

加速器駆動システム(ADS)による 核変換技術の研究開発の状況



平成25年11月26日

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

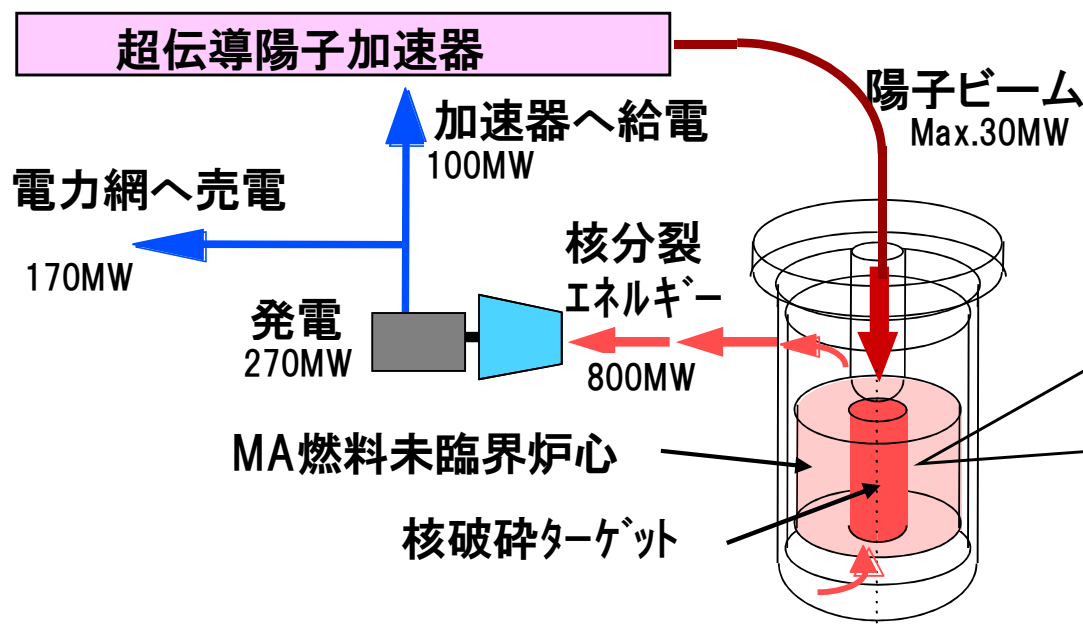
ADSを用いた核変換システム

ADSの仕組み:

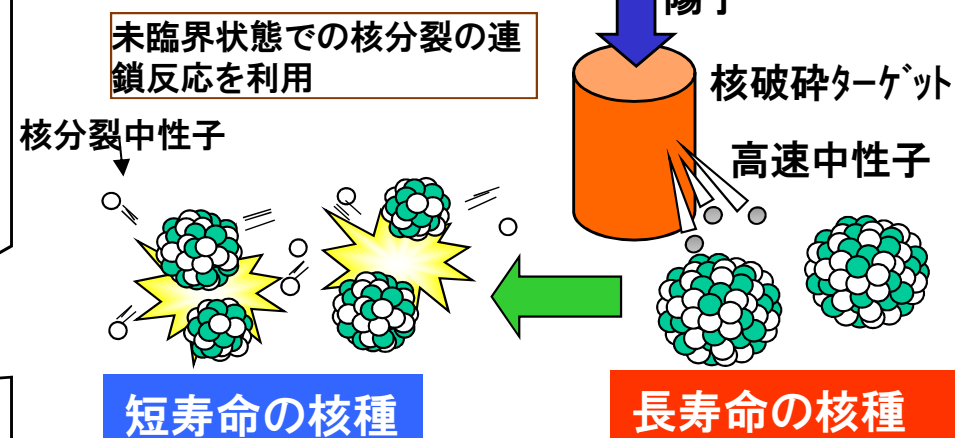
- ・**超伝導加速器**で大強度の陽子を高効率で加速。
- ・陽子は**鉛・ビスマス(Pb-Bi)**に入射し、核破碎反応で大量の中性子を発生。
- ・燃料の主成分は**マイナーアクチノイド(MA)**。
- ・中性子によりMAを核分裂反応で核変換。
→核分裂の**連鎖反応**で、1個の中性子を20個に増倍しながら核変換。

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ためMA割合を低くしなければならないが、未臨界で運転するADSでは影響が小さいためMA割合を高くできる → **効率的なMA核変換**。



ADSによる核変換の原理



ADSに関する指摘事項と対応状況

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	➤ 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。
ビーム窓の工学的成立性を確証すること	➤ 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 。
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	➤ 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。
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	➤ 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 。

