



2014年度バックエンド週末基礎講座

地層処分の性能評価研究

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター
基盤技術研究開発部 システム性能研究グループ

江橋 健



内容

1. **地層処分における安全確保の考え方**
2. **長期安全性の確認**
3. **性能評価研究の例**
 - 3.1 **シナリオ構築手法の高度化**
 - 3.2 **地質環境の長期変遷を考慮した評価手法**
 - 3.3 **パラメータの安全裕度に関する評価手法**
4. **研究開発を取り巻く状況**
5. **まとめ**



高レベル放射性廃棄物の処分方法

制度的管理



長期管理貯蔵

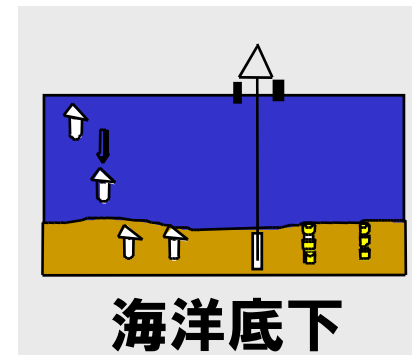
- 現状施設で対応可能
- 無期限には困難(将来世代の管理負担増加等)
- いずれ処分が必要

永久隔離(処分)



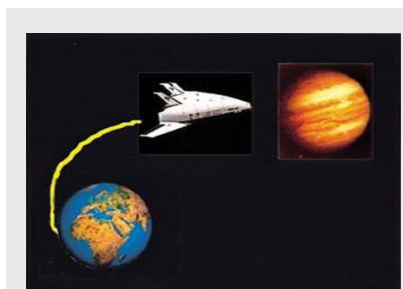
地層中

地層が持っている物質を閉じ込める性質を利用する



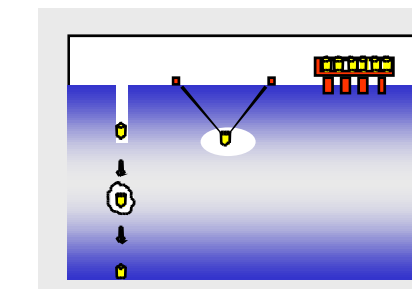
海洋底下

ロンドン条約により禁止



宇宙空間

発射技術の信頼性に問題あり



極地の氷床

南極条約により禁止/氷床の特性等の解明が不十分

地層の性質を利用することが最も現実的な方法



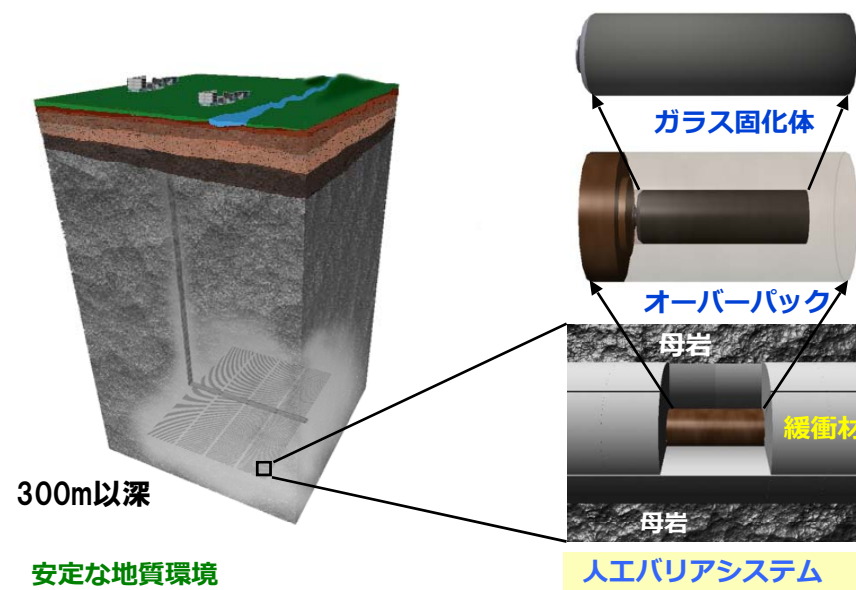
隔離・閉じ込めを重視したシステム

- 安定な地質環境に適切に工学的対策を施すことにより、地質環境が本来有する隔離性と多重の対策(天然の地層+人工バリア)による閉じ込めにより安全性を確保
- 地層処分システムは処分後長期において放射性物質を閉じ込めるため、人間環境への影響は遠い将来において極めてわずかしか見込まれないと考えられる



一定期間、頑健な容器で放射性物質を閉じ込めておくものの、未来永劫地層処分システムから放射性物質の漏洩がないことを示すことはできない

- 評価上の想定として、いつかは廃棄物中の放射性物質が漏れ出すことを仮定



隔離

閉じ込め



実物大の模擬人工バリア



日本原子力研究開発機構
地層処分基盤研究施設(東海)
http://www.jaea.go.jp/04/tisou/shisetsu/entry_01.html



原子力環境整備・資金管理センター
地層処分実規模試験施設(幌延)
<http://www.rwmc.or.jp/institution/project/>



地層処分の安全性とは？

処分場閉鎖前の安全性(操業安全性):

処分場の建設, 操業, 閉鎖～事業廃止までの数十年～約百年程度の期間

- 放射線安全の確保(他の原子力施設での経験を活用)
- 一般労働安全の確保(通常の土木工事での経験を活用)

処分場閉鎖後の安全性(長期安全性):

廃棄物を定置してから閉鎖後の長期にわたる期間(数万年以上)

- 適切なサイト選定
- 工学的対策
- 長期間の安全性の評価

- 人類がかつて経験したことのない巨大システムと評価期間
- 地層処分に特有なものとして考慮する必要がある



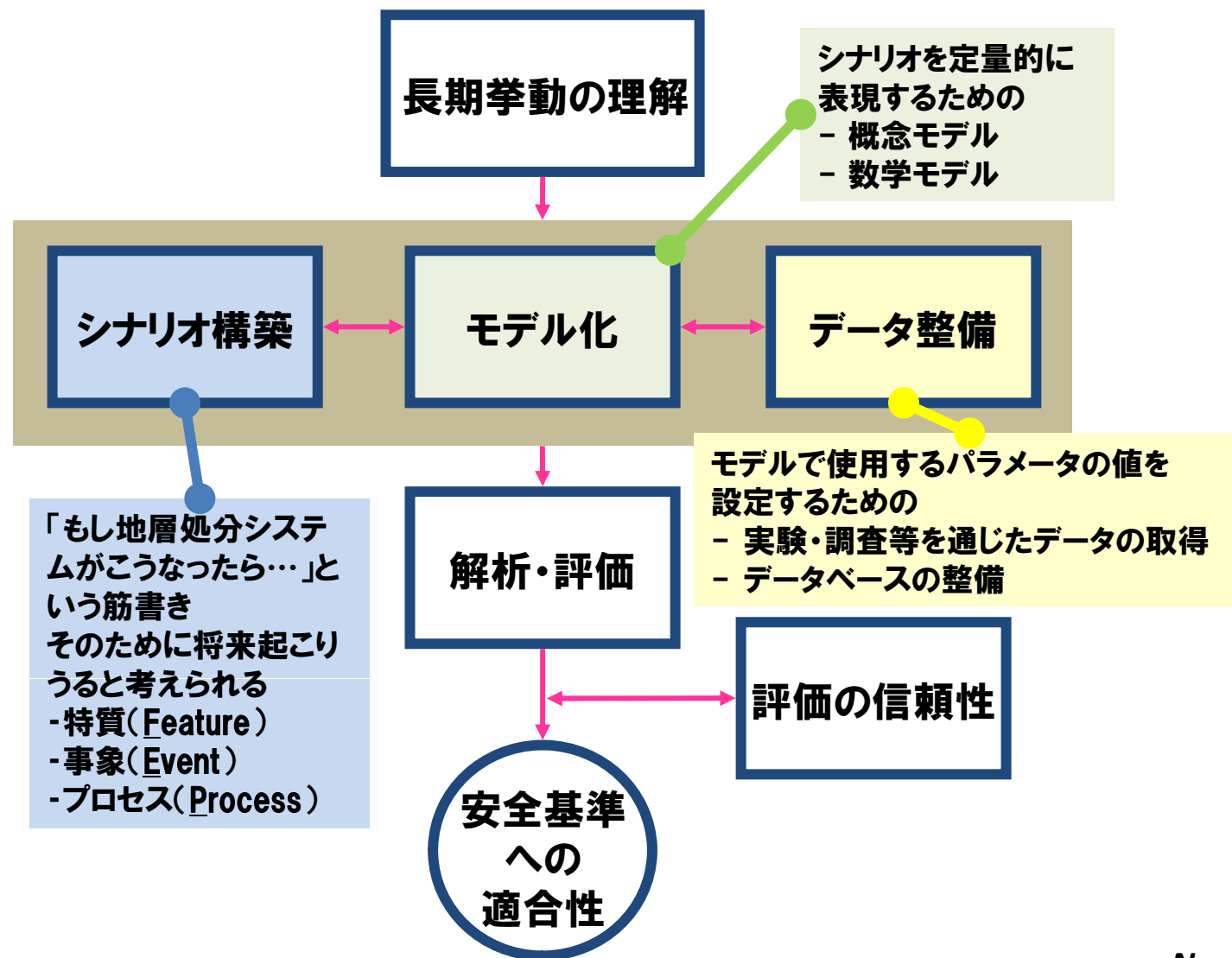
内容

1. 地層処分における安全確保の考え方
2. **長期安全性の確認**
3. **性能評価研究の例**
 - 3.1 シナリオ構築手法の高度化
 - 3.2 地質環境の長期変遷を考慮した評価手法
 - 3.3 パラメータの安全裕度に関する評価手法
4. 研究開発を取り巻く状況
5. まとめ



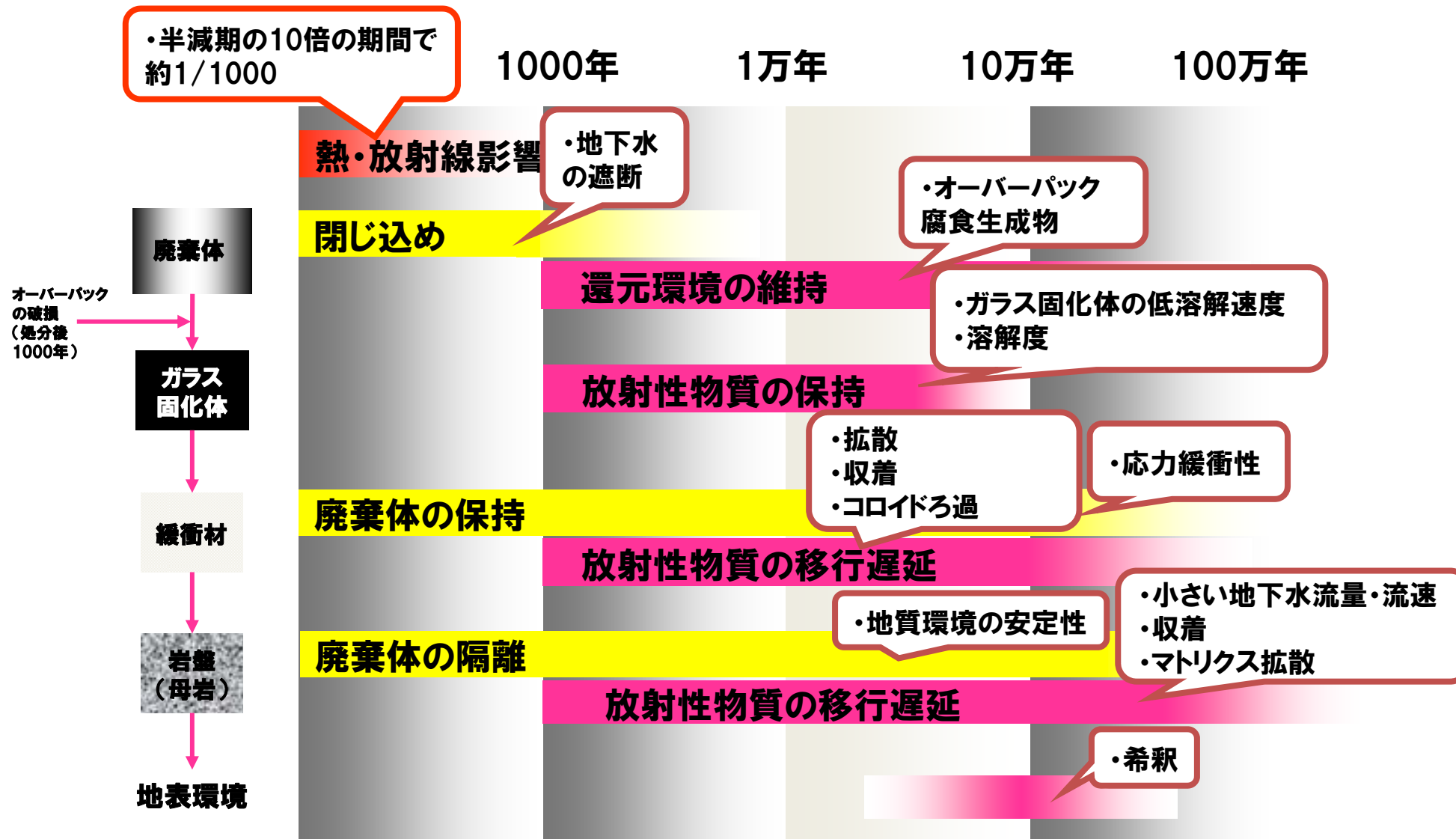
どのように安全性を確認するのか？

- 地層処分の特有の特徴を考慮すれば、(一般的な人工構造物のように)試作品による実験を積み重ね、その安全性を直接確認することは不可能
- 将来の状態を想像し、それを定量的に表現するモデルを開発し、それらを用いて予測解析することによって安全性を確認(安全評価)



