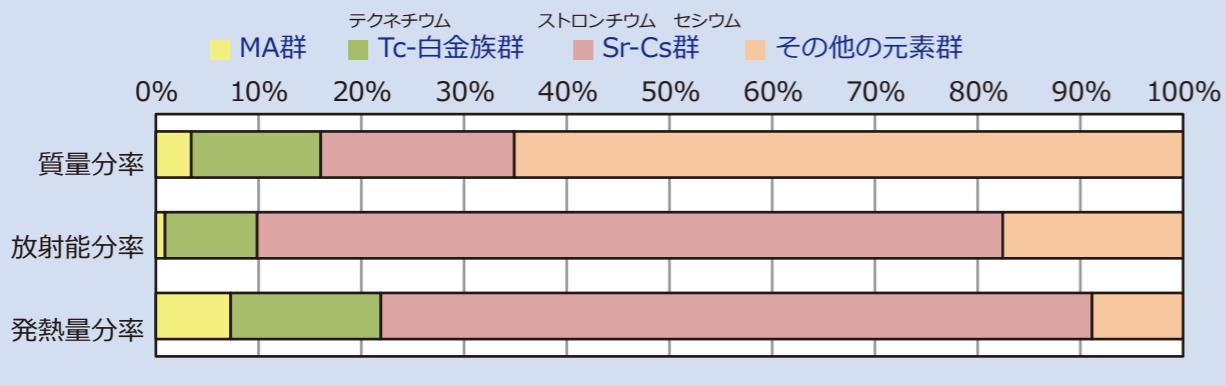


分離変換技術は、ゴミの分別のように廃棄物を分別して、長寿命核種を核変換することで、地層処分の負担軽減を目指します。

分離プロセス

使用済み燃料の再処理工程から、核分裂生成物やマイナーアクチノイド(MA)を含んだ高レベル放射性廃棄物が発生します。このなかの元素について、化学的性質、利用目的に応じて元素を大まかに4つの群に分離する群分離技術の開発をしています。

原子力発電所から出た高レベル放射性廃棄物中の主要元素を4群に分けた場合



今後の研究課題

- 経済性の向上、二次廃棄物発生量の低減に取り組みます。
 - 硝酸濃度低下などの沈殿を生成しやすいプロセスの排除
 - 操作性が向上し、経済性が向上
 - 炭素、水素、酸素、窒素で構成された抽出剤の使用
 - 抽出剤の完全焼却が可能となり、廃棄物量が低減

核変換用燃料製造・再処理

高レベル放射性廃棄物から分離したMAを使って核変換用燃料を製造する技術と、核変換システムから発生する使用済み燃料を再処理する技術の開発を行っています。

核変換用燃料は高濃度のMAを含むため、高い発熱と放射能を有します。その特徴から、燃料としては塗化物燃料を、使用済みの核変換用燃料の再処理としては乾式再処理を有力候補として研究しています。

商用発電サイクル(軽水炉・高速炉)



塗化物燃料の特徴

- 熱伝導度と融点が高い
 - 冷却しやすく安全裕度が大きい
- アクチノイドが相互に固溶
 - 燃料組成の自由度が大きい
- 空気中の酸素、水と反応
 - 不活性雰囲気での取扱いが必要

