



平成27年11月8日
東北大大学 青葉山キャンパス

2015年度バックエンド週末基礎講座

地層処分の工学技術および

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 核種移行研究グループ

石寺 孝充



内容

- 1. 地層処分における安全確保の考え方**
- 2. 工学技術**
 - 2.1 工学技術の目的・概要**
 - 2.2 原位置での人工バリア性能確認試験**
- 3. 性能評価**
 - 3.1 長期安全性の確認**
 - 3.2 収着分配係数の設定と収着のモデル化**
 - 3.3 核種移行に及ぼすコロイド影響の評価**
- 4. 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)



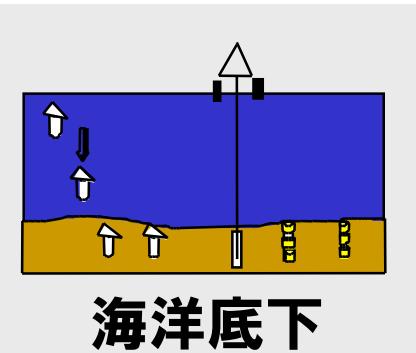
地層中

地層が持っている物質を閉じ込める性質を利用する



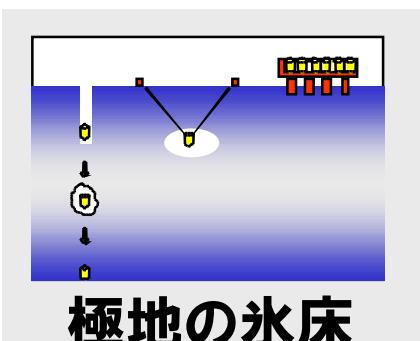
宇宙空間

発射技術の信頼性に問題あり



海洋底下

ロンドン条約により禁止



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



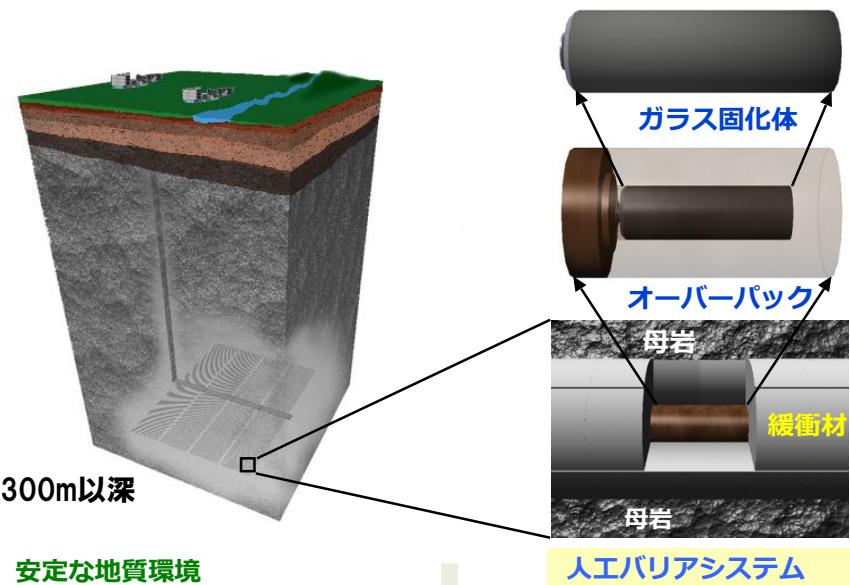
隔離・閉じ込めを重視したシステム

- 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



安定な地質環境

300m以深

閉じ込め

隔離



实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. 工学技術
 - 2.1 **工学技術の目的・概要**
 - 2.2 原位置での人工バリア性能確認試験
3. 性能評価
 - 3.1 **長期安全性の確認**
 - 3.2 **収着分配係数の設定と収着のモデル化**
 - 3.3 **核種移行に及ぼすコロイド影響の評価**
4. まとめ



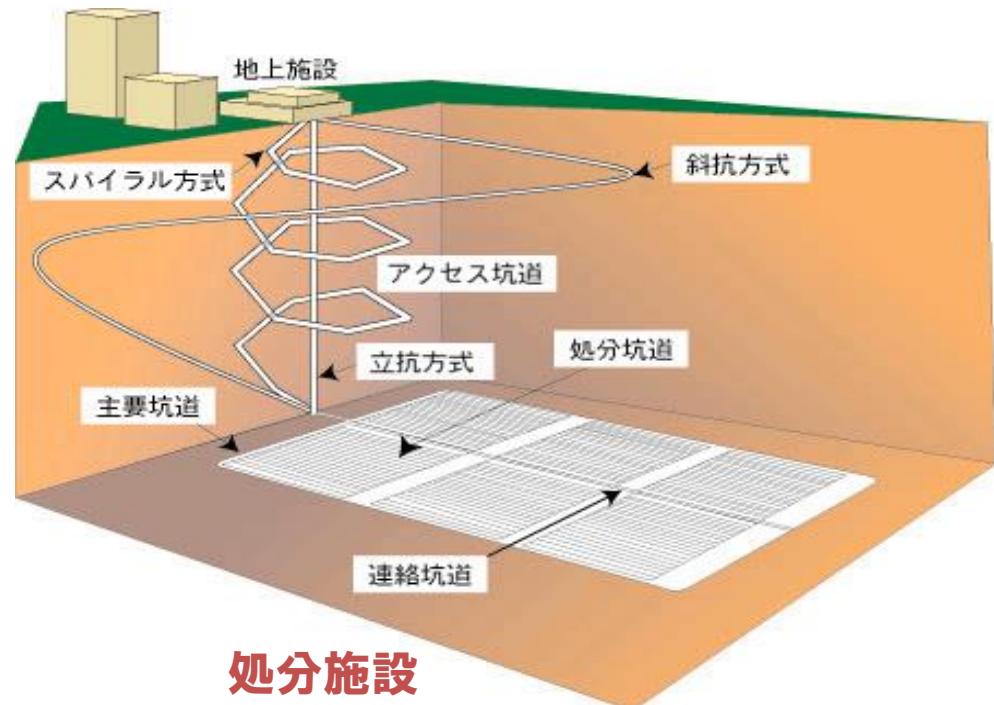
地層処分の工学技術

目的及び検討の範囲:

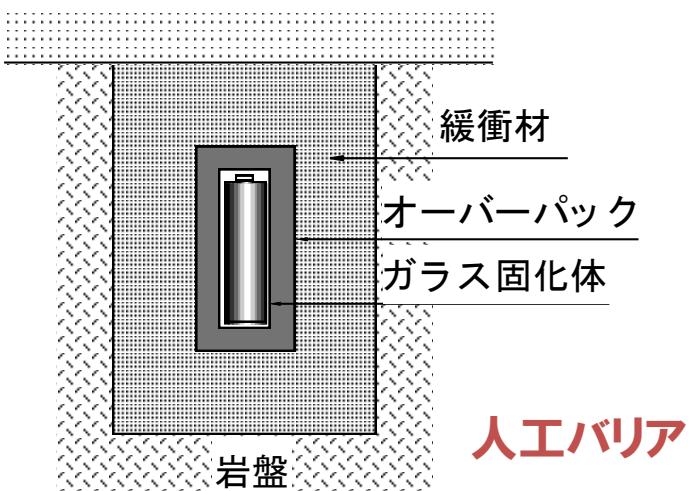
- ・安全性を実現するための信頼性の高い人工バリアならびに処分施設の設計
- ・それらが現実的な工学技術によつて合理的に構築できることを示す

工学技術の概要

- ・人工バリア及び処分場の設計
- ・人工バリア埋設後の健全性評価
再冠水時的人工バリア挙動評価/構造力学安定性評価/ニアフィールドの耐震安定性評価/ガス移行評価/緩衝材の岩盤内侵入評価
- ・処分場の建設、操業、閉鎖、管理等



処分施設



人工バリア



人工バリアの設計

オーバーパック

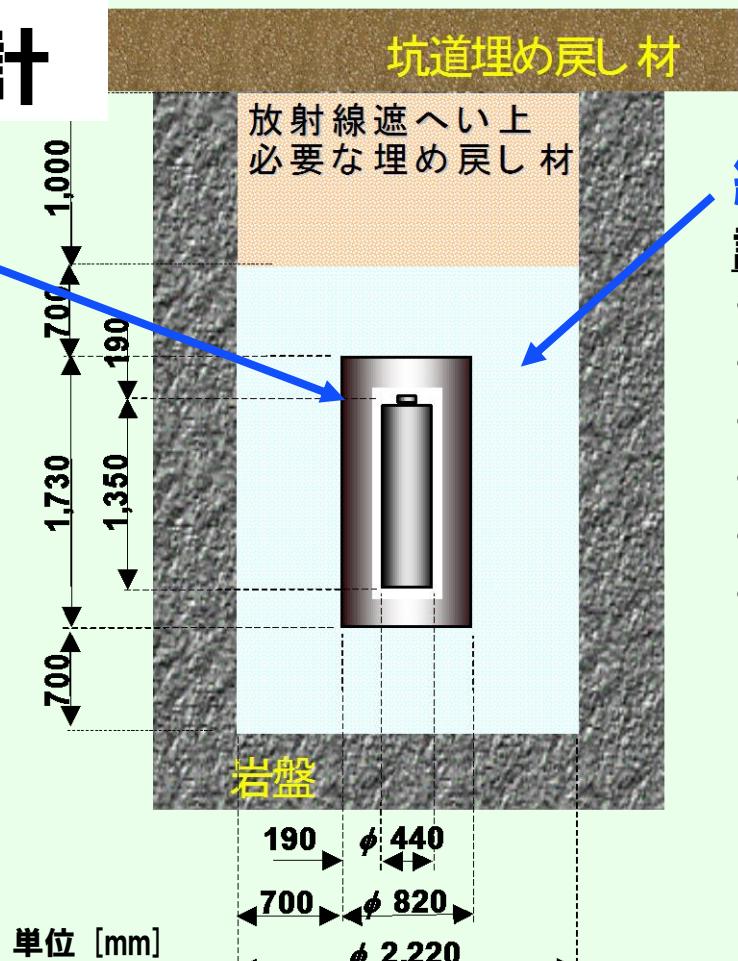
設計要件

- ・腐食性
- ・耐圧性
- ・放射線しゃへい性
- ・製作／施工性
- ・経済性



設計に必要なデータ

- ・地下深部の条件を模擬した長期腐食試験
- ・試作等



緩衝材

設計要件

- ・応力緩衝性
- ・低透水性
- ・コロイドろ過機能
- ・熱伝導性
- ・製作／施工性(締固め特性)
- ・経済性



設計に必要なデータ

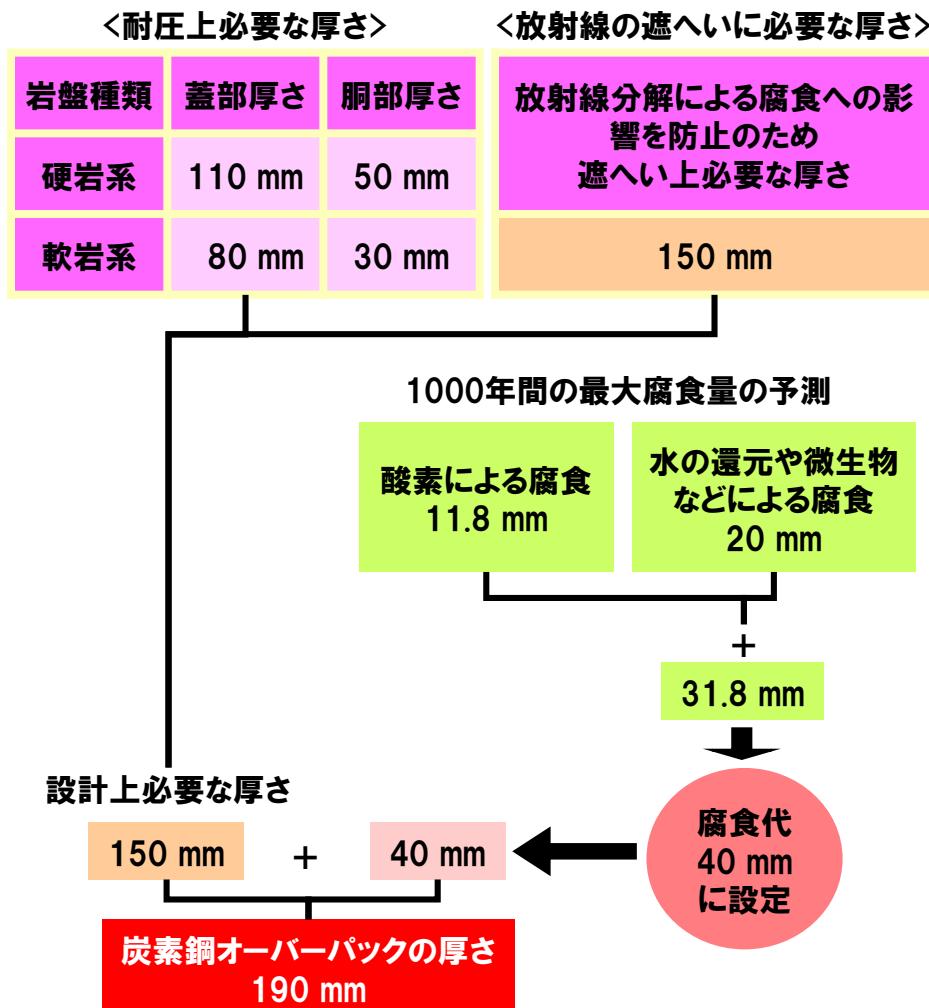
- ・ベントナイト材料の特性に関する室内試験データ
- ・原位置施工試験等

岩盤物性

(文献データ・地下研究所等における実測値)