枢要課題(核変換システム)に対する取組のあり方



枢要課題(核変換システム)に対する取組のあり方

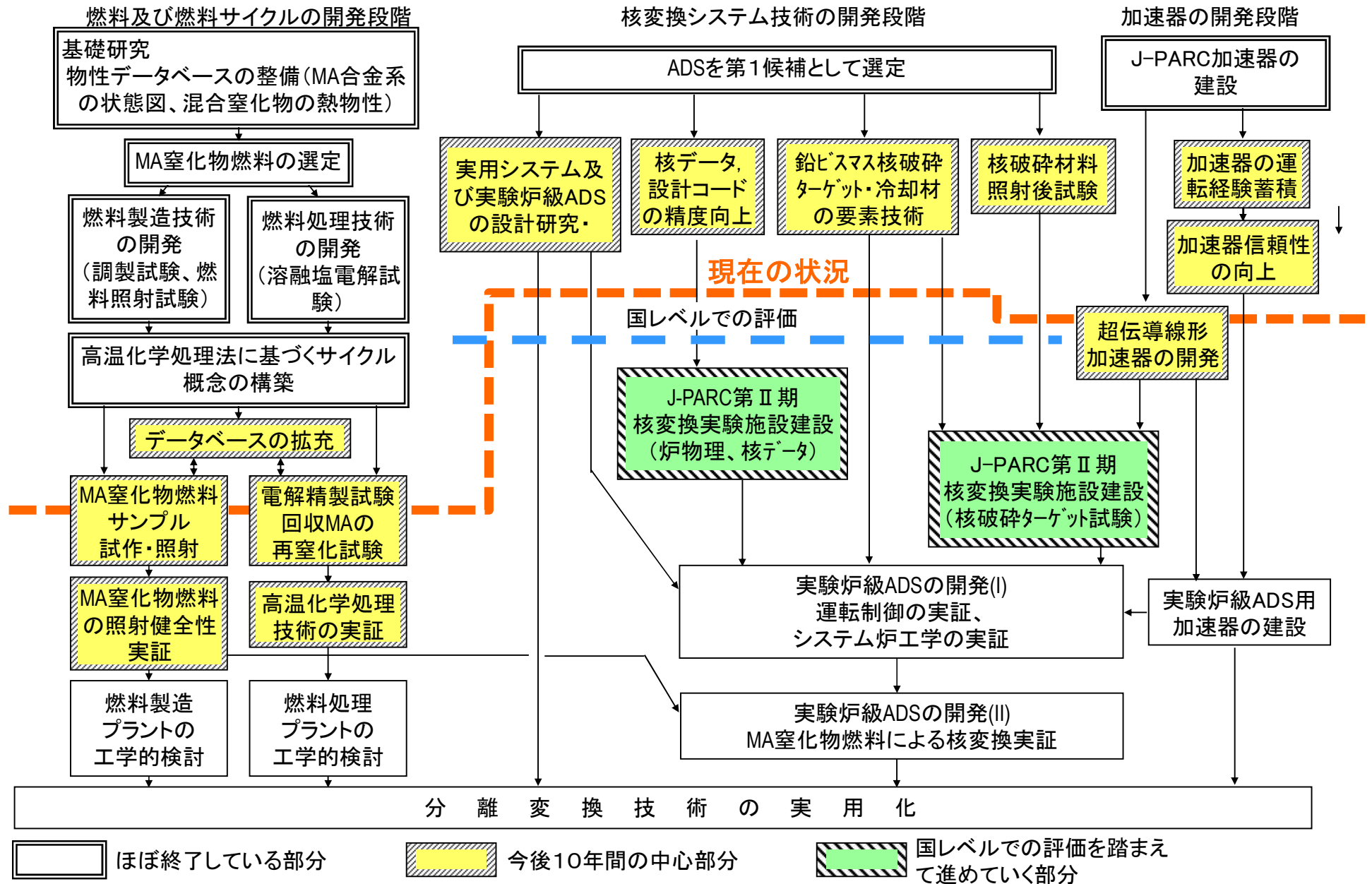
ADS

- **基盤的データの蓄積、炉心概念の検討、加速器や鉛ビスマス技術、核破碎ターゲットの研究開発が必要。**海外の同種の取り組み、加速器中性子源の開発の進捗、高速増殖炉の実用化を目指した研究開発等と連携して効率よく推進していくべき。
- 核破碎中性子源と高速未臨界炉心を組み合わせた模擬実験は世界的にも未着手、**J-PARC等の活用**が期待される。その際には、加速器－未臨界炉結合実験としての京都大学原子炉実験所における実験成果等を十分に参考にすることが望まれる。

(1) 平成21年原子力委員会C&Rにおける指摘事項と対応状況

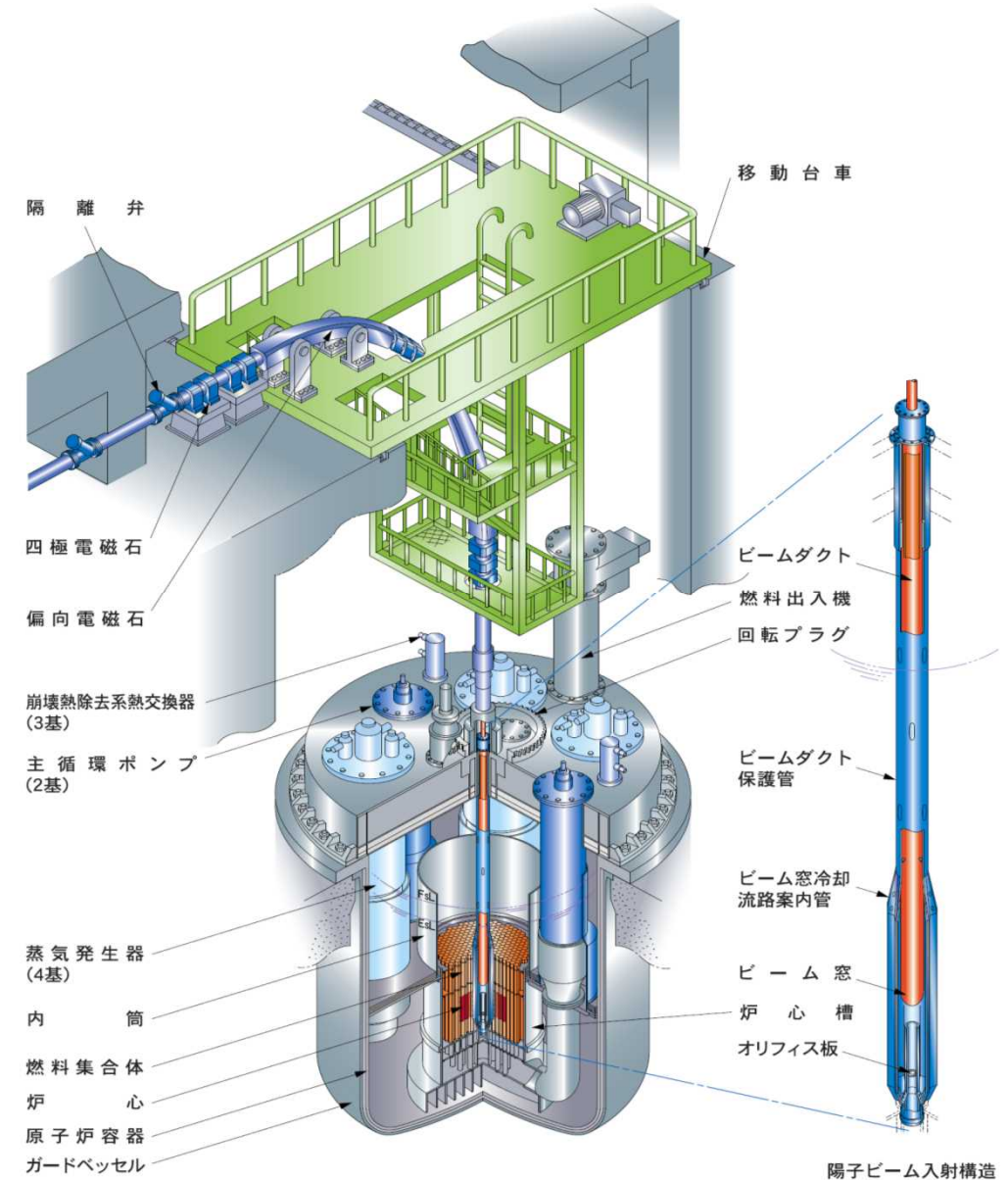


平成21年原子力委員会C&Rで提示したロードマップ



JAEAで検討しているMA核変換用ADSの概略仕様

- ・ 陽子ビーム : 1.5GeV
- ・ 核破砕ターゲット : Pb-Bi
- ・ 冷却材 : Pb-Bi
 入り口 : 300°C、出口 : 407°C
- ・ 最大 $k_{\text{eff}} = 0.97$
- ・ 熱出力 : 800MWt
- ・ MA初期装荷量 : 2.5t
- ・ 燃料組成 :
 (MA + Pu)N + ZrN
- ・ 核変換効率 :
 10%MA / 年
- ・ 燃料交換法 : 600EFPD, 1 バッチ
- ・ 主循環ポンプ : 2基
- ・ 蒸気発生器 : 4基
- ・ 崩壊熱除去系 : 3系統

