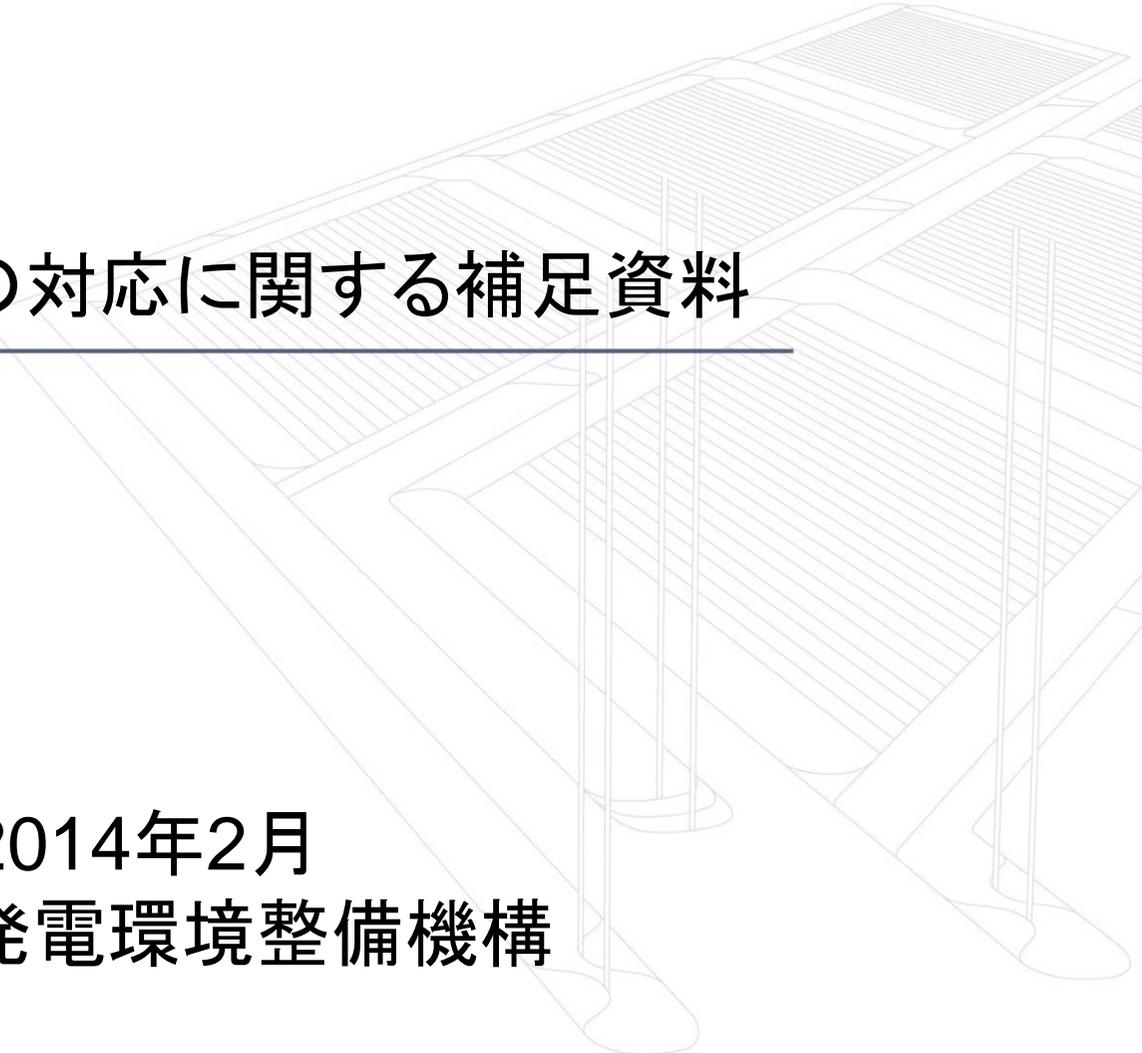




影響要因への対応に関する補足資料

2014年2月
原子力発電環境整備機構





1. 影響要因への対応に関する技術的根拠(資料-1の補足)
2. 天然現象の調査・評価の例(資料-2の補足)



1. 影響要因への対応に関する技術的根拠(資料-1の補足)

1.1 各調査段階における工学的対策と安全性の評価(1)

文献調査の段階

○天然現象の著しい影響の回避

- 火山・火成活動、断層活動、隆起・侵食作用のうち著しい事象の回避

○工学的対策および長期安全性の評価に関する実施

- 幅広い地質環境を対象とした人工バリア概念の適用性の検討
- 人工バリア設置環境、建設可能性、天然バリアの機能に関する調査項目の概要調査計画への反映

1. 1 各調査段階における工学的対策と安全性の評価(2)

概要調査の段階

○天然現象の著しい影響の回避

- 現地情報で新たに得られる情報を加味し、文献調査段階で明らかに適さない地域が除外されていることを確認

○好ましい地質環境特性の確認

- 地上からの物理探査やボーリング調査に基づく、地下施設設置対象候補となる岩盤の地質環境特性の調査

○工学的対策(概念設計)

•広域スケールでの検討事項

- 地形、海水準変動に伴う水理場の変化などを考慮した、施設設置可能位置および施設設置可能深度の検討

•処分場スケールでの検討事項

- 地下深部の地温に基づいた離間距離、廃棄体定置間隔の設計
- 地下深部の化学場に基づいた人工バリア、シーリング(プラグ・埋め戻し)の設計

○長期安全性の評価に関する実施

- 地下水シナリオ、変動シナリオを中心とした予備的な評価に基づいた、人工バリア設置環境、建設可能性、天然バリアの機能(低透水性、収着性など)の適性の確認。
- 上記、設計・評価結果に基づいた、調査項目の精密調査計画への反映。

1.1 各調査段階における工学的対策と安全性の評価(3)

精密調査の段階

○天然現象の著しい影響の回避

(概要調査の段階までに回避する。ただし、新たな情報が得られた場合には、回避の必要性を検討する。)

○好ましい地質環境特性の確認

- 地下調査施設からの施設設置対象候補となる岩盤の地質環境特性の調査

○工学的対策(基本設計)

- 処分場スケールでの検討事項

- 地下調査施設からの調査結果に基づいた地下施設設置可能位置・深度、人工バリア仕様などの概念設計結果の妥当性の確認・修正
- 地下深部の亀裂密集帯や活動性がきわめて低い断層・破碎帯の分布などを考慮したパネルレイアウト・形状の設計
- 人工バリア施工技術などの工学技術の実現性の実証的確認
- 設計に基づいた地質環境特性に関する追加的な調査項目のフィードバック。

○長期安全性の評価に関する実施

- 文献調査、地表からの調査、地下調査施設からの調査の結果、および基本設計の結果に基づいた、シナリオの構築(地下水シナリオ、変動シナリオ、希頻度シナリオ、事象の掛け合わせを含むなど)。シナリオに沿った安全性の評価。
- 安全性の評価に基づいた設計や地質環境特性に関する追加的な調査項目のフィードバック。

1.2 影響を与える事象毎の、影響の確認や工学的対策の見通しなど

対応方針が「工学的対策」であるものは、固有の地質環境特性に係る情報が無い現段階での、事象毎の影響の確認や工学的対策の見通しを示す。その他は、回避すべき理由や影響が限定的である根拠などを示す。

	影響要因	関連事象	対応方針
熱環境	熱源の移動, 発生	地熱活動	回避
		断層活動の摩擦熱	(限定的影響)
	地表の温度の上昇	地表面の気温変動	工学的対策
		火砕流による地表温度の上昇	工学的対策
力学場	岩盤のクリープ変形量の増大	地温上昇(地熱活動)	工学的対策
	岩盤の破断・破砕	処分深度に達する断層のずれ	回避(一部は工学的対策)
	岩盤の弾性変形	地震動による岩盤のひずみ	(限定的影響)
水理場	動水勾配の増加	隆起, 海水準変動	工学的対策
		地形変化	工学的対策
	地下水流動経路の変化	地震に伴う地下水位(または水圧)の変化	(限定的影響)
		流出点の変化, 塩水/淡水境界の位置の変化	工学的対策
		断層のずれに伴う透水性の増加	回避(広域スケールで評価)
涵養量の変化	涵養域の降水量の変化	(限定的影響)	
化学場	低pH地下水の流入	火山性熱水や深部流体の移動・流入	回避
	炭酸化学種を含む地下水の流入		
	高pH地下水の流入	超塩基性岩との反応した地下水の移動・流入	(限定的影響)
	酸化性地表水の流入	断層のずれに伴う透水性の増加	回避(条件による)



1.2 影響要因への対応に関する技術的根拠

熱環境

影響要因	関連事象	対応方針
熱源の移動, 発生	地熱活動	回避
	断層活動の摩擦熱	(限定的影響)
地表の温度の上昇	地表面の気温変動	工学的対策
	火砕流による地表温度の上昇	工学的対策

熱源の移動・発生：地熱活動

【NUMOの対応の考え方】

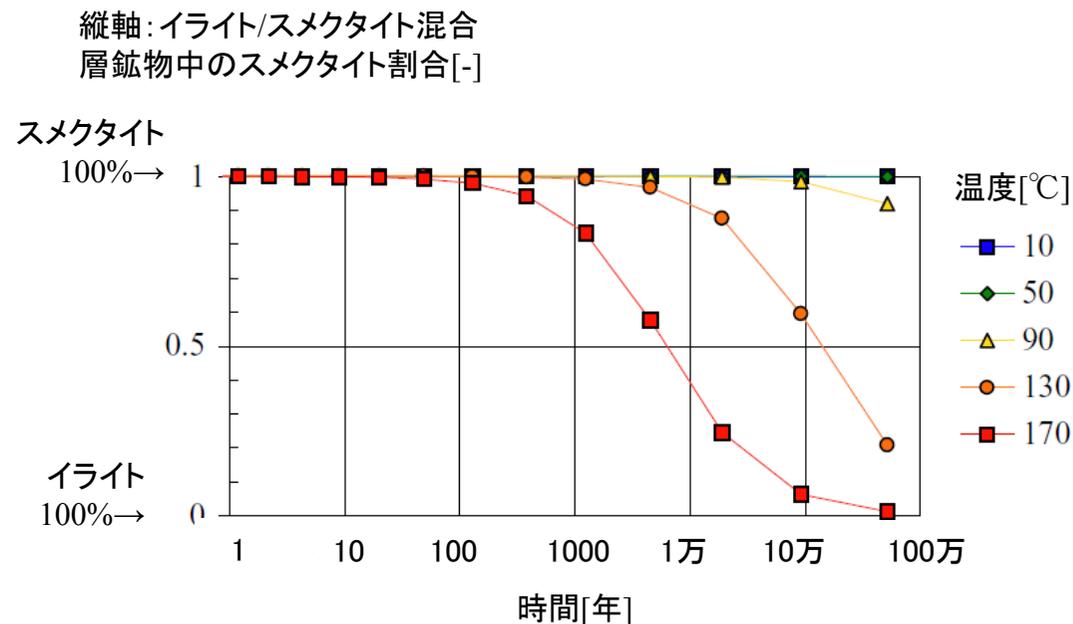
- 高い地温勾配を生じるような地熱活動が発生すると、地下深部の地温が高くなるので、**著しい影響を与える事象**と考えられる。したがって、将来地熱活動が発生する可能性が高い地域はサイト選定において**回避する事が必要**。

【想定する変動範囲など】

- 地熱活動に伴い地温勾配が5~10°C/100mを超える地域が国内にも分布する。(分冊1, 2.4.2)
- 国内における最高地温勾配は38°C/100mである。
- 地温勾配10°C/100m, 地表温度15°C, 深さ1,000mの地点に処分場を設計した場合, 処分場の地温は115°Cとなる。
- 現在の地熱活動域は、現在のテクトニクスが維持される限りは大きく変わらないと考えられる(八幡, 2002)。このため、ここでは地温115°Cは**長期にわたって持続する**と想定する。
- また、地熱活動であるため、**処分場スケールを超える広がり**を持つと考えられる。

【技術的論拠】

- 緩衝材の熱的影響による機能劣化は成分である粘土鉱物スメクタイトのイライト化により生じる。
- 長期に渡り処分環境が100°Cを超える場合、スメクタイトのイライト化が懸念されている(右図)。
- したがって、長期にわたって地温100°Cを超える環境では、スメクタイトのイライト化が顕著になると考えられる。
- 処分場を超える広がり**で**万年オーダーの長期にわたる高温状態であるため、影響を除くための断熱等を工学的に施すことは困難である**と考えられる。



時間経過に伴うスメクタイトのイライト化
(Karnland et al., 2000より)

•八幡正弘(2002):北海道における後期新生代の鉱化作用および熱水活動の時空変遷. 北海道立地質研究所報告, 73, 151-194.

