

分離変換技術の導入シナリオの検討

- 移行期におけるFBR燃料のMA装荷率の変化
- 加速器駆動システム(ADS)又は非均質FBRの導入規模

平成20年10月1日

日本原子力研究開発機構

シナリオ検討の基本的な考え方

- 第2再処理(2047年運転開始と想定)以降でマイナーアクチノイド(MA)が高レベル廃棄物から回収され、核変換されるとする

- MA核変換の方法:

- 発電用高速炉を用いる方法

MA均質サイクル

MA非均質サイクル

発電用高速炉燃料に
MAを添加

- 核変換専用システム(主にADS)を用いる方法(階層型)

MA割合の高い核変換
専用燃料を用いる

- 検討事項:

- 発電用高速炉(均質FBR)でMAを核変換する場合の燃料中のMA装荷率の推移

- ◆ MA装荷率の上限設定の影響(5%、4%、3%)

- ◆ MAを一旦貯蔵して、 $Cm-244$ の減衰を待ってから核変換する場合

- ◆ Np のみをFBRで核変換し、 $Am + Cm$ は廃棄する場合

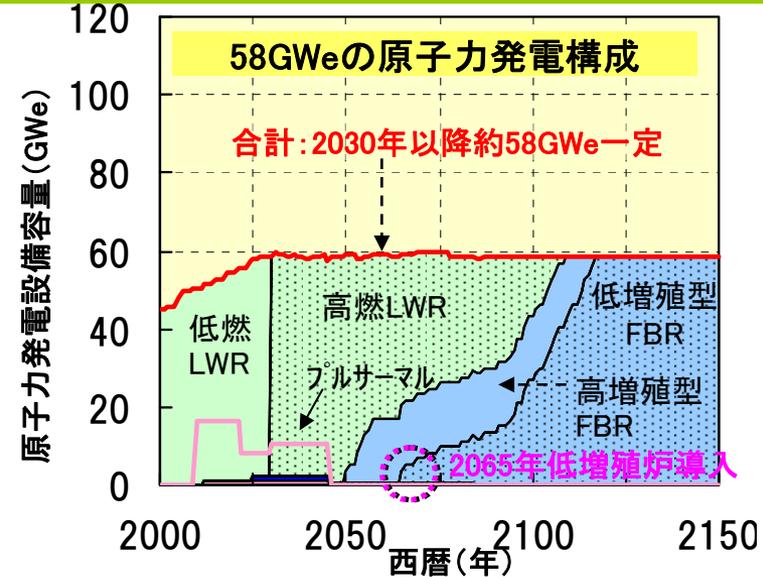
- ADS又は非均質FBRでMAを核変換する場合に必要な導入規模

原子力発電の構成及びサイクルシステムの想定

(1) 制約条件

- ①Puバランスを保ちつつ所定の移行期間で軽水炉からFBRへ切り替わる
- ②六ヶ所工場のPu貯蔵能力を考慮する
- ③第二再処理の全操業期間の平均稼働率は、80%以上を確保する

