

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 —

2013年12月
原子力発電環境整備機構



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

補足：安全評価の際考慮する地質環境特性についての考え方

- (1) 物質移動特性のうち物理的構造
- (2) 物質移動特性のうち化学的性質

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】

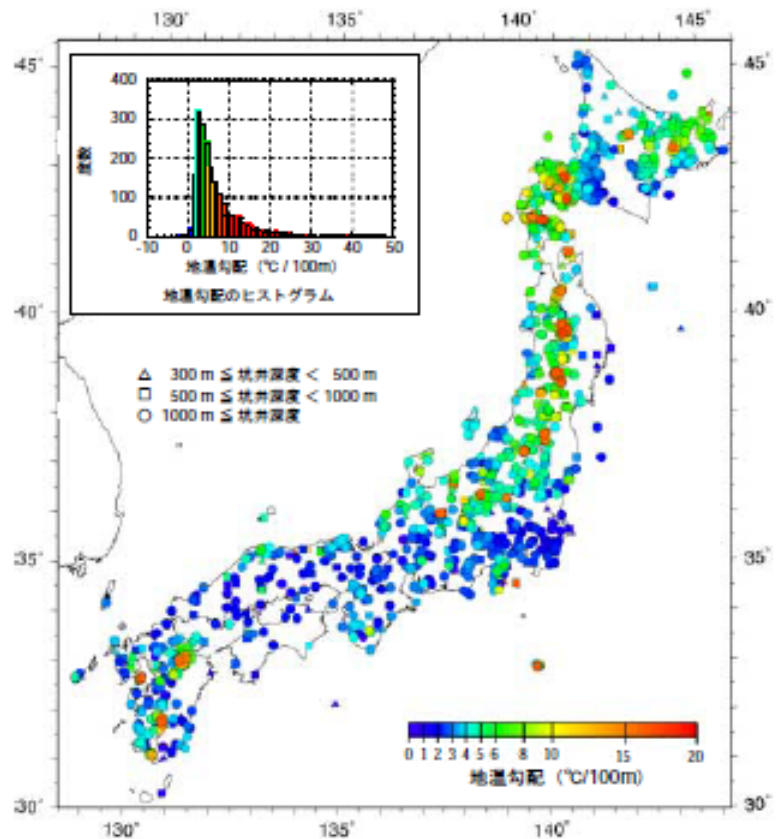
- 地温分布に関する情報も全国規模でデータベース化されており, 非火山地域における地温勾配はおおむね3~5℃/100 m程度であることが読み取れる(田中ほか, 2004など)。
- 深地層の研究施設においては, 瑞浪で約2℃/100m, 幌延で約5℃/100mの値が得られている(JNC, 2005)。

【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

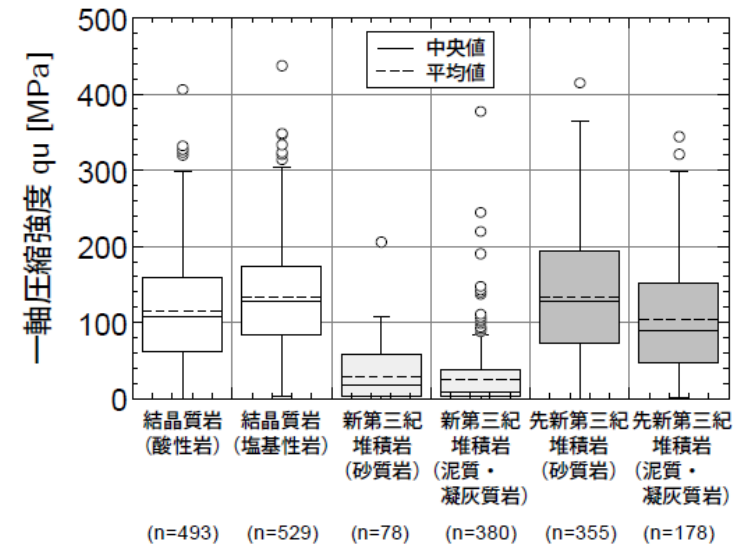
- 岩盤のクリープ変形量が小さいこと
- 初期応力に対する一軸圧縮強度が大きいこと (※簡易な判定としては地山強度比が2以上)
- 鉛直応力と水平応力が同程度であること

