

日本原子力研究開発機構における 核変換技術に関する研究開発の現状について — 階層型 —

平成20年12月19日

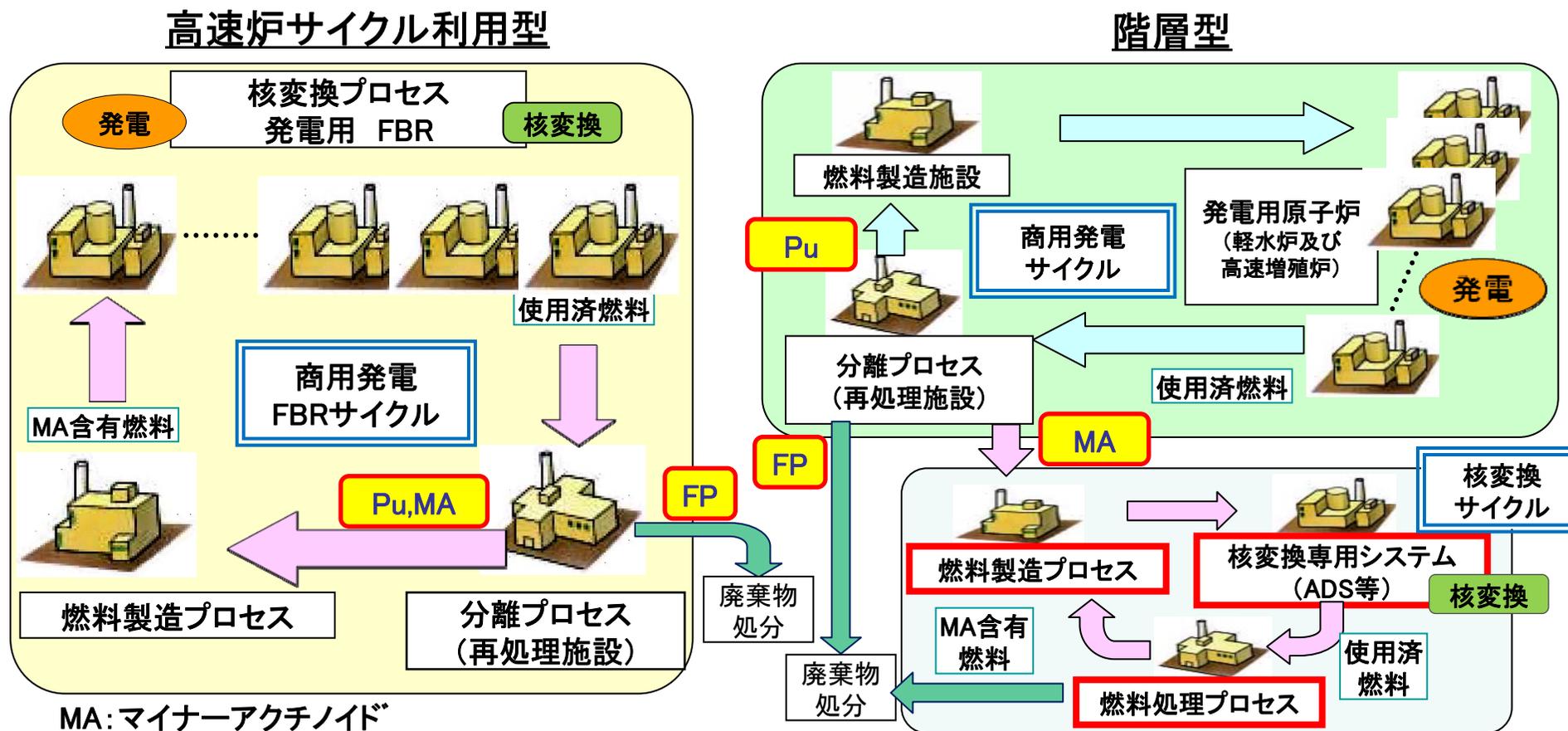
日本原子力研究開発機構

内 容

- (1) 研究開発の経緯
- (2) 平成12年のC&Rでの要求事項と対応状況
- (3) ADSに関する研究開発
- (4) ADS用燃料と乾式処理に関する研究開発
- (5) 国際協力
- (6) まとめと今後の進め方

(1) 研究開発の経緯

高速炉サイクル利用型と階層型



- ・発電炉を用いた分離変換技術。
- ・次世代再処理プラントでPuと共にMAもリサイクル。
- ・核変換には発電炉(高速炉)を用いる。

- ・発電用サイクルに核変換サイクルを付設。
- ・核変換には専用システム(加速器駆動システム: ADS、等)を用いる。
- ・コンパクトな核変換サイクルにMAを閉じ込める。

- ・高速炉サイクル利用型(均質サイクル)では少量のMAをU・Puに均質に分布させた燃料を用いる。
- ・階層型では、Uを含まずMAを主成分とする燃料を用いる。

(1) 研究開発の経緯

平成12年のチェックアンドレビューまで

- 昭和63年の「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」(オメガ計画)
 - 消滅処理分野 → 原子炉(炉物理・物性、FBR応用、専焼高速炉)
加速器(陽子加速器、電子加速器) (下線部は旧原研の所掌)

- 平成12年までの主な経緯
 - 陽子加速器利用
陽子で直接的に核変換するのでは、エネルギー収支が成立しないことが問題
→ 加速器中性子源の中性子を増倍しながら核変換できる加速器駆動システムへ

 - 専焼高速炉
ドップラーフィードバックが小さい、実効遅発中性子割合が小さい等の問題
→ 未臨界状態とすることで、反応度係数や遅発中性子割合の影響を低減

 - 核変換専用燃料
中性子スペクトルを硬くでき、熱伝導度の良い金属燃料と窒化物燃料を選択
→ MAの安定性と組成に対する柔軟性に優れた窒化物を第1候補に

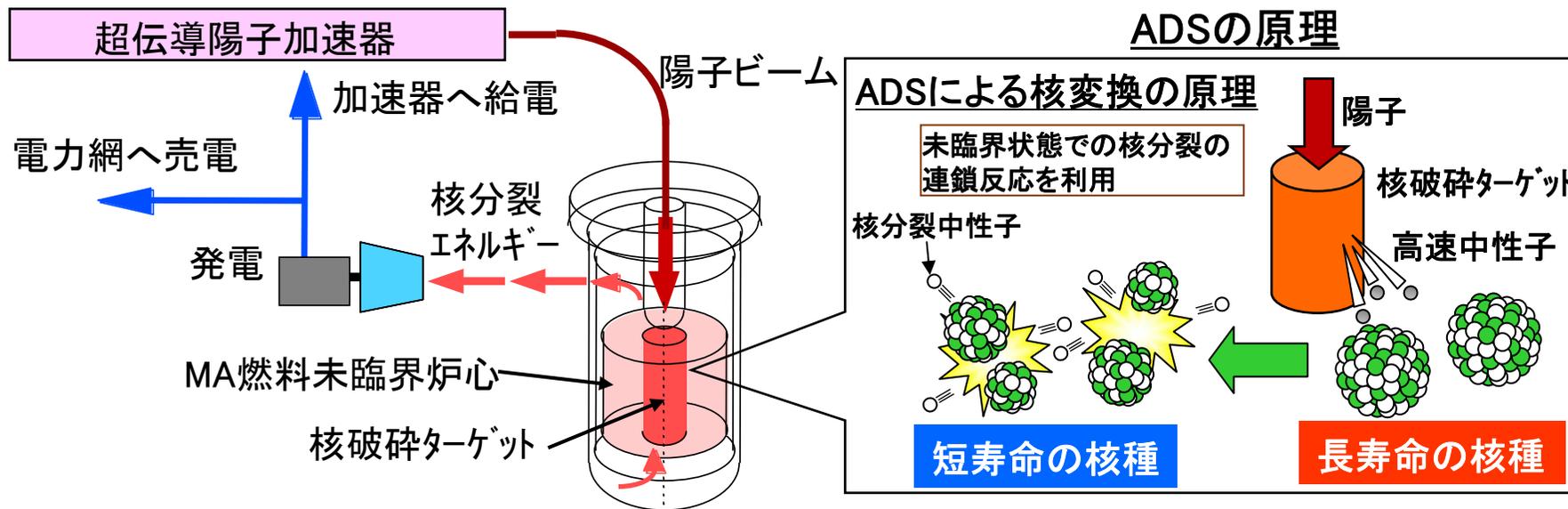
 - 冷却材
Na、Pb、Pb-Bi、He を検討
→ 冷却材ボイド係数や冷却能力の観点から、Pb-Biを第1候補に



MA窒化物燃料・鉛ビスマス冷却・加速器駆動未臨界システム(ADS)を第1候補に

(1) 研究開発の経緯

ADSの概念と特徴



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。
- ・陽子はビームダクト・ビーム窓を通過して鉛・ビスマス(Pb-Bi)に入射。
- ・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)。
- ・陽子はPb-Biとの核破碎反応で大量の中性子を発生。
- ・その中性子によりMAを核分裂反応で核変換。
- ・さらに核分裂で発生した中性子も核変換に使用。
→核分裂の連鎖反応で、1個の中性子を20個に増倍。
- ・核分裂で発生する熱で発電し、加速器に供給。

ADSによる核変換の特徴:

- ・臨界高速炉によるMA核変換で問題となる実効遅発中性子割合の低下、ドップラーフィードバックの低下、冷却材ボイド反応度の悪化等の影響が小さい
- ・出力規模で30~40倍の軽水炉で生じるMAを核変換できる。例えば、熱出力800MWthのADSであれば、1基で1GWe規模の軽水炉約10基またはFBR8基で生じるMAを核変換できる
- ・少数のADSと発電炉サイクルの1/30~1/100程度の規模の物流量で、MAをコンパクトな核変換専用システムに閉じこめ、発電用燃料サイクルに影響を与えないで効果的にMAを核変換できる

(2) 平成12年のC&Rでの要求事項と対応状況

ADSに関する平成12年のC&Rでの要求事項と対応状況

前回オメガ計画チェックアンドレビューでの記載	対応状況
<p>ADSによる核変換プロセスについては、従来の原子炉と構造や制御方法が異なるため、システムの安全性の実証、大電流陽子加速器の開発が課題である。当面は、炉心設計やシステム制御方法の開発、ビーム窓の開発、構造・材料の設計、核データやモデルの整備・検証が重点課題である。</p>	<ul style="list-style-type: none">➤ADSに関する安全性確保の考え方等の検討を実施するとともに、高速増殖炉の安全解析コードを用いた検討を実施中。しかし安全性の実証には、実験炉級ADS等の専用施設が必要。➤加速器開発では、超伝導クライオモジュールの試作やADS用陽子加速器の設計検討を進めるとともに、J-PARC用加速器の建設・製作・試運転を進めてきた➤炉心設計では、未臨界であることに起因する出力分布ピークの平坦化等の核設計検討、被覆管最高温度の低減化、ビーム停止事象の影響評価等を実施➤ADSの制御方法の検討では、加速器出力の調整によりシステムを制御する手法を検討➤ビーム窓については、座屈強度の確保のための設計検討を進めるとともに、Pb-Biループを製作して伝熱流動試験等を実施。欧州等とのMEGAPIE国際共同実験でメガワット級Pb-Bi核破碎ターゲットの成立性を示した。➤その他、材料試験(腐食試験、照射試験)等を実施➤JENDL核データファイルの整備や核データの積分テストを実施

