

原子力委員会
研究開発専門部会
第1回分離変換技術検討会

高レベル放射性廃棄物処分への 分離変換技術の導入意義

平成20年9月19日

日本原子力研究開発機構

1. 多様な核燃料サイクルにおけるMA核変換の意義
2. MA核変換、発熱性FP分離、および廃棄体貯蔵期間の影響

1. 多様な核燃料サイクルにおけるMA核変換の意義

— 対象とした核燃料サイクル —

- 軽水炉(UO_2 燃料、MOX燃料)及び高速炉からの使用済燃料を再処理した際に生じる高レベル放射性廃棄物(HLW)からマイナーアクチノイド(MA)を回収することの処分への影響を評価

ケース	原子炉	燃 料	再処理回収元素	略称	
ケース1	LWR	ウラン燃料	なし (直接処分)	LWR (直接処分)	 LWR起源のHLWからMAを回収する効果
ケース2	LWR	ウラン燃料	U+Pu	LWR	 プルサーマル起源のHLWからMAを回収する効果
ケース3	LWR	ウラン燃料	U+Pu+MA	LWR (MAリサイクル)	 FBR起源のHLWからMAを回収する効果
ケース4	LWR	MOX燃料(プルサーマル燃料)	U+Pu	プルサーマル	
ケース5	LWR	MOX燃料(同上)	U+Pu+MA	プルサーマル (MAリサイクル)	
ケース6	FBR	MOX燃料	U+Pu	FBR	
ケース7	FBR	Np含有MOX燃料	U+Np+Pu	FBR (Npリサイクル)	
ケース8	FBR	MA含有MOX燃料	U+Pu+MA	FBR (MAリサイクル)	

燃焼度: LWR 4.9万MWd/t 、 FBR 11.5万MWd/t

再処理前の貯蔵期間:4年 、 ガラス固化体の貯蔵期間:50年

1. 多様な核燃料サイクルにおけるMA核変換の意義

— 分離変換技術の導入意義の指標 —

MA核変換の意義を検討するための4つの指標：

潜在的な有害度

実効線量率

固化体発生量

処分場の面積

様々な要因

に影響をうけるが、ここでは
炉型とMA回収の有無の影響を比較

処分場の面積

処分場の深度

岩種

実効線量率
(被ばくリスク)

固化体発生量

HLW定置方法

HLW貯蔵期間

原子炉炉型

燃焼度

天然バリア条件

使用済燃料冷却期間

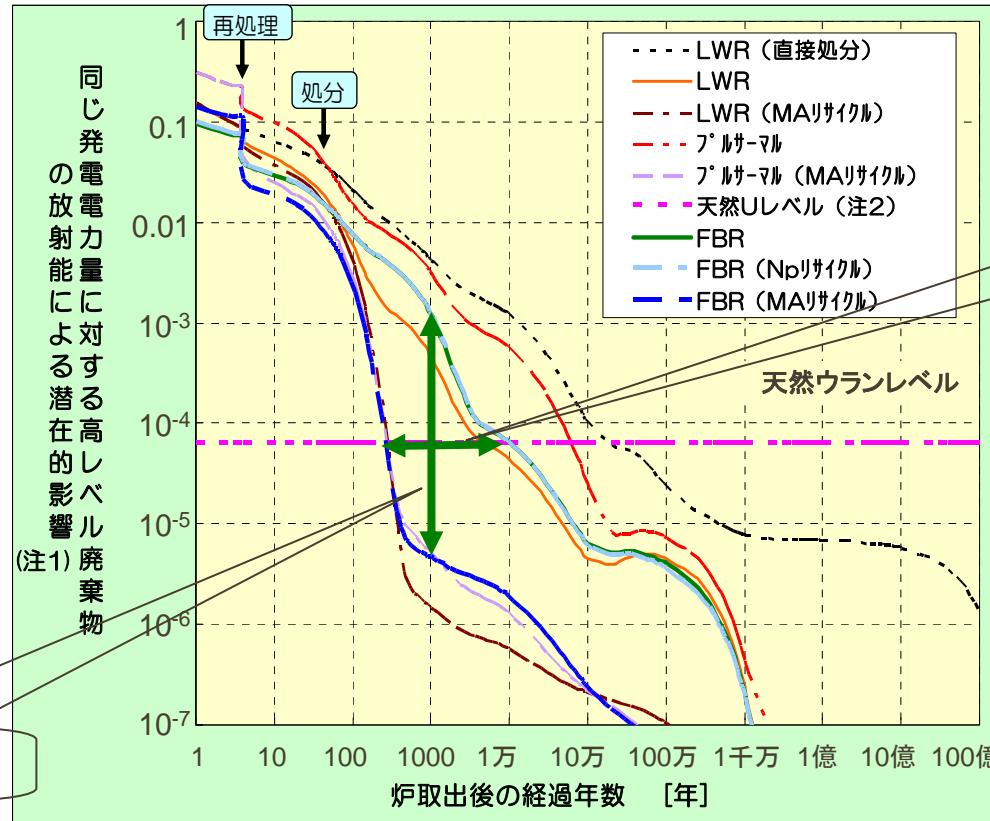
人工バリア条件

再処理での分離(元素移行率)

潜在的な有害度

1. 多様な核燃料サイクルにおけるMA核変換の意義

— 潜在的な有害度 —



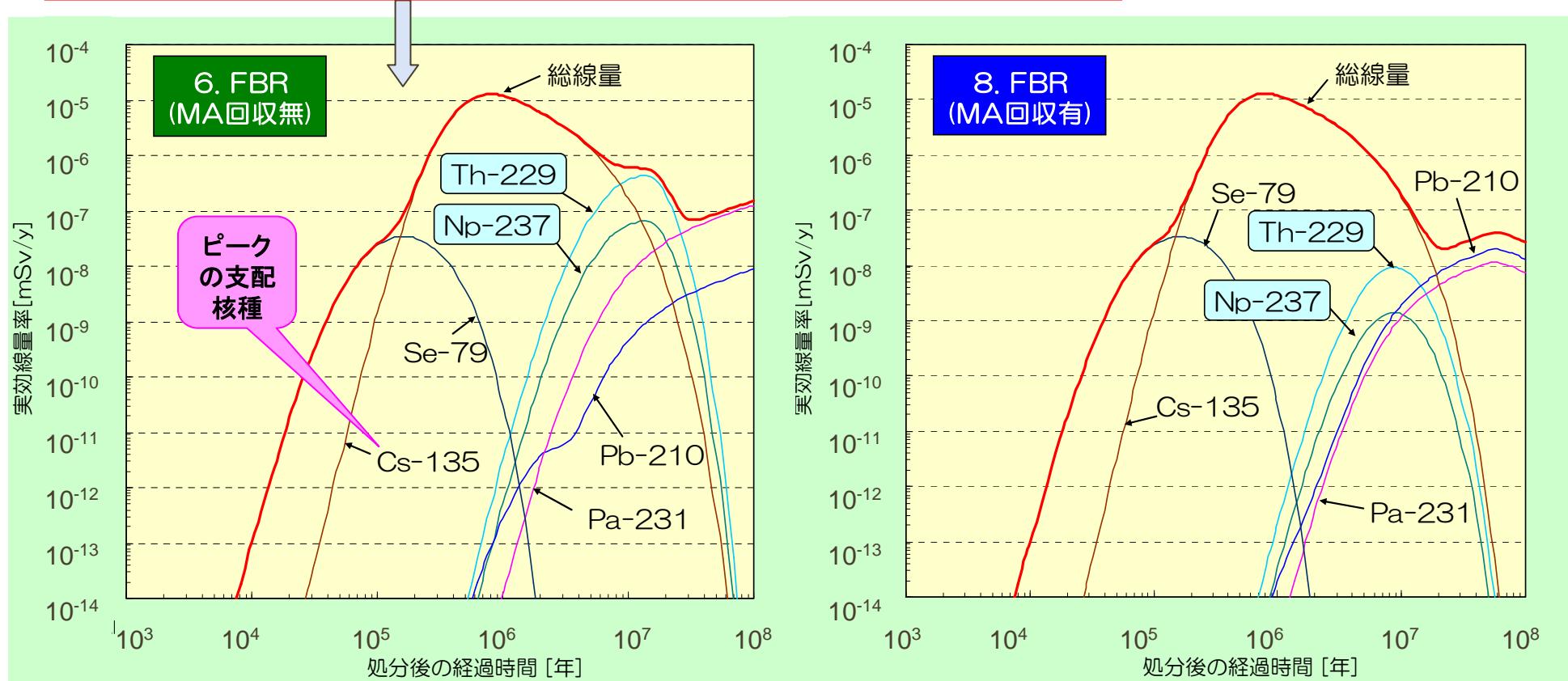
(注1)高レベル放射性廃棄物と人間との間の障壁は考慮されておらず、高レベル放射性廃棄物の実際の危険性ではなく、潜在的な有害度(経口摂取による年摂取限度で規格化)を示している。使用済燃料取り出し直後の潜在的影響を1とした相対値。

