



地層処分に適した地質環境の選定 およびモデル化

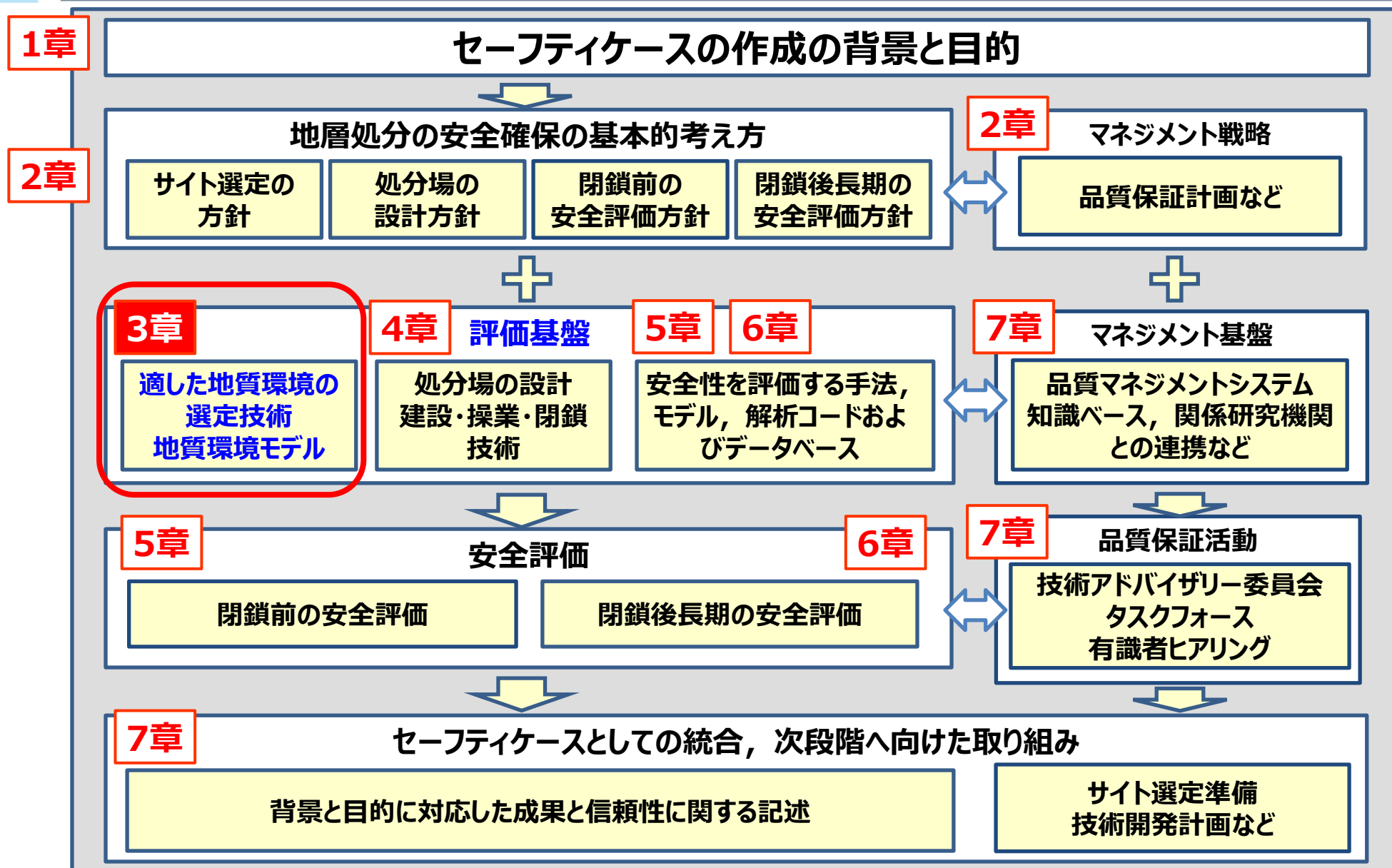
(包括的技術報告書より)

2023年 10月 20日

原子力発電環境整備機構 (NUMO) 技術部



セーフティケースの構造と報告書の構成との関係





(1) 目的

(2) 各節の概要

- 3.1節 地質環境が安全確保に果たす役割
- 3.2節 地層処分に適した地質環境の選定プロセス
- 3.3節 検討対象母岩のモデル化
- 3.4節 将来における自然現象の発生可能性とその地質環境への影響
- 3.5節 まとめと今後の取り組み

(3) 日本原子力学会レビュー結果と改訂の要点

3章「地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化」の目的

■ 包括的技術報告書作成の目的

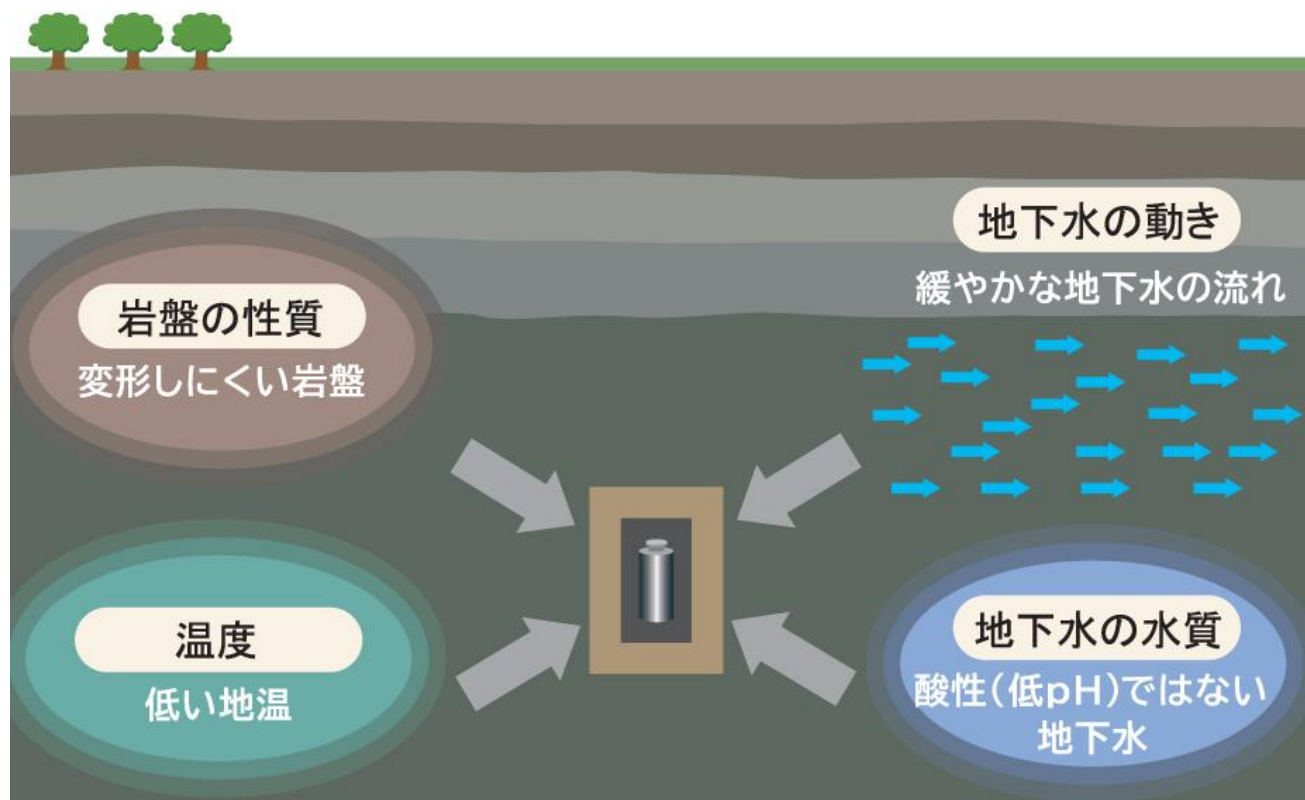
- これまでに蓄積されてきた科学的知見や技術を統合して、**地層処分の実施主体として、わが国の地質環境に対して安全な地層処分を実現するための方法を説明し、技術的な取り組みの最新状況として取りまとめる**

■ 3章の目的

- わが国の地質環境に係る最新の科学的知見や技術開発成果に基づき、**サイト選定における判断の基本的な考え方や調査・評価技術を体系的に整備**していることを示す
- **段階的に取得する地質環境情報を**、処分場の設計および安全評価に係る取り組みの基盤となる**検討対象母岩の地質環境モデルとして解釈・統合できる技術**を保有していることを示す

地質環境・地質環境特性

- **地質環境**：地層処分の観点から見た地下の環境であり、岩盤とそこに含まれる地下水などから構成
- **地質環境特性**：地層処分の安全確保において重要な地質・地質構造、岩盤の熱的・力学的な性質、地下水の地球化学的な性質、地下水の流動や物質の移行などの性質の総称

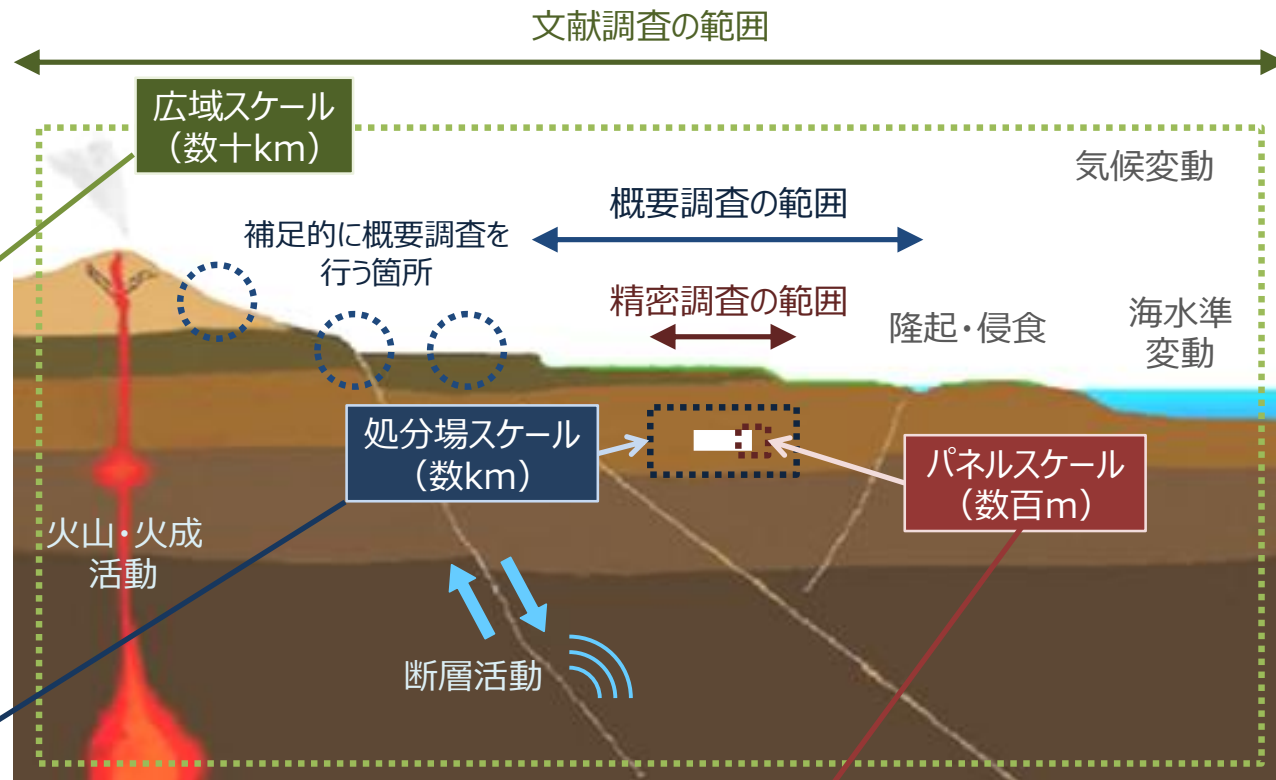


好ましい地下深部の地質環境特性

調査段階と空間スケールとの関係

広域スケール :

処分場スケールの領域の地質環境特性に影響を与える自然現象を考慮する範囲 (処分場スケールの領域を包含し, サイト調査において, 涵養域から流出域までの地下水の移行経路や分水嶺などの水理境界を包含する範囲)



処分場スケール :

地下深部における閉じ込めの観点から**好ましい地質環境特性とその長期的な安定性を確認**する処分場 (候補母岩) とその近傍の地層・岩体を含む範囲

パネルスケール :

処分場スケールの領域において実際に処分区画を設置し, 母岩の核種移行・遅延特性や人工バリアの形状などに影響を及ぼす**地質環境特性を詳細に評価**する範囲

地質環境が安全確保に果たす役割

－ 閉鎖前の地質環境に求められる要件および影響要因 －

- **地層処分技術WG「中間とりまとめ^[1]」・「とりまとめ^[2]」**を踏まえて、処分場の選定から建設・操業を経て閉鎖に至る一連の**作業の安全確保を最優先にした合理的な実施の観点から要件を整理し、それに影響を及ぼす要因を特定**

[1] 総合資源エネルギー調査会（2014）：最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価－地質環境特性および地質環境の長期安定性について－，総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術WG.

