

2014年10月9-10日
国際シンポジウム
「放射性廃棄物低減に向けた現状と将来の展望
～ゼロリリースを目指して～」

加速器による放射性廃棄物の低減



日本原子力研究開発機構

戦略企画室

(兼 原子力基礎工学研究センター、J-PARCセンター)

大井川 宏之

原子核の変換



●核変換:

原子核に働きかけて、異なる元素、異なる核種(同位体)に変える

原子核に働きかける方法:

効率的な核変換が可能

◆ **中性子** → 電氣的に中性なので、プラス電荷の原子核に入り込みやすい

- **中性子捕獲反応** (n, γ) : 質量数が1増加
- 中性子による**核分裂反応** (n, f) : 2つの核分裂片と3個程度の中性子に
- (n, xn) : 質量数がx-1減少

◆ **γ 線** → 電氣的に中性だが、原子核に入る前に電子と相互作用

- **光核反応** (γ , n) : 質量数が1減少
- **光核分裂** (γ , f) : 2つの核分裂片と3個程度の中性子に

◆ **熱核融合** → 高密度プラズマが必要

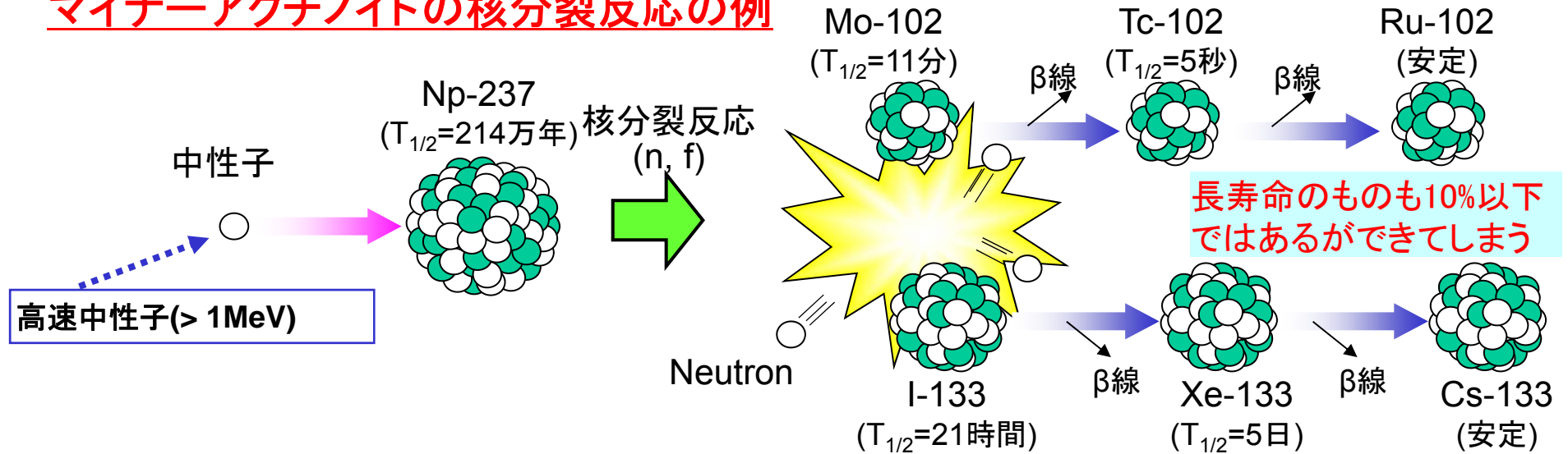
- **DD反応、DT反応等** : 軽い核が中心

◆ **加速粒子(又はRI線源)** → 粒子を加速し、標的に当てる

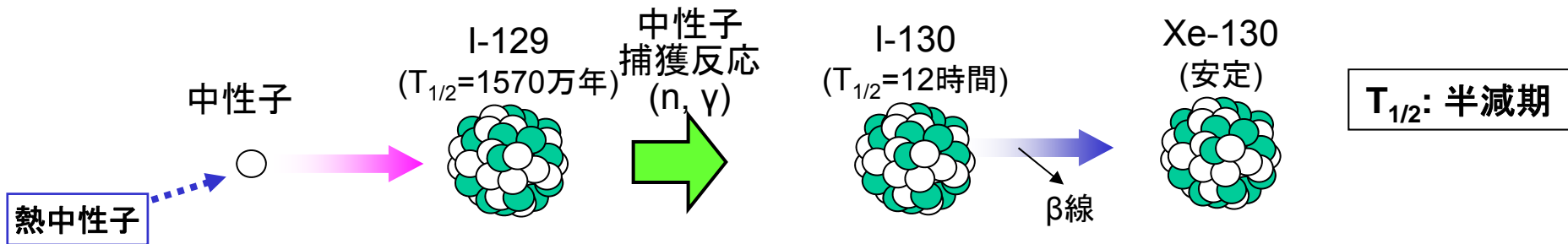
