

深地層の研究施設計画に関する報告会2020

3. 超深地層研究所計画(瑞浪)

3) 共同研究成果トピックス (電力中央研究所)

(一財)電力中央研究所

上席研究員 長谷川 琢磨

2020年12月1日

電力中央研究所

研究の背景・目標

- ◆ 高レベル放射性廃棄物を地層処分する際の天然バリアの性能評価においては、処分施設周辺の**地下水流動・物質移行**を精度良く把握する必要がある。
- ◆ 電力中央研究所では、地下水の流動を**天然のトレーサー**を用いて評価する**地下水年代測定技術**や、岩盤中での物質の移行特性を**人工のトレーサー**を用いて評価する**トレーサー試験技術**の開発を進めてきた。
- ◆ 本報告では、地下水年代測定技術やトレーサー試験技術を花崗岩が分布する**瑞浪超深地層研究施設**に適用し、有効性を確認する。

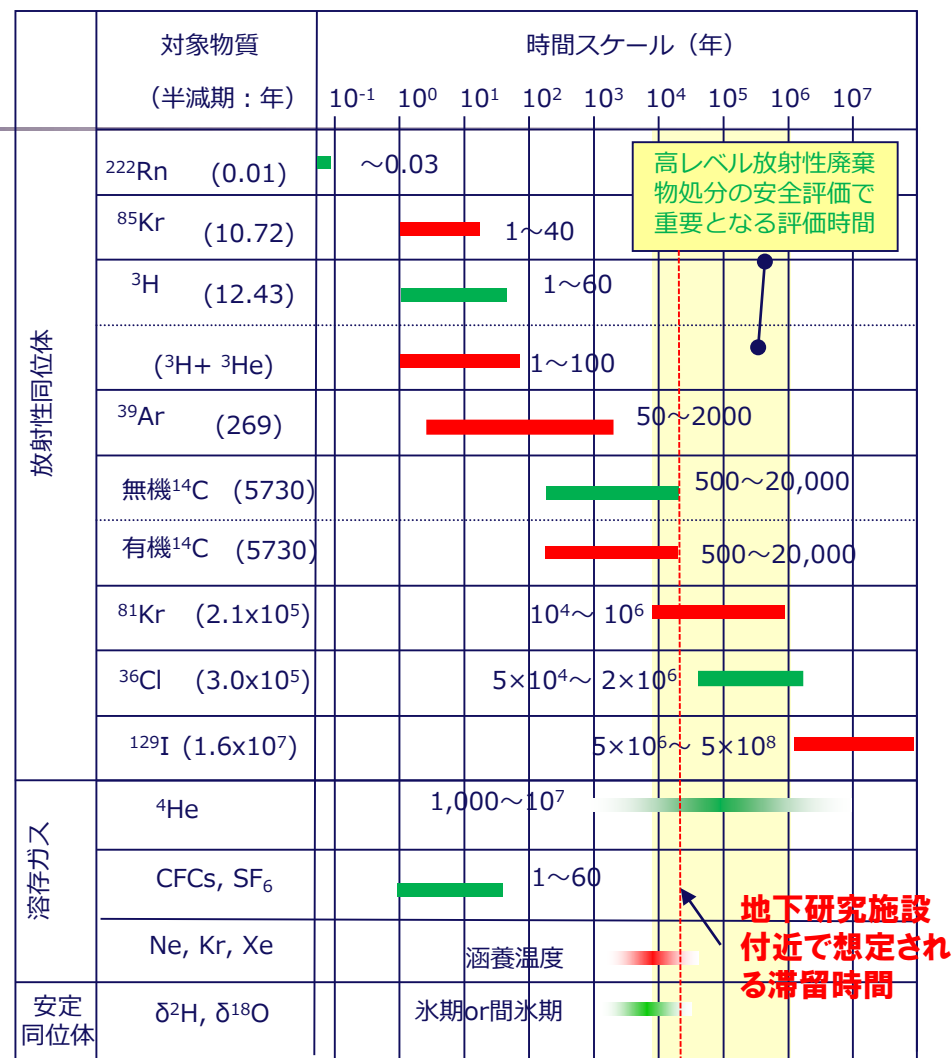
本研究は、**経済産業省**資源エネルギー庁より電力中央研究所が受託した「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（**岩盤中地下水移行評価確証技術開発**）」の成果の一部である。また、本研究は**日本原子力研究開発機構**との共同研究として実施した。

地下水年代測定技術

これまでの研究では、地下研究施設周辺は、広域地下水流動の**流出域**に位置し、地下水年代が**2万年程度**と推定されているが、下記の課題が残されている。

課題

- ◆ **^{14}C 年代**は、流出域では溶存炭酸類の濃度が低く、前処理が上手くいかない場合があり、分析結果にばらつきが大きい。
- ◆ **^4He 年代**は、流出域では外部フラックスの影響が大きく、**原位置生成による蓄積**の定量的な評価が難しい。
- ◆ 流出域では、 **δD と $\delta^{18}\text{O}$** は現降水に比べて低いが、**涵養温度**との関係が明確でない。