[2] 総合資源エネルギー調査会（2017）：地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果（地層処分技術WGとりまとめ），総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術WG.

閉鎖前の地質環境に求められる要件	影響要因
母岩が第四紀の未固結堆積物ではないこと	深度300m以上の深さにおける第四紀の未固結堆積物の分布
地下施設の安全性や施工性に影響を及ぼす事象が発生する可能性が小さいこと	地熱・温泉*，膨張性地山，山はね，泥火山，湧水，有害ガス，地震などの発生
地上施設の安全性を損なう事象が発生する可能性が十分に小さいこと	火砕物密度流，溶岩流，岩屑なだれなどの発生
地上施設の安全性に影響を及ぼす事象が発生する可能性が小さいこと	軟弱地盤の分布，地盤の変形・変位，地震，津波，地すべり，土石流，洪水などの発生

*地中から湧出する温・熱水

地質環境が安全確保に果たす役割

— 閉鎖後長期の地質環境に求められる要件および影響要因 —

- **地層処分技術WGI「中間とりまとめ」・「とりまとめ」およびIAEAの安全要件（SSR-5）**などを踏まえて、**隔離**および**閉じ込め**の基本概念を達成するための**安全機能の長期的な維持の観点から要件を整理し、それに影響を及ぼす要因を特定**

基本概念	安全機能	閉鎖後長期の地質環境に求められる要件	影響要因
隔離	自然現象の著しい影響からの防護	廃棄体を人間の生活環境に接近あるいは露出させるような著しい影響を及ぼす 自然現象が生じないこと	火山・火成活動，隆起・侵食
	人間接近の抑制	現在認められている経済的価値の高い 鉱物資源が存在しないこと	鉱物資源の存在
閉じ込め	放射性物質の溶出抑制 および 放射性物質の移行抑制	熱環境 ：地温が低いこと	火山性熱水・深部流体の移動・流入
		水理場 ：地下水流動が緩慢であること	地震・断層活動，隆起・侵食
		力学場 ：岩盤の変形が小さいこと	地震・断層活動
		化学場 ：地下水は高pHあるいは低pHではない，酸化性雰囲気ではない，炭酸化学種濃度*が0.5 mol/L以上とならないこと	火山性熱水・深部流体の移動・流入，地震・断層活動，隆起・侵食

*溶液中に溶存している無機炭素（炭酸塩，炭酸水素塩，炭酸，二酸化炭素）の合計の濃度

地質環境が安全確保に果たす役割

— 閉鎖前の影響要因に対するサイト選定上の対応方針 —

- **地層処分技術WG「とりまとめ」**を踏まえるとともに、原子力関連施設や土木構造物などにおける**既存の対策事例**を参考に、**閉鎖前の安全確保における影響の程度を考慮して対応の基本的な考え方を決定**

地質環境に求められる要件	影響要因	対応の基本的な考え方	文献調査	概要調査	精密調査
母岩が第四紀の未固結堆積物ではないこと	第四紀の未固結堆積物の分布	深度300m以上の深さに第四紀の 未固結堆積物が分布する地域の除外		広域	処分場
地上施設 の安全性および 地下施設 の安全性や施工性に影響を及ぼす事象が発生する可能性が小さいこと	地熱・温泉や地震などの発生，軟弱地盤の分布，地盤の変形・変位など	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 操業期間中の影響の程度・範囲の把握 ➢ 影響を低減するための情報化施工技術の適用や地上施設の設置位置の検討 		広域	処分場 パネル
地上施設 の安全性を損なう事象が発生する可能性が十分に小さいこと	火砕物密度流，溶岩流，岩屑なだれなどの発生	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 操業期間中の影響範囲の把握 ➢ 影響を回避するための地上施設の設置位置の検討 		広域	処分場

地質環境が安全確保に果たす役割

— 閉鎖後長期の影響要因に対するサイト選定上の対応方針 —

- 閉鎖後長期の**安全機能の維持の観点**から、これまでに示された著しい影響などへの対応に加えて、**緩慢・累積的な影響についても考慮して対応の基本的な考え方を決定**

地質環境に求められる要件	影響要因	対応の基本的な考え方	文献調査	概要調査	精密調査
<ul style="list-style-type: none"> ➢ 廃棄体を人間の生活環境に接近あるいは露出させるような著しい影響を及ぼす自然現象が生じないこと ➢ 地温が低いこと ➢ 地下水流動が緩慢であること ➢ 岩盤の変形が小さいこと ➢ 地下水は、高pHあるいは低pHではない、酸化性雰囲気ではない、炭酸化学種濃度が0.5mol/L以上とならないこと 	火山・火成活動、 火山性熱水・深部流体の移動・流入、 地震・断層活動、 隆起・侵食	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 著しい影響が及ぶ範囲の除外 ➢ 適格性が劣る地質環境特性の範囲の除外 	広域	処分場	パネル
		<ul style="list-style-type: none"> ➢ 緩慢・累積的な影響に伴う地質環境特性の長期変遷の把握 ➢ 影響を考慮した適切な工学的対策の検討 ➢ 安全評価による放射性物質の溶出・移行抑制機能の長期的な維持の確認 ➢ 放射性物質の溶出・移行抑制機能が期待できない場合は、選定候補からの当該範囲の除外 	広域	処分場	パネル
経済的価値の高い鉍物資源が存在しないこと	鉍物資源の存在	経済的に価値が高い鉍物資源が地下に存在する 範囲の除外	広域	処分場	

地質環境が安全確保に果たす役割

－ 地層処分に適した地質環境の存在 －

- 全国規模で収集した最新の科学的知見に基づき、わが国の**地下深部に広く認められる地質環境特性を整理**

好ましい地質環境特性		地下深部で広く認められる地質環境特性
熱環境	地温が低いこと	火山地域などの高温異常域を除けば、地温勾配は 3～5°C/100m 程度
水理場	地下水流動が緩慢であること	動水勾配は 0.001～0.01 オーダー、透水係数は 10⁻¹²～10⁻⁶m/s オーダーで深度とともに減少し、低透水係数の岩盤に伴って大きな動水勾配が発生
力学場	岩盤の変形が小さいこと	岩盤の圧縮強度や弾性率が大きく、長期的なクリープ変形量は 設計で対応可能な範囲内
化学場	地下水は、高pHあるいは低pHではないこと、酸化性雰囲気ではないこと、炭酸化学種濃度が0.5mol/L以上とならないこと	地下水は、 pH6～9 程度で還元性雰囲気が維持され、炭酸化学種濃度は 最大0.1mol/L 程度

地層処分に適した地質環境の選定プロセス

－ 基本的な考え方・進め方 －

- **安全機能が長期にわたって維持される地質環境を適切に選定**するために、「**過去から現在までに生じた地質学的な事象やプロセスを正しく把握することにより、現在発生している地質学的な事象やプロセスの理解を深め、将来の地質学的な事象やプロセスを推測すること**」を基本的な考え方としてサイト選定を**段階的**に進める。



- ① 火山・火成活動，火山性熱水・深部流体の移動・流入，地震・断層活動，著しい隆起・侵食，第四紀未固結堆積物の分布，鉱物資源の存在により，**明らかに適格性が劣ると判断される範囲を除外**
- ② 自然現象の著しい影響を回避したサイトにおいては，**閉じ込めの観点から**地質環境特性を評価して**明らかに適格性が劣る範囲を除外**
- ③ 緩慢かつ累積的なプロセスが地質環境特性に及ぼす影響を考慮する必要があるため，過去から現在までの地質環境特性の時間的・空間的変遷を把握して，将来10万年程度を超えるような長期にわたって**閉じ込めの観点から好ましい地質環境特性が安定に維持されることを確認**
- ④ 特に将来10万年程度を超える期間においては，その発生可能性が極めて小さい場合であっても，処分場の安全機能に著しい影響を及ぼす可能性が想定される事象が想定される場合は，当該**事象の発生とその地質環境への影響について，外挿や確率論による方法を組み合わせて評価したうえで，その不確実性の程度を把握**

地層処分に適した地質環境の選定プロセス

－ 各段階における調査・評価の進め方 －

文献調査の段階：応募等区域およびその周辺地域を対象に、自然現象の著しい影響の回避などの観点から、概要調査地区としての**適格性が明らかに劣る範囲を除外**するとともに、広域スケールの地質環境モデルを構築し、その結果を踏まえて**概要調査地区を選定**



概要調査の段階：概要調査地区およびその周辺の地域において、一連の調査・評価を通じて**概要調査地区としての適格性の評価結果の妥当性を確認**するとともに、広域・処分場スケールの地質環境モデルを更新・構築し、**地質環境特性とその長期変遷の評価**に加え、環境影響や経済性の観点も考慮して**精密調査地区を選定**



