

核燃料サイクルと放射性廃棄物処理

平成17年12月2日

総合科目「エネルギー問題・地球環境問題を考える」

田中 知

(工学部システム創成学科E&Eコース)

(昭和43年理I入学、大阪府岸和田市出身、三国丘高校卒業)

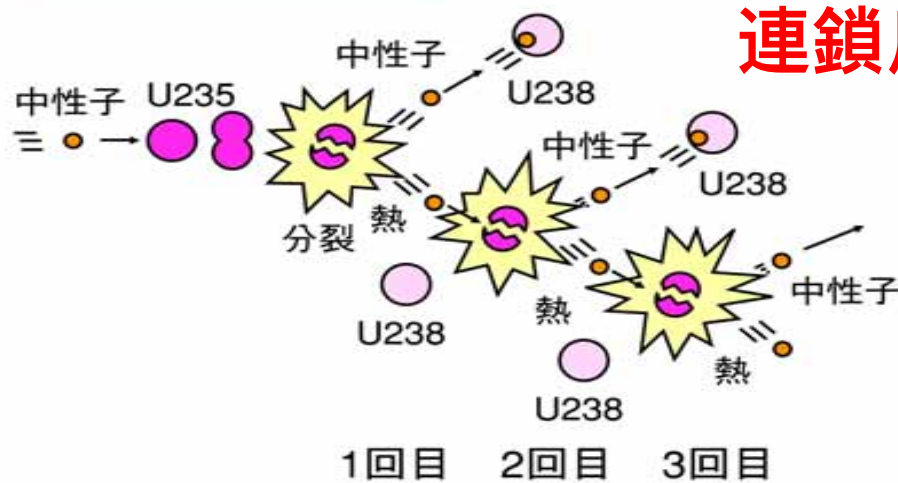
s-tanaka@q.t.u-tokyo.ac.jp

内容

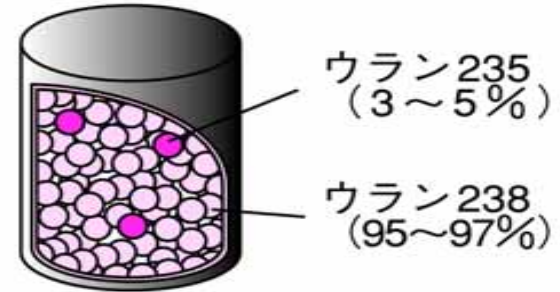
- 原子力エネルギーの利用
- リサイクルと廃棄物
- 核燃料サイクル
- 放射性廃棄物とは、その種類と特徴
- 放射性廃棄物の処理とその特徴を理解した安全な閉じ込め(処分)
- 廃棄物の有効利用と無害化

原子力発電の原理

原子力発電の場合



連鎖反応



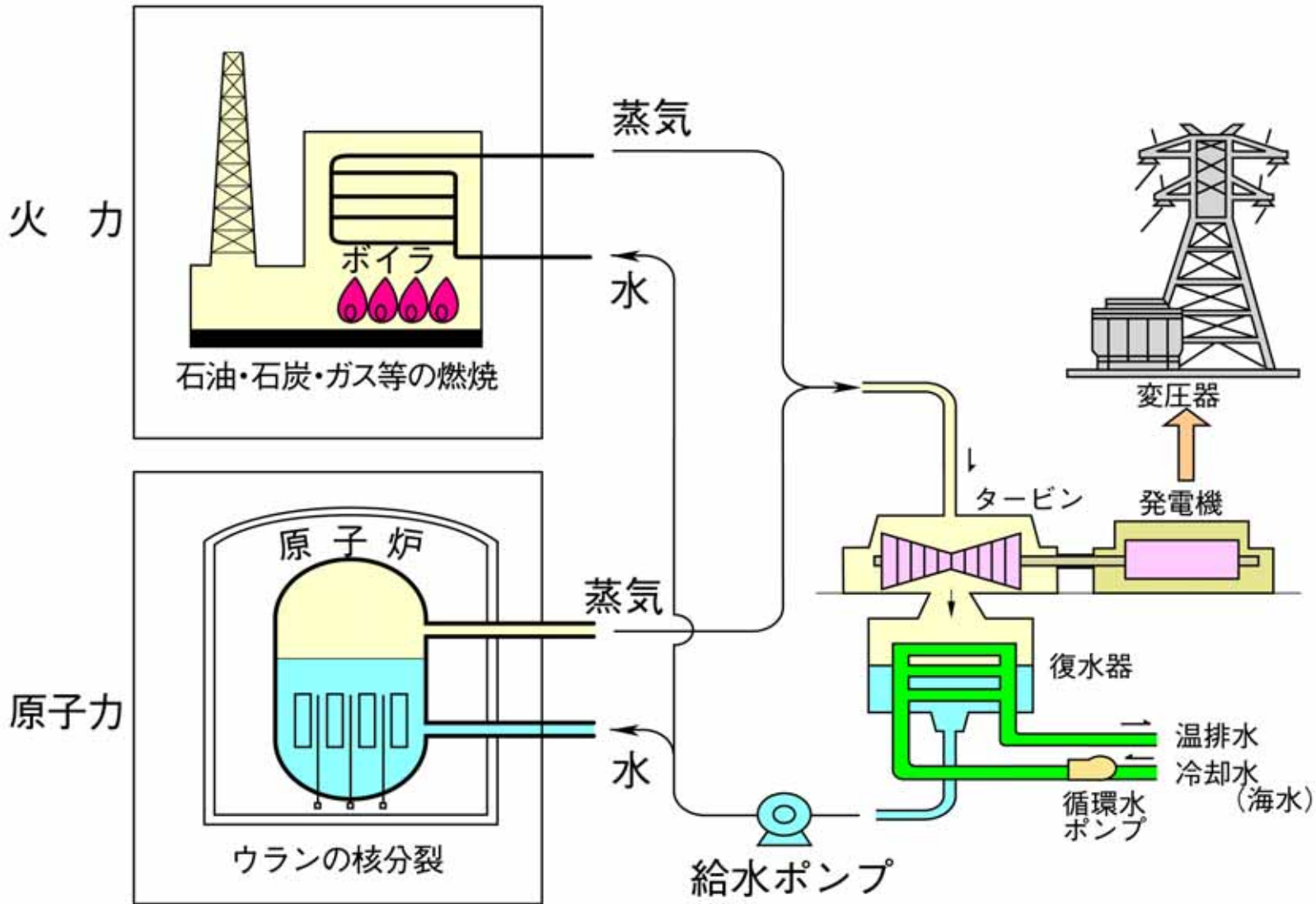
遅発中性子 (0.65%)
平均遅れ時間 12秒

ウラン235 (陽子数92、中性子数143)

熱中性子で核分裂
天然ウラン中0.7%

ウラン238 (陽子数92、中性子数146)

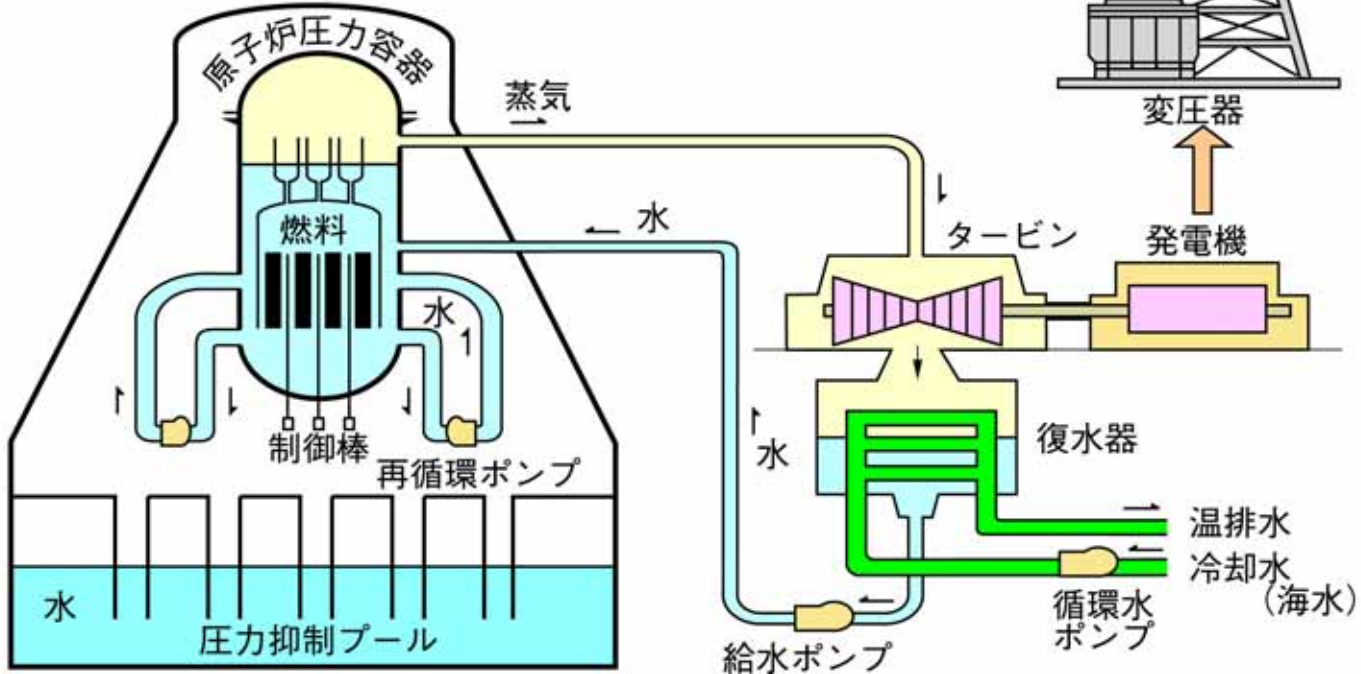
火力発電と原子力発電の違い



沸騰水型炉(BWR)原子力発電のしくみ

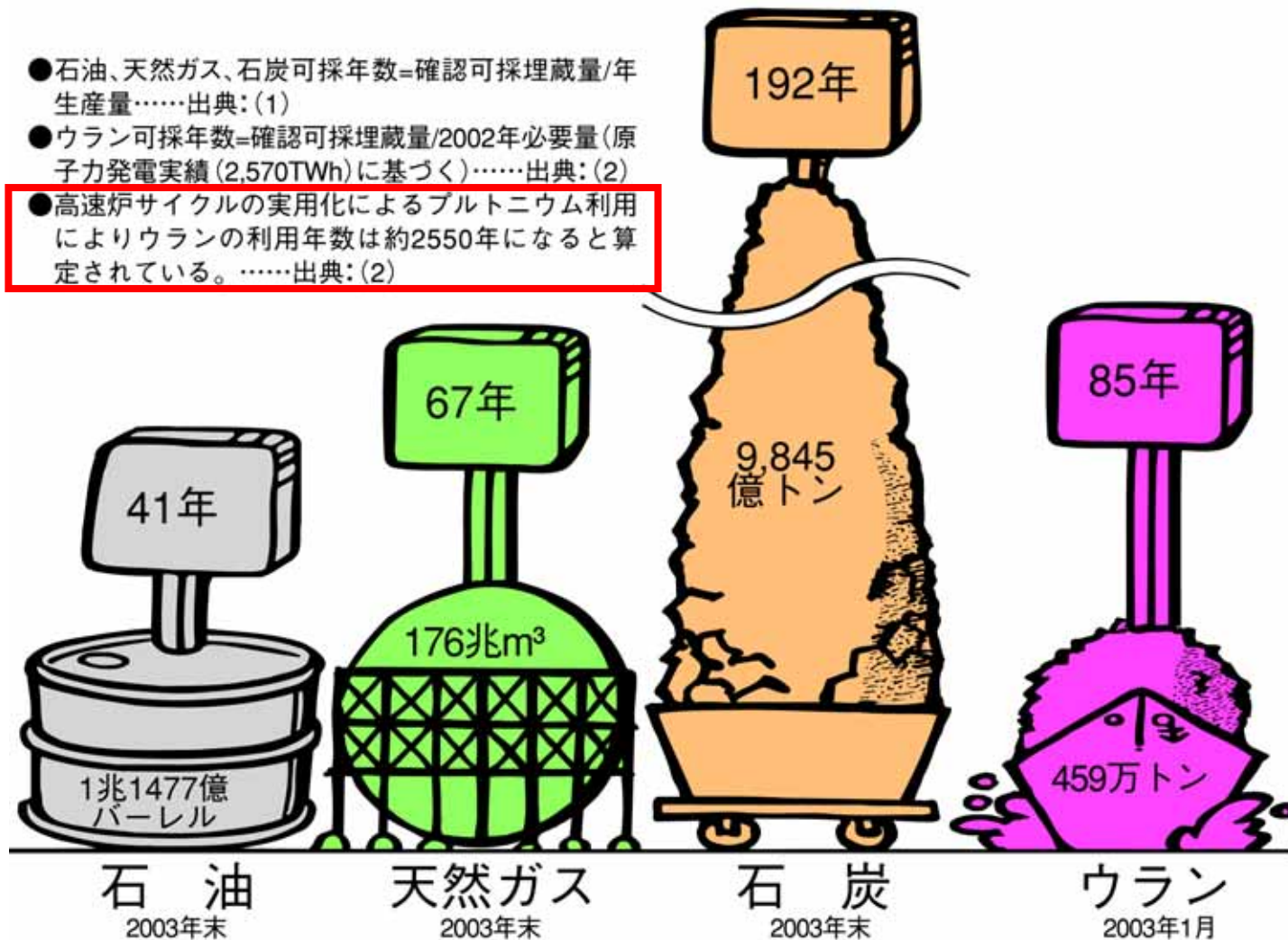


原子炉格納容器

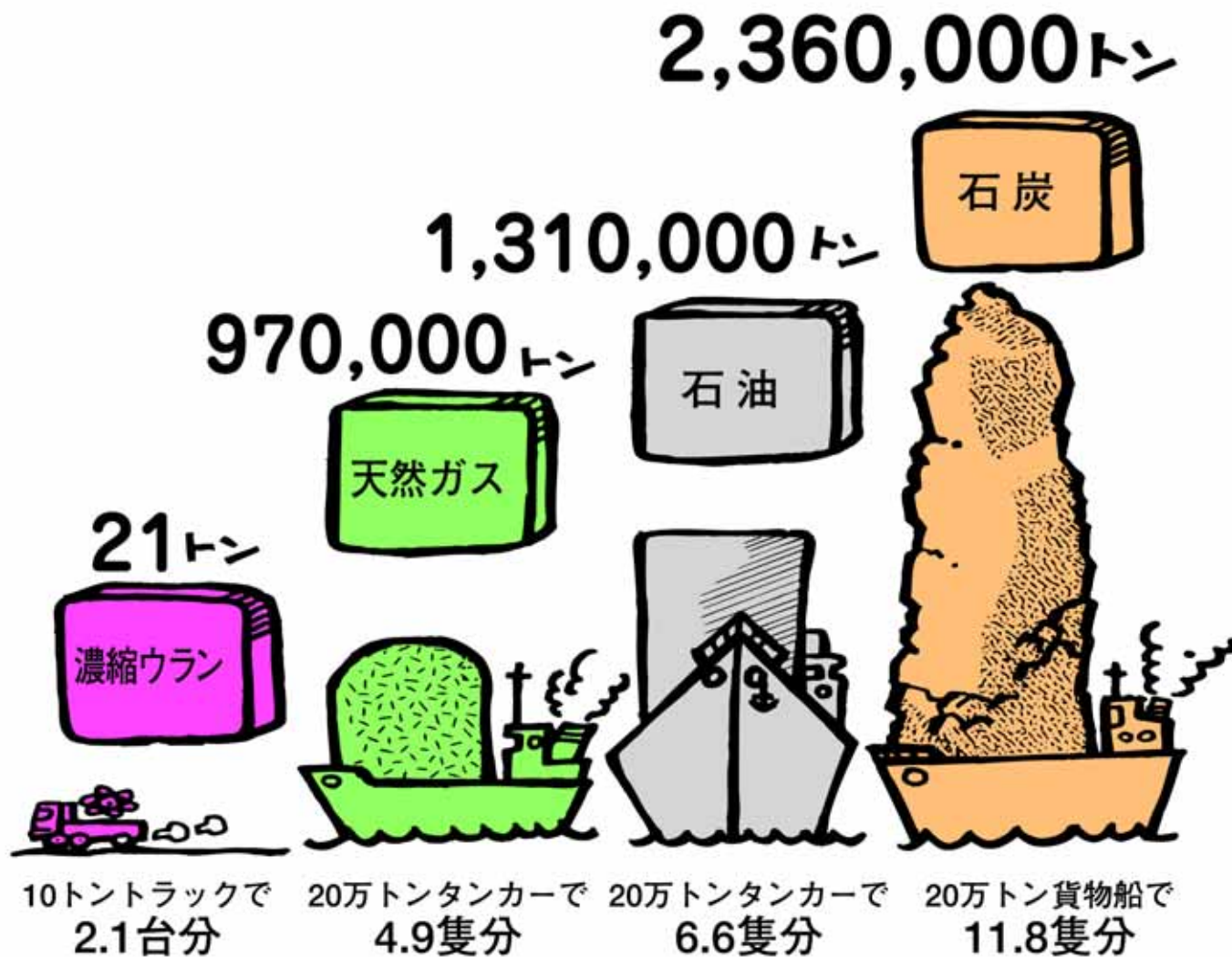


世界のエネルギー資源確認埋蔵量

- 石油、天然ガス、石炭可採年数=確認可採埋蔵量/年生産量……出典:(1)
- ウラン可採年数=確認可採埋蔵量/2002年必要量(原子力発電実績(2,570TWh)に基づく)……出典:(2)
- 高速炉サイクルの実用化によるプルトニウム利用によりウランの利用年数は約2550年になると算定されている。……出典:(2)

