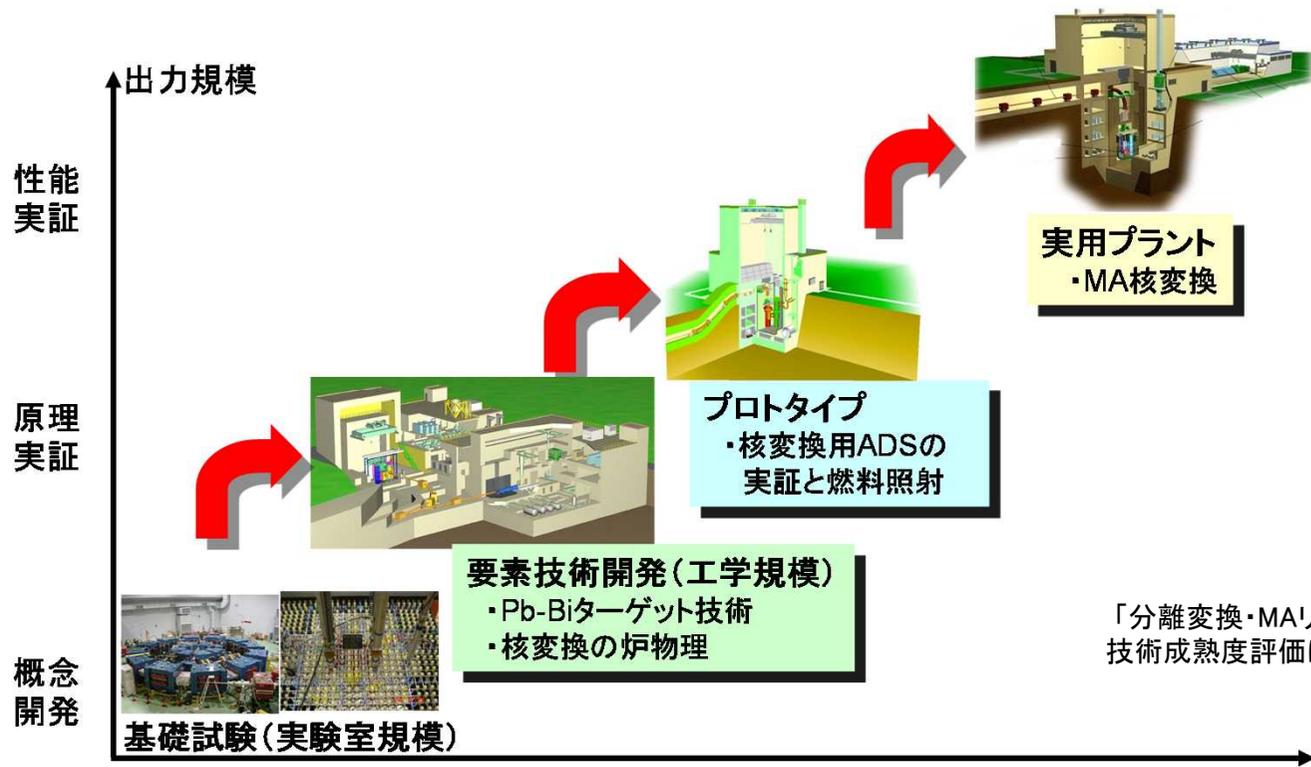


(4) 分離変換技術の技術レベル

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

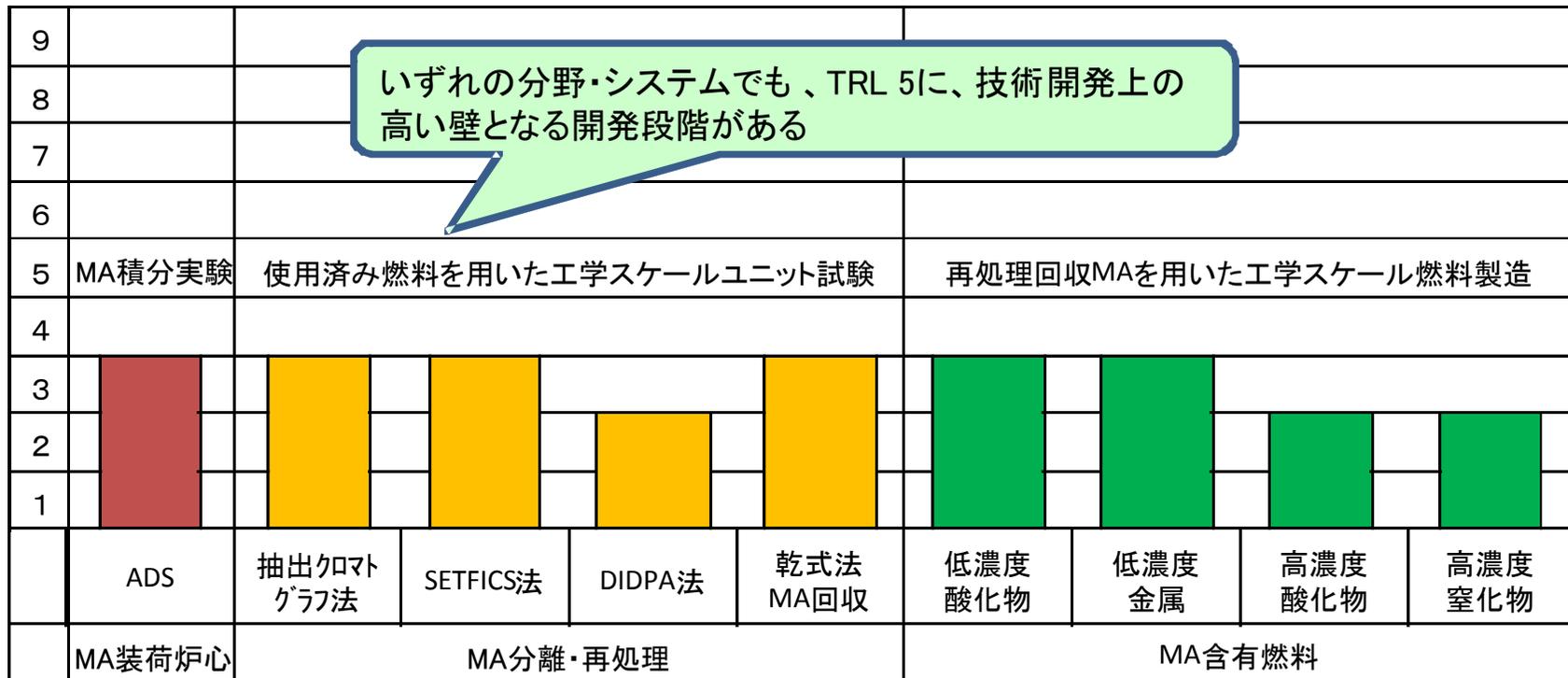
「分離変換・MAリサイクル」研究専門委員会、『分離変換技術はどこまで成熟したか？技術成熟度評価に基づく現状整理と提案』, 日本原子力学会誌, Vol.52, No.12 (2010).

(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。



□ 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**

(6) ADS階層型のコスト試算

