

**「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現
－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－」（レビュー版）**

セッション5 閉鎖後長期の安全性の評価

NUMO包括的技術報告書（レビュー版）に関する外部専門家向け説明会

原子力発電環境整備機構（NUMO）

藤崎 淳

第6章の目的とアプローチ

○目的

わが国の多様な地質環境に対して、処分場の閉鎖後長期にわたる安全性を評価するための技術基盤が整っていること、および閉鎖後長期の安全性を確保できる見通しを有することを提示

○アプローチ（再掲）

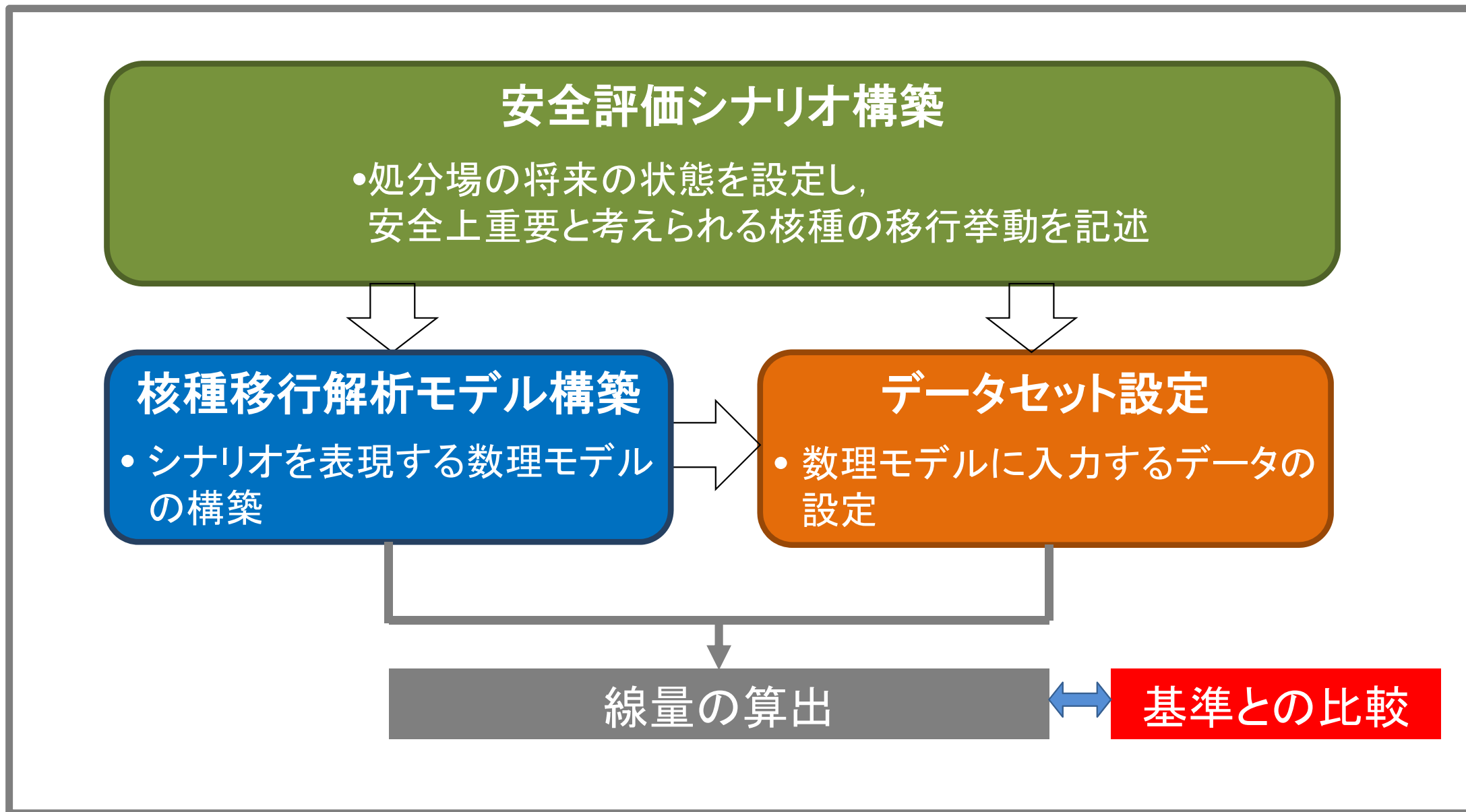
- 国際的な指針などを参考に、さまざまな不確実性を適切に取り扱うためリスク論的な考え方を導入し、安全性を判断するめやすとなる基準を仮設定したうえで、定量的な安全評価を行うために必要な考え方や手法を提示
- 地質環境条件の違いや処分場の仕様の違いを反映し、異なる処分場が有するそれぞれの長期的な性能を合理的に比較・評価できる核種移行解析の手法を整備していることを提示
- これらに基づき、検討対象母岩の地質環境モデルおよび処分場の設計結果を対象として、発生可能性に応じた安全評価シナリオを設定し、閉鎖後長期の処分場の性能を解析。解析結果と仮設定した基準との比較を通じて、安全性を議論

1. 安全評価の基本的枠組み
2. 安全評価の基本的手順
3. 安全評価シナリオの作成
4. 基本シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
5. 変動シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
6. 稀頻度事象シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
7. 人間侵入シナリオの評価
8. 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
9. まとめと今後の取り組み

1. 安全評価の基本的枠組み
2. 安全評価の基本的手順
3. 安全評価シナリオの作成
4. 基本シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
5. 変動シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
6. 稀頻度事象シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
7. 人間侵入シナリオの評価
8. 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
9. まとめと今後の取り組み

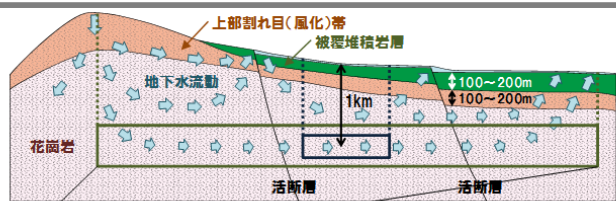
安全評価の進め方

- 処分場の閉じ込め性能を線量を指標として評価

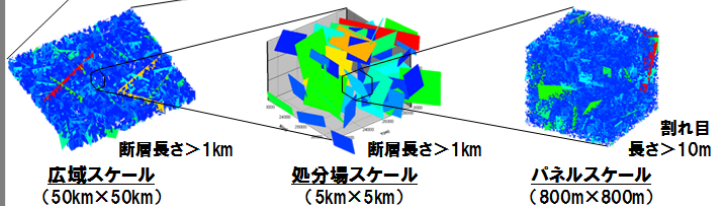


評価の対象とする処分場

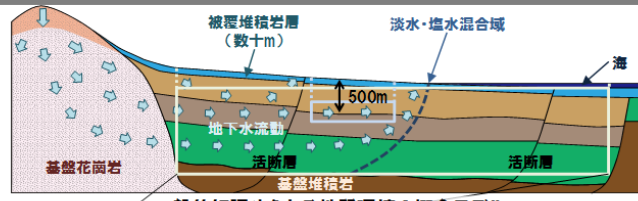
深成岩類 (モデル水質:2種類)



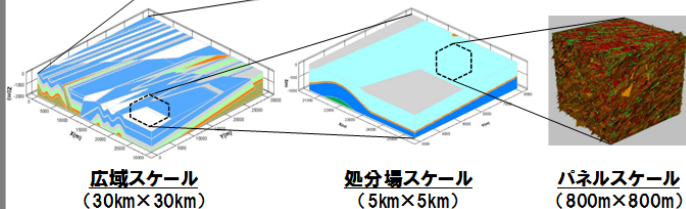
一般的に認められる地質環境の概念モデル



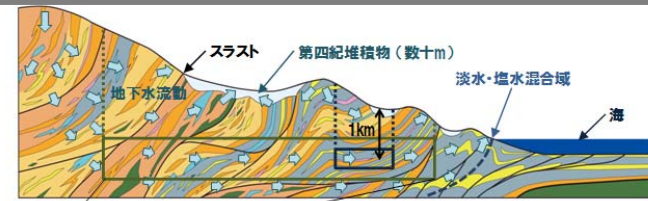
新第三紀堆積岩類(モデル水質:2種類)



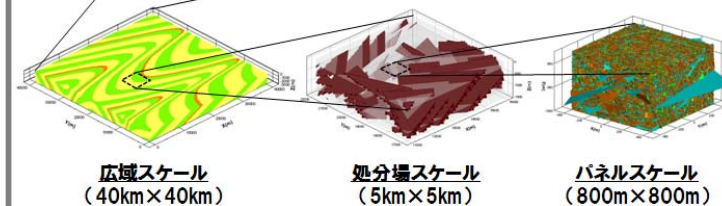
一般的に認められる地質環境の概念モデル



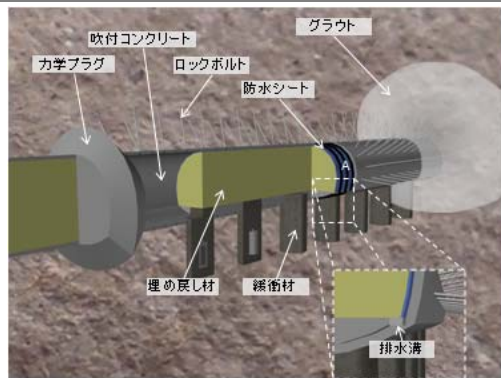
先新第三紀堆積岩類(モデル水質:2種類)



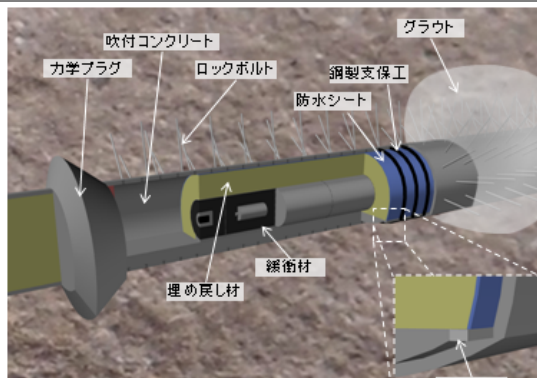
一般的に認められる地質環境の概念モデル



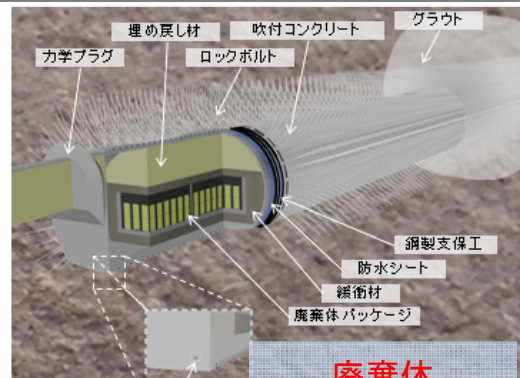
HLW※処分場 (縦置き・ブロック方式)



HLW※処分場 (横置き・PEM方式)

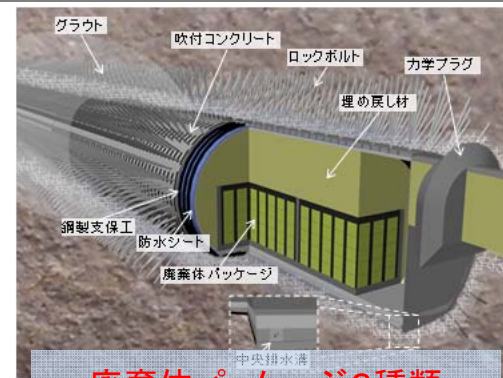


TRU等廃棄物処分場(緩衝材有り)

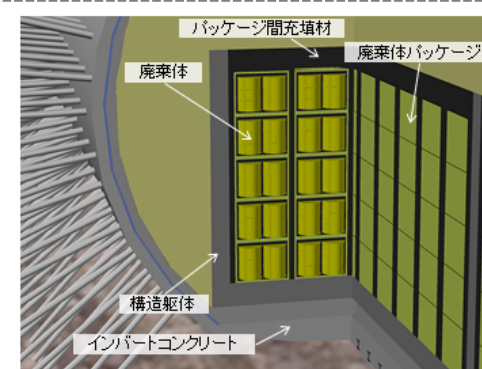
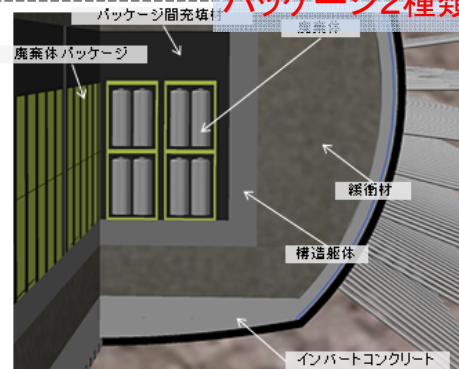
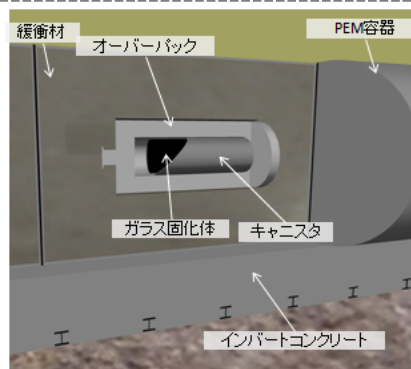
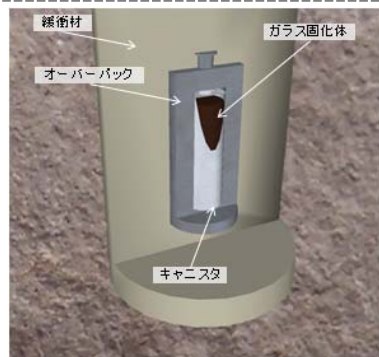


廃棄体
パッケージ2種類

TRU等廃棄物処分場(緩衝材無し)



廃棄体パッケージ2種類



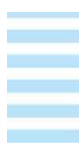
リスク論的考え方に基づく安全評価と評価基準（1/2）

- 線量と発生確率を別々に考察して評価する「線量確率分解アプローチ」を採用
- シナリオを発生可能性に応じて区分し，区分ごとに基準値を設定
- ICRP等の国際機関の指針を基本にシナリオ区分とめやす線量を設定
- 評価期間は，計算上最大の線量が現れるまでの時期が確認できるまでの期間とした

シナリオ区分	各シナリオの定義	めやす
基本シナリオ	<ul style="list-style-type: none">●適切なサイト選定とそのサイトの地質環境条件を考慮した処分場の設計によって期待する安全機能を発揮できるように構築された地層処分システムに対して発生する可能性が最も高いと想定されるシナリオ → （もしも被ばくが起きるとすれば，そのようなことをもたらす発生の可能性が高いとみなすべきもの）	安全性の確認： 300μSv/y （安全性を確認するめやす線量として線量拘束値を設定） 基本シナリオに対する事業者としての 努力目標： 10μSv/y （諸外国の安全規制に適用されている基準の最小値を設定）
変動シナリオ	<ul style="list-style-type: none">●基本シナリオに対して，科学的知見に基づいて合理的に設定できる不確実性を考慮したシナリオ	

リスク論的考え方に基づく安全評価と評価基準 (2/2)

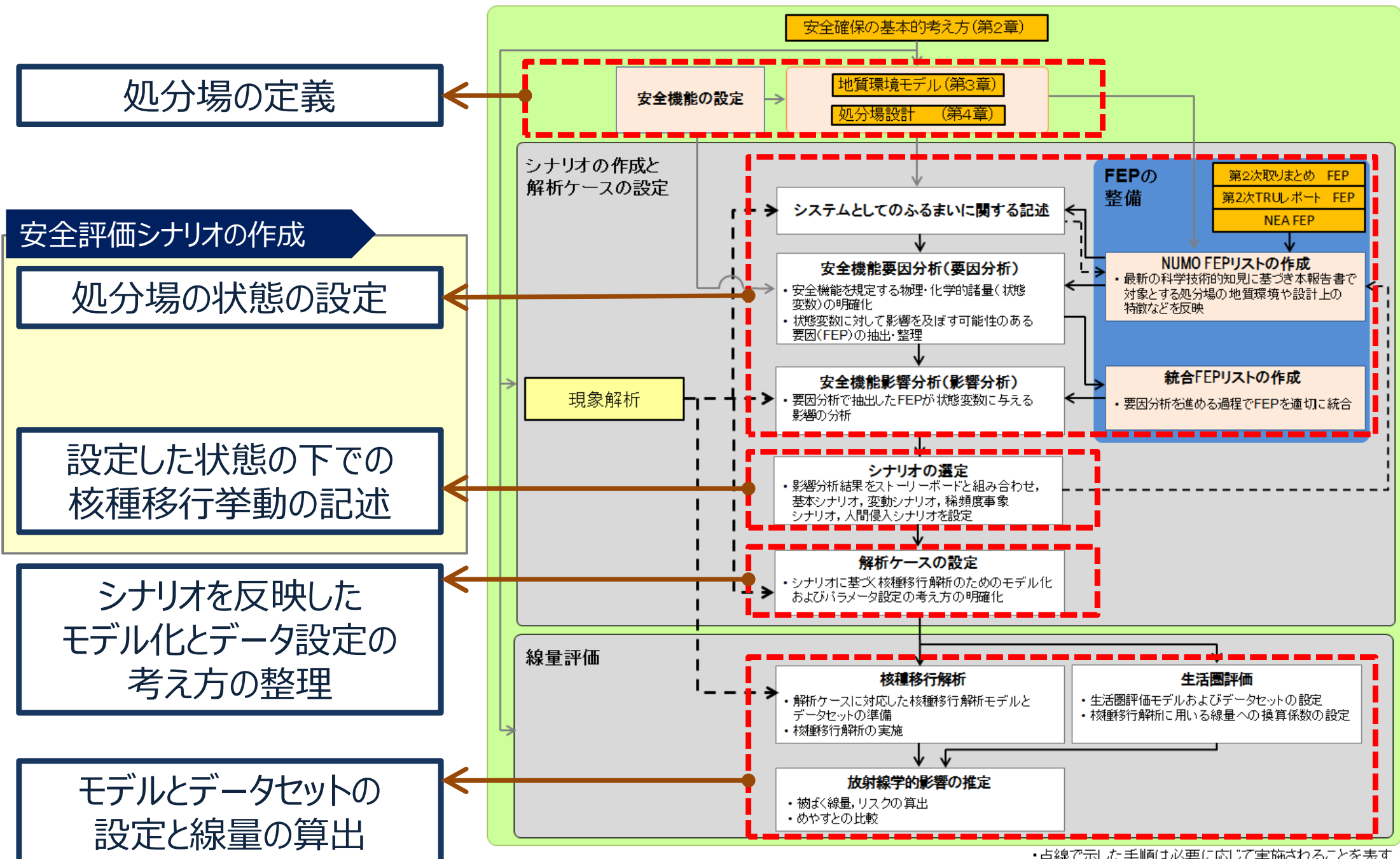
シナリオ区分	各シナリオの定義とめやす基準の考え方	めやす
稀頻度事象 シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ● 適切なサイト選定とそのサイトの地質環境条件を考慮した処分場の設計によって期待する安全機能を発揮できるように構築された地層処分システムに対しては発生可能性が極めて小さいと考えられる自然事象にかかわるシナリオ ● このようなシナリオを想定したとしても、著しい放射線学的影響がないことを示すためのシナリオであり、ICRPが示している同様のシナリオに対する被ばく状況の参考値の幅を適用 	20～100mSv (1年目) 1～20mSv/y (2年目以降)
人間侵入 シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ● 地層処分システムは本来的に人間侵入が生じる可能性を最小限とするようにサイトを選定し処分場を設計することによって構築されていることから、人間侵入シナリオが生ずる可能性は極めて小さい ● その発生を想定したとしても、著しい放射線学的影響がないことを確認するためのシナリオであり、ICRPが示している同様のシナリオに対する被ばく状況の参考値の幅を適用 	20～100mSv (1年目) 1～20mSv/y (2年目以降)



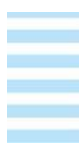
ご説明の内容

1. 安全評価の基本的枠組み
- 2. 安全評価の基本的手順**
3. 安全評価シナリオの作成
4. 基本シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
5. 変動シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
6. 稀頻度事象シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
7. 人間侵入シナリオの評価
8. 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
9. まとめと今後の取り組み

安全評価のフロー



・点線で示した手順は必要に応じて実施されることを表す



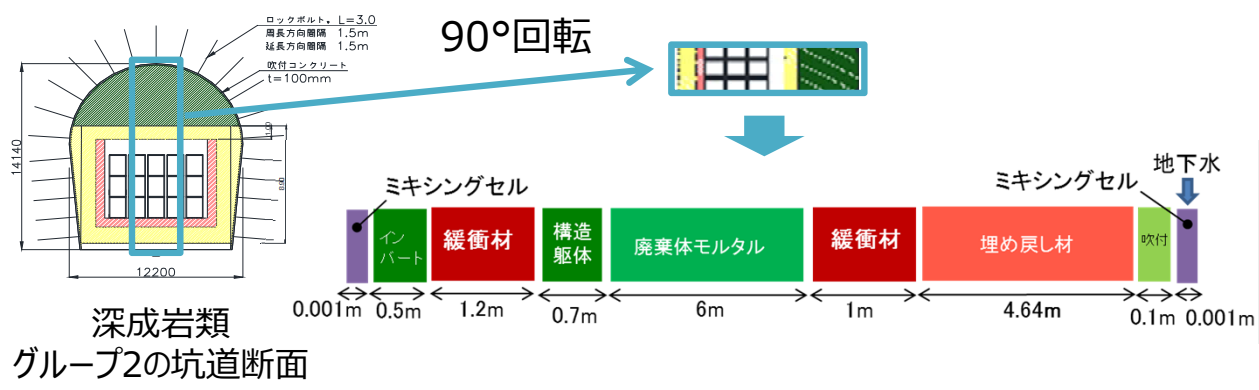
ご説明の内容

1. 安全評価の基本的枠組み
2. 安全評価の基本的手順
- 3. 安全評価シナリオの作成**
4. 基本シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
5. 変動シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
6. 稀頻度事象シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
7. 人間侵入シナリオの評価
8. 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
9. まとめと今後の取り組み

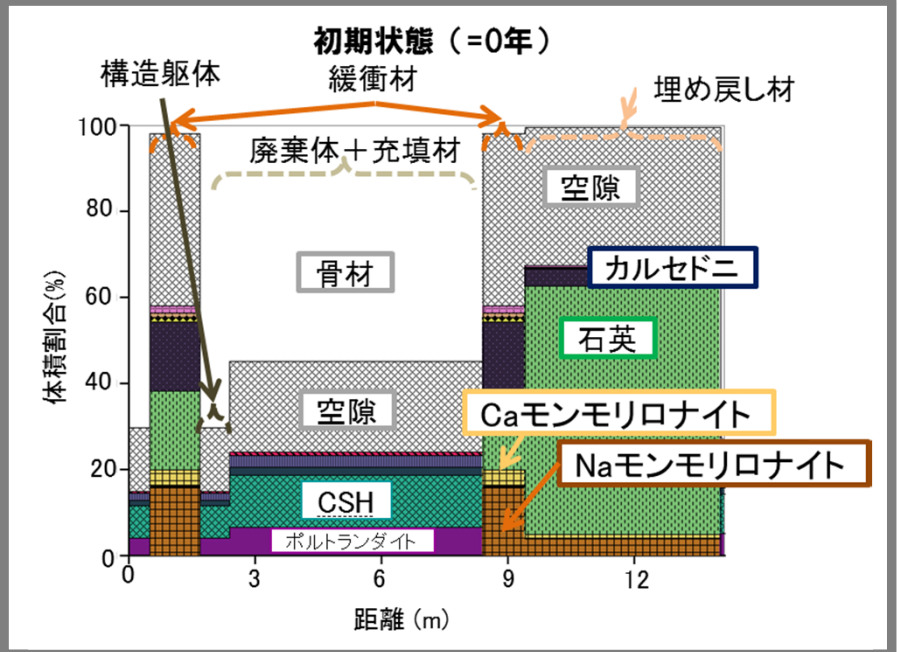
- 安全機能を割り当てられた構成要素の状態を設定するにあたり、建設・操業を経て閉鎖された時点のシステムの状態が時間・空間的にどのように変遷するかを記述
 - 時間枠
 - ・T1：処分場閉鎖から再冠水完了までの期間
 - ・T2：再冠水完了から放射性核種の移行が生ずるまでの期間
 - ・T3：放射性核種の移行が生じてから現在の地質環境の特性が大きく変化しないと考えられるまでの期間
 - ・T4：地質環境の特性に関する不確実性が増大する期間
 - 空間スケール
 - ・ニアフィールドスケール（人工バリアおよび処分坑道とその周辺100m程度）
 - ・パネルスケール（数百m×数百m）
 - ・処分場スケール（数km×数km）
 - ・広域スケール（数十km×数十km）

処分場の状態設定に資する情報の取得 (1/3)

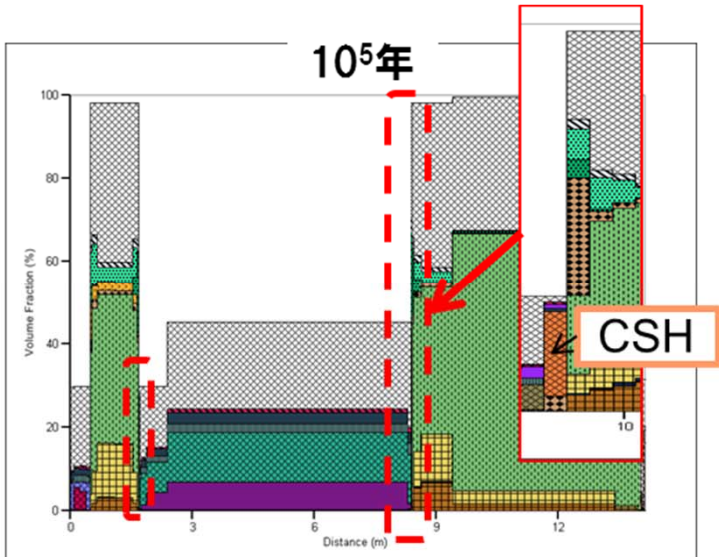
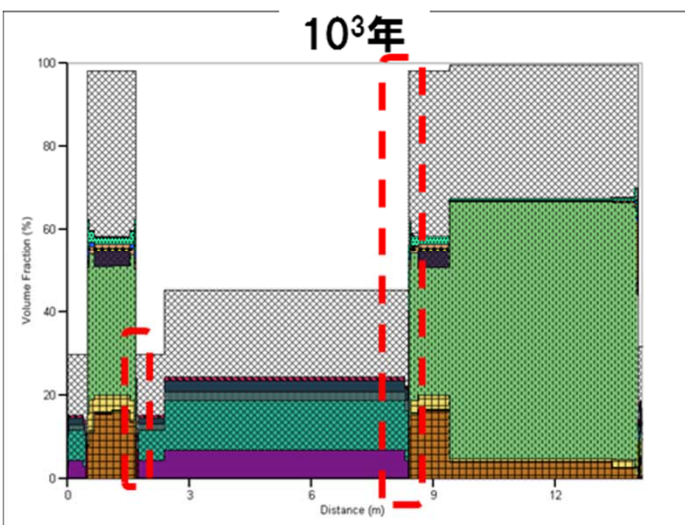
■変質解析 (セメントと緩衝材の相互作用) の例



反応速度式に従った鉱物の溶解・沈殿
 間隙率変化に伴う拡散係数の変化 } を考慮して解析



深成岩類低Cl-濃度地下水の例

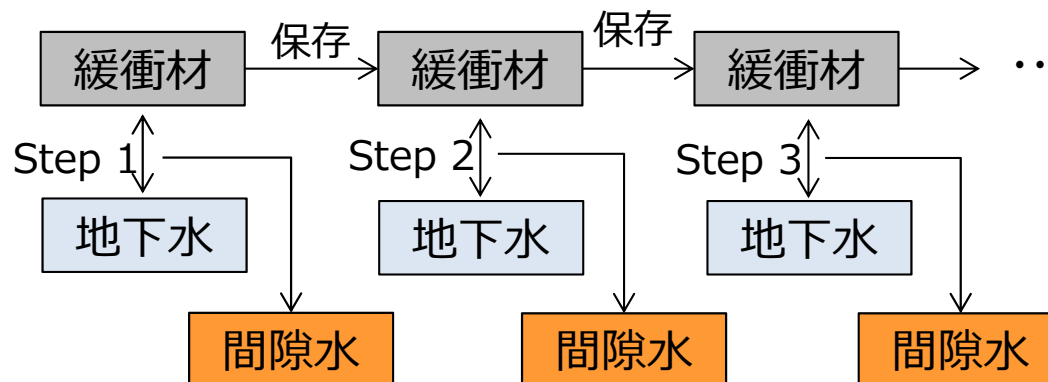


CSHやカルサイトが沈殿
 ↓
 沈殿による空隙率低下
 ↓
 物質移行率低下
 ↓
 変質が抑制され
 緩衝材が長期に安定

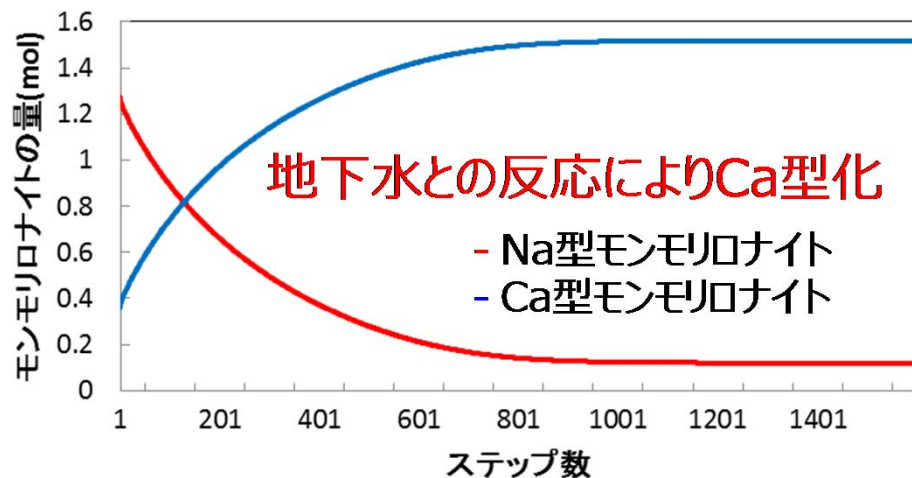
■ 緩衝材の地下水による変質の評価

- 緩衝材間隙水の水質
 - 緩衝材の交換性陽イオン組成
- を評価

計算モデルの概念図



緩衝材中のモンモリロナイトの量(深成岩類低塩分濃度地下水)