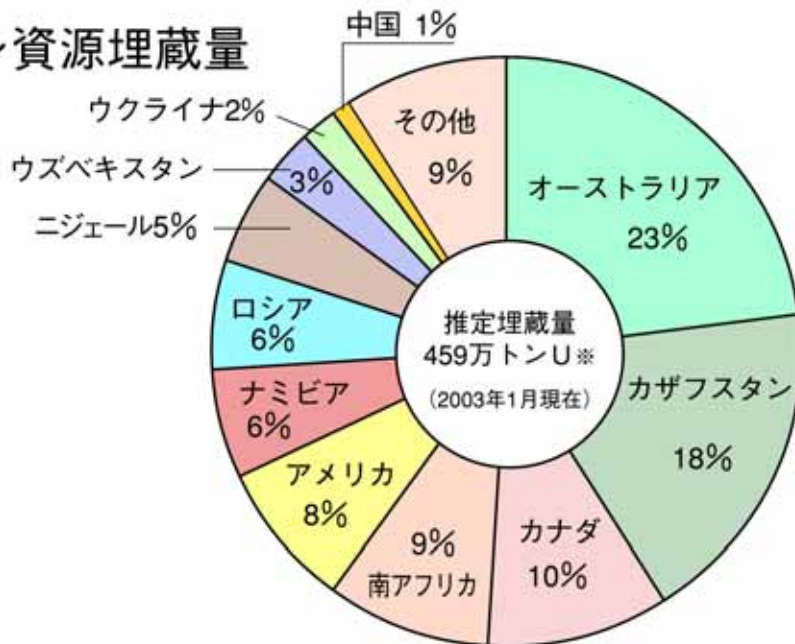


100万kWの発電所を1年間運転するために必要な燃料



ウラン資源埋蔵量と確保状況

ウラン資源埋蔵量



政情不安定な中
近東でなく世界中に

トンU：金属ウランでの重量トン

出典：OECD/NEA - IAEA
「URANIUM(2003)」

日本の確保状況

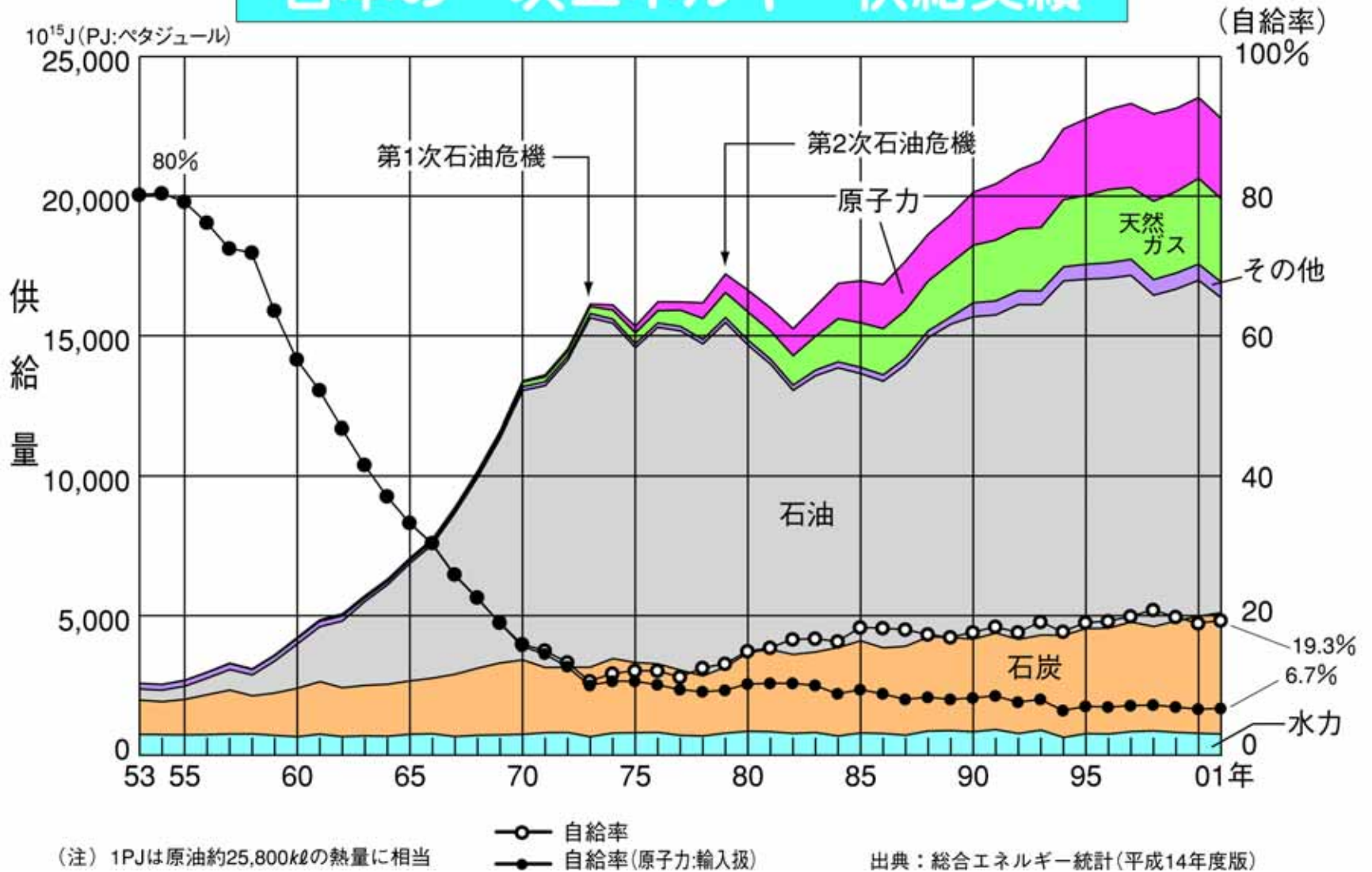
(2003年3月現在)

購入契約形態	相手先国	契約数量 (U ₃ O ₈ ショート・トン)
長期契約、短期契約及び製品購入	カナダ、イギリス、南アフリカ、オーストラリア、フランス、アメリカ等	約 255,600
開発輸入分	ニジェール、カナダ、オーストラリア	約 59,600
	計	約 315,200

(注) 1ショート・トン=約0.907トン

出典：原子力ポケットブック2004年版

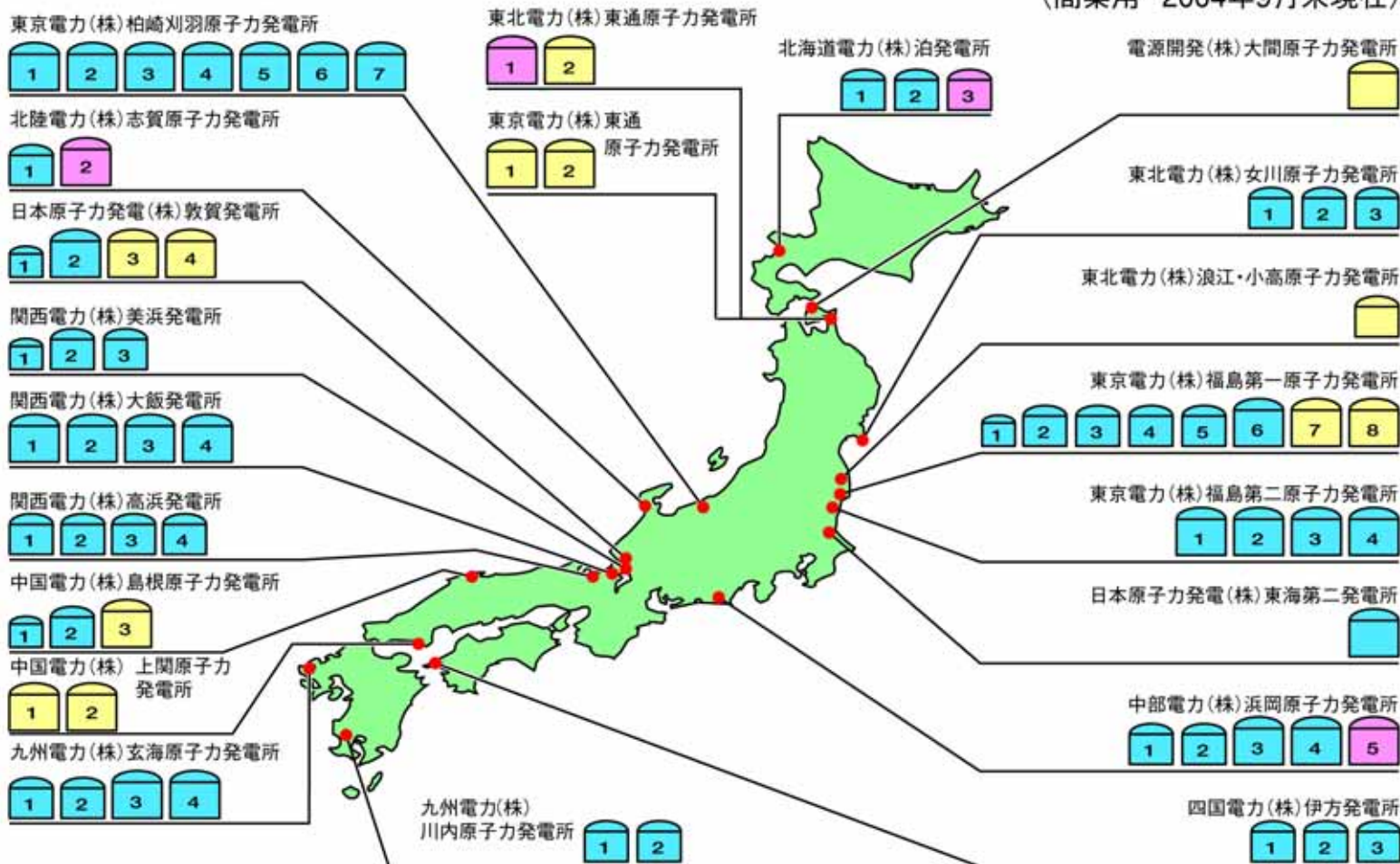
日本の一次エネルギー供給実績



現在、総発電量の約35%が原子力で

日本の原子力発電所の運転・建設状況

(商業用・2004年9月末現在)



