

# 廃炉事業に資する放射線遮蔽・遮水機能を有する

## 超重泥水・土質系材料の開発

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

福島第一原子力発電所の廃止措置を、実効性の高い技術に基づき実現することを目指して、高放射線環境等原子力特有の条件を地盤工学に融合し、原子力発電所の現状から廃炉までの時間軸を考慮して、「土・地盤の放射線遮蔽性能を活用したデブリ取出し補助技術と掘削技術の適用評価、それに基づく実効性の高い数種類のデブリ処理メニューの提示」を行う。

また、これらの技術を体系化し、原子力技術者と協働できる新しい地盤工学技術者の育成プログラム「廃炉地盤工学」の一単位を提供することを目的とする。なお、本研究は、文部科学省「国家課題対応型研究開発推進事業」『廃止措置研究・人材育成等強化プログラム』に採択された「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技术開発と人材育成プログラム」(代表：公益社団法人 地盤工学会)の再委託研究の一環として進める。

### 2. 主な研究成果

原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF)が発表した「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2021」において、【燃料デブリや固体廃棄物の「廃棄物対策」の重要性】が強調されている。本研究では、当該課題解決を目指して、土木工学・地盤工学の観点から、超重泥水とニューマチックケーソン工法を併用した燃料デブリ等の保管技術の提案を行っている。本年度は、中間保管施設の試設計と燃料デブリ収納缶の保管容量の可能性の定量評価、中間保管施設中で利用する超重泥水の状態モニタリング技術と回収可能性の定量評価、超重泥水からの燃料デブリ収納缶の引き抜き可能性を数多くの実験を通じて調査した。得られた成果の具体的な内容は、以下の通りである。

- (1) 超重泥水からの燃料デブリ収納缶の引き抜き可能性評価 (図1~4参照)
- (2) 燃料デブリ対策のための超重泥水等の熱特性評価 (図5~8参照)

