

バックエンド夏期セミナー

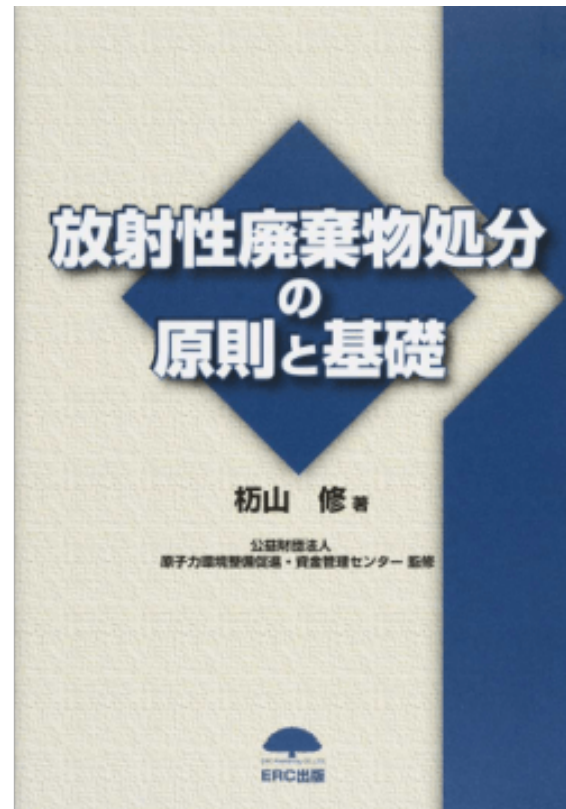
「放射性廃棄物処分の原則と基礎」 紹介

原環センター創立40年記念刊行図書(発行年月日：2016/12/11)

出版社：ERC出版 (¥2916税込み)

pdf版：http://www.rwmc.or.jp/library/history_40/

著者：朽山 修（著）／原子力環境整備促進・資金管理センター（監修）



原子力安全研究協会
朽山 修

科学者の使命

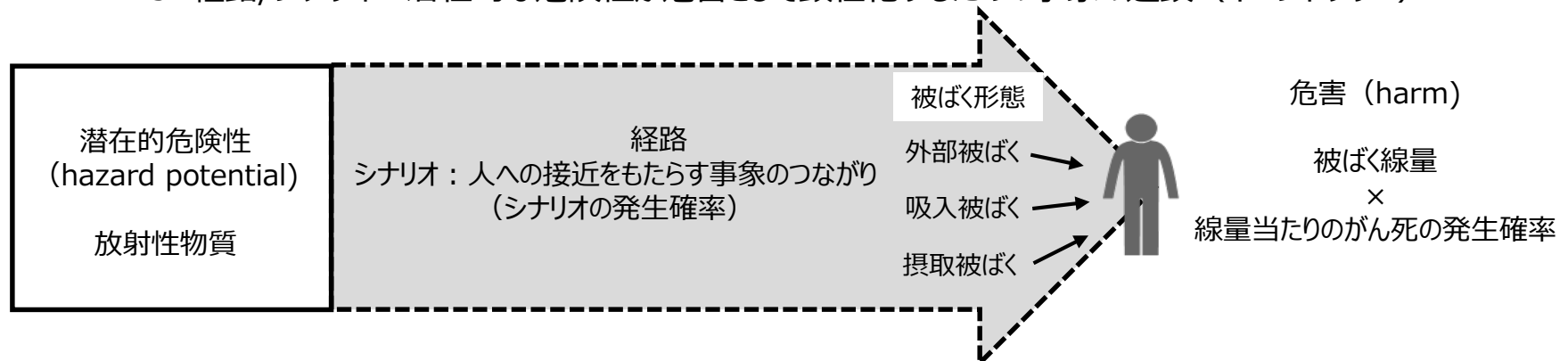
人々に代って知識を獲得（勉強）して、人々が共有できるように社会に提供する。
人々は知識を情報として用いてより良い意思決定をする。

放射性廃棄物処分の専門家の使命

放射性廃棄物のもたらすリスクの性質と程度に応じて最適な（過不足のない）
安全対策を準備して社会に実装する。

リスク：ある行動をする/しないことによって危険に遭う/損をする**可能性**
安全：許容できないリスクのないこと

1. 危害（harm）：人の受ける身体的傷害/健康障害または財産/環境の受ける害
2. 潜在的危険性（hazard potential）：潜在的に危害の原因となり得るもの
3. 経路/シナリオ：潜在的な危険性が危害として顕在化するための事象の連鎖（イベントツリー）



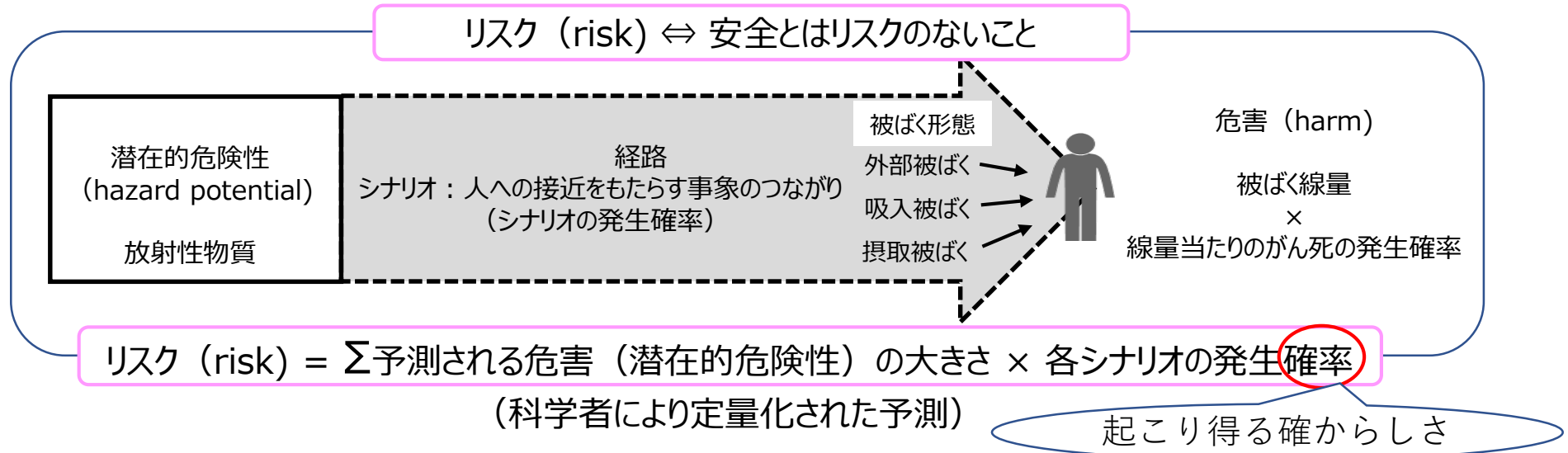
リスク (risk) = 予測される危害（潜在的危険性）の大きさ × シナリオの発生確率
全リスク = Σ (シナリオごとのリスク)

潜在的な危険が危害に結びつくのは、放射性物質と人が接近して人が被ばくするような事象の連鎖（シナリオ）があるときのみ。→ 安全対策 = シナリオの発生確率を減らすことによりなされる。（処分の目的）

意思決定に対する規範的(normative)アプローチ

norm = 従うべき基準、論理、価値

リスク (risk) \Leftrightarrow 安全とはリスクのないこと



1. 安全対策 = 危険に遭う可能性 (シナリオの発生確率) を減らすことによりなされる
2. リスクの程度に応じた**最適**な安全対策の準備 (過少も過剰も不利益となる)
3. リスクの評価 (予測) には不確実性が伴う (人間の知識は限られている)

不確実性に配慮して用心のため過剰に対策する (予防原則)

どれだけ確からしいかを伝える必要がある。

確実 (知っていること)

二分法 (白黒の判断) は適用できない

不確実 (知らないこと)

社会に対する実装の提案 \Rightarrow 社会の意思決定

危険の程度を判断するための指標 (リスク指標) は妥当か = 倫理的妥当性

安全装置 (安全戦略) は妥当で、機能すると判断できるか = 過不足なく、かつ工学的に実現できるか

意思決定に対する記述的(descriptive)アプローチ 矛盾に満ちた社会で実際に起こることに備える

リスク (risk) ⇔ 安全とはリスクのないこと

潜在的危険性
(hazard potential)
放射性物質

**わからないから短絡する
(恐れ、嫌悪からの想像、疑心暗鬼)**



危害 (harm)
社会における人々の反応
過剰防衛、風評、関連死

何が起こるか知らないほど潜在的危険性に対する想像や疑心暗鬼は膨らむ

**人々は合理的に行動するわけではない
その分危害は拡大する**

リスク (risk) = 日常経験や想像から起こるとされる直感される被害

科学者が主張する確実性 (どのくらい確からしいか = 不確実性がある)

確実 (知っていること)

二分法 (白黒の判断) は適用できない

不確実 (知らないこと)

ヒューリスティックバイアス

非専門家はこの辺と思う

専門家は
この辺と思う

知っていることと知らないことはその人ごとに異なる
分業化社会の中で安全を他者に委ねている
(専門家として関わらないので知らない)
理解できない部分、直感と合わない部分を信用してよいかどうか
(相手の能力と意図を信用してよいか)

確率としてまたは定性的に (相場観として) しか伝えられない

科学者の使命＝リスクを定量化して、その大きさに応じた安全措置を施す (システム1の社会に対する規範的アプローチによる意思決定の勧め)

危険の程度を判断するための指標 (リスク指標) は妥当か = 倫理的妥当性

安全装置 (安全戦略) は妥当で、機能すると判断できるか = 過不足なく、かつ工学的に実現できるか

$$\text{全リスク (risk)} = \sum (\text{予測される危害} = \text{潜在的危険性の大きさ} \times \text{各シナリオの発生確率})$$

Σ

確実 (知っていること)

二分法 (白黒の判断) は適用できない

不確実 (知らないこと)

システム全体のリスク評価は、数多あるシナリオのリスク評価 (確からしさ \leftrightarrow 不確実性) の統合

“専門家”は特定のシナリオに関する知識が説明できる

“非専門家”にシナリオごとの評価の確からしさ (不確実性) はどれだけ伝わるか

“非専門家”はシステム全体の安全の程度 (確からしさ) を把握できるか

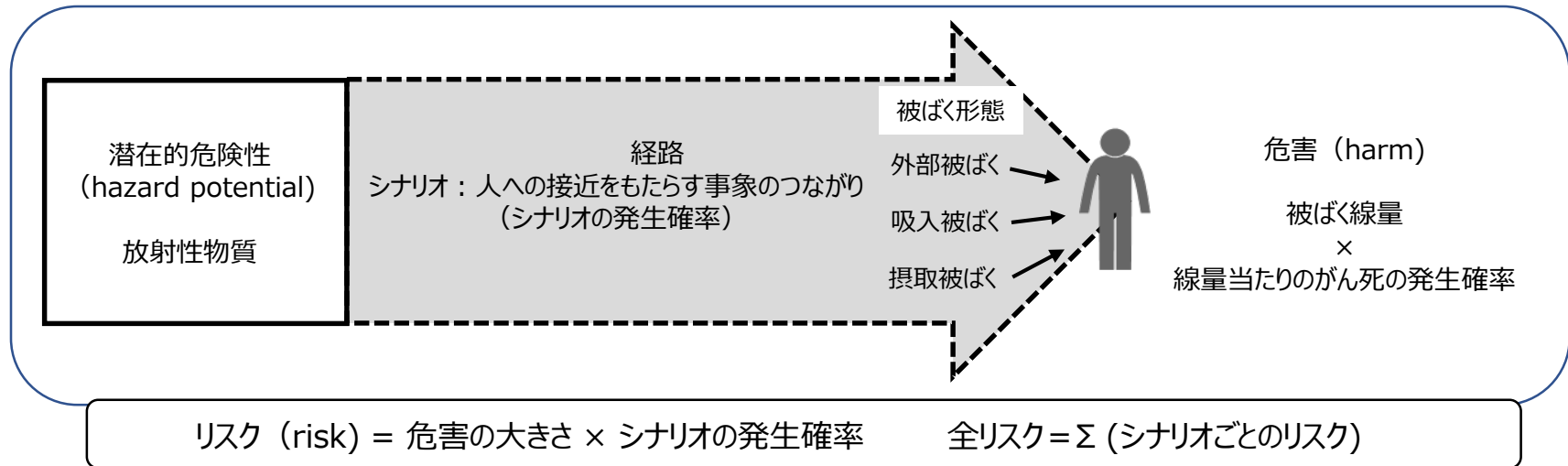
網羅主義、要素還元主義の限界

木を見て森を見ない人が何人集まっても森は見えない

システム全体の安全性 (確からしさ = 残る不確実性) が分からない

放射性廃棄物処分の俯瞰(全体像の把握)が必要

放射性廃棄物の処分における安全の確保 (目次)



第1章 放射性廃棄物と社会：社会は廃棄物をどう扱ってきたか

第2章 核反応と放射線：どのような放射性核種がどのようにできるのか

第3章 放射線の健康影響と放射線防護：放射線はどのような危害を与えるのか

第4章 放射性廃棄物の発生：どこからどのような放射性廃棄物がどれだけ出ているのか

第5章 放射性廃棄物処分の基本戦略：どのようにして処分の安全を確保するのか

第6章 放射性廃棄物の隔離と閉じ込めの達成：隔離と閉じ込めはどのように達成されるのか

第7章 放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価：隔離と閉じ込めの達成の確認はどのようにしてなされるのか

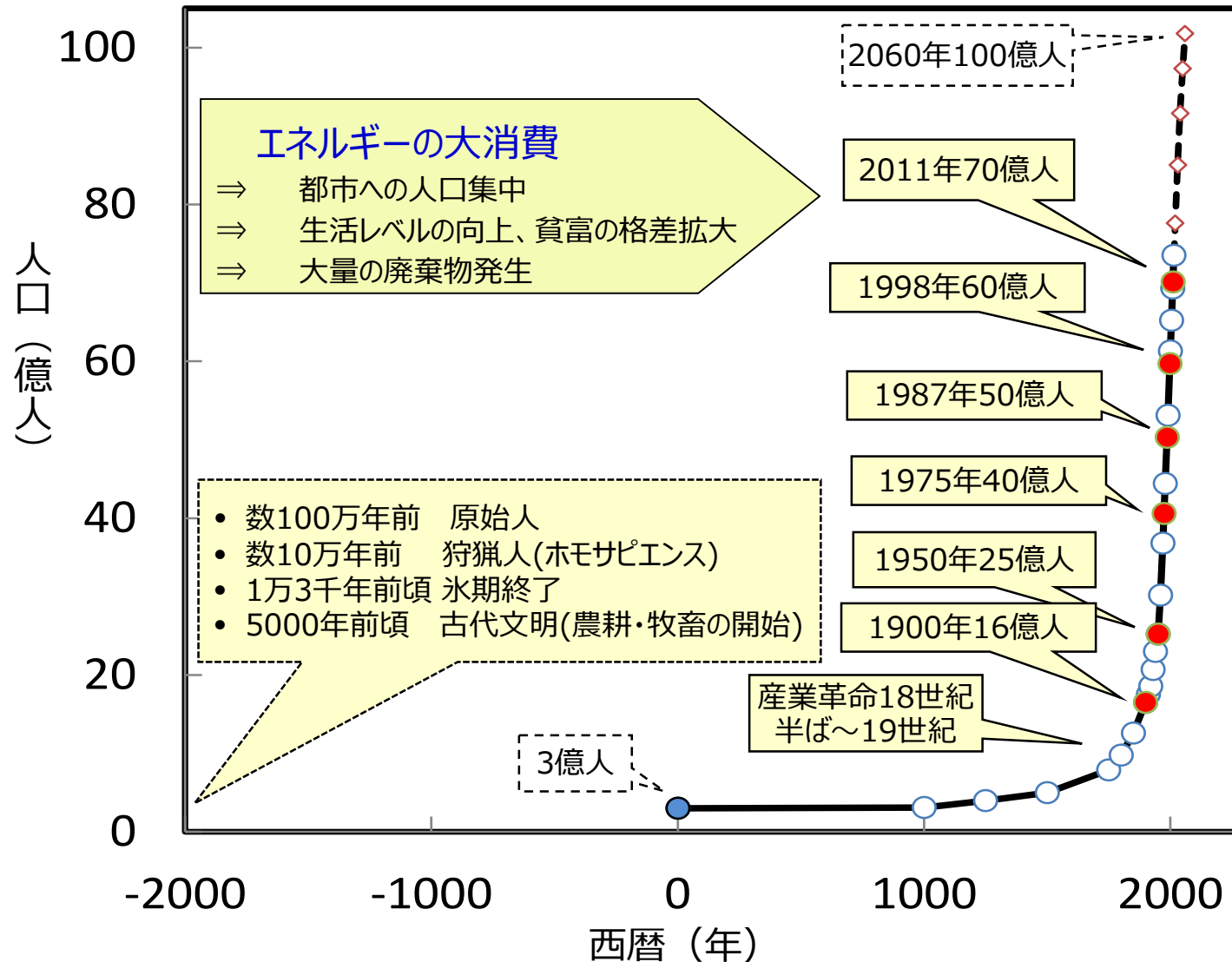
第1章 放射性廃棄物と社会

社会は廃棄物をどう扱ってきたか

- 1 .1 廃棄物の管理の基本的考え方
- 1 .2 廃棄物と環境
 - 1 .2 .1 地球環境と生物の進化
 - 1 .2 .2 文明の発展と環境負荷
 - 1 .2 .3 環境汚染
 - 1 .2 .4 汚染者支払いの原則
 - 1 .2 .5 予防原則
 - 1 .2 .6 持続可能性
- 1 .3 廃棄物の処分を巡る慣行：条約や法令および処分施設
 - 1 .3 .1 バーゼル条約
 - 1 .3 .2 ロンドン条約
 - 1 .3 .3 スーパーファンド法
 - 1 .3 .4 廃棄物の最終処分場
- 1 .4 放射性廃棄物の管理
 - 1 .4 .1 放射性廃棄物の発生
 - 1 .4 .2 放射性廃棄物の発生源による分類
 - 1 .4 .3 放射性廃棄物の危険性
 - 1 .4 .4 放射性廃棄物管理の考え方
 - 1 .4 .5 放射性廃棄物の処分の技術的段階
- 1 .5 参考文献

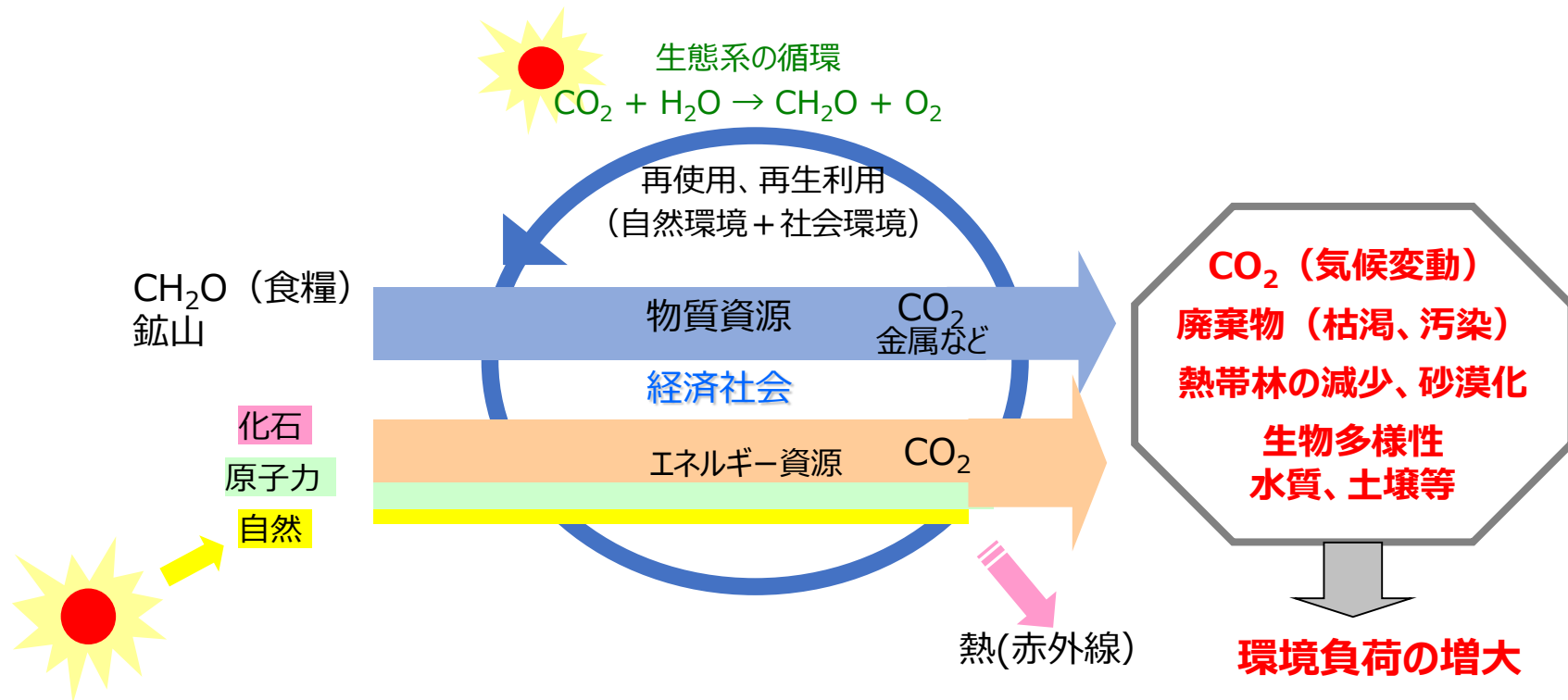
世界の人口の推移

(図1.2-2)



出典：国連人口部「World Population Prospects: The 2015 Revision」(2016年)、同「The World at Six Billion」(1999)、他

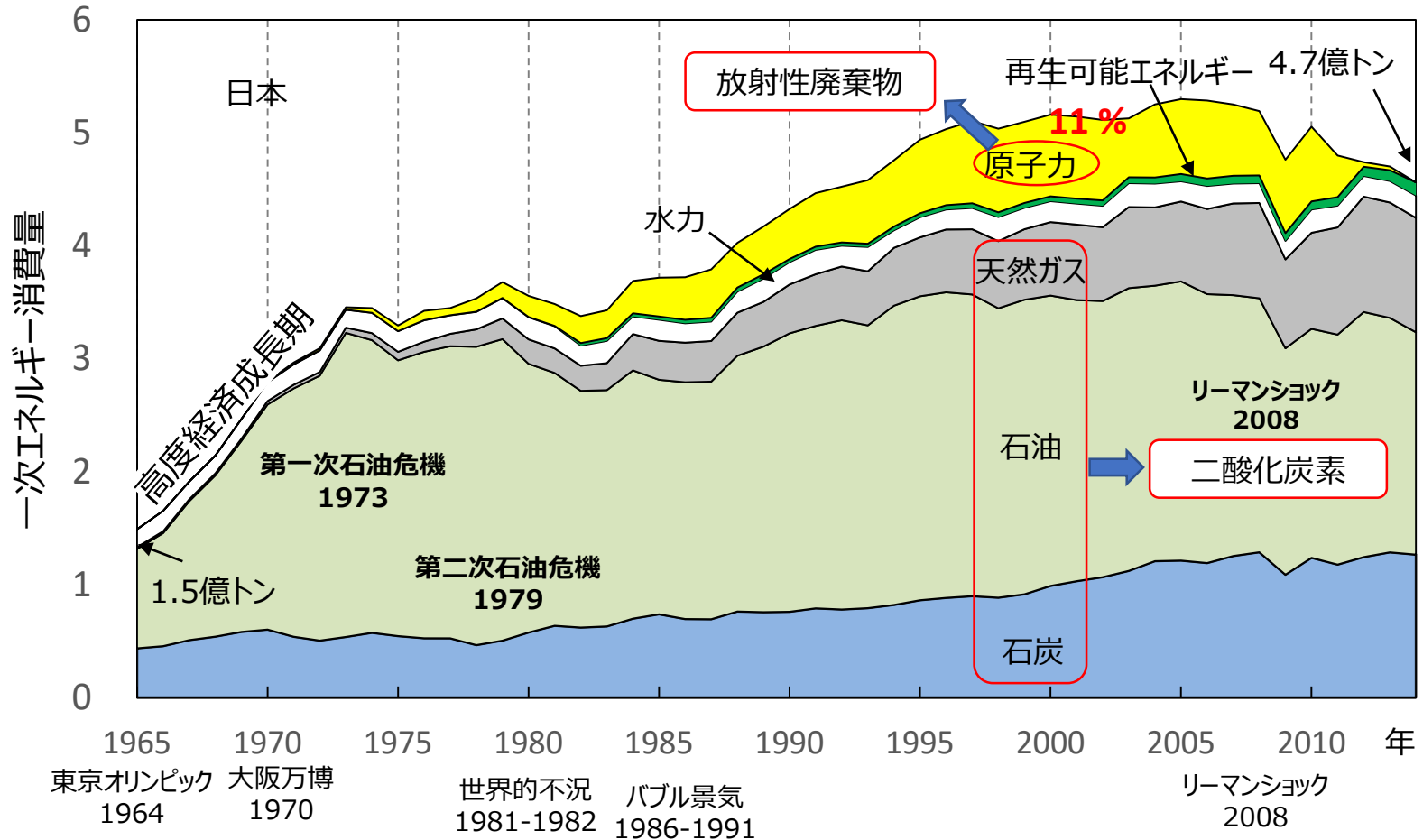
社会活動に伴う物質の流れの肥大化による地球全体での 資源・環境問題(環境による浄化の限界)



1.3万年前	最終氷期の終結、狩猟採集生活 → オーストラリア、ニューギニアの大型動物、アメリカ大陸のマンモスの絶滅
B.C.11,000 ~A.D.1,500	農耕、家畜、冶金、人口の密集と複雑な政治構造 → 戦争、伝染病、砂漠化 (気候変動: メソポタミアなど、乱伐: イースター島など)
A.D.1800~	産業革命 → 化石エネルギーの利用、人口の爆発的増加、科学技術による資源、エネルギーの大量利用 → 公害、地球規模の環境問題、資源の枯渇

エネルギー資源：日本の一次エネルギー供給実績 (図1.2-4)

石油換算億トン(TOE) 1 TOE = 10^7 kcal = 41.87 GJ



一次エネルギー全体のうち約40%が電力として使われていて、そのうち30%弱が原子力だった

あらゆる製品やサービスはエネルギーを投入して生産され、人は全てその製品やサービスを利用して生きている



放射性廃棄物や二酸化炭素はその廃棄物

人間活動にエネルギーは必須 ⇒ その廃棄物の発生も不可避

廃棄物を巡る社会の動き

(分業化社会の経済取引の外にあるものとしての環境：環境は誰のもの)

都市の発達とともに、廃棄物やごみは発生源の近くでの処分が不可能となった。

- 都市人口の増大
- 都市機能の集約による環境基準や規制の強化
- 処分費用の高騰
- NIMBY (Not In My Back-Yard) 症候群
- 分業の高度化 (受益者と廃棄物の分離) による責任の所在の不透明化



廃棄物の越境、不法投棄が事件として顕在化(国際条約等)

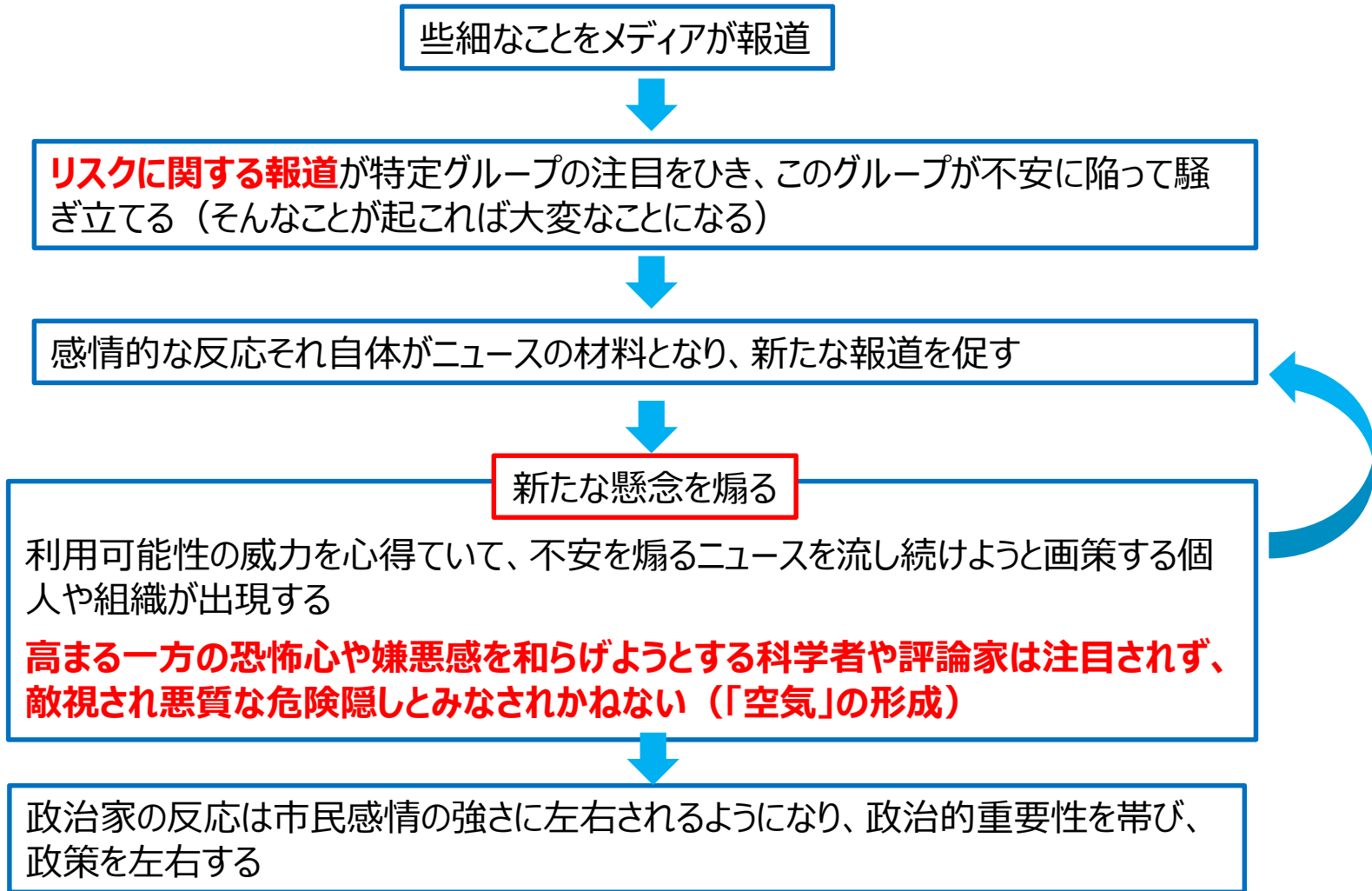
- バーゼル条約：有害廃棄物越境問題
- ロンドン条約：有害廃棄物海洋投棄問題
- 米国スーパーファンド法：有害廃棄物で汚染された土地の問題

環境防護の原則

- 持続可能性の原則 (The Sustainability Principle)
- 汚染者支払いの原則 (The Polluter Pays Principle)
- 予防原則 (The Precautionary Principle)

システム1思考の弊害:利用可能性カスケード (利用可能性ヒューリスティックス:すぐ思いつくことは起こり易いと思う)

些細なことをメディアが報道することから始まり、一般市民のパニックや大規模な政府介入に発展する



C. R. Sunstein: Risk and Reason(2002) → ラブ・キャナル事件は利用可能性カスケードによる健康被害の過大視

廃棄物問題は社会の問題

社会の経済成長とともに廃棄物の環境への侵入が顕在化
廃棄物の侵入を犯罪として拒否する環境意識の高まりが規制として実現
安易な投棄積み上げ処分(Open Dumps)の失敗



- **廃棄物越境 = 投棄積み上げ処分 = 汚染（廃棄物のリスクの押し付け合い）**
 - **廃棄物処分（廃棄物問題の工学的解決）**
- 両者の感性的同一視によるNIMBY問題**