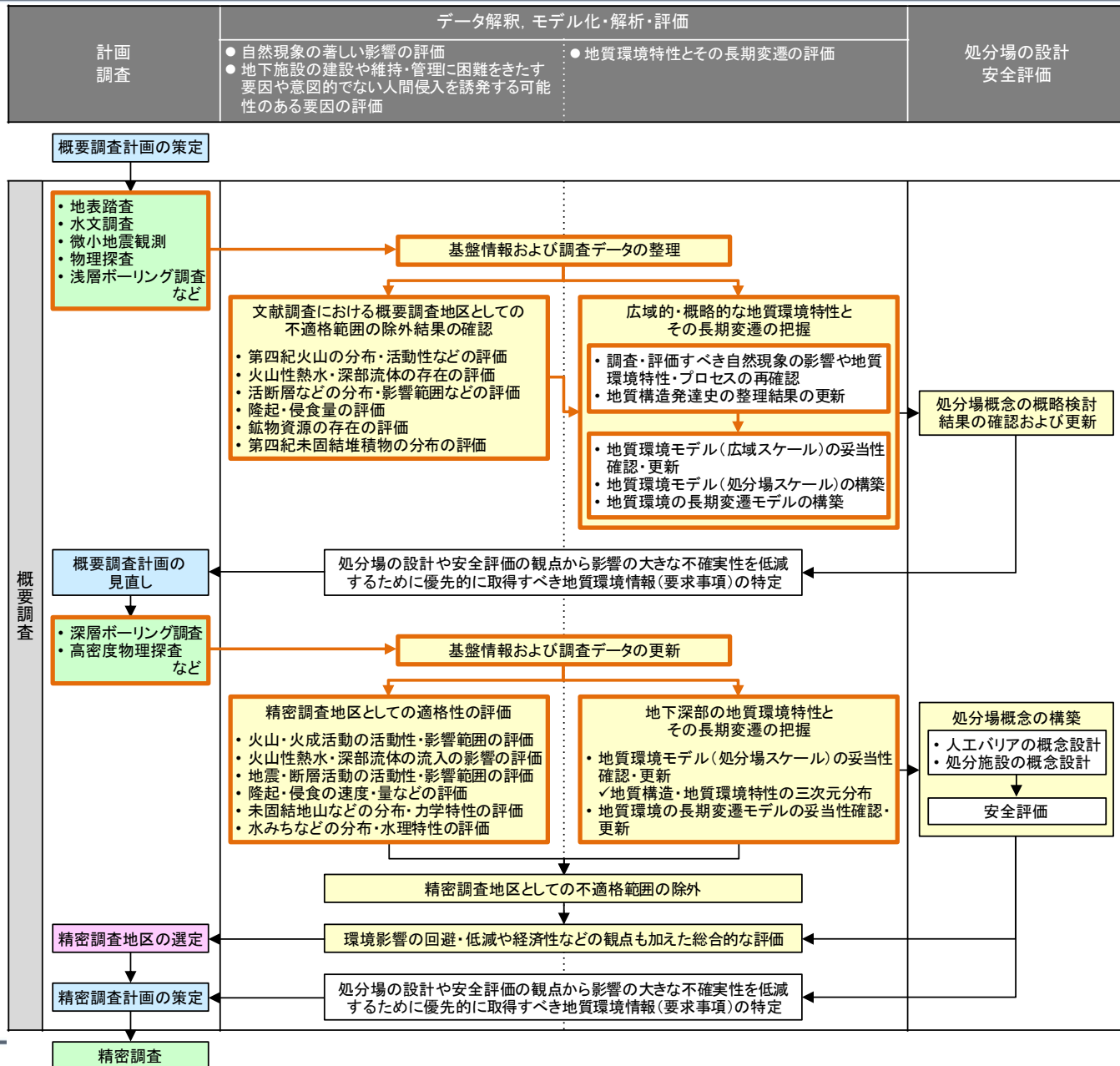
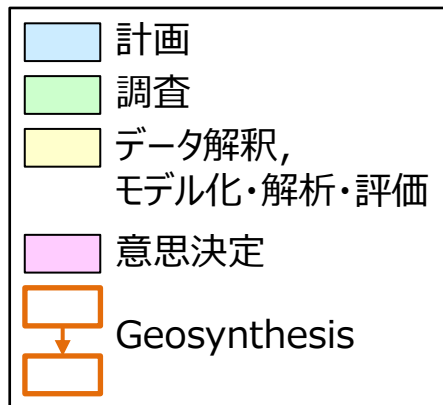
精密調査の段階：精密調査地区において、地表から調査や地下調査施設での試験を通じて、**候補母岩の特性に係る不確実性の低減**とともに、処分場・パネルスケールの地質環境モデルの詳細化を図り、閉鎖後長期の安全評価の結果を踏まえて候補母岩の**地層処分への適性を確認**

地層処分に適した地質環境の選定プロセス

－ 各段階における調査・評価の進め方 －

- 地層処分に適した地質環境の選定の基本的考え方や、「**繰り返しアプローチによる不確実性の低減**」および「**地質環境情報の統合化による処分場の設計および安全評価との連携**」といった方法論に基づき、**各段階における地質環境調査・評価の進め方を提示**

概要調査のフロー



地層処分に適した地質環境の選定プロセス

— 地質環境調査・評価技術 —

- 資源開発や建設工事などの分野で**実績**があり、関係研究機関などにより開発され**適用性が確認**された調査・評価技術について、**現状の技術レベル・課題を網羅的に整理**

- 最新の技術的知見に基づき、個別技術について、取得データ、反映先、目的、概要、手法、適用事例、有効性、技術的課題を**調査技術シートに網羅的に整理**

調査・評価技術		現状の技術レベル・課題
火山・火成活動	第四紀火山からのマグマの移動の可能性・範囲に係る調査・評価技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 第四紀火山の活動特性や形成発達史の把握に係る地質学的手法や火山体の地下構造の把握に係る地球物理学的・地球化学的手法は整備 ・ マグマの有無の把握に係る地球物理学的手法は陸域を対象に整備／沿岸部海域は適用性確認を通じた整備が課題 ・ 成層火山やカルデラなどの活動様式に応じたマグマの活動範囲に係る知見は限定的／知見の拡充が課題
	火山（マグマ供給系）の新規発生の可能性・範囲に係る調査・評価技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 火山活動の時間的・空間的変遷の把握に係る地質学的手法や地下の地震波速度・熱構造の把握に係る地球物理学的・地球化学的手法は整備 ・ 地殻・マントル内の高温領域の偏在性などを説明するモデルは整備／時間変化や連続性の評価に係るモデルの信頼性向上が課題

海上ボーリング掘削			海域調査	
文献調査	概要調査（広域）	概要調査（処分場）	精密調査（地上）	精密調査（地下）
取得データ： ボーリングコア				
反映先： ①自然現象の著しい影響：活断層および火山・火成活動の著しい影響の回避への情報提供 ②地質環境特性：地質環境特性（地質・地質構造、水理地質構造、熱・物理・力学特性、地化学特性）に関する情報の提供				
目的： <ul style="list-style-type: none"> ・ 地層処分ににおける海上ボーリング掘削は、掘削で採取したボーリングコアを観察し、活断層による地層の擾乱、火山・火成活動による岩脈貫入や地質の変質等を把握し、それらの著しい影響を回避した上で、地質環境特性（地質・地質構造、水理地質構造、熱・物理・力学特性、地化学特性）に関する情報を取得し、地層処分に適する地質環境であることの評価を目的として実施する。 				
概要： <ul style="list-style-type: none"> ・ 海上ボーリング掘削とは、海底下の地層や岩盤を掘削するために、海上に掘削用の台座または台船を設置してボーリング掘削を行う。 ・ 海上ボーリング調査は、陸上とは異なり、掘削の足場となる構造物が必要である。水深によって足場は異なる。図1に主な海上ボーリング調査の足場を示す。海上ボーリング調査は、足場が必要なこと以外は、基本的に陸上ボーリングと同様である。ただし掘削方法にいくつかの違いがみられる。 ・ 従来の海上ボーリング掘削では、掘削パイプだけで掘り進み、海水を掘削孔に注入して掘り屑を海底面へ押し出すライザーレス掘削方式が用いられてきた。しかしこの手法では、孔壁の崩壊のため掘削深度が大きくとれない等の欠点があった。そこで陸上ボーリングと同様に、泥水循環により孔内の環境をコントロールしながら掘削を行うライザー掘削方式が用いられるようになってきた（図2）。ライザー方式では、海底から海上フロアまでが鉄管で繋がることから、ボーリング孔を利用する調査技術は陸上と同様に適用できる。 				

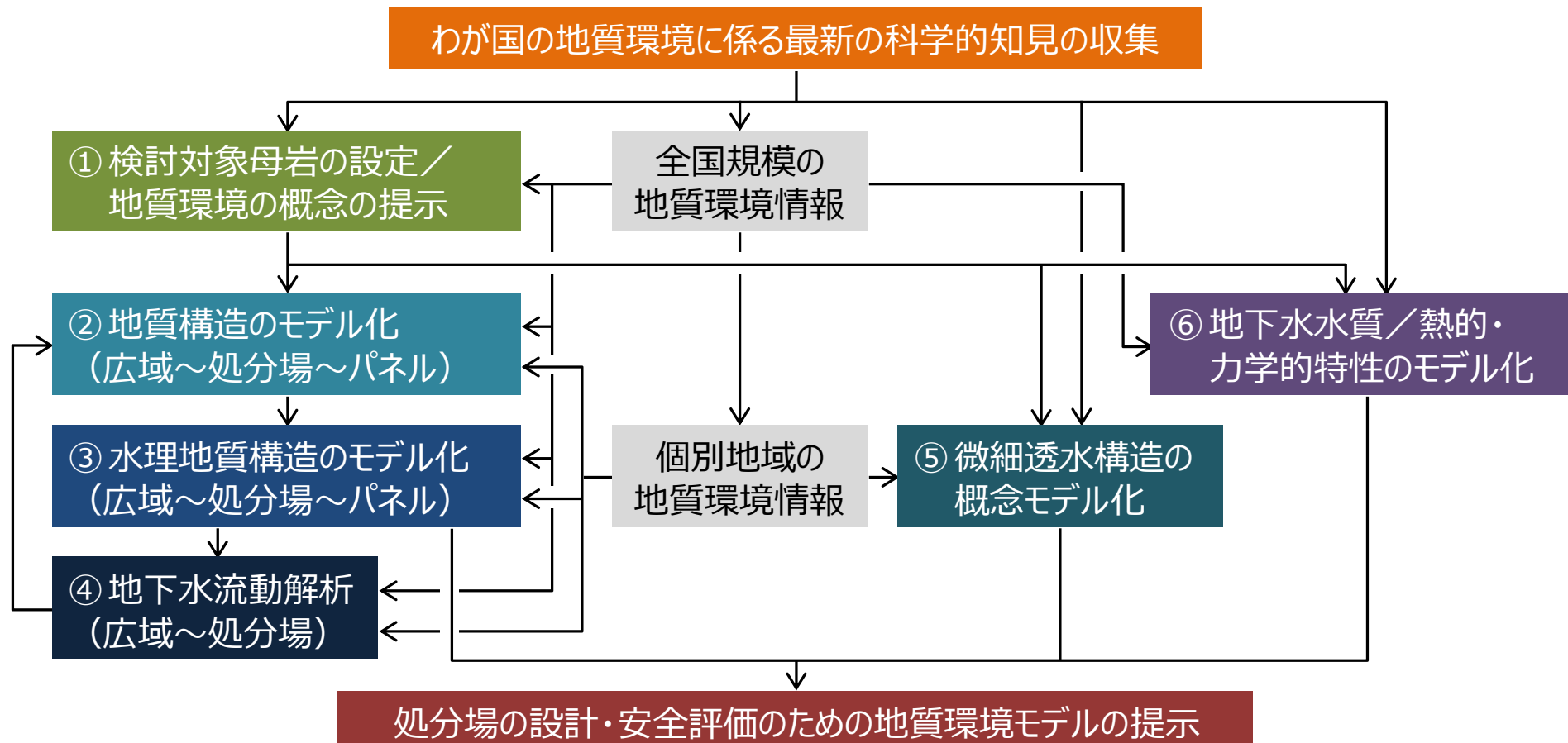
調査技術シート
(海上ボーリング掘削の例)

①は地熱資
 ②は断層・
 ③理学的手
 備が課題
 ④影響の程
 課題
 ⑤調査、物理
 ⑥地震後に、
 蓄積
 ⑦は整備／
 ⑧における
 ⑨能的な地
 ⑩再活動に
 は可能

検討対象母岩のモデル化

－ 検討対象母岩の地質環境モデルの構築の進め方 －

- 最新の科学的知見に基づき、処分場の設計および安全評価に係る一連の検討の基盤となる、現在の**地下深部の地質環境の特徴を考慮した地質環境モデルを構築**



本報告書における検討対象母岩の地質環境のモデル化フロー

検討対象母岩のモデル化

— 検討対象母岩の設定（対象・評価項目の設定） —

- ① 処分場の選定に際して考慮すべき重要な地質学的事項に対応した**地質の特徴を明確にする観点から、日本地質学会により区分された7岩種を対象**
 - ✓ 第四紀堆積岩類，第四紀火山岩類，新第三紀堆積岩類，先新第三紀堆積岩類，新第三紀・先新第三紀火山岩類，深成岩類，変成岩類
- ② **第四紀堆積岩類および第四紀火山岩類は、他の5岩種と比較して、処分場の母岩として対象となる可能性が相対的に低いと考えられることから検討対象から除外**
 - ✓ 分布範囲が、科学的特性の提示に係る要件・基準のうち「**深度300m以深まで更新世中期以降の地層が分布する範囲**」を包含し、地表の**第四紀火山岩類**の80%以上が「**第四紀火山の中心から15km以内**」に分布
- ③ 全国規模で収集した最新の科学的知見に基づき、**処分場の設計および安全評価の観点から重要となる特性に着目して5岩種の特徴を整理**
 - ✓ 処分場の設計：一軸圧縮強さ，熱伝導率，有効間隙率
 - ✓ 安全評価：水みちの構造，透水係数，有効間隙率
- ④ 「**第四紀火山の中心から15km以内**」を除外した範囲を対象に，産総研「20万分の1日本シームレス地質図」およびYasue et al. (2014) に基づき，**地表，深度500mおよび1,000mにおける5岩種の分布面積比率を推定**

