

加速器駆動核変換システム



辻本 和文

原子力基礎工学研究部門核変換工学技術開発グループ

J-PARC核変換セクション

日本原子力研究開発機構

■ 放射性廃棄物処分と分離変換技術

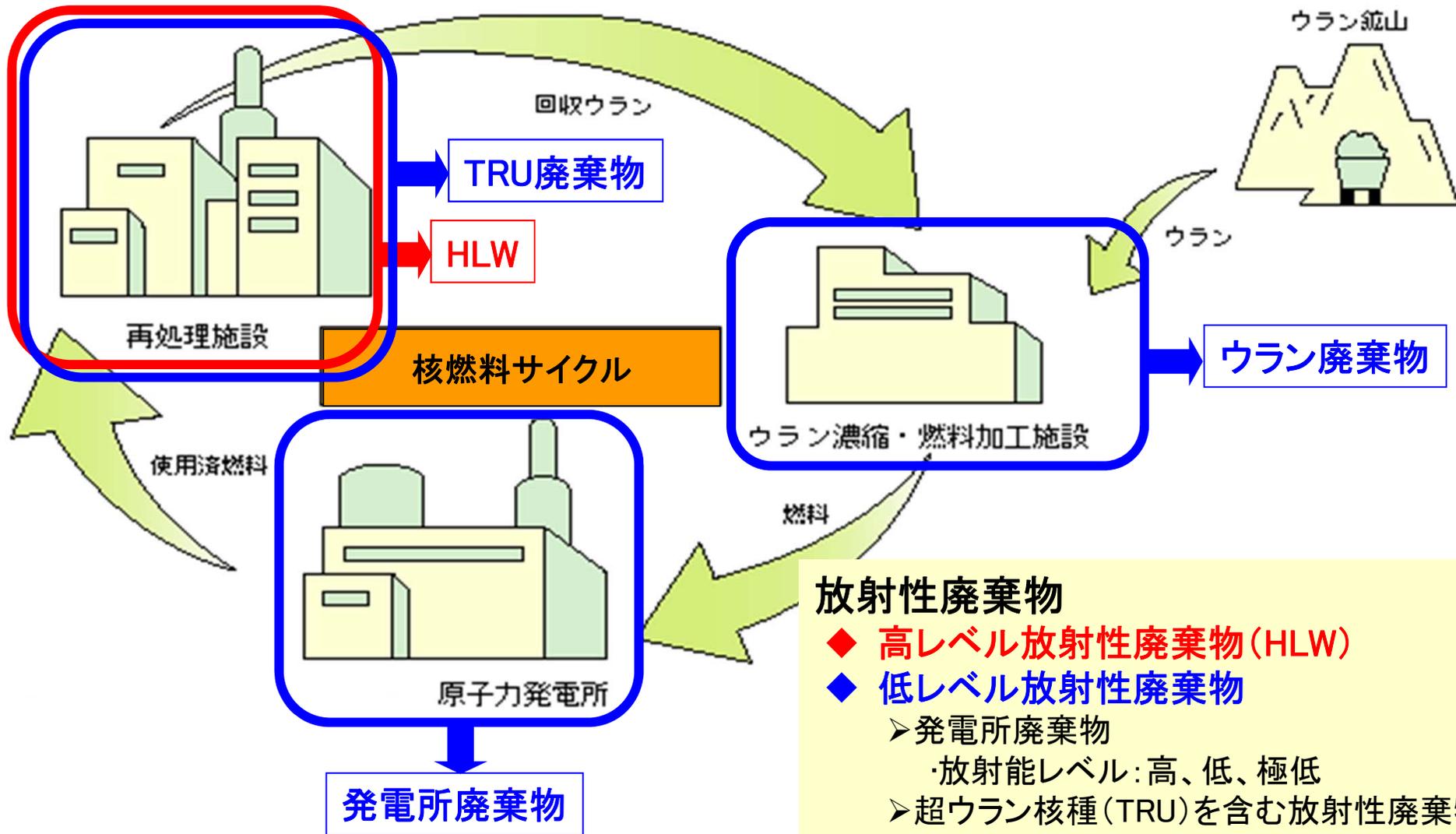
- 核燃料サイクルと放射性廃棄物処分
- 高レベル放射性廃棄物の地層処分
- 分離変換技術：概要と意義

■ 核変換技術

- 核変換システム：商用発電炉利用と専用システム
- ADS(Accelerator Driven System)による加速器駆動核変換システム

■ まとめ

原子力利用に伴う放射性廃棄物の分類



放射性廃棄物

- ◆ **高レベル放射性廃棄物 (HLW)**
- ◆ **低レベル放射性廃棄物**
 - 発電所廃棄物
 - ・放射能レベル: 高、低、極低
 - 超ウラン核種 (TRU) を含む放射性廃棄物
 - ウラン廃棄物
 - RI、研究所等による廃棄物

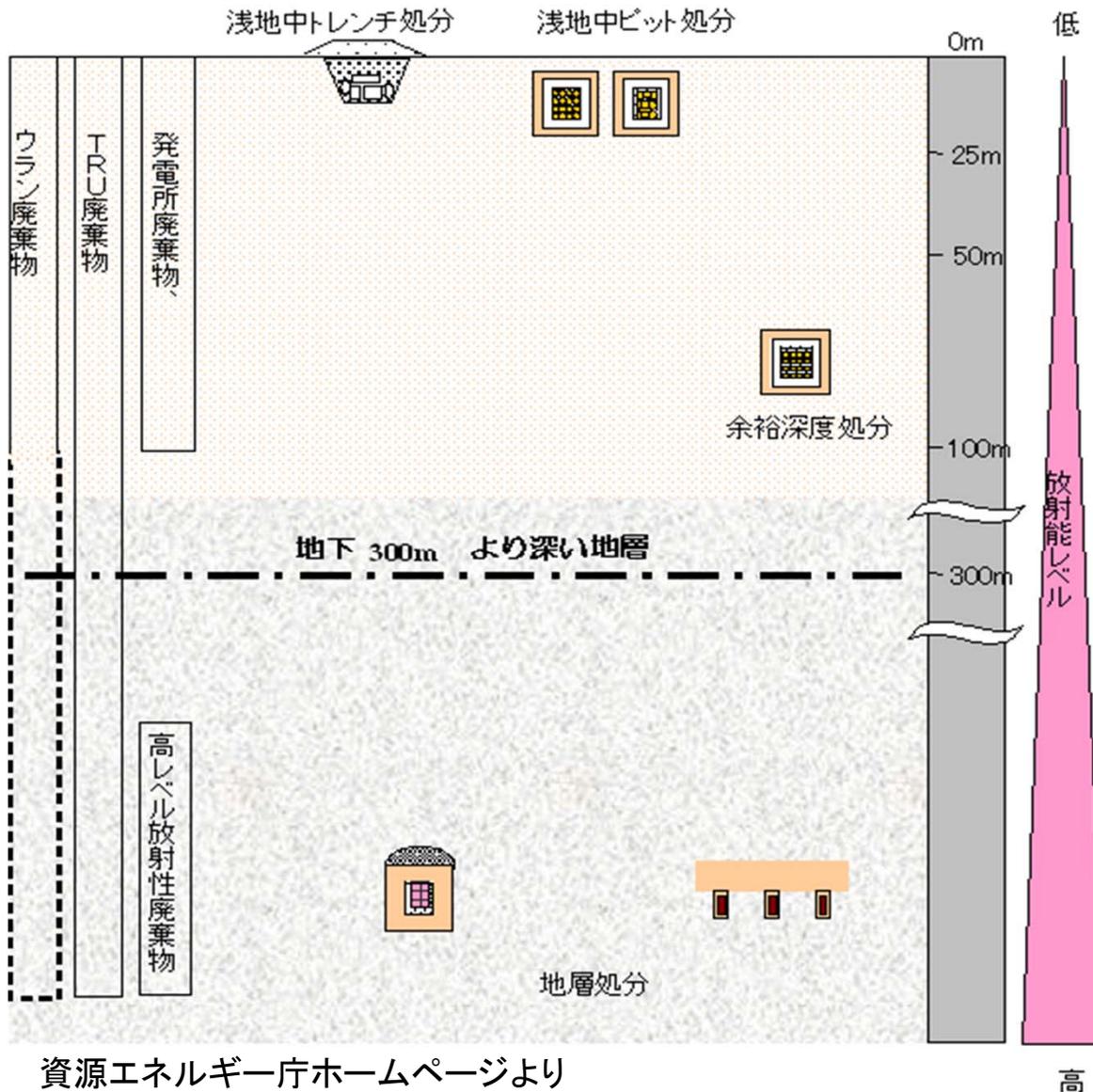
原子力利用に伴う放射性廃棄物の処理処分

放射性廃棄物処理処分の原則(原子力政策大綱)

- 発生者責任の原則
- 放射性廃棄物最小化の原則
- 合理的な処理・処分の原則
- 国民との相互理解に基づく実施の原則

廃棄物の種類		廃棄物の例		発生源	処分方法(例)
高レベル放射性廃棄物		ガラス固化体		再処理施設	地層処分
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	放射能レベル: 高	制御棒、炉内構造物	原子力発電所	余裕深度処分
		放射能レベル: 低	廃液、フィルター、廃器材、 消耗品等を固形化		浅地中ピット処分
		放射能レベル: 極低	コンクリート、金属等		浅地中トレンチ処分
	TRU廃棄物		燃料棒の部品、廃液、 フィルター	再処理施設、MOX 燃料加工施設	地層処分、余裕深度処分、 浅地中ピット処分
ウラン廃棄物		消耗品、スラッジ、廃器材	ウラン濃縮・燃料加 工施設	余裕深度処分、浅地中ピット 処分、浅地中トレンチ処分、場 合によっては地層処分	

放射性廃棄物の処分方法



資源エネルギー庁ホームページより

浅地中トレンチ処分:

コンクリートピットなどの人工構造物を設置せず、浅地中に埋設処分する方法。50年程度の管理期間を経たあとは、一般的な土地利用が可能。

浅地中ピット処分:

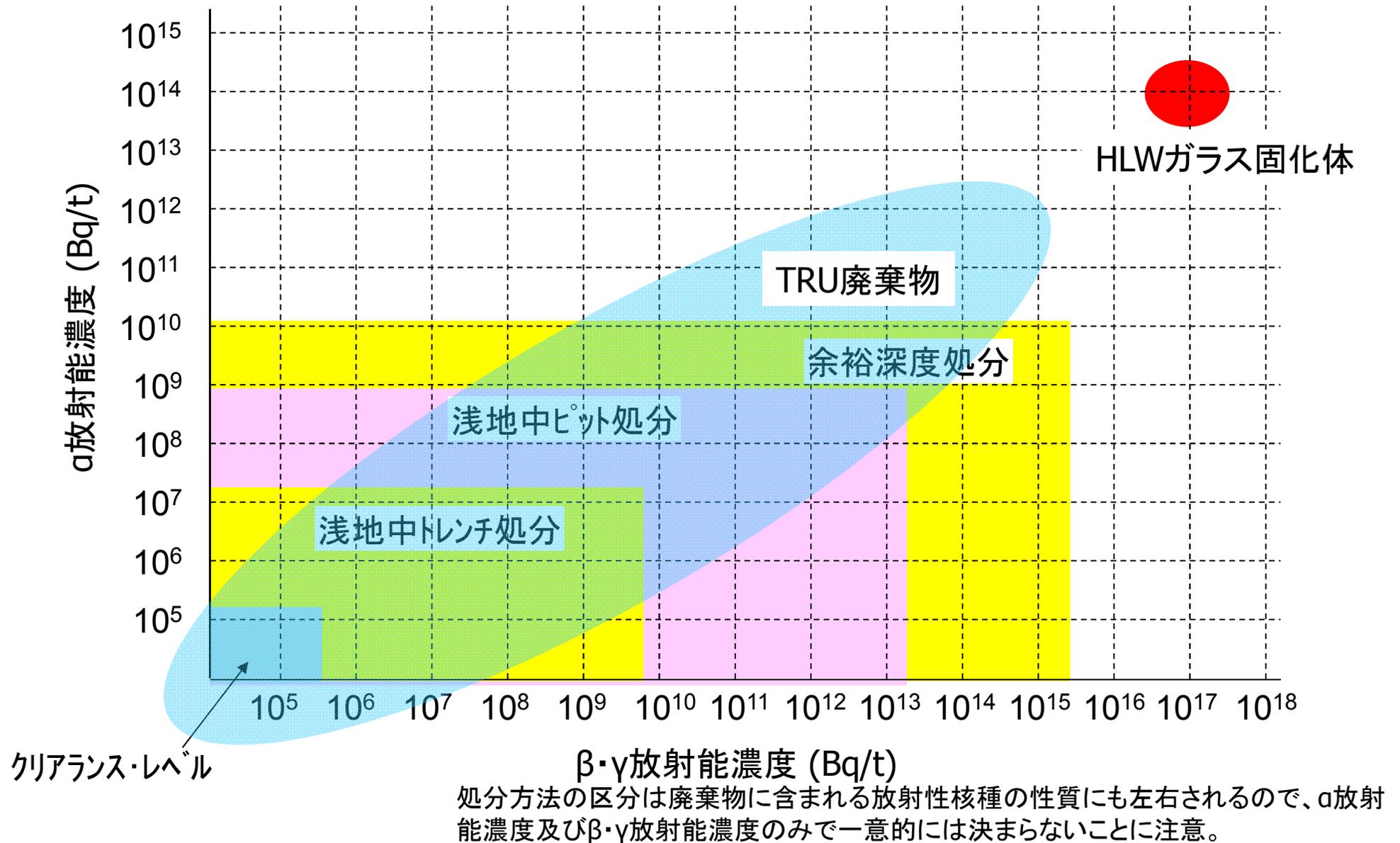
浅地中にコンクリートピットなどの人工構造物を設置して埋設する方法。管理が必要な期間として、300~400年が一つの目安。