(2) 平成12年のC&Rでの要求事項と対応状況

核変換用燃料に関する平成12年のC&Rでの要求事項と対応状況

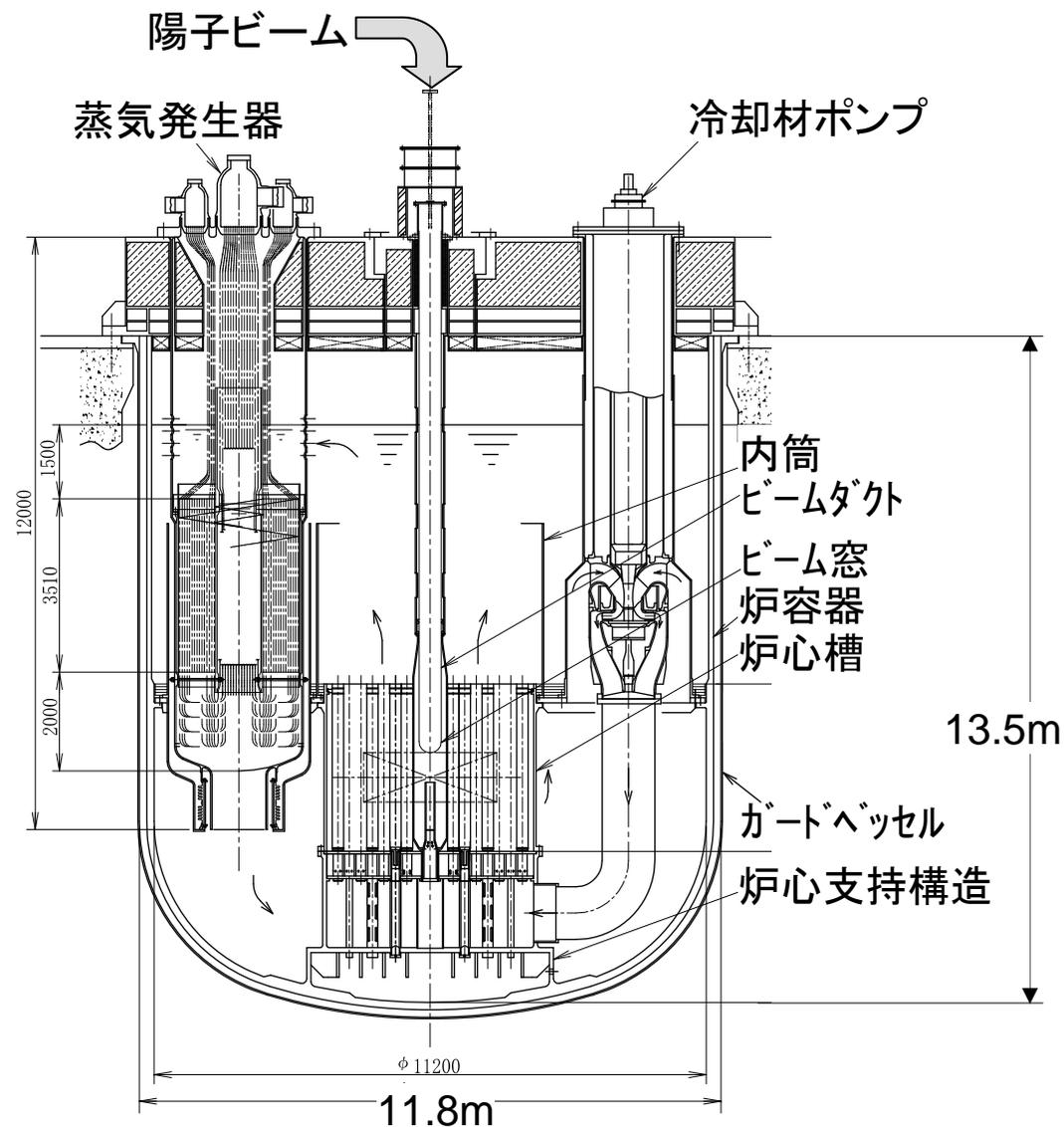
前回オメガ計画チェックアンドレビューでの記載	対応状況
MA窒化物燃料の 照射データの蓄積、発熱対策、窒素-15の経済的濃縮法の開発 等が課題である。当面は、 MA窒化物燃料の試作及び照射試験 を進める。	<ul style="list-style-type: none">➤ 燃料製造工程でMAによる発熱が特に問題となる工程について、除熱法の基礎的な検討を実施➤ 大学への委託研究により窒素-15濃縮法の基礎的検討を進めたが、経済的濃縮法の開発には至っていない➤ Pu-Am-Cm系、Np-Pu-Am-Cm系、Pu-Am-Cm-Zr系等のMA含有窒化物を調製するとともに、MA含有窒化物の物性測定を実施中➤ JMTRにおいてUフリーの(Pu,Zr)N及びPuN+TiN燃料の照射試験を実施し、照射後試験データを取得。また、CEAとの研究協力の下で、高速実験炉フェニックスにおけるMA窒化物燃料の照射試験を開始
燃料処理プロセスについては、 電解精製試験、回収したMAの再窒化試験 を進める。	<ul style="list-style-type: none">➤ MA窒化物や燃焼度模擬窒化物の電解精製における陽極溶解と液体Cd陰極への回収を確認するとともに、電気化学的データを取得➤ 蒸留窒化法を開発して、電解精製後の液体Cd陰極からPuN、AmN等を調製。さらに、再窒化した粉末を原料として窒化物ペレットを調製

(3) ADSに関する研究開発

概念設計

- ・ 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
- ・ 崩壊熱除去計 : 3系統



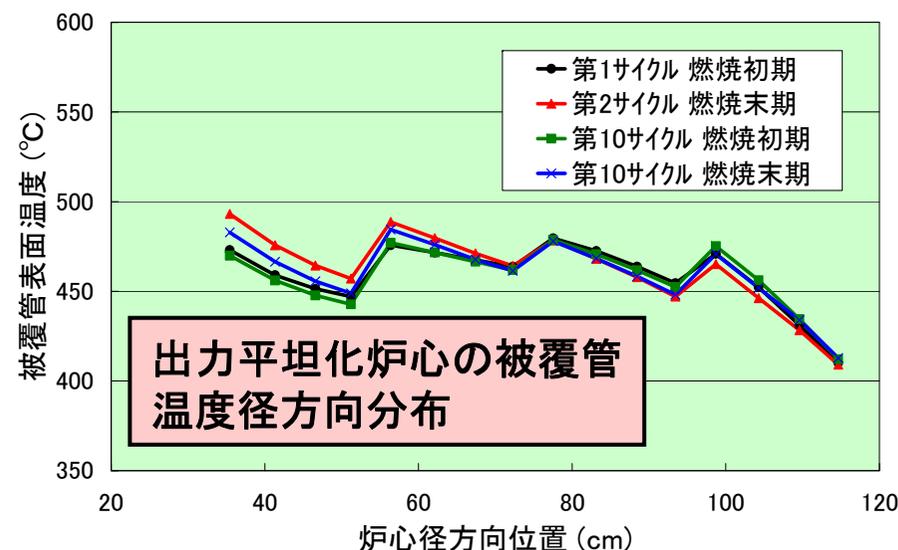
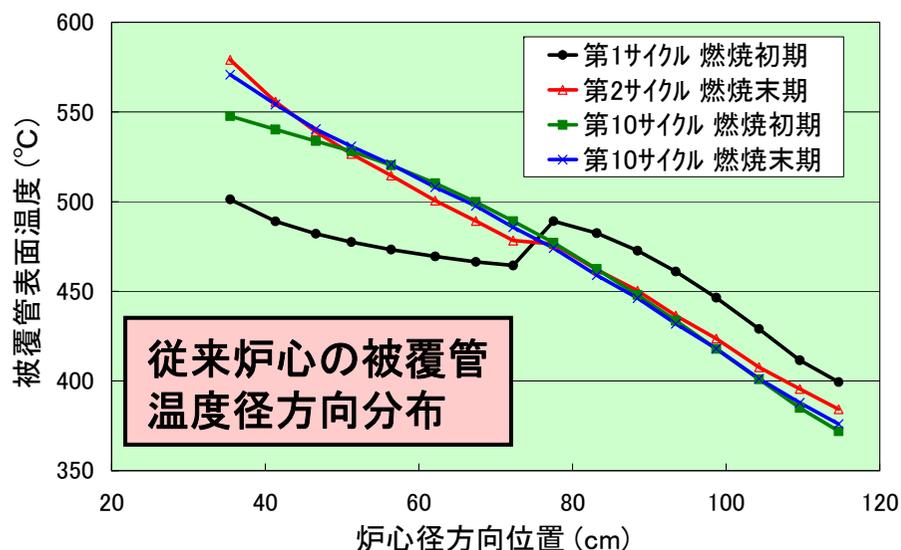
(3) ADSに関する研究開発

ADS 出力分布平坦化の検討

目的： 初期燃料のPu富化度を2領域化することでピーキング抑制を図ってきたが、それだけでは**被覆管最高温度が600°C**近くとなっていた。この温度では鉛ビスマス冷却材による腐食が問題となる。そこで、**燃焼反応度変化の抑制と径方向出力分布の平坦化**により、被覆管最高温度を低減する

研究内容：

- 不活性母材(ZrN)の添加率を燃焼サイクル毎に調整して**燃焼反応度変化を抑制**
- **多領域化**(ZrN添加率又はピン径)によって出力分布を平坦化
- 必要な陽子ビームが過大とならないように最適化



成果と今後の課題：

- 被覆管最高温度を**100°C**近く低減。これにより、鉛ビスマスによる腐食に対処できる見込み
- 燃料サイクルの工程上現実的な**不活性母材の添加割合調整法の検討**が必要

(3) ADSに関する研究開発

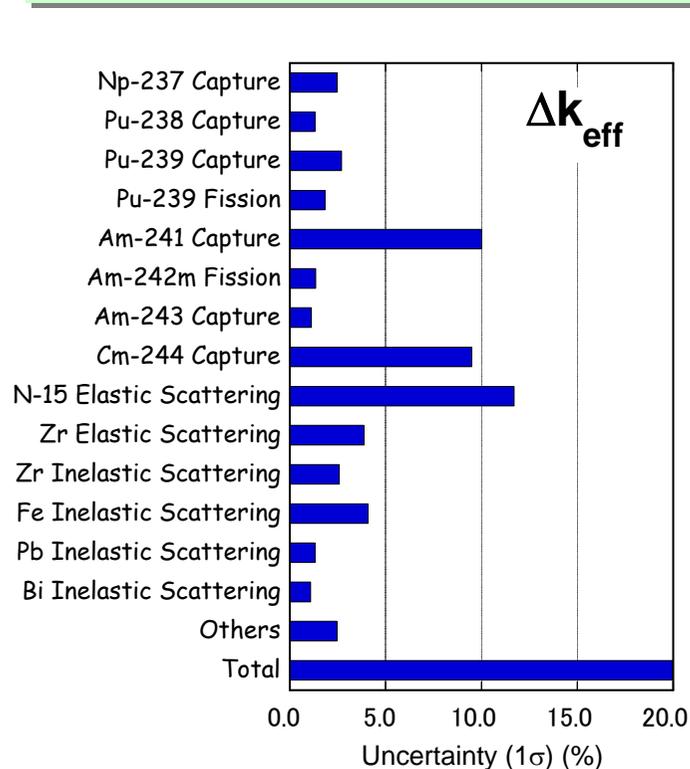
核設計精度の評価と未臨界度監視技術の開発

目的: ADSは、MA燃料を大量に用いて未臨界で運転するため、従来の原子炉とは大きく異なる概念

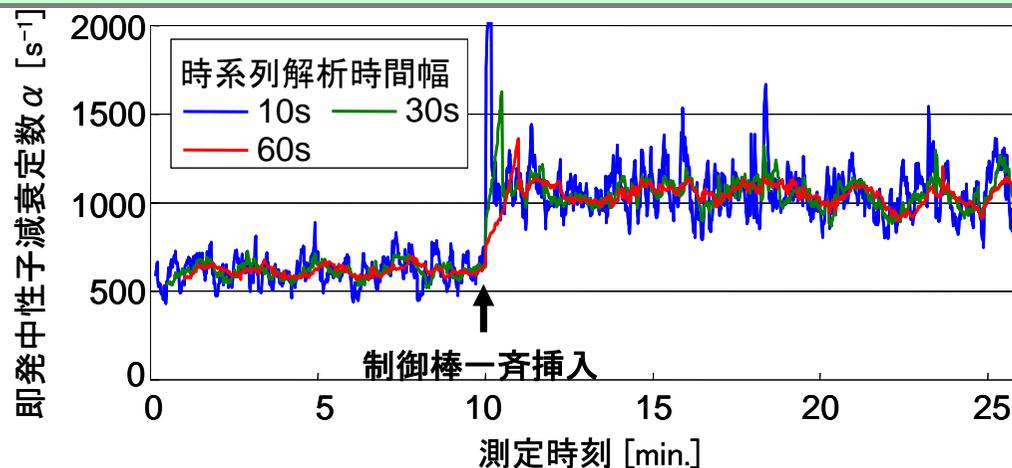
- 従来の核データや核設計手法の適用性の把握
- 出力、出力分布、安全性等に大きく影響を及ぼす未臨界度の監視技術の開発

研究内容:

- 核データの共分散データと感度解析手法を組み合わせた核設計精度の評価
- KUCA、FCAを用いたADSの未臨界度監視の基礎実験



燃焼反応度の不確かさの評価結果



KUCA実験におけるパルス運転中のRossi- α 法の適用例

成果と今後の課題:

- 精度向上が必要な核種・反応は特定できたが、ADSの実効増倍係数の精度が通常の高速炉と同程度との結果が出るなど、MAの共分散データの見直しが必要と考えられる
- 未臨界度監視の基礎的な見通しは得られた
- 今後、MA装荷臨界・未臨界実験による核設計精度の検証や出力運転時の未臨界度測定技術の確立が必要

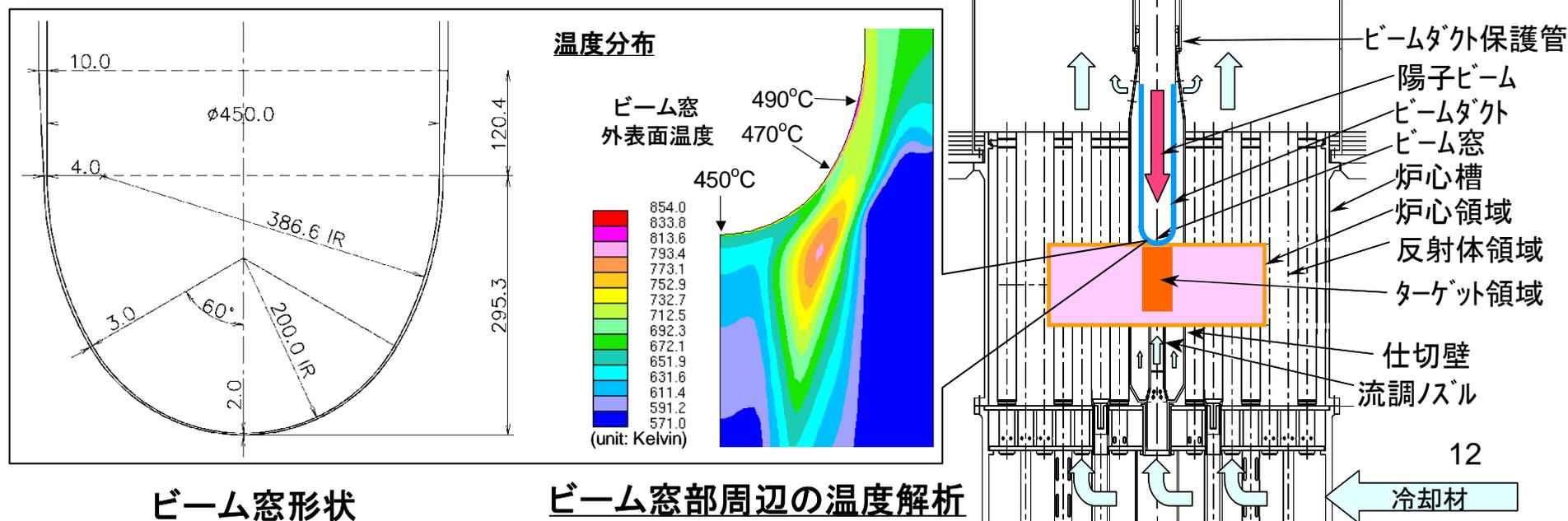
(3) ADSに関する研究開発

ビーム窓の設計検討

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**について、成立性の高い概念を創出する

研究内容：

□球殻を組み合わせるビーム窓概念の創出と、流調ノズルの設置による有効冷却の確保



成果と今後の課題：

- ビーム窓外表面温度を**500°C以下**に抑制できる見込みを得た。
- 安全率3程度で**座屈に対する健全性が確保できる**ことを確認（設計外圧1.0 [MPa]）
- 先端部の板厚が1.4~2.4[mm]で成立するが、腐食を考慮して**2.0~2.4[mm]**を**最適範囲**と設定
- 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

