

地下深部の岩盤における地下水の流れの有無を水の安定同位体比から判別する

望月 陽人 石井 英一
Mochizuki Akihito Ishii Eüchi

1. はじめに

日本では、原子力発電に伴って生じる高レベル放射性廃棄物を、地下 300 m よりも深い岩盤中に埋設することとなっている（以下、地層処分）。地層処分では、工学的なバリアシステム（人工バリア）と地下深部の岩盤（天然バリア）により、放射性物質を地下深部に閉じ込め、人間の生活環境から長期間にわたって隔離する（図 1）¹⁾。ここでの「長期間」とは数万年以上の時間スケールを想定しており、これは廃棄物中の放射性物質の放射能が人間の生活環境に影響を与えないレベルまで減衰する期間に相当する。地層処分では、この期間内に放射性物質が地

下水中に漏れ出す可能性を考慮し、廃棄物周辺の地下水の流れが緩慢であること等が処分場の選定を行う上で重要な条件となる。

地下深部の地下水は岩盤中の隙間に存在する。その隙間の幅はナノメートルスケールからミリメートルスケールまで様々であるが、より隙間が小さい岩盤ほど水が流れにくくなる。しかし、隙間の小さい岩盤は一般的に硬く、硬い岩盤は地殻変動や温度変化等によって亀裂（岩盤が部分的に分断される箇所）が発生しやすい。一度亀裂が形成されると、その亀裂内を地下水が流れやすくなることがあるため、亀裂は地下水の流れを検討する上で重要な構造として認識される。

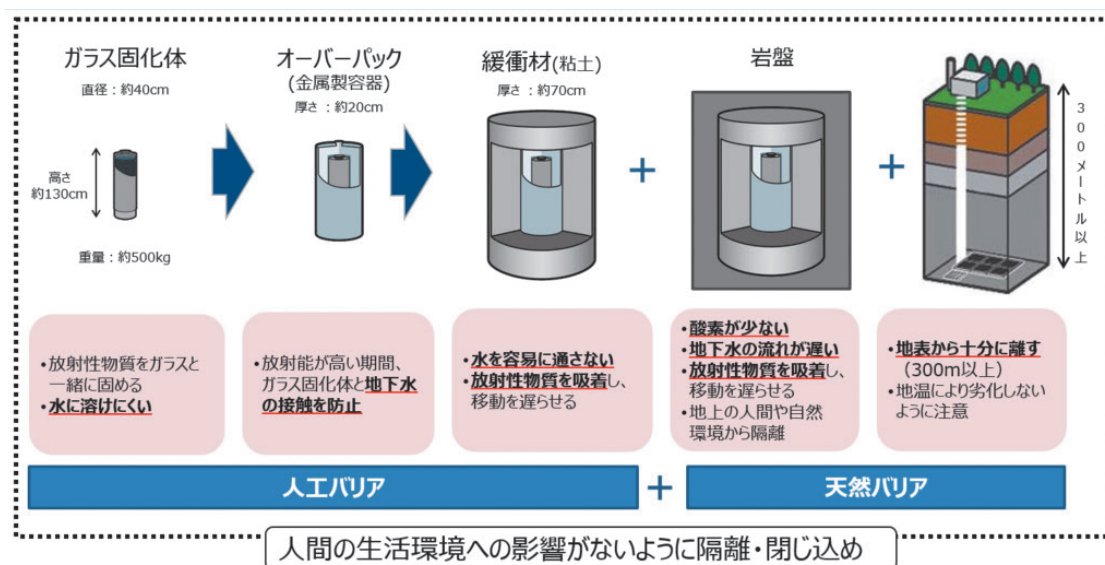


図 1 地層処分システムの概要¹⁾

亀裂の発達する岩盤中の地下水の流れの速さ（あるいは流量）は、亀裂の隙間の幅（亀裂の透水性）とその隙間のつながり具合（亀裂の水理学的連結性）、そして地下水を動かす駆動力（動水勾配）に支配される。例えば、亀裂の透水性あるいは水理学的連結性が十分に小さければ、動水勾配が大きくても地下水はほとんど流れない。また、亀裂の透水性や水理学的連結性が高くても、動水勾配が十分に小さければ、地下水はほとんど流れない。このように亀裂の透水性や水理学的連結性及び地下水の動水勾配は地下水の流れを評価する上で重要であるが、必ずしもこれらのパラメータを効率的かつ正確に測定することは容易ではない。例えば、地下深部の地下水の動水勾配（あるいは流速）を直接測定することは、装置の検出下限との関係から、困難な場合がある。

