

地質環境特性に関する確認事項

- 確認できたと考えられる事項
- 地層処分技術WG第3回会合 資料1, 2抜粋版

2013年1月
原子力発電環境整備機構



確認できたと考えられる事項

•安全機能等の観点からの以下のような好ましい地質環境特性(※)が存在することについて、
おおよその見解の一致を得たと考えられる。

(※具体的な条件については下記の括弧内に示した添付資料の該当箇所を参照)

- 熱環境:地温が低いこと(p10, 11)。
- 力学場:地圧の異方性が小さく, 地圧に対して岩盤強度が大きいことや岩盤のクリープ変
形量が小さいこと(p12, 13)。
- 水理場:岩盤中の動水勾配や透水性が小さく地下水流動が緩慢であること(p14~17)。
- 化学場:pHが中性~弱アルカリ性であり酸化性雰囲気でないことや炭酸化学種濃度が高
くないこと(p18, 19)。



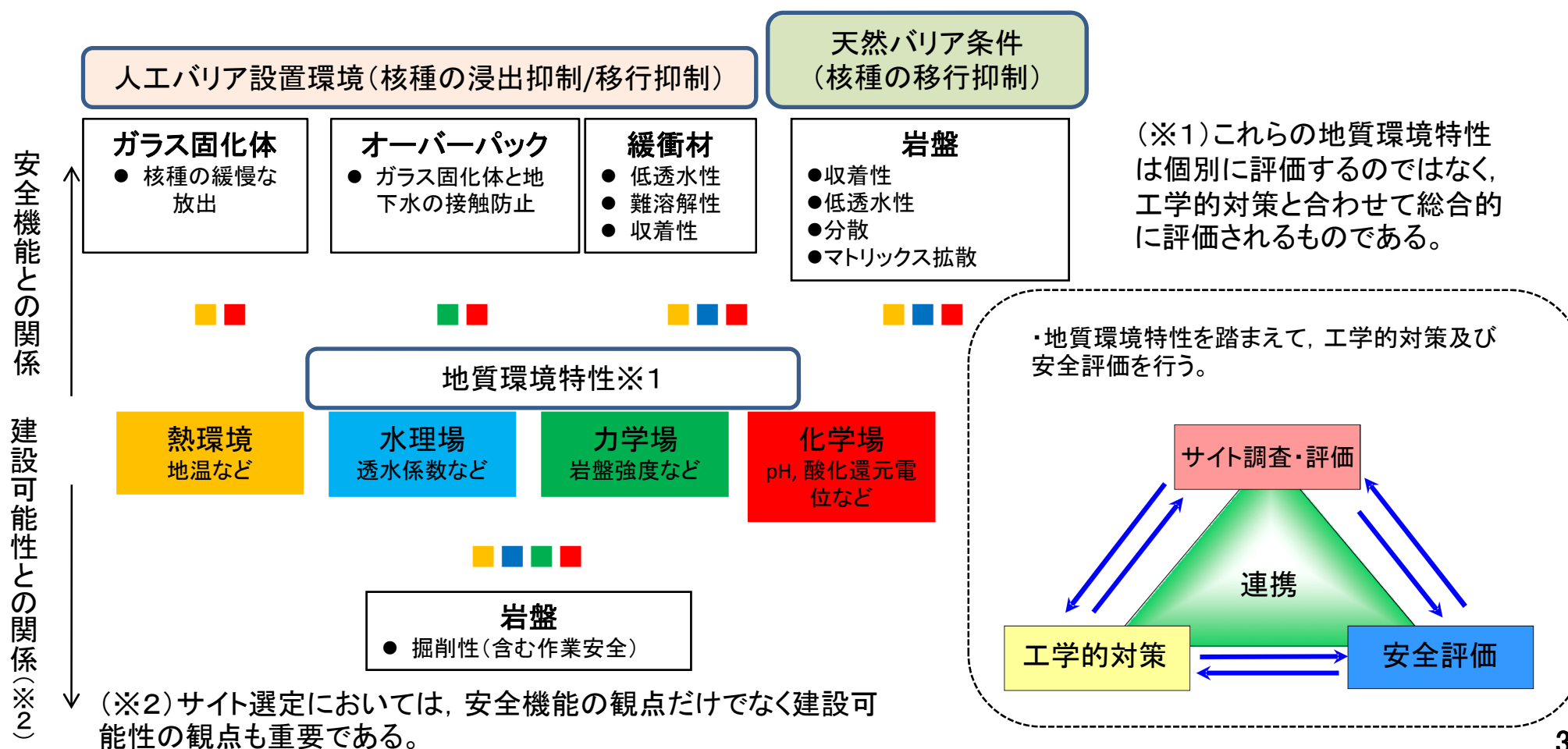
地質環境特性に関する検討(その1)－安全機能等と好ましい地質環境特性－

目次

1. 地層処分システムの安全機能等と地質環境特性との関係
2. 安全機能の観点からの好ましい地質環境特性, 人工バリア設置環境:放射性物質の浸出抑制
3. 安全機能の観点からの好ましい地質環境特性, 人工バリア設置環境:緩衝材中での移行抑制
4. 安全機能の観点からの好ましい地質環境特性:天然バリア
5. 建設可能性の観点からの好ましい地質環境特性
6. 好ましい地質環境特性のまとめ

1 地層処分システムの安全機能等と地質環境特性との関係

- 天然現象(火成活動, 断層活動, 著しい隆起・侵食)による著しい影響を受ける可能性のある範囲を回避する。
- その上で, 調査により地下深部の地質環境特性(熱環境, 水理場, 力学場, 化学場)を把握し, その適性を以下の観点から確認する。
 - 人工バリアの安全機能が確実に発揮されるよう, 人工バリア設置環境として適した特性を有するか?
 - 天然バリアとして, 放射性物質の移行を抑制する特性を有するか?
 - 対象となる岩盤において, 現状及びその改良技術により処分施設の建設を安全かつ合理的に行うことが可能か?