地下水年代測定技術の適用範囲と開発状況

汎用技術 ■■■■ 開発技術 ■■■■

地下水年代測定 実施内容

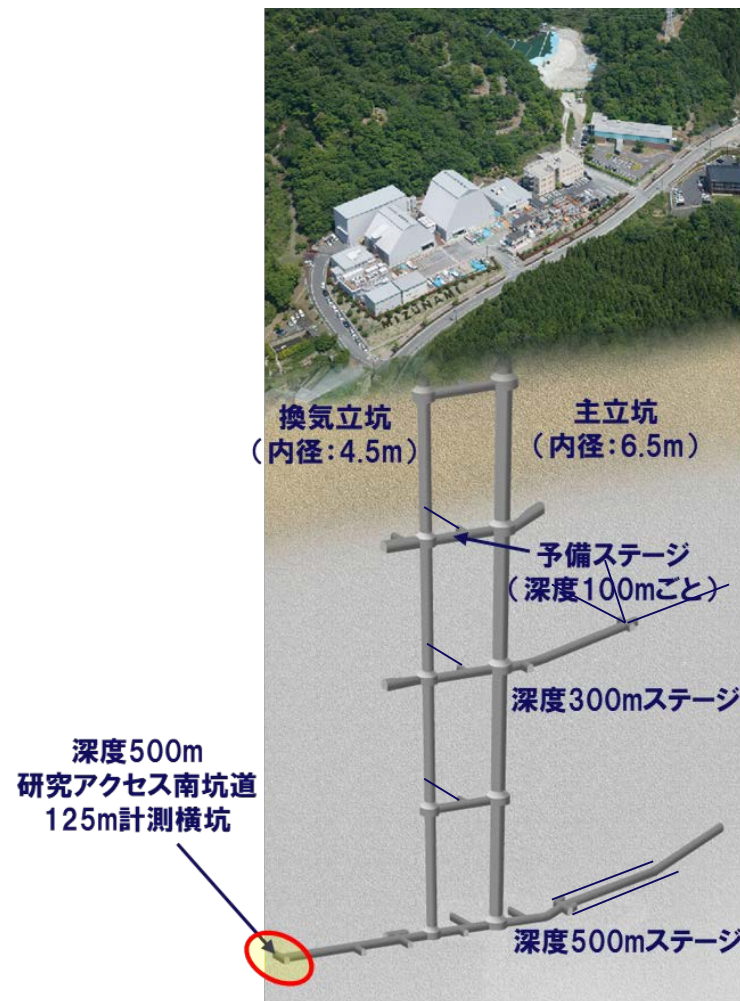
◆ 採水地点: 地下水水質観測ボーリング孔

(200, 300, 400m予備ステージおよび
300mアクセス坑道、500mアクセス南北坑道)

◆ 分析項目

- 主要溶存イオン (Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO_3^- , SO_4^{2-})
- 微量元素 (Br, B, F, I, etc)
- 安定同位体 (δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{37}\text{Cl}$)
- 放射性同位体 (^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{81}Kr , ^{129}I)
- 溶存ガス (He, Ne, Kr, Xe, CFCs, SF_6)

注) 立坑周辺の滞留時間に比べて、半減期が長いもの
(^{36}Cl : 30万年、 ^{81}Kr : 23万年、 ^{129}I : 約1600万年)、
拡散の指標($\delta^{37}\text{Cl}$)などについては、ここでは説明していない。



瑞浪超深地層研究所の坑道レイアウト
(JAEAのHPより引用したものに加筆)

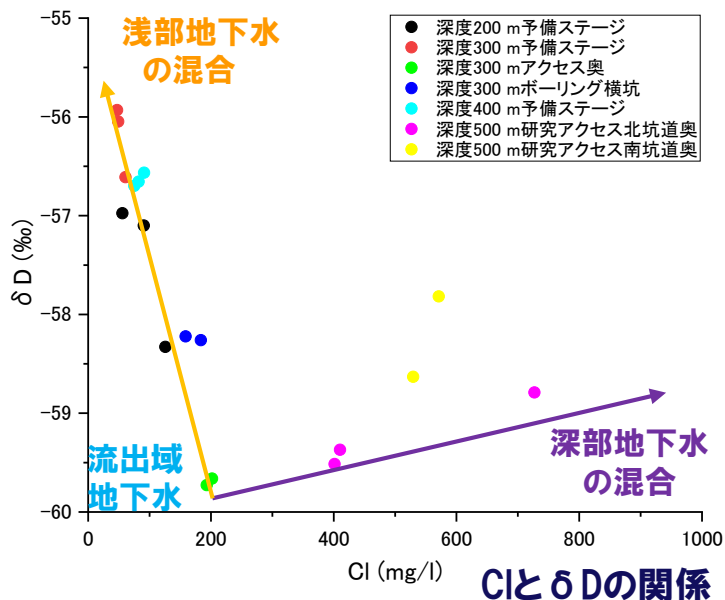
研究施設建設による地下水の混合

地下研究施設周辺の地下水は、以下に大別される。

- 浅部地下水(現降水)
- 流出域地下水(氷期降水)
- 深部地下水(化石海水)

主に、流出域地下水に浅部地下水が流入して混合していると考えられる。

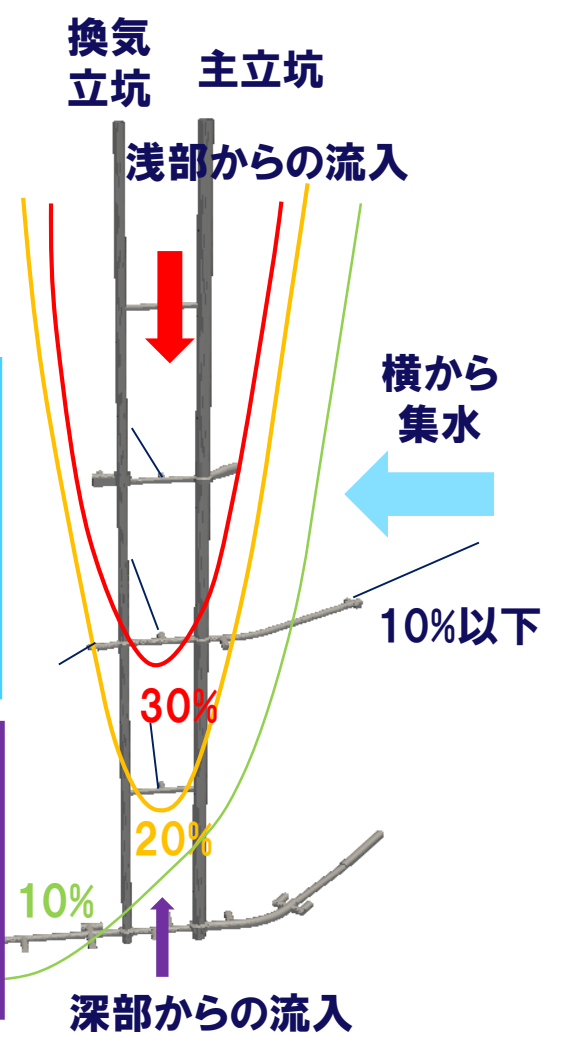
→ δD やClから浅部地下水と深部地下水の混合率がわかる。



浅部地下水
 $\delta D \cdot \delta^{18}O$ は高い
 (温暖期涵養)
 3H 、 ^{14}C が高い(若い)
 4He 濃度が低い(若い)
 Cl: 0~2mg/l (降水)
 Ca- HCO_3 型