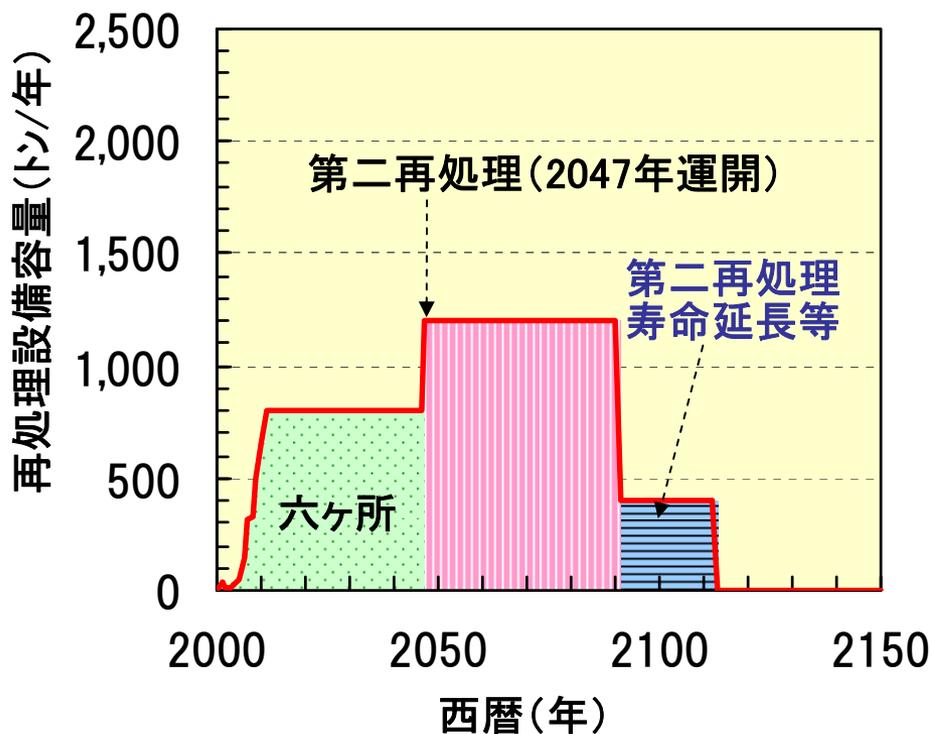
(2) 核燃料サイクルシステムの主な想定条件



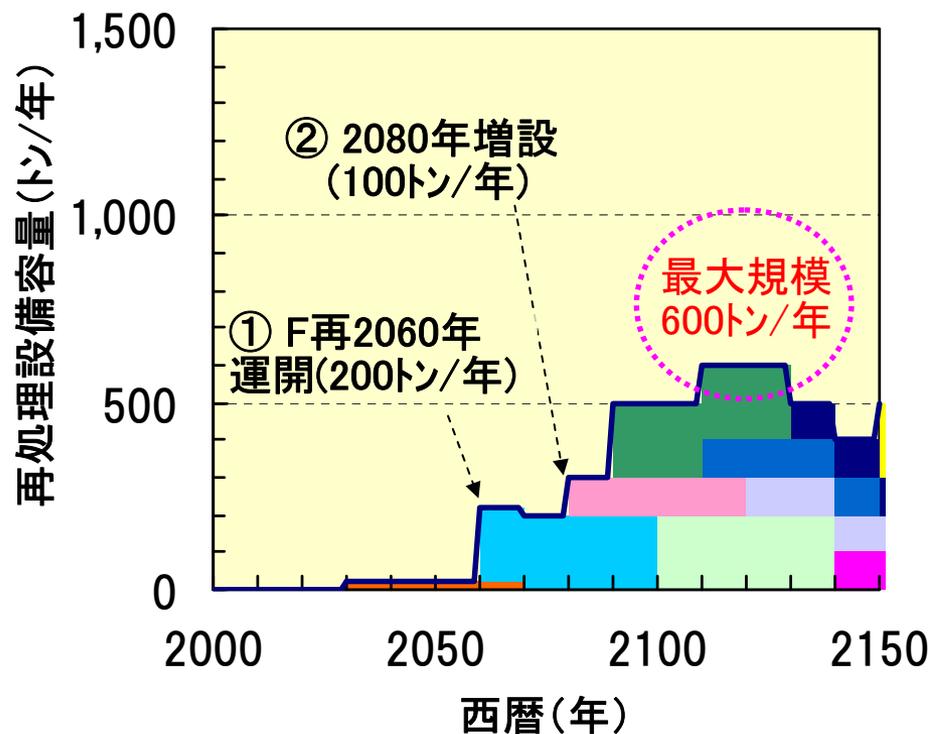
システム		概要
原子炉システム	軽水炉	～2029年: 燃焼度 約4万MWd/t、稼働率80% 2030年～: 燃焼度 約6万MWd/t、稼働率90% プルサーマル: 2010年利用開始(導入規模、終了時期はFBR導入に応じて変更)
	FBR	高増殖型: 増殖比1.2、Pu需給バランスに応じて低増殖型(増殖比1.03)を導入
燃料サイクルシステム	炉外サイクル時間	軽水炉サイクル: 4年、FBRサイクル: 5年
	ロス率	軽水炉サイクル(転換:0.5%、加工:0.1%、再処理:Uは0.4%、Puは0.5%、MAは0.1%) FBRサイクル(加工:0.1%、再処理:U、Pu、Am、Cmは0.1%、Npは10%)
	その他	軽水炉サイクル: 回収ウラン再濃縮利用、第二再処理以降でMA回収を想定 再処理技術: L再ではPurex法を想定(MAは一括回収)、F再ではNEXT法を想定(大部分のNpはPu製品に随伴、AmとCmは独立して回収) プルサーマル再処理: 第二LWR再処理の初期に5:5で再処理する 高レベル廃棄物処分場: 2035年頃に運開、ガラス固化体は処分まで50年貯蔵 原子炉の寿命: 60年、再処理施設の寿命: 40年

再処理量の推移

- 第2再処理工場は、2047年から、1,200トン／年で、主に軽水炉(UO₂)燃料を再処理すると仮定
- FBR再処理は、2060年から、200トン／年で、FBR燃料を再処理
- MOX軽水炉の使用済燃料は、第2再処理工場で、2047年から再処理して、PuをFBRに供給すると仮定