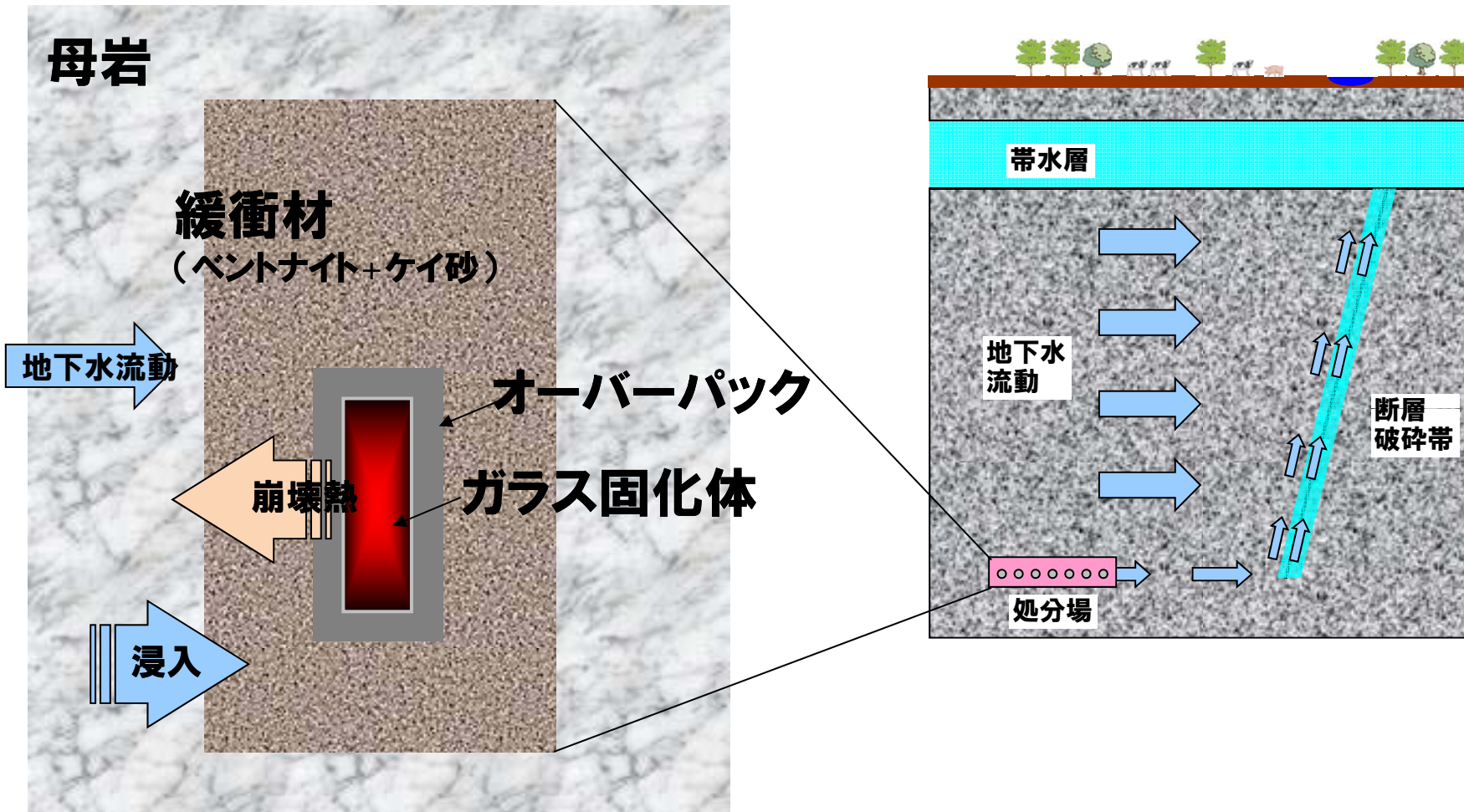


システムに期待する主な安全機能





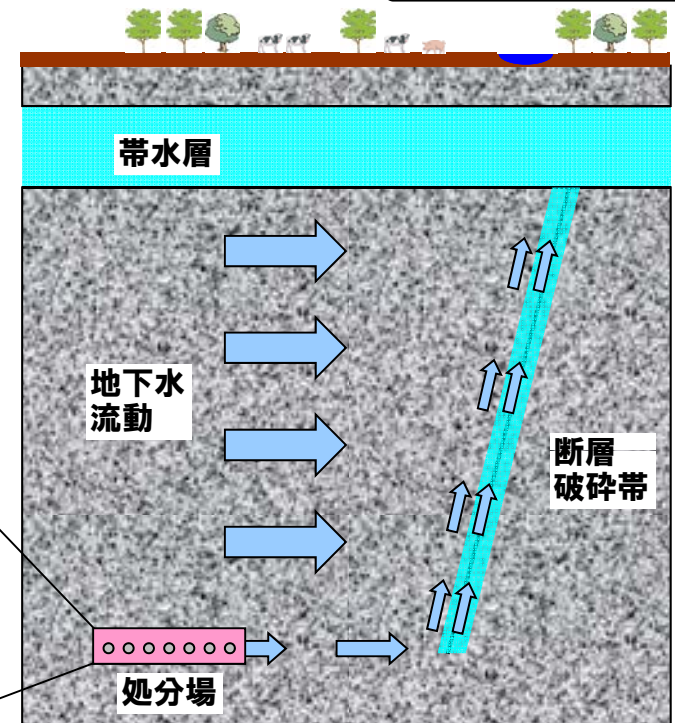
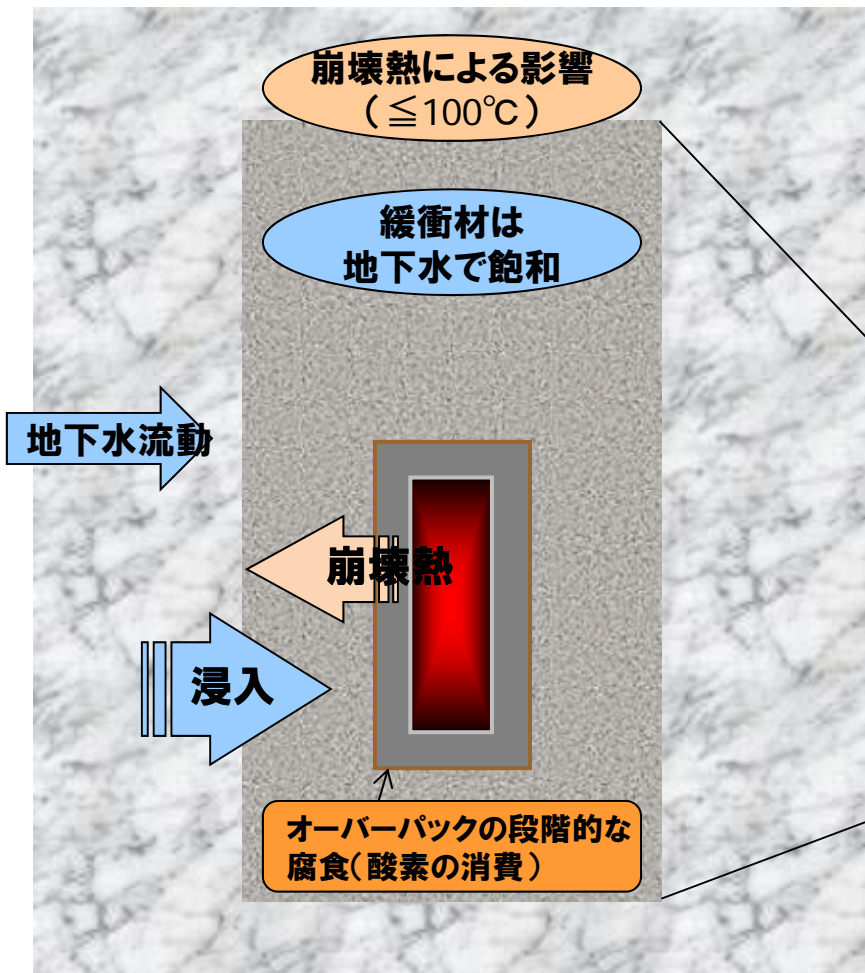
地層処分システムがどのように機能するか？ (長期挙動の理解) 処分後 0年





地層処分システムがどのように機能するか？ (長期挙動の理解) 処分後 数十年

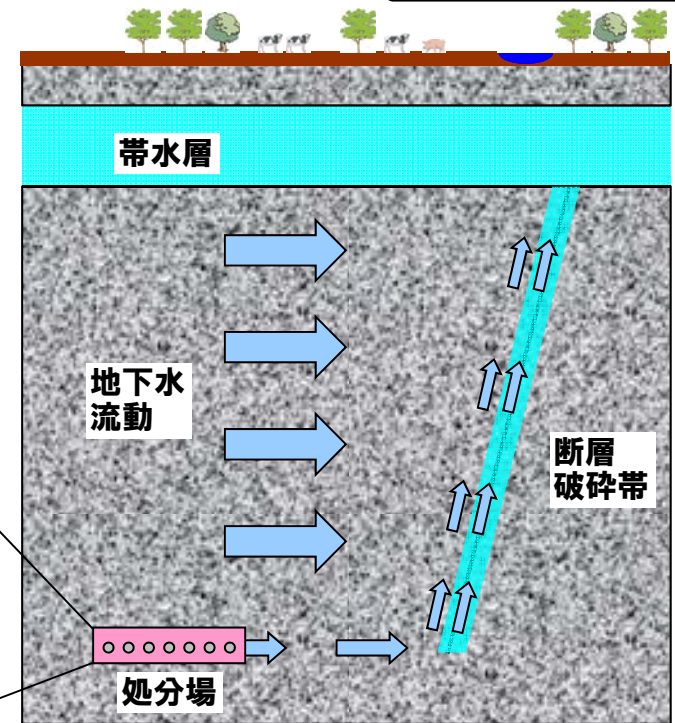
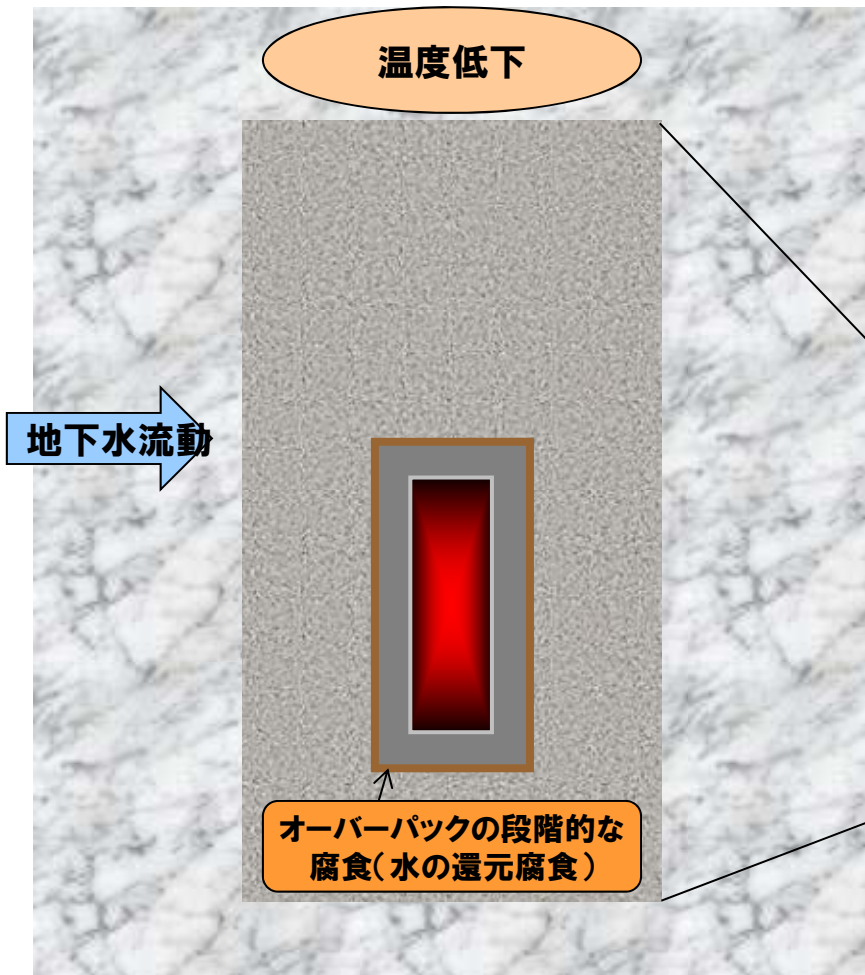
種々の仮定に基づく目安





地層処分システムがどのように機能するか？ (長期挙動の理解) 処分後 数百年

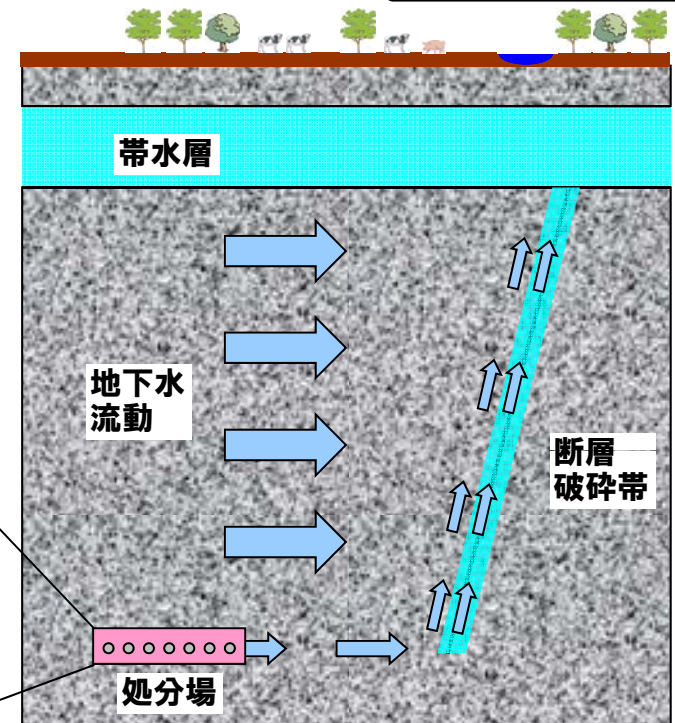
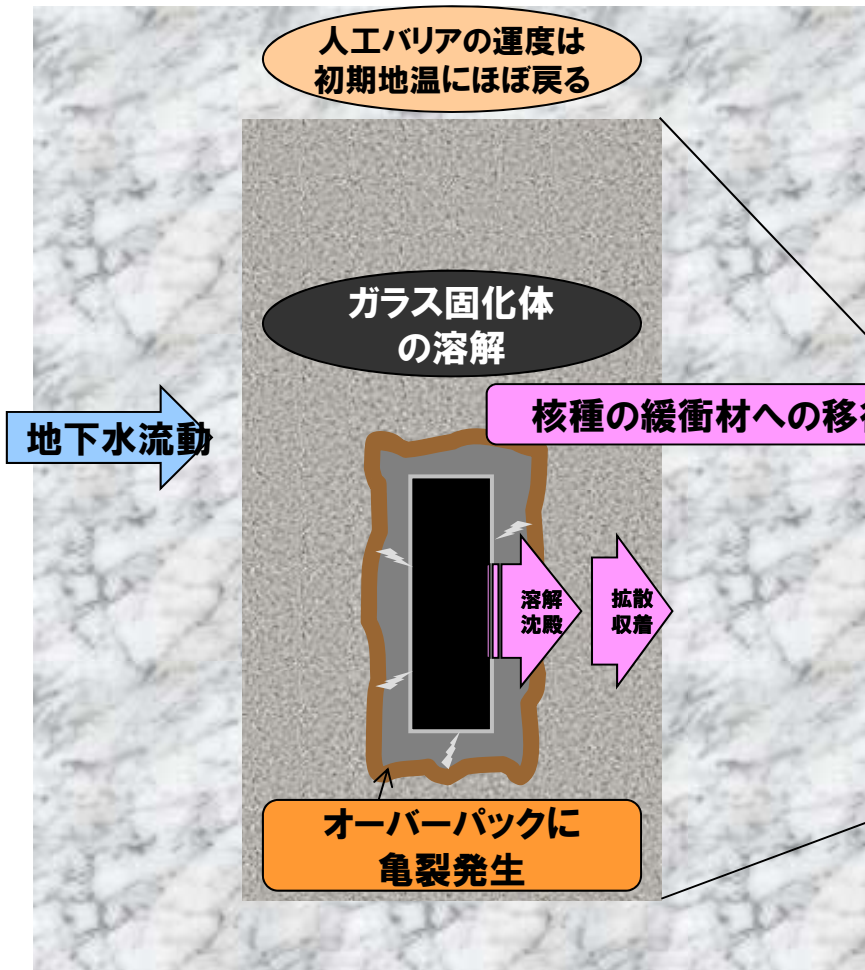
種々の仮定に基づく目安

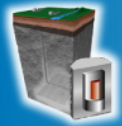




地層処分システムがどのように機能するか？ (長期挙動の理解) 処分後 数千年

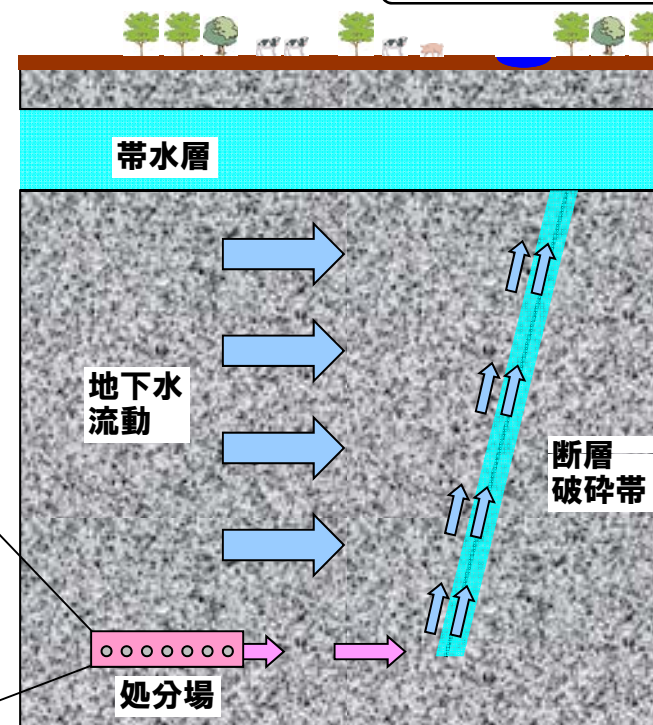
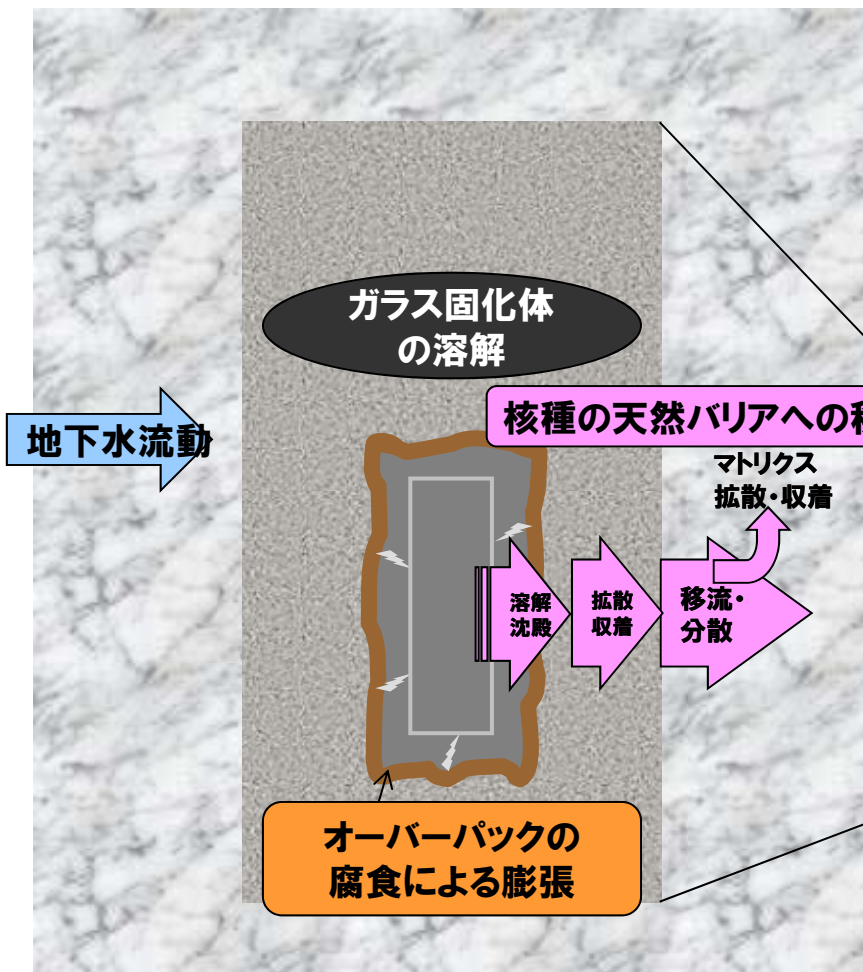
種々の仮定に基づく目安