2 安全機能の観点からの好ましい地質環境特性 人工バリア設置環境：放射性物質の浸出抑制

オーバーパックは、地下水の熱対流や放射線分解などの厳しい条件下での放射性核種移行が起こらないよう、放射性物質の崩壊に伴うガラス固化体の発熱が著しい期間、ガラス固化体と地下水との接触を防止する。また、ガラス固化体と地下水の接触後は、ガラス固化体の溶解を抑制（放射性物質を緩慢に放出）する。これらは、地質環境特性の調査・評価結果を踏まえ、工学的対策とあわせて担保する。

安全機能	地質環境特性	安全機能から見た要件	好ましい地質環境特性
浸出抑制 (ガラス固化体, オーバーパック)	熱環境	ガラス固化体の溶解(溶解速度)が著しく促進されないこと	地温が低いこと
	力学場	オーバーパックの構造健全性が確保されること	岩盤のクリープ変形量が小さい
	水理場	ガラス固化体の溶解(溶解速度)が著しく促進されないこと	(緩衝材の低透水性により、ガラス固化体の周囲の地下水の流れは無視できる)
	化学場	- ガラス固化体の溶解(溶解速度)が著しく促進されないこと - オーバーパックの耐食性(腐食形態, 腐食速度)に影響を与えないこと	- 地下水の水素イオン指数(pH)が高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 - 地下水の炭酸塩濃度が高くないこと



3 安全機能の観点からの好ましい地質環境特性, 人工バリア設置環境:緩衝材中での移行抑制

緩衝材は、低透水性、間隙水中での放射性物質の難溶解性、収着性の機能により、ガラス固化体から浸出した放射性物質が天然バリアに移行することを遅延させる。この機能が長期間維持されるよう、緩衝材の劣化（変質、密度低下）を抑える必要がある。これらを、地質環境特性の調査・評価結果を踏まえ、工学的対策とあわせて担保する。

安全機能	地質環境特性	安全機能から見た要件	好ましい地質環境特性
移行抑制 (緩衝材)	熱環境	・ 緩衝材の物理的・化学的特性を著しく損なわないこと	・ 地温が低いこと
	水理場	・ 緩衝材の低透水性が維持されること	・ 緩衝材に接触する地下水の流速が小さいこと
	化学場	・ 緩衝材の収着性と放射性物質の難溶解性の性能が著しく低下しないこと	・ 地下水の水素イオン指数(pH)が高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 ・ 地下水の塩分濃度が著しく高くないこと



4 安全機能の観点からの好ましい地質環境特性： 天然バリア

地下深部の岩盤は、人工バリア設置環境としての場を提供するとともに、それ自身も放射性物質の移行に対するバリアとして機能する(天然バリア)。このため、天然バリアとしては、動水勾配が小さく、岩盤や割れ目の透水性が低い、地下水の流れが緩慢であることが好ましく、さらに、放射性物質が収着やマトリックス拡散により、放射性核種の移行を遅延することも期待する。このため、地質環境特性の調査・評価結果に基づいて、岩盤の天然バリアとしての特質を安全評価に反映する。

安全機能	地質環境特性	安全機能から見た要件	好ましい地質環境特性
移行抑制 (天然バリア)	熱環境	熱対流による地下水流速の上昇が小さいこと	地温勾配が小さいこと
	水理場	核種の移行時間が十分長いこと	- 動水勾配が小さいこと - 岩盤の透水性が低いこと - 割れ目の透水性が低いこと - 核種の移行経路が十分長いこと
	化学場	放射性物質が難溶解性を示す条件であること	- 地下水の水素イオン指数(pH)が高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

5 建設可能性の観点からの好ましい地質環境特性

建設期間中は、作業従事者の安全が確保されるよう、地下施設の空洞の力学的安定性を確保する。また、建設を合理的に進める上では、湧水量が少なく、有害ガスの発生量も少ない岩盤が好ましい。これらについて、地質環境特性の調査・評価結果を踏まえて、合理的な工学的対策が実施可能か確認する。

項 目	地質環境特性	建設可能性から見た要件	好ましい地質環境特性
建設可能性	熱環境	・コンクリート構造物の強度に著しい影響を与えないこと	・地温が65℃以下であること
		・作業環境を合理的な対策で維持できること	・作業環境を維持するため、坑内の温度を法令（労働安全衛生規則 第611条）で定められる温度（37℃）以下に維持するために必要な換気・空調設備の規模が現実的であること
	力学場	・建設・操業期間中を通して空洞の力学的安定性が確保されること	・初期応力に対する岩盤の一軸圧縮強度が大きいこと
			・処分場を想定する深度において一軸圧縮強度が1 MPa以上であること（未固結堆積物を避けるための目安）
			・鉛直方向応力と水平方向応力が同程度であること
	水理場 化学場	・坑道掘削作業に著しい影響を与えず、合理的な対応策が実施できる範囲であること。	・吸水膨張性を示さないこと
			・坑道内での湧水量が少ないこと ・坑道内の有害ガス発生量が小さいこと

6 好ましい地質環境特性のまとめ

- 地質環境特性の各項目(熱環境, 水理場, 力学場, 化学場)において, 支配的と考えられる特性を選定し(表中の青字), これらについて, 最新の科学的知見を踏まえ, 地質環境特性に対する考え方を示す(資料2: 次頁以降)。
- なお, この考え方は, 具体的なサイトが特定されていない現段階における考え方である。実際の地質環境特性の適性は, 文献調査, 概要調査, 精密調査を通じて, 人工バリアなどの工学的対策の効果もあわせて, 確認する。

	人工バリア設置環境としての 好ましい地質環境特性	天然バリアとしての 好ましい地質環境特性	建設可能性の観点からの 好ましい地質環境特性
熱環境	・地温が低いこと	・地温勾配が小さいこと	・地温が65℃以下であること ・坑内の温度を一定(37℃)以下に維持するために必要な設備規模が現実的であること
力学場	・岩盤のクリープ変形量が小さいこと		・初期応力に対する一軸圧縮強度が大きいこと ・鉛直応力と水平応力が同程度であること ・吸水膨張性を示さないこと
水理場	・緩衝材に接触する地下水の流速が小さいこと	・動水勾配が小さいこと ・岩盤の透水性が低いこと ・割れ目の透水性が低いこと ・核種の移行経路が十分長いこと	・坑道内での湧水量が少ないこと
化学場	・地下水の水素イオン指数(pH)が高pHあるいは低pHではないこと ・地下水が酸化性雰囲気でないこと		・坑道内の有害ガス発生量が小さいこと
	・地下水の炭酸化学種濃度が高くないこと ・地下水の塩分濃度が高くないこと		



