

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

**セッション2 地層処分に適した  
地質環境の選定およびモデル化**

NUMO包括的技術報告書（レビュー版）に関する外部専門家向け説明会

原子力発電環境整備機構（NUMO）

太田 久仁雄

# 第3章の目的とアプローチ

## ○目的

わが国の**多様な地質環境**を対象に、**三段階のサイト選定**における地質環境調査・評価および地質環境モデルの構築を通じて、**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**が整っていることを提示

## ○アプローチ（再掲）

- 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提示**
- 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母岩の地質環境モデルとして解釈・統合する技術を保有し、これを展開することが可能であることを提示
- 科学的特性の提示に係る要件・基準に関する議論を踏まえつつ、全国規模で収集した最新の地質環境情報などをもとに、わが国の多様な地質環境を処分場の設計および安全評価の観点から重要となる特徴に着目して類型化し、**検討対象とする母岩を設定**
- それぞれの検討対象母岩について、**全国規模で収集した地質環境データを用いて**、断層の存在などの現実的な地質環境条件を考慮しながら、処分場の設計および安全評価の検討の基盤となる**地質環境モデルを提示**



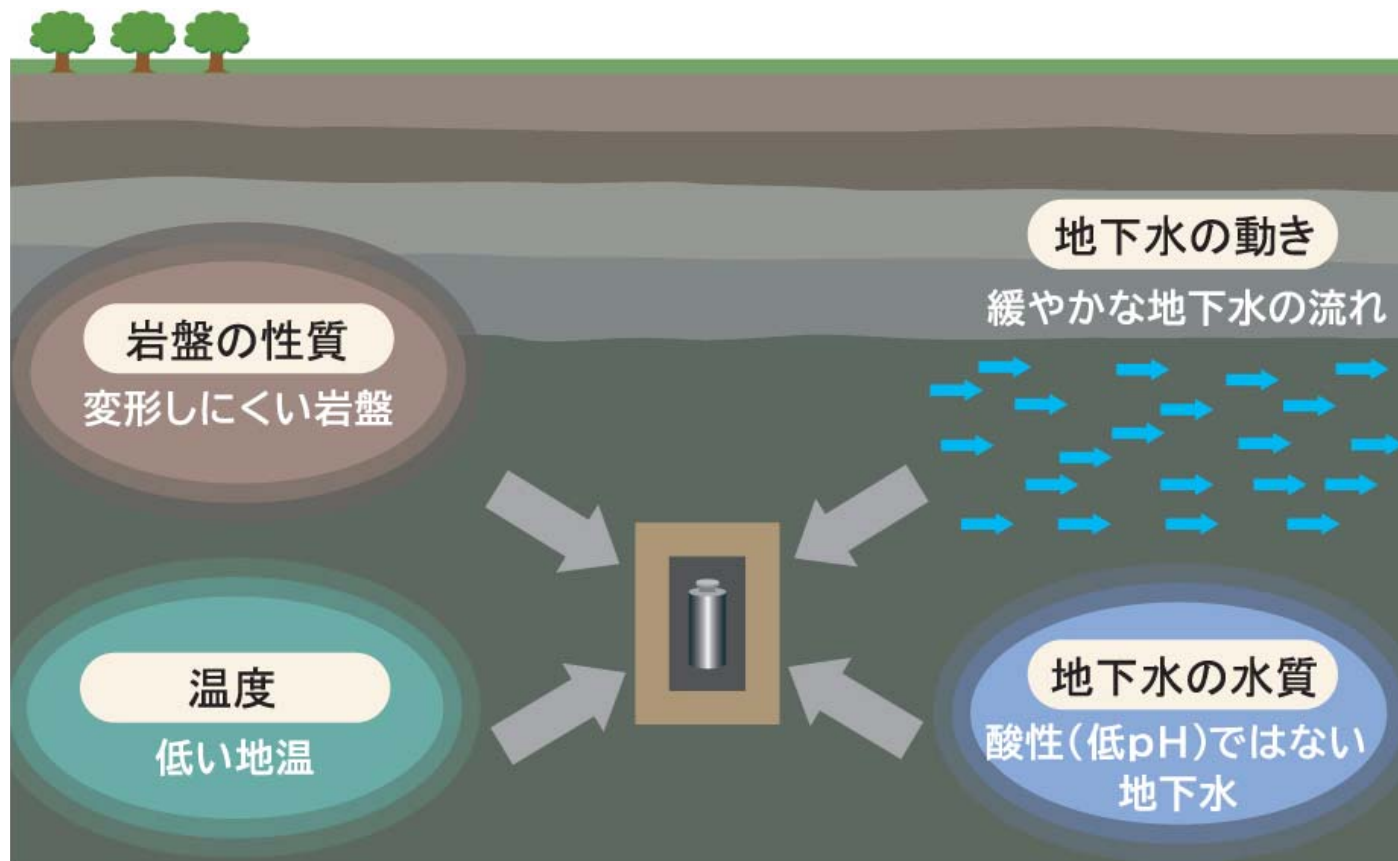
# 説明内容（地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化）

---

- 1 地質環境が安全確保に果たす役割（3.1節）
- 2 地層処分に適した地質環境の選定プロセス（3.2節）
- 3 検討対象母岩のモデル化（3.3節）
- 4 将来における自然現象の発生可能性（3.4節）
- 5 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
- 6 まとめと今後の取り組み（3.5節）

# 地質環境・地質環境特性とは？

- **地質環境**は、**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**は、**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

# 三段階のサイト調査とは？

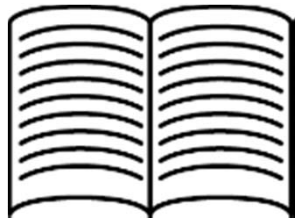
処分地の選定に向けた**法律に基づく**三段階の調査

文献調査

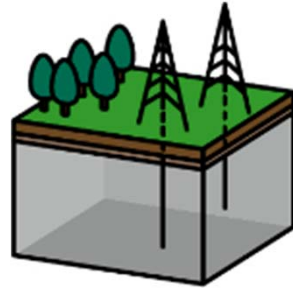
概要調査

精密調査

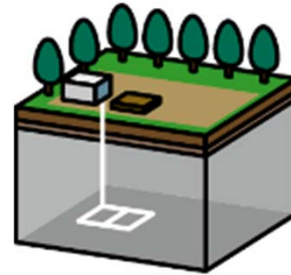
処分地の選定



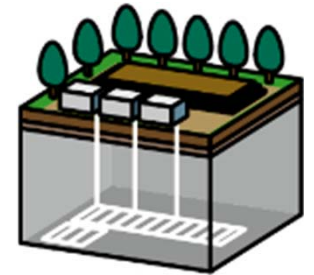
文献の収集・調査



地表での物理探査や  
ボーリング調査



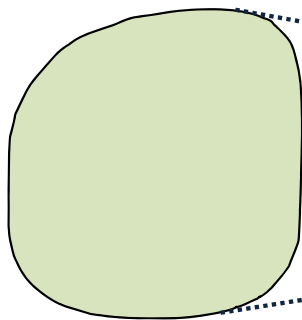
地下調査施設での  
原位置試験・調査



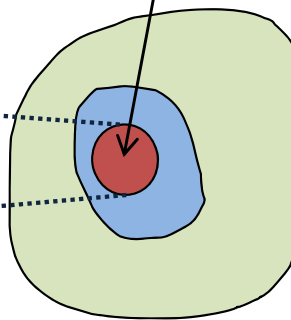
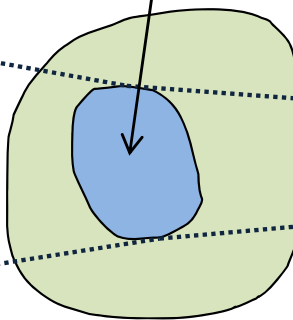
文献調査範囲

概要調査地区

精密調査地区



数十km



数km程度

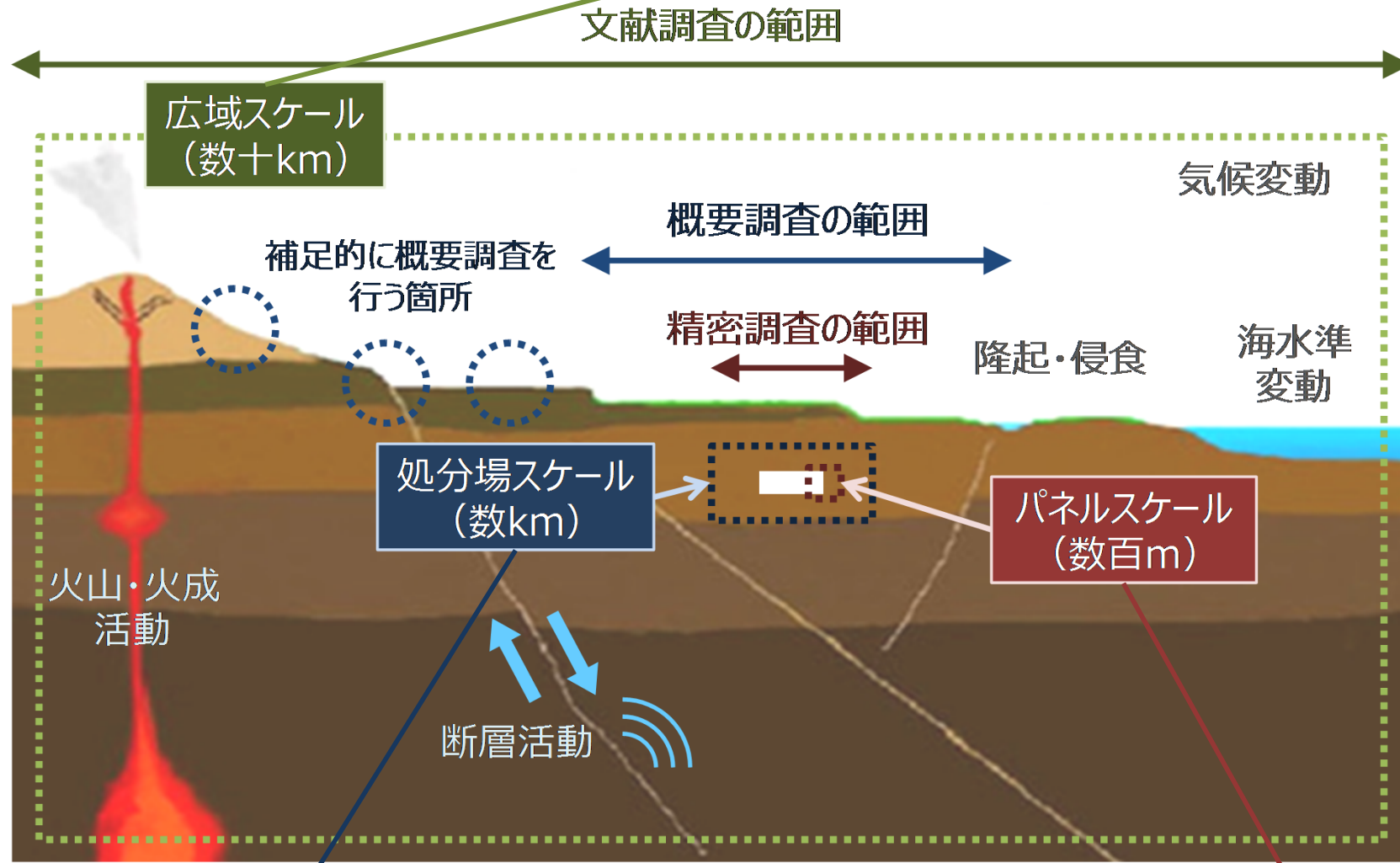
明らかに適性の  
劣る場所の除外

安全性が確保できる  
場所の存在の確認

安全性が確保  
できる母岩の確認

# 調査段階と空間スケールとの関係は？

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



地下深部における地層処分の観点から好ましい地質環境特性とその長期安定性を確認する範囲

処分場スケールの領域において処分パネルを設置する範囲

# 報告書の論証構造（その1）

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提示するための論拠として…

- ✓ 地質環境に**求められる要件**が整理されている
- ✓ 各要件に**影響を及ぼす要因**が特定されている
- ✓ 各要因に対する**サイト選定上の対応方針**が整備されている
- ✓ わが国に地層処分に適した**地質環境が存在**する
- ✓ 地層処分に適した地質環境を選定するための**基本的な考え方**が整備されている
- ✓ サイト調査の**項目や方法論**が整備されている
- ✓ サイト調査の**各段階の進め方**が整備されている
- ✓ サイト調査に用いる**調査・評価技術**が整備されている
- ✓ サイト調査に必要な**技術力**を保有している

3.1.1項

3.1.2項

3.1.3項

3.1節 「地質環境が安全確保に果たす役割」  
**説明内容 1**

3.2.1項

3.2.2項

3.2.3項  
(3.3節)

3.2節 「好ましい地質環境の選定プロセス」  
**説明内容 2**

# 説明内容（地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化）

## 1 地質環境が安全確保に果たす役割（3.1節）

2 地層処分に適した地質環境の選定プロセス（3.2節）

3 検討対象母岩のモデル化（3.3節）

4 将来における自然現象の発生可能性（3.4節）

5 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映

6 まとめと今後の取り組み（3.5節）



- ① 地質環境に求められる要件が整理されている
- ② 各要件に影響を及ぼす要因が特定されている
- ③ 影響要因に対するサイト選定上の対応方針が整備されている
- ④ 地層処分に適した地質環境が存在する



# ①②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」・「とりまとめ」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

地質環境に求められる要件	影響要因
母岩が第四紀の <b>未固結堆積物ではない</b> 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 <b>影響を及ぼす事象</b> の発生可能性が <b>小さい</b> 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 <b>安全性を損なう事象</b> の発生可能性が <b>十分に小さい</b> 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 <b>影響を及ぼす事象</b> の発生可能性が <b>小さい</b> 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

\* 地層処分技術WG「中間とりまとめ」：総合資源エネルギー調査会（2014），地層処分技術WG「とりまとめ」：総合資源エネルギー調査会（2017）

# ①②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WG「中間とりまとめ」・「とりまとめ」およびIAEA（2011）の安全要件を踏まえて、**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	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 <b>自然現象が生じない</b> こと	火山・火成活動，隆起・侵食
	人間接近の抑制	経済的価値の高い <b>鉱物資源が存在しない</b> 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： <b>地温が低い</b> こと	火山性熱水・深部流体の移動・流入
		水理場：動水勾配が小さいまたは岩盤の透水性が低いことにより <b>地下水流動が緩慢である</b> こと	地震・断層活動，隆起・侵食
		力学場：圧縮強さや弾性率が大きく，クリープ変形などが小さいことにより <b>岩盤の変形が小さい</b> こと	地震・断層活動
		化学場：地下水は， <b>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</b> 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

### ③閉鎖前の影響要因に対するサイト選定上の対応方針

- 閉鎖前の**安全確保**における**影響の程度**を考慮し、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**対応方針**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 <b>地域の除外</b>		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の発生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"> <li>➤ 操業期間中の影響の程度・範囲の把握</li> <li>➤ <b>影響を低減</b>するための<b>情報化施工技術の適用</b>や<b>地上施設の設置位置の検討</b></li> </ul>		広域	
					処分場
					パネル
地上施設の安全性を損なう事象の発生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"> <li>➤ 操業期間中の影響範囲の把握</li> <li>➤ <b>影響を回避</b>するための<b>地上施設の設置位置の検討</b></li> </ul>		広域	
					処分場

### ③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**対応方針**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"> <li>➤ 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</li> <li>➤ 地温が低いこと</li> <li>➤ 地下水流動が緩慢であること</li> <li>➤ 岩盤の変形が小さいこと</li> <li>➤ 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</li> </ul>	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"> <li>➤ <b>著しい影響</b>が及ぶ<b>範囲の除外</b></li> <li>➤ 適格性が<b>劣る</b>地質環境特性の<b>範囲の除外</b></li> </ul>	広域	処分場	パネル
		<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>緩慢・累積的な影響</b>に伴う地質環境特性の<b>長期変遷の把握</b></li> <li>➤ 影響を考慮した適切な<b>工学的対策の検討</b></li> <li>➤ <b>安全評価</b>による放射性物質の溶出・移行抑制<b>機能の維持の確認</b></li> <li>➤ 放射性物質の溶出・移行抑制機能が<b>期待できない場合は、当該サイトの除外</b></li> </ul>	広域	処分場	パネル
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	経済的に価値が高い鉱物資源が地下に存在する <b>範囲の除外</b>	広域	処分場	

## ④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 <b>3~5°C/100m</b> 程度
水理場	地下水流動が緩慢であること	動水勾配は <b>0.001~0.01オーダー</b> 、透水係数は <b>10<sup>-12</sup>~10<sup>-6</sup>m/sオーダー</b> 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 <b>設計で対応可能な範囲内</b>
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、 <b>pH6~9程度</b> で還元性雰囲気が維持され、炭酸化学種濃度は <b>最大0.1mol/L</b> 程度

## ④地層処分に適した地質環境の事例

### ■ 好ましい地質環境特性が長期にわたり維持されている事例として・・・

- 幌延地域では、隆起・侵食や海水準変動などの影響を被ったにもかかわらず、地下深部の**低透水性の堆積岩**中には年代が**数百万年程度の古い地下水**が滞留しており、地下水の**pH・還元環境が長期にわたり維持**（例えば、中田・長谷川，2010；岩月ほか，2009）
  - 横須賀地域および釧路地域では、泥岩などの**低透水性の岩盤**中には年代が**数百万年程度の古い地下水**が滞留しており、**地下水流動が極めて緩慢**（例えば、馬原ほか，2006；長谷川ほか，2013）
  - 東濃地域では、断層運動や隆起・侵食などの影響を被ったにもかかわらず、新第三紀**堆積岩**中の**pH・還元環境が長期にわたり維持**され、ウラン鉱床が約1,000万年間保持（例えば、Sasao et al., 2006）
  - 東濃地域では、基盤の白亜紀**花崗岩**中の地下水の化学環境には現在までに多少の変化が認められるものの、地下深部では**還元環境は大きな変化がなく維持**（例えば、水野・岩月，2006）
- わが国の地下深部には**好ましい特性を有する地質環境**が確認されている地域が存在し、そのような地域は**広く分布**すると推測

