

加速器駆動システムによる核変換技術



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

原子力発電利用に伴う課題

■ 安全対策の向上

- 今後も原子力発電を利用していくならば、必要不可欠な課題。
- 福島原発事故を踏まえた安全対策の向上や事故対策。

■ 使用済み核燃料の処理処分方策

- 今後も原子力発電を利用していく場合も、段階的あるいは即時廃止しても共通の課題。
- 使用済み燃料の処分は原発利用国の共通の課題。
- 地層処分実現の目途が立っているのはフィンランド・スウェーデンのみ。我が国では候補地も決まっていない。
- 福島原発事故でサイト内貯蔵の使用済み燃料のリスクが顕在化。

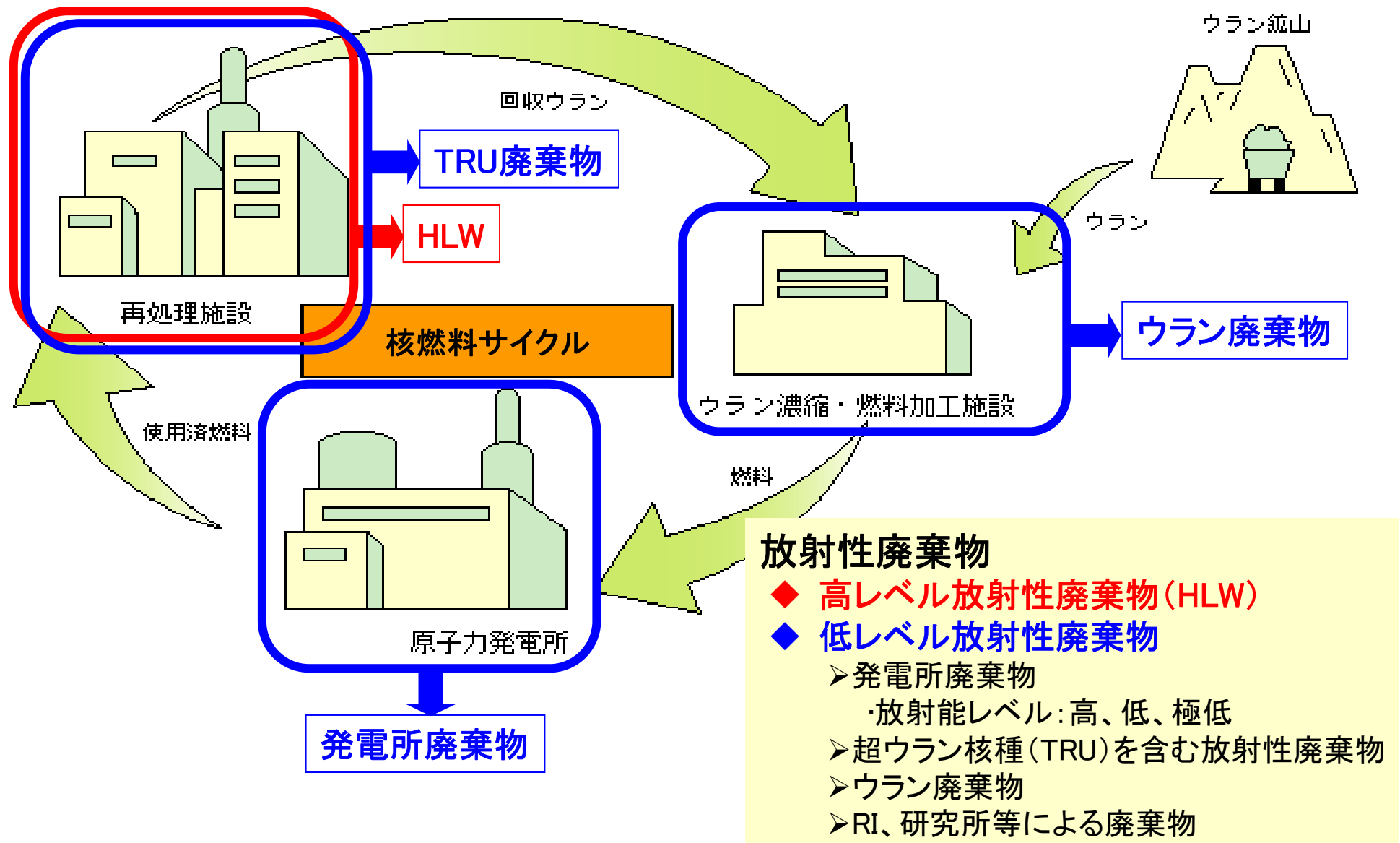
原発における使用済み燃料貯蔵状況

(2011年9月末現在)

電力会社名	発電所名	1炉心(tU)	1取替分(tU)	管理容量(tU)	貯蔵量(tU)	貯蔵割合(%)
北海道電力	泊	170	50	1,000	380	38
東北電力	女川	260	60	790	420	53
	東通	130	30	440	100	23
東京電力	福島第一	580	140	2,100	1,960	93
	福島第二	520	120	1,360	1,120	82
	柏崎刈羽	960	230	2,910	2,300	79
中部電力	浜岡	410	100	1,740	1,140	66
北陸電力	志賀	210	50	690	150	22
関西電力	美浜	160	50	680	390	57
	高浜	290	100	1,730	1,180	68
	大飯	360	110	2,020	1,400	69
中国電力	島根	170	40	600	390	65
四国電力	伊方	170	50	940	590	63
九州電力	玄海	270	90	1,070	830	78
	川内	140	50	1,290	870	67
日本原子力発電	敦賀	140	40	860	580	67
	東海第二	130	30	440	370	84
	合計	5,070	1,340	20,630	14,200	69

原子力委員会 原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会
第8回資料より(平成24年2月23日)

