

分離変換技術の目的



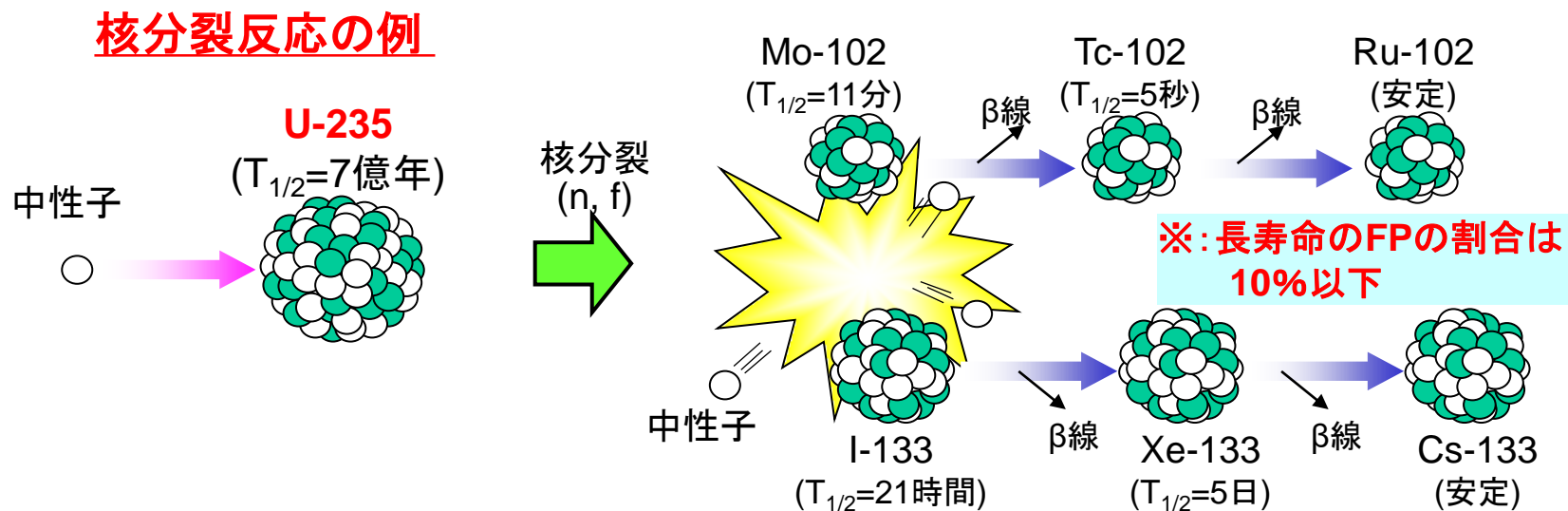
2021年6月

核変換システム開発Gr

日本原子力研究開発機構

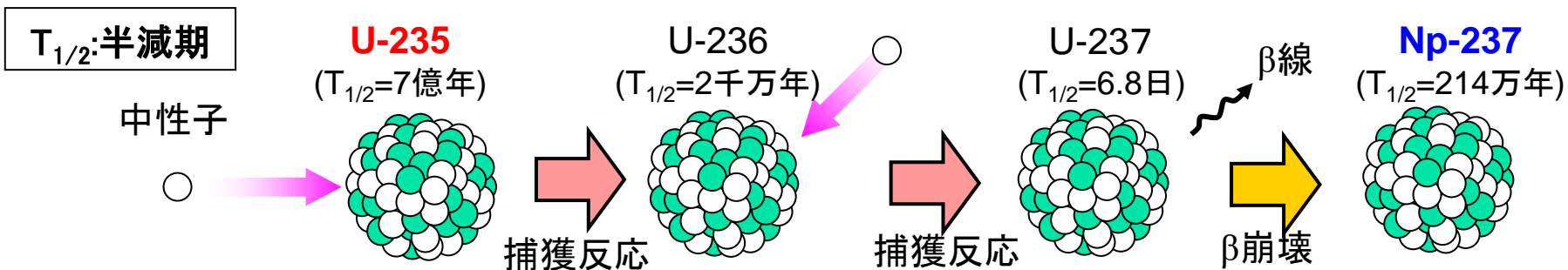
原子炉内で起こっている核反応：核分裂反応

- ✓ 主にウラン235 (^{235}U)の核分裂反応
- ✓ 1個のウラン235原子が、2個の核分裂生成物 (FP:Fission Product)に変換
- ✓ 原子核の結合エネルギーの一部が開放されて熱エネルギー(約200 MeV)に変化
- ✓ 余った2~3個の中性子を放出
- ✓ 放出された中性子が次のウランに当たって核分裂を起こす → **連鎖反応 (Chain Reaction)**
- ✓ この間、約0.1マイクロ秒(高速中性子炉)から0.1ミリ秒(熱中性子炉)