出力規模



50万kW未満



100万kW未満



100万kW以上



運転中



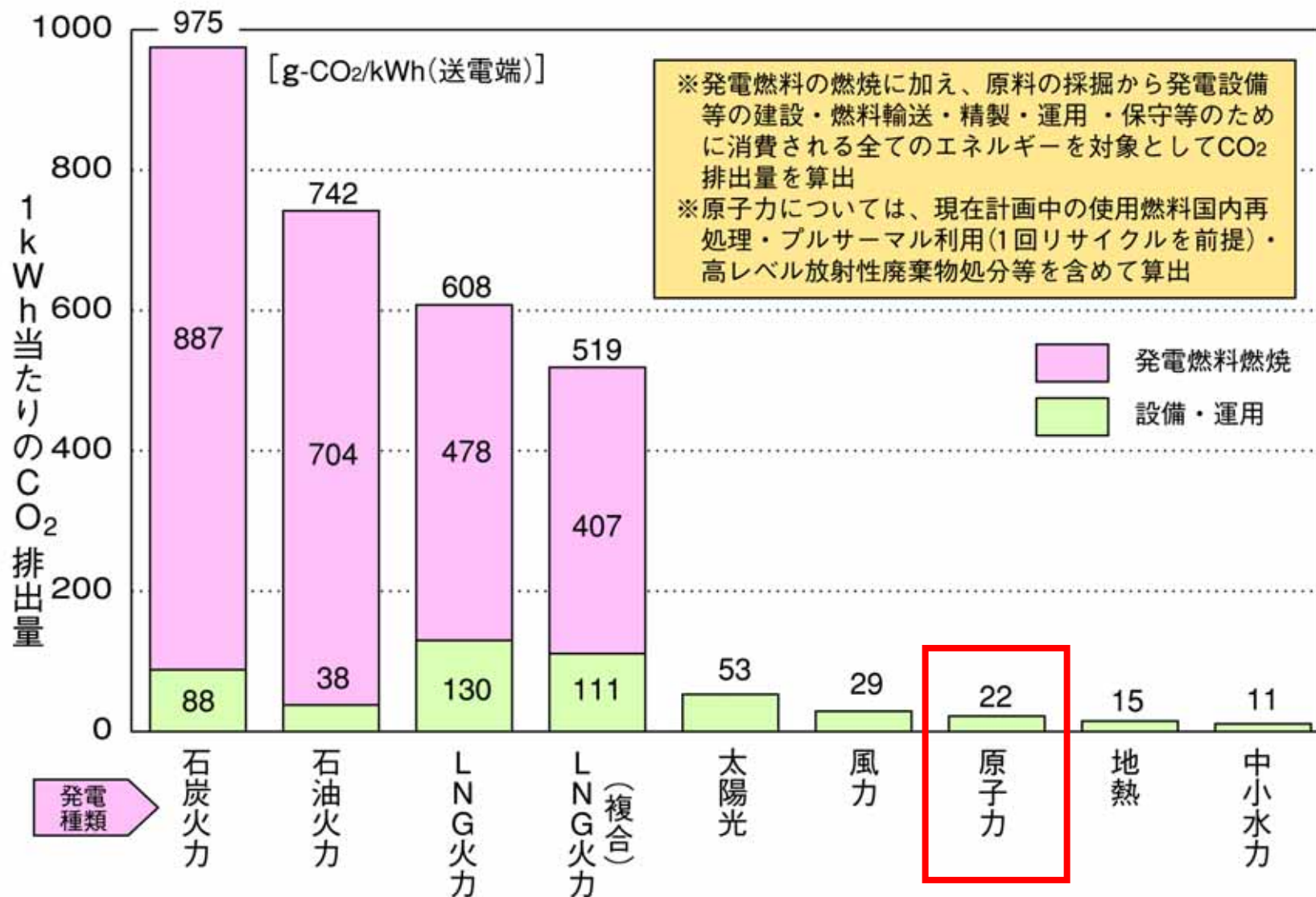
建設中



着工準備中

	基数	合計出力(万kW)
運転中	52	4,574.2
建設中	4	475.0
着工準備中	12	1,631.8
合計	68	6,681.0

各種電源別のCO₂排出量

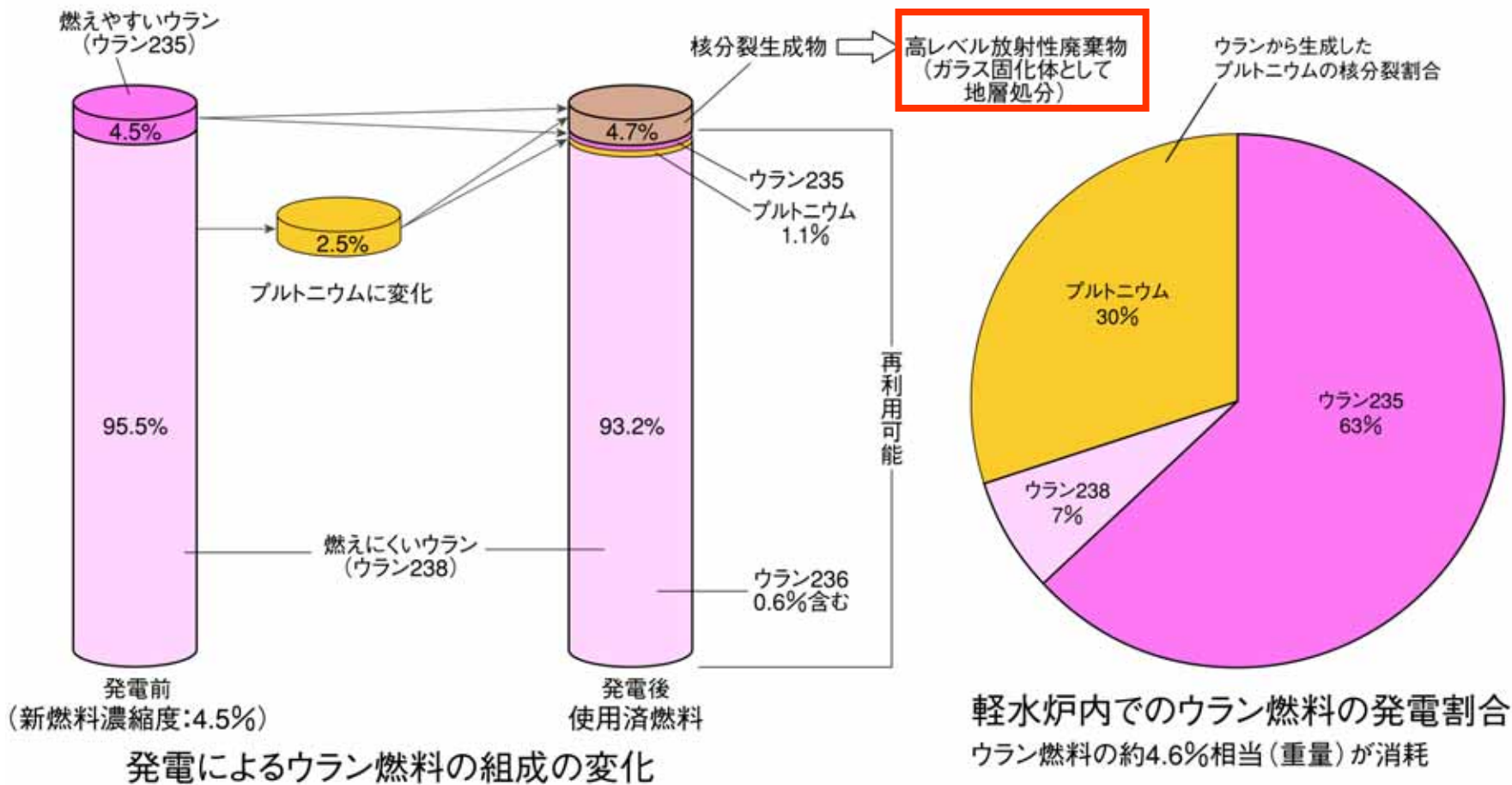


(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。

出典：電力中央研究所報告書 他

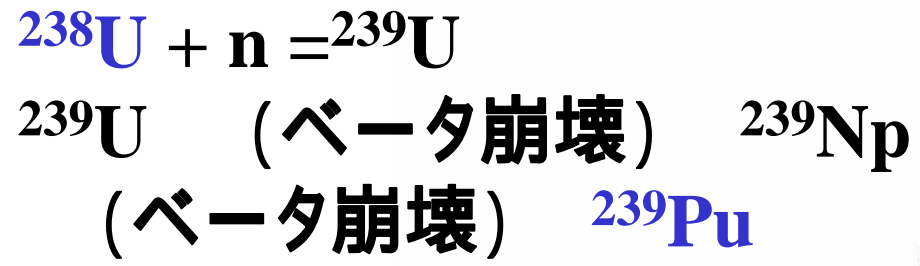
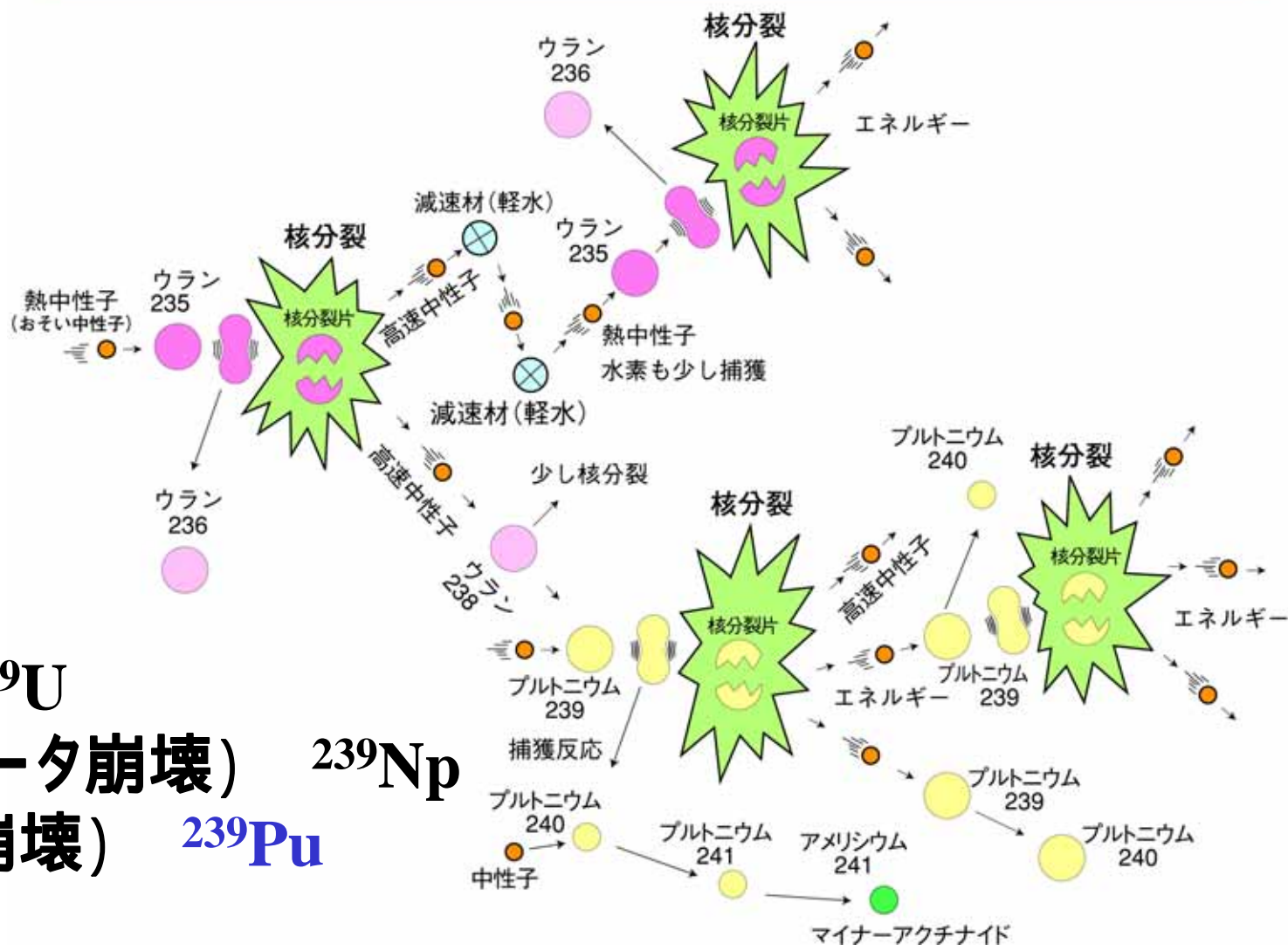
軽水炉内でのウラン燃料の燃焼による変化

〈エネルギー生産量:燃焼度(平均):45,000MWD/tUの場合〉



**使用済み燃料中にはウラン、プルトニウムが存在
重要なエネルギー資源**

ウランの核分裂とプルトニウムの生成・核分裂

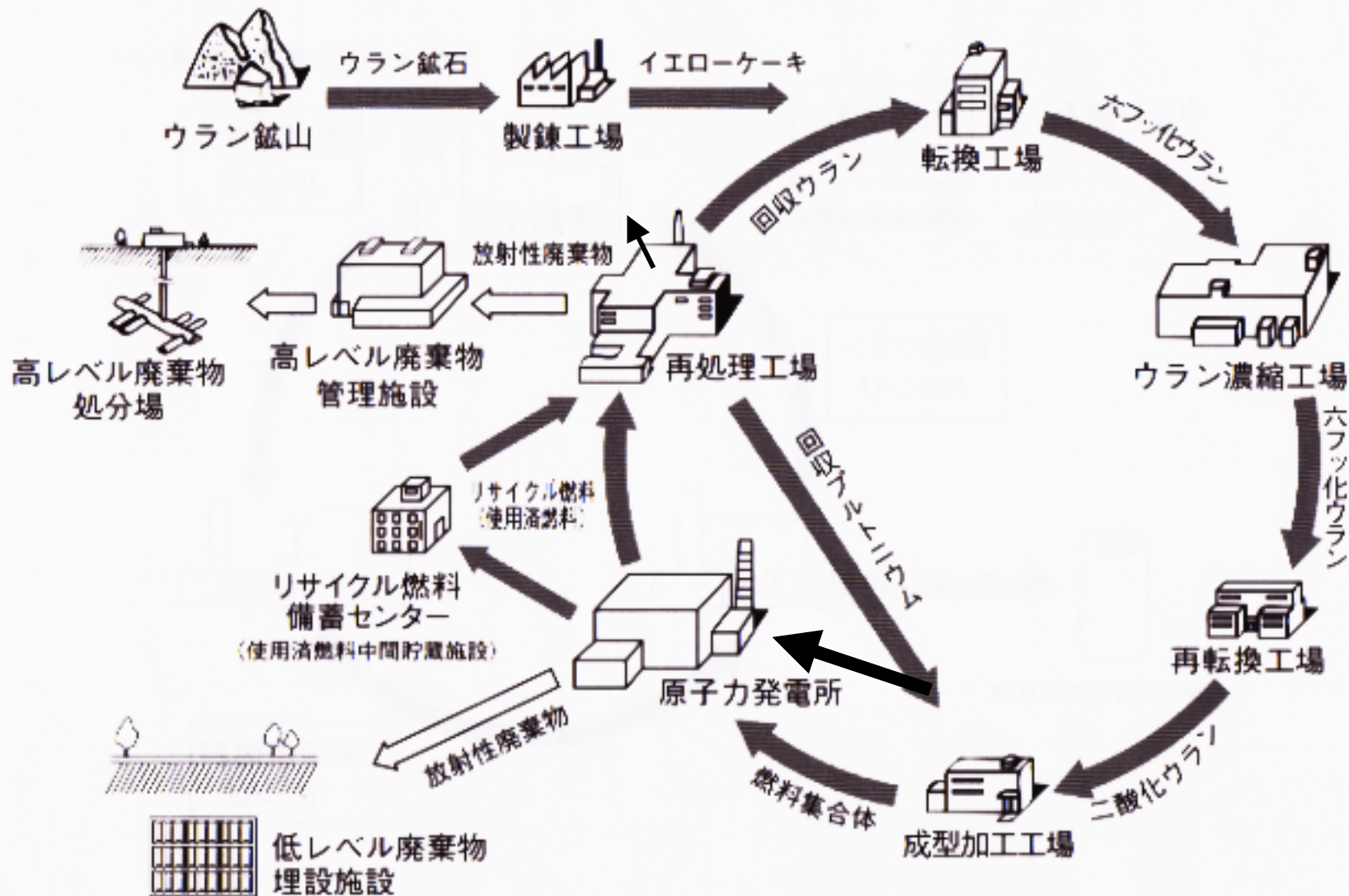


^{239}Pu : 中性子を吸収して核分裂

様々な燃料リサイクル方法

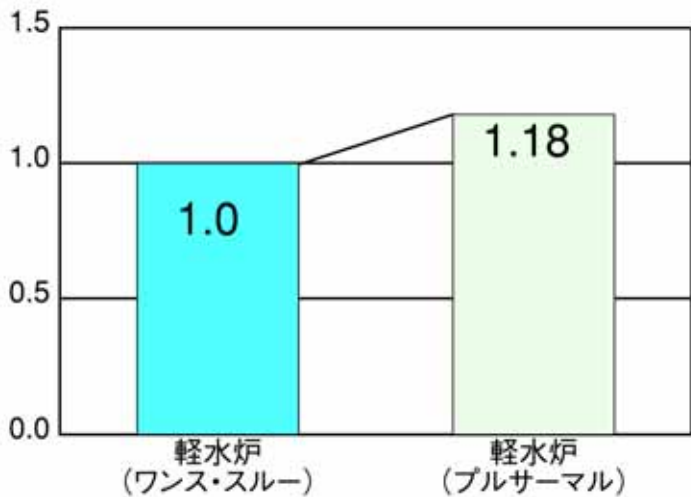
- ・使用済み燃料中のウランを回収し再濃縮して再び原子力発電所(軽水炉)に
- ・使用済み燃料中のプルトニウムを回収し、ウラン燃料と混ぜて、軽水炉で使用(プルサーマル)
- ・高速増殖炉にて積極的にウラン資源の利用

原子燃料サイクル



ウラン資源のリサイクル利用（資源の有効活用）

ウランの利用効率



高速炉サイクルの実用化によるプルトニウム利用によりウラン利用効率を約30倍に高めることが期待される。……出典：(1)

六ヶ所工場 回収プルトニウムの軽水炉利用（「プルサーマル」利用）

国内総発電量（約1.1兆KWh、平成14年度実績）の約3%（3,000億KWh）に相当する発電を行うことができる。

104トン・MOX燃料/年 ※

800トン・ウラン/年



※使用済燃料1トン再処理すると130KgMOX燃料を製造することができる。……出典：(2)

プルサーマルによる回収プルトニウムの有効活用

出典：(1) IAEA・OECD/NEA "URANIUM2003"

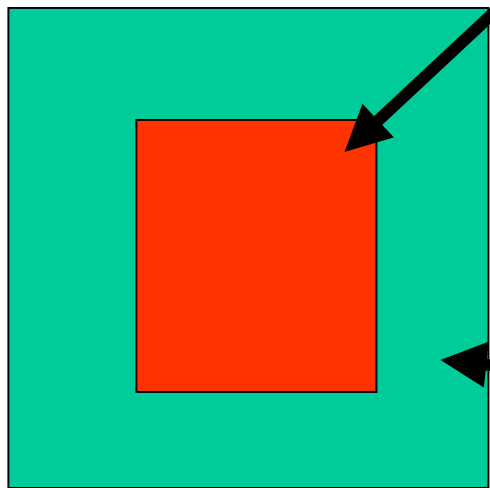
(2) 原子力委員会 新計画策定会議（第5回）資料（平成16年）

図53 ウラン資源の有効利用



出典：鈴木篤之編著「プルトニウム」

高速増殖炉にすると天然ウランの利用度が 飛躍的に増大



炉心: U-Pu

(プルトニウムが**高速**中性子で核分裂すると発生中性子数が3個程度と大きい)

ブランケット: 劣化ウラン

(ウラン238が中性子を吸収してプルトニウム239に変化)

