

平成24年9月29日

自然科学研究機構シンポジウム

日本のエネルギーは大丈夫か？

～  $E=mc^2$  は 人類を滅ぼすのか、救うのか・・・ ～

# 長寿命放射性廃棄物の短寿命化技術の 現状と展望

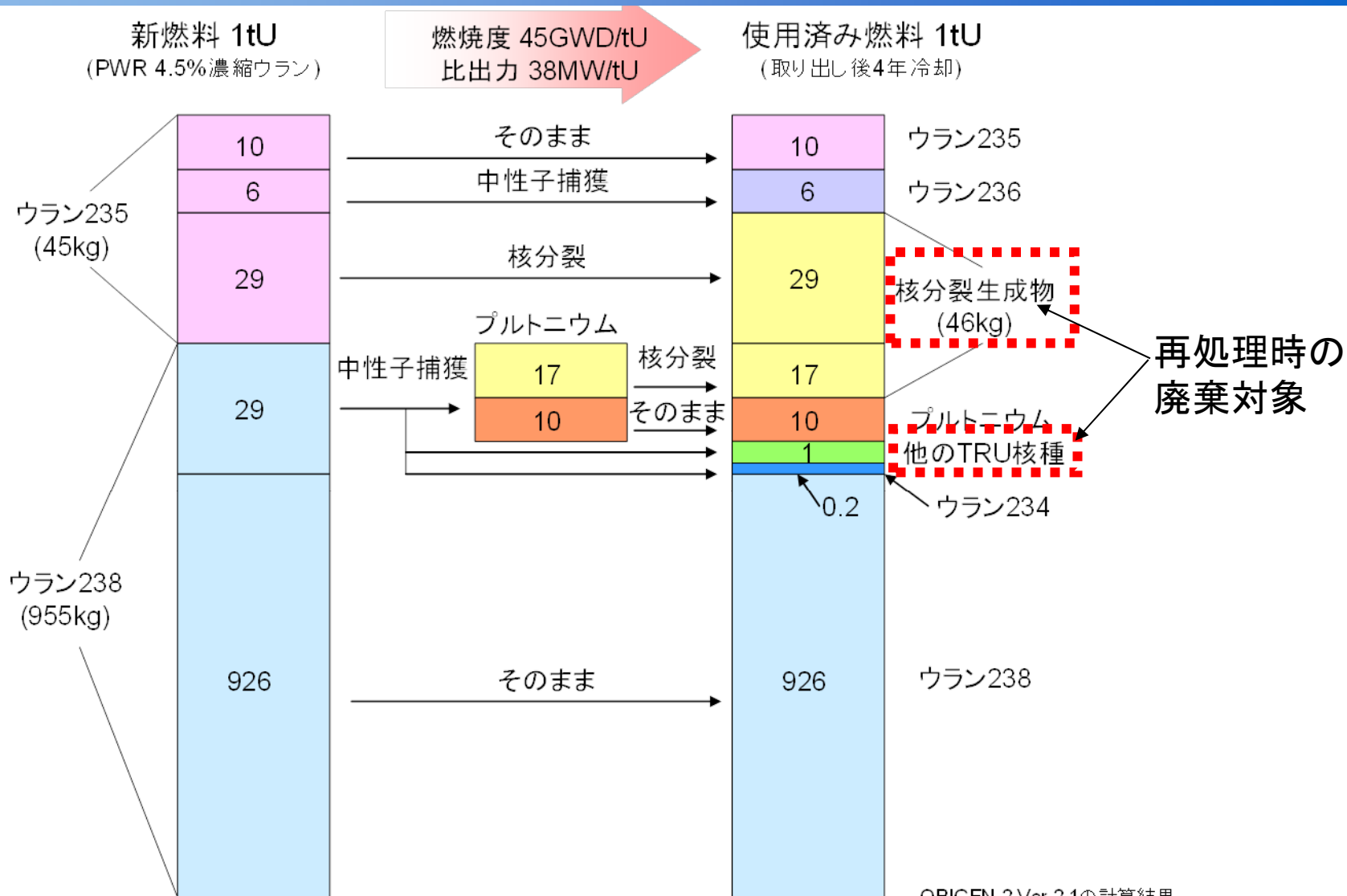


日本原子力研究開発機構

原子力基礎工学研究部門・J-PARCセンター

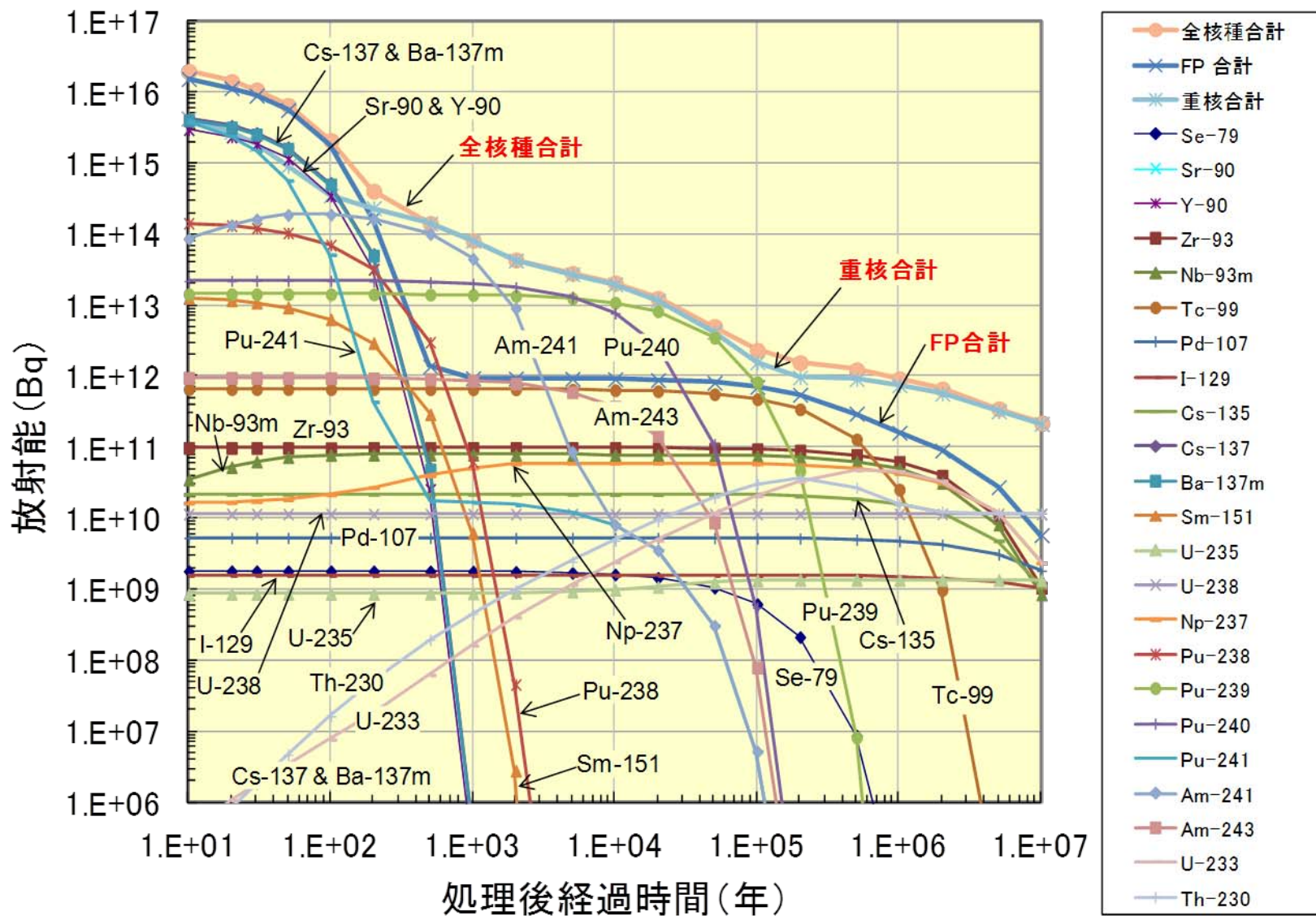
大井川 宏之

# 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)

# 使用済燃料中の主な長寿命核種の減衰



# 使用済燃料中の主な長寿命核種

核種	半減期	線量換算係数 (Sv/Bq)	含有量 (1トン当たり)
U-235	7億年	$4.7 \times 10^{-8}$	10kg
U-238	45億年	$4.5 \times 10^{-8}$	930kg