乾式再処理の特徴

- 溶融塩・液体金属を用いる
 - 耐放射線性、耐発熱性が高い
- 不活性雰囲気での取扱いが必要

乾式再処理で回収したMAを燃料として再利用し、核変換率を高めます。

品質の高いMA燃料を製造するための技術開発を進めています。また、乾式再処理によって使用済みの核変換用燃料からMAを取り出し、燃料として繰り返し使用します。

今後の研究課題

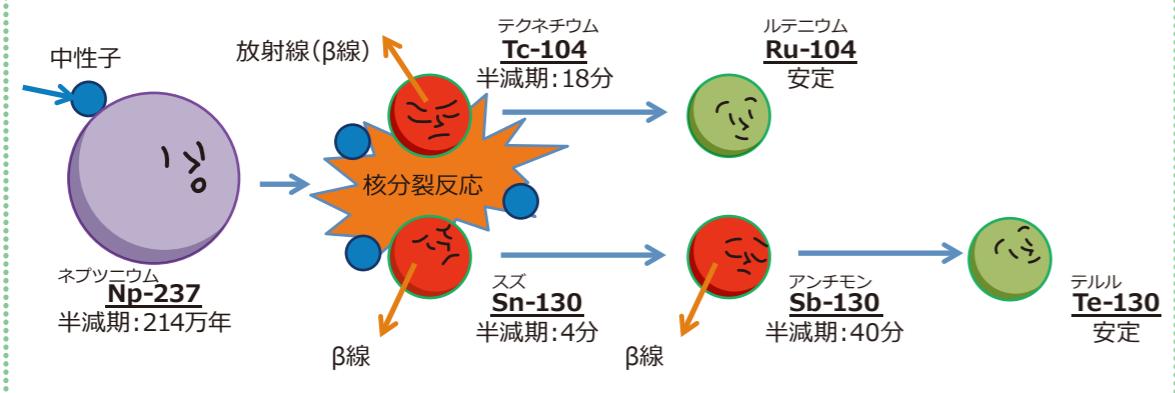
- 燃料製造、再処理ともに原理的成立性を実証したことから、今後はMAの発熱に対応した工学機器開発に取り組むとともに、以下のこと取り組みます。
 - 燃料製造: 燃料へ混入した不純物の影響評価、燃料挙動の予測精度向上
 - 乾式再処理: MAの回収率向上

ADSによる核変換

核変換を行うシステムとして、効率的な核変換が可能な加速器駆動核変換システム(ADS)を中心に研究開発を進めています。

MA等の核変換

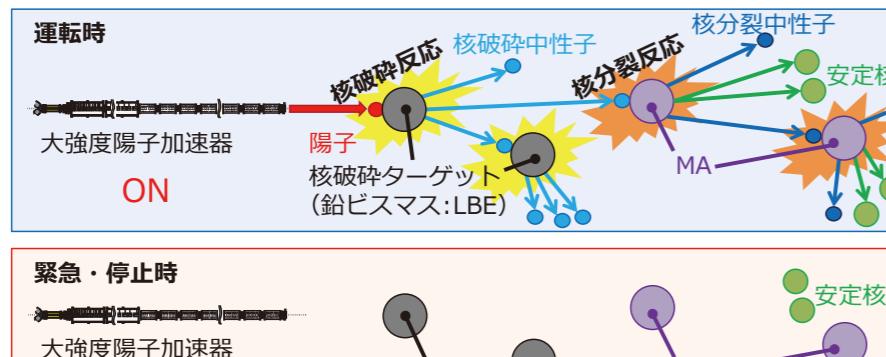
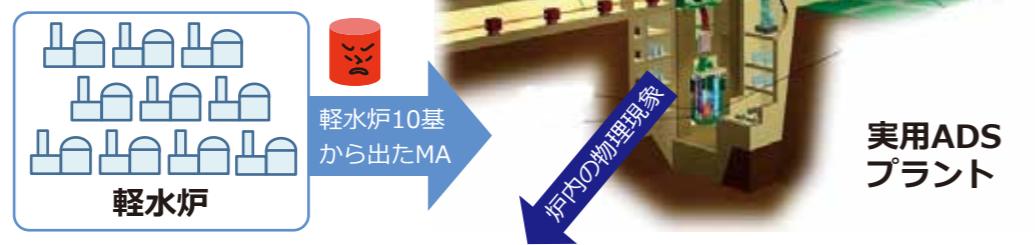
ウラン、プルトニウムやMAなどに中性子をあて、主に核分裂反応によって違う核種に変えることを核変換といいます。これにより長寿命核種を半減期の短い核種や安定核種に変えることが可能となります(下図は一例。核分裂後は様々な核種になります)



ADSは発電用高速炉を用いた方式よりも効率的な核変換を目指すシステムで、陽子加速器と、MAを燃料とする原子炉を組み合わせたハイブリッドシステムです。原子炉は、外部から中性子源を持ち込まない限り核分裂の連鎖反応が持続しない、未臨界状態となっています。陽子加速器で生成した陽子ビームを、原子炉内の核破碎ターゲット(鉛ビスマス: LBE)に当てることで火種となる中性子(核破碎中性子)を発生させ、未臨界状態で運転しながらMAの核変換を行います。