北海道幌延町の幌延深地層研究センター（以下、センター）は、数百万年前の海底に堆積した細粒物からなる岩石（新第三紀堆積岩）を対象とした事例研究を通じて、地層処分技術に関する様々な研究開発を行ってきている²⁾。その中で、岩盤中の亀裂の透水性や水理学的連結性及び地下水の動水勾配に関する調査手法やモデルの開発を行っている³⁻⁵⁾。本稿ではこれらのうち、地下水の動水勾配に関して新たに開発した調査手法⁵⁾を紹介する。本手法は、地下水の水素・酸素安定同位体比（ δD , $\delta^{18}O$;以下、同位体比）を利用して、亀裂を通じた地下水の流れの有無を判別するものである。

2. 地下水の同位体比の従来の利用方法

地層処分では、人工バリアの健全性評価や地下水中に漏洩する可能性のある放射性物質の移動・遅延現象の評価のために、地下水の水質やその形成プロセスを知る必要がある。地下水の同位体比は、化学反応等による変化が短期間で生じにくく、その起源となる水の同位体比を保持しやすい⁶⁾。そのため、しばしば地下水の起源を推定するために利用される。例えばセンター周辺の地下水は、地表から浸透した降水と、化石海水（過去の海水が長年にわたる堆積物の埋没・圧密作用及び鉱物との化学反応を経て希釈・変質した水）との混合からなることが分かっている。前者の降水は、同位体の分別作用時における温度依存性（低温期の降水の同位体組成は相対的に軽くなる）⁷⁾や地下水の年代測定から、過去の氷期に涵養した降水と現在の後氷期に涵養した降水の2種類に更に大別できる。後者の化石海水は、粘土鉱物やシリカ鉱物との長年にわたる反応（同位体平衡）により、一定の同位体比（ δD : $-30 \sim -20\%$, $\delta^{18}O$: $0 \sim 4\%$ ）を示し、百万年前より古い水であることが分かっている。

センター周辺の降水起源の地下水と化石海水の分布は、水理学的な調査等から推定される亀裂の水理学的連結性の分布と整合的であることが分かっている³⁾。図2はセンター周辺の稚内層と呼ばれる地層における、地下水の同位体比の深度分布を示す。同

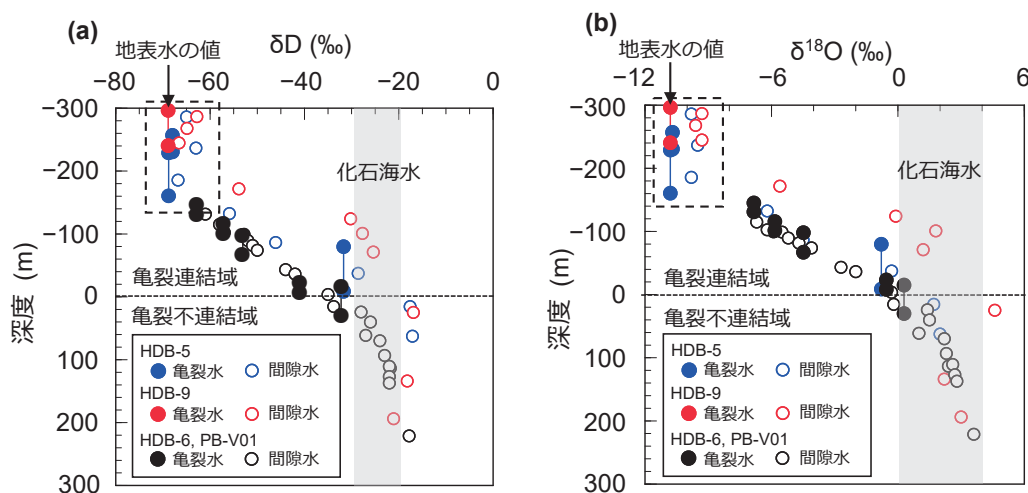


図2 稚内層における地下水の同位体比の深度分布⁵⁾

(a) δD , (b) $\delta^{18}O$ 。縦軸の深度は、亀裂連結域と亀裂不連結域の境界を0mとしたもの。黒点線枠の部分は、亀裂水の同位体比が間隙水と比べて地表水により近く、亀裂を通じた地表水の流動が示唆される。HDB-5, -6, -9, 及びPB-V01はセンター周辺のボーリング孔の名称である