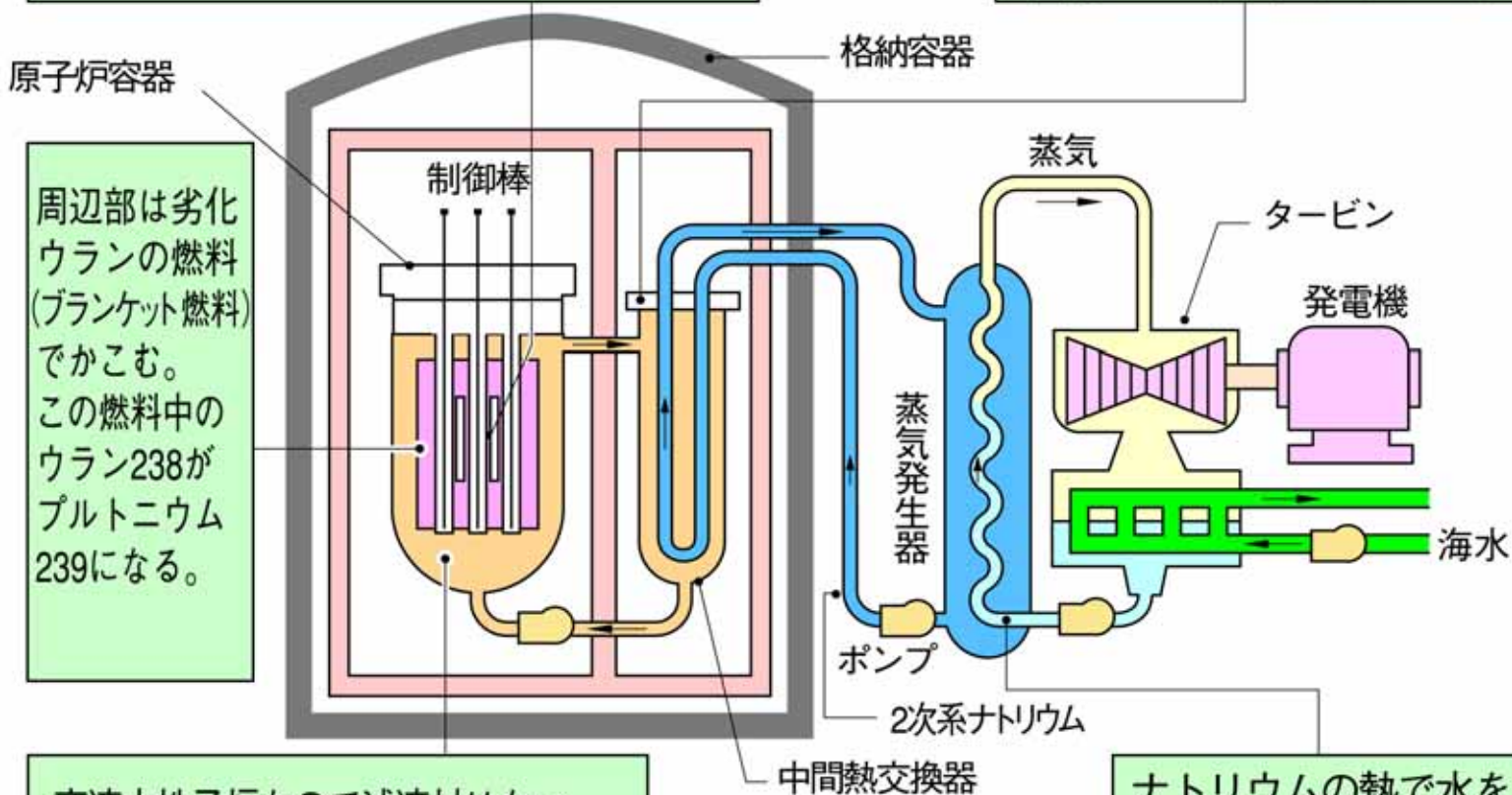
核分裂のできる
高速中性子を減速する必要がない、**ナトリウム**で冷却

うまく設計すると炉心で核分裂でなくなる燃料以上の燃料をブランケットで生成(**増殖**)

高速増殖炉 (FBR) のしくみ

中央部の燃料にはプルトニウムとウランを混ぜたものを使う。

原子炉で発生した熱は中間熱交換器で別の系統の液体金属ナトリウム (2次系ナトリウム) に伝えられる。



周辺部は劣化ウランの燃料 (ブランケット燃料) でかこむ。この燃料中のウラン238がプルトニウム239になる。

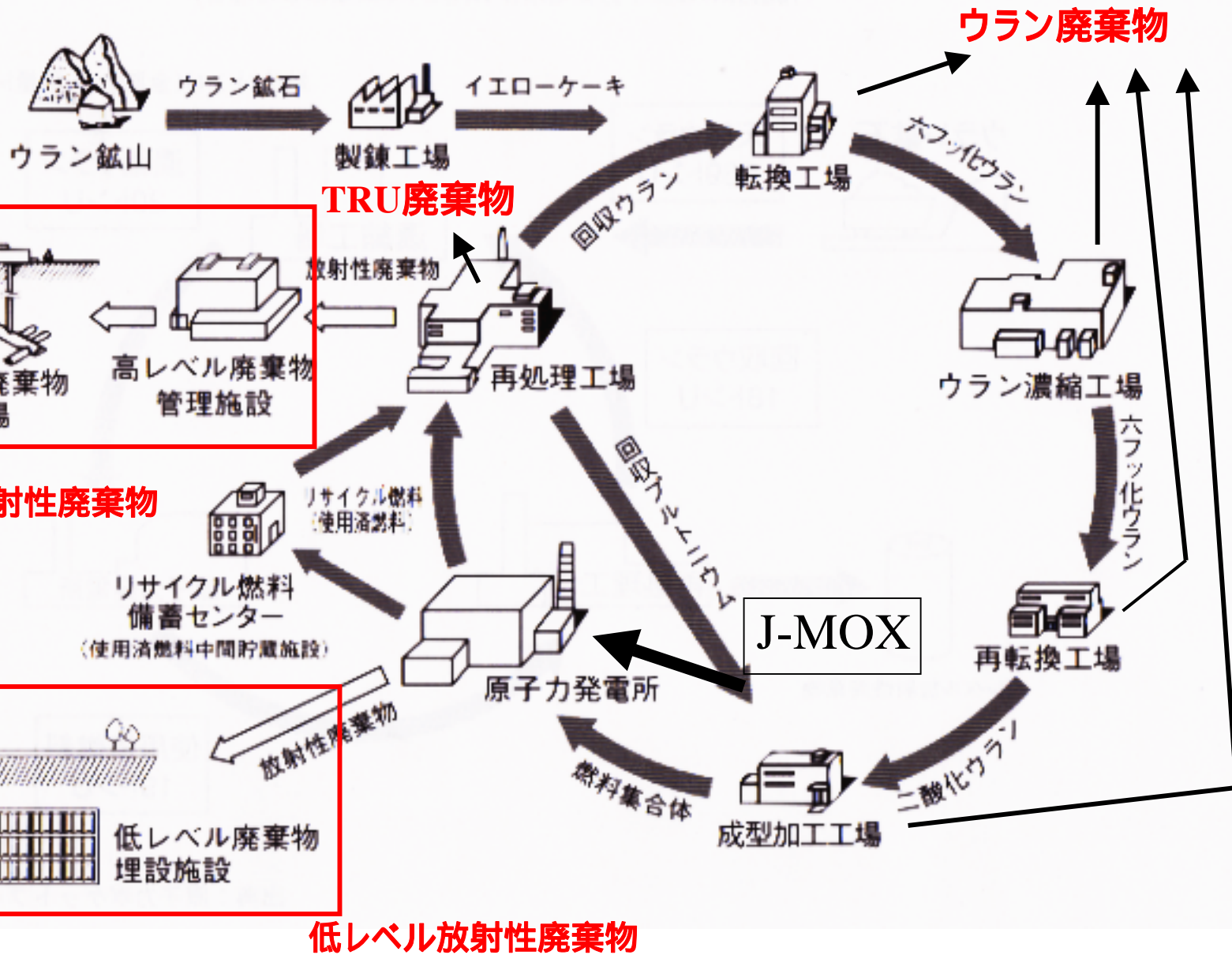
高速中性子炉なので減速材はない。冷却材には熱のよく伝わる液体金属ナトリウム (1次系ナトリウム) を使う。

ナトリウムの熱で水を蒸気にしてタービンをまわす。

放射性廃棄物

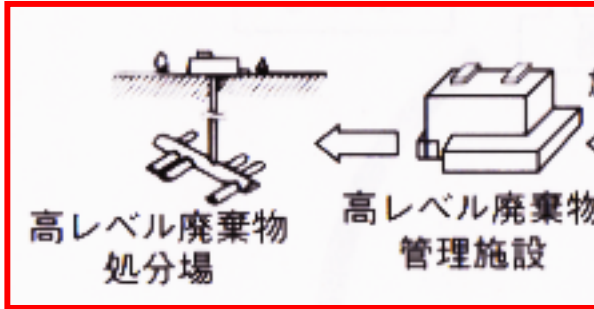
- ・適切な処理の後、生活圏から隔離(処分)
(一部実施)
- ・有用物質の分離後利用 (基礎研究段階)
- ・極低レベルのもの(クリアランスレベル以下)の
再利用、産業廃棄物として処分 (法整備済)
- ・放射性物質の無害化(分離核変換) (基礎研
究段階)

原子燃料サイクル

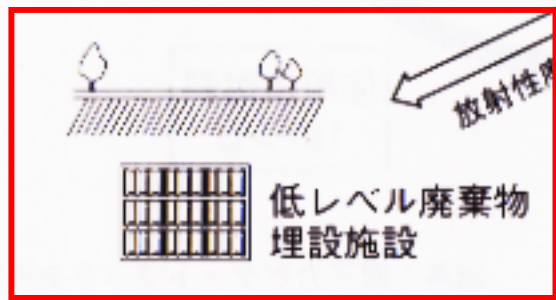


ウラン廃棄物

TRU廃棄物



高レベル放射性廃棄物

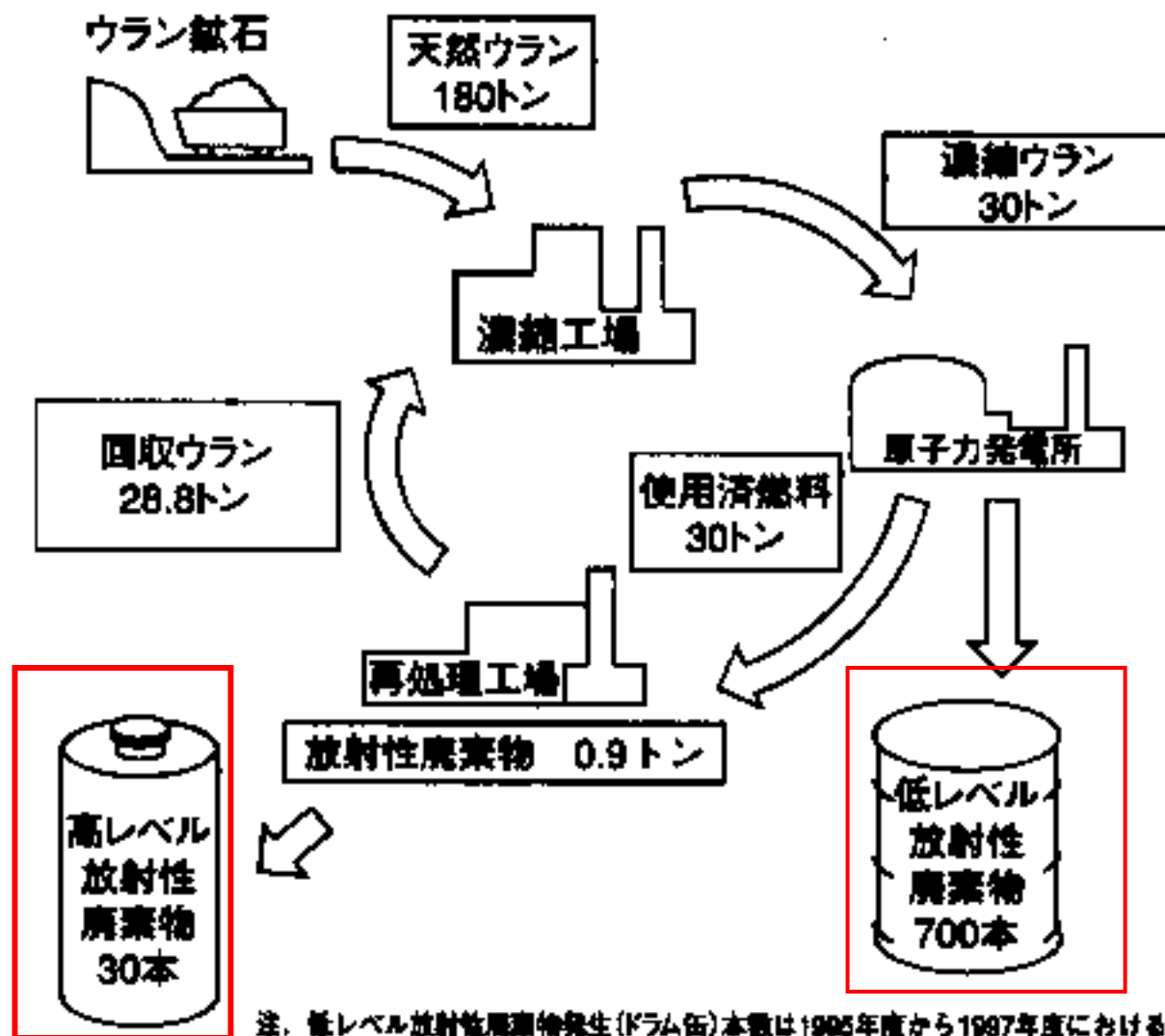


低レベル放射性廃棄物

J-MOX

原子燃料サイクルのウランの流れ

(100万kWの原子力発電所を1年間運転した場合)



注. 低レベル放射線性廃棄物発生(ドラム缶)本数は1965年度から1987年度における全原子力発電所の平均
出典: 「原子力ポケットブック」ほか

日本で発生する廃棄物の量

	発生廃棄物量 (t/日)		備考
一般 廃棄物	主に家庭から排出される生ゴミ、粗大ゴミ及びオフィスから排出される紙くずなど	227,000	平成13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、廃油、廃プラスチック、廃酸、廃アルカリなどの19種類	1,100,000	平成13年度実績
放射性 廃棄物	原子力施設の運転、保守などに伴って発生する放射性的の廃棄物	高レベル 1.5	平成15年度推定
		低レベル 59	平成15年度実績