- **陽子、重陽子、 α 粒子等** 例: ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 、 ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ 、 ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$
- 陽子による**核破碎反応** 標的: 鉛、タングステン、ウラン等の重核
- **重イオン反応** 例: ${}^{16}\text{O}+{}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{250}\text{Fm}+\dots$

中性子を使った長寿命核種の核変換

マイナーアクチノイドの核分裂反応の例



長寿命核分裂生成物の中性子捕獲反応による核変換の例



加速器を使った核変換の特徴

有利な点

- 核変換に適した粒子のエネルギーを選べる可能性がある。
- 原子炉のように燃料組成に関する安全上の厳しい制限が不要
(核変換対象の原子核だけに効率良く働きかけることが可能)

不利な点

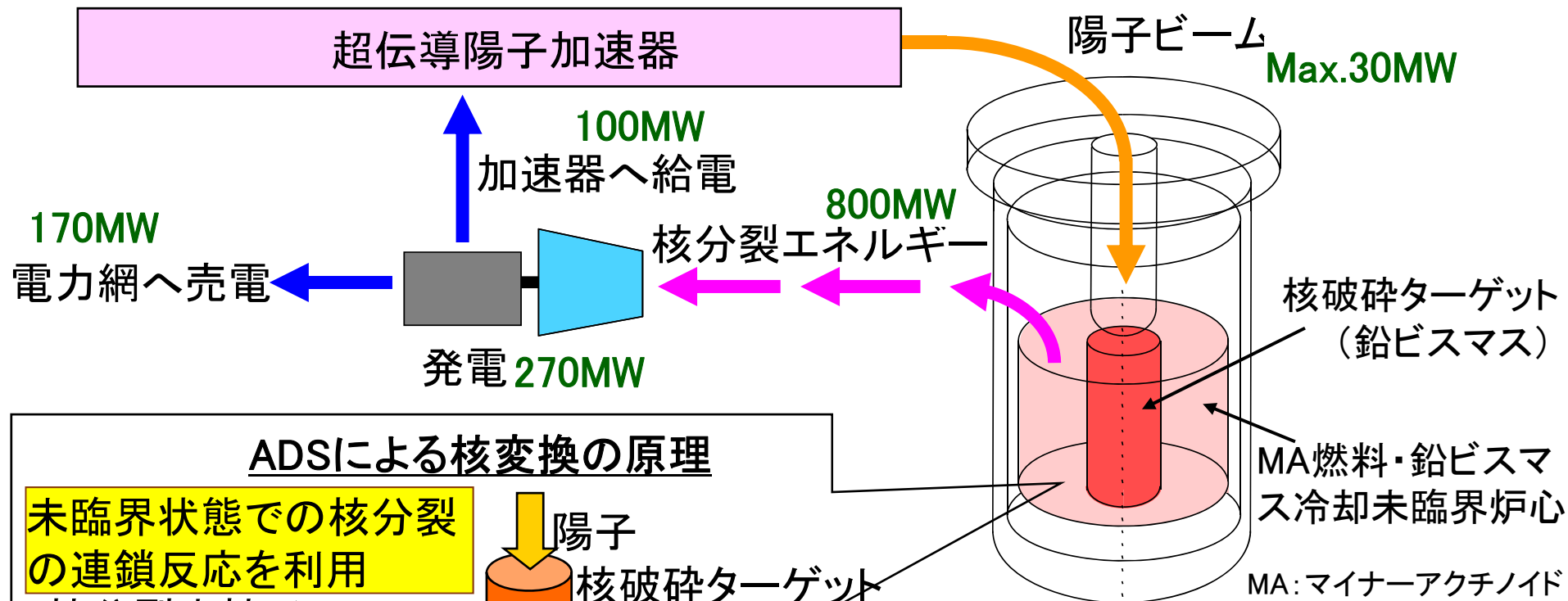
- エネルギーが多く必要
- 必要な粒子の数を稼ぐのが難しい(現状では強度が足りない)