# 説明内容（地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化）

- 1 地質環境が安全確保に果たす役割（3.1節）
- 2 地層処分に適した地質環境の選定プロセス（3.2節）**
- 3 検討対象母岩のモデル化（3.3節）
- 4 将来における自然現象の発生可能性（3.4節）
- 5 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
- 6 まとめと今後の取り組み（3.5節）



- ①地層処分に適した地質環境の選定の基本的な考え方が整備されている
- ②サイト調査の項目や方法論が整備されている
- ③サイト調査の各段階の進め方が整備されている
- ④サイト調査に用いる調査・評価技術が整備されている
- ⑤サイト調査に必要な技術力を保有している

# ①地層処分に適した地質環境の選定の基本的な考え方

- **変動帯**に位置し，さまざまな**自然現象**が繰り返しあるいは継続的に発生しているわが国において，地層処分にとって**好ましい特性が長期にわたり維持される地質環境**を選定
- **過去から現在**までの地質学的現象を正しく**観察**することにより，**現在**生じている現象の**理解**を深め，**将来**の現象を**推測**することを基本



- 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，**明らかに適性が劣るサイト**を法定要件や科学的特性マップの要件・基準に基づき**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も**緩慢かつ累積的な影響を考慮**する必要があることから，地質環境特性の時間的・空間的な変遷を把握し，好ましい地質環境特性の**安定的な維持を確認**
- 3 将来の発生可能性が極めて小さい事象でも，安全機能への**著しい影響が想定**される場合は，当該**事象の発生**とそれに伴う**地質環境の状態変化**の起こりやすさを確率論的に**評価**



## ②サイト調査の項目

- 自然現象の影響の回避，処分場の工学的実現性および閉鎖後長期の安全性の確認における**不確実性の低減**を図るために**調査・評価すべき項目**（要求事項）を特定

調査・評価の目的	求められる調査・評価の項目	
自然現象の影響の回避の確認	火山・火成活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 第四紀火山からのマグマの移動の可能性・範囲</li> <li>➤ 火山（マグマ供給系）の新規発生の可能性・範囲</li> </ul>
	火山性熱水・深部流体の移動・流入	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 将来の熱水・流体による熱的・化学的影響の範囲・規模</li> </ul>
	地震・断層活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 活断層の分布および現在から将来の活動性</li> <li>➤ 断層運動に伴う水理学的・力学的影響範囲</li> <li>➤ 地震活動に伴う地質環境の変化</li> </ul>
	隆起・侵食	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 将来の隆起・沈降量</li> <li>➤ 将来の侵食量および地形変化</li> <li>➤ 気候・海水準変動</li> </ul>
処分場の工学的実現性の確認 および 処分場の閉鎖後長期の安全性の確認	地質構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 地下水移行経路として重要な地質構造の空間分布・形状</li> <li>➤ 地層・岩体の空間分布・形状</li> <li>➤ 地層・岩体中の岩相・割れ目の空間分布</li> <li>➤ 放射性核種の移行・遅延の場となる微細透水構造の形状</li> </ul>
	熱環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 地温の空間分布</li> <li>➤ 地層・岩体が有する熱的特性</li> </ul>
	水理場	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 水理学的に重要な構造の空間分布</li> <li>➤ 地下水流動域および拡散支配域の空間分布</li> <li>➤ 地層・岩体および水理学的に重要な構造が有する水理学的特性</li> <li>➤ 地層・岩体および水理学的に重要な構造が有するガス移行特性</li> <li>➤ 水頭および水温の空間分布</li> <li>➤ 微細透水構造が有する放射性核種の移行・遅延特性</li> </ul>
	力学場	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 地層・岩体および断層・割れ目が有する物理的特性</li> <li>➤ 地層・岩体および断層・割れ目が有する力学的特性</li> </ul>
	化学場	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 地下水の水質・同位体比の空間分布</li> <li>➤ 地下水のpH・Eh（酸化還元電位）の空間分布</li> <li>➤ 地層・岩体中および地下水中のガスの性質・分布</li> <li>➤ コロイド・有機物・微生物の化学的影響</li> <li>➤ 微細透水構造が有する放射性核種の移行・遅延特性</li> </ul>
	地質環境特性の長期変遷	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 広域応力場の変遷</li> <li>➤ 地形および地質構造の発達</li> <li>➤ 地下水流動域およびその水理学的特性の時間変化</li> <li>➤ 地下水の水質形成機構および時間変化</li> <li>➤ 地層・岩体が有する熱的・物理的・力学的特性の時間変化</li> </ul>

## ②サイト調査の方法論

- 三段階のサイト調査において、空間スケールおよび対象とする事象やプロセスなどを絞り込みつつ、その詳細度を高めながら展開するため、関係研究機関によりその適用性が確認されたサイト調査の**基幹となる方法論**として…
  - **繰り返しアプローチ**を適用し、地質環境の理解に係る不確実性を把握するとともに、処分場の工学的実現性および閉鎖後長期の安全性に**大きな影響を及ぼす因子**（構造やプロセス）を特定し、次段階でその構造やプロセスを優先的に調査・評価することにより**段階的に不確実性を低減**
  - **地質環境情報の統合化**（Geosynthesis）の手法を適用し、分野間の整合性やスケール間の連続性に留意しながら地質環境情報を解釈したうえで**地質環境モデルとして統合**することにより、地質環境の理解や不確実性の程度に係る認識を処分場の設計や安全評価と共有
- 三段階のサイト調査において、一貫性のある**品質マネジメント**を実践することにより、地質環境調査・評価とその成果物が**要件や要求事項を満足**することを確認
- 三段階のサイト調査において、サイト環境条件に応じてその時点で**利用可能**であり、目的に対して**最適かつ最も信頼性の高い技術**を適用して地質環境調査・評価を実施

### ③サイト調査の段階的な展開

**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**

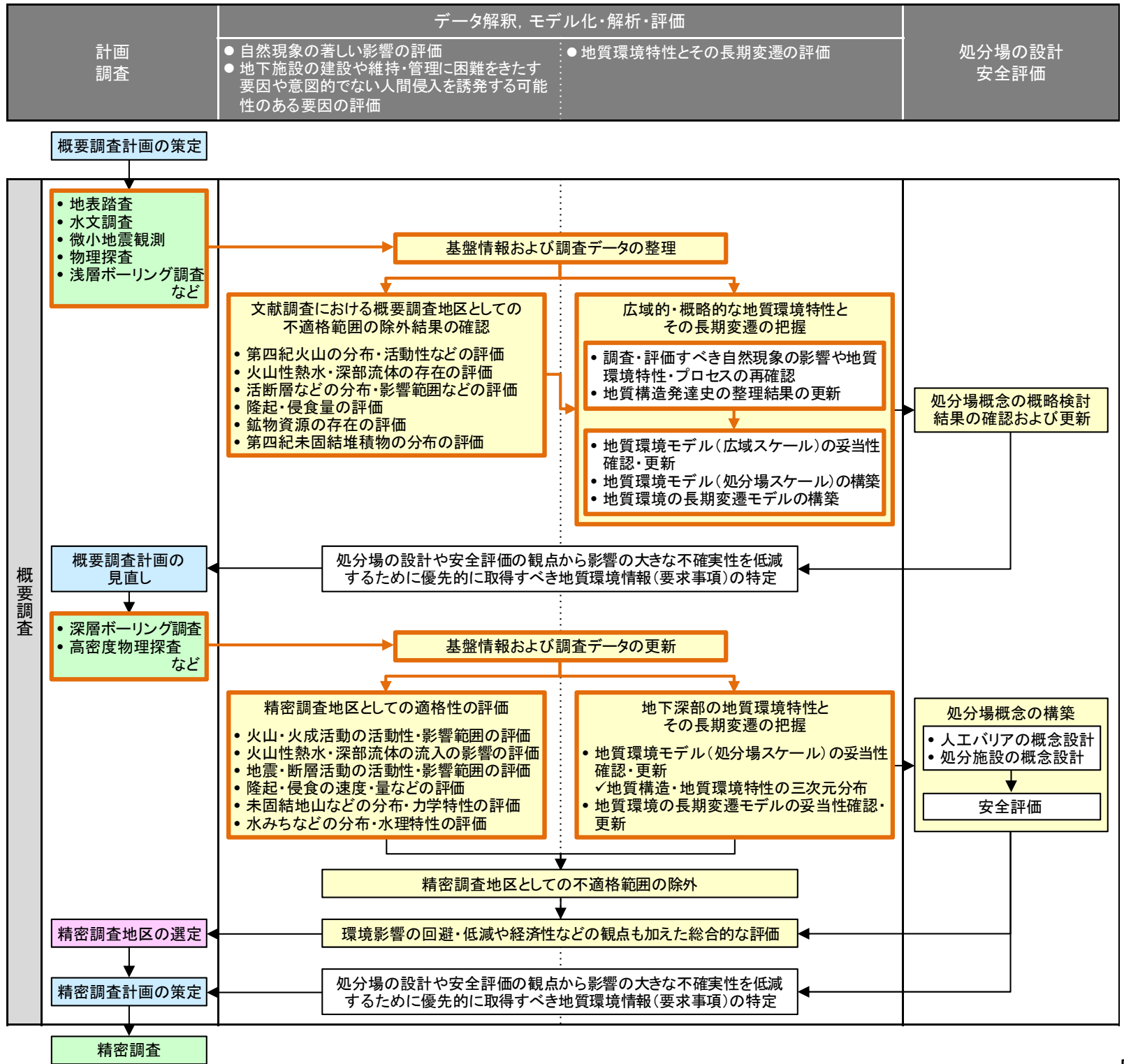
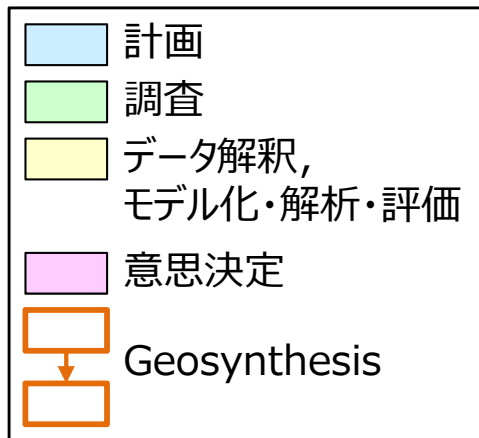


**精密調査の段階**：精密調査地区において，地表から調査や地下調査施設での試験を通じて，**候補母岩の特性に係る不確実性の低減**とともに，処分場・パネルスケールの地質環境モデルの詳細化を図り，閉鎖後長期の安全評価の結果を踏まえて候補母岩の**地層処分への適性を確認**

# ③サイト調査の各段階の進め方

■ 地層処分に適した地質環境の選定の**基本的考え方**および**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



# ④ サイト調査に用いる調査・評価技術の整備 (1/2)

■ 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

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"> <li>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</li> <li>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</li> <li>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</li> </ul>
	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"> <li>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</li> <li>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／時間変化や持続性の評価に係るモデルの信頼性向上が課題</li> </ul>
火山性熱水・深部流体の移動・流入	将来の熱水・流体による熱的・化学的影響の範囲・規模に係る調査・評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>火山性熱水の熱的・水理学的・地球化学的な影響の調査・評価は地熱資源分野で開発された技術の適用が可能</li> <li>深部流体などの分布、化学・同位体組成の特徴と判定方法および断層・構造線との関連性に係る知見は限定的／知見の拡充が課題</li> <li>深部流体などの有無や関連する地質構造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</li> <li>深部流体の分布特性の把握、上昇経路としての断裂系の検出や影響の程度や範囲の評価などを含む体系的な調査・評価技術の整備が課題</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>陸域における地形判読、測地観測、地表地質踏査、トレンチ調査、物理探査、ボーリング調査などの個別技術は整備</li> </ul>

調査・評価技術		現状の技術レベル・課題
地質構造	地下水移行経路として重要な地質構造の空間分布・形状に係る調査・評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>陸域における物理探査やボーリング調査、坑道壁面調査などを組み合わせた調査技術は事例研究などを通じて整備</li> <li>断層の空間分布の把握に係る三次元物理探査手法は資源開発などで整備／サイト調査技術の整備の観点から調査事例の蓄積が課題</li> <li>海陸接合部の断層などを対象とした物理探査手法は整備／データ解析手法などの高度化が課題</li> <li>沿岸部海域における調査技術は資源開発や学術調査などを通じて整備／サイト調査技術の整備の観点から適用性確認が課題</li> </ul>
	地層・岩体の空間分布・形状に係る調査・評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>処分場スケールにおける断層や透水性割れ目などの連続性に係る個別の調査技術は整備／体系的な調査・評価技術の適用性確認が課題</li> </ul>
	地層・岩体中の岩相・割れ目の空間分布に係る調査・評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>ボーリング孔の掘削・調査技術は事例研究などを通じて整備／脆弱層を挟在する岩盤を対象とした技術の高度化が課題</li> <li>微細な割れ目などの検出技術は基本的に整備／泥水掘削のボーリング</li> </ul>

の地域において発生した規模の大きな地震後に、合わせにより活断層を検出した事例を蓄積  
底地形探査や音波探査などの個別技術は整備／技術の高度化が課題  
別技術の組み合わせによる海陸接合部における層の適用性確認が課題  
層の分布・活動性の検出・評価に係る補完的な地質学的に古い時期に形成された断層の再活動に  
換や数値解析などの結果に基づく評価は可能

# ④ サイト調査に用いる調査・評価技術の整備 (2/2)

- 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

## 海上ボーリング孔掘削の例

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"> <li>地層処分における海上ボーリング孔掘削は、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行うことを目的として実施する。</li> </ul>				
概要： <ul style="list-style-type: none"> <li>海上ボーリング掘削とは、海底下の地層や岩盤をサンプリングするために、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手法である。</li> <li>海上ボーリング調査は、陸上とは異なり、海上に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に主な海上掘削用の足場を示す。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の手法を用いることが多い。ただし掘削方法にいくつかの違いがみられる。</li> <li>従来の海上ボーリング掘削では、ドリル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</li> </ul>				

### 調査・評価手法：

#### (1) ジャッキアップ型

- ジャッキアップ型を使った掘削作業では、ボーリング孔のある海底面と掘削作業を行う台船の間は、ジャケット（プラットフォームの土台となる構造物）/レグ（ジャッキアップリグの足）や、コンダクター

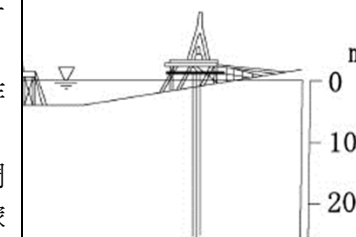
### 有効性：

- 汀線から深海までの海域でボーリング調査が可能となる。
- ライザーパイプを用いる掘削方式では、陸上のボーリング同様に掘削泥水を用いた掘削が行えるため、ボーリング孔が安定した掘削調査を行うことができる。

### 技術的課題：

- 水深によって使用する台船（足場）が異なる。

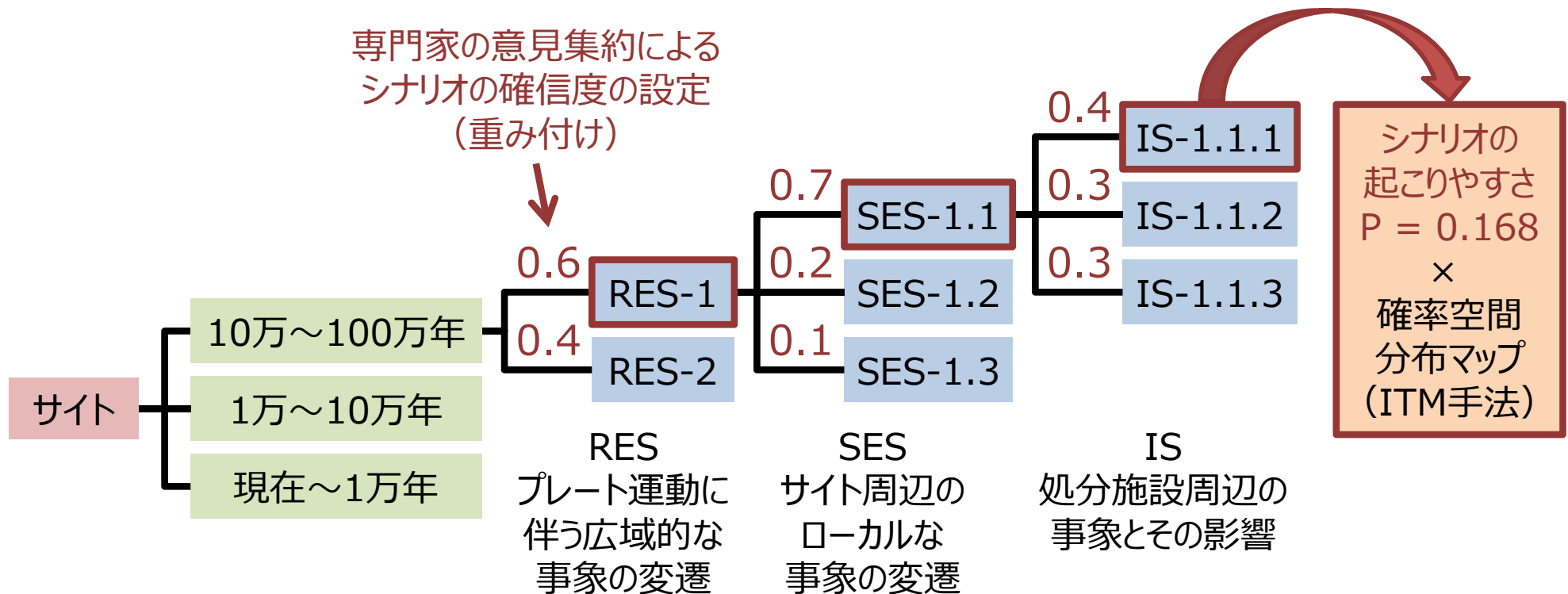
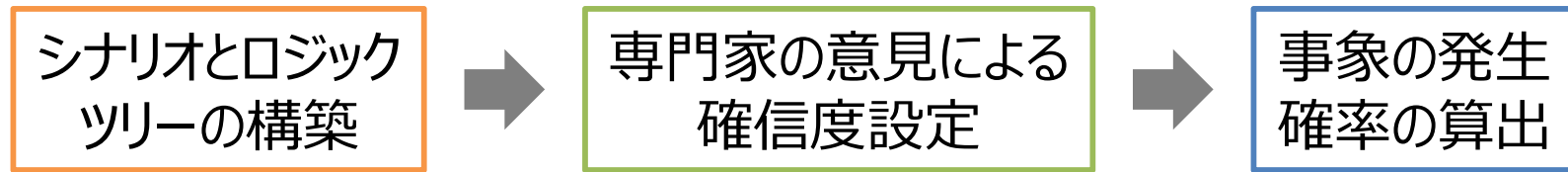
と利用する調査技術は陸上と