原子力利用に伴う放射性廃棄物の分類





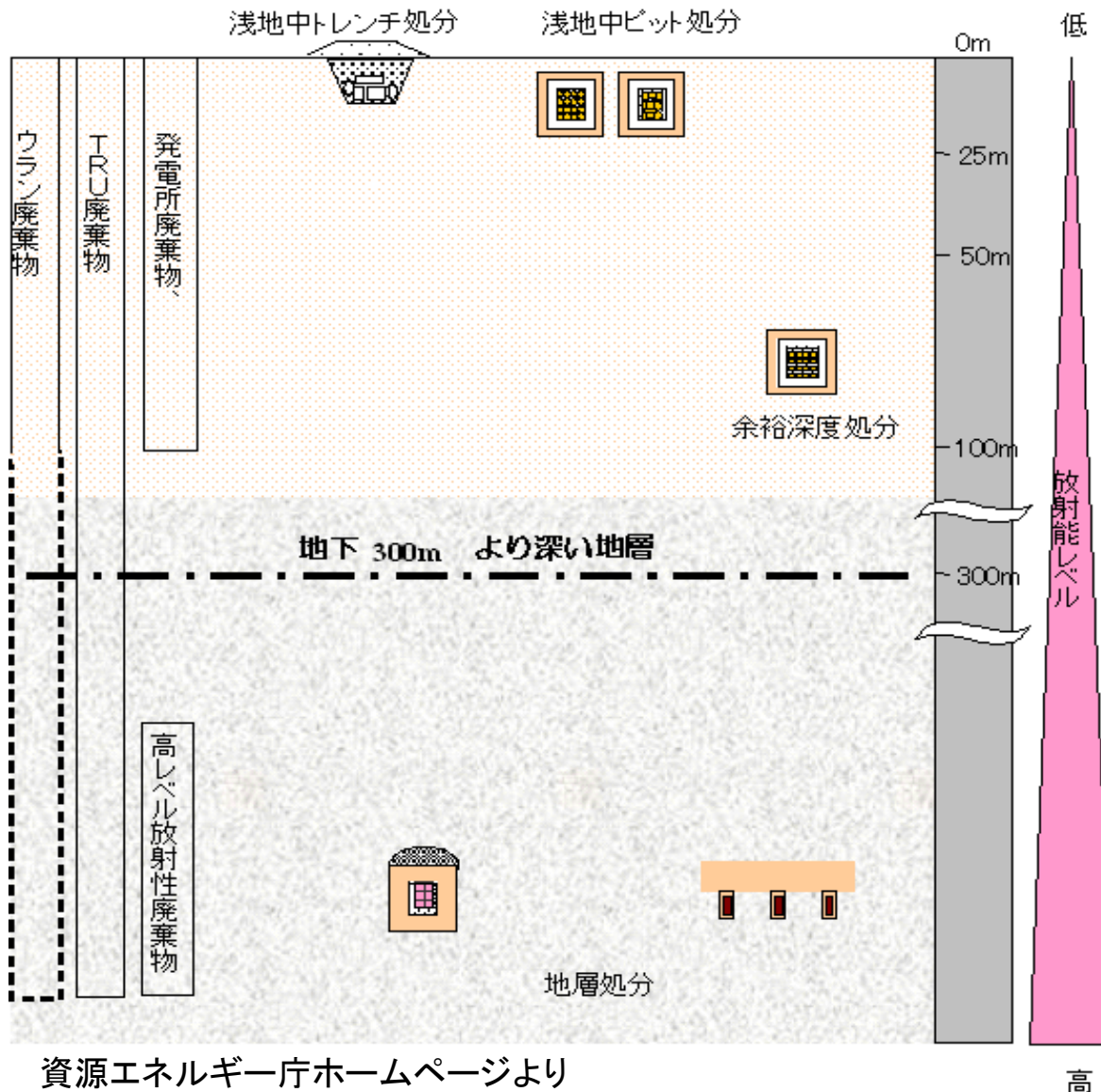
原子力利用に伴う放射性廃棄物の処理処分

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。

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

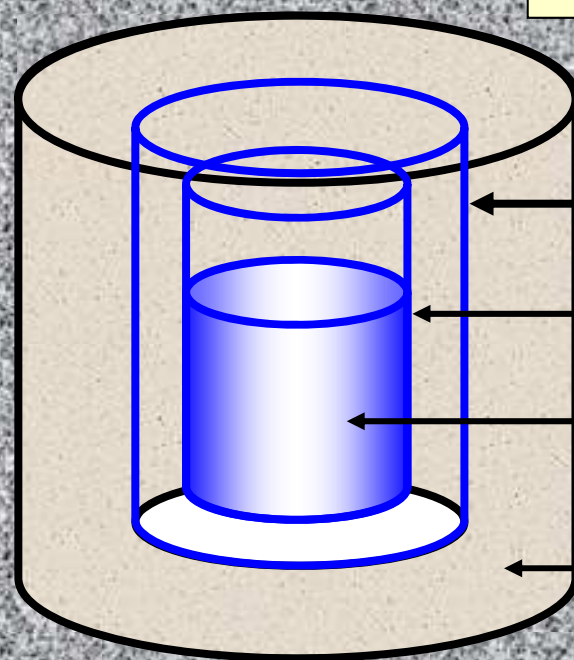
人工バリア

- ・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



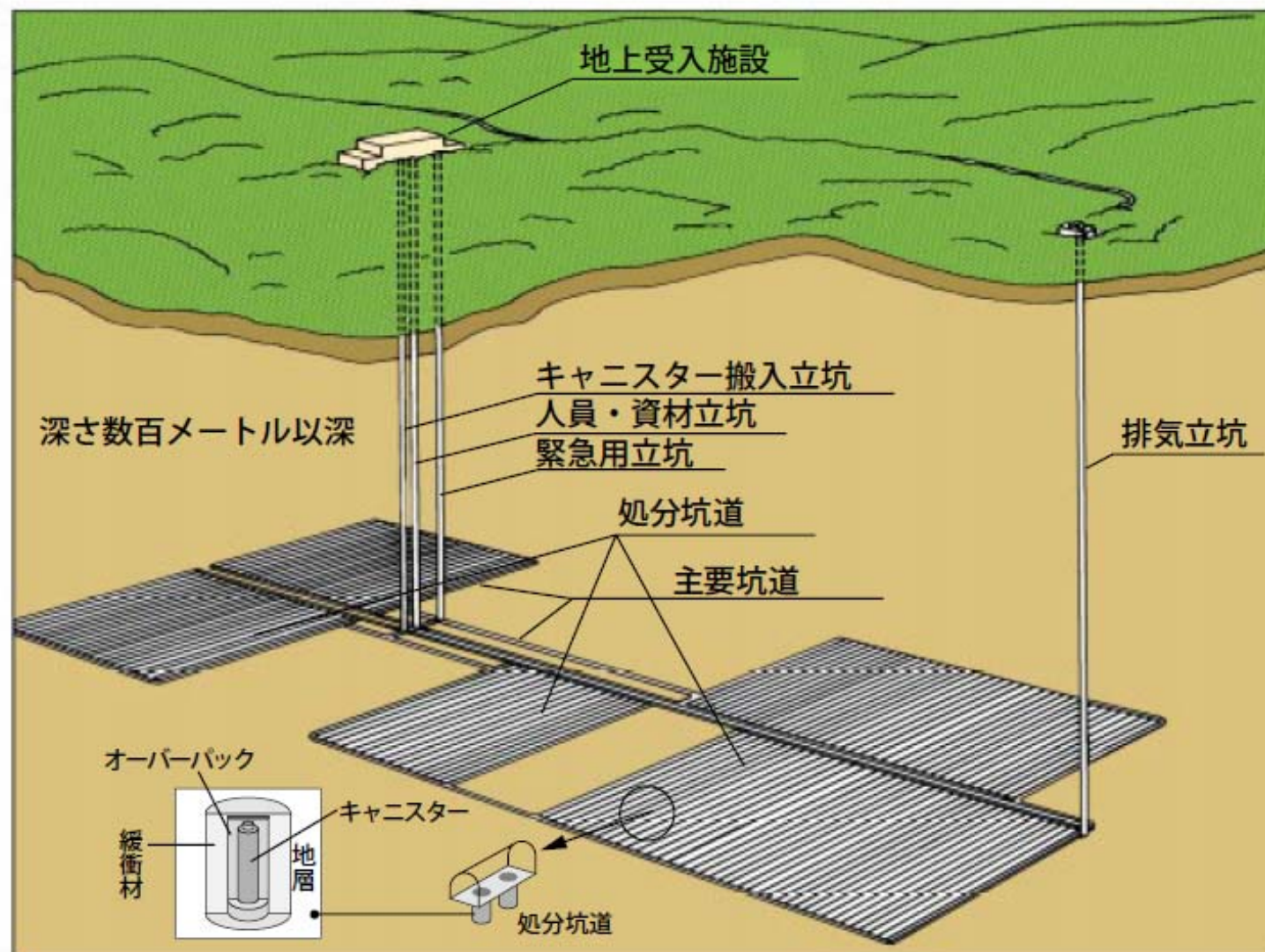
オーバーパック(鋼製)