効率的な核変換

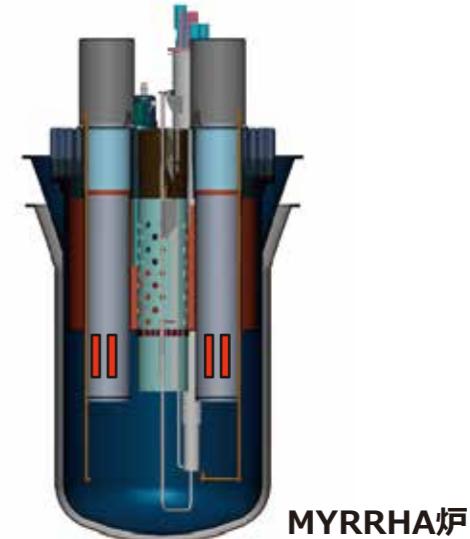
年間、軽水炉10基から出たMAをADS1基(800MW)で核変換可能



加速器OFF
→核分裂反応STOP
高い安全性

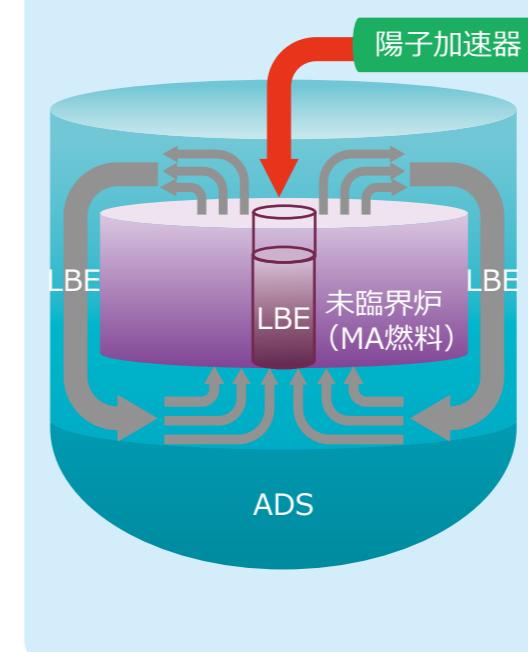
ADSの研究開発については、欧州においてベルギーが中心となって、100MW熱出力級のADSを建設する計画(MYRRHAプロジェクト)を進めており、JAEAは積極的な情報交換を行っています。

MYRRHAは、主に照射を行うことを目的とした加速器駆動の原子炉であり、MAの核変換そのものを行うわけではありません。しかし、未臨界炉の核特性、LBE取扱技術、運転経験の蓄積など多くの貴重な成果が期待されます。



ADSを用いることで、効率的かつ安全に放射性廃棄物を減らすことが期待されます。その実現に向けて、加速器、原子炉物理、材料、プラント技術など、様々な分野での研究開発を進めるとともに、積極的な国際協力をしています。

今後の研究課題 各構成要素について原理を実証するための研究開発に取り組みます。



課題①

未臨界炉の核特性、運転制御性の把握
→新しい実験施設での実験
(8ページ、TEF-P)