廃棄物問題の解決に対する技術の貢献

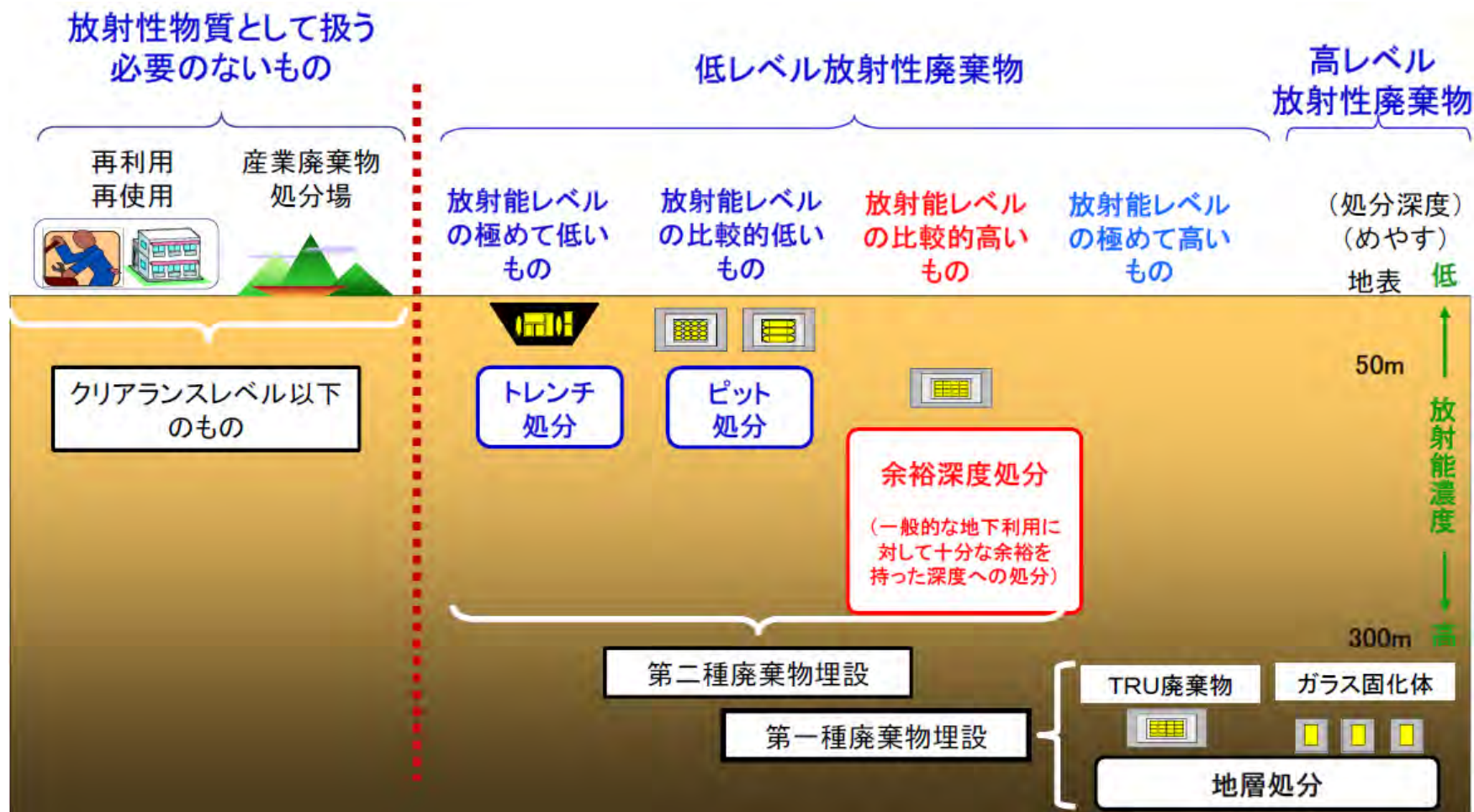
1. まず廃棄物そのものの発生を減らし(Reduce)
2. それでも出てくる廃棄物は、部品、製品を再利用(Reuse)または
廃棄物を再資源化 (Recycle)し、

3. それが不可能なものは最適処分を行う

4. そして、廃棄物による汚染には浄化措置を実施する

有害廃棄物が発生してから最終処分されるまで「揺りかごから墓場まで」を管理規制する

廃棄物は現在および将来の国民の健康と環境への悪影響を最小限にとどめるよう
取り扱われるべきである



規制委員会 廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合
資料1-1 第二種廃棄物埋設に係る規制制度の概要

第2章 核反応と放射線

2.1 原子の構造

2.1.1 物質, 原子, 原子核の構造

2.1.2 電磁気力と化学エネルギー

2.1.3 核力と核エネルギー

2.1.4 宇宙における元素の合成

2.2 核反応

2.2.1 放射性崩壊

2.2.2 崩壊則

2.2.3 崩壊連鎖

2.2.4 放射性核種の生成

2.2.5 燃焼計算

2.3 放射線と物質の相互作用

2.3.1 概要

2.3.2 アルファ粒子の吸収

2.3.3 電子の吸収

2.3.4 ガンマ線の吸収

2.4 参考文献

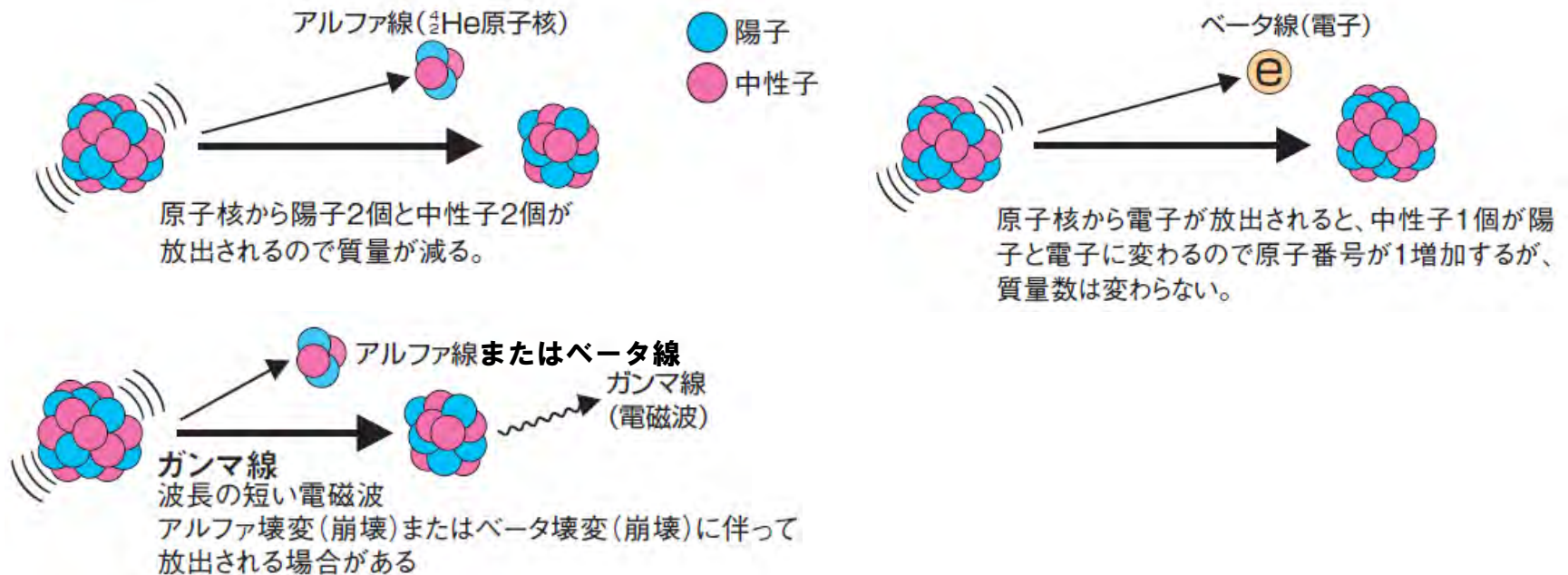
放射線：高エネルギーkeV～MeVの粒子線、電磁波

- 核反応（原子核の変化）：自然の地球上では起こらない（原子核のプラスの電気同士の反発が強いいため）

ビッグバン、超新星爆発、恒星の中（太陽の中）で、宇宙線により起こる。

人工的な元素合成（中性子の吸収⇒核分裂など）で起こる。

- 陽子と中性子の数が釣り合いな場合、原子核は不安定になる。
- 不安定な原子核が壊れて、より安定な原子核に変わる時放射線が放出される。
- 放射線（粒子線：アルファ線、ベータ線、中性子線、電磁波：ガンマ線、エックス線）



放射能の単位:ベクレル

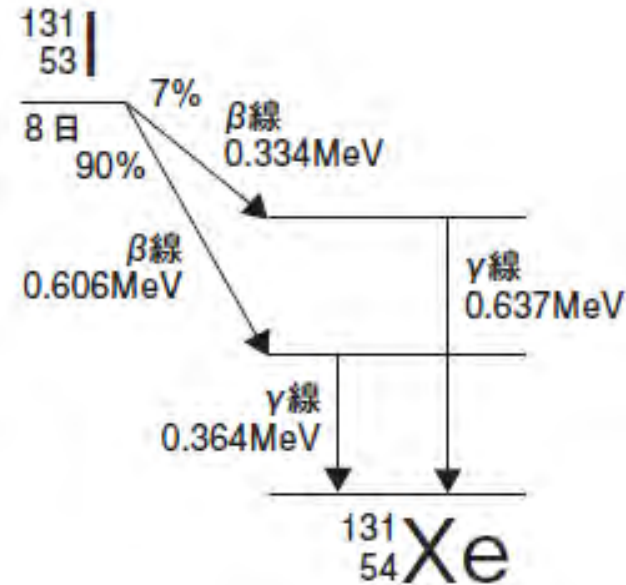
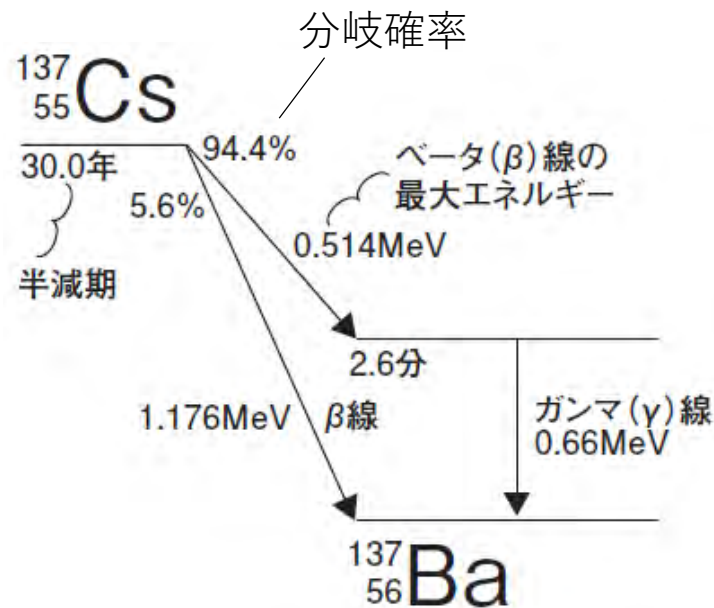
ベクレル (Bq)

放射性物質が放射線を出す能力を表す単位 (放射能 = 崩壊現象)

1ベクレルとは、1秒間に一つの原子核が壊変(崩壊)※することを表す。

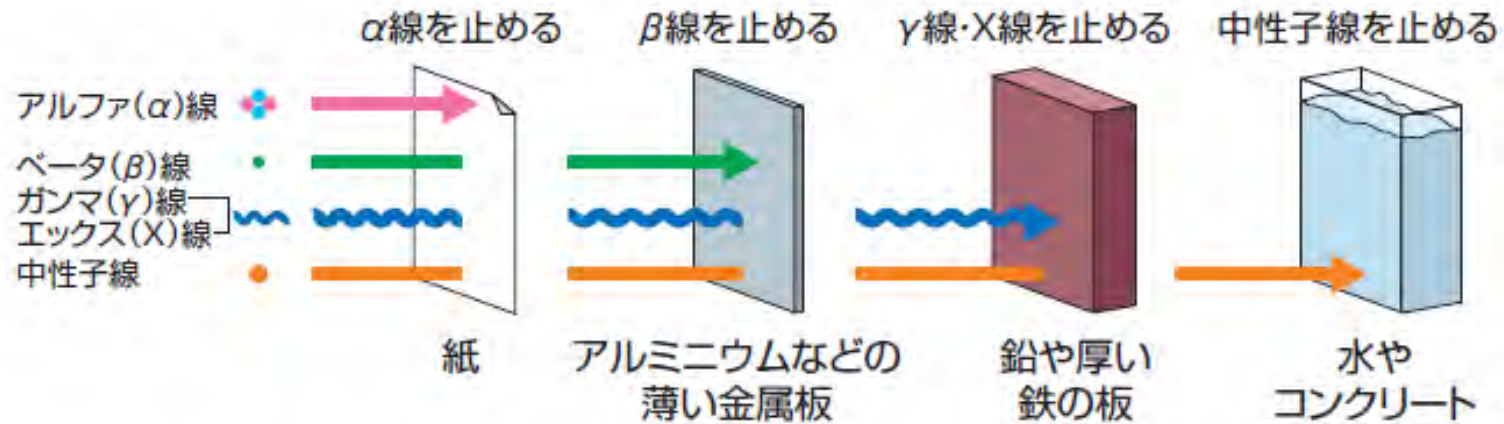
例えば、370ベクレルの放射性カリウムは、毎秒370個の原子核が壊変して放射線を出しカルシウムに変わる。

※壊変(崩壊)とは原子核が放射線を出して別の原子核になる現象のこと。



一つの崩壊に伴って何本かの放射線が出る

放射線の種類と透過力



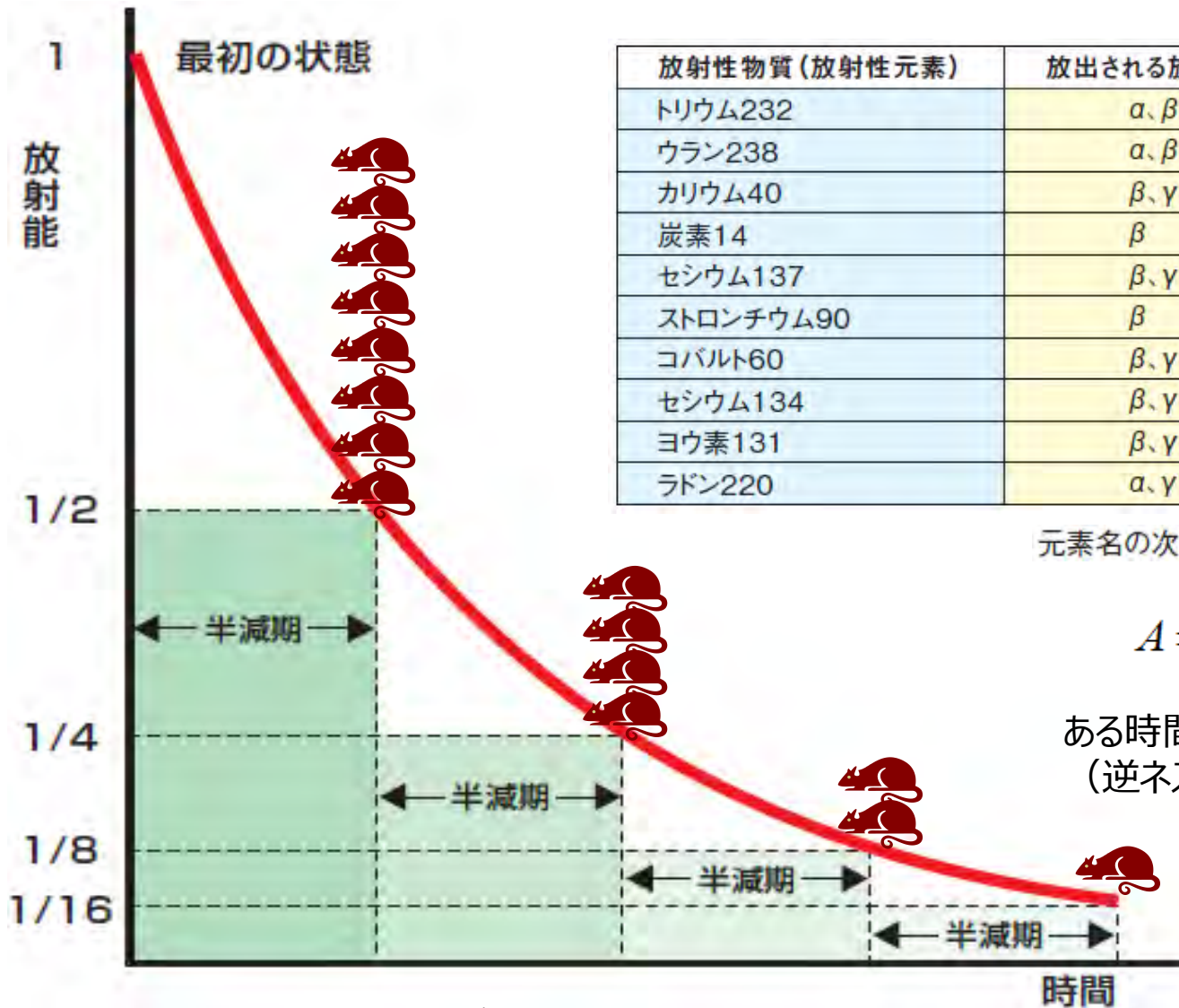
- アルファ線＞ベータ線＞ガンマ線の順により多くの電子を弾き飛ばす。
中性子線は電子を弾き飛ばさないで原子核と衝突する。
- 電子がたくさんある物質（原子番号が大きく密度の高い物質）ほど多くの衝突が起こり（透過しにくく）、より多くの電子が弾き飛ばされる（電離が起こる）

放射線が止まる＝放射線のエネルギーが物質に吸収（付与）される（LET）

放射線	エネルギー /MeV	最大飛程		水中の平均LET 値 keV μm^{-1}
		空気中/cm	水中/mm	
電子	1	405	4.1	0.24
	3	1400	15	0.20
	10	4200	52	0.19
ヘリウム	1	0.57	0.0053	190
	3	1.7	0.017	180
	10	10.5	0.11	92
核分裂片	100	2.5	0.025	3300

放射能＝放射線（危害のもと）を出す能力

放射能は半減期ごとに倍々で減衰する



放射性物質（放射性元素）	放出される放射線（注2）	半減期
トリウム232	α 、 β 、 γ	141億年
ウラン238	α 、 β 、 γ	45億年
カリウム40	β 、 γ	13億年
炭素14	β	5730年
セシウム137	β 、 γ	30年
ストロンチウム90	β	28.7年
コバルト60	β 、 γ	5.3年
セシウム134	β 、 γ	2.1年
ヨウ素131	β 、 γ	8日
ラドン220	α 、 γ	55.6秒

元素名の次に来る数字は質量数

$$A = A_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{t/t_{1/2}}$$

ある時間ごとに半分に減っていく
（逆ネズミ算）

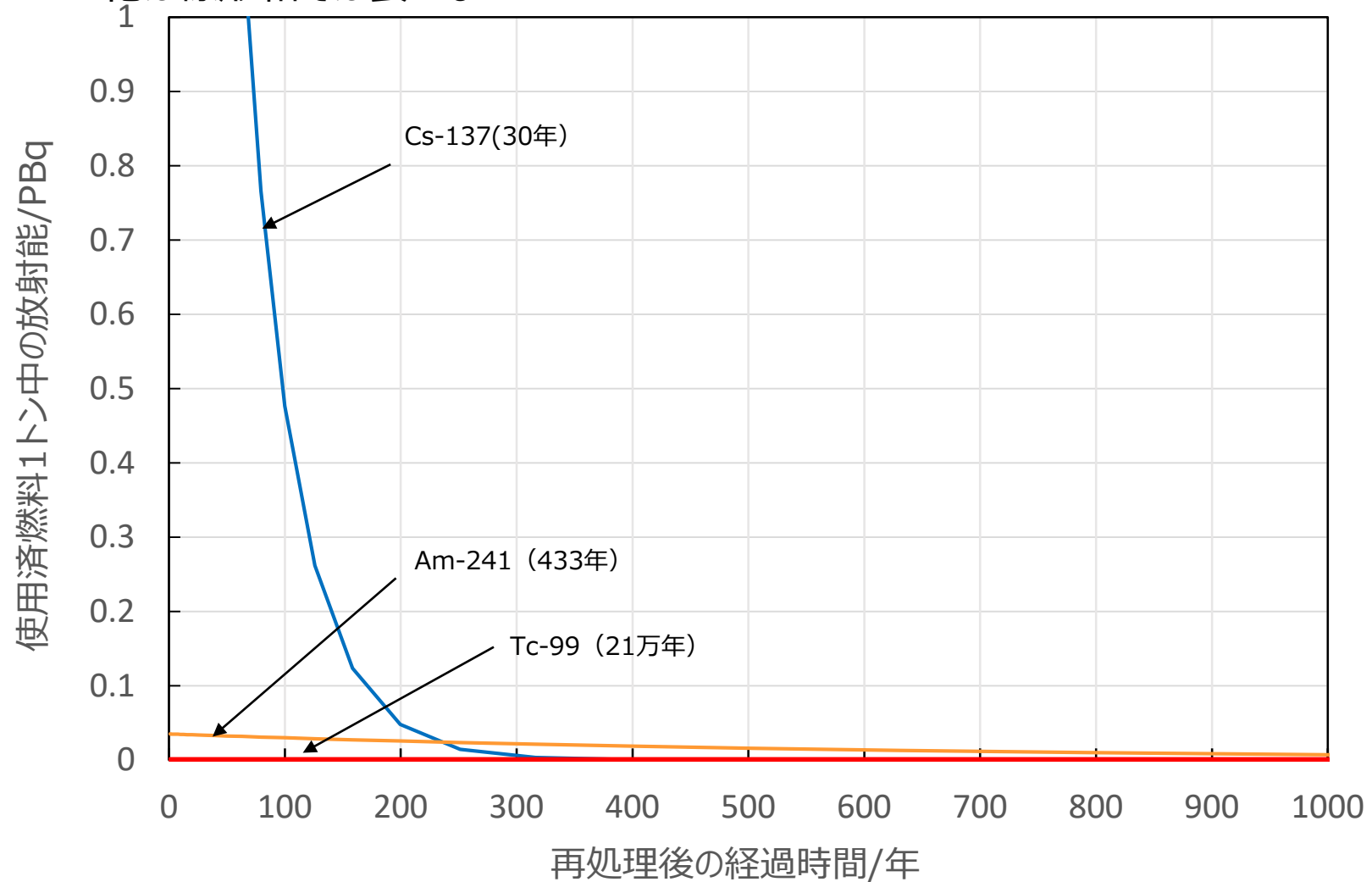
半減期を単位とした時間軸

半減期は核種により
大きく異なる

放射能＝放射線（危害のもと）を出す能力

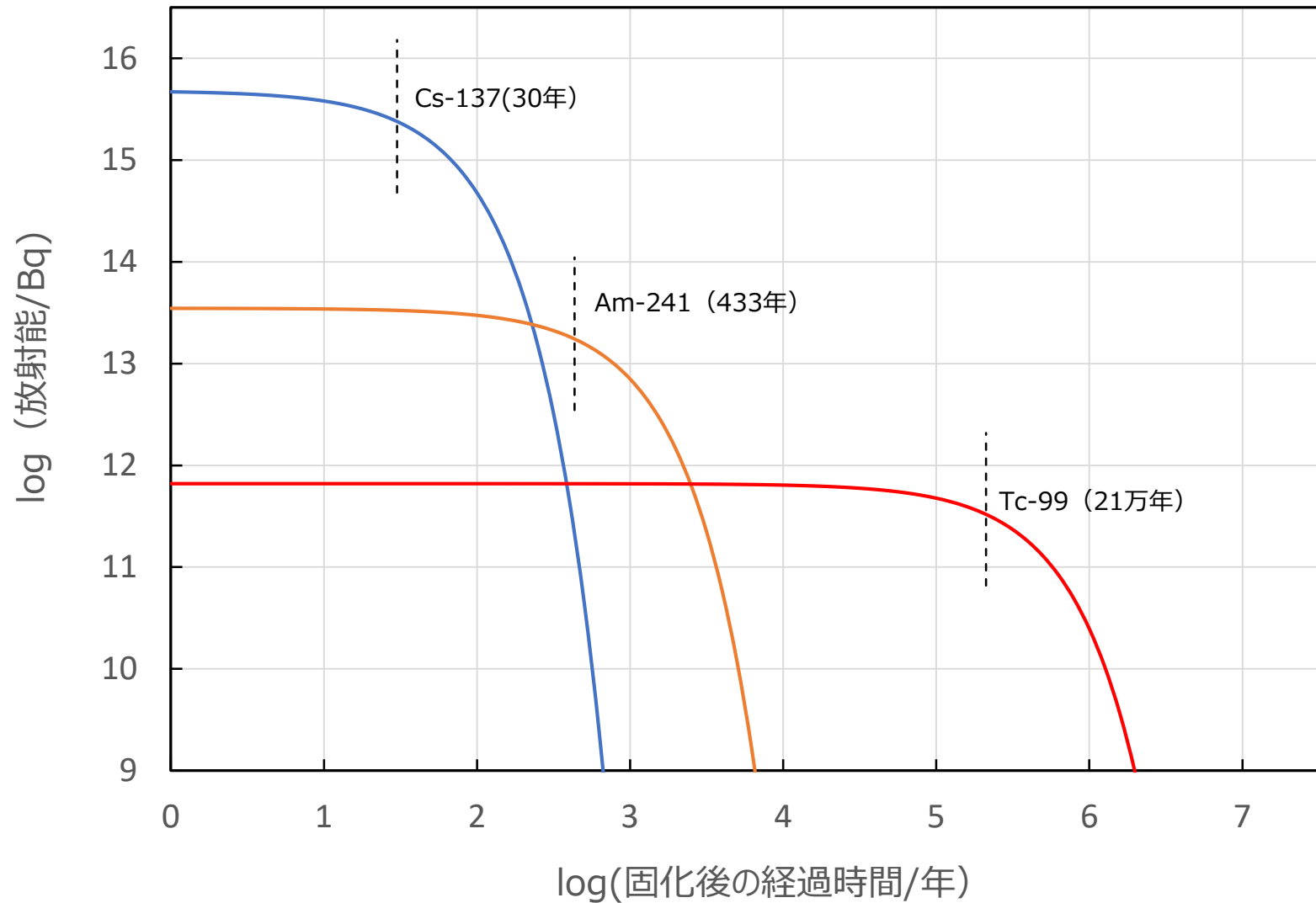
放射能は半減期ごとに倍々で減衰する

放射能の減衰：核種ごとに大きく異なる時間軸で倍々で減衰する放射能の変化は線形軸では表せない



放射能の減衰

核種ごとに大きく異なる時間軸で倍々で減衰する放射能の変化
→両対数軸での表記

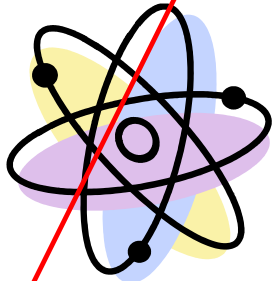


第3章 放射線の健康影響と放射線防護

- 3.1 バックグラウンド放射線と放射線の健康影響
- 3.2 放射線防護に用いられる諸量
 - 3.2.1 放射線によるエネルギー付与と電離
 - 3.2.2 身体中において定義される線量（防護量）
 - 3.2.3 計測のために定義される様々な計測量（実用量）
- 3.3 照射の生物学的影響
 - 3.3.1 放射線によるDNA 損傷と放射線障害の発生
 - 3.3.2 確定的影響
 - 3.3.3 確率的影響
- 3.4 規制勧告と防護基準
 - 3.4.1 被ばく状況
 - 3.4.2 正当化の原則
 - 3.4.3 防護の最適化の原則
 - 3.4.4 線量限度の適用の原則
- 3.5 参考文献

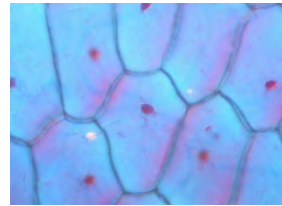
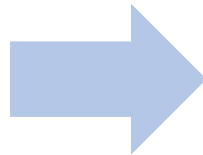
放射線の生物に対する影響

酵素代謝、環境や食品中の発がん物質、たばこウイルス、生活習慣、紫外線、自然放射線



原子（原子核、電子）

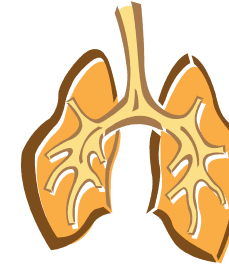
1 個の細胞は $10^{15} \sim 10^{18}$
個の原子でできている



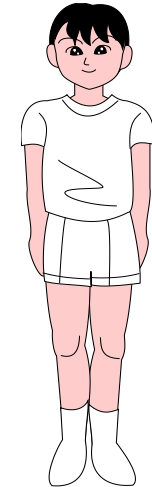
細胞、DNA

人は 6×10^{13} 個の細胞
でできている

細胞分裂



臓器、組織



膨大な数の原子・分子を組み合わせて細胞を作り
膨大な数の細胞を組み合わせて組織・臓器を作っている。
組み合わせる = 結合を壊したり結びつけたりしている。
1 か月から 1 年で各組織の細胞は入れ替わっている。

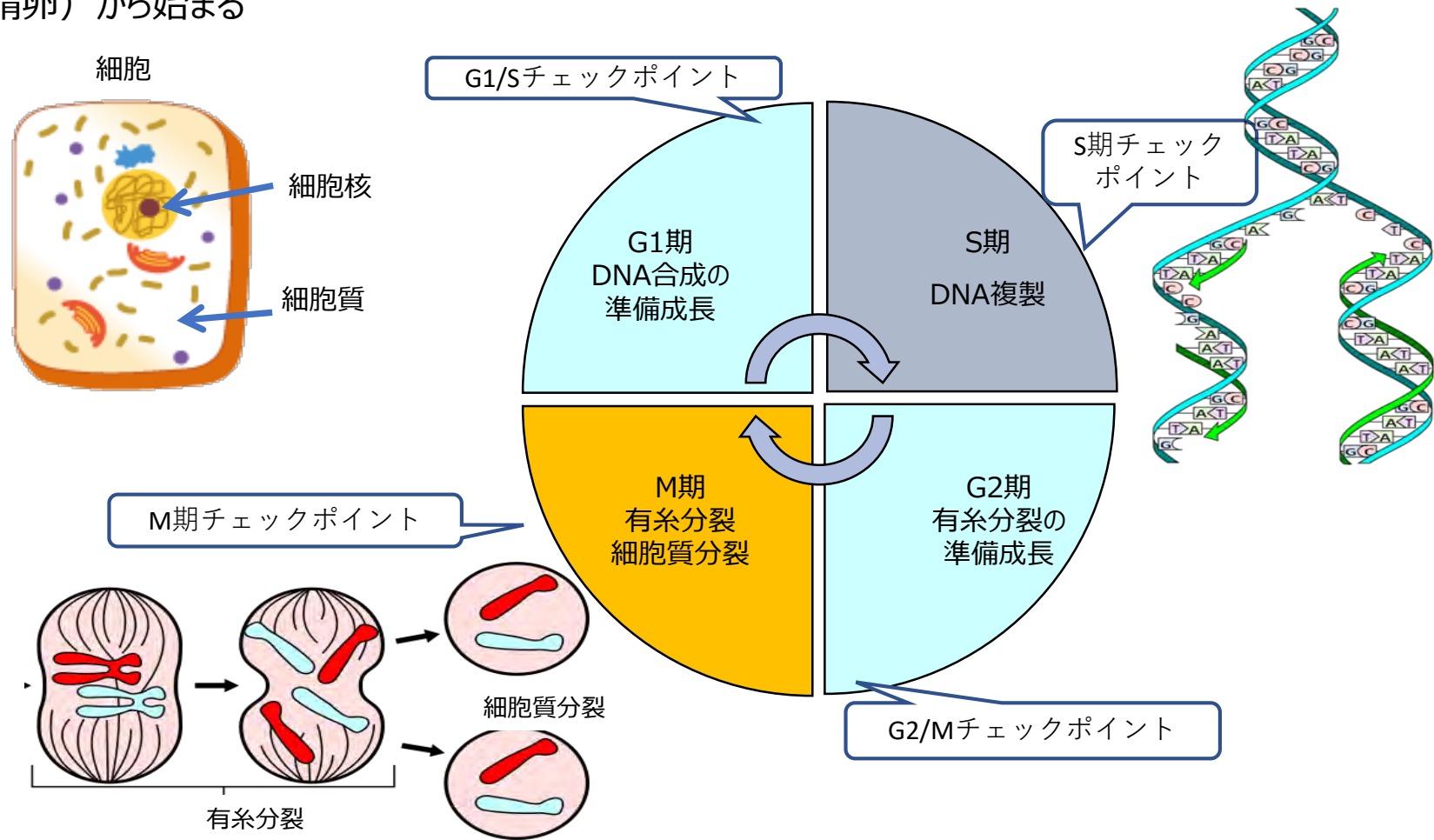
1 mGyで各細胞あたり平均して 1 本の放射線が通る。

ある確率で細胞に傷がつく

化学反応（質量作用の法則） = Law of Mass Action, Mass = 多数, かなりの数 とは違う！
 $1 \text{ mol} = 6 \times 10^{23} \text{ 個}$

