

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04260

研究課題名（和文）各種放射性廃棄物処分の地下水質を考慮したベントナイトの水分移動特性評価手法の構築

研究課題名（英文）Evaluation method on water transfer characteristics of bentonites considering ground water quality in radioactive waste disposal

研究代表者

伊藤 大知（Ito, Daichi）

早稲田大学・理工学術院・講師（任期付）

研究者番号：40875225

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、各種放射性廃棄物処分の安全評価に不可欠である、ベントナイト系材料の各種地下水質・地下水圧および排気条件の影響を考慮した水分移動特性データベースの構築である。交換性陽イオン組成の異なるNa型・Ca型およびCa・Mg型の各種ベントナイトについて、海水や地下水に含まれるイオン種が浸潤特性に及ぼす影響を評価した。また、最大4 MPaまで水圧を高めた条件で不飽和時水分移動特性を評価し、水分拡散挙動に則ることや水分拡散係数に大きな差異が生じないことを確認した。最後に、排気条件が水分移動挙動に及ぼす影響を評価し、間隙空気量および空気圧による影響を考慮すべきことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、各種放射性廃棄物処分のバリアシステムにおけるキーコンポーネントであるベントナイト系材料による遮水材の材料仕様決定に直接的に応用可能である。幅広い水質、水圧環境における水分移動特性を実験的に明らかにしており、処分施設の様々な立地条件や地層環境に応用可能な基礎的知見である。ゆえに、現在選定が進んでいて今後建設が想定される、地層処分施設をはじめとした各種放射性廃棄物処分施設のバリア材の仕様設計に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a database for water migration characteristics of bentonite materials considering the effects of various groundwater quality, groundwater pressure, and exhaust conditions, which are essential for the safety assessment of radioactive waste disposal. The effects of ionic species present in seawater and groundwater on the infiltration properties of Na, Ca, and Ca-Mg bentonite with different exchangeable cation compositions were evaluated. In addition, water movement characteristics at unsaturated conditions were evaluated under increased water pressure up to 4 MPa, and it was confirmed that the water diffusion behavior was consistent and that no significant differences in water diffusion coefficients occurred. Finally, the effects of exhaust conditions on moisture migration behavior were evaluated, suggesting that the effects of pore air volume and air pressure should be considered.

研究分野：地盤工学

キーワード：放射性廃棄物処分 ベントナイト 水分移動特性 地下水質

1. 研究開始当初の背景

原子力発電により生じる放射性廃棄物は、放射能レベルに応じて高レベル放射性廃棄物(地下300m以深に地層処分)と低レベル放射性廃棄物(浅い地中に設置されるコンクリート等の人工構造物内に処分)に分類され、図1のように処分場の形態や処分深度が異なる。これらの処分では、放射性物質の漏出を遅延するために、廃棄物周囲に低透水性や膨潤性に優れた粘土系材料であるベントナイトを締め固めて施工する。処分施設の設計や安全性評価においては、地下水が処分場内に浸潤して飽和するのに要する時間と、放射性物質が水とともに処分場外へ浸出するのに要する時間を定量化する必要があり、そのためにはベントナイト系材料の水分移動特性を精度よく評価することが極めて重要である。

ベントナイトの特性は、膨潤性粘土鉱物であり構成鉱物の一つであるモンモリロナイトの性質に因るものであり、モンモリロナイトの単位結晶層間中に存在する陽イオン(以下交換性陽イオン)の組成や、モンモリロナイト含有率などの状態量により規定される。ベントナイト中の水分移動形態として、不飽和時は水分拡散現象(水分濃度差を駆動力とした移動)、飽和時は移流現象(水頭差を駆動力とした移動)であると考えられている²⁾。また、流入する地下水の水質がベントナイトの水分移動に影響を及ぼすが、既往研究における検討条件は人工海水(沿岸部における地層処分想定)やCaCl₂(浅地中・中深度処分におけるコンクリート構造物からの溶脱水を想定)など、想定される代表的な水質環境を模擬した条件に限定されている(例えば³⁾)。また、ベントナイト系材料の水分移動性の低さに伴う試験時間の長期化により実験ケース数が限られてしまうため、ベントナイトの種類や水質環境をパラメータとした、処分場設計に資する体系的な実験・理論的検討は十分ではない。