岩種	地下水	解析結果
深成岩類	低Cl ⁻	Ca型化
	高Cl ⁻	Ca型化
新第三紀堆積岩類	低Cl ⁻	Ca型化
	高Cl ⁻	Na型で安定
先新第三紀堆積岩類	低Cl ⁻	Ca型化
	高Cl ⁻	Na型で安定

処分場の状態設定に資する情報の取得 (3/3)

■ TRU等廃棄物に含有する硝酸塩の移行挙動評価の例 (地質環境の安全機能の状態設定に反映)

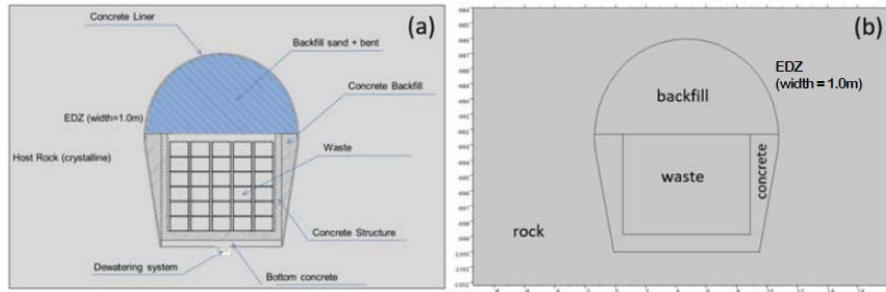


図-1 設計断面と幾何学モデル

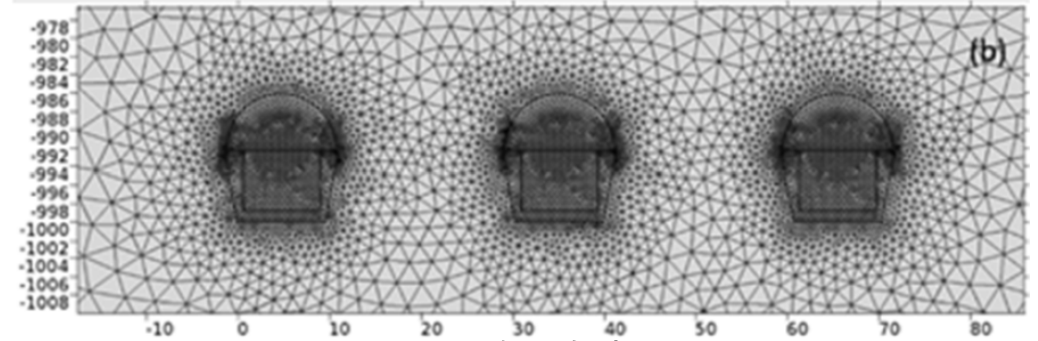


図-2 二次元解析メッシュ

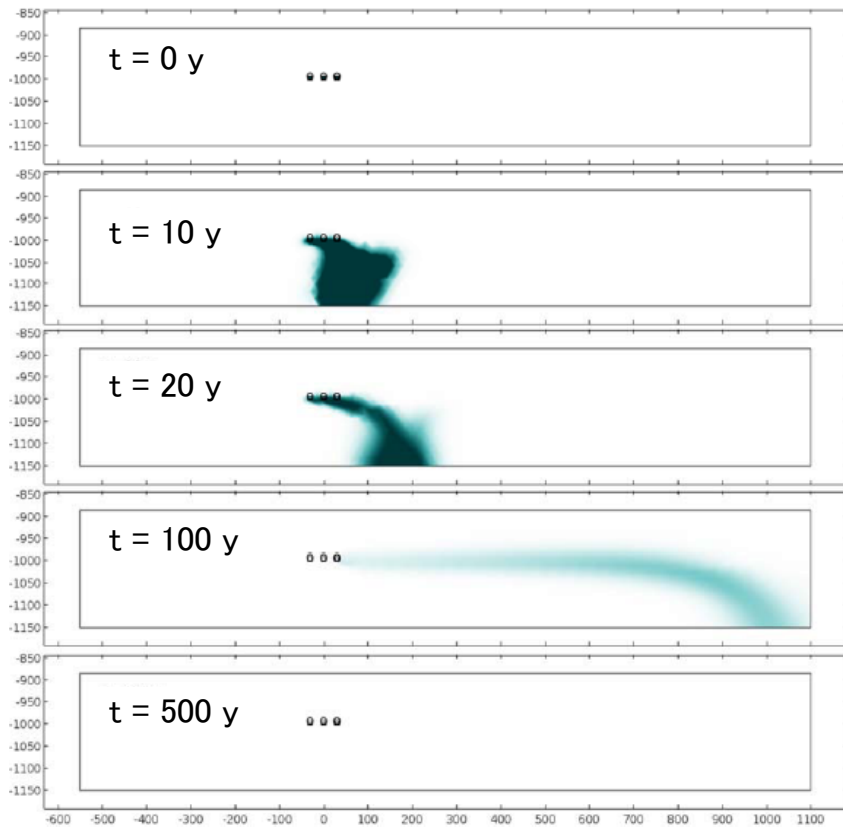


図-3 硝酸イオンの移行挙動

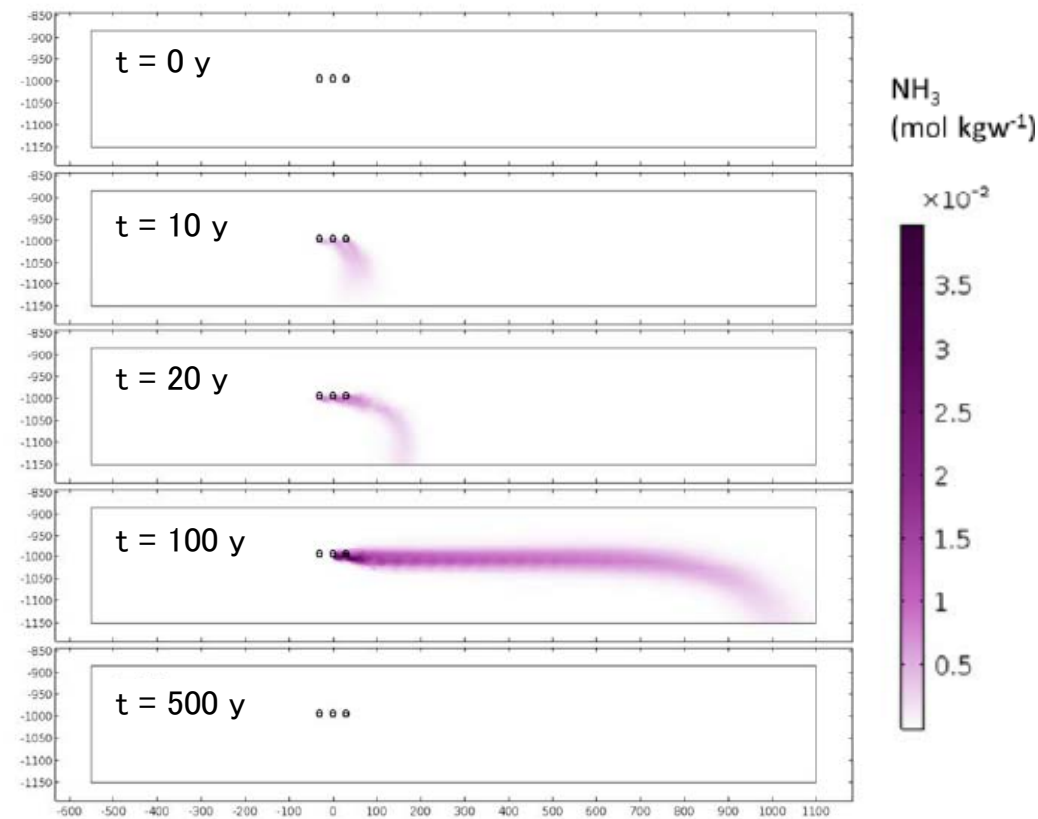



図-4 アンモニアの移行挙動

処分場閉鎖後のシステムとしてのふるまいに関する記述

➤地層処分システム全体のふるまいを俯瞰し、時間・空間スケールに関する整合性を確認できるようにする表現方法として「ストーリーボード」を導入

時間

空間スケール

		現在の地質環境が継続すると考えられる期間 (T ₁ ~T ₂)			地質環境の特性に関する不確実性が增大する期間 (T ₃)
		処分場閉鎖から再冠水完了までの期間 (T ₁)	再冠水完了から放射性核種の移行が生ずるまでの期間 (T ₂)	放射性核種の移行が生じてから現在の地質環境の特性が大きく変化しないと考えられるまでの期間 (T ₃)	
		建設・操業	処分場閉鎖	再冠水完了	放射性核種の移行の生起
広域スケール	 <ul style="list-style-type: none"> 火山および大規模な活断層から十分な離隔を確保。 新規断層の発生について極めて小さい可能性あり。 隆起・侵食や海水準変動といった広域的で緩やかなプロセスによって、温度場、水理場、応力場、化学場の状態が少しずつ変化する。 				<ul style="list-style-type: none"> 処分場の安全機能に影響を及ぼすような地質環境の変化が生ずる可能性が増大。
処分場スケール	 <ul style="list-style-type: none"> 地下施設に地下水が継続的に流入し、地下施設に向かう流動場が形成。 坑道に地下水が流出することにより、処分場設置領域の水圧が低下。 アクセス坑道を通じて酸素が取り込まれる。 	 <ul style="list-style-type: none"> 廃棄体の発熱により処分場近傍の温度が上昇し、いずれ低下に転じる。 処分場近傍の水圧は、地下施設建設前よりも低下し、処分場に向かう地下水流動場が形成される。 	 <ul style="list-style-type: none"> 処分場近傍の温度が徐々に低下し、初期の地温に近づく。 処分場近傍の水理場は地下施設建設前の状態に回復し定常状態に至り、坑道に直交する地下水流動場が形成。 還元環境に回復。 	 <ul style="list-style-type: none"> 処分場近傍の温度場、水理場、応力場、化学場は定常とみなせる状態が継続。 大規模な断層に至った放射性核種は、断層を支配的な経路として地質環境中を移行し生活圏に至る。 	 <ul style="list-style-type: none"> 地下施設近傍の温度場、水理場、応力場、化学場の変化を生ずる可能性がある。
パネルスケール	 <ul style="list-style-type: none"> ガラス固化体の設置が完了した領域の温度が上昇。 坑道近傍の水圧が低下。 坑道周辺にEDZが発生。 埋め戻し材と坑道壁面との間に隙間が生じる。 取り込まれた酸素により、坑道壁面近傍に酸化性の領域が生起。 	 <ul style="list-style-type: none"> ガラス固化体の発熱により坑道近傍の温度が上昇し、いずれ低下に転じる。 埋め戻した坑道の水飽和度は不飽和。 支保工は健全で埋め戻し材には地圧は作用しない。 坑道周辺にEDZが存在。 埋め戻し材と坑道壁面との間に隙間が残存。 坑道壁面近傍に酸化性の領域が存在。 セメント系材料から高アルカリ成分が溶出し、坑道近傍の地下水のpHが上昇。 	 <ul style="list-style-type: none"> 坑道近傍の温度が徐々に低下し、初期の地温に近づく。 坑道周辺の水圧は建設前の状態に回復し定常状態に至り、坑道に直交する地下水流動場が形成。 埋め戻し材の膨潤変形により坑道壁面との隙間が消滅。 坑道壁面近傍の酸素は黄鉄鉱などの還元剤により徐々に消費され、還元環境に移行しつつある。 埋戻し材や止水プラグは地下水との反応により少しずつ変質する。 	 <ul style="list-style-type: none"> 坑道近傍の温度場および水理場は、定常状態。 坑道の支保コンクリートが変質・劣化した透水性が増大。連続した高透水性の構造となる。 上記の連続した高透水性の構造は、止水プラグにより分断されるため、この構造に沿った地下水は生じない。 岩盤のクリーブ変形により、坑道が内側に変形。 還元環境に回復。 放射性核種は地下水の流れに沿って移流・分散メカニズムにより移動する。 	 <ul style="list-style-type: none"> 温度場、水理場、応力場、化学場の変化を生ずる可能性がある。
ニアフィールドスケール	 <ul style="list-style-type: none"> ガラスマトリクスに製造時に生じた亀裂が存在。 ガラス固化体の発熱により温度が上昇し、いずれ低下に転じる。 ニアフィールドの水飽和度は不飽和。 緩衝材が膨潤し、廃棄体を力学的に安定な状態に維持するとともに、地下水の流れを妨げる。 緩衝材リング間やオーバーバックとの間に隙間が存在。 処分坑道周辺にEDZが存在。 オーバーバックやPEM容器が残存する酸素を消費しながら少しずつ腐食する。地下水は還元環境に移行しつつある。 放射線分解および還元環境における鉄の腐食により、水素ガスが発生。 緩衝材に鉄による変質がわずかに生じる。 	 <ul style="list-style-type: none"> ニアフィールドの温度は徐々に低下して初期の地温に近づく。 入工バリア外側の水圧は建設前の値に回復する。 緩衝材は膨潤し、設置時に生じた隙間が消滅。 緩衝材や埋戻し材は地下水との反応によって少しずつ変質する。 操業期間中に取り込まれた緩衝材中の酸素が消費され、還元環境となる。 オーバーバックの腐食膨張により緩衝材が変形。PEM容器の腐食膨張により緩衝材と埋戻し材が変形。 オーバーバックやPEM容器の腐食に伴い、ガラス近傍および緩衝材中の間隙水組成が変化。 放射線分解および還元環境における鉄の腐食により、水素ガスが発生。 オーバーバックは少なくとも1000年間は健全。 	 <ul style="list-style-type: none"> 温度場および水理場は定常状態。 地下水流動場は、変質・劣化したコンクリート支保工や、埋め戻し時に残置された排水溝など高透水性の構造の影響を受ける。 ガラス固化体に地下水が接触し溶解する。 オーバーバックが完全に腐食し腐食膨張が止まる。 時間とともに密閉性が喪失するオーバーバックの本数が増加。 放射線分解および還元環境における鉄の腐食により、水素ガスが発生。 緩衝材や止水プラグ、埋戻し材は地下水との反応によって少しずつ変質する。 ガラス固化体から地下水に溶出した放射性核種は、緩衝材中を拡散によって移行する 	 <ul style="list-style-type: none"> 温度場、水理場、応力場、化学場の変化を生ずる可能性がある。 	

■ 設定した状態の下で安全機能がどのように働くかを分析

- 安全機能と影響を及ぼす可能性のあるFEP※を整理
(安全機能要因分析)
- 「システムとしてのふるまいに関する記述」において考慮したFEPの網羅性を確認
- 各々の安全機能について、関連するFEPによる影響を分析
(不確実性による影響の分析も含む)

※FEP：地層処分システムの各構成要素の特徴(**F**eature), 特徴に影響を与える事象(**E**vent), 地層処分システムの時間的変遷のプロセス (**P**rocess)の略称

- 安全機能の働きの程度に影響する物理的・化学的性質などを状態変数として抽出
- 安全機能に関連付けた状態変数に対し、「処分場のシステムとしてのふるまいの記述」等を参照してFEPを関連付け

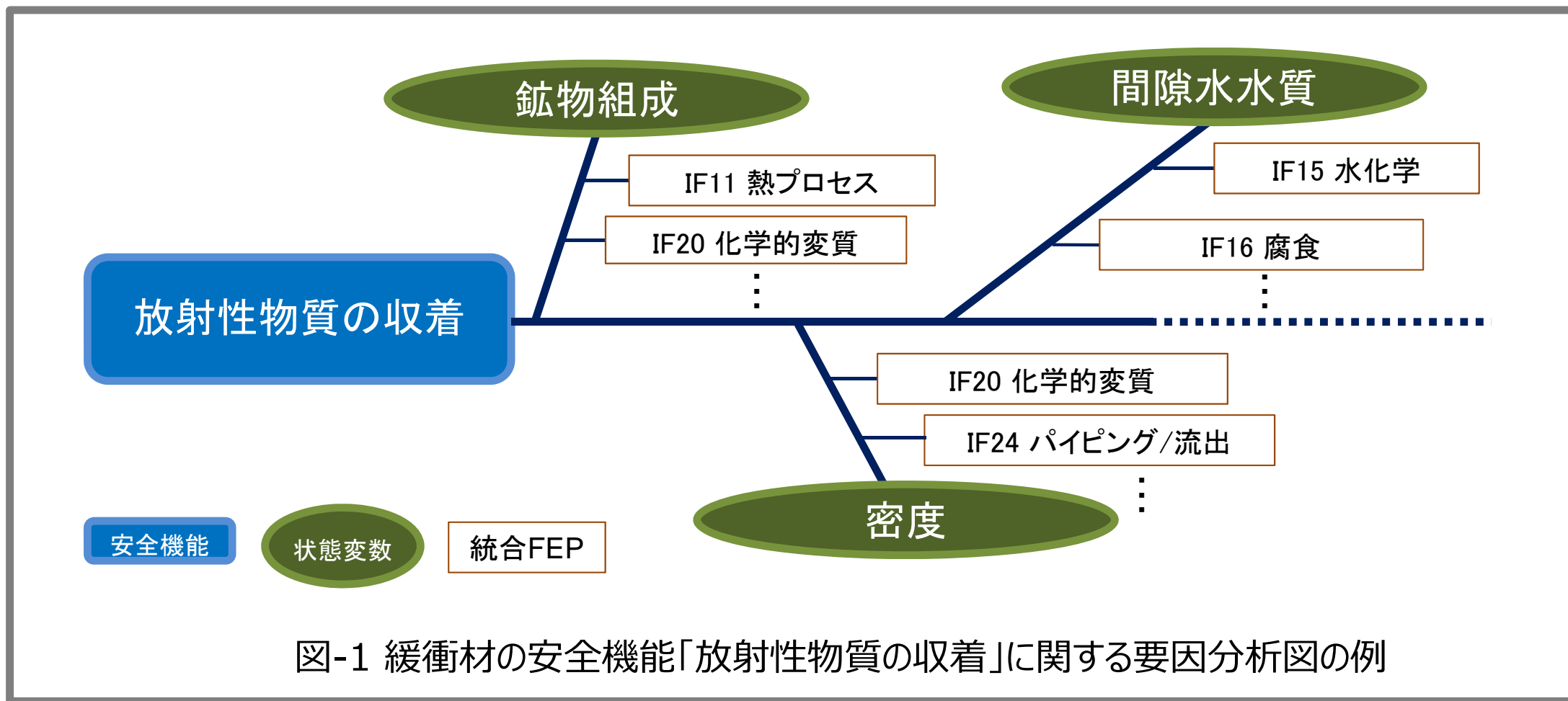
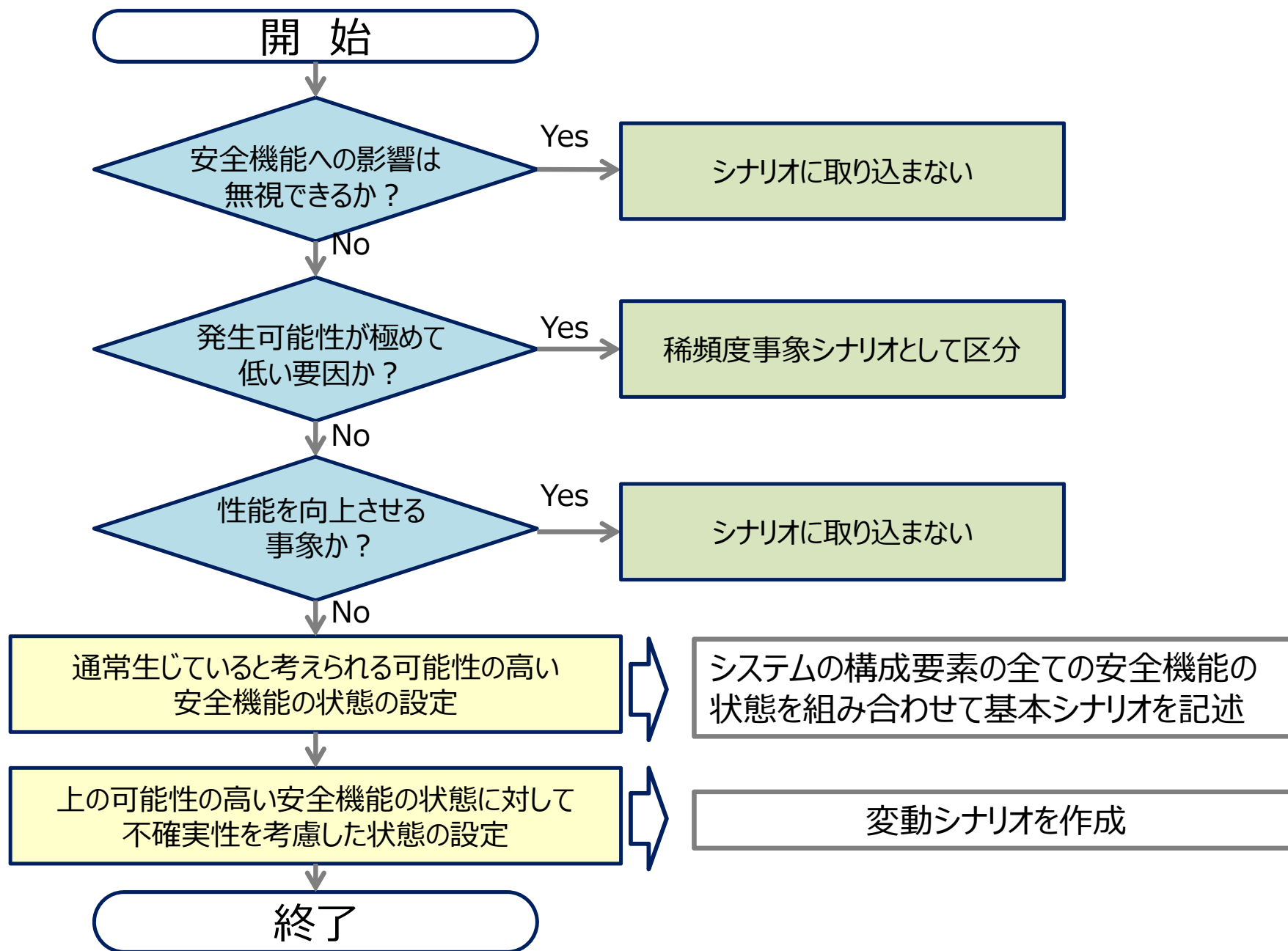
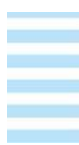


図-1 緩衝材の安全機能「放射性物質の収着」に関する要因分析図の例





ご説明の内容

1. 安全評価の基本的枠組み
2. 安全評価の基本的手順
3. 安全評価シナリオの作成
- 4. 基本シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析**
5. 変動シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
6. 稀頻度事象シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
7. 人間侵入シナリオの評価
8. 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
9. まとめと今後の取り組み

解析ケース設定の例 (1/4)

期間：閉鎖後から放射性核種の移行の開始まで (T1, T2)

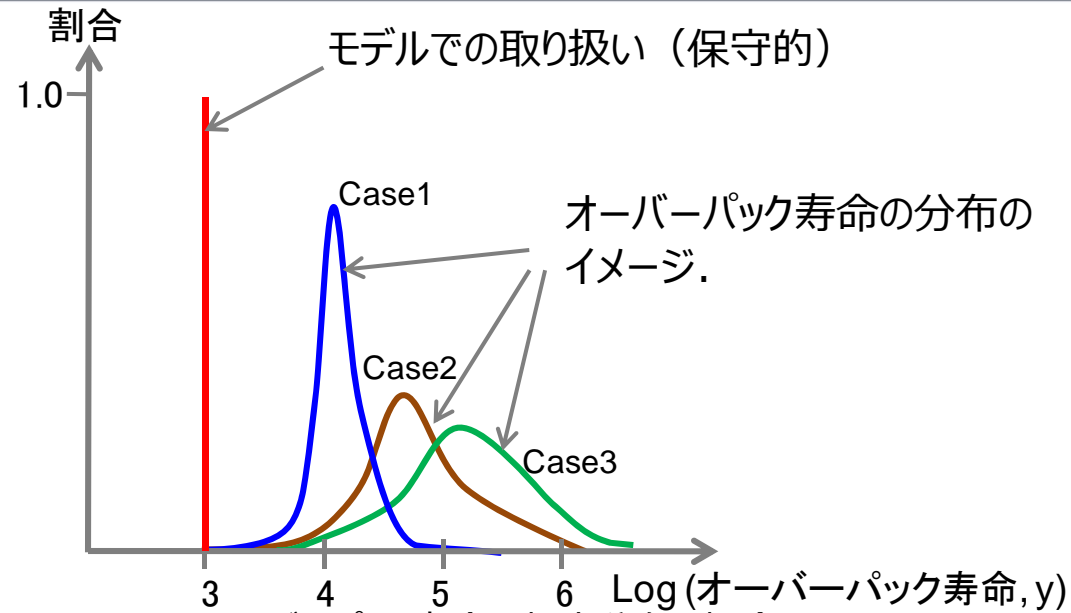
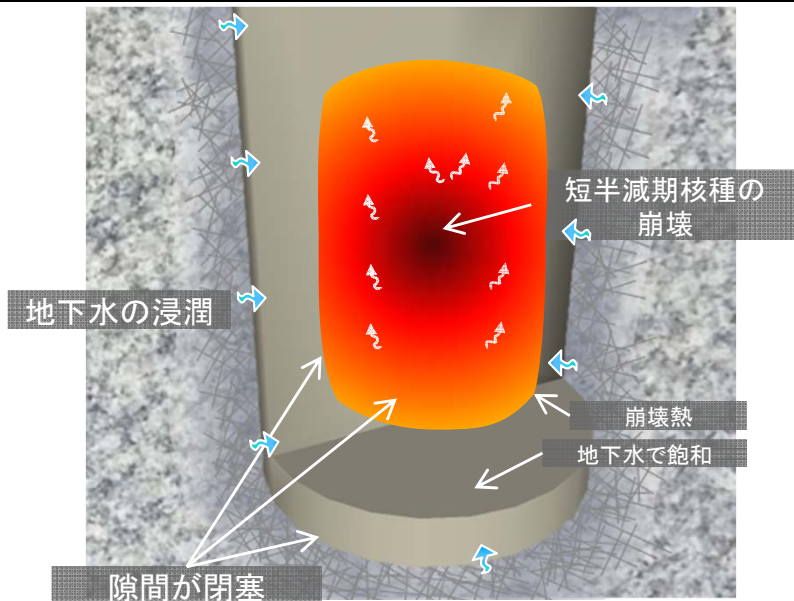


図-1 オーバーパック寿命の頻度分布の概念図

基本シナリオ	核種移行解析上の取り扱いの考え方 (解析ケースの設定)
<ul style="list-style-type: none"> • 緩衝材は数十年～数百年程度で水で満たされる。 • 廃棄体からの発熱により近傍の温度は一時上昇。放射性核種が移行を開始する時期には、ほぼ元の地温に近づく。 • オーバーパックは、坑道内に残存する酸素により表面から11mm程度腐食し、その後の還元環境下では腐食速度が低下し、1000年までに6mm程度進行する。最新の知見に基づけば、現在の設計厚さ190mmでは17,000年程度閉じ込め機能を維持する可能性が示唆されている。 	<ul style="list-style-type: none"> • オーバーパックの寿命を、これまでに国際的なレビューを受けた値である1000年とし、この時期に4万本のオーバーパックがいっせいに閉じ込め機能を失うとする。

期間：放射性核種の移行の開始以降(T3)

