

廃炉地盤工学の創生

東畑郁生*1 小峯秀雄*2 後藤茂*3 鈴木誠*4 菱岡宗介*5 渡邊保貴*6

2011 年の大震災に伴う原子力発電所の事故は、困難ではあるが国民の英知を結集して終息させなければならない。地盤工学も、原子力工学の問題解決では知識経験が十分であるとは言えないが、培ったその技術には廃炉問題の解決に役立つ独自のものがある。本稿では、まず地下水環境の超長期予測によって廃炉事業全工程にわたる現場放射能環境を推定する試みを述べる。次に超重泥水技術により、原子炉からの汚染水漏出停止と放射能遮蔽の双方を同時に達成しようとしている技術開発の現況を説明する。これらの研究の上に立って、廃炉地盤工学という学術体系を構築し、今後 40 年にわたって廃炉に取り組む技術者育成がすすんでいるが、その現在までの達成状況を紹介する。

Keywords: 地盤工学, 廃炉処置, 放射能遮蔽, 人材育成, 大学教育

The solution of nuclear reactor accident in 2011 is a difficult issue but has to be achieved by employing the nation's overall capacity. Although geotechnical engineering is not a central part of the nuclear engineering, it has a variety of underground technology that can play important roles in the decommissioning of damaged reactors. The present paper touches first upon the technology developments towards long-term prediction of underground hydraulic environment, by which the radioactive environment can be assessed for the entire period of decommissioning project. Second, the technology of super-heavy mud water is introduced by which sealing of radioactive leakage and shielding of radioactive waves are simultaneously achieved. Based on these technological developments, a new discipline of decommissioning geotechnology will be created for the sake of human resource development for decommissioning. The achievements to date are the major content of this paper.

Keywords: geotechnical engineering, decommissioning, radioactive shielding, human resources, university education

1 はじめに

地盤工学は、土木・建築・農林などの分野で、地面から下の土と岩とを対象とした建設事業を担当してきた。地下水流動の制御や地下掘削、盛土造成などに多くの実績がある。原子力発電の分野でも、発電所施設の基礎の設置や耐震問題に深くかかわってきたのはじめ、バックエンドの分野では、地層処分技術の開発研究に携わってきた実績もある。しかし 2011 年から始まった津波被災原発の廃炉問題に関しては、原子力発電技術の根幹についての知識不足から、当初は当事者意識を持つことができないでいた。震災直後は、津波被災地における防潮堤の復旧、地盤かさ上げ、崩壊宅造地や液状化被災地のコミュニティー再建等の問題にエネルギーを割いていたことも、理由の一つである。しかしそれらが一段落したところ、被災原子炉の処理はなおも難航しており、問題の解決に向けてあらゆる分野の英知を結集しなければならない、との機運が高まって来た[1]。

当時の状況を見ると、地下水流動を介して環境放射能汚染が続き、事故原子炉からのデブリ取り出し（地盤掘削作業との類似）、汚染廃棄物の地中最終処分、発電所跡地の整備などは、いずれも地盤工学が実践してきた技術の延長上

にあると考えられたため、地盤工学会の正式な活動として文部科学省の公募する英知事業にぜひ応募すべきであると決断した。学会メンバーの研究者や実務者を公募して委員会を設立し、当時の会長の筆者が、委員長に就任した。この小文では、当該グループが平成 29 年度までに活動した内容を、途中経過として記述する。

2 英知事業における研究活動

地盤工学会の活動計画では、今後 40 年にわたろうとする廃炉事業において、デブリ取出しと廃棄物の長期的な処置に取り組む予定である。これらに関係する科学技術的な研究を実施する一方、大学院生や若手技術者をこの研究にいざなうことにより、廃炉事業へ長期的に貢献する人材を育成したい。期待される人材像とは、土木・建築的な基礎の上に原子力の知識を兼ね備えた人材である。以下に 2 つの研究課題について説明するが、それらを統合し、また既存の地盤工学技術の中から廃炉事業に貢献できる技術も収集し、廃炉地盤工学という学術を創成することで人材育成に貢献することが、大目的である[2]。