そこで本研究では、国内の放射性廃棄物処分で使用が想定される多種類のベントナイトに対して、処分時に想定される多様な水質環境や、排気や拘束圧などの境界条件における水分移動特性を体系的にまとめた実験データベースを構築し、処分施設設計や数値解析的安全評価に寄与できる知見を収集するべく各種実験を行った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、各種放射性廃棄物処分における処分施設設計・安全性評価に必要不可欠であ

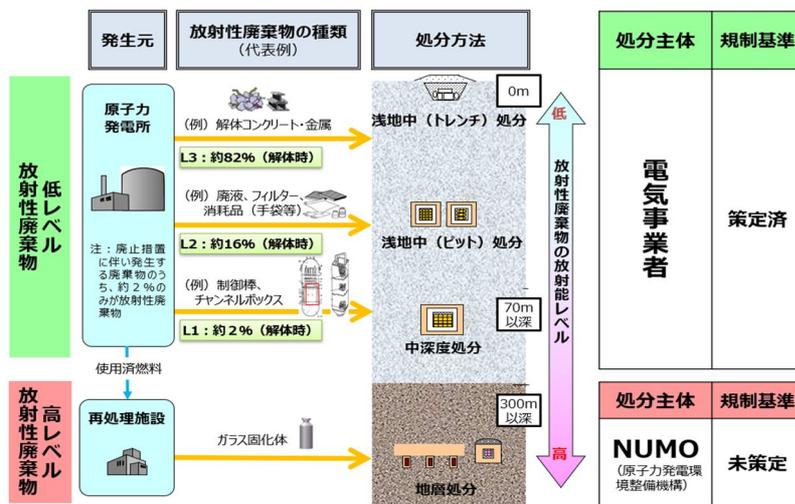


図1 各種放射性廃棄物の区分と処分方法¹⁾

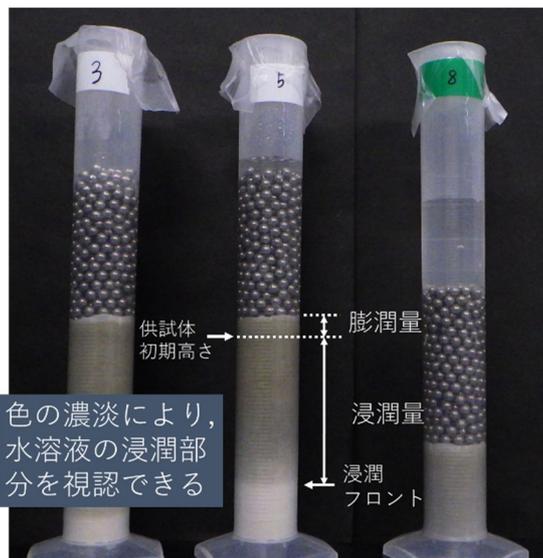


図2 メスシリンダー法の様子

表1 本研究で使用した試料の基本的性質

試料	KV1	KB	KP-F	MG	
タイプ	Na型	Ca型	Na型	Ca・Mg型	
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.76	2.53	2.80	2.53	
液性限界 (%)	469	118	922	99.0	
塑性限界 (%)	29.1	45.9	50.2	35.3	
塑性指数	440	72	871	63.7	
モンモリロナイト含有率 (%)	55.6	71.1	100	48.7	
陽イオン交換容量 (cmol(+)/kg) (SFSA改良法)	Na ⁺	62.0	8.3	108.6	8.1
	K ⁺	0.0	0.2	0.3	1.2
	Ca ²⁺	13.7	61.8	13.5	22.7
	Mg ²⁺	1.3	15.3	0.5	21.2
Total	77.1	85.6	122.9	53.3	

や数値解析的安全評価に寄与できる知見を収集するべく各種実験を行った。

る、多種類のベントナイトの各種水質環境における水分移動特性データベースおよび解釈方法を構築することである。ベントナイトの特性評価試験において一般にボトルネックとなる、水分移動性の低さによる試験時間の長期化・ケース数の限定化については、3.2節で後述する「メスシリンダーを用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法（以下、メスシリンダー法）」⁴⁾を用いることで解決した。本申請課題では、ベントナイトの種類（パラメータ：交