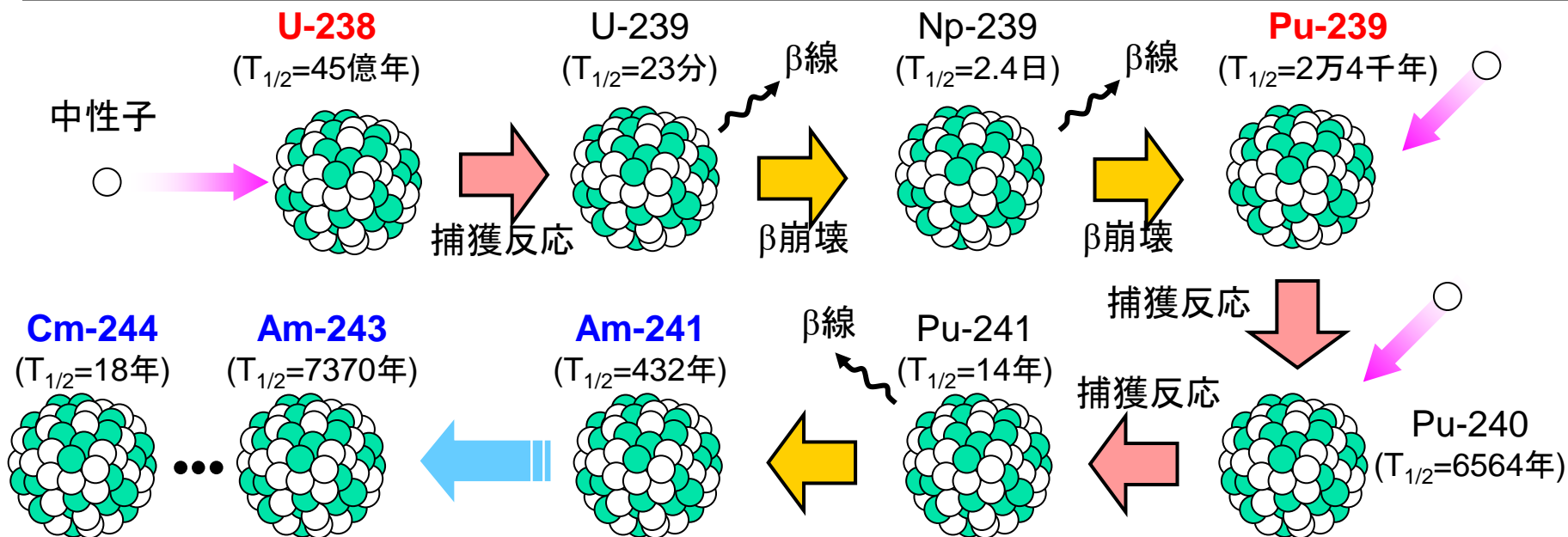


原子炉内で起こっている反応：捕獲反応

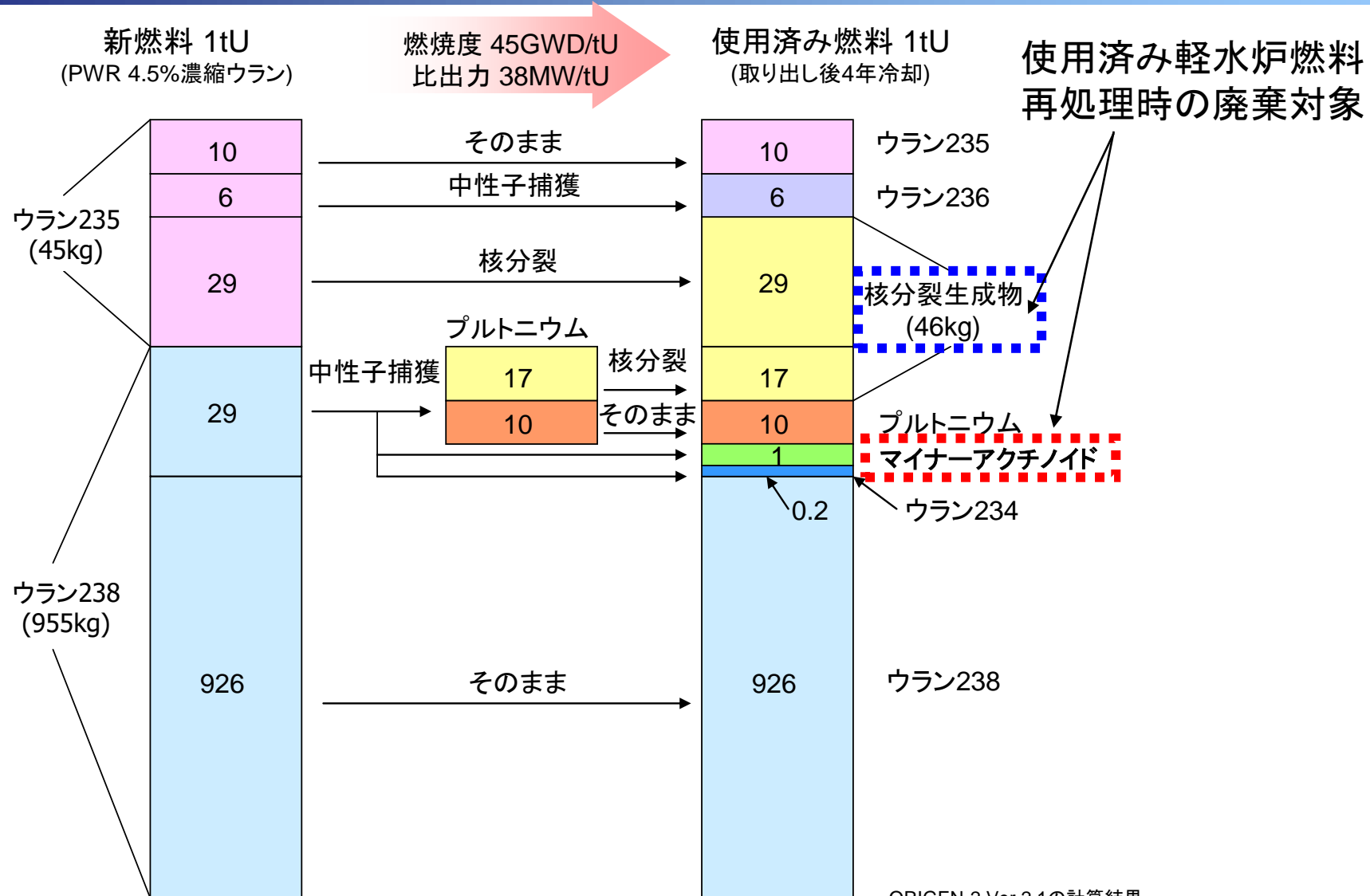
□ **ウラン235 (^{235}U)**：天然では0.7%の同位体比 原子炉では3~5%程度に濃縮



□ **ウラン238 (^{238}U)**：天然では99.3%の同位対比



原子炉燃料の燃焼による組成の変化



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)

核分裂生成物とマイナーアクチノイド(MA)

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	殻構造	
周期	(1A)	(2A)	(3B)	(4B)	(5B)	(6B)	(7B)	(8)			(1B)	(2B)	(3A)	(4A)	(5A)	(6A)	(7A)	(0)		
1	1H 水素 1.008																		2He ヘリウム 4.003	K殻
2	3Li リチウム 6.941	4Be ベリリウム 9.012											5B ホウ素 10.81	6C 炭素 12.01	7N 窒素 14.01	8O 酸素 16.00	9F フッ素 19.00	10Ne ネオン 20.18	L殻	
3	11Na ナトリウム 22.99	12Mg マグネシウム 24.31											13Al アルミニウム 26.98	14Si ケイ素 28.09	15P リン 30.97	16S 硫黄 32.07	17Cl 塩素 35.45	18Ar アルゴン 39.95	M殻	
4	19K カリウム 39.10	20Ca カルシウム 40.08	21Sc スカンジウム 44.96	22Ti チタン 47.87	23V バナジウム 50.94	24Cr クロム 52.00	25Mn マンガン 54.94	26Fe 鉄 55.85	27Co コバルト 58.93	28Ni ニッケル 58.69	29Cu 銅 63.55	30Zn 亜鉛 65.39	31Ga ガリウム 69.72	32Ge ゲルマニウム 72.61	33As ヒ素 74.92	34Se セレン 78.96	35Br 臭素 79.90	36Kr クリプトン 83.80	N殻	
5	37Rb ルビジウム 85.47	38Sr ストロンチウム 87.62	39Y イットリウム 88.91	40Zr ジルコニウム 91.22	41Nb ニオブ 92.91	42Mo モリブデン 95.94	43Tc テクネチウム [99]	44Ru ルテニウム 101.1	45Rh ロジウム 102.9	46Pd パラジウム 106.4	47Ag 銀 107.9	48Cd カドミウム 112.4	49In インジウム 114.8	50Sn スズ 118.7	51Sb アンチモン 121.8	52Te テルル 127.6	53I ヨウ素 126.9	54Xe キセノン 131.3	O殻	
6	55Cs セシウム 132.9	56Ba バリウム 137.3	57~71 ランタノイド *	72Hf ハフニウム 178.5	73Ta タンタル 180.9	74W タングステン 183.8	76Re レニウム 186.2	76Os オスマニウム 190.2	77Ir イリジウム 192.2	78Pt 白金 195.1	79Au 金 197.0	80Hg 水銀 200.6	81Tl タリウム 204.4	82Pb 鉛 207.2	83Bi ビスマス 209.0	84Po ポロニウム [210]	85At アスタチン [210]	86Rn ラドン [222]	P殻	
7	87Fr フランシウム [223]	88Ra ラジウム [226]	89~103 アクチノイド **	104Rf ラザホージウム [261]	105Db ドブニウム [262]	106Sg シーボーギウム [263]	107Bh ボーリウム [264]	108Hs ハッcium [265]	109Mt マイトネリウム [268]											
族の一般名	アルカリ金属	アルカリ土類金属	希土類元素													カルコゲン元素	ハロゲン元素	不活性ガス		
価電数	1	2	遷移元素の価電子数は、1または2が多い										3	4	5	6	7	0		
酸化数	+1	+2																		