キャニスタ(ステンレス製)

ガラス固化体

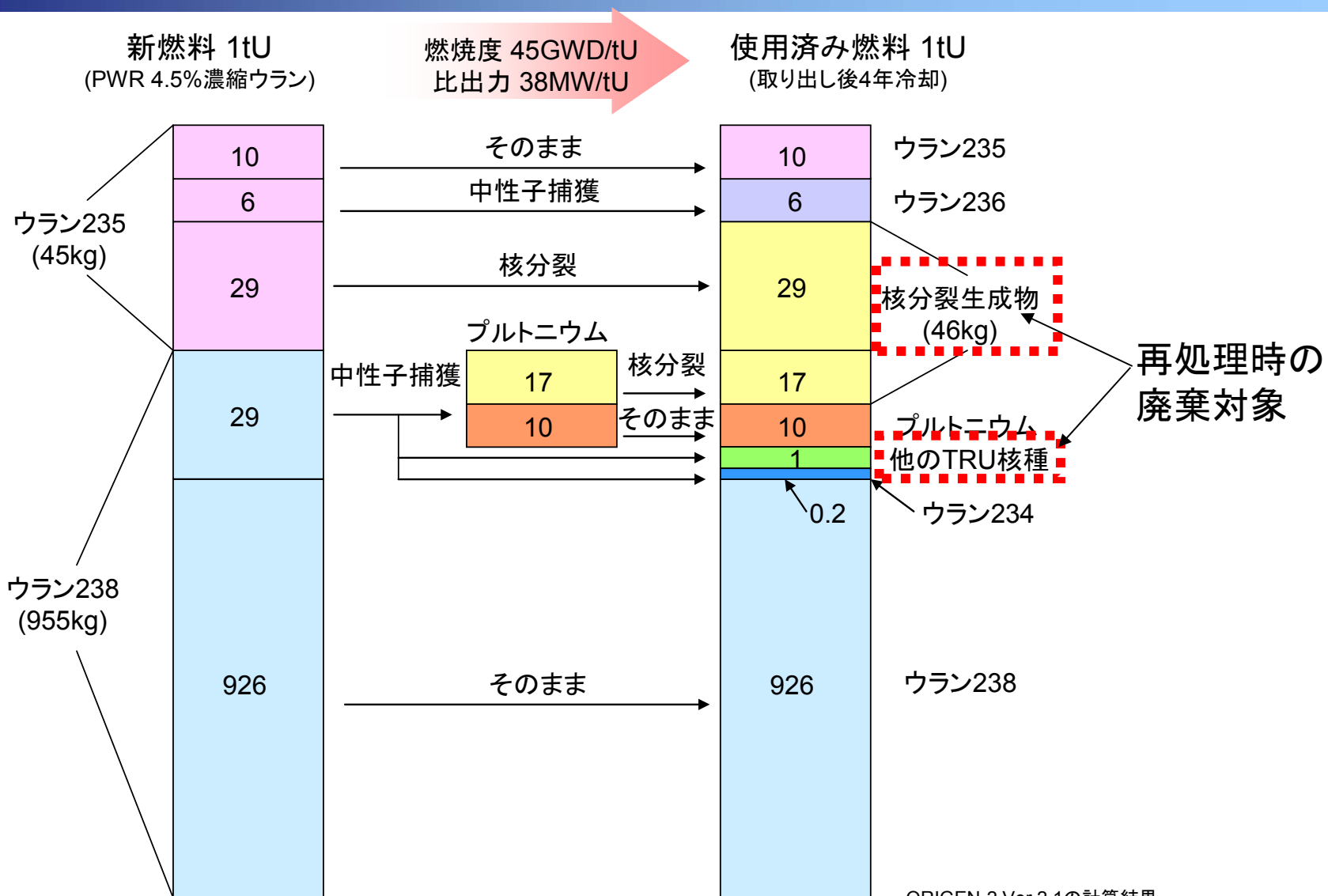
ベントナイト(粘土の一種)