換性陽イオン組成・モンモリロナイト含有率）・初期乾燥密度・処分場近傍において想定される地下水質を考慮した供給水溶液の水質（蒸留水・人工海水・NaCl・CaCl₂・NaHCO₃など）⁵⁾をパラメータとした。既往の研究にはない膨大かつ体系的な水分移動特性データベースを構築する点に学術的独自性がある。また、排気条件や地下水圧などの境界条件が水分移動特性に及ぼす影響を明らかにし、処分施設設計や数値解析的安全評価に直接的に寄与するデータを取得する点についても、工学的に観て高い創造性を有するといえる。

3. 研究の方法

本研究では、以下に示すベントナイト試料、供給水溶液を用いて、多様な水質環境におけるベントナイトの不飽和水分移動、膨潤挙動について網羅的に調べた。

3.1 使用した試料

本研究で使用した試料は、表1に示す通りである。クニゲルV1（KV1、クニミネ工業製、日本の地層処分関連研究で最も使用されている）、クニボンド（KB、クニミネ工業製）、クニピアF（KP-F、クニミネ工業製、純モンモリロナイト試料）、および三川原鉱（MG、ホーゲン製）である。これらの試料を用いた理由として、ベントナイトに含まれるモンモリロナイト層間の交換性陽イオン組成やモンモリロナイト含有率に差異があるとともに、日本国内で産出される試料であり、各種処分事業において使用される可能性が想定される点が挙げられる。

3.2 試験方法の概要

本研究で実施したのは、図2に示すメスシリンダー法である。本試験では、ポリプロピレン製メスシリンダー（容量100 mL）内にベントナイト（体積20～50 mL）を締固めて設置し、上部より水溶液を浸潤させた際の浸潤量・膨潤量を測定する。非常に簡便であるために多量のケースを同時並行して行うことができ、本申請課題の目的であるデータベースの構築には最適な試験方法である。本試験では、随時供試体の膨潤量、浸潤量（図2）を読み取り、以下の式(1)・(2)に基づき浸潤速度・膨潤率を算出した。その後、これらの経時変化（図3）を双曲線近似し、その切片から定常値（定常浸潤速度）を式(3)・(4)に示す式で求めた。定常膨潤率も同様の式で求めた。

$$v_s = \frac{V_0 - V_b}{A \times t_s} \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = \frac{V_a - V_0}{V_0 - V_b} \quad (2)$$

$$v_s(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (3)$$

$$v_{steady} = \lim_{t \rightarrow \infty} v_s(t) = \frac{1}{b} \quad (4)$$

ここに、 V_0 ：メスシリンダーの目盛りから読んだ供試体の初期体積、 V_b ：所定時間経過したときの供試体の浸潤部の下端部のメスシリンダー読み値、 V_a ：所定時間経過したときの供試体の上端部のメスシリンダー読み値、 A ：供試体断面積、 t_s ：経過時間、 t ：時間、 $v_s(t)$ ：時間 t における浸潤速度、 v_{steady} ：定常浸潤速度、 a, b ：近似により求められる定数である。

