

核変換実験施設について



J-PARCセンター・核変換セクション
辻本 和文

分離変換技術の目指すところ

分離変換技術:

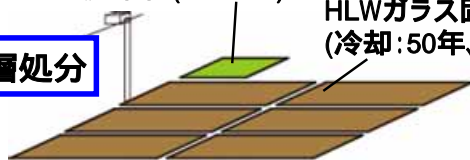
放射性廃棄物処理・処分の負担軽減及び資源の有効利用のために、高レベル放射性廃棄物に含まれる元素や放射性核種を、その半減期や利用目的に応じて分離するとともに、長寿命核種を短寿命核種あるいは安定な核種に変換する技術

45GWd/tの使用済み燃料32,000tHMで規格化

TRU廃棄物(0.13km²)

HLWガラス固化体:4万本
(冷却:50年、面積:1.8km²)

従来の地層処分



分離変換導入

MAの核変換とSr-Csの100~130年後の分別廃棄で、処分場面積を約1/4に

Sr-Cs焼成体:5,100本
(冷却:130年、面積:0.23km²)

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

高含有ガラス固化体:8,300本
(冷却:5年、面積:0.18km²)

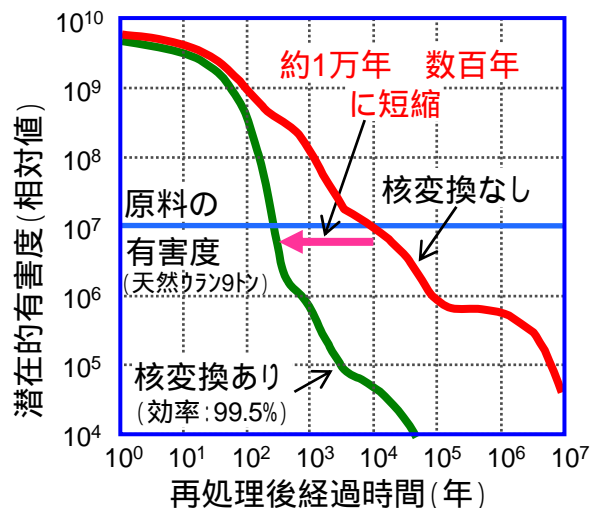
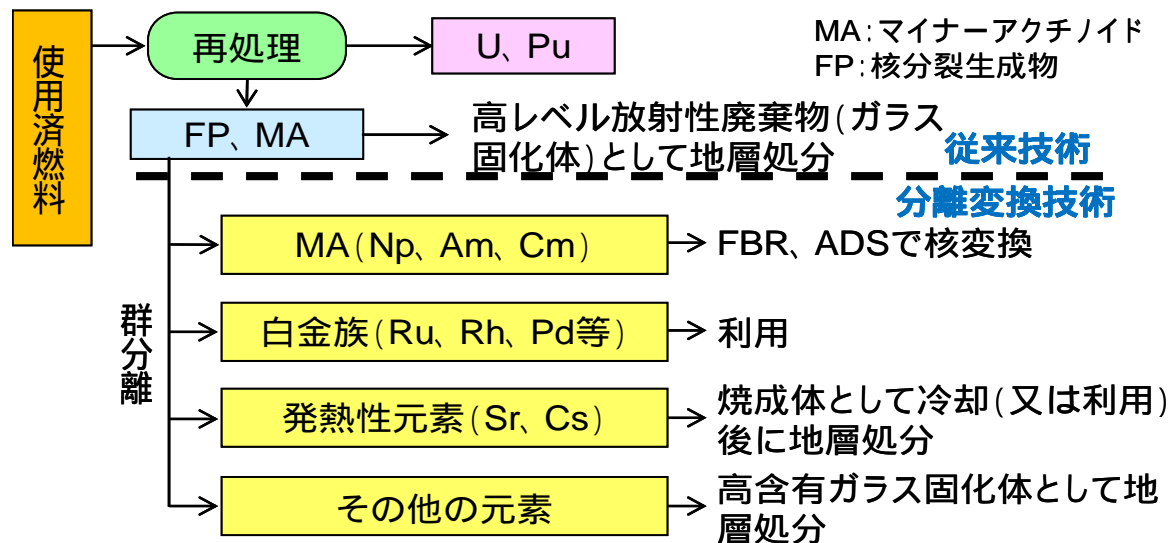
さらに長期貯蔵

Sr-Cs焼成体:5,100本
(冷却320年、面積:0.005km²)

高含有ガラス固化体:8,300本
(冷却:45年、面積:0.01km²)

Sr-Csに300年程度の長期貯蔵を適用することで、全てTRU廃棄物相当の廃棄体とでき、処分場面積を約1/100に

分離変換及び長期貯蔵の組み合わせによる処分場面積の低減

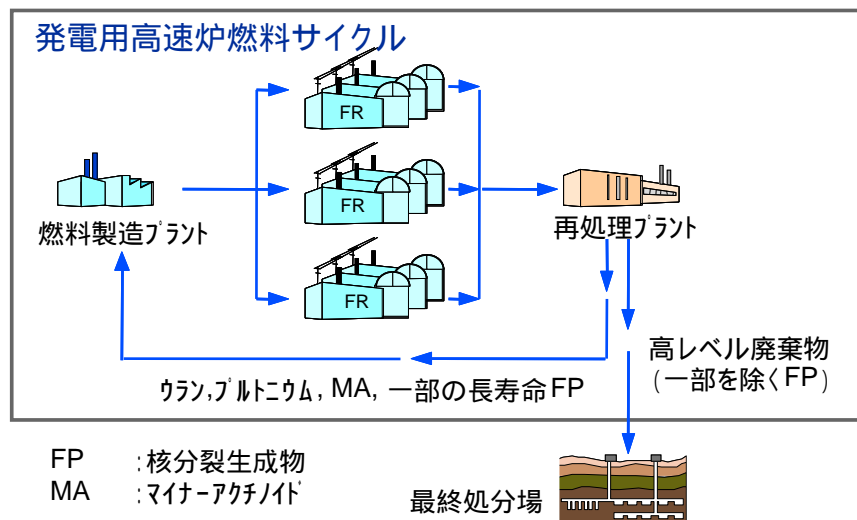


核変換による潜在的有害度低減効果

ADS: 加速器駆動核変換システム (Accelerator Driven System)