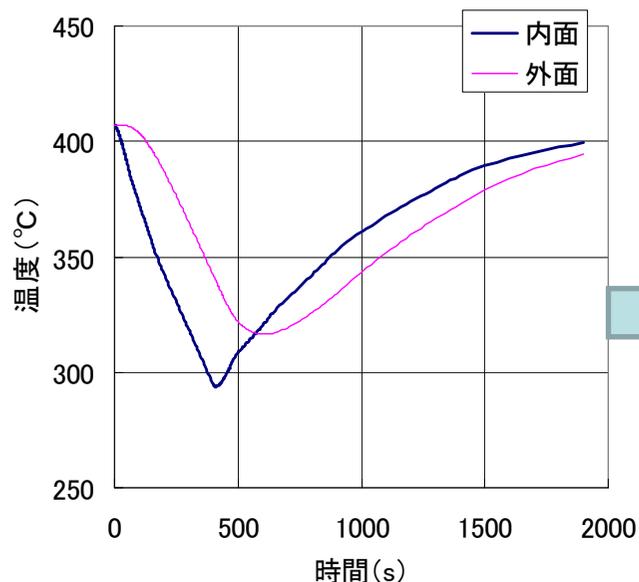
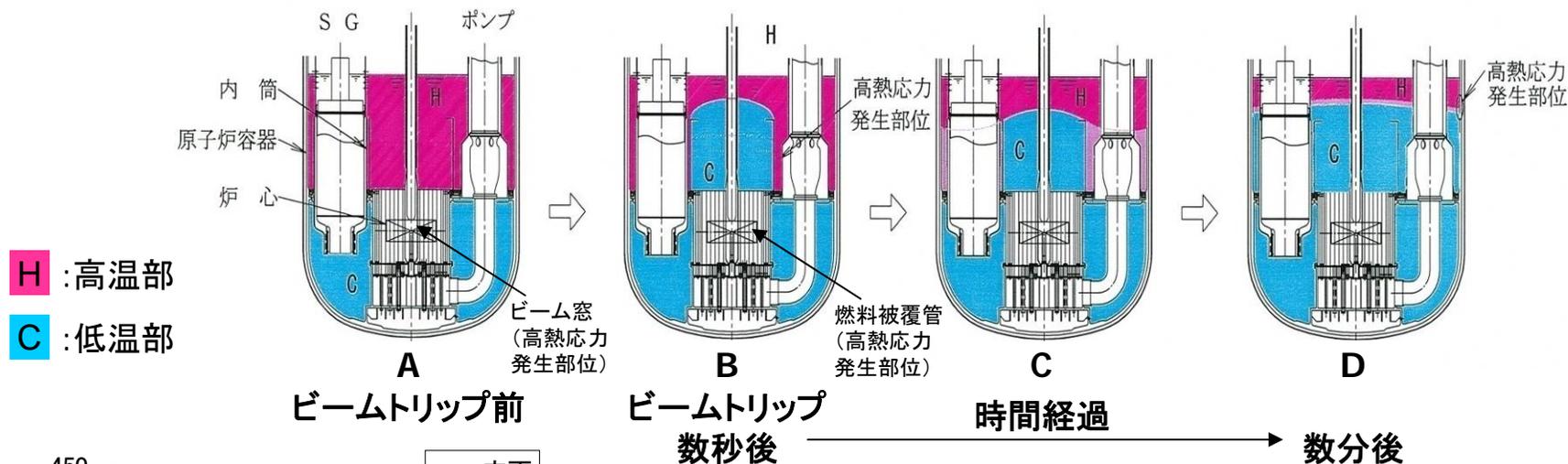
なお、欧州では、「窓無し概念」の研究開発が盛んであり、情報の交換を実施中

(3) ADSに関する研究開発

ビームトリップ事象の影響検討 (1)熱応力解析

目的: 予想される**加速器の頻繁な停止**に対して、**未臨界炉心の健全性を評価**する

□ 評価部位: ビーム窓、燃料被覆管、内筒、原子炉容器壁



評価結果:

疲労の観点からの許容ビームトリップ回数

- ビーム窓、燃料被覆管: 2年間の寿命中に 10^5 回以上
- 内筒: 40年間の寿命中に 10^5 回以上
- 原子炉容器壁: 40年間の寿命中に 3×10^4 回

◎ 但し、内筒と原子炉容器壁については、**10秒以内に復帰**できれば影響は小さい

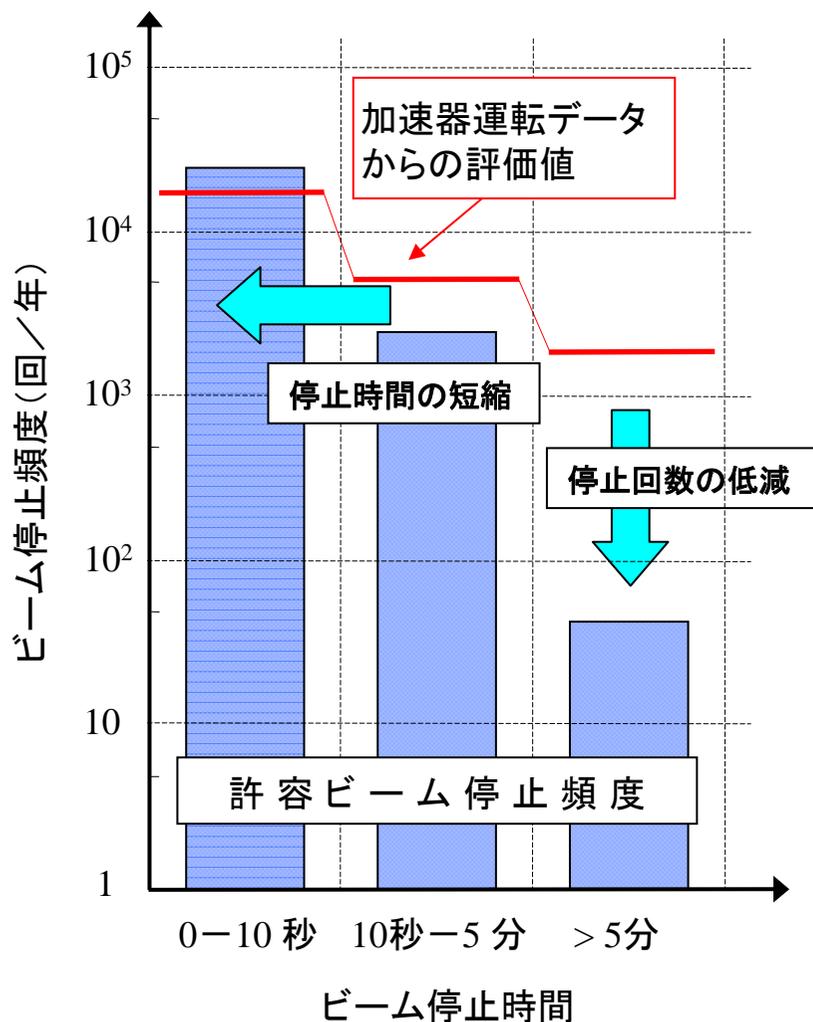
ビームトリップ時の原子炉容器壁の内外面の温度変化

(3) ADSに関する研究開発

ビームトリップ事象の影響検討 (3)加速器信頼性評価との比較

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

1年間(7,200時間)のビーム停止時間と頻度



研究内容：

既存の加速器(※)の運転データを解析し、その結果に基づいて、ADS用加速器の場合のビーム停止頻度を推定する。

※ イオン源:LANSCE、高周波系:KEKB

対応方策：

- 素早いビーム復帰
- 余裕の有る設計
- 冗長なシステム
- 自己診断・修復システム
- 保守・管理の徹底

但し、冗長なシステムは高コストになることに注意を要する

成果と今後の課題

- 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
- 今後、機器の単体試験や、J-PARC加速器の運転を通じて、停止回数低減方策の研究を進める

なお、欧州の研究では、1秒以上のビーム停止頻度を3回/3ヶ月程度に低減可能と試算

(3) ADSに関する研究開発

ADSの安全性予備的検討

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、事故時の影響を把握する

研究内容：

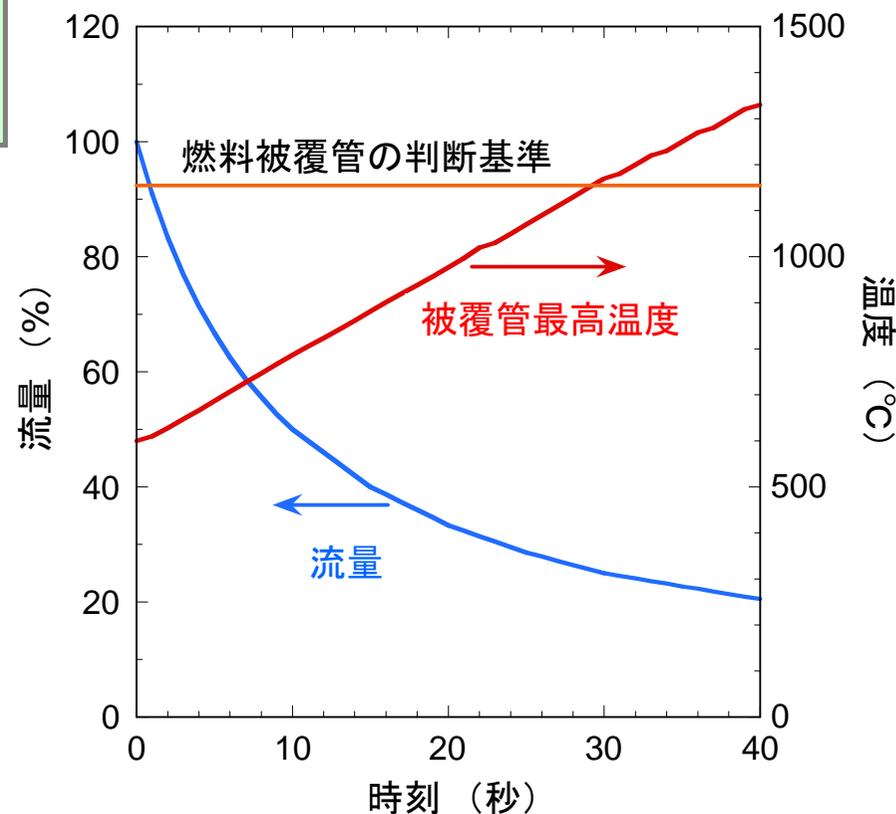
- ビーム窓の過渡解析
- 燃料被覆管温度の過渡解析

判断基準

- 燃料温度 $\leq 2700^{\circ}\text{C}$
- 被覆管温度 $\leq 1150^{\circ}\text{C}$
- CDF (累積損傷和) 値 ≤ 0.5
- 事故時冷却材バウンダリ温度 $\leq 650^{\circ}\text{C}$

判断基準に達するのに要する時間

流量半減時間	燃料温度	被覆管温度	CDF	冷却材温度
15 秒		43 秒	31 秒	96 秒
10 秒	84 秒	29 秒	22 秒	64 秒
5 秒	46 秒	16 秒	12 秒	35 秒



ULOF時の燃料被覆管最高温度の変化
(ポンプ流量半減時間:10秒)

成果と今後の課題：

- ポンプ停止後10秒程度以内に加速器を停止する必要があることが分かった。
- 燃料破損時の挙動等をSIMMER-IIIコードを用いて解析中

(3) ADSに関する研究開発

鉛ビスマス技術及び核破砕ターゲット (1) 全体概要

- 材料面から見たADSの特徴
 - 冷却材及び核破砕ターゲットとして鉛ビスマスを使用
 - ビーム窓が高エネルギーの陽子・中性子照射を受ける
(ビーム窓ありADS)

- 鉛ビスマス技術における課題
 - 鉛ビスマスによる鋼材の腐食特性の把握及び腐食量低減
 - 計測と制御技術(酸素濃度、流速など)
 - 熱流動及び熱伝達
 - 鉛ビスマス中の不純物挙動(Poなど)

- ビーム窓材における課題
 - ビーム窓材は陽子ビームによる発熱、鉛ビスマスによる腐食、応力、照射損傷に耐える設計が必要
 - ✓ 強度データ、熱特性、中性子照射データなどから、フェライト/マルテンサイト鋼(Mod.9Cr-1Mo,F82H)を第1候補に、オーステナイト鋼(316SS, JPCA)をバックアップ材料として設計
 - 高エネルギーの陽子・中性子照射を受けた材料の特性評価
 - メガワット級鉛ビスマス核破砕ターゲットの国際共同実験: MEGAPIE

(3) ADSに関する研究開発

鉛ビスマス技術及び核破砕ターゲット (2) 鋼材の腐食

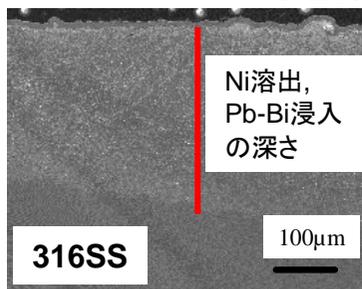
目的: 鉛ビスマスによる**鋼材腐食**の特徴と腐食深さの把握と、腐食の低減方策の提案