(注2)天然ウランレベルの線は、LWR(直接処分)のケースで燃料の原料として必要な天然ウラン(190トン強)とその娘核種による潜在的な有害度の経時変化における最大値を示している。

1. 多様な核燃料サイクルにおけるMA核変換の意義

— 地下水シナリオによる実効線量率(被ばくリスク) —

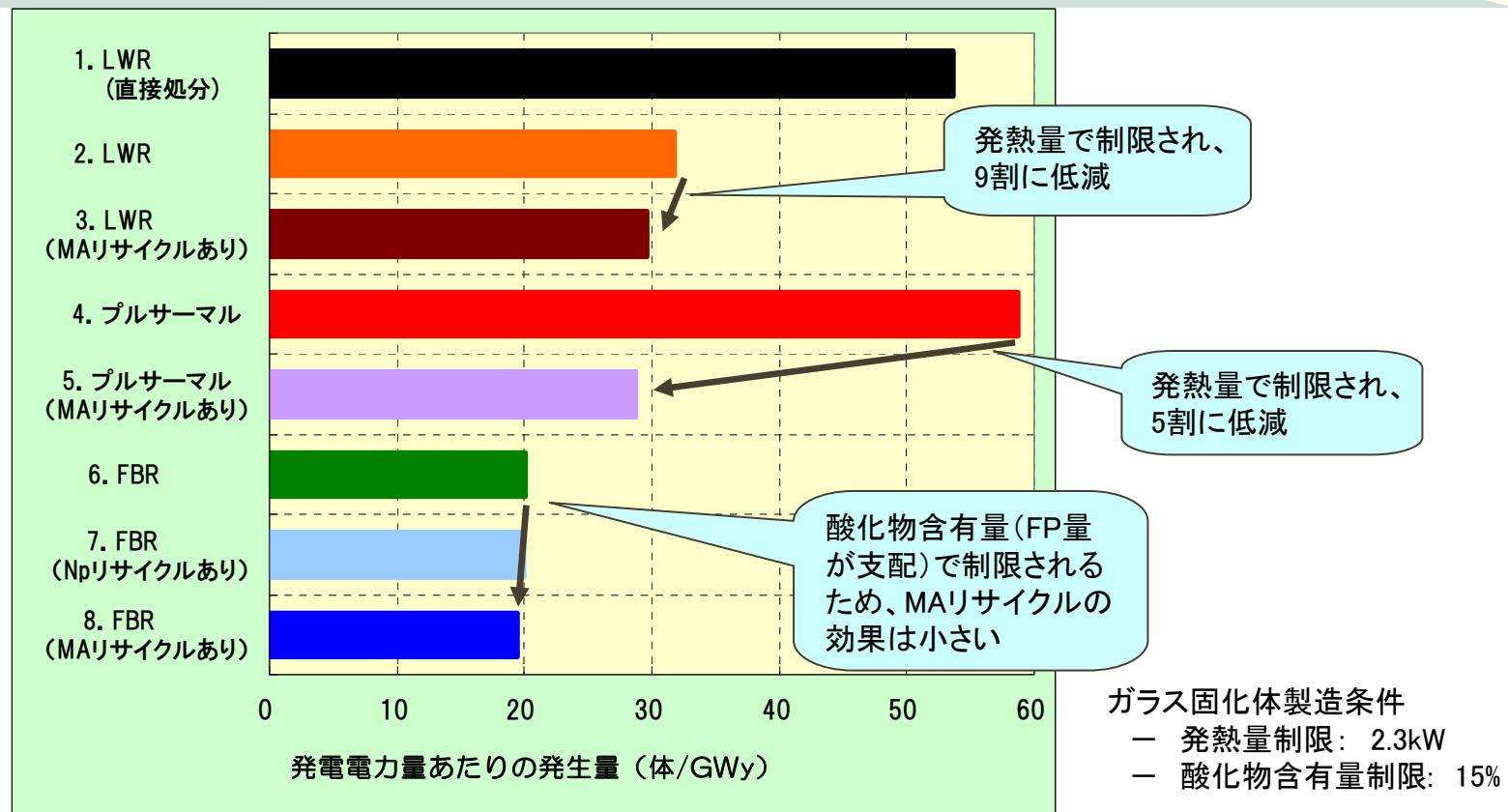
諸外国で提案されている安全基準(0.1~0.3mSv/年)に比べて十分低い



- 地下水シナリオでは、ピークの実効線量率はCs-135で支配され、MA核変換の効果は限定的
- 1000万年頃のNp-237/Th-229による実効線量率は、MAリサイクルによって変化