核分裂生成物

元素記号
原子番号
元素名
原子量

★ 1993年 国際原子量
[] 内の数値は最も安定な同位体の質量数を示す。

核燃料

マイナーアクチノイド

* ランタノイド	57La ランタン 138.9	58Ce セリウム 140.1	59Pr プラセオジム 140.9	60Nd ネオジム 144.2	61Pm プロメチウム [145]	62Sm サマリウム 150.4	63Eu ユーロピウム 152.0	64Gd ガドリニウム 157.3	65Tb テルビウム 158.9	66Dy ジスプロシウム 162.5	67Ho ホルミウム 164.9	68Er エルビウム 167.3	69Tm ツリウム 168.9	70Yb イッテルビウム 173.0	71Lu ルテチウム 175.0
** アクチノイド	89Ac アクチニウム [227]	90Th トリウム 232.0	91Pa プロトアクチニウム 231.0	92U ウラン 238.0	93Np ネプツニウム [237]	94Pu プルトニウム [239]	95Am アメリシウム [243]	96Cm キュリウム [247]	97Bk バークリウム [247]	98Cf カリホルニウム [251]	99Es アインスタイニウム [252]	100Fm フェルミウム [257]	101Md メンデレビウム [258]	102No ノーベリウム [259]	103Lr ローレンシウム [262]

- 非金属元素、他は金属元素
- 遷移金属(B)、他は典型元素(A)
- 軽金属
- 重金属
- 常温、常圧で気体
- 常温、常圧で液体
- 無印 常温、常圧で固体
- 金属元素 = 重金属 + 軽金属

使用済み燃料に含まれる主な長寿命核種

核種 Nuclide	半減期 Half-life	線量換算係数 ($\mu\text{Sv/kBq}$)	含有量 (1tHM当り)
U-238	45億年	45	930kg

核種 Nuclide	半減期 Half-life	線量換算係数 ($\mu\text{Sv/kBq}$)	含有量 (1tHM当り)
Pu-239	2411万年	250	6kg
Pu-240	6,561年	250	3kg
Pu-241	14.29年	4.8	1kg

核種 Nuclide	半減期 Half-life	線量換算係数 ($\mu\text{Sv/kBq}$)	含有量 (1tHM当り)
Am-241	432.6年	200	0.4kg
Am-243	7,370年	200	0.2kg
Cm-244	18.11年	120	60g

Actinides

Trans-uranic elements (TRU)

Minor actinides (MA)

核種 Nuclide	半減期 Half-life	線量換算係数 ($\mu\text{Sv/kBq}$)	含有量 (1tHM当り)
Se-79	29.5万年	2.9	6g
Zr-93	161万年	1.1	1kg
Tc-99	21.1万年	0.64	1kg
Pd-107	650万年	0.037	0.3kg
Sn-126	23万年	4.7	30g
I-129	1,570万年	110	0.2kg
Cs-135	230万年	2.0	0.5kg
Sr-90	28.79年	28	0.6kg
Cs-137	30.08年	13	1.5kg

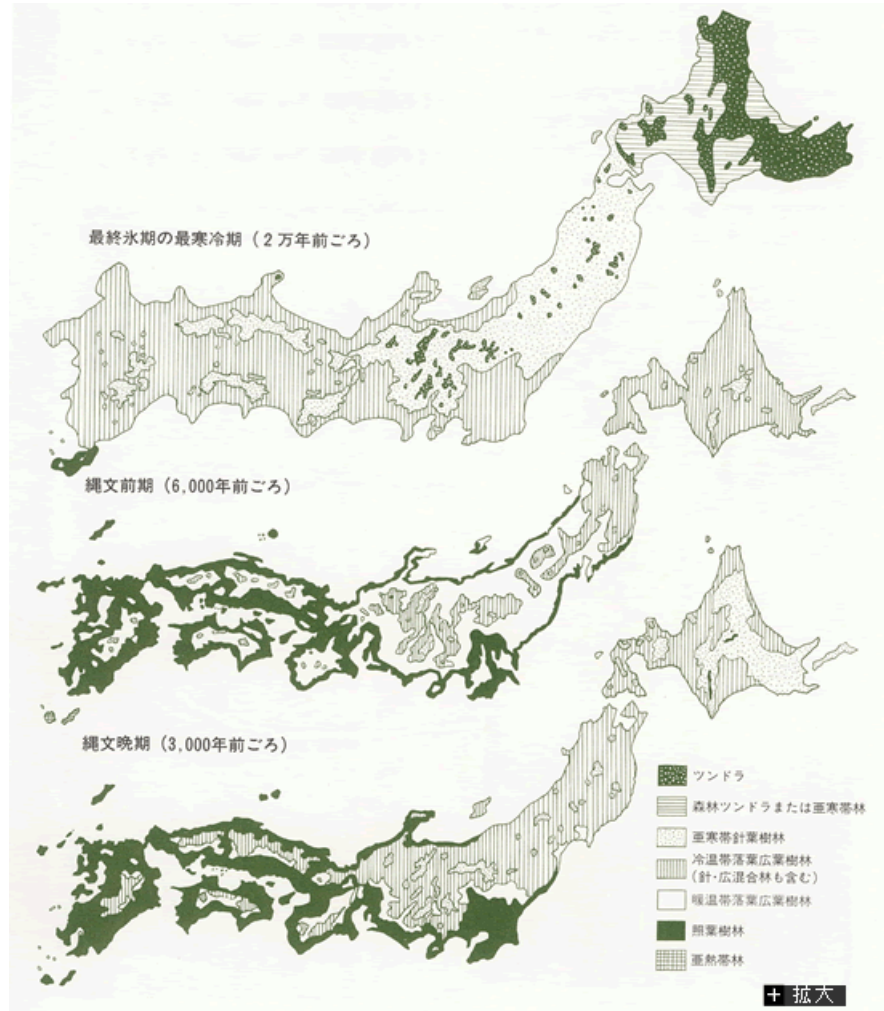
Fission products (FP)

Long-lived fission products (LLFP)

短期だが高放射能

線量換算係数(Dose coefficient)
 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。

分離変換技術とは： 超長期間にわたるリスクをどう考えるか



死海文書
(BC250~70年頃)



契丹文字(未解読)
(10~12世紀)

