

MA変換 －均質型／非均質型／階層型－ の特徴と課題について

**日本原子力学会
分離変換・MAリサイクル研究専門委員会編集**

**原子力委員会研究開発専門部会
分離変換技術検討会資料
2009.1.21**

報告の概要

- **MA変換概念の分類と呼称**
- **各概念の概要と特徴**
- **各概念の典型的なパラメータ**
- **各概念の特徴の比較**
- **各概念に共通する課題、固有の課題**
- **各概念の開発段階、課題の比較**
- **まとめ**
- **今後研究開発を進めるにあたって**

MA変換概念の分類と呼称

システム呼称	FBR均質型	FBR非均質型	ADS階層型
炉 型	FBR		ADS (加速器駆動未臨界炉)
燃料中の重金属に占めるMA濃度と装荷形態	低濃度(5%以下) 発電用燃料を兼用 炉心全体	やや高濃度(20～30%) MOX炉心の一部にMA ターゲット燃料を装荷	高濃度(50～80%) Uフリー窒化物燃料 炉心全体
MA燃料の 再処理・再加工	発電サイクル設備で 一括処理	発電サイクル設備を 一部共用	発電サイクルと独立の MA専用サイクル設備
備 考	MA濃度は、 最大 5% (移行期) 0.5 ～ 1% 前後 (平衡期)	我が国は、MA燃料のリ サイクル方式で開発 フランスは、MA燃料の ワンスルー方式も並 行して検討	MA専焼 (臨界) 炉は、 安全性の余裕が厳しい ため現在のところ検討 対象外

各概念の概要と特徴

FBR均質型の概要

➤ 基本概念：

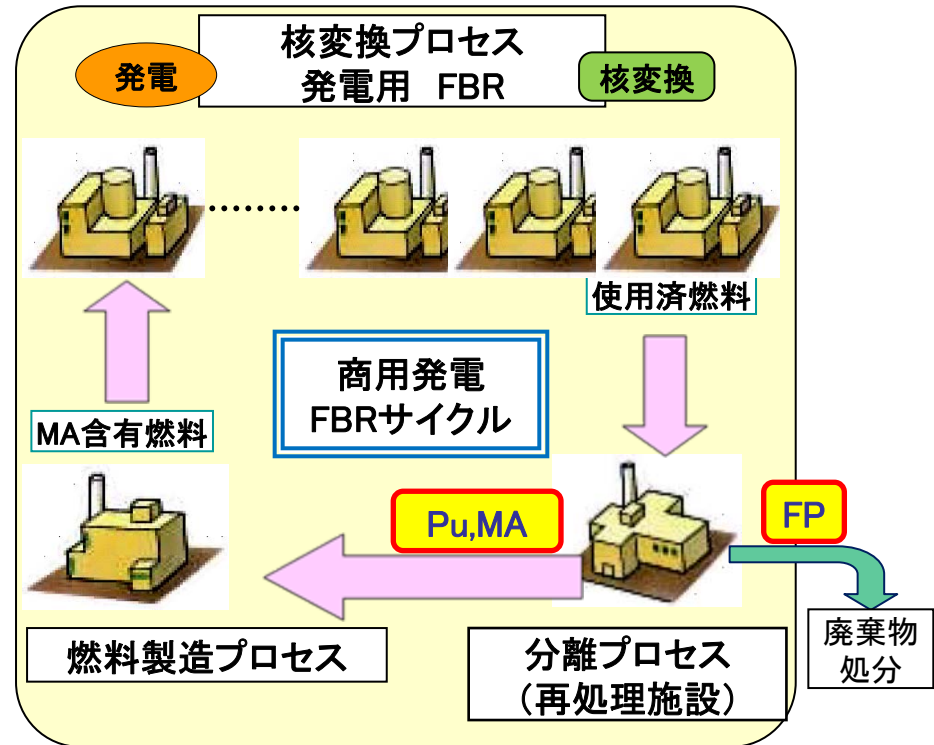
- ・ MAを高速炉燃料に低濃度で混合し、全ての発電用高速炉で燃焼

➤ 特徴：

- ・ MAを低濃度に抑えて影響を抑制
- ・ MAによる燃料の崩壊熱増加を最小限に抑制
- ・ 酸化物燃料：現状の技術基盤を足掛かりとして開発
- ・ 金属燃料：酸化物に比べ、中性子特性の観点からMA変換能力に優れる

➤ 検討例：

- ・ MA含有MOX燃料-Na冷却炉 (FaCT主概念)
- ・ MA含有金属燃料-Na冷却炉 (FaCT副概念)



