

日本原子力学会バックエンド部会週末基礎講座

核燃料サイクルとバックエンドの基礎

平成26年10月18日

東北大学

大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻

原子核システム安全工学講座

原子力地質工学分野

新堀 雄一



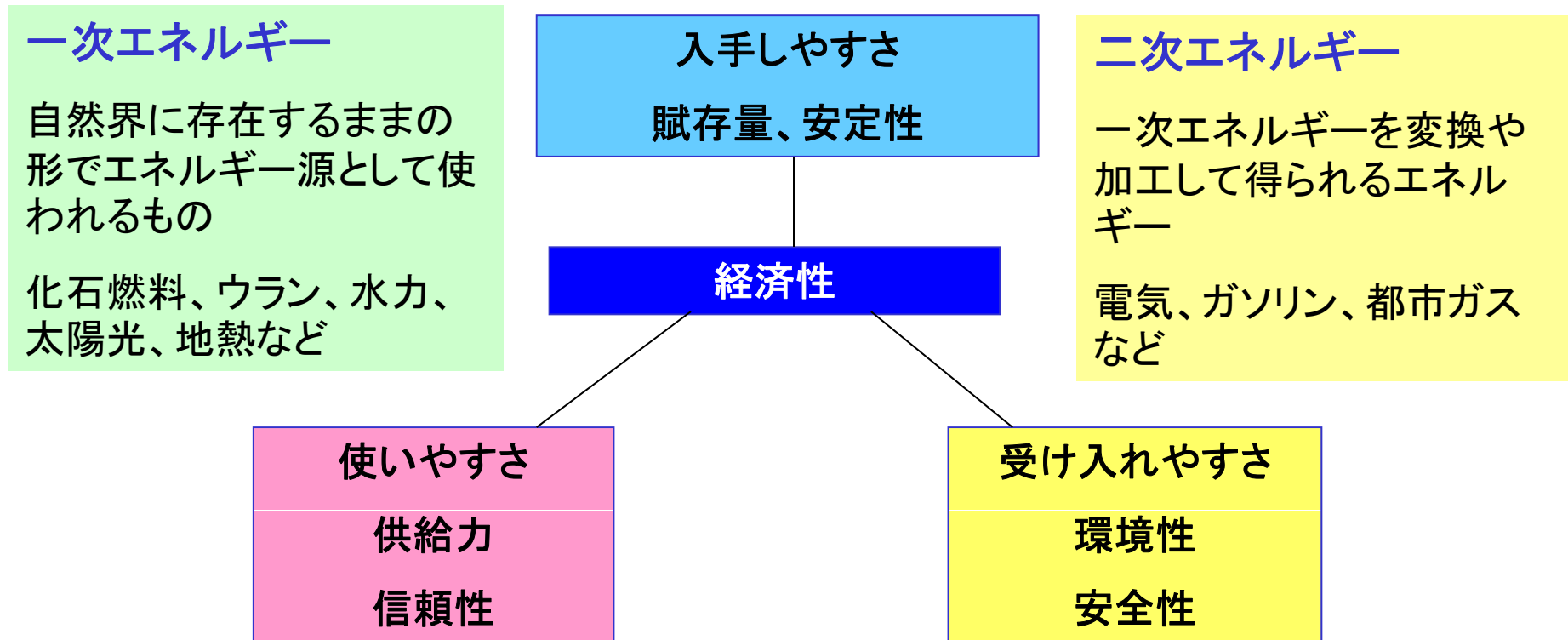
バックエンド分野: 核燃料サイクルにおける放射性廃棄物に関連する処理処分の分野
加えて、事故廃棄物、IR・研究所等による放射性廃棄物の処理処分手続き

内 容

- 1. はじめに(エネルギーの俯瞰)
- 2. 最終的に目指す核燃料サイクル
- 3. 核燃料(軽水炉)サイクルと放射性廃棄物
処分形態、廃棄物量
- 4. 地層処分システム(HLW, TRU)
処分システムの性能評価手法
- 5. 各国のHLWの処分
- 6. LLW処分システムの基本安全機能と段階管理
- 7. 変動帯である日本列島と地層処分の実現
- 8. まとめ

1. はじめに(エネルギー供給の俯瞰)

エネルギー供給の3つの基本要件



人類の利用してきたエネルギー源

人力、火力(薪炭)、水力、家畜力、風力、火力(石炭、石油、天然ガス)

地熱、原子力、太陽光など

エネルギーを何に使ってきたか → 生活を豊かにするための
輸送、ものづくり、生活環境、食料など

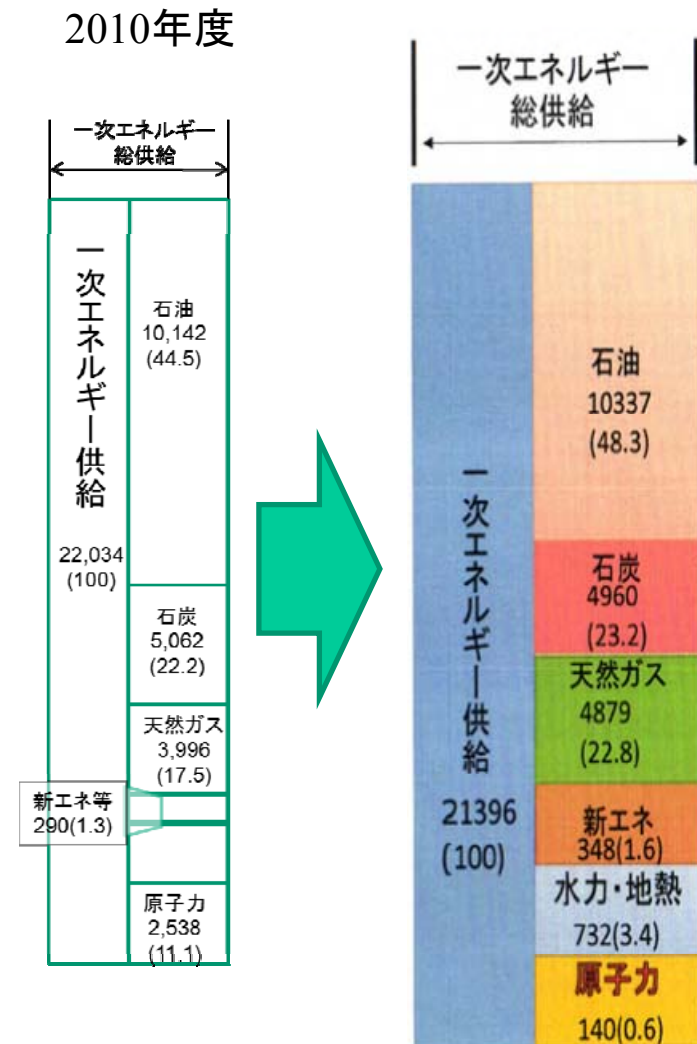
2012年度の日本のエネルギーフロー

2010年度と比較して 単位 10^{15} J

- ・原子力による1次エネルギーの供給減 2,538 (2010年度) → 140 (2012年度)
- ・天然ガスによる1次エネルギーの供給増 3,996 (2010年度) → 4,879 (2012年度)
- ・最終消費の減少 14,683 (2010年度) → 13,532 (2012年度)
- ・1次エネルギーの減少 22,034 (2010年度) → 21,396 (2012年度)

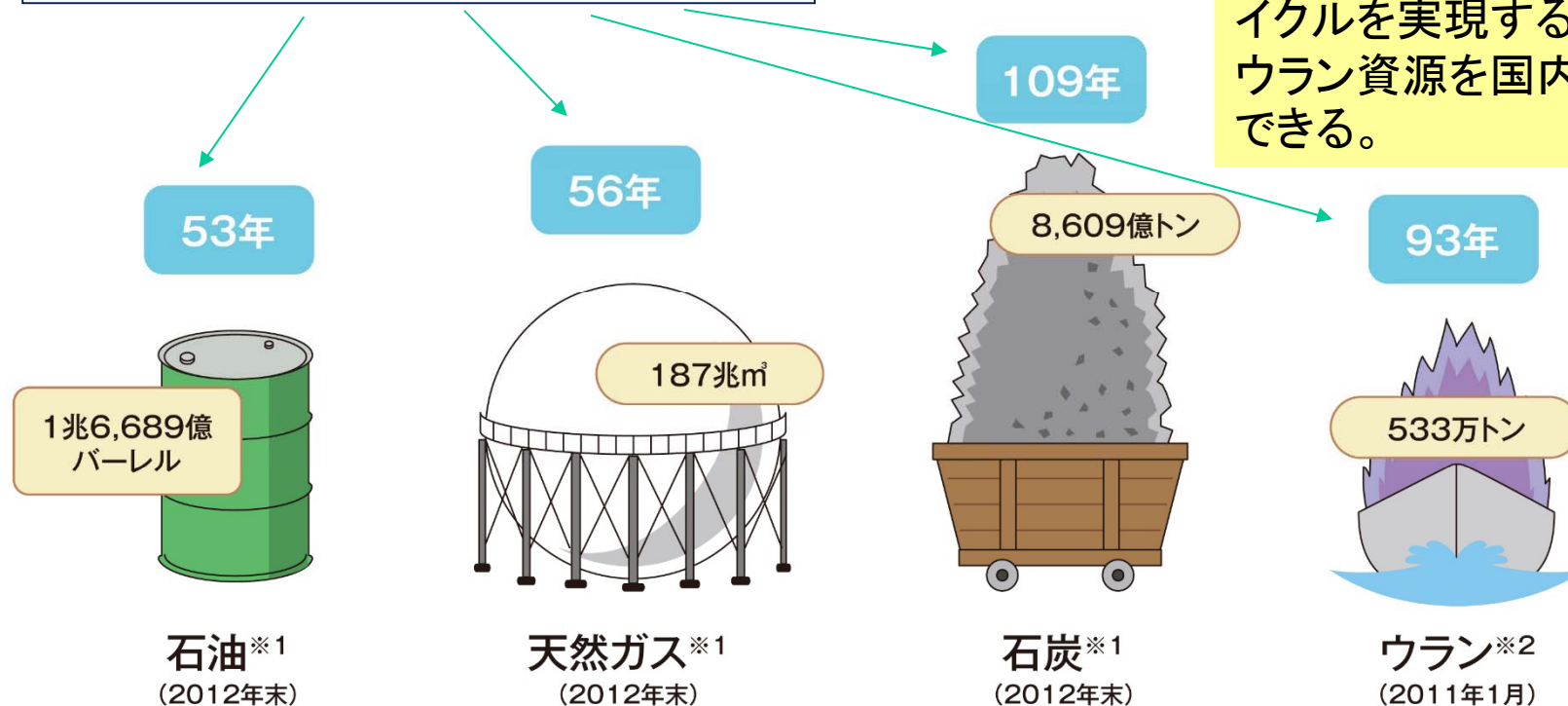
原子力の供給減を、天然ガスと消費減少(節約、震災影響)により補う。

原油換算 1971年～80年 9,300 kcal/l (平均発熱量)
 1981年～99年 9,250 kcal/l
 2000年以降 9,126 kcal/l



世界のエネルギー資源確認埋蔵量

確認埋蔵量/年間生産量

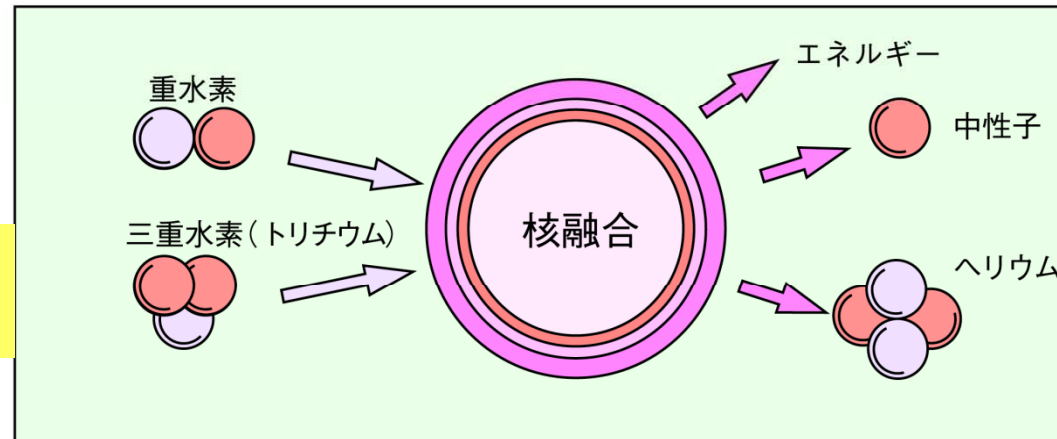


ウランの資源を有効利用する高速増殖炉の燃料サイクルを実現することで、ウラン資源を国内で確保できる。

(注) 可採年数=確認可採埋蔵量/年間生産量
ウランの確認可採埋蔵量は費用130ドル/kgU未満

核融合と核分裂の原理

核融合の原理



夜空に輝く星のエネルギーの源

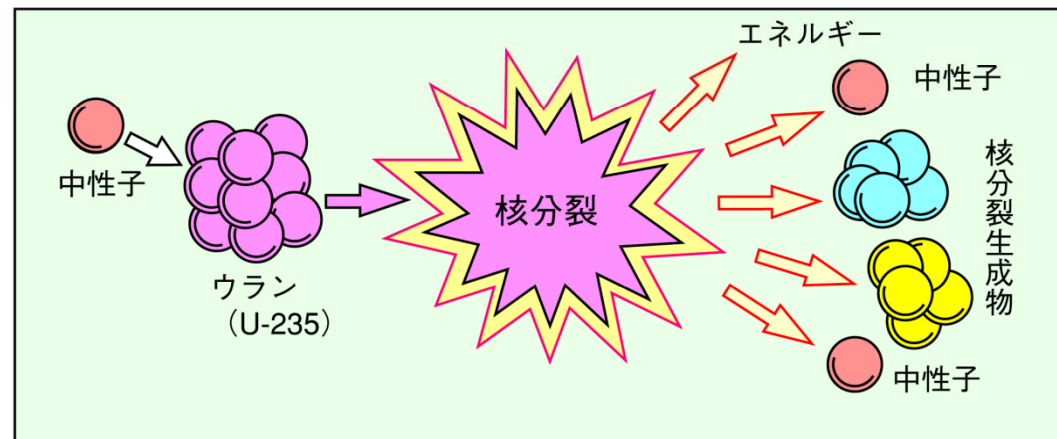
質量がエネルギーEになる

$$E=mc^2$$

m:質量

C:光速
(3×10^8 m/s)

核分裂の原理



どちらも原子力エネルギー

原子炉のエネルギーの源

ではどうやって
エネルギーを
取り出すのか

- ・ 原子核は Z 個の陽子と N 個の中性子とから 構成されている.
- ・ その原子核の質量 を $M(Z, N)$ と表す.
- ・ 原子核が単に陽子と中性子の集まりであるならば, その質量 $M(Z, N)$ は陽子の質量の Z 倍と中性子の質量 の N 倍の和となる.
- ・ しかし, 原子核は単に 核子 (陽子と中性子) が集まっただけではなく, それらが相互作用 (核力) で 強く結合している.

「原子核の質量欠損」

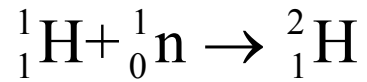
一般に, 2つ以上の粒子が 相互作用して結合すると, 全体の質量は元の粒子の質量の合計より 軽くなる. 結合が強ければ強いほど 質量は軽くなり, この質量の減少を質量欠損と呼ぶ.

陽子数 Z , 中性子数 N の原子核の質量欠損 は, $ZM_p + NM_n - M(Z, N)$ で定義される. 陽子の質量 $M_p = 1.673 \times 10^{-27}$ kg, 中性子の質量 $M_n = 1.675 \times 10^{-27}$ kg

結合エネルギー

$$B(Z, N) = \{ZM_p + NM_n - M(Z, N)\} c^2 \quad (c: \text{光の速度 } 3 \times 10^8 \text{ m/s})$$

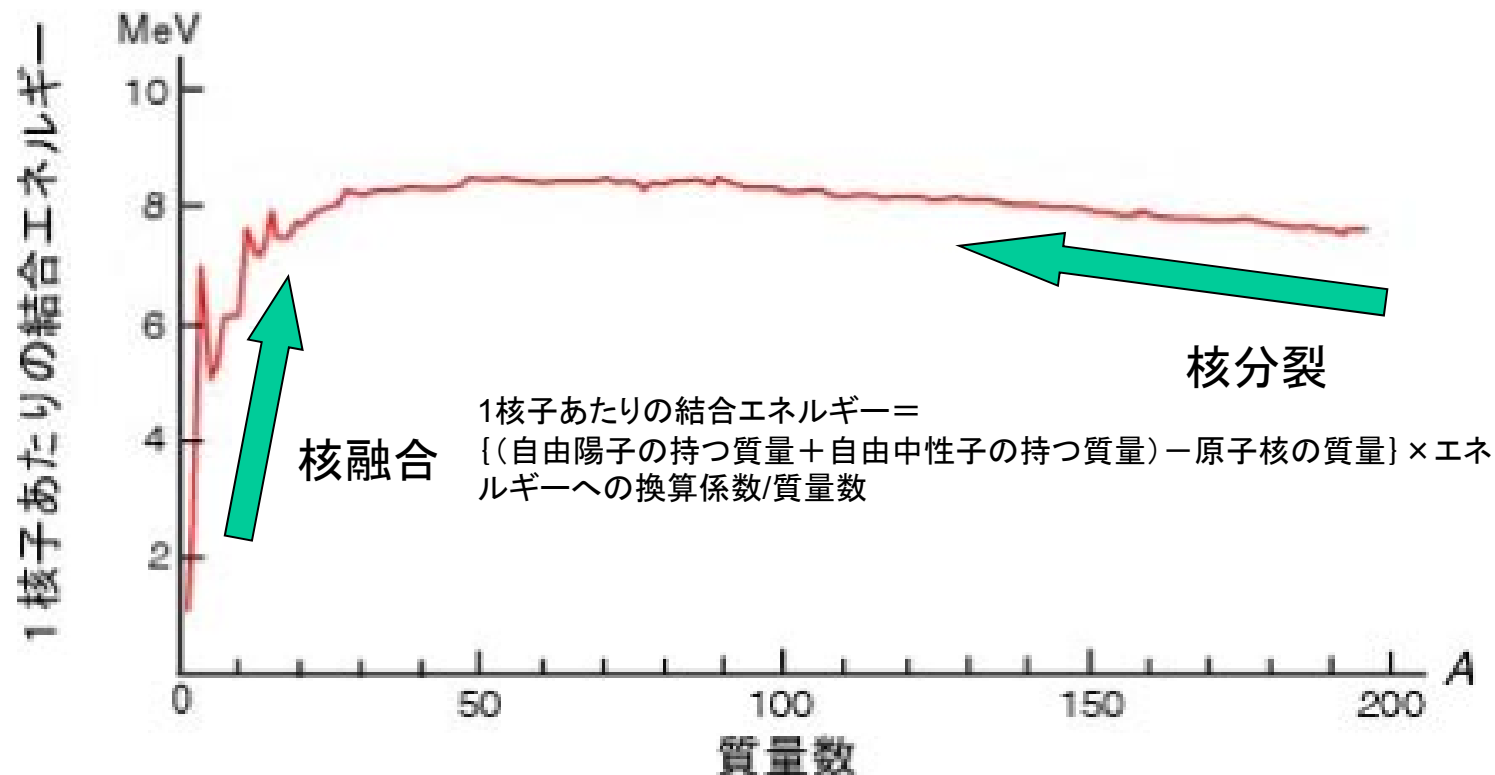
たとえば、水素に中性子を当てると重水素が出来るとともにγ線(2.2 MeV)がでる。



