

高レベル放射性廃棄物の 減容化・有害度低減への挑戦

平成26年11月27日

独立行政法人日本原子力研究開発機構

戦略企画室 次長

大井川 宏之

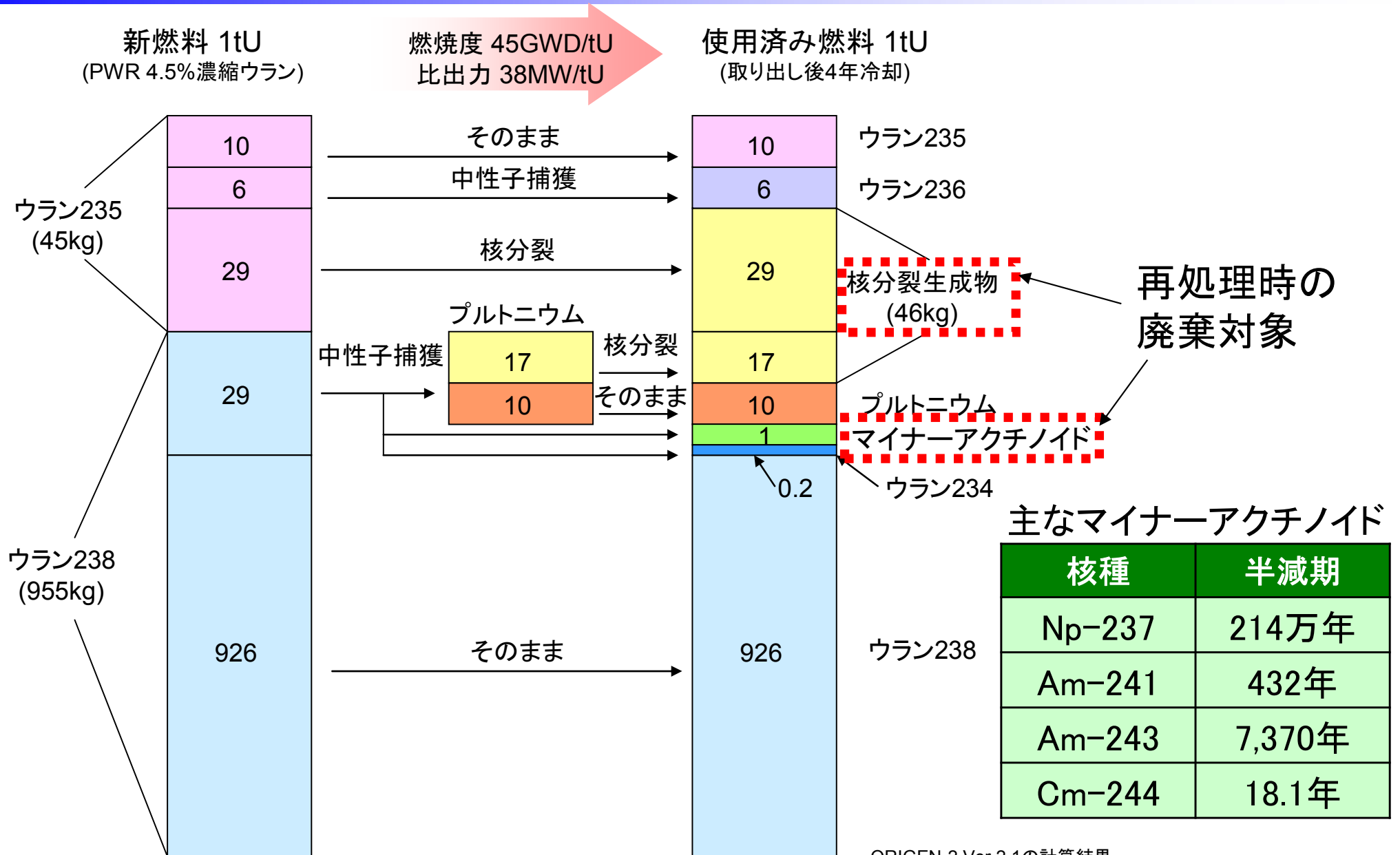
背景

- 原子力を利用する上で、放射性廃棄物の処理処分の負担軽減が課題
 - 100万キロワット級の原子力発電所からは毎年約20トンの使用済燃料が発生
 - 我が国は大量の使用済燃料を保管(約17,000トン)
- ◎ 原子力機構では、廃棄物処分の負担軽減を目指し、核燃料サイクルの研究開発とともに、「分離変換技術」の研究開発を進めてきた



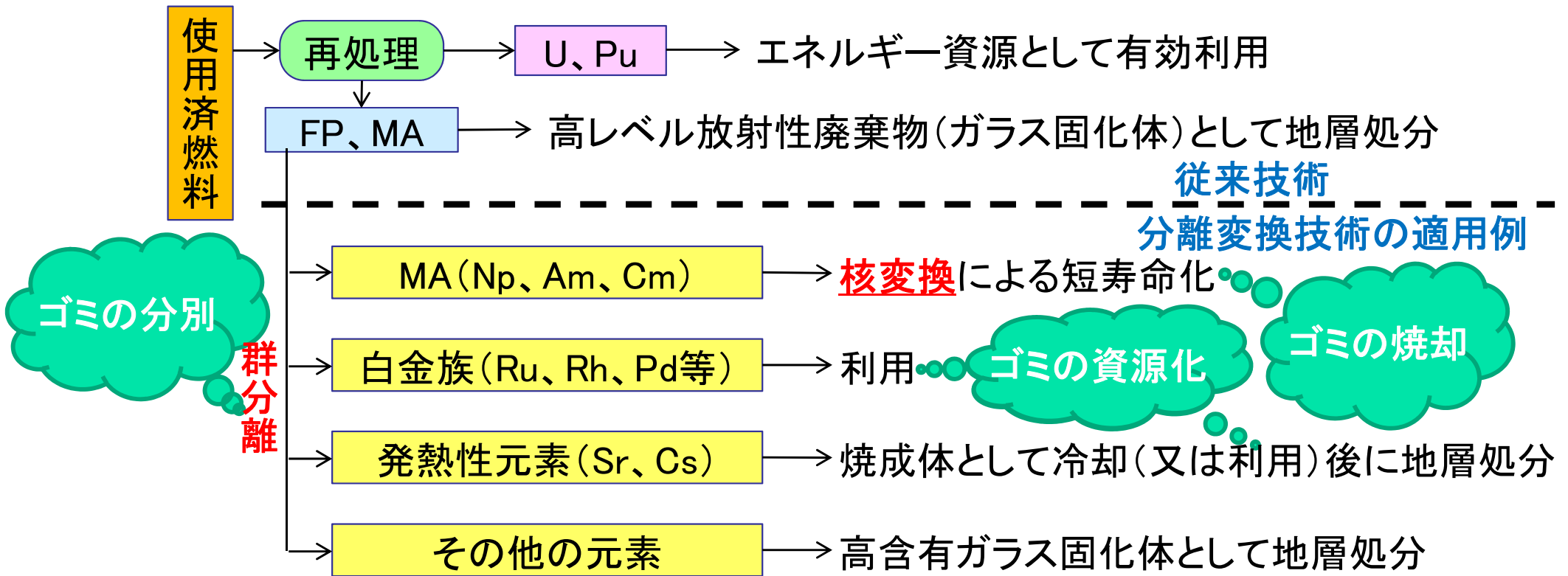
- 昨年9月、文部科学省は「もんじゅ研究計画」を取りまとめ、廃棄物の減容・有害度低減等を目指した研究開発を「もんじゅ」の3つの役割の一つとした
- 昨年11月、文部科学省は「群分離・核変換技術評価作業部会」において、加速器駆動システムを中心とした研究開発について推進の方向性を示した
- 本年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、「高速炉や、加速器を用いた核種変換など、放射性廃棄物中に長期に残留する放射線量を少なくし、放射性廃棄物の処理・処分の安全性を高める技術等の開発を国際的なネットワークを活用しつつ推進する」などの方向性が示された

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)

分離変換技術 (Partitioning & Transmutation)