FBR非均質型の概要

➤ 基本概念：

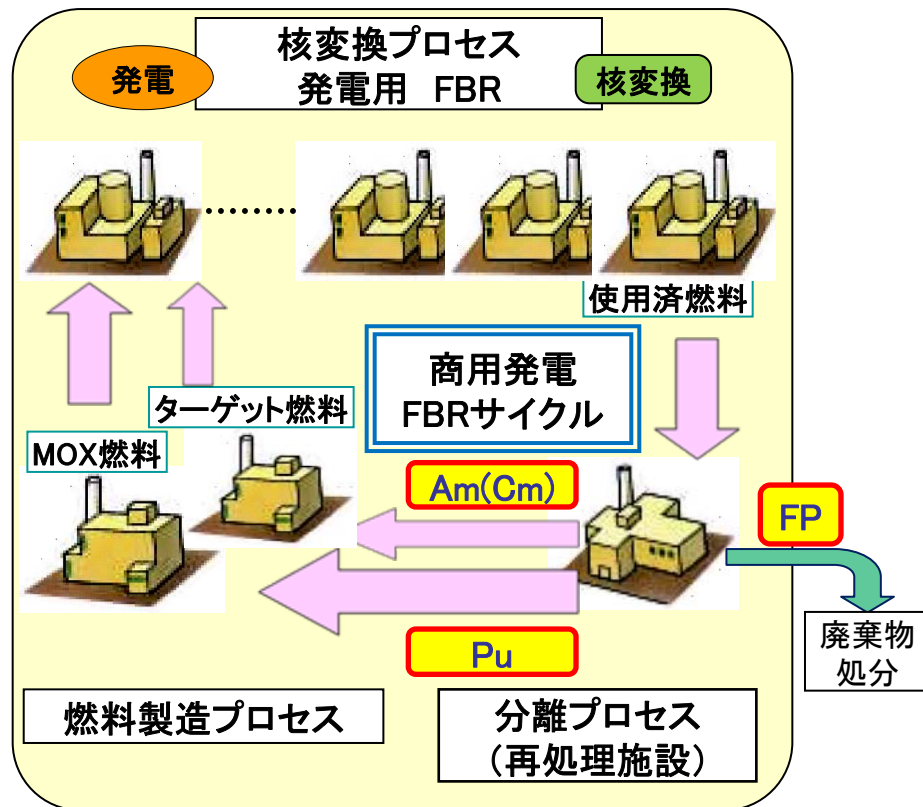
- MAを比較的高濃度でターゲット燃料に含有し、高速炉で燃焼

➤ 特徴：

- ドライバー燃料には現行技術（グローブボックスでの燃料製造）を利用
- 少数の燃料体でMAを集中的に燃焼
- 均質炉心と同等の核変換性能
- MA燃料製造システムを小規模にできる

➤ 検討例：

- 20%Am含有MOX燃料炉（JAEA）
- MA燃料ブランケット装荷炉心（CEA）
- Amターゲット燃やし切り概念（長期間の照射で装荷量の90%を燃焼, CEA）



ADS階層型の概要

➤ 基本概念：

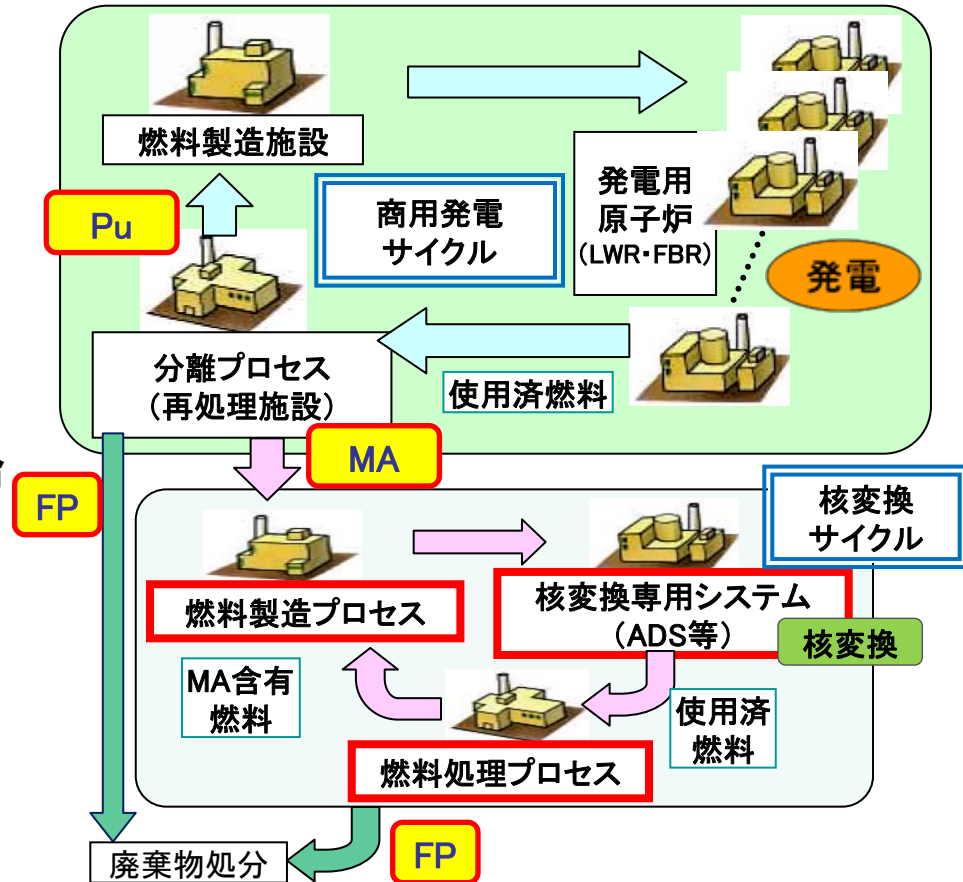
- MA主体の燃料を核変換専用システムにより燃焼する専用サイクルを構成

➤ 特徴：

- 核変換に最適化したADSに大量のMAを集中装荷して燃焼
- 関連施設を集約配置し、MAをサイト内に閉じ込めて発電サイクルから隔離するとともにMA燃料輸送の負担を最小化
- 発電サイクルの様々な炉型や燃焼・冷却履歴からの使用済燃料に柔軟に対応可能
- MAサイクルを発電サイクルから可能な限り分離

➤ 検討例：

- MA窒化物燃料－乾式再処理（JAEA）
- Pb-Bi冷却炉（JAEA, EU）
- Pb-Biターゲット/Heガス冷却炉（CEA）
- 分散型酸化物燃料（EU）
- 熔融塩炉（BNL, LANL, JAEA, ロシア, チェコ）



各概念の典型的なパラメータ

典型的なパラメータの比較

概念	FBR [参考: MA非装荷]	FBR均質型		FBR 非均質型	ADS 階層型
		MOX	金属		
熱出力 [GWt]	1.6*	3.57	3.9	3.57	0.8
燃焼度 [GWd/tHM]	90*	147	150	150	117
MA含有割合 [wt%] (内側/外側/ターゲット)	0/0/0	移行期: < 5 平衡期: ~1	移行期: < 5 平衡期: ~0.6	-/-/21.2	70.0/51.5/-
MA装荷量 [kg/基]	0	3,750	2,110	3,080	2,500
MA核変換量 [kg/GWt/年]	—	50	60	31	313
新燃料の発熱量 [W/kgHM] (移行期/平衡期)	4/3	15/9	15/3.6	54/155 (ターゲット)	300/385
新燃料の中性子放出量 [10 ⁶ n/s/kgHM] (移行期/平衡期)	0.3/0.2	32/26	32/7.1	140/560 (ターゲット)	660/1,010