2.1 地下水環境等の解析・調査技術と予測技術の高度化

読者もご承知のように、建設プロジェクトは段取りが勝負と言われ、作業の進行に伴う状況の変化を詳細に予測して、必要な人員や機材・材料の手当てを確立しておくことが本質的に重要である。ただしそれと同時に、予想外の事態に対しても対応できる経験と決断力も必要である。今後 40 年間にも及ぶ事故原子炉の廃炉事業では、現場の放射能の状況が作業の難易を左右するファクターと考えられる。放射能は原子炉から地下水を介して外部に影響すると考えられることから、40 年を目安とする超長期的な地下水環境の予測を、研究テーマに挙げている。現時点では発電所周辺を含む広域を念頭に大型の非定常シミュレーションの妥当性を検討するとともに、実際の地盤にボーリング孔を掘削して地下水流動の実測と予測の比較を行っている。

Geotechnical engineering for nuclear decommissioning by Ikuo TOWHATA (towhata.ikuo.ikuo@gmail.com), Hideo KOMINE, Shigeru GOTO, Makoto SUZUKI, Sousuke HISHIOKA and Yasutaka WATANABE

*1 関東学院大学客員教授

Visiting Professor, Kanto Gakuin University
〒236-8501 神奈川県横浜市金沢区六浦東 1-50-1

*2 早稲田大学教授

Professor, Waseda University
〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

*3 招聘研究員 早稲田大学

Senior Researcher, Waseda University
〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

*4 千葉工業大学教授

Professor, Chiba Institute of Technology
〒275-0016 千葉県習志野市津沼 2-17-1

*5 パシフィックコンサルタンツ (株)

Chief Engineer, Pacific Consultants Co. Ltd.
〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目 22 番地)

*6 電力中央研究所

Researcher, Central Research Institute of Electric Power Industry
〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646

2.2 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価

廃炉事業現場の放射能を軽減することは、事業に従事する人々の安全を高めるとともに、事業の進捗を容易にし、工期短縮に貢献する。そのために、放射線の遮蔽と被災原子炉からの漏水停止の双方に貢献できる技術開発を行っている。ここではそれを、超重泥水技術と呼ぶ。

建設現場ではしばしば泥水（でいすい）と呼ばれるベントナイト粘土水溶液を、掘削溝の安定化に利用している。本研究はこの技術から出発し、特殊な重い粘土の水溶液によって放射能を遮蔽し、同時に原子炉周辺からの汚染水漏れを止めることを狙っている。周知のように、ガンマ線は質量密度の大きな物質で透過を減らすことができ、中性子線は水素原子が透過を阻害する。そこで質量密度の大きい特殊な粘土を水に溶かすことにより、ガンマ線と中性子線の両者を遮蔽することが、超重泥水技術の狙いである。また流動性に富むことから、原子炉周辺の配管の中にも注入することができる。配管から放射能を帯びた水が漏えいすることも阻害でき、この機能はすでに実用されている。写真1に、この超重泥水を示しておく。



写真1 高い流動性と放射能遮蔽性能をともに備えた超重泥水

超重泥水でできた遮蔽体にガンマ線や中性子線を照射して透過する放射線の強さを測定し、遮蔽性能を評価する実験が進んでいる。その結果を図1と図2に示す[3]。ガンマ線は密度の高い超重泥水ほど透過を防止でき（図1）、中性子線は水を多く含む（湿潤密度は小さい）超重泥水ほど透過が防止できる。ガンマ線と中性子線とで湿潤密度の遮蔽効果が逆であるが、現場の放射線の状況に応じ、最適な遮蔽効果を実現できる湿潤密度があるものと考えている。