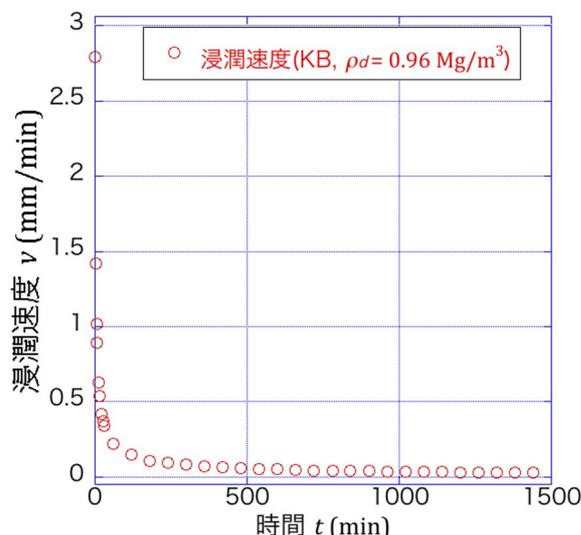


図3 浸潤速度の経時変化例

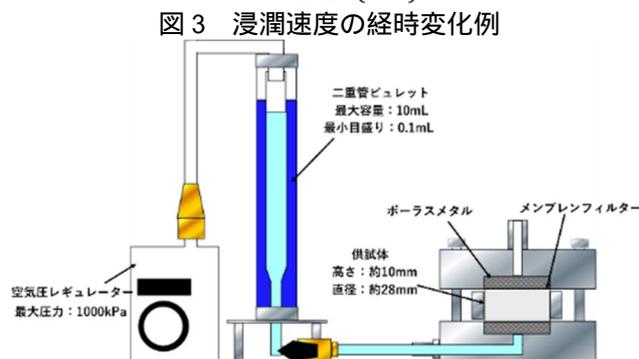


図4 水圧付加下での水分移動試験

境界条件として地下水圧を想定した実験においては、別途図 4 に示すように金属製容器の中にベントナイト試料を締め、二重管ピュレットや金属製シリンダーを用いて水圧を高めて給水した。排気条件については、底部に廃棄用の孔を設けるか否かで調整した。拘束圧に関しては、供試体上部のステンレスボールによる載荷量を調整することで変化させた。

また、供給した水溶液の水質や濃度については、表 2 にまとめた通りである。含有イオンの電荷や組成が異なる多数の溶液において、イオン種の差異による影響を検討するため、式(5)に示すイオン強度を用いて濃度を調整した。人工海水（富田製薬製・マリンアート）のイオン強度が 0.655 mol/L であり、他の溶液もそれに合わせて濃度調整した。

$$\mu = \frac{1}{2} \sum c_i z_i^2 \quad (5)$$

ここに、 μ ：イオン強度 (mol/L)、 c_i ：各イオンの濃度 (mol/L)、 z_i ：各イオンの電荷 である。

4. 研究成果

4.1 供給水溶液と交換性陽イオン組成の関係

図 5 にそれぞれ、各ベントナイト試料の蒸留水・人工海水環境における、定常浸潤速度と有効モンモリロナイト密度(単位体積あたりモンモリロナイト乾燥質量)の関係を示す。浸潤特性は、Na 型 (KV1・KP-F) が最も浸潤速度が遅く、Ca 型 (KB)・Ca-Mg 型 (MG) は Na 型に比べて 5 倍程度速いことが分かった。人工海水環境下では、Na 型ベントナイトの浸潤速度が約 5 倍速い一方、Ca 型ベントナイトでは大きな差異は見られなかった。

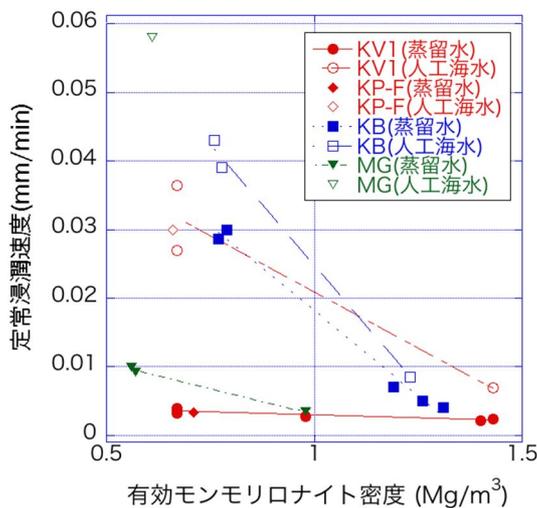


図 5 定常浸潤速度 - 有効モンモリロナイト密度関係 (蒸留水・人工海水環境)

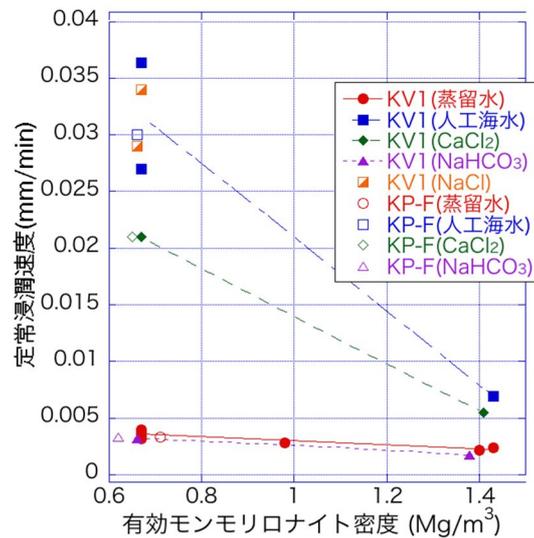


図 6 定常浸潤速度 - 有効モンモリロナイト密度関係 (Na 型ベントナイト)