流出域地下水(氷期降水)
 $\delta D \cdot \delta^{18}O$ が低い
 (氷期涵養)
 3H 、 ^{14}C が低い(古い)
 4He 濃度が高い(古い)
 Cl: 2 mg/l
 Na- HCO_3 型

深部地下水(化石海水)
 $\delta D \cdot \delta^{18}O$ は不明
 3H 、 ^{14}C を含まない
 4He 濃度が非常に高い
 Cl: 1000mg/l以上
 Na-Cl型



地下水混合の概念図

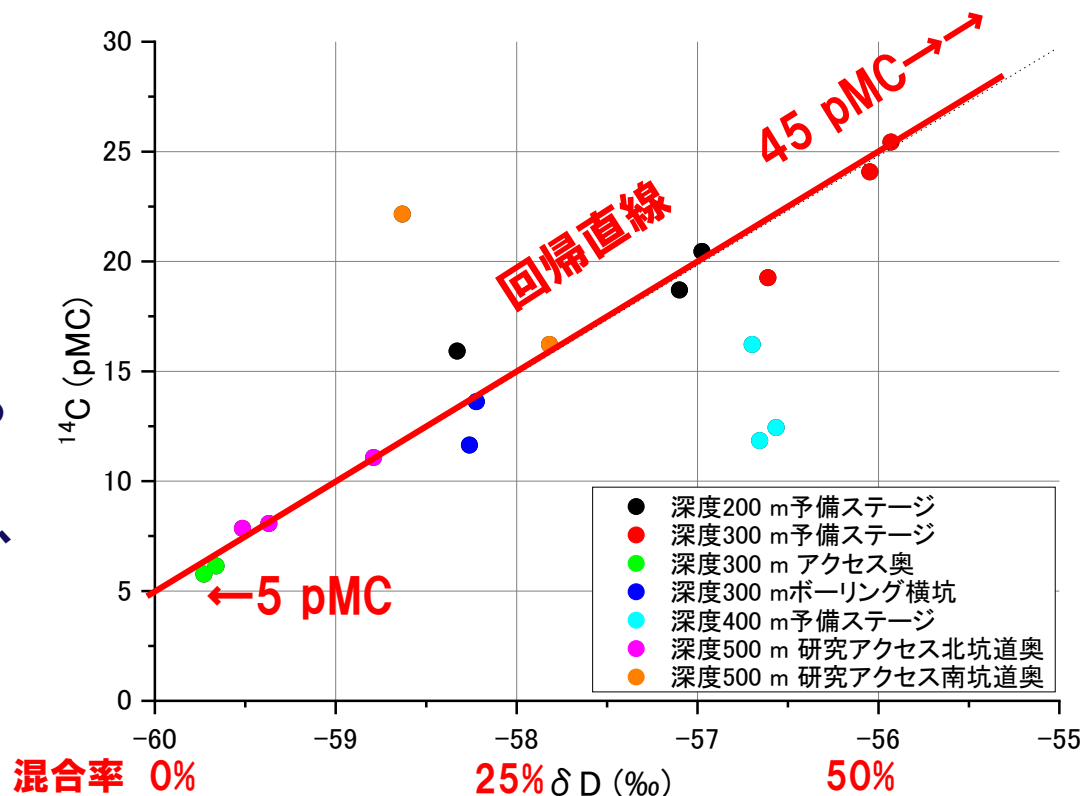
^{14}C 年代：浅部地下水の混合を考慮

^{14}C 年代は、放射壊変に伴う濃度変化に着目して滞留時間を推定する。立坑の地下水は混合しているため、 δD （浅部地下水の混合指標）で混合を考慮し、 ^{14}C 年代を求めた。

混合率が 0%（流出域地下水）になる -60‰ では、5 pMC 程度
 混合率が 100%（浅部地下水） になる -52‰ では、45 pMC 程度

初期値 45 pMC で 5 pMC まで放射壊変で減衰したとすると、 ^{14}C 年代は、約 17,000 年となる。

注) 前処理方法を沈殿法からガス化法に変更することで、分析結果にバラツキが小さく、再現性が高くなった (Nakata et al., 2016)。



^4He 年代: フラックスの混合影響

^4He 年代では、 ^4He の蓄積量を蓄積速度で割ることで年代を求める。
蓄積には、**原位置生成**と**フラックス(外部流入)**の2つがある。
立坑ではフラックスの影響があるため、差し引いて ^4He 年代を求めた。

フラックスは、 ^3He の含有量が大きい。フラックスの寄与を差し引くと(^3He が0になるところ)、**原位置生成分(切片)**が残る。

原位置生成分:

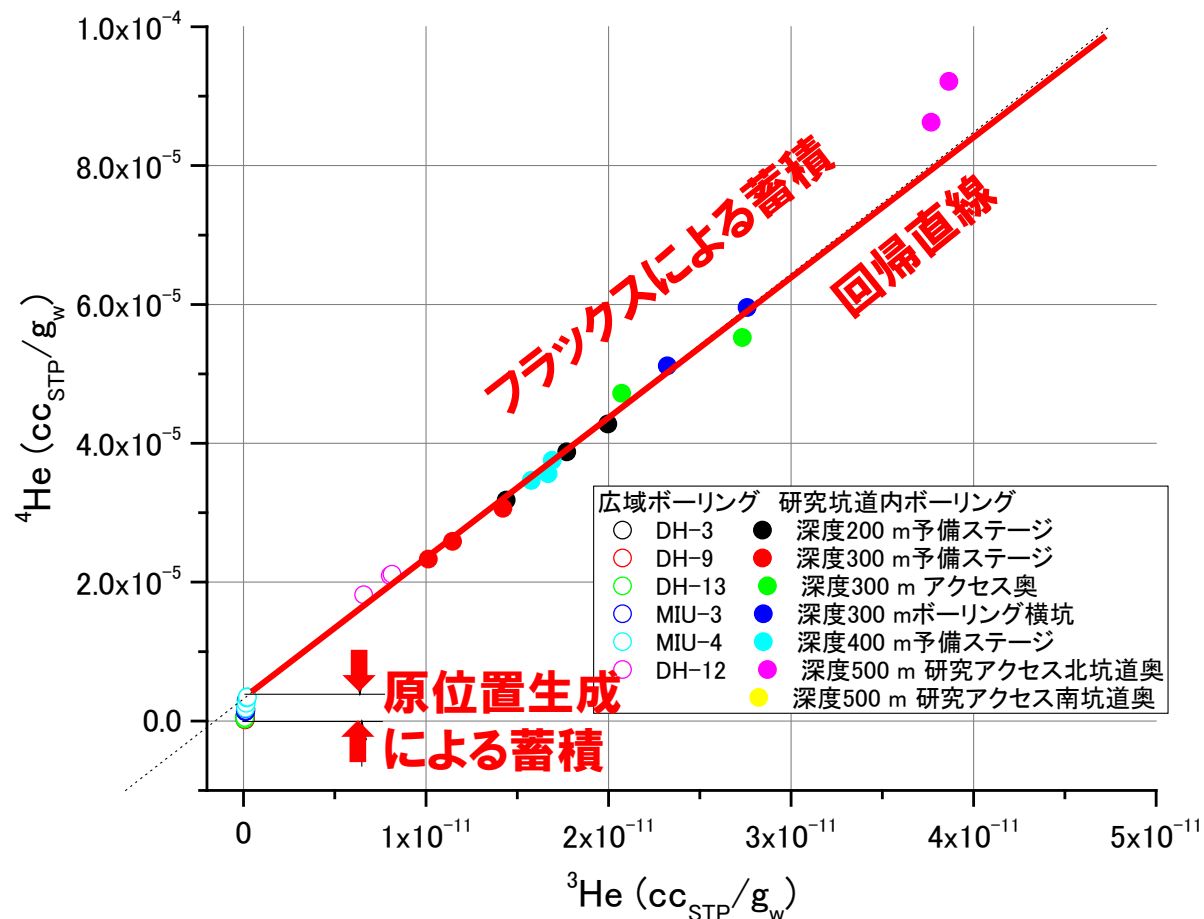
$$3.6 \times 10^{-6} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$$

原位置生成速度:

$$2 \times 10^{-10} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w\text{y}$$

^4He 年代は、

1.8万年程度



希ガス温度計(涵養温度の推定)

流出域の地下水は、氷期(1.5万年以上前)に涵養したと考えられるため、希ガス濃度(Xe, Kr, Ar, Ne)から涵養温度を推定した(溶解度の温度存性を利用)。

