

処分場の設計・安全評価と必要なデータ

第2回 バックエンド週末基礎講座

2003年12月13日

於 (財) 原子力安全研究協会地下会議室

原子力発電環境整備機構 (NUMO)

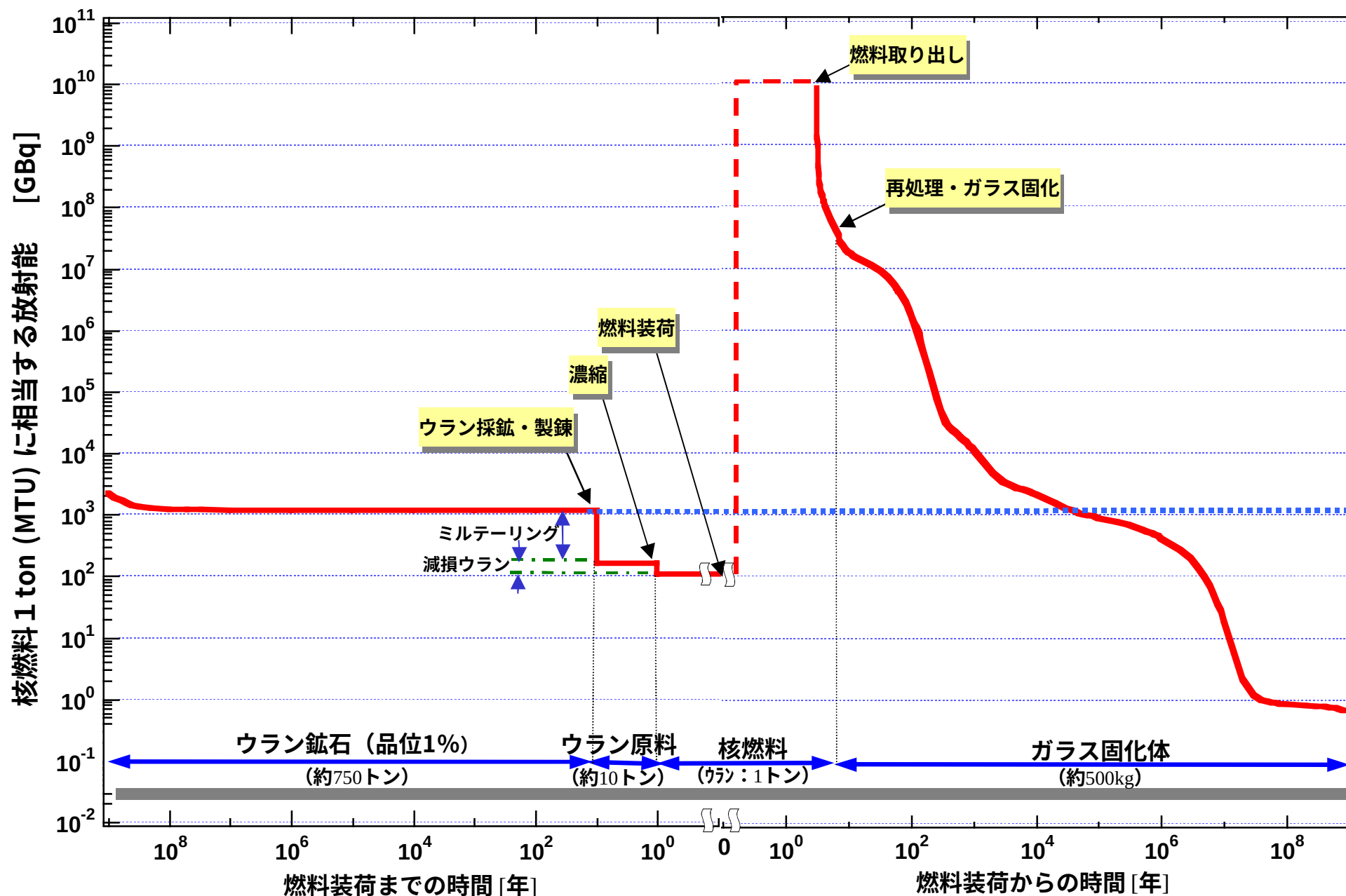
梅木博之

1. 地層処分による安全確保の考え方
2. 地層処分システムの固有性能の確保
 - 適切な地質環境の選定（サイト選定）
 - 選定された地質環境に対し人工バリアや処分施設を適切に設計・施工（工学的対策）
3. 地層処分システムの長期安全性の確認
（安全評価／性能評価）
4. データ取得
5. まとめ

1. 地層処分による安全確保の考え方

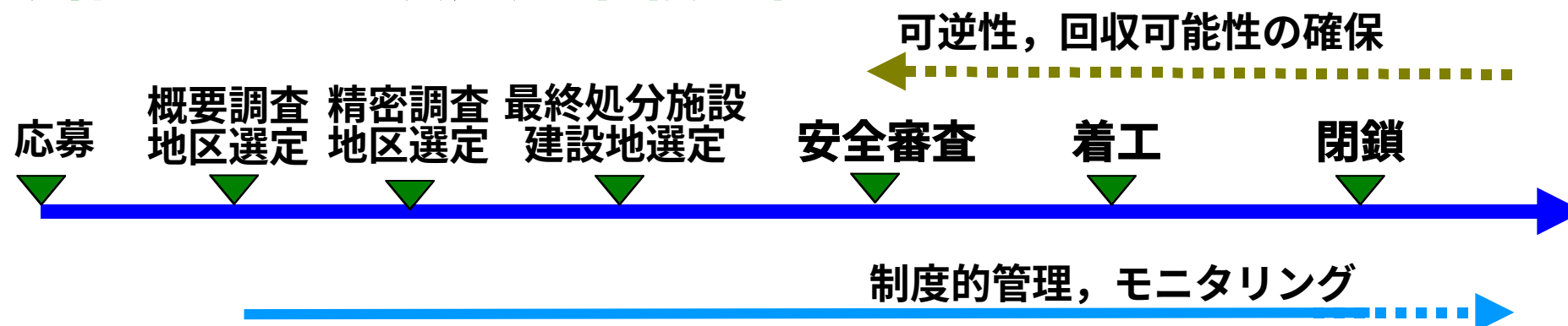
放射能の推移から眺めた高レベル放射性廃棄物の特徴 **NUMO**

(第2次取りまとめ総論レポート第1章より)



地層処分計画の進め方

段階的な意思決定／信頼の構築



信頼の構造

・ 地層処分安全性への信頼

- 安全性の議論に対する科学的客観性と技術的信頼性

・ 処分事業への信頼：

- 処分事業者の事業運営と技術的能力に姿勢に対する信頼
- 政策に対する信頼
- 規制への信頼

地層処分の安全性

処分場閉鎖前安全性：処分場の建設，操業，閉鎖～事業廃止までの数十年～百年程度の期間について通常の原子力施設（ただし，線源は物理的・化学的により安定）と同様に扱うことが可能

処分場閉鎖後安全性：人間の関与が終了した後の時期

- ・ 受動的なシステム（閉鎖後数万年以上の長期間）
- ・ 地層処分に特有なものとして考慮しなければならない

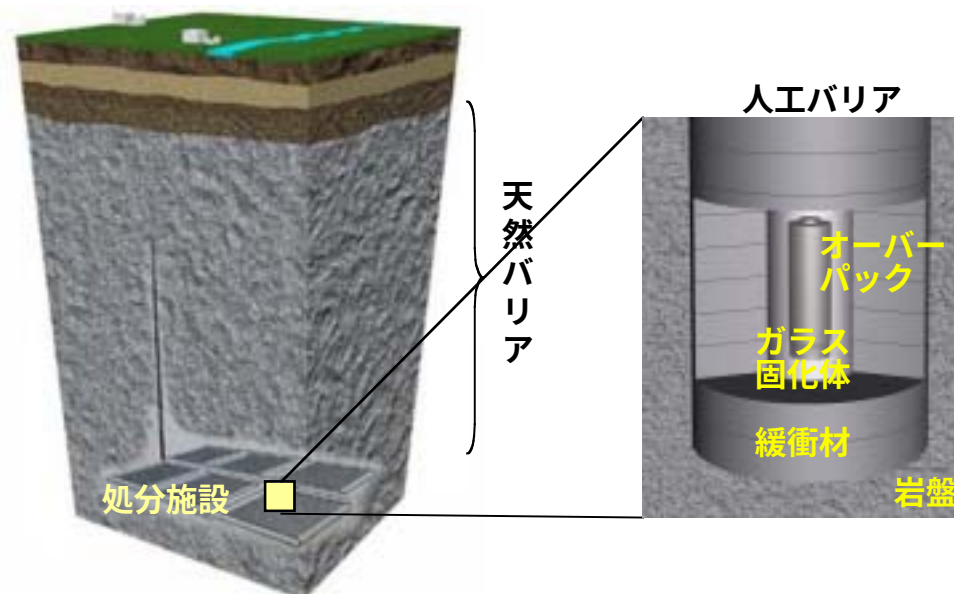
地層処分による安全確保の考え方

処分場閉鎖後の長期安全性

地層処分システムの構築（固有性能の確保）

サイト選定

地層処分にとって
長期的に安定で好
ましい条件を備え
た地質環境（場所）
の選定



工学的対策

サイトの条件に応
じた人工バリア／
処分施設の設計・
施工

安全性の確認

安全評価

- ・ 地層処分システムの長期安全機能の評価
- ・ 処分計画の進展に応じて蓄積する情報（地質環境，科学技術の進展等）に基づいて閉鎖に至るまで繰り返し実施

地層処分システムの構成要素と期待される安全機能

人工バリア

ガラス固化体

(ステンレス製キャニスタに充填されたもの)

- ・放射性核種を均一かつ安定に固定
- ・高い化学的耐久性により地下水への放射性核種の溶出を抑制
- ・熱や放射線に対する安定性

オーバーパック

(炭素鋼)

- ・ガラス固化体の発熱や放射能が高い期間、地下水とガラス固化体の接触を阻止
- ・地下水との反応によりガラス固化体近傍の還元性を維持
- ・放射性核種の腐食生成物への収着

緩衝材

(ベントナイトを主成分)

- ・低透水性（オーバーパックと地下水の接触抑制）
- ・小さな物質移動速度
- ・放射性核種の移行遅延（収着）
- ・膨潤性と可塑性
- ・化学的緩衝性
- ・空隙水中での低い溶解度
- ・コロイド、微生物、有機物の移動に対するフィルター効果

地質環境

長期的な安定性

- ・火山活動がない
- ・活断層が存在しない
- ・著しい隆起・侵食が生じない
- ・気候変動によって著しい影響を受けない
- ・資源が存在しない

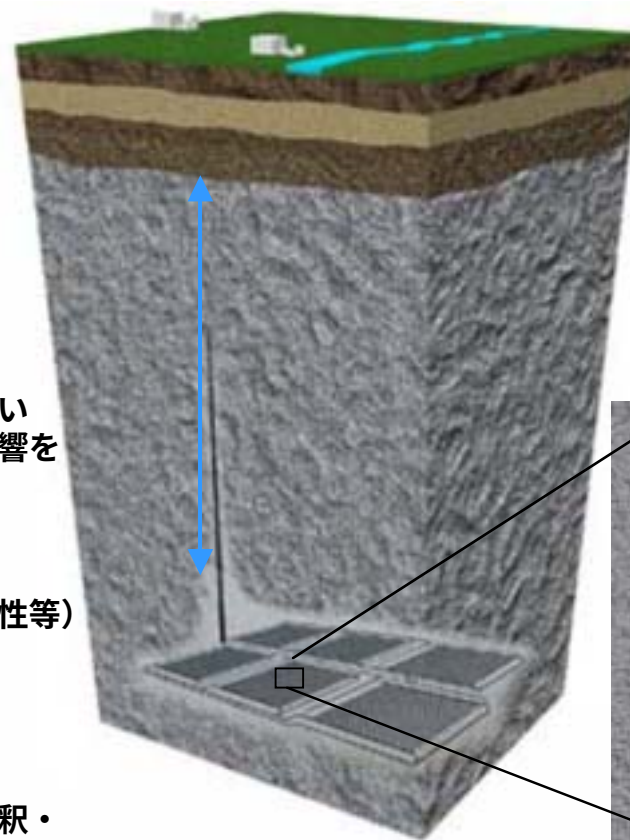
人工バリアの設置環境

- ・好ましい地下水化学（還元性等）
- ・小さな地下水流束
- ・力学的安定性
- ・人間環境からの物理的障壁

天然バリアとしての機能

- ・放射性核種の移行抑制と希釈・分散

(第2次取りまとめ総論レポート第II章に加筆)



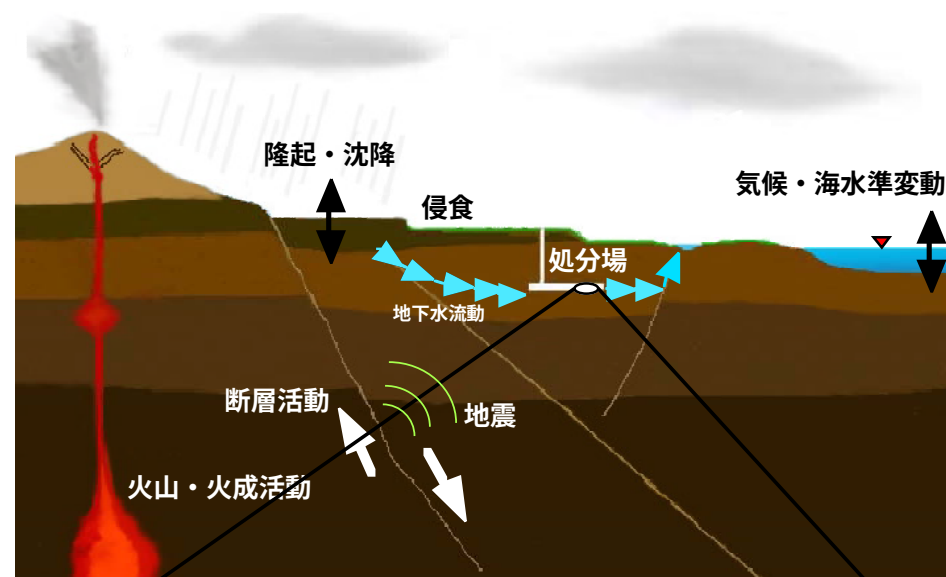
2. 地層処分システムの固有性能の確保

- 適切な地質環境の選定（サイト選定）
- 選定された地質環境に対し人工バリアや処分施設を適切に設計・施工（工学的対策）

地層処分にとって適切な地質環境の選定

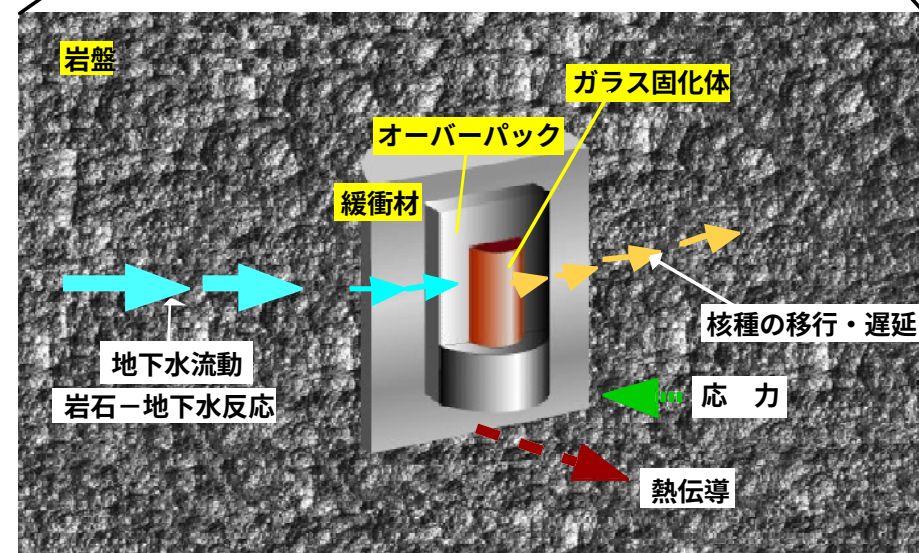
地質環境の長期安定性

地層処分の場としての長期にわたる安定性の確認



地質環境の特性

人工バリアの設置環境及び天然バリアとしての岩盤や地下水の性質に関する適性の確認



(第2次取りまとめ総論レポート第III章より)

適切な地質環境を確認するためのアプローチ

地質環境の長期安定性

天然現象の過去から現在までの活動履歴を追跡

- ・ 文献調査
- ・ 年代測定等による履歴の調査



将来の天然現象の発生予測



天然現象が発生した場合の
地質環境への影響評価

地質環境の特性

文献調査，ボーリングなどによる調査



人工バリア／処分施設の設計・安全評価に必要なデータの整備

サイト地質環境の例



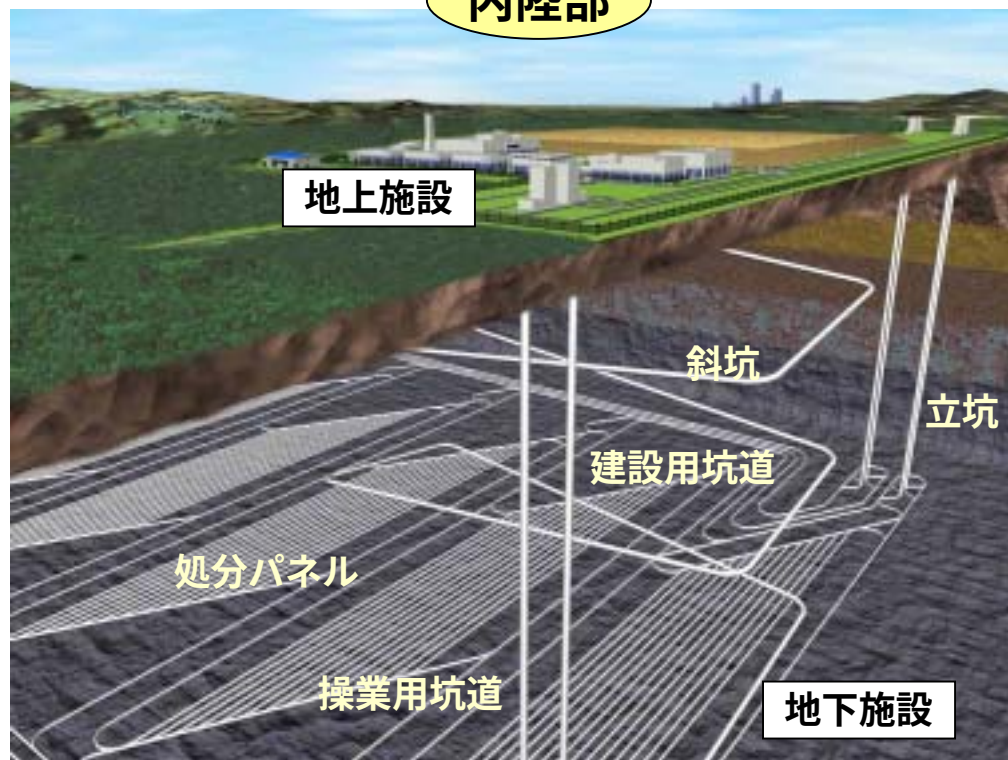
(処分場の概要 (原環機構, 2002) より)

2. 地層処分システムの固有性能の確保

- 適切な地質環境の選定（サイト選定）
- 選定された地質環境に対し人工バリアや処分施設を適切に設計・施工（工学的対策）

処分場のイメージ

内陸部



仕様の一例（現時点の概略仕様）

地上施設

- 敷地面積：1,000,000m²

地下施設

- 深度：1000m； 大きさ（平面）：約3km×約2km
- 立坑：6本； 斜坑：1本
- 坑道延長（立坑，斜坑除く）：約250km
- 総掘削量（立坑，斜坑除く）：約630万m³
- 立坑＋斜坑の延長距離：約20km；
- 立坑＋斜坑の掘削量：約60万m³

沿岸部



仕様の一例（現時点の概略仕様）

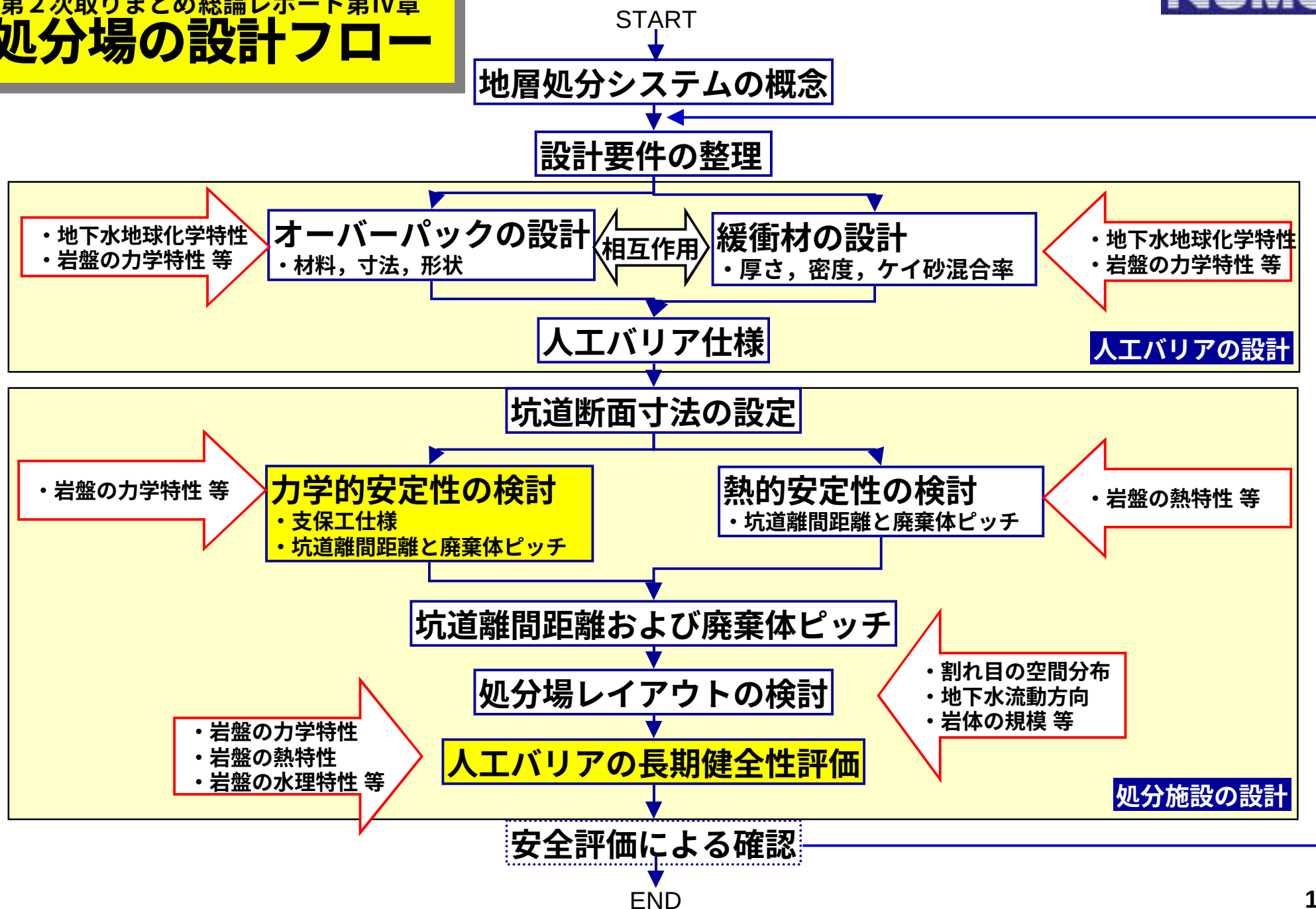
地上施設

- 敷地面積：1,000,000m²

地下施設

- 深度：500m； 大きさ（平面）：約3.5km×約1.5km
- 斜坑：6本
- 坑道延長（斜坑除く）：約200km
- 総掘削量（斜坑除く）：約230万m³
- 斜坑の延長距離：約40km
- 斜坑の掘削量：約120万m³