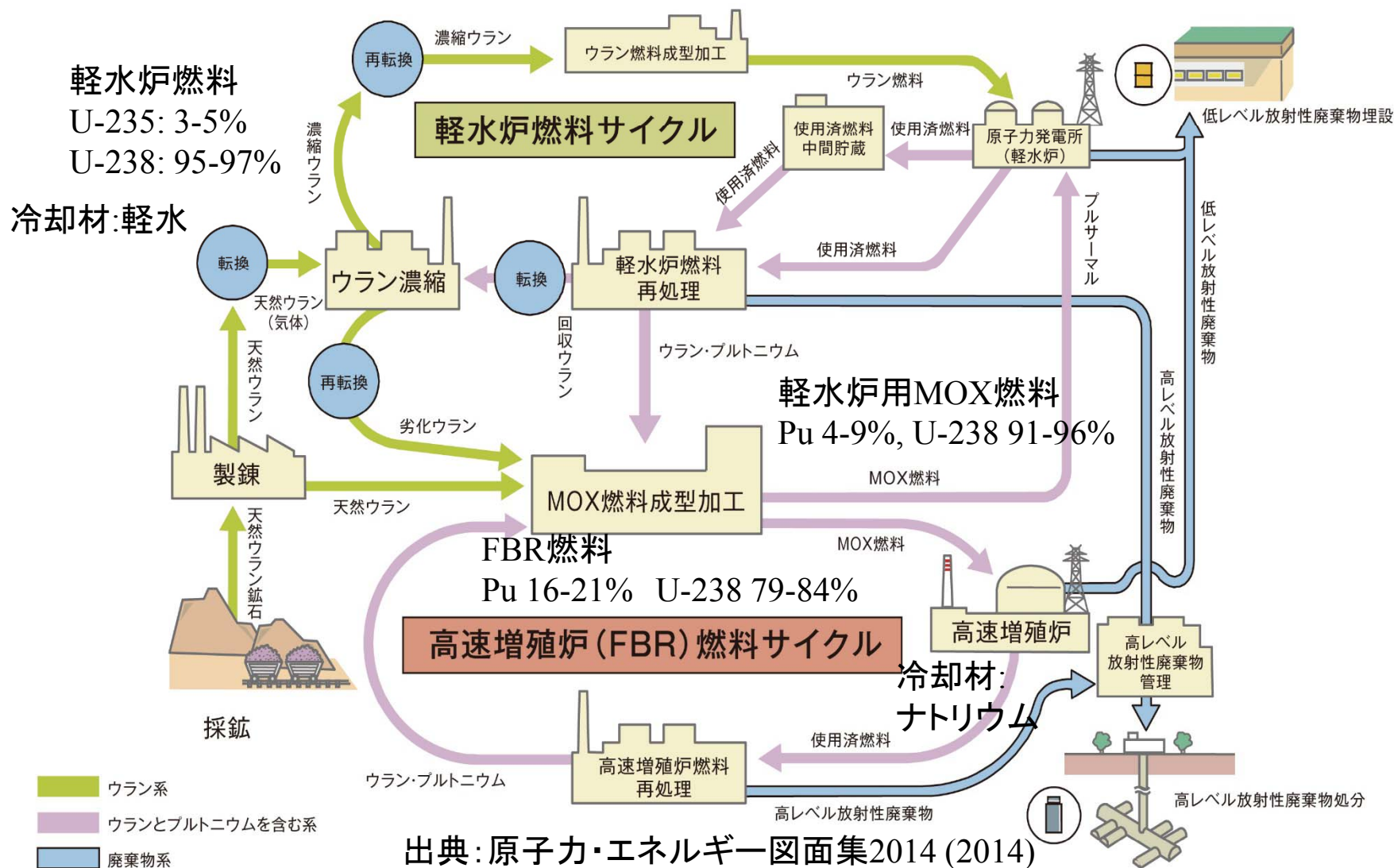
${}^2_1\text{H}$ の核子1個あたりの結合エネルギーは1.1 MeV
(核子とは陽子、中性子を指す。)
重水素はより強い結合となり、その分不要となる
エネルギーを放出する

原子核の持つ結合エネルギーを核子の数で割る。

eV: 1 V の電位差がある自由空間内で電子 1 つが得るエネルギー
を 1 eV とする(1 eV = 1.60×10^{-19} J)



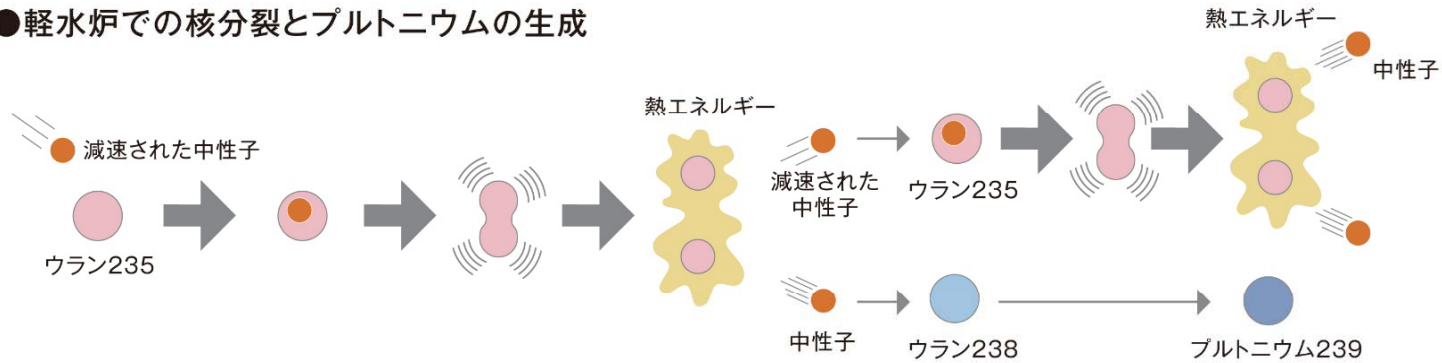
2. 最終的に目指す核燃料サイクル



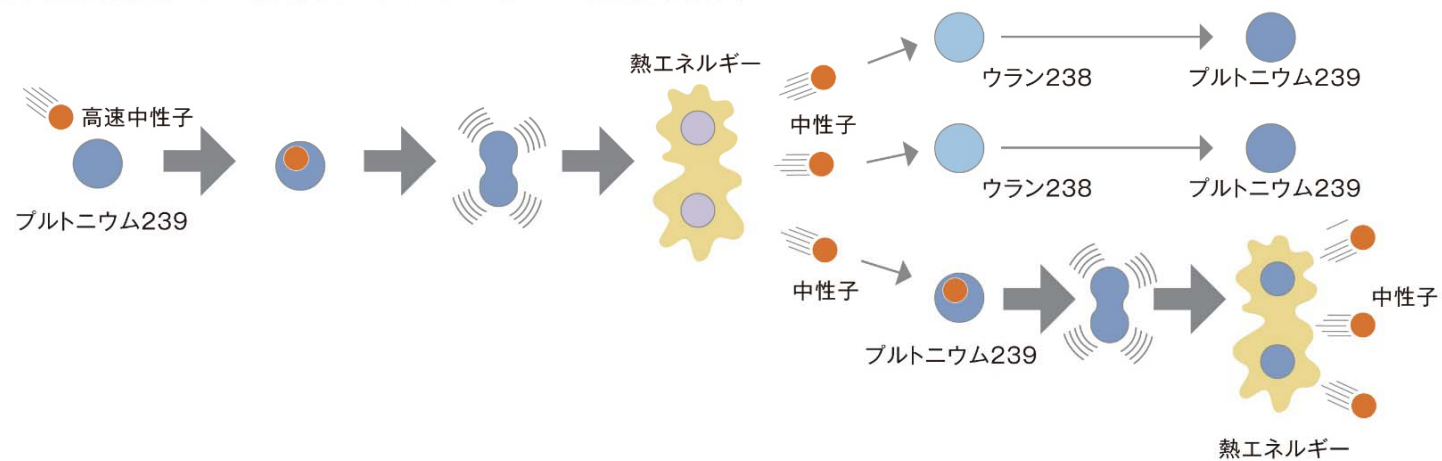
Pu-239の核分裂に伴い発生する中性子はU-238(劣化ウラン)と反応しPu-239になる(U資源を2500-5000年有効利用)。軽水炉利用で蓄積した劣化ウランを活用。MAも活用できる。

ウランの核分裂とプルトニウムの生成・核分裂

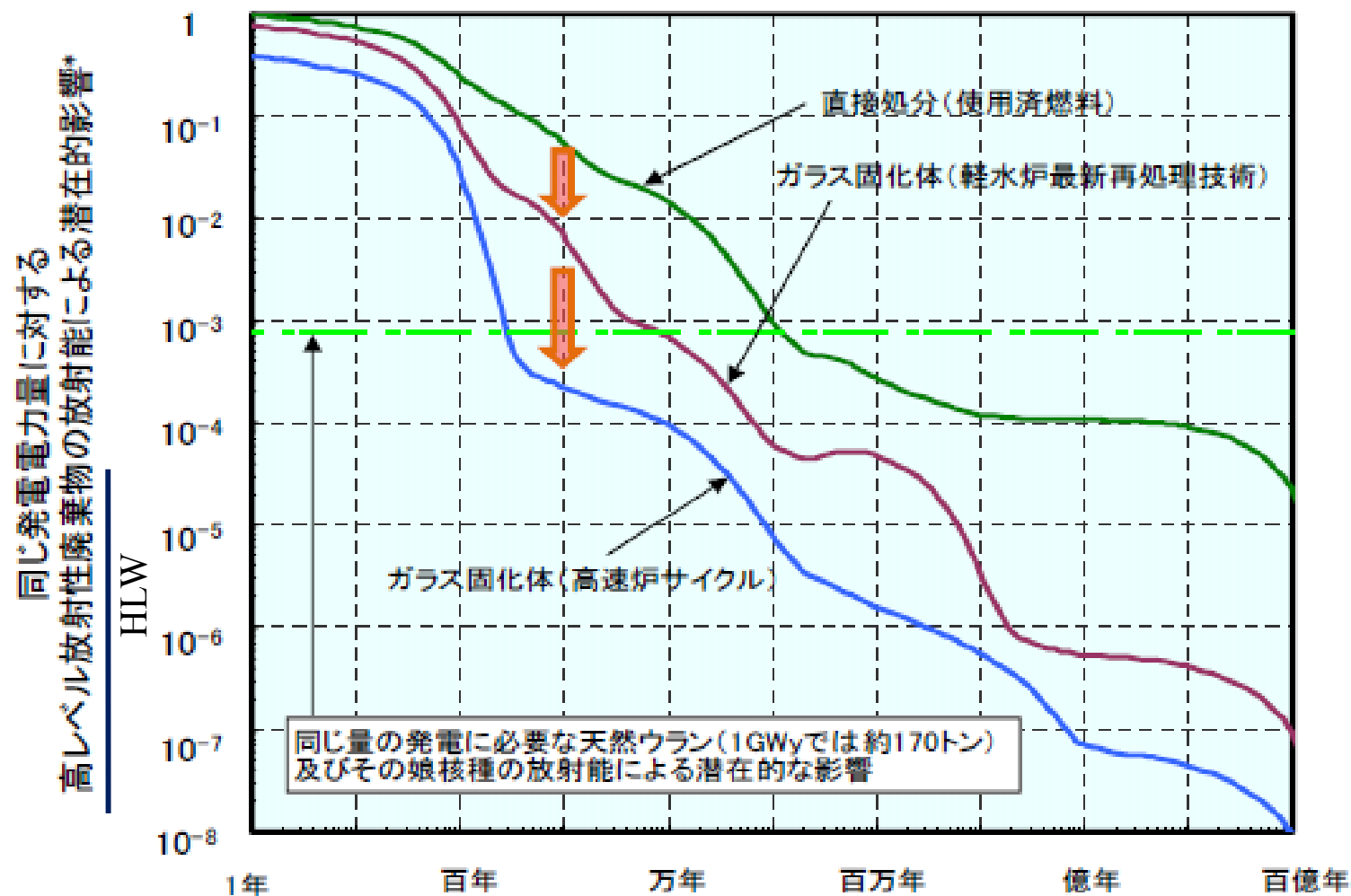
●軽水炉での核分裂とプルトニウムの生成



●高速増殖炉での核分裂とプルトニウムの生成(増殖)



高レベル放射性廃棄物(HLW)の潜在的有害度

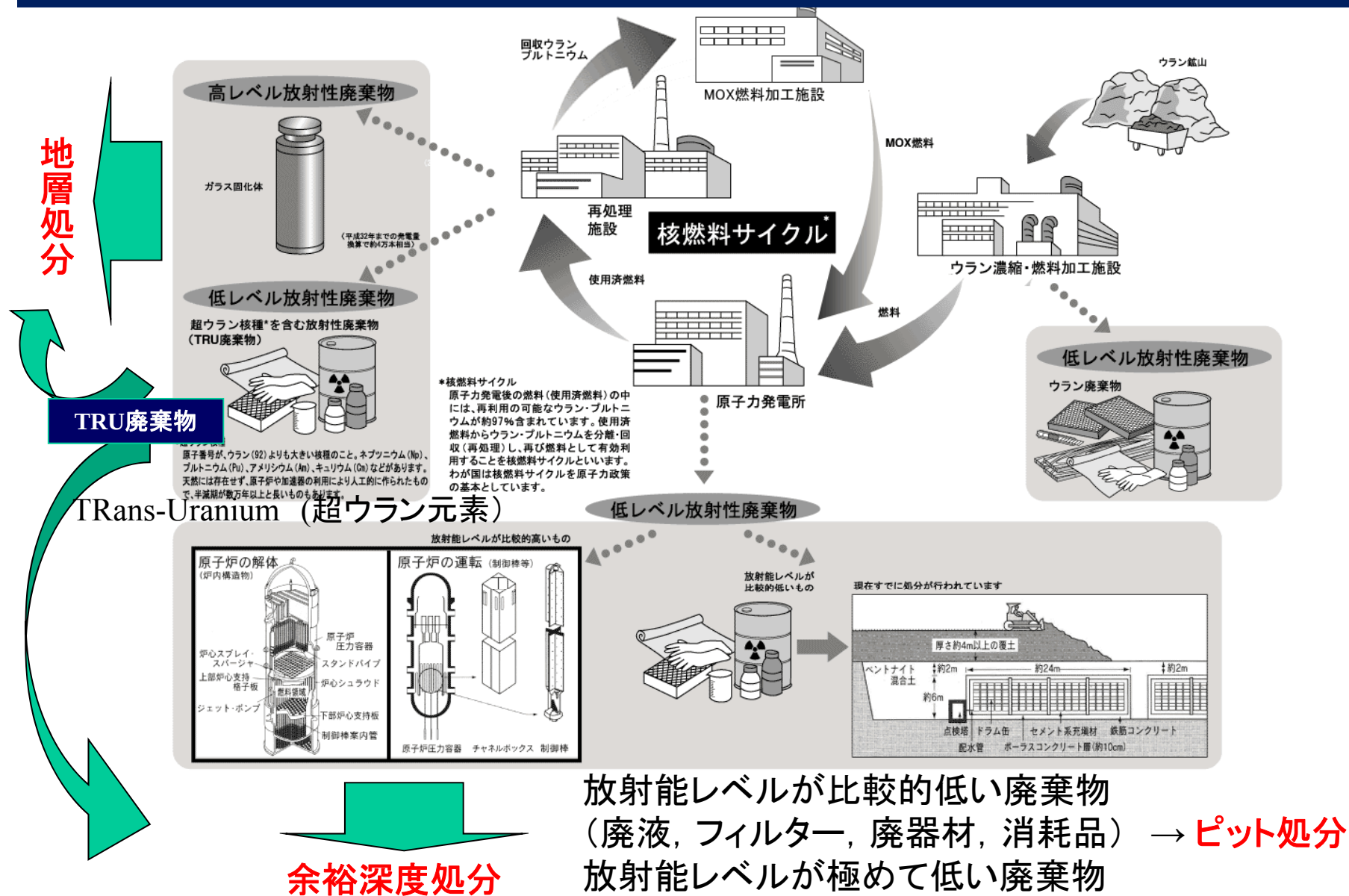


縦軸：全量直接処分の1年目の毒性(Sv)を1とした相対値
横軸：経過時間

資料1-1 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会

原子力科学技術委員会もんじゅ研究計画作業部会(第3回) H24. 11. 21 より

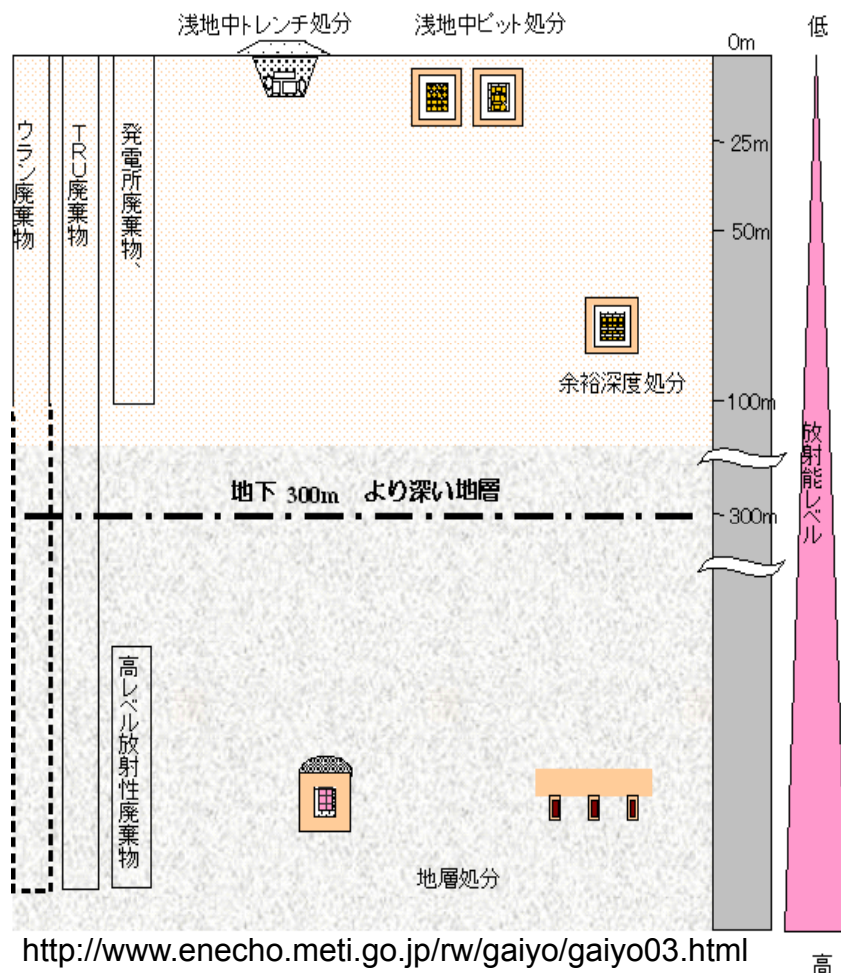
3. 核燃料(軽水炉)サイクルと放射性廃棄物(HLW & LLW)