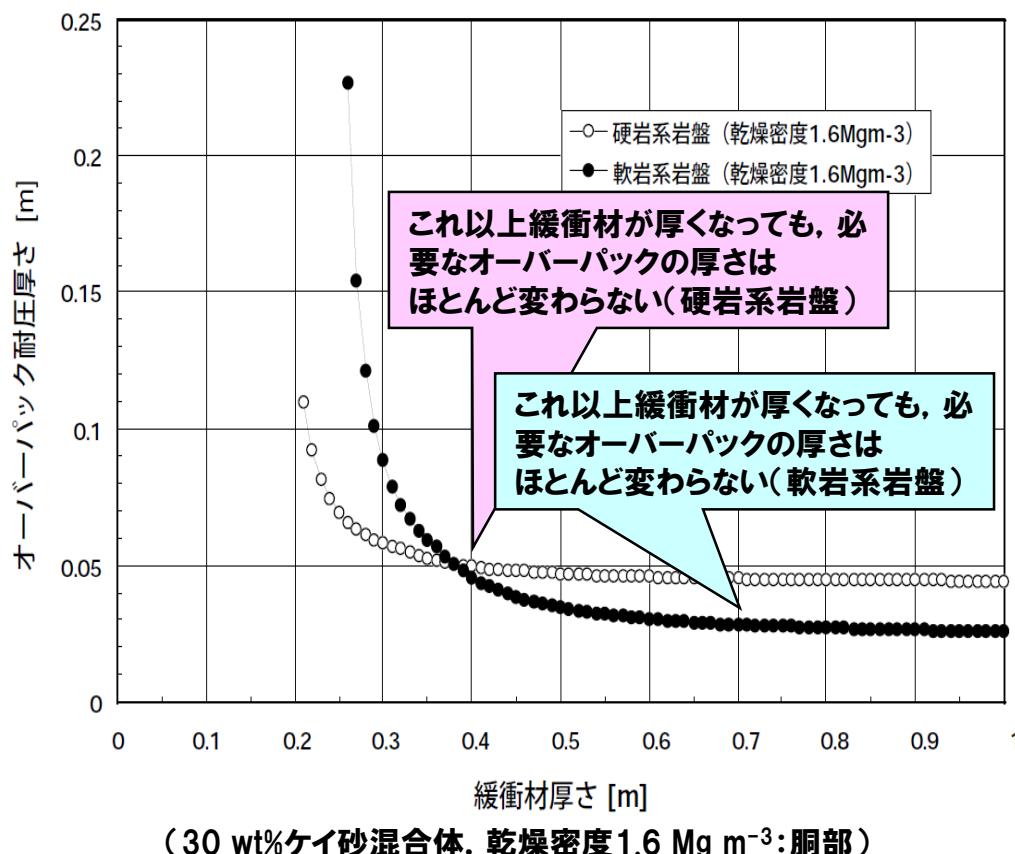


オーバーパックの厚さはどのように決めるのか？



人工バリアの設計

緩衝材の厚さはどのように決めるのか？

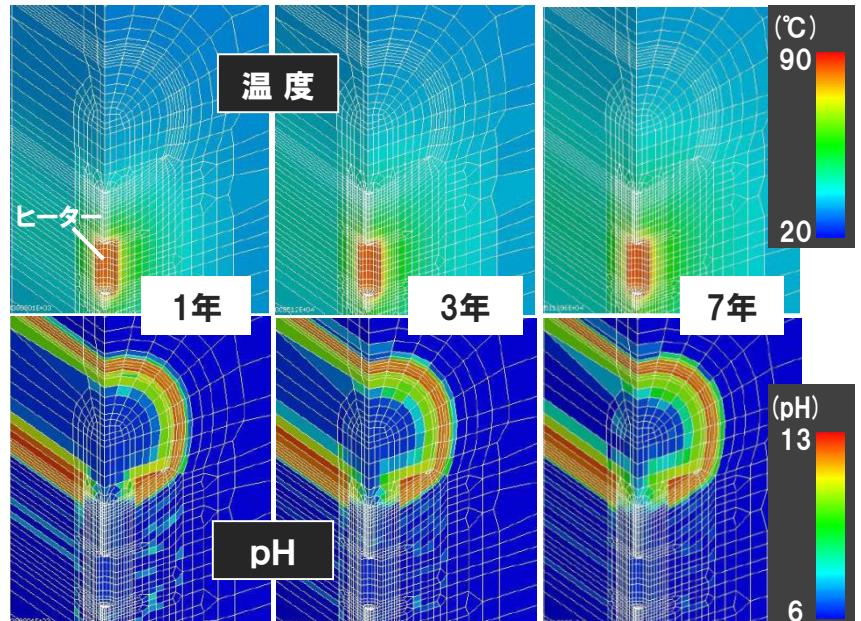
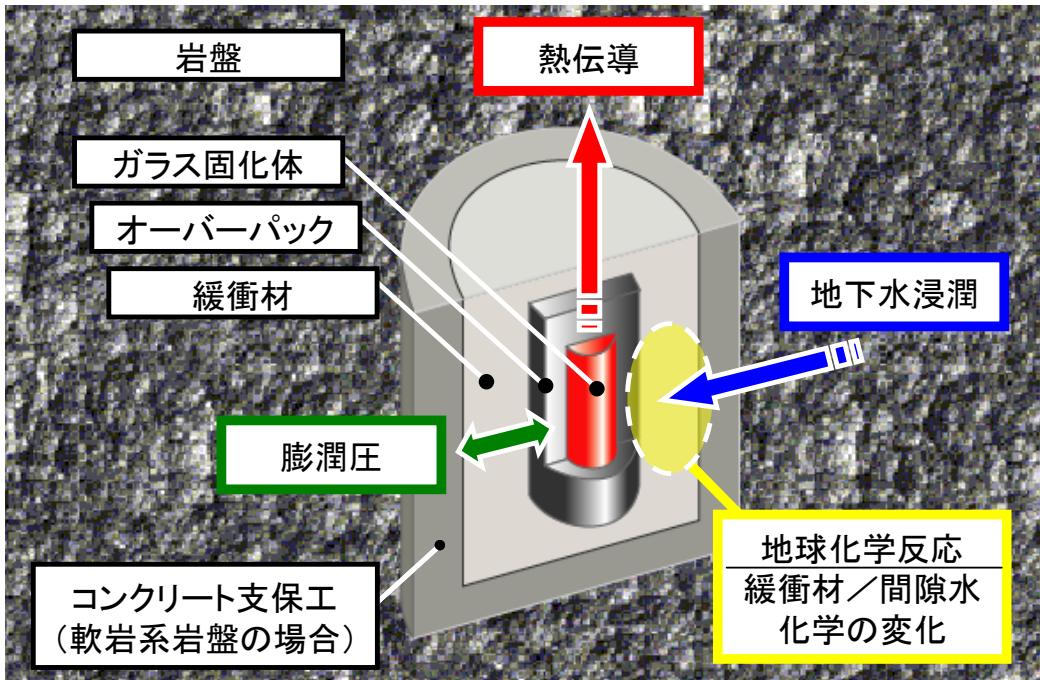




人工バリアの長期健全性評価の例

再冠水時的人工バリア挙動評価: (熱-水-応力-化学(THMC)連成挙動解析)

- ニアフィールドの熱的, 水理学的, 力学的, 化学的なプロセスの時間的、空間的な変化を評価



ニアフィールドの長期挙動解析例
幌延URLの岩盤等の物性値, ヒーターの埋設を仮定した試解析例
No. 11



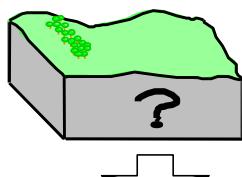
内容

1. 地層処分における安全確保の考え方
2. 工学技術
 - 2.1 工学技術の目的・概要
 - 2.2 原位置での人工バリア性能確認試験
3. 性能評価
 - 3.1 長期安全性の確認
 - 3.2 収着分配係数の設定と収着のモデル化
 - 3.3 核種移行に及ぼすコロイド影響の評価
4. まとめ



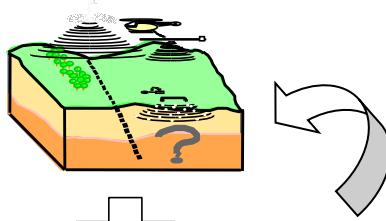
地下研究所の役割:地層処分技術の確立

深地層の研究施設

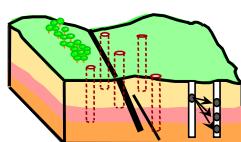


調査－予測－検証による技術の確立

調査による
地下の予測



追加調査による予測結果の検証



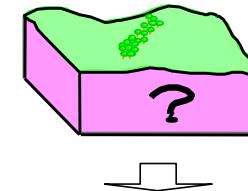
長期性能の確認



検証された技術 長期性能の保証

処分場候補地

確立された技術による適性の評価

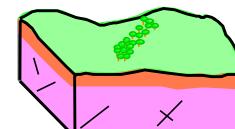


<応募された場所>



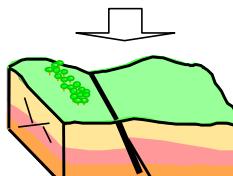
検証された調査技術による地下の予測
擾乱を与えないように最小限の調査

失敗は許されない



地質環境の理解

地質環境の理解
↓
調査技術の体系化
適用性確認

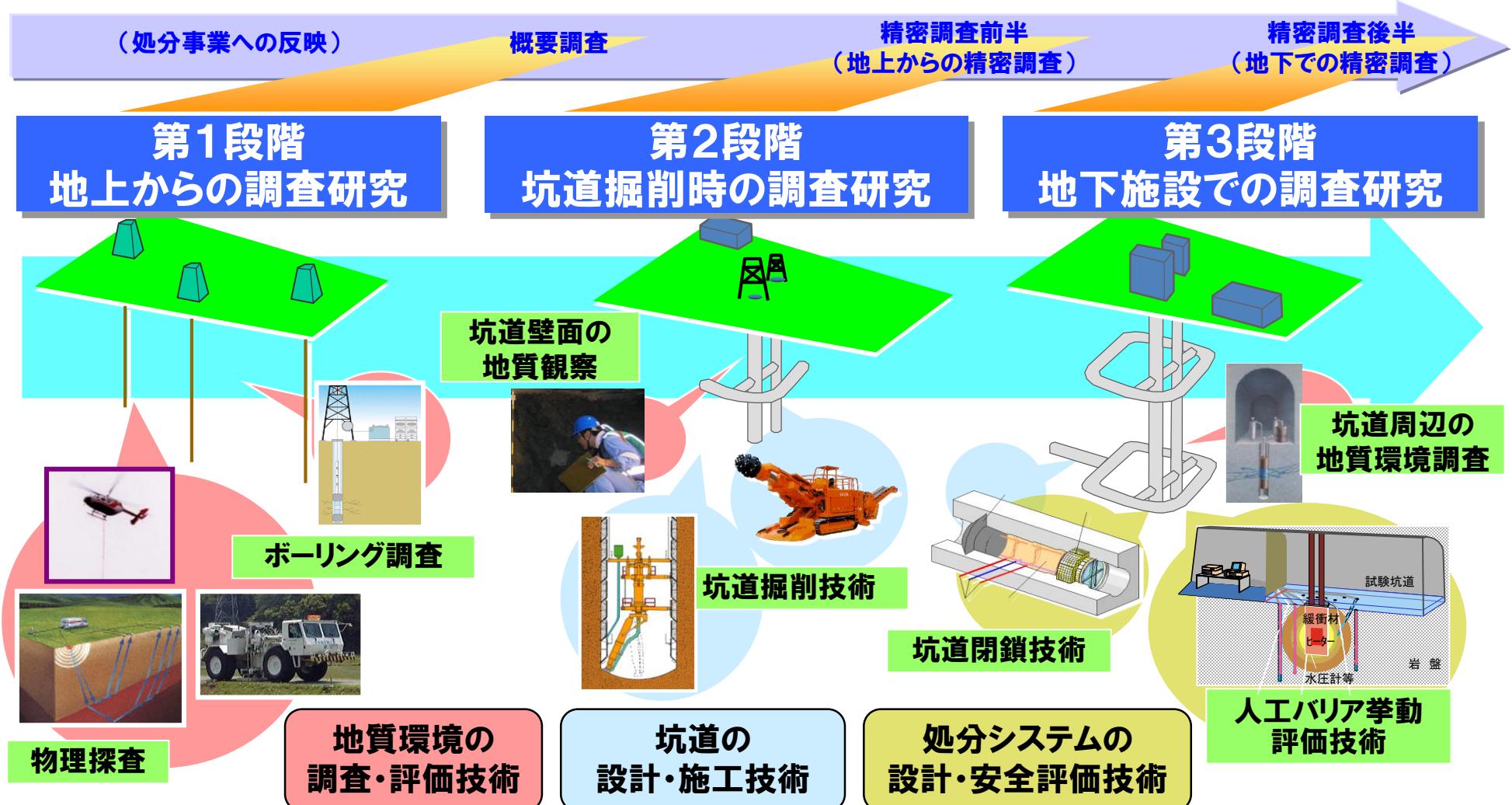


試行錯誤ができる

↓
処分地としての適性評価
処分場の設計・安全評価



深地層の研究施設設計画の進め方

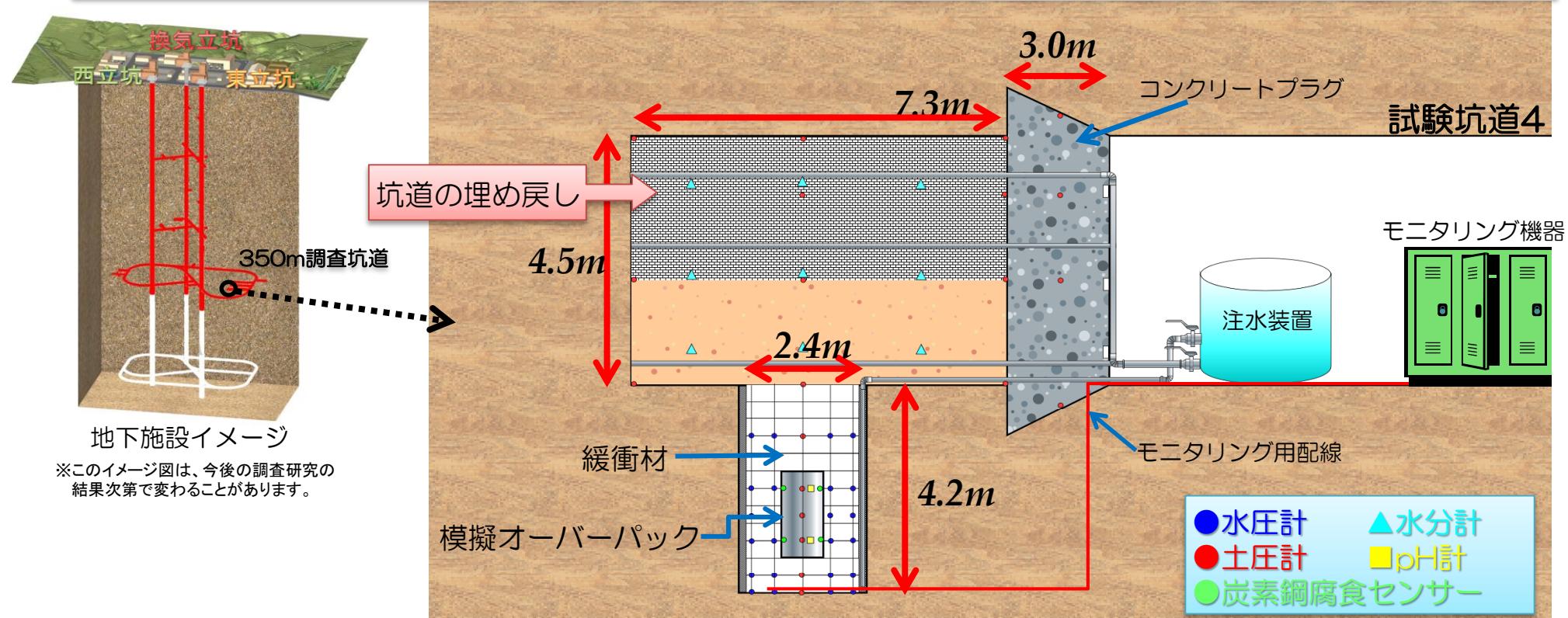




人工バリア性能確認試験

【目的】

- ✓ 人工バリア等を設計し、地下で施工できる事を確認
- ✓ 人工バリアや周辺岩盤の変化(温度、水分、応力、水質等)を観測し、評価モデルを検証





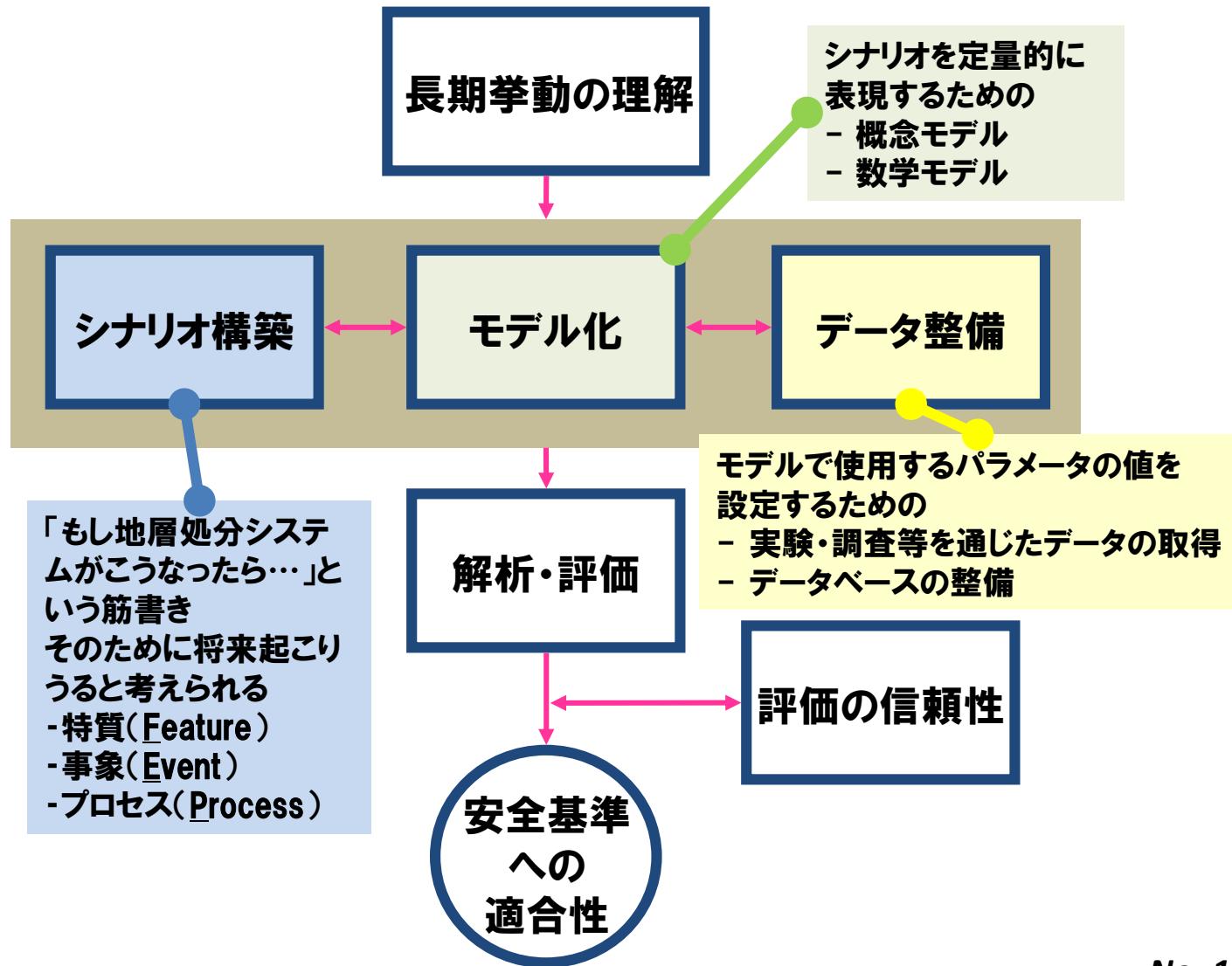
内容

1. 地層処分における安全確保の考え方
2. 工学技術
 - 2.1 工学技術の目的・概要
 - 2.2 原位置での人工バリア性能確認試験
3. 性能評価
 - 3.1 **長期安全性の確認**
 - 3.2 収着分配係数の設定と収着のモデル化
 - 3.3 核種移行に及ぼすコロイド影響の評価
4. まとめ