この章で述べた二つの研究テーマ、すなわち地下水環境の長期予測と超重泥水の技術は、廃炉の現場において、発電所周辺の広域地下水環境の長期予測、事故原子炉に貯留した超重泥水による遮蔽およびデブリ掘削装置（地盤ボーリング技術の応用を想定）の側方支持（座屈防止）、廃棄物の中長期貯蔵施設の放射線遮蔽、などにも役立つことが期待されている（図3）。

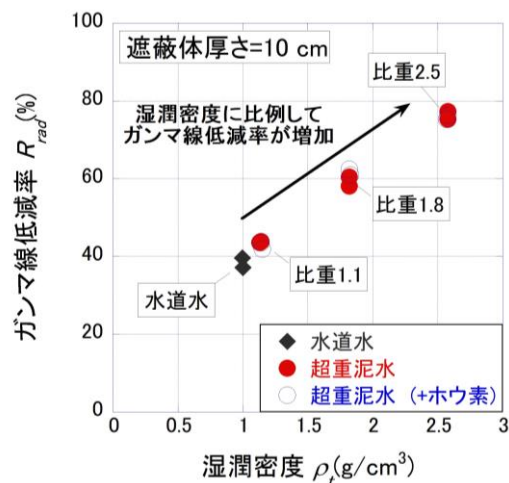


図1 ガンマ線低減率と超重泥水の湿潤密度との関係

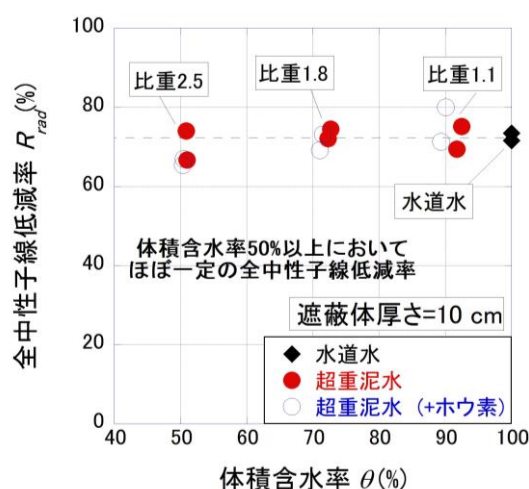


図2 全中性子線低減率と超重泥水の体積含水率との関係

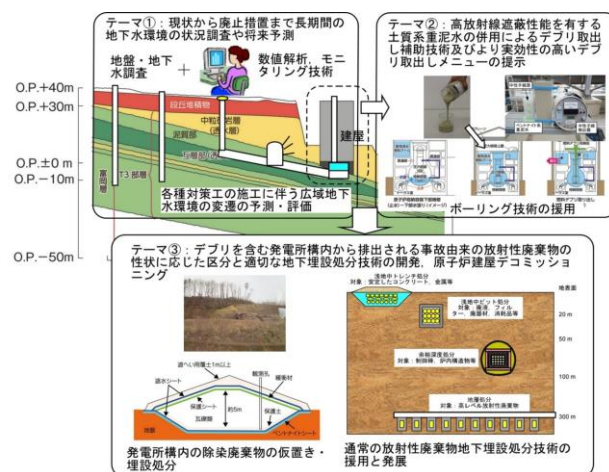


図3 事故原発の廃止に対する研究成果の適用概念図

研究開発と実用との相違は、重要な留意事項である。具体的に述べると、地下水環境予測はすぐれた解析プログラムだけでできるものではなく、現場の地質構造や周辺地域から流入する地下水の流況を正確に把握することが、絶対に必要である。目視できない地下の状況を正確に調査することは、それほど容易ではない。地盤調査が不十分であるにもかかわらず詳細な解析を行っただけで、地下の状況を

理解したかのような錯覚に陥らないよう、注意している.