ADSを使った階層型分離変換技術のコストの予備的検討

ADSのコスト 予備検討 (単位:億円)

項目	建設	運転維持	解体	計
ADS 炉心部分	1,700	2,720 ^{a)}	140 ^{b)}	4,560
ADS 加速器部分	590	940 ^{a)}	50 ^{b)}	1,580
計	2,290	3,660	190	6,140

a) 建設コストの4%が毎年かかるとした。(寿命は40年間と仮定)

b) 建設コストの8%とした。

ADSの燃料サイクルコスト (単位:億円)

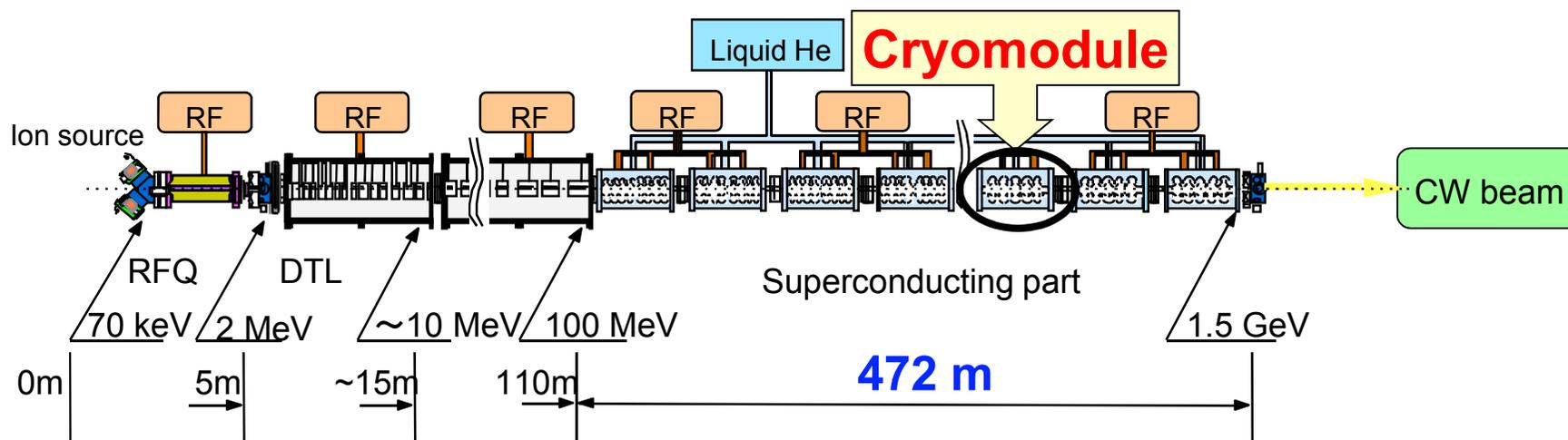
項目	コスト
ADS 4基	24,600
群分離工程	5,700
MA燃料製造	5,200
MA燃料再処理	4,500
ADSによる発電電力を売電	-7,500
処分場建設コストの低減	-19,000
計	13,400