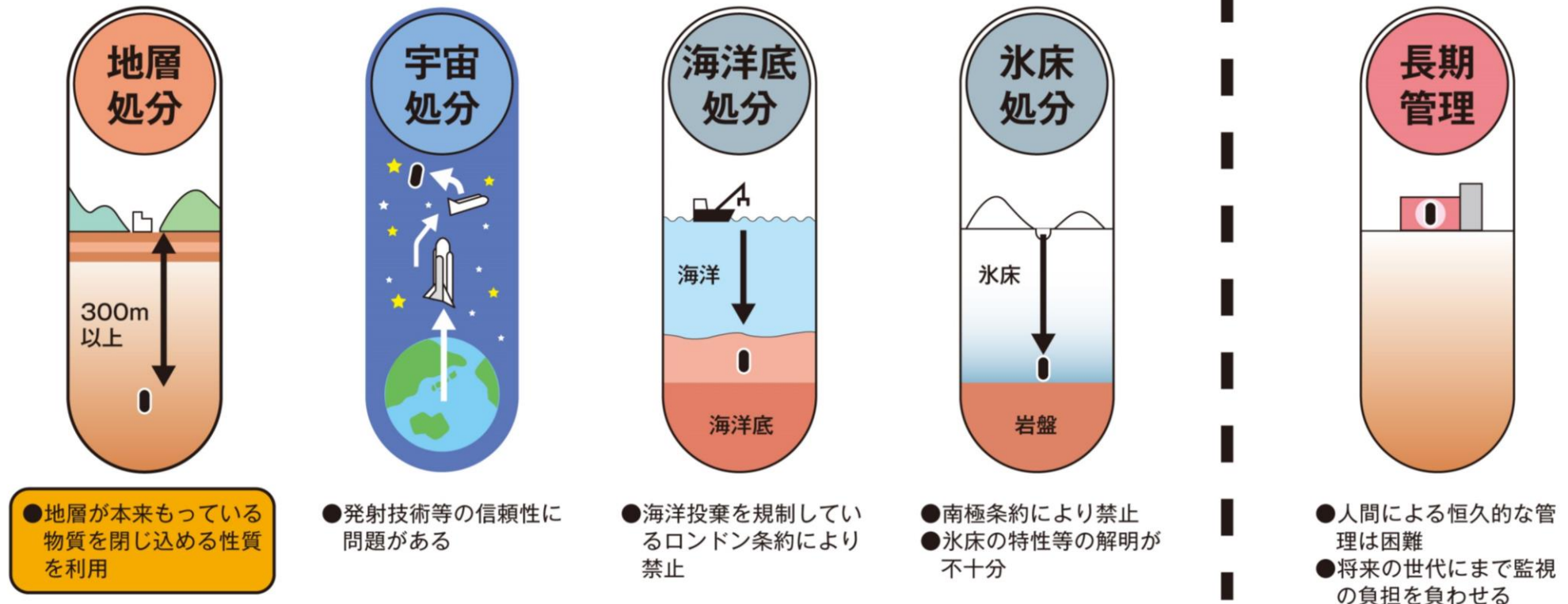


ストーンヘンジ
(BC2500~2000)

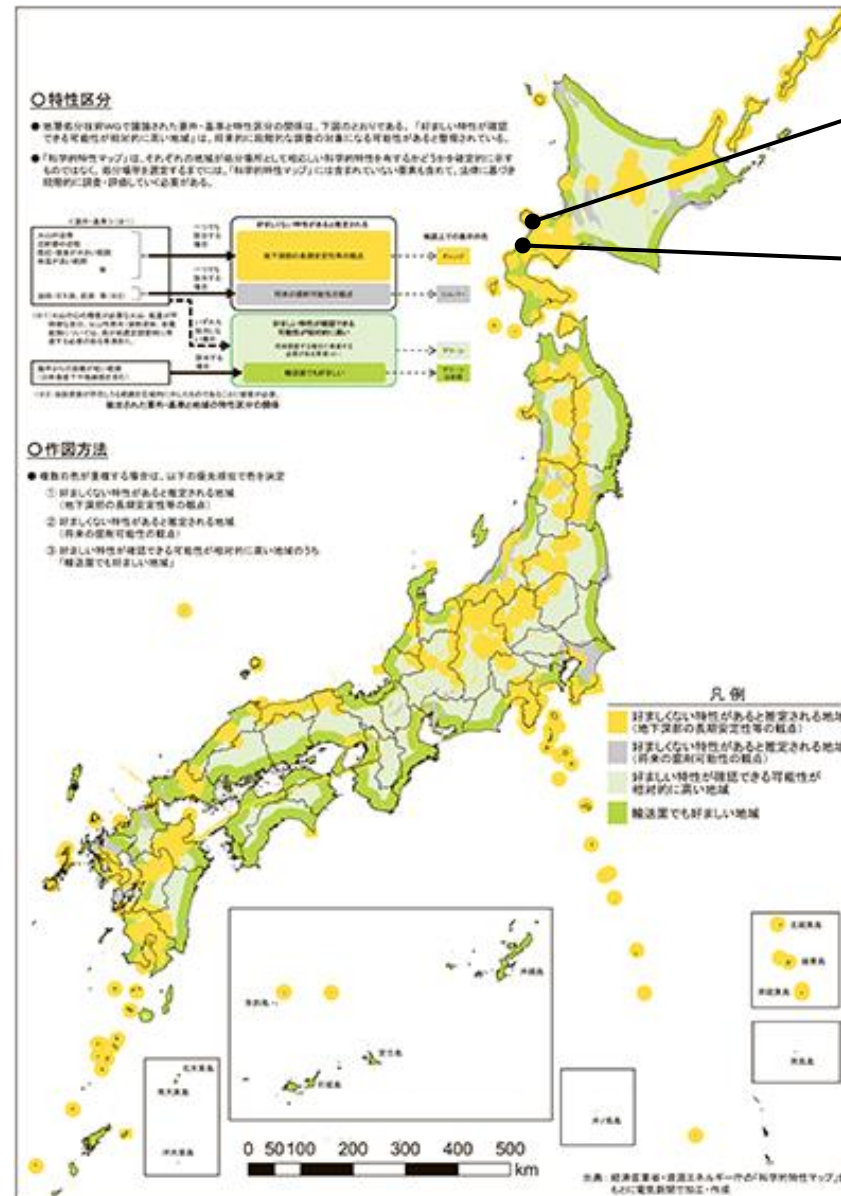


ギザのピラミッド
(BC2500)

恒久的な管理は困難：ピラミッド方式、伊勢神宮方式 管理しなくても安全性を確保できる方法が検討



- 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



神恵内(かもえない)村

寿都(すつつ)町

分離変換技術とは： 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

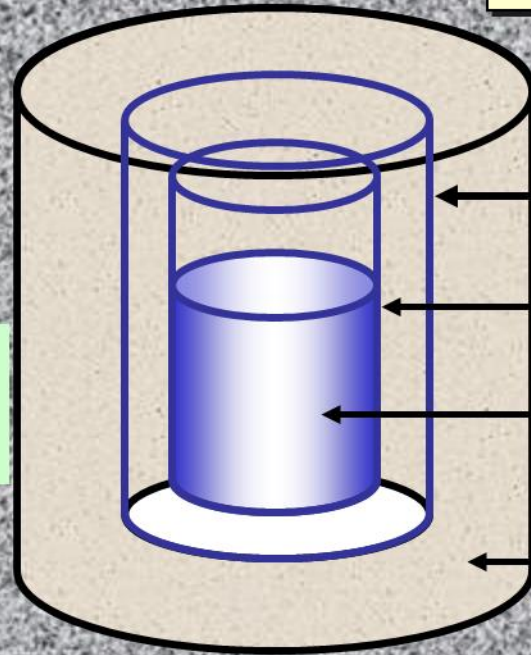
人工バリア

- ・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)