ポット型腐食装置



石英製容器

酸素濃度依存性 550°C、低酸素濃度



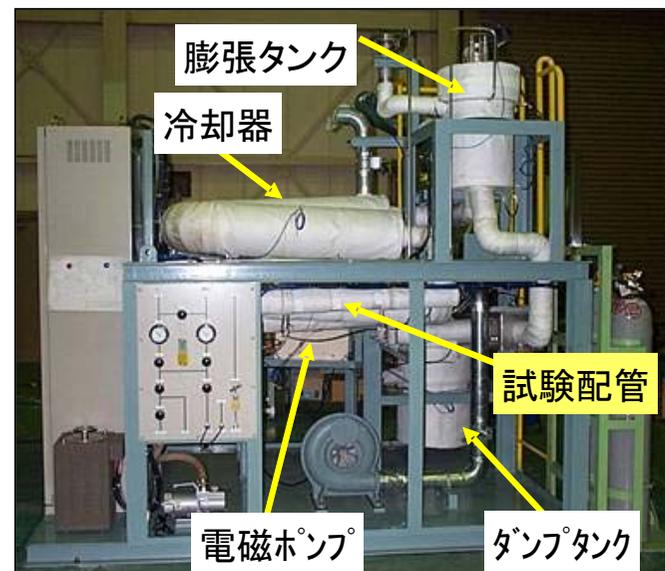
Ni溶出, Pb-Bi浸入の深さ

316SS

100μm

ループ型腐食装置

高温部: 450°C



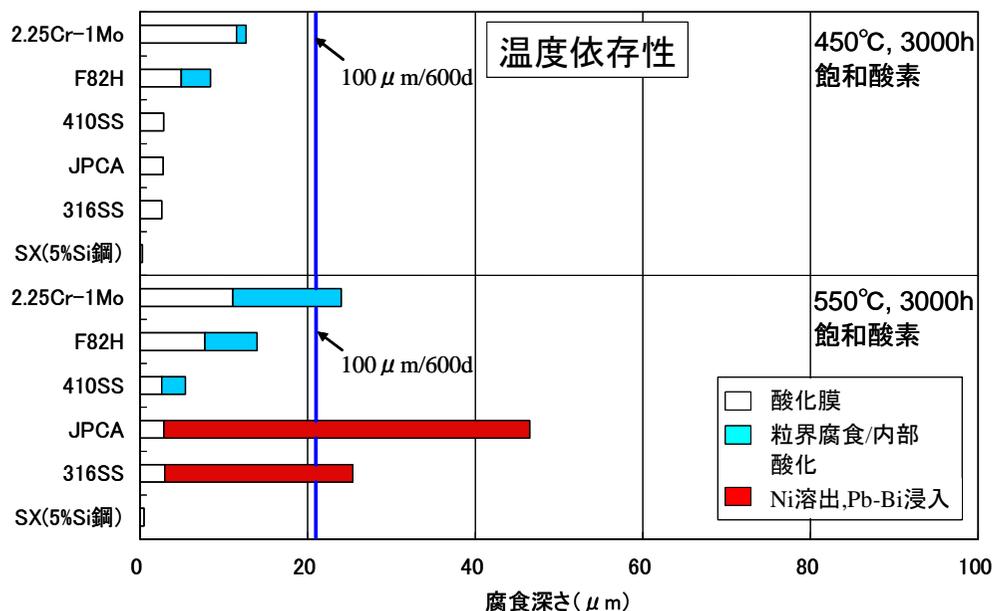
膨張タンク

冷却器

試験配管

電磁ポンプ

ダンプタンク



2mm

鉛ビスマスの流れ方向

316SS管の縦断面(3000h試験後)

成果と今後の課題:

- 腐食の**温度・酸素濃度依存性**を取得。腐食量低減には、**SiやAlの添加**、酸素濃度制御が有効
- ループ試験では流れの乱れによる**エロージョン・コロージョン**があるとみられ、今後更なる検討が必要

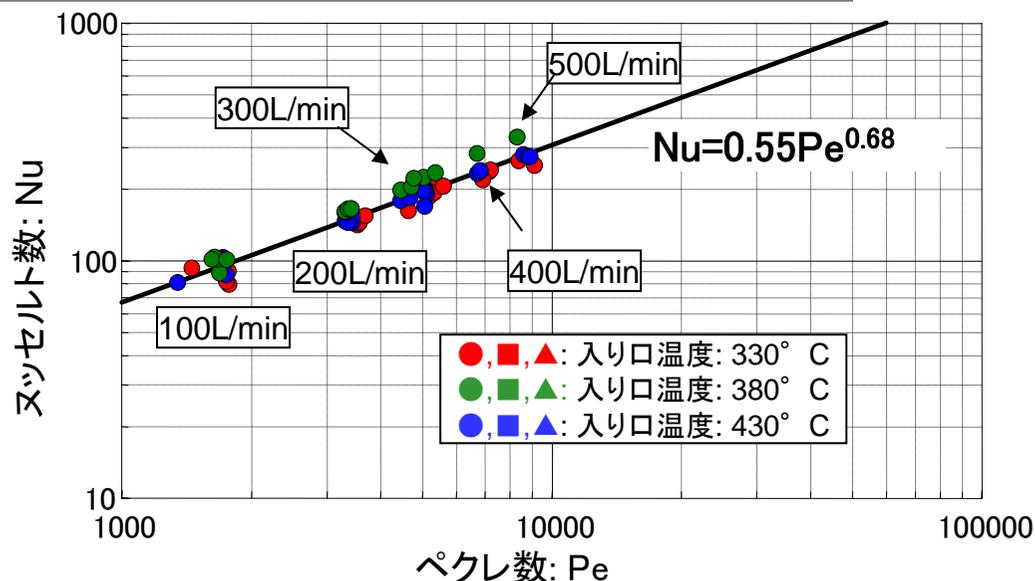
(3) ADSに関する研究開発

鉛ビスマス技術及び核破砕ターゲット (3) ビーム窓熱流動試験

目的: ビーム窓成立性評価で重要な鉛ビスマスの伝熱流動特性を把握する



伝熱流動ループ全景

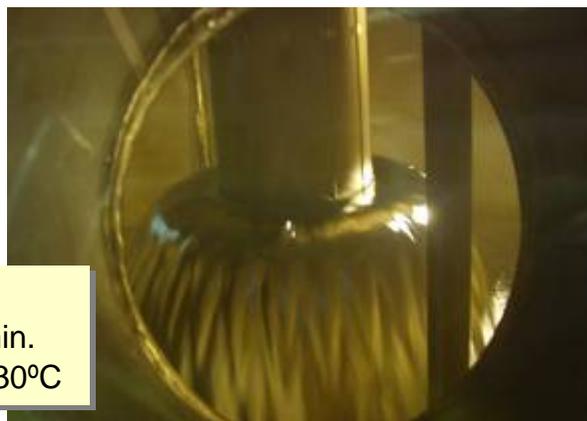


ビーム窓部平均の熱伝達の相関式



ヒータ出力: 6kW
流量: 100-500 L/min.
入り口温度: 330-430°C

ビーム窓模擬試験体



オーバーフロー部の流況

成果と今後の課題:

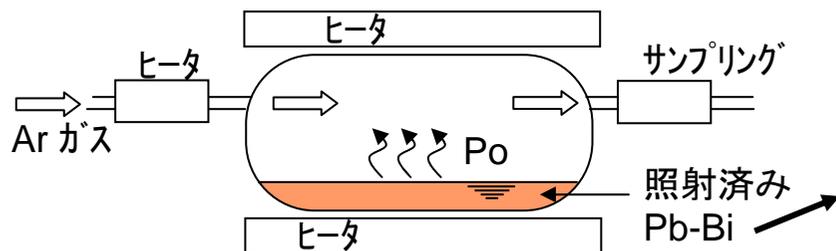
- 先端部で温度の不安定挙動が観察されたが、全体的な熱伝達特性は、乱流モデルに低Re数型線形k-εモデルで**精度良く予測可能**
- 超音波流速分布計の開発を実施中
- 今後、グリッドスペーサを含めた被覆管の伝熱流動試験が必要

(3) ADSに関する研究開発

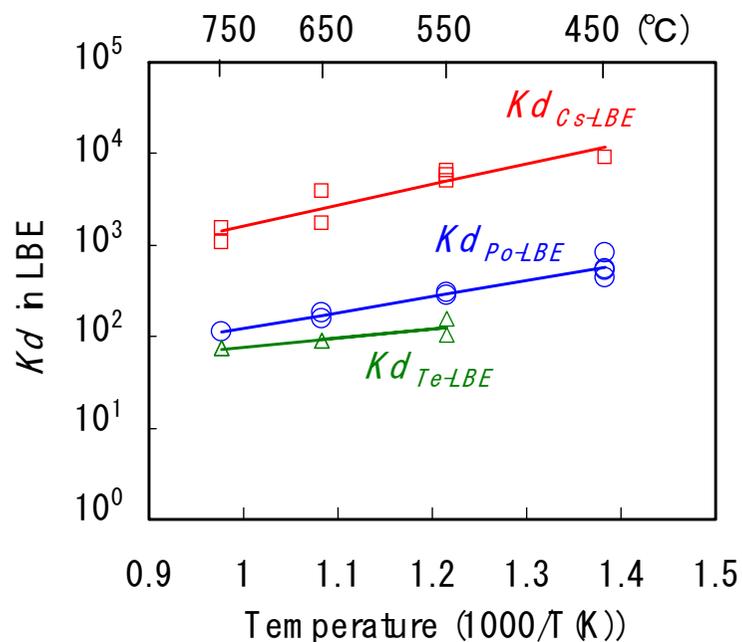
鉛ビスマス技術及び核破砕ターゲット (4)Po等蒸発試験

目的: Bi-209が中性子を吸収して生じるPo-210(半減期:138日)は揮発性のある α 線放出核種であり、取り扱いに注意を要する。鉛ビスマス中からの蒸発挙動のデータを取得し、整備する

JMTRにて鉛ビスマスを照射してPo-210を生成し、動的流通法で気液平衡分配係数を測定



動的流通法(トランスパレーション法)の試験原理



Te, Cs, Poの気液平衡分配係数

成果と今後の課題:

□Poの蒸発データの取得と定式化

$$\log P'_{Po-LBE} = 10.5357 + \log \chi_{Po} - 8,348/T$$

□Po, Te, Csなどの不純物の鉛ビスマスからの蒸発データを取得し、活量係数、気液平衡分配係数を導出

□得られた熱力学的な係数より、液体鉛ビスマスから不純物の蒸発のしやすさを推定

□結果は、MEGAPIE国際共同実験の安全評価でも活用された

□今後は、事故解析に使用できる非平衡状態のデータ取得が課題

(3) ADSに関する研究開発

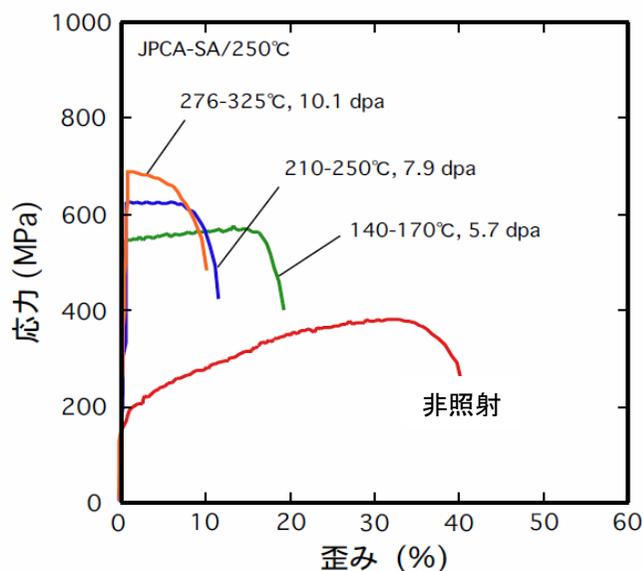
鉛ビスマス技術及び核破砕ターゲット (5) ビーム窓用材料

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

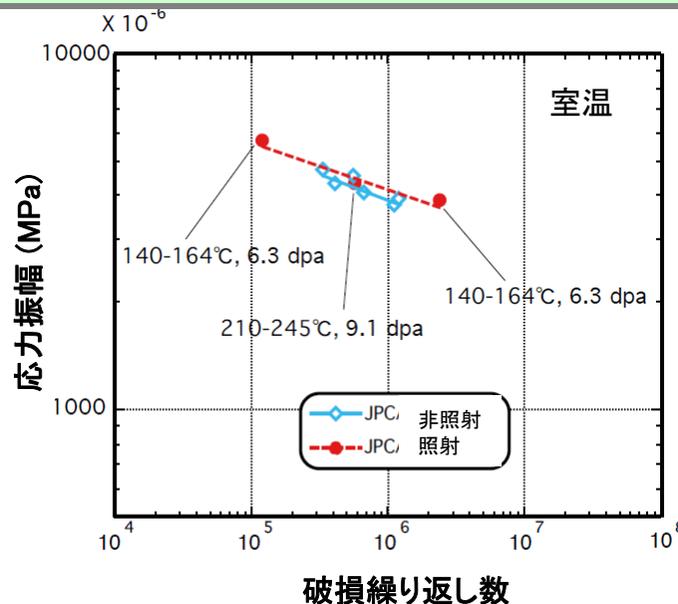
- 概念設計を行っている800MWthのADSのビーム窓材は、2年間に98dpaのはじき出し、1900appmのHeを生成する照射損傷を受ける

研究内容:

- スイスのポール・シェラー研究所(PSI)の加速器により、580MeVの陽子照射を行った試料を用いて、照射後試験を実施



JPCAの引張り試験結果



JPCAの疲労試験結果

成果と今後の課題:

- 照射硬化が起こり、降伏応力が上昇、延性の低下もみられるが、それほど大きなものではない
- 照射条件の範囲では、陽子照射材の疲労寿命は非照射材とほぼ同等
- 今後、重照射材、高温照射材及びマルテンサイト鋼の照射後試験を実施

(3) ADSに関する研究開発

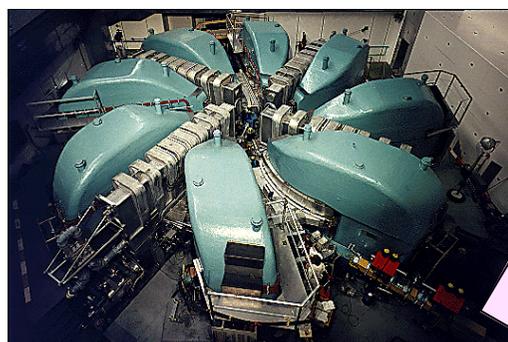
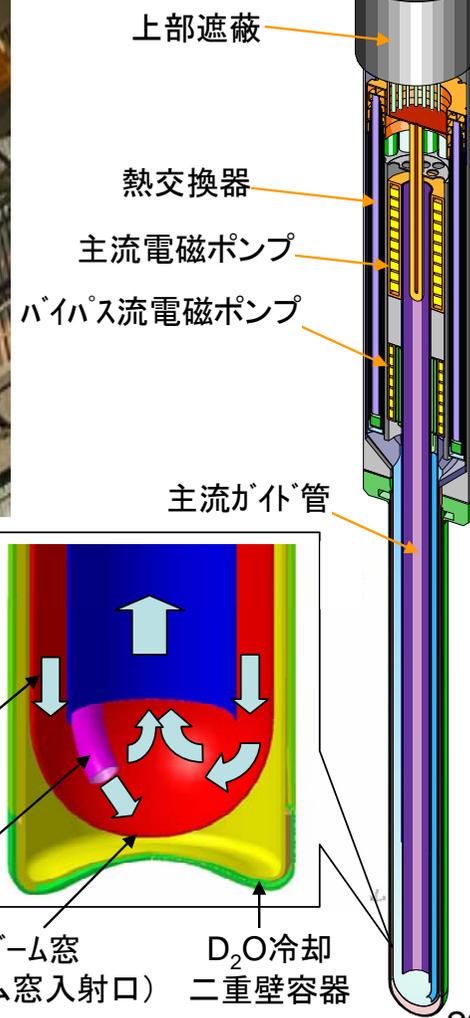
鉛ビスマス技術及び核破砕ターゲット (6) MEGAPIE国際共同実験

実験の概要とこれまでの成果:

- スイス・ポールシェー研究所 (PSI) の加速器中性子源施設 SING を利用し、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
- その後、供用を開始し、最高1.35mAで、12月21日まで運転
- 照射後の材料試験の準備中



ターゲット本体



陽子サイクロトロン



中性子源施設SING

陽子ビーム

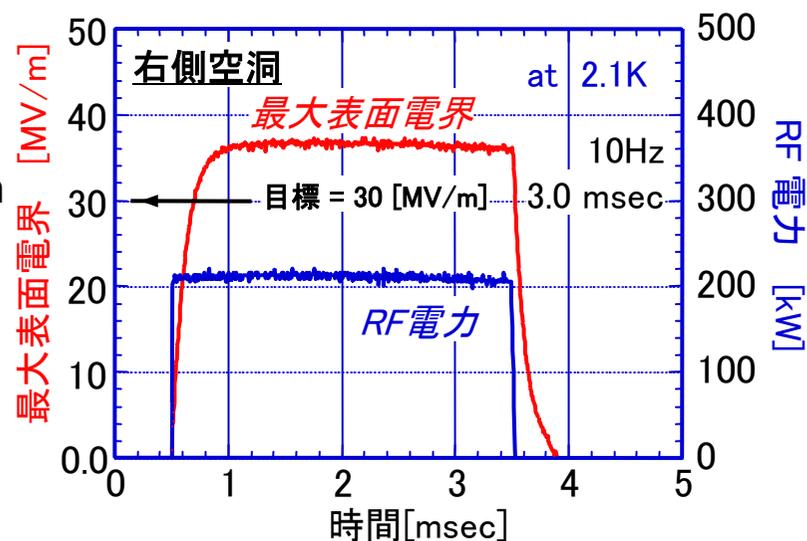
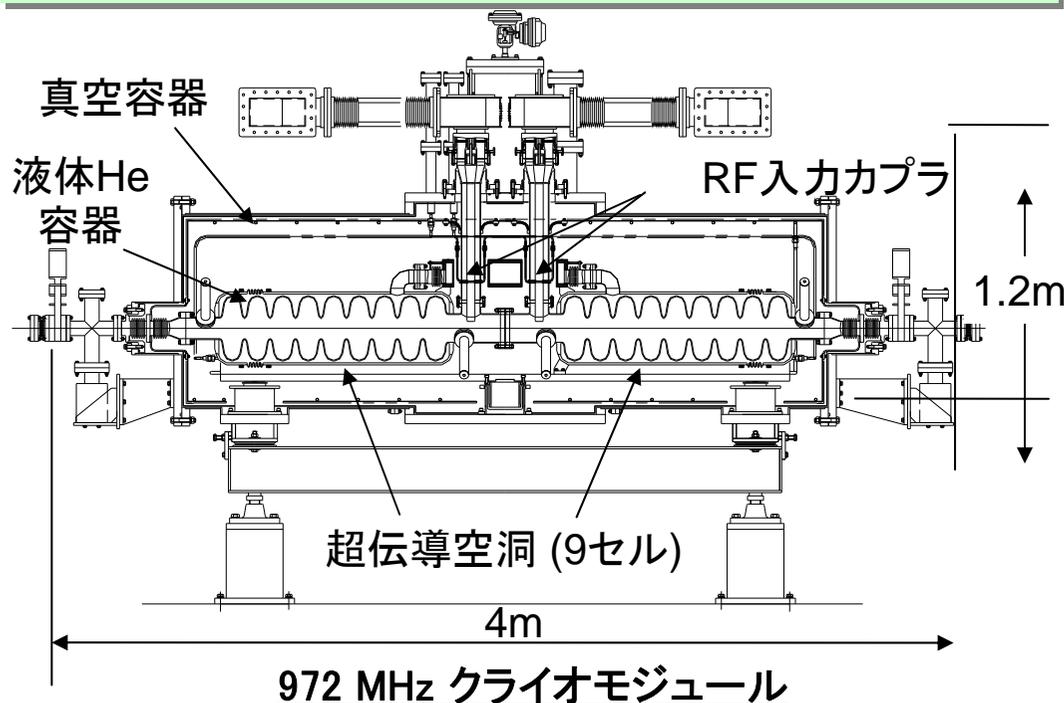
(3) ADSに関する研究開発

加速器の研究開発 (1) 超伝導線形陽子加速器の開発

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を開発する

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、冷却性能、チューナー性能の確認等を実施した後、最大表面電界(目標30MV/m)を測定



クライオモジュールの試験結果

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
- 今後、低温断熱設計の改善、より短尺(現在は470mと推定)での加速方法を検討する必要がある

(3) ADSに関する研究開発

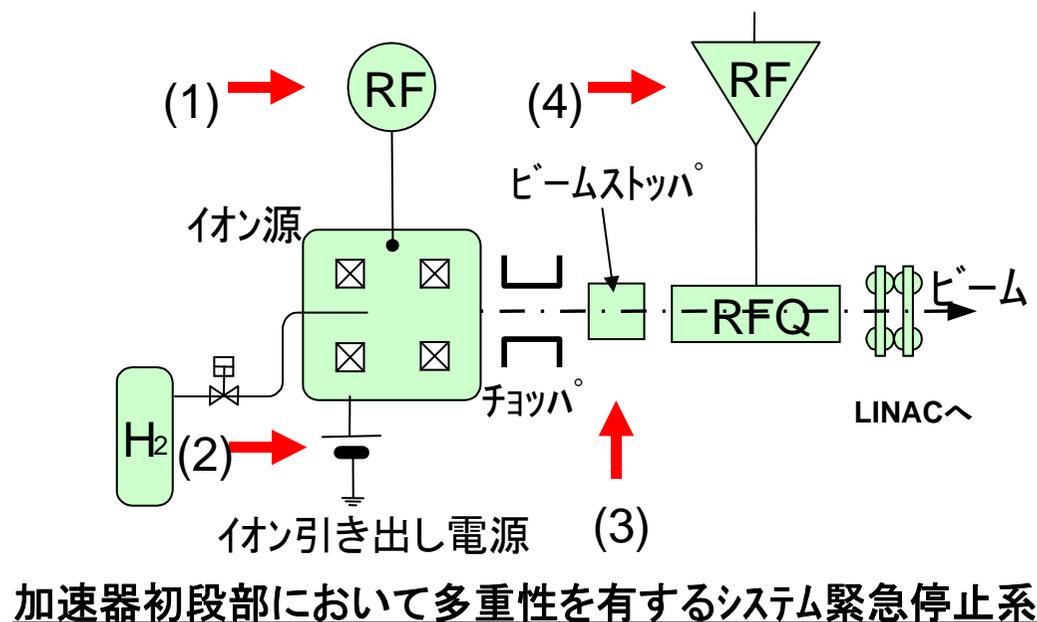
加速器の研究開発 (2) 超伝導線形加速器のシステム設計

研究内容:

- 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

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%)



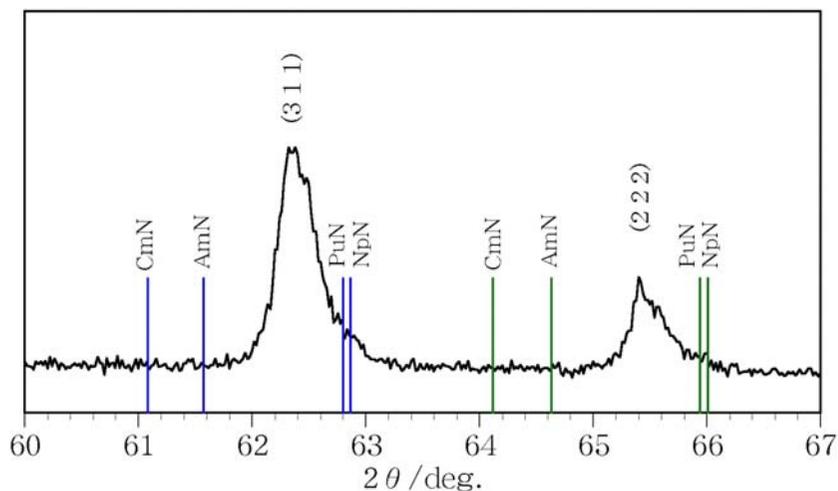
成果と今後の課題:

- 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、低エネルギー部の効率化、安定な加速器システムの実現(高電圧機器の信頼性向上)、最適エネルギーの選定、未臨界炉とのインターフェースの開発等が必要

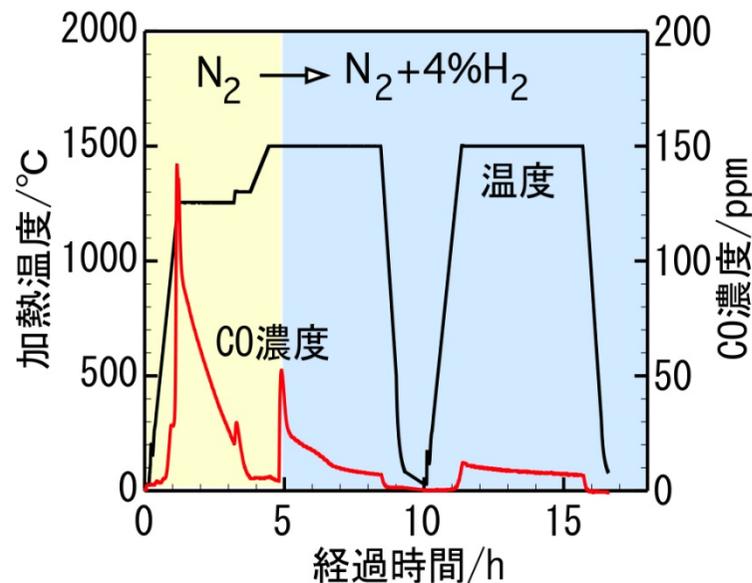
(4) ADS用燃料と乾式処理に関する研究開発

炭素熱還元法によるMA窒化物燃料の調製(1)

目的：三元系、四元系を含む単相のMA窒化物固溶体を調製する。また、MA含有窒化物ペレットを調製して、種々の物性測定を可能とする。



調製した(Np,Pu,Am,Cm)NのX線回折パターン



二段階加熱による炭素熱還元反応



熱拡散率測定用(Np,Pu,Am,Cm)Nペレット(86%TD)

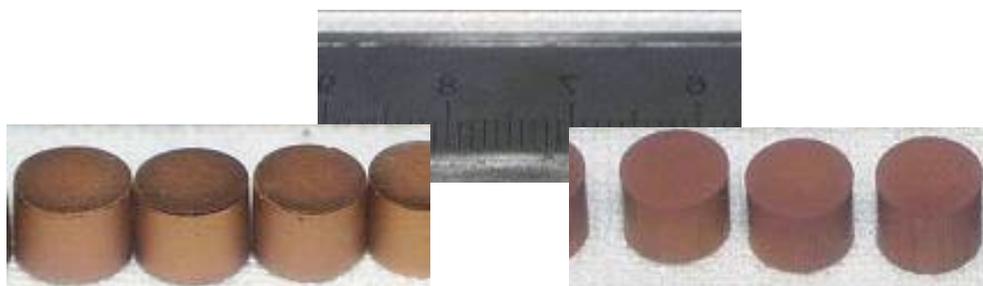
成果と今後の課題:

- ADS用燃料として重要な組成柔軟性の実証
- Amの蒸発を抑制した高純度窒化物固溶体調製技術の確立
- N₂雰囲気下の焼結(T<1953K)により、高密度(>85%TD)とAmの蒸発抑制を両立

(4) ADS用燃料と乾式処理に関する研究開発

炭素熱還元法によるMA窒化物燃料の調製(2)

目的: 希釈材(ZrN, TiN)を含有した窒化物を調製して特性を調べるとともに、物性測定、照射試験、乾式処理試験用試料として供給する。



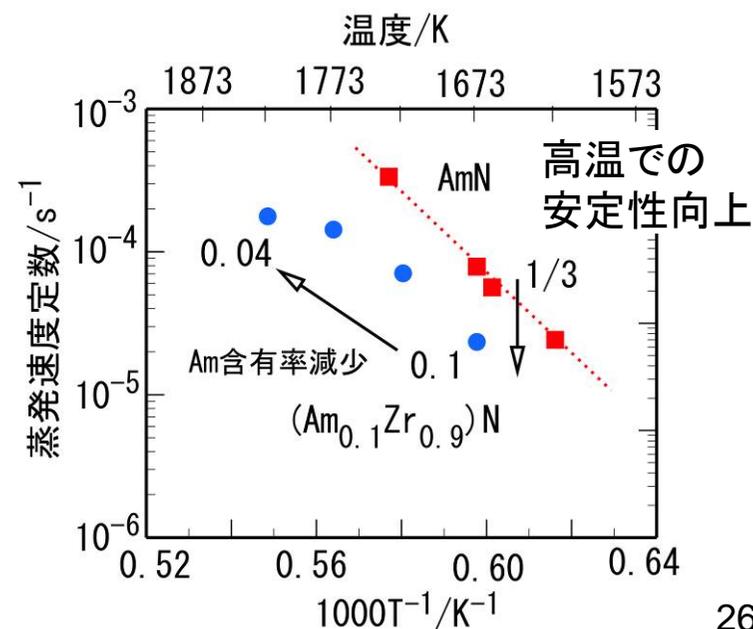
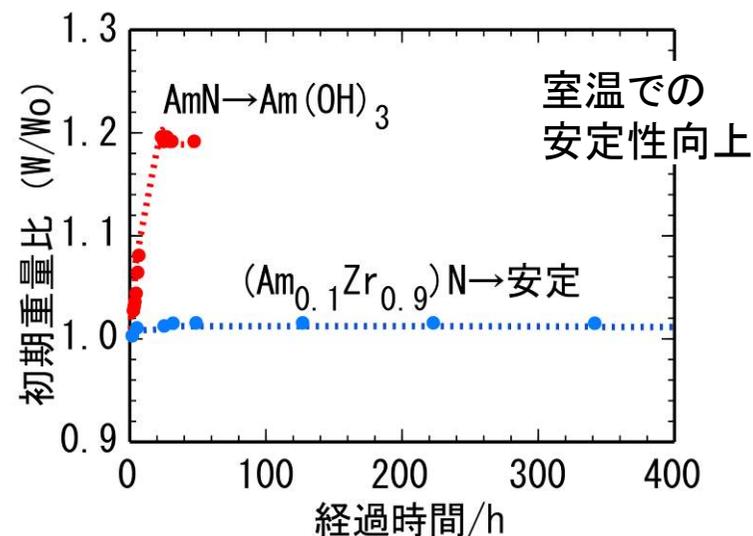
(Pu,Zr)N

PuN+TiN

JMTR 照射試験用希釈材含有 Pu 窒化物ペレット

成果と今後の課題:

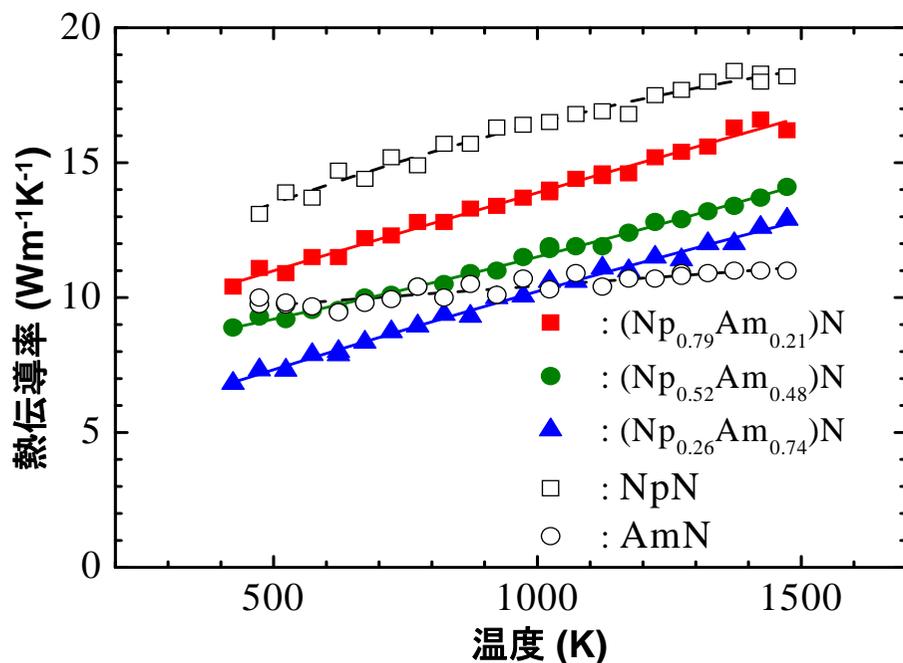
- ❑ 希釈材含有窒化物固溶体(ZrNの場合)、二相分散型窒化物(TiNの場合)を調製
- ❑ ZrN含有によるMA窒化物の化学的安定性向上を確認
- ❑ 高密度化、不純物(酸素、炭素)含有量低減化等について検討中



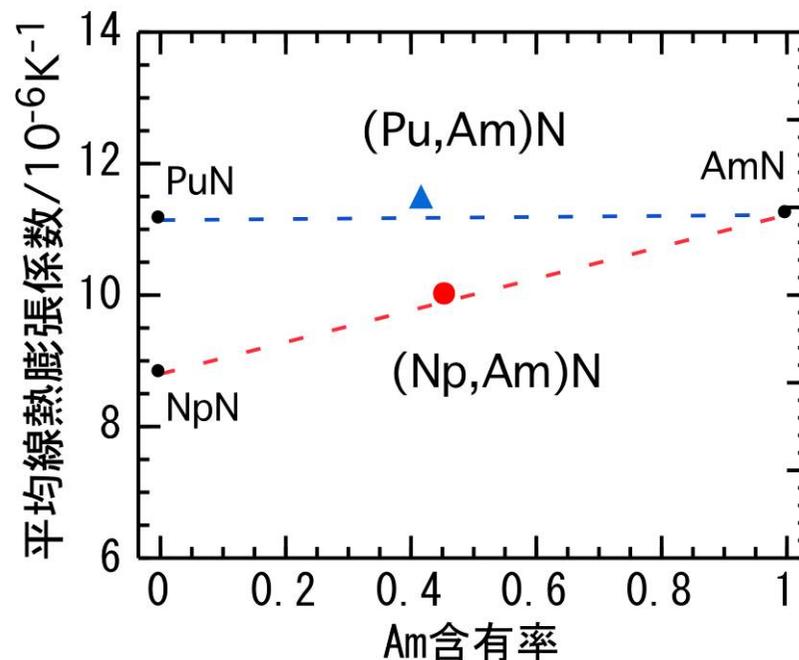
(4) ADS用燃料と乾式処理に関する研究開発

MA窒化物燃料の物性測定(1)

目的: これまで全く報告されていないMA含有窒化物の熱物性データを整備する。



NpN, AmN, (Np,Am)Nの熱伝導率



NpN, AmN, (Np,Am)N, (Pu,Am)Nの熱膨張係数

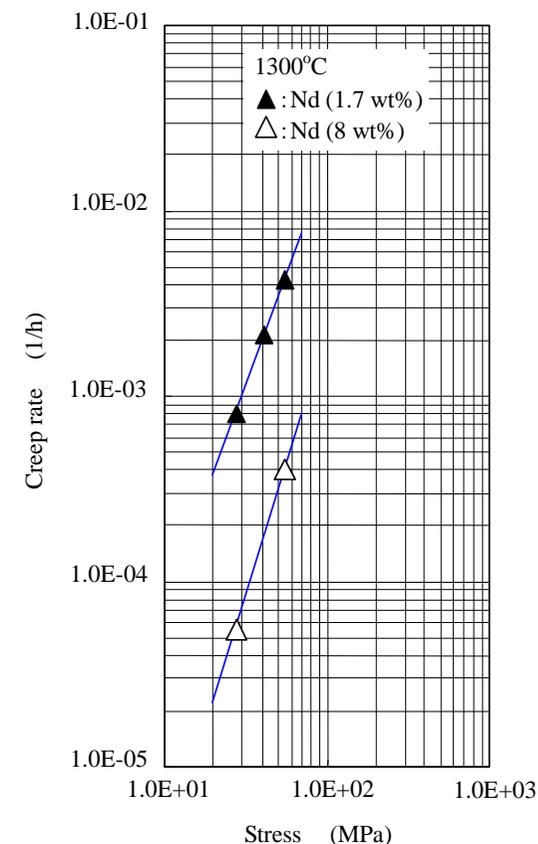
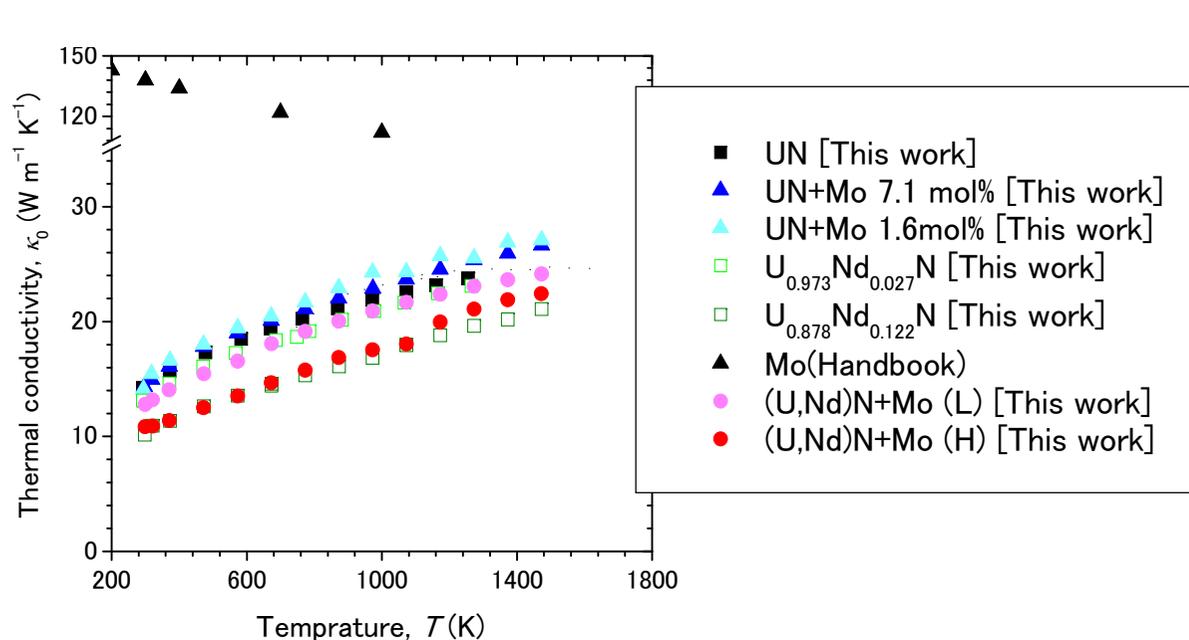
成果と今後の課題:

- 微小試料ならびに酸化防止対応を施した測定により高精度の熱物性測定を実現
- MA含有窒化物の熱膨張率、比熱、熱伝導率等の温度ならびに組成依存性に関するデータを取得
- MAを高含有しても窒化物燃料の特長である優れた熱物性が維持されることを確認
- 原子力機構で取得した熱物性値を中心とするデータベース作成を予定

(4) ADS用燃料と乾式処理に関する研究開発

MA窒化物燃料の物性測定(2)

目的: FPの蓄積や希釈材の添加が窒化物の物性値に与える影響を評価する。



燃烧度模擬窒化物の熱伝導率(大阪大学との共同研究)(上)
とインデンテーション法で測定した熱クリープ速度(右)

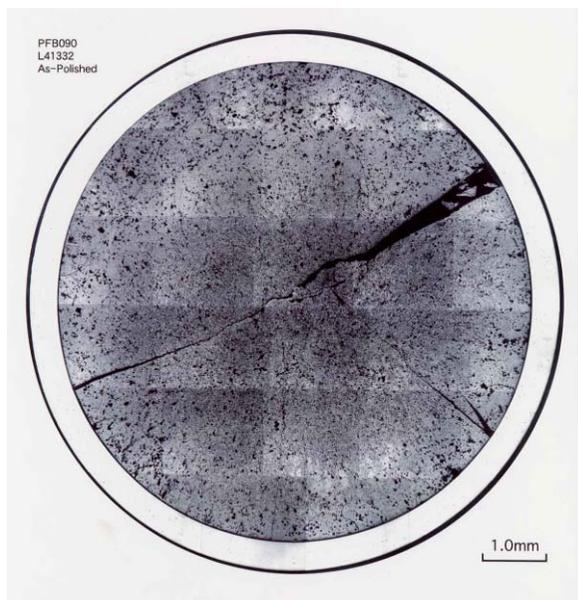
成果と今後の課題:

- 模擬FP元素を添加した燃烧度模擬窒化物の熱伝導率、熱クリープ速度等の物性値を取得
- 希釈材(ZrN, TiN)を添加したU窒化物の熱伝導率、熱クリープ等の物性値を取得
- 希釈材(ZrN, TiN)を添加したMA窒化物の熱伝導率等の物性測定を実施中