- 収支バランス : 0.12 ~ 0.13 円/kWh(割引率 : 0%)
- 消費者価格(約20円/kWh)では、0.6%の上昇
 - 一般家庭の消費量300kWh/月のうち、1/3が原発によると仮定すると、各家庭で12~13円/月の負担増
- 単純な発電システムとすると、21円/kWh
- ADSのコスト削減と、処分場建設コスト低減効果の高精度化が必要

(群分離工程:5HMt/年、MA燃料製造・再処理:10HMt/年)

参考資料

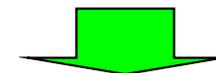
ADS用超伝導加速器の課題



超伝導リニアック(1.5GeV)運転に必要な電力

機器	所要電力
超伝導空洞用RF源	69.6MW
四極電磁石電源	0.4MW
ヘリウム冷凍機	16.5MW
100MeV入射加速器	10.0MW
ユーティリティ	9.7MW
計	106.2MW

- 超伝導空洞等の要素技術開発を実施。
- 要素技術試験結果等を基に、システム設計を実施し、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)、低エネルギー一部の効率化、**安定な加速器システム等**の検討が必要

鉛ビスマス中の鋼材腐食試験及び耐食性改良

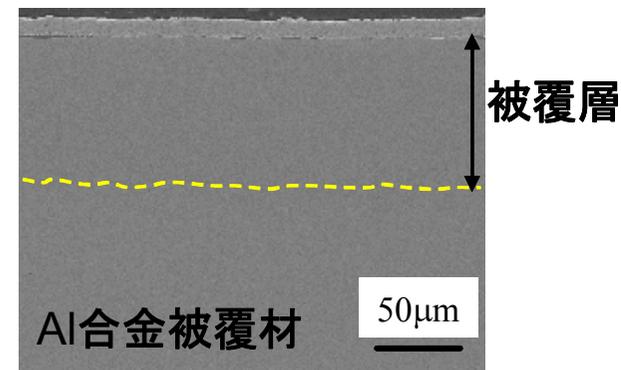
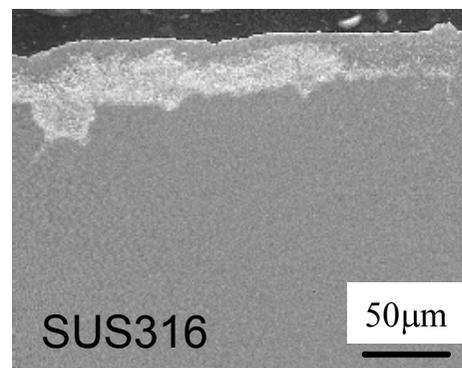
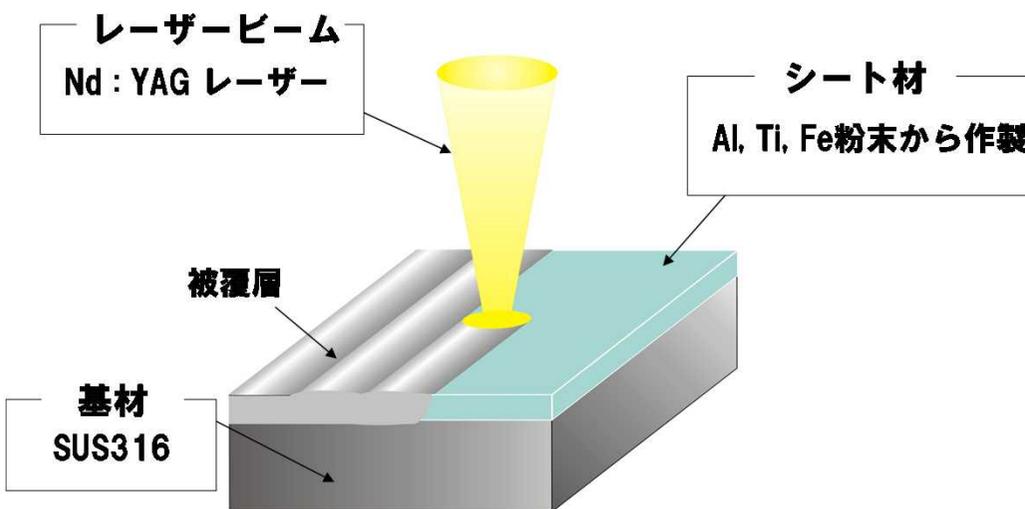
目的： 高温(500°C以上)鉛ビスマス環境中の鋼材腐食の特徴と腐食深さの把握と、腐食の低減方策の提案。