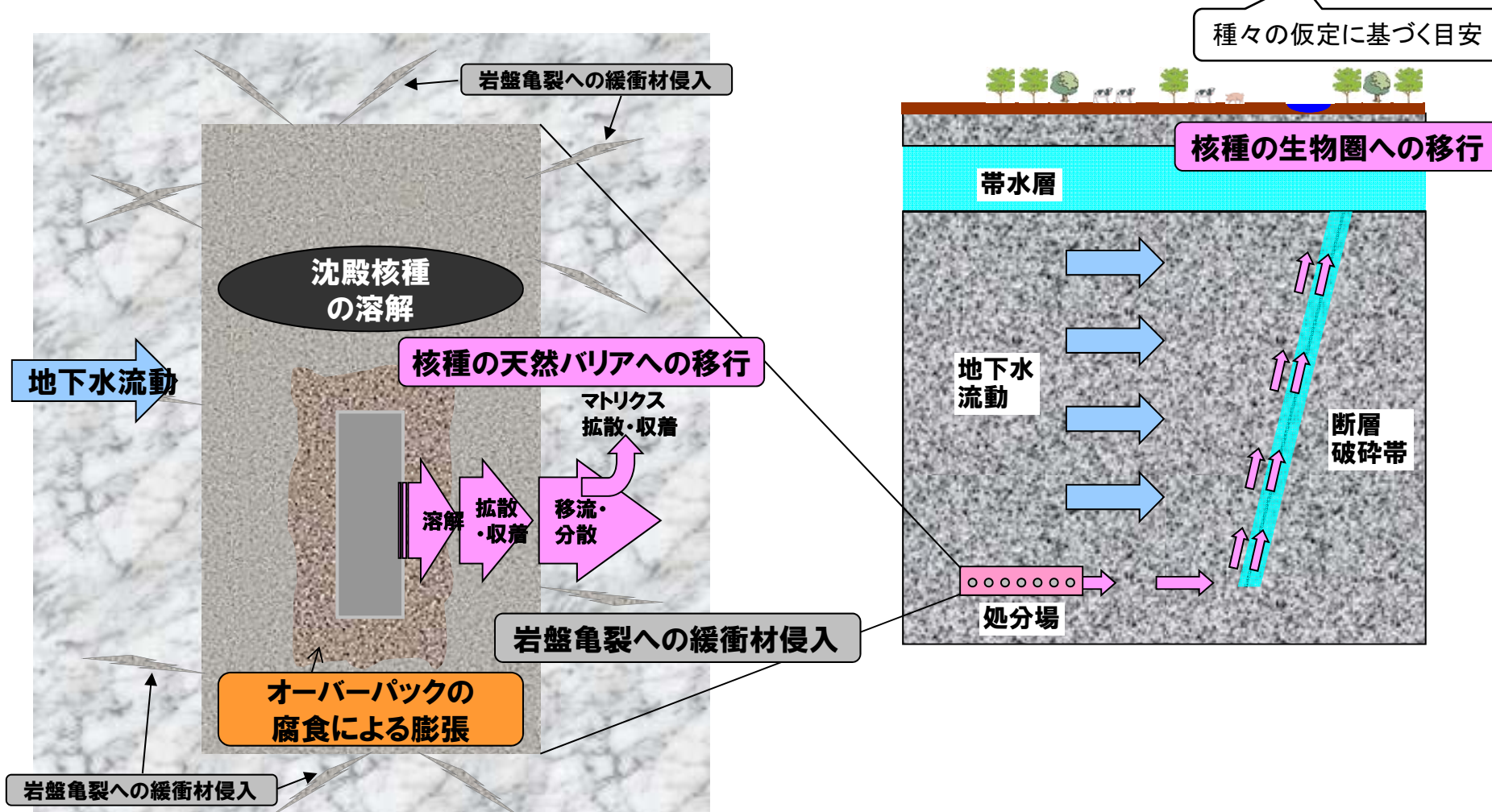
地層処分システムがどのように機能するか？ (長期挙動の理解) 処分後 数万年

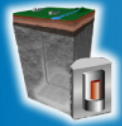
種々の仮定に基づく目安





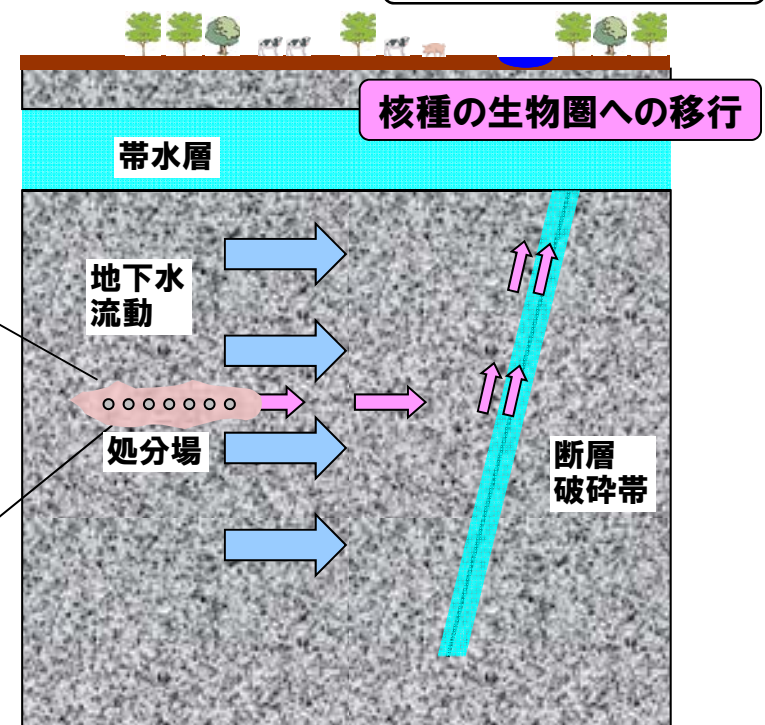
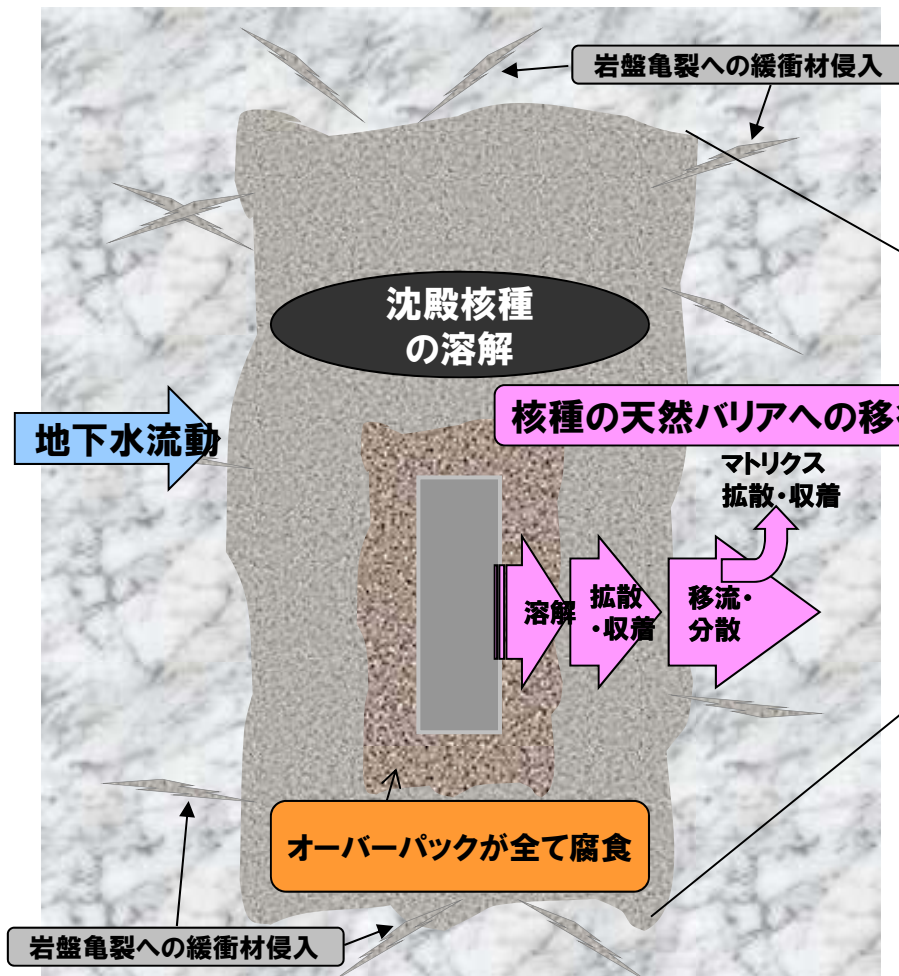
地層処分システムがどのように機能するか？ (長期挙動の理解) 処分後 数十万年





地層処分システムがどのように機能するか？ (長期挙動の理解) 処分後 数百万年

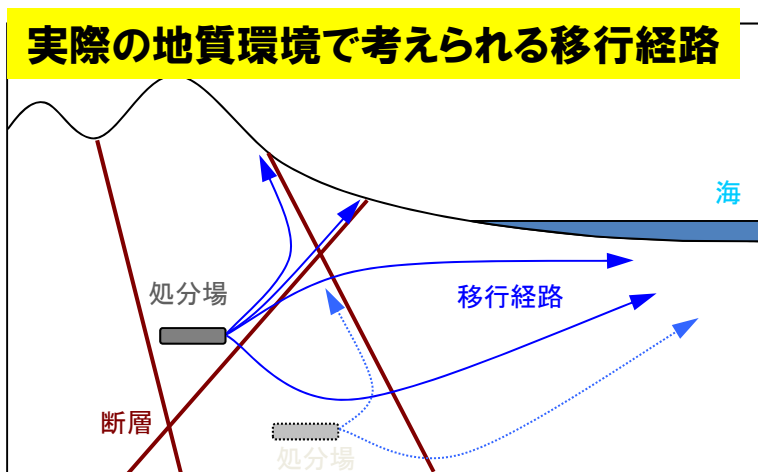
種々の仮定に基づく目安



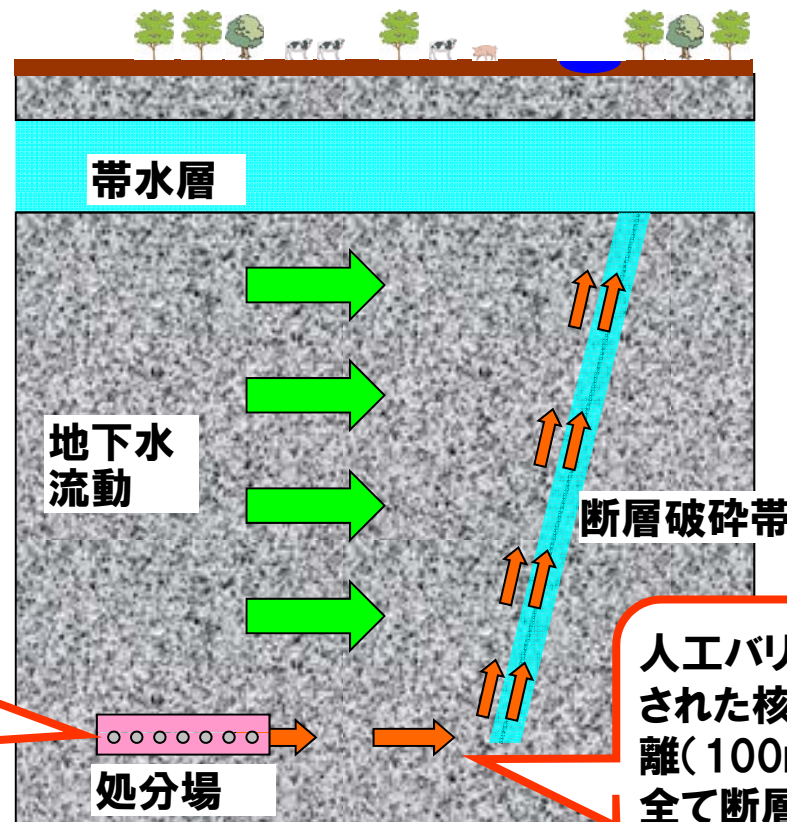


核種移行評価モデル

地層処分研究開発第2次取りまとめ(H12)での例



簡略化



- ・オーバーパックは処分後1,000年で全て破損し、漏出開始
- ・断層に最も近い廃棄体(1本)のみ評価

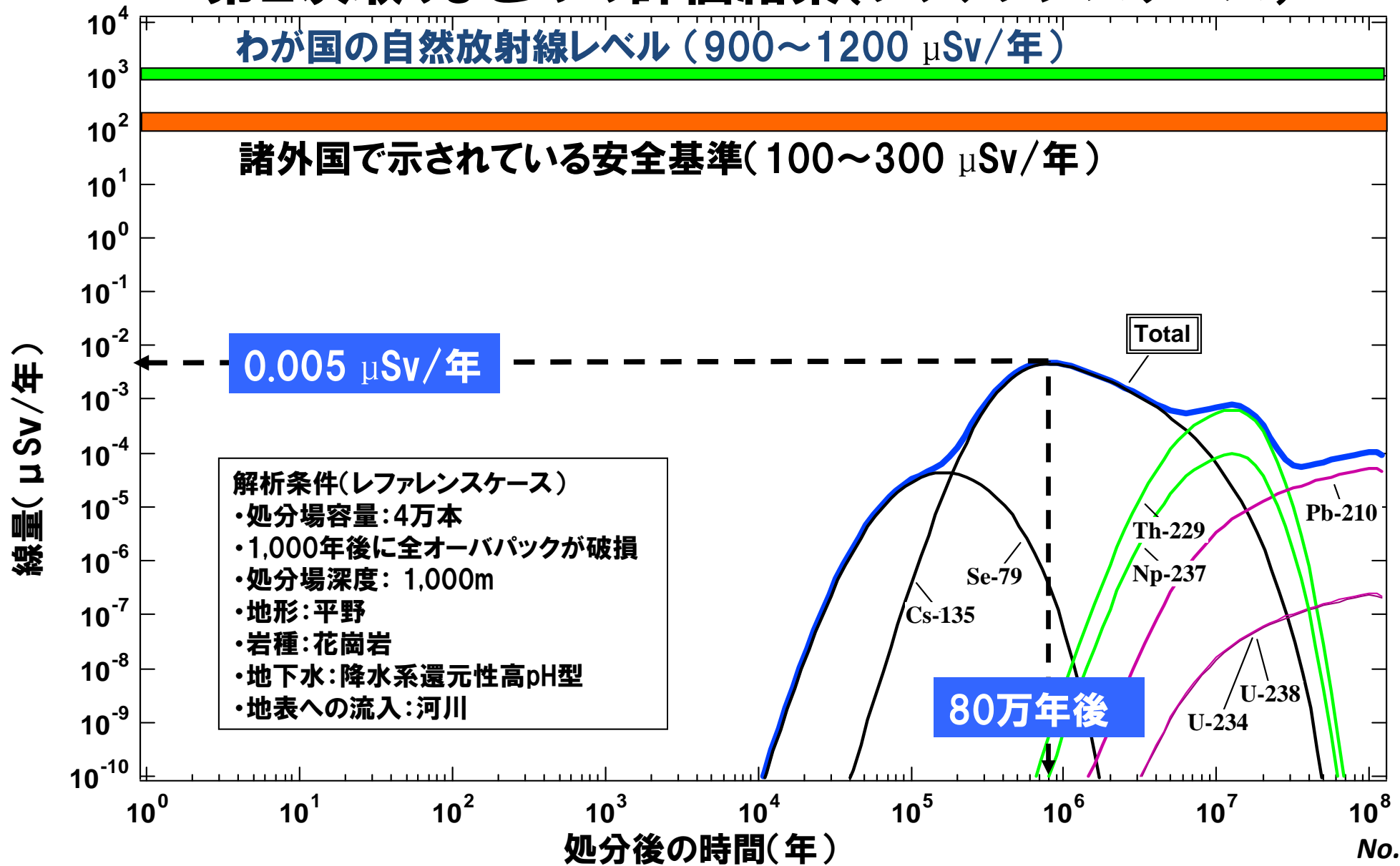
人工バリアから放出された核種は最短距離(100m)を通過して全て断層に移行



オーバーパックによる閉じ込め (処分後1000年で破損)