余裕深度処分:

一般的な地下利用に対しても十分に余裕をもった深度に、コンクリートでトンネル型やサイロ型の建造物をつくり、廃棄物を埋設処分する方法。数百年の管理期間を経た後には、一般的な土地の利用が可能。



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



地層処分の考え方

天然バリア

- ・生活圏に届くのを遅らせる
- ・1万年以上の性能を期待

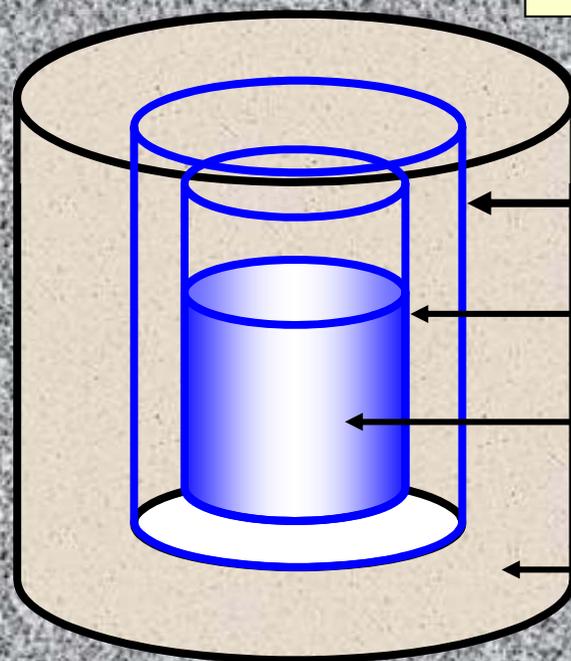
人工バリア

- ・地下水の浸入、放射性物質の漏洩を防ぐ
- ・千年以上の性能を期待

安定な地層

300m以深

物質の地中移行が遅い地層



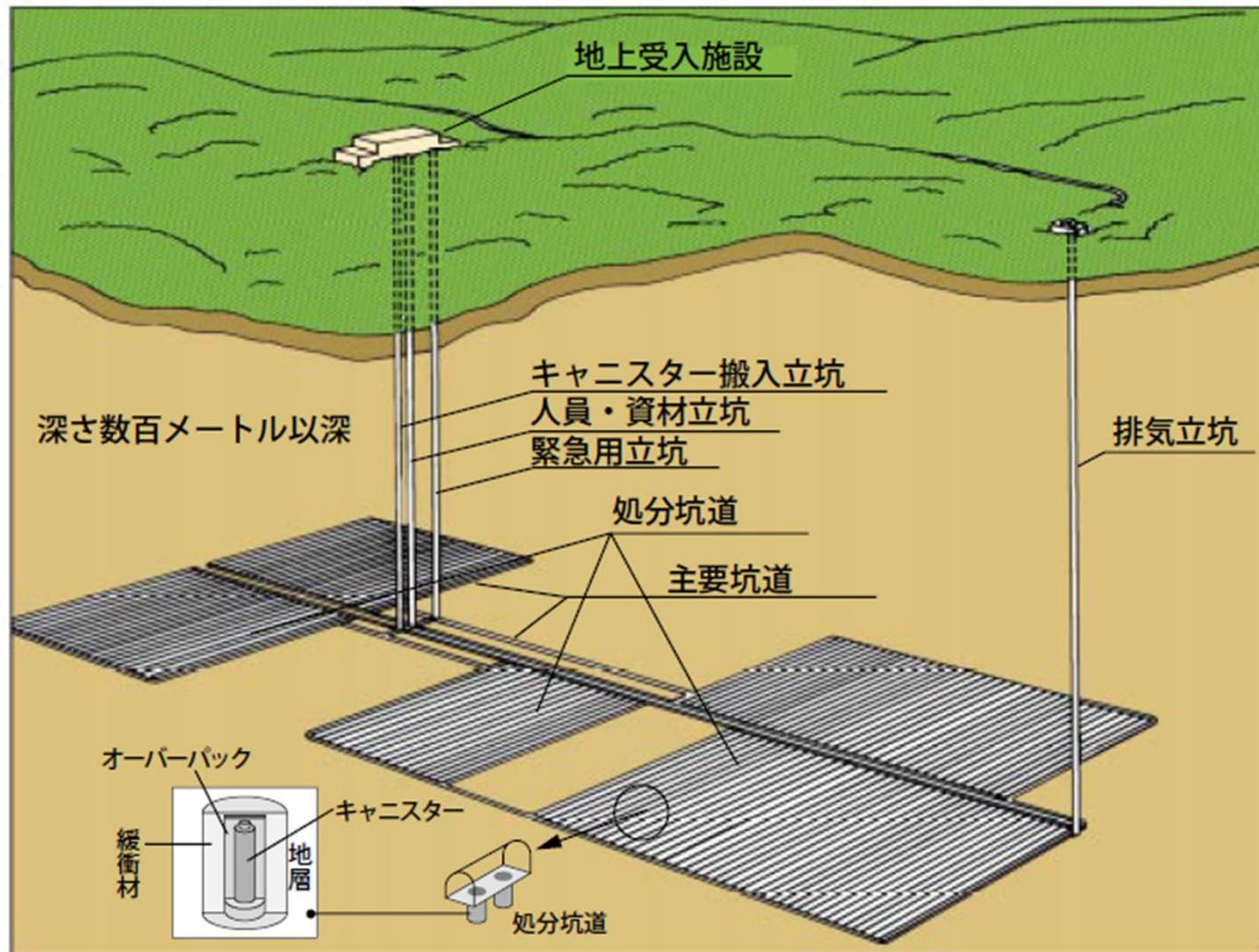
オーバーパック(鋼製)

キャニスタ(ステンレス製)

ガラス固化体

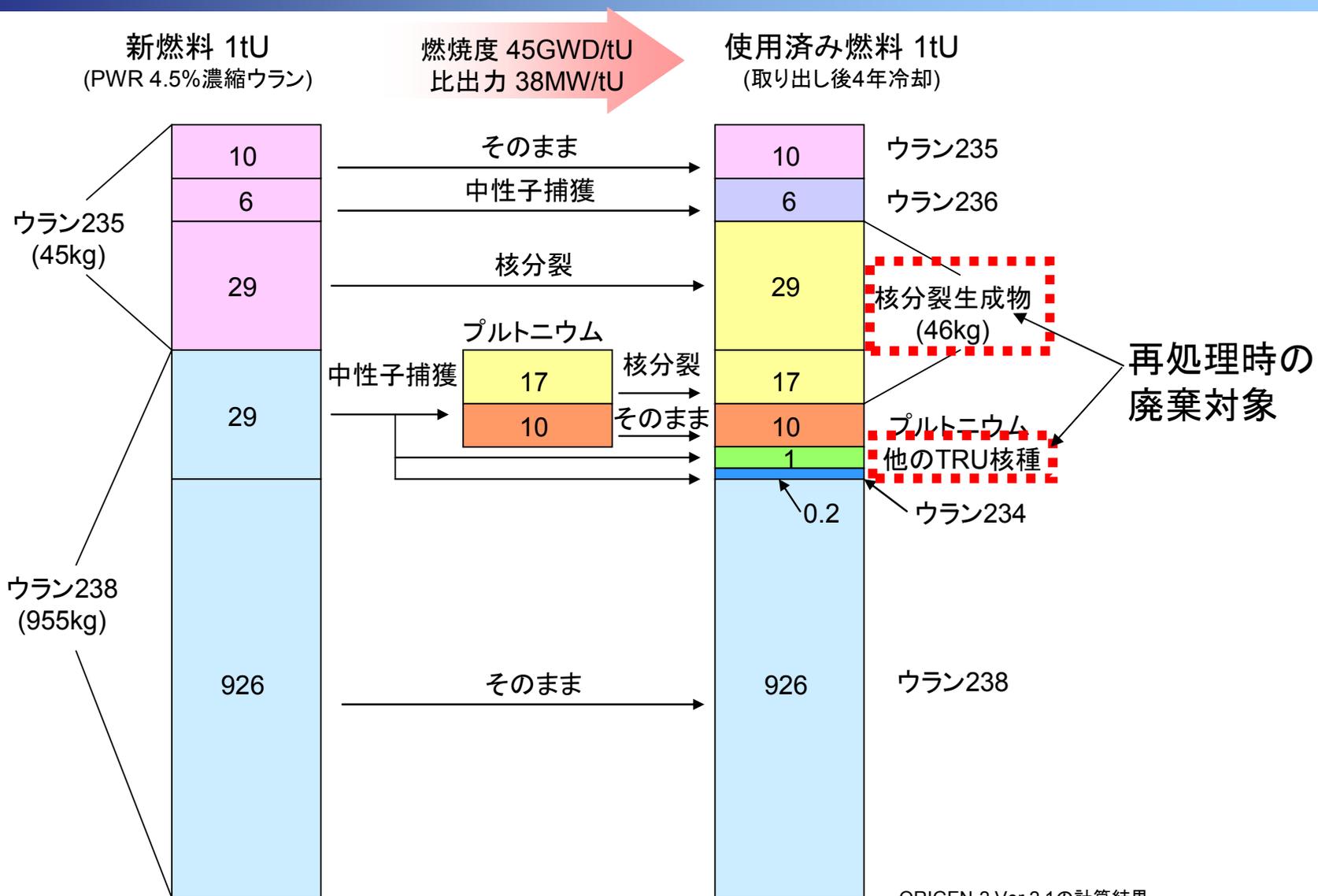
ベントナイト(粘土の一種)