人体は最初ただ一個の細胞
(受精卵) から始まる

細胞分裂とDNA複製の様子

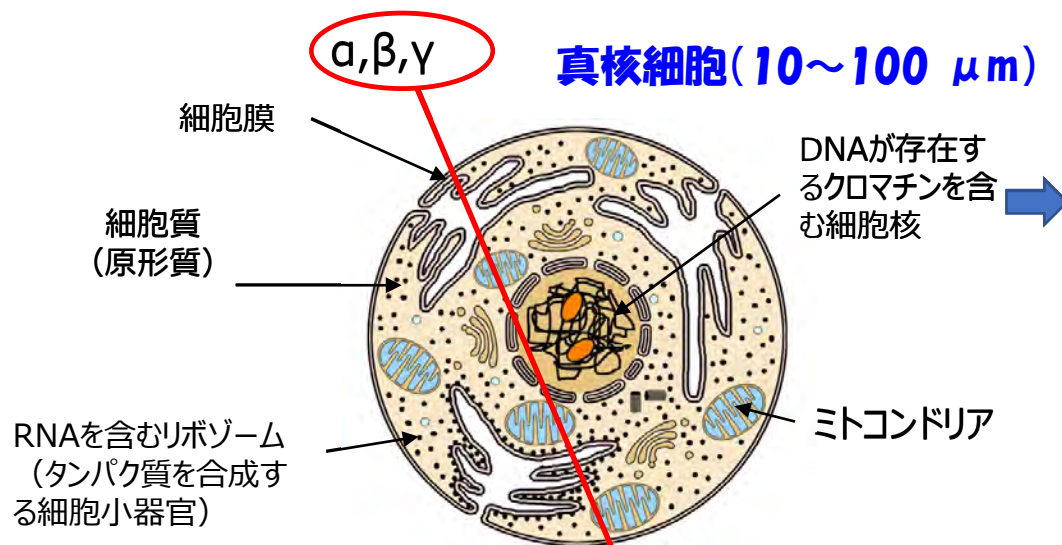


個体の発生と成長：細胞の増殖が終わると細胞の分化が始まり，一定の機能を持つ細胞となり，組織形成，器官形成に至り，必要な機能をはたして死滅する。

生涯を通じて機能する細胞：神経，筋肉細胞など

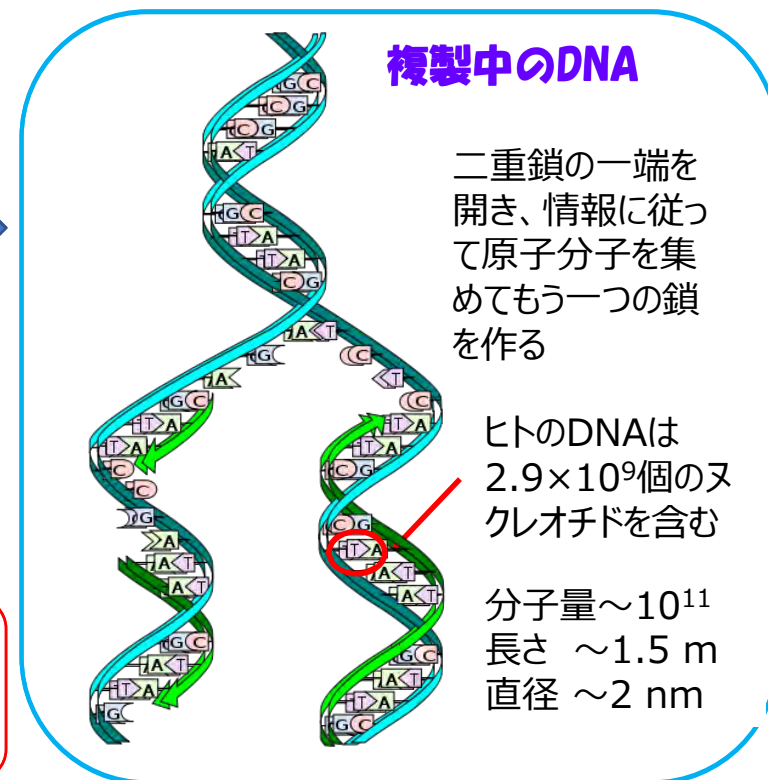
消耗され入れ替わる細胞（幹細胞＝分裂能を有する細胞が補う）：皮膚(1か月),赤血球(120日),小腸上皮(数日)など

放射線の健康影響：DNA鎖の切断



1 Gyの低LET線量 ⇒ 細胞あたり1000本通過 ⇒ 一部または全部が吸収

- 間接作用： $\cdot\text{OH}$, e_{aq}^- , H_2O_2 などを通じて
- 直接作用：DNA鎖の切断

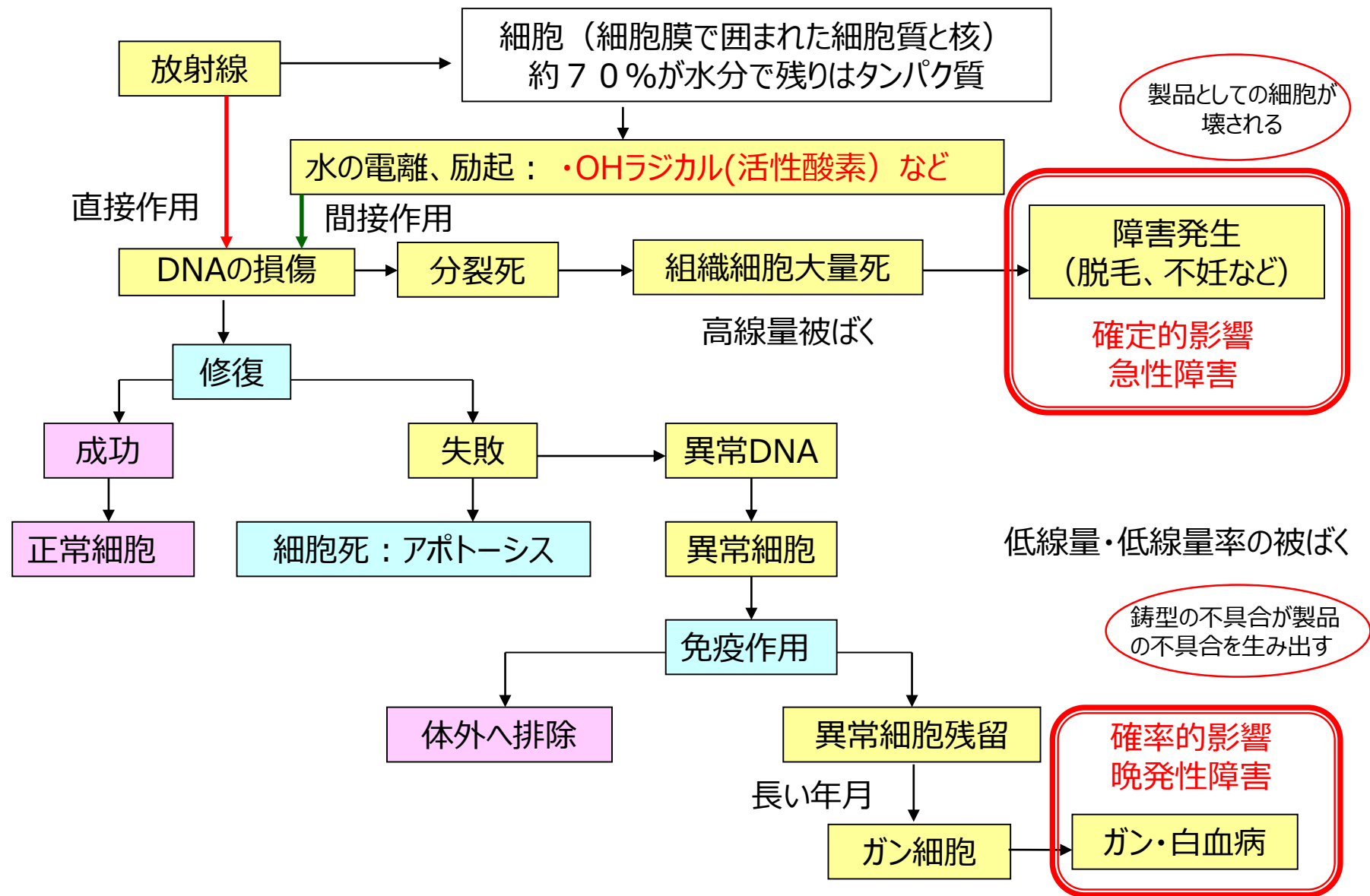


単一の放射線量子により1個の細胞核に引き起こされる損傷

放射線	飛程単位長さ当たり失う平均エネルギー(LET)	イオン化の平均数	切断の平均数	
			DNA一本鎖	DNA二本鎖
γ線	0.2～35 keV/μm	70(1～1,500)	1(0～20)	0.04(0～少し)
α粒子	～200 keV/μm, 数千イオン対/μm	23,000(1～100,000)	200(0～400)	35(0～100)

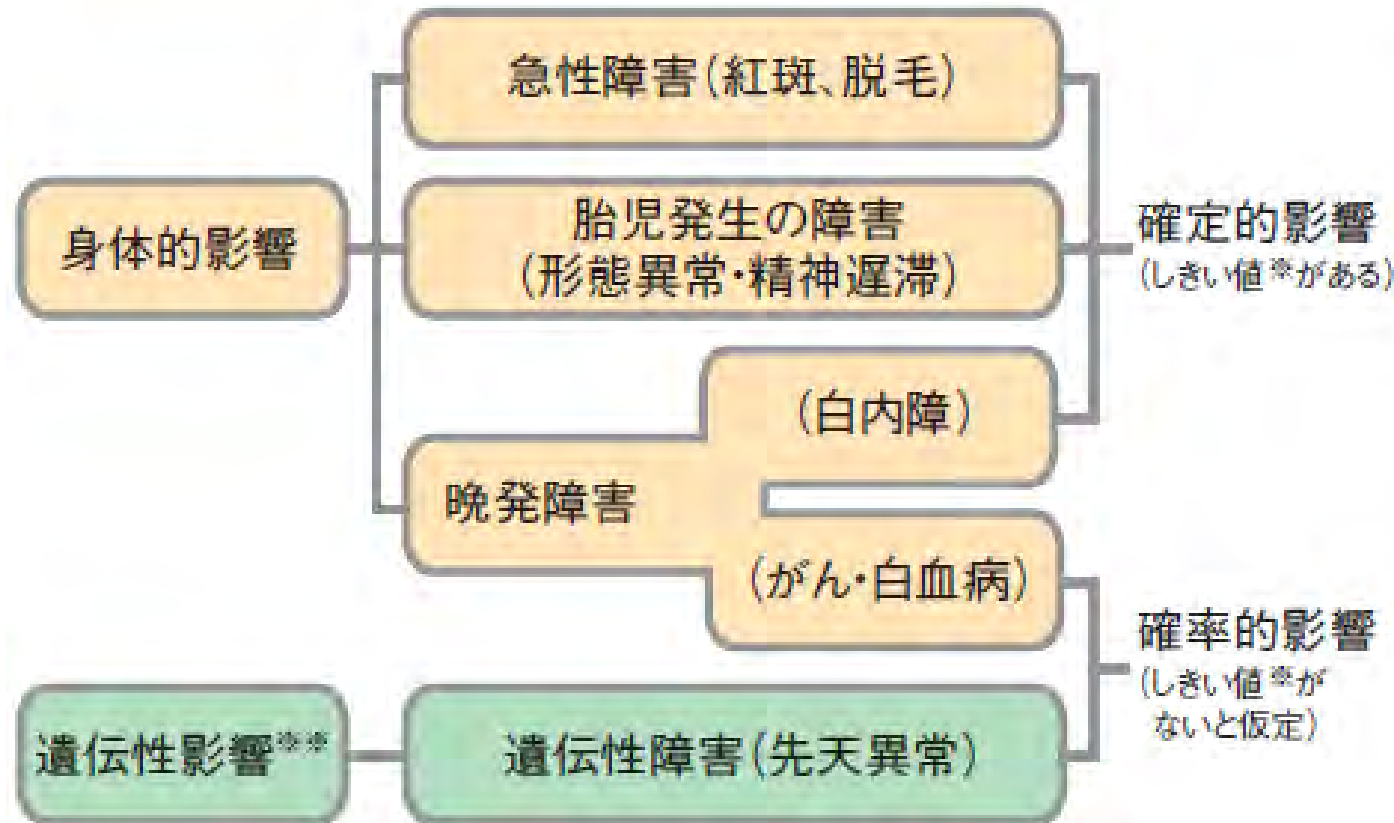
修復に要する時間：一本鎖（～10分）、二本鎖（数時間）
染色体異常は二本鎖があるときのみ起こる

放射線の生物影響：放射線効果と修復作用



DNAの損傷はDNA複製ミスと細胞内の反応性環境、毒物、紫外線、放射線などにより、1日1細胞あたり約100万回発生し、人間はそれをほとんど正常に修復して生きている。

放射線による人体への影響



- ❑ 確定的影響：組織細胞が大量に壊れ、細胞の生産が間に合わない
- ❑ 確率的影響：DNAまたは細胞レベルでの不具合が残り、これが修復をすり抜けて不具合な組織に成長する。

** 遺伝性影響が人に現れたとする証拠は、これまでのところ報告されていない。

放射線の健康影響：ベクレルからシーベルトへ

ベクレル (Bq)

放射性物質が放射線を出す能力を表す単位

1ベクレルとは、1秒間に一つの原子核が壊変(崩壊)*することを表す。

例えば、370ベクレルの放射性カリウムは、毎秒370個の原子核が壊変して放射線を出しカルシウムに変わる。

※壊変(崩壊)とは原子核が放射線を出して別の原子核になる現象のこと。



放射線



キロ (k) = 10^3 = 千倍

メガ (M) = 10^6 = 百万倍

ギガ (G) = 10^9 = 十億倍

グレイ (Gy)

放射線のエネルギーが物質や人体の組織に吸収された量を表す単位

放射線が物質や人体に当たると、もっているエネルギーを物質に与える。1グレイとは、1キログラムの物質が放射線により1ジュール*のエネルギーを受けることを表す。

※ジュール: エネルギーの大きさを表す単位

シーベルト (Sv)

人体が受けた放射線による影響の度合いを表す単位

放射線を安全に管理するための指標として用いられる。

ミリ (m) = 10^{-3}
= 千分の一

マイクロ (μ) = 10^{-6}
= 百万分の一

放射線の種類、エネルギーを与えられた臓器の種類による

吸収線量と等価線量、実効線量

- 物理的線量（グレイ：Gy）（1 Gy = 1 J/kg = 100 Rad）
- 吸収線量：物質に吸収されたエネルギー 1 Gy = 1 J/kg
- 人体、組織、臓器への影響を表すための線量（シーベルト：Sv）
 等価線量 = 平均吸収線量 × 放射線荷重係数（ w_R ）
 実効線量 = Σ 等価線量 × 組織荷重係数（ w_T ）

◆放射線加重係数

放射線の種類	放射線加重係数
光子（ガンマ線、エックス線）	1
電子（ベータ線）	1
陽子	2
アルファ粒子、核分裂片、重い原子核	20
中性子線	2.5～20

◆組織加重係数

組織・臓器	組織加重係数	組織・臓器	組織加重係数
赤色骨髄	0.12	食道	0.04
結腸	0.12	甲状腺	0.04
肺	0.12	唾液腺	0.01
胃	0.12	皮膚	0.01
乳房	0.12	骨表面	0.01
生殖腺	0.08	脳	0.01
膀胱	0.04	残りの 組織・臓器	0.12
肝臓	0.04		

内部被ばく量の計算(摂取した放射能の量から実効線量への換算)

実効線量係数：公衆の単位摂取量あたりの預託線量の例 (μSv/Bq)

核種	半減期	年齢/歳					
		< 1	1-2	2-7	7-12	12-17	>17
I-131	8.04 日	0.18	0.18	0.10	0.052	0.034	0.022
Cs-137	30.0 年	0.021	0.012	0.0096	0.010	0.013	0.013
Cs-134	2.06 年	0.026	0.016	0.013	0.014	0.019	0.019

公衆、作業者の摂取、吸入について核種ごとの値が表にまとめられている
実効半減期 (T_e)、体内での挙動を考慮

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b} \quad T_p : \text{物理学的半減期}, T_b : \text{生物学的半減期}$$

- ❑ 200Bq/kgのセシウム137を含む1リットルの水道水を1年間飲み続けた場合の内部被ばく量は？

➤ $200 \times 1 \times 365 \times 0.013 = 950 \mu\text{Sv} = 0.95 \text{ mSv}$

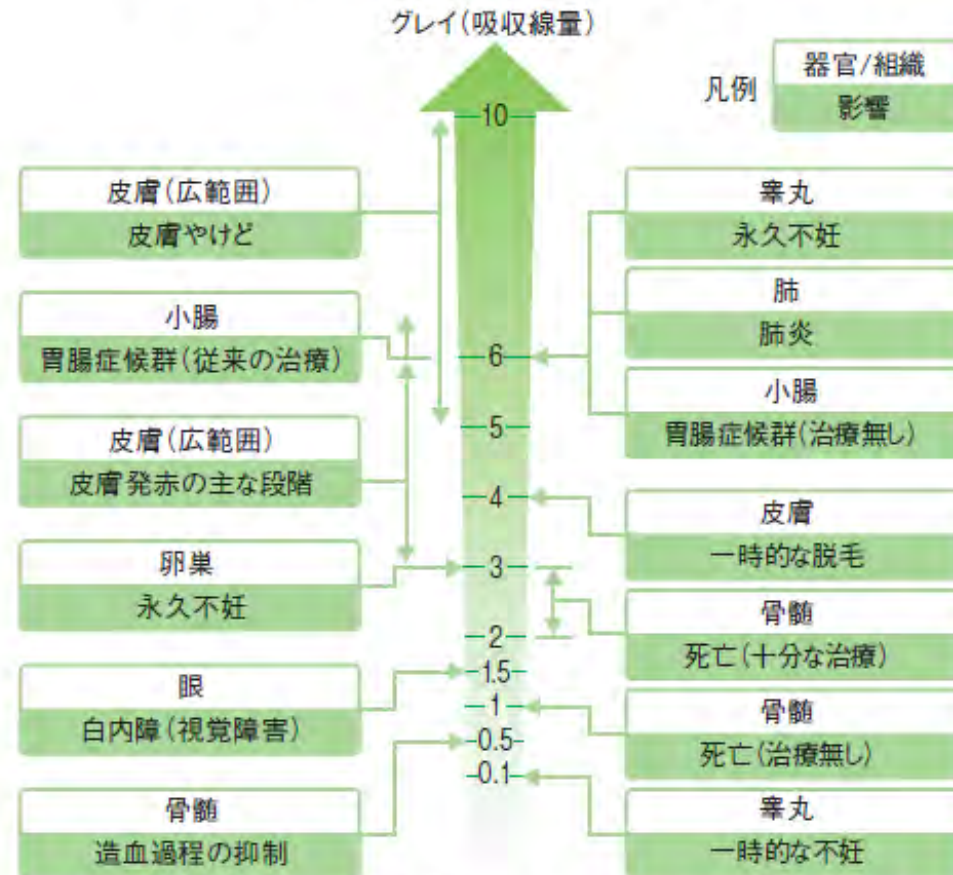
IAEA Safety Standard Series No. GSR Part 3(Interim), Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards(2011)

GSR = General Safety Requirement (一般安全要件)

放射線を受けた時の人体への影響（確定的影響）

- ❑ 組織細胞が大量に壊れ、細胞の再生産が間に合わない
- ❑ しきい値がある

罹患率と死亡率が1%になる予測推定しきい値※



※しきい値:ある作用が反応を起こすか
起こさないかの境の値のこと

出典:ICRP Publication 103, 2007

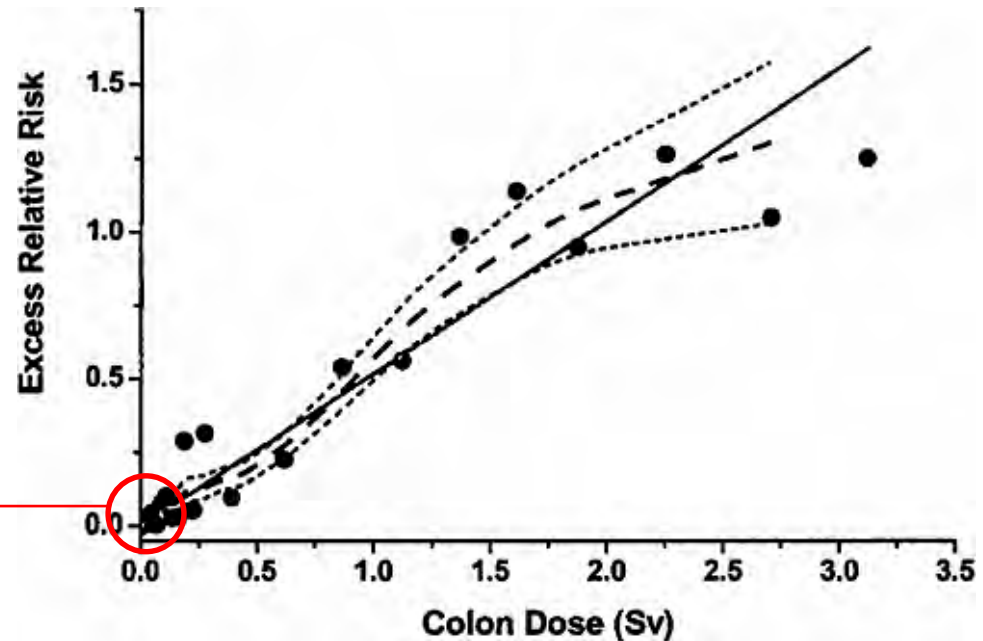
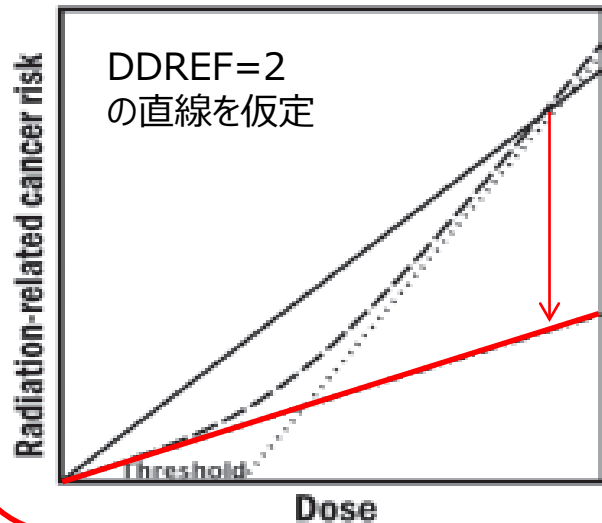
確定的影響が現れるのは0.1 グレイ以上の大量の放射線を受けた時

放射線を受けた時の人体への影響（確率的影響）

放射線影響の疫学調査広島原爆被爆者（総数24万人、生存者14万人、死亡者10万人）についての固形がん過剰リスク

統計からの確率推定ではなく、知識不足をヒューリスティックで推定

防護のためのLNT（しきい線量なし直線仮説）



- 100 mSv以下の低線量の影響を検出することはきわめて難しい。
- しきい値があるかどうか分からない
- 同じ総線量でも低線量率（低い線量を長時間うける場合）の方が影響は小さい。

DDREF(Dose and Dose Rate Effectiveness Factor)

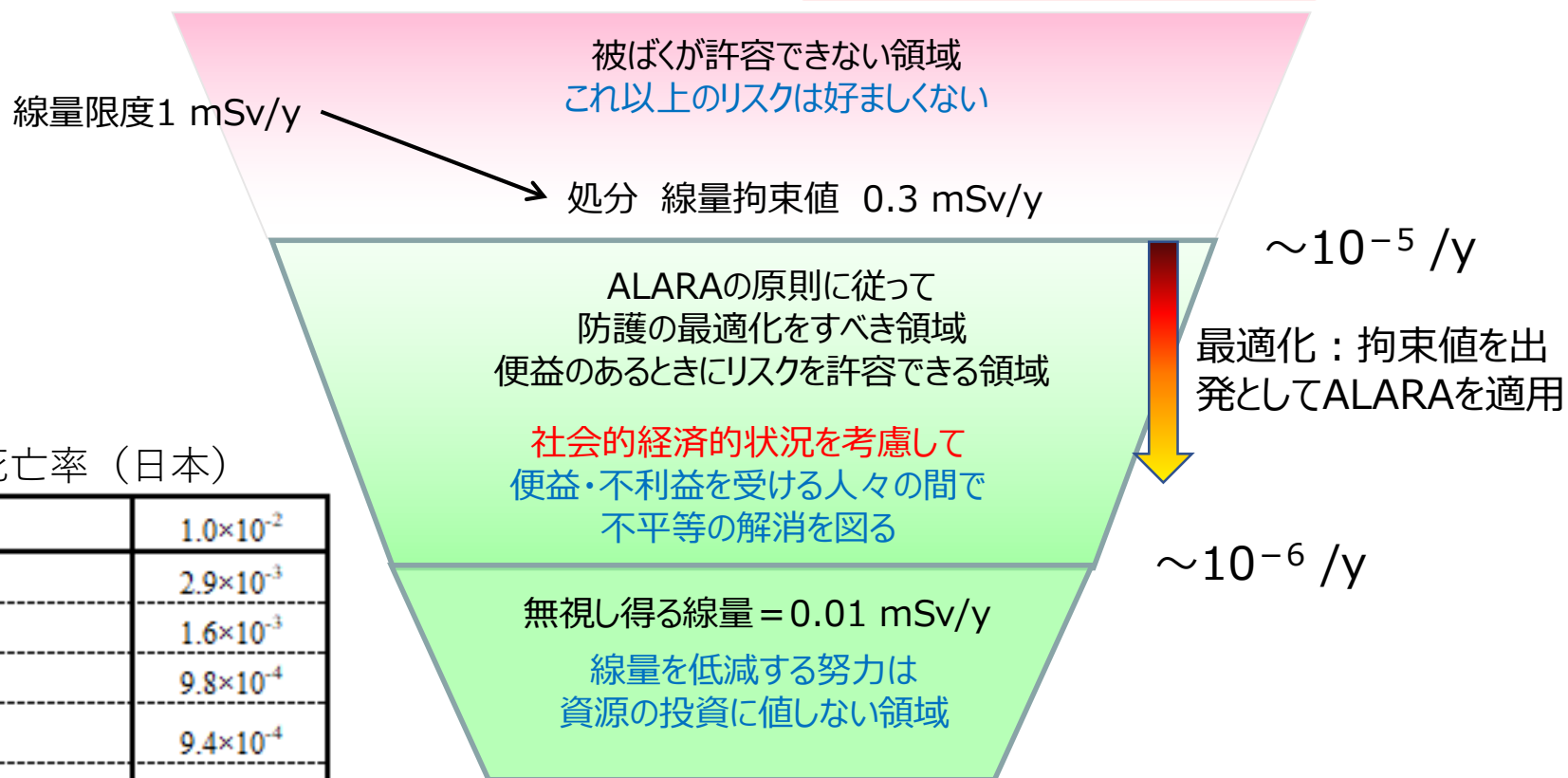
この式を防護のためのよりどころとする

$$\text{致死がんリスク} = 0.055 \times \text{線量(Sv)} (\text{ICRP2007})$$

線量拘束値＝防護の最適化のための出発点

線量でなく、線量を与える行為（線源）を拘束している

規制の対象は人の行為



死因別個人死亡率（日本）

全死因	1.0×10^{-2}
悪性新生物(がん)	2.9×10^{-3}
心疾患	1.6×10^{-3}
肺炎	9.8×10^{-4}
脳血管疾患	9.4×10^{-4}
老衰	5.6×10^{-4}
不慮の事故	3.2×10^{-4}
自殺	2.1×10^{-4}
腎不全	2.0×10^{-4}
慢性閉塞性肺疾患（COPD）	1.3×10^{-4}
大動脈瘤及び解離	1.3×10^{-4}

- 行為の正当化：放射線による損害 < 便益
- 防護の最適化：被ばくは合理的にできる限り低く
- 線量限度：ある個人が受ける被ばく線量の制限

放射線の国際基準

ICRP（国際放射線防護委員会） Pub.103（2007）の防護基準（勧告）

被ばくをもたらす状況		めやすとなる線量
緊急時被ばく状況	事故等により混乱しているとき	事故による急性または年あたりの被ばくを20～100ミリシーベルトになるよう抑える
現存被ばく状況 （事故後の復旧時）	事故の後など既に被ばくをもたらす放射線源があるとき	急性または年あたりの被ばくを1～20ミリシーベルトになるよう抑える
計画被ばく状況 （平常時）	原子力、放射線の利用で住民に被ばくを与えるかもしれない事業を計画するとき	公衆は年間1ミリシーベルト、作業従事者は5年で100ミリシーベルトを超えず（ 線量限度 ）、出来る限り被ばくが低くなるようにする（ 目標 ）

その行為が社会に導入されて、全体として便益＞リスクとなるとしても、一部の人が不当に高いリスクを被るべきではない

事業の設計施工と操業時の管理により、環境に放出される放射性物質を抑制し、公衆の被ばくをできる限り低減する

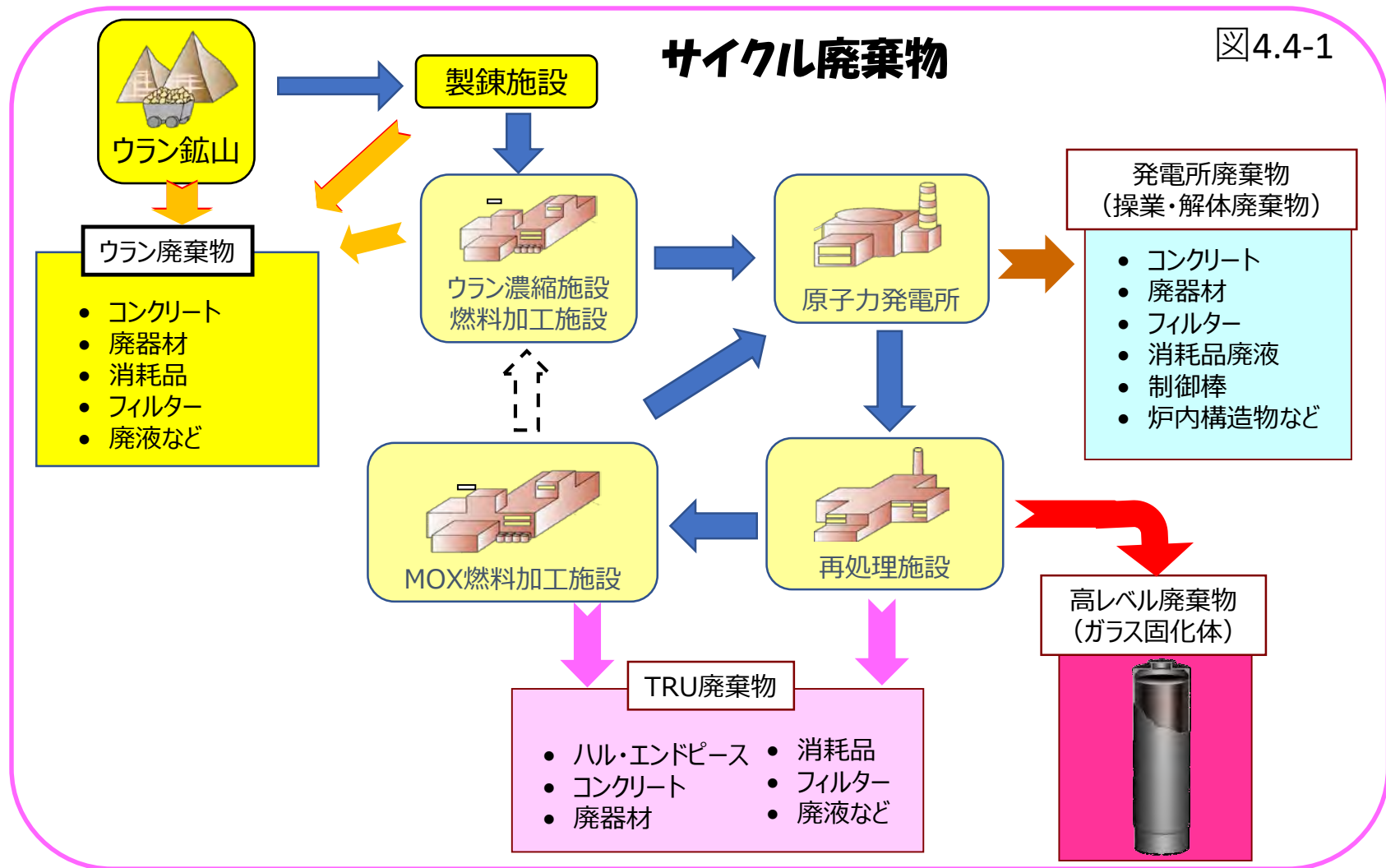
状況に応じて避難、食品流通管理、環境回復などにより被ばくを低減する

ICRP, Publication 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Elsevier (2007).