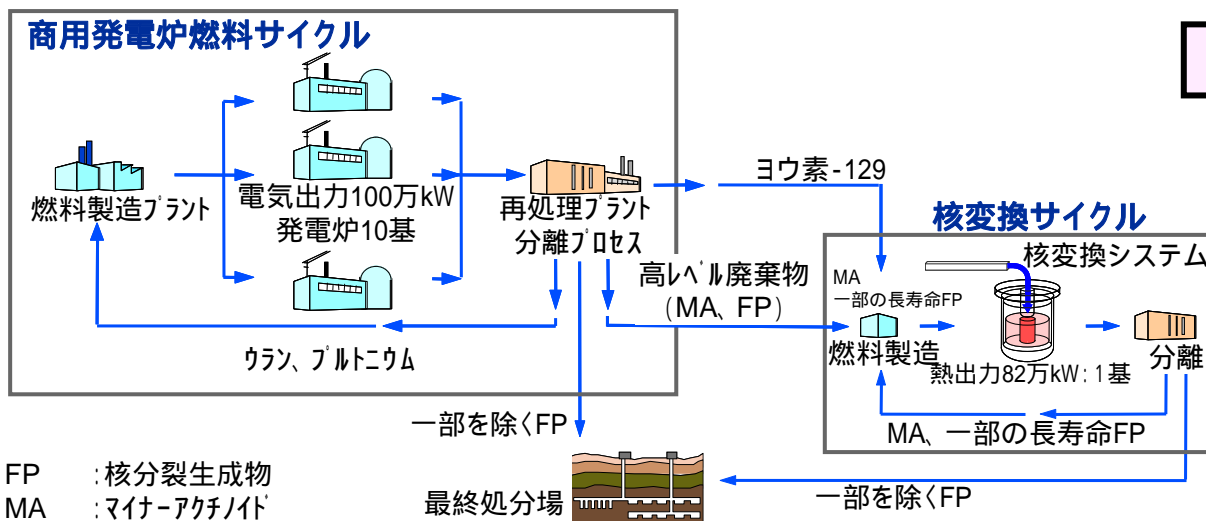
分離変換の意義

- 廃棄物処分に係る物理的・時間的負担を大幅に軽減できる可能性を有する。
- 廃棄物処分体系の設計における自由度の増大。



高速炉サイクル利用型

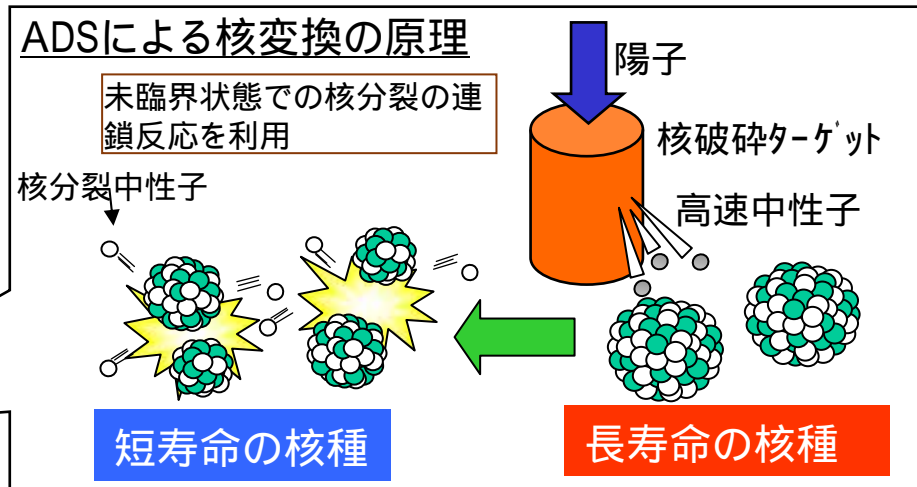
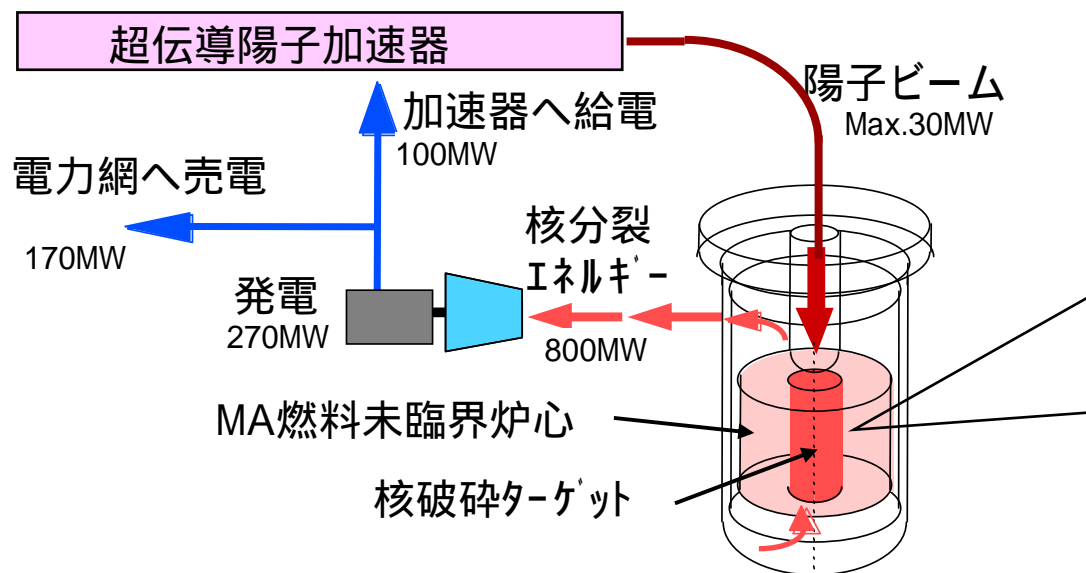
- ・発電炉を用いた分離変換技術。
- ・次世代再処理プラントでウランやプルトニウムと共にマイナーアクチノイドもリサイクル。
- ・核変換には発電炉(高速炉)を用いる。



専用サイクル型(階層型)

- ・発電用サイクルに分離プロセスと核変換サイクルを付設。
- ・核変換には専用システム(加速器駆動炉: ADS)を用いる。
- ・コンパクトな核変換サイクルにマイナーアクチノイドを閉じ込める。

加速器駆動核変換システム(ADS)



ADSの仕組み:

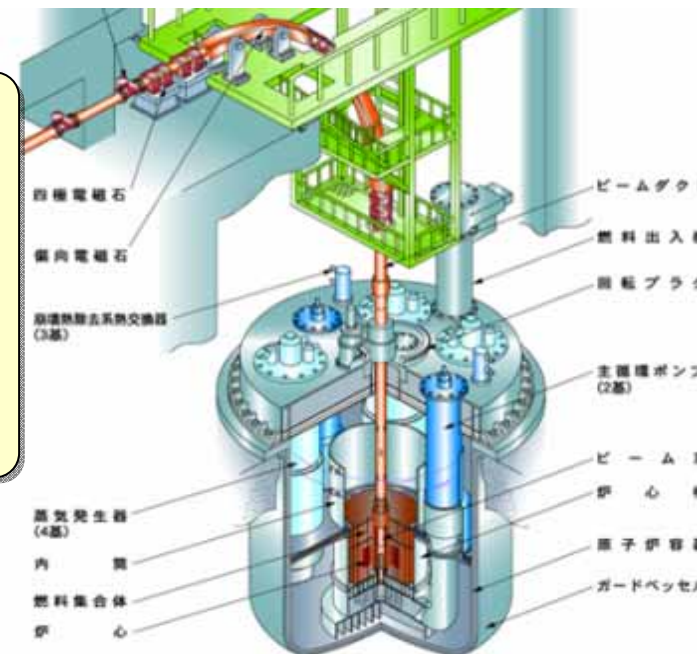
- ・超伝導加速器で大強度の陽子を高効率で加速。
- ・陽子は鉛・ビスマス (Pb-Bi) に入射し、核破碎反応で大量の中性子を発生。
- ・Pb-Biは核破碎ターゲットと炉心冷却材を兼ねる。
- ・燃料の主成分はマイナーアクチノイド (MA)。
- ・中性子によりMAを核分裂反応で核変換。

核分裂の連鎖反応で、1個の中性子を20個に増倍しながら核変換。

- ・核分裂で発生する熱で発電し、加速器に供給。エネルギー収支は正に。

ADSの特徴:

- ・加速器を止めれば核分裂の連鎖反応は停止 **安全性が高い。**
- ・通常の原子炉 (臨界炉) でMA燃料を用いると安全上の問題が生じるが、ADSでは影響が小さいため使用可能。



平成19年：大強度陽子加速器計画中間評価報告書

「核変換技術については、重要な基盤技術として引き続き研究開発を進める必要があるが、核変換実験施設の整備については、原子力政策全体の中で検討していく必要があり、今後、原子力委員会等の評価を踏まえて進めていくことが適当である。」

平成21年：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」を取りまとめ

- 分離変換技術の国レベルでのC&Rとして、分離変換技術に関する研究開発の現状について整理し、本技術の効果及び意義を分析し、技術の進捗状況を踏まえ、今後の研究開発の進め方等について検討を実施。
- 分離変換技術は放射性廃棄物の処分体系を一層合理化できる自由度の増大が期待されることから、研究開発を着実に推進することが関係機関に対して求められた。

平成22年：原子力機構の中期目標(第2期：平成22年度～平成27年度)

「我が国のエネルギー利用に係る技術の高度化と共通的科学技術基盤の形成を図り、新たな原子力利用技術を創出するため」の研究開発の一つとして分離変換技術を記述。

平成23年3月11日以降

- 今後の我が国の原子力利用のあり方について議論が継続中。分離変換の位置付けも不明確。
- どのような選択がなされようとも、「**放射性廃棄物の処理処分**」は、**我々が責任を持って、長期にわたって着実に遂行しなければならない。**

ADSの実現のために解決すべき技術課題

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
ビーム窓の工学的成立性を確証すること
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
Pb-Bi冷却炉の設計及び安全性を高い信頼度で確証すること