検討対象母岩のモデル化

— 検討対象母岩の設定（5岩種の特徴の整理） —

地質時代	新第三紀	先新第三紀	新第三紀・ 先新第三紀	新第三紀・ 先新第三紀	
岩種	堆積岩類	堆積岩類	火山岩類	深成岩類	変成岩類
地表分布面積比率 [%]	15	41	18	18	8
深度500m分布面積比率 [%]	15	40	15	20	10
深度1,000m分布面積比率 [%]	10	45	10	25	10
水みちの構造	粒子間隙 割れ目	割れ目 層理面	割れ目	割れ目 岩脈	割れ目 片理面
透水係数の代表値 [m/s]	2.9×10^{-7}	4.7×10^{-7}	2.1×10^{-7}	5.5×10^{-8}	4.3×10^{-8}
有効間隙率の代表値 [%]	25~27	3.5~6.8	5.4~7.9	0.8~1.5	1.2~6.8
熱伝導率の代表値 [W/mK]	1.6~1.8	1.4~1.5	2.4~2.5	2.8~2.9	3.3
一軸圧縮強さの代表値 [MPa]	9~28	74~90	92~106	108~110	55~66

* 分布面積比率は、第四紀火山の中心から15km以内の範囲を除外した地質環境を対象に算出

検討対象母岩のモデル化

— 検討対象母岩の設定（特徴に基づく類型化） —

- **新第三紀堆積岩類および深成岩類：検討対象母岩に設定**
 - ✓ 第2次取りまとめの検討結果などに基づく、閉じ込めの観点から**好ましい地質環境特性を有すると推測**され、JAEAの深地層の研究施設計画における最新の科学的知見からも支持
- **先新第三紀堆積岩類：検討対象母岩に設定**
 - ✓ 日本列島の形成においてその骨格をなす**基盤岩として重要であり、地下深部の地質環境の半分程度を占めると推定**され、同じ堆積岩ではあっても**新第三紀堆積岩類とは異なる地質学的特徴**
- **新第三紀・先新第三紀火山岩類：深成岩類および先新第三紀堆積岩類と同様の対応可能**
 - ✓ **処分場の設計の観点から深成岩類、安全評価の観点から先新第三紀堆積岩類と類似した特徴**
- **変成岩類：深成岩類および先新第三紀堆積岩類と同様の対応可能**
 - ✓ 地表に分布する約89%が変成度の低い結晶片岩類および変成度の高い片麻岩類であり、結晶片岩類は**先新第三紀堆積岩類**、片麻岩類は**深成岩類**と類似した特徴

検討対象母岩のモデル化

— 検討対象母岩の設定（3岩種の設定） —

地質時代	新第三紀	先新第三紀	新第三紀・ 先新第三紀	新第三紀・ 先新第三紀	
岩種	堆積岩類	堆積岩類	火山岩類	深成岩類	変成岩類
地表分布面積比率 [%]	15	41	18	18	8
深度500m分布面積比率 [%]	15	40	15	20	10
深度1,000m分布面積比率 [%]	10	45	10	25	10
水みちの構造	粒子間隙 割れ目	割れ目 層理面	割れ目	割れ目 岩脈	割れ目 片理面
透水係数の代表値 [m/s]	2.9×10^{-7}	4.7×10^{-7}	2.1×10^{-7}	5.5×10^{-8}	4.3×10^{-8}
有効間隙率の代表値 [%]	25~27	3.5~6.8	5.4~7.9	0.8~1.5	1.2~6.8
熱伝導率の代表値 [W/mK]	1.6~1.8	1.4~1.5	2.4~2.5	2.8~2.9	3.3
一軸圧縮強さの代表値 [MPa]	9~28	74~90	92~106	108~110	55~66

- 処分場の設計および安全評価の観点から重要な特徴に着目して類型化した3岩種（新第三紀堆積岩類，先新第三紀堆積岩類，深成岩類）を対象とした検討により，わが国の代表的な5岩種について対応可能

検討対象母岩のモデル化

— 地質環境モデル構築の基本的な考え方 —

- 広域スケールでは、地形や海陸分布などを考慮したうえで地下深部の地質環境から表層環境までを対象とすることや、広域的な隆起・侵食などに起因する地形および地質構造の変化に伴う地質環境特性の長期変遷についても概念化することが必要であるが、サイトを特定しない本報告書においては、**サイトに固有の地形や表層環境を詳細にモデル化することや、サイトの地質環境条件に強く依存する地質環境特性の長期変遷を概念的にモデル化することは困難**
- 第四紀火山の中心から15 km以内の範囲、ならびに第四紀堆積岩類・火山岩類の分布範囲を除外したうえで、適切にサイト選定を行うことにより、**地下深部に分布する検討対象母岩において、著しい隆起・侵食などの影響が及ぶことがなく、地層処分の観点から好ましい地質環境特性が長期にわたって維持されると仮定**
 - 「**第四紀火山の中心から15 km以内***」および「**深度300 m以深まで更新世中期以降（約78万年前以降）の地層が分布する範囲**」に該当する地質環境情報は、地質環境モデルの構築において除外
 - 以下の範囲に該当する地質環境情報については地質環境モデルの構築に使用
 - **地質構造モデルおよび水理地質構造モデルの構築において考慮する「活断層に、破砕帯として断層長さの100分の1程度の幅を持たせた範囲」**
 - **地下深部の地質環境特性とは直接関連しない「将来10万年間で隆起と海水準低下による侵食量が300 mを超える可能性が高いと考えられる地域」**、「**完新世（約1万年前以降）の火砕流堆積物・火山岩・火山岩屑の分布範囲**」および「**技術的に採掘が可能な鉱量の大きな鉱物資源の存在が示されている範囲**」

* 「第四紀火山の中心から15 km以内」に該当する範囲は「約15°C/100 mより大きな地温勾配の範囲」および「地下水の特性として、pH4.8未満あるいは炭酸化学種濃度0.5 mol/L以上を示す範囲」をほぼ包含

検討対象母岩のモデル化

— 空間スケールに応じたモデル化手法 —

- 地下水流動場に影響を与える断層・割れ目の分布は**DFNモデル**，断層・岩相の違いによる透水不均質性は**連続体モデル**を適用し，**入れ子構造になるようにモデル化**

	深成岩類	新第三紀堆積岩類	先新第三紀堆積岩類
広域 スケール	50 km×50 km×3 km	30 km×30 km×2 km	40 km×40 km×3 km
	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・断層 (> 1 km) : 確率論的DFN ● <u>水理地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・連続体 	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・断層 (> 1 km) 分布 : 確率論+決定論的DFN ・岩相分布 : 連続体 ● <u>水理地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・連続体 	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・断層 (> 10 km) 分布 : 決定論的DFN ・断層 (1~10 km) 分布 : 確率論+決定論的DFN ・岩相分布 : 連続体 ● <u>水理地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・連続体
処分場 スケール	5 km×5 km×1.5 km	5 km×5 km×1 km	5 km×5 km×1.5 km
	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・断層 (1~10 km) : 決定論的DFN ・断層・割れ目 (<1 km) : 確率論的DFN ● <u>水理地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・連続体 	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・断層 (1~10 km) : 決定論的DFN ・岩相分布 : 連続体 ● <u>水理地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・連続体 	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・断層 (1~10 km) : 確率論+決定論的DFN ・岩相分布 : 連続体 ● <u>水理地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・連続体
パネル スケール	800 m×800 m×100 m	800 m×800 m×100 m	800 m×800 m×100 m
	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・断層・割れ目 (<1 km) : 確率論的DFN ● <u>水理地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・確率論的DFN 	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・断層・割れ目 (<1 km) : 確率論的DFN ● <u>水理地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・連続体 	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・断層・割れ目 (<1 km) : 確率論的DFN ● <u>水理地質構造モデル</u> <ul style="list-style-type: none"> ・確率論的DFN

検討対象母岩のモデル化

— 地質環境モデルの構築に使用したデータの種類 —

- 調査段階ごとに情報の質・量が異なることを考慮し、**広域スケール**では**主として全国規模で収集した地質環境情報**、**処分場～パネルスケール**では**深地層の研究施設で取得された地質環境情報を活用**

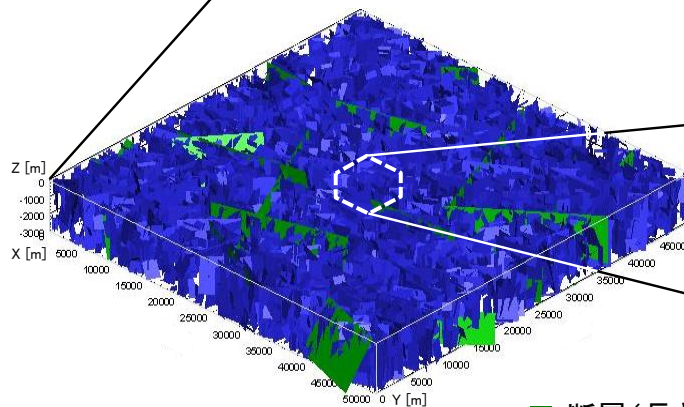
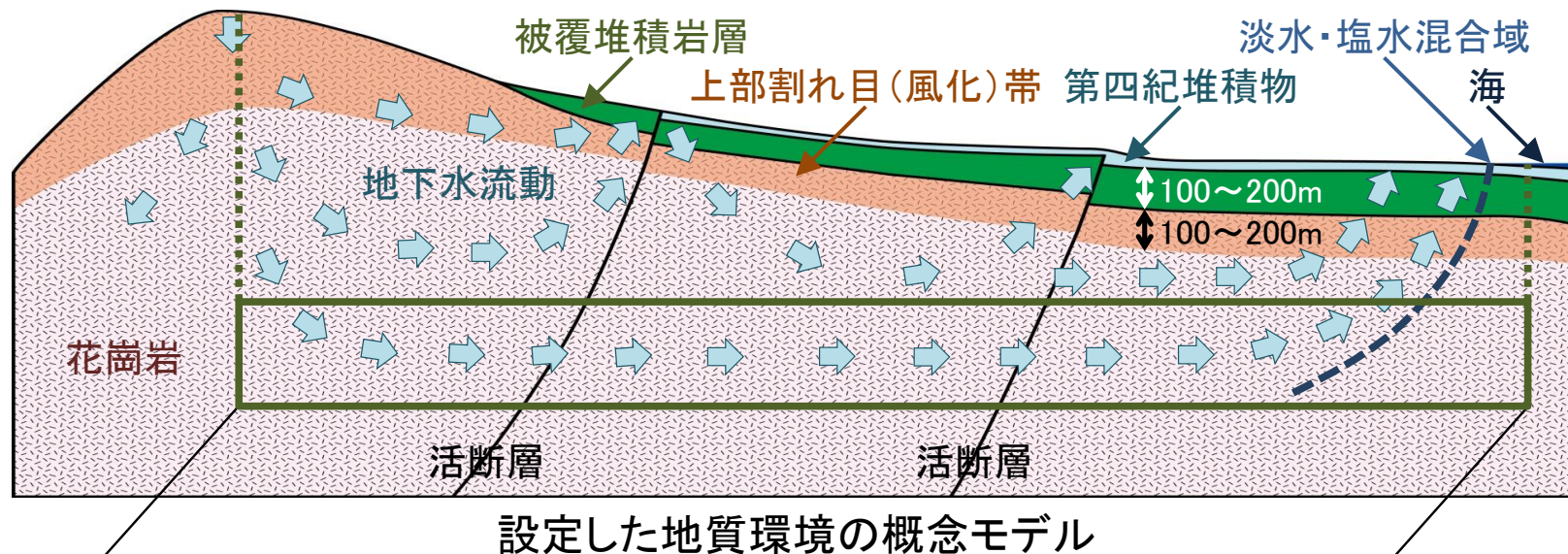
モデル	パラメータ	広域スケール (数十km×数十km)	処分場スケール (5km×5km)	パネルスケール (800m×800m)
地質構造 モデル	断層・割れ目の長さ・密度	全国規模の地質図・公開文献 深地層の研究施設のデータ		
	断層・割れ目の走向・傾斜	全国規模の地質図・公開文献 深地層の研究施設のデータ		深地層の研究 施設のデータ
	堆積岩の岩相・分布・構造	全国規模の地質図・公開文献		
水理地質 構造モデル	各地層の透水係数	全国規模のデータベース 深地層の研究施設のデータ		深地層の研究 施設のデータ
	断層（長さ1km以上）の 透水係数	全国規模のデータベース		—
	断層・割れ目（長さ1km 未満）の透水量係数	—		深地層の研究施設のデータ