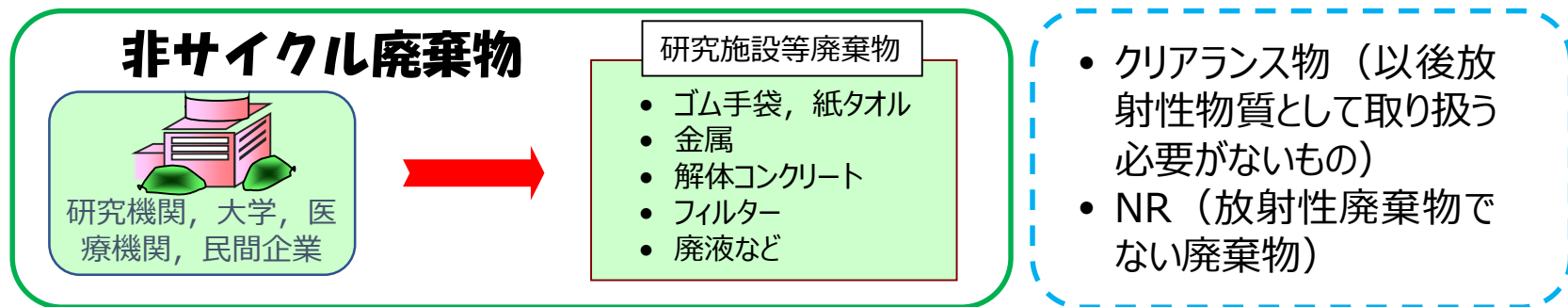
第4章 放射性廃棄物の発生

- 4 .1 放射性廃棄物の発生：概要
- 4 .2 原子力によるエネルギー生産
- 4 .3 核燃料サイクル
 - 4 .3 .1 採鉱と粗製錬（milling）
 - 4 .3 .2 精製錬（purification, refining）, 転換（conversion）
 - 4 .3 .3 濃縮（enrichment）
 - 4 .3 .4 成形加工（fabrication）, 転換（conversion）
 - 4 .3 .5 原子炉（ reactor）の運転
 - 4 .3 .6 使用済燃料貯蔵
 - 4 .3 .7 再処理
 - 4 .3 .8 MOX 燃料加工
- 4 .4 核燃料サイクルからの廃棄物
 - 4 .4 .1 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）
 - 4 .4 .2 TRU 廃棄物
- 4 .5 原子炉施設から発生する運転・解体廃棄物
 - 4 .5 .1 放射能レベルの比較的高い原子炉施設廃棄物（ L1廃棄物）
 - 4 .5 .2 放射能レベルの比較的低い原子炉施設廃棄物（ L2廃棄物）
- 4 .6 研究施設等から発生する廃棄物
 - 4 .6 .1 研究施設からの廃棄物（原子炉等規制法関連）
 - 4 .6 .2 放射性同位体の製造と使用から生じる廃棄物（放射線障害防止法関連）
 - 4 .6 .3 研究施設等からの廃棄物の扱い
- 4 .7 アップストリーム工程からの廃棄物
 - 4 .7 .1 NORM を含む放射性廃棄物
 - 4 .7 .2 ウラン廃棄物
- 4 .8 事故廃棄物
- 4 .9 参考文献

サイクル廃棄物

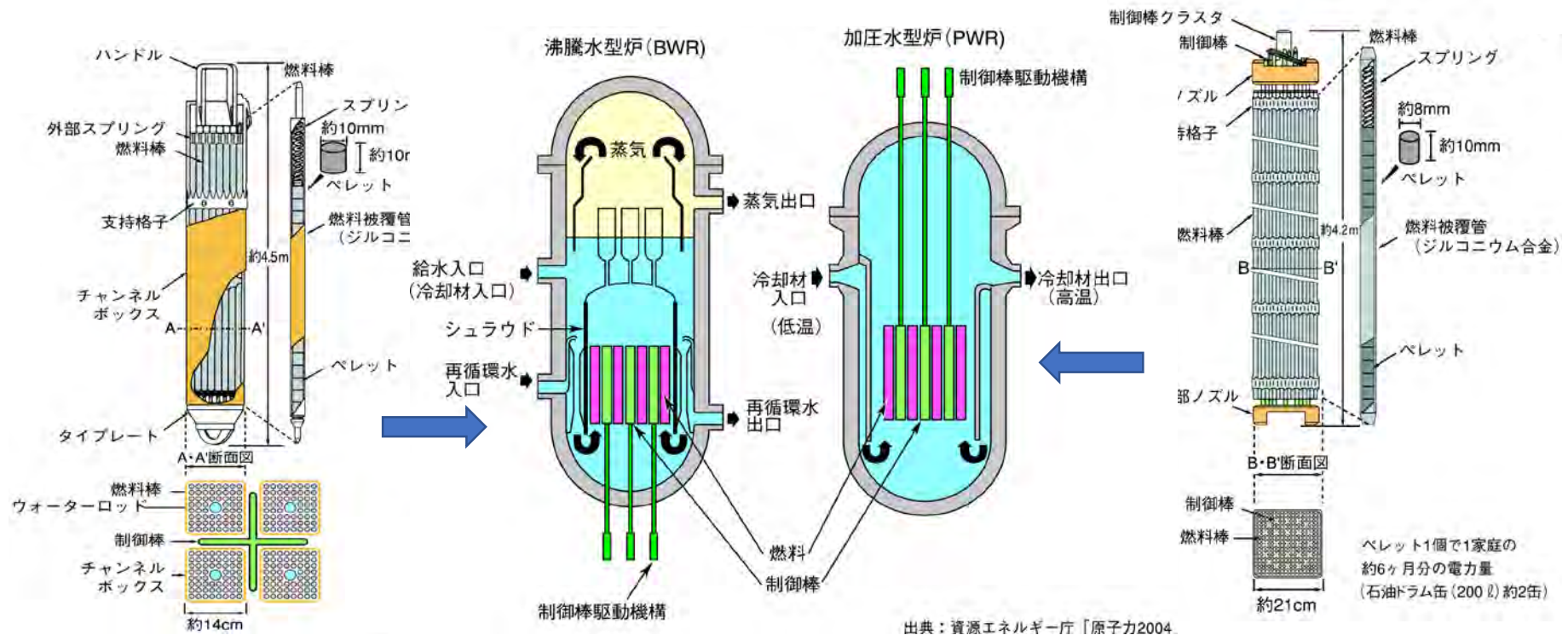


非サイクル廃棄物



燃料集合体と原子炉压力容器

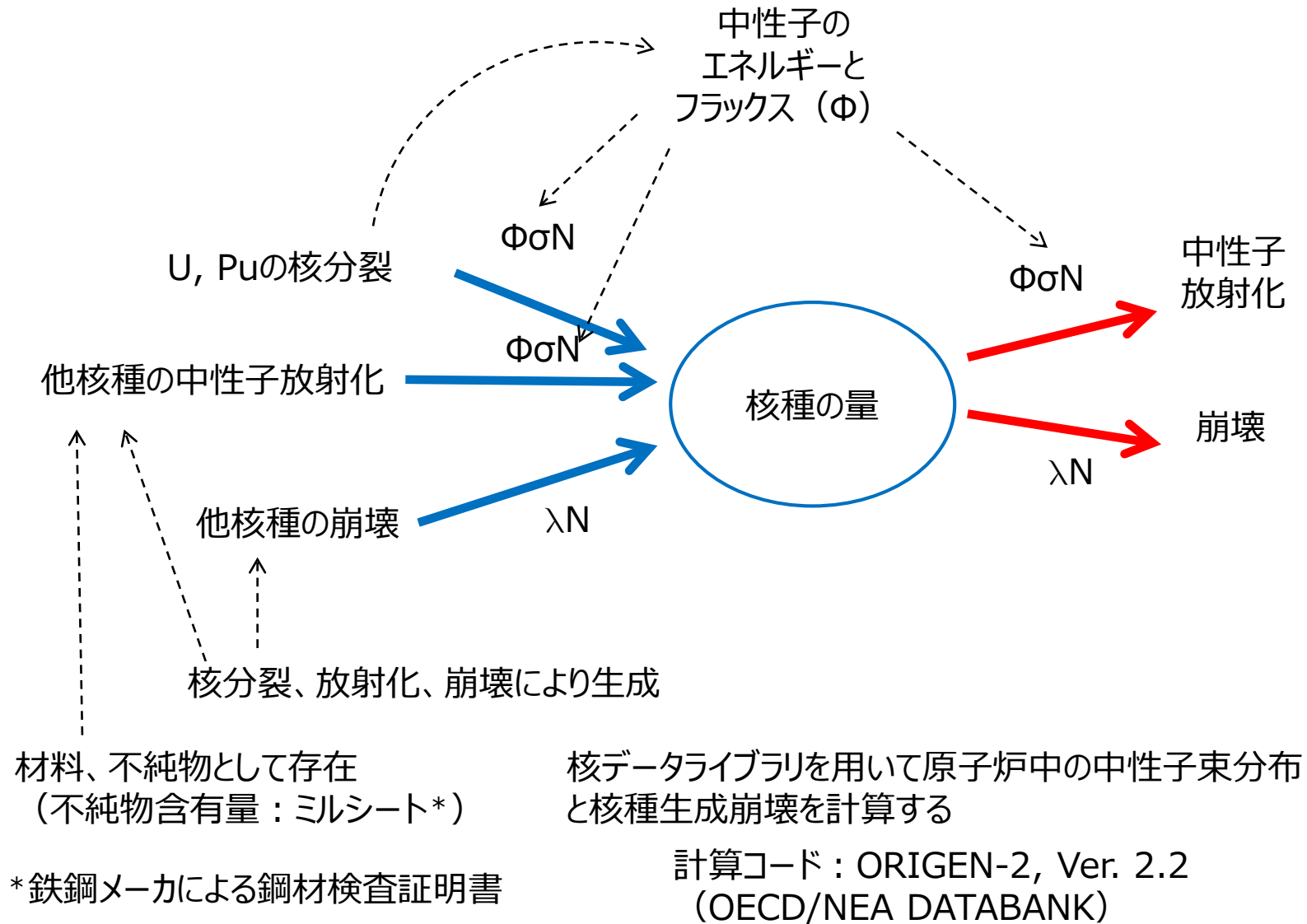
図4.3-2, 4.3-3



燃料を沸騰軽水または加圧軽水中に置き、連鎖的に核分裂を起こさせる
水は核分裂が起こりやすいように中性子を減速させる
制御棒により中性子束を制御して、連鎖反応をコントロールする

インベントリの計算：原子炉中の放射性核種の生成と崩壊 (実測、できないときは計算とプロセス管理)

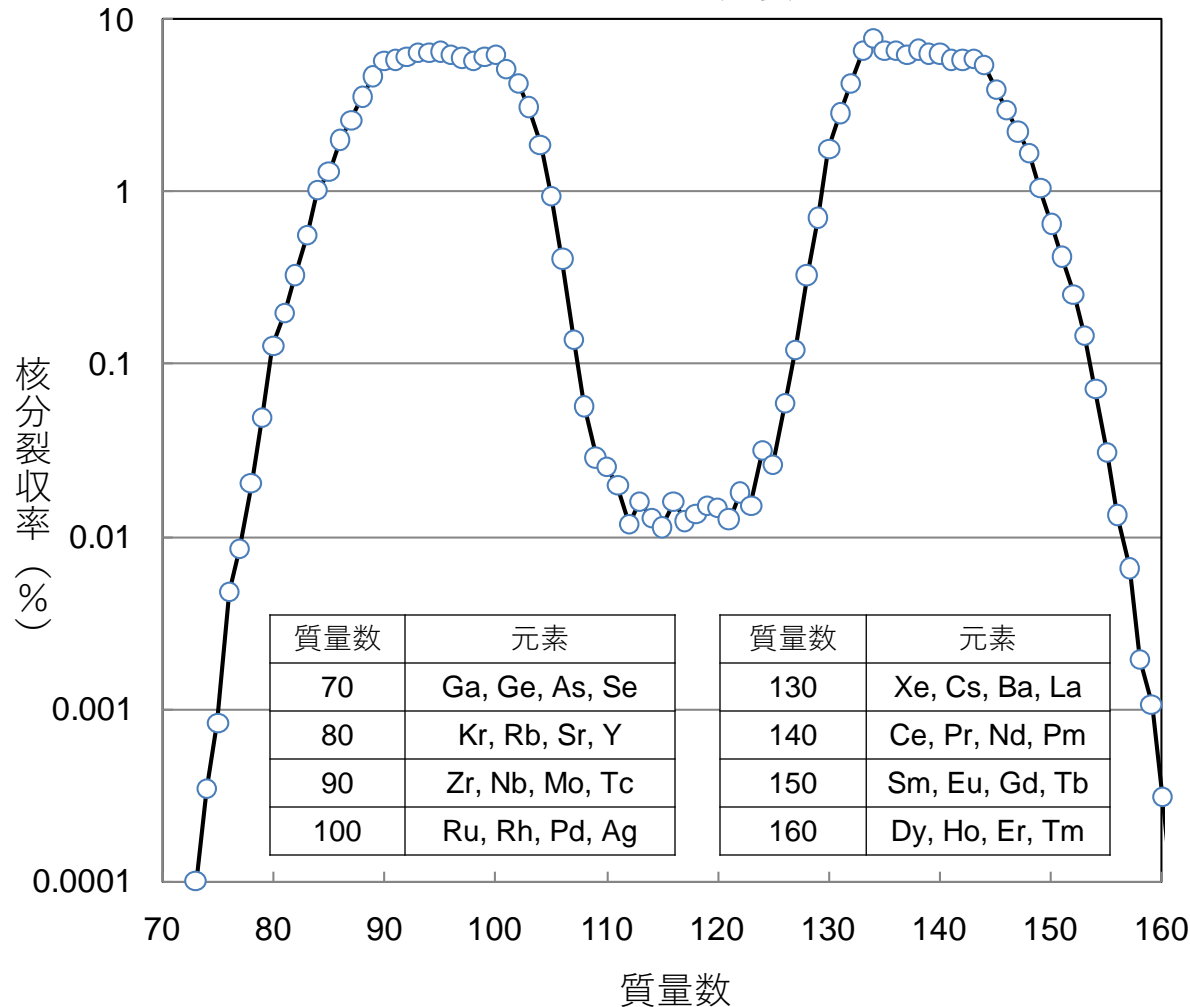
図2.2-4



軽水炉で生成する核分裂生成物

図4.2-1

ほぼ2：3に分裂する



⁸⁵ Kr	10.8	y
⁹⁰ Sr	28.8	y
¹³⁷ Cs	30.1	y
¹⁵¹ Sm	90	y
なし	10 ² ~2×10 ⁵ y	
⁷⁹ Se	6.5×10 ⁴	y
¹²⁶ Sn	1×10 ⁵	y
⁹⁹ Tc	2.1×10 ⁵	y
¹³⁵ Cs	2.3×10 ⁶	y
⁹³ Zr	1.5×10 ⁶	y
¹⁰⁷ Pd	6.5×10 ⁶	y
¹²⁹ I	1.6×10 ⁷	y

半減期30年以下の核種が放射能の大部分を占める
中性子が過剰なのでβ-崩壊する

放射能は半減期に逆比例する

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N = -\frac{\ln 2}{t_{1/2}} N$$

原子炉で起こる副反応：放射化 主な中性子放射化生成核種

表2.2-7

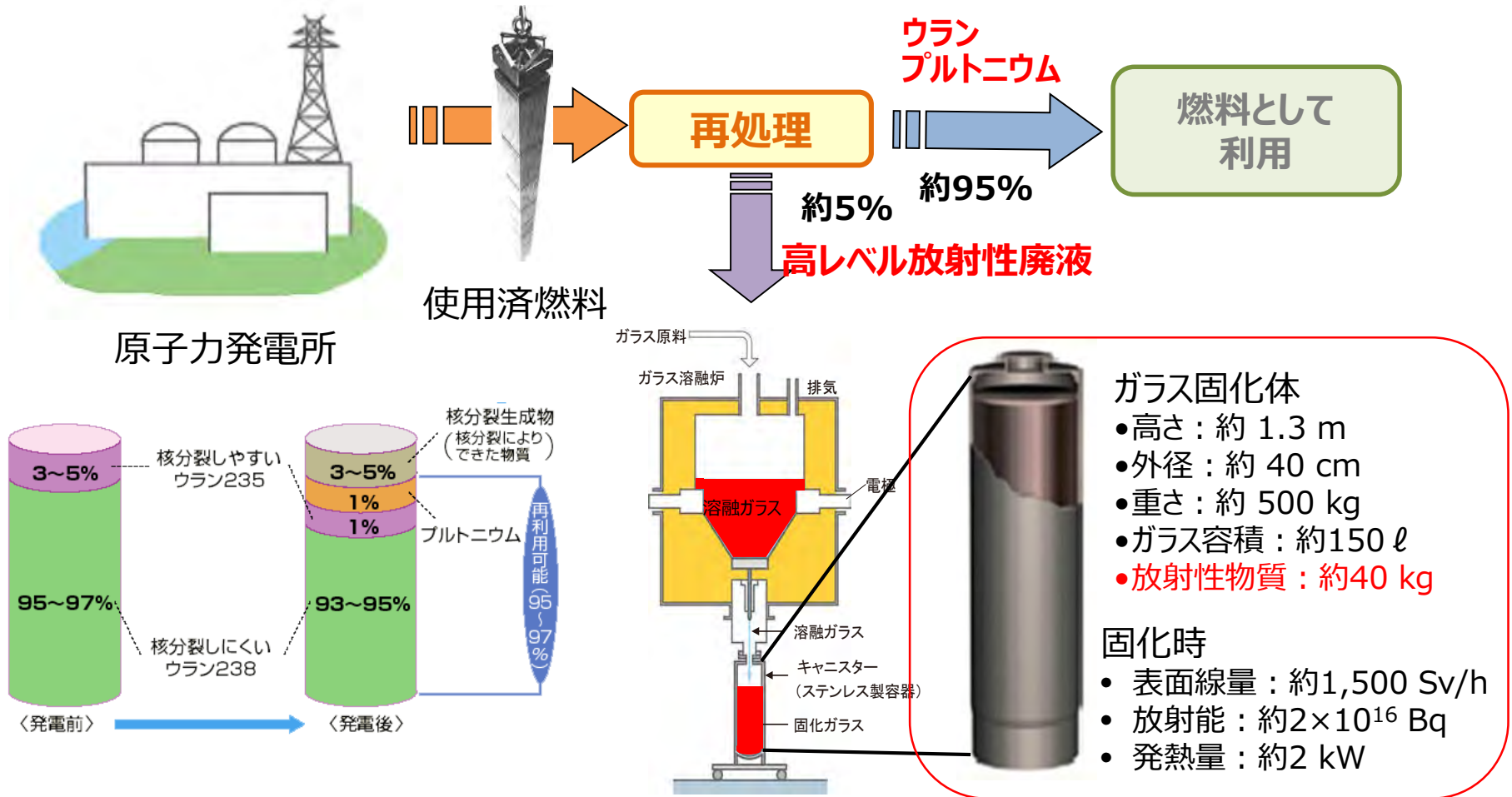
生成核種	崩壊様式	半減期/年	標的核種	存在度/%
Na-24	β^-	0.0017	Na-23	100
Mn-54	EC	0.85	Fe-54	5.84
Tm-171	β^-	1.92	Tm-169	100
Fe-55	EC	2.74	Fe-54	5.84
Pm-147	β^-	2.62	Nd-146	17.2
Sb-125	β^-	2.76	Sn-124	5.79
Tl-204	β^-	3.78	Tl-203	29.52
Co-60	β^-	5.271	Co-59	100
Eu-154	β^-	8.6	Eu-153	52.19
H-3	β^-	12.33	Li-6	6.742
Cd-113m	β^-	14.1	Cd-112	24.07
Sn-121m	β^-	43.9	Sn-120	32.97
Ni-63	β^-	101.2	Ni-62	3.66
Ag-108m	EC	438	Ag-107	51.35
Mo-93	EC	4000	Mo-92	15.86
C-14	β^-	5700	N-14	99.635
			C-13	1.108
Nb-94	β^-	20300	Nb-93	100
Ni-59	EC	76000	Ni-58	67.76
Tc-99	β^-	211100	Mo-98	24.4
Cl-36	β^-	301000	Cl-35	75.53

使われている材料中に含有されていて、半減期の長い核種を生成するものが問題となる

高レベル放射性廃棄物とは何か

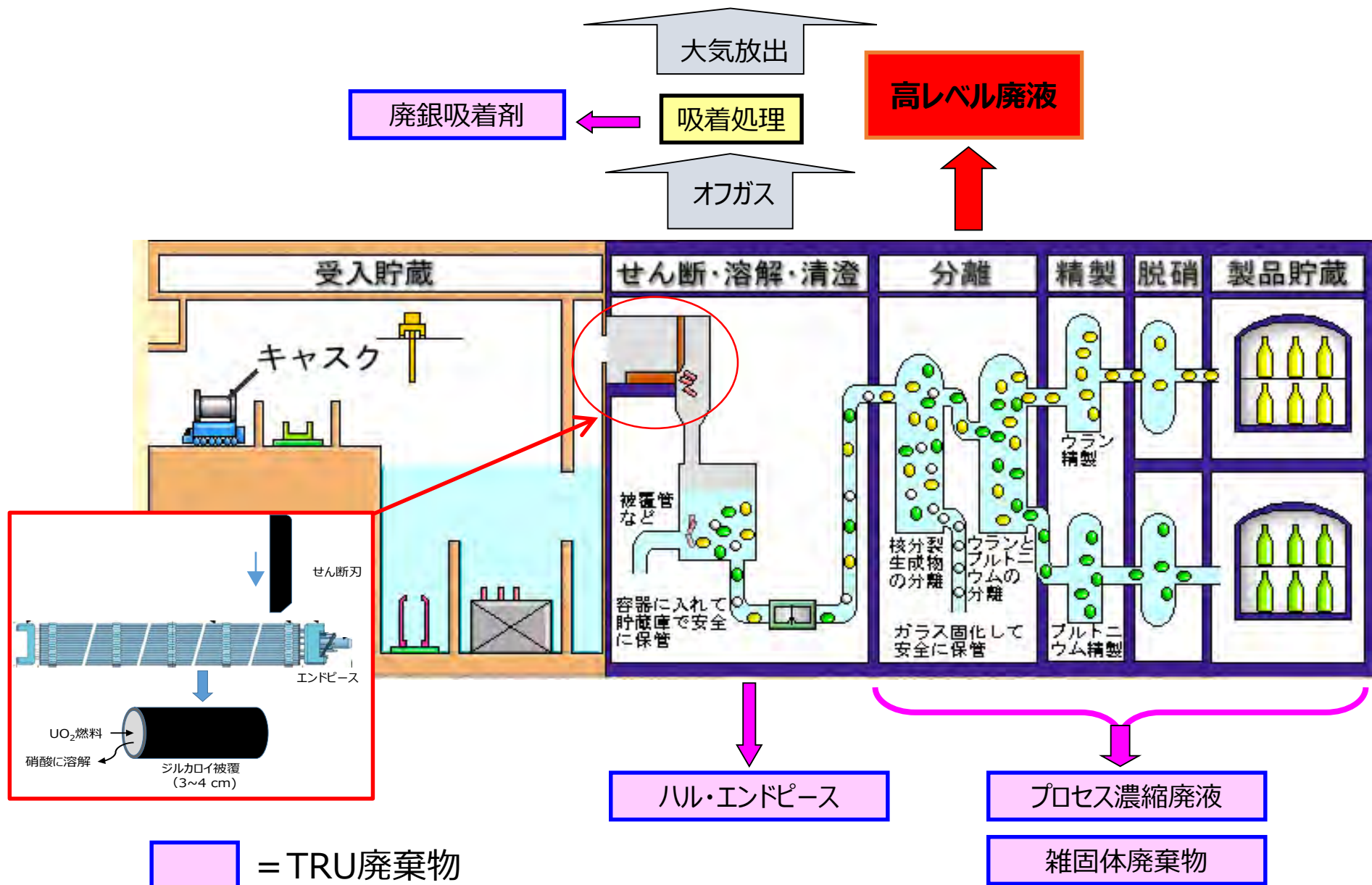
実際に燃えて（核分裂して）廃棄物になるのは約5%

わが国では原子力発電で使い終えた燃料を再処理してウランやプルトニウムを取り出し、再び燃料として使うことにしている。この再処理の過程で発生する高レベル放射性廃液をガラス固化したもの（ガラス固化体）が高レベル放射性廃棄物。



再処理工場から発生する放射性廃棄物

図4.3-4, 4.3-5

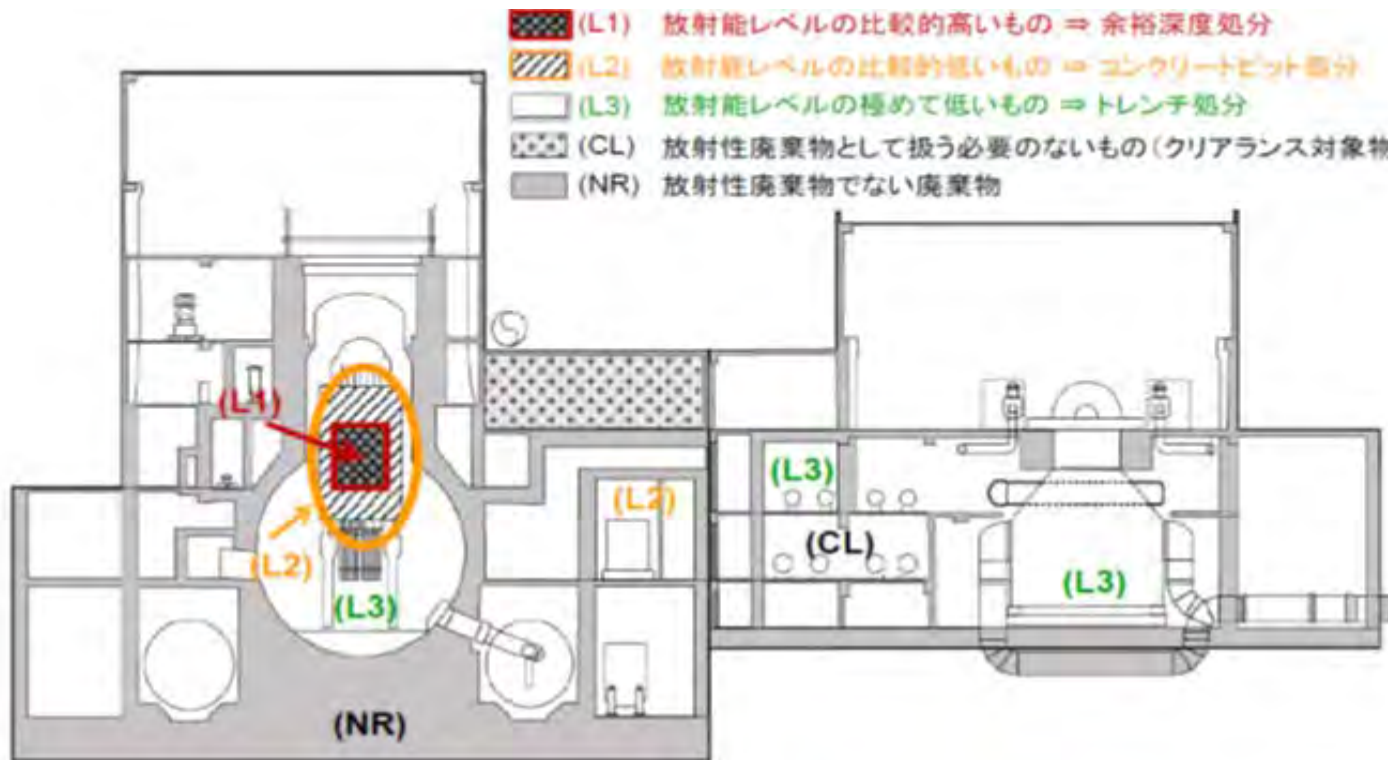


廃止措置に伴い発生する廃棄物(浜岡1,2号の例)

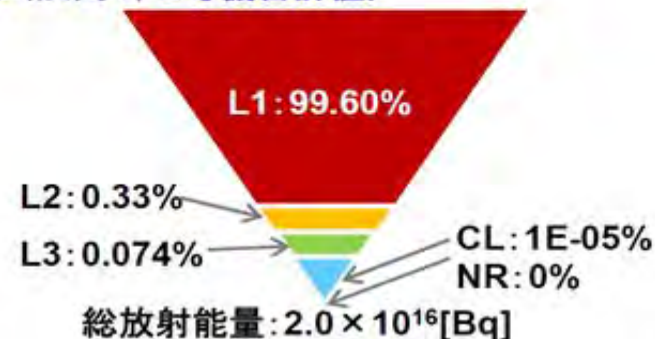
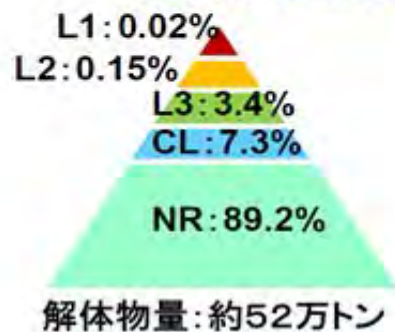


放射化生成物
で汚染した材料

図4.5-1



解体物量と放射能レベル(浜岡1, 2号機合計値)