次に NaCl・CaCl₂・NaHCO₃ の 3 種類の水溶液について、イオン強度を人工海水と統一した環境における定常浸潤速度への影響(図 6)について述べる。Na 型ベントナイトについて NaCl・CaCl₂ では膨潤率が約 1/5 に低下して浸潤速度が蒸留水の約 5 倍であった一方、NaHCO₃ では膨潤率が低下した一方で浸潤速度は蒸留水と同様であった。Ca 型ベントナイトではいずれの供給水溶液で膨潤率・浸潤速度はほぼ一定であり、多様なイオン環境下においても一定の膨潤・水分移動特性を期待できることが示唆された。また、KV1・MG について別途人工海水イオン強度に対し 0(蒸留水)・25・50・75・100%となるよう濃度調整した人工海水・NaCl・CaCl₂ 溶液の 3 種類の水質のもと行ったところ、いずれにおいても、濃度が 0 25%に増加した際に大幅な浸潤速度の上昇および膨潤率の低下が生じ、Ca 型ベントナイトと異なりイオン流入の影響を強く受けることが示唆された。Ca・Mg 型ベントナイトでは、イオン強度の変化による浸潤速度の変化は小さく、特に供給水溶液に Ca イオンが含まれる場合、交換性陽イオン中の Na イオン・Mg イオンとの間でイオン交換が生じ、Ca 型ベントナイトに近い性質を持つことが示唆された。

4.2 供給水圧が拡散的な水分移動に及ぼす影響

地層処分については地下 300 m 以深の深地層中に処分場を建設することが定められており、緩衝材に流入する地下水の圧力は数 MPa 程度と高圧になることが想定される。このような高圧環境におけるベントナイトの水分移動特性を調査するため、100・200・300・400 kPa (KV1・MG) および 2・4 MPa (KV1) の水圧を付加した条件のもと、吸水量を計測し不飽和水分移動特性における水圧の影響を調査した。その結果、上記の水圧範囲において、図 7 に示すように吸水量と時間の平方根の間に比例関係がみられ、高水圧環境においても不飽和時の水分移動は水分拡散現象に従うことが示された。

図 8 に吸水量 - 時間の平方根関係より算出した水分拡散係数と、水圧の関係を示す。これより、水圧の増加に伴い水分拡散係数が大きくなる傾向が見られるが、その差異は 1 オーダー未満(約 2 倍)であり影響は小さいものと考えられる。