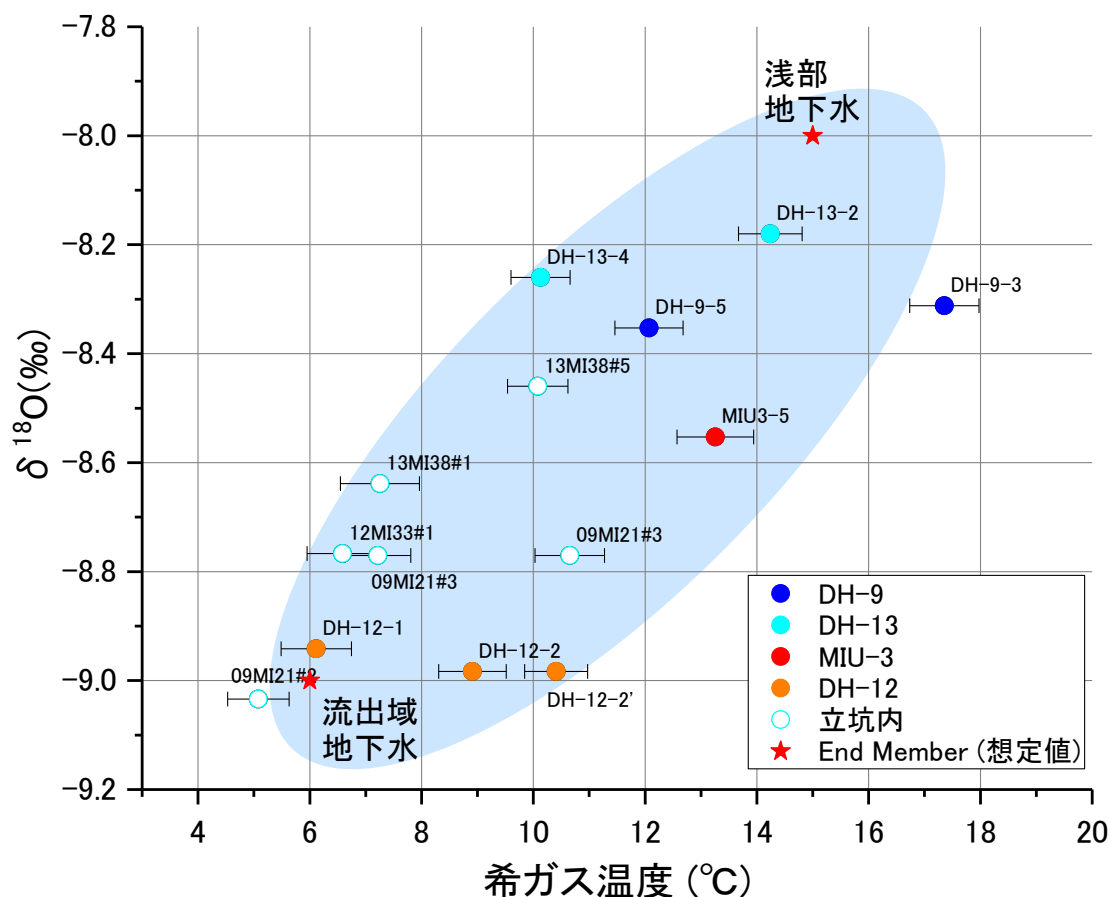
混合が少ないと考えられる地下水を利用して涵養温度を推定した。

水素・酸素同位体比と涵養温度は相関があるように見える。

流出域の地下水($\delta^{18}\text{O} = -9\%$)は、6°C程度の涵養温度になる。

このため、氷期に涵養した地下水と推定される。

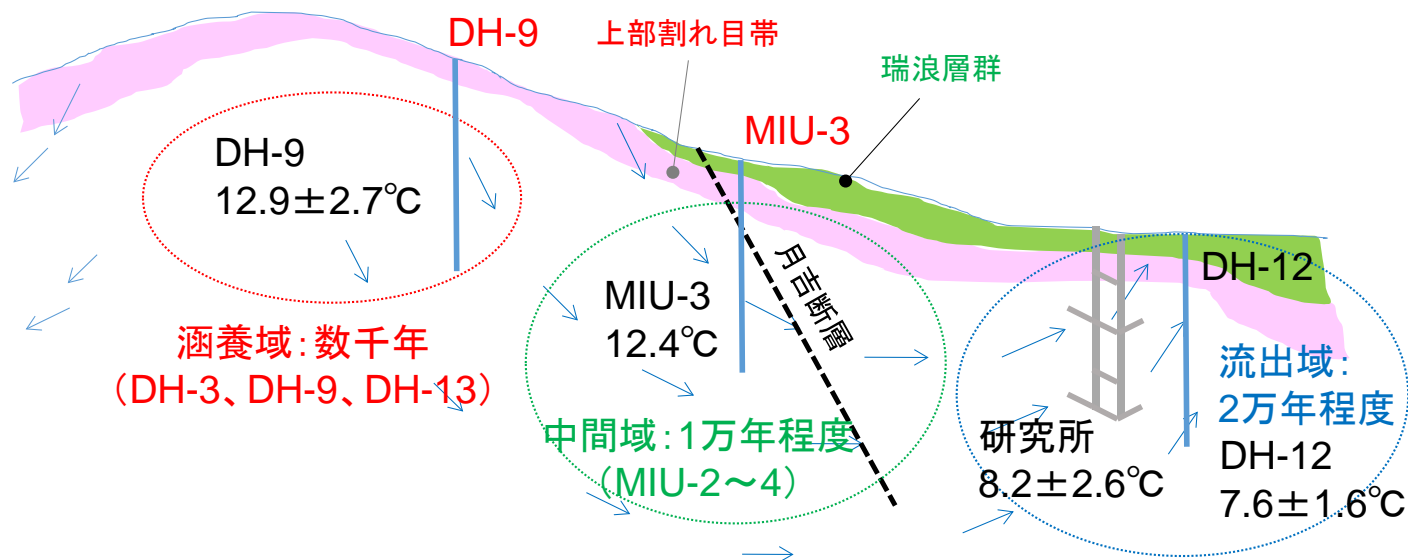
注)瑞浪の年平均気温は約15°C、氷期の気温は、現在よりも8~9°C低いと推定されている(佐々木ほか、2006)。



地下水年代測定 まとめ

瑞浪超深地層研究所の研究坑道内に掘削されたボーリング孔から地下水を採取し、 ^{14}C 、 ^4He 、希ガス温度計などによる地下水年代測定を実施した。

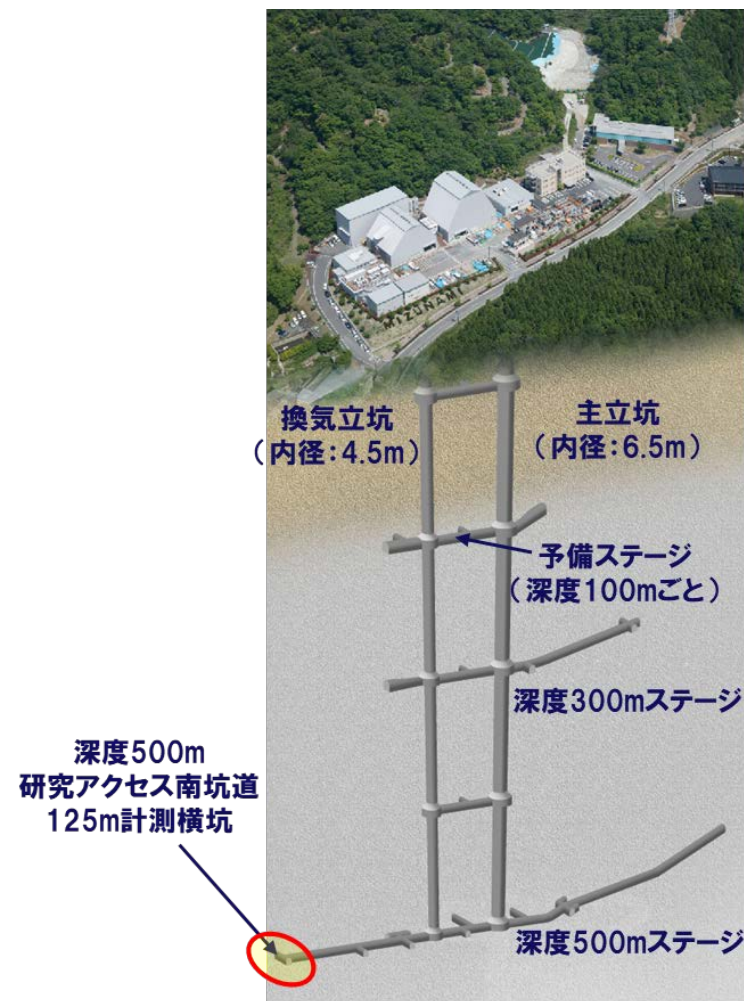
この結果、2万年程度の滞留時間を複数の方法で整合的に説明することができた。これらの方法は、花崗岩での地下水流動評価の有効な指標になると考えられる。



