

### 幌延深地層研究計画に関する 令和6年度の成果及び令和7年度の計画

### (2) 必須の課題のうち令和6年度に取りまとめる課題

### 1. 実際の地質環境における人エバリアの適用性確認 1.2 <u>物質移行試験</u>

### 令和7年3月11日

### 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

解析条件などの詳細説明箇所には、 補足資料と付記しています。

# 1.2 物質移行試験

### 【第4期中長期計画 目的】

幌延地域に分布する水みちの特性が異なる3つの岩盤を事例に、岩盤特性の不均質性等を考慮 した上で、物質移行のシナリオおよび関連因子(微生物、有機物、コロイド影響など)や坑道近傍 からより広い領域を含む複数のスケールを対象とした核種移行モデルを構築・検証するとともに、 これら一連のモデル化・解析手法を総合的な物質移行特性評価手法として整備

### 【令和6年度の計画】

- 掘削損傷領域における物質移行
  - ▶ モデル化・解析手法の取りまとめ
- 有機物・微生物・コロイドの影響評価
  - > 室内試験および原位置試験の結果の 整理
  - ▶ 影響評価手法の取りまとめ
- ブロックスケールを対象とした物質移行試験
  - ▶ モデル化・解析手法の取りまとめ



※数字は東立坑坑口を基準(0m)とした時の深度

ブロックスケールを対象とした物質移行試験 (東立坑の480m付近の稚内層深部を対象,孔間距離4.5m)

### 【成果取りまとめ】

- ▶ 350m調査坑道の試験坑道3および4(左下図)において掘削損傷領域を対象とした原位置での 孔間トレーサー試験(左下図)によりデータを取得
- ▶ 1次元の物質移行モデルを仮定することで掘削損傷領域の移流分散挙動を適切に評価可能であることを確認(右下図)
- ▶ これまでに知見の得られていない掘削損傷領域の物質移行特性を把握するための原位置での データ取得とモデル化の手法を提示



武田·石井(2024)

#### 【背景·目的】

- 立坑や坑道沿いに発達する掘削損傷領域は岩盤基 質部と比べ、有意に透水性が高いことが知られてい る。
- ト 粘 土 質 岩 で は 粘 土 鉱 物 の 膨 潤 等 に よる "Selfsealing"や"Self-healing"といった現象により、透水 性が 亀裂が 発達する前の状態に戻る可能性が 指摘さ れている。
- このような現象が期待できない岩盤においては、EDZ が長期的に核種の移行経路となる可能性があるため (右図)、EDZの核種移行特性を把握することは地層 処分の安全評価において重要。
- ▶ 数m以上にわたって連結するEDZ中の割れ目の物質 移行特性は室内試験で確認することは難しく、原位 置試験(トレーサー試験等)で確認する必要
- 単積岩中のEDZを対象としたトレーサー試験の事例や これらに基づく物質移行特性の評価事例はこれまで にない。
- ▶ 粘土鉱物の膨潤による透水性の変化が期待できない 幌延の泥岩を対象に、①原位置トレーサー試験を実施するとともに、②試験結果の解析評価に基づき、 EDZの物質移行特性を評価



#### **坑道周辺の水みちの水理・物質移行特性** 凡例で示す引張割れ目、せん断割れ目、ハイブリッド割れ目が断層 帯およびEDZ内に発達

### 【トレーサー試験条件:試験箇所】



- 試験坑道3および試験坑道4の周囲には掘削損傷の割れ 目が分布
- コンクリートプラグ内側の埋め戻し部周辺の岩盤には掘削 損傷による割れ目以外の天然の割れ目がほとんど確認されない(青柳・川手,2015)



#### H4-1、P孔の割れ目分布および透水性

(a):コア観察およびBTVの双方で認められた割れ目(掘削損傷による割れ目)の位置、(b)区間の透水係数を示す。各区間の透水係数から、掘削損傷の割れ目を含む両孔の区間2の透水性が他の区間と比べて優位に高い。H4-1孔の区間1の透水性が高いのはコア観察では割れ目が確認できており、BTVで視認できない微細な割れ目の影響の可能性。

(b) 350m試験坑道4の断面図(東-西断面)

#### 【トレーサー試験時の流量条件】

(a) A-A'断面



#### 350m試験坑道4における注水方法

埋め戻し区間への平均注水量(Q<sub>B</sub>):336 mL/min テストピットへの平均注水量(Q<sub>D</sub>):232 mL/min

#### 【トレーサーおよび流量の収支】



赤字はトレーサー濃度の観測地点(M2以外は流 量も観測)

	流量(mL/min)	回収割合(%)
埋め戻し部	336	-
テストピット	232	-
集水ピット: M1	-396	18
P孔 区間2	-150	5
H4-1孔 区間2	20	-
壁面湧水(試験坑道3): M2	No data	5