*:原電実証炉

各概念の特徴の比較

-性能と必要な基数-

➤ FBR均質型の特徴

全ての発電炉にMAを装荷するため、MA含有率は低く抑えられ、MAによる核的な影響を最小化できる。MA含有割合は導入時期、導入基数により変動するが、平衡期のMA含有率は極めて低い(約0.5~1%)。

➤ FBR非均質型の特徴

MAターゲット集合体はMAを高濃度に含有(約20~30%)するが、安全性の観点から炉心中に占める割合が制限(約20~30%)される。このため、サイクル全体でのMA変換性能は均質型と同等となる。

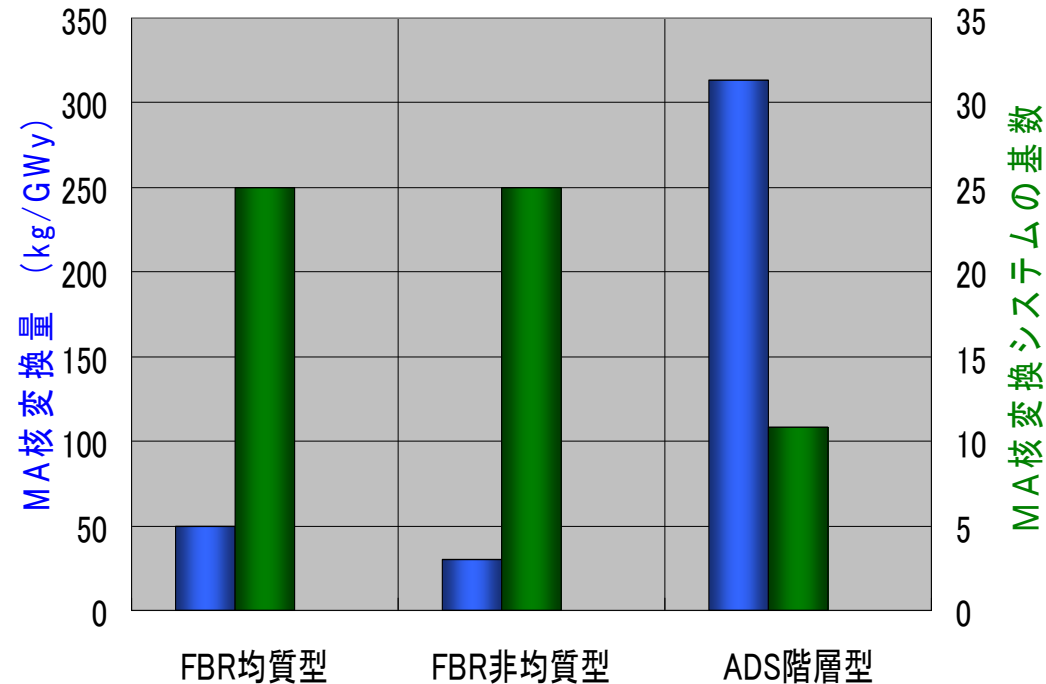
➤ ADS階層型の特徴

出力当りのMA核変換量が最大であり、核変換効率が低い。ただし、1基あたりの熱出力がFBRより低いため、必要な基数が増加する。

■ MA 核変換量

■ FBR-MOXからのMA生成とバランスする炉の基

FBR: 3.5 GWth
階層型: 0.8 GWth



*:58GWeのFBR-MOX、年間稼働率(95%)から発生する
MA重量の処理を仮定

-MA含有燃料の特性-

➤ 燃料組成

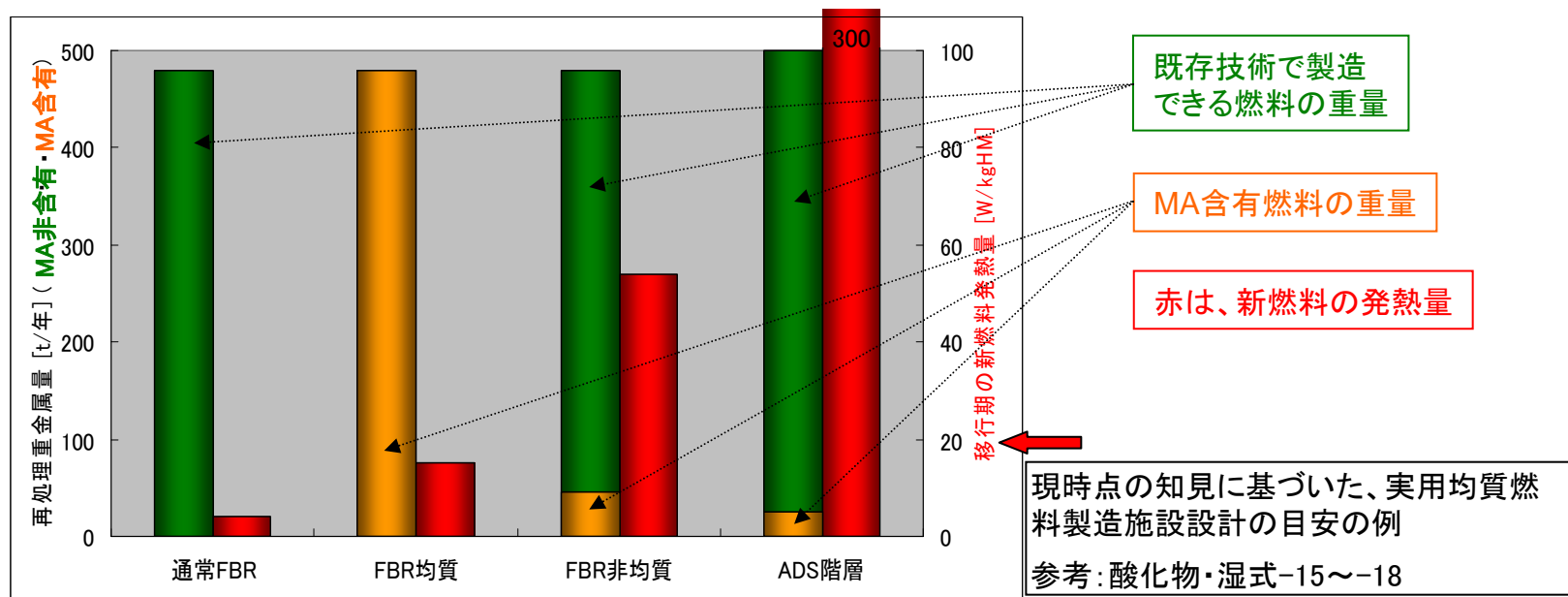
MA濃度増加は、核的な安全性の余裕とトレードオフの関係にある。FBRでは、炉心のMA濃度を抑制し、核的な安全性への影響を抑制する。ADSでは、核的な安全性を未臨界炉心により担保する。(MA濃度は、FBR利用型で<5%、ADS階層型で約60%)