* 先新第三紀堆積岩類：全国規模で収集した地質環境情報のみ

検討対象母岩のモデル化

— 地質環境の概念モデルおよび地質構造モデル —

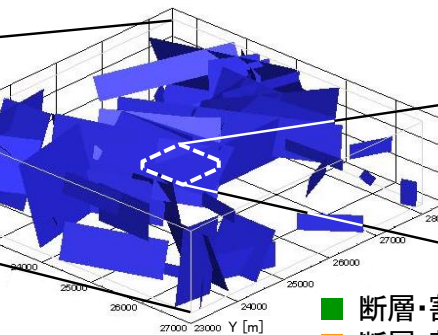
■ 深成岩類の例



(50 km × 50 km)

広域スケール

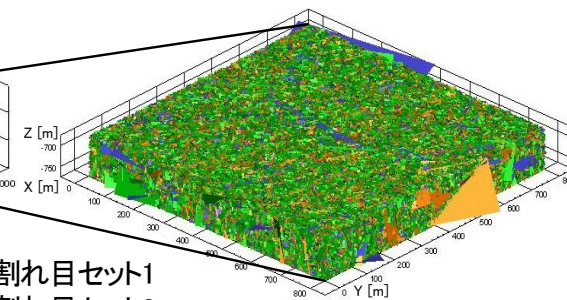
■ 断層(長さ10 km以上)
■ 断層(長さ1~10 km)



(5 km × 5 km)

処分場スケール

■ 断層・割れ目セット1
■ 断層・割れ目セット2
■ 断層・割れ目セット3



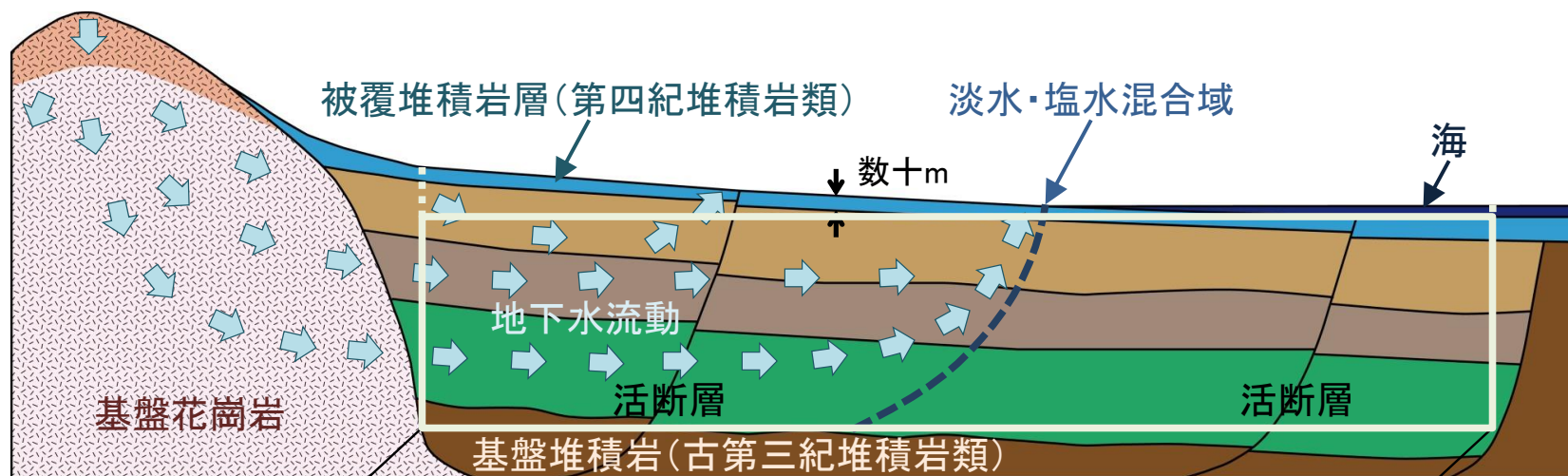
(800 m × 800 m)

パネルスケール

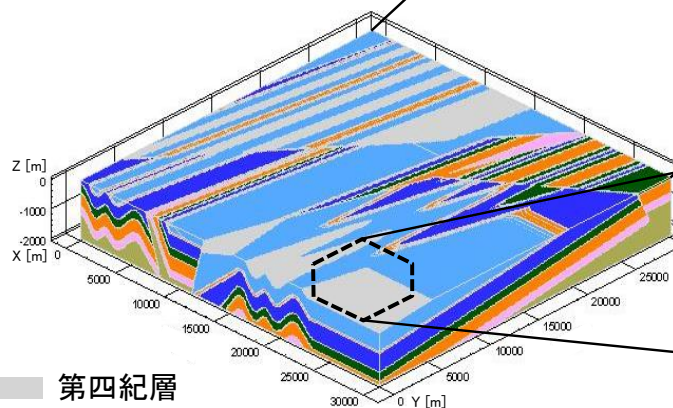
検討対象母岩のモデル化

— 地質環境の概念モデルおよび地質構造モデル —

■ 新第三紀堆積岩類の例



設定した地質環境の概念モデル



- 第四紀層
 - 上部泥岩層
 - 下部泥岩層
- (30 km × 30 km)

広域スケール

- 砂岩泥岩互層
 - 砂岩層
 - 礫岩層
 - 基盤岩
- (5 km × 5 km)

処分場スケール

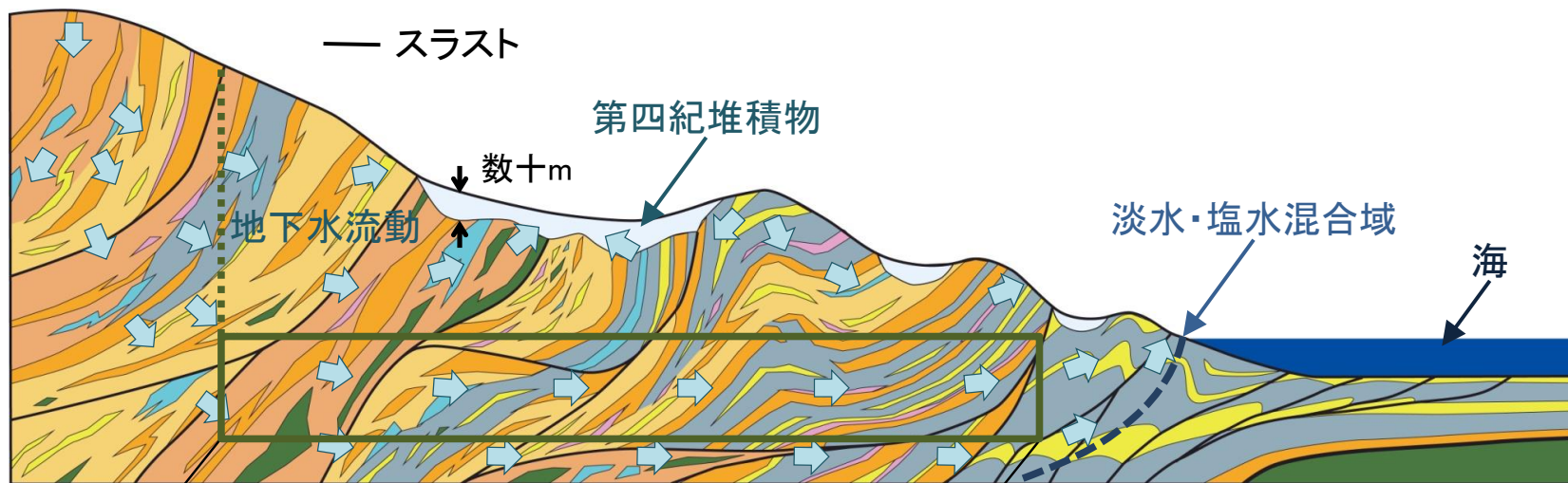
- 断層・割れ目セット1
 - 断層・割れ目セット2
 - 断層・割れ目セット3
- (800 m × 800 m)

パネルスケール

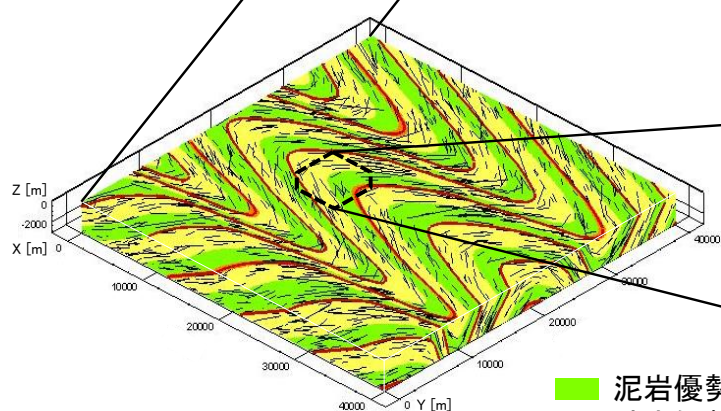
検討対象母岩のモデル化

— 地質環境の概念モデルおよび地質構造モデル —

■ 先新第三紀堆積岩類の例



設定した地質環境の
概念モデル

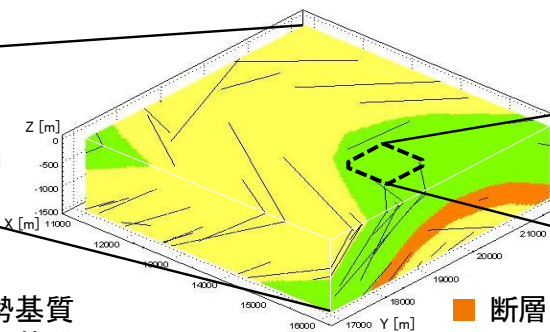


— スラスト
— 断層

(40 km × 40 km)

広域スケール

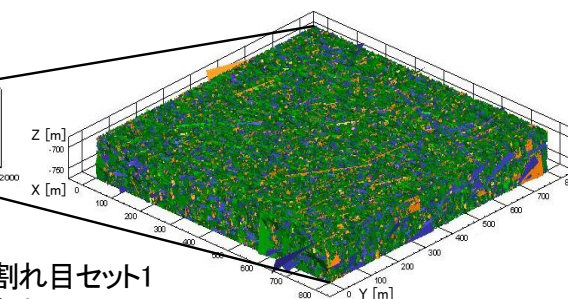
- 泥岩優勢基質
- 砂岩優勢基質
- チャート岩塊



(5 km × 5 km)

処分場スケール

- 断層・割れ目セット1
- 断層・割れ目セット2
- 断層・割れ目セット3



(800 m × 800 m)

