



# 閉鎖後長期の安全性の評価

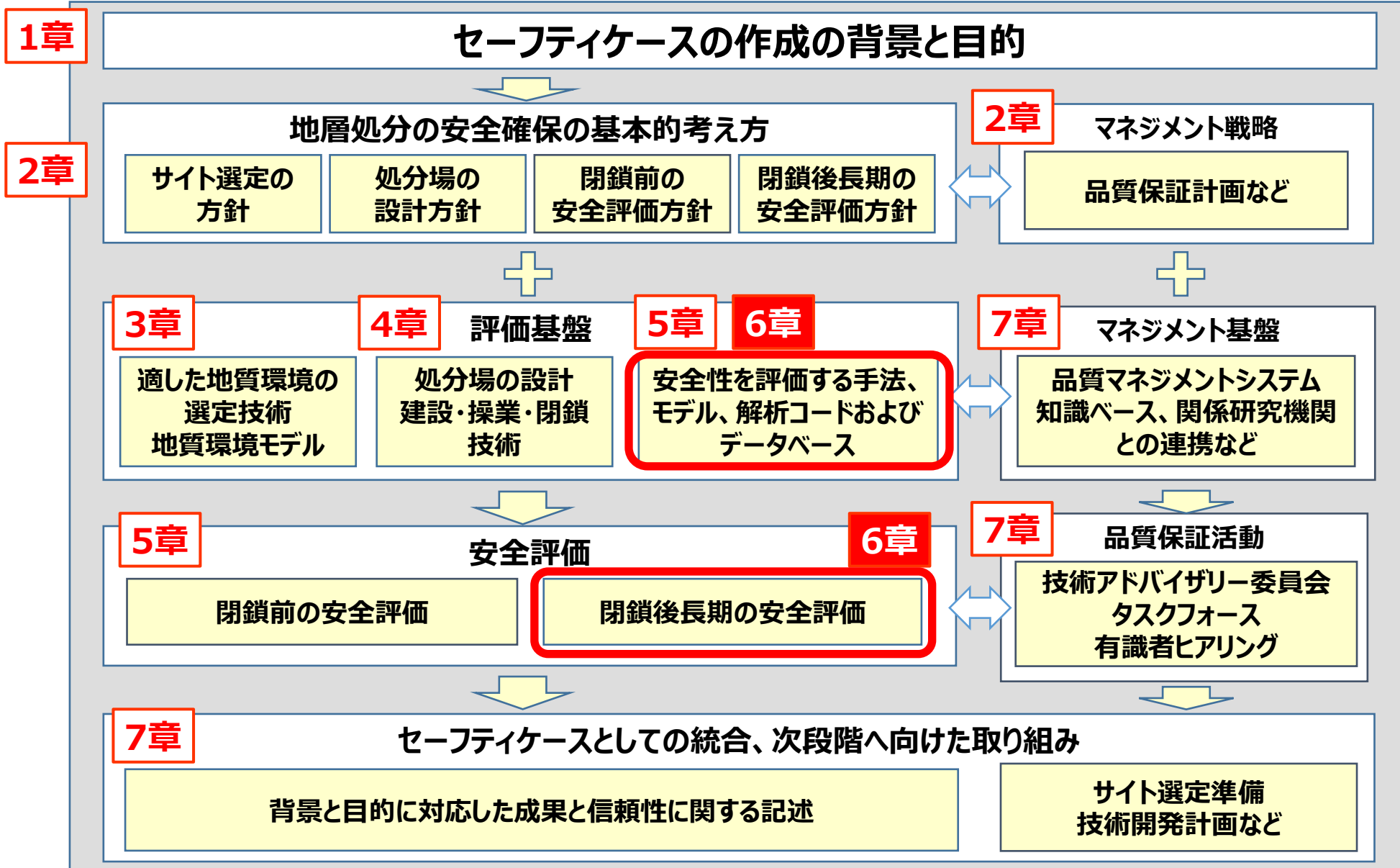
---

地層処分技術オンライン説明会  
(改訂した包括的技術報告書)  
長期安全評価

2021年 6月 30日

原子力発電環境整備機構 (NUMO) 技術部  
藤崎 淳

# セーフティケースの構造と報告書の構成との関係



### ○目的

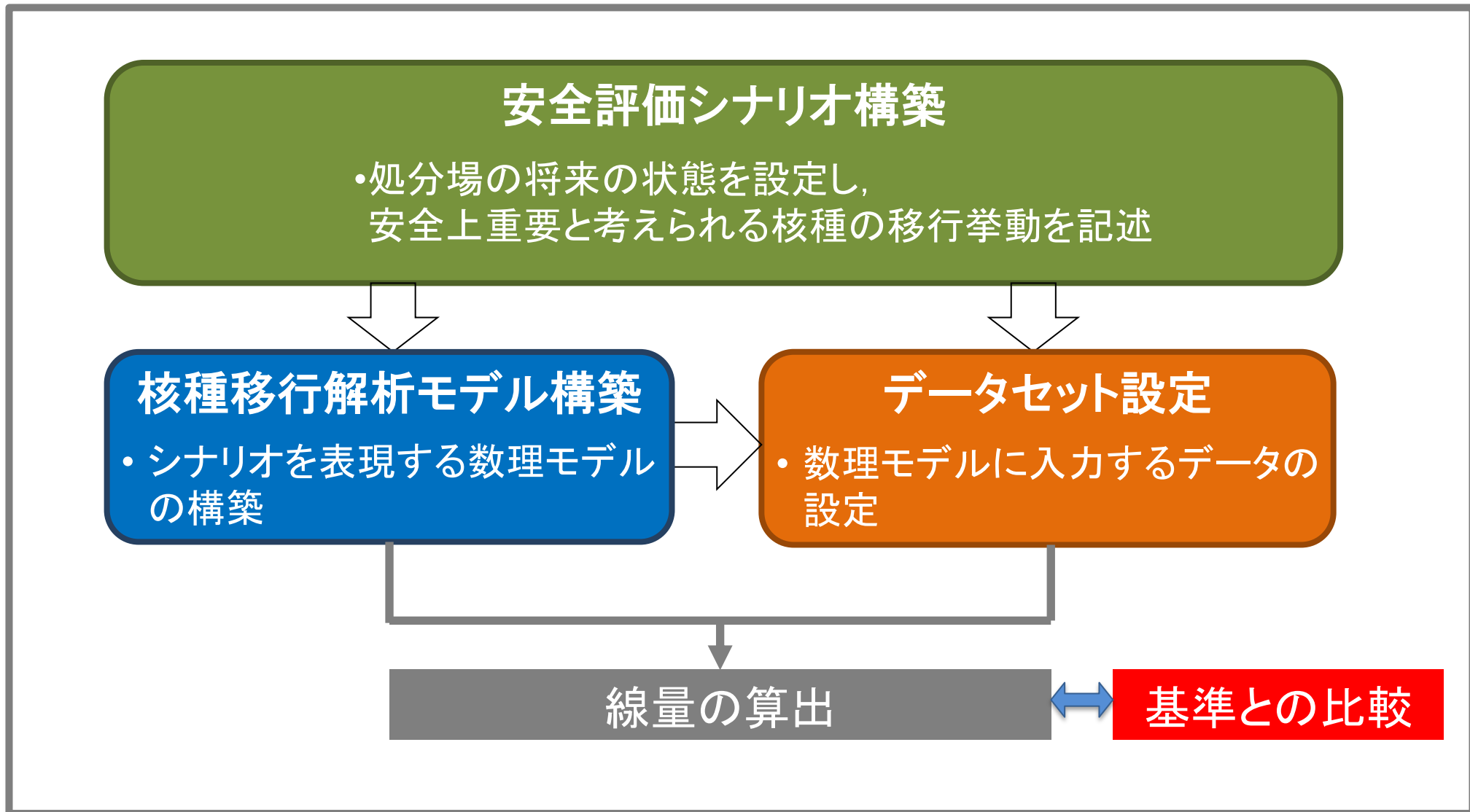
わが国の多様な地質環境に対して、処分場の閉鎖後長期にわたる安全性を評価するための技術基盤が整っていること、および閉鎖後長期の安全性を確保できる見通しを有することを提示

### ○アプローチ

- 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
- 特に、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安全性を合理的に比較・評価できる核種移行解析の手法を開発
- 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たうえで、核種移行解析を実施して線量を推定した結果と仮設定した基準との比較を通じて安全性を議論

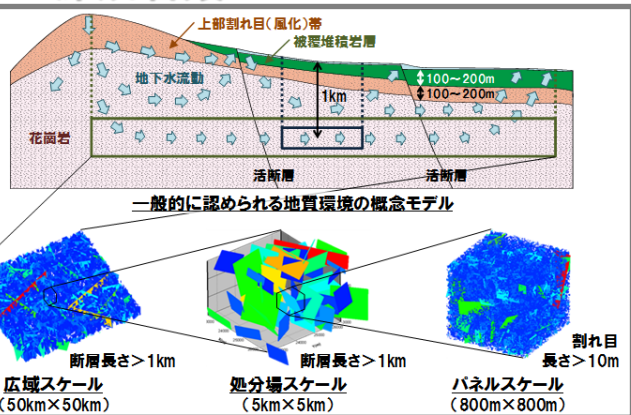
1. 安全評価の基本的枠組み (6.1節)
2. 安全評価の基本的手順 (6.2節)
3. 安全評価シナリオの作成 (6.3節)
4. 基本シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析  
(6.3節, 6.4節)
5. 変動シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析  
(6.3節, 6.4節)
6. 稀頻度事象シナリオに対応する解析ケースの設定と核種移行解析  
(6.3節, 6.4節)
7. 人間侵入シナリオの評価 (6.5節)
8. まとめと今後の取り組み (6.6節)
9. 原子力学会レビュー結果

- 処分場の閉じ込め性能を線量を指標として評価

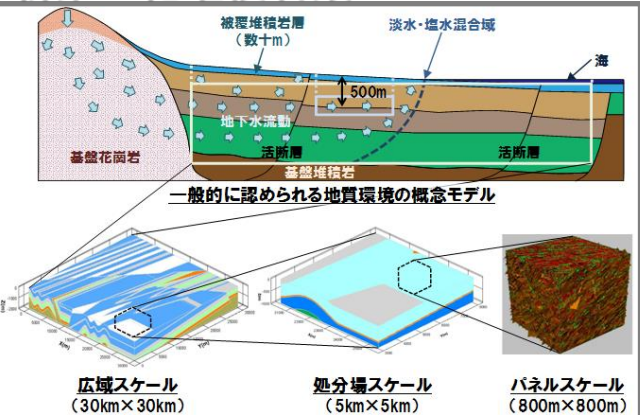




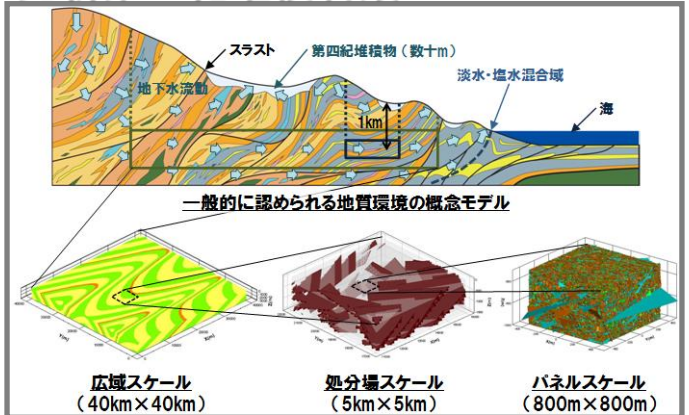
## 深成岩類 (モデル水質:2種類)



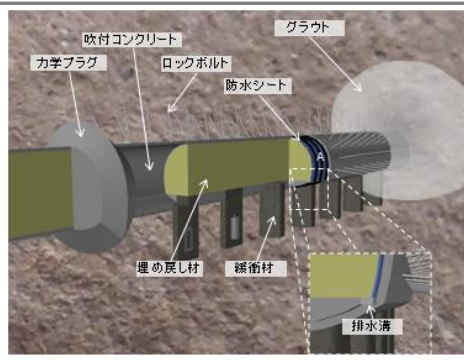
## 新第三紀堆積岩類(モデル水質:2種類)



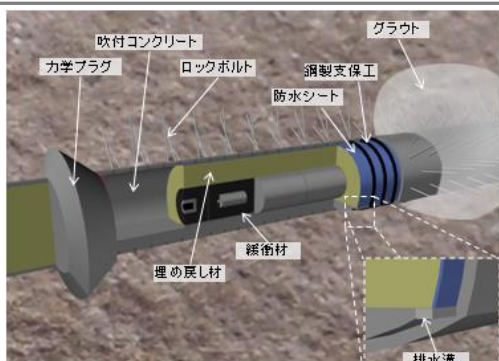
## 先新第三紀堆積岩類(モデル水質:2種類)



