

平成 30 年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業
英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

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
地盤工学的新技術開発と人材育成プログラム

成果報告書

平成 31 年 3 月

公益社団法人 地盤工学会

本報告書は、文部科学省の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業による委託業務として、公益社団法人地盤工学会が実施した平成 30 年度「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術開発と人材育成プログラム」の成果を取りまとめたものです。

目次

概略	vi
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 平成 30 年度計画	2-2
2.3 平成 30 年度の成果の目標及び業務の実施方法	2-3
2.3.1 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム	2-3
2.3.2 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価（再委託先：早稲田大学）	2-3
2.3.3 地下水環境等の解析・調査技術と予測技術の高度化（再委託先：千葉工業大学）	2-4
2.3.4 研究推進	2-4
3. 平成 30 年度の実施内容及び成果	3-1
3.1 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム	3-1
3.1.1 廃炉地盤工学の構築と廃炉プロセス技術シナリオの評価	3-1
3.1.2 廃炉地盤工学教育システムの構築	3-14
3.1.3 廃炉地盤工学に関する認知度の向上と技術の集約体制の構築	3-25
3.2 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価（再委託先：早稲田大学）	3-30
3.2.1 デブリ取出し補助及び構内除染廃棄物の一時仮置き施設のための超重泥水及び覆土材のガンマ線・中性子線遮蔽性能の一次データベース	3-30
3.2.2 超重泥水の充填施工性・安定性及び覆土材の保水性能の定量評価	3-35
3.2.3 覆土材の保水性能の定量評価	3-40
3.3 地下水環境等の解析・調査技術と予測技術の高度化（再委託先：千葉工業大学）	3-44
3.3.1 概要	3-44
3.3.2 室内土層試験による物質移行の測定方法の検討	3-44
3.3.3 実験井戸による現場試験	3-47
3.3.4 移流分散方程式の理論解と確認計算	3-53
3.4 研究推進	3-57
3.4.1 廃炉地盤工学委員会	3-57
3.4.2 コアメンバー会議及びワーキング（WG）について	3-59
3.4.3 関係機関協議	3-60
4. 結言	4-1

図一覧

図 1-1	各基盤研究で予想される成果の福島第一原子力発電所廃止措置への適用に関する概念図	1-2
図 1-2	福島第一原子力発電所の現状評価からデブリ取出し、最終的な廃止措置に至るまでの時間経過における個別基盤研究テーマの位置付けと連結性	1-3
図 3.1-1	業務実施体制（平成 30 年度）	3-1
図 3.1-2	廃止措置に寄与可能な地盤工学系技術	3-3
図 3.1-3	技術マップの基本構成	3-4
図 3.1-4	技術メニューDB rev.H30（抜粋）	3-5
図 3.1-5	基本的なシナリオ構成	3-6
図 3.1-6	【燃料デブリ取出し工法の実現性検討】で寄与可能な地盤工学系技術の一覧	3-7
図 3.1-7	【廃棄物対策】で寄与可能な地盤工学系技術の一覧	3-7
図 3.1-8	基本的なシナリオ構成（燃料デブリ取出し工法実現性検討）	3-8
図 3.1-9	処分シナリオと地盤工学系技術の適用性（その 1）	3-8
図 3.1-10	処分シナリオと地盤工学系技術の適用性（その 2）	3-9
図 3.1-11	処分シナリオと地盤工学系技術の適用性（その 3）	3-10
図 3.1-12	基本的なシナリオ構成（廃棄物対策分野）	3-10
図 3.1-13	処分シナリオと地盤工学系技術の適用性（その 4）	3-11
図 3.1-14	福島第一原子力発電所視察状況（その 1）	3-12
図 3.1-15	福島第一原子力発電所視察状況（その 2）	3-12
図 3.1-16	GER2018 の状況	3-13
図 3.1-17	第 8 回国際環境地盤工学会議の状況	3-13
図 3.1-18	検討・研究開発中の地盤工学系技術（地盤・地下水環境）	3-15
図 3.1-19	検討・研究開発中の地盤工学系技術（燃料デブリ取出し（補助））	3-15
図 3.1-20	検討・研究開発中の地盤工学系技術（施設解体・放射性廃棄物の処分①）	3-16
図 3.1-21	検討・研究開発中の地盤工学系技術（施設解体・放射性廃棄物の処分②）	3-16
図 3.1-22	検討・研究開発中の地盤工学系技術（施設解体・放射性廃棄物の処分③）	3-17
図 3.1-23	一時的原位置封じ込めにおいて活用可能な研究開発成果	3-21
図 3.1-24	廃炉地盤工学の教材 1（早稲田大学大学院／地盤工学特論 B：第 4 回）	3-23
図 3.1-25	廃炉地盤工学の教材 2（早稲田大学大学院／地盤工学特論 B：第 9 回）	3-23
図 3.1-26	特別セッション風景	3-25
図 3.1-27	講習会風景（10 月 19 日）	3-26
図 3.1-28	講習会風景（12 月 18 日）	3-27
図 3.1-29	廃炉地盤工学ホームページ	3-28
図 3.2-1	超重泥水のホウ素濃度と熱中性子線低減率の関係	3-30
図 3.2-2	ホウ素含有超重泥水の厚さと熱中性子線低減率の関係	3-30
図 3.2-3	供試体を線源寄りに設置した場合の放射線遮蔽実験の概略図	3-31
図 3.2-4	供試体を検出器寄りに設置した場合の放射線遮蔽実験の概略図	3-31
図 3.2-5	湿潤密度とガンマ線低減率の関係	3-32

図 3. 2-6	体積含水率と全中性子線低減率の関係	3-32
図 3. 2-7	体積含水率と速中性子線低減率の関係	3-32
図 3. 2-8	体積含水率と熱中性子線低減率の関係	3-32
図 3. 2-9	これまで実施された放射線遮蔽実験の位置関係（左）と 回転台を使用した 2 次元的な放射線分布・散乱成分の測定（中央・右）	3-33
図 3. 2-10	遮蔽体設置に伴うガンマ線分布の変化（左）と透過距離・湿潤密度との関係（右）	3-34
図 3. 2-11	遮蔽体設置に伴う各方向の中性子線線量分布の変化	3-34
図 3. 2-12	タクトイルセンサシートの外観と タクトイルセンサシートによる 土圧分布測定の様子・測定容器寸法	3-35
図 3. 2-13	容器充填過程における土圧分布の変化の様子	3-36
図 3. 2-14	容器充填 5 分後における土圧分布の様子	3-36
図 3. 2-15	泥水の粒子沈降に伴う泥水圧分布の変化の様子	3-37
図 3. 2-16	泥水の粒子沈降に伴う泥水圧の時間変化	3-37
図 3. 2-17	テクスチャーアナライザー	3-38
図 3. 2-18	貫入・引き抜き試験の概要図	3-38
図 3. 2-19	球状治具の貫入・引き抜き時間に伴う荷重の変化	3-39
図 3. 2-20	球状治具の貫入・引き抜き距離に伴う荷重の変化	3-39
図 3. 2-21	球状治具の貫入・引き抜き距離に伴う荷重の変化（比重 1.1 及び 1.8 の拡大図）	3-39
図 3. 2-22	材料の攪拌に伴う貫入・引き抜き抵抗の減少	3-39
図 3. 2-23	保水性試験装置の概略図	3-40
図 3. 2-24	各種土質材料の含水比とマトリックポテンシャルの関係	3-41
図 3. 2-25	水ポテンシャル測定装置	3-41
図 3. 2-26	含水比と化学ポテンシャルの関係	3-42
図 3. 3-1	室内土層試験装置	3-44
図 3. 3-2	試験孔配置図（室内土質試験）	3-44
図 3. 3-3	電気伝導率の経時変化	3-45
図 3. 3-4	解析モデル	3-46
図 3. 3-5	電気伝導率の経時変化（試験値と解析値）	3-46
図 3. 3-6	各孔におけるピーク時の濃度分布	3-47
図 3. 3-7	試験機の概要	3-47
図 3. 3-8	試験井戸 4 における経過時間ごとの各測定深度における温度変化	3-48
図 3. 3-9	試験井戸平面図	3-49
図 3. 3-10	試験孔配置図（現場試験）	3-49
図 3. 3-11	パッカー概要図（左：全体図 右：詳細図）	3-50
図 3. 3-12	電気伝導率の経時変化（条件①の場合）	3-50
図 3. 3-13	電気伝導率の経時変化（条件②の場合）	3-50
図 3. 3-14	解析モデル図の概要	3-51

図 3.3-15	試験と解析の経時変化の比較	3-52
図 3.3-16	異なる時間の濃度分布	3-55
図 3.3-17	x=10 m における時間濃度分布	3-55
図 3.4-1	第 1 回廃炉地盤工学委員会の様子	3-57
図 3.4-2	第 2 回廃炉地盤工学委員会の様子	3-58
図 3.4-3	第 3 回廃炉地盤工学委員会の様子	3-58
図 3.4-4	平成 30 年度成果報告会用制作ポスター	3-61

表一覧

表 2.1-1	本事業の全体計画 (5 カ年計画)	2-1
表 2.2-1	平成 30 年度の業務実施計画	2-2
表 3.1-1	廃炉地盤工学委員会構成メンバー (平成 30 年度)	3-2
表 3.1-2	地盤工学特論 B 講義内容一覧	3-22
表 3.1-3	廃炉地盤工学教育システムにおける取組み	3-24
表 3.1-4	廃炉地盤工学ホームページ更新コンテンツ一覧 (平成 30 年度)	3-28
表 3.2-1	クレーサンドの供試体作製条件	3-31
表 3.2-2	タクタイルセンサの仕様	3-36
表 3.2-3	テクスチャーアナライザーの仕様	3-38
表 3.2-4	使用した土質材料の基本物性	3-40
表 3.2-5	各種復興資材の塩化物含有量と溶出液の化学ポテンシャル測定結果	3-42
表 3.3-1	水位差別の測定結果	3-45
表 3.3-2	解析パラメータ	3-46
表 3.3-3	流向流速測定試験の結果	3-49
表 3.3-4	解析に用いた移流分散パラメータ	3-52
表 3.3-5	移流分散方程式の理論解について調査した国内書籍	3-53

略語一覧

- JGS _____ 公益財団法人 地盤工学会
(The Japanese Geotechnical Society)
- NDF _____ 原子力損害賠償・廃炉等支援機構
(Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation)
- IRID _____ 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
(International Research Institute for Nuclear Decommissioning)
- JAEA _____ 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
(Japan Atomic Energy Agency)
- CLADS _____ 廃炉国際共同センター
(Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science)
- OECD/NEA _____ 経済協力開発機構／原子力機関
(The Organisation for Economic Co-operation and Development／The Nuclear Energy Agency)
- NDEC _____ 次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス
(Conference for R&D Initiative on Nuclear Decommissioning Technology by the Next Generation)
- 1F _____ 福島第一原子力発電所
- TMI _____ スリー・マイル・アイランド原子力発電所 (Three Mile Island)
- PCV _____ 原子炉格納容器 (Primary Containment Vessel)
- RPV _____ 原子炉圧力容器 (Reactor Pressure Vessel)
- R/B _____ 原子炉建屋 (Reactor Building)
- S/C _____ 圧力抑制室 (Suppression Chamber)
- NP _____ NP (Non-Plastic)
土の液性限界・塑性限界試験 (JIS A 1205) において、定められた操作で液性限界もしくは塑性限界が求められないとき、塑性指数では液性限界もしくは塑性限界が求められないとき、または液性限界と塑性限界に優位な差がないときに記載。
- CPD _____ 技術者の継続教育または継続研鑽※ (Continuous Professional Development)
技術者個人の資質向上のための取組み・実績を登録する制度であり、土木・建設系の資格認定団体が実施。

※資格認定団体により表現は異なる。

概略

地盤工学は原子力事業を支援する技術の 1 つとして、地下水流動予測や各種地盤改良工法等を通じて、被災原子炉から発生する汚染水対策に寄与しているのみならず、廃炉に至る今後の作業でも地下掘削や放射性廃棄物処分において重要な役割を果たすことができる。

一方、地盤工学・土木工学分野の専門家・技術者の多くは、一般公共事業への寄与を主な目的として技術開発を行っており、必ずしも原子力工学分野に詳しくはないのも事実である。また、多くの土木工学系学科では、一般公共事業への寄与を念頭に置いた技術者教育が展開されているが、今後 40 年にも亘る福島第一原子力発電所の事故収束に寄与できる人材を育成するためには、従来型の地盤工学・土木技術者教育に加え、原子力工学分野の知見・教育事項を取入れた新しいカリキュラムの構築と実践が必要不可欠である。

このような背景及び実情の打開を目指し、本事業では「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 2018, 2018 年 10 月 2 日, 原子力損害賠償・廃炉等支援機構 (NDF)」及びそれ以前に公開された戦略プランに基づき、実効性の高い研究及び技術開発を行うと共に、それを支える次代の技術者を育成する教育プログラムの構築を狙いとして研究を推進している。

戦略プラン 2015 では「福島第一原子力発電所の廃炉作業は、事故に由来する通常の原子力発電所にはない放射性物質によるリスクを継続的に下げるとの取組みであり、当該戦略プランは中長期のリスク低減戦略の設計と言え、その策定にあたり、安全、確実、合理的、迅速、現場指向という 5 つの基本的考え方を定め、リスク低減の優先順位付けをして今後の取組みをまとめている」とされている。また、同プランでは優先順位により 3 つに分類された主要なリスク源のうち、可及的速やかに対処すべき「汚染水等」については既に対策が進められているという認識の下、周到な準備を必要とし、数多くの課題にチャレンジしなければならない「燃料デブリ取出し」と「長期的な措置を要する廃棄物対策」の検討を実施するとされている。

そこで、本事業では「燃料デブリ取出し」及び「長期的な措置を要する廃棄物対策」に焦点を当てると共に、福島第一原子力発電所でこれらの作業を実施するにあたり、安全確保の観点から必要不可欠となる工事環境や工事に伴う周辺環境への影響評価も取上げ、このような狙いを達成すべく、以下に示す (i) ~ (iii) を個別基盤研究テーマとして設定し、研究を進めている。

- (i) 現状から廃止措置までの長期間の地下水環境・作業環境の状況調査と将来予測
 - ・高精度かつ広域の地下水状況の把握
(放射性物質濃度の地下分布の高精度測定と将来予測技術の開発)
 - ・高精度かつ長期に亘る将来に適用可能な地下水調査・予測技術の構築
(構内における工事の安全性や資材搬入経路の選定、廃止措置までのモニタリング等に活用)
- (ii) 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
 - ・土や地盤が有する高い放射線遮蔽性能を活用した燃料デブリ取出し方法の実効性評価
 - ・数多くの実績を有する掘削技術を援用したデブリ処理メニューの提示
(構内における工事の安全性や資材搬入経路の選定、廃止措置までのモニタリング等に活用)
- (iii) 福島第一原子力発電所構内の除染廃棄物処分と原子炉建屋デコミッショニングに関する実

現可能な技術の開発

- ・地盤工学分野で開発された放射性廃棄物の処分技術を起点とした実現可能なデコミッションング技術の開発と処分シナリオの構築

また、人材育成の面においては、地盤工学会内に専門の学術研究委員会を組織し、福島第一原子力発電所の廃止措置に寄与可能な地盤工学技術の体系化を進めると共に、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を目的としたプログラム「廃炉地盤工学」の構築を目指している。

以下に、5ヵ年計画の4年目である本年度業務成果の概略を述べる。

(1) 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム

(地盤工学会／個別基盤研究テーマiii及び成果総括)

1) 廃炉地盤工学の構築と廃炉プロセス技術シナリオの評価

- ・地盤工学会における広い分野の人材を集結した「福島第一原子力発電所廃止措置に向けた地盤工学的新技术と人材育成に関する検討委員会、略称；廃炉地盤工学委員会」において、廃炉地盤工学の内容の充実を図るために再委託先等で新たに開発された技術の組込み等を検討し、これまでの活動で作成した技術マップを拡充すると共に、NDF等から提示される廃炉シナリオに対する適用性の検討を行った。
- ・NDF及びIRIDや当プログラム採択機関との協調強化のため、データベースの作成や機関担当者との打合せ等を通じて、廃炉地盤工学技術（地盤工学的技術）の見える化を更に進めた。
- ・検討の深化のため、福島第一原子力発電所の視察のほか、関連する学術研究機関や企業等との協議の機会を設け、有用な情報の収集に努めた。更に、廃炉や放射性廃棄物処分等に携わる海外の関連機関からも情報を収集し、処分シナリオの検討を行った。

2) 廃炉地盤工学教育システムの構築

- ・昨年度試構築したシラバスを基に教材（教科書）の試作を進めると共に、内容の向上を図った。更に、試作した教材を基に早稲田大学等で廃炉地盤工学の授業を実施した。また、地盤工学会組織を通じた他教育機関への展開や授業での繰返し使用の可能性を考慮し、上記授業のビデオ化について実施方法等を検討した。
- ・初年度より実施している講習会については、受講者にG-CPD（継続的専門能力開発（CPD）の地盤工学会版）を付与することで、主に若手技術者の専門能力の継続的な維持・向上にも努めた。

3) 廃炉地盤工学に関する認知度の向上と技術の集約体制の構築

- ・地盤工学研究発表会（高松開催）において廃炉地盤工学に関する特別セッション等を開催し、全国レベルでの認知度向上を図ると共に、このような場を活用して広く学会会員からの廃炉地盤工学に関する意見や技術情報の集約に努めた。また、当プログラムホームページの内容を拡充し、学会会員や一般社会に対し業務内容や成果に関する情報を発信した。
- ・更に土木学会等の関連学会の大会に参加し、当プロジェクトの活動内容を発信すると共に関連情報を収集した。なお、収集した情報は廃炉地盤工学委員会にフィードバックし、共有化することで、検討の深化を図った。

(2) 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価

(再委託先：早稲田大学／個別基盤研究テーマ ii・iii)

- ・デブリ取出し補助のためのガンマ線と中性子線両方の遮蔽性能を有する超重泥水や、構内除染廃棄物の一時仮置き施設のためのガンマ線遮蔽性能と遮水性能の両方を保有する覆土材の仕様設計に資するため、各材料仕様に応じて取得した放射線遮蔽データの一次データベースの拡張を行った。
- ・また、各材料仕様に応じた施工性を評価するため、平成 29 年度までに導入した超重泥水の充填施工性評価実験装置とタクトイルセンサシステムを活用すると共に平成 30 年度に導入するテクスチャーアナライザーでは詳細な超重泥水の充填施工性と安定性を、平成 29 年度までに導入した保水性試験装置及び水ポテンシャル測定装置では覆土材の保水性をそれぞれ定量測定し、一次データベースの作成を行った。
- ・上記の成果については各材料の仕様に応じて整理し、廃炉地盤工学委員会で進める廃炉プロセス技術シナリオを支援するための新技術メニューへの導入を行った。
- ・更に大学における卒業研究・修士研究・博士研究を通じて上記成果を得ることにより、人材育成を行った。

(3) 地下水環境等の解析・調査技術と予測技術の高度化

(再委託先：千葉工業大学／個別基盤研究テーマ i)

- ・長期間の地下水環境・作業環境状況を調査するための地下水流動評価技術の開発基盤として室内土層実験を実施し、地下水流動によって物質が移動する移流分散現象の測定方法を検証し、現場実験に展開するための課題をまとめた。
- ・また、現場での詳細な地下水流動を把握するため、平成 29 年度までに設置したボーリング孔を用いて、物質移動評価を対象とした現場実証試験を実施した。なお、同試験では、過年度の研究において同一層内で地下水流動特性が異なることが判明したことを受け、新たに水みち調査を実施した。
- ・また、サイト周辺の地下水環境変動予測技術を開発するため、サイト周辺の地下水流動の非定常解析を実施すると共に、基本的な物質移動に関して、有限要素法による移流分散解析結果と理論式に基づく計算結果とを比較することにより、解の検証を行った。
- ・更に大学における卒業研究・修士研究を通じて上記成果を得ることにより、教材・資料の作成及び人材育成を行った。

(4) 研究推進

- ・再委託先の研究成果等を取りまとめ、廃炉地盤工学委員会の幹事会において実効性の観点から議論を行い、より質の高い研究の推進に努めた。また研究代表者の下、各研究項目間における連携を密にすると共に、廃炉地盤工学委員会で交わされる幅広い意見を聴きつつ研究を進めた。更に「廃炉基盤研究プラットフォーム」等に積極的に参画すると共に、採択機関が主催する NDEC の運営にも取組んだ。

以降に次年度における見通しを述べる。

(1) 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラムでは、廃炉地盤工学の内容の充実を図るため、再委託先等で新たに開発された技術の組み込み等について検討し、これまでの活動で作成した技術マップを拡充するほか、技術マップの掲載技術並びに他分野における既存の地盤工学技術を集約し、NDF 等から提示される廃炉シナリオに対する適用性について検討する。また、NDF 及び IRID や当プログラム採択機関との更なる協調強化のため、技術マップに掲載した技術のデータベース化や機関担当者との打合せ等を通じ、廃炉地盤工学技術（地盤工学的技術）の見える化を進める。更に、昨年度に引き続き、早稲田大学で廃炉地盤工学の授業を実施し、学生の教育を行う。全国レベルでの廃炉地盤工学の実践を展開するために、この授業はビデオ化を進め、他教育機関でも使用可能な状態でのオンデマンド化を目指す。併せて、上記授業で使用した教科書・資料や廃炉地盤工学講習会の教材は地盤工学会を通じた全国展開として廃炉地盤工学ホームページ等での公開を行う。また、初年度より開催している講習会等を活用して、若手技術者の専門能力の継続的な維持・向上にも努める。

(2) 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価においては、デブリ取出し補助のためのガンマ線と中性子線両方の遮蔽性能を有する超重泥水や構内除染廃棄物の一時仮置き施設のためのガンマ線遮蔽性能と遮水性能の両方を保有する覆土材の仕様設計に資するため、各材料仕様に応じて取得した放射線遮蔽データを取りまとめ、データベースとして構築する。また、各材料仕様に応じた施工性と安定性を評価するため、これまで各種装置により測定・評価してきた施工性と安定性に関する物性値を取りまとめると共に、実際の工事でもこれらの観点から評価できるようにデータベース化を進める。更に、デブリ取出し完了までの期間を念頭に置き、超重泥水の状態モニタリングへの弾性波速度の活用可能性について、次年度導入する岩石速度測定装置を用いて調査する。なお、これらの成果は、廃炉地盤工学委員会で進める処分シナリオを支援するための新技術メニューとして導入する。

(3) 地下水環境等の解析・調査技術と予測技術の高度化では、長期間の地下水環境・作業環境状況を調査するための地下水流動評価技術の開発基盤として室内土層実験を実施すると共に、種々の試験より得られた測定値を比較し、現状把握と予測解析に展開するための課題をまとめる。また、現場での地下水流動を把握するため、ボーリング孔の一部を改良して、平成 29 年度に引き続き現場実証試験を実施する。なお、今年度は土層内の流路に着目して、地下水流動による物質移動の評価を対象とする。更に、サイト周辺の地下水環境変動予測技術を開発するため、広域の概略地下水流動解析結果を引き継ぎ、サイト周辺の詳細地下水流動解析のための水理モデルを改良すると共に、非定常解析の効率化について検討する。また、大学における卒業研究・修士研究を通じて上記成果を得ることにより、人材育成を行うほか、得られた成果については教材・資料として活用する。

(4) 研究推進においては、再委託先の研究成果等を取りまとめ、廃炉地盤工学委員会の幹事会において実効性の観点から議論を行い、より質の高い研究の推進に努める。また、研究代表者の下、各研究項目間における連携を密にすると共に、廃炉地盤工学委員会等で得られる幅広い意見を踏まえつつ研究を進める。更に、「廃炉基盤研究プラットフォーム」等に積極的に参画すると共に、採択機関が主催する NDEC の運営にも取り組む。

1. はじめに

地盤工学は原子力事業を支援する技術の1つとして、地下水流動予測や各種地盤改良工法等を通じて、被災原子炉から発生する汚染水対策に寄与しているのみならず、廃炉に至る今後の作業でも地下掘削や放射性廃棄物処分において重要な役割を果たすことができる。一方で、地盤工学・土木工学分野の専門家・技術者の多くは、一般公共事業への寄与を主な目的として技術開発を行っているため、必ずしも原子力工学分野に詳しくはないのも事実である。そのため、福島第一原子力発電所の燃料デブリ取出しから廃止措置に貢献できる基本的技術を保有しているにもかかわらず、原子力工学分野の求めている事項を認識していないが故に、直接的な寄与ができていないのが実情と考えられる。また、土木工学系学科の多くでは、一般公共事業への寄与を念頭に置いた技術者教育が展開されているが、今後40年にも亘る福島第一原子力発電所の事故収束に寄与できる人材を育成するためには、従来型の地盤工学・土木技術者教育に加え、原子力工学分野の知見・教育事項を取入れた新しいカリキュラムの構築と実践が必要不可欠である。具体的には、20世紀に地盤工学・土木工学が多大な貢献を果たしてきた原子力発電所の建設技術に加えて、立地や放射性廃棄物の処分、解体・撤去等、廃止措置に至る過程を一貫して担うことのできる教育プログラムの構築と実践である。これにより、廃止措置において、地盤工学・土木工学の観点から寄与・貢献できる技術産業を創出し、若者が将来の職業として魅力を感じる産業に育成することで、東京電力福島第一廃炉推進カンパニー等への人材輩出及び実効的な技術支援が可能になるものとする。

このような背景及び実情の打開を目指し、本事業では「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2018, 2018年10月2日, 原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF)」及びそれ以前に公開された戦略プランに基づき、実効性の高い研究及び技術開発を行うと共に、それを支える次代の技術者を育成する教育プログラムの構築を狙いとして研究を推進している。

戦略プラン2015では「福島第一原子力発電所の廃炉作業は、事故に由来する通常の原子力発電所にはない放射性物質によるリスクを継続的に下げるとの取組みであり、当該戦略プランは中長期のリスク低減戦略の設計と言え、その策定にあたり、安全、確実、合理的、迅速、現場指向という5つの基本的考え方を定め、リスク低減の優先順位付けをして今後の取組みをまとめている」とされている。また、同プランでは優先順位により3つに分類された主要なリスク源のうち、可及的速やかに対処すべき「汚染水等」については既に対策が進められているという認識の下、周到な準備を必要とし、数多くの課題にチャレンジしなければならない「燃料デブリ取出し」と「長期的な措置を要する廃棄物対策」の検討を実施するとされている。更に、戦略プラン2018では、廃炉に向けた技術戦略として「3.1 燃料デブリ取出し」、「3.2 廃棄物対策」、「3.3 汚染水対策」、「3.4 使用済み燃料プールからの燃料取出し」という各節が設けられ、取組み全体を俯瞰した中長期的な視点からの方向性が提示されたことから、本事業が着目し検討してきた事項の重要性は、より明らかとなってきている。

そこで、本事業では引き続き「燃料デブリ取出し」及び「長期的な措置を要する廃棄物対策」に焦点を当てると共に、福島第一原子力発電所でこれらの作業を実施するにあたり、安全確保の観点から必要不可欠となる工事環境や工事に伴う周辺環境への影響評価も取上げ、このような狙いを達成すべく、以下に示す(i)～(iii)を個別研究テーマとして設定し、研究を進めている。

- テーマ(i)：現状から廃止措置までの長期間の地下水環境・作業環境の状況調査と将来予測
- テーマ(ii)：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
- テーマ(iii)：福島第一原子力発電所構内の除染廃棄物処分と原子炉建屋デコミッションに
関する実現可能な技術の開発

図 1-1 に本研究課題の基盤研究テーマとそれらの相関を模式図として示す。また、図 1-2 には福島第一原子力発電所の現状評価からデブリ取出し、最終的な廃止措置に至るまでの時間経過における個別基盤研究テーマの位置付けと連結性を模式図として示す。

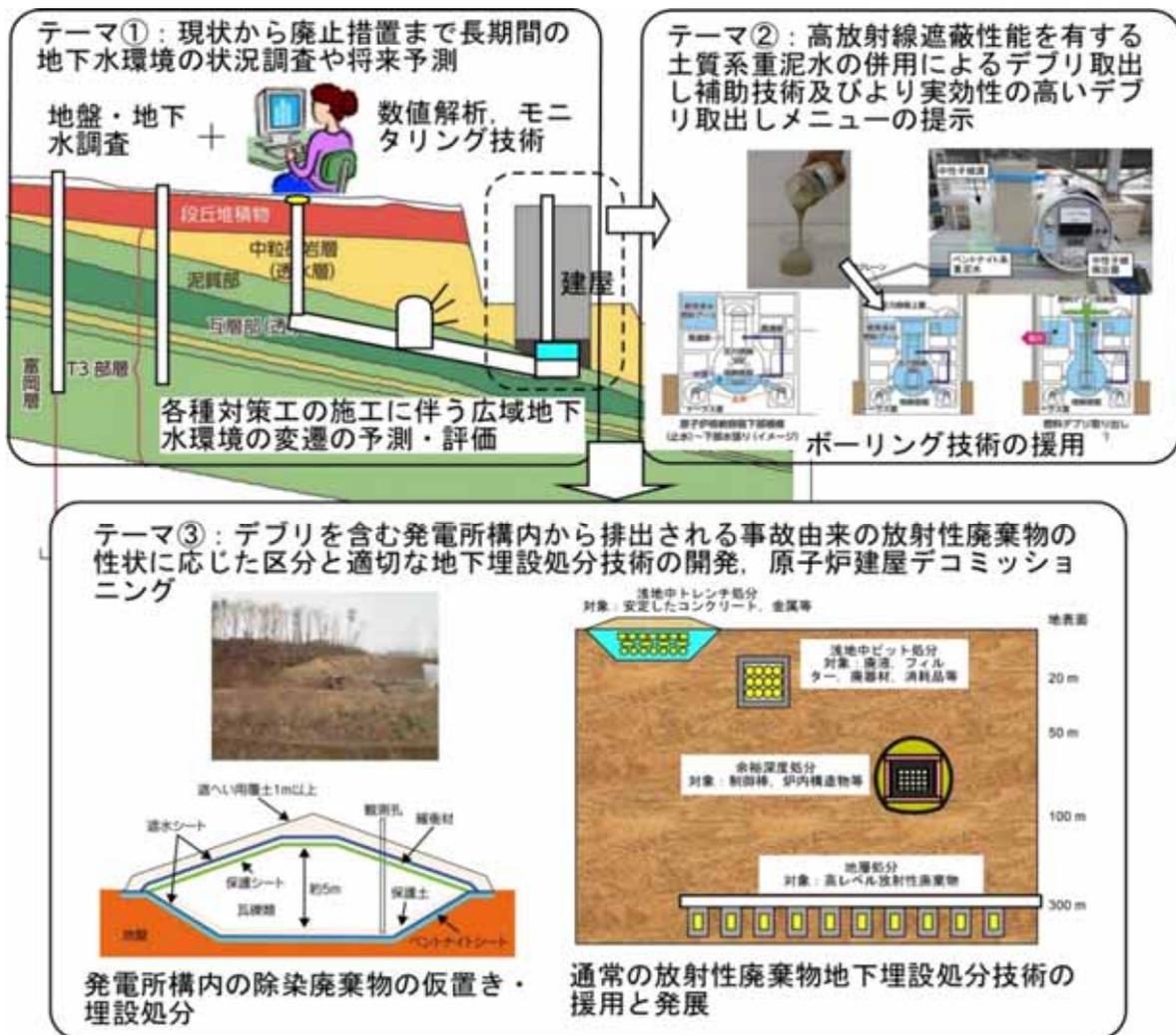


図 1-1 各基盤研究で予想される成果の福島第一原子力発電所廃止措置への適用に関する概念図

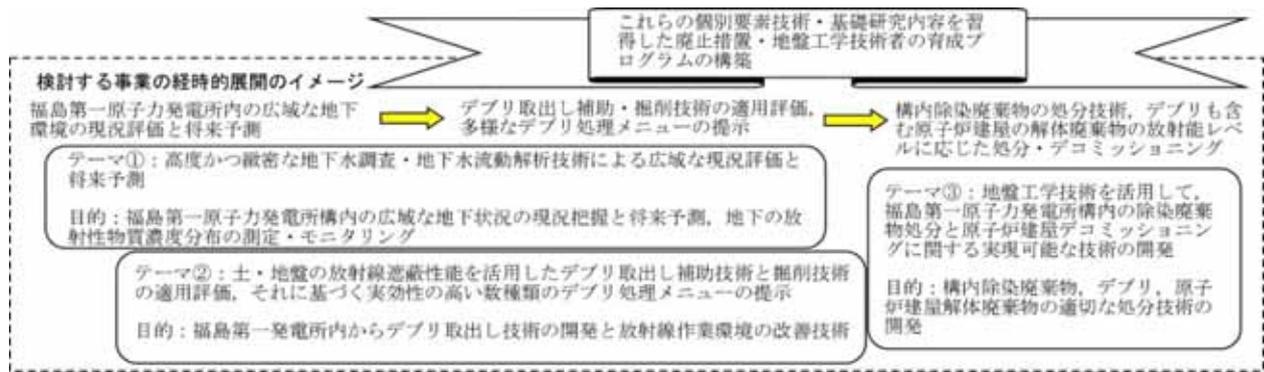


図 1-2 福島第一原子力発電所の現状評価からデブリ取出し、最終的な廃止措置に至るまでの時間経過における個別基盤研究テーマの位置付けと連結性

以下に、本研究における実施内容の具体を個別基盤研究テーマごとに取りまとめると共に、地盤工学会としての狙い・方針を述べる。

「テーマ(i)：現状から廃止措置までの長期間の地下水環境・作業環境の状況調査と将来予測」

高精度かつ広域な地下水状況の把握、特に放射性物質濃度の地下分布の高精度測定と将来予測技術を開発する。また、福島第一原子力発電所構内で行われる工事の安全性や資材搬入経路選定等に活用するため、極めて高精度かつ長期将来に適用可能な地下水調査・予測技術を構築する。更に開発した技術は廃止措置までの地下水モニタリングにも応用する。

「テーマ(ii)：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」

土・地盤の持つ高い放射線遮蔽性能を活用しながら、炉心溶融により格納容器内に残置されている燃料デブリを取出す方法の実効性評価と非常に数多くの実績のある掘削技術を援用した燃料デブリ処理メニューの提示を行う。

「テーマ(iii)：福島第一原子力発電所構内の除染廃棄物処分と原子炉建屋デコミッショニングに関する実現可能な技術の開発」

地盤工学分野で開発された放射性廃棄物処分技術を起点に、実現可能なデコミッショニング技術の開発と処分シナリオの構築を行う。これは、未解決の課題であるデブリ取出しに向けた発電所構内で進められている除染工事で発生する廃棄物の処理・処分、及び取出される燃料デブリや解体される原子炉建屋の処分におけるデコミッショニング技術の開発を行うものである。

以上の個別基盤研究に対して、地盤工学会では日本全国に及ぶネットワークを活用して、広い分野の英知を結集した専門の学術研究委員会を学会内に設置し、各テーマの研究開発成果を議論し、より良い研究成果となるよう導く。

また、廃止措置に寄与可能な地盤工学技術を個別基盤研究で開発した技術も含めて体系化し、原子力技術者と協働できるような新しい地盤工学技術者を育成するプログラム「廃炉地盤工学」を構築する。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本事業は、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、高放射線環境下での作業等、原子力分野特有の条件を地盤工学分野の技術と融合し、現状から廃炉までの時間軸を考慮した個別基盤研究テーマ i～iii の技術開発を進めると共に、これら廃止措置に寄与可能な地盤工学技術を体系化し、原子力技術者と協働できるような新しい地盤工学技術者を育成するプログラム「廃炉地盤工学」を構築する。

本事業の全体計画（5 ヶ年計画）を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 本事業の全体計画（5 ヶ年計画）

研究項目	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	平成 31 年度
(1) 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム (地盤工学会：テーマ*iii 及び成果総括)					
① 廃炉地盤工学の構築と廃炉プロセス技術 シナリオの評価		←			→
② 廃炉地盤工学教育システムの構築		←			→
③ 廃炉地盤工学に関する認知度の向上と技術 の集約体制の構築		←			→
(2) 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能 (早稲田大学：テーマ*ii・iii)		←			→
(3) 地下水環境等の解析・調査技術と 予測技術の高度化 (千葉工業大学：テーマ*i)		←			→
(4) 研究推進		←			→

*個別基盤研究テーマ

2.3 平成30年度の成果の目標及び業務の実施方法

本節では、本年度成果目標及び実施方法の具体について、作業項目ごとに整理して示す。

2.3.1 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム

(1) 廃炉地盤工学の構築と廃炉プロセス技術シナリオの評価

地盤工学会における広い分野の人材を集結した「福島第一原子力発電所廃止措置に向けた地盤工学的新技术と人材育成に関する検討委員会、略称；廃炉地盤工学委員会」において、廃炉地盤工学の内容の充実を図るために再委託先等で新たに開発された技術の組み込み等を検討し、これまでの活動で作成した技術マップを拡充すると共に、NDF等から提示される廃炉シナリオに対する適用性の検討を行う。また、NDF及びIRIDや当プログラム採択機関との協調強化のため、データベースの作成や機関担当者との打合せ等を通じて、廃炉地盤工学技術（地盤工学的技術）の見える化を更に進める。

検討の深化のため、福島第一原子力発電所の視察のほか、関連する学術研究機関や企業等との協議の機会を設け、有用な情報の収集に努める。更に、廃炉や放射性廃棄物処分等に携わる海外の関連機関からも情報を収集し、処分シナリオの検討を行う。

(2) 廃炉地盤工学教育システムの構築

昨年度試構築したシラバスを基に教材（教科書）の試作を進めると共に、内容の向上を図る。更に、試作した教材を基に早稲田大学等で廃炉地盤工学の授業を実施する。また、地盤工学会組織を通じた他教育機関への展開や授業での繰返し使用の可能性を考慮し、上記授業のビデオ化について実施方法等を検討する。なお、初年度より実施している講習会については、受講者にG-CPD（継続的専門能力開発（CPD）の地盤工学会版）を付与することで、主に若手技術者の専門能力の継続的な維持・向上にも努める。

(3) 廃炉地盤工学に関する認知度の向上と技術の集約体制の構築

地盤工学研究発表会（高松開催）において廃炉地盤工学に関する特別セッション等を開催し、全国レベルでの認知度向上を図ると共に、このような場を活用して広く学会会員からの廃炉地盤工学に関する意見や技術情報の集約に努める。また、当プログラムホームページの内容を拡充し、学会会員や一般社会に対し業務内容や成果に関する情報を発信する。更に土木学会等の関連学会の大会に参加し、当プロジェクトの活動内容を発信すると共に関連情報を収集する。なお、収集した情報は廃炉地盤工学委員会にフィードバックし、共有することで、検討の深化を図る。

2.3.2 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価（再委託先：早稲田大学）

テーマ(ii)や(iii)に関して、デブリ取出し補助のためのガンマ線と中性子線両方の遮蔽性能を有する超重泥水や、構内除染廃棄物の一時仮置き施設のためのガンマ線遮蔽性能と遮水性能の両方を保有する覆土材の仕様設計に資するため、各材料仕様に応じて取得した放射線遮蔽データの一次データベースの拡張を行う。また、各材料仕様に応じた施工性を評価するため、平成29年度までに導入した超重泥水の充填施工性評価実験装置とタクティルセンサシ

システムを活用すると共に平成 30 年度に導入するテクスチャーアナライザーでは詳細な超重泥水の充填施工性と安定性を、平成 29 年度までに導入した保水性試験装置及び水ポテンシャル測定装置では覆土材の保水性をそれぞれ定量測定し、一次データベースの作成を行う。上記の成果については各材料の仕様に応じて整理し、廃炉地盤工学委員会で進める廃炉プロセス技術シナリオを支援するための新技術メニューへの導入を行う。更に大学における卒業研究・修士研究・博士研究を通じて上記成果を得ることにより、人材育成を行う。

2.3.3 地下水環境等の解析・調査技術と予測技術の高度化（再委託先：千葉工業大学）

テーマ(i)に関して、長期間の地下水環境・作業環境状況を調査するための地下水流動評価技術の開発基盤として室内土層実験を実施し、地下水流動によって物質が移動する移流分散現象の測定方法を検証し、現場実験に展開するための課題をまとめる。また、現場での詳細な地下水流動を把握するため、平成 29 年度までに設置したボーリング孔を用いて、物質移動評価を対象とした現場実証試験を実施する。なお、同試験では、過年度の研究において同一層内で地下水流動特性が異なることが判明したことを受け、新たに水みち調査を実施する。また、サイト周辺の地下水環境変動予測技術を開発するため、サイト周辺の地下水流動の非定常解析を実施すると共に、基本的な物質移動に関して、有限要素法による移流分散解析結果と理論式に基づく計算結果とを比較することにより、解の検証を行う。

更に大学における卒業研究・修士研究を通じて上記成果を得ることにより、教材・資料の作成及び人材育成を行う。

2.3.4 研究推進

再委託先の研究成果等を取りまとめ、廃炉地盤工学委員会の幹事会において実効性の観点から議論を行い、より質の高い研究の推進に努める。また研究代表者の下、各研究項目間における連携を密にすると共に、廃炉地盤工学委員会で交わされる幅広い意見を聴きつつ研究を進める。更に「廃炉基盤研究プラットフォーム」等に積極的に参画すると共に、採択機関が主催する NDEC の運営にも取り組む。

3. 平成 30 年度の実施内容及び成果

3.1 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム

3.1.1 廃炉地盤工学の構築と廃炉プロセス技術シナリオの評価

(1) 研究実施体制

平成 29 年度に引き続き、地盤工学会に設けた「福島第一原子力発電所廃止措置に向けた地盤工学的新技术と人材育成に関する検討委員会」（以下「廃炉地盤工学委員会」と記す。）において、廃炉プロセスや学問単元ごとの地盤系技術の位置付け、新技术の発掘及びその実現性について検討を行うことにより、廃炉地盤工学の内容の充実を図った。なお、平成 30 年度は当該委員会活動の更なる拡充を図るため、新規委員を補充し、表 3.1-1 に示すメンバー構成とした。

図 3.1-1 に本研究の実施体制を示す。

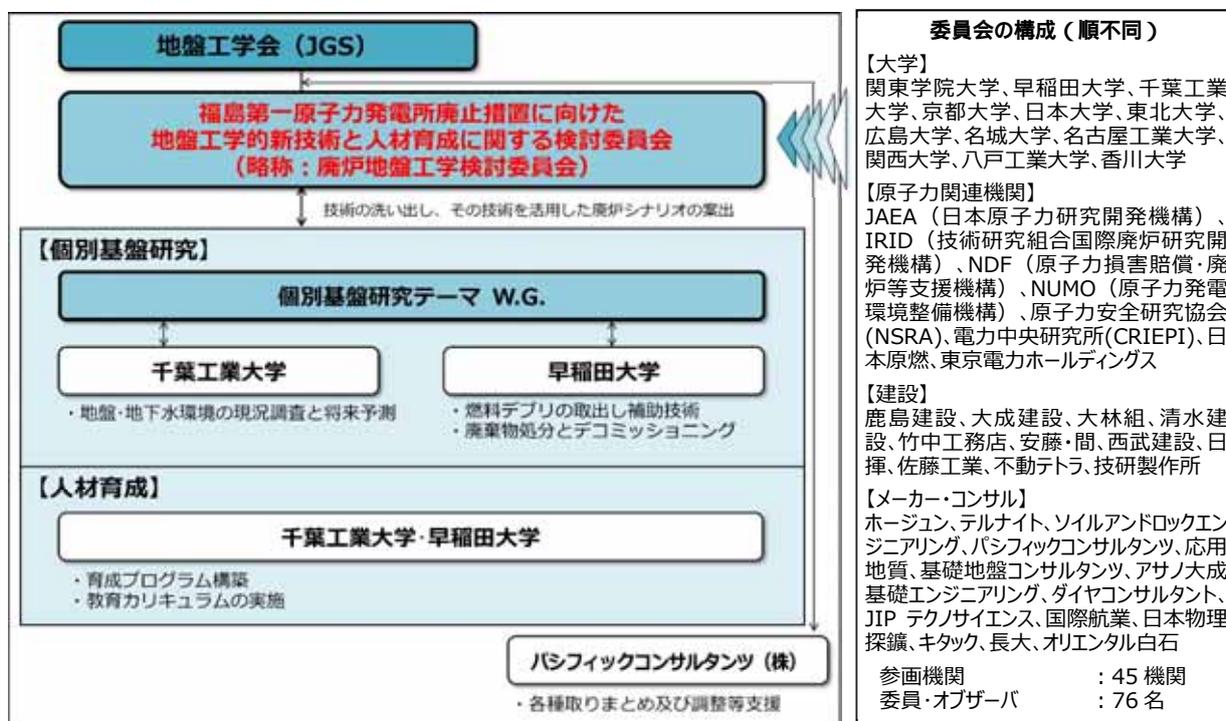


図 3.1-1 業務実施体制（平成 30 年度）

本年度は、廃炉地盤工学委員会を計 3 回（平成 30 年 6 月 21 日、10 月 22 日、平成 31 年 3 月 12 日）開催し、プログラム推進方向等の議論、放射線と健康被害、及び福島県の汚染土壌処分等の情報共有を実施した。また、委員会の運営方法を協議するため、委員長・座長・幹事等で構成されるコアメンバー会議（幹事会）を 1.5 ヶ月に 1 回定期的に開催した。これらに加え、個別基盤研究テーマワーキンググループ（以下、WG と記す。）として、地盤工学会主導による廃炉地盤工学のための地盤施工学 WG、早稲田大学主導による地盤材料学 WG、千葉工業大学主導による地盤環境 WG における活動を継続して実施した。

表 3.1-1 廃炉地盤工学委員会構成メンバー（平成 30 年度）

会務	氏名	所属	会務	氏名	所属
1 委員長	東畑 郁生	関東学院大学	39 委員	塩月 正雄	(国研)日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター
2 副委員長	鈴木 誠	千葉工業大学 創造工学部 都市環境工学科	40 委員	嘉門 雅史	京都大学名誉教授
3 座長	小峯 秀雄	早稲田大学 理工学術院 創造理工学部 社会環境工学科	41 委員	張 鋒	名古屋工業大学 大学院工学研究科 地盤工学研究室
4 幹事長	後藤 茂	地盤工学会/早稲田大学 理工学術院総合研究所	42 委員	小高 猛司	名城大学 理工学部 社会基盤デザイン工学科
5 幹事	高尾 肇	日揮(株) インフラ統括本部 インフラプロジェクト本部 国内原子力プロジェクト部 原子力ソリューショングループ	43 委員	土田 孝	広島大学 大学院工学研究科 地盤工学研究室
6 幹事	渡邊 保貴	(一財)電力中央研究所 地球工学研究所 バックエンド研究センター	44 委員	半井 健一郎	広島大学 大学院工学研究科 土木構造工学研究室
7 幹事	斉藤 泰久	パシフィックコンサルタンツ(株) 事業強化推進部 技術研究センター	45 委員	木村 育正	(株) 技研製作所 工法事業部
8 幹事	菱岡 宗介	パシフィックコンサルタンツ(株) 国土基盤事業本部 地盤技術部 地盤環境マネジメント室	46 委員	進士 喜美	日本原燃(株) 埋設事業部 開発設計部
9 幹事	成島 誠一	西武建設(株) 環境エンジニアリング部	47 委員	氏家 伸介	(株)ホーチュン 応用粘土科学研究所
10 幹事	山田 淳夫	(株)安藤・間 技術本部 原子力部	48 委員	後藤 政昭	ソイルアンドロックエンジニアリング(株)
11 幹事	竹内 真司	日本大学 文理学部 地球科学科	49 委員	重富 正幸	ソイルアンドロックエンジニアリング(株)
12 委員	末岡 徹	(株)キタック	50 委員	須佐見 朱加	佐藤工業(株) 技術研究所 土木研究部
13 委員	浅岡 顕	公益財団法人 地震予知総合研究振興会	51 委員	原田 健二	(株)不動テトラ 地盤事業本部 技術部
14 委員	日下部 治	国際応入学会	52 委員	河井 正	東北大学 工学研究科 土木工学専攻
15 委員	三村 衛	京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 ジオマネジメント工学講座	53 委員	片山 啓	(株)長大 海外事業本部 海外事業部海外技術1部
16 委員	勝見 武	京都大学大学院 地球環境学堂	54 委員	内海 秀幸	千葉工業大学 工学部 建築都市環境学科
17 委員	河西 基	(株)アサノ大成基礎エンジニアリング 資源エネルギー事業部	55 委員	千々松 正和	(株)安藤・間 技術本部 原子力部
18 委員	黒木 亮一郎	(独)日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 企画調整室	56 委員	利藤 勇男	応用地質(株) 技術本部
19 委員	藤崎 淳	原子力発電環境整備機構(NUMO) 技術部 性能評価技術グループ	57 委員	平山 利晶	国際航業(株)
20 委員	新貝 文昭	パシフィックコンサルタンツ(株) 北海道支社 国土基盤事業部	58 委員	竹原 和夫	JIPテクノサイエンス(株) 解析ソリューション事業部 東京技術営業部 技術課
21 委員	田中 耕一	鹿島建設(株) 土木設計本部 地盤基礎設計部	59 委員	熊谷 浩二	八戸工業大学
22 委員	江崎 太一	鹿島建設(株) 土木設計本部 地下空間設計部 原子力環境Gr	60 委員	吉田 秀典	香川大学 安全システム建設工学科
23 委員	瀬尾 昭治	鹿島建設(株) 技術研究所 岩盤・地下水グループ	61 委員	井上 誠	(有)地球情報・技術研究所
24 委員	須山 泰宏	鹿島建設(株) 原子力部 企画室	62 委員	青山 翔吾	基礎地盤コンサルタンツ(株) 技術本部 地盤岩盤解析室
25 委員	井尻 裕二	大成建設(株) 原子力本部 原子力技術第三部	63 委員	内田 篤貴	日本物理探検(株) 企画本部
26 委員	長峰 春夫	大成建設(株) 原子力本部 原子力技術第三部	64 委員	長江 泰史	(株)テルナイト
27 委員	堀越 研一	大成建設(株) 技術センター 技術企画部 企画室	65 委員	加茂 由紀彦	八千代エンジニアリング(株) 総合事業本部 地質・地盤部技術第2課
28 委員	奥野 哲夫	清水建設(株) 技術研究所	66 委員	田岸 宏孝	(株)アサノ大成基礎エンジニアリング 原子力バックエンド事業部
29 委員	土 宏之	清水建設(株) 土木事業本部 土木技術本部 バックエンド技術部	67 委員	阿部 慎太郎	オリエンタル白石(株) 東京支店
30 委員	樋口 義弘	清水建設(株) 土木事業本部 土木技術本部 バックエンド技術部	68 オブザーバー	末広 俊夫	東京電力ホールディングス(株) 経営技術戦略研究所 土木・建築エンジニアリングセンター
31 委員	山本 修一	(株)大林組 低レベル放射性廃棄物処分プロジェクト	69 オブザーバー	小野 文彦	東京電力ホールディングス(株) 福島第一廃炉推進カンパニー プロジェクト計画部 廃棄物対策グループ
32 委員	深谷 正明	(株)大林組 原子力本部 原子力環境技術部	70 オブザーバー	山内 文樹	原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF) 技術グループ
33 委員	松田 隆	(株)大林組 技術本部	71 オブザーバー	今村 功	技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID) 開発計画部 企画・管理チーム
34 委員	渡邊 康司	(株)大林組 東京本社 技術本部 技術研究所 地盤技術研究部	72 オブザーバー	松元 慎一郎	技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID) 開発計画部
35 委員	山本 彰	(株)大林組 東京本社技術本部 技術研究所	73 オブザーバー	高守 謙郎	技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID) 研究管理部
36 委員	下河内 隆文	(株)竹中工務店 原子力火力本部 計画推進1グループ	74 オブザーバー	藤崎 三郎	(公財)原子力安全研究協会 研究支援部
37 委員	菱谷 智幸	(株)ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業本部 地盤環境事業部	75 オブザーバー	芦田 敬	(国研)日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 廃炉国際共同研究センター 廃棄物処理処分ディビジョン
38 委員	西本 壮志	(一財)電力中央研究所 地球工学研究所 バックエンド研究センター / 原子力リスク研究センター 自然外部事象研究チーム	76 オブザーバー	茶谷 恵治	(国研)日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 廃炉国際共同研究センター

(2) 廃炉地盤工学の構築

廃炉地盤工学とは、図 3.1-2 に示すような原子力発電所の廃止措置の各段階で寄与可能な様々な地盤工学系技術の位置付け（適用可能性）を明確化し、新技術の創出や技術の高度化を促進すると共に、廃炉事業のための人材育成を主目的としたものである。

これら地盤工学会が考える（1）汚染水・地下水環境から（2）デブリ取出しを経て（3）施設解体・廃棄物処理処分に至る時系列な流れと中長期ロードマップや戦略プランから導かれたシナリオを対比することで、これまでに技術マップとして取りまとめた廃炉に寄与可能と考えられる地盤工学関連技術がどの作業項目において適用・貢献可能かを廃炉事業に携わる方々に、より分かり易く提供できるものと考えられる。

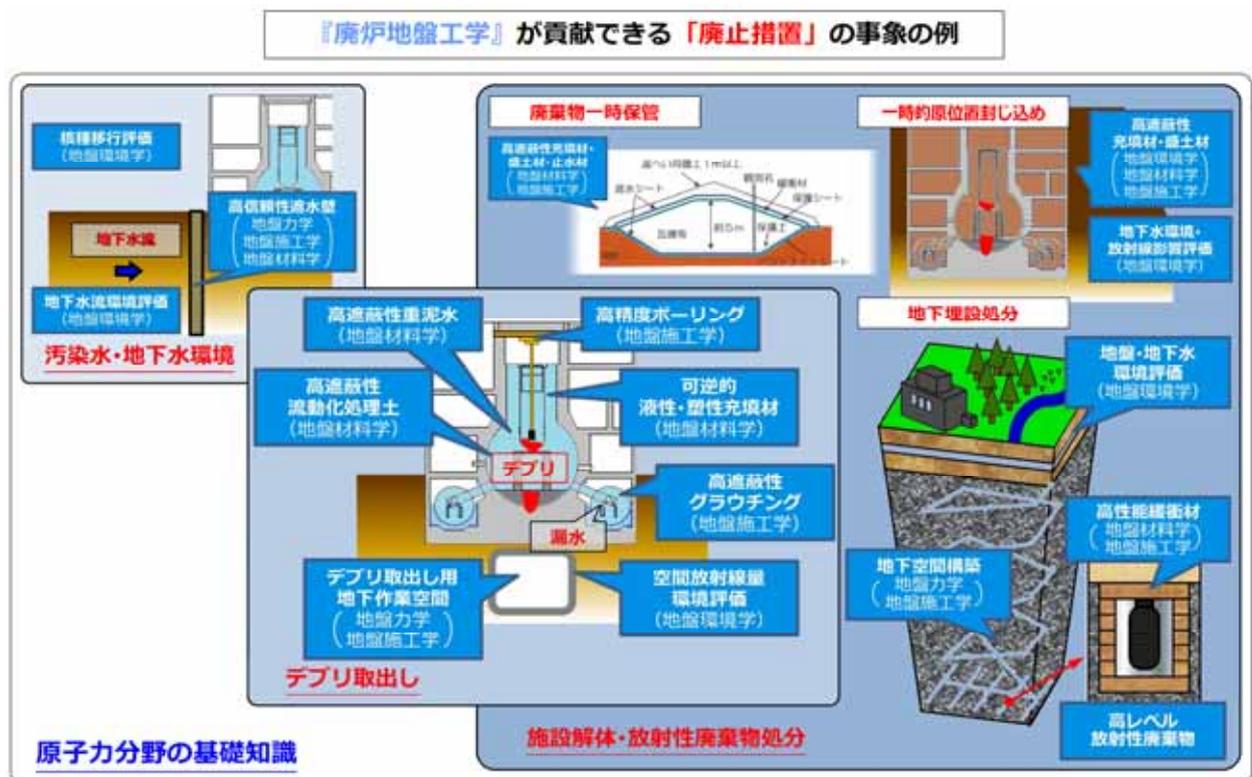


図 3.1-2 廃止措置に寄与可能な地盤工学系技術

このような考えの下、地盤工学系技術の位置付けや新技術の発掘を継続して実施すると共に、その適用性について検討を進めた。以下にその検討結果について詳述する。

1) 技術マップに関する検討

過年度に構築した技術マップ及びその技術情報を収めたデータベースである技術メニューDB について、新たに収集した技術情報に基づき更新を行った。なお、これらに整理された技術情報は、平成 31 年 3 月時点で 96 件となっている。

図 3. 1-3 に技術マップの基本構成を示す。また、図 3. 1-4 に更新した技術メニューDB を抜粋して示す。

	(A) Contaminated water management-Environment of groundwater (Decontamination technology)	(B) Fuel debris retrieval	(C) Demolition of facilities- Waste management-Processing and disposal	
Geotechnical engineering	① Mechanics	for Maintenance / management of stable plant condition for Contaminated water management - Evaluation of earthquake-resistant on cut-off wall installation ground	for Feasibility of fuel debris retrieval method - Stability evaluation of contaminated water storage facilities - Evaluation of the stability of the underground base for preventing radiation leakage at the bottom of the reactor building	for Waste management - Ensuring the stability the structure and the ground through the decommissioning process
	② Environmental	for Maintenance / management of stable plant condition for Contaminated water management - Predicting and measuring of changes in groundwater flow and movement of radioactive pollutants - Restoring the surrounding environment of nuclear power plants contaminated with radioactive materials	for Removal of spent fuel from the spent fuel pool for Feasibility of fuel debris retrieval method for Preparation for fuel debris retrieval - Environmental evaluation of space radiation dose at underground base (lower part of reactor building) - Radiation level evaluation of debris removal work environment	for Waste management for Processing and disposal - Prediction and evaluation of groundwater and radiation condition around the building along the decommissioning stage - Groundwater condition evaluation for margin depth disposal - Purification / detoxification aiming for future use and site release
	③ Material	for Maintenance / management of stable plant condition for Contaminated water management - Development of high quality water sealing material for contaminated water storage pool - Development of high quality material to enhance reliability of cut-off wall - Development of high quality shielding material suitable for storing rubble and logging material	for Removal of spent fuel from the spent fuel pool for Understanding and estimating reactor condition for Feasibility of fuel debris retrieval method for Preparation for fuel debris retrieval - Development of high quality radioactive shielding liquid material to fill Containment container. - Development of high shielding solidified slurry applicable to Storage containers Water leakage - Development of reversible liquid / plasticity material for temporary in-situ containment of debris	for Waste management for Processing and disposal - Development of high quality sealing / shielding material suitable for storing rubble and logging waste - Development of space filling material corresponding to margin depth waste disposal - Development of high shielding filling material for stable confinement of containment containers - Development of high quality shielding embankment material covering the entire facilities in decommissioning
	④ Construction management	for Maintenance / management of stable plant condition for Contaminated water management for Ensuring occupational safety - Construction method of highly reliable cut-off wall to stop inflow of groundwater - Construction method of cut-off wall for applicable in complex condition with many underground structures - Waterproofing method with self-diagnosis function to lay in contaminated water pool	for Removal of spent fuel from the spent fuel pool for Understanding and estimating reactor condition for Preparation for fuel debris retrieval for Ensuring occupational safety - High precision boring method for removing fuel debris - Construction method of underground base for removing fuel debris - Highly shielding grouting method stopping against sealing reactor container water leakage - Decontamination technology inside the facilities on removal spent fuel and fuel debris	for Waste management for Processing and disposal for Ensuring occupational safety - Construction method of underground disposal facility - Disposal technology of high radioactive solid waste -spent fuel. - Highly shielding filling method for reactor container stable condition - Construction method for storage facilities for rubble and logging material - Volume reduction technology for minimizing polluted soil - Cleaning / recovery technology of harbor bottom sediment - Ground improvement to assumption of future use - Landfill technology

図 3. 1-3 技術マップの基本構成

技術分類	(A) 汚染水・地下水処理 (除去設備)	(B) 放射防護 (遮蔽)	(C) 放射性物質 管理・監視・処分
	1. 汚染水処理	○	○
2. 放射防護	○	○	○
3. 放射性物質管理	○	○	○
4. その他	○	○	○

技術名称	社名	No.	技術分類			概要	適用性①					適用性②		出典	備考
			(A)	(B)	(C)		環境	室内	実験	実用	特許	on site	off site		
地盤系材料の放射線遮蔽性能の評価技術	早稲田大・西武建設・ホージュン・SRE	②B-01		①		ガンマ線・中性子線両方の遮蔽性能を有する超重量水、並びに除染廃棄物の一時仮置施設のためのガンマ線遮蔽性能・遮水性能の両方を保有する置土材について、仕様設計に資することや含水・保水状態等の施工性評価などに資するためのデータを取得中。	○	○							
広域水循環を評価できる解析プログラム群 (GETFLOWS)	(株)地盤環境テクノロジ	②A-02 ②C-02	②		②	環境における水循環システムを多相多成分流体系として定式化し、従来困難であった地上及び地下の水の流れを完全に一体化させた点が特徴である。一般的な地下水系解析、河川流出解析、洪水氾濫解析、地表水・地下水の相互作用解析、汚染物質（放射性物質等）を含む非定常分散解析、油膜解析、熱解析など極めて広範な分野における地盤流体モデリングと数値シミュレーションを可能とする。	○		○				地盤環境テクノロジHP http://www.getf.co.jp/softwares/aboutgetf/		
埋設型ガンマ線検出器による地盤（地下水）中の放射性物質拡散監視システム	ソバク工業（株）	②C-14			②	汚染された土壌や廃棄物の仮置施設、中間貯蔵施設、廃伊建屋周辺および汚染水タンクヤードなどの地盤（地下水）中の任意の深度にガンマ線測定プローブを埋設し、地盤中（地下水）のガンマ線の強度変化から放射性物質の濃度を監視するシステムである。	○	○							
現地発生土を利用した土質治水技術 (エコ・ソイルライナー (E.S.L.) 工法)	(株)大林組	③A-08 ③C-12	③		③	廃棄物最終処分場における治水構造のひとつである土質材料による不透水層（所謂、土質不透水層）の造成技術として、現地発生土にベントナイトや微、超微スラグあるいは固化材などを混合する工法である。	○	○					大林組HP http://www.obayashi.co.jp/tech/kyokai/shany/05/2002_06/11.pdf		
高線量および地中埋設物の影響を受けにくいトレンチを利用した低線量下での地盤改良工法	清水建設(株)	③A-14	③			東土層内側に幅3m程度のトレンチを掘削し、地上部に高圧機を挿入した掘削工を設けることで、掘削下での作業を実現した。トレンチから地盤改良方向の掘削近傍へ地中埋設物を避けるように水平方向を実施することで、地上部からの改良を可視化している。地盤改良には3A以外の高圧土を主とした工法を、止水材料には地盤への浸透性・長期耐久性に優れた溶液型水ガラス系材料を用いる。	○	○	○				IRID HP http://irid.or.jp/ov/public/592.pdf		
空間放射線量を低減する高遮断性超重量水の開発 (NBC)	早稲田大・ソバク工業（株）	③B-01		③		ガンマ線・中性子線両方の遮蔽性能を有する超重量水、及び構内除染廃棄物の一時仮置施設のためのガンマ線遮蔽性能・遮水性能の両方を保有する置土材について、仕様設計に資することや含水・保水状態を施工性評価に資するためのデータ取得のため、各種実験を実施中。	○	○							
3Dスキャナを用いた除染重機の遠隔作業の効率化	清水建設(株)	④B-11		④		重機両側に搭載された3Dカメラ2台、重機中央に搭載する二次元カメラ1台、及び映像を現場から遠隔地のモニター室に伝送する機器等から構成される。カメラは二次元の映像で機体状況を認識しながら、3Dカメラにより実行情報を確認し、重機を操作する。3Dカメラは専用ソフトウェアでも使用される隠蔽なものであるが、ソフトウェアによる重機の操作に必要な任意のカメラ映像は即時取得することができる。	○	○	○				IRID HP http://irid.or.jp/ov/public/595.pdf		
海面処分場の護岸構造に関する研究	広島大	④C-02			④	福島第一原発事故により発生した廃棄物と除染発生土を対象とした海面処分場の構造として、重力式護岸と鋼管矢板二重線切り内に土質系止水材を充填した治水工による構造とし、両者の間に幅広の裏込めを設けて分離する護岸断面を提案し、遠心載荷模型実験・模型振動台実験・数値解析による護岸と止水矢板の変形量を検討。	○								
高温環境でのコンクリート中性子遮蔽性能の向上を図る耐熱コンクリート	大成建設(株)	④C-06			④	従来コンクリートに対して耐熱性を大幅に高め、150℃の高温下でも長期的な使用が可能となるコンクリート材料であり、使用資材中間貯蔵用コンクリートの基本設計に採用されている。当該コンクリート材料を用いることで、現在国内で中間貯蔵用に使われている金属製容器と同等の安全性を維持しつつ、より安価なコンクリートの製造を可能とする。今後は早期実用化を図る。	○	○	○				大成建設会社情報/プレスリリース/2003 http://www.daiichi.co.jp/about_us/release/2003/mar04.html	(株) 神戸製鋼所との共同開発	
破砕後の大型土のう袋や有機物を確実に分別・除去する高精度分別回収機	(株)大林組	④C-11			④	除去土等には粘性土や有機物が含まれているため、従来の回転ふるい機による分別ではスクリーン孔漏れが目立ち、不十分な分別等により、後工程に多大な影響が及ぶことが懸念されることを受け、エアークラウド・内部構造の改良等を実施し、開発された破砕後の大型土のう袋及び有機物を確実に分別する回収機である。工程の遵守、かつ減容化や埋立て土の有機物含有率削減への寄与を可能とする鉄筋コンクリート製の筐体（躯体）を地上で構築し、躯体下部に気密な作業室を設け、ここに地下水圧に見合った圧縮空気を送り込むことにより、地下水の浸入を防ぎ、掘削・掘土を行いながら躯体を地下に沈める工法であり、シールドトンネルの発生立坑や地下鉄・地下道路のトンネル本体などとして広く活用される技術である。	○	○	○				大林組HP http://www.obayashi.co.jp/press/news/2013/11/07_01	株式会社新地機工所の共同開発	
ニューマチックケーソン工法 (大型化・複雑化する各種地下構造物のニーズに対応可能)	初工株式会社(株)	④C-22			④	ニューマチックケーソン工法における掘削・掘土作業の効率向上と高気圧下の労働環境の改善を目的として開発されたシステムで、地上遠隔操作室から作業室内の掘削設備をTVモニターとコンピュータグラフィック、および情報化施工によるリアルタイム計画監視により遠隔操作する技術である。	○	○	○	○			ニューマチックケーソン工法/オリエンタル白石(株)パンフレットより		
ケーソン遠隔操作技術 (ニューマチック工法完全無人化技術)	初工株式会社(株)	④C-23			④	ニューマチックケーソン工法における掘削・掘土作業の効率向上と高気圧下の労働環境の改善を目的として開発されたシステムで、地上遠隔操作室から作業室内の掘削設備をTVモニターとコンピュータグラフィック、および情報化施工によるリアルタイム計画監視により遠隔操作する技術である。	○	○	○	○			NETIS登録番号No.X1-990443-V (白石製無人ケーソン工法) ニューマチックケーソン工法/オリエンタル白石(株)パンフレットより ©NETIS 2017年4月掲載期間終了		
スリムケーソン工法 (狭径箇所での施工・重要構造物の近接施工)	初工株式会社(株)	④C-24			④	ニューマチックケーソン工法の狭径地での施工を可能とする技術である。小断面ケーソン (φ7.0m以下) に対応した小型無人掘削機による地上遠隔操作での無人掘削を可能としており、専用のロックシャフトを用いることで、効率的な土砂排出、安全な作業員の入出などを実現している。	○	○	○	○			特許第3908747号 (スリムケーソン工法) ニューマチックケーソン工法/オリエンタル白石(株)パンフレットより		

図 3.1-4 技術メニューDB rev.H30 (抜粋)

2) 廃炉シナリオに関する検討

政府・国・東京電力等が構想する廃炉までの事業の流れや考え方を正しく理解・把握することで、前述の技術マップに掲載した廃炉に寄与可能と考えられる様々な地盤工学系技術について、より実情に則しかつ説得力ある形で提示することができるものと考え、過年度より中長期ロードマップや戦略プランに記された内容を踏まえた基本的なシナリオを構築し、更新を進めてきた。

検討・構築した基本的なシナリオ構成を図 3.1-5 に示す。

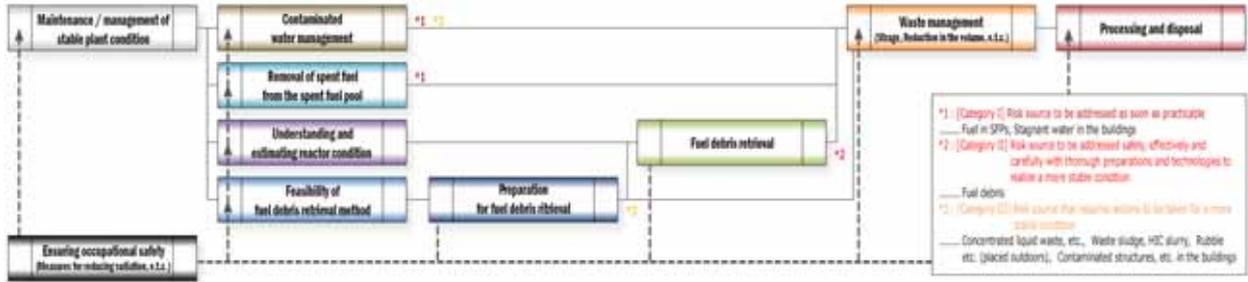


図 3.1-5 基本的なシナリオ構成

この基本的なシナリオは、中長期ロードマップ^{※1}及び戦略プラン^{※2}に示された廃炉までに必要な作業や内容をいくつかの作業グループごとに整理し、この結果より導かれた作業項目を時系列に沿って取りまとめたものであり、『プラント安定状態維持・管理』以下に「臨界管理」「冷却」「閉じ込め」「安全設備の維持・信頼性向上」等が存在するように、各作業項目の下位には、より詳細な作業工程・項目が存在する構成としている。

なお、本年度 10 月に公開された戦略プラン 2018 では、福島第一原子力発電所廃炉の取組み全体を俯瞰した中長期的な視点から方向性を提示するものとして、これまでの『燃料デブリ取出し』『廃棄物対策』に着目したことから、『汚染水対策』『使用済燃料プールからの燃料取出し』等との関連性・整合性を踏まえた検討も必須とされたが、これらの作業グループについては、中長期ロードマップに示された方向性に基づき、既に基本的なシナリオ構成に含めていたことから、本年度は基本的なシナリオ構成について更新を行っていない。

※1 福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ（第 4 回改訂版）

※2 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 2018

3) 地盤工学系技術を活用した処分シナリオと適用性に関する検討

本項では、過年度に実施した技術マップに掲載された様々な地盤工学系技術と整理したシナリオとの融合結果を踏まえ、これらの技術を活用した処分シナリオの創出を試みた。なお、検討では、無数の組合せが存在する廃炉までのシナリオ全体を対象とするのではなく、図 3.1-5 に示した作業項目単位のうち、地盤工学技術と関連深い【燃料デブリ取り出し工法の実現性検討】、及び【廃棄物対策】分野に着目して進めた。

参考として、過年度成果で示した各段階で寄与可能な地盤工学系技術を図 3.1-6 及び図 3.1-7 に再掲する。

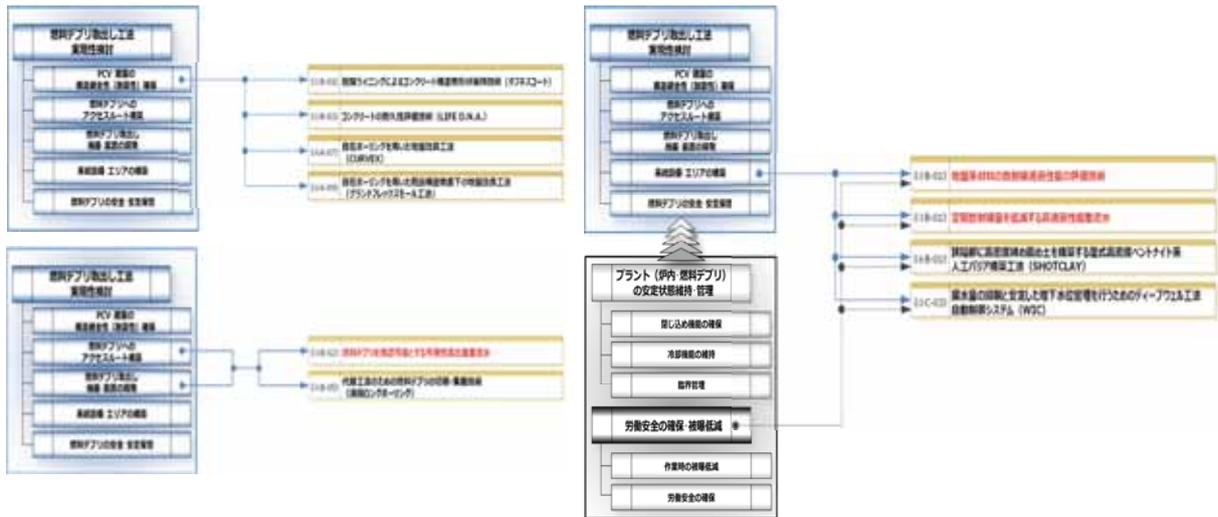


図 3.1-6 【燃料デブリ取り出し工法の実現性検討】で寄与可能な地盤工学系技術の一覧

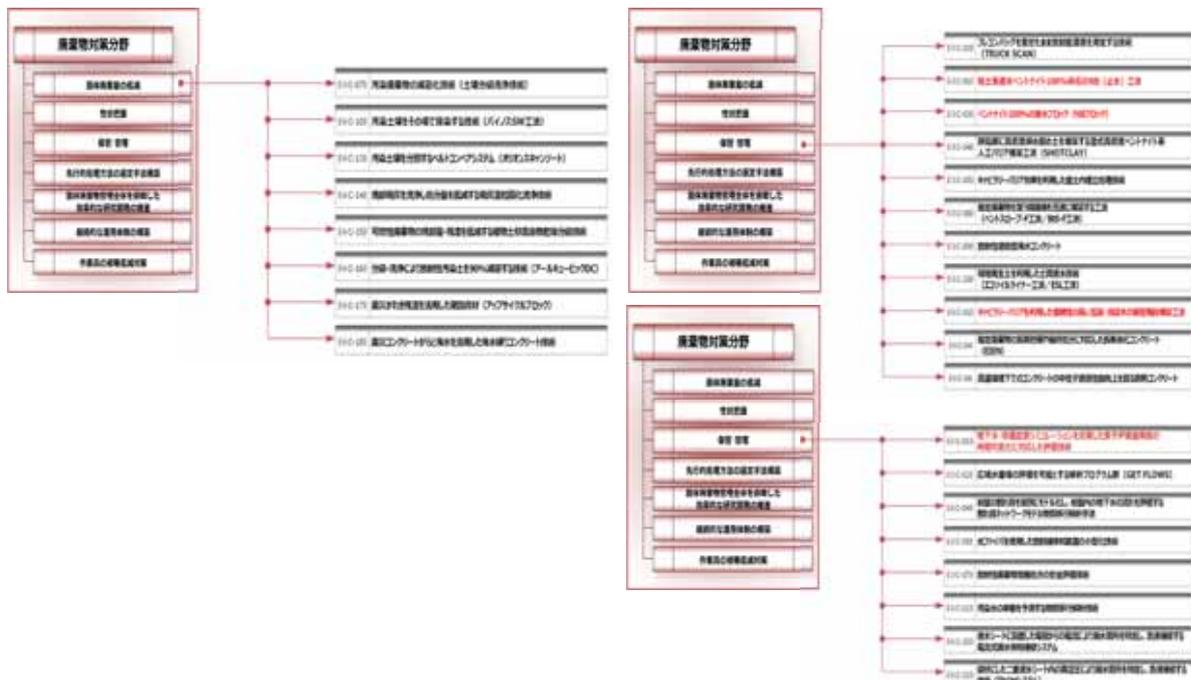


図 3.1-7 【廃棄物対策】で寄与可能な地盤工学系技術の一覧

次頁以降に、検討結果を示す。

(a) その1【燃料デブリ取出し（気中-横アクセス）】

戦略プラン2017で示された「気中-横アクセス工法」を採用した燃料デブリ取出し工法実現性検討段階での地盤工学系技術を適用したシナリオについて検討した。

基本的なシナリオを図3.1-8に整理する。ここでは【プラント（炉内・燃料デブリ）の安定状態維持・管理】を継続して行うと共に、【作業員の労働安全・被曝低減】にも配慮した上で、【燃料デブリ取出し工法の実現性検討】を進める流れとなる。



図 3.1-8 基本的なシナリオ構成（燃料デブリ取出し工法実現性検討）

ここで記された作業項目を踏まえ、技術マップで掲げた地盤工学系技術の適用性について検討し、現状で考える課題と併せて取りまとめた結果を図3.1-9に示す。



図 3.1-9 処分シナリオと地盤工学系技術の適用性（その1）

「PCV・建屋の構造健全性確保」「閉じ込め機能の確保：遮蔽性」「冷却機能の維持：止水性」「作業時の被曝低減」等では、いくつかの課題は有するものの、複数の技術が適用可能と評価した。

(b) その2【燃料デブリ取出し（冠水）】

戦略プラン 2017 以前に示されていた「冠水工法」を採用した燃料デブリ取出し工法実現性検討段階での地盤工学系技術を適用したシナリオについて検討した内容を図 3.1-10 に示す。なお、基本的なシナリオは図 3.1-8 に示した通りである。



図 3.1-10 処分シナリオと地盤工学系技術の適用性（その2）

上記は、PCV 内を冠水させるのに超重泥水を使用することで、課題として挙げられていた PCV 上部の配管系統からの漏水に対する遮水性や燃料デブリ取出し時の遮蔽性を期待したシナリオである。但し、冷却機能の維持（循環系統）、大量に使用することになる超重泥水の処理・処分等が課題として挙げられた。

なお、「PCV・建屋の構造健全性確保」「閉じ込め機能の確保：遮蔽性」「冷却機能の維持：止水性」「作業時の被曝低減」については、図 3.1-9 と同様、いくつかの課題は有するものの、複数の技術が適用可能と評価した。

(c) その3【燃料デブリ取出し（その他）】

参考として、前述の「冠水工法」と「気中工法」を組合わせた燃料デブリ取出し工法実現性検討段階での地盤工学系技術を適用したシナリオについて検討した内容を図 3.1-11 に示す。

なお、基本的なシナリオは図 3.1-8 と同じものである。

本シナリオは、予め構築した PCV を地下トンネルに沈降させた後に燃料デブリ取出し作業を進めることで、放射性物質の飛散防止を図ったものである。しかし、放射性物質の飛散防止を図るのであれば、周辺の地形（立地状況）や現地発生土を活用して原位置に封じ込める（仮置き）方が、施工性や経済性に優れるものと考えられたため、本項では参考にとどめた。



図 3.1-11 処分シナリオと地盤工学系技術の適用性（その3）

(d) その4【廃棄物対策分野】

戦略プラン 2018 で示された廃棄物対策分野における地盤工学系技術を適用したシナリオについて検討した。

基本的なシナリオを図 3.1-12 に整理する。廃棄物対策分野では、廃棄物量の低減を図る（【固体廃棄量の低減】）と共に、廃棄物の【性状把握】を進め、処分するまで性状に応じて適切に【保管・管理】する流れが示されている。更にこれらと並行して処理方法や管理方法の研究開発の推進、運用体制の構築を進める流れとなっている。



図 3.1-12 基本的なシナリオ構成（廃棄物対策分野）

図 3.1-13 に検討結果を示す。

① 固体廃棄量の低減

- ・ 汚染土壌・瓦礫を放射線濃度により分別《④C-13》。
- ☞ 放射能濃度に応じた処理・処分を可能とすることを期待。
- ・ 植物混合土の分離、汚染土壌の分級、汚染瓦礫・土壌の洗浄による減容化《③C-07、④C-10、④C-15、④C-16ほか》。
- ☞ 処理（保管・管理）・処分対象となる廃棄物量の低減を期待。
- ・ 焼却飛灰の洗浄、除染後（洗浄後）の瓦礫を建設資材として再利用《④C-14、④C-16、④C-17》。
- ☞ 最終的な処分量の低減を期待。（オフサイトでの再利用：持ち出し、除染後の放射能濃度などが課題）

② 保管・管理

- ・ 保管施設周辺の地下水環境の評価《②A-01、②A-02、②C-07ほか》。
- ☞ 地下水による放射性核種の移行を評価（安全評価）。
- ・ キャピラリバリアを利用した覆土《③C-05、③C-07、④C-01ほか》。
- ☞ 保管中の廃棄物への雨水浸透防止や遮蔽性を期待。
- ・ 遮水シートの代わりに、ベントナイト、またはベントナイトと現地発生土の混合土等を使用《④C-20、④C-21》。
- ☞ 浸出水の流出・地下水の流入防止（放射性核種の移行抑制）
- ・ （遮水シートを設置している場合）電流や真空圧により、浸出水や地下水の流入を検知・補修（モニタリング）《③C-20、③C-01、》。
- ☞ 地下水による放射性核種の移行抑制

図 3.1-13 処分シナリオと地盤工学系技術の適用性（その 4）

【固体廃棄量の低減】については、事故後のオフサイトにおける除染等で培われてきた技術が、【保管・管理】では廃棄物処分場で現在使用されている技術や放射性廃棄物の処分（地層処分、中深度処分、浅地中処分）で研究・開発が進められてきた技術が適用可能と評価した。

一方、【固体廃棄量の低減】において、減容化技術を適用したシナリオの場合、オフサイトでの再利用（搬出）や除染後の放射能濃度等が課題として挙げられた。

(3) 情報の収集

検討の深化のため、福島第一原子力発電所の視察のほか、関連する学術研究機関や企業等との協議の機会を設け、有用な情報の収集に努めた。更に廃炉廃棄物処分等の海外の関連機関からも情報を収集した。

以下にその概略をまとめる。

1) 平成 30 年度福島第一原子力発電所視察

本プログラムを推進するにあたっての人材教育及び情報収集の一環として、昨年度に引き続き廃炉地盤工学委員会幹事団及び学生を主体として、福島第一原子力発電所（以下、1F と記す。）の視察を行った。現地到着後は新たに開館した東京電力廃炉資料館を見学し、東京電力側視察担当者から各号機の最新状況等について説明を受けた後、専用バスで 1F 構内へ向かった。今回の視察では、海側から各号機の損傷状況・対策状況のほかに陸揚げされた貯留タンクの運搬状況等、様々な状況が確認できた。また、昨年度も視察した敷地北側では、固体廃棄物（瓦礫・伐採木等）の保管エリアの整備が進む状況や新たに設置された焼却設備を確認できた。視察状況を図 3. 1-14 及び図 3. 1-15 に示す。

廃炉に向けた作業が少しずつではあるが着実に進展している状況や作業環境の改善・向上、自動運転 EV バスの導入等の様子を確認できた一方で、新たに開館した廃炉資料館では当時の緊迫した状況を振り返る貴重な機会となった。

- 日時 : 平成 31 年 1 月 15 日（火）午後
- 場所 : 東京電力廃炉資料館～福島第一原子力発電所構内
- 参加人数 : 18 名（うち、学生 8 名）



図 3. 1-14 福島第一原子力発電所視察状況（その 1）

（左：視察参加者 中央：1 号機屋上の状況－散水設備 右：使用済み吸着塔（SARRY）の保管状況）



図 3. 1-15 福島第一原子力発電所視察状況（その 2）

（左：陸揚げされた貯留タンクの運搬状況 中央：廃棄物保管エリアの整備状況 右：廃棄物保管エリアの保管状況）

2) 海外関連機関等からの情報収集

(a) Wood 社 (Wood Nuclear Limited)

原子力発電所の新規建設・操業支援・廃止措置に携わると共に、福島第一原子力発電所の廃止措置において東京電力や NDF 等の支援も行っている英国 Wood 社から、同社が有する廃止措置に関する経験・実績情報のほか、廃棄物対策（処理・保管）に関する技術情報を収集した（平成 30 年 11 月）。

(b) ワークショップ (GER2018)

平成 30 年 9 月 9 日～9 月 12 日に、中国の太原工業大学において、ワークショップを共同開催し、廃炉のための放射線遮蔽覆土材及び超重泥水の金属物接触に関する研究成果を発表すると共に、学術機関レベルでの技術に関する情報交換を行った（図 3.1-16）。



図 3.1-16 GER2018 の状況

(c) 第 8 回国際環境地盤工学会議 (8ICEG)

平成 30 年 10 月 28 日～11 月 1 日に、中国杭州の浙江大学にて開催された第 8 回国際環境地盤工学会議において、廃炉のための超重泥水研究及び放射性廃棄物処分に関する研究成果について発表を行うと共に、中国における高レベル放射性廃棄物地層処分関連の情報を収集した（図 3.1-17）。また、中国では、国家による強いリーダーシップの下、放射性廃棄物処分という難しい原子力関連事業を、如何に国民に情報を提供しつつ進めているか等について、中国の原子力庁研究者と情報交換を行った。



図 3.1-17 第 8 回国際環境地盤工学会議の状況

上記以外の情報収集活動に関連した学術研究機関等との協議については、3.4.3 に示す通りである。

3.1.2 廃炉地盤工学教育システムの構築

廃炉地盤工学を軸とした教育体制構築のためには、構成する学問単元の内容の明確化が必要である。昨年度の検討では、地盤施工学の取組みの優先度が高いことが明らかになったことから、地盤施工学の大枠を明確化した。

学問単元のうち、地盤力学は学問的に構築が進んでおり、更なる内容の明確化は廃止措置におけるニーズが明確になった後でも実施可能と考えられたことから、今年度は地盤環境学と地盤材料学の内容を明確化するため、廃止措置に対応しうる地盤工学系技術の位置付けを明確にするとの観点から検討を進めた。

検討の内容を以下に示す。

(1) 地盤環境学・地盤材料学の概要

廃炉地盤工学を構成する学問単元は地盤力学・地盤環境学・地盤材料学・地盤施工学の4単元である。このうち、今年度詳細検討の対象とした地盤材料学・地盤環境学の概要を以下に示す。

地盤環境学：廃止措置過程において必要な放射線環境（空間、地下、地下水等）を予測・評価しそれを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。

(2) 放射線対策のための環境学・材料学

環境学及び材料学的に事故廃炉の放射線汚染問題を検討する上で、発生源や拡散の原因、防止策等を整理すると以下のようなになる。

- ・放射線発生源：爆発飛散した放射性ホコリ・ガラ、燃料デブリ、使用済み核燃料
- ・拡散原因：風、地下水流、格納容器からの漏水、漏気（空気に乗った飛散）
- ・遮蔽対象：除染土壌・廃棄物、放射性ガラ、デブリ自体、デブリ解体時の粉塵
- ・防止策：被覆（風に当たらない）、止水（地下水を入れない）、封じ込め（外へ出さない）
- ・必要な特性：放射線遮蔽性、耐久性、施工性

これらの事象に対応する技術・材料の研究開発において、事象の要求機能・要求性能と対応技術の真の特性・代用特性を結び付け、定量的な評価を可能とするのが環境学・材料学の主な役割となる。

(3) 活用が想定される地盤施工学的技術と現在進行中の研究開発課題

図 3.1-2 で示した廃止措置のフェーズごとに寄与可能と考えられる地盤環境学・地盤材料学に分類される地盤工学系技術について検討した結果を以下に示す。

1) 地盤・地下水環境

地盤・地下水環境管理では、デブリ冷却水への地下水混入防止のための遮水壁構築技術や地下水及び核種移行シミュレーション技術が検討の対象となり、その一部は再委託

先の千葉工業大学で検討が進められている（図 3.1-18）。汚染水の保管に関しては、既に研究開発が進められている高性能止水性地盤作成技術や自己診断機能付きの遮水材料（遮水シート）が適用できる可能性がある。また、これらに関連して締め固めたベントナイト・バライト地盤についての研究も進行中である。

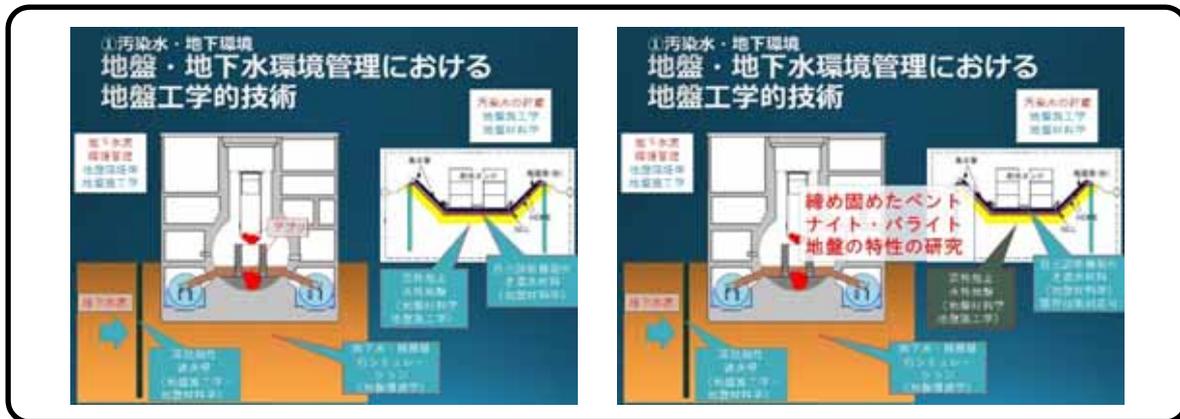


図 3.1-18 検討・研究開発中の地盤工学系技術（地盤・地下水環境）

2) 燃料デブリ取出し（補助）

燃料デブリ取出しのフェーズでは取出し作業（技術）の活用の妨げとなっている燃料デブリ等に起因する高放射線環境の緩和を地盤工学系技術活用のターゲットとして想定した。

高放射線環境は人的作業の妨げになっているだけでなく、観測及び取出し機器の活用における半導体の使用に厳しい制限を生じさせており、放射線環境を緩和することは、格納容器内で行うデブリ等の観測や取出しにおいて活用できる機器の拡大につながる。

地盤工学では、格納容器の漏水制御につながるグラウチング技術等を既に保有しているが、再委託先の早稲田大学を中心に超重泥水及びこれに関連した図 3.1-19 に示すような高性能な格納容器充填材料の検討を進めている。

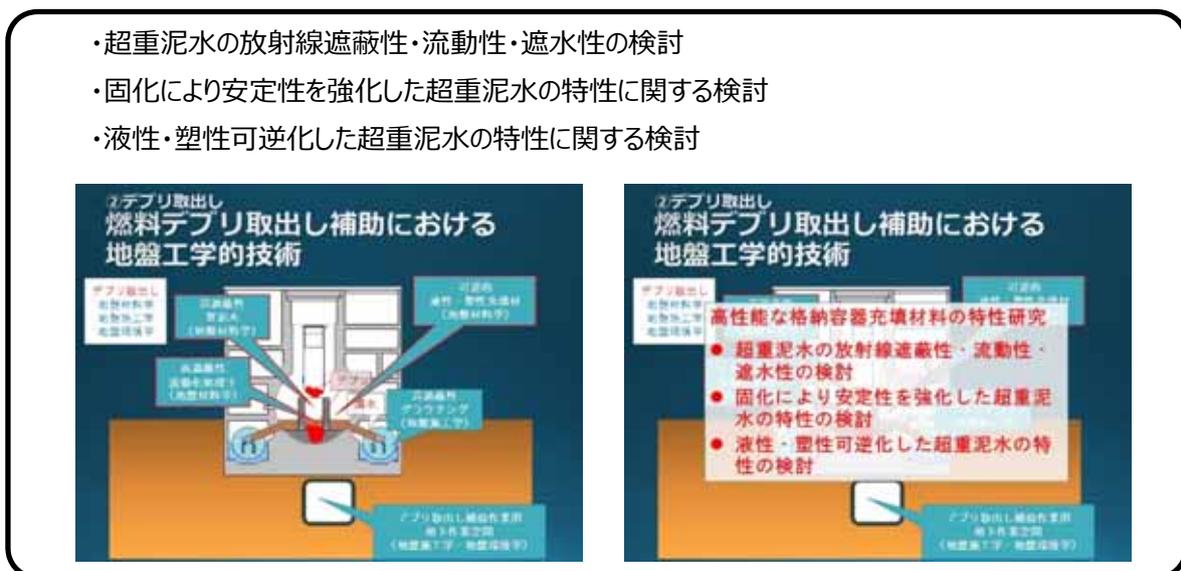


図 3.1-19 検討・研究開発中の地盤工学系技術（燃料デブリ取出し（補助））

3) 施設解体・放射性廃棄物の処分

施設解体・放射性廃棄物処分のフェーズでは、①廃棄物一時保管施設、②地中埋設処分、③デブリの一時的原位置封じ込めを主な対象として検討を進めている。

進行中のそれぞれに対応した研究を図 3.1-20～図 3.1-22 に示す。

廃棄物一時保管施設

高性能な覆土材料の特性研究として、土質系材料、ベントナイト混合土、復興資材（津波堆積物）の覆土材料としての適応性を把握・確認するために、以下の検討を実施中である。

- ・放射線遮蔽性の検討
- ・遮水特性の検討
- ・締め固め施工性の検討



図 3.1-20 検討・研究開発中の地盤工学系技術（施設解体・放射性廃棄物の処分①）

地中埋設処分

ベントナイト緩衝材の高温・高圧・超長時間による特性変化を把握・確認するために、以下の検討を実施中である。

- ・高温履歴による膨潤特性変化の検討
- ・ナチュラルアナログを援用した膠着作用の影響評価手法の検討
- ・吸水方向と膨潤特性の方向性の検討



図 3.1-21 検討・研究開発中の地盤工学系技術（施設解体・放射性廃棄物の処分②）

燃料デブリの一時的原位置封じ込め

格納容器内での燃料デブリ安定化のための技術として、以下の研究開発を進めている。

- ・高遮蔽性重泥水：
重泥水の特性に関する研究
- ・高遮蔽性流動化処理土：
超重泥水と同等の遮蔽性能を有する固化泥水の
研究
- ・可逆的液性・塑性充填材：
超重泥水と同等の遮蔽性能を有する材料への液体
状・固体状の可逆的変相特性の付与に関する研究

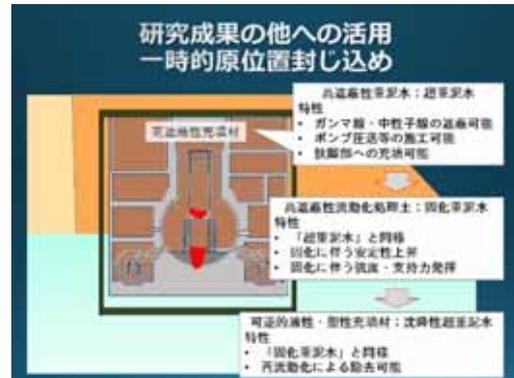


図 3. 1-22 検討・研究開発中の地盤工学系技術（施設解体・放射性廃棄物の処分③）

(4) 事故原発の廃止措置事象における要求機能・要求性能と真の特性・代用特性

事故原発の廃止措置の各事象における要求機能・要求性能を検討することにより、地盤工学的技術に要求される特性（真の特性）が明らかとなり、施工段階で管理等に用いられる代用特性を設定することができる。この要求機能から代用特性までの結び付きを定量的に確立することも地盤環境学・地盤材料学の役割であり、これにより具体的な研究開発課題に落とし込むことができる。

以降に、各フェーズにおける要求機能と要求性能、及び要求性能と対応する真の特性と代用特性について取りまとめる。

1) 燃料デブリ取出し補助材として超重泥水の活用

放射性物質に対する要求機能

- ・漏水等による拡散防止
- ・取出し時の拡散防止
- ・取出し作業の効率化
- ・遮蔽による作業環境の（放射線環境）保全
- ・長期保管時の燃料デブリの安定性強化？



放射性物質に対する要求機能

- ① 漏水等による拡散防止
- ② 取出し時の拡散防止
- ③ 取出し作業の効率化
- ④ 遮蔽による作業環境の（放射線環境）保全
- ⑤ 長期保存時のデブリの安定性強化？

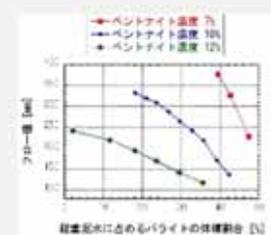
要求性能

- ① 格納容器の漏水を抑制
- ② デブリ切削粉の飛散抑止
- ③ 切削粉等の取出し媒体
- ④ デブリからの放射線遮蔽

○要求性能と対応する真の特性・代用特性

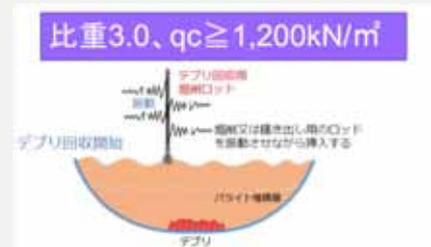
① 格納容器の漏水を抑制

[真の特性] 遮水性
 [代用特性] 流動性、空隙充填性、泥膜生成能力、泥膜の透水性・強度
 [研究成果例]
 ・超重泥水に占めるパライトの体積割合とフロー値の関係



② 燃料デブリ切削粉の飛散抑止

[真の特性] 粉塵抑止特性
 [代用特性] 気相／液相（気泡）、粘性、比重
 [研究成果例]
 ・遮蔽、飛散防止を目的とした回収方法（案）



③ 切削粉等の取出し媒体

[真の特性] 切粉等の保持能力
 [代用特性] 粘性、比重、流速、粉塵の分離性
 [研究成果例]
 ・遮蔽、飛散防止を目的とした回収方法（案）



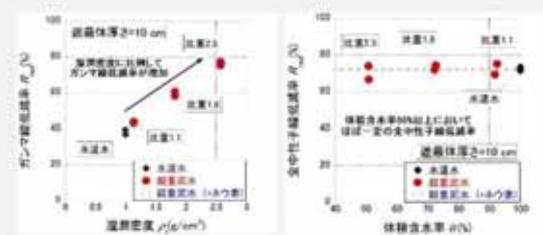
要求性能

- ① 格納容器の漏水を抑制
- ② デブリ切削粉の飛散抑止
- ③ 切削粉等の取出し媒体
- ④ デブリからの放射線遮蔽

● 真の特性：切粉等の保持能力
 ● 代用特性：粘性、比重、流速、粉塵の分離性

④ 燃料デブリからの放射線遮蔽

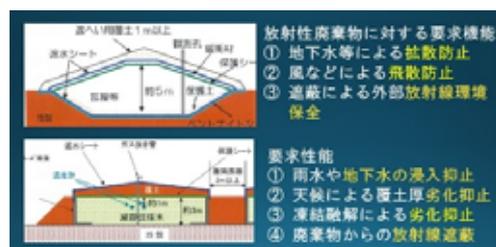
[真の特性] 放射線遮蔽特性
 [代用特性] 密度、含水率（体積）
 [研究成果例]
 ・湿潤密度とガンマ線低減率の関係
 ・体積含水率と全中性子線低減率の関係



2) 放射性廃棄物処分と覆土材としてのベントナイト混合土の使用

放射性廃棄物に対する要求機能

- ・地下水等による拡散防止
- ・風等による飛散防止
- ・遮蔽による外部放射線環境保全



○要求性能と対応する真の特性・代用特性

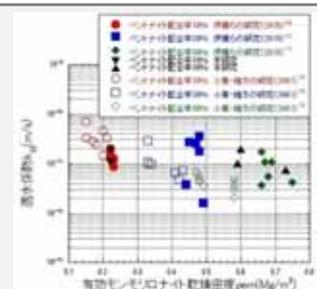
① 雨水や地下水の浸入抑止

[真の特性] 遮水性（透水性）

[代用特性] 密度、厚さ、ベントナイト量

[研究成果例]

- ・有効モンモリロナイトの乾燥密度と透水係数の関係



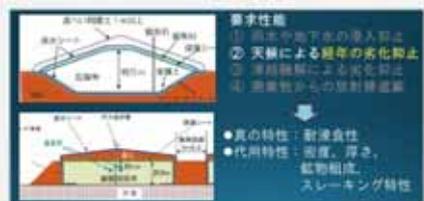
② 天候による覆土厚劣化抑止

[真の特性] 耐浸食性

[代用特性] 密度、厚さ、鉱物組成、スレーキング特性

[研究成果例]

- ・耐浸食性を考慮した覆土材の研究開発



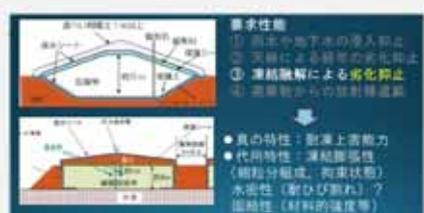
③ 凍結融解による劣化抑止

[真の特性] 耐凍上害能力

[代用特性] 凍結膨張性（細粒分組成、拘束状態）
水密性（耐ひび割れ）、固結性（材料的強度等）

[研究成果例]

- ・耐凍上性を考慮した覆土材の研究開発



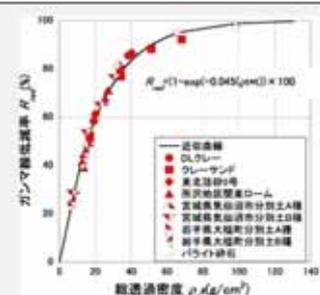
④ 廃棄物からの放射線遮蔽

[真の特性] 放射線遮蔽性

[代用特性] 密度、厚さ、含水状態、土の種類

[研究成果例]

- ・土質系材料のガンマ線遮蔽性能



3) 地中埋設処分における緩衝材としてのベントナイトの使用

地中埋設処分で使用する緩衝材について、高レベル放射性廃棄物の地層処分での用いる緩衝材を検討対象として、要求機能・要求性能を述べる。

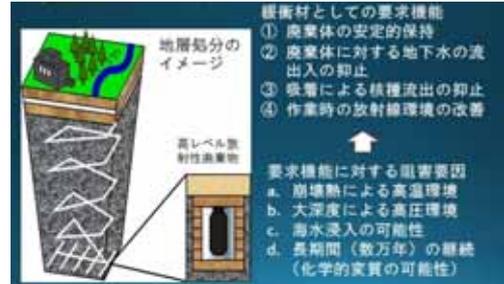
地層処分で用いられる緩衝材は、ベントナイトのシール性や自己修復性が主な要求性能となるが、これらより地中大深度での長期間保持に伴う阻害要因が研究開発の具体的な課題となる。

緩衝材としての要求機能

- ・廃棄体の安定的保持
- ・廃棄体への地下水の流入及び流出の抑止
- ・吸着による核種流出の抑止
- ・作業時の放射線環境の改善

地層処分に伴う阻害要因

- ・核種の崩壊熱による高温環境
- ・大深度に伴う高圧環境
- ・海水（塩水）流入の可能性
- ・長期間（数万年）に亘る継続（化学的変質の可能性）



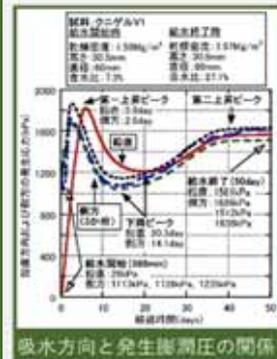
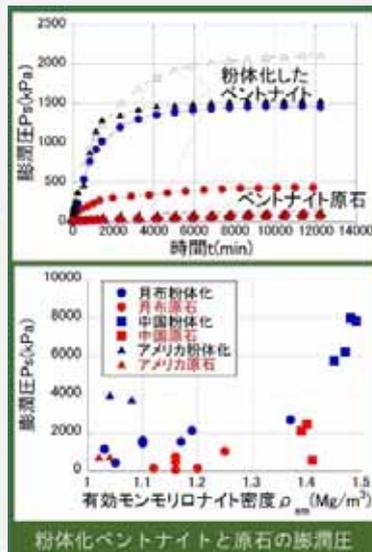
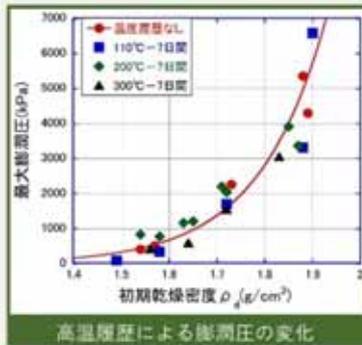
○阻害要因に対応したベントナイトの研究課題

[研究課題]

- ・高温履歴による膨潤特性変化の検討
- ・ナチュラルアナログを援用した膠着作用に関する影響評価手法の検討
- ・吸水方向と膨潤特性の方向性に関する検討

[研究成果例]

- ・高温履歴による膨潤圧の変化
- ・粉体化ベントナイトと原石の膨潤圧
- ・吸水方向と発生膨潤圧の関係



(5) 研究開発成果の活用（一時的原位置封じ込め）

格納容器からの燃料デブリ取出しや取出し後の放射性廃棄物の処理・処分については現状でも多くの課題を抱えており、具体的な計画の策定には多くの時間を要する可能性がある。

このような場合を想定し、格納容器内の安定した状態を継続することで、燃料デブリや高レベルの放射線に汚染された物質の一時的な保管施設としての活用可能性を検討した（図 3.1-23）。なお、この考えを実現するには、外部に対する放射線の継続的かつ安定した遮断が必要であることから、これまでの研究成果である高遮蔽性の格納容器充填材や高遮蔽性盛土材料としての活用の検討が必要とされる。

① 高遮蔽性重泥水（超重泥水）の活用効果

- ・ガンマ線・中性子線の遮蔽
- ・ポンプ圧送等による施工
- ・狭隘部への充填

② 高遮蔽性重泥水処理土（固化重泥水）の活用

- ・超重泥水と同様の特性
- ・固化に伴う安定性の上昇
- ・固化に伴う強度・支持力の発揮

③ 可逆的液性・塑性充填材（沈降性重泥水）の活用

- ・超重泥水+固化重泥水と同様の特性
- ・再流動化により除去が可能（除去作業効率の向上）

④ 高遮蔽性覆土材（ベントナイト混合土）の活用

- ・締め固め施工が可能
- ・低透水性、力学的安定性
- ・ガンマ線・中性子線の遮蔽

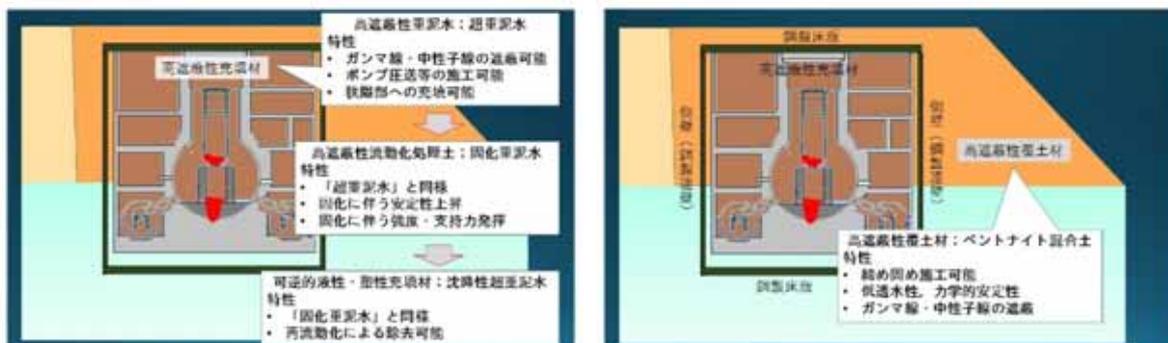


図 3.1-23 一時的原位置封じ込めにおいて活用可能な研究開発成果

(6) 廃炉地盤工学の実践

1) 授業の実施

早稲田大学大学院で廃炉地盤工学の授業（地盤工学特論 B）を実施し、学生の教育を実施した。講義では、これを通じて育成される学生各自の社会及び原子力発電所の廃止措置に対する問題意識、具体的な解決案の構築、更に高度化するための相互議論を行い、それらを総括したレポート・論文の作成するものとした。なお、レポートの課題は、具体的に福島第一原子力発電所の廃止措置をテーマとして、全講義の内容を起点に、技術的観点から論述してもらうこととした。

講義内容一覧を表 3.1-2 に示す。

表 3.1-2 地盤工学特論 B 講義内容一覧

日付	内容	担当
第 1 回 2018/9/28	講義概要説明、 課題設定とブレインストーミング演習	小峯 秀雄 (早稲田大学)
第 2 回 2018/10/5	放射線に関する基礎知識 1	吉村 貢 (ソイルアンド・ロッキングエンジニアリング)
第 3 回 2018/10/12	放射線に関する基礎知識 2	吉村 貢 (ソイルアンド・ロッキングエンジニアリング)
第 4 回 2018/10/19	廃炉のための地盤工学 (廃炉地盤工学)	後藤 茂 (早稲田大学/地盤工学会)
第 5 回 2018/10/26	廃炉のための地盤材料学	成島 誠一 (西武建設)
第 6 回 2018/11/9	廃炉のための地盤環境学	鈴木 誠 (千葉工業大学)
第 7 回 2018/11/16	廃炉のための廃棄物処分学	渡邊 保貴 (電力中央研究所)
第 8 回 2018/11/23	廃炉のための地盤施工学	後藤 茂 (早稲田大学/地盤工学会)
第 9 回 2018/11/30	中長期ロードマップ・戦略プランと技術マップ	菱岡 宗介 (パシフィックコンサルタンツ)
第 10 回 2018/12/7	地盤材料学の観点からの 「超重泥水」技術開発	成島 誠一 (西武建設)
第 11 回 2018/12/14	地盤環境学の観点からの 地下水制御対策の評価	片山 啓 (長大)
第 12 回 2019/1/11	廃炉廃棄物処分工学 1	山田 淳夫 (安藤ハザマ)
第 13 回 2019/1/18	廃炉廃棄物処分工学 2	渡邊 保貴 (電力中央研究所)
第 14 回 2019/1/25	学生発表・ブレインストーミング演習	小峯 秀雄 (早稲田大学)
第 15 回 2019/2/1	原発事故と健康影響	山下 俊一 (福島県立医科大学)

図 3.1-24 及び図 3.1-25 に講義で使用した教材の一部を抜粋して示す。



図 3.1-24 廃炉地盤工学の教材 1 (早稲田大学大学院／地盤工学特論 B：第 4 回)



図 3.1-25 廃炉地盤工学の教材 2 (早稲田大学大学院／地盤工学特論 B：第 9 回)

2) オンデマンド化に向けた検討

全国レベルでの廃炉地盤工学の実践を展開するため、他教育機関でも使用可能な教材としてオンデマンド化に向けた検討を進めた。今年度は、試行的に講義や実験、討論風景のビデオ撮影を行い、カメラ配置やアングル、編集方法、講師の音量等について確認を行った。なお、ビデオ撮影した講義は以下の通りである。

- ・第 10 回：地盤材料学の観点からの「超重泥水」技術開発 _____ 実験風景
- ・第 14 回：学生発表・ブレーンストーミング演習 _____ 討論風景
- ・第 15 回：原発事故と健康影響 _____ 講義風景

3) 廃炉地盤工学教育システムにおける取組み

前述の早稲田大学における講義を含め、本研究プログラムで実施した本年度の取組みを表 3.1-3 に整理する。

表 3.1-3 廃炉地盤工学教育システムにおける取組み

	講演会名称	内容	対象	参加人数
1	第 53 回 地盤工学研究発表会 特別セッション (@高松市)	・廃炉地盤工学の活用と原子力発電所 廃止措置への地盤工学的技術の貢献 方法の検討	・地盤工学関連技術者 ・学生	50 名以上
2	「地盤工学特論 B」 (早稲田大学大学院)	・福島第一原子力発電所の廃止措置を 主なトピックとして取上げ、地盤工学会・ 廃炉地盤工学委員会からの講師が『廃 炉地盤工学』全般を教授	・学生 (院生)	6~7 名
3	「現場実験から把握する地下水の 実流速 (その 2)」廃炉地盤工 学委員会講習会	・実際の計測における問題点とその解決策 を把握し、今後の現場実測のあり方を理 論と実験両面から学習	・地盤工学関連技術者	53 名
4	「福島第一原子力発電所の廃止 措置への貢献を目指す『廃炉地 盤工学』~地盤施工学の創設 ~」講習会	・『廃炉地盤工学』を構成する学問単元 「地盤材料学」「地盤環境学」に焦点を 当てた講演	・地盤工学関連技術者 ・学生	86 名

3.1.3 廃炉地盤工学に関する認知度の向上と技術の集約体制の構築

(1) 認知度の向上に向けた取組み

廃炉地盤工学の認知度向上に向けて、地盤工学研究発表会（全国大会）における特別セッションや廃炉地盤工学委員会主催の講習会の開催等、様々な取組みを進めた。また、これらの講習会では、受講者にG-CPDを付与した。なお、CPDとは、土木・建設系技術者の自己研鑽や継続教育のための制度である（G-CPD：CPD認定機関である地盤工学会が講習会等の受講を証明するポイント）。

以下にその概要を述べる。

1) 第53回 地盤工学研究発表会 特別セッション「廃炉地盤工学の活用と原子力発電所廃止措置への地盤工学的技術の貢献方法の検討」

平成30年度の地盤工学研究発表会（サンポートホール高松）において、標記特別セッションを開催した（図3.1-26）。本セッションでは、廃炉地盤工学による技術の展開とスリーマイル島原発（TMI-2）におけるデブリ取出し事例の施工学的解釈についての講演や技術マップと活用方法の紹介、更に廃止措置への地盤工学的技術の一事例として、デブリ取出し時における超重泥水の遮水・遮蔽材としての活用方法について、模擬実験の結果をまじえ紹介された。

また、質疑応答では、実験結果が示された超重泥水に関する長期安定性に関する質問のほか、地盤工学会としての廃炉地盤工学の進め方に関する意見等が交わされた。

- 日時 : 平成30年8月25日（水）9:00～10:30
- 場所 : サンポートホール高松 大ホール
- 主催委員会 : 福島第一原子力発電所廃止措置に向けた地盤工学的新技术と人材育成に関する検討委員会（略称：廃炉地盤工学委員会）



図 3.1-26 特別セッション風景

2) 「現場実験から把握する地下水の実流速（その2）」廃炉地盤工学委員会講習会

本講習会は、福島第一原子力発電所の廃止措置において、「現状から廃止措置までの長期間の地下水環境・作業環境の状況調査と将来予測」のために、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として企画された「廃炉地盤工学委員会」の活動の一環として実施したものである。

一般に地盤工学では、地下水は流量が問題になることが多いため、ダルシーの法則に従った地下水解析を教えている。この方法は、地盤を多孔質体と仮定し、全断面でどれだけの流量があるかを算定するため、透水係数というパラメータでその特性を表現したものである。しかし、実際には、地下水は土粒子の間隙を縫うように流れるため、透水係数から算定された流速（ダルシー流速）より、実際の流速（実流速）は速くなり、地盤の間隙率（有効間隙率）や動水勾配も影響すると考えられる。したがって、地下水による汚染物質等の広がり把握するためには、この実流速が重要となる。

本講習会は、基本的に2017年度と同様に午前の座学と午後の現場実験を組合わせて実施した（図3.1-27）。座学では問題点の概要に加えて、現場ボーリング孔を用いた実験の目的と内容を説明し、現場実験では水理試験（揚水試験）を行い、この状態で温度検層とトレーサー試験を実施した。なお、現場実験では、現場の対象土層の流速を流向流速計で確認し、温度検層によって水みちを特定した後、トレーサー試験により平均実流速を把握している。これは、揚水井戸で対象土層に動水勾配をつけた一種の加速試験であるため、測定結果からだけでは実流速は評価できないことから、モデル解析を併用して、結果を解釈した。

以上の講習を通じて、受講者は、実際の計測の問題点とその解決策を把握し、今後の現場実測のあり方を理論と実験の両面から学習した。

- 日時 : 平成30年10月19日（金）9:00～16:30
- 場所 : 日本大学文理学部 百周年記念館敷地内
- 参加人数 : 53名



図3.1-27 講習会風景（10月19日）

（左：座学風景 右：現場実習風景）

3) 「福島第一原子力発電所の廃止措置への貢献を目指す『廃炉地盤工学』」に関する講習会

地盤工学会では、文部科学省に採択された「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取り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」を通じて、福島第一原子力発電所の廃止措置に向け、地盤工学的技術の貢献を促進するべく活動を行っている。

この一環として実施してきた一昨年度の「廃炉地盤工学の全体枠組み」についての講習会、昨年度の『廃炉地盤工学』の学問単元「地盤施工学」に焦点を当てた講習会に引き続き、今年度は「地盤材料学」と「地盤環境学」に焦点を当てて講習会を開催した（図 3.1-28）。

■日時 : 平成 30 年 12 月 18 日（火）14:00～17:30

■場所 : 地盤工学会（JGS 会館） 地下大会議室

■参加人数 : 86 名

講習会では、前半が総論と施工を達成するための要求性能を有する材料の設計と開発について、廃炉地盤工学委員会及び地盤材料学 WG で検討・議論されてきた内容が報告された。その後、空間放射線（放射線対策）と地盤環境・材料についての講習を挟んで、後半は施工を適切に実施するために要求される作業環境等の整備と評価について、地盤環境学 WG で検討・議論されてきた内容が報告された。

質疑応答では、様々な施工経験・概念を有する参加者と福島第一原子力発電所廃止措置の実現に向けた地盤工学的技術の展開等について、活発な意見交換・議論がなされた。

■講習会プログラムと講師一覧

- ① 地盤材料学と地盤環境学の総論 _____ 小峯 秀雄（早稲田大学）
- ② 超重泥水と材料配合・調合 _____ 長江 泰史（テルナイト）
- ③ 施工から要求される材料性能 _____ 成島 誠一（西武建設）
- ④ 空間放射線と地盤環境・材料学 _____ 後藤 茂（早稲田大学）
- ⑤ 地下水環境の測定と課題 _____ 竹内 真司（日本大学）
- ⑥ 地下水環境予測と数値解析 _____ 鈴木 誠（千葉工業大学）



図 3.1-28 講習会風景（12月18日）

(2) 廃炉地盤工学ホームページの更新・拡充

廃炉地盤工学ホームページについて、本研究プログラムの進展に伴って更新を行った。本年度更新したコンテンツは表 3.1-4 に示す通りであり、更新したホームページを図 3.1-29 に示す。

表 3.1-4 廃炉地盤工学ホームページ更新コンテンツ一覧（平成 30 年度）

No.	更新コンテンツ
2-1-4	平成 29 年度 成果報告書
2-2-8	平成 30 年度 第 1 回廃炉地盤工学委員会
2-2-9	平成 30 年度 第 2 回廃炉地盤工学委員会
2-2-10	平成 30 年度 第 3 回廃炉地盤工学委員会
2-3-15	第 53 回 地盤工学研究発表会特別セッション
2-3-16	「現場実験から把握する地下水の実流速（その 2）」廃炉地盤工学委員会講習会
2-3-17	「福島第一原子力発電所の廃止措置への貢献を目指す『廃炉地盤工学』」に関する講習会
2-3-18	平成 30 年度福島第一原子力発電所視察
4-2	福島第一原子力発電所事故の経緯概略



廃炉地盤工学 HP : <http://www.jiban.or.jp/hairo/>
(公益社団法人 地盤工学会ホームページ内 : <http://www.jiban.or.jp/>)

図 3.1-29 廃炉地盤工学ホームページ

なお、本ホームページのアクセス解析によると、平成 31 年 3 月末時点で訪問者数（ユーザー数）は 2,669 人（平成 29 年 4 月～平成 31 年 3 月の 2 年間）、ページビュー数は約 14,000 となっている。

(3) 関連学会への参加、活動内容の発信・情報収集

土木学会等の関連学会へ参加し、当プロジェクトの活動内容を発信すると共に、関連情報を収集した。

以下に参加した関連学会・ワークショップ等を示す。

- ・ 「燃料デブリ取出しにおける潜在的課題」に関する勉強会
／福島復興・廃炉に貢献する学協会連絡会（ANFURD）
：平成30年5月15日（火）9:00～12:00
- ・ 第2回「福島第一原子力発電所における廃炉・汚染水対策の現状報告及び意見交換」
／土木学会
：平成30年7月12日（木）13:30～16:50
- ・ GER2018
Geo-environmental Engineering and Recycling 2018
：平成30年9月9日（日）～9月12日（水）
- ・ 第8回 国際環境地盤工学会議（8ICEG）
The 8th International Congress on Environmental Geotechnics
：平成30年10月28日（日）～11月1日（木）

(4) 収集した情報の委員会へのフィードバック、共有化、検討の深化

前述の特別セッションで出された意見、関連学会で収集した情報等については、過年度までと同様に、廃炉地盤工学委員会（3.1.1参照）にフィードバックすると共に、委員用サーバ上で共有化することにより検討の深化を図った。

参考文献

- (1) 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議：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止措置等に向けた中長期ロードマップ（第4回改訂版），2017年9月。
- (2) 原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）：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2018，2018年10月。

3.2 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価（再委託先：早稲田大学）

早稲田大学では、個別基盤研究テーマ「(ii)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」、及び「(iii)福島第一原子力発電所構内の除染廃棄物処分と原子炉建屋デコミッションングに関する実現可能な技術の開発」に関して、デブリ取出し補助のためのガンマ線と中性子線両方の遮蔽性能を有する超重泥水や、構内除染廃棄物の一時仮置き施設のためのガンマ線遮蔽性能と遮水性能の両方を保有する覆土材の仕様設計に資するため、各材料仕様に応じて取得した放射線遮蔽データを拡充すると共に、一次データベースの作成を行った。

また、超重泥水の充填施工性評価実験装置と液圧測定のできるタクトイルセンサシステム及びテクスチャーアナライザーを用いて超重泥水の充填施工性及び安定性を検討すると共に、水ポテンシャル測定装置及び保水性試験装置により覆土材の保水性能を定量評価した。上記の成果を、各材料の仕様に応じて整理し、廃炉地盤工学委員会が進める廃炉プロセス技術シナリオを支援するための新技術メニューを作成した。

なお、参考文献に掲げた成果は、卒業研究・修士研究・博士研究を通じて得た成果を社会に公開したものであり、このような活動を通じて人材育成に寄与した。

具体的な内容を以下に述べる。

3.2.1 デブリ取出し補助及び構内除染廃棄物の一時仮置き施設のための超重泥水及び覆土材のガンマ線・中性子線遮蔽性能の一次データベース

本項では、平成 28 年度に示した実験手法やその応用手法を用いることで、ガンマ線及び中性子線に対して高い遮蔽性能を有するデブリ取出し補助材料である超重泥水や、構内除染廃棄物の一時仮置き施設に用いる覆土材に関して様々な境界条件で放射線遮蔽データを取得し、整理した一次データベースについて論じる。

(1) 各超重泥水のガンマ線・中性子線遮蔽性能の一次データベース

格納容器への充填が想定される超重泥水は、燃料から照射される中性子線の遮蔽が求められる。熱中性子捕獲に有効なホウ素を添加した超重泥水を用いて、遮蔽実験のデータベース拡張を行った^{1),2)}。図 3.2-1 及び図 3.2-2 は、超重泥水のホウ素濃度と熱中性子線低減率の関係、超重泥水の厚さと熱中性子線低減率の関係を示す。測定結果から、厚さが小さいほどホウ素濃度による低減率への影響が顕著であり、同一厚さにおいてホウ素の質量濃度が 0.4 %以上であれば一定の熱中性子線遮蔽性能を有することが示された。

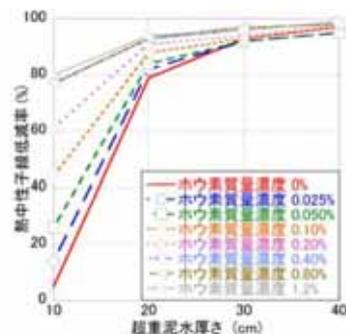
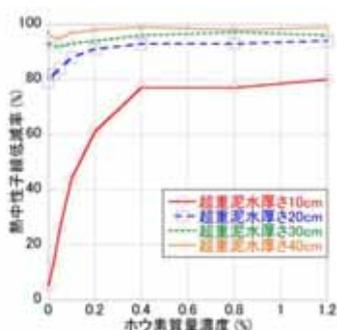


図 3.2-1 超重泥水のホウ素濃度と熱中性子線低減率の関係 図 3.2-2 ホウ素含有超重泥水の厚さと熱中性子線低減率の関係

(2) 各覆土材料のガンマ線・中性子線遮蔽性能の一次データベース

平成 29 年度までの研究において、覆土材料を用いた場合に熱中性子低減率が負の値を示すこと、即ち速中性子の減速による熱中性子の増加量が遮蔽量を上回る現象が確認されてきた。

前述の現象が生じる条件として、供試体の厚さ及び水分の含有量が考えられる。また、これまでの遮蔽実験では、供試体は線源に接する位置に配置して透過線量を測定してきた。本項では、体積含水率を変化させた土質材料を用いた遮蔽実験のデータベースを拡張すると共に、供試体の配置位置の相違が測定結果に及ぼす影響について論じる³⁾。

1) 体積含水率及び供試体の配置位置を変化させた遮蔽実験の条件と方法

表 3.2-1 にクレーサンドの供試体作製条件を示す。また、図 3.2-3 は供試体を線源寄りに設置した場合の放射線遮蔽実験の概略図、図 3.2-4 は供試体を検出器寄りに設置した場合の放射線遮蔽実験の概略図を示す。本試験では、同一試料に対し、供試体を線源寄りに設置した場合と供試体を検出器寄りに設置した場合の 2 通りで放射線遮蔽実験を行った。双方とも検出器と線源の間隔を 50 cm とし、線源側及び検出器側に層厚 5 cm 及び 10 cm の供試体を設置し、検出器で各種放射線の透過線量を測定した。

表 3.2-1 クレーサンドの供試体作製条件

試料名称	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	体積含水率 (%)	含水比 w (%)
クレーサンド ($w=10\%$)	1.18	10.7	10.0
クレーサンド ($w=20\%$)	1.22	18.8	19.3
クレーサンド ($w=30\%$)	1.71	37.8	28.4
クレーサンド ($w=40\%$)	1.79	51.2	40.1

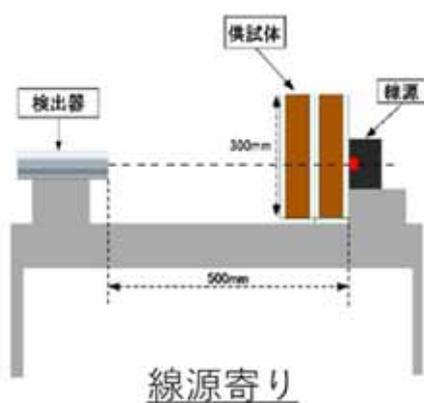


図 3.2-3 供試体を線源寄りに設置した場合の放射線遮蔽実験の概略図

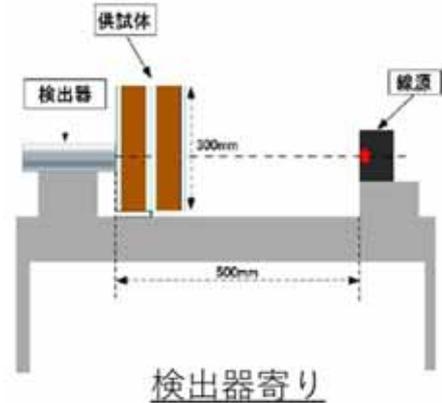


図 3.2-4 供試体を検出器寄りに設置した場合の放射線遮蔽実験の概略図

2) 体積含水率を変化させたクレーサンドの放射線遮蔽性能の変化

図 3.2-5 は湿潤密度とガンマ線低減率の関係、図 3.2-6 は体積含水率と中性子線低減率の関係、図 3.2-7 は体積含水率と速中性子線低減率の関係、図 3.2-8 は体積含水率と熱中性子線低減率の関係を示す。測定結果から、供試体の配置位置に依存して、従来の線源寄りに配置した場合の方がガンマ線低減率は大きく、全中性子、速中性子及び熱中性子低減率は小さく評価された。この相違の原因として、供試体の配置位置によって、各放射線の散乱の仕方が異なることが考えられる。したがって、材料の放射線遮蔽性能を比較するためには、試験方法を統一することが重要である。

図 3.2.1-8 から、覆土材料の熱中性子線低減率は、厚さ 5 cm において体積含水率 10 % から 50 % に至るまで負の低減率を示した。一方、厚さ 10 cm においては体積含水率 20 % 付近においてのみ負の値を示した。このことから、遮蔽材の厚さ及び水分の含有量によって、速中性子の減速による熱中性子の増加と遮蔽による熱中性子の減少の大小が変化するものと考えられる。

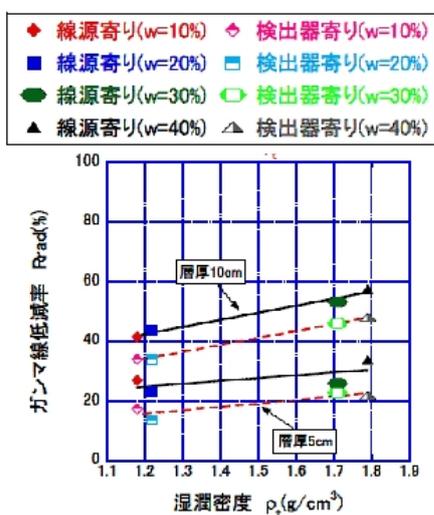


図 3.2-5 湿潤密度とガンマ線低減率の関係

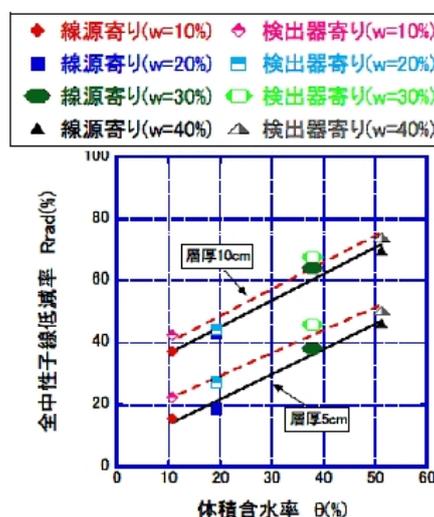


図 3.2-6 体積含水率と全中性子線低減率の関係

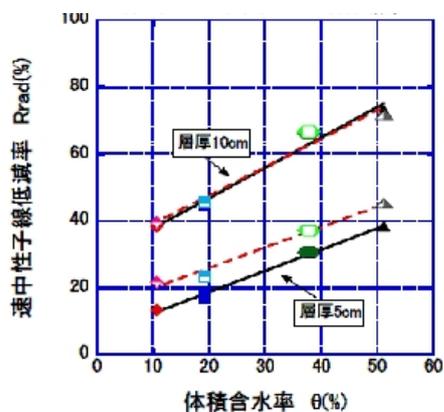


図 3.2-7 体積含水率と速中性子線低減率の関係

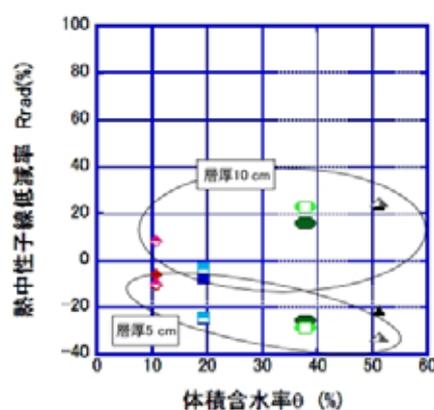


図 3.2-8 体積含水率と熱中性子線低減率の関係

(3) 遮蔽実験における散乱放射線の影響評価及び2次元放射線分布の測定

これまで実施した土質材料の放射線遮蔽実験では、線源、試料、検出器を一直線に配置し、試料のガンマ線及び中性子線の低減率・透過率を評価してきた。一方、試料に対して方向を変えたガンマ線、中性子線散乱成分及び1次元方向以外の周囲の線量分布はこれまで測定されなかった。そこで回転台を用いて検出器の位置を相対的に変え、各方向の線量分布の測定を試みた。本項では、測定した試料周辺の各方向の線量分布・散乱成分の測定結果と減衰の傾向について述べる。

1) 測定に用いた試料及び測定方法

測定に使用した土質材料は、平成29年度までに配合を示した比重2.5、比重1.8の超重泥水及び東北砂砂である。これに加えて水道水を遮蔽体とした実験を実施した。これまでの遮蔽実験における線源・遮蔽体・検出器の位置関係、及び回転台を使用した本実験における位置関係は、図3.2-9に示す通りである。

本実験では、図に示すように、それぞれが一直線に並んだ状態を0度の回転角度とし、15度あるいは45度ずつ、最大180度回転させることで、各方位のガンマ線・中性子線量を測定した。線源は他の遮蔽実験同様に¹³⁷Cs及び²⁵²Cfの封入線源を使用し、完全には方向を絞れないものの、ガンマ線・中性子線がある程度まで前方に対して射出されるよう鉛及びポリプロピレンの後部遮蔽体を設置している。

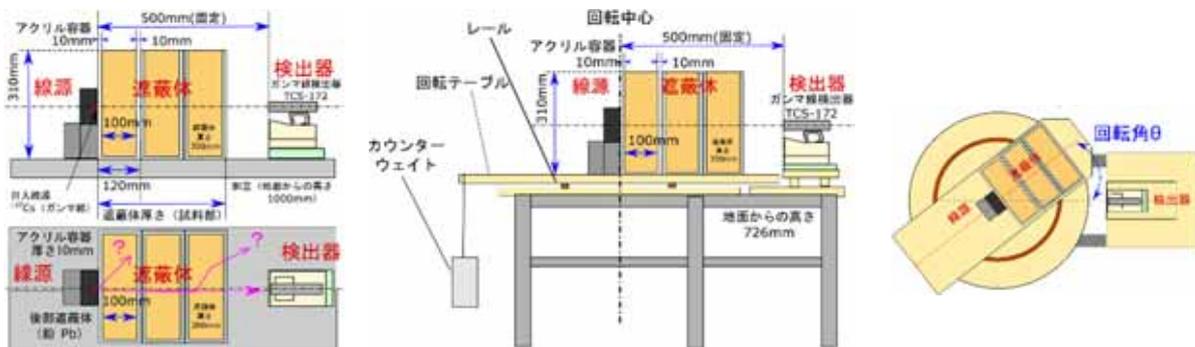


図3.2-9 これまで実施された放射線遮蔽実験の位置関係（左）と回転台を使用した2次元的な放射線分布・散乱成分の測定（中央・右）

2) ガンマ線の各方向の線量分布及び散乱成分の評価

図3.2-10は遮蔽体設置個数により各方向に検出されるガンマ線量の変化を各方向極形式（中心から遠いほど線量大きい）で表したものである。

測定の結果、各方向で線源のみの場合以上のガンマ線が観測されることはなく、ガンマ線の後方散乱成分は確認されなかった。また、遮蔽体を通過した部分においては、平成29年度までの結果同様、各方向で透過距離と湿潤密度の積に対する指数でガンマ線量が減少する傾向が認められた。また、その実験式に関しては、1次元の場合⁴⁾とほぼ一致した。以上から、これまでの遮蔽実験の結果は、散乱成分と直進成分を含んだ形として遮蔽設計に適用可能なことが示唆され、今後、結果を根拠として、土質材料の湿潤密度の管理と遮蔽体厚さの決定を検討することが期待される。

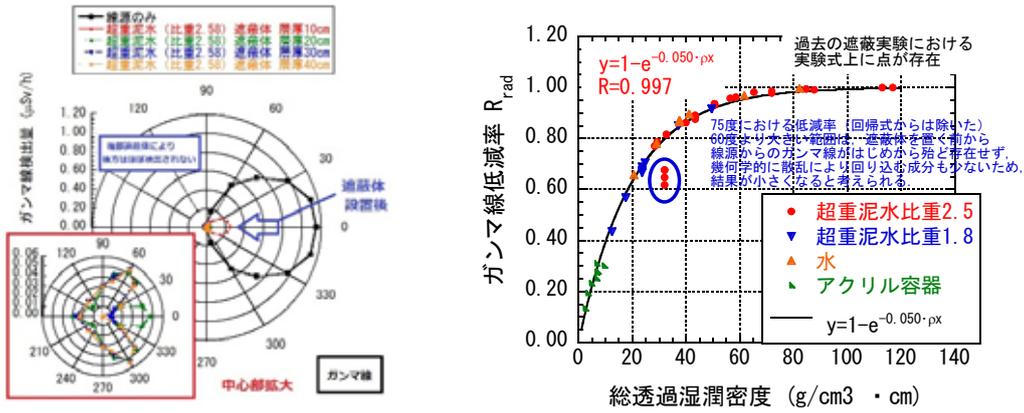


図 3.2-10 遮蔽体設置に伴うガンマ線分布の変化（左）と透過距離・湿潤密度との関係（右）

3) 中性子線の各方向の分布

図 3.2-11 は、同様に中性子線に対して、全中性子線、速中性子線、熱中性子線の各方向の分布を表したものである。中性子線の場合、後部遮蔽体で絞りきれない線量の影響も考えられるが、後方に対しては遮蔽体設置後に線量の増加が認められ、後方散乱と見られる中性子線成分の存在が確認された。これにより、中性子線の場合、全方向に中性子線散乱成分が存在することが示唆された。また、後方散乱成分の量は、試料により、遮蔽体の厚さには依存しなかった。今後はこの散乱線の影響に関して遮蔽性能評価への反映を検討すると共に、材料の違いによる散乱量の違い及び散乱に寄与する土質材料の状態量あるいは散乱メカニズムに関して考察をしていくことが求められる。

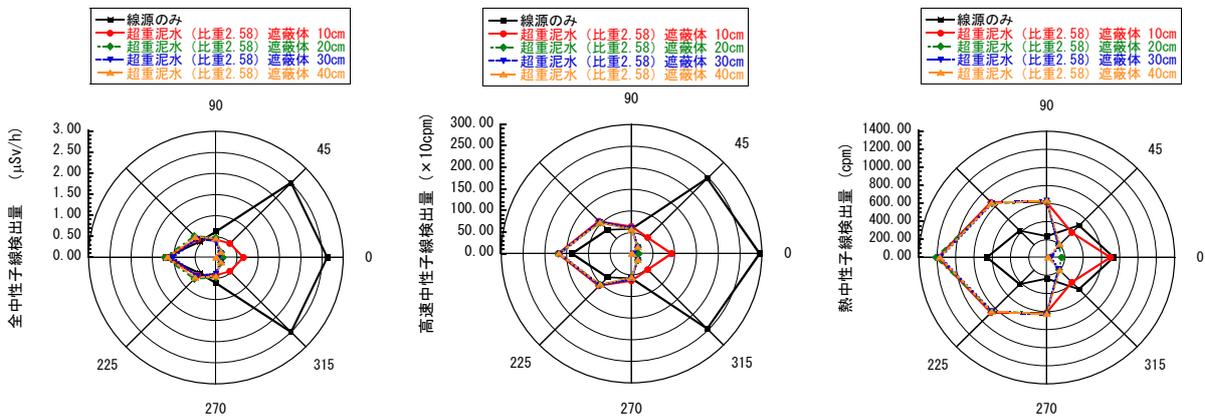


図 3.2-11 遮蔽体設置に伴う各方向の中性子線線量分布の変化

3.2.2 超重泥水の充填施工性・安定性及び覆土材の保水性能の定量評価

本項では、タクタイルセンサシステムを使用した超重泥水の充填施工性に関する評価、及び充填後の施工状況把握に関して述べる。

(1) タクタイルセンサシステムを用いた超重泥水の充填施工性評価

当該研究の目的は、超重泥水の充填施工を想定し、泥水が充填予定箇所に対して適当に充填可否について把握することである。ここでは、充填箇所を模擬した容器へのセンサの取付け及び液圧・土圧分布の計測を行い、泥水充填箇所の把握・定量化を試みた。また、本年度は充填施工中の液圧・土圧分布の把握に加え、これまでの配合に対し過剰な分散剤を加えることで超重泥水に意図的な粒子沈降を引き起こし、液圧・土圧分布を特性値とした分離速度や分離状況の把握に関して評価を試みた。

1) タクタイルセンサシステムの仕様と試験方法

本研究における土圧分布の測定は、平成 29 年度に示した圧力分布測定システム、タクタイルセンサシステムによって実施した。タクタイルセンサは、2 枚のフィルムにそれぞれ行、列の銀電極が配線されたもので、電極交点における電気抵抗値の変化によって圧力分布を測定するものである。

本研究では、充填箇所に見立てたアクリル容器にセンサを取付け、泥水充填中及び充填後の分布を測定した。タクタイルセンサシステムの外観と測定状況を図 3.2-12 に、タクタイルセンサの仕様を表 3.2-2 に示す。



図 3.2-12 タクタイルセンサシートの外観と
タクタイルセンサシートによる土圧分布測定の様子・測定容器寸法

表 3.2-2 タクタイルセンサの仕様

使用装置	タクタイルセンサ I-SCAN210(0.8)
センサ部サイズ	238×238 mm
シート厚み	0.1 mm
最大圧力	80 kPa
センサ点数	1936点 (44行×44列)
分解能	8 bit

2) 充填に伴う泥水圧分布の変化

図 3.2-13 は、充填に伴う泥水圧発生状況を示したものである。図に示すように、充填中の受圧面に対する泥水圧分布を追うことで、超重泥水の充填箇所が観測可能である。また、図 3.2-14 は、超重泥水充填直後の泥水圧分布を示したものである。超重泥水を流し込んだ直後、水平方向に対しては泥水圧分布の偏りが殆どなく、受圧面の隅、即ち容器の隅々にまで広がって泥水圧が発生した。これにより、超重泥水は、充填によって深度方向にはほぼ均一な遮蔽体形成が可能なことが確認された。充填直後における超重泥水の泥水圧分布はほぼ線形で、泥水比重と充填高さから算出される最大土圧 (6.07 kPa) は、タクタイルセンサの最下部の行における平均土圧 (5.98 kPa) とほぼ一致しており、充填で均一な遮蔽体の形成が可能なことがこの結果からも確認された。

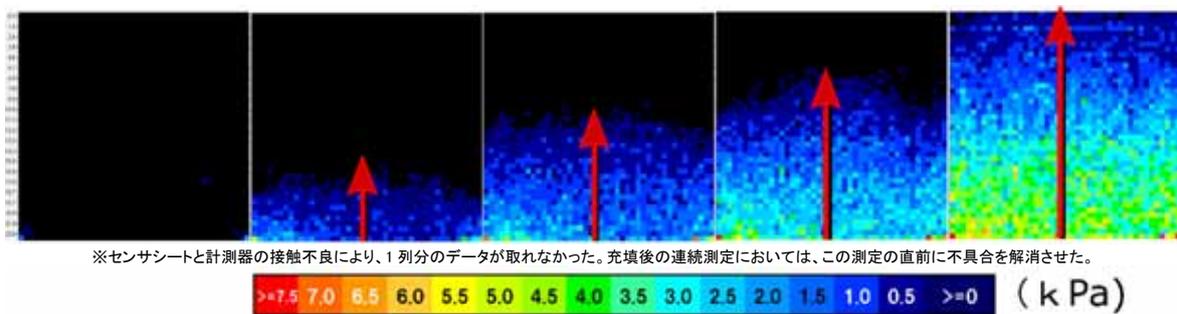


図 3.2-13 容器充填過程における土圧分布の変化の様子

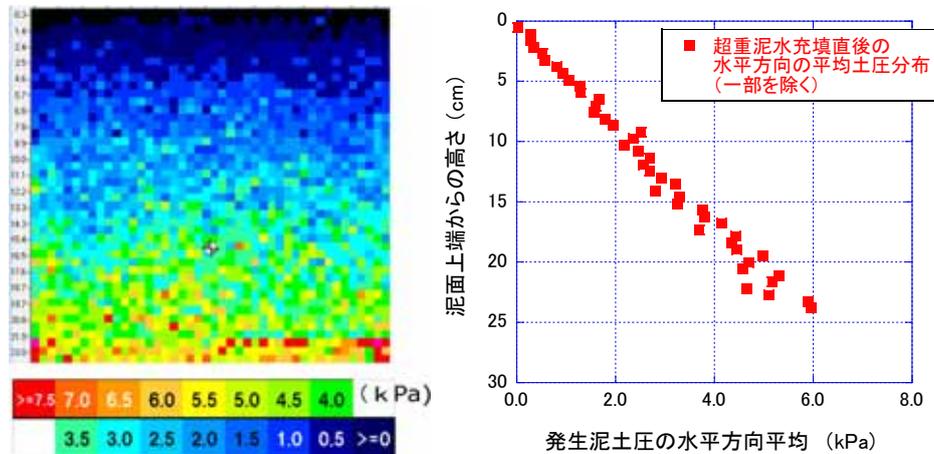


図 3.2-14 容器充填 5 分後における土圧分布の様子

3) 泥水の分離に伴う泥水圧の変化

図 3.2-15、図 3.2-16 は、分散剤を過剰に添加し、意図的に粒子沈降を促進させた超重泥水に対し、泥水圧の時間経過を測定したものである。

土圧分布の時間経過を観察すると、泥面直下以外の泥水圧は時間と共に減少し、その減少の割合は受圧面下方になるほど大きくなった。また、この泥水圧の減少はある程度時間が経つと変化が認められなくなった。これらの現象は、粒子沈降に伴う上部の比重・泥水圧の減少と下部における比重・泥水圧の増加を捉えたものと考えられる。今回の例のように、例えば泥水圧を物理量として充填施行後の超重泥水の状態を予測することが可能であり、他の物理量を含め、超重泥水の状態とその物理量との関係を併せて整理することで、充填施工の良否やその後の状態をモニタリングすることが有効であると考えられる。

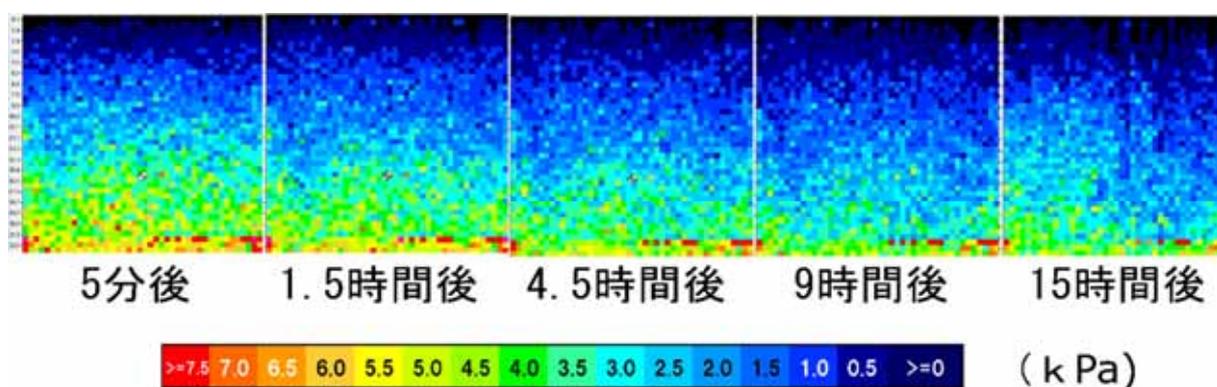


図 3.2-15 泥水の粒子沈降に伴う泥水圧分布の変化の様子

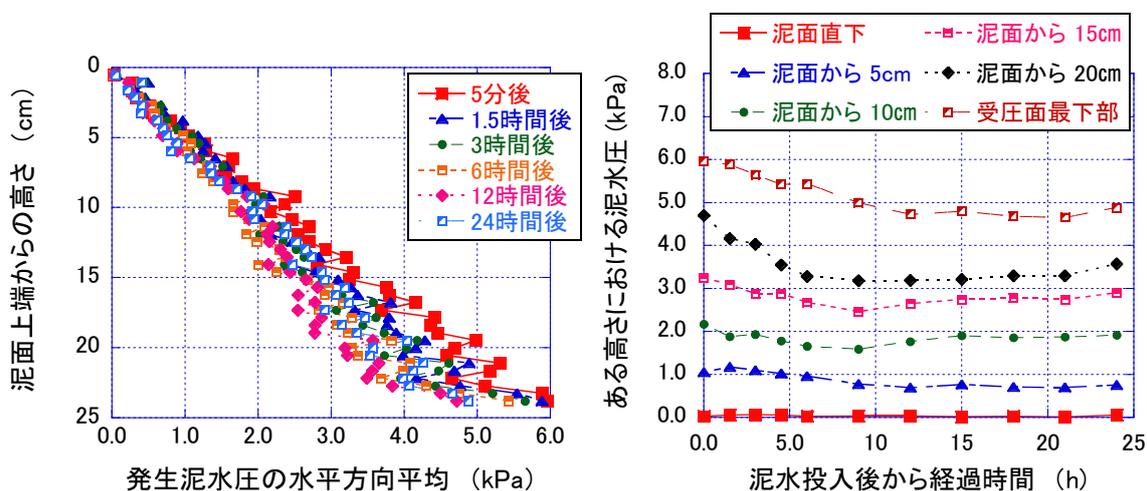


図 3.2-16 泥水の粒子沈降に伴う泥水圧の時間変化

(左：土圧分布 右：泥面から 5 cm ごとの高さにおける泥水圧の時間変化)

(2) テクスチャーアナライザーを用いた超重泥水の安定性評価

ここでは、超重泥水の力学特性の実験的評価に関して論じる。材料の安定性や充填施工性を検討する上で、材料の応力や強度を測定することが求められる。しかし、超重泥水のように軟弱な材料が発揮する応力は、土質試験用の装置では測定範囲外なほど微小であり、その測定には応答の分解能が高い装置を用いる必要がある。そこで、超重泥水の力学的特性を検討するため、最大荷重 500 g のテクスチャーアナライザーを導入し、その構造に関する検討を行った⁵⁾。

1) テクスチャーアナライザーの仕様と試験概要

表 3.2-3 に装置の仕様と実験条件を示す。バライト粉末を混合した超重泥水の挙動には、加重材であるバライト粒子の噛み合い等の影響が大きく寄与する。そこで、材料内部の構造を支配する骨格(構造骨格)及び分散への抵抗に寄与する力を実験的に評価するために、バライト粉末混合ベントナイトスラリー比重 1.1、1.8 及び 2.5 について、テクスチャーアナライザーによる貫入及び引き抜き抵抗の実験的評価を行った。本試験では、貫入・引き抜き試験に球状プローブを使用した。図 3.2-17 及び図 3.2-18 に使用装置と実験方法を示す。

表 3.2-3 テクスチャーアナライザーの仕様

使用装置	TA. XTplus (EKO 精機)
最大荷重	500 g
使用治具	0.5 インチ球状プローブ
圧縮引き抜き速度	3 mm/sec
圧縮・引き抜き距離	9 cm (底面から 10 cm)
試料作製日	測定 7 日前



図 3.2-17 テクスチャーアナライザー

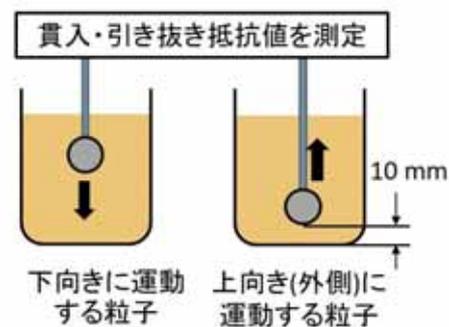


図 3.2-18 貫入・引き抜き試験の概要図

2) テクスチャーアナライザーによる貫入・引き抜き試験結果

図 3.2-19 及び図 3.2-20 に貫入・引き抜き抵抗荷重と貫入距離、及び時間の関係を示す。図 3.2-19 及び図 3.2-20 より、比重 2.5 は他の試料と比較して最大貫入・引き抜き荷重が 10 倍程度を示し、荷重の変化は線形的であった。前述の両挙動は、バライト粒子

同士の接触により、容器底面に貫入力が伝達したことに起因したものと考えられる。したがって、比重 2.5 は他の試料よりも構造骨格の強度及び粒子の分離に対する抵抗性が大きいと考えられる。また、引き抜き時は貫入時の 2/1 程度の荷重を示した。

図 3.2-21 に比重 1.1 及び比重 1.8 の貫入・引き抜き荷重の拡大図を示す。これらの試料は、バライトの含有体積割合が小さく、貫入・引き抜き荷重はベントナイト懸濁液部分が負担すると考えられる。測定開始直後は、貫入荷重が粒子間結合の破壊に用いられ、底面まで影響が到達していないと考えられる。その後、貫入距離 80 mm 程度において、底面の影響と思われる傾きの変化が生じている。ここで、ベントナイトの体積割合が最も大きい比重 1.1 は、ファンデルワールス力 (van der Waals force) によると考えられる引き抜き抵抗を示した。これにより、比重 1.1 は材料分離に関しても一定の抵抗性がある可能性が示された。一方、比重 1.8 では、上向きに移動するプローブに対して、分離を促進する方向に力が働くため、材料分離に対する抵抗力を殆ど有さないことが示された。図 3.2-22 に材料の攪拌に伴う貫入・引き抜き抵抗の減少を示す。これは、ベントナイトのチキソトロピー性に起因するせん断に伴う粘性低下によると考えられる。

本研究結果より、バライト粉末混合スラリーの構造骨格は、比重 1.1 ではモンモリロナイトのファンデルワールス力が支配し、比重 2.5 ではバライト粒子同士の接触が支配しているのに対して、比重 1.8 の配合ではバライト同士、ベントナイト粒子同士の接触がないことから、分散媒である水の性質が顕著に現れていると考えられる。

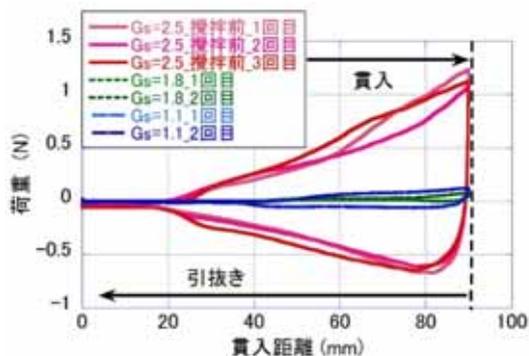


図 3.2-19 球状治具の貫入・引き抜き時間に伴う荷重の変化

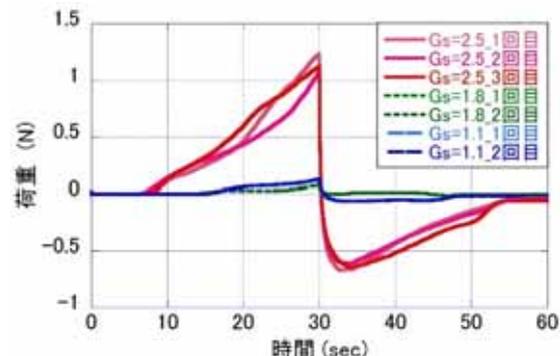


図 3.2-20 球状治具の貫入・引き抜き距離に伴う荷重の変化

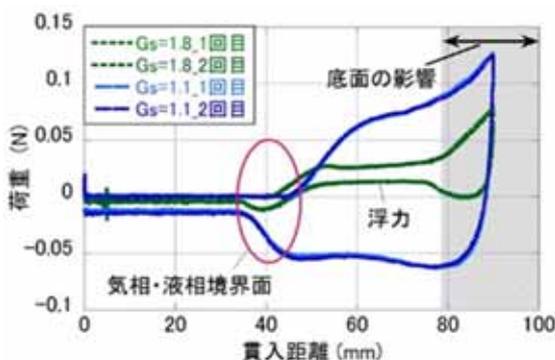


図 3.2-21 球状治具の貫入・引き抜き距離に伴う荷重の変化 (比重 1.1 及び 1.8 の拡大図)

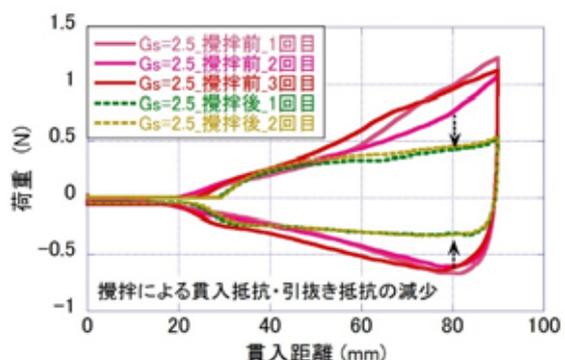


図 3.2-22 材料の攪拌に伴う貫入・引き抜き抵抗の減少

3.2.3 覆土材の保水性能の定量評価

土質材料の中性子線の遮蔽は、体積含水率に依存することが明らかになっていることから、高い保水性を有する土質材料は、高い中性子線遮蔽性能を長期間に亘って発揮することが予想される。また、土質材料の保水性を評価する際に使用されるのが土中水の化学ポテンシャルであり、これはマトリックポテンシャルと浸透ポテンシャルの和で表される。

本項では、覆土候補材料の保水性を測定するために保水性試験装置及び水ポテンシャル測定装置による試験結果を論じる。

(1) 保水性試験装置を用いた覆土材料の保水性能評価

ここでは、保水性試験装置によって取得した各種土質材料及び復興資材のマトリックポテンシャルの水分特性曲線について論じる。

1) 保水性試験に使用した各種覆土材料の仕様と試験概要

平成 30 年に試験を実施した材料は、東北硅砂 5 号、DL クレー、クレーサンド、宮城県気仙沼市分別土 A 種、宮城県気仙沼市分別土 B 種、岩手県大槌町分別土 A 種及び岩手県大槌町分別土 B 種である。

表 3.2-4 に使用した土質材料の基本物性を、図 3.2-23 には保水性試験装置の概略図を示す。

表 3.2-4 使用した土質材料の基本物性

試料	種別	土粒子の密度 (g/cm ³)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数	強熱減量 (%)	初期含水比 (%)
宮城県気仙沼市分別土 A 種	復興資材	2.684	56.2	33.7	22.5	12.9	30.9
宮城県気仙沼市分別土 B 種	復興資材	2.648	56.9	34.5	22.4	12.7	31.8
岩手県大槌町分別土 A 種	復興資材	2.693	38.1	24.6	13.5	5.8	16.8
岩手県大槌町分別土 B 種	復興資材	2.678	42.9	25	17.9	7.3	22.4
東北硅砂 5 号	砂	2.647	NP	NP	NP	0.3	0
DL クレー	シルト	2.646	NP	NP	NP	0.8	0
クレーサンド	粘性土	2.596	49.1	25.0	24.1	5.6	5.5

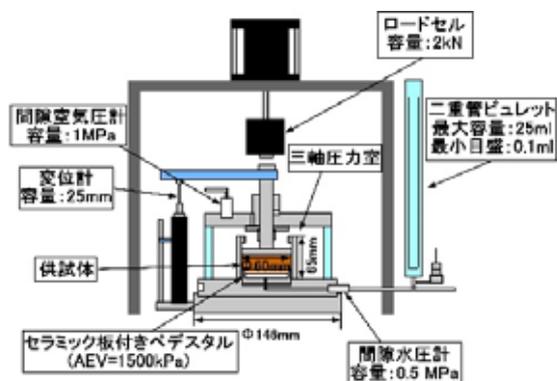


図 3.2-23 保水性試験装置の概略図

2) 試験結果

図 3.2-24 に各種土質材料の含水比とマトリックポテンシャルの関係を示す。

気仙沼市の分別土については、粘性土であるクレーサンドと同等のマトリックポテンシャルを有することが確認された。また、これらの土質材料は長期間に亘り中性子線遮蔽性能を発揮することが期待される一方で、同じ復興資材である大槌町の分別土は気仙沼市の分別土よりも保水性が低いことが確認された。以上から、復興資材の活用を検討する際には、地域によって保水性が変わることに注意しなければならないと言える。

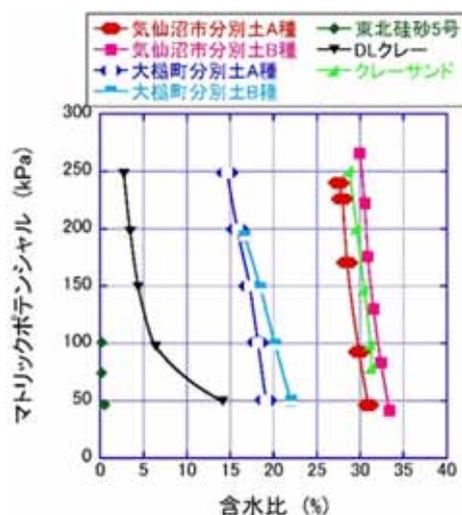


図 3.2-24 各種土質材料の含水比とマトリックポテンシャルの関係

(2) 水ポテンシャル測定装置を用いた覆土材料の保水性能評価

本項では、水ポテンシャル測定装置によって取得した各種土質材料、及び復興資材の化学ポテンシャルの水分特性曲線について論じると共に、復興資材中に含まれる塩分等が化学ポテンシャルに与える影響について検討した。

1) 水ポテンシャル測定に使用した各種覆土材料の仕様と試験概要

使用した土質材料は、表 3.2-4 と同じものを使用した。使用した水ポテンシャル測定装置は、METER 社の WP4C である。使用した水ポテンシャル測定装置を図 3.2-25 に示す。また、復興資材中に含まれる塩分等が化学ポテンシャルに与える影響については、各種復興資材から得られた溶出液の塩化物含有量と化学ポテンシャルを測定することにより評価した。

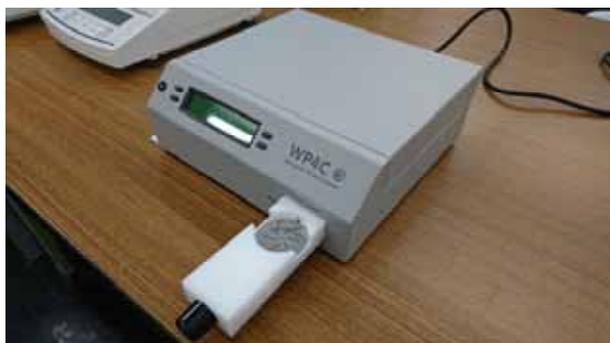


図 3.2-25 水ポテンシャル測定装置

2) 試験結果

図 3.2-26 に各種土質材料の含水比と化学ポテンシャルの関係を示す。

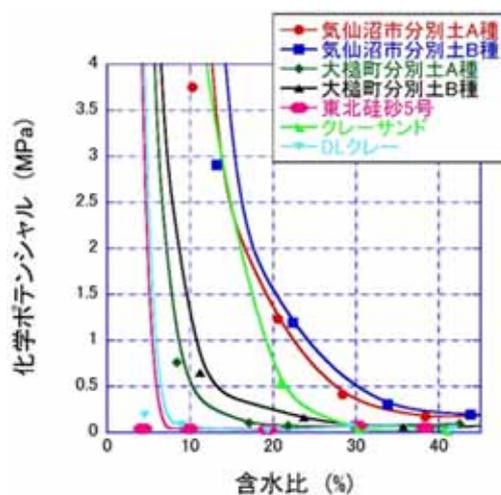


図 3.2-26 含水比と化学ポテンシャルの関係

これより、気仙沼市の分別土やクレーサンドの保水性が高いことが確認された。また、保水性試験装置を用いた結果と比較すると、気仙沼市の保水性がより高くなっていることが確認されていることから、これらの土質材料は長期間に亘って中性子線遮蔽性能を発揮するものと期待される。

復興資材については含水比が 40 % 以上の場合、気仙沼市の分別土で -0.15 MPa、大槌町の分別土で -0.07 MPa 付近の一定値を取った。なお、復興資材は津波堆積物を処理したものであるため、海水中の塩分が含まれていると考えられる。そこで、各種復興資材の塩分の影響を評価するため、各種復興資材の溶出液の塩化物含有量と化学ポテンシャルを測定した結果を表 3.2-5 に示す。

表 3.2-5 各種復興資材の塩化物含有量と溶出液の化学ポテンシャル測定結果

試料	塩化物含有量 (mg/g)	化学ポテンシャル (MPa)
宮城県気仙沼市分別土 A 種	1.1	-0.15
宮城県気仙沼市分別土 B 種	1.0	-0.13
岩手県大槌町分別土 A 種	0.029	-0.05
岩手県大槌町分別土 B 種	0.024	-0.04

測定の結果、気仙沼市の分別土の塩化物含有量は岩手県のものよりも多いことが確認されると共に、塩化物含有量が多くなるにつれて化学ポテンシャルも大きくなることが確認された。以上から、復興資材の化学ポテンシャルを評価する場合には、塩化物含有量に注意する必要があると言える。

参考文献

- (1) 瀬川一義、吉川絵麻、小峯秀雄、後藤茂、中村朋弘、氏家伸介、吉村貢：放射線遮蔽性能を有する超重泥水のホウ素濃度による中性子線低減効果の評価，第 52 回地盤工学研究発表会，pp. 2075-2076，2017.
- (2) 瀬川一義、吉川絵麻、小峯秀雄、後藤茂、成島誠一、氏家伸介、吉村貢：超重泥水のホウ素濃度による熱中性子線遮蔽性能の実験的評価，第 53 回地盤工学研究発表会，pp. 391-392，2018.
- (3) 神田皓城、那須郁香、吉川絵麻、小峯秀雄、後藤茂、王海龍、吉村貢：供試体設置位置を変化させた場合のクレーサンドの放射線遮蔽性能の評価，第 54 回地盤工学研究発表会，2019
- (4) 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(地圏 C)，Vol. 73, No. 4, pp. 342-354, 2017.
- (5) 吉川絵麻、小峯秀雄、後藤茂、氏家伸介、成島誠一、長江泰史、吉村貢：超重泥水の粘度に影響を及ぼす配合割合とそのメカニズムに関する研究，第 52 回地盤工学研究発表会，pp. 317-318，2017

3.3 地下水環境等の解析・調査技術と予測技術の高度化（再委託先：千葉工業大学）

3.3.1 概要

現状から廃止措置までの長期間に亘る地下水環境や作業環境の状況調査と将来予測を行うため、地下水流動評価技術の開発基盤として、昨年度に引き続き室内土層試験を実施し、現場で用いるトレーサー試験による物質移行の測定を試みた。また、現場での地下水流動を把握するため、ボーリング孔を用いた水理特性試験とトレーサー試験を実施した。更に、トレーサー試験で用いられる移流分散方程式の理論解について、主要な国内書籍を調査・取りまとめ、それらの理論解の確認計算を行った。

