

バックエンド週末基礎講座
石川県4高記念文化交流館
2013年10月26日



低レベル廃棄物に相当する 放射能汚染物の最終処分において 安全確保をどう考えるか

東海大学
大江俊昭

放射性廃棄物処分は最近の話題？

The Disposal of Radioactive Waste in Land

Report of the
Committee on Waste Disposal
of the
Division of Earth Science

Committee Members

Harry H. Hess, Chairman
John N. Adkins William B. Heroy
William E. Benson M. King Hubbert
John C. Frye Richard J. Russell
Charles V. Theis

Publication 519
Price \$1.00

National Academy of Sciences - National Research Council
Washington, D. C.

September 1957

米国科学アカデミー 処分の報告書 1957

岩塩層への処分の信頼性が高いと報告

世界初のPWR
 Shippingport原子力発電所
 操業開始1958年



我が国は？

1962年 日本原子力委員会廃棄物処理専門部会 中間報告

最終処分方式としては次の2方式

(i) 容器に入れて**深海に投棄**

国土が狭あいで、地震のあるわが国では最も可能性のある
最終処分方式

海洋に投棄する場合でも、廃棄物は低および中レベルのもの
に止めるべき

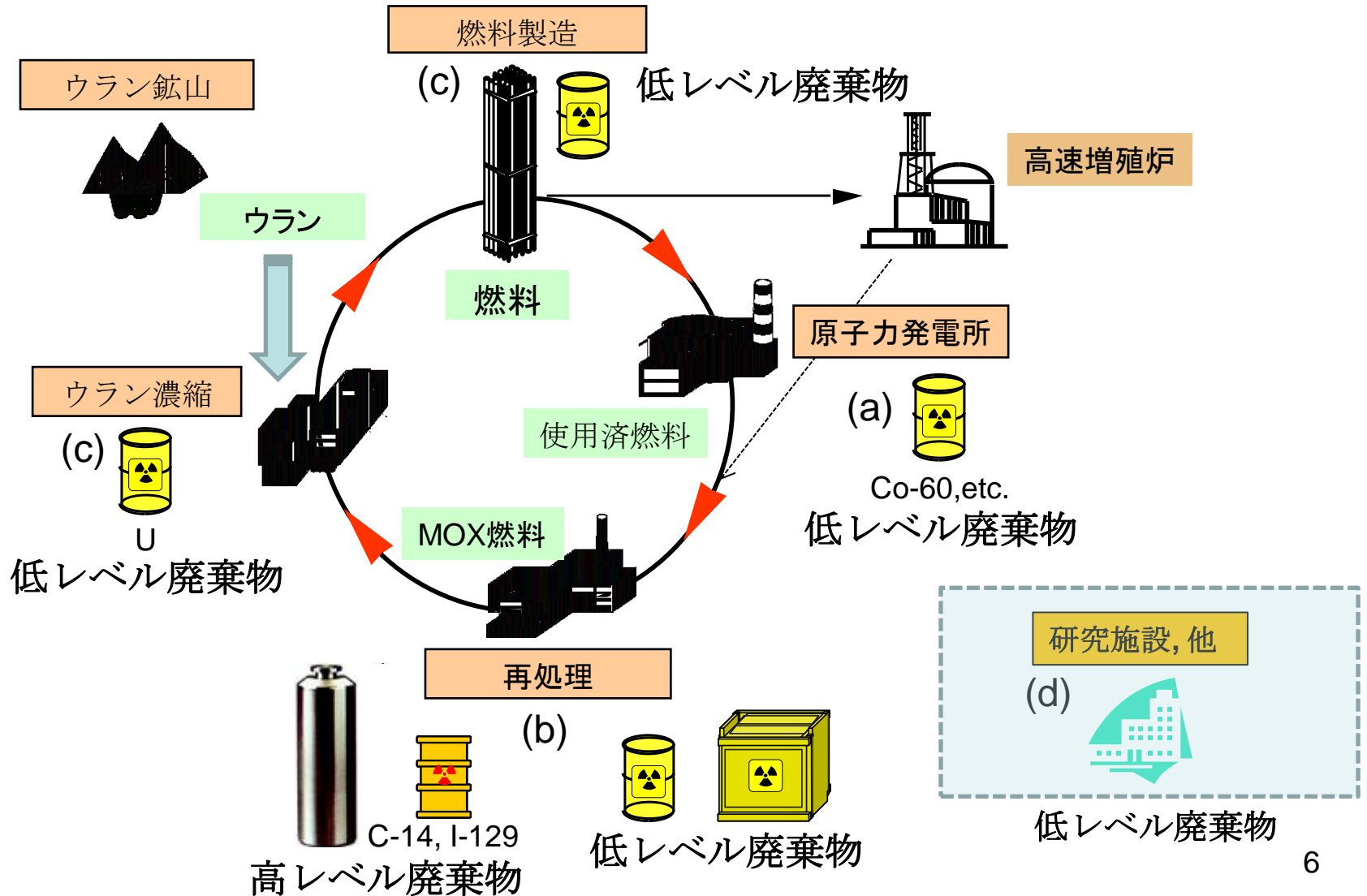
(ii) 放射性廃棄物を人の立ちいることの不可能なかつ漏洩の恐れのない
土中に埋没したり、天然の堅牢な**洞窟あるいは岩石層**
に入れる

内容

- 1. 処分方法の分類と事例**
- 2. 防護と処分の重要パラメータ**
- 3. 影響評価の手法と事例**
- 4. 新しい問題 汚泥と焼却灰の最終処分
F-1事故由来の廃棄物の処分**

1. 処分方法の分類と事例

放射性廃棄物の発生



3つの処分概念

0. 浅地中処分 (トレンチ)

1. 浅地中処分 (ピット)

約 88,400 m³ (63%)

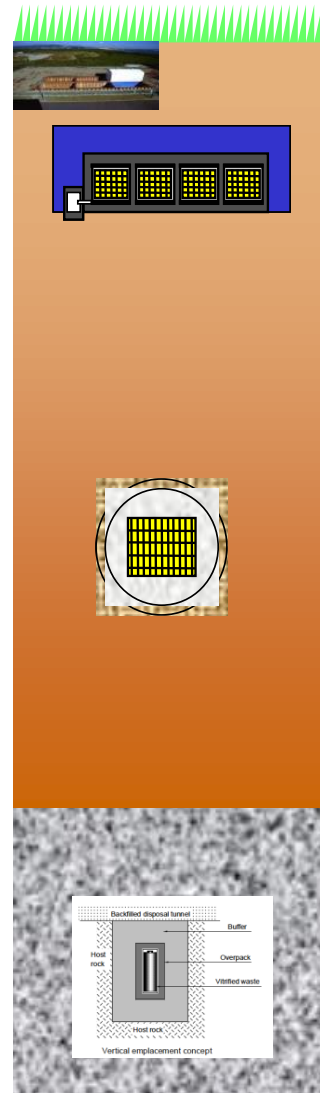
2. 余裕深度処分

約 25,200 m³ (18%)

3. 地層処分

約 26,600 m³ (19%)

(2050年までの見込み発生体積)



深度

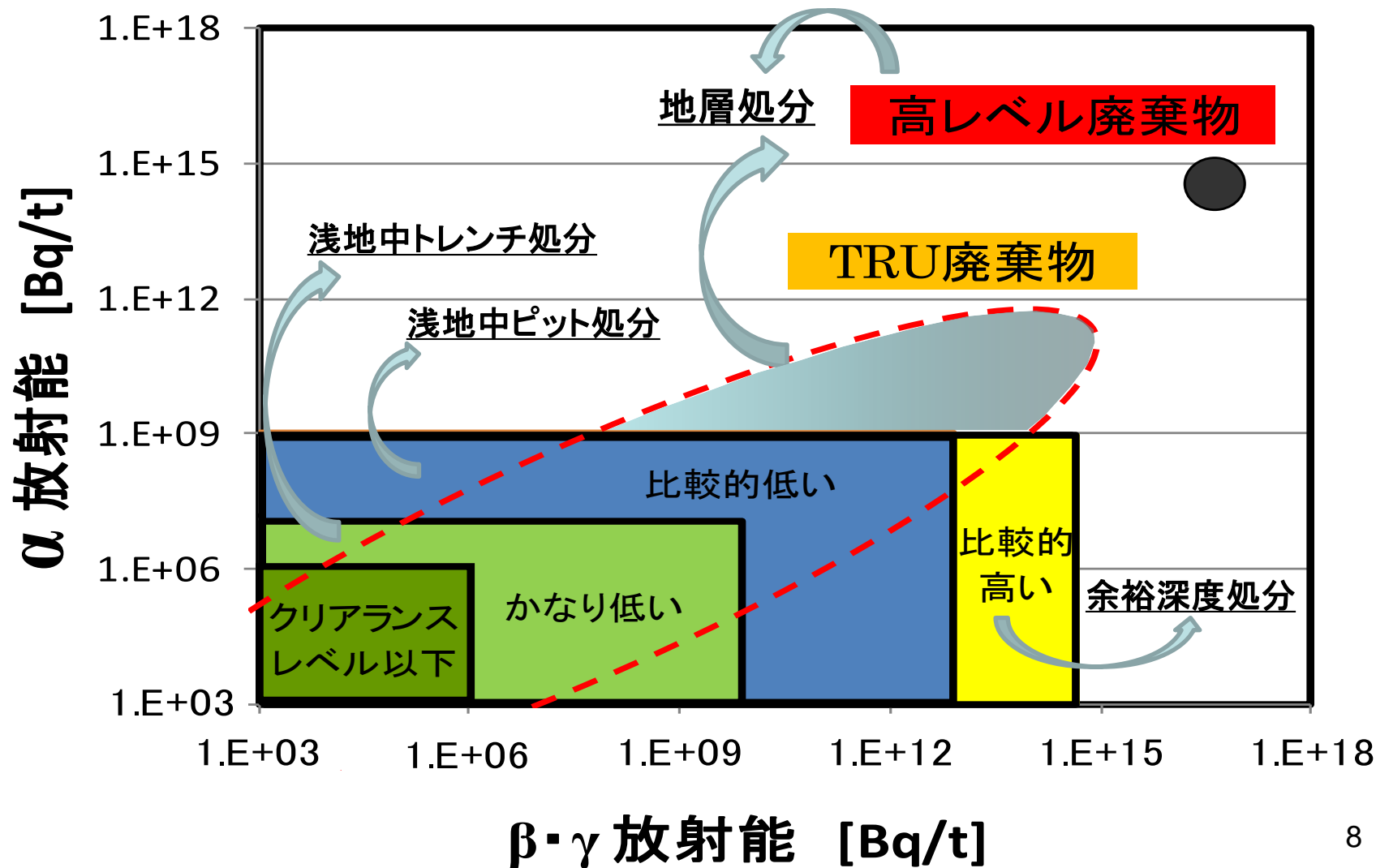
2m

10m程度

50 - 100 m

300m以深

放射能濃度による区分



処分方法の考え方

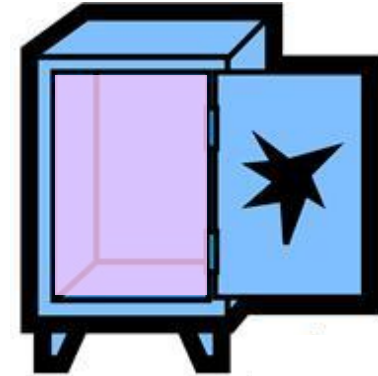
浅地中処分

管理型



半減期の短い
核種が多い
60-Co(5年)、
63-Ni(100年)

管理期間中の
減衰

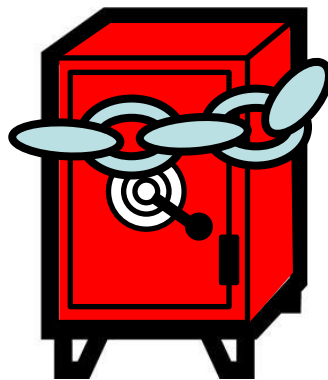


特段の管理が
不要のレベルまで管理

余裕深度処分

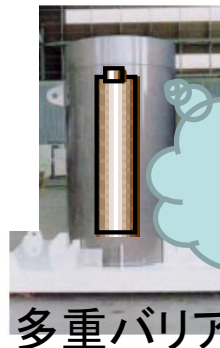
隔離型

厳重な隔離

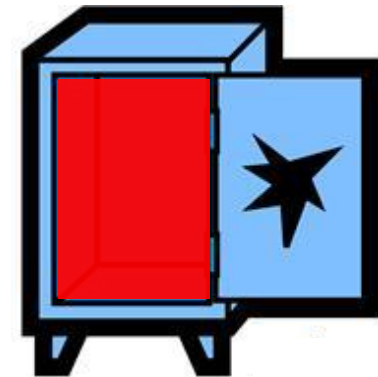


有意な減衰を
期待できない

135-Cs
(230万年)
237-Np
(214万年)