地下水流動と地下水年代の概念図

原位置トレーサー試験技術

- ◆ 結晶質岩に対する原位置トレーサー試験研究は、スウェーデンSKBやスイスNagraにより地下研究施設で実施されてきた。
- ◆ 電力中央研究所では、欧米に比べ割れ目密度の高い我が国の岩盤に対応可能な**トレーサー試験装置**や、試験結果から物質移行パラメータを推定する**評価手法**の開発を進めてきた。
- ◆ 上記トレーサー試験装置や評価手法の我が国の結晶質岩盤への適用性を確認するため、**深度500m**研究アクセス南坑道125m計測横坑において、水理地質環境調査、**トレーサー試験を実施し**、その結果を基に対象岩盤の物質移行特性の評価を試みた。



瑞浪超深地層研究所の坑道レイアウト
(JAEAのHPより引用したものに加筆)

試験装置の特長

開発したトレーサ試験装置は以下の特長を有する。

- ① トレーサ吐出口をパッカーに直付けすることで、投入区間の**デッドボリューム**を極限まで**減らす**ことが可能(**特許 5350136**)
- ② トレーサーの切り替えを孔内装置に組み込むことで、**トレーサの注入濃度**をほぼ**矩形形状**に制御可能
- ③ 孔内装置に組み込んだ**センサー**により、**蛍光トレーサの濃度を孔内で直接測定**できる。
- ④ **無脈動ポンプ**により**注入・揚水流量**を**安定して制御**できる。



パッカーに取り付けた吐出口

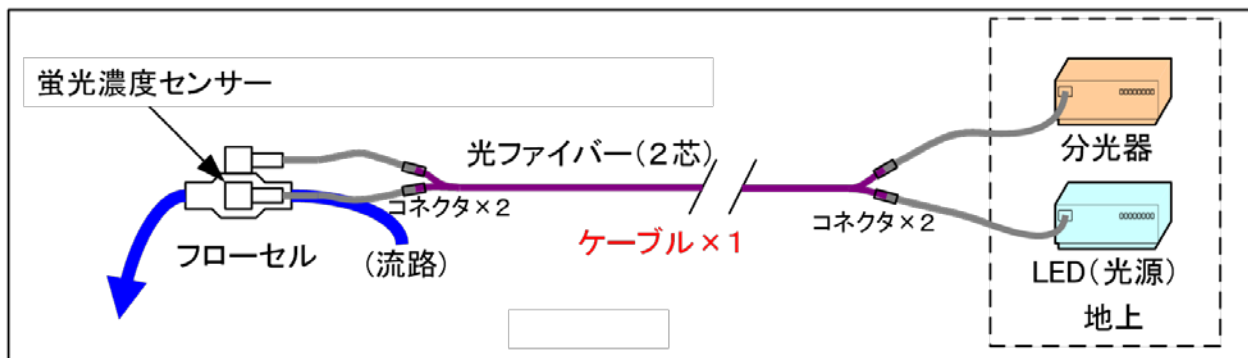


室内での注入試験
(アクリル管内でウラニンを放出)