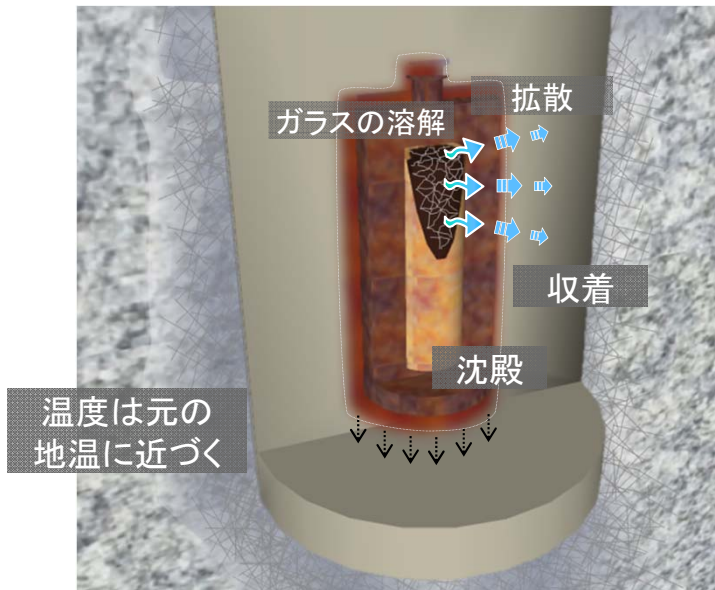


図-1 廃棄体近傍の核種移行の概念図

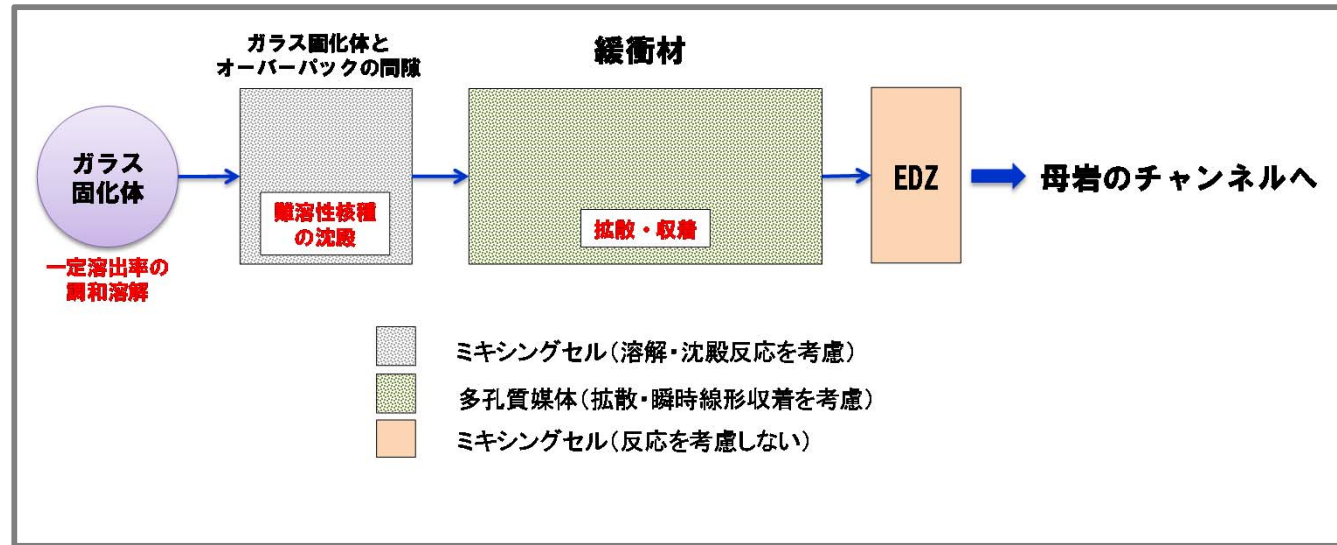


図-2 人工バリア中の核種移行解析モデルの概念図

基本シナリオ	核種移行解析上の取り扱いの考え方 (解析ケースの設定)
<ul style="list-style-type: none"> •オーバーパックの開口部から侵入した地下水にガラス固化体が接触し、放射性核種がガラスの溶解とともにゆっくりと地下水に溶解。 •放射性核種の溶解は溶解度を上限として抑制。 •地下水中の放射性核種は緩衝材中を拡散により移行する。この際、放射性核種は鉱物に収着し移行が遅延される。 •緩衝材中を移行した放射性核種はやがて母岩に移行する。 	<ul style="list-style-type: none"> •オーバーパックの存在は考慮しない (移行の抵抗なし)。 •ガラスの溶解速度は長期の浸出試験をふまえて保守的に設定。 •ガラス固化体の近傍での放射性核種の沈殿を考慮。 •緩衝材中の収着と拡散を考慮。

解析ケース設定の例 (3/4)

期間：放射性核種の移行の開始以降(T3)

廃棄物 : TRU等廃棄物
対象スケール : ニアフィールドスケール

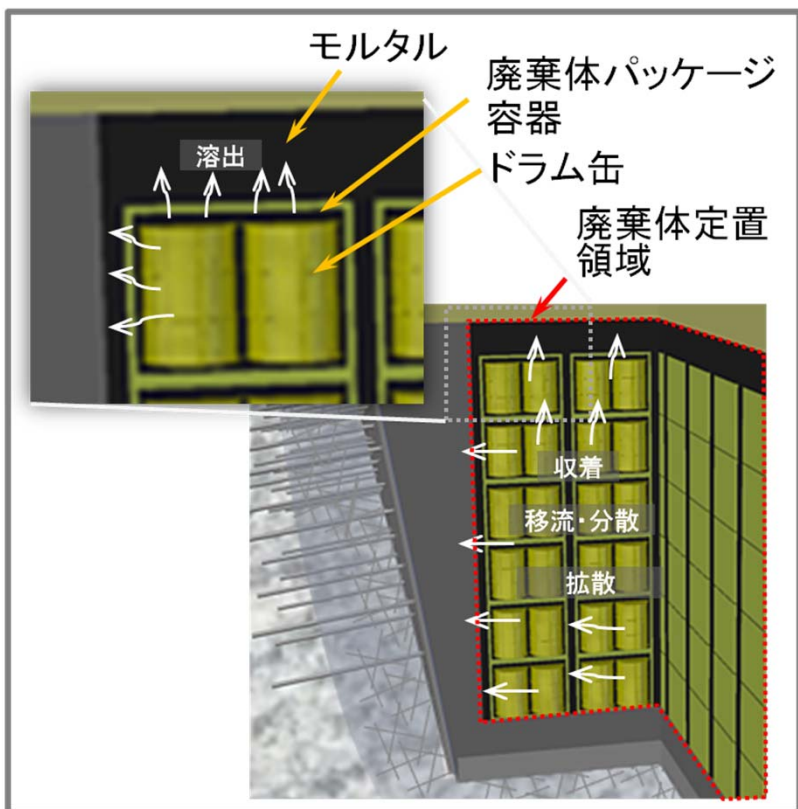
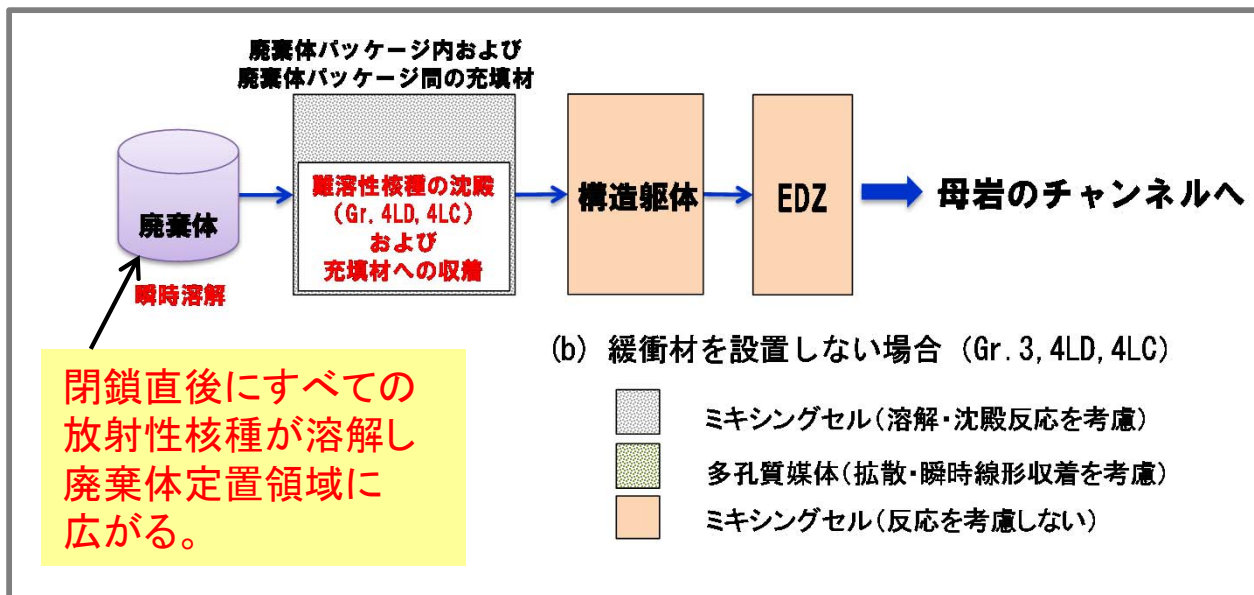


図-1 廃棄体近傍の核種移行の概念図



閉鎖直後にすべての放射性核種が溶解し廃棄体定置領域に広がる。

図-2 人工バリア中の核種移行解析モデルの概念図 (TRU等廃棄物処分場 緩衝材敷設なしのケース)

基本シナリオ	核種移行解析上の取り扱いの考え方
<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体パッケージが地下水に接触し、廃棄体から溶出した放射性核種は、廃棄体や廃棄体パッケージ内に充填されたセメントに収着しつつ、母岩に向かい移行する。 	<ul style="list-style-type: none"> 1次元のモデルで表現。 廃棄体定置領域における核種の移行挙動を簡略化し、閉鎖後にすべての放射性核種が瞬時に溶解し、廃棄体定置領域に広がる。

解析ケース設定の例 (4/4)

時期：放射性核種の移行の開始以降(T3)

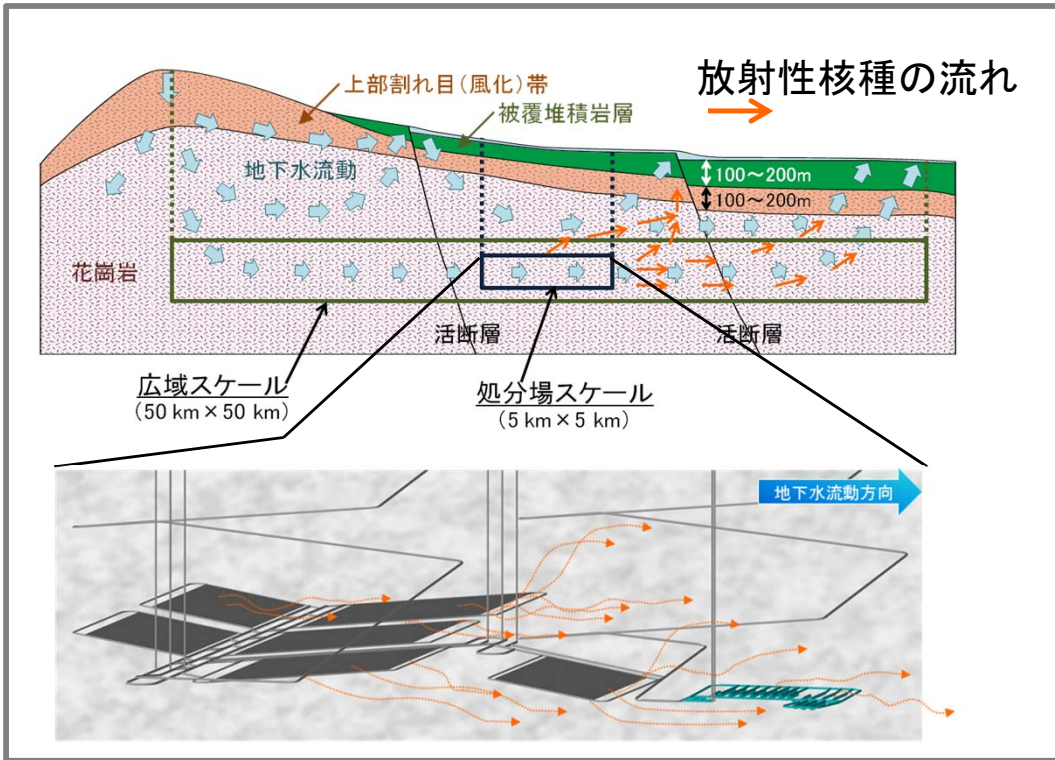


図-1 シナリオにおける放射性核種の移行の概念 (深成岩類)

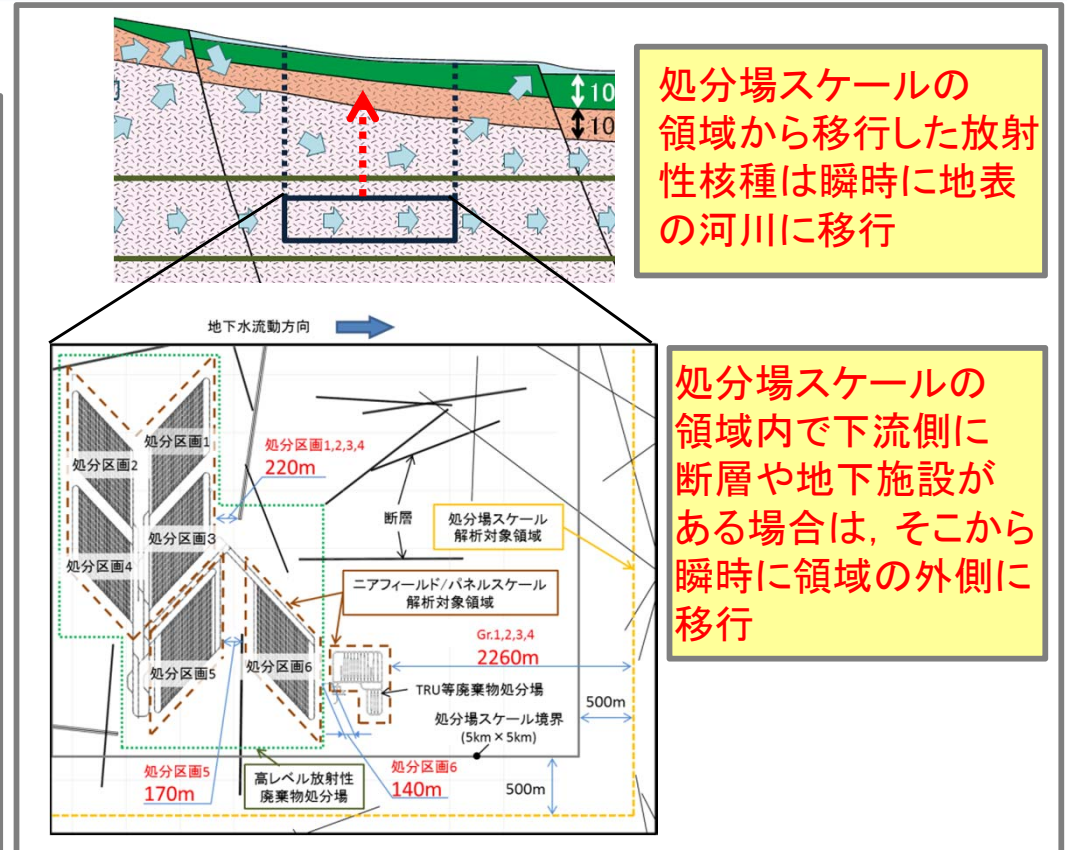


図-2 モデルにおける放射性核種の移行の取り扱い (深成岩類)

基本シナリオ	核種移行解析上の取り扱いの考え方 (解析ケースの設定)
<ul style="list-style-type: none"> 放射性物質は、岩盤の亀裂ネットワーク中の移流・分散によって処分場の周囲に移行。 処分場スケールの領域に大規模な断層などがある場合は、地下水の流れが変化し、一部の放射性核種はこの領域の外側に移行する。広域スケールの領域に移行した核種は地表まで到達する大規模な活断層などに沿って生活圏に移行する。 	<ul style="list-style-type: none"> 処分場スケールの領域中の移行距離は、下流側の大規模な断層や地下施設までの距離とする。これらが無い場合には、領域の下流端まで。 処分場スケールの領域から外側に移行した放射性核種は瞬時に河川に移行。河川への入り口は1箇所を設定 (空間的な広がりを無視)。

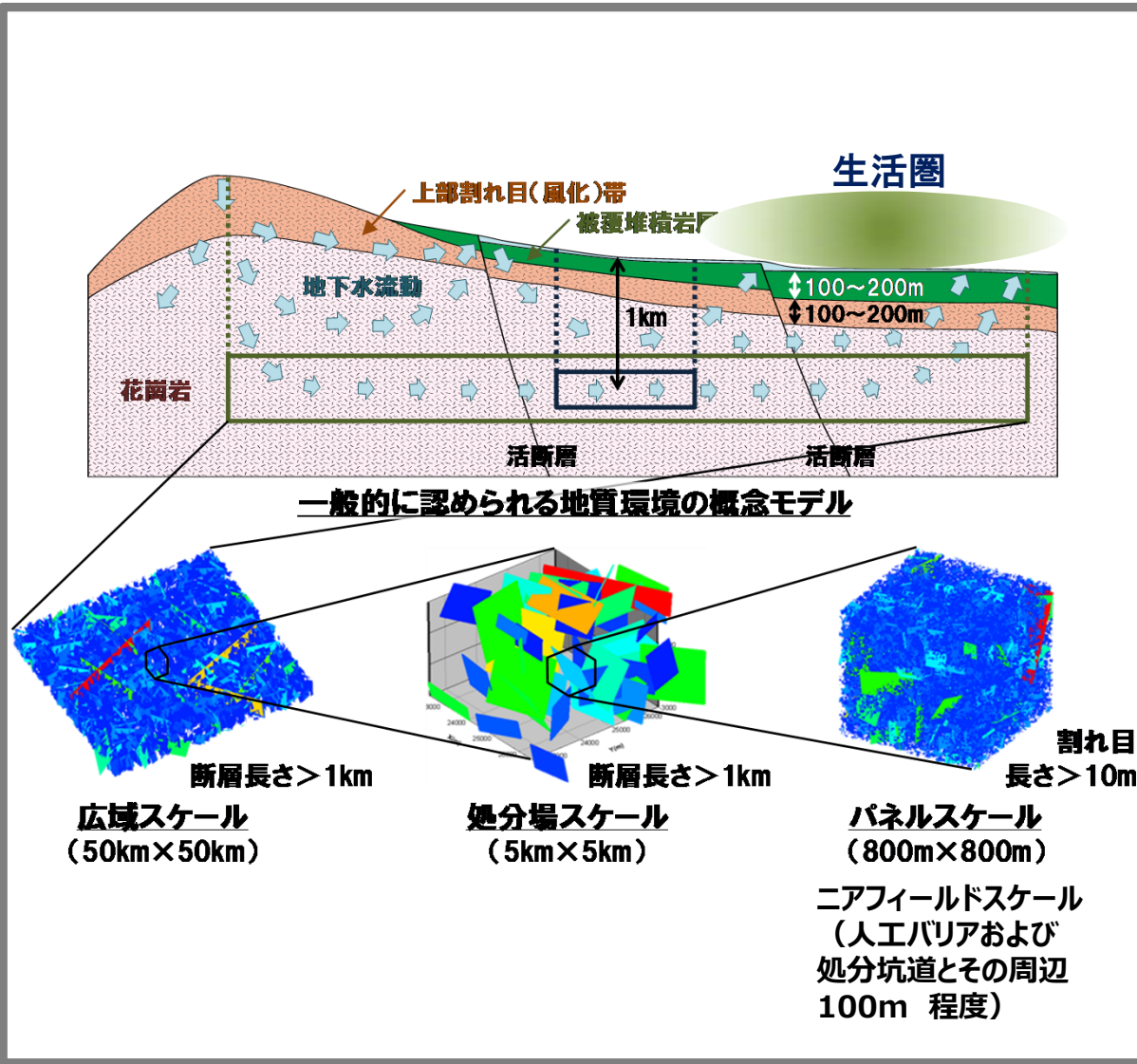


図-1 空間スケール (深成岩類の例)

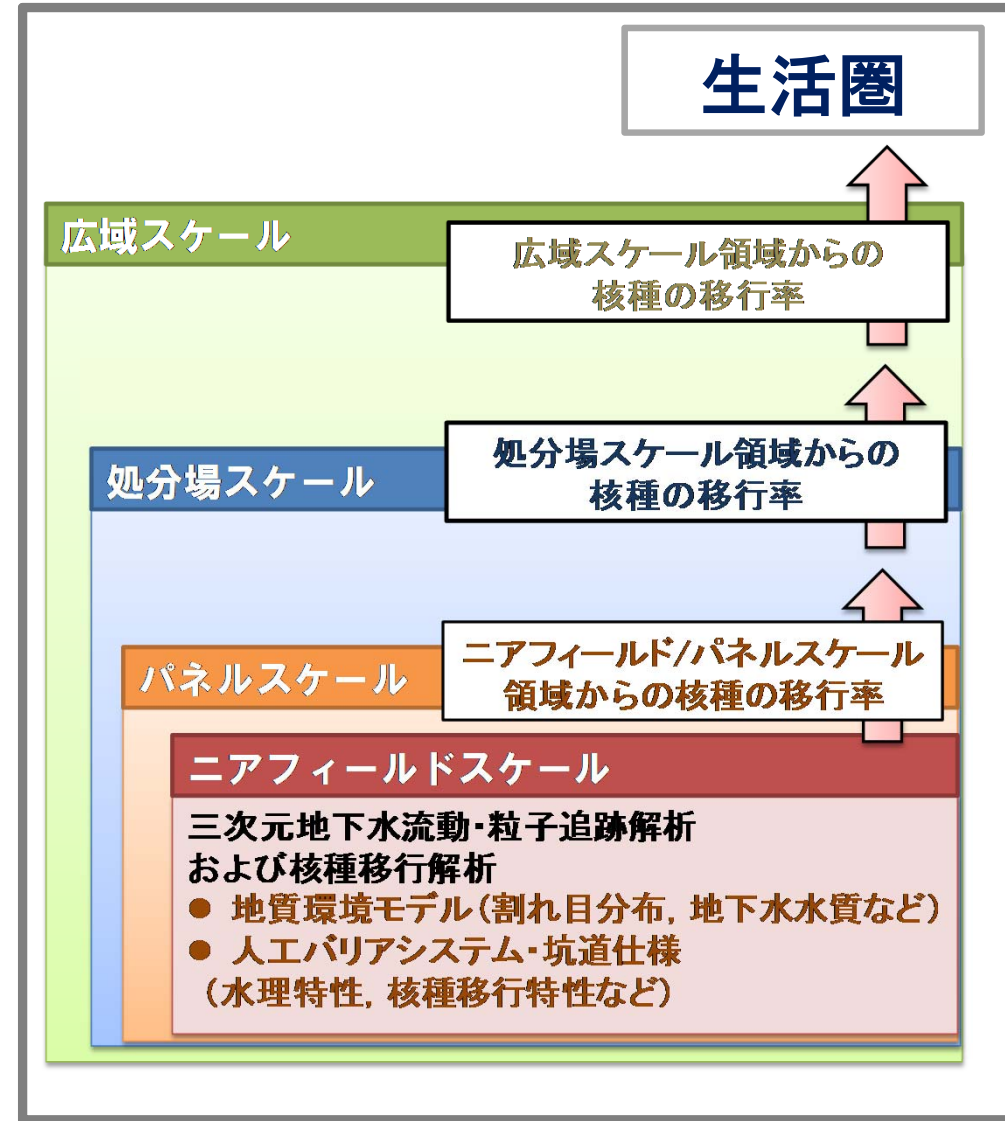


図-2 空間スケール間の核種の移行の概念

核種移行解析で考慮する空間スケール

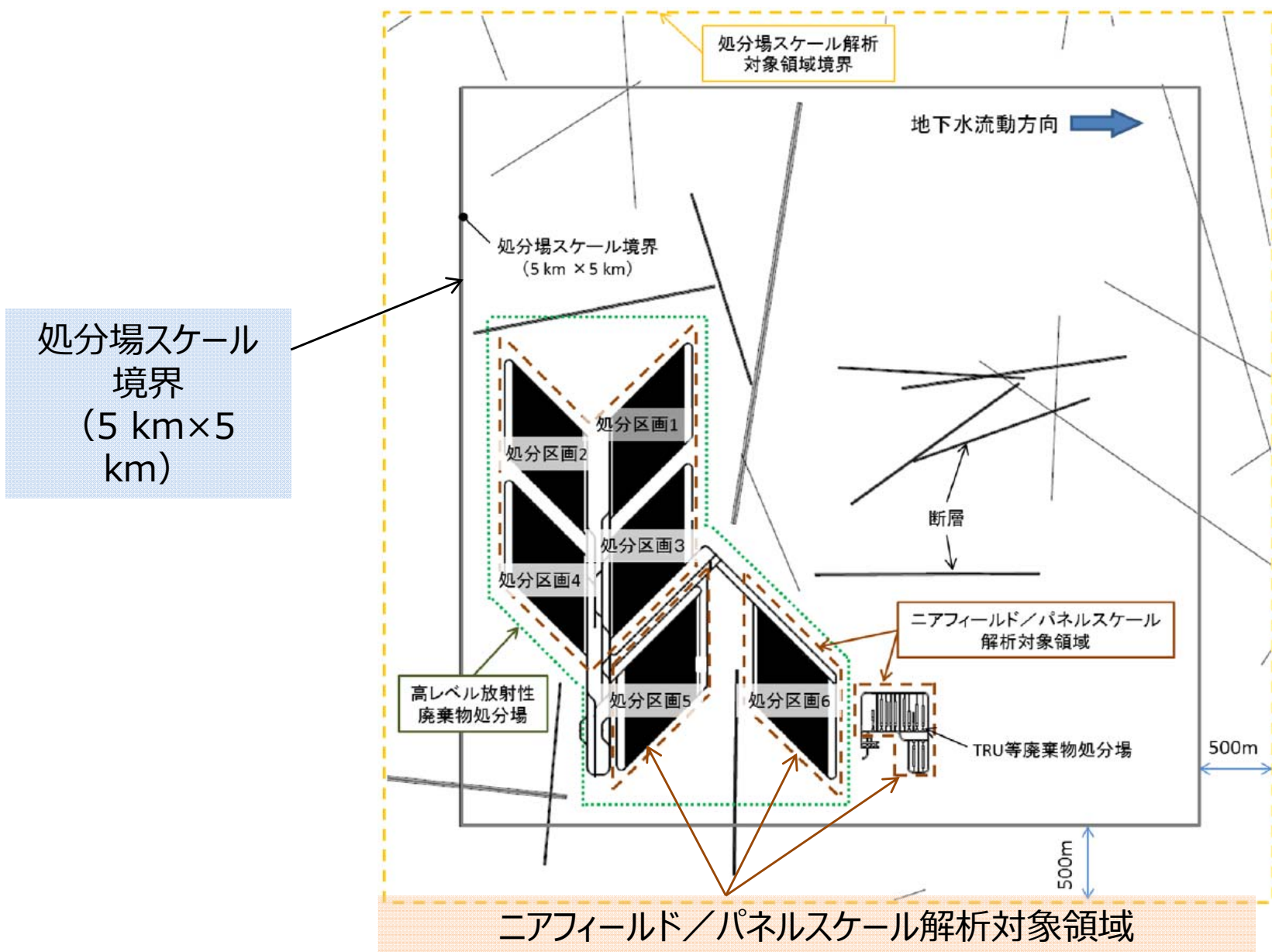


図-1 核種移行解析で考慮する空間スケールの設定の例

(深成岩類を対象とした高レベル放射性廃棄物処分場 (縦置き・ブロック方式) とTRU等廃棄物処分場の併置の例)

モデル化の方針

- 人工バリアおよび母岩の特徴に即して，ニアフィールドスケールの領域における放射性核種の移行経路や移行距離，移行速度などを精緻に評価する

方針に基づく対応策

- 処分場の構成要素を三次元空間に忠実に表現
- 母岩中の割れ目の空間分布を割れ目ネットワークモデルで表現
- 三次元地下水流動解析・粒子追跡解析を実施
- 核種移行解析においては，さまざまなシナリオに対して多岐にわたる核種を対象とした多数の計算を実施できるように，三次元の粒子追跡解析の結果に基づき簡略的なモデルを作成

高レベル放射性廃棄物処分場 (縦置き・ブロック方式)