➤ 発熱量について

MA濃度増加は、新燃料の発熱量とトレードオフの関係にある。また、いずれの型式でも、MA含有燃料はセル遠隔操作で取扱う必要がある。

FBR非均質型では、FBR均質型に比べ、MA含有燃料の発熱量が約3倍に増加(単位重金属量あたり)するが、その取扱重量は大きく低減される。ドライバ燃料には、MA添加しない従来型FBRに関する既存技術(グローブボックス技術)が適用できる。

ADS階層型では、FBR均質型の10倍程度の発熱量(発電炉と異なる集合体設計による、第2回検討会資料2-3)になるが、発電サイクルの燃料には既存技術が適用できる。



-平衡期*のMAのシステムインベントリ-

*:移行期については、第3回検討会で議論

FBR均質型/非均質型

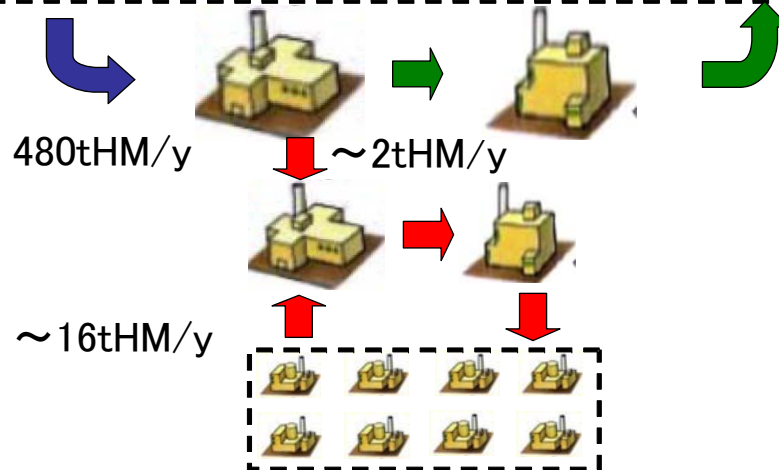
58GWe



- MOX燃料の流れ (Green arrow)
- MA入り燃料の流れ (Orange arrow)
- MA、MAターゲット燃料の流れ (Red arrow)
- 使用済燃料(MAを含む)の流れ (Blue arrow)

ADS階層型

58GWe



出力: FBR/1.5GWe, ADS/0.8GWth
480tHMには軸ブランケット130tHMを含む

➤ 平衡期の特徴

FBR均質型の場合、ブランケット (劣化ウラン) を含め、**毎年約480 t** のアクチニドをリサイクルできる再処理、燃料製造施設が必要となる (発電量58GWeと仮定)。

ADS階層型の場合、MAは主に専用サイクルに集中される (**毎年約16t**)。専用サイクルの規模が小さいことから、施設を1サイトに集約し、発電サイクルから隔離する概念が可能となる。

各概念の課題と開発段階

- タスクフォースでの作業 -

- 公開文献に基づく課題の整理
- 共通の課題と固有の課題の分類
- 開発段階の整理*と相互比較

(*: 開発段階の整理のために、TRL的な考え方に基づき、対象核種ごとの開発段階(規模)マップを作成した。
しかし、暫定版)

各概念に共通する課題

(これまでの検討会で議論)

・ 燃料/炉心

(MA燃料炉心の積分データ取得等による)

- **核データ精度の向上** (現行：JENDL-3.3, JENDLアクチニドファイル)
- MA燃料の物性測定 (再分布、FCCI、等) (燃料形態により重要となる物性及び測定範囲が異なる)
- **Cm含有燃料の物性データ**の取得
- **MA燃料の照射挙動**評価・解析 (ピン照射・バンドル照射)

・ 再処理

- U/Pu/MA/FP共存条件での**プロセス計量精度の向上**
- MA回収率評価精度の向上、**廃棄物移行量の評価**
- セル内遠隔操作技術の開発

・ 燃料製造・輸送

- **セル内遠隔操作技術**の開発
- MA含有燃料取扱い技術 (高発熱・高放射線・MA粉末)

・ 処分

- **処分への影響評価の精度向上**
- 潜在的有害度の低減効果の解析
- TRU廃棄物等の副次的な廃棄物発生量評価精度の向上
- **発熱性FP廃棄体**概念に沿った**効率的な処分概念**の構築

軽水炉燃料再処理から発生する高レベル廃液からの MA分離技術に固有の課題

(これまでの検討会で議論)

- **湿式分離**

- MA回収率の向上
- MAと希土類FPの相互分離
- 高温対応（崩壊熱対策）
- 廃液処理技術
- 製品の転換技術
- 発熱性FPの回収・廃棄体転換技術

- **乾式分離**

- 前処理工程（脱硝・塩化物転換）での揮発物や残渣対策
- 塩化物転換工程での容器材料寿命の向上（現行評価：約1000時間）
- 多段抽出工程（MA回収）の機器開発
- 塩廃棄物製造技術の開発、処分性能の評価
- 乾式法の溶媒リサイクル技術の確立