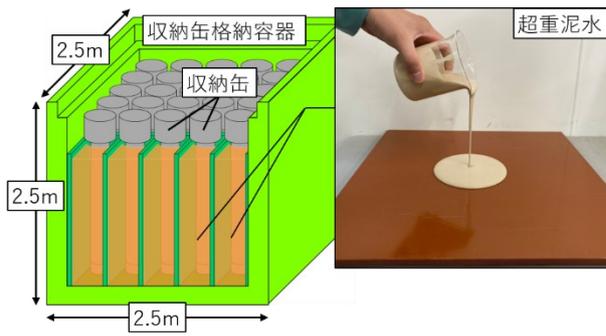


図1 燃料デブリの地下式中間保管における超重泥水の活用のイメージ図

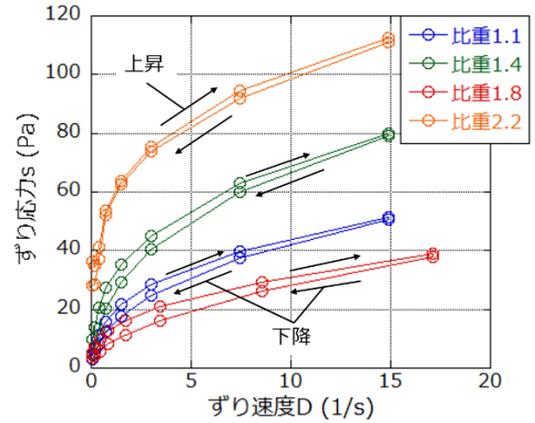


図2 超重泥水におけるずり応力とずり速度の関係

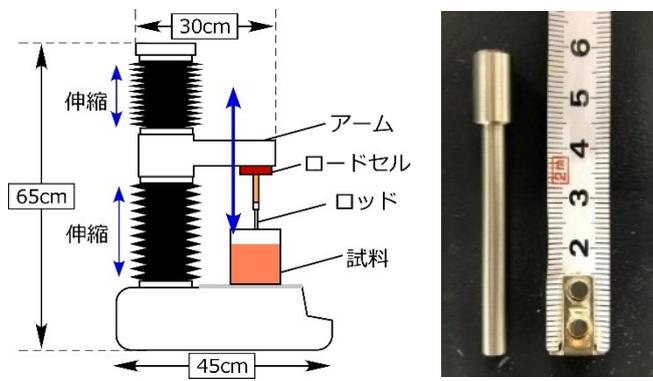


図3 超重泥水からの引き抜き抵抗測定時の装置

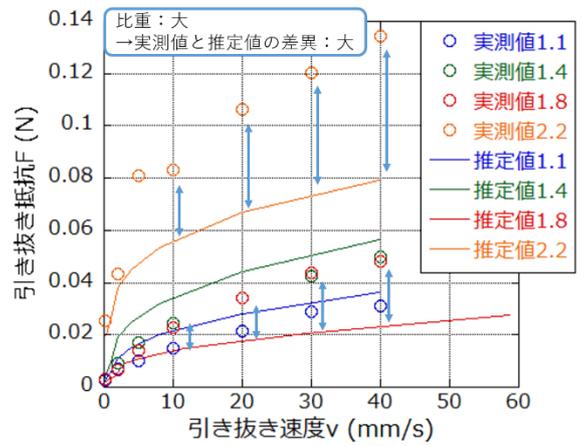


図4 粘度測定結果を用いた推定値と実測値の比較

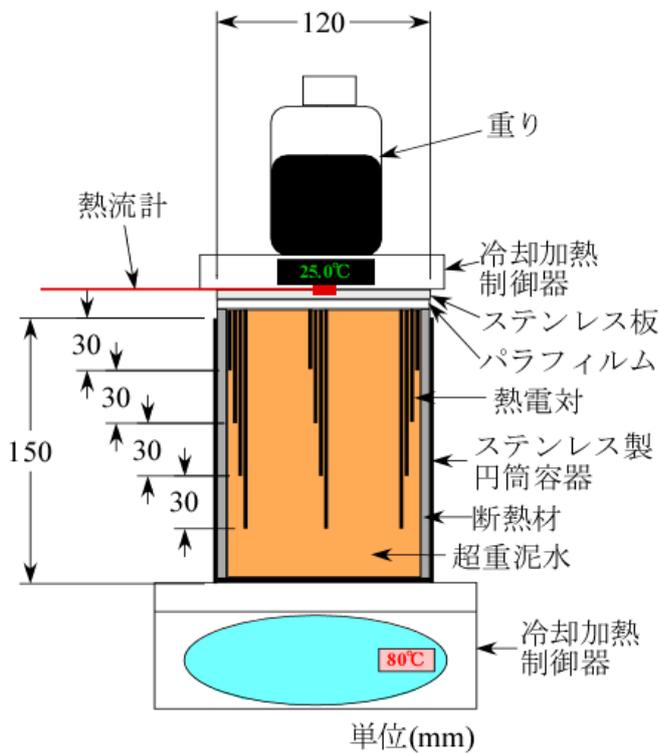


図5 超重泥水の熱伝導率算出用の実験装置の概略図

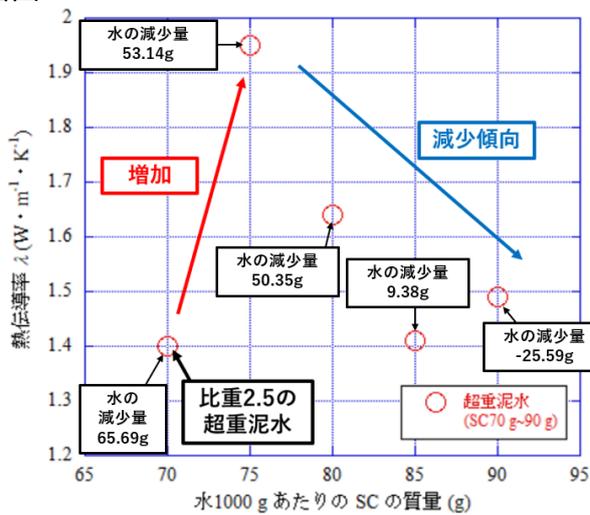


図7 ベントナイトを増量させた超重泥水の熱伝導率

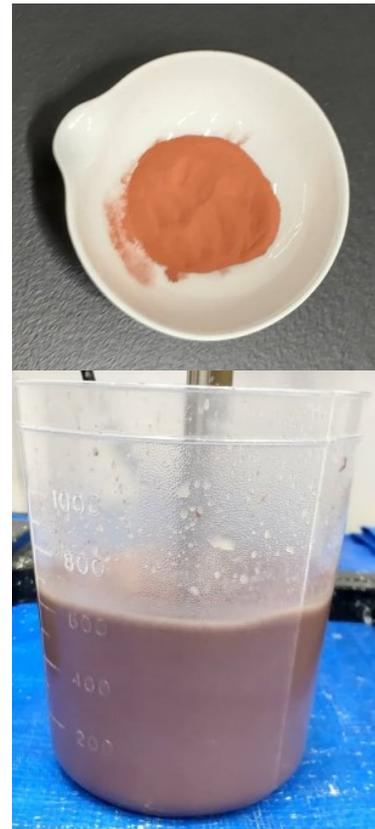


図6 銅粉末を添加した超重泥水を作製している様子

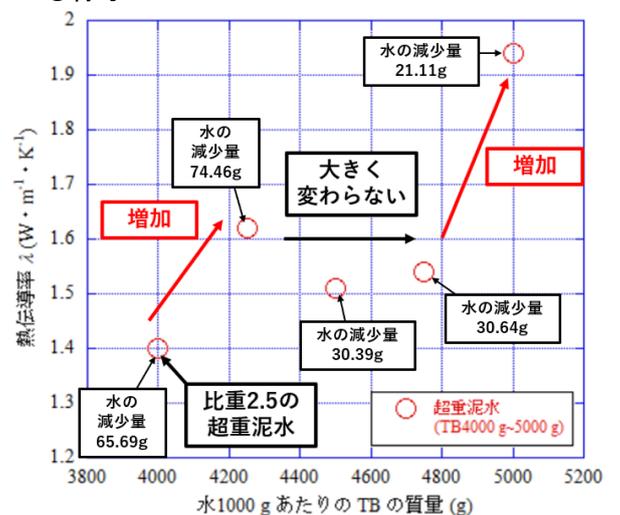


図8 バライトを増量させた超重泥水の熱伝導率

### 3. 共同研究者

後藤 茂 (理工学研究所・招聘研究員)

王 海龍 (国際理工学センター・准教授)

渡邊保貴 (理工学研究所・招聘研究員／電力中央研究所)

氏家伸介 (NB 研究所, 元創造理工学研究科 博士後期課程)

伊藤大知 (理工学術院・創造理工学部 社会環境工学科・助教)

國府田隆 (JR 東海株式会社, 元創造理工学研究科 博士前期課程 2 年)

原崎 智 (パシフィックコンサルタンツ, 元創造理工学研究科 博士前期課程 2 年)

根本大志 (創造理工学研究科 博士前期課程 2 年)

岩崎充希 (創造理工学研究科 博士前期課程 1 年)

曹基安 (ソウル国立大学 博士前期課程 1 年, 元創造理工学部 社会環境工学科 4 年)

鎮西由美希 (創造理工学研究科 博士前期課程 1 年)

### 4. 研究業績

#### 4.1 学術論文

- 1) 白河部匠, 王海龍, 後藤茂, 山本修一, 小峯秀雄: 不飽和ベントナイトの水分移動特性に及ぼす温度履歴の影響評価, 土木学会論文集 C (地圏工学) 77(2) 103-117 2021 年 4 月
- 2) Hideo Komine: Cation Filtration of Montmorillonite on Hydraulic Conductivities of Some Bentonites in Artificial Seawater, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 147(5) 06021002-06021002 2021 年 5 月
- 3) 小峯秀雄: モンモリロナイトによる微小物質濾過性能の定量的推論と工学的活用事例, 土木学会論文集 C (地圏工学) 77(3) 296-301 2021 年 9 月
- 4) Kunlin RUAN, De'an SUN, Xianlei FU, Hailong WANG, Hideo KOMINE: Reversibility of micro and macrostructure in compacted bentonite under chemo-mechanical couplings, 3rd International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics 9(2) 20-25 2021 年 10 月 12 日
- 5) Hailong Wang, Kunlin Ruan, Satoru Harasaki, Hideo Komine: Effects of specimen thickness on apparent swelling pressure evolution of compacted bentonite, Soils and Foundations 62(1) 101099-101099 2022 年 2 月
- 6) 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 年 3 月 1 日
- 7) 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, 地盤工学会誌 70(4) 6-11 2022 年 4 月