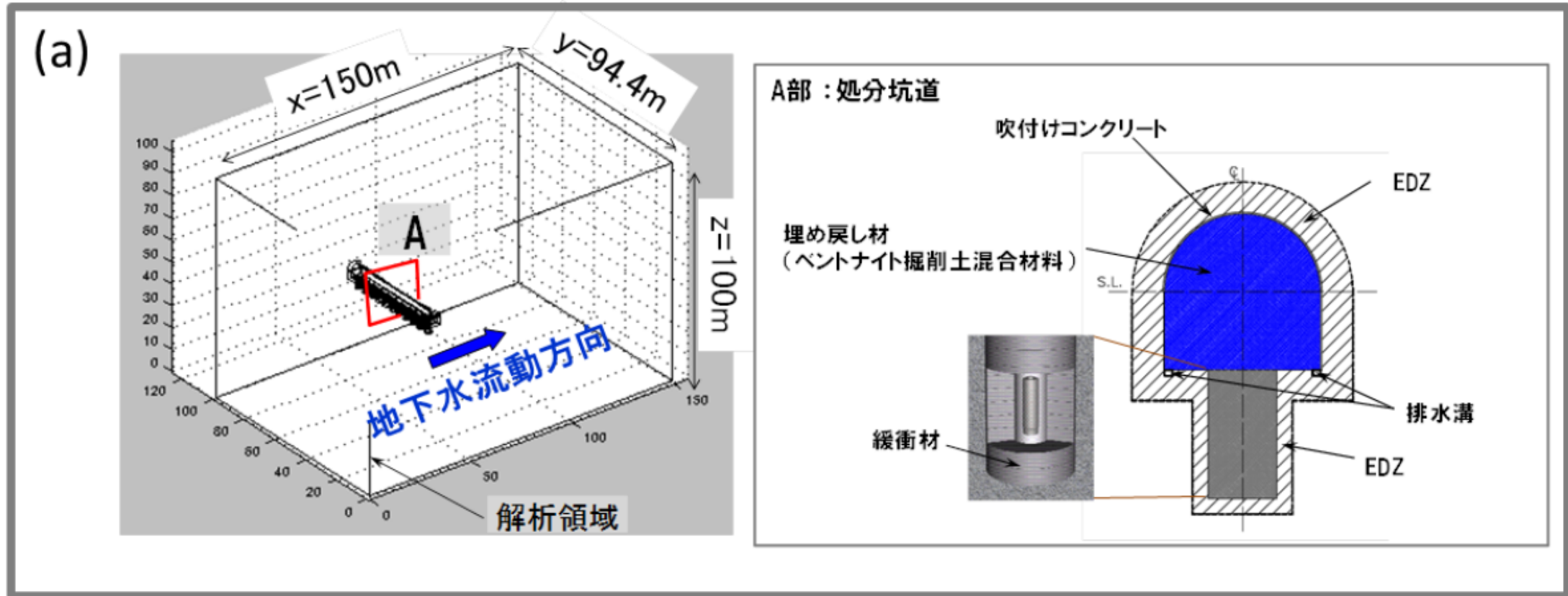


図-1 深成岩類の処分場, 先新第三紀堆積岩類の処分場におけるニアフィールドスケールの三次元地下水流動・粒子追跡解析の解析体系例

TRU等廃棄物処分場 (グループ2)

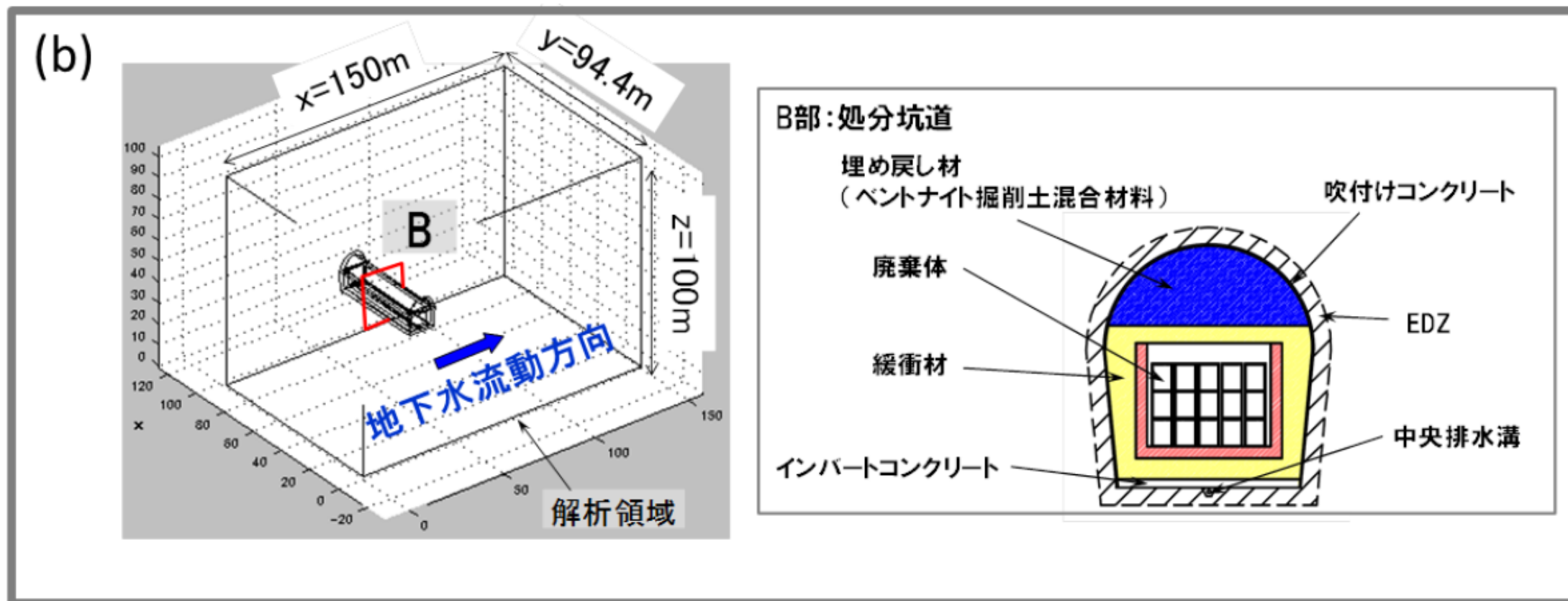


図-1 深成岩類の処分場, 先新第三紀堆積岩類の処分場におけるニアフィールドスケールの三次元地下水流動・粒子追跡解析の解析体系例

高レベル放射性廃棄物処分場 (縦置き・ブロック方式)

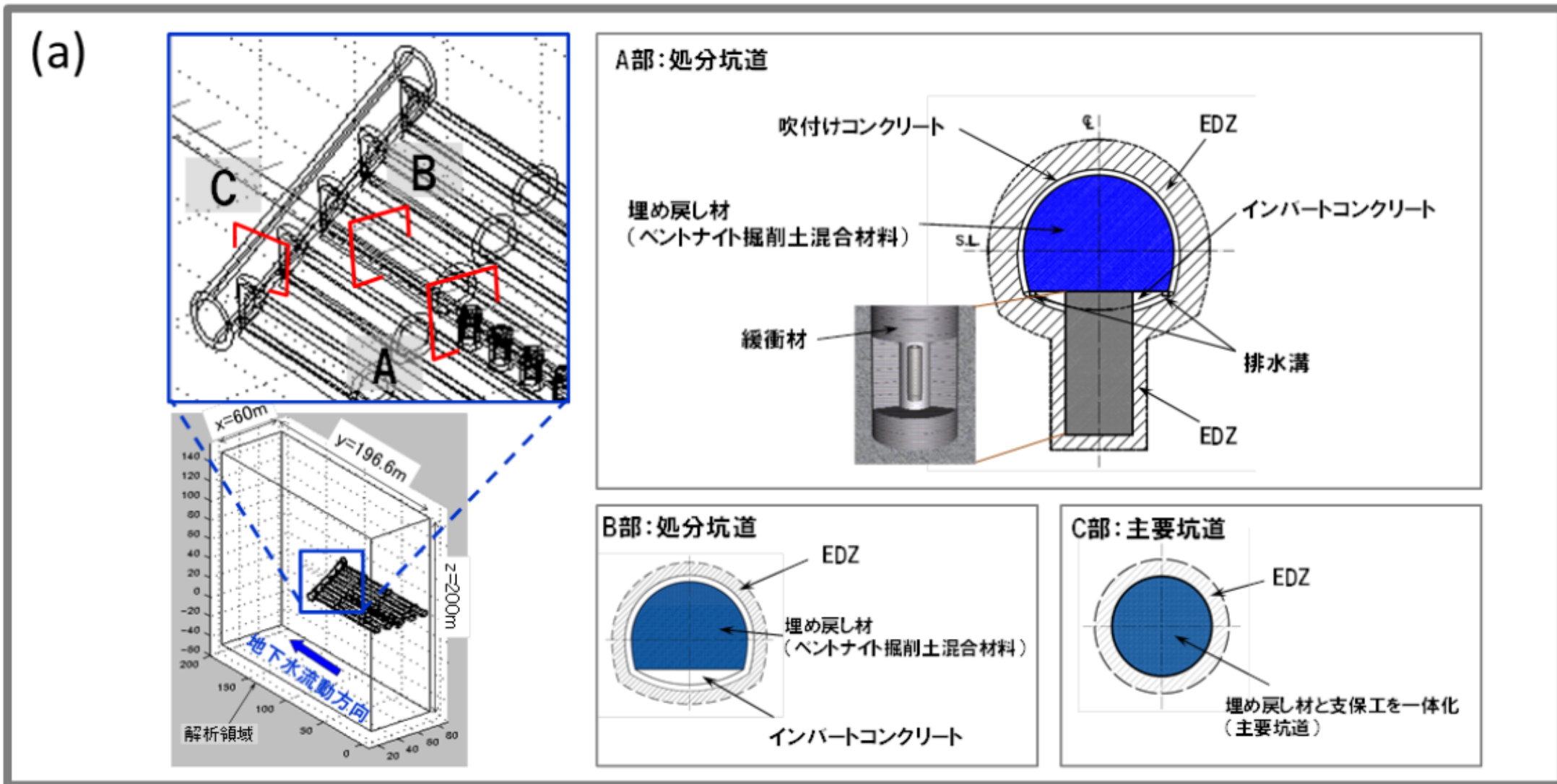


図-1 新第三紀堆積岩類の処分場におけるニアフィールドスケールの三次元地下水流動・粒子追跡解析の解析体系例

TRU等廃棄物処分場 (グループ2)

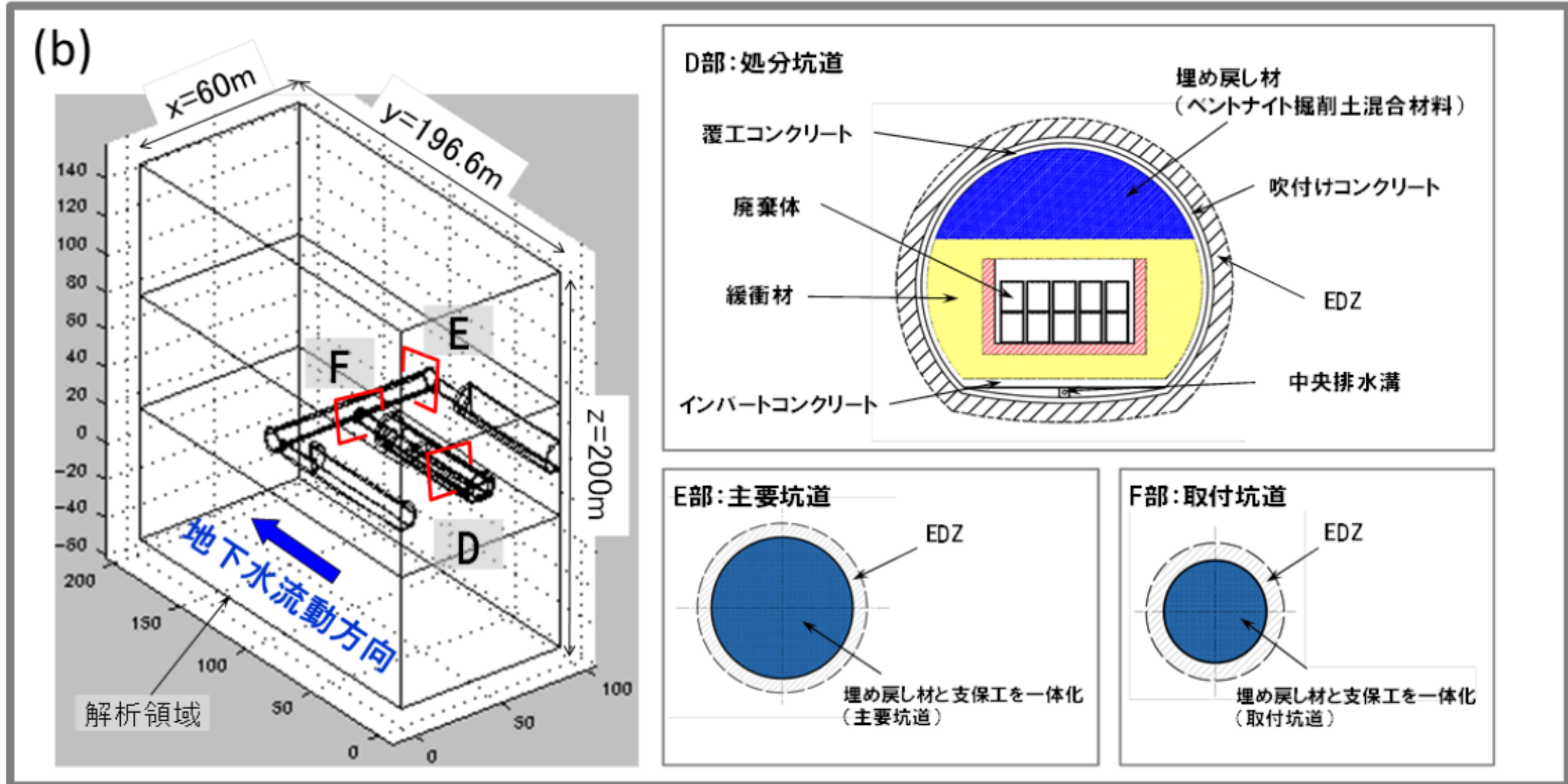
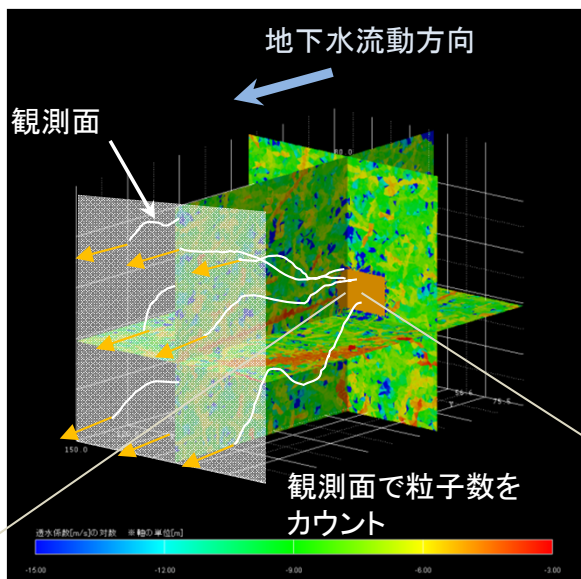


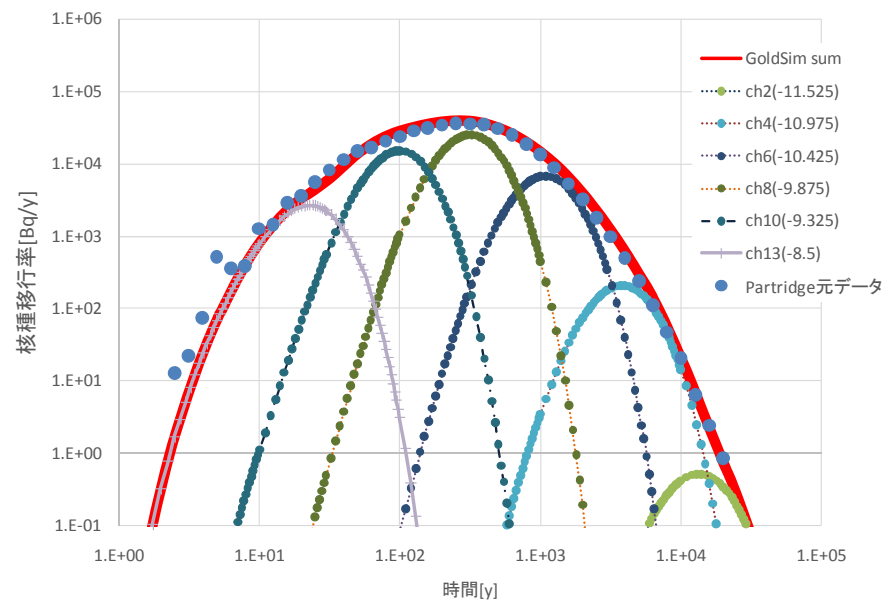
図-1 新第三紀堆積岩類の処分場におけるニアフィールドスケールの三次元地下水流動・粒子追跡解析の解析体系例

簡略化した核種移行解析モデルの作成

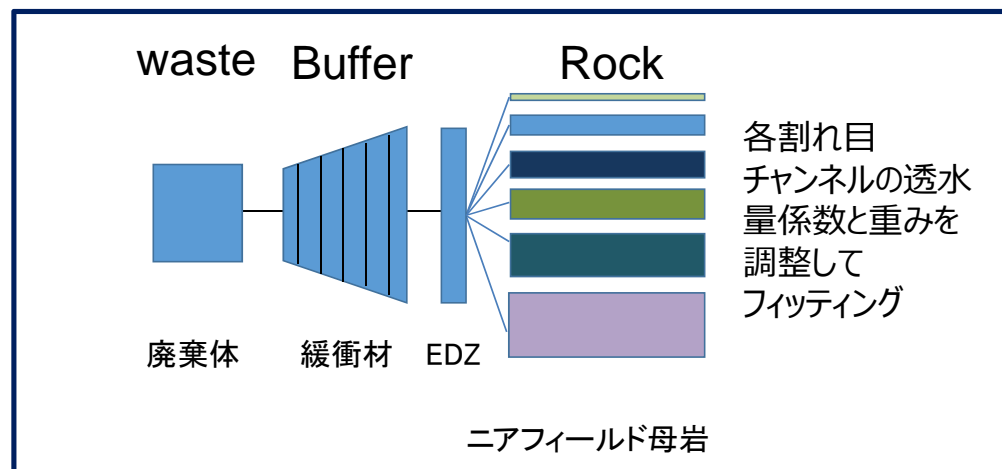
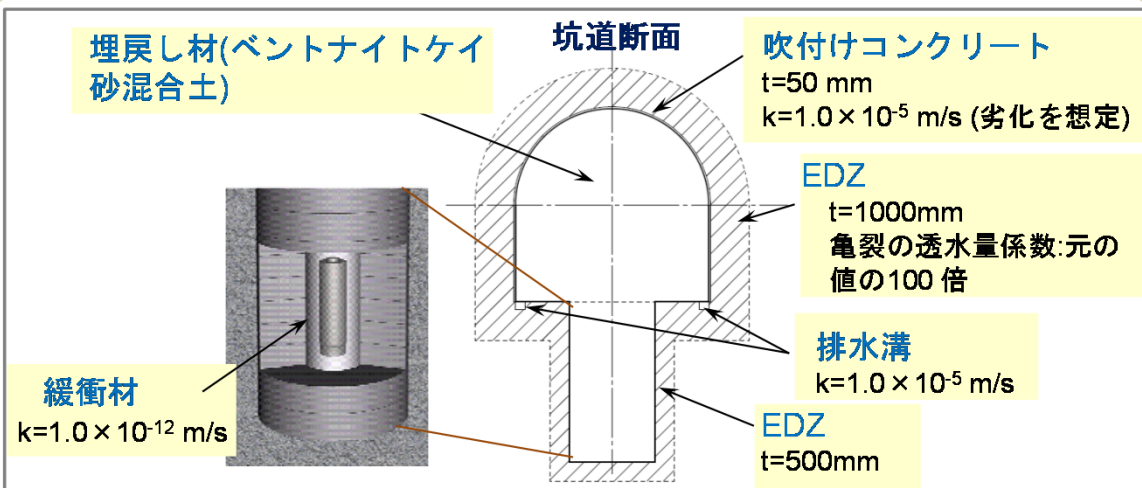
— 三次元の粒子追跡解析に基づく一次元モデルの構築 —



三次元粒子追跡解析(解析コード: Partridge)



フィッティング



一次元の物質移行解析(Goldsim)

図-1 ニアフィールドの簡略化核種移行解析モデルの構築

割れ目ネットワークモデルの取り扱い

- 割れ目ネットワークモデル：母岩の割れ目に関する空間的な特性を統計的に扱い計算機上で作成
⇒ 計算機上で作成された1つのネットワークモデルは特定の場合を決定論的に再現するものではない
- 「**代表性のある**」地下水流動・核種移行挙動を評価するためには、統計的に十分な数の割れ目ネットワークモデルを対象とした粒子追跡解析を行い、「**平均的な**」粒子移行挙動に基づいた一次元の核種移行解析モデルの設定が必要
- ネットワークモデルでの多様性を少数のケースで考慮可能とするために、100ケースの割れ目ネットワークモデルを対象とした地下水流動解析を行い、解析対象領域の透水性を指標として粒子追跡解析に用いる割れ目ネットワークモデルを層別サンプリングにより抽出

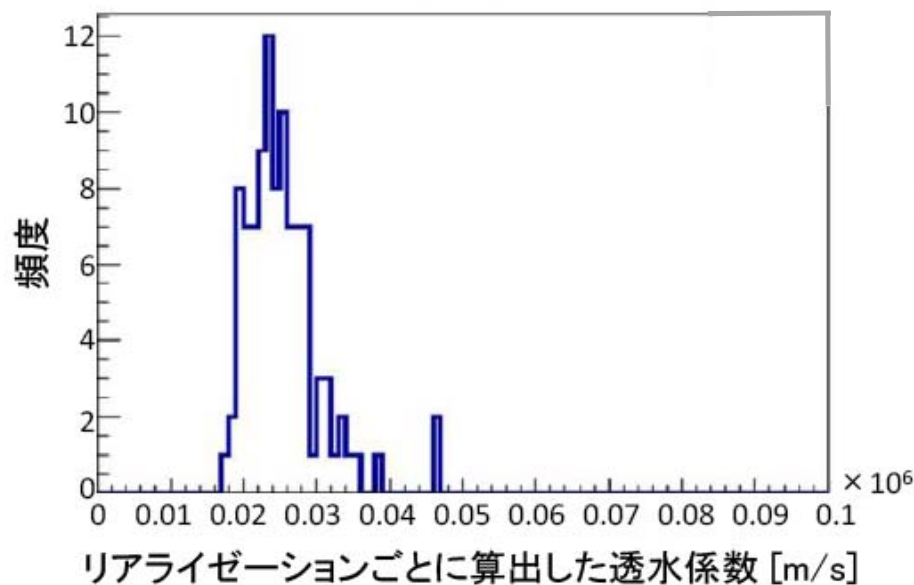


図-1 地下水流動解析結果（深成岩類，HLWの例）

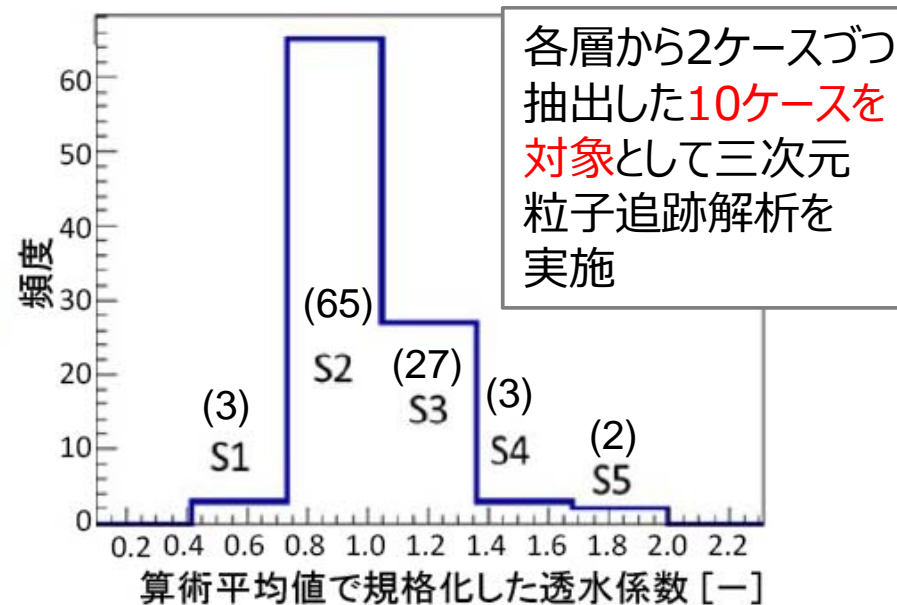
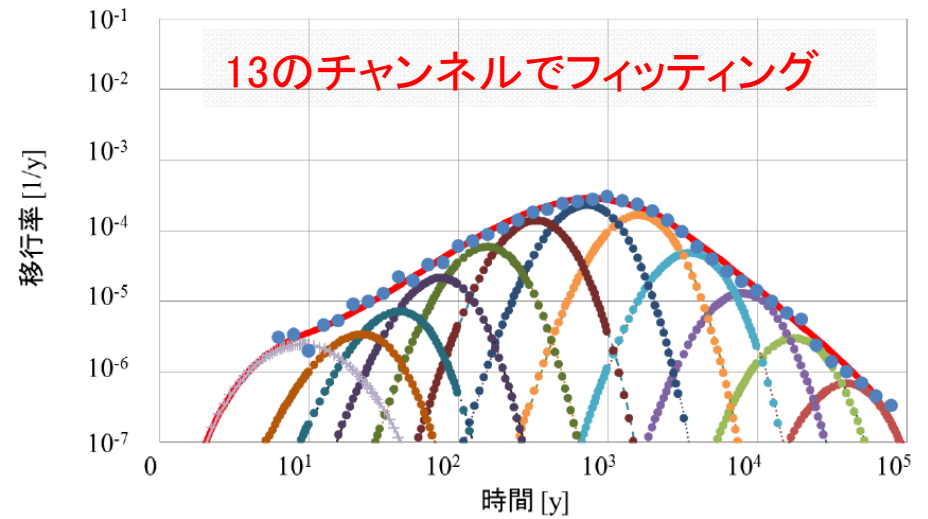
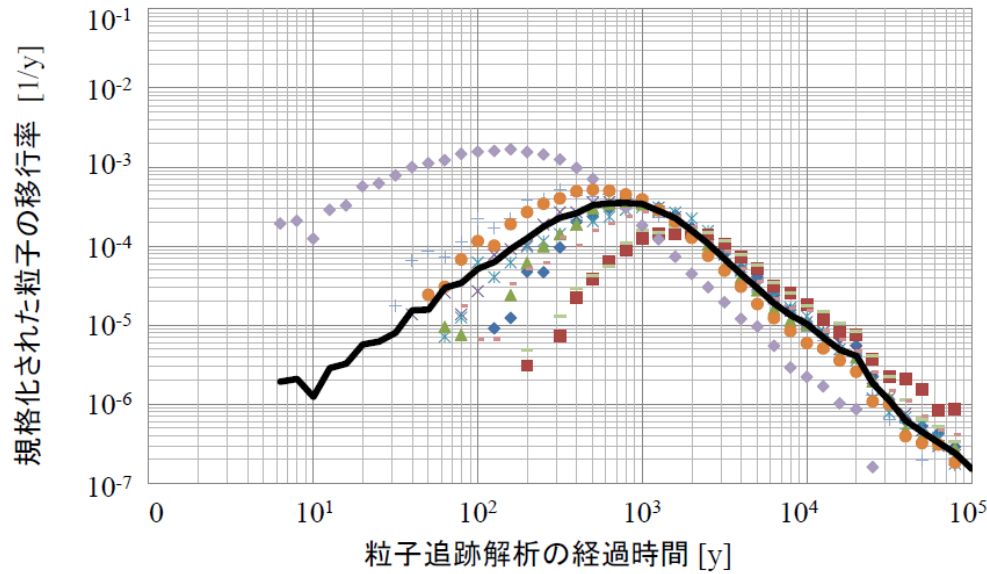
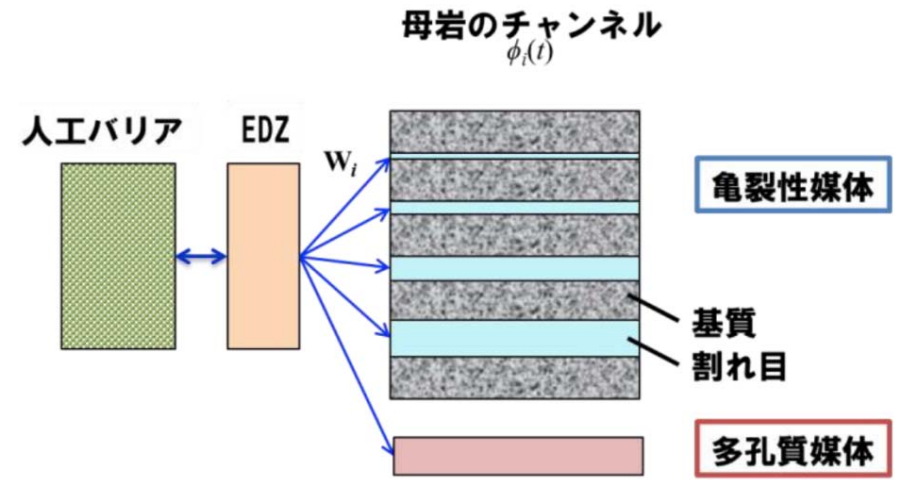
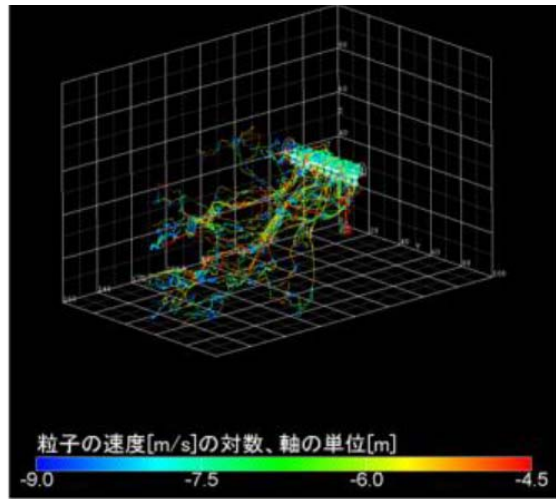