地質環境特性に関する検討(その2)－好ましい地質環境特性に対する考え方－

目 次

1. 熱環境
2. 力学場
3. 水理場
 - (1) 動水勾配
 - (2) 透水性
4. 化学場

1 熱環境(1/2)

【安全機能, 建設可能性から求められる要件】

- ガラス固化体の溶解を著しく促進したり, 緩衝材の特性を著しく損なわないこと(緩衝材は100℃を超えないこと)
- コンクリート構造物の強度に著しい影響を与えないこと(温度が65℃以下)

【好ましい地質環境特性】 資料-1の参考2-1,2-5,3-1参照

- 地温が低いこと

【第2次取りまとめにおける考え方】

- 地温勾配の全国分布図が作成されている。これによれば, 火山地域を除く大部分の地域で地温勾配はおおむね5℃/100m以下(平均的には3℃/100m)前後である(分冊1:要約)。

【その後の知見】

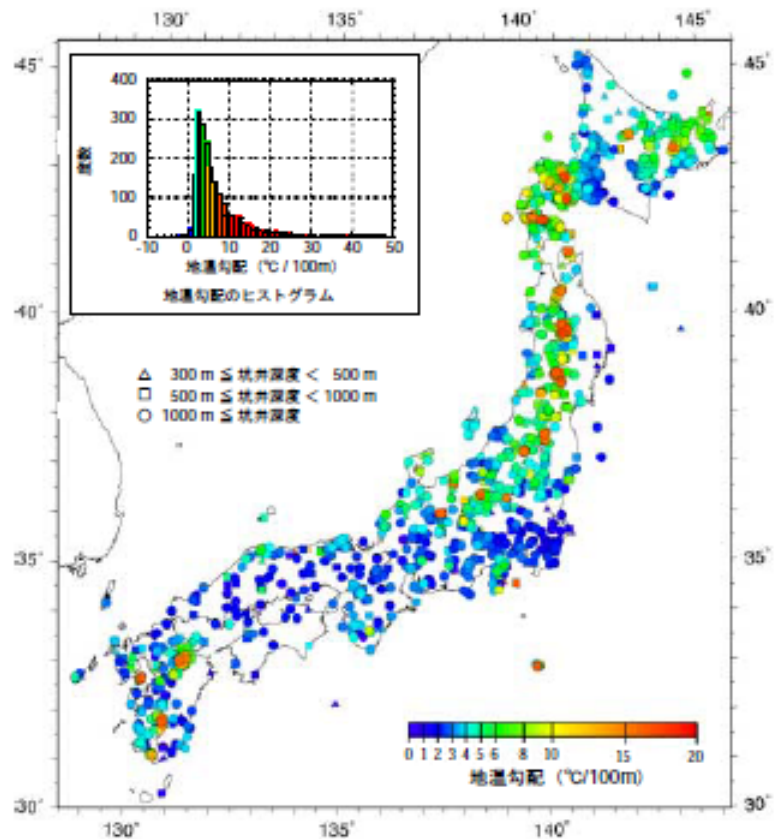
- 地温分布に関する情報も全国規模でデータベース化されており, 非火山地域における地温勾配はおおむね3~5℃/100 m程度であることが読み取れる(田中ほか, 2004など)。
- 深地層の研究施設においては, 瑞浪で約2℃/100m, 幌延で約5℃/100mの値が得られている(JNC, 2005)。

【NUMOの考え方】

- 火山地域を除けば地温勾配はおおむね3~5℃/100 m程度であることは一般的知見と考えられる。したがって, 好ましい特性を有する地質環境は広く存在していると考えられる。例えば, $15^{\circ}\text{C} + 3 \sim 5^{\circ}\text{C}/100 \text{ m} \times 1000 \text{ m} = 45 \sim 65^{\circ}\text{C}$ 。

【調査手法(調査技術/調査時期)】

- 全国規模のデータが把握されており, 文献調査段階から大まかに推定可能
- 温度検層により, 概要調査段階でより詳細なデータが把握可能



日本の地温勾配図(分冊1, 図3.5-11)
(矢野ほか, 1999より)

【長期的変遷】

- 火山地域を除けば長期的に定常であると考えられる。

1 熱環境(2/2)

【その後の知見:補足】

○地温勾配については, 上述(田中ほか, 2004)のように, 産業技術総合研究所により「日本列島及びその周辺地域の地温勾配及び地殻熱流量データベース」として公開されている。

地温勾配以外に下記の熱特性(熱伝導率など)に関する知見が得られている。

- ・北海道幌延地域(堆積岩)を事例として, 新第三紀堆積岩(声問層および稚内層)の熱物性を把握(山本ほか, 2005)。飽和および自然含水状態の熱伝導率は, 深度100 mで $1.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 程度, 深度700 mで $1.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 程度であり, 深度とともに増加する傾向
- ・岐阜県東濃地域(結晶質岩)を事例として, 土岐花崗岩の熱物性を把握(三枝ほか, 2007)熱伝導率は $1.5 \sim 5.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, 線膨張係数は $0.5 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 程度
- ・既存文献の調査結果を集約し, 高温および低温下における岩盤物性(物理特性, 力学特性, 透水性, 熱特性)をデータベース化(土木学会 岩盤力学委員会 岩盤の熱環境に関する研究小委員会, 2006)

2 力学場(1/2)

【安全機能, 建設可能性から求められる要件】

- オーバーパックの構造健全性が確保されること
- 空洞の力学的安定性が確保されること

【好ましい地質環境特性】 資料-1の参考2-2,3-3,3-4参照

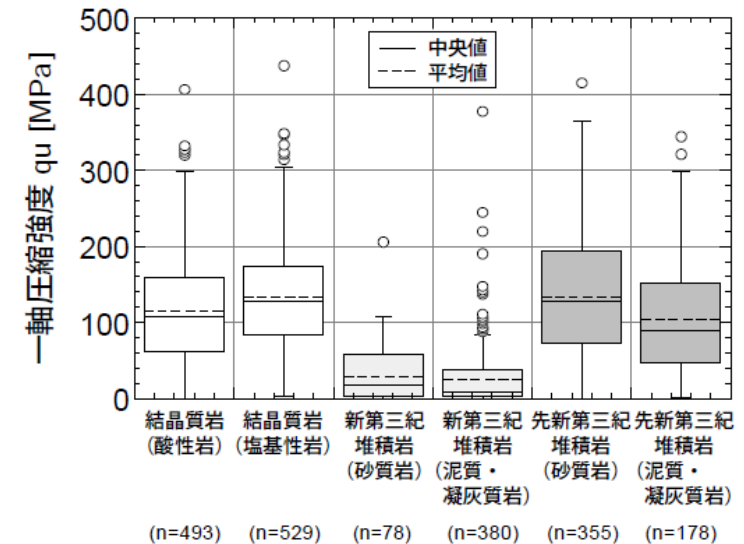
- 岩盤のクリープ変形量が小さいこと
- 初期応力に対する一軸圧縮強度が大きいこと（※簡易な判定としては地山強度比が2以上）
- 鉛直応力と水平応力が同程度であること

【第2次取りまとめにおける考え方】

- 軟岩系岩盤のクリープ解析によると, 1000年後のクリープ変形量は15mm 程度であり, これに対応する外荷重は水圧などと較べると小さく, オーバーパックの設計は可能である(分冊2:4. 3, 4. 1)。
- 全国規模で岩種ごとに特性が整理されており, 一軸圧縮強度は, ばらつきが大きいものの, 新第三紀堆積岩で平均20MPa程度, それ以外の岩種で100MPa程度である(分冊2:3. 2)。
- 地下深部での鉛直応力は, ほぼ土かぶり圧に等しく, 鉛直応力と水平応力との比は地下浅部ではばらつくものの, 深度が大きくなるにしたがって1前後に近づく(分冊1:要約)。

【その後の知見】

- 堆積軟岩の高温環境下におけるクリープ特性が確認されており(岡田, 2006), より正確な変形量の把握が可能になったと考えられる。
- 鉛直応力に対する水平応力の比は, 地下深部において1~2の範囲内にある(Yokoyama et al., 2003など)。
- 深地層の研究施設において健岩部の一軸圧縮強度が得られており, 瑞浪で50~200MPa, 幌延で10~35MPaである(JNC, 2005など)。



一軸圧縮強度の分布(分冊2, 図3.2-5)

2 力学場(2/2)

【NUMOの考え方】

- クリープ変形に対応する外荷重は水圧などと較べると小さく、オーバーパックで対応が可能である程度であると考えられる。
- 地下深部に行くほど、応力の異方性は小さくなる傾向がある。
- 地下深部の鉛直応力は、土かぶり圧程度であり、これに対応できる強度を有する岩種は多いことは一般的な知見だと考えられる。
※例えば、地山強度比: (一軸圧縮強度20MPa) / (単位体積重量2 Mg/m³としたときの深度500mにおける土被り圧) = 2
- したがって、好ましい特性を有する地質環境は広く存在していると考えられる。

【調査手法(調査技術/調査時期)】

- 既往の文献による岩種別の特性等により、おおよその傾向は推定可能
- ボーリング孔内試験, コアを用いた室内試験により、概要調査の段階でより詳細なデータが把握可能

【長期的変遷】

- 鉄道トンネル, 道路トンネルや鉱山などの実績をふまえれば、数十年から百年程度の期間は、処分施設の坑道の空洞安定性の確保が可能であると考えられる。

3 水理場(1)動水勾配(1/2)

【安全機能から求められる要件】

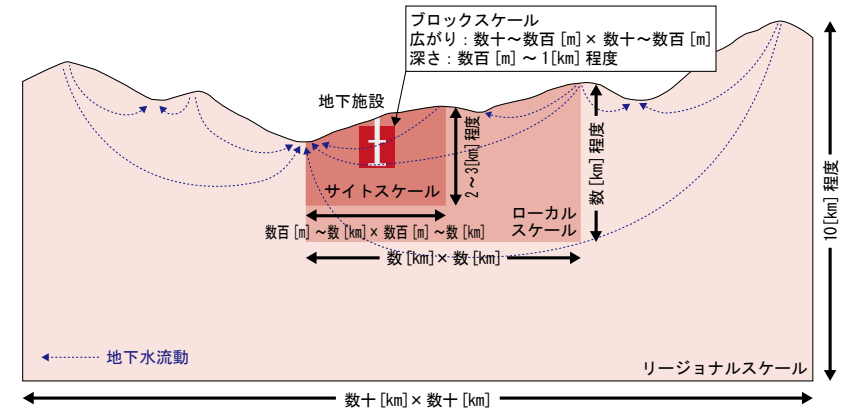
- 核種の移行時間が十分長いこと。

【好ましい地質環境特性】資料-1の参考2-9参照

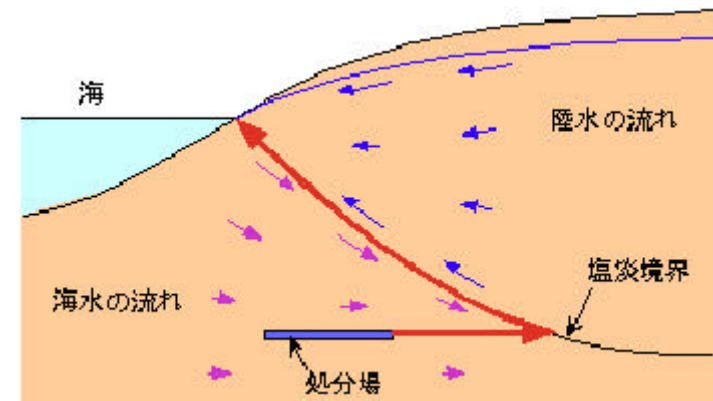
- 動水勾配が小さいこと。
※ 第2次取りまとめにおける性能評価では、動水勾配0.01を基本ケースとして設定し、動水勾配0.1と0.001についてケーススタディを実施。