ソースターム

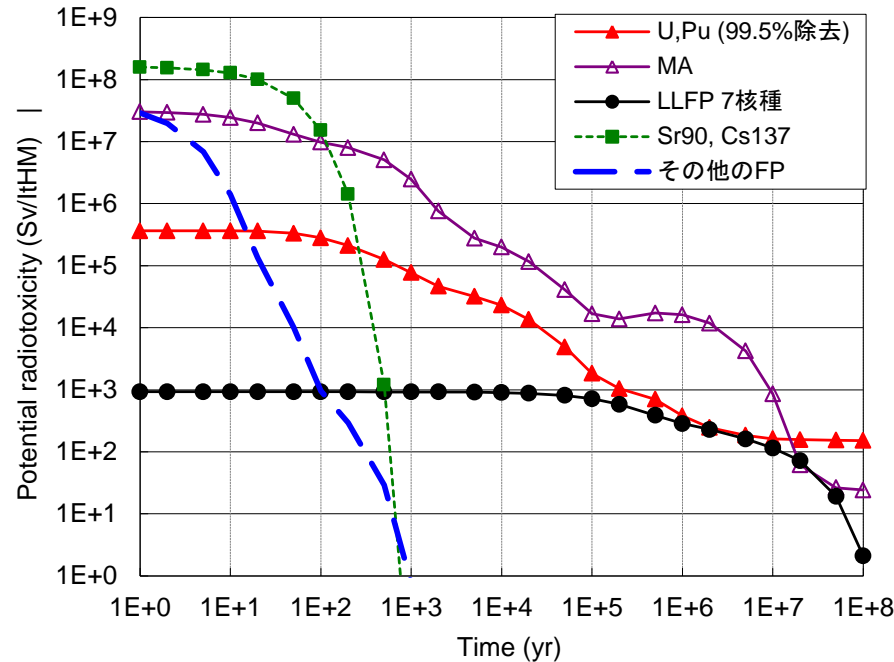
ソースターム(source term)
= 源項 S 。

放射能の環境中濃度 C の式(拡散方程式)は、

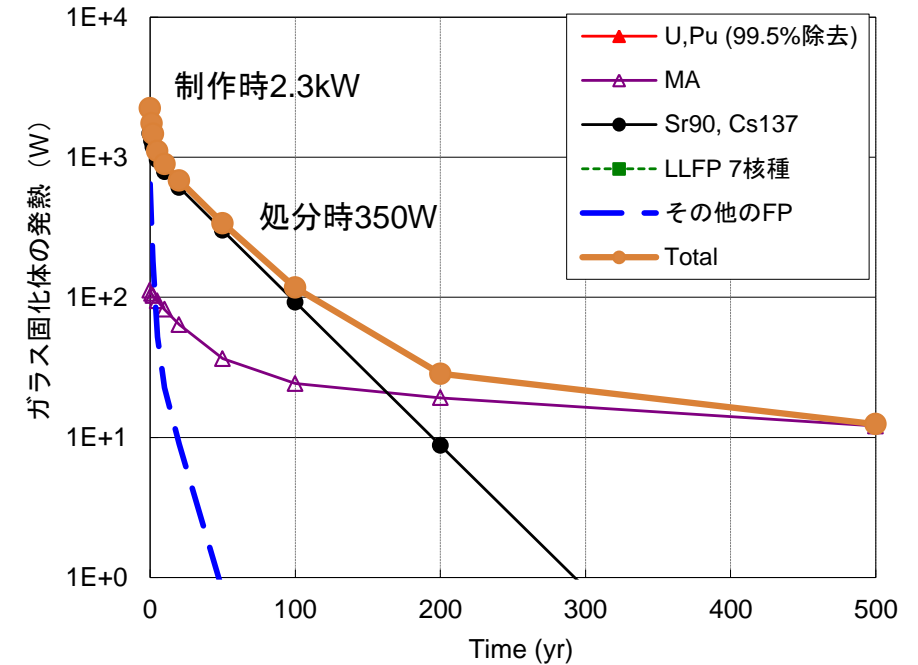
$$R \frac{\partial}{\partial t} C(x, t) = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} C(x, t) + S(t)$$

処分場の温度 T の式(熱伝導方程式)は、

$$C_v \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) = \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, t) + S(t)$$