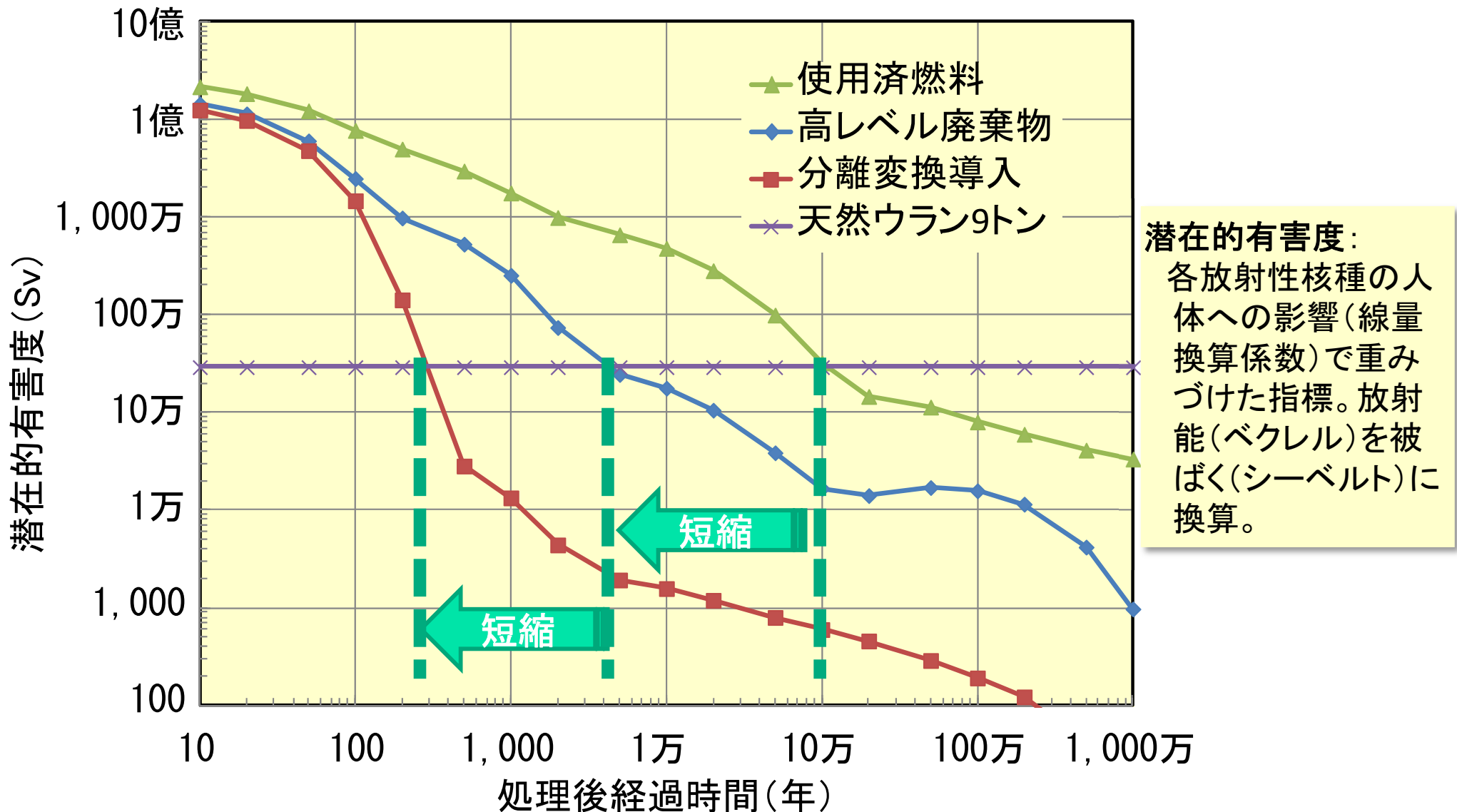


MA: マイナーアクチノイド
FP: 核分裂生成物

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
- ・ **処分場のコンパクト化:**
発熱の大きい核種を除去
- ・ **放射性廃棄物の一部資源化:**
希少元素の利用(白金族、希土類など)

使用済燃料の潜在的有害度の減衰



群分離プロセスの研究開発

- MA分離回収

- **MA+RE分離**: TDdDGA抽出剤によるプロセスを開発中。模擬廃液中のAmの99.99%以上回収に成功
- **MA/RE分離**: 新規抽出剤の開発を進め、高い分離性能を有する数種の候補抽出剤を見出した

- Sr-Cs、その他

- 抽出クロマトグラフ法の小規模実液試験等を実施



NUCEF/BECKY
空気雰囲気セル



NUCEF/BECKY
空気雰囲気グローブボックス

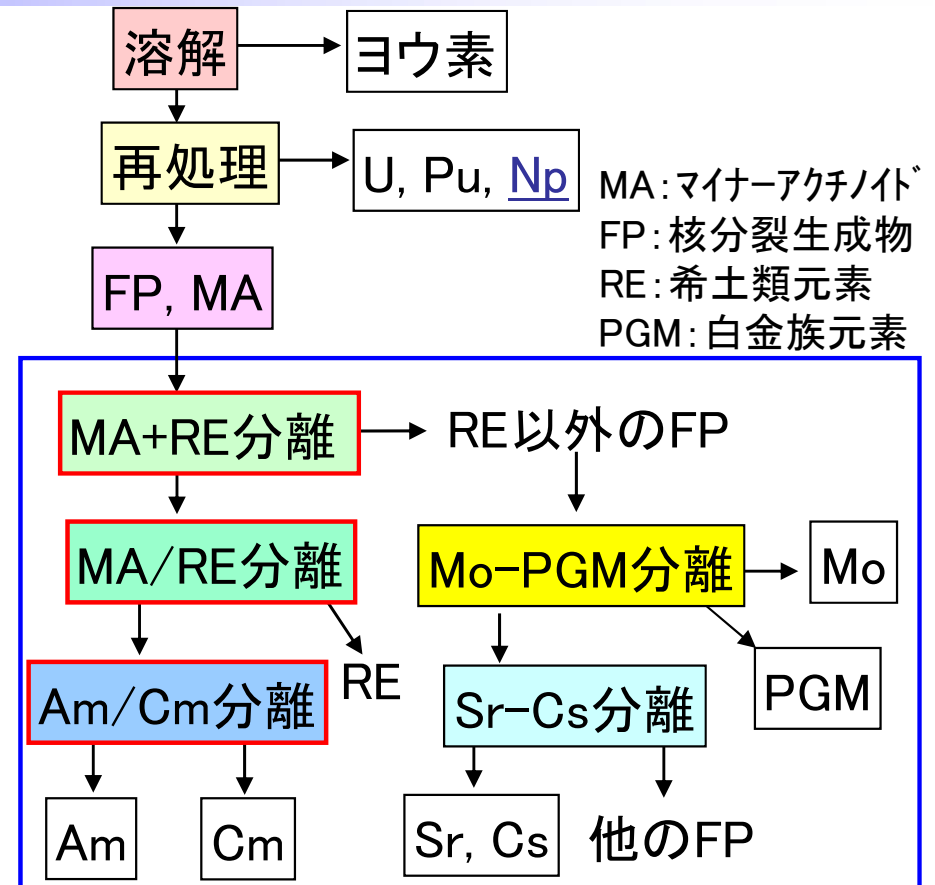
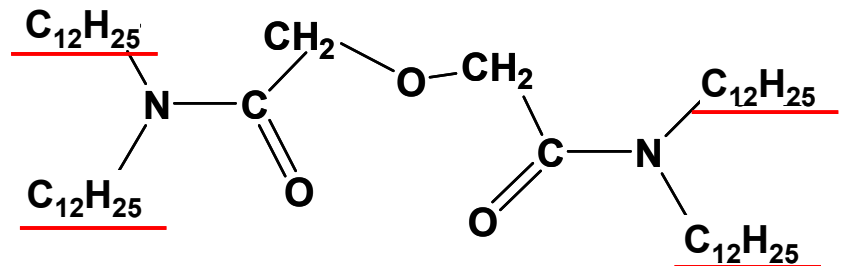


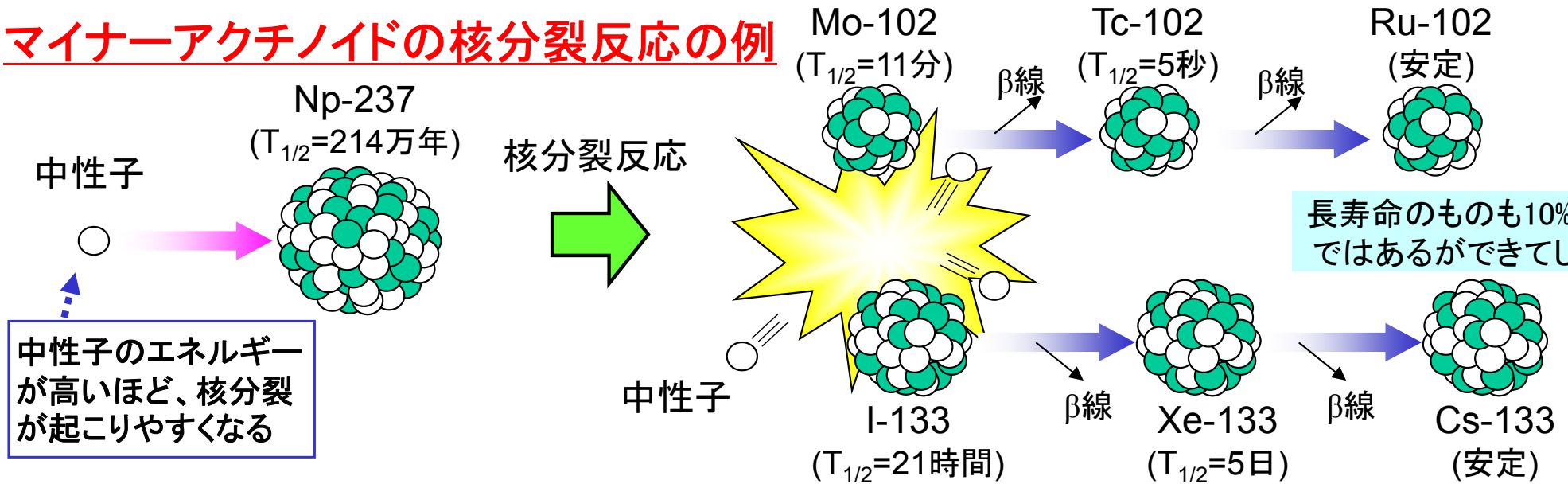
図 分離プロセスの一例



TDdDGA : テトラドデシルジグリコールアミド (ドデシルDGA)