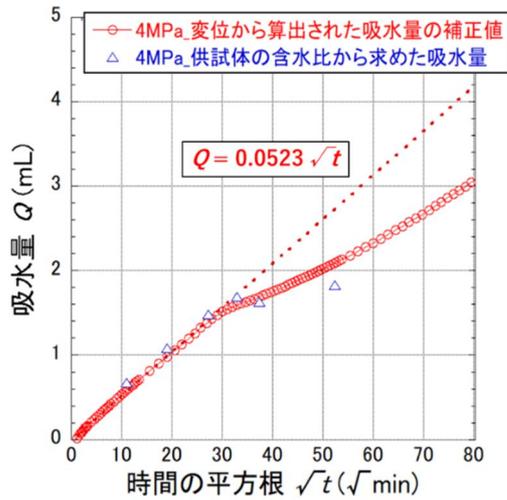


図7 吸水量 - 時間平方根関係の例

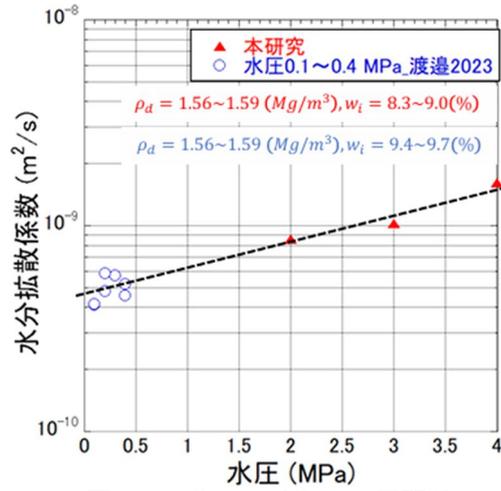


図8 水分拡散係数 - 水圧関係

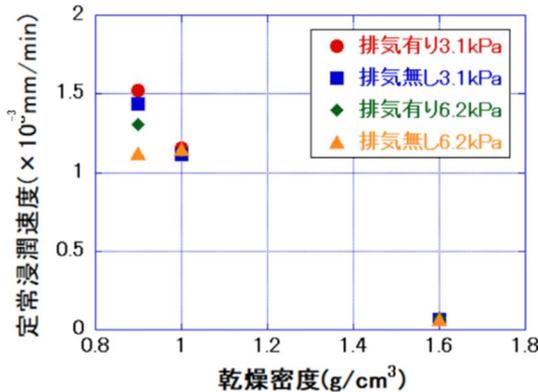


図9 定常浸潤速度-乾燥密度関係 (KV1)

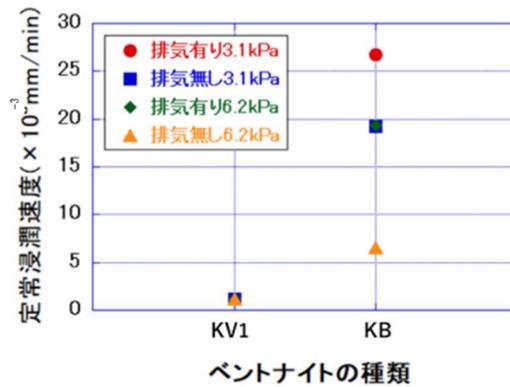


図10 定常浸潤速度の比較 (KV1・KB)

4.3 境界条件としての排気・拘束圧が不飽和時水分移動に及ぼす影響

KV1 (Na 型), KB (Ca 型) の2種類の粉体状ベントナイトを用い, 境界条件として排気の有無による水分移動特性の差異に関して検討した. 乾燥密度をパラメータとして試験を実施した結果を図9に示す. これより, 低乾燥密度において排気無しのケースで浸潤速度の低下が見られたが, 高乾燥密度になるに従い差異が小さくなる傾向であった. この理由として, 水の浸潤に抵抗するのは間隙内にトラップされた空気圧の増分であり, 乾燥密度が高いほど供試体内の初期空気量が小さいことが推察される. また, 図10にKV1とKBにおける定常浸潤速度の排気有無による比較結果を示す. これより, KBの非排気条件において顕著に浸潤速度の低下が見られた.

4. 成果のまとめ

本研究で得られた成果は以下の通りである.

- 1) Na 型・Ca 型および Ca・Mg 型の各種ベントナイトについて, 海水や地下水に含まれるイオン種が浸潤特性に及ぼす影響を評価した.
- 2) 最大 4 MPa まで水圧を高めた条件で不飽和時水分移動特性を評価し, 水分拡散挙動に則ることや水分拡散係数に大きな差異が生じないことを確認した.
- 3) 排気条件が水分移動挙動に及ぼす影響を評価し, 間隙空気量および空気圧による影響を考慮すべきことが示唆された.