多重バリア



影響を極力抑える
処分システムを構築

地層処分

管理型トレンチ処分の事例

動力試験炉 (JPDR) の解体にともなって発生した廃棄物を対象

コンクリートピットなどの人工構造物を設置せず、浅地中に埋設処分

50年程度の管理期間を経たあとは、一般的な土地利用が可能
クリアランスレベル相当



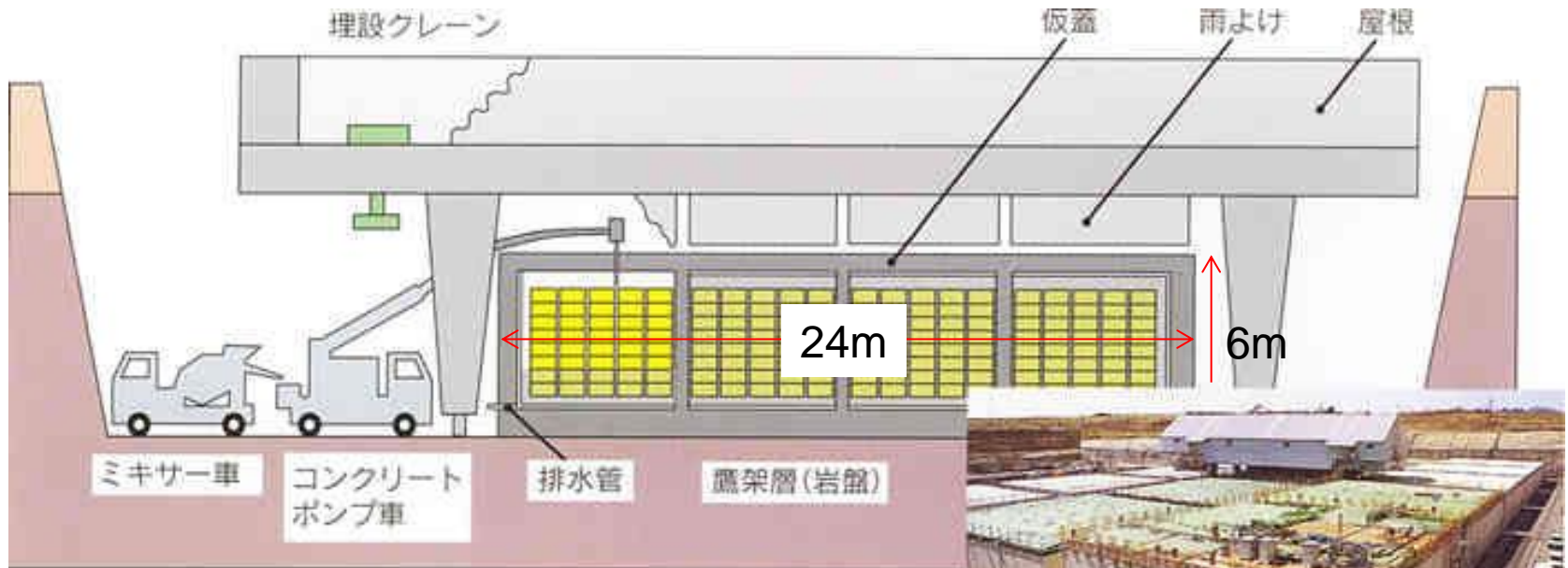
日本原子力研究開発機構
廃棄物埋設実地試験

管理型ピット処分の事例



日本原燃(株)
六ヶ所低レベル放射性廃棄物貯蔵センター

埋設の方法



廃棄体の間にセメント系充てん材
(モルタル)を注入

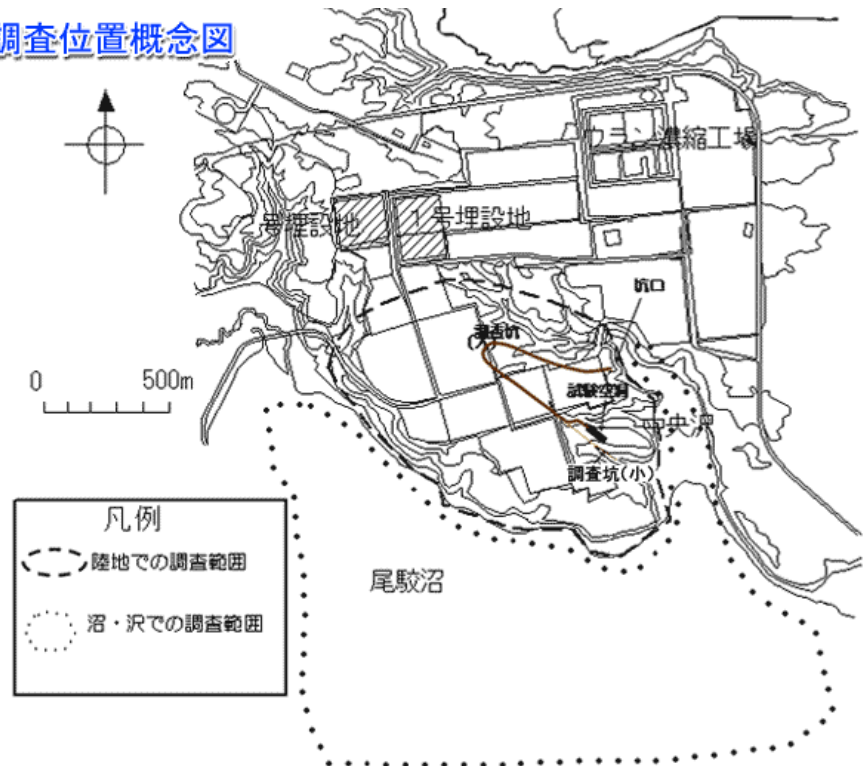
余裕深度処分の候補

低レベル放射性廃棄物のうち放射能レベルの比較的高い廃棄物



図-6 試験空洞

調査位置概念図



六ヶ所村日本原燃(株)の事業所内で調査中

隔離型処分の事例

フィンランド

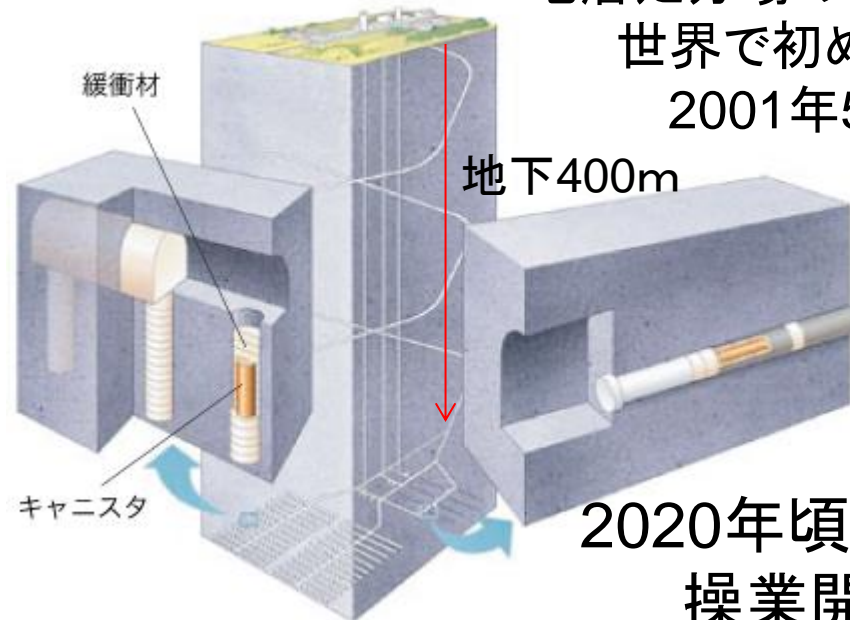
使用済燃料は再処理せず高レベル放射性廃棄物として地層中に処分



使用済み燃料を収納する
銅製容器



地層処分場のサイト選定が
世界で初めて最終決定
2001年5月議会承認



2020年頃に処分場の
操業開始予定

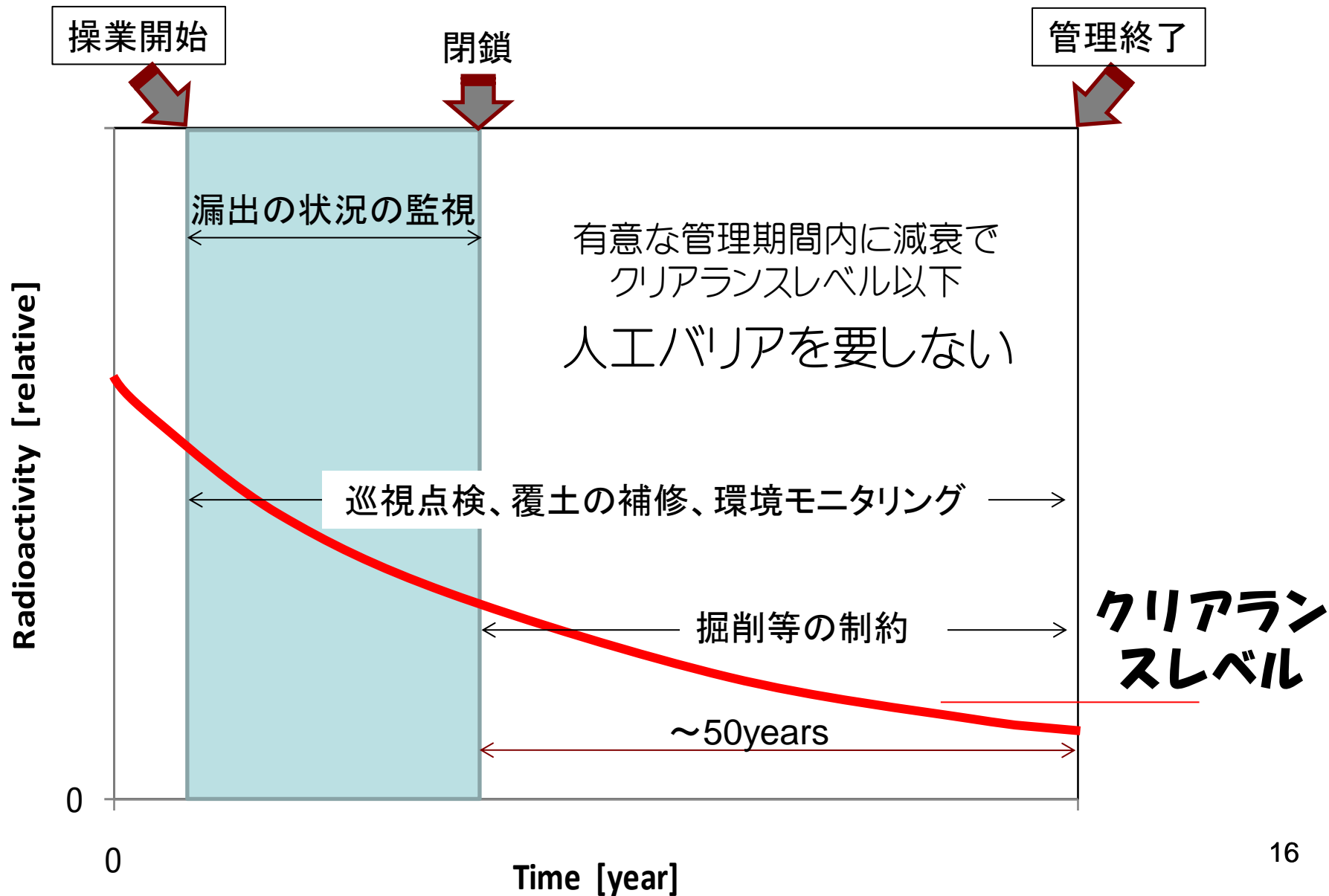
浅地中処分の管理

管理とは何か？

トレンチ	ピット
埋設保全区域の設定、巡視点検、覆土の補修、環境モニタリング	
地下水中の放射性物質濃度の監視	
	排水・監視設備により排水
漏出の状況の監視	
	埋設設備の修復
掘削等の制約	

