

放射性廃棄物処分施設・高度構築技術

研究代表者 小峯 秀雄
(創造理工学部 社会環境工学科 教授)

1. 研究課題

原子力発電事業から排出される放射性廃棄物の処分は、国家的な重要事案である。実際、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業は、北海道の 2 つの地方自治体において、原子力発電環境整備機構 (NUMO) による文献調査によるサイト調査の段階に入った。研究代表者は、30 年以上、放射性廃棄物処分におけるキーデバイスとも言える人工バリア・ベントナイト系緩衝材の設計・製作にかかわる基礎研究を継続している。これらの研究は、数多くの科研費の支援も継続的に受けている (<https://kaken.nii.ac.jp/ja/search/?qm=90334010>)。

本研究では、これらの基礎研究を起点に、電力関連の研究所および施工実績のある企業との協働を図り、基礎研究から施工など実務への応用までを念頭に置いた設計・施工・品質管理技術としての体系化・技術の高度化を行う。特に、事業化しており、処分サイト選定において前進しつつある高レベル放射性廃棄物地層処分と通常廃炉において緊急課題となっている L3 低レベル放射性廃棄物処分に関するベントナイト系の緩衝材および遮水材を研究対象として、透水・膨潤・強度変形・熱伝導性という基礎的な物理・化学特性に関する実験的研究とデータベースの構築、これらの基礎的な物理・化学特性に基づく仕様設計方法の提案、要求性能に応じた材料配合と施工技術の構築を行う。

2. 主な研究成果

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設における人工バリア材の 1 つである「ベントナイト系緩衝材」を対象として、水分移動特性や膨潤特性に影響を及ぼし得る境界条件である、流入地下水の水圧による水分拡散特性への影響、緩衝材周囲の隙間を充填するための砂質系材料による発生圧力・ベントナイト侵入挙動への影響、および人工・天然バリア材の低透気性を考慮した排気条件に関する数多くの種類の実験的研究を実施した。今年度の成果の特筆すべき点は、最大 15 MPa の高い流入水圧環境での締固めたベントナイト供試体の水分移動特性を評価した点や、地層処分の隙間充填材の材料仕様決定を想定した様々な粒度の砂中の間隙へのベントナイトの侵入挙動を評価した点、および乾燥密度や排気条件による水分拡散係数への影響を定量評価した点が挙げられる。主な成果を以下に示す。

(1) ベントナイトの水分拡散挙動に及ぼす流入水圧の影響

- 最大 15 MPa の水圧を負荷できる試験系 (図 1) を開発し、締固めたベントナイトに対し 0.0 MPa~15.0 MPa の流入水圧の下浸潤試験を行った。
- 浸潤試験から得られた水分拡散係数について、水圧が高いほど水分拡散係数が高くなる傾向が見られた (図 2)。しかし、いずれの水圧条件においても $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーであり、水圧による水分拡散特性への影響は小さいことが分かった。