今後は、上記の各課題に対する解あるいは解に対する技術的・経済的見込みを得る活動を着実に推進すべきである。

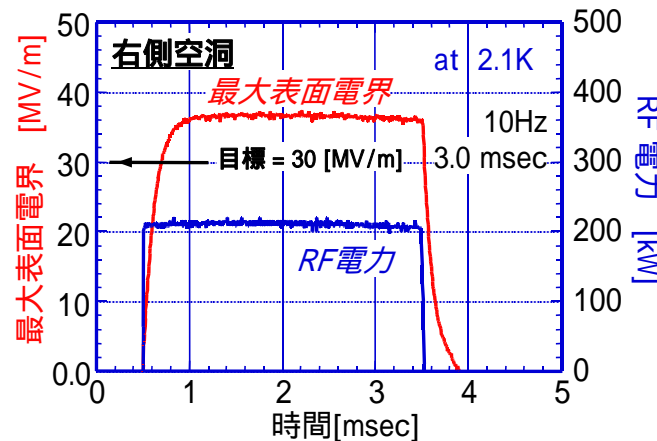
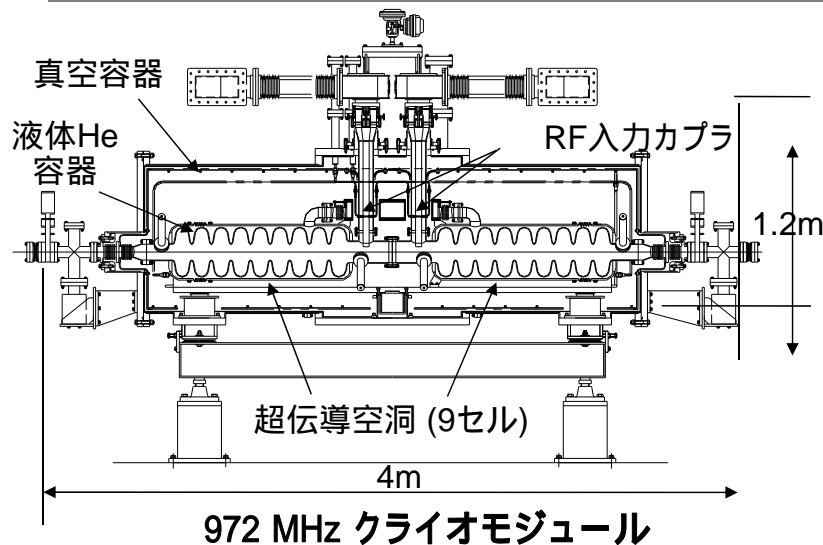
概要課題(核変換システム)に対する取組のあり方

- 「MA核変換システムの核特性評価の信頼性を向上させるため、**J-PRARC第2期の必要性・有効性についても検討すべき**」
- 「**核破砕中性子源と高速未臨界炉心を組み合わせた実験は世界的にも未着手で、J-PRARC等の活用に期待**」

目的: ADS用加速器に必要な高出力(30MW)、高エネルギー効率(30%以上)、高信頼性を得るための**超伝導線形加速器**の開発

研究内容:

- 超伝導線形加速器の構成要素となる**クライオモジュール**を試作し、最大表面電界(目標30MV/m)を測定
- クライオモジュール試験結果を基にADS用加速器システム全体の最適化設計を実施し、エネルギー効率、安全系としての加速器緊急停止系の検討を実施



クライオモジュールの試験結果

加速器構成最適化後の所要電力

構成機器	所要電力
超伝導空洞のRF源	69.6MW
四重極電磁石	0.4MW
He冷凍機	16.5MW
100MeV入射加速器	10.0MW
ユーティリティ	9.7MW
合計	106.2MW (効率28%)

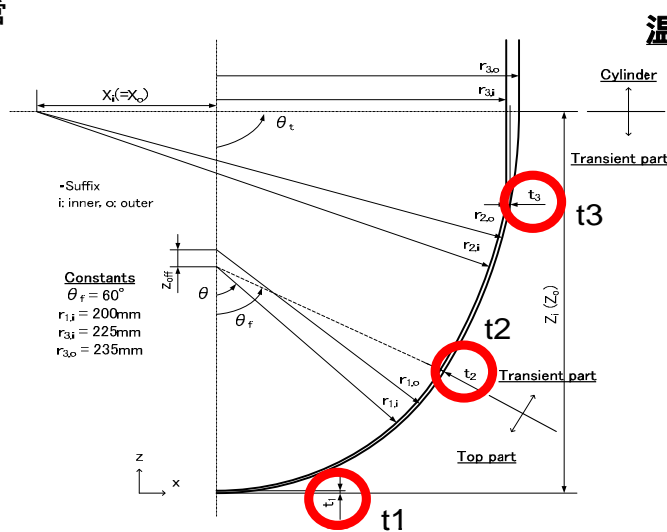
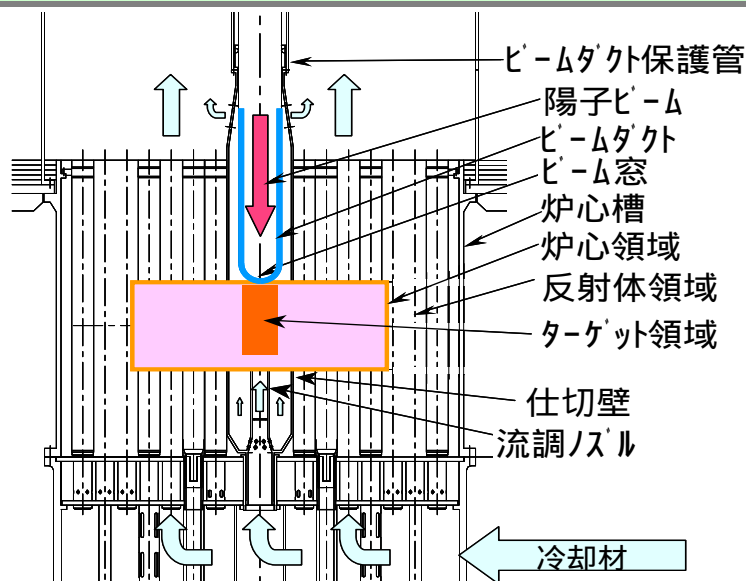
成果と今後の課題:

- 温度2.1Kにて**最大表面電界30MV/m以上**を記録し、高エネルギー部の技術成立性を実証
- システム設計によりADS用加速器(1.5GeV、30MW)の全体像(エネルギー効率、配置、緊急停止系、故障頻度等)を明確化し、ADS用加速器の基本データベースを構築
- 今後、短尺化(現在は470mと推定)、低エネルギー部の効率化、安定な加速器システム等の検討が必要

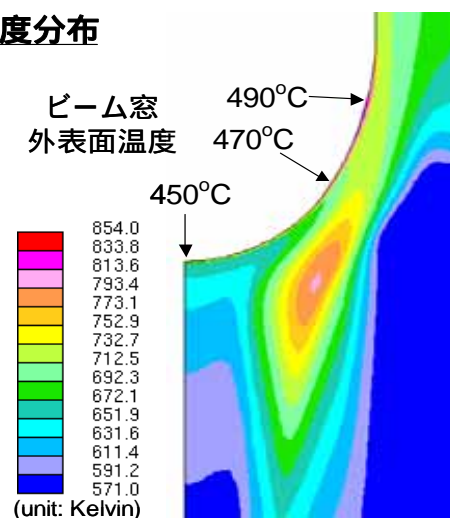
目的: 陽子ビームによる発熱、熱衝撃、鉛ビスマスによる静圧、腐食、照射損傷などに耐える設計が要求される**ビーム窓**の工学的成立性を検討

研究内容:

- 陽子ビーム照射下 (1.5GeV-20mA(30MW))で、設計外圧1.0 MPaに対して安全率3を確保 (最大温度500以下) できる構造を検討



温度分布



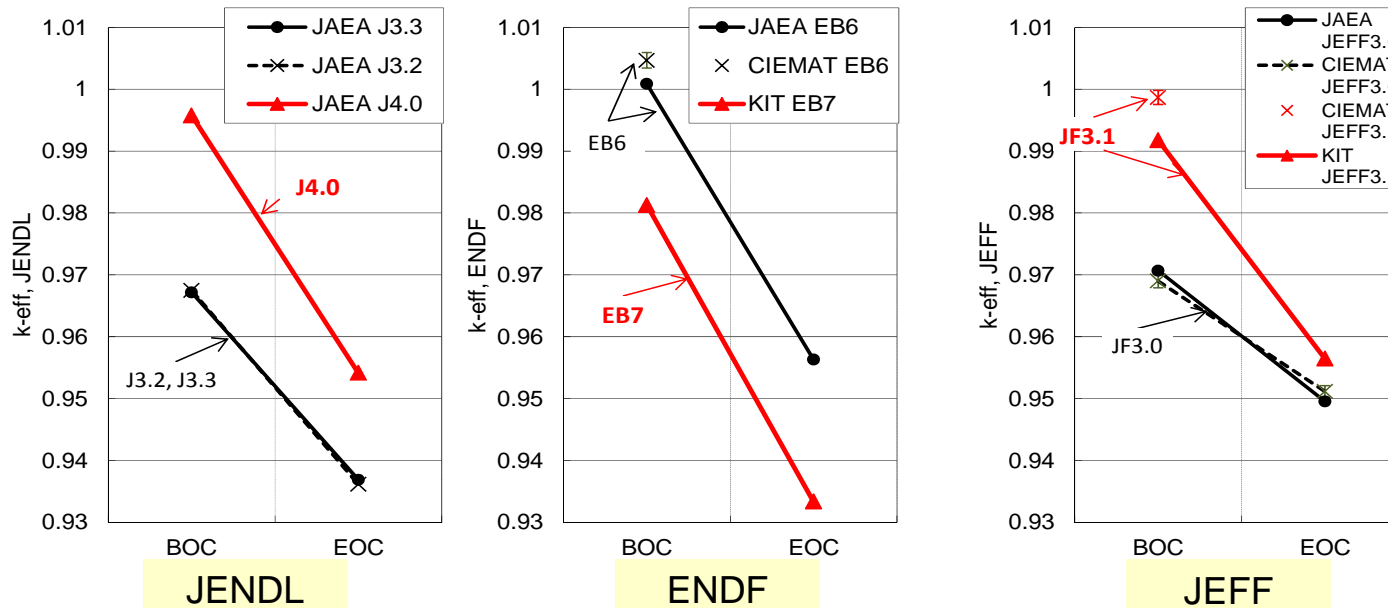
成果と今後の課題:

- ビーム窓の板厚として、2.0 ~ 3.0 mmを選定 (座屈圧力3.54 MPa)。鉛ビスマスによる腐食を考慮しても非照射条件で**座屈に対する健全性が確保できる見通し**を得た
- 今後、さらに、鉛ビスマス中の腐食、熱流動、照射データの蓄積が必要 **各種試験を実施中**
- ビーム窓の寿命評価のためには、特に**照射データ (照射硬化やDBTT(延性脆性遷移温度)) の蓄積が必要**

目的: MA装荷高速中性子体系の現状の核特性解析精度を把握し、核データ改善のための方策を検討

研究内容:

- JAEAのADS設計を基にしたベンチマーク解析問題をIAEAの国際共同研究プログラムに提案し、様々な核データライブラリを使用した解析を実施



JAEAがIAEA-CRPに提案したADSベンチマークの計算結果の比較 (熱出力800MWのADSに対して、600日の燃焼計算を実施。燃焼初期と末期での実効増倍率の比較)

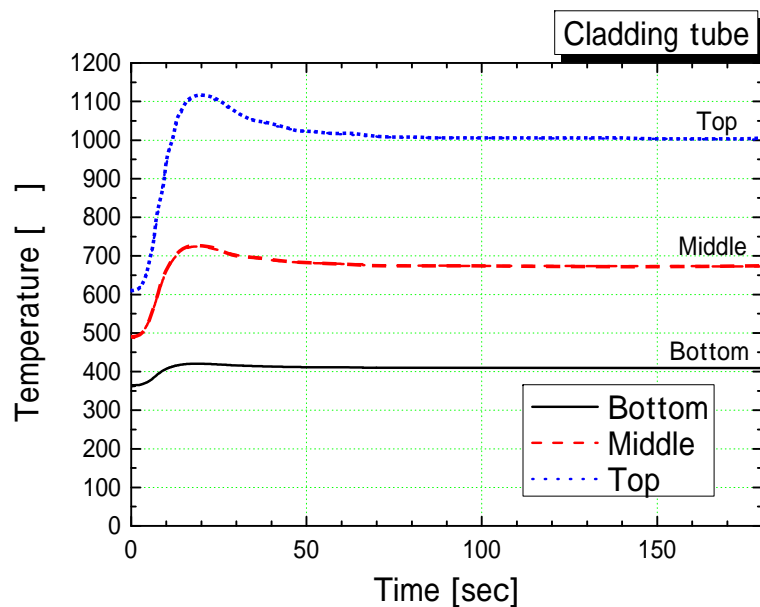
成果と今後の課題:

- ベンチマーク計算の結果は、最新のライブラリ間においても、実効増倍率に対して2%以上の差異が存在することを提示(燃焼初期:0.98 ~ 1.0、燃焼末期: 0.93 ~ 0.96)
- 設計余裕を合理化するために、積分実験と解析手法の高度化により設計精度を向上していくことが必要

目的: 冷却材ポンプ停止時にビーム停止に失敗する場合 (ULOF)等の事故時の影響を把握

研究内容:

- ADSで起こりうる事故事象とその発生頻度をレベル1PSAで系統的に整理し、事故事象及び設計基準外事象を抽出し、それぞれの代表的な場合の燃料溶融の可能性を検討



ULOF時の燃料被覆管温度変化

基準外事象時の各部の最高到達温度()

	UTOP-BOP	ULOF
燃料	2100	1560
被覆管	795	966
冷却材	620	840

窒化物燃料融点: 約2800

被覆管融点(T91): 約1400

冷却材(LBE)沸点: 約1670

成果と今後の課題:

- 代表的な事故事象 (BWB: ビーム窓破損、PLOHS: 除熱源喪失)及び設計基準外事象 (UTOP-BOP: ビーム出力増大、ULOF: 冷却材流量喪失) に対する予備的安全解析(SIMMER-IIIコード)を実施
- 設計基準外事象に対して、炉心損傷や炉心損傷に伴う最臨界の可能性は極めて低いことを確認

安全性、信頼性、経済性の高いADS用加速器の実現

- 安全性、信頼性向上には、J-PARCやSNSの加速器運転経験の蓄積が重要。

ビーム窓の工学的成立性の確証

- 陽子ビーム照射下での液体鉛ビスマターゲットの運転
- 寿命評価のために液体鉛ビスマス環境下での照射データ蓄積。

未臨界炉心の制御等の炉物理的課題の解決

- MA装荷体系の核特性予測精度検証のためのMA装荷炉物理実験。

Pb-Bi冷却炉の設計及び安全性の確証

- 基礎データを蓄積するとともに、最終的には、ある程度出力規模(MWクラス)の実験炉の運転が必要であり、実験炉級ADSの建設を計画している欧州や中国との国際協力が重要。