FBR均質型（酸化物・湿式再処理）に固有の課題

（これまでの検討会で議論）

- 燃料/炉心
 - MA含有酸化物燃料の**照射健全性**の確認（Amの再分布、等）
 - MA含有酸化物燃料の物性測定（Am,Cm）
- 再処理
 - **抽出クロマトグラフィー技術**（Am,Cm回収技術、代替として溶媒抽出技術）
 - **Np分離性能の向上**
- 燃料製造・輸送
 - **脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発**（個別の製造工程は実用化に目処）
 - **ペレット焼結・O/M調整技術**

FBR均質型 (金属・乾式再処理) に固有の課題

(これまでの検討会で議論)

- 金属燃料/炉心
 - 炉心安全性 (過渡事象) に関する、検証データの蓄積及び評価手法の確立
 - MA含有金属燃料に固有の燃料挙動評価 (燃料成分の再分布、MAと被覆管の両立性、等)
 - MA含有金属燃料の基礎物性データベースの確立
- 乾式再処理
 - 高温融体や活性物質を含む低除染燃料の機器開発 (遠隔、マテリアルハンドリング) (Kg規模の小規模バッチを連続処理による乾式再処理では、ハンドリング技術開発が大きな課題)
 - 乾式再処理に適した計量管理概念 (技術) の確立
 - 特有の廃棄物 (塩廃棄物、金属廃棄物) の製造技術
 - プロセスロス (ドロス等) からのアクチニド回収と溶媒リサイクル
(化学的に活性な重金属を取扱う乾式再処理では、不純物や坩堝材料との反応でドロスと言われる酸化物系の残渣が発生する)
- 金属燃料製造・輸送
 - 金属Amの蒸発対策
 - 蒸留・射出鑄造での坩堝材料開発・寿命評価
 - 高温融体を含む遠隔・マテハン技術 (含：ボンドNa取扱い)
- 塩廃棄物処分
 - 特有の廃棄物の処分技術 (ガラス固化体に比べ低温・低密度)

FBR非均質型に固有な課題

(これまでの検討会で議論)

- 燃料/炉心

- MAターゲット燃料で重要となる**物性測定** (密度、相分離、Am蒸発、等)
- 金属添加物の有効性検証 (FCCI対策)
- MAターゲット燃料の**照射挙動**評価 (Amスポット、等)

- 再処理

- MAターゲット燃料の溶解性能の検証 (高濃度MAの溶解、金属添加物の挙動)

- 燃料製造・輸送

- **最大Am濃度20%でのMOX及びUO₂焼結技術** (均質性、マイクロクラック、等)
- 高Am濃度による**燃料劣化防止技術** (熱伝導度改善、酸素ポテンシャル制御、等)

ADS階層型に固有な課題

(これまでの検討会で議論)

- ADS未臨界炉心
 - **未臨界炉物理** (未臨界度、ボイド反応度・ドップラー反応度、高エネルギー粒子の影響、実効中性子源強度、ビーム出力による炉出力のフィードバック制御、等)
 - **その他要素技術** (加速器技術、Pb-Bi取扱技術、等)
- ADS燃料
 - 窒化物燃料の**物性データベースの整備** (相状態、高温安定性、熱伝導度、等)
 - **N-15**の調達と濃縮・回収技術の開発
- 窒化物燃料再処理 (金属燃料の乾式再処理との相違)
 - 陽極溶解技術
 - **高濃度MA含有溶媒での電気化学・熱化学プロセス**
- 窒化物燃料製造
 - **再処理回収MAの窒化**
- 処分
 - **特有の廃棄物の処分技術**

各概念の課題の比較

開発のねらい(1/2)

概念	FBR均質(MOX/金属)	FBR非均質	ADS階層
MA変換性能	・Puに随伴するMAを低濃度で均質添加	・MAを専用集合体に集約 炉心平均では均質型と同等	・専用サイクル
	<p>・FBR利用型では、変換性能(30-60kg/GWt/年)に大きな差異はない(ADSでは約10倍の性能)</p> <p>・均質型はMAを低濃度に保つことを重視、非均質型はMA集約することでMOX燃料製造には既存技術を適用する、階層型は専用サイクル構築によるMAの効率的な燃焼をねらう(重視する観点が異なる)</p>		
安全性	・MA5%以内に抑制	・MA5%以内に抑制(炉心全体)	・未臨界体系
	<p>・いずれの概念でも、MA変換と核的安全性の裕度がトレードオフの関係にあり、FBR利用型ではMA濃度を抑制して安全性を担保するのに対し、MA濃度が高い階層型では常に未臨界であることで安全性を担保する</p>		
核不拡散性	・MA均質添加で、接近や取扱い困難	・ターゲット燃料への接近やその取扱いが困難 (ドライバ燃料は従来通り)	・MA燃料への接近やその取り扱いが困難 (発電炉燃料は従来通り)
	<p>・均質型では、全ての燃料にMAを含有させ核不拡散性の向上をめざす(乾式再処理では、再処理中もPuとMAが同伴)、非均質型や階層型では、ドライバ燃料や発電サイクルの核不拡散性に余り影響しない</p> <p>・MAを添加しないブランケットへの対応が必要となる(混合再処理等)</p> <p>・一方で、いずれの概念でもMAリサイクルによりPuの検認が難しくなるため、MAリサイクルと核不拡散性の関係については今後の検討が必要</p>		
経済性	<p>・OECD/NEAの検討によると、いずれの概念でも、MA添加により燃料サイクルの経済性は低下するが、現時点での評価では燃料サイクル全体に与えるコストアップは、ワンスルーに比べて20%以内であり、概念間の差異は評価の信頼性の巾の範囲内である(第3回技術検討会で報告)</p> <p>・いずれの概念でも、MAを添加した燃料に関する研究は基礎的な段階にあり、研究開発コストが必要となる</p> <p>・いずれの概念でもMAの一時貯蔵は不可欠であり、コスト増加の要因となる(MA変換技術の導入が遅れると、一時貯蔵コストも増加する)</p>		

開発のねらい(2/2)