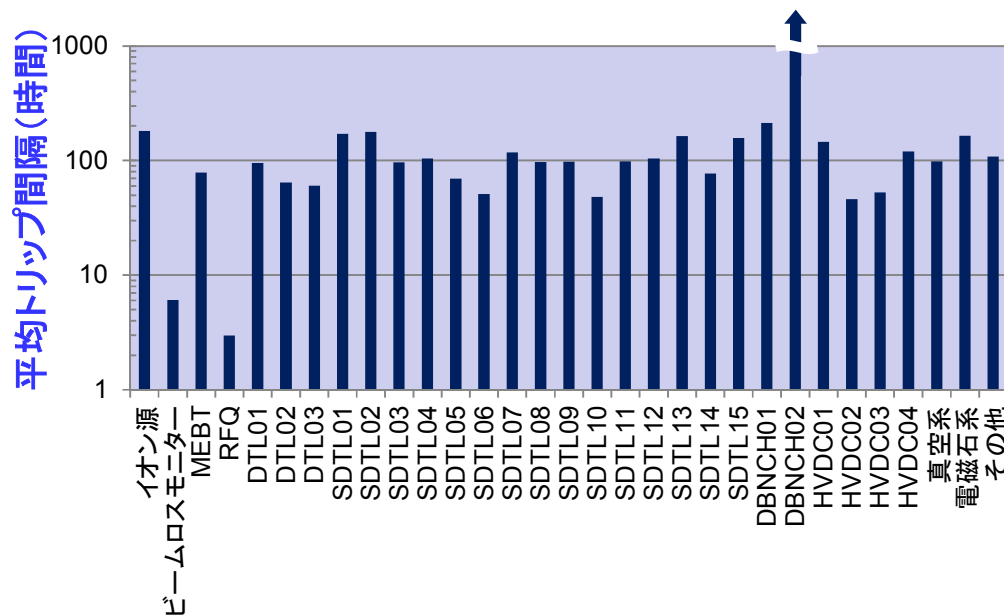


(2) ADSに関する研究開発

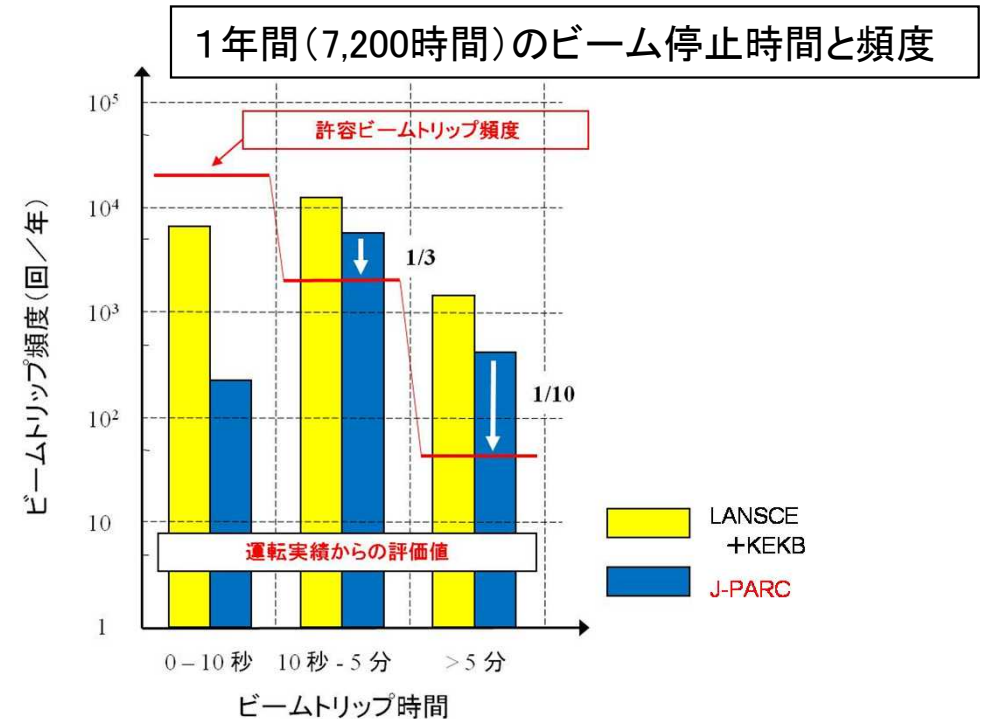
超伝導加速器の信頼性評価



目的： 現状の加速器ビーム停止頻度から推定されるADS用加速器の停止頻度と、ADSの許容ビームトリップ頻度を比較し、今後の研究開発の方向性を示す



J-PARCリニアックの運転データ(H22.10～H23.3までの104日間、平均稼働率95.4%)から算出した各要素設備毎の平均トリップ間隔



成果と今後の課題

- J-PARCリニアック等の既存加速器の運転データを解析し、その結果に基づいてADS用加速器のビーム停止頻度を推定。
- ビーム停止頻度低減の目標を、ビーム停止時間毎に明確化。10秒以上のビームトリップは、現状の1/3～1/10までビームトリップ頻度を低減する必要。
- 今後、更なるJ-PARC運転データの蓄積(～1MW)、要素設備毎の信頼性目標の設定、冗長性の検討の研究を進める。