第2次取りまとめ総論レポート第IV章
処分場の設計フロー



第2次取りまとめ総論レポート第IV章
人工バリアの設計

主な設計条件

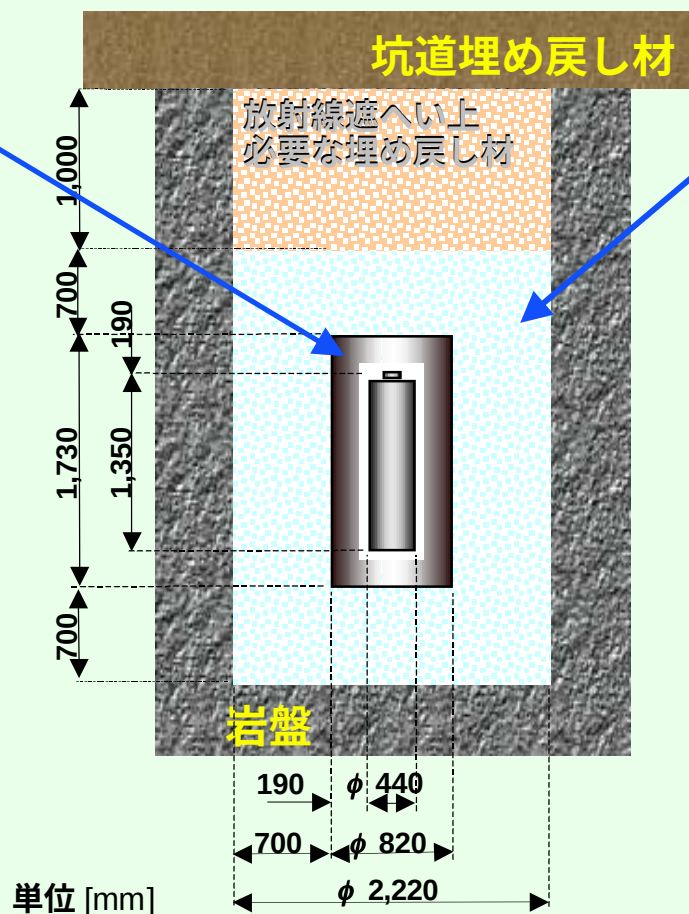
- ・ オーバーパックの寿命：少なくとも1000年
- ・ 緩衝材の制限温度：100℃以下

NUMO

**オーバーパック
(炭素鋼)**

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

- ・ 地下深部の条件を模擬した長期腐食試験
- ・ 試作



緩衝材

(ベントナイト70%, ケイ砂30%)

- ・ 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

- ・ ベントナイト・ケイ砂混合材料の特性に関する室内試験データ
- ・ 原位置施工試験

岩盤物性

(文献データと東濃地域・釜石鉱山における実測値による確認)

処分場の仕様例

	処分孔縦置き方式	処分孔横置き方式
硬岩		
軟岩		

適切な地質環境の確保：

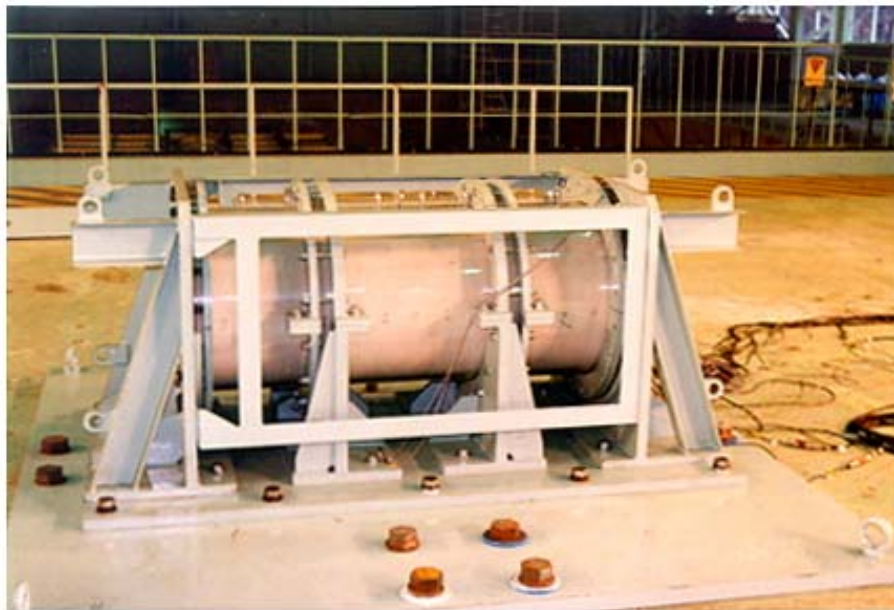
- ・ 段階的な調査によるサイト選定
- ・ ナチュラルアナログ

地質環境に応じた工学的対策：

- ・ 設計・施工の品質管理
- ・ モックアップ等による実証試験（例：遠隔操作技術）
- ・ ナチュラルアナログ
- ・ 健全性の評価（例：耐震性）

人工バリア振動試験

(JNC/旧防災科学技術研究所共同研究)



カナダURLでの実規模シーリング試験

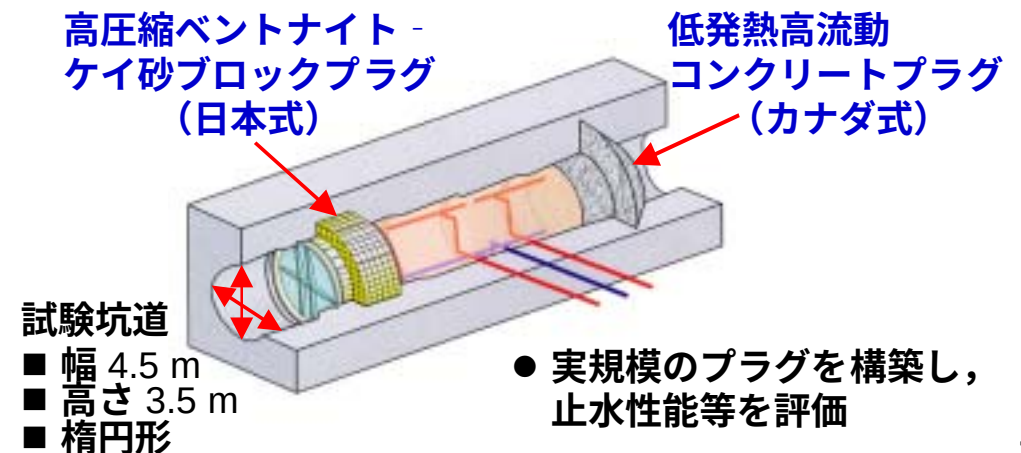
(JNC/AECLとの国際共同研究)



- 地下約400m
- 硬岩

高圧縮ベントナイト -
ケイ砂ブロックプラグ
(日本式)

低発熱高流動
コンクリートプラグ
(カナダ式)



(第2次取りまとめ総論レポート第IV章より)

3. 地層処分システムの長期安全性の確認 (安全評価／性能評価)

地層処分システムの安全評価

地層処分システムの特徴

- 通常の工学システムと異なり，対象とする全時間（数万年以上）・空間領域（～数 $\text{km}^2 \times 300\text{m}$ 以深）にわたって働く安全機能を直接確認することは困難

“予測評価”による安全性の確認

- シナリオに基づく予測解析
- “予測”は，将来の人間への影響を言い当てる必要はなく，安全性の基準と対比するための判断材料を提供することが主旨
- 長期間の予測に伴う不確実性を考慮

何を評価するか？

地層処分した高レベル放射性廃棄物による人間とその環境への影響

- ・ 放射線による潜在的な影響

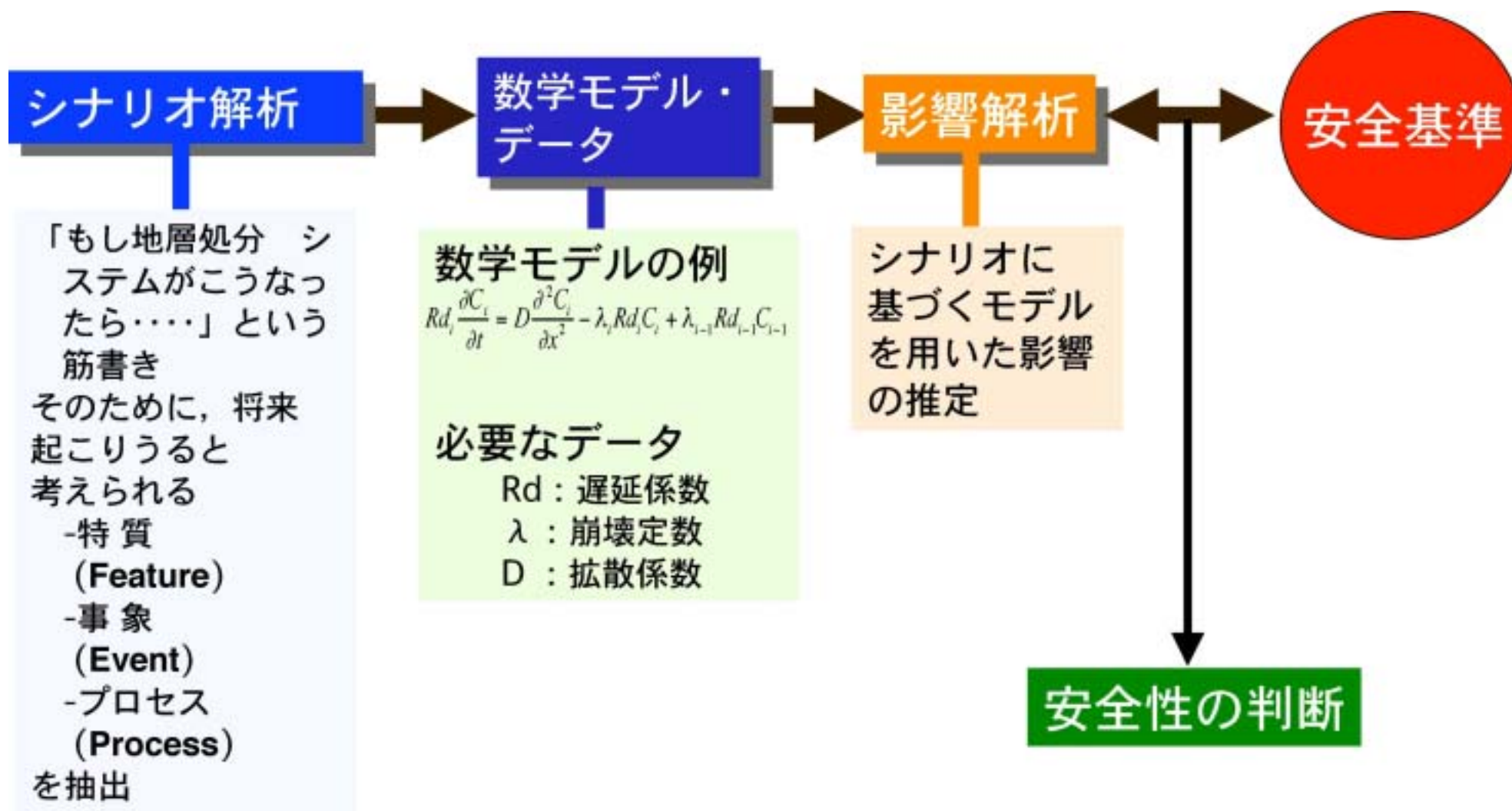
影響が生じる可能性

- ・ 人間が近づく（放射線に曝される）
- ・ 放射性物質が人間の生活環境に運ばれる（放射性物質の摂取）

評価指標：

- ・ 放射線の影響を表す線量やリスク

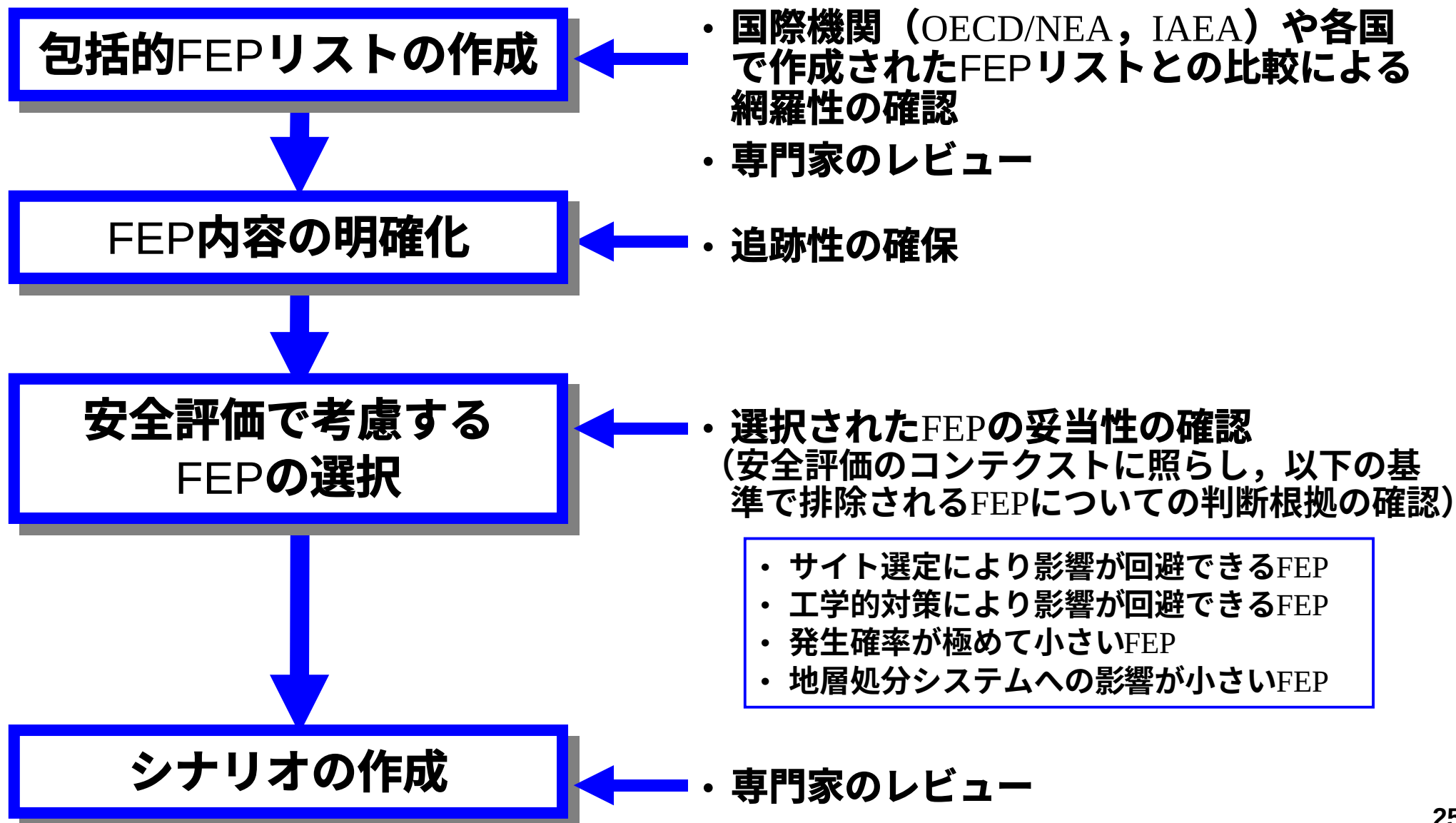
安全評価の体系



不確実性の取り扱い

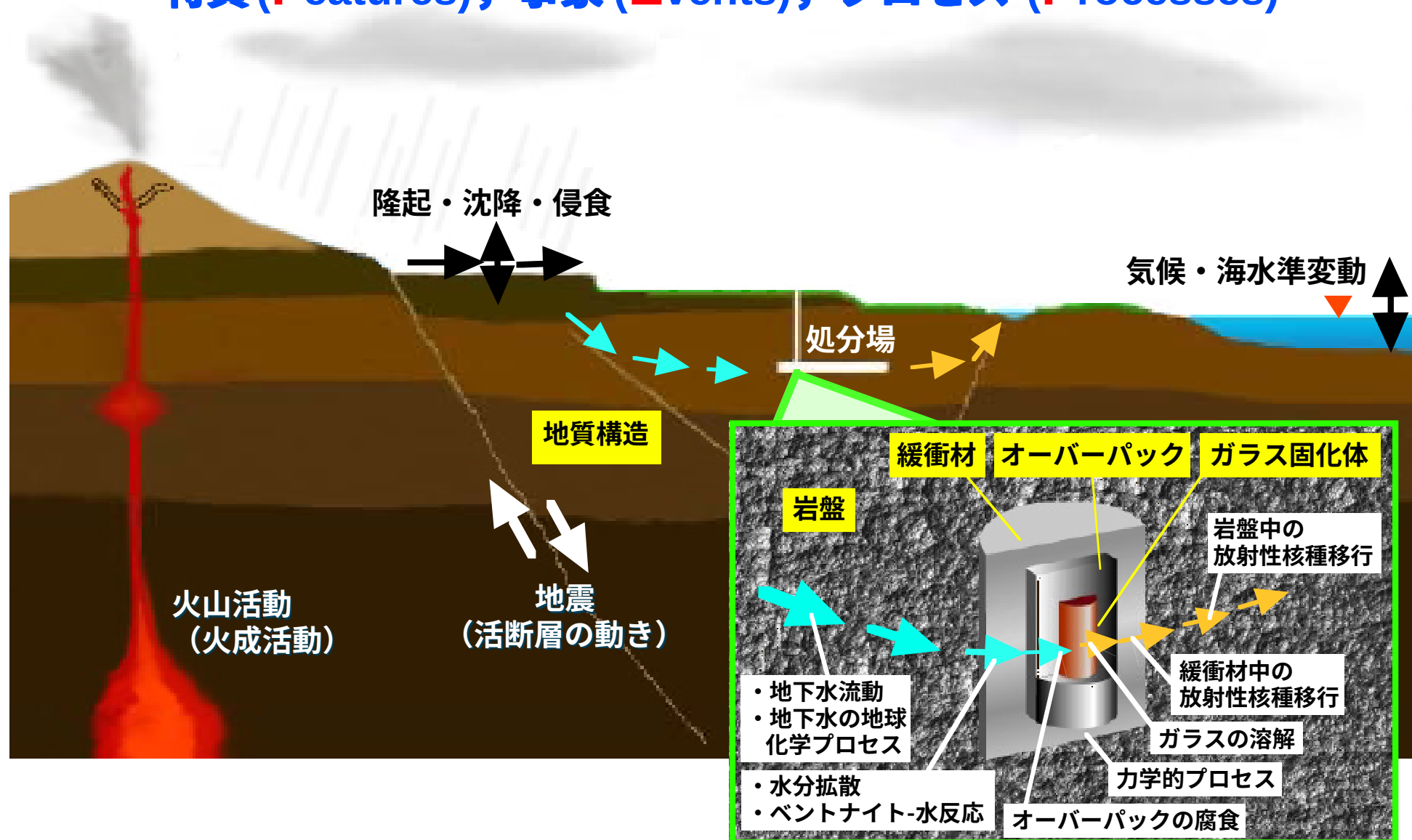
- システムの変遷に伴う不確実性への対処
 - ✓ 適切なシナリオの選択
 - ✓ 保守的な仮定（結果が厳しくなるように設定）
 - ✓ 感度解析や必要に応じて行う“what if”シナリオの評価により、安全評価で用いる仮定への影響を確認
 - ✓ 用いる安全評価手法や得られる結果について、外部専門家によるレビューの実施

シナリオの作成とその妥当性の検討



第2次取りまとめ総論レポート第V章
地層処分で考慮するFEPの例

特質 (Features), 事象 (Events), プロセス (Processes)



第2次取りまとめ総論レポート第V章

包括的FEPリスト

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

安全評価シナリオの分類と取り扱い

安全評価で考慮するFEPリスト

地下水シナリオ

接近シナリオ

(火山の噴火、断層運動、
隆起・侵食、人間侵入)

適切な処分サイトの
選定と処分場の
設計によって影響
を回避

想定を超える天然現象の影響

将来の人間活動の影響

処分場の欠陥による影響

基本シナリオ

- ・レファレンスケース
- ・データ不確実性ケース
- ・地質環境変更ケース
- ・概念モデル変更ケース
- ・代替デザインケース

変動シナリオ

モデルとデータ
による解析評価

基本シナリオ:

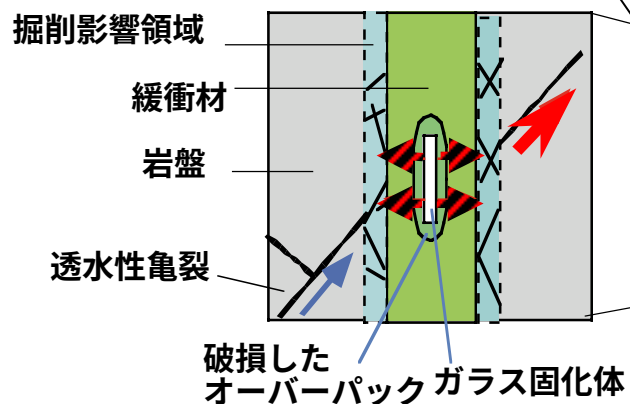
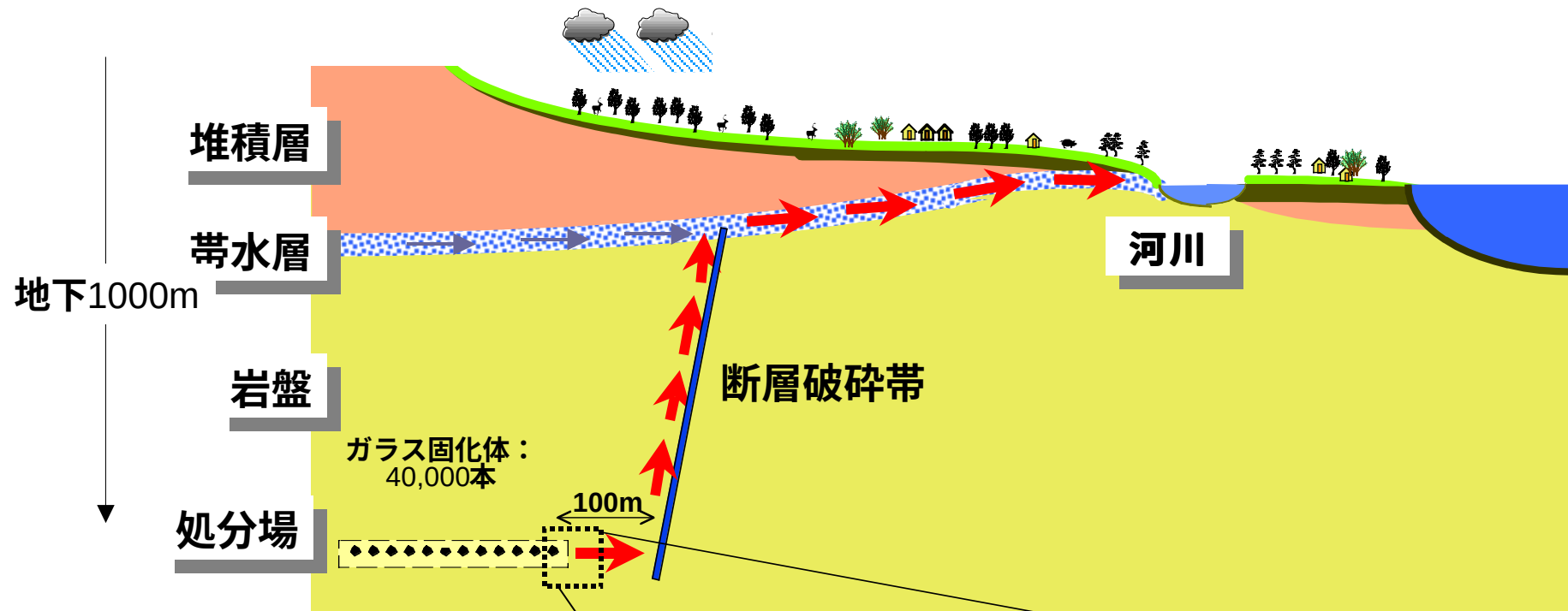
固有性能が確保されたシステムの将来挙動

- ・ 現在の地質環境が将来まで継続
- ・ 人工バリアが設計どおりの機能を発揮
- ・ 将来の人間活動による影響がない

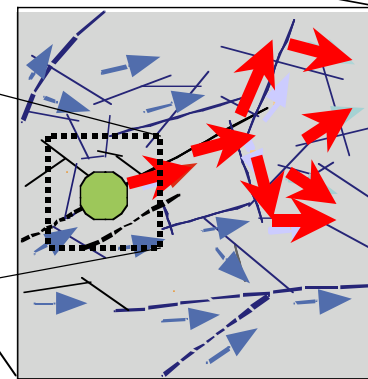
解析ケースの設定

- ✓ レファレンスケース：基本シナリオの解析を行ううえでの参照ケース
- ✓ レファレンスケースに対するバリエーション
 - ・ モデルやデータに伴う不確実性を考慮したケース
 - ・ 地質環境の多様性や処分場仕様のオプションを考慮した種々の地層処分システムに対する解析ケース

第2次取りまとめ総論レポート第V章
レファレンスケース



人工バリア及び坑道周辺



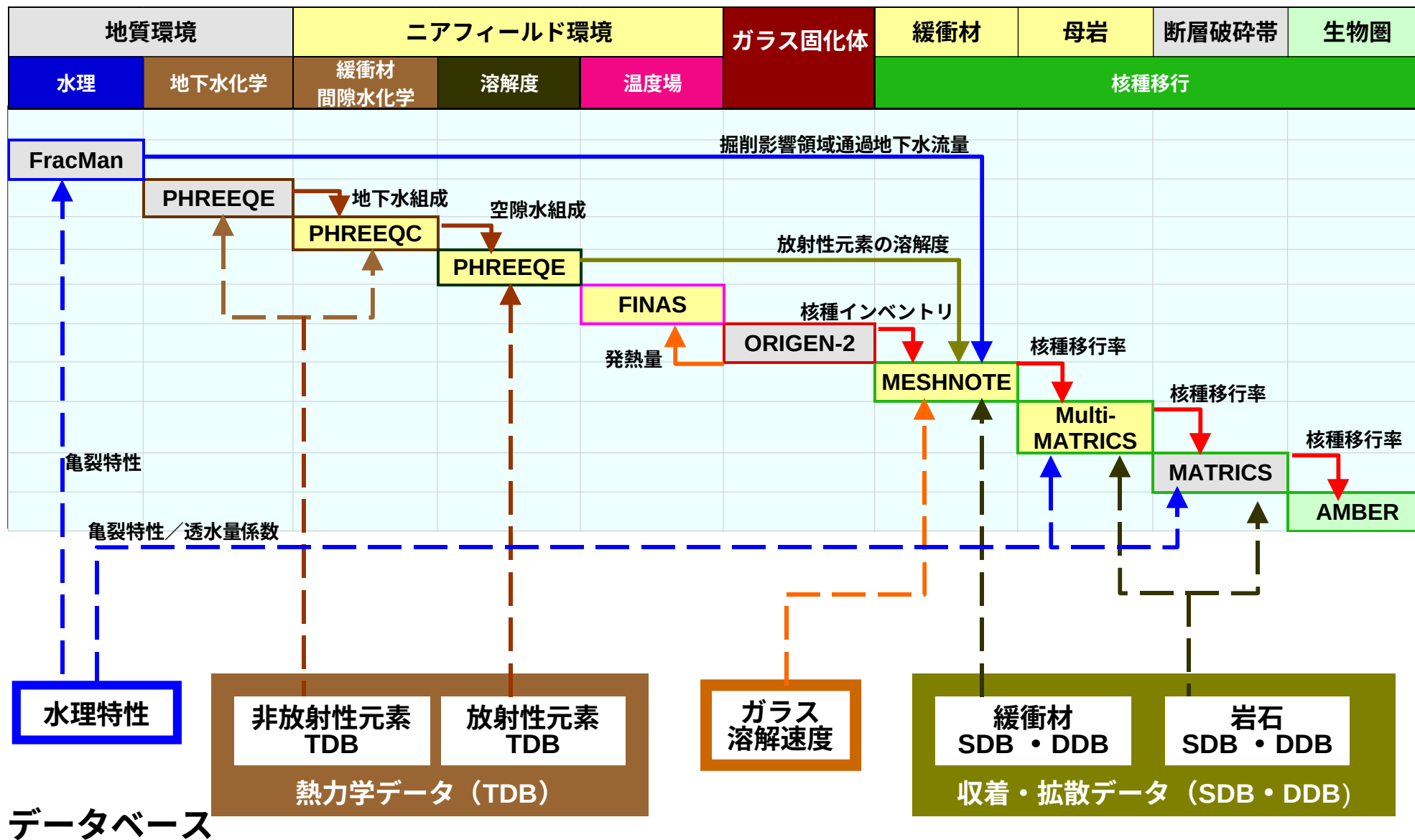
母岩領域

- : 地下水の動き
- : 拡散による間隙水中の放射性核種の動き
- : 放射性核種が溶解した地下水の動き

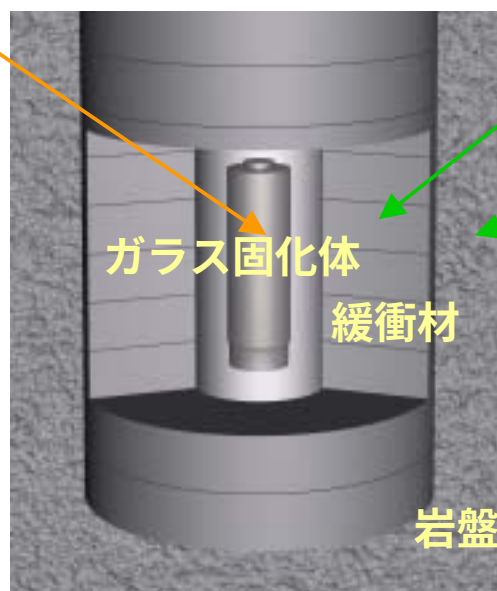
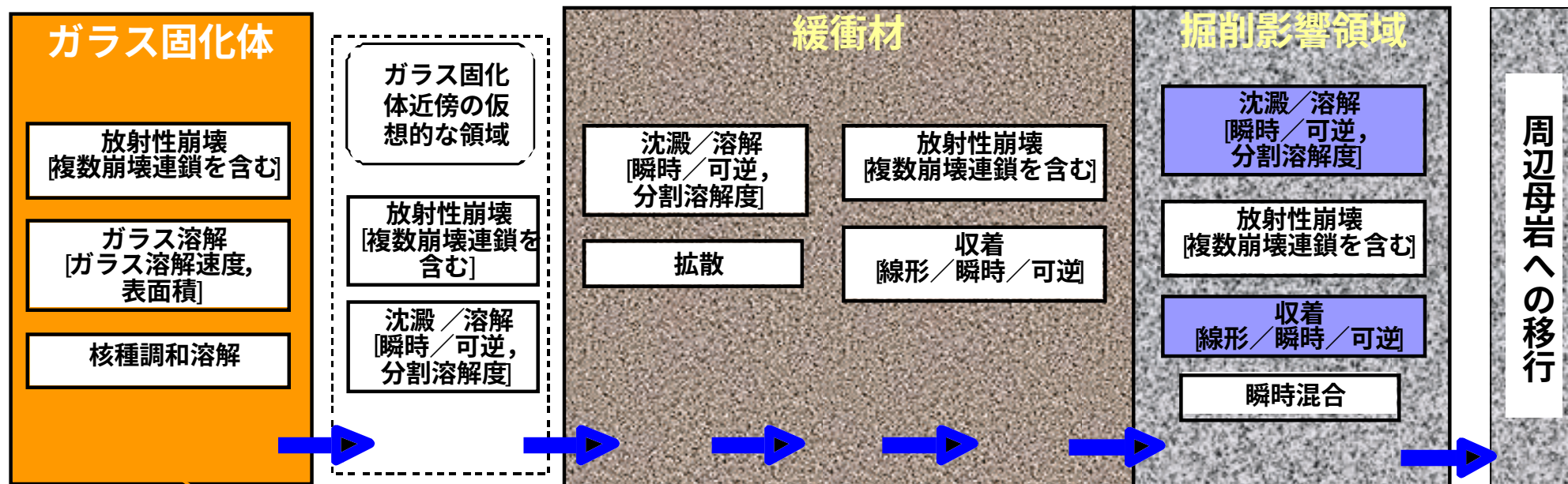
モデルやデータが満たすべき要件

- 一般的に認められている科学的原理に基づく十分に確立された概念モデルの適用
- 不利益な影響を及ぼすと考えられるすべてのプロセスの考慮
- 簡略化の結果が保守的であることの保証
- 影響を緩和するプロセスは、それが信用できると考えられる場合のみ考慮
- 直接的な根拠により正しいことが保証されているか、または保守的であることが示されているパラメータ値（範囲）の採用

第2次取りまとめ総論レポート第V章
解析コードとデータベース

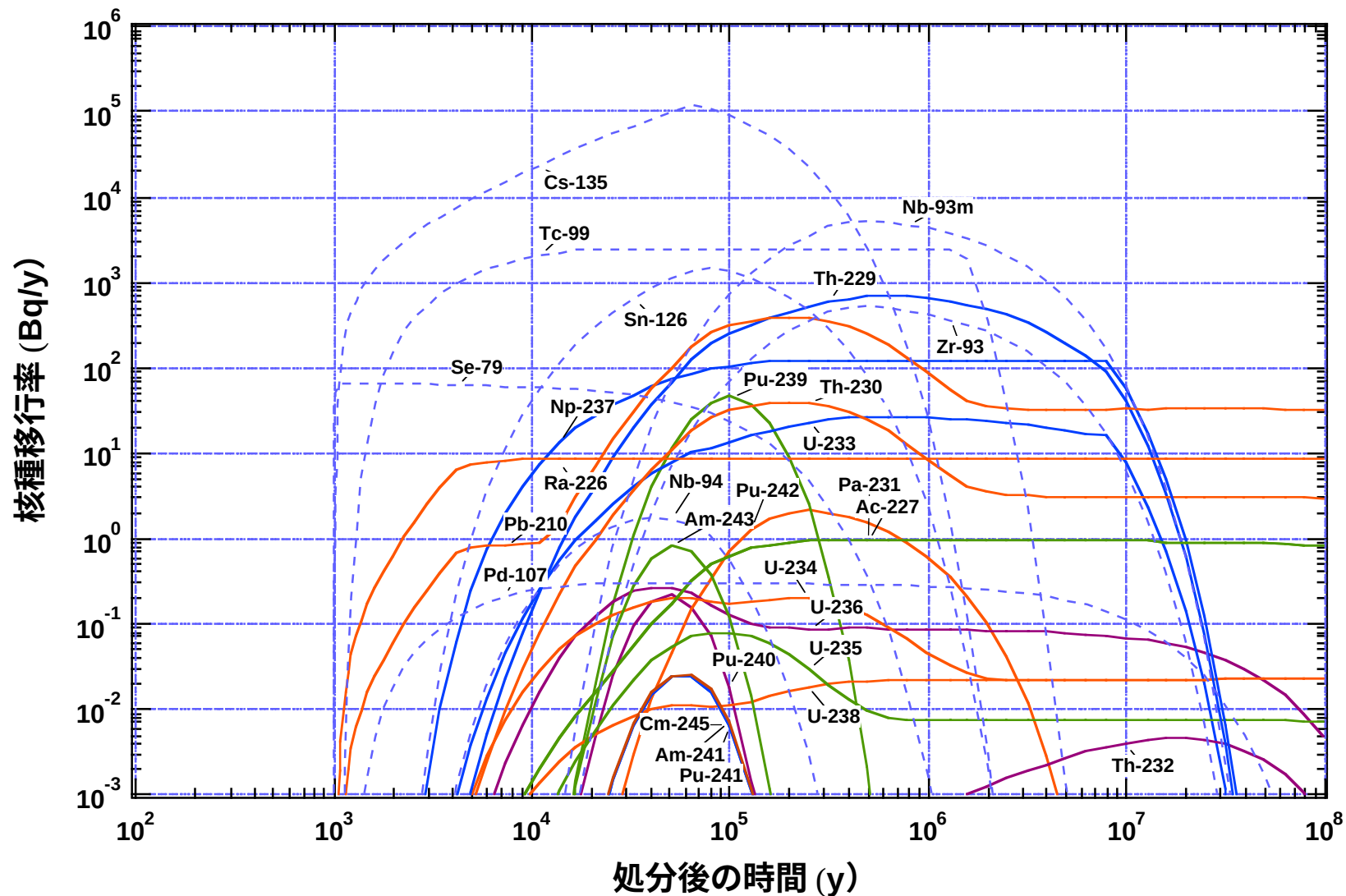


人工バリア中核種移行のモデル化



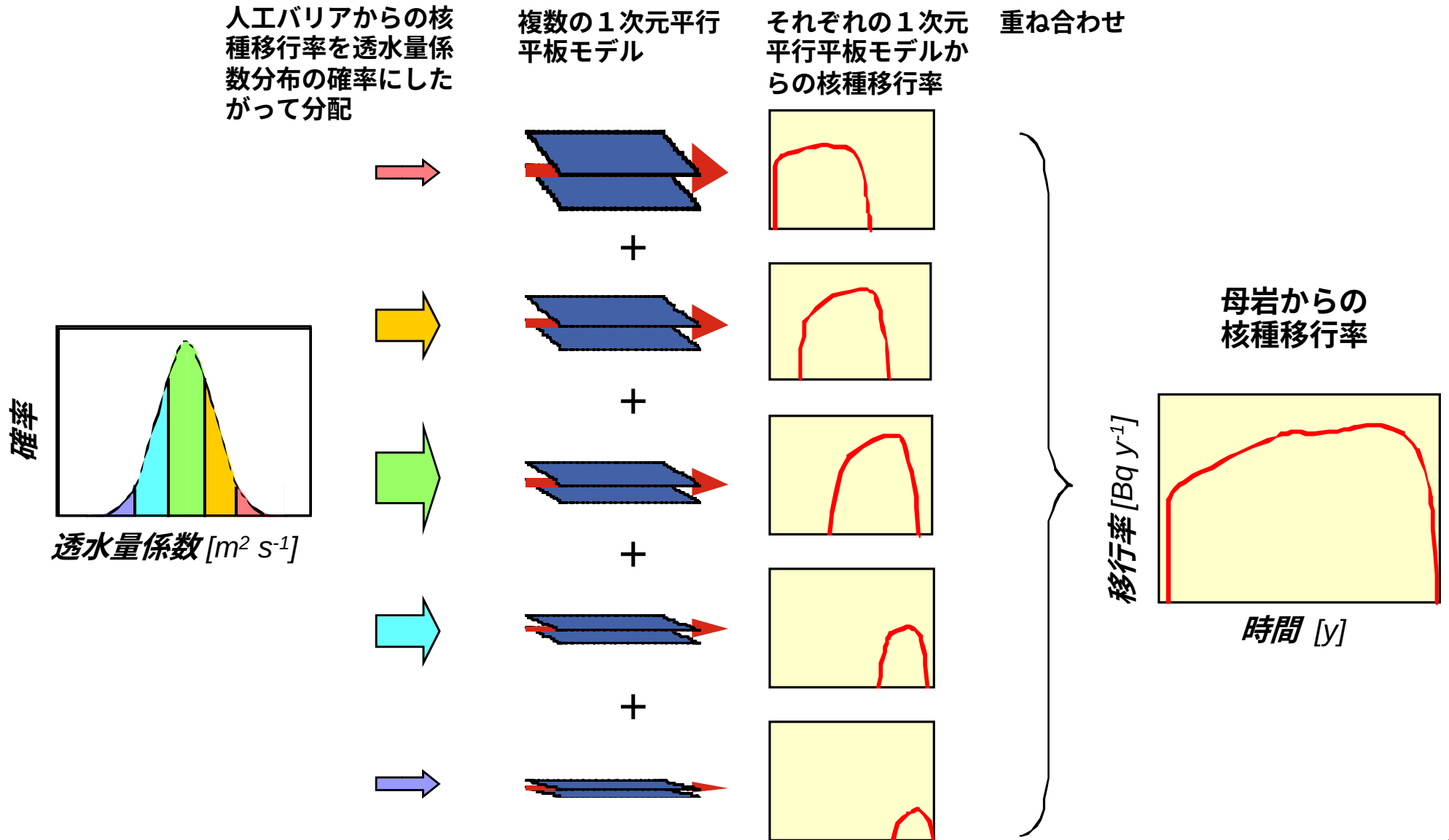
レファレンスケースでは考慮しない

人工バリアからの核種移行率 (レファレンスケース：ガラス固化体1本あたり)