概念	FBR均質(MOX/金属)	FBR非均質	ADS階層
MA燃料の 輸送・保管	・全集合体にMA装荷	・専用集合体にMA装荷	・ADS燃料にのみMA装荷
	<ul style="list-style-type: none"> ・均質型では、全集合体に発熱・放射線対策を施し、輸送・保管を行う(コロケーションにより輸送負担を低減する概念もある) ・非均質型や階層型では、FBRのドライバー燃料の輸送・保管に現状技術が適用可能である ・MA混合に伴う発熱・放射線対策の実績はほとんど無いため、技術的ハードルが高く、非均質や階層型では強制冷却技術等の課題が大きい ・階層型では、ADSを集中立地し、MA燃料輸送をサイト内に限定する概念も取りうる 		
処分への 影響	・高レベル廃棄物の発熱量低減と潜在的な有害度低減による処分の効率化を目指す	・均質(MOX)に準ずる	・専用サイクル廃棄物は均質(金属)に準ずる
	<ul style="list-style-type: none"> ・共通課題として、いずれの概念でも、処分への影響評価(処分場有効利用など)の精度向上、潜在的有害度低減効果の評価、TRU廃棄物への移行量の評価精度の向上が重要である ・この観点からは、再処理方法の相違により重要な課題が異なる(MOX・湿式では、ガラス固化体への影響評価、金属(or窒化物)・乾式では固有の廃棄物の技術開発と処分評価) ・発熱性FPの処理処分、LLFP(I,Tc,等)の処理処分にに基づく処分への影響評価も重要である 		
国際協力	・MA含有燃料照射試験、等	・模索中	・EUとの包括的研究協力、等
	<ul style="list-style-type: none"> ・いずれの概念でも、国際協力を進めている ・均質型では、我が国の施設や知見に基づき、我が国を中心とした国際協力が進展している ・非均質型は、現在、模索中であるが、欧州などが国際協力に興味を示している ・階層型は、ADSの研究を進めるEUのEUROTRANS計画に参加している 		

核データ・基礎物性

概念	FBR均質(MOX/金属)	FBR非均質	ADS階層
現状(実績)	<ul style="list-style-type: none"> 核データ: JENDLアクチニドファイル(日本、各概念共通) 常陽での核データ取得 基礎物性: MA<5%での基礎物性測定(熱伝導度、融点、など) 	<ul style="list-style-type: none"> 核データ: JENDLアクチニドファイル(日本、各概念共通) 基礎物性: 高濃度MA含有MOXの密度、相分離、Am蒸発、等を実施 	<ul style="list-style-type: none"> 核データ: JENDLアクチニドファイル(日本、各概念共通) 高エネルギーファイル、粒子挙動解析コード、など 基礎物性: Np,Am,Cm含有窒化物燃料データベース整備
クリティカルな技術課題 (詳細は、開発主体による取り纏めを参照)	<ul style="list-style-type: none"> 積分実験による核データ検証と解析精度の向上 標準燃料(MOXやUPuZr)とMA添加燃料の諸物性の差異の評価 	<ul style="list-style-type: none"> 核データは均質型と同様(より高い精度が必要) 高濃度MA含有MOXの物性データベースの整備・構築 	<ul style="list-style-type: none"> 核データは均質型と同様(より高い精度が必要) 未臨界体系での炉物理特性把握と予測精度の向上 MA装荷臨界/未臨界実験 MA含有窒化物燃料の基礎物性データベース構築
	<ul style="list-style-type: none"> いずれの概念でも、MA核データの微分測定、あるいは積分実験による核データの検証が不可欠であり、既存施設の活用が望まれる (MA核データの精度が核特性に与える影響は、FBR均質<FBR非均質<ADS階層の順に増加する) いずれの概念でも、Cmの基礎物性データ取得はほとんど進んでいない (金属や窒化物で部分的なデータあり) ため、今後のデータ取得が不可欠である 		
必要インフラ	<ul style="list-style-type: none"> MA核データ測定施設 MA核データ積分実験施設(臨界集合体、照射試験炉) 燃料基礎物性測定施設(既存施設の活用が望まれる) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 高濃度MA取扱い設備 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 未臨界高速中性子場 核破碎中性子源(陽子ビーム) 大強度核破碎ターゲットに関する開発設備

燃料製造

概念	FBR均質(MOX/金属)	FBR非均質	ADS階層
開発方針	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔セル技術 (簡素化ペレット法/射出鑄造法) ・ドライバー燃料: 既存のグローブボックス技術 ・ターゲット燃料:遠隔セル技術 ・発電サイクル:既存GBX技術 ・専用サイクル:遠隔セル技術 <p>・いずれの方式でも、遠隔セルでMA含有燃料を製造する技術を開発する必要がある</p> <p>・均質型は、全ての工程で遠隔セルが必要となる</p> <p>・一方、非均質型や階層型は、ドライバー燃料や発電炉燃料を既存技術ベースで製造できるが、MA集約のため、遠隔セルでの発熱・放射線対策の技術的ハードルは高くなる(施設規模はコンパクト)</p>		
現状 (実績)	<ul style="list-style-type: none"> ・MOX:常陽・もんじゅ用MOX燃料製造実績、照射試験用MA含有燃料の製造実績、集合体組立時の除熱試験 ・金属:母燃料は工学規模での製造実績(米国)、照射燃料ピン製造実績(国内、国際共研)、MAに関しては要素技術開発中 	<ul style="list-style-type: none"> ・MAターゲット燃料に係る固有の課題は要素技術開発中 (ドライバーと開発段階を分ける) 	<ul style="list-style-type: none"> ・グラム規模以下のNp-Pu-Am-Cm系窒化物焼結体の製造試験中 (発電サイクルと開発段階を分ける)
クリティカルな 技術課題 (詳細は、開発 主体による取り 纏めを参照)	<ul style="list-style-type: none"> ・簡素化ペレット法、金属燃料の射出成型など、燃料の形態に応じた製造技術、燃料管理技術等 ・セル内遠隔操作機器開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・MA集中取扱いによる高発熱・高放射線対策 ・MAターゲット燃料に固有の課題(密度、相分離、Am蒸発) ・MA含有微粉末対策 ・セル内遠隔操作機器開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・MA集中取扱いによる高発熱・高放射線対策 ・MA含有窒化物燃料に関する基礎物性データベース構築 ・セル内遠隔操作機器開発
必要インフラ	<ul style="list-style-type: none"> ・工学規模燃料製造試験設備 (金属では、その前段階として、不活性雰囲気の燃料ピン製造設備) 	<ul style="list-style-type: none"> ・最大数百g規模でのMA取扱い施設 	<ul style="list-style-type: none"> ・試験燃料製造設備 27 (不活性雰囲気)