MA装荷体系の炉物理特性及び未臨界炉心の炉物理的性質を探索

ADSビーム窓用材料の研究開発と核破砕ターゲットの技術開発

核変換物理実験施設

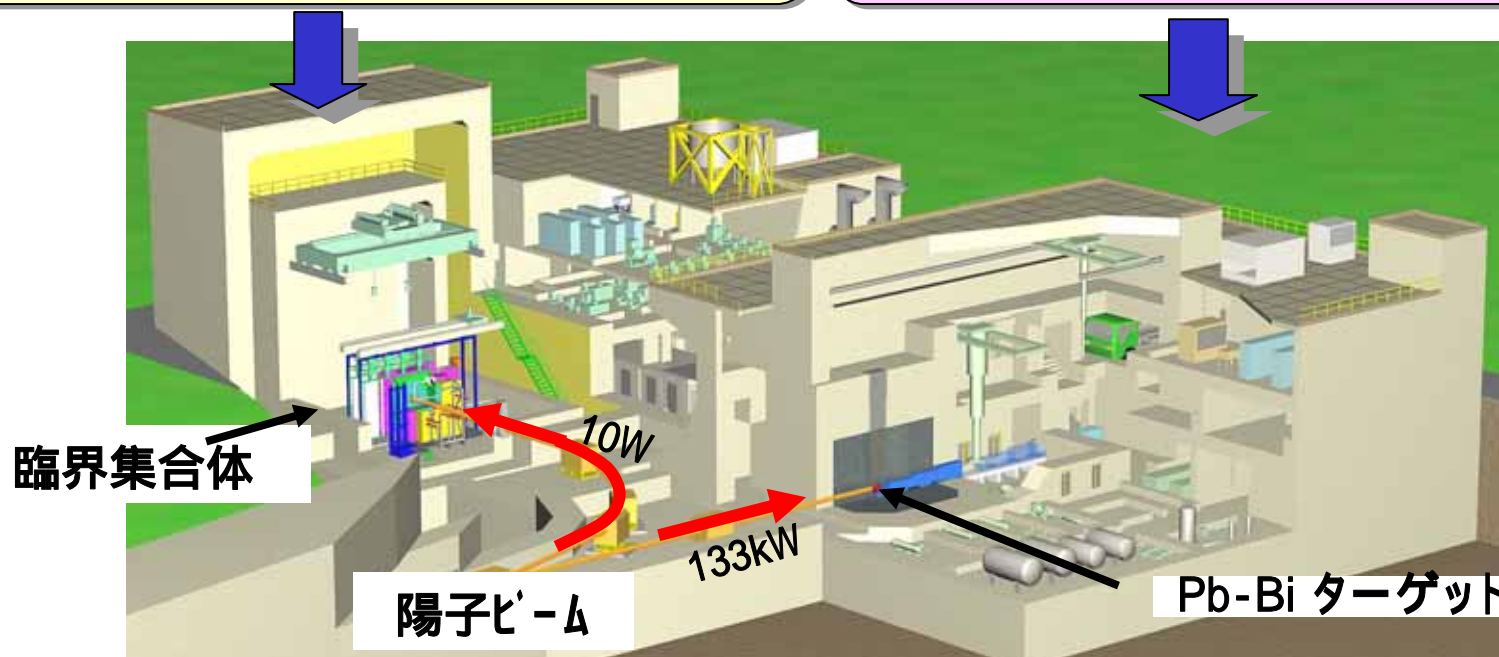
TEF - P

施設区分：原子炉(臨界実験施設)
陽子ビーム：400MeV(600MeV)、10W
熱出力：500W以下

ADSターゲット試験施設

TEF - T

施設区分：放射線発生装置
陽子ビーム：400MeV、133kW
ターゲット材料：鉛・ビスマス



- ◆ 現状では、J-PARCには陽子照射できる施設が無い。
- ◆ 材料照射試験の他に、放射性同位元素(RI)の製造、物理学実験など、J-PARCの陽子ビームを多様な目的に利用するニーズは高い。

材料照射

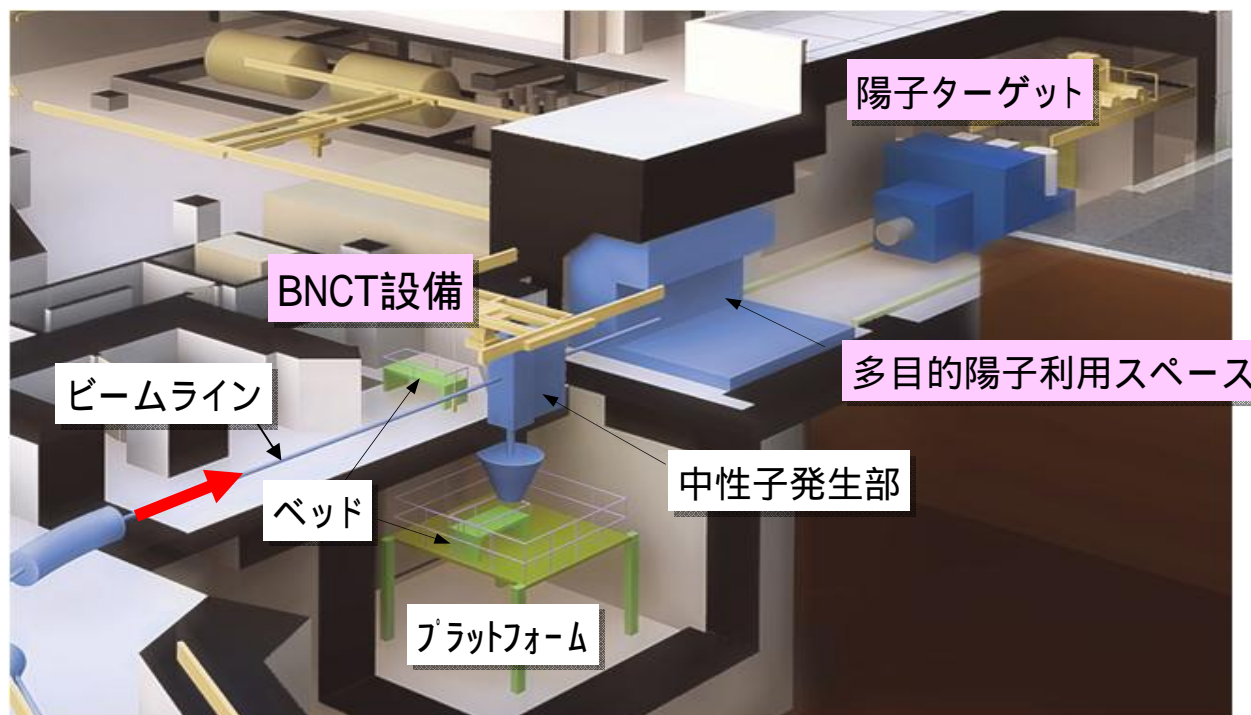
RI製造

物理学実験

ADS窓材料の照射試験

我が国におけるRIの安定供給に貢献

超冷中性子の発生、短寿命核ビームの発生など、最先端物理学に貢献



□ 陽子・中性子利用の新たな可能性が広がり、産業の活性化や新たな知の創造につながる。

ADSターゲット試験施設の多目的利用例
(BNCT研究施設を付設した場合の検討例)

国内(原子力学会)

「分離変換・MAリサイクル」研究専門委員会

- 「MA燃料炉心に対しては核特性評価技術の向上が重要であり、今後、積分実験等により、核的影響評価のための基礎データ蓄積や評価手法の向上を行う必要がある。」

「アクチノイド・マネジメントに関する炉物理実験施設」研究専門委員会 (原子力学会炉物理部会「次世代炉物理実験施設活用方策」検討会)

- 喫緊の課題の一つとして「マイナーアクチノイド核種(MA)や長寿命核分裂生成物(LLFP)の核変換に関する技術開発」があり、そのためにMAを装荷可能な臨界実験装置が必要であるとした。

国外(OECD/NEA)

「Research and Test Facilities Required in Nuclear Science and Technology (2009)」 (OECD/NEA)

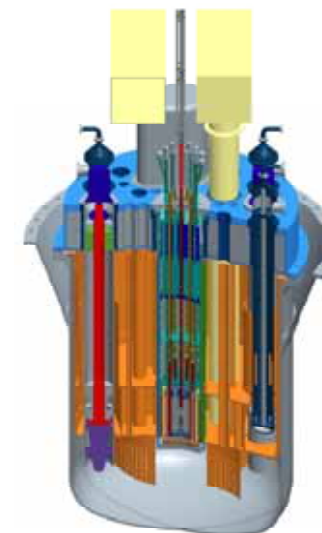
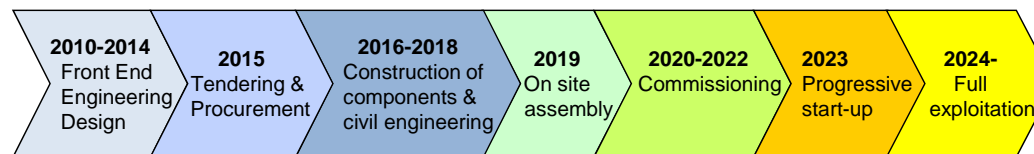
- 実証炉にすすむ前に、MA取扱及び陽子加速器と高速スペクトル炉を結合するための基本技術が、システム設計の信頼性、安全性評価を保証し、若い科学者と技術者を訓練するために非常に重要である。そのような観点から、日本のJ-PRACの核変換実験施設は非常に重要な役割を果たすと期待される。