ガラス固化体, 地層処分対象TRU廃棄物, 運転・解体廃棄物中で 重要な寄与をする放射性核種

表5.4-1

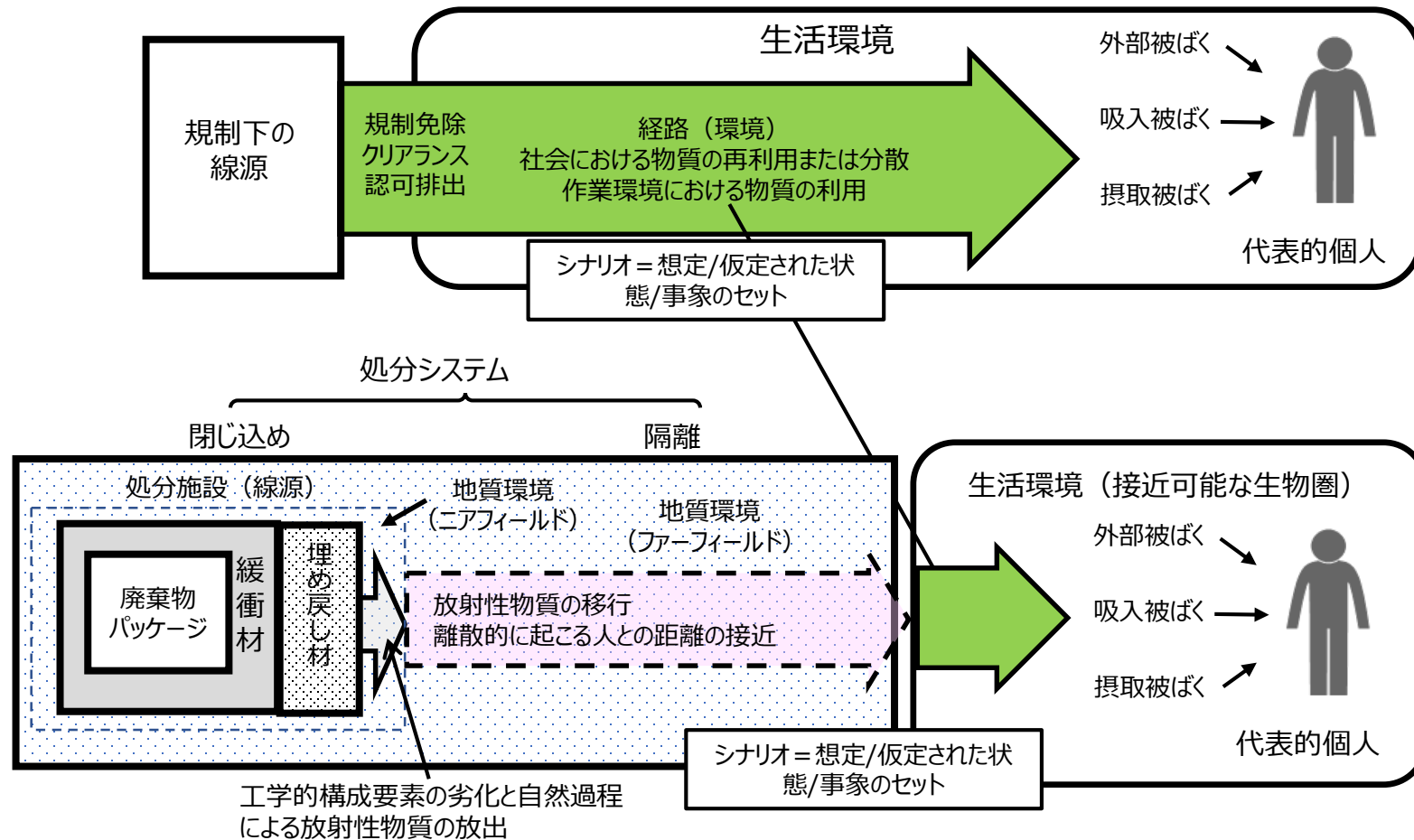
核分裂生成物とTRU核種				放射化生成物			
半減期 (年)	核種	半減期 (年)	相対影響度が 全体に占める 割合 (%)	半減期 (年)	核種	半減期 (年)	相対影響 度が全体 に占める割 合 (%)
< 30	Cs-137 Sr-90	30.1 28.8	~97	< 30	Co-60	5.3	~99.9
<10 ³	Am-241	432.6	2.6	<10 ³	Ni-63	101.2	~0.1
<10 ⁴	Pu-240 Am-243	6561 7370	< 0.1	<10 ⁴	C-14	5700	
>10 ⁴	Pu-239	2.4E+04	< 0.01	>10 ⁴	Ni-59	7.6E+04	< 0.01
	U-233	1.6E+05			Nb-94	2.0E+04	
	Np-237	2.1E+06			Ca-41	1.0E+05	
	Tc-99	2.1E+05			Tc-99	2.1E+05	
	Sn-126	2.3E+05			Cl-36	3.0E+05	
	Se-79	3.0E+05			Hf-182	8.9E+06	
	Zr-93	1.6E+06					
	Cs-135	2.3E+06					
	Pd-107	6.5E+06					
	I-129	1.6E+07					

第5章 放射性廃棄物処分の基本戦略

- 5.1 放射性廃棄物処分の安全原則
 - 5.1.1 原子力，放射線の利用における安全基準
 - 5.1.2 基本安全原則
 - 5.1.3 放射線リスクを生じる施設と活動に対する責任
 - 5.1.4 放射性廃棄物の発生の正当化とその管理の正当化
 - 5.1.5 防護の最適化
 - 5.1.6 個人のリスクの制限と現在および将来の世代の防護
 - 5.1.7 事故の防止と緊急時の準備と対応
- 5.2 放射性廃棄物の処分に関連するIAEA安全基準の要件と指針
 - 5.2.1 処分の基本戦略としての閉じ込め・隔離とクリアランス・管理放出
 - 5.2.2 処分による現世代と将来世代の防護
 - 5.2.3 処分施設のライフタイムと監視のレベル
 - 5.2.4 処分施設の安全基準
- 5.3 規制免除，クリアランスと認可排出
 - 5.3.1 規制免除とクリアランスの規準
 - 5.3.2 免除またはクリアランスレベルの決定
 - 5.3.3 気体，液体の排出の認可
 - 5.3.4 排出限度の決定：放射線環境影響評価
- 5.4 放射性廃棄物の分類と処分オプション
 - 5.4.1 廃棄物の分類：危険性の持続時間
 - 5.4.2 廃棄物の閉じ込め：処分施設の構成と放射性廃棄物の処分前管理
 - 5.4.3 放射性廃棄物の処分前管理
 - 5.4.4 放射性廃棄物の処分
 - 5.4.5 廃棄物の隔離：埋設深度の選択
 - 5.4.6 浅地中，余裕深度処分施設の概要
 - 5.4.7 地層処分施設の概要
- 5.5 参考文献

放射性廃棄物管理：安全確保＝もたらされるリスクの低減 処分＝潜在的危険性が危害につながる経路の遮断

クリアランスと認可排出：環境に再循環してもよいことを確認



処分：隔離と閉じ込めにより環境への再流入を限定

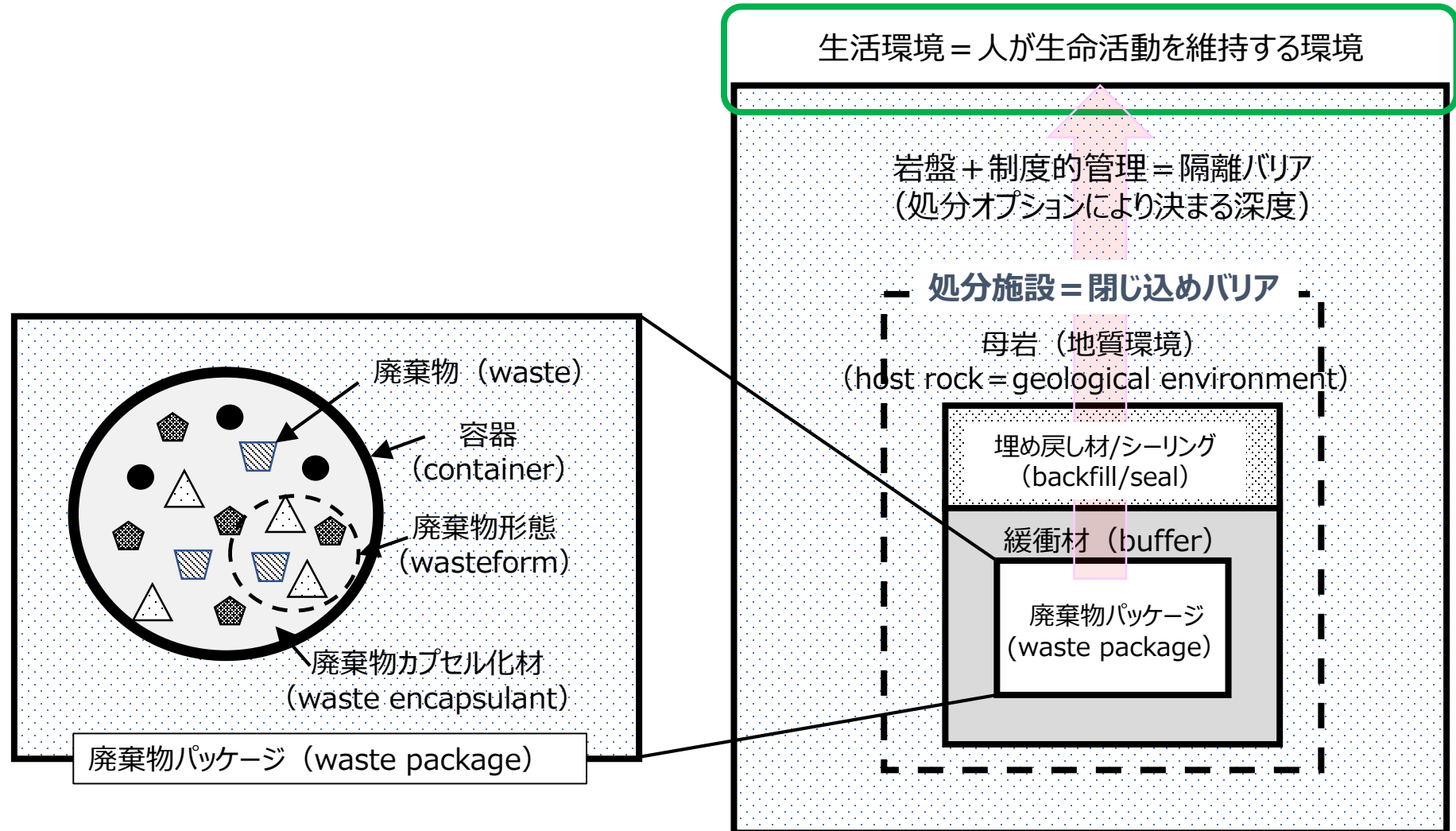
- ・ 隔離と閉じ込め：多重バリア（人工バリア＋天然バリア）で達成
- ・ 多重バリアの有効性：安全評価で確認

処分施設の構成

図5.4-8

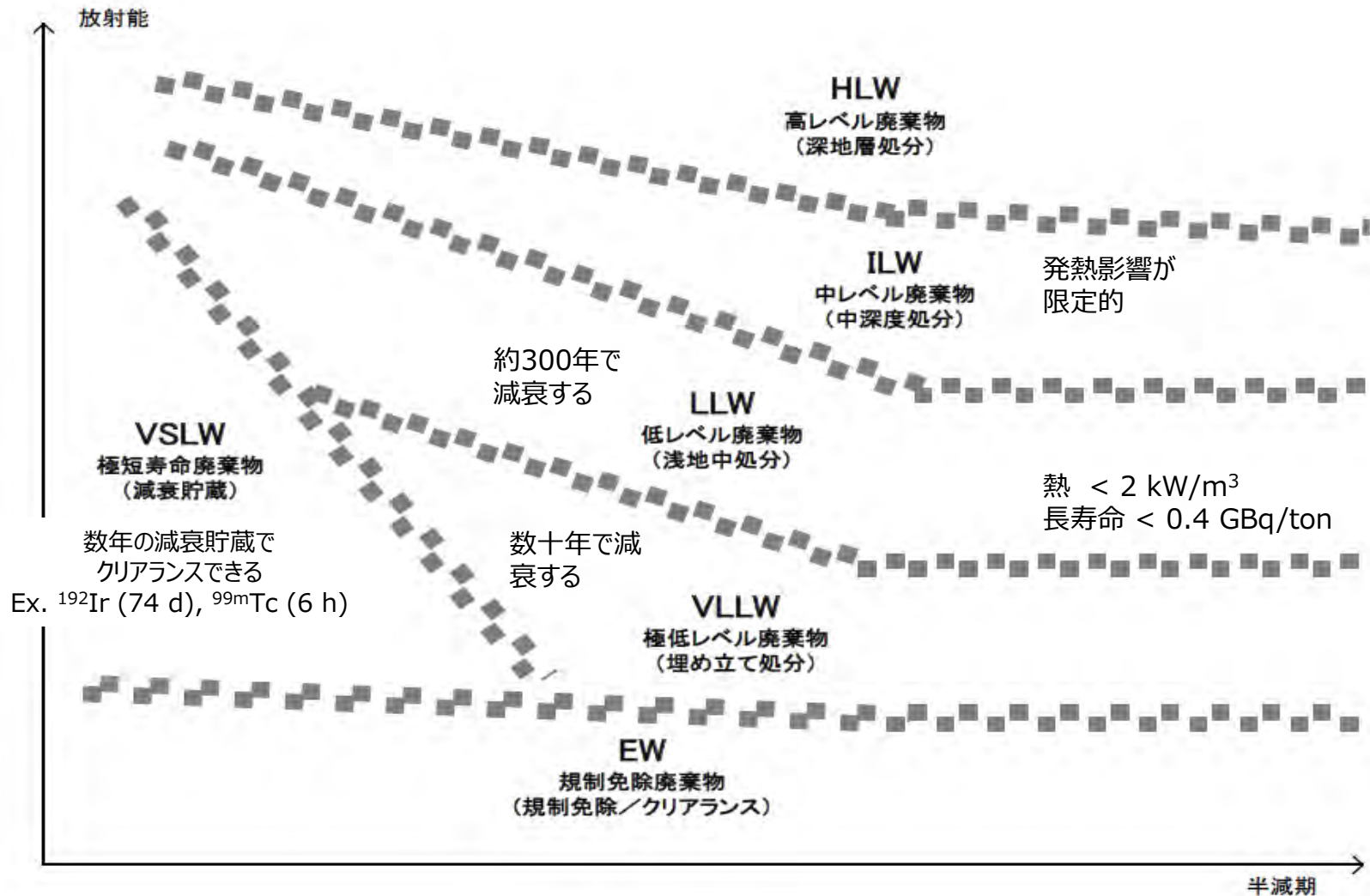
廃棄物が危険な間生活環境から隔離し閉じ込める*

* 人間による能動的管理は失われるので、自然に隔離され閉じ込められているようにする



IAEAの廃棄物分類

図5.4-1



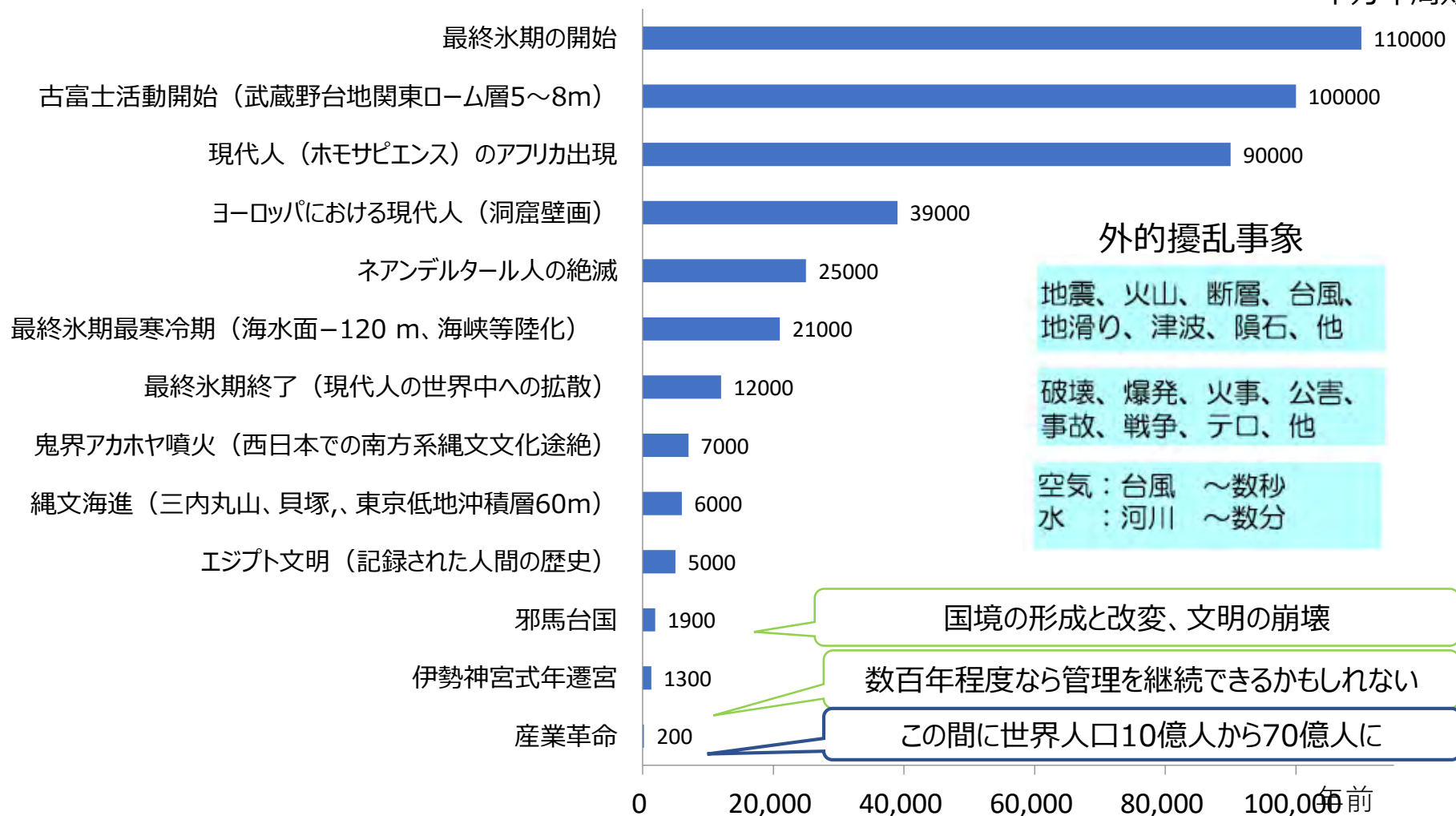
大雑把に見て30年以下の半減期のものとそれ以上の長寿命のものに分かれる

IAEA Safety Standard Series No. GSG-1: *Classification of Radioactive Waste* (2009)邦訳 安全指針GSG-1「放射性廃棄物の分類」

<http://www.nsra.or.jp/rwdsrca/iaea/index.html>

地表の生活環境に起こる変化：社会による管理の限界

氷期・間氷期
十万年周期

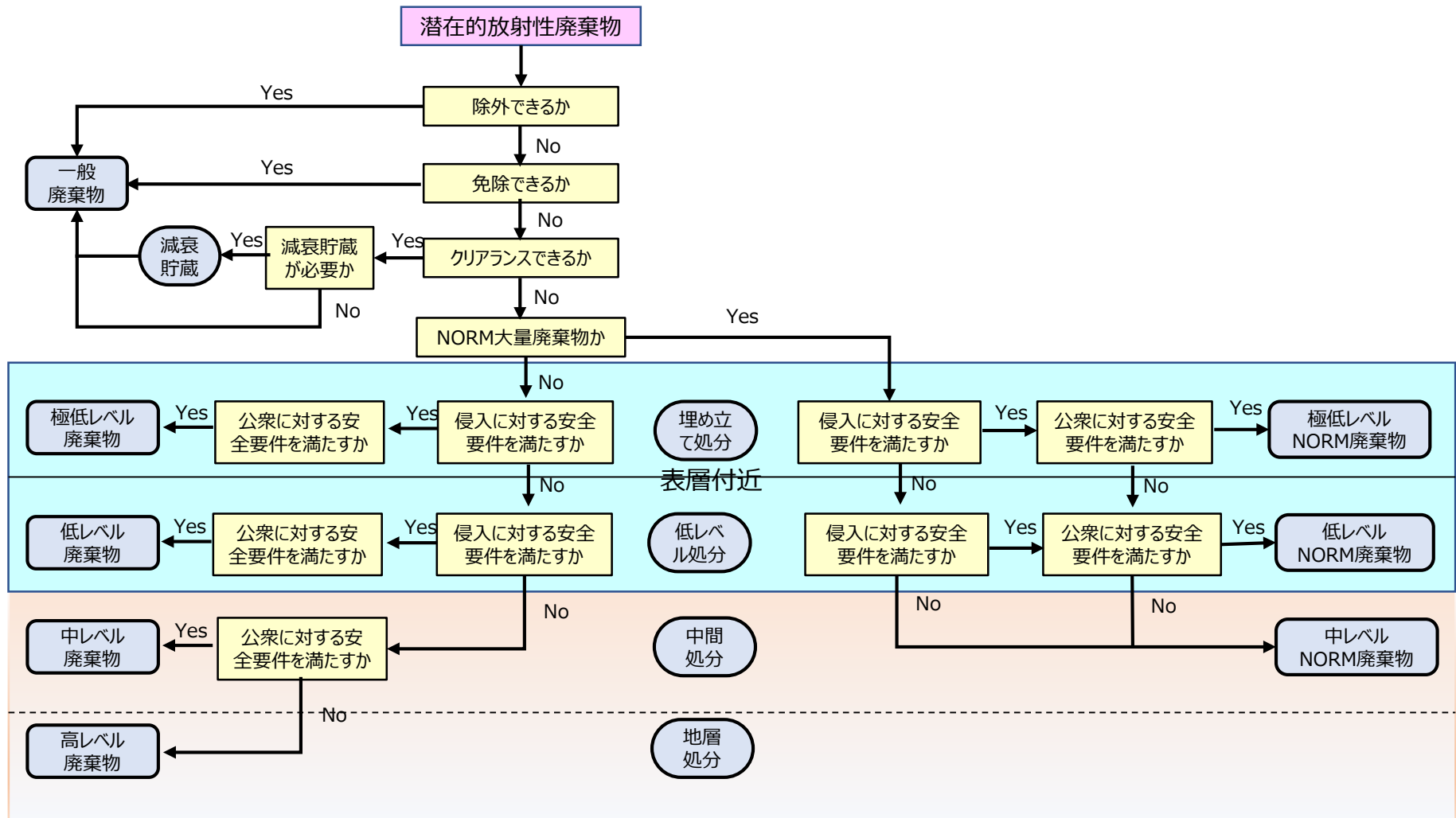


- “永久管理”には限界がある
将来世代に管理の負担
- それ以上の期間危ないものは地表に置いておけない
安全上のリスクが増大（様々な外的擾乱事象）

人が忘れてしまっても
安全な処分法が必要

放射性廃棄物処分のオプションの選択

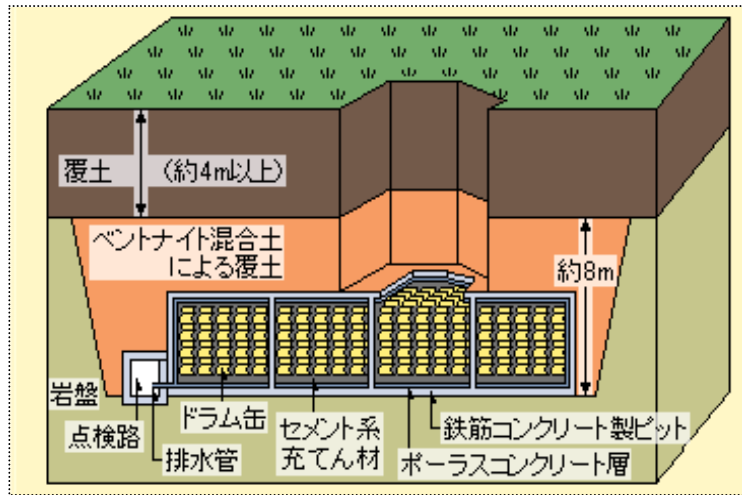
図5.4-13



放射性廃棄物処分の基本方針

①隔離 (isolation) + ② 閉じ込め (containment)

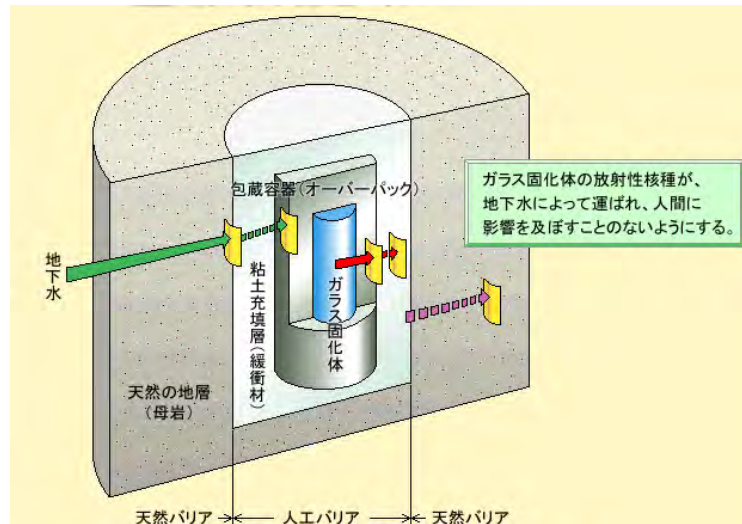
浅地中ピット処分



閉じ込め (IAEA No.SSR-5、要件 8)

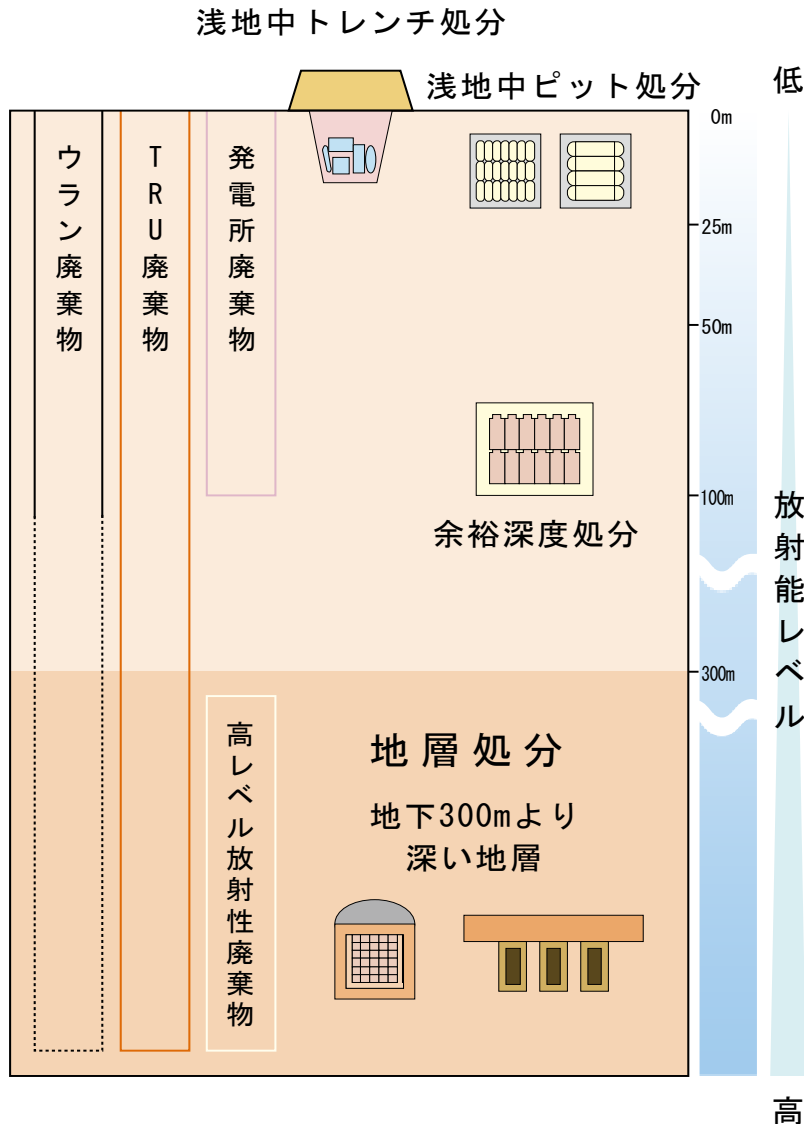
放射性核種を定められた期間にわたり廃棄体およびパッケージに閉じ込め、比較的短寿命の放射性核種の大部分が原位置で減衰することを確保しなければならない。低レベル廃棄物の場合、そのような期間は数百年程度 (several hundred years)、高レベル廃棄物の場合は数千年程度 (several thousands of years) になるだろう。高レベル廃棄物の場合は、処分システムの外部への放射性核種のいかなる移行も、放射性崩壊により発生した熱が実質的に減少した後にのみ生じるということも確保されなければならない。

地層処分



放射性廃棄物処分の基本方針

①隔離 (isolation) + ② 閉じ込め (containment)



隔離 (IAEA No.SSR-5、要件9)

- 浅地中施設の隔離： 処分施設の位置と設計によって、および操業上の管理と制度的管理によってもたらされなければならない。
- 放射性廃棄物の地層処分施設の隔離： 処分の深度の結果として主に母岩となる地層 (host geological formation) によってもたらされることになる。

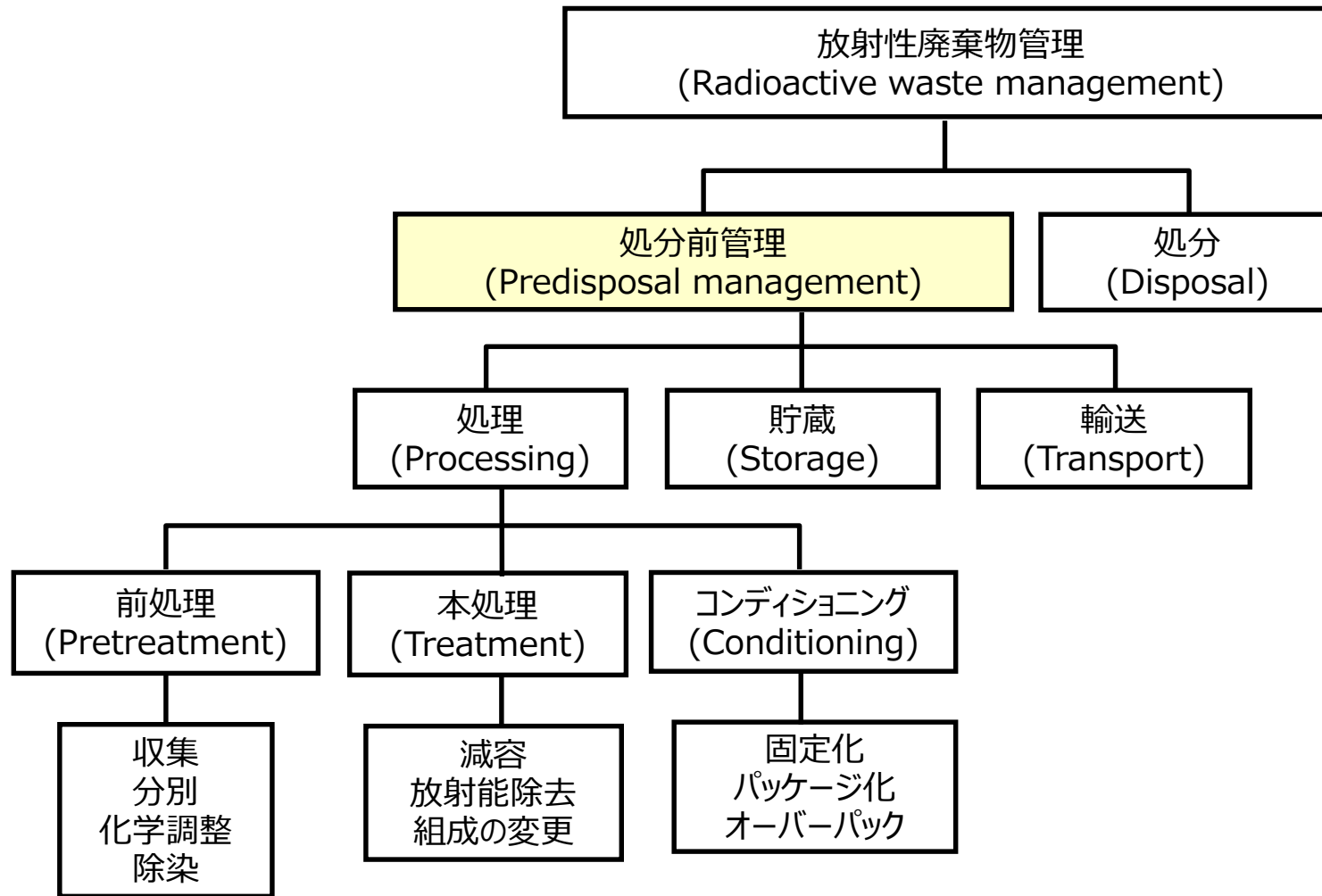
IAEA Safety Standard Series No. SSR-5, Disposal of Radioactive Waste (2011)

