

# NUMO技術開発成果報告会2015

～包括的技術報告書「わが国における安全な地層処分の実現性」(仮称)～  
中間報告

## (4) 処分場の安全性の評価

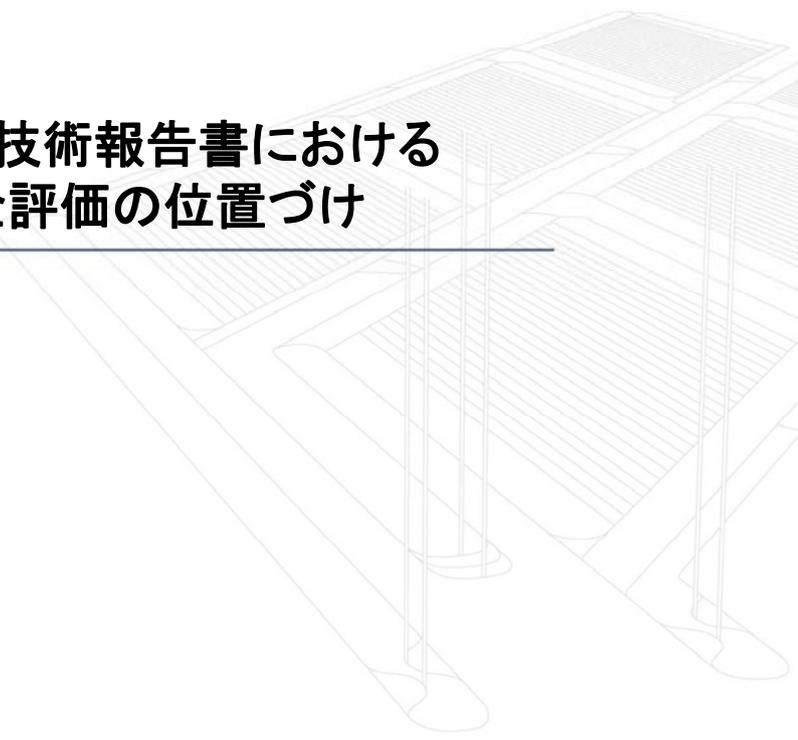
### 2) 処分場の閉鎖後長期における安全性

2015年6月29日

原子力発電環境整備機構(NUMO)  
技術部 稲垣 学

## 報告内容

1. 包括的技術報告書における安全評価の位置付け
2. 安全評価の枠組み
3. 安全評価シナリオの作成
4. モデル開発とデータ
5. 安全評価解析
6. まとめと今後の予定



## 1. 包括的技術報告書における安全評価の位置づけ

---



### 包括的技術報告書における安全評価の位置付け

---

- 国際的な指針等を参考に安全評価の枠組み(評価期間や基準など)を設定する。
- 地層処分に影響を与える可能性のある事象を網羅的に抽出したうえで、それら事象の発生の確からしさに応じたシナリオの区分を行う。
- 地質環境条件の違いや処分場の仕様の違いを反映し、異なる処分場の性能を合理的に比較・評価できる安全評価解析の手法を整備し、安全評価解析を行う。
- これらに基づき、わが国の地質環境と処分場の仕様に対して、閉鎖後長期の安全評価を実施し、長期的な安全性の議論に資する。

## 2. 安全評価の枠組み

### リスク論的な考え方を踏まえた安全評価のシナリオ区分と線量めやす値

シナリオ区分	定義	線量めやす値*1)
基本シナリオ	通常想定されるシナリオであり、その評価により、処分施設の安全性を評価するためのシナリオ	10 $\mu$ Sv/y
変動シナリオ	発生可能性が低いシナリオであり、基本シナリオに対して、科学的に想定される安全上重要な変動要因を考慮したシナリオであり、処分施設が不確かさに対する頑健性を有するか評価するためのシナリオ	300 $\mu$ Sv/y
稀頻度事象シナリオ	発生可能性が著しく低い自然事象を考慮したシナリオであり、そのような事象に対しても処分施設が頑健性を有していることを確認するためのシナリオ	発生直後：20～100 mSv/回 2年目以降：1～20 mSv/y
人為事象シナリオ	偶発的な人間活動による処分施設の損傷等による影響を緩和できる処分システムかどうかを確認するシナリオ。(なお、処分場に直接影響を与えない人為事象については、自然事象の生活圏の変動ケースとして取り扱う)	周辺被ばく：1～20 mSv/y 近接者：20～100 mSv/回
評価期間	国際機関の提示内容や海外の規制の状況を踏まえて検討する。	