図-2 層別した透水係数のヒストグラム



- + リアライゼーションNo.14
- × リアライゼーションNo.20
- × リアライゼーションNo.42
- リアライゼーションNo.53
- ◆ リアライゼーションNo.15
- リアライゼーションNo.54
- ◆ リアライゼーションNo.55
- ▲ リアライゼーションNo.59
- リアライゼーションNo.66
- リアライゼーションNo.72
- 各リアライゼーションの頻度分布による重みを乗じて総和をとったトレーサ移行率

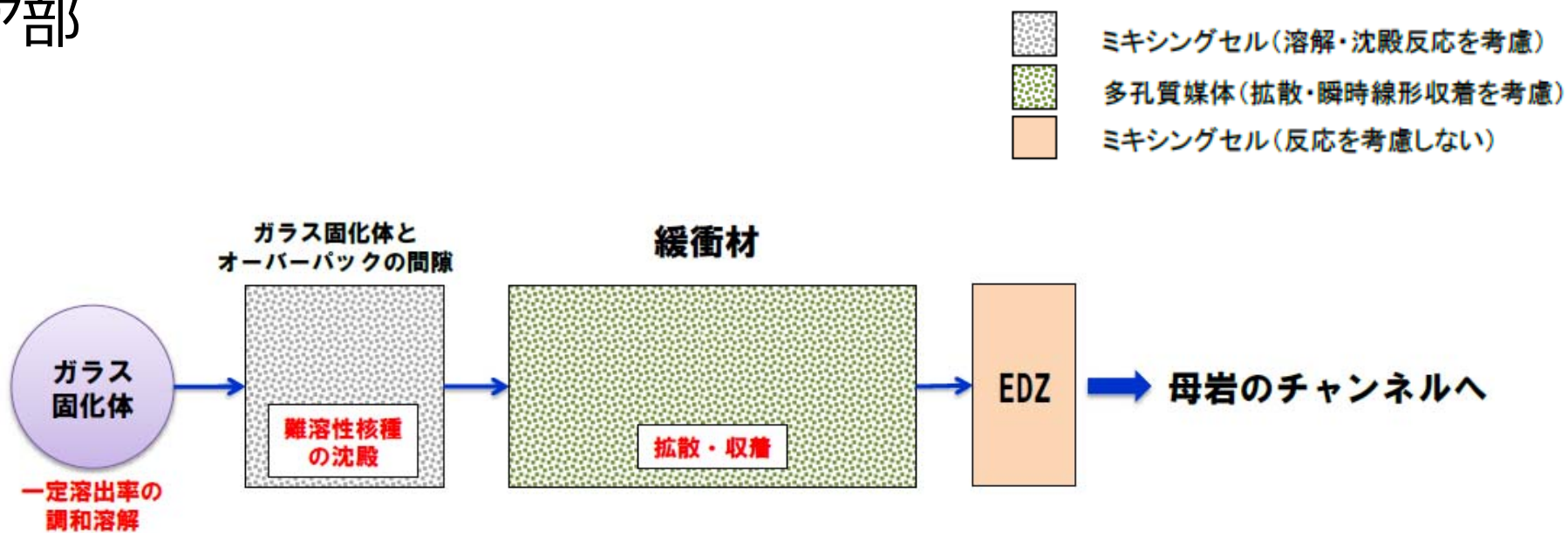
- 全チャンネルの合計
- - - チャンネル1(-12)
- チャンネル2(-11.65)
- . - . チャンネル3(-11.3)
- チャンネル4(-10.95)
- . - . チャンネル5(-10.6)
- チャンネル6(-10.25)
- . - . チャンネル7(-9.9)
- チャンネル8(-9.55)
- . - . チャンネル9(-9.2)
- . - . チャンネル10(-8.85)
- . - . チャンネル11(-8.5)
- . - . チャンネル12(-8.15)
- . - . チャンネル13(-7.8)
- $\phi_{3D}(t)$

()内は透水量係数 [m²/s]の対数

図-1 10ケースの粒子追跡解析結果の例 (深成岩類, HLWの例)

図-2 マルチチャンネルによるフィッティング (深成岩類, HLWの例)

人工バリア部



母岩のチャンネル部（基本ケース、 縦置き・ブロック方式の例）

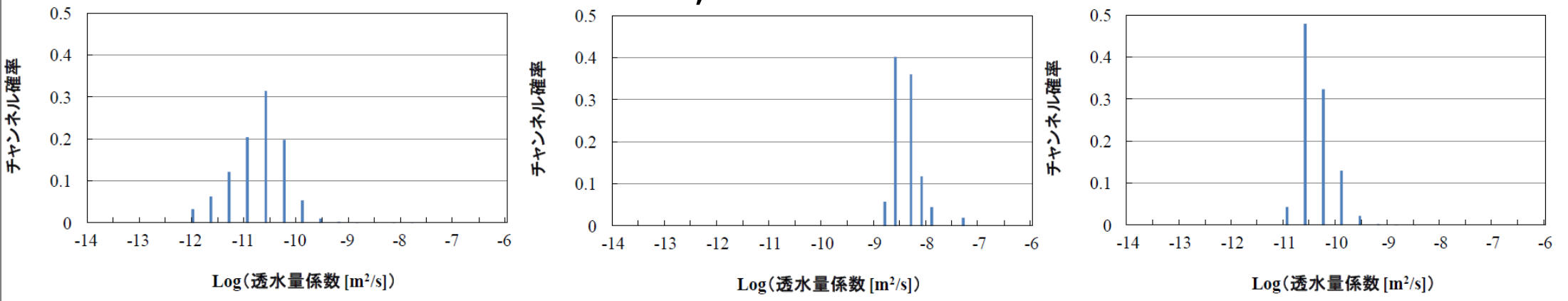


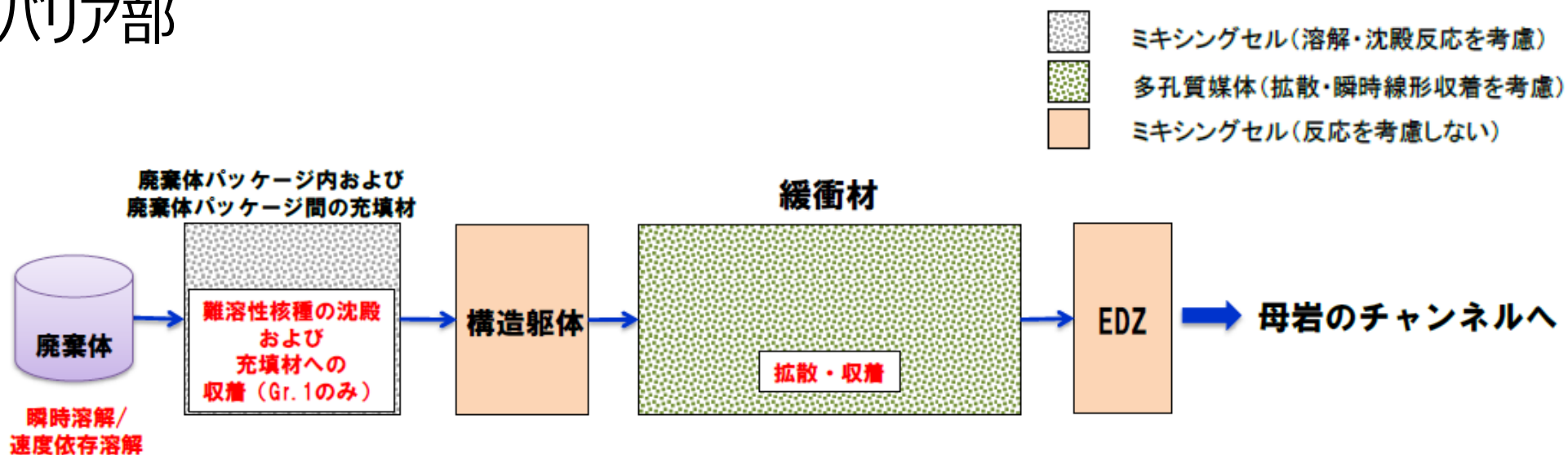
図-1 深成岩類

図-2 新第三紀堆積岩類

図-3 先新第三紀堆積岩類

簡略化した核種移行解析モデル (TRU等廃棄物処分場, 緩衝材あり)

人工バリア部



(a) 緩衝材を設置する場合 (Gr. 1, 2, 4HD, 4HH)

母岩のチャンネル部 (基本ケースの例)

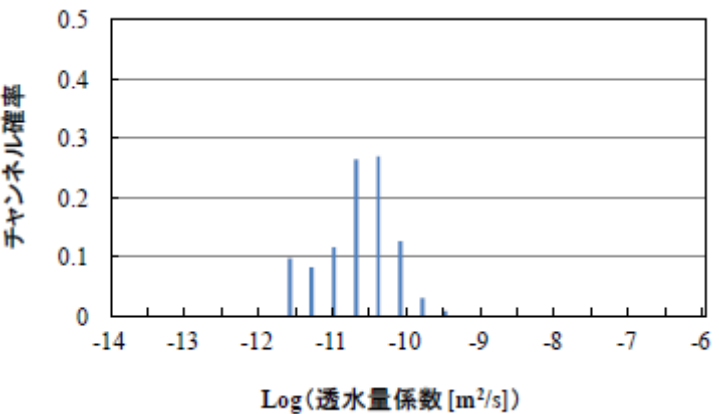


図-1 深成岩類

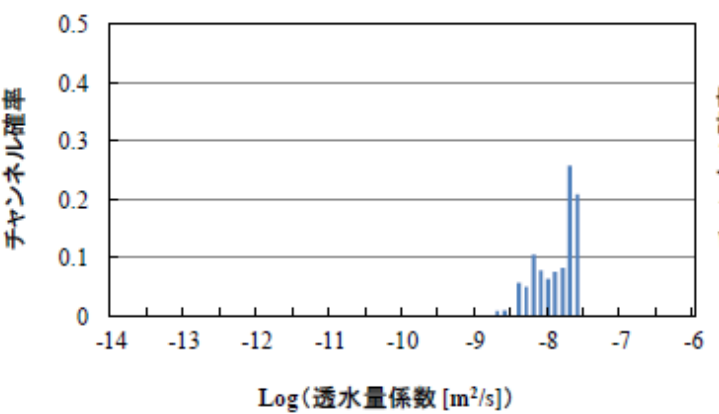


図-2 新第三紀堆積岩類

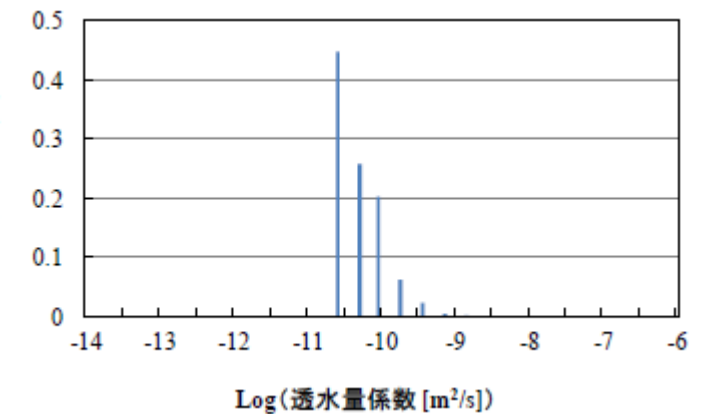
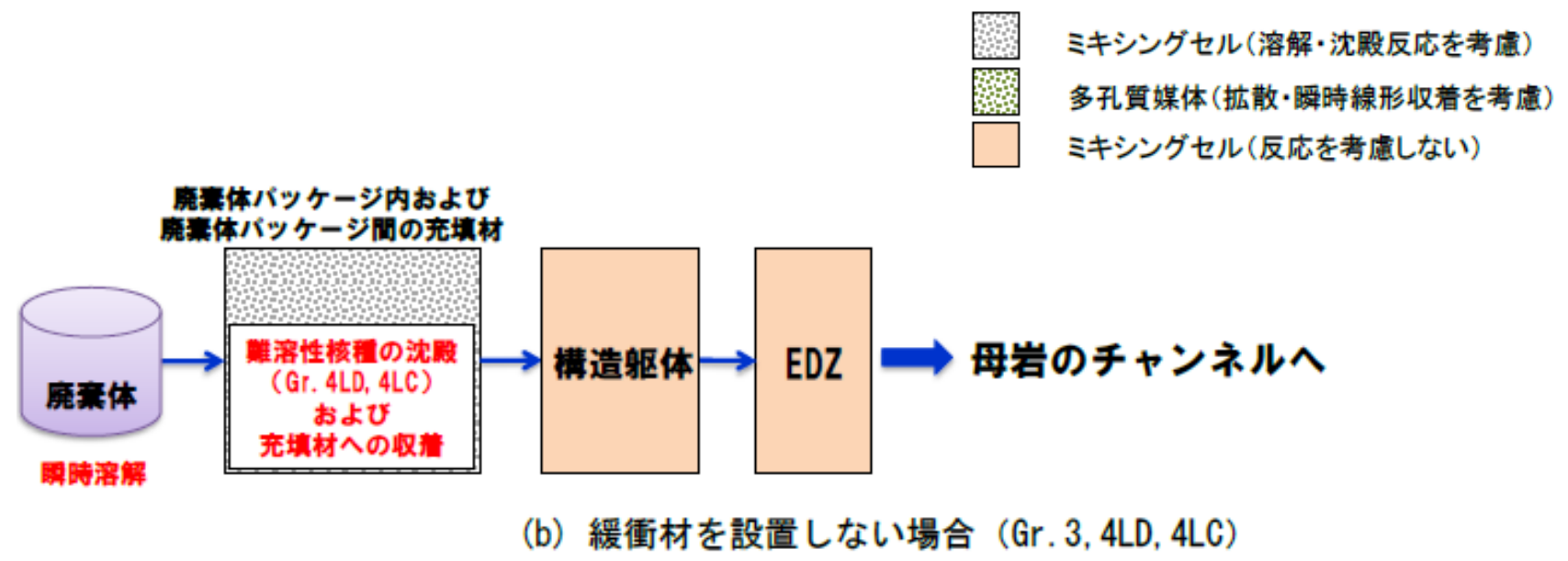


図-3 先新第三紀堆積岩類

簡略化した核種移行解析モデル (TRU等廃棄物処分場, 緩衝材なし)

人工バリア部



母岩のチャンネル部 (基本ケースの例)

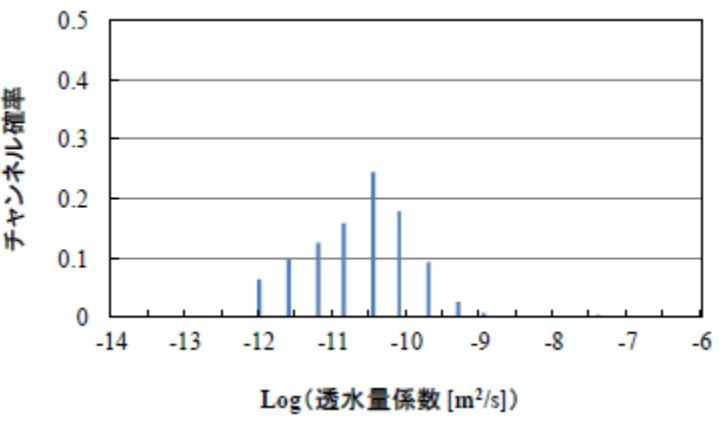


図-1 深成岩類

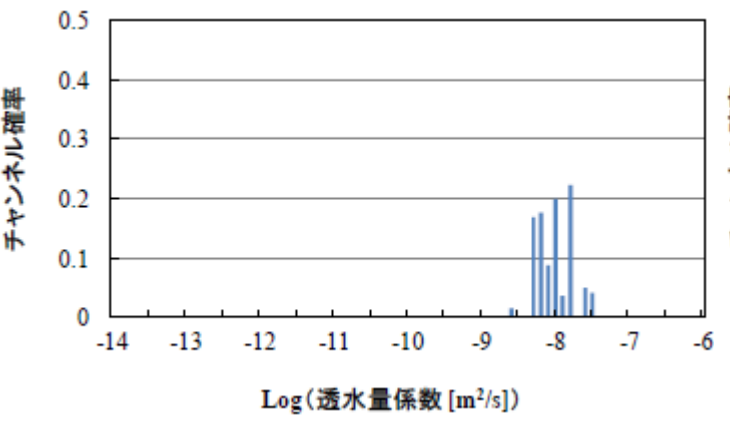


図-2 新第三紀堆積岩類

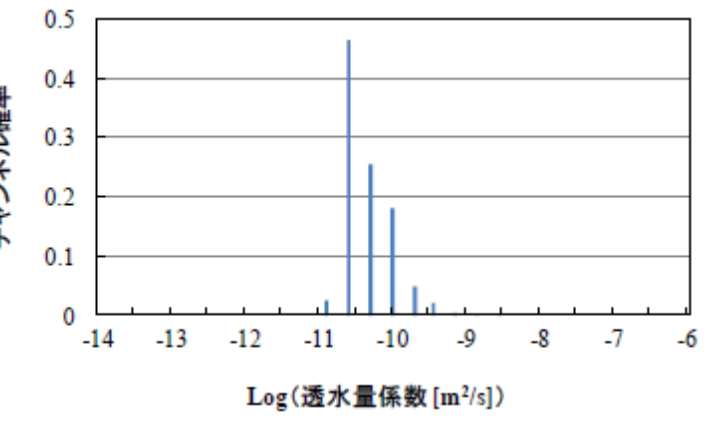


図-3 先新第三紀堆積岩類

処分場スケールのモデル構築 (1/5)

➤ 母岩を対象として粒子追跡解析を実施

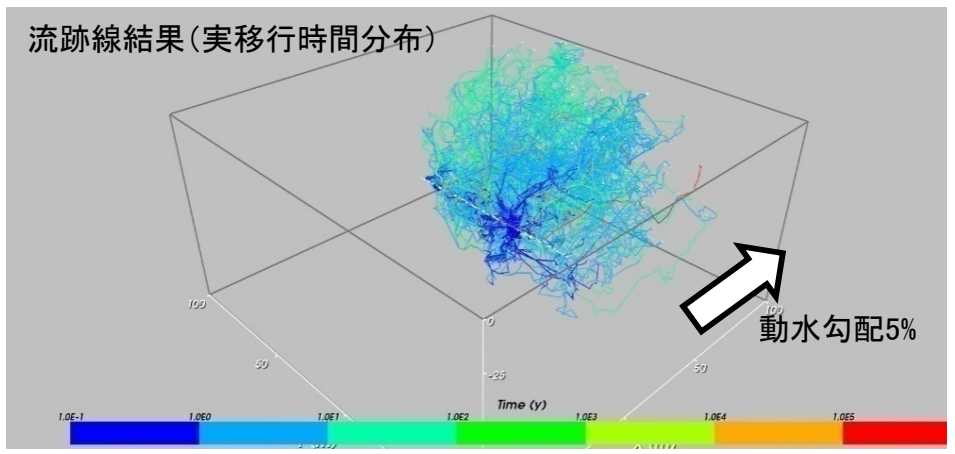


図-1 3次元地下水流動解析に基づく粒子追跡解析結果の例

	V_R :	実流速
$V_R = \frac{T}{e_{ave}} \cdot i = \frac{L}{t_R}$	T :	透水量係数
	L :	移行距離 ⇒ 100m
$T = \frac{L}{t_R \cdot i} \cdot e_{ave}$	t_R :	実移行時間
	i :	動水勾配 ⇒ 5%
	e_{ave} :	開口幅 ⇒ 経験則

流线ごとの平均実流速から割れ目の透水量係数を算定



一次元のマルチチャンネルモデルで表現

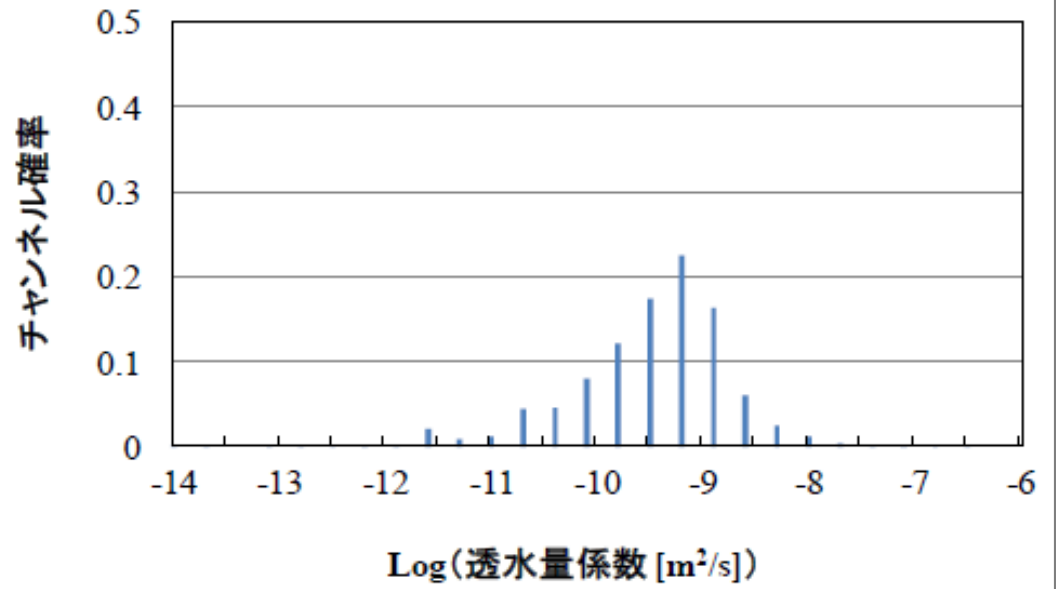
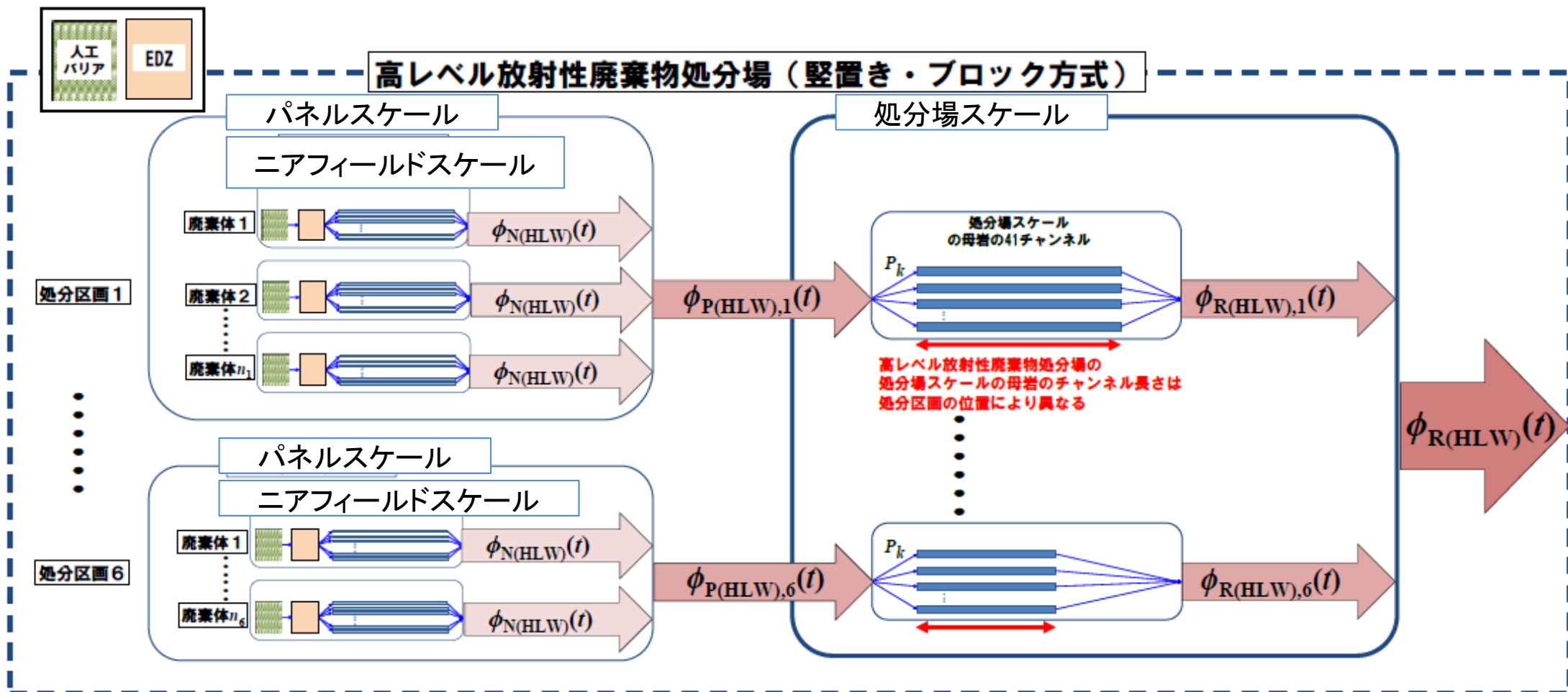


図-2 マルチチャンネルの重み分布 (深成岩類, 基本ケースの例)

処分場スケールのモデル構築 (2/5)

- $\left[\begin{array}{c} \text{パネルスケールからの} \\ \text{核種の移行率} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{ニアフィールドスケールの廃棄体1本} \\ \text{あたりからの核種の移行率} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{対象領域の廃棄体本数} \end{array} \right]$
- パネルスケールからの核種の移行率を処分場スケールのマルチチャンネルに入力



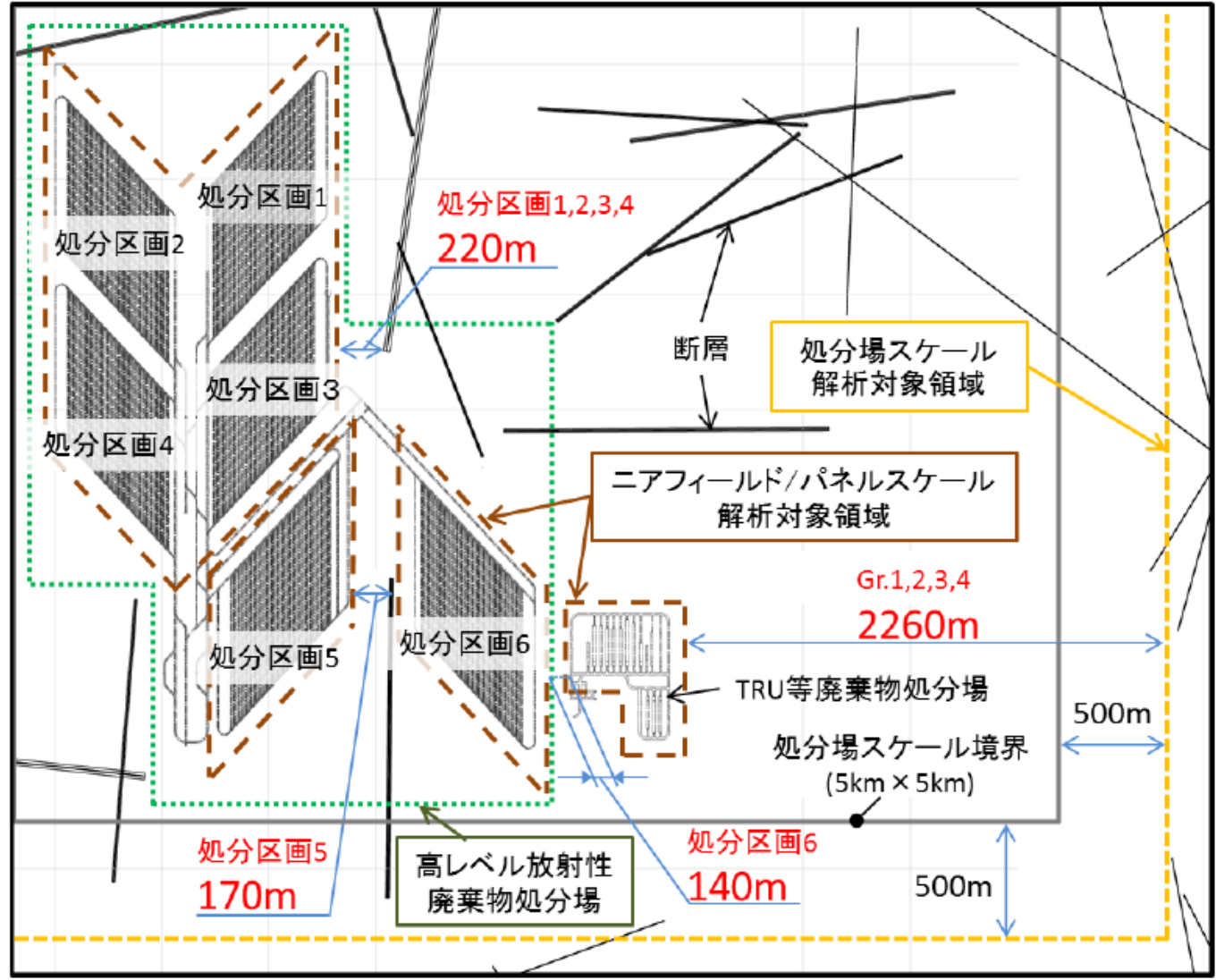
※ 処分場スケールからの核種移行率を直接生活圏に入力（広域スケールを保守的に取扱い）