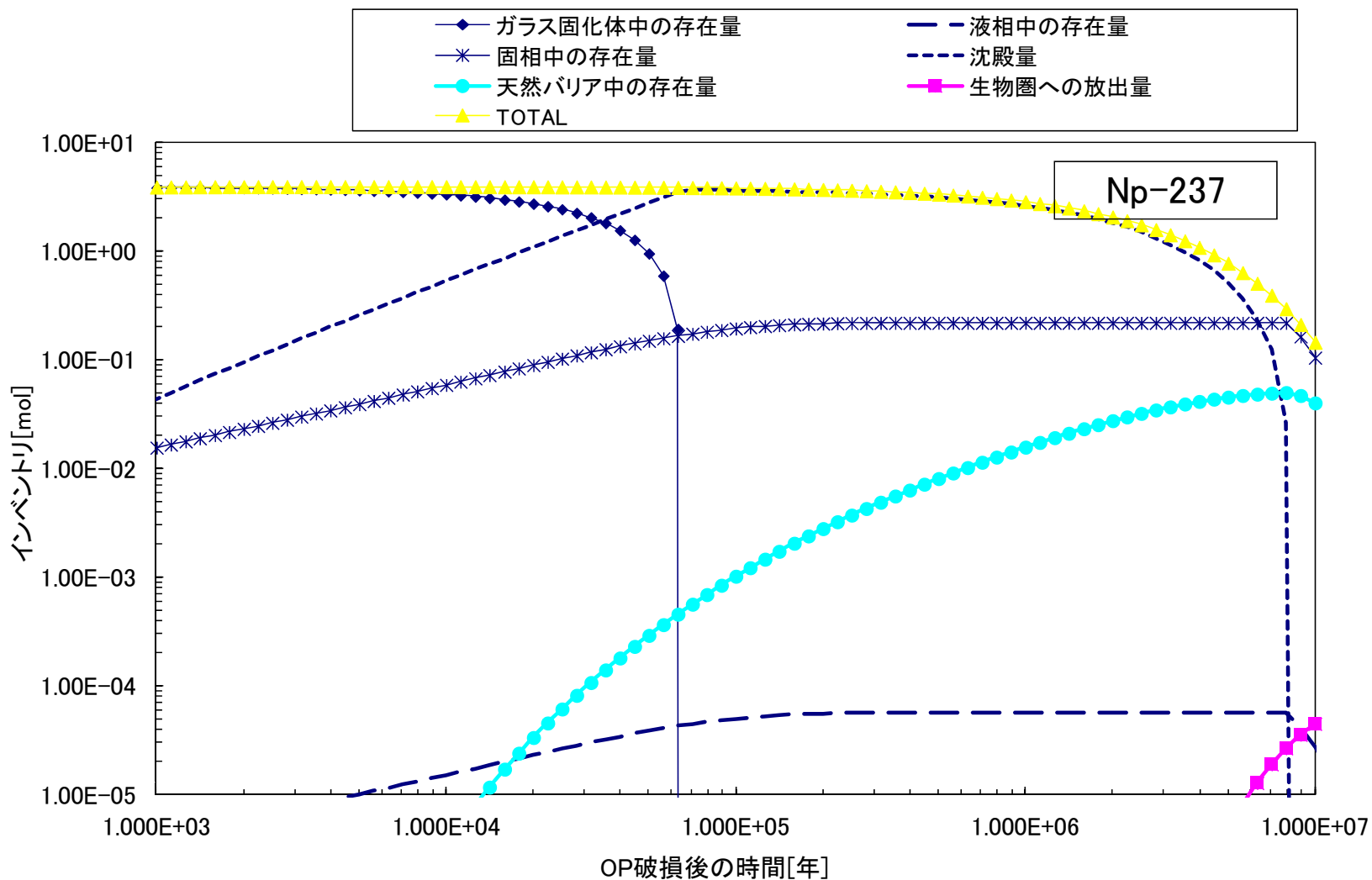


第2次取りまとめの評価結果(レファレンスケース)



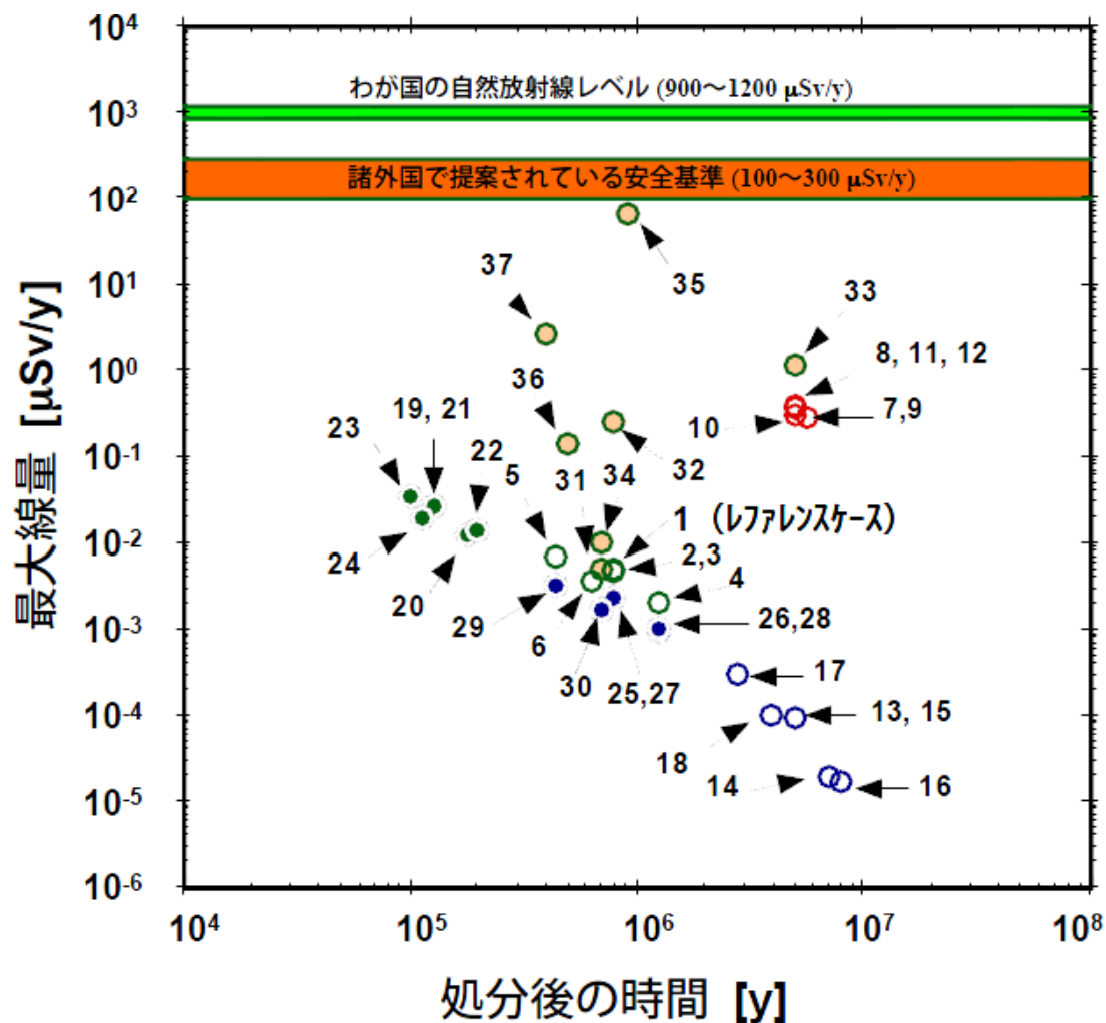


レファレンスケースにおける各バリアの核種存在量(Np-237)





総合的な安全評価解析の結果



Case #1: レファレンスケース

- 岩種：結晶質岩（塩基性）
- 地下水/GBI：降水系/河川水
- 地形：平野

Case #2- #32: システムの多様性

以下の可能性ある組み合わせより構成

- 岩種：6種類
- 地下水/GBI：[降水系, 海水系] / [河川水, 沿岸海域, 深井戸]
- 地形：平野, 丘陵, 山地
- 人工バリアの代替デザイン

Case #33: データ不確実性

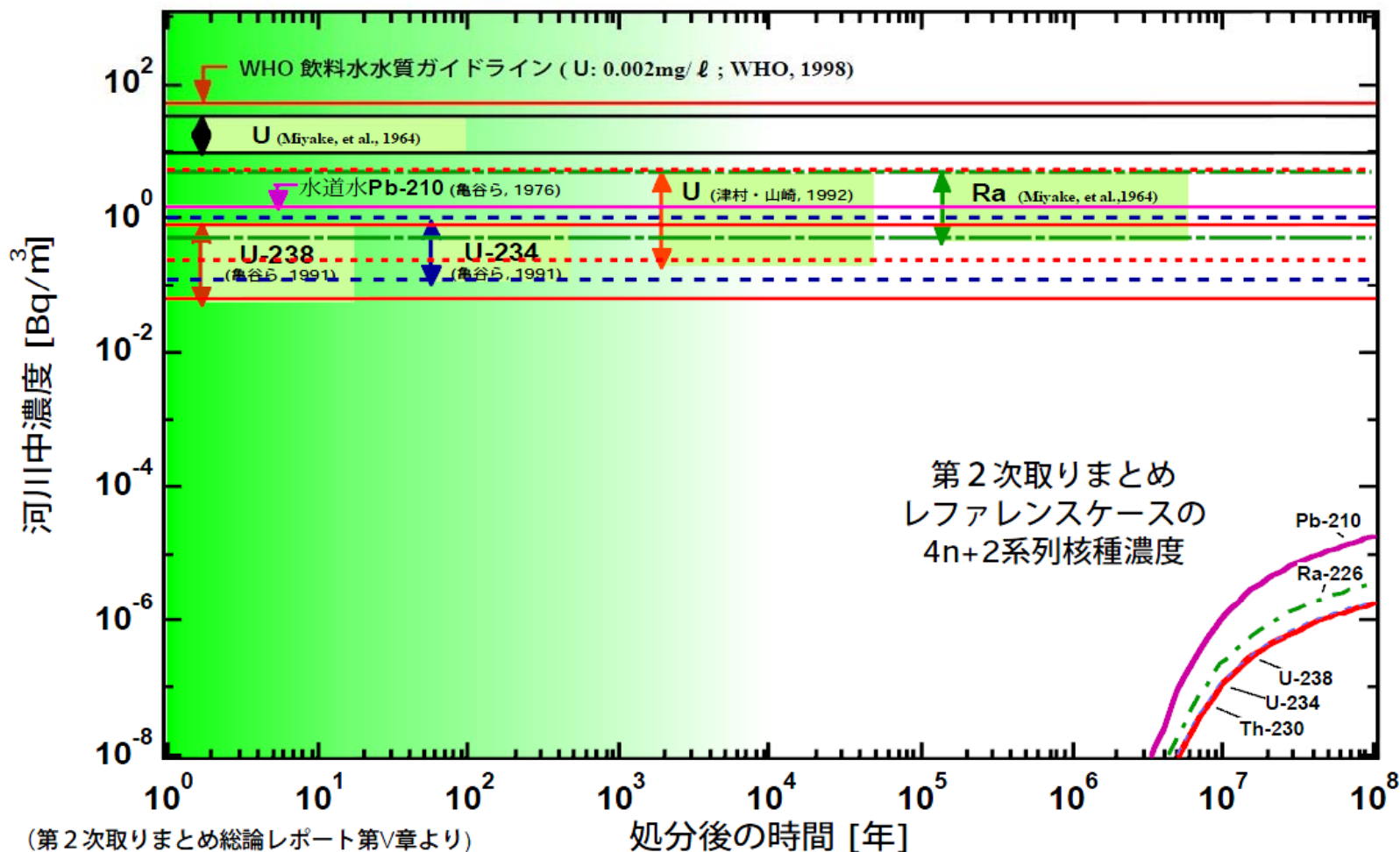
Case #34: モデル不確実性

Case #35-37: シナリオ不確実性

- 隆起・侵食（隆起・侵食速度 = 1mm/y）
- 埋め戻し・プラグの施工不良
- 天然バリア機能を考慮しない



レファレンスケースの評価結果と天然放射性核種の実測値との比較: 4n+2系列核種の濃度





安全評価の信頼性は？

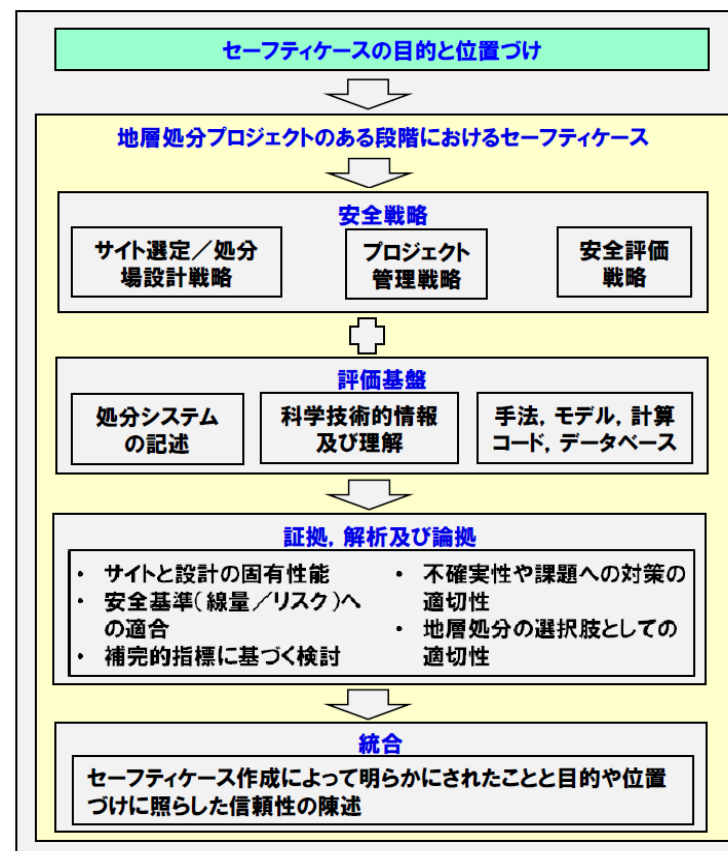
安全評価の結果だけで、遠い未来の安全性を判断できるのか

セーフティケースの概念

A safety case is the synthesis of evidence, analyses and arguments that quantify and substantiate a claim that the repository will be safe after closure and beyond the time when active control of the facility can be relied on.

セーフティケースは、閉鎖された後の制度的な管理の維持が保証できないような時間枠においても、処分場が安全であり続けるとする主張を定量化し立証するための証拠、解析さらには論拠の統合体である。

Post-Closure Safety Case for Geological Repositories: Nature and Purpose (NEA, 2004)



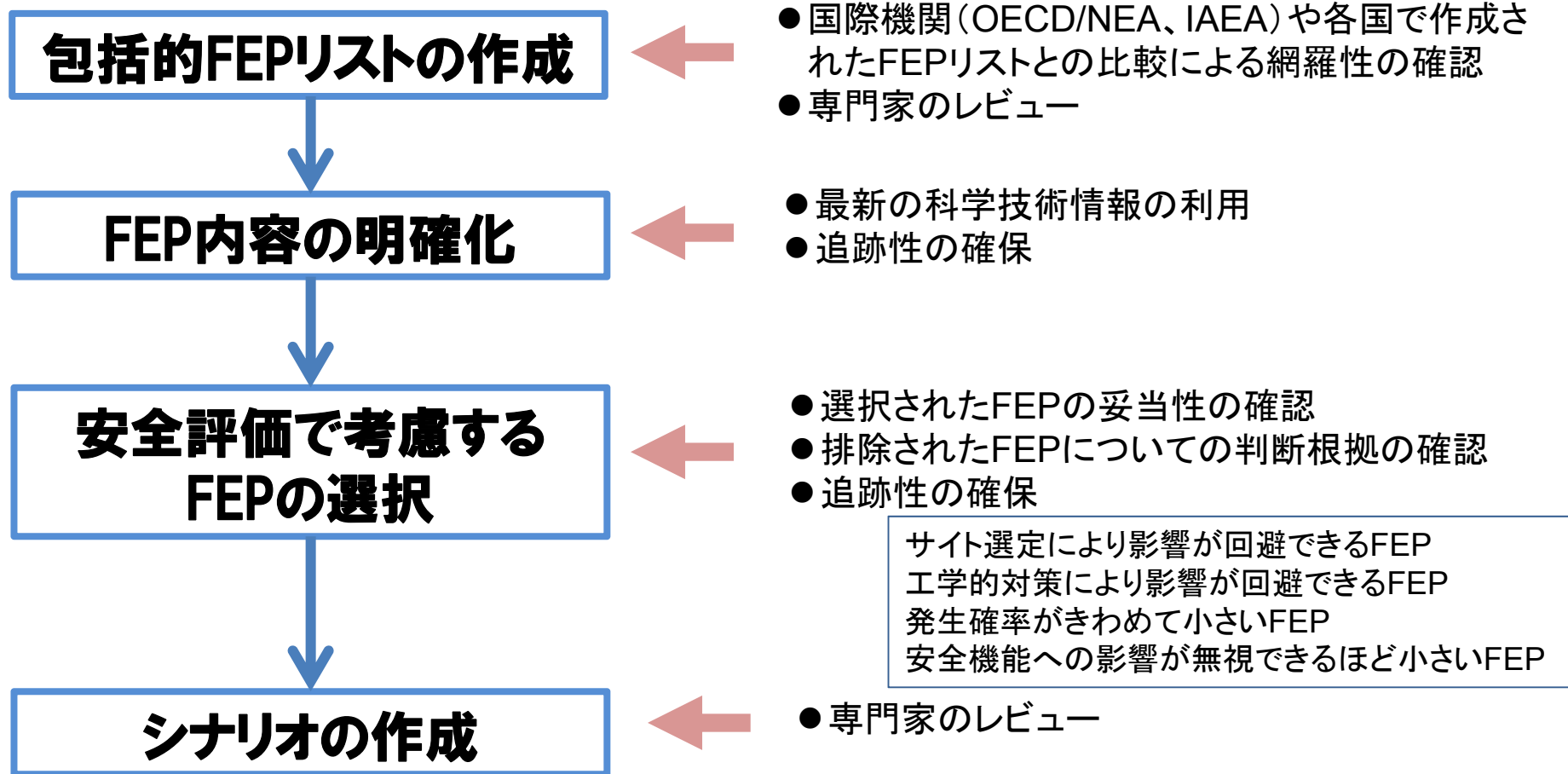


内容

1. **地層処分における安全確保の考え方**
2. **長期安全性の確認**
3. **性能評価研究の例**
 - 3.1 **シナリオ構築手法の高度化**
 - 3.2 **地質環境の長期変遷を考慮した評価手法**
 - 3.3 **パラメータの安全裕度に関する評価手法**
4. **研究開発を取り巻く状況**
5. **まとめ**