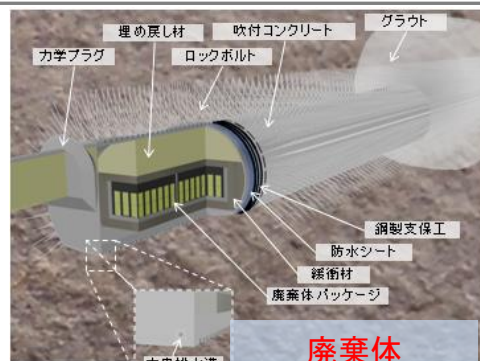
## HLW※処分場 (縦置き・ブロック方式)



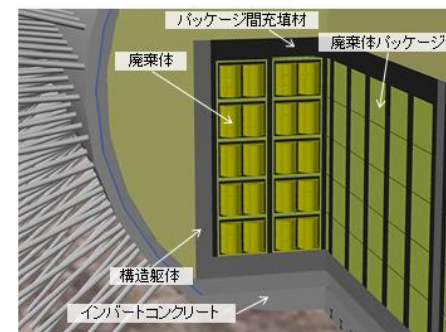
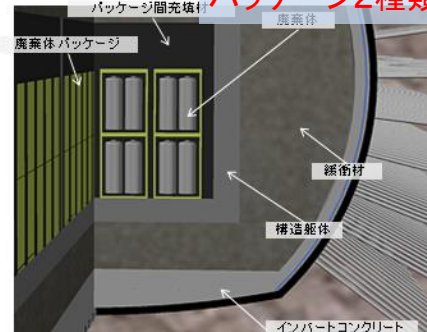
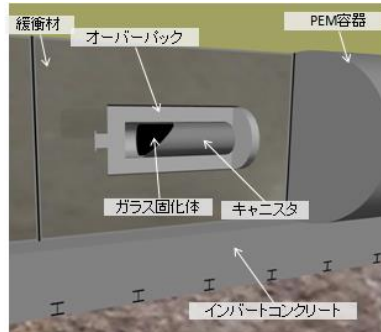
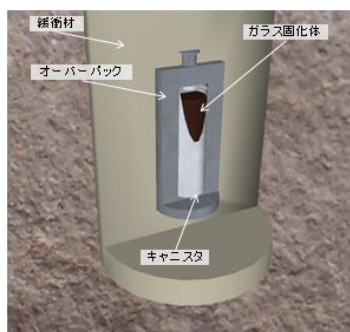
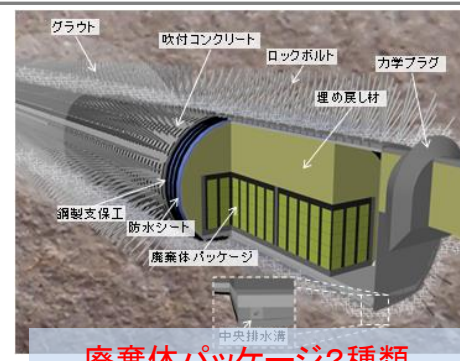
## HLW※処分場 (横置き・PEM方式)



## TRU等廃棄物処分場 (緩衝材有り)



## TRU等廃棄物処分場 (緩衝材無し)

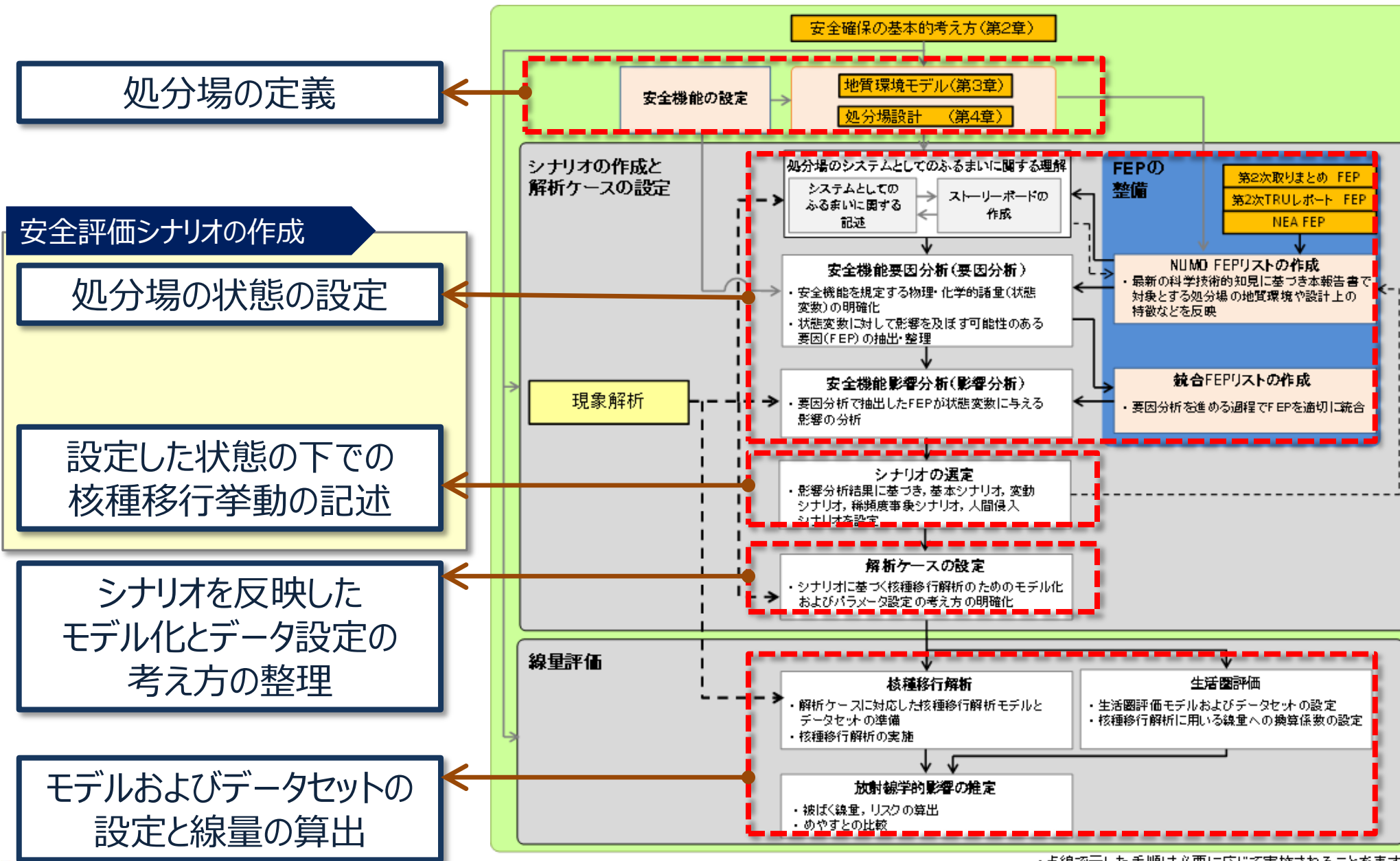


- 線量と発生確率を別々に考察して評価する「線量確率分解アプローチ」を採用
- シナリオを発生可能性に応じて区分し，区分ごとに基準値を設定
- ICRP等の国際機関の指針を基本にシナリオ区分とめやす線量を設定
- 評価期間は，計算上最大の線量が現れるまでの時期が確認できるまでの期間とした

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"> <li>●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<b>発生する可能性が最も高いと想定されるシナリオ</b> → (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<b>発生の可能性が高いとみなすべきもの</b>)</li> </ul>	<p><b>安全性の確認：</b>  <b>300<math>\mu</math>Sv/y</b>                      (安全性を確認するめやす線量として線量拘束値を設定)</p> <p>基本シナリオに対する事業者としての<b>努力目標：</b>  <b>10<math>\mu</math>Sv/y</b>                      (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)</p>
変動シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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</li> </ul>	

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"> <li>● 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<b>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</b></li> <li>● <b>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</b>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レベルの幅を適用</li> </ul>	<p>20～100mSv (事象発生直後の1年間) 1～20mSv/y (事象発生から2年目以降)</p>
人間侵入シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 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、<b>人間侵入シナリオが生ずる可能性は極めて小さい</b></li> <li>● 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レベルの幅を適用</li> </ul>	<p>20～100mSv (事象発生直後の1年間) 1～20mSv/y (2年目以降)</p>





・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

- 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
- 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
- 処分場の構成要素について考慮すべき熱的、水理学的、力学的、化学的な状態（以下、「THMC状態」という）の変化は以下の情報を考慮し網羅的に検討
  - 最新の科学技術的知見に基づき作成したNUMO FEPリスト
  - THMC状態の変化に関する現象解析結果（例：緩衝材ベントナイトの変質解析）

例：火山活動

例：廃棄体の特性

例：化学的変質

\* FEP：地層処分場の各構成要素の特徴(**F**eature), 地層処分場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

## ストーリーボードのイメージ

## 時間枠

- ・ $T_1$  : 処分場閉鎖から再冠水完了までの期間
- ・ $T_2$  : 再冠水完了から放射性核種の移行が生ずるまでの期間
- ・ $T_3$  : 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
- ・ $T_4$  : 地質環境の特性に関する不確実性が增大する期間

### 空間スケール

広域スケール  
(数十km×数十km)

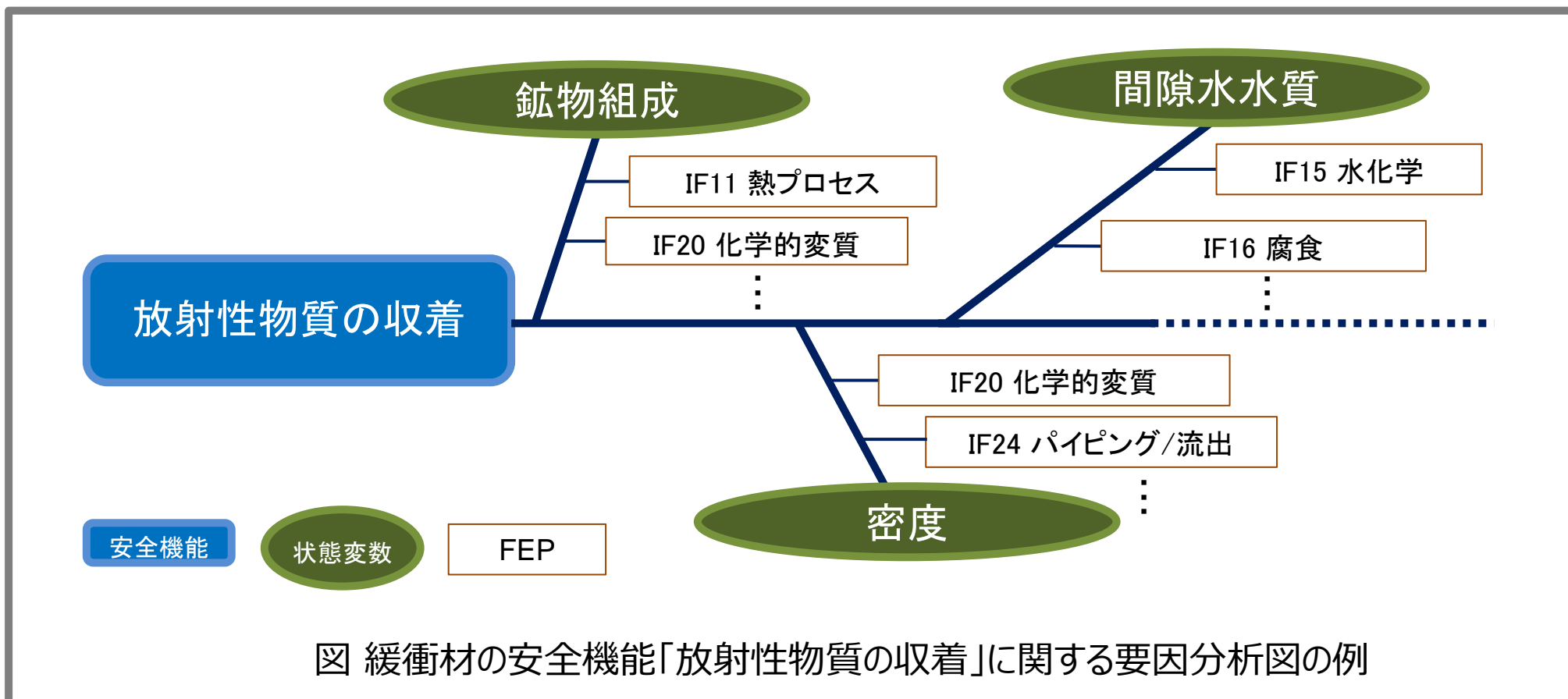
処分場スケール  
(数km×数km)

パネルスケール  
(数百m×数百m)

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)