#### 4.2 総説・著書

- 1) 小峯秀雄, 阿部慎太郎, 鈴木忠勝, 本間美湖: 被災原子力発電所の廃止措置に向けた基礎工の応用一福島第一原子力発電所を例に一, 基礎工 66-69 2021 年 11 月
- 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め固め特性および透水性の評価方法, 基礎工 73-76 2022 年 4 月

#### 4.3 招待講演

- 1) 小峯秀雄：福島第一原子力発電所の廃止措置に貢献する地盤工学～廃炉地盤工学の創生～，地盤工学会関東支部特別講演会，2021年4月21日
- 2) 小峯秀雄：原子力工学分野と協働する地盤工学の展開～廃炉地盤工学の創生～，原子力システム研究懇話会，2021年11月16日
- 3) 小峯秀雄：原子力と土木・地盤工学の協働で実効性のある廃炉や放射性廃棄物処分の実践を，第7回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス（NDEC-7），2022年3月11日

#### 4.4 受賞・表彰

- 1) 國府田隆：第56回地盤工学研究発表会 優秀論文発表者賞，燃料デブリの取り出しや中間保管に資する超重泥水の電気比抵抗を用いた状態把握モデルの提案
- 2) 原崎智：第56回地盤工学研究発表会 優秀論文発表者賞，燃料デブリ取り出しに資する超重泥水の処理・処分方法の構築—メチレンブルー溶液消費量の測定による超重泥水の含有粘土鉱物および構成材料の乾燥質量定量評価方法の提案—
- 3) 伊藤大知：土木学会第76回年次学術講演会優秀論文賞，締固めたベントナイトの透水係数測定に向けた厚さ2mmの供試体を用いた変水位透水試験の適用性評価
- 4) Kian Cho: Prize of Geoenvironmental Engineering and Recycling 2021 (GER2021), Development of Monitoring System of Buffer Material Based on Swelling Pressure of Compacted Bentonite
- 5) 岩崎充希：地盤工学会関東支部発表会 GeoKanto2021 優秀発表者賞，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ベントナイトの熱特性評価
- 6) 曹基安：地盤工学会関東支部発表会 GeoKanto2021 優秀発表者賞，膨潤圧を指標とするベントナイト系緩衝材の飽和・密度状態のモニタリング技術の提案

#### 4.5 学会および社会的活動

- 1) 金田舜，伊藤大知，小峯秀雄，後藤茂，王海龍。「一次元的な熱移動を制御した熱伝導率測定方法の提案～Na型ベントナイトの熱伝導率に関する平板比較法との結果の比較および考察～」第56回地盤工学研究発表会，12-1-2-08，2021.7.
- 2) 國府田隆，小峯秀雄，王海龍，後藤茂，伊藤大知，氏家伸介，成島誠一。「燃料デブリの取り出しや中間保管に資する超重泥水の電気比抵抗を用いた状態把握モデルの提案」第56回地盤工学研究発表会，12-2-3-03，2021.7.
- 3) 近藤誠，伊藤大知，小峯秀雄，王海龍，後藤茂，山田淳夫。「RGB値を利用したベントナイト混合土の含水状態の確認の可能性調査」第56回地盤工学研究発表会，13-2-4-03，2021.7.
- 4) 齋藤七菜子，伊藤大知，小峯秀雄，後藤茂，王海龍，関口高志，北原慎也。「高レベル放射性廃棄物の地層処分における隙間充填材料を想定した珪砂のベントナイトろ過特性に関する実験的研究」第56回地盤工学研究発表会，12-4-2-06，2021.7.
- 5) 藤縄凱，伊藤大知，小峯秀雄，後藤茂，王海龍，工藤寛史。「重要構造物の立地を想定したスメクタイト系粘土鉱物含有地盤の体積膨張特性評価」第56回地盤工学研究発表会，13-2-1-03，2021.7.
- 6) 山本有雅，伊藤大知，小峯秀雄，後藤茂，王海龍，関口高志，北原慎也。「締固めたベントナイトの膨潤圧および自己シール性に及ぼす吸水方向の相違の影響」第56回地盤工学研究発表会，

13-4-1-05, 2021.7.