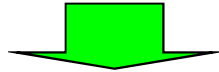
陽子ビーム窓の工学的成立性に関する検討

□ ビーム窓構造成立性の検討条件

- ✓ 設計外圧1.0 MPa(外圧のノミナル値=0.8 MPa)
に対して安全率3を確保

□ 検討条件

- ✓ ビーム条件: 1.5 GeV-20 mA (30 MW)
- ✓ 鉛ビスマス流速: < 2m/s
- ✓ ビーム窓温度: < 500°C

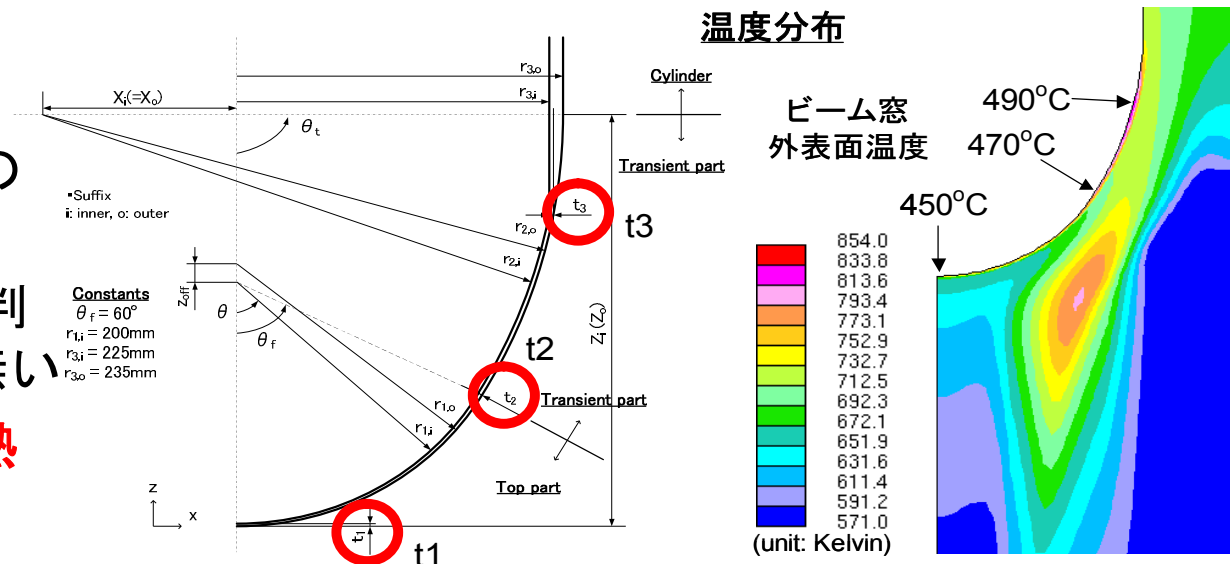
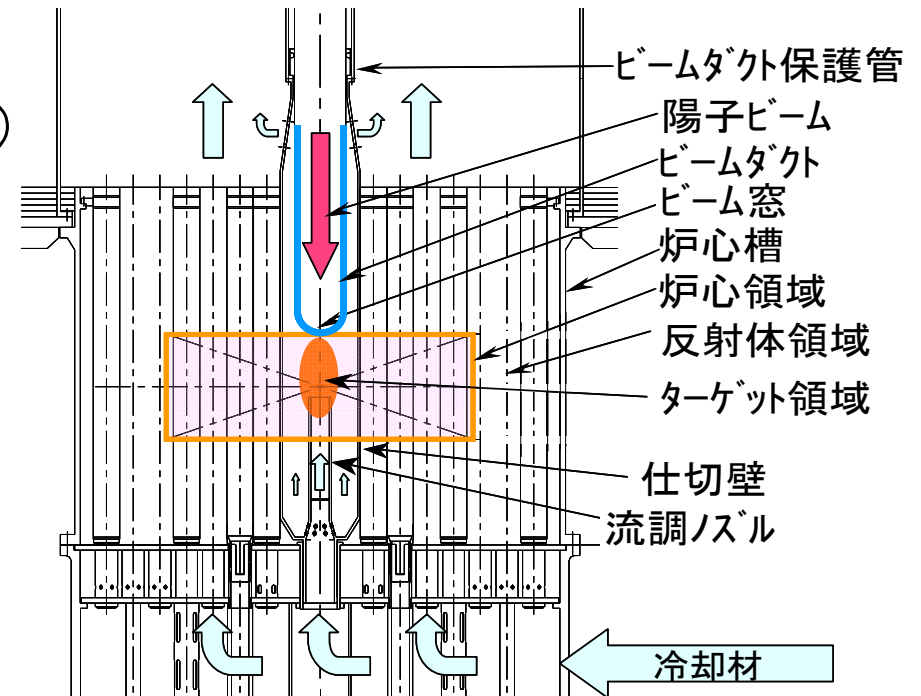


- $t_1/t_2/t_3 = 2.0/3.0/3.0$ mm(座屈圧力 3.54 Mpa)を選定。非照射条件で成立見込み(腐食考慮: 約55 μ m/600日)。

□ 照射の影響

- ✓ **照射硬化**: 挫屈耐性増加 (PSIでの陽子照射試験結果からの類推)
- ✓ **DBTT(延性脆性遷移温度)**: 直接判断できる照射条件でのデータが無い

- 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。



(2) ADSに関する研究開発

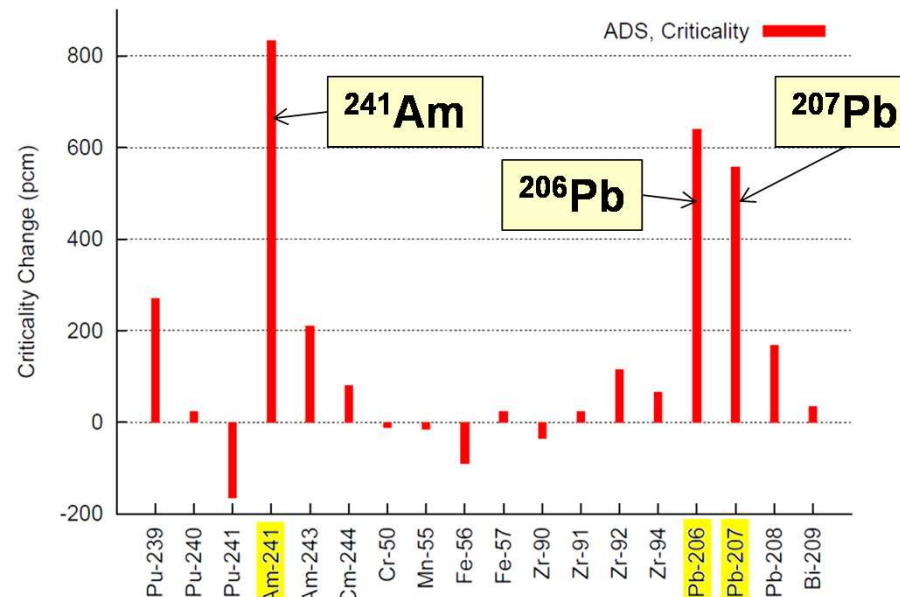
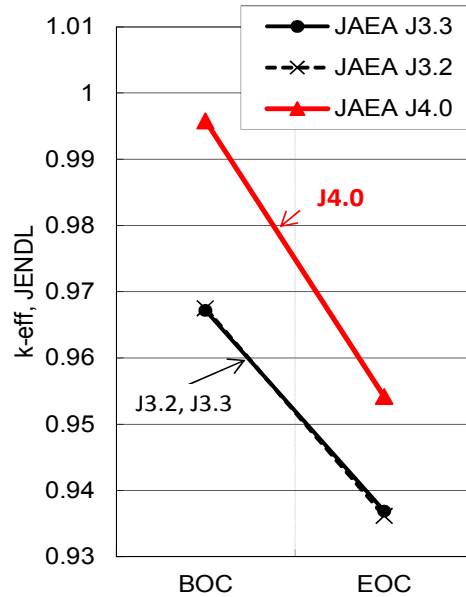
ADSの核特性解析精度の向上