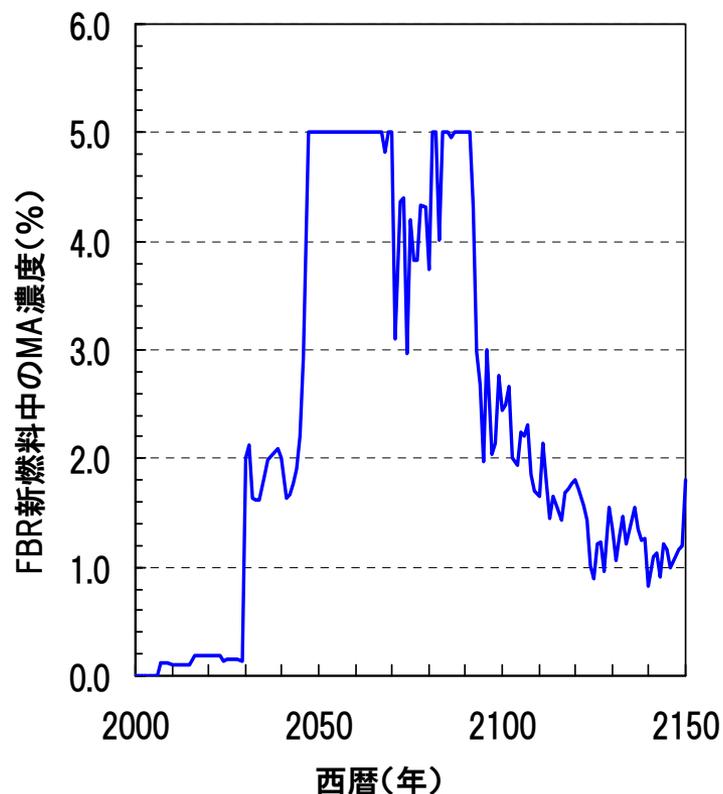
軽水炉再処理設備容量の推移
(58GWe)



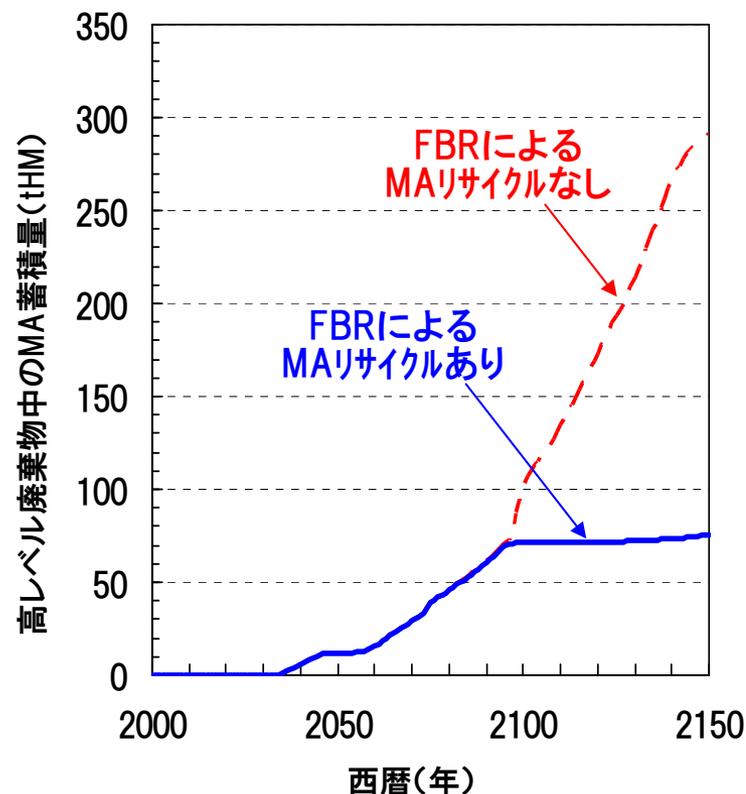
FBR再処理設備容量の推移
(58GWe)

FBR燃料MA装荷率と廃棄物中MA蓄積量

- FBR炉心燃料中のMA装荷率(MA濃度)は、軽水炉からFBRへの移行過程で約5%の期間が50年程度続き、その後20年間かけて約3%から約1%に徐々に低下。
- 軽水炉ならびにFBRの使用済燃料から回収したMAをFBRでリサイクルした場合、ガラス固化体へ移行するMA量を大幅に軽減。