る。このため、  
て、陸上掘削作  
航が終了し、調  
車によりリグ稼  
データを測定す  
地点の海底地形

# ⑤ サイト調査に必要な技術力の保有 (ITM-TOPAZ手法)

- NUMOは、将来10万年を超えるような長期の**自然現象の発生可能性**とそれに伴う**地質環境の状態変化**について、不確実性を定量化し、その**起こりやすさを確率論的に評価**する「ITM-TOPAZ手法」を開発



ITM-TOPAZ手法の流れとロジックツリーの基本構造 (後藤ほか, 2014を編集)

## ⑤ サイト調査に必要な技術力の保有（横須賀実証研究）

- NUMOは、サイト調査を展開するための**技術的知識**や**実践的経験**を蓄積





# 報告書の論証構造（その2）

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**母岩の地質環境モデルとして解釈・統合する技術を保有**していることを提示するための論拠として…

- ✓ 処分場の設計および安全評価の基盤となる母岩の**地質環境モデル構築の進め方**を明示できる
- ✓ わが国の多様な地質環境を類型化し、**検討対象母岩**を設定できる
- ✓ 地下深部の地質環境の特徴を考慮し、段階ごとの詳細度に応じた**地質環境モデル**を構築できる
- ✓ 閉鎖後長期の安全評価において考慮すべき自然現象の影響を特定し、必要となる**基盤情報**を整理できる

3.3.1項

3.3.2項

3.3.3項

3.3節 「検討対象  
母岩のモデル化」  
**説明内容 3**

3.4節 「将来における自然現象の  
発生可能性」  
**説明内容 4**

# 説明内容（地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化）

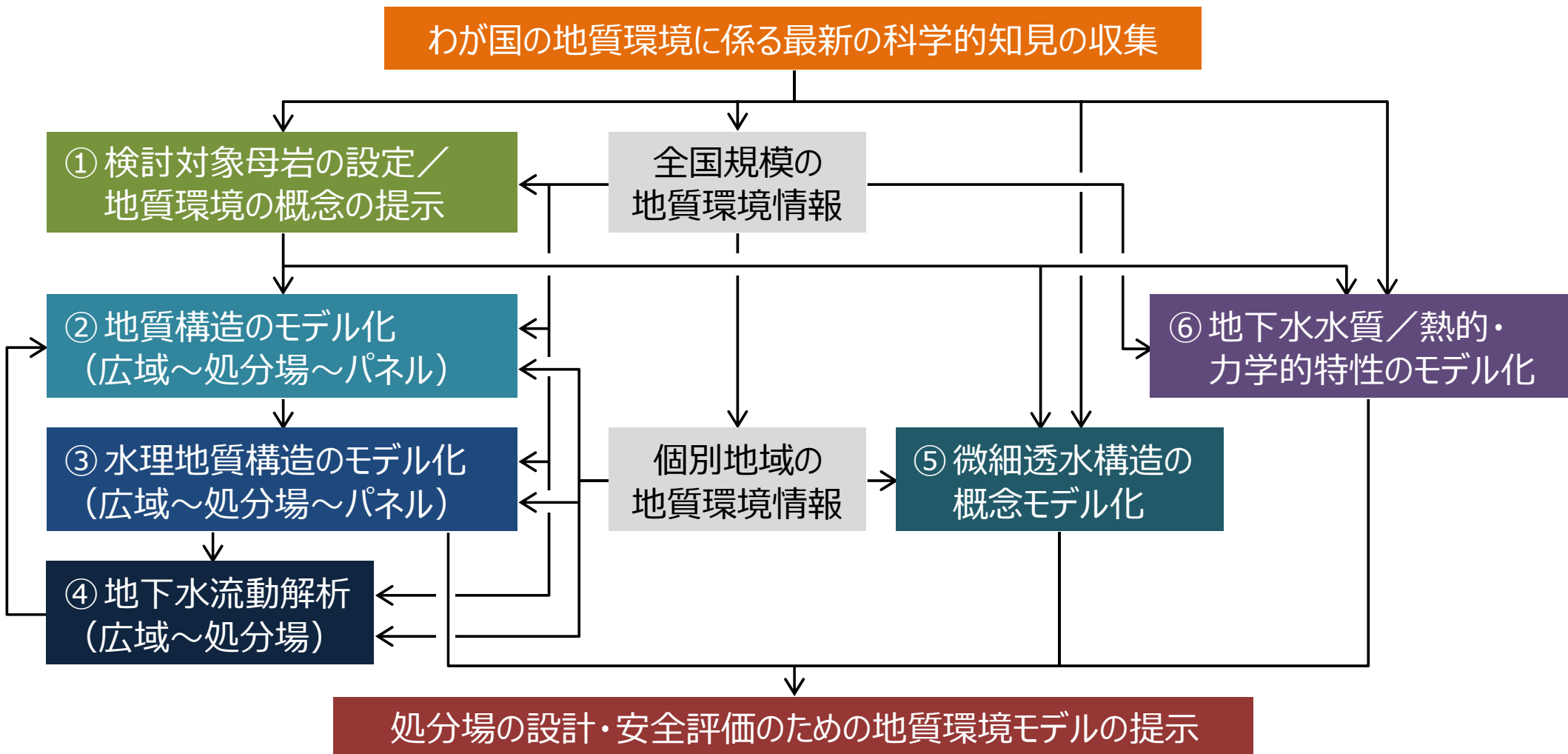
- 1 地質環境が安全確保に果たす役割（3.1節）
- 2 地層処分に適した地質環境の選定プロセス（3.2節）
- 3 検討対象母岩のモデル化（3.3節）**
- 4 将来における自然現象の発生可能性（3.4節）
- 5 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
- 6 まとめと今後の取り組み（3.5節）



- ①地質環境モデル構築の進め方を明示できる
- ②多様な地質環境を類型化し，検討対象母岩を設定できる
- ③段階ごとの詳細度に応じた地質環境モデルを構築できる

# ①候補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をモデル化**するための進め方を提示



検討対象母岩の地質環境のモデル化フロー（Ota et al., 2015を編集）

## ②検討対象母岩の設定（対象・評価項目の設定）

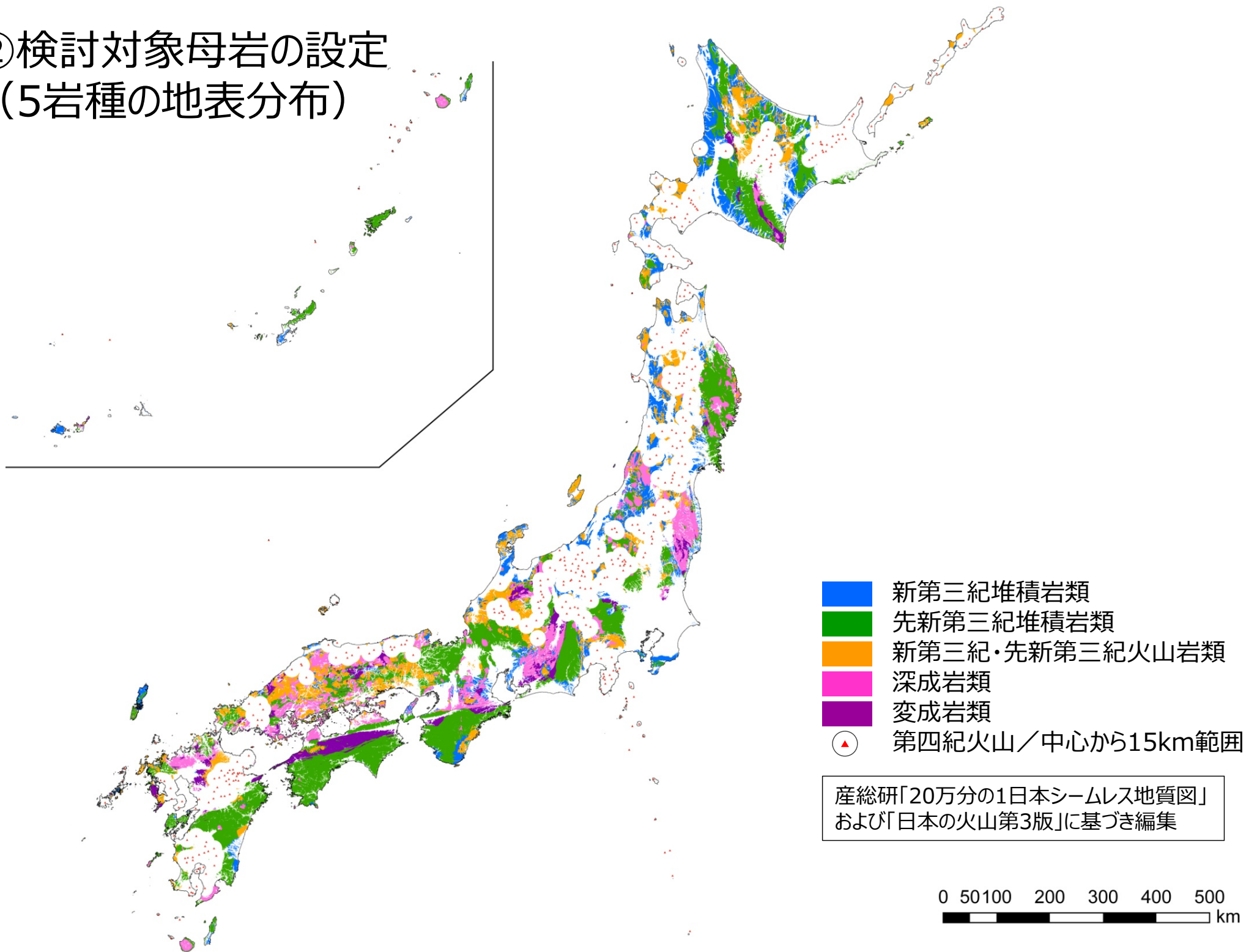
- 1 処分場の選定に際して考慮すべき重要な地質学的事項に対応した**地質の特徴**を明確にする観点から、日本地質学会（2011）により区分された**7岩種**を対象
  - 第四紀堆積岩類，第四紀火山岩類，新第三紀堆積岩類，先新第三紀堆積岩類，新第三紀・先新第三紀火山岩類，深成岩類，変成岩類
- 2 **第四紀堆積岩類**および**第四紀火山岩類**は、「**深度300m以深まで更新世中期以降の地層が分布する範囲**」を包含し，地表の**第四紀火山岩類**の約85%は「**第四紀火山の中心から15km以内**」に分布
  - 他の5岩種と比較して，処分場の母岩として対象となる可能性が**相対的に低い**と考えられることから**検討対象から除外**
- 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

## ②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]	$2.9 \times 10^{-7}$	$4.7 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-7}$	$5.5 \times 10^{-8}$	$4.3 \times 10^{-8}$
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：「第四紀火山の中心から15km以内」、第四紀堆積岩類および第四紀火山岩類を除外した範囲を対象に算出

## ②検討対象母岩の設定 (5岩種の地表分布)



## ②検討対象母岩の設定（特徴に基づく類型化）

- 5 **新第三紀堆積岩類**および**深成岩類**は、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**  
→ **検討対象母岩**に設定
- 6 **先新第三紀堆積岩類**は、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**  
→ **検討対象母岩**に設定
- 7 **新第三紀・先新第三紀火山岩類**は、**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**  
→ **深成岩類**および**先新第三紀堆積岩類と同様の対応**可能
- 8 **変成岩類**は、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**  
→ **深成岩類**および**先新第三紀堆積岩類と同様の対応**可能

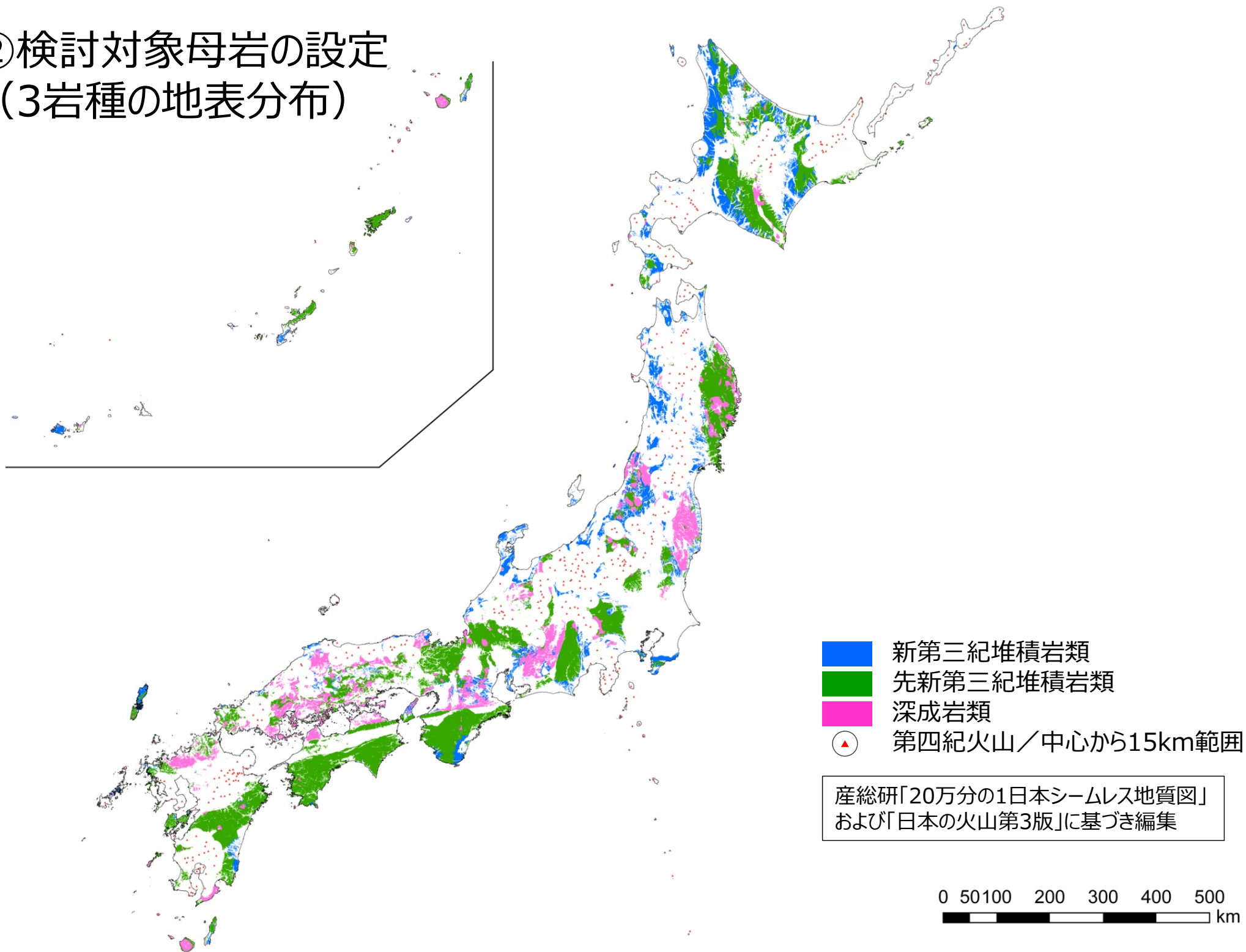
## ②検討対象母岩の設定（3岩種の設定）

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]	$2.9 \times 10^{-7}$	$4.7 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-7}$	$5.5 \times 10^{-8}$	$4.3 \times 10^{-8}$
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



## ②検討対象母岩の設定 (3岩種の地表分布)



### ③地質環境モデルの構築（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	

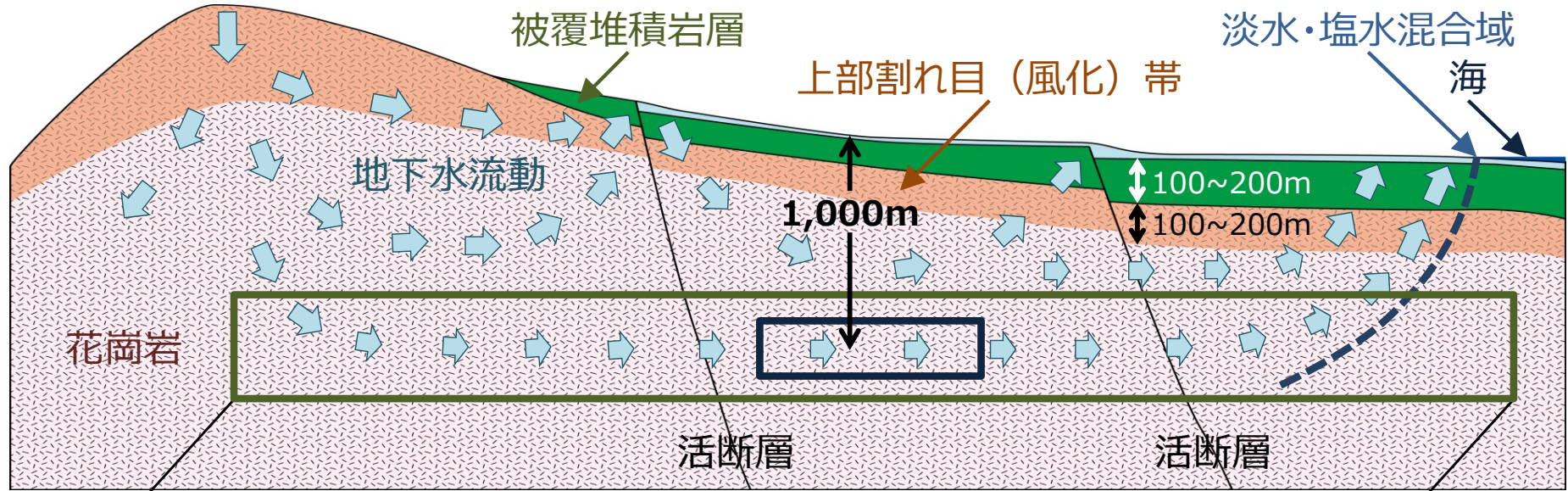
\* 先新第三紀堆積岩類：全国規模で収集した地質環境情報のみ

### ③地質環境モデルの構築（空間スケールに応じたモデル化手法）

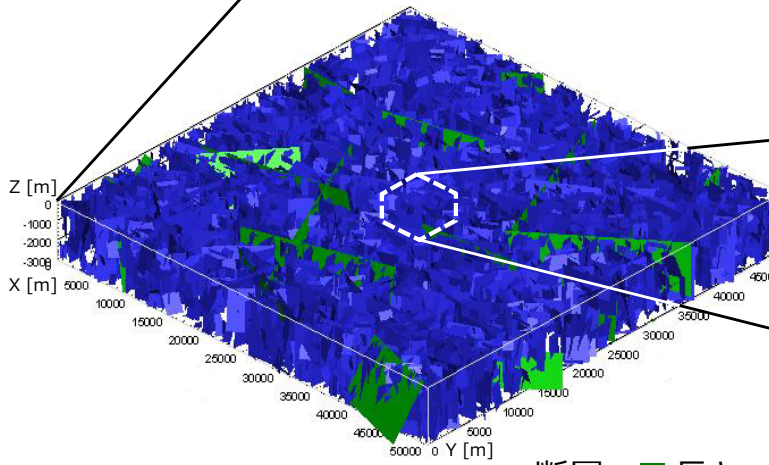
- 地下水流動場に影響を与える断層の分布はDFNモデル，断層・岩相の違いによる透水不均質性は連続体モデルを適用し，入れ子構造になるようにモデル化