超重泥水のような新材料の応用においても、試験管レベルの成果と「実際」との違いを理解しなければならない。実験室で良い成果を挙げた材料であっても、現場の大きな事業に適用するには、短期間に均質な材料を大量に供給する体制が不可欠である。地盤工学会の超重泥水研究では、供給側に立つ企業の全面的な参画を得ている。

3 廃炉地盤工学の創生

3.1 廃炉地盤工学とは

従来の地盤工学に原子力工学の視点を取り込んで、廃炉地盤工学という学術分野を創生する。その具体的な内容を定めるにあたり、研究グループは地盤工学の実績を俯瞰し、廃炉の実現に向けて取りうるシナリオを検討した。このシナリオは国が現在行おうとしている廃炉手法とは必ずしも一致していないが、研究グループによる一構想として、ご理解願いたい。そして、各シナリオに寄与できる技術を探査し、技術マップにまとめる、という作業を行った。

図4は、想定したシナリオを例示したものである。たとえば、汚染地下水の移動をすでに実用化されている地中連続壁で封じ込める、廃棄物の盛土形式中間貯蔵、事故原子炉の一時的な封じ込め、遮蔽力のある超重泥水で満たした事故原子炉中におけるボーリング形式のデブリ取出し、地盤と地下水でかなり遮蔽されている地下トンネルから鉛直に掘削することによるデブリ取出し無人化作業（シールドトンネルの技術は圧気環境で地下水流入を防ぎつつロボット掘削できる）、廃棄物の埋設処分場の環境評価などである。このようなシナリオから、廃炉地盤工学を構成するべき学術要素を想定した。

廢炉地盤工学は、次のような要素によって構成される：

- ・ 地盤力学：廃炉への各段階で生じる構造物および地盤の形態変化について、地震等に対する安定性を検討するための技術群。
- ・ 地盤環境学：廃炉過程において必要な地盤内（地下水、地下空洞等）の放射線環境を予測・評価・改善するための技術群。
- ・ 地盤材料学：廃止措置に有効な地盤系材料（ボーリング補助液、止水材、グラウト材、覆土材料等）を開発・改良する技術群。
- ・ 地盤施工学：廃止措置における環境的・構造的条件を考慮して、最適な工法・材料を選択し、廃止措置過程を実体化させるための技術群。

そして廃炉への工程は、汚染水・地下水環境、デブリ取出し、原発施設解体・廃棄物処理処分の3段階に係ると考えられる。これら4要素3段階の具体的な内容をまとめたのが**表1**である。

表 1 廃炉地盤工学の内容

学問單元	汚染水・地下水環境	デブリ取出し	原発施設解体・廃棄物処理処分
地盤力学	汚染水貯留施設の安定性評価、遮水壁設置地盤の地震安定性評価	原子力建屋下部の放射線漏洩防止処置の為の地下基地の安定性評価	原発施設解体の段階に沿った地盤・建屋系の地震時安定性評価
地盤環境学	原子力建屋周囲の時間的变化に対応した地下水・核種拡散シミュレーション	上記地下基地の空間放射線量の環境評価	原発施設解体の段階に沿った建屋周囲の地下水環境・放射線環境予測と評価、地中埋設処分対応地下水環境評価
地盤材料学	汚染水貯留プールに適用可能な高性能止水材料の開発、遮水壁の信頼性を高める高性能遮水壁材料の開発	空間放射線量を低減する高遮蔽性超重泥水の開発、デブリ視認可能な可視性超重泥水の開発、格納容器水漏れ箇所に対応可能な高遮蔽性固化泥水開発、デブリの一時的封込めに対応可能な可逆的液性・塑性（高遮蔽性）充填材の開発	瓦礫・伐採材保管に適した高遮蔽性覆土材料と止水材料の開発、地中埋設処分に対応した廃棄物空間充填材料の開発、 安定的原位置封込め に対応できる格納容器用高遮蔽性充填材料の開発、 安定的原位置封込め で建屋全体を覆う高遮蔽性盛土材料の開発
地盤施工学	地下水の流入を止める信頼性の高い遮水壁の構築工法、輻輳する地下構造物に対応できる遮水壁構築工法、汚染水プールに敷設する自己診断機能付き遮水幕工法	デブリ取出しのための高精度ボーリング工法、上記地下基地の構築工法、格納容器水漏れ箇所封鎖のための高遮蔽性グラウチング工法	信頼性の高い瓦礫・伐採材の保管施設構築工法、地中埋設処分施設の構築工法、 安定的原位置封込め での格納容器用高遮蔽性充填工法、同上で建屋全体の鋼製外殻による封込め工法