核種	半減期	線量換算係数 (Sv/Bq)	含有量 (1トン当たり)
Pu-238	87.7年	$2.3 \times 10^{-7}$	0.3kg
Pu-239	2万4千年	$2.5 \times 10^{-7}$	6kg
Pu-240	6,564年	$2.5 \times 10^{-7}$	3kg
Pu-241	14.3年	$4.8 \times 10^{-9}$	1kg

核種	半減期	線量換算係数 (Sv/Bq)	含有量 (1トン当たり)
Np-237	214万年	$1.1 \times 10^{-7}$	0.6kg
Am-241	432年	$2.0 \times 10^{-7}$	0.4kg
Am-243	7,370年	$2.0 \times 10^{-7}$	0.2kg
Cm-244	18.1年	$1.2 \times 10^{-7}$	60g

核種	半減期	線量換算係数 (Sv/Bq)	含有量 (1トン当たり)
Se-79	29万5千年	$2.9 \times 10^{-9}$	6g
Sr-90	28.8年	$2.8 \times 10^{-8}$	0.6kg
Zr-93	153万年	$1.1 \times 10^{-9}$	1kg
Tc-99	21万1千年	$6.4 \times 10^{-10}$	1kg
Pd-107	650万年	$3.7 \times 10^{-11}$	0.3kg
Sn-126	10万年	$4.7 \times 10^{-9}$	30g
I-129	1,570万年	$1.1 \times 10^{-7}$	0.2kg
Cs-135	230万年	$2.0 \times 10^{-9}$	0.5kg
Cs-137	30.1年	$1.3 \times 10^{-8}$	1.5kg

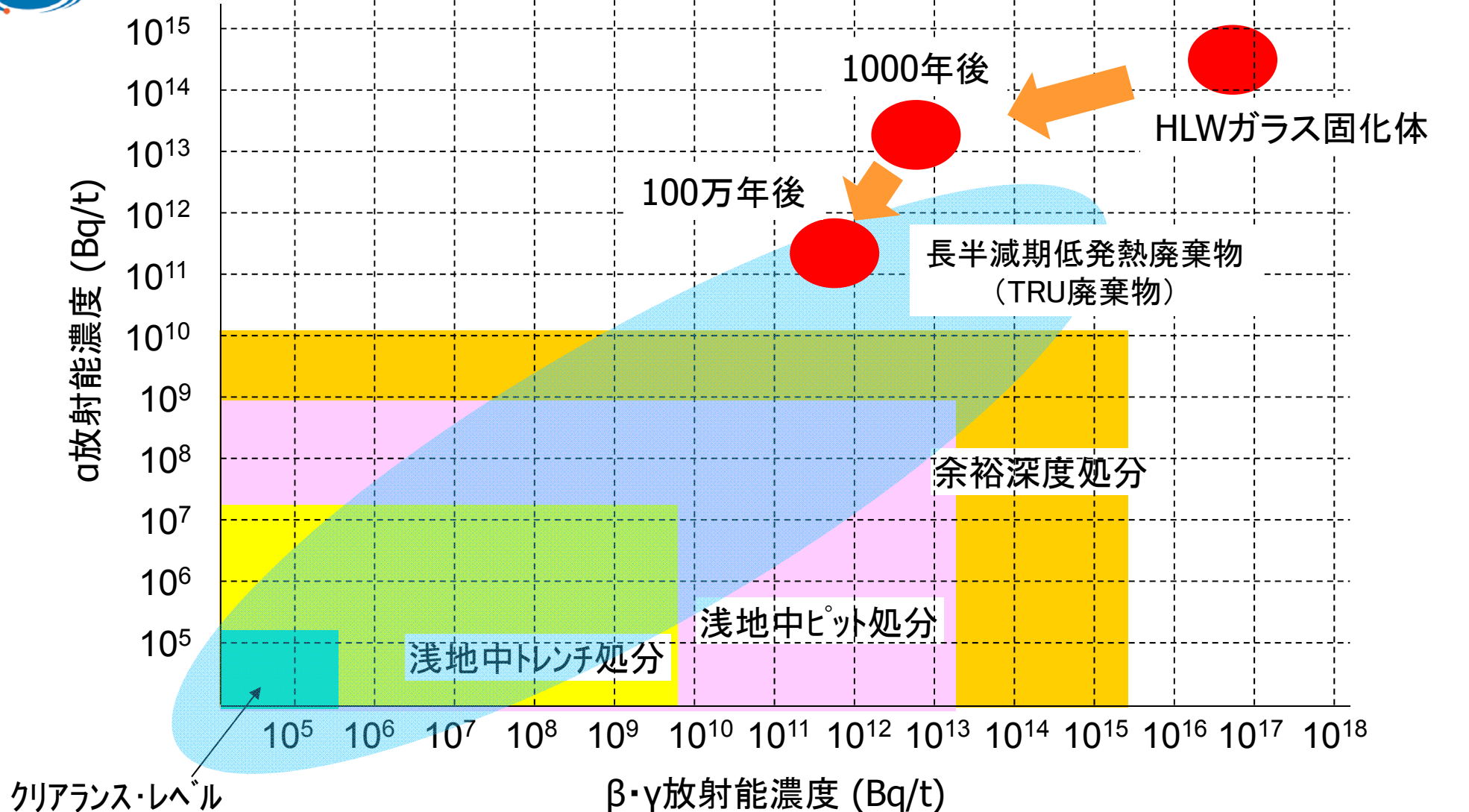
アクチノイド

超ウラン元素  
(TRU)

マイナーアクチノイド  
(MA)

核分裂生成物  
(FP)