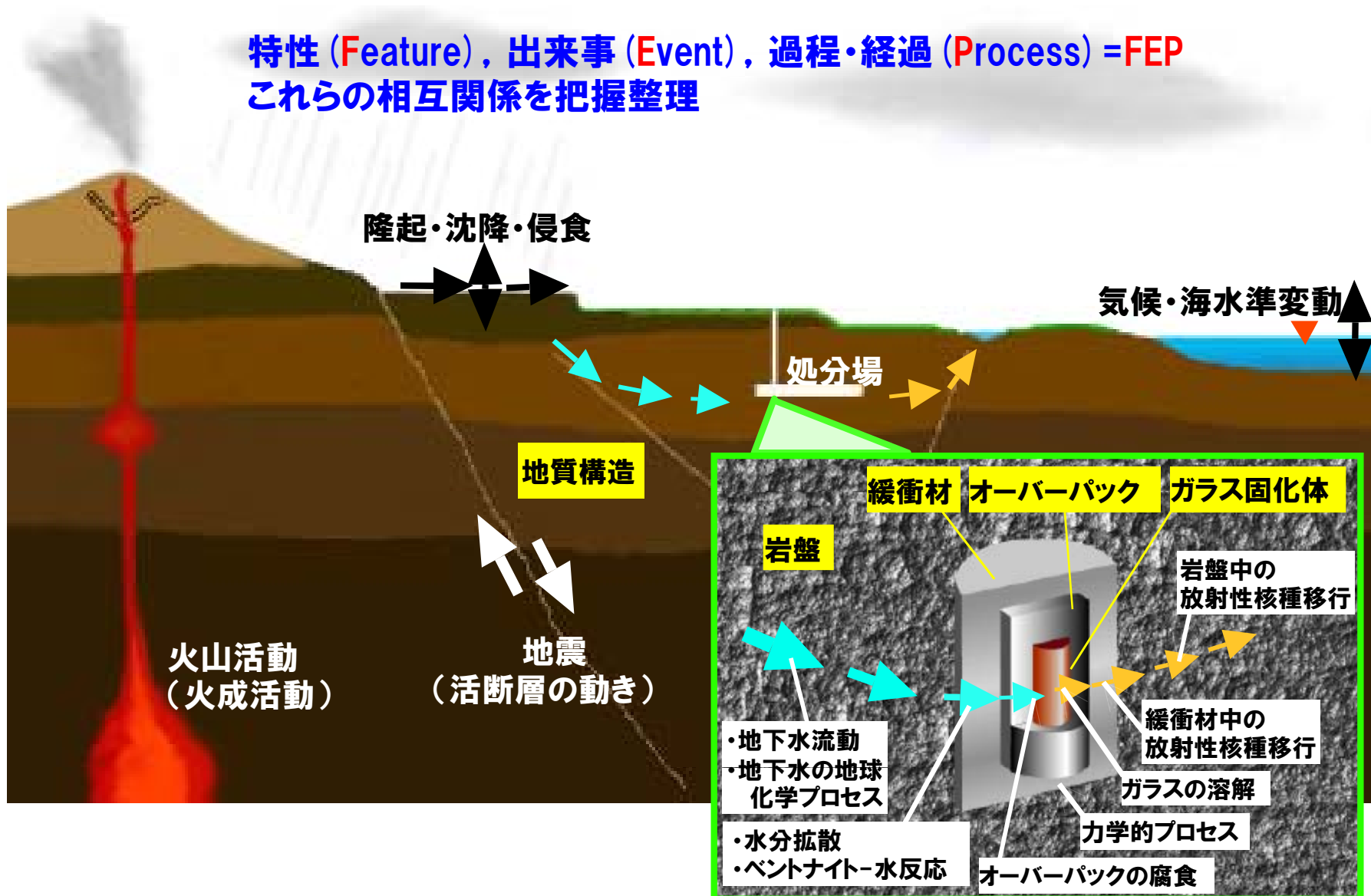


シナリオ構築の考え方(第2次取りまとめ)





特性 (Feature), 出来事 (Event), 過程・経過 (Process) = FEP
これらの相互関係を把握整理





第2次取りまとめでの包括的FEPリスト

	G. ガラス固化体とその近傍	OP. オーバーパック (腐食生成物含む)	B. 緩衝材	D. ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材	H. 母岩 (掘削影響領域, 断層破壊帯含む)
1. 熱的現象・特性	G-1.1 ガラス固化体の熱物性 G-1.2 ガラス固化体の温度 G-1.3 ガラス固化体の熱膨張 G-1.4 腐蝕熱の発生	OP-1.1 オーバーパックの熱物性 OP-1.2 オーバーパックの温度 OP-1.3 オーバーパックの熱膨張	B-1.1 緩衝材の熱物性 B-1.2 緩衝材の温度 B-1.3 緩衝材の熱膨張	D-1.1 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の熱物性 D-1.2 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の温度 D-1.3 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の熱膨張	H-1.1 母岩の熱物性 H-1.2 母岩の温度 H-1.3 母岩の熱膨張
2. 水理学的現象・特性			B-2.1 緩衝材の水理特性 B-2.2 緩衝材の飽和 B-2.3 緩衝材中での地下水流動	D-2.1 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の水理特性 D-2.2 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の飽和 D-2.3 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材中での地下水流動	H-2.1 母岩の水理特性 H-2.2 母岩の飽和 H-2.3 母岩中での地下水流動
3. 力学的現象・特性	G-3.1 ガラス固化体の力学特性 G-3.2 ガラス固化体の応力 G-3.3 ガラス固化体の割れ	OP-3.1 オーバーパックの力学特性 OP-3.2 オーバーパックの応力 OP-3.3 オーバーパックの破損 OP-3.4 オーバーパックの腐食膨張 OP-3.5 オーバーパックの沈下	B-3.1 緩衝材の力学特性 B-3.2 緩衝材の応力 B-3.3 緩衝材の膨潤 B-3.4 緩衝材の変形 B-3.5 緩衝材の流出	D-3.1 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の力学特性 D-3.2 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の応力 D-3.3 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の膨潤 D-3.4 ブラグ, 支保, 埋め戻し材の変形 D-3.5 ブラグ/グラウト, 埋め戻し材の流出	H-3.1 母岩の力学特性 H-3.2 母岩の応力 H-3.3 母岩のクリープ
4. 化学的現象・特性	G-4.1 ガラス固化体の化学特性 G-4.2 ガラス固化体周囲の地下水化学 G-4.3 ガラス固化体の溶解 G-4.4 ガスの発生/影響 G-4.5 微生物の影響 G-4.6 有機物の影響 G-4.7 コロイドの形成 G-4.8 ガラス固化体の化学的変質	OP-4.1 オーバーパックの化学特性 OP-4.2 オーバーパックの地下水化学 OP-4.3 オーバーパックと地下水の反応 OP-4.4 オーバーパックの腐食 OP-4.4.1 全面腐食 OP-4.4.2 孔食 OP-4.4.3 すきま腐食 OP-4.4.4 応力腐食割れ OP-4.5 腐食生成物の生成 OP-4.6 ガスの発生/影響 OP-4.7 微生物の影響 OP-4.8 有機物の影響 OP-4.9 コロイドの形成	B-4.1 緩衝材の化学特性 B-4.2 緩衝材中の地下水化学 B-4.3 緩衝材と地下水の反応 B-4.4 ガスの発生/影響 B-4.5 微生物の影響 B-4.6 有機物の影響 B-4.7 コロイドの形成 B-4.8 緩衝材の化学的変質 B-4.9 塩の蓄積	D-4.1 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の化学特性 D-4.2 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材中の地下水化学 D-4.3 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材中と地下水の反応 D-4.4 ガスの発生/影響 D-4.5 微生物の影響 D-4.6 有機物の影響 D-4.7 コロイドの形成 D-4.8 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の化学的変質	H-4.1 母岩の化学特性 H-4.2 母岩中の地下水化学 H-4.3 母岩と地下水の反応 H-4.4 ガスの発生/影響 H-4.5 微生物の影響 H-4.6 有機物の影響 H-4.7 コロイドの形成 H-4.8 母岩の化学的変質
5. 放射線学的現象・特性	G-5.1 ガラス固化体中での核種の放射性崩壊 G-5.2 ガラス固化体周囲の地下水の放射線分解 G-5.3 ガラス固化体の放射線損傷	OP-5.1 腐食生成物中での核種の放射性崩壊 OP-5.2 腐食生成物中の間隙水の放射線分解 OP-5.3 腐食生成物の放射線損傷	B-5.1 緩衝材中での核種の放射性崩壊 B-5.2 緩衝材中の間隙水の放射線分解 B-5.3 緩衝材の放射線損傷	D-5.1 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材中での核種の放射性崩壊 D-5.2 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材中の地下水の放射線分解 D-5.3 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の放射線損傷	H-5.1 母岩中での核種の放射性崩壊 H-5.2 母岩中の間隙水の放射線分解 H-5.3 母岩の放射線損傷
6. 物質(核種)移動現象・特性	G-6.1 ガラス固化体周囲の物質移動特性 G-6.2 ガラス固化体からの核種の溶出 G-6.2.1 核種のコングリュエントな溶出 G-6.2.2 沈澱/溶解	OP-6.1 腐食生成物の物質移動特性 OP-6.2 幾何形状/間隙構造 OP-6.3 腐食生成物中の核種の移行 OP-6.3.1 移流/分散 OP-6.3.2 拡散 OP-6.3.3 収着 OP-6.3.4 沈澱/溶解 OP-6.3.5 コロイドによる移行 OP-6.3.6 ガスによる移行	B-6.1 緩衝材の物質移動特性 B-6.2 幾何形状/間隙構造 B-6.3 緩衝材中の核種の移行 B-6.3.1 移流/分散 B-6.3.2 拡散 B-6.3.3 収着 B-6.3.4 沈澱/溶解 B-6.3.5 コロイドによる移行 B-6.3.6 ガスによる移行	D-6.1 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の物質移動特性 D-6.2 幾何形状/間隙構造 D-6.3 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材中の核種の移行 D-6.3.1 移流/分散 D-6.3.2 拡散 D-6.3.3 収着 D-6.3.4 沈澱/溶解 D-6.3.5 コロイドによる移行 D-6.3.6 ガスによる移行	H-6.1 母岩の物質移動特性 H-6.2 幾何形状, 間隙, 亀裂の構造 H-6.3 母岩中の核種の移行 H-6.3.1 移流/分散 H-6.3.2 拡散 H-6.3.3 収着 H-6.3.4 沈澱/溶解 H-6.3.5 コロイドによる移行 H-6.3.6 ガスによる移行 H-6.4 臨界
7. システムの擾乱となり得る現象	G-7.1 ガラス固化体の組成不良	OP-7.1 オーバーパックの製作不良	B-7.1 緩衝材の製作不良 B-7.2 緩衝材の施工不良	D-7.1 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の製作不良 D-7.2 ブラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の施工不良	
天然現象 (NP-1 地震・断層活動, NP-2 隆起・侵食, NP-3 火山・火成活動, NP-4 気候・海水準変動, NP-5 隕石の落下)					
HA-1 ホーリング, HA-2 井戸の掘削・採水 (探査, 探鉱, 地中空間利用, 土木工事)					



第2次取りまとめでの除外FEPリスト

除外するFEP [表 4.1-1 に対応するFEP番号] [4.2の関連項目]	根拠
地震・断層活動 :付録B参照 [NP-1]	分冊1での検討から、十万年程度の将来については、現在までの活動の継続として、断層活動を評価することが可能と考えられる。したがって、個々の活断層について、処分施設との間に適切な距離を確保することにより、重大な影響は避け得ると考えられる。また、断層が発達しているわが国ではまったく弱面の存在しない岩盤に新たに断層が発生する可能性は小さい。仮に新たな断層が生じた場合、初期の断層は小規模な破断の集合帯として徐々に成長するため、これが大きな変位を生じさせる大断層に急速に成長する可能性はきわめて小さい。仮に断層活動による地層処分システムへの影響の発生を想定するとしても、その確率はきわめて小さく、リスクの試算から、その影響も諸外国で提案されている上限値を十分下回ると考えられる。
火山・火成活動 :付録B参照 [NP-2]	分冊1での検討から、十万年程度の将来については、数十万年～百数十万年程度の火山活動の時間的・空間的变化に基づき、将来の活動場を評価することが可能と考えられる。したがって、処分場を現在の火山地域からその範囲を考慮して離すことにより、火山活動による重大な影響は避け得ると考えられる。仮に火山活動による地層処分システムへの影響の発生を想定するとしても、その確率はきわめて小さく、リスクの試算から、その影響も諸外国で提案されている上限値を十分下回ると考えられる。
工学的対策に関する初期欠陥 ^{*1} [G-7.1, B-7.1/B-7.2] [4.2.4.2]	ガラス固化体、緩衝材などの製作・施工については、基本的に現状の手法を適用することにより、それらの品質を管理し、もし不備があったとしてもそれを検出・補修することが可能であると考えられる。そのため、工学的対策に関する初期欠陥が生じることが考えにくい。
将来の人間活動 ^{*2} :付録A参照 [HA-1(直接的な接近)] [4.2.4.3]	資源のない場所に適切な深度で処分場を構築することにより処分場への人間の直接的な接触の可能性は小さくなる。また、専門部会報告書でも述べられているように、意図的な人間侵入については、そうした活動を起こす責任はその社会に帰属すべきとの観点から、またはそれに対し防護しようとするのは無意味との観点から、評価する必要はないと考えられている(たとえば、OECD/NEA, 1995b)。さらに、意図しない人間侵入の発端として、ボーリングを考へる場合、侵入者自身に対する危険性や地表へ運ばれる物質による公衆に対する危険性についてリスクを解析することは、固有の処分場サイトや設計について有益な情報を与えるとは考え難く、人間侵入に対する処分場の性能を判断する技術的基礎を与えることはならない(NAS, 1995)。
隕石の落下 [NP-5]	隕石の衝突は、日本においてのみの特徴的な現象ではなく、地球上においてランダムに発生するものである。これまでに行われた評価例によれば、処分場の深さまで直接影響を与えるような隕石の衝突頻度は、 1.5×10^{-13} [km ² y ⁻¹](Goodwin et al., 1994)から 5×10^{-10} [km ² y ⁻¹](Diebold and Mueller, 1984)の範囲にあり、地層処分システムの性能に影響を及ぼす可能性はきわめて小さいと考えられる。
臨界 [H-6.4] [4.2.4.4]	臨界の可能性については、兵器級プルトニウムを地層処分することによる自己触媒的な臨界到達の可能性が指摘された(Bowman and Venneri, 1995)。しかし、このような臨界が生じるうえで必要となる種々のプロセスに対する発生確率は無視できる程小さく、仮に臨界が発生しても放出エネルギーがきわめて小さく、地層処分システムの性能に影響を与えることはない(判断)と判断(Parke et al., 1995; Konynenburg, 1995)。また、安ほか(1998)は、ガラス固化体中の核種が放出された核種がすべて一点に濃集すると仮定した場合について、臨界が生じる可能性を論じている。その結果として、処分場中の核種濃集が臨界濃度(約10%)に達する可能性は極めて低く、濃集が臨界濃度を超過する可能性は極めて低く、ウランの濃集量は高々数モル程度と無視できるくらい濃集が起きた場合でも、母岩である花崗岩の間隙率が30%を超えない限りは事実上否定できるとした。以上のことから、臨界が発生することは考