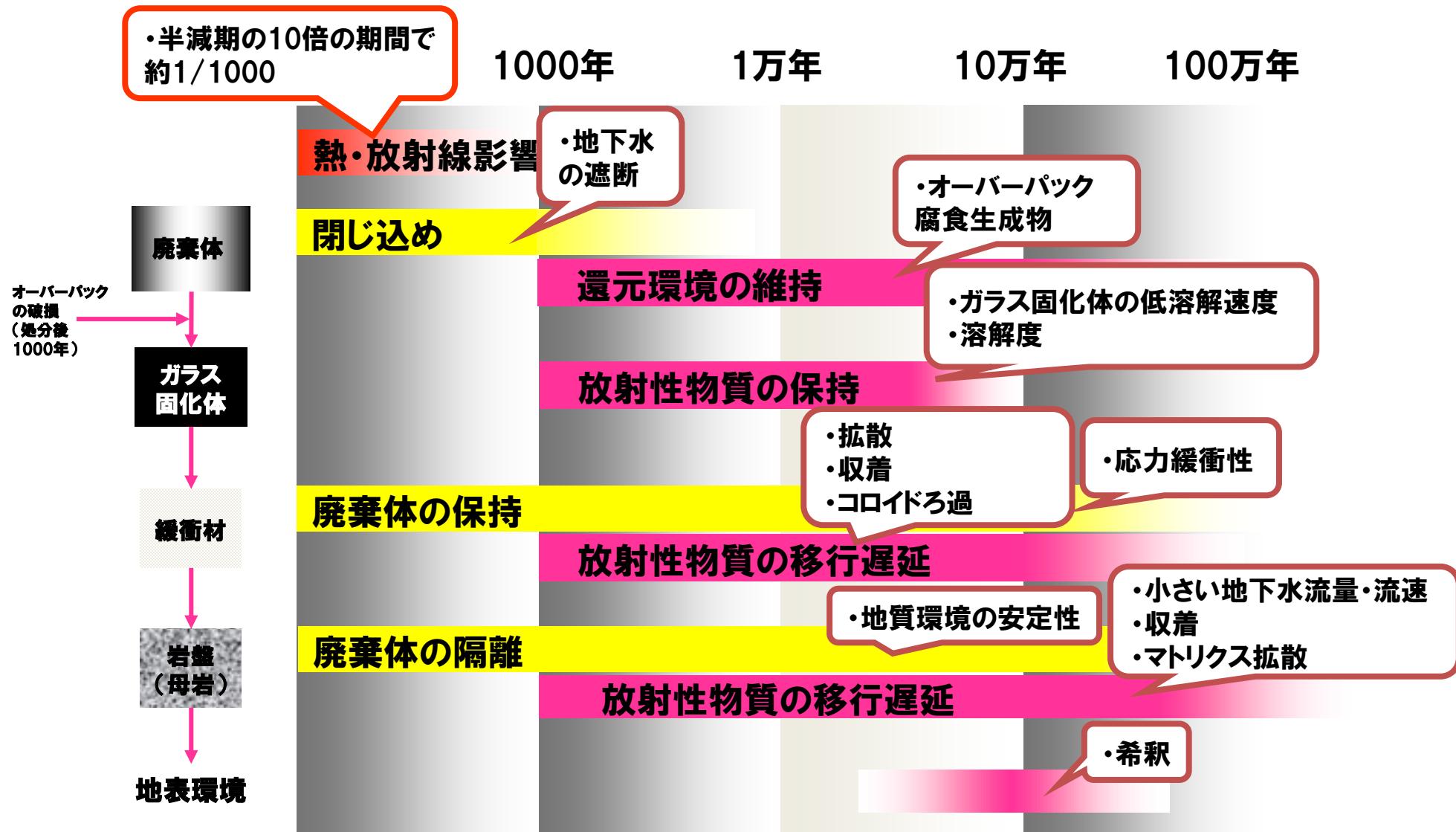
どのように安全性を確認するのか？

- 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)





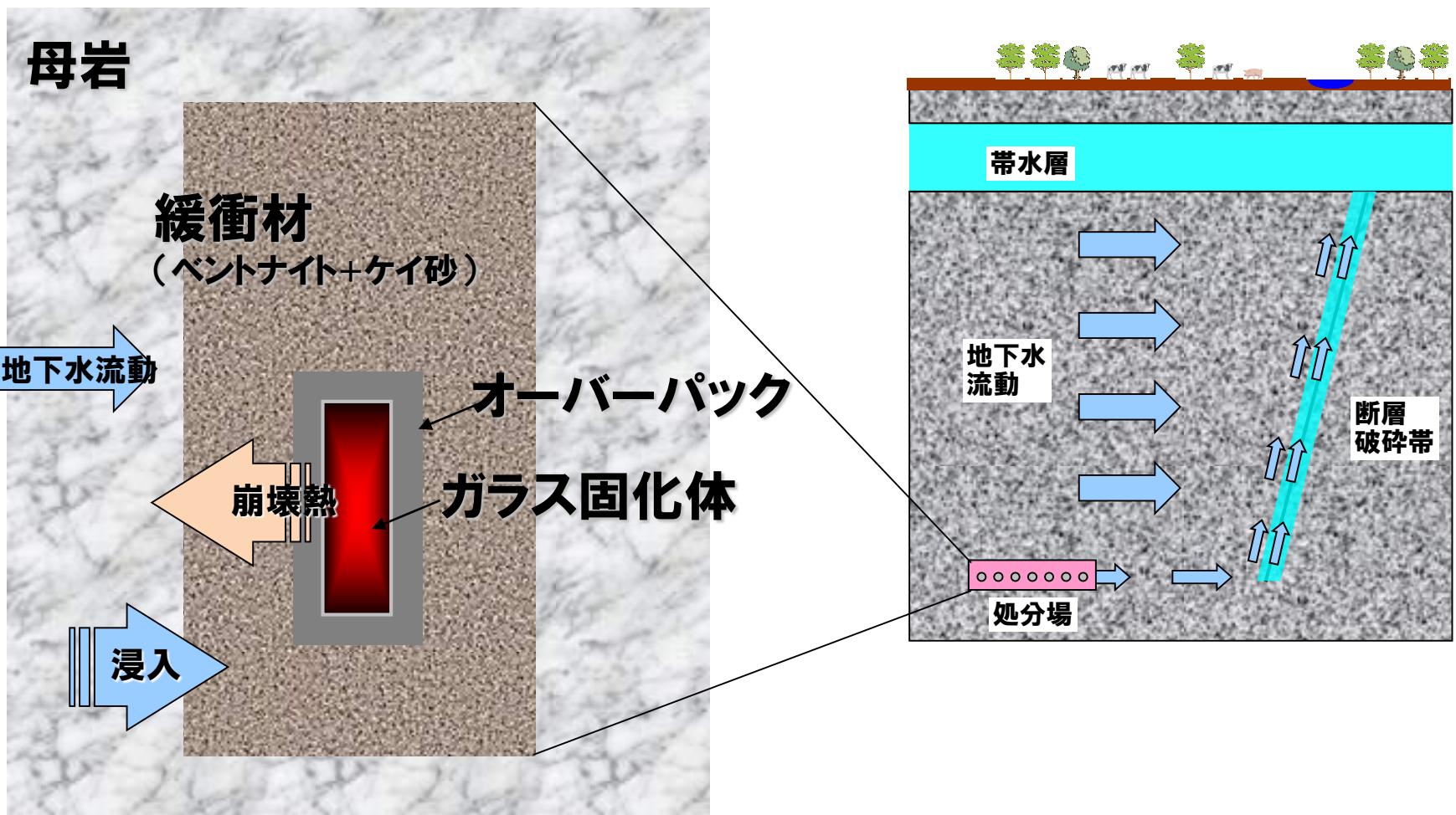
システムに期待する主な安全機能





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)

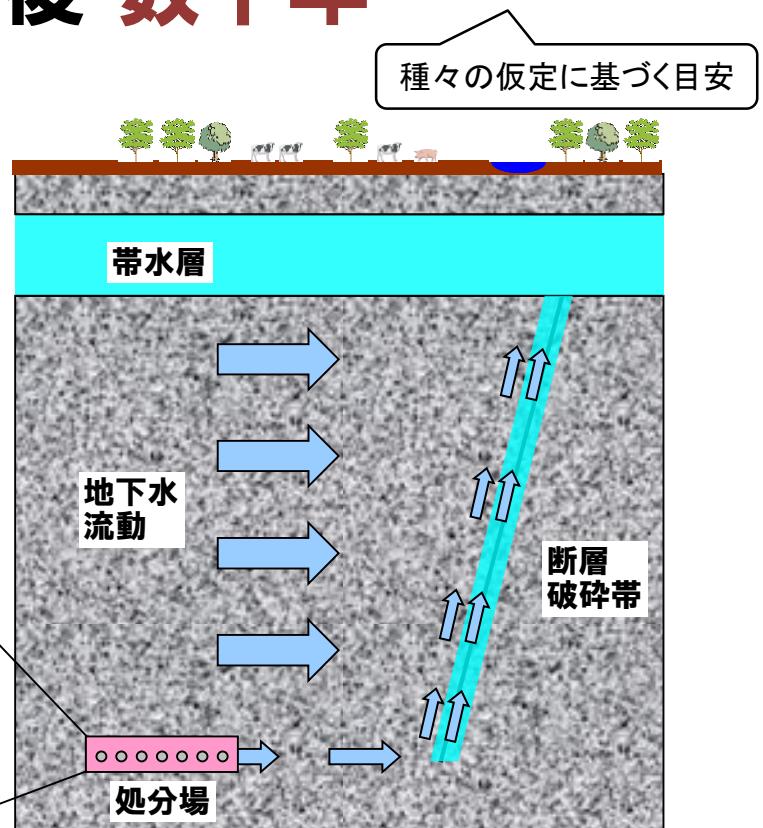
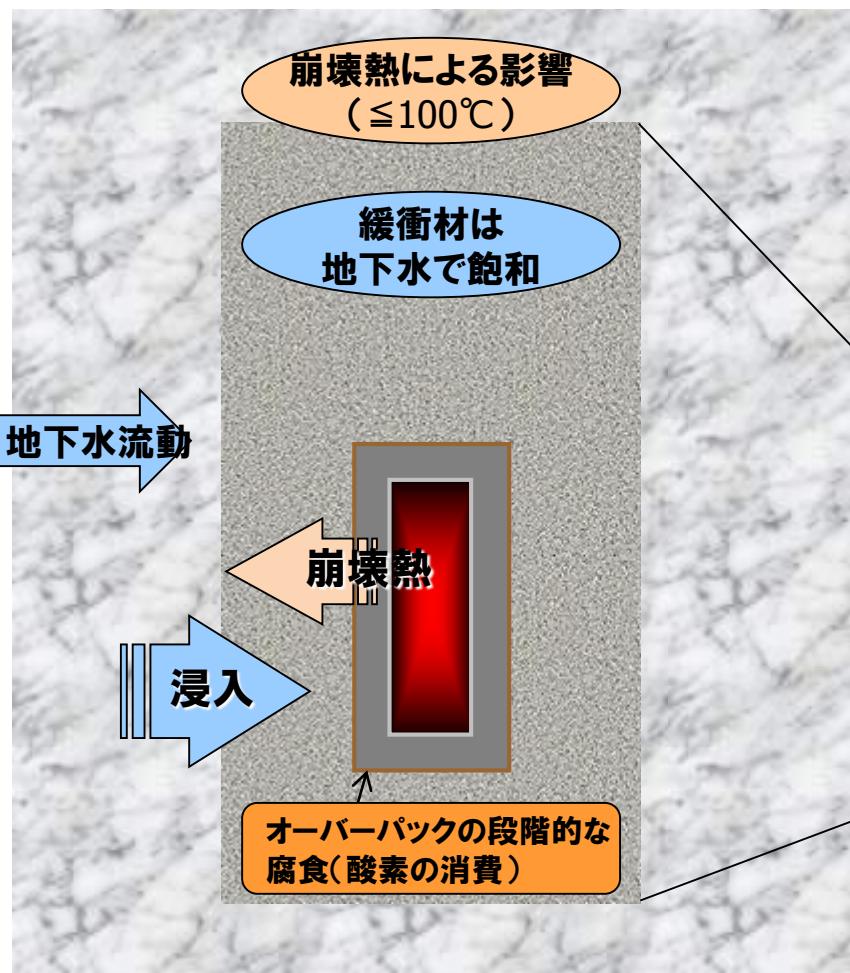
処分後 0年





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)