3.2 技術マップの意義

廃炉事業に関連すると思われる技術を93件収集し、その内容や特長をまとめてデータベースに構成したものを、技術マップと呼んでいる。単に技術パンフレットを羅列したのではなく、事業担当者がニーズに応じて検索し、かつ内容を把握できるよう工夫したことが、その特長である。

図5は、技術マップの一部である。地盤環境学のカテゴリーでまず地下水環境、デブリ取出し、最終処分の分野を選択し、それぞれにおいてニーズや作業内容を確認しつつ、利用可能な技術項目に到達する流れである。

技術マップに含まれている個々の技術は、メニューデータベースで詳細を確認することができる。その例が図6で

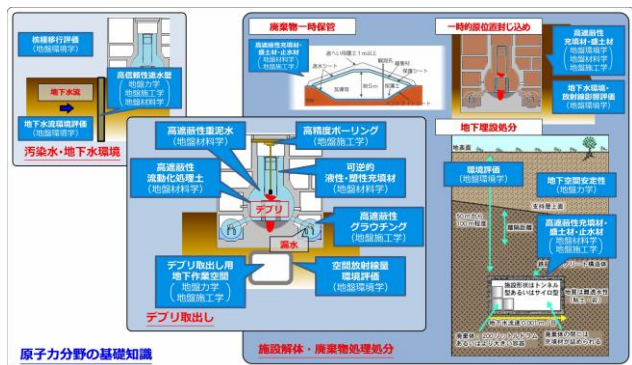


図4 廃止処置に寄与可能な地盤工学技術

https://www.jiban.or.jp/hairo/reaserch_result/ 地下水移行や土・重泥水の放射線遮蔽実験、廃炉/

40 年におよぶ廃炉事業に対して建設分野から貢献する人材は、どのようにして育成すればよいのか。この課題について、研究計画を提案するにあたって多くの議論が行われた。当時の結論をまとめると、次のようになる。

- ・大学の建設分野の学生には、ゼネコン、技術コンサルタ

- ・これら他分野も学生の誘引に努力しており、その中で廃炉へ学生をいざなうには、単なる講義やセミナーだけでは全く不十分である。
- ・修士論文のために廃炉に関する研究に従事することは、本人の興味と自信を生むことにつながり、廃炉の人材育成にとって有意義である。
- ・現場見学が有意義であることは言を俟たない。
- ・廃炉事業には、技術開発研究以外にも、その実施に伴って多くのむずかしい段階がある：建設プロジェクト全体の運営、自然災害等の困難の克服、他事業体との協同作業、地元被災者からの信頼醸成。これらを遂行できる能力は、実際の建設事業（原子力とは直接関係のない橋梁、

※表内に整理された技術が貢献可能と予想される中長期ロードマップや技術マップ等に表示された作業工程・内容

図 5 技術マップ公開用 rev09.1 (公開用)

[illegible]

図 6 技術メニューデータベース案 (rev.H29)

トンネル、港湾、道路などの建設)にある程度深くかかわることで初めて身に着くものであり、新卒段階から廃炉事業にのみ関わり続けることは、長期的に有用な廃炉人材を育成することには、必ずしもならない。