再処理

概念	FBR均質(MOX/金属)	FBR非均質	ADS階層
	先進湿式法(MOX)/乾式法(金属)	先進湿式法	<ul style="list-style-type: none"> ・発電サイクル: 湿式分離法 ・専用サイクル: 乾式法
開発方針	<ul style="list-style-type: none"> ・いずれの方式も、遠隔セルでの取扱いとなる (用いる再処理手法により、開発課題が共通する) ・均質型(MOX・湿式)は、先進湿式法 (MA回収技術を含む) を用いる ・均質型(金属・乾式)は、本質的にU,Puに低濃度でのMAが随伴するプロセスである ・非均質型は、開発課題は均質型(MOX・湿式)に準ずる (ドライバー・ターゲット混合再処理) ・階層型は、均質型 (金属・乾式) の再処理技術を高濃度MA条件に適用する 		
現状(実績)	<ul style="list-style-type: none"> ・先進湿式: 工学規模ホット試験施設の設計 (内装機器設計)と建設(内装は除く)、小規模ホット試験、工学規模U/コールド試験 ・乾式: 工学規模での再処理実績(U-Fs燃料、米国)、小規模ホット試験(MA含有、国際共研)、小規模連続試験(国内)、など 	<ul style="list-style-type: none"> ・先進湿式法の開発に準ずるが、燃料溶解等の固有の課題について要素技術開発中 (ターゲット燃料と開発段階を分ける) 	<ul style="list-style-type: none"> ・金属乾式法とは異なる窒化物乾式法に特有の陽極溶解および再窒化回収プロセスのMAを用いた基礎試験 ・専用(発電サイクルと開発段階を分ける)
クリティカルな技術課題 (詳細は、開発主体による取り纏めを参照)	<ul style="list-style-type: none"> ・先進湿式: MA抽出クロマトグラフィー、遠隔セル機器開発 ・乾式: 高温・不活性セル対応の遠隔機器開発、乾式再処理に固有の課題(プロセス計量、塩廃棄物、等) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ターゲット燃料の溶解、分離技術の開発(固有の課題) 	<ul style="list-style-type: none"> ・専用サイクルは、乾式に準ずる ・窒化物燃料に固有の課題(N-15、高濃度MA)
	<ul style="list-style-type: none"> ・いずれの概念でも、MA含有燃料の再処理試験は実験室規模に留まっており、遠隔セル技術開発等は各概念の共通課題である (FBR均質型では準工学規模での機器開発が進められている) 		
必要インフラ	<ul style="list-style-type: none"> ・工学規模ホット試験設備 (乾式では、前段階として、不活性雰囲気の小規模ホット試験設備) 	<ul style="list-style-type: none"> ・小規模ホット試験設備 (高濃度MAの溶解、分離技術開発) 	<ul style="list-style-type: none"> ・小規模ホット試験設備 (不活性雰囲気)
	<ul style="list-style-type: none"> ・実機開発に展開するには、数kg規模の使用済み燃料取扱い施設が必要である(乾式では、前段階としてピン単位での小規模ホット試験設備が必要である) 		

燃料開発

概念	FBR均質(MOX/金属)	FBR非均質	ADS階層
開発方針	・低い濃度(<5%)で母燃料にMA添加	・高い濃度(約20%)のMAを添加	・MAを主成分とする燃料
	<p>・均質型は、母材料に関する従来知見からの外挿に基づいて燃料性能の確保や燃料挙動評価を進める</p> <p>・非均質型や階層型は、ドライバ燃料や発電炉燃料は既存技術に基づく一方で、高濃度でMAを含有する燃料を開発する</p>		
現状(実績)	<p>・MOX: Am/Npピン照射試験を実施中、MA含有燃料を常陽で照射するための許認可を取得</p> <p>・金属: 照射実績(EBR-II, FFTF, 米国)、ピン照射試験(国内、国際共研)、等</p>	<p>・未照射燃料の熱化学物性取得(2010まで)</p> <p>・常陽でのターゲット燃料照射試験</p>	<p>・(Pu,Zr)N、PuN+TiN燃料ペレットのJMTR照射試験、照射後試験</p> <p>・(Np,Pu,Am,Zr)N燃料ペレットのPhenix照射試験実施中</p> <p>・MAサンプル照射(英、PFR)</p>
クリティカルな技術課題 (詳細は、開発主体による取り纏めを参照)	<p>・MA含有燃料の物性測定(MOX: Am再分布、Amスポットなど、金属: 燃料成分再分布、MAのFCCIへの影響など)</p> <p>・照射健全性の確認</p>	<p>・高濃度Amによる燃料劣化防止(熱伝導度低下対策、熱膨張)</p> <p>・高濃度Am燃料に固有の照射挙動(安定性、FCCI、O/M、等)</p>	<p>・ADS燃料に固有な課題(高温安定性、FCCIなど)</p> <p>・ADS燃料の照射データ取得</p>
	<p>・いずれの概念でも、MA含有燃料の開発は基礎段階にあり、サンプル照射等を進めている</p> <p>・この分野では、国際協力に基づく計画が進展している</p>		
必要インフラ	<p>・照射試験設備(常陽、もんじゅ)</p> <p>・照射後試験設備(ピン単位)(金属では、不活性雰囲気が必要)</p>	・同左	<p>・同左(不活性雰囲気)</p>