研究内容：

□鉛ビスマス中での耐食性改善のために、耐食性の優れたAl合金被覆法の開発と鉛ビスマス中腐食試験

Al合金被覆法

レーザービーム加熱を用いてシート材を溶解し、表面被覆



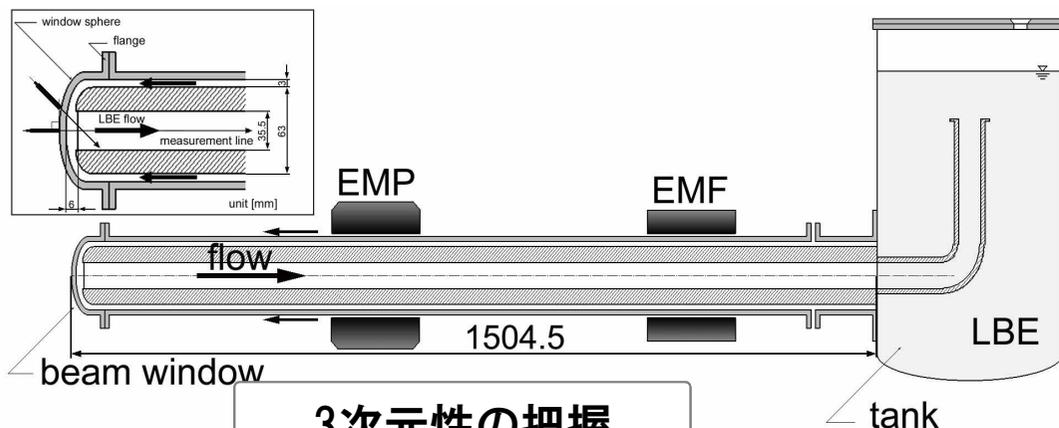
鉛ビスマス中静的腐食試験結果(550°C、3000時間、被覆層のAl濃度:4.6wt%、酸素濃度は 10^{-6} ~ 10^{-3} wt.%(高酸素濃度))

成果と今後の課題

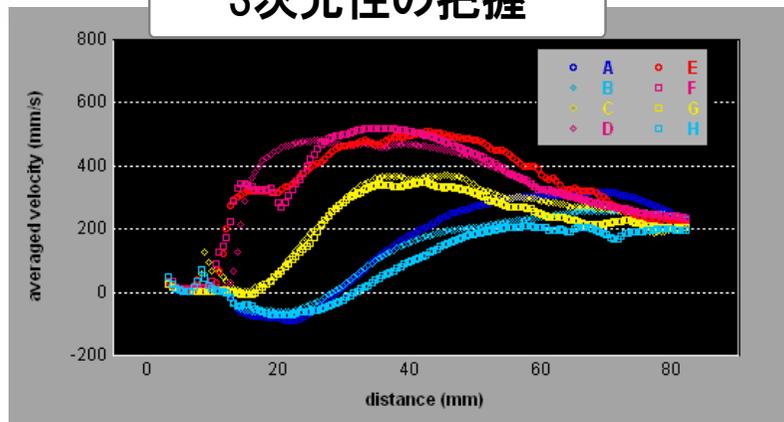
- 550°CのLBE中静的腐食試験で、316SSにAl合金被覆を施した場合、被覆層がNiの溶出、結晶粒の脱落、LBEの侵入といった激しい腐食を防ぐことを提示。
- Al合金被覆SUS316の腐食試験により、耐食性改善に有効なAl濃度が4~12wt.%であることを提示。
- 照射挙動の把握、加工技術の開発等が今後の課題。