地層処分場の概念



出典：資源エネルギー庁「原子力発電2002」

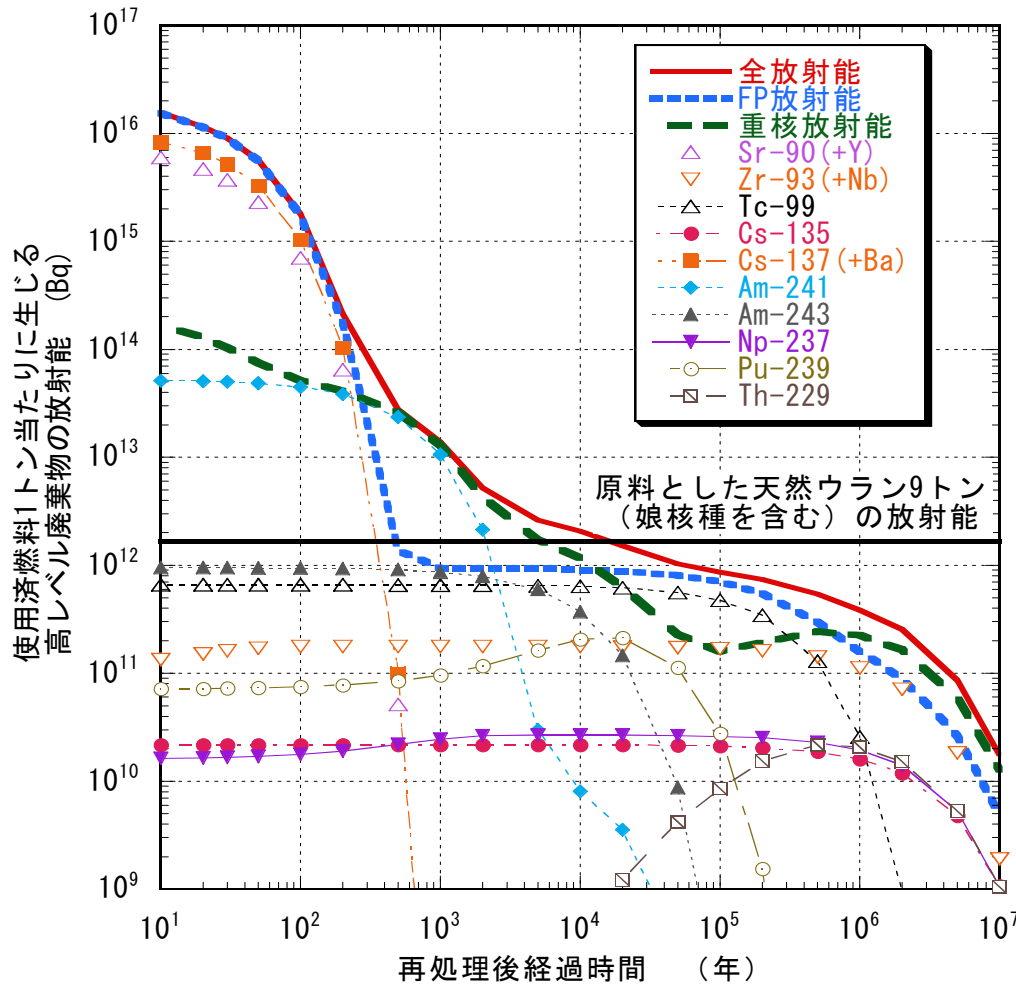
軽水炉内でのウラン燃料の転換



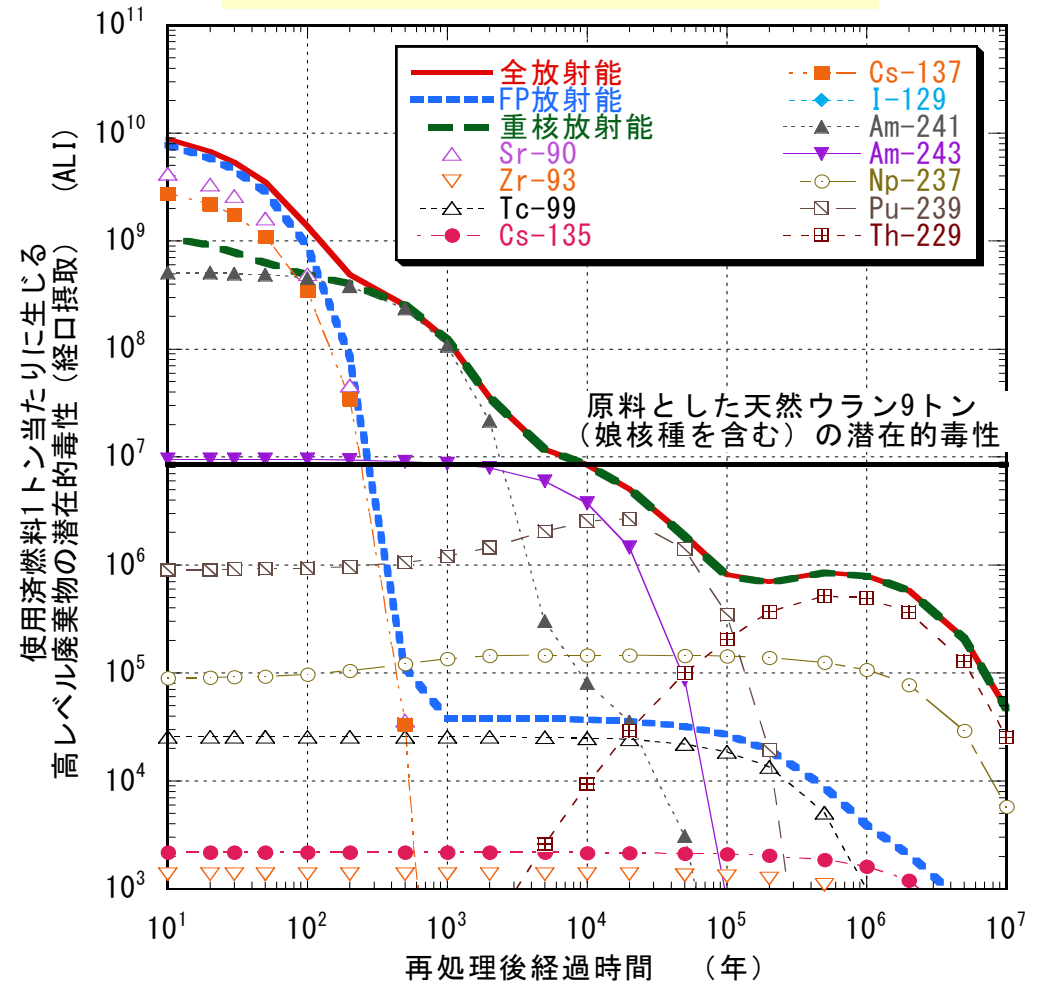
ORIGEN-2 Ver.2.1の計算結果。
棒グラフ中の数字の単位はkg。
(四捨五入の関係で合計があわない場合がある)

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

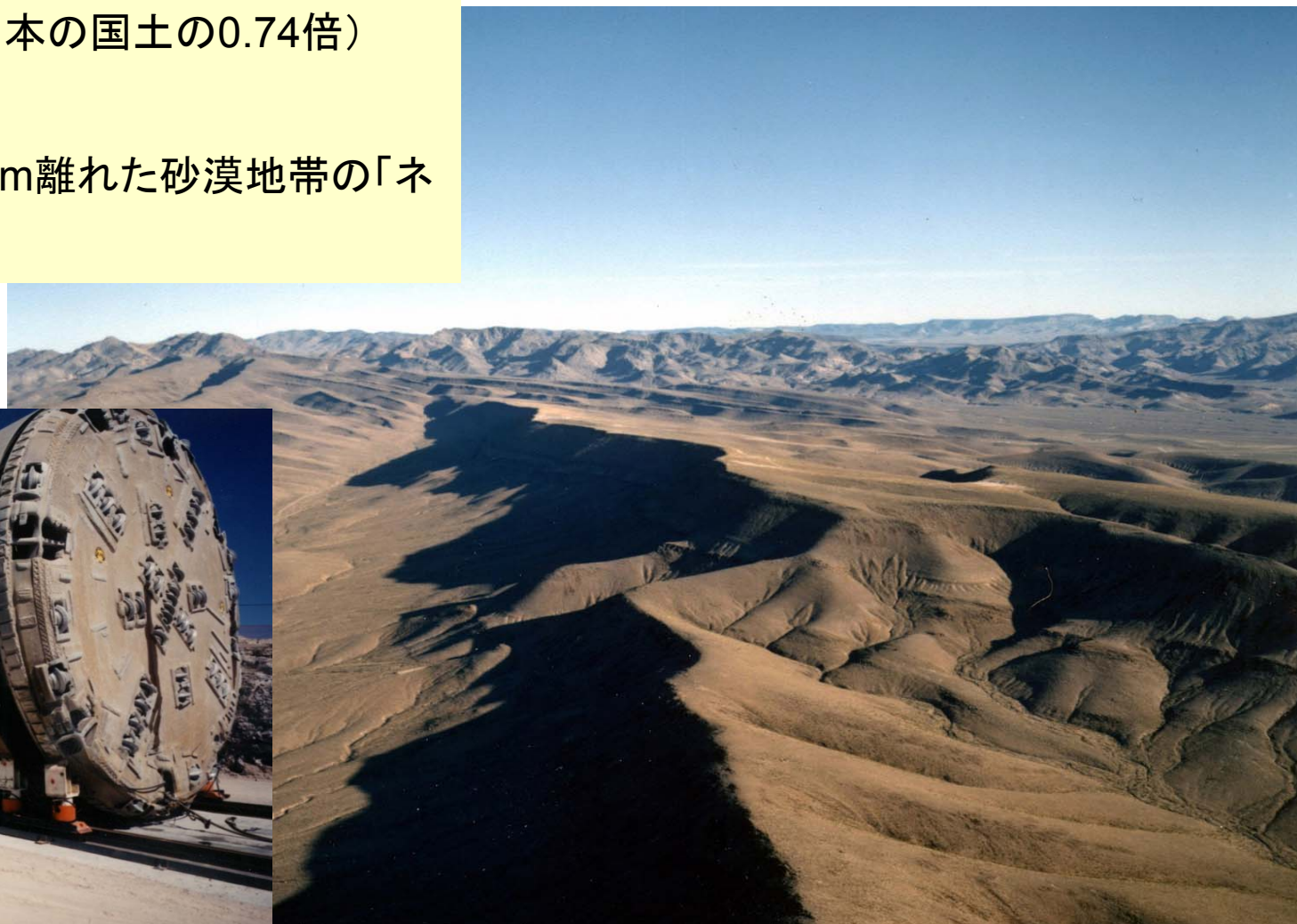
- サイクル機構(当時)の第2次取りまとめレポート(H11)
- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律制定(H12)
- 原子力環境整備機構(NUMO)の設立(H12)
- 最終処分の計画 (H20年改定)
 - ・ 候補地域を公募中
 - ・ 文献調査 → 概要調査
 - ・ 平成20年代中頃(~2015) : 精密調査地区を選定
 - ・ 平成40年前後(~2030) : 最終処分施設建設地選定
 - ・ 平成40年代後半(~2035) : 最終処分開始
 - ・ 1~2キロメートル四方の第1処分場で2020年までに生じる使用済み燃料に相当する4万本のガラス固化体を処分