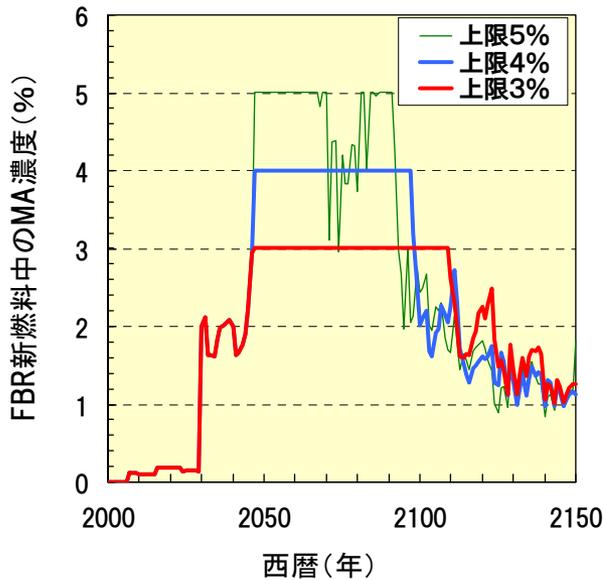
FBR新燃料中のMA濃度



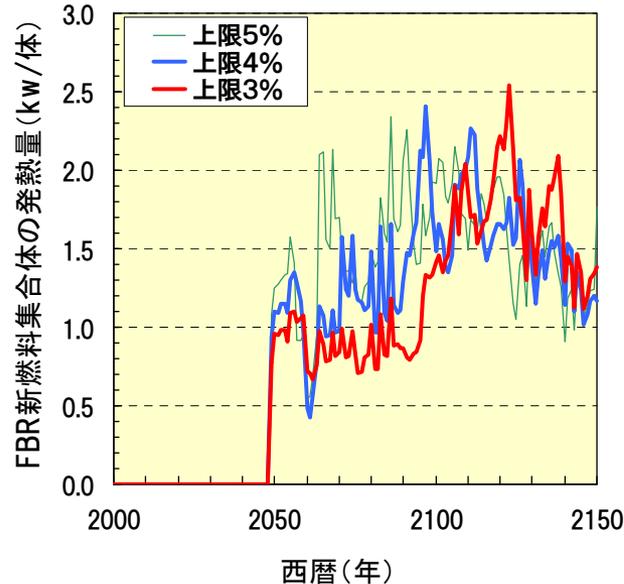
ガラス固化体中のMA蓄積量(処分時)

均質FBR燃料中のMA装荷率上限を変えた場合の影響

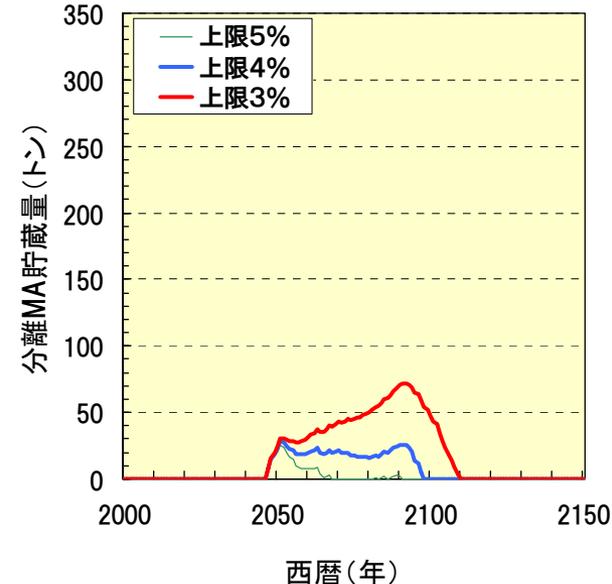
- ・FBR燃料中のMA装荷率の上限を5%から4%および3%に変更した場合、FBR新燃料中のMA濃度が上限の5%、4%、3%で維持される期間は、それぞれ約20年、約50年、約60年と見込まれる。
- ・FBR燃料中のMA装荷率の上限を下げた場合、LWRからFBRへの移行期間中(2050~2100年)のFBR新燃料の発熱量は装荷率に概ね比例して低下するが、上限3%では2100年以降でCm244の増加により発熱量が増大する。
- ・軽水炉使用済燃料およびFBR使用済燃料から回収された分離MA貯蔵量(燃料製造への払出し後の残量)のピークについては、MA装荷率の上限が5%と4%の場合は30トン程度、同じく3%の場合は72トン程度になる。