【第2次とりまとめにおける考え方】

- 動水勾配は地形に強く依存するが、地下深部の岩盤中では、局所的な地形の影響が少ないため、地表付近に比べて動水勾配は緩やかになる。(分冊1:要約)
- 全国各地の井戸データなどから地表付近の動水勾配(地下水面の勾配)を求めた結果から、地表付近の動水勾配は地形勾配に強く支配されており、低地(0.008)、台地(0.016)、丘陵地(0.035)、山地(0.061)の順に大きくなる(カッコ内の数字は、地形ごとの動水勾配の平均値)。(分冊1:要約)
- 沿岸域では、海水と陸水の密度差の影響を考慮する必要がある、動水勾配を定量的に把握することが困難である。(分冊3:要約)



地下水流動経路の概念 (JNC, 2005)



沿岸地域の海水系地下水環境における地下水の流れと核種移行の概念図 (分冊3:図7.1-1)

3 水理場(1)動水勾配(2/2)

【その後の知見】

- 右図の事例では、遮水性を有する断層を境に動水勾配が変化することが報告されている。また、この例では、断層を境に、その上流側で被圧傾向の水頭分布を示し、このような水理特性を有する断層で挟まれた領域の動水勾配は小さくなる傾向が認められる(JNC, 2005)。
- 瑞浪および幌延の深地層の研究施設においては、地下水流動解析結果やボーリング調査などにに基づき水頭分布の解析がなされ、地下深部の動水勾配として0.01オーダー(瑞浪)と0.001オーダー(幌延)が示されている(JNC, 2005)。

【NUMOの考え方】

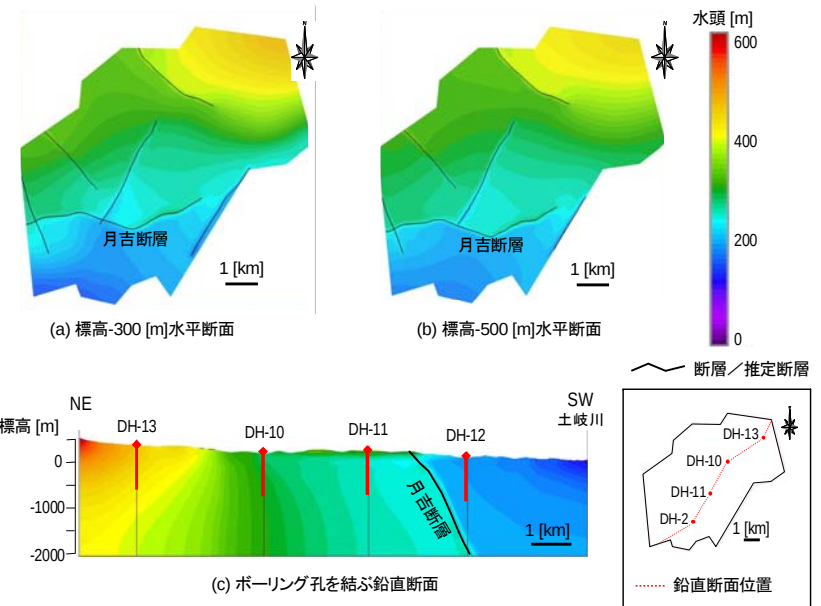
- 動水勾配は、地形や地質構造に依存するものの、地下深部の岩盤中では緩やかである。また、第2次取りまとめにおいて設定した幅に収まる地質環境が広く分布すると考えられる。

【調査手法(調査技術/調査時期)】

- 文献調査段階においては、第2次取りまとめおよびそれ以降に示された調査・解析手法により動水勾配を推定可能。
- 大局的な動水勾配は地形に支配されており、標高の高い領域で涵養傾向、標高が低い河川部で流出傾向が確認される。このような傾向は、地下水流動方向に配置するボーリング孔における間隙水圧の観測により妥当性を確認可能(JNC, 2005)。
- 地質構造の把握により、動水勾配をより正確に把握出来る。

【長期的変遷との関係】

- 動水勾配は、地形に強く依存することから、長期的な地形変化の影響を考慮する必要がある。
- 沿岸域では地形変化に加え、海水準変動に伴う海水と陸水の境界(塩淡水境界)の変化の影響を考慮する必要がある。



地下水流動解析結果に基づく水頭分布(JNC, 2005)

3 水理場(2)透水性(1/2)

【安全機能から求められる要件】

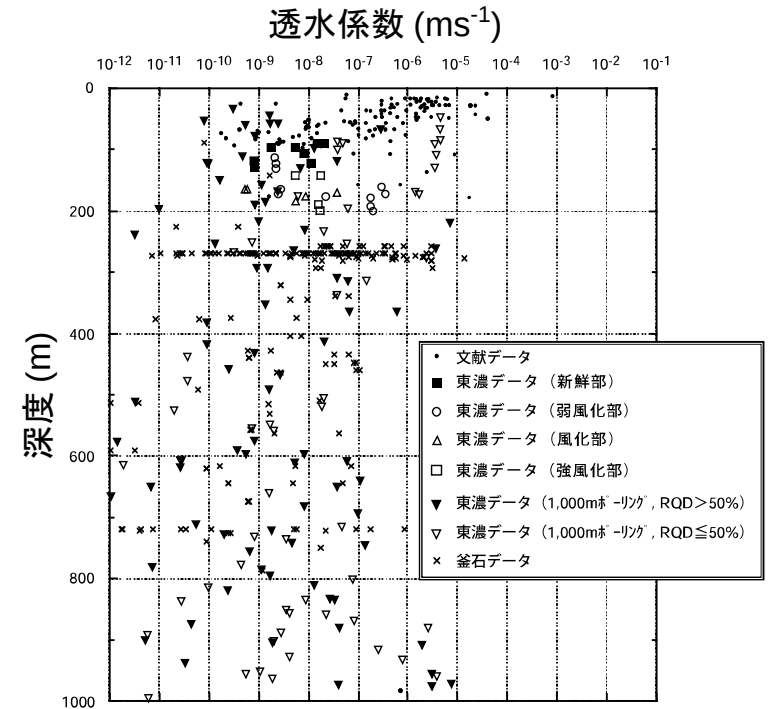
- 核種の移行時間が十分長いこと。

【好ましい地質環境特性】資料-1の参考2-9参照

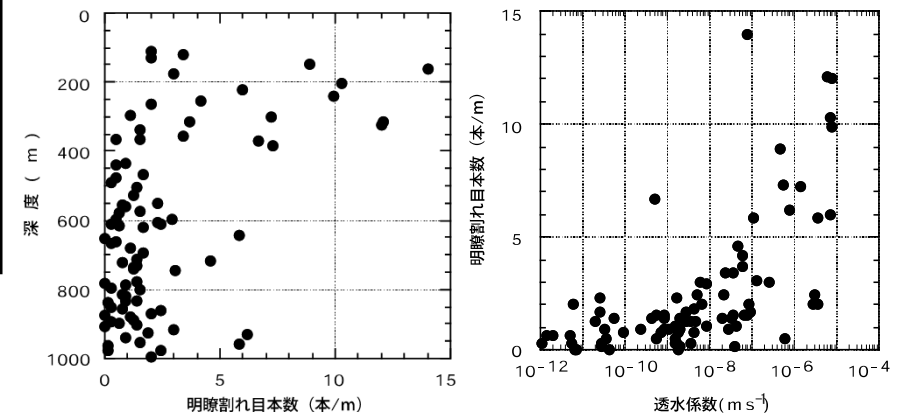
- 岩盤の透水性が低いこと。
- 割れ目の透水性が低いこと。

【第2次とりまとめにおける考え方】

- 岩盤の透水性は岩石の種類や場所によって異なるが、断層破碎帯や割れ目集中帯を除くと、地下深部の岩盤としての平均的な透水係数は、概ね $10^{-10} \sim 10^{-7} \text{ m/s}$ の範囲である(分冊1:要約)。
- 岩盤の透水係数は深度とともに減少する深度依存性を呈することが知られている(SK B, 1992; 木下ほか, 1993; Poteri and Laitinen, 1999など)。東濃地域では、深度依存性の明瞭な傾向が認められない。(分冊1:要約)
- 1,000mボーリングの結果から明瞭割れ目本数は、断層や割れ目帯の周辺でのばらつきが認められるものの、深度とともに減少する傾向にある。また、明瞭割れ目の本数と透水係数には、正の相関が認められる。(分冊1:要約)



深度と透水係数の関係(分冊1, 図3.3-6)



透水係数と割れ目本数の関係(分冊1, 図3.3-7)

3 水理場(2)透水性(2/2)

【その後の知見】

- 瑞浪と幌延の深地層の研究施設においては、ボーリング調査により、地下深部の地層の透水係数が得られており、第2次取りまとめの検討例の対数平均より1～2桁大きいデータが取得されている(JNC, 2005)。
- 透水係数が深度ともに小さくなる傾向は、瑞浪と幌延で確認されており、それらは、割れ目の分布や空隙構造の変化などの地質構造に対応していると考えられる(太田ほか, 2007)。
- 透水性が高い地質構造を選択的に対象とした水理試験が多く実施され、ボーリング孔全体を含む様に水理試験が実施されていないことから、統計的なデータとして提示することが適切でない場合がある(三枝ほか, 2007)。
- 堆積岩の地下水中の同位体組成などを用いて、地下水年代の推定が試みられている。地下浅部では地表水との混合により堆積年代より地下水は若く、地下深部では堆積年代と同等の地下水の年代(700万年程度)であることの事例などが示されている(電中研, 2008, 2009など)。

【NUMOの考え方】

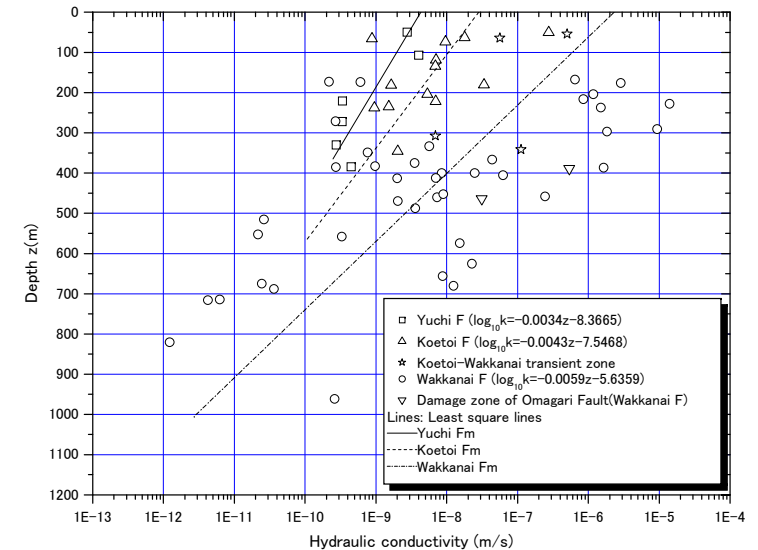
- 断層破碎帯や割れ目集中帯などを除くと、地下深部の岩盤としての平均的な透水係数は、第2次取りまとめで示されたものと概ね一致することは一般的知見と考えられ、好ましい特性を有する地質環境は広く存在するものと考えられる。

【調査手法(調査技術/調査時期)】

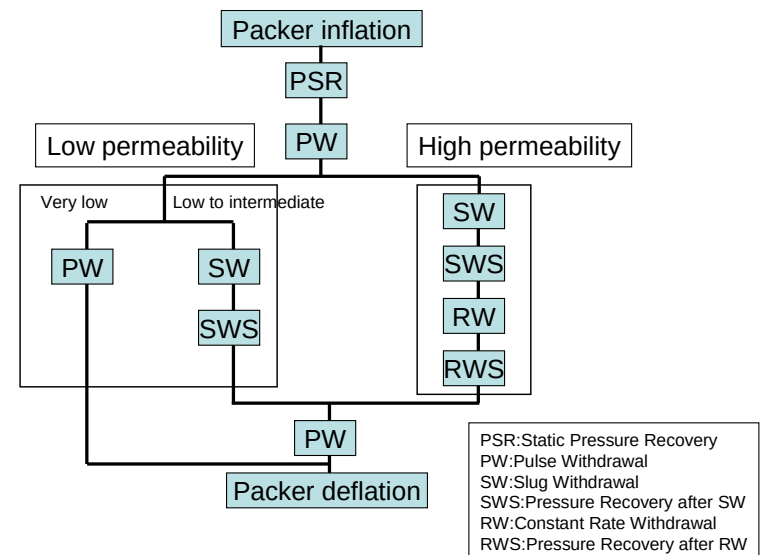
- 文献調査段階においては、岩種ごとの透水係数の測定事例の統計的な処理により、透水係数を推定。
- ボーリング調査時に実施する水理試験は、国内外で多くの実績があり、既存の調査技術により透水係数を取得。
- 割れ目の透水量係数に関する調査技術は、国内での調査事例が少ないものの、海外における実績等を考慮すると、有効性が高い技術が構築されている。
- 地下水年代測定は長期的な地下水挙動評価に有効である。

【長期的変遷との関係】

- 岩盤の透水性は、自然現象の変化(地震、隆起・侵食等)と関連させた検討が必要である。



幌延における深度と透水係数の関係(太田ほか, 2007)



水理試験の実施方法の考え方(三枝ほか, 2007)

4 化学場(1/2)地下水化学

【安全機能から求められる要件】

- ①ガラス固化体の溶解速度が著しく大きくならないこと
- ②オーバーパックの腐食が顕著に進展しないこと
- ③緩衝材の性能が著しく低下しないこと
- ④緩衝材内部での核種の溶解度が著しく高くないこと

【好ましい地質環境特性】 資料-1の参考2-3,2-4,2-7,2-8参照

- 地下水の水素イオン指数(pH)が高pHあるいは低pHではないこと(要件①②③④)
- 地下水が酸化性雰囲気でないこと(要件④)
- 地下水の炭酸化学種濃度が高くないこと(要件②)

※炭酸塩濃度は 0.5mol/dm^3 を超えると、応力腐食割れの感受性が高くなるとされている(分冊2)。

【第2次取りまとめにおける考え方】

- 降水を起源とする地下水水質は、地表付近から地下深部にいくにしたがってpHは酸性から弱アルカリ性に変化する。堆積岩では深度数十m、花崗岩では深度数百m程度で、還元性の地下水が形成されている。海水も同様と考えられる(分冊1:要約)。

【その後の知見】

○地下水のpHおよび還元性に関する知見

- ・対象とする岩種や起源にかかわらず、地下深部の地下水は、地下浅部の地下水と比較して中性から弱アルカリ性を示し、還元状態が維持される傾向が認められる(石井ほか, 2007など)。
- ・深地層の研究施設における事例では、掘削に伴い、表層水が深部まで流入したものの、還元性が維持されているという報告もある(竹内ほか, 2010など)。
- ・有機物に富む場合には、生物学的プロセスによっても還元環境が形成されている(Shimizu et al., 2006など)。

○炭酸化学種濃度に関する知見

- ・地下浅部では涵養した天水により重炭酸ナトリウムに富む地下水が形成されるが、地下深部ではむしろ現海水や化石海水、長期にわたる水-岩石反応を経て生成した塩水などの影響により、NaClに富むようになる。また、炭酸塩濃度の観測事例では 0.01mol/dm^3 のオーダーであることが報告されている(太田他, 2007など)。

4 化学場(2/2)地下水化学

【NUMOの考え方】

○対象とする岩種や起源にかかわらず、地下深部の地下水は、中性から弱アルカリ性を示し、還元状態が維持される傾向が認められること、炭酸塩濃度が高くないことは一般的な性質であると考えられることから、好ましい特性を有する地質環境は広く存在していると考えられる。



【調査手法(調査技術／調査時期)】

- 文献調査段階から既往文献による値を用いて大まかな評価が可能。
- 概要調査段階で、ボーリング孔内測定等により、詳細なデータが把握可能

【長期的変遷】

○隆起、火成活動及び海水準変動に伴う地下水化学変化による岩盤の変質の可能性を除けば、長期的に一定であると考えられる。

参考文献(1／3)

■ 熱環境

- 田中明子, 山野 誠, 矢野雄策, 笹田政克(2004): 日本列島及びその周辺地域の地温勾配及び地殻熱流量データベース. 数値地質図P-5, 産業技術総合研究所 地質調査総合センター.
- JNC(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ー平成17年取りまとめー 分冊1 深地層の科学的研究. JNC TN1400 2005-014
- 山本卓也, 松井裕哉, 堀内康光, 富永英治(2005): 幌延深地層研究計画における堆積軟岩の熱特性について. 第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 153-158
- 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野崇, 大山卓也, 濱克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工(2007): 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-043.
- 土木学会 岩盤力学委員会 岩盤の熱環境に関する研究小委員会(編)(2006): 熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざしてー熱物性と解析.

■ 力学場

- 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)ー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
- Yokoyama, T., Ogawa, K., Kanagawa, T., Tanaka, M., Ishida, T.(2003): Regional in-situ stress states in Japan based on measurements. In: Sugawara, K., Obara, Y., Sato, A. (Eds.) Rock Stress, Swets & Zeitlinger, Lisse
- 西尾和久, 松岡稔幸, 見掛信一郎, 鶴田忠彦, 天野健治, 大山卓也, 竹内竜史, 三枝博光, 濱 克宏, 水野 崇, 齋 正貴, 平野 享, 弥富洋介, 島田顕臣, 松井裕哉, 尾方伸久, 池田幸喜, 山本 勝, 内田雅大, 杉原弘造(2009): 超深地層研究所計画 年度報告書(2007年度). JAEA-Review 2009-002
- 星野一男, 加藤碩一, 深部物性データ編集委員会(2001): 本邦産岩石の深部物性データ集. 産業技術総合研究所 地質調査総合センター速報, No.23.
- 地盤工学会(2009): 原位置岩盤試験データベース(2008年度版). 丸善.
- 中山 雅, 佐野満昭, 真田祐幸, 杉田 裕(編)(2009): 幌延深地層研究計画 平成20年度調査研究成果報告. JAEA-Research 2009-032.
- 小山俊博, 石橋勝彦, 金子岳夫, 南 将行, 小林順二, 齋藤敏明, 菊地宏吉(2007): 大規模地下発電所空洞の時間依存性変形挙動に関する研究. 土木学会論文集F, 63, 309-322.