原子炉と加速器の長所を合わせた「加速器駆動システム」を研究開発中

加速器駆動核変換システム

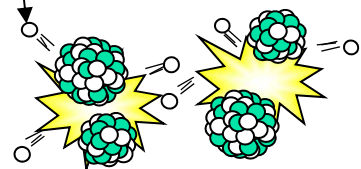
ADS: Accelerator Driven System



ADSによる核変換の原理

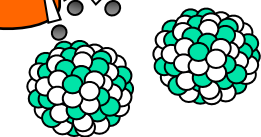
未臨界状態での核分裂の連鎖反応を利用

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

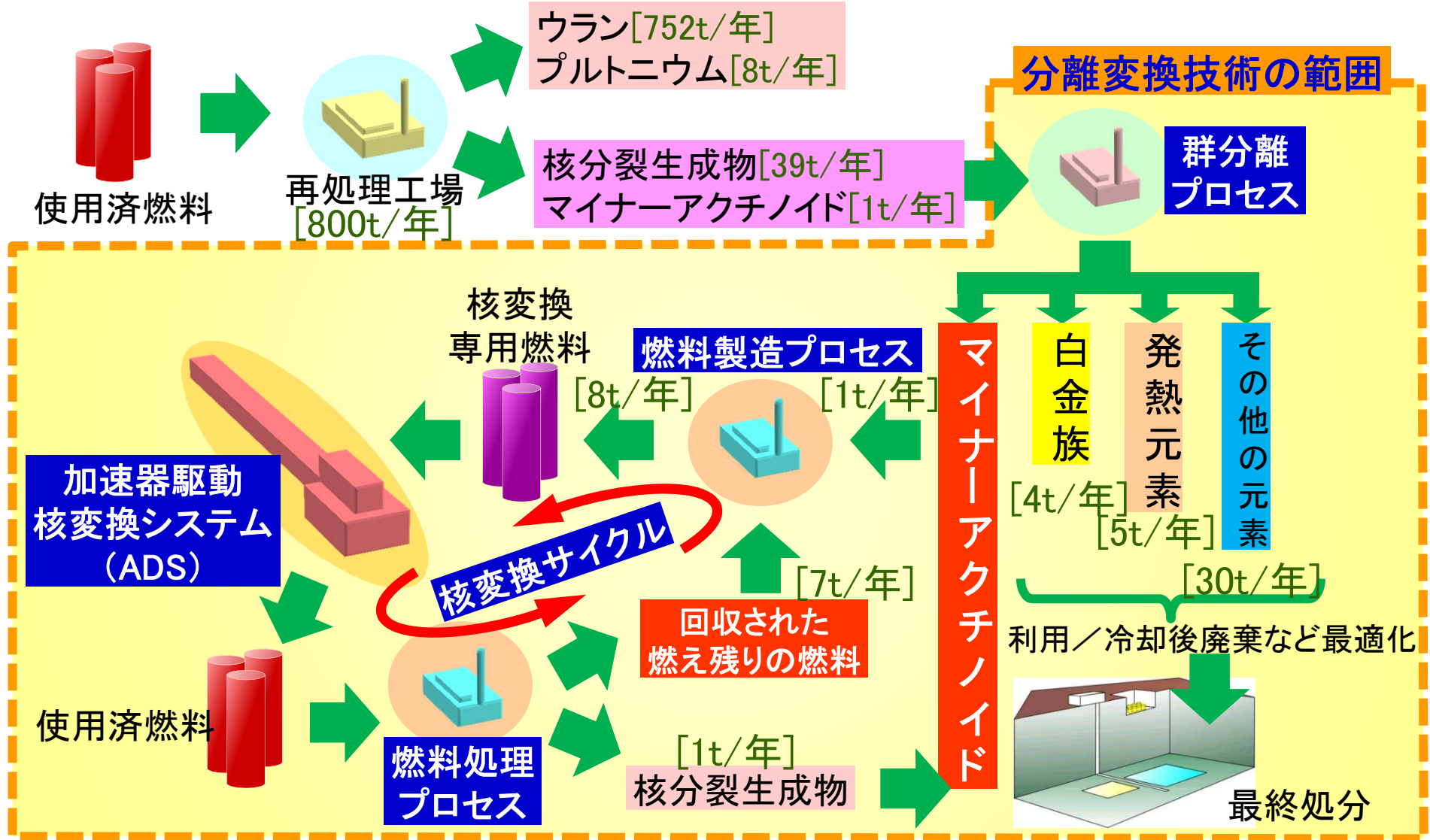


長寿命の核種

ADSの特徴:

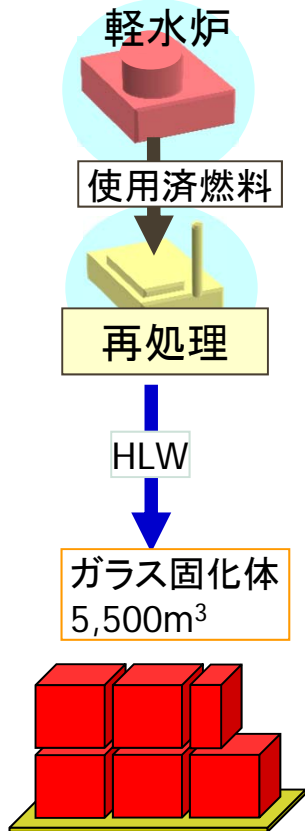
- ・加速器を止めれば連鎖反応は停止
→ 核反応の暴走の心配が無い。
- ・MA濃度の高い燃料が使用可能
→ 1基で軽水炉10基分のMAを核変換。
- ・Pb-Biは化学的に不活性。