1. 多様な核燃料サイクルにおけるMA核変換の意義

－ 発電電力量あたりのHLW発生量 －

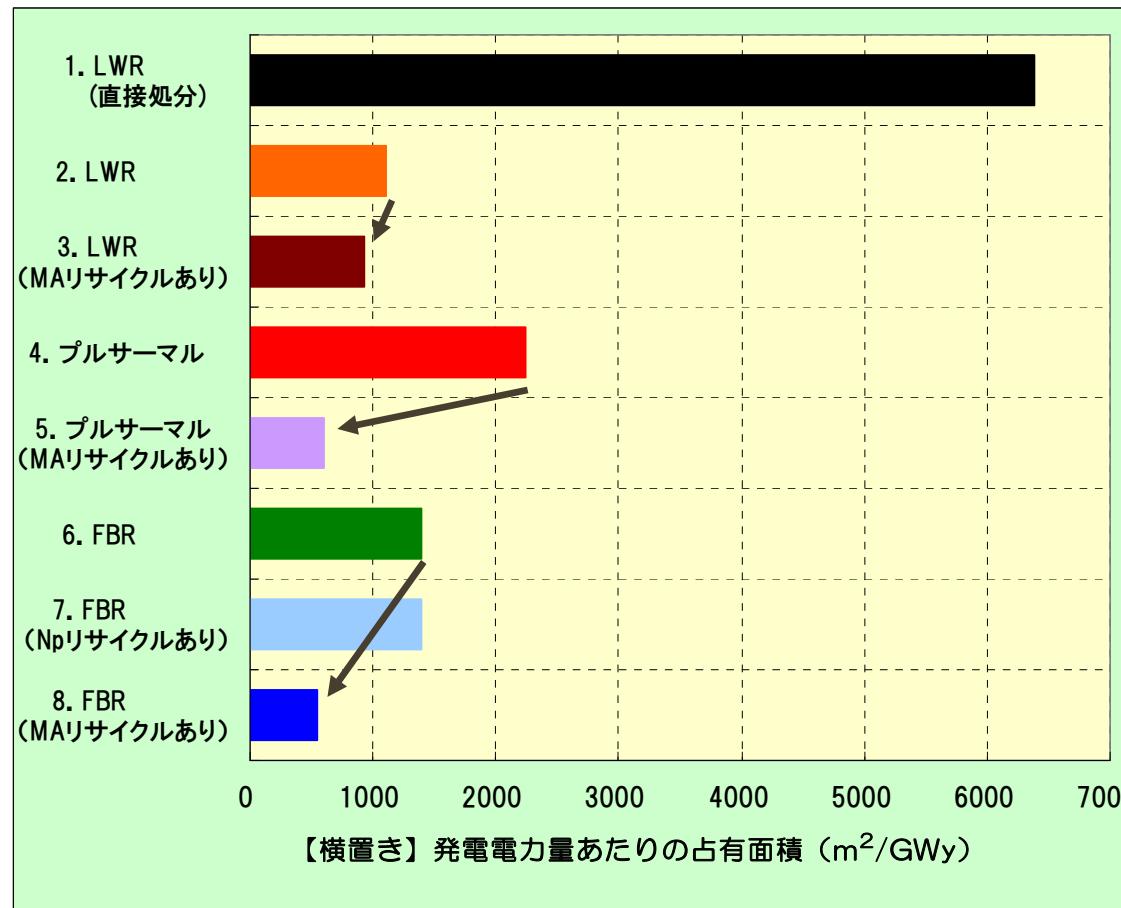


- MAをリサイクルした場合、発電電力量あたりのガラス固化体発生量は以下の通り。
 - LWR : 9割程度に低減
 - プルサーマル : 5割程度に低減
 - FBR : ほとんど変わらない
- 発電電力量あたりのガラス固化体発生量は、熱効率向上と発熱性FPの発生量が少ないため、FBRの方がLWRよりも少なくなる。

注) LWR(直接処分)のケースについては燃料集合体の体数で表し、それ以外のケースについてはガラス固化体の体数で表している。

1. 多様な核燃料サイクルにおけるMA核変換の意義

— 処分場の廃棄体定置面積(発電電力量あたり:硬岩・横置き) —



ガラス固化体処分条件
— 構造上の強度が十分強い
— 緩衝材温度制限: 100°C

■ MAをリサイクルした場合、発電電力量当たりの処分場面積は以下の通り。

LWR : 8割程度に低減(HLW発生量が約9割、HLW1体あたり占有面積が9割に低減)

プルサーマル : 3割程度に低減(HLW発生量が約5割、HLW1体あたり占有面積が5割強に低減)

FBR : 4割程度に低減(HLW発生量はほぼ同じ、HLW1体あたり占有面積が4割に低減)

1. 多様な核燃料サイクルにおけるMA核変換の意義 —まとめ—

【潜在的な有害度】

- LWR、プルサーマル、FBRとともに、MAリサイクルにより100年後以降のガラス固化体の放射能による潜在的な有害度を、**1/10～1/1000程度**に低減する。

【実効線量率(被ばくリスク)】

- MAリサイクルによる実効線量率ピークの低減効果は**ほとんどない**。

【ガラス固化体の発生量(発電電力量あたり)】

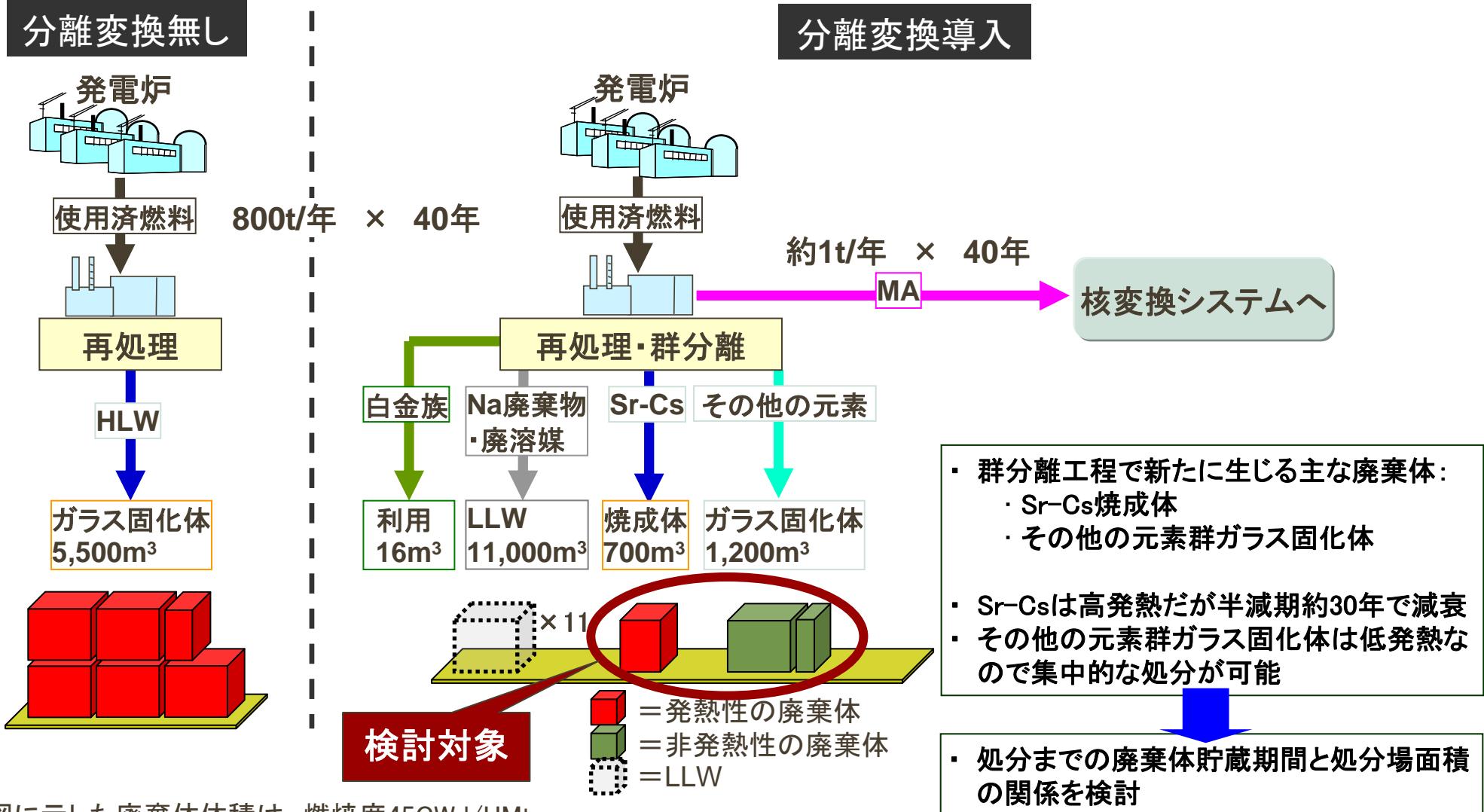
- MAリサイクルを行った場合、ガラス固化体の発熱量低減の影響により、LWRで**9割程度**に、プルサーマルでは**5割程度**に低減する。一方、FBRでは**ほとんど変わらない**。

【占有面積(発電電力量あたり)(横置きの場合)】

- MAリサイクルを行った場合、ガラス固化体の発熱量低減の影響により、LWRで**8割程度**に、プルサーマルでは**3割程度**に、FBRでは**4割程度**に低減する。