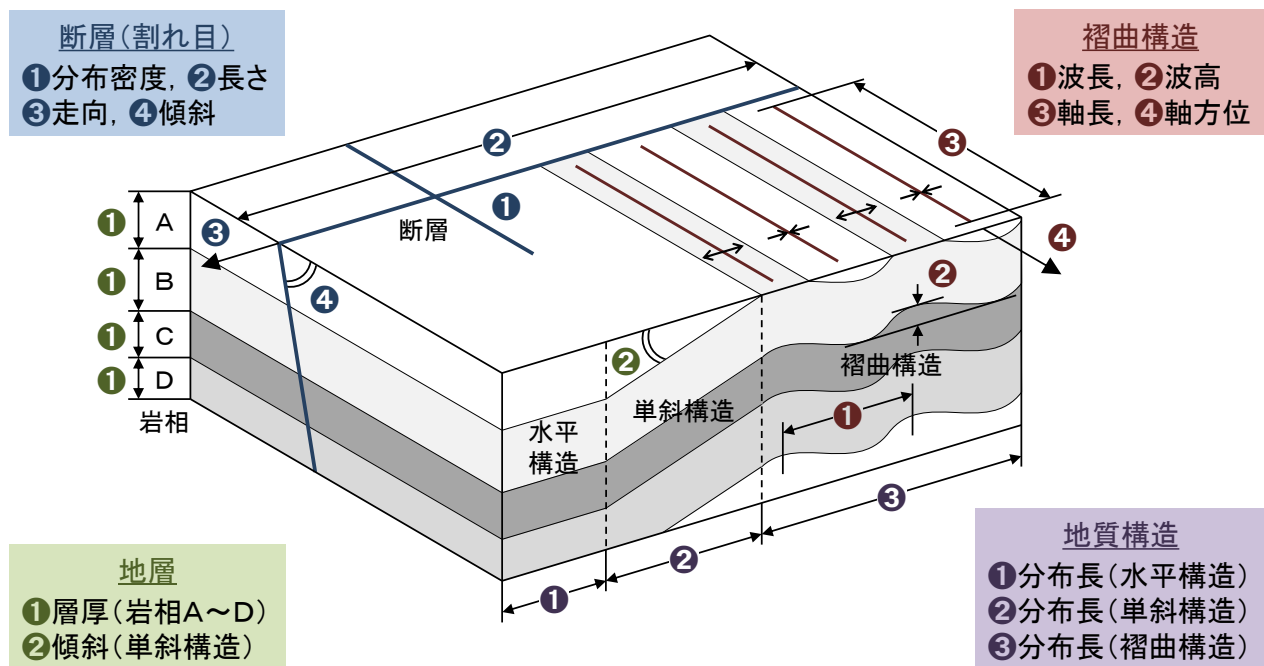
パネルスケール

検討対象母岩のモデル化

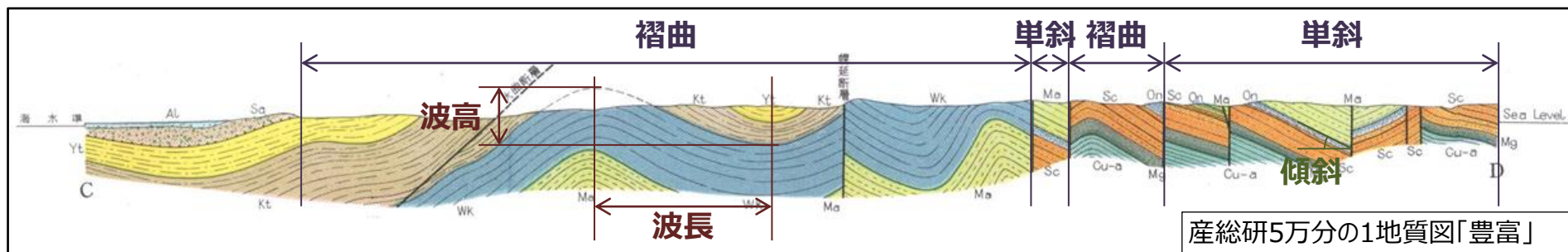
— 地質構造モデル構築のパラメータの設定 —

■ 新第三紀堆積岩類の例

- 「第四紀火山の中心から半径15km以内」を除外した範囲において、新第三紀堆積岩類分布域の約70%を対象に地質図幅の判読などにより各パラメータの値を設定



モデル入力パラメータ

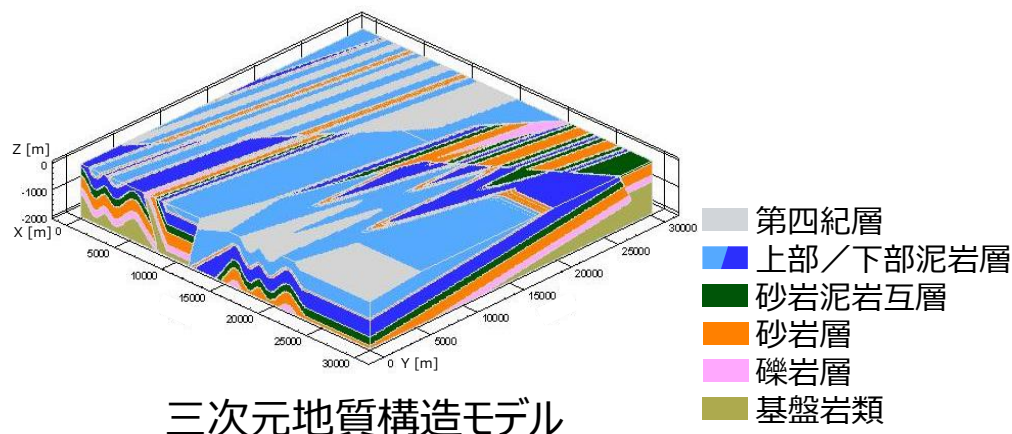


地質構造, 褶曲波長・波高, 地層傾斜

検討対象母岩のモデル化

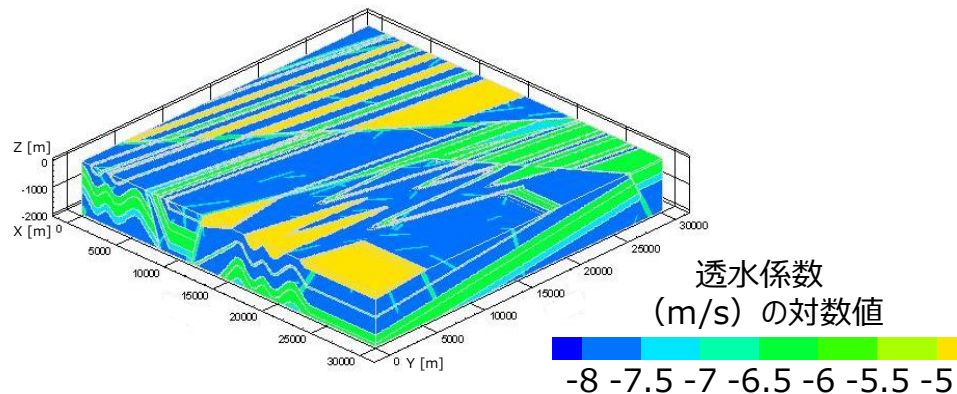
— 地質構造・水理地質構造モデルおよび地下水流動解析 —

■ 広域スケールにおける新第三紀堆積岩類の例



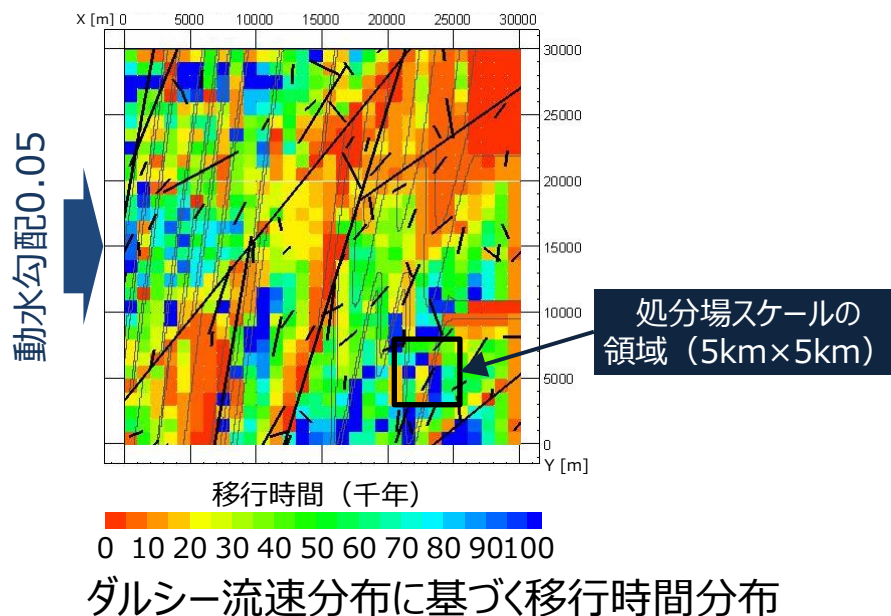
三次元地質構造モデル

- ✓ 新第三紀の広域応力場の変遷に伴う地層の傾動や褶曲構造などの地質構造の発達史および断層の形成順序を考慮



三次元水理地質構造モデル

- ✓ 異なる岩相の分布などによる水理学的特性の不均質性や断層の透水異方性が顕著ではないという調査事例を考慮



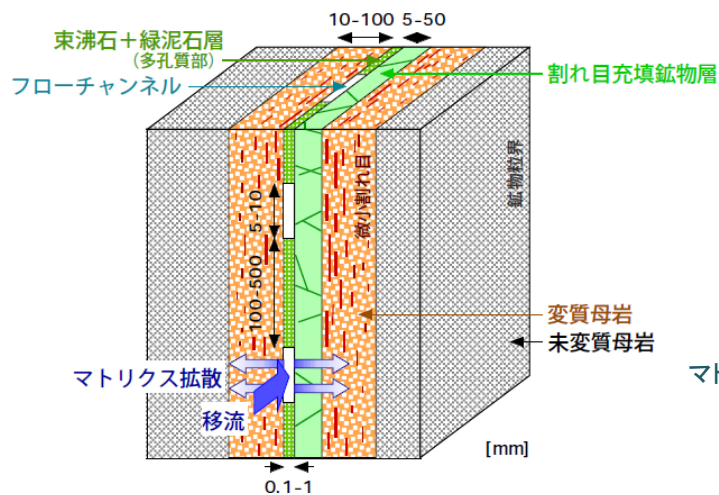
- ✓ 全国を対象とした地下水流動解析および深地層の研究施設における地質環境調査により導出された動水勾配 (0.003~0.04) よりも保守的な動水勾配 (0.05) となるように固定水頭境界を設定し、直交2方向で地下水流動解析を実施

- 処分場スケールの領域は、移行時間が相対的に大きい領域から、複雑な地質構造を対象とした処分場の設計および長期安全性の確保の検討を目的として選定

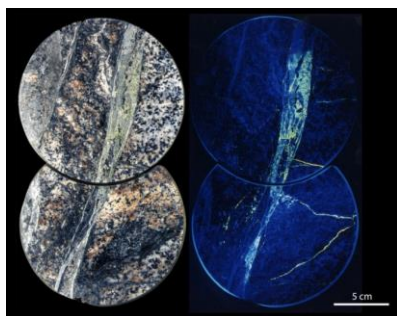
検討対象母岩のモデル化

— 微細透水構造概念モデル —

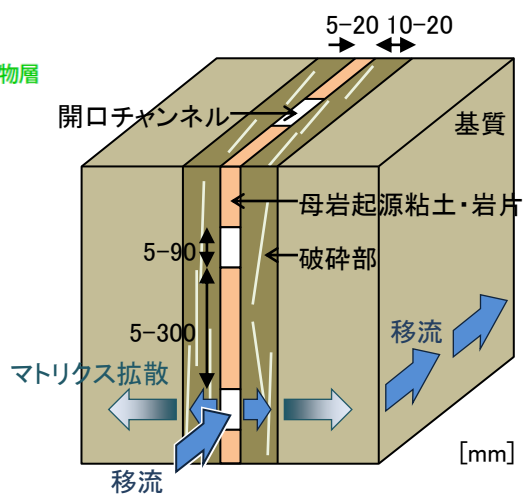
- 地質環境調査などの事例に基づき，検討対象母岩中の放射性核種の移行・遅延を支配する**微細透水構造（数cm～数十cmスケール）**の概念モデルを構築