(2) ADSに関する研究開発 参考資料③ 鉛ビスマスの流動試験

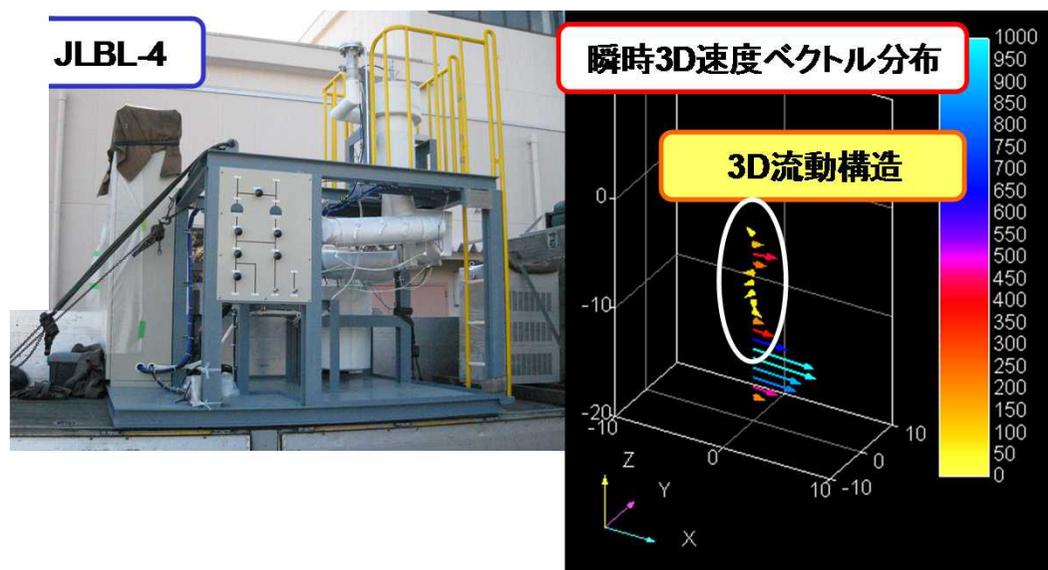
目的： 超音波流速測定技術を用いた、鉛ビスマス流動場の可視化技術の開発。



3次元性の把握



超音波流速計による鉛ビスマス流速測定結果



流動鉛ビスマスループで、Vector-UVP法を用いた鉛ビスマス3次元流速ベクトルの測定結果

成果と今後の課題

- ❑ 超音波流速分布計による鉛ビスマス流速測定システム及び流速分布測定法を開発。
- ❑ LBE中の3次元速度ベクトル分布の計測に成功(空間分解能1mm以下、時間分解能数10msec)。
- ❑ 高温LBEへの適用が今後の課題。

鉛ビスマス中での材料照射挙動

目的: 高エネルギーの陽子・中性子照射を受けた材料の特性データ整備

研究内容:

□ スイスのポール・シェラー研究所 (PSI) で実施したMEGAPIE国際共同実験の試料の照射後試験を実施予定

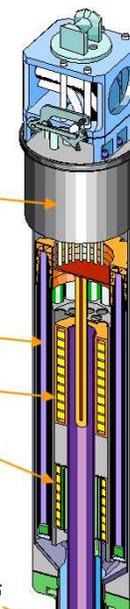
実験の概要とこれまでの成果:

- 世界初のメガワット級液体鉛ビスマス核破砕ターゲットの成立性を実証
- スイス、フランス、ドイツ、ベルギー、イタリア、日、米、韓が参加
- 2006年8月17日に700kW (1.2mA × 580MeV) の入射に成功。最高1.35mAで、12月21日まで運転
- 照射後の材料試験片を2013年6月にJAEAに搬入。



ターゲット本体

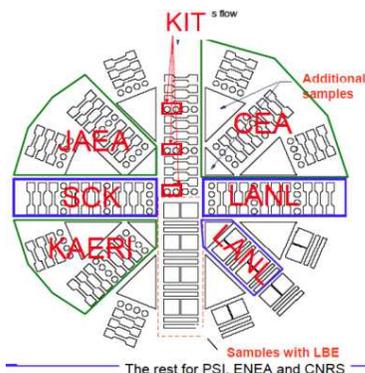
- 上部遮蔽
- 熱交換器
- 主流電磁ポンプ
- バイパス流電磁ポンプ



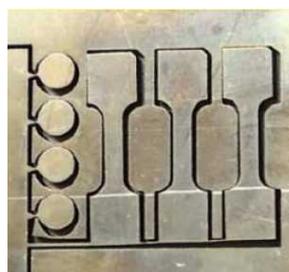
主流パイプ管



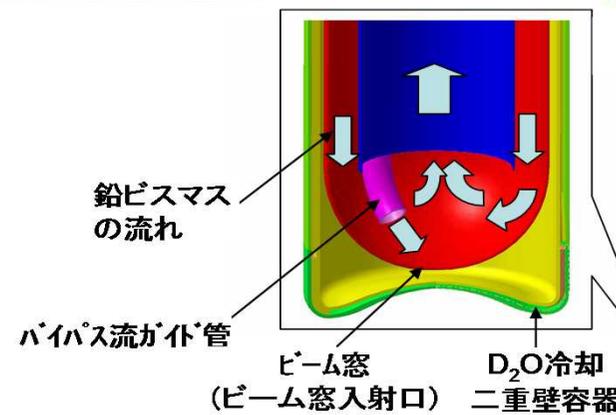
照射試験後のビーム窓部



ビーム窓部の試験片切り出しと分配案



放電加工による試験片切り出し(モックアップ試験)



未臨界体系の炉物理特性に関する実験的研究

目的: 核破碎中性子+未臨界体系特有の炉物理的課題解決に向けた研究開発

研究内容:

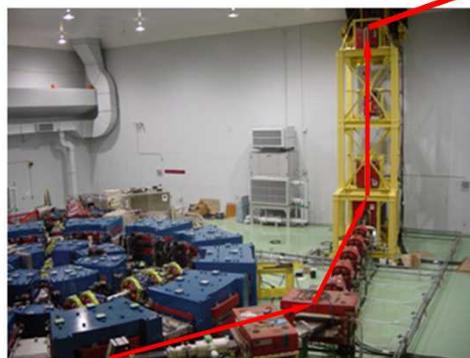
- 京都大学原子炉実験所の臨界集合体KUCAとFFAG陽子加速器を用いたADS模擬体系において、パルス中性子法を適用して、検出感度の低い検出器で未臨界度を測定するための技術開発を実施



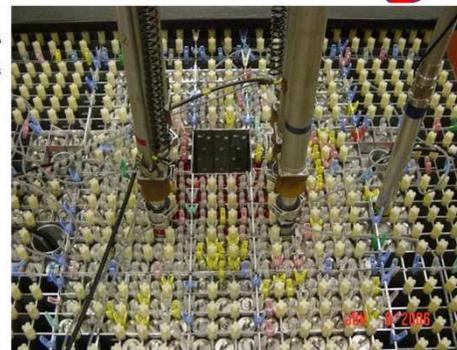
FFAG Accelerator



KUCA A-core



100MeV
Proton
Beam
Line



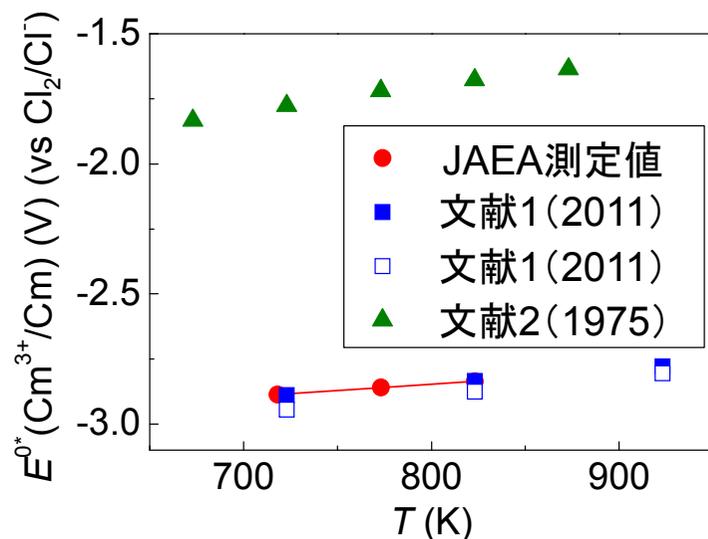
成果と今後の課題:

- 未臨界度測定手法や鉛核データの検証データの取得等の基礎的な実験研究を継続中。
- KUCAの熱中性子体系で得た知見の高速中性子体系への適用性の検討が課題。

乾式再処理 (1) 基礎データベースの拡充

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: 溶融塩中でのCmの酸化還元電位測定により、溶融塩電解基礎データを取得



LiCl-KCl共晶溶融塩中のCmイオンの酸化還元電位



電気化学試験用に調製したCmCl₃試料

成果と今後の課題

- MA(Np,Am,Cm)の電気化学データを取得し、原理的に**MA回収率を評価できるデータベースを整備**。
- **再処理回収MAを用いたホット試験によるプロセス原理の確証**、準工学規模試験による**不純物の影響評価**、**工学機器開発**、**工学プロセスでのMA回収率評価**が今後の課題。

乾式再処理 (2) 工学技術の開発



目的: MA含有窒化物燃料乾式再処理技術を工学規模で実施するための技術開発

研究内容:

- 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(電中研)
- 軽水炉使用済燃料由来の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(原子力機構)

電中研による工学規模の乾式再処理機器開発

「溶融塩電解」、「溶融塩/液体Cd系による還元抽出」、「塩廃棄物処理」などは、窒化物燃料乾式再処理と共通の技術である。



Ar雰囲気GB内に各装置を設置



溶融塩電解装置

溶融塩



還元抽出装置(6段)

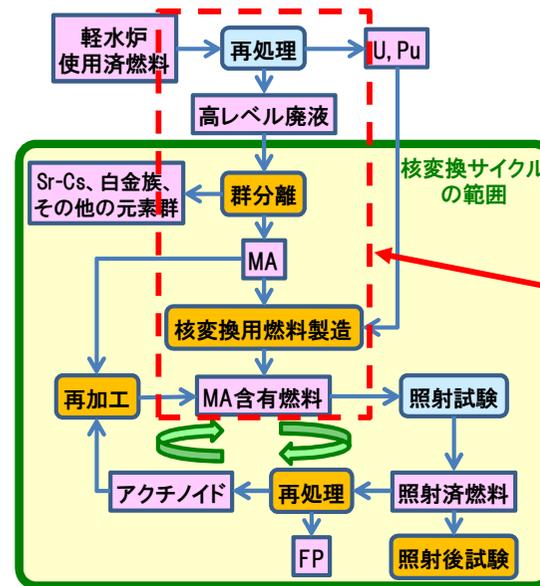
液体Cd



Cd蒸留装置

電中研提供資料

軽水炉使用済燃料由来のMAを原料として用いる小規模リサイクル試験(予定)