- 7) 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. 「燃料デブリ取り出しに資する超重泥水の処理・処分方法の構築—メチレンブルー溶液消費量の測定による超重泥水の含有粘土鉱物および構成材料の乾燥質量定量評価方法の提案—」第 56 回地盤工学研究発表会, 13-4-2-03, 2021.7.
- 8) 根本大志, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知, 阿部慎太郎, 鈴木忠勝, 本間美湖, 氏家伸介, 成島誠一. 「超重泥水からの燃料デブリ収納缶取り出しを想定した引き抜き抵抗の要素測定のための実験条件の影響評価」第 56 回地盤工学研究発表会, 13-4-4-01, 2021.7.
- 9) 伊藤大知, 王海龍, 小峯秀雄. 「種々の拘束条件におけるベントナイト原鉱石の拘束圧—乾燥密度関係の評価」第 56 回地盤工学研究発表会, 13-6-4-02, 2021.7.
- 10) 伊藤大知, 王海龍, 小峯秀雄. 「種々の拘束条件におけるベントナイト原鉱石の拘束圧—乾燥密度関係の評価」第 56 回地盤工学研究発表会, 13-6-4-02, 2021.7.
- 11) 阮坤林, 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍. 「限定湿潤下で異なる溶液によって飽和したナトリウム-ベントナイトの膨潤圧と水拡散係数」, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, CS2-38, 2021.9.
- 12) 金田舜, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知. 「一次元的な熱移動を制御した熱伝導率測定方法による Na 型ベントナイトの熱伝導率の測定」, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, III-335, 2021.9.
- 13) 木全祐輔, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 伊藤大知. 「処分孔プラグを想定した砂・鉛玉・Na 型ベントナイト混合土の放射線遮蔽性能に関する実験的調査」, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, CS12-21, 2021.9.
- 14) 伊藤大知, 貞松暁大, 小峯秀雄, 王海龍. 「締固めたベントナイトの透水係数測定に向けた厚さ 2mm の供試体を用いた変水位透水試験の適用性評価」, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, CS12-27, 2021.9.
- 15) 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. 「燃料デブリ取り出しに資する超重泥水の処理・処分方法の提案—遠心分離による超重泥水の含有粘土鉱物および構成材料の分離・回収の試み—」, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, III-330, 2021.9.
- 16) 藤縄凱, 伊藤大知, 小峯秀雄, 王海龍, 工藤寛史. 「スメクタイト系粘土鉱物含有地盤の体積膨張を想定した膨潤変形挙動に及ぼす初期乾燥密度および有効スメクタイト密度の影響評価」, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, III-320, 2021.9.
- 17) 山本有雅, 小峯秀雄, 王海龍, 後藤茂, 伊藤大知, 関口高志, 北原慎也. 「締固めたベントナイトの自己シール性に及ぼす吸水方向および隙間幅の影響の実験的調査」, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, III-345, 2021.9.
- 18) 國府田隆, 小峯秀雄, 王海龍, 後藤茂, 伊藤大知, 氏家伸介, 成島誠一. 「燃料デブリの取り出しや中間保管に資する超重泥水の状態把握における電気比抵抗の有効性に関する調査」, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, III-166, 2021.9.
- 19) 龍原毅, 金丸奈美, 齊藤泰久, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知, 渡部厚, 園田真帆, 村田航大. 「高レベル放射性廃棄物地層処分プロジェクトへの技術者としての参画意欲育成のための教材開発 (その 1) ~教材開発の研究開発スキームの紹介~」, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, CS12-01, 2021.9.
- 20) 園田真帆, 村田航大, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知, 渡部厚, 龍原毅, 金丸奈美, 齊藤泰久. 「高

レベル放射性廃棄物地層処分プロジェクトへの技術者としての参画意欲育成のための教材開発（その2）～学生ブレインストーミングの結果に基づく必要事項抽出～，土木学会全国大会第76回年次学術講演会，CS12-02，2021.9.