流量:コンクリートプラグ西側の坑道および周辺のEDZを含む領域(左図の黒枠の領域)への流入量をプラス、流出量をマイナスで表現 回収割合:H4-1孔 区間2へ注入したトレーサーの全量(g)に対し、試験期間中に回収されたトレーサー量(g)の割合を示す

### 回収できなかったトレーサー(72%)はコンクリート内側の坑道内に残留した可能性

### 【解析モデルの考え方】



- ・ EDZの割れ目を一次元のチューブで仮定
- ・ P孔で回収されたトレーサーが注入区間から揚水区間まで100%の回収率で移行
- ・ トレーサー回収率(R)は以下に従って設定

R=(単位時間あたりの回収量)/(単位時間あたりの注入量)

 注水流量(20 mL/min)のうち、トレーサー回収率(R)に応じた流量のみが割れ目を 流れると仮定

#### 【解析結果】



トレーサー試験の解析評価

破線および点線はモデルパラメータのうち、縦方向分散長(α<sub>L</sub>=0.12)のみを0.5倍もしく は2倍にした際の解析結果。解析結果①および②(図中の青および黒実線)は重なってい

- ・観測結果を概ね再現可能
- ・ 縦方向分散長は評価スケールの1/100~1/10の回帰式の間にプロットされる
- 移行経路の屈曲度の影響により比較的大きい流路断面積が推定されている可能性
- →移行経路長を2倍にすると、流路断面積が半分になるものの、移行距離に対する縦方向分散長の 割合は変わらない

024)

8

 $\alpha_L = L$ 

縦方向分散長と評価スケールの関係

(Gelhar et al. 1992に追記)

#### 【成果取りまとめ】

- ※ 稚内層深部で実施したブロックスケールのトレーサー試験結果を対象として、割れ目の水理学的連結性が乏しい
  断層(DI>2)における物質移行のモデル化手法を検討
- 身体的には、①孔間透水試験時の水理解析から流れの次元と流動経路の長さを推定(左下図)、②水理解析 結果から推定された情報を基に物質移行モデルを構築、③孔間トレーサー試験時の再現解析(物質移行解析) から物質移行モデルの適用性を評価。その結果、稚内層深部のような水理学的連結性が乏しい断層(DI>2) の物質移行挙動は、非常に長い一次元の物質移行経路を仮定することで推定可能であることを確認(右下図)
- ▷ ブロックスケールの物質移行特性を把握するための一連のデータ取得とモデル化手法を提示



Ohno et al: Modelling transport pathways of faults with low hydraulic connectivity in mudstones with low swelling capacity, Geoenergy, 2024

#### 【背景·目的】

- > 巨視的には水理学的連結性が乏しい/限定 的な断層の物質移行特性を評価することは重 要である一方で、十分に検討されていない。
- ・幌延URL周辺に分布する泥岩は膨潤性が低く、 稚内層深部の断層は水理学的連結性が限定 的であることがわかっているものの、このような 構造の物質移行特性は分かっていない。
- ・ 稚内層深部(右図:DI>2の領域)の断層を対象 とした孔間透水試験および孔間トレーサー試験 の解析評価に基づき、水理学的連結性が限定 的である構造における物質移行モデルを検討



#### 幌延URL周辺の地質構造断面図

当時東立坑の坑底が380 mbglだった時に鉛直下向き に掘削した2本のボーリング孔(350-FZ-01,350-FZ-02)で孔間透水試験、孔間トレーサー試験を実施

#### 【孔間透水試験の解析評価の一例】



孔間透水試験時の水圧データは、流れの次元が1、 かつ水圧の伝搬領域(r)が非常に長い場合を仮定 することにより、再現可能(下図)



 $A \propto r^{n-1}$ 

流れが1次元の場合、伝搬 領域が広がっても水が流れ る断面積は変化しない

非常に長い1次元の経路を仮定した水 理解析モデルが適用可能

1次元流れのイメージ





物質移行試験レイアウト (東立坑の480m付近の稚内層深部を対象,孔間距離4.5m)

トレーサー試験中はFZ-02孔の区間3(断層②を含む)への注水(10 mL/min)、 FZ-01孔の区間2(断層①を含む)からの揚水(500 mL/min)を継続。



#### 【トレーサー試験の解析結果の一例】



#### トレーサー試験結果の解析結果

トレーサー注入開始から16日以降の観測データの乱れを考慮し、使用するデータを3セット(0 ~16日、0~18日、0~21日)に分けて、1次元モデル(上図)を用いて解析した結果、最適 化したパラメータ(半径、縦方向分散長)に大きな変化はない