ペレット及びピン規模の燃料製造・照射・再処理・再加工試験を実施する。

・点線内は既存設備で対応可能な部分

・照射試験用ピン製造、照射試験、照射済燃料の再処理・再加工設備の新設が必要

成果と今後の課題

- 準工学規模での主工程ユニット試験による物質移送技術開発、塩廃棄物処理など周辺工程技术開発を実施(電中研)、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)
- 物質移送技術・塩廃棄物処理技術等の共通要素技術の窒化物燃料乾式処理への適用性評価(共同研究等による電中研からの技術導入を検討)及び窒化物燃料の小規模リサイクル試験によるプロセス原理実証が課題

MA含有窒化物燃料 (1) 製造技術の開発

目的: MA含有窒化物燃料製造技術の基礎となる実験室規模試験による試料調製技術の確立

研究内容: 高純度Cm窒化物試料を調製



陰イオン交換法によるCmの分離



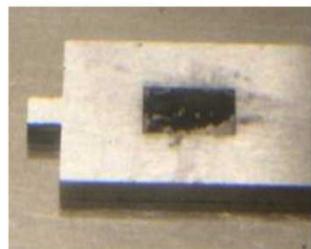
シュウ酸Cmの沈殿生成



乾燥後のシュウ酸Cm



焙焼後に得られたCmO₂粉末



炭素熱還元で調製したCmN粉末

成果と今後の課題

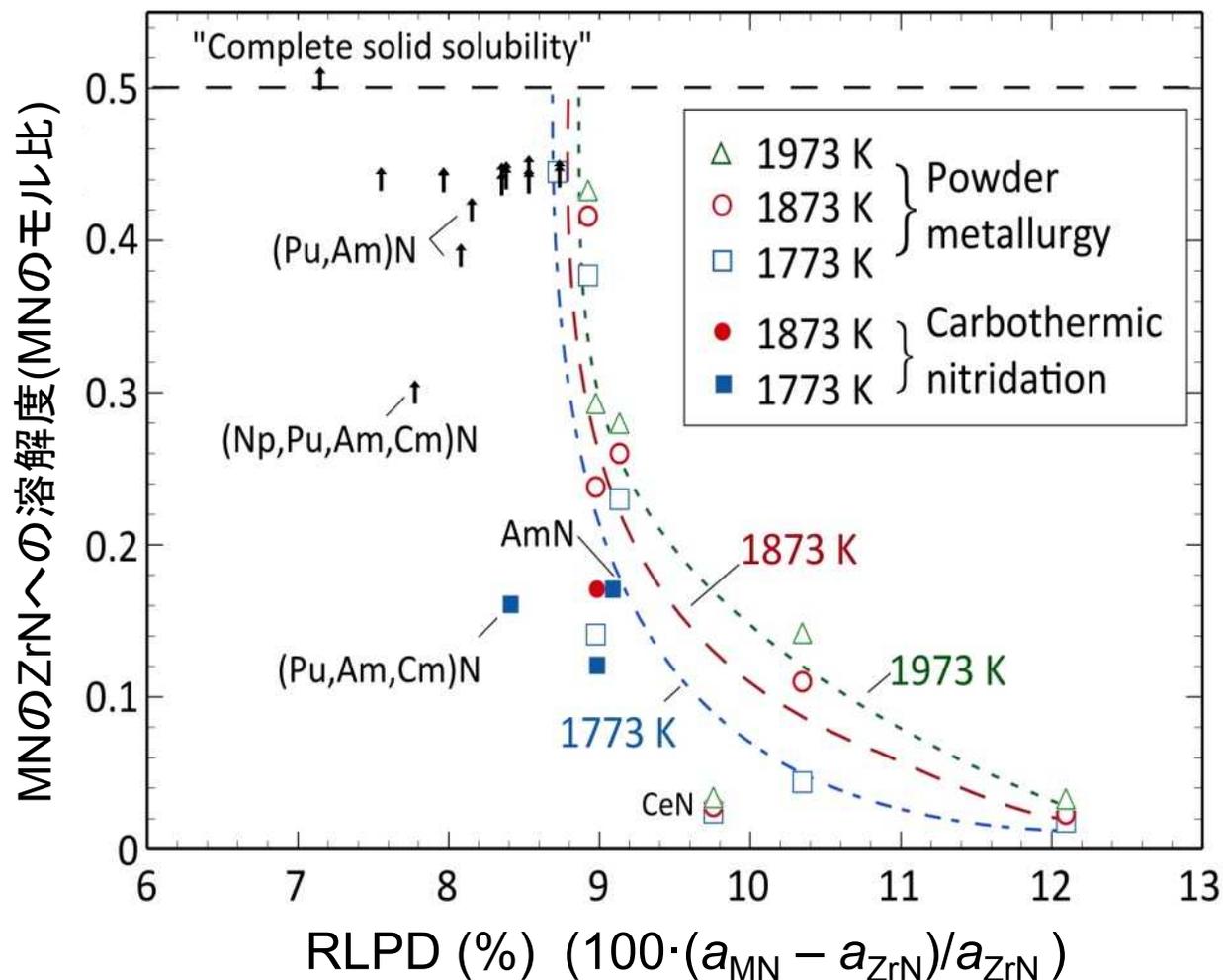
- MA窒化物試料の調製技術を確立した。
- 実用的な製造条件での歩留まり、不純物混入、製品特性のばらつきの評価に着手した。
- 耐放射線・耐発熱性を考慮した小規模バッチでの準工学規模試験装置開発、及びこれを用いた工学パラメータ取得が課題。