「MAマネジメント積分実験に関する専門家会合(2009～2012)」(OECD/NEA)

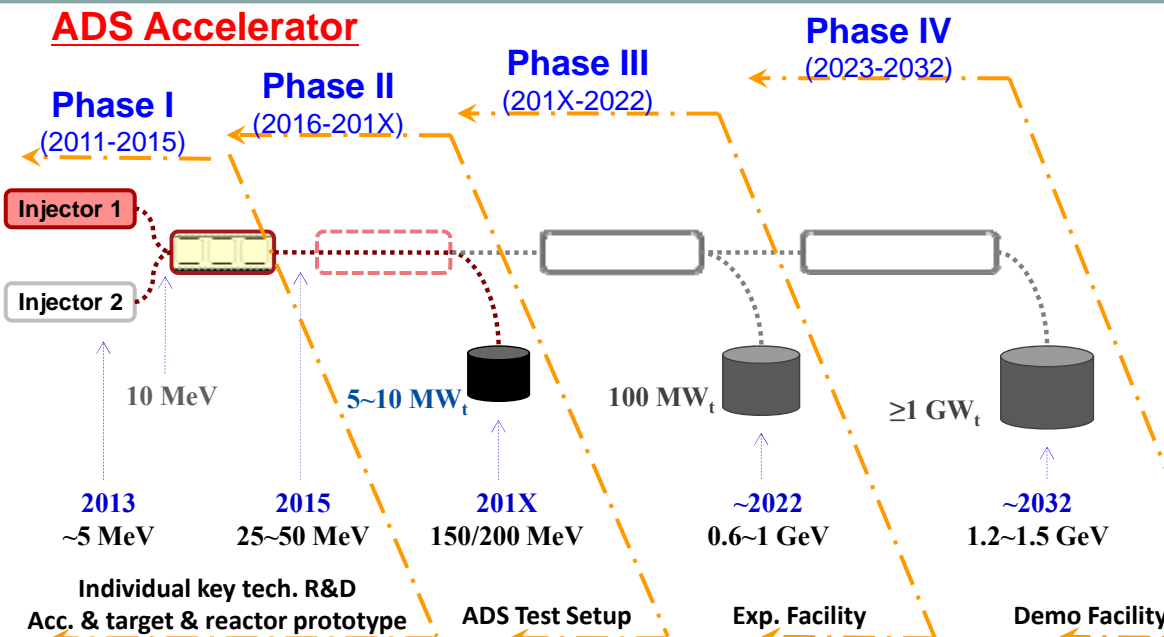
- 軽水炉、高速炉および加速器駆動炉などの原子炉におけるMA核変換の検討に必要なMA積分実験の整理と今後の実施項目、必要な実験装置の仕様等について検討中。
- J-PRACの核変換実験施設の重要性について、参加者間で共通認識を得ている。

ベルギー-SCK・CENにおけるMYRRHAプロジェクト

- MYRRHAは50 ~ 100MW程度の出力を持つ多目的利用ADS (核変換実験、鉛合金高速炉開発、燃料・材料照射、RI製造等)。
- FP7 (2009-) でベルギー-SCK/CENに中央設計チーム (CDT) を組織し、2015年の評価 (建設の可否) に向けて、精力的に研究開発を行っている。

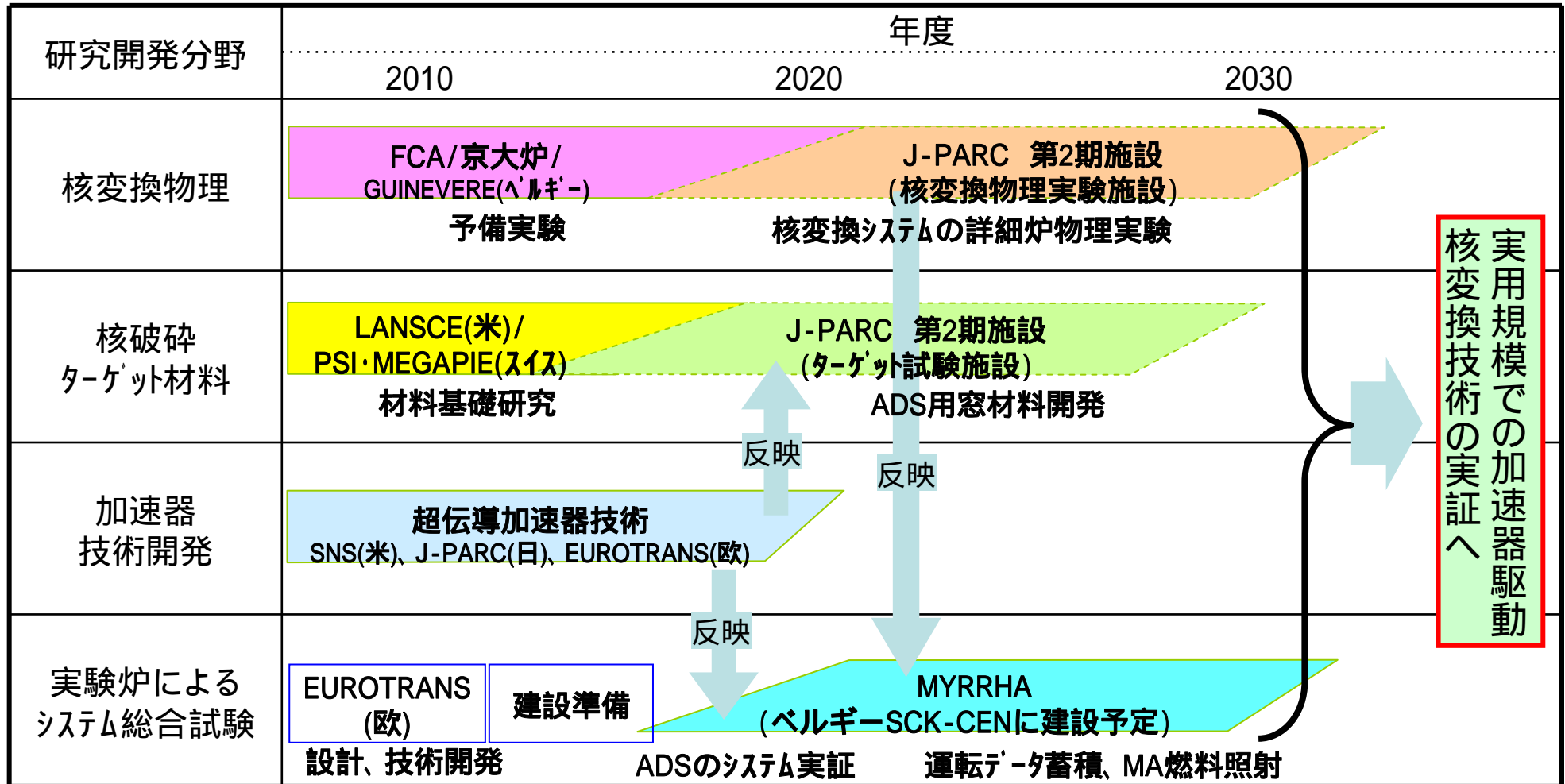


ADS Accelerator



中国におけるADS研究開発

- 持続的な原子力エネルギーの利用のために、高速炉は燃料増殖のため、ADSは核変換のため、研究開発を進めている。
- 2032年に800MWthの原型炉を運転することを目標に研究開発を実施。
- Phase1用の資金 (\$250M) 及び建設用地 (内陸部) を確保。



□ 分離変換技術の役割

- 今後の原子力政策が議論されているが、どのような選択がなされようとも、「**放射性廃棄物の処理処分**」は、我々が責任を持って、長期にわたって着実に遂行しなければならない。
- ADSは廃棄物処分の負担軽減に貢献できる可能性を有する。