\*1) IAEA SSR-5 及び ICRP Pub.122を参考とした

### 3. 安全評価シナリオの作成

#### 包括的なシナリオ作成の手順



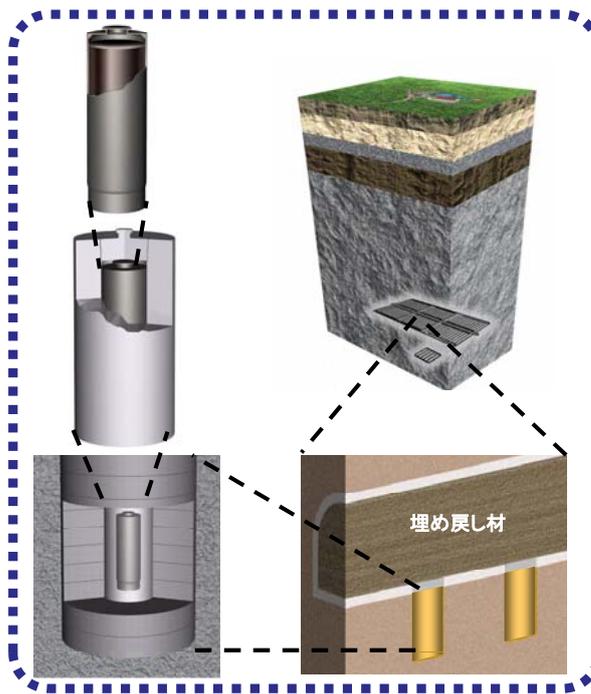
# 安全機能の定義

**隔離:** 地質の長期的な変動からの防護, 人の接近の抑制  
**閉鎖後閉じ込め:** 放射性物質の浸出抑制, 放射性物質の移行抑制

**ガラス固化体**  
**【閉鎖後閉じ込め】**  
 ・ガラスが溶けにくいことによる浸出抑制

**オーバーパック**  
**【閉鎖後閉じ込め】**  
 ・発熱が著しい期間の地下水接触の防止

**緩衝材**  
**【閉鎖後閉じ込め】**  
 ・移流による移行の抑制  
 ・コロイド移行の防止・抑制  
 ・収着による放射性物質の移行遅延



**天然バリア+人工バリア**  
**【閉鎖後閉じ込め】**  
 ・放射性物質の溶解度制限

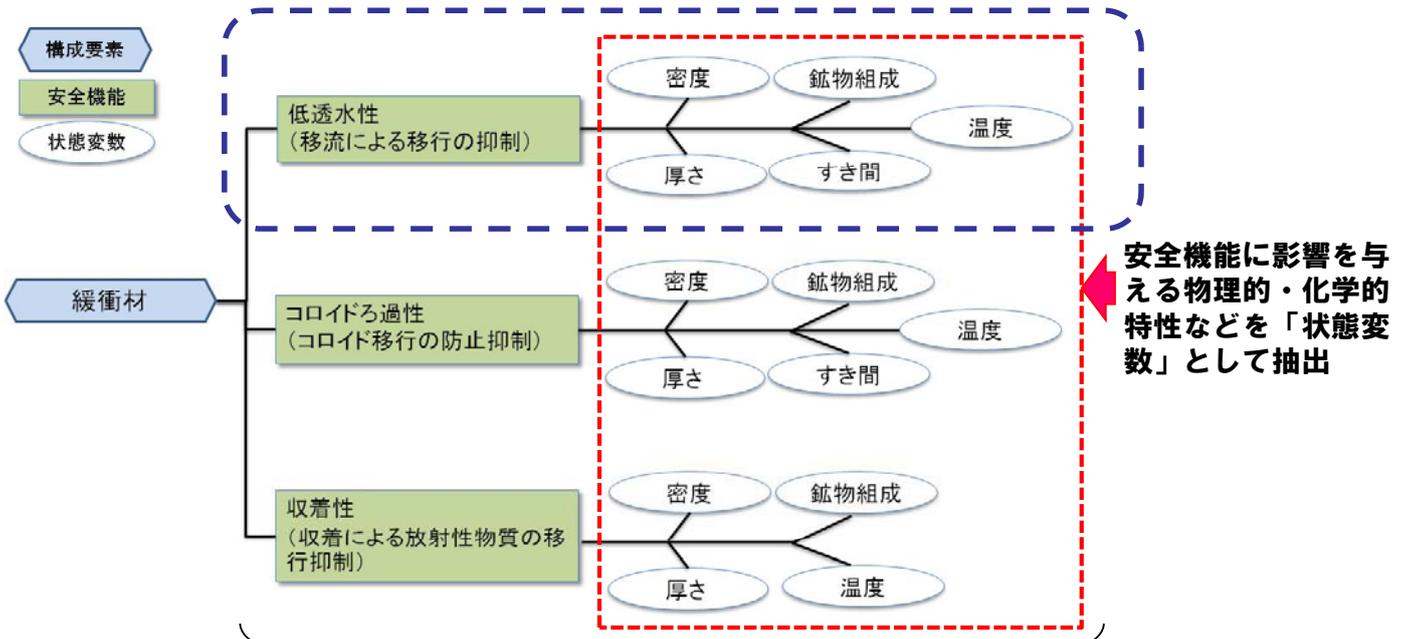
**天然バリア**  
**【隔離】**  
 ・地質の長期的な変動からの防護  
 ・人の接近の抑制  
**【閉鎖後閉じ込め】**  
 ・収着による放射性物質の移行遅延  
 ・遅い地下水流動  
 ・分散による移行率の低減