吐出口の周囲に並べたスペーサーを
メッシュで固定して試験区間を構築

パッカー一体型トレーサ投入装置



孔内蛍光濃度センサー

トレーサ試験結果

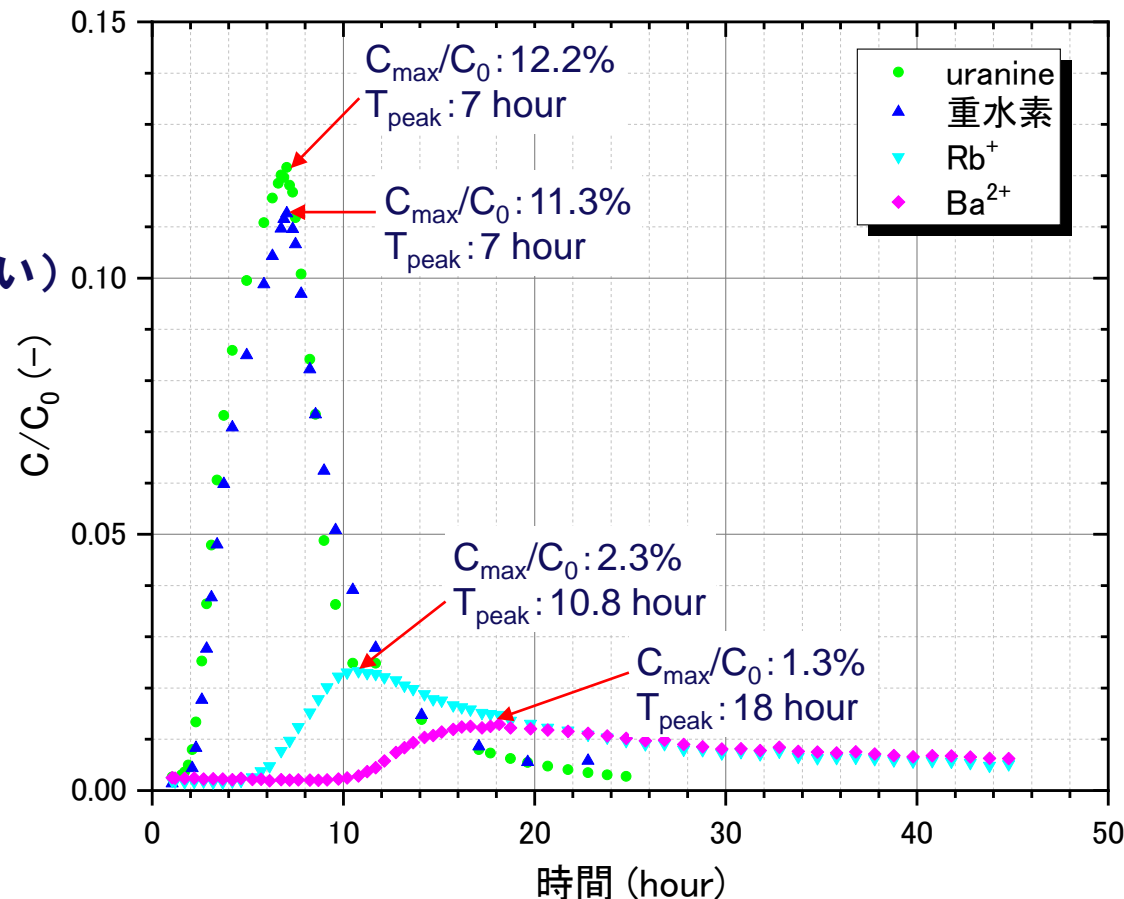
◆ 試験の条件:ダイポール試験

- 注入孔:15MI52号孔(1.5 mL/min)
- 揚水孔:16MI59号孔(9.0 mL/min)

◆ トレーサの種類:

- 非収着性:ウラン、重水素(拡散係数の違い)
- 収着性: Rb^+ 、 Ba^{2+} (収着性の違い)

トレーサー	23時間後の回収率 %	50%回収時刻 hour
ウラン	90.6	7.2
重水素	88.5	7.8
Rb^+	51.4	22.1
Ba^{2+}	27.5	38.2



◆ **重水素の方が岩石マトリクス中の実効拡散係数が大きく、ウランよりマトリクス拡散が進むため、ピーク濃度が低く、破過曲線に時間遅れが見られたと考えられる。**

◆ **Rb^+ と Ba^{2+} の破過曲線の違いは収着性の違いによるものである。**

非収着性トレーサーウラニンの破過曲線の評価解析

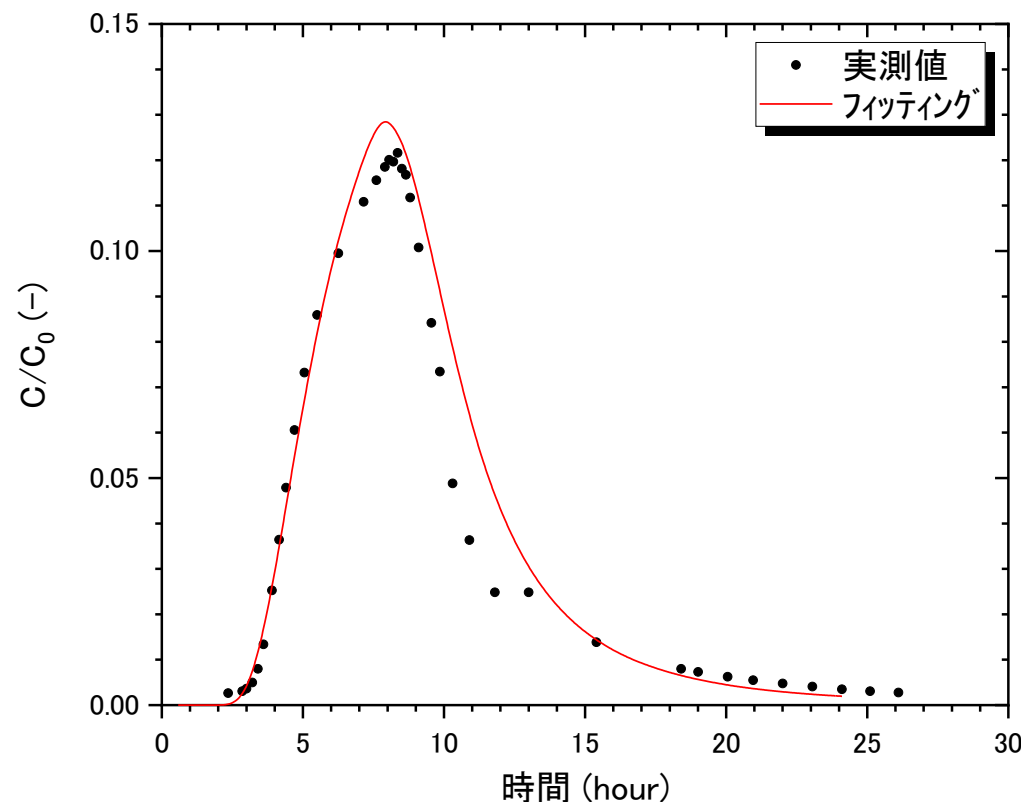
設定条件

- ◆ 縦分散長:横分散長 = 10:1
- ◆ 割れ目の開口率:60 %
高精度BTV の観察結果より設定
→岩石マトリクスへの拡散は割れ目面の60 %に相当する領域においてのみ生じる
- ◆ 岩石マトリクスの間隙率:1.05%
- ◆ 岩石マトリクス中の実効拡散係数: $4.08 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$
國丸他 (2012) の割れ目近傍の試料の数値から設定