- ・学会という組織で人材育成に取り組むことは、全国レベルで多くの人材発掘につながることであり、単一の大学高専から数名しか廃炉人材を生み出せない恐れ(上述したように多くの就職分野がある)に比べ、大きなメリットである。特に学会の構成員には若手技術者も多数おり、そこからも将来の廃炉を担うエンジニアが育つであろう。

以上の考え方に基づき、廃炉関連技術研究を大学の修士論文テーマに組み入れているほかに、大学と地盤工学会で、廃炉地盤工学の講義や講習会を実施している。また、地元福島県の行政担当者や、広島と長崎の原爆被爆者の治療から福島原発事故の被災者の治療にまで従事してきた専門医師の方々を招聘し、お話を伺う機会も設けてきた。これは、単に建設や原子力工学の「技術」的な立場からだけでは、複雑な廃炉問題は解決しがたい、社会的・医学的な知識も備えることが総合的な廃炉技術者にとって必要な要件である、という考え方に基づくものである。

大学において一学期間の廃炉地盤工学講義を実現するにあたっては、表1の4つの学問単元の優先順位を検討した。その結論が表2である。この中で、末尾の地盤施工学を最重要と考えている。その理由は、施工学が現場での経験に強く依存する学問であって、従来の大学の講義では取り上げられるケース少なかったこと、事故原発の廃炉という前

例のない事業では、既成概念にとらわれず現場の状況に応じて対応できる人材が必要であること、である。そして今後実際に開講される講義の内容は、表3のとおりである。この枠組みの中で、原子力の技術に関わってきたエンジニアが、原子力工学の基礎知識についても講義する。

表3 廃炉地盤工学としての講義カリキュラムの試作例

回数	単元タイトル	内容キーワード
第1回	講義概要説明、課題設定とブレインストーミング演習	廃炉地盤工学、シラバス、人材育成方針
第2回	放射線に関する基礎知識1	放射線の基礎理論と特性
第3回	放射線に関する基礎知識2	放射線計測技術、応用技術、放射線遮蔽
第4回	廃炉のための地盤工学(廃炉地盤工学)の全体概要	廃炉地盤工学、地盤力学、地盤環境学、地盤材料学、地盤施工学(特に基本的な部分:施工計画、施工技術、技術マップ構築)
第5回	廃炉のための地盤材料学	超重泥水、放射線遮蔽特性、遮水性能、配合設計、実施工
第6回	廃炉のための地盤環境学	地下水流動、流向・流速、土壌・地下水汚染、物質移流分散、原位置計測
第7回	廃炉のための廃棄物処分学	閉じ込め機能、遮蔽、処分シナリオ、廃棄物処分場設計
第8回	廃炉のための地盤施工学	廃炉の特殊性と類似性、要求性能・代用特性、デブリ取出し事例
第9回	中長期ロードマップ・戦略プランと技術マップ	廃炉までのシナリオ、戦略プラン、中長期ロードマップ、技術マップと地盤工学的技術の活用
第10回	地盤材料学の観点からの「超重泥水」技術開発	超重泥水、沈降型泥水の実演
第11回	地盤環境学の観点からの地下水制御対策の評価	事象研究、解析的検証と考察、地下水制御工、中間貯蔵設備への応用
第12回	廃炉廃棄物処分工学1	低レベル放射性廃棄物の埋設、ベントナイト混合土、締固め、施工計画、要求性能・代用特性
第13回	廃炉廃棄物処分工学2	インベントリ・性状、処分形態、安全評価、多重防護
第14回	原発事故と健康影響	原爆被災、チェルノブイリ、福島、原発事故、放射線健康リスク
第15回	学生発表・ブレインストーミング演習1	ブレインストーミング、学生間意見交換