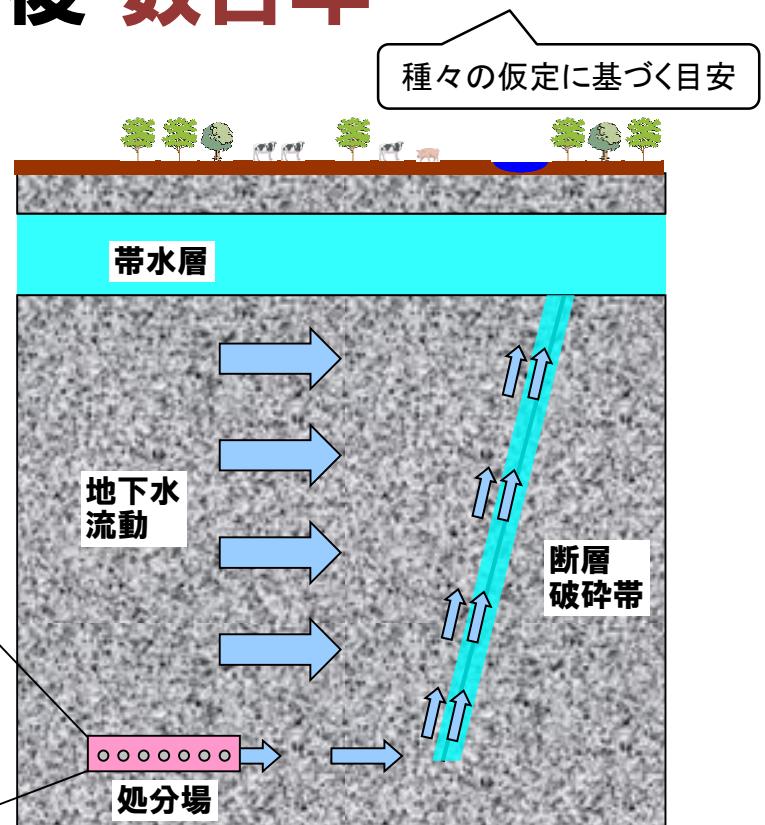
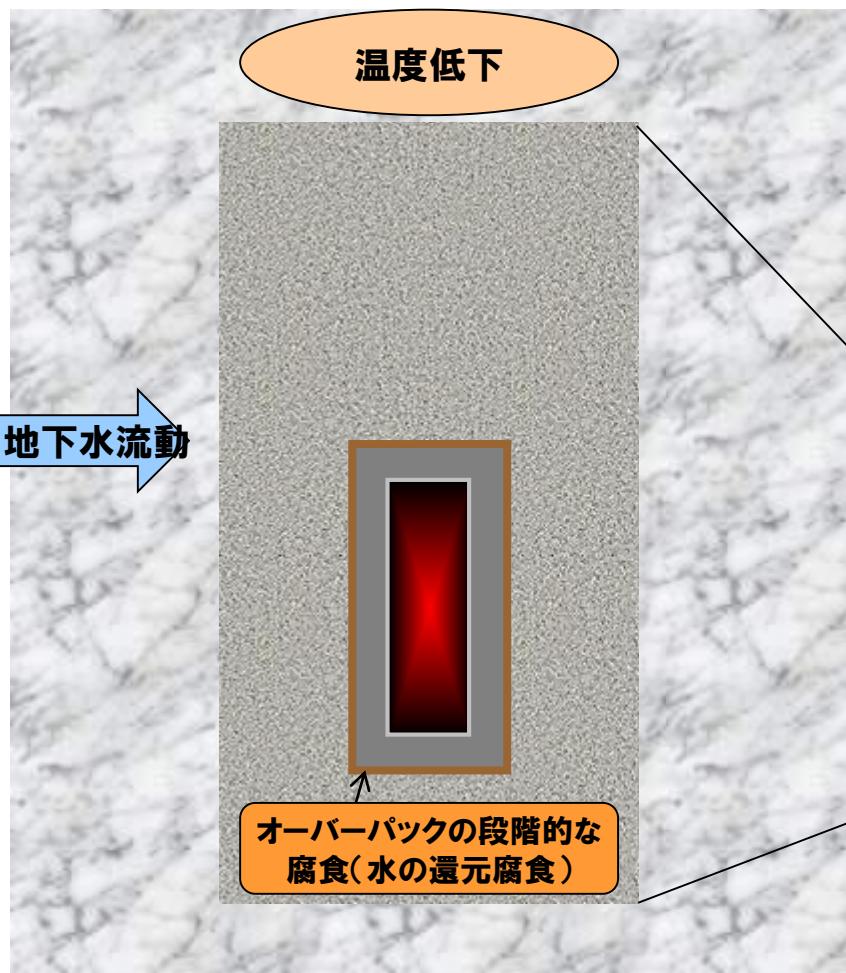
処分後 数十年





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)

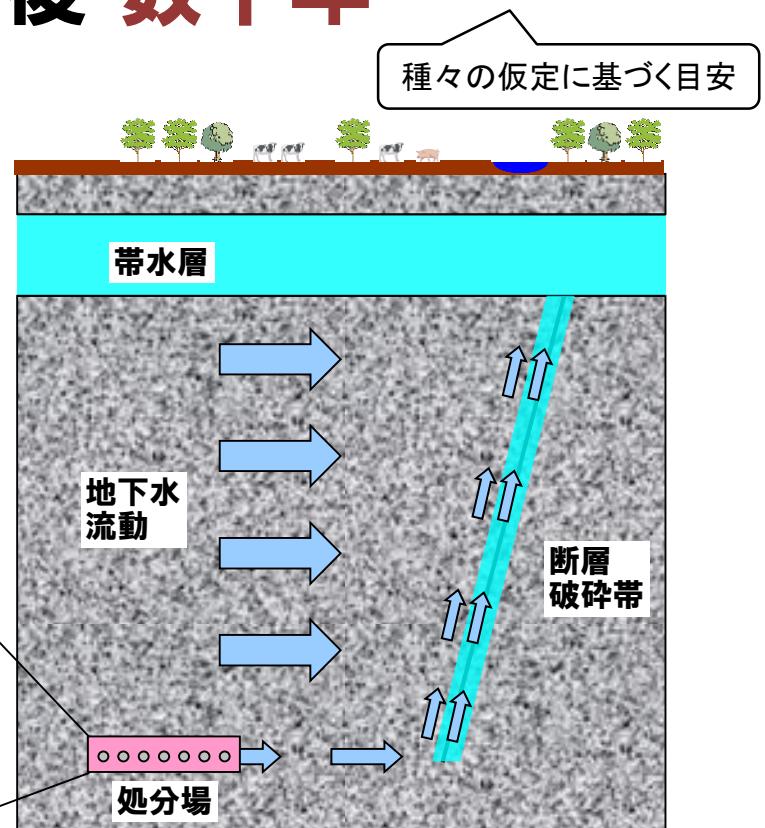
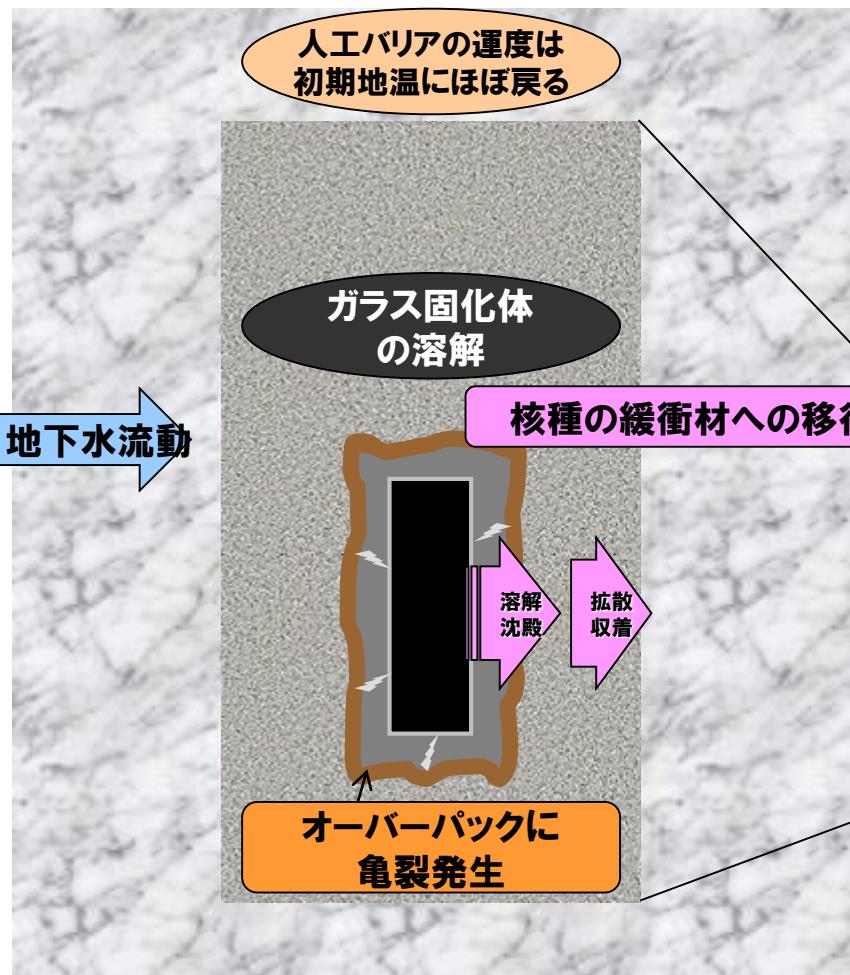
処分後 数百年





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)

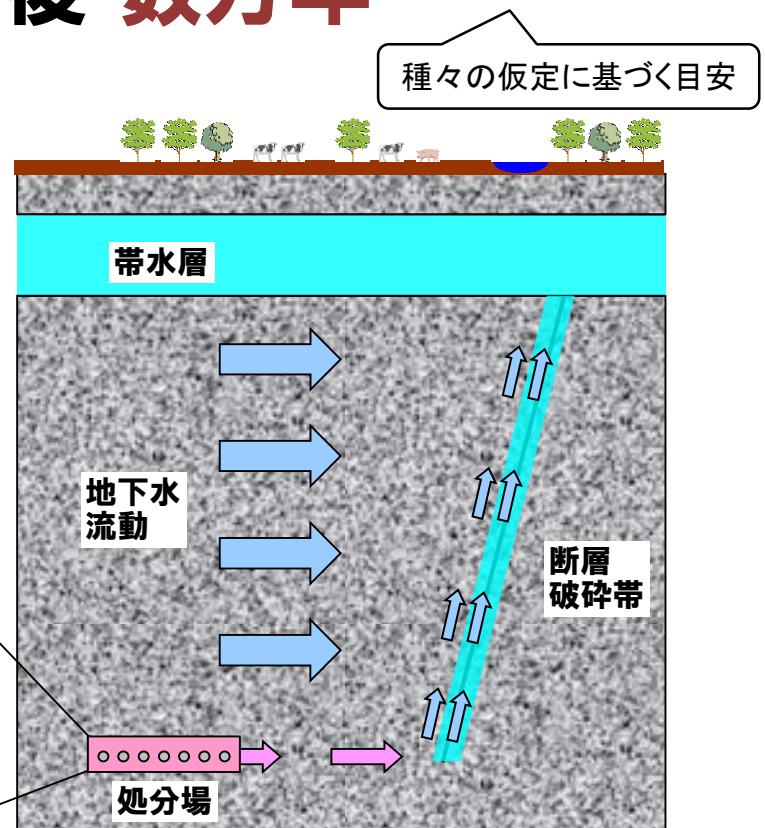
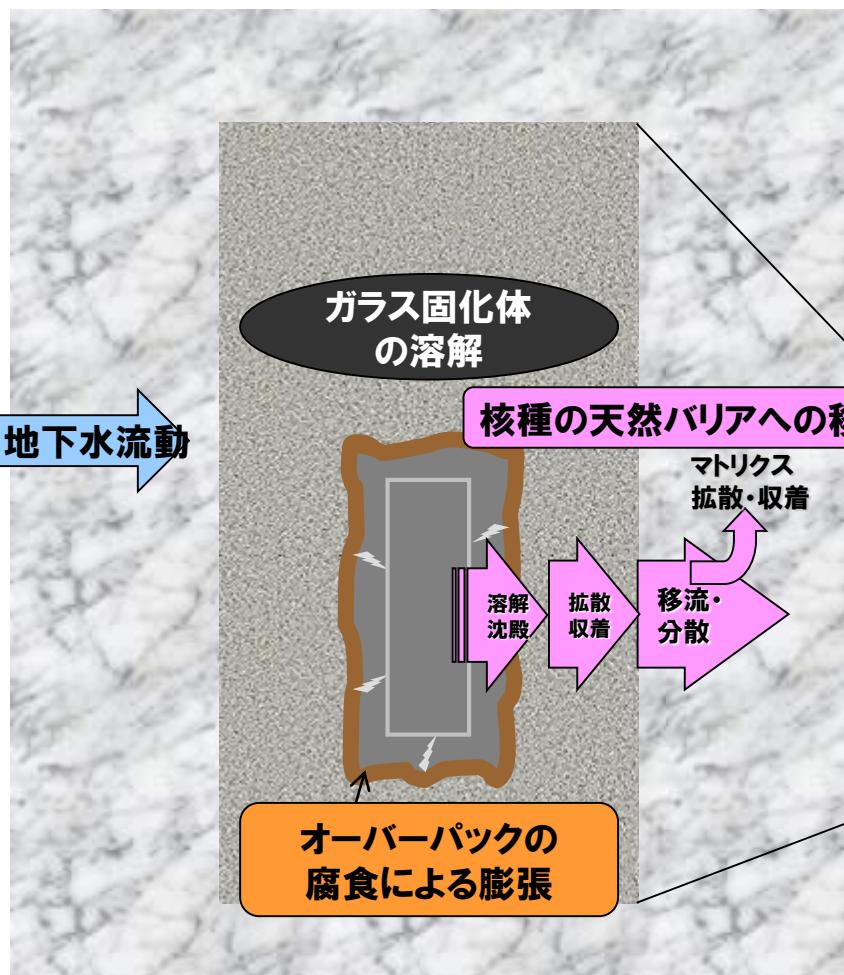
処分後 数千年





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)

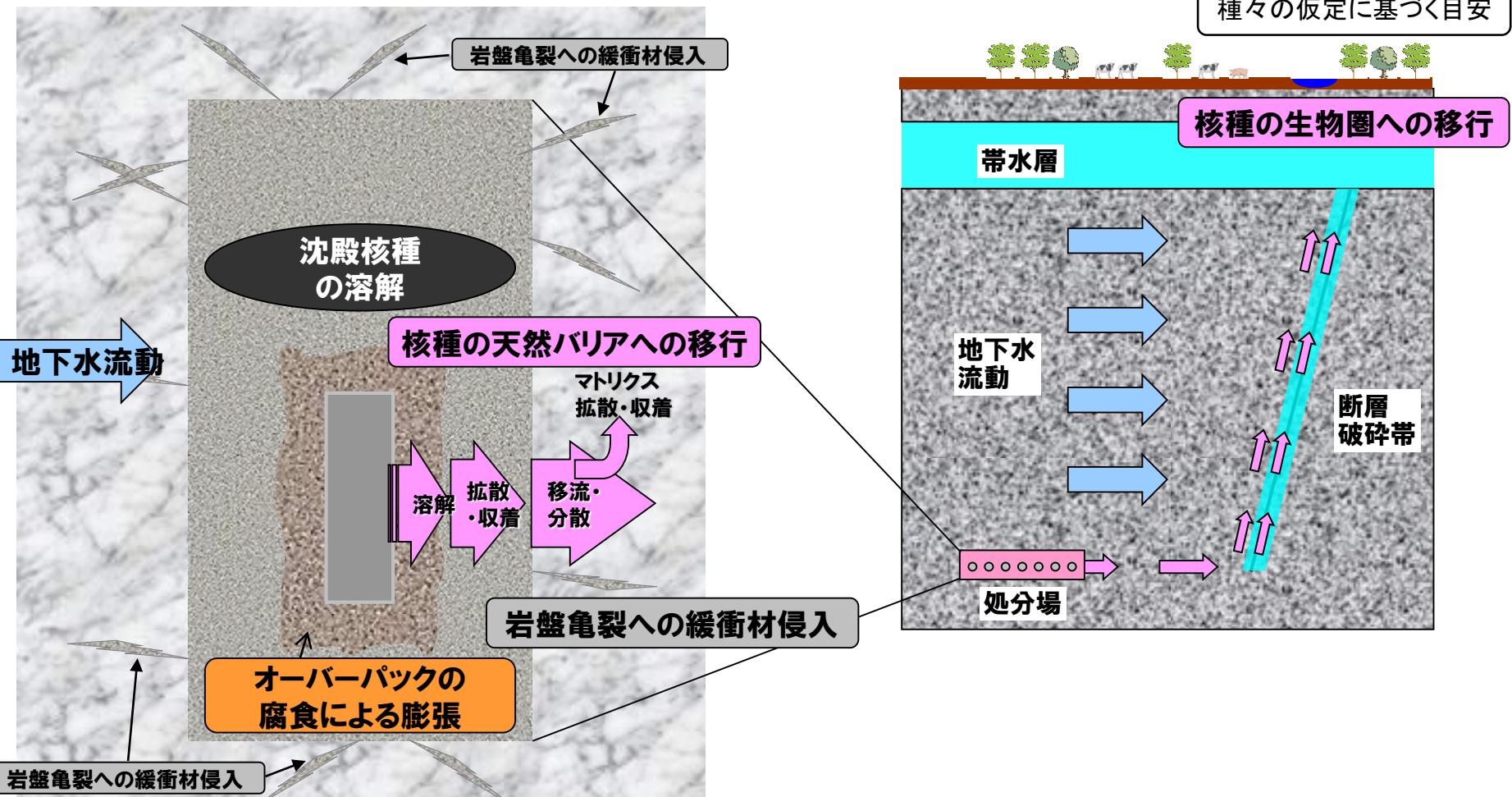
処分後 数万年





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)