ADSを中心とした「階層型」分離変換技術

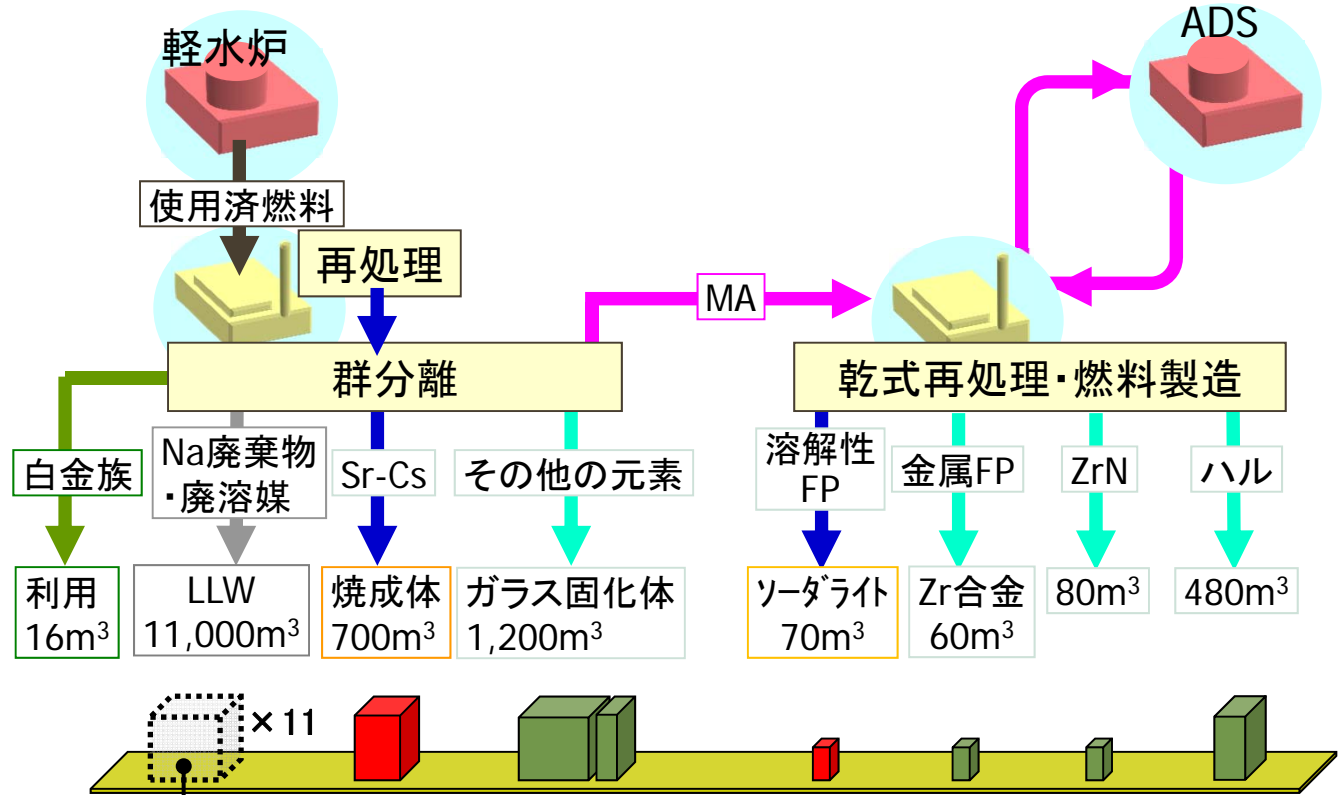


階層型分離変換技術で発生する放射性廃棄物

分離変換無し



分離変換導入



コンクリートピット処分可能。日本原燃では合計60万m³のピット処分を計画*しており、その2%に相当。

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

- = 発熱性の廃棄物
- = 非発熱性の廃棄物
- = LLW

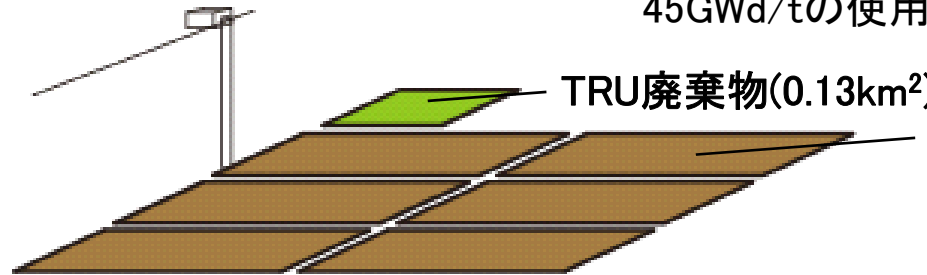
*原子力委員会 新大綱策定会議（第5回）資料第3-1号 p.42

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



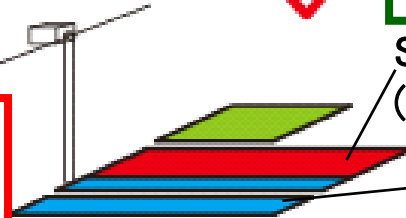
HLWガラス固化体: 4万本
(冷却: 50年、面積: 1.8km²)