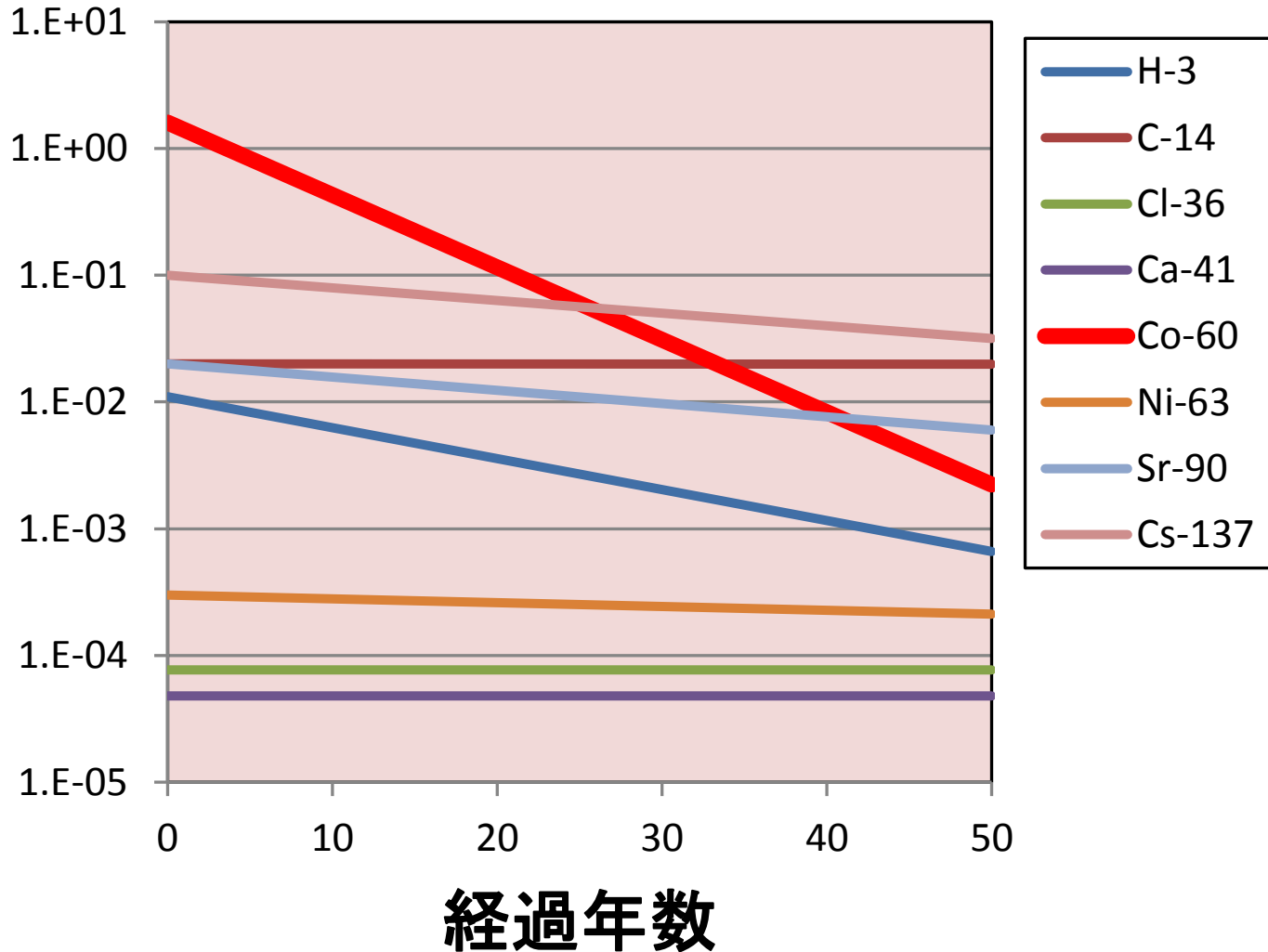
管理の期間はどのように決まるのか？

トレンチ処分の安全確保の概念

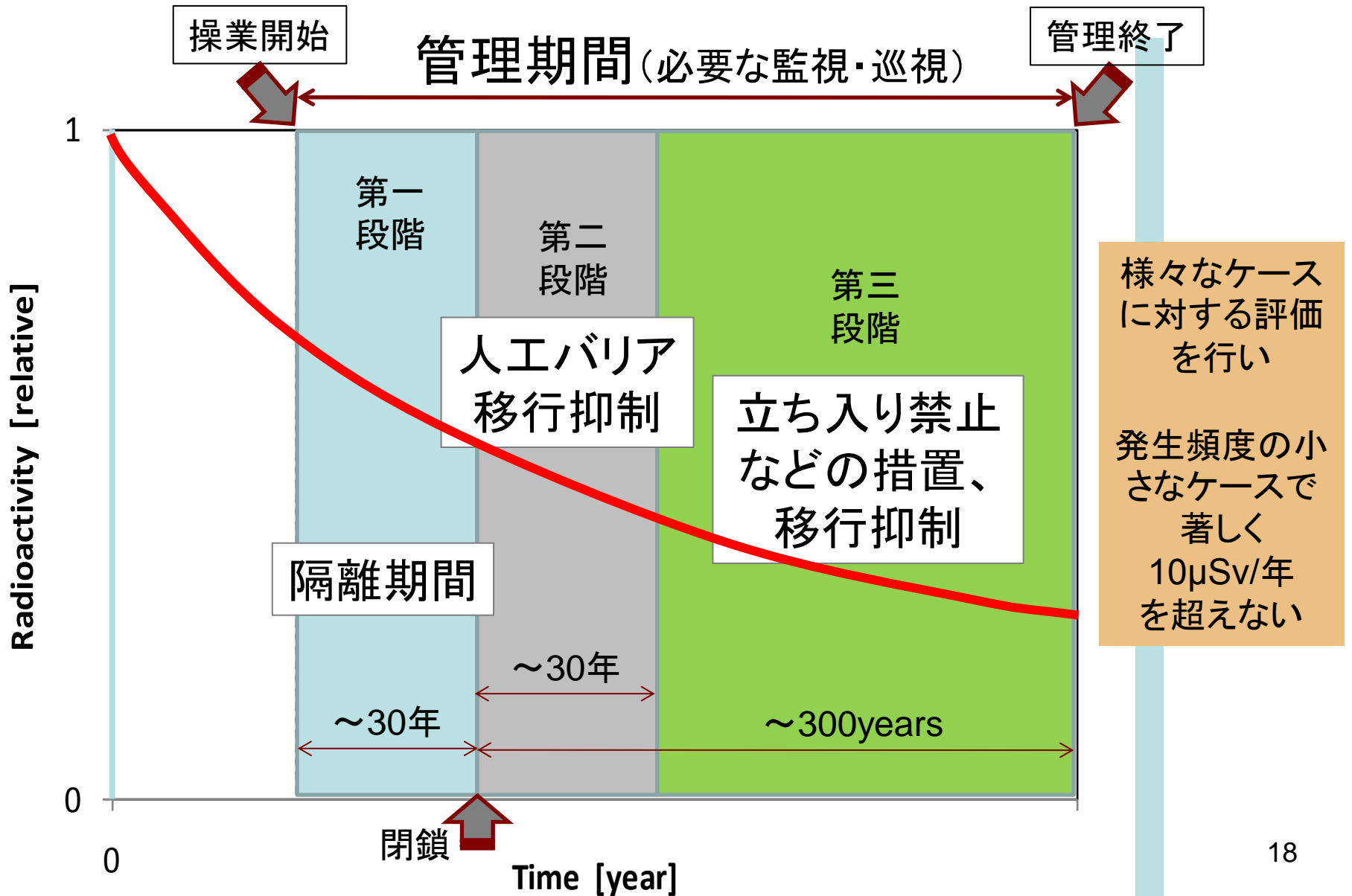


申請最大濃度の経時変化

クリアランスレベルで規格化した濃度



ピット処分の安全確保の概念



管理期間の終了

放射性物質の濃度が十分低くなるまで埋設地の掘削を制限するなどの管理を行います。

資源エネルギー庁HP

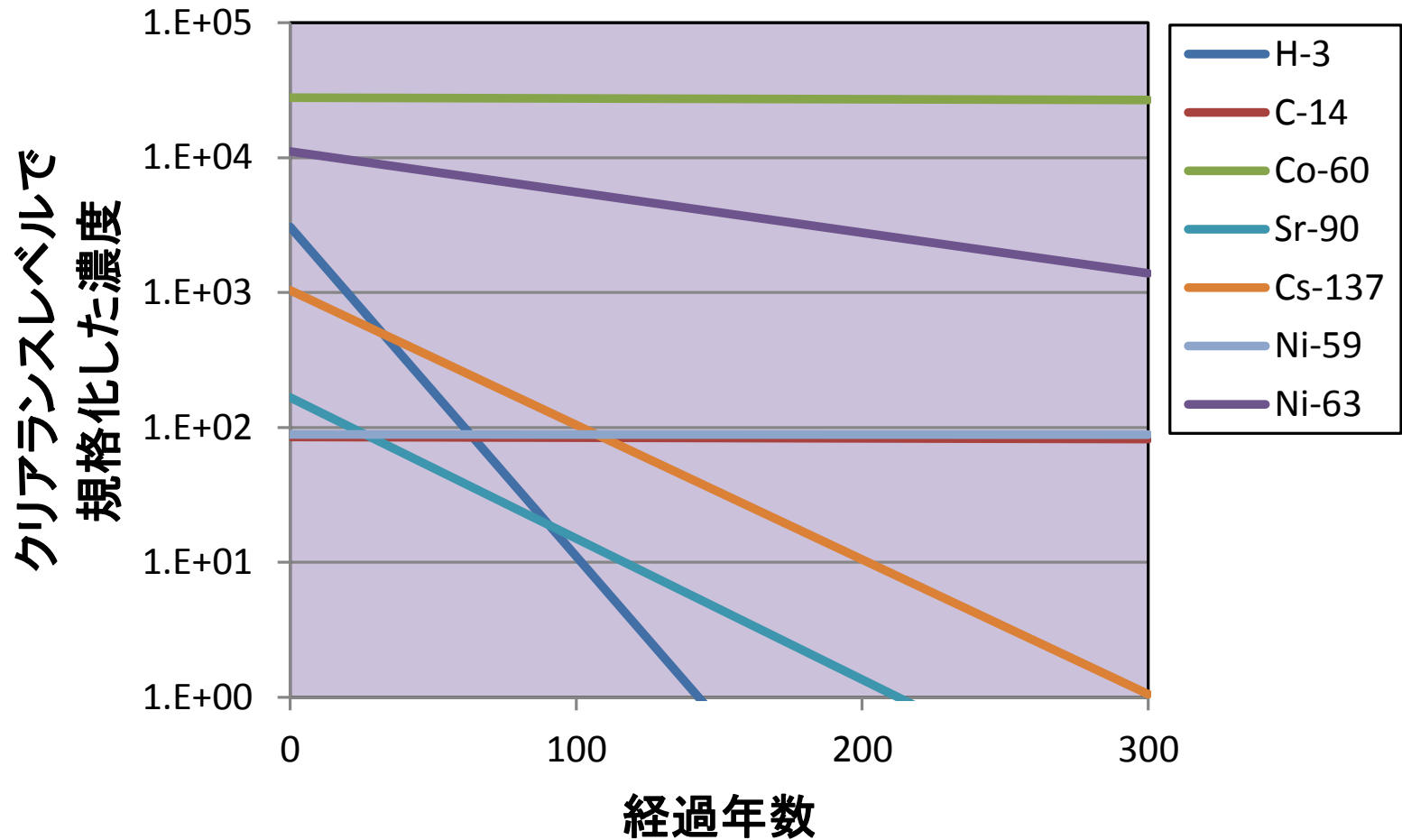
管理が必要な期間として、**300～400年**が一つの目安とされています。

300～400年の根拠？

管理期間終了後は、**一般的な土地利用が可能**になります。

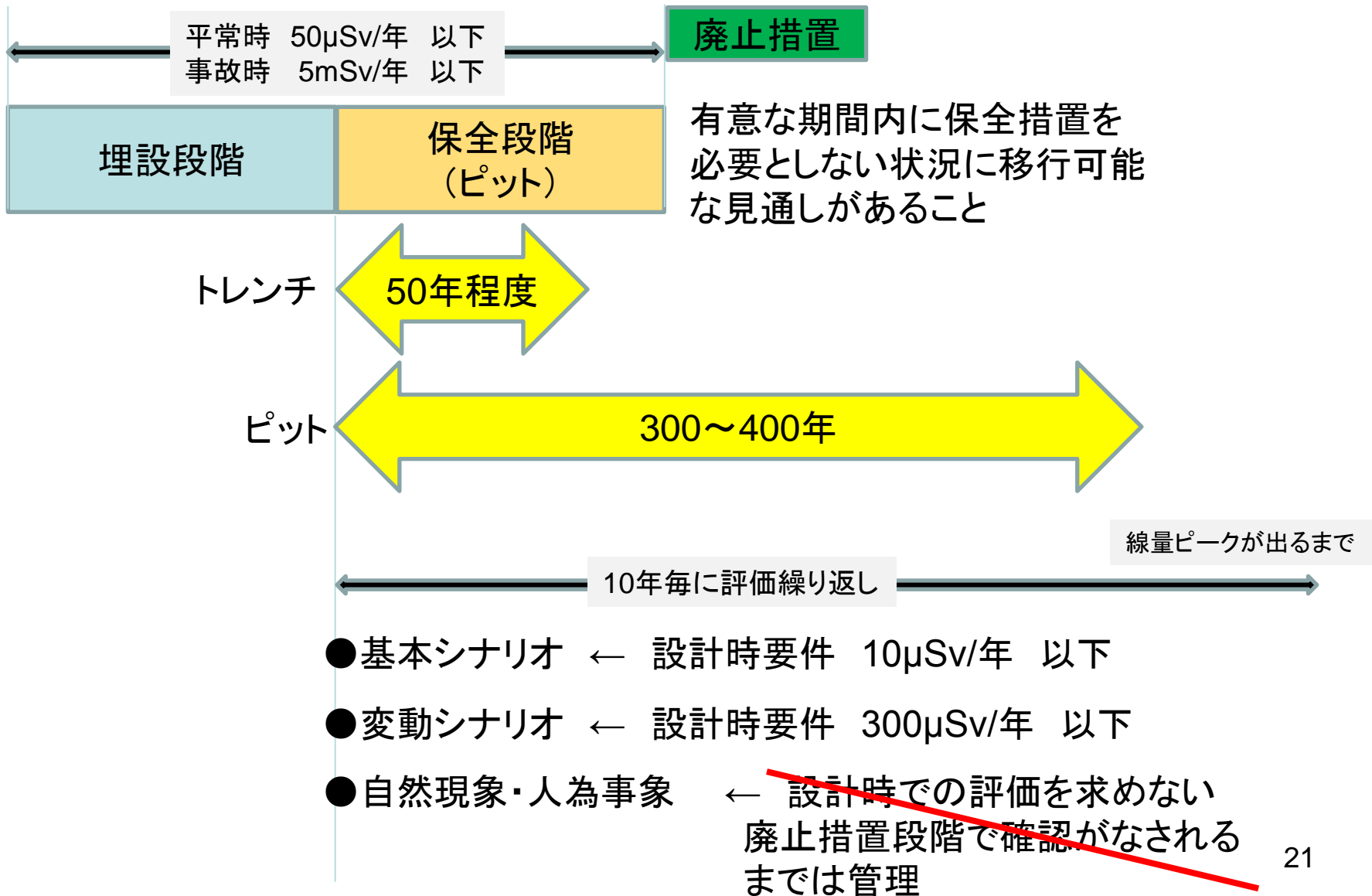
一般的な利用？

申請最大濃度の経時変化



300～400年後でもクリアランスレベル以下とならない核種

規制委員会の新基準骨子案



廃棄物埋設施設の新規制基準

5月14日付配布資料より要点抜粋

1. 規制対象が存在する施設のみ(**余裕深度処分は除外**)
余裕深度処分は インベントリが大きい
超長期に亘り生物圏への影響を防止するための管理方法が必要
← **地層処分の安全規制との整合**的な検討をすべき
2. 管理期間終了後の安全評価基準は、**基本シナリオと変動シナリオのみ**
3. 安全評価の更新制度(第二埋設規則の改正)
4. 廃止措置まで間の「保全」や「モニタリング」等管理の明確化
5. 管理期間は事業の終了期限を定めるものではなく、
有意な期間内に管理を必要としない状況への移行が可能かどうかの見通しを得る
ことを審査ガイドに明示

事業許可基準

5月21日付資料より

稀頻度事象 シナリオ : 極めて長期間の時間枠において考慮すべき自然現象のうち
重大な影響を被る可能性のある範囲を立地条件として避ける
ことを前提としている。

人為事象 シナリオ : 一般的な土地利用を想定しない埋設深度の確保や埋設存在地の
認知性の確保等の、制度的管理を前提としている。

基本シナリオと変動シナリオのみとする理由

余裕深度処分に比べて放射能濃度が低い

→ **極めて長期間の時間枠は考慮する必要がない**

一般的な**土地利用を制限する措置が講じられていること**が前提とならない

→ 想定される自然事象や人為事象は基本・変動シナリオの範疇で
取り扱うべきもの

後段規制

定期的評価の要求

意図すること

管理期間中に得られた知見や情報に基づき、より確度の高い評価が可能
保安規定変更や廃止措置計画の認可の際の判断材料

埋設地保全の要求

意図すること

埋設終了前(埋設段階)から保安措置命令を行える

廃止措置計画の認可が保全段階(管理期間)の終了を意味し、
管理期間終了に対する国の関与が明確化

廃止措置計画の認可基準の追加

意図すること

管理期間の終了だけでなく、保全のための措置を必要としない状況であることを
安全評価結果に基づき判断することを明確化

議論のポイント

稀頻度、人為事象シナリオを排除できるのか？

シナリオ	意味合い	
基本	処分システムの設計および考え方の妥当性確認	
変動	基本シナリオの持つ不確かさを考慮し、基本シナリオの条件やパラメータの変動要因を分析して、その影響を把握。	
稀頻度	確率は極めて低いが、仮に起こったら影響が大きいので、あらかじめ評価しておき、それでもなお、極端な被ばく影響をもたらすようなことを把握。	基本、変動のシナリオを想定してもなお残る不確実性の考慮
人為事象		能動的行為に起因し、生活圏設定の範囲では扱えない範疇の考慮

基本シナリオと変動シナリオのみとする理由

余裕深度処分比べて放射能濃度が低い

→ 極めて長期間の時間枠は考慮する必要がない

安全評価においては、濃度が評価値を決める要因にならない、あくまでもインベントリーが重要

隔離のための深度を確保する余裕深度処分とは異なって

一般的な土地利用を制限する措置が講じられていることが前提とならない

→ 想定される自然事象や人為事象は基本・変動シナリオの範疇で
取り扱うべきもの

不確実性への対処の視点で、国際的な考えとも相違



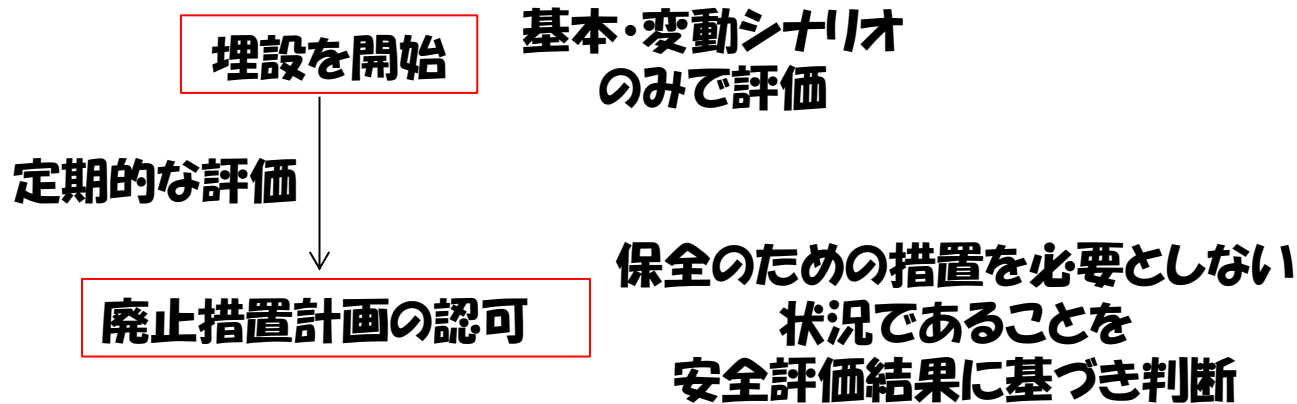
私見です

稀頻度事象や人為事象シナリオの本来の意図

「起こりえるかどうか定かではものの、起こったら影響が大きいので、あらかじめ評価しておき、それでもなお、極端な被ばく影響をもたらさうもないことを確認する」

処分方法によらず、不確実なものへの対処としての根本思想
ただし、処分対象により考慮すべきシナリオに違いは出る

本質的な議論



私見です

様々な不確実性を考慮しても廃止可能である確認を最終段階で行う

これではとりあえずの「**貯蔵**」?

埋設を認可する段階で

保全のための措置を必要としない状況を見通すのが「**処分**」

この時、「処分」の評価が完璧ではなく不確実であることを認識して判断

ただし、廃止措置計画の段階で「処分」不可とされることもあり得る

線量基準

稀頻度・人為事象シナリオ

不確実な事象でありながら、目安線量が高すぎないか？

シナリオ	線量の目安
基本	10 μ Sv/y
変動	300 μ Sv/y
稀頻度	10~100mSv/y
人為事象	

線量ではなく「リスク」が先

線量目安 × 発生頻度

↑
定量的評価が困難
頻度は **1** と設定

リスク

そもそも $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ 、 $300\mu\text{Sv}/\text{年}$ はどういう意味？

リスクレベル

不慮の事故のリスク 10^{-4} 年間1万人当たり1名の死亡

放射性固体廃棄物埋設処分に係る放射線防護に関する国際的な考え方(文科省)
ICRP Pub. 77(1997年)

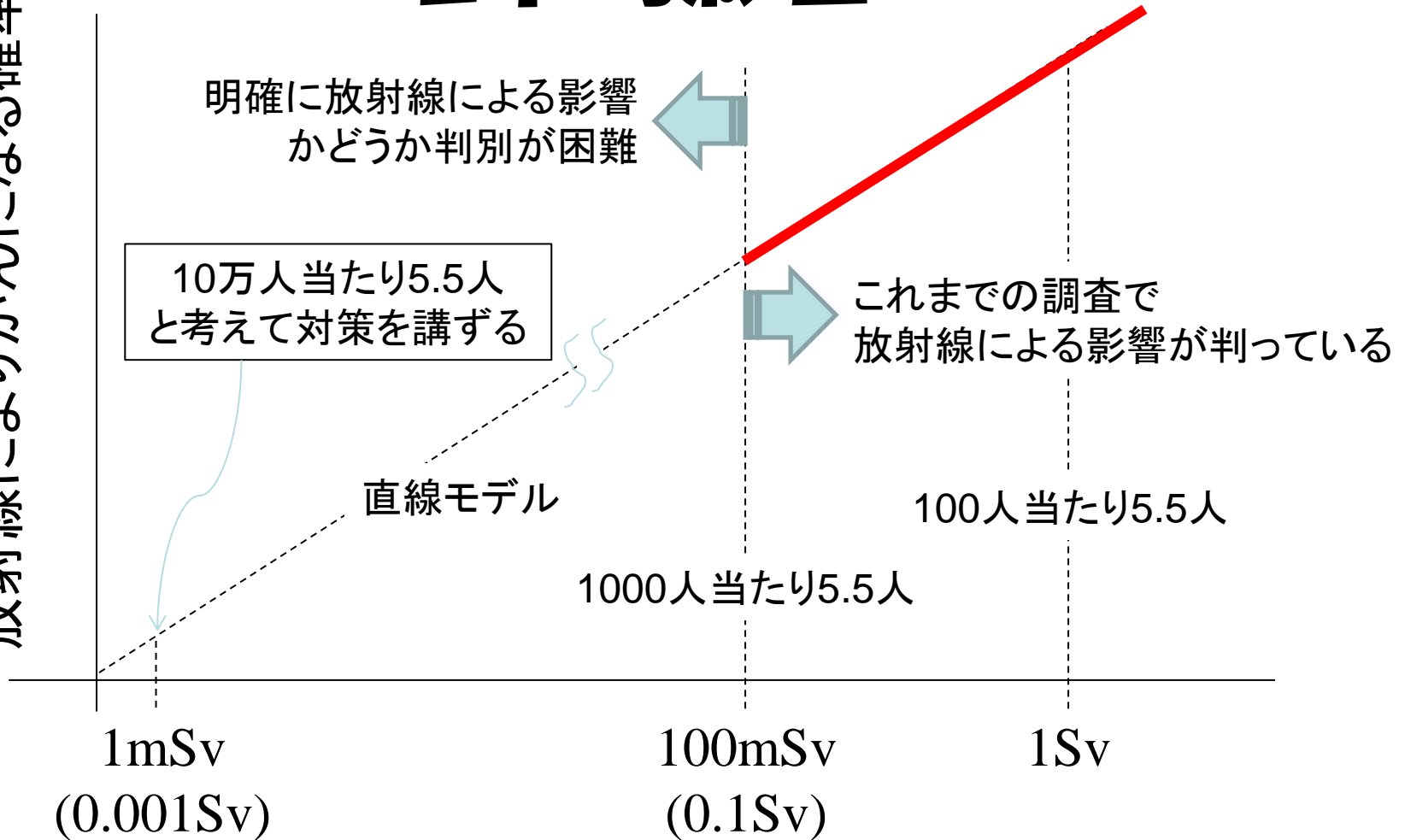
線量限度 **1**ミリシーベルト／年  1万人当たり0.55名の発癌

公衆被ばくの管理について
複数の線源による被ばくを
見込んで

線量拘束値約 $300\text{マイクロシーベルト}/\text{年}$ を超えない値が適切

確率的影響

放射線によりがんになる確率



ICRP (2007年勧告)
低線量での確率を求めるものではなく、
対策を講ずる際の目安

旧食品販売規制 5mSvの意味

放射性セシウムは筋肉蓄積（全身）

➡ 摂取制限で 5mSv 以下に

↓ 1mSvでは10万人
あたり5.5人のがん

1年間の摂取があると

がんのリスクは 5倍の 1万人あたり2.75人

不慮の事故のリスク 1万人あたり3.2人/年 と同程度

1桁違っていても 1000人あたり2.75人



放射線以外のがんのリスク 10人あたり3人/年 よりも十分低い

落ち着きどころ

5月14日

自然現象・人為事象 ← 設計時での評価を求めない
廃止措置段階で確認がなされるまでは管理

9月2日

第二種廃棄物埋設施設の新規制基準骨子案(改訂版)