地層処分場の概念



出典：資源エネルギー庁「原子力発電2002」

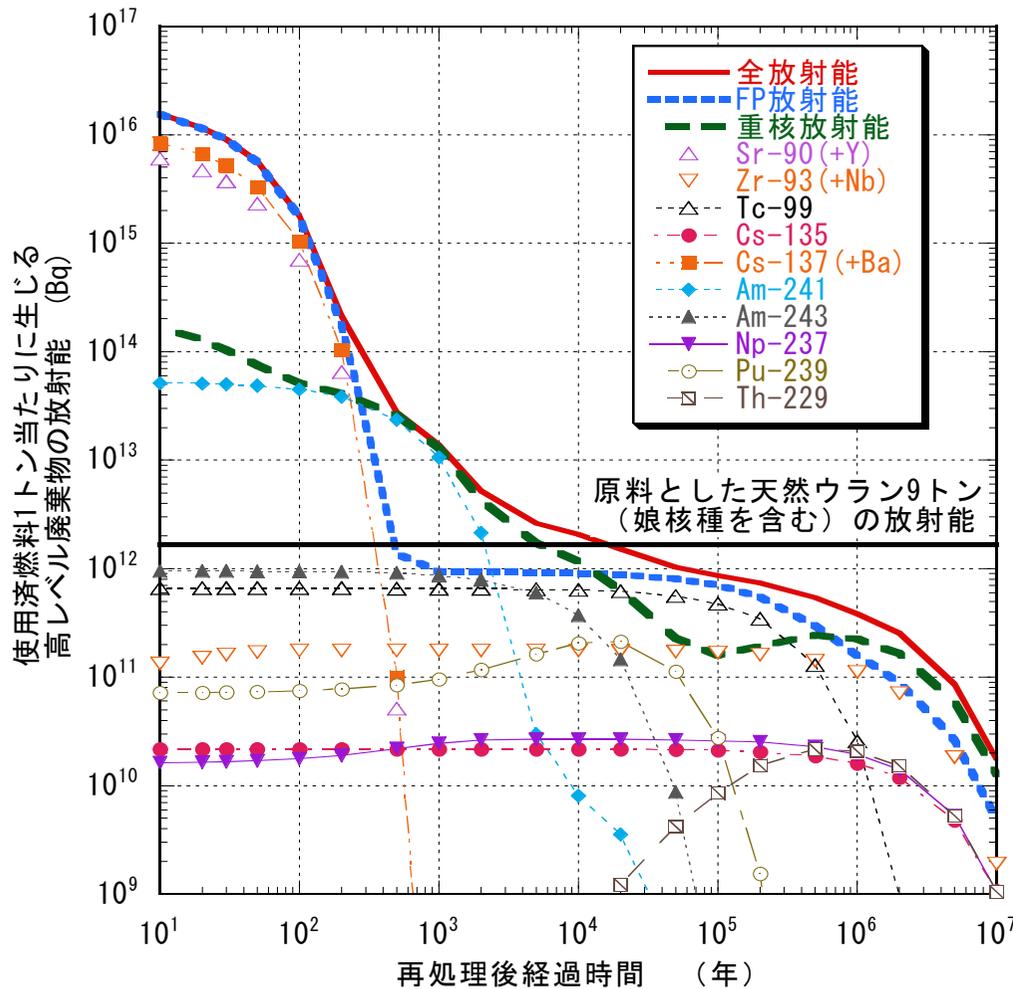
軽水炉内でのウラン燃料の転換



ORIGEN-2 Ver.2.1の計算結果。
棒グラフ中の数字の単位はkg。
(四捨五入の関係で合計があわない場合がある)

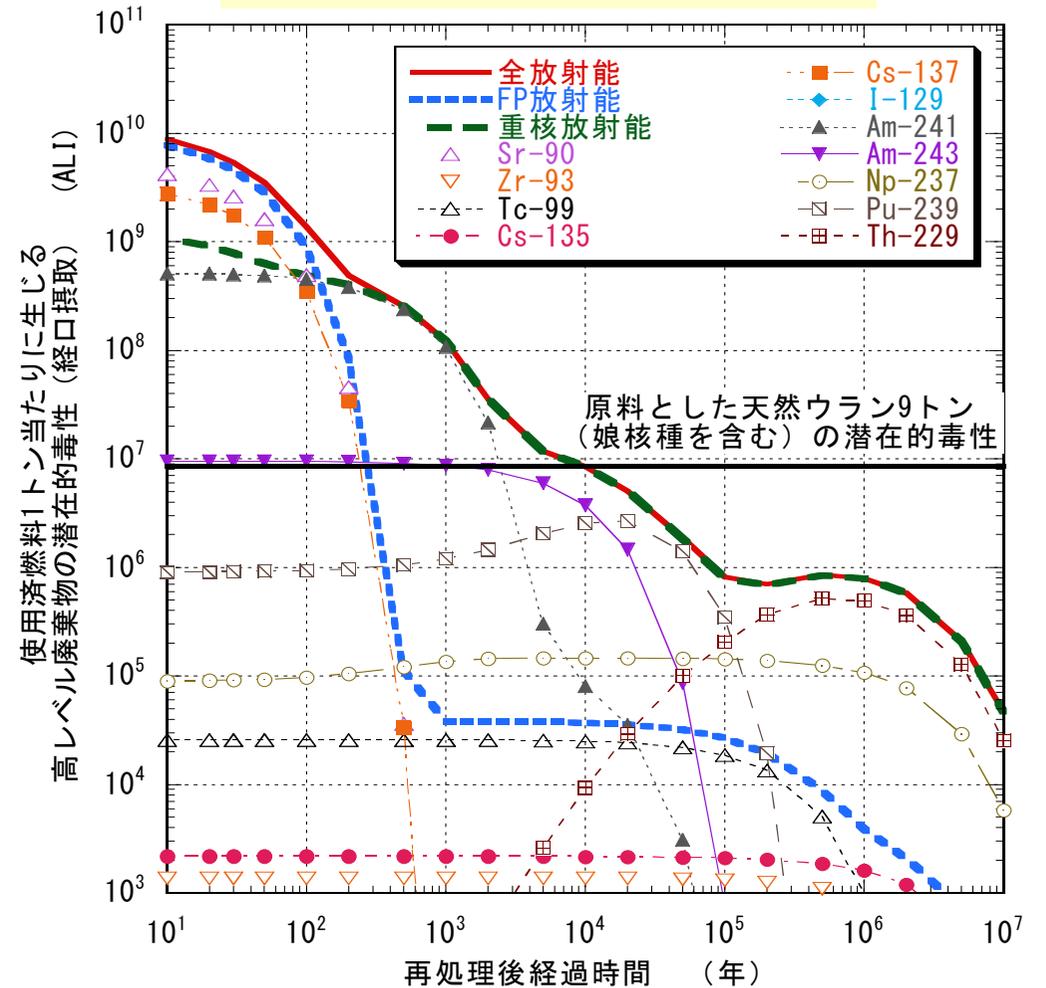
HLWの放射能及び潜在的経口摂取毒性の減衰

放射能



潜在的経口摂取毒性

含まれる核種の質量をそれぞれの年摂取限度で除した数値



我が国における地層処分の進め方

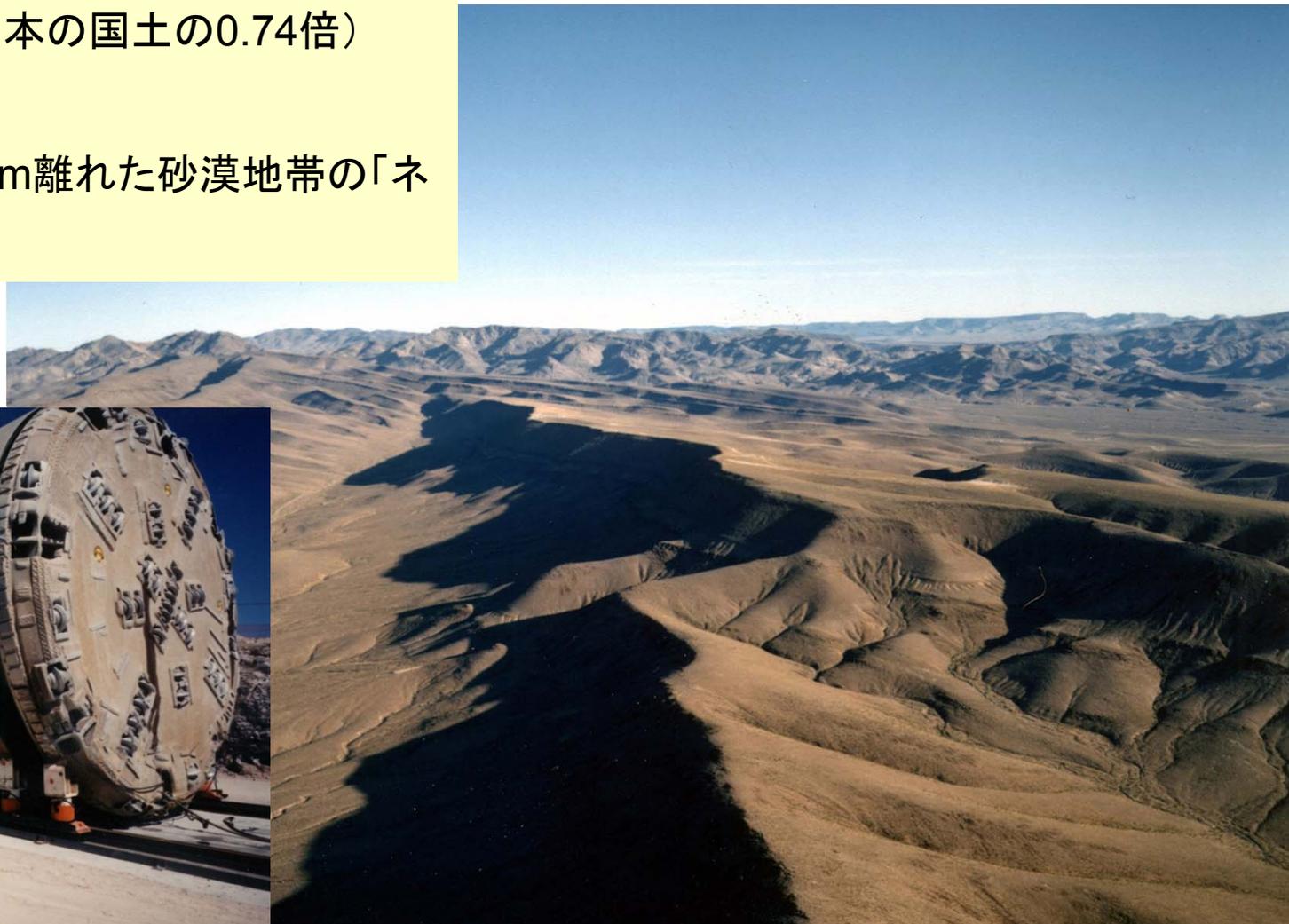
- サイクル機構(当時)の第2次取りまとめレポート(H11)
- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律制定(H12)
- 原子力環境整備機構(NUMO)の設立(H12)
- 最終処分の計画 (H20年改定)
 - ・ 候補地域を公募中
 - ・ 文献調査 → 概要調査
 - ・ 平成20年代中頃(~2015) : 精密調査地区を選定
 - ・ 平成40年前後(~2030) : 最終処分施設建設地選定
 - ・ 平成40年代後半(~2035) : 最終処分開始
 - ・ 1~2キロメートル四方の第1処分場で2020年までに生じる使用済み燃料に相当する4万本のガラス固化体を処分