•Karnland et al.(2000):"Long term test of buffer material Final report on the pilot parcels", SKB TR-00-22.

熱源の移動・発生：断層活動の摩擦熱

【NUMOの対応の考え方】

- 断層活動に伴う摩擦熱により150～400℃程度の熱水が断層破碎帯内において形成される可能性があるが、一時的なもので、粘土鉱物を熱変質させることなく、短時間で地温程度に戻ると考えられる。**著しい影響を与える事象ではない**と考えられる。

【想定する変動範囲など】

熱が発生している断層内の領域の大きさにもよるが、仮に1mの幅で深さ方向に一様に摩擦熱が発生していることを考慮して、熱伝動解析で簡易的に評価したところ、**100℃を下回るのに、400℃の条件で60日程度、200℃の条件で10日程度**であった。

【技術的論拠】

- イライト化は、スメクタイトと接触する地下水中のカリウムイオン濃度および温度に依存する(右上式)。
- 一方、室内試験、ナチュラルアナログの知見を基に、スメクタイトのイライト化に関する変質速度式が提案されている(右上式)。モンモリロナイトのイライト化(半減期として)は、海水程度のカリウム濃度(2mmol/dm³)においては、温度170℃で7000年程度かかる。温度90℃では10万年経過しても、ほとんど変化がない(右図)。
- したがって、**イライト化には万年オーダーの時間を要するが、これと比較して、摩擦熱による影響は短時間(1年未満)であり、イライト化には至らないと考えられる。**

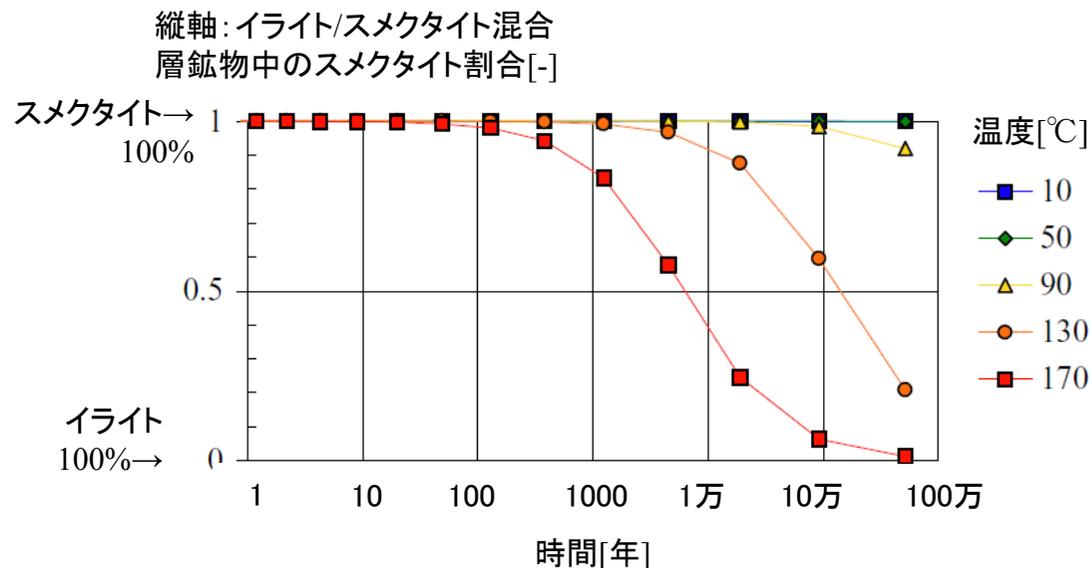
【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】地下水中のカリウム濃度の確認が必要。
- 【信頼性向上】摩擦熱の発生時間については、より詳細な解析(地下水対流、三次元化)により、評価の信頼性を向上させることが可能。

イライト化に関する変質速度式

$$-dS/dt = A \cdot [K^+] \cdot S^2 \cdot \exp(-E_a/RT)$$

S: イライト/スメクタイト混合層鉱物中のスメクタイト割合[-]
 A: 頻度因子, [K⁺]: カリウムイオン濃度, E_a: 活性化エネルギー,
 R: 気体定数, T: 温度



時間経過に伴うスメクタイトのイライト化
 (Karnland et al., 2000より)

Karnland et al.(2000): "Long term test of buffer material Final report on the pilot parcels", SKB TR-00-22.

地表の温度の上昇：地表面の気温変動

【NUMOの対応の考え方】

長期的な平均気温の変動に対しては、合理的な範囲で工学的対策が実施可能であると考えられる。

【想定する変動範囲など】

- 第2次取りまとめにおいて、地表の気温は現在に比べ間氷期の最温暖期には $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 高かったと考えられることが示されている(分冊1, 2. 6. 3)
- 長期的な平均気温の変動幅は最大でも 10°C 程度と考えられ、現在と比較しても著しく高温になることはない。地表付近の平均温度と地温勾配から見積もった平均地温の変動範囲も最大でも同程度と考えられる。
- 温暖化による地表気温の上昇による影響はこの範囲に収まると考えられる。

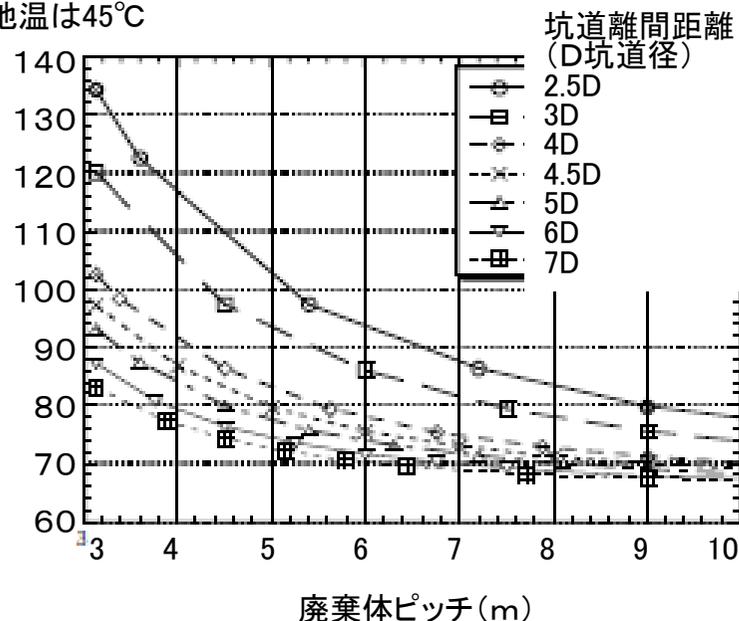
【技術的論拠】

- 緩衝材の最高温度がその制限温度に上記の地温上昇量を加えた値を超えないように、処分深度を浅くする、あるいは、坑道離間距離や廃棄体定置間隔を広くとるなどの対応が可能である(右図)。

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】温暖化や間氷期の気候による地表の温度と処分場設置深度の地温の推定。

緩衝材の温度($^{\circ}\text{C}$)
※地温は 45°C



廃棄体間隔の効果(分冊2, 図4.2.2-99)
(軟岩系岩盤処分坑道横置き方式)

地表の温度の上昇：火砕流による地表温度の上昇

【NUMOの対応の考え方】

- 大規模火砕流が長期間地表を覆ったとしても、地下300m以下の範囲の温度上昇は60°Cを下回る(地温勾配が3°C/100m以下の場合)。合理的な範囲で工学的対策が実施可能と考えられる。

【想定する変動範囲など】

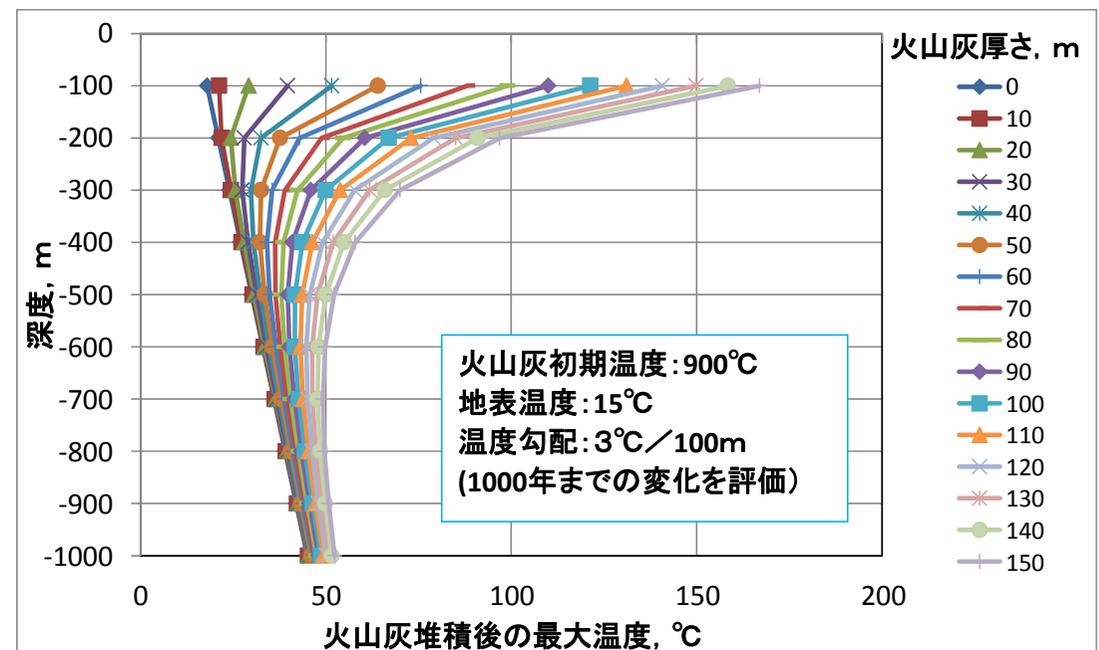
- 第四紀の主要な大規模火砕流30岩体の調査結果では、**最大層厚は概して50m以下**、最大級で150m程度であり、**堆積時の推定最高温度は450~600°C前後以上**である。また、**供給源からの距離に応じて堆積物の層厚が減る**(石丸・角田, 2002)。

【技術的論拠】

- 上記の変動範囲を踏まえた条件を設定し、降雨等の冷却条件等を保守的に含めない一次元熱伝導解析を実施した結果では、**300m以深の温度は60°Cを超えることはなかった**(右図)。
- したがって、処分深度の選択や廃棄体の配置間隔などの考慮により合理的な範囲で工学的対策が可能といえる。

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】**石丸・角田(2002)にある過去の大規模火砕流事例を参考に、火砕流を引き起こす可能性のある近傍の火山の有無、想定される火砕流の規模等を把握する。
- 【信頼性向上】**火砕流より到達距離は小さいが溶岩流についても影響を検討する。



火砕流堆積時の基盤岩中の温度変化

・石丸・角田(2002)に倣い、温度変化評価は1次元熱伝導モデルを用いた。

・石丸恒在, 角田地文(2002): 日本列島における大規模火砕流の特徴と熱的影響解析, サイクル機構技報 No.14 2002.3



1.2 影響要因への対応に関する技術的根拠 力学場

影響要因	関連事象	対応方針
岩盤のクリープ変形量の増大	地温上昇(地熱活動)	工学的対策
岩盤の破断・破碎	処分深度に達する断層のずれ	回避(一部は工学的対策)
岩盤の弾性変形	地震動による岩盤のひずみ	(限定的影響)