核変換の方法

マイナーアクチノイドの核分裂反応の例



- ・原子核に入り込みやすい 中性子を使うのが有効
- ・マイナーアクチノイドは 高速中性子で核分裂させるのが効率的
- ・高速中性子の供給方法：
 - 高速炉 → 高速炉サイクル利用型
 - 加速器 → 核変換専用サイクル型(階層型)

高速炉サイクル利用型と 核変換専用サイクル型(階層型)

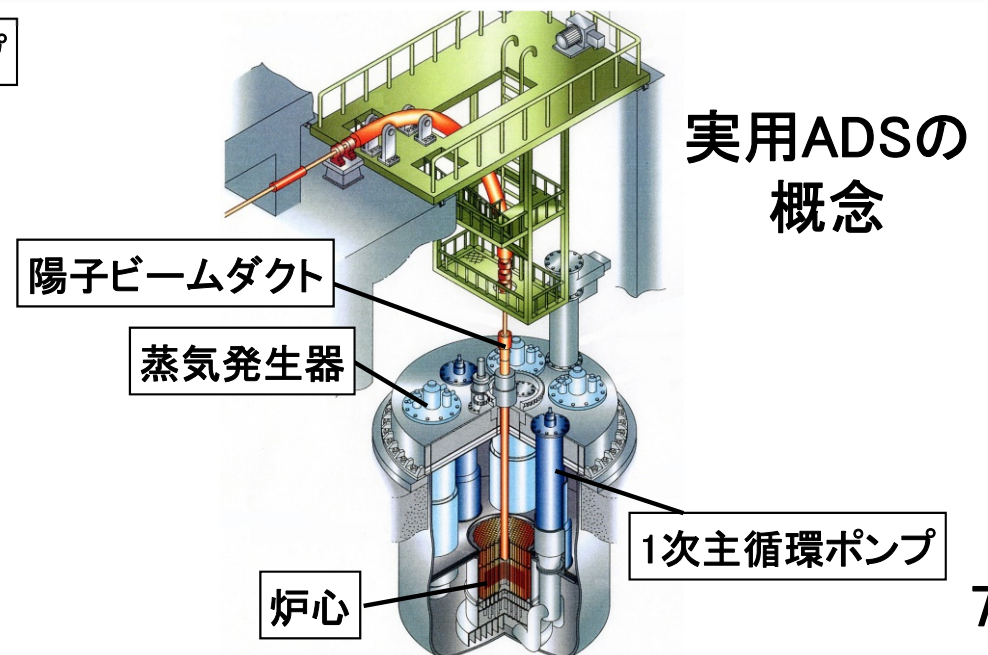
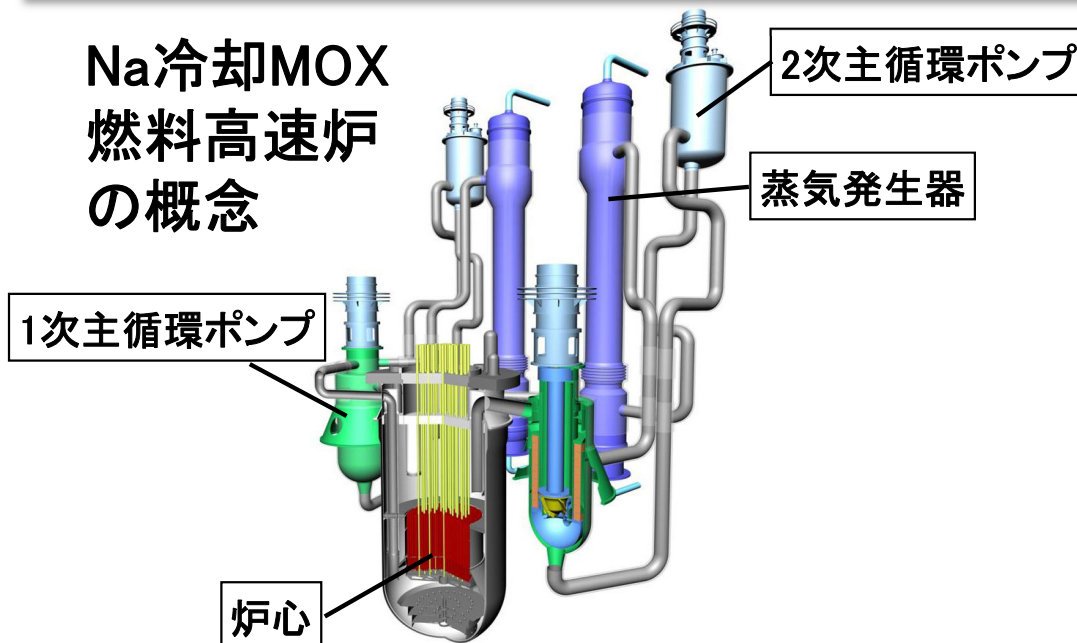
高速炉サイクル利用型

- ・発電炉を用いた分離変換技術
- ・ひとつのサイクル内でPuと共にMAをリサイクル
- ・発電炉(高速炉)内でMAを核変換
- ・燃料のMA含有量は5%まで
- ・Na冷却MOX燃料高速炉が有力候補

核変換専用サイクル型(階層型)

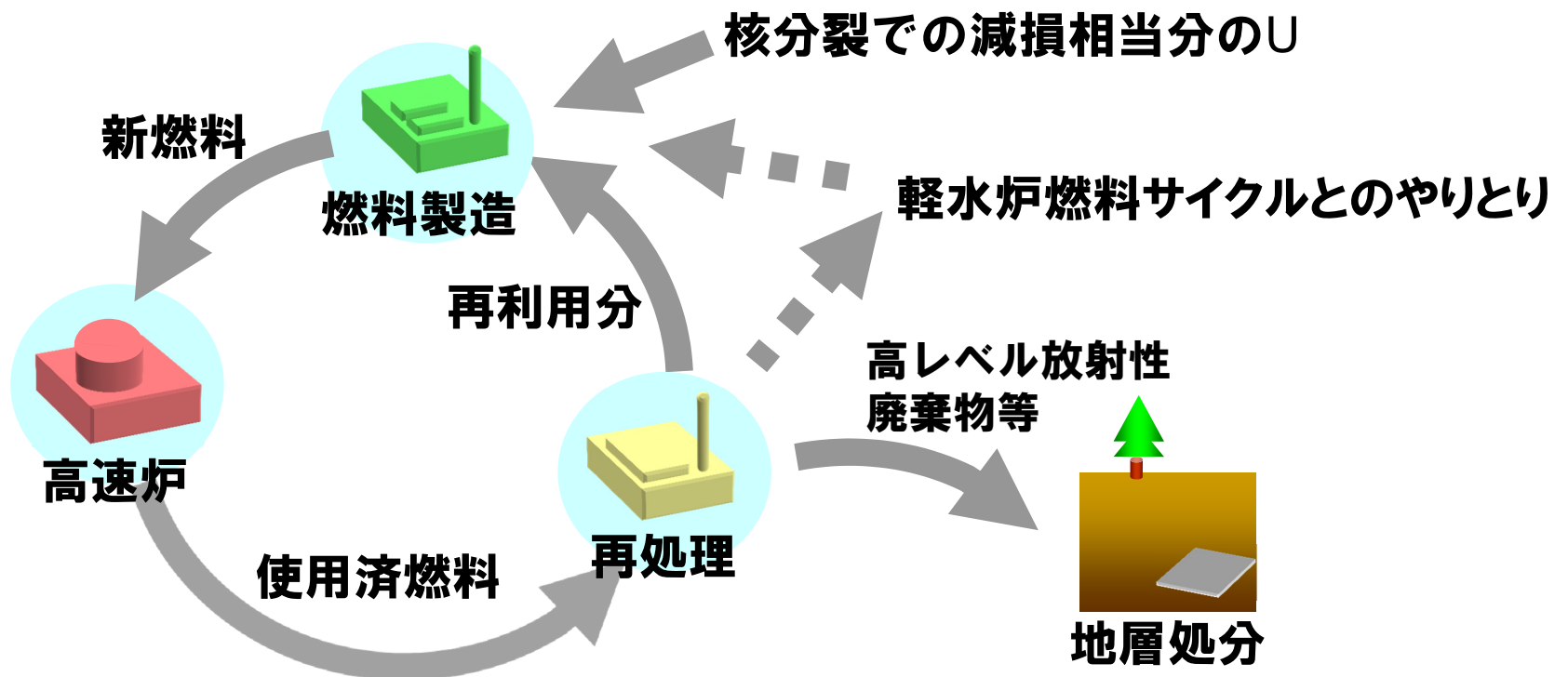
- ・発電用サイクルに核変換サイクルを付設
- ・コンパクトなサイクルにMAを閉じ込める
- ・核変換専用システム(加速器駆動システム: ADS 等)
- ・燃料のMA含有量は50%以上(ウランを含まない燃料)
- ・鉛合金冷却窒化物燃料ADSが有力候補

2つの方法は共通部分が多く、それぞれに特徴を持つことから、並行・連携して研究開発を推進



高速炉サイクル利用型の特徴

- エネルギー生産とウラン資源の有効利用を達成しながら、MAを核変換し、放射性廃棄物に含まれるPu、MAを最小化
 - 炉心の変更により、MAを核変換しながら、Puの増殖にも、Puの燃焼にも利用可能
- 社会ニーズに応じて役割を変えられる(Pu増殖、持続、TRU管理)



社会ニーズに応じた 高速炉サイクルの役割

代表例	Puの外部への供給	自己で再利用	投入	意義、ねらい
Pu増殖モード	Pu増加分 (発電規模増加に利用)	U減損、Pu装荷分、MA	U減損分	Puストックなしで 高速炉発電規模を拡大 (高速増殖炉開発当初)
持続モード	なし	U減損 PuとMAは不変	U減損分	将来の持続的エネルギー源 U資源を最大利用 (エネルギー基本計画)
TRU管理モード	なし	U、Pu、MA減少	U、Pu、MA減少分	軽水炉サイクルの TRU量調整・廃棄物低減 (エネルギー基本計画)

注) 表中示したサイクルのモード概念は代表例

高速炉サイクル利用型で確認すべき事項

燃料開発及び照射試験:

- ・MA含有MOX燃料、高Pu富化度MOX燃料等の系統的な照射試験



FMF



AGF

燃料製造:

- ・遠隔製造技術の開発
- ・対応可能な燃料組成範囲の判断



Pu-3



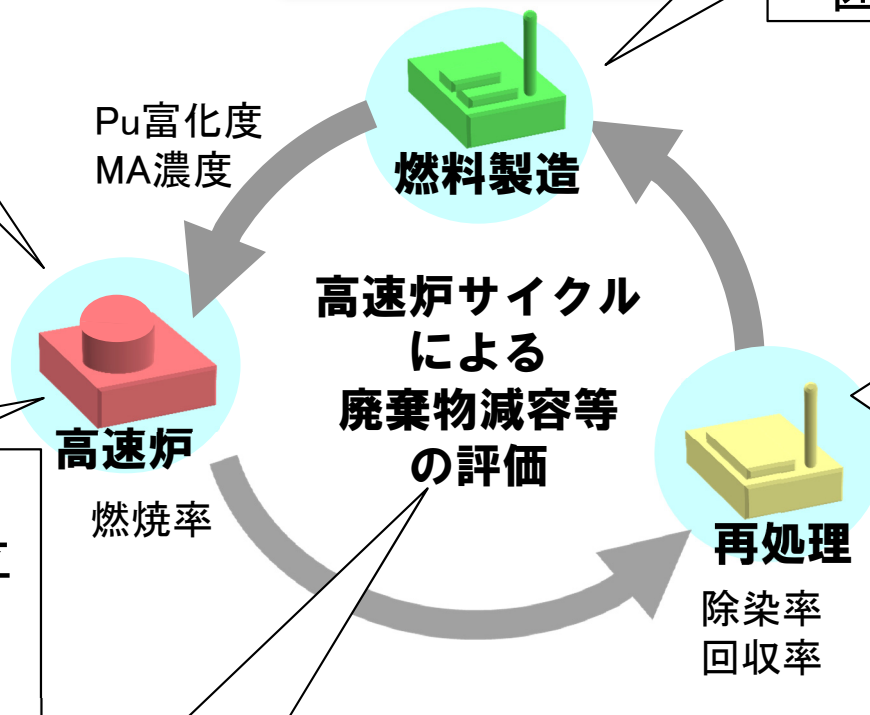
常陽

炉特性・炉システム:

- ・高速炉プラント技術の成立性確認
- ・MA含有炉心の特性取得



もんじゅ



再処理:

- ・MA分離プロセスの開発と性能評価
- ・実現可能なプロセス概念の構築

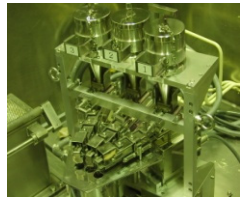


CPF

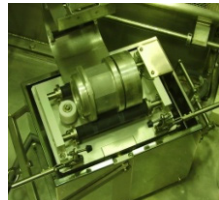
全体システム評価:

- ・各分野の情報の統合と有望なシステム概念の絞り込み
- ・廃棄物減容化・有害度低減の効果の確認

①燃料製造技術 (遠隔燃料製造に向けた開発)



粉末供給装置(秤量機)



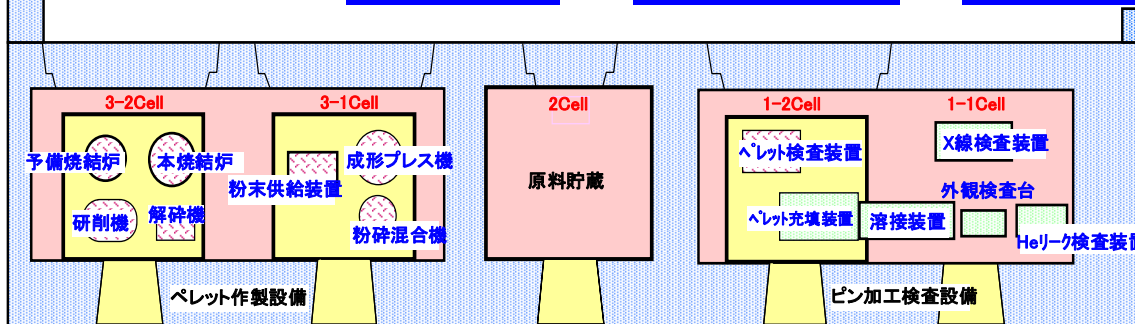
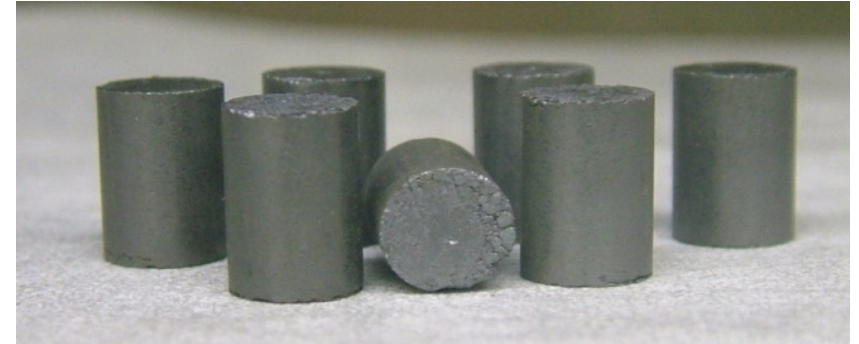
回転揺動混合機