	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	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 断層 (&gt;1km) 分布：確率論的DFN</li> <li>➤ 水理地質構造：連続体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 断層 (&gt;1km) 分布：確率論 + 決定論的DFN</li> <li>➤ 岩相分布：連続体</li> <li>➤ 水理地質構造：連続体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 断層 (&gt;10km) 分布：決定論的DFN</li> <li>➤ 断層 (1~10km) 分布：確率論 + 決定論的DFN</li> <li>➤ 岩相分布：連続体</li> <li>➤ 水理地質構造：連続体</li> </ul>
処分場スケール	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 断層 (1~10km) 分布：決定論的DFN</li> <li>➤ 断層・割れ目 (&lt;1km) 分布：確率論的DFN</li> <li>➤ 水理地質構造：連続体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 断層 (1~10km) 分布：決定論的DFN</li> <li>➤ 岩相分布：連続体</li> <li>➤ 水理地質構造：連続体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 断層 (1~10km) 分布：確率論 + 決定論的DFN</li> <li>➤ 岩相の分布：連続体</li> <li>➤ 水理地質構造：連続体</li> </ul>
パネルスケール	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 断層・割れ目 (&lt;1km) 分布：確率論的DFN</li> <li>➤ 水理地質構造：確率論的DFN</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 断層・割れ目 (&lt;1km) 分布：確率論的DFN</li> <li>➤ 水理地質構造：連続体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 断層・割れ目 (&lt;1km) 分布：確率論的DFN</li> <li>➤ 水理地質構造：確率論的DFN</li> </ul>

# ③地質環境モデルの構築（深成岩類）



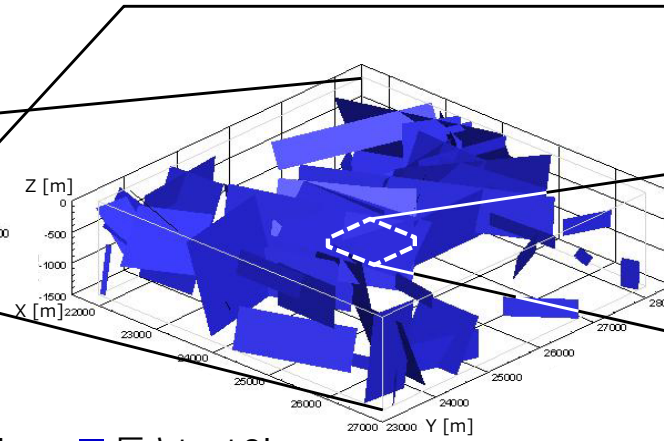
一般的に認められる地質環境の概念



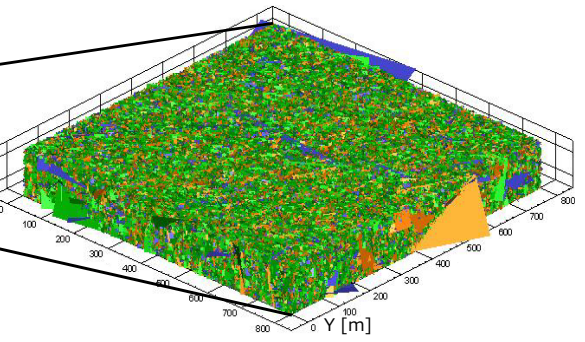
断層：■長さ>10km, ■長さ1~10km

地質構造  
モデルの例

広域スケール  
(50km×50km)



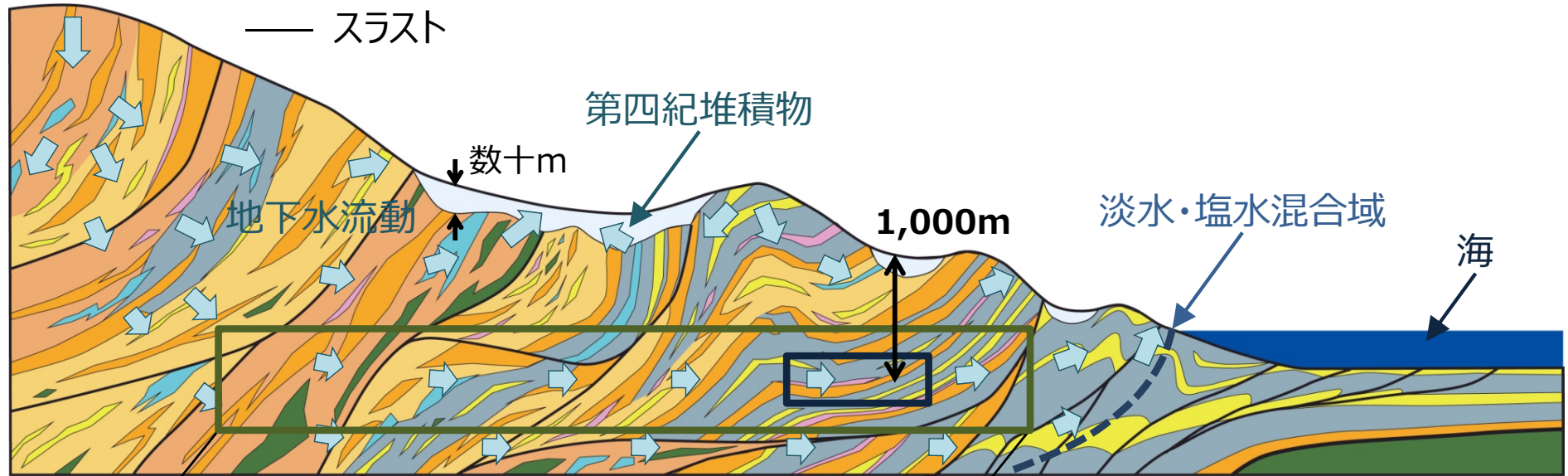
処分場スケール  
(5km×5km)



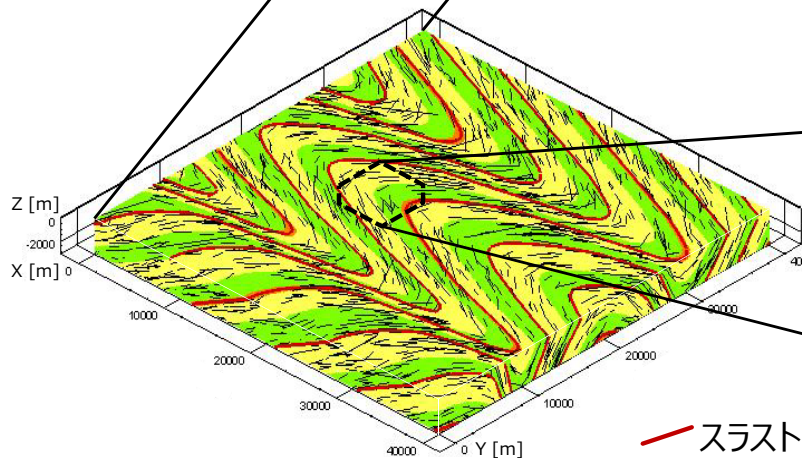
断層・割れ目セット：■1, ■2, ■3

パネルスケール  
(800m×800m)

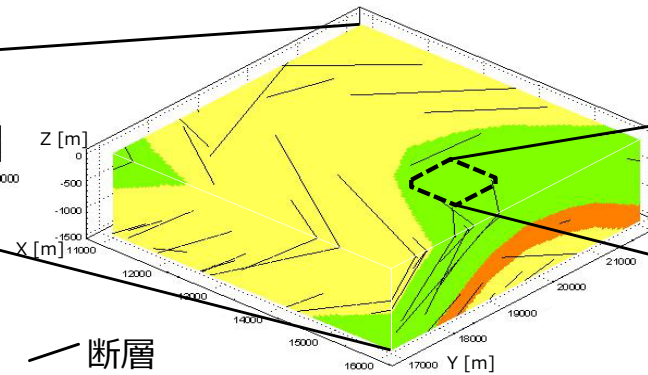
# ③地質環境モデルの構築（先新第三紀堆積岩類）



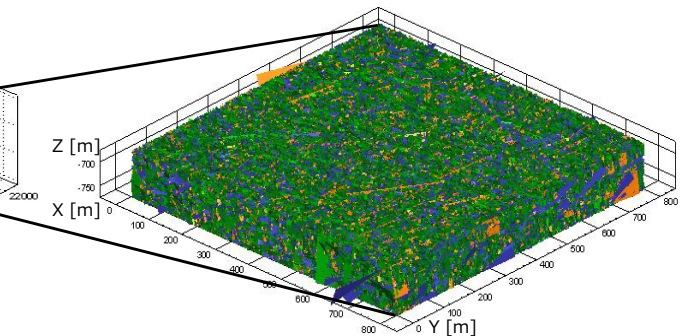
一般的に認められる  
地質環境の概念



地質構造  
モデルの例  
広域スケール  
(40km×40km)



処分場スケール  
(5km×5km)

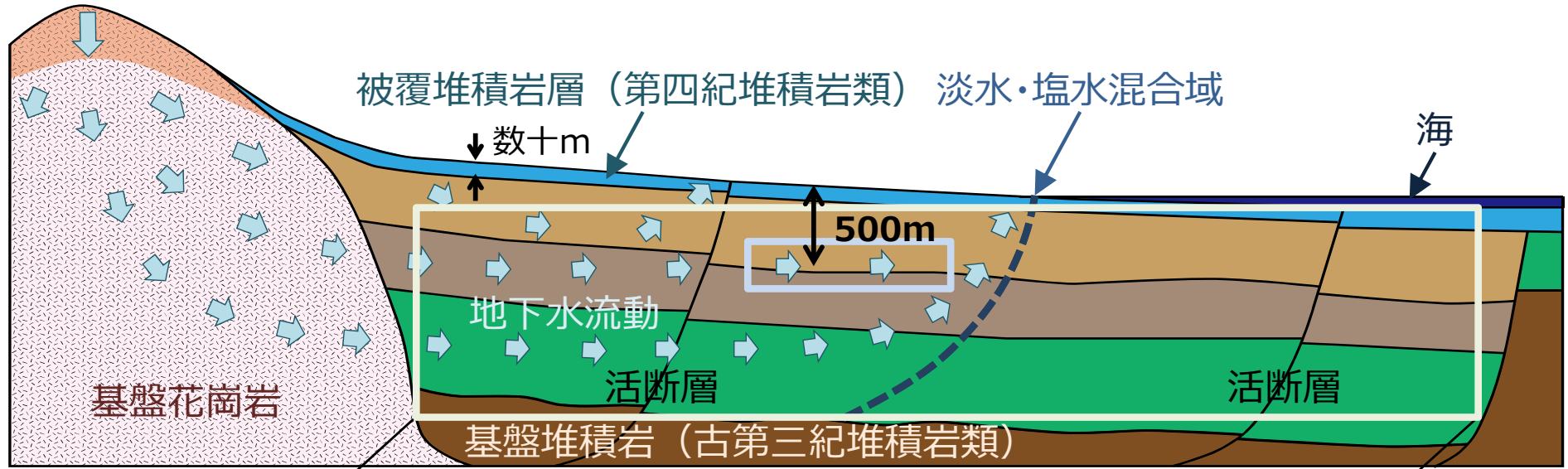


断層・割れ目セット：1, 2, 3

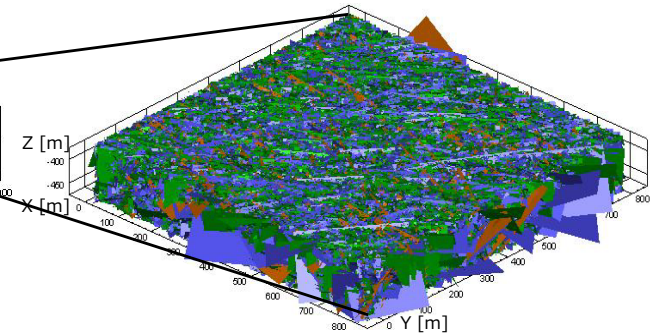
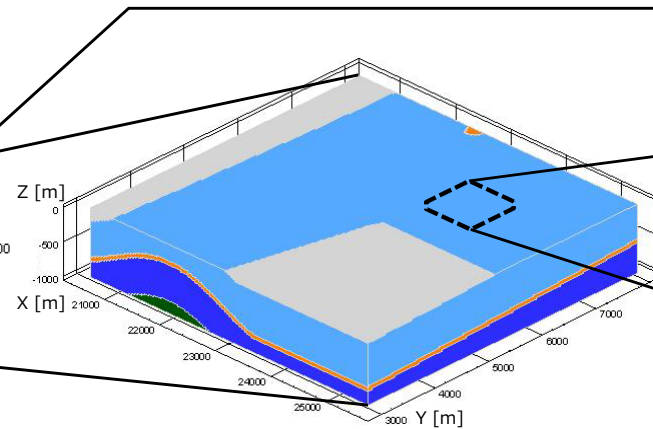
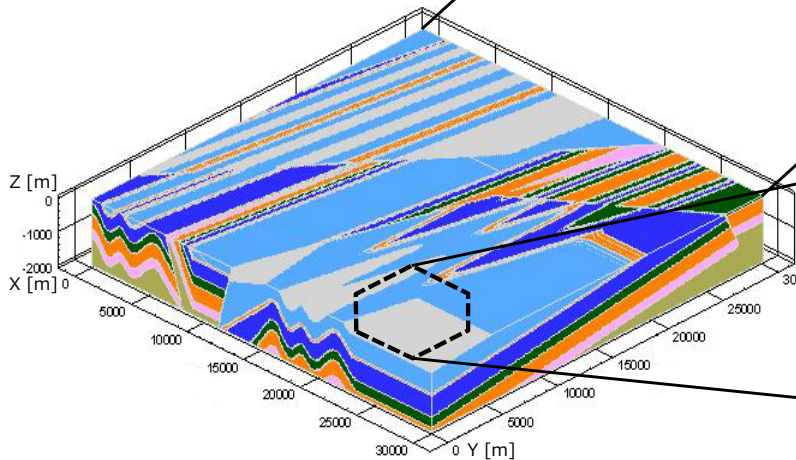
パネルスケール  
(800m×800m)