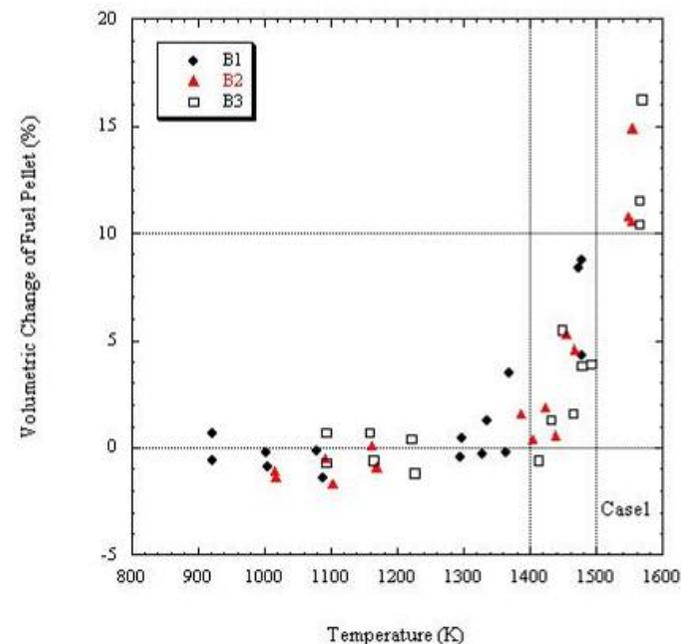
(4) ADS用燃料に関する研究開発

窒化物燃料の照射挙動評価(1)

目的: 「常陽」で照射した(U,Pu)N燃料の照射後試験により、照射挙動評価を行う。



「常陽」照射後(U,Pu)Nの断面写真



燃料温度と局所的スエリング率の関係

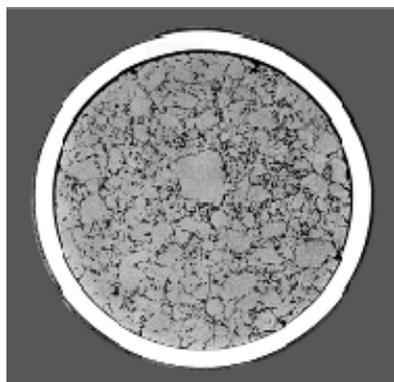
成果と今後の課題:

- 我が国で初めての窒化物燃料の高速炉照射試験により、低～中燃焼度(~4.5at%)までの健全性実証と照射挙動の把握
- 窒化物燃料の組織再編・FPガススエリング開始の“しきい温度”を評価
- 燃料と被覆管の機械的相互作用が顕著化する高燃焼度領域の健全性評価は今後の課題

(4) ADS用燃料と乾式処理に関する研究開発

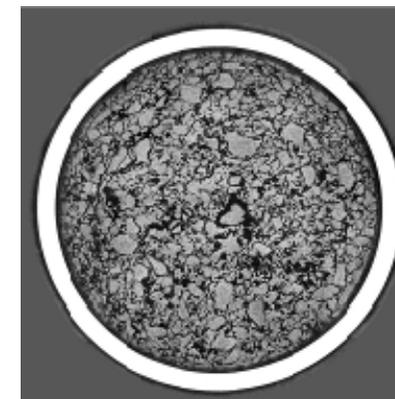
窒化物燃料の照射挙動評価 (2)

目的: 希釈材 (ZrN, TiN) を添加したUフリー窒化物燃料の照射試験を実施し、照射挙動評価を行う。

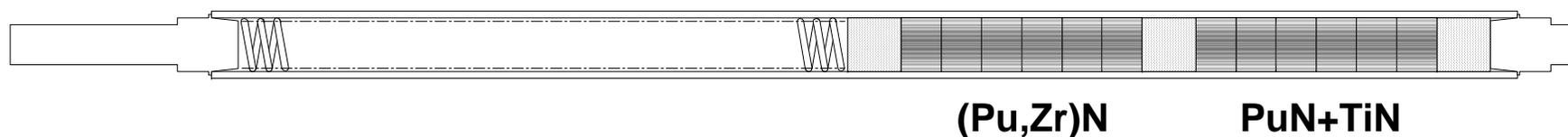


JMTR照射後(Pu,Zr)N
の断面写真

	(Pu,Zr)N	PuN+TiN
平均線出力	~41kW/m	~36kW/m
到達燃焼度(at%(Pu))	~15%	~17%
燃料最高温度(計算値)	~1273K	~1173K
スエリング率	3.6%	2.6%
FPガス放出率	1.6%	



JMTR照射後PuN+TiN
の断面写真



成果と今後の課題:

- 希釈材としてZrN, TiNを添加した(Pu,Zr)N及びPuN+TiN燃料の照射試験をJMTRで実施し、照射条件下では添加した希釈材が窒化物燃料の照射挙動を阻害しないことを確認
- ADS用窒化物燃料では、添加する希釈材の熱特性により“Cold Fuel Concept”が体現する可能性を示唆

(4) ADS用燃料と乾式処理に関する研究開発

発熱対策・窒素-15濃縮に関する検討

目的： MA窒化物燃料製造時の発熱対策及び窒素-15濃縮に関する検討を行い課題を抽出する。

・実験炉級ADS用燃料製造工程の検討



・粉末貯蔵時における除熱法の基礎的検討
・燃料組立時における除熱法の基礎的検討
・輸送時における除熱法の基礎的検討

・窒素-15の濃縮・リサイクル技術の検討



・ADSを用いた窒化物燃料サイクルにおける炭素-14の生成量を評価
・窒素-15のリサイクル、回収技術と発電コストへの影響に関する基礎的検討
・窒素-15濃縮技術として、環状化合物固定化樹脂を用いた方法に関する基礎的検討(名古屋大学への委託研究)

成果と今後の課題：

- ❑ 粉末貯蔵時においては、平板形状容器を用いた液体中保管が有効
- ❑ 燃料集合体組立時においては、エントランスノズルからではなく、横方向からの強制冷却(空気)が有効
- ❑ 輸送時は、鉛ビスマス充填容器を用いた事業所内輸送を検討
- ❑ 工学的検討は今後の課題

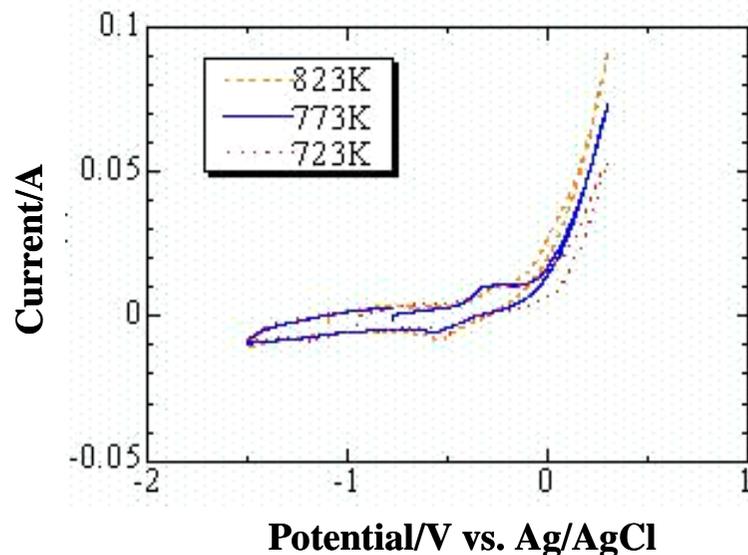
成果と今後の課題：

- ❑ 燃料製造工程では、窒素-15を閉鎖系で取扱うことが、発電コストへの影響を数%以内に抑える条件
- ❑ 窒素-15のリサイクル、回収技術としては、これまでも実績のある低温精留法が有望
- ❑ 経済性に優れ、環境負荷が小さく、規模拡大に適した窒素-15濃縮技術開発は今後の課題

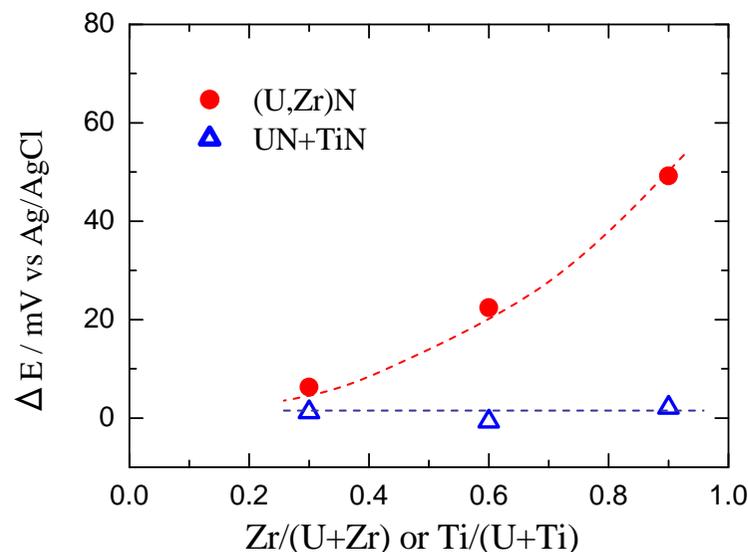
(4) ADS用燃料と乾式処理に関する研究開発

窒化物燃料の熔融塩電解試験

目的： 乾式処理プロセスの主工程となる熔融塩電解時のMA含有窒化物燃料の挙動評価を行う。



AmNの溶解挙動を示す電位—電流曲線
(AmNはUN, PuNより卑な電位で溶解し、液体Cd陰極中にはAmCd₆として回収される)



熔融塩中での静止電位に対する添加した希釈材濃度の影響 (ZrNは窒化物と固溶体を形成するため濃度により静止電位が変化する)

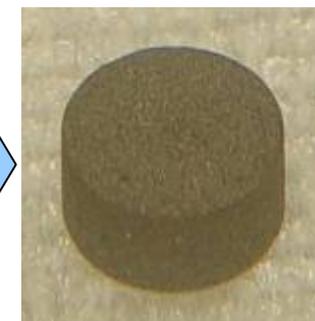
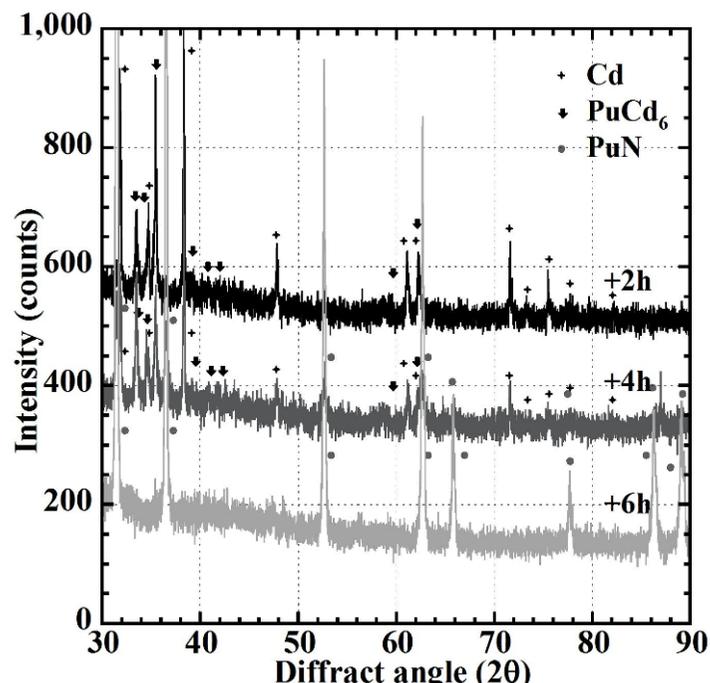
成果と今後の課題：

- AmNの熔融塩電解試験を行い、MA窒化物の陽極溶解、液体Cd陰極へのMA回収挙動を把握
- 燃焼度模擬窒化物の熔融塩電解試験を行い、窒化物燃料の電解挙動に対するFPの影響を把握
- 希釈材 (ZrN, TiN) を添加した窒化物の電解試験を行い、窒化物燃料の電解挙動に対する希釈材添加の影響を把握

(4) ADS用燃料と乾式処理に関する研究開発

乾式処理工程からの窒化物調製

目的： 溶融塩電解で液体Cd陰極に回収したアクチノイドの再窒化技術を開発し、窒化物燃料の乾式処理プロセスの技術的成立性を示す。



(U,Pu)N 電解後
の液体Cdの一部

蒸留窒化反応後に回
収した(U,Pu)N 粉末

回収粉末から調製し
た窒化物ペレット

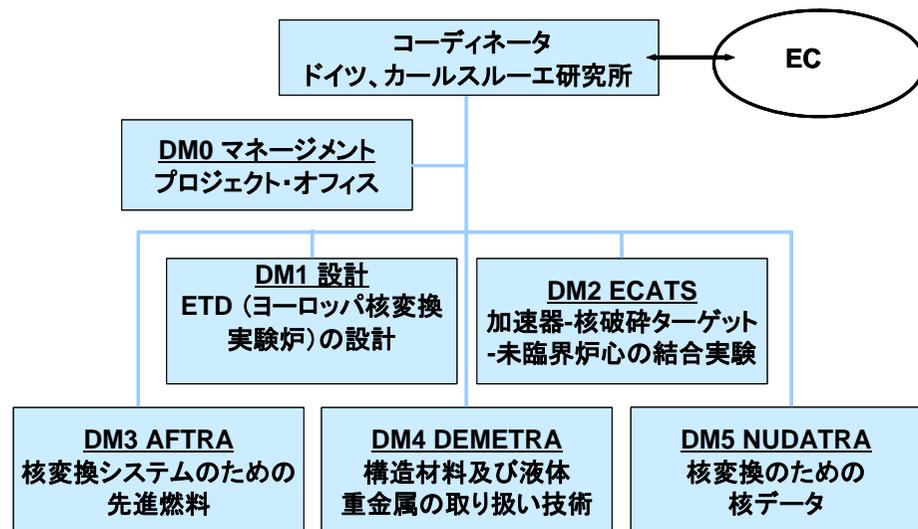
蒸留窒化反応によるPuN生成過程を示すX線回折パターン(左)
(N₂気流中、700°Cの加熱でCdの蒸留とPuの窒化が同時に進行)