FBR新燃料中のMA濃度



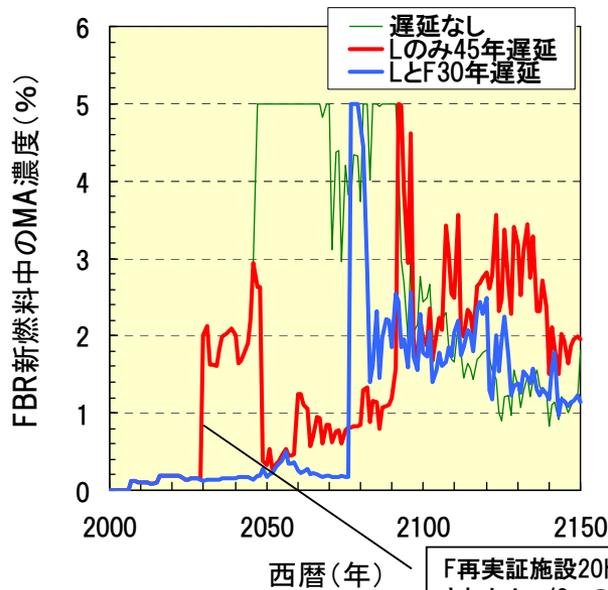
FBR新燃料集合体1体当りの発熱量



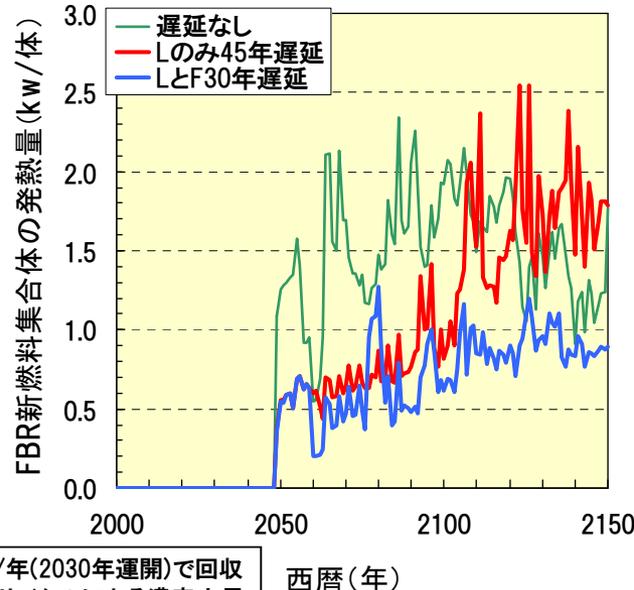
分離MA貯蔵量

Am及びCmを分離後、冷却してから均質FBRに装荷する場合

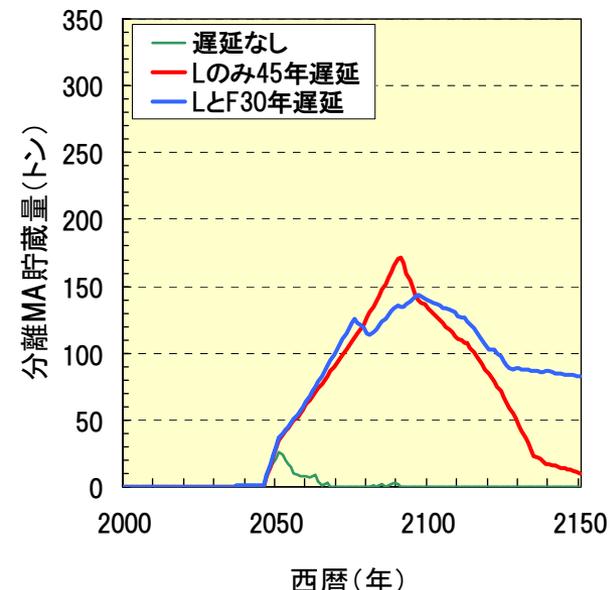
- 回収MAを遅延なしでリサイクルするリファレンスケースに対して、LWR再処理から回収したMA (Am、Cm、Np) を45年後にFBR燃料として装荷する場合（「Lのみ45年遅延」）、LWR再処理から回収されたMAおよびFBR再処理から回収されたAmとCmを30年後にFBR燃料として装荷する場合（「LとF30年遅延」）の3ケースを比較した。
- 「Lのみ45年遅延」および「LとF30年遅延」の場合、第二再処理（L再）の運開から6年間に処理されたプルサーマル燃料からの回収MAが45年または30年の遅れを経てFBR燃料に装荷されるため、FBR新燃料中のMA濃度は一時的に上限の5%まで上昇するものの、FBR新燃料集合体の発熱量は1.3～1.4kW/体程度にとどまる。また、「Lのみ45年遅延」の2100年以降では、Pu238とCm244の増加によりFBR新燃料集合体の発熱量が増大している。
- 「LとF30年遅延」の場合、FBR新燃料集合体一体あたりの発熱量は3ケース中最も低く約0.5～1.3kW/体に抑えられ、分離MA貯蔵量は約80～140トンの範囲になる。なお、「Lのみ45年遅延」での分離MA貯蔵量は最大約170トンになる。