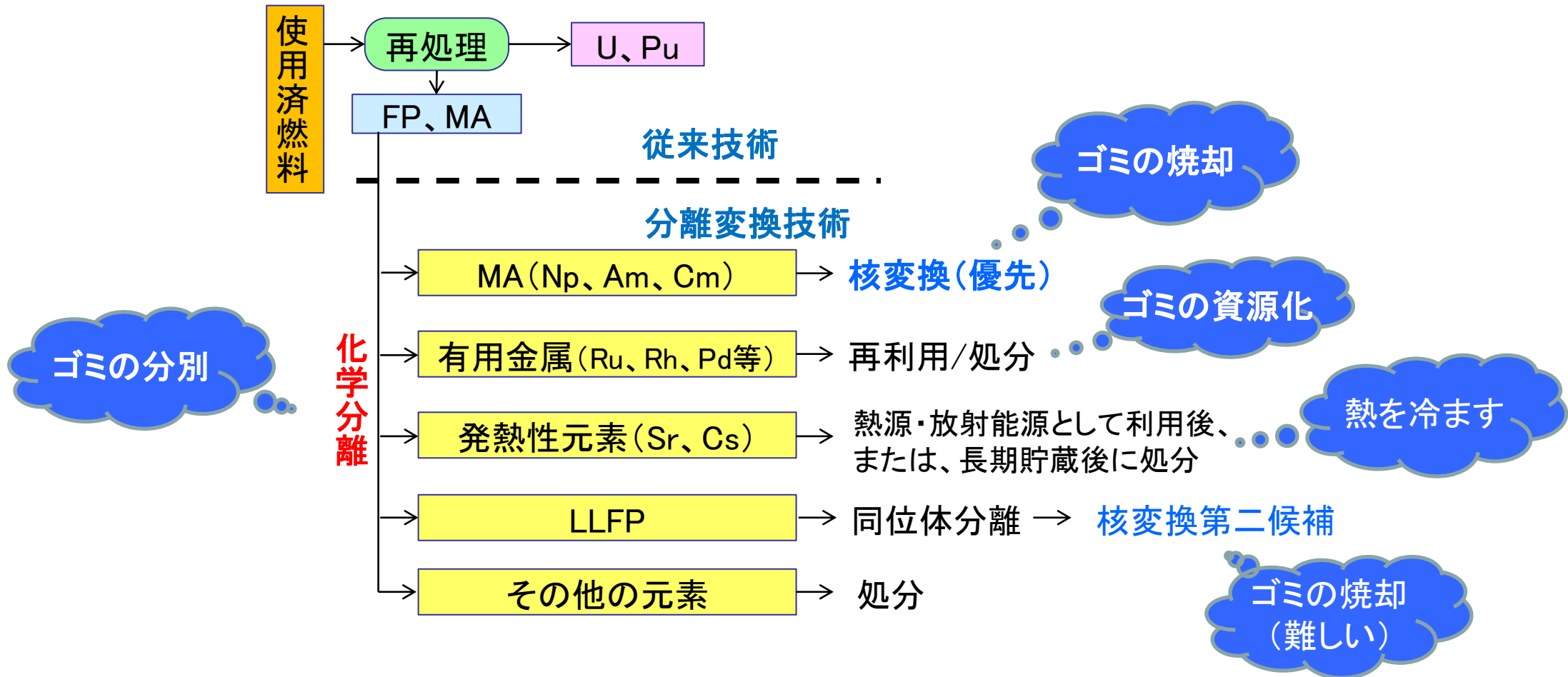
被ばく線量のソースターム



発熱のソースターム

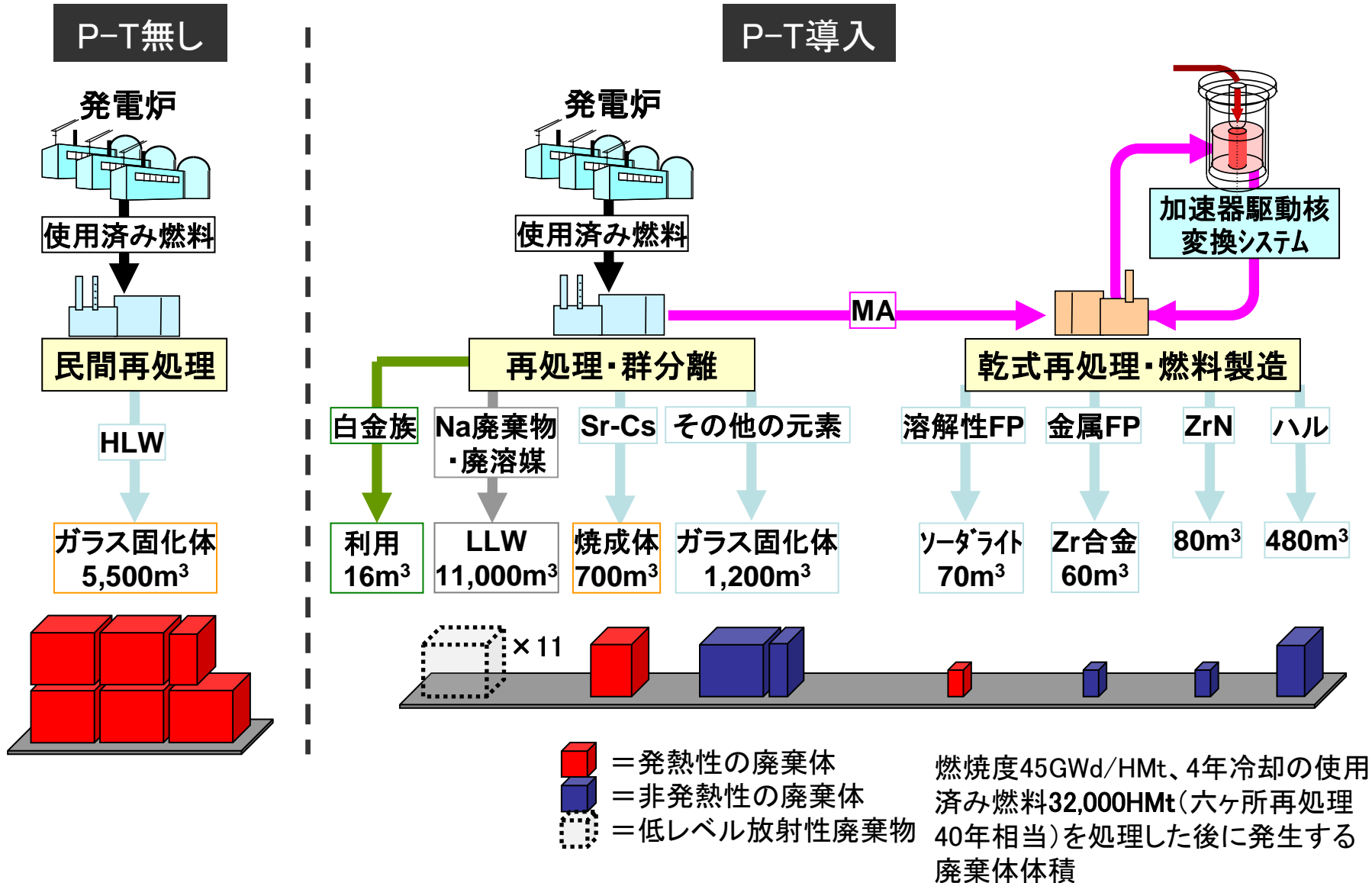
放射能や温度上昇はソースタームに比例する！

どうやって変えるか

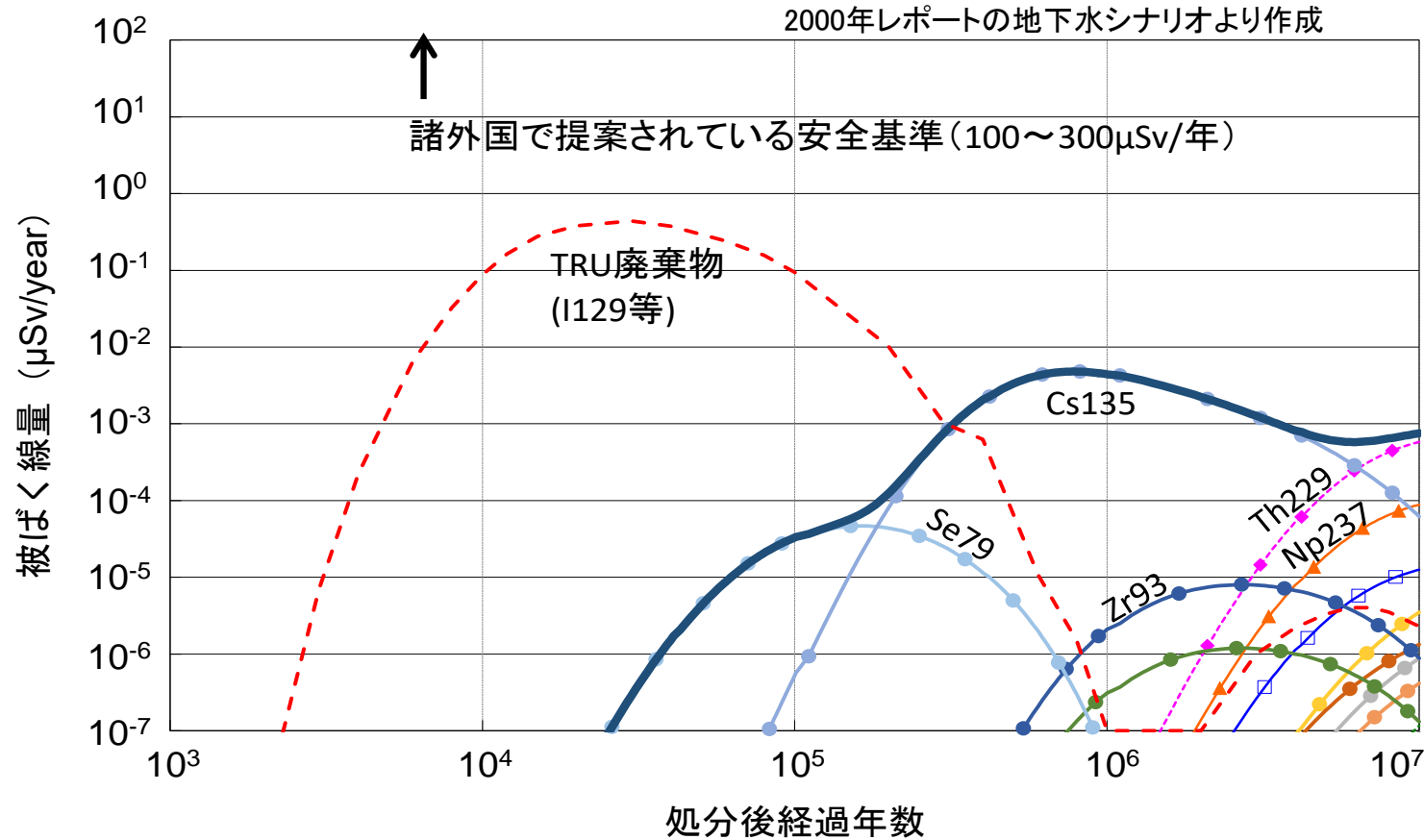


高レベル廃液を多様に分離し、更に核変換する = 分離変換技術

廃棄物の減容効果

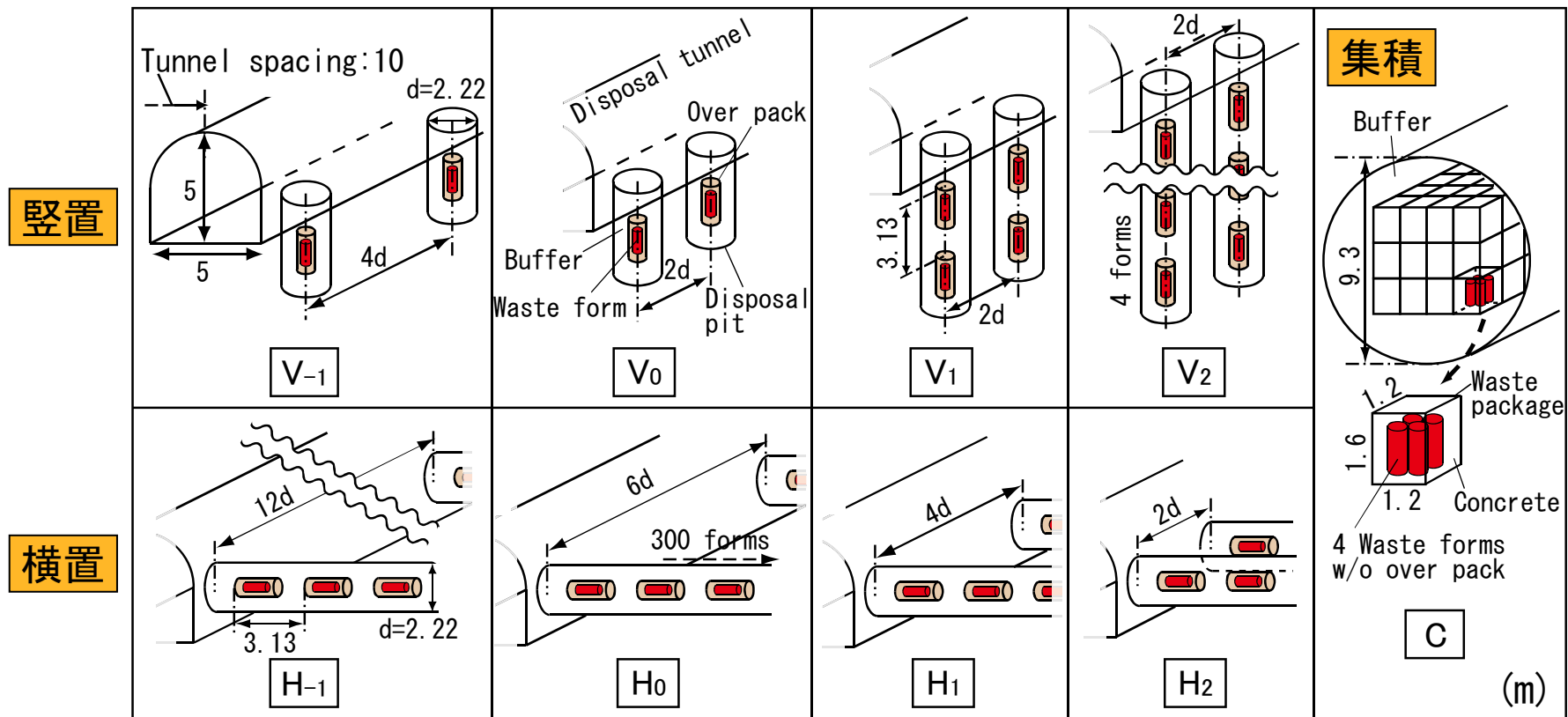


長期放射能低減による被ばく線量の低減効果