基本・変動シナリオ以外の自然現象および人為事象に(係るシナリオ)については
サイト条件を十分に勘案して
その発生の可能性が排除されない限り

その影響について評価すること

線量目安に関する記述は特になし

2. 防護と処分の重要パラメータ

影響抑制の決め手 多重バリア

地層の核種保持機能

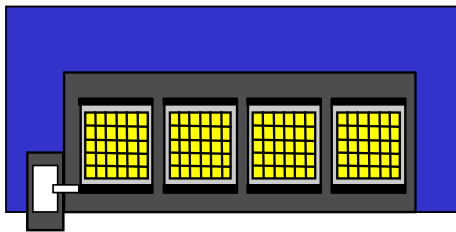
放射性核種

収着性 分散，移流を抑制

分散（機械的散乱＋拡散）

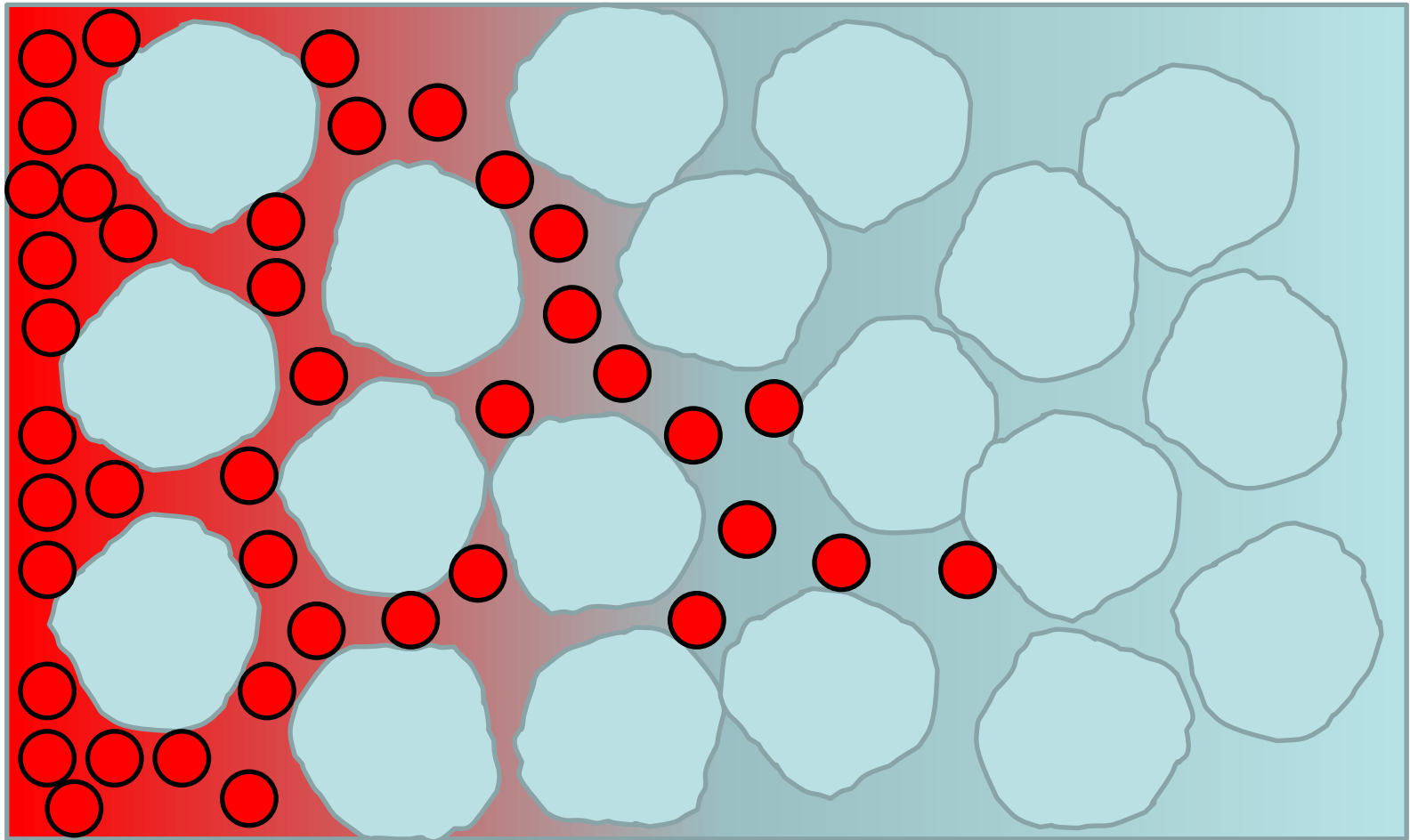
地下水流れ（移流）

天然バリア



人工バリアからの
の漏洩速度小

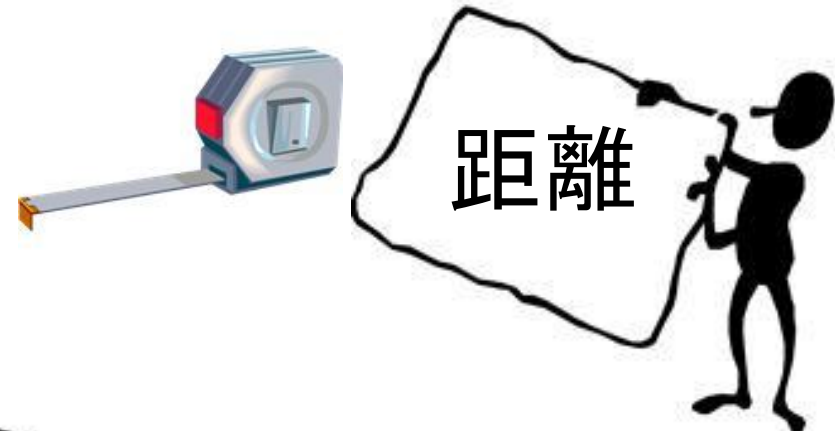
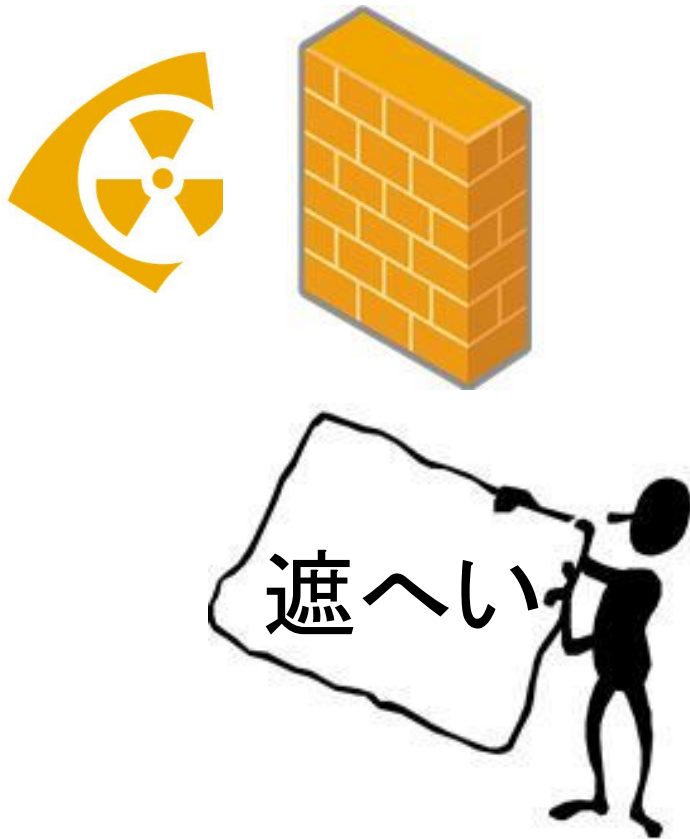
地層中での吸着の効果



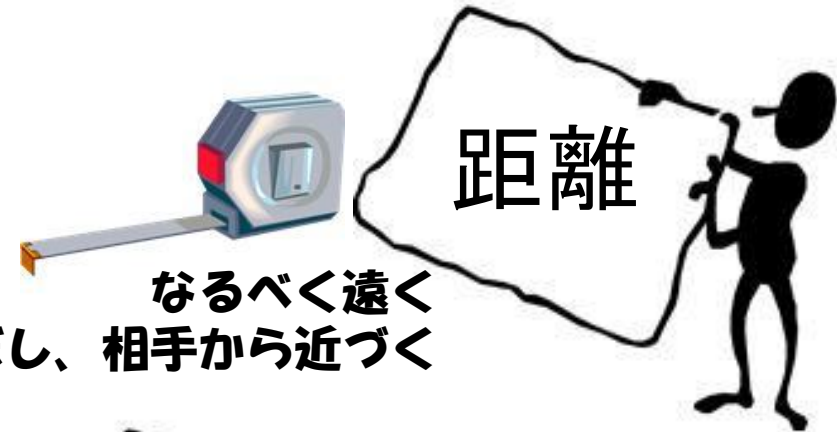
自然の浄化能力

放射線防護の3原則と処分パラメータ

3原則



放射線防護の原則と処分パラメータ

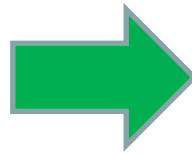


地下水中の濃度下げる
→ 吸着、溶解度



処分の影響評価

最も起こり得ると
考えられるケース



地下水移行シナリオ

地下水中の放射能濃度を表わす式
(移流・分散方程式 一次元)

地下水中の濃度
の時間変化

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U_p \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C$$

分散
係数

間隙
流速

壊変
係数

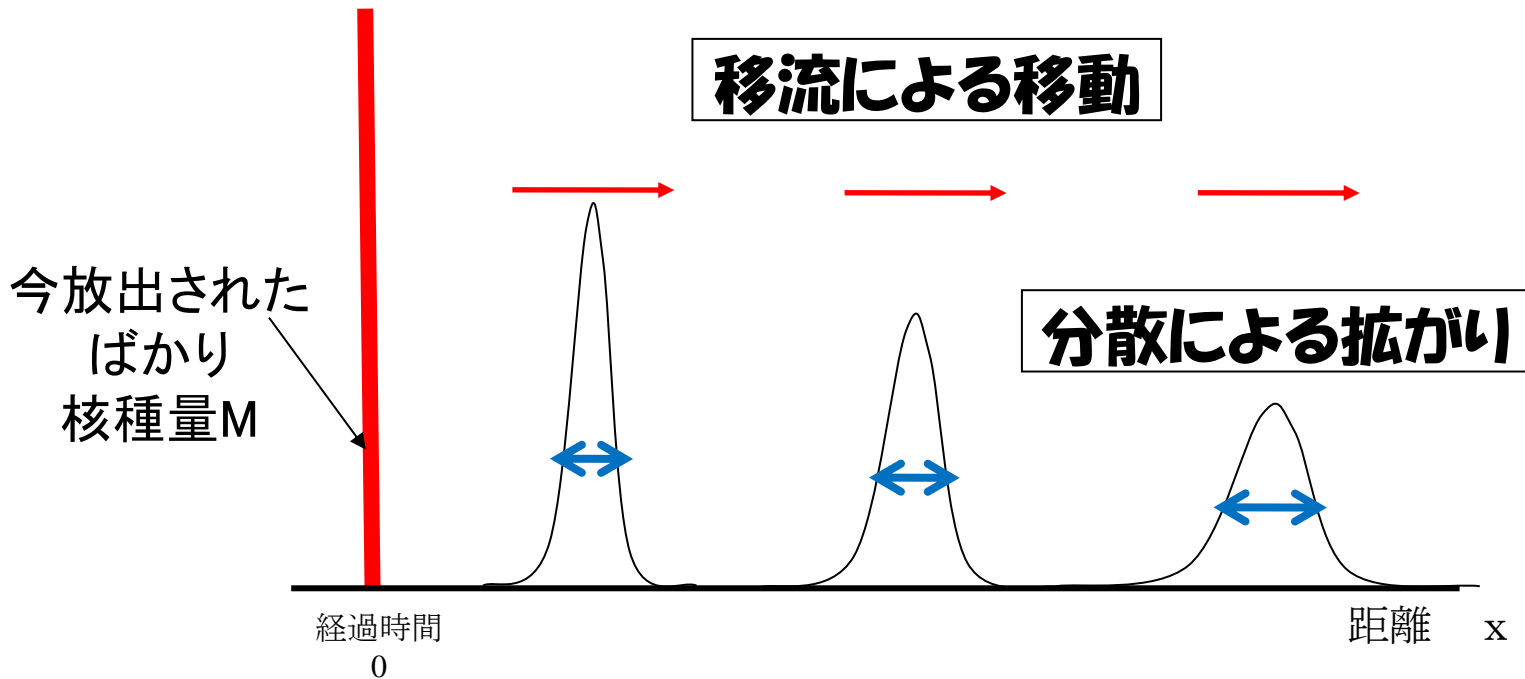
放射性崩壊
による減衰

濃度勾配、機械的散乱
による移動(分散効果)

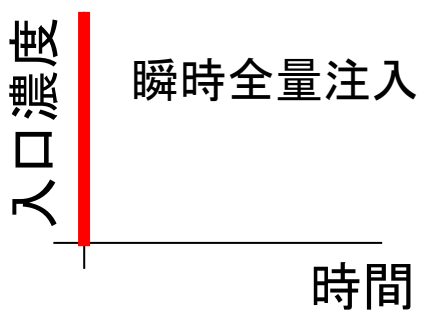
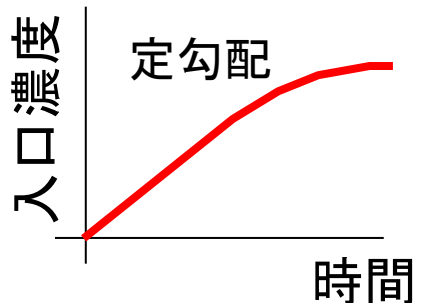
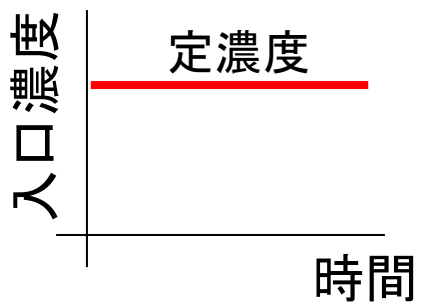
地下水による搬送
(移流効果)

移流・分散方程式

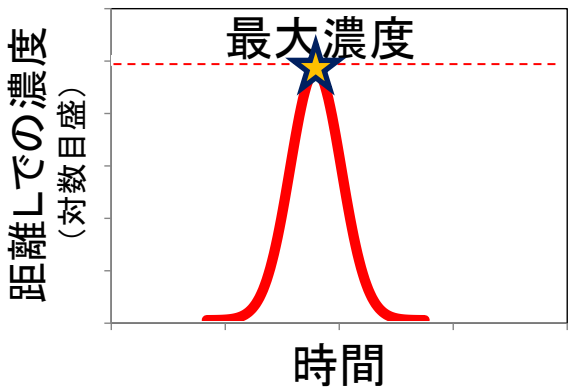
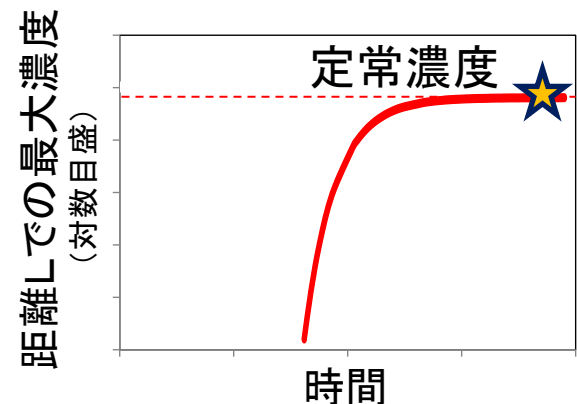
$$\text{濃度の時間変化} \frac{\partial c}{\partial t} = \overset{\text{分散項}}{D_h \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}} - \overset{\text{移流項}}{U_p \frac{\partial c}{\partial x}} - \overset{\text{崩壊項}}{\lambda c}$$