FBR新燃料中のMA濃度



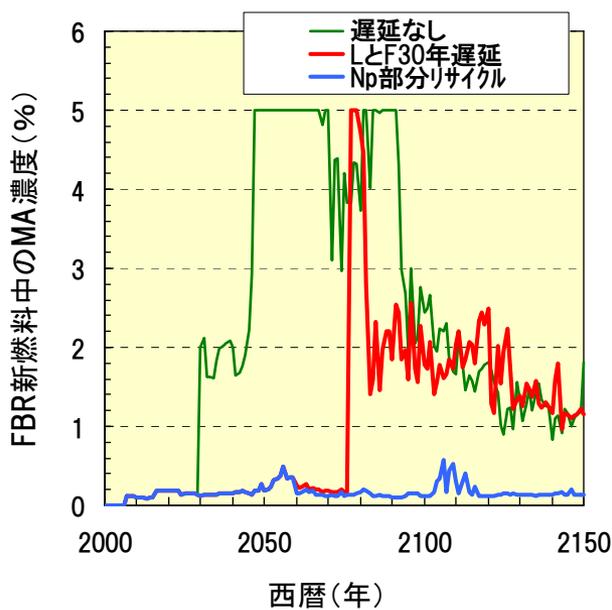
FBR新燃料集合体一体あたりの発熱量



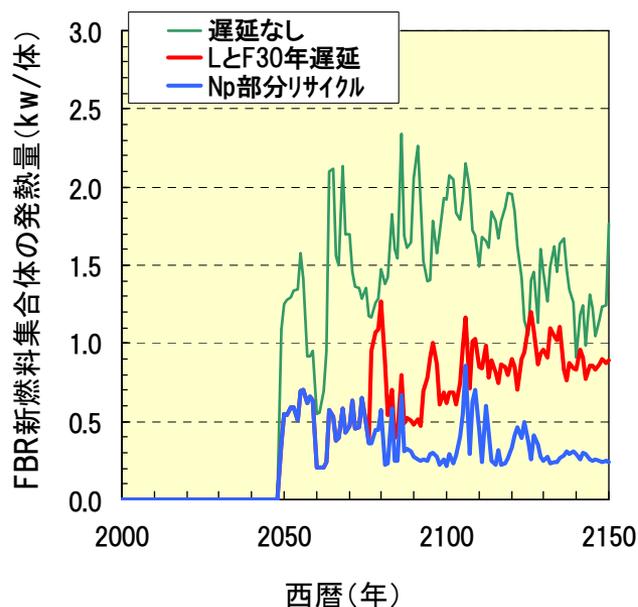
分離MA貯蔵量

均質FBRでNpのみを部分リサイクルする場合

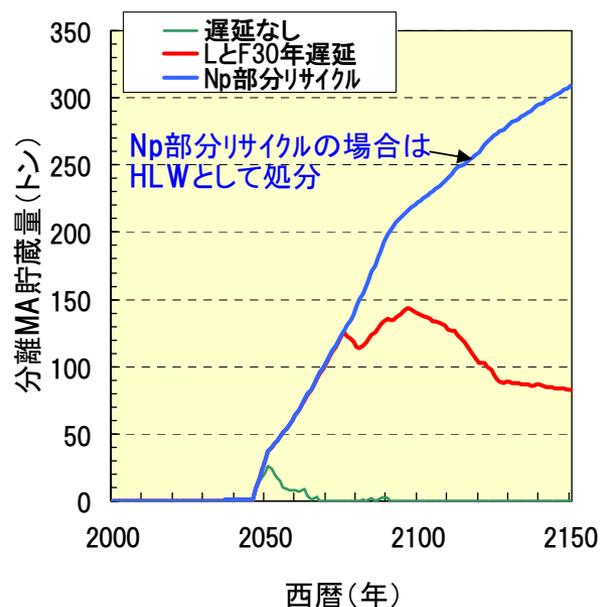
- ・回収MAを**遅延なし**でFBR燃料に装荷するリファレンスケースに対して、FBR再処理から回収したNpのみを再利用する「**Np部分リサイクル**」(LWR再処理で回収したMAおよびFBR再処理で回収したAmとCmは地層処分する)、LWR再処理の回収MAおよびFBR再処理で回収されたAmとCmを30年後にFBR燃料に装荷する場合(「**LとF30年遅延**」)の3ケースを比較した。
- ・「**Np部分リサイクル**」の場合、FBR新燃料中のMA濃度は約0.2~0.5%、FBR新燃料集合体発熱量は全ケース中最も低く約0.2~0.8kW/体に抑えられる。
- ・また、「**Np部分リサイクル**」で高レベル放射性廃棄物(HLW)として処分されるMAの累積量は、2100年で220トン程度、2150年で310トン程度と見込まれる。