**閉鎖用埋め戻し材など**  
**【閉鎖後閉じ込め】**  
 ・アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制

高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係

# 安全機能に係る状態変数の抽出

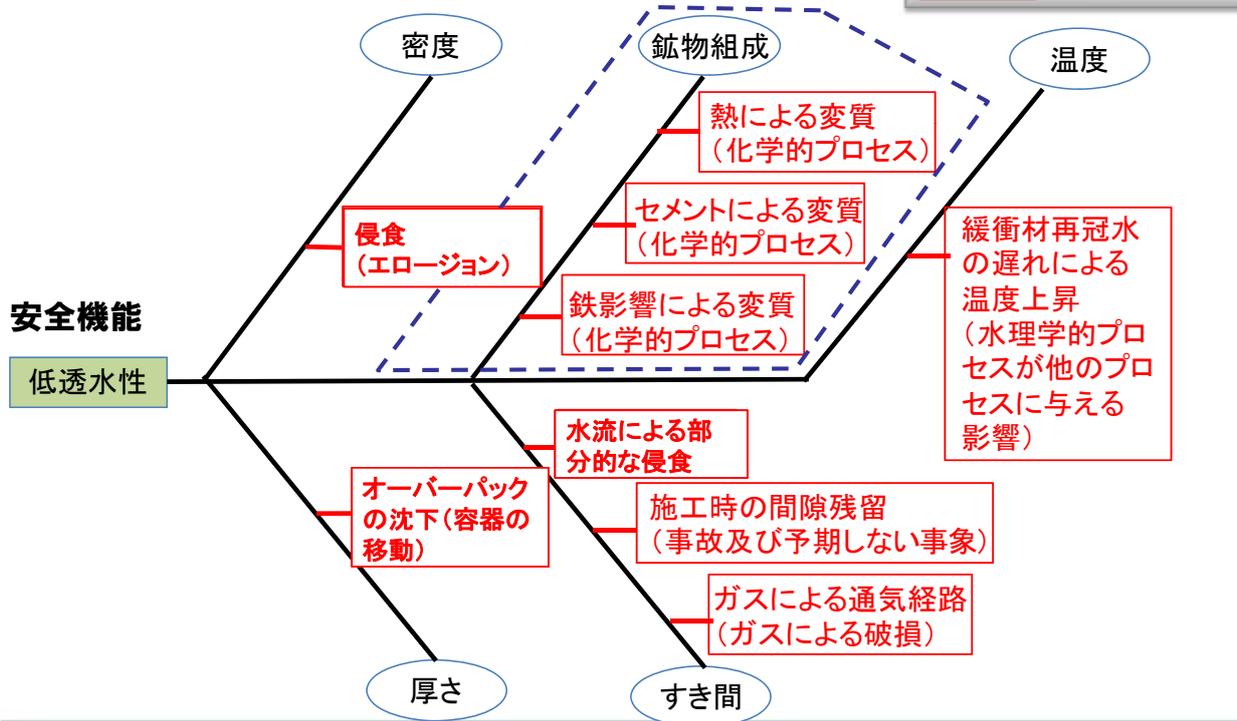
緩衝材に対する安全機能に対する抽出例



抽出した状態変数と安全機能の関連を表現

# 状態変数に影響を与えるFEPの抽出

安全機能－状態変数－FEP関連図



## 安全機能に影響を及ぼす事象の発生可能性の分析(シナリオ分岐分析表)

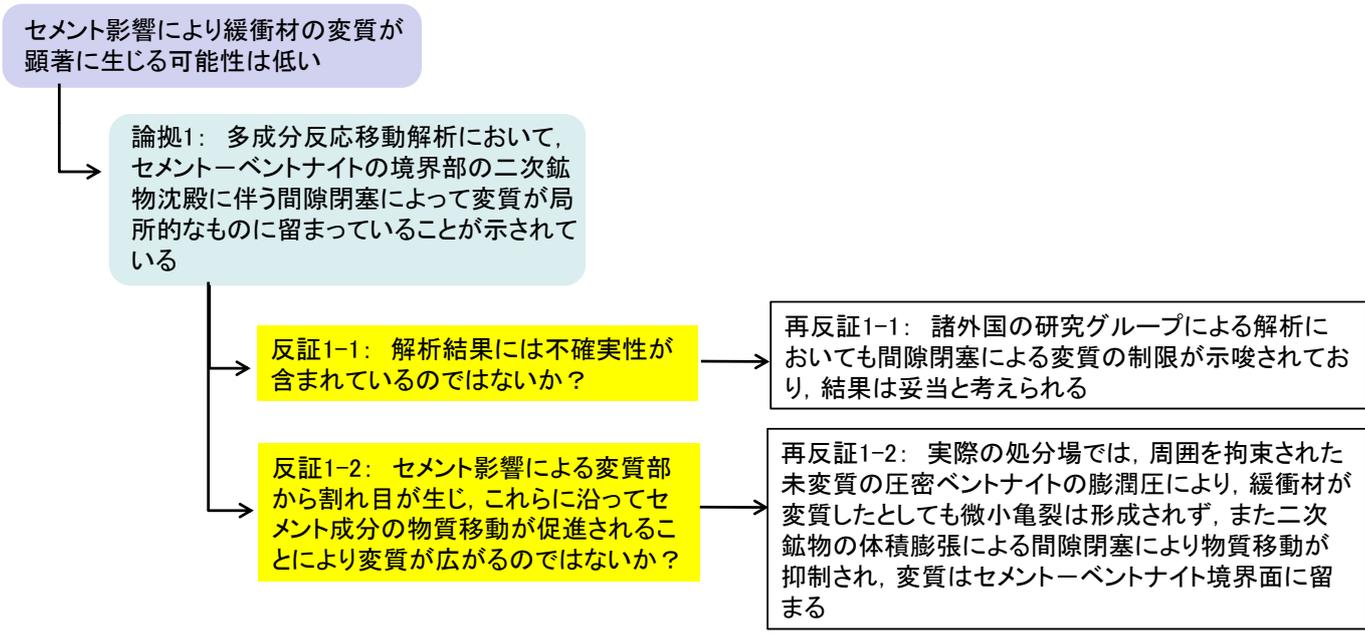
安全機能－状態変数－FEP関連図

FEPシート

安全機能	状態変数	FEP	理解の現状	不確実性	シナリオ上の取り扱いにかかわる分析
低透水性	鉱物組成	セメント影響による緩衝材変質	セメント溶脱によってCa濃度やpHが上昇することによりベントナイトのイオン交換、モンモリロナイトの溶解と二次鉱物沈殿などが生じ、鉱物組成が変化するが、ベントナイトコンクリート境界での間隙閉塞のため変質は局所的である。	二次鉱物による間隙閉塞の長期安定性、モンモリロナイト反応速度式の誤差、生成する二次鉱物に関する知見の不足	<p>討論モデルなどを用いた不確実性の程度の判断</p> <p>討論モデルなどを用いた不確実性の程度の判断</p>
		鉄影響による緩衝材変質	オーバーパックの腐食によって生ずるFeイオンによりベントナイトのイオン交換、モンモリロナイトの溶解と二次鉱物沈殿などが生じ、鉱物組成が変化するが、ベントナイトとオーバーパック境界での間隙閉塞のため変質は局所的である。	二次鉱物による間隙閉塞の成否(変質部の割れ目生成等)、モンモリロナイト反応速度式の誤差、生成する二次鉱物に関する知見の不足	

# 安全機能に影響を及ぼす事象の発生可能性の分析

## ■ 論証・反証のダイアグラム例



# 安全機能に影響を及ぼす事象の発生可能性の分析

			シナリオ分岐分析表		
安全機能	状態変数	FEP	理解の現状	不確実性	シナリオ上の取り扱いにかかわる分析
低透水性	鉱物組成	セメント影響による緩衝材変質	セメント溶解によってCa濃度が増加し、モンモリロナイトとのイオン交換、モンモリロナイトの溶解と二次鉱物沈殿などが生じ、鉱物組成が変化するが、ベントナイトコンクリート境界での間隙閉塞のため変質は局所的である。	二次鉱物による間隙閉塞の成否(変質部の割れ目生成等)、モンモリロナイト反応速度式の誤差、生成する二次鉱物に関する知見の不足	左記の不確実性要因を考慮した場合にはベントナイト残存量はある程度低下する可能性があるが、 <u>深成岩系では坑道支保やグラウトなど、セメントの使用量が制限されることから、緩衝材の変質は局所的であり、安全機能への影響はほとんどないものと考えられる。</u>
		鉄影響による緩衝材変質	オーバパックの腐食によって生ずるFeイオンによりベントナイトのイオン交換、モンモリロナイトの溶解と二次鉱物沈殿などが生じ、鉱物組成が変化するが、ベントナイトとオーバパック境界での間隙閉塞のため変質は局所的である。	二次鉱物による間隙閉塞の成否(変質部の割れ目生成等)、モンモリロナイト反応速度式の誤差、生成する二次鉱物に関する知見の不足	間隙閉塞によって影響領域が限定され大半の緩衝材が未変質のまま残ると予想されるが、左記の不確実性要因を考慮して間隙閉塞を無視した場合には <u>顕著な割合の緩衝材の変質可能性が否定できない。</u>

シナリオの分岐

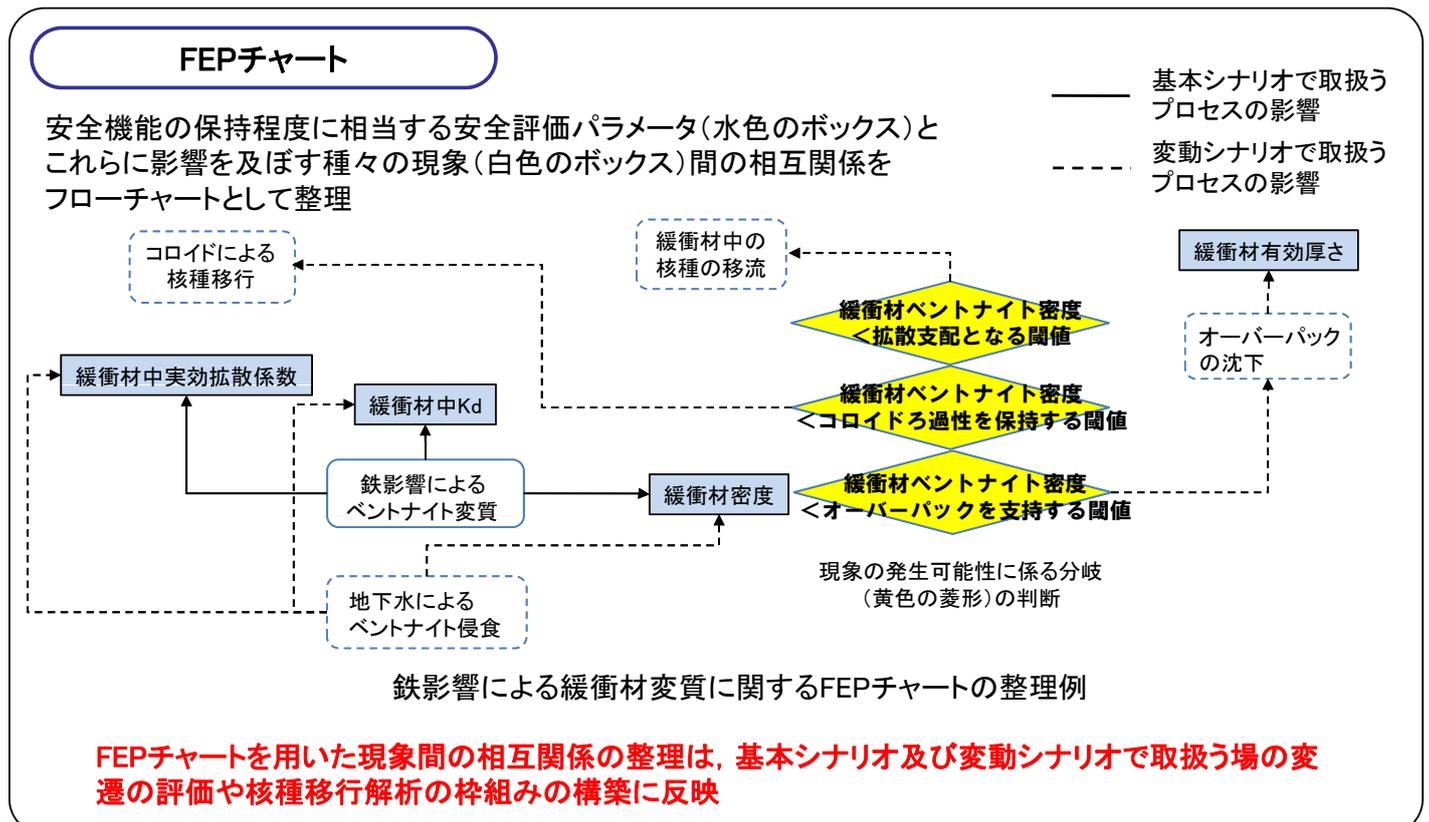
# シナリオで取扱う処分システムの状態変遷の可視化

(ニアフィールドに関する例示)