2. MA核変換、発熱性FP分離、および廃棄体貯蔵期間の影響

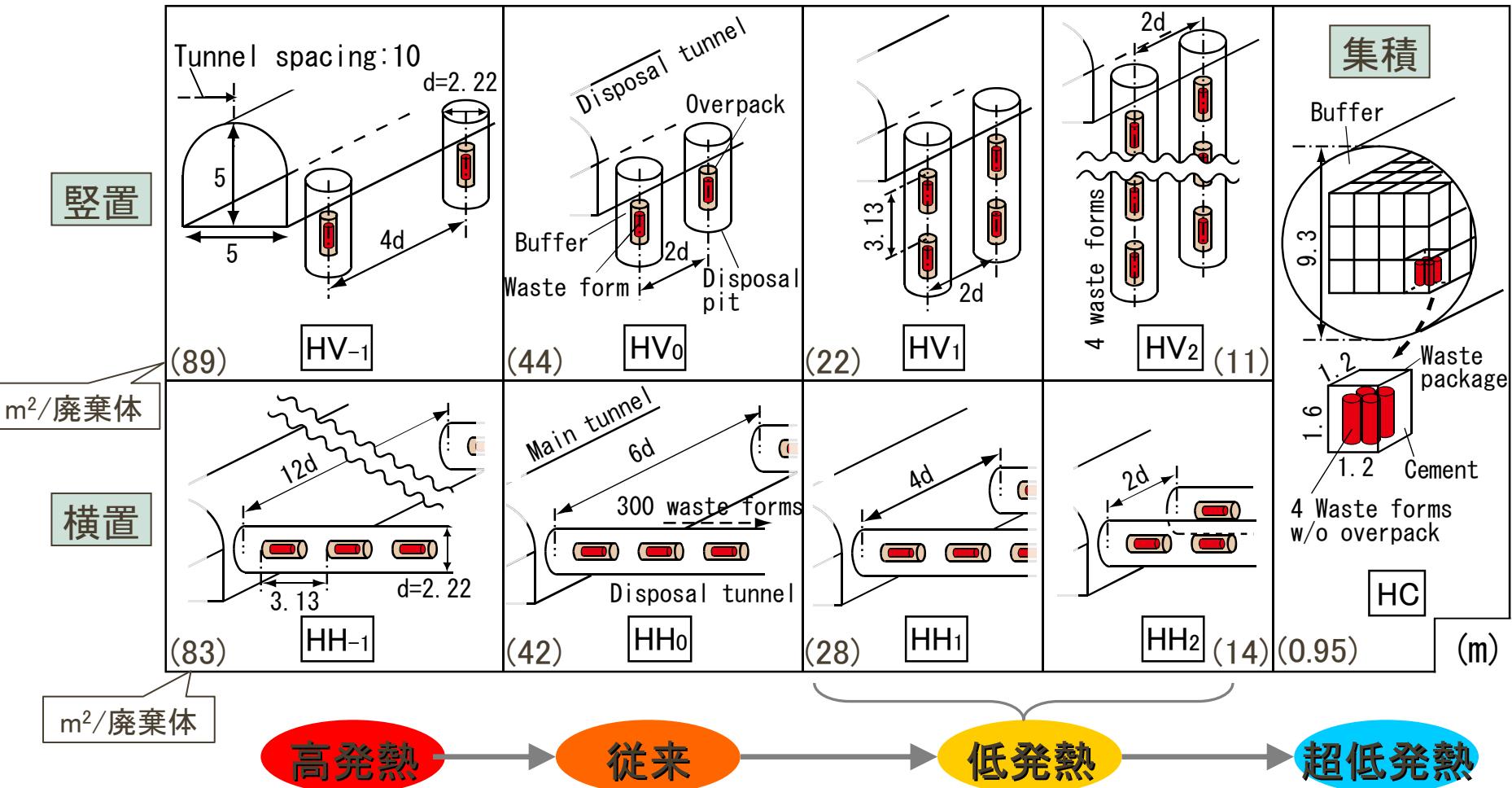
— 分離変換で新たに生じる廃棄体 —



上図に示した廃棄体体積は、燃焼度45GWd/HMt、4年冷却の軽水炉使用済燃料32,000HMtで規格化

2. MA核変換、発熱性FP分離、および廃棄体貯蔵期間の影響

－ 廃棄体定置方法 －



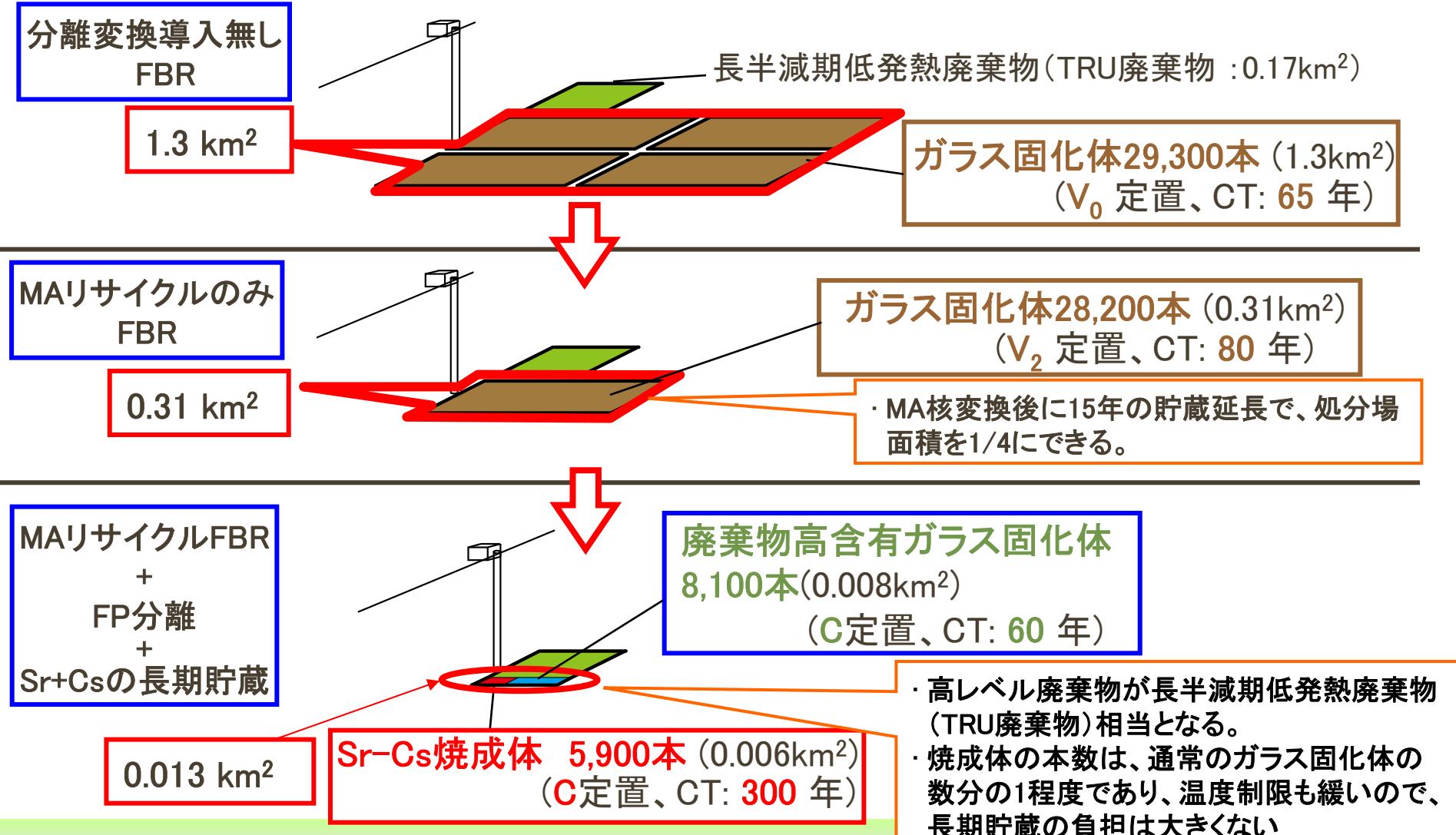
発熱性FP分離、MA核変換の後、貯蔵期間を長期化すれば、FPの崩壊によって、次第にコンパクトな処分が可能になる。

2. MA核変換、発熱性FP分離、および廃棄体貯蔵期間の影響

— 分離変換技術導入効果 —

分離変換導入と長期貯蔵を組み合わせた場合の処分概念の例

注) 40GWeの高速炉を40年間運転した場合で規格化。硬岩系地層への豊富な場合。CT: 処分前貯蔵期間。



3. まとめ

- MA核変換は、長期にわたる潜在的有害度の低減や、処分場面積の抑制の観点から効果が高い。特に、Pu利用時の効果が大きい。
- MA核変換、FP分離、廃棄体貯蔵期間の延長を効果的に組み合わせれば、HLW処分に係る負担の大幅軽減の可能性がある。



- ◆ 処分場面積の抑制は、同じ面積の処分場敷地を有効活用できることを意味しており、原子力の持続的な利用に寄与。
- ◆ 今後も引き続き、MA回収技術、FP分離技術、核変換技術等に関する研究開発を着実に進め、HLW処分の負担軽減に貢献したい。