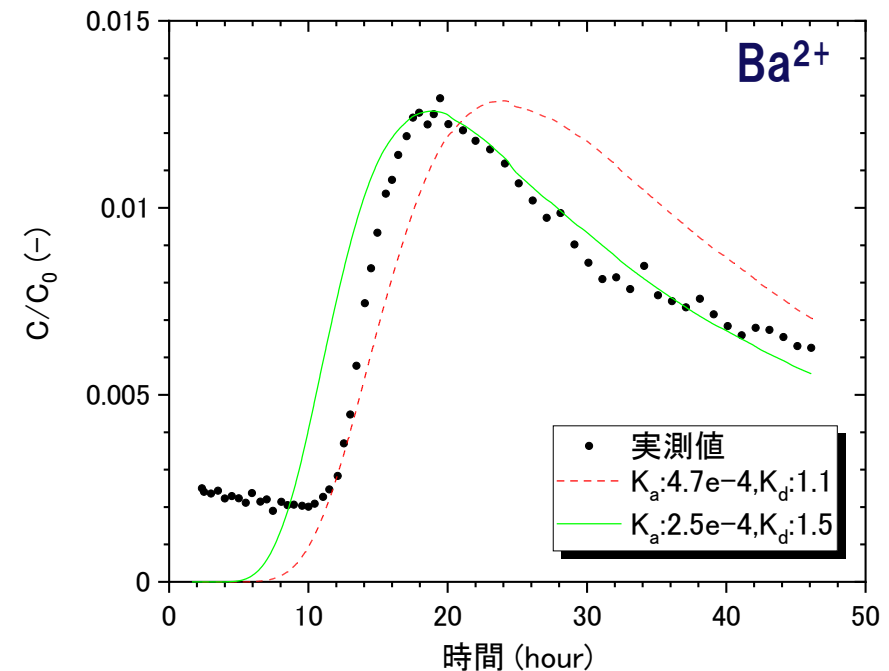
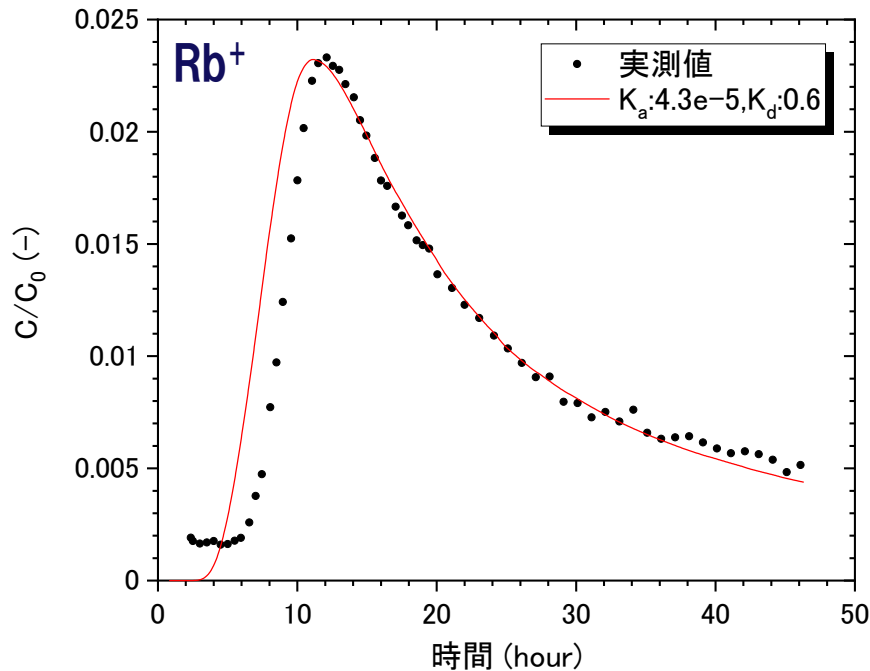
評価結果

- ◆ 割れ目の平均開口幅:0.13 mm
高解像度ボアホールTVによる15MI52 号孔の平均開口幅0.19 mmに近い
- ◆ 縦分散長:0.2 m
縦分散長は移行距離 (2.6 m) の1/10 倍付近に分布するとしたGelhar *et al.* (1992) の調査結果と調和的



実測値と最も一致した計算結果との比較

収着性トレーサー Rb^+ と Ba^{2+} の破過曲線の評価解析



割れ目開口幅と分散長にはウランによる推定結果を、表面吸着係数と分配係数には**室内バッチ試験の結果**を用いて破過曲線の**同定**を試みた。ただし、表面吸着やマトリクス拡散・吸着に寄与するのは、全割れ目面積の60%とした。



- Rb^+ では**室内バッチ試験**の表面吸着係数 $4.3 \times 10^{-5} \text{ m}$ 、室内バッチ試験に近い分配係数 0.62 mL/g で**実測値**に良く一致した。
- Ba^{2+} では室内バッチ試験の表面吸着係数 $4.7 \times 10^{-4} \text{ m}$ では破過曲線は再現できず、**表面吸着係数を約1/2**の $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}$ にすると、分配係数を 1.48 mL/g とした場合に破過曲線は**実測値**と良く一致した。

トレーサー試験 まとめ

- ◆ 非収着性トレーサーの**重水素とウラニン**で破過曲線に差異が見られ、**マトリクス拡散の影響**が確認された。一方、収着性トレーサーの**Rb⁺やBa²⁺**では**収着**による移行の遅れやピーク濃度の減衰もみられた。
- ◆ 非収着性トレーサーのウラニンの破過曲線から対象割れ目の開口幅と分散長を同定した。
 - ✓ **開口幅**の同定値は、高解像度のボアホール**TVカメラ**による計測値と整合性がある。
 - ✓ **縦分散長**は、**移行距離の1/10程度**となり、Gelhar et al. (1992)の調査結果と整合性がある。
- ◆ 収着性トレーサーの**Rb⁺**の破過曲線の評価解析では、**室内での収着バッチ試験**で求めた表面吸着と分配係数とほぼ**同じ値**で、**破過曲線を再現**できた。**Ba²⁺**の破過曲線の評価解析では、室内での収着バッチ試験で求めた表面吸着と分配係数に**近い値**で、破過曲線を再現できた。
- ◆ 結晶質岩の物質移行速度**遅延機能**を支配する重要なパラメータである岩石マトリクスの**分配係数**の推定精度が高まることで、天然バリア性能評価における**信頼性の向上**への反映が期待される。

今後の展望

平成30年度からは日本原子力研究開発機構殿と当所とで、経産省から「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(岩盤中地下水流動評価技術高度化開発)」を共同受託している。

- ◆ 地下水年代測定については、これまでの調査結果を踏まえて、広域の地下水モデルの妥当性の検証を行っている。この中で、地下水年代を用いたモデルの校正やパラメータの推定誤差の評価に取り組んでいる。
- ◆ トレーサー試験については、瑞浪超深地層研究所地下において多数の岩盤割れ目のネットワークを対象とした物質移行試験を実施し、現在その結果に対する評価を行っている。さらに、その結果を基に広域的な物質移行特性の評価に取り組む予定である。