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

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



Sr-Cs焼成体: 5,100本
(冷却: 130年、面積: 0.23km²)

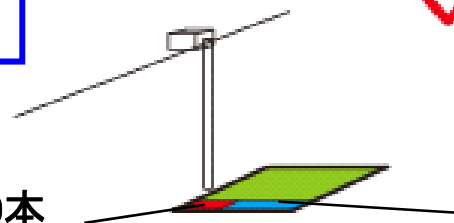
高含有ガラス固化体: 8,300本
(冷却: 5年、面積: 0.18km²)

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)

ADSを中心とした階層型分離変換技術の コストの予備的検討



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	1,700	2,720 ^{a)}	140 ^{b)}	4,560
ADS 加速器部分	590	940 ^{a)}	50 ^{b)}	1,580
計	2,290	3,660	190	6,140

a) 建設コストの4%が毎年かかるとした。(寿命は40年間と仮定)

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)

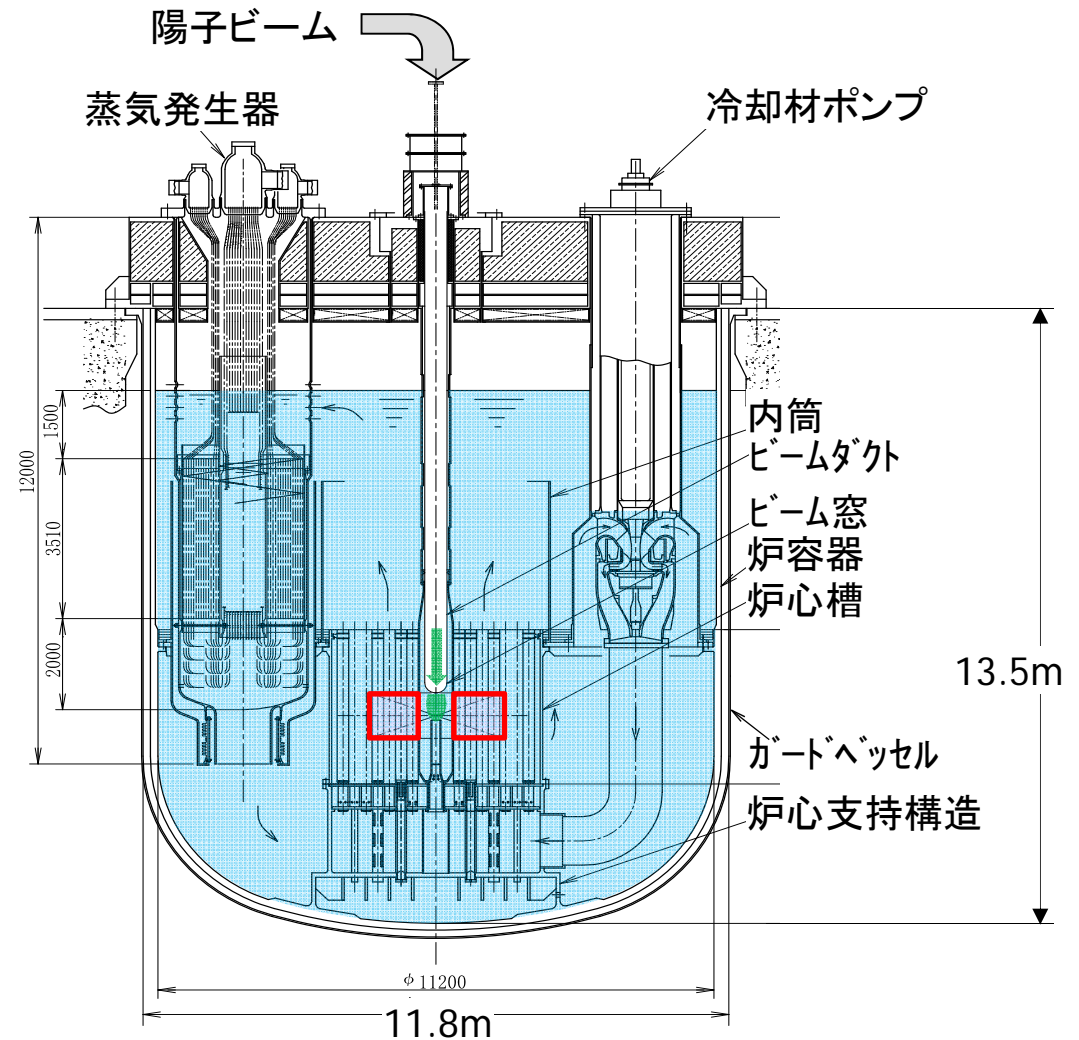
項目	コスト
ADS 4基	24,600
群分離工程	5,700
MA燃料製造	5,200
MA燃料再処理	4,500
ADSによる発電電力を売電	-7,500
処分場建設コストの低減	-19,000
計	13,400