# 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

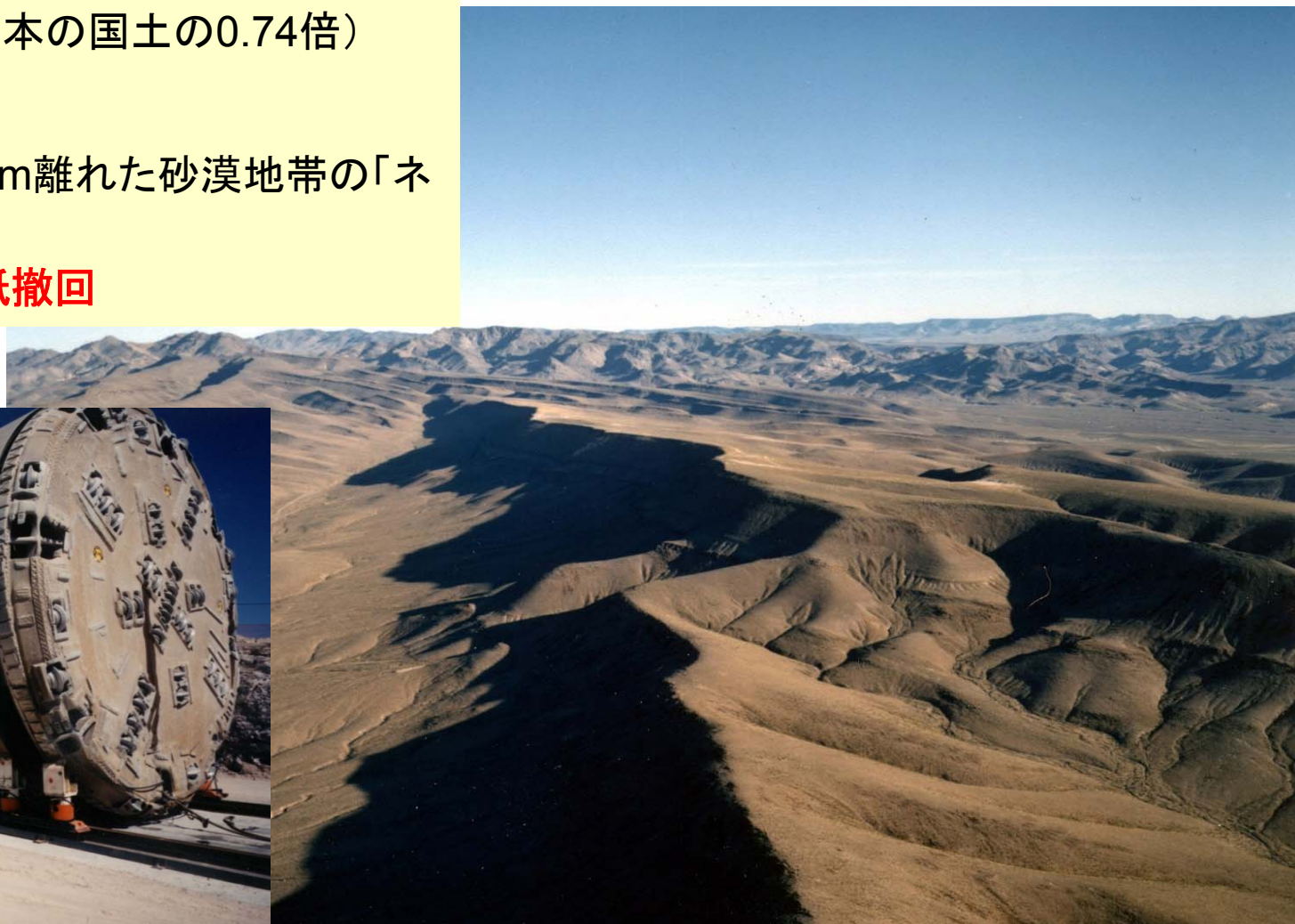


処分方法の区分は廃棄物に含まれる放射性核種の性質にも左右されるので、α放射能濃度及びβ・γ放射能濃度のみで一意的には決まらないことの注意。

# 米国のヤッカマウンテン処分サイト



- ネバダ州  
→面積28万km<sup>2</sup>（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
- **オバマ政権では白紙撤回**



トンネル掘削機

<http://www.ocrwm.doe.gov/>より

# 分離変換技術 (Partitioning & Transmutation)

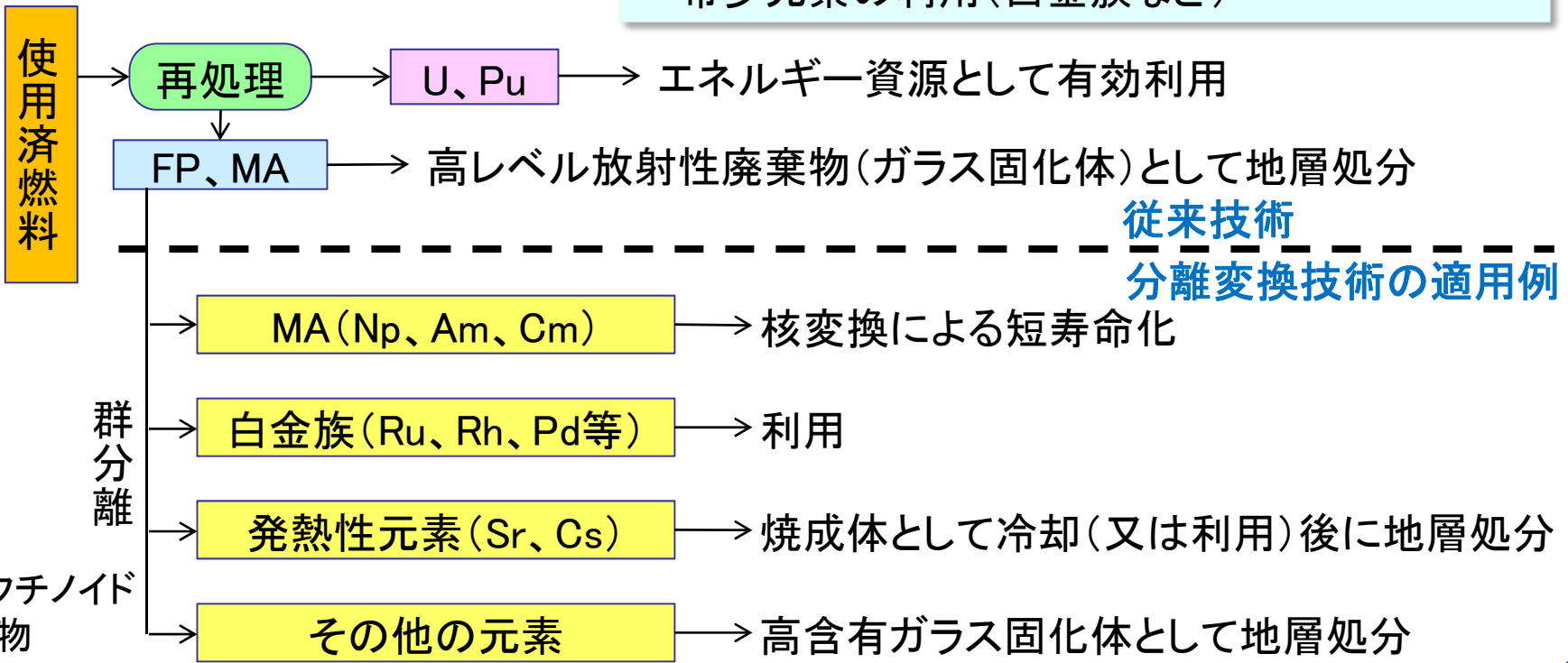
## 分離変換技術

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

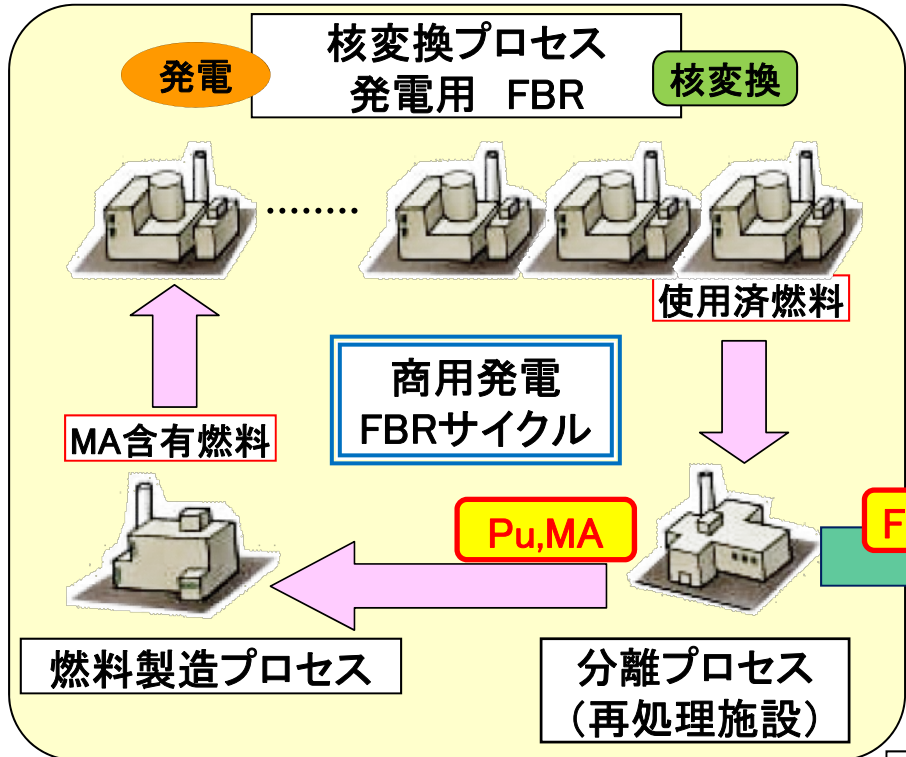
- ・長期リスクの低減:  
廃棄物の潜在的有害度の総量を大幅に低減
- ・処分場の実効処分容量の増大:  
発熱の大きい核種を除去してコンパクトに処分
- ・放射性廃棄物の一部資源化:  
希少元素の利用（白金族など）



MA: マイナーアクチノイド  
FP: 核分裂生成物

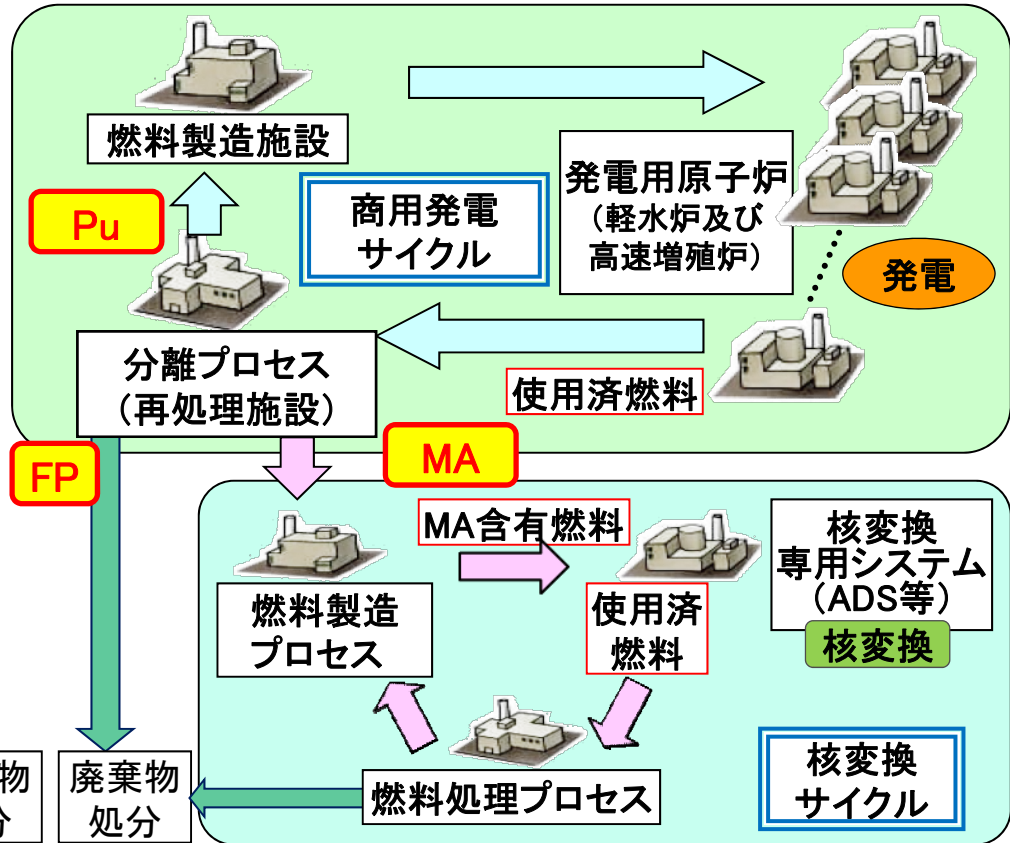
# 高速炉サイクル型と核変換専用サイクル型(階層型)

## 高速炉サイクル利用型



MA: マイナーアクチノイド  
TRU: 超ウラン元素

## 階層型



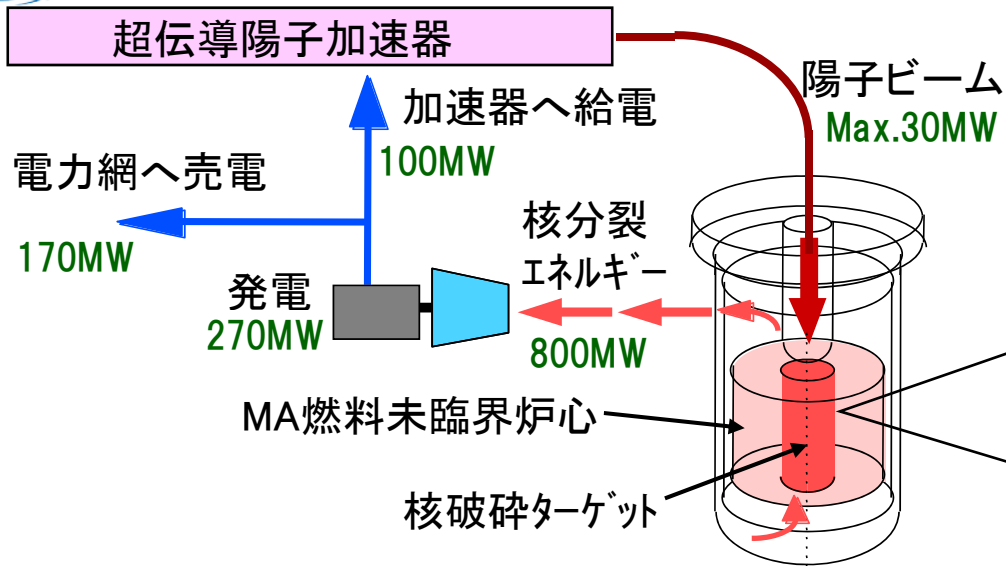
- ・発電炉を用いた分離変換技術
- ・ひとつの閉サイクル内でPuと共にMAをリサイクル
- ・発電炉(高速炉)内でMAを核変換

- ・発電用サイクルに核変換サイクルを付設
- ・核変換専用システム(加速器駆動システム: ADS等)
- ・コンパクトな核変換サイクルにMAを閉じ込める

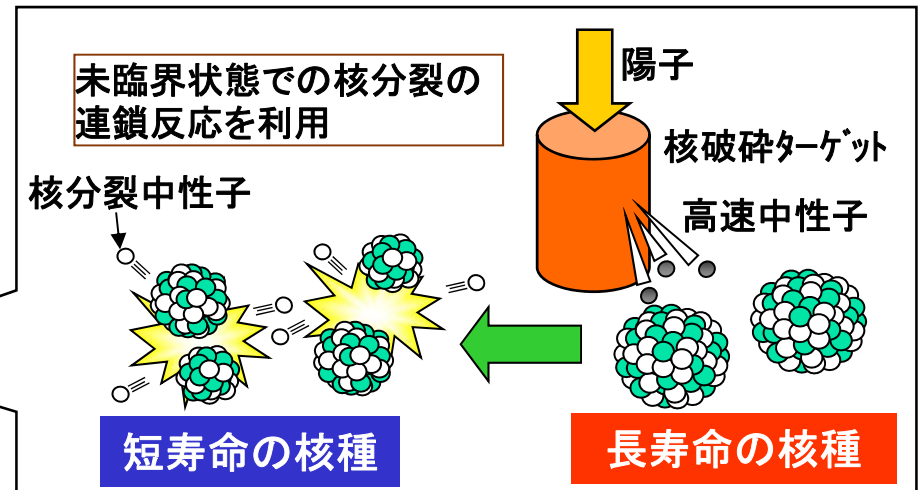


# 核変換専用サイクル型のMA核変換

(加速器駆動未臨界システムを用いた核変換) **ADS: Accelerator Driven System**



## ADSによる核変換の原理



## ADSの仕組み:

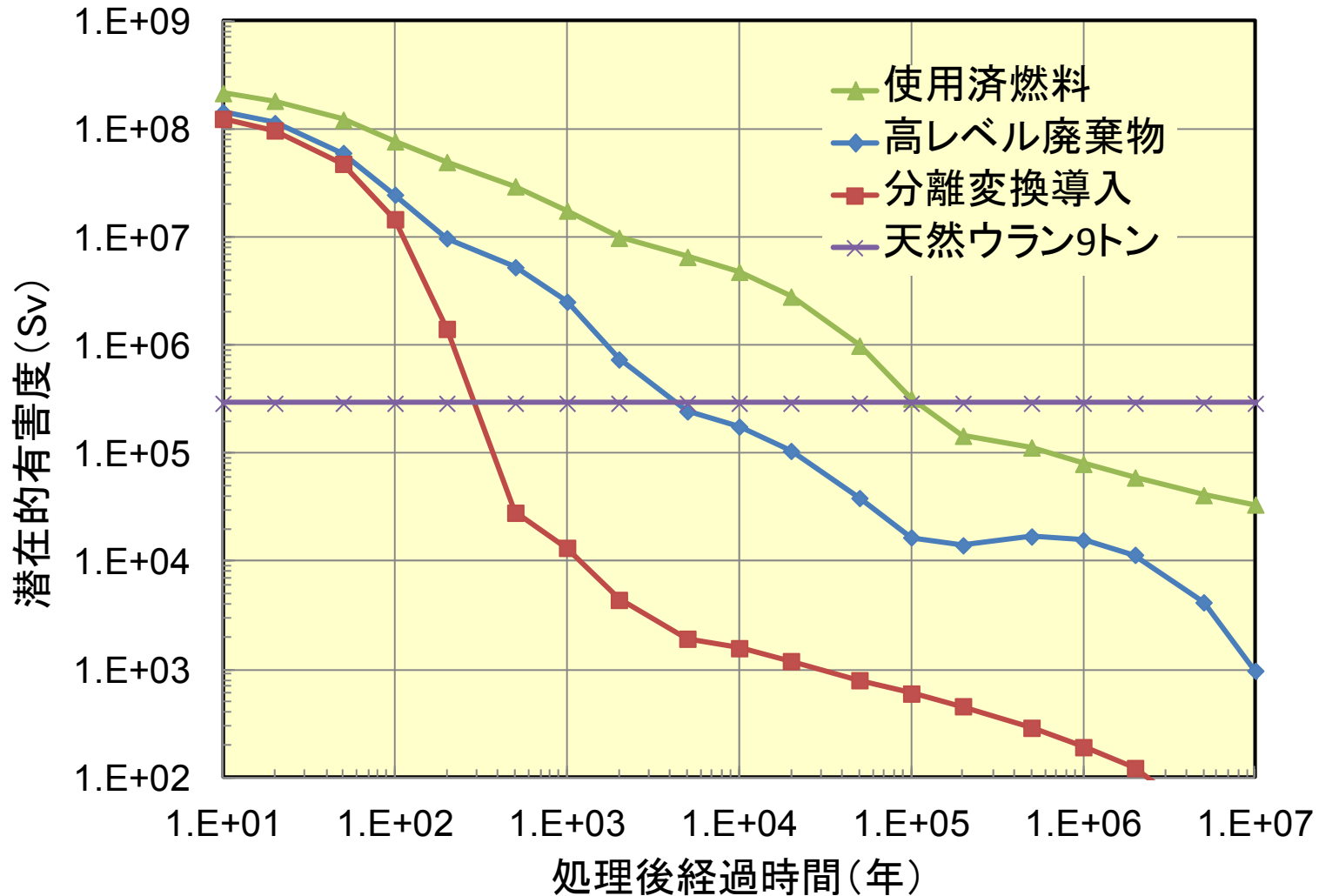
- ・超伝導加速器で大強度の陽子を高効率で加速。
- ・陽子はビームダクト・ビーム窓を通過して鉛・ビスマス(Pb-Bi)に入射。
- ・Pb-Biは核破砕ターゲットと炉心冷却材を兼ねる。
- ・燃料の主成分はマイナーアクチノイド(MA)。
- ・陽子はPb-Biとの核破砕反応で大量の中性子を発生。
- ・その中性子によりMAを核分裂反応で核変換。
- ・さらに核分裂で発生した中性子も核変換に使用。  
→核分裂の連鎖反応で、1個の中性子を20個に増倍。
- ・核分裂で発生する熱で発電し、加速器に供給。

## ADSの特徴:

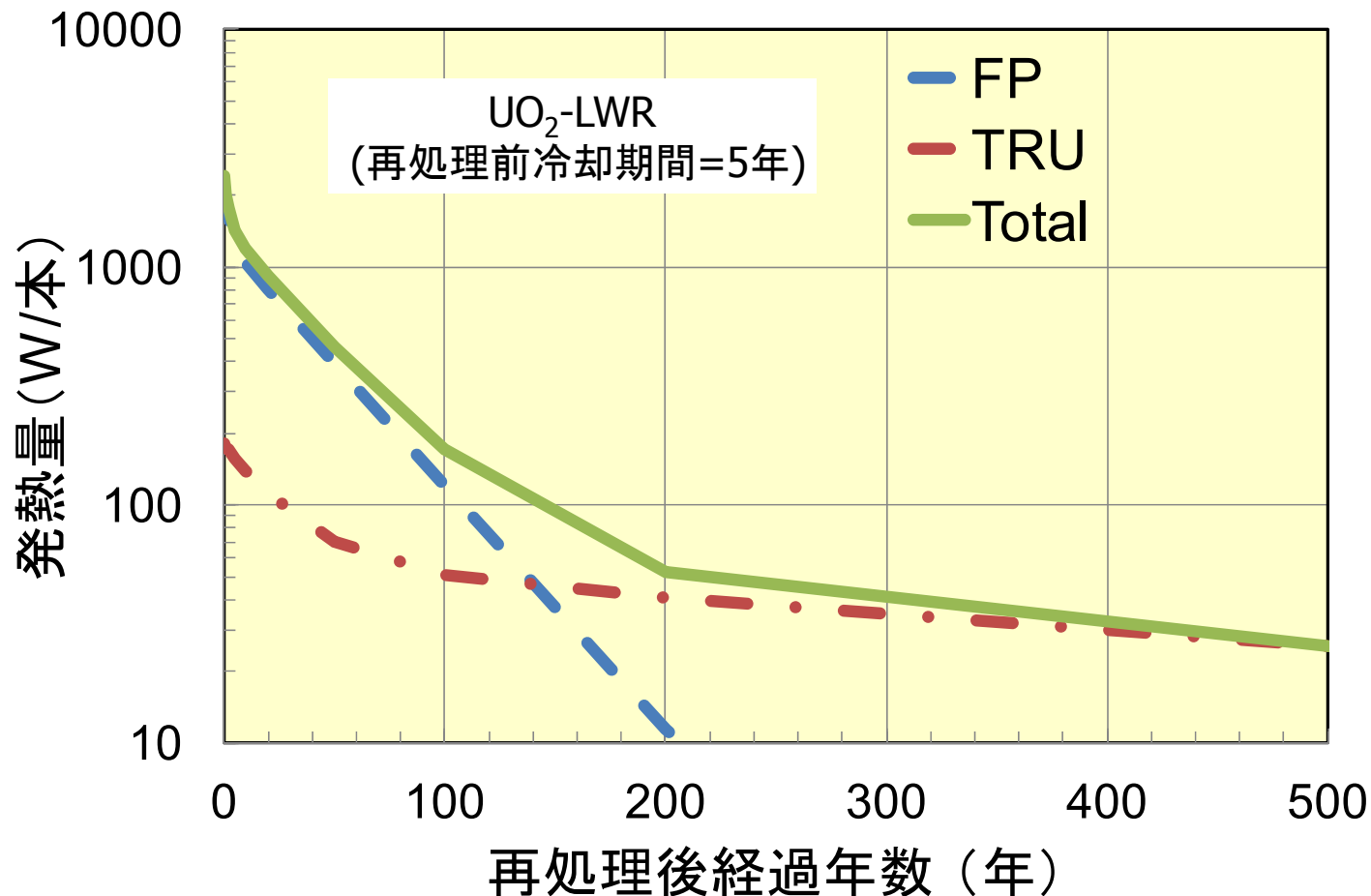
- ・加速器を止めれば連鎖反応は停止  
→ 安全性が高い。
- ・通常の原子炉(臨界炉)でMA燃料を用いると安全上の問題(遅発中性子割合、冷却材ボイド反応度等)が生じるが、ADSでは影響が小さいため使用可能。  
→ 1基で軽水炉10基分のMAを核変換。
- ・Pb-Biは化学的に不活性。

# 使用済燃料の潜在的有害度の減衰と核変換の効果

潜在的有害度： 各放射性核種の人体への影響(線量換算係数)で重みづけした指標



# ガラス固化体の発熱の減衰



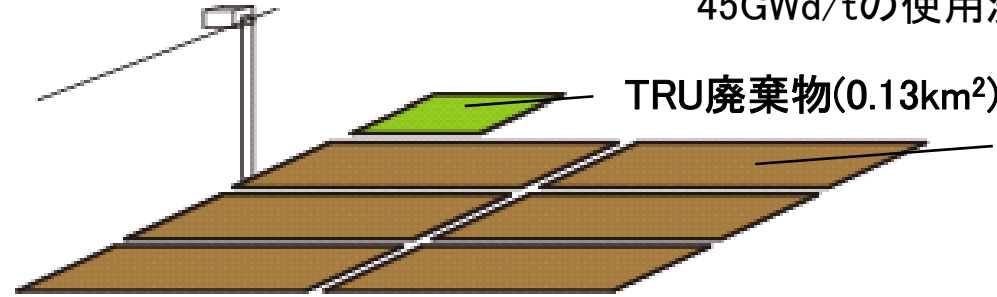
- ガラス固化体は初期発熱が大きい(2.3kW/本程度)ので、処分場の閉じ込め性能に影響を及ぼさなくなるまで冷却(約50年、350W/本程度)してから処分
- 200年以降もTRU(主にAm-241)の発熱は続く

# 分離変換技術の導入による処分概念の合理化 長期貯蔵との組み合わせ



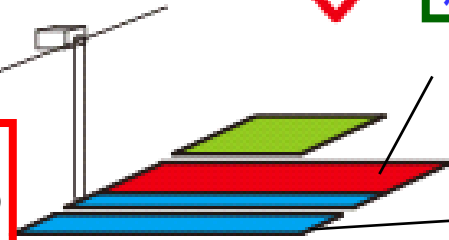
45GWd/tの使用済み燃料32,000tHMで規格化

## 従来の地層処分



## 分離変換導入

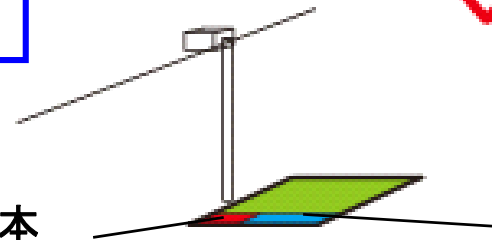
MA核変換は超長期の潜在的有害度削減と長期発熱核種(Am-241)の除去に有効



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

## さらに長期貯蔵

Sr-Cs焼成体:5,100本  
(冷却320年、面積:0.005km<sup>2</sup>)