根拠を示したうえで除外することが肝要

除外するFEP [表 4.1-1 に対応するFEP番号] [4.2の関連項目]	根拠
人工バリア中での地下水流れ [B-2.3/B-6.3.1, OP-6.3.1] [4.2.2.3]	緩衝材は、飽和にもなる膨潤と、施工において生じた隙間や周辺岩盤の亀裂に対する自己シールにより、低透水性の場が実現される。これにより、人工バリア中の地下水流れは非常にゆっくりとしたものとなり、核種の移動の駆動力とはならない。
塩の蓄積 [B-4.9] [4.2.2.4]	埋め戻し後初期、不飽和で緩衝材中の温度勾配が大きい期間には、塩の蓄積が生じ、局所的な化学的環境変化が生じることも考えられる(Karnland and Pusch, 1995)。しかしながら、温度勾配が小さくなり、緩衝材が地下水で飽和された後には、蓄積された塩は可溶性不純物として溶解し、拡散により散逸すると考えられる。
母岩中での沈殿/溶解 [H-6.3.4] [4.2.2.5]	核種濃度は、基本的にガラス固化体近傍が最も高く、外側に向かって減少する。また、親核種からの崩壊により娘核種の沈殿が起こるには、親核種に比べて娘核種の溶解度や分配係数が小さいことが必要であり、沈殿が生じるとしてもその量は小さいと考えられる。そのため、母岩中での沈殿が核種移行に大きな影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。
熱膨張 [G-1.3, OP-1.3, B-1.3, D-1.3, H-1.3]	緩衝材の温度が100℃未満となるよう処分場が設計されるため、緩衝材、ガラス固化体、オーバーバック、処分施設および母岩の機能に影響を与えるような熱膨張が発生することは考えにくい。
有機物、微生物 [G-4.5/G-4.6, OP-4.8, B-4.5/B-4.6, D-4.5/D-4.6, H-4.5] [4.2.3.1]	有機物は分子サイズが大きい場合圧縮ベントナイトにより過渡されることが実験により確認されている(金持ほか, 1999a)。核種と有機物の錯体形成は、炭酸などのほかの配位子との競合を考慮するとその影響は大きくないと報告がある(金持ほか, 1999b, 1999c)。また、ベントナイトに含まれる有機物の影響については、ベントナイトを用いた拡散試験から得られた実測値に含まれている。微生物は、分子サイズが大きい場合圧縮ベントナイトで過渡されることが実験で確認されている(濱田ほか, 1999a)。微生物の存在は、地下水中の酸化還元反応速度に影響を与えるが、平衡を仮定した地下水水質形成モデルの中で、その影響を考慮していると考えられる。また、米国 WIPP サイトの条件を考慮して破砕した岩石を用いたコロイド移行室内試験においては、微生物の移行は、岩石によるフィルター効果で著しく遅延されているという報告(Yelton et al., 1996)もある。しかしながら、有機物や微生物による影響の詳細な検討は、今後の具体的な地質環境条件下の研究に依存するものと考えられる。
緩衝材中でのコロイド移行 [OP-6.3.5, B-6.3.5] [4.2.3.2]	実験により金コロイド(15nm)が圧縮ベントナイトにより過渡されることが確認されている(Kurosawa et al., 1997)ことから、人工バリア中で生成するコロイドは、緩衝材で過渡されると考えられる。
ガス生成/移行 [G-4.4, OP-6.3.6, B-4.4/B-6.3.6, D-4.4/D-6.3.6, H-4.4/H-6.3.6] [4.2.3.3]	ガスの発生については、オーバーバック腐食による水素ガスの発生が卓越している。腐食速度が時間的に減少する(本田ほか, 1997)ことや溶存水素ガスの拡散(分冊2 4.3.4)により、透気が起こるほどの水素ガスの蓄積はないと考えられる。また、仮に透気が起こったとしても、緩衝材の自己シール性により透気経路は閉塞されることを示す実験結果も得られている(Tamai et al., 1997)。崩壊により生成される放射性のガス成分や微生物によるメタンガスの生成が考えられるが、それらの量は水素ガスに比べて有意ではない。
放射線分解/放射線損傷 [G-5.2/G-5.3, OP-5.2/OP-5.3, B-5.2/B-5.3, D-5.2/D-5.3, H-5.2/H-5.3] [4.2.3.4]	放射線分解で発生し得る酸化剤(H ₂ O ₂ など)の量に比べて、人工バリア中に十分な量の還元物質(オーバーバックやその腐食生成物、緩衝材中の黄鉄鉱、地下水中の還元物質)が存在することにより酸化性雰囲気は緩衝されると考えられる(動力炉・核燃料開発事業団, 1992; Nagra, 1994a)。放射線損傷については、ガラス固化体へのα線の影響やスマクタイトへのγ線の影響は小さいものと考えられる(動力炉・核燃料開発事業団, 1992)。
オーバーバックの沈下 [OP-3.5] [4.2.3.8]	保守的な仮定に基づいたとしても沈下量は小さく(分冊2 4.3.2)、オーバーバックの腐食膨張による比重量や緩衝材の圧縮は沈下をさらに起こりにくくする。
緩衝材の化学的変質 [B-4.8] [4.2.3.5]	緩衝材の温度が100℃未満となるよう処分場が設計されるため、緩衝材性能を損なうようなスマクタイトのイライ化やセンテーションは起こらない(動力炉・核燃料開発事業団, 1992)。また、セメント材料を用いる際でも、その材料を適切に選定すれば、スマクタイトの顕著な変質は避けられると考えられる(久保ほか, 1998; 黒木ほか, 1998)。
処分施設の変形や流出 [D-3.4/D-3.5] [4.2.1.4]	ブラッグ/グラウト、支保工、埋め戻し材については、環境条件を勘案し、変形や流出のような変化があっても、それが人工バリアや天然バリアの機能を損なわないように配慮すると考えられる。
処分施設中での核種移行 [D-5.1/D-6.1/D-6.2/D-6.3]	ブラッグ/グラウト、支保工、埋め戻し材については、それら自身に安全性を高める機能は期待していない。
母岩の化学的変質 [H-4.8] [4.2.1.3]	緩衝材の温度を最大でも100℃未満となるよう処分場のレイアウトが設計され、母岩の温度は、埋め戻し後の初期に地温より数℃高い時期があるにすぎず、地下水と鉱物との化学的相互作用に大きな影響を及ぼすとは考え難い。長期において、母岩が変質を受けたとしても、充填物の生成や亀裂を移行する物質の岩石基質部への拡散が起こりやすくなるという好ましい効果が期待できる。また、支保工の影響についても、低アルカリ性コンクリートの使用により、母岩の著しい劣化を避けることができる。



アプローチと課題

ボトムアップアプローチ

- 包括的FEPリストの作成
- 評価で考慮すべきFEPの選択
- **FEPの相関関係の把握**
- 評価すべきシナリオの構築
- 解析ケースの設定

シナリオの構築プロセスとその内容がわかりにくい

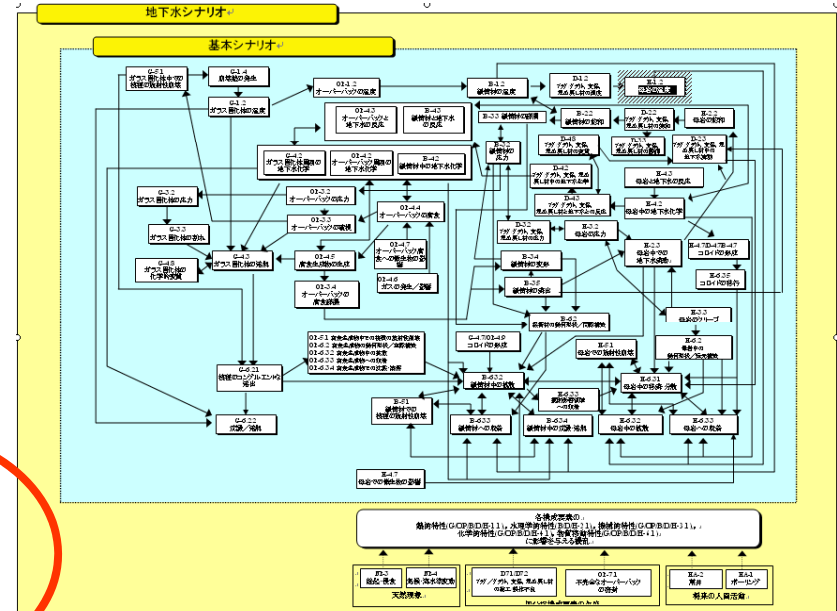
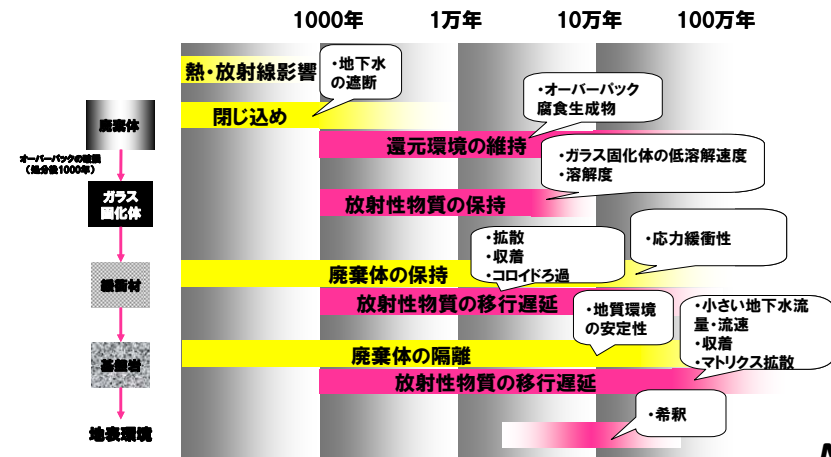


図 5.4-4 FEP の主要な相関関係についてのインフレンスダイアグラム

トップダウンアプローチ

- システムに期待する安全機能を考え、それに対する影響要因をトップダウン的に検討することによりシナリオを導く

わかりやすい半面、重要な影響要因が網羅されていることを示しにくい





内容

1. 地層処分における安全確保の考え方
2. 長期安全性の確認
3. 性能評価研究の例
 - 3.1 シナリオ構築手法の高度化
 - 3.2 地質環境の長期変遷を考慮した評価手法
 - 3.3 パラメータの安全裕度に関する評価手法
4. 研究開発を取り巻く状況
5. まとめ



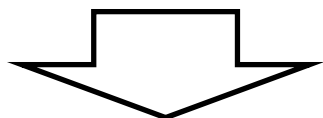
沿岸域における地質環境の変遷を考慮した評価技術:

➤沿岸域では、内陸部と比較すると、隆起・侵食に加えて海水準変動を考慮する必要がある。

→塩淡水境界の移動に伴い処分場周辺の地下水流速や化学環境が複雑に変化する

→地表環境においても、汀線の移動に伴い、海域と陸域を繰り返す

➤既往の簡略的な取扱いでは、塩淡水境界の時間的な変遷が考慮されておらず、塩淡水境界の移動や廃棄体の位置の違いが与える影響を定量的に把握することが困難であった。



これらの影響を考慮できる評価技術を整備

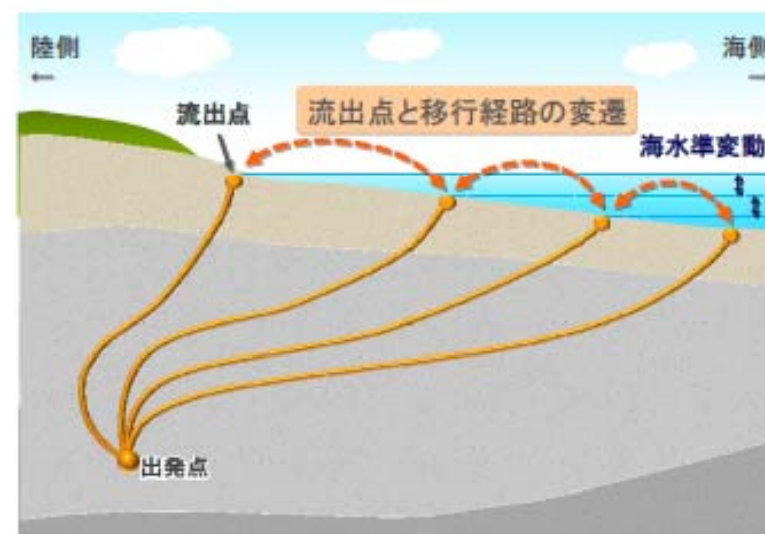
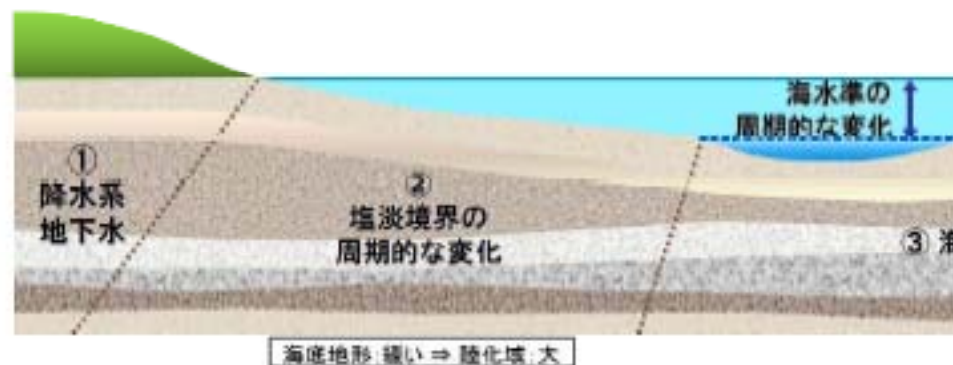
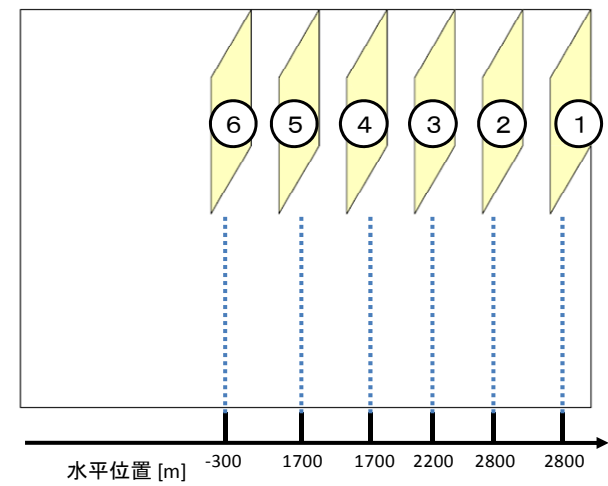
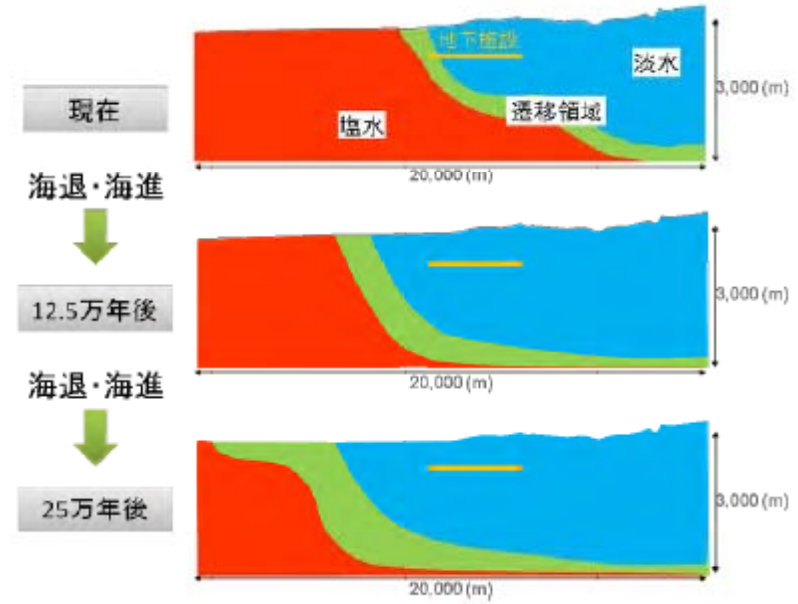
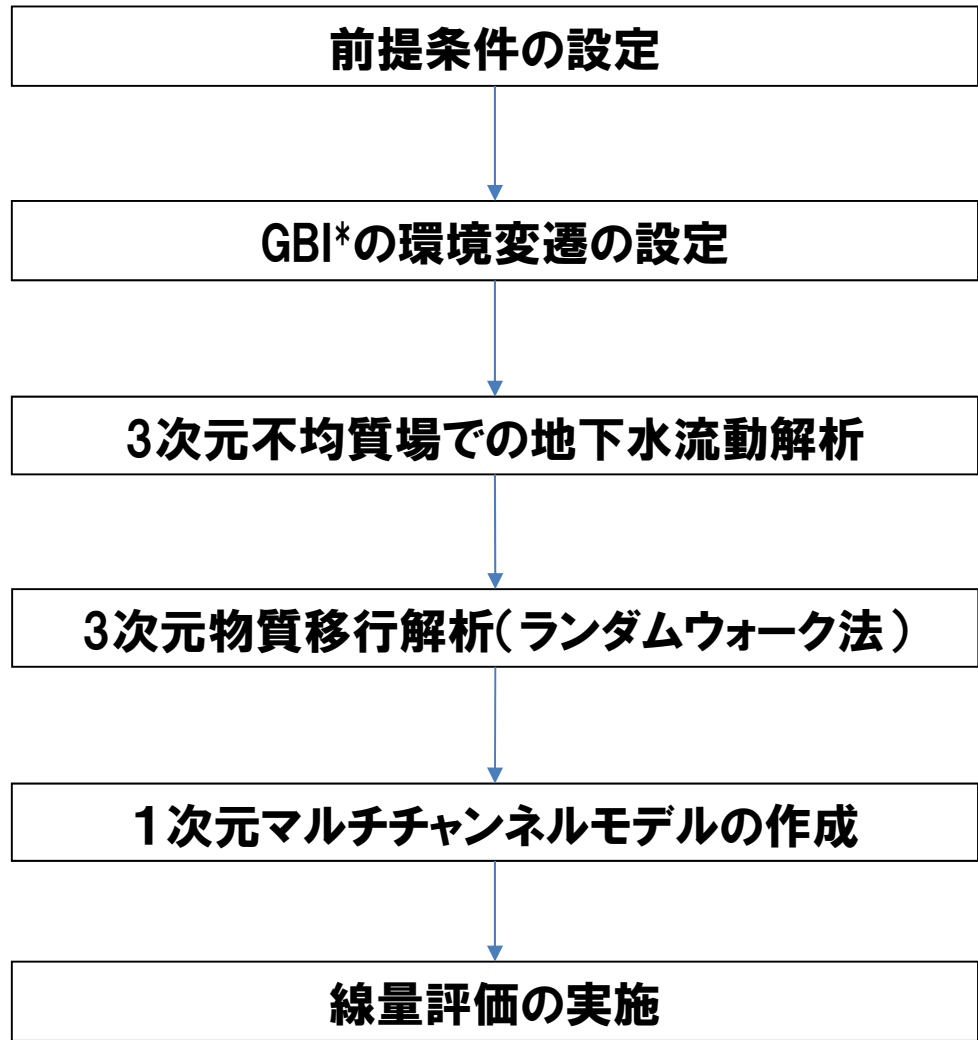