<http://www.enecho.meti.go.jp/rw/gaiyo/gaiyo03.html>

加えて、放射性廃棄物にはRI・研究所等廃棄物(医療用を含む)や1F事故廃棄物

4つの処分形態の利用



H19.6 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律等の一部改正(原子炉等規制法の改正):

放射能レベルでの分類(第1種廃棄物埋設、第2種廃棄物埋設), NUMOにより代替取得の廃棄物およびTRU廃棄物を取り扱えるようになった。

第2種廃棄物埋設(管理型処分)

浅地中トレンチ処分

人工構築物を設けない浅地中埋設処分

浅地中ピット処分

コンクリートピットを設けた浅地中への処分

余裕深度処分

一般的な地下利用に対して十分余裕を持った深度(地下50～(100 m))への処分

第1種廃棄物埋設

地層処分

地下300 mより深い地層中に処分

廃棄物量(H24年度現在)

廃棄物の種類				廃棄物の例	発生源	廃棄物の量	
高レベル放射性廃棄物				ガラス固化体	再処理施設	H26.4現在1,920本 (JNFL),247本(JAEA)	2020年までに 7,000 m ³ (ガラス固化体 4万本) 地層処分
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	高↑放射能レベル↓低	放射能レベルの比較的高い廃棄物	制御棒、炉内構造物	原子力発電所	200Lドラム缶で約67万本(H24年末現在), その他に制御棒、チャンネルボックス、蒸気発生器も保管されている	余裕深度処分
			放射能レベルの比較的低い廃棄物	廃液、フィルター、廃器材、消耗品等を固形化			ピット処分
			放射能レベルの極めて低い廃棄物	コンクリート、金属等			トレンチ処分
	超ウラン核種を含む放射性廃棄物 (通称 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	200Lドラム缶で約17万本(H24年末現在)	地層処分 余裕深度処分 ピット処分、トレンチ処分
	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	200リットルドラム缶約10.4万本 (H21.3現在)	詳細検討中 (2030年までに27万本)
クリアランスレベル以下の廃棄物				原子力発電所解体廃棄物の大部分	上に示した全ての発生源	13～53万トン／基	(加えて、事故に伴う廃棄物: 今後整理要)

表 <http://www.enecho.meti.go.jp/rw/gaiyo/gaiyo01.html>
発生量 ガラス固化体 http://www.numo.or.jp/q_and_a/01/ (JNFL分 仏1310本, 英 264本受け入れ H26.7現在)、他 <http://www.rwmc.or.jp/disposal/radioactive-waste/> より

日本で発生する廃棄物の量

	発生廃棄物量(トン/日)		備考
一般廃棄物	主に家庭から排出される生ゴミ、粗大ゴミ およびオフィスから排出される紙くず等	124,356	平成23年度実績
産業廃棄物	事業活動に伴って生じた廃棄物のうち、 廃プラスチック、廃酸、廃アルカリ等	1,044,411	平成23年度実績
放射性廃棄物	原子力施設の運転、保守等に伴って 発生する放射性の廃棄物	高レベル 1.4	平成12～18年 推定
		低レベル 80※	平成24年度実績

※福島第一原子力発電所のデータについては含まない

出典：原子力・エネルギー図面集2014 (2014)

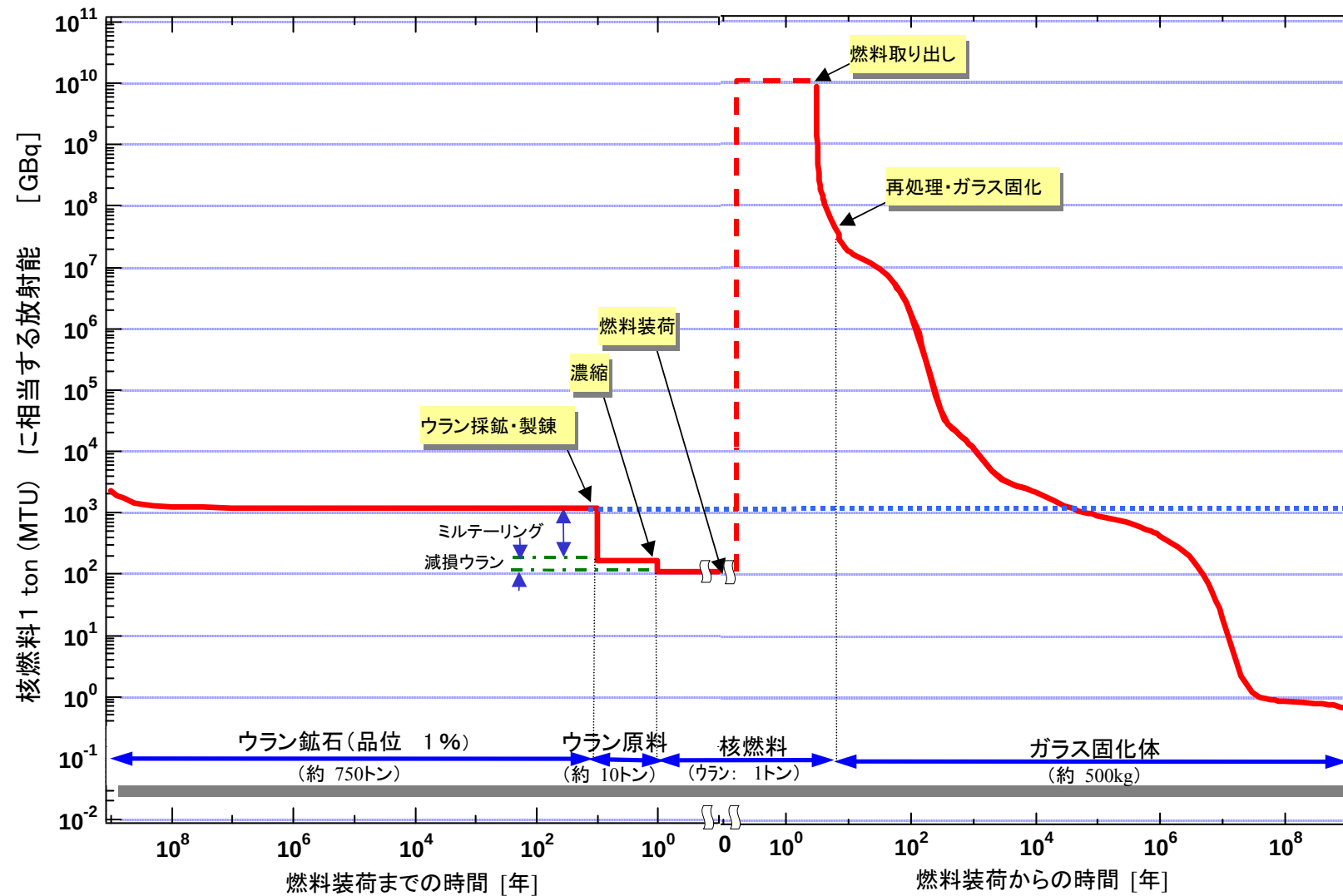
$$40,000 \times 0.5 \text{ ton} / (40 \text{ y} \times 365 \text{ d/y}) = 1.37$$

ガラス固化体からの放射線量

	表面	1m	レントゲン撮影
製造時	14,000 Sv/h (2秒で100% の人が死亡)	420 Sv/h	1秒で426 回分
30年冷却	500 Sv/h	30 Sv/h	1秒で28 回分
オーバーパック (29 cm厚) 封入	0.00084 Sv/h	0.0002 Sv/h	36分で1回分

科学技術庁原子力局廃棄物政策課: 高レベル放射性廃棄物に向けての基本的考え方について、参考資料 (1998,5)より

高レベル放射性廃棄物についての放射能の時間的推移



濃縮度4.5%の核燃料1MTU相当

福島第一放出: 約90万テラBq = 9.0×10^8 GBq
 チェルノブイリ放出: 約520万テラBq

(サイクル機構: 第2次取りまとめ総論レポート第I章より)

100万kWe級発電所1年分の稼働により発生する使用済燃料 30 ton, 0.9 tonの高レベル放射性廃液(HLLW). 内訳は下記.

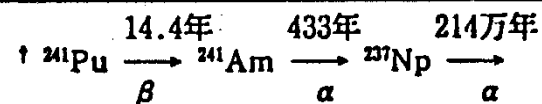
→MA

表1 核分裂生成物生成量の半減期による区分け
(100万kW級のPWR:Pressurized Water Reactor)

半減期区分	主要核種	核分裂生成物生成割合(wt%)
1年未満	多 数	1.0
1年～10年	ルテニウム ^{106}Ru セシウム ^{134}Cs プロメチウム ^{147}Pm ユウロピウム ^{155}Eu	1.3
10年～30年	クリプトン ^{85}Kr ストロンチウム ^{90}Sr セシウム ^{137}Cs	5.3
30年～100年	サマリウム ^{151}Sm	0.03
100年～1万年	な し	0.0
1万年～50億年	ジルコニウム ^{93}Zr テクネチウム ^{99}Tc パラシウム ^{107}Pd スズ ^{126}Sn ヨウ素 ^{129}I セシウム ^{135}Cs	6.6
50億年以上	ルビジウム ^{87}Rb セリウム ^{142}Ce ネオジム $^{144}\text{Nd}, ^{150}\text{Nd}$ サマリウム $^{147}\text{Sm}, ^{148}\text{Sm}, ^{149}\text{Sm}$	9.5
安 定	多 数	76.3

表-2 軽水炉使用済燃料中のマイナー
アクチノイドの組成と生成量

核 種	半減期	再処理までの冷却期間	
		3年	10年
^{237}Np	214万年	57.9%	41.3%
$^{241}\text{Am}^\dagger$	433年	27.4	48.8
$^{242\text{m}}\text{Am}$	141年	0.06	0.04
^{243}Am	7,380年	11.9	8.33
^{243}Cm	28.5年	0.03	0.02
^{244}Cm	18.1年	2.67	1.44
^{245}Cm	8,500年	0.15	0.10
年間生成量		23.8 kg	33.9 kg



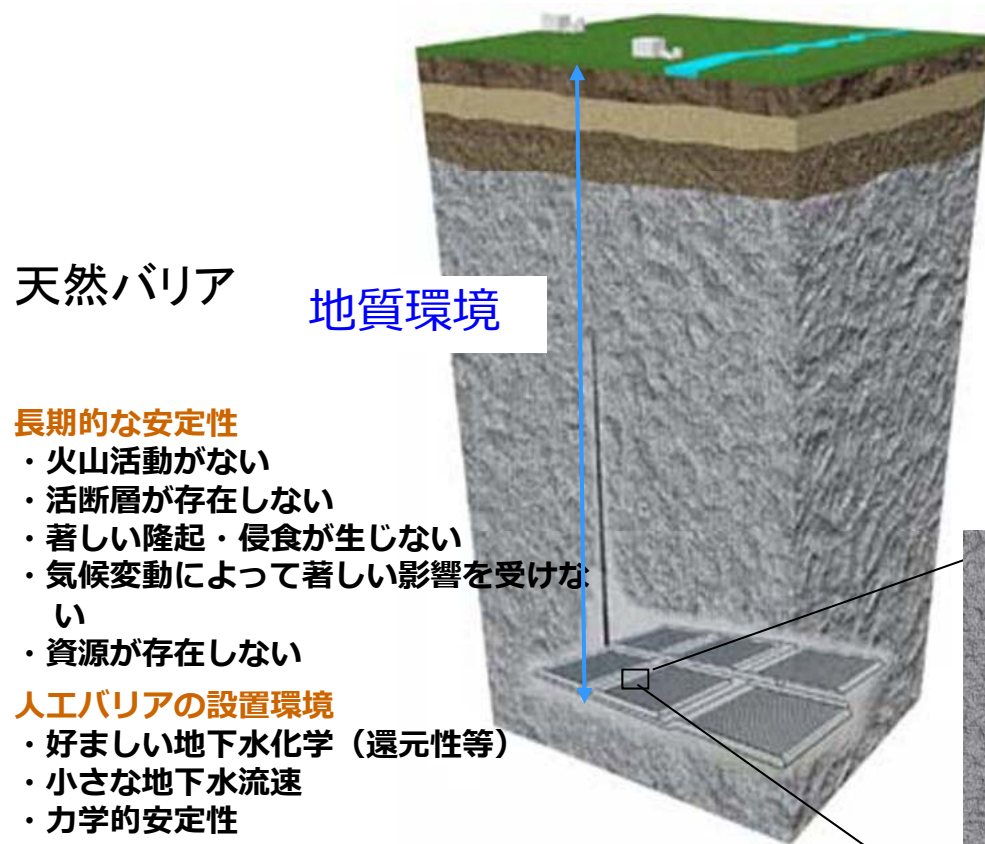
(出典：日本原子力学会誌 1995年3月号)

原子力学会誌 1995年3号より

ガラス固化体 30 本 (重量約490kg／本, 高さ約1,340mm・外径約430mm)
 ・ガラス量約150リットル／本・容器材質 ステンレス鋼
 ・ガラス固化体のHLLWの重量割合 (900 kg/30本) / 490 kg/本 = 6%)

4. 地層処分システム

サイクル機構：第2次取りまとめ総論レポート第II章より



天然バリア

地質環境

長期的な安定性

- ・火山活動がない
- ・活断層が存在しない
- ・著しい隆起・侵食が生じない
- ・気候変動によって著しい影響を受けない
- ・資源が存在しない

人工バリアの設置環境

- ・好ましい地下水化学（還元性等）
- ・小さな地下水流速
- ・力学的安定性
- ・人間環境からの物理的障壁

天然バリアとしての機能

- ・放射性核種の移行抑制と希釈・分散

人工バリア

ガラス固化体

（ステンレス製キャニスタに充填されたもの）

- ・放射性核種を均一かつ安定に固定
- ・高い化学的耐久性により地下水への放射性核種の溶出を抑制
- ・熱や放射線に対する安定性

オーバーパック

（炭素鋼）

- ・ガラス固化体の発熱や放射能が高い期間、地下水とガラス固化体の接触を阻止
- ・地下水との反応によりガラス固化体近傍の還元性を維持
- ・放射性核種の腐食生成物への収着

緩衝材

（ベントナイトを主成分）

- ・低透水性（オーバーパックと地下水の接触抑制）
- ・小さな物質移動速度
- ・放射性核種の移行遅延（収着）
- ・膨潤性と可塑性
- ・化学的緩衝性
- ・空隙水中での低い溶解度
- ・コロイド、微生物、有機物の移動に対するフィルター効果