水理解析と同様に、非常に長い1次元 の経路を仮定した物質移行解析モデル が適用可能

(m)

4

3

2

#### 【成果取りまとめ】

- 地下水中の有機物・微生物・コロイドとの相互作用が希土類元素等の濃度変化に与える影響を、室内・原位置 試験により取得し、その結果を定量的に評価
- > 有機物・微生物・コロイド各成分の特性に関する知見やその評価手法を、幌延での試験・分析を事例として整備
- ▶ 地下水中の有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響を定量的に評価する手法を整備



### 【背景·目的】

- 高レベル放射性廃棄物から漏出した放射性核種と、地下水中に存在する有機物・微生物やそれらのコロイド(地下水コロイド)との相互作用(収着、錯生成、取込等)による、移行促進/遅延の評価
- 微生物・有機物・コロイドの特性評価手法の開発・高度化



「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 [JPJ007597] :ニアフィールドシステム評価確証技術開発 ならびに地層処分安全評価確証技術開発(核種移行総合評価技術開発)」の一環として実施

### 【室内試験の結果の整理】

 ● 地下水中に存在する有機物・微生物やそれらのコロイド(地下水コロイド)が希土類元素の挙動に 与える影響を、室内試験により評価



### 【原位置試験の結果の整理】

● 実際の地下岩盤中に添加した希土類元素の挙動を原位置試験により把握



#### 【特性評価手法の整備】

● 有機物・微生物・コロイド各成分の特性に関する知見やその評価手法を、幌延での試験・分析を事例として整備

文献	概要(汎用性のある手法等)	関連 項目	10	①コロイドは処分場に 存在するか?
Terashima et al.	幌延と新潟の地下水からDAX-8樹脂で腐植物質を抽出し濃度分析。堆	1		YES
(2020)	積石中の地下水で、 <u>DOM濃度から腐植物質濃度を推定可能</u> 。			②コロイドは移動可能か?
望月ほか	少量の幌延地下水から <u>三次元蛍光分析、ゲル浸透クロマトグラフィー、</u> イオンクロマトグラフィーで取得した有機物の組成・サイズ等は、大	12		YES
(2020)	量の地下水から精製分離した有機物と整合的。		NO	③コロイドは安定か? 
Kirishima et al	幌延・瑞浪の地下水に <u>室内で希土類元素とウランを添加してろ過分画</u> 。	4	NO	YES
(2022)	幌延の場合、希土類元素の溶解度はリン酸錯体に制限されにか、リランは炭酸錯体を形成しほぼ沈殿せず。			④コロイドは 核種を取込むか?
Nishimura et al.	原位置環境を模擬した <u>高圧室内培養システム</u> により、幌延地下水中の 嫌気的メタン酸化微生物を培養。縣濁物質中の鉄を含むケイ酸塩鉱物	1		YES
(2023)	が酸化剤として機能することを示唆。			 ⑤コロイドによる
Saito et al.	幌延地下水中のDOMの構成成分と各成分のEuとの結合特性を、三次元 第半分析とPARAFAC解析により調査。化石海水と玉水との混合の程度	4		核種の取込みは 不可逆的か?
(2023)	や微生物による有機物分解の程度が、Euの収着に影響。			YES
Hirota et al.	幌延のEDZ割れ目上で認められた <u>バイオフィルムに対する顕微鏡観</u> 察・赤外分光分析と16S rBNA遺伝子配列分析 EDZ割わ日において	12		コロイドは核種移行に
(2024)	O2を発生する好気性メタン資化細菌の優占を確認。		↓↓L	有意な影響を及ぼす
Amano et al. (2024)	幌延・瑞浪地下水中の微生物群集や代謝反応を網羅的に解析するため の <u>メタゲノム解析</u> 。両地下環境で微生物群集が著しく異なるが、代表 的な代謝反応は共通。	123	<u>、</u> コ 有意	ロイドは核種移行に な影響を及ぼさない