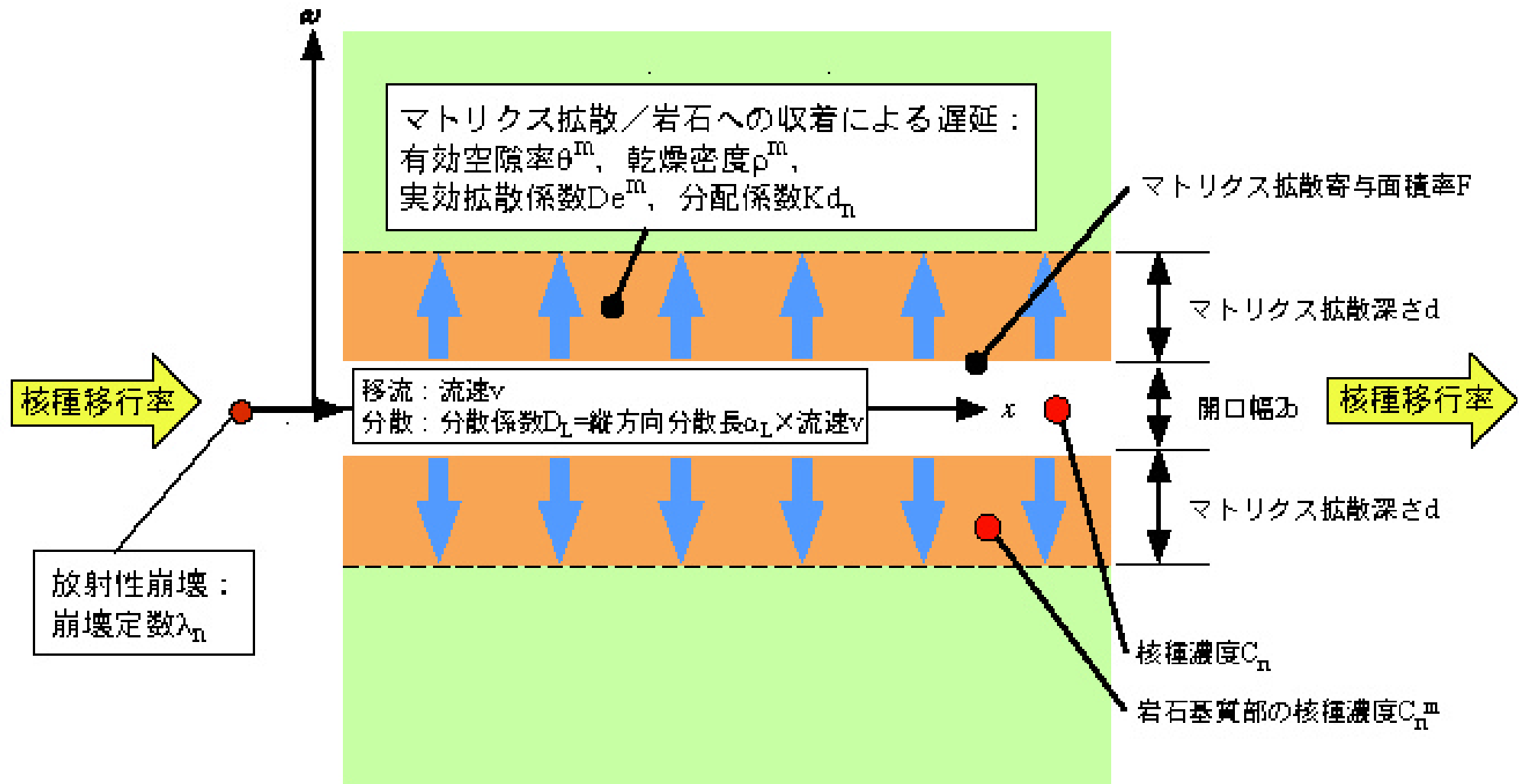


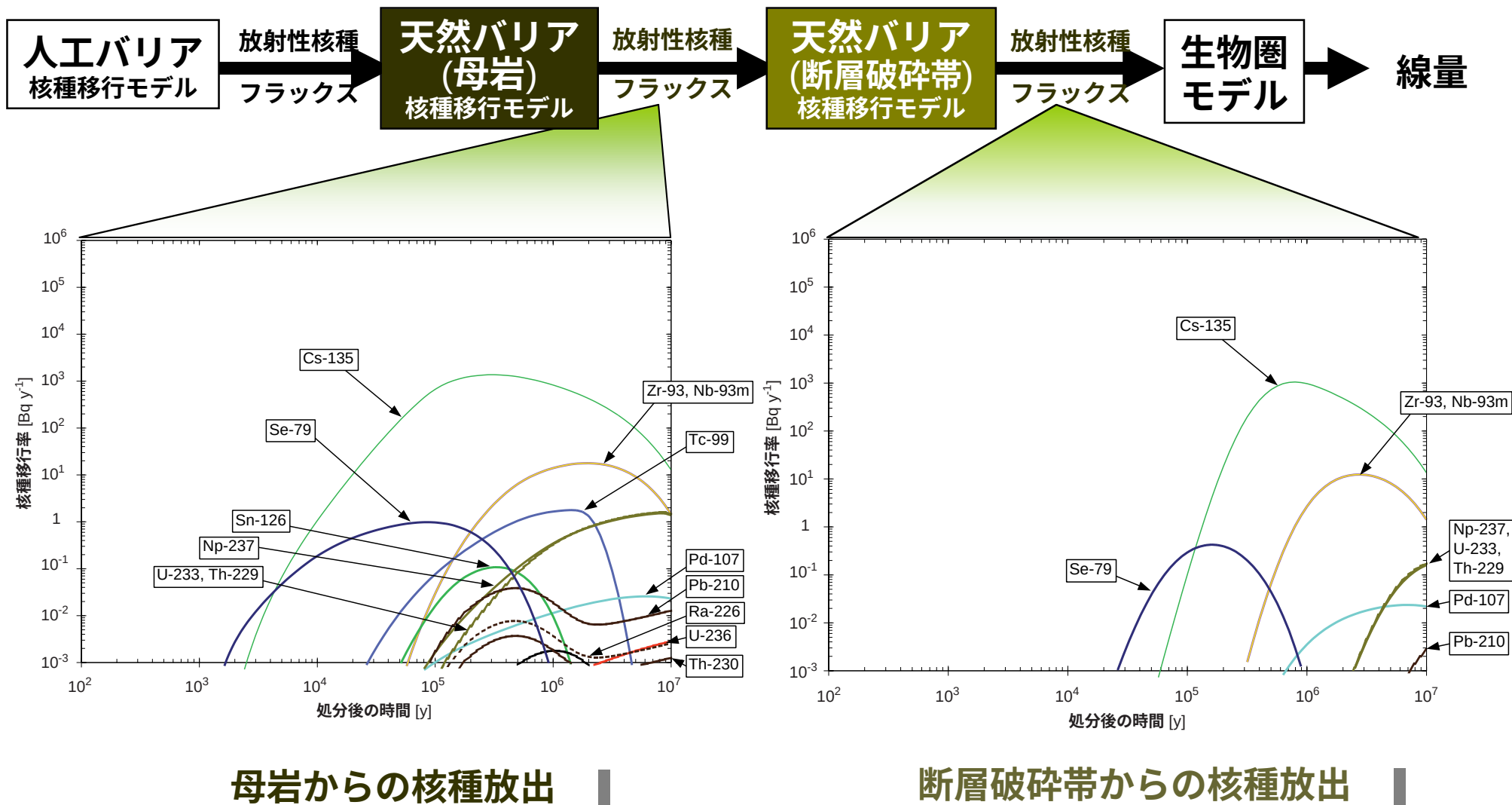
天然バリア中核種移行モデル

(1次元平行平板モデルの重ね合わせ概念図)



第2次取りまとめ総論レポート第V章
1次元平行平板モデル





地層処分の安全評価と生物圏モデル

・地層処分による放射線学的影響の評価



・長期間の予測に伴う不確実性大

- ✓ 生活環境：将来の人間活動や気候変動による影響
- ✓ 生活様式：将来の人間社会の変化

・生物圏モデルのアウトプットの意味

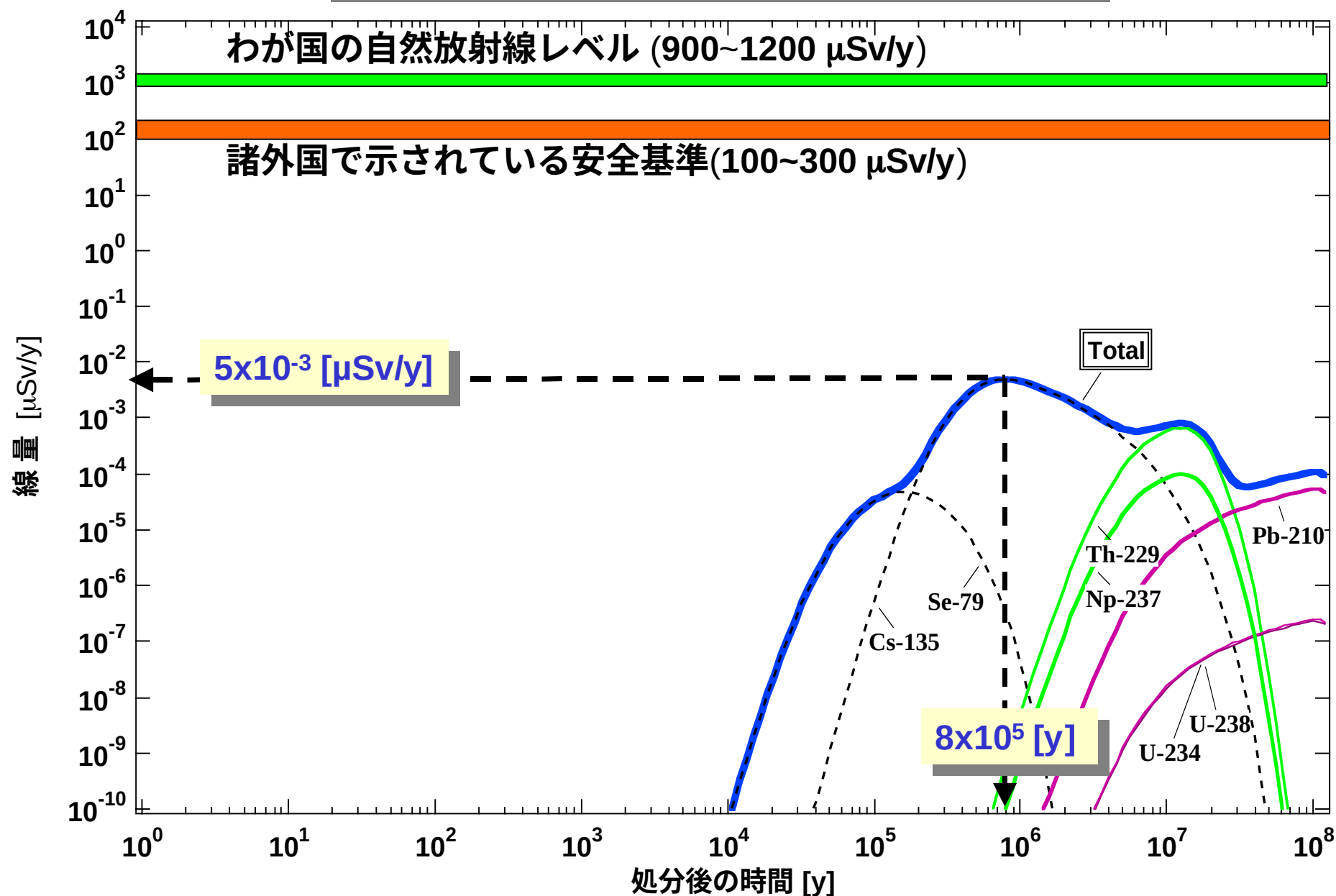
実際に人間や環境が受ける影響ではなく，シナリオに沿った地層処分システムの性能を放射線学的影響尺度に変換したもの



生物圏のモデル化：

将来の人間生活の環境や様式について，安全評価の目的に応じた，整合のとれた仮定に基づくことが必要（**レファレンスバイオスフェア**の概念）

レファレンスケースの解析結果



変動シナリオ

天然現象

- ・ 隆起・侵食：
処分場が地表に近づくことによる地下水組成および水理場の変化を想定
- ・ 気候・海水準変動：
氷期における海水準の低下とそれに伴う塩淡水境界の移動を想定

初期欠陥

- ・ 埋戻し・プラグの施工不良
- ・ オーバーパックの溶接ミスなどによる不完全な密封を想定

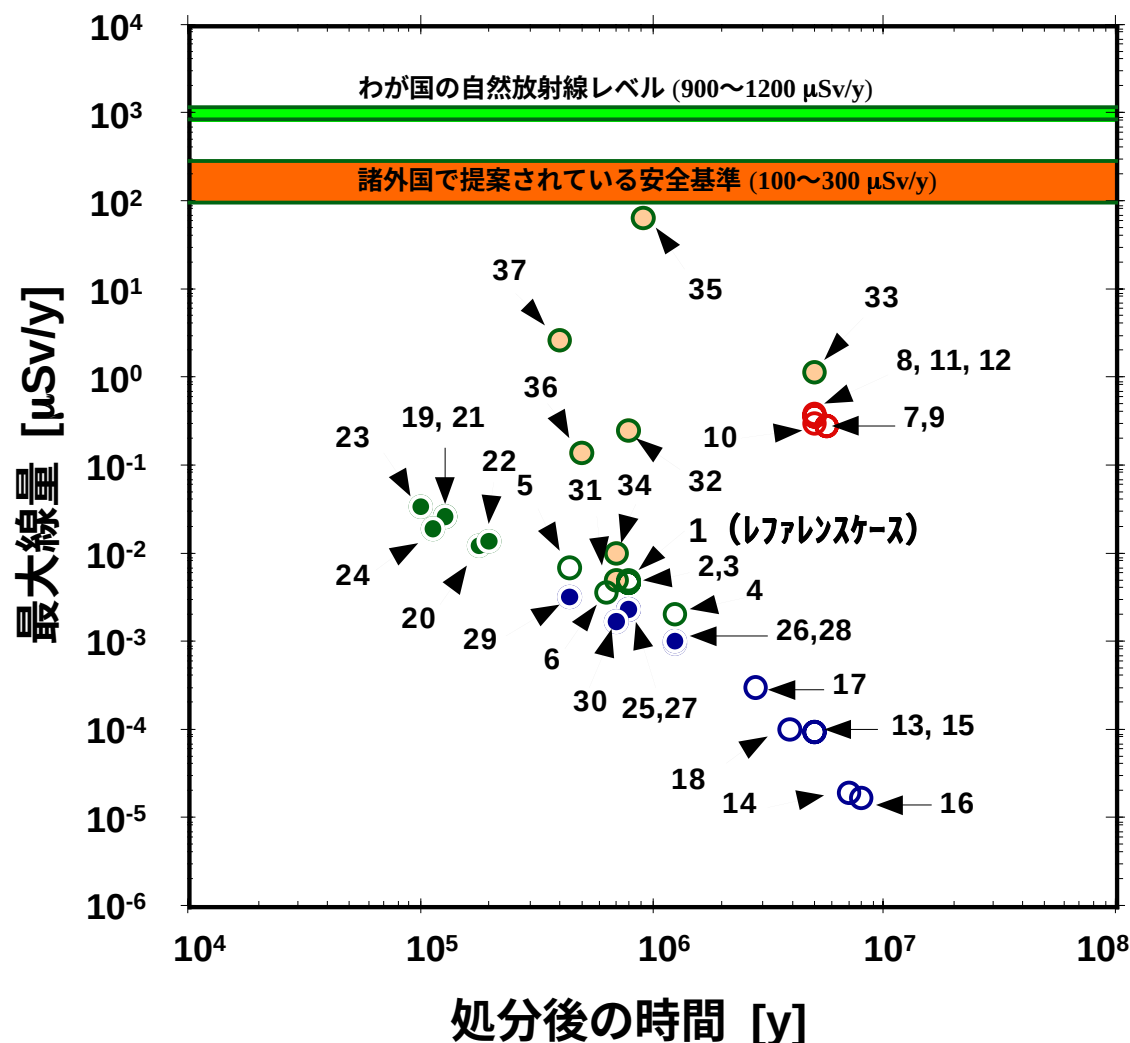
人間活動

- ・ 井戸の掘削およびボーリングによる影響を想定

地層処分システムの全体性能の解析

地下水シナリオに対する最大線量の分布

(40,000本の廃棄体を処分する場合を想定)



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

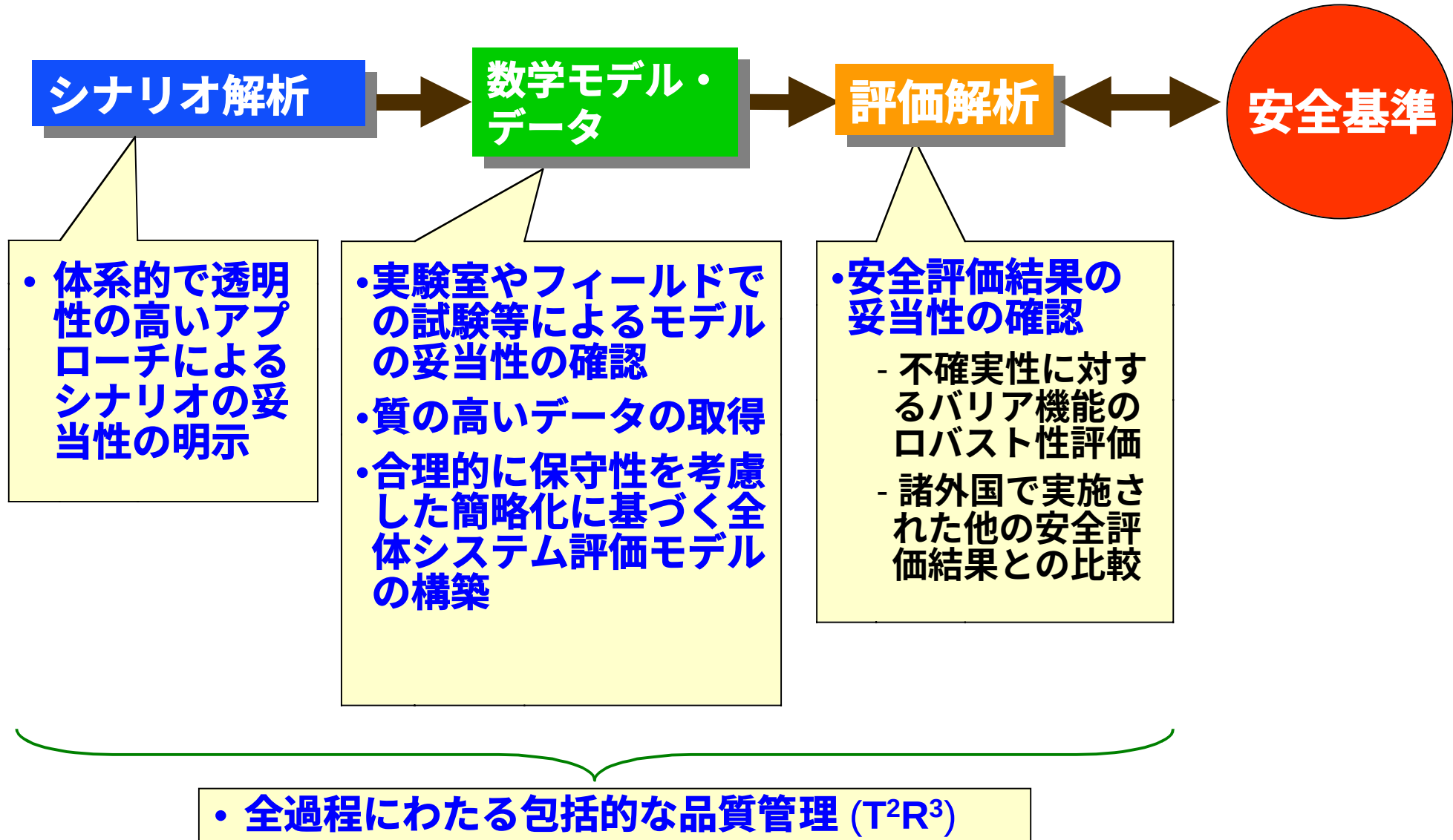
- 岩種：6種類
- 地下水/GBI：
[降水系, 海水系] / [河川水, 沿岸海域, 深井戸]
- 地形：平野, 丘陵, 山地
- 人工バリアの代替デザイン

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



4. データ取得

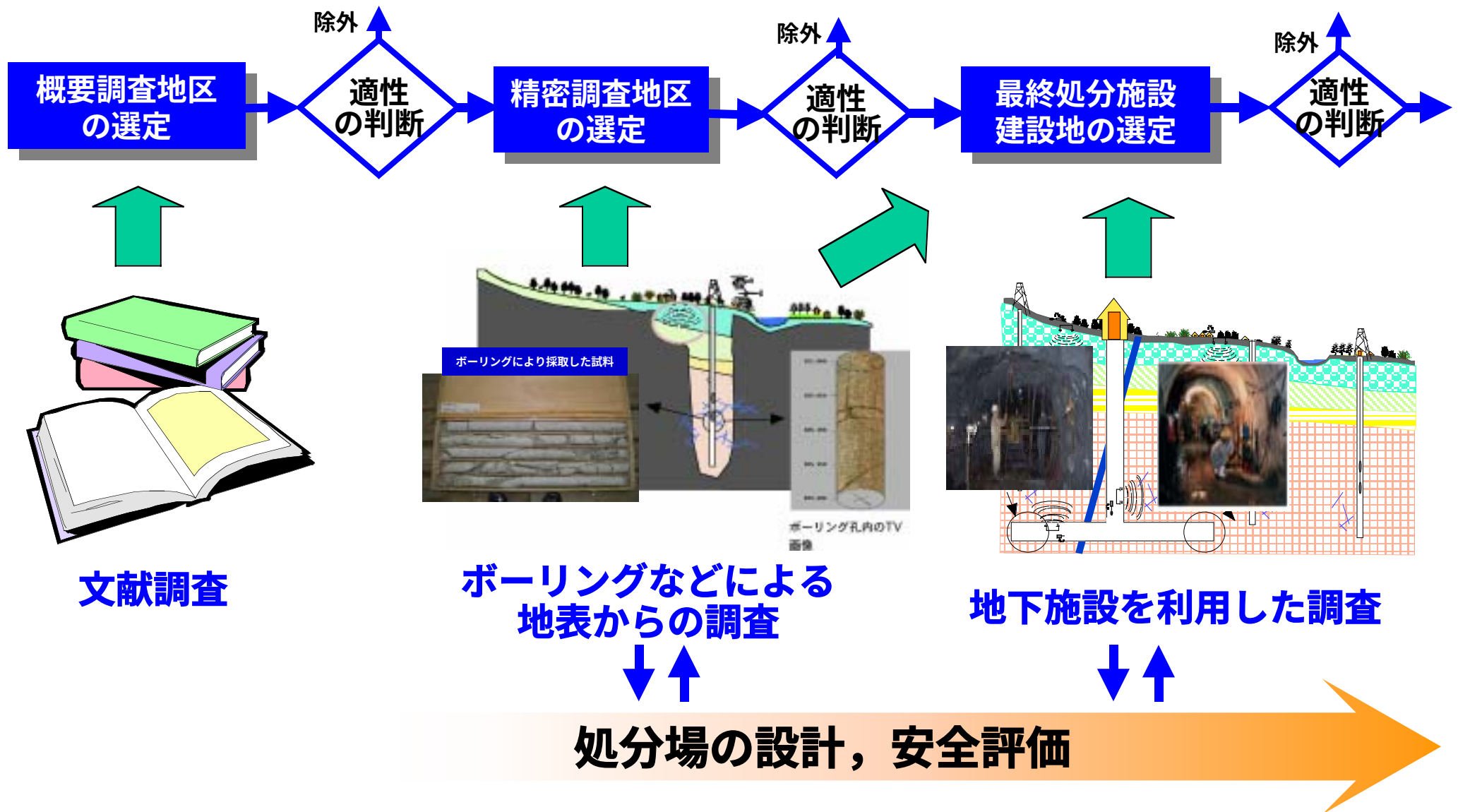
- **データ取得の重要性**

- ✓ 処分場の設計・安全評価の基盤
- ✓ 地層処分計画において最も重要な課題の一つ
- ✓ 時間，人的資源，費用の面で高価
- ✓ データの利用可能性：サイトや設計を制約

- **データ取得のための適切かつ有効な対策を考えるうえでの留意点**

- ✓ 処分計画の様々な段階で必要なデータのタイプとソースは異なる
- ✓ 求められるデータの質はパラメータに応じて異なり，計画の進展に伴い変化

段階的なサイト選定に応じたサイト環境情報の取得



処分場の設計

- **詳細な処分場設計**

- ✓ 制約となる条件（求められるデータ）
 - 廃棄物のタイプとインベントリ
 - 母岩の特性と地質環境情報

- **天然バリアの選択**

- ✓ サイト選定段階においてのみ可能

- **処分場及び種々の人工バリアデザイン**

- ✓ 処分場の操業／閉鎖までのすべての段階にわたり制御することができ、最適化が可能

安全評価に必要なデータ

- 廃棄物の特性とその変動
- 処分場を使用する材料と構造
- 処分場周囲の地質環境特性と岩盤で生じるプロセス及びそれらの変動性に関する知見
- ニアフィールド，天然バリアおよび生物圏における放射性核種の振るまいと人間の健康に与える放射線学的影響
- 使用される材料間の相互作用プロセス

• データ取得全体計画を策定するうえでの基本的課題

- ✓ 処分場の設計や安全評価で必要とするデータは必ずしも直接取得されとは限らず，また本来的に不確実性あるいは信頼性に欠ける性質を有する
- ✓ 科学研究者が室内やフィールドの試験あるいは理論研究に基づいて産みだすデータは，処分場の設計や安全評価にとって関連性がないか，あるいは限定的で不十分な品質なものとなる場合が多い
- ✓ データ測定は対象とするシステムに擾乱を与える可能性がある（例えば，低透水性岩盤へのボーリング孔）
- ✓ データ取得は，技術的な制約のみならず，多くの実際的（政策的あるいは社会経済的）な観点で制限される

特性調査対象地域の例（スイス Zürcher Weinland）

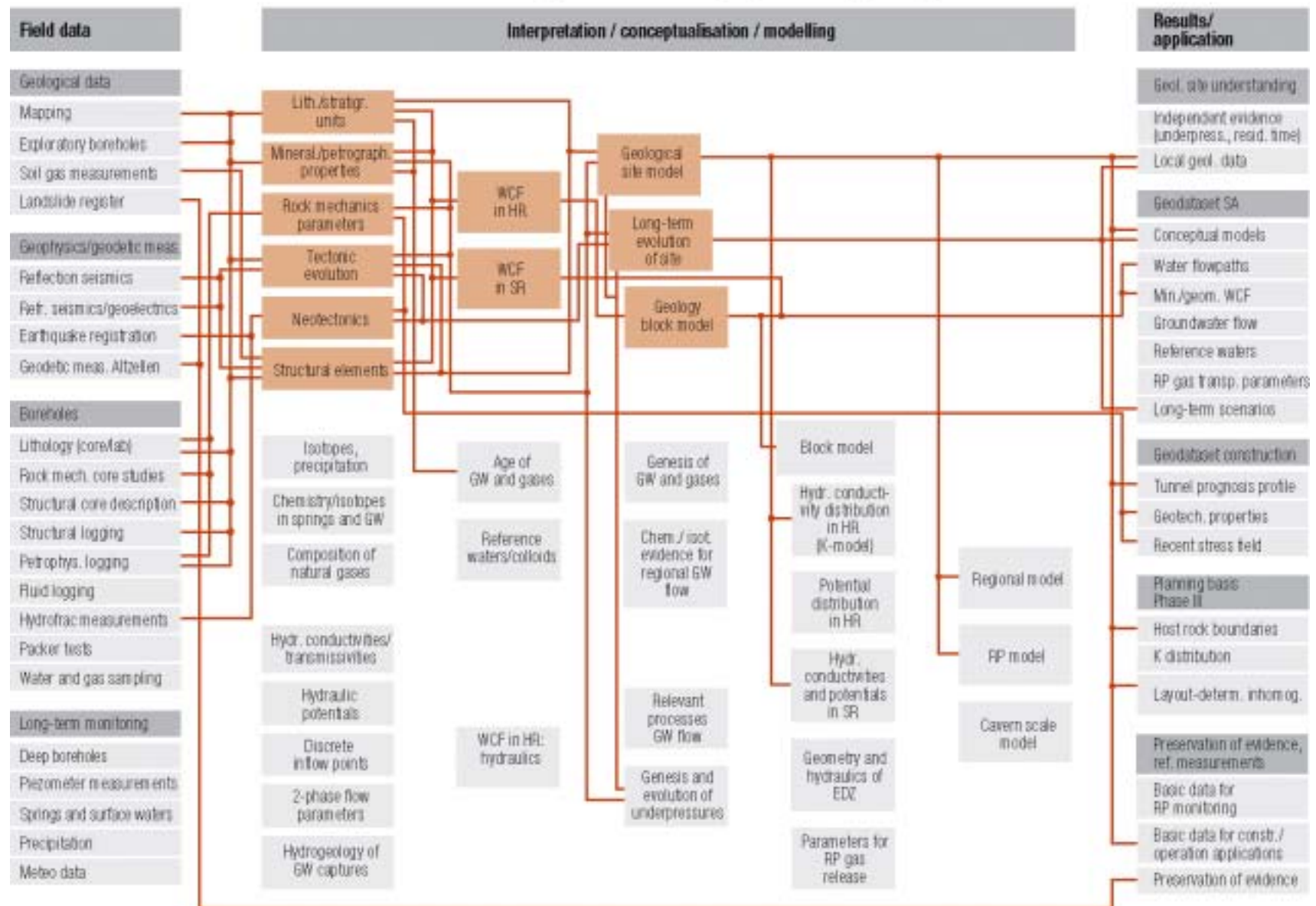


フィールドデータ取得計画 (地質環境の合成“Geosynthesis”)

- **必要な情報と取得するデータとのマッピング**
 - ✓ 測定対象や情報源のレベルからモデルレベルまでを関係付ける一連の合成，統合化のステップの明確化
 - ✓ 設計や安全評価に直接用いることが可能な測定データはわずかであることを呈示
 - ✓ ほとんどの情報は，設計や安全評価を支援する論拠の構築や関連する活動（例えば環境影響評価）に間接的に用いられる
- **様々なデータソースは，処分計画の進展に応じた優先順位付けが可能**
- **処分計画の後期の段階では不確実性解析あるいは感度解析により，最も重要となるデータを特定しながら解析をより定量的なものに進めることが可能**

地質環境情報の合成“Geosynthesis”:スイスWellenbergの例

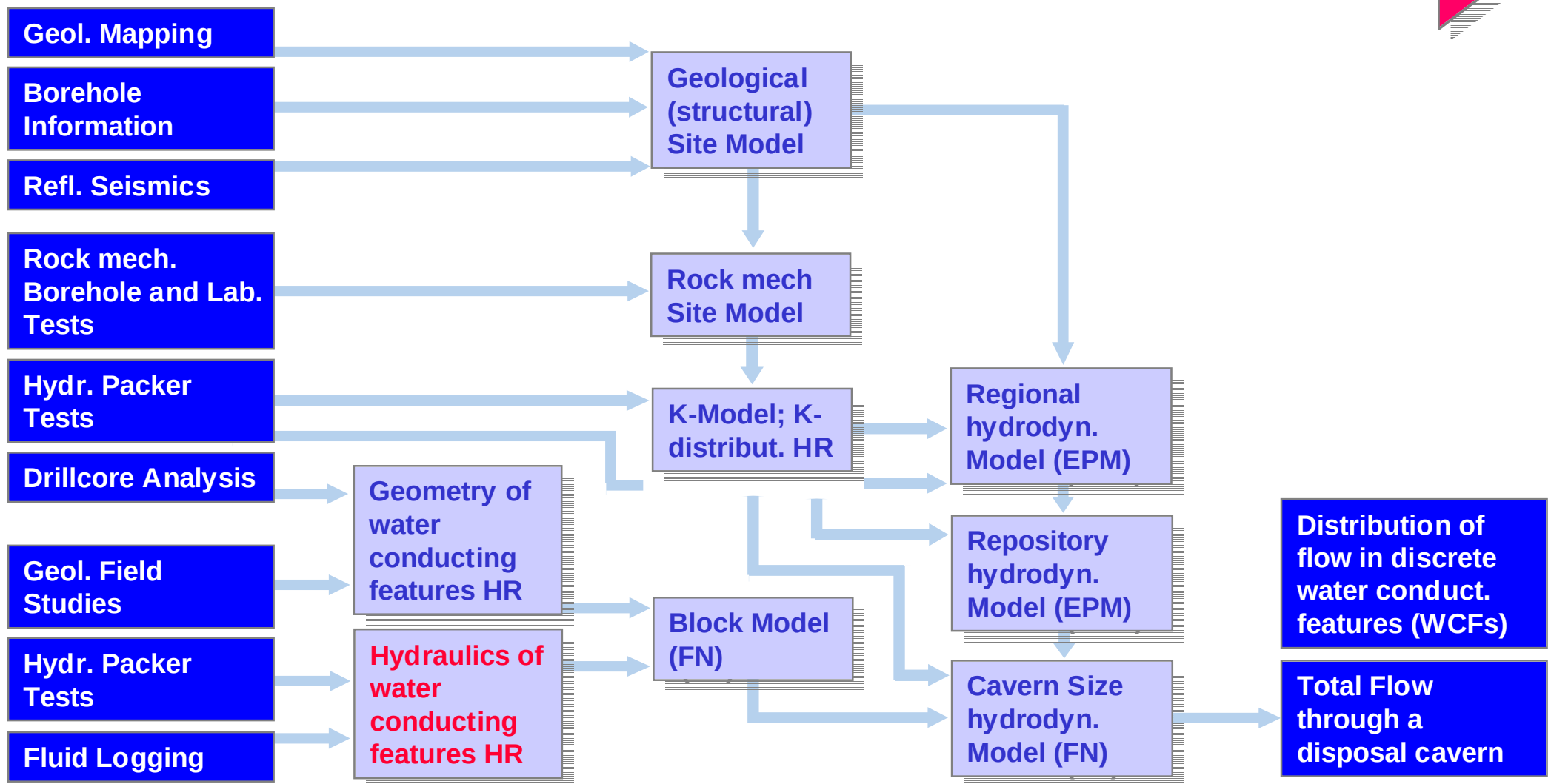
Data flow diagram Wellenberg synthesis: geology



(Nagra Bulletinより)

地質環境情報データセット作成：スイスWellenbergの例

Field data - Interpretation - Conceptual Models - Numerical Models - GeoDataset



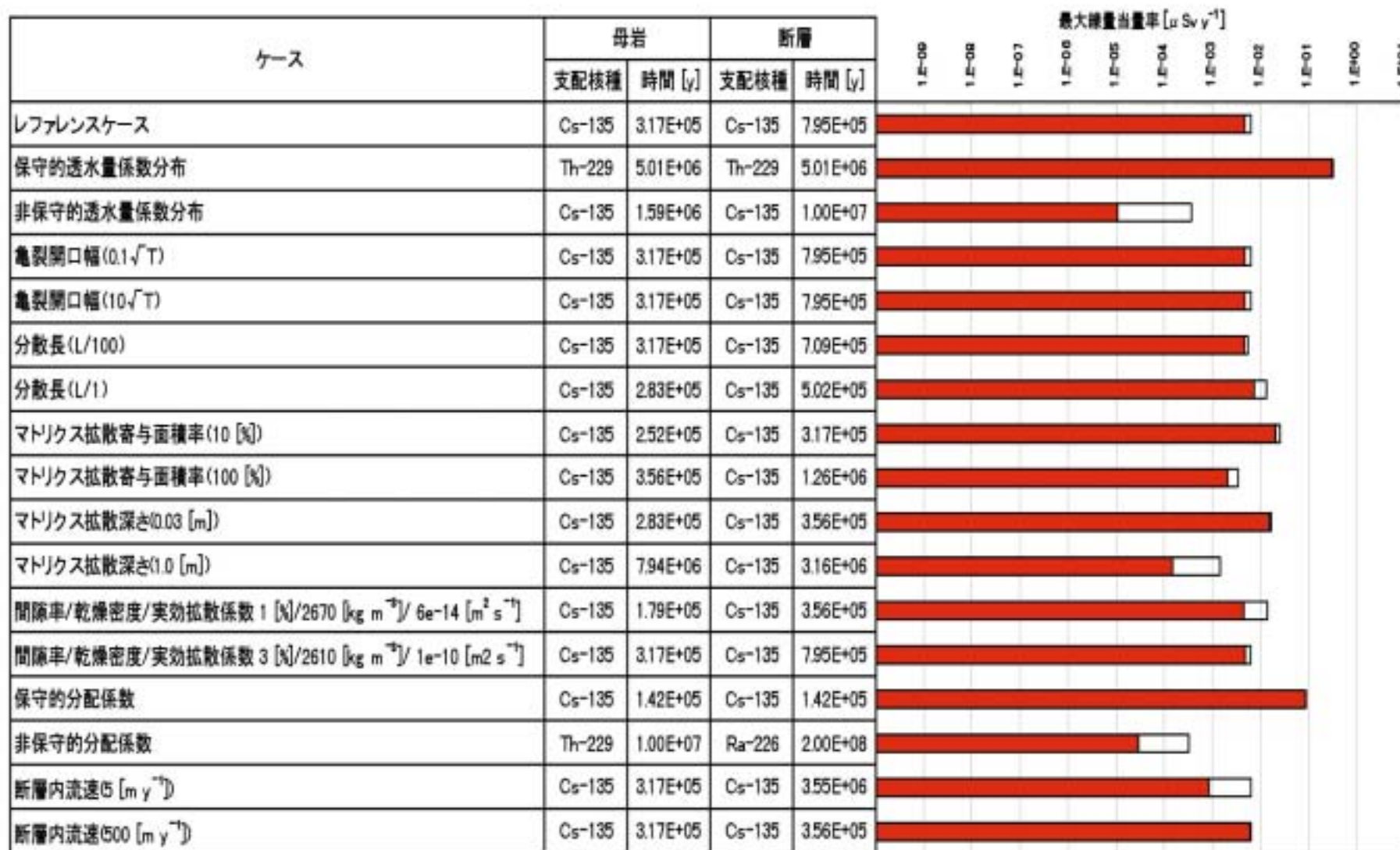
(Nagra Bulletinより)

不確実性に対するバリア機能のロバスト性

システムのバリエーション／不確実性の影響の評価（例：人工バリア中核種移行）

ケースの分類	内 容
データ不確実性ケース	・ ガラス溶解速度の不確実性を考慮。 ・ オーバーパック破損時期の不確実性（破損時期の遅れ）を考慮。 ・ 掘削影響領域通過流量の不確実性を考慮。
モデル変更ケース	・ 腐食生成物層での核種遅延（拡散・収着）を考慮。 ・ 掘削影響領域での核種遅延（収着）を考慮。 ・ オーバーパックの腐食膨張による緩衝材の厚さ減少および周辺母岩への緩衝材の侵入による緩衝材の密度低下の発生を想定。
代替設計ケース	・ 代替オーバーパックを使用した場合の破損時期の不確実性（設計よりも長期にわたるオーバーパックの核種封じ込め）を考慮。 ・ 緩衝材厚さの変更。
地質環境変更ケース	・ 動水勾配のバリエーションに応じた掘削影響領域通過流量の設定の変更。 ・ 岩種のバリエーション（堆積岩）による支保材の使用を想定し、地下水と支保材の反応による間隙水化学の変化を考慮。 ・ 岩種が堆積岩の場合、支保材の変質およびオーバーパック腐食膨張による母岩への応力やクリープを考慮した掘削影響領域通過流量の設定の変更。 ・ 地下水タイプのバリエーション（海水系地下水）を考慮。 ・ 地下水タイプのバリエーション（海水系地下水）に応じたオーバーパックを使用した場合の破損時期の不確実性（設計よりも長期にわたるオーバーパックの核種封じ込め）を考慮。

データ不確実性ケースにおける最大線量



図中白棒線は母岩から放出された核種の線量，赤棒線は断層から放出された核種の線量を表す。

□ 母岩 ■ 断層

(第2次取りまとめ総論レポート第V章より)

データ取得：データの質と量

- **一般原則**

- ✓ 一つの適切なデータは，データ取得計画の策定時や処分場の設計／安全評価に向けたデータ設定を行う際において，何千もの不適切なデータより価値がある

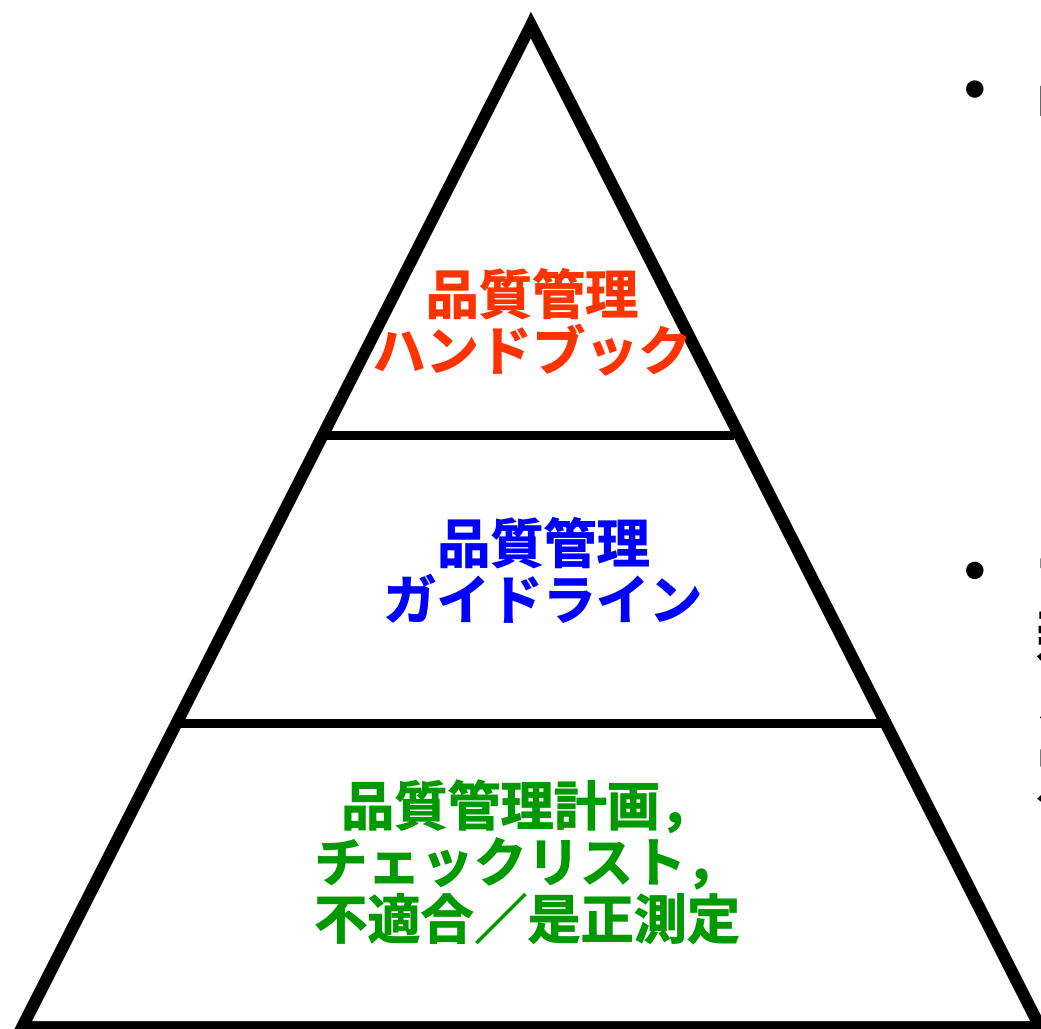
- **品質保証 (QA)**

- ✓ 適切な科学的活動を支援
- ✓ データ，モデル，意思決定に関する追跡性の確保

- **データの質を示す一般的な指標**

- ✓ 関連する不確実性についての十分な評価（例えば，すべてのソースからの誤差伝播，適切な規格の使用，ブランク／バックグラウンド測定など）
- ✓ 内的／外的な整合性の確認
- ✓ データの外挿あるいは内挿可能性に関する評価
- ✓ 検証／確証の程度

品質保証体系の階層構造の例



- 品質管理ガイドラインは直接品質に関わる作業に使用
 - ✓ 個々の作業プロセスについてガイドラインを規定することができ、この規定は品質管理ハンドブックに記載
 - ✓ 品質管理計画で言及
- データの適用限界，使用期限，更新手続きなどの明確化は，大規模な統合プロジェクトでデータを決定する際に特に重要

データ取得：入手不可能なデータ

- **最初に認識しておくべきこと**

- ✓ 必要なデータのいくつかは得ることが不可能か、あるいは処分計画の後期においてのみ得られる

- **とるべき対策のオプション**

- ✓ 該当するファクターを用いた解析の実施を先送り（この際、設計や安全評価において未解決であることをラベリング）
- ✓ 保守的な値を仮定しそれでも設計や安全評価で許容できない結果とならないことを示す
- ✓ データがとりうると考えられる最大の範囲までを想定し該当するパラメータの感度を評価（以後のデータ取得に対する指針としても有効）
- ✓ 対象となるパラメータが何ら影響を持たない（あるいは無視できる）ように、サイトや概念あるいはモデルを変更

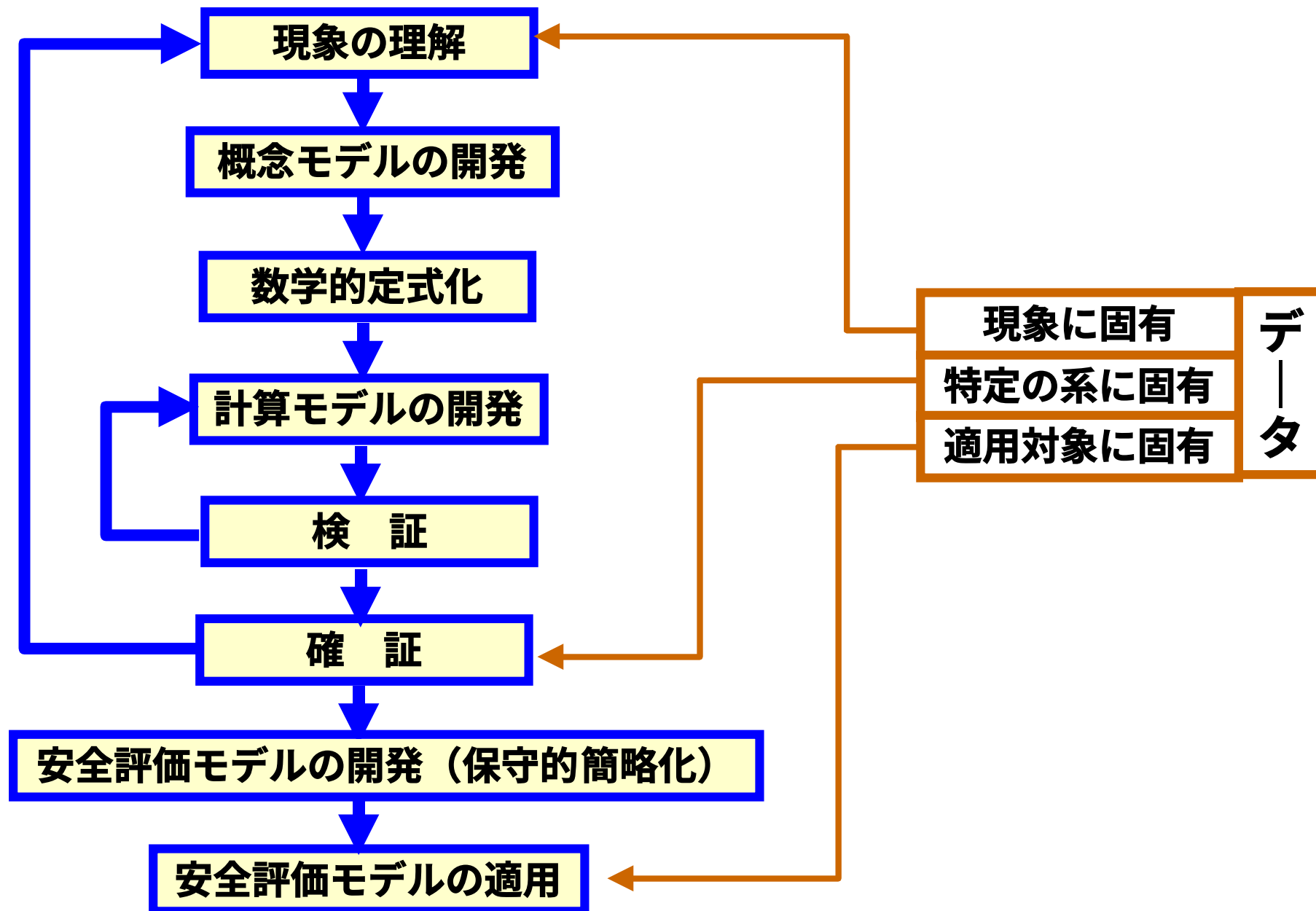
データ取得：検証と確証

・データベースと関連するコード

- ✓ 検証や確証などにより，使用に適したものであることを示すことが必要

・特に安全評価における重要なチャレンジ

- ✓ 数十万年あるいは数百万年の時間スケール：アナログシステムによるモデルのテスト
- ✓ ミクروسケール（cmのオーダーかそれ以下）の特性を必要とするプロセス（例えば放射性核種の移行）を伴う数平方km×300m以深の空間スケールを有する地質環境を対象
- ✓ 一般に時間の経過に伴い変遷する人工バリアと天然バリアとの複雑なインターフェイス
- ✓ 擾乱を及ぼすプロセスに関するメカニズムや理論に関する理解（例えば，コロイド，微生物や有機物，ガスの影響など）