➤ 処分深度に達する断層のずれのうち、繰り返し活動し変位の規模が大きい断層については工学的対策が容易でなく回避が必要な理由を、それ以外の断層については、工学的対策や安全性の評価による確認の見通しについて説明する。

岩盤のクリープ変形量の増大: 地温上昇(地熱活動)

【NUMOの対応の考え方】

温度依存性が認められる場合には、クリープ変形量に基づいて人工バリアの設計に反映するなど、工学的対策を実施することが可能であると考えられる。

【想定する変動範囲など】

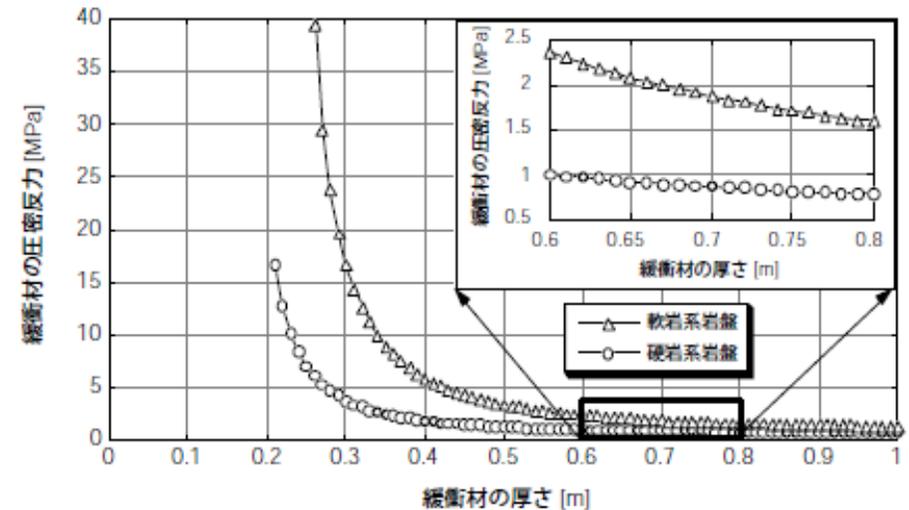
- 泥岩のクリープ特性の温度依存性はないが、凝灰岩には依存性があり、岩種により異なる(岡田, 2006)
- 凝灰岩を対象とした研究事例では、温度が80°C~95°Cの条件下での2次クリープ速度は、20°C~60°Cにおけるそれよりも、1オーダー程度増大するという報告がある(Shibata et al., 2007)

【技術的論拠】

- クリープ速度が増大する場合には一定時間に発生する**緩衝材の変形量が増加(間隙比が減少)するため**、オーバーパックの設計で用いる**作用荷重(圧密反力)が増大**
- 一方で、オーバーパックへの作用荷重のうちクリープ荷重が**占める割合は小さい**。また、現在の緩衝材厚さの設定値**0.7m程度ではクリープ変形などによる圧密圧力の変動は小さい(右図)**。
- したがって、緩衝材の**厚さを適切に設定**することで岩盤のクリープ変形によるオーバーパックへの**作用荷重を低減**することは可能。
- **深度を浅くし作用荷重を低減**することが可能
- 以上より工学的対策は可能と考えられる。

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】サイト毎に岩盤のクリープ特性の温度依存性に関するデータを取得する。



緩衝材厚さと緩衝材の圧密反力の関係
(分冊2, 図4.1.1-19)

- 岡田哲実(2006): 高温環境下における堆積軟岩の力学特性(その2) — 軸圧縮試験によるクリープ特性の温度依存性の評価. 電力中央研究所報告, N05057.
- SHIBATA, K., TANI, K. and OKADA, T. (2007): Creep behavior of tuffaceous rock at high temperature observed in unconfined compression test, Soils and Foundations, Vol. 47, No. 1, pp. 1- 10.
- 高治一彦, 鈴木英明(1999): 緩衝材の静的力学特性, JNC TN8400 99-041.

岩盤の破断・破碎：処分深度に達する断層のずれ(1)

【サイト選定で回避する対象について】

■ NUMOの対応の考え方

- 繰り返し活動し、変位の規模が大きい断層は、変位量が大きく、合理的な範囲の工学的対策が容易ではないと考えられる。

■ 想定する変動範囲など

- 確認されている主な活断層の平均変位速度は、0.01～10 m/1000年の範囲。(分冊1:2.3.1, 図.2.3-1)。数万年では数十cm～数百mの累積変位が想定される。

■ 回避が必要な根拠

- 緩衝材の安全機能(移行抑制)から見た要件は、緩衝材の低透水性が維持されることであり、好ましい地質環境特性として緩衝材に水みちを形成させるほどの岩盤変形が生じないことが考えられる。
- このような岩盤変形は、岩盤側の条件(力学特性, せん断速度, せん断の角度など)と緩衝材の設計(工学的対策)の関係から求まるが、岩盤側の条件が未定であることから、大凡の目安として緩衝材厚さ(数十cm)を越えるような大きなせん断変形とする。このような変形に対して水みちを生じさせないような工学的対策は困難であると考えられる
- 上記で想定する岩盤のずれの大きさは、緩衝材厚さを上回る可能性が大きい。

【サイト選定で回避せず工学的に対応する対象について】

■ NUMOの対応の考え方

- 繰り返し活動し、変位の規模が大きい断層以外の断層については、処分パネルの形状や大きさの設計, 廃棄体定置位置を合理的に設定するなどの工学的対策が可能であると考えられる。

■ 想定する対象

- (1) 小規模で変位の累積性が小さい活断層, (2) 既存の破断・割れ目

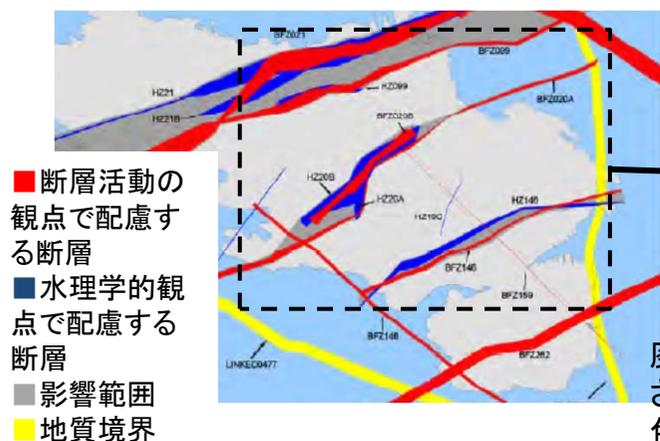
岩盤の破断・破碎：処分深度に達する断層のずれ(2)

【サイト選定で回避せず工学的に対応する対象について(つづき)】

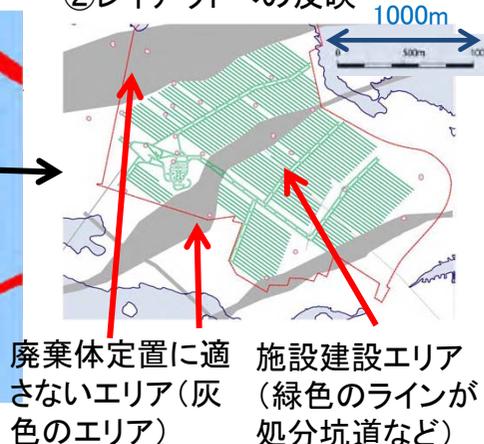
- 技術的論拠** 以下の検討事例のような絞り込んだ候補地内においても、工学的対策の技術的見通しがあると考えられる。
- (1) 小規模で変位の累積性が小さい活断層への対応：現地調査により**実際のサイトの断層の分布とその影響範囲を特定**し、これらの小さい活断層に配慮して、**断層の線上や近傍を外した**処分パネルの形状や定置場所を検討する(左下図)。
- (2) 既存の破断・割れ目への対応：**処分場から離れた活断層の影響**(右下図)の**可能性**を評価し、必要に応じてこれらの破断・割れ目に配慮して、坑道や廃棄体定置位置の配置を検討する。

処分深度の地質構造を反映した地下施設レイアウトによる対策の検討事例
(Posiva, 2012に加筆)

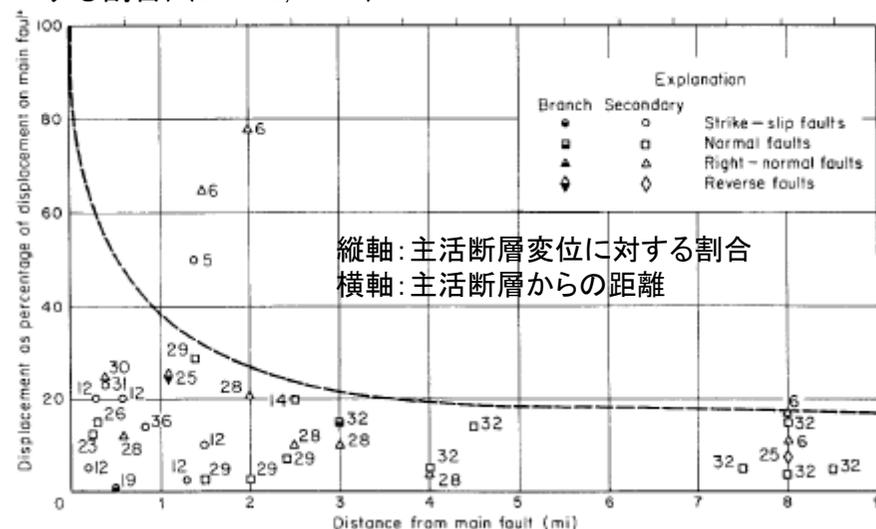
①配慮する地質要素の抽出



②レイアウトへの反映



主活断層から離れた副断層などの変位(主活断層変位に対する割合)(Bonilla, 1970)



■ サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取組み

【確認事項】・レイアウトで配慮すべき地質要素の抽出,

・処分場周辺の活断層の特性の把握と影響を受けると想定される既存の破断・割れ目の抽出

【信頼性向上】・離れた活断層の活動による応力場の変化, 既存の破断・割れ目の挙動などの把握

岩盤の弾性変形:地震動による岩盤のひずみ

【NUMOの対応の考え方】

- 地下深部の加速度は、深度に依存せず同一地点の地表観測値に対して1/3~1/5であり、地震動が処分場に入射しても人工バリアは岩盤と一体となって振動するため影響は小さい。
- ただし、長期的な影響については、再来性や人工バリア特性の変化などを考慮した解析などにより確認し、**必要に応じて人工バリア設計に反映**することが**可能**であると考えられる。

【想定する変動範囲】

- 東北地方太平洋沖地震で観測された**300m以深における最大加速度は176gal**(宮城県小野田)である(KiK-net)。

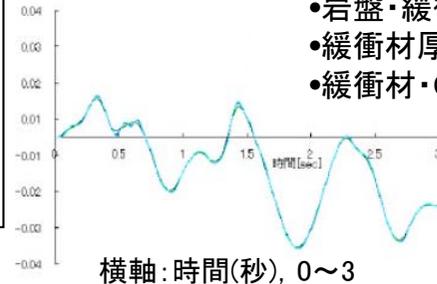
【技術的論拠】

- 過去に起こった巨大地震動を用いて、**埋設後の緩衝材の耐震安定性が以下のように確認**されている(分冊2, 4.3.3)。
 - 岩盤, 緩衝材, オーバーパックが一体となって振動(右図)
 - 緩衝材に生じるせん断ひずみは微小であり, また, 液状化が生じる可能性は低い。
- **解析用入力地震動の最大加速度は, 深度1000mで300gal程度, 深度500mで800gal程度**であり(谷口, 高治, 杉野, 森, 1999), 上記の観測値176Galを上回っている。

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】地下深部の地震観測に基づく地震動の設定
- 【信頼性向上】長期的な人工バリア状態の変遷を考慮した動的解析に基づく影響の確認, 振動試験による影響確認, 巨大地震を考慮した地震動の影響の確認, 解析体系の改良, 緩衝材等の力学挙動試験による特性値の拡充