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



ADSベンチマークの計算結果(JENDL)及び解析結果の差に寄与する核種 (熱出力800MWのADSに対して、600日の燃焼計算前後の実効増倍率)

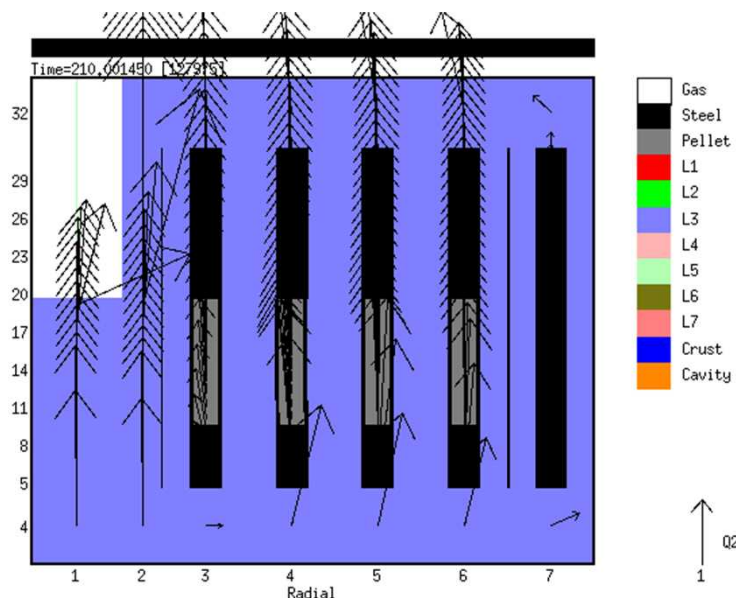
成果と今後の課題:

- 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

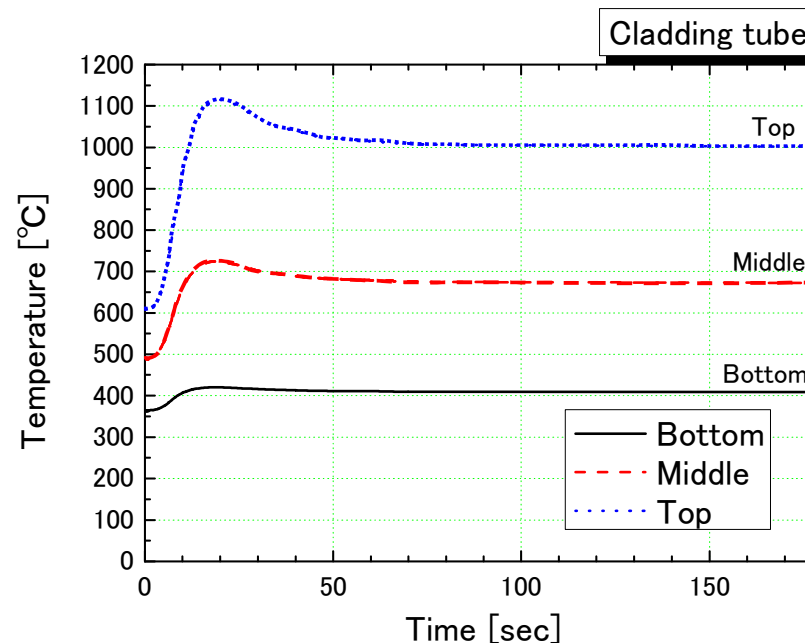
ADSの動特性解析

目的： ADSの典型的事故事象における炉心損傷の可能性の検討及び核設計の予測精度の検討。

閉塞した集合体側に流れが変化



ADSにおけ冷却材流路閉塞事象の解析例



ADSにおけるULOF時の燃料被覆管温度変化

成果と今後の課題

- ❑ レベル1PSA手法を用いて異常事象を系統的に整理。炉心損傷に至る可能性のある典型的な事故事象（ビーム窓破損、除熱源喪失事象、ビーム電流増大、スクラム失敗時流量喪失、冷却材流路閉塞）について、動特性解析を実施。
- ❑ 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。ビームが止まらない極めて保守的な条件で燃料・被覆管温度が融点以下であることを確認。
- ❑ 今後は、クリープ破損等の詳細な燃料健全性評価や長期間の電源喪失事象等を想定した場合の詳細なプラント動特性と機器設計が課題。

原子力委員会・分離変換技術検討会での指摘



ADSの実現のために解決すべき技術課題(MA含有燃料サイクル)

- ⑤ 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
窒化物燃料の乾式再処理技術は高速炉用金属燃料の再処理と多くの技術基盤を共有するため、工学規模への拡大に向けては**高速炉用金属燃料再処理技術の活用を積極的に図るべき**
- ⑥ 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

枢要課題(MA含有燃料)に対する取組のあり方

共通課題

- **Cmを含めたMA含有燃料**基礎データベースの整備が不十分である。
- **高線量・高温環境下**でのMA含有燃料製造の**工学規模での技術的成立性**を判断するための知見が必要である。
- 相対的に施設負荷の小さい**燃料ピン・ペレットレベルでデータの充実**を図り、集合体レベルの施設設計・建設・試験に向けて必要な基礎データの取得を継続することが重要。

ADS用MA高含有燃料

- ADS等を用いた非均質MAリサイクルの場合の**MA含有率の高い燃料の工学規模での製造技術**について知見が乏しい。

核変換用燃料に関する指摘事項と対応状況



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
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">➤ 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を整備、特にデータが不十分であったCmデータを取得(参考資料①)。➤ 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回収法を考案、プロセス原理を確認(次ページ)。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。➤ 高速炉用金属燃料再処理技術開発において、乾式再処理技術工学化に向けた研究開発を実施、使用済み金属燃料(Metaphix燃料)からのNp,Am,Cm回収に成功(電中研) (参考資料②)➤ 軽水炉使用済み燃料由来のMAを原料として用いる小規模リサイクル試験を実施する予定(参考資料②)
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 信頼度で確証する こと	<ul style="list-style-type: none">➤ ADS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を確立し、Cmを含むペレット調製に成功(次ページ、参考資料③)➤ 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、最も重要となる熱物性と固溶度の評価式を開発(次々ページ、参考資料④)。➤ 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を定式化(次々ページ、参考資料⑤)。➤ EUROTRANSへの参加により、酸化物分散型MA高含有燃料に関する知見を得た。