出典：平成13年版環境白書、平成10年版原子力安全白書

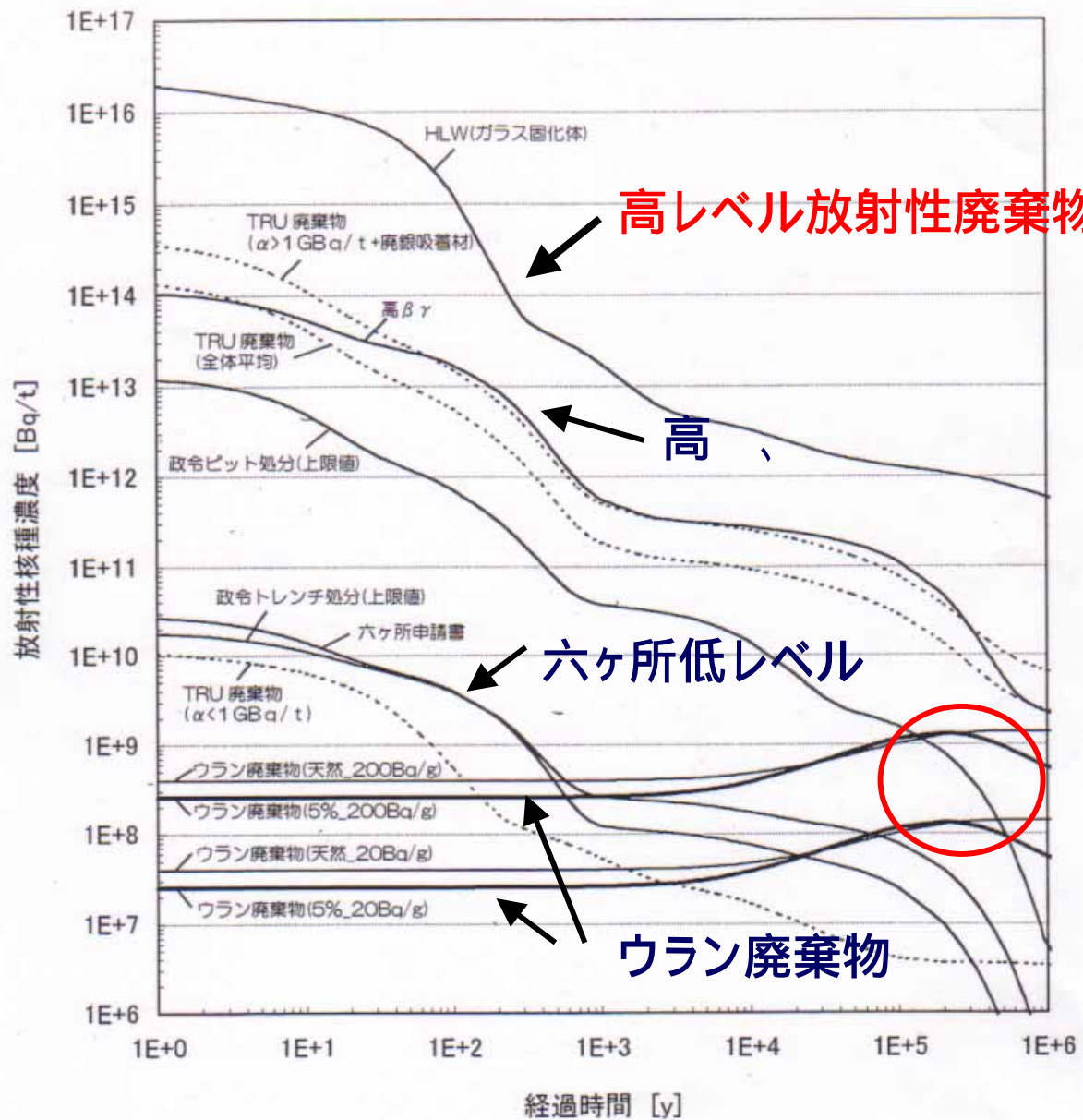
環境省「日本の廃棄物処理」平成13年度版

環境省「産業廃棄物・処理状況調査報告書」平成13年度版実績

資源エネルギー庁「原子力関係資料」（平成15年8月）

原子力安全・保安院「平成15年度原子力施設における放射性廃棄物管理状況」

文部科学省「原子力施設における放射性業務従事者の被ばく管理状況および放射性廃棄物管理状況について（平成15年度）」

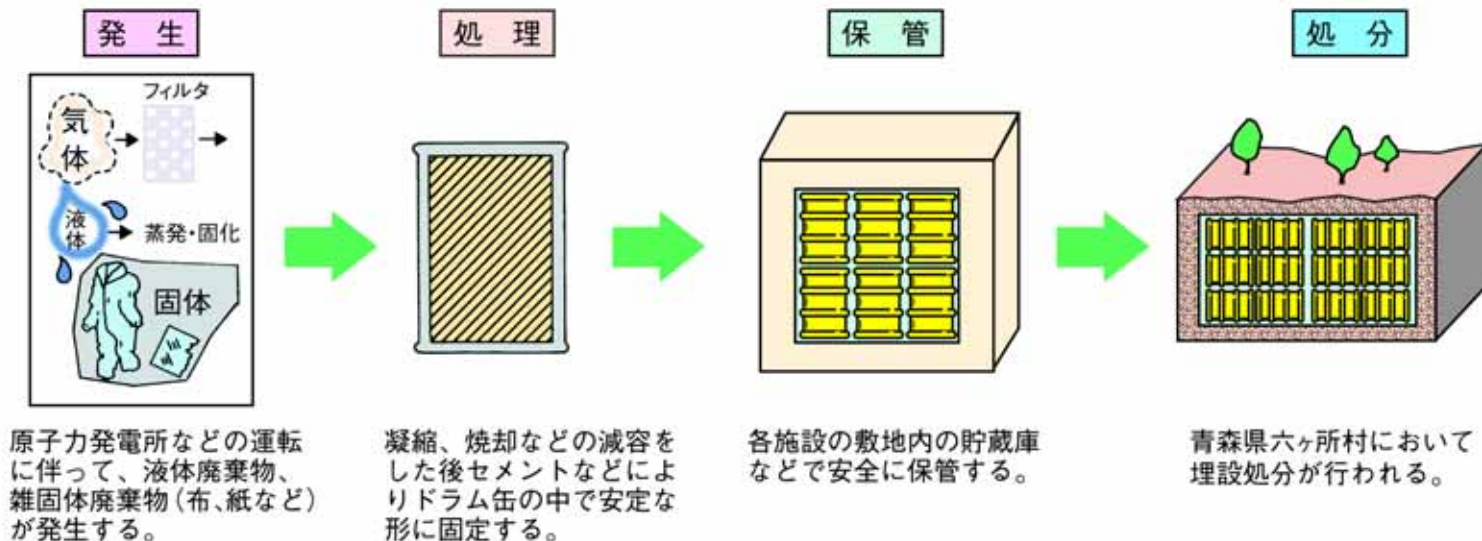


時間とともに
減衰

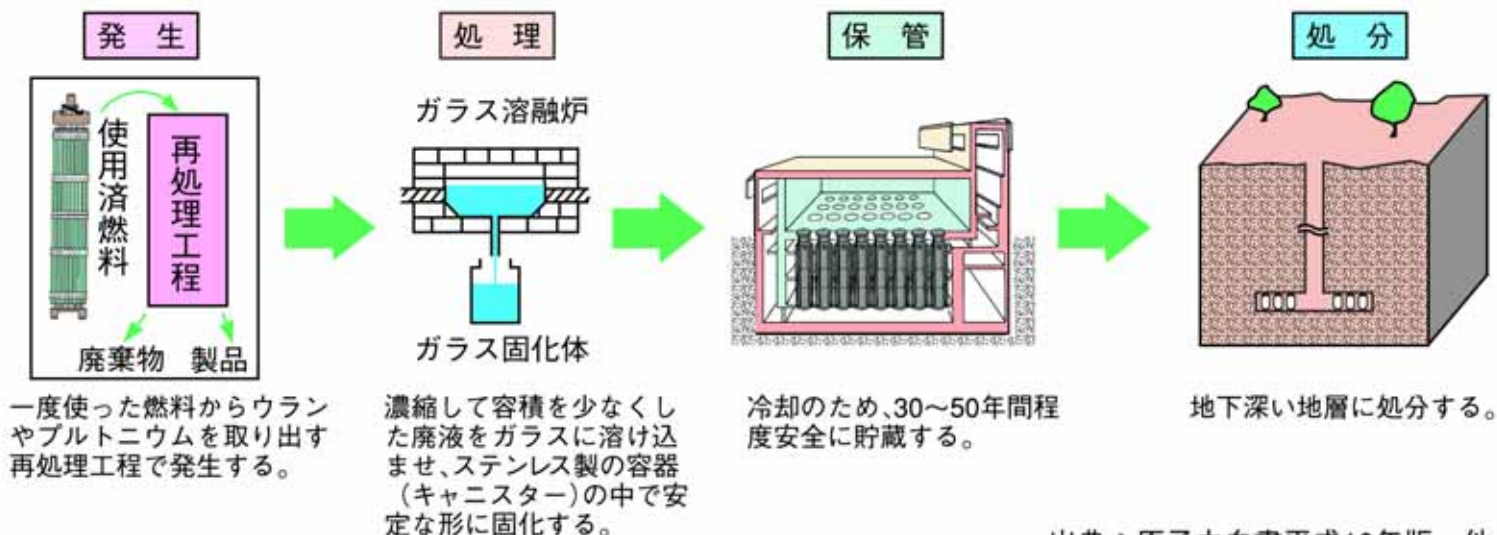
図 放射性固体廃棄物に含まれる放射性核種濃度の経時変化の試算例

放射性廃棄物の処理・処分の基本的考え方

低レベル放射性廃棄物

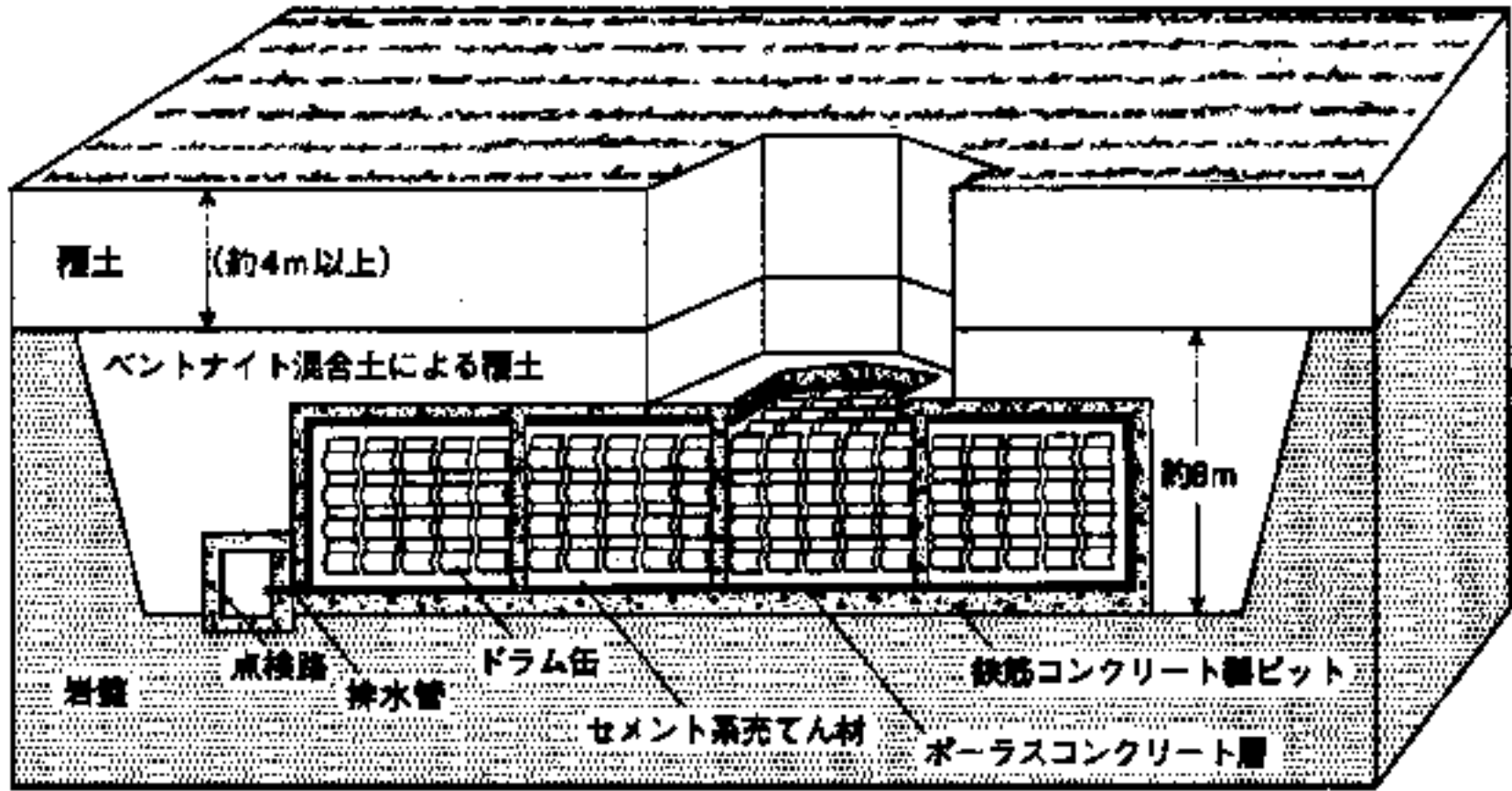


高レベル放射性廃棄物



低レベル放射性廃棄物埋設施設の概念図

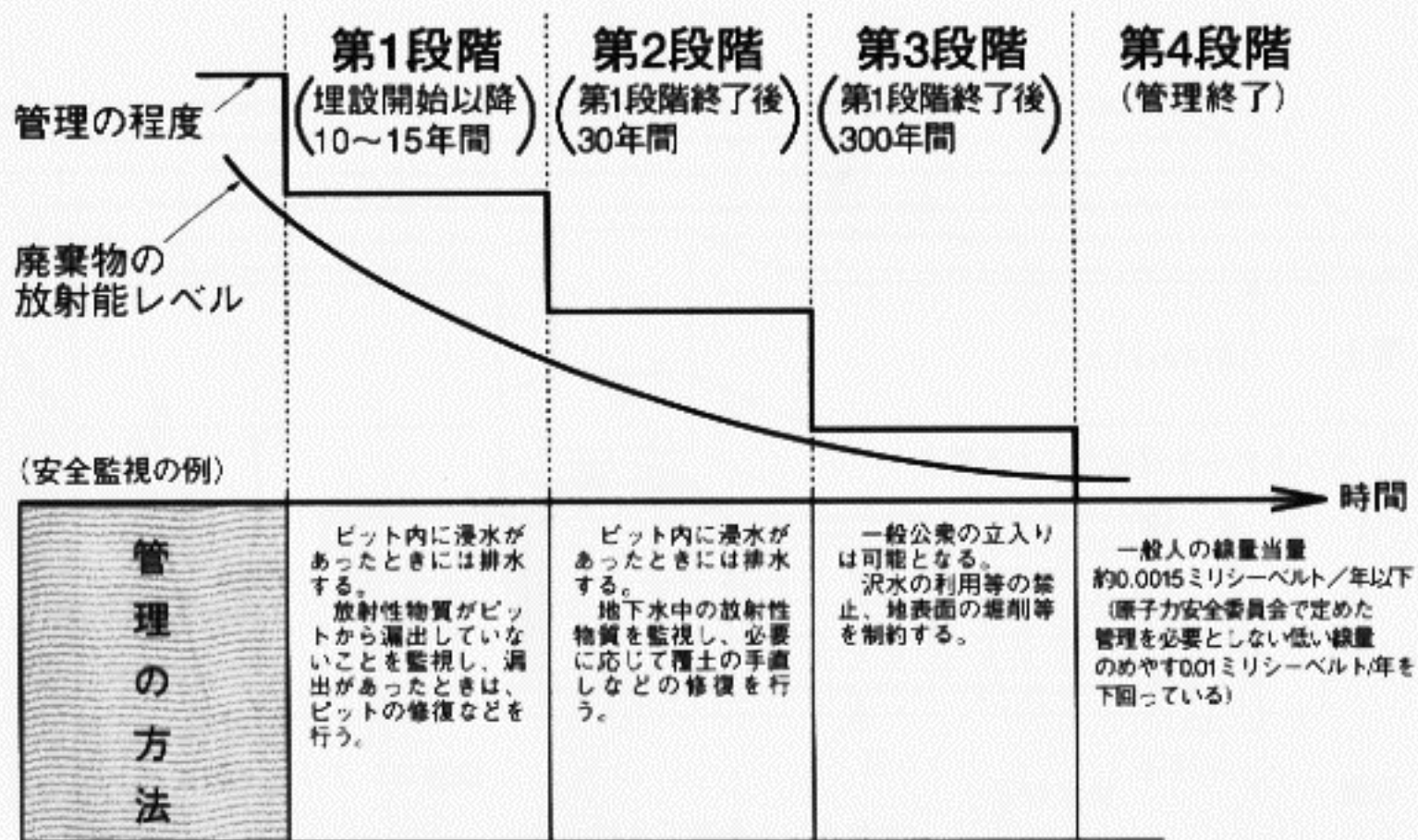
浅地中埋設処分



青森県六ヶ所村にて実施中

出典：「原子力白書(平成9年版)」

低レベル放射性廃棄物の陸地処分の考え方



(環境モニタリングは各段階とも実施する。)