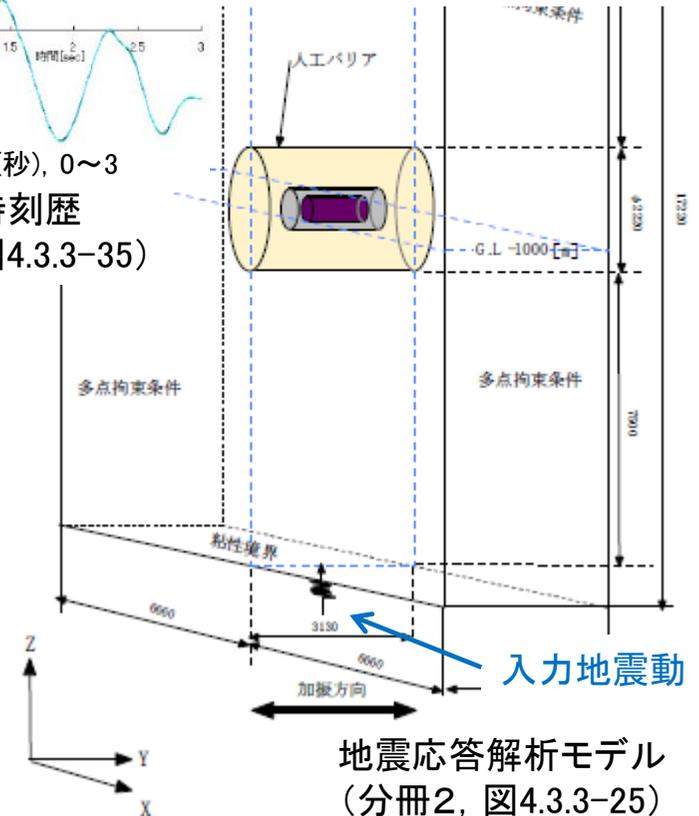
縦軸:変位(m)
-0.04~+0.04



横軸:時間(秒), 0~3
変位時刻歴
(分冊2, 図4.3.3-35)

解析の結果, 以下の点の変位の時刻歴は殆ど重なっている。

- 岩盤・緩衝材境界の岩盤側と緩衝材側
- 緩衝材厚さ方向中心での2点
- 緩衝材・OP境界の緩衝材側とOP側



地震応答解析モデル
(分冊2, 図4.3.3-25)



1.2 影響要因への対応に関する技術的根拠 水理場

影響要因	関連事象	対応方針
動水勾配の増加	隆起, 海水準変動	工学的対策
	地形変化	工学的対策
	地震に伴う地下水位(または水圧)の変化	(限定的影響)
地下水流動経路 の変化	流出点の変化, 塩水/淡水境界の位置の変化	工学的対策
	断層のずれに伴う透水性の増加	回避(広域スケールで評価)
涵養量の変化	涵養域の降水量の変化	(限定的影響)

動水勾配の増加: 隆起・海水準変動, 地形変化

【NUMOの対応の考え方】

地形変化や, 沿岸部においては隆起・海水準変動に伴う相対的海水準変動により, 広域スケールの地下水水頭分布が変化し, 処分場スケールの動水勾配が変化する可能性がある。処分深度を深くすることや施設配置の工夫などの工学的対策が合理的な範囲で実施可能と考えられる。

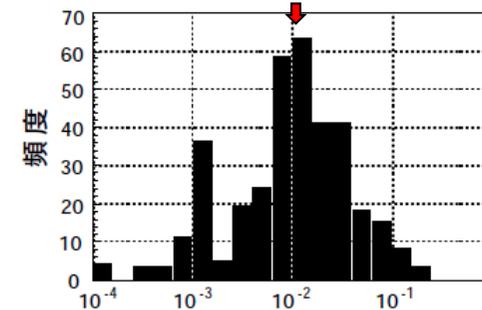
【想定する変動範囲など】

- 海水準変動は, +10m弱 (Kopp,R.E. et al,2009) ~ -150m程度 (Clark,P.U. et al.,2009など)と予想される。海水準低下後の沿岸部の地形は, 現海底下の地形に依存する。
- **変化後の地形**における地形勾配は, **現在の一般的に存在する低地~山地地形**の地形勾配の範囲と考えられる。
- 地表付近の動水勾配は地形勾配に強く支配される。地下深部の動水勾配は, 局所的地形の影響が少ないため, 地表付近に比べて緩やかになる(分冊1, 要約)。

【技術的論拠】

- 地形変化や海水準変動による広域スケールの地下水水頭分布は, 変化後の地形に依存する。
- 低地~山地地形の**地形別の動水勾配の違い**は, **レファレンスの条件に対して1桁程度**であり(右図), この違いが安全性に与える影響が確認されている(分冊3, 6.1.3.3)。
- 既往の影響評価結果を踏まえて, 地形変化の影響を見通すことが可能であり, 必要に応じて, 処分深度を深くすることや施設配置の工夫などが出来る。

レファレンスの動水勾配



データ数: 365
平均
全体: 0.015
低地: 0.008
台地: 0.016
丘陵: 0.035
山地: 0.061

地形別動水勾配分布(地下水面傾斜)
(分冊1, 図3.3-2)

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- **【確認事項】**隆起・侵食などによる地形変化と海水準変動を踏まえて将来の地下水の水頭分布を推定する。

Kopp,R.E., Frederik J. Simons,F.J.X., Mitrovica,X., Maloof,A.C. &Oppenheimer1,M. (2009)Probabilistic assessment of sea level during the last interglacial stage. Nature, 462,863-867.

Clark,P.U., Dyke,A.S., Shakun,J.D., Carlson,A.E., Clark,J., Wohlfarth,B., Mitrovica,J.X., Hostetler,S.W. and Marshall McCabe, A. (2009) The Last Glacial Maximum. Science, 325, 710-714.
Dutton,A. and K. Lambeck (2012) Ice Volume and Sea Level During the Last Interglacial.

動水勾配の増加：地震に伴う地下水位（または水圧）の変化

【NUMOの対応の考え方】

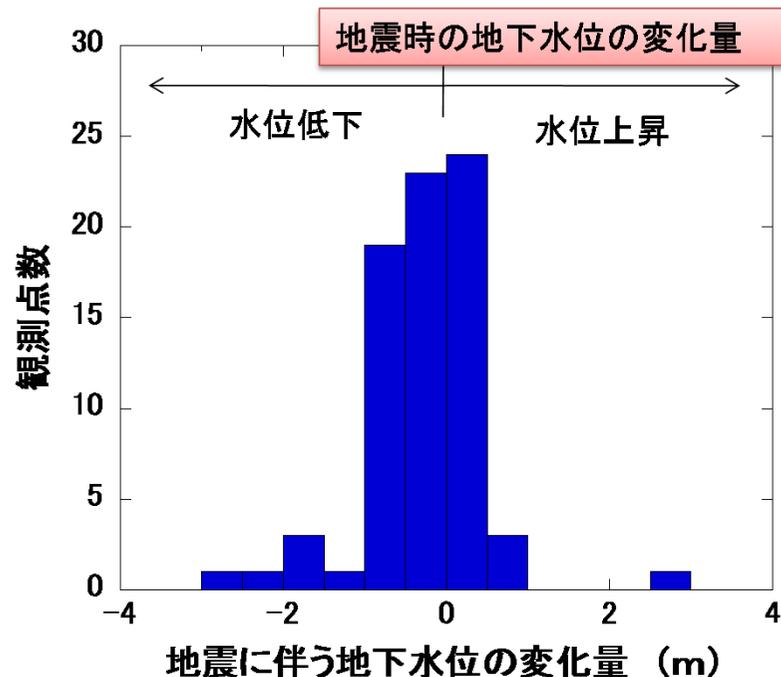
地震に伴う地下水位（または水圧）の変化は、広域スケールで発生するが、サイトの地質構造（遮水性断層の有無など）に依存して、処分場スケールでも変化すると考えられる。影響の程度は、水圧変化が発生している頻度や範囲に依存するが、これまでの観測の範囲の変化であれば、新たな**工学的対策は必要ない**と考えられる。

【想定する変動範囲など】

- 2011年東北地方太平洋沖地震では、地下水の水位や水質はわが国の広範囲にわたり変化が観測されたものの、ほとんどの観測地点において1年以内に地震発生前の状態に回復している。
- 2011年東北地方太平洋地震後、井戸の観測により得られた**水位変化は3m以内**に収まっている。

【技術的論拠】

- 動水勾配は、単位距離当たりの水位変化量であり、**地下水面の変化が広域的であることを考慮すると、動水勾配の変化量は小さい**ものと推察され、著しい影響を与える事象ではないと考えられる。



産業技術総合研究所公開のWell Webのデータ
(<https://gbank.gsj.jp/wellweb/GSJ/index.shtml>)
を用い地震後の水位変化量を抽出・ヒストグラム化

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【信頼性向上】調査した中で湧水が継続している事例もあり、原因が十分に解明されていない。湧水となる地下水の起源の確認や局所的な水位変化に関して事例調査を続け、事象を一般化することが必要である。

地下水流動経路の変化：流出点の変化，塩水／淡水境界の位置の変化

【NUMOの対応の考え方】

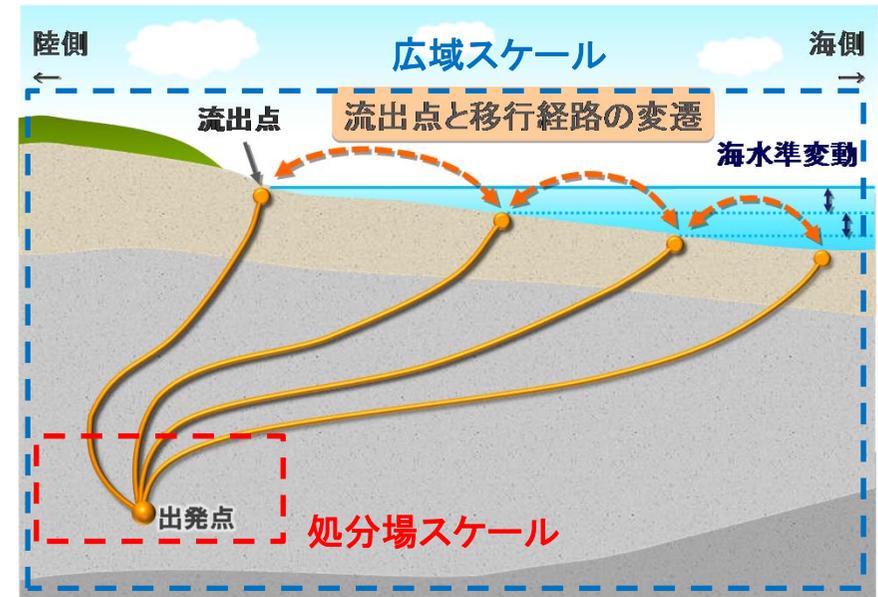
- 沿岸部では海水準変動により，広域スケールで塩淡水境界位置や流出点が変わり，**処分場スケールにおける地下水流動経路が変化**する可能性があるが，そのような影響を取り込んで，処分場の設置位置や深度など工学的対策や安全性の評価を実施することは可能である。なお，**広域スケール**における流出点の変化については**安全性の評価において考慮**する。

【想定する変動範囲など】

- 海水準の変動は+10m弱(Kopp,R.E. et al,2009)～-150m程度(Clark,P.U. et al.,2009など)と予測されている。
- 塩淡水境界が海退，海進時に前進，後退するのに合わせて流失点も沖合へ，陸地へと移動する。
- このような塩淡水境界，流出点の移動に合わせて流動経路も変化する。

【技術的論拠】

- 広域スケールにおける流動経路の変化に対して，**処分場スケール付近における流動経路の変化は小さく，経路長や岩盤の移行特性の変化は小さい**と考えられる(右図)。
- したがって影響を見通し，必要に応じて処分場の設置位置の工夫などの対策が可能である。
- なお，**広域スケール**においては，流出点の変化に対応した，**性能を評価することが可能**である。