— スラスト — 断層  
■ 泥岩優勢基質 ■ 砂岩優勢基質 ■ チャート岩塊

# ③地質環境モデルの構築（新第三紀堆積岩類）



一般的に認められる地質環境の概念



第四紀層
  上部／下部泥岩層
  砂岩泥岩互層
  砂岩層
  礫岩層
  基盤岩

断層・割れ目セット：  1,  2,  3

地質構造  
モデルの例

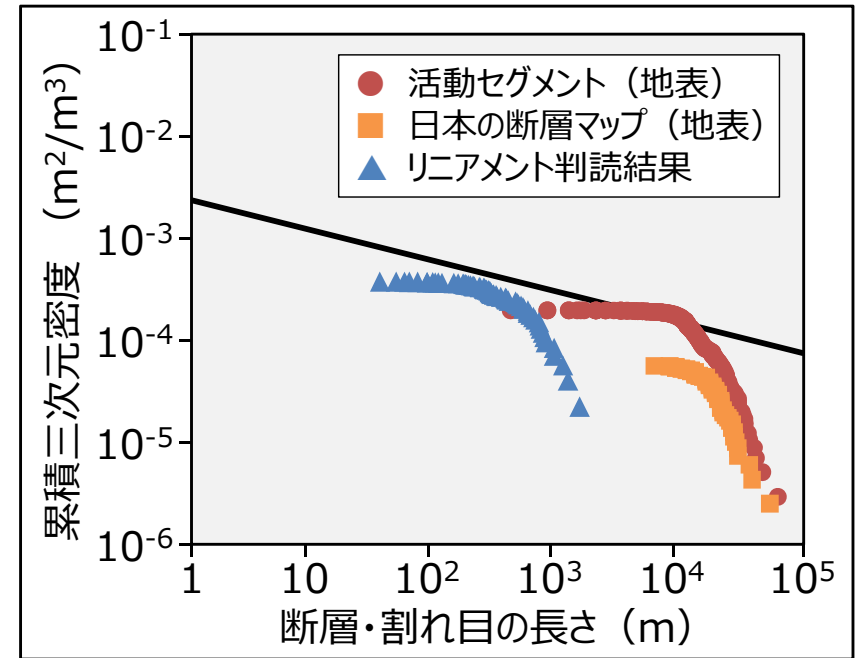
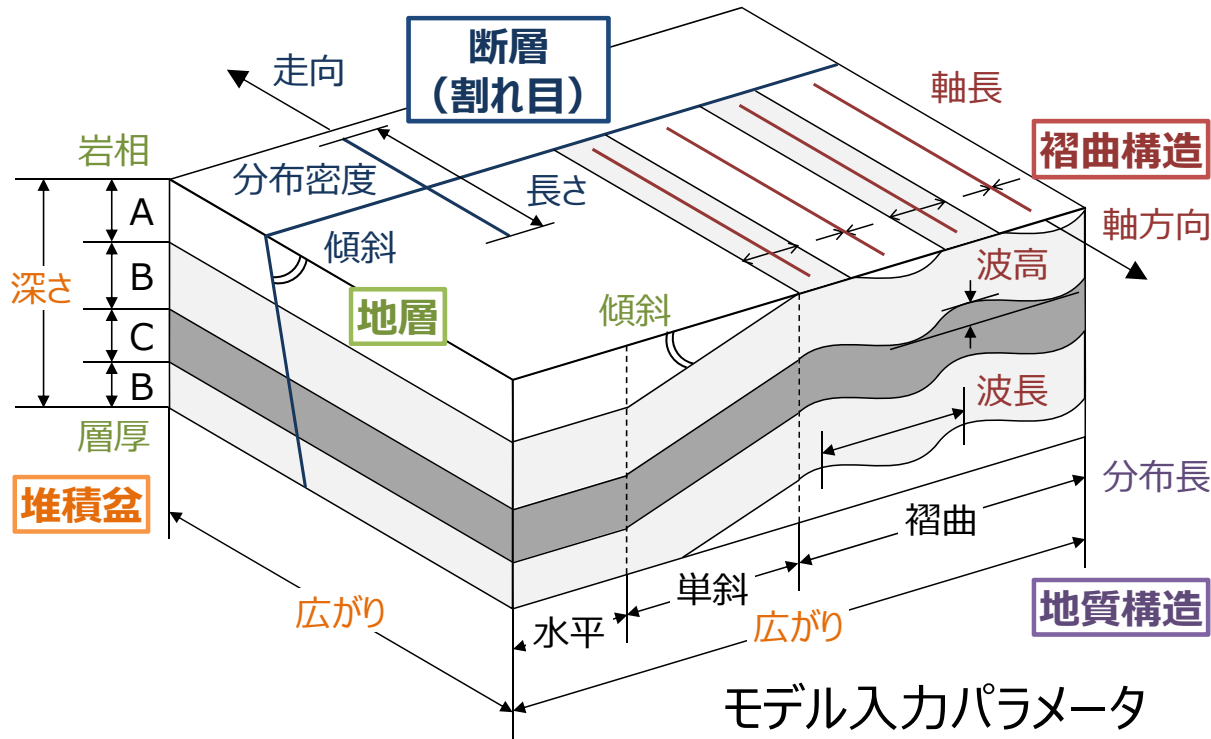
広域スケール  
(30km×30km)

処分場スケール  
(5km×5km)

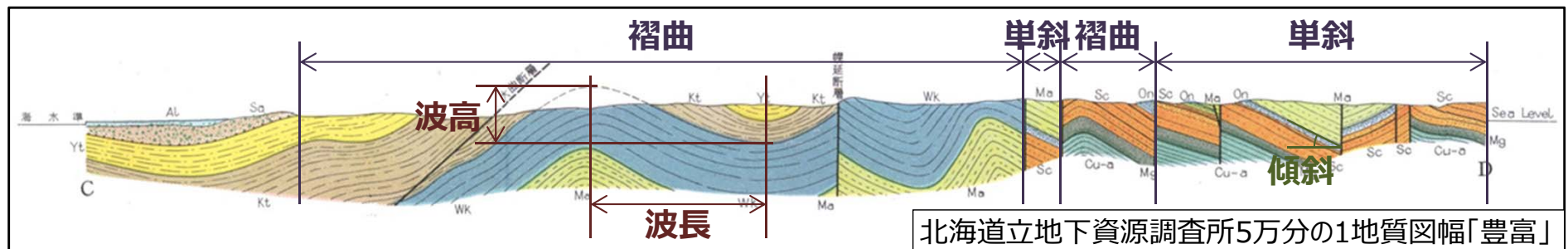
パネルスケール  
(800m×800m)

# 新第三紀堆積岩類：地質構造モデル構築のパラメータの設定

- 「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71%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



断層・割れ目の累積三次元密度・長さ

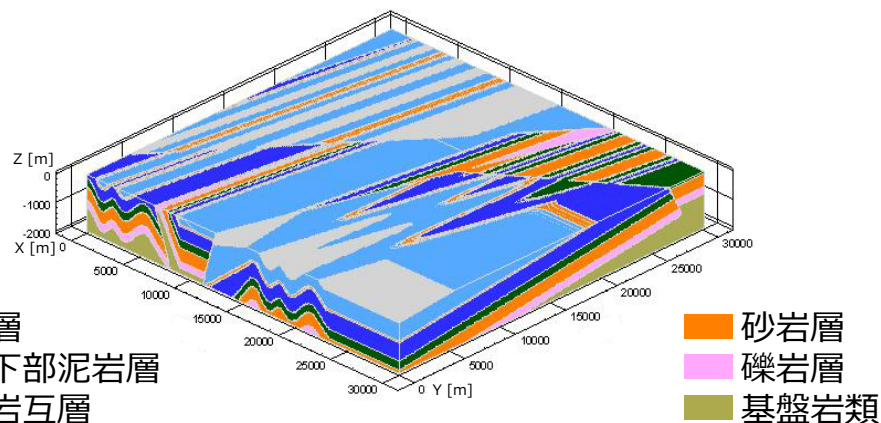


地質構造，褶曲波長・波高，地層傾斜

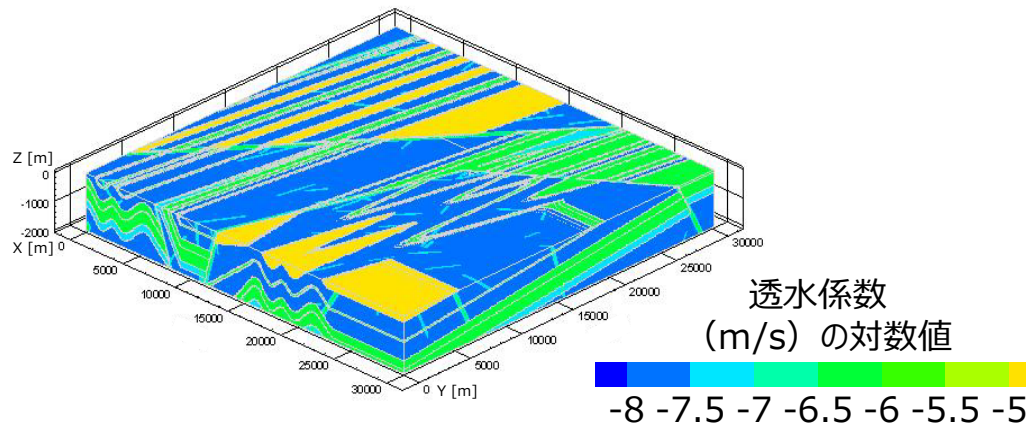
# 新第三紀堆積岩類：地質構造・水理地質構造モデル（広域）

- 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

- 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



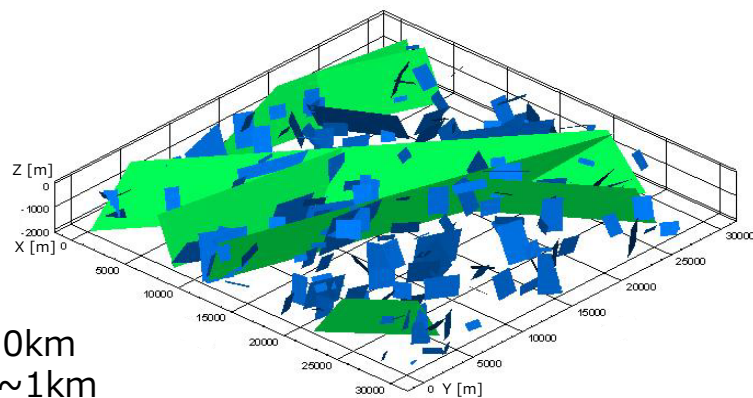
三次元地質構造モデル



三次元水理地質構造モデル

## 水理地質構造モデルの設定パラメータ

水理地質区分	透水係数 (m/s)	特記事項
第四紀層	$1.0 \times 10^{-5}$	全国DB
泥岩層	$2.3 \times 10^{-8}$	全国DB+幌延DB
砂岩泥岩互層	鉛直方向： $2.3 \times 10^{-8}$ 水平方向： $5.3 \times 10^{-7}$	鉛直方向：泥岩層 水平方向：砂岩層
砂岩層	$5.3 \times 10^{-7}$	全国DB
礫岩層	$6.5 \times 10^{-8}$	全国DB
基盤岩類	$1.1 \times 10^{-8}$	全国DB
断層 > 1km	$5.4 \times 10^{-7}$	幌延DB



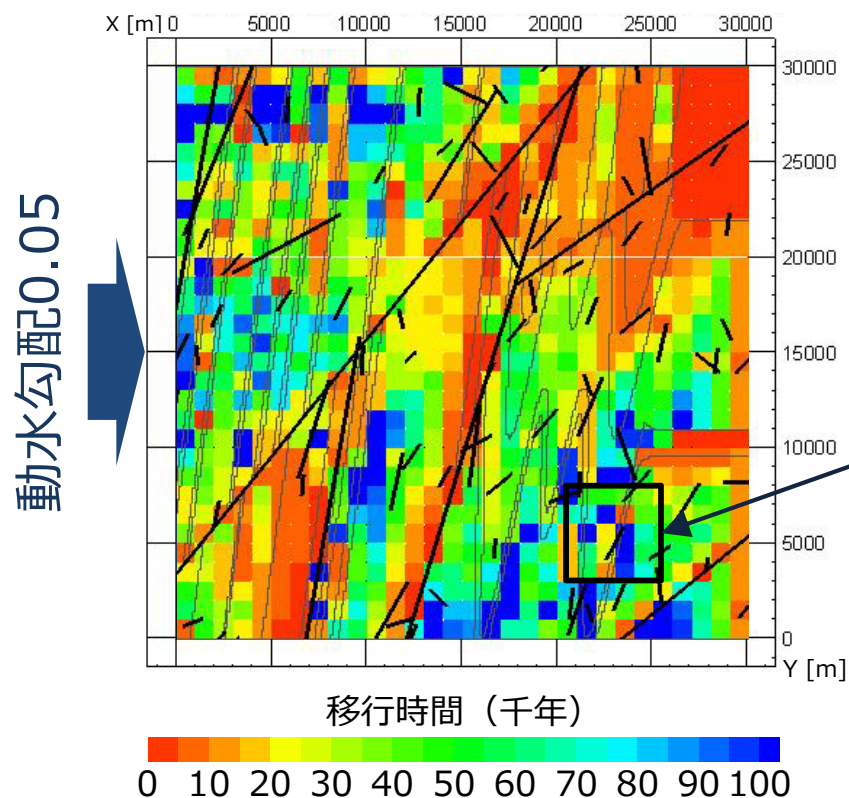
断層の空間分布モデル



# 新第三紀堆積岩類：地下水流動特性（広域）

東京  
ご意見を反映

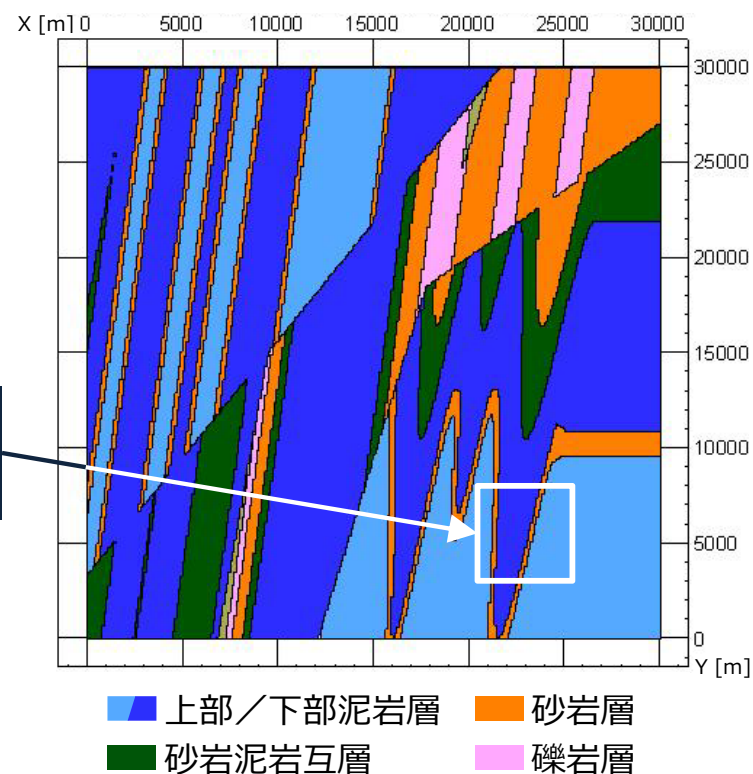
- 全国を対象とした地下水流動解析および深地層の研究施設における地質環境調査により導出された動水勾配（0.003～0.04）よりも**保守的な動水勾配（0.05）**となるように固定水頭境界を設定し、**直交2方向**で地下水流動解析を実施



ダルシー流速分布に基づく移行時間分布

処分場スケールの  
領域（5km×5km）

地下施設設置深度  
500m水平断面

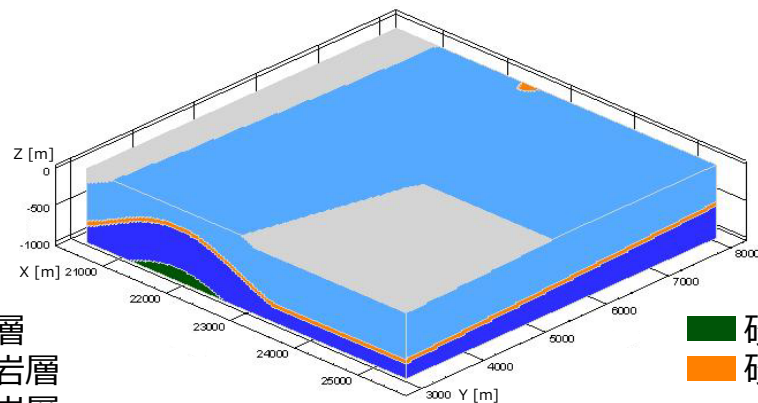


地質構造

- **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

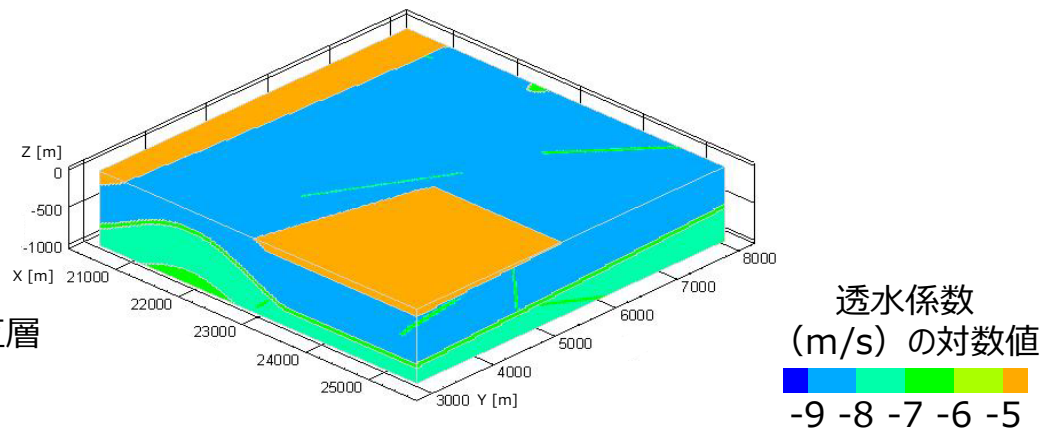
# 新第三紀堆積岩類：地質構造・水理地質構造モデル（処分場）

- 広域スケールにおける地質構造モデルから選定した領域を切り出し

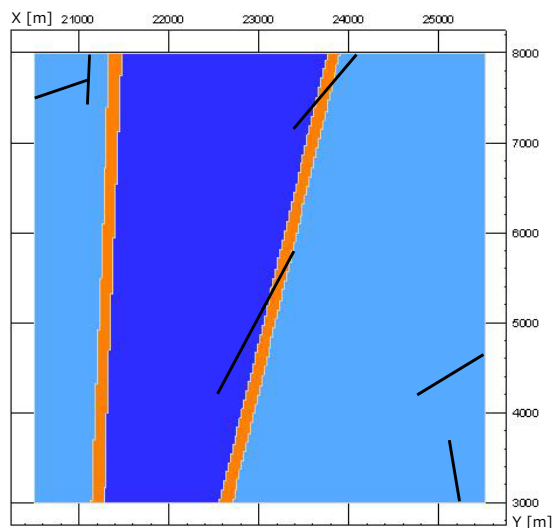


三次元地質構造モデル

- 上部泥岩層および下部泥岩層にそれぞれ異なる透水性を設定



三次元水理地質構造モデル

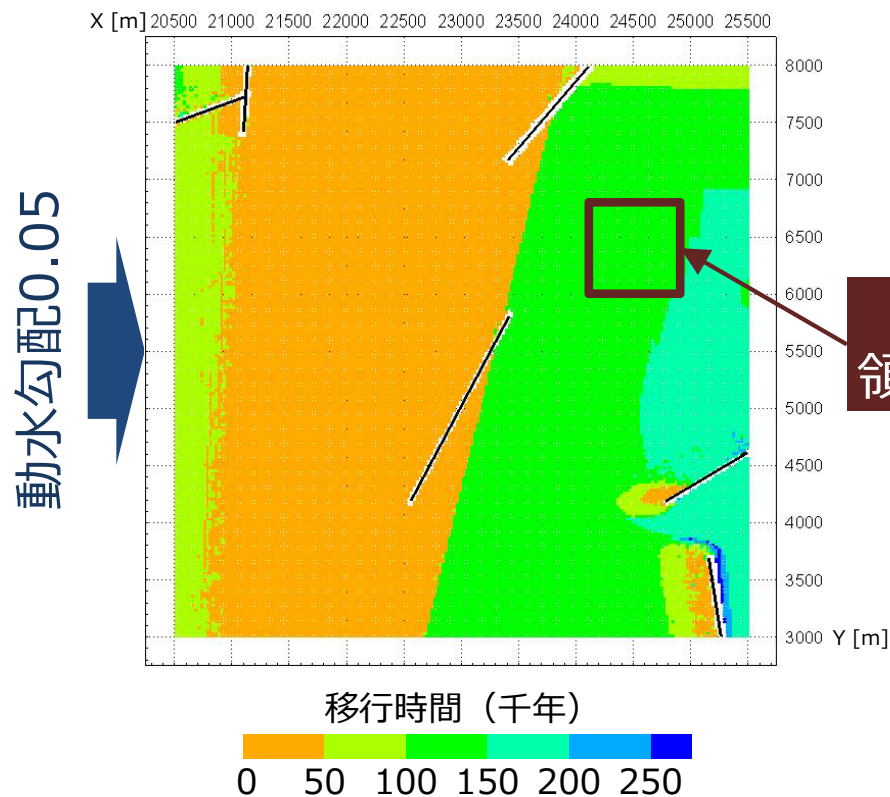


地下施設設置深度500 m水平断面

## 水理地質構造モデルの設定パラメータ

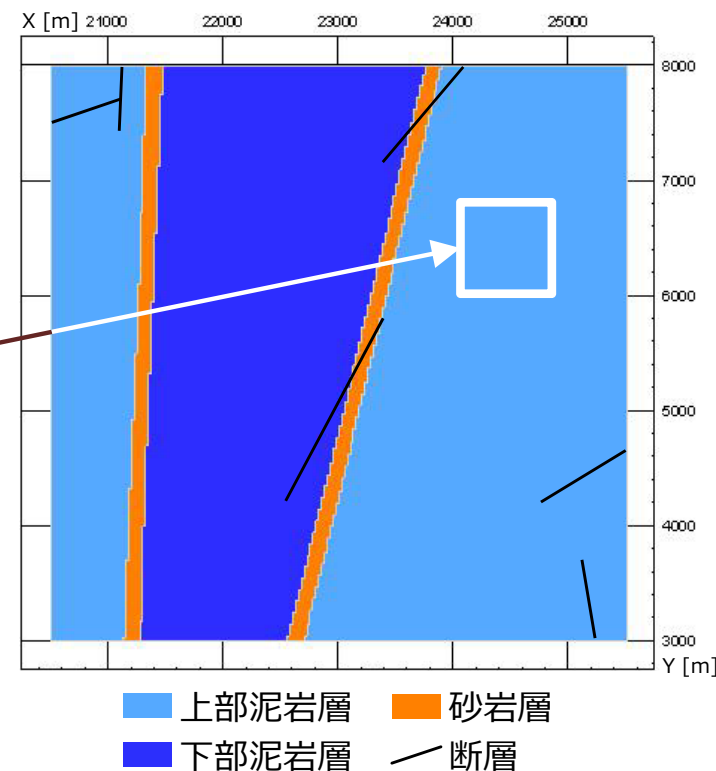
水理地質区分	透水係数 (m/s)	特記事項
第四紀層	$1.0 \times 10^{-5}$	全国DB
上部泥岩層	$2.0 \times 10^{-9}$	幌延DB
下部泥岩層	$4.4 \times 10^{-8}$	幌延DB
砂岩泥岩互層	鉛直方向： $2.3 \times 10^{-8}$ 水平方向： $5.3 \times 10^{-7}$	鉛直方向：泥岩層 水平方向：砂岩層
砂岩層	$5.3 \times 10^{-7}$	全国DB
断層>1km	$5.4 \times 10^{-7}$	幌延DB

- **広域スケール**における地下水流動解析により得られた**全水頭分布**に基づき，固定水頭境界を設定して地下水流動解析を実施



パネルスケールの  
領域（800m×800m）

地下施設設置深度  
500m水平断面



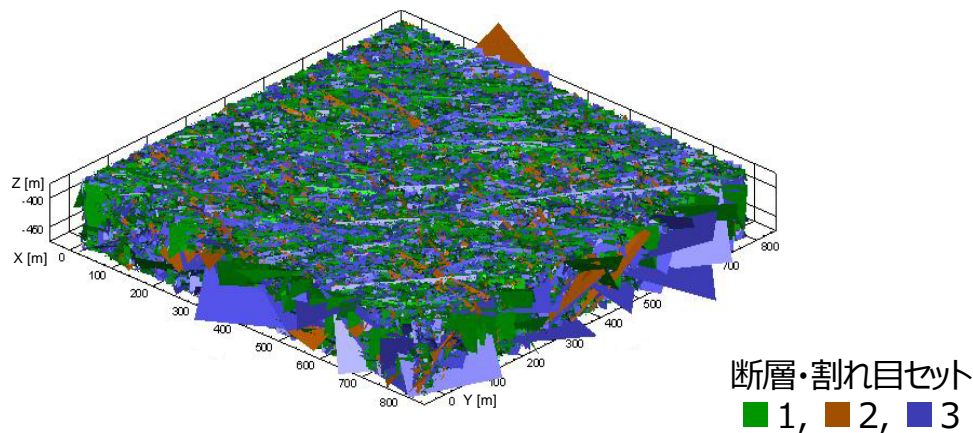
地質構造

ダルシー流速分布に基づく移行距離  
500mまでの移行時間分布

- **パネルスケールの領域**は，**移行時間が相対的に大きい**上部泥岩の分布域において，処分場の設計の目的から**深度方向に十分な広がり**を有するように選定

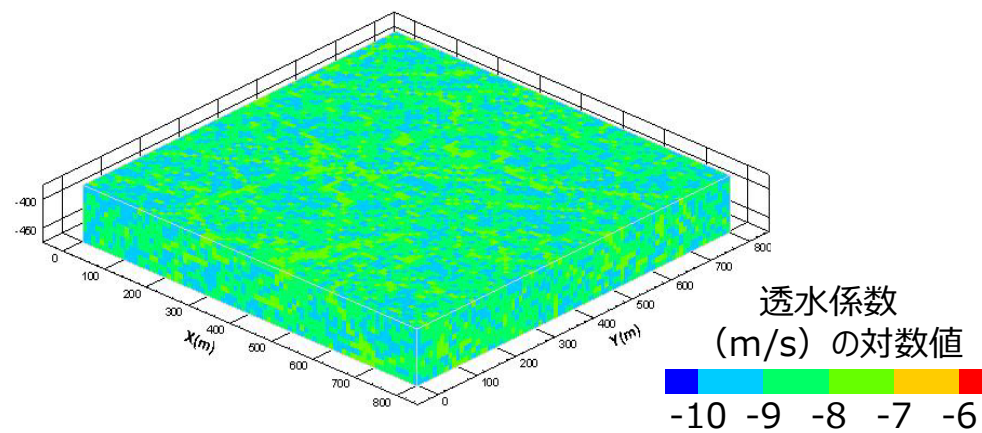
# 新第三紀堆積岩類：地質構造・水理地質構造モデル（パネル）

- 深地層の研究施設における**地質学的調査の結果**などにに基づき，上部泥岩層および下部泥岩層にそれぞれ異なる**断層・割れ目セット**を設定



三次元地質構造モデル  
上部泥岩

- 深地層の研究施設における**孔内水理試験の結果**などにに基づき，基質および割れ目の水理特性を組み合わせる空間的な**透水不均質性**をモデル化



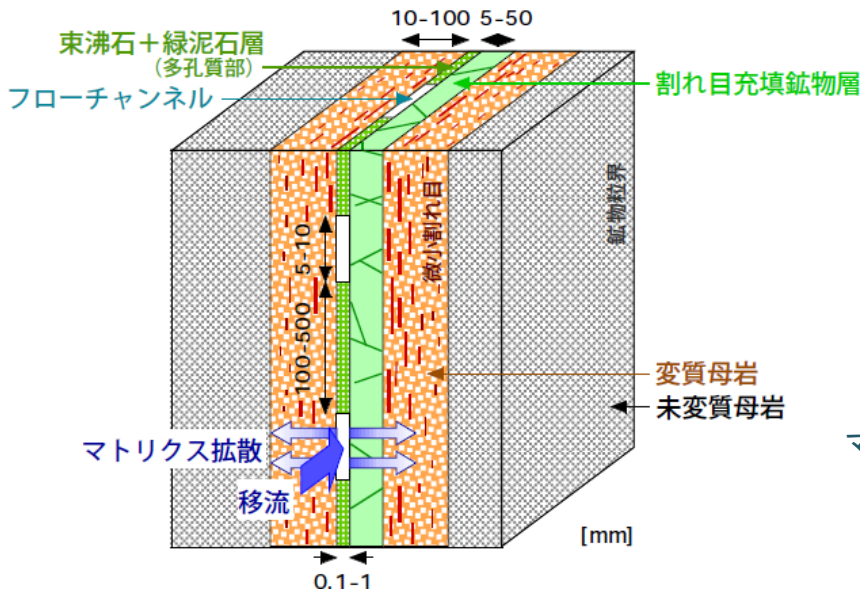
三次元水理地質構造モデル  
上部泥岩

## 水理地質構造モデルの設定パラメータ

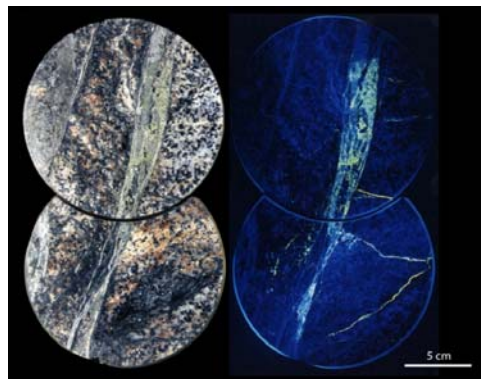
水理地質区分	透水量係数 (m/s)	特記事項
上部泥岩層	$1.1 \times 10^{-8}$	幌延DB・対数平均
下部泥岩層	$7.8 \times 10^{-8}$	幌延DB・対数平均

# ③地質環境モデルの構築（微細透水構造の概念モデル化）

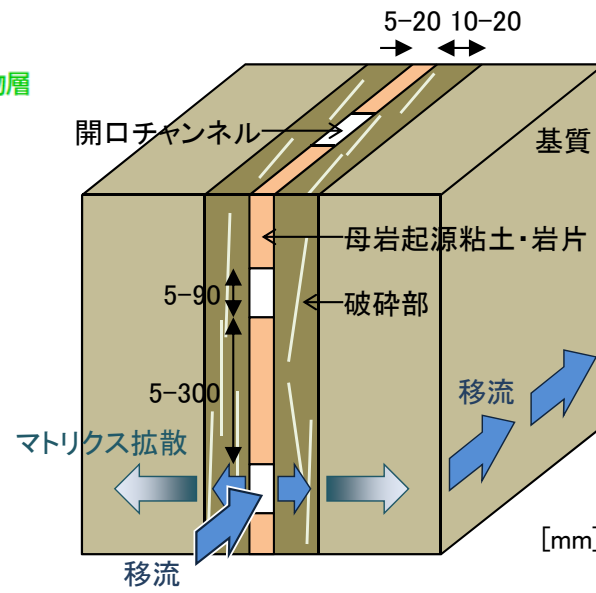
- 地質環境調査などの事例に基づき，検討対象母岩中の放射性核種の移行・遅延を支配する**微細透水構造**（数cm～数十cmスケール）の概念モデルを構築



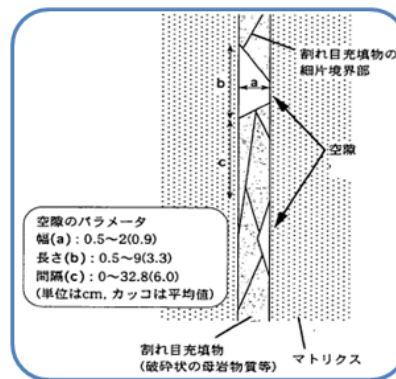
深成岩類



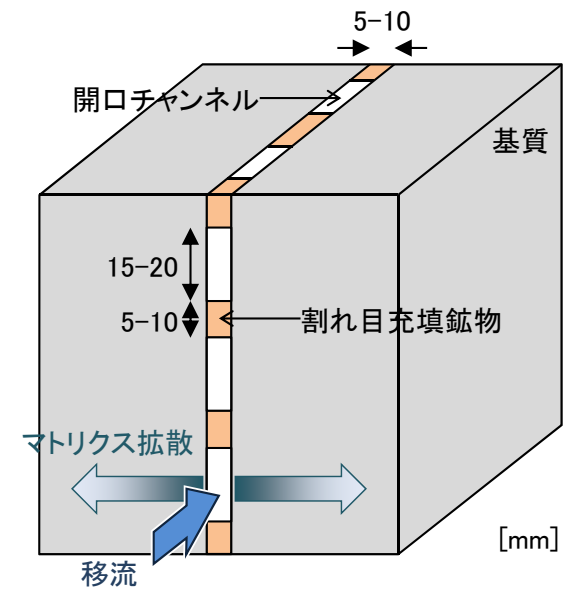
(Ota et al., 1999)



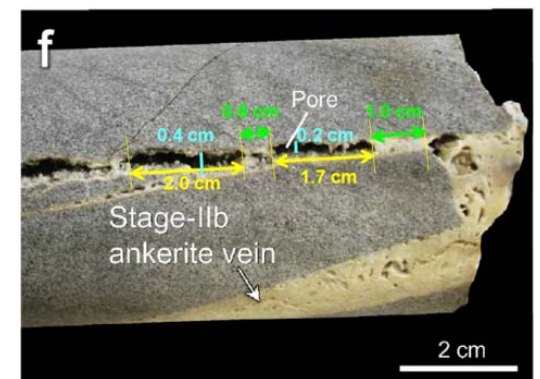
新第三紀堆積岩類



(杉山ほか, 2003)



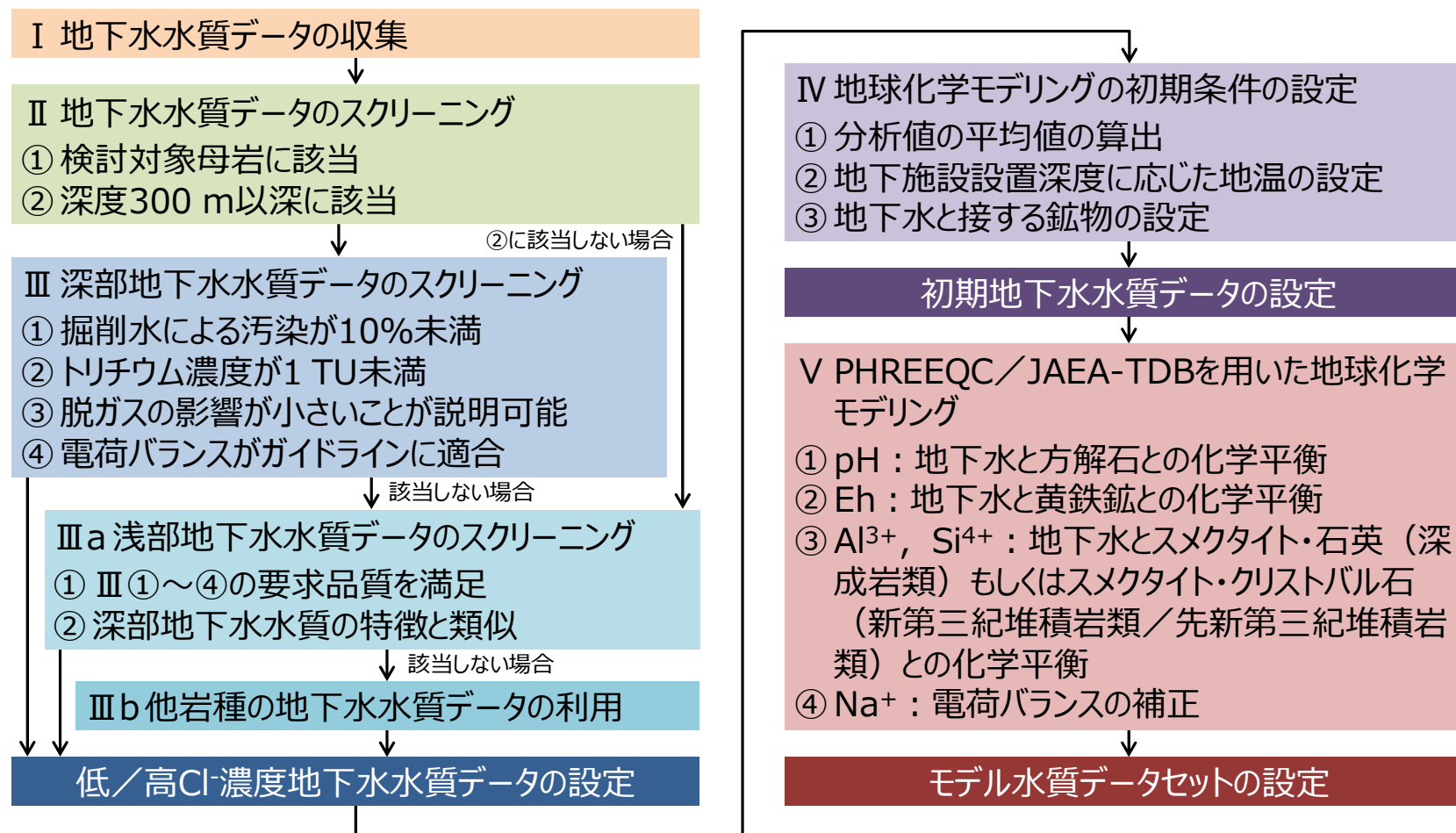
先新第三紀堆積岩類



(Ono et al., 2016)