- ^{135}Cs が支配しており4桁の余裕がある。
- MAは1000万年以降に $10^{-6}\text{mSv}/\text{yr}$ 程度で現れるため、核変換の効果は小さい。→外乱、人間侵入ではMAの影響が大きくなる。
- TRU廃棄物中のI129の影響がより大きい。

発熱減少による効果

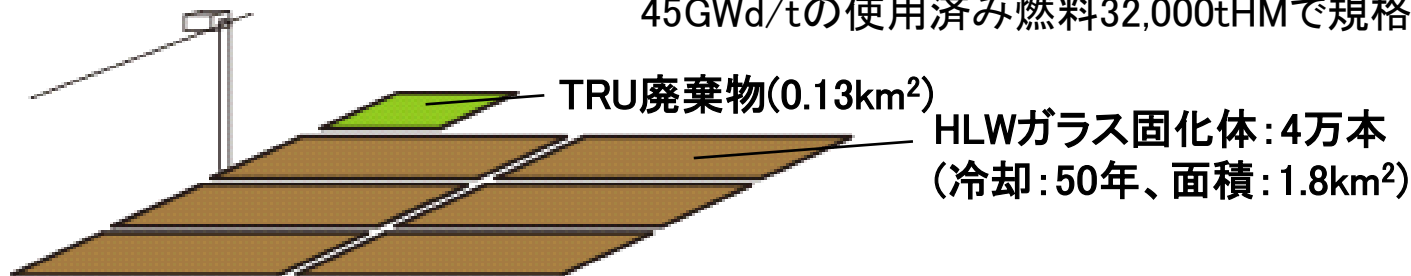


定置面積 [m ² /廃棄体] (縦置/横置)	(89/83)	(44/42)	(22/28)	(11/14)	(0.95)
	高発熱	従来	低発熱		超低発熱
		350W/本			4W/本