- 21) 村田航大，園田真帆，小峯秀雄，王海龍，伊藤大知，渡部厚，龍原毅，金丸奈美，斉藤泰久。「高レベル放射性廃棄物地層処分プロジェクトへの技術者としての参画意欲育成のための教材開発（その3）～地盤中の水分移動の可視化と定量的理解のための手段～」，土木学会全国大会第76回年次学術講演会，CS12-03，2021.9.
- 22) 小峯秀雄，王海龍，伊藤大知，渡部厚，龍原毅，金丸奈美，斉藤泰久，園田真帆，村田航大。「高レベル放射性廃棄物地層処分プロジェクトへの技術者としての参画意欲育成のための教材開発（その4）～ベントナイト系緩衝材の材質感を実感する締固めデモ実験装置の試作～」，土木学会全国大会第76回年次学術講演会，CS12-04，2021.9.
- 23) 根本大志，小峯秀雄，後藤茂，王海龍，伊藤大知，阿部慎太郎，鈴木忠勝，本間美湖，氏家伸介，成島 誠一。「燃料デブリの中間保管状況における超重泥水からの収納缶取り出し時を想定した引き抜き抵抗測定」，土木学会全国大会第76回年次学術講演会，CS11-19，2021.9.
- 24) 藤縄凱，伊藤大知，近藤誠，小峯秀雄，後藤茂，王海龍，工藤寛史，中村洋一，高岡一章。「風化の影響を受けた自然地盤材料を対象とした膨潤特性の評価」第14回環境地盤工学シンポジウム，135-138，2021.09.
- 25) 國府田隆，小峯秀雄，後藤茂，王海龍，伊藤大知，氏家伸介，成島誠一。「福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた超重泥水の電気比抵抗・比誘電率を用いたモニタリング技術の提案に関する基礎的研究」第14回環境地盤工学シンポジウム，117-182，2021.09.
- 26) 藤縄凱，伊藤大知，近藤誠，小峯秀雄，後藤茂，王海龍，工藤寛史，中村洋一，高岡一章。「膨潤性粘土鉱物を含有する地盤を模擬した混合供試体の体積膨張に及ぼすスメクタイト含有率および初期含水比の影響」第14回環境地盤工学シンポジウム，135-138，2021.09.
- 27) 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。「福島第一原子力発電所廃止措置に資する土質系材料「超重泥水」の処理・処分方法の構築—メチレンブルー溶液消費量の測定による超重泥水の含有粘土鉱物および構成材料の乾燥質量の定量評価方法—」第14回環境地盤工学シンポジウム，155-162，2021.09.
- 28) 根本大志，小峯秀雄，後藤茂，王海龍，伊藤大知，阿部慎太郎，鈴木忠勝，本間美湖，氏家伸介，成島誠一。「超重泥水を活用した燃料デブリの収納缶付き地下式中間保管施設の試案と収納缶取り出し可能性評価のための要素試験」第14回環境地盤工学シンポジウム，163-168，2021.09.

## 5. 研究活動の課題と展望

福島第一原子力発電所の廃止措置に実効的に寄与するため，土木工学・地盤工学分野の新学問体系「廃炉地盤工学」の下，研究代表者の研究チームは，新たに開発した遮水性能と放射線遮蔽性能の両方を保有する「超重泥水」等の高機能土質系材料の開発を鋭意行っている．このような研究開発実績を活用し，次年度以降は，JAEAが提示している「基礎・基盤研究の全体マップ」の中央に位置づけられクローズアップされている燃料デブリ等の「廃棄物対策」の課題解決を第一の目標とする．具体的には，開発してきた超重泥水をはじめとする高機能土質系材料を，燃料デブリや高放射性の廃棄物の保管に活用する際に要求される遮水性能，放射線遮蔽性能，有効な放熱性を達成するための配合や仕様を設計する方法の構築をより一層進める．そして，仕様設計される高機能土質系材料と実際の工事現場での実績の高い施工技

術，特に，地下等に燃料デブリ収納缶を保管できる大規模空間の建設に高い優位性のあるニューマチックケーソンと組み合わせて，斬新かつ施工可能性の高い“燃料デブリと高放射性廃棄物の保管技術”の基本概念および基本設計とその方法を具体的に提案する．