# ③地質環境モデルの構築（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



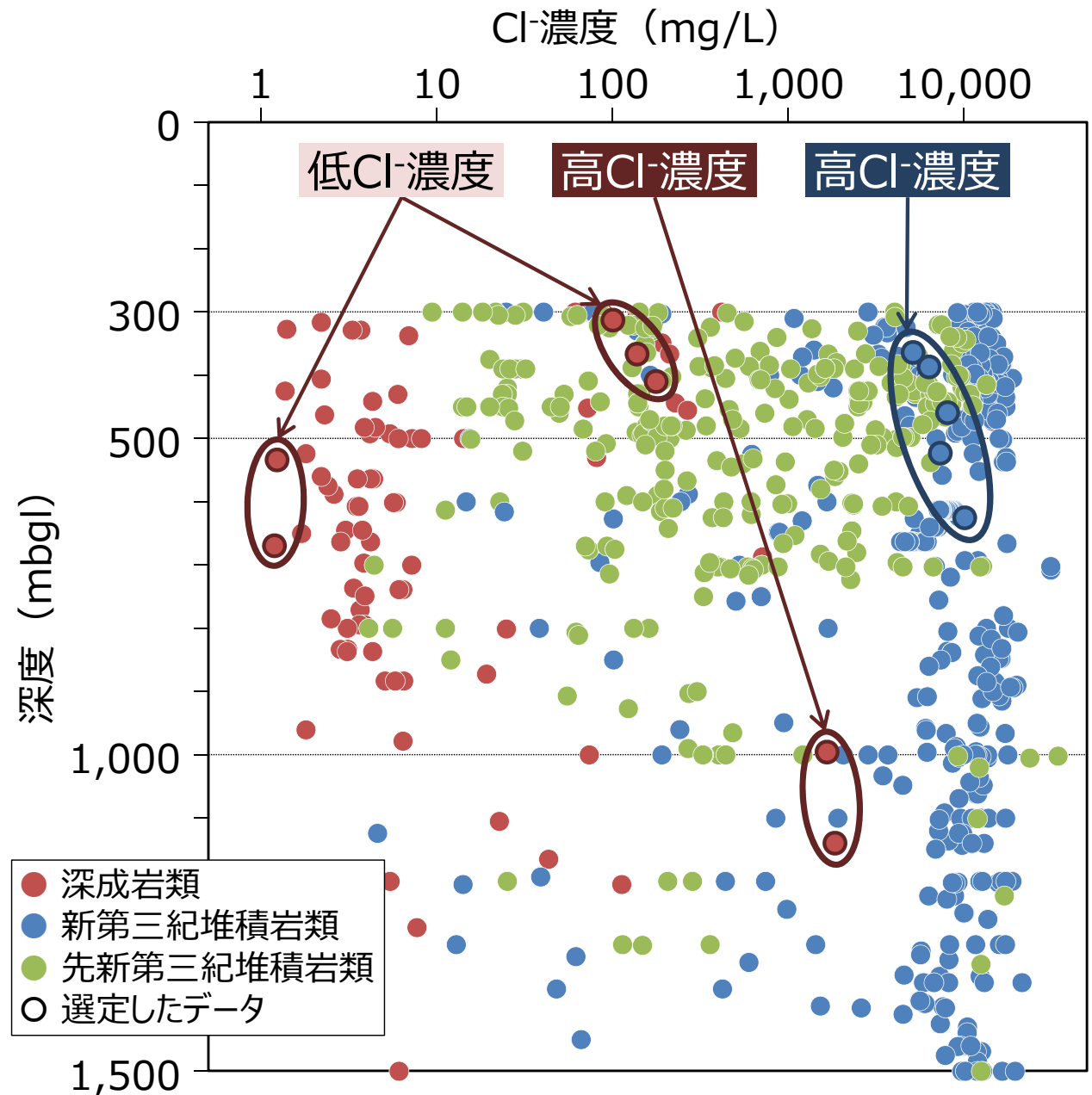
→ 検討対象母岩のそれぞれについて設定した**低Cl濃度**および**高Cl濃度のモデル水質**は、わが国に分布する地下水**水質をほぼ網羅**

# 品質の観点からの地下水水質データのスクリーニング (1/2)

■ 全国規模のデータベースや深地層の研究施設で取得された**深度300m以深**の地下水水質データを対象に**スクリーニング**

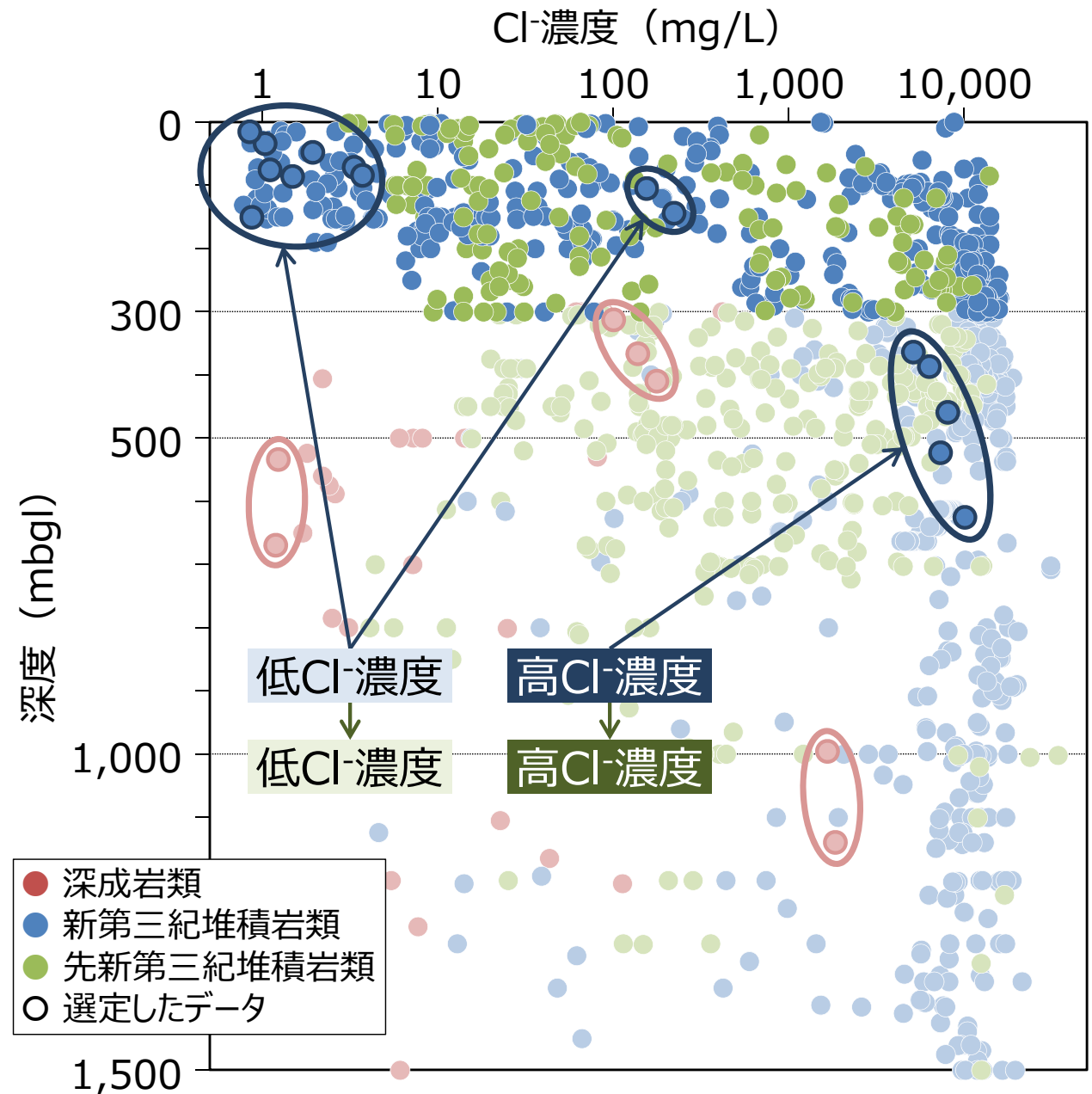
- **掘削水による汚染**が10%未満
- **トリチウム濃度**が1TU未満
- 地下水の原位置pHやガス濃度が測定されている場合, **採水時の脱ガスの影響**が小さいと推定
- **電荷バランス**が日本分析化学会(1996)のガイドラインに適合

→ **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



# 品質の観点からの地下水水質データのスクリーニング (2/2)

- **深度300m以浅**の地下水水質データについて、同様の要求品質で**スクリーニング**
- **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





# 地球化学モデリングによるモデル水質の設定

- 地球化学モデリングの**初期条件**として…
  - **初期水質**は、基本的に選定した地下水水質データの**算術平均値**，定量値がない場合は検出限界値を設定
  - **地温**は，**地下施設設置深度**を考慮し，深成岩類・先新第三紀堆積岩類（深度1,000m）は**45°C**，新第三紀堆積岩類（深度500m）は**30°C**を設定
  - 地下水との**化学平衡反応に寄与する鉱物**は，**水みちの観察結果**などに基づき，方解石，黄鉄鉱，スメクタイトに加え，深成岩類は石英など，新第三紀堆積岩類・先新第三紀堆積岩類はイライト，カオリナイト，クリストバル石などを設定
- PHREEQC ver.3.0（Parkhurst and Appelo, 2013）およびJAEA β-TDB ver.1.07（JAEA, 2017）を使用して**化学平衡計算**を実施
  - **pH**は，地下水と**方解石との化学平衡**を仮定して設定
  - **pe**は，原位置Eh測定値と整合する地下水と**黄鉄鉱との化学平衡**を仮定して設定
  - **Al<sup>3+</sup>・Si<sup>4+</sup>**は，コロイドの影響による分析値の過大評価を補正するため，地下水と**スメクタイト・石英**（深成岩類）または地下水と**スメクタイト・クリストバル石**（新第三紀堆積岩類・先新第三紀堆積岩類）**との化学平衡**を仮定して設定
  - **Na<sup>+</sup>**は，**電荷バランスを補正**するために加除して補正

### ③地質環境モデルの構築（深成岩類のモデル水質）

検討対象母岩 地下水タイプ	深成岩類				検討対象母岩 地下水タイプ	深成岩類			
	低Cl <sup>-</sup> 濃度		高Cl <sup>-</sup> 濃度			低Cl <sup>-</sup> 濃度		高Cl <sup>-</sup> 濃度	
	初期	モデル	初期	モデル		初期	モデル	初期	モデル
温度(°C)	45		45		H <sub>2</sub> S		4.79E-10		2.75E-09
pH	9.08	8.16	8.35	7.56	HS <sup>-</sup>		1.30E-08		2.16E-08
Eh		-301		-259	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		6.89E-06		1.36E-05
	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	イオン強度		0.004		0.065
Na <sup>+</sup>	2.96E-03	3.09E-03	1.81E-02	1.72E-02		(SI)	(SI)	(SI)	(SI)
K <sup>+</sup>	1.58E-05	1.58E-05	1.02E-04	1.02E-04	曹長石	-0.92	-0.88	-0.32	-0.72
Mg <sup>2+</sup>	8.23E-06	8.23E-06	6.17E-05	6.17E-05	方解石	0.72	0.00	0.44	0.00
Ca <sup>2+</sup>	3.96E-04	3.96E-04	1.60E-02	1.60E-02	CO <sub>2</sub> ガス	-4.37	-3.29	-4.60	-3.45
total Fe	8.95E-07	8.95E-07	4.92E-07	4.92E-07	α-クリストバル石	-0.74	-0.51	-0.57	-0.51
Al <sup>3+</sup>	3.71E-06	7.91E-07	1.04E-06	2.84E-07	苦灰石	1.05	-0.41	-0.22	-1.09
F <sup>-</sup>	5.68E-04	5.68E-04	1.26E-04	1.26E-04	針鉄鉱	-	1.11	-	-0.48
Cl <sup>-</sup>	2.34E-03	2.34E-03	4.90E-02	4.90E-02	イライト	1.99	2.35	2.64	2.50
Br <sup>-</sup>	4.32E-06	4.32E-06	3.88E-05	3.88E-05	カオリナイト	1.72	2.67	2.28	2.85
I <sup>-</sup>	7.88E-06	7.88E-06	5.52E-06	5.52E-06	Ca-モンモリロナイト	-0.19	0.24	0.40	0.24
total S	7.28E-06	7.28E-06	2.03E-05	2.03E-05	Na-モンモリロナイト	-0.43	0.00	0.17	0.00
total P	6.46E-07	6.46E-07	5.26E-06	5.26E-06	白雲母	0.39	0.89	1.23	1.29
total N	2.03E-05	2.03E-05	2.77E-05	2.77E-05	黄鉄鉱	-	0.00	-	0.00
total C	7.39E-04	9.48E-04	1.12E-04	2.16E-04	石英	-0.23	0.00	-0.06	0.00
Si <sup>4+</sup>	2.57E-04	3.20E-04	2.92E-04	3.05E-04	菱鉄鉱	-	-0.63	-	-2.43
B <sup>3+</sup>	4.62E-06	4.62E-06	2.73E-04	2.73E-04	非晶質シリカ	-1.20	-0.97	-1.04	-0.97
CO <sub>2</sub> (aq)		1.18E-05		8.06E-06					
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		9.11E-04		1.81E-04					
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		1.06E-05		8.16E-07					

### ③地質環境モデルの構築（新第三紀堆積岩類のモデル水質）

検討対象母岩 地下水タイプ	新第三紀堆積岩類				検討対象母岩 地下水タイプ	新第三紀堆積岩類			
	低Cl <sup>-</sup> 濃度		高Cl <sup>-</sup> 濃度			低Cl <sup>-</sup> 濃度		高Cl <sup>-</sup> 濃度	
	初期	モデル	初期	モデル		初期	モデル	初期	モデル
温度(°C)	30		30		H <sub>2</sub> S		9.53E-11		1.41E-09
pH	8.20	8.38	6.57	6.54	HS <sup>-</sup>		2.93E-09		8.45E-10
Eh		-282		-168	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		1.20E-04		2.57E-06
	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	イオン強度		0.004		0.238
Na <sup>+</sup>	2.47E-03	2.77E-03	2.15E-01	2.18E-01		(SI)	(SI)	(SI)	(SI)
K <sup>+</sup>	3.01E-05	3.01E-05	3.18E-03	3.18E-03	曹長石	0.74	-0.62	2.71	-0.38
Mg <sup>2+</sup>	1.47E-05	1.47E-05	4.95E-03	4.95E-03	方解石	-0.17	0.00	0.03	0.00
Ca <sup>2+</sup>	2.26E-04	2.26E-04	3.45E-03	3.45E-03	CO <sub>2</sub> ガス	-3.17	-3.36	-0.47	-0.45
total Fe	8.45E-07	8.45E-07	3.25E-05	3.25E-05	α-クリストバル石	0.02	0.00	0.21	0.00
Al <sup>3+</sup>	4.82E-07	2.20E-08	3.71E-07	1.31E-09	苦灰石	-0.31	0.02	1.50	1.44
F <sup>-</sup>	1.90E-04	1.90E-04	6.49E-06	6.49E-06	針鉄鉱	-	1.19	-	-1.22
Cl <sup>-</sup>	1.11E-03	1.11E-03	2.08E-01	2.08E-01	イライト	5.07	1.69	8.43	2.06
Br <sup>-</sup>	4.44E-06	4.44E-06	7.98E-04	7.98E-04	カオリナイト	4.55	1.46	7.37	2.08
I <sup>-</sup>	3.94E-06	3.94E-06	1.83E-04	1.83E-04	Ca-モンモリロナイト	2.60	0.15	4.63	-0.31
total S	1.24E-04	1.24E-04	4.09E-06	4.09E-06	Na-モンモリロナイト	2.43	0.00	4.94	0.00
total P	5.62E-06	5.62E-06	5.92E-06	5.92E-06	白雲母	3.71	-0.73	8.22	0.25
total N	2.54E-06	2.54E-06	1.01E-02	1.01E-02	黄鉄鉱	-	0.00	-	0.00
total C	1.69E-03	1.66E-03	3.93E-02	4.00E-02	石英	0.56	0.54	0.75	0.54
Si <sup>4+</sup>	7.73E-04	7.47E-04	1.08E-03	6.64E-04	菱鉄鉱	-	-0.40	-	0.07
B <sup>3+</sup>	4.62E-06	4.62E-06	1.02E-02	1.02E-02	非晶質シリカ	-0.47	-0.49	-0.28	-0.49
CO <sub>2</sub> (aq)		1.40E-05		1.10E-02					
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		1.60E-03		2.47E-02					
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		2.42E-05		1.20E-05					

### ③地質環境モデルの構築（先新第三紀堆積岩類のモデル水質）

検討対象母岩 地下水タイプ	先新第三紀堆積岩類				検討対象母岩 地下水タイプ	先新第三紀堆積岩類			
	低Cl <sup>-</sup> 濃度		高Cl <sup>-</sup> 濃度			低Cl <sup>-</sup> 濃度		高Cl <sup>-</sup> 濃度	
	初期	モデル	初期	モデル		初期	モデル	初期	モデル
温度(°C)	45		45		H <sub>2</sub> S		3.32E-10		4.69E-09
pH	8.20	8.15	6.57	6.33	HS <sup>-</sup>		8.65E-09		2.49E-09
Eh		-289		-171	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		1.19E-04		2.52E-06
	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	イオン強度		0.004		0.238
Na <sup>+</sup>	2.47E-03	2.82E-03	2.15E-01	2.19E-01		(SI)	(SI)	(SI)	(SI)
K <sup>+</sup>	3.01E-05	3.01E-05	3.18E-03	3.18E-03	曹長石	-0.04	-0.66	2.03	-0.42
Mg <sup>2+</sup>	1.47E-05	1.47E-05	4.95E-03	4.95E-03	方解石	0.04	0.00	0.24	0.00
Ca <sup>2+</sup>	2.26E-04	2.26E-04	3.45E-03	3.45E-03	CO <sub>2</sub> ガス	-3.07	-3.02	-0.36	-0.12
total Fe	8.45E-07	8.45E-07	3.25E-05	3.25E-05	α-クリストバル石	-0.13	0.00	0.07	0.00
Al <sup>3+</sup>	4.82E-07	4.25E-08	3.71E-07	2.44E-09	苦灰石	0.18	0.08	2.00	1.51
F <sup>-</sup>	1.90E-04	1.90E-04	6.49E-06	6.49E-06	針鉄鉱	-	1.25	-	-1.12
Cl <sup>-</sup>	1.11E-03	1.11E-03	2.08E-01	2.08E-01	イライト	3.39	1.47	6.96	1.84
Br <sup>-</sup>	4.44E-06	4.44E-06	7.98E-04	7.98E-04	カオリナイト	2.93	1.18	5.93	1.79
I <sup>-</sup>	3.94E-06	3.94E-06	1.83E-04	1.83E-04	Ca-モンモリロナイト	1.43	0.21	3.62	-0.25
total S	1.24E-04	1.24E-04	4.09E-06	4.09E-06	Na-モンモリロナイト	1.20	0.00	3.87	0.00
total P	5.62E-06	5.62E-06	5.92E-06	5.92E-06	白雲母	1.61	-1.08	6.38	-0.09
total N	2.54E-06	2.54E-06	1.01E-02	1.01E-02	黄鉄鉱	-	0.00	-	0.00
total C	1.69E-03	1.70E-03	3.93E-02	4.66E-02	石英	0.38	0.51	0.58	0.51
Si <sup>4+</sup>	7.73E-04	1.03E-03	1.08E-03	9.18E-04	菱鉄鉱	-	-0.40	-	0.10
B <sup>3+</sup>	4.62E-06	4.62E-06	1.02E-02	1.02E-02	非晶質シリカ	-0.59	-0.46	-0.40	-0.46
CO <sub>2</sub> (aq)		2.20E-05		1.67E-02					
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		1.64E-03		2.55E-02					
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		1.83E-05		9.57E-06					

# 説明内容（地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化）

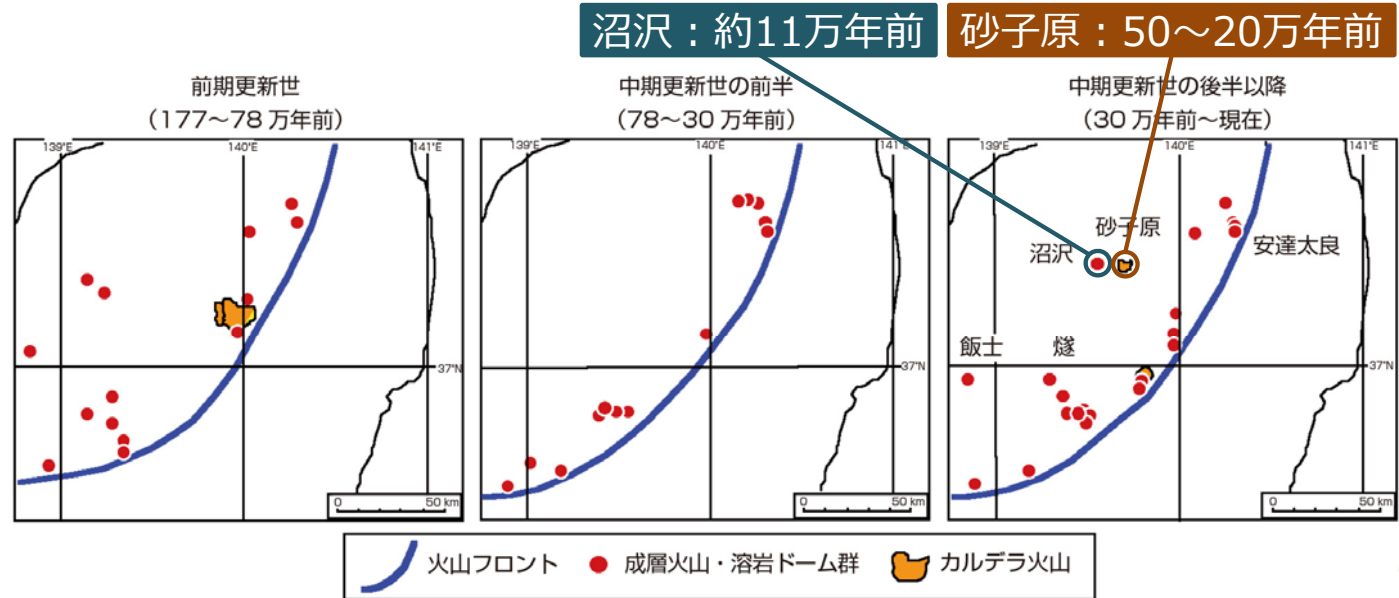
- 1 地質環境が安全確保に果たす役割（3.1節）
- 2 地層処分に適した地質環境の選定プロセス（3.2節）
- 3 検討対象母岩のモデル化（3.3節）
- 4 将来における自然現象の発生可能性（3.4節）**
- 5 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
- 6 まとめと今後の取り組み（3.5節）



自然現象の影響を特定し必要となる基盤情報を整理できる

# 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**

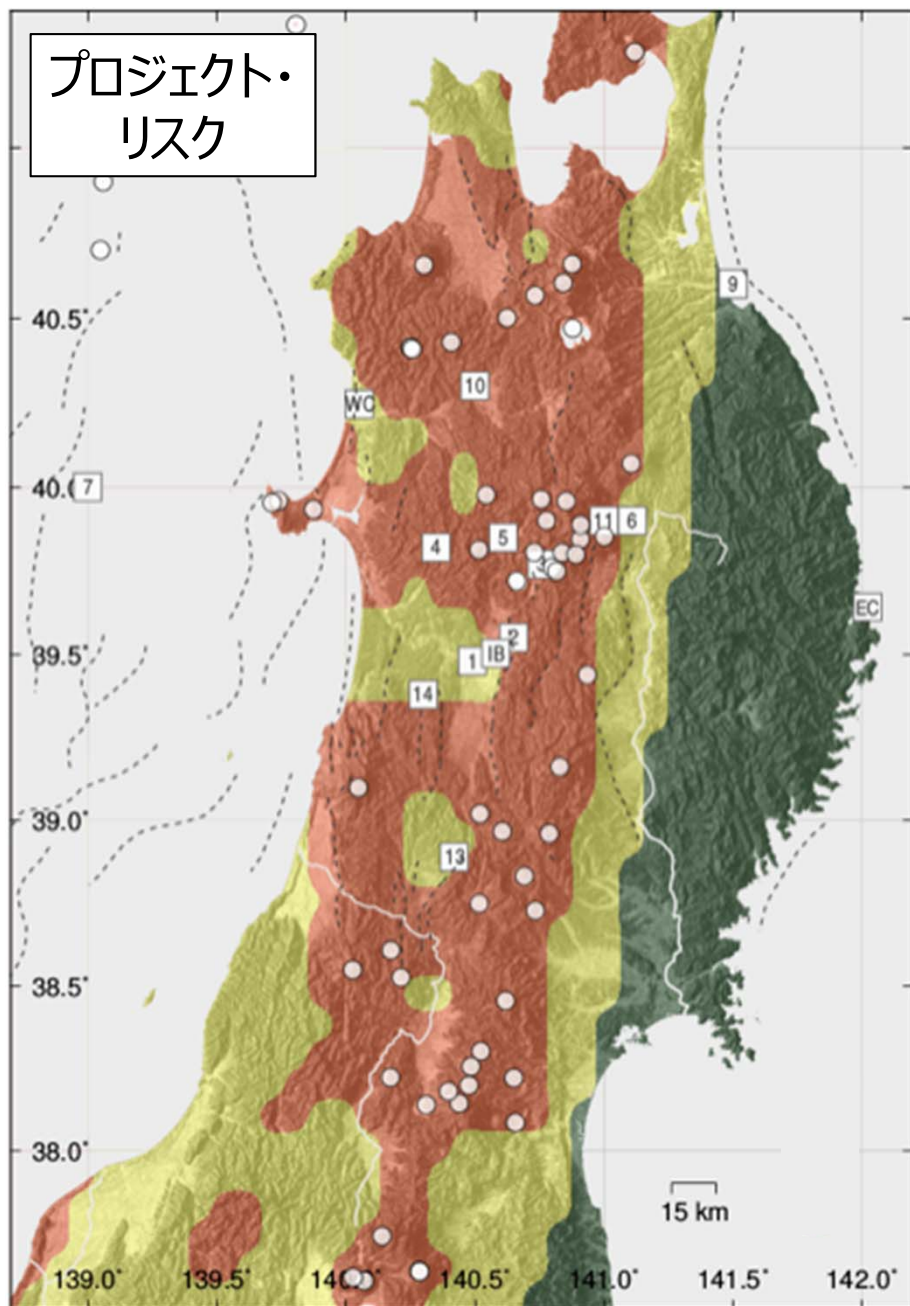


背弧域における火山活動（山元，2011を編集）

- 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**

# 将来の火山・火成活動の発生可能性に係る知見

大阪  
ご意見を反映



■ 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100km<sup>2</sup>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<sup>-6</sup>程度**

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

- 第四紀以前に形成された断層は、第四紀以降の**広域応力場**に応じて、あるいは局所的な**応力場の变化**などにより**再活動**
- 活断層であることが確認される事例もあることから、現時点では活断層であるとは認定されていないものの、**活動性を有する断層**が地下に存在する**可能性があると推測**
- 地層中において初期のひび割れが活断層に成長するためには極めて長い時間が必要であり、断層が現存しない場所で活断層が**新規に発生する可能性は極めて小さいと推測**
- **長さ10km程度**の断層により引き起こされると考えられる**M6.5以上**の内陸地震では、**震源断層が地表に出現**する事例が確認
- 地表において確認されていない断層が**地下深部から地表に伸展する可能性**を考慮しておくことが重要
- 1923年～2016年3月に発生した**M6.5以上**の内陸地震の発生頻度（1年あたり約**0.3回**）および断層活動による**影響範囲**がプロセスゾーンの幅として断層**長さの1/100程度**であること考慮し、プロセスゾーンの**出現可能性**を評価
- **プロセスゾーン**が「第四紀火山の中心から半径15km以内」を除外した範囲の処分場スケールの領域（5km×5km）に**出現する確率は、 $10^{-10}$ 回/年オーダー**





# 地震・断層活動の影響に係る知見

---

- 地震・断層活動に伴い、断層近傍（数m程度）の岩盤の**透水性が増加し、数年以内で活動以前と同様の状態に回復**した事例や、地下水の**湧出が数年にもわたって継続**する事例を確認
- 地震・断層活動に伴い、起源や水質などの異なる地下水が地下深部から上昇し混合したことや、酸化性地表水が地下深部に浸透したことなどに起因すると考えられる**地下水水質の変化**および**数年で活動以前と同様の状態への回復**に係る事例を確認



# 説明内容（地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化）

---

- 1 地質環境が安全確保に果たす役割（3.1節）
- 2 地層処分に適した地質環境の選定プロセス（3.2節）
- 3 検討対象母岩のモデル化（3.3節）
- 4 将来における自然現象の発生可能性（3.4節）
- 5 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映**
- 6 まとめと今後の取り組み（3.5節）

# 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映

## ■ 検討対象母岩の設定

7岩種から3岩種に絞り込んだプロセスを明確に示すべき

→ 7岩種から2岩種を除外し、残りの5岩種を3岩種に類型化した**プロセスとその科学・技術的根拠**について、本編・付属書に記述

## ■ 地下水流動解析の境界条件

地下水流動の境界条件の設定について記述すべき

→ 全国規模で実施した地下水流動解析の結果や第2次取りまとめに示されている動水勾配分布などに基づき**保守的に考慮**していることについて、本編・付属書に記述

## ■ 将来の自然現象の発生可能性

将来100万年間の自然現象の発生確率も考慮していることを明記すべき

→ 「第四紀火山の中心から半径15km以内」を除外した範囲を対象とした、火山フロントの背弧域における**火山の新規発生**および**断層（プロセスゾーン）の出現可能性の確率**について、本編・付属書に記述



# 説明内容（地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化）

---

- 1 地質環境が安全確保に果たす役割（3.1節）
- 2 地層処分に適した地質環境の選定プロセス（3.2節）
- 3 検討対象母岩のモデル化（3.3節）
- 4 将来における自然現象の発生可能性（3.4節）
- 5 前回の報告会での主なご意見と報告書への反映
- 6 まとめと今後の取り組み（3.5節）**

# まとめ

- 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であり、提示した地質環境モデルは**文献調査の段階以降における基本形**
- 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として・・・
  - 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、三段階の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

# 今後の技術開発への取り組み

- 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）から具体化

分類	実施項目
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"><li>➤ 火山・火成活動の発生および影響の評価技術の高度化</li><li>➤ 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</li><li>➤ 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</li><li>➤ 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</li><li>➤ 長期的な自然現象の発生可能性および地質環境の状態変遷に係る評価技術の整備</li></ul>
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"><li>➤ 水みちの水理・物質移動特性の評価技術の整備</li><li>➤ 沿岸海底下の地質環境特性の調査・評価技術の整備</li><li>➤ 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化</li><li>➤ 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</li></ul>
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"><li>➤ 自然現象の発生とその影響に係る科学的知見の蓄積</li><li>➤ 地質環境特性とその長期変遷に係る科学的知見の蓄積</li><li>➤ 地質環境調査・評価技術に係る技術的知見の拡充</li><li>➤ 品質マネジメントシステムの拡充</li><li>➤ 実践的な経験の蓄積</li></ul>



**ご清聴ありがとうございました**

---

# 参考文献 (1/3)

- 後藤淳一, 西尾光, 吉村公孝, ニール・チャップマン, 河村秀紀 (2014) : 日本の地層処分に向けた自然現象の影響の確率的評価手法, 原子力バックエンド研究, Vol. 21, pp. 21-22.
- 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 近藤浩文, 五嶋慶一郎, 村元茂則, 富岡祐一, 後藤和幸, 柏谷公希 (2013) : 沿岸域における地下水の流動性の年代測定による評価 – 三浦半島西部沿岸域でのボーリング調査 –, 地学雑誌, Vol. 122, pp. 116-138, doi: 10.5026/jgeography.2012ap01.
- 北海道立地下資源調査所 (1960) : 5万分の1地質図幅「豊富」(旭川 – 第15号) .
- IAEA (2011) : Disposal of radioactive waste, Specific Safety Requirements, IAEA Safety Standard Series, No. SSR-5.
- 岩月輝希, 石井英一, 新里忠史 (2009) : 北海道幌延地域における深部地球化学環境の長期変遷シナリオの構築, 地学雑誌, Vol. 118, pp. 700-716, doi: 10.5026/jgeography.118.700.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2017) : 平成28年度地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発報告書.
- 馬原保典, 中田英二, 大山隆弘, 宮川公雄, 五十嵐敏文, 市原義久, 松本裕之 (2006) : 化石海水の同定法の提案 – 太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と地下水年代評価 –, 地下水学会誌, Vol. 48, pp. 17-33, doi: 10.5917/jagh1987.48.17.
- 水野崇, 岩月輝希 (2006) : 地下深部における地球化学的環境の長期的変遷 – 炭酸塩鉱物中の微量元素に基づく解析例 –, 地球化学, Vol. 40, pp. 35-45, doi: 10.14934/chikyukagaku.40.33.
- 中田弘太郎, 長谷川琢磨 (2010) : 地下水年代測定評価技術の開発 (その10) – 北海道幌延地域における $^4\text{He}$ ・ $^{36}\text{Cl}$ 法適用の試み –, 電力中央研究所報告, N09027.
- 日本分析化学会北海道支部 (編) (1996) : 水の分析, 第4版, 化学同人.





## 参考文献 (2/3)

---

- 日本地質学会 (編) (2011) : 日本列島と地質環境の長期安定性, 地質リーフレット4, 地質環境の長期安定性研究委員会.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2017) : TOPAZ project, Long-term tectonic hazard to geological repositories: Toward practical application of the ITM-TOPAZ methodology, NUMO-TR-16-04.
- Ono, T., Yoshida, H. and Metcalfe, R. (2016) : Use of fracture filling mineral assemblages for characterizing water-rock interactions during exhumation of an accretionary complex: An example from the Shimanto Belt, southern Kyushu Japan, *Journal of Structural Geology*, Vol. 87, pp. 81-94, doi: 10.1016/j.jsg.2016.04.009.
- Ota, K., Amano, K. and Ando, T. (1999) : Brief overview of in situ contaminant retardation in fractured crystalline rock at the Kamainshi In Situ Test Site, *Proceedings of the International Workshop for the Kamaishi In Situ Experiments, Kamaishi, Japan, 24-25 August 1998*, JNC TN7400 99-007, pp. 67-76.
- Ota, K., Goto, J., Kunimaru, T., Moriya, T., Yoshimura, K. and Takeda, S. (2015) : Development of the NUMO Safety Case – Geological characterisation and synthesis –, *Proceedings of ANS 15<sup>th</sup> International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM 2015)*, Charleston, SC, USA, 12-16 April 2015, pp. 276-283, ANS.
- Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J. (2013) : Description of input and examples for PHREEQC version 3 – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, *USGS Techniques and Methods, Book 6, Chapter A43*, available only at <https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/>.
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2013) : 日本の火山 (第3版) , 200万分の1地質編集図 No. 11, 産業技術総合研究所 地質調査総合センター.

## 参考文献 (3/3)

- 産総研（産業技術総合研究所）：20万分の1日本シームレス地質図，<https://gbank.gsj.jp/seamless/>（2016年4月1日閲覧）。
- Sasao, E., Ota, K., Iwatsuki, T., Niizato, T., Arthur, R.C., Stenhouse, M.J., Zhou, W., Metcalfe, R., Takase, H. and MacKenzie, A.B. (2006) : An overview of a natural analogue study of the Tono Uranium Deposit, central Japan, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Vol. 6, pp. 5-12, doi: 10.1144/1467-7873/05-084.
- 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.
- 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.
- 杉山和稔，池田則生，齋藤茂幸，諸岡幸一，内田雅大（2003）：露頭観察に基づく新第三紀堆積岩中の水理・物質移行経路抽出の試み，*応用地質*，Vol. 43， pp. 372-381，doi: 10.5110/jjseg.43.372.
- 山元孝広（2011）：地質学から見た高レベル放射性廃棄物処分の安全評価－事象のシナリオに基づく長期予測の方法論－，*シンセオロジー*，Vol. 4， pp. 200-208，doi: 10.5571/synth.4.200.
- Yasue, K., Ishimaru, T., Kobori, K., Umeda, K. and Nakatsuka, N. (2014) : Subsurface geological mapping of the Japanese Islands, *Journal of the Geological Society of Japan*, Vol. 120, pp. XIII-XIV, doi: 10.5575/geosoc.2014.0043.