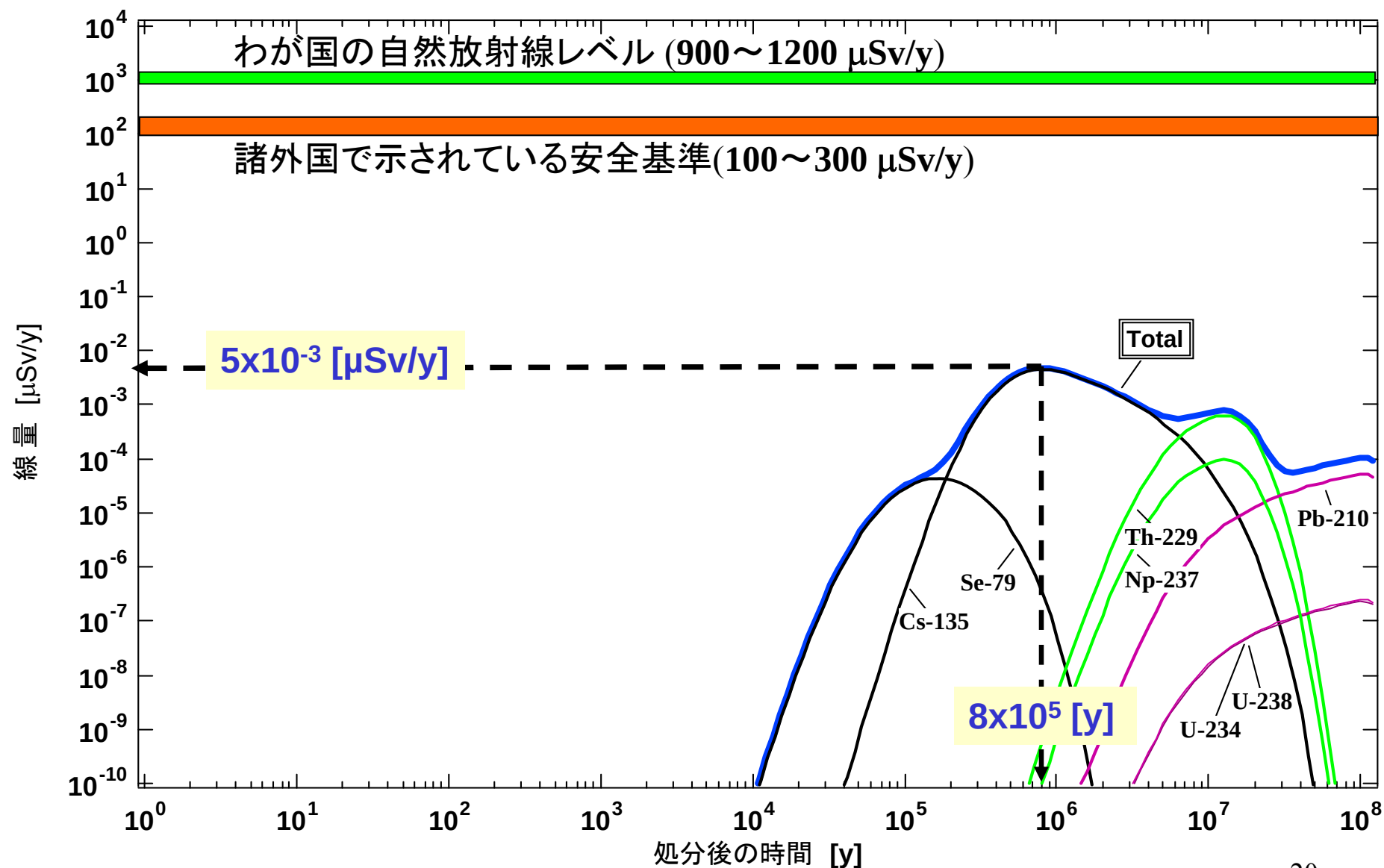


JNC(1999)

HLW

第2次取りまとめ総論レポート第V章

レファレンスケースの解析結果

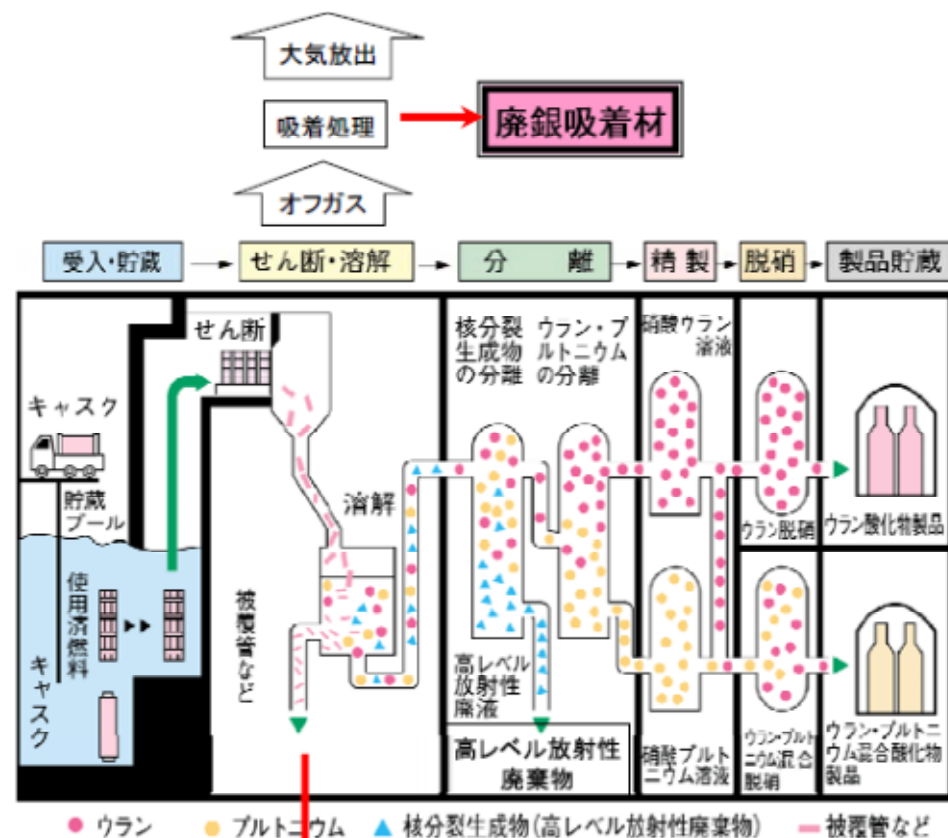


20

第2次取りまとめ総論レポート第V章より

TRU廃棄物

主に再処理工場やMOX加工工場からの廃棄物（多様であり、それらを区分して、4つの処分形態を利用）これらの廃棄物の中でガラス固化体を除く**放射性廃棄物を長半減期低発熱放射性廃棄物**と呼ぶ（通称 TRU廃棄物：超ウラン元素(Trans-Uranium elements)を含む廃棄物） Np, Pu, Am etc



【TRU廃棄物の種類】

○ハル

- 数cmにせん断された燃料棒を、溶解槽で溶解させた際に溶け残る燃料被覆管

○エンドピース

- 使用済燃料集合体の末端部分
- 集合体のせん断時に、切断除去

○プロセス濃縮廃液

- 酸回収、溶媒再生、除染、分析等により発生し、蒸発濃縮等の処理後、固化

○雑固体廃棄物

- 再処理工程の各工程で発生する雑多な固体状の廃棄物
- 可燃性(紙、布等容易に焼却できるもの)、不燃性(金属配管、ガラス等焼却できないもの)に分類(MOX燃料加工施設の操業・解体からも発生)

○廃銀吸着材

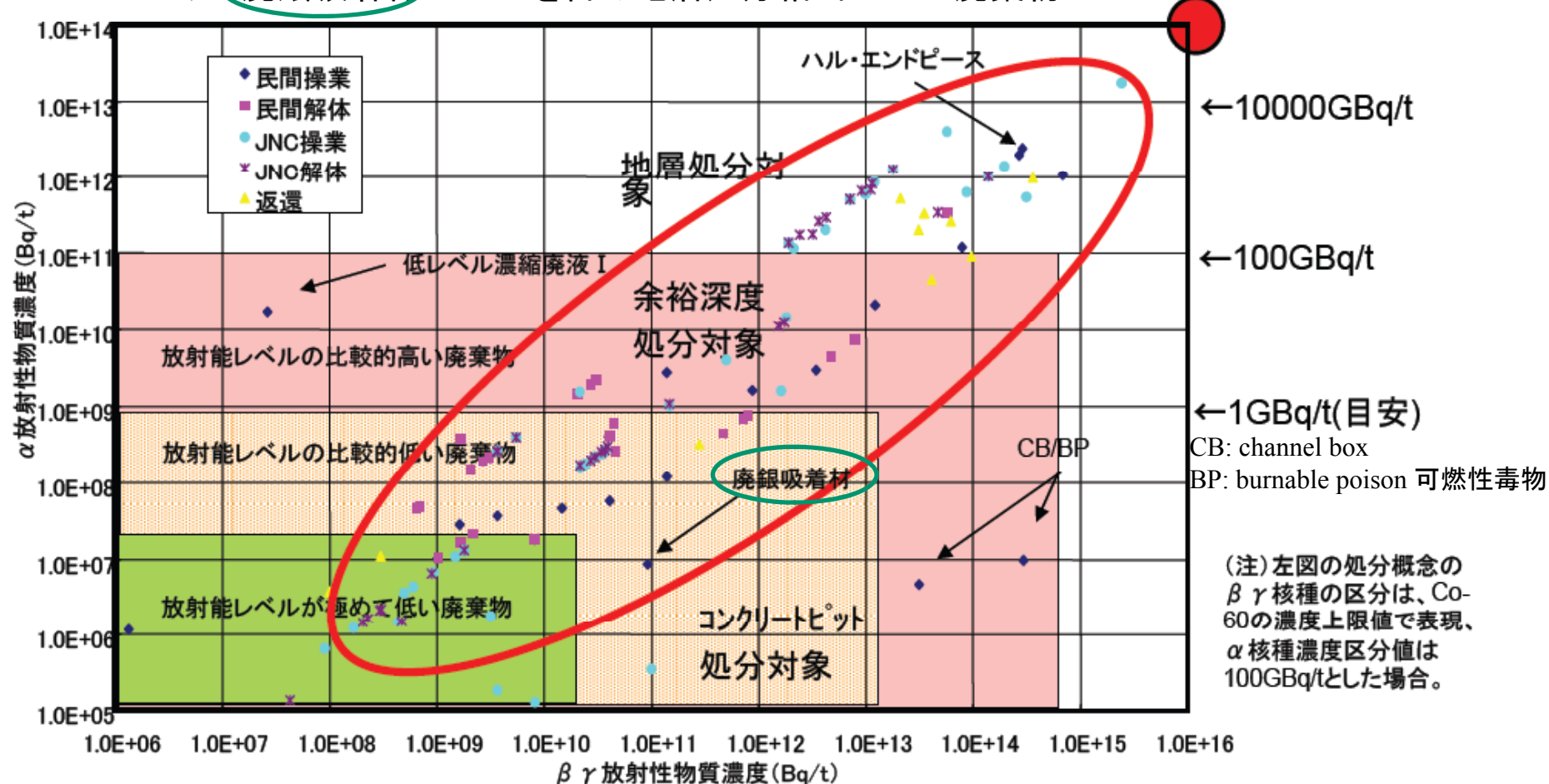
- 使用済燃料のせん断・溶解時に発生するオフガス中の放射性ヨウ素を吸着した使用済みのフィルター

プロセス濃縮廃液
雑固体廃棄物

TRU廃棄物の多様な放射能レベル

注 廃銀吸着材はI-129を含み地層処分相当のTRU廃棄物

高レベル放射性廃棄物(HLW)



	単位	HLW	地層処分TRU(α区分=1GBq/t)
放射性物質濃度	Bq/t	βγ:約1.0E+16, α:約1.0E+14 ^{*1}	βγ:1.7E+14, α:4.0E+11 ^{*3}
総放射性物質質量	Bq	βγ:約2.0E+20, α:約2.0E+18 ^{*2}	βγ:1.7E+19, α:3.9E+16
発熱量	W/本	2,300 ^{*1}	61(JNFLハル・エンドピース)

*1:(財)原子力環境整備促進・資金管理センター 放射性廃棄物ハンドブック(平成17年度版)より

*2:放射性物質濃度から、ガラス固化体重量:約500kg/本、発生量:40,000本として算出

*3:総放射生物質量を地層処分対象廃棄体の総重量:約98,000tonで除して算出

JAEA, 電事連: 第2次TRUレポートの概要, 原子力委員会資料 (2005)

処分形態と濃度上限値

(単位 : Bq/t)

核種	浅地中トレンチ 処分	浅地中ピット 処分	余裕深度処分
C-14	-	1E+11	1E+16
Cl-36	-	-	1E+13
Co-60	1E+10	1E+15	-
Ni-63	-	1E+13	-
Sr-90	1E+07	1E+13	-
Tc-99	-	1E+09	1E+14
I-129	-	-	1E+12
Cs-137	1E+08	1E+14	-
α核種	-	1E+10	1E+11

原子力安全委員会『低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について』平成19年5月21日



実際の安全審査では、濃度上限値とは別に、申請書にある対象廃棄物の放射能濃度を前提に詳細な安全評価を行った上、安全性を判断することから、濃度上限値そのものが処分の安全性に影響を及ぼすことはない。

濃度上限値の設定は、線量換算係数等の値が変更されても規制の継続性の観点からその値を頻繁に変更することがないよう適度な余裕を見込んでおくことが重要。

一例

放射性物質上下水処理等副次産物の当面の取扱いに関する考え方 (H.23, 6.16, 原子力災害対策本部)

Cs-134, Cs-137の合計濃度に着目

8,000 Bq/kg以下(8×10^6 Bq/t以下)の場合、跡地を居住地に供しない上で、土壌層の設置、防水対策等を講じた埋立処分を可能とする。(トレンチ処分)

100,000 Bq/kg以下(10^8 Bq/t以下)の場合、処分地の敷地境界から所定距離以上離れた位置(70 m以下)に仮置きが可能。今後、個別の評価を要せずに管理型処分場で処分することについて、検討する。

(100,000 Bq/kg以下、跡地に居住しない、長期的に適切な措置が講じられれば10 μ Sv/yを下回るとの試算を引用)

(クリアランスレベル: Cs-134 0.1 Bq/g, Cs-137 0.1 Bq/g(各核種の放射能濃度をクリアランスレベルで割り、その合計が1を超えないこと)

LLW (TRU廃棄物：地層処分相当)

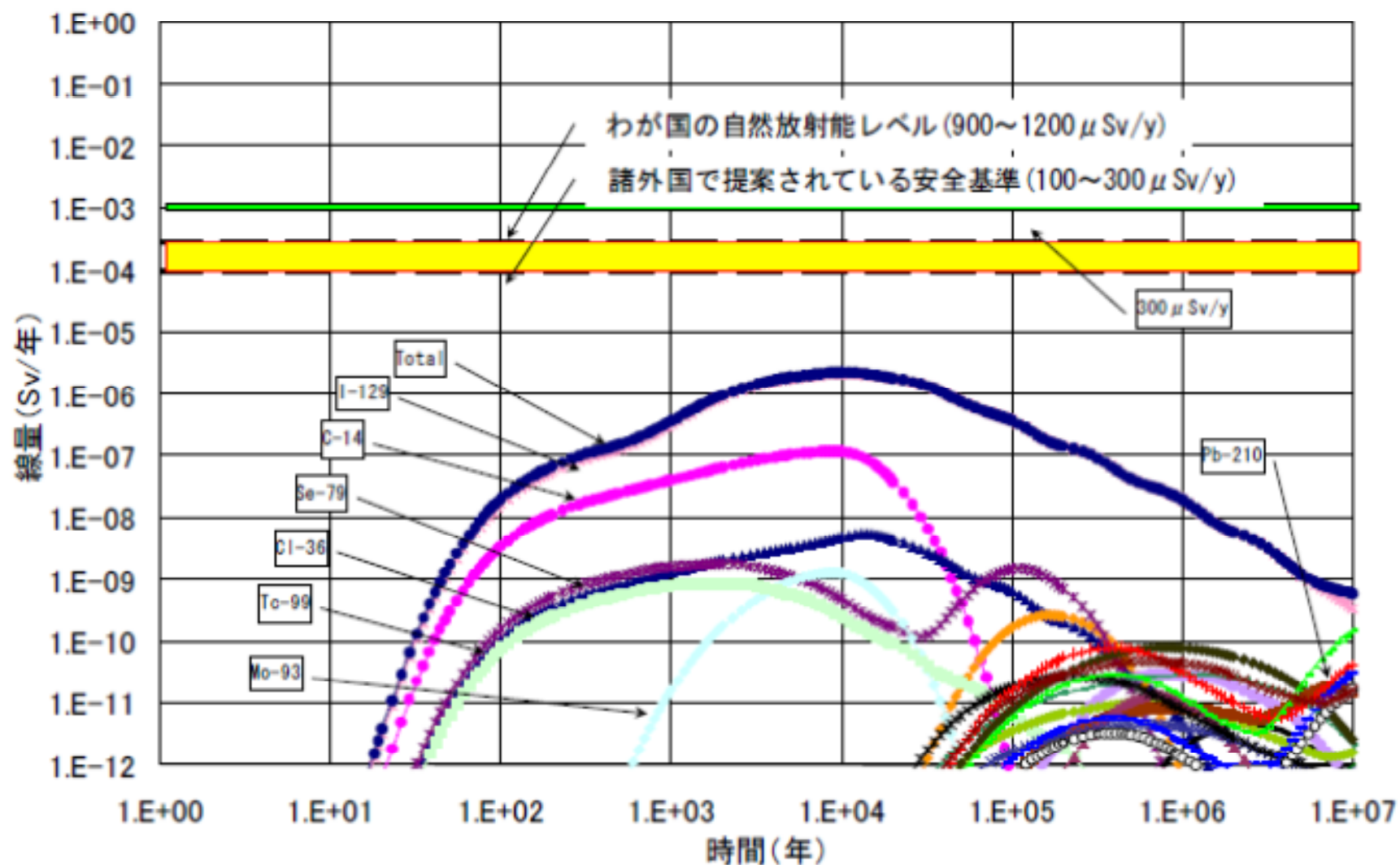


図 8.4.4-2 レファレンスケースの評価結果 (核種ごと)

福島第一の事故

放射性廃棄物の処分方法は今後詳細に議論要



多様な廃棄物

- ・分類・区分により管理できる状態に

(汚染水(吸着材、スラッジ、処理容器・配管)、核燃料(熔融物)、使用済燃料、圧力容器、格納容器など炉・建屋等の解体施設、環境修復に伴う廃棄物など)

- ・放射能レベル等に応じた処分

日本では4つの処分形態が存在

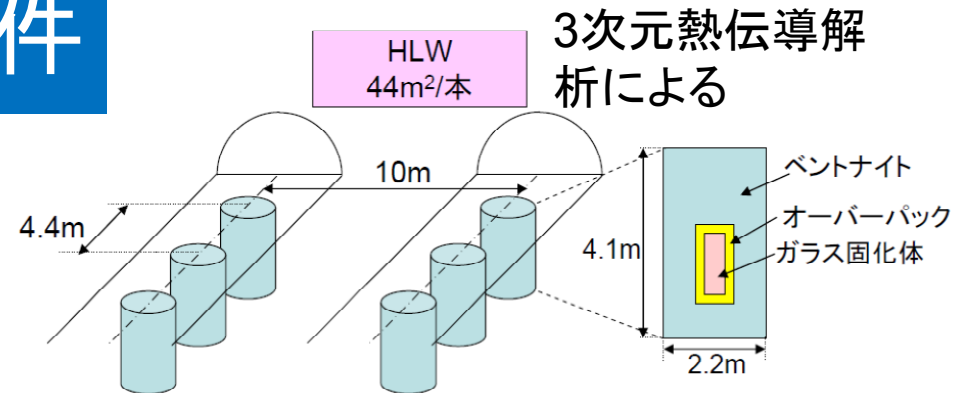
トレンチ処分、ピット処分、余裕深度処分

地層処分

- ・これらの処分システムでは蓋然性の高いシナリオ(基本シナリオ)において生活圏で $10\mu\text{Sv/y}$ 以下に
- ・直接処分の検討要

ガラス固化体の制約条件

放射線耐性 ($\beta\gamma: 5.1 \times 10^{16} \text{ Bq/t}$, $\alpha: 4.9 \times 10^{14} \text{ Bq/t}$) に
 加え、下記の制約条件満たす必要がある。