成果と今後の課題：

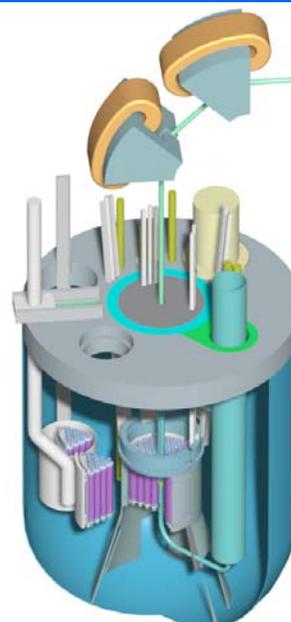
- ❑ 液体Cd中で安定化するMA, Puの再窒化に適用可能な蒸留窒化法を開発
- ❑ 蒸留窒化法によるAmN, PuN, (U,Pu)Nの生成とCdの蒸発除去を確認するとともに、蒸発窒化反応後に回収した窒化物粉末から窒化物ペレットを調製
- ❑ 窒化物燃料の乾式処理に特有な陽極溶解ならびに再窒化プロセスについてMA, Puを用いて実験室規模で技術的成立性を確認(工学的課題については多くの技術基盤を共有する金属燃料サイクルに関する研究開発成果の利用が可能)

(5) 国際協力の現状

ADSに関する国際協力



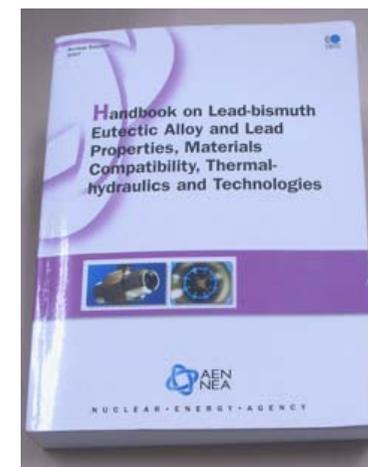
欧州のADSの総合研究体EUROTRANSの組織



陽子加速器

加速器:超伝導LINAC
 陽子ビーム:350MeV, 最大1.75MW
 核破碎ターゲット:Pb-Bi(窓なし型)
 炉心冷却材:Pb-Bi
 最大keff=0.9552(ks=0.96)
 熱出力:52MWt
 燃料初期装荷量:514kg
 燃料組成:MOX(富化度30wt%)

ベルギーの照射試験用
ADS:MYRRHA炉の概念



欧、米、日の実験データ等を収集・編集したOECD/NEAの鉛ビスマス・ハンドブック(2007)

ADSに関する国際協力を通して、効率的に研究開発を推進

- 欧州のADSの総合研究体EUROTRANSへの参加
 - ▶ 燃料(酸化物-窒化物)、ビーム窓概念等で相補的な関係
- フランスCEAとの協力(燃料照射、未臨界炉物理実験等)
- ベルギー原子力センターとの協力(照射試験用ADSの設計、Pb-Bi中の材料照射等)
- MEGAPIE国際共同実験(鉛ビスマスを用いたメガワット級核破碎ターゲットの開発)への参加
- Asia ADSネットワークを形成しての情報交換
- IAEA、OECD/NEAなどのADS、鉛ビスマス研究への参画

(6) まとめと今後の進め方

ADSに関する研究開発

- ・ ADSの設計研究については、熱出力800MWの鉛ビスマス冷却型概念について、出力分布平坦化、核設計精度の検証、未臨界度監視技術の開発、ビーム窓部の設計、ビーム停止事象への対処方策検討、事故時挙動解析等を通じて、成立性の高い概念を構築・提示してきた。今後、これらの設計研究に用いた様々なデータの検証・拡充を図りたい。また、熔融塩燃料ADS等、様々な炉心概念の探索も行う。
- ・ 鉛ビスマス技術及び核破砕ターゲットについては、鋼材の腐食試験、ビーム窓部の伝熱流動試験、Po等の蒸発挙動試験、陽子による照射試験を実施するとともに、MEGAPIE国際共同実験に参加して、メガワット級ターゲットの成立性を実証した。引続き、各種試験を着実に進め、データの蓄積を図る。
- ・ 加速器については、クライオモジュール試験や設計研究により、ADS用加速器の基本概念を構築した。今後、J-PARC加速器の運転を通じた陽子加速器技術の蓄積等を図る。
- ・ 熱出力800MWの実規模プラントに先立って、熱出力80MW程度の実験炉級ADSの建設が必要

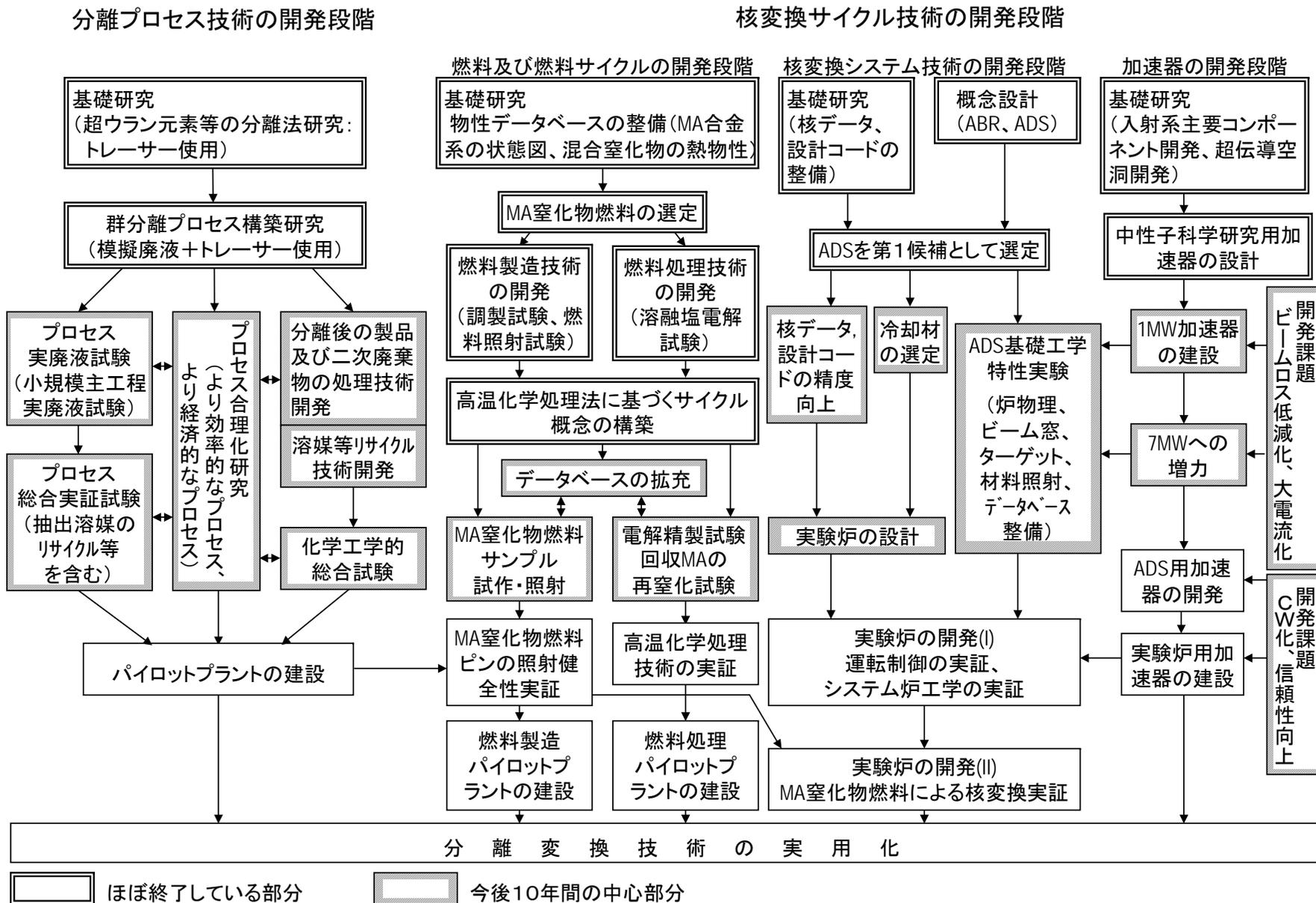
(6) まとめと今後の進め方

ADS用燃料と乾式処理に関する研究開発

- ・ 窒化物燃料製造プロセス及び燃料処理プロセスについては、これまでの研究によって実験室規模でのプロセス成立性を示すことができた。今後は、工学的規模への拡大に際しての課題を抽出する。
- ・ 窒化物燃料の物性測定については、炉心設計や挙動解析のためのデータが依然として不足しており、今後もデータの拡充を継続するとともに、Cmを含めたMA燃料データベースの構築を図る。
- ・ 窒化物燃料の照射挙動評価については、燃料の調達、施設及び研究資源等の制約から、当面は国際協力を活用した照射データの入手を優先する。
- ・ MA燃料の共通技術基盤確立のため、窒化物以外のMA燃料の物性測定や燃料中のHe挙動評価等に関する研究も実施する。
- ・ 研究の継続にあたっては、MAの入手が今後の課題の一つである。実廃液からの分離、Pu-241の崩壊で蓄積したAm-241の分離、海外からの調達等の方策について検討を進める。

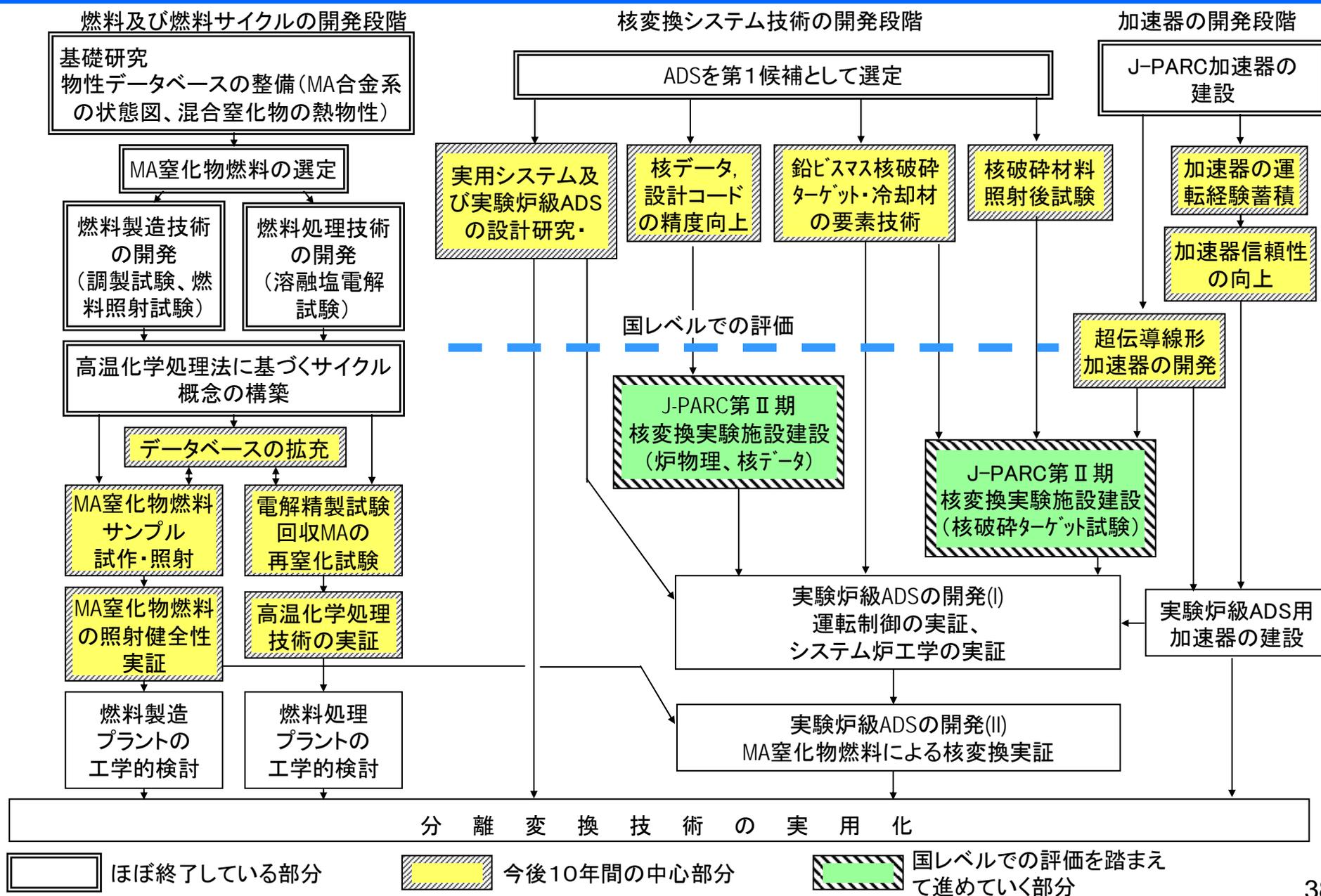
(6) まとめと今後の進め方

平成12年のチェックアンドレビューで提示したロードマップ



(6) まとめと今後の進め方

今後の計画



謝辞

本報告には、旧電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として日本原子力研究開発機構が実施した平成14年度から平成16年度までの「加速器駆動核変換システムの技術開発等」及び平成14年度から平成18年度までの「窒化物燃料と乾式再処理に基づく核燃料サイクルに関する技術開発」の成果を含みます。