	$T_1$ 環境が継続すると考えられる期間	$T_2$ 移行が生ずるまで	$T_3$ 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	$T_4$ 考えられるまでの期間
<p>建設・操業 → 処分場閉鎖</p> <p>建設・操業 → 処分場閉鎖</p>	<p>再冠水完了</p> <p>再冠水完了</p>	<p>放射性核種の移行の生じ</p> <p>放射性核種の移行の生じ</p>	<p>放射性核種の移行の生じ</p> <p>放射性核種の移行の生じ</p>	<p>放射性核種の移行の生じ</p> <p>放射性核種の移行の生じ</p>
<p>広域スケール</p> <p>・サイト選定で処分場スケールの領域から除外した活断層や大規模な断層が存在する。</p>	<p>・放射性核種の移行は地下の流れに沿って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。</p>	<p>・放射性核種の移行は地下の流れに沿って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。</p>	<p>・放射性核種の移行は地下の流れに沿って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。</p>	<p>・放射性核種の移行は地下の流れに沿って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。</p>
<p>処分場スケール</p> <p>・坑道への湧水は排水され、坑道周辺の母岩中の水位は下がって坑道へ向かう水の流れが生じる。</p> <p>・坑道から空気が供給され母岩は部分的に水理学的に不飽和状態となる。</p> <p>・坑道周辺の地下水は酸化性環境となる。</p>	<p>・処分場の建設や操業によって擾乱を生じた人工バリア周辺の母岩のTHM状態は、地質環境が有する元の特性への回復が進んでおり、地質環境に期待される隔離および閉じ込めの安全機能が発揮できるような状態となっている。</p> <p>・埋め戻し材や周辺母岩のセメント系材料による変質がわずかに生じる。</p>	<p>・<math>T_1</math>に引き続き母岩のTHM状態は安全機能が発揮できるような状態となっている。</p>	<p>・地質環境の条件は安定的に継続する。</p> <p>・地震によって水理や地下水の化学的条件が短期的に変化する可能性があるが速やかに回復する。</p> <p>・止水プラグや埋め戻し材は地下水との反応によって少しずつ変質する。</p> <p>・母岩を移行する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。</p>	<p>・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。</p>
<p>パネルスケール</p> <p>・坑道への湧水は排水され、坑道近傍の母岩中の水位は下がって坑道へ向かう水の流れが生じる。</p> <p>・坑道から空気が供給され母岩は部分的に水理学的に不飽和状態となる。</p> <p>・坑道周辺の地下水は酸化性環境となる。</p>	<p>埋め戻した坑道は坑道の母岩から徐々に地下水が冠水し、母岩と一体になって飽和状態に回復する。</p> <p>建設・操業中に導入された空気中の酸素は周辺母岩中の鉱物との反応等により消費されて地下水は本来の還元性に戻る。</p> <p>腐食に伴って発生した水素が緩衝材中や処分坑道、連絡坑道、母岩などを介して処分場から分散・移動する。</p> <p>坑道内のセメント系材料と地下水が反応することにより坑道周辺母岩の地下水のpHは局所的に高いものとなる。これにより埋め戻し材や周辺母岩の変質がわずかに生じる。</p>	<p>腐食に伴う水素ガスが気相あるいは地下水中の溶解あるいは緩衝材や埋め戻し材、母岩などを介して処分場から分散・移動する。</p> <p>母岩中の地下水は受け付けコンクリートやグラウトと反応して化学的特性が変化し、止水プラグ、埋め戻し材と反応する。これにより止水プラグ、埋め戻し材の変質がわずかに生じる。</p>	<p>母岩中には割れ目のネットワークが形成されており、地下水はネットワーク中の連結した多数の割れ目の中を流動する。</p> <p>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。</p> <p>核種の一部は母岩地下水中のコロイドとともに移行する可能性がある。</p> <p>止水プラグや埋め戻し材は地下水との反応によって少しずつ変質する。</p> <p>セメント系材料の溶出によって地下水水質や母岩の構成鉱物に変化が生じる。</p> <p>処分場に存在する有機物が核種移行挙動に影響する可能性がある。</p>	<p>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。</p>
<p>ニアフィールドスケール</p> <p>処分坑道や処分坑を掘削した後、オーバーバックに封入した高レベル放射性廃棄物を埋設する。</p> <p>埋設が完了した処分坑道は埋め戻される。</p> <p>ガラス固化体定置後に廃棄物の発熱により周辺温度が上昇。</p> <p>処分坑道の周辺にEDZが発生。</p> <p>処分坑道周辺の地下水は酸化性環境となる。</p>	<p>廃棄物の発熱量の低下によって温度は元の地温レベルに下がっていく。</p> <p>埋め戻された坑道は周辺の母岩から徐々に地下水が冠水し、母岩と一体になって飽和状態に回復する。</p> <p>緩衝材は地下水の冠水とともに膨張することによって、廃棄体を力学的に安定な状態に維持するとともに、非常に低い透水性の場を作る。</p> <p>設置・ブロック方式の場合は、緩衝材が膨張することによって施工時に残された隙間をふさぐ。</p> <p>緩衝材や周辺母岩のセメント系材料による変質がわずかに生じる。</p> <p>オーバーバックが腐食する跡を消費しながら少しずつ一様に腐食する。腐食は水素発生型の極めてゆっくりとした形態に移行する。</p> <p>還元環境における鉄の腐食により、水素ガスが発生し、地下水に溶解、あるいは、過剰なものは気相を形成する。</p> <p>緩衝材に鉄による変質がわずかに生じる。</p> <p>新第三紀堆積岩層では、クレープ現象による坑道内側への岩盤の変形が緩やかに進行する。</p> <p>緩衝材が変形してせん断応力が増加する。</p> <p>オーバーバックの自重による長期的な沈下が生じる。</p>	<p>オーバーバックは少なくとも1,000年間は廃棄体と地下水の接触を防止する。PEM容器の腐食による酸素の消費は閉じ込め期間の延長に寄与する。</p> <p>EDZは緩衝材の膨張、オーバーバックなどの腐食による体積の膨張を経て力学的に変化し、それに伴って水理学的特性が変化する。</p> <p>ガラス固化体中の多くの放射性核種は放射性崩壊によって減衰する。</p> <p>放出される放射線や熱は著しく減少して、人工バリア周辺の温度は地温に緩やかに近づく過程にある。</p> <p>オーバーバックについて放射線による酸化がわずかに生じる。</p> <p>金属材料の腐食に伴う水素ガスの発生が継続する。</p>	<p>オーバーバック破壊後、ガラス固化体は地下水と接触し溶解する。</p> <p>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。</p> <p>放射性核種を含むコロイドは緩衝材のろ過機能により移行が阻止され、緩衝材内に留まる。</p> <p>放射性核種は放射性崩壊によって減衰する。</p> <p>放射性核種はEDZ内で地下水と混合し、EDZ外側に位置する母岩に移行する。</p> <p>緩衝材は地下水との反応によって少しずつ変質する。</p>	<p>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。</p>

- 設定したシステムのふるまいの下での、各構成要素の安全機能の状態を設定するために、安全機能への影響要因を特定
  - 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
  - 「処分場のシステムとしてのふるまいの記述」等を参照して安全機能に関連付けた状態変数に対し影響を及ぼすFEPを関連付け

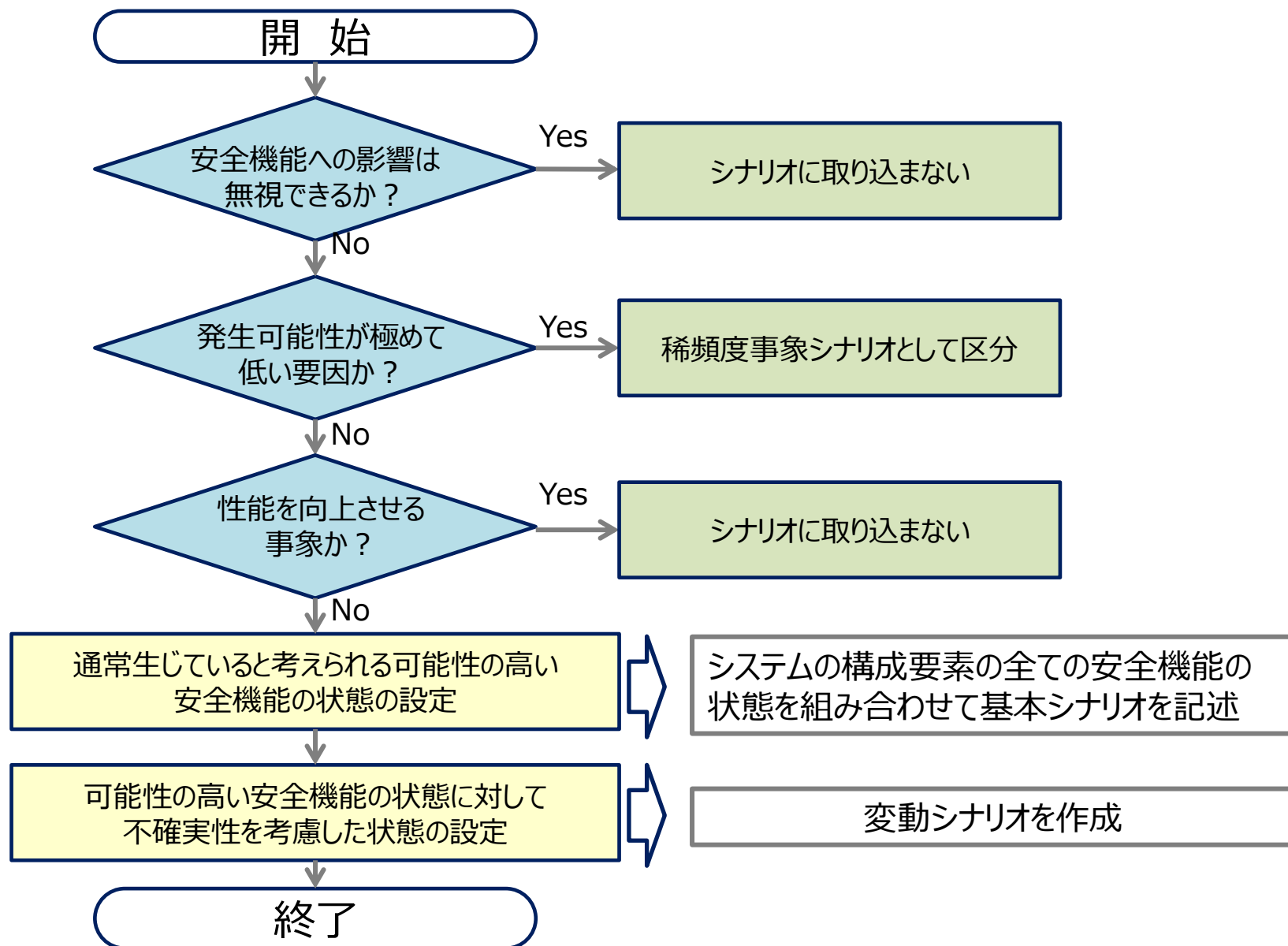


- 状態変数に関連付けたFEPごとに安全機能への影響を表形式で分析
- 前頁の緩衝材の安全機能「放射性物質の収着」に対する影響分析の一部

状態変数	FEP	もっとも確からしい状態	シナリオで考慮すべき不確実性	シナリオ上の取り扱い区分
間隙水水質	水化学	<p>地下水組成によってはモンモリロナイトのCa型化が進展する可能性がある（付属書6-15参照）。</p> <p>⋮</p> <p>FEPによりもたらされるもっとも確からしい状態を根拠とともに記述。</p>	<p>現象解析において、モンモリロナイトの溶解速度、熱力学データ、沈殿する二次鉱物とその物質移行抑制効果に不確実性が存在。不確実性を考慮したとしても健全部が十分に残存することを支持する知見が得られている（付属書6-8参照）。</p> <p>⋮</p> <p>シナリオで考慮すべき不確実性を根拠とともに記述。</p>	<p>高レベル放射性廃棄物処分場における緩衝材中の核種の収着や拡散に対して、地下水と緩衝材との反応による間隙水水質とCa型化の進展度を考慮する。</p> <p>⋮</p> <p>シナリオ上の取り扱いを記述。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•「●●●を考慮する／しない。」</li> <li>•「変動シナリオにおいて○○○の不確実性を考慮する。」</li> </ul>

■ 安全機能（合計14個）に関係づけられる各FEP（合計956個）について上記の分析を実施





## ■ 基本ケース設定の例

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)
<p>期間：放射性核種の移行の開始以降(<math>T_3</math>)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 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出</li> <li>• 放射性核種の溶出は溶解度を上限として抑制</li> <li>• 地下水中の放射性核種は緩衝材中を拡散により移行</li> <li>• 放射性核種は鉱物に収着し移行が遅延</li> <li>• 緩衝材中を移行した放射性核種はやがて母岩に移行</li> </ul> <p>図 廃棄体近傍の核種移行の概念図</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• オーバーパックの存在は無視 (移行の抵抗なし)</li> <li>• 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</li> <li>• ガラス固化体の近傍での放射性核種の沈殿を考慮</li> <li>• 緩衝材中の収着と拡散を考慮</li> </ul>