■ 水理場

- 中野勝志, 竹内真司, 濱 克宏, 松井裕哉, 池田幸喜, 天野健治, 山内大祐, 大澤英昭, 長谷川 健, 杉原弘造, 武田精悦(2001): 超深地層研究所計画の現状ー平成8年度～平成11年度. JNC TN7400 2001-001.
- 操上広志, 竹内竜史, 藪内 聡, 瀬尾昭治, 戸村豪治, 柴野一則, 原 稔, 國丸貴紀(2008): 幌延深地層計画の地上からの調査研究段階における地下水流動に関する調査研究. 土木学会論文集C, 64, 680-695

参考文献(2/3)

■ 水理場(つづき)

- 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 近藤浩文, 五嶋慶一郎, 富岡祐一, 後藤和幸, 柏谷公希(2010):水質・地下水年代を利用した地下水流動評価法の高度化—三浦半島西部沿岸を対象とした地下水流動・物質移動解析. 電力中央研究所報告, N10017.
- SKB (1992):SKB 91 - Final Disposal of Spent Nuclear Fuel; Importance of the Bedrock for Safety, SKB Technical Report 92-20.
- Poteri, A. and Laitinen, M. (1999): Site-to-canister scale flow and transport in Håstholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara sites, Helsinki, POSIVA 99-15.
- 木下直人, 安部透, 竹村友之, 横本誠一 (1993): 原位置透水試験によるトンネル周辺岩盤の水理特性の調査, 第 25 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.481-485.
- 太田久仁雄, 安部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗 (2007): 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階)研究成果報告書, 分冊「深地層の科学的研究」, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-044.
- 電力中央研究所(2008):地層処分共通技術調査:岩盤中地下水移行評価技術高度化開発)-地下水年代測定技術調査-
- 電力中央研究所(2009):地層処分共通技術調査:岩盤中地下水移行評価技術高度化開発)-地下水年代測定技術調査-
- 大竹健司(2001):水封式地下岩盤貯槽方式を主力とするLPガスの国家備蓄の現状. 石油技術協会誌, 66, 183-193.

■ 化学場

- 石井英一, 濱 克宏, 國丸貴紀, 佐藤治夫(2007):海成堆積物の地下浅部における天水の浸透に伴う地下水のpH変化. 地質学雑誌, 113, 41-52.
- 太田久仁雄, 安部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗 (2007): 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階)研究成果報告書, 分冊「深地層の科学的研究」, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-044.
- 竹内真司, 國丸貴紀, 見掛信一郎, 西尾和久, 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 早野 明, 竹内竜史, 三枝博光, 大山卓也, 水野 崇, 平野 享, 尾方伸久, 濱 克宏, 池田幸喜, 山本 勝, 弥富洋介, 島田顕臣, 松井裕哉, 伊藤洋昭, 杉原弘造(2010):超深地層研究所計画 年度報告書 (2008年度). JAEA-Review 2010-014.
- Shimizu, S., Akiyama, M., Ishijima, Y., Hama, K., Kunimaru, T., Naganuma, T.(2006): Molecular characterization of microbial communities in fault-bordered aquifers in the Miocene formation of northernmost Japan. Geobiology, 4, 203-213.
- 産業技術総合研究所(2011):沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 成果報告書(平成23年3月)
- 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 近藤浩文, 五嶋慶一郎, 富岡祐一, 後藤和幸, 柏谷公希(2010):地下水年代測定による現海水と化石海水の同定—三浦半島西部沿岸ボーリングへの地下水年代測定法の適用. 電力中央研究所報告, N10008

参考文献(3／3)

■ 化学場(つづき)

- 大山隆弘, 猪原芳樹, 長岡 亨(2007): 地下岩盤の地化学環境調査・評価技術の開発ー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
- 馬原保典, 中田英二(2003): 化石海水の同定手法の提案ー太平洋炭鉱における地下水水質・同位体の分布と³⁶Cl測定による地下水年代評価. 電力中央研究所報告, U03019.
- 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ー立地要件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性. 産業技術総合研究所 地質調査総合センター研究資料集, No.560.
- 尾山洋一, 高橋正明, 塚本 斉, 風早康平, 安原正也, 高橋 浩, 森川徳敏, 大和田道子, 芝原暁彦, 稲村明彦(2011): 日本列島の非火山地域における深層地下水水質と地質との関係について. 原子力バックエンド研究, 18, 25-34.

■ 物質移動特性

- Akagawa, F., Yoshida, H., Yogo, S., Yamamoto, K.(2006): Redox front formation in fractured crystalline rock: an analogue of matrix diffusion in an oxidizing front along water-conducting fractures. *Geochem. Explor. Environ. Anal.*, 6, 49-56
- Ochs, M., Tachi, Y., Trudel, D. and Suyama, T. (2013): Kd setting approaches for Horonobe mudstone systems: Applications of TSMs and semi-quantitative estimation procedures, JAEA Technical report, JAEA-Research 2012-044
- 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 竹内真司, 岩月輝希, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 尾上博則(2005): 東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術. JNC TN7400 2005-023.
- 産業技術総合研究所(2012): 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 成果報告書(平成24年3月)
- 高畑裕之, 長根将格, 松本尚巳(2004): 幌延町における新第三紀堆積岩の地質・地質構造に関する調査. JNC TJ5420 2004-002.
- 舘 幸男, 栃木善克, 陶山忠宏, 齋藤好彦, Ochs, M., 油井三和(2009): 地層処分安全評価のための核種の収着・拡散データベースシステムの開発. JAEA-Data/Code 2008-034.
- 栃木善克, 甲川憲隆, 向井 悟, 神徳 敬, 笹本 広, 柴田雅博, 油井三和(2007): 花崗岩質岩石のマトリクスにおける拡散深さに関する研究. JAEA-Research 2007-024
- Yoshida, H., Metcalfe, R., Yamamoto, K., Murakami, Y., Hoshii, D., Kanekiyo, A., Naganuma, T., Hayashi, T.(2008): Redox front formation in an uploading sedimentary rock sequence: an analogue for redox-controlling processes in the geosphere around deep geological repositories for radioactive waste. *Appl. Geochem.*, 23, 2364-2381
- Yoshida, H., Metcalfe, R., Ishibashi, M., Minami, M.(2013): Long-term stability of fracture systems and their behaviour as flow paths in uplifting granitic rocks from the Japanese orogenic field. *Geofluids*, 13, 45-55.