		坑道閉鎖後 100 年間程度	オーバーバック開口後
概要			
環境条件	T	<ul style="list-style-type: none"> <li>●緩衝材及び母岩中の最高温度は 100°C 以下</li> <li>●廃棄体の発熱による温度上昇が顕著な期間は数十年程度</li> </ul>	●処分場深度減少に応じて、地温勾配(3°C/100m 程度)に従い人工バリア等の温度は低下する
	H	<ul style="list-style-type: none"> <li>●透水性割れ目からの地下水供給によって上部坑道埋め戻し材及び緩衝材が水分飽和に到る</li> <li>●飽和後の緩衝材は低透水性であり地下水の流れは無視し得る</li> </ul>	●処分場深度における地下水流速の変化は顕著ではない
	M	<ul style="list-style-type: none"> <li>●埋め戻し材及び緩衝材は膨潤して一様な圧縮場となる</li> <li>●緩衝材膨潤圧と地圧・静水圧が均衡することによって新たな定常的応力場が形成される</li> </ul>	同左
	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>●坑道閉鎖後に残留する酸素は、オーバーバック、緩衝材や母岩中の鉄鉱物あるいは微生物等との反応によって消費され、還元環境となる</li> <li>●周辺岩盤中の地下水水質は当初の FRHP に回帰する</li> </ul>	同左
放射線物質の溶解度制限	万一の核種漏洩に備えたバックアップとしての潜在的機能	処分場深度は還元環境であり、地下水水質は FRHP であるため、核種移行抑制に寄与する	
移流・分散による移行率の低減	万一の核種漏洩に備えたバックアップとしての潜在的機能	深部岩体(母岩)中の地下水流速は上部割れ目体比して顕著に小さく、また、飽和後の緩衝材は低透水性であり地下水の流れは無視し得るため、核種移行抑制に寄与する	
収着による移行の抑制	万一の核種漏洩に備えたバックアップとしての潜在的機能	処分場深度は還元環境であり、地下水水質は FRHP であるため、核種移行抑制に寄与する	

↑ どのような安全機能が維持されているか、あるいは低減/喪失されるか記述(表中の記述は一例)

# シナリオにおける現象間の相互関係の可視化



# 地層処分の安全評価のための情報基盤のデータベース化

## 【FEPデータベース】

各FEPに関して、科学的知見の調査により得られた情報を、既往のFEPシートを参考に整理している。下表には、2014年度に整理したFEPシートの一例を示す。2015年度は、他のFEPシートを整理し、FEPデータベースとして体系化していく予定である。

1. 名称		緩衝材の化学的変質 (3.2.4.12)	
2. 概要	緩衝材の物理的特性は、膨潤圧と低透水性、およびモンモリロナイト層（膨潤時）とベントナイト間での水の保持能力であるが、モンモリロナイトが膨潤性の低い鉱物へと変質することで、これらの物理的特性が変化することが考えられる。「化学的変質」の内容には、このような緩衝材の特性・長期健全性を考慮する際の、熱による影響、セメント影響による変質、鉄影響による変質が含まれる。		
3. 安全性への影響の可能性	下図に、緩衝材の化学的変質の安全性への影響可能性を示す。当該FEPに関する影響要因（熱、セメント影響、鉄影響）	4. 理解の現状	熱影響による緩衝材変質 核種崩壊に伴い廃棄体から放出された熱は、緩衝材へと伝播して、その影響し、モンモリロナイトがイライト化することにより、膨潤性物質からく過程を経るセメント影響セメント系材ナイトと反応衝材の変質がらし、緩衝材止するメカニズムの還元炭素鋼の還元層間でのイオン鉄を含む二次イオンの変質が
	熱による	5. ナチュラルアナログ	熱影響による緩衝材変質に関連するモンモリロナイトからイライトへの温が上昇することに起因してイライト鉄影響による緩衝材変質に関するナ上述したように、炭素鋼の還元環境ベントナイトの変質メカニズムのうち、層間での鉄イオンの固定に伴う chlorite 化が、ナチュラルアナログにおいて観察されている。
	セメントによる	6. 今後の課題	二次鉱物による間隙閉塞の成否（変質部の割れ目生成等）、モンモリロナイト反応速度式の誤差、生成する二次鉱物に関する知見の不足
	鉄影響による	7. 包括的技術報告書における取扱い	・緩衝材熱変質に関しては、設計上考慮する人工バリア内最高温度は 100℃以下であり、また、仮にこれを上回ることがあったとしても、ガラス固化体の発熱期間を考慮すれば十分な期間にわたって継続することはない。 ・セメント影響による緩衝材変質に関しては、セメント溶脱成分との反応によりベントナイト残存量がある程度低下する可能性があるが、吹き付けコンクリートやグラウトの使用量の制限や低 pH セメントの使用等によって回避可能と考えられる。 ・鉄影響による緩衝材変質に関しては、間隙閉塞によって影響領域が限定され大半の緩衝材が未変質のまま残ると予想されるが、前述の不確実性要因を考慮して間隙閉塞を無視した場合には顕著な割合の緩衝材の変質可能性が否定できない。 以上から、鉄影響による緩衝材変質に関して、変動シナリオで取り扱うこととする。

記載項目
1. 名称
2. 概要
3. 安全性への影響の可能性
4. 理解の現状
5. ナチュラルアナログ(天然環境で生じた類似の事象)
6. 今後の課題
7. 包括的技術報告書における取扱い
8. 参考文献
9. 履歴

OECD/NEAの国際FEPリスト、第2次取りまとめ、第2次TRUレポートを参考に包括的なFEPリストおよびFEPシートを作成した

# 安全評価シナリオの作成(1/2)

## 深成岩類／堅置き方式／淡水系の地下水化学環境の場合

### 基本シナリオで想定される環境条件(ニアフィールド)

	坑道閉鎖後100年程度	オーバーパック開口後
T (熱)	<ul style="list-style-type: none"> <li>緩衝材及び母岩中の最高温度は100℃以下</li> <li>廃棄体の発熱による温度上昇が顕著な期間は数十年程度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>処分場深度の減少に応じて、地温勾配(3℃/100m程度)に従い人工バリア等の温度は低下する</li> </ul>
H (水理)	<ul style="list-style-type: none"> <li>透水性の割れ目からの地下水供給によって上部坑道埋め戻し材及び緩衝材が水分飽和にいたる</li> <li>飽和後の緩衝材は低透水性であり、地下水の流れは無視し得る</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>処分場深度における地下水流速の変化は顕著ではない</li> </ul>
M (力学)	<ul style="list-style-type: none"> <li>埋め戻し材及び緩衝材は膨潤して一様な圧縮場となる</li> <li>緩衝材膨潤圧と地圧・静水圧が均衡することによって、新たな定常的応力場が形成される</li> </ul>	同左
C (化学)	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道閉鎖後に残留する酸素は、オーバーパック、緩衝材や母岩中の鉄鉱物あるいは微生物等との反応によって消費され、還元環境となる</li> <li>周辺岩盤中の地下水水質は当初の地下水組成に回帰する</li> </ul>	同左



### 結果の反映

- 恒常的に、または高頻度で発生する事象を考慮
  - ✓ 隆起・侵食、海水準変動、地震動による影響



## 安全評価シナリオの作成(2/2)

### ■ 変動シナリオで取り扱う事象の候補(緩衝材の劣化に伴う事象の例)

1. 鉄影響による緩衝材変質
2. 緩衝材浸食
3. 処分容器沈下
4. コロイドとしての核種移行
5. ガス通気経路の残留
6. ガラス固化体の溶解速度不確実性(ガラスマトリクスの低浸出性に関するデータ)
7. 母岩の透水係数不確実性(母岩の低透水性に関するデータ)

### ■ 稀頻度事象シナリオの例

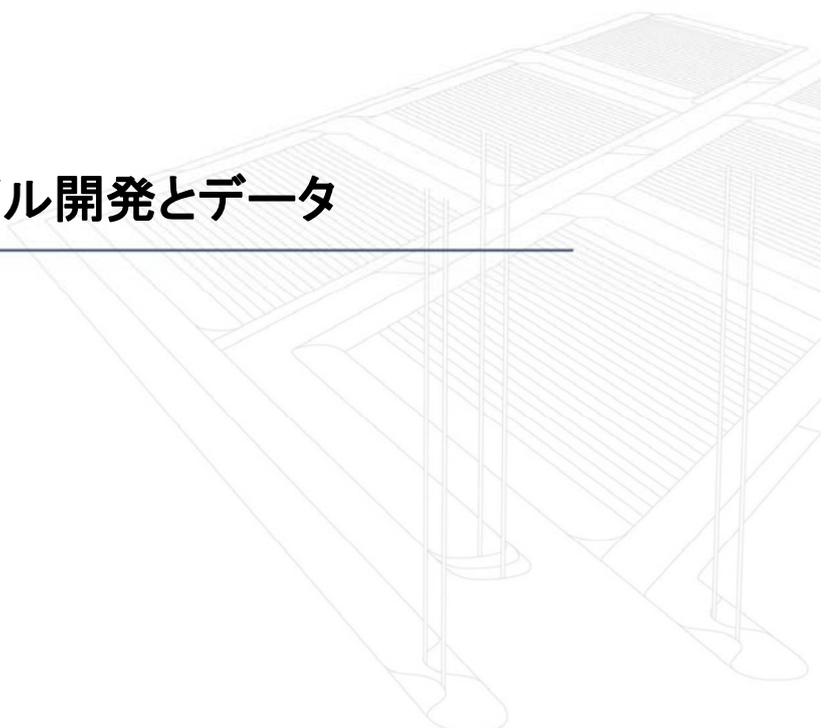
- ✓ 火山・火成活動: 火山が処分場を直撃するような極端な事象を考慮
- ✓ 断層活動: 断層が処分場を横切り発生するような極端な事象を考慮

### ■ 人為事象シナリオの例

- ✓ ボーリング: 温泉開発を目的としたボーリングを考慮



## 4. モデル開発とデータ



## モデル開発の方針

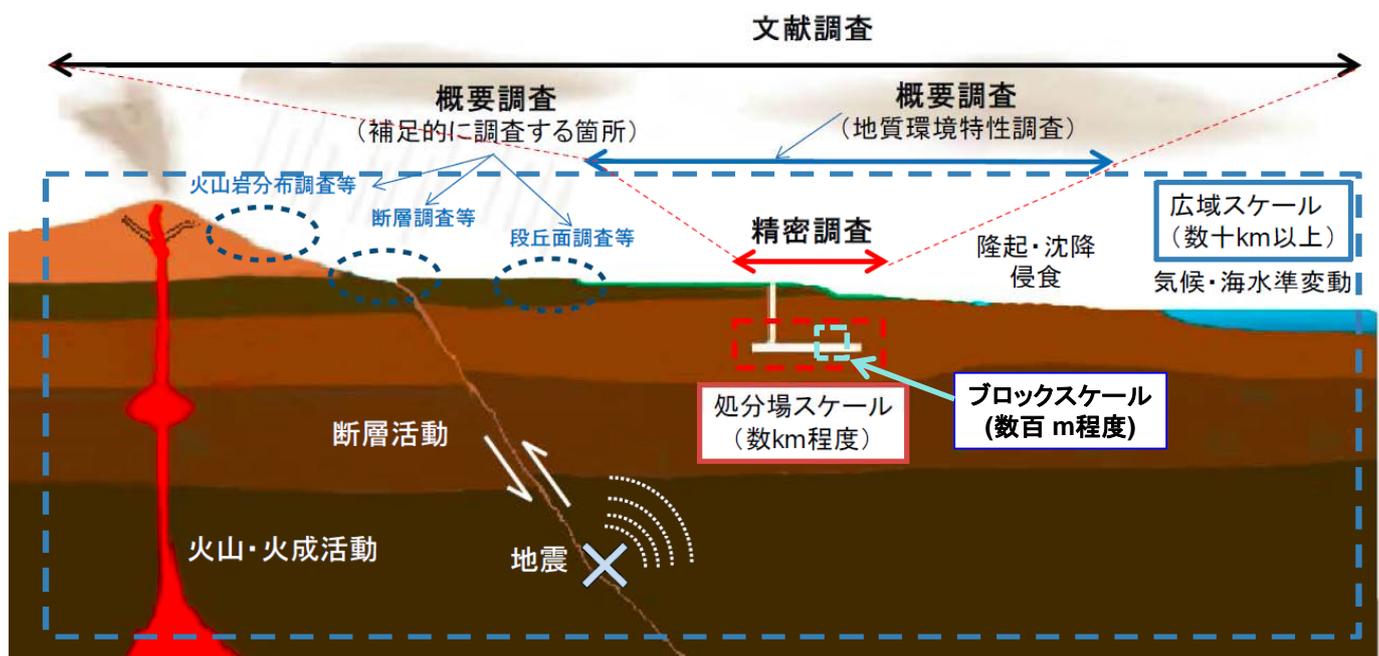
### ■ わが国の地質環境の特徴を踏まえた、現実的な解析のためのモデルの開発

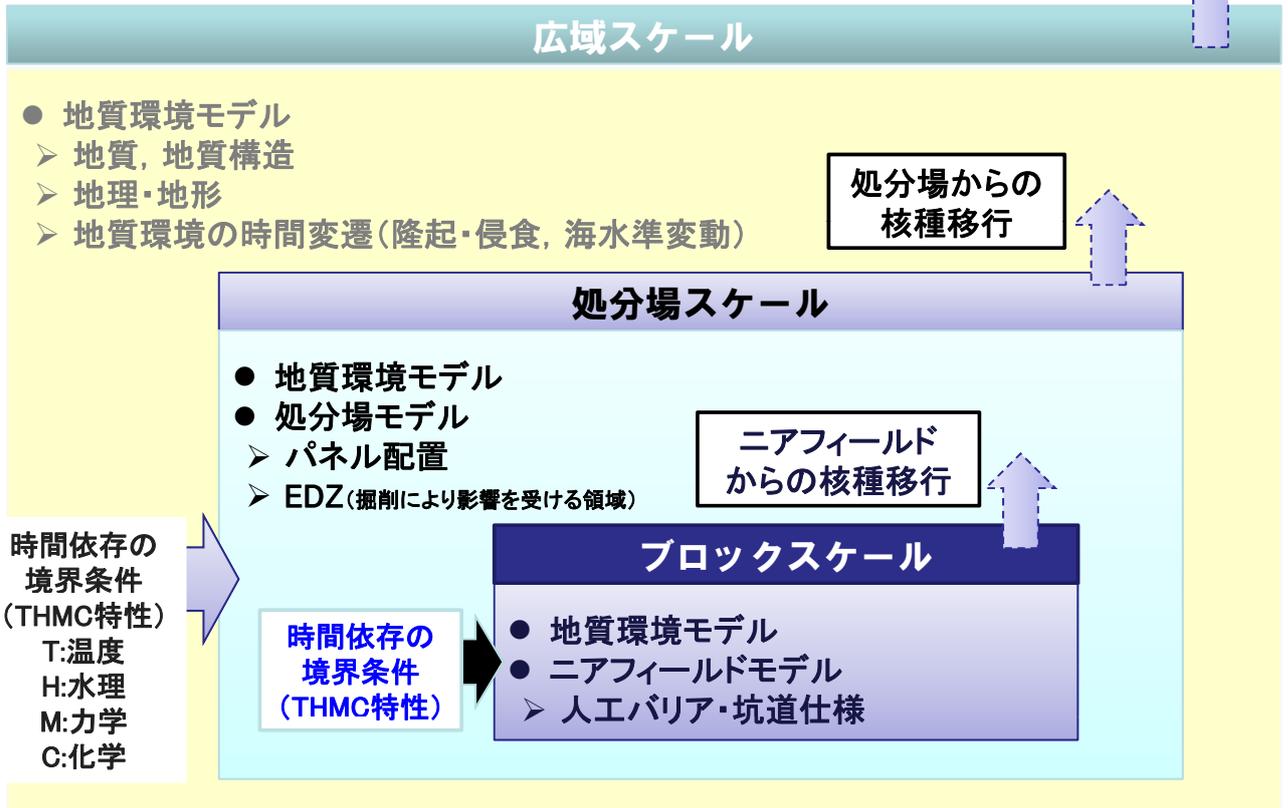
- ✓ 処分場の安全評価に必要な地質環境モデルのスケール
  - 人工バリアおよびニアフィールド(処分孔近傍の岩盤) → ブロックスケール
  - 処分場全体 → 処分場スケール
  - 処分場から生活圏への放出点の把握 → 広域スケール
- ✓ 3つのスケールの地質環境モデルは以下の点を考慮
  - スケール内, およびスケール間におけるTHMC特性の整合性
  - 調査段階や調査技術に依存する情報の詳細度
  - 解析モデルの特徴, 計算コードの能力 など