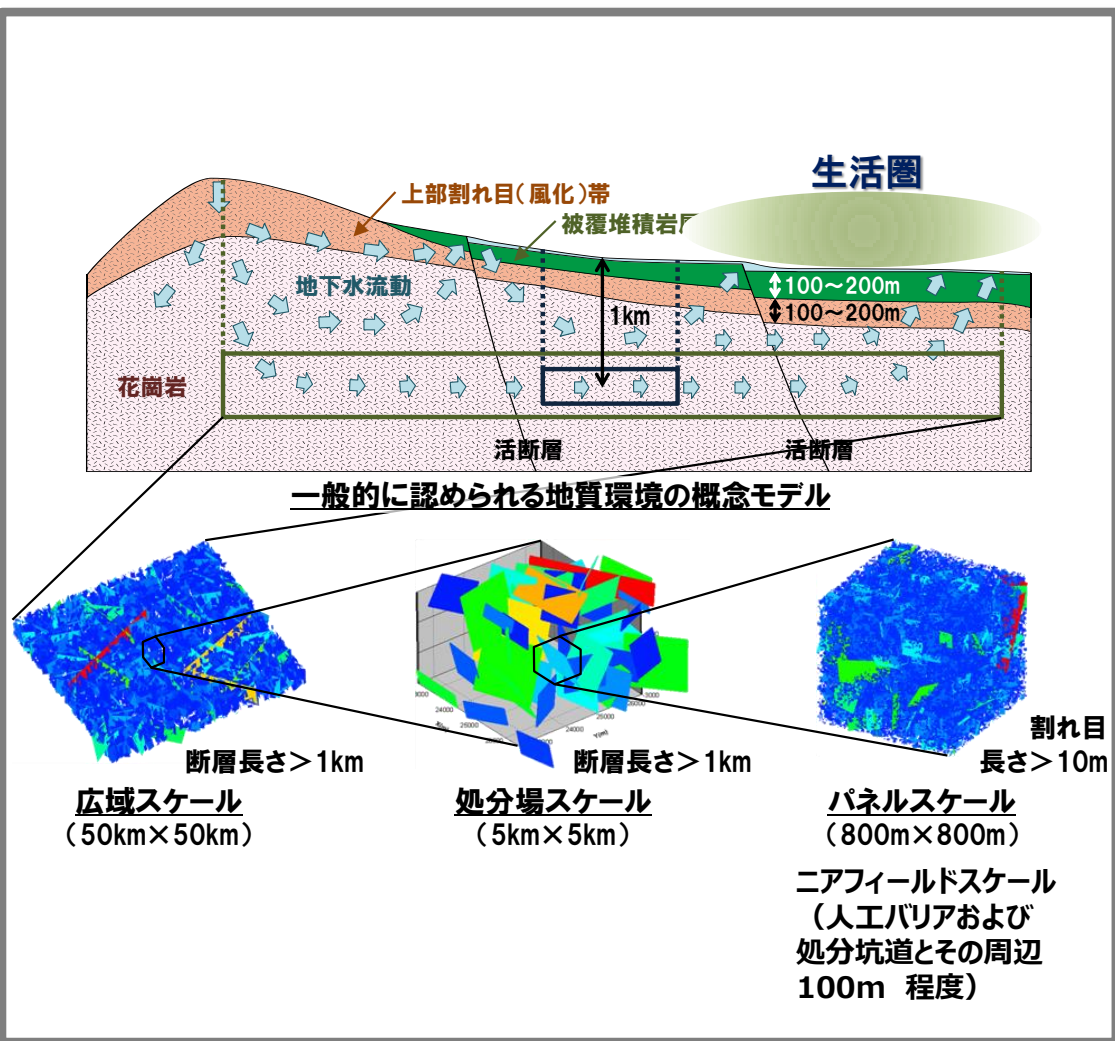


図-1 空間スケール (深成岩類の例)

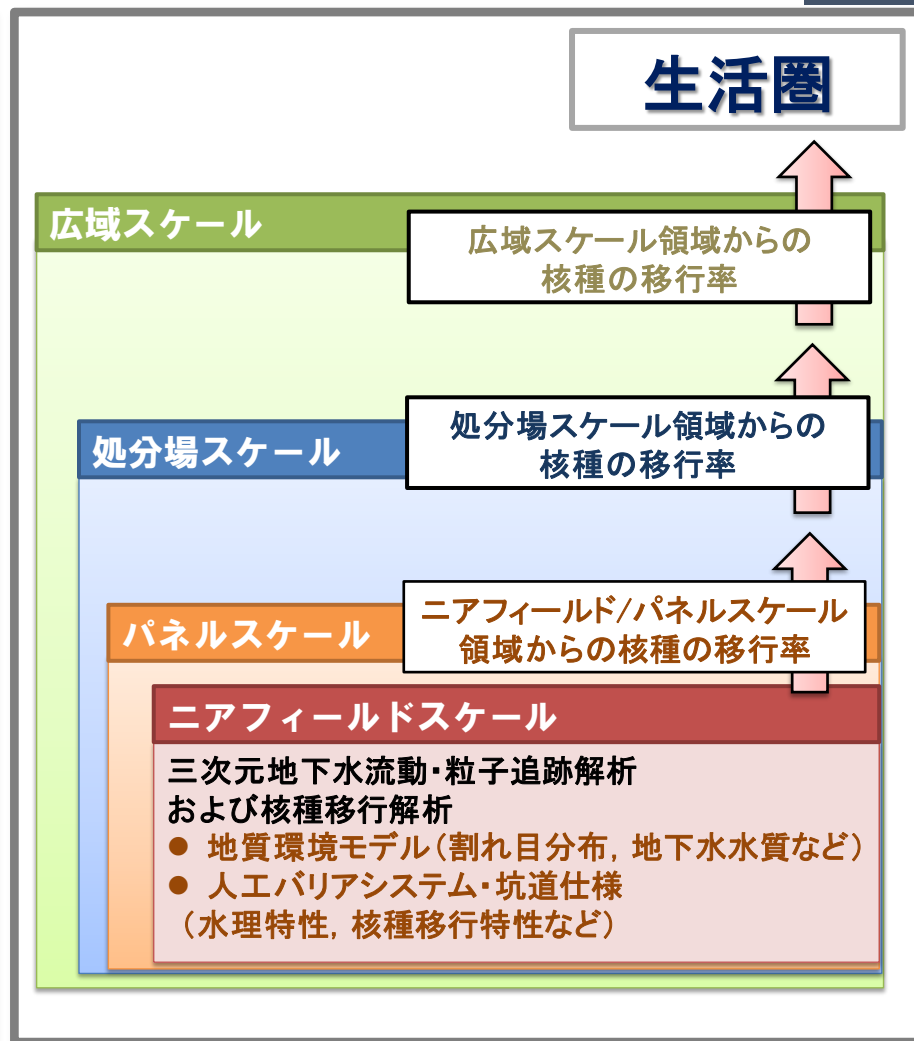
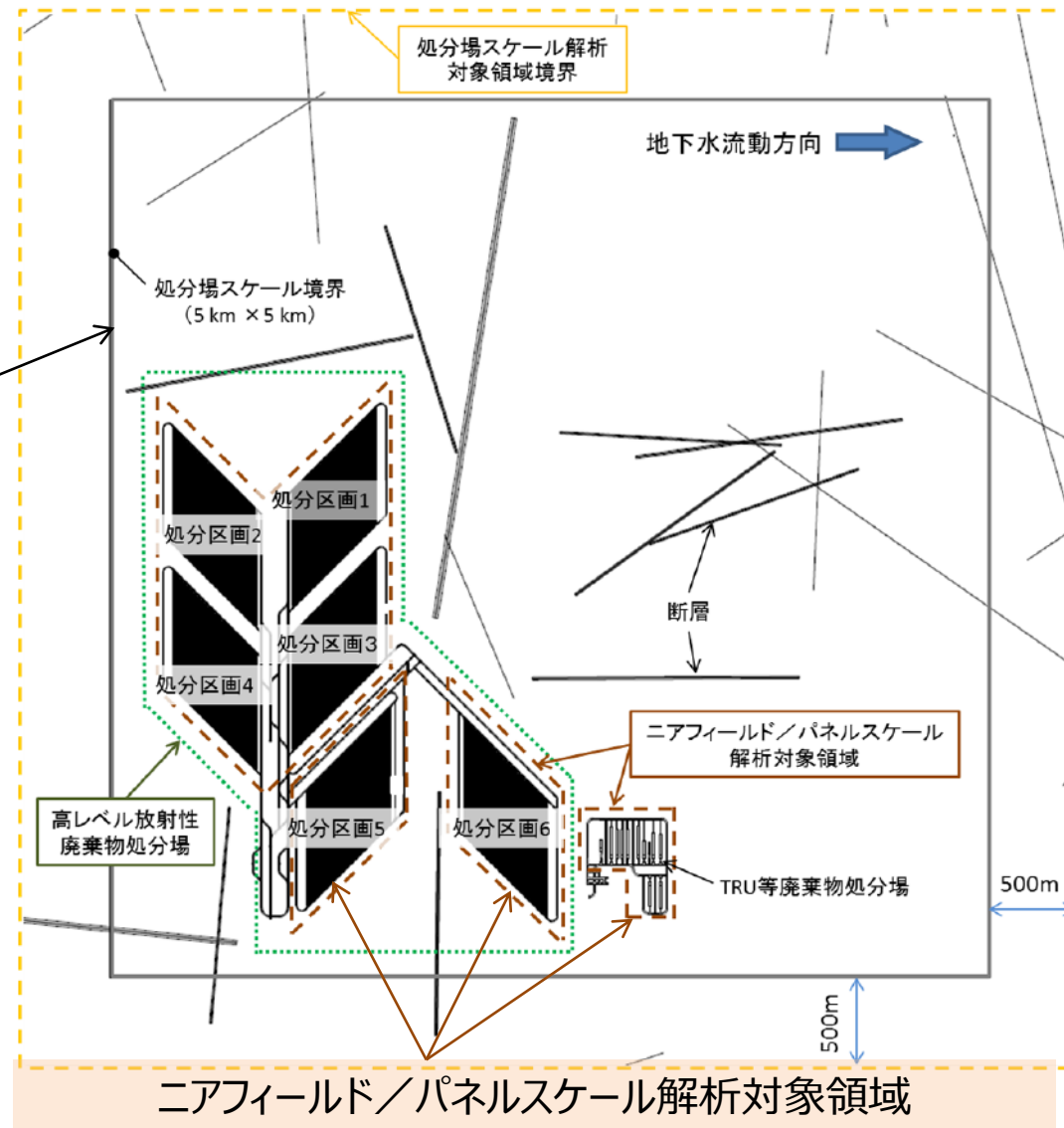


図-2 空間スケール間の核種の移行の概念

# 核種移行解析で考慮する空間スケール



処分場スケール  
境界  
(5 km×5km)

図 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

## 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・ランダムウォーク粒子追跡法による物質移動解析を実施
- 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）

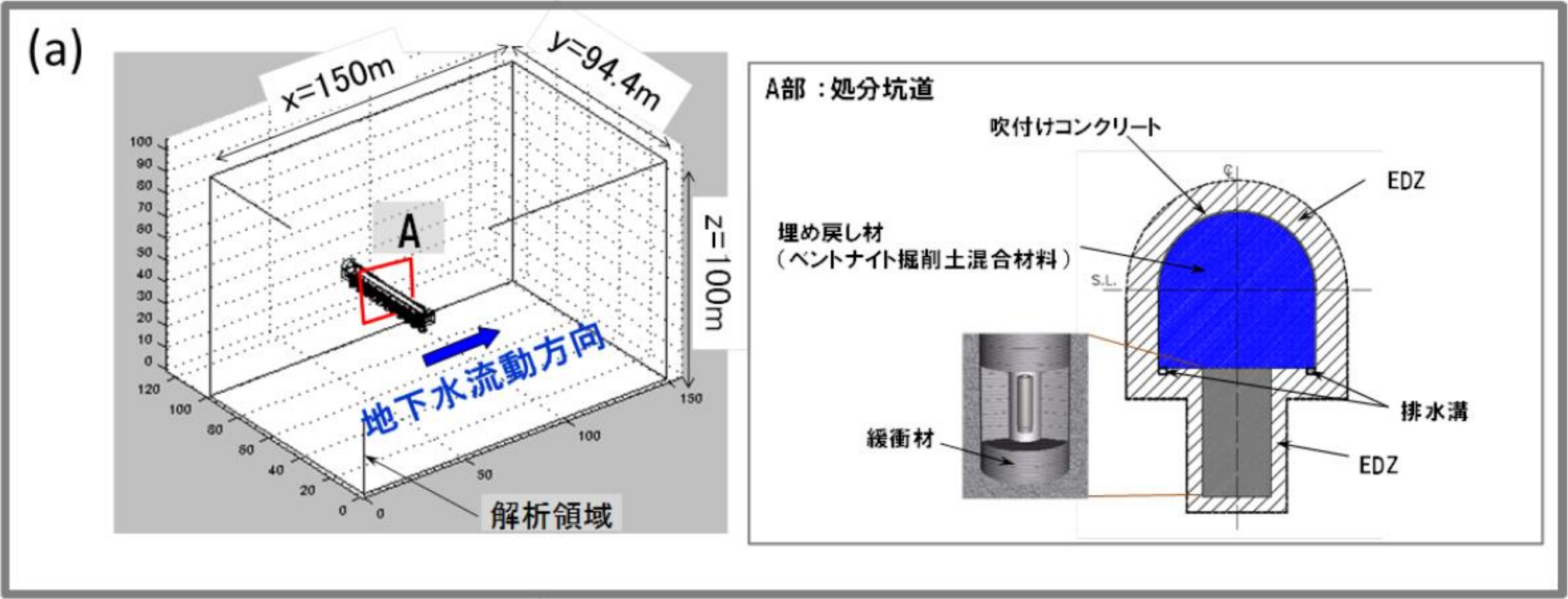
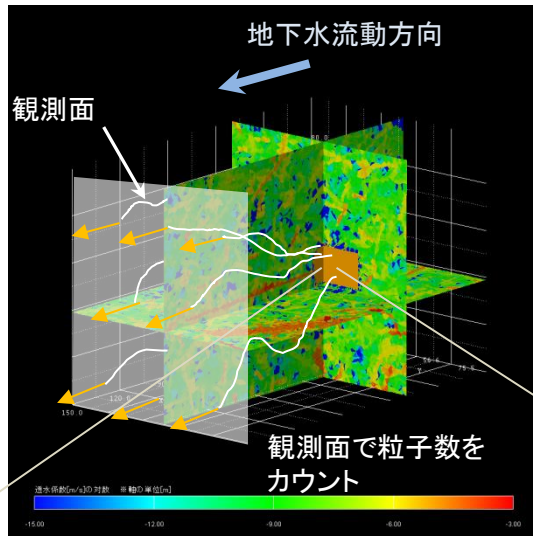


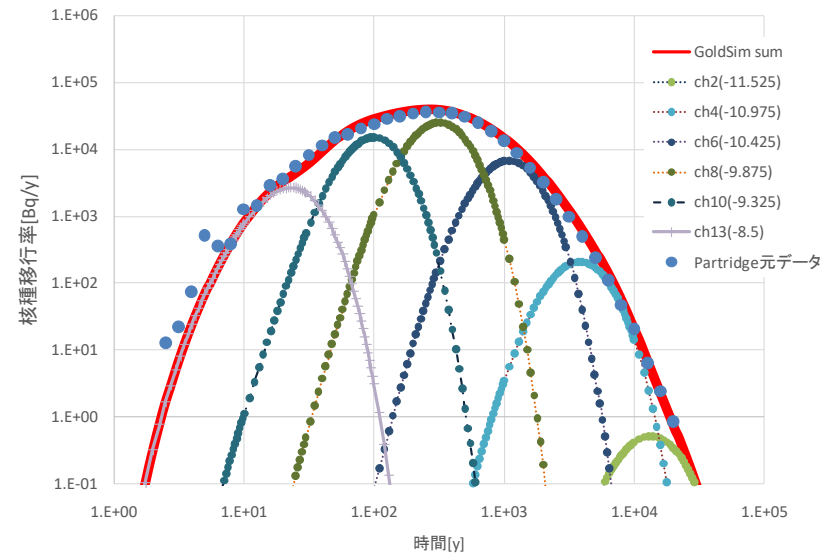
図 深成岩類の処分場，先新第三紀堆積岩類の処分場におけるニアフィールドスケールの三次元地下水流動・粒子追跡解析の解析体系例

# 三次元ランダムウォーク粒子追跡解析モデルと簡略化

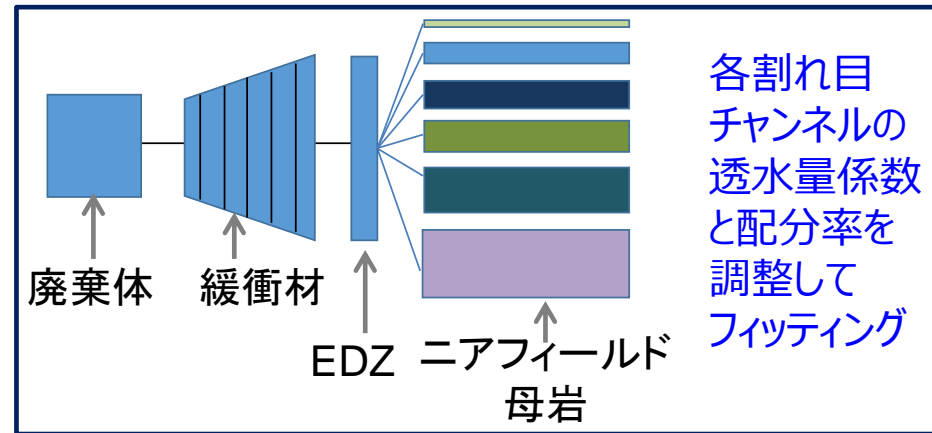
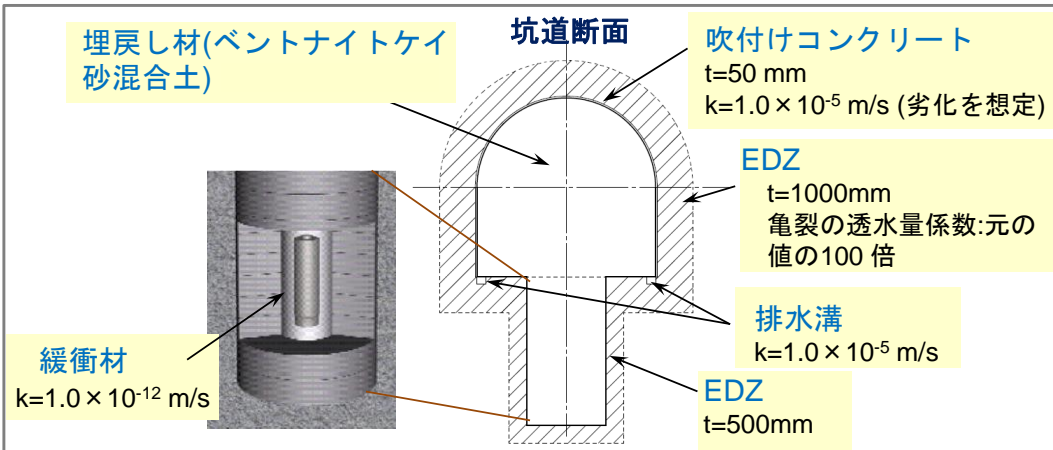
— 三次元のランダムウォーク粒子追跡解析に基づく一次元モデルの構築 —



三次元粒子追跡解析(解析コード: Partridge)



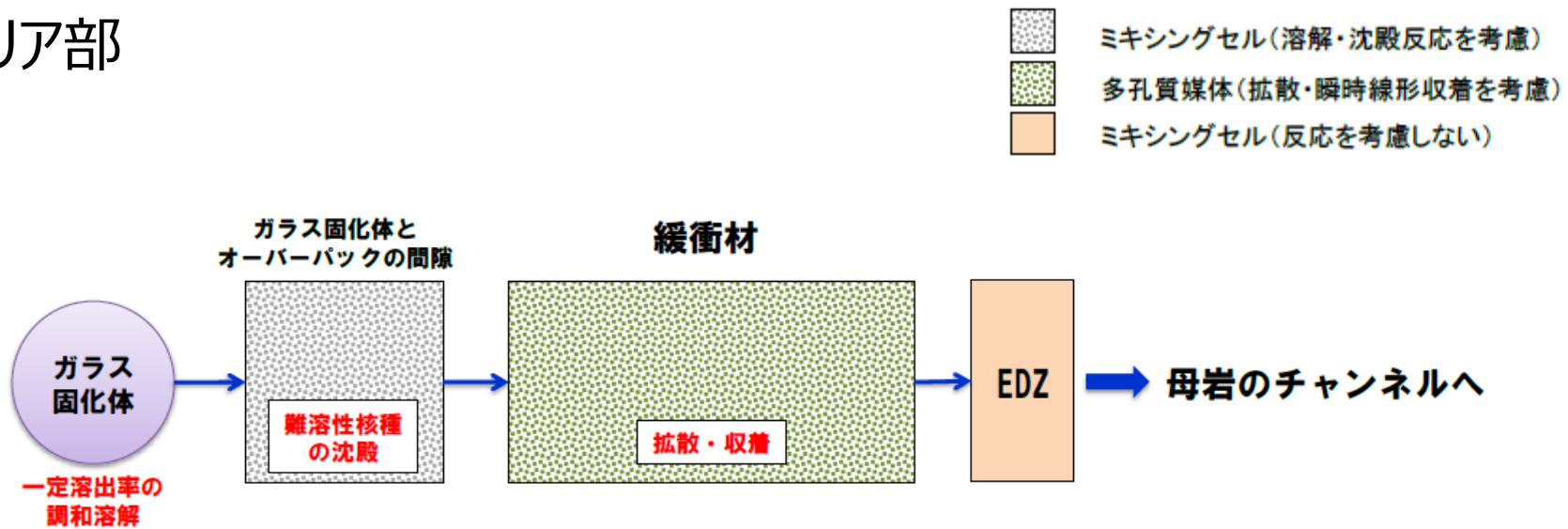
フィッティング



一次元の物質移行解析 (Goldsim)