米国のヤッカマウンテン処分サイト

- ネバダ州
 - 面積28万km²（日本の国土の0.74倍）
 - 人口168万人
- ラスベガスから160km離れた砂漠地帯の「ネバダ試験場」にある



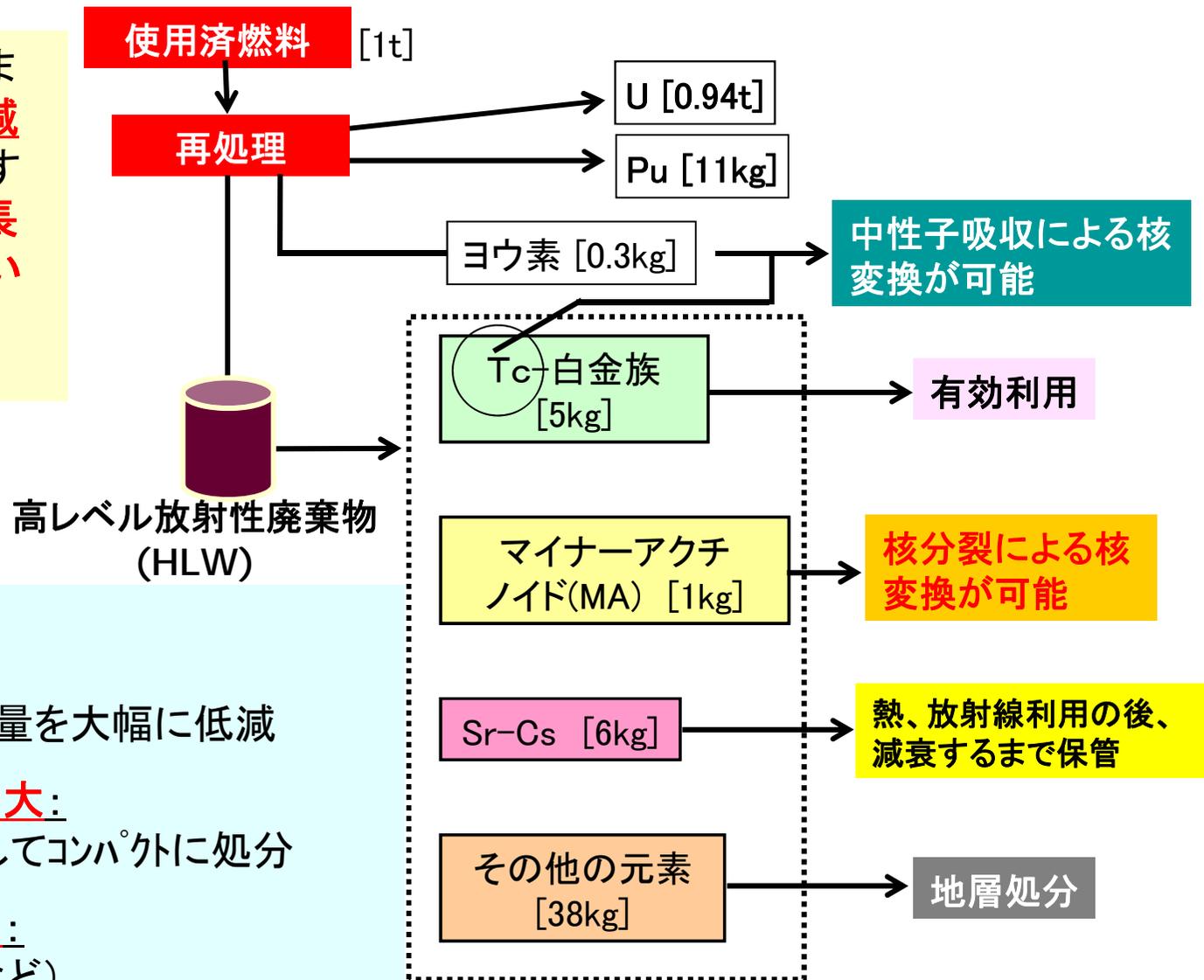
トンネル掘削機



<http://www.ocrwm.doe.gov/>より

分離変換技術 (Partitioning & Transmutation)

高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種を、その半減期や利用目的に応じて分離する（分離技術）とともに、長寿命核種を短寿命核種あるいは非放射性核種に変換する（変換技術）ための技術」



目標

- ・**長期リスクの低減:**
廃棄物の放射能毒性の総量を大幅に低減
- ・**処分場の実効処分容量の増大:**
発熱の大きい核種を除去してコンパクトに処分
- ・**放射性廃棄物の一部資源化:**
希少元素の利用 (Ru、Pdなど)

核変換処理の対象核種

■ 核変換処理対象核種選定の考え方

- PuとUはリサイクルが前提
- 短半減期核種は自然崩壊に任せる(Sr-90、Cs-137)
- 人工バリアが期待できないような長期(千年以上)に影響を持つ核種を対象とする
- 短寿命であっても、上記の核種の親核種は対象とする
- 処分場設計において長期の発熱影響の大きい核種(Am-241)も対象とする
- 同位体分離が必要な核種(Cs-135)はエネルギー収支の観点から現時点では困難



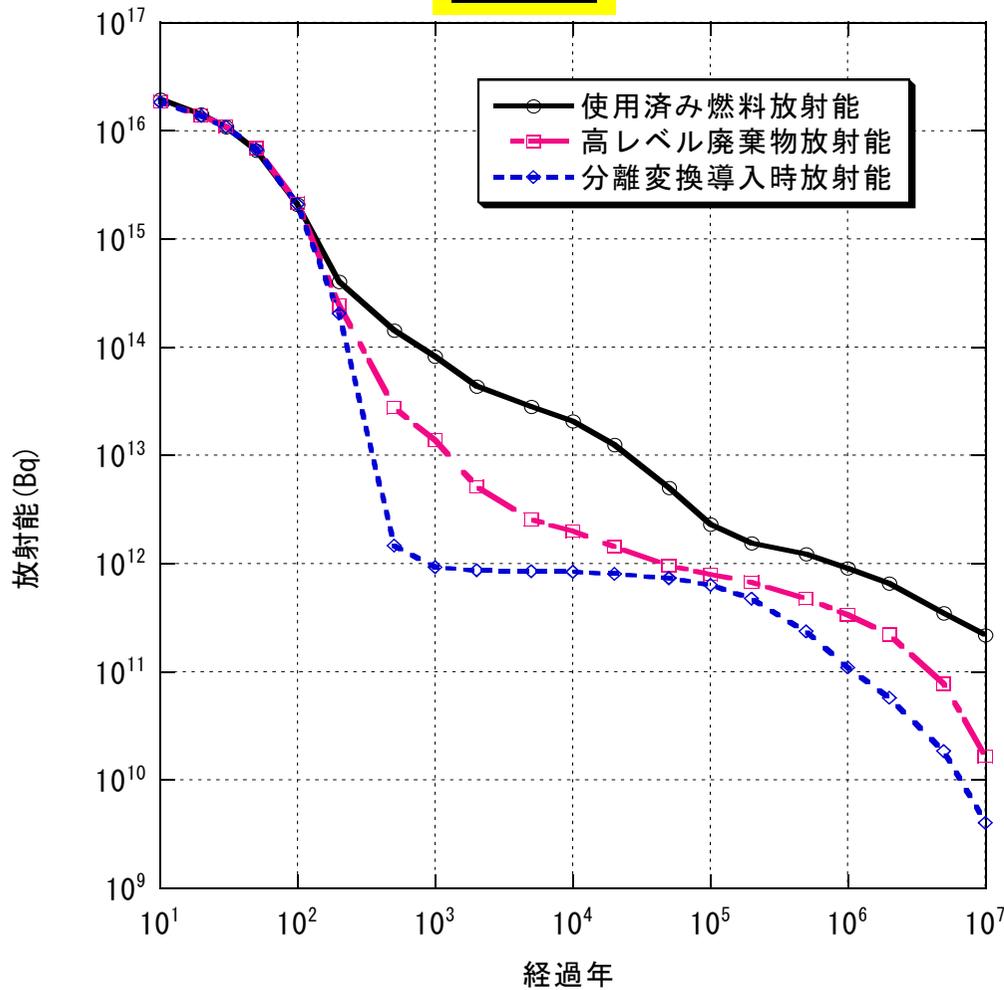
- MA核種: Np-237、Am-241、Am-243、Cm-244
- FP核種: Tc-99、I-129

半減期:

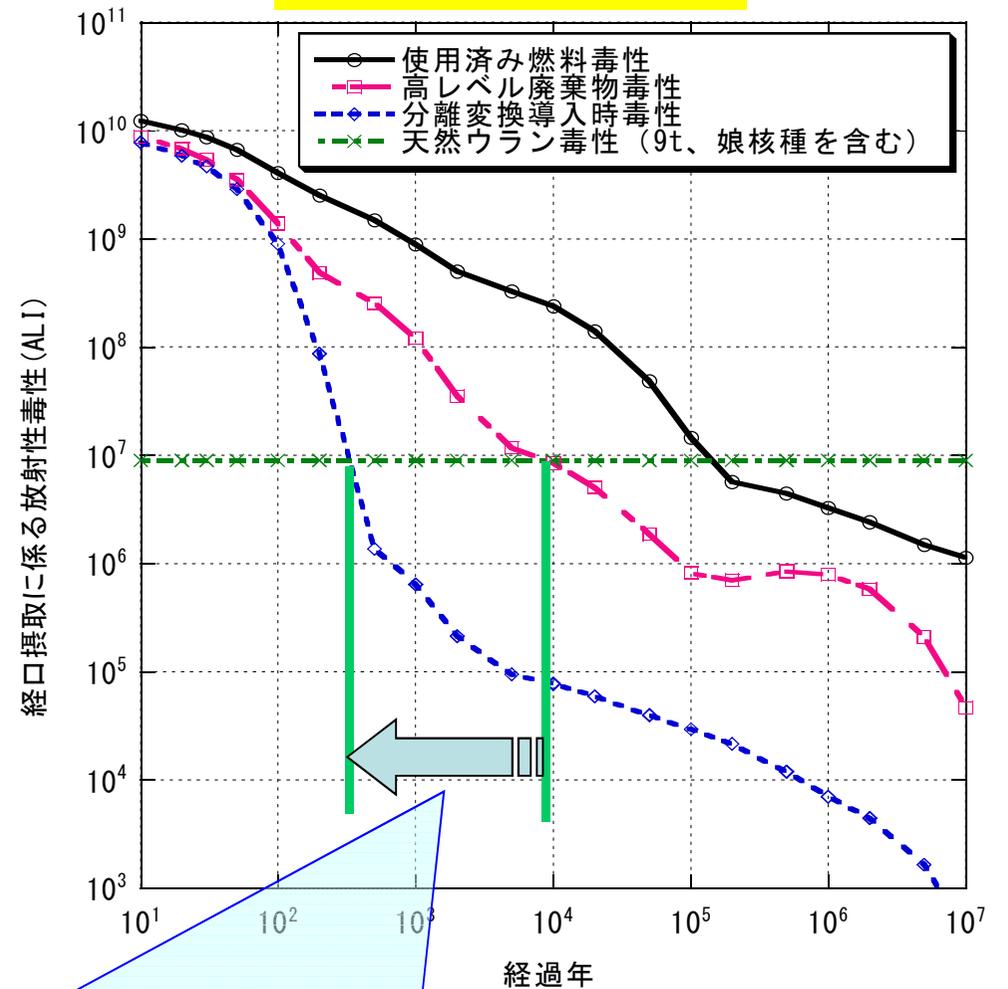
Sr-90 = 28年	U-238 = 45億年	Am-241 = 433年
Cs-137 = 30年	Np-237 = 214万年	Am-243 = 7370年
Tc-99 = 21万年	Pu-239 = 24000年	Cm-244 = 17.6年
I-129 = 1600万年	Pu-240 = 6500年	