補足資料

1. 多様な核燃料サイクルにおけるMA核変換の意義 —主な前提条件—

前提条件

今回の検討

項目	内 容
対象炉型	PWR (4.9万MWd/t) FBR (11.5万MWd/t)
再処理までの貯蔵期間	4年
核種移行率	次頁の表を参照
ガラス固化体 製造条件	発熱量制限：2.3kW 酸化物含有量制限：15%
ガラス固化体 の貯蔵期間	50年（使用済燃料の貯蔵期間 も50年）
処分場	硬岩、地下1000m
処分方法	横置き、（豎置き）
処分条件	空洞安定性制限：構造上の強 度が十分強い 緩衝材温度制限：100°C

政策大綱及び H12レポート

項目	内 容
対象炉型	PWR (4.5万MWd/t)
再処理までの貯蔵期間	4年
核種移行率	U : 0.422%、Pu : 0.548%、 MA : 100%
ガラス固化体 製造条件	六ヶ所再処理工場の製造条件 に同じ
ガラス固化体 の貯蔵期間	50年（使用済燃料の貯蔵期間 も50年）
処分場	硬岩（地下1000m） 軟岩（地下500m）
処分方法	豎置き、横置き
処分条件	空洞安定性制限：構造上の強 度が十分強い 緩衝材温度制限：ガラス固化体 は100°C、使用済燃料は90°C

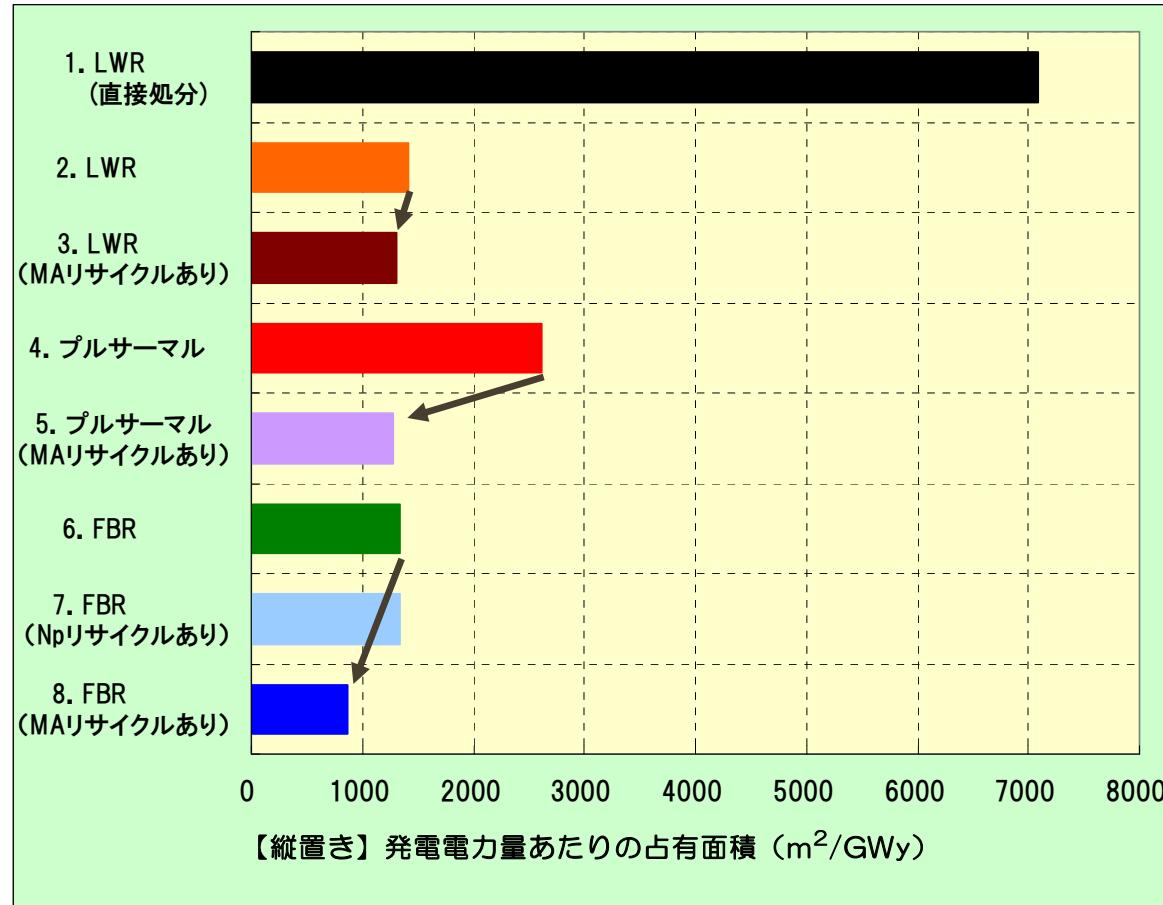
1. 多様な核燃料サイクルにおけるMA核変換の意義

—各核種のHLWへの移行率—

ケース	ケースの特徴	U, Pu (%)	Np (%)	Am, Cm (%)	想定される再処理プロセス
ケース1	LWR直接処分	100	100	100	なし
ケース2	LWRでMAリサイクルなし	0.03	97.9	99.9	ピューレックス (PUREX)
ケース3	LWRでMAリサイクルあり	0.03	2	0.03	PUREX+MA回収
ケース4	プルサーマルでMAリサイクルなし	0.03	97.9	99.9	PUREX
ケース5	プルサーマルでMAリサイクルあり	0.03	1.4	0.03	先進湿式
ケース6	FBRでMAリサイクルなし	0.03	97.9	99.9	PUREX
ケース7	FBRでNpリサイクルあり	0.03	1.2	98.9	先進湿式
ケース8	FBRでMAリサイクルあり	0.03	1.2	0.03	先進湿式

1. 多様な核燃料サイクルにおけるMA核変換の意義

—処分場の占有面積(発電電力量あたりの占有面積: 縱置き)—



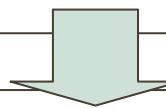
- MAをリサイクルした場合、HLW1体あたりの処分場面積は以下の通り。
 - LWR : 9割程度に低減 (HLW発生量が9割)
 - プルサーマル : 5割程度に低減 (HLW発生量が5割)
 - FBR : 6割程度に低減 (注: Npリサイクルでは変わらない)

2. MA核変換、発熱性FP分離、および廃棄体貯蔵期間の影響

— 検討の目的と検討条件 —

問題提起:

処分場の面積を低減するなら、核変換しなくとも、ガラス固化体が十分に冷えてから廃棄すれば良いのではないか？



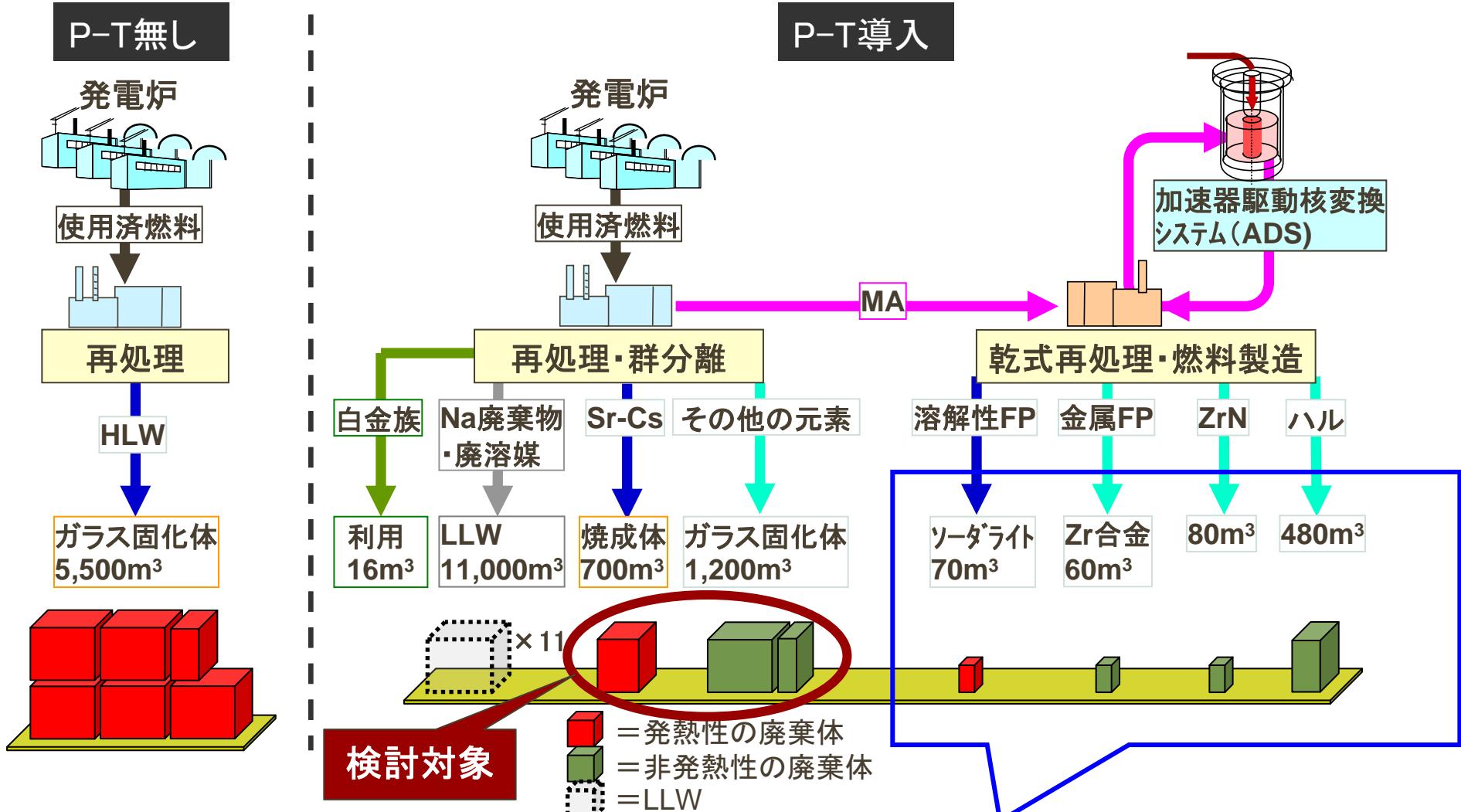
4つのFBR再処理オプションについて、廃棄までの貯蔵期間と処分場面積の関係を検討

検討条件

- FBR115GWd/HMt, 4年冷却
- 4つのFBR再処理オプション（ADSを用いても結果はほぼ同等）
 - ① PT導入無し (FBR(Np)) → 従来ガラス固化体。作成時2.3kW/体、酸化物重量15wt%で制限。（シナリオ7）
 - ② MAリサイクルのみ (FBR(MA) or FBR(Np)+ADS) → 従来ガラス固化体(同上)。（シナリオ8）
 - ③ FP分離のみ (FBR(Np)+P) → Sr-Cs焼成体+MAを含むガラス固化体(同上)
 - ④ MAリサイクル+FP分離 (FBR(MA)+P or FBR(Np)+ADS+P)
 - Sr-Cs焼成体+高含有ガラス固化体(酸化物重量10+30wt%で制限)。
- 廃棄前の貯蔵期間5～500年
- 硬岩・1000m深度・豎置/横置
- その他
 - 焼成体を含め、全ての廃棄体の寸法は従来ガラス固化体と同一。

2. MA核変換、発熱性FP分離、および廃棄体貯蔵期間の影響

— 分離変換で新たに生じる廃棄体(ADSの場合) —

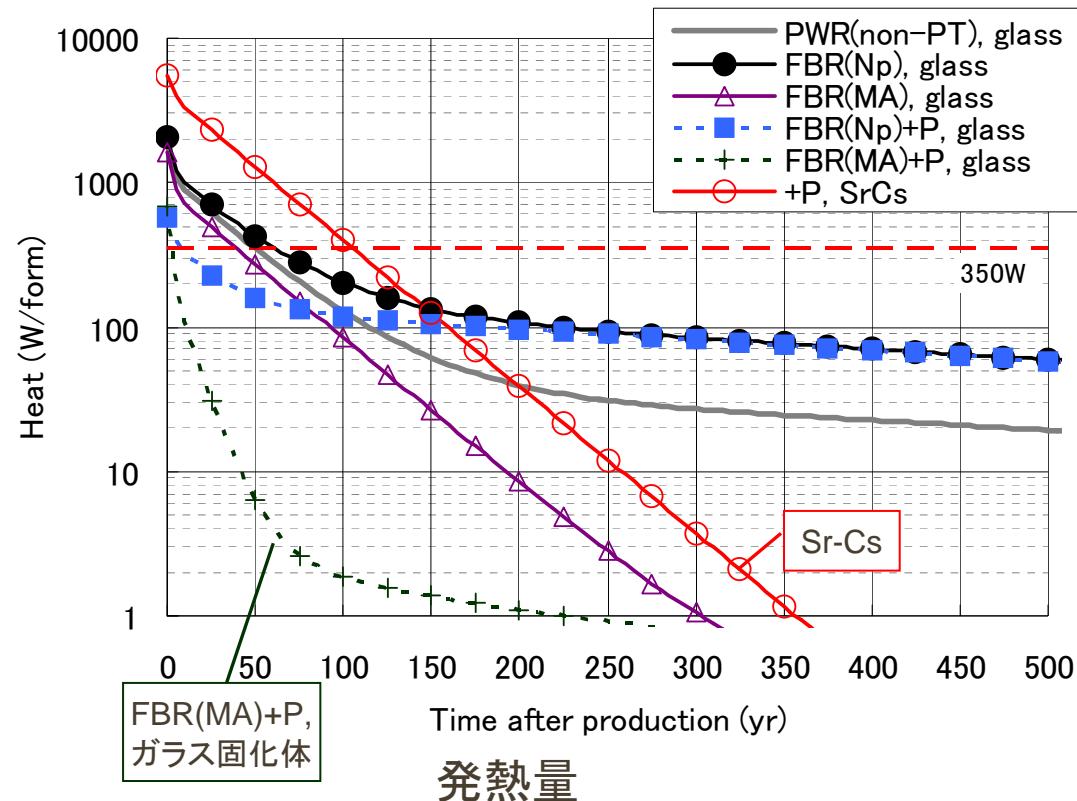
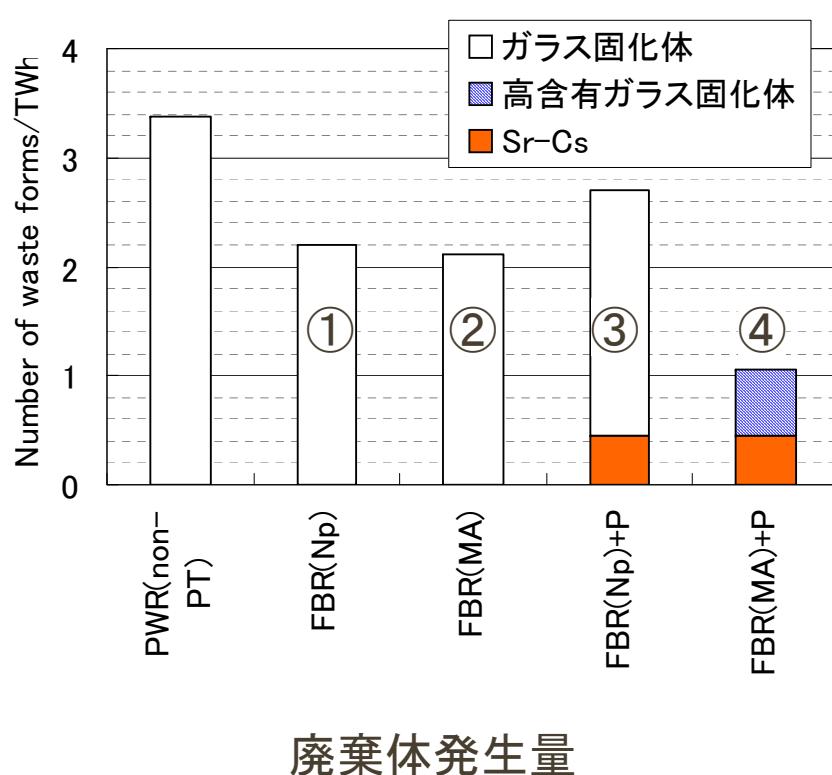