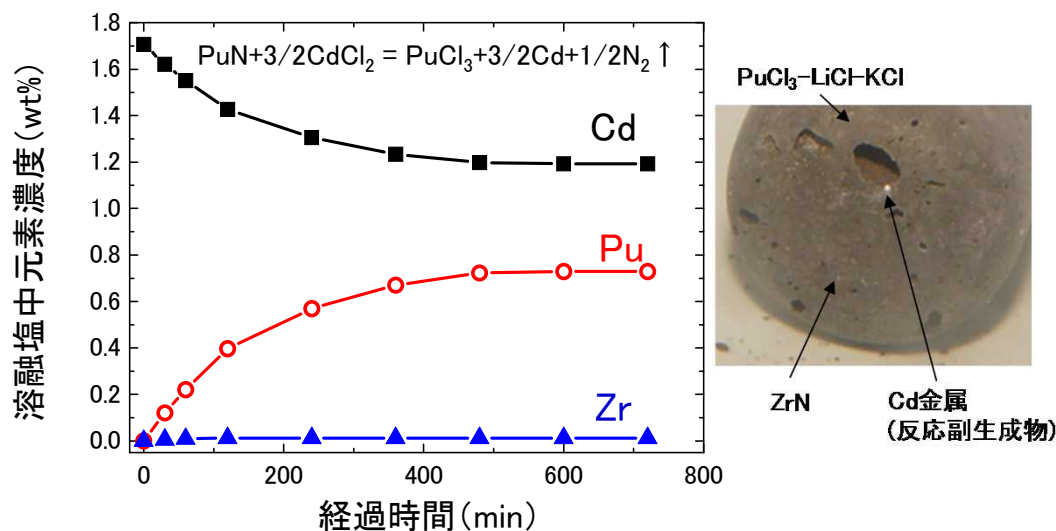
(3) ADS用燃料と乾式処理に関する研究開発

窒化物燃料乾式再処理、燃料製造



目的： MA含有窒化物燃料乾式再処理技術開発に必要な基礎データベースの拡充

研究内容： 不活性母材含有Pu窒化物の化学溶解試験により、電解不溶解残渣処理法の基礎データを取得

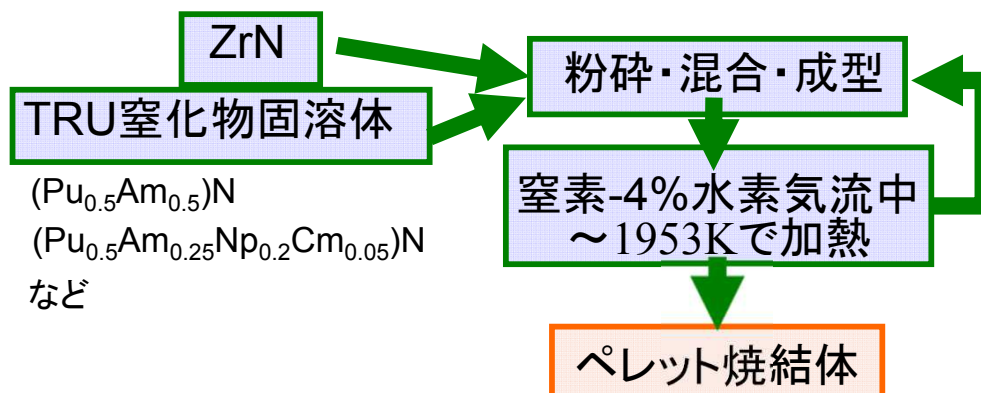


LiCl-KCl共晶溶融塩中での CdCl_2 による
 $\text{Pu}_{0.4}\text{Zr}_{0.6}\text{N}$ の化学溶解挙動

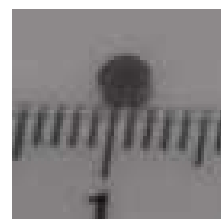
成果：不活性母材含有MA窒化物特有の課題である電解残渣からのTRU(MA+Pu)回収に関し、回収法を考案し、実験室規模でプロセス原理を確認した。