分離変換技術の適用による放射能及び潜在的経口摂取毒性の低減効果

放射能

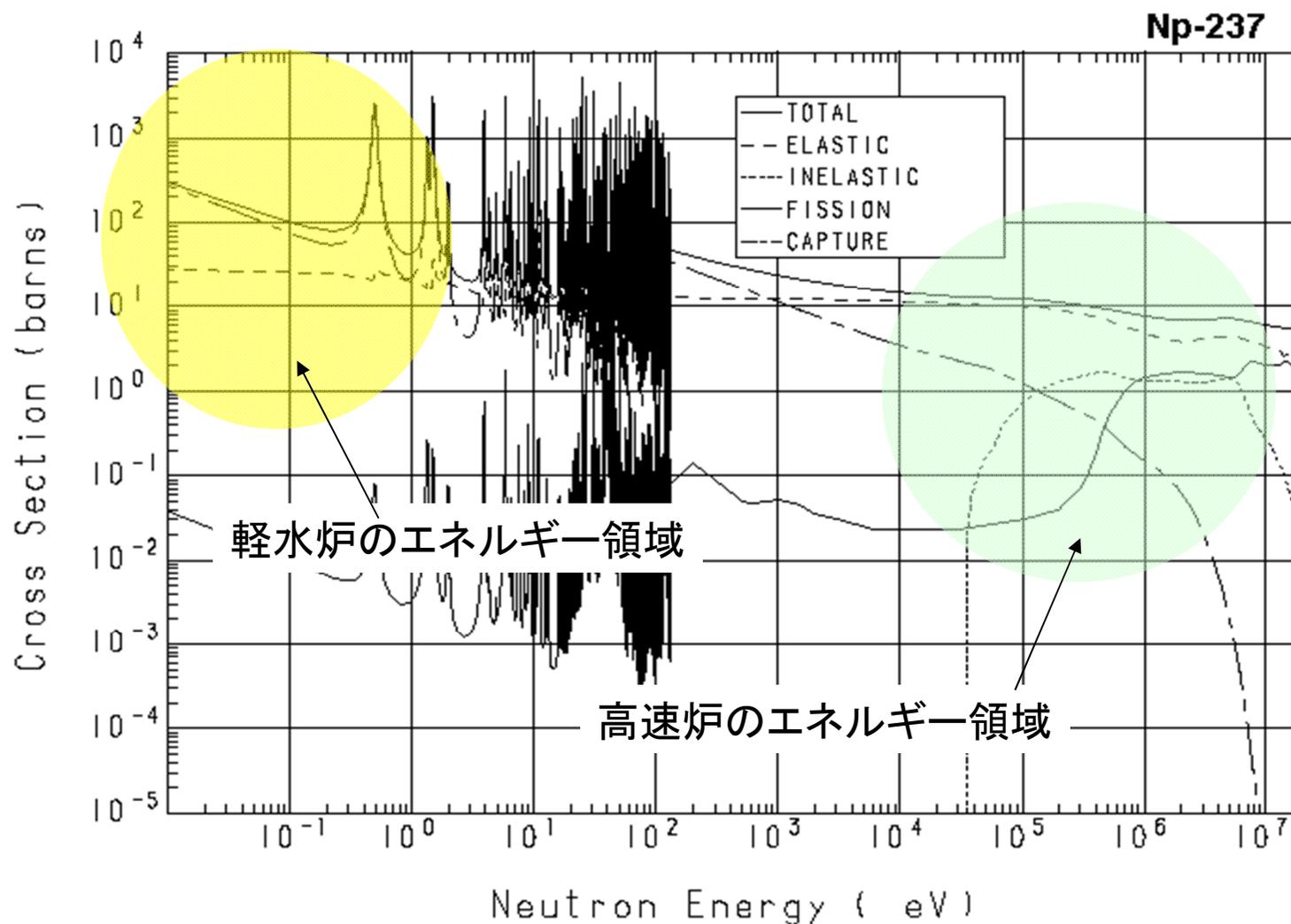


潜在的経口摂取毒性



■ 99.5%のMAを核変換すれば、原料とした天然ウランのレベルまで毒性が減衰するのに要する時間を 1万年 → 数百年 に短縮

マイナーアクチノイド(MA)の反応断面積:Np-237



◆高速中性子による核分裂の連鎖反応を利用するのが有利。



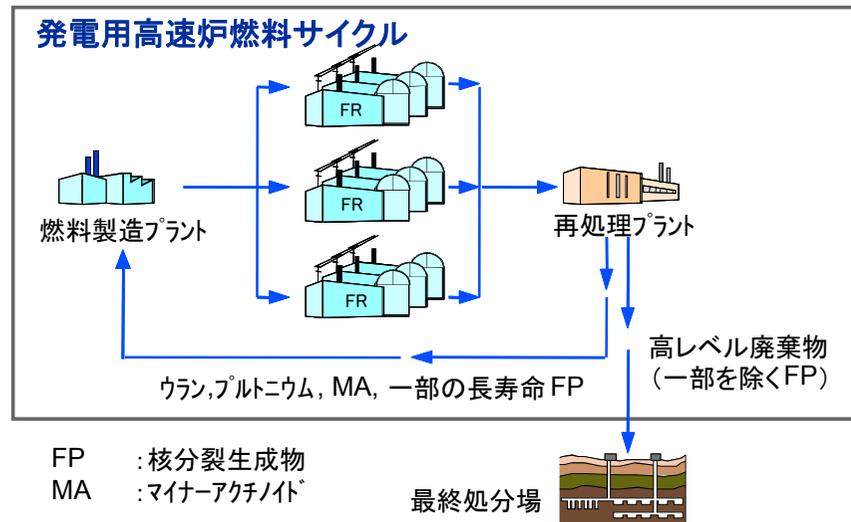
核変換の戦略：高速炉サイクル型と専用サイクル型

- 99.5%ものMAを核変換するには、
照射→処理→燃料製造→照射→.....
を繰り返す**核燃料サイクル**が必要となる。

- 将来の高速炉を中心とした発電用核燃料サイクルにMAを薄く広く入れる方法：
→ 高速炉サイクル利用型
- 核変換専用の核燃料サイクルを発電用サイクルとは別に設ける方法：
→ 専用サイクル型（階層型核燃料サイクル）

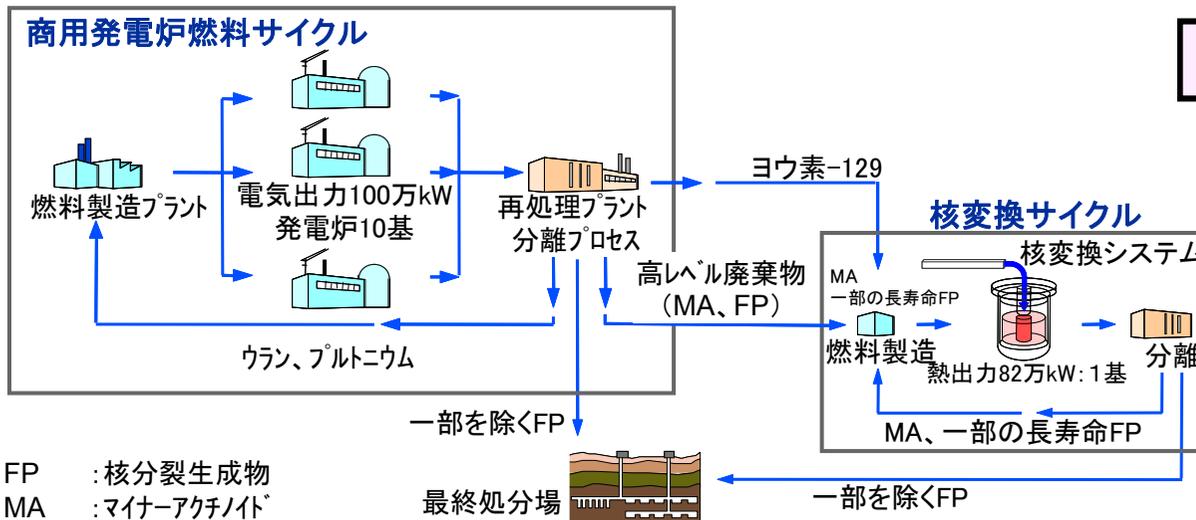
☆「日本原子力研究開発機構」において、両方の戦略の研究開発を実施中

高速炉サイクル型と核変換専用サイクル型



高速炉サイクル利用型

- ・発電炉を用いた分離変換技術。
- ・次世代再処理プラントでウランやプルトニウムと共にマイナーアクチノイドもリサイクル。
- ・核変換には発電炉(高速炉)を用いる。

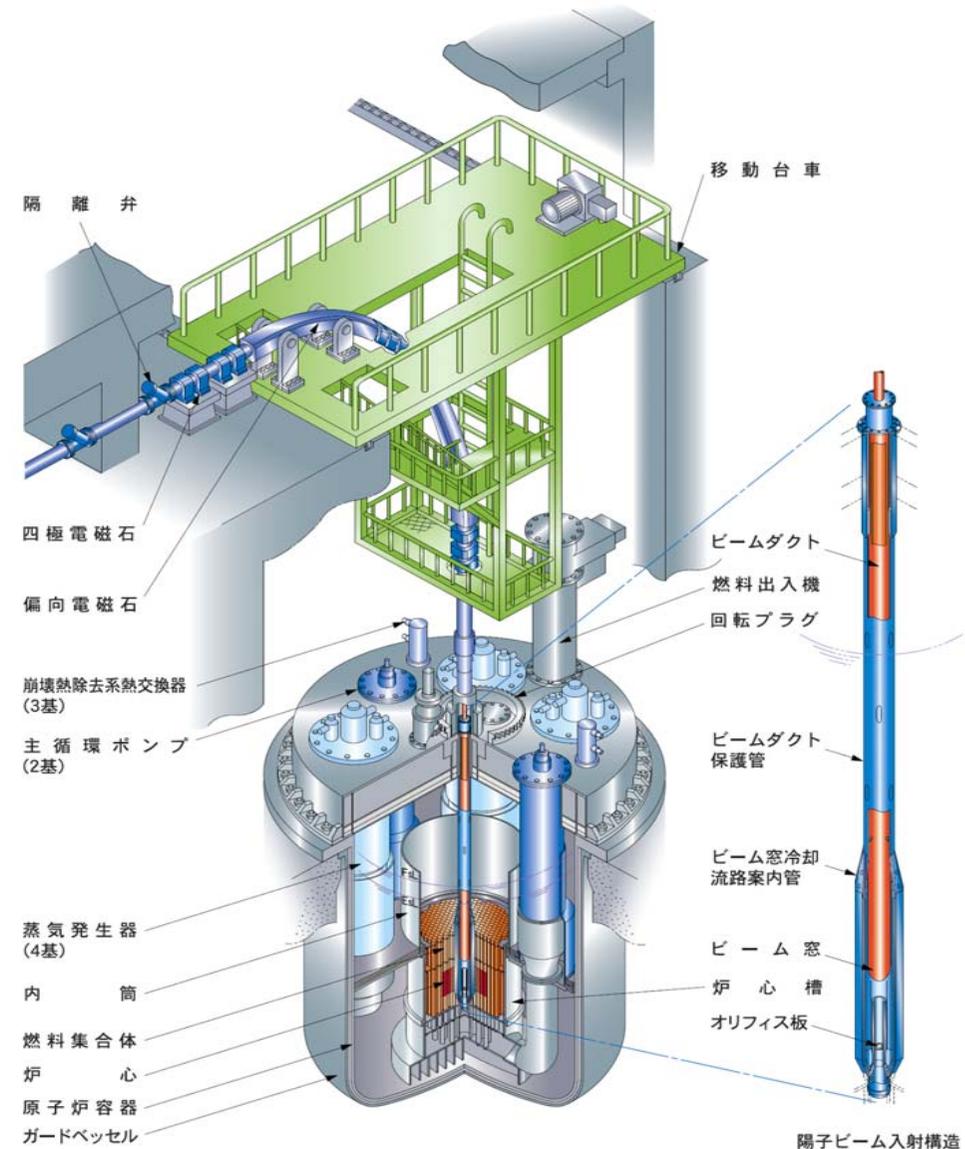


専用サイクル型(階層型)

- ・発電用サイクルに分離プロセスと核変換サイクルを付設。
- ・核変換には専用システム(加速器駆動炉: ADS)を用いる。
- ・コンパクトな核変換サイクルにマイナーアクチノイドを閉じ込める。

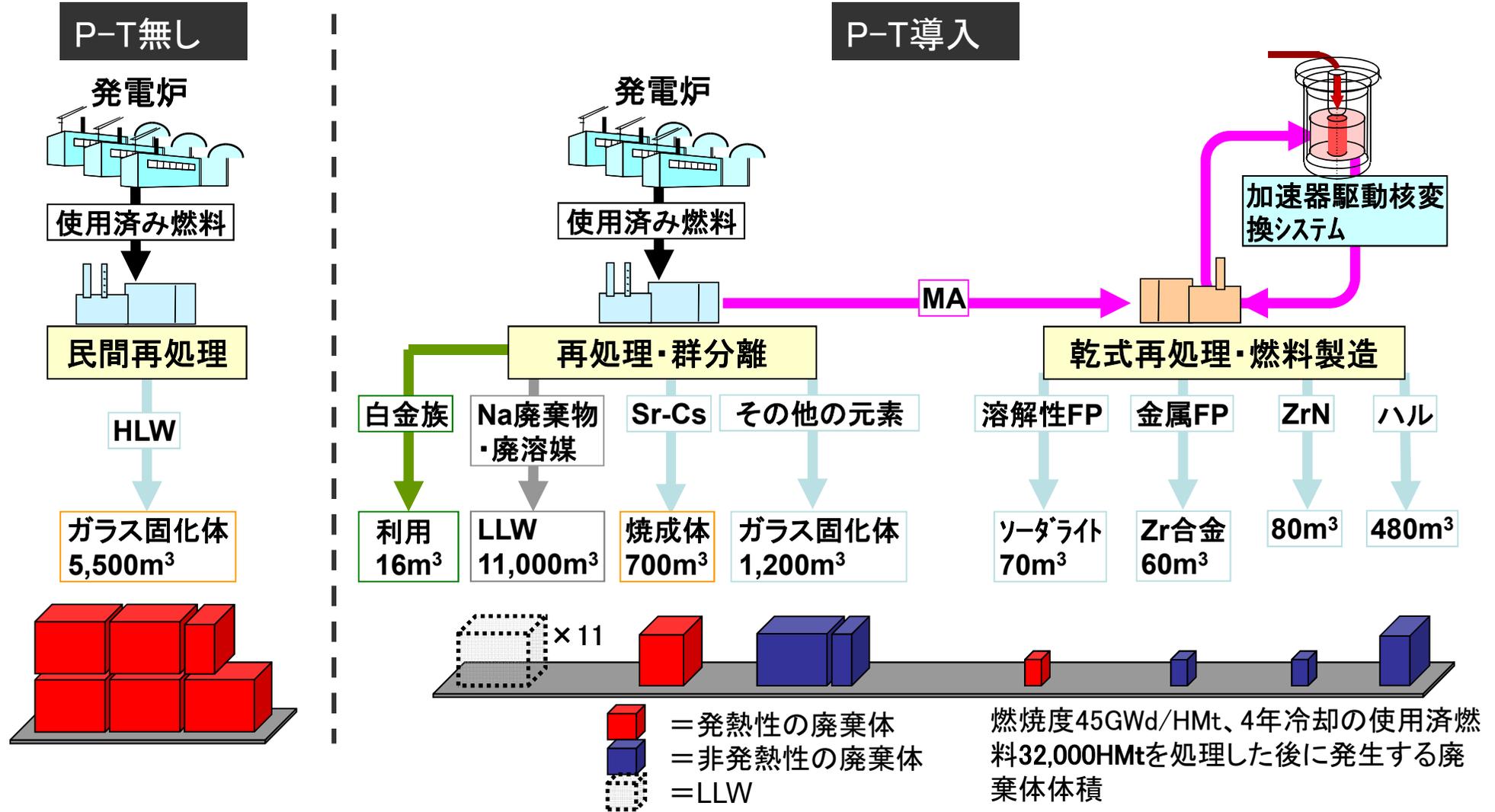
ADSの概略仕様

- 陽子ビーム : 1.5GeV
- 核破砕ターゲット : Pb-Bi
- 炉心冷却材 : Pb-Bi
- 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)窒化物 + ZrN
 初期組成:
 領域-1: Pu/HM=30.0%
 領域-2: Pu/HM=48.5%
- 核変換率 :
 10%MA / 年
- 燃料交換 ; 600EFPD, 1 バッチ