課題②

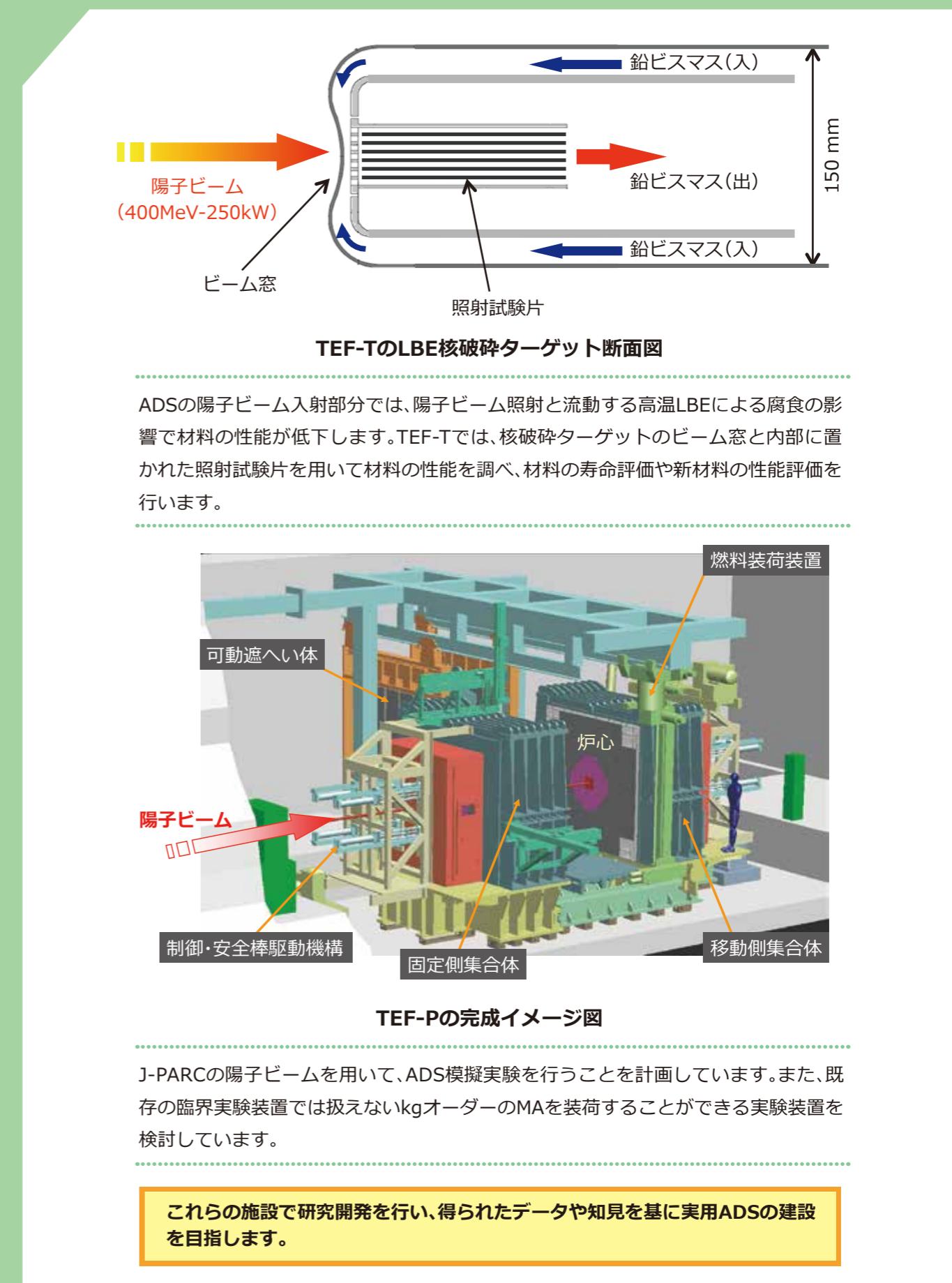
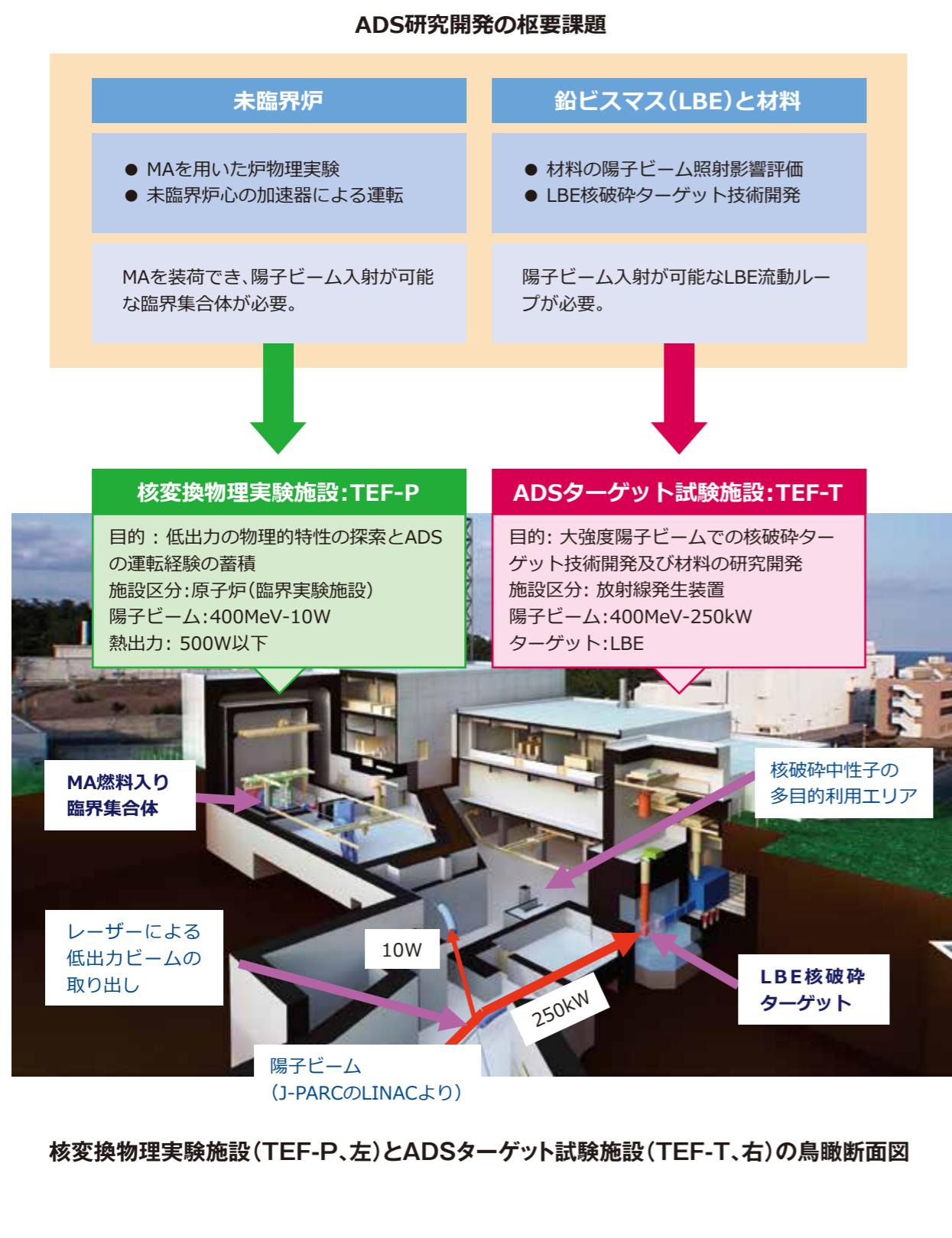
液体鉛ビスマス(LBE)を冷却材兼核破碎ターゲットとして用いる上での技術開発
→新しい実験施設での実験
(8ページ、TEF-T)