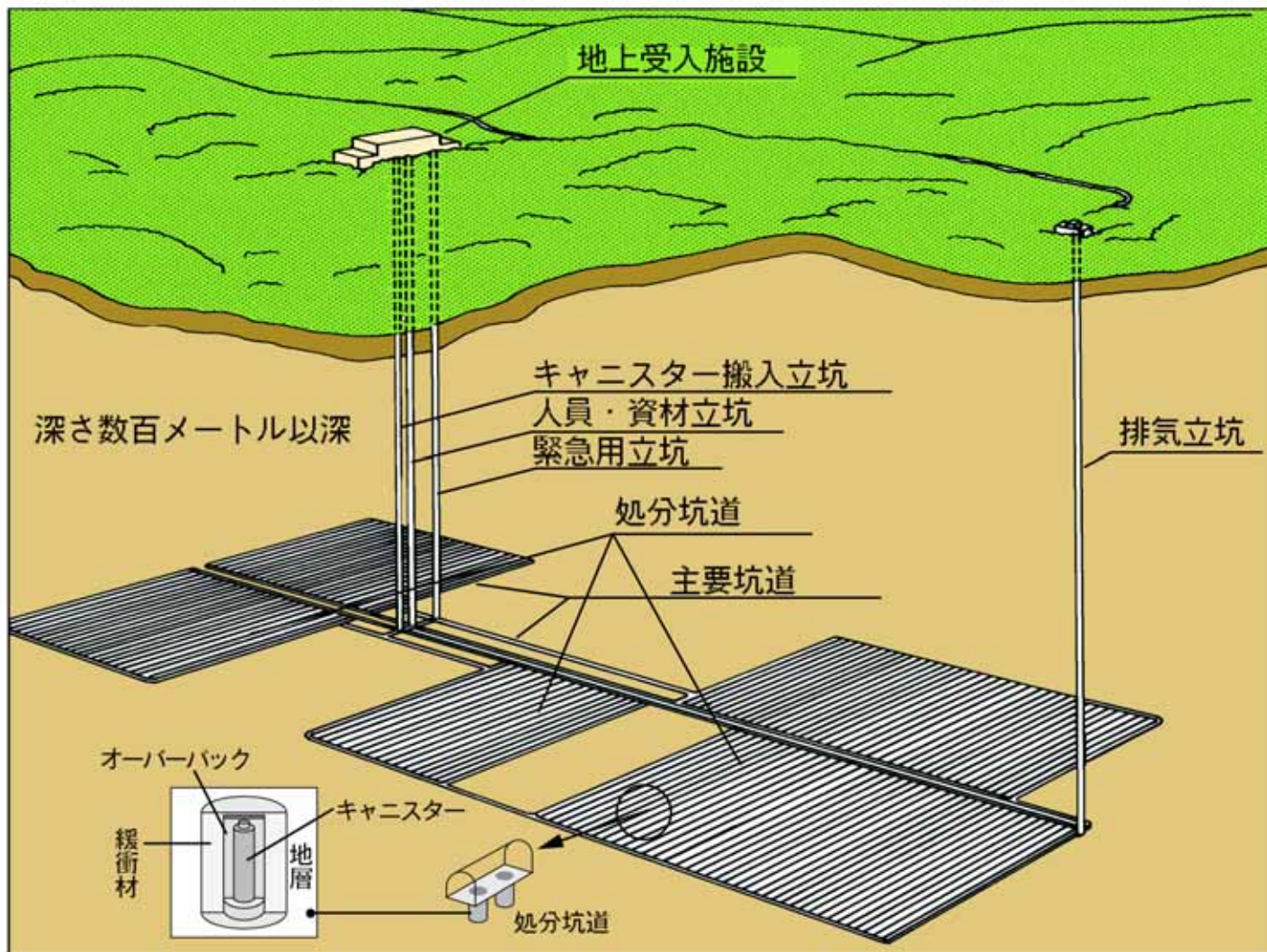
埋設開始

埋設完了

管理終了

出典：日本原燃パンフレットほか

高レベル放射性廃棄物地層処分場の概念図



地層処分

天然バリア

人工バリア

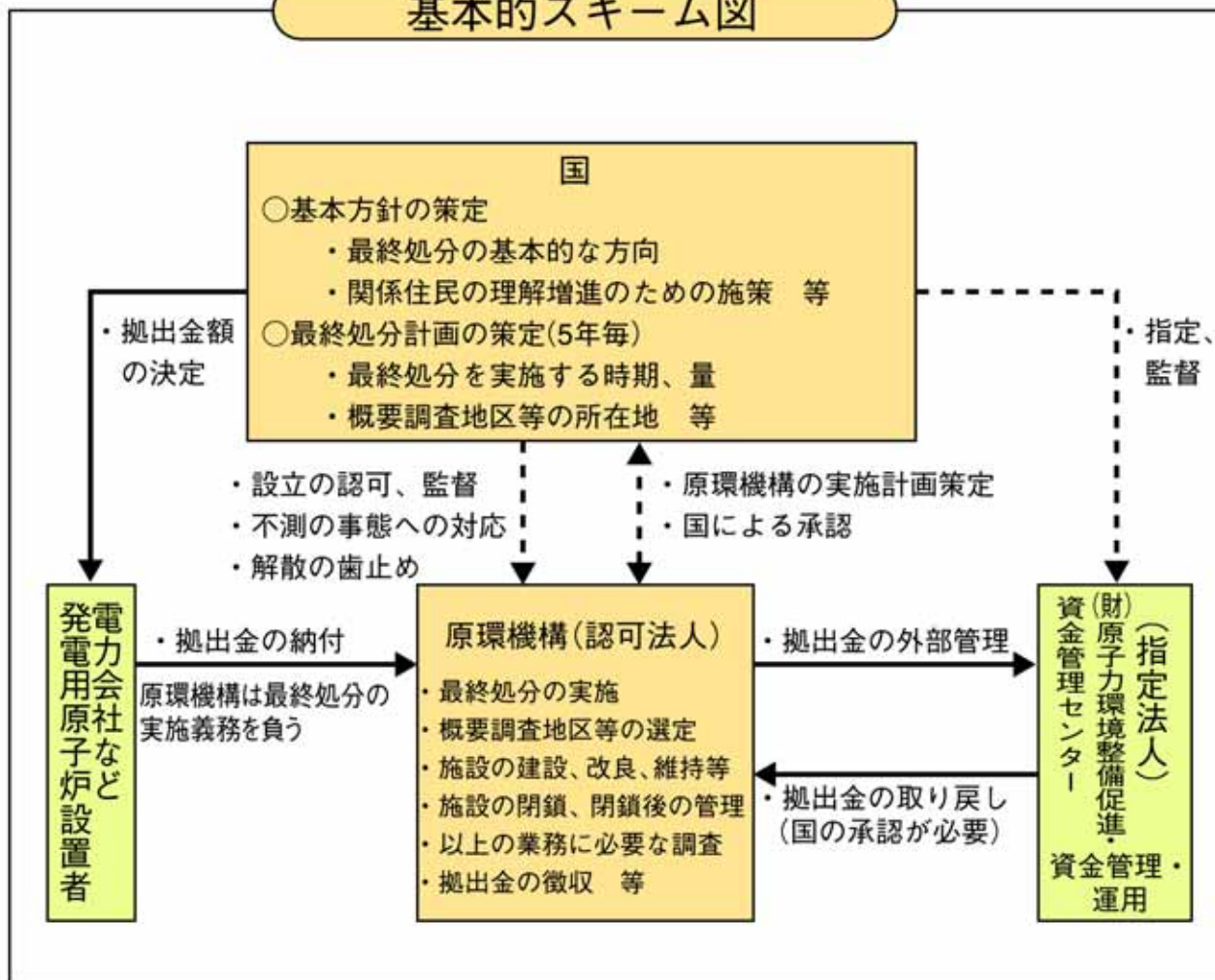


図 2.2-1 地層処分システムの構成要素と期待されるバリア機能

2000年レポート

高レベル放射性廃棄物処分の取り組み体制

基本的スキーム図



スケジュールの概要

原環機構の設立
(平成12年10月)

▼ 文献による調査

概要調査地区の選定

▼ ボーリングの実施等による調査

精密調査地区の選定
(平成20年代前半ごろ)

▼ 地下施設等を用いた調査

最終処分施設建設地の選定
(平成30年代後半ごろ)

▼

処分場の設計
国による安全審査の実施
処分場の建設
(平成30年代後半～)

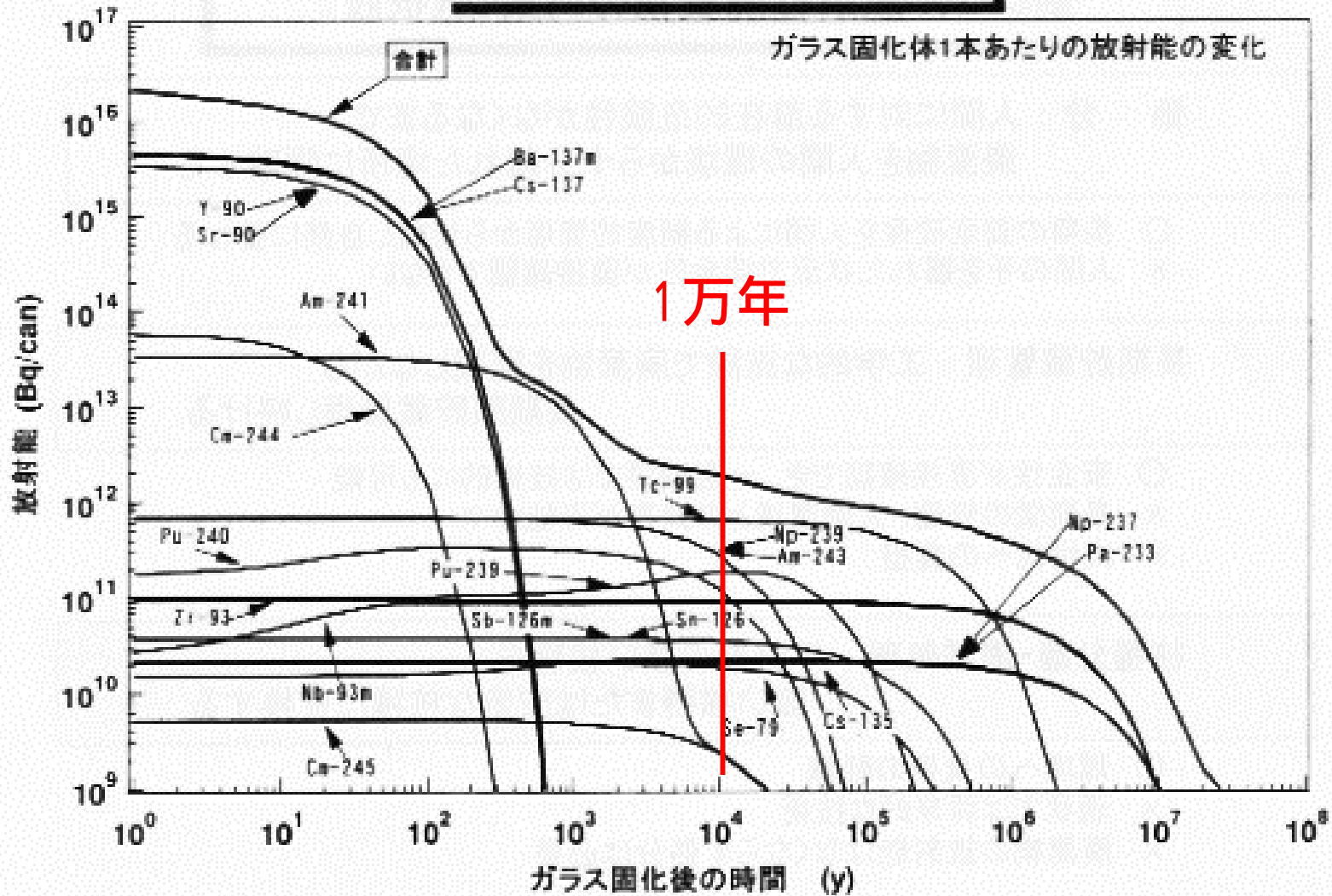
▼

最終処分の操業開始
(平成40年代後半ごろ)

原環機構：原子力発電環境整備機構 (NUMO)