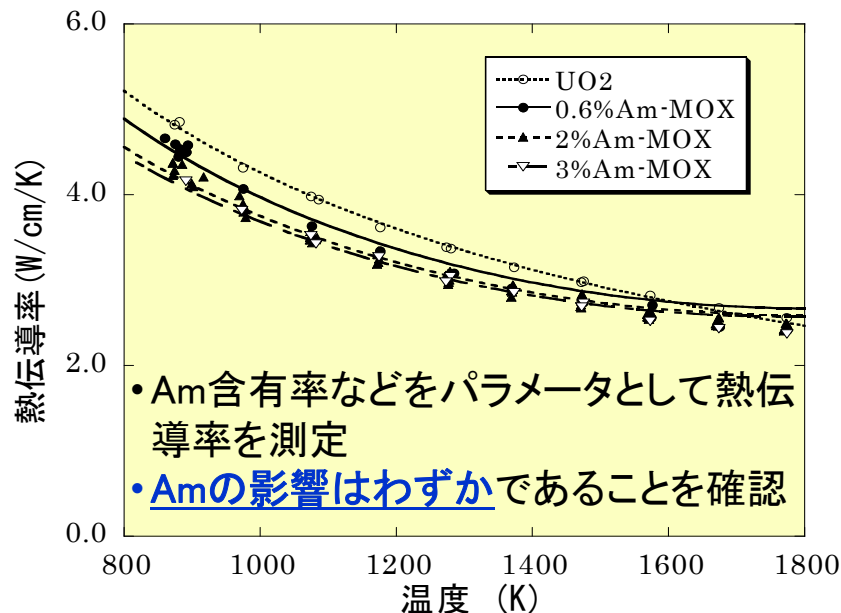
成形プレス機



本焼結炉



- ・ホットセルにおいてAm-MOX燃料ペレット製造設備、ピン加工検査設備を導入
- ・遠隔での操作性・保守性を考慮
- ・常陽で照射した試験燃料ピン(5%Am-MOX)を遠隔製造



- ・Am含有率などをパラメータとして熱伝導率を測定
- ・Amの影響はわずかであることを確認

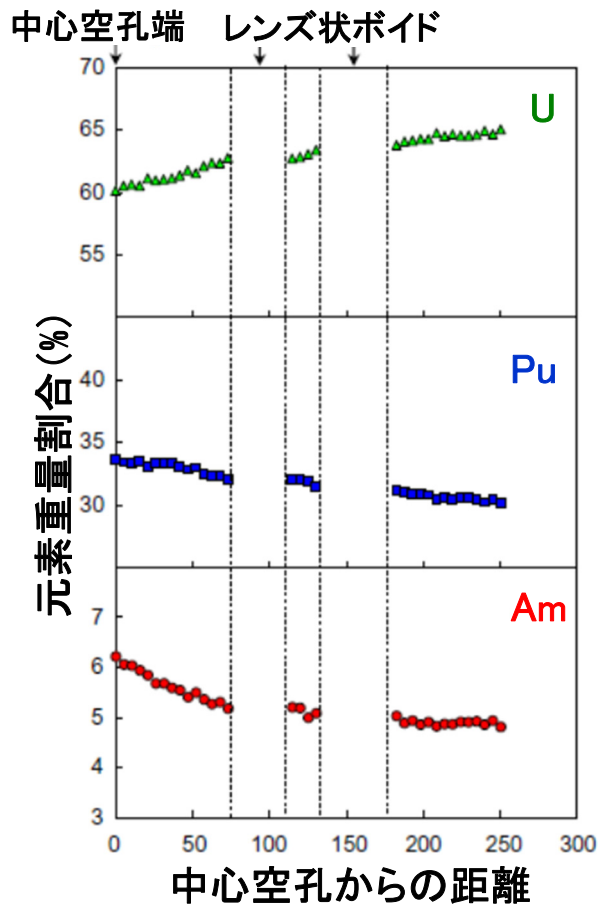
熱伝導率測定結果

今後のMA-MOX燃料製造技術開発

- 製造プロセスの基礎試験(O/M調整技術等)及び融点、熱伝導度等の燃料の基礎物性研究
- 高線量、高発熱となるMA燃料の遠隔燃料製造に適した製造プロセス(簡素化ペレット法:燃料粉末取扱い工程の大幅合理化プロセス)の開発
- 燃料製造自動化設備の改良高度化

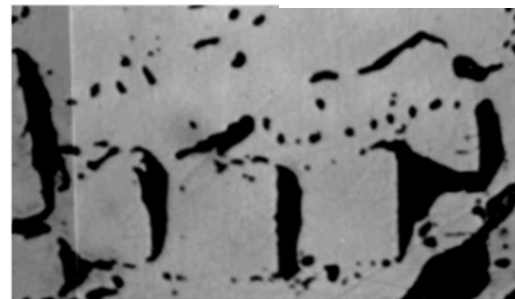
②燃料開発及び照射試験 (Am含有MOX燃料の照射試験)

- Amを最大5%含有するMOX燃料の「**常陽**」**短期照射試験**により、**燃焼初期の燃料挙動に対するAm含有効果は小さい**ことを確認
- 今後、**燃焼度、線出力等のデータ範囲を拡張**するとともに、「**もんじゅ**」での**実規模照射**を実施予定

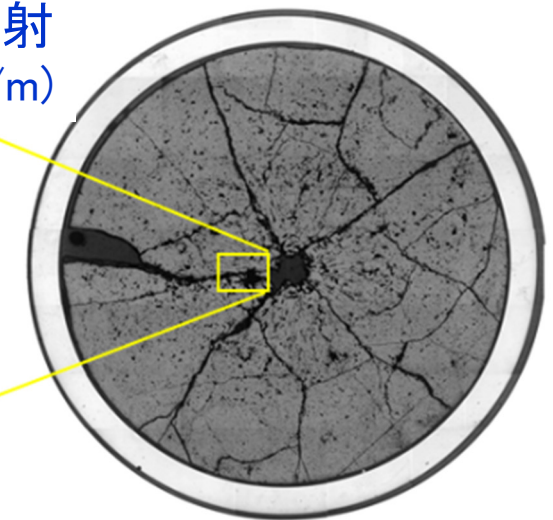


短時間照射試験後の中心空孔部周辺の元素濃度分布 (5%Am、10分間照射)

10分間照射
(43kW/m)



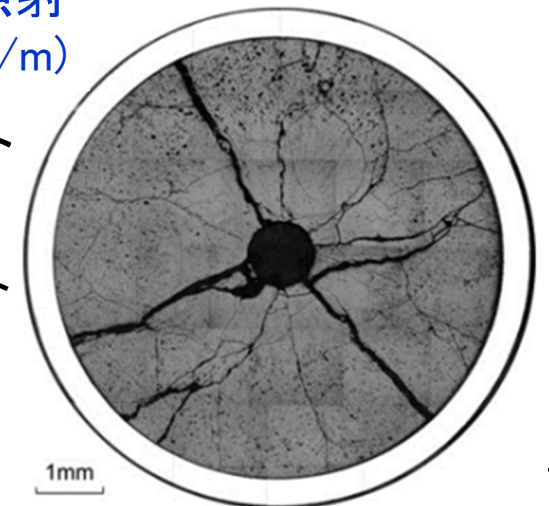
(レンズ状ポイド)



24時間照射
(45kW/m)