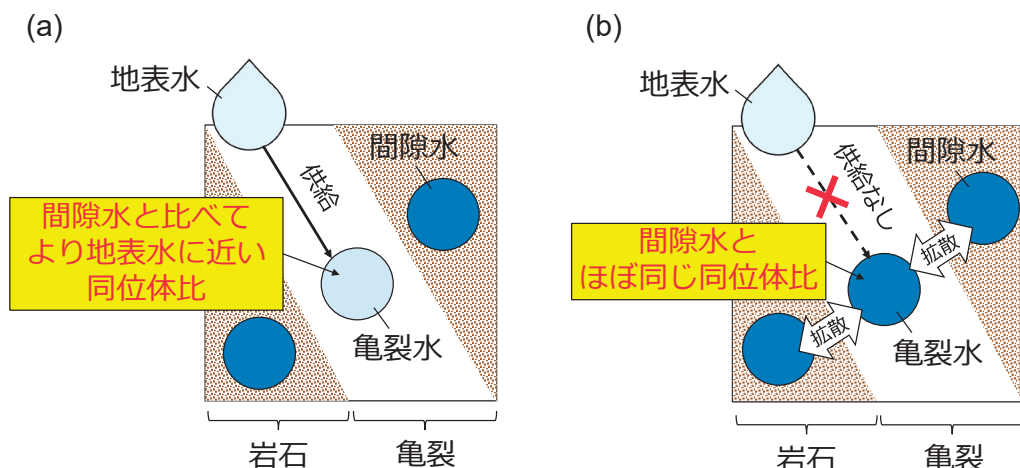


図3 亀裂水と間隙水の水質（同位体比）に関する概念図

(a) 亀裂に沿った地下水の流れが生じている場合、(b) 亀裂に沿った地下水の流れが生じていない場合

図には、地上からのボーリング孔からポンプで揚水した亀裂内の水（亀裂水）と、岩石コア試料を圧縮することにより採取した亀裂の無い岩盤部の間隙中の水（間隙水）の同位体比を示している。亀裂の水理学的連結性が高い領域（以下、亀裂連結域）では地表水（降水）の有意な混入が同位体比から示され、亀裂を通じた地表水の浸透が推定されている。一方、亀裂の水理学的連結性に乏しい領域（以下、亀裂不連結域）では、化石海水の存在が確認できる。

3. 地下水の同位体比を利用した今回の方法

亀裂の発達する岩盤中の地下水は、亀裂の部分と、亀裂の無い岩盤部内の間隙の部分の両方に存在し、地下水が流れる場合は亀裂の方が一般に流れやすいことから、亀裂を優先的に流れる。そのため、岩盤にもともと含まれていた水とは異なる水質の水が亀裂内を流れる場合、亀裂水の水質は、間隙水と比べて、流れてきた水の水質（同位体比）により近くなる（図3a）。しかし、亀裂内の水の流れが止まると、亀裂水と周囲の間隙水の水質は拡散により均一になり、割れ目水と間隙水はほぼ同じ同位体比を示すようになる（図3b）。この考えが正しければ、亀裂水と間隙水の同位体比のコントラストを用いて、亀裂内に地下水の流れが生じているか否かを判別することができる。それにより、例えば地下水の動水勾配や流速が実際に測定できなくても、地下水の流れの有無を評価すること等が可能となる。

筆者らは前記の考えをセンター周辺のボーリングデータを用いて実証した。図2の同位体比の深度分布に示されるように、亀裂連結域の浅部では、亀裂水の値が近傍深度の間隙水と比べてより地表水に近く（黒点線枠の部分）、深部では亀裂水と近傍深度の間隙水の同位体比が類似する。したがって、亀裂連結域の浅部では亀裂水と周囲の間隙水との混合が十分に進んでいないと解釈でき、亀裂に沿って地表水が流れていることが考えられる。一方、亀裂連結域の深部では亀裂水と間隙水との均質化が進んでいると解釈でき、亀裂に沿って地表水が流れていないことが示唆される。