【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】地形，岩盤水理特性を踏まえた3次元地下水流動解析結果や地下水化学環境の情報から，処分場の適切な位置を検討する。

涵養量の変化：涵養域の降水量の変化

【NUMOの対応の考え方】

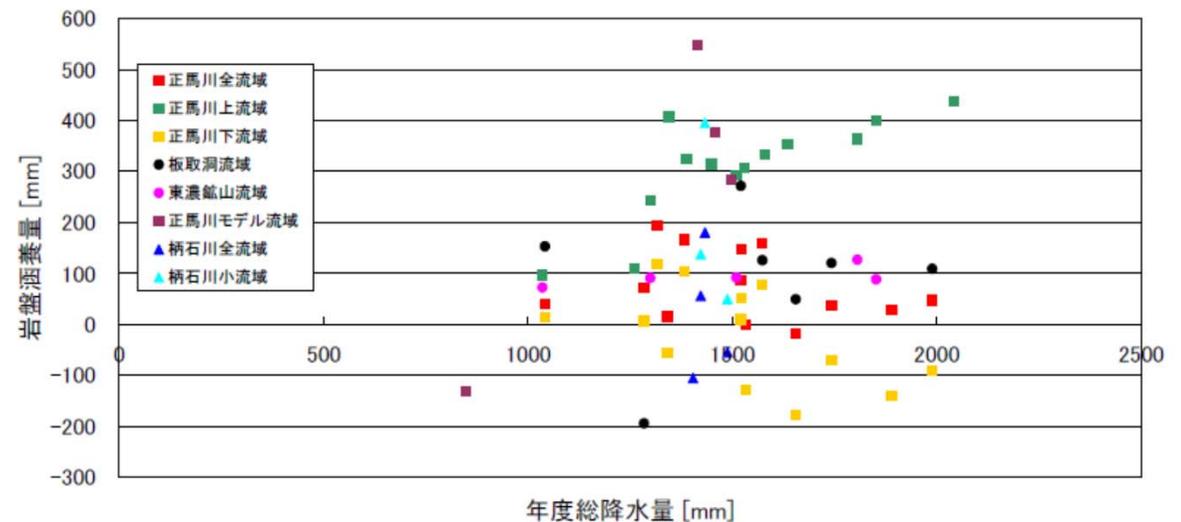
- 涵養量は、広域スケールにおいてサイトの地形や局所的な気候に依存するので、サイトごとに涵養量を評価し、処分場スケールに対する影響を評価する必要がある。ただし、氷期における降水量は現在の5～7割程度に減少にとどまり、**著しい影響を与える事象とはならない**と考えられる。

【想定する変動範囲など】

- 氷期における降水量は現在の5～7割程度に減少するものと予想されている(分冊1, 2.6.3)。
- 降水量の変動に対応して涵養量も変動する(右図)

【技術的論拠】

- 現在は間氷期であるため、将来の降水量は間氷期には現在と同じ程度、氷期には**減少**すると考えられる。
- 涵養量の減少は**動水勾配を減少**させると考えられる。
- 以上のことから将来の涵養量の変化は著しい影響を与える事象とはならないと考えられる。



瑞浪における各年度の降水量と岩盤涵養量の関係
(核燃料サイクル開発機構, 2005, 図4.2.3-12)

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】シミュレーションにより想定する将来の地形変化に降水量等の気候変動を併せて、将来の地下水流動状況を想定する。

核燃料サイクル開発機構(2005):高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築,
一分冊1 深地層の科学的研究一,核燃料サイクル開発機構 JNC TN1400 2005-014



1. 2 影響要因への対応に関する技術的根拠

化学場

影響要因	関連事象	回避の必要性
低pH地下水の流入	火山性熱水や深部流体の移動・流入	回避
炭酸化学種を含む地下水の流入		
高pH地下水の流入	超塩基性岩と反応した地下水の移動・流入	(限定的影響)
酸化性地表水の流入	断層のずれに伴う透水性の増加	回避(条件による)

低pH地下水，炭酸化学種を含む地下水の流入：火山性熱水や深部流体の移動・流入

【NUMOの対応の考え方】

- 将来，地熱活動が活発化した際，pH低下や炭酸富化の可能性はある。また深部流体（非火山性熱水）も同様の可能性はある。
著しい影響を与えるので，そのような地域をサイト選定において回避する必要がある。

【想定する変動範囲など】

- pHは火道近傍で4.8以下，それ以遠（15km程度以遠）は中性～弱アルカリ性と考えられる。
- 水質は，火道ごく近傍で SO_4^{2-} 卓越，近傍では Cl^- 卓越，その周りで HCO_3^- 卓越。
- また，深部流体についても同様の影響を考慮する必要がある。（以上，第4回資料2，p37より）

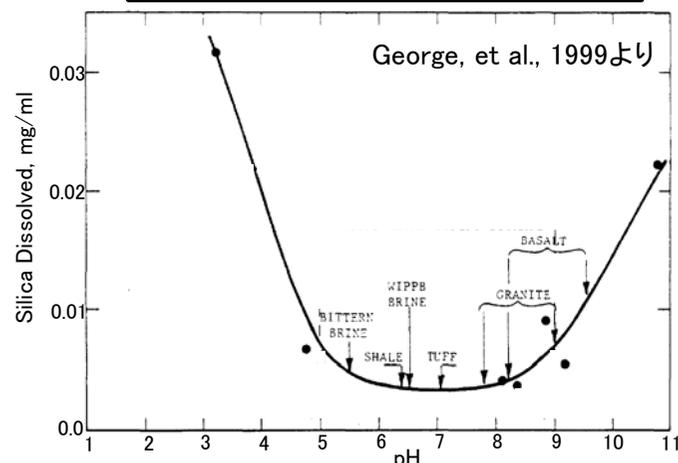
【技術的論拠】

- 酸性条件では，**ガラス固化体が溶解しやすい**（右上図，George, et al., 1999 など），**緩衝材が変質しやすい**，一部の放射性物質の**溶解度が増加しやすい**，**緩衝材，および天然バリアの収着能が低下**する条件となる。
- また，オーバーパックに関しては，顕著な腐食現象である**局部腐食を招く不動態化**の回避が望まれる。これまでの実験の結果から，炭酸化学種の濃度の高い環境では不動態化しやすいことが示される（右下図，谷口ほか，1999）。
- 地熱活動，深部流体による酸性化，炭酸富化は**広い範囲にわたり，天然バリア等への影響は工学的対処が難しい**。

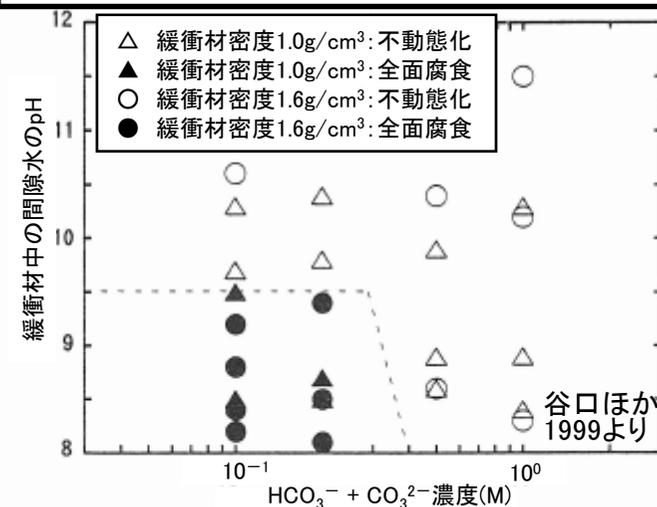
George, et al., (1999): "The Chemical Durability of Savannah River Plant Waste Glass as a Function of Groundwater", Journal of American Ceramic Society., DP-MS-81-104.

谷口 ほか(1999): "ベントナイト中における炭素鋼の不動態化条件の検討", サイクル機構技報告, No.4, pp.87-91.

ガラス固化体の溶解挙動のpH依存性



オーバーパックの腐食挙動の炭酸化学種濃度依存性



高pH地下水の流入：塩基性岩と反応した地下水の移動・流入

【NUMOの対応の考え方】

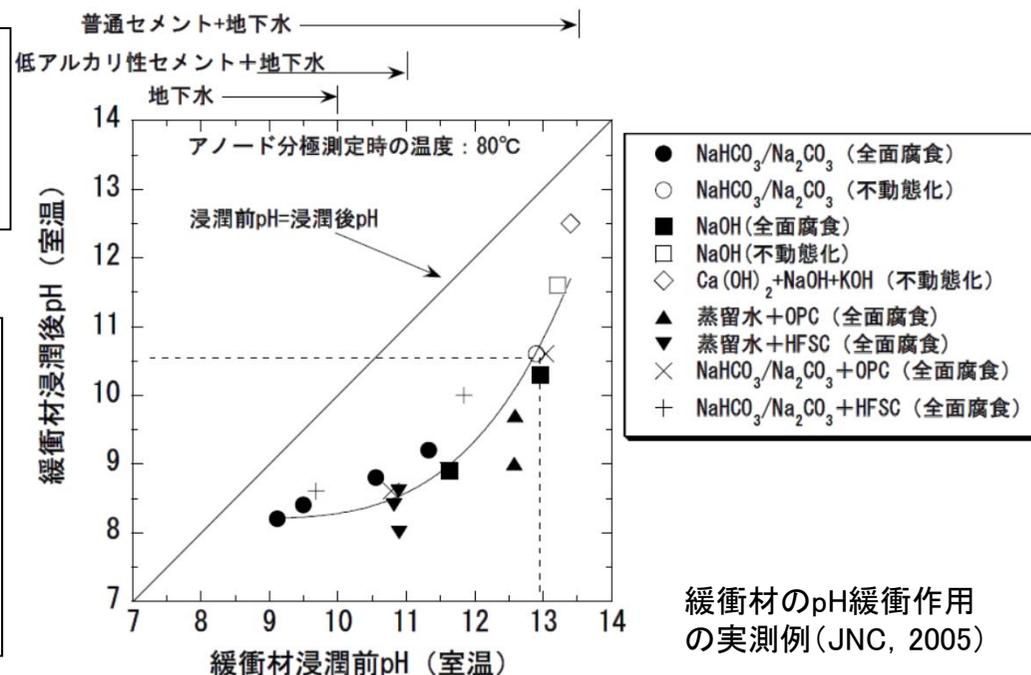
- 超塩基性岩と地下水との反応により蛇紋岩化作用が生じ、アルカリ性地下水が生成するが、この際のpHは11程度である。また、**影響の範囲は限定的であり**、工学的対策により対応可能である。

【想定する変動範囲など】

- 蛇紋岩化に伴うpHとしては、11程度で、最高11.7の報告がある(原環センター, 2013など)。
- また、起源は特定されていないが、10-11程度のアルカリ性の地下水がある(板寺, 2012)。

【技術的論拠】

- 人工バリアを構成する緩衝材にはpH緩衝作用が期待できる。例えば、緩衝材外側のpH(右図の“緩衝材湿潤前pH”)が11-12程度でも、緩衝材の内側のpH(“緩衝材湿潤後pH”)は8.5-9.5程度となる(JNC, 2005; 右図)。
- したがって、**外部の地下水として高pH水が流入しても、オーバパックの不動態化、ガラス固化体の溶解速度の促進に至らないと考えられる。**



【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

【確認事項】超塩基性岩やアルカリ性の地下水の分布を確認し、地下水流動性評価を踏まえて影響が及ぶ範囲を確認する。

【信頼性向上】緩衝材のpH緩衝性について、定置後初期の再冠水の過程における効果などについて検討する。

- 原子力環境整備促進・資金管理センター(2013):平成24年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 多重バリアの長期安定性に関する基礎情報の収集及び整備.平成19年度~平成24年度とりまとめ報告書.
- 板寺一洋(2012):“水文科学が解き明かす不思議な天然水”、日本水文科学学会誌、Vol.42、No.1、pp.21-28
- 核燃料サイクル開発機構(2005):高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 一分冊2工学技術の開発一、JNC TN1400 2005-015、p.25.

酸化性地下水の流入:断層のずれに伴う透水性の増加

【NUMOの対応の考え方】

- 一定の条件下で発生すると考えられる。このような現象が発生した場合には、放射性物質の難溶解性や収着性など幅広い機能に影響を与えることから、著しい影響を与える事象と考え、回避すべきと考えている。

【想定する変動範囲など】

- 野島断層では、深度1,300mのカタクレーサイト中の開口性割れ目まで地表近くの酸化性な水が深部まで流入したものと解釈されている。また、影響範囲はまた活断層破碎帯の近傍数十mと考えられる(分冊1, 2.3.2)

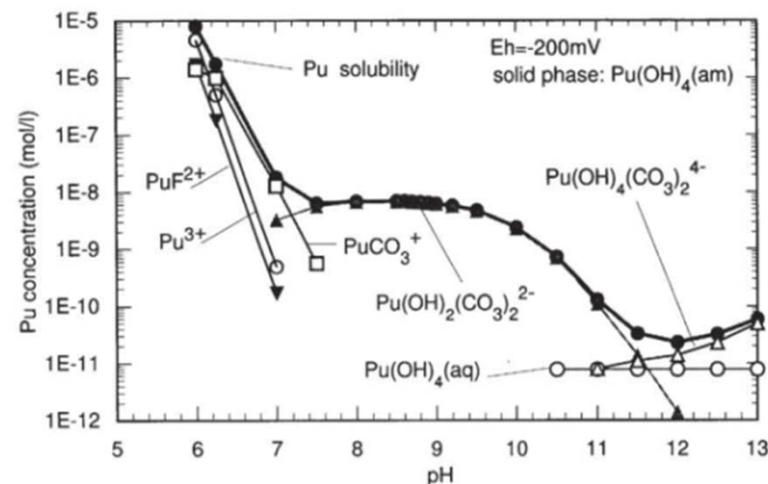
【技術的論拠】

- 以下に示すように酸化性条件では、核種の溶解度が増加し、緩衝材及び天然バリアの収着性が低下する。
 - ✓ 核種によっては酸化性条件で溶解度が著しく高くなる(武田, 1999)。
 - ✓ 同じpHであっても、Ehが異なると、核種の溶解度を支配する化学種が異なり、とくに酸化性の雰囲気では顕著に溶解度が高くなる(Barbara, 2005)
 - ✓ Se, Tc, Np, Pa, Pu およびUなどは、酸化性条件で化学形態が変化し、緩衝材や地質媒体に対する収着性が低下する(分冊3, 6.2.1 : 三原, 2006)。
- 断層のずれ及びそれに伴う地下水流入を工学的に対処することは難しい。

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】サイト毎に、涵養量や地形等を踏まえて、処分深度に達する断層のずれによる酸化性地表水の引き込みによる擾乱の範囲を解析評価する。

pHの違いによる溶解度の変化の例



武田, 1999より

• 武田聖司(1999): “地下水中におけるAm, Pu, Tcの溶解度の解析”, JAERI Research 99-047.
Solubility in Groundwater, JAERI-Research 99-047.

• Barbara(Ed.)(2005): Environmental geochemistry, p.235.
• 三原(2006): TRU廃棄物処分システムの安全評価における核種移行データセット, JAEA-Review 2006-011.



2. 天然現象の調査・評価の例 (資料-2の補足)

天然現象に関する調査・評価項目および評価事例の一覧

	調査・評価項目	調査・評価事例
火山・火成活動	火山の分布および地熱活動の評価	<ul style="list-style-type: none"> •地熱活動(熱・熱水・ガス)の調査事例 •地下物理探査に基づく地殻下部のマグマの分布の調査・評価事例
	深部流体などの非火山性熱水の評価	深部流体の調査事例
断層活動	繰り返し活動し、変位の規模が大きな断層の分布の評価	•断層の分布の評価事例
	活動性の評価	•断層の活動性の評価例
	断層の影響範囲の評価	•断層破碎帯の調査例
隆起・侵食	隆起量・侵食量の評価	•隆起量・侵食量の評価例
	表層付近の酸化帯分布の評価	•表層付近の酸化帯分布の評価例



火山・火成活動：地熱活動（熱・熱水・ガス）の調査事例

【評価内容】

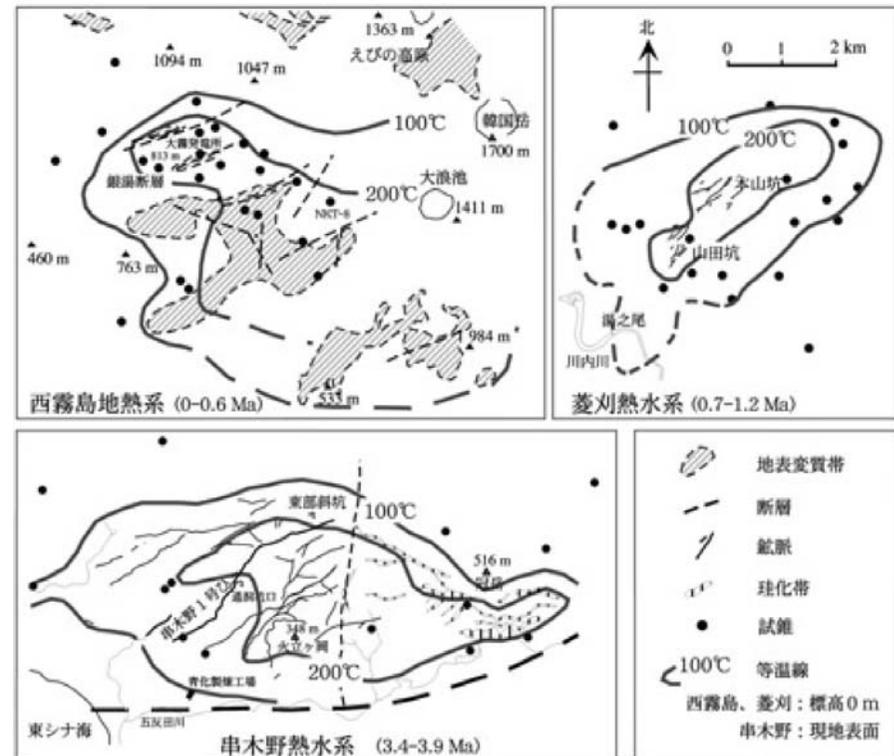
- 概要調査地区において、現地調査に基づいて、火山活動の地表の痕跡である、熱・熱水・ガスの有無と分布を確認する。これらが分布する地域は、今後も地熱活動が継続すると考えられることから、回避して、精密調査の範囲を設定する。

【適用する調査技術】

- 地表踏査，物理探査，ボーリング調査（右の例），地化学分析などにより，著しい熱・熱水対流，熱水・噴気（火山性ガス），著しい第四紀の熱水変質帯，熱源の有無や分布を確認する。

【信頼性向上に向けた取り組み】

- すでに確立された手法であり，新規の技術開発の必要性はないと考えられる。ただし，調査事例を蓄積・分析し，その手順や留意すべき点などを，実際のサイトにおける調査計画に反映することで，調査の合理化や，調査結果の信頼性の向上に資すると考えられる。



熱水変質帯の分布に基づく熱水系の分布の評価事例(井澤, 2004)

火山・火成活動：地下物理探査に基づく地殻下部のマグマの分布の調査・評価事例

【評価内容】

- 火山活動の痕跡が認められない場合でも、地下深部にマグマ溜りが存在する可能性を評価する。

【適用する調査技術】

- 物理探査，地震観測，測地観測などにより，地球物理学的アノマリー（地震波速度，比抵抗，重力，磁気，温度），火山性地震，低周波微動，地殻変動の有無や分布を確認する。

【調査の信頼性向上に向けた取り組みの事例】

- 右記のような，物理探査技術を用いたマグマだまりの事例調査が実施されている。

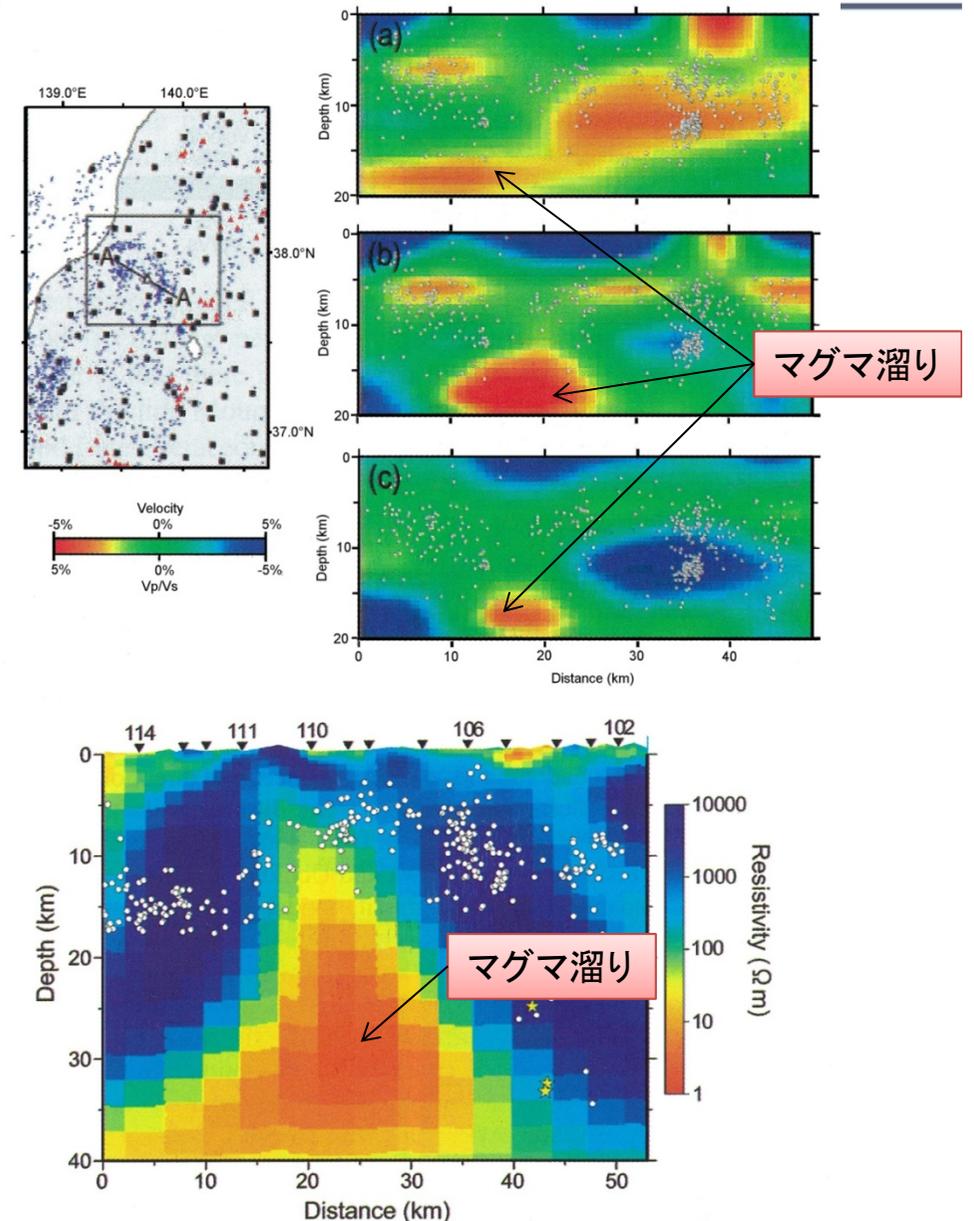
地球物理学的手法を用いたマグマの存在の検討例

(Umeda, 2009)