ニアフィールドの簡略化核種移行解析モデルの構築

## ■ 人工バリア部



## ■ 母岩のチャンネル部の透水量係数分布（基本ケース， 縦置き・ブロック方式の例）

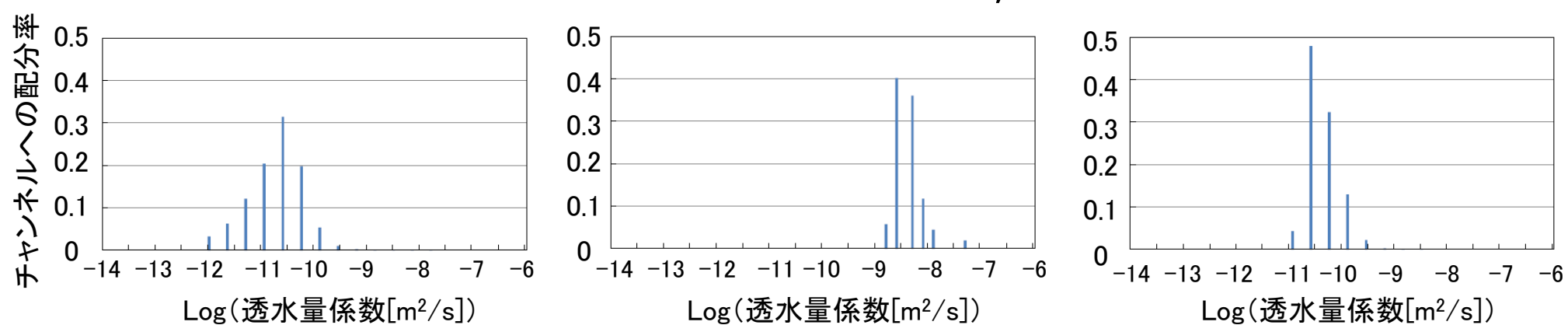


図-1 深成岩類

図-2 新第三紀堆積岩類

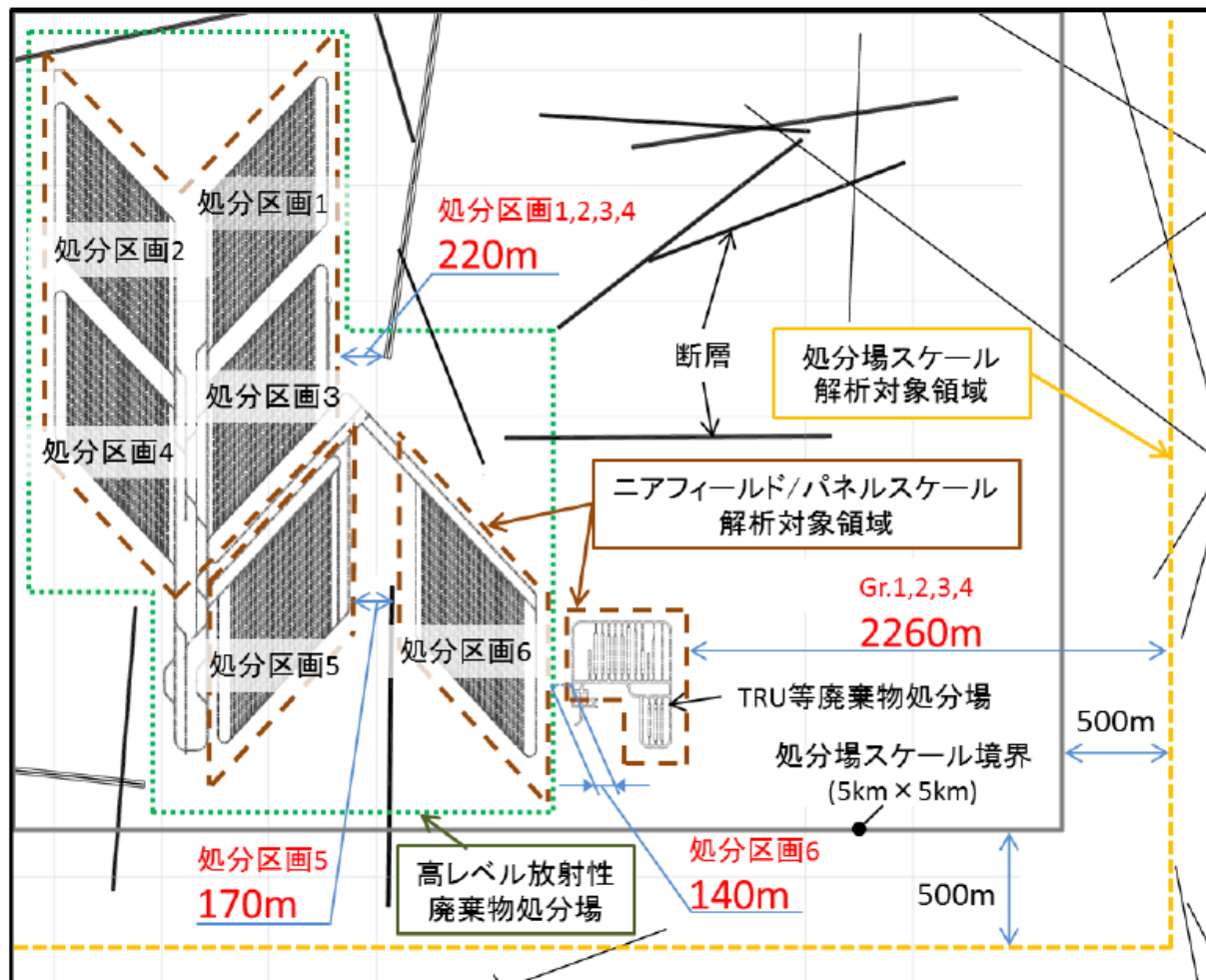
図-3 先新第三紀堆積岩類

# 処分場スケールのモデル構築

## ➤ 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

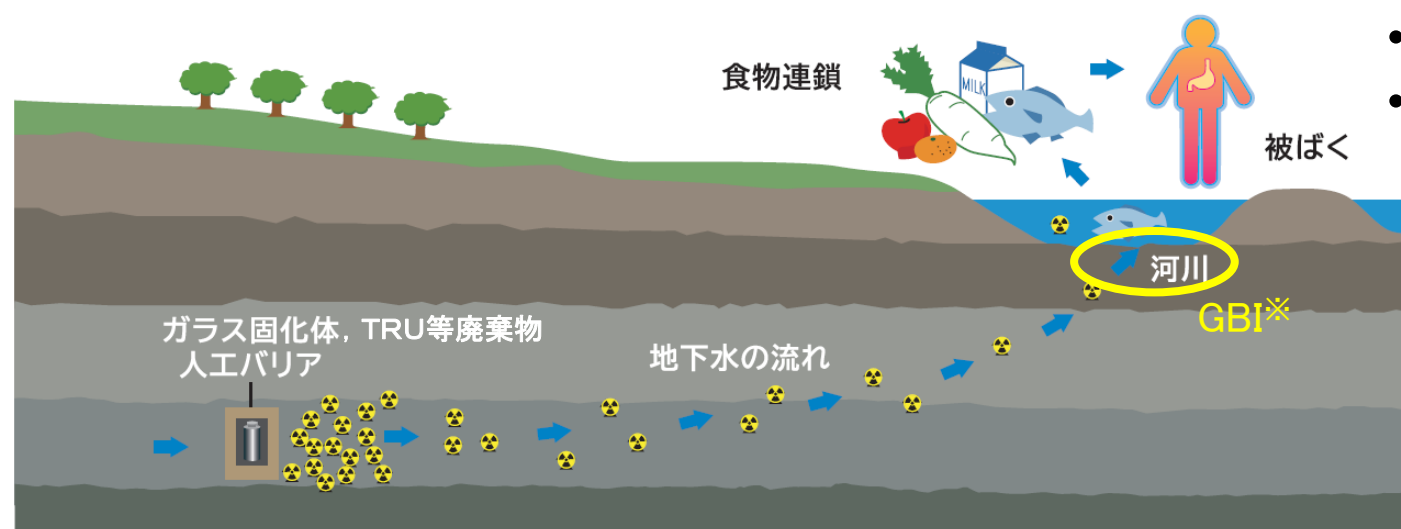
地下水流動方向



## □ 移行距離設定の考え方

- パネルスケール解析領域の境界から、下流域に存在する長さ1 km以上の断層またはTRU等廃棄物処分場まで（HLWの場合）の地下水流動方向に沿った最短距離を設定
- これらが存在しない場合には処分場スケール解析対象領域境界との最短距離を設定

※ 処分場スケールからの核種移行率を直接生活圏に入力（広域スケールの安全機能を保守的に無視）



- 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
- 線量の計算：核種ごとの線量への換算係数 ( $[Sv/y] / [Bq/y]$ )をあらかじめ求めておき、処分場スケールからの核種移行率 ( $[Bq/y]$ )に乗じて算出

※GBI (Geosphere- Biosphere Interface)



## ➤ GBI : 平野部の河川

- ・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（GBIとして河川または海域を想定）
- ・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 : 温暖帯

- ・現在の日本においては温暖帯である地域が大部分を占め、長期的な気候変動を考慮しても氷河に覆われる地域は一部に限定されることから温暖帯を考慮

## ➤ 代表的個人を想定する集団 : 農作業従事者グループ<sup>o</sup>, 淡水漁業従事者グループ<sup>o</sup>, 海洋漁業従事者グループ<sup>o</sup>

## ■ 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, 生活圏に到達する核種の崩壊系列上の核種 (半減期25日以上) も考慮

## 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 (第3章, 約2万件)

### モデル地下水 (第3章) / 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

## ■ 生活圏評価における核種移行プロセスに関わるパラメータ

### ➤ 生活圏の構成要素間の移行量

・河川流量，地下水流量等⇒統計データ等から平均値を採用

・河川流量：全国の一級河川の流量の対数平均値  
( $1 \times 10^9$  (m<sup>3</sup>/y)) を設定

・侵食速度，堆積物の沈澱量等⇒わが国の評価事例や公開文献から引用

### ➤ 生活圏の構成要素のサイズ

・関連するパラメータ間の整合を考慮して設定

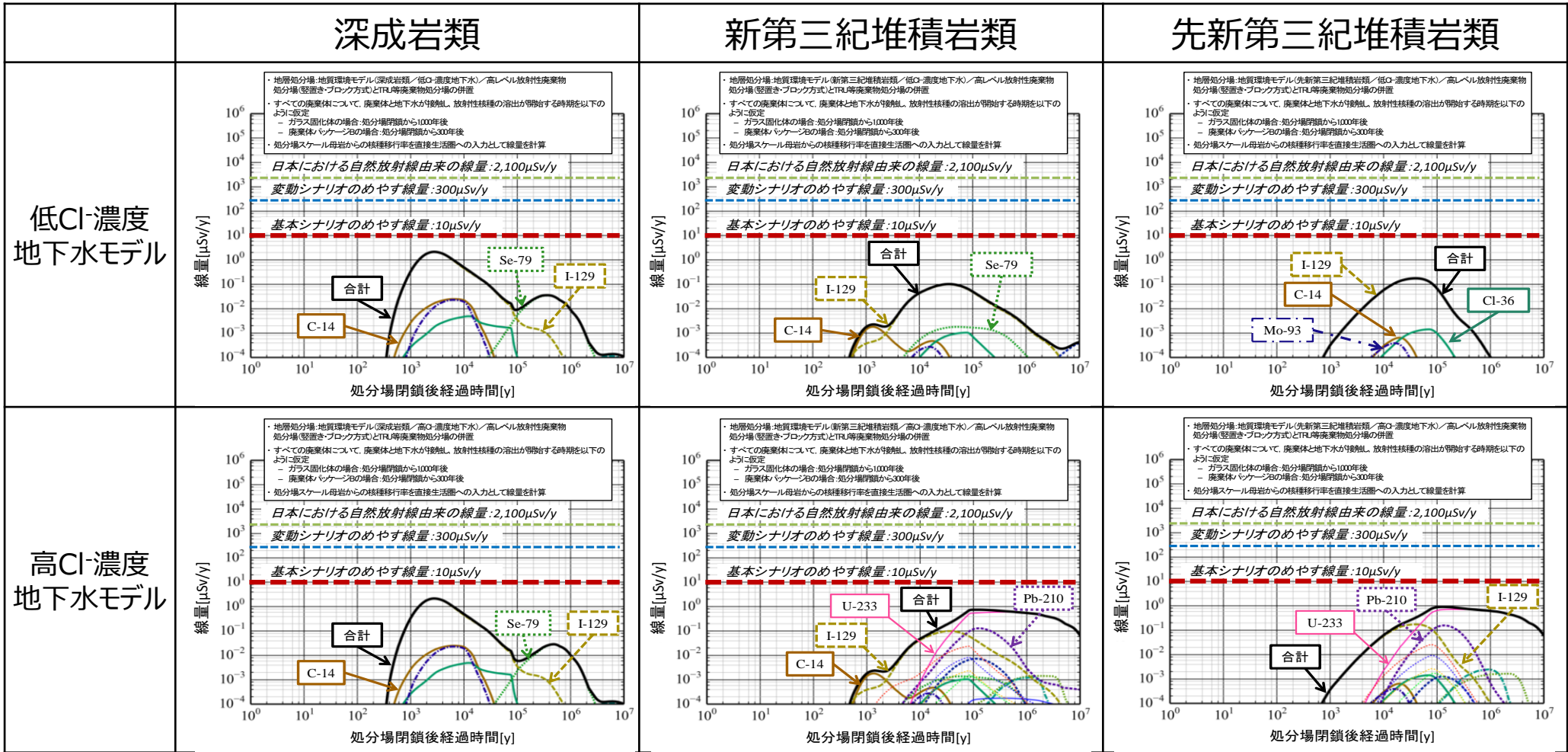
### ➤ 元素毎の土壌の分配係数

・IAEAのデータベース (IAEA, 1994) から引用

IAEA (1994) : Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments, IAEA Technical Report Series No.364

# 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等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





- 影響分析によって抽出した安全機能を有する処分場の状態に関する不確実性を考慮した**変動シナリオ**として以下の4つを設定
  - (1) ガラス固化体の状態の不確実性を考慮したシナリオ (HLW)
  - (2) 金属廃棄物の状態の不確実性を考慮したシナリオ (TRU等廃棄物)
  - (3) 硝酸塩プルームの広がりに関する不確実性を考慮したシナリオ (TRU等廃棄物)
  - (4) 溶解度への温度影響の不確実性を考慮したシナリオ (HLW/TRU等廃棄物)
  
- 想定する必要がないほど発生可能性が極めて小さいと考えられるものの、サイト選定による完全な回避や、発生の可能性を科学的に完全に否定することが現状では困難であるが、発生した場合に処分システムの隔離機能あるいは閉じ込め機能に重大な影響を与える可能性のある事象に対して**稀頻度事象シナリオ**として以下の3つを設定
  - (1) 火山・火成活動による処分場への直接的な影響が生ずることを想定したシナリオ (新規火山発生シナリオ)
  - (2) 処分場スケール内とその周辺の比較的小規模の断層が連結し地下施設に直接的に影響を与えるシナリオ (断層連結シナリオ)
  - (3) 断層が地下深部から伸展し地下施設に直接的に影響を与えるシナリオ (断層伸展シナリオ)