モデルの検証と確認

検証：

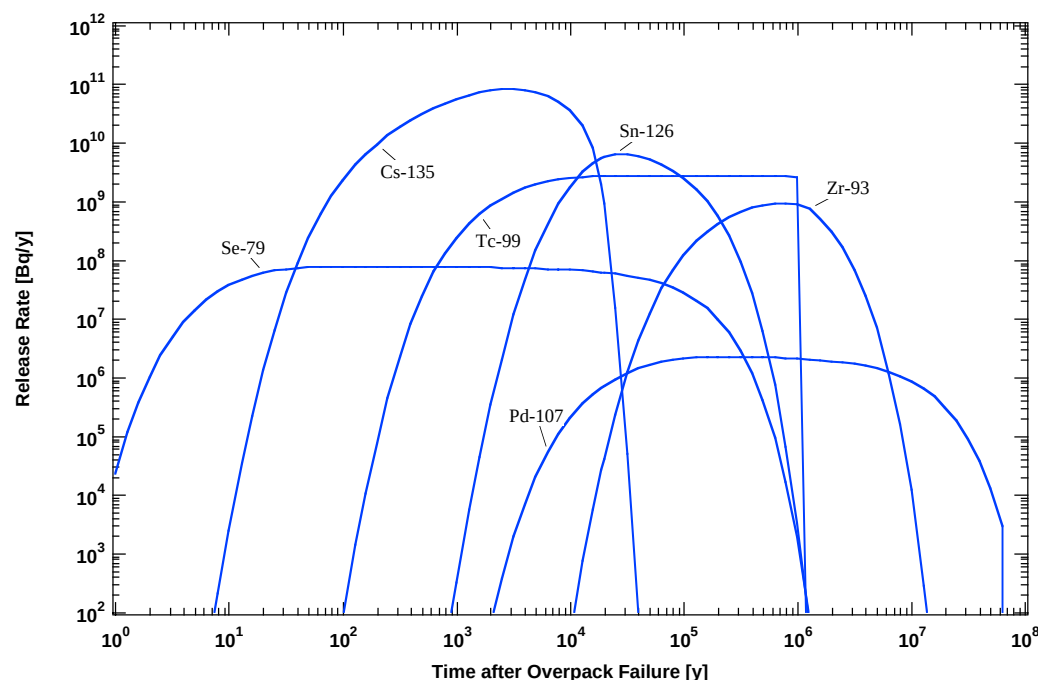
対象とする現象のシステム挙動を表す数学モデルが適切な数学的定式化によって作成されているか，数学的定式化に基づく計算モデルは正しくプログラミングされ解法されているかの確認

確認：

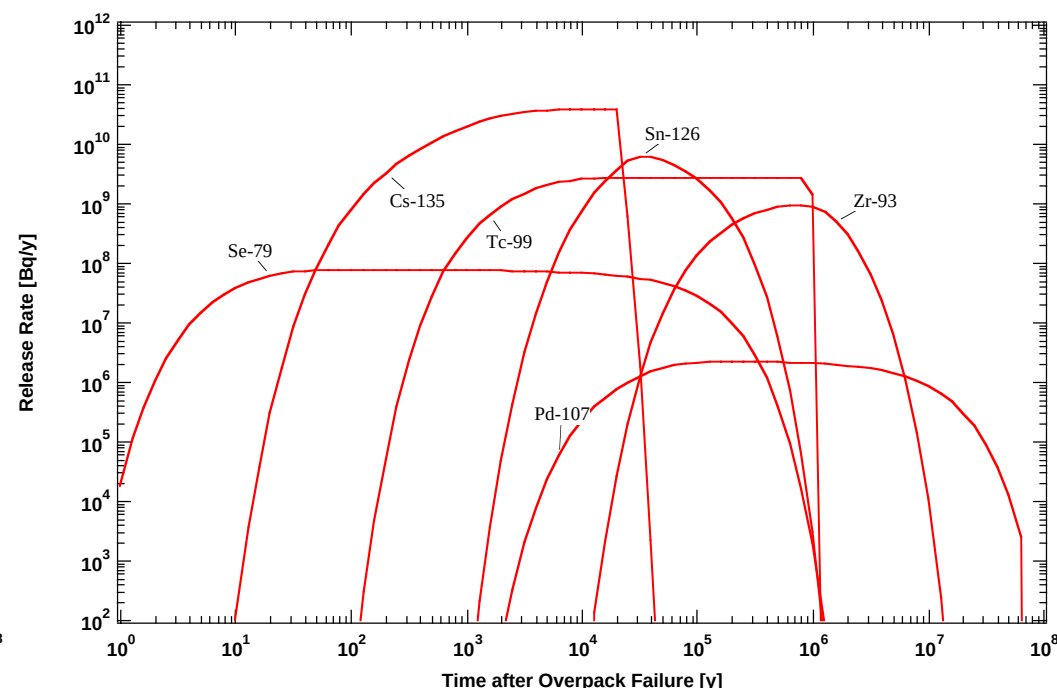
安全評価に用いる計算モデルが，評価の目的に沿って対象とする現象を適切に表現していることを，モデルの推定結果や実験などの観察事実との比較による確認

計算モデルの検証例

人工バリアからの核種移行率（核種：核分裂生成物/放射化生成物）
（ガラス固化体：40,000本，外側境界地下水流量：0.05 m³/y）

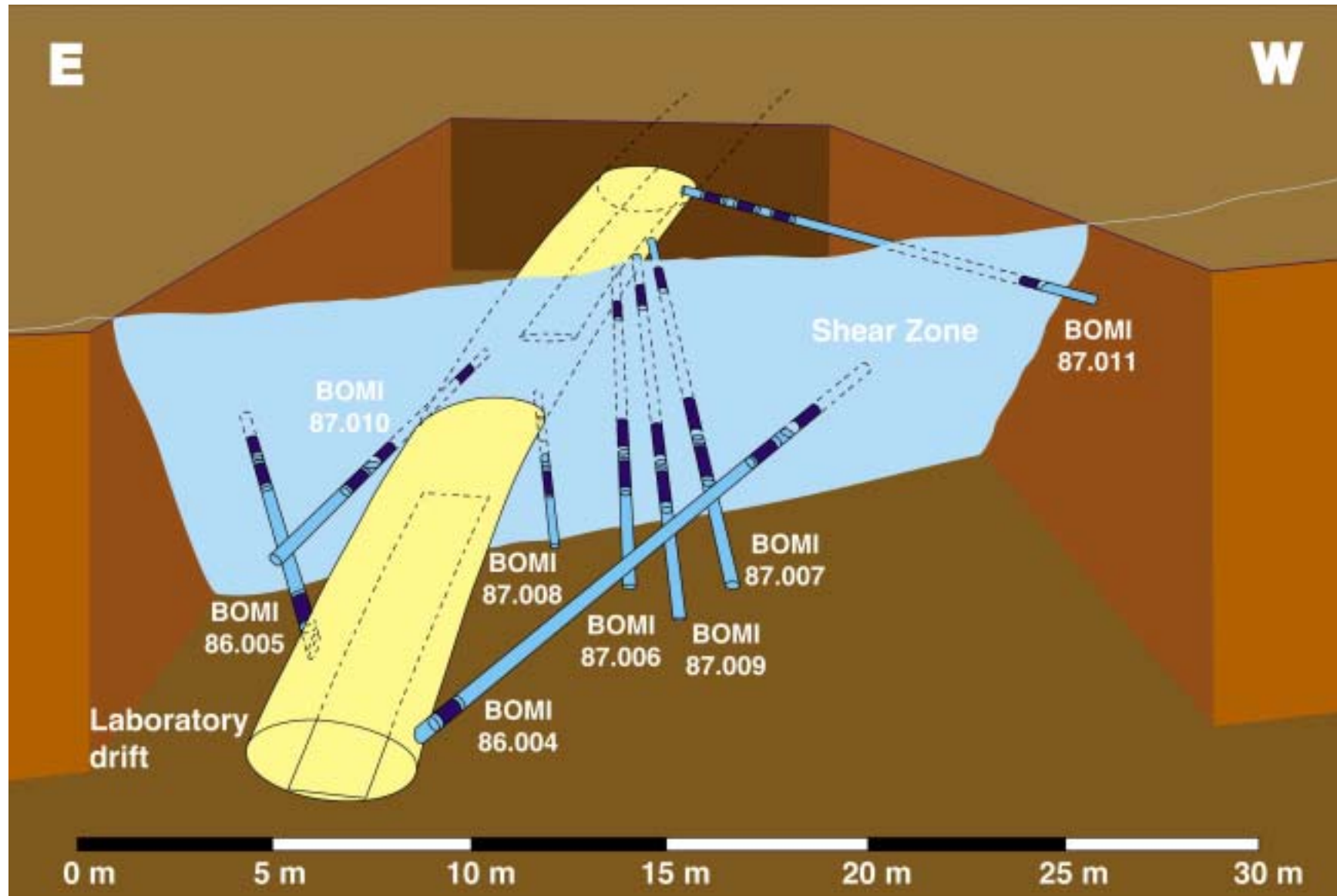


STRENGコード
(スイス)



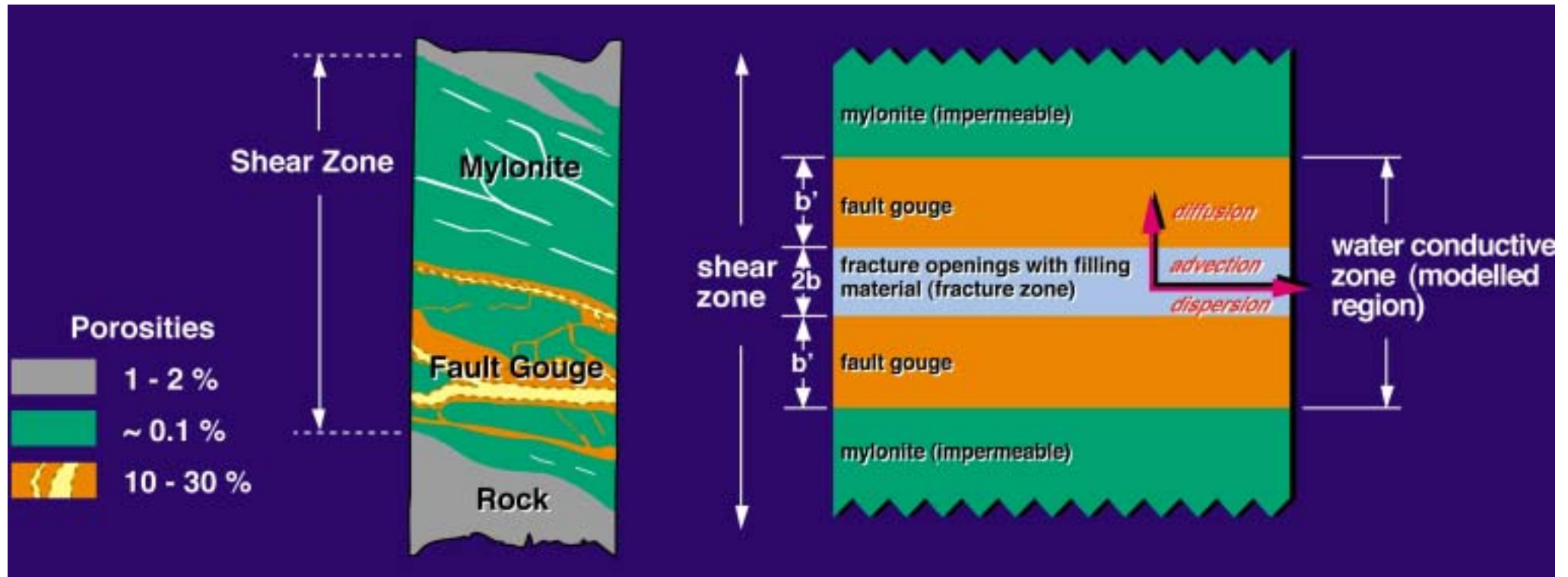
MESHNOTEコード
(第2次取りまとめ)

モデル開発の例： グリムゼル試験サイトにおける核種移行試験



Umeki, H., et al. (1995)より (The Nagra/PNC Grimsel Test Site Radionuclide Migration Experiment: Rigorous Field Testing of Transport Models, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 353, pp.427-434.)

モデル開発： 核種移行概念モデル



Umeki, H., et al. (1995) より (The Nagra/PNC Grimsel Test Site Radionuclide Migration Experiment: Rigorous Field Testing of Transport Models, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 353, pp.427-434.)

In the fracture zone :

$$\theta_1 R d_1 \frac{\partial C_1}{\partial t} = \nabla(D_L \nabla C_1) - \nabla(C_1 V) - \lambda \theta_1 R d_1 C_1 + \frac{\theta_2 D_p}{b} \frac{\partial C_2}{\partial z} \Big|_{z=b}$$

In fault gouge :

$$R d_2 \frac{\partial C_2}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 C_2}{\partial z^2} - \lambda R d_2 C_2$$

$$R d_i = 1 + \frac{(1 - \theta_i) K d_i}{\theta_i} \rho_s, \quad D_L = \alpha_L V + D_e$$

where,

$R d_i$: retardation factor (-)

θ_i : flow porosity (-)

C_i : concentration (M/L³)

D_L : dispersion coefficient (L²/T)

V : Darcy velocity (L/T)

D_p : pore diffusion coefficient (L²/T)

$K d_i$: distribution coefficient (L³/M)

D_e : effective diffusion coefficient (L²/T)

$2b$: width of the fracture zone (L)

ρ_s : density of fault gouge (M/L³)

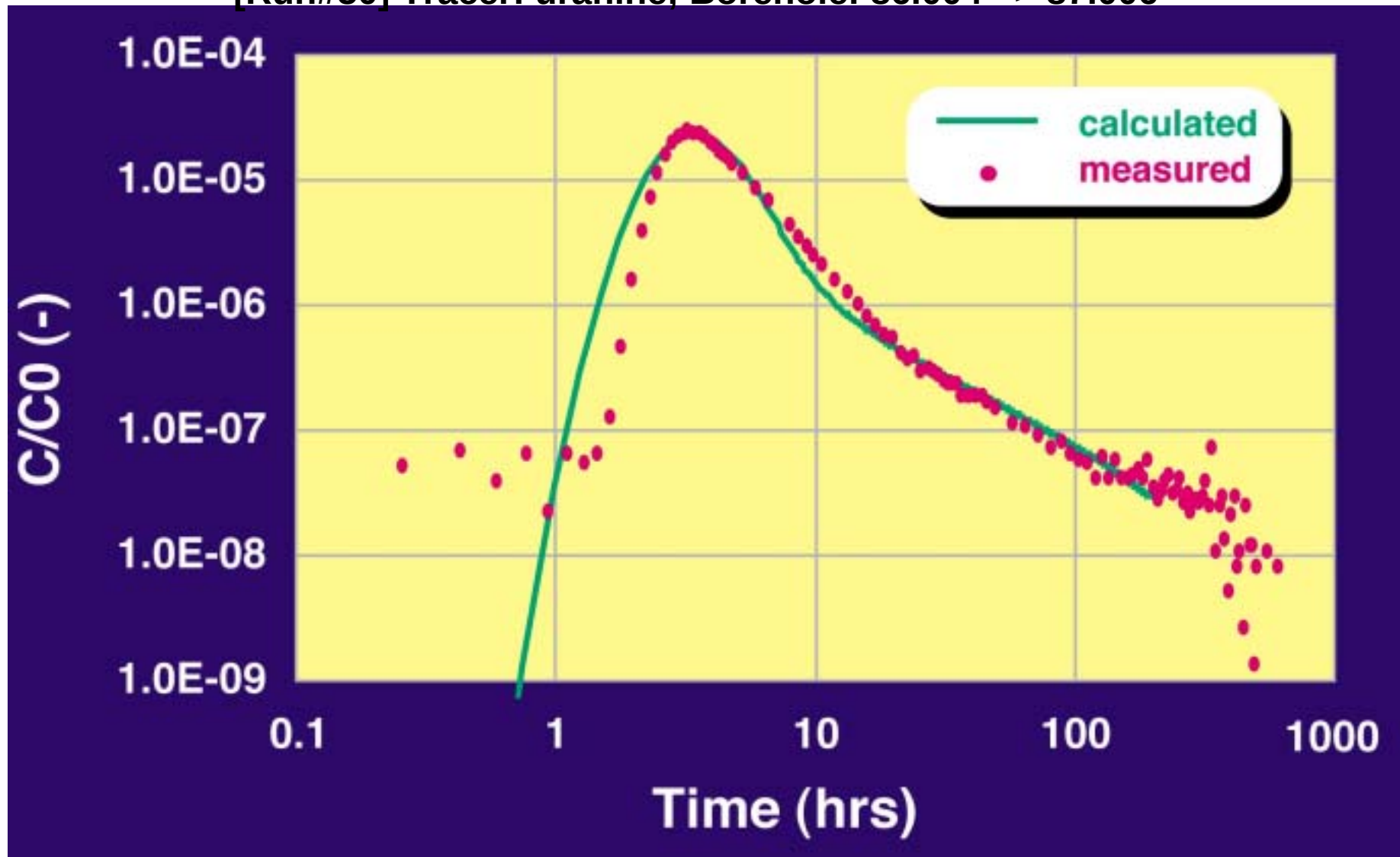
i : indicator, 1=fracture zone, 2=fault gouge

λ : decay constant (1/T)

α_L : dispersion length (L)

モデルの確証例

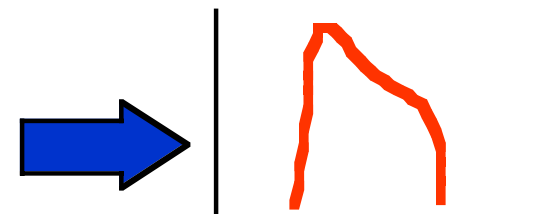
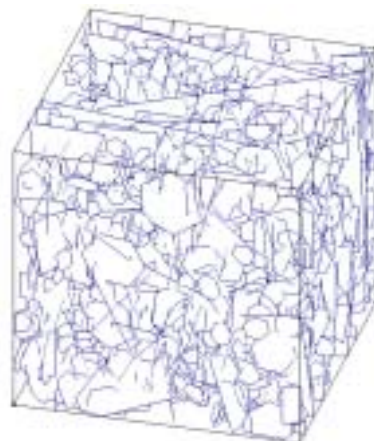
[Run#50] Tracer: uranine; Borehole: 86.004 => 87.006



Umeki, H., et al. (1995)より (The Nagra/PNC Grimsel Test Site Radionuclide Migration Experiment: Rigorous Field Testing of Transport Models, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 353, pp.427-434.)