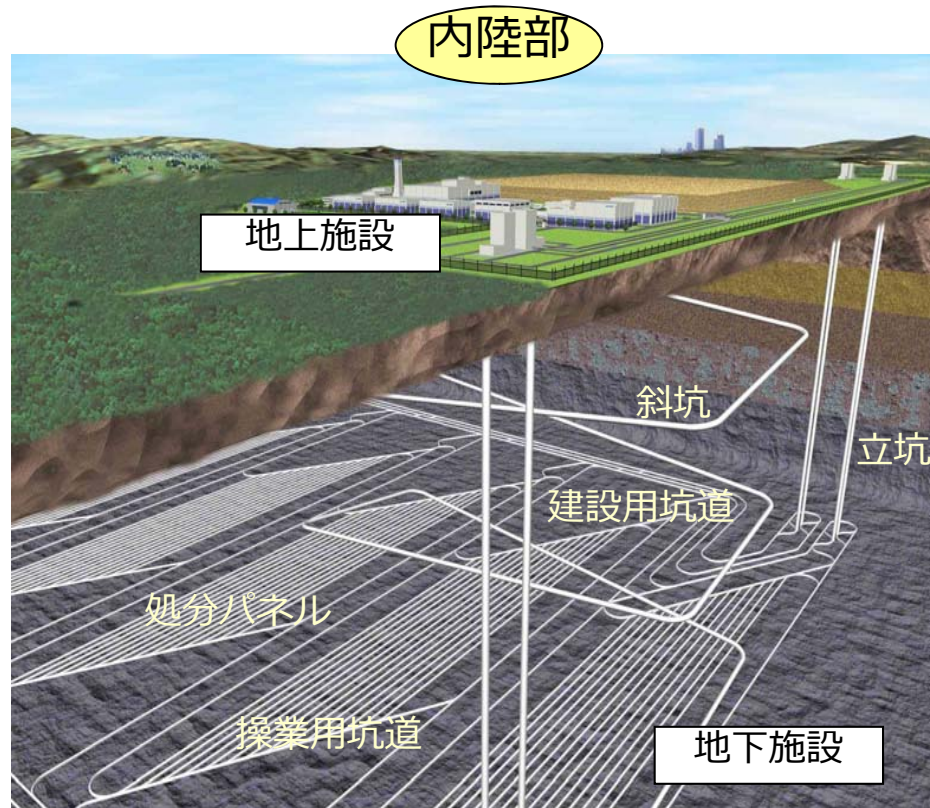
- ・制約条件 1: 緩衝材の最高温度を100℃以下にする (100℃以上で緩衝材の変質反応が加速するため. 変質すると放射性元素の収着性・止水性が激減する.) そのためには、ガラス固化時に2.3 kW以下にする。これにより50年間の冷却により350 Wになる。

解析用熱物性値 (JNC, 1999)

熱伝導率 λ [W/m·K]	熱伝導率 λ [W/m·K]	比熱: C [kJ/kg·K]	密度: ρ [kg/m ³]	熱容量: [kJ/K·m ³ ·K]
ガラス固化体	1.2	0.96	2800	2688
オーバーパック	51.6	0.47	7860	3694
緩衝材	0.78	0.59	1712	1010
埋戻し材	0.78	0.59	1712	1010
岩盤 (硬岩系)	2.8	1.0	2670	2670
岩盤 (軟岩系)	2.2	1.4	2200	3080

- ・制約条件 2: モリブデン酸化物 MoO_3 の最大割合3 wt%(12kg)以下にする(モリブデン酸塩を主成分とする結晶相の生成を防ぐ) (1体 400 kg)
- ・ガラス固化体の浸出速度: 60℃, $1 \times 10^{-3} \text{ g/m}^2/\text{d}$ (約 $3.7 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2/\text{y}$) (JNC, 1999)

処分場のイメージ



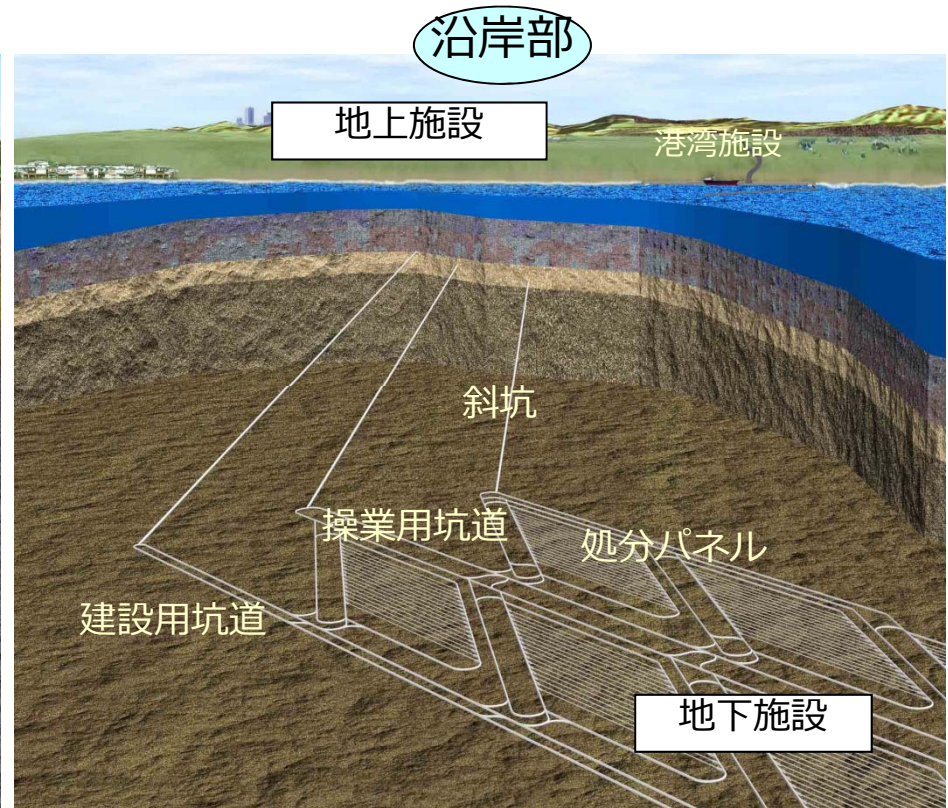
仕様の一例（現時点の概略仕様）

地上施設

- 敷地面積：1,000,000m²

地下施設

- 深度：1000m； 大きさ（平面）：約3km×約2km
- 立坑：6本； 斜坑：1本
- 坑道延長（立坑，斜坑除く）：約250km
- 総掘削量（立坑，斜坑除く）：約630万m³
- 立坑＋斜坑の延長距離：約20km；
- 立坑＋斜坑の掘削量：約60万m³



仕様の一例（現時点の概略仕様）

地上施設

- 敷地面積：1,000,000m²

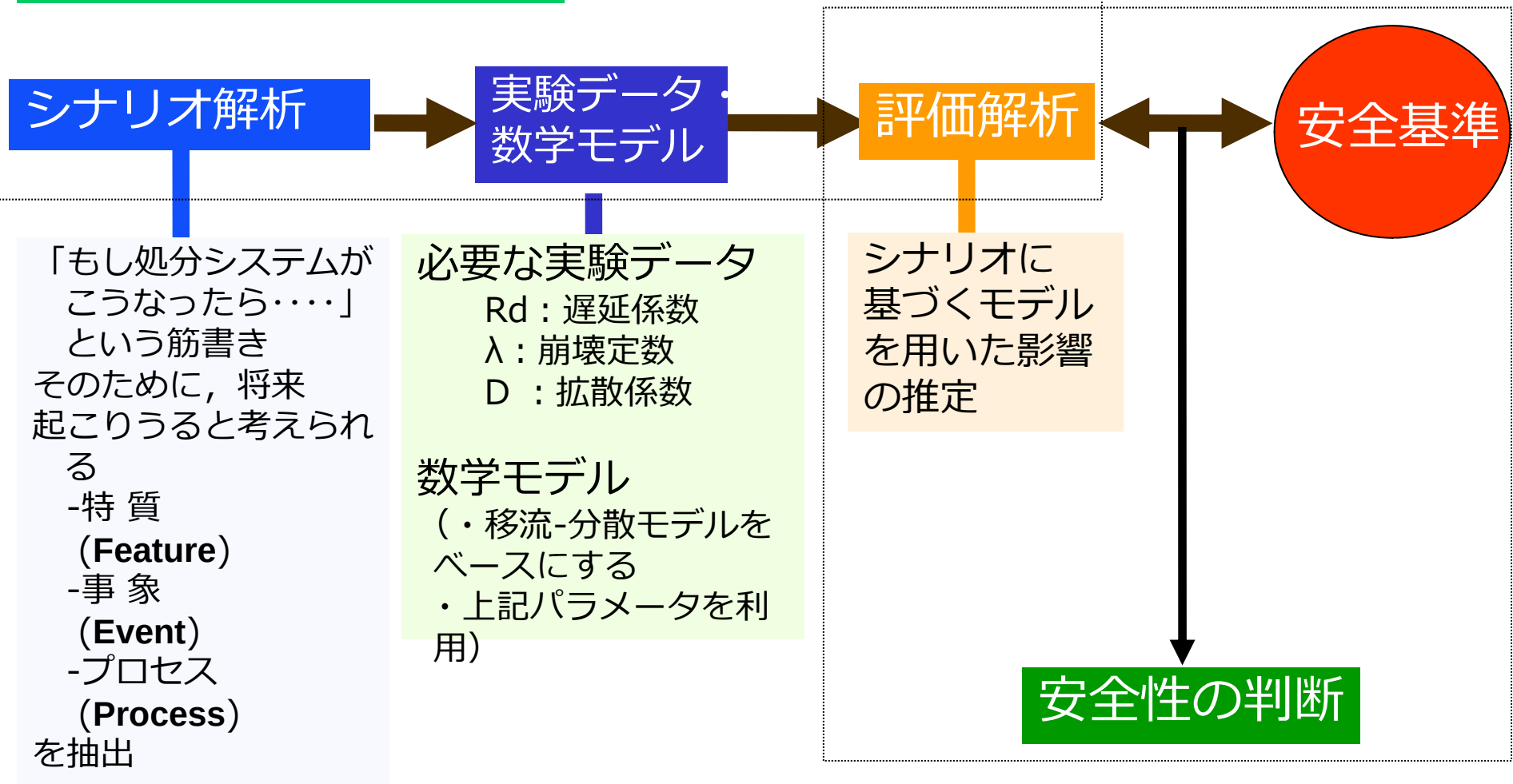
地下施設

- 深度：500m； 大きさ(平面)：約3.5km×約1.5km
- 斜坑：6本
- 坑道延長(斜坑除く)：約200km
- 総掘削量(斜坑除く)：約230万m³
- 斜坑の延長距離：約40km
- 斜坑の掘削量：約120万m³

(JNC, 1999)

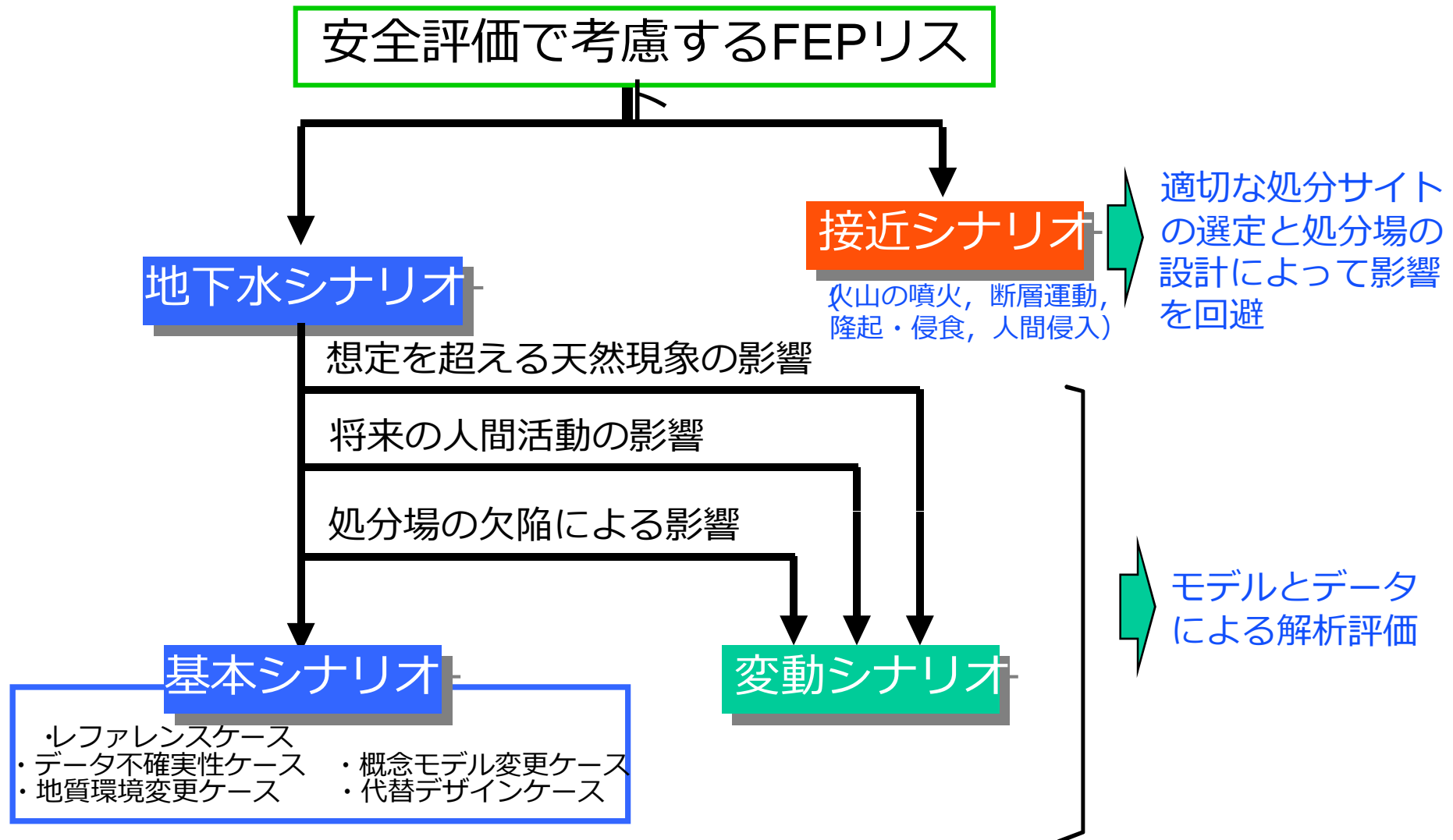
処分システムの安全評価

処分システムの性能評価

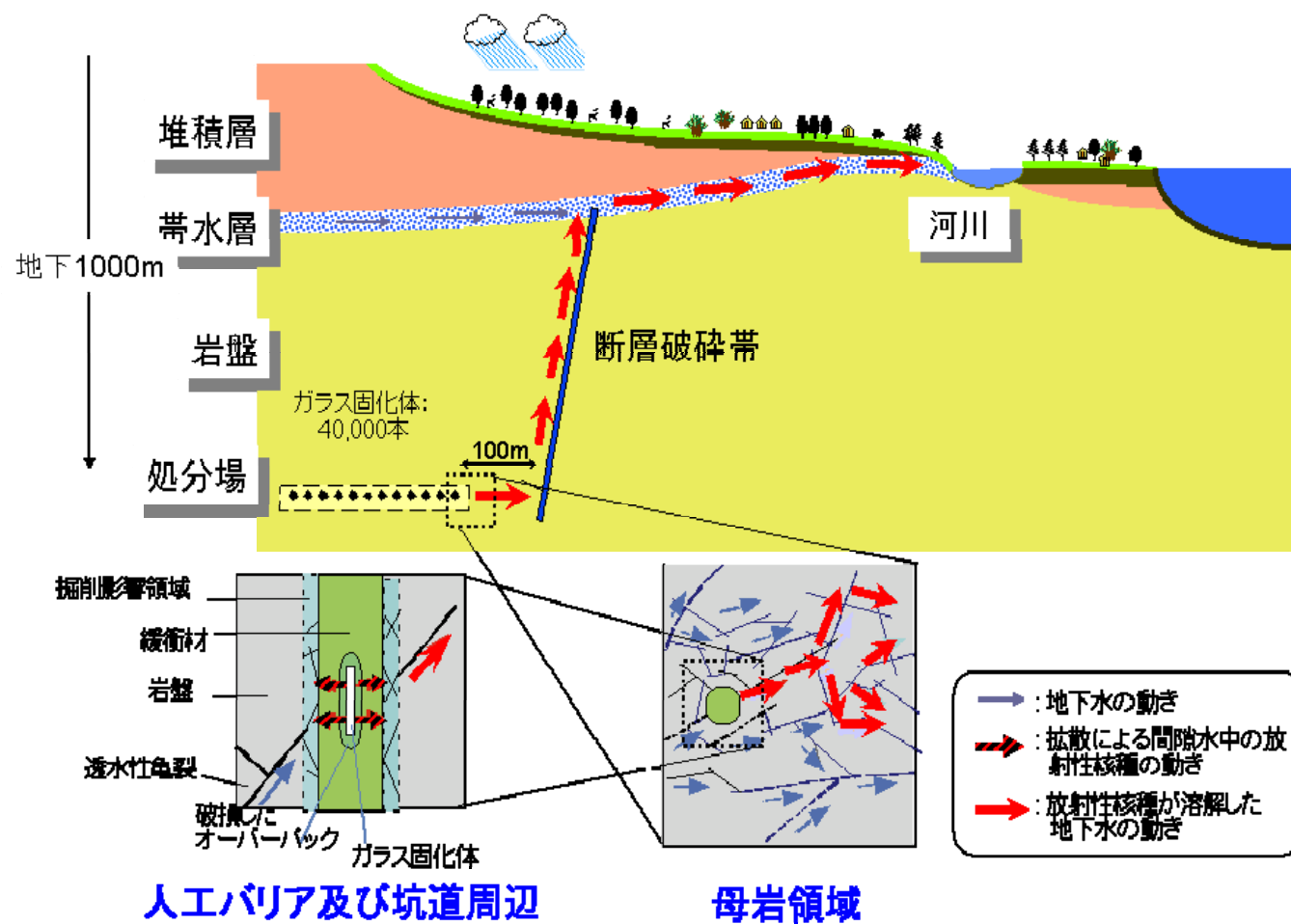


地下水流動, 物質移動, 熱移動, 固相への核種の収着
溶解度を制限する固相の時間変化, 有機や無機コロイドと核種との錯生成,
微生物影響, セメント影響...