目的： 不活性母材含有MA窒化物試料の調製技術の確立

研究内容： ADS燃料模擬ペレット試料を調製



不活性母材含有MA窒化物ペレット試料の調製方法



直径・・・2.81 mm
厚さ・・・1.54 mm
質量・・・95.4 mg
相対密度・・・94.4 %TD

N / O / C = 0.91/0.09/<0.01

熱拡散率測定用($\text{Zr}_{0.58}\text{Pu}_{0.21}\text{Am}_{0.21}\text{N}$)ペレットの性状

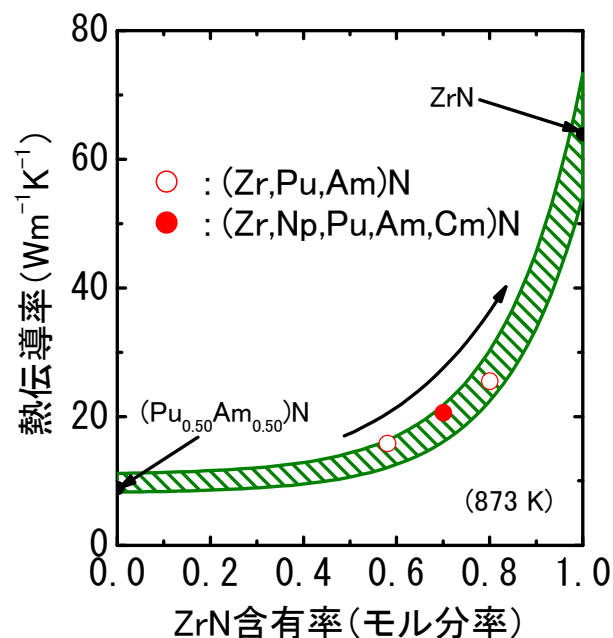
成果：ADS模擬燃料ペレット試料の調製技術を確立した。

(3) ADS用燃料と乾式処理に関する研究開発

燃料設計・挙動評価

目的: ADS用燃料挙動評価に必要な物性データベースの整備

研究内容: 不活性母材含有MA窒化物の熱伝導率を測定・評価

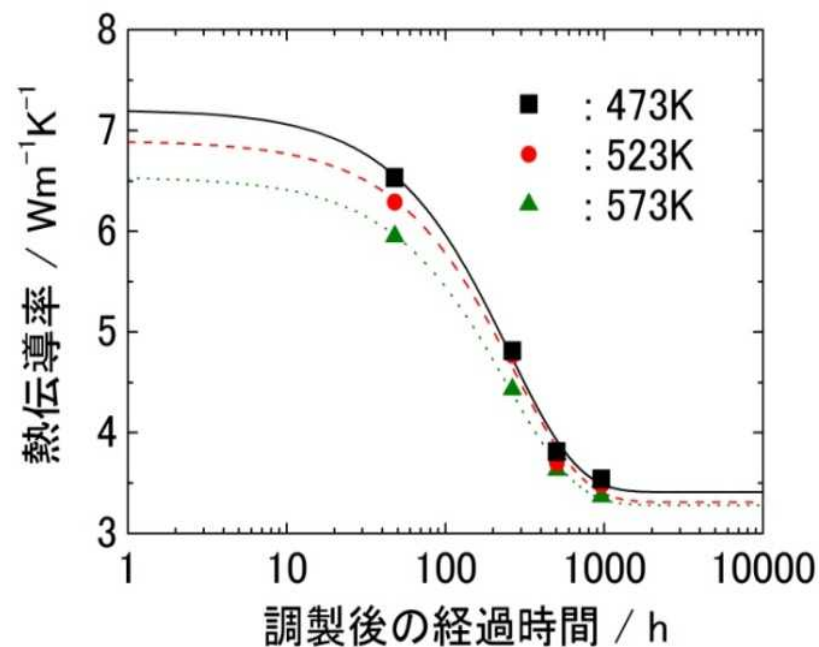


$(Zr_{1-2x}Pu_xMA_x)N$ の熱伝導率のZrN含有率依存性

成果: ADS用燃料の設計に不可欠な**熱伝導度の評価式を整備**した。

目的: MA含有燃料におけるMA核種の α 崩壊の影響の評価

研究内容: 高濃度でCmを含有する酸化物試料の基礎物性値の時間変化を評価



$(Pu_{0.91}^{244}Cm_{0.09})O_2$ の熱伝導率の時間経過に伴う変化

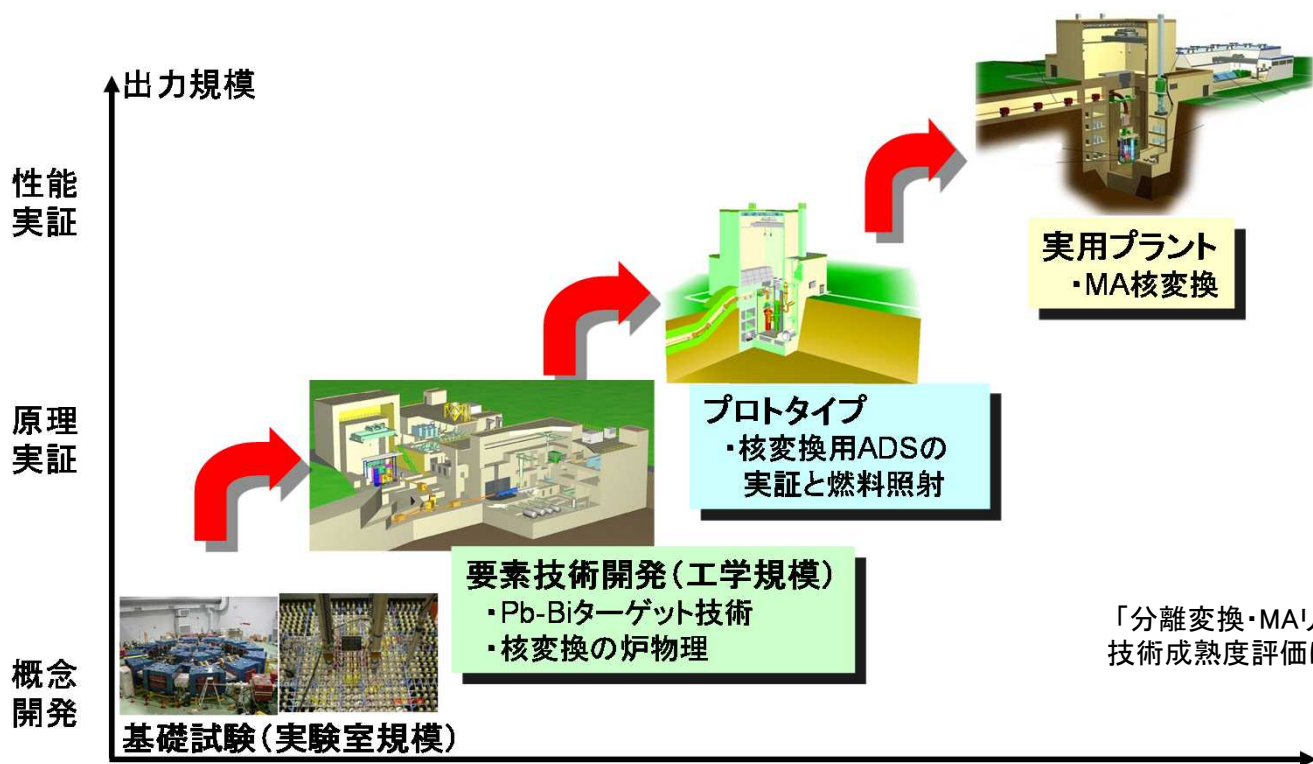
成果: 酸化物燃料に関して、高濃度MA含有燃料で課題となる、**MA核種の α 崩壊による燃料物性への影響を評価**した。**高濃度MA含有窒化物燃料における評価・定式化**が今後の課題。

(4) 分離変換技術の技術レベル

開発段階の考え方(ADSの例)



- 原子力学会の研究専門委員会において、NASAやJAXAで活用されている**技術成熟度(TRL)**基準を参考に、現状と今後の方向性を議論。
- 実用化に向け、**次の段階に進むための課題認識を関係者で共有**するために有効。
- 特に、異分野間(核設計、燃料設計、再処理、等)での**水平連携**、及び、基礎基盤研究－工学技術開発－プラント工学技術の**垂直連携**のための情報共有が重要な目的
- レベルの絶対値の議論に注力するべきではない。



TRL	開発段階	
9	性能実証段階	実機プラント運転
8		実機プラント試験
7		プロトタイプ試験運転
6	原理実証段階	技術基盤の確立
5		要素技術の完成
4		要素技術の開発
3	概念開発段階	技術開発の活性化
2		技術概念の具体化
1		システム概念の構築

「分離変換・MAリサイクル」研究専門委員会、『分離変換技術はどこまで成熟したか？技術成熟度評価に基づく現状整理と提案』, 日本原子力学会誌, Vol.52, No.12 (2010).