典型的な条件での地下水中の放射能濃度



典型的入力パターンに対する
出口の応答



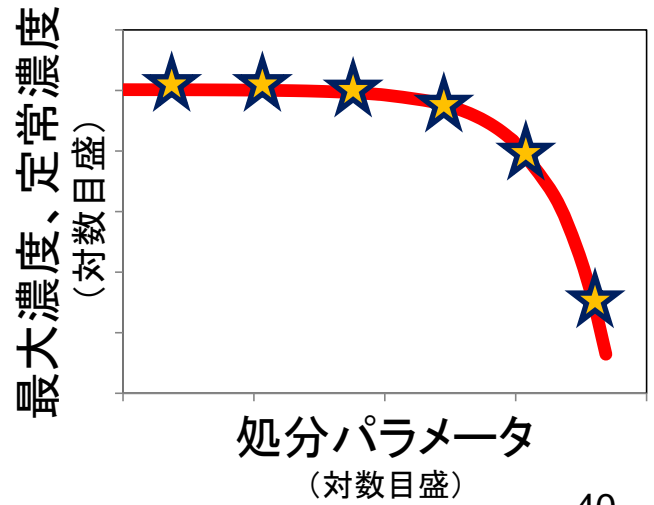
パラメータ群で整理

遅延係数

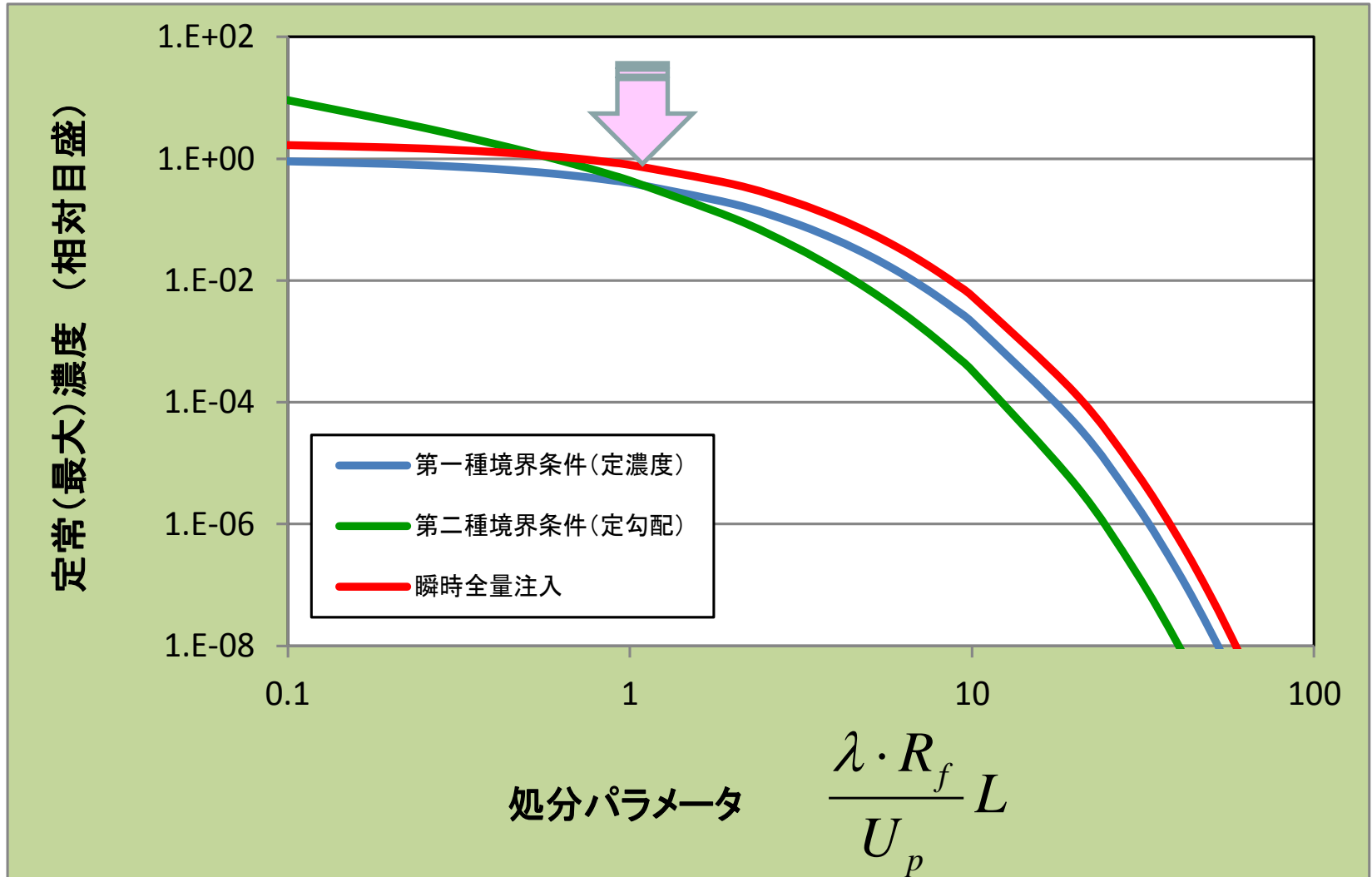
$$\frac{\lambda \cdot R_f}{U_p} L \text{ が因子}$$

地下水流速

移行距離



処分パラメータ **大** が安全上有利



地下水の動き

核種濃度 C での移動速度 $\text{Bq/m}^2 \text{ s}$

何も無い空洞

移流効果 $U_p \cdot C$

分散効果 $-D_h \frac{\partial C}{\partial x}$

水の動き 100%

岩石・土壌

移流効果 $\varepsilon \cdot U_p \cdot C$

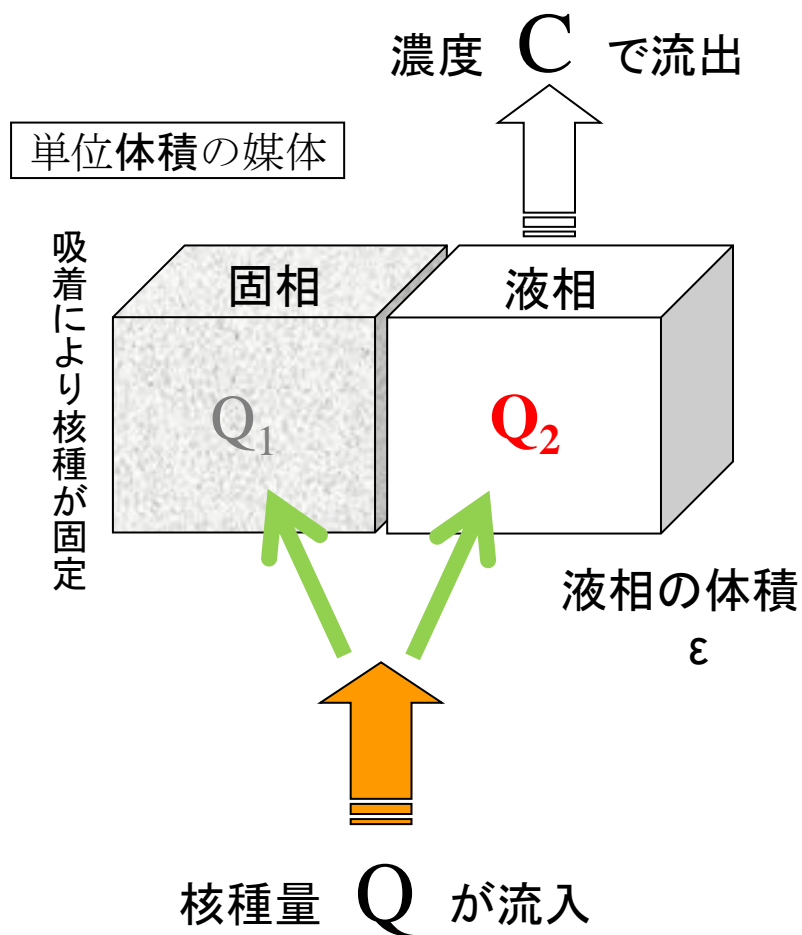
拡散効果 $-\varepsilon \cdot D_h \frac{\partial C}{\partial x}$

水の動き

隙間の体積 $\times \varepsilon$

核種の吸着効果の意味

核種の吸着効果がある場合



移動性の核種の割合

$$\frac{\text{液相からの流出量 } Q_2}{\text{流入全体量 } Q} = \frac{1}{R_f}$$

遅延係数

$$c = \frac{Q_2^{\text{量}}}{\epsilon_{\text{体積}}} = \frac{Q}{\epsilon R_f}$$

移動が関与する項の濃度は $1/R_f$ 倍

$$-\epsilon \cdot D_h \frac{\partial C}{\partial x} \quad \epsilon \cdot U_p \cdot C$$

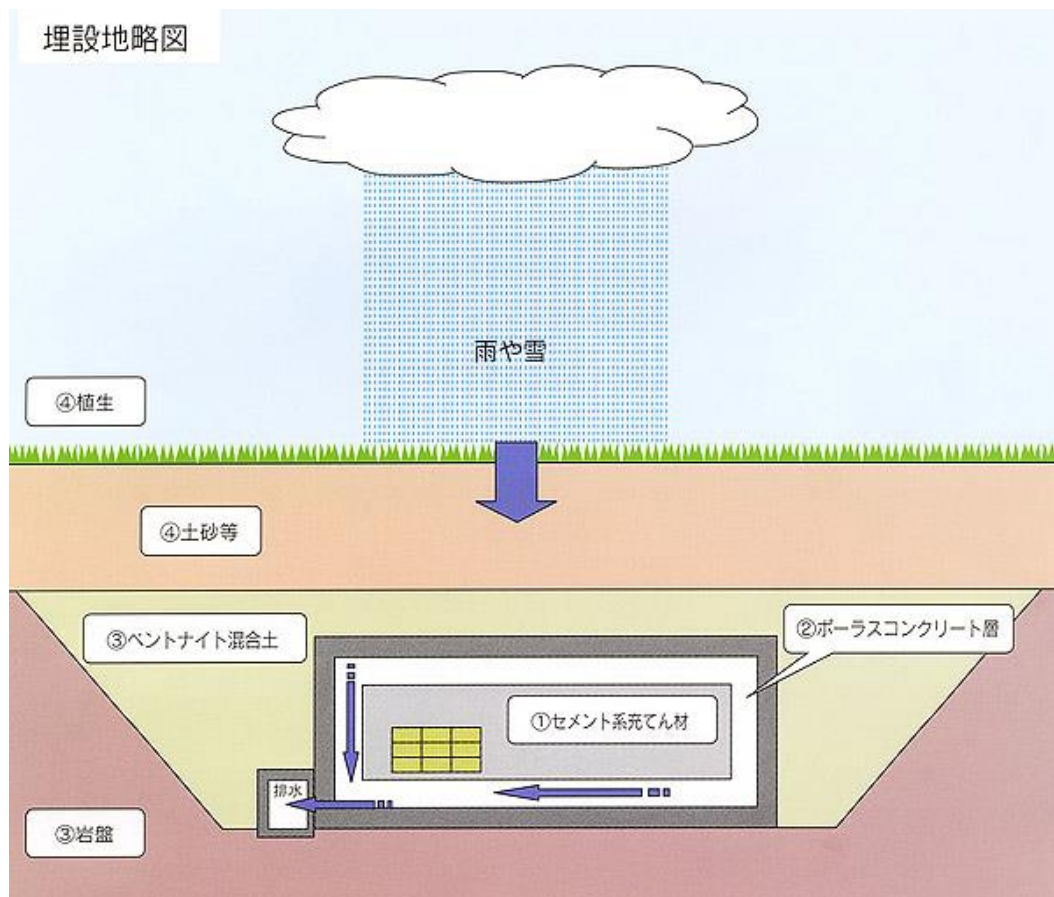
$$\frac{\partial c}{\partial t} = \left(\frac{D_h}{R_f} \right) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \left(\frac{U_p}{R_f} \right) \frac{\partial c}{\partial x} - \lambda c$$

移動の係数が $1/R_f$ に

3. 影響評価の手法と事例

管理型の影響評価

管理期間(300年)は 監視、巡視の対象
1mSv/年以下



管理期間(300年)後は
放射能が減衰



平常時(十分起こりえる)事象
10 μ Sv/年 以下

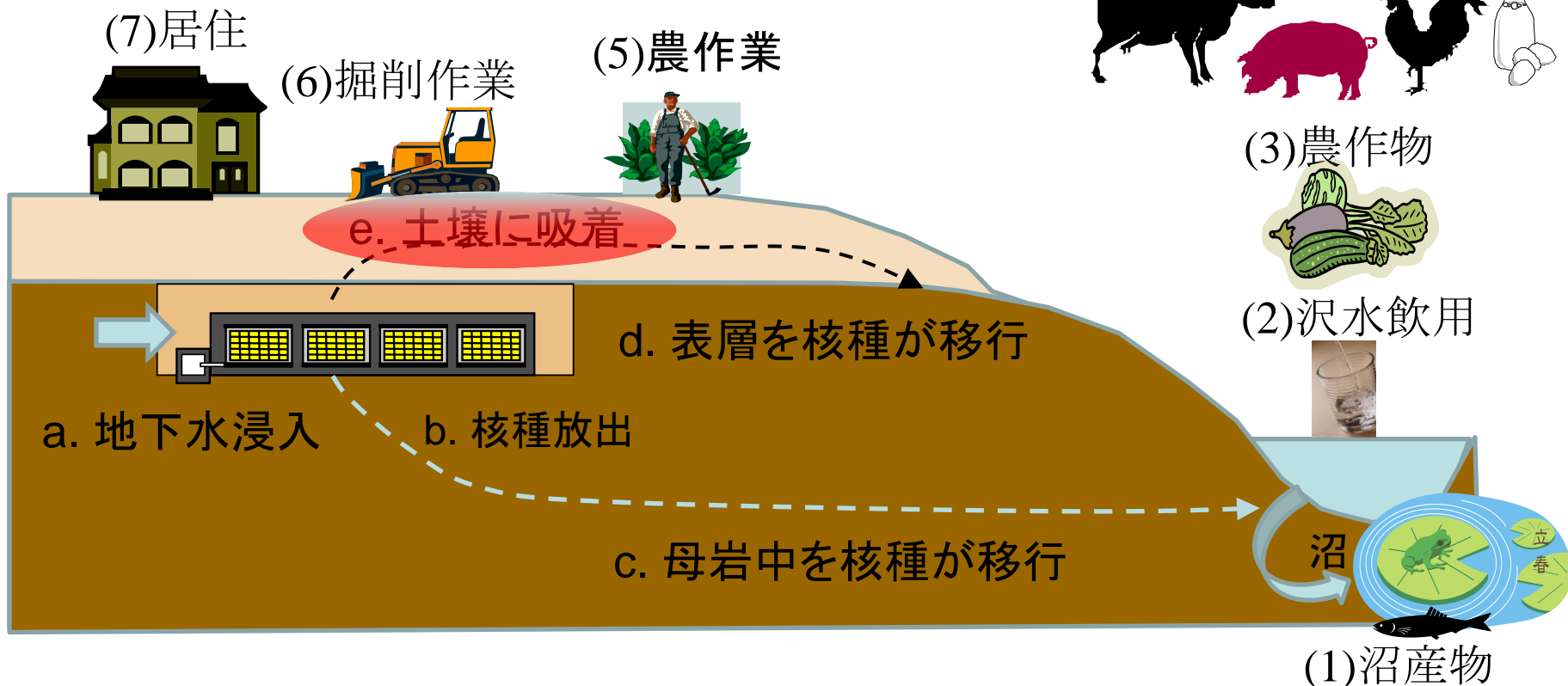
稀頻度事象
10 μ Sv/年 を著しく超えない

平常時の被ばく影響評価

管理期間(300年)後 線量の目安は 10 μ Sv/年

汚染土壌に起因

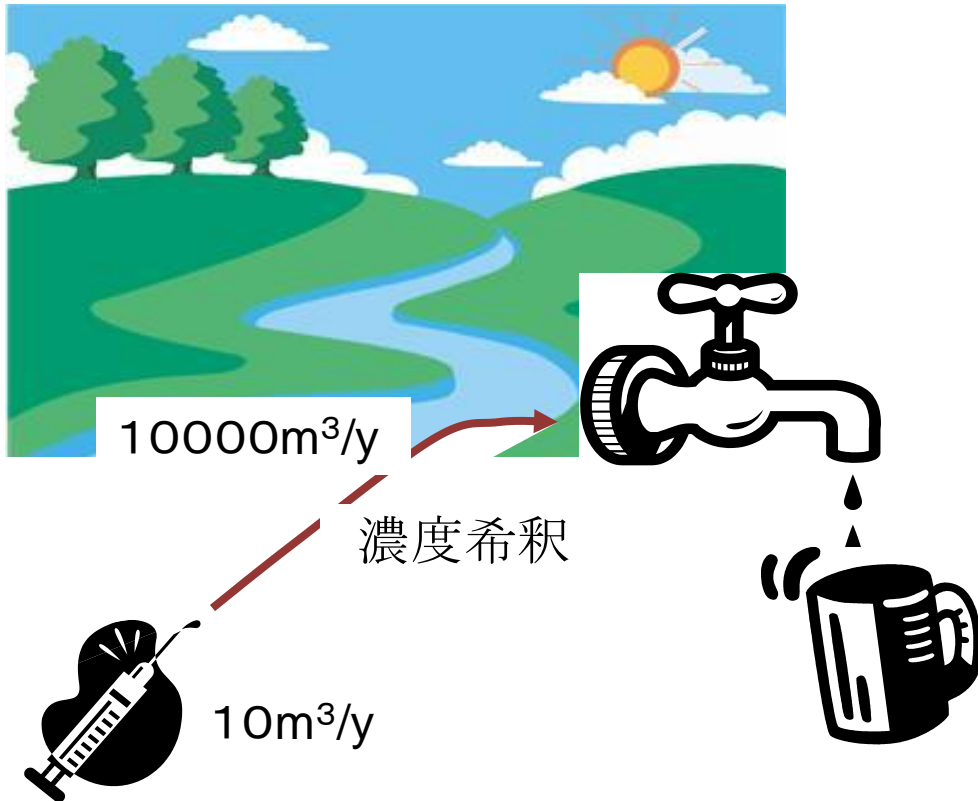
摂取に起因



水飲用による被ばく量評価

汚染地下水が希釈

地下水濃度 ÷ 希釈倍率 → 飲用水濃度
 10000 (Bq/m³) 1000倍 10 (Bq/m³)