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



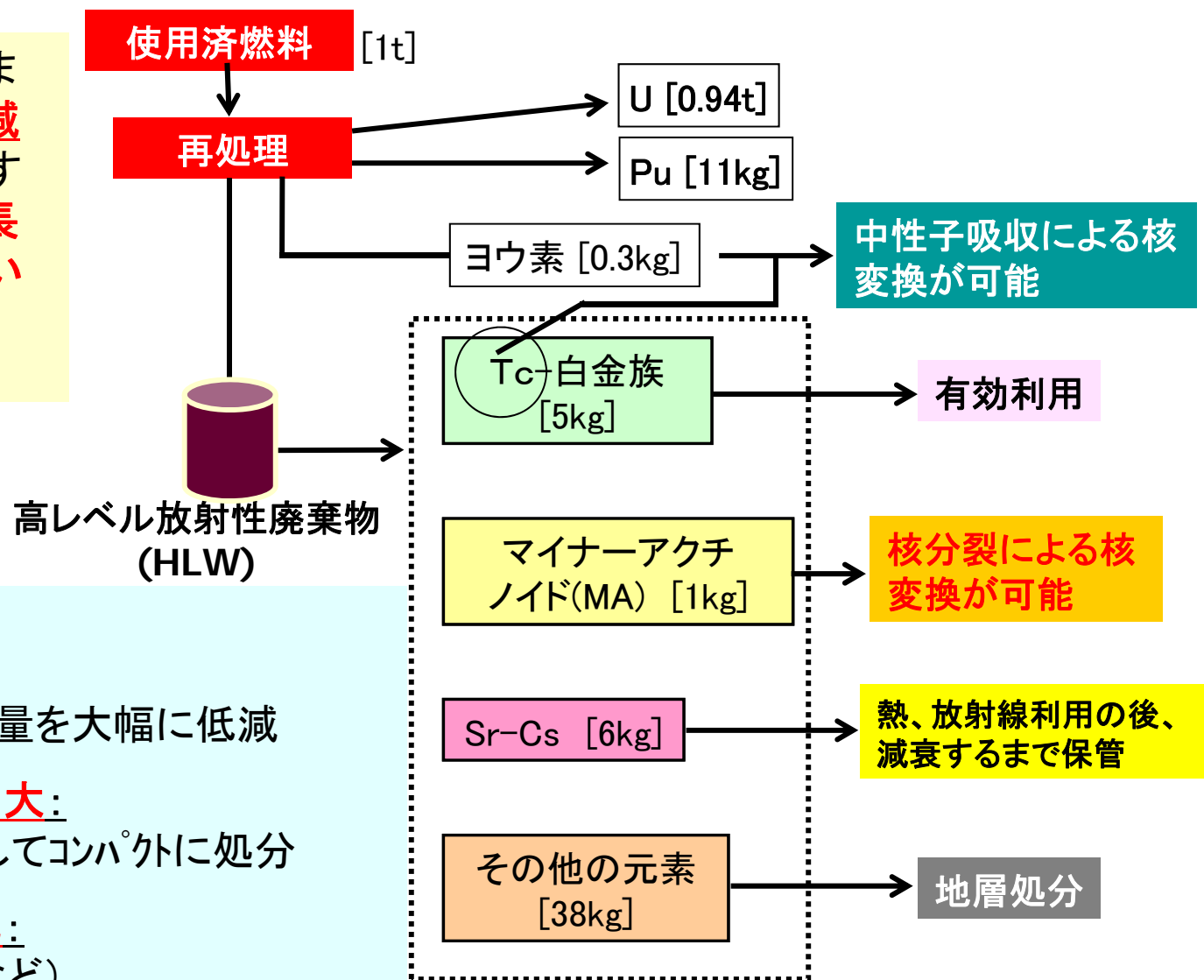
トンネル掘削機



<http://www.ocrwm.doe.gov/>より

分離変換技術とは

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



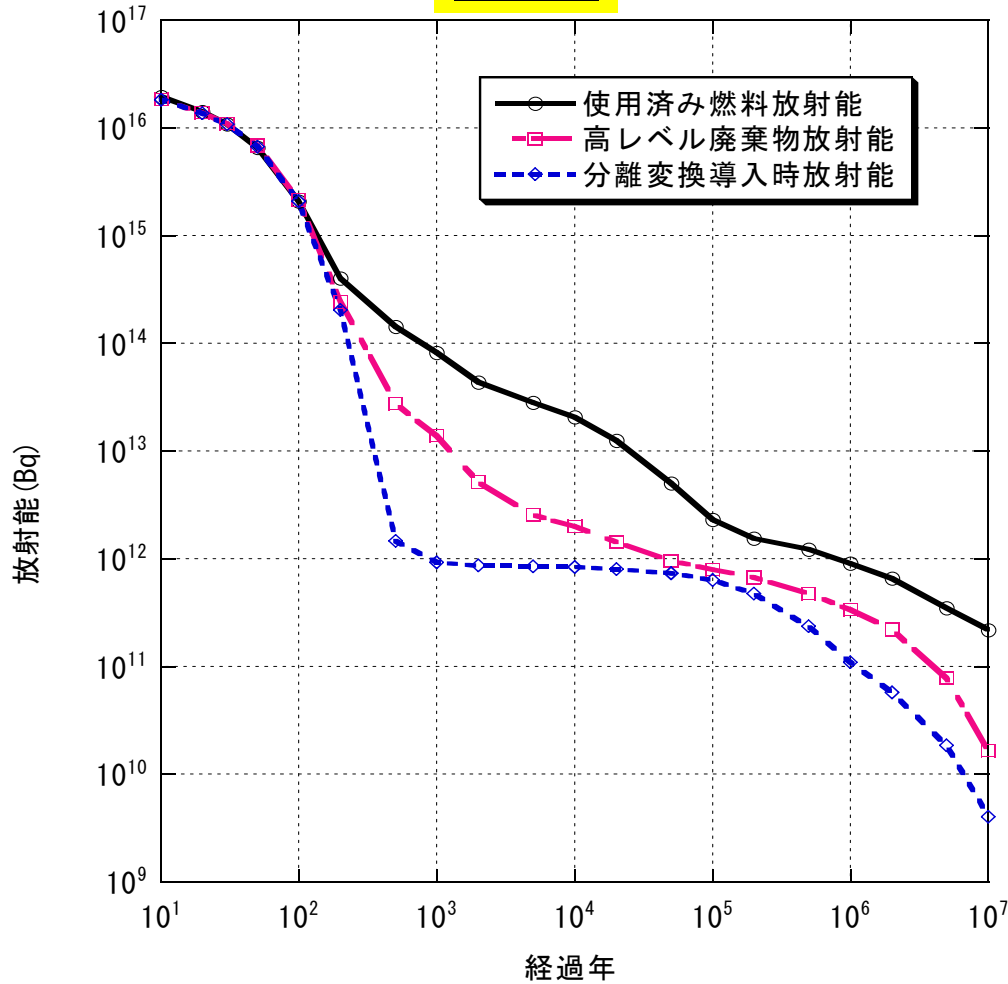
- MA核種: Np-237、Am-241、Am-243、Cm-244
- FP核種: Tc-99、I-129

半減期:

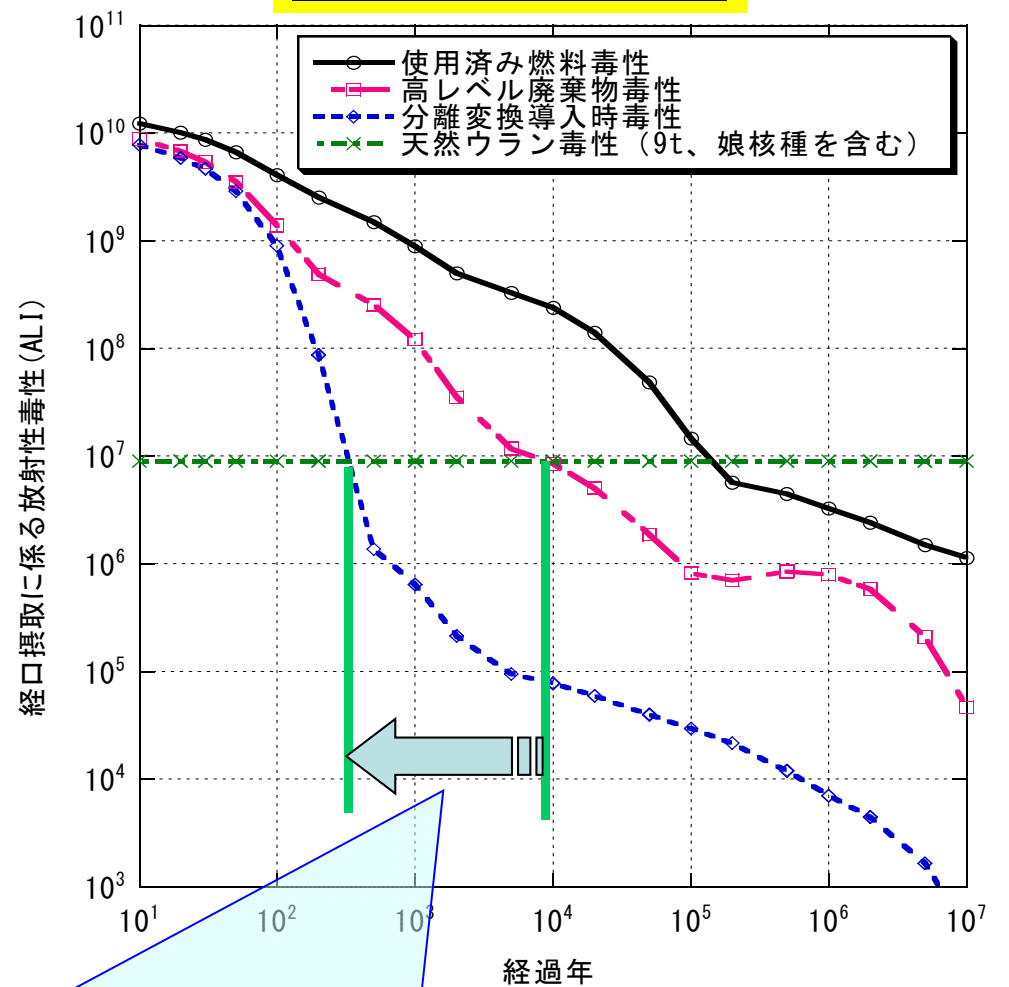
Sr-90 = 28年	U-238 = 45億年	Am-241 = 433年
Cs-137 = 30年	Np-237 = 214万年	Am-243 = 7370年