上図：飯豊山を横切る東西(A-A')の地震波速度構造の断面図〔(a)P波，(b)S波，(c)Vp/Vs〕。

下図：同地域のMT法探査の二次元比抵抗モデル断面図(白点は微小地震の震源，黄色の☆印は深部長周期地震源)。

両図における深度15km以深のアノマリー(赤色)がマグマの存在を示唆している。





火山・火成活動：深部流体の評価

【評価内容】

- 火山活動の痕跡が認められない場合でも、地下深部にマグマ溜りが存在する可能性を評価する。

【適用する調査技術】

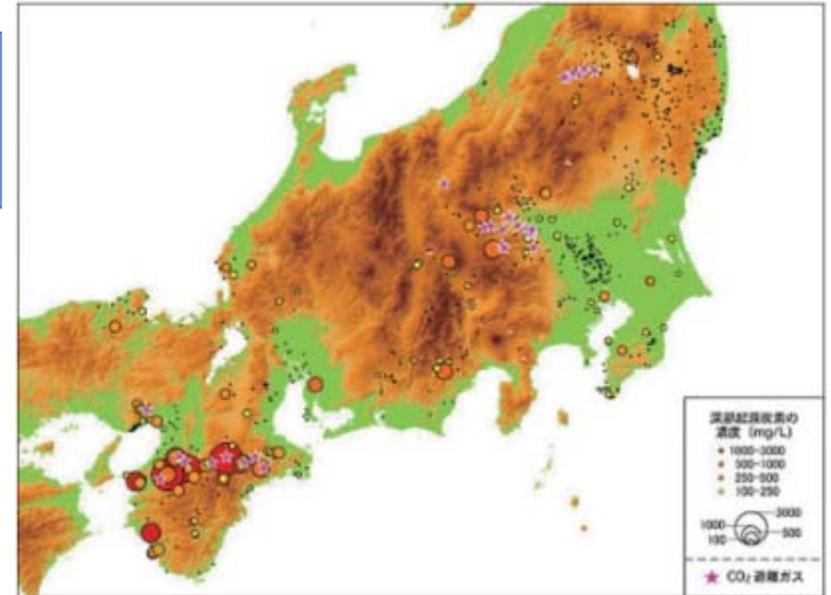
採水調査(水温, 地下水水質, 同位体, ガス成分)や岩石コア採取。
・水素酸素, 炭素, ヘリウム同位体比測定
地下水起源と混合評価技術。

【信頼性向上に向けた取り組みの事例】

- 右記に示す深部流体に起因すると考えられる炭素濃度や遊離ガスの分析などの事例調査が蓄積されている(産総研, 2007, 2012 など)

参考文献

- 産業技術総合研究所(2012): 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料, 地質調査研究資料集, No. 560.
- 岩月ほか(1998): 深地層を対象とした地下水の地球化学調査の現状, バックエンド研究, Vol.



地下水中の深部起源無機炭素濃度および二酸化炭素の遊離ガスの分布(産業技術総合研究所, 2007)

断層活動：断層の分布の評価事例(1)

【評価内容】

- 地表の断層の痕跡や、地下物理探査の結果に基づいて地上および地下の断層の分布を把握する。

【適用する調査技術】

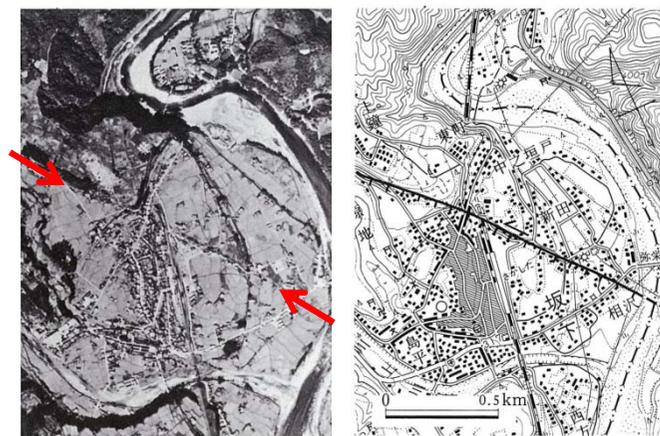
- 空中写真判読(右上図), 地下物理探査(右下図)などにより, 断層の分布を調査する。

【信頼性向上に向けた取り組み】

- 断層が未成熟な場合や変位が小さい場合は, 空中写真判読だけでは, 見落とす可能性がある。ただし, そのような場合においても, 反射法地震波探査やボーリング調査, トレンチ調査などを組み合わせることで, 断層を特定できることが, 事例調査により示されている(井上ほか, 2002など)。

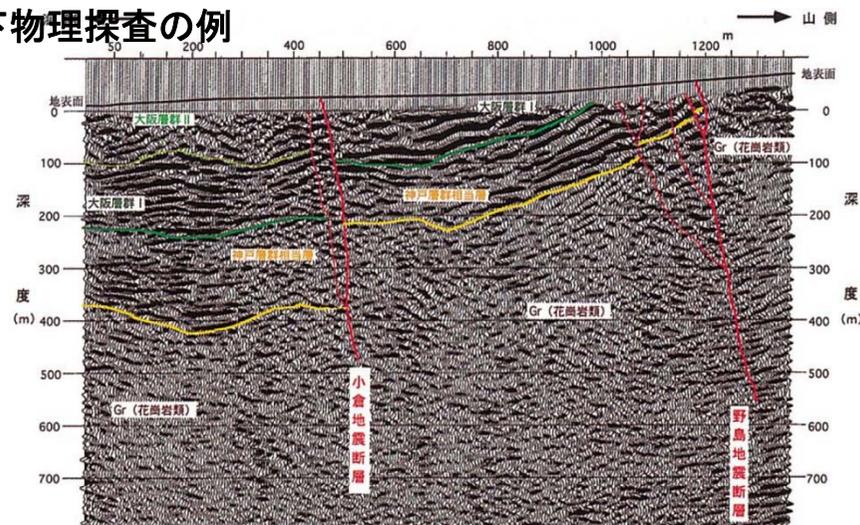
(続く)

空中写真判読の例



活断層研究会編(1991)阿寺断層の例(赤矢印はNUMO追記)

地下物理探査の例



地震断層を横断する反射断面図(岡田ほか, 2000:原著 是石ほか, 1995)

岡田勝也・池田研一・長谷川達也編(2000):活断層調査から耐震設計まで, 鹿島出版会, 203p.

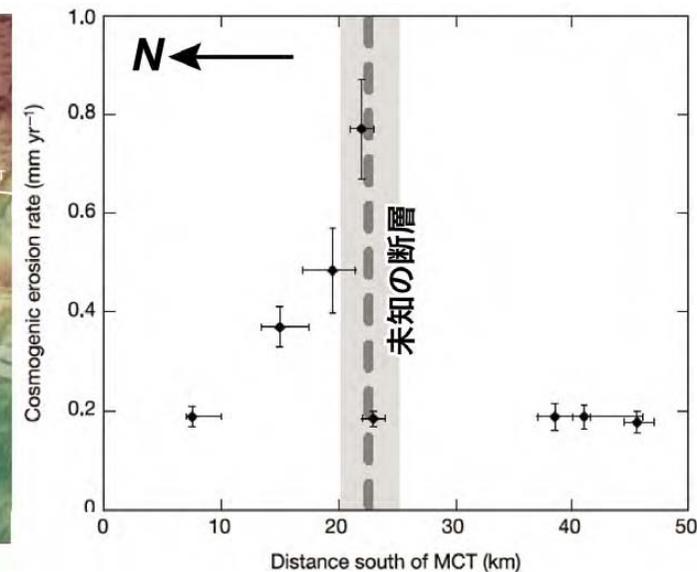
是石康則・江尻寿延・松井和夫・衣笠善博(1995):北淡町野島断層における反射法地震探査, 物理探査学会第92回学術講演会論文集, pp.255-259.

断層活動：断層の分布の評価事例(2)

【信頼性向上に向けた取り組み】

(続き)

- 断層活動の痕跡が不明瞭な場合は、変動地形、隆起による段丘面の分析や侵食量の空間分布などから(右図の例)、断層の存在が間接的に確認された事例のレビューもある(産総研, 2012)。



TCN(¹⁰Be)による侵食速度の較差から未知の断層が検出された事例。侵食速度の急変により現在地形的には不鮮明な断層の存在が推定される。(原著Wobus et al., 2005 に追記)(産総研, 2012)

断層活動:断層の活動性の評価例

【評価内容】

- 断層の活動の履歴などに基づいて、過去の断層の活動性を評価し、将来も活動する可能性がある場合に回避して、精密調査の範囲を設定する。

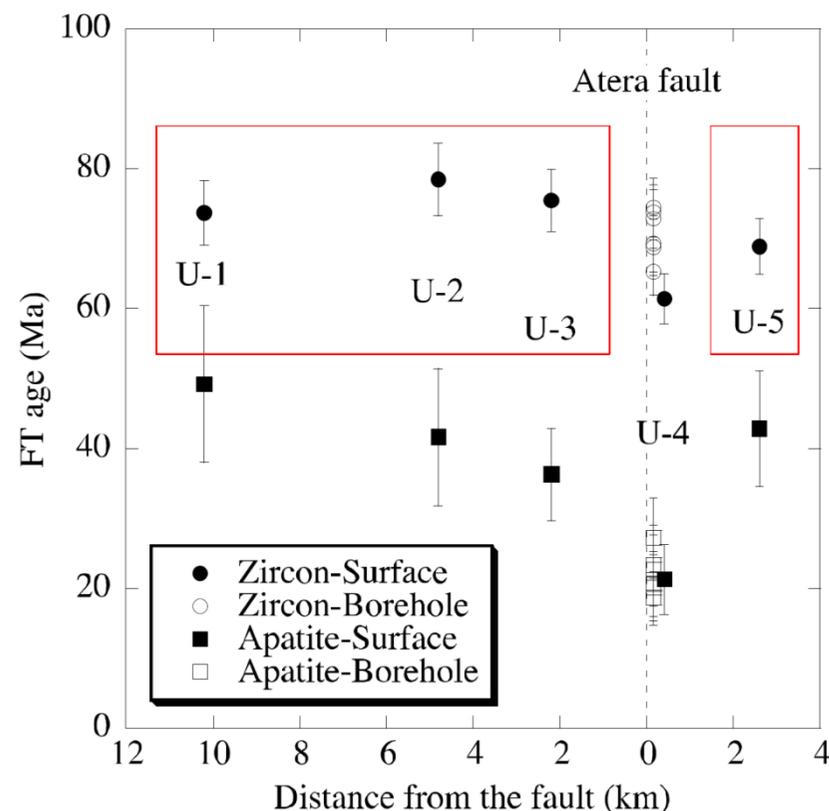
【適用する調査技術】

- 上載地層法に基づいて、トレンチ調査(右図)などに基づいて、最近の地質時代の活動性を評価することが基本である。
- なお、上載地層法の適用が困難な場合には、変動地形の解析や、断層・破砕帯の性状(組織, 充填鉱物など)などの調査手法を組み合わせ、総合的に評価する必要がある。

【信頼性向上に向けた取り組みの事例】

- 上載地層法の適用が困難な場合に適用する技術については、断層内の破砕帯の組織構造, 充填鉱物の年代測定など、複数の手法の適用性について事例的な調査が実施されている(JAEA, 2012)。

* 上載地層法:破砕帯を覆う地層(上載地層)の年代を特定することにより、破砕帯の活動時期を判断する方法のこと



阿寺断層を事例とした断層の年代測定の事例
(http://www.jaea.go.jp/04/tisou/iinkai/anteisei_iinkai/10-6.pdf)