(4) 分離変換技術の技術レベル

分離変換技術の成熟度評価 (TRL: Technology Readiness Levels)



□ TRLの評価を通して、それぞれの技術分野において、TRL 5に難しい要求があることを認識

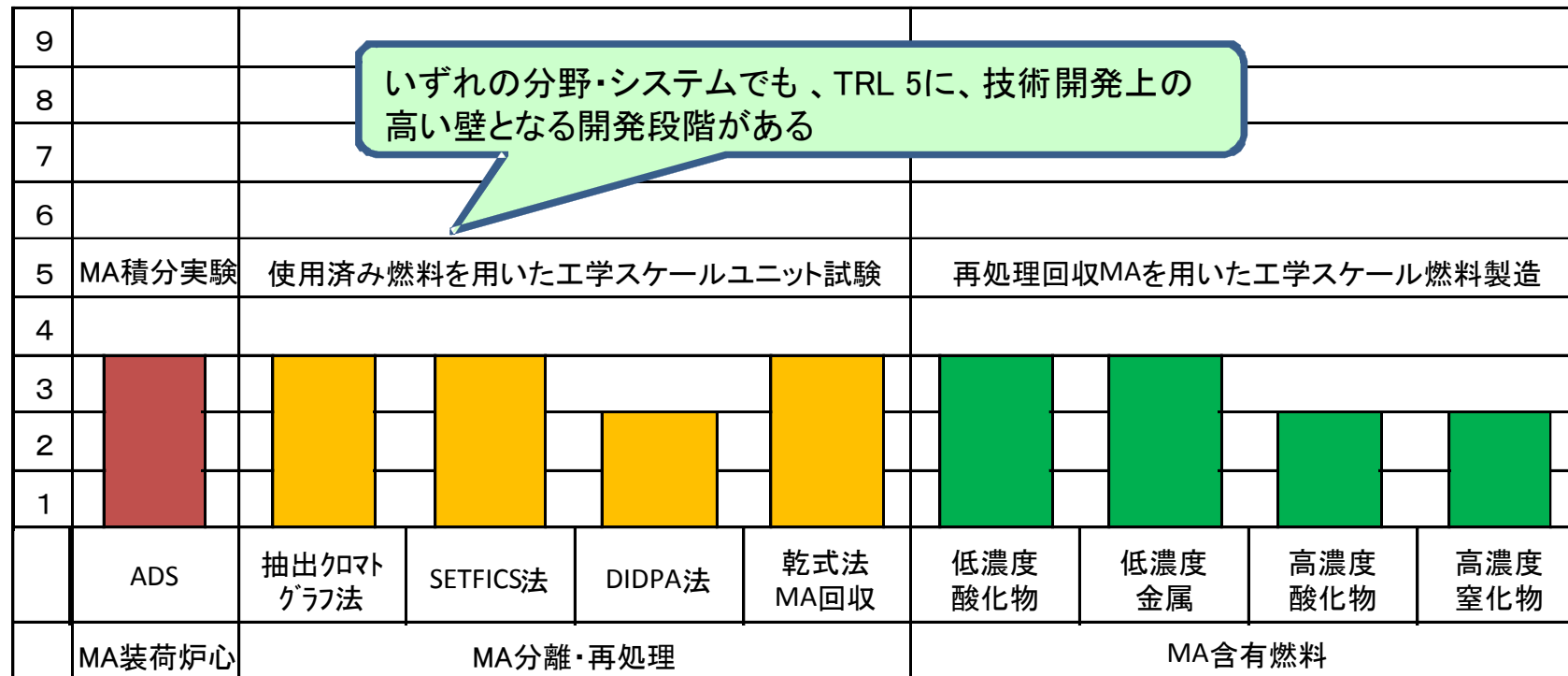
➤ MA装荷ADS炉心

MA試料調達と新たな炉物理実験施設が必要なMA核データ積分実験

➤ ADS用のMA燃料サイクル(再処理、燃料製造、燃料挙動)

再処理回収MAを用いた小規模ホット試験(MA: 数10g規模)と準工学規模コールドユニット試験(数kg規模)の再処理・燃料製造試験、及び燃料ピン照射試験による過渡時の安全性も含めた燃料ふるまい評価

◆ 全ての分野で、**相当量のMAを用いた試験が可能なインフラの欠如**が、次段階に進む障害になっている。



平成21年原子力委員会C&R以降の成果のまとめ



□ ADSに関する研究開発成果

- J-PARCリニアックの運転実績から**ADS用加速器のビームトリップ頻度を評価**。許容トリップ頻度との比較から、ADS用加速器のトリップ頻度低減策の検討を実施中。
- ビーム窓の使用条件における外力、熱応力、除熱、腐食等の観点から**成立の見込めるビーム窓の概念を提示**。
- 新たに評価された**JENDL-4.0及び誤差評価システム**を用いて、核変換システムの**核データ起因誤差を定量的に評価**。炉定数調整法を用いて、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。また、**KUCA-FFAG実験において、未臨界度測定手法を開発**。
- 炉心損傷事故に至る可能性のある事象に対して、**動特性解析を実施**。極めて保守的な条件でも燃料破損の可能性が極めて低いことを確認。

□ ADS用のMA燃料サイクル技術に関する研究開発成果

- MA回収率を評価できる**物性データベースを整備**。**窒化物固有課題**(電解残渣対策)の、**プロセス原理を確認**。**使用済み金属燃料からMA回収**(電中研成果)。
- ADS用燃料ペレットの**調製技術基盤を確立**するとともに、燃料設計に不可欠な**熱伝導度及び溶解度の評価式を整備**。

□ 研究開発の進捗

- 原子力委員会C&Rで指摘された具体的な技術課題解決に向けた研究開発を実施。
- ADSやADS用燃料のサイクル技術に関し、**原理実証段階に進むための基盤データを取得するとともに、工学的課題克服のための要素技術開発が進行中(TRL3~TRL4)**。

ADS研究開発の今後の課題



- **ADS燃料サイクルの工学技術基盤の完成(TRL5)が、重要な開発目標。**研究者や技術者が責任持って、技術の到達レベル(実用化で達成できること)を見通せる開発段階を達成する。(社会的要請があれば、いつでも実用開発に展開できる技術を保有)

- **ADSの技術的成熟度を向上するための主な課題**
 - ✓ ビーム窓の工学的成立性評価のために、**鉛ビスマス核破砕ターゲットの運転と材料照射データ**(照射硬化や延性脆性遷移温度等)の充実
 - ✓ 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**(ADSだけでなく、高速炉を含めたMA装荷体系全般に貢献可能)と**核破砕ターゲット＋高速未臨界体系**の核特性評価
 - ✓ ある程度出力規模(MWクラス)のADSの設計・建設・運転

- **ADS用のMA燃料サイクル技術の技術的成熟度を向上するための主な課題**
 - ✓ **主工程の小規模ホット試験(MA:数10g規模)と準工学規模コールドユニット試験(数kg規模)**によるプロセス実証 (備考:従来技術の準工学規模はADS燃料サイクルでは実機規模)
 - ✓ MA高含有燃料の**照射挙動や機械的特性の把握、ふるまいコードの整備**