Tc-99 = 21万年	Pu-239 = 24000年	Cm-244 = 17.6年
I-129 = 1600万年	Pu-240 = 6500年	

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

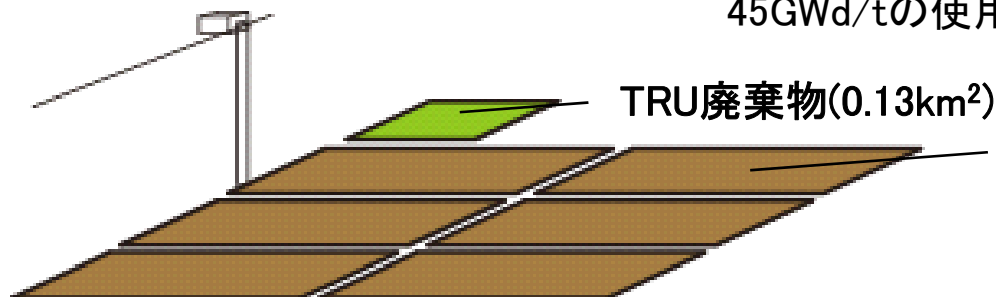
分離変換技術の導入による処分概念の合理化検討

— 長期貯蔵との組み合わせ



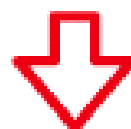
45GWd/tの使用済み燃料32,000tHMで規格化

従来の地層処分



TRU廃棄物(0.13km²)
HLWガラス固化体:4万本
(冷却:50年、面積:1.8km²)

分離変換導入

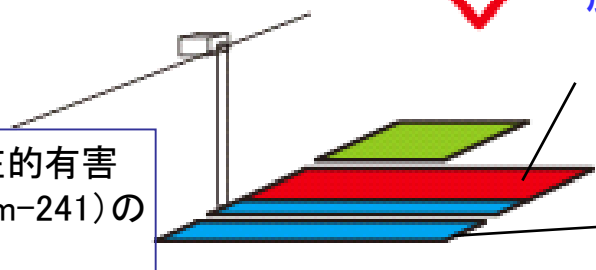


MAの核変換とSr-Csの100~130年後の分別
廃棄で、処分場面積を約1/4に

Sr-Cs焼成体:5,100本
(冷却:130年、面積:0.23km²)