処分場スケールのモデル構築 (3/5)

➤ 処分場スケールの移行距離 (深成岩類の例)

縦置き・ブロック方式

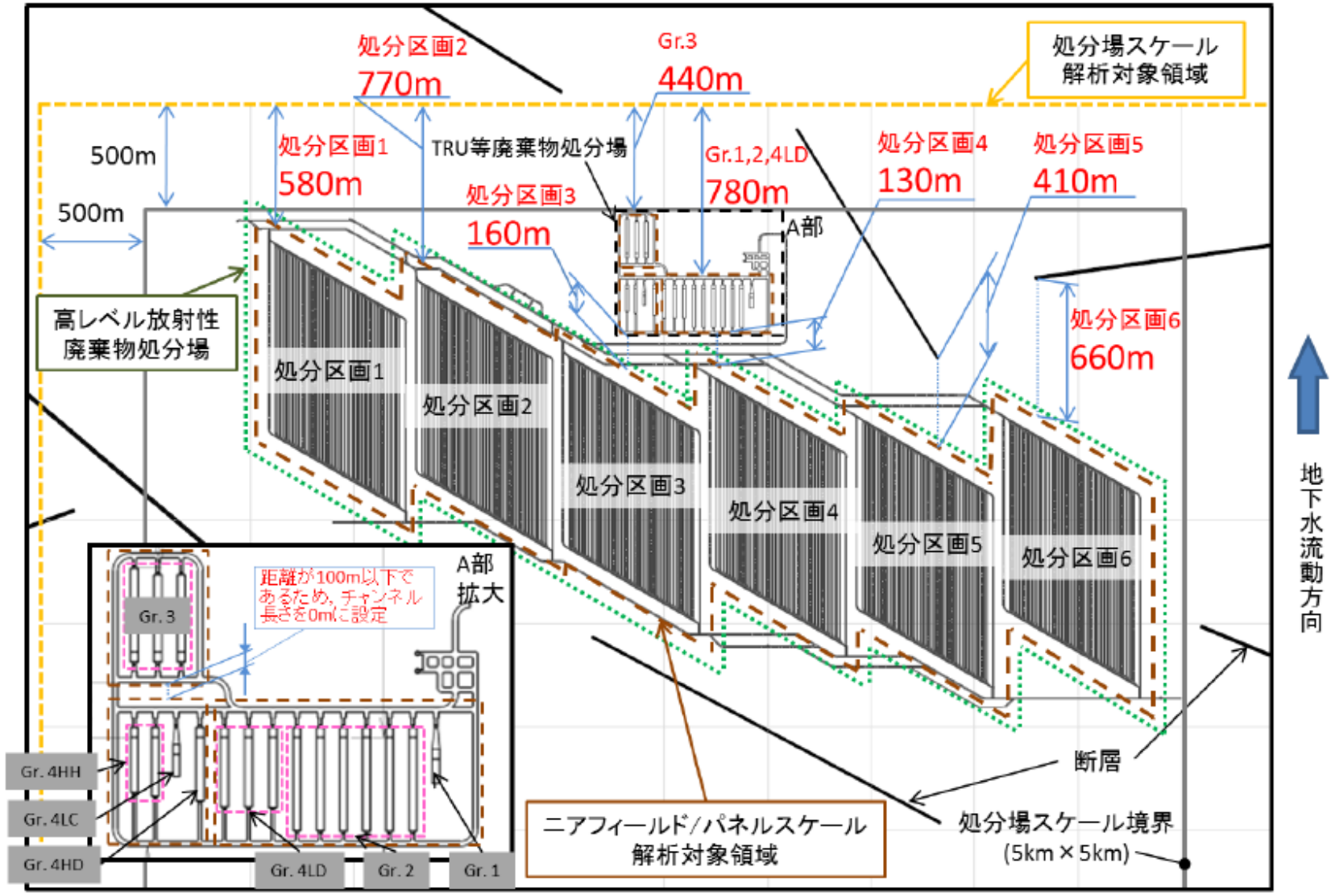
地下水流動方向 →



処分場スケールのモデル構築 (4/5)

➤ 処分場スケールの移行距離 (新第三紀堆積岩類の例)

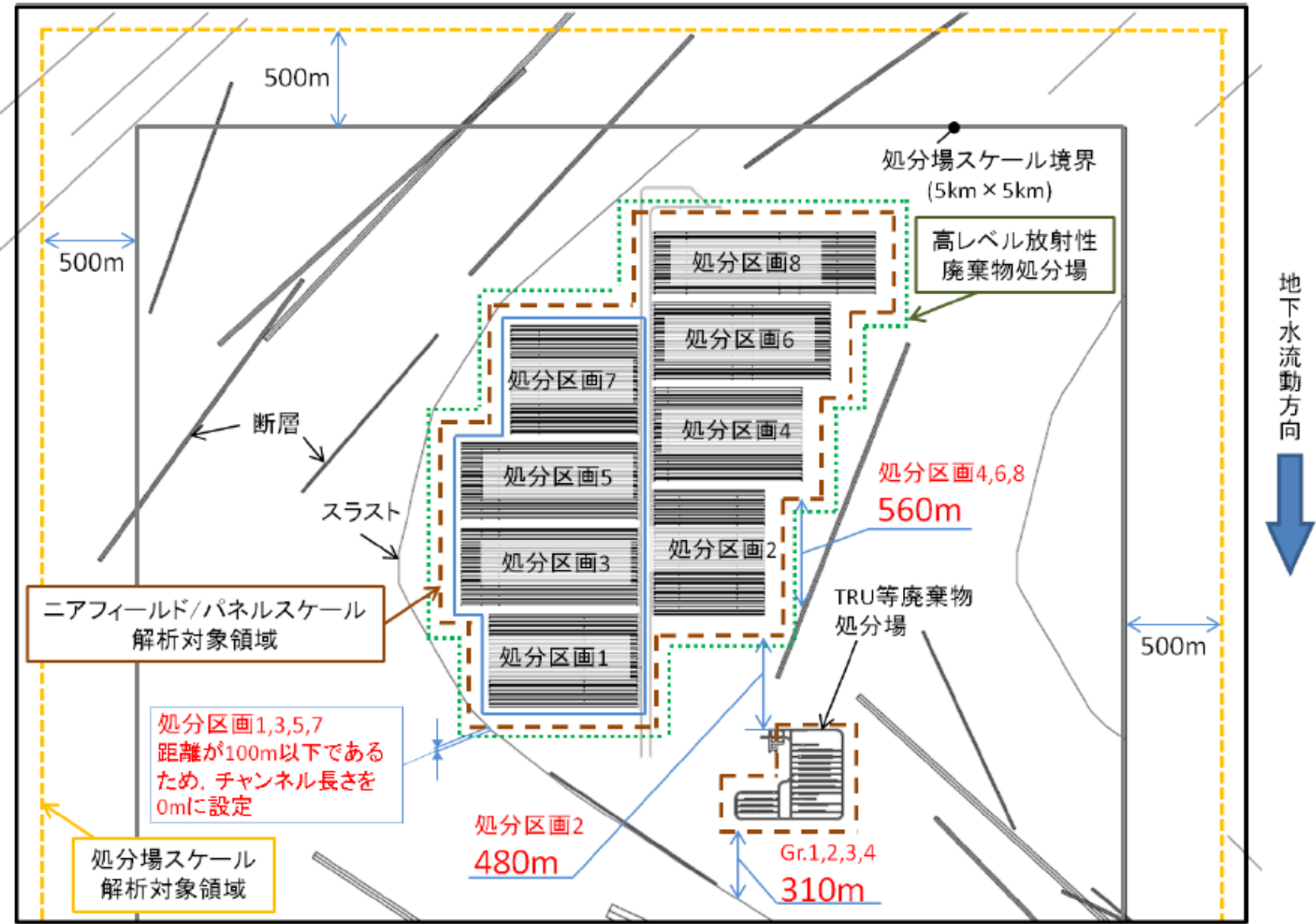
縦置き・ブロック方式

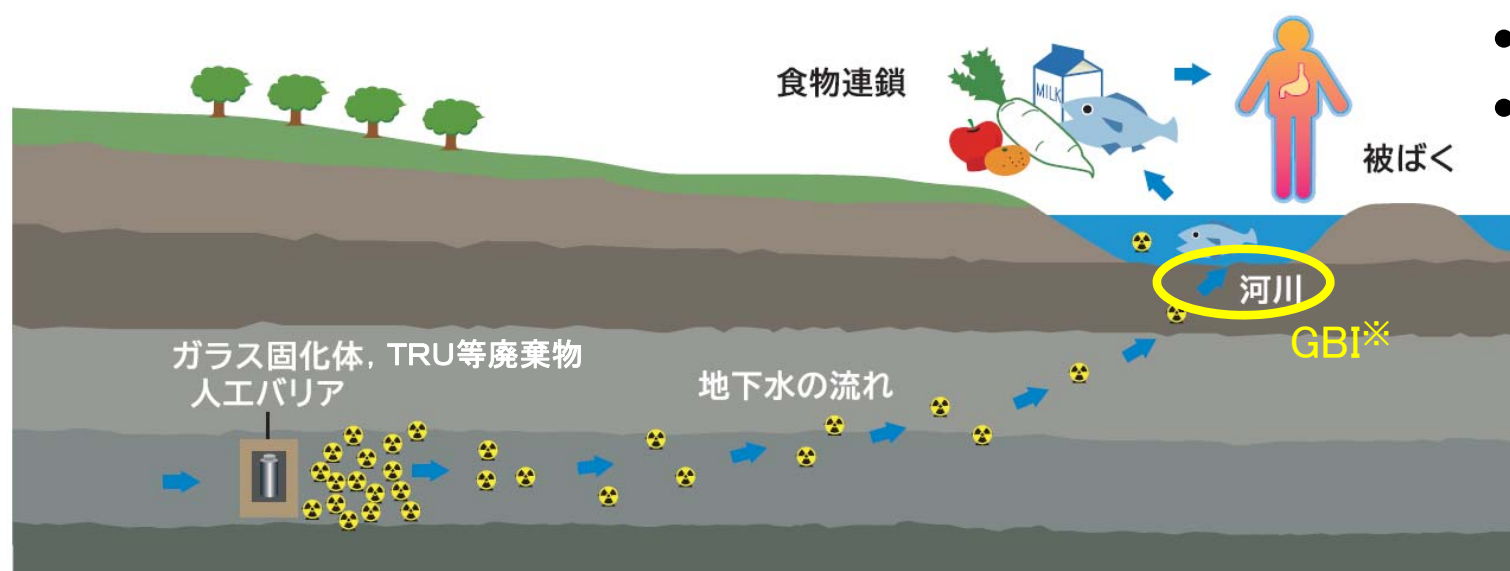


処分場スケールのモデル構築 (5/5)

➤ 処分場スケールの移行距離 (先新第三紀堆積岩類の例)

縦置き・ブロック方式





- 核種移行プロセス
- 被ばくプロセス
(内部／外部被ばく)

(NUMOパンフレット「知ってほしい、地層処分」に加筆)

- 核種移行プロセスのモデル化
- 人間の生活様式に基づく被ばく形態のモデル化
- モデルのアウトプット：核種ごとの線量への換算係数 ($[Sv/y] / [Bq/y]$)

※GBI (Geosphere- Biosphere Interface)

➤ GBIを平野部の河川と設定

- ・ 第四紀火山の中心から半径15kmの範囲を除外した地域の平均標高は100 m程度
- ・ 処分場がその地下に建設されると、一般にそれよりも下流域にGBIが存在
- ・ 年間使用水量の約9割を河川から取水
- ・ 河川よりも海域の方が水量が多い（河川をGBIとする方が保守的）

➤ 気候を温暖気候に設定

- ・ 長期的な気候変動を考慮：我が国の気候区分は寒帯～亜熱帯となる可能性
- ・ 多くのケースで寒帯気候よりも温暖気候の方が保守的評価を導く

➤ 代表的個人を想定する集団として、農業従事者グループ、淡水漁業従事者グループ、海洋漁業従事者グループを設定

地表における核種移行プロセスの設定

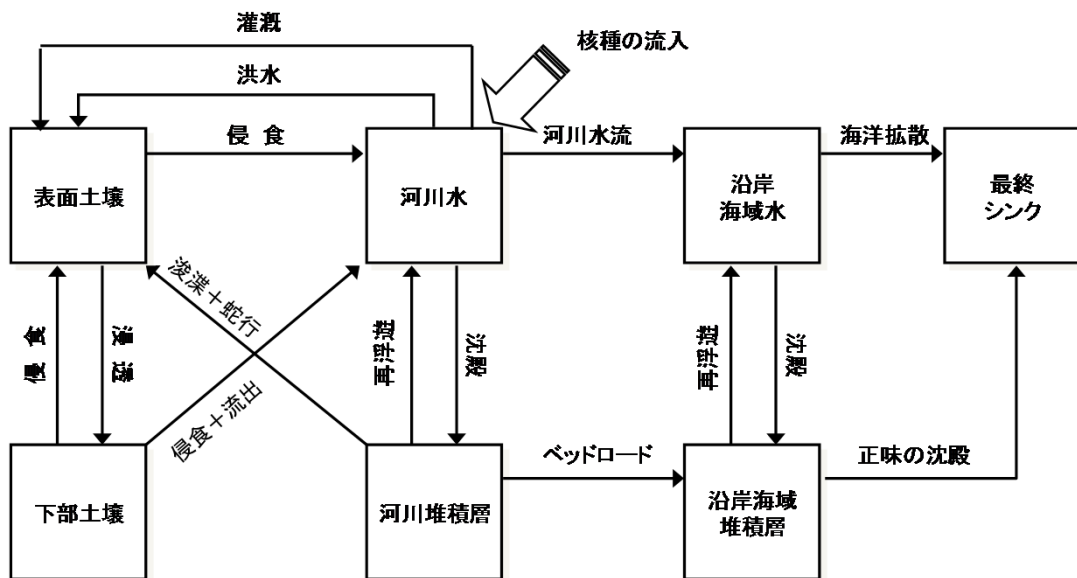


図-1 生活圏評価における核種移行プロセスの例 (河川水GBI※・温暖気候・農業従事者グループの場合)

人間の被ばくプロセスの設定

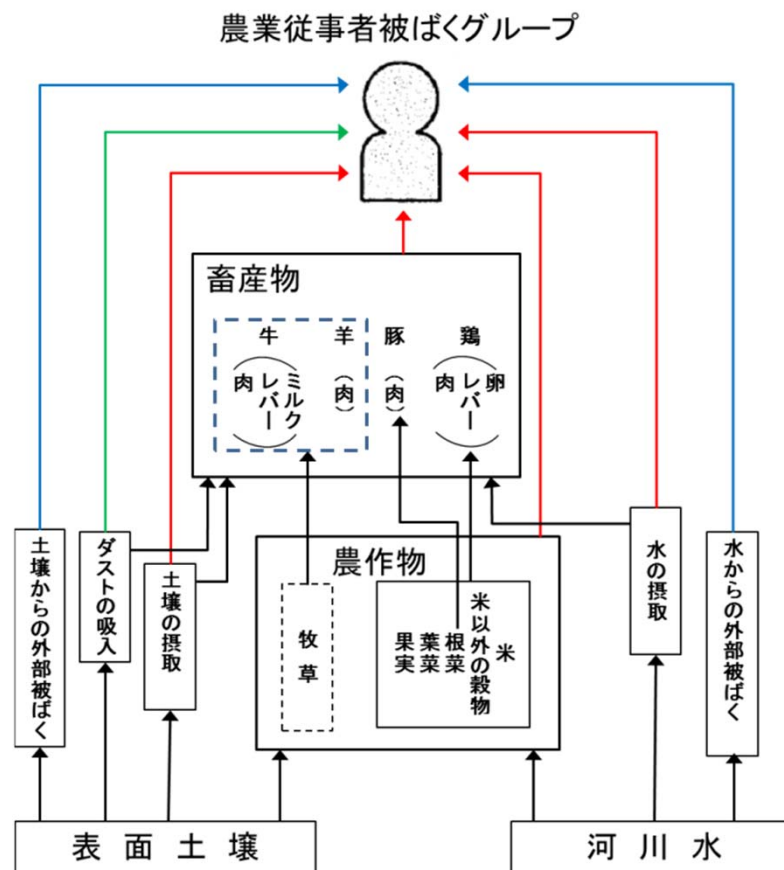


図-2 生活圏評価における被ばくプロセスの例 (河川水GBI・温暖気候・農業従事者グループの場合)

※ GBIを河川とした場合

核種移行解析に用いるデータの設定 (1/2)

■ 評価対象核種と放射能インベントリ (すべてのシナリオについて共通)

➤ ガラス固化体に対する評価対象核種

- 地下水移行シナリオに関して、これまで国内における安全評価で対象とした核種を基本としたうえで、諸外国における最新の動向の調査・評価を行い設定

→ C-14, Cl-36, I-129を新たに追加

- 稀頻度事象シナリオや人間侵入シナリオを念頭に以下の核種を追加
 - 半減期が比較的短い放射線学的影響の大きい核種
→ Sr-90, Cs-137
 - 内部被ばくに対する重要度が高いアクチノイド系列の核種

➤ TRU等廃棄物に対する評価対象核種

- 第2次TRUレポートにおける地下水移行シナリオを念頭に選定されたものを設定
- ガラス固化体のケースと同様に稀頻度事象シナリオや人間侵入シナリオを念頭に設定

➤ 生活圏評価における評価対象核種

- 上記ガラス固化体, TRU等廃棄物に対する評価対象核種に加え, 地表付近で生成する崩壊系列上の半減期25日以上核種も評価対象核種に設定

核種移行解析に用いるデータの設定 (2/2)

■ 核種移行パラメータの設定

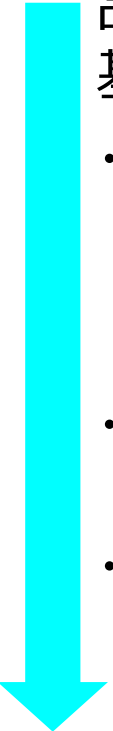
全国地下水水質データの分析 (約2万件)



モデル地下水/間隙水の設定

品質の高い実測地下水データを
基に熱力学平衡計算により設定

- ・採水時に擾乱を受けていることが想定されるため (脱ガスの影響など), 地下水と特定の鉱物との化学平衡を仮定して化学平衡計算により値を補正
- ・HLWの間隙水では緩衝材との反応をモデル化
- ・TRU等廃棄物の間隙水では緩衝材およびセメントとの反応をモデル化



核種移行パラメータ設定

核種移行パラメータ設定の概要

溶解度		間隙水の水質を基に熱力学平衡計算により設定
収着分配係数	緩衝材	圧縮ベントナイト中の実効拡散係数と見かけの拡散係数から設定
	母岩	モデル地下水水質に基づいて最新のJAEA収着データベースから設定
実効拡散係数	緩衝材	最新の实測データを踏まえ、各元素の支配化学種の電荷を考慮して設定
	母岩	最新の拡散データから設定

生活圏評価に用いるデータの設定 (1/2)

■ 生活圏評価における核種移行プロセスに関わるパラメータ

➤ 環境媒体のサイズ

- ・関連するパラメータ間の整合を考慮して設定
- ・井戸, 河川, 沿岸海域水, 土壌等

➤ 環境媒体間の移行量 :

- ・河川流量, 地下水流量等⇒統計データ等から平均値を採用
- ・侵食速度, 堆積物の沈澱量等⇒我が国の評価事例や公開文献から引用

➤ 元素毎の土壌の分配係数

- ・IAEAのデータベースから最新の値を引用

➤ 河川流量

- ・全国の一級河川の流量の対数平均値 (1×10^9 (m³/y)) を設定

生活圏評価に用いるデータの設定 (2/2)

■算出された線量への換算係数

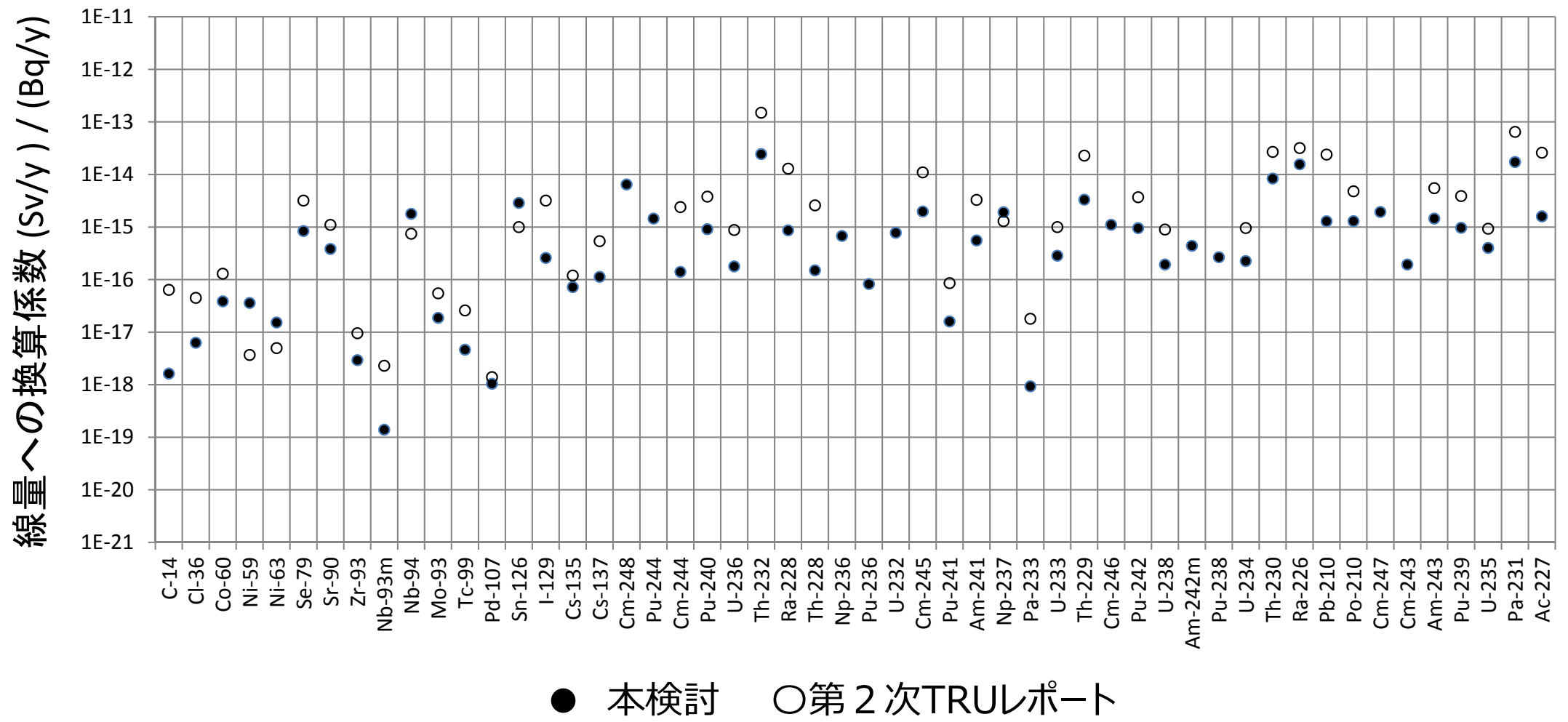
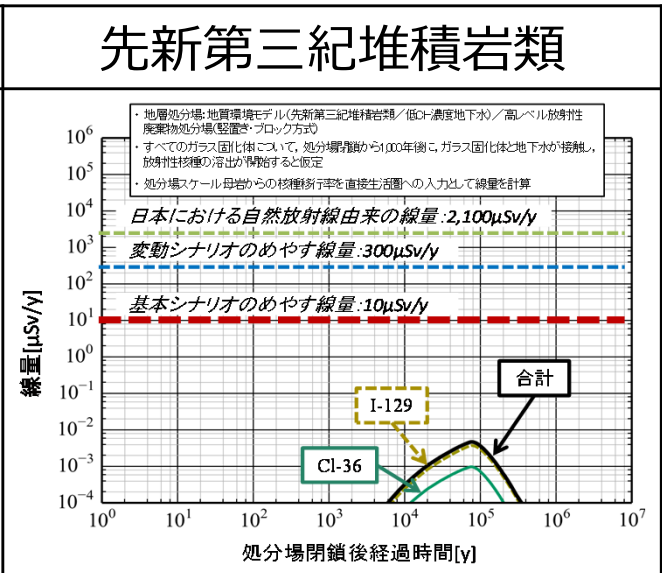
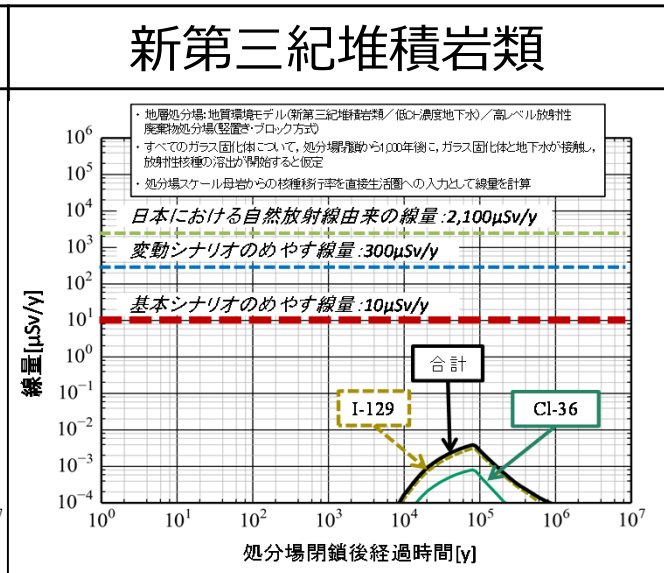
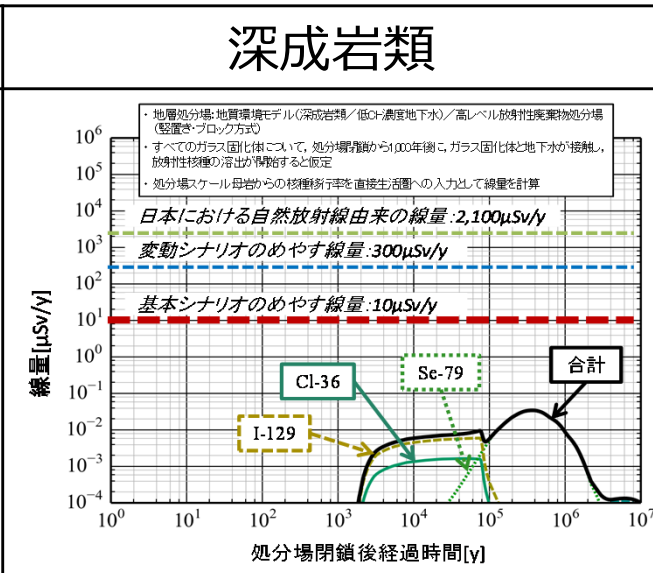


図-1 農業従事者に対する線量への換算係数 (GBI河川水, 温暖気候の場合)

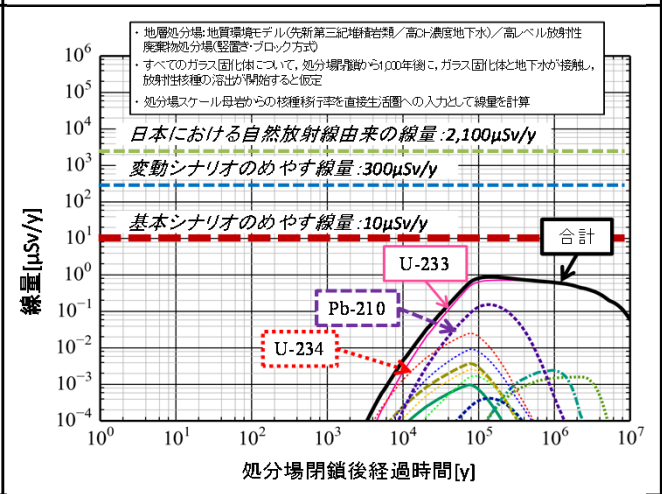
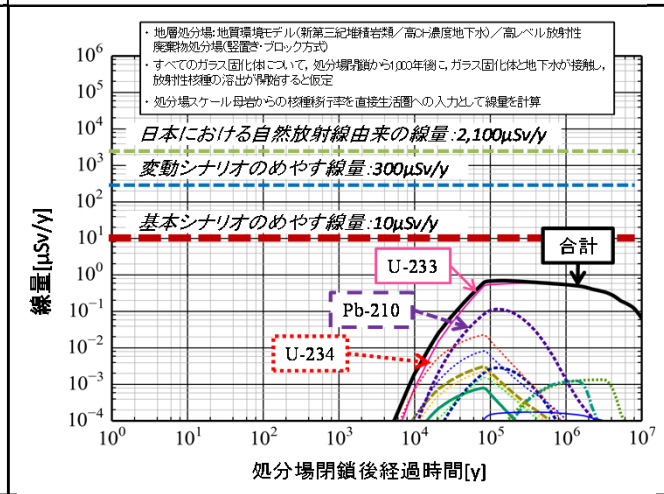
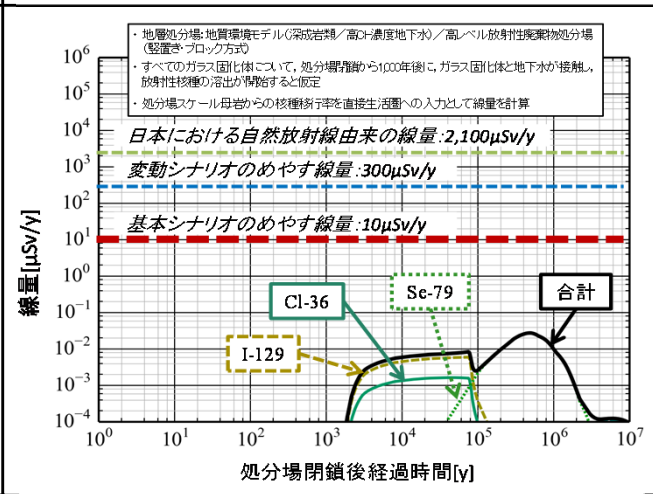
基本ケースの解析結果（高レベル放射性廃棄物）（1/4）