参考文献

- 1 経済産業省資源エネルギー庁: 放射性廃棄物について, https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gasnuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.htm (2020年10月10日閲覧)
- 2) 小峯秀雄, 小山田拓郎ら: 締固めた粉体状ベントナイト各種の水分移動特性と膨潤圧挙動に関する考察, 土木学会論文集 C, Vol. 74, No. 1, pp. 63-75, 2018.
- 3) 長谷川琢磨: ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響, 電力中央研究所研究報告, N04005, 2004.
- 4) 小峯秀雄, 直井優ら: メスシリンダーを用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法, 土木学会論文集, No. 771/ -68, pp. 225-234, 2004.
- 5) 核燃料サイクル開発機構: 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験, JNC TN8430 2004-005, 2005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ito Daichi, Wang Hailong, Komine Hideo	4. 巻 62
2. 論文標題 Hydraulic conductivity test system for compacted, 2-mm-thick bentonite specimens	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 101210 ~ 101210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2022.101210	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ito D., Wang H., Komine H.	4. 巻 1124
2. 論文標題 Experimental study of aging-induced cementation effect on permeability property of bentonites	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	6. 最初と最後の頁 012118 ~ 012118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1755-1315/1124/1/012118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 伊藤大知, 王海龍, 小峯秀雄	4. 巻 70(4)
2. 論文標題 地層処分におけるベントナイト系緩衝材の膠結作用に伴う超長期的劣化を考慮した自己修復性評価手法の提案	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 6-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 渡邊康太郎, 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍, 山田味佳, 関口高志
2. 発表標題 メスシリンダー法によるNa型およびCa-Mg型ベントナイトの膨潤・浸潤特性に及ぼす人工海水濃度の影響評価
3. 学会等名 第19回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊康太郎, 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍, 山田味佳, 関口高志
2. 発表標題 メスシリンダー法による Na 型および Ca-Mg 型ベントナイトの浸潤・膨潤特性に及ぼす 人工海水濃度の影響評価
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊康太郎, 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍, 関口高志
2. 発表標題 Na型およびCa-Mg型ベントナイトの不飽和時水分移動特性に及ぼす水圧の影響評価
3. 学会等名 土木学会全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 館野壮平, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知
2. 発表標題 メスシリンダー法によるCa-Mg型およびNa型ベントナイトの浸潤・膨潤特性に及ぼす地下水質の影響調査
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 館野壮平, 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍, 山田味佳
2. 発表標題 OH-イオンとCl-イオン環境下におけるCa-Mg型ベントナイトの膨潤変形特性に関する実験的研究
3. 学会等名 土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊康太郎, 伊藤大知, 小峯秀雄, 関口高志
2. 発表標題 海水系地下水質および地下水圧負荷環境下でのNa型, Ca-Mg型ベントナイトの水分移動特性に関する研究
3. 学会等名 第15回環境地盤工学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daichi Ito, Hailong Wang, Hideo Komine
2. 発表標題 Evaluation on hydraulic conductivity of saturated bentonites containing different exchangeable cation composition
3. 学会等名 9th International Congress on Environmental Geotechnics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋智紀, 小峯秀雄, 伊藤大知, 王海龍, 阮坤林
2. 発表標題 メスシリンダー法を用いた排気・拘束条件によるベントナイトの水分移動特性への影響
3. 学会等名 第20回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊 康太郎, 伊藤 大知, 小峯 秀雄, 王 海龍, 関口 高志
2. 発表標題 Na型およびCa-Mg型ベントナイトの不飽和時水分移動特性に及ぼす水圧の影響評価
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤 大知, 王 海龍, 小峯 秀雄
2. 発表標題 交換性陽イオン組成の異なるベントナイトの透水係数の測定
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊 康太郎, 伊藤 大知, 小峯 秀雄, 王 海龍, 阮 坤林, 関口 高志
2. 発表標題 高地下水圧環境におけるベントナイトの水分移動特性
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高橋 智紀, 渡邊 康太郎, 小峯 秀雄, 伊藤 大知, 王 海龍, 阮 坤林, 関口 高志
2. 発表標題 Na型ベントナイトの水分移動特性に及ぼす間隙空気の影響
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤大知, 王海龍, 小峯秀雄
2. 発表標題 最大20万を超える動水勾配を作用できる締固めたベントナイトの透水試験方法の開発
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高橋 智紀, 渡邊 康太郎, 小峯 秀雄, 伊藤 大知, 王 海龍, 阮 坤林, 関口 高志
2. 発表標題 Na型およびCa型ペントナイトの水分移動特性に及ぼす間隙空気の影響
3. 学会等名 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 渡邊 康太郎, 伊藤 大知, 小峯 秀雄, 王 海龍, 阮 坤林, 関口 高志
2. 発表標題 高水圧環境でのペントナイト供試体内飽和度による水分移動特性の評価
3. 学会等名 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	王 海龍 (Wang Hailong)	東京大学・大学院工学系研究科社会基盤学専攻・特任准教授 (12601)	
研究協力者	小峯 秀雄 (Komine Hideo)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	
研究協力者	阮 坤林 (Ruan Kunlin)	早稲田大学・創造理工学部社会環境工学科・助教 (32689)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	舘野 壮平 (Tateno Sohei)	元早稲田大学・創造理工学部社会環境工学科・学部生 (32689)	
研究協力者	渡邊 康太郎 (Watanabe Kotaro)	早稲田大学・大学院創造理工学研究科建設工学専攻・修学生 (32689)	
研究協力者	高橋 智紀 (Takahashi Tomoki)	早稲田大学・大学院創造理工学研究科建設工学専攻・修学生 (32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関