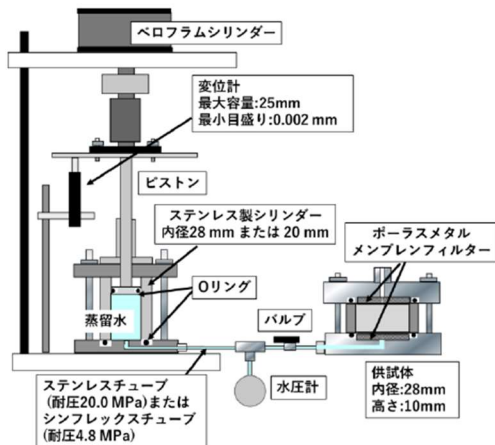


図1 最大水圧 15 MPa まで負荷できる浸潤試験系の概念図

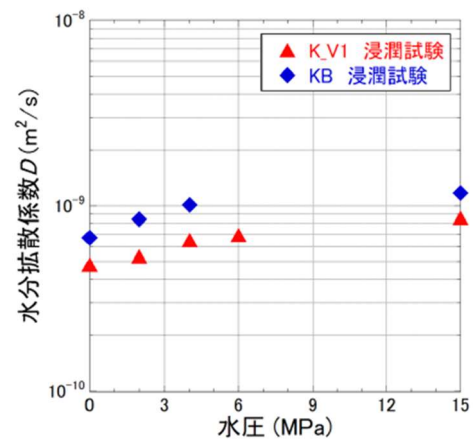


図2 水分拡散係数—流入水圧の関係

(2) 砂による隙間充填時における締固めたベントナイトの砂間隙への侵入挙動の評価

- 一次元膨潤圧試験を用いて、締固めたベントナイトの下部に存在する隙間を砂で充填し、砂充填時の条件がベントナイトの砂間隙への侵入深さに及ぼす影響について検討した (図3)。
- 異なる粒径の砂 (珪砂 V3, V5, V7 号) を充填し、充填時の砂乾燥密度がベントナイトの砂間隙への侵入深さに及ぼす影響を評価した。その結果、充填した砂の粒径の低下および充填時砂乾燥密度の増加に伴い、ベントナイトの侵入深さの低下が確認された (図4)。

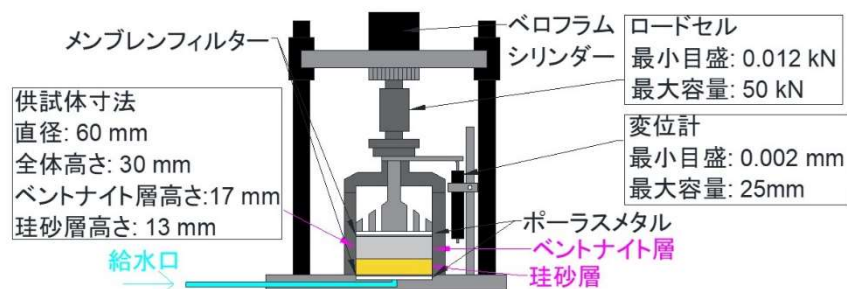


図3 砂中へのベントナイト侵入挙動評価のための一次元膨潤圧実験概念図

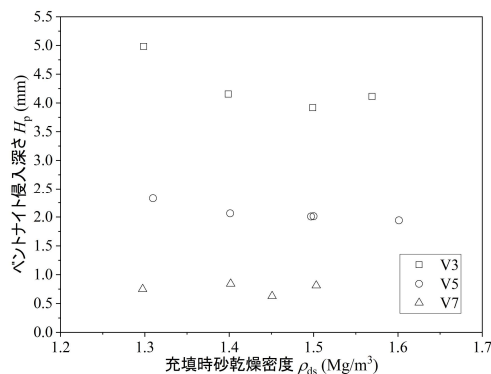


図4 異なる粒度の砂におけるベントナイト侵入深さ—砂乾燥密度の関係

(3) 乾燥密度や排気条件による締固めた Na 型ベントナイトの水分拡散係数への影響

- 供試体内の間隙空気の排気条件を変化させた吸水量測定試験により，蒸留水の浸潤に伴い発生する残存間隙空気が水分拡散係数に及ぼす影響を評価した（図 5）。
- 吸水量測定試験により，供試体の初期乾燥密度を変えて，排気条件による水分拡散係数の差異を評価した．その結果，間隙空気の残存が懸念される非排気条件の場合に水分拡散係数が小さい値を示すことが認められ，初期乾燥密度が小さいほど，差異が顕著であった（図 6）。

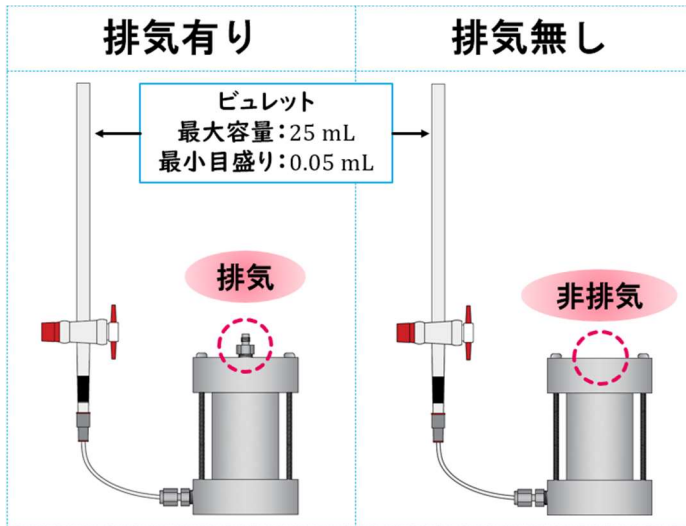


図 5 排気条件を変更可能な吸水量測定試験装置の概要図

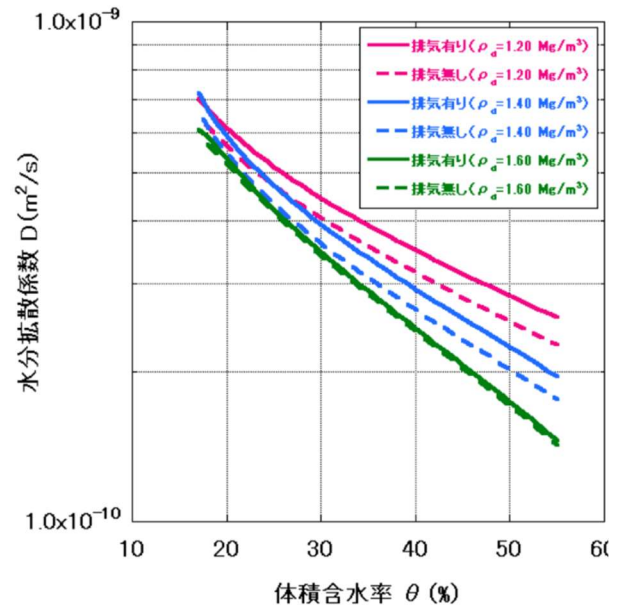


図 6 各乾燥密度における排気条件に伴う水分拡散係数の差異

3. 共同研究者

伊藤大知（創造理工学部 社会環境工学科・講師（任期付））

阮 坤林（創造理工学部 社会環境工学科・助教）

新井靖典（理工総研嘱託研究員/西武建設）

佐古田又規（理工総研嘱託研究員/ホーゲン）

後藤 茂（理工総研招聘研究員）

龍原 毅（理工総研招聘研究員）

渡邊保貴（理工総研招聘研究員）

吉川絵麻（理工総研招聘研究員）

王 海龍（理工総研招聘研究員）

CAI, Guodong（創造理工学研究科 博士後期課程 3 年）

Wang Hao（創造理工学研究科 博士後期課程 2 年）

Zhao Qingyuan（創造理工学研究科 博士後期課程 1 年）

岩原将斗（創造理工学研究科 博士前期課程 2 年）

村瀬颯太（創造理工学研究科 博士前期課程 2 年）

山崎 玉（創造理工学研究科 博士前期課程 2 年）

渡邊康太郎（創造理工学研究科 博士前期課程 2 年）

浦野知治（創造理工学研究科 博士前期課程 1 年）

高橋智紀（創造理工学研究科 博士前期課程 1 年）

小山すす（創造理工学部 社会環境工学科 4 年）

國嶋大悟（創造理工学部 社会環境工学科 4 年）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- 1) Hideo Komine (2025) Quantitative analogism on montmorillonite mineral layer filtration ability against micro-materials, Applied Clay Science 267 107718-107718 2025. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2025.107718>.
- 2) Sota Murase, Te Ma, Kunlin Ruan, Daichi Ito, Hailong Wang, Hideo Komine (2025) Estimation of water content of compacted Kunigel-V1 bentonite using near-infrared spectra, Soils and Foundations 65(1) 101545-101545 2025. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101545>.
- 3) Danxi Sun, Hailong Wang, Hideo Komine, Hiroshi Tsunai, Daichi Ito, Gaofeng Pan, Kunlin Ruan (2024) Improved SfM-MVS approach using artificial backgrounds, Soils and Foundations 64(5) 101495-101495 2024. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101495>.
- 4) Kian Cho, Hailong Wang, Daichi Ito, Junboun Park, Hideo Komine (2024) Effect of Initial Water Content and Dry Density on the Water Movement of the Compacted Bentonite, KSCE Journal of Civil Engineering 2024. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1808-7>.
- 5) Guodong Cai, Hailong Wang, Kunlin Ruan, Dachi Ito, Hideo Komine (2024) Investigation of ion concentration in pore water in compacted bentonite after infiltration by salt solutions, Soils and Foundations 64(4) 101467-101467 2024. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101467>.
- 6) Daichi Ito, Hailong Wang, Hideo Komine (2024) Apparatus for swelling deformation of compacted bentonite utilizing multi-ring moulds for evaluation of dry density and water content distribution, E3S Web of Conferences, IS-Porto2023 544 01001-01001 2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454401001>.
- 7) Yuta Ichikawa, Hideo Komine, Shigeru Goto (2024) Anisotropy of Pressure Generated by Water Absorption of Deformation-Constrained Granular Bentonite Specimens, Geo-Sustainnovation for Resilient Society, Lecture Notes in Civil Engineering 446 257-267 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9219-5_24.
- 8) Daichi Ito, Hailong Wang, Hideo Komine (2023) Evaluation on hydraulic conductivity of saturated bentonites containing different exchangeable cation composition, Proceedings of 9ICEG 252-260 2023 年 6 月
- 9) Daichi Ito, Hailong Wang, Hideo Komine (2023) Experimental study of aging-induced cementation effect on permeability property of bentonites, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1124(1) 012118-012118 2023 年 1 月 1 日,

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1124/1/012118>.

4.2 総説・著書

- 1) 小峯秀雄「土木の責任・「利他」の土木へ」土木学会誌 109(12) 23-23 2024 年 12 月.
https://hkomine.w.waseda.jp/JSCE_Journal20241201Responsibility-Soil.pdf.
- 2) 小峯秀雄「高レベル放射性廃棄物地層処分事業への参画意欲育成とスキルアップ ―土木工学の視点から―」原子力バックエンド研究 31(1) 54-62 2024 年 6 月.
<https://nuce.aesj.or.jp/jnuce/vol31/jnuce-vol31-1-p54-62.pdf>.
- 3) 招待講演
 - 1) Kunlin RUAN, Hideo KOMINE, Daichi ITO1, Hydraulic Conductivity and X-ray Diffraction Tests of Unsaturated Bentonites with a Multi-ring and Their Predictions by Pores Distributions, Keynote lecture, GER2024, Taiyun, China, 2024/09.
- 4) 受賞・表彰
 - 1) 王海龍, 阮坤林, 原崎智, 小峯秀雄: 令和 5 年度地盤工学会賞・論文賞 (英文文門)
 - 2) 王海龍, 山本有雅, 京川裕之, 伊藤大知, 小峯秀雄: 令和 5 年度地盤工学会賞・論文賞 (英文文門)
 - 3) 伊藤大知: 地盤工学会・令和 5 年度国際会議若手優秀論文賞
 - 4) 浦野知治: 第 59 回地盤工学研究発表会 優秀論文発表者賞
 - 5) Zhao Qingyuan: The 10th Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering and Recycling 2024 (GER2024)
 - 6) 浦野知治: The 10th Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering and Recycling 2024 (GER2024)
 - 7) 岩原将斗: 土木学会第 79 回年次学術講演会優秀論文賞
 - 8) 村瀬颯太: 土木学会第 79 回年次学術講演会優秀論文賞
 - 9) 浦野知治: 土木学会第 79 回年次学術講演会優秀論文賞
 - 10) 王海龍: 土木学会第 79 回年次学術講演会優秀論文賞
- 5) 学会および社会的活動
 - 1) 岩原将斗, 王海龍, 伊藤大知, 小峯秀雄: 厚さ 2 mm 供試体によるベントナイトと珪石粉混合体の透水係数の測定・評価, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
 - 2) 小峯秀雄: 各種ベントナイトの塑性限界と捕獲水分子数から考えるモンモリロナイト含有率の推算とその有効性, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
 - 3) 山崎玉, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知: チキソトロピー性能を有するサポナイト水のテクスチャーアナライザー試験による保持性能評価, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
 - 4) 伊藤大知, 王海龍, 小峯秀雄: 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, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
 - 5) Guodong CAI, Hailong WANG, Kunlin RUAN, Daichi ITO, Hideo KOMINE: NaCl 溶液浸透によるベントナイトの膨潤圧に関する X 線回折調査, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.

- 6) 渡邊康太郎, 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍, 山田味佳, 関口高志: 高地下水圧環境におけるベントナイトの水分移動特性, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
- 7) 村瀬颯太, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知: PLS 回帰を用いた近赤外分光スペクトルによる締固めたベントナイトの含水比の推定, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
- 8) 阮坤林, 小峯秀雄, 伊藤大知: クニゲル-V1 ベントナイトの膨潤圧に及ぼす高温履歴効果, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
- 9) 高橋智也, 伊藤大知, 小峯秀雄: 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, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
- 10) 浦野知治, 小峯秀雄, 伊藤大知, 阮坤林: 隙間を異なる乾燥密度の砂で充填した際のベントナイトの発生圧力の実験的評価, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
- 11) 覺前瞭太, 小峯秀雄, 伊藤大知: 温度勾配環境における締固めたベントナイト中の水分移動の経時変化に関する実験的評価の試み, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
- 12) 小橋優, 浦野知治, 小峯秀雄, 伊藤大知, 阮坤林, 王海龍: 砂・ベントナイト混合材料における最終膨潤変形率の新たな算出方法の提案, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
- 13) 岩原将斗, 王海龍, 伊藤大知, 小峯秀雄: ベントナイトと珪砂混合体の透水係数に及ぼす骨格の変化の影響に関する研究, JSCE 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会.
- 14) 阮坤林, 伊藤大知, 王海龍, 小峯秀雄: 締めたクニゲル-V1 ベントナイトの膨潤圧に及ぼす温度履歴効果に関する実験的研究, JSCE 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会.
- 15) Guodong CAI, 王海龍, 阮坤林, 伊藤大知, 小峯秀雄: NaCl 溶液浸透下における Kunigel_V1 ベントナイトの膜挙動, JSCE 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会.
- 16) 山崎玉, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知: チキソトロピー性能を保有するサポナイト水の B 型粘度計を用いた状態評価, JSCE 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会.
- 17) 渡邊康太郎, 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍, 関口高志: 高水圧環境でのベントナイト供試体内飽和度による水分移動特性の評価, JSCE 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会.
- 18) 村瀬颯太, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知: 近赤外分光スペクトルによるベントナイトの含水状態の分析に関する基礎的研究, JSCE 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会.
- 19) 小橋優, 浦野知治, 小峯秀雄, 伊藤大知, 阮坤林, 王海龍: 砂・ベントナイト混合材料における膨潤変形実験の終了判定に関する一考察, JSCE 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会.
- 20) 浦野知治, 小峯秀雄, 伊藤大知, 阮坤林, 王海龍: Effect of Dry Density of Bentonite on the Penetration Behaviors into Sand Voids, JSCE 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会.
- 21) 高橋智也, 伊藤大知, 阮坤林, 小峯秀雄: Na 型および Ca 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, JSCE 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会.
- 22) 覺前瞭太, 小峯秀雄, 伊藤大知, 阮坤林: 締固めたベントナイト中の熱・水連成特性の要素試験における供試体端面の閉塞条件による供試体内の水分移動への影響評価, JSCE 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会.

5. 研究活動の課題と展望

今年度実施した実験的研究をさらに展開し，第 2 期において，緩衝材・埋戻し材の仕様設計法の構築を行う．特に次年度は，埋戻し材中のベントナイトやモンモリロナイトの骨材骨格中の移動特性評価や隙間充填砂中へのベントナイト・モンモリロナイト粒子の移動メカニズムの解明と，それを考慮した仕様設計法の試作を行う．