モデルの保守的簡略化の例 (1/2)

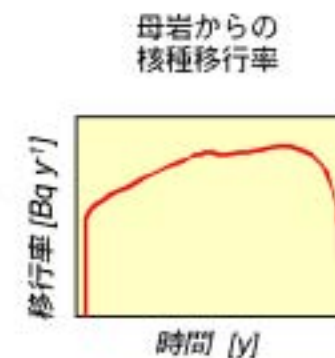
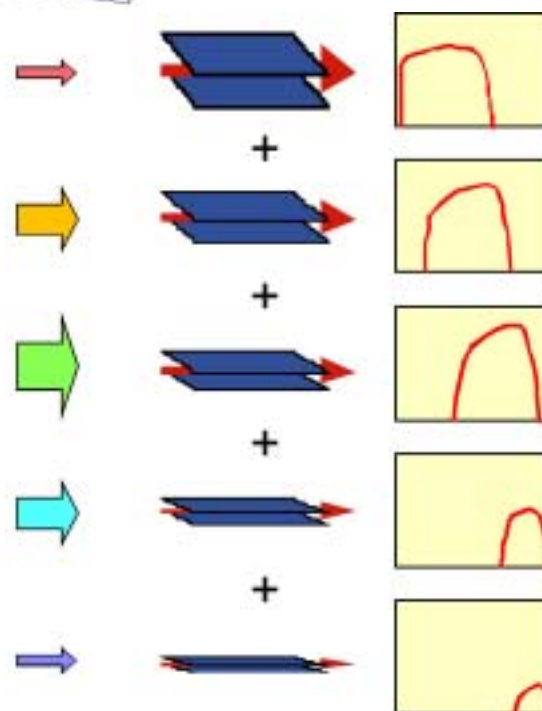
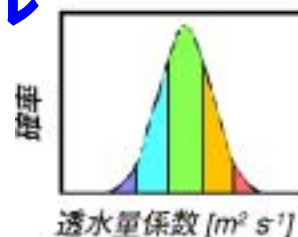
3次元亀裂ネットワークモデル



核種放出

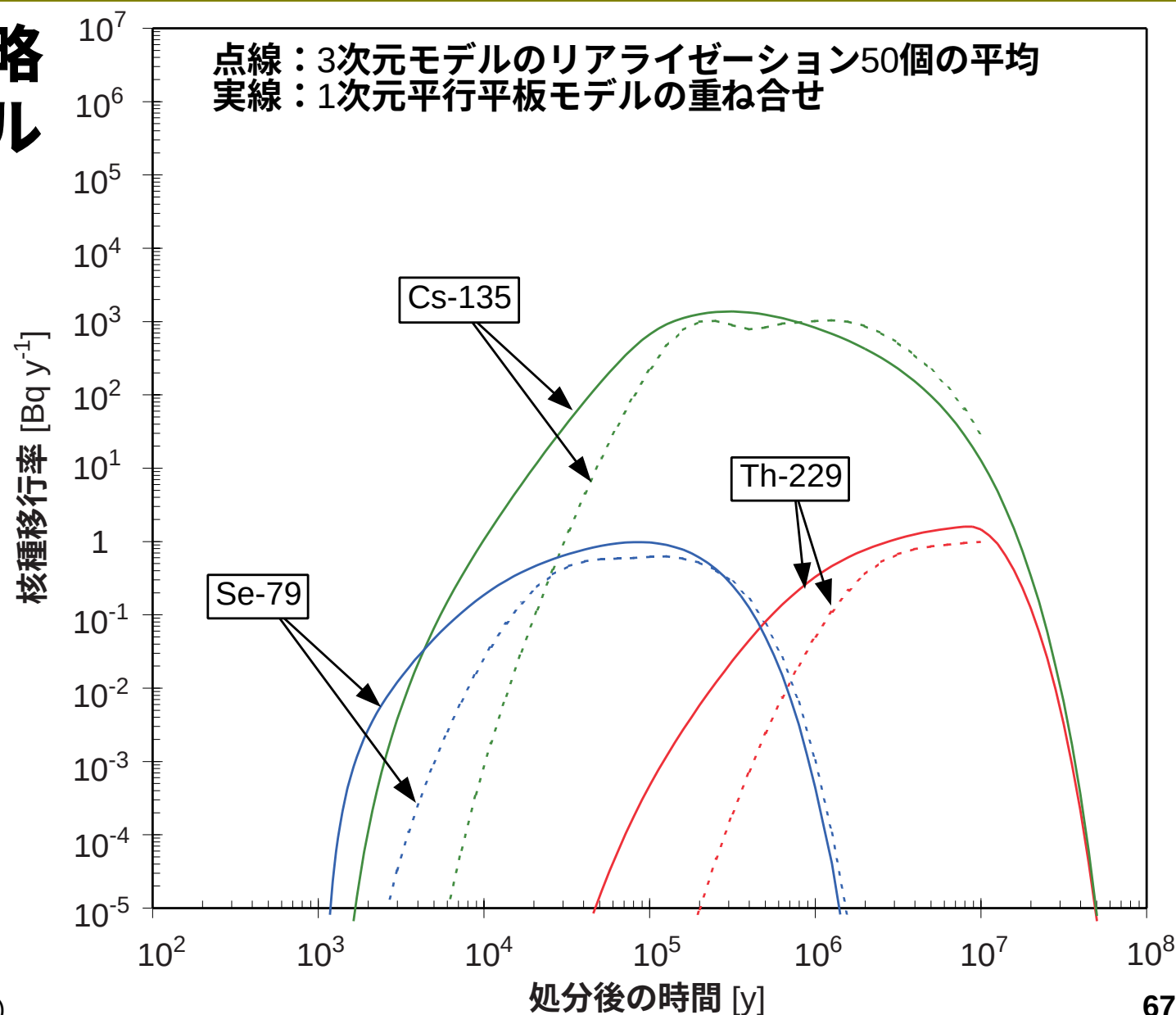
簡略化

1次元平行平板モデルの重ね合わせ

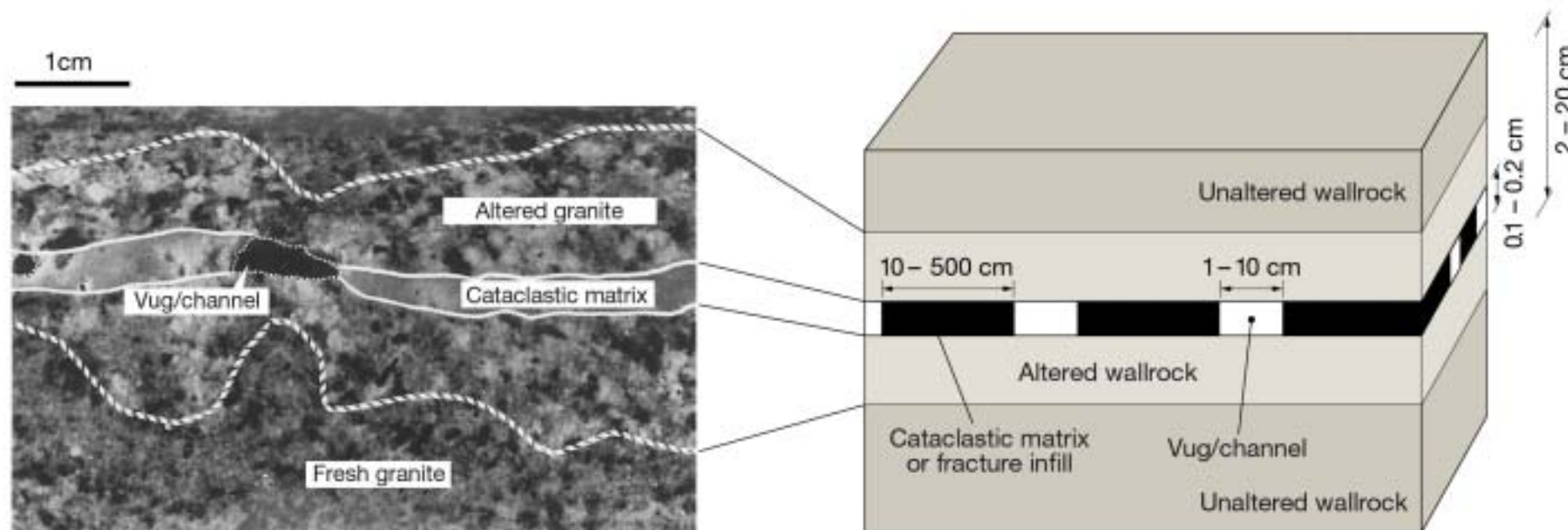


モデルの保守的簡略化の例 (2/2)

3次元モデルと簡略化した1次元モデルとの比較



結晶質岩における透水性の空隙構造に関する概念モデル



スイス北部の基盤岩である結晶質岩の透水性(cataclastic zone)に関する微小スケールの概念モデルの例

人工バリアに関するデータ取得

- 大部分の処分概念に関する人工バリア特性について求められる情報は類似
- 処分場の設計
 - ✓ 廃棄物のインベントリ，廃棄物のタイプの特定，廃棄物の処理条件，放射性核種の含有量など
 - ✓ 処分場概念とレイアウトの開発に必要な母岩の特定
 - ✓ 安全評価に必要なインベントリの追加情報（例えば，溶解度分割を考慮するために必要な安定同位体の濃度）
- 安全評価：初期の段階
 - ✓ 可能性の高いシナリオ（例えば，人工バリアの劣化プロセスや最終的に生じる地下水への緩慢な放射性核種の溶出）
- 安全評価：後期の段階
 - ✓ 変動シナリオに関する追加情報（例えば，ガス発生，微生物による影響）
 - ✓ システム性能の安全裕度を確認するための追加情報（"What if" シナリオ）

人工バリアに関するデータ取得：現状 (1/2)

・廃棄物

- ✓ 高レベル放射性廃棄物や使用済燃料などの特性やインベントリのデータベースは、どの処分概念でも整備
 - 不確実性（例えば、ガラスの長期溶解速度）に対しては、合理的に保守性を考慮したデータが利用可能

・廃棄物容器（オーバーパック／キャニスタ）

- ✓ ほとんどの処分概念において、オーバーパックやキャニスタには特性がよく知られた金属材料を使用（例えば炭素鋼，銅，チタン合金）
- ✓ 容器の破壊モードや健全性喪失後のバリアとしての役割は十分に定義されていないが，一般に保守的な仮定によって補うことが可能
- ✓ データ取得の課題は，大部分が新素材を考慮する場合（例えば新種合金やセラミックス）

人工バリアに関するデータ取得：現状(2/2)

・緩衝材

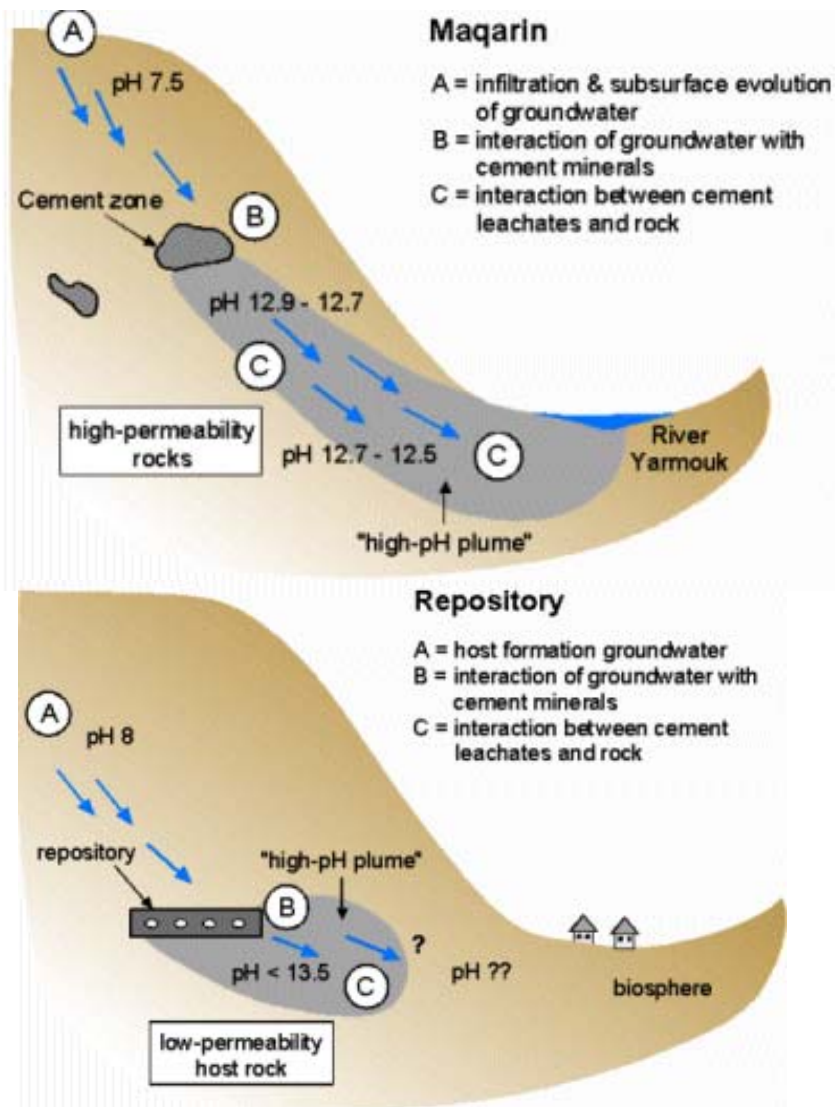
- ✓地下水で飽和される処分場概念では，主に粘土の緩衝材や埋め戻し材を使用
- ✓圧縮された粘土を主成分とする緩衝材のデータベースは合理的に確立されているが，熱-水-応力-化学の強い連成プロセスのため，その特性を定量的に示す基本的なメカニズムに関するモデルの適用を制限する

・セメント／コンクリート

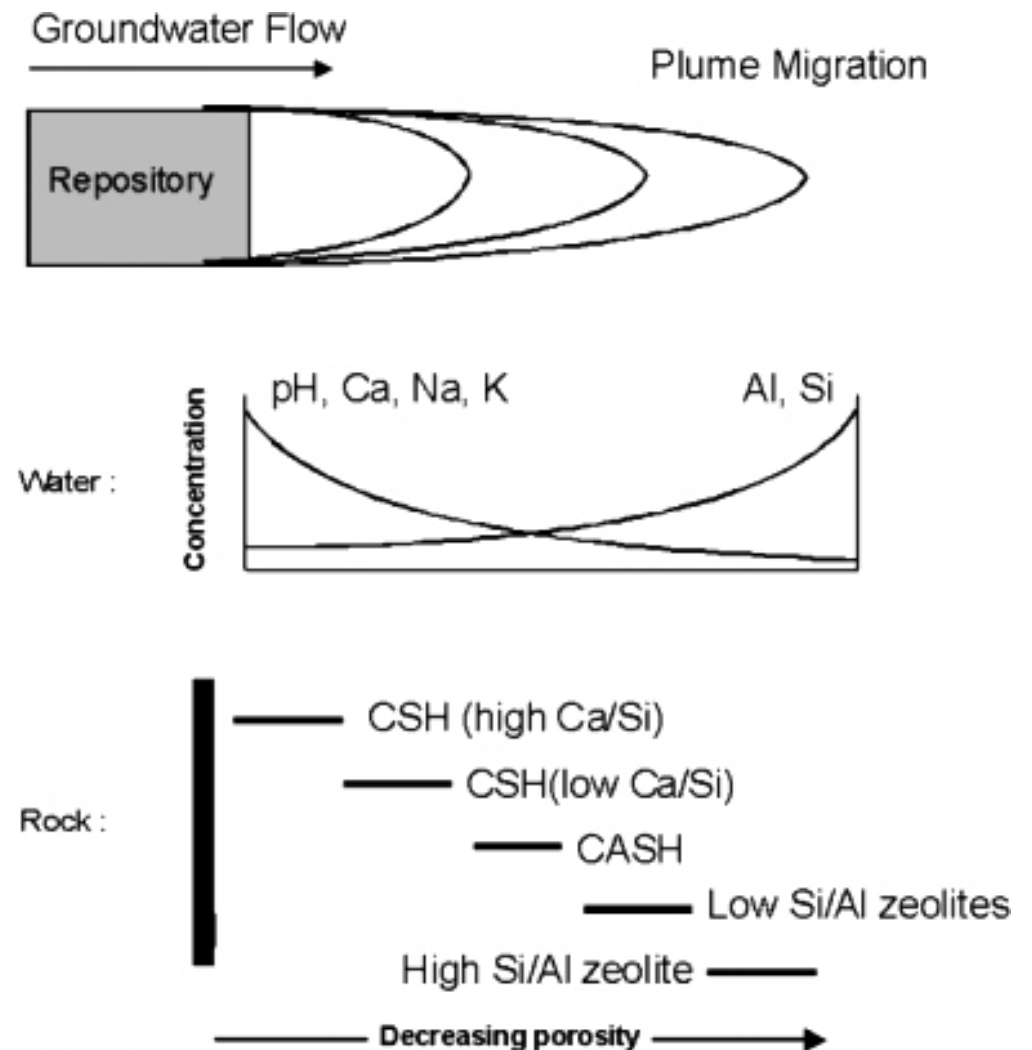
- ✓多くの処分場概念では，廃棄体自体やその処理剤，グラウト，支保工，プラグなどに大量のセメントやコンクリートを利用
- ✓セメント系材料が存在する系については経験に基づく多くのデータベースが存在するが，長期の時間的変遷モデルの検討に用いることのできるデータは限られる（例えばナチュラルアナログ）
- ✓セメントの使用で生じる一般的な問題は高アルカリの浸出液が他の人工バリア材（例えば粘土の埋め戻し材）や周辺岩盤に影響を与えうること
- ✓高pH条件下での実験は特に困難であり，そのような環境条件における熱力学データベースは充分に開発されていない

ナチュラルアナログ研究の例: The Maqarin Natural Analogue Project

The basis of the analogy (from Alexander and Mazurek, 1996)



Conceptual model of the hyperalkaline plume evolution (after Savage, 1999)



人工バリアに関するデータ取得： 今後の課題

・インベントリデータベースの改良

- ✓追加の特性試験に伴うコストと（潜在的な放射線被ばく）のバランスを考慮

・安全評価からのフィードバック

- ✓追加の特性調査による利点の明確化（例えば、あるタイプの廃棄物ではC-14の特定）
- ✓廃棄物処理過程の改良の利点の明確化（例えば、I-129の固定化）

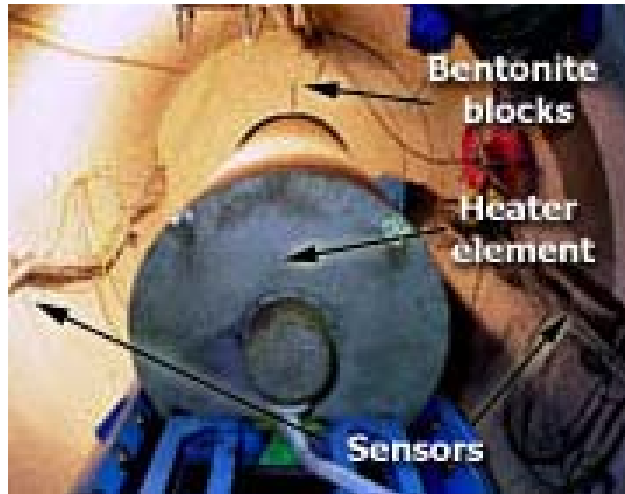
・人工バリア全体：理想的なモデルではなく定置されたシステムをそのままモデル化

- ✓処分場の建設や廃棄体の取扱いと定置プロセス（遠隔操作）およびバリア材の品質の評価の必要性
- ✓大規模室内試験や地下研究施設での原位置試験からのデータ供給

・実用的な観点からの人工バリア建設技術の検討

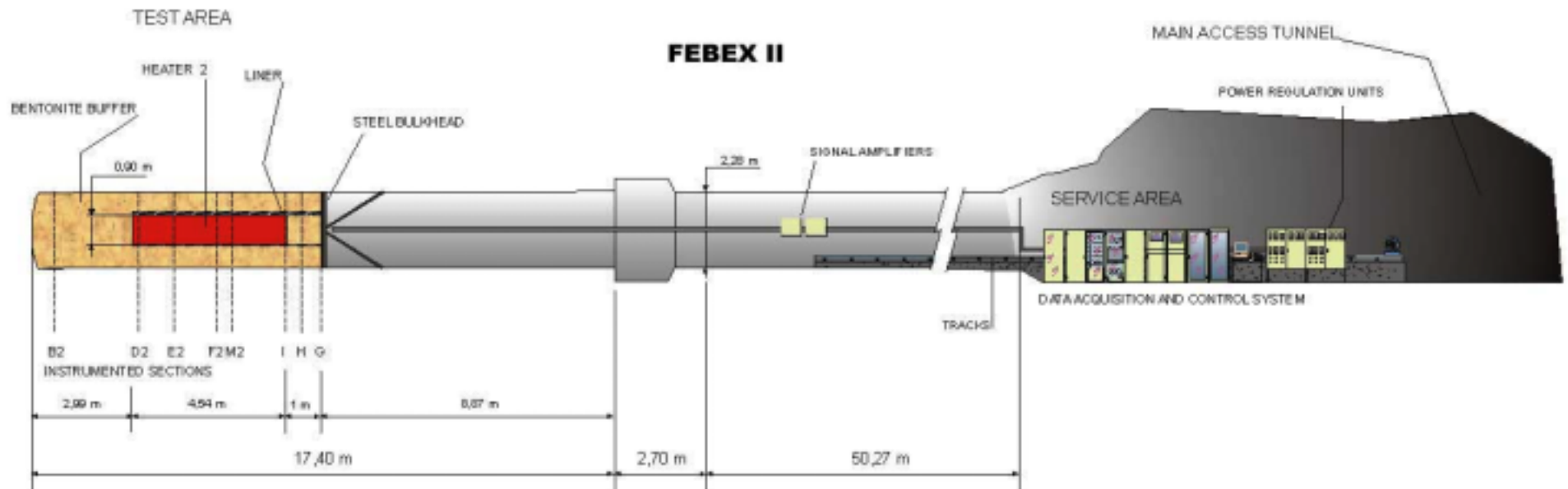
- ✓より一般化された設計の最適化：安全評価と社会経済的な観点からのフィードバック，サイトと処分概念に特化された設計
- ✓極めて現実的な人工バリア評価モデルの開発（処分場を完全に表現する3次元モデルに時間的変遷を加えた4Dモデル）
- ✓計算技術の進展に伴い上記のようなモデルは可能（現時点ではモデルの作成や確認に必要なデータが限られているためその適用は制限されている）

人工バリアの実用化試験の例：FEBEX Project



FEBEX General Objectives

1. Demonstration of the feasibility of the EBS
2. Define the EBS behaviour and barrier function in an realistic environment (study of thermo-hydro-mechanical (THM) and thermo-hydro-geochemical (THG) processes in the near field)
3. Test the capability of THM and THG modelling codes
4. Technology demonstration



(Grimsel Test Site ホームページより)

地質環境に関するデータ取得 (1/2)

- 求められるデータは一般にどの処分概念に対してもかなり類似したものとなるがサイトに大きく依存
 - ✓ 測定すべき（あるいは可能な）ものの詳細化
 - ✓ 設計や安全評価に使用できるレベルのデータを抽出するために必要な測定結果や観察結果の加工方法
- 主な相違点
 - ✓ 処分場の位置が地下水面の上か下か，“水のない”岩盤（例えば岩塩層）か“水のある”岩盤か，亀裂が卓越している硬岩か微細な空隙の軟岩か，など
 - ✓ 処分計画の進展に応じて利用可能となる情報

地質環境に関するデータ取得(2/2)

- **重要な地質環境特性の3次元表現での抽出（関連する不確実性評価も併せて行うことが理想的）**
 - ✓ 広範囲の情報の統合化が必要（どのサイトでも、この種のデータベースは本質的に限定される）
 - ✓ モデルの時間的変遷を評価することが必要
- **評価すべき時間スケールは廃棄物のインベントリあるいは規制の要求に応じて設定され则认为られる**
- **要求される評価のタイプや予測に用いるデータの利用可能性についてはサイトに大きく依存**
 - ✓ 長期的で緩慢なプロセス（隆起・侵食）と劇的な事象（例えば気候・海水準変動や氷期など）を考慮することの必要性
 - ✓ 天然事象（例えば火山・火成活動）あるいは人間活動（例えば人間侵入）によって生じる天然バリアの破壊を伴うシナリオに必要なデータ

地質環境に関するデータ取得：現状 (1/2)