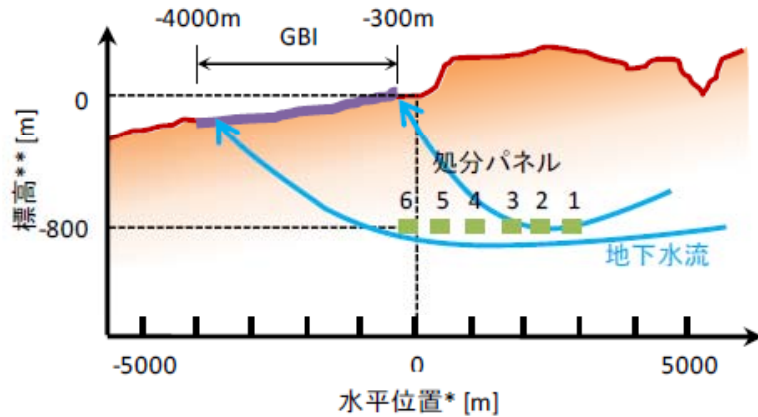
図 6.5.1-4 粒跡線解析による海水準変動による流出点移動のイメージ



*:Geosphere-Biosphere Interface (放射性核種が生物圏に流入すると仮定する場所)

NUMO-TR-11-01より

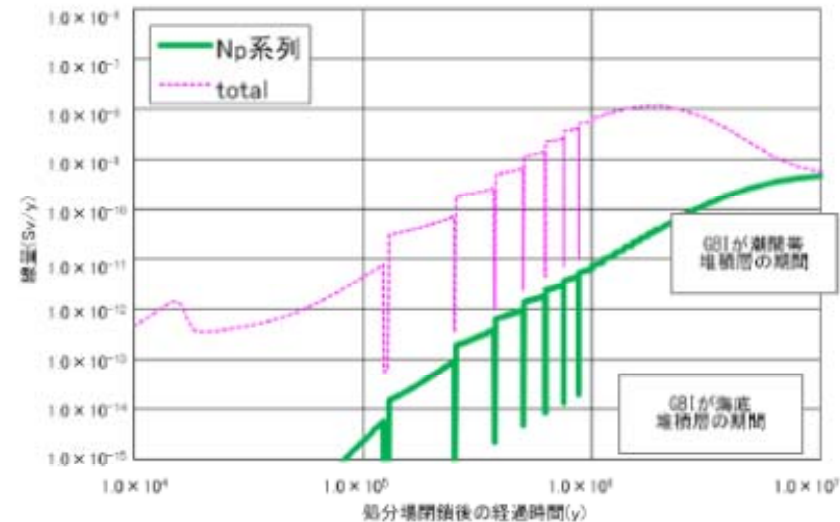
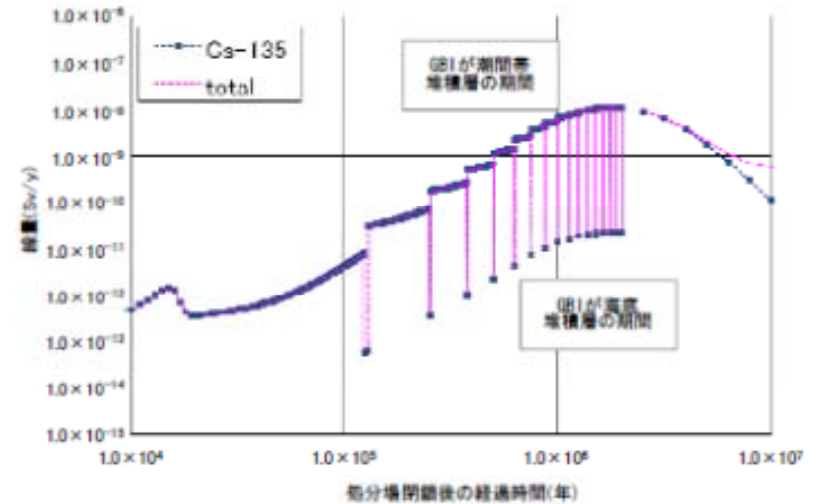
(現在の汀線の位置を0mとする、-は汀線より海側、+は汀線より陸側を示す)



*)水平位置は現在の汀線位置を0mとし、陸側を正とした。
 **)標高は現在の海水準を0mとした。

参考図 2-5 地下水流動の外観と GBI

- ・ GBIが海域(海底堆積層)である期間の被ばく線量は、GBIが陸域である期間の被ばく線量よりも小さい。
- ・ GBIが海域から陸域に遷移した際には、核種を保持している海底堆積層の陸化による影響により、被ばく線量が増大している。
- ・ 100万年までの期間では、Np系列の被ばく線量は、Cs-135と比べると、無視しうるほど小さい。

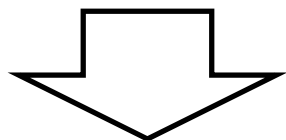


NUMO-TR-11-01より

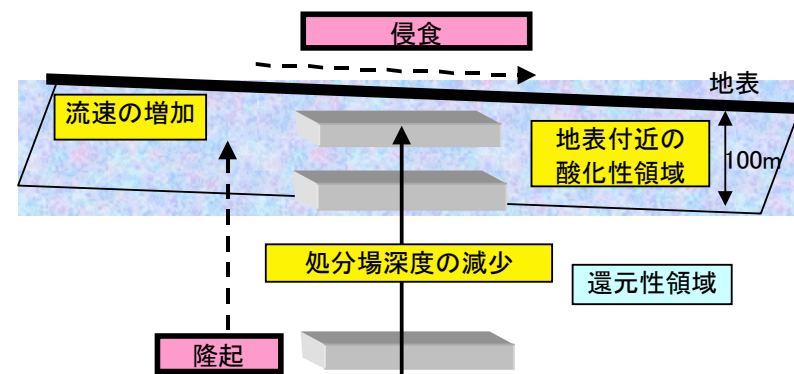


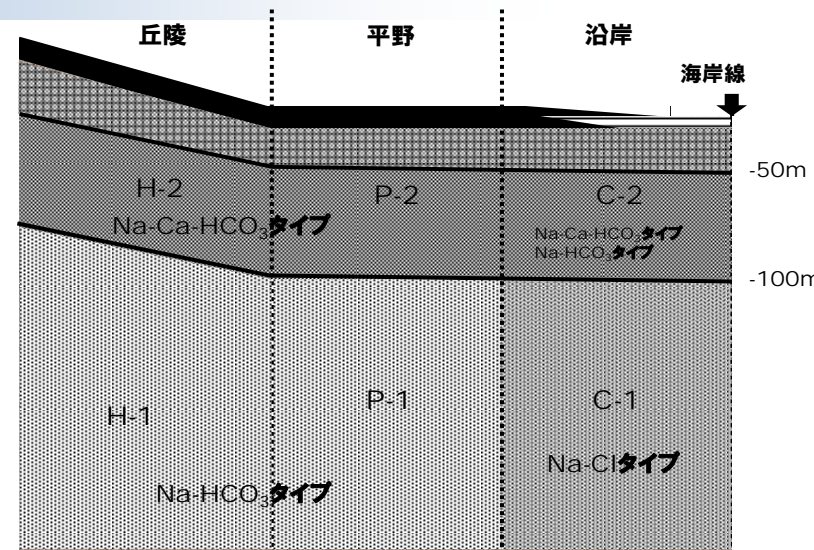
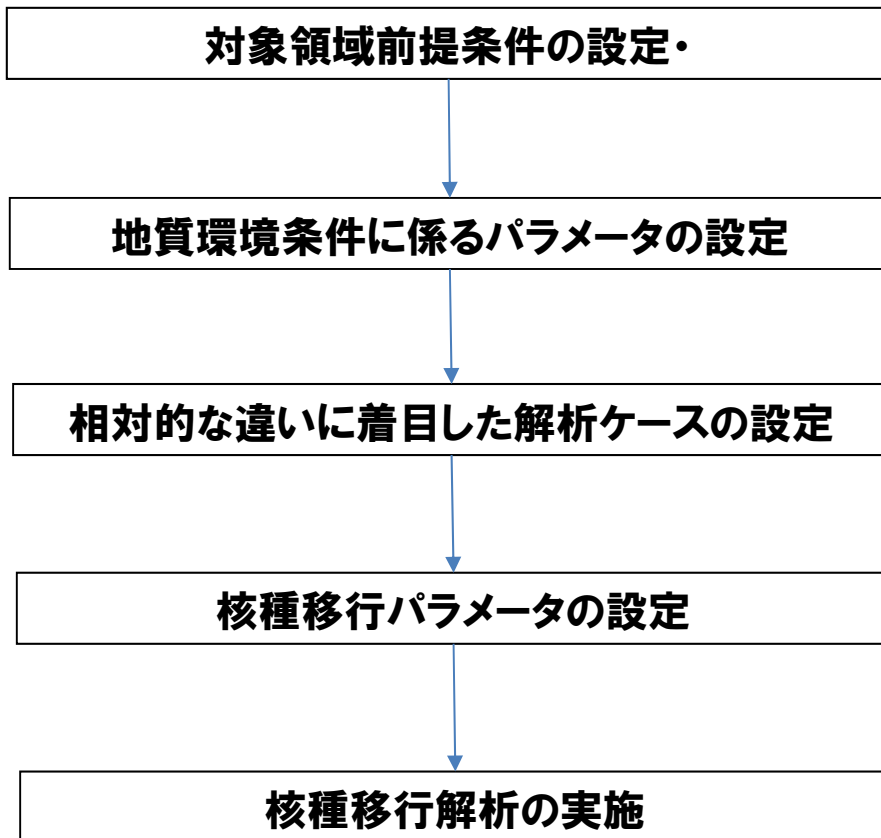
隆起速度と侵食速度の違いに着目した評価技術:

- 広域的で緩慢な現象である隆起・侵食については、最終処分法やNUMO考慮事項に基づき、明らかに隆起速度が速い場所は選定しないこととしている。
- しかしながら、将来数十万年を超えるような超長期においては、隆起・侵食が継続する場合、地形や深度の変化、それらが地下水流動や地下水質に影響を及ぼす可能性がある。
- 既往の検討においては、隆起速度と侵食速度が等しいと仮定して処分深度が減少することを前提としていた(隆起・侵食による深度の減少に伴い、深度100m以浅に仮定する酸化帯に入り、地下水流動や地下水質が変化することを想定)。
- 実際のサイトにおいては、我が国が隆起傾向にあることや褶曲構造・小断層の存在等により、隆起速度と侵食速度が異なることも十分に考えられることから、その違いが地層処分システムに与える影響を分析しておく必要がある。



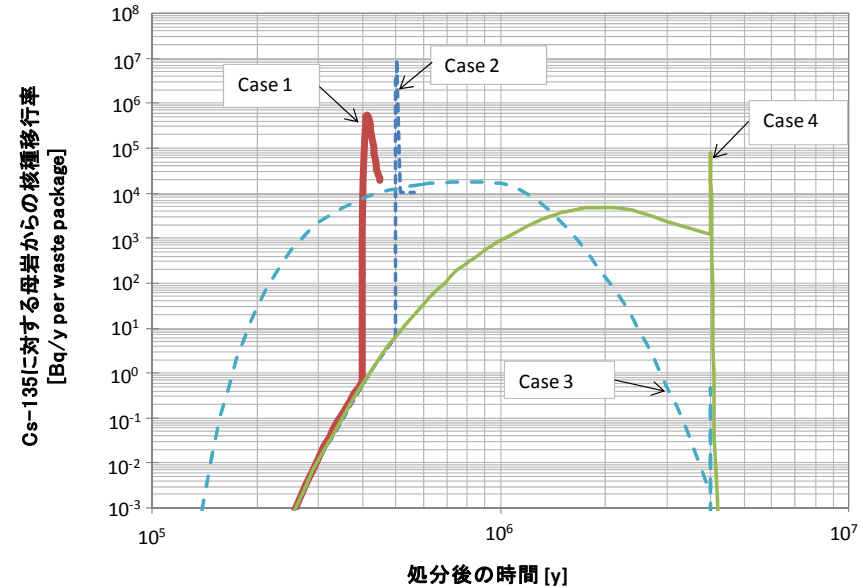
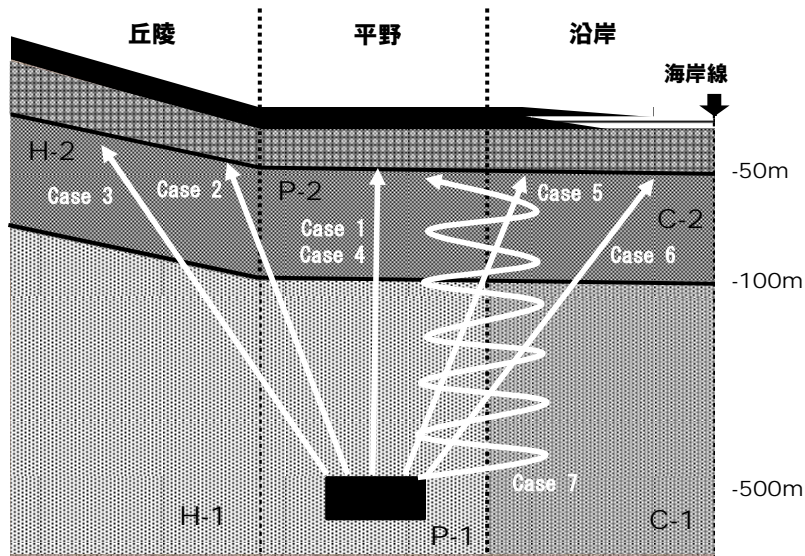
これらの影響を考慮できる評価技術を整備





地質環境条件に係るパラメータ		単位	ブロック						
			H-1	H-2	P-1	P-2	C-1	C-2	
T	岩盤の温度	degree C	25	17	25	17	25	17	
	温度勾配	degree C/100m	2	2	2	2	2	2	
H	透水係数	m/s	1×10 ⁻⁷	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁸	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁹	1×10 ⁻⁷	
	動水勾配	-	0.035	0.138	0.016	0.100	0.008	0.067	
M	間隙率	%	35	35	35	35	35	35	
	岩盤の密度	g/cm ³	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	
C	pH	-	7.8~8.5	7.5~8.5	7.8~8.5	7.5~8.5	7.8~8.5	7.5~8.5	
	Eh	mV	-340~-280	-300~-200	-340~-280	-300~-200	-340~-280	-300~-200	
	地下水 陽イオン 組成	[Na ⁺]		2300	2300	2300	2300	6400	2300
		[K ⁺]		20	20	20	20	70	20
		[Ca ²⁺]	mg/l	30	30	30	30	85	30
		[Mg ²⁺]		20	20	20	20	200	20
		[Cl ⁻]		2100	2100	2100	2100	9700	2100
	陰イオン 組成	[HCO ₃ ⁻]		1600	1600	1600	1600	1100	1600
		[CO ₃ ²⁻]	mg/l	10	10	10	10	500	10
		[SO ₄ ²⁻]		350	350	350	350	1500	350
粘土鉱物			1~18	1~18	1~18	1~18	1~18	1~18	
雲母			~1	~1	~1	~1	~1	~1	
鉱物組成	緑泥石	%	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
	方解石		1~5	~1	1~5	~1	1~5	~1	
	黄鉄鉱		2~3	2~3	2~3	2~3	2~3	2~3	