高含有ガラス固化体:8,300本
(冷却:5年、面積:0.18km²)

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



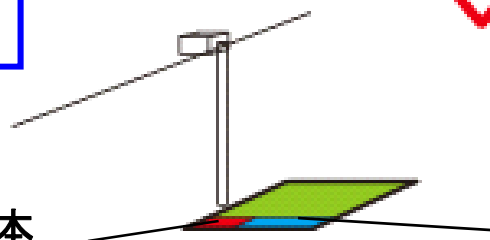
さらに長期貯蔵



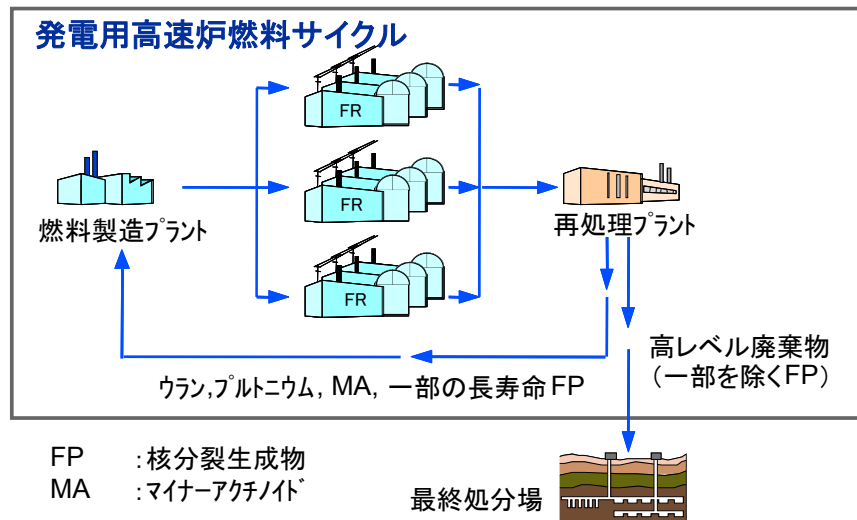
Sr-Csに300年程度の長期貯蔵を適用すること
で、全てTRU廃棄物相当の廃棄体とでき、処分
場面積を約1/100に

Sr-Cs焼成体:5,100本
(冷却320年、面積:0.005km²)

高含有ガラス固化体:8,300本
(冷却:45年、面積:0.01km²)

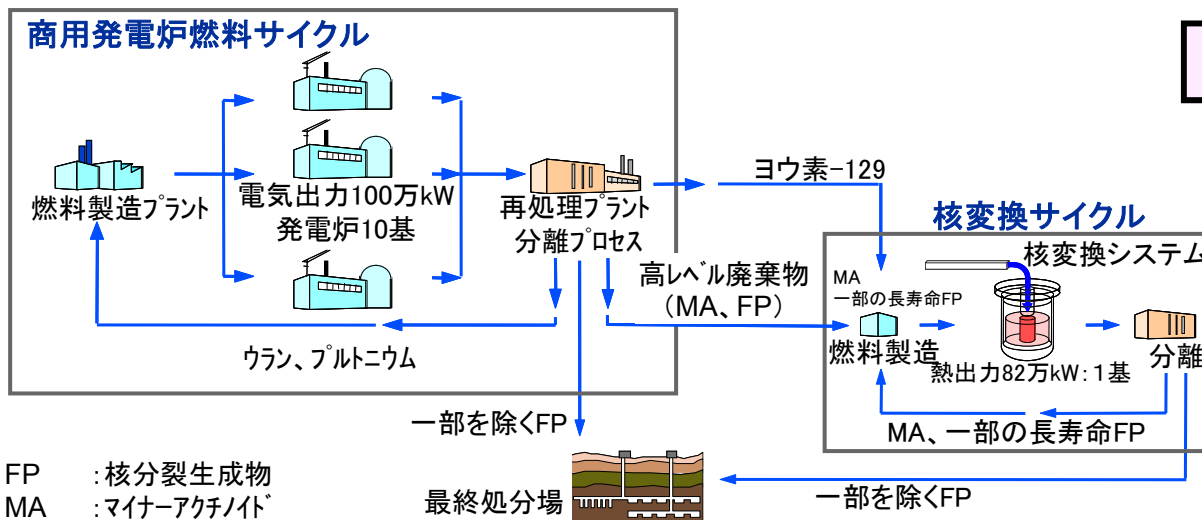


核変換の戦略: 高速炉サイクル型と専用サイクル型



高速炉サイクル利用型

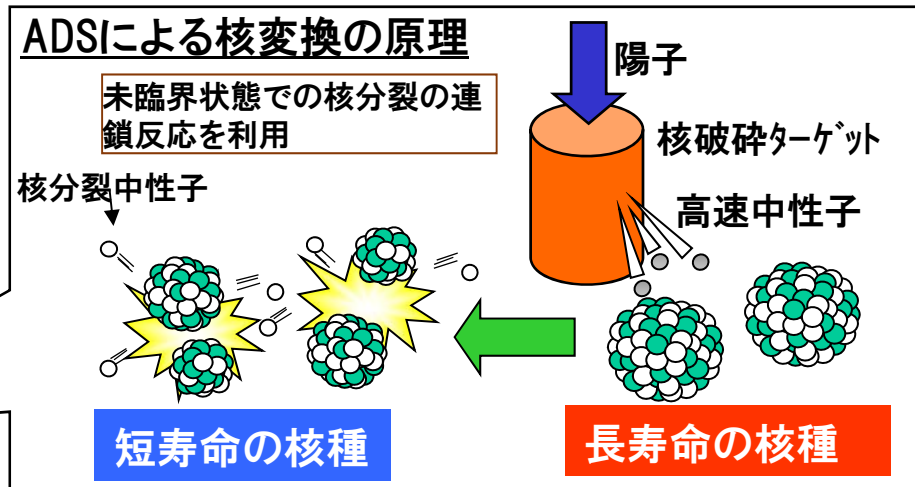
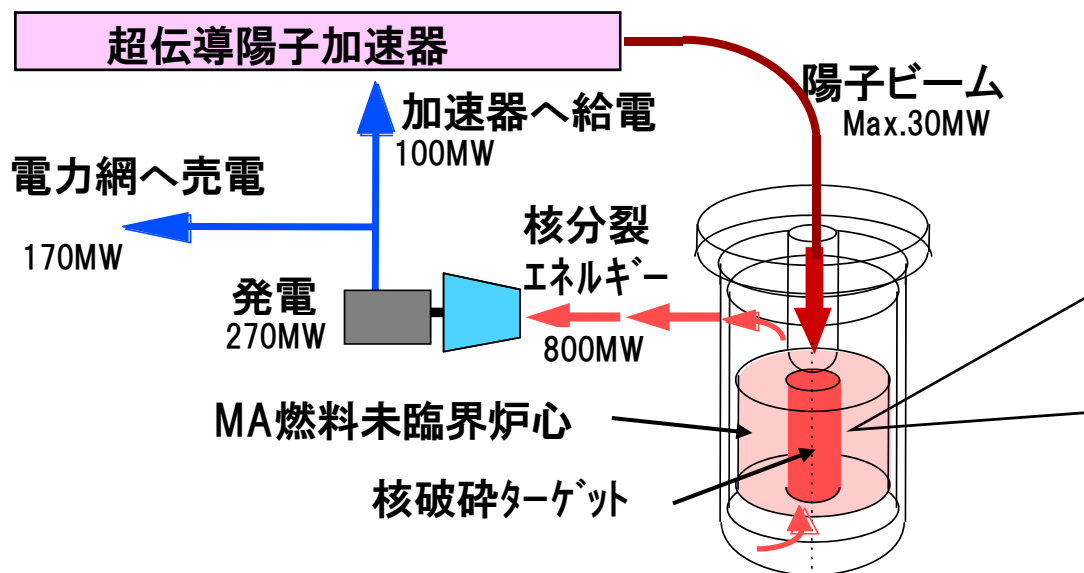
- ・発電炉を用いた分離変換技術。
- ・次世代再処理プラントでウランやプルトニウムと共にマイナーアクチノイドもリサイクル。
- ・核変換には発電炉(高速炉)を用いる。