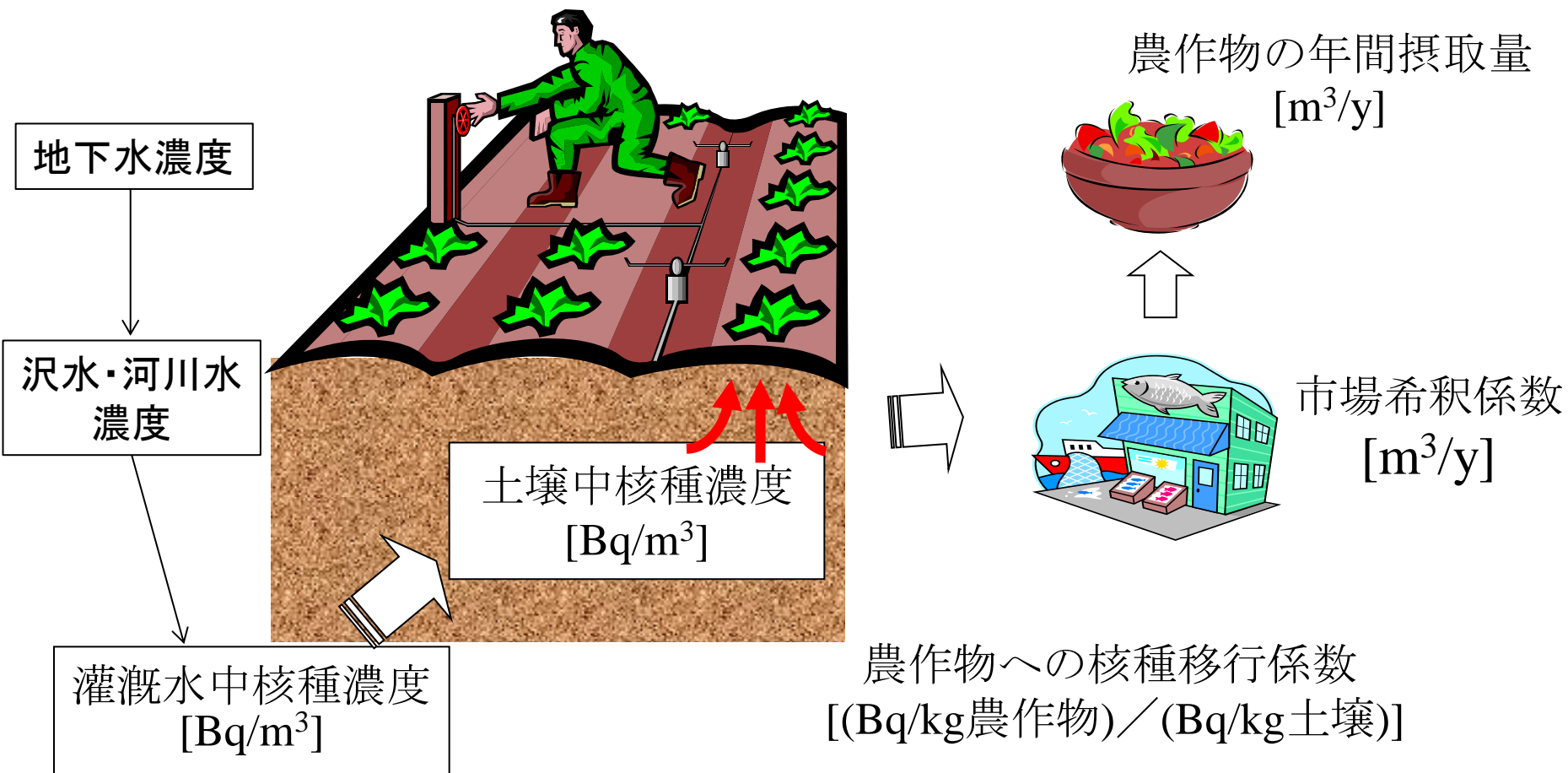


年間飲料摂取量
 0.5 [m³/y]

$$10 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \times 0.5 \frac{\text{m}^3}{\text{y}} = 5 [\text{Bq}/\text{y}] \longrightarrow [\text{Sv}/\text{y}]$$

線量換算係数
 [Sv/Bq]

汚染水灌漑の農作物摂取



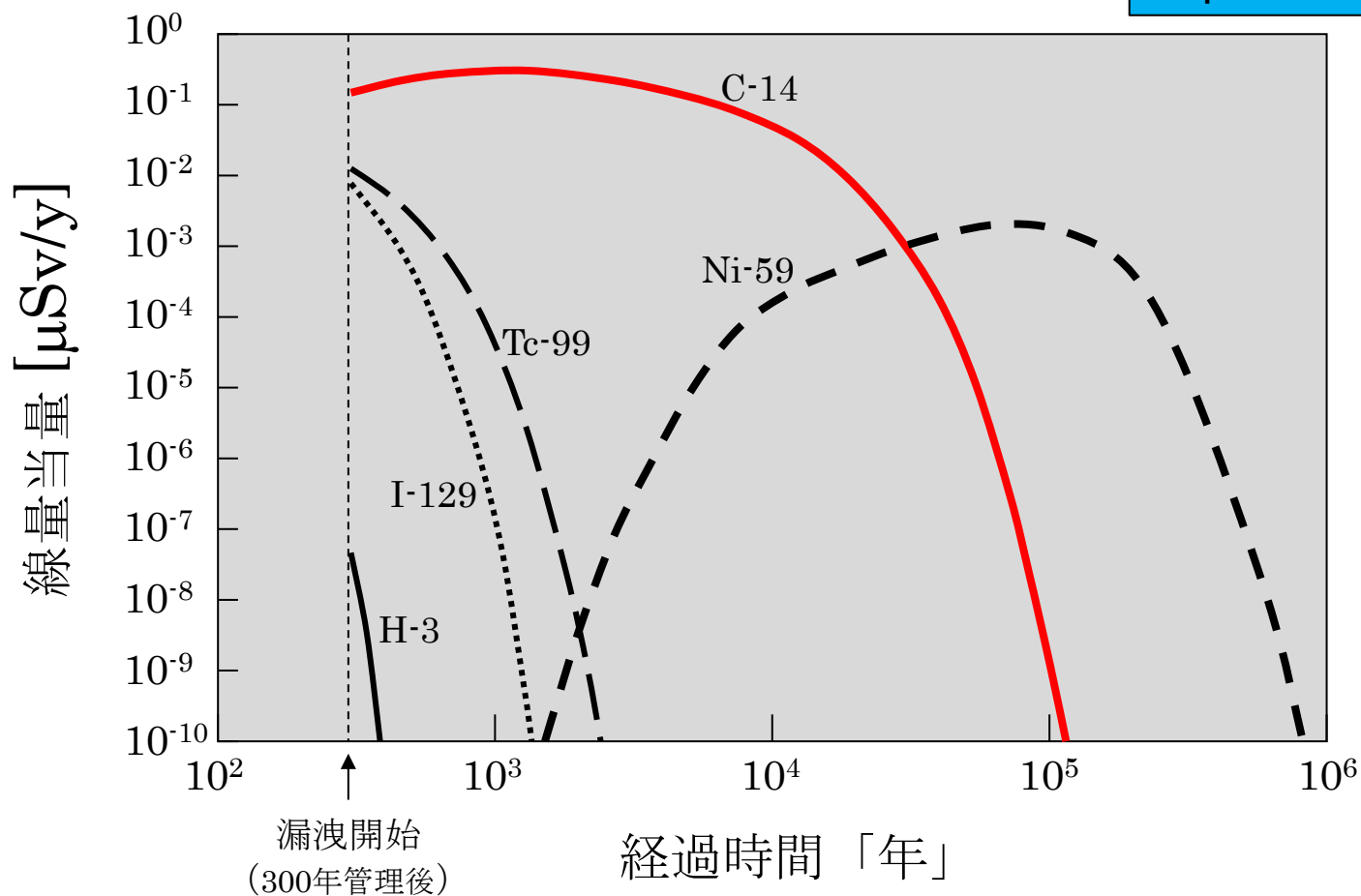
$$\text{農作物中濃度} = \text{土壌中濃度} \times \text{移行係数}$$

$$\text{土壌中濃度} = \text{水中濃度} \times (\text{収着})\text{分配係数}$$

評価結果

沢水引用シナリオの例

平常時事象
10 μ Sv/年 以下

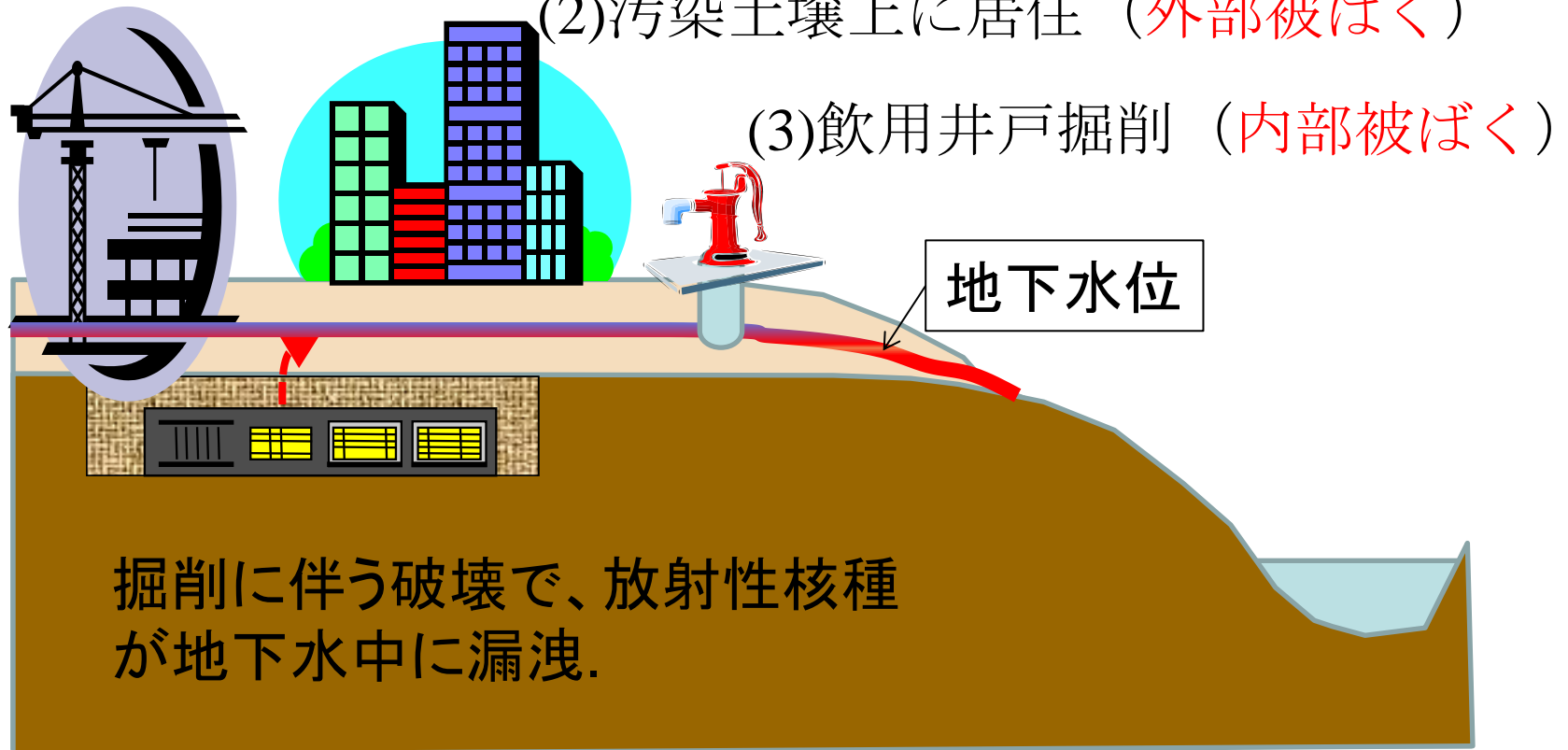


稀頻度事象による被ばく評価

(1) 処分場の破壊を伴う大規模土地利用 (外部被ばく)

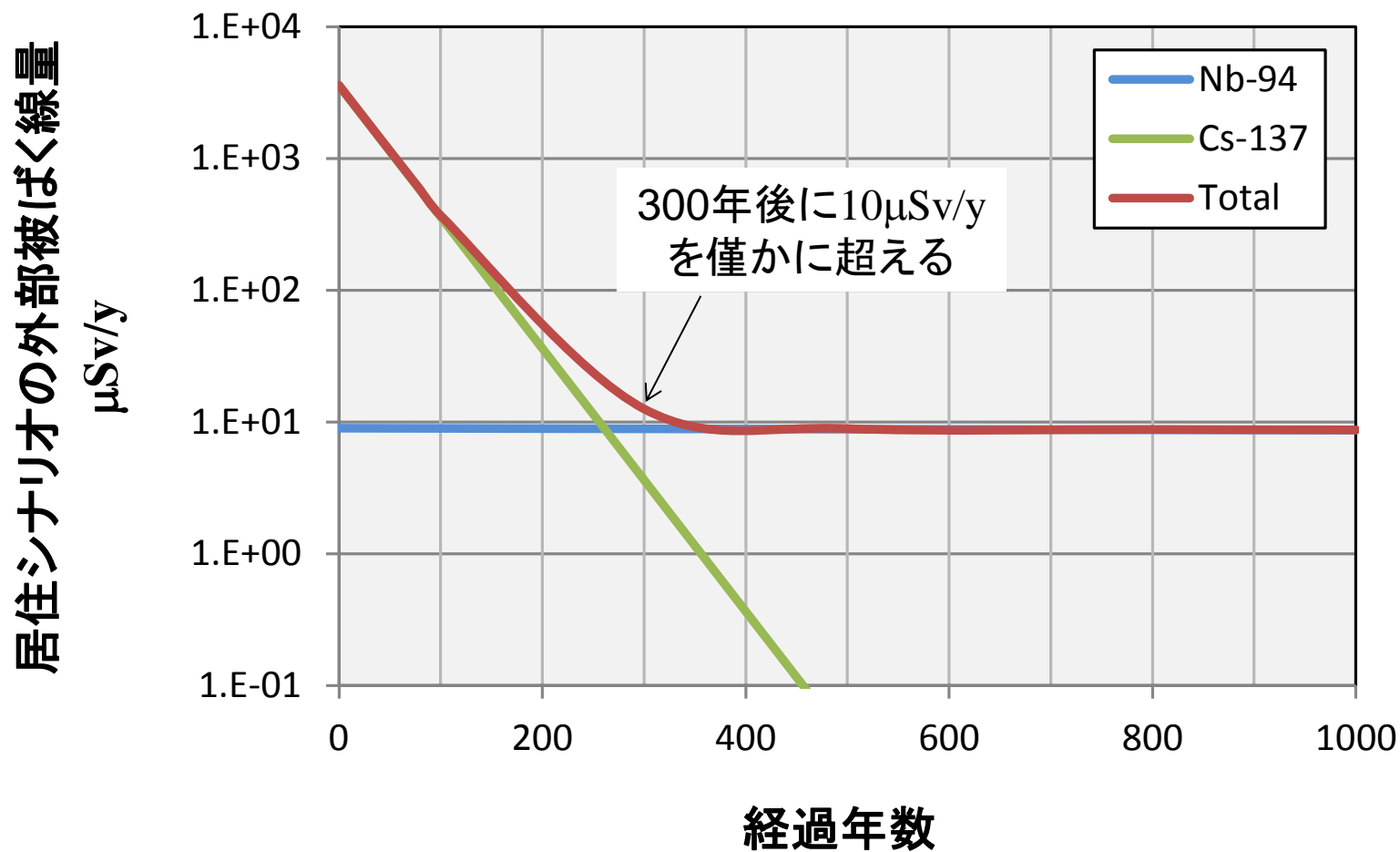
(2) 汚染土壌上に居住 (外部被ばく)

(3) 飲用井戸掘削 (内部被ばく)