PT導入効果の検討: 廃棄物の減容化

ADSサイクルで新たに生じる廃棄物

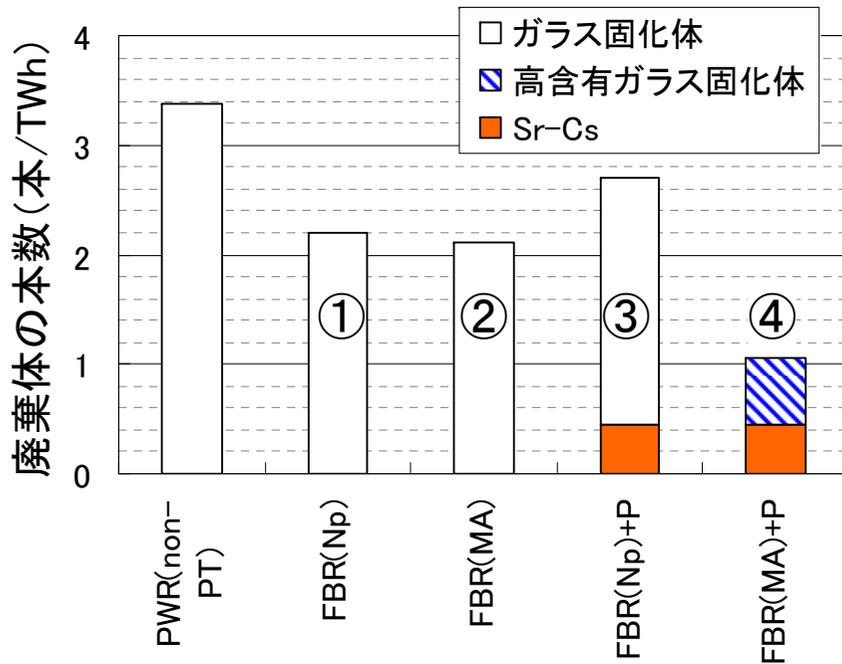


ADSサイクルで生じる発熱性の廃棄物はごく少量

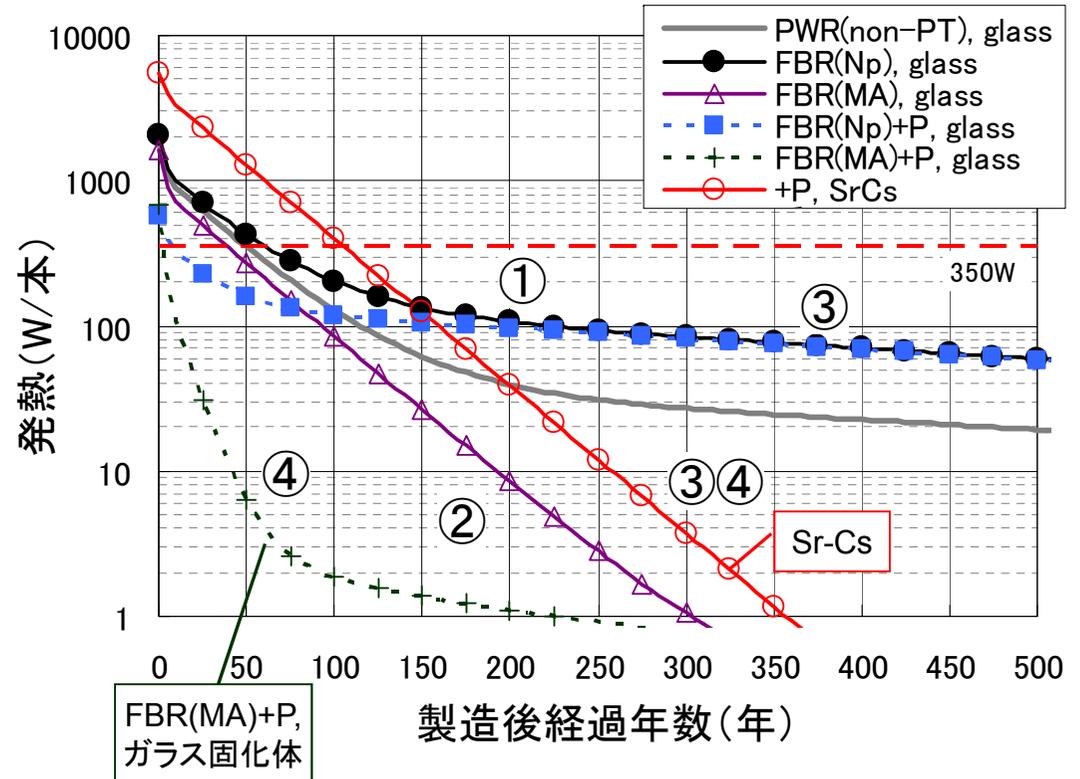
廃棄体貯蔵期間と処分場の面積の関係について — ケーススタディ —

- ① PT導入無し (FBR(Np))
→ 従来ガラス固化体
- ② MAリサイクルのみ (FBR(MA) or FBR(Np)+ADS)
→ 従来ガラス固化体
- ③ FP分離のみ (FBR(Np)+P)
→ Sr-Cs焼成体+MAを含むガラス固化体
- 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

廃棄体貯蔵期間と処分場の面積の関係について — 発生する廃棄物量 —



廃棄体発生量

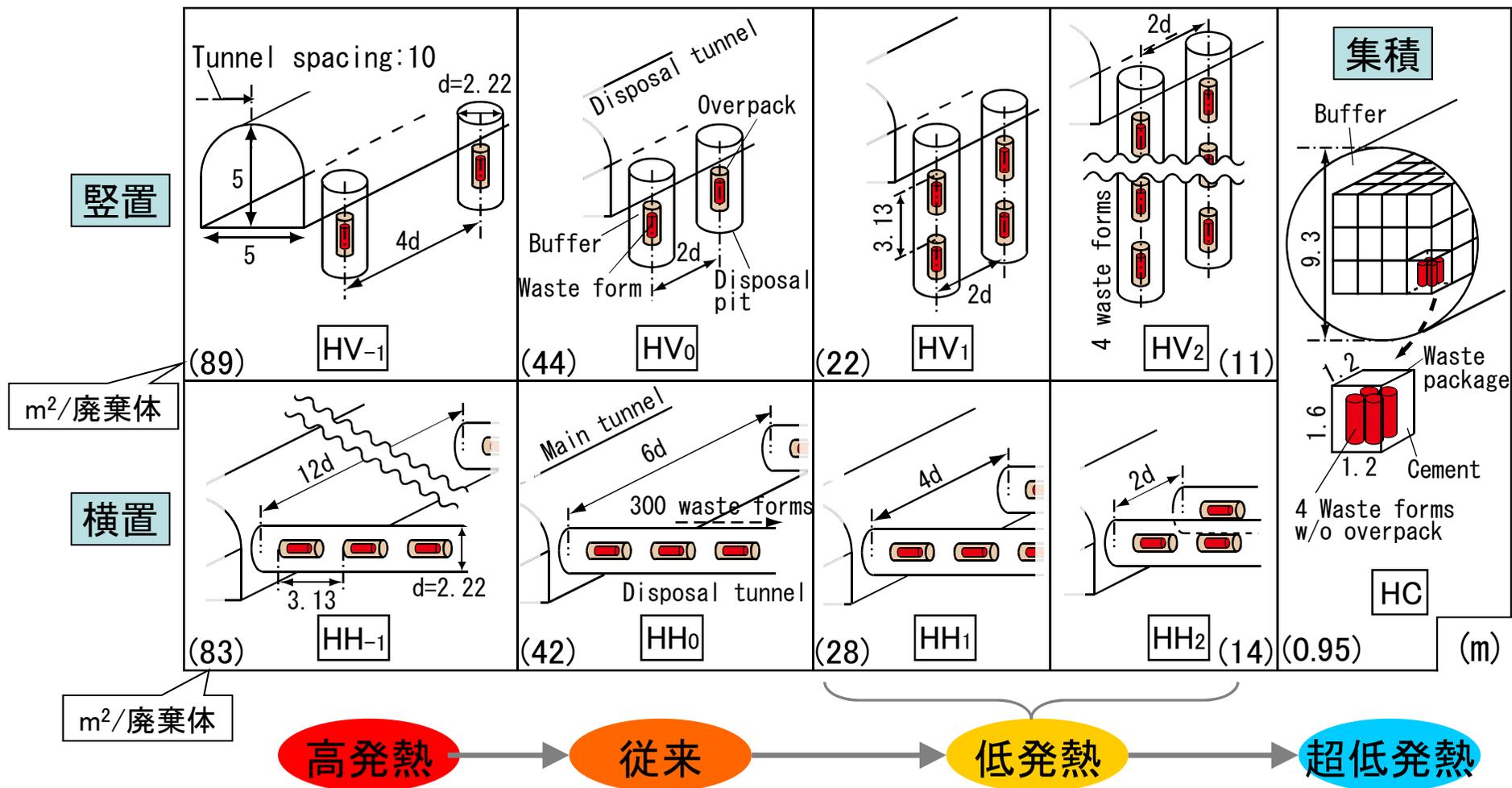


発熱量

- 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

- ① PT導入無し (FBR(Np))
- ② MAリサイクルのみ (FBR(MA) or FBR(Np)+ADS)
- ③ FP分離のみ (FBR(Np)+P)
- ④ MAリサイクル+FP分離 (FBR(MA)+P or FBR(Np)+ADS+P)