FBR新燃料中のMA濃度



FBR新燃料集合体一体あたりの発熱量

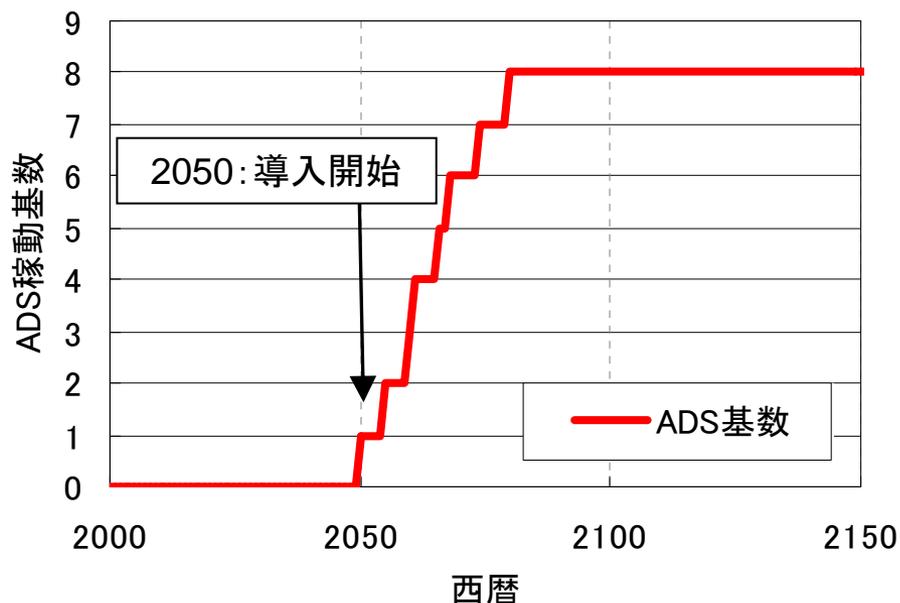


分離MA貯蔵量

ADSでAm+Cmを核変換する場合

— 共存シナリオ —

- Am+Cm排出量:
 - 移行期 → 年間約3トン
 - FBR平衡期 → 年間約1.5~2トン
- ADS(800MWth)の核変換能力 : 年間0.25トン
- 従って、MA蓄積に応じて、**8基程度のADS(6.4GWth: 1.5GWeFBRで約2基相当)**を投入
- ADS用燃料の**再処理量は年間16tHM程度であり、FBR燃料再処理の1/20程度の規模**
- ADS用燃料: MA:Pu=60:40、不活性マトリックス(ZrN)の重量割合:約50%
- ADS及びその燃料サイクル施設を発電炉用再処理工場に隣接して設置することで、**発熱と放射線の観点から取扱の厄介なMAをコンパクトに閉じ込める**



多様な炉型構成に対する柔軟性を有するADS

α : FBRの発電容量割合

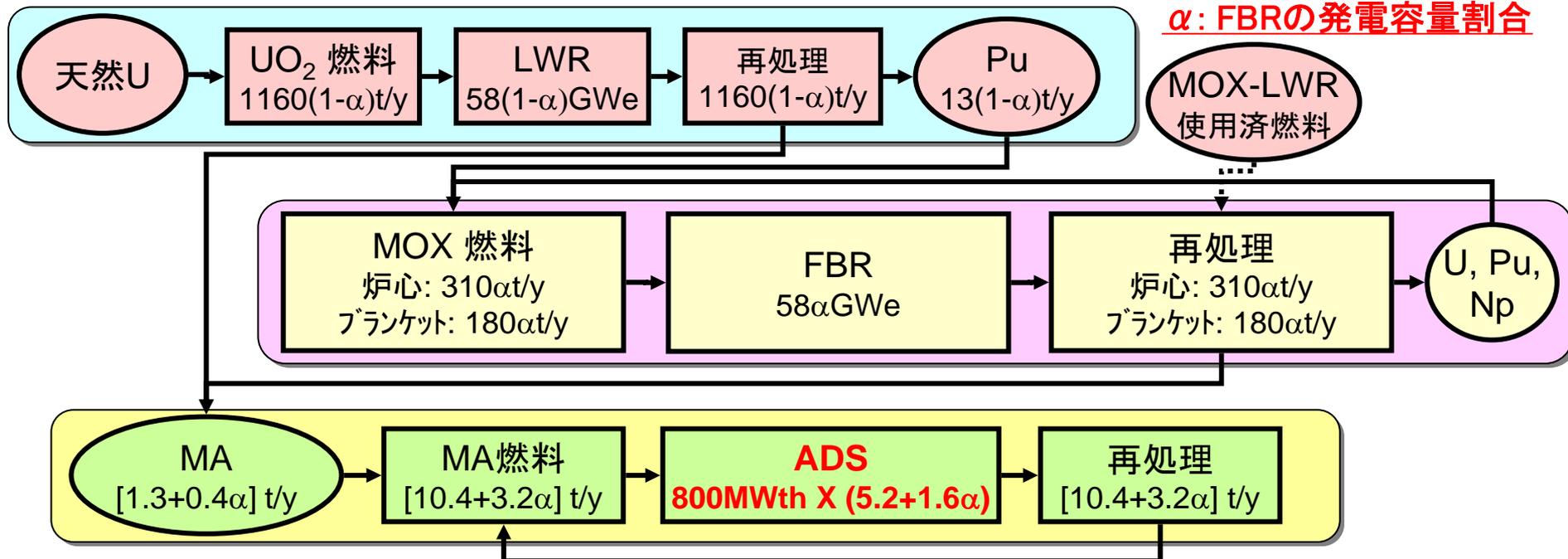


表 FBRの導入割合と燃料サイクルの構成規模の関係

FBR発電容量割合 α	0.2	0.5	0.8
LWR 燃料 再処理	930t/y	580t/y	230t/y
FBR燃料 再処理	98t/y	250t/y	390t/y
ADS 燃料再処理	11t/y	12t/y	13t/y
ADS導入基数	5.5	6.0	6.5