SSR = Specific Safety Requirements 個別安全要件

放射性廃棄物の処分前管理 (Predisposal Management)

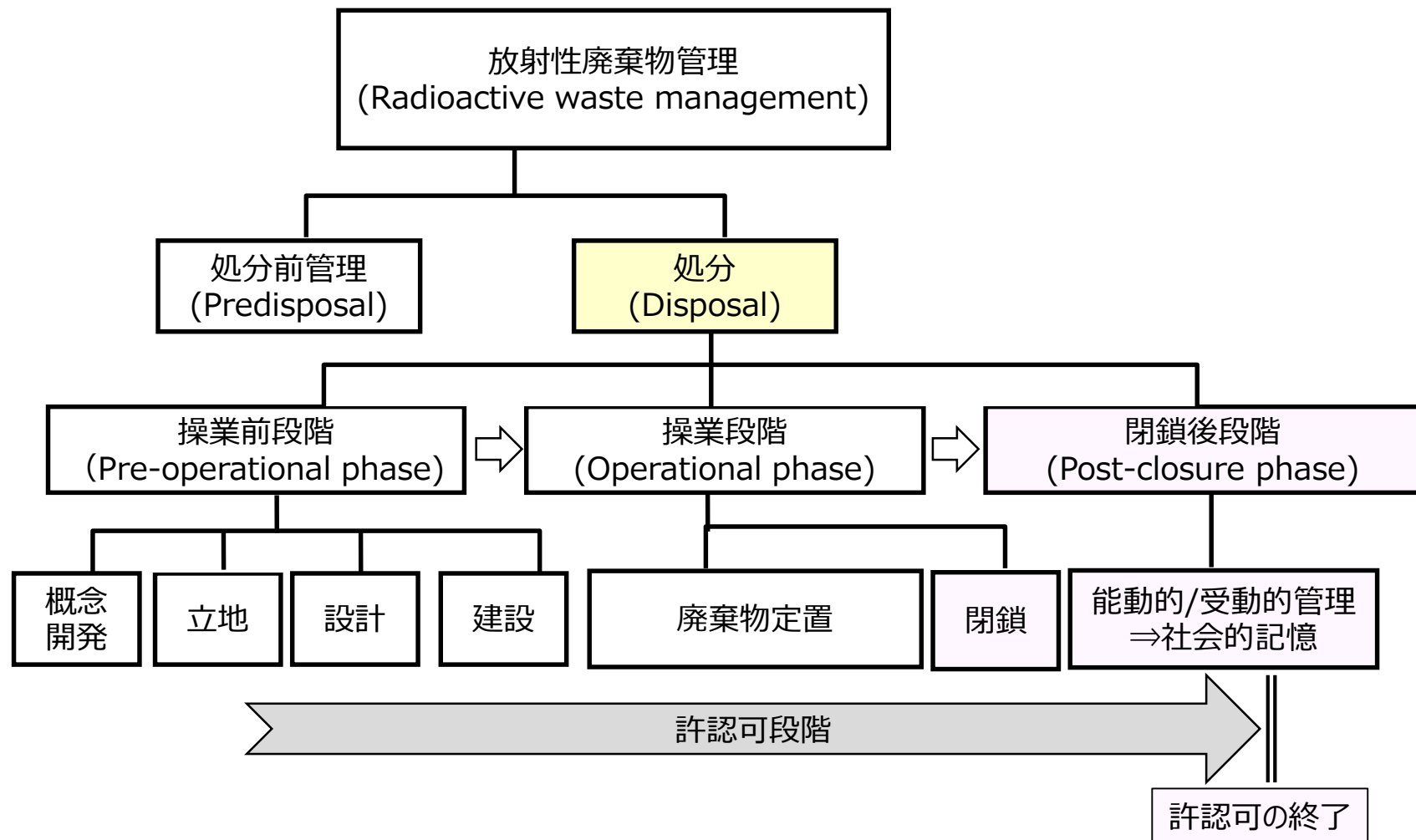
全ての放射性物質を扱う施設・活動は処分前管理が必要

図5.4-9



環境に分散しにくい形態にする（固定化）⇒ 処分に適合するようにする

長寿命核種を含む廃棄物処分における監視 (oversight)



- いつか人間による監視は失われる時が来る
処分(けりをつけること)が必要 = 何らかの形で次世代に引き渡さざるを得ない
- その時には何かあってもそのフィードバック (事故処理など) により安全性を向上させること (最適化) ができない

放射性廃棄物処分のオプション

表5.4-2

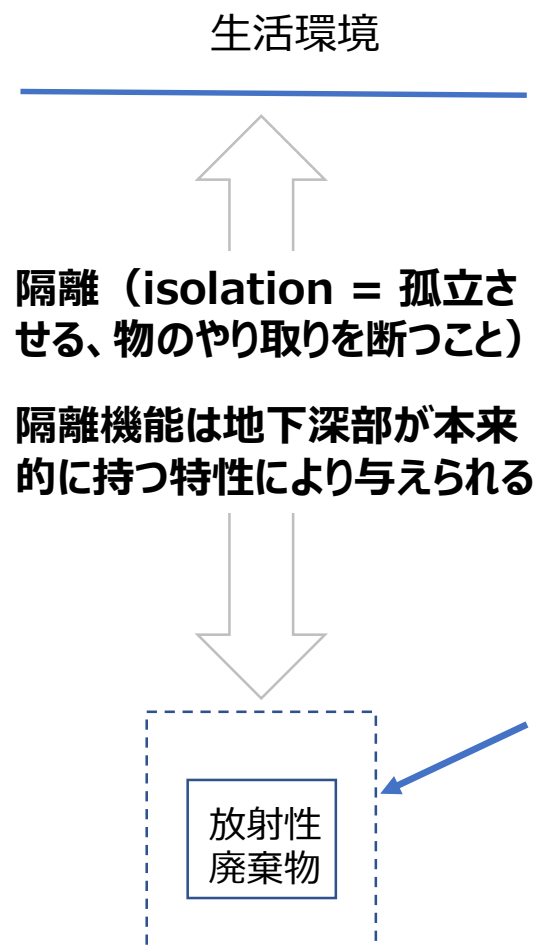
放出、規制免除またはクリアランス	生活環境への再循環（再利用、処分）	生活環境に放出、循環利用されても影響が無視できること。
減衰貯蔵	減衰するまで貯蔵してその後放出	
埋め立て処分	工学的な表層埋め立て方式の施設への処分	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 減衰するまで生活環境から制度的管理により隔離して閉じ込める。 ✓ 閉じ込めから漏出するものは、生活環境に入っても影響が無視できること。 ✓ 減衰後は、生活環境に入る際に希釈され、影響が無視できること ✓ 制度的管理期間は、社会制度の存続する数百年が限度（この期間で安全なレベルに減衰しないものは地層処分）。
浅地中処分	トレンチ、ボルト（ピット）あるいは浅いボアホールなど、表層あるいは数十メートル程度の深さの工学的施設への処分	
中深度処分 ボアホール処分	数十メートル程度から数百メートル程度の中深度の工学的施設への処分（既存の空洞を含む）および小径のボアホールへの処分	
地層処分	深度数百メートル程度またはそれ以上の深の安定な深地層に設置された工学施設への処分	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ほぼすべてを永遠に（減衰するまで）隔離して閉じ込める。 ✓ 閉じ込めから漏出するものは、生活環境に入っても影響が無視できること。

IAEA, Classification of Radioactive Waste General Safety Guide, IAEA Safety Standard Series No. GSG-1 (2010)

第6章 放射性廃棄物の隔離と閉じ込めの達成

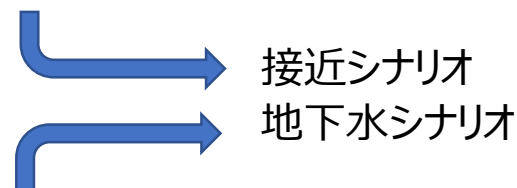
- 6.1 地球環境における物質の循環
 - 6.1.1 地球の構造
 - 6.1.2 マントル対流とプレートテクトニクス
 - 6.1.3 岩石の循環
 - 6.1.4 地層の形成
- 6.2 地下水の動き
 - 6.2.1 地下水の動き
 - 6.2.2 ダルシーの法則
- 6.3 元素の固液分配と動きやすさ
 - 6.3.1 放射性核種の元素としての性質
 - 6.3.2 環境中の地下水の特性
 - 6.3.3 自然界における元素の固液分配
- 6.4 放射性核種の移行挙動
 - 6.4.1 移流
 - 6.4.2 拡散
 - 6.4.3 移流に伴う分散
 - 6.4.4 収着性多孔質媒体中の物質移行
 - 6.4.5 閉じ込めの達成
- 6.5 閉じ込めのための地質環境と隔離の確保
 - 6.5.1 浅地中処分と地層処分における隔離の確保
 - 6.5.2 好ましい地質環境
 - 6.5.3 地質環境の長期安定性に影響を与える要因
 - 6.5.4 地質環境に著しい影響を与える天然現象の地域的分布と長期的変動の傾向
 - 6.5.5 処分地（サイト）選定における段階的調査の考え方
- 6.6 参考文献

地層処分システムの安全確保戦略：隔離・閉じ込め機能



隔離 = 閉じ込めのための地質環境の擾乱からの隔離

地質環境の長期安定性は、火山、隆起侵食、人間侵入などを避けることにより得られる



閉じ込め 地質環境 = 廃棄物を取り囲む環境（岩石 + 水）

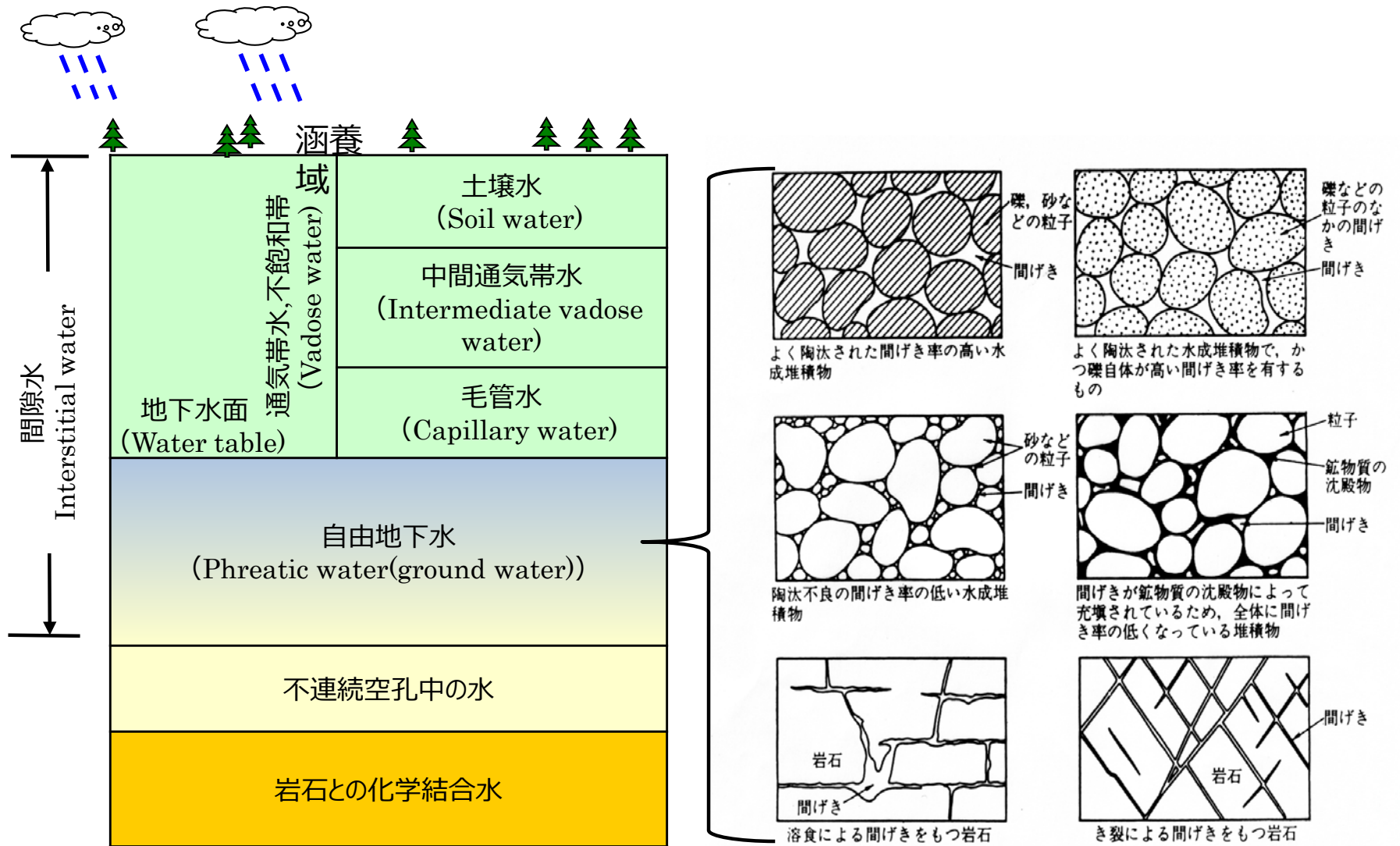
閉じ込め機能は地下深部が本来的に持つ特性により与えられる

地質環境特性 = 廃棄物が定置されている場所の水質・水理特性

- 溶解度制限による溶出抑制
- 遅い地下水流速、小さい地下水流束（間隙率）

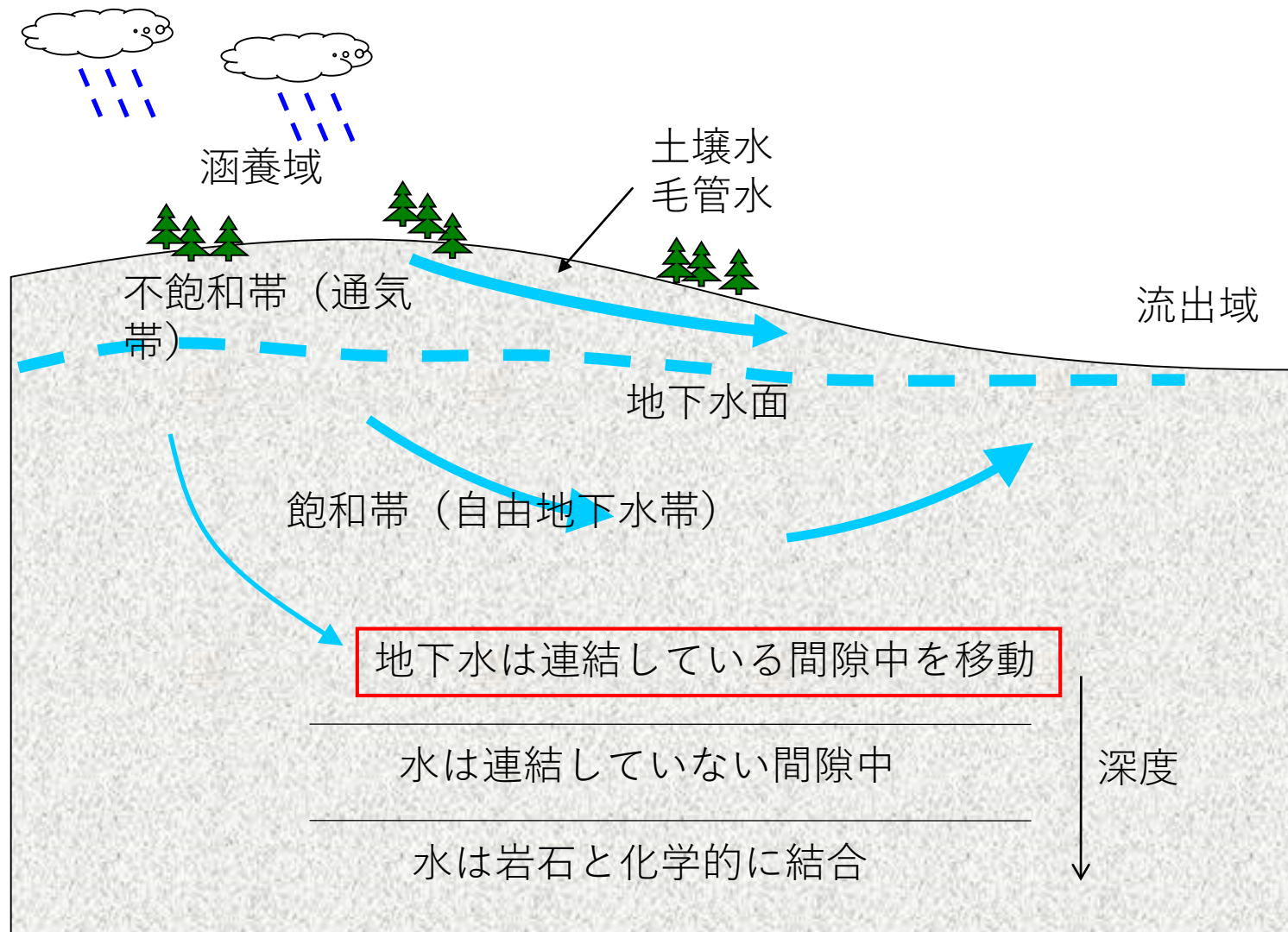
地質環境が擾乱を受けなければ大部分の放射性核種は地質環境に閉じ込められたままで崩壊して放射性でなくなる

地下水の状態(岩石の間隙中に存在)



P. A. Domenico, F. W. Schwartz, Physical & Chemical Hydrogeology (1990)より

地下水の状態(岩石の間隙中に存在)

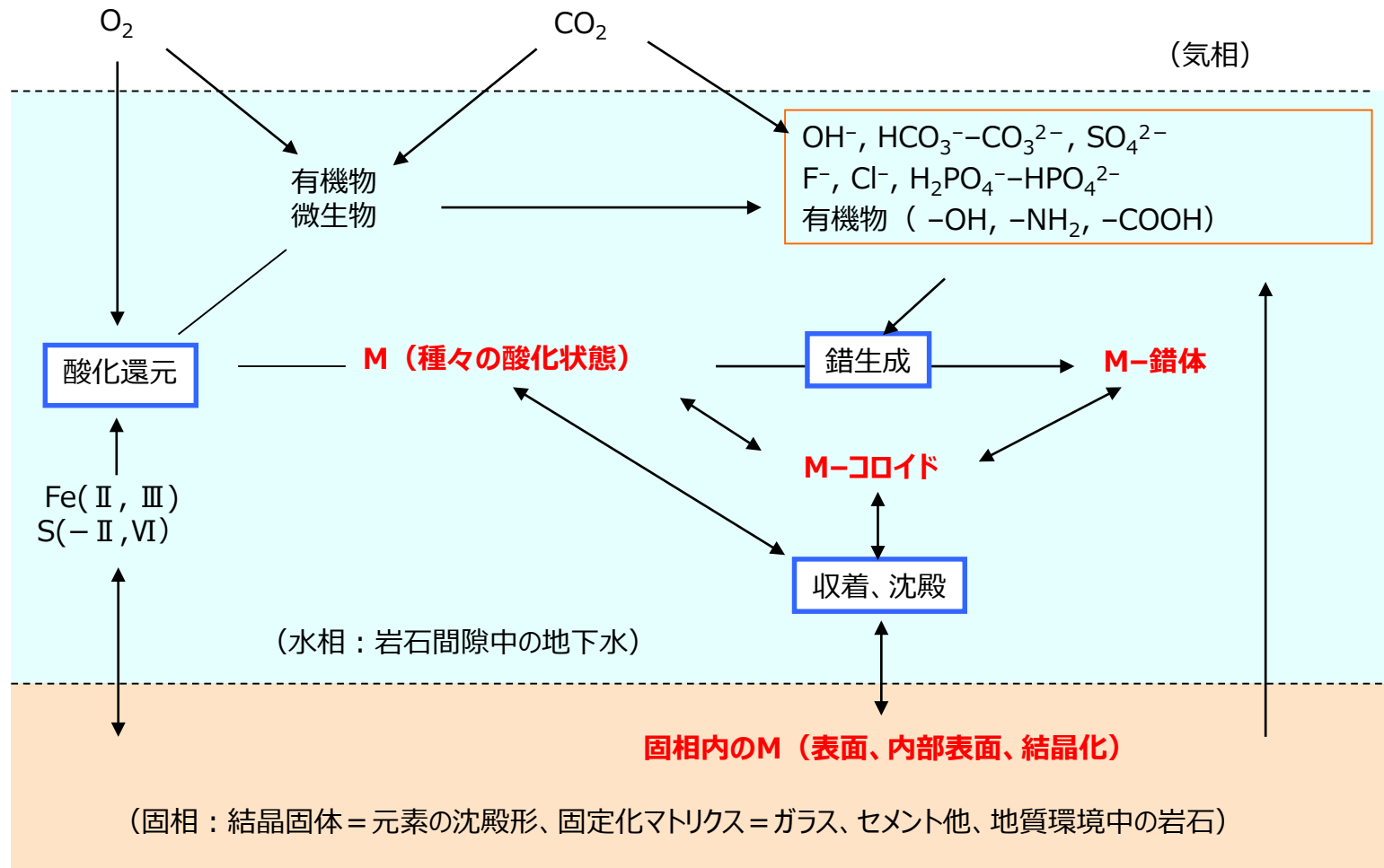


地下水の流れる速さ

= 岩石の隙間の水の通りやすさ (透水係数) × 地下水面の勾配 (動水勾配)

(500-1000 m の地下では) $= 10^{-9} \text{ m / 秒} \times 0.01 = 10^{-11} \text{ m / 秒} = \text{約 } 0.3 \text{ mm / 年}$

地質環境（廃棄物を取り囲む直近の地質媒体）中の 放射性核種の媒体間の分配(分配係数)



- 電荷密度が大きい（周期表の両端を除く元素）ほど、加水分解、収着、錯生成が起こりやすい
- 酸性（低pH）、アルカリ性（高pH）では溶解度が高くなる
- 酸化雰囲気になると多くの元素の溶解度は高くなる

廃棄物の閉じ込めのための不動化

核分裂生成物、TRU核種の周期表の位置

	1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	¹ H																		² He
2	³ Li	⁴ Be												⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne
3	¹¹ Na	¹² Mg												¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar
4	¹⁹ K	²⁰ Ca		²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr
5	³⁷ Rb	³⁸ Sr		³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe
6	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	*	⁷¹ Lu	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	**	¹⁰³ Lr	¹⁰⁴ Rf	¹⁰⁵ Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt	¹¹⁰ Ds	¹¹¹ Rg							

* lanthanoids
** actinoids

⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb
⁸⁹ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk	⁹⁸ Cf	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰¹ Md	¹⁰² No

ほとんど水に溶けない
(酸化物、水酸化物、硫化物になる)

- 核分裂生成物
- 超ウラン核種（中性子吸収とβ崩壊）
- 超ウラン核種の子孫核種
- 主な放射化生成核種

天然バリア機能（天然の地質環境が本来的に有する閉じ込め機能） 溶解度制限による溶出抑制と遅い地下水流速による移行抑制

	半減期	1本당りに含まれる総放射能 (Bq/本)	ガラスの溶解速度* ¹ (Bq/年)	地下水への溶解度(Bq/L)	起こる結果
Sr-90	29年	5.5×10^{15}	7.8×10^{10}		オーバーパック内で1000年で減衰* ²
Cs-137	30年	7.6×10^{15}	1.1×10^{11}		
Am-241	432年	3.0×10^{13}		6.1×10^6	数万年以上の地下水移行時間で減衰* ²
Am-243	7370年	7.9×10^{11}		3.6×10^5	
Se-79	6.5万年	1.7×10^{10}		6.1×10^2	地表に運ばれる少量の地下水が大量の地表水で希釈
Sn-126	10万年	3.0×10^{10}		6.6×10^5	
Tc-99	21万年	5.2×10^{11}		2.5×10^3	
Zr-93	153万年	7.4×10^{10}		8.6×10^3	
Np-237	214万年	1.8×10^{10}		1.2×10^2	
Cs-135	230万年	1.8×10^{10}	2.6×10^5		

- ほとんどの放射性核種はその場所に固体のまま留め置かれる
- 溶出した放射性核種のほとんどはその近傍で崩壊する
- ごくわずかに運ばれる地下水は地表に至るまでに大量に希釈を受ける

*¹ ガラスは極微量が地下水に溶けてこれがより安定な鉱物として析出する（変質）。この際にガラスとともに固化されていた元素のうち地下水に溶けやすい元素は地下水中に残される。

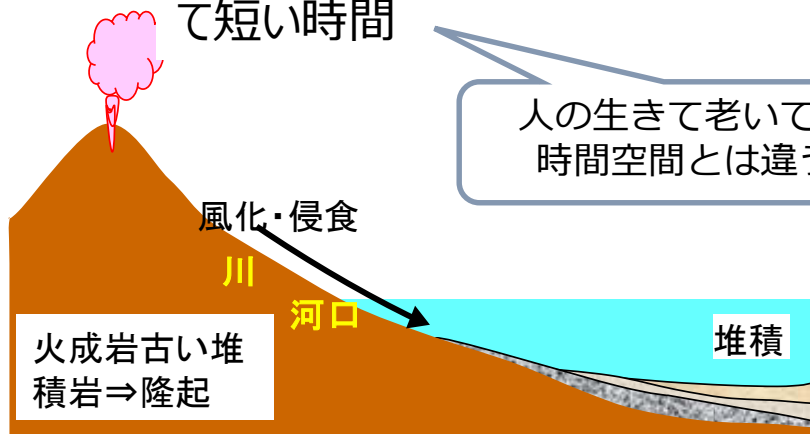
*² 半減期の10倍の時間で $(1/2)^{10} = 1/1024$ になる

忘れ去られても大丈夫にするには？

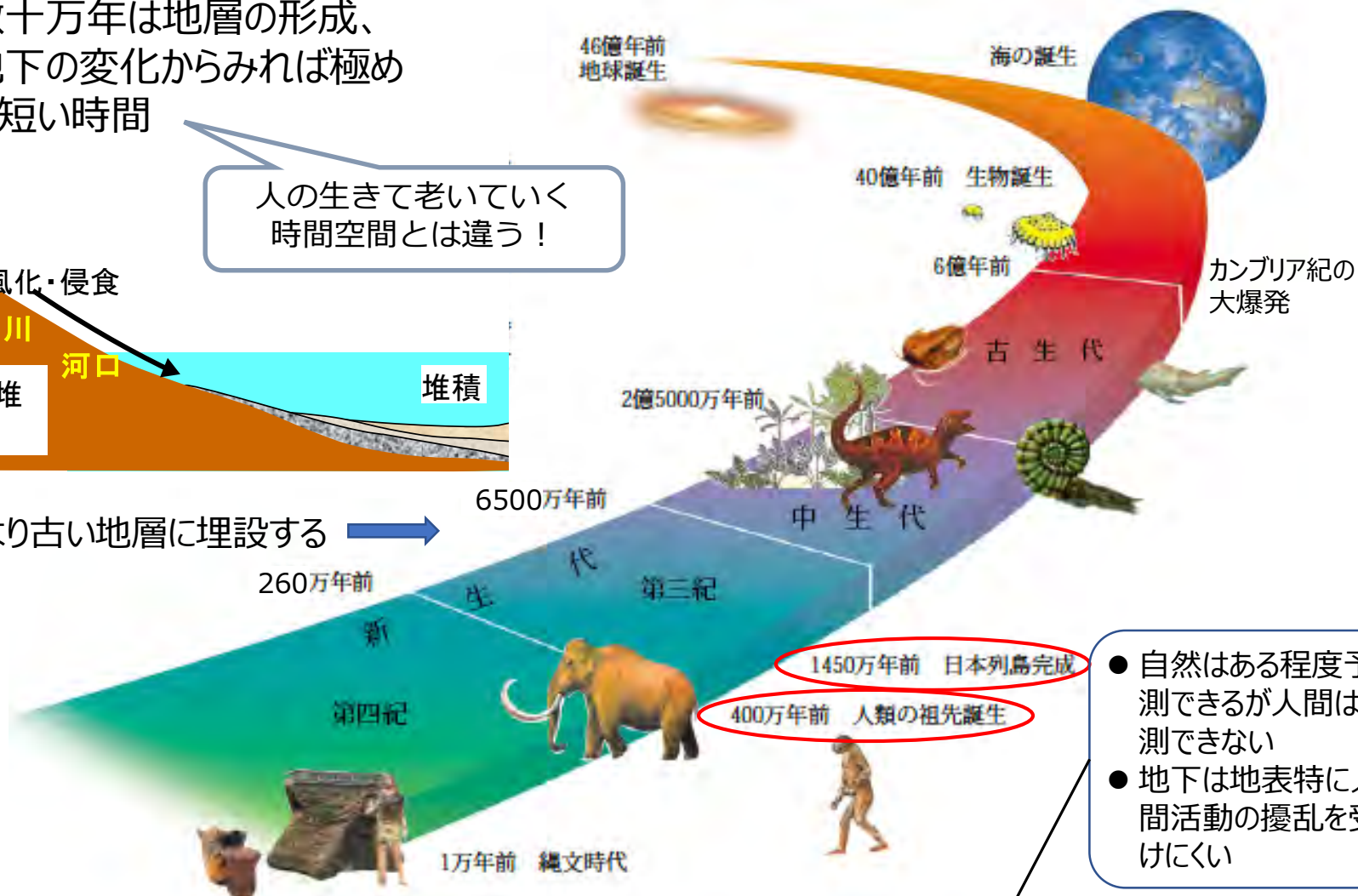
地層 = ある厚さと広がりをもった層状の岩体で
堆積した時の地表の活動の歴史を保存している(地質年代)

数十万年は地層の形成、
地下の変化からみれば極めて
短い時間

人の生きて老いていく
時間空間とは違う！



第四紀より古い地層に埋設する →

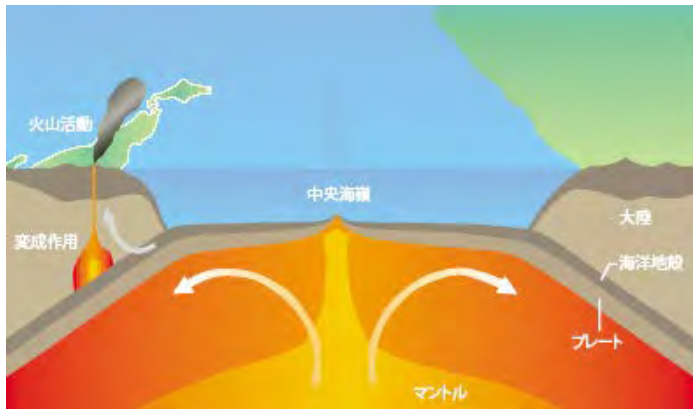


- 自然はある程度予測できるが人間は予測できない
- 地下は地表特に人間活動の擾乱を受けにくい

地下の変化は極めて緩やか
人間よりも自然の地下の地質の安定性の方が頼りになり予測できる

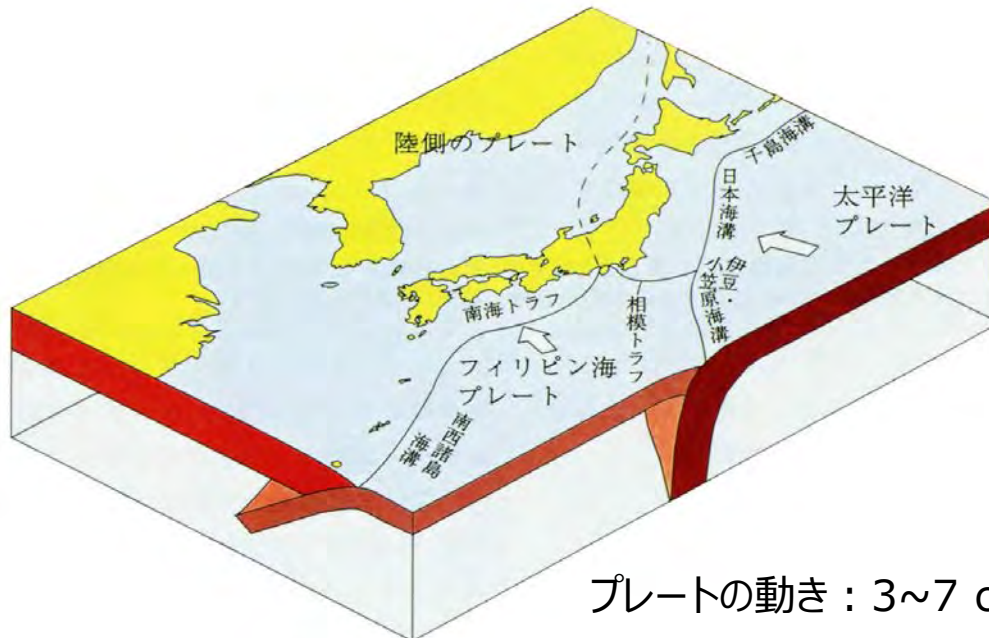
地層が数百メートルの地下を地表から隔離しておく機能

日本列島を含む周辺のプレートシステムの理解



- 大陸の形成と分裂を支配するマントル対流：数千万年～数億年をかけて移動
- 日本列島の動きや火山活動は、マントル対流によるプレート運動によっている

- ◆ 日本は太平洋プレート、フィリピン海プレートといった海洋プレートが、ユーラシアプレートや北米プレートといった大陸プレートの下に沈み込んでいるため、火山や地震が多い
- ◆ プレートの位置や運動方向・速度は約200～100万年前からほとんど変化がなく、今後も10万年程度はほとんど変化しないと考えられている