短時間照射試験のペレット横断面の金相写真

照射が進むにつれ、ペレットの組織変化が進行し、中心空孔が拡大

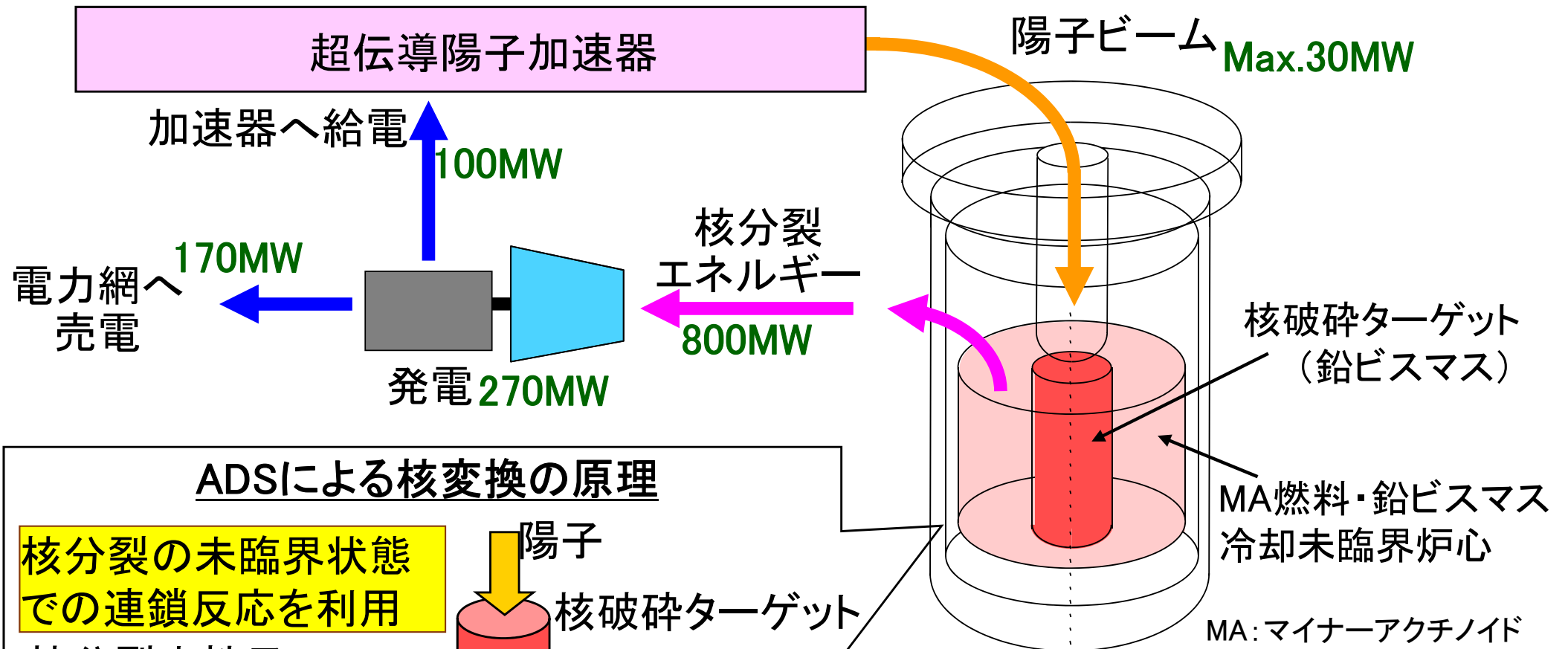


高速炉を用いた核変換技術の 今後の取組

- 「もんじゅ研究計画」の高速増殖炉開発の成果の取りまとめにより、Na冷却MOX燃料(原子炉級Pu)高速炉の技術成立性を確認
- 「もんじゅ研究計画」の廃棄物減容・有害度低減研究として、Amを多く含むMOX炉心のデータを「もんじゅ」で取得
- 高次化PuやAm及びNpの均質サイクルに関する燃料製造、照射、照射後試験、再処理試験を実規模を見通せるレベルで実施
- 使用済燃料からのMA(Cmを含む)について、分離・回収転換、燃料製造、照射、照射後試験までの一連の試験を行うことにより、サイクル施設での物質収支等の知見を得る取り組みを既存施設を用いて進める
- 「もんじゅ」等での照射試験、その試験燃料の製造、原料物質調達、照射後試験等を国際協力として実施

加速器駆動核変換システム

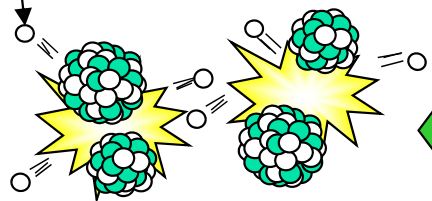
ADS: Accelerator Driven System



ADSによる核変換の原理

核分裂の未臨界状態での連鎖反応を利用

核分裂中性子

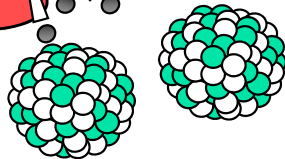


短寿命の核種

陽子

核破砕ターゲット

高速中性子



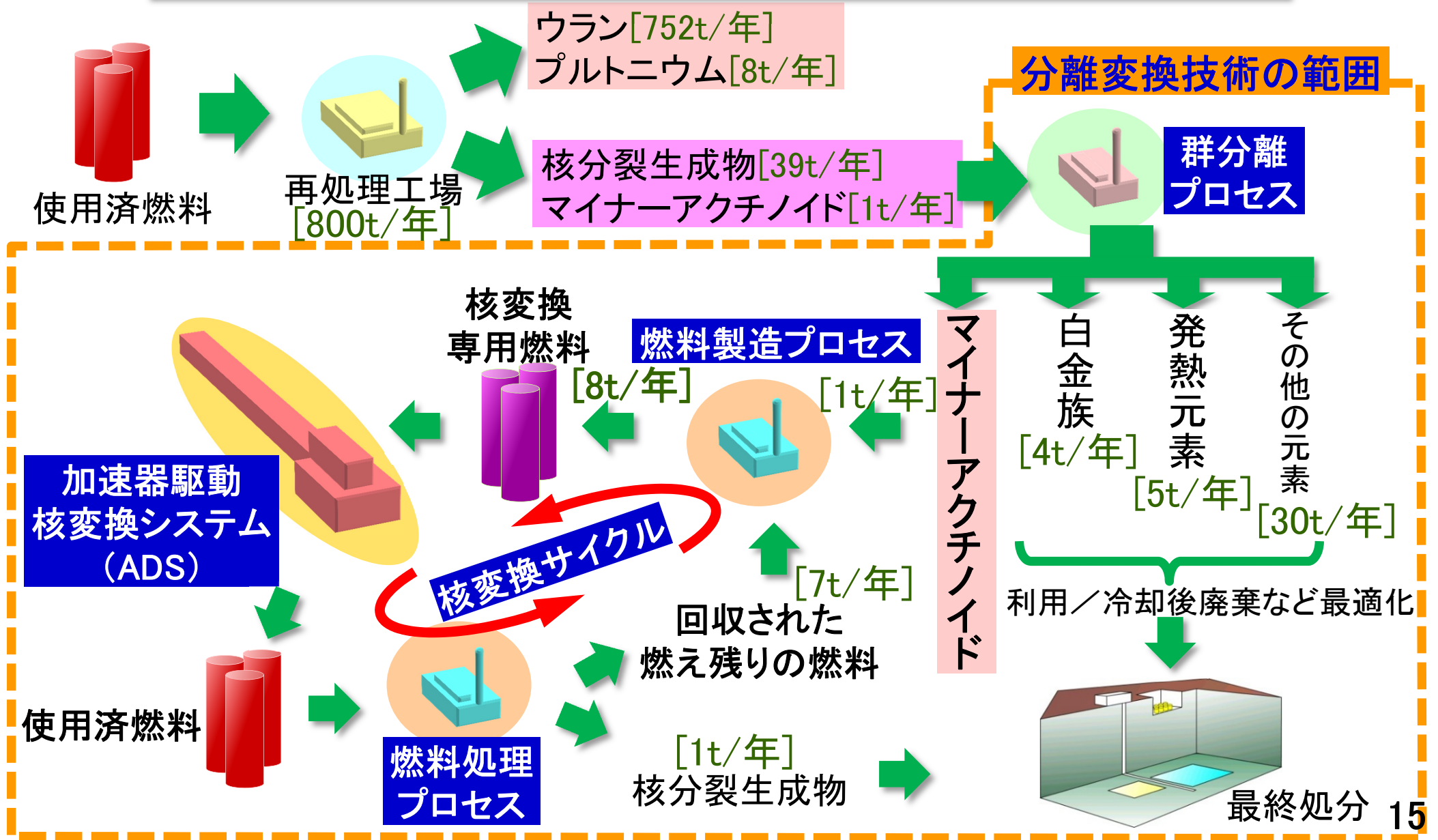
長寿命の核種

ADSの特徴:

- ・加速器を止めれば連鎖反応は停止
→ 核反応の暴走の心配が無い
- ・MA濃度の高い燃料が使用可能
→ 1基で軽水炉10基分のMAを核変換
- ・鉛ビスマスは化学的に不活性。

ADSを中心とした階層型分離変換技術

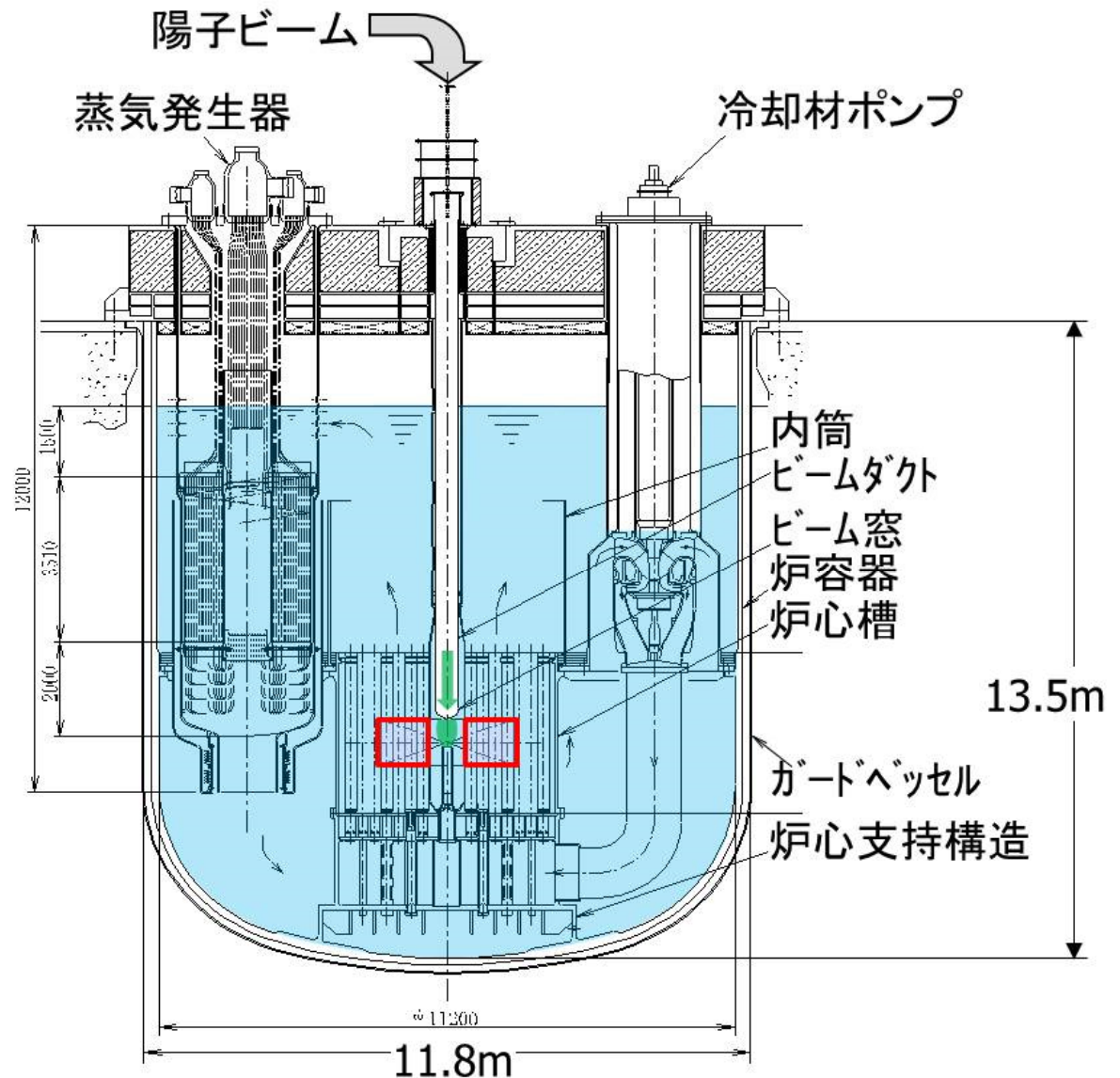
特徴：コンパクトな燃料サイクルにMAを閉じ込めて効率よく核変換



ADSの概略仕様

- ・ 陽子ビーム : 1.5GeV
- ・ 核破碎ターゲット : 鉛ビスマス
- ・ 冷却材 : 鉛ビスマス
 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



①ADSの研究開発

・FBR技術を応用しつつ、多岐にわたる研究開発が必要

鉛ビスマス技術

- ・FBR開発で培った液体金属技術(可視化、計測、純度管理等)を応用



ビーム窓模擬ループのオーバーフロー部の流況

超伝導加速器技術

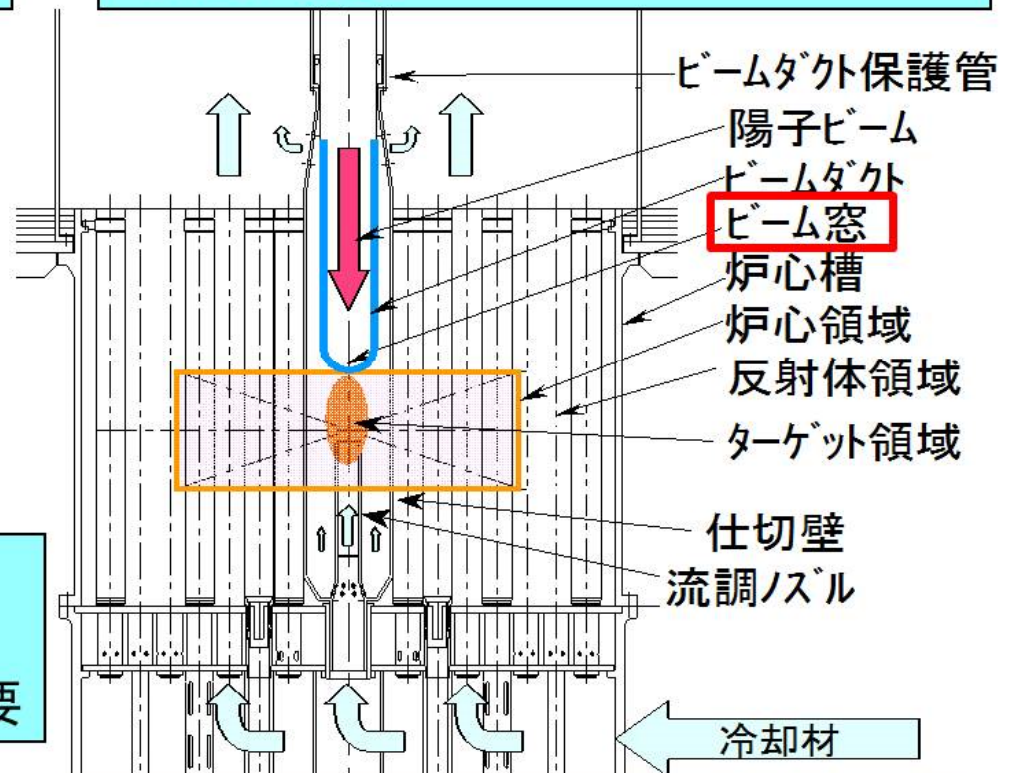
- ・高い加速電界達成を確認
- ・大強度で信頼性の高い加速器の開発が必要



ニオブ製の超伝導空洞

ビーム窓

- ・陽子・中性子で照射されるので寿命の評価が必要



未臨界炉

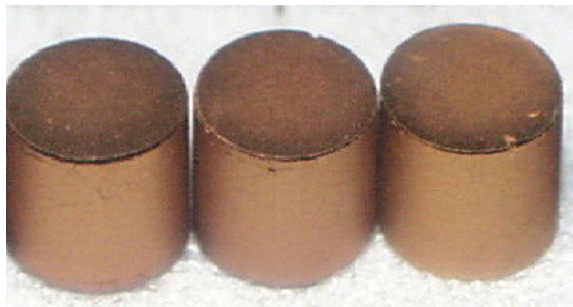
- ・運転制御の経験蓄積が必要
- ・MAや鉛の核データの検証が必要

②ADS用の核変換サイクルの研究開発

・ADS用の燃料として、MAの安定性と熱伝導度に優れる窒化物を中心に研究を実施

MA含有燃料の製造・物性測定

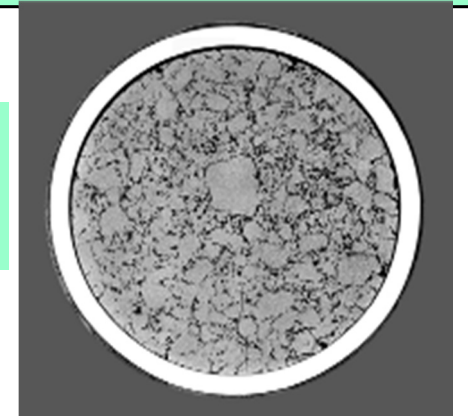
・(MA,Pu,Zr)N等の実験室規模での調製に成功し、熱伝導率を温度・ZrN含有率をパラメータに測定



(Pu,Zr)N

MA含有燃料の照射挙動評価

・(Pu,Zr)N等をJMTRや常陽で照射



JMTR照射後(Pu,Zr)Nの断面写真

燃料製造



照射挙動



燃料サイクルの課題

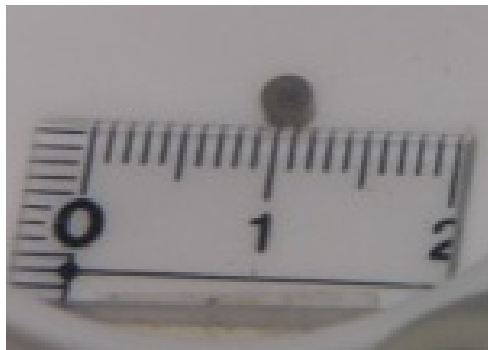
・総合的な燃料設計クラ
イテリアの選定
・工学的な技術の開発

燃料処理



使用済燃料の高温化学処理

・窒化物の電解⇒回収⇒再窒化⇒焼結に成功



(Pu_{0.21}Am_{0.21}Zr_{0.58})N



電解後の液体Cd陰極



再窒化回収粉末



(U,Pu)N焼結ペレット



NUCEF/BECKY
TRU-HITEC (Ar雰囲気セル)