分離変換技術の導入による処分概念の合理化

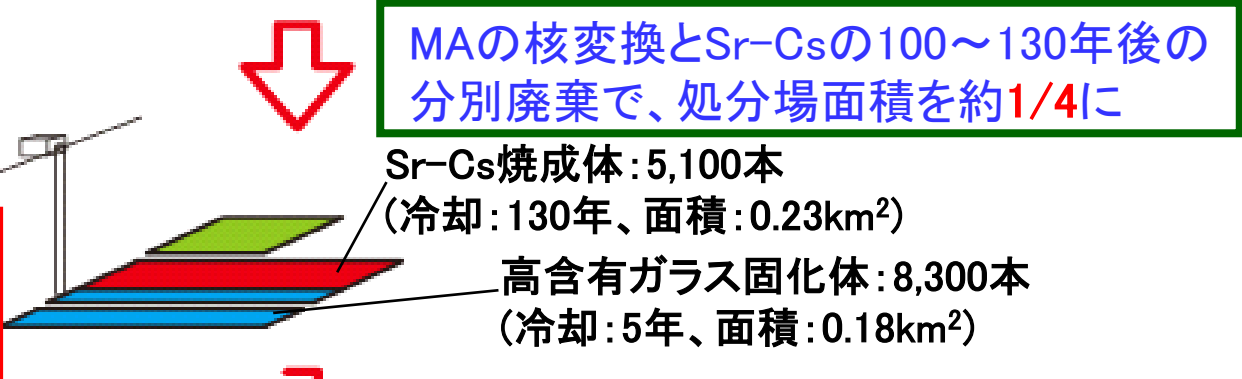
45GWd/tの使用済み燃料32,000tHMで規格化

従来の地層処分

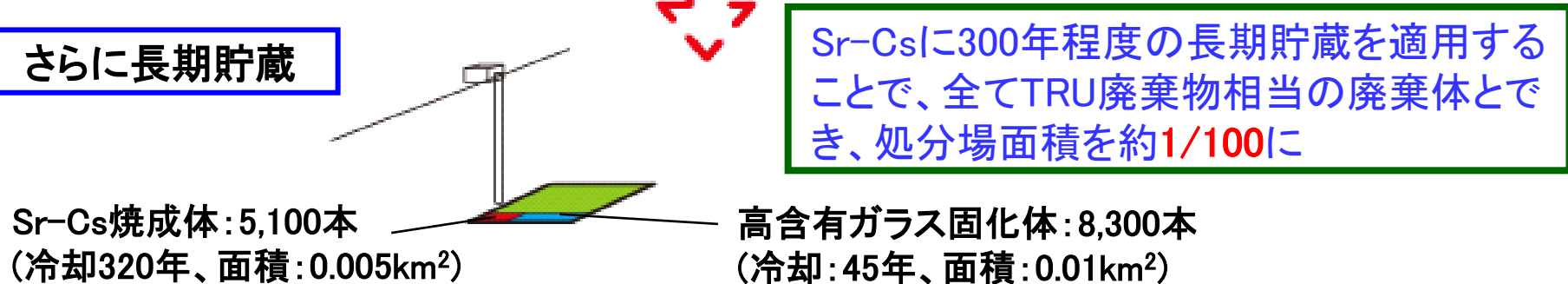


分離変換導入

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

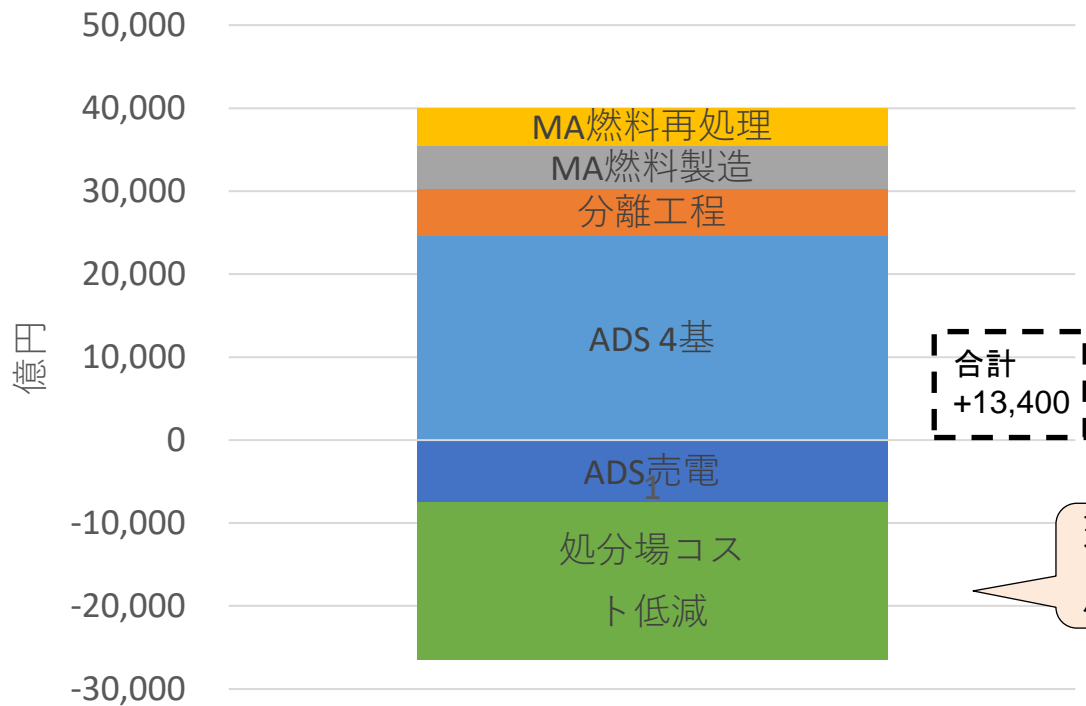


さらに長期貯蔵



経済性

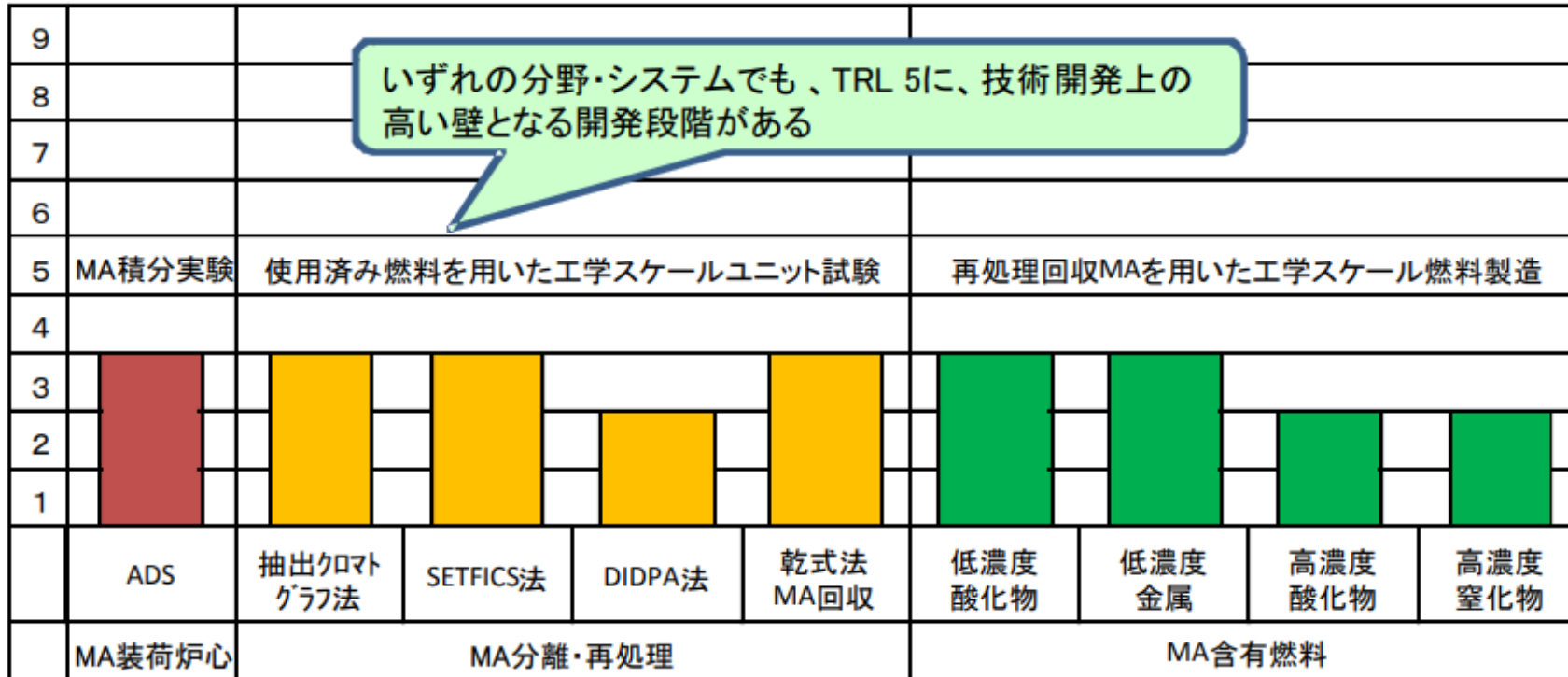
軽水炉40GWeからのMAを成熟したADS4
基で核変換とした場合のコスト概算



- 1兆3000億円の発電コスト増
- 40GWe, 40年の軽水炉の総発電量で除すると、0.12 ~ 0.13 円/kWh (割引率: 0%)

現在の処分費用は約3兆円

実現性



TRL	開発段階	
9	性能実証段階	実機プラント運転
8		実機プラント試験
7		プロトタイプ試験運転
6	原理実証段階	技術基盤の確立
5		要素技術の完成
4		要素技術の開発
3	概念開発段階	技術開発の活性化
2		技術概念の具体化
1		システム概念の構築

TRL (Technical readiness level): 技術成熟度レベル。1974年、NASAにより提唱された。実用化されると9に到達する。

まとめ

- 使用済み燃料には様々な特徴をもつ放射性核種が含まれている。
- それらを分別して、燃焼・長期冷却・再利用することで、長期の安全性評価の不確実性を減らすとともに、廃棄物の量を減らし、処分場を小さくすることができる。
- 分離変換には費用が掛かるが、処分場規模縮小である程度相殺され、0.13円/kWhと見積もられる。
- 実現には、工学的規模の研究開発が必要となる。