# 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

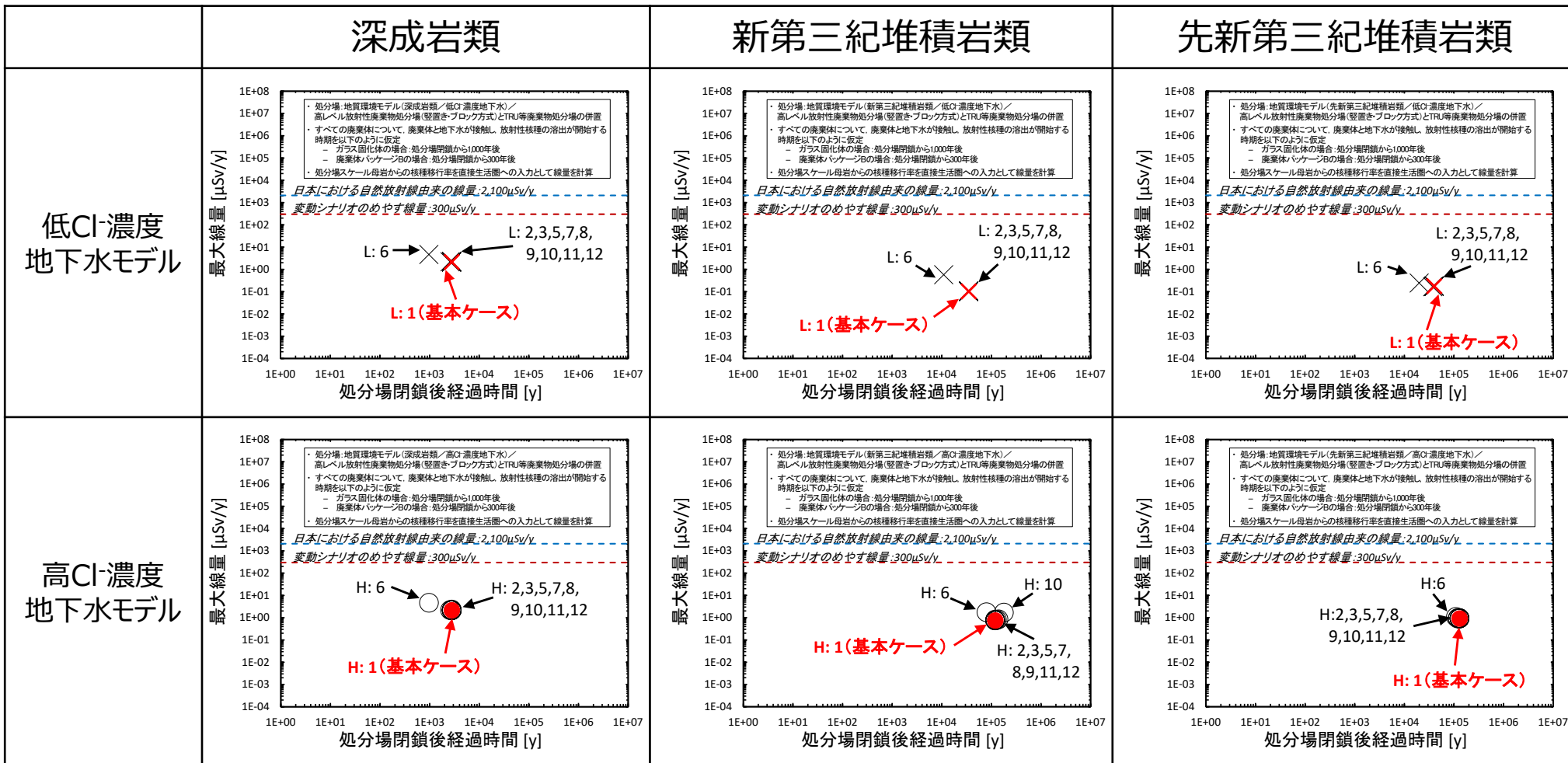
- 基本ケースにおける核種移行解析上の取り扱いと処分場構成要素の状態に関する取り扱いを参照しつつ、変動ケースにおける取り扱いの考え方を検討
- 処分場の状態設定の不確実性に対する変動のみならず、基本ケースで用いる**評価モデルやデータセットに対して合理的に想定される不確実性を考慮したものも変動ケースとする**

シナリオ区分	解析ケース	めやす線量
基本シナリオ	基本ケース	<b>安全性の確認 :</b> <b>300<math>\mu</math>Sv/y</b>
	変動ケース	
変動シナリオ	変動ケース	<b>基本ケースに対して :</b> <b>10<math>\mu</math>Sv/y (目標値)</b>

基本ケースで用いる評価モデルやデータセットに対して合理的に想定される不確実性を考慮

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	構造躯体劣化不確実性ケース
5	硝酸塩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	緩衝材に対する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に関する不確実性ケース
9	母岩に対する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に関する不確実性ケース
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に関する不確実性ケース

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当たり300  $\mu\text{Sv}$ を下回る



# 考慮するパラメータの不確実性に対する十分性の確認 (1/2)

■ 変動ケースによって考慮すべき不確実性を網羅していることの十分性を確認するために核種移行解析モデルで取り扱っているパラメータについてランダムに選定して組合わせた多数の計算を実施 (付属書6-24, 6-25, 6-26)

核種移行解析モデルの複数のパラメータの値に合理的な範囲で保守性を考慮して分布を設定

設定した分布からランダムサンプリングにより対象とするパラメータのデータセットを作成

データセットに対して数値解析を実施 (3000回/廃棄体種類)

被ばく線量が $300\mu\text{Sv/y}$ を超えるケースを抽出

抽出したケースのパラメータの値の合理性を評価

図-1 検討フロー

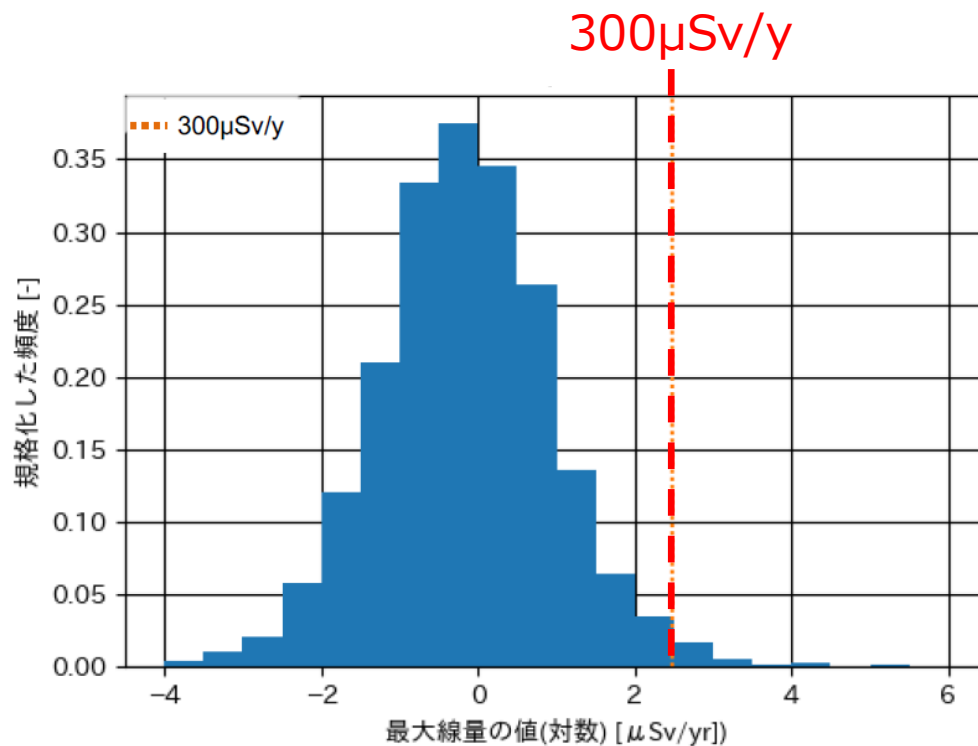


図-2 3000回の数値解析結果の例

(深成岩類, 高レベル放射性廃棄物, 豎置き・ブロック方式)

付属書6-24 : 深成岩類の処分場の基本ケースおよび変動ケースの線量評価結果

付属書6-25 : 新第三紀堆積岩類の処分場の基本ケースおよび変動ケースの線量評価結果

付属書6-26 : 先新第三紀堆積岩類の処分場の基本ケースおよび変動ケースの線量評価結果



## 考慮するパラメータの不確実性に対する十分性の確認 (2/2)

### ■ 300 $\mu$ Sv/yを超えるケースについて設定されたパラメータに関するデータセットの分析：共通の要因として以下の3つを特定

#### (1) 動水勾配

- 国内の台地や丘陵の観測データの最大値である 0.1 以上となっているケース
- 隆起・侵食を考慮しても、最大線量を観測する時期までにこのような値となる可能性は極めて小さい

#### (2) 処分場スケール母岩における移行距離

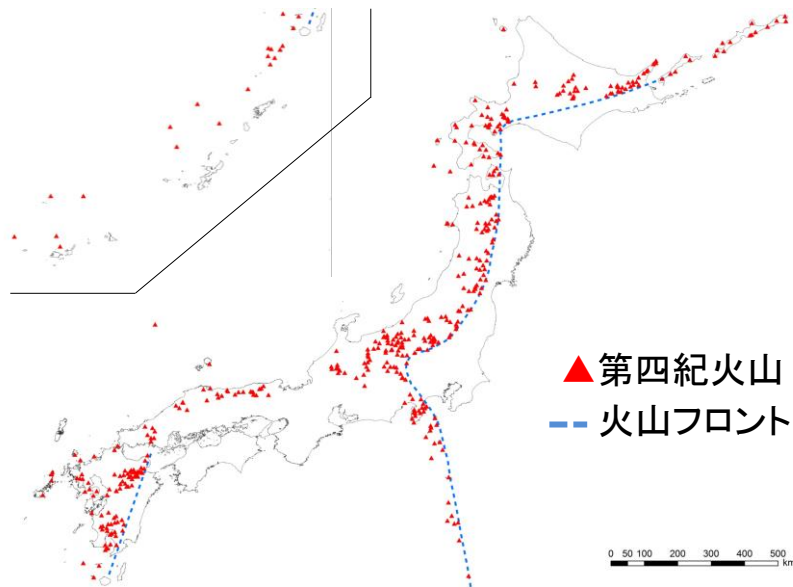
- 処分場スケール母岩における移行距離 が 0 mとなっているケース
- 隆起・侵食を考慮しても、最大線量を観測する時期までにこのような値となる可能性は極めて小さい

#### (3) マトリクス拡散深さ

- マトリクス拡散深さが数十mm以下となっているケース
- 母岩中の移行経路の全領域にわたってマトリクス拡散深さがこのような値となる可能性は極めて小さい

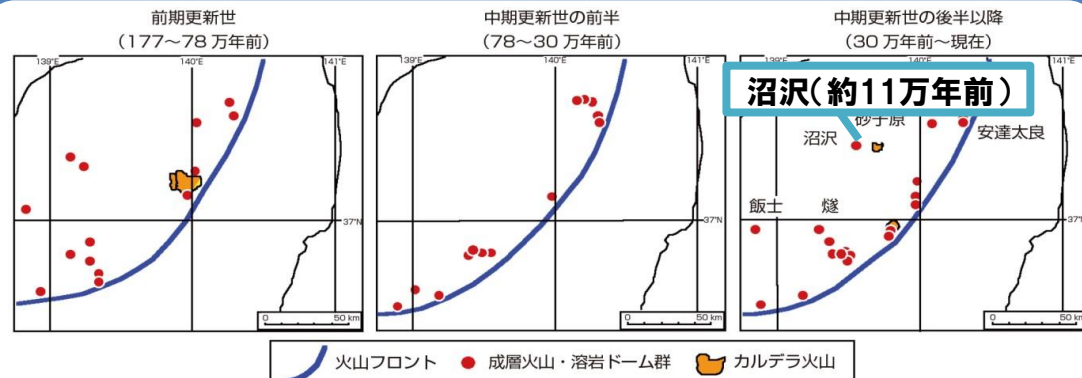
□ めやす値である300 $\mu$ Sv/yを超えるのは、いずれも非現実的なパラメータ値を与えた場合であり、変動ケースによって考慮すべき不確実性は十分であること、また、不確実性の重畳を考慮してもめやす値を超えないことが示された。

## - 新規火山発生シナリオの事象発生時期の設定 -



▲ 第四紀火山  
-- 火山フロント

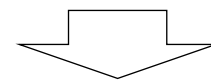
- 火山フロントは長期（少なくとも約260万年間）にわたり安定
- 第四紀火山の中心から半径15kmの範囲，その外側でマグマの貫入等の可能性が高い範囲を除外



山元(2011)を編集

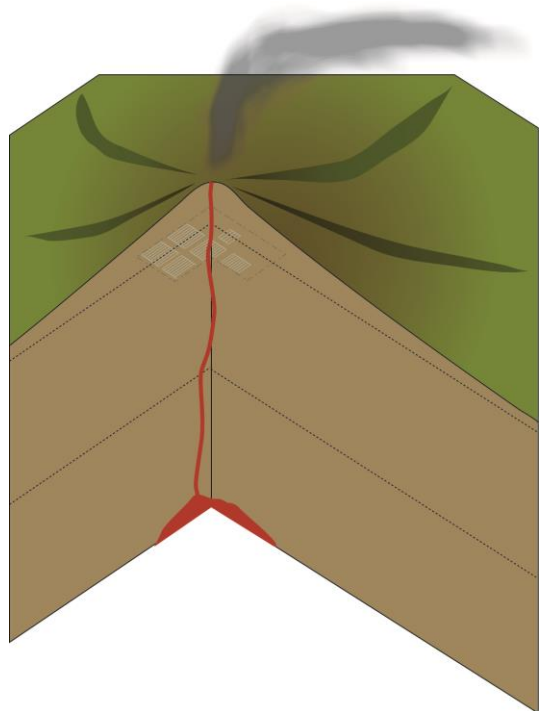
### 東北日本南部における火山の時空間分布変化

- 火山フロントの背弧域において，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**農作業従事者**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（事象発生直後の1年間：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 <sup>2</sup> )	噴出物量(km <sup>3</sup> )	線量結果(mSv/y)
三途川カルデラ	0.2	1×10 <sup>2</sup>	2×10 <sup>-3</sup>
子持火山	7×10 <sup>-2</sup>	10	7×10 <sup>-3</sup>
上宝	4	40	4×10 <sup>-2</sup>
雲仙岳	2×10 <sup>-2</sup>	0.2	9×10 <sup>-2</sup>

- 例えば東北日本の検討事例で示されている火山の著しい影響を排除した場所における将来100万年間の発生確率（10<sup>-6</sup>[1/y]/100[km<sup>2</sup>] 以下）を用いて算出した最大リスクは1×10<sup>-12</sup>[1/y]となり、リスク拘束値10<sup>-5</sup>[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

- 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
- ※断層連結シナリオに対応する解析ケースを包含（断層が伸展し地下施設に影響を与えるという観点では両者は同様であるため）