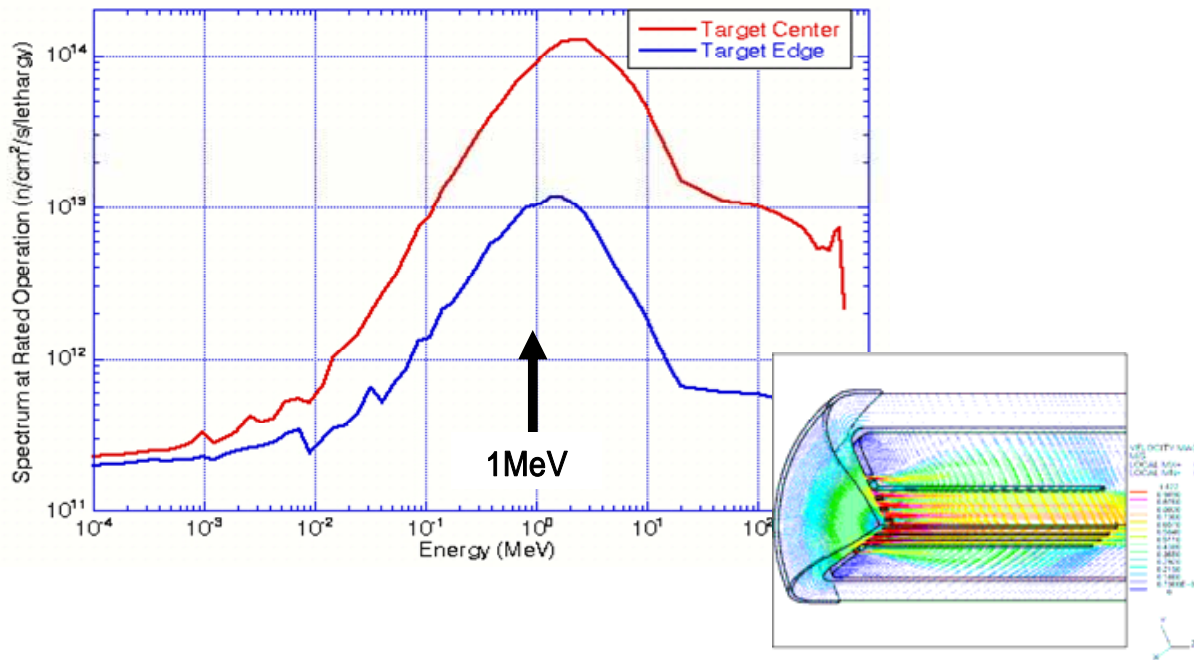
□ 原子力機構におけるADS研究開発

- 原子力委員会C&R(平成21年)で着実な研究開発の実施が求められた。
- 原子力委員会で指摘された技術開発課題を中心に、その解決に向けた研究開発を実施。
- ADSの研究開発で必要不可欠な技術開発課題を抽出。
MA装荷体系での炉物理実験やビーム窓材料の照射試験
- J-Parc核変換実験施設は上記の研究開発課題解決のために計画。国内外専門家間で、その有効性・必要性等についてのコンセンサスを得ている。

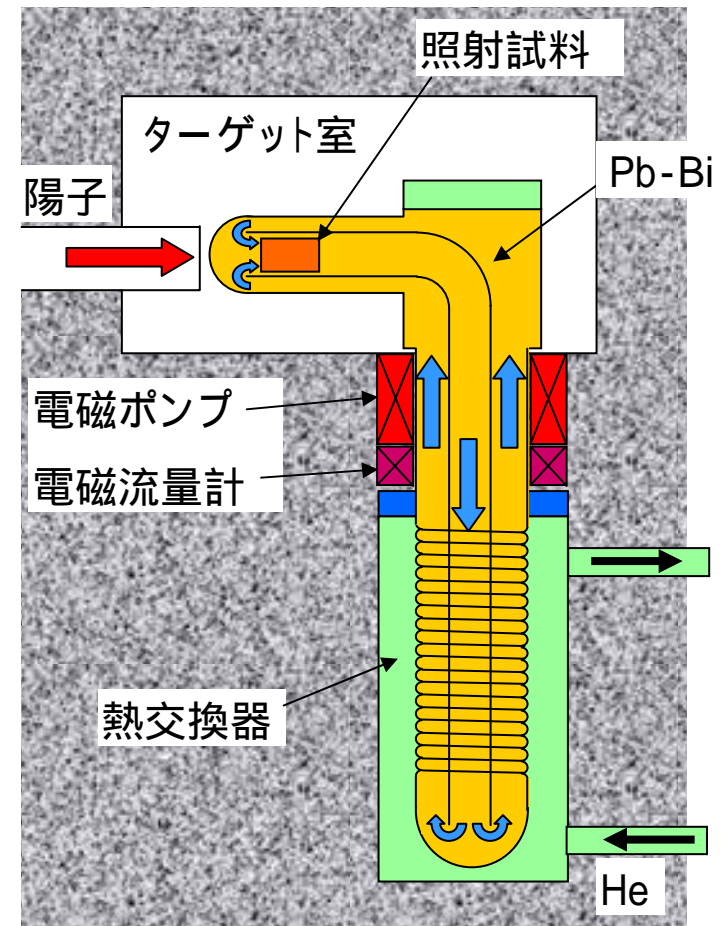
□ 今後の研究開発の進め方

- 今後の原子力政策の動向に沿って、研究開発の進め方を考えていく必要がある。

- 陽子ビームと高速中性子による材料照射施設
- ADSのビーム窓候補材、FBR用構造材、核融合材料等の照射が可能
- 鉛ビスマス核破砕ターゲットの条件(温度、流速等)を変え、ADS実用化の際に必要なデータベースを構築