次ページで詳細説明





### 1.2 物質移行に係る成果

- Amano, Y., Sachdeva, R., Gittins, D., Anantharaman, K., Lei, S., Valentin-Alvarado, L. E., Diamond, S., Beppu, H., Iwatsuki, T., Mochizuki, A., Miyakawa, K., Ishii, E., Murakami, H., Jaffe, A. L., Castelle, C., Lavy, A., Suzuki, Y. and Banfield, J. F. (2024): Diverse microbiome functions, limited temporal variation and substantial genomic conservation within sedimentary and granite rock deep underground research laboratories. Environmental Microbiome, vol.19, 105.
- Hirota, A., Kozuka, M., Fukuda, A., Miyakawa, K., Sakuma, K., Ozaki, Y., Ishii, E. and Suzuki, Y. (2024): Biofilm formation on excavation damaged zone fractures in deep neogene sedimentary rock, Microbial Ecology, vol.87,132.
- Kirishima, A., Terasaki, M., Miyakawa, K., Okamoto, Y. and Akiyama, D. (2022): Deep groundwater physicochemical components affecting actinide migration, Chemosphere, vol.289, 133181.
- 望月陽人, 笹本広, 馬場大哉, 生垣加代子(2020):少量試料に適用可能な簡易分析法に基づく深部地下水中の溶存有機物の特性評価 , 陸水学雑誌, vol.81, no.2, pp. 153-166.
- 日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中央研究所 (2023): 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 [JPJ007597] ニアフィールドシステム評価確証技術開発 平成30年度 ~ 令和4年度 取りまとめ報告書.
- 日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中央研究所(2024): 令和5年度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 [JPJ007597] 地層処分安全評価確証技術開発 核種移行総合評価技術開発 報告書.
- Nishimura, H., Kouduka, M., Fukuda, A., Ishimura, T., Amano, Y., Beppu, H., Miyakawa, K. and Suzuki, Y. (2023): Anaerobic methaneoxidizing activity in a deep underground borehole dominantly colonized by Ca. Methanoperedenaceae, Environmental Microbiology Reports, vol.15, no.3, pp.197-205.
- Ohno, H. and Ishii, E. (2022) : Effect of fault activation on the hydraulic connectivity of faults in mudstone, Geomechanics for Energy and the Environment, vol. 31, p.100317\_1-100317\_9.
- Ohno, H., Ishii, E. and Takeda, M. (2024) : Modelling transport pathways of faults with low hydraulic connectivity in mudstones with low swelling capacity, Geoenergy, vol. 2, no. 1, p.geoenergy2023-047\_1-p.geoenergy2023-047\_10.
- Saito, T., Nishi, S., Amano, Y., Beppu, H. and Miyakawa, K. (2023): Origin of dissolved organic matter in deep groundwater of marine deposits and its implication for metal binding, ES&T Water, vol.3, no.12, pp.4103-4112.
- 武田匡樹, 石井英一 (2024):原位置トレーサー試験による堆積岩中の掘削損傷領域内の移流分散評価, 原子力バックエンド研究, vol.31 , no.1, pp. 3-10.
- Terashima, M., Endo, T. and Miyakawa, K. (2020): Determination of humic substances in deep groundwater from sedimentary formations by the carbon concentration-based DAX-8 resin isolation technique, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.57, no.4, pp.380-387.

### 文献リスト

Miller, W., Alexander, R., Chapman, N., McKinley, I., Smellie, J. (2000): Waste Management Series Vol.2: Geological disposal of radioactive wastes & natural analogues, Pergamon.

### 補足1

### 【補足資料:室内試験の結果】



各希土類元素の室内試験の結果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Н																	He
2	Li	Be											в	С	N	0	F	Ne
	Na	Mg											Al	Si	Р	S	Cl	Ar
	к	Ca	Sc	Ti	v	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zu	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Ι	Xe
	Cs	Ba	ランタ ノイド	Hf	Та	w	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Ро	At	Rn
	Fr	Ra	アクチ ノイド	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
	ł	ランタ、	ノイド	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Тb	Dy	Но	Er	Tm	Yb	Lu
	1	アクチ	ノイド	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

- 軽希土類元素の方が>0.2 µm(●と○の差)の割合が
   大きく、時間経過に伴う濃度減少も大きい
  - → 軽希土類ほどリン酸イオンとの錯形成定数が大きい ことと整合 >0.2 µmのリン酸錯体沈殿の形成を示唆
- 地下水コロイドとの相互作用の程度(○と△の差/比) は希土類元素間で大きくは変わらず、1オーダー程度

補足2-1

#### 【補足資料:原位置試験の結果】



#### 各希土類元素の原位置試験の結果

- 室内試験と同様に、軽希土類元素ほど>1 µm( と●の差)の割合が大きく、時間経過に伴う濃度減少も 大きい
- 岩盤内を循環した試料の<10 kDaの減少程度(▲と●の差/比)は、軽希土類元素ほど大きい

# 補足2-2



本研究での原位置試験と 先行研究 (Kirishima et al, 2022) との比較  ● 添加直後~数日:0.2 µmろ過試料の実濃度(数µg/L)は先行研究と 整合、ただし10 kDaろ過試料の割合が先行研究の約1/10
 ● 添加から数十日以降:0.2 µmろ過試料と10 kDaろ過試料の濃度が 同程度になるという点で、先行研究と整合



原位置試験期間における 岩盤内を循環する地下水の鉄濃度の変化