【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では、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。

【その後の知見:補足】

- 凝灰岩の10年間に渡る長期クリープ試験の結果、クリープひずみ速度の低下傾向の継続が確認できるとともに、第2次取りまとめで岩盤の長期クリープ解析に用いたコンプライアンス可変型モデルでクリープ挙動を表現できることを再確認(西尾ほか, 2009など)
- 全国の深部岩盤の力学特性(変形係数, せん断強度)を中心とする物性値をデータ集としてまとめて公開(星野ほか, 2001), 加えて全国約120のプロジェクトから原位置岩盤試験データを収集し、岩盤の工学的分類に基づき整理した原位置岩盤試験データベース(変形係数, せん断強度)を構築し公開(地盤工学会, 2009)。調査の初期段階では岩盤分類に応じてデータベースを活用した設計パラメータの設定が可能
- 北海道幌延地域(堆積岩)における地下研究施設の建設・調査において、坑道掘削による周辺岩盤の緩みを掘削前後で計測し、岩盤の力学特性が大きく変わる範囲は坑道周辺の数10cm程度に限られるという知見が得られている(中山ほか, 2009など)。掘削影響領域の調査・評価や設計での対処は十分に可能
- 東京電力葛野川地下発電所(砂岩・泥岩混合層, 土被り約500 m)において、大規模地下空洞の10年間程度の岩盤変位計測を行うとともにコンプライアンス可変型モデルでクリープ挙動を表現できることを確認(小山ほか, 2007)

3 水理場(1)動水勾配(1/3)

【安全機能から求められる要件】

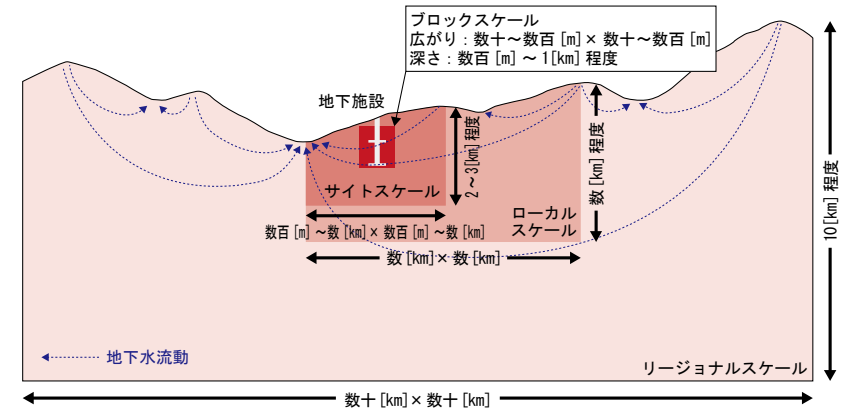
- 核種の移行時間が十分長いこと。

【好ましい地質環境特性】資料-1の参考2-9参照

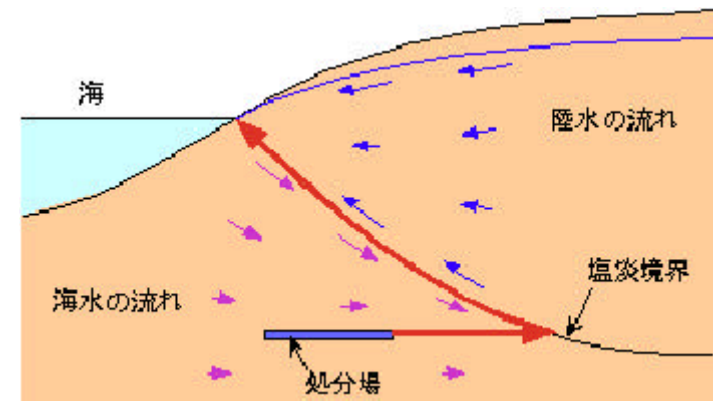
- 動水勾配が小さいこと。
※ 第2次取りまとめにおける性能評価では、動水勾配0.01を基本ケースとして設定し、動水勾配0.1と0.001についてケーススタディを実施。

【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(2/3)

【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】

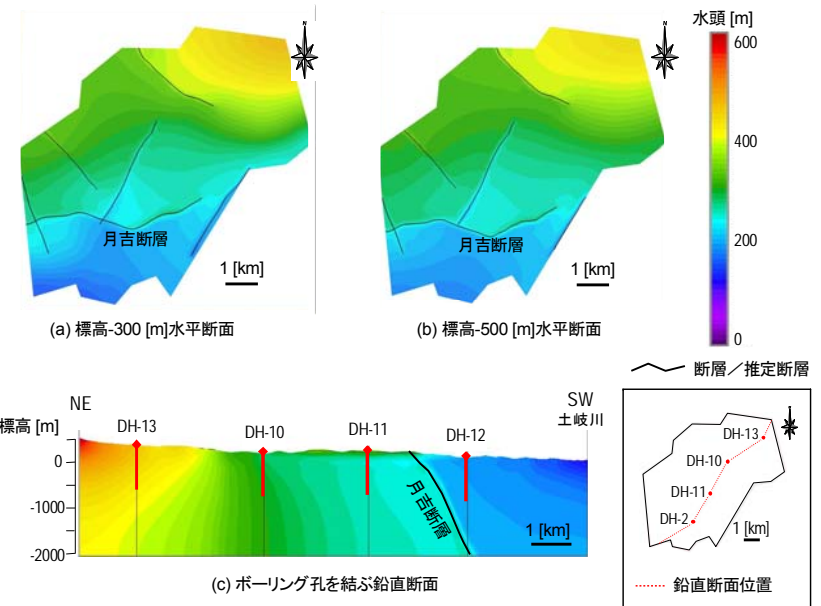
- 動水勾配は、地形や地質構造に依存するものの、地下深部の岩盤中では緩やかである。また、第2次取りまとめにおいて設定した幅に収まる地質環境が広く分布すると考えられる。

【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(1)動水勾配(3／3)

【その後の知見:補足】

○ 全水頭分布(動水勾配の算出に使用)は、主として地形(標高)により支配されるが、遮水性の断層の分布や、地下の被圧水の有無、海水準変動の影響の残存などにより、影響を受ける。

以下に知見を示す。

- 岐阜県瑞浪地域(結晶質岩)の事例では、地下水の主要な流動方向は地形に支配されており、標高の高い領域では涵養傾向、標高の低い河川部で流出傾向、それ以外はおおむね静水圧分布であることを確認(中野ほか, 2001)
- 北海道幌延地域(堆積岩)の事例では、地層中の全水頭分布は地形との相関がありわずかに被圧した傾向を示し、地下深部には高い全水頭が保持されている。約130万年前から現在の海水準および地下水涵養量の変動を考慮した地下水流動解析により、解析値と実測値の差を把握し、次段階の調査計画に反映することで、現状の全水頭分布の推定の精度を向上することなどの対策を提示(操上ほか, 2008 など)
- 神奈川県横須賀地域(付加体堆積岩)の事例では、同位体組成分布や地下水組成などの情報に基づいて、解析結果を評価し、沿岸域において実測の全水頭分布を再現するためには、地形だけでなく、海水準変動などの履歴も考慮する必要があることを確認(長谷川ほか, 2010 など)

3 水理場(2)透水性(1／3)

【安全機能から求められる要件】

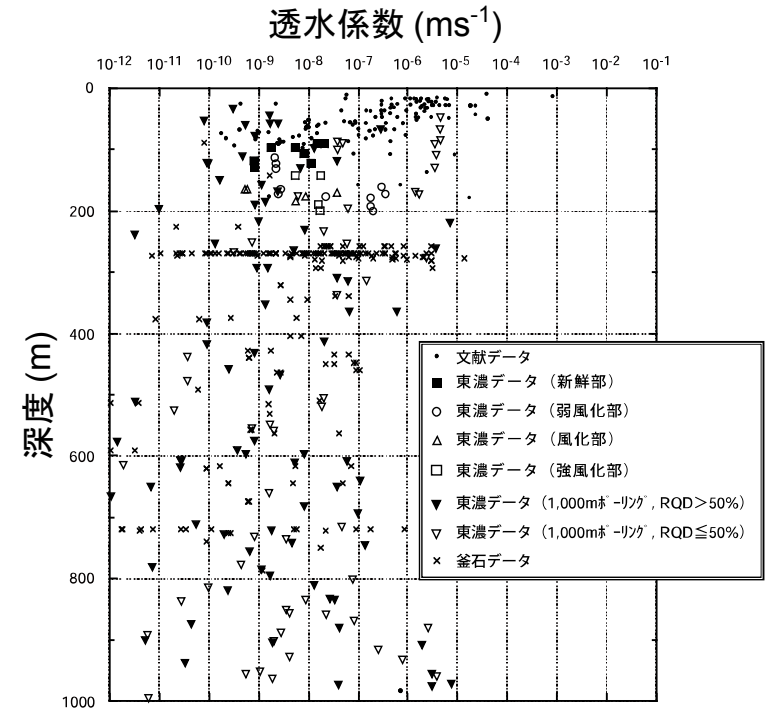
- 核種の移行時間が十分長いこと。

【好ましい地質環境特性】資料-1の参考2-9参照

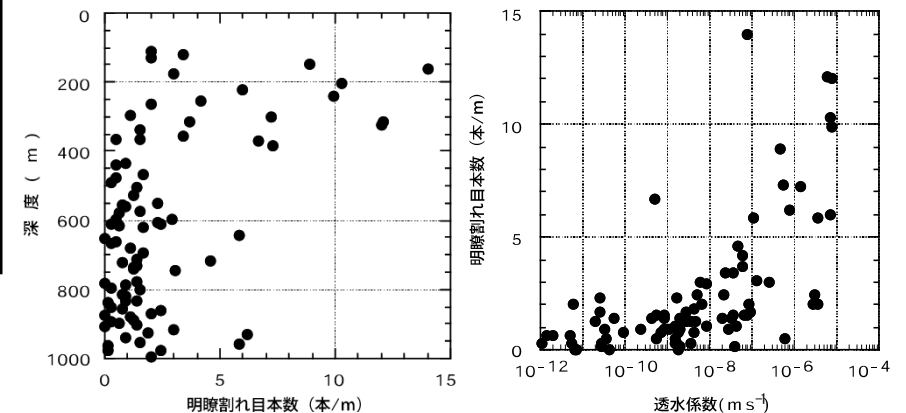
- 岩盤の透水性が低いこと。
- 割れ目の透水性が低いこと。

【第2次とりまとめにおける知見】

- 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(2/3)

【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】

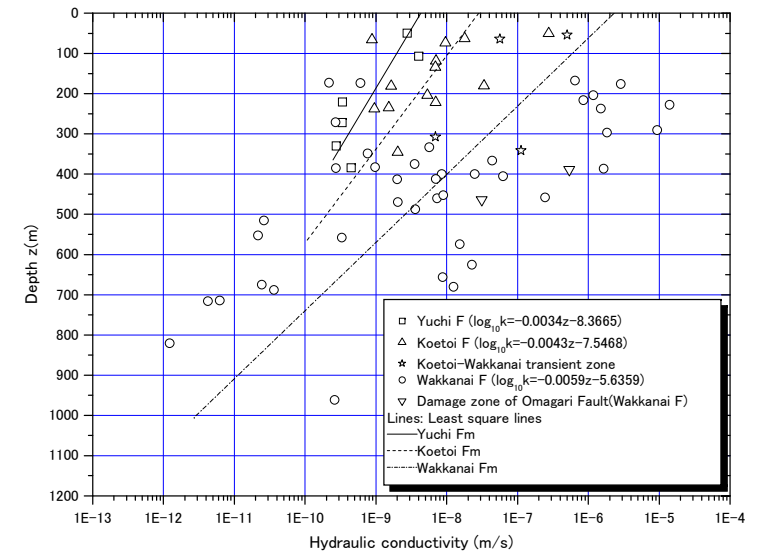
- 断層破碎帯や割れ目集中帯などを除くと、地下深部の岩盤としての平均的な透水係数は、第2次取りまとめで示されたものと概ね一致することは一般的知見と考えられ、好ましい特性を有する地質環境は広く存在するものと考えられる。

【調査手法(調査技術/調査時期)】

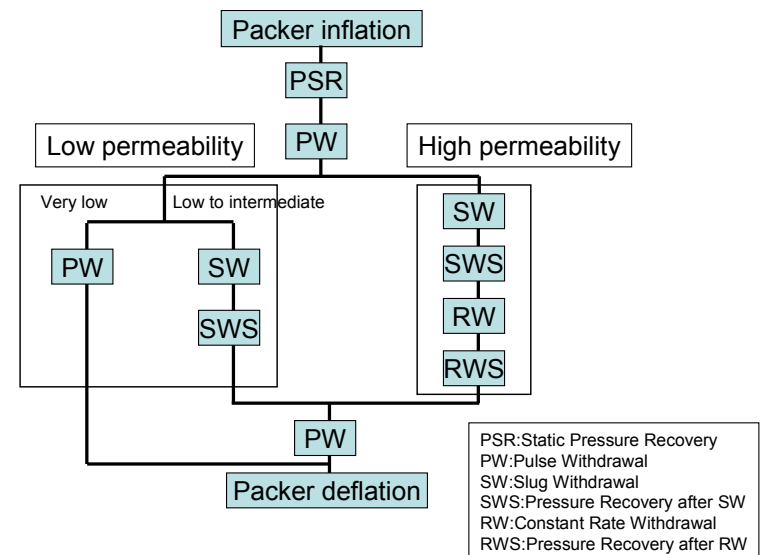
- 文献調査段階においては、岩種ごとの透水係数の測定事例の統計的な処理により、透水係数を推定。
- ボーリング調査時に実施する水理試験は、国内外で多くの実績があり、既存の調査技術により透水係数を取得。
- 割れ目の透水量係数に関する調査技術は、国内での調査事例が少ないものの、海外における実績等を考慮すると、有効性が高い技術が構築されている。
- 地下水年代測定は長期的な地下水挙動評価に有効である。

【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)

3 水理場(2)透水性(3／3)

【その後の知見:補足】

○以下の事例に基づいて、地下深部の岩盤の透水係数は、岩種、岩盤中の変質および割れ目の発達程度に依存して変化し、健岩部では $10^{-12} \sim 10^{-6}$ m/sオーダーの範囲にあること、一方、割れ目帯や連続・連結する割れ目などの水みちでは、それよりも大きな透水性を示し、透水係数が 10^{-4} m/sオーダーにも達する場合もあること、また、地下深部では、地下浅部と比較して岩盤の透水係数が小さく、堆積岩では被圧状態が維持される傾向も認められるといった知見が拡充されている。これらの傾向を踏まえて、調査の初期段階であれば、岩種毎の透水係数を推定することが可能と考えられる。

- ・岐阜県瑞浪地域(結晶質岩)の事例(透水係数は割れ目低密度帯で $5.0 \times 10^{-12} \sim 8.0 \times 10^{-5}$ m/s, 割れ目帯で $4.0 \times 10^{-11} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ m/s(中野ほか, 2001)
- ・愛媛県波方および岡山県倉敷(結晶質岩)の事例(LPガスの水封式地下岩盤貯槽施設において、貯槽を設置する花崗岩新鮮部の透水係数は、波方(深度約180 m)で 5.6×10^{-9} m/s, 倉敷(深度約187 m)で 3.3×10^{-8} m/s)(大竹, 2001)
- ・北海道幌延地域(堆積岩)の事例(透水係数は勇知層で $10^{-10} \sim 10^{-9}$ m/sオーダー, 声問層で $10^{-9} \sim 10^{-8}$ m/sオーダー, 稚内層では $10^{-11} \sim 10^{-5}$ m/sオーダーで地下深部の透水性は地下浅部に比べて小さくなる傾向, 透水性割れ目の透水量係数は平均値 1.7×10^{-6} m²/s, 標準偏差 3.2×10^{-6} m²/sの対数分布に従うことを把握)(操上ほか, 2008 など)
- ・神奈川県横須賀地域(付加体堆積岩)の事例(三浦層群の透水係数は 1.0×10^{-7} m/s程度, 葉山層群の透水係数は 1.0×10^{-9} m/s程度であり, 三浦層群中のスコリア濃集層の透水係数は 1.0×10^{-5} m/s程度と高い傾向)(長谷川ほか, 2010 など)

○ ^{14}C , ^{36}Cl , ^4He , $\delta^{37}\text{Cl}$ などの地下水の同位体組成を用いて、地下水年代の推定が実施されており、地下水の流動が緩慢である地域の存在を示唆する結果が得られている(電中研, 2008 など)。関連する知見をp.13-14に引用して記載。

4 化学場(1/3)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(2/3)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。

【その後の知見:補足】

- 以下の事例において、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、天水の影響が及ばない地下深部の地下水は、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あるいは深部起源成分などの影響により、NaClに富んでいることが確認されている。
- ・北海道幌延地域のうち沿岸域の堆積岩を事例として、塩分濃度の深度分布を把握するとともに、起源、水質形成機構を確認。pHは深度約500 m以浅で6～9の範囲でばらつくものの、深度約500～1,000 mでは8前後(産業技術総合研究所, 2011など)
- ・北海道幌延地域のうち内陸部の堆積岩を事例として、地下水のpHは約6～9の範囲にあり、Ehは地下深部で還元性の値(深度約140 m, 171～237 mの声間層でそれぞれ約-190～-230 mV, 約-220 mV, 深度約500～550 m, 約606～644 mの稚内層でそれぞれ約-100 mV, 約-170 mV)を指示、⁴He蓄積法による地下水の年代は、深度約250 mの声間層で200万年、深度約700 mの稚内層で1,000万年であり、³⁶Cl法による年代値(いずれの地層も100年以上)と整合することから、地下水は堆積後からほぼ滞留と解釈(太田ほか, 2007 など)
- ・神奈川県横須賀地域(沿岸域・付加体堆積岩)を事例として、地下水(裂隙水および間隙水)の水質分布、起源・滞留時間、水質形成機構について把握。⁴He蓄積法による地下水の年代は、葉山層群で700万年程度と推定され、深度300 m以深の葉山層群において地下水の流動性が低いことを示唆(長谷川ほか, 2010など)
- ・青森県六ヶ所地域(沿岸域・堆積岩)を事例として、地下水の水質分布、起源・滞留時間、水質形成機構について把握。深度110～120 mの試験空洞周辺の地下水の¹⁴C地下水年代は24,000年と推定(大山ほか, 2007など)

(次ページに続く)

4 化学場(3／3)地下水化学

【その後の知見:補足(続き)】

- ・北海道釧路炭鉱(海域・堆積岩)を事例として, 地下水の水質分布, 起源・滞留時間, 水質形成機構について把握。白亜系の塩水は, ^{36}Cl 法による年代が200万年以上と推定(馬原・中田, 2003)
- ・福島県および新潟県を事例として, 既存データの詳細な分析を通じて, 深層地下水の水質分布, 起源, 水質形成機構などの地域的な特徴を把握。地下水のpHは火山フロント西側で6~7が卓越, 東側で6~8の範囲, 太平洋沿岸部では6~9が卓越(産業技術総合研究所, 2012)
- ・中国・四国地域を事例として, 既存データの詳細な分析を通じて, 深層地下水の水質分布, 起源, 水質形成機構などの地域的な特徴を把握。深層地下水のpHは, 全域で6~8の範囲にあることを確認(産業技術総合研究所, 2012)
- ・非火山地域の深層地下水データ(約5,200点)について, 堆積岩類, 付加コンプレックス, 火山岩類, 深成岩類の4タイプの地質で水温, pH及びイオン濃度を比較し, 水温の平均値は火山岩類中の地下水が最も高く, pHの平均値は地質間で大きな差は見られず, 主要陽イオン濃度の平均値は堆積岩類が最大であることを確認(尾山ほか, 2011)

補足：安全評価の際考慮する地質環境特性についての考え方 物質移動特性のうち物理的構造

【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】

○さまざまな岩盤においてマトリクス拡散効果を期待できる。

【第2次取りまとめにおける考え方】

- 亀裂が地下水の移動経路となる岩盤において、核種は、割れ目表面の岩盤基質部の変質部だけでなく未変質部にもマトリクス拡散すると考えられる(分冊3:5. 3. 2)。
- ナチュラアナログによる観察では、花崗岩において、割れ目表面から数十mm程度まで、マトリクス拡散が生じていることが実際に観察された(分冊1:要約)。

【その後の知見】

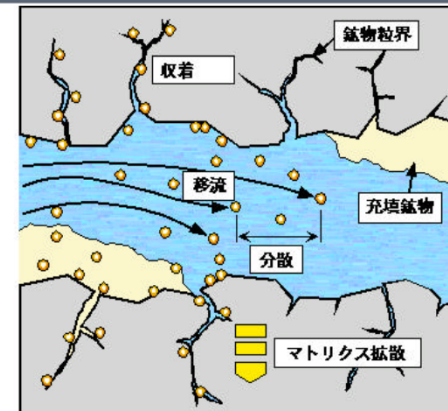
- マトリクス拡散による核種の移行遅延効果は、割れ目の発達程度にかかわらず、花崗岩や堆積岩の基質において認められる(JNC, 2005)。
- 微視的には、連結する間隙構造において、物質の移動とともに、収着およびマトリクス拡散による物質移動の遅延が実際に生じている(Yoshida et al., 2013など)ことが認められる。

【NUMOの考え方】

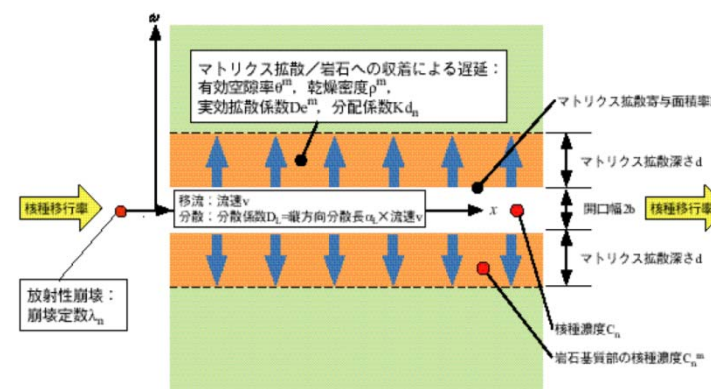
- マトリクス拡散による核種の移行遅延効果は一般的性質であると考えられる。
- 一般的性質であることから、定量評価におけるデータ取得の対象とする。

【調査手法(調査技術／調査時期)】

- 岩種や亀裂のタイプを踏まえ、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。
- 概要調査段階において、ボーリングコアを用いた室内試験等により、詳細なデータが把握可能



岩盤中の核種の移行に対する遅延効果
(分冊3, 図4. 2. 2-1)



遅延効果に対するモデル上の取り扱い
(分冊3, 図5. 3. 2-1)

【長期的変遷】

- 隆起や火成活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。

補足：安全評価の際考慮する地質環境特性についての考え方 物質移動特性のうち化学的性質

【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】

○多くの鉱物が放射性物質を収着する能力をもつが、特に粘土鉱物（イライト、スメクタイト）、雲母、鉄含有鉱物などが多く含まれるとよい。

【第2次取りまとめにおける考え方】

○移行経路に存在する粘土鉱物および雲母や黄鉄鉱などの鉄含有鉱物は、石英、長石類、方解石などに比べて、一般に物質を吸着する能力が高いことがわかっている（分冊1：要約）

【その後の知見】

○様々な岩石に対して測定された核種の分配係数および拡散係数がデータベースとして取りまとめられ（館ほか、2009）、岩種情報からその遅延性能を推測することが可能になった。
○岩盤中の粘土鉱物の存在量などから、その収着性能を見積もることが可能になった。（Ochs, et al., 2012）

【NUMOの考え方】

○岩石の収着性能は一般的な性質であると考えられる。
○対象地域に存在する岩石の性質からその遅延機能を推測可能。

【調査手法（調査技術／調査時期）】

○文献調査段階から上記データベースを活用し、岩種や地下水化学の推定情報により、遅延性の評価が可能。
○概要調査段階において、ボーリングコアと現場の地下水を用いた試験等により、データを取得し、上記データベースとの比較により、遅延性の評価が可能。

【長期的変遷】

○隆起や火成活動に伴う地下水化学変化及び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。

補足：安全評価の際考慮する地質環境特性についての考え方 物質移動特性に関するその後の知見：補足

【その後の知見：補足】

- 以下の事例に基づいて、実際の調査・評価に適用可能な物質移動特性に関する体系的な調査・評価技術が整備できていると判断できる。
- 白亜紀の土岐花崗岩を対象に、JAEA瑞浪超深地層研究所(岐阜県瑞浪市)における調査研究を通じて、マトリックス拡散が数十mm以上に及ぶこと、原位置地下水条件下でのCsの分配係数が0.5MNaCl溶液条件下の値に比べ1オーダー大きくなることなどを確認(太田ほか, 2005など)
- 白亜紀の万成花崗岩(底盤型, 岡山市)および白亜紀の土岐花崗岩(岩株型, 岐阜県東濃地方)を対象とした室内試験により、変質部の間隙に形成した雲母鉱物や鉄水酸化物により、未変質部に比べて大きな収着効果を示すことを確認(Akagawa et al., 2006など)
- JAEA瑞浪超深地層研究所(岐阜県瑞浪市)において、新第三紀堆積岩の瑞浪層群明世累層の凝灰質砂岩を対象に、放射性核種などの移動および固定化を規制する酸化還元フロントの地球化学的な特性を調査し、酸化還元フロントにFe及び希土類元素等が増加することを確認(Yoshida et al., 2008)
- 北海道幌延町の沿岸域において、更新世堆積岩の勇知層(地下500 m以深)を対象に、地質学的特性、地下水の水質・同位体の深度プロファイルから、地下500～800 m区間では拡散域、地下800～1,000 m区間では滞留域であること、および物質移動は拡散支配となることを確認(産業技術総合研究所, 2012)
- 花崗岩試料を用いた非収着性イオンによる非定常拡散試験により、拡散係数は試料の長さに依存しないほぼ一定値が得られ、非収着性イオンは花崗岩マトリックスを数百mmの深さまで拡散し得ると推定(栃木ほか, 2007)

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.