大規模土地利用での居住シナリオ

処分場まで掘削し、廃棄物と土壌が混合した汚染土壌の上に居住した時の外部被ばく



各被ばくケースに対する評価結果

	ケース	評価値 μSv/y	規制 μSv/y
平常時	沼産物摂取	0.075	10 以下
	沢水飲用	0.13	
	農作物摂取	0.091	
	畜産物摂取	0.029	
	農作業	0.055	
	住居建設掘削作業	0.083	
	居住	1.5	
稀頻度	大規模掘削	8.1	10 を著しく超えない
	大規模居住	14	
	井戸水飲用	3.0	

4. 新しい問題 汚泥と焼却灰の処分

新たな問題 汚泥、焼却灰

放射性セシウムで汚染



下水処理の汚泥

行き場の無い
ゴミがあふれる
問題



ごみ焼却灰



セメントを利用して製造される生コンクリート等
が安定的に**クリアランスレベル**以下とする
ことにより、今後とも脱水汚泥等を安定的に
受け入れるよう要請

政府(厚生労働省、経済産業省、国
土交通省) 2011年6月28日付



汚泥、焼却灰

基準	対処	
100,000Bq/kg 超える	適切に放射線を遮へいできる施設で保管	遮断型 最終処分場？
8,000 Bq/kg 超える	適切な対策を施した上で埋め立て可能	管理型 最終処分場
8,000 Bq/kg 以下	埋め立て可能	
100Bq/kg 以下	汚泥はセメント原料として使用可能	セメント会社へ の引取り要請

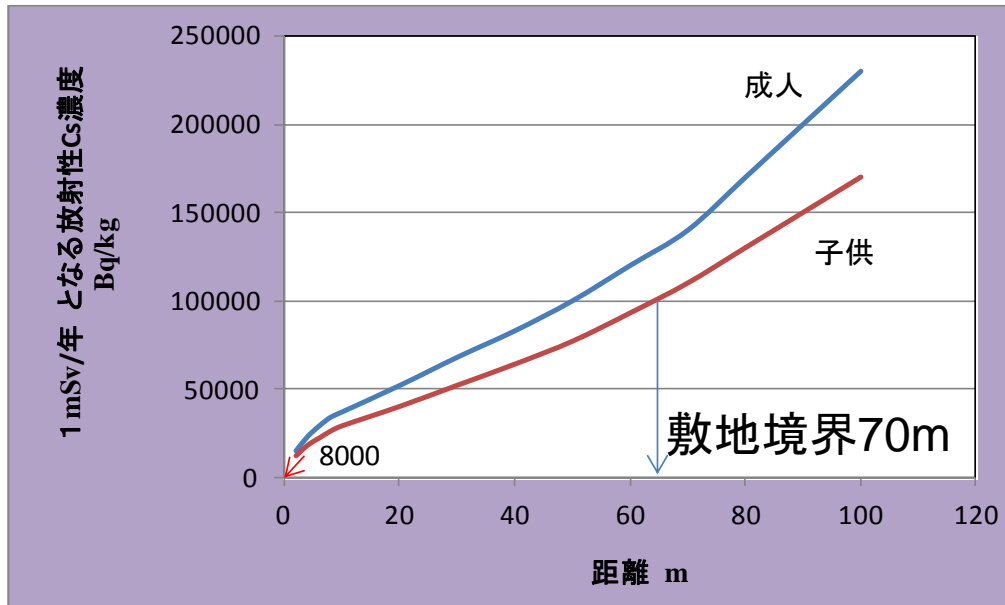
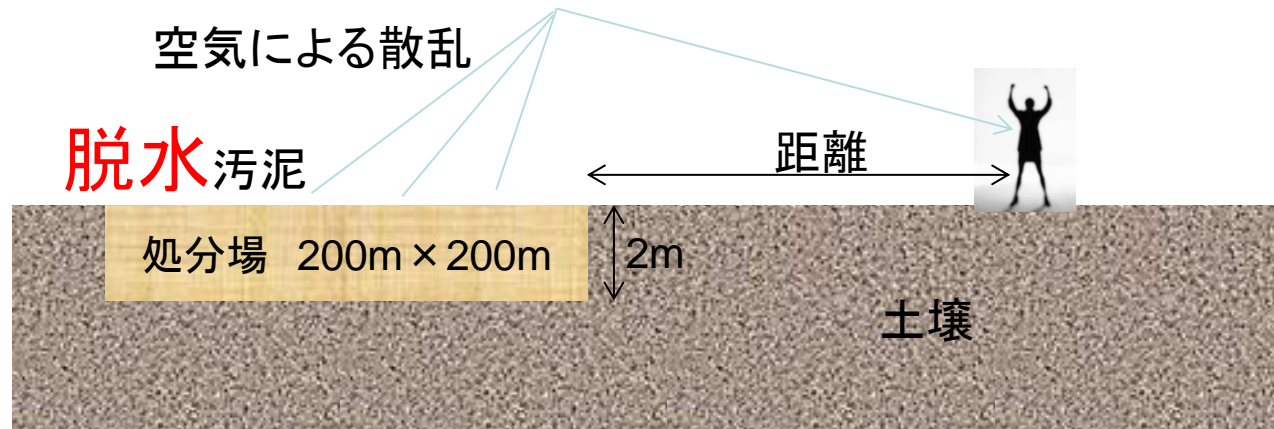
食品の規制値は

100Bq/kg

(← 300Bq/kg よりも厳しく)

なぜ こんなにも違うのか？

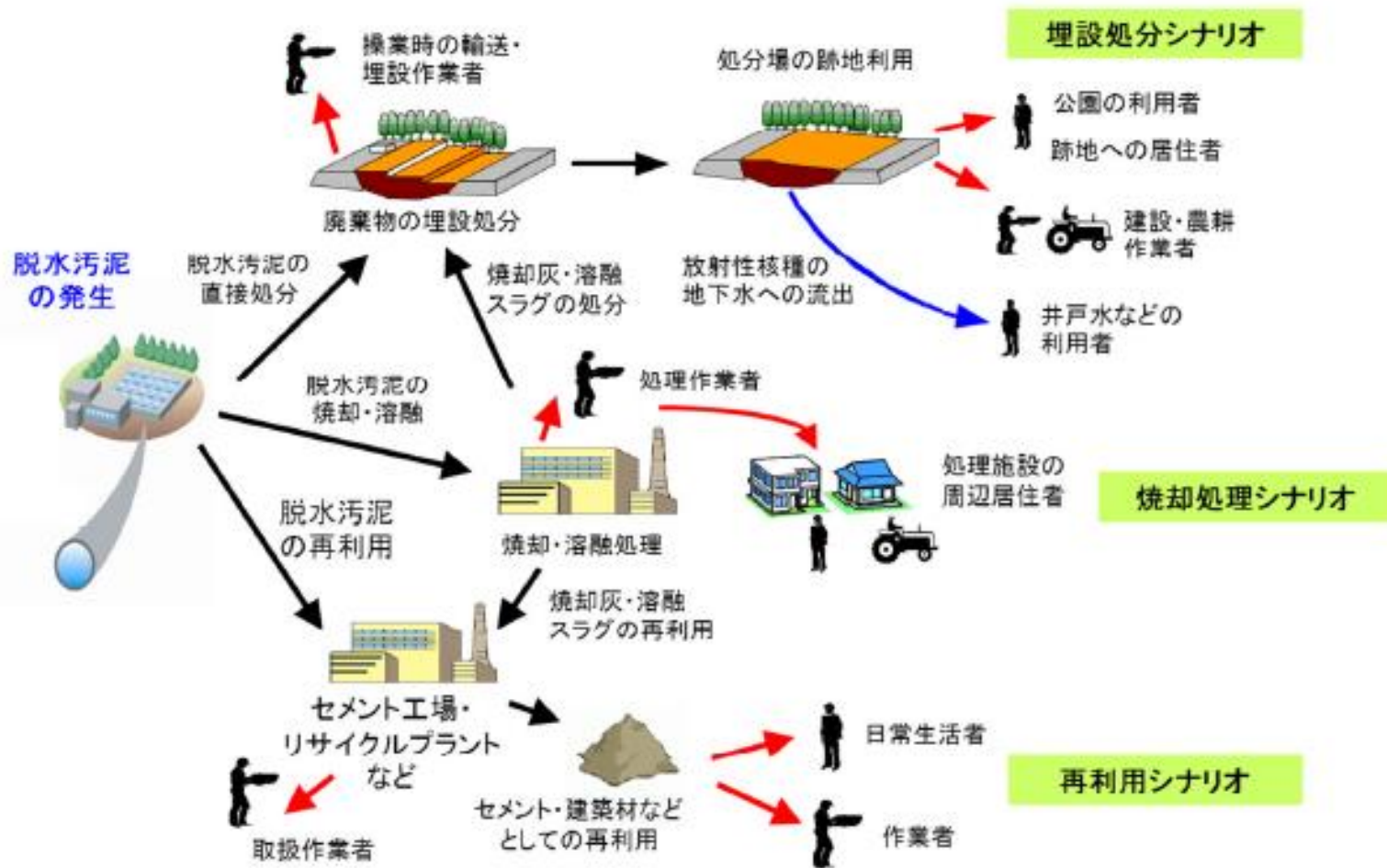
スカイシャインによる外部被ばく



8000Bq/kg以下ならば
処分場直近で 1mSv/年以下

100000Bq/kg以下ならば
住宅地等と適切な距離を保った上で、
管理型処分場に仮置きができる

スカイシャイン以外の評価シナリオ



福島県の浜通り及び中通り地方(避難区域及び計画的避難区域を除く)の災害廃棄物の処理・処分における放射性物質による影響の評価について

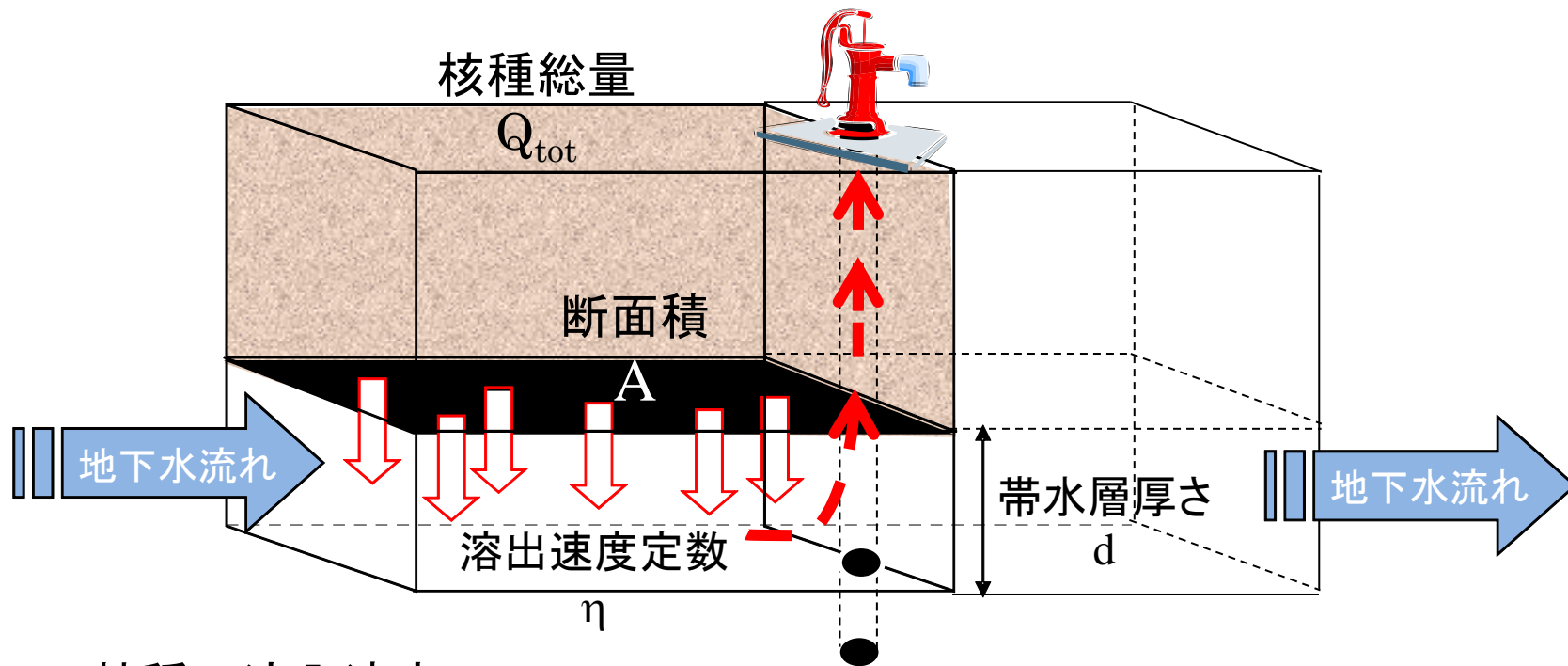
跡地利用の評価結果

^{134}Cs と ^{137}Cs が各々4000Bq/kg

シナリオ	経路	対象	評価線量 mSv/年
跡地居住	外部	子供	1.1
跡地農耕	外部	作業者	0.15
→ 跡地の適切な管理			
跡地農作物	摂取	成人	0.041
跡地畜産物	摂取	成人	0.043
地下水利用農作物	摂取	成人	0.0023
飲料水	摂取	成人	0.00099 =1 $\mu\text{Sv}/\text{年}$

飲料水摂取シナリオ

処分場境界のすぐ横で井戸水摂取

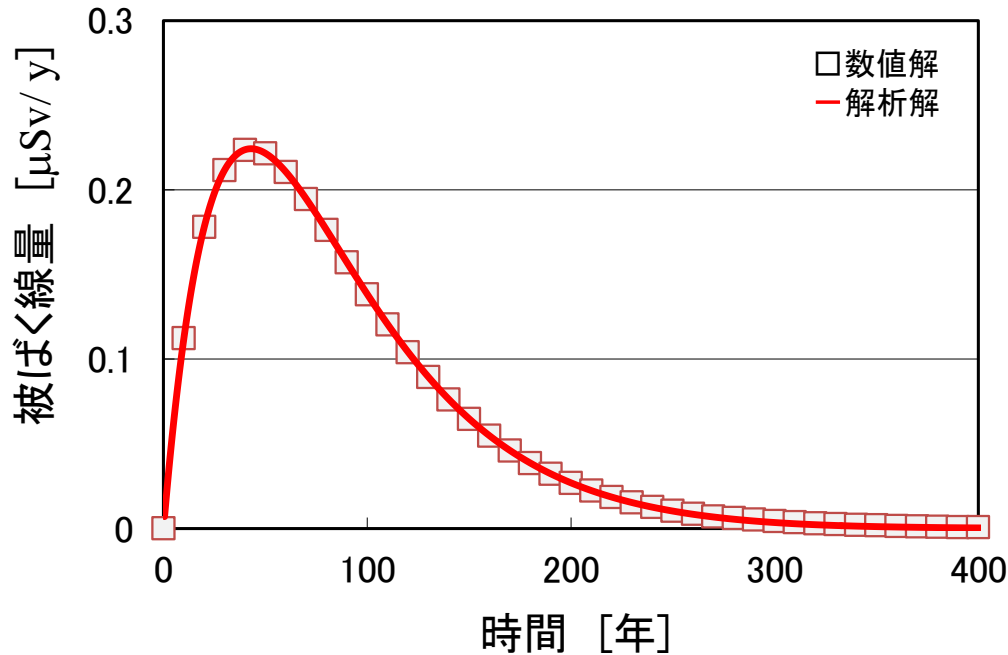


核種の流入速度

$$K = \frac{\eta \cdot Q_{tot}}{A \cdot d} \cdot \exp[-(\lambda + \eta)t]$$

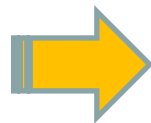
移流方程式 $\varepsilon R_f \frac{\partial C}{\partial t} = -U_d \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda \cdot \varepsilon R_f \cdot C + K$

解析解



$^{137}\text{Cs} + ^{134}\text{Cs}$ が
各々**1000**Bq/kgで
0.25 $\mu\text{Sv}/\text{年}$