- 6～8基程度のADSと小規模な核変換専用サイクルで柔軟に対応可能
- 高速炉サイクルは移行期に必要な3～5%のMA添加の負担が軽減されるため、導入しやすくなる。

FBRにおけるAm+Cmの非均質装荷

- Am+Cmの核変換専用ターゲット燃料を非均質装荷した高速炉^(*1) (1.5GWe):
 - ・ MA装荷率20wt%の「ターゲット集合体」を内側炉心と外側炉心の間に装荷
 - ・ 年間約110kgのMAを核変換できる

- Np部分リサイクル均質高速炉(1.5GWe)では、年間約40kgのAm+Cmが生成

- 従って、平衡期における、58GWeの内訳は概ね以下の通り:
 - Np部分リサイクル均質高速炉: 約29基
 - Am+Cm装荷非均質高速炉: 約10基

- 移行期にはMAの発生が増えるので、MA蓄積を抑制するには、非均質高速炉を先行して投入する必要がある。

- 上記の議論は、非均質高速炉の設計に大きく依存する。

(* 1) S. Ohki, et al., "An Effective Loading Method of Americium Targets in Fast Reactors," Proc. of GLOBAL 2007, Sept. 9-13, 2007, Boise, Idaho, p.1280, (2007).

MA割合の高い核変換専用燃料の問題点

- ADS又は非均質高速炉における核変換専用燃料(ターゲット燃料)は、MA含有量が高いため、発熱、放射線等の観点から注意を要する。

- ADS用燃料の発熱の概要：
 - MA窒化物燃料の発熱密度： 約400W/kgHM
 - 集合体中の重金属量： 7～50kgHM/集合体（61～397ピンに相当）
- 従って、**3～20kW/集合体**
- なお、ADSでは、ダクトレス燃料を採用して、組み立て時などに横方向からの空冷が可能な設計を採用する予定

- 集合体仕様は、製造時の除熱、遮蔽、炉心設計、燃料交換の簡便性等の観点から、総合的に検討して決定する必要がある。

まとめ

□2047年の第2再処理工場からMAを回収し、核変換するシナリオを検討

□検討項目：

- FBR均質サイクルの場合の燃料中の**MA装荷率**
- ADSまたは非均質高速炉を用いる場合の**導入規模**

□高速炉で均質にMAをリサイクルする場合：

- 軽水炉から高速炉への**移行期**には、高速炉燃料のMA装荷率は、燃料製造時の発熱影響等の観点から**最大5%程度**に制限
- 均質高速炉のみの**平衡期**にはMA装荷率は**最大1%程度**
- MA装荷率を制限する場合、後年にCm-244が増加し、新燃料発熱の低減には効果が小さい
- Am+Cmを別途冷却すると、効果が期待できる。ただし、冷却時の貯蔵方法の検討が必要。
- 均質高速炉ではMAのうちNpのみをリサイクルすると、MA全体をリサイクルする場合に比べて新燃料発熱の低減効果が大きい。ただし、Am+Cmは2150年までに約300トンが廃棄物へ移行する。

□ADSまたは非均質高速炉でMAを核変換する場合：

- ADSでは、MAの分離状況に合わせて**8基程度の800MWth**規模の施設を順次投入。サイクル規模は、**高速炉サイクルの1/20**程度。MAをコンパクトに閉じ込め、多様な炉型に柔軟に対応
- 非均質高速炉の場合は、**平衡期には全体の1/4程度のFBRがAm+Cmの非均質装荷**となる。但し、非均質高速炉の設計に依存するところが多い。
- 核変換専用燃料では、燃料の発熱等が高くなるので、設計上の配慮が必要。



高速炉で均質にMAをリサイクルする場合、ADSまたは非均質高速炉でMAを核変換する場合のどちらの導入シナリオでも、MAのマネジメントが可能

(補足資料) MAの特性

■ 核的特性:

- ✓ 高速中性子(数百keV以上)で核分裂反応
- ✓ 遅発中性子割合が小さい

■ 取り扱い性:

- ✓ 高発熱 ・ 高 γ 線強度 ・ 高中性子線強度(自発核分裂+(α, n)反応)

核種	半減期 (年)	発熱 (W/g)	γ 線強度 ($\gamma/g \cdot s$)	中性子線強度 ($n/g \cdot s$)
Np-237	2.14×10^6	0.0002	7.3×10^6	0.9
Pu-238	87.7	0.56	3.0×10^8	36000
Pu-239	2.41×10^4	0.002	1.1×10^6	96
Pu-240	6.54×10^3	0.007	3.9×10^6	1300
Pu-241	14.4	0.004	1.2×10^7	1.23
Am-241	432.2	0.11	4.9×10^{10}	7000
Am-243	7.38×10^3	0.007	5.5×10^9	540
Cm-244	18.11	2.8	6.9×10^8	1.2×10^7

■ 燃料特性:

- ✓ 融点の低下などの物性変化
- ✓ Heの蓄積による被覆管内圧の上昇、等