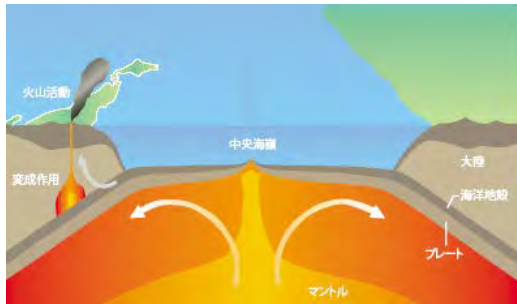
プレートの動き：3～7 cm/年

日本列島とその周辺のプレート

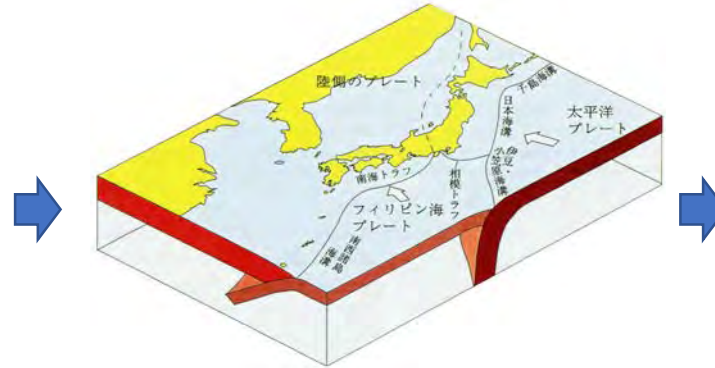
(地震調査研究推進本部地震調査委員会編、1997に一部加筆)

隔離機能とテクトニクス（プレートシステム）

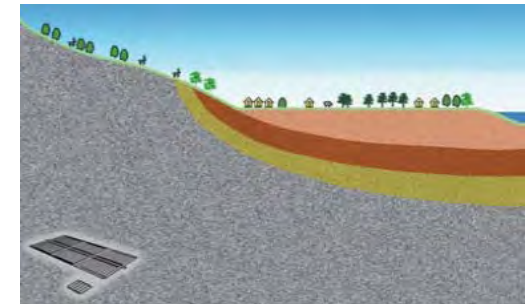
地質構造の分布と時間的変遷



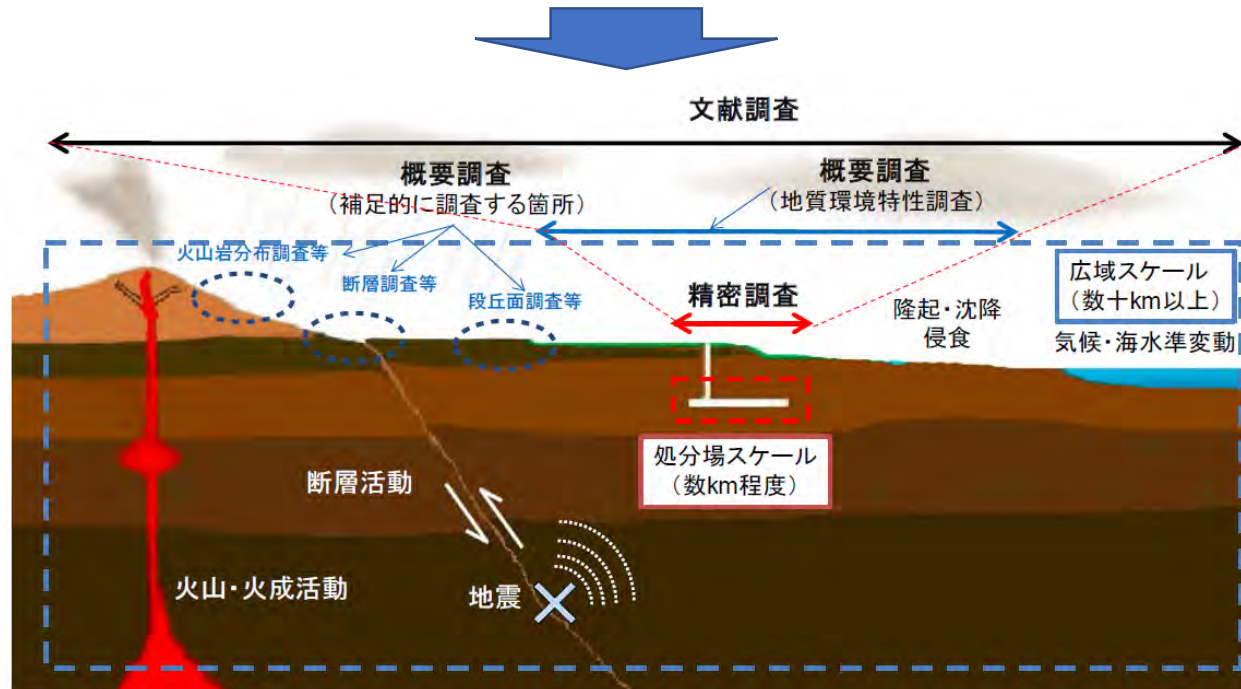
マントル対流



日本列島周辺のプレート配置



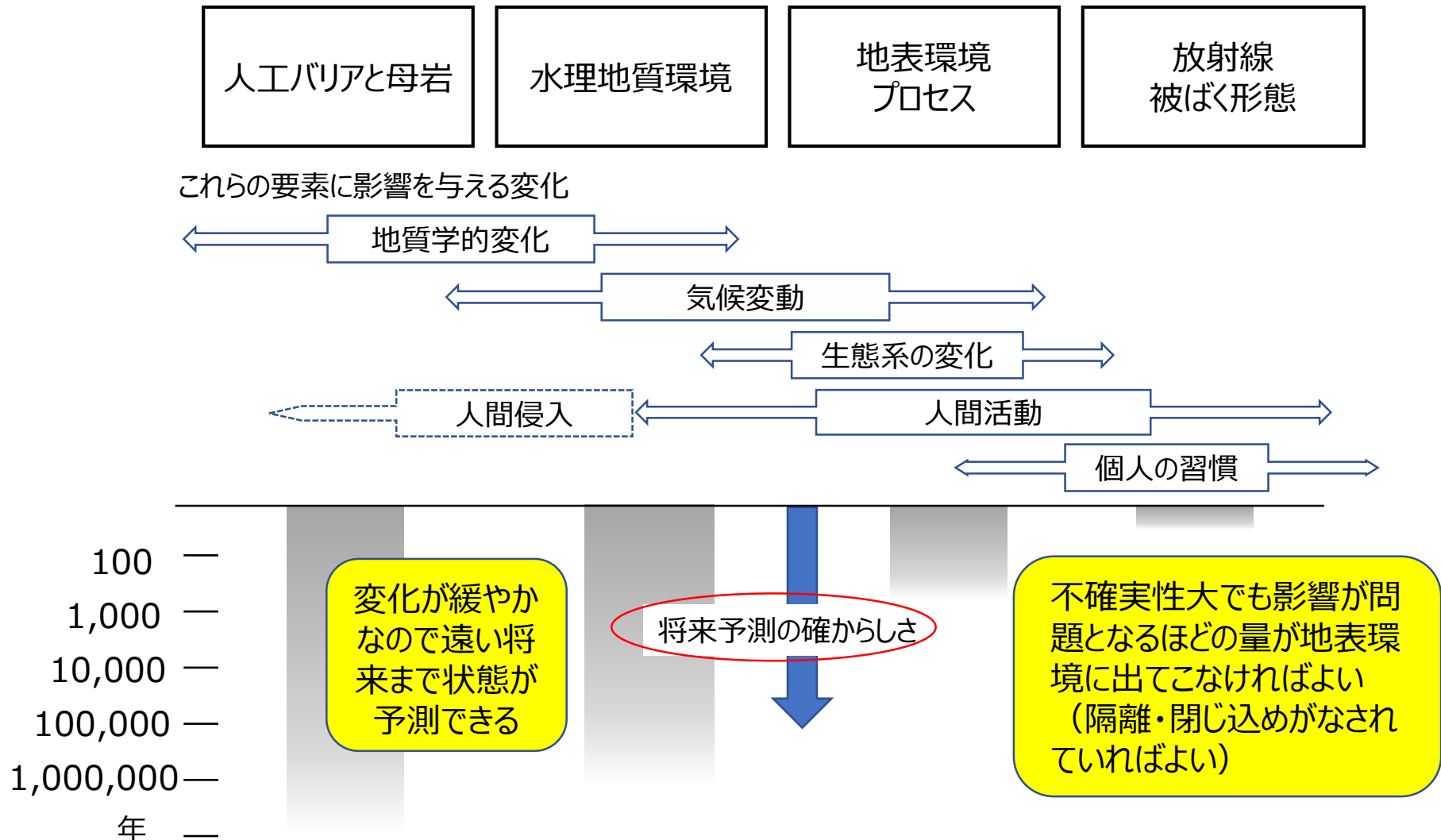
プレート運動による地層の形成



閉じ込めのための地質環境の擾乱事象からの隔離



処分システムの状態/要素の変遷をある程度の確かさで予測できる時間幅

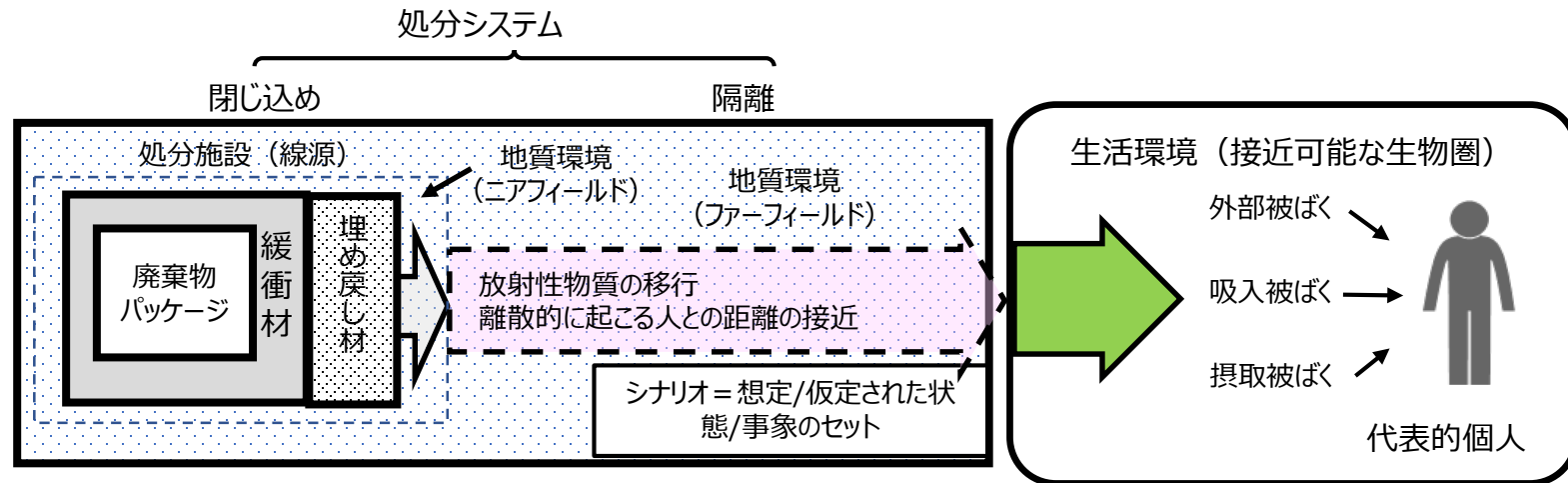


- 放射能インベントリ（核種の崩壊）：ほぼ永遠に正しく予測でき、時間とともに減少する
- 処分システムから生活圏に移行する放射エネルギー：不確実ながら予測でき、時間とともに不確実性が増大する
- 生物圏における人の生活様式：数十～数百年以降はまったく予測できない

第7章 放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価

- 7.1 セーフティケース概論
 - 7.1.1 放射性廃棄物処分のセーフティケース
 - 7.1.2 セーフティケースと安全評価
 - 7.1.3 不確実性とリスク
 - 7.1.4 不確実性下の意思決定
- 7.2 安全評価
 - 7.2.1 安全評価の手順
 - 7.2.2 安全評価の例
- 7.3 セーフティケースの構成要素
 - 7.3.1 セーフティケースの構成と要素
 - 7.3.2 目的と背景 (purpose and context)
 - 7.3.3 安全戦略 (safety strategy)
 - 7.3.4 評価基盤 (assessment basis)
 - 7.3.5 安全評価, 証拠と論証 (safety assessment, evidence and arguments)
 - 7.3.6 統合 (synthesis)
- 7.4 シナリオ区分による不確実性に対する対策: 処分システムの頑健性の確保
 - 7.4.1 シナリオ評価による安全評価の不確実性
 - 7.4.2 安全評価におけるリスク論的アプローチ
 - 7.4.3 線量/確率分解アプローチによるシナリオ区分
 - 7.4.4 シナリオに対するめやすの設定
- 7.5 参考文献

処分施設の閉鎖後のセーフティケースと安全評価



$$\begin{aligned} \text{リスク} &= \text{シナリオの発生確率} \times \text{影響の大きさ} \\ &= \text{経路を通じて人の被ばくが起こる可能性} \times \text{被ばく線量} \times \text{致死リスク係数} \\ \text{全リスク} &= \sum (\text{シナリオごとのリスク}) \leftarrow \text{いろいろな可能性 (シナリオ) が懸念される} \end{aligned}$$

安全評価 = 予測的線量評価(prospective safety assessment)
線源とリスクを結び付けて、処分システムの安全を達成する性能を確認する

残余のリスク = 固有のリスク - リスク対策 (安全対策) の効果
固有のリスク : 科学的/合理的に予想されるリスク
残余のリスク : 固有のリスクを除いた後に残るリスク (対策の不備、知識不足のため)

セーフティケース

安全評価 : 残余のリスクが順守すべきレベルを超えないこと
品質保証 : 様々なリスクに対する対策 (バリア) が正しく機能し、評価が正しく行われていること

安全評価 (safety assessment)

線源及び行為に付随する危険ならびに関連する防護と安全の対策を体系的に解析し評価するプロセス及びその結果。しばしば、規準との比較のために達成度の尺度を定量化することを目的とする。

scenario (シナリオ)

- 仮定あるいは想定された条件及び／又は事象の一式。
- 原子力施設における可能性のある事故又は処分場やその周辺環境の可能性のある将来の進展変化のような、可能性のある将来の条件及び／又は事象をモデル化することを表すために解析あるいは評価において最も一般的に使われる。
- ある一点の時間における条件又は、単一の事象あるいは、条件及び／又は事象（プロセスを含む）の時間履歴を表すこともある。

source term
(ソースターム)



exposure
pathway
(被ばく経路)



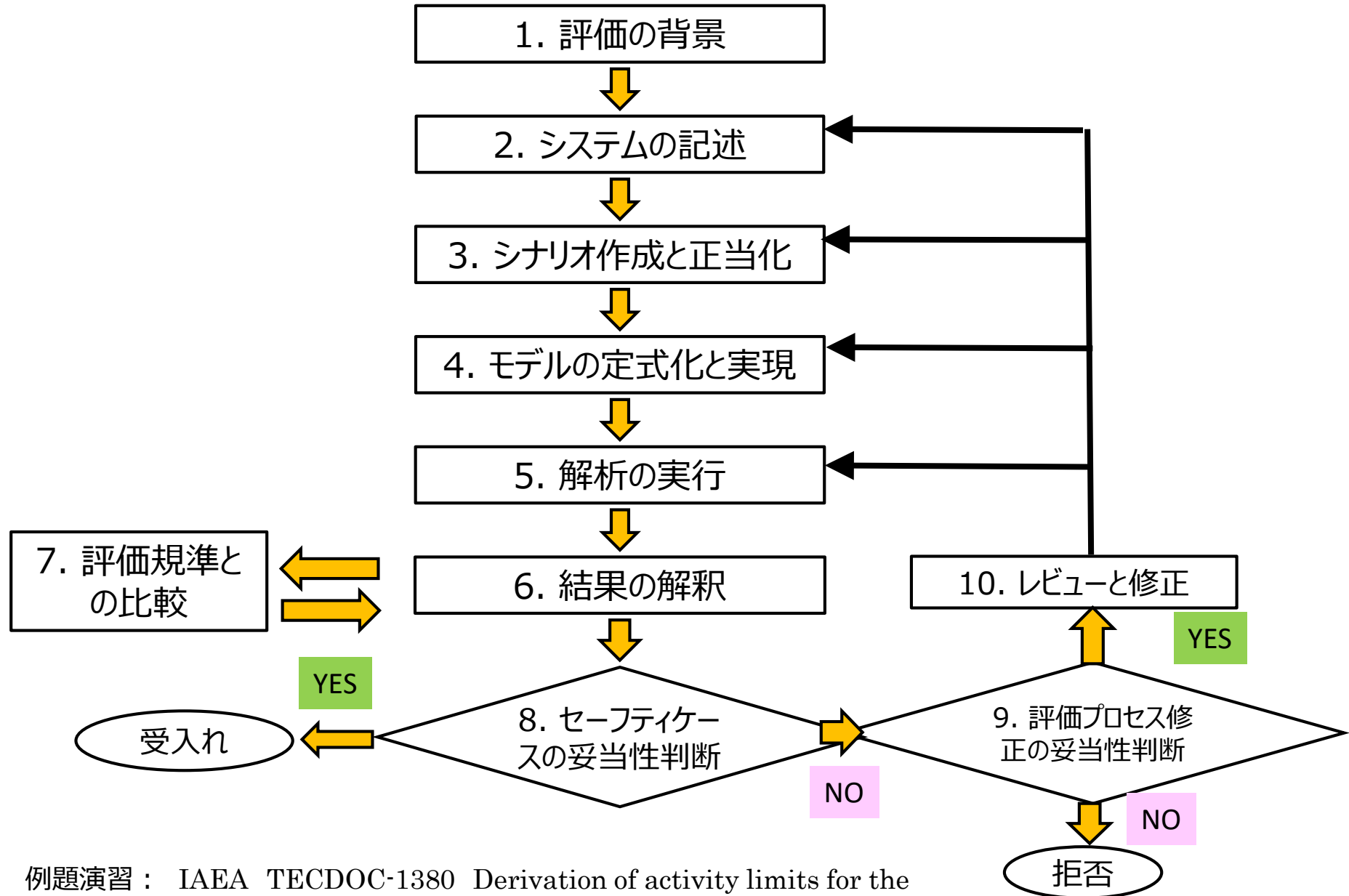
end point
(終点)

- 施設から放出された（あるいは放出されることが想定されている）物質の量と同位体組成。
- 特に、原子力施設における事故あるいは処分場における放射性廃棄物からの放出に関連した、環境への放射性核種の放出のモデル化に用いられる。

- 放射線又は放射性核種が人間に到達し、被ばくを引き起こしうる経路。

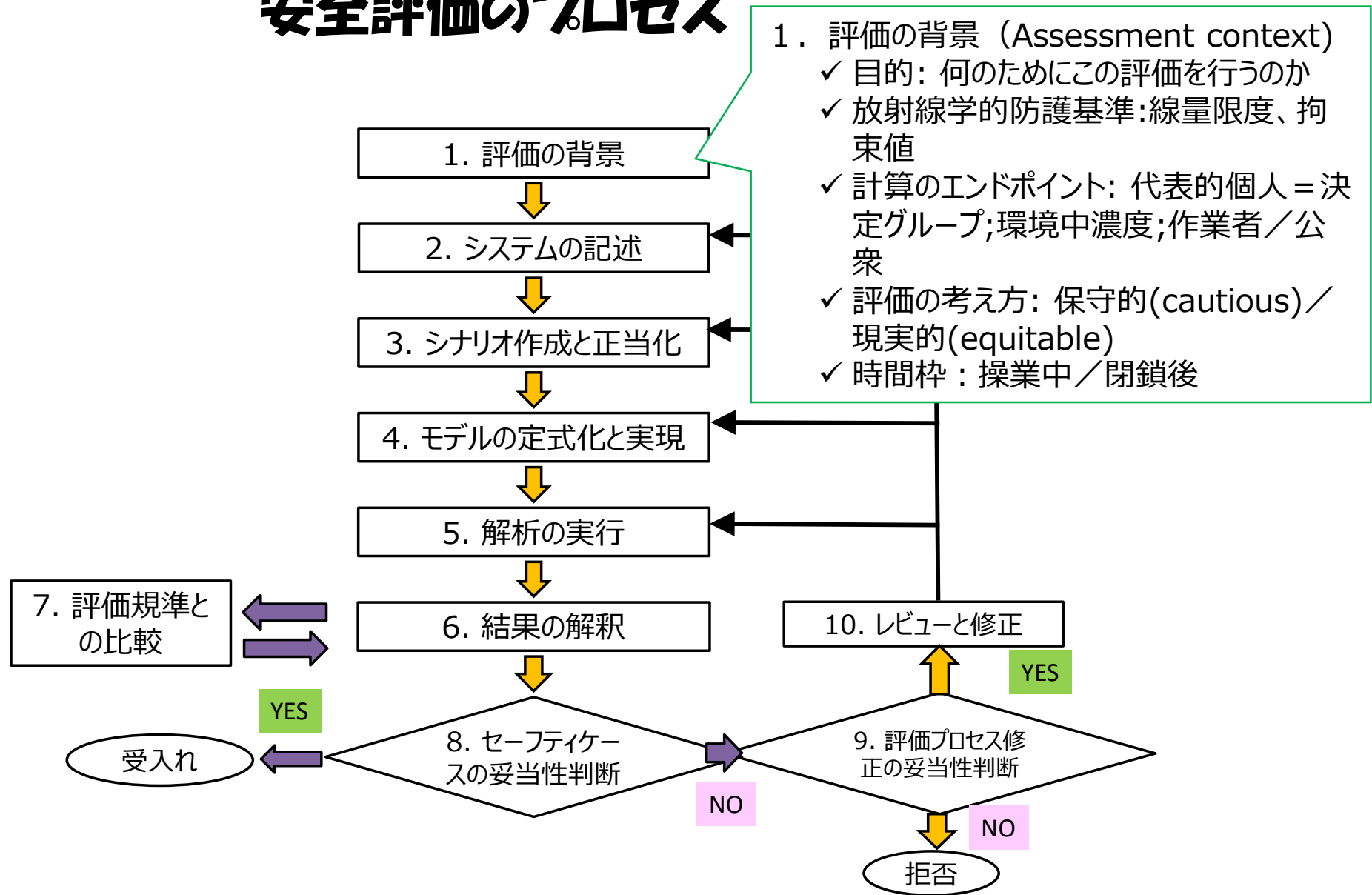
- あるプロセスの最終段階、特に、ある効果が観察される局面。
- 異なる結果あるいは影響の範囲をやや大まかに述べるのに用いられる。たとえば、「生物学的エンドポイント」という用語は、被ばくから生じ得る健康影響（あるいはその健康影響の確率）を述べるのに用いられる。

安全評価のプロセス



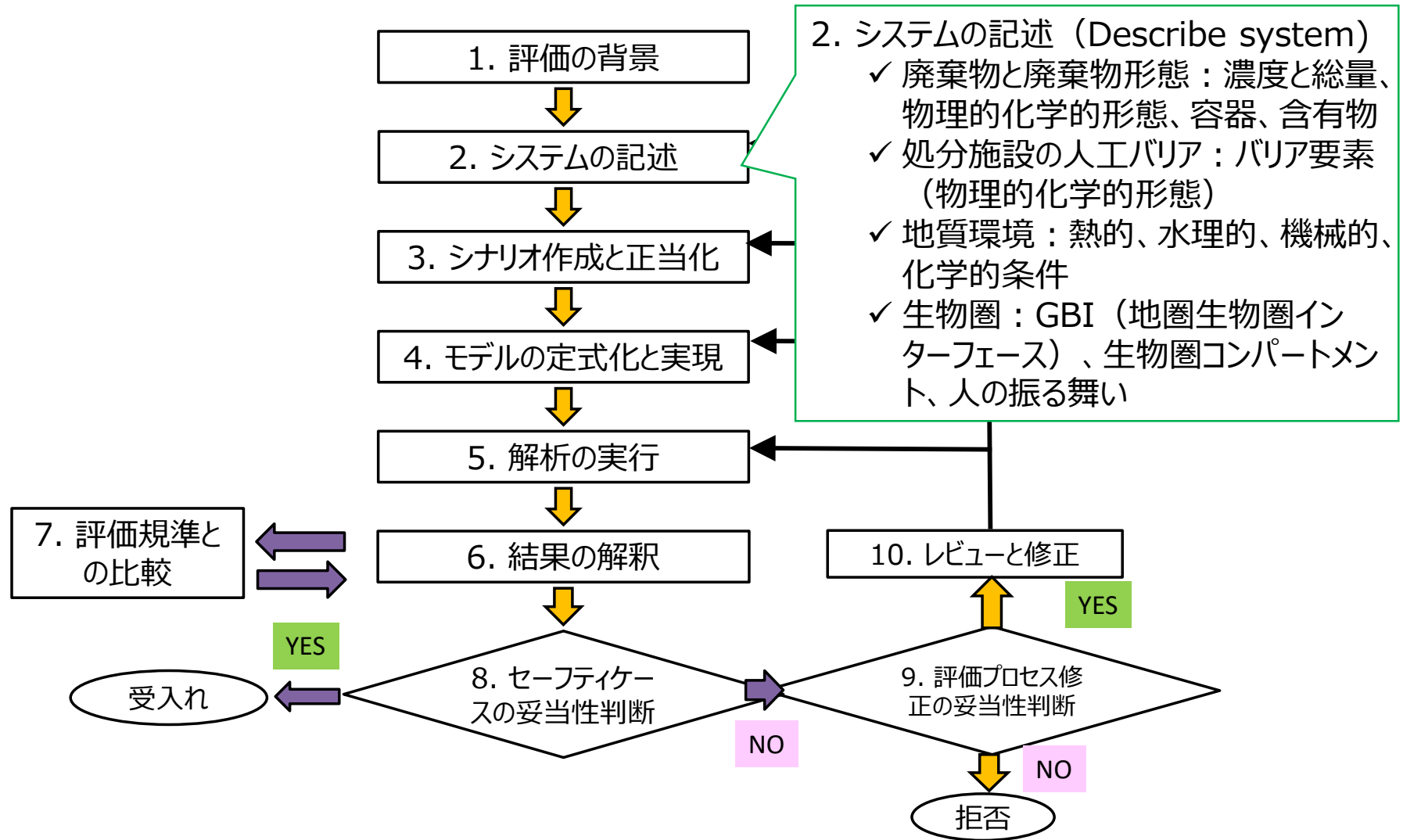
例題演習： IAEA TECDOC-1380 Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities (2003)

安全評価のプロセス



例題演習: IAEA TECDOC-1380 Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities (2003)

安全評価のプロセス

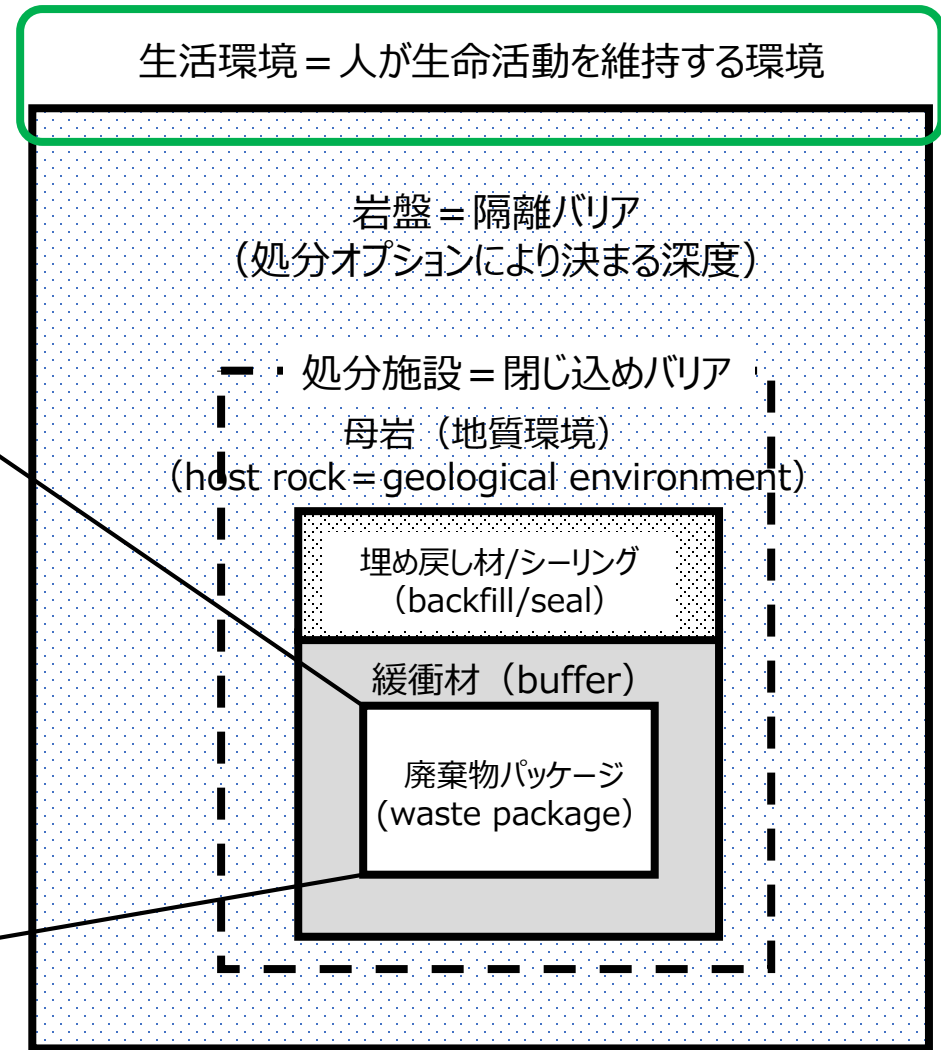
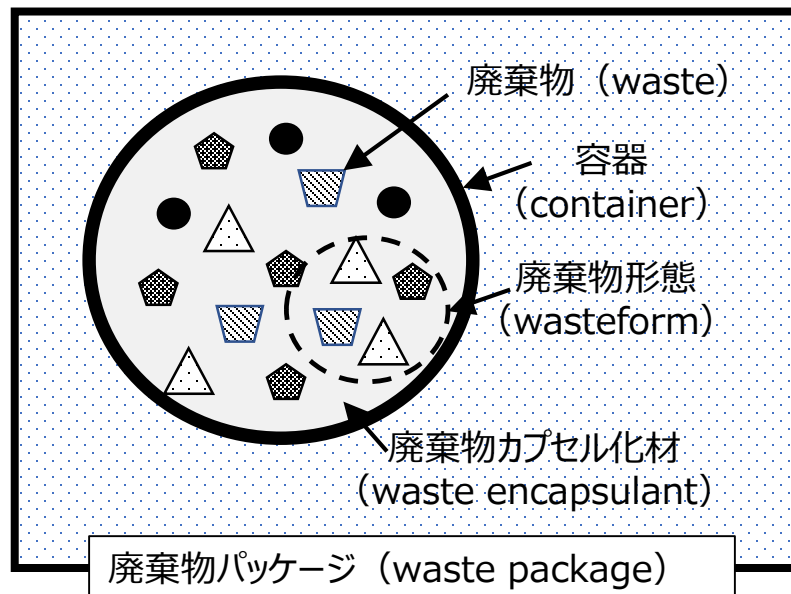


