

共同研究成果報告書

放射性廃棄物処分坑道の閉鎖措置確認に向けた EDZ 及びベントナイトの透水性に関する研究

原子力規制委員会 原子力規制庁

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

国立大学法人東京大学

令和7年6月

1. 研究目的

放射性廃棄物の処分において、坑道が安全上支障を生じることのないように閉鎖されることを確認するために必要な科学的・技術的知見を取得する。

2. 研究内容

坑道の周囲の岩盤には、応力の解放等、掘削に伴う力学的な影響によって損傷を受けた領域（Excavated disturbed zone、以下「EDZ」という。）が形成される。EDZは、健全な岩盤に比べて透水性能等の水理学的特性が変化している可能性があり、その場合、EDZが水みちになることが懸念されている。水みちが形成された場合、地下水流動及び核種移行の評価に対して影響を与える。このため、EDZによる地下水流動への影響の評価が必要である。そのため、操業段階や坑道の埋戻し後におけるEDZの地球化学特性や水理特性の変化に与える影響についての科学的・技術的知見が必要である。加えて、坑道の閉鎖においては、EDZの存在を考慮した上で、天然バリアの性能に影響を及ぼすような水みちが形成されないよう、適切に埋戻しが行われていることの確認も必要となる。坑道の埋戻し材としては、止水性が期待できるベントナイト系材料が用いられることが想定されるが、その透水性は材料配合や施工方法、周囲の地下水環境によって変化することが知られている。さらに溶出したセメント成分との反応によりベントナイトが変質し、止水性が低下することが懸念されている。

以上を踏まえると、閉鎖措置の際に、水みちが生じることのないよう確実に閉鎖されていることを確認するためには、以下の科学的・技術的知見が必要である。

- ① EDZの影響範囲における地球化学的調査及び物理学的調査に基づいた地球化学特性や水理特性について
- ② 止水性を目的として設置される坑道の埋戻し材の長期的変質とそれに伴う透水性の変化について

このうち①については、EDZの影響範囲の水理特性調査のため、既存の地下研究施設の坑道において、地球化学的調査及び物理学的調査を行い、EDZ周辺の地球化学特性及び水理特性を調査した。物理学的調査は物理試験等を行い、地球化学的調査においては、岩石薄片観察、鉍物分析等を行って、EDZの地球化学特性及び水理特性及びそれらの変化について考察した。

また、②の評価を行うため、ベントナイトの透水性の評価及び地下水に溶出したセメント成分との反応による変質の影響を把握した。

本研究では、上記①及び②に関する科学的・技術的知見を得るため、室内実験に加えて地下研究施設における坑道を利用した検討を行うとともに、得られた科学的・技術的知見を踏まえて、実際の坑道の閉鎖時において確認すべき汎用的な事項や確認に当たっての視点を

抽出・整理した。

3. 実施方法

3.1 EDZ の影響範囲における地球化学特性及び水理特性の評価

物理学的調査として、日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）幌延深地層研究センターの坑道壁面近傍での原位置調査、室内試験等を行い、EDZ の水理特性を取得した。また、地球化学的調査として、ボーリングコア採取、コアからの岩石薄片の作成、顕微鏡観察、鉍物分析等を行った。以上の調査結果から、EDZ の影響範囲、水みちとなる亀裂の炭酸塩等の二次鉍物の充填度合、EDZ での変質、透水性との関係性等について検討し、操業段階及び埋戻し後における EDZ の地球化学特性及び水理特性の評価に必要な科学的・技術的知見を整理した。

3.2 坑道の埋戻し材の長期的な透水性の評価

イオン強度の異なる溶液やセメント成分を含んだ溶液等と接触したことにより起こるベントナイトの膨潤性の変化や変質、それに伴うベントナイトの透水性への影響を評価するための試験を室内及び JAEA 幌延深地層研究センター坑道で実施した。膨潤性の変化については、X 線回折装置 (X-ray diffractometer、以下「XRD」という。) を用いてベントナイトの微細構造の分析を行い、透水性との関係について検討した。また、ベントナイト変質に関しては、XRD を用いて溶解・生成した鉍物を同定するとともに、微少部を測定可能な蛍光 X 線分析装置 (X-ray fluorescence spectrometer、以下「マイクロ XRF」という。) を用いた変質範囲の特定等を行い、透水性への影響について検討した。さらに、これらの結果を踏まえ、ベントナイトの長期的な透水性評価に必要な科学的・技術的知見を整理した。

4. 研究実施分担

	原子力規制庁	日本原子力 研究開発機構	東京大学
3.1 EDZ の影響範囲における地球化学特性及び水理特性の評価	◎	○	◎
3.2 坑道の埋戻し材の長期的な透水性の評価	◎	◎	—

(◎：主担当、○：副担当)