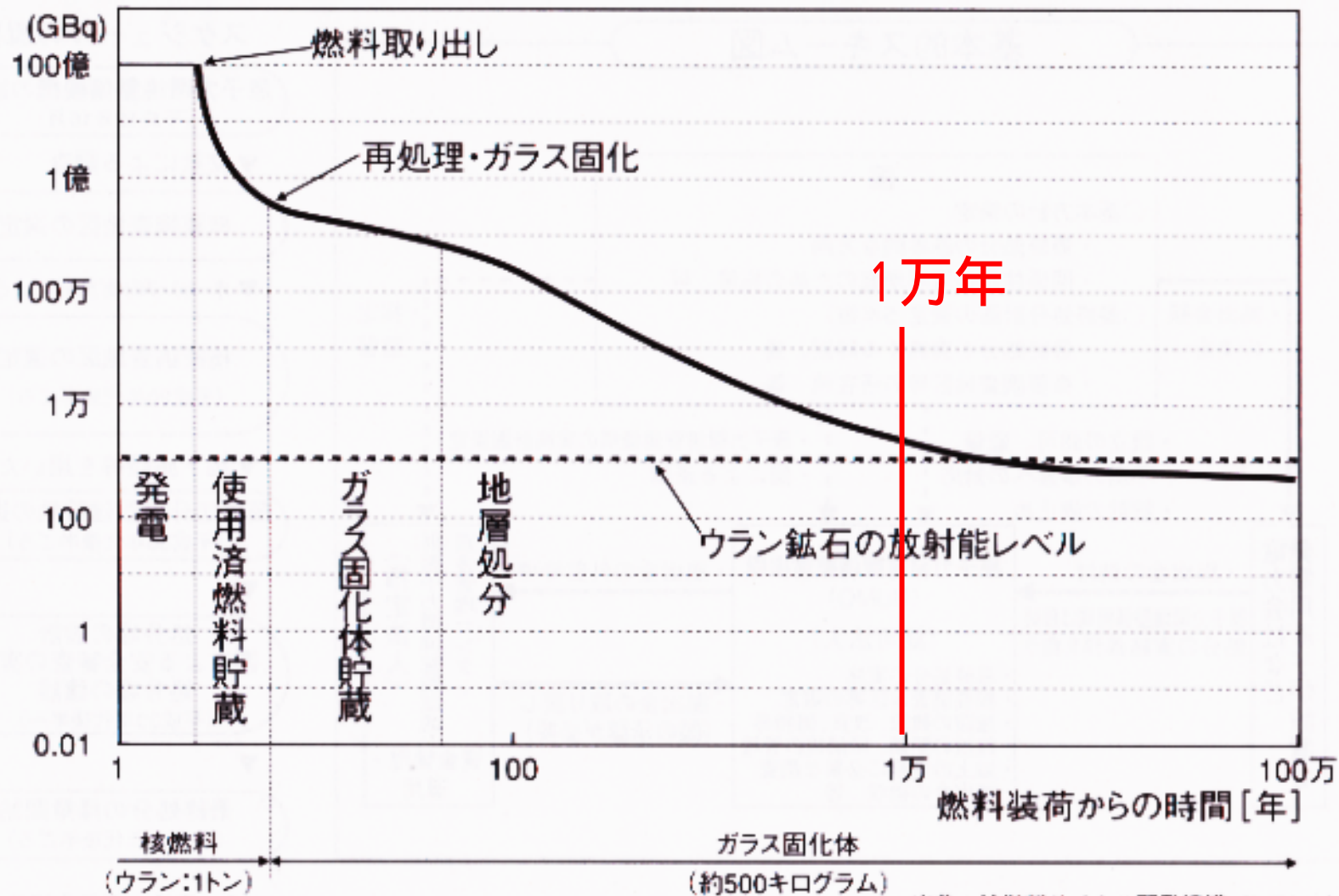
出典：原子力委員会資料 他

ガラス固化体の放射能



高レベル放射性廃棄物の放射能の減衰

燃料1トンに相当する放射能



出典：核燃料サイクル開発機構パンフレット

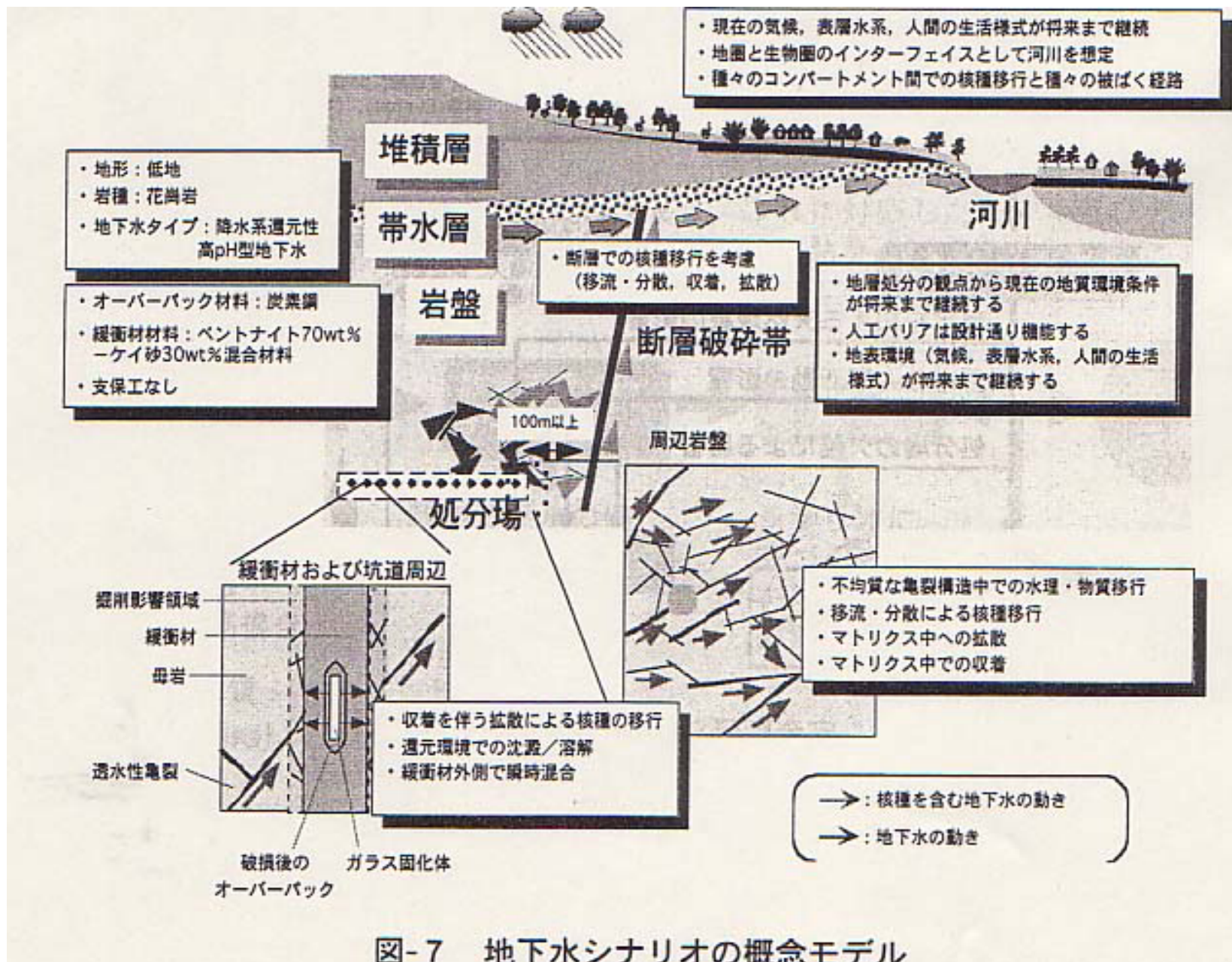


図-7 地下水シナリオの概念モデル

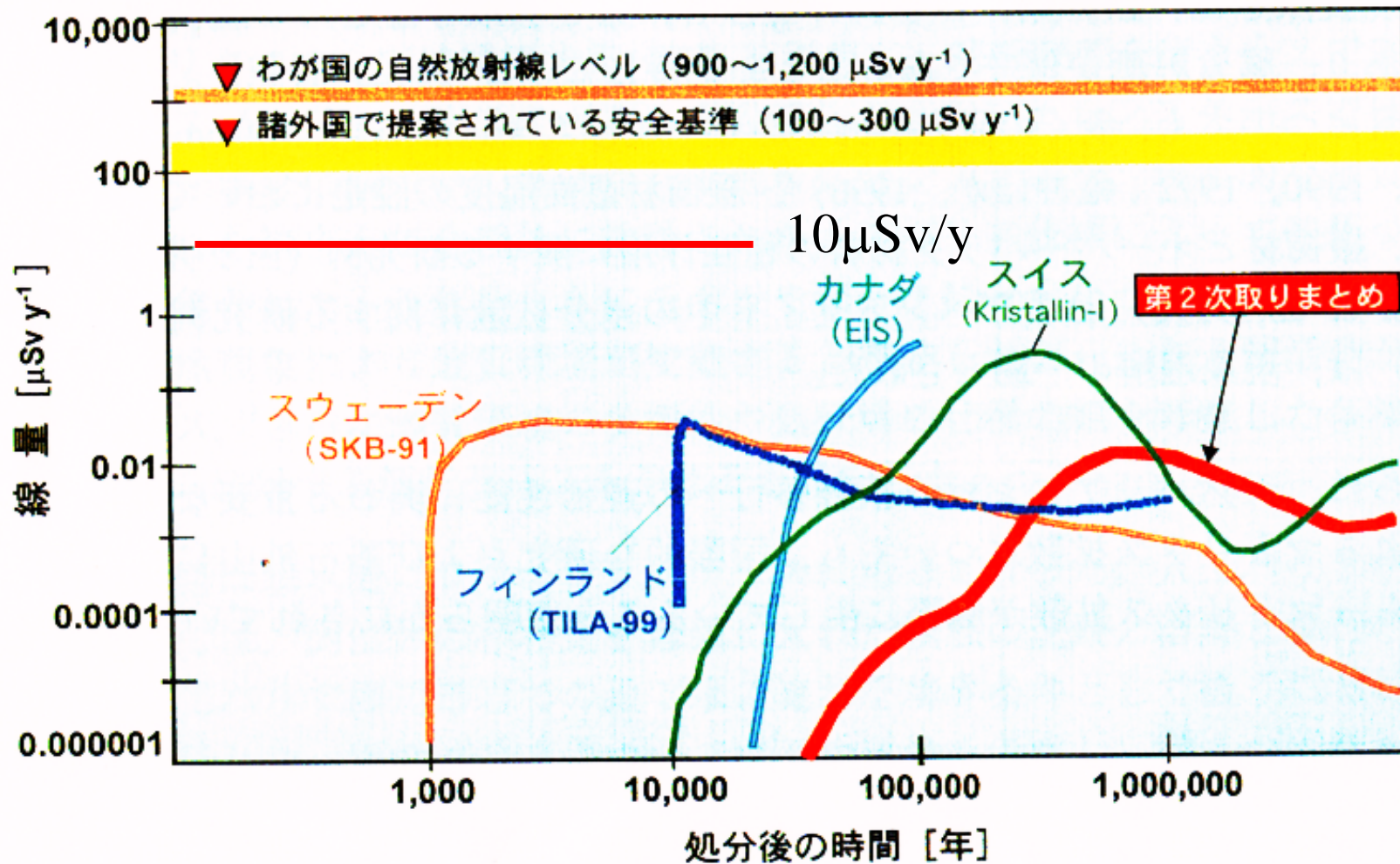
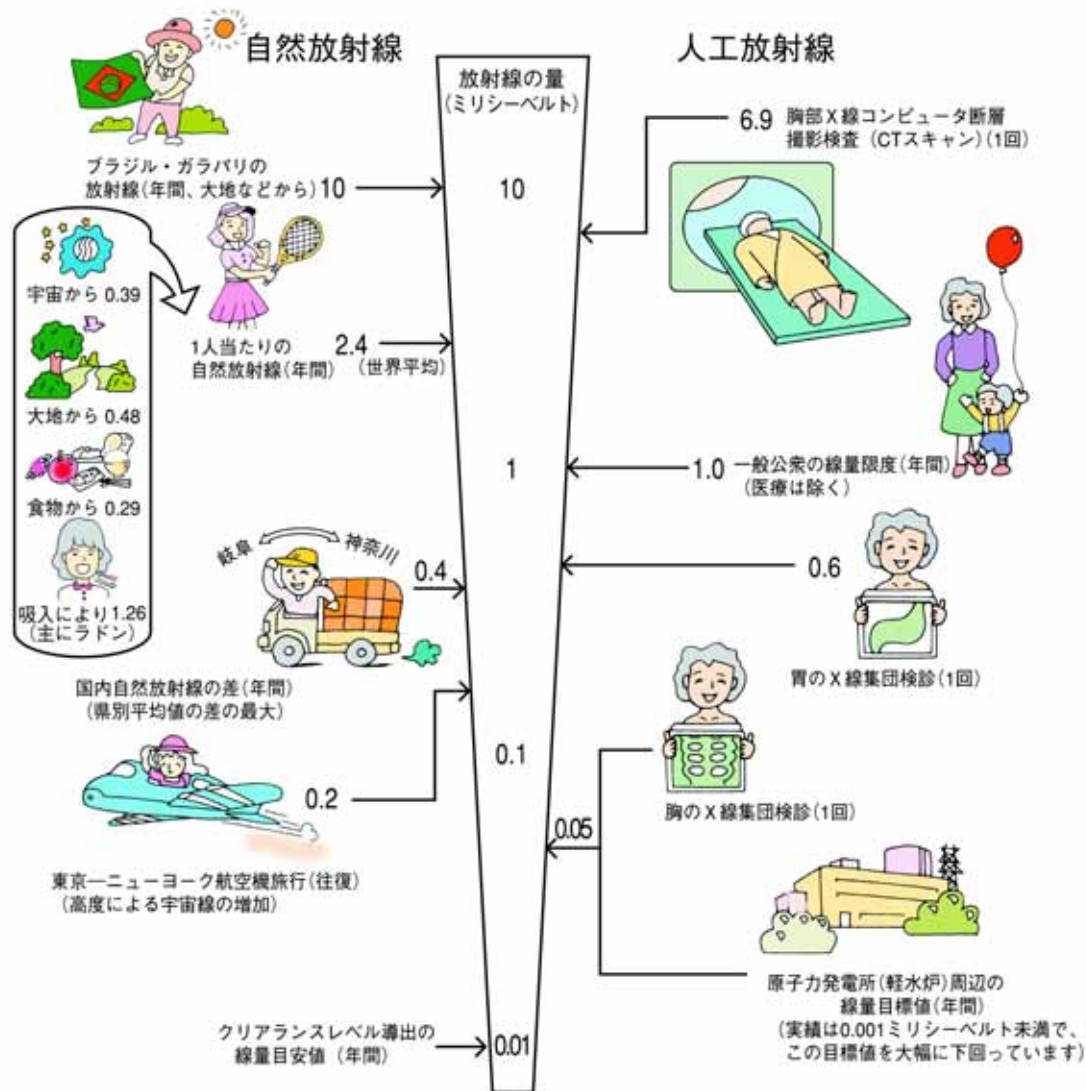


図 5.8-6 各国の安全評価結果の比較

2000年レポート

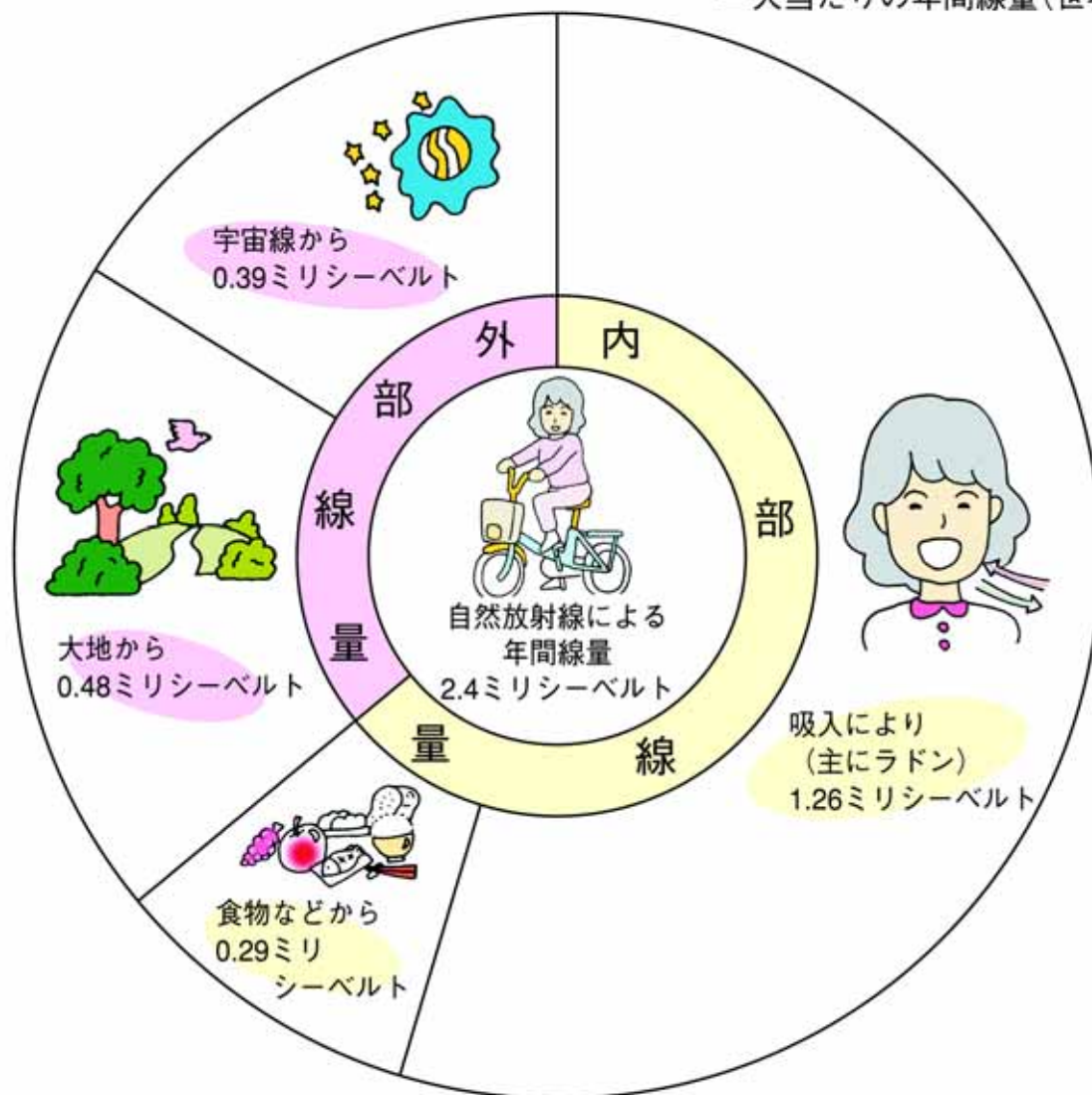
日常生活と放射線



出典：資源エネルギー庁「原子力2004」他

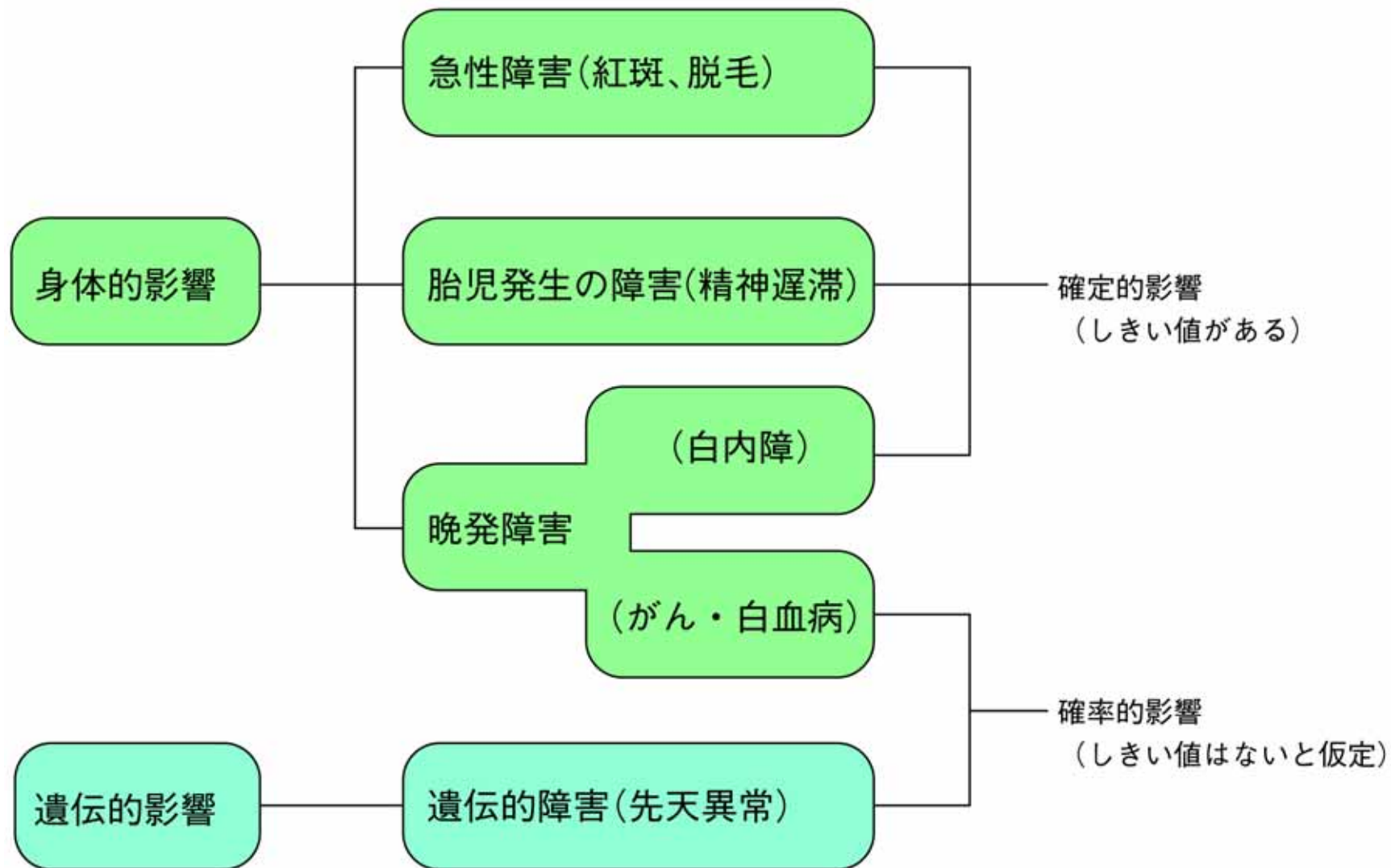
自然放射線から受ける線量

一人当たりの年間線量(世界平均)