3種類の岩種と2種類の地下水タイプで、高レベル放射性廃棄物からの基本ケースの最大線量の評価結果は、「めやす」として仮設定した目標値（年あたり10 μ Sv）を下回る

低Cl濃度
地下水モデル

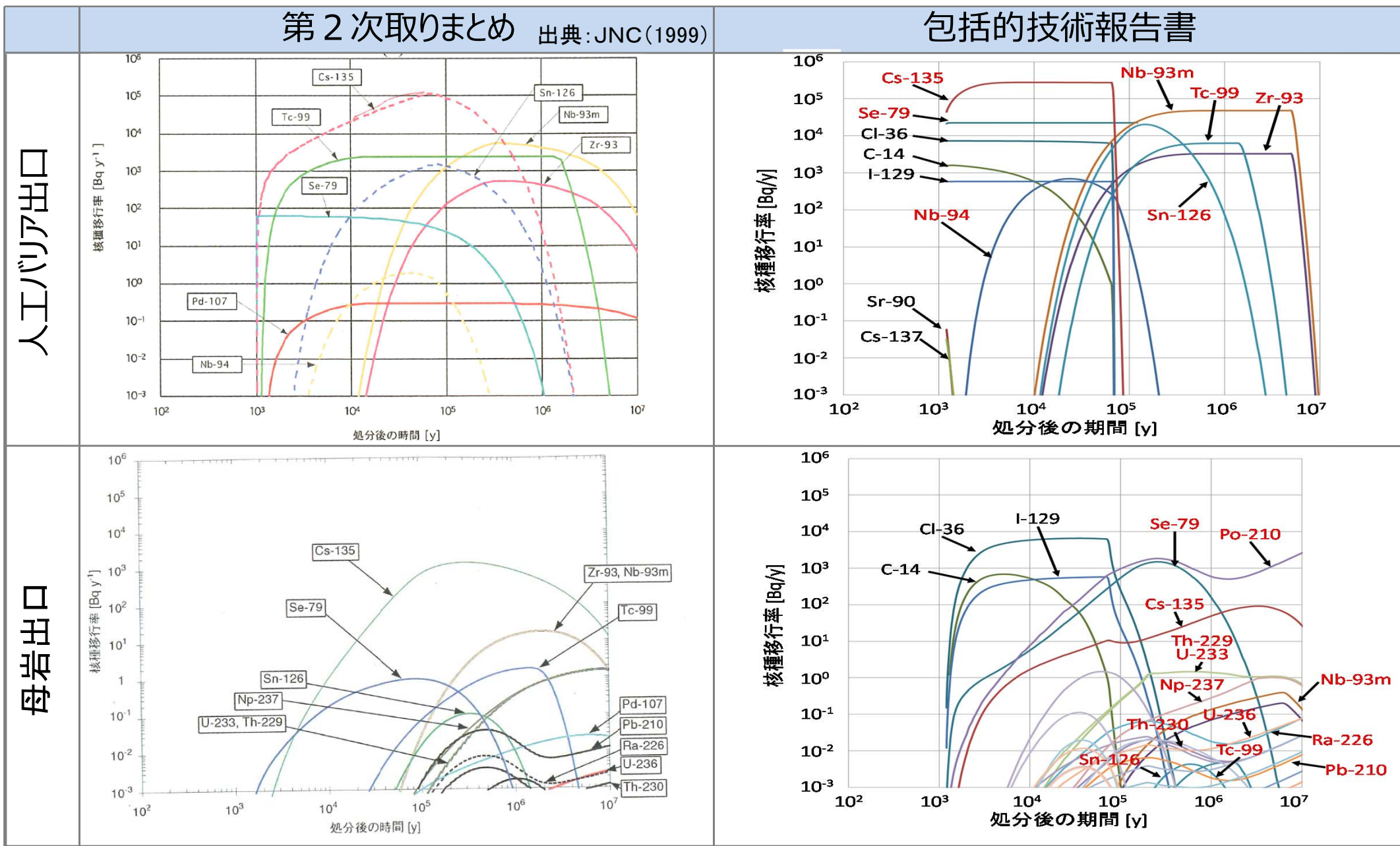


高Cl濃度
地下水モデル



基本ケースの解析結果（高レベル放射性廃棄物）（2/4）

第2次取りまとめとの核種の移行率の比較（深成岩類，低Cl-濃度地下水）



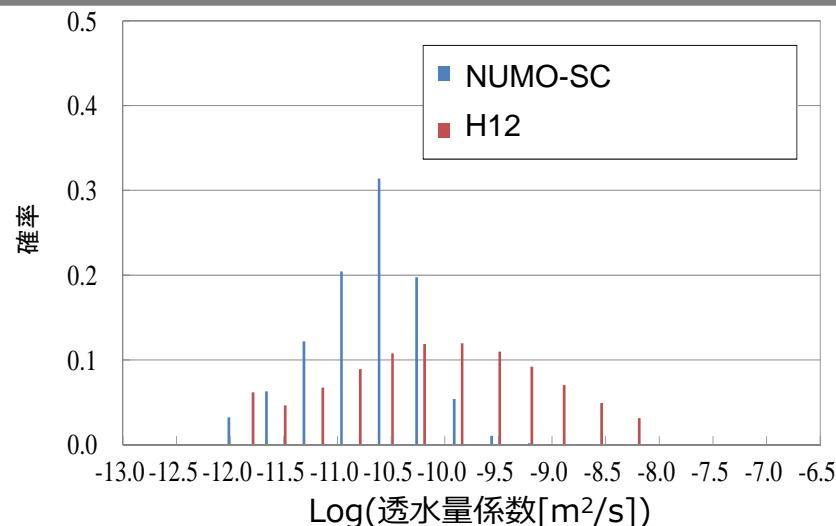
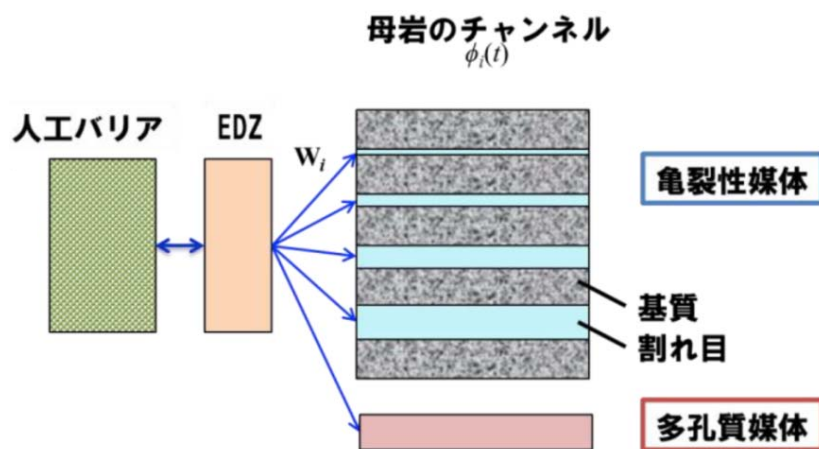
■ 第2次取りまとめとの核種の移行率の比較（深成岩類，低Cl⁻濃度地下水）

□ 核種移行パラメータの比較

		Cs-135		Se-79		Zr-93		Tc-99		Nb-93m	
		H12	SC	H12	SC	H12	SC	H12	SC	H12	SC
溶解度 (mol/kg)		可溶性	可溶性	3×10^{-9}	3×10^{-8}	1×10^{-6}	1×10^{-8}	4×10^{-8}	5×10^{-9}	1×10^{-4}	2×10^{-5}
緩衝材	D_e (m ² /s)	6×10^{-10}	8×10^{-9}	2×10^{-10}	4×10^{-11}	3×10^{-10}	1×10^{-10}	3×10^{-10}	1×10^{-10}	3×10^{-10}	1×10^{-10}
	K_d (kg/m ³)	0.01	0.06	0	0.0004	10	3	0.1	5	1	0.2
母岩	D_e (m ² /s)	3×10^{-12}	9×10^{-13}	3×10^{-12}	9×10^{-13}	3×10^{-12}	9×10^{-13}	3×10^{-12}	9×10^{-13}	3×10^{-12}	9×10^{-13}
	K_d (kg/m ³)	0.05	0.04	0.01	0.001	0.1	0.8	1	8	0.1	0.4

H12: 第2次取りまとめレファレンスケース, SC: 包括的技術報告書・深成岩類低Cl⁻濃度地下水 基本ケース

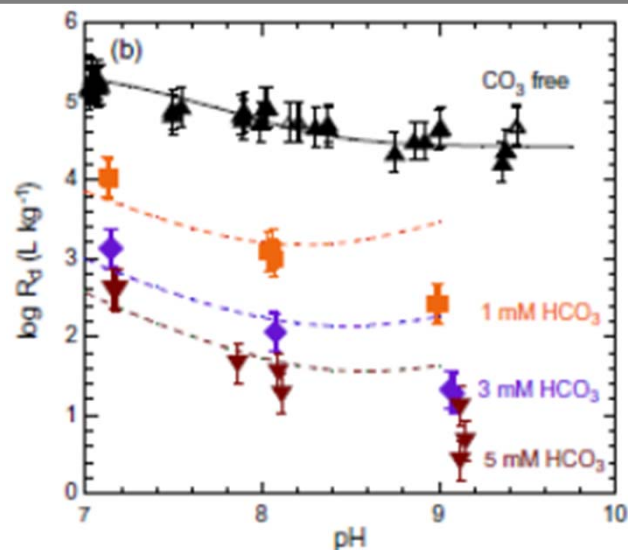
□ マルチチャンネルの透水量係数分布の比較



基本ケースの解析結果（高レベル放射性廃棄物）（4/4）

■ 新第三紀堆積岩類（高Cl⁻濃度地下水モデル）の支配核種に関して

- 堆積岩類の高Cl⁻濃度の地下水については炭酸濃度が高く（約40m mol/L）、金属イオンが炭酸錯体を形成
- Uの取り扱い
 - 熱力学計算に基づくと溶液中で大半はU（VI）で存在
 - U（VI）については還元環境かつ炭酸が存在する環境下での収着データが存在せず
 - UのK_dを酸化環境かつ比較的高い炭酸濃度（1～5m mol/L）の条件における収着データを外挿して設定
 - K_d設定値：2×10⁻⁶m³/kg（高Cl⁻濃度地下水モデル（炭酸濃度：約40m mol/L））、6 m³/kg（低Cl⁻濃度地下水モデル（炭酸濃度：約2m mol/L））

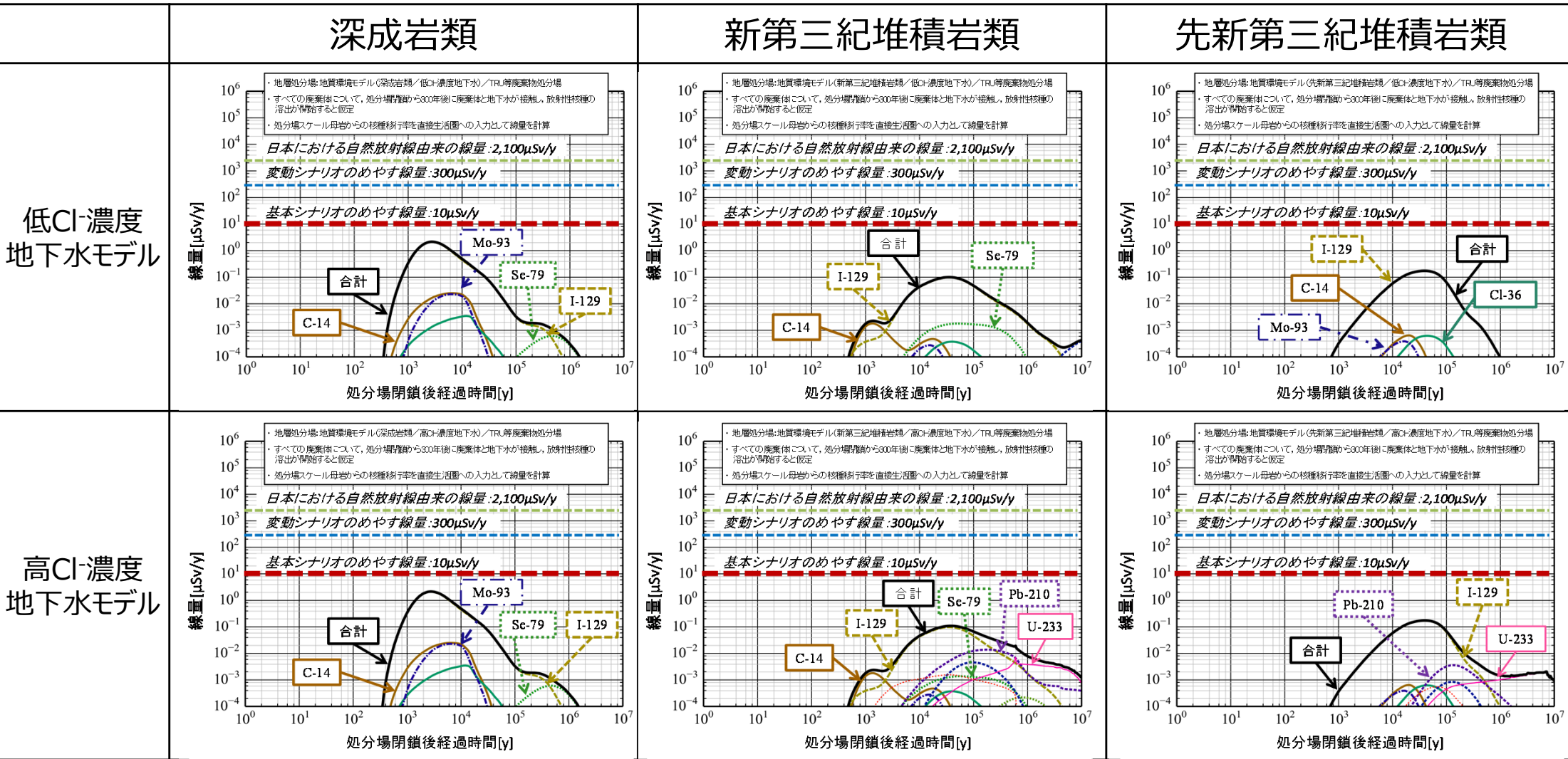


- U(VI)のモンモリロナイトへの収着に対する炭酸濃度の影響 (Marques Fernandes et al., 2012)
- HCO₃⁻の濃度が5 mmol/Lである場合のモンモリロナイトに対するU(VI)のK_dは、1 mmol/Lである場合の約100分の一

Marques Fernandes, M., Baeyens, B., Dahn, R., Scheinost, A.C., Bradbury, M.H. (2012): U(VI) sorption on montmorillonite in the absence and presence of carbonate: A macroscopic and microscopic study, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 93, pp.262-277.

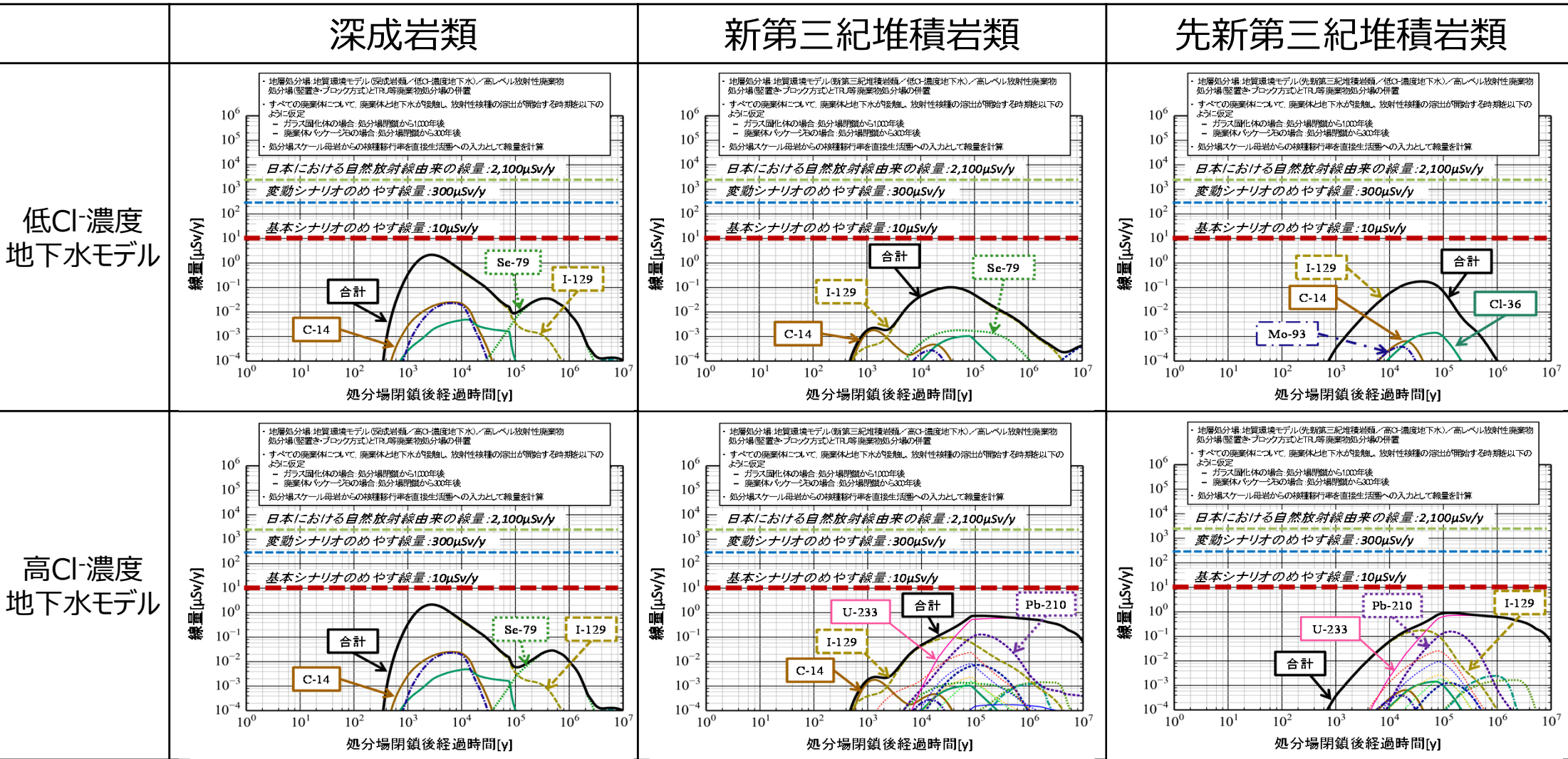
基本ケースの解析結果 (TRU等廃棄物)

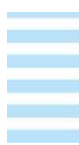
3種類の岩種と2種類の地下水タイプで、TRU等廃棄物からの基本ケースの最大線量の評価結果は、「めやす」として仮設定した目標値(年あたり10 μSv)を下回る



基本ケースの解析結果 (高レベル放射性廃棄物 + TRU等廃棄物)

高レベル放射性廃棄物とTRU廃棄物の併置処分でも、基本ケースの最大線量の評価結果は、「めやす」として仮設定した目標値(年あたり10 μSv)を下回る





ご説明の内容

1. 安全評価の基本的枠組み
2. 安全評価の基本的手順
3. 安全評価シナリオの作成
4. 基本シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
- 5. 変動シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析**
6. 稀頻度事象シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
7. 人間侵入シナリオの評価
8. 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
9. まとめと今後の取り組み

変動シナリオに対応する解析ケースの設定

□ 変動シナリオに対応する解析ケースの設定

- 基本ケースにおける核種移行解析上の取り扱いと処分場構成要素の状態に関する取り扱いを参照しつつ、変動ケースにおける取り扱いの考え方を検討
- 処分場の状態設定の不確実性に対する変動のみならず、基本ケースで用いる**評価モデルやデータセットへの摂動として与えられるものも変動ケース**とする

表-1 変動シナリオに対応する解析ケースの例（HLW処分場）

構成要素	安全機能	不確実性を考慮した状態 または考慮すべき評価モデルやデータセットの摂動	核種移行解析上の取り扱いの考え方
ガラス固化体	ガラスマトリクスによる溶出の抑制	<ul style="list-style-type: none"> 以下の不確実性によりガラスの溶解速度が増大する可能性がある。 <ul style="list-style-type: none"> 初期ひび割れの不確実性 オーバーパックの腐食による外部応力による割れ目の発生に関する不確実性 ガラス固化体の溶解に及ぼす鉄腐食生成物、緩衝材の影響に関する不確実性 	<ul style="list-style-type: none"> ガラス溶解速度の設定に反映する。本解析ケースを「ガラス溶解速度不確実性ケース（HLW）」とする。
オーバーパック	廃棄体と地下水の接触の防止	<ul style="list-style-type: none"> 基本シナリオに不確実性を考慮した状態を包含する。 	<ul style="list-style-type: none"> 基本シナリオに対応する解析ケースを包含する。
緩衝材	放射性物質の移流による移行の抑制	<ul style="list-style-type: none"> 拡散係数の測定データの摂動を考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材の実効拡散係数の設定に反映する。本解析ケースを「緩衝材中の核種の実効拡散係数の不確実性ケース（HLW）」とする。

解析ケース 名称	基本ケースにおける取り扱い（上段）と 変動ケースでの取り扱い（下段）	
ガラス溶解速度 不確実性ケース (HLW)	基本	長期溶解速度を用いたガラス溶解モデルを適用する。製造時のひび割れによる表面積の増加を考慮してガラスの溶解速度を設定
	変動	以下の不確実性を考慮してガラスの溶解速度を増大させて設定 <ul style="list-style-type: none"> • 初期ひび割れの不確実性 • オーバーパックの腐食による外部応力による割れ目の発生に関する不確実性 • ガラス固化体の溶解に及ぼす鉄腐食生成物、緩衝材の影響に関する不確実性
ハル・エンドピース 腐食速度 不確実性ケース (TRU)	基本	既往の測定データに基づき、ジルカロイ、ステンレス鋼・インコネルの腐食速度を設定
	変動	測定データの摂動を考慮し、腐食速度を基本ケースに対し増大させて設定

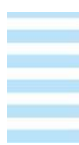
解析ケース 名称	基本ケースにおける取り扱い（上段）と 変動ケースでの取り扱い（下段）	
緩衝材への核種の 収着分配係数 の 不確実性ケース (HLW・TRU)	基本	緩衝材の仕様や間隙水水質に対応する収着分配係数の平均的な値を適用
	変動	緩衝材の収着分配係数に関する測定データの摂動を考慮し、収着分配係数の平均的な値より低い値を設定
緩衝材中の核種の 実効拡散係数 の 不確実性ケース (HLW・TRU)	基本	緩衝材の乾燥密度や間隙水水質に対応する実効拡散係数の平均的な値を適用
	変動	緩衝材の実効拡散係数に関する測定データの摂動を考慮し、実効拡散係数が平均的な値より大きい状態を設定
母岩への核種の 収着分配係数の 不確実性ケース (HLW・TRU)	基本	岩種や地下水水質に対応する収着分配係数の平均的な値を適用
	変動	母岩の収着分配係数に関する測定データの摂動を考慮し、収着分配係数が平均的な値よりも低い状態を設定

変動シナリオに対応する解析ケース（変動ケース）一覧

No.	名称
1	基本ケース
2	ガラス溶解速度不確実性ケース
3	ハル・エンドピース腐食速度不確実性ケース
4	構造躯体の劣化不確実性ケース
5	硝酸プルームの広がりに関する不確実性ケース
6	母岩の割れ目の連結性に関する不確実性ケース
7	緩衝材への核種の収着分配係数の不確実性ケース
8	緩衝材中の核種の実効拡散係数の不確実性ケース
9	母岩への核種の収着分配係数の不確実性ケース
10	母岩中の核種の実効拡散係数の不確実性ケース
11	溶解度設定における温度影響の不確実性ケース
12	溶解度制限固相の熱力学データの不確実性ケース

併置処分においても変動ケースの最大線量の評価結果は、「めやす」として仮設定した年あたり300 μSv を下回る。

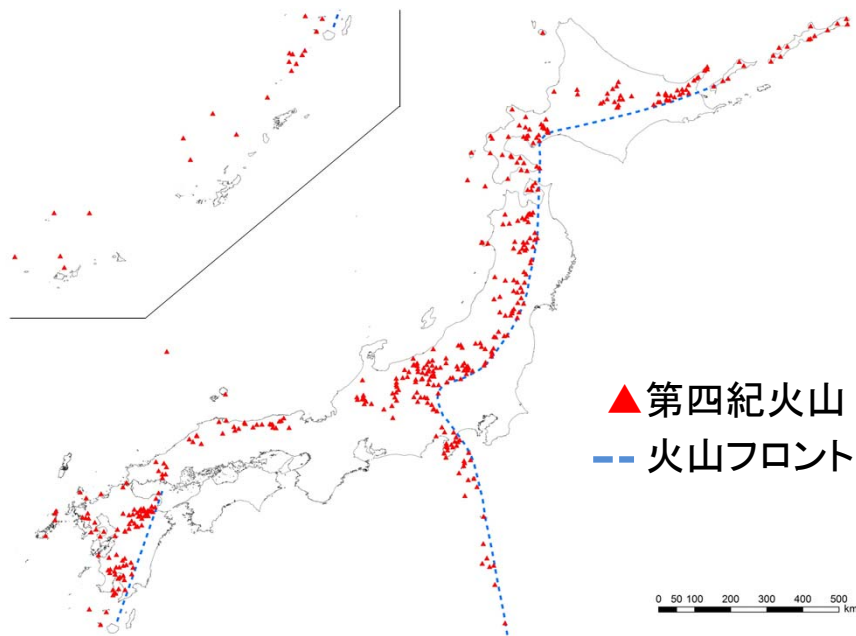
	深成岩類	新第三紀堆積岩類	先新第三紀堆積岩類
低Cl濃度 地下水モデル	<p>最大線量 [$\mu\text{Sv/y}$]</p> <p>日本における自然放射線由来の線量: 2,100 $\mu\text{Sv/y}$ 変動シナリオのめやす線量: 300 $\mu\text{Sv/y}$</p> <p>L: 6 L: 1 (基本ケース) L: 2,3,5,7,8,9,10,11,12</p> <p>処分場閉鎖後経過時間 [y]</p>	<p>最大線量 [$\mu\text{Sv/y}$]</p> <p>日本における自然放射線由来の線量: 2,100 $\mu\text{Sv/y}$ 変動シナリオのめやす線量: 300 $\mu\text{Sv/y}$</p> <p>L: 6 L: 1 (基本ケース) L: 2,3,5,7,8,9,10,11,12</p> <p>処分場閉鎖後経過時間 [y]</p>	<p>最大線量 [$\mu\text{Sv/y}$]</p> <p>日本における自然放射線由来の線量: 2,100 $\mu\text{Sv/y}$ 変動シナリオのめやす線量: 300 $\mu\text{Sv/y}$</p> <p>L: 6 L: 1 (基本ケース) L: 2,3,5,7,8,9,10,11,12</p> <p>処分場閉鎖後経過時間 [y]</p>
高Cl濃度 地下水モデル	<p>最大線量 [$\mu\text{Sv/y}$]</p> <p>日本における自然放射線由来の線量: 2,100 $\mu\text{Sv/y}$ 変動シナリオのめやす線量: 300 $\mu\text{Sv/y}$</p> <p>H: 6 H: 1 (基本ケース) H: 2,3,5,7,8,9,10,11,12</p> <p>処分場閉鎖後経過時間 [y]</p>	<p>最大線量 [$\mu\text{Sv/y}$]</p> <p>日本における自然放射線由来の線量: 2,100 $\mu\text{Sv/y}$ 変動シナリオのめやす線量: 300 $\mu\text{Sv/y}$</p> <p>H: 6 H: 1 (基本ケース) H: 10 H: 2,3,5,7,8,9,11,12</p> <p>処分場閉鎖後経過時間 [y]</p>	<p>最大線量 [$\mu\text{Sv/y}$]</p> <p>日本における自然放射線由来の線量: 2,100 $\mu\text{Sv/y}$ 変動シナリオのめやす線量: 300 $\mu\text{Sv/y}$</p> <p>H: 6 H: 1 (基本ケース) H: 2,3,5,7,8,9,10,11,12</p> <p>処分場閉鎖後経過時間 [y]</p>