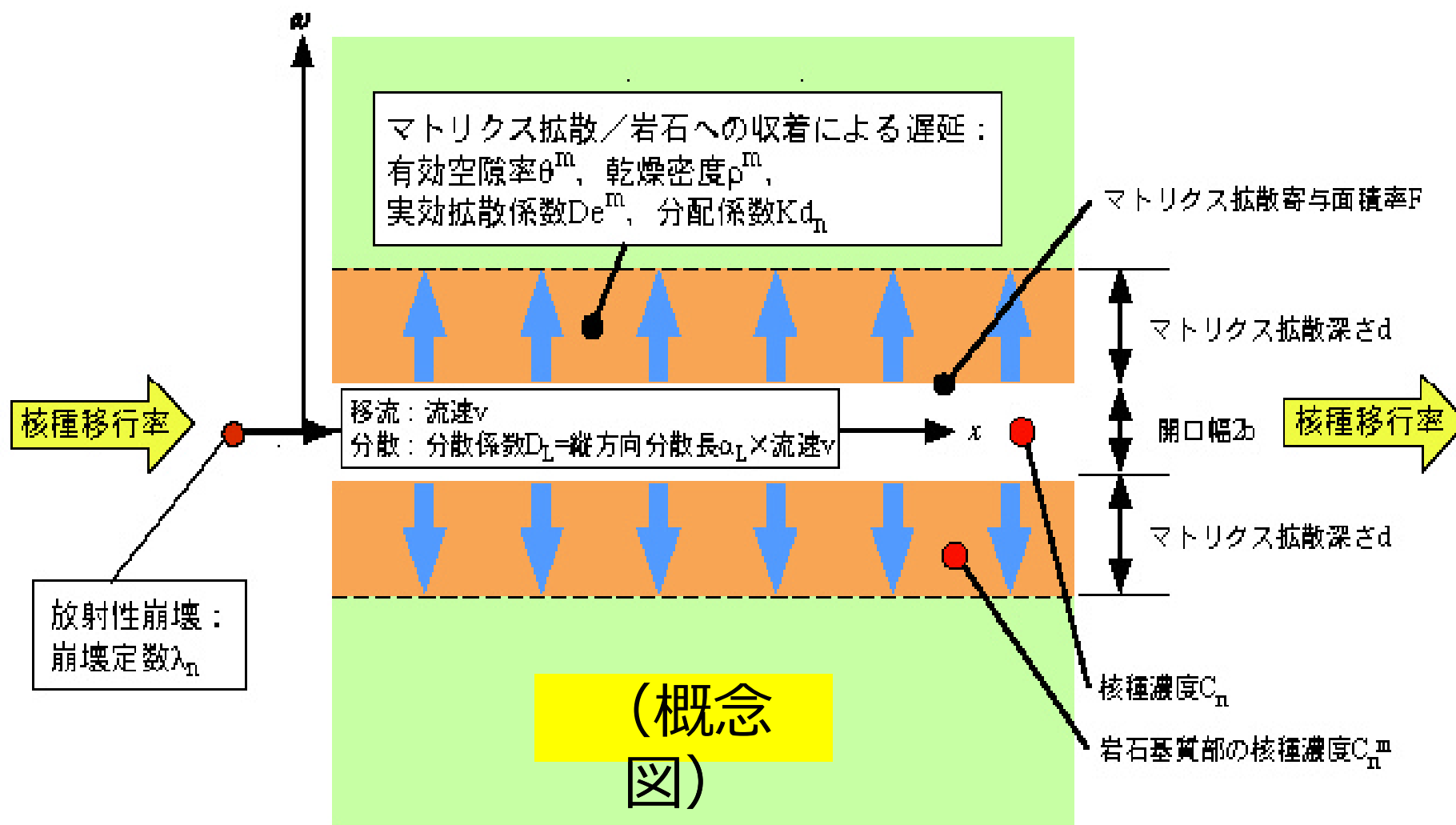
シナリオの区分



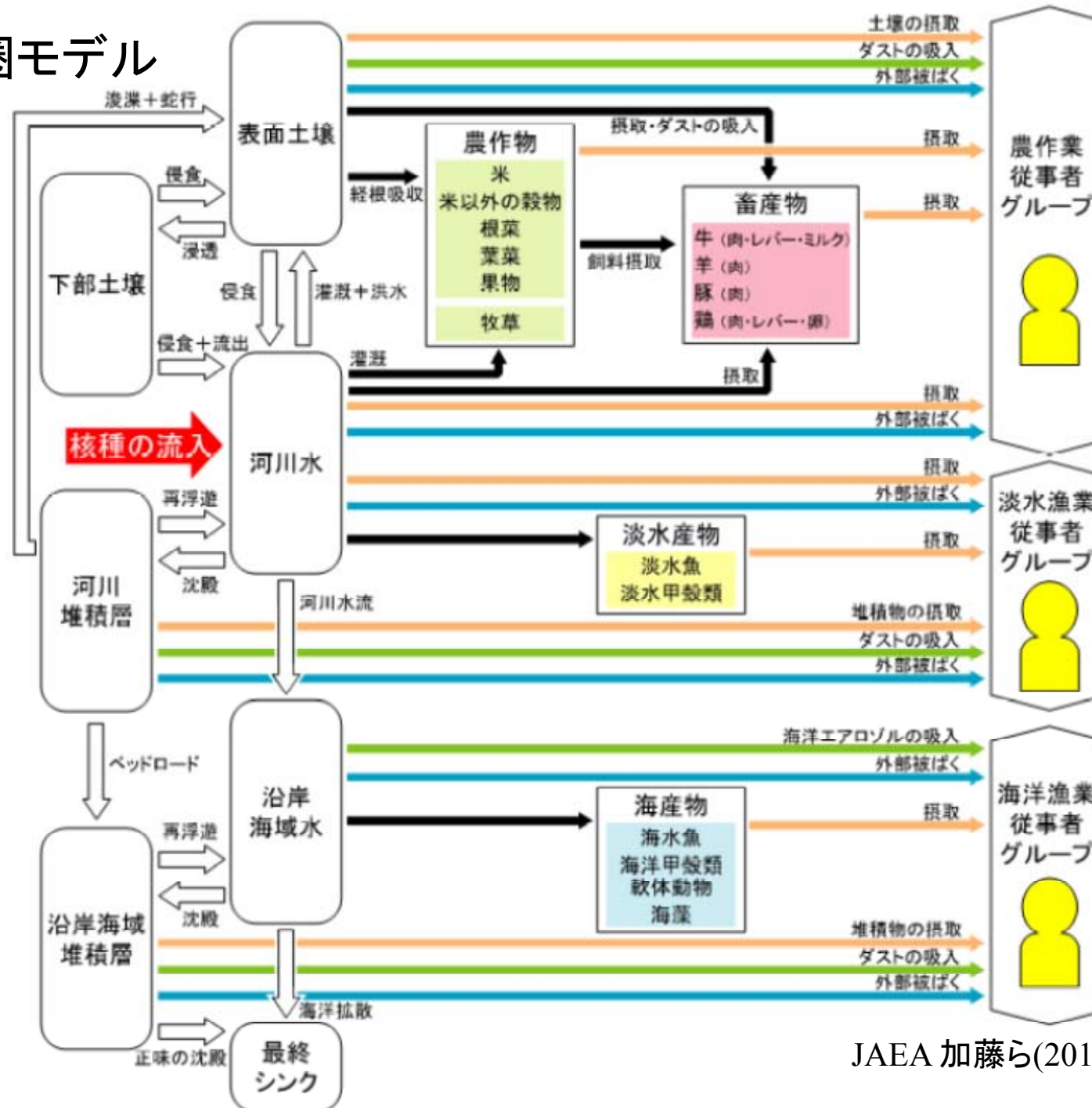
基本シナリオ (第2次取りまとめ総論レポート第V章より)



天然バリアにおける核種移行モデル



生物圏モデル

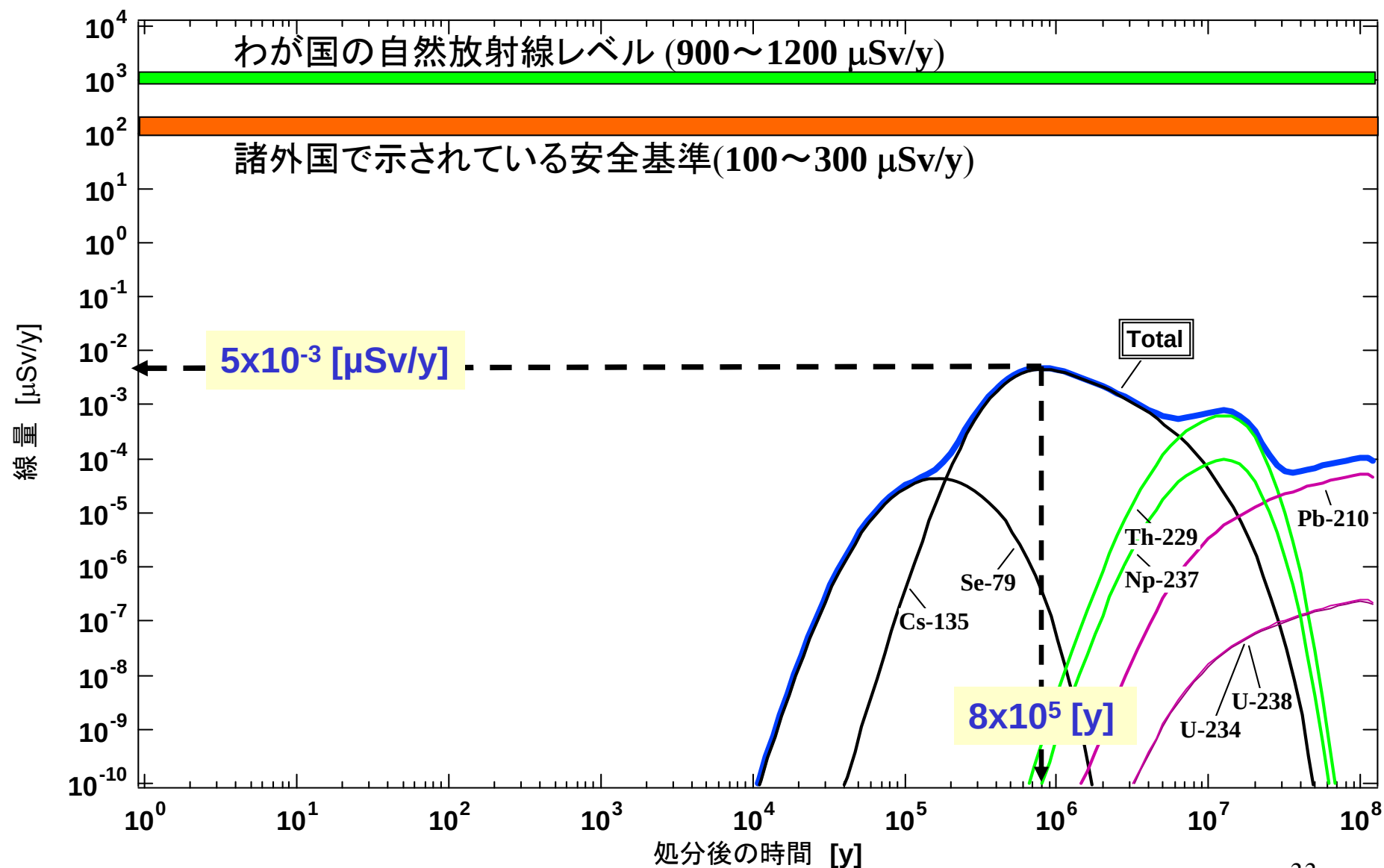


HLW

第2次取りまとめ総論レポート第V章

レファレンスケースの解析結果

再掲



33

第2次取りまとめ総論レポート第V章より

5. 各国のHLWの処分

高レベル放射性廃棄物 (ガラス固化体)の処分

フランス

- ステンレス製の容器にガラス固化体として封入
- さらに鋼鉄製容器(オーバーパック)厚さ5 cmに封入
- 地下500 m(粘土層)に埋設
- 可逆性のある地層処分

処分場所

ビュール地下研究所の近傍に候補サイトを特定(2010年3月)

・現在のところ日本も同様であるが、オーバーパックの厚さを19 cmにしている。また、岩質は堆積岩(500 m), 結晶岩(1000 m)を想定している。法律では300 m以深と設定されている。

使用済燃料の直接処分

処理処分費用の観点からは、再処理をしない分、安価となる。

スウェーデン、フィンランド

- 直接処分: 使用済燃料を容器
(キャニスタ)に封入

- 容器(キャニスタ):

スウェーデンの処分容器(例)
(容器サイズ: 直径1.05 m, 高さ 4.835 m)

外側 銅製(耐腐食),

内側 鋳鉄製(耐荷重)

- 地下500 m(Sweden) 結晶質岩に埋設
- 地下400 m(Finland) 結晶質岩に埋設
- 処分場所

スウェーデン: エストハンマル地区、2009年6月決定

フィンランド: オルキルオト地区、2001年1月決定)

使用済燃料の直接処分と ガラス固化体の処分(1)

米国

- 使用済燃料、ガラス固化体を外側(耐腐食) Alloy 22 (ニッケル合金),内側(耐荷重) ステンレス鋼の容器に入れる
- 岩種(想定): 凝灰岩(火山灰が堆積したもの)
- 深度: 200 m～500 m
- サイト 未定 (ユッカマウンテンの計画はストップ)

使用済燃料の直接処分と ガラス固化体の処分(2)

スイス

- 使用済燃料を鋼鉄製容器に収納・封入して地層処分
- 返還ガラス固化体はステンレス製の容器にガラス固化体として封入
(2006年6月以前の再処理の契約(1,100 tの使用済燃料)によりフランスと英国からガラス固化体(115 m³)が返還される。同年7月から10年間再処理契約を凍結。)
- さらに鋼鉄製容器(オーバーパック)に封入
- 地下400～900 m(堆積岩:オパリナス粘土)に埋設
- スイス北部を検討中

(オパリナス粘土:アンモナイトの殻がオパールのように光彩を放つ)

使用済燃料の直接処分と ガラス固化体の処分(3)

ドイツ

- 使用済燃料を燃料棒のみ取り出して複合構造のPolluxキャスクに収納して直接処分
- 国外での再処理によるガラス固化体やハル・エンドピースも地層処分
- 地下840～1200 m(岩塩ドーム)に埋設(定置後は岩塩で埋め戻される。ドイツ北部のゴアレーベンで試験。サイトは選定方法を再検討中)

使用済燃料の直接処分と ガラス固化体の処分(4)

英国

- 使用済燃料、ガラス固化体を外側を銅製、内側を鋳鉄製の容器(キャニスターに入れる)
- 岩種: 未定
- 深度: 200 m～1000 m

その他

- ・スペイン, ベルギーが直接処分とガラス固化体の併置処分
- ・カナダが使用済燃料の直接処分
- ・中国は、使用済燃料とガラス固化体を保有など

諸外国の動向（フィンランドの例）

- フィンランド オルキルオト地区(2001,5)を最終処分場とすることが国の議会において決定

□ 1983-1993 自治体は受入反対

□ 1994 国は「海外に廃棄物を持ち出さない」ことを決定
(同時にオルキルオト地区を最終処分場にしない：ゼロスタート)

技術的な検討を経て

□ 2001,1月 国会とは別に自治体の意思を問う形の投票
(賛成20, 反対7)

この意識の変化は？

技術的な検討プロセス

- ・当該廃棄物の処分事業について段階的なサイト選定
- ・詳細サイト特性調査地として選ばれた4つのサイトについての環境影響評価
- ・議会がオルキオト地区に決定

サイトの絞り込みにおいて地下の破碎帯や活断層等を回避し得る地区が必要条件の一つとし、また、4つのサイトでは、最終処分を行った際に長期にわたる安全評価(TILA-99)が行われ、技術的、科学的な視点からの詳細検討がなされた

社会の変化(意識の変化)

- ① これまでの当該地区における原子力発電所の信頼性や職場としての役割拡大
オルキオト地区: 原子力発電所サイト, 1978年オルキオト1号, 1982年2号機完成, 1992年からTVO(テオリスーデン・ヴォイマ社)が中低レベル放射性廃棄物の処分場を操業
- ② フィンランドのロシアへの信用が原子力発電の運開後20年の間に次第に変化し, EUへの帰属と責任といった意識の変化
- ③ オルキオトビジョンという「処分場が出来ることによって, 当地区がpositiveになるか否かのシミュレーション(定量評価)」を市民の意見を十分に取り入れながら段階的に作成し, 地域の理解を得ていたことにある。

諸外国の動向（スウェーデン例）

- 最終処分地：エストハンマルに決定(6月3日, 2009)
- 1993-2000 スウェーデンは8自治体を調査、このうち2自治体は住民投票により中止、SKB（スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社）が3自治体を選択。その内、自治体の中のエストハンマルとオスカーシャムが01年に調査の受け入れを決めた。
- 最終選定理由：当該の埋設予定地の地下は、割れ目のほとんどない岩石で占められ、地下水もほとんど出ない。

- エストハンマル:1980年フォルスマルク原子力発電所運開, 1988年中低レベル処分場操業開始
- オスカーシャム:1974年原子力発電所運開, 1985年中間貯蔵施設操業, 1995年エスポ岩盤研究所, 1998年キャニスタ研究所

WINNER 25%、LOSER75% (原子力委員会メールマガジン7/10, 09)

SKBは地域支援金として両自治体にあわせて20億SK(約360億円) (施設周辺へのアクセス道路の整備、地元の教育機関での原子力関連学科の新設、職業訓練施設の設置、訪問者用の宿泊・会議設備の新築などに)。

・最終処分場の現場がエストハンマル自治体に建設されるだけで、それに至る前の諸施設は既にオスカーシャム自治体にあるか、今後建設

・両自治体には今後このほかの新たな施設建設費関連としてエストハンマルに350億SK(4550億円)、オスカーシャムに320億SK(4160億円)を投資。

米国は？ YMPが...