炉特性・炉システム

概念	FBR均質(MOX/金属)	FBR非均質	ADS階層
開発方針	・低いMA濃度(<5%)	・MA燃料とMOX燃料併用	・専用サイクル
	・MA添加量と炉心安全性に関わるパラメータ（ドップラー反応度、ボイド反応度、遅発中性子割合、など）はトレードオフの関係にある ・FBR利用型では、炉心へのMA添加量を抑制して安全性を担保する（非均質型では、MA局在） ・階層型のADSでは、臨界状態での安全確保は困難なため、未臨界炉心により核的安全余裕を確保する ・FBRとADSでは、目標とする出力が大きく異なる（FBR:3.5GWt、ADS:0.8GWt）		
現状 (実績)	・U,Pu燃料による実験炉、原型炉、実証炉（MOX:常陽、もんじゅ、Superphenix、など） （金属:EBR-II、FFTF） ・Np装荷実験(ロシアBFS)	・ターゲット燃料に関する炉特性試験の実績は無い	・MA核分裂反応率測定(FCA) ・MASURCA(仏)、FCA、KUCAでのADS模擬実験など
	・それぞれのデータは相互に利用が可能であり、炉型を問わず一体的・相補的な研究が望ましい		
クリティカルな技術課題	・MA核種の燃焼特性の把握	・同左	・同左 ・ADSに固有のシステム技術(Pb-Bi、ビーム窓、加速器信頼性、ビームトリップ、炉心構成材料、など) ・MAを主体とする燃料での中性子場特性の把握 ・未臨界炉核特性予測精度検証
	・Np単体の積分実験は、Np含有炉心の核特性予測精度向上に多大な寄与を果たしており、他のMA核種について同様のデータによる核特性予測精度向上を図る必要がある ・MA核種の燃焼挙動予測の精度向上に資する燃焼データの整備が不可欠である ・階層型では、高濃度MA燃料場での未臨界炉心核特性などの固有の課題を解決していく必要がある		
必要インフラ	・MA積分実験施設 （臨界集合体、照射試験炉、等）	・同左 ・高濃度MAを取扱い可能な施設	・同左 ・加速器駆動未臨界炉実験施設

まとめ

- ・ FBR均質型、FBR非均質型、ADS階層型のそれぞれの概念は、特徴や技術的成熟度に違いがあるものの、技術や適用シナリオの優劣を判断する段階にはない。
- ・ FBR均質型
 - MAが低濃度 (5wt%以下) で混合されるため、炉心成立性や燃料物性の観点からは、従来技術の延長線上での開発が可能である。
 - 基礎データの充実や燃料製造・取扱いの技術開発により、MA含有燃料のリサイクルに関する多くの課題を解決する必要がある。
- ・ FBR非均質型
 - MAの核変換性能はFBR均質型と同等であり、MAの取扱いをサイクル内で局所化できるメリットを持つ、また均質型に比べコンパクトな遠隔燃料製造施設となる。
 - 高濃度のMA (約20wt%) を含むターゲット燃料を実用化するため、均質型の開発課題に加えて固有の技術開発が不可欠である。特にCm含有量が増えるため、除熱・放射線対策が重要である。
- ・ ADS階層型
 - MA専用サイクルを設けることで、MAの取扱いに係る技術開発を発電サイクルから分離できる。
 - MA核変換に特化したシステム・燃料取扱い技術を構築する必要がある。
 - 陽子加速器については要素技術の基盤開発が行われているが、工学規模での加速器開発が重要なステップとなる。
 - MA燃料については、FBR利用に比べ高濃度 (約60wt%) のMAを含有する燃料を実用化する必要がある。

今後研究開発を進めるにあたって (1/2)

- ・ 今後発生する使用済U-Pu燃料は、 UO_2 燃料に比べて多量のMAを含有する。そのため、欧米でも積極的に研究開発されているように、MAの分離変換は高レベル廃棄物の合理的処分の観点から将来的には有効な技術となりうる。
- ・ 一方、MAの分離変換には、MA分離技術、MA含有燃料製造技術、MA含有燃料輸送技術、ADSなど、これまでに経験のない技術の実用化が必要となる。また、それらの取扱いほとんど遠隔で行わなければならない。
- ・ MAの分離変換に関する多くの課題は、まだ基礎・基盤研究の段階にあり、さらに関連データの取得に努めることが望まれる。また、基礎・基盤研究の成果に基づいて成立性が見通せた技術については、遠隔対応の工学装置の開発や一定量以上のMAを使った試験、等への展開が求められる。
- ・ 最終処分場の効率的な運用には、MAだけでなく発熱性FP (Cs, Srなど) の適切な処分が有効である。このためのMA以外の核種分離技術の開発も重要である。
- ・ 本技術開発を欧米 (一部アジアの国にも) に比肩して進めるためには、国内の研究施設整備とその柔軟な運用が極めて重要となる。一方で、明確な役割分担の下、これら諸国との協力体制も図っていくことが有効である。

今後研究開発を進めるにあたって (2/2)

各概念に共通して開発推進に必要な事項

- MAを国内で十分に調達・利用できる環境あるいは枠組みが不可欠
- 国際協力の推進と、資源・設備の有効利用
- 分離・MAリサイクル・燃料製造のそれぞれの技術に関して、
 - ・ 現有施設の有効利用による、実験室レベルでの化学プロセスの確証（客観的なレビューも重要）
 - ・ g-100g規模のMA（特に、Am,Cm）を用いた試験の実施
 - ・ 工学規模への適用に際して、適切な開発段階（MA添加程度、機器規模、等）を設けた上での機器及びシステム開発
- 核変換システムについては、
 - ・ MA装荷炉心や陽子ビーム駆動をはじめとする革新的な炉概念に対応した臨界集合体等が必要*
 - ・ 常陽・もんじゅを活用したMA照射データの拡充

- 最後に

MA分離・変換技術は多くの技術分野が関連することから、各界、各分野の専門家の叡智を集めて開発を行うことが有効である。また、放射性廃棄物処分の社会的受容性に係ることから、広く社会との対話をもって進めていくことが肝要である。

*: 将来の原子力システムの研究に役立つ臨界集合体概念と施設要件については、日本原子力学会の研究専門委員会及び炉物理部会において議論が進行中である。