上図に示した廃棄物体積は、燃焼度45GWe/HMt、4年冷却の軽水炉使用済燃料32,000HMtで規格化

ADSサイクルで生じる発熱性の廃棄物はごく少量

2. MA核変換、発熱性FP分離、および廃棄体貯蔵期間の影響

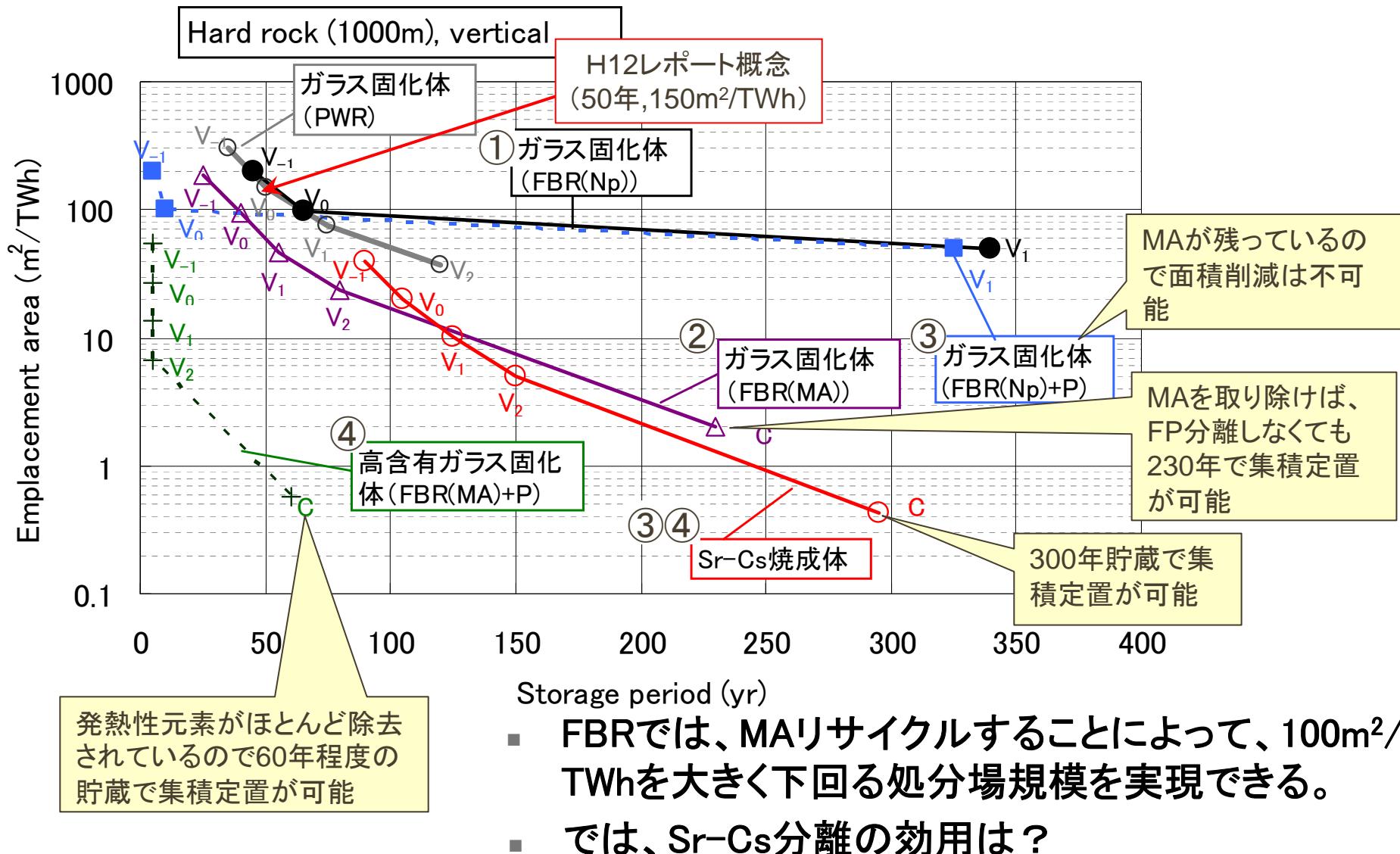
－ 発生する廃棄物量 －



- FBR(MA)+FP分離の場合のみ、本数が減る。
- Sr-Cs焼成体の発熱量は極めて大(初期5.5kW)。
- FBR(MA)+FP分離シナリオのガラス固化体の発熱量は極めて小