例題演習： IAEA TECDOC-1380 Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities (2003)

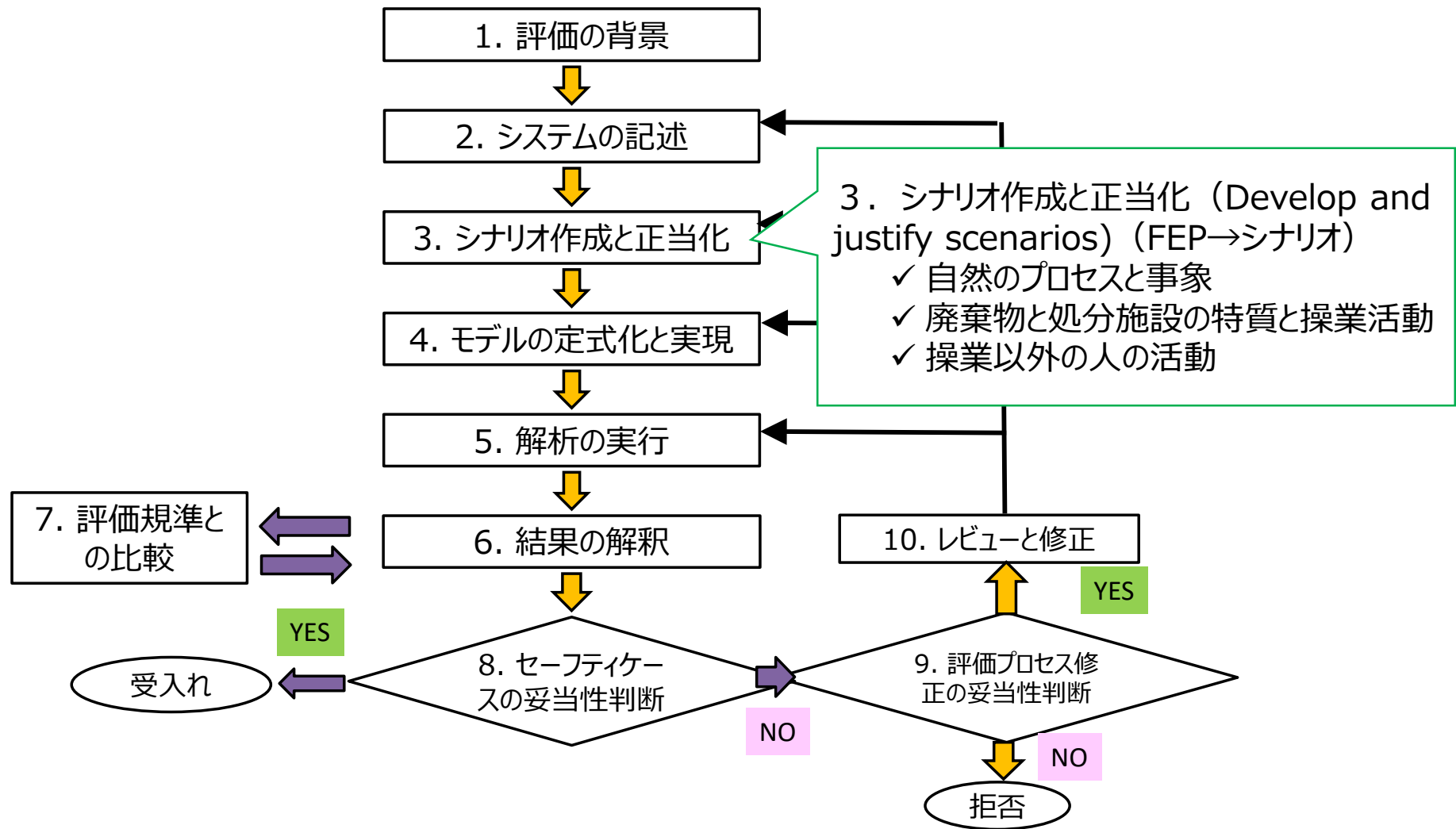
システムの記述(Describe system)

2. システムの記述 (Describe system)

- ✓ 廃棄物と廃棄物形態：濃度と総量、物理的・化学的形態、容器、含有物
- ✓ 処分施設の人工バリア：バリア要素（物理的・化学的形態）
- ✓ 地質環境（近傍、遠隔）と生物圏



安全評価のプロセス



例題演習： IAEA TECDOC-1380 Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities (2003)

シナリオの誘導

- 処分システムの初期状態の記述
廃棄物の特性把握
サイトの特性把握 (geosynthesis)
- どちらも不確実性の特定を含む



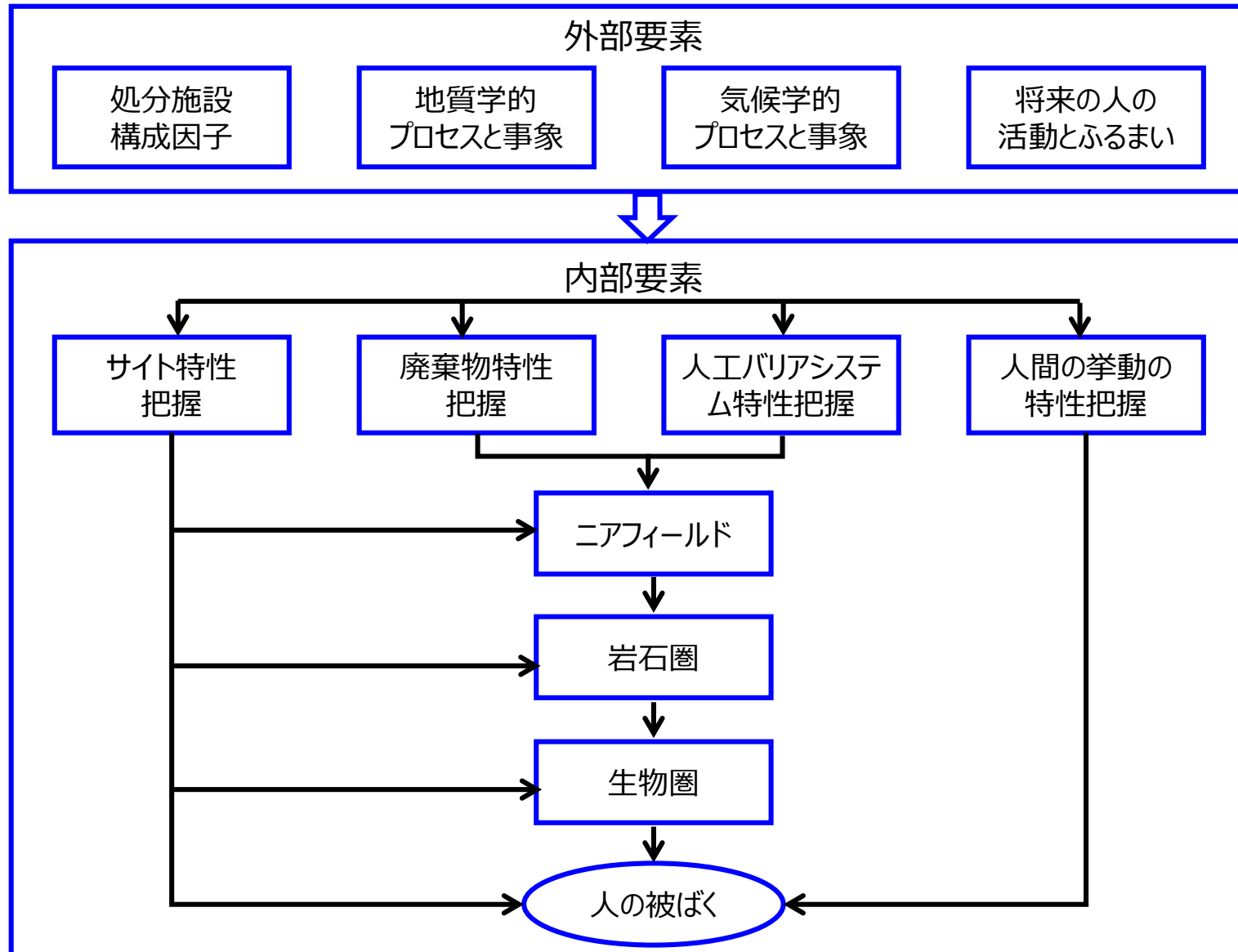
- 処分システムの進展変化 (FEP) の記述
システム (人工バリア、天然バリア) 設計と安全機能の時間的進展変化の把握 (化学 : **C**hemical、熱 : **T**hermal、水理 : **H**ydraulic、機械 : **M**echanical、ガス生成 : **G**as formation、放射線 : **R**adiation、生物 : **B**iological プロセスの把握)



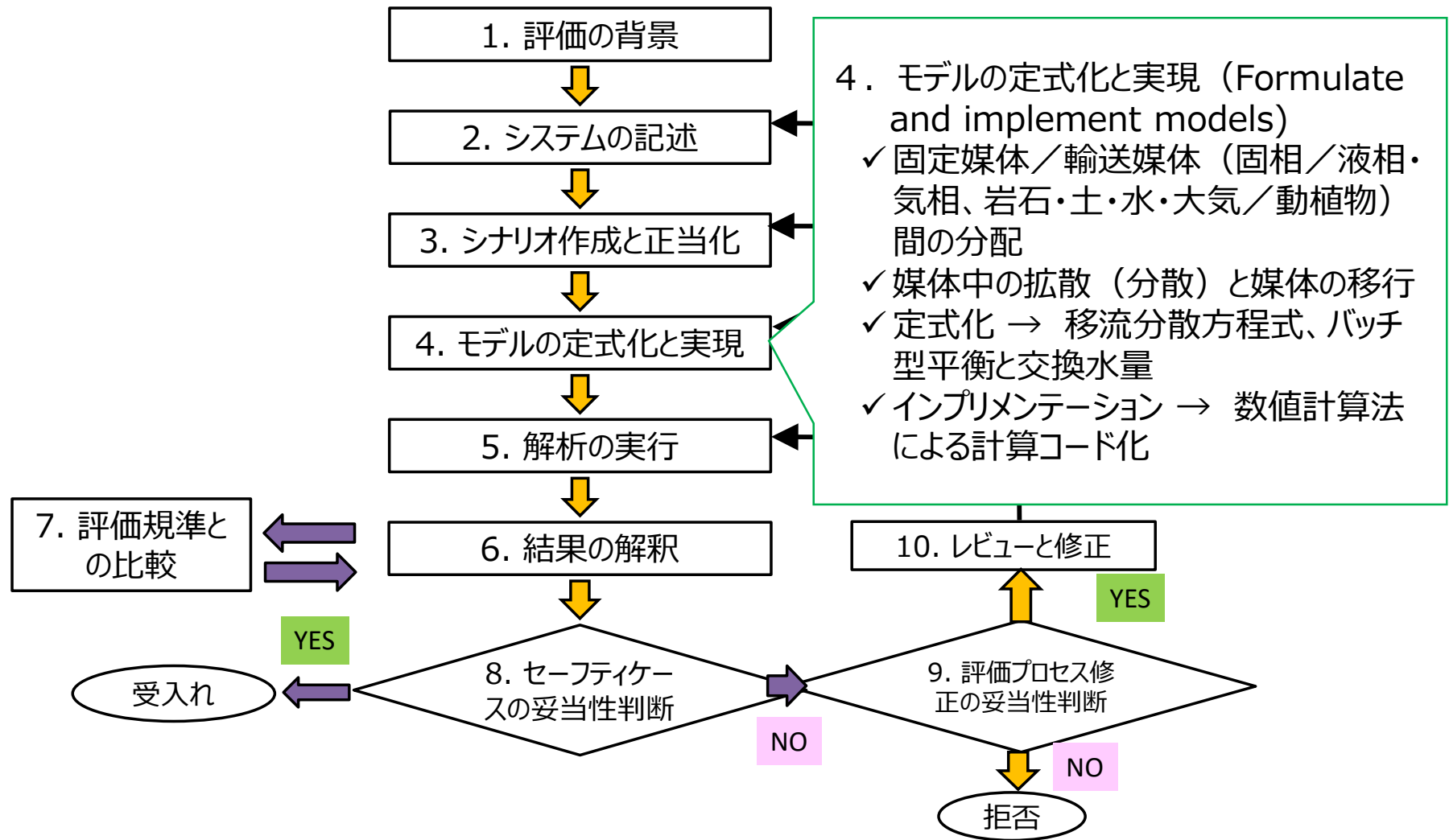
- ボトムアップアプローチ (FEPからの組み立て)
外部事象、状態変化 (気候変動、人間侵入、初期欠陥など) を発端とする処分システムの変化を考える
- トップダウンアプローチ (安全機能からの設定)
重要な安全機能を損なう条件の組み合わせを考える

両者を併用してシナリオを構築する

シナリオ開発：関連するプロセス要素の概念的記述とそれらの間の情報の流れ

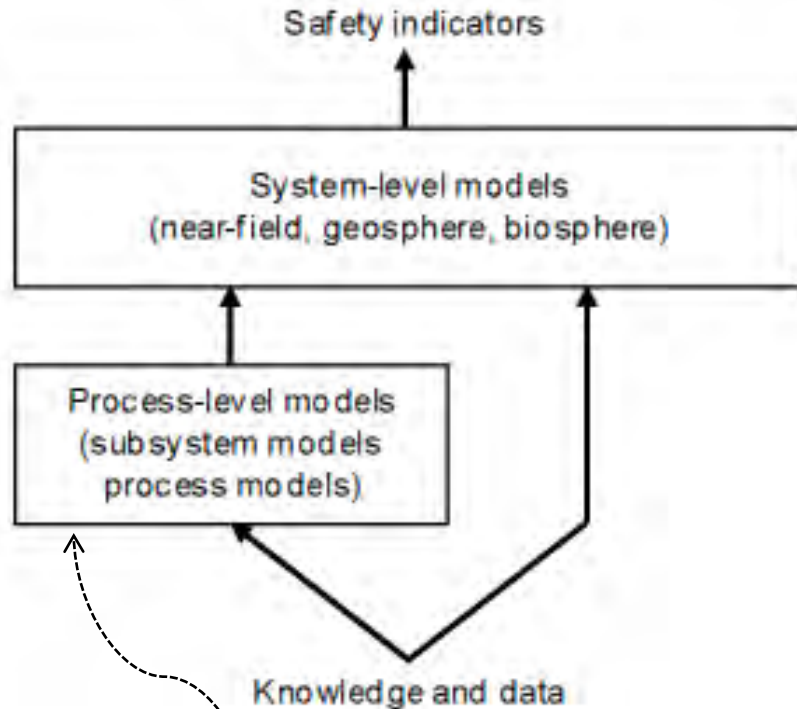


安全評価のプロセス



例題演習： IAEA TECDOC-1380 Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities (2003)

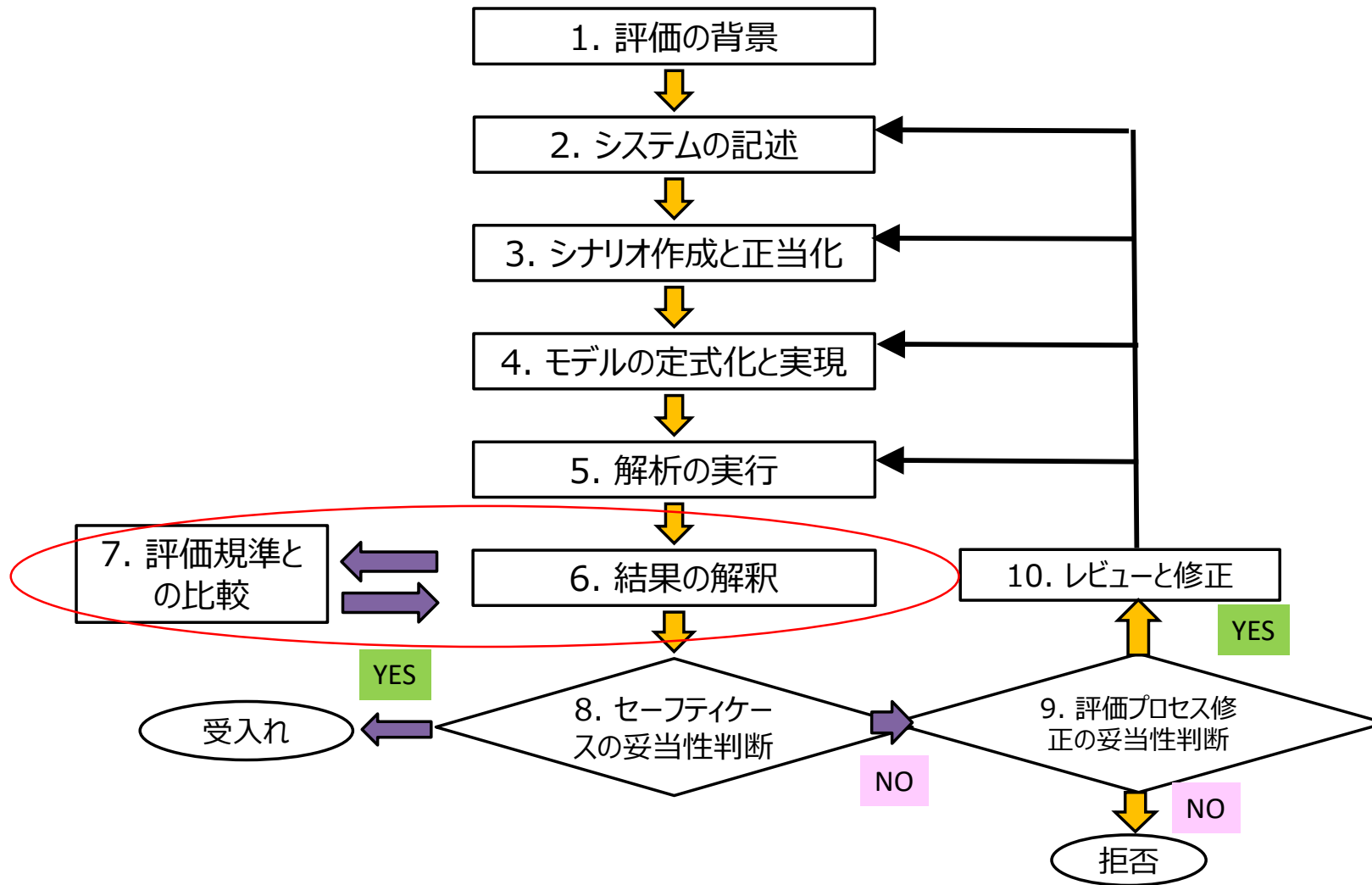
安全評価に用いられるモデルの階層とモデルの開発



シナリオの抽出、除外等セーフティ
ケース構築に重要となる
(THMCプロセス間の相互作用と
安全機能との関係の理解)

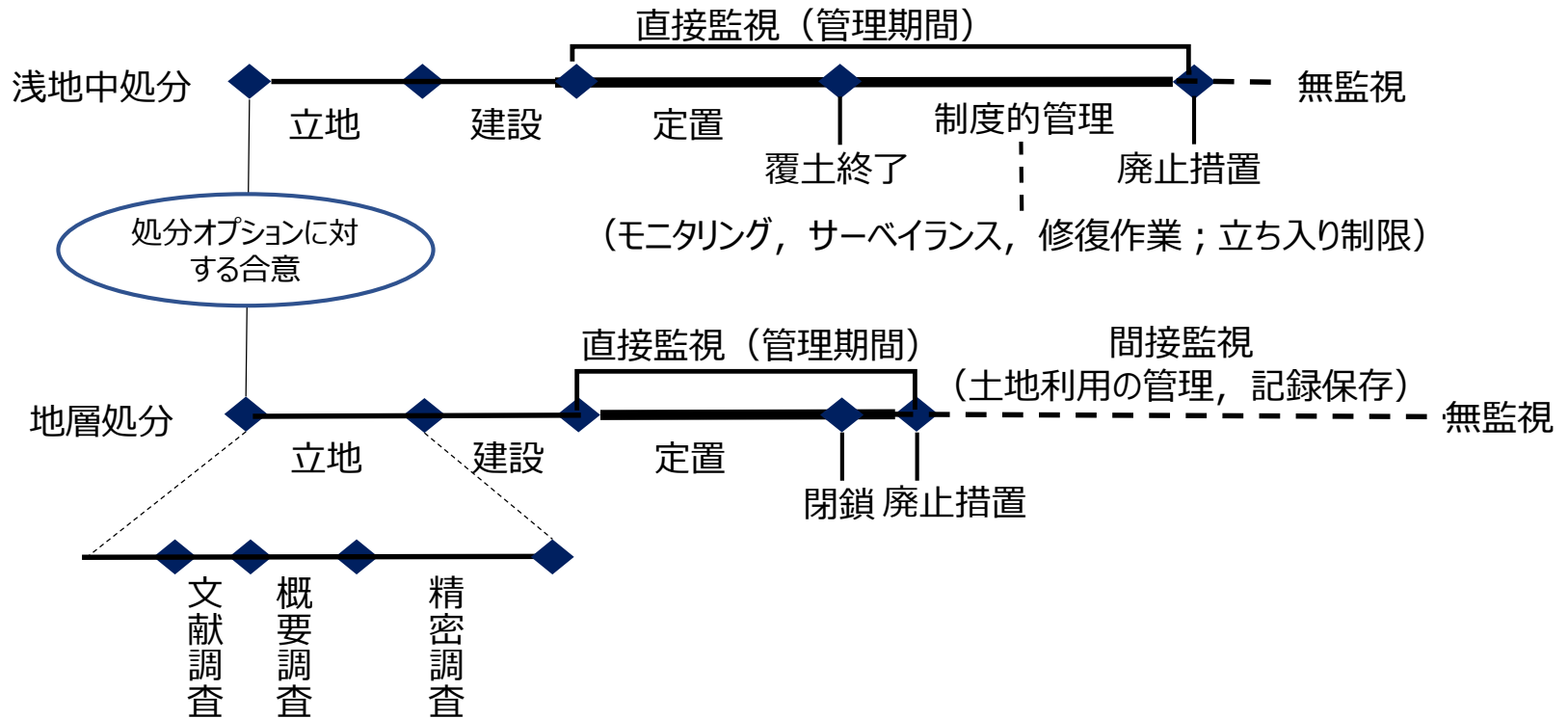
1. 概念モデル
2. 数学モデルへの定式化
3. 数値モデル（計算コード）への転換
コンピュータの計算能力の向上（メッシュ細
分化による数値計算安定性）
数値計算技術の向上（離散化計算、ソ
ルバー）
可視化・グラフ化ユーザーインターフェイス
4. データ収集と品質マネジメント
データとモデルの関係を考えた品質（不確
実性）の評価：空間軸、時間軸との関
係（データは外挿やスケール拡大される必
要があるか）
5. モデルの品質確認
Verification（検証）：モデルは意図し
た計算モデルを正しく反映して作られてい
るか
Validation（確証）：モデルは現象を正
しく表現しているか

安全評価のプロセス



例題演習： IAEA TECDOC-1380 Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities (2003)

処分施設の段階における監視 (oversight) と社会の意思決定



- 設計と予測（安全評価に基づくセーフティケース）のみに基づいて意思決定しなければならない
（通常の運転システム＝設計と管理により安全を確保）

処分のSCの特徴：何かあったら弁償（処罰）するという約束では意思決定できない

- 立地では社会の共有財である環境を利用するので、利害関係者の同意が必要となる。

なぜセーフティケースが必要か？（不確実性下の意思決定）

- 地層処分の安全評価が対象とする全時間・空間スケールに対して文字通りの実証は不可能（不確実性の増大）
- 安全評価（システムの安全レベルの定量化、因果の鎖としてのシナリオの評価）だけでは十分な信頼性を提供できないー多面的な証拠(multiple lines of evidence)による説明
- 段階的なアプローチ／意思決定（不確実性を残した状況）における各段階において safety case を提示する

規制の要求

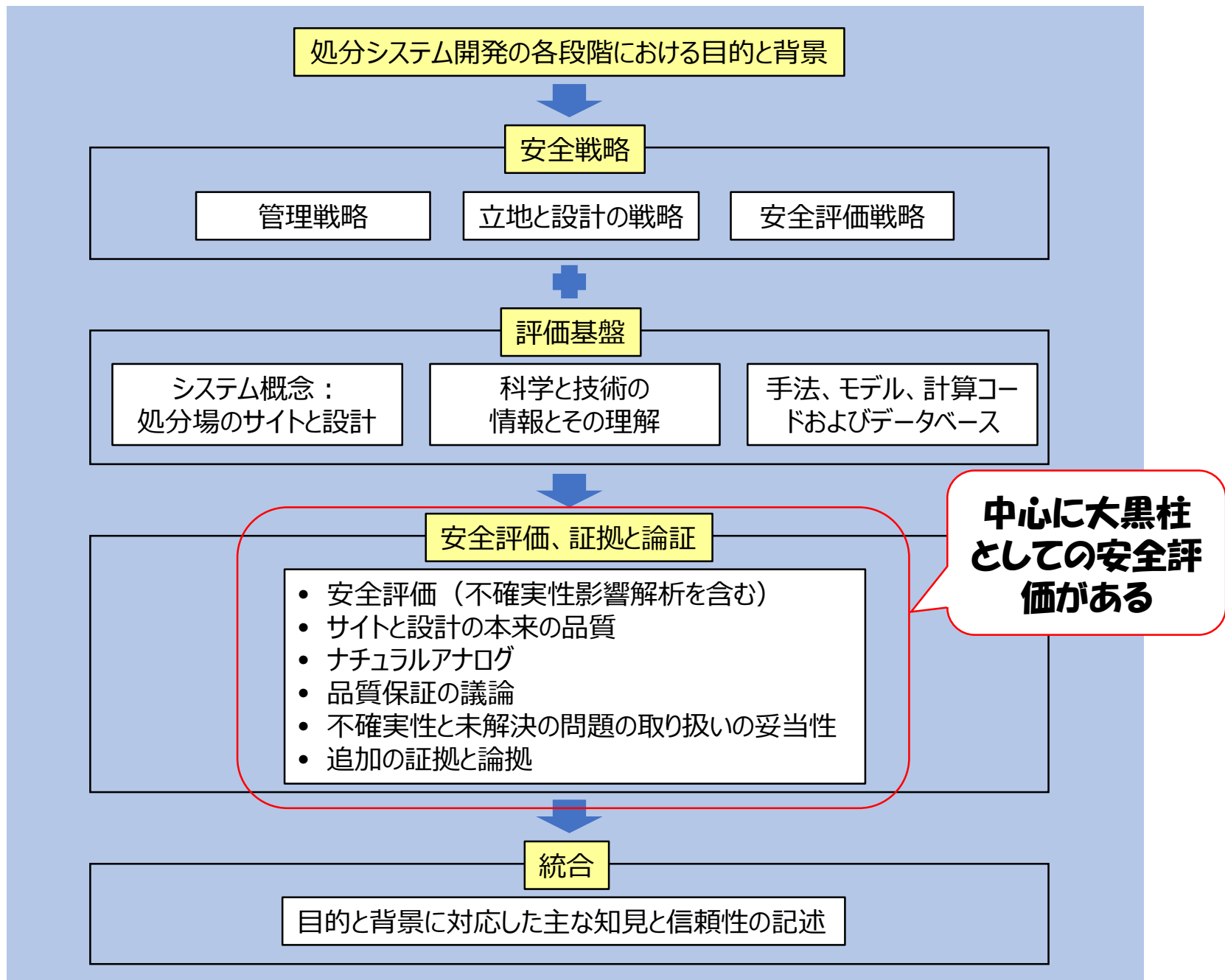
- 安全評価（システムの安全レベルの定量化）の結果の規準に対する順守
- システムと安全評価の双方が十分な頑健性（robustness）を有すること
- 処分システムの時間的変遷（evolution:進展変化）を十分理解していること



たとえば

- なぜこのシナリオでよいのか？（シナリオの網羅性）
- なぜ他のシナリオ（地震の影響、微生物誘導腐食など）は除外してよいのか？
- なぜこれらのモデル、データでよいのか？
- 予測の蓋然性を支持する傍証（ナチュラルアナログ）。
- 残る不確実性をどう判断したか？（不確実性の存在を認めてどう割り切ったかを示す ex. 遠い人の生活の様式化, 被ばく線量の意味, what-if シナリオ）

閉鎖後セーフティケースの構成要素間の関係



不確実性の取り扱い

不確実性の分類

- **シナリオの不確実性**：人工バリア、物理プロセス、サイトにおける顕著な変化に伴う不確実性。
- **モデルの不確実性**：天然バリア、人工バリアの進展変化、物理プロセス、サイトの特性把握、評価のためのモデル化や計算コード化に関する知識の不足および理解の不足による不確実性。
- **データとパラメータの不確実性**：評価モデルに使われるパラメータが、不完全（目的に対して不十分）なこと、正確に取得できないこと、入手できないことによりもたらされる不確実性。



不確実性に対する対策（不確実性の存在を認める）

- その不確実性が安全評価に関係しないことを示す。
- 不確実性を評価処理する—確率論的アプローチや感度解析による。
- 不確実性の範囲を明示する—保守的簡単化の仮定をして、計算される被ばく線量や放射線学的リスクのような安全指標が過大評価となるようにする。
- 不確実な事象またはプロセスを除外する—例えば低頻度であること、起こるとしてもより深刻な影響があることを理由として除外する。
- 同意された様式化アプローチをとる—たとえば生物圏の不確実性や将来の人の振る舞い（生活、人為過程）の不確実性は、様式化された“代表的個人”と今日の状態と技術を仮定して評価する。



無関係であることが示せない不確実性

サイトの選定、サイトの特性調査、処分施設の設計、プロセスについての研究により



回避（avoid）、緩和（mitigate）、低減（reduce）する

シナリオのセットの評価により 不確実性を考慮して予測により予防する

将来を完全に言い当てることはできないので、安全かどうかの意思決定をするためには、シナリオを用いて廃棄物が辿る運命の幅を考えて、その幅において悪影響を及ぼすことにならないことを確認する。この意味で、シナリオ開発とは、安全評価に問題となるような潜在的な将来の選択、幅の記述、同定であり、安全評価において最も重要となる作業である。

設計基準変遷(design-basis evolution)

- 基本シナリオ (main, base, normal, expected, likely, reference scenarios)
処分システムの予期される進展変化を表わすことを目指したシナリオ
- 変動シナリオ (less-likely but still plausible (altered, disturbed) scenarios)
あまり起こりそうもないが、それでも考え得るシナリオ
Likely = will probably happen in a particular situation
Plausible = seems likely to be true or valid

処分システムの将来の運命を言い当てようとするのではなく、**運命の幅を範囲づける(bound)ために**基本シナリオを設定し、変動シナリオにより運命の幅を考える。

設計基準外変遷(non-design-basis evolution)

- 稀頻度シナリオ (Unlikely scenarios)
起こりそうもないシナリオ
- 人為シナリオ (Possible future human actions)*
処分システムを損なう可能性のある人為事象
- “What-if” scenarios
起こるとは考えにくいまたは物理的に不可能なシナリオ
システムや評価の頑健性の確認のために考えるシナリオ（説明には気をつける必要がある）

確率分布曲線で
表せない事象

それでも発生の可能性を完全には否定できない事象について念のためにその影響が、回復不可能なほど大きくなることを確認する

* 代表的個人 (representative person) を設定して生活環境の汚染を評価する際の人の振る舞い (life style) とは区別する