### ■ 生活圏評価

- ✓ 気候の将来変遷や地理・地形のバリエーションを踏まえた類型化に基づくモデル化
- ✓ 様式化した被ばく経路と線量換算係数の設定

## 空間スケールの具体的イメージ



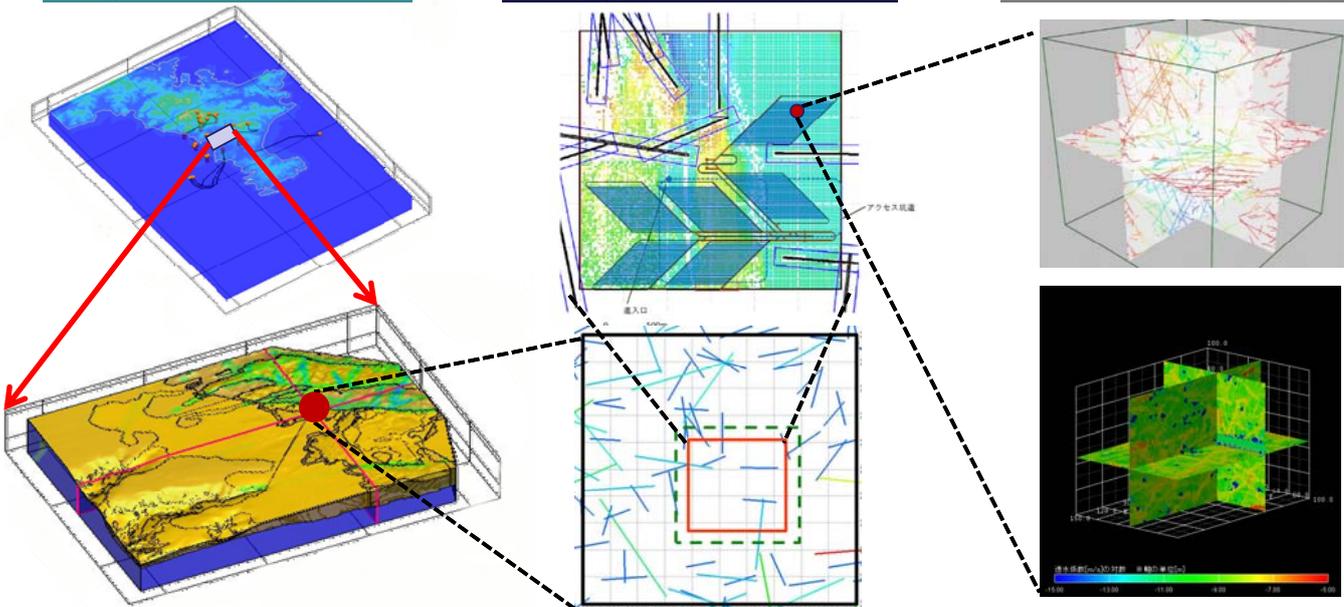


## 各スケールの水理地質構造モデルのイメージ

広域スケール (数十km)

処分場スケール (約km)

ブロックスケール (数百m)

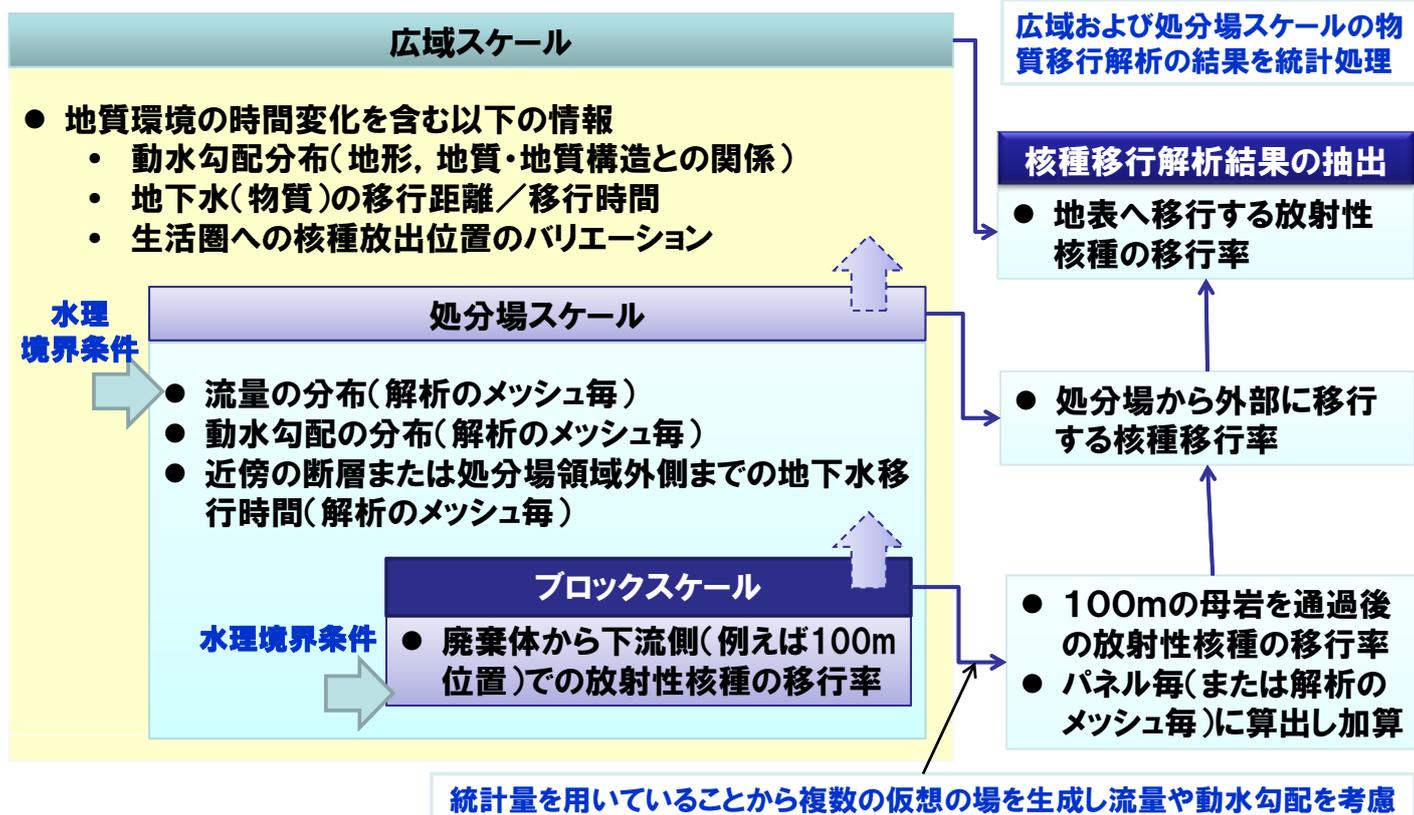


- 多孔質媒体モデルによる三次元解析
- 地質・地質構造などの地質環境特性 (THMC)やこれらの時間変化による影響
  - 動水勾配分布
  - 地下水(物質)の移行距離/移行時間
- 核種放出地点のバリエーション

- 多孔質媒体モデルによる三次元解析
- 広域スケールと統合的な境界条件, 地質環境の設定
- 坑道や掘削影響領域(EDZ)の透水性といった設計条件を考慮

- 割れ目情報, 人工バリア構成を形状モデルに反映
- 地下水の移行状態に基づき, 三次元の亀裂ネットワーク, 等価多孔質媒体, および両者のハイブリットによるモデル化・解析
- 広域・処分場スケールと統合的な境界条件, 地質環境の設定

## 各スケールにおける核種移行評価に関する情報の流れ

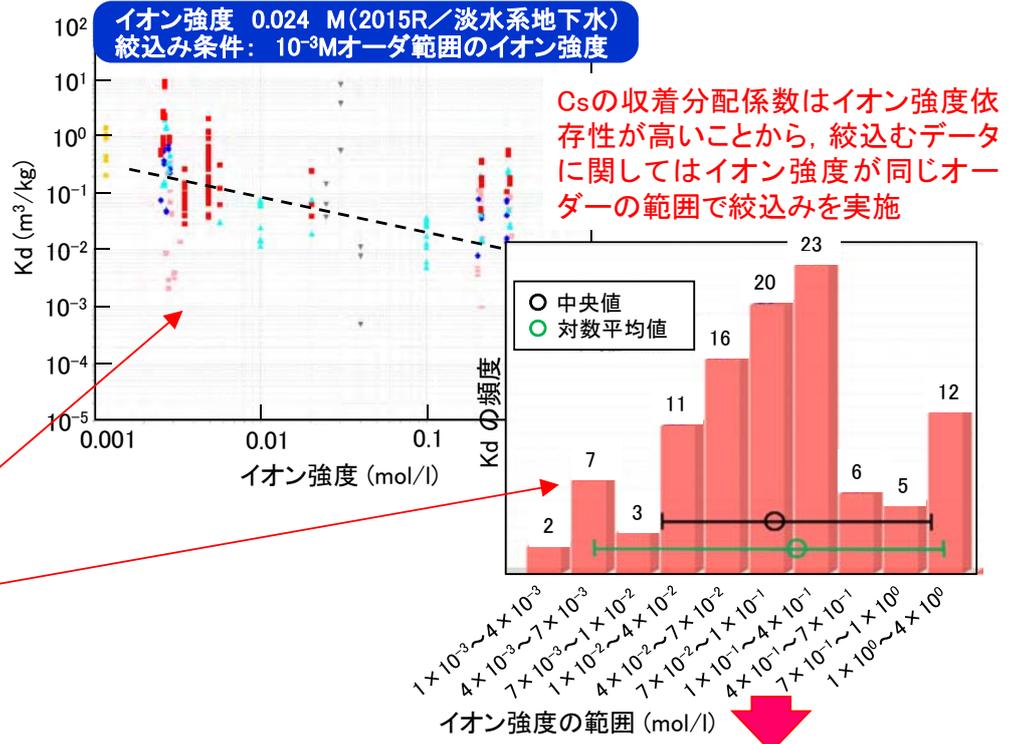
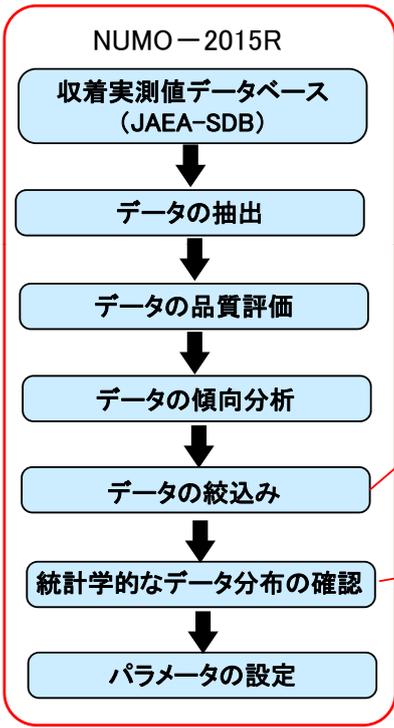


## 本報告書における解析モデルの取り扱い

- 候補サイトが明らかになった場合後の安全評価では、三次元による核種移行解析を、各スケールで接続させ実施
- 本報告書では、以下を背景として、三次元から一次元に簡略化するための手法を整備して適用
  - ✓ サイトが特定されていない現段階では、地形や地質環境の不均一性などの三次元な分布を直接反映した核種移行解析を行うことに大きな意味を持たせることはできない
  - ✓ 物質収支的には、三次元的な核種の移行経路は複数の一次元のチャンネルを組み合わせたモデルで表現可能
  - ✓ 候補サイトが明らかになった場合においても、処分場位置の検討、処分概念の比較、安全性への不確定要因の影響、次段階の調査計画の検討などに対し、使い勝手の良い簡略化したモデルを準備しておくことは極めて有効



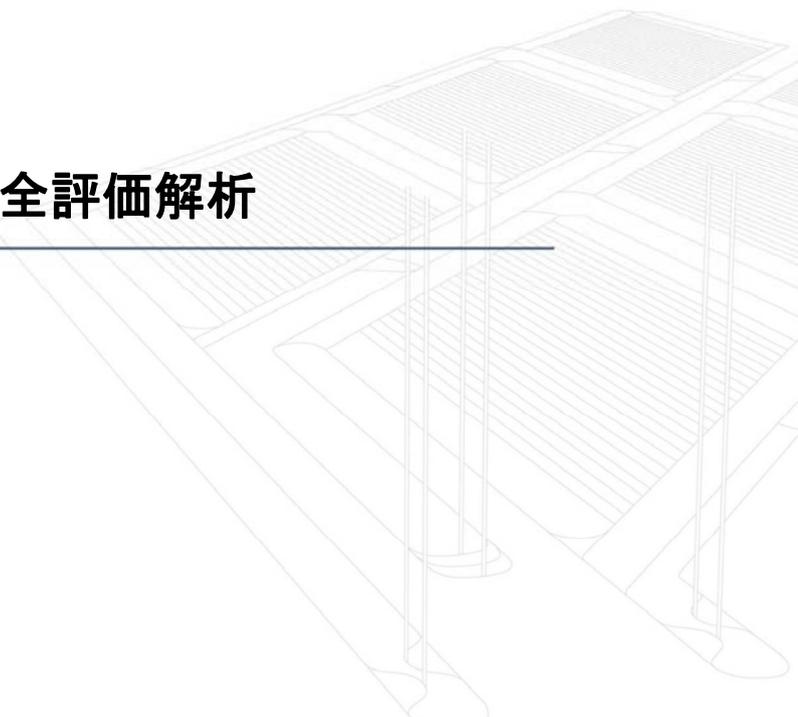
# 深成岩の収着分配係数の設定例



Kd(分配係数) 値としては中央値を設定



## 5. 安全評価解析



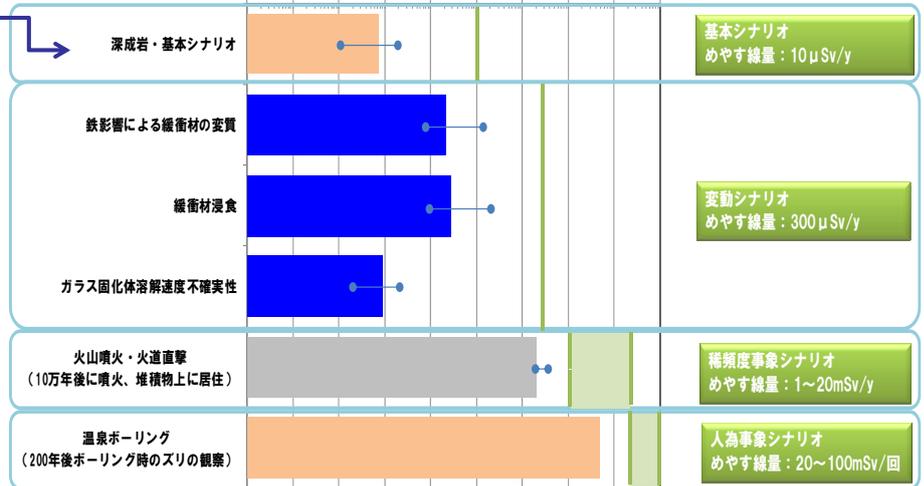
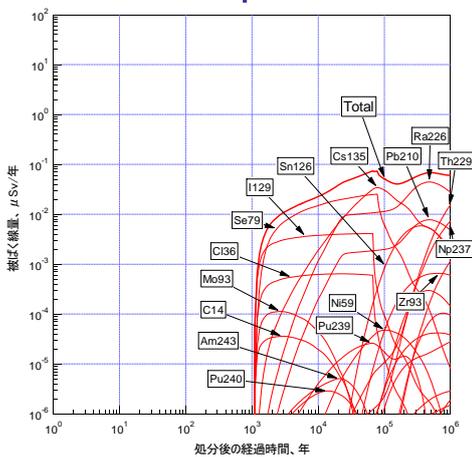
## 基本シナリオ

## 変動, 稀頻度事象, 人為事象シナリオ

- 深成岩類を対象とする
- 母岩からの出口の核種移行率を線量に換算
- 中規模の河川に核種が移行することを仮定
- 河川水を利用する農作業従事者の被ばくを想定

最大被ばく線量 ( $\mu\text{Sv}/\text{年}$ , または  $\mu\text{Sv}/\text{回}$ )

1E-4 1E-3 1E-2 1E-1 1E+0 1E+1 1E+2 1E+3 1E+4 1E+5

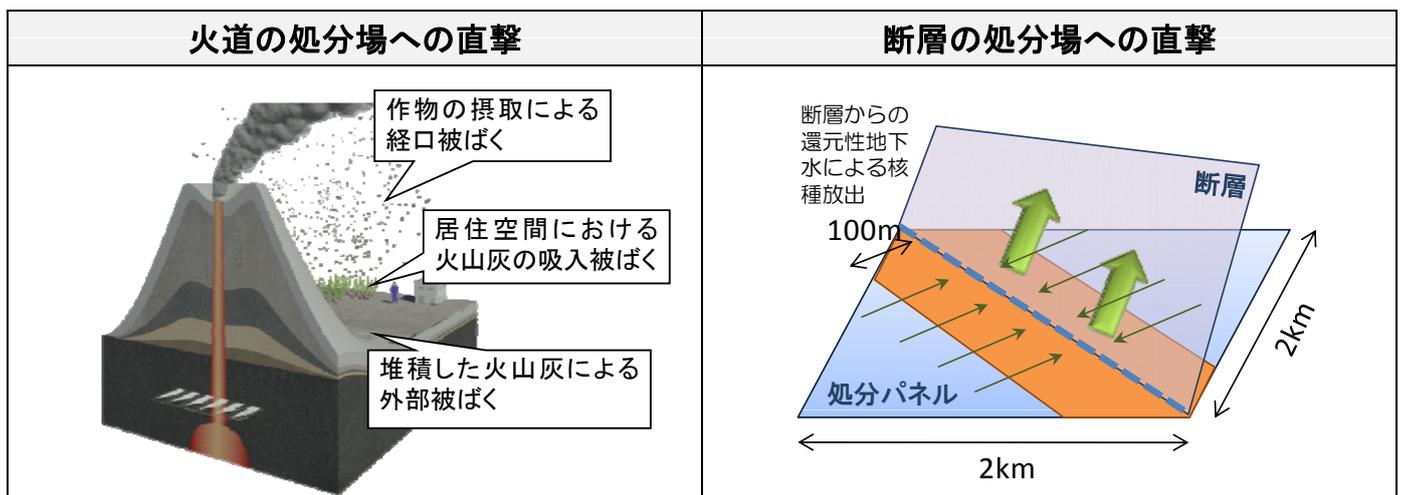


## 稀頻度事象シナリオに関する試行

### 検討を進めているシナリオ案

- 火山・火成活動(広い影響範囲が想定される熱水活動, マグマの貫入 等), 断層活動(地下深部からの断層の進展, C級断層の活動 等)については, 日本の地質環境を踏まえ, 注意深くシナリオ作成を実施
- 事象の発生時刻は, 幅広い時間範囲を検討する
- 発生可能性は非常に低いと考えられるが, あえて直撃にまで至るシナリオについても検討

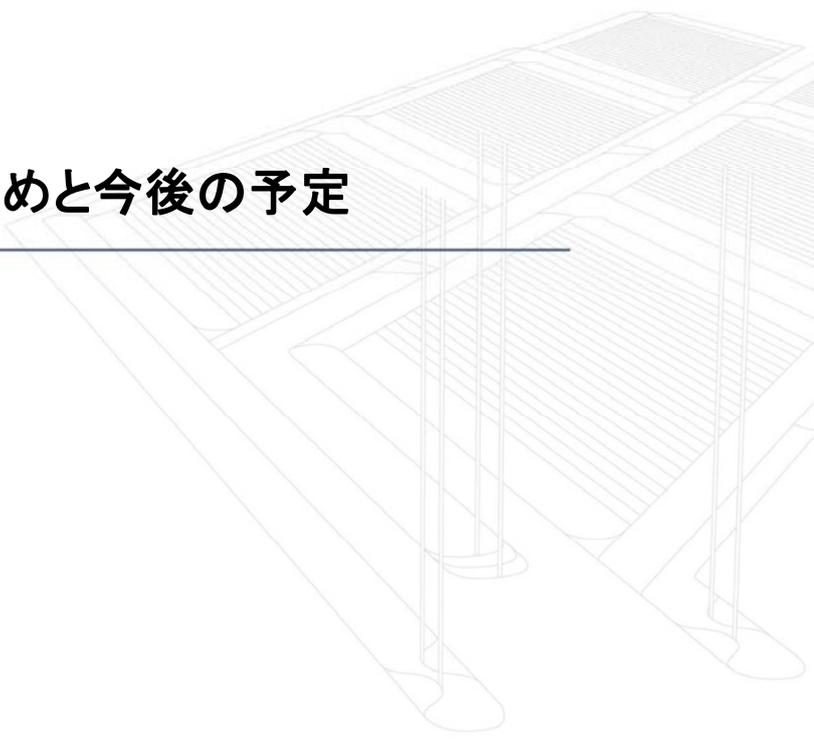
### 概念モデルの例





## 6. まとめと今後の予定

---



### まとめと今後の予定

---

#### ■ まとめ

- 安全評価を実施するための枠組みを想定
- 深成岩を対象として、一連の作業を実施。一部のシナリオについては、安全評価解析までを実施

#### ■ 今後の予定

- シナリオ区分に応じた安全評価シナリオの厳密な設定
- 深成岩以外の岩種(新第三紀堆積岩, 先新第三紀堆積岩)についての安全評価モデルの構築及び安全評価の実施
- TRU廃棄物に対する評価の実施