2. MA核変換、発熱性FP分離、および廃棄体貯蔵期間の影響

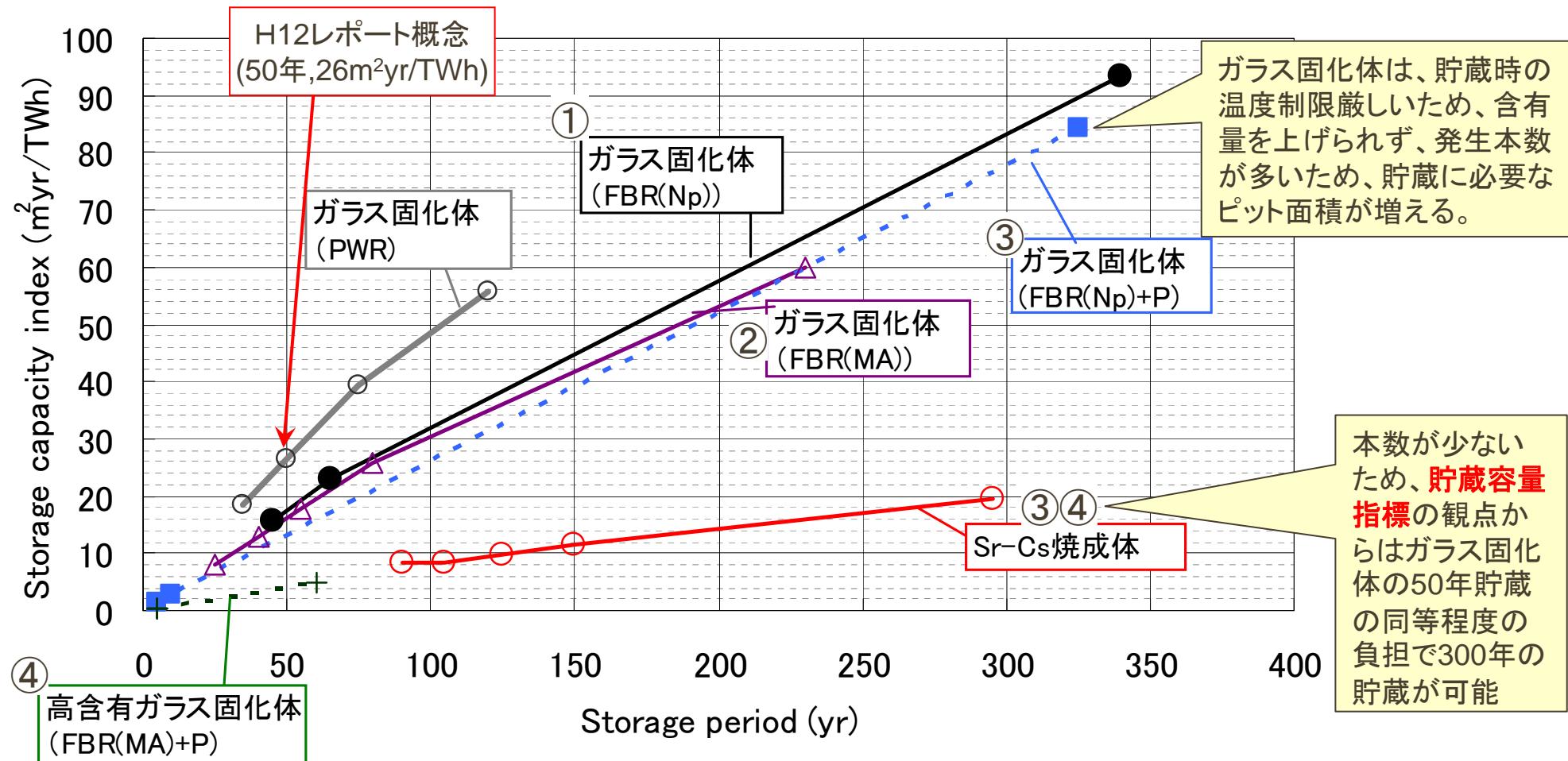
— 貯蔵期間と処分場規模の関係(硬岩・豎置) —



2. MA核変換、発熱性FP分離、および廃棄体貯蔵期間の影響

— 長期貯蔵の負担の比較 —

貯蔵容量指標、Storage capacity index = 乾式貯蔵に必要なピット面積 × 貯蔵年数。 $(m^2\text{年})$



2. MA核変換、発熱性FP分離、および廃棄体貯蔵期間の影響

— Sr-Cs焼成体の概要 —

■ 分離

- Srは含水チタン酸、Csはゼオライト(結晶中に微細孔を持つアルミニノ珪酸塩、沸石)に吸着させる。
- 2つのイオン交換体からなる混合カラムにSrとCsを同時に吸着後、そのまま焼結を行い、ガラス固化体と同じ寸法のSr-Cs焼成体を作製する。
- 30リットルの高レベル実廃液に対して99.6%以上の回収率が達成された。^{*1}

■ 貯蔵

- 85年～300年の貯蔵を想定する。
- 初期発熱量は、10.4kW/本(PWR由来)、あるいは5.5kW/本(FBR由来)
- ガラス固化体と同様の乾式貯蔵を適用した場合、廃棄体中心温度が1200°C(焼結温度)を下回るという条件下で成立する。(ガラス固化体の条件は500°C)

■ 処分

- ガラス固化体と同様に19cm厚さのオーバーパックに収納することで、遮蔽要求を満たす。
- 寸法が同一であるから、ガラス固化体と同様の概念で定置可能。
- コールドの浸出試験^{*2}の結果、焼成体からの浸出率はガラス固化体よりも2～3桁小さい可能性があり、十分な閉じ込め性能を持つ。

^{*1} 久保田益充、他, JAERI-M 85-066, ^{*2} M. Kubota, et. al, *J. Radioact. Waste Manag. Nucl. Fuel Cycle*, 7, 303(1986)

原子力利用に伴う放射性廃棄物の発生量

廃棄物の種類		H15年度末保管量 ^(注1)	今後累積発生量推定
高レベル 放射性廃棄物	国内分	高レベル廃液:425m ³ ガラス固化体:130本	ガラス固化体: 約4.1万本 ^(注2)
	返還分	892本	約2,200本 ^(注3)
放射性廃棄物 低レベル	発電所廃棄物		約275万本(約550千m ³) ^(注4)
	TRU廃棄物	約13万本(約25千m ³)	約65万本(約130千m ³) ^(注5)
		0本	約6.3万本(約13千m ³) ^(注6)
	ウラン廃棄物	約14万本(約27千m ³)	約43万本(約85千m ³) ^(注7)

ガラス固化体の単位: ガラス固化体キャニスター本数(JAEA分120L、その他は150L)

その他の廃棄物の単位: 200Lドラム缶換算本数及び体積

原子力委員会ホームページより

注1:原子力施設運転管理年報(H16年度版)等より

注2:JNFLによる2046年度までの再処理工場操業+JAEAによる処理

注3:電気事業分科会・コスト等検討小委員会に提出された電気事業者資料より

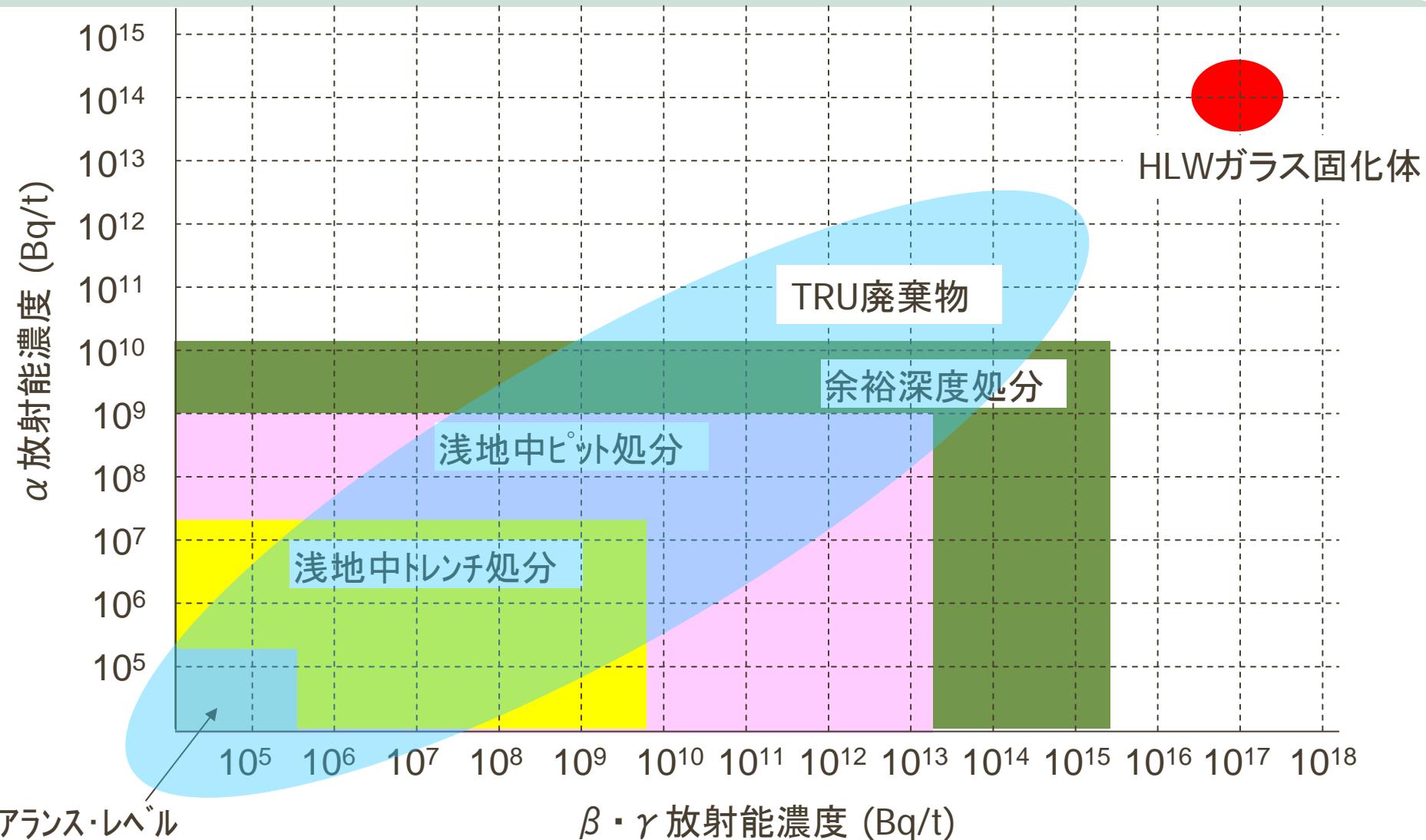
注4:電気事業者による2050年度末の推定+JAEAによる2048年度末の推定

注5:JNFLによる推定+JAEAによる2048年度末の推定

注6:電気事業分科会・コスト等検討小委員会に提出された電気事業者資料より

注7:ウラン加工事業者による2030年度末の推定+JAEAによる2048年度末までの推定

原子力利用に伴う放射性廃棄物の放射能レベルのイメージ



処分方法の区分は廃棄物に含まれる放射性核種の性質に左右されるので、 α 放射能濃度及び $\beta \cdot \gamma$ 放射能濃度のみで一意的には決まらないことに注意。