(川村ほか, 2010 ; Ebashi et al., 2014)



(川村ほか, 2010 ; Ebashi et al., 2014)

- 隆起速度と侵食速度の相対的な違い, それらに起因する地質環境条件の変化(特に、水理)は、地層処分システムにおける重要核種のひとつである Cs-135に与える影響が大きい。
- このため、地質環境調査においては、これらの関係性とその解釈が重要な調査項目となりうることを示唆。

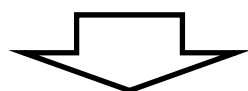


内容

1. **地層処分における安全確保の考え方**
2. **長期安全性の確認**
3. **性能評価研究の例**
 - 3.1 **シナリオ構築手法の高度化**
 - 3.2 **地質環境の長期変遷を考慮した評価手法**
 - 3.3 **パラメータの安全裕度に関する評価手法**
4. **研究開発を取り巻く状況**
5. **まとめ**

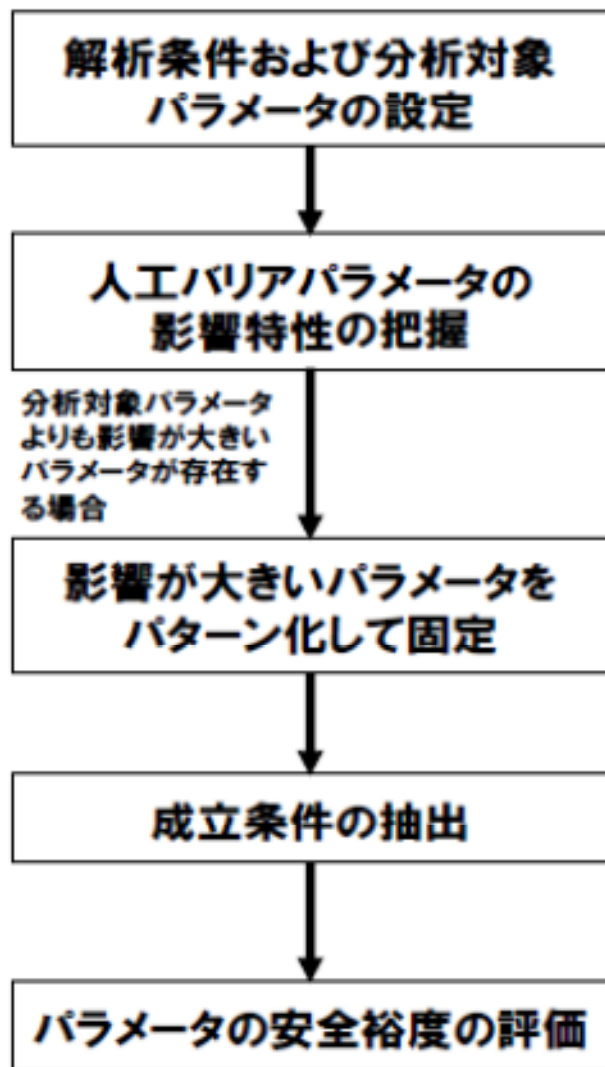


- ・安全評価の信頼性を高めていくためには、不確実性の低減および頑健性の提示が重要となる。
 - 不確実性の低減：不確実性の影響が大きい因子を抽出し、個別現象研究の知見を優先的に拡充する
 - 頑健性の提示：安全評価で用いるパラメータがどの程度の安全裕度を有しているかという評価を行うことも有効なアプローチのひとつ。
- ・パラメータの安全裕度の評価において、保守的な天然バリアの条件 (what-if) 下で人工バリアを対象とした成立条件*が示される場合には、サイト選定に幅を持たせるとともに、地質環境の多様性に対する人工バリアの高い頑健性を示すための有用な情報になる。

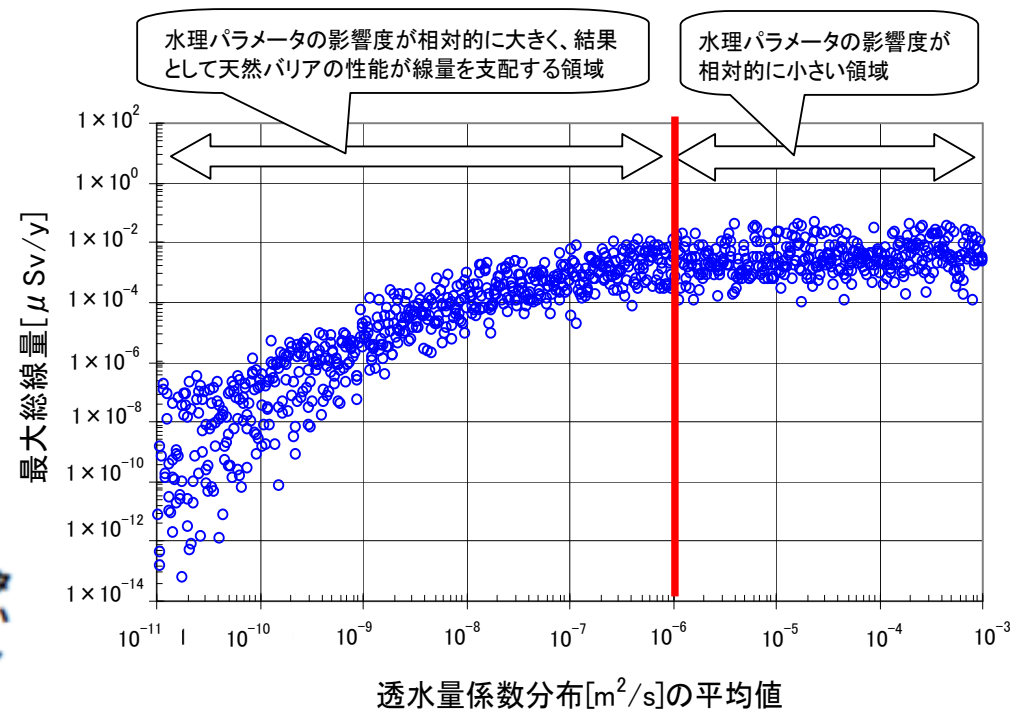


*：目標値を下回るためのパラメータ値の組合せ

包括的感度解析手法(第2次TRULレポート)を用いて、人工バリアのパラメータに着目して安全裕度を評価するための考え方について提案

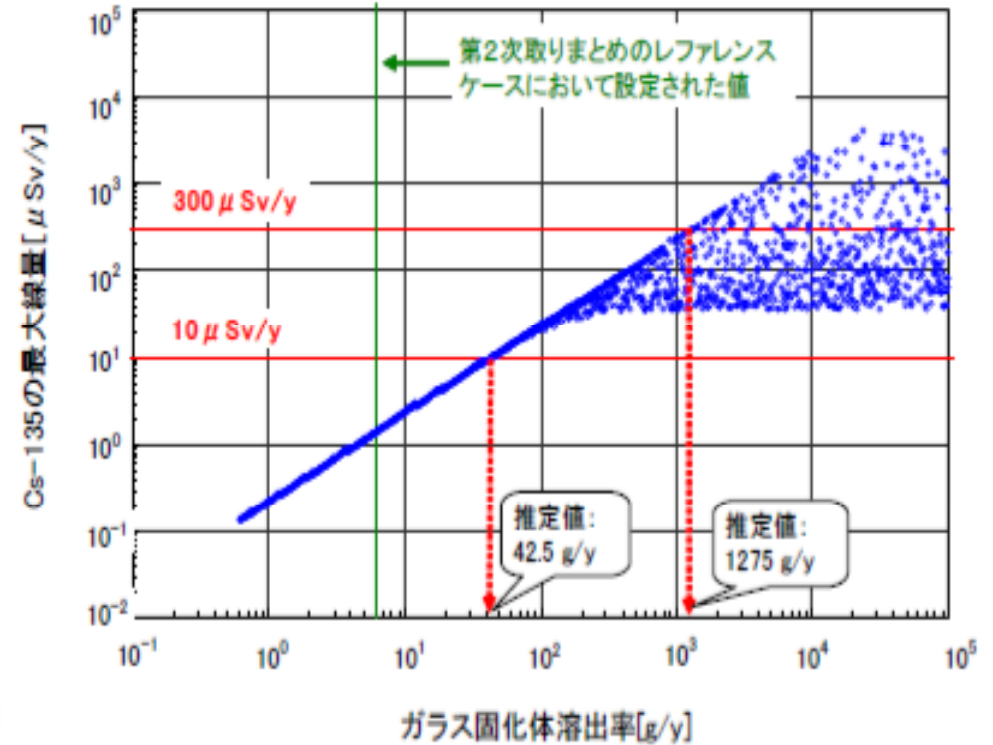
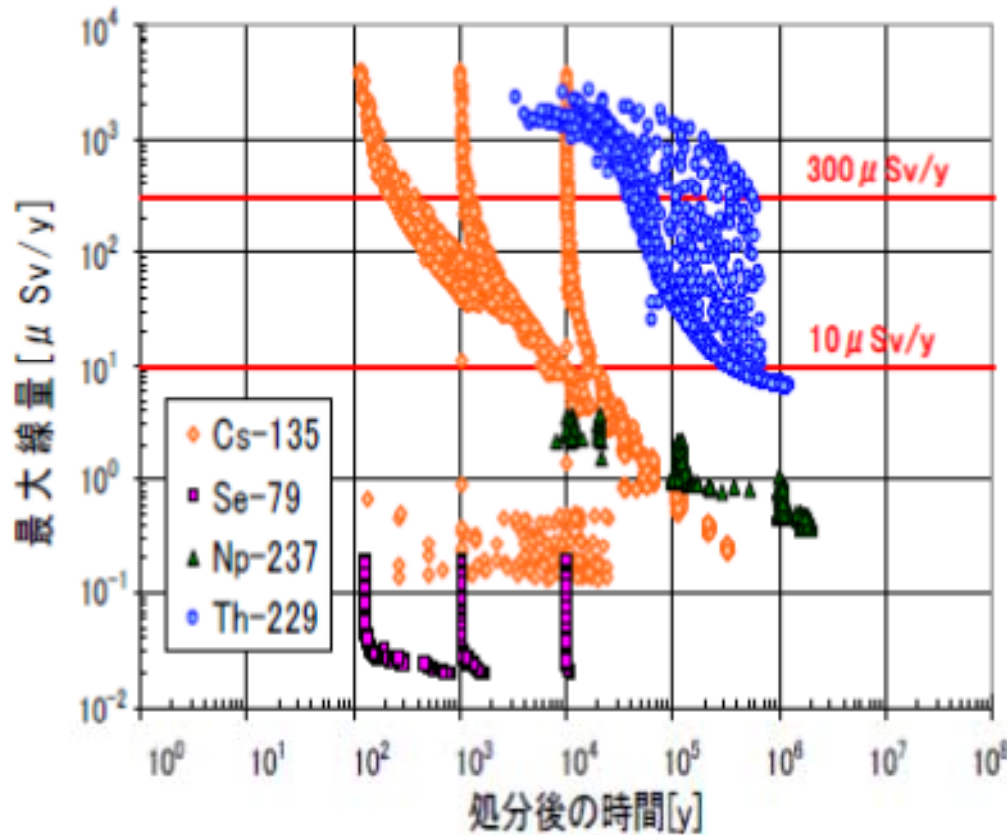


分析対象パラメータ
よりも影響が大きい
パラメータが存在し
ない場合



パラメータ	単位	変動範囲	
		最小値	最大値
ガラス固化体浸出率	g/y	6.2×10^{-1}	4.1×10^5
オーバーパック破損時期	y	100, 1000,	10000
緩衝材厚さ	m	0.1	3.0

(江橋ほか, 2009)



(江橋ほか, 2009)

- ・極めて保守的な天然バリアを想定した降水系地下水の条件において、ガラス固化体溶出率が図中の示したそれぞれの値(42.5g/yおよび1275g/y)を下回れば、最大線量が性能目標値を下回る可能性がある
- ・ガラス固化体浸出率が約 10^2g/y 以下の条件では、最大線量はオーバーパック破損時期や緩衝材厚さに依存しないが、仮にガラス固化体浸出率が 10^3g/y を超えるような場合には、他のパラメータ(ここでは緩衝材厚さ)が最大線量の低減に有効となる。



内容

1. **地層処分における安全確保の考え方**
2. **長期安全性の確認**
3. **性能評価研究の例**
 - 3.1 **シナリオ構築手法の高度化**
 - 3.2 **地質環境の長期変遷を考慮した評価手法**
 - 3.3 **パラメータの安全裕度に関する評価手法**
4. **研究開発を取り巻く状況**
5. **まとめ**



地層処分に関わる国内の動向

- ・平成22年9月7日 原子力委員会が日本学術会議に対して審議を依頼(国民への説明や情報提供のあり方等)
- ・平成24年9月11日 日本学術会議が原子力委員会へ回答「高レベル放射性廃棄物の処分について」
- ・平成24年12月18日 原子力委員会の報告書を公開「今後の高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る取組について(見解)」
- ・平成25年5月 日本学術会議が「高レベル放射性廃棄物の処分に関するフォローアップ検討委員会」を設置
⇒2つの分科会が報告書を公開(平成26年9月)



- ・平成25年4月～ 原子力規制庁 核燃料施設等の新規制基準に関する検討チーム
→ 余裕深度処分と地層処分を統合的に議論する方針を示した。
- ・平成25年5月 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 放射性廃棄物ワーキンググループ（議論開始）
→ 可逆性・回収可能性を担保し、将来世代も含めて最終処分に関する意思決定を見直せる仕組みの重要性等を指摘。
→ 中間とりまとめ報告書の公表（平成26年5月）
- ・平成25年10月 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ（議論開始）
→ H12 レポート以降の最新の科学的知見を反映した再評価の結果として、段階的なサイト調査を適切に行うことにより、好ましい地質環境とその地質環境の長期安定性を確保できる場所をわが国において選定できる見通しが得られたことを示した。
→ 中間とりまとめ報告書の公表（平成26年5月）



- ・エネルギー基本計画（平成26年4月、閣議決定）
 - 核燃料サイクル政策に関しては、引き続き従来の方針に従い再処理事業に取り組む
 - 並行して、使用済燃料の直接処分に関する調査・研究、使用済燃料の貯蔵能力の拡大、放射性廃棄物の減容化・有害度低減のための技術開発等を進める
- ・これに先立ち、原子力委員会は、「すでに発生している研究炉の使用済燃料や福島第一原子力発電所の使用済燃料対策などを考えると、使用済燃料を直接処分することを可能にしておくことの必要性は明らかである」と指摘（平成24年）。

→直接処分に関する研究開発に着手

国内の動向を把握した上で、事業の進展や安全規制の整備に資する研究開発課題を考えていくことが極めて重要



内容

1. **地層処分における安全確保の考え方**
2. **長期安全性の確認**
3. **性能評価研究の例**
 - 3.1 **シナリオ構築手法の高度化**
 - 3.2 **地質環境の長期変遷を考慮した評価手法**
 - 3.3 **パラメータの安全裕度に関する評価手法**
4. **研究開発を取り巻く状況**
5. **まとめ**



- **安全評価は、セーフティケースにおいて重要な役割を果たす要素。**
- **特に、長期予測に係る不確かさを鑑み、安全評価の結果に加え、以下の観点から、一連の手順や用いる論拠に対する妥当性を示していくことが肝要である。**
 - **控えめな性能の見積もり**
 - **国内外の動向や新知見の考慮**
 - **外部機関によるレビュー**
 - **調査-設計-安全評価が連携した反復的な評価**
 - **残された課題とその対応策の提示 など**



- **地層処分の安全性を論じる際には、技術(安全)に加え、社会受容性(安心)にも配慮して、ステークホルダーとコミュニケーションを図ることが肝要。**
 - **コミュニケーションスタイルの転換：「決定し、宣言し、防御する(decide, announce and defend)」⇒「関与を促し、相互に交流し、共同作業する(engage, interact and co-operate)」**
 - **欠如モデルからのパラダイムシフト：「一般市民は科学や技術の知識が欠如しており、専門家が正しい知識をわかりやすく伝えることが重要」と考える認識の発展
⇒双方向的、創発的な関係性および仕組みづくりへ**



キャリアプラン構築に向けた提案(1/2)

・I型人才→T型人才→Π型人才


→特定の専門分野を究めた高い専門性

I型人才:特定の分野(縦棒)に秀でたスペシャリスト

→国内外の様々な専門家との協働による問題解決

T型人才:縦棒+視野の広さ(横棒)

Π型人才:T型の進化版,複数の専門分野(縦棒)に精通し,かつ全体の調整もできる人材へ

- 
- ・異分野との協働/融合が新しい価値を生み出す。
 - ・横棒が大きいほど、縦棒の数が多いほど、他分野の専門家と議論することが可能となり、問題解決につながる



キャリアプラン構築に向けた提案(2/2)

- 専門家以外の人達とコミュニケーション経験の蓄積
- 種々の知見を統合(Integration)する経験の蓄積
- 放射性廃棄物処分の総合的な推進への貢献

(TRU廃棄物, 発電所廃棄物, 1F事故廃棄物も含む)



**ご静聴ありがとうございました。
ございました。**