出典：国連科学委員会(UNSCEAR)2000年報告

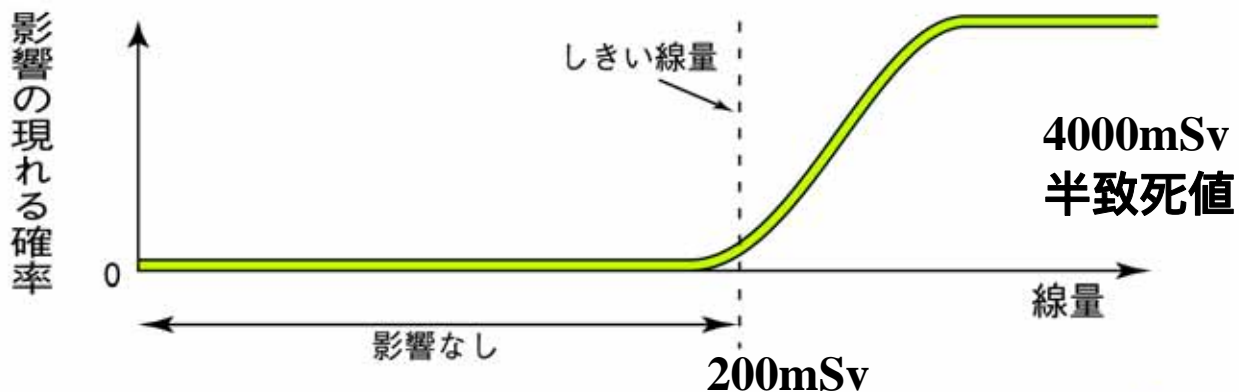
放射線の人体への影響



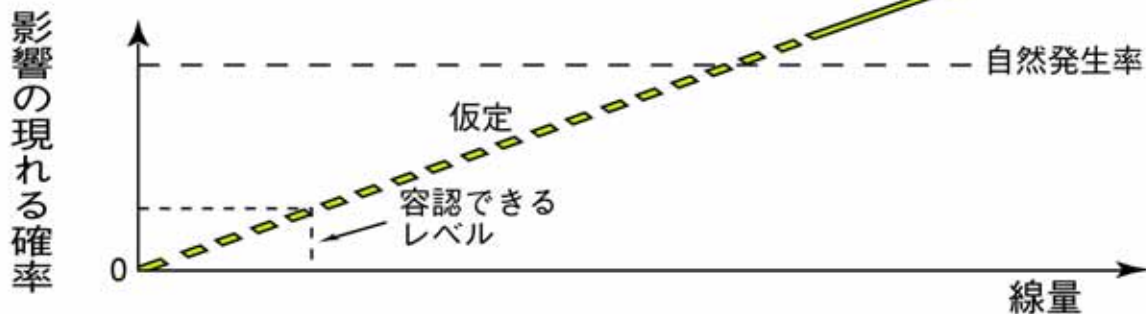
放射線防護の考え方

確定(非確率)的影響は、しきい線量以下に抑えることで影響をなくす。
確率的影響は、できるだけ線量を低くすることで影響を少なくする。

〔確定(非確率)的影響(脱毛・白内障など)〕



〔確率的影響(ガン・白血病など)〕



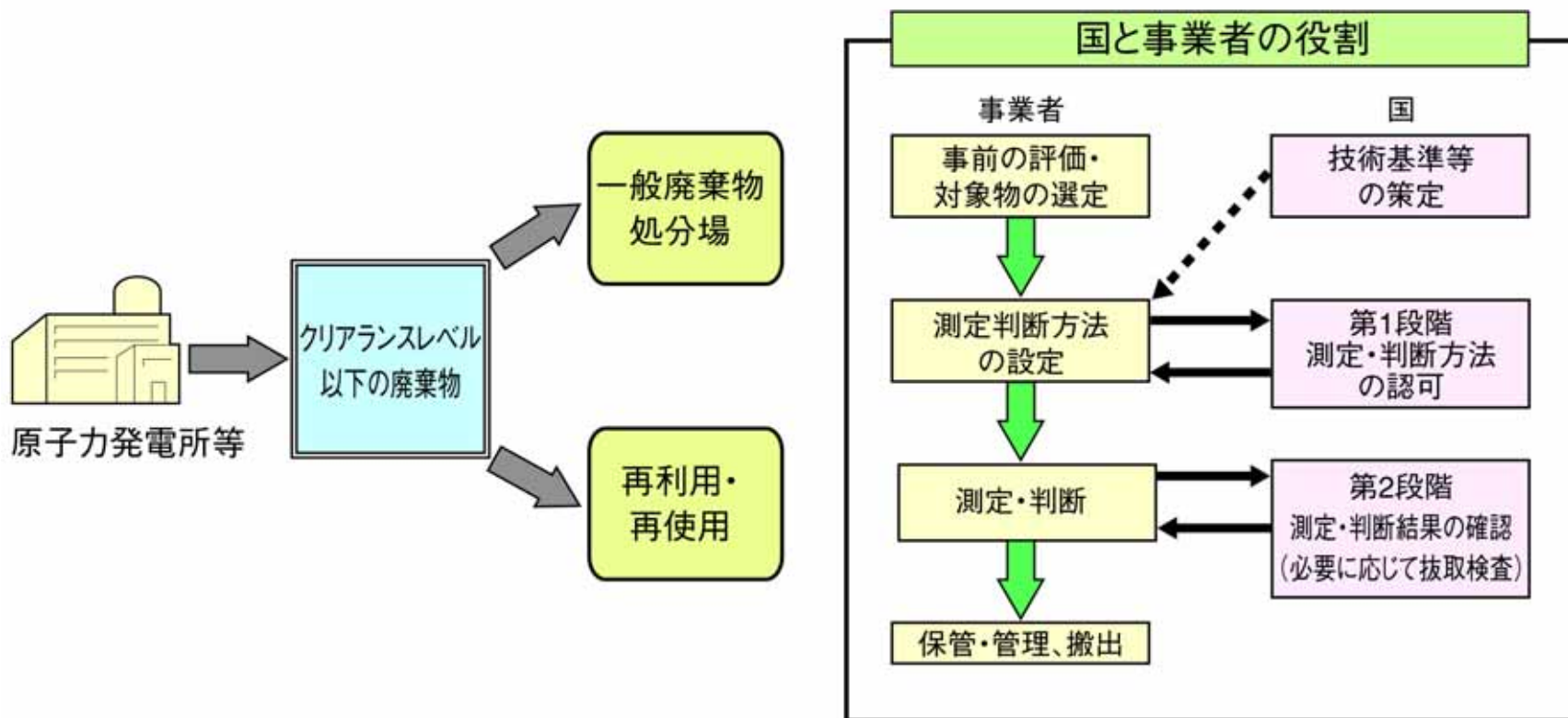
(注) しきい値…ある作用が反応を引き起こすか起こさないかの境の値のこと。

クリアランス制度

原子力利用にともない発生する廃棄物などの安全かつ合理的な処理、処分及び再利用の推進

クリアランスレベル :0.01mSv/年 (日本の自然放射線レベル:1.5mSv/年)

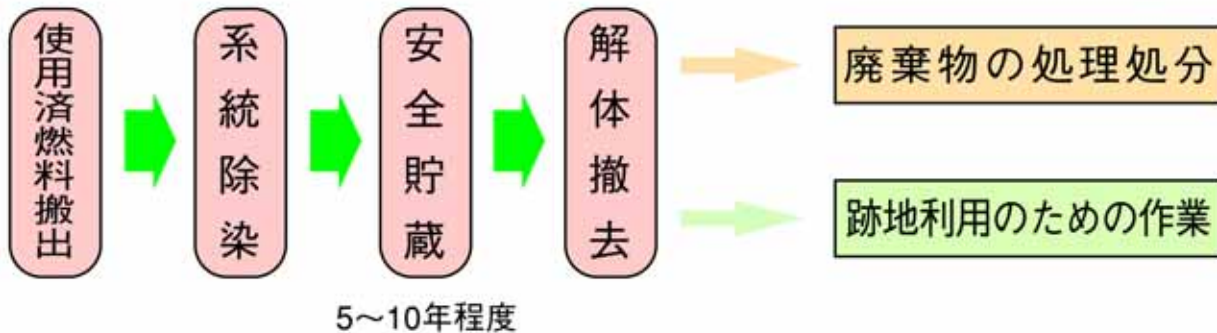
放射能濃度が十分に低く「放射性物質として扱う必要がない物」を区分するレベル



出典：原子力安全委員会廃棄物関連資料
原子力安全・保安院クリアランス制度関連資料

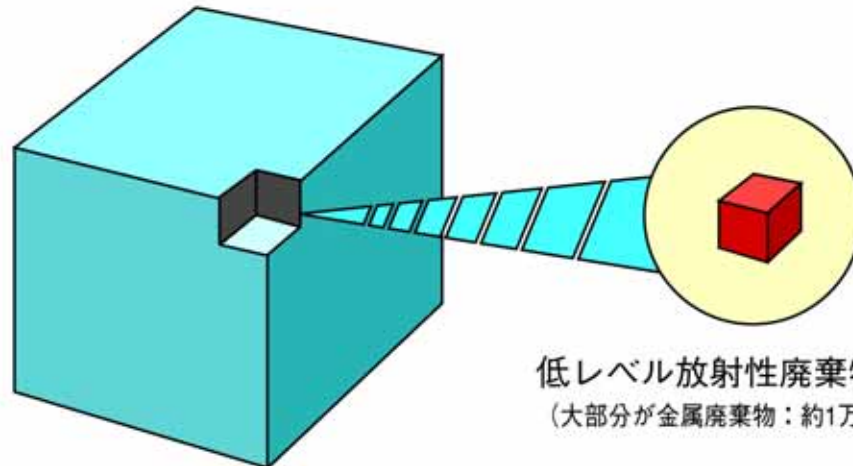
原子力発電所の廃止措置

●解体撤去の手順



●解体撤去で発生する廃棄物の量 (110万kW級軽水炉の試算)

放射性廃棄物として
扱う必要のない廃棄物 **97%**以上
(大部分がコンクリート廃棄物：約49万~53万トン)



低レベル放射性廃棄物 **3%**以下
(大部分が金属廃棄物：約1万トン前後)

高レベル放射性廃棄物中の有効資源

(1) 希少であり天然資源として有効利用

(30000MWD/t, 5年冷却)

テクネチウム(Tc) 700g/t

ルテニウム(Ru) 2000g

ロジウム(Rh) 500g

パラジウム(Pd) 1000g

セレン(Se), テルル(Te) 500g

(2) 熱源や放射線源として有効利用

セシウム(Cs) 2500g

ストロンチウム(Sr) 800g

(3) 燃料として利用

ネプツニウム(Np), アメリシウム(Am), キュリウム(Cm)

表 3.1 主な核変換研究対象核種

核種	半減期 (年)	中性子反応 断面積 * (b)	生成量 **	
			(Ci / 年)	(kg / 年)
MA				
^{237}Np	2.1×10^6	181 (1.6)	11	144
^{241}Am	432	603 (1.3)	5.0×10^3	1.46
^{243}Am	7380	79 (1.1)	601	3.03
^{243}Cm	28.5	720 (2.0)	55	0.01
^{244}Cm	18	15 (2.0)	5.8×10^4	0.72
^{245}Cm	8500	2347 (1.6)	4.1×10^3	0.03
FP				
^{90}Sr	29	0.015†	2.5×10^6	17.8
^{93}Zr	1.5×10^6	2.6	61	24.0
^{99}Tc	2.1×10^5	22.9†	433	25.5
^{107}Pd	6.5×10^6	1.8	3.6	7.0
^{129}I	1.6×10^7	30.3†	1.0	5.8
^{135}Cs	2.3×10^6	8.3†	13.5	11.7
^{137}Cs	30	0.25†	3.5×10^6	39.5
^{151}Sm	90	15000	1.1×10^4	0.4

* MA については熱中性子に対する (n, γ) と (n, f) 反応断面積の和
括弧内には 1 MeV 中性子に対する (n, f) 反応断面積を示した。

** 出力 1 GWe の軽水炉の年間生成量

† PNC 測定データ

分離核変換

マイナーアクチノイド
(MA) や長半減期核
分裂生成物が対象

核変換法:

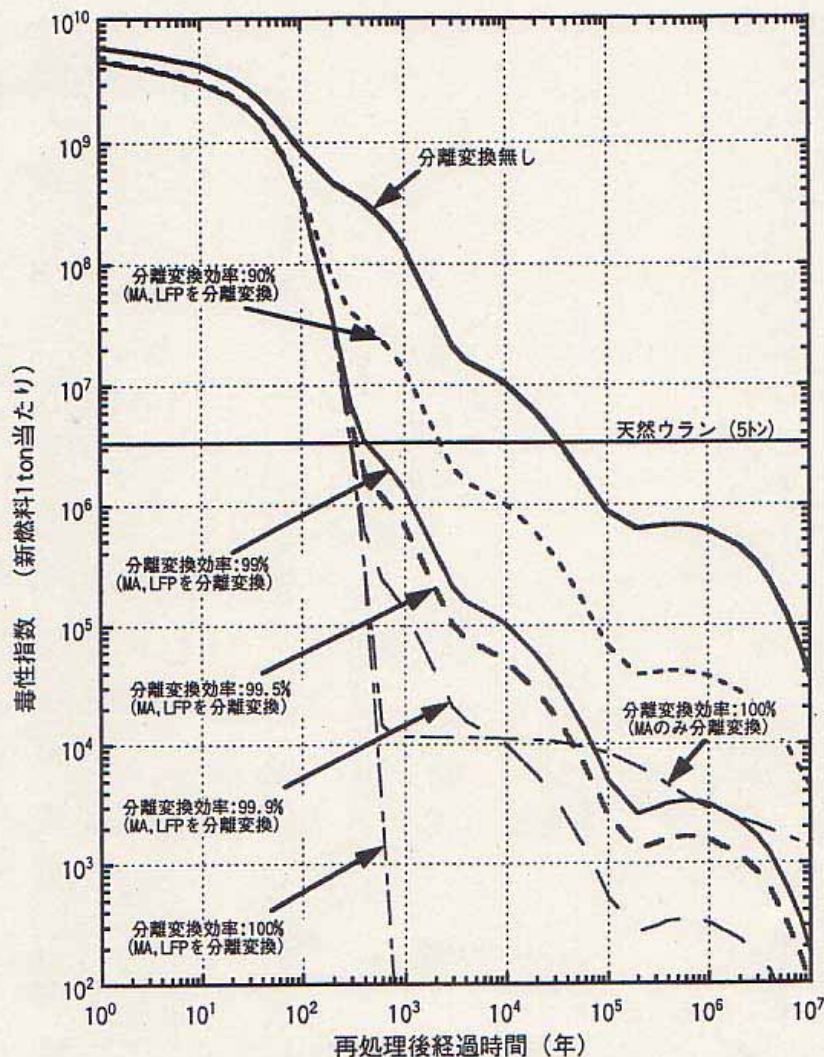
- ・中性子による
核分裂

(原子炉、加速器)

- ・ガンマ線照射

基礎研究段階

分離変換による高レベル廃棄物の放射能レベルの減少



添付図6 分離変換による高レベル廃棄物の毒性の減少
(LFP:半減期が30年以上の核分裂生成物)

使用済燃料: 燃焼度33GWD/MT、3年冷却
再処理効率: 99.9%U, Pu回収

レポート課題

有用物質のリサイクルと放射性廃棄物の生活圏からの隔離という観点から原子力エネルギー利用の特徴を述べよ