## ① 処分場への断層の直撃

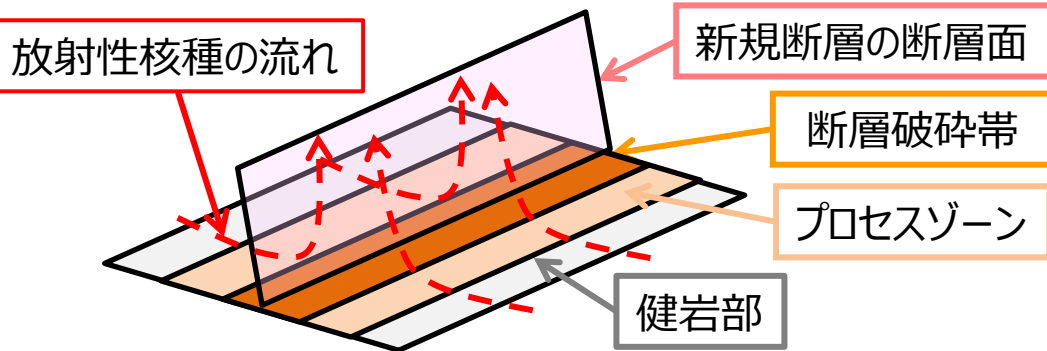
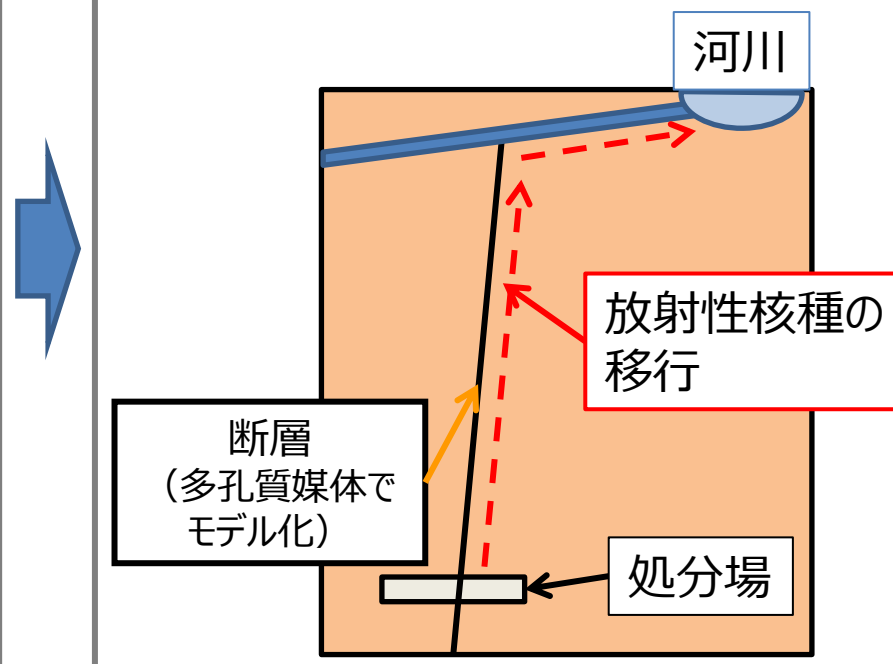


表 安全機能への影響の考慮の有無

位置	ガラス固化体	オーバーパック	緩衝材	母岩
新規断層の断層面	有	有	有	有
断層破砕帯	有	有	有	有
プロセスゾーン	無	無	無	有

## ② 断層を経由して河川水へ放射性核種が流入





## 【線量評価およびリスク評価】

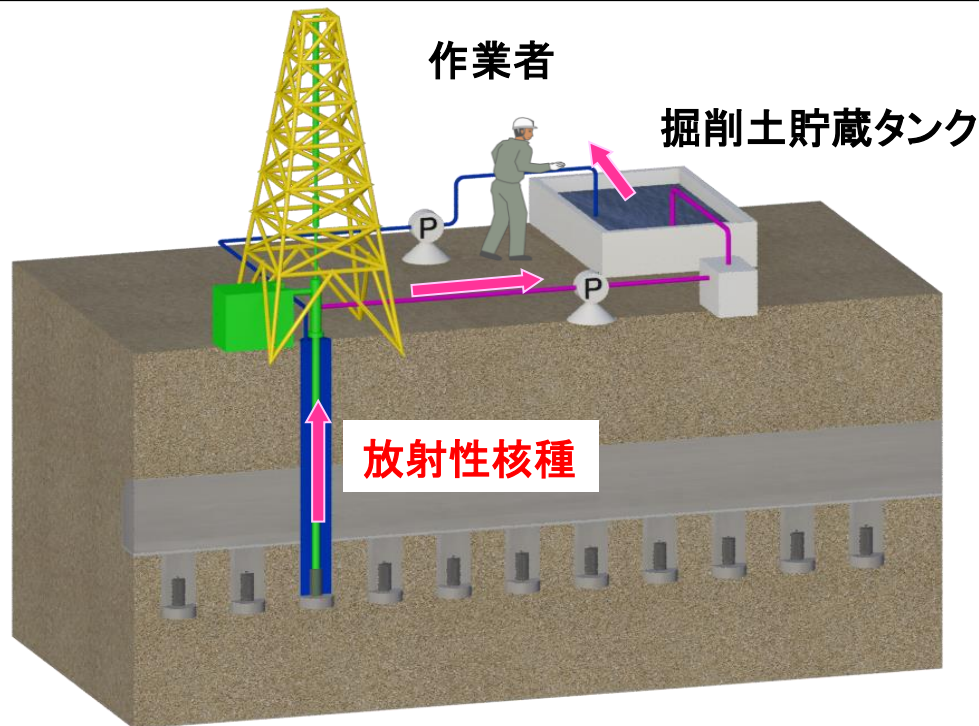
- 線量結果は、めやす線量（事象発生1年目：20～100mSv，事象発生2年目以降：1～20mSv/y）を下回る

検討対象母岩	モデル水質 (Cl <sup>-</sup> 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

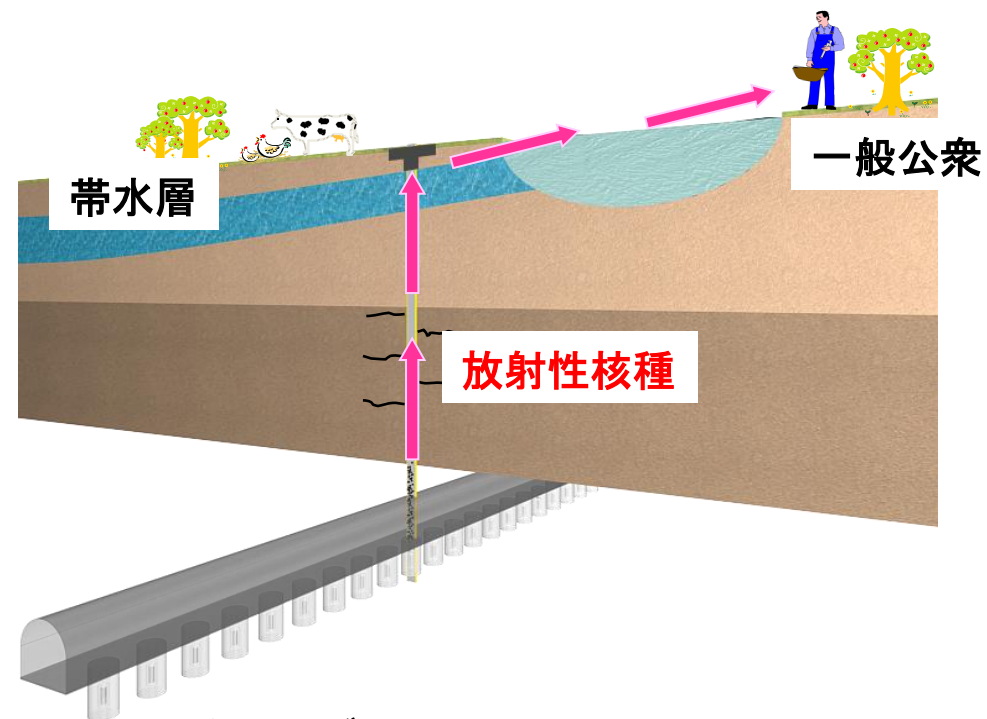
- 本シナリオの1年間あたりの発生頻度 $2.2 \times 10^{-7}$  回/yを用いて算出した最大リスク（新第三紀堆積岩類の場合）は、 $2 \times 10^{-10}$  [1/y]となり、リスク拘束値 $10^{-5}$  [1/y]を大きく下回る

- 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考えかたを①～⑤のように整理
  - ①～⑤に基づき，NUMO FEPの人為事象に関係す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

- 記録保存の有効性またはボーリングに対するオーバーパック等の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（TRU等廃棄物のみ）、35,000年（高レベル放射性廃棄物のみ）**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すべて**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

## 放射能の移行挙動

- 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現在汎用的に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
- ダスト濃度やコア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

## 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、埋め戻しに用いたセメント系材料などの充填物の状態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（ $1 \times 10^{-5}$  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	$4 \times 10^{-5} \sim 9 \times 10^{-5}$

- 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 $2 \times 10^{-7}$  [1/y]
  - ボーリング孔核種移行ケース：リスクの最大値は $2 \times 10^{-8}$  [1/y]



- 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

- 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ランダムウォーク粒子追跡による物質移動解析モデルを適用
  - 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を継続
- 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"> <li>➤ 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</li> <li>➤ 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</li> <li>➤ 現象解析モデルの統合化技術の構築 など</li> </ul>
(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"> <li>➤ 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</li> <li>➤ 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</li> </ul>
(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"> <li>➤ 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</li> <li>➤ 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</li> </ul>
(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"> <li>➤ 施設設計を反映した核種移行解析モデルの構築・高度化</li> <li>➤ 地質環境の変遷に応じた生活圈評価手法の高度化</li> </ul>
(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"> <li>➤ 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</li> <li>➤ 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</li> </ul>

# 原子力学会レビュー結果 (1/2)

- 「包括的技術報告書の第6章で示された閉鎖後長期の安全評価の体系は、国際的なガイドラインや諸外国の方法論と整合的であり、**地層処分の安全性を定量的に示すアプローチとして妥当**である。特に、具体的なサイトが特定されていない状況において、地層処分の技術的成立性を示すジェネリックな評価からサイト固有の詳細な情報を用いるサイトスペシフィックな評価を指向し、**我が国の地質環境や処分システムの特徴をより現実的に考慮するための安全評価技術の準備を進めたことを高く評価**する。」
- 「第2次取りまとめや第2次TRULレポート以降の成果を踏まえ、以下の取り組みについて**大きな進展を認める**。」
  - シナリオの発生の可能性を考慮したリスク論的アプローチと線量/確率分解アプローチの採用
  - シナリオの作成におけるFEPによるボトムアップアプローチと安全機能によるトップダウンアプローチを融合させた統合化手法とストーリーボードの利用
  - 包括的技術報告書の第3章で構築した具体的な地質環境モデルや同報告書の第4章で開発・設計した地層処分システム（建設・操業時に導入される人工物等の残置物を含む）の特徴を可能な限り現実的に扱った、より実践的な方法の導入
  - 核種移行に関わるデータ設定における最新のデータベースの利用
  - ガラス固化体、TRU等廃棄物の併置処分を考慮した安全評価体系の構築
  - 最新の知見を取り入れた生活圏評価

## 原子力学会レビュー結果（2/2）

- 「閉鎖後長期の安全評価の信頼性向上の観点から、以下の点について改善の余地が残されていると考える。」
  - シナリオの構築に用いられている一連のツールや分析法（ストーリーボード、FEP、要因分析など）の位置付け、役割、関連性の明確化
  - 核種移行プロセスに関する数理モデルやコード、データ、解析等の品質保証に関する情報の拡充
  - 安全評価で対象とすべき不確実性が十分包括的に考慮されていることの提示
  - 閉鎖前で想定される地下環境の擾乱、回収可能性、建設・操業時の異常状態に対する評価との関連性の整理
  - 既往の安全評価結果との比較・相違点の考察

## ■ 技術的根拠の補強

### ➤ 検討内容の技術的な信頼性をより高めるための技術的な根拠を付属書に補強

(例) 変動ケースによって考慮している不確実性に不足がないことを再確認するための検討結果を付属書に記載 (付属書6-24, 6-25, 6-26)

(例) 本報告書の線量評価結果と第2次とりまとめや第2次TRUレポートとが異なる理由の考察を付属書に記載 (付属書6-24, 6-25, 6-26)

## ■ 説明の拡充、記述の改善

### ➤ 記述はしているが説明が複雑、論旨が不明瞭な箇所について、記述を改善

(例) シナリオ選定の手順、解析ケースの設定や核種移行解析モデル構築などの記述が複雑で難解な箇所について、補足する説明や図表を加えるなどしてわかりやすくなるよう改善





**ご清聴ありがとうございました**

---





# 「長期安全評価」説明資料の修正履歴

2021年6月16日修正

該当頁	修正前	修正後
p.21	広域スケールの安全機を保守的に無視	広域スケールの安全機能を保守的に無視
p.50		「長期安全評価」説明資料の修正履歴」の slides を追加