米国における放射性廃棄物の分類と処分

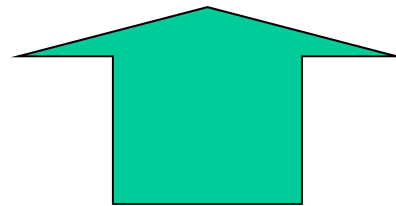
区分		種類	処分方法	処分場	実施主体	規制者:規制基準
高レベル放射性廃棄物		使用済燃料 ガラス固化体(軍事用等)	地層処分	ユッカマウンテン (リセット)	エネルギー省/ 民間 放射性廃棄物管理局 (DOE／OCRWM)	原子力規制委員会(NRC): 10 CFR Part 63 環境保護庁(EPA):40 CFR Part 197[EPAは規則策定のみ]
TRU廃棄物		核兵器開発による 廃棄物	地層処分	廃棄物隔離パイ ロットプラント(WIPP)	エネルギー省(DOE)	環境保護庁(EPA):40 CFR Part 191、40 CFR Part 194
		上記以外	未定	未定	未定	—
低レベル放射 性廃棄物	クラスC超え	原子力発電所の運 転・廃止措置、医療 、産業、研究所等か らの廃棄物	地層処分等	未定	エネルギー省(DOE)	原子力規制委員会(NRC): 10 CFR Part 61、10 CFR Part 60、10 CFR Part 63
	クラスC		浅地中処分	民間処分場(バーンウェル、 クライブ、リッ チランド)	エナジーソリュー ションズ社、US エコロジー社	NRCとの協定州: 10 CFR Part 61
	クラスB					
	クラスA					
副生成物		鉱石からウランまた はトリウムの抽出・ 濃縮により発生する 鉱滓または廃棄物	浅地中処分	民間処分場(クライブ)	エナジーソリュー ションズ社	

田辺 (2007)バックエンド部会週末基礎講座資料に一部加筆

廃棄物に関する基本的な考え方

- ・ 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

(H17年10月:原子力政策大綱より)



後送りにしない仕組みが必要

(国の基本的な考え方をベースに、処分についての民間規格の整備が
原子力学会において進められている)

6. LLW処分システムの基本安全機能と段階管理

重要なキーワード：“基本安全機能”および“段階管理”

基本安全機能：低レベル放射性廃棄物(LLW)の廃棄物埋設地において、安全を確保するために埋設設備などに要求される機能。

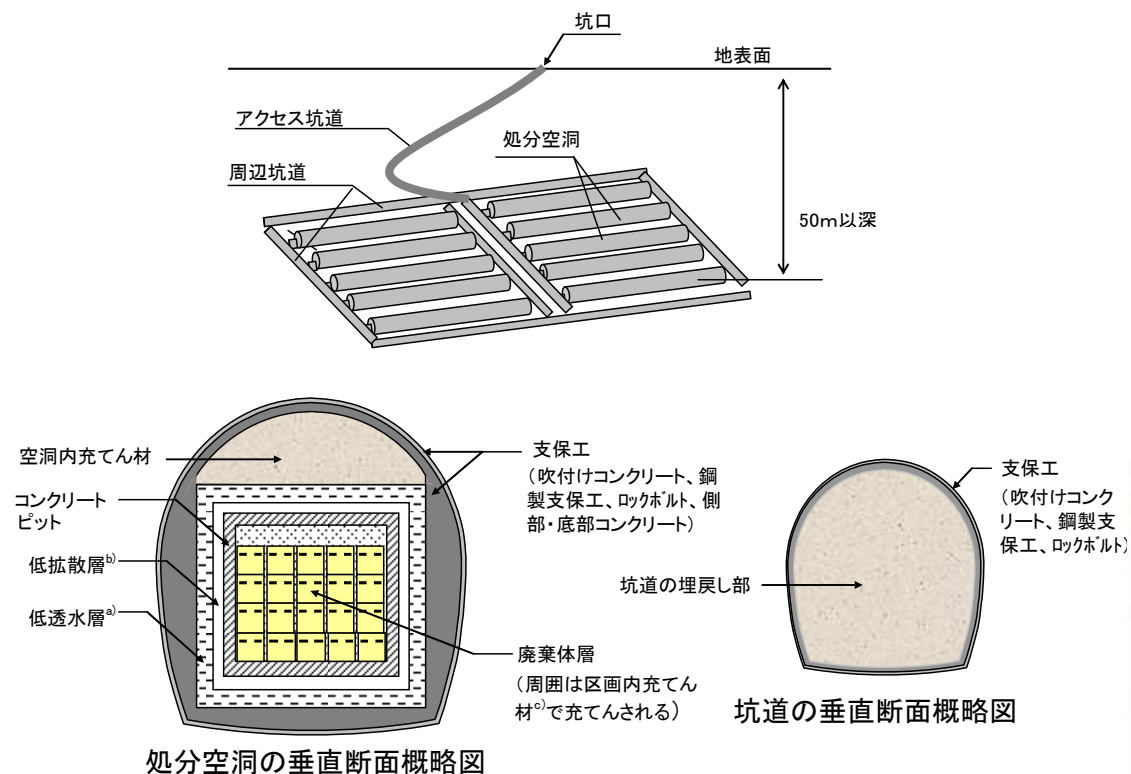
遮へい, 閉じ込め, 移行抑制, 離隔, 飛散防止

ピット処分においては, “遮へい”, “閉じ込め”及び“移行抑制”の3つの機能が要求される。余裕深度処分においては, これに“離隔”が加わる。トレンチ処分においては, “遮へい”, “飛散防止”及び“移行抑制”が要求される。

段階管理：一般公衆の被ばく線量を合理的に達成出来る限り低く抑えるため, 埋設した廃棄物の放射能が時間の経過に伴って低減し放射能のレベルが安全上支障のないレベル以下になるまでの間, 廃棄物の種類, 放射能レベルなどに応じて廃棄物埋設地の管理を行うこと。

LLWの埋設地に係る埋戻し方法及び施設の管理方法

余裕深度処分の場合

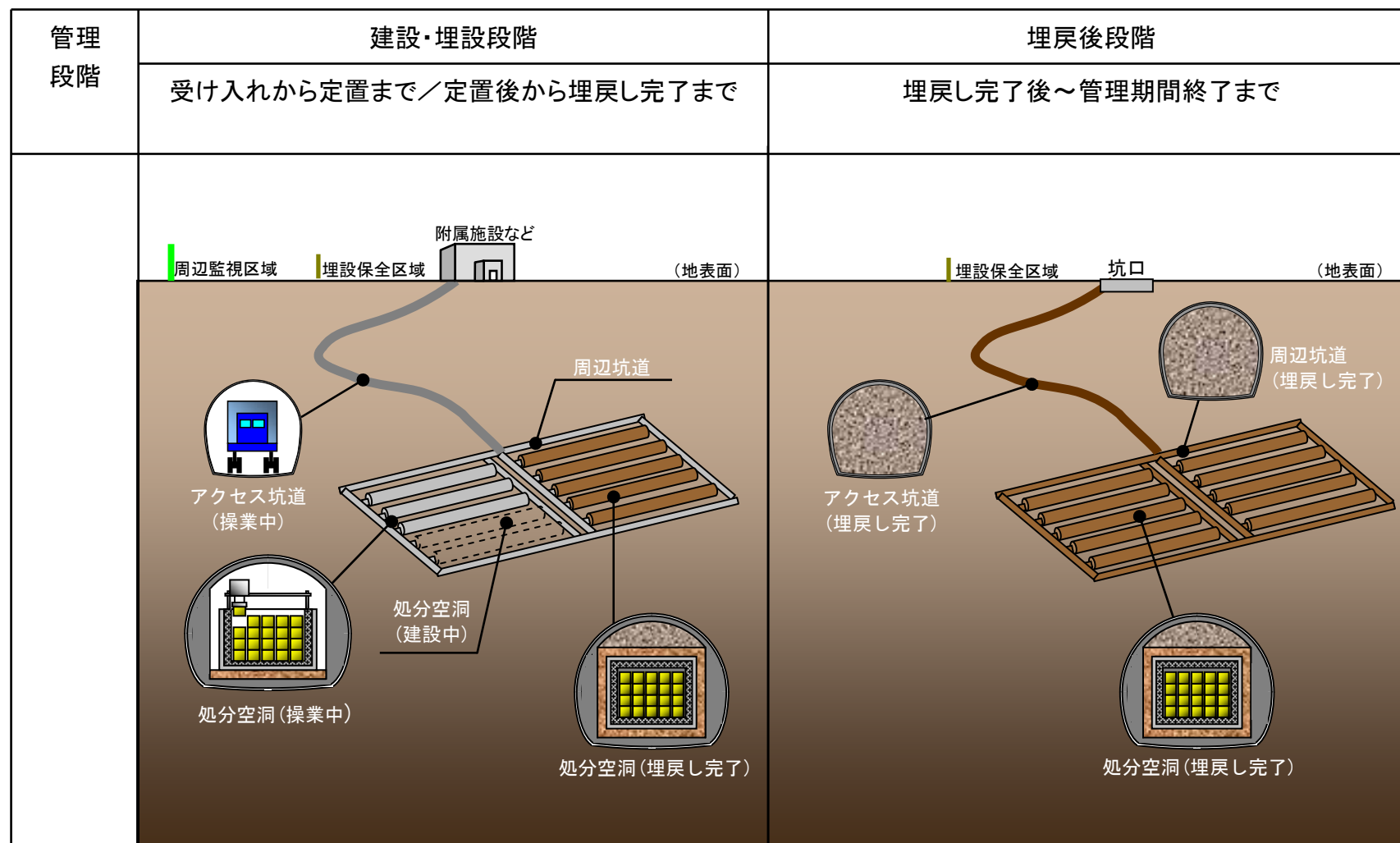


日本原子力学会：同規格より(2010)



試験空洞(幅18 m, 高さ16 m)
JNFL Webより

LLWの埋設地に係る埋戻し方法及び施設の管理方法



標準の参照処分場(余裕深度処分施設の建設・埋設段階及び埋戻後段階)

日本原子力学会：同規格より(2010)

● 標準の規定内容について

表1-1 余裕深度処分各段階及び各工程における基本安全機能と管理措置の実施時期の事例

段階管理		建設・埋設段階			埋戻後段階	管理期間終了以降の長期間
工程	廃棄体定置	定置終了から埋戻し完了まで			埋戻し完了後から管理期間終了まで	
		最初の処分空洞の ・人工バリア構築 ・処分空洞充てん	その後の工程 (アクセス坑道開坑中)	周辺・アクセス坑道の埋戻し（施工の開始から完了まで）		
管理措置				坑道の埋戻し部の施工		
			廃棄物埋設地に係る保全			
		監視				
		安全レビュー				
記録		記録				
基本安全機能	遮へい					
	閉じ込め ^{b)}					
	移行抑制 ^{c)}					機能期待期間
	離隔 ^{d)}	当該機能は要求されないが、継続して確保されている期間				
注記 各管理措置及び記録の□印を付した部分が、この標準の範囲となる。この標準の範囲外のものも枠で示す。						
注 a) 安全機能の一つである“冷却”が求められるような廃棄体の埋設は、この標準の適用範囲外である。						
b) 坑道埋戻し前の期間は、隣接する処分空洞の掘削、建設・定置、空洞内充てんが並行する状況において開空洞側に周囲の地下水が流入するため放射線管理上の観点から一括して“閉じ込め”としている。						
c) “移行抑制”は、管理期間終了後において、長期に亘って期待できる機能である。						
d) “離隔”は、立地条件などにより廃棄物埋設地に元来備わっている機能である。この機能が発揮され、人間接近などに対する安全性の確保に貢献するのは、管理期間終了後であるが、管理期間内において、他の基本安全機能からの要求により実施されるアクセス坑道の埋戻し及び保安のための措置（巡視・点検、安全レビューなど）によって、管理期間内及び終了後も継続して確保されるものである。						

ピット処分の各段階及び各工程における基本安全機能と管理措置の実施時期の事例

(各段階の呼び名は変更される予定)

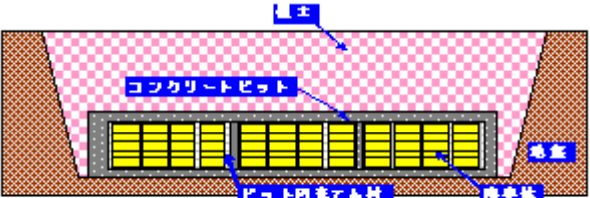


図-2 ピット処分施設の概要図

段階管理		第 1 段階			第 2 段階	第 3 段階	管理期間終了以降の期間		
工程	廃棄体定置	定置終了から覆土の完了まで		覆土の完了後から管理期間終了まで					
		・ 充てん材充てん ・ 覆い施工	覆土の施工 (施工開始から完了まで)						
管理措置			覆土の施工						
			廃棄物埋設地に係る保全						
			監視						
記録		記録							
基本安全機能	遮へい								
	閉じ込め								
	a)						機能期 期間		
注記		管理措置	記録の	の	の	の	の	の	で
注 a)		管理期間終了後にいて期でる機能でる							

日本原子力学会：同規格より(2010)

(300年～400年間の管理を予定)

ピット処分 JNFL：1992年に埋設を開始し、2014年9月現在、26.7万本が埋設済み
 当面は100万本を予定しているが、最終的には300万本への拡張を計画

トレンチ処分の各段階及び各工程における基本安全機能と管理措置の実施時期の事例

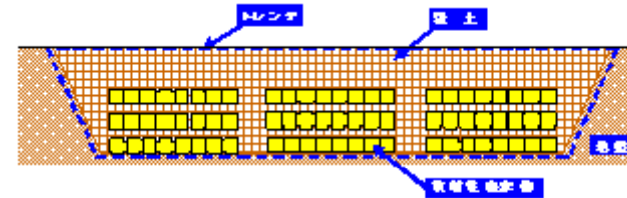


図-3 トレンチ処分施設の概要図

段階管理		埋設段階		保全段階
工程		廃棄物定置	覆土の施工 (施工の開始から完了まで)	覆土の完了後 管理期間終了まで
管理措置			覆土の施工	
			廃棄物埋設地に係る保全	
			監視	
記録		記録		
基本安全機能	遮へい			
注記 管理措置 記録の□ の の る の の の の で				
注 飛散防止は、廃棄物定置 の 期間 の で である に めら る ので る 廃棄物埋設地 の覆土の施工 開始 物 の の 以降 めら る機能で い				

(50年間の管理を予定)

日本原子力学会：同規格より(2010)

一方、諸外国に例を見ると：フランスの例（低レベル放射性廃棄物の処分）

Andra Surface Repositories



Centre Manche in operation

Final shape being prepared.



- Operated between 1969 and 1994 (527 000 m³).



300年間のモニタリングを予定

ANDRA 2009 CEG WORKSHOP FEB 24-26 資料より

オーブ処分場

ラ・マンシュの後継処分場。処分容量 約100万 m^3
1992年操業開始。2006年末までに約20万 m^3 の処分が実施、
2050年頃まで操業を予定



処分施設は、地下水面より上の位置で整地された地表面(砂層)にコンクリート製のセル(25 mL $\times$ 21mW $\times$ 8.5mH)を設置し、その内部に廃棄体を定置して空隙にコンクリートや砂利を充填後、覆土を行う。



(1992年 JNFLのピット処分の操業開始時期)



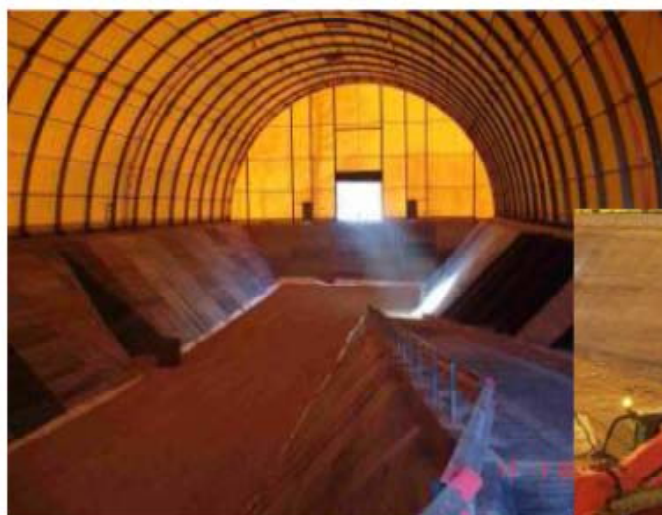
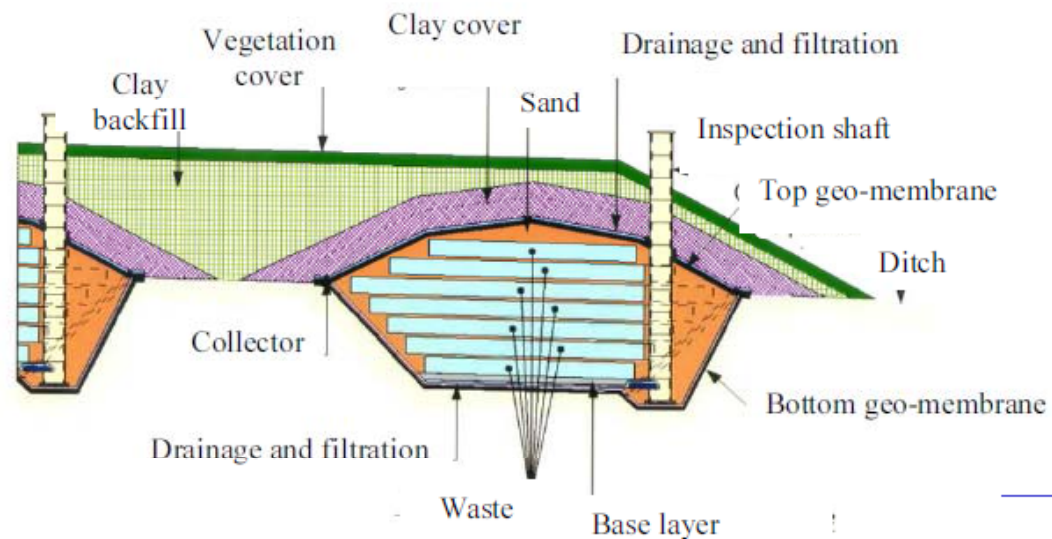
このようなセルを440設置する予定