課題③

高効率・高信頼性・低成本の大強度陽子加速器の実現

核変換実験施設(TEF)

ADSによる核変換の実現に向けた研究開発を行うため、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC の施設として、核変換実験施設(TEF; Transmutation Experimental Facility)の建設に着手しました。

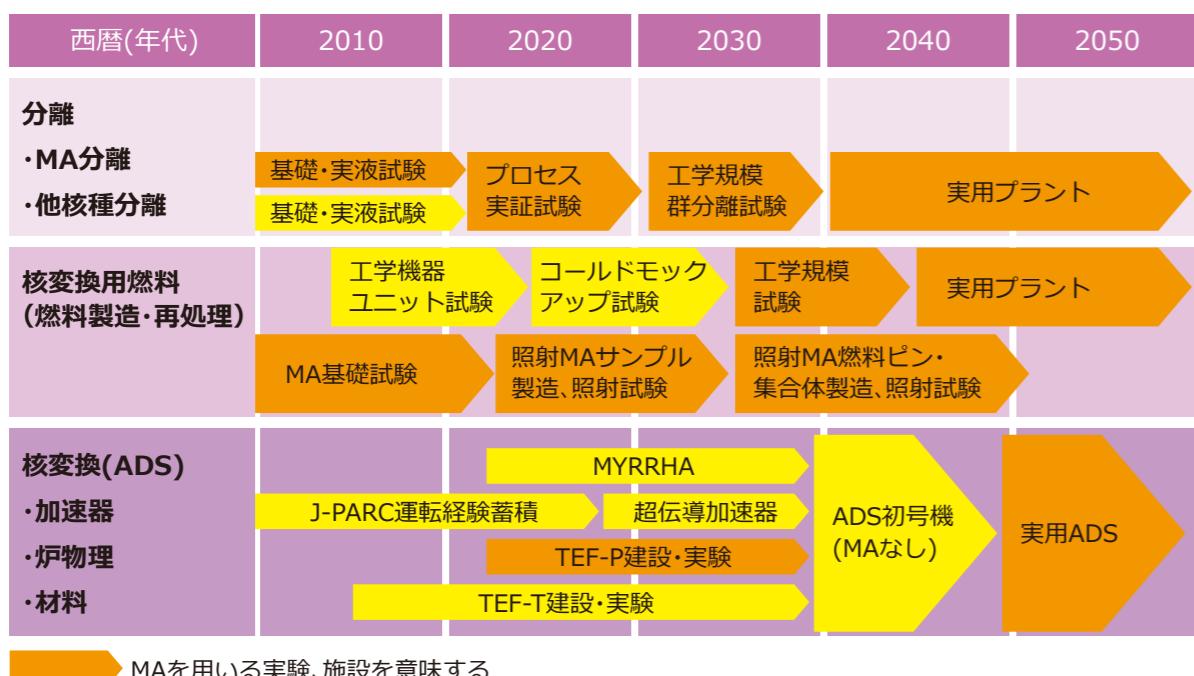


今後の展望

分離変換技術の技術レベルを知る指標として、米国航空宇宙局(NASA)などで活用されている技術成熟度(TRL:Technology Readiness Level)基準を用いて評価した結果、多くが概念開発段階終了(TRL3)程度であり、実際のシステム運用(TRL9)に至るまでには、技術開発上の壁があることが示されました。今後、J-PARC TEF施設に代表される研究開発用のインフラ整備等を進め、技術成熟度を更に押し上げます。

開発段階	分離変換技術	その他の技術の例
性能実証段階(TRL7~9)	(MYRRHA、各実用プラント)*	軽水炉燃料再処理技術(TRL8)
原理実証段階(TRL4~6)	(TEF、各工学規模試験)*	高速炉(TRL6) 核融合炉(TRL6)
概念開発段階(TRL1~3)	分離技術(TRL3) MA燃料製造技術(TRL2) ADS(TRL3)	

* 今後これらの施設が整備されることで達成が期待される段階



各分野の研究開発をこれまで以上に推進するとともに、TEF-Pに代表される大量のMAを用いた試験を実施するためのインフラの整備と、それらを利用した実験・試験により技術成熟度を押し上げ、分離変換技術の実現を目指します。

アクチノイド

原子番号89のアクチニウムから103のローレンシウムまでの15元素の総称。いずれも放射性核種であり、核燃料として利用できるウランやプルトニウムを含む。

核種

特定の原子番号と質量数により特定される元素の種類のこと。例えば、ウラン元素(原子番号92)には、核種としてU-235(質量数235)やU-238(質量数238)などが含まれる。さらに核種は、放射性核種と安定核種に分類ができる。放射性核種は、その放射能のある期間を寿命とし、半減期の長さに応じて長寿命核種、短寿命核種などに分けられる。

核燃料サイクル

ウランを鉱石より鍛錆し、濃縮、加工等を経て核燃料として原子炉で使用すると、使用済み燃料中に核分裂性のプルトニウムが生ずる。これを再処理により取り出すことで再び原子炉で核燃料として利用できる。このような核燃料の循環の体系を、一連の過程から発生した放射性廃棄物の処理処分を含めて、核燃料サイクルという。

核破碎反応

核物理反応の一種。鉛等の重い物質に高速の陽子が当たると、粉々に粉碎され、複数の核種を生成し、かつ複数の中性子等が放出される反応。

核分裂生成物 (Fission Product: FP)