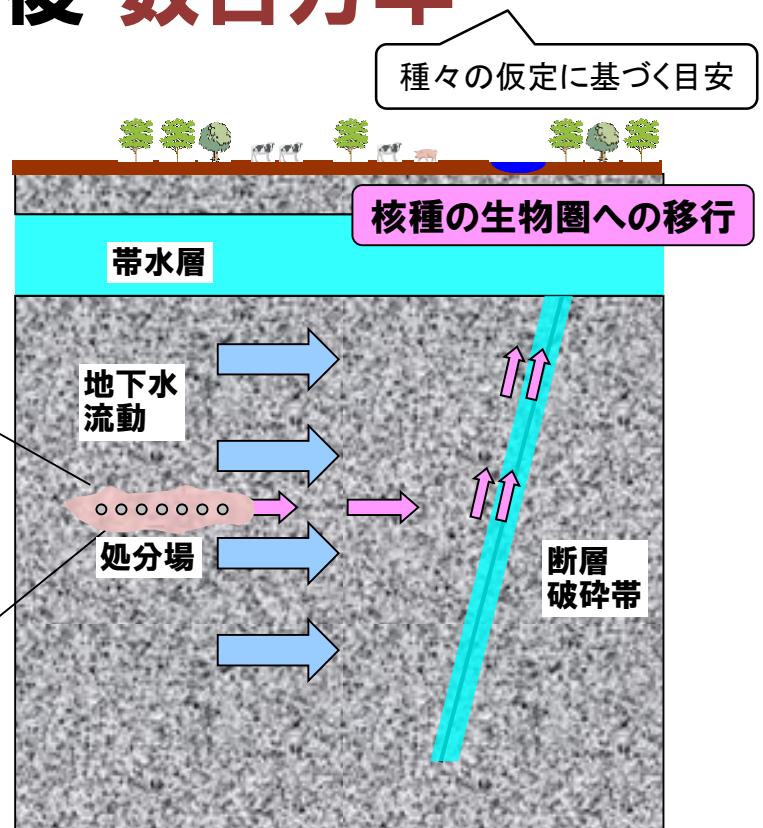
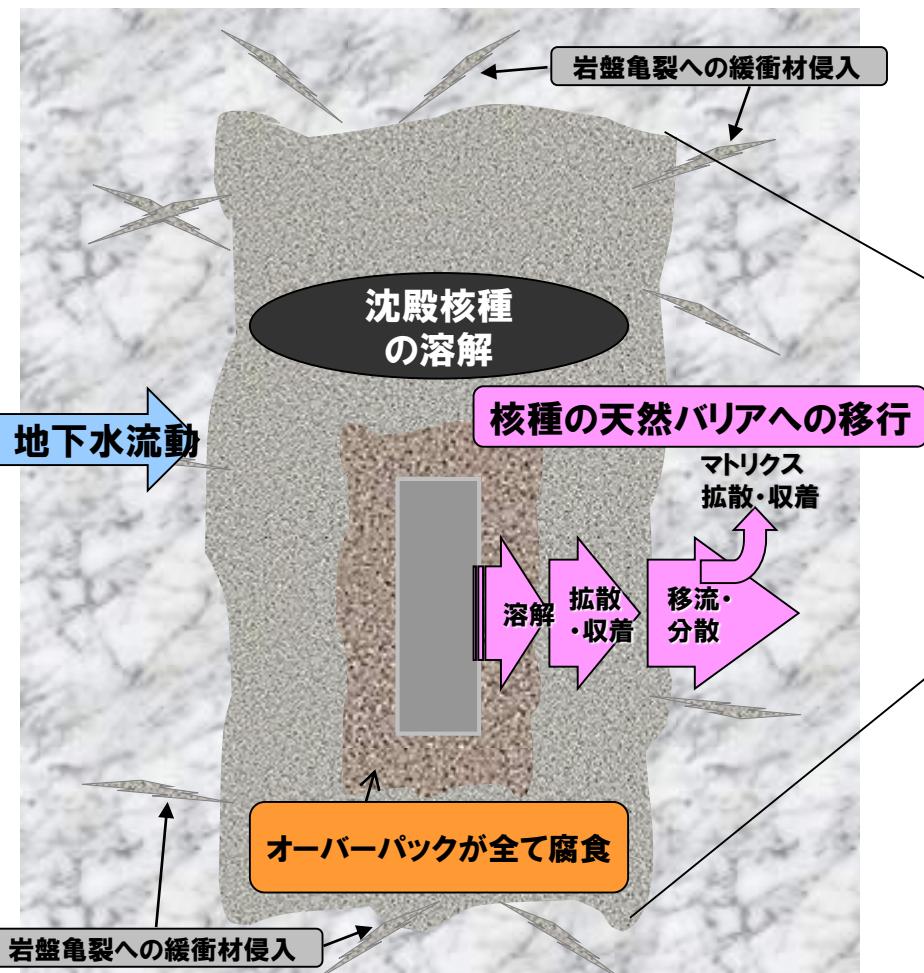
処分後 数十万年





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)

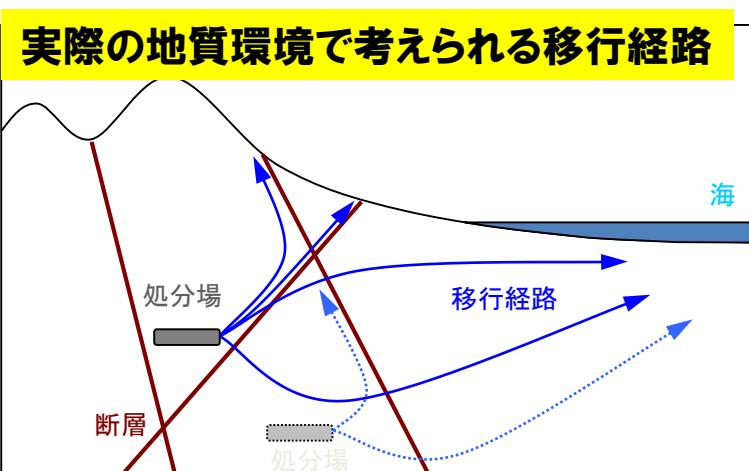
処分後 数百万年



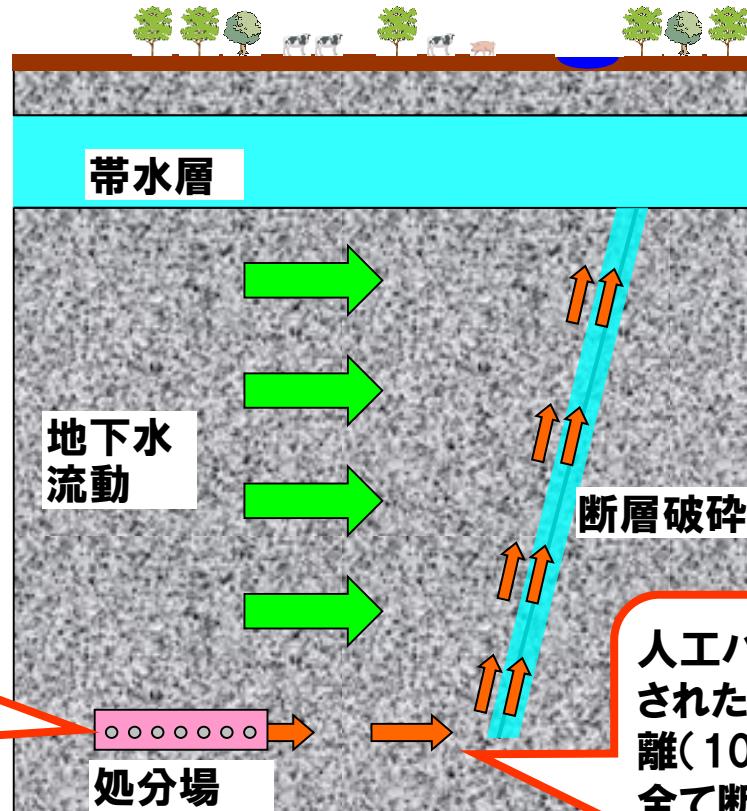


核種移行評価モデル

地層処分研究開発第2次取りまとめ(H12)での例



簡略化



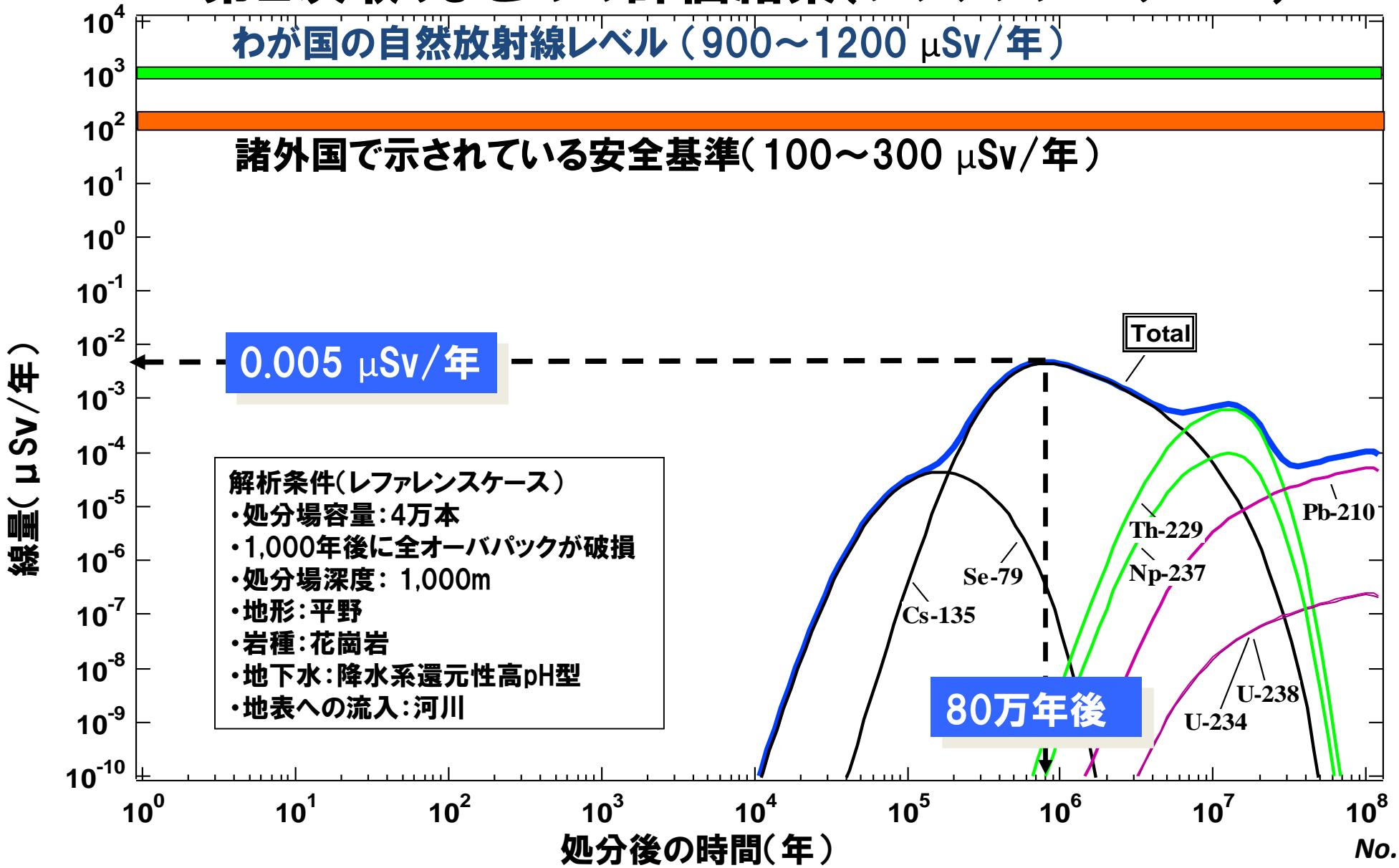
- ・オーバーパックは処分後1,000年で全て破損し、漏出開始
- ・断層に最も近い廃棄体(1本)のみ評価

人工バリアから放出された核種は最短距離(100m)を通って全て断層に移行

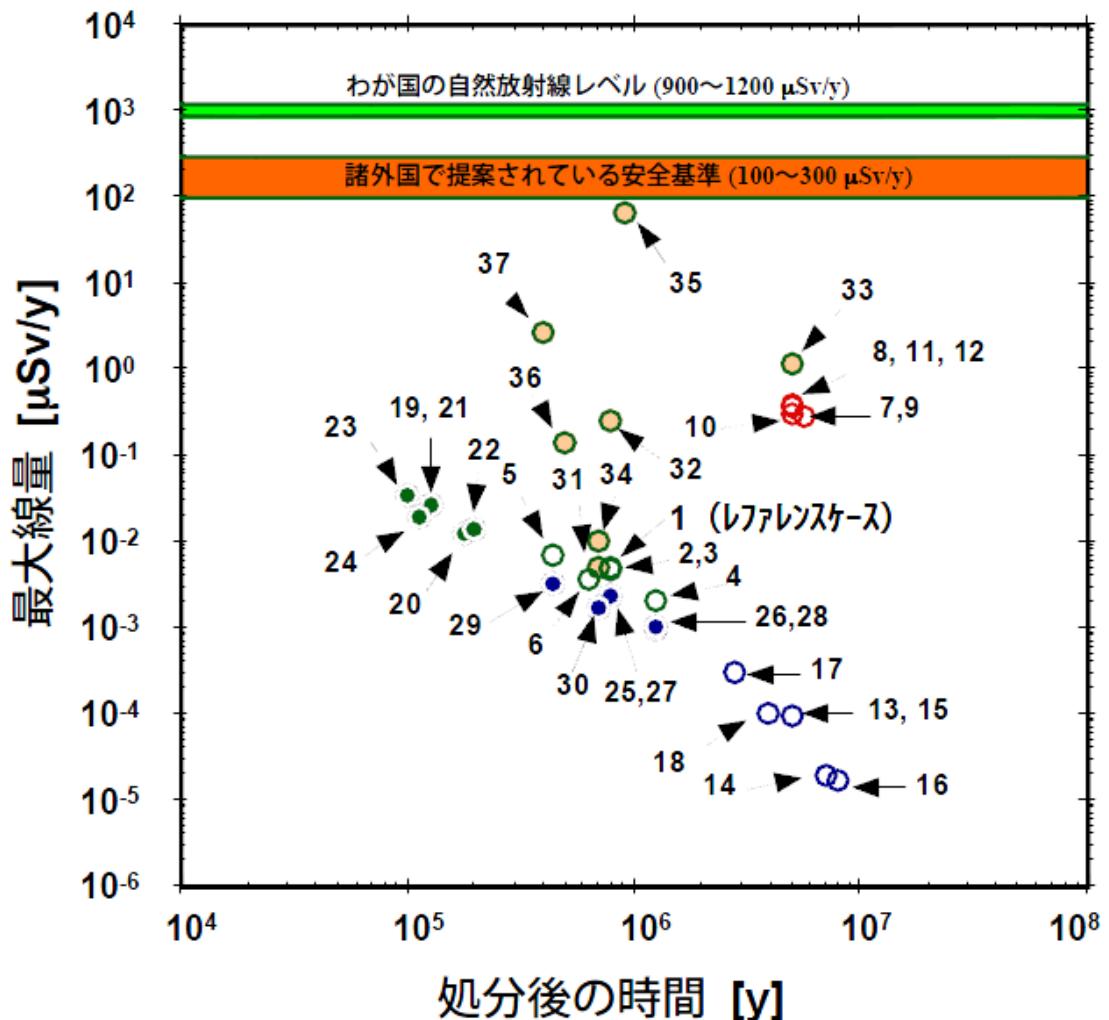




第2次取りまとめの評価結果(レファレンスケース)