さらに、地盤工学会に所属する全国の会員技術者を対象として、平成30年度から廃炉地盤工学講習会を開催する。

表2 各学問単元と廃炉地盤工学における取組優先度

学問単元	取組優先度	理由
地盤力学	小	学問的に先行し成熟しており、廃止措置が進展し、課題が明確になった時点から取組むことで対応可能と考えられる。
地盤環境学	中	現状の技術の進展を進めていくことで対応できる可能性が高い。原子力工学分野特有の放射性物質の地下水移行中の挙動評価などが比較的急がれている。
地盤材料学	中	現状でも、盛んに技術が進展しており、これを進めていくことで廃止措置に向けた課題に大きく貢献できる可能性が高い。
地盤施工学	大	経験工学的な側面が強く、学問としての普遍性という意味で現状のレベルは極めて低く、特に未経験な場面が連続する事故原発の廃止措置については対応できない可能性が高い。一方で、計画の具現化や新材料の適用には「施工」の概念が必須となるため、早急に取り組む必要がある。

これは、前年度まで講演会として実施していた行事だが、廃炉地盤工学の構成が具現化してきたのにもない、カリキュラムを作り、講習会に格上げた。その内容は、地盤材料学と地盤環境学の総論、超重泥水と材料配合・調合、施工から要求される材料性能、空間放射線と地盤環境・材料学、地下水環境の測定と課題、地下水環境予測と数値解析、質疑応答である。そして講師はいずれも廃炉地盤工学の実現最前線に立っている技術者である。

5 まとめ

この小文は、地盤工学会で現在進めている廃炉地盤工学事業について、その理念や目的、現状等を書き出したものである。活動途中の段階であるため、決定的なことは書きにくい、次のように内容をまとめることができよう。

- (1) 事故原発の廃炉事業は基本的には原子力工学の範疇に属するが、文部科学省の英知事業の理念が謳うように、多様な分野が協働して推進しなければならない。
- (2) 地盤工学が持っている地下掘削、ボーリング調査、地下水環境などの技術は、視点を変えると廃炉事業に応用が可能である。
- (3) 廃炉地盤工学という新たな学術分野を創生し、人材育成が始まっている。
- (4) 超重泥水の技術を開発し、汚染水漏洩の停止や放射能遮蔽に利用することを目指している。
- (5) 廃炉事業は大規模なプロジェクトであり、試験管レベルではなく大型の実事業規模で推進できる技術が必要である。

6 謝辞

本稿の内容は、地盤工学会の廃炉地盤工学委員会の活動成果であり、多彩な活動を展開している委員会メンバー各位にまず感謝する。本研究の一部は、文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」の採択課題「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の新技術開発と人材育成プログラム（地盤工学会）」の支援により得られたものである。また、地盤工学的基礎研究の一例である超重泥水の開発研究では、一般社団法人 NB 研究所、西武建設株式会社、株式会社ホーゲン、株式会社テルナイト、ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社、早稲田大学地盤工学研究室、特に吉川絵麻氏の多大なるご支援をいただいた。ここに感謝する。

参考文献

- [1] 阿部博志, 兼子信吾, 川崎大介, 鈴木茂和, 塚原剛彦, 渡邊保貴, 木藤啓子: 座談会「廃炉関連の人材育成には戦略的連携を 若手指導者, 学会の情報共有と発信に期待」. 日本原子力学会誌 **59**(7) pp.370-376 (2017).
- [2] 小峯秀雄, 後藤茂, 鈴木誠, 菱岡宗介, 渡邊保貴, 東畑郁生: 廃炉地盤工学の提唱とカリキュラムの試作.

土木学会論文集投稿中 (2018).

- [3] 吉川 絵麻, 小峯 秀雄, 後藤 茂, 吉村 貢, 鈴木 聡彦, 成島 誠一, 新井 靖典, 氏家 伸介, 佐古田 又規, 長江 泰史: 土質系材料の放射線遮蔽性能の定量評価. 土木学会論文集 C (地盤工学) **73**(4): pp.342-354 (2017).