ご説明の内容

1. 安全評価の基本的枠組み
2. 安全評価の基本的手順
3. 安全評価シナリオの作成
4. 基本シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
5. 変動シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
6. 稀頻度事象シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
7. 人間侵入シナリオの評価
8. 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
9. まとめと今後の取り組み

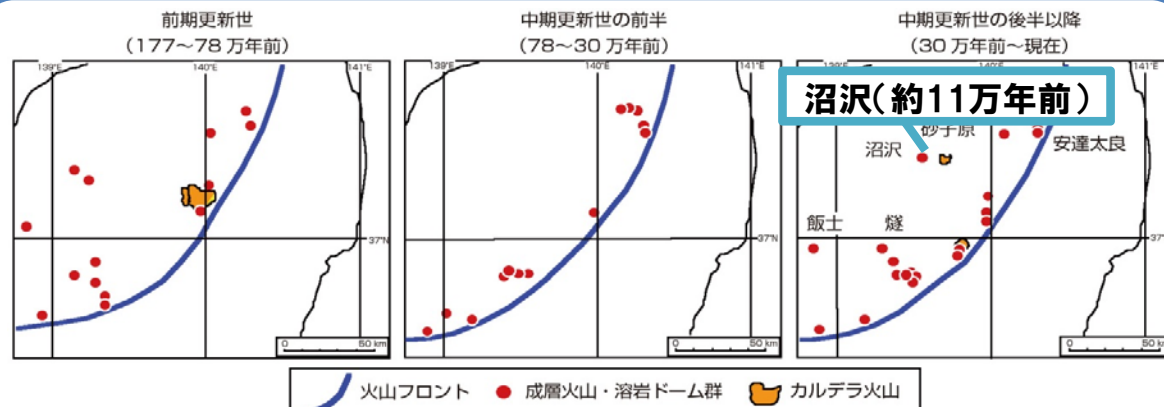
稀頻度事象 シナリオ名称	概要	発生可能性
新規火山発生 シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 新規火山が発生し 処分場を直撃 	<ul style="list-style-type: none"> 10^{-6}[1/y]/100[km²]以下 (東北日本で適切なサイトを選定した 場合の将来10万年程度を越える期間 における発生確率)
断層伸展シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 処分場下の地震 発生層相当の地下 深部から断層が 伸展し処分場を 直撃 	<ul style="list-style-type: none"> 9.3×10^{-11} 回/ y (20 km 規模の断層が処分場 スケールの領域に発生し, それ が処分場に直接的な影響を与える事象 の発生確率)



▲ 第四紀火山
-- 火山フロント

産総研(2013)を編集

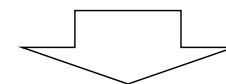
- 火山フロントは長期（少なくとも約260万年間）にわたり安定
- サイト選定において，第四紀火山の中心から半径15kmの範囲，その外側でマグマの貫入等の可能性が高い範囲を除外



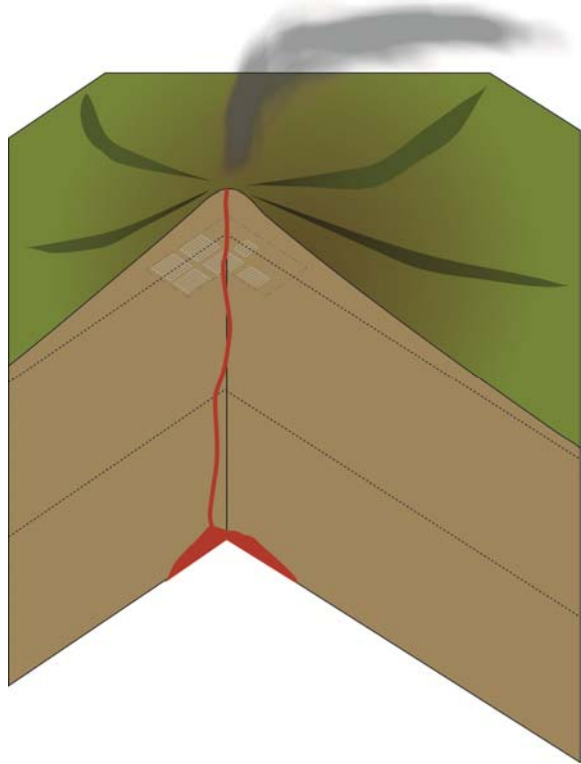
山元(2011)を編集

東北日本南部における火山の時空間分布変化

- 火山フロントの背孤域において，10万年以上にわたり火山が存在していなかった地域においても火山の発生例あり
- 閉鎖後10万年程度を超える長期間における火山・火成活動の発生を完全に否定することはできない



閉鎖後10万年後に火山が新規に発生すると設定



- 処分場閉鎖から**10万年後**に，マグマが処分場に貫入
- **火道の領域（火道面積）**に存在する放射性物質がマグマに取り込まれ，噴出物（火山灰など）として地表に放出



- 噴出物は**既存の土壌と均一に混合**
- 混合した土地に**農業従事者**が生活して被ばくすることを想定

【評価の前提】

- マグマの貫入に至るまでの10万年間、すべての核種は放射性崩壊をしながら廃棄体内部に閉じ込められているとする
- 火道面積と噴出物量が記載されている噴火を対象に線量評価を実施

【線量評価およびリスク評価】

- 線量結果は、めやす線量（事象発生1年目：20～100mSv，事象発生2年目以降：1～20mSv/y）を下回る

名称等	火道面積(km ²)	噴出物量(km ³)	線量結果(mSv/y)
三途川カルデラ	0.2	1×10 ²	2×10 ⁻³
子持火山	7×10 ⁻²	10	7×10 ⁻³
上宝	4	40	4×10 ⁻²
雲仙岳	2×10 ⁻²	0.2	9×10 ⁻²

- 東北日本で適切なサイトを選定した場合における発生確率（10⁻⁶[1/y]/100[km²]以下）を用いて算出した最大リスクは1×10⁻¹²[1/y]となり、リスク拘束値10⁻⁵[1/y]を大きく下回る

断層伸展シナリオに対応する解析ケース (1/2)

- 断層破砕帯やプロセスゾーンの領域は一度の断層活動で急激に発達することはないが、評価では一度の活動で十分に発達するという極端な状態を想定。
- 発生時期を特定することは困難であるため、1,000年、1万年、10万年で評価
- すべての核種は発生時期まで放射性崩壊をしながら廃棄体内部に閉じ込められているとする

① 処分場への断層の直撃

放射性核種

断層面：

人工バリア×，地質環境×

断層破砕帯：

人工バリア×，地質環境×

プロセスゾーン

地質環境×

健岩部

② 断層を經由して河川水へ放射性核種が流入

河川

放射性核種

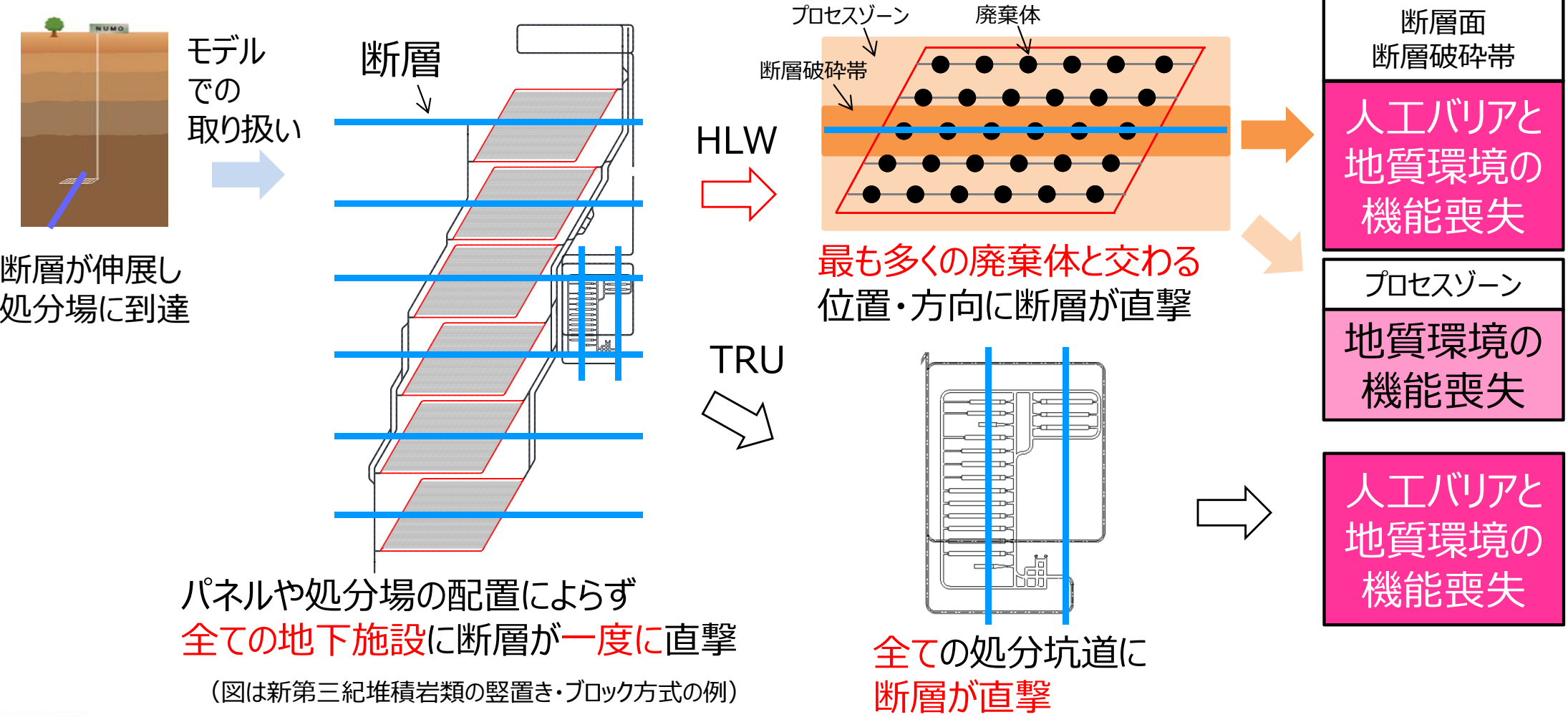
多孔質媒体

処分場

断層伸展シナリオに対応する解析ケース (2/2)

- 一度に、全ての地下施設へ断層が直撃するという**非現実的な**設定を採用
 - HLW処分場：人工バリアと地質環境の両方の安全機能が**全喪失**（廃棄体の約10%）
地質環境のみの安全機能が**全喪失**（廃棄体の約90%）
 - TRU等廃棄物処分場：人工バリアと地質環境の両方の安全機能が**全喪失**（全廃棄体*）

*: 全ての処分坑道が破壊されるという設定

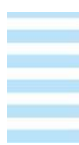


【線量評価およびリスク評価】

- 線量結果は、めやす線量（事象発生1年目：20～100mSv，事象発生2年目以降：1～20mSv/y）を下回る

検討対象母岩	モデル水質 (Cl ⁻ 濃度)	最大線量[mSv/y]
深成岩類	低	4
	高	4
新第三紀堆積岩類	低	14
	高	14
先新第三紀堆積岩類	低	4
	高	4

- 本シナリオの1年間あたりの発生確率 9.3×10^{-11} 回/yを用いて算出した最大リスク（新第三紀堆積岩類の場合）は、 7×10^{-14} [1/y]となり、リスク拘束値 10^{-5} [1/y]を大きく下回る



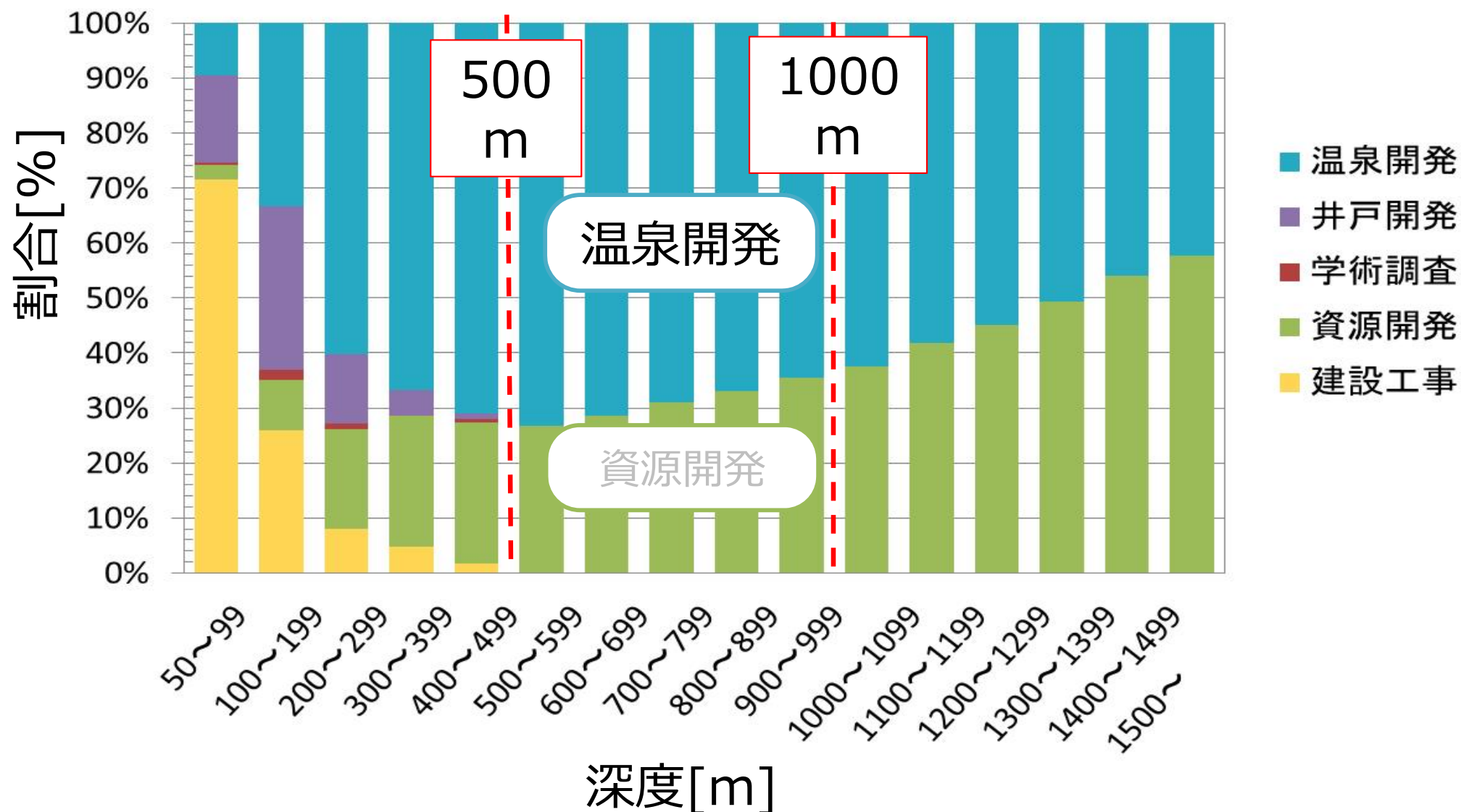
ご説明の内容

1. 安全評価の基本的枠組み
2. 安全評価の基本的手順
3. 安全評価シナリオの作成
4. 基本シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
5. 変動シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
6. 稀頻度事象シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
- 7. 人間侵入シナリオの評価**
8. 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
9. まとめと今後の取り組み

- 国内外の地層処分における報告書を参考に，人間侵入シナリオの選定の方針①～⑤を整理
 - 方針①～⑤に基づき，国際FEPに示されている人為事象に係るものからボーリングによる掘削活動を選定
- ① 処分施設に直接的な擾乱を与える行為を対象とする
 - ② 処分場閉鎖後の期間に生ずると考えられる行為を対象とする
 - ③ 偶発的な侵入を対象（意図的な侵入は考慮しない）とする
 - ④ 偶発的な人間侵入への対策により，その発生可能性を極めて小さく抑えることができると考えられるものの，処分場へ擾乱を与えるという観点で考慮する必要があるものを対象とする
 - ⑤ 想定するシナリオは，人間侵入の行為としてもっともらしい（plausible）ものであるとともに，現在の技術と手順に基づき様式化したものとする

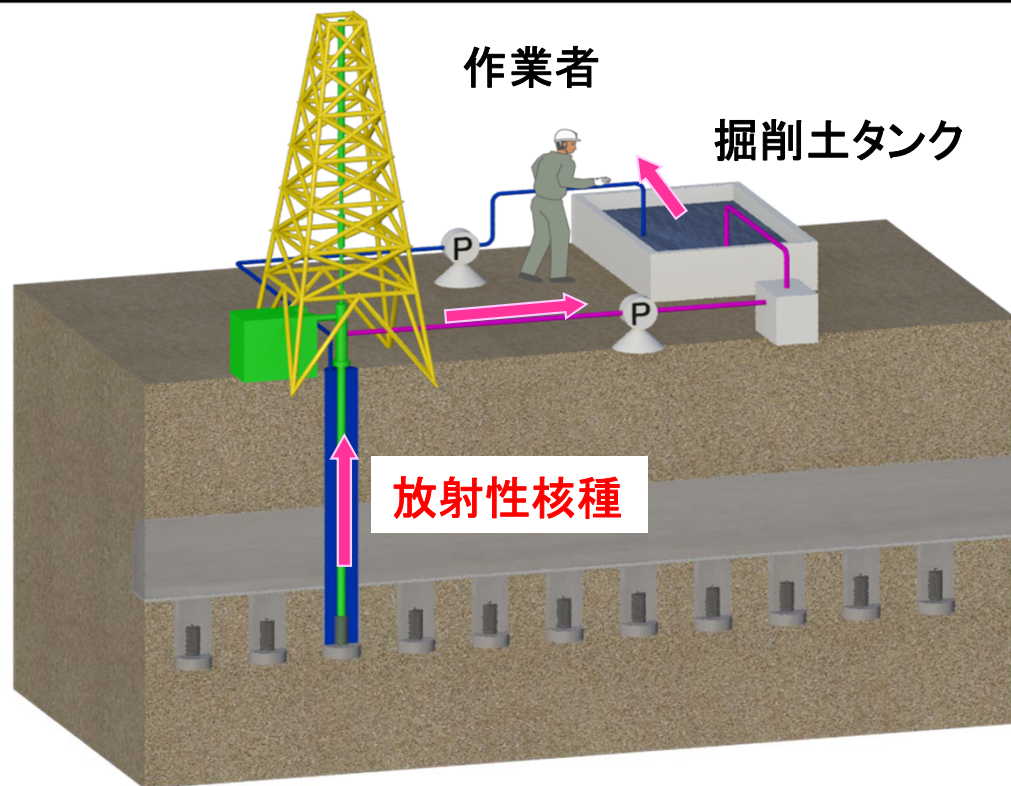
評価すべき人間侵入の設定 (2/2)

国内におけるボーリングの実績，および，サイト選定時に鉱物資源が分布する地域が除外されることを踏まえ，温泉開発を目的としたボーリングを想定

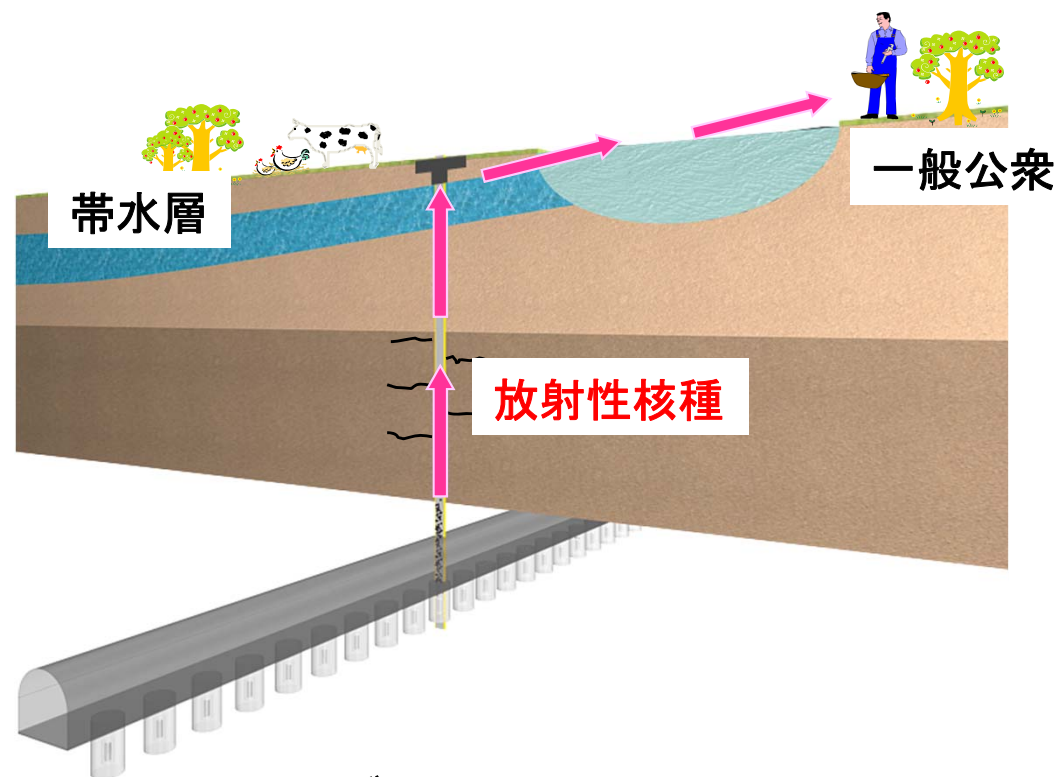


人間侵入シナリオの設定

- 記録保存の有効性またはオーバーパック等のボーリングに対する物理的抵抗性が維持される期間は、偶発的な侵入が回避されるとして、300年, 1000年, 18,000年*1, 35,000年*2を発生時期として設定
- 放射性核種は人間侵入の発生時まで放射性崩壊により減衰しつつ廃棄体内に滞留
- ボーリング孔が廃棄体または処分坑道を直撃
- ボーリング作業者の被ばくと、ボーリング孔を経由して地表に到達した放射性核種による一般公衆の被ばくを評価



ボーリング作業従事者被ばくケース



ボーリング孔核種移行ケース

*1: TRU等廃棄物のみ, *2: 高レベル放射性廃棄物のみ

放射能の移行挙動

- 人間侵入の発生時まで放射性崩壊により減衰しつつ廃棄体内に滞留
- ガラス固化体またはTRU等廃棄物の、ボーリング孔が貫通した時点で廃棄体に留まっていた核種は、全量が瞬時に地下水へ溶出

ボーリング作業従事者被ばくケース

- 温泉開発を目的としたボーリングにおいて使用される機材の仕様（例：ボーリング口径）を参照し現実的な値を設定
- ダスト濃度や観察時間など一意に設定することが難しいパラメータについては、IAEAなどの文献で用いられている値を参考に設定

ボーリング孔核種移行ケース

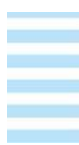
- 地下水中へ溶出した核種は、全量ボーリング孔に瞬時に移行
- ボーリング孔内の核種移行パラメータについては、充填物の物性などの不確実性を考慮し、保守的に設定（例えば、砂と同程度の透水係数（ 1×10^{-5} m/s）を採用）
- ボーリング孔内の移行経路長は地下施設の設置深度と被覆堆積岩層の厚さから設定

■ 線量評価およびリスク評価結果

- 線量結果は、めやす線量（事象発生1年目：20～100mSv，事象発生2年目以降：1～20mSv/y）を下回る

解析ケース		記録管理の有効性を考慮した発生時期		物理的抵抗性を考慮した発生時期	
		300年	1,000年	18,000年 (TRU等廃棄物)	35,000年 (HLW)
ボーリング作業 従事者被ばく ケース [単位:mSv]	掘削土観察	50～60	20	6	0.6～0.7
	コア観察	40	20	4～6	0.4
ボーリング孔核種移行ケース [単位:mSv/y]		2～7	0.6～2	0.6～2	$7 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$

- 日本全国の深度300 mから1,000 mまでの範囲で温泉開発を目的としたボーリングの発生頻度を用いて算出したリスクは、リスク拘束値 10^{-5} [1/y]を大きく下回っている。
 - ボーリング作業従事者被ばくケース：リスクの最大値は 2×10^{-7} [1/y]
 - ボーリング孔核種移行ケース：リスクの最大値は 2×10^{-8} [1/y]



ご説明の内容

1. 安全評価の基本的枠組み
2. 安全評価の基本的手順
3. 安全評価シナリオの作成
4. 基本シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
5. 変動シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
6. 稀頻度事象シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析
7. 人間侵入シナリオの評価
8. 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
9. まとめと今後の取り組み

■ 第2次取りまとめや第2次TRULレポートからの進展

第2次取りまとめや第2次TRULレポートからの変更点を示すべき。

- 安全評価におけるリスク論的な考え方の適用，シナリオ作成の体系的方法論の開発，地質環境や処分場の設計を反映した現実的な解析モデルの開発，最新のデータベースの整備と適用が技術的に進展させた点であることを明示。

■ 核種インベントリの設定根拠

核種インベントリの設定根拠を説明すべき。

- ガラス固化体，TRU等廃棄物に対する評価対象核種および生活圈評価における評価対象核種の設定の考え方を明示



まとめ (1/2)

- 国内外の動向やこれまでの安全評価事例などを参考に、今後、処分場のサイト選定を進めていく過程で繰り返し実施する安全評価への適用を指向した評価の枠組みとこれに沿った方法論を構築
 - シナリオの発生可能性を考慮したリスク論的な考え方を適用
 - 線量／確率分解アプローチに基づくシナリオ区分（基本シナリオ、変動シナリオ、稀頻度事象シナリオ、人間侵入シナリオ）の提示
 - 各シナリオ区分における線量評価結果やリスク評価結果が満たすべきめやすの提示
 - シナリオの構築方法では、処分システム要素に期待される安全機能からトップダウンに検討する方法とFEPに基づくボトムアップ的な検討を行う方法を組み合わせた新たな方法を開発
 - 現実的な安全評価を目指し、母岩の地質環境やそれに応じて設計された処分場の特徴をできるだけ忠実に反映した解析モデルを開発
 - 最新のデータベースを用いたデータセットを設定

まとめ (2/2)

- 第2次取りまとめおよび第2次TRULレポートからの主要な進展
 - シナリオの発生可能性を考慮したうえで、放射線学的影響を議論するリスク論的な考え方を適用
 - 安全機能を視軸として、関連するFEPによりもたらされる状態に基づきシナリオを構築する手法を導入
 - 化学反応と物質移行を連成した人工バリアの変質などの現象解析の情報を状態設定に反映
 - 緩衝材や埋戻し材、排水溝などの人工物を多孔質媒体で表現し、母岩を割れ目ネットワークモデルで表現した三次元モデルを用いた粒子追跡解析を実施
 - 処分坑道などの設計や母岩の割れ目の連結性を反映した粒子追跡解析結果を用いて核種移行解析モデルを構築
 - 廃棄体下流に存在する断層や処分パネルなどの地下施設の配置を反映して、評価上の核種移行距離を設定
 - 第2次取りまとめおよび第2次TRULレポート以降に拡充されたデータベースを用いて核種移行パラメータを設定

今後の取り組み

- 現状の評価の保守性をより合理的なものとするための、現実的な評価技術の開発
- 安全評価シナリオの作成から解析ケース設定に至る一連の作業の追跡性の向上
- 核種移行パラメータを設定するために必要なデータの継続的な拡充

分類	主な技術開発項目
(1) 地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化	<ul style="list-style-type: none"> ➢ ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化 ➢ 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討 ➢ 現象解析モデルの統合化技術の構築 など
(2) リスク論的考え方に則したシナリオの構築手法の高度化	<ul style="list-style-type: none"> ➢ シナリオ構築から核種移行解析ケース設定に用いる情報の管理ツールの整備 ➢ 様々なデータを利用可能なストーリーボードの高度化 など
(3) 地層処分システムの状態変遷などを反映した核種移行解析モデルの高度化	<ul style="list-style-type: none"> ➢ ニアフィールドにおける状態変遷を考慮した核種移行解析モデルの構築 ➢ 水みちの微細透水構造などを反映した核種移行解析モデルの構築・高度化
(4) 施設設計などを反映した核種移行解析モデルの高度化	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 施設設計を反映した核種移行解析モデルの構築・高度化 ➢ 地質環境の変遷に応じた生活圈評価手法の高度化
(5) 核種移行などに関するデータの取得およびデータベース整備	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 処分場について想定される多様な環境や状態を対象とした核種移行パラメータの設定に資するデータの拡充 ➢ さまざまな生活圈の条件を想定した評価に係るデータの拡充 など



ご清聴ありがとうございました





参考文献

- JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC-TN1400 99-023.
- Marques Fernandes, M., Baeyens, B., Dahn, R., Scheinost, A.C., Bradbury, M.H. (2012): U(VI) sorption on montmorillonite in the absence and presence of carbonate: A macroscopic and microscopic study, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 93, pp.262-277.
- 産総研（産業技術総合研究所）（2013）：日本の火山（第3版）, 200万分の1地質編集図 No.11, 産業技術総合研究所 地質調査総合センター.
- 山元孝広（2011）：地質学から見た高レベル放射性廃棄物処分の安全評価－事象のシナリオに基づく長期予測の方法論, *シンセオロジー*, 4, pp. 200-208.