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



安全評価の信頼性は？

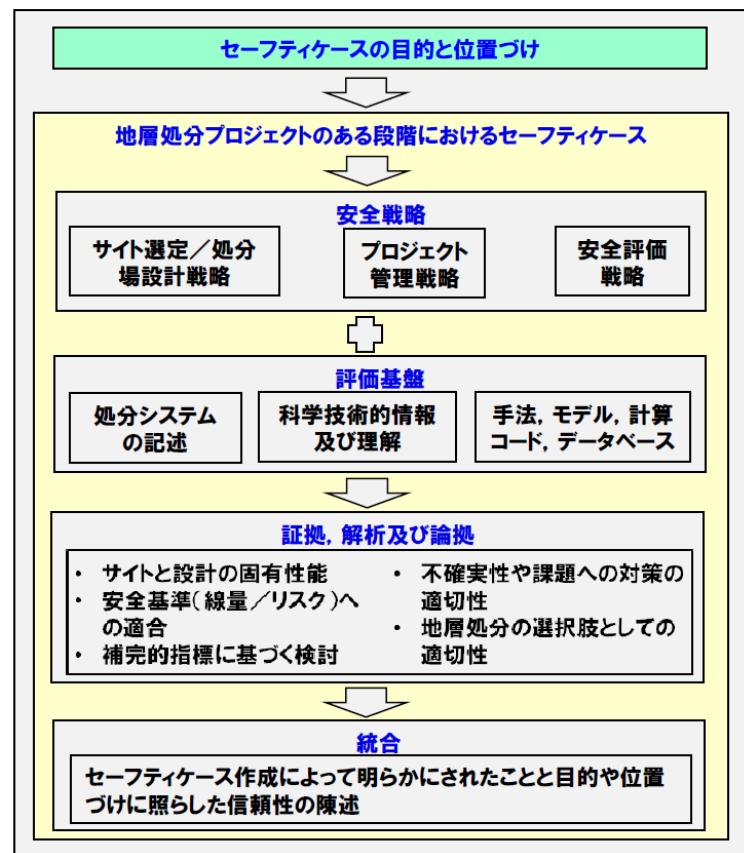
安全評価の結果だけで、遠い未来の安全性を判断できるのか

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)



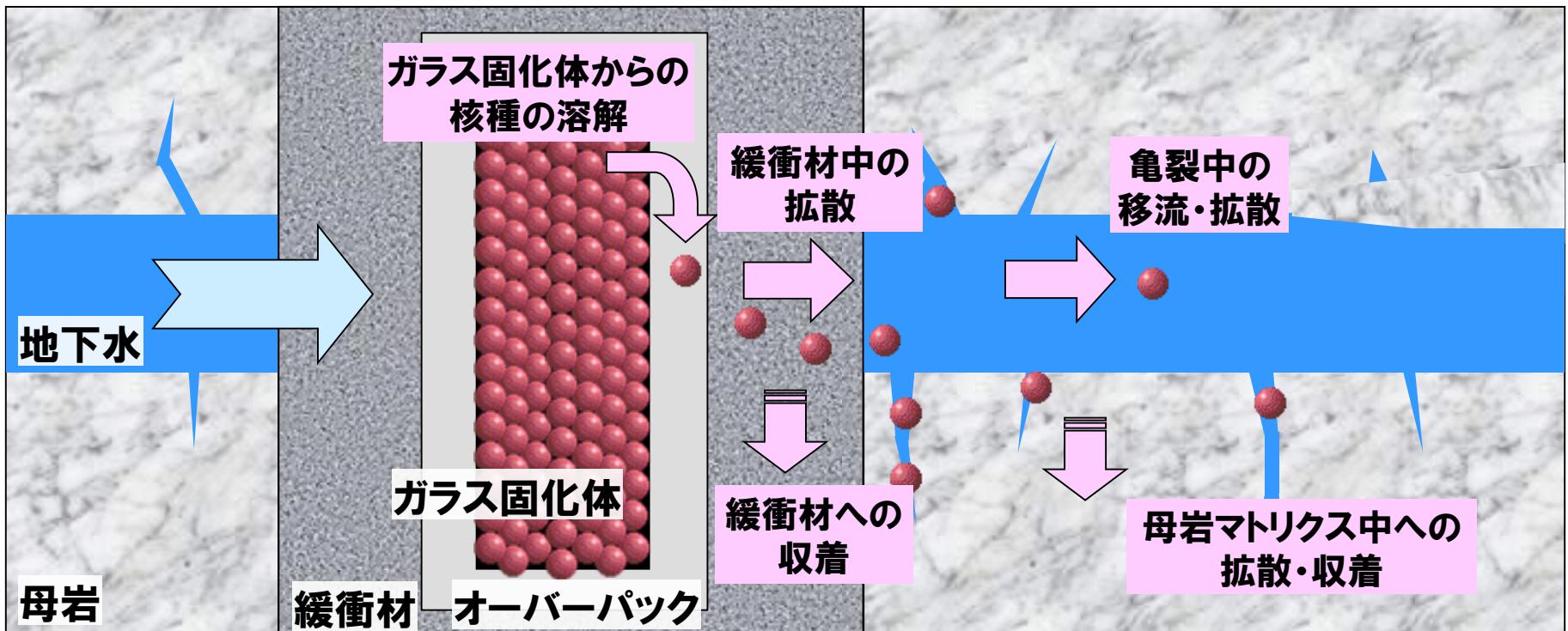


内容

1. 地層処分における安全確保の考え方
2. 工学技術
 - 2.1 工学技術の目的・概要
 - 2.2 原位置での人工バリア性能確認試験
3. 性能評価
 - 3.1 長期安全性の確認
 - 3.2 収着分配係数の設定と収着のモデル化
 - 3.3 核種移行に及ぼすコロイド影響の評価
4. まとめ

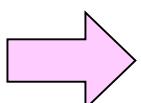


核種の移行シナリオ



核種の移行プロセス

- ・ ガラス固化体からの核種の溶解
- ・ 緩衝材中の拡散・緩衝材への収着
- ・ 母岩亀裂中の移流・拡散・マトリクス中への拡散・収着

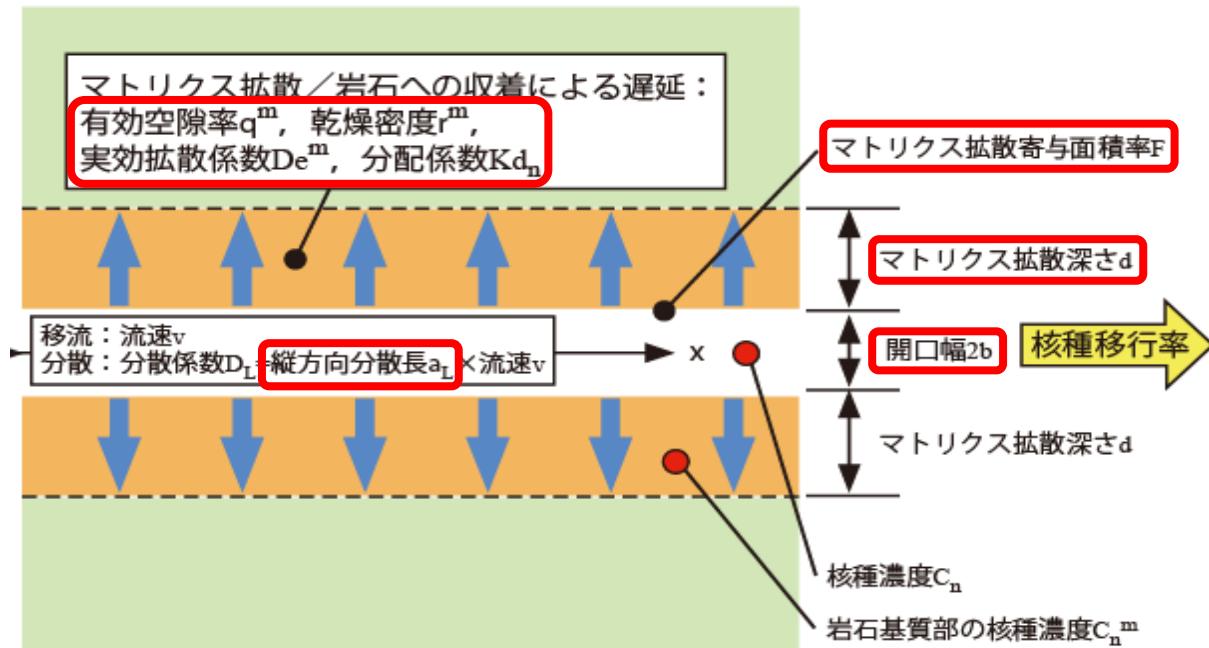


**核種移行解析モデルを
設定して評価**



母岩中の核種移行解析モデルと入力パラメータ

一次元平行平板モデル



□ 入力パラメータ

- ・調査や実験データ等を元に入力パラメータを設定
- ・核種移行支配方程式を元に核種移行率を算出

亀裂中の核種移行支配方程式

亀裂部及び断層部

$$R_n \frac{\partial C_n}{\partial t} + v \frac{\partial C_n}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} D_L \frac{\partial C_n}{\partial x} + R_n I_n C_n - R_{n-1} I_{n-1} C_{n-1} + \frac{F}{b} D^m \frac{\partial C_n}{\partial w} \Big|_{w=0} = 0$$

岩石マトリクス部

$$R_n^m \frac{\partial C_n^m}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial w} D^m \frac{\partial C_n^m}{\partial w} + R_n^m I_n C_n^m - R_{n-1}^m I_{n-1} C_{n-1}^m = 0$$

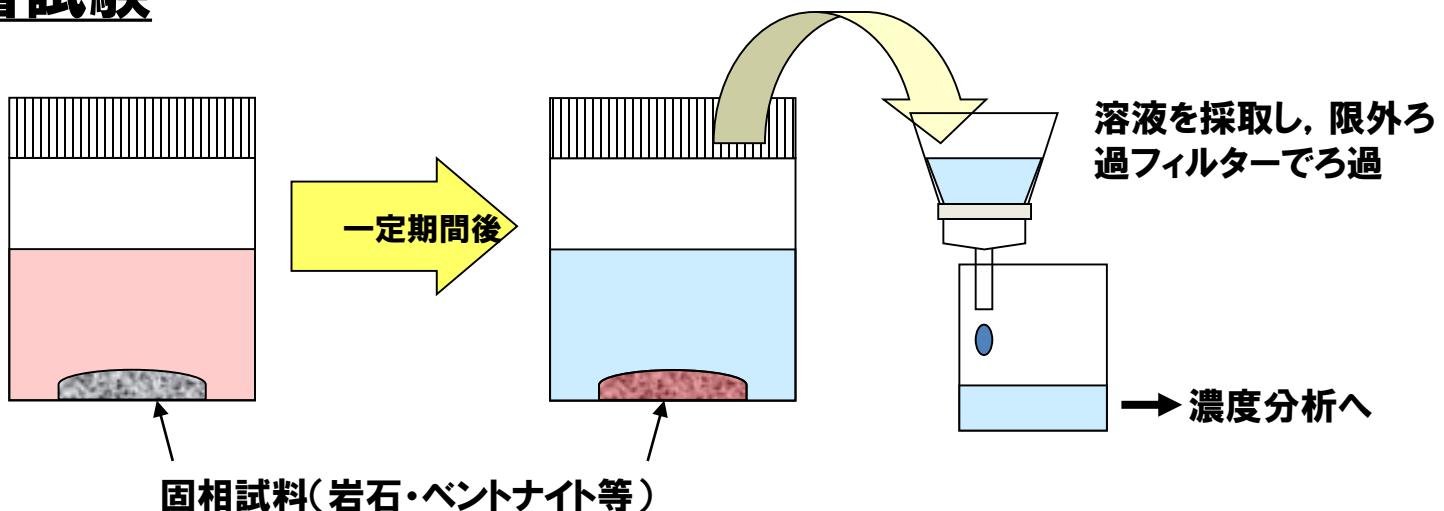
R_n : 亀裂中および断層中遅延係数 (=1) ,

R_n^m : 岩石基質部遅延係数 $= 1 + \frac{r^m Kd_n}{q^m}$



入力パラメータ設定の例: 収着分配係数の評価

バッチ式収着試験



分配係数(Kd)

核種溶液中に固相試料を添加し、一定期間経過後、溶液を採取・ろ過

→ろ液中の核種濃度を測定、以下の式から、分配係数Kdを求める

$$Kd = \frac{\text{固相中核種濃度}}{\text{溶液中核種濃度}} = \frac{C_0 - C_1}{C_1} \frac{V}{S}$$

C_0 :初期核種濃度
 C_1 :一定期間後の核種濃度
 S :固相添加量
 V :溶液体積



収着データベースの整備

- Kd実測データのデータベース化
(様々な条件・手法で得られた 約28,000件のデータを登録)
- 信頼度評価ガイドライン策定と個別データ評価



信頼性の高いKdデータを効率的に抽出可能

TDB, SDB and DDB provides site. - Windows Internet Explorer

http://migrationdb.jaea.go.jp/

Since 2003/06/01
Last Up Date 2009/10/14

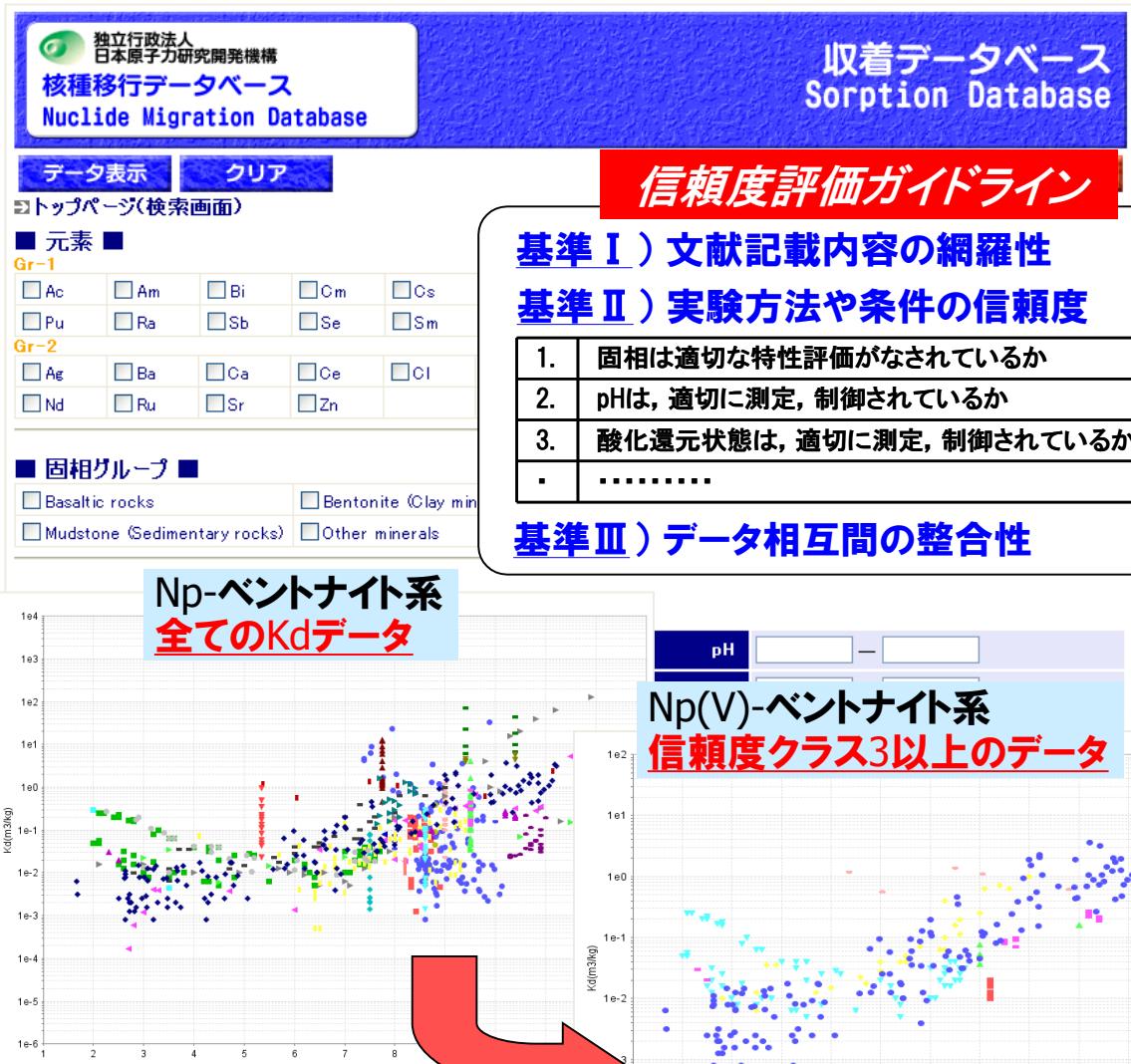
熱力学・収着・拡散 データベース
Thermodynamic, Sorption & Diffusion DataBase