ウランやプルトニウム等の核分裂反応に伴って生じた核種及びその一連の放射性崩壊で生じる核種のこと。大部分が放射性である。□

核分裂反応

核物理反応の一種。ウランなどの重い核種に中性子が当たると、2つの核種に分裂し、エネルギーを放出し、かつ2-3個の中性子が放出される反応。

ガラス固化体

高レベル放射性廃棄物をガラスと高温で融かし合わせ、ステンレス製の容器の中で冷却して固化したもの。30年から50年の中間貯蔵を経た後に、オーバーパックと呼ばれる金属容器に収納されて地層処分される。

乾式再処理

水溶液と有機溶媒を用いるPUREX法に代表される湿式再処理に対し、水溶液を用いない元素分離法。溶融塩中に溶解した燃料を電解精製あるいは液体金属との分配により核分裂生成物と分離する方法が代表的なもの。

技術成熟度 (Technology Readiness Level: TRL)

新技術の着想段階から実用段階までをいくつかの段階に分け、技術開発の段階を体系的に示す指標。

高レベル放射性廃棄物 (High Level Waste: HLW)

再処理工程において使用済み燃料からウラン、プルトニウムを回収したのちの、ストロンチウム-90、セシウム-137に代表される核分裂生成物とアメリシウム-241、ネプツニウム-237に代表されるアクチノイドを含む高レベル放射性廃液、またはそれをガラス固化したもの。

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

素粒子物理、原子核物理、物質科学、生命科学、原子力など幅広い分野の最先端研究を行うための陽子加速器群と実験施設群の呼称。2008年に(独)日本原子力研究開発機構(JAEA)東海の原子力科学研究所内に第一期施設が完成し、高エネルギー加速器研究機構(KEK)とJAEAが共同で運営している。

超伝導加速器

超伝導空洞を用いて荷電粒子(ここでは陽子)を加速する加速器。常伝導の場合と比べて電力効率が高いこと、ビーム管径を大きくできることなどが特徴。

鉛ビスマス (Lead Bismuth Eutectic; LBE)

鉛とビスマスの共晶合金で、融点が低く化学的にも安定であるため、ADSでは核破碎反応を起こすためのターゲット材と炉心冷却材として提案されている。

白金族元素

ルテニウム、ロジウム、パラジウム、オスミウム、イリジウム、白金の6元素の総称。これらの元素は物理的性質、化学的性質が類似している。使用済み燃料中には、ルテニウム、ロジウム、パラジウムの3元素が含まれる。

半減期

ある量の放射性核種が放射線を放出して、その量が半分になるまでの時間。半減期は各核種によって定まっており、数十億年以上といった長いものから、百万分の1秒以下の短いものまで種々ある。

ビーム窓

ここでは陽子加速器と核破碎ターゲットの境界を成す構造物をいう。加速器側は真空中であり、また陽子ビームの通過により発熱することから、厳しい条件下で使用される。

ベータ線

放射線の一種。飛び交う電子や陽電子を指す。数mmのアルミ板や1cm程度のプラスチック板で遮蔽可能。代表的な放射線としては他にアルファー線、ガンマ線、中性子線などがある。

放射性毒性 (潜在的放射性毒性)

使用済み燃料由来の放射性廃棄物は地層処分されるため、遅延や拡散の効果により全ての放射性核種が公衆に摂取されることはあり得ないが、仮にこれらが全て公衆により経口摂取された場合の被ばく線量を、潜在的放射性毒性という。

マイナーアクチノイド (Minor Actinide; MA)

使用済み燃料中に含まれるアクチノイドのうち、ウラン及びプルトニウムを除く、ネプツニウム、アメリシウム及びキュリウムの3元素を指す。

溶融塩

溶融して液体となった塩類。使用済み燃料の乾式再処理において、溶媒として使用される。

ランタノイド (Lanthanoid, Ln)

原子番号57のランタンから71のルテチウムまでの元素の総称であり、物理的性質、化学的性質が類似している。高レベル放射性廃液中には主にガドリニウムより原子番号が小さいランタノイドが含まれる。(一方、ランタノイドにスカンジウムとイットリウムを加えた元素を希土類元素と総称する。)

臨界集合体

原子炉の核的な特性を研究するための小型・低出力の実験装置。実験の目的に応じて燃料、減速材、構造材の組成や配置を変える事が出来る。