(Pu_{0.8}Cm_{0.2})O₂ 原料からのCm分離とCmNの調製

MA含有窒化物燃料 (2) 物性評価

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窒化物試料のMA窒化物溶解度を測定・評価



成果と今後の課題

- ADS用燃料の設計に不可欠な溶解度の評価式を整備した。
- 窒化物燃料のふるまい解析コード開発に向けた諸物性評価式を整備(機械的物性、照射特性)が今後の課題

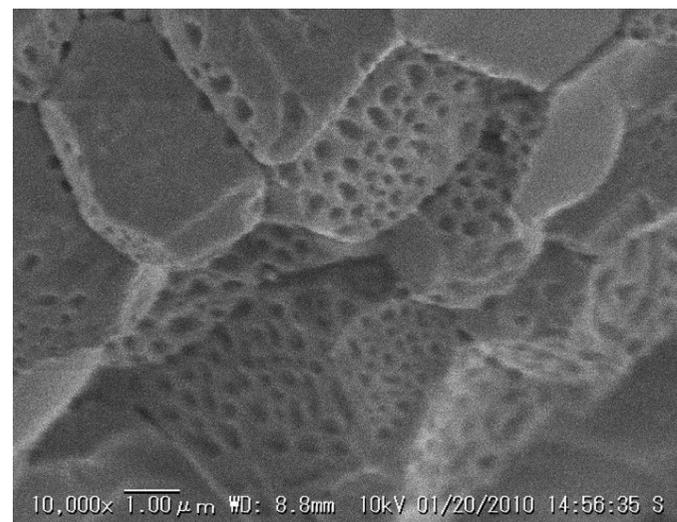
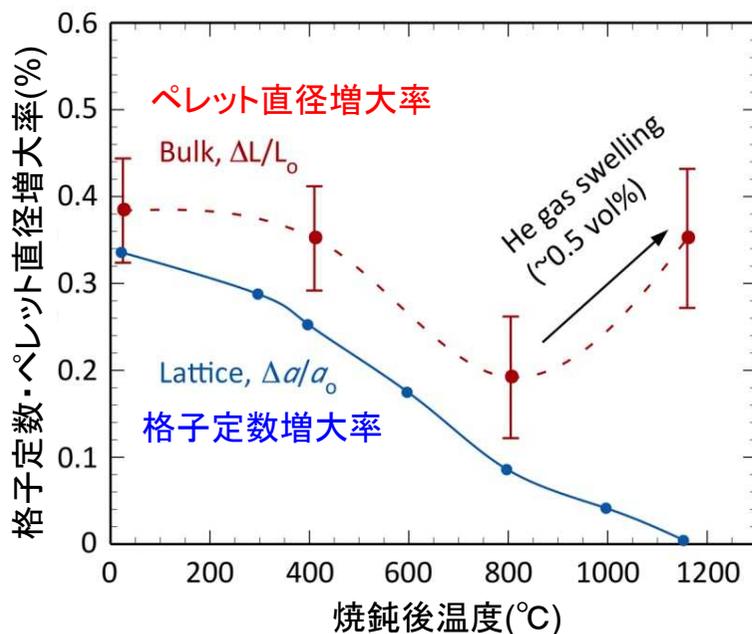
ZrN不活性母材中へのMA窒化物の溶解度と格子定数の関係

高濃度MA含有燃料特有の物性の評価

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焼鈍の影響を評価

1160°C焼鈍後のペレット破面には、
粒界He気泡が見られた。



^{244}Cm の α 崩壊によりHeが蓄積した
($\text{Pu}_{0.95}^{244}\text{Cm}_{0.05}$) O_2 試料の焼鈍試験結果

成果と今後の課題

- 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 α 崩壊の影響評価・定式化が今後の課題。**