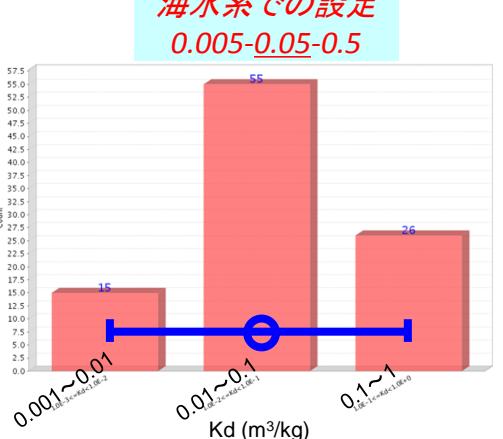
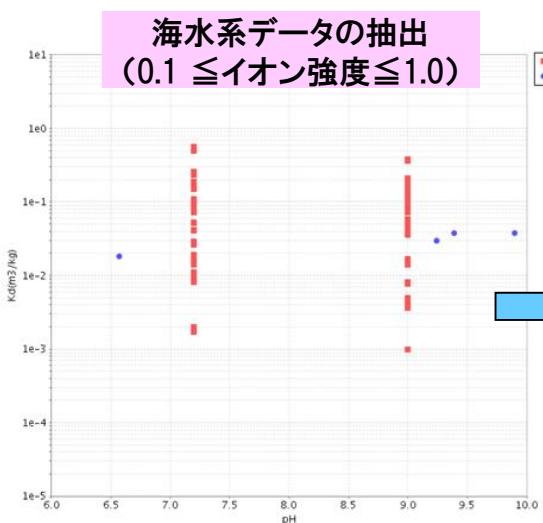
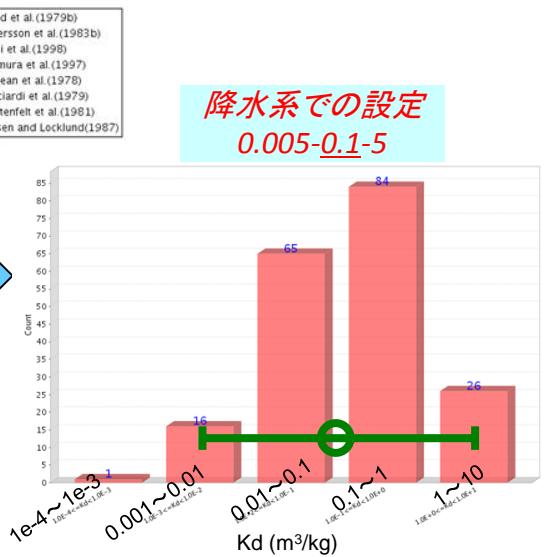
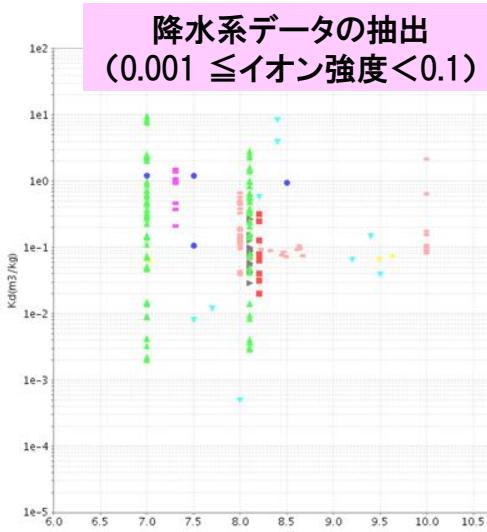
【日本語】 文字コード Encoding:iso-2022-jp
このサイトでは、日本原子力研究開発機構で整備を進めている、地層処分システムの安全評価のための熱力学データベース、収着データベースおよび拡散データベースの公開、配布を行っております。コメント欄内にご意見・ご要望等がございましたら、サイト管理者(該種移行研究グループ)までご連絡下さい。

現在、本サイトに記載されている内容および入手可能なデータ等は、すべて無償にてご利用頂けます。

JAEA-SDBのWeb公開
(<http://migrationdb.jaea.go.jp>)

このサイトは、フレームに対応したブラウザを対象としています。
フレーム未対応のブラウザをお使いの方は、お手数ですが対応版を入手してから再度アクセスをして下さい。





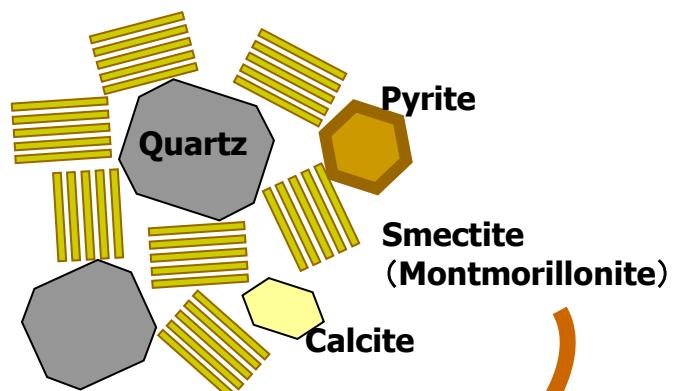
Cs-花崗岩系岩石 (検索条件: pH 6~10)

SDBより抽出したデータを用いた分配係数の検討例

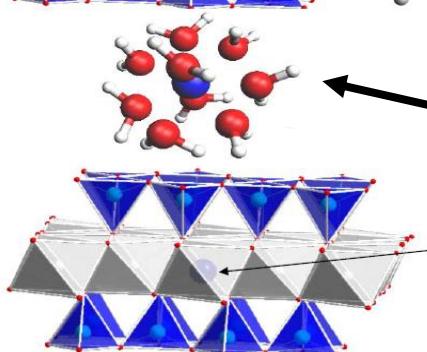
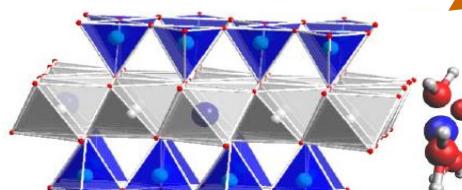
- ・ 収着分配係数は環境条件 (地下水組成、緩衝材や岩石の鉱物組成等) に依存して変動するパラメータ
- ・ 可能性のある全てのサイト条件で分配係数を整備することは難しい
- ・ 実測値だけでなく、現象理解に基づいたモデル計算による予測も重要

分配係数変動要因の検討

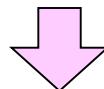
圧縮ベントナイト(緩衝材)の微細構造



スメクタイトの微細構造



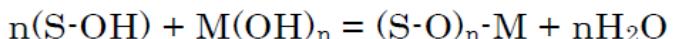
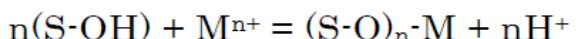
- ・収着に寄与する(複数種の)鉱物の同定
- ・各鉱物中の収着サイトと各収着サイトへの核種の選択定数の決定



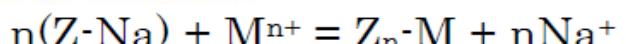
収着モデルによる分配係数の予測

表面錯体サイト: 収着量が主にpHに依存

吸着反応 (錯体反応, 配位子交換)



イオン交換サイト: 収着量が主に塩濃度に依存

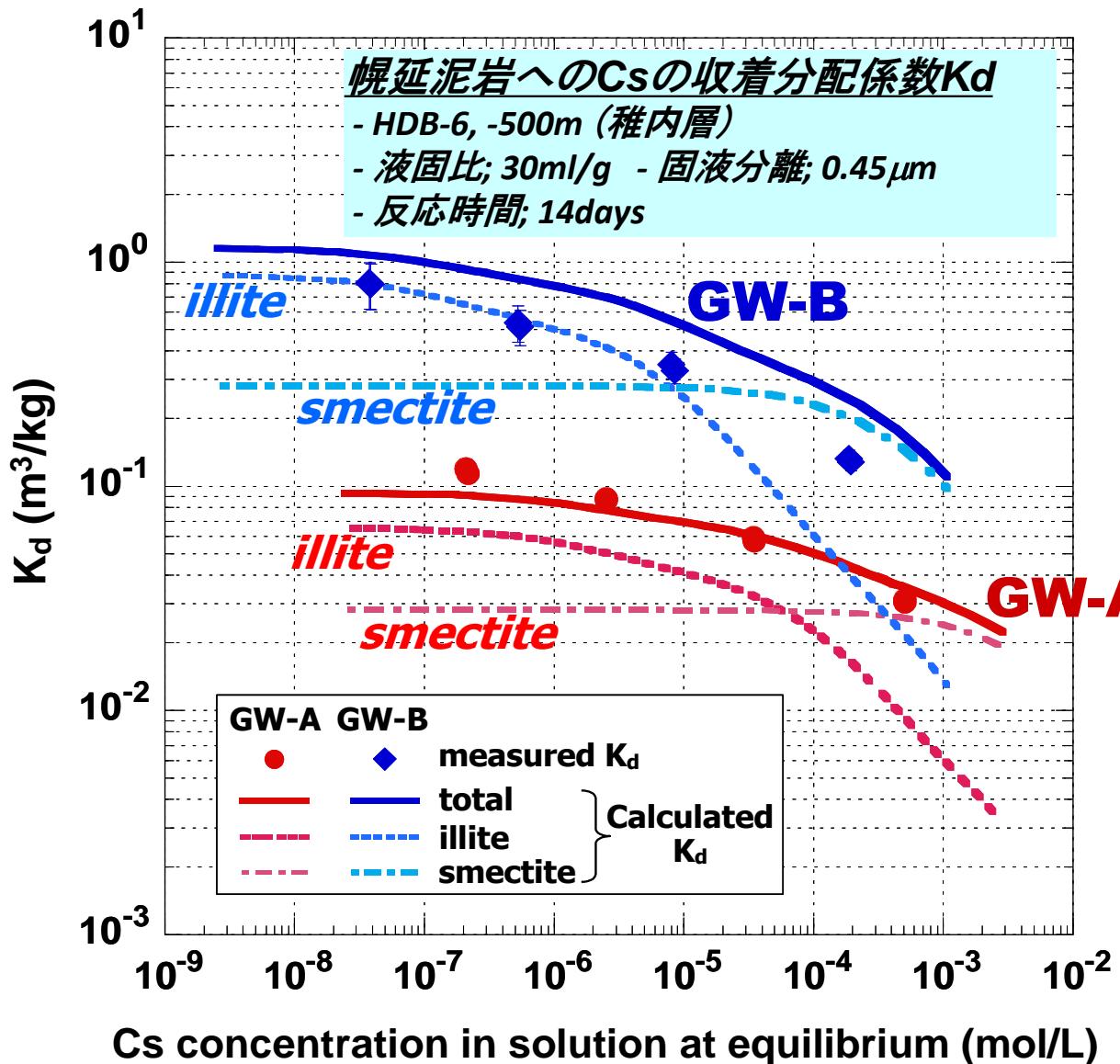


Z: イオン交換サイト (初期は Na 吸着を仮定),

M: n^+ の陽イオン



熱力学的収着モデルの適用性確認 [幌延の堆積岩]



- 粘土鉱物(イライト及びスマектタイト)を収着支配鉱物として、既往イオン交換モデルと鉱物含有率を考慮したCAモデルによって、一連の実測 K_d を説明可能



内容

1. 地層処分における安全確保の考え方
2. 工学技術
 - 2.1 工学技術の目的・概要
 - 2.2 原位置での人工バリア性能確認試験
3. 性能評価
 - 3.1 長期安全性の確認
 - 3.2 収着分配係数の設定と収着のモデル化
 - 3.3 核種移行に及ぼすコロイド影響の評価
4. まとめ

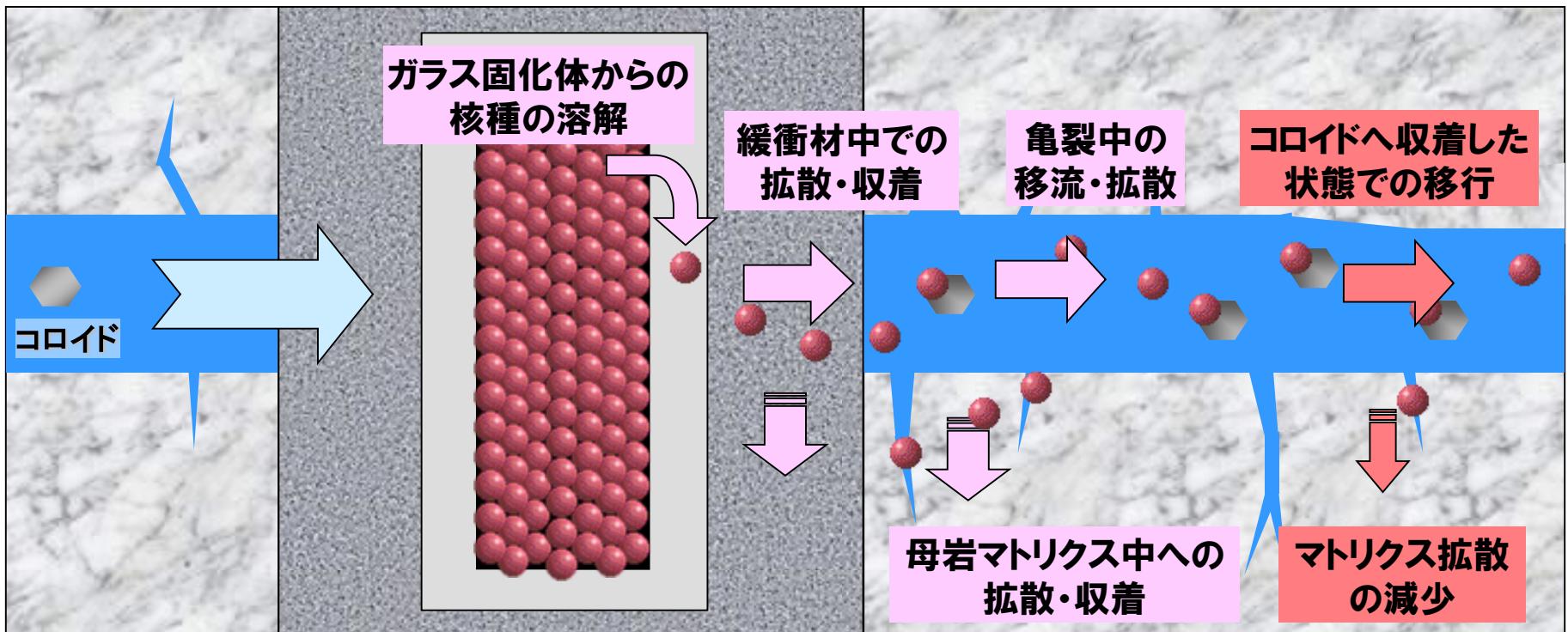


安全機能に影響を与える可能性のある現象

- ・有機物: 溶解度上昇/収着量低下
- ・微生物: 酸化還元環境の変化等
- ・コロイド生成/移行: 収着量の低下/マトリクス拡散の減少
- ・ガス生成/移行: 緩衝材中の透気/間隙水の排水
- ・放射線分解/放射線損傷: 酸化還元環境の変化
- ・緩衝材の変質: 収着量の低下/膨潤性の低下
- ・亀裂への緩衝材の侵入: 緩衝材密度の低下
- ...