δD と $\delta^{18}O$ を両軸にプロットすると前述のことがより明瞭に可視化される。図4に今回対象とした調査ボーリング孔の1つであるHDB-5孔での結果を例示する。亀裂連結域の浅部に位置する深度154～180 m 及び182～250 m の区間から採取した亀裂水の同位体比は、その周囲の深度（125～279 m）の間隙水と比べて現在の地表水の値（ $\delta D = -68.9\%$ 、 $\delta^{18}O = -10.9\%$ ：図中の△）に近い（図4b）。この結果は、現在の地表水が亀裂に沿って流れており、周囲の間隙水とは平衡に達していないことを示唆する。一方、亀裂連結域の深部に相当する深度331～402 m の亀裂水は、上下深度である325 m と426 m の間隙水の間プロットされる（図4a）。したがって、亀裂を通じた地下水の流れが現在生じていないか、亀裂水と間隙水との均質化が卓越するほど流れが遅いと解釈できる。

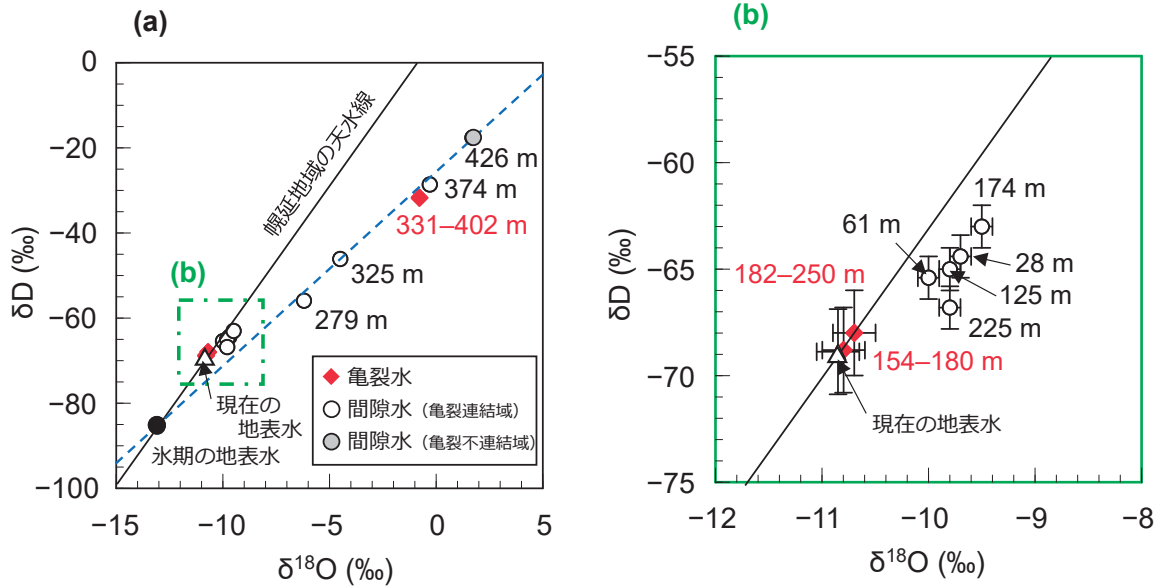


図4 調査ボーリング孔 (HDB-5 孔) における $\delta D - \delta^{18}O$ プロット⁵⁾

(a) 全体図, (b) 一部領域の拡大図。プロットの脇の数字は各地下水の採取地点の地上からの深度を表す。青点線は、氷期の地表水の同位体推定値と亀裂不連続域の化石海水の間隙水とを結んだもの。黒実線は、幌延地域における天水線 ($\delta D = 7.0\delta^{18}O + 6.9$)