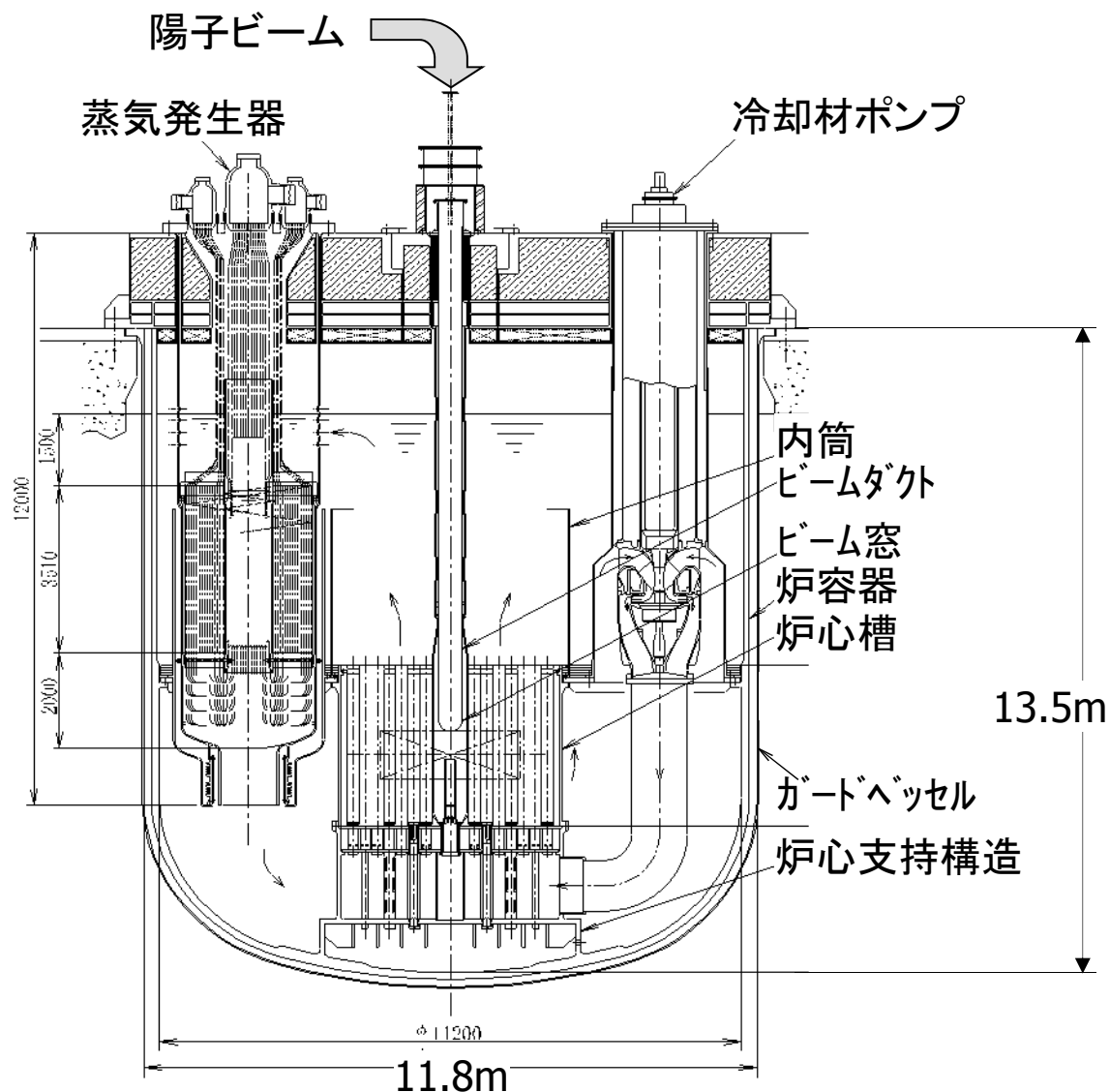


Sr-Csに300年程度の長期貯蔵を適用することで、全てTRU廃棄物相当の廃棄体とでき、処分場面積を約1/100に

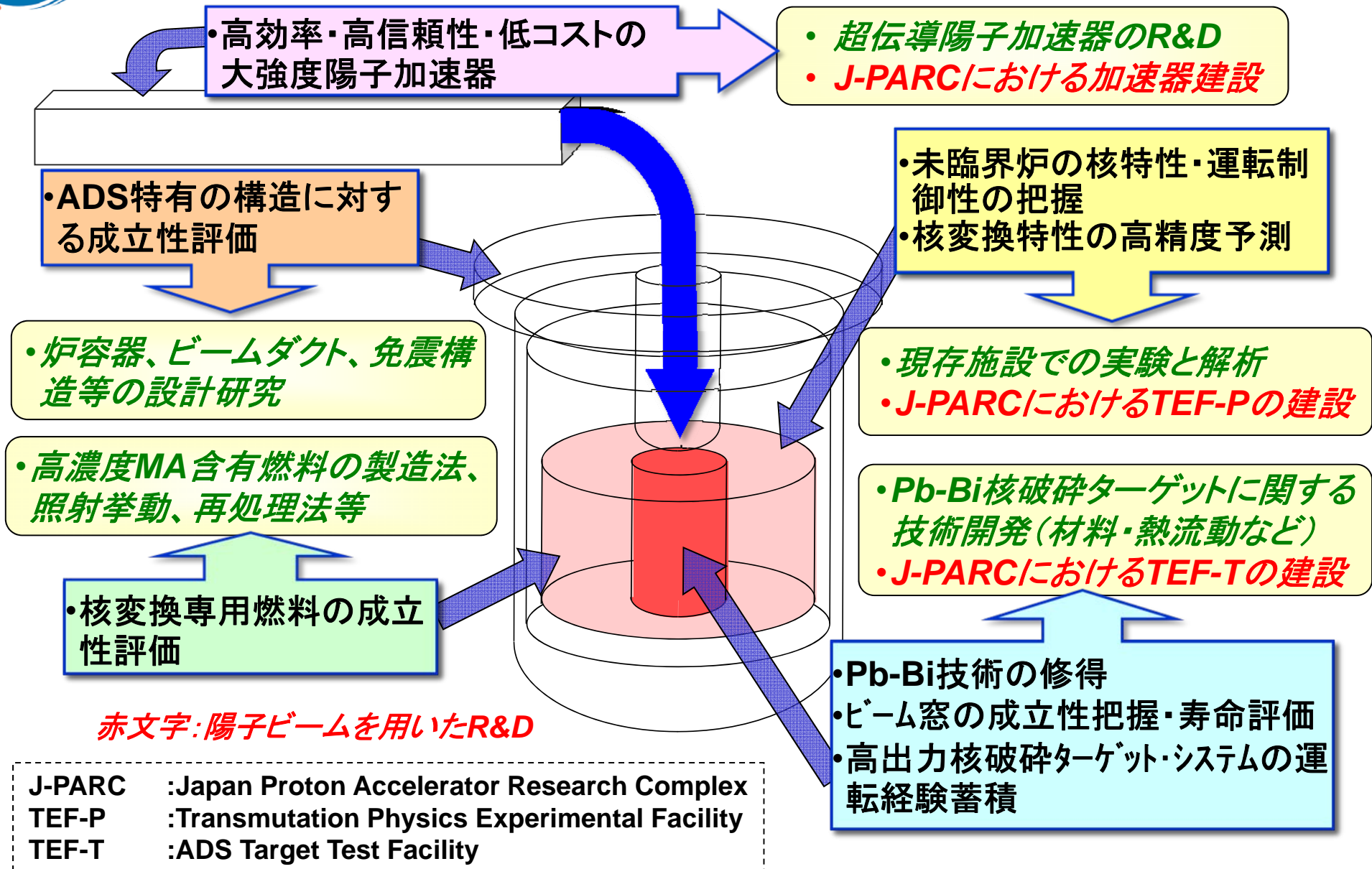
# ADSの概略仕様



- ・ 陽子ビーム : 1.5GeV
- ・ 核破砕ターゲット : Pb-Bi
- ・ 冷却材 : Pb-Bi  
    入り口 : 300°C、出口 : 407°C
- ・ 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)N + ZrN
- ・ 核変換効率 :  
    10%MA / 年
- ・ 燃料交換法 : 600EFPD, 1 バッチ
  
- ・ 主循環ポンプ : 2基
- ・ 蒸気発生器 : 4基
- ・ 崩壊熱除去計 : 3系統



# ADSの開発に必要な技術



# 鉛ビスマスによるビーム窓模擬体の冷却試験

目的: ビーム窓成立性評価で重要な鉛ビスマスの伝熱流動特性を把握する



伝熱流動ループ全景 (JLBL-3)



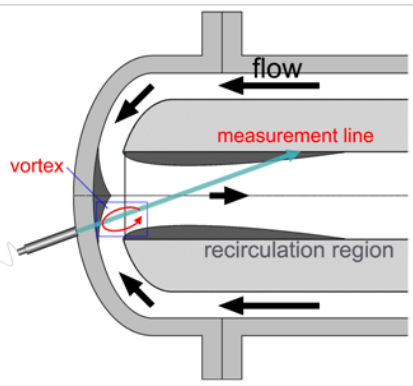
ヒータ出力: 6kW  
 流量: 100-500 L/min.  
 入り口温度: 330-430°C

ビーム窓模擬試験体



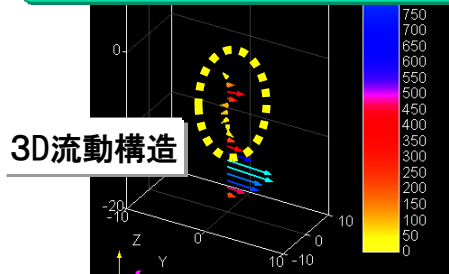
オーバーフロー部の流況

## LBE流動の実験的評価手法



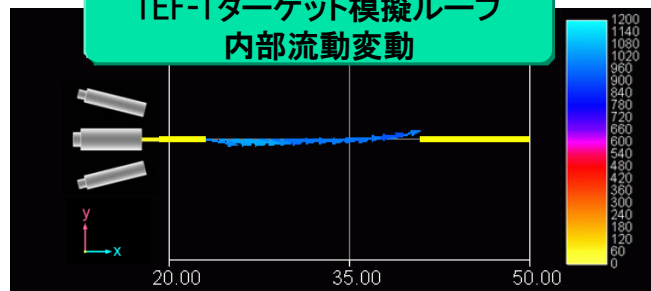
TEF-Tターゲット  
 模擬ループ (JLBL-2)

### エロージョン発生箇所を模擬した 局所流動計測



3D流動構造

### TEF-Tターゲット模擬ループ 内部流動変動



- ❑ 先端部で温度の不安定挙動が観察されたが、全体的な熱伝達特性は、乱流モデルに低Re数型線形k-εモデルで精度良く予測可能
- ❑ 今後、グリッドスペーサを含めた被覆管の伝熱流動試験が必要
- ❑ 予測解析手法の実験的評価のため、超音波によるLBE流動計測手法を開発中(耐熱性に課題)

# 大強度陽子加速器プロジェクト J-PARC





# J-PARCにおける核変換実験施設計画(第Ⅱ期計画)

## 核変換物理実験施設:TEF-P

目的: 低出力で未臨界炉心の物理的性質を探るとともに、ADSの運転制御経験を蓄積する

施設区分: 原子炉(臨界実験施設)

陽子ビーム: 400MeV-10W

熱出力: 500W以下

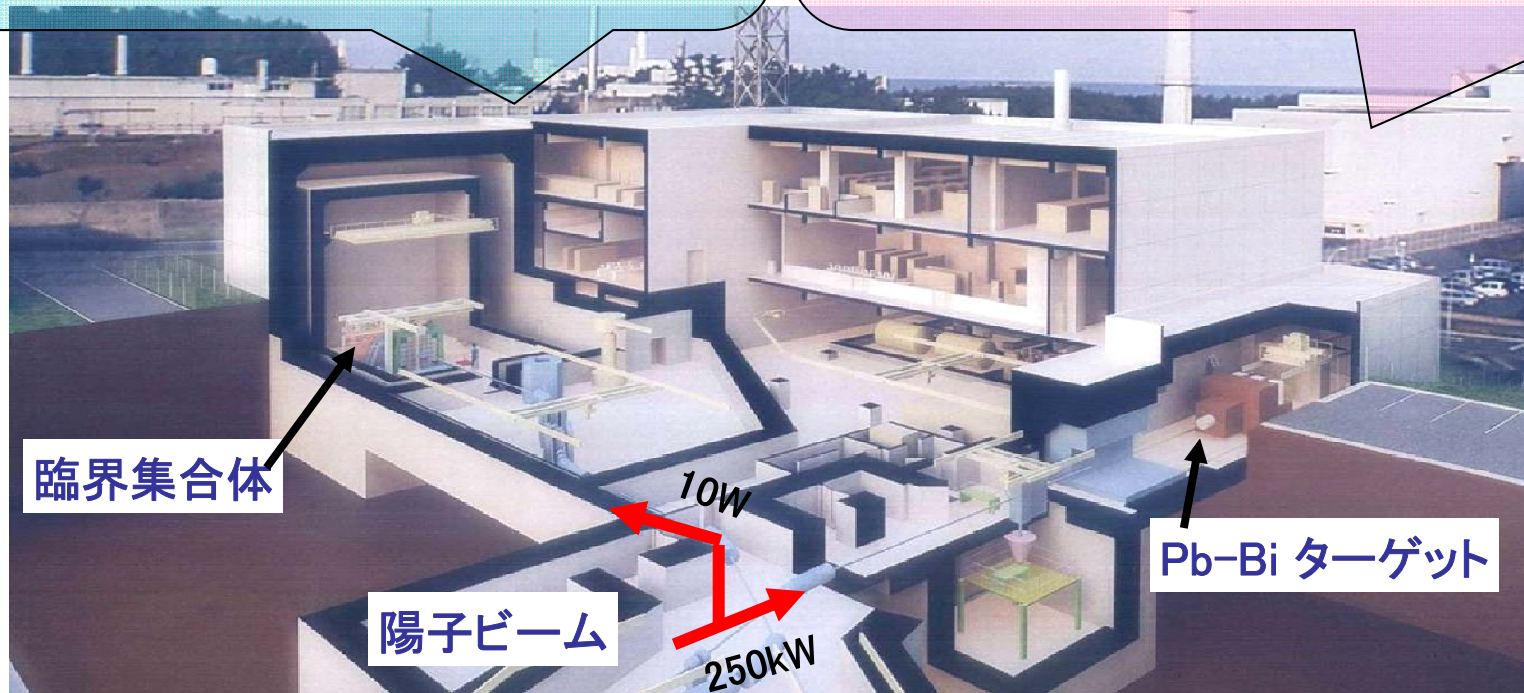
## ADSターゲット試験施設:TEF-T

目的: 大強度の陽子ビームで核破砕ターゲットの技術開発と材料の研究開発を行う

施設区分: 放射線発生装置

陽子ビーム: 400MeV-250kW

ターゲット材料: 鉛ビスマス合金



臨界集合体

陽子ビーム

10W

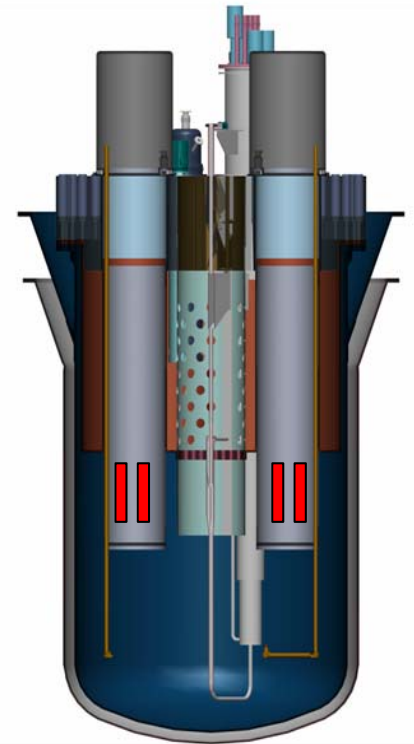
250kW

Pb-Bi ターゲット

# 核変換技術に関する世界の動向



- 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・パネルを設けて、今後の政策を検討。→中間貯蔵の推進へ
  - レーザー核融合を中性子源としたハイブリッド核変換等の検討も進捗
- フランス
  - 2006年の「廃棄物管理研究法」に基づき、ADSとFBRの両方を並行して研究
  - 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年着工を目指している
  - 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、CDT等の多様なプロジェクトを展開し、研究者・技術者の育成にも活用。
- インド：トリウム資源の利用を狙ったADSの研究を実施中
- アジア：日、中、韓、印、インドネシアの有志研究者によりWGを設立して、ADSロードマップの作成を開始
- 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いる照射用ADS:MYRRHA

# まとめ

- ADSは、長寿命核種の核変換を効率よく行うことで、放射性廃棄物の負担軽減に貢献する可能性を秘めている。
- 我が国は、これまでに大強度加速器技術、高速炉技術、核燃料サイクル技術等を培ってきており、ADSを用いた核変換技術を通して、世界における原子力の安全な利用に貢献するべき。
- 核変換は、様々な国・分野の研究者・技術者の力を結集して、数十年かけて実現する技術。若い人たちが、この技術の実現を目指した研究開発に積極的に参加してくれることを願う。