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

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
特性の探索とADSの運転制御
経験を蓄積

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

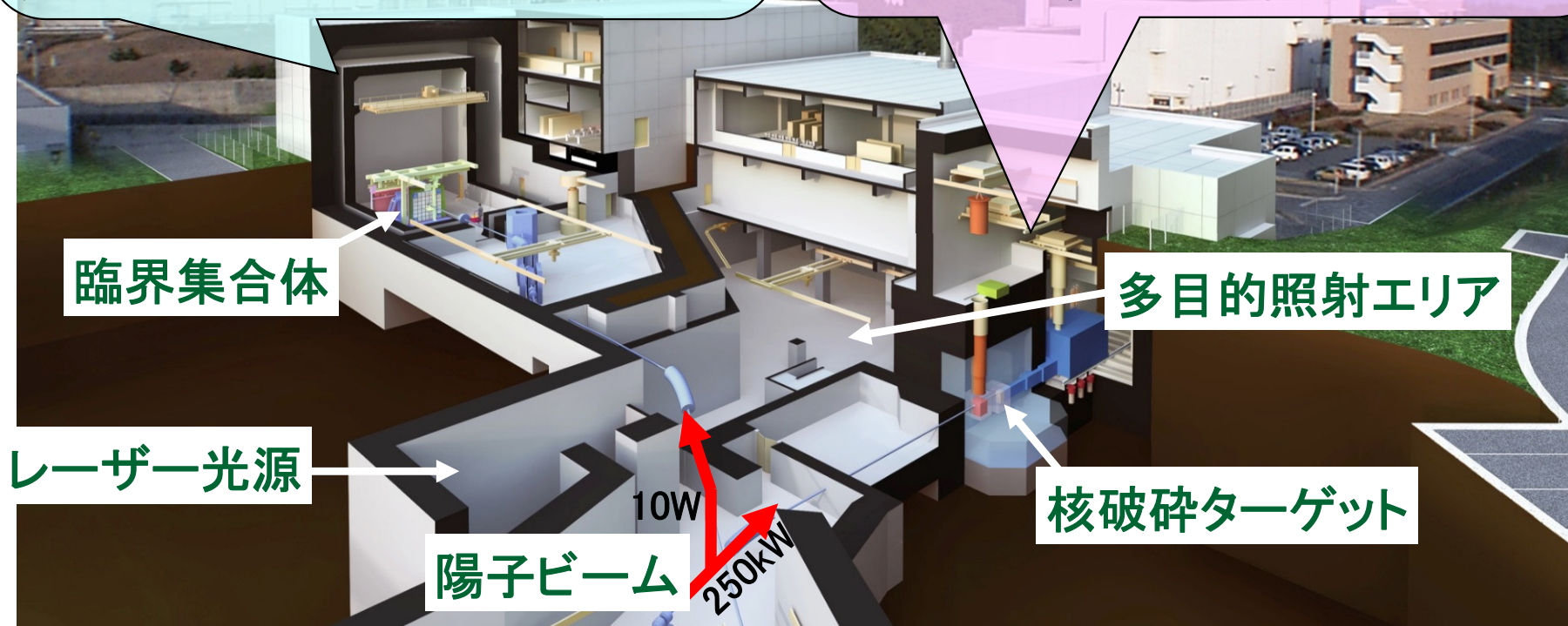
ADSターゲット試験施設: TEF-T

目的: 大強度陽子ビームでの核破砕
ターゲットの技術開発及び材料の
研究開発

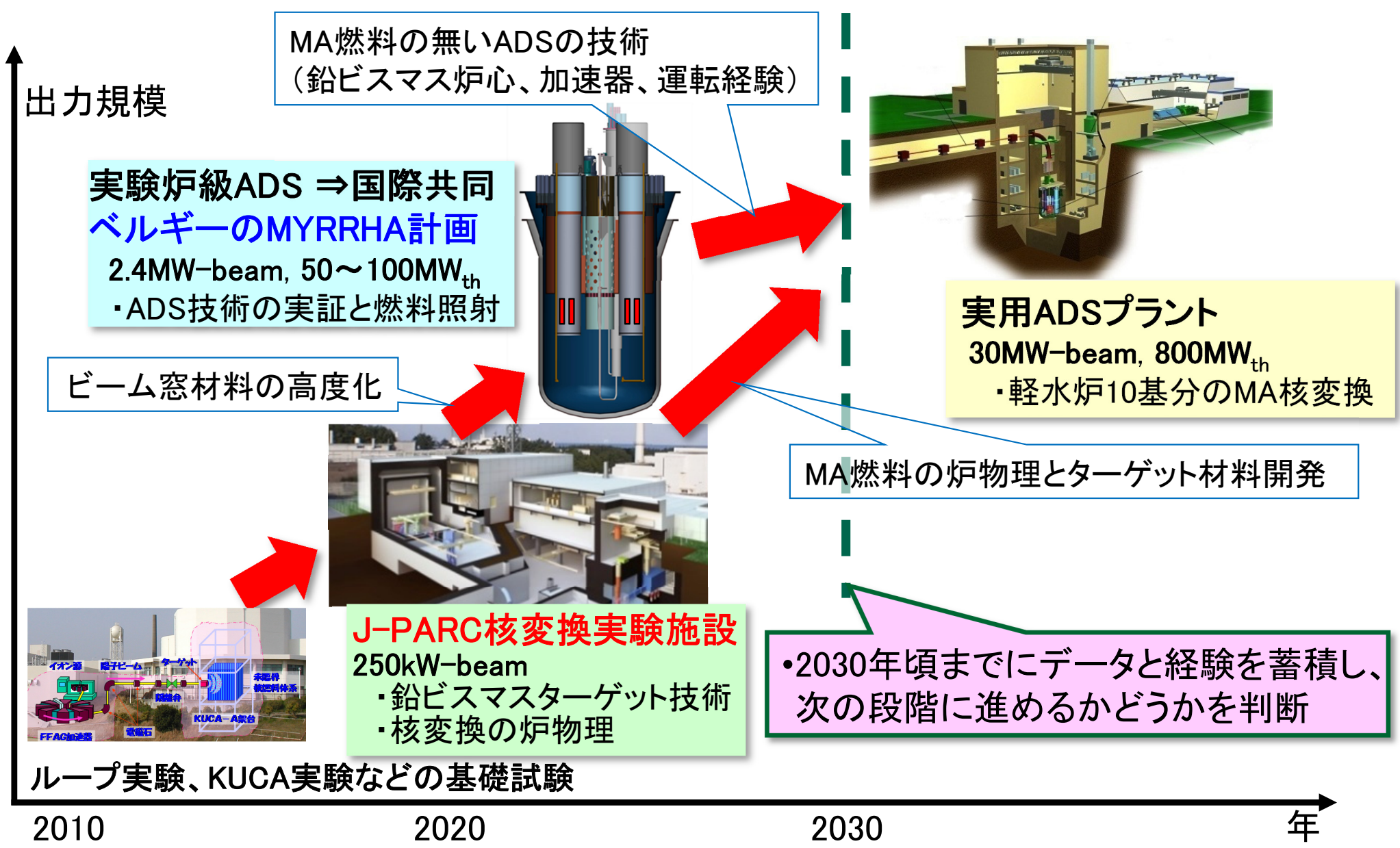
施設区分 : 放射線発生装置

陽子ビーム : 400MeV-250kW

ターゲット : 鉛ビスマス合金



ADSによる核変換技術の実用化に向けた道筋



ループ実験、KUCA実験などの基礎試験

まとめ

- 「エネルギー基本計画」、「もんじゅ研究計画」、「群分離・核変換技術評価作業部会」の見解などに基づき、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減を目指した研究開発に計画的に取り組む
- 高速炉サイクル利用型と階層型(ADS)が連携して一体的に研究開発を推進
- MA核変換システム(高速炉・加速器駆動システム)の開発だけでなく、「分離」、「MA燃料製造」、「MA燃料再処理」などの核燃料サイクル技術の研究開発が必要
- MAなどの放射性物質の取扱い能力を增強し、技術基盤を充実していくことが必要
- わが国は、世界の国々と連携し、この分野の研究開発において主導的役割を果たすことで、持続的に社会に受け入れられる原子力の利用に貢献すべき。

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 (μ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)
U-235	7億年	47	10kg
U-238	45億年	45	930kg

核種	半減期	線量換算係数 (μ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)
Pu-238	87.7年	230	0.3kg
Pu-239	2万4千年	250	6kg
Pu-240	6,564年	250	3kg
Pu-241	14.3年	4.8	1kg

核種	半減期	線量換算係数 (μ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)
Np-237	214万年	110	0.6kg
Am-241	432年	200	0.4kg
Am-243	7,370年	200	0.2kg
Cm-244	18.1年	120	60g

核種	半減期	線量換算係数 (μ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)
Se-79	29万5千年	2.9	6g
Sr-90	28.8年	28	0.6kg
Zr-93	153万年	1.1	1kg
Tc-99	21万1千年	0.64	1kg
Pd-107	650万年	0.037	0.3kg
Sn-126	10万年	4.7	30g
I-129	1,570万年	110	0.2kg
Cs-135	230万年	2.0	0.5kg
Cs-137	30.1年	13	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

線量換算係数:

放射性核種を人体に摂取した時の影響を示す指標。放射能(ベクレル)あたりの被ばく(シーベルト)で示す。