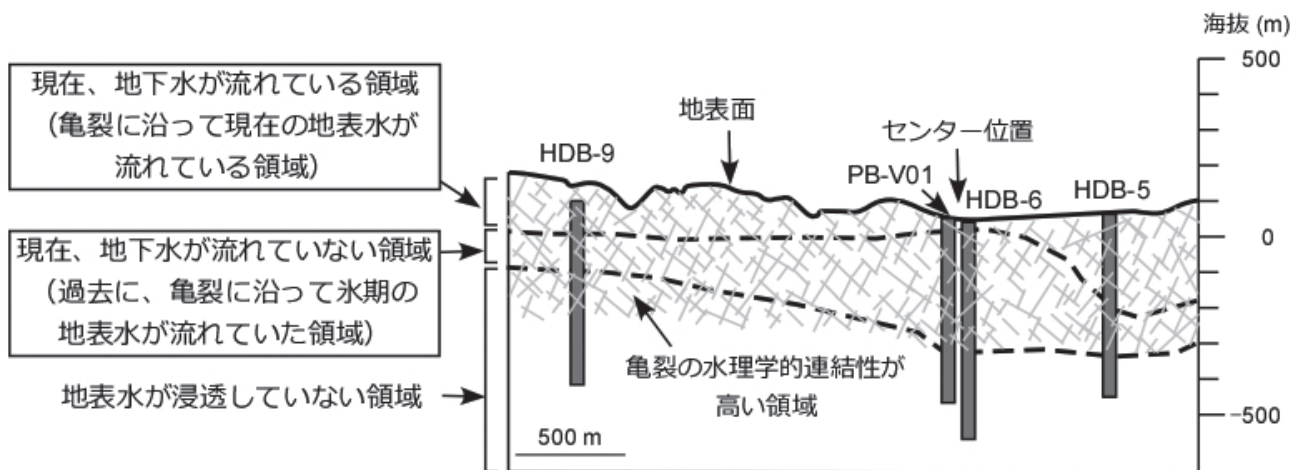


図5 センター周辺の亀裂に沿った地下水の流れに関する領域分布

前記の解釈は現在の地表水の混入状態とよく整合する。図4aの $\delta D - \delta^{18}O$ プロットにおいて、幌延地域における氷期の地表水の同位体比 ($\delta D = -85.3\text{‰}$, $\delta^{18}O = -13.2\text{‰}$: 図中の●)と、亀裂不連続域の化石海水が存在する深度426 mの間隙水を直線で結ぶと(図中の青点線)、深度279 m以深の亀裂水及び間隙水はこの直線上に位置する。すなわち、亀裂連結域の深部に相当する深度279 m以深の地下水は氷期の地表水と化石海水の混合により形成されており、現在(後氷期)の地表水は混入していない。一方、亀裂連結域浅部の深度250 m以浅の地下水の

同位体比は青点線から離れて現在の地表水の値により近い値を示し(図4a)、現在の地表水の混入が示唆される。地表水が深度250 mまで亀裂とは無関係に拡散によってのみ浸透することは、それに必要な時間の長さ(数万年以上)を考えると現実的ではなく、亀裂に沿って現在の地表水が流れていることが示唆される。これは前段落で述べた解釈と一致する。

図5は、亀裂の水理的連結性に関する領域分布図に、地下水の流れの分布を併せて示したものである。同図から分かるように、亀裂の水理的連結性が高い領域の中でも、現在、地下水が流れていない

部分が広く分布する。この部分は亀裂の水理学的連結性のみならず、透水性も高い⁴⁾ことを考慮すると、動水勾配が非常に小さいために地下水が流れていないことが考えられる。この部分には現在の地表水が認められないものの、氷期の地表水が認められることから、氷期のある時期に動水勾配が高くなり、この部分まで氷期の地表水が亀裂に沿って浸透した可能性がある。仮にこの動水勾配の変化が氷期・間氷期の環境の違いにより生み出されているとすれば、次の氷期（あるとすれば）まで、この部分の動水勾配は小さく、地下水は流れてない状態が保持されると推察される。

4. おわりに

本稿で紹介した地下水の同位体比を用いた調査手法により、地下深部の岩盤における地下水の現在の流れ具合の分布を推定することが可能となった。亀裂の水理学的連結性が高く、亀裂を通じて地表水が浸透し得る領域の中でも、地下水の流れが生じていない領域が広く存在し得ることが実証できた。また、

今回のケーススタディに関して言えば、その水の流れていない状態は次の氷期まで保持される可能性があることが分かった。これらの成果及び知見は、高レベル放射性廃棄物の地層処分における処分場の候補地選定や数万年の時間スケールにおける地層の閉じ込め性能の評価に役立つと考えられる。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html
- 2) 日本原子力研究開発機構
<https://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/index.html>
- 3) Ishii, *Water Resour. Res.*, **54**, 3335-3356 (2018)
- 4) Ishii, *Eng. Geol.*, **294**, 106369 (2021)
- 5) Mochizuki, *et al.*, *Hydrogeol. J.*, **30**, 813-827 (2022)
- 6) Clark, *et al.*, *Environmental Isotopes in Hydrology* (1997)
- 7) Rozanski, *Chem. Geol.*, **52**, 349-363 (1985)

((国研)日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター)