

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地層処分の人工バリア・キーデバイスである「ベントナイト系緩衝材」と、当該施設の坑道埋戻しや、低レベル放射性廃棄物における遮水材として期待される砂・ベントナイトの混合により製造される「埋戻し材」を対象とした。これらの材料において、水分移動特性と膨潤圧特性に関する数多くの種類の実験的研究を実施した。また、今回の特徴的な研究のポイントは、実際の処分施設の設置個所における地下水質の考慮、データ取得の迅速化を目指した新しい実験装置の開発と有効性である。主な成果は以下の通りである。

(1) Na 型ベントナイトおよび Ca・Mg 型ベントナイトの海水環境・高地下水压載荷下の水分移動特性の評価

- メスシリンダー法 (図 1 参照) を用いて、人工海水由来のイオン濃度を調整した水溶液中での定常浸潤速度・定常膨潤率を評価した (図 2 参照)。
- 100～400 kPa の水压を負荷した吸水量測定試験を行った (図 3 参照)。これらの水压環境においても大気圧環境と同様、不飽和時は拡散挙動で水分が移動することが示唆された。

(2) 砂・ベントナイト混合土を模擬したベントナイト・アルミナ混合材の 2 mm 層厚供試体による膨潤圧特性と有効モンモリロナイト密度による評価

- 極薄供試体 (厚さ 2mm) を用いて砂ベントナイト混合土を模擬する膨潤圧実験

の装置を開発した（図 4～5 参照）.

- 複数の乾燥密度と模擬材の配合率条件における混合土の膨潤圧特性を取得した（図 6 参照）.
- 膨潤圧の挙動を支配すると考えられるパラメータである有効モンモリロナイト密度と平衡膨潤圧の関係を得て、有効モンモリロナイト密度が一定になっても模擬材料の混合率によって平衡膨潤圧の差異が生じることが確認された(図 7 参照).

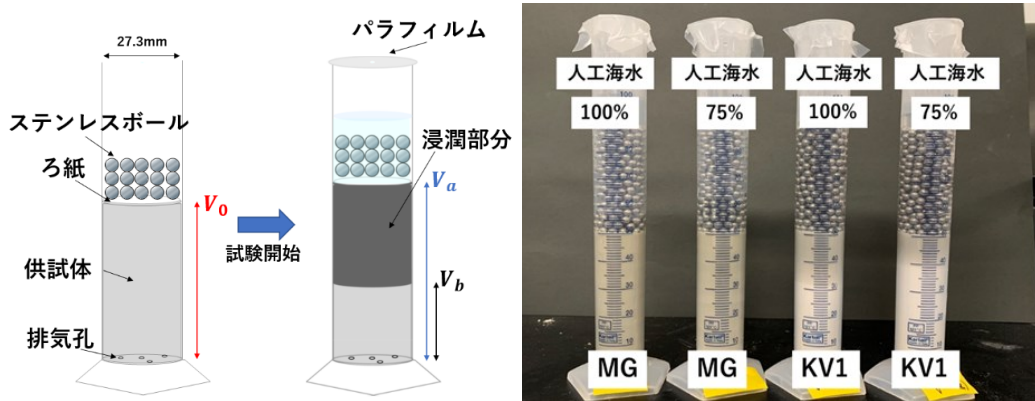
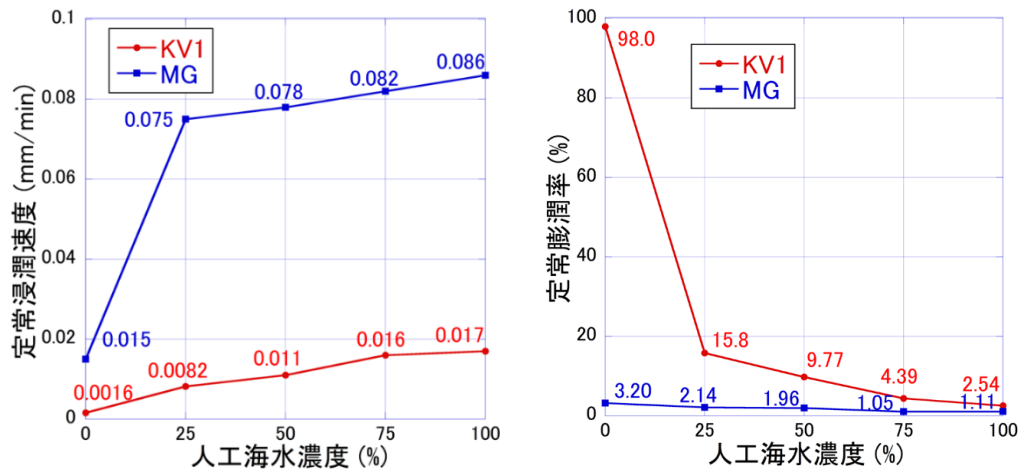


図 1 メスシリンダー法の様子（左：模式図，右：実際の実験中の様子）

図 2 人工海水濃度による定常浸潤速度（左）および定常膨潤率への影響



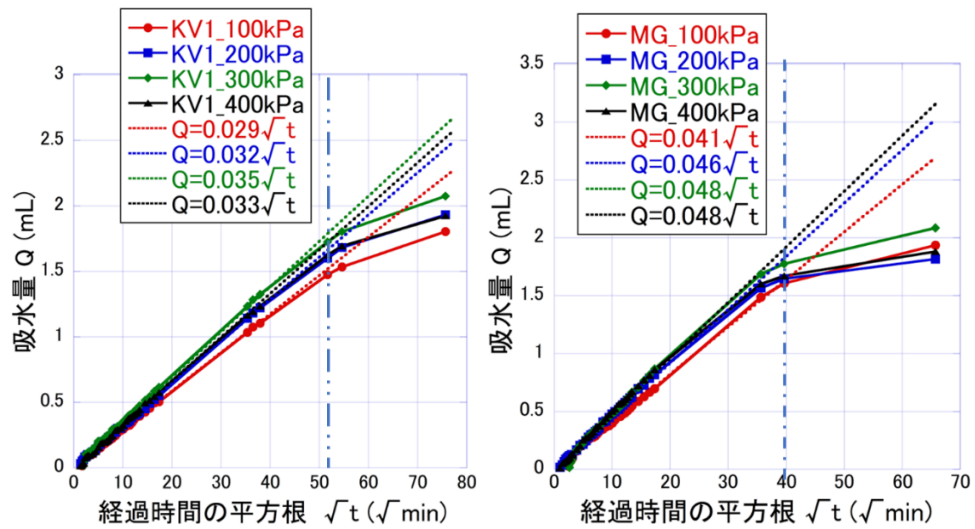


図3 吸水量と経過時間の平方根の関係（左：Na型ベントナイト，右：Ca・Mg型ベントナイト）

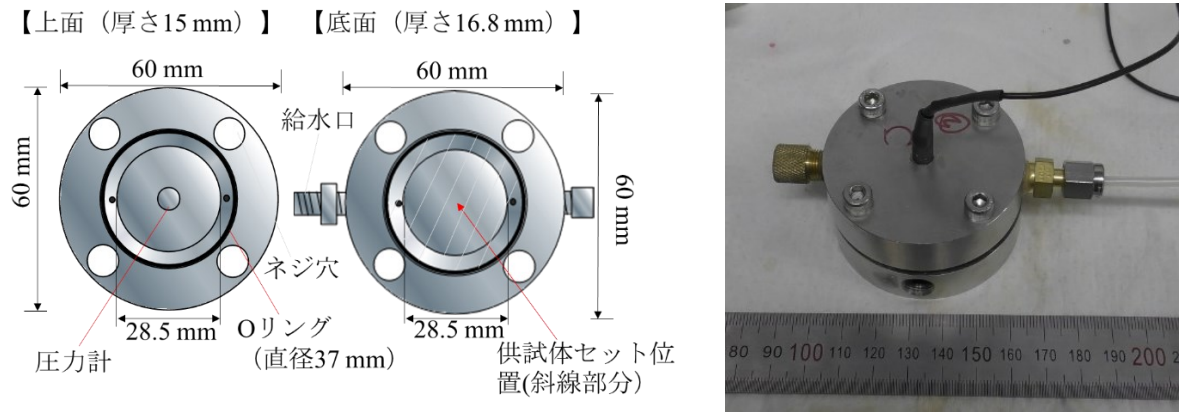


図4 極薄供試体を用いる膨潤圧試験装置

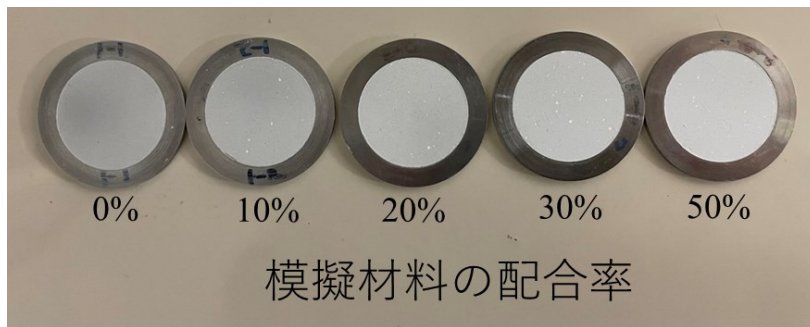


図5 配合率の異なる砂ベントナイト混合土の模擬極薄供試体（厚さ 2mm）

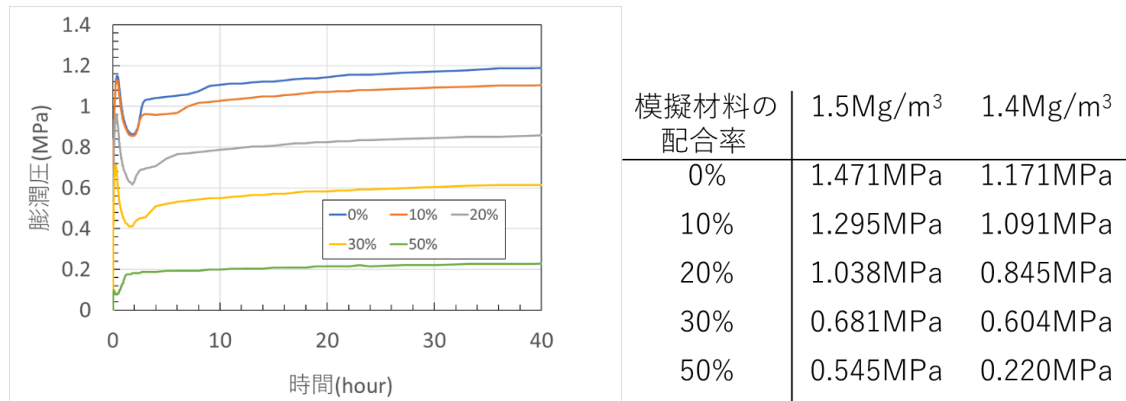


図 6 (左) 乾燥密度 1.4Mg/m³における混合土の膨潤圧の経時変化の例 (右) 乾燥密度の異なる条件での平衡膨潤圧の比較

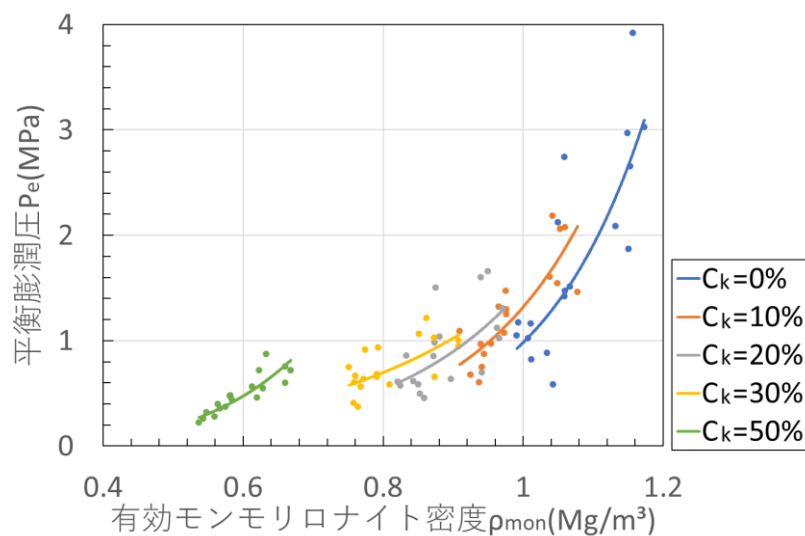


図 7 模擬材料の混合率が異なる供試体の有効モンモリロナイト密度と平衡膨潤圧の関係

3. 共同研究者

王 海龍 (国際理工学センター・准教授)
 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/ホーチュン)
 山田味佳 (元理工総研次席研究員)
 後藤 茂 (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)
 CAI, Guodong (創造理工学研究科 博士後期課程 2 年)
 Wang Hao (創造理工学研究科 博士後期課程 1 年)

Zhao Qingyuan (創造理工学研究科 博士前期課程 1 年)

岩原将斗 (創造理工学部 社会環境工学科 4 年)

渡邊康太郎 (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) Wang, H. (2022) Pore water density in a saturated bentonite. *Géotechnique*, in press. <https://doi.org/10.1680/jgeot.22.00247>
- 2) Wang, H., Ito, D., Shirakawabe, T., Ruan, K., and Komine, H. (2022) On swelling behaviors of a bentonite under different water contents. *Géotechnique*, in press. <https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00312>
- 3) Ruan, K., Komine, H., Wang, H., and Ito, D. (2022) Experimental study of initial water content and specimen preparation method effects on Kunigel-V1 bentonite swelling pressures. *Canadian Geotechnical Journal*, in press. <https://doi.org/10.1139/cgj-2021-0532>
- 4) Ruan, K., Komine, H., Wang, H., Ito, D. and Gotoh, T. (2022) Experimental study on swelling pressure of low dry density compacted bentonites during saturation combining X-ray diffraction. *Canadian Geotechnical Journal*, in press. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0342>
- 5) Wang, H., Komine, H., and Gotoh, T. (2022) A swelling pressure cell for X-ray diffraction test. *Géotechnique* 72(8): 675-686. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.00005>
- 6) Wang, H., Ruan, K., Harasaki, S., and Komine, H. (2022) Effects of specimen thickness on apparent swelling pressure evolution of compacted bentonite. *Soils and Foundations* 62(1): 101099. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.101099>
- 7) Ito, D., Wang, H., and Komine, H. (2022) Hydraulic conductivity test system for compacted, 2-mm-thick bentonite specimens. *Soils and Foundations* 62: 101210. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101210>
- 8) Ruan, K., Wang, H., Komine, H., and Ito, D. (2022) Experimental Study for Temperature Effect on Swelling Pressures During Saturation of Bentonites. *Soils and Foundations* 62(6): 101245. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101245>
- 9) 原崎 智, 小峯 秀雄, 後藤 茂, 王 海龍, 伊藤 大知, 氏家 伸介, 成島 誠一「遠心分離による土質系材料「超重泥水」の処理システム設計に向けた実験的検討」土木学会論文集 C (地圏工学) 78(2): 128-139. 2022. https://doi.org/10.2208/jscejge.78.2_128
- 10) 伊藤 大知, 王 海龍, 小峯 秀雄「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」地盤工学誌 70(4): 6-11. 2022.
- 11) 白河部 匠, 王 海龍, 諸留 章二, 小峯 秀雄「ベントナイトに適用した陽イオン交換容量および浸出陽イオン量の各種測定方法の検討」地盤工学ジャーナル 17(1): 61-71. 2022. <https://doi.org/10.3208/jgs.17.61>
- 12) Ruan, K., Komine, H., Ito, D., Miyoshi, K. and Gotoh, T. (2022) Hydraulic conductivity and X-ray diffraction tests of unsaturated bentonites with a multi-ring and their predictions by pores distributions. *Engineering Geology* 306(5): 106738

<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106738>

- 13) 龍原毅, 膳場百合子, 小峯秀雄「真摯な技術者がコンプライアンス違反に陥る遠因とその対策ー地盤工学プロジェクトに関連して技術と社会心理学の視点からー」地盤工学会誌 70(12): 31-34. 2022.
- 14) 高畑 修, 原田 拓也, 宮口 新治, 桑原 充, 門間 聖子, 保高 徹生, 小峯 秀雄「道路盛土構造が有する酸性化抑制機能の評価」土木学会論文集 C (地圏工学) 78(2): 83-95. 2022.
https://doi.org/10.2208/jsceige.78.2_83

4.2 総説・著書

- 1) 小峯秀雄「基礎と専門を融合できる 「地球のお医者さん」の育成を」下水道協会誌 58(711): 10-11. 2022.
- 2) 千々松正和, 山田淳夫, 小峯秀雄「放射性廃棄物処分施設におけるベントナイト系バリア材の締固め特性および透水性の評価方法」基礎工 50(585): 73-76. 2022.

4.3 招待講演

- 1) 小峯秀雄：内科医的土木技術者の育成，八千代エンジニアリング社内研究会，2022/09/02
- 2) 小峯秀雄：廃炉地盤工学の創生，TRD 工法協会技術セミナー，2022/11/11
- 3) 小峯秀雄：廃炉地盤工学の創生，地盤工学会東北支部講演会，2023/01/16

4.4 受賞・表彰

- 1) 伊藤大知：第 57 回地盤工学研究発表会 優秀論文発表者賞
- 2) 藤縄 凱：第 57 回地盤工学研究発表会 優秀論文発表者賞
- 3) 綱井裕史：第 57 回地盤工学研究発表会 優秀論文発表者賞
- 4) 伊藤大知：土木学会第 77 回年次学術講演会優秀論文賞
- 5) 渡邊保貴：土木学会第 77 回年次学術講演会優秀論文賞
- 6) 吉川絵麻：土木学会第 77 回年次学術講演会優秀論文賞

4.5 学会および社会的活動

- 1) Yoshikawa, E., Watanabe, Y., Komine, H., Goto, S. and Yoshimura, M. (2022) Development of localized low permeability in heavy slurry induced by water seepage. Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- 2) Ito, D. and Komine, H. (2022) Experimental study to elucidate cementation effect on swelling pressure and montmorillonite basal spacing of bentonite ore. Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- 3) Wang, H., Shirakawabe, T., and Ito, D. (2022) Apparatus design and measuring of apparent swelling pressure of compacted bentonite. Fifth International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Online, June 30-July 2, 2022.
- 4) Ito, D., Wang, H., and Komine, H. (2022) Experimental study of aging-induced cementation effect on permeability property of bentonites. EUROCK 2022, September

12-15, 2022, Espoo, Finland.

- 5) Yamada M, Cai G, Komine H. (2022) Comparing the Chemical Characteristics of Geopolymers Formed Using Two Different Metakaolin Products. 2022 Fall meeting of the Atomic Energy Society of Japan.
- 6) 山田味佳, Iysatta Manneh, 石田優子, 王海龍 小峯秀雄. 「ジオポリマー合成の水配合率が沖縄由来赤土の固化に与える影響」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, III-140, 2022.9.
- 7) Ishida, Y., Koemoto, M., Yamada, M. and Ito, H. (2022) EXPERIMENTAL STUDY ON SURFACE PROTECTION OF RESTORATIVE BRICK FOR CULTURAL PROPERTIES IN AYUTTHAYA. 12th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials & Environment, Bangkok, Thailand, 22-24 November 2022
- 8) 阮 坤林, 伊藤 大知, 小峯 秀雄, 王 海龍. 「クニゲル-V1 ベントナイトの飽和中の膨潤圧力に及ぼす温度の影響」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, 発表番号[CS12-04], 2022.9.
- 9) 伊藤 大知, 王 海龍, 小峯 秀雄, 「締め固めたベントナイトの膨潤変形に伴う乾燥密度・含水比・飽和度分布の経時変化の実験的評価」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, CS12-09, 2022.9.
- 10) 舘野 壮平, 小峯 秀雄, 王 海龍, 山田 味佳, 伊藤 大知 「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」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, CS12-11, 2022.9.
- 11) 小峯 秀雄, 山田 味佳, 龍原 毅, 金丸 奈美, 斉藤 泰久, 園田 真帆, 村田 航大, 「土木技術者・社会心理学者らによるブレインストーミングから抽出された高レベル放射性廃棄物地層処分プロジェクトに関する土木工学的視点からの技術的課題」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, CS12-31, 2022.9.
- 12) 龍原 毅, 小峯 秀雄, 膳場百合子ほか, 「定量的な地下状況の把握に資する DX 技術の可能性 ～高レベル放射性廃棄物地層処分に関連して地下の定量的理解に向けて～」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, 発表番号[CS12-33], 2022.9.
- 13) 岩崎 充希, 金田舜, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知, 後藤茂, 「燃料デブリ中間保管施設に活用する超重泥水の作製に用いるバライトの熱特性評価」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, III-285, 2022.9.
- 14) 藤縄 凱, 小峯 秀雄, 伊藤 大知, 王 海龍, 工藤 寛史, 中村 洋一 「スメクタイト系粘土鉱物含有地盤を模擬した Ca 型および Ca・Mg 型ベントナイトを含む混合供試体の膨張率と経過時間との関係」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, III-288, 2022.9.
- 15) Navya Ann Eldho, Hailong Wang, 「STUDY ON UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF MAGNESIUM CARBONATE AND SOIL MIXTURES」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, CS2-40, 2022.9.
- 16) 孫 丹曦, 小峯 秀雄, 王 海龍, 「写真法による秋田泥岩のスレーキング挙動中の三次元粒子分析パート 2」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, CS2-41, 2022.9.
- 17) 王 海龍 「締め固めたベントナイトの膨潤圧の経時変化に及ぼす供試体厚さの影響—その 2」 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, III-275. 京都, 2022.09.12-16
- 18) 綱井 裕史, 小峯秀雄, 王海龍, 山田味佳, 伊藤大知ほか, 「締め固め試験における加速度応答

- 特性の経時変化計測システムの提案」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, CS9-60, 2022.9.
- 19) 曹 基安、王 海龍、小峯 秀雄、伊藤 大知、阮 坤林、後藤 茂、関口 高志, 「高レベル放射性廃棄物処分におけるベントナイト系緩衝材の飽和度予測の試み」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, III-334, 2022.9.
- 20) 横井 亨朱、小峯 秀雄、後藤 茂、王 海龍、伊藤 大知、鈴木 清彦、國弘 彩、疋田 貴大, 「最終処分場に埋立処分された焼却灰による 経過時間, 深さごとの CO₂ 固定化量の推定」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, VII-104, 2022.9.
- 21) 根本 大志, 小峯 秀雄, 後藤 茂, 王 海龍, 山田 味佳, 伊藤 大知ほか, 「粘度測定結果に基づく超重泥水からの引き抜き抵抗推定の試み」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, III-34, 2022.9.
- 22) 根本 大志, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 山田味佳, 伊藤大知ほか, 「各種配合の超重泥水における物体に作用する浮力に関する実験的評価」第 57 回地盤工学研究発表会, 20-3-1-04, 2022.7.
- 23) 小峯 秀雄, 「モンモリロナイト結晶層の保水性を支配因子とする仮説に基づく各種ベントナイトの液性限界時の保水状況の予備的推察」第 57 回地盤工学研究発表会, 発表番号, 2022.7.
- 24) 舘野 壮平, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知ほか, 「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」第 57 回地盤工学研究発表会, 発表番号, 2022.7.
- 25) 藤縄 凱, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知ほか, 「スメクタイト含有地盤の体積膨張挙動における交換性陽イオンと鉛直圧の影響」第 57 回地盤工学研究発表会, 発表番号, 2022.7.
- 26) 曹 基安, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知ほか, 「締固めたベントナイトの水分拡散特性に及ぼす初期含水比の影響」第 57 回地盤工学研究発表会, 発表番号, 2022.7.
- 27) SUN DANXI, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知ほか, 「写真法による秋田泥岩のスレーキング挙動中の三次元粒子分析パート 1」第 57 回地盤工学研究発表会, 発表番号, 2022.7.
- 28) 岩崎 充希, 金田舜, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知, 「燃料デブリ中間保管施設に活用する超重泥水の熱特性評価」第 57 回地盤工学研究発表会, 21-4-1-02, 2022.7.
- 29) 綱井 裕史, 小峯秀雄, 王海龍, 山田味佳, 伊藤大知ほか, 「砂質土の締固めにおける加速度センサを用いた応答特性経時変化に関する研究」第 57 回地盤工学研究発表会, 21-8-1-08, 2022.7.
- 30) 横井 亨朱, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知ほか, 「遊離 Ca を含有する焼却灰の CO₂ 固定化量に及ぼす乾燥密度の影響」第 57 回地盤工学研究発表会, 発表番号, 2022.7.
- 31) 阮 坤林, 伊藤 大知, 小峯 秀雄, 王 海龍, 「ベントナイトの膨潤圧に及ぼす初期含水量の影響」第 57 回地盤工学研究発表会, 発表番号[22-7-2-02], 2022.7.
- 32) 伊藤 大知, 共著者名, 「ベントナイト原鉱石の透水特性における膠結作用の影響評価」第 57 回地盤工学研究発表会, 発表番号, 2022.7.
- 33) 王 海龍「締固めたベントナイトの膨潤圧の経時変化に及ぼす供試体厚さの影響—その 1」第 57 回地盤工学研究発表会, 22-7-2-01. 新潟市, 2022.07.20-22

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、緩衝材、埋戻し材の仕様設計をさらに合理的にするための実験データベースの拡充をはかる。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分では、廃棄物由来の崩壊熱の影響を考慮することが必要不可欠である。次年度以降は、この熱勾配が付与された状態での水分移動特性を精密に計測する新しい装置の開発など、より高い精度を目指した実験的研究を進める。