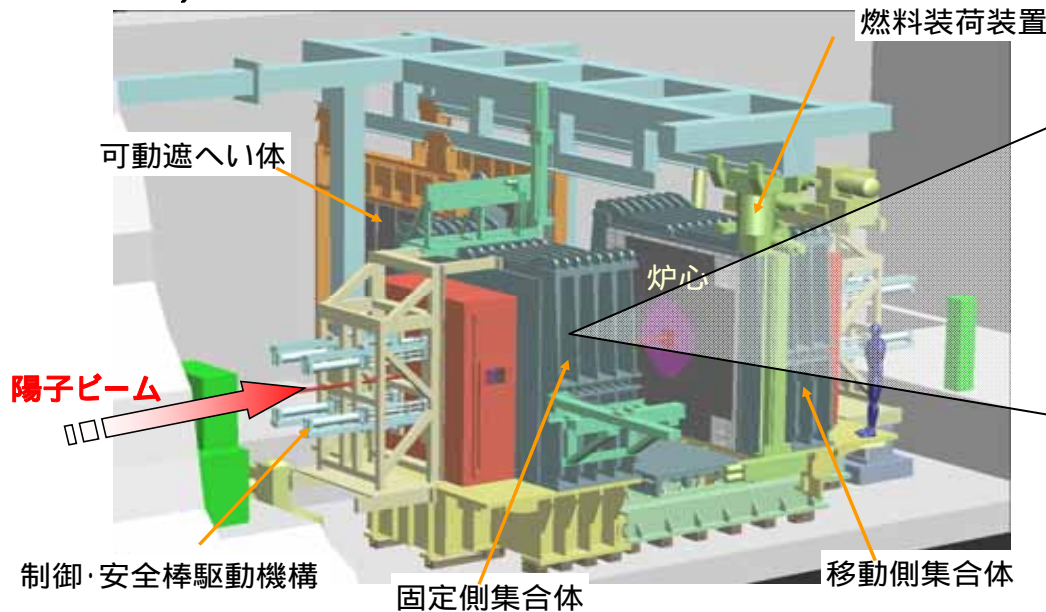
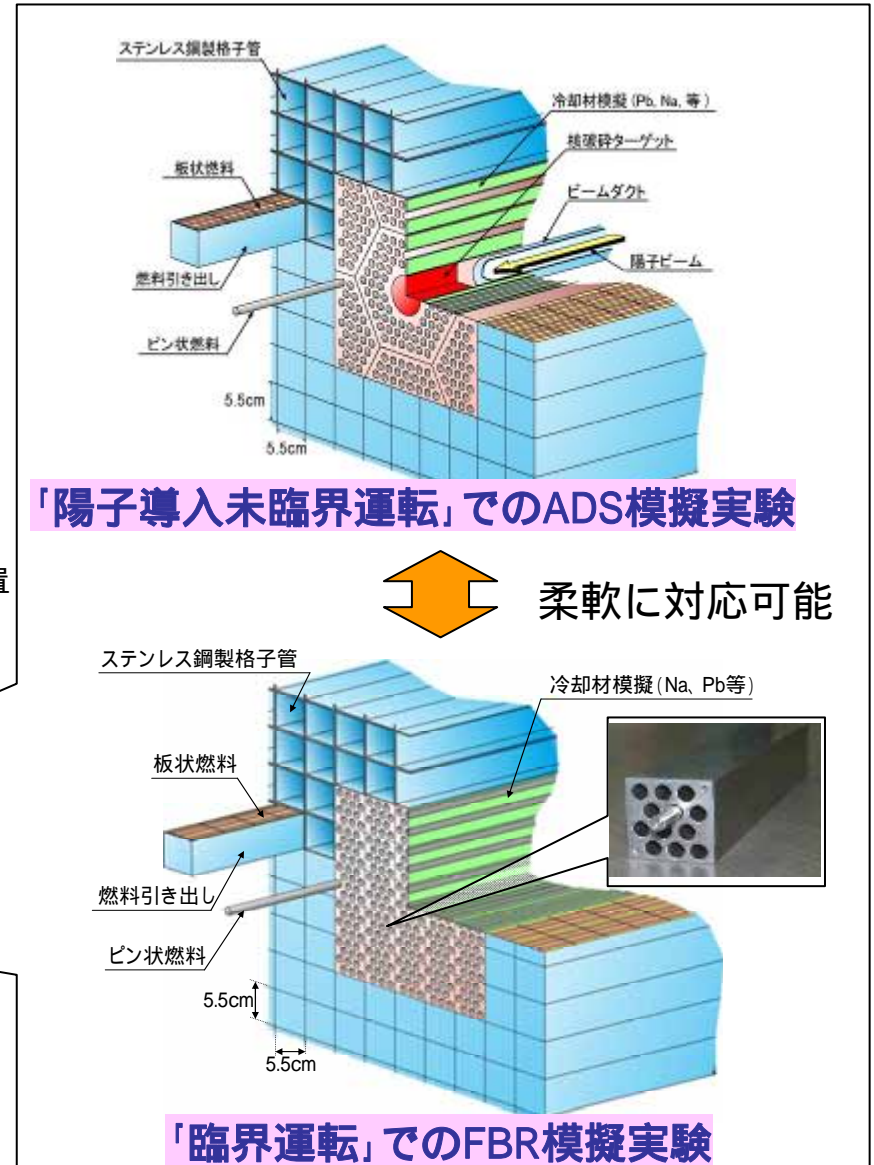


照射試験領域の中性子束のエネルギー分布



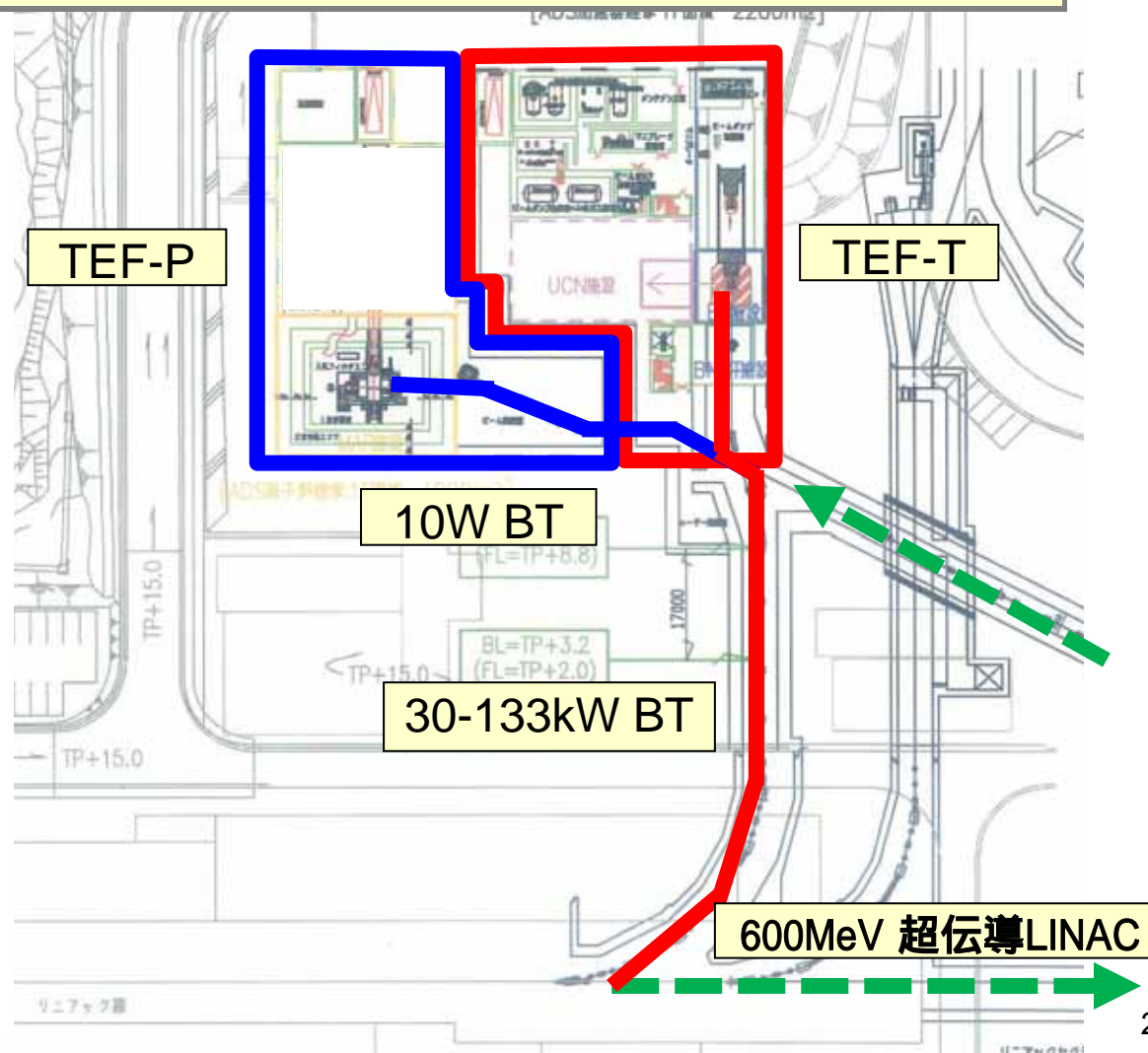
ADSターゲット試験施設で採用予定の2重管型ターゲット概念

- J-PARC第2期で建設を計画
- 既存の高速炉臨界実験装置 (FCA) に準拠した設計
- 核変換に係わる炉物理・核データの研究を実施 (ADSとFBRの双方に貢献)
- 中心5×5格子管を交換可能とし、**ピン燃料装荷実験**や**高発熱試料 (MAやFP)**を用いた実験に供することのできるようにする。(但し、遮蔽、冷却、遠隔操作が必要)



- ▶ 前期: ビーム輸送系 (400MeV, 30 ~ 133kWビーム)、ADSターゲット試験施設(TEF-T)
- ▶ 後期: レーザー荷電変換装置、核変換物理実験施設(TEF-P)

- **ADSターゲット試験施設(TEF-T)**を先行して建設
 - ターゲットは可変(固体・液体鉛ビスマス)。ADSビーム窓材料照射試験を実施。
 - 多目的陽子・中性子利用施設として、RI製造、物理学実験等も可能。
- TEF-T建設後に、**核変換物理実験施設(TEF-P)**を建設
 - MA燃料装荷可能な施設として、核変換システムの核特性の研究を実施。
 - レーザー荷電変換でTEF-Pで使う10Wビームを取り出し。



(参考資料)核変換実験施設整備の年次展開案