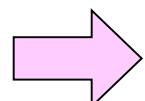
基本ケース(レファレンスケース)に対し、これらの影響を考慮したケースを設定して評価(第2次取りまとめ)

コロイド影響のシナリオ



コロイドによる核種移行の促進

- ・母岩へのマトリクス拡散の減少
- ・母岩亀裂中の移行フラックスの増加

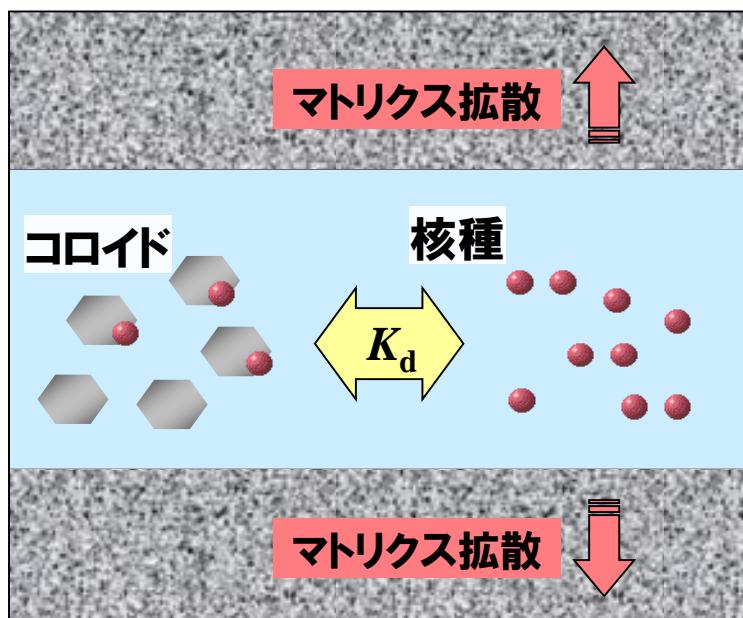


コロイド影響を考慮した核種移行解析モデルを設定して評価



コロイド影響を考慮した核種移行解析モデル

コロイド考慮モデルの概念



モデル解析上の仮定

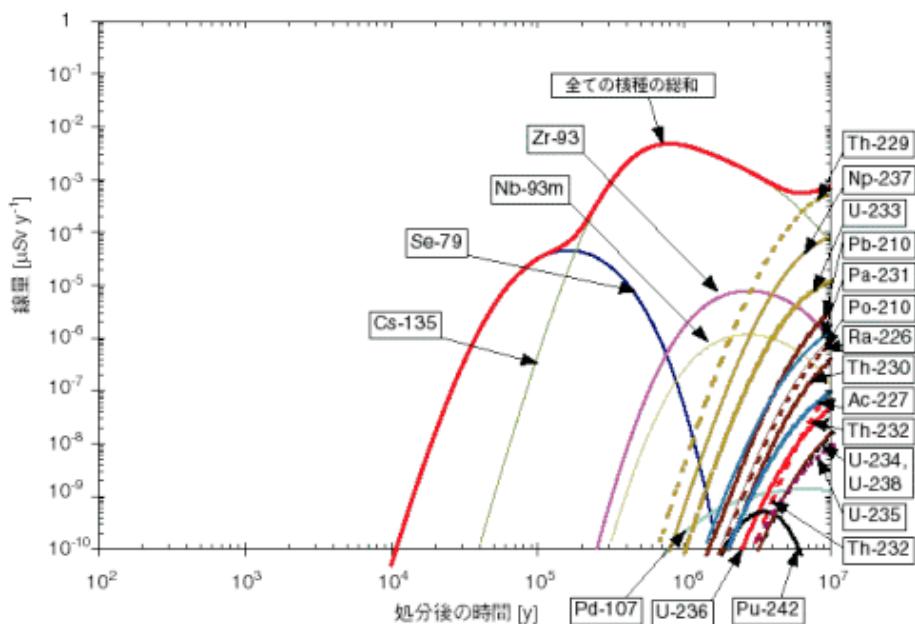
- ・コロイドのマトリクス拡散は考慮しない
- ・コロイドと核種の移流速度、分散係数は等しい
- ・核種のコロイドへの収着は、瞬時/線形/可逆
- ・コロイド濃度は場所や時間にかかわらず一定

入力パラメータ

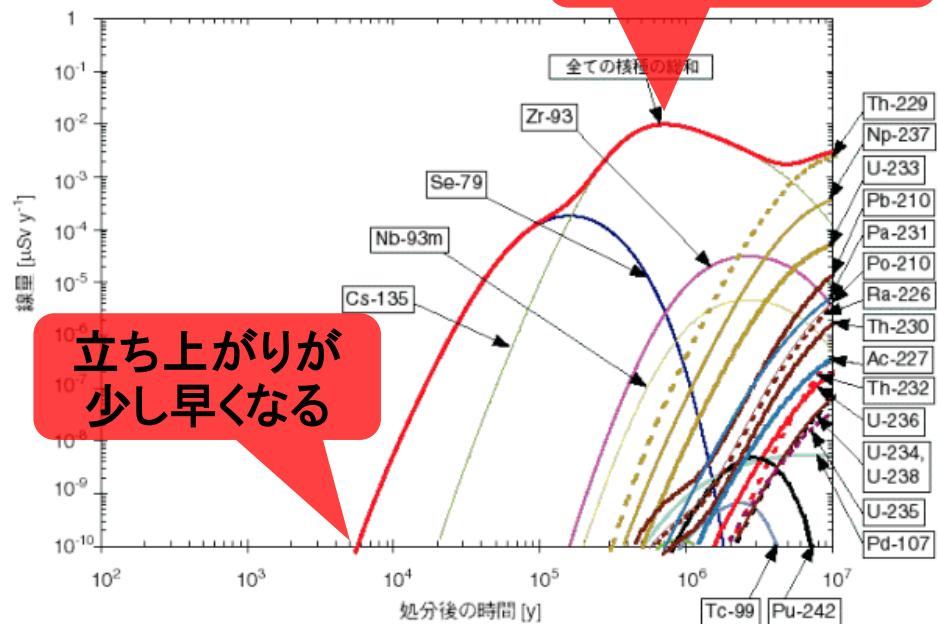
- ・コロイド-核種間の分配係数
- ・コロイド濃度

上記の仮定/モデルパラメータを元に核種移行率の解析を実施して
コロイド影響を評価

コロイド影響の解析結果(第2次取りまとめ)



レファレンスケース



コロイド影響を考慮したケース

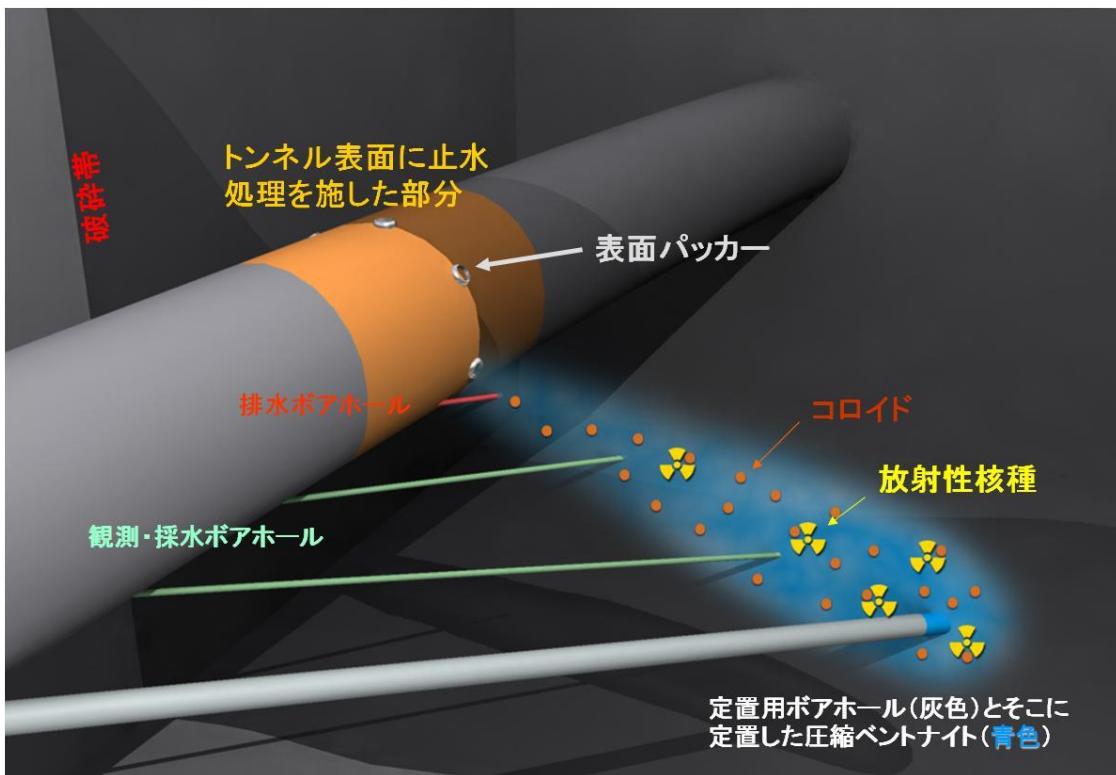
入力パラメータ

- ・コロイド-核種間の分配係数: $1000\text{m}^3/\text{kg}$ (過去の実験データ(文献値)から最も大きいものを採用)
 - ・コロイド濃度: 1 ppm (地下水中のコロイド濃度測定結果より決定)

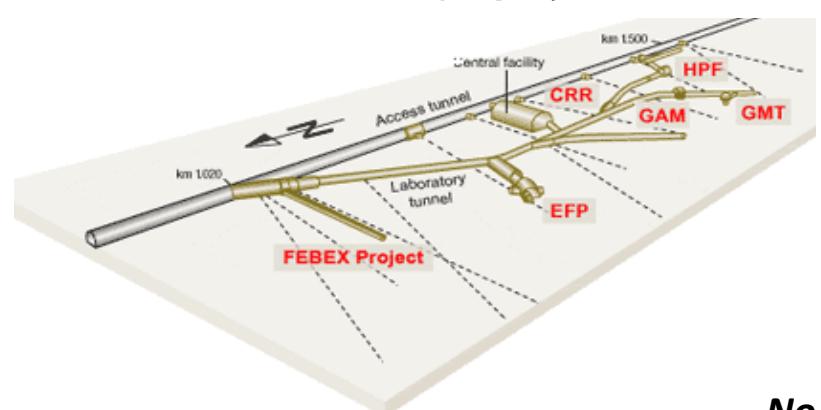


原位置でのコロイド移行試験(CFMプロジェクト)

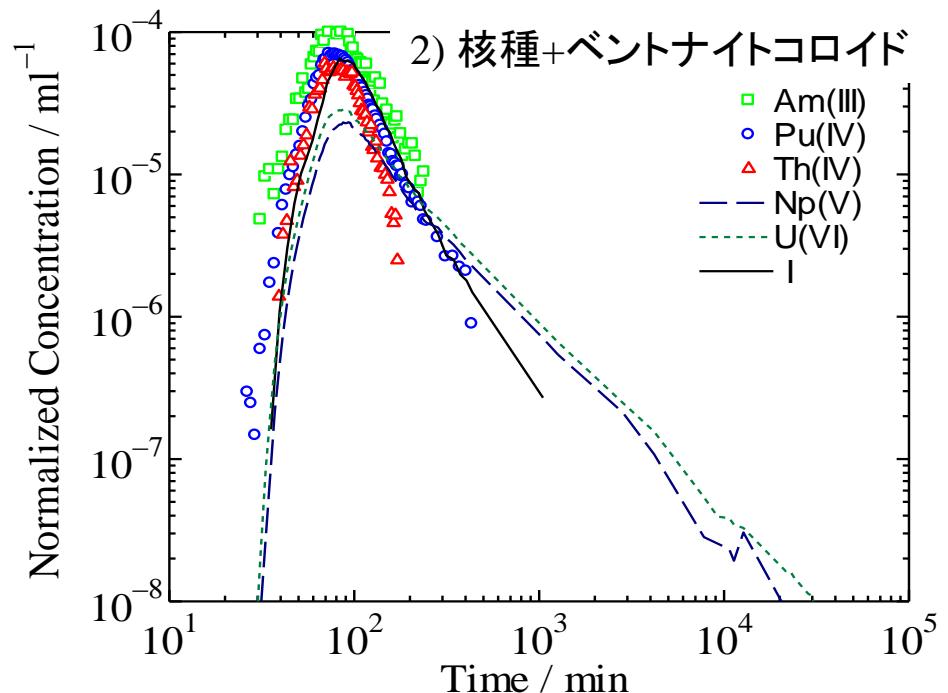
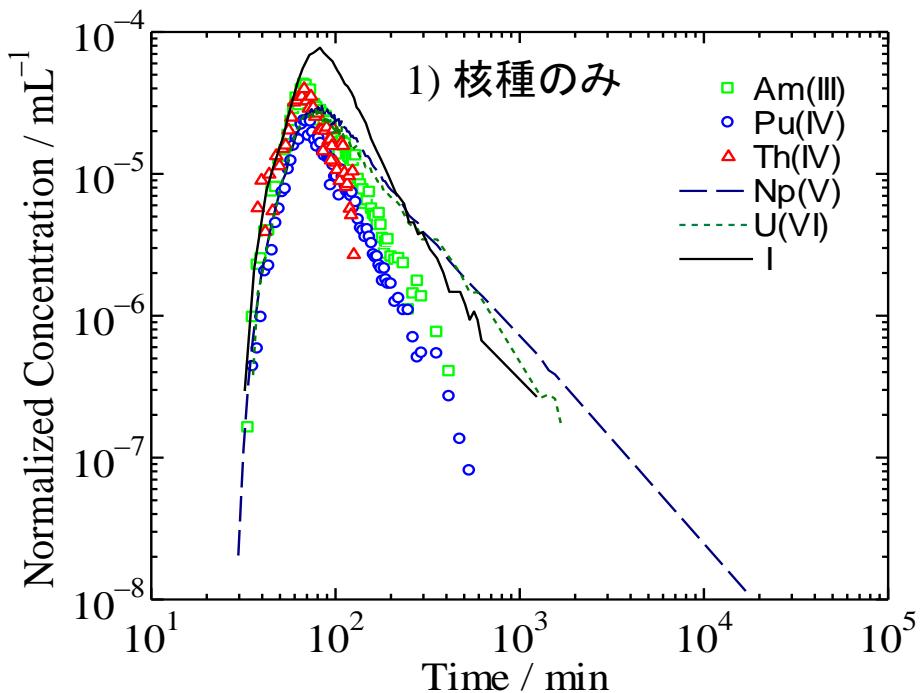
- 原位置試験により、コロイドの生成、核種とコロイドの移行挙動を調査
- コロイド影響評価手法の検証データの取得



コロイド移行試験の概略図



原位置実験での核種の破過曲線(CRRプロジェクト)



原位置実験における核種の破過曲線

- Am(III), Pu(IV), Th(IV) : コロイドが存在すると移行促進
- Np(V), U(VI) : コロイド存在下でも、破過時間に変化なし

・速い流速条件 (~6 × 10⁻⁴ m/s) で実施



内容

1. 地層処分における安全確保の考え方
2. 工学技術
 - 2.1 工学技術の目的・概要
 - 2.2 原位置での人工バリア性能確認試験
3. 性能評価
 - 3.1 長期安全性の確認
 - 3.2 収着分配係数の設定と収着のモデル化
 - 3.3 核種移行に及ぼすコロイド影響の評価
4. まとめ



まとめ

工学技術

- ・ 現実的な技術によって合理的に構築でき、安全性が実現できる人工バリアや処分施設を設計すること
- ・ 人工バリア等の長期挙動に関する基礎データの拡充、解析手法の改良
- ・ 原位置(地下研)での技術の実証と検証データ取得

性能評価

- ・ システムの長期挙動の理解を基本に、シナリオ構築、モデル化およびデータ整備を組み合わせた解析・評価
- ・ 実測データ(データベース)とモデル化を組み合わせることにより、様々な環境条件での核種移行パラメータ設定値の精度を向上



ご静聴ありがとうございました。