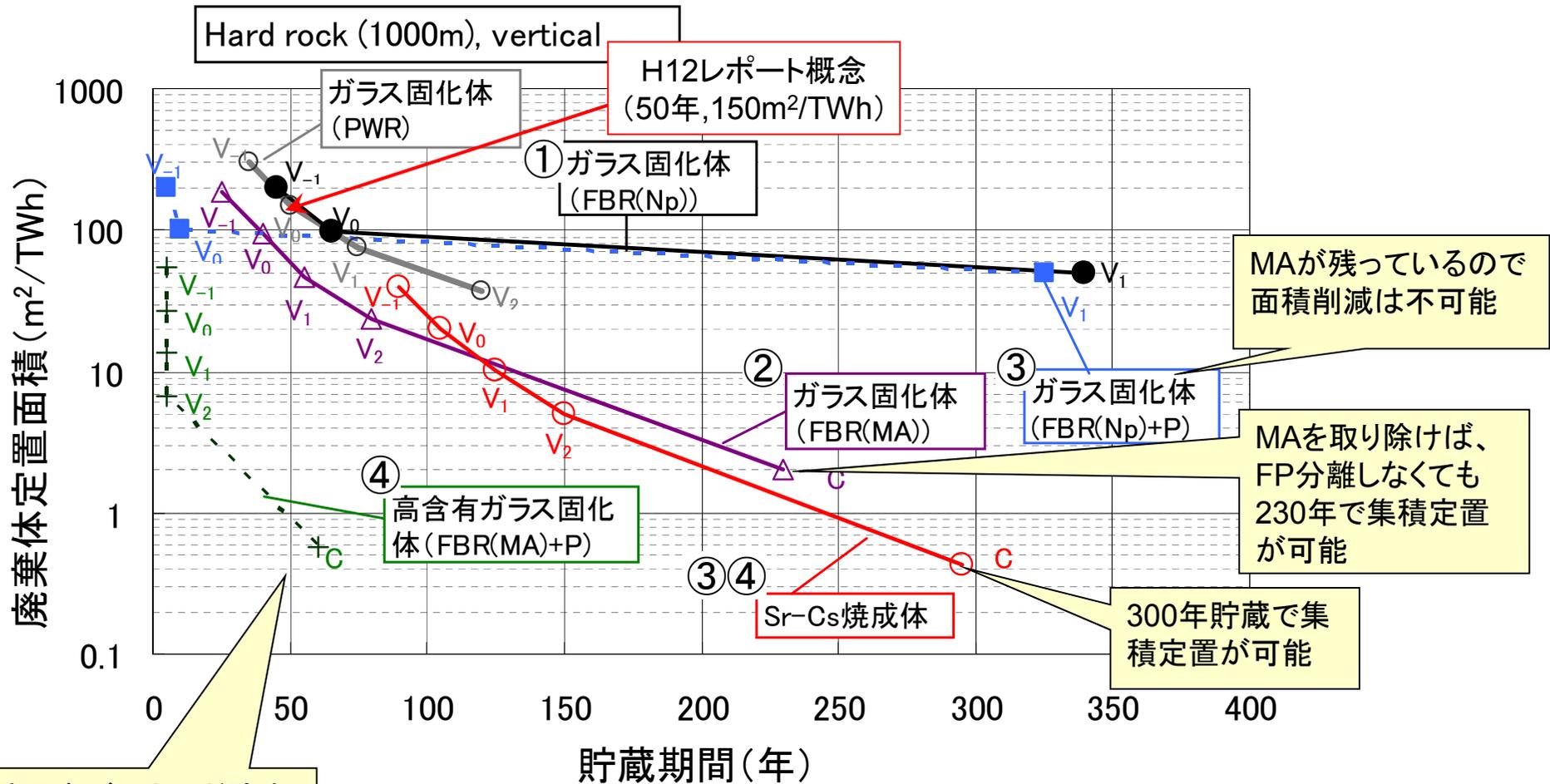
廃棄体貯蔵期間と処分場の面積の関係について — 処分法概念(硬岩系) —



温度解析では、地下1,000mを仮定

廃棄体貯蔵期間と処分場の面積の関係について

— 貯蔵期間と処分場規模の関係(硬岩・縦置) —

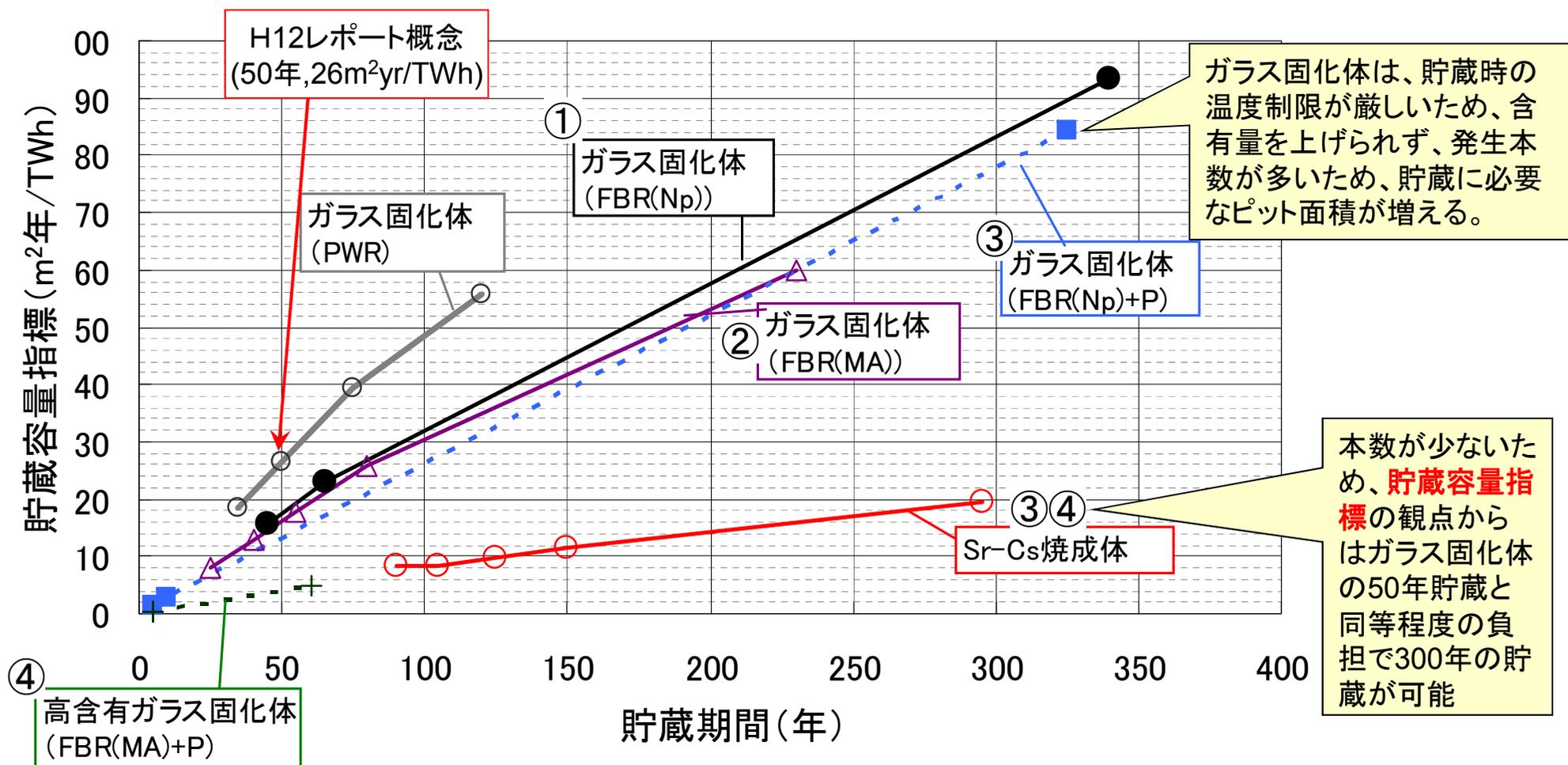


- ① PT導入無し (FBR(Np)) → 従来ガラス固化体
- ② MAリサイクルのみ (FBR(MA) or FBR(Np)+ADS) → 従来ガラス固化体
- ③ FP分離のみ (FBR(Np)+P) → Sr-Cs焼成体+MAを含むガラス固化体
- ④ MAリサイクル+FP分離 (FBR(MA)+P or FBR(Np)+ADS+P) → Sr-Cs焼成体+高含有ガラス固化体

廃棄体貯蔵期間と処分場の面積の関係について

— 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。(m²年)



分離変換技術の導入による処分概念の合理化検討

— 長期貯蔵との組み合わせ



45GWd/tの使用済み燃料32,000tHMで規格化

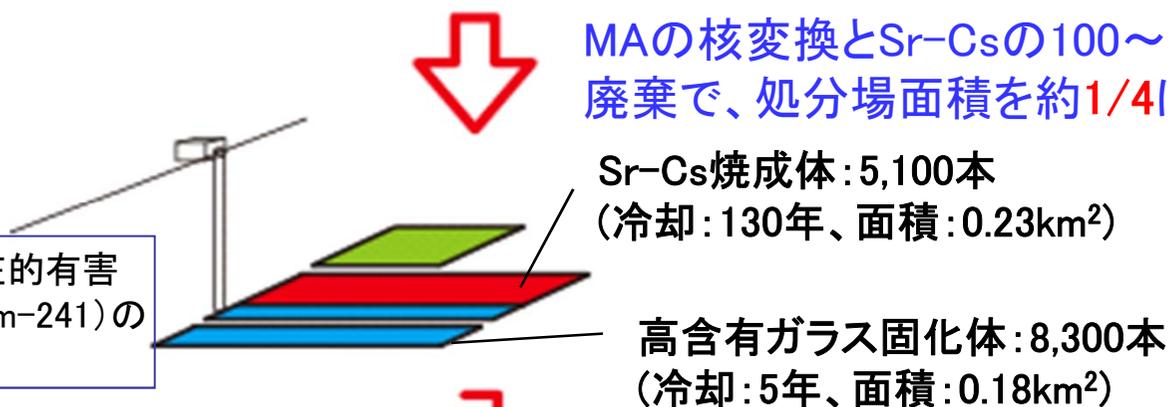
従来の地層処分



分離変換導入

MAの核変換とSr-Csの100~130年後の分別
廃棄で、処分場面積を約1/4に

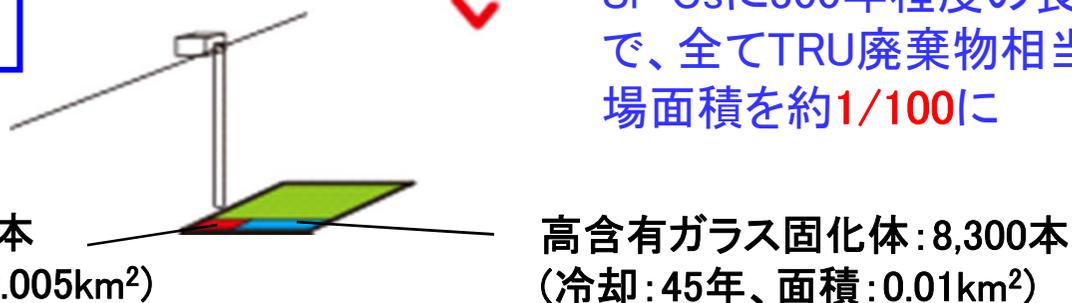
MA核変換は超長期の潜在的有害
度削減と長期発熱核種(Am-241)の
除去に有効



さらに長期貯蔵

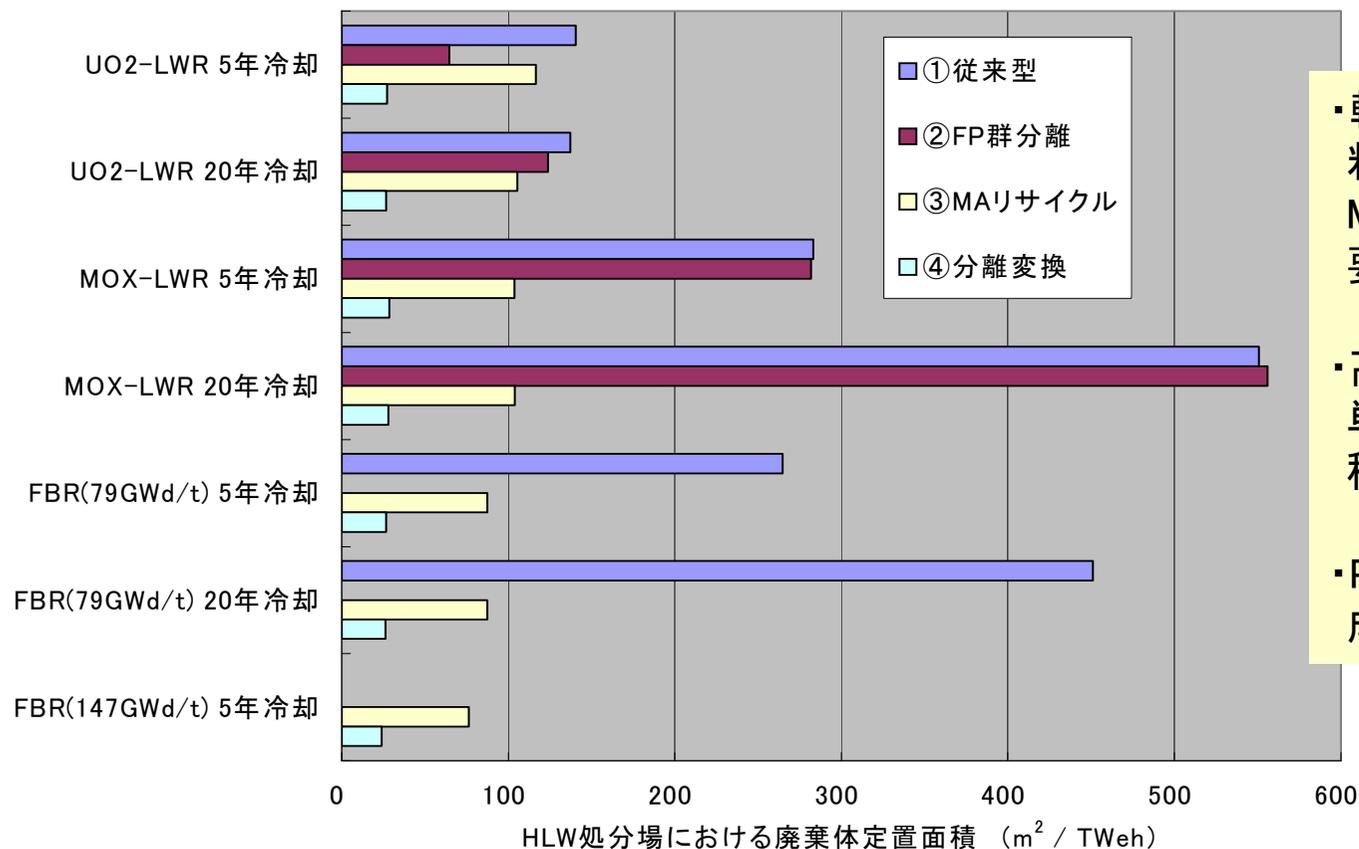
Sr-Csに300年程度の長期貯蔵を適用すること
で、全てTRU廃棄物相当の廃棄体とでき、処分
場面積を約1/100に