JAEA報告と一致

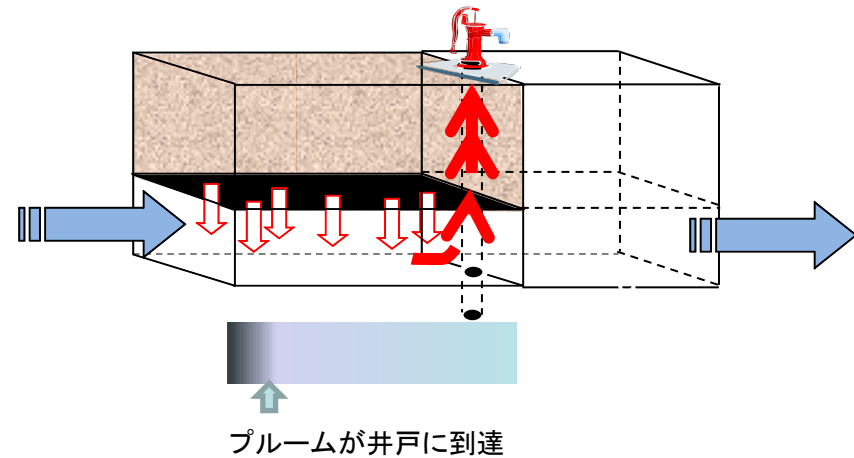
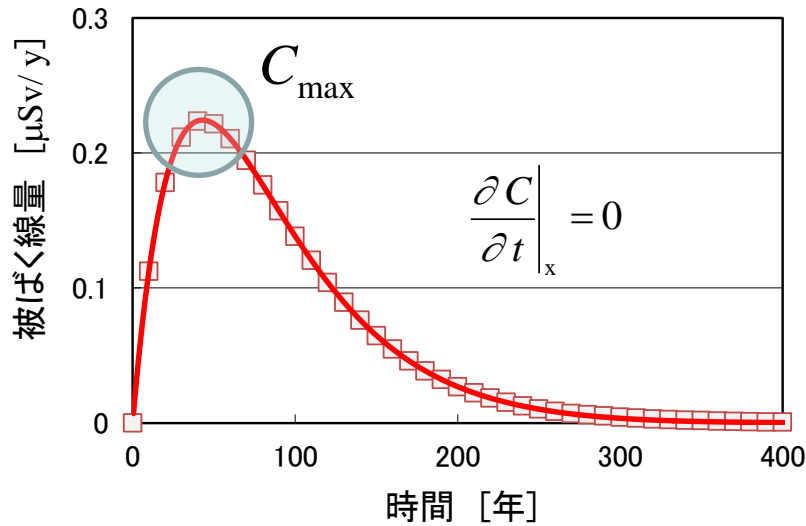


4000+4000 Bq/kg では1 $\mu\text{Sv}/\text{年}$

クリアランスレベル 10 $\mu\text{Sv}/\text{年}$ 以下

「8000Bq/kg以下の場合は管理型最終処分場に埋め立て可能」とする根拠の一つ

最大濃度の近似解



プルーム到着の前後

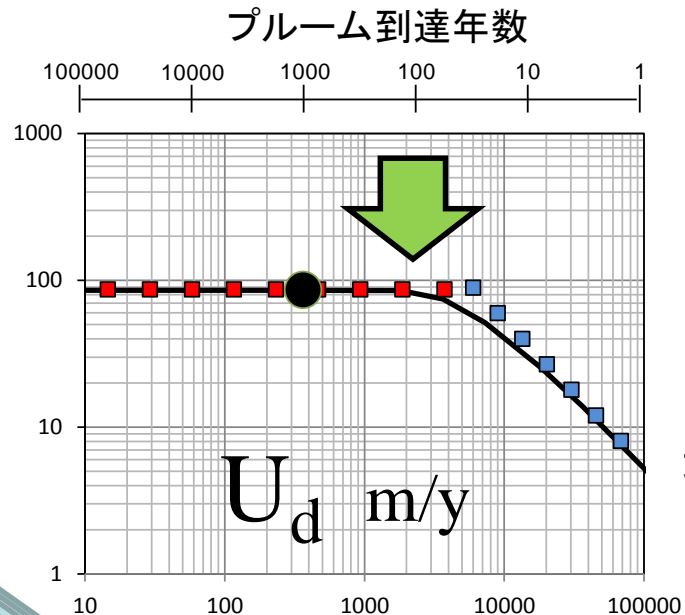
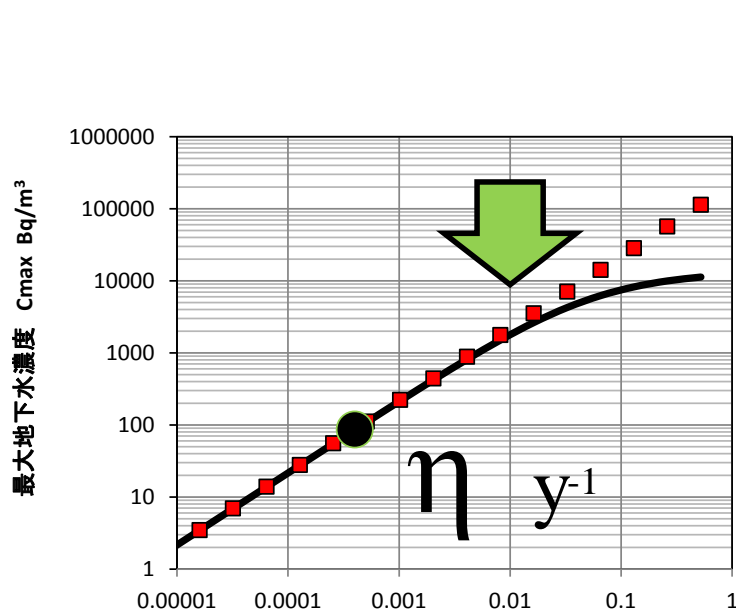
$$t < \frac{\varepsilon R_f}{U_d} \cdot x$$

$$C_{\text{max}} \approx \frac{Q_{\text{tot}}}{A \cdot d} \cdot \frac{1}{(1 - \varepsilon) \rho} \cdot \eta \cdot \frac{1}{K_d} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-1}$$

$$t > \frac{\varepsilon R_f}{U_d} \cdot x$$

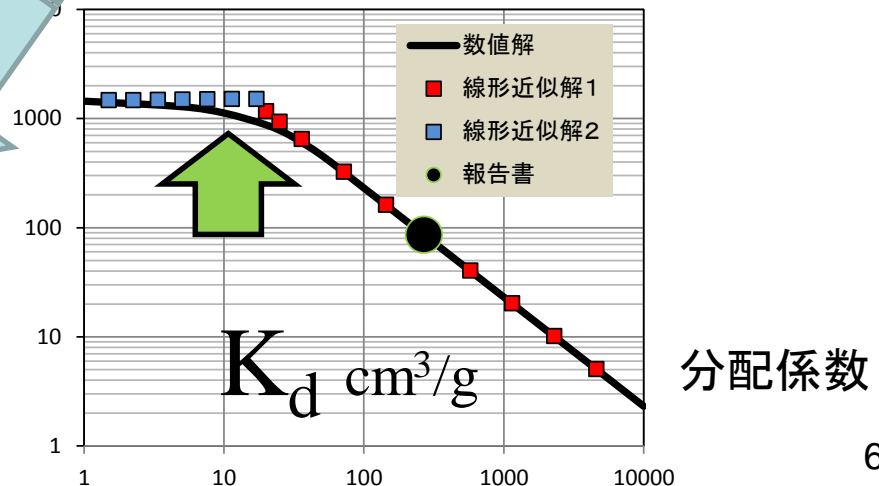
$$C_{\text{max}} \approx \frac{Q_{\text{tot}}}{A \cdot d} \cdot \eta \cdot \left[\frac{x}{U_d} \right]$$

パラメータの変動と感度



廃棄物からの溶出速度

溶出速度に敏感
地下水流速に感度がない



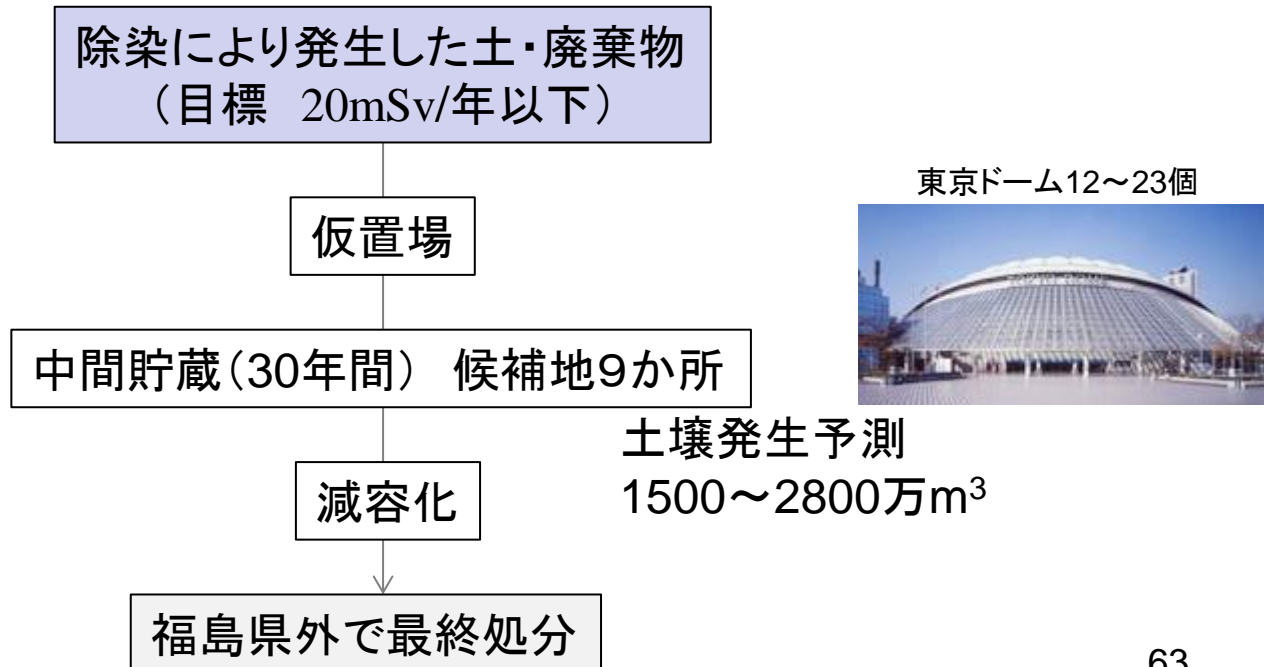
中間貯蔵施設

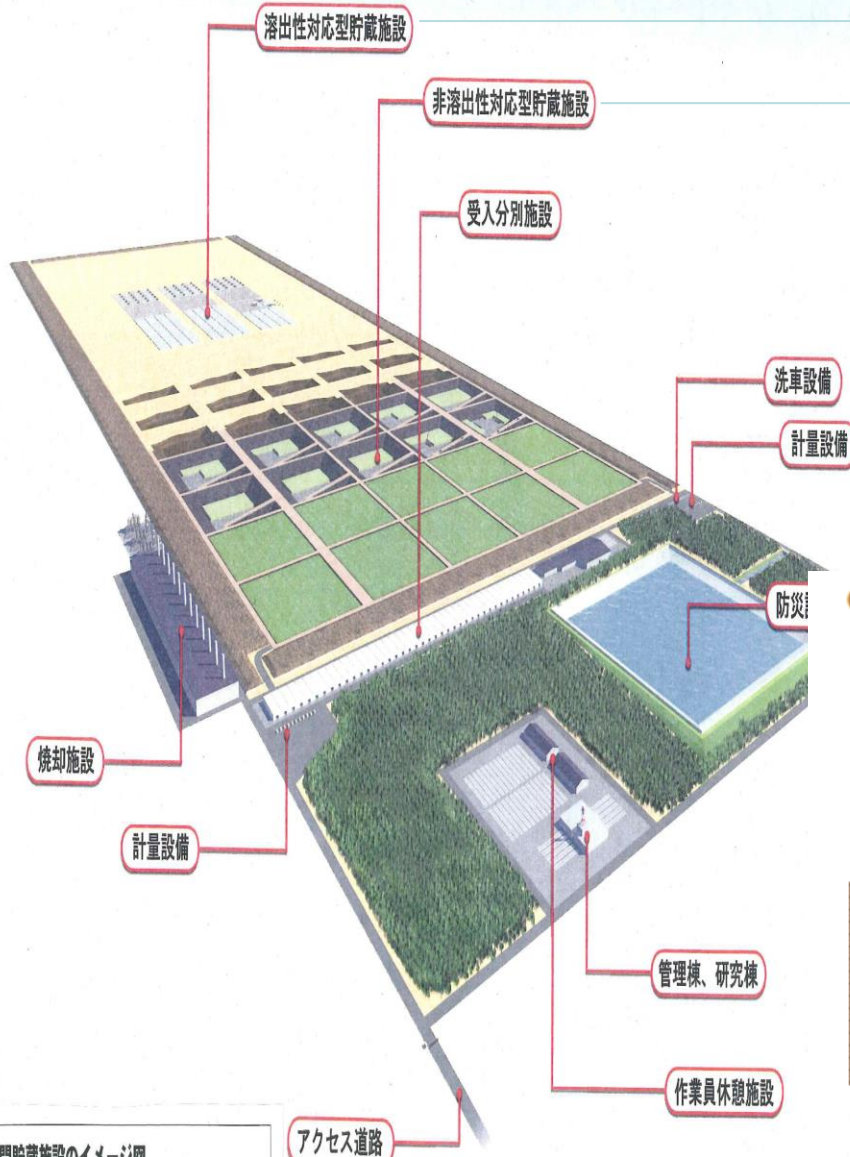
放射性物質汚染対策特措法

- 8000Bq/kg以下 最終処分
- 8000～10万Bq/kg セメント固化、不透水性土壌層などにより管理型処分
- 10万Bq/kgを超える 遮断型処分



環境省中間貯蔵施設安全対策検討会(第1回)



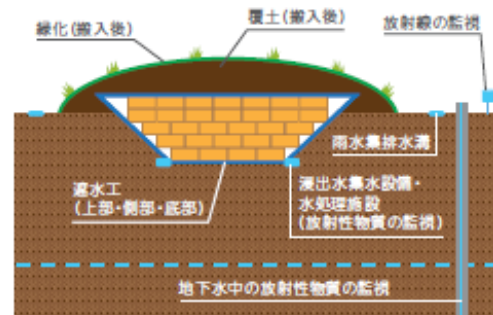


中間貯蔵施設のイメージ図

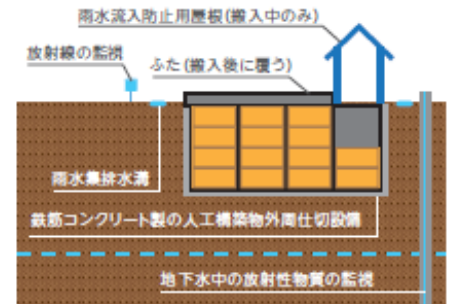
(実際の施設は異なる場合があります)

● 中間貯蔵施設のイメージ図

非溶出性対応型施設の例
(土をかぶせる)



溶出性対応型施設の例
(コンクリートでおおう)



環境省中間貯蔵施設安全対策検討会(第1回)

放射線安全に関する評価シナリオ

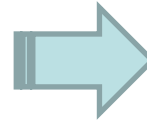
環境省中間貯蔵施設安全対策検討会(第2回)

シナリオ		対象	線源	形態
貯蔵時	事故時	貯蔵施設周辺居住	貯蔵中の除去土壌等	外部
			大気中へ飛散した放射性物質	外部・吸入
			護岸に流出した除去土壌等	外部
			水産物	経口
			地震等による公共用水域及び地下水の汚染防止機能の喪失	経口
	地震・火災等による遮へい機能の喪失			
	津波等による浸出液・除去土壌等の流出			

遮断型の最終処分

放射能濃度が著しく低く
コンクリートなど
再生利用等ができる。

10 μ Sv/年



クリアランスレベル

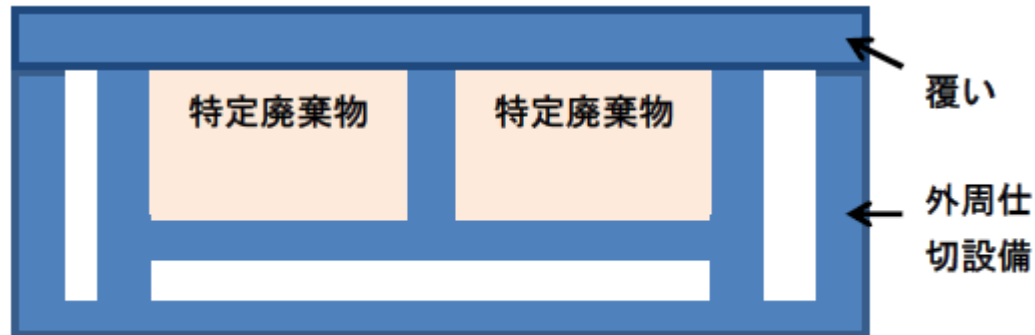
^{137}Cs

100Bq/kg

300年後

10万Bq/kg → 100Bq/kg
クリアランスレベル同等

10万Bq/kgを超えるものは
300年後でも放射性物質の扱い？



(遮断型相当の構造)

まとめ

1. 処分方法の分類と事例

管理型 浅地中処分 管理期間終了後は特段の管理を要しない
余裕深度処分
隔離型 地層処分 減衰が期待できず、漏洩抑制が基本

2. 防護と処分の重要パラメータ

処分パラメータ $\lambda R_f \frac{L}{U_p}$ を大きく が安全確保のキー

3. 影響評価の手法と事例

浅地中処分 平常時シナリオ、稀頻度事象 ← 新規制基準(案)
地層処分 地下水移行シナリオ

4. 新しい問題 汚泥と焼却灰の処分

スカイライン、跡地利用シナリオ ← 地下水移行シナリオの応用