- 収支バランス: **0.12~0.13 円/kWh** (割引率: 0%)
- 消費者価格(約20円/kWh)では、0.6%の上昇
→ 一般家庭の消費量300kWh/月のうち、1/3が原子力によると仮定すると、各家庭で12~13円/月の負担増
- 単純な発電システムとすると、**21円/kWh**
- **ADSのコスト削減と、処分場建設コスト低減効果の高精度化が必要**

(群分離工程: 5H Mt/年、MA燃料製造・再処理: 10H Mt/年)

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



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

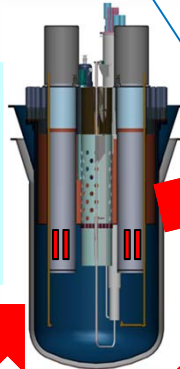


出力規模

実験炉級ADS ⇒ 国際共同
ベルギーのMYRRHA計画
2.4MW-beam, 50~100MW_{th}
・ADS技術の実証と燃料照射

ビーム窓材料の高度化

MA燃料の無いADSの技術
(Pb-Bi炉心、加速器、運転経験)

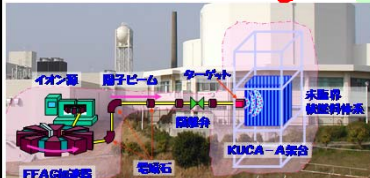


実用ADSプラント
30MW-beam, 800MW_{th}
・LWR10基分のMA核変換

MA燃料の炉物理とターゲット材料開発



J-PARC核変換実験施設
250kW-beam
・Pb-Biターゲット技術
・核変換の炉物理



ループ実験、KUCA実験などの基礎試験

	J-PARC核変換実験施設	ベルギーMYRRHA
目的	要素技術開発 (ターゲット技術、物理)	照射試験、 未臨界炉運転経験蓄積
出力	陽子ビーム250kW 未臨界炉熱出力: 500W	陽子ビーム2.4MW 未臨界炉熱出力50~100MW
MA	大量に用いて 核変換システムを模擬	少量の照射試験のみ

・J-PARCとMYRRHAが連携し、世界における核変換技術
の開発・実証・高度化を先導
・2030年代に実用規模へ展開できる知見・経験を得る

2010

2020

2030

年

まとめ

- マイナーアクチノイド(MA)を効率よく核変換するため加速器駆動システム(ADS)を研究開発中
- ADSを中心とした分離変換技術は、我が国がこれまでに培ってきた大強度加速器技術、高速炉技術、核燃料サイクル技術等の融合技術
- わが国は、世界の国々と連携し、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減の研究開発において主導的役割を果たすことで、社会に受け入れられる原子力の利用に貢献すべき。