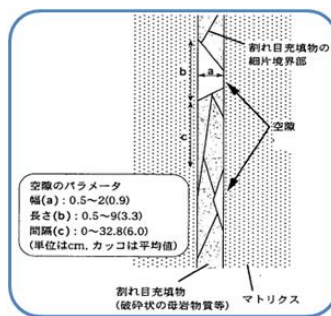
深成岩類



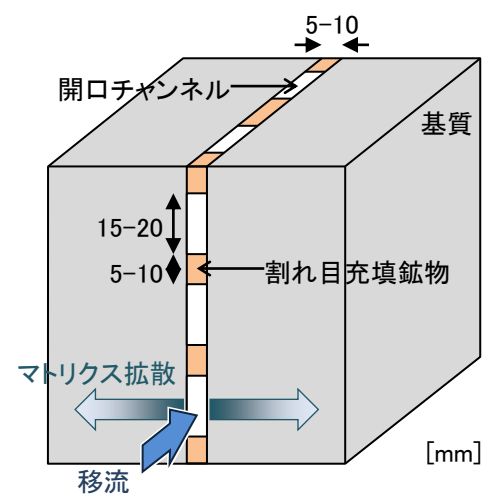
(Ota et al., 1999)



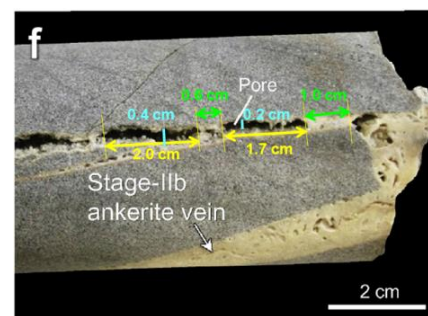
新第三紀堆積岩類



(杉山ほか, 2003)



先新第三紀堆積岩類

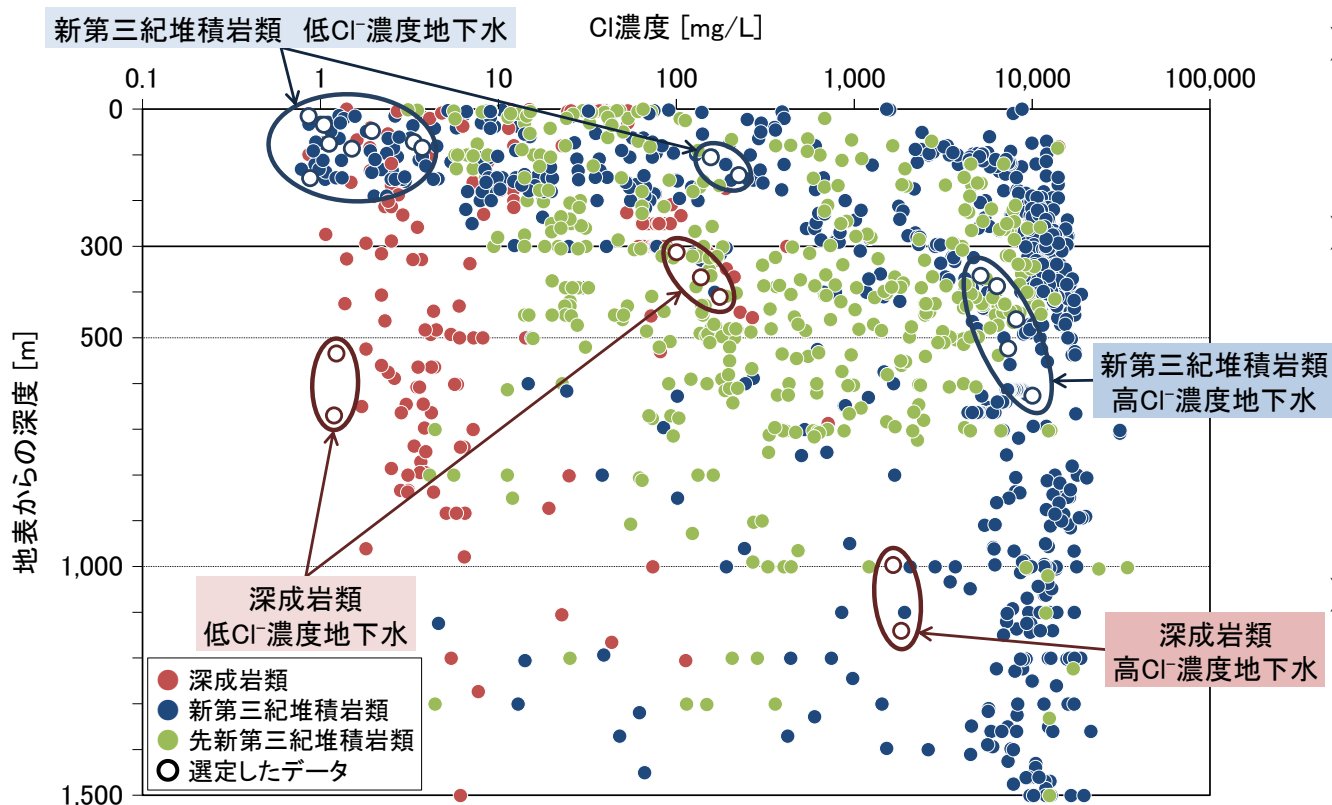


(Ono et al., 2016)

検討対象母岩のモデル化

－ モデル水質の設定 －

- 閉鎖後長期の安全性の評価においては、品質保証された地下水水質データセットに基づく検討が不可欠であることから、**品質保証された地下水水質データを選定**

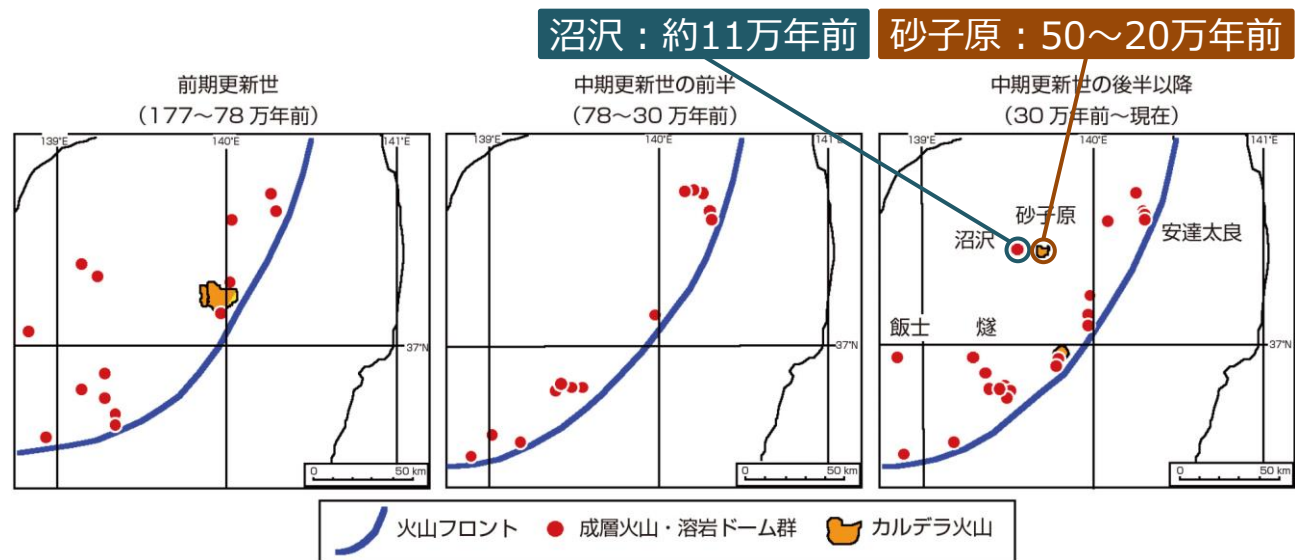


- 深成岩類の地下水および新第三紀堆積岩類の高Cl濃度地下水の水質データを選定
- 新第三紀堆積岩類については、深度300m以深に胚胎する地下水と同様の特徴（還元性雰囲気，長期間にわたり滞留）を有する低Cl濃度地下水を設定
- 先新第三紀堆積岩類については、地下水水質の幅や鉱物組成などの類似性を考慮し、新第三紀堆積岩類の地下水水質データを設定

将来における自然現象の発生可能性

— 第四紀の火山・火成活動に係る知見 —

- 火山の分布・活動は海洋プレートの沈み込みに対応しており、**火山フロントの位置は過去数百万年間にわたって安定**
- 東北日本の前弧域および四国地方では、少なくとも**過去数百万年間にわたって火山・火成活動が発生していないことを確認**



背弧域における火山活動 (山元, 2011を編集)

- 火山フロントの**背弧域**では、**火山活動域とそれ以外の領域とが識別可能**
- **過去数十万年間において**、10万年間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**新規発生事例を確認**
- 東北日本の**前弧域**および**四国地方**では、**将来10万年程度を超える期間**において、**火山・火成活動が閉鎖後長期の安全性に影響を及ぼす可能性は極めて小さいと推測**
- 火山フロントの**背弧域**では、**将来10万年程度を超える期間**において、**火山の新規発生を想定**

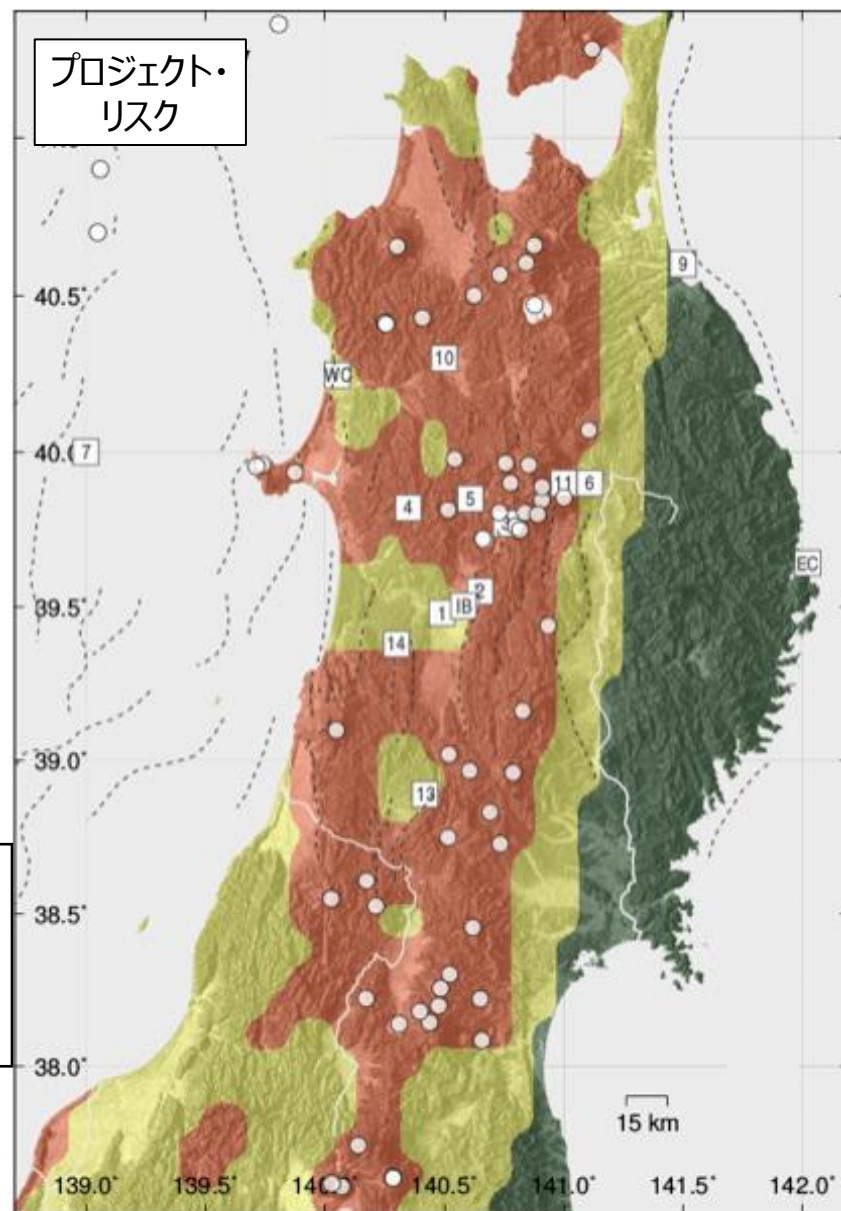
将来における自然現象の発生可能性

— 将来の火山・火成活動の発生可能性に係る知見 —

- 将来10万年程度を超える期間における**火山の新規発生**をITM-TOPAZ手法などを用いて**確率論的に評価**
- 火山フロントの**背弧域**において、「第四紀火山の中心から半径15km以内」を除外した範囲の100km²領域における**火山の新規発生の確率**は、1年あたり最大でも**1×10⁻⁶程度**