モルビリエ処分場(トレンチ処分: 極低レベル)



処分容量65万 m^3 で、2003年の操業開始以降、約30年間利用を予定。
2006年末までに約6.5万 m^3 の処分を実施。(10⁶~10⁸ Bq/ton)

処分セルは、地下水に接触しない深さ約8mまで掘削。その側面と底面(約80m×約25m)を水密性シート(高密度ポリエチレン)と不織布(ジオメンブラン)によって保護。

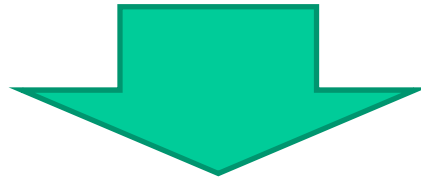


廃棄物の定置作業は、移動式のシェルター内で風雨から保護して実施。セル内の埋め戻しには砂が用いられ、埋め戻し後に上面を不織布と水密性シートで覆い、粘土質の覆土が施工される

7. 変動帯である日本列島と地層処分の実現

日本列島は変動帯にあり、火山活動も盛んで、活断層もある。

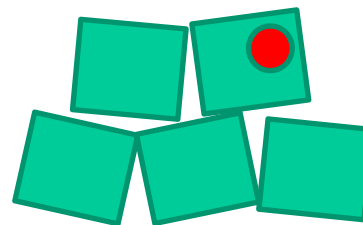
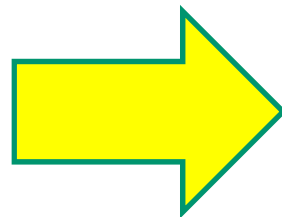
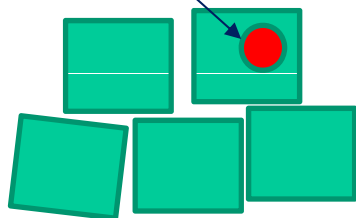
地層処分ができるような場があるのか？



地層処分に必要な面積 3 km × 2 km 程度

- ・火山からの回避
- ・変動場における安定な場所の存在

処分スペース



圧縮場

日本列島

(付加体からなる)

変動帯にある

地殻変動や火山活動の活発な地域

現在の日本列島は、主に付加体と呼ばれる海洋でできた堆積物からなっている。

かつて日本付近はアジア大陸の端で、古生代には大陸から運ばれてきた砂や泥が堆積していた(現在の北陸北部、岐阜県飛騨地方、山陰北部など)。そこへ、はるか沖合で海洋プレートの上に堆積した珊瑚や放散虫などからなる岩石(石灰岩やチャート)が移動してきて、それが海溝で潜り込むときに、陸からの堆積物と混合しながらアジア大陸のプレートに押しつけられて加わった(付加)。この付加が断続的に現在まで続いたため、日本列島は日本海側が古く太平洋側に行くほど新しい岩盤でできている。

活断層の定義

第四紀層(260₍₁₈₀₎万年以降)や地形面などを
累積的に変位させている断層

(第四紀層の地層を変位させている断層を単純に指すのではなく、将来活動をする可能性を秘めている断層)

・国際地質科学連合は2009
年に第四紀の定義を180万
年前から260万年前に変更

多田文男(東大地震研) (1927):「きわめて近き時代まで地殻変動を繰り返した断層であり、今後
なお活動すべき可能性大なる断層」

この解釈

- ・地殻内での歪みによって最近まで活動を繰り返していた断層は、地殻の応力状態が変わらない限り、今後も活動する。
- ・現在の日本列島の広域地殻応力場が定まったのは第四紀の初頭(260万年前)以降と言われる。

$$\sigma = F/A \text{ [Pa]}$$

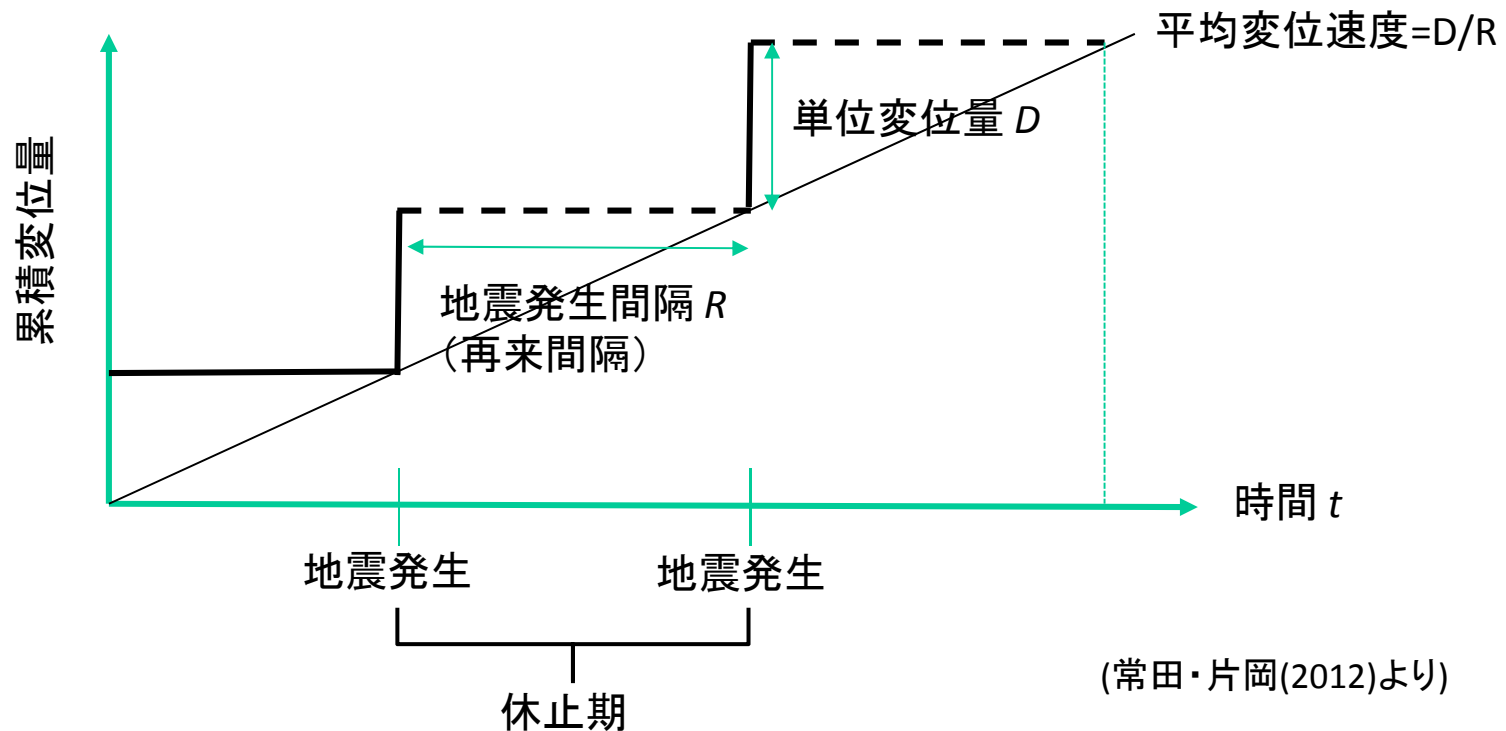
「活断層とは何か」の著者ら (池田安隆, 島崎邦彦, 山崎晴雄) :

- ・野外の露頭で、第四紀層が断層でずれているのを見つけて活断層であると考える人がいるが、これは誤りである。
- ・活断層とは第四紀層を変位させている断層のことを単純に指すのではない。
- ・あくまでも将来活動する可能性を秘める断層であり、第四紀層や地形面などが累積的に変位しているかどうかで判断される。
- ・地下深部に過去において断層運動を繰り返した断層があっても、それが**第四紀に地層等を累積変位させている証拠がなければ活断層とは呼ばない**。
- ・たとえば、弾性波等を利用した地下探査(物理探査と呼ばれる)で地下の基盤深度に断層と思われる食い違い認められたとしても、その地表に近い部分に第四紀層や地形面の累積的な食い違いがなければ活断層ではない。
- ・但し、沖積層など新しい地層に埋もれて、断層地形が分からなくなっている場合は伏在断層と呼ばれ、深部断層と区分される。

累積的な変位とは

渡辺・鈴木(1999)は「第四紀後期に活動していないと判断できる十分な証拠がある場合のみ、活断層でないと判断する。第四紀断層周辺に数万年より若い地形面しか分布していない場合、その断層が活断層であることを否定しない。」としている。

累積的な変位



活動度(活断層の運動の活発さの程度)を表わす指標として

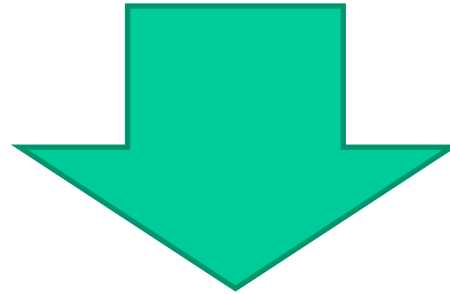
平均変位速度 $S = D/R$ (上下成分と水平成分に分けて求められる)

第四紀に関する情報が増えて

累積的な断層が動き ⇒ 第四紀以降

(断続的 or 間欠的)

・さらに、第四紀前半には繰り返し活動していたのに、以降は活動を停止し、近い将来活動する可能性のない断層がある。これを活断層とするのはおかしいという考え方が出てきた。



・これを除外するために第四紀後期以降(おおよそ12万年前)に繰り返し活動する断層を活断層とする識別法が出てきた。(地質調査所の活構造図はこの考え方を採用)

さらに、12万年前 ⇒ 40万年前

NZ地質調査所: 活断層とは、過去5万年間に活動したか、または過去50万年間に繰り返し活動した証拠のある断層と定義

日本では、活動度をAA級、A級、B級、C級に分類
その際に平均変位速度 S を用いる (常田・片岡, 2012)

AA級: 10 mm/y以上 (1,000年あたり10 m以上)

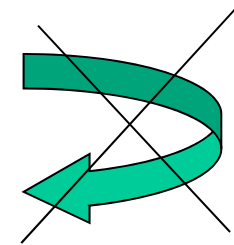
AA級: M8クラスのプレート境界地震のみ

A級: 1 mm/y~10 mm/y未満 (1,000年あたり1 m~10 m未満)

B級: 0.1 mm/y~1 mm/y未満 (1,000年あたり10 cm~1 m未満)

C級: 0.01 mm/y~0.1 mm/y未満 (1,000年あたり1 cm~10 cm未満)

陸域ではA級以下



松田(1975)*は

最大変位量 D (m)と地震のマグニチュード M との間に

$$\log D = 0.6M - 4 \quad (M8.0のとき 6.3 \text{ m}, M7.0のとき 1.6 \text{ m})$$

A級活断層の平均変位速度 S を 5 mm/yとすると,

M8.0の地震 ($D = 6.3 \text{ m}$)を起こす場合、地震の再来間隔は 1,260年

M7.0の地震 ($D = 1.6 \text{ m}$)を起こす場合、地震の再来間隔は 320年

また、断層の長さ L (km)も経験式として提案

$$\log L = 0.6M - 2.9 \quad (M8.0のとき 80 \text{ km}, M7.0のとき 20 \text{ km})$$

松田の式などこれらの式は、平均
変位自体はエネルギーに直接結
びつかないことを言っていること
になる(逆に、それらを結びつけ
ることが課題になっているという
見方もある)

MEMO: 地震が発するエネルギーの大きさを E (単位: ジュール)、マグニチュードを M とすると $\log_{10} E = 4.8 + 1.5 M$ (つまり、上の式と組み合わせると、 D や L は E に比例するという分かり易い形になる)

*松田時彦: 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震II, 28, 269-283 (1975).

活断層への工学的な対応例

- ・日本の主な内陸活断層の平均活動間隔
1000年から数万年のオーダー
- ・プレート内の活断層の平均変位速度は、プレート境界断層に比較して1桁小さく、約5 mm～8 mm/y
- ・C級活断層では一回の地震で1cm～数mのずれ

日本列島内のインフラは活断層を横切る場合が出てくるが、それらをどのように考慮してきたのか

利府一長町構造線と東西線の例

長町ー利府線断層帯の評価

21ー40km

平成14年2月13日
地震調査研究推進本部
地震調査委員会

本断層帯の活動間隔を直接に示すデータはない。しかし、断層帯の長さ(21ー40 km)から推定される1回の変位量(上下成分2m程度以上)と平均変位速度(上下成分0.5ー0.7m／千年)から計算した値に基づくと、活動間隔は3千年程度以上であった可能性がある。

これまでの整理した式を利用してみると

$$\log L = 0.6M - 2.9$$

L : 断層の長さ(km)

$$\log D = 0.6M - 4$$

D : 最大変位量(m)

$$R = D/S$$

R : 地震発生間隔, S : 平均変位速度 mm/y

$$\log L + 2.9 = 0.6M$$

$$\log D = 0.6M - 4$$

$$\log D = \log L + 2.9 - 4$$

$$\log D = \log L - 1.1$$

$$\log D = \log (L \times 10^{-1.1})$$

$$D = L \times 10^{-1.1} = 0.08 L \text{ (m)}$$

$$R \doteq 80 \text{ (L/S)}$$

断層の長さから平均変位速度から地震発生間隔が推算

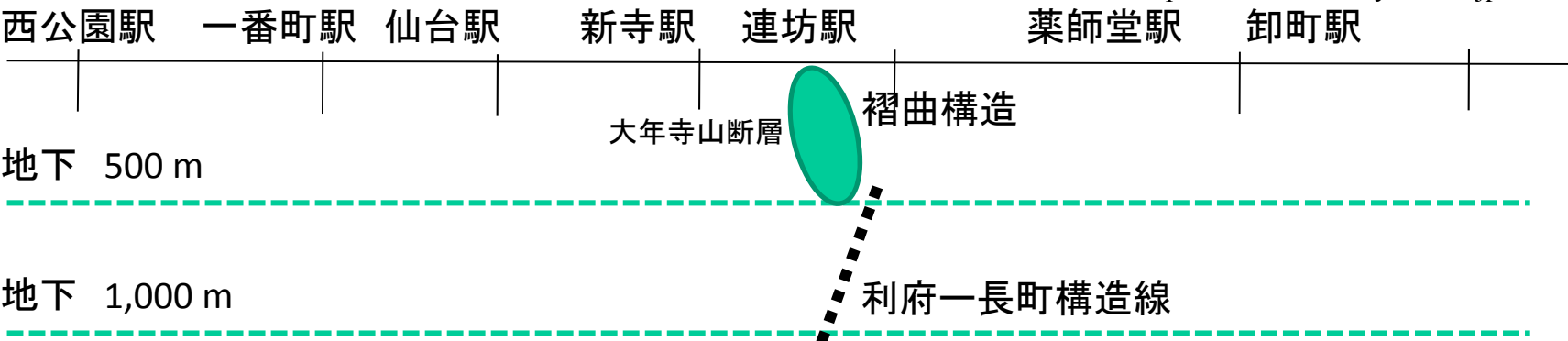
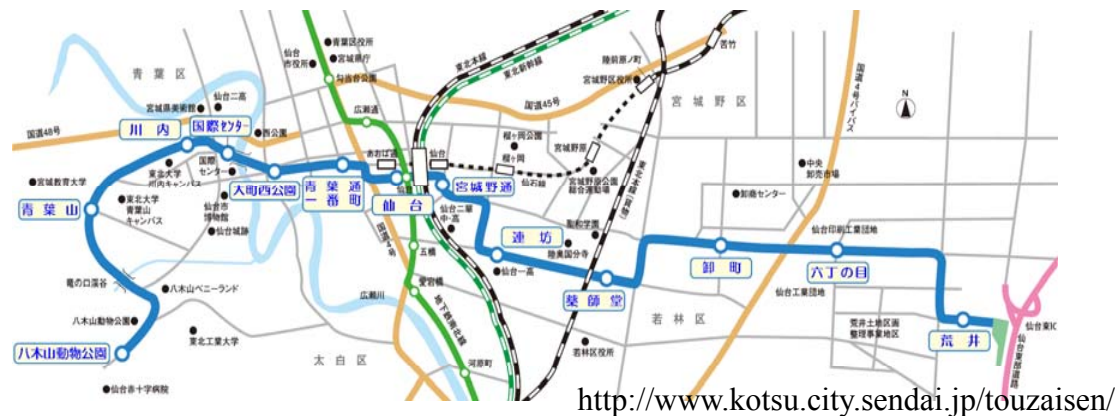
$L=20 \sim 40 \text{ km}$, $S=0.5 \sim 0.7 \text{ mm/y}$

のとき, 2300年～6400年の発生間隔

(上述のほぼ3千年程度を試算)

地下鉄東西線

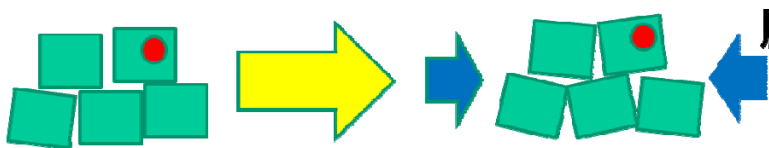
営業距離 約13.9km



別の調査により、大年寺断層の平均変位速度 $S=0.1 \text{ mm/y}$
 発生間隔3000年の利府-長町構造線の活動により、大年寺断層の変位が生じ、その動きが地表付近まで伝わると考えと変位量は30 cm



新寺駅から連坊駅の間の新寺トンネル区間では、トンネル径を5.4 mから5.9 mに0.5 m拡幅している 常田・片岡 (2012)



圧縮場

地層処分に必要な面積 $3 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 程度

8. おわりに

- ・核燃料サイクルとバックエンドとの密接な関係
 - ・加えて、福島第一の放射性廃棄物の管理・処分
(放射能、廃棄物の特徴を考慮した処分システムの選択)
 - ・モニタリング技術の向上 / 性能評価の高度化
 - ・サイト選定プロセスの加速
 - ・自然環境に応じたバックエンド技術の更なる構築
-
- ・受入サイトの将来ビジョンの議論
 - ・品質保証, 技術伝承, 人材育成