5. 共同研究参加者

所属部局、氏名	本研究における役割
原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ 放射線・廃棄物研究部門 廣田 明成 市耒 高彦 向井 広樹 木嶋 達也	研究の統括 3.1 担当 3.1 担当 3.2 担当
日本原子力研究開発機構 安全研究センター 廃棄物・環境安全研究グループ 武田 聖司 石井 英一 村上 裕晃 尾崎 裕介 佐久間 圭佑 飯田 芳久 澤口 拓磨 笹川 剛 阿部 健康	研究の統括 3.1 担当 3.1 担当 3.1 担当 3.1 担当 3.2 担当 3.1 及び 3.2 担当 3.1 及び 3.2 担当 3.1 担当
東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 鈴木 庸平 幸塚 麻理子 福田 朱里	3.1 担当 3.1 担当 3.1 担当

6. 研究実施工程

項目	R4 年度		R5 年度		R6 年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
3.1 EDZ の影響範囲における地球化学特性及び水理特性の評価	コア採取、室内試験および原位置調査					
			薄片作成・観察、分析、原位置調査			
					EDZ の水理特性、地球化学特性の整理	
3.2 坑道の埋戻し材の長期的な透水性の評価	変質・透水試験の実施					
			微細構造と透水性の関係に係る検討			
			変質が透水性に及ぼす影響の検討			

7. 成果概要

3.1 に関しては、JAEA 幌延深地層研究センターの深度 350 m 坑道において実施したボアホールテレビ観察（以下「BTV」という。）により、坑壁から数十センチメートル以内の領域で高密度の EDZ 亀裂が発生していることが確認された。また、単孔式原位置透水試験および塩水注入による比抵抗トモグラフィ試験の結果、坑壁付近に水みちとなり得る亀裂が存在し、高透水性の領域が広がっていることが確認された。加えて、コア試料の赤外分光分析によって一つの EDZ 亀裂にバイオフィームが形成され、好気的な微生物の繁殖が確認された。これらの結果から、EDZ 亀裂の発生によって坑壁付近の透水性が高くなり、閉鎖後に好気的な環境が形成される可能性があることが分かった^{1,2}。これらの環境変化は、核種移行を促進する要素となりえる^{1,2}。本研究の成果はモデルフィールドで得られたものであり、実際の埋設地で同じ現象が起きるとは限らないが、EDZ の評価に参考になると考えられる。

3.2 に関しては、透水係数をモンモリロナイトの密度から推定する式を開発した³。また、イオン強度の異なる溶液に浸漬したモンモリロナイト及びベントナイトの膨潤性の変化を確認するため、XRD により層間間隔の測定を行い、開発した透水係数推定式の改良に必要なデータを取得した。さらに、JAEA 幌延深地層研究センターの深度 350 m 坑道において、約 1 年半にわたりセメント系材料に接触させたベントナイト系埋戻し材をマイクロ XRF で測定した。セメント系材料との接触境界近傍において Ca 濃度の増加が認められたことから、

初期鉱物の溶解及び Ca に富む二次鉱物としてケイ酸カルシウム水和物 (calcium silicate hydrate) 等 (以下「CSH 等」という。) の生成を観察したものと考えられ、ベントナイトの変質範囲を組成の変化から特定することができる可能性を示した。また、CSH 等の生成はベントナイトの間隙を埋め、透水性を小さくする可能性があることから、二次鉱物の生成による間隙構造の変化を組み入れた透水係数推定式の改良が必要であることを示した。

坑道の閉鎖時において確認すべき汎用的な事項として、EDZ の影響範囲については、坑壁から数十センチメートルの範囲で亀裂の発生、透水係数の上昇、および好気的な環境の形成の有無について確認する必要がある。これらの確認について、BTV、透水試験、トモグラフィ試験、赤外分光分析等の手法によって得られた結果が有効な指標となりえることを抽出した。また、埋戻し材の長期的な透水性の評価については、使用するベントナイトの陽イオンの種類と密度の関係が透水性に影響することを整理した。特に、Ca 型ベントナイトを使用する場合において、ベントナイト含有率が少ないと締固め条件によって透水係数が室内試験で得られた値よりも大きくなる場合があるため、坑道の閉鎖時において確認すべき事項と考える。長期的な透水性という観点では、透水性の変化を確認する際の事項として、ベントナイトの変質に伴う微細構造の変化を抽出した。

8. 公表成果一覧

- 1 Hirota, A., Kouduka, M., Fukuda, A., Miyakawa, K., Sakuma, K., Ozaki, Y., Ishii, E., Suzuki, Y., “Biofilm Formation on Excavation Damaged Zone Fractures in Deep Neogene Sedimentary Rock”, *Microbial Ecology*, Vol. 87, No. 132, 2024. doi:10.1007/s00248-024-02451-7.
- 2 Hirota, A., “Biofilm Formation and the Establishment of Anaerobic Environment on Excavation Damaged Zone Fractures in Deep Neogene Sedimentary Rock”, *ETSON News*, 2025
- 3 Kijima, T., Sasagawa, T., Sawaguchi, T., Yamada, N., “A model for estimating the hydraulic conductivity of bentonite under various density conditions”, *Hydrology Research*, Vol. 53, No. 10, pp. 1256-1270, 2022. doi:10.2166/nh.2022.021