- 低：全てのモデルの発生確率が10⁻⁸/年未満
- 中：全てのモデルの発生確率が10⁻⁷/年以下で、10⁻⁸/年を超えるモデルが一つ以上
- 高：発生確率が10⁻⁷/年を超えるモデルが一つ以上

100万年間の火山の発生確率に基づく
プロジェクト・リスク (NUMO, 2017を編集)



- わが国の多様な地質環境に適用可能な、地層処分に適した地質環境の選定に係る基本的な考え方や実践的な方法論、調査・評価の技術基盤の整備について、第2次取りまとめ以降の着実な進展を提示
 - 段階的に取得する地質環境情報を地質環境モデルとして統合的に解釈・統合する技術を保有し、これを展開することが可能
 - 本報告書の取りまとめを通じて特定された技術的課題および国の審議会などで提示された技術的課題を概要調査の的確な実施の観点から網羅的に整理
 - 第2次取りまとめからの大きな進展
 - 地層処分の観点から重要となる特徴を考慮して、堆積岩を新第三紀堆積岩類および先新第三紀堆積岩類に分類し、3岩種の検討対象母岩を設定
 - 地下深部で実際に取得された地質環境情報に基づき、地下深部の地質環境の特徴を考慮して、詳細度を変えた地質環境モデルを構築
- NUMOは、段階的に進めるサイト選定における地質環境調査・評価および地質環境情報の解釈・統合を通じた地質環境モデルの構築を的確に実施し、この結果に基づく処分場の設計および安全評価の繰り返しにより、地層処分に適した地質環境の選定を可能とする技術基盤を整備

今後の取り組み

- 本報告書の取りまとめを通じて特定された技術的課題および国の審議会などで提示された技術的課題を網羅的に整理し、**概要調査を的確に実施する観点**（調査・評価技術の信頼性の向上や実証的な取り組みを通じた高度化）から**今後の課題を具体化**

分類	課題
自然現象の発生とその影響に係る今後の取り組み	<ul style="list-style-type: none">➤ 火山・火成活動の発生および影響の評価技術の高度化➤ 深部流体の移動・流入に係る現象理解および影響の評価技術の整備➤ 地震・断層活動の活動性および影響の調査・評価技術の高度化➤ 地形・地質学的情報に基づく隆起・侵食の調査・評価技術の高度化➤ 長期的な自然現象の発生可能性とその地質環境への影響に係る評価技術の高度化
地質環境特性とその長期変遷に係る今後の取り組み	<ul style="list-style-type: none">➤ 水みちの水理・物質移動特性の評価技術の整備➤ 沿岸海底下の地質環境特性の調査・評価技術の整備➤ 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化➤ ボーリング孔における体系的な調査・モニタリング・閉塞技術の整備
サイト調査のための技術基盤の強化に係る今後の取り組み	<ul style="list-style-type: none">➤ 自然現象の発生とその影響に係る科学的知見の蓄積➤ 地質環境特性とその長期変遷に係る科学的知見の蓄積➤ 地質環境調査・評価技術に係る技術的知見の拡充➤ 品質マネジメントシステムの拡充➤ 実践的な経験の蓄積

■ レビューの結果

- 幅広い地質環境データの収集・整理の結果に基づき、地層処分の観点から、わが国の多様な地質環境が具体的に類型化されるとともに、3種類の検討対象母岩の代表的な地質環境モデルとして例示されたことに加えて、地質環境モデルの構築技術が具体的に示されたことは、**サイトが特定されていない段階における第2次取りまとめ以降の着実な進展として高く評価できる**
- 包括的技術報告書第3章の上記二つの個別目標である「わが国の地質環境に係る最新の科学的知見や技術開発成果に基づき、**サイト選定における判断のための基本的な考え方や調査・評価技術を体系的に整備していることを示す**」および「**段階的に取得する地質環境情報を、処分場の設計および安全評価の基盤となる検討対象母岩の地質環境モデルとして解釈・統合できる技術を保有していることを示す**」は、レビューの視点に照らして十分な水準に達しており、**今後サイト選定を進めるための技術基盤として高く評価できる**
- 他方、わが国の自然現象および地質環境特性や地質環境調査・評価技術等に係る広範な情報を網羅しているが故に、**記述内容の論理性、客観性、可読性の観点で改善が望まれる点が存在する**

■ レビューコメントを受けた改善

- 本編および付属書のレビュー版での記述内容を、**論理性、客観性、可読性の観点で精査**し、**記述の改善**や**説明の拡充**などを実施するとともに、**関連事例や引用文献のさらなる拡充**を図り、**技術的根拠の補強**を実施

✓ 例えば

- 地層処分の原理、地質環境の長期安定性の考え方（一般的な地質学で考える時間・空間スケールとの違い）など、第2次取りまとめで既に示されている地層処分の基本的な考え方について、変動帯に位置するわが国にとって重要な議論であることを考慮し、**付属書を追加**
- 地質環境モデルを構築する際の前提条件を明確化するために、目次構成を見直し、**説明を拡充**
- 断層や岩盤の割れ目の情報を地質環境モデルとして表現する手法の妥当性を示す根拠として、事業が先行するフィンランドやスウェーデンにおける地質環境モデル作成の方法・結果、規制機関によりその妥当性を確認している**事例を追加**

OECD/NEALレビュー結果の要点（技術的提言）

- 地質環境モデルを用いるアプローチを継続して、**サイト選定プロセスのさまざまな段階で地球科学知識を取得するたびに反復的にそれを統合することを推奨する**。そのようなアプローチは、さまざまな応募サイトを通じて一貫性のある学際的な説明を可能にすると思われる。
- NUMOの全体的な戦略は、地層処分は、その個々の構成要素が必要とされるさまざまな機能を果たすシステムとしてのみ評価し得るという確固とした洞察に基づいている。この観点から、特に研究やサイト評価の段階では、地圏の役割が重要になる。**核種移行を適切に遅延させる地質媒体の能力は、サイト固有の評価の際に、より詳細に考慮されなければならない、それが判別基準となる可能性がある。**

https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_77138/the-nuclear-waste-management-organization-of-japan-s-pre-siting-safety-case-based-on-the-site-descriptive-model-an-international-peer-review-of-the-numo-safety-case

https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_82280/-numo

■ 全体

- 新第三紀・先新第三紀火山岩と変成岩については、3つの代表的な地質環境モデルがこれらの岩種の特性をカバーすると考えられるため、この段階では特定の地質環境モデルを詳しく説明しない方針が取られている。ただし、**フィールドデータが入手可能になった際には、これら代表的な地層の特性を火山岩や火成岩の地層と区別することが推奨される。**
- 主に「自然現象による擾乱」、すなわち内的小よび外的な地球力学と、隔離という安全機能に関連する天然資源の存在に基づいて、サイト選定が行われることが想定されている。母岩の形状、透水性、強度、熱伝導率など、閉じ込めにある程度関連するパラメータは、よく特徴付けられ、地質環境モデルに含まれている。ただし、透水構造の分布と水理特性を除き、候補サイトの除外や、サイトの比較、または候補領域における処分場の設置場所の最適化に関しては、これら閉じ込めに関連するパラメータは考慮されていない。**閉じ込めに関連するパラメータに関しては、地層処分の主な機能を代表する定量的または定性的な基準がサイト選定にあたって適したものとなる可能性がある。競合サイトが複数ある場合、これらのタイプの基準は、それぞれの性能に基づいてサイトをさらに比較するのにも適したものとなりうる。**

■ 地質環境が処分場の安全確保に果たす役割

- **気候変動の影響も言及されており、特にこれは、水理地質構造および地下水の地球化学の状況に関連して、将来の安全評価において具体的に開発していく価値がある。**地層処分のための地質環境の適合性基準は依然として、特に、より定量的な基準で開発される必要がある。課題の1つは、適切な設計と建設時の対策によって特定の弱点を補うことで、適切なサイトとすることができるかどうかを評価することである。これは、サイト自体ではなく、サイトと処分される廃棄体パッケージ、およびすべての人工システム（人工バリアと全体的な構造物）を含む「処分システム」の一部として考慮することを意味する。
- **地質媒体の物理的特性の中では、地質パラメータの観点からだけでなく、処分システムの枠組みの中で考慮すべきものもいくつかある。すべてが連成プロセスの結果であるため、こうした考え方が不可欠である。**例えば、熱の問題は、地質環境、パッケージの力学強度（TRU廃棄物を含む）、換気または埋め戻し材に関連する地球化学的な影響にも関係する可能性がある。

■ 地層処分に適した地質環境の選定プロセス

- **関連するすべてのプロセスとカップリングが考慮**される。後続段階では、微生物活動の役割もさらに詳しく調査されるかもしれない。
- 地質環境モデルに基づくセーフティケースに記載されている全体的な処分場の構造は、まだ一般的なものである。深成岩類の場合、処分坑道の向きは動水勾配に基づいている。立坑、斜坑、処分パネルなど、設置される他の構成要素も同様に検討されなければならない。さらに、立坑か斜坑かという選択肢も、特に表層の帯水層との関連で分析する必要がある。
- 新第三紀堆積岩類は、非常に低い強度、比較的高い熱伝導率、および高い透水性といった特徴を有する。これらは処分場の大きさに深くかかわるパラメータであり、サイト毎に大きく異なる場合がある。したがって、おそらく他の岩種タイプよりも、こうした変化に対する設計は、実際の場合に合わせて適応させる必要があるだろう。

■ 検討対象母岩のモデル化

- 新第三紀・先新第三紀火山岩と変成岩に関しては、特定の地質環境モデルが詳しく説明されているわけではないが、これら岩種の特徴をカバーする代表的な3種類の地質環境モデルが検討され、セーフティケースのための設計と安全評価に使用されている。具体的なサイトについては、文献調査と特性評価に基づいてそれぞれの地質環境モデルが構築される。**サイト固有の地質環境モデルに応じ、特に最適化のために避けられない反復的な検討においては、設計と安全評価のアプローチを適切に連携させる必要がある**だろう。透水性は、さまざまな地質構造にとって重要なパラメータであり、閉鎖後の閉じ込め機能の点で大きな判別要因となる可能性がある。したがって、すべてにほぼ同じ値を使うのではなく、最も可能性の高い代表値を使用することが推奨される。この問題は、特に花崗岩のような割れ目系岩盤の場合は、スケール効果を考慮する必要があるかもしれない。



ご清聴ありがとうございました