Sr-Cs焼成体: 5,100本
(冷却320年、面積: 0.005km²)



分離変換技術の導入による処分概念の合理化検討

— 燃料種類・再処理前冷却期間の影響



・軽水炉MOX使用済燃料はUO₂燃料に比べて発生量は少ないが、MA蓄積が顕著であり、注意が必要。

・高速炉は熱効率が高いことから単位発電量あたりのHLW定置面積では有利。

・Pu-239核分裂によるSr-90の生成量はU-235の概ね半分。

- UO₂燃料では、**Am-241の蓄積前に再処理**できれば、MAを廃棄してもFP分離(Sr・Csの冷却後廃棄)により面積半減が可能。冷却期間が10年を超えると、FP分離のみでは効果は小さい。
- **MA回収**により、燃料依存性及び冷却期間依存性は低減し、**特にMOXで面積節減効果が大きい**。
- **MA回収とFP分離**を組み合わせることで、**大幅な面積低減**が可能になる。

多様な炉型構成に対する柔軟性を有するADS

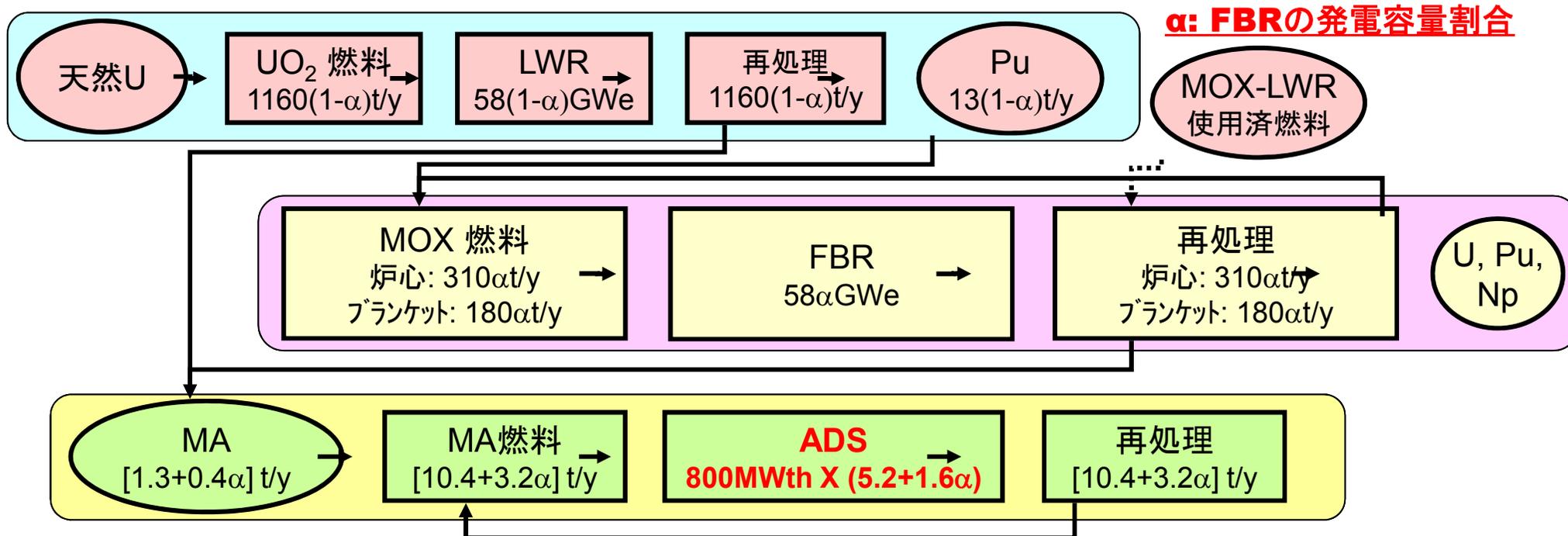


表 FBRの導入割合と燃料サイクルの構成規模の関係

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。

階層型分離変換技術のコスト 予備検討

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	1,500	2,400 ^{a)}	120 ^{b)}	4,020
ADS 加速器部分	760	1,220 ^{a)}	60 ^{b)}	2,040
計	2,260	3,620	180	6,060

a) 建設コストの4%が毎年かかるとした。 b) 建設コストの8%とした。

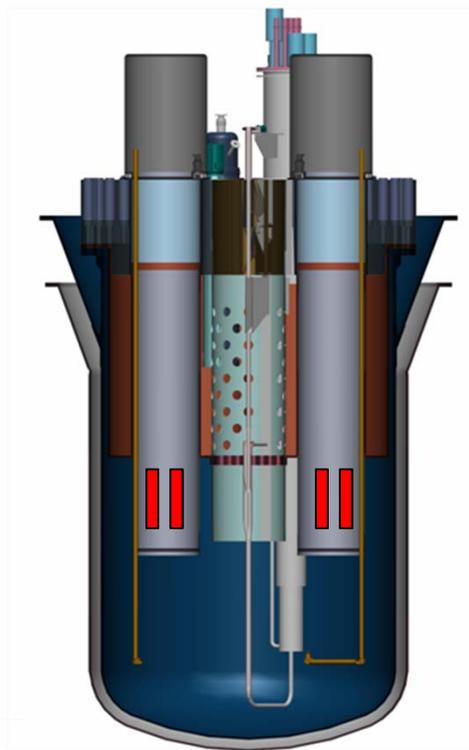
ADSの燃料サイクルコスト (単位:億円)

項目	コスト
ADS 4基	24,500
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 %)
- 約**2-3 %**の発電コストの上昇
- 消費者価格(約20円/kWh)では、0.6%の上昇
→ 従量料金月1万円で、原子力発電の割合が1/3とすると、20円の増加。
- **ADSのコスト削減が必要!**

分離変換に関する世界の状況

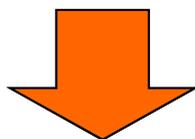
- 米国
 - オバマ政権は、ヤッカマウンテン処分場見直しを表明。
 - ブルー・リボン・コミッションを設けて、今後の政策を検討中。
- フランス
 - 2006年の「廃棄物管理研究法」に基づき、ADSとFBRを並行して研究
 - 但し、ADSは下記の欧州の枠組みが中心。
- ベルギー
 - 老朽化した照射炉(BR2)の代替として、50MW程度の出力を持つ照射用ADSであるMYRRHAの2016年着工を目指して開発・設計を実施中
 - 核変換実験、鉛合金高速炉開発、燃料・材料照射、RI製造等が目的。
- 欧州
 - 様々な原子力政策の国が集まるが、廃棄物処分の負担軽減のニーズは一致。このため、分離変換技術の研究開発を精力的に展開
 - 欧州枠組みプログラム(FP6、FP7等)においてEUROPART、EUROTRANS、ADSの中央設計チーム(CDT)等の多様なプロジェクトを展開し、研究者・技術者の教育・育成にも活用。
- 中国： DT中性子源と未臨界体系を組み合わせたADS模擬実験装置VENUSを設置
- インド： トリウム資源の利用を狙ったADSの研究を実施中
- OECD/NEA、IAEA： 分離変換技術に関する情報交換会議やベンチマーク活動を主催



ベルギー原子力研究センターで建設が計画されてる照射用ADS:MYRRHA

まとめ

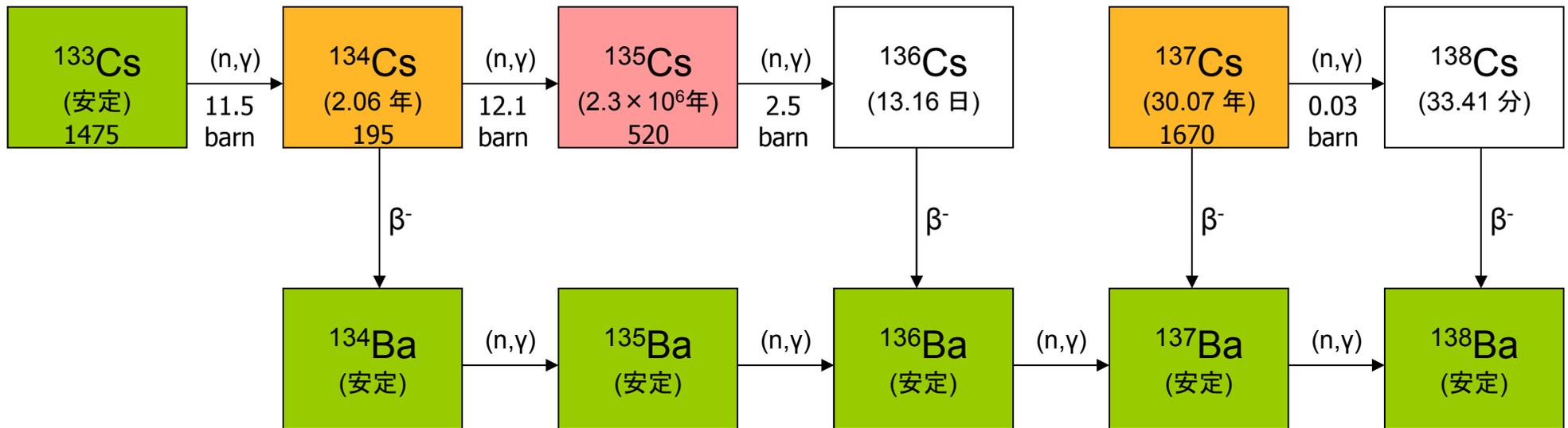
- 分離変換技術は、**高レベル廃棄物処分の負担を軽減**することで、原子力の持続的利用への貢献を目指す。
- 世界中で、**今世紀前半に実用化**の目途をつけるためのR&Dが行われている。
- **ADS**を用いて集中的に核変換する方法と、**FBR**に薄く添加する方法に大別される。
- 核変換技術は、人類共通の課題への挑戦であり、**国際協力**を活用して研究開発が進められている。



◆ H23.3.11以降、我が国における原子力利用は大きな岐路に

- どのような選択がなされようとも、「**放射性廃棄物の処理処分**」は、我々が責任を持って、長期にわたって着実に遂行しなければならない。
- ADSは発電用サイクルの状況に左右されずに着実に廃棄物処分に貢献できる可能性を有する。➡ **着実な研究開発の積み重ねが必要**。

Csの核変換



燃料1トン中の生成量
(PWR4.5%濃縮ウラン燃料、燃焼度45GWd/t)

- Cs135が中性子を吸収するよりも早く、Cs133からCs135が生成される。
- Cs133もBa134 or Ba136に向かって核変換することになる。
- そのためには、中性子が1 or 3個必要。(Cs135は1個)
- Cs135のみの核変換に比べて、軽水炉からのCsでは4~10倍、高速炉からのCsでは2~4倍の中性子個数が必要。