断層活動：断層破碎帯の調査例

【評価内容】

- 現地調査などに基づいて、断層破碎帯の幅を評価し、その領域を回避して、精密調査の範囲を設定する。

【適用する調査技術】

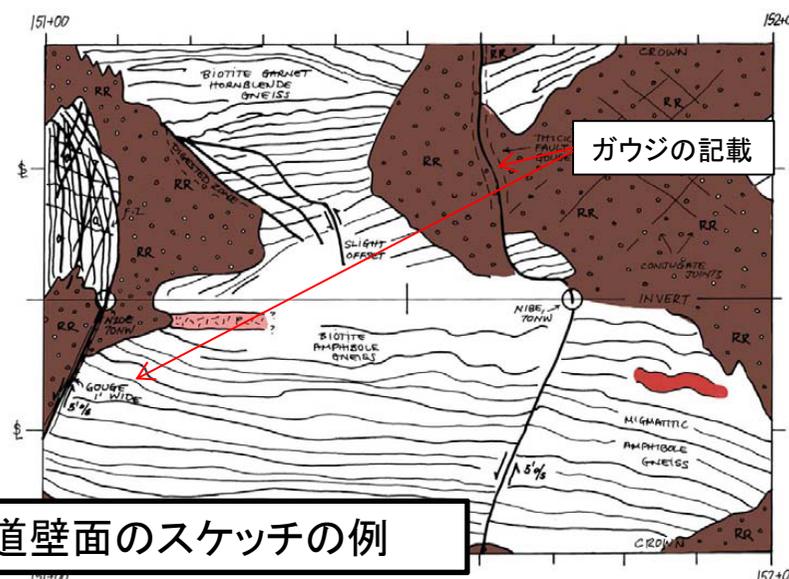
- トレンチ調査, ボーリング調査(サンプリングなど), 地表踏査など

【信頼性向上に向けた取り組みの事例】

日本に分布する代表的な活断層を対象とした以下の事例調査が進められている。

- 阿寺断層(延長60 km), 跡津川断層(延長69 km), 牛首断層(延長54 km), 山口ー出雲地震帯(全長約180 kmうち約70%が活断層あるいは推定活断層)など, 規模の大きい活断層を対象として, 断層活動に伴う物理的影響範囲などが調べられており, 断層延長と影響範囲の関係は, 従来の見積もり範囲と整合する(長友・吉田, 2009; 吉田ほか, 2009; Niwa et al., 2009, 2011; 金折・遠田, 2007, 大橋・小林, 2008など)

Merguerian, Charles, 2002b, Brittle Faults of the Queens Tunnel Complex, NYC Water Tunnel #3: p. 63-73 in Hanson, G. N., chm., Ninth Annual Conference on Geology of Long Island and metropolitan New York, 20 April 2002, State University of New York at Stony Brook, NY, Long Island Geologists Program with Abstracts, 116 p.



坑道壁面のスケッチの例

坑道壁面の断層ガウジの例



ニューヨーク水路トンネルの事例

隆起・侵食：隆起量・侵食量の評価例

【評価内容】

過去の隆起量などに基づいて、将来の隆起・侵食量を推定する。

【適用する調査技術】

- 空中写真判読、測量、地形面の年代測定技術

【信頼性向上に向けた取り組みの事例】

TCN 法など、地形面の年代測定技術や、基準となる地形面が存在しないケースへの適用性の評価などが進められている（産総研，2012でレビューが取りまとめられている）。

隆起量の調査・評価の流れの事例

海成段丘の分布調査

- 空中写真判読や現地調査に基づき段丘分布図を作成



段丘の高度測定

- 段丘の高度測量を行い地形の隆起量を求める



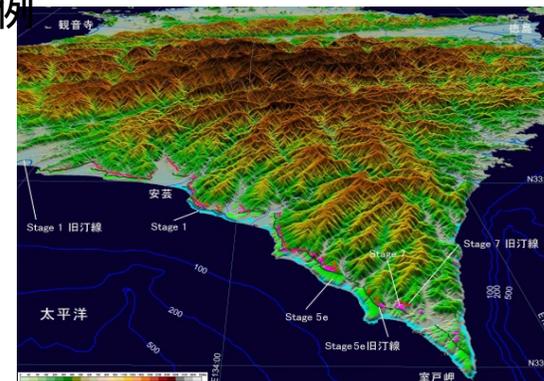
段丘の編年

- 火山テフラ等を用い段丘の形成年代を推定



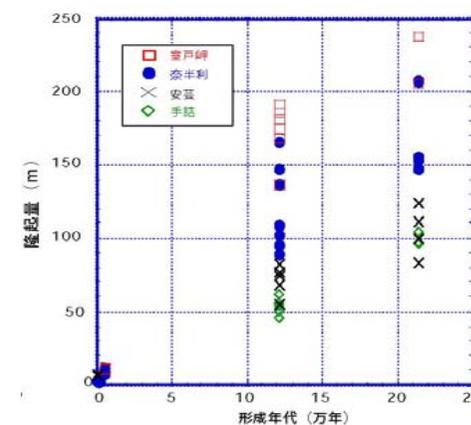
隆起速度の推定

- 段丘の高度を段丘の年代で除し隆起速度を推定



(小池・町田, 1999)

II



第2次取りまとめ(分冊1) (小池・町田編, 1999を編集)

隆起・侵食：表層付近の酸化帯分布の評価

【評価内容】

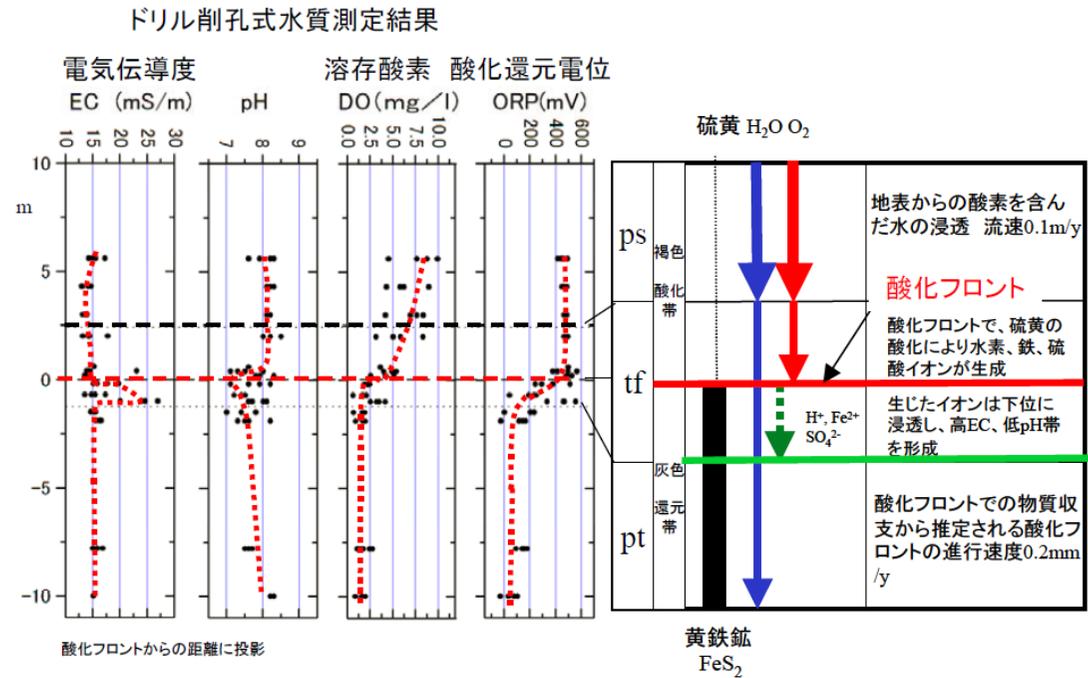
地下水の化学分析に基づいて、表層付近の酸化帯の分布を評価する。

【適用する調査技術】

- 地下水化学分析技術

【信頼性向上に向けた取り組みの事例】

- ボーリング孔の孔内水の化学分析などに基づいて、岩盤の鉱物組成との関係を考慮し、酸化フロントの形成メカニズムなどの事例検討が進められている。



電力中央研究所(2007)N07001

参考文献(1/2)

■ 1.1 熱環境

- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 —地層処分研究開発第2次取りまとめ—, 分冊1, JNC TN1400 99-021. 2.4.2
- 八幡正弘 (2002): 北海道における後期新生代の鉱化作用および熱水活動の時空変遷. 北海道立地質研究所報告, 73, 151-194.
- Karnland et al.(2000): "Long term test of buffer material Final report on the pilot parcels", SKB TR-00-22.

■ 1.2 力学場

- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 —地層処分研究開発第2次取りまとめ—, 分冊2, JNC TN1400 99-022. 4.3.3
- 谷口 航, 高治一彦, 杉野弘幸, 森 康二 (1999) ニアフィールドの耐震安定性評価, JNC TN8400 99-054

■ 1.3 水理場

- 溝口 一生, 廣瀬 丈洋, 島崎 邦夫, 安藤 雅季, 西上 欽也, 大志万 直人 (2000): 野島断層の透水性構造, 月刊 地球, 号外No.31
- 核燃料サイクル開発機構 (2005): 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築, 一分冊1 深地層の科学的研究一, 核燃料サイクル開発機構 JNC TN1400 2005-014

■ 1.4 化学場

- George, et al., (1999): "The Chemical Durability of Savannah River Plant Waste Glass as a Function of Groundwater", Journal of American Ceramic Society., DP-MS-81-104.
- 谷口 ほか (1999): "ベントナイト中における炭素鋼の不動態化条件の検討", サイクル機構技報告, No.4, pp.87-91.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター (2013): 平成24年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 多重バリアの長期安定性に関する基礎情報の収集及び整備. 平成19年度～平成24年度とりまとめ報告書.
- 板寺一洋 (2012): "水文科学が解き明かす不思議な天然水", 日本水文科学学会誌, Vol.42, No.1, pp.21-28
- 核燃料サイクル開発機構 (2005): 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 一分冊2工学技術の開発一, JNC TN1400 2005-015, p.25.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 —地層処分研究開発第2次取りまとめ—, 分冊1, JNC TN1400 99-021.
- 武田聖司 (1999): "地下水中におけるAm, Pu, Tcの溶解度の解析", JAERI Research 99-047.
- Barbara (Ed.) (2005): Environmental geochemistry, p.235.
- 三原 (2006): TRU廃棄物処分システムの安全評価における核種移行データセット, JAEA-Review 2006-011.

参考文献(2/2)

■ 2. サイト調査手法

- 電力中央研究所(2007): 地下地盤の地化学環境調査・評価技術の開発—六ヶ所サイト試験空洞周辺岩盤の酸化還元状態と将来予測—. 電力中央研究所報告N07001.
- 井上大栄, 宮腰勝義, 上田圭一, 宮脇明子, 松浦一樹(2002): 2000年鳥取県西部地震震源域の活断層調査. 地震, 54, 557-573.
- 井澤英二(2004): 変質帯から見た浅熱水系の広がり(特集: 北薩地域金鉱床調査の歴史と成果—菱刈・串木野鉱床を中心として). 地質ニュース, 49-54.
- 金折裕司, 遠田晋次(2007): 中国地方西部に認められるプレート内山口—出雲地震帯の成因と地震活動. 自然災害科学, 25, 507-523.
- 長友晃夫, 吉田英一(2009): 断層と割れ目系およびその充填鉱物を用いた阿寺断層の地質的履歴解析. 地質学雑誌, 115, 512-527.
- Niwa, M., Mizuochi, Y., Tanase, A.(2009): Reconstructing the evolution of fault zone architecture: field-based study of the core region of the Atera Fault, central Japan. Island Arc, 18, 577-598.
- Niwa, M., Kurosawa, H., Ishimaru, T.(2011): Spatial distribution and characteristics of fracture zones near a long-lived active fault: a field-based study for understanding changes in underground environment caused by long-term fault activities. Eng. Geol., 119, 31-50.
- 大橋聖和, 小林健太(2008): 中部地方北部, 牛首断層中央部における断層幾何学と過去の運動像. 地質学雑誌, 114, 16-30.
- 産業技術総合研究所(2007): 第5回深部地質環境研究センター研究発表会資料集.
- 産業技術総合研究所(2012): 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料, 地質調査研究資料集, No. 560.
- Umeda, K., Ninomiya, A.(2009): Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults. Geochem. Geophys. Geosyst., 10, Q08010, doi:10.1029/2009GC002501.
- 吉田英一, 大嶋章浩, 吉村久美子, 長友晃夫, 西本昌司(2009): 断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴—阿寺断層における‘ダメージゾーン’解析の試み. 応用地質, 50, 16-28.