専用サイクル型(階層型)

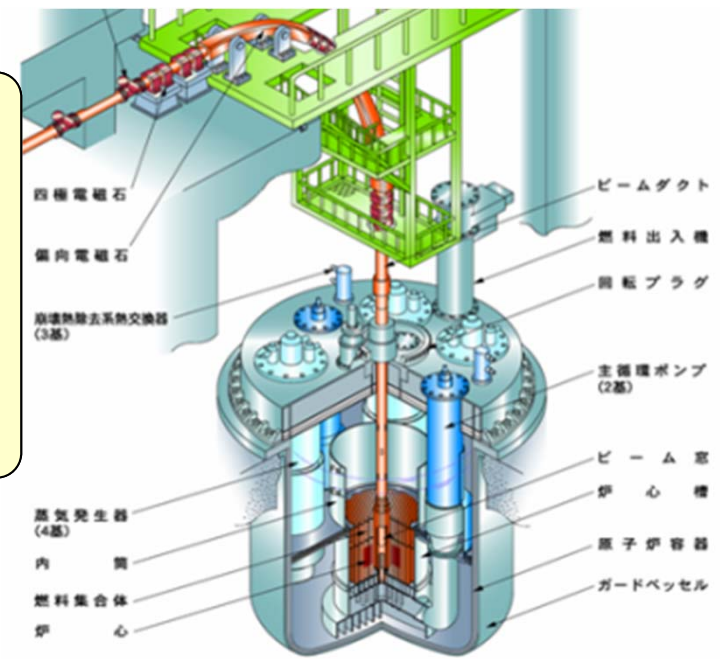
- ・発電用サイクルに分離プロセスと核変換サイクルを付設。
- ・核変換には専用システム(加速器駆動炉: ADS)を用いる。
- ・コンパクトな核変換サイクルにマイナーアクチノイドを閉じ込める。

加速器駆動核変換システム (ADS)



- 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。
 - ・陽子は鉛・ビスマス(Pb-Bi)に入射し、核破砕反応で大量の中性子を発生。
 - ・Pb-Biは核破砕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)。
 - ・中性子によりMAを核分裂反応で核変換。
→核分裂の連鎖反応で、1個の中性子を20個に増倍しながら核変換。
 - ・核分裂で発生する熱で発電し、加速器に供給。エネルギー収支は正に。

- ADSの特徴:
- ・加速器を止めれば核分裂の連鎖反応は停止 → 安全性が高い。
 - ・通常の原子炉(臨界炉)でMA燃料を用いると安全上の問題が生じるが、ADSでは影響が小さいため使用可能。



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!**

J-PARCにおけるADS実験計画

MA装荷体系の炉物理特性及び未臨界炉心の炉物理的性質を探る

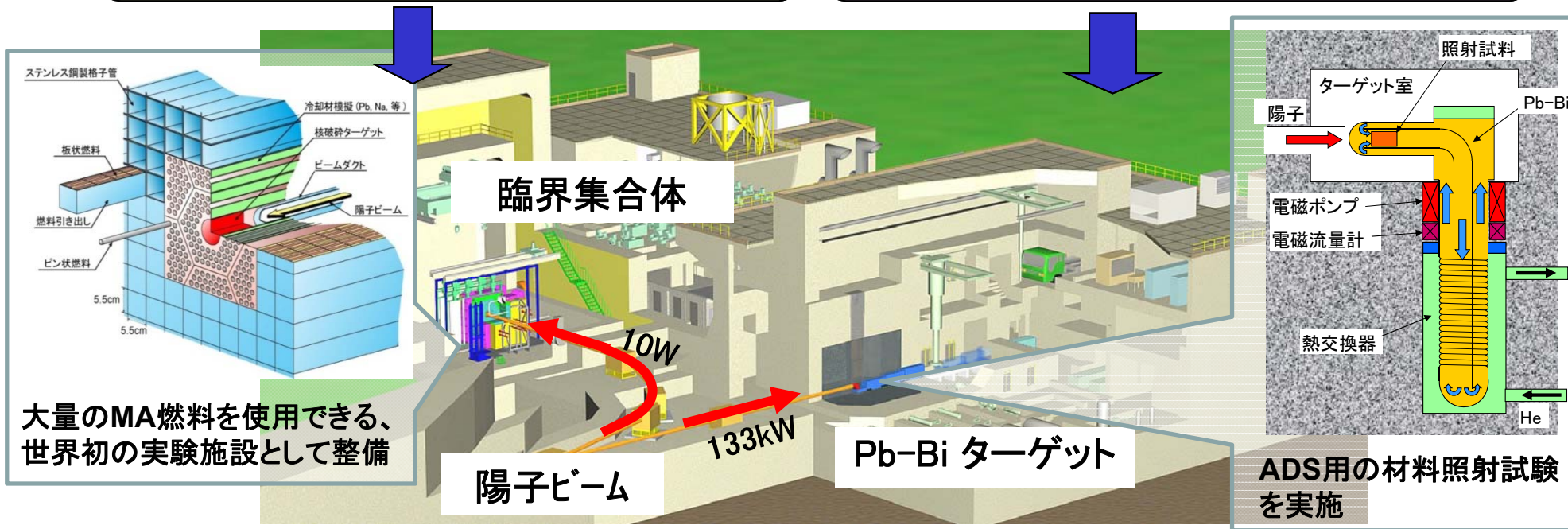
ADSビーム窓用材料の研究開発と核破砕ターゲットの技術開発

核変換物理実験施設 TEF-P

ADSターゲット試験施設 TEF-T

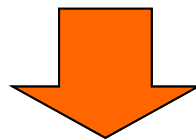
施設区分：原子炉(臨界実験施設)
陽子ビーム：400MeV(600MeV)、10W
熱出力：500W以下

施設区分：放射線発生装置
陽子ビーム：400MeV、133kW
ターゲット材料：鉛・ビスマス



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。**