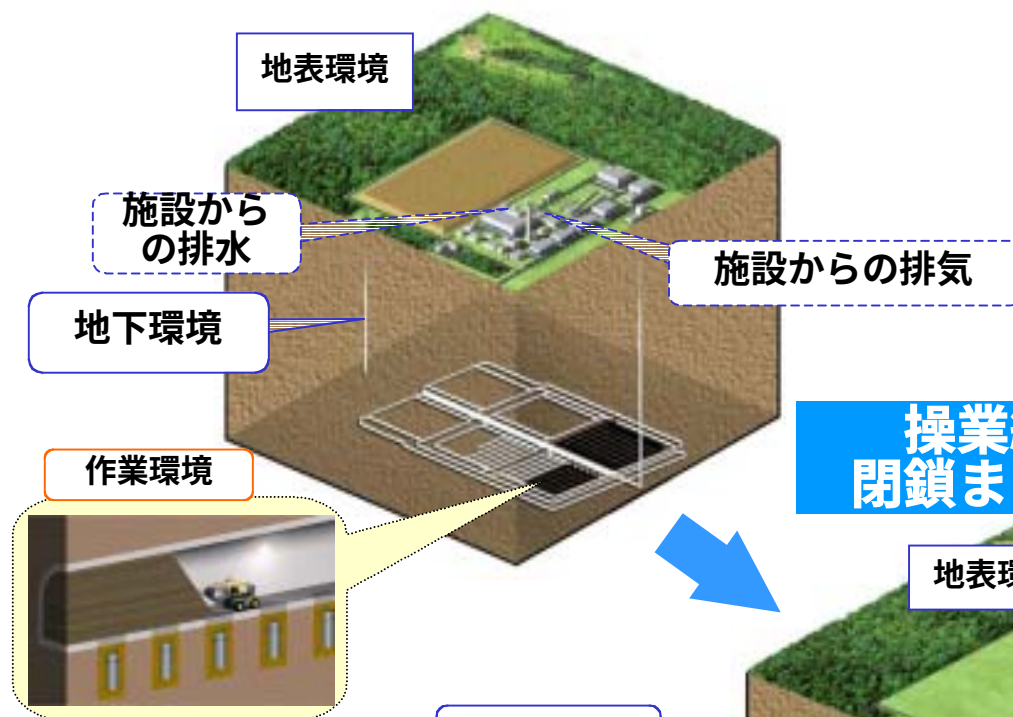
- 十分に計画された段階ごとの特性調査：
 - ✓ 文献調査
 - ✓ 地表からの調査（ボーリング孔を含む）
 - ✓ 地下での調査（処分場の建設前）
 - ✓ 処分場の建設，操業，制度的管理に期間にわたるモニタリング
- 初期の段階では処分場概念の成立性に焦点があてられ，このため調査では以下の項目を含む
 - ✓ 地質環境の安定性：主な擾乱（例えば，火山・火成活動や断層運動）あるいは人間侵入（資源が存在しないこと）によるリスクが低いこと
 - ✓ 母岩の力学的性質
 - ✓ 母岩とその周辺の地層の水理学的／地質学的性質
 - ✓ 地質環境と生物圏とのインターフェイス（希釈効果）
- 調査のレベルと要求される精度は，サイトに依存し，また一つのサイトの調査なのか複数のサイトの比較を行うかにも依存

地質環境に関するデータ取得：現状(2/2)

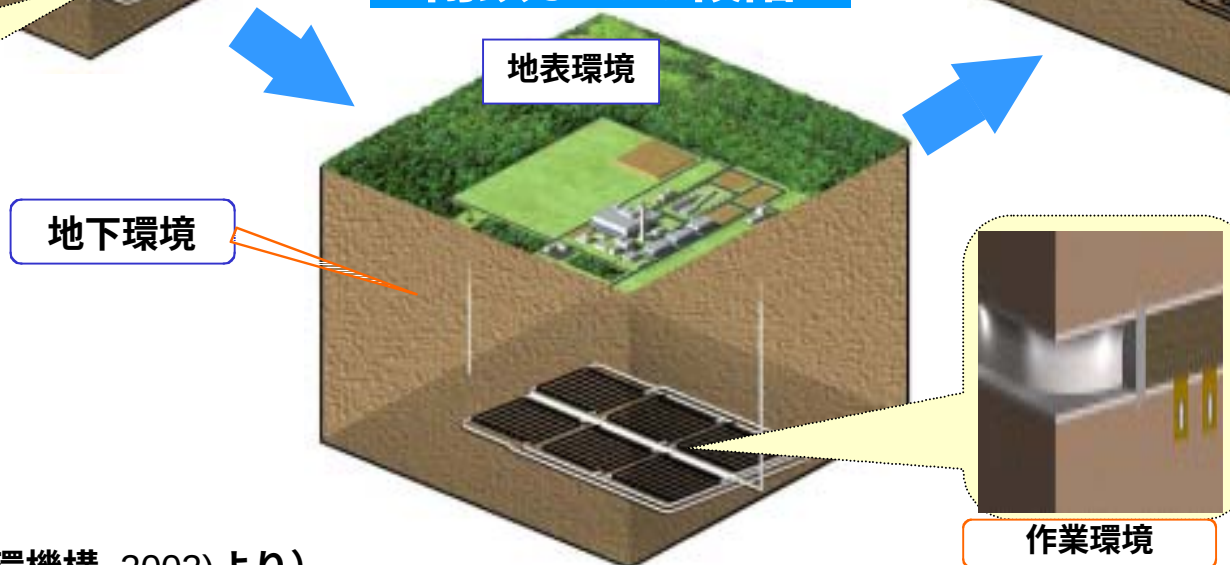
- 初期の段階でも，サイト調査は別の一般的な地下研究施設で得られる情報によって補完することが可能
 - ✓ リモートセンシング技術あるいは室内試験手法の適用性の確認
 - ✓ サイトで取得することが困難（または非実用的）なデータ（例えば放射性核種の移行データ）あるいは擾乱プロセスに関する情報の収集
- 処分場の本格的な建設に先立ち行われるアクセス立坑／坑道の建設期間中の地下環境特性調査
 - ✓ 基本的な調査活動
 - ✓ 建設によって生じる擾乱（掘削影響領域，地下水位の低下，酸化）および閉鎖後元の状態に復帰するまでに要する時間の評価

処分場の建設，操業，制度的管理期間中のモニタリング例

処分場の建設，操業段階

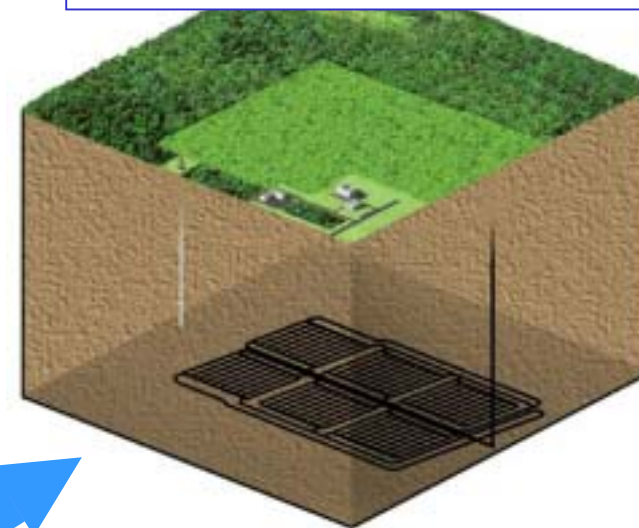


操業終了後 閉鎖までの段階



処分場の閉鎖後

必要に応じて，地表および地下
の環境のモニタリングを継続



(処分場の概要(原環機構, 2002)より)

地質環境に関するデータ取得: 今後の課題

- 各国の処分計画において焦点となっている現在の研究開発
 - ✓ 隆起・侵食シナリオの特性の評価
 - ✓ 氷河の後退に伴うあるいはその後のプロセス特性の評価
 - ✓ 沿岸部における海水準変動の影響の評価
 - ✓ リモートセンシングによる硬岩系における構造的特徴の把握
 - ✓ 地質環境の擾乱プロセス（例えば、高pH流体やガスなど）及び人工バリアと地質環境との境界部のモデル化とその確証
- 品質管理に対する重要性の認識
 - ✓ 地質環境データの収集と設計や安全評価のパラメータに用いるための加工について品質保証手順の改善や透明性の確保

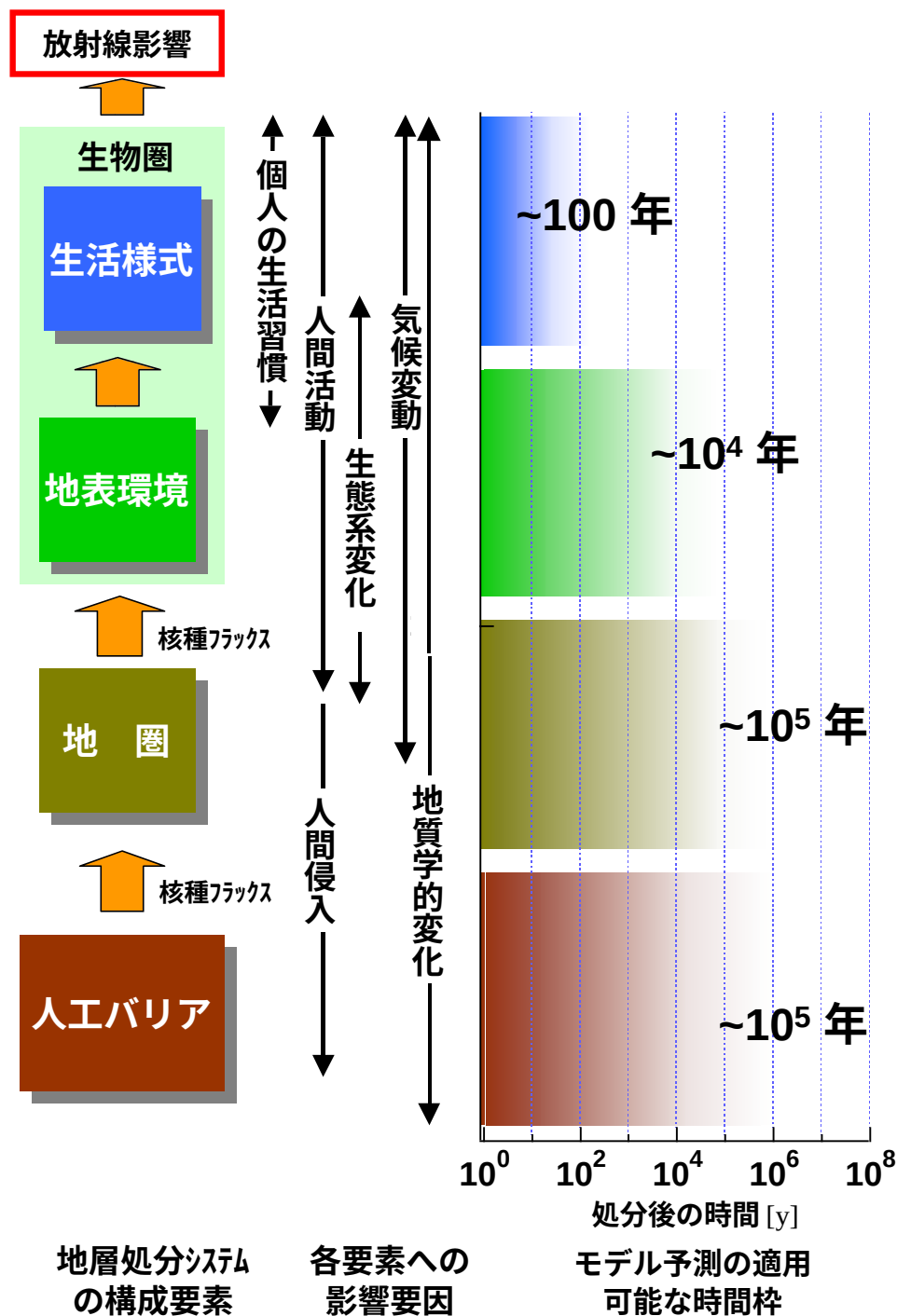
生物圏に関するデータ取得 (1/2)

- **様々な場所における現在の生活様式を仮定した生物圏**
 - ✓ 全国／地域別の地理統計データベースに基づいて合理的に設定可能
 - ✓ 放射性核種の移行／線量換算のモデルに対して一般的に利用可能なデータが多く存在するが、地域の気候条件や社会的文化的条件を考慮した慎重な取扱いが必要
- **地質環境と生物圏とのインターフェイス**
 - ✓ モデルを作成するうえで最も難しい分野
 - ✓ 線量結果において直接桁のレベルで変動する可能性がある希釈量を決定
 - ✓ 重要な不確実性の要因であり、保守的な仮定あるいは広範囲の潜在的な希釈の幅を考慮することによって対処することが必要

生物圏に関するデータ取得(2/2)

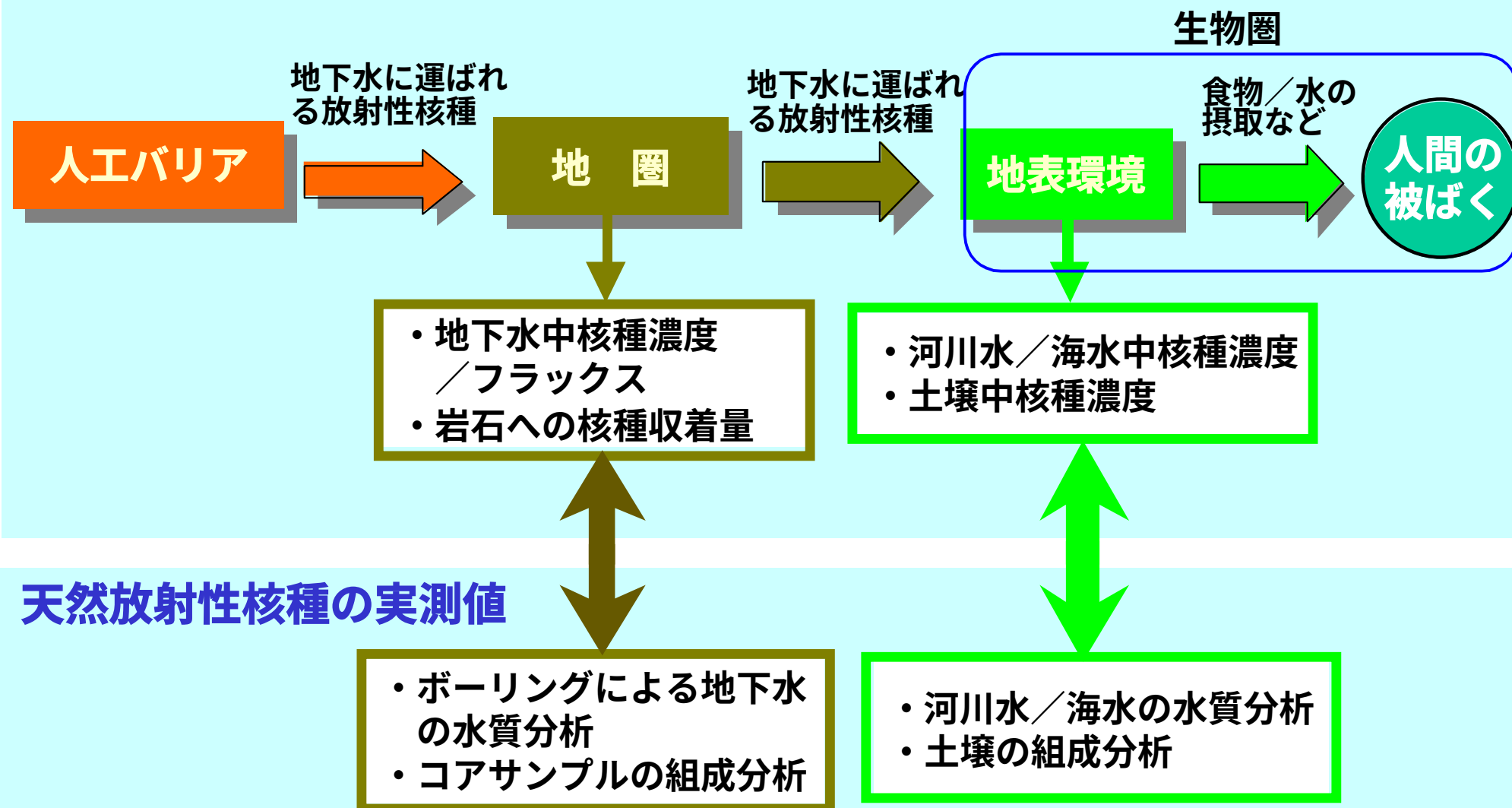
- **生物圏の不確実性：極めて短期間の間に大きな変化が生じる可能性**
 - ✓ 人為的な影響に加え，気候変動に起因
 - ✓ 規制のガイドラインでは，通常生物圏モデルを地質環境から移行する放射性核種の程度を単純に表現するものととらえている
 - ✓ 現在の環境に焦点が当てられているが，起こりやすいと考えられる変動（例えば気候条件）を考慮したモデルも必要
 - ✓ 地質環境から移行する放射性核種の程度を補完するために，線量以外の指標（例えば天然放射性核種の濃度やフラックス）を適用

モデル予測の適用可能性

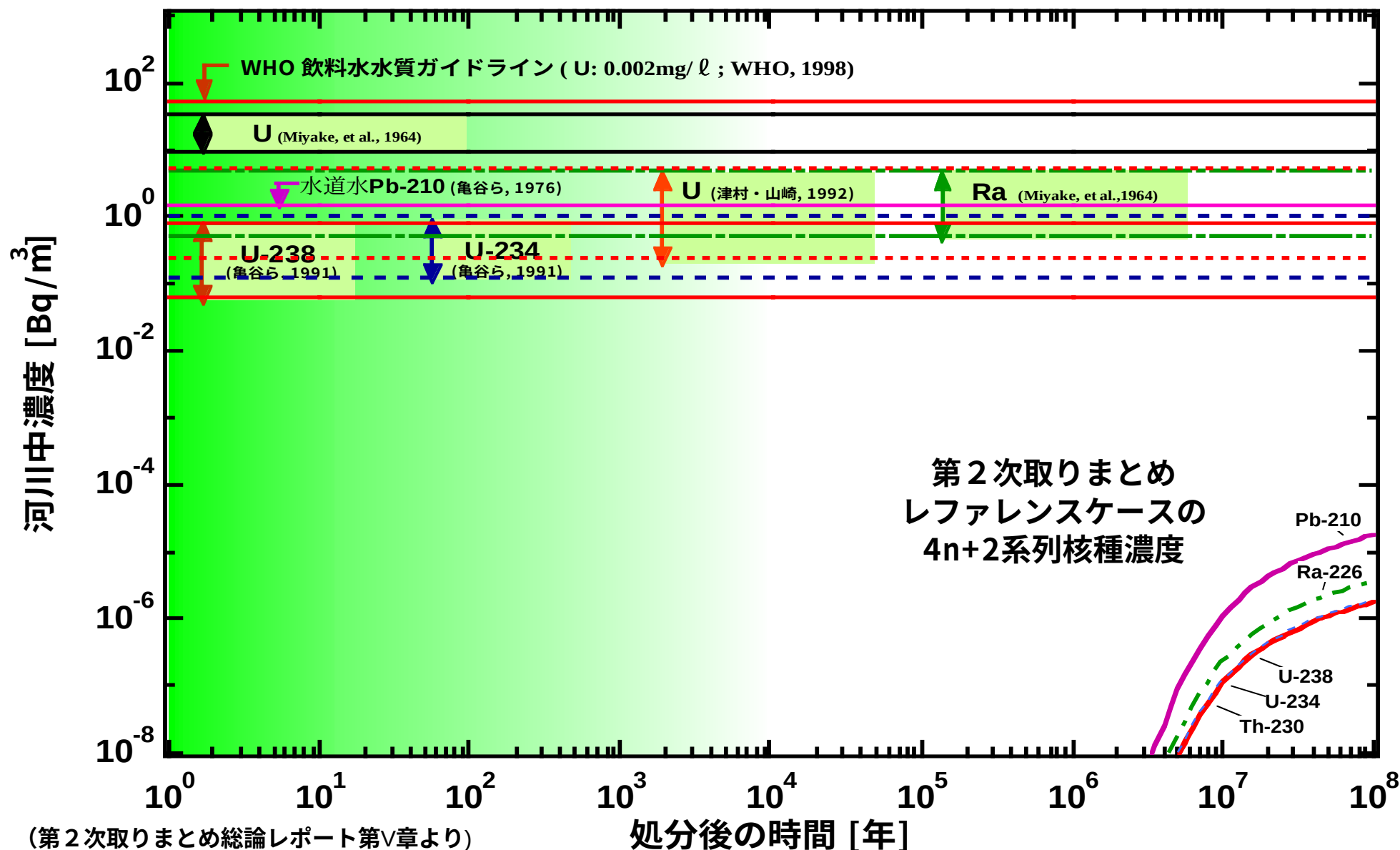


天然放射性核種の濃度測定値を用いた指標の適用例

地層処分システムの性能評価（モデルによる予測）



性能評価結果と天然放射性核種の実測値との比較例 (河川中濃度)



- 初期の段階

- ✓ 生物圏にはあまり重点が置かれない
- ✓ 地質環境からの放射性核種を飲料水として摂取するという簡単な仮定に基づいて線量に換算
- ✓ 計算結果に大きな影響を与えるため希釈の程度に関する推定が必要

- より詳細なレベルの段階

- ✓ 可能性のあるサイトの環境を表現するために多くの生物圏モデルが存在
- ✓ これらは欧米の温帯気候にある生活様式に基づくことから、場所によっては慎重に取扱うことが必要

- 特定の地域に対して

- ✓ 特に気候変動など起こりうる変化を表現する一連の生物圏モデルが開発されている
- ✓ ただし、一般に種々の気候変動がそれぞれ一つのケースとして設定されているだけで、連続的な気候変動プロセスを表現する試みは行われていない

生物圏に関するデータ取得：今後の課題

- **生物圏評価に用いるデータの改良が必要な領域**
 - ✓ 既存の放射性核種移行／線量換算のデータベースの適用が困難なケース（例えば，沿岸地域に対して）
 - ✓ 相対的に短期間で生物圏に多大な影響が起こりやすい，あるいはその可能性があると考えられる地域（例えば沿岸域の処分場サイト）

データ取得における最近の話題

- サイトの確認（モニタリング／制度的管理）
 - ✓ 測定すべきかデータは何か？
 - ✓ 必要とする期間にわたって信頼性をもって測定が可能か？
 - ✓ どのように限界のレベルを規定しているか？
 - ✓ "パンドラの箱" ？
- 最先端の設計
 - ✓ 最先端の科学技術を駆使した処分場への期待
 - ✓ 十分に試験された材料と技術に基づくロバスト性
 - ✓ 必要なバランス

まとめ (1/2)

- これまでわが国では具体的なサイトを特定しない一般的な地質環境条件を想定した処分場の設計と安全評価研究を実施
- 現在，概要調査地区選定に向け“高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域”が公募されており，今後は具体的な処分サイトに対応できるように，設計と安全評価手法を改良・拡張していくことが必要
- サイトが選定されれば，その候補サイトあるいは類似した条件を有するサイトにおいて種々のフィールドでの試験を行った結果得られるデータや情報を基に，設計技術の実証や安全評価モデルの妥当性の検討を進めていくことが重要
- 地震・火山活動などといった天然事象についても，そのサイトの条件を十分に検討して安全評価に反映させることが肝要

まとめ (2/2)

- データ取得における問題点を認識したうえで、
 - ✓ 設計と安全評価に最も重要となるFEPに専念
 - ✓ 量よりも質に重点
 - ✓ データのいくつかは、期待するレベルの質をもって、あるいは計画のある段階では取得できないことに留意
 - ✓ 限界となるデータに対しても設計に柔軟性を維持（サイトや処分場概念またはモデルなどの変更によって）
 - ✓ 一般的なデータには多くのソースが利用可能であるが、その使用には細心の注意を払うべき（専門家のレビューに基づく技術文献においても、質の点では開きがある）