なお、大学における卒業研究を通じてこれらの成果を得ると共に、講習会（3.1.3の2）における資料作成や対外発表^{4)~8)}を行うことで人材育成も進めた。

3.3.2 室内土層試験による物質移行の測定方法の検討

汚染物質は地下水によって移流分散すると考えられるが、現場調査で使える方法には限りがある。そこで、現場で用いるトレーサー試験の測定方法について検討し、室内土層試験により移流分散に関係する地下水の実流速の測定を試みた。

今年度の室内土層試験では、無水エタノールを用いて比重調整した塩水をトレーサー剤に用いることにより、物質移行の測定が基本的に可能であることを確認する一方で、孔内で測定するという方法は、孔内における流れの影響を受けることが判明した。

(1) 室内土層試験の概要

室内土層試験装置を図3.3-1に示す。水槽内には幅100cm、奥行き60cm、高さ50cmの土層を、珪砂5号を用いて間隙率が約40%となるように突き固めて作成した。この土層水槽に一定の動水勾配を与えて流量を測定することでダルシー流速を求めることができる。

土層には図3.3-2に示すように投入孔と観測孔を設置し、各孔に電気伝導率計を設置してトレーサー剤の移行を電気伝導率で測定した。なお、トレーサー剤には、塩水に無水エタノールを混合して、比重1.0になるように調整した混合液を使用し、測定は水位差を数段階に変化させて実施した。

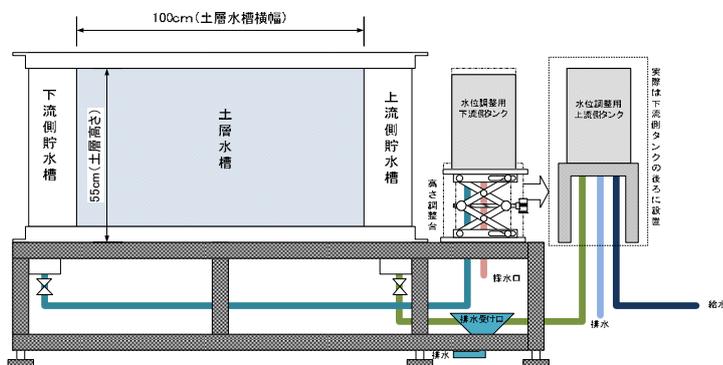


図 3.3-1 室内土層試験装置

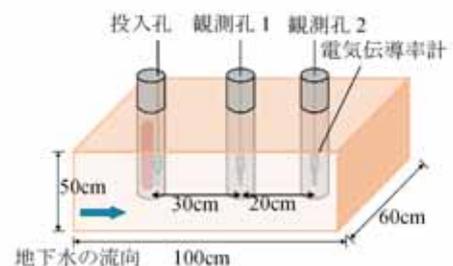


図 3.3-2 試験孔配置図（室内土質試験）

(2) トレーサー試験の評価

トレーサー試験では、はじめに採水口から砂層内の流量を計測し、ダルシー流速 v_1 を算出した後、トレーサー剤を投入し、各孔内の電気伝導率の変化から実流速 v_2 を算出した。その後、式(3.3-1)より有効間隙率 n_e を算出し、間隙率 n との関係から測定された実流速の妥当性を評価した。

$$n_e = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{式(3.3-1)}$$

トレーサー剤を投入した瞬間を 0 秒として、各試験孔における電気伝導率の経時変化を表した結果を図 3.3-3 に示す。この図が示す通り、各試験孔の電気伝導率が最大値となる時点（ピーク時）と、変化が見られた立ち上がり時から実流速を算出した。

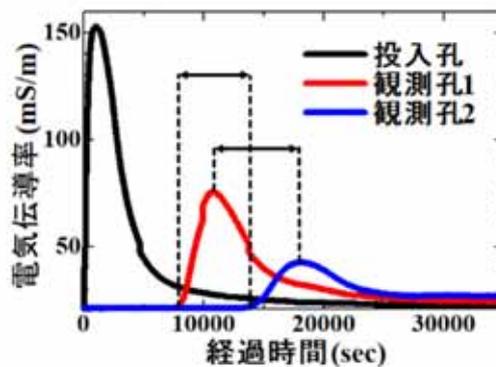


図 3.3-3 電気伝導率の経時変化

試験時に水位差を変化させて得た各測定値を表 3.3-1 に示す。この結果、有孔間隙率は間隙率 $n=40\%$ に対して概ね 30% 前後となり、ピーク時と立ち上がり時について差異はあるが妥当な結果が得られている。

表 3.3-1 水位差別の測定結果

水位差 (cm)	ダルシー流速 (m/s)	実流速(m/s)		有効間隙率(%)	
		ピーク	立ち上がり	ピーク	立ち上がり
4.81	4.59×10^{-5}	1.31×10^{-4}	1.37×10^{-4}	35.04	33.41
3.68	3.12×10^{-5}	9.19×10^{-5}	3.12×10^{-4}	33.95	30.72
2.24	1.35×10^{-5}	4.21×10^{-5}	5.22×10^{-5}	32.07	25.50
1.79	8.46×10^{-6}	2.72×10^{-5}	3.50×10^{-5}	31.83	24.70
0.93	4.98×10^{-6}	1.73×10^{-5}	2.54×10^{-5}	28.71	19.63

(3) 数値解析による評価

数値解析は、有限要素法による移流分散解析の 1 つである Dtransu の軸対象モデルを用い、定常状態で実施した。解析モデルは図 3.3-4 に示す通り、観測孔 2 の中心から上流側に 55 cm、幅 10 cm の長方形モデルを作成し、縦横 5 mm 間隔でメッシュ分割した。

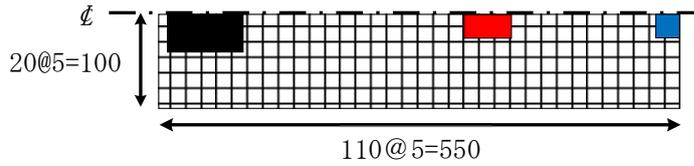


図 3.3-4 解析モデル

計算方法は、クーラン数が1以下となるように時間刻みを1.0秒から10.0秒間で設定した。また、試験の濃度変化については、初期濃度を1.00とし、得られた濃度に最大電気伝導率を掛けて、各観測孔での濃度変化が収束するまで計算した。

表 3.3-2 に解析で用いたパラメータを示す。なお、パラメータを決定する際、透水係数は室内試験から算出した値を用い、試験孔の有効間隙率は100%とした。砂層の有効間隙率と分散長については、数値解析の電気伝導率の経時変化が試験値と同様の形で表現できるような値を採用した。

表 3.3-2 解析パラメータ

	透水係数 (cm/sec)	有効間隙率 (%)	縦分散長 (cm)	横分散長 (cm)
観測孔 1	6.02×10^2	20	5.0×10^{-1}	9.0×10^{-3}
観測孔 2	6.02×10^2	17	4.0×10^{-1}	9.0×10^{-3}

解析の結果、有効間隙率は試験値と近い値となり、分散長は投入孔からの距離によって変化するため異なる値となった。結果の一例として、水位差2.24 cm、初期濃度0.78の場合における各観測孔の電気伝導率の経時変化を図 3.3-5 に、観測孔 2 の中心から上流側に約 25 cm 区間における各観測孔のピーク値付近の経過時間の濃度分布コンター図を図 3.3-6 に示す。

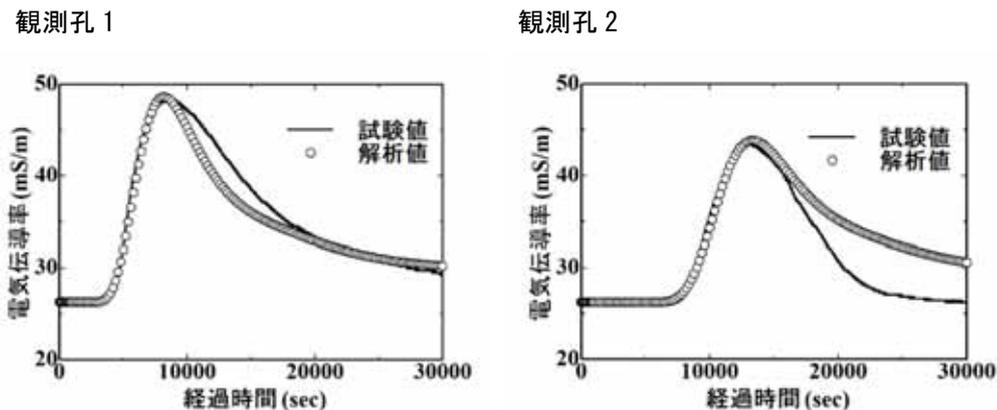


図 3.3-5 電気伝導率の経時変化 (試験値と解析値)

観測孔 1 : 9,800sec

観測孔 2 : 13,600sec

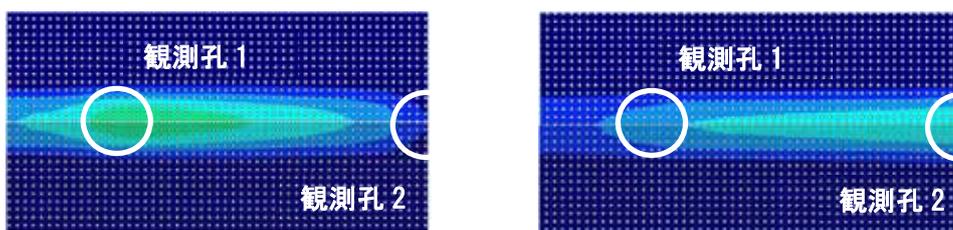


図 3.3-6 各孔におけるピーク時の濃度分布

以上の結果、数値解析は試験結果と同様の電気伝導率の経時変化を表現できると共に、投入孔から観測孔に達したトレーサー剤の割合を把握できることが確認できた。一方、課題としてはトレーサー剤の投入方法、観測孔内の対流防止（パッカー設置）が挙げられた。

3.3.3 実験井戸による現場試験

地下水の賦存環境及び物質の移行特性を調査・観測する経験を通じた次世代技術者の育成を目的に、現場実験が行える実験井戸を設置し、これを用いて現場調査・試験を実施した。

現場試験では、自然地下水流の流速が遅いことから、昨年度と同様、1つの井戸を揚水井戸として動水勾配を人工的に生じさせ、放射状収束試験として実施した。なお、試験では最初に温度検層により地下水流動層の推定した後、流向流速試験を行い、地下水流の流れ場を評価した上で、室内土層試験の結果を踏まえて比重調整した塩水を用いたトレーサー試験を実施した。

(1) 地下水流動層の推定

トレーサー試験により適切な測定結果を得るためには、地盤の不均質性の影響により存在する複数の水みちを把握することが重要となる。そのため、水みちを把握するため、試験井戸の有孔管区間を対象に、孔内の温度変化を用いた検層試験を実施した。

検層機の概要を図 3.3-7 に示す。検層機は長さ約 1 m、外径 1 cm の棒状ヒーターに、測定範囲 0~100 °C の温度計を等間隔に 5~6 箇所設置したものである。これを各試験井戸の試験区間に設置し、30 分間の加熱中における昇温過程の温度変化と加熱後 30 分間の降温過程の温度変化を測定した。なお、試験では測定深度間にパッカーを設置し、孔内の上下流の影響を小さくした。

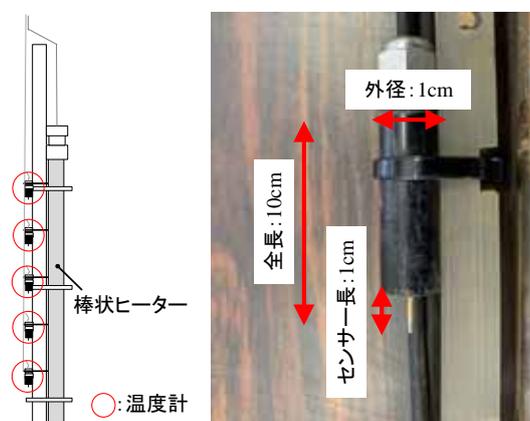


図 3.3-7 試験機の概要

一例として、試験井戸4の有孔管下端から26 cm、46 cm、66 cm、86 cm、106 cmの5箇所を対象に経過時間ごとの温度変化について測定した結果を図3.3-8に示す。

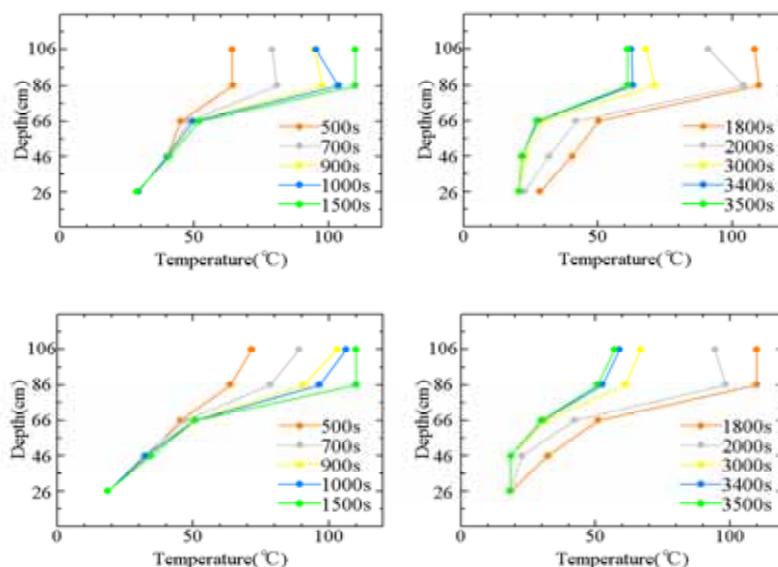


図 3.3-8 試験井戸4における経過時間ごとの各測定深度における温度変化

（ 上段左：自然状態時の昇温過程 上段右：自然状態時の降温過程
下段左：揚水状態時の昇温、下段右：揚水状態時の降温過程 ）

各図において、昇温時の結果は加熱開始後の測定開始から $t = 500 \sim 1500$ (s) まで、降温時の結果は加熱終了後の $t = 1800 \sim 3500$ (s) までの経過時間を抽出し、プロットしたものである。これらの結果が示す通り、昇温過程と降温過程のいずれの場合でも、26 cm と 46 cm で顕著な温度低下が認められることから、26～46 cm 区間付近に優位な水みちが存在するものと推測された。

(2) 流向流速測定試験

地下水流動層推定のために実施した温度検層試験結果から推定された優位な水みち付近において、地下水の流動方向及び流速（ダルシー流速）を把握するため、流向流速測定試験を実施した。試験には地下水の流れを電極間での抵抗変化により検出する「地下水流速流向計」を用いた。なお、測定にあたっては、試験井戸5は20 L/minで揚水している状態で、試験井戸3・4は温度検層試験により優位な水みちと推定された深度付近で実施した。

表 3.3-3 に深度と測定結果から算出した流向と流速を示す。測定結果より算出した流向は、どちらの試験井戸でも、おおよそ南方向に流れているが、若干の差異があることが確認された。また、流速については、試験井戸3では2つの測定深度で同程度の値を示したのに対して、試験井戸4では46 cmよりも26 cmの方が2倍程度の大きい値を示した。

表 3.3-3 流向流速測定試験の結果

測定井戸	有孔管下端 からの距離 (cm)	帯水層	測定結果	
			流向 (磁北 : N)	ダルシー流速 (m/s)
試験井戸 3	39	砂礫	S 30 度 W	1.43×10^{-6}
試験井戸 3	19	砂礫	S	1.32×10^{-6}
試験井戸 4	46	砂礫	S 15 度 W	1.87×10^{-6}
試験井戸 4	26	砂礫	S 15 度 E	3.46×10^{-6}

(3) トレーサー試験

トレーサー試験では、図 3.3-9 に示した位置関係で設置した試験井戸のうち、南北方向に配置された 4 本の井戸を使用した。なお、試験井戸の名称は、それぞれ北から南の順に投入孔、観測孔 1、観測孔 2、揚水孔とした。なお、試験方法は揚水孔から一定量 (20 L/min) で揚水し、投入孔からトレーサー剤を投入する放射状収束試験とした。

井戸断面図を図 3.3-10 に示す。対象とした試験区間は、事前の水理試験において透水係数が 10^{-4} m/s 程度の透水性が良好な砂礫層とし、投入孔の GL-11.0 m~-12.0 m、観測孔及び揚水孔の GL -11.5 m~-12.5 m に、それぞれ開孔率 30 %の有孔管を設置した。試験では、各孔の有孔管区間に電気伝導率計を複数個設置し、トレーサー剤の移行を測定した。なお、トレーサー剤には、塩分濃度約 3.5 %となるように塩水にエタノールを混合し、比重が 1.00 になるように調整した混合液を用いた。

トレーサー剤の投入にあたっては、トレーサー剤を注入した水風船をストレーナー内に設置し、井戸上部から先端が鋭利な棒鋼を落下させ風船を破裂させる方法とした。これは孔内の容積増加を防ぎ、瞬間的に地下水と置換する有効な方法である。

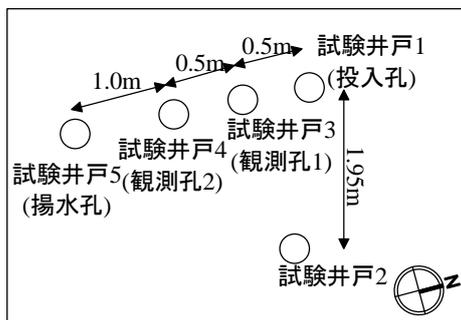


図 3.3-9 試験井戸平面図

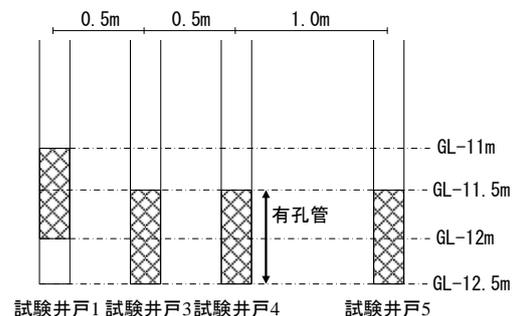


図 3.3-10 試験孔配置図 (現場試験)

また、孔内における上下方向の流れの影響を考慮し、図 3.3-11 に示すように測定区間をパッカーで区切った。なお、パッカーとは、連続気泡構造のスポンジを井戸径よりもひとまわり大きくするように巻き付けたものである。



図 3.3-11 パッカー概要図（左：全体図 右：詳細図）

試験結果として、以下の2ケースを例として示す。なお、投入孔にはGL- 11.0 m付近となるストレーナー上部にパッカーを設置している。但し、条件②で観測孔1にパッカーを設置した理由は、観測孔1が観測孔2と投入孔との間に位置するため、当該孔がトレーサー剤のバイパスとなることが懸念されたためである。

<試験条件>

- ① 観測孔1：有孔管下端から 17 cm, 37 cm, 57 cm, 77 cm, 97 cm で測定
 観測孔2：有孔管下端から 26 cm, 46 cm, 66 cm, 86 cm, 106 cm 付近にパッカー設置
- ② 観測孔1：有孔管下端から 17 cm, 37 cm, 57 cm, 77 cm, 97 cm 付近にパッカー設置
 観測孔2：有孔管下端から 26 cm, 46 cm, 66 cm, 86 cm, で測定

各試験条件における電気伝導率の測定結果を図 3.3-12 及び図 3.3-13 に示す。なお、各図における横軸は経過時間、縦軸の左軸は投入孔、右軸は観測孔の電気伝導率を表す。

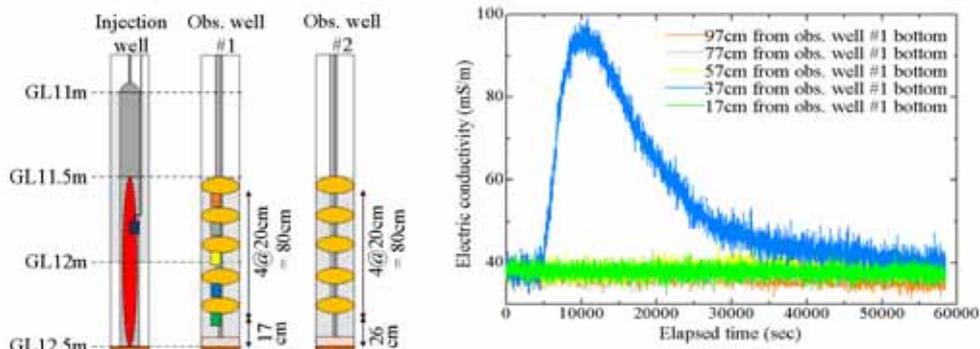


図 3.3-12 電気伝導率の経時変化（条件①の場合）

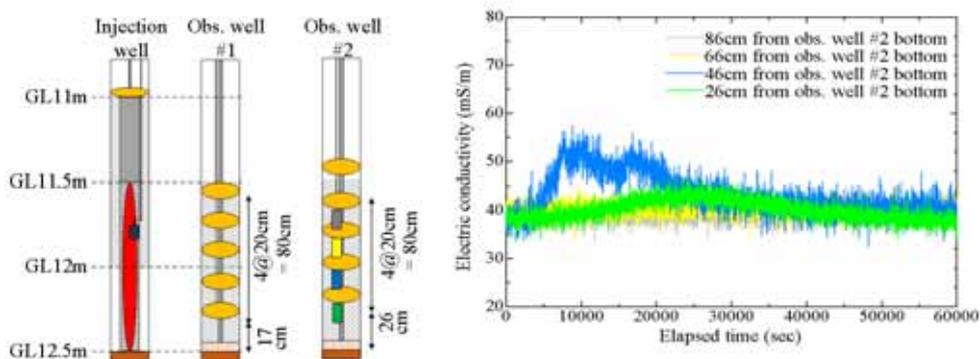


図 3.3-13 電気伝導率の経時変化（条件②の場合）

条件①では有孔管下端から 37 cm のみで反応が確認され、変化曲線は正規分布に類似した形となった。一方、条件②では有孔管下端から 46 cm で顕著な反応が確認されたが、有孔管下端から 26 cm では他の深度と比較するとピークに達するまで時間を要した。また、条件②の観測孔 2 では、反応が確認された深度のうち、有孔管下端から 46 cm の区間で顕著なピークが観測されたことから、この深度にトレーサー剤の大部分が到達していることが推測できた。しかし、測定区間を同じように区切った条件①の観測孔 1 とは異なり、他の深度でも反応が確認されており、有孔管下端から 26 cm ではピークに達するまでの時間が長く、46 cm と比較してピーク値が低い値となった。

この要因として、トレーサー剤が投入孔から観測孔 2 に直線的な経路ではなく、観測孔 1 を迂回するような経路で到達した可能性があると考えられる。

(4) 数値解析による考察

解析モデルについては、平面 2 次元モデルを用いて、図 3.3-14 に示す通り揚水孔を中心に半径 2.5 m、中心角 15 度の扇形状で作成した。メッシュは数値分散の影響を抑えるため、流動方向のペクレ数が 2 以下となるように、縦方向を 0.3 cm 間隔、横方向を 0.4 cm 間隔で分割した。

透水係数の値は、4 本の井戸を用いた揚水試験（定常状態）より算出した値 3.39×10^{-4} m/s を用い、有効間隙率の値は、井戸内を 100 % で固定し、地盤内は試験結果の経時変化の立ち上がりとピーク時間を再現するよう設定した。また、縦及び横分散長の値も、地盤内の有効間隙率同様、試験結果の経時変化を再現するよう設定した値を用いた。

境界条件については、モデル内周部（揚水孔壁）は揚水時の孔内水位を、外周部は定常井戸理論の式から投入孔と観測孔の水位が揚水時の水位となるように算定した水位を水頭固定した。

計算方法は、時間刻みをクーラン数が 1 以下となるように時間間隔を 1.0 秒と 10.0 秒で設定した。投入孔には試験時の電気伝導率の変化を初期濃度 1.0 として与え、各観測孔での変化が収束するまで計算した後、計算された濃度に、投入孔における試験結果より得た最大電気伝導率を掛け、電気伝導率の変化で試験結果を比較した。また、解析による計算結果における濃度 0.0 の部分は、各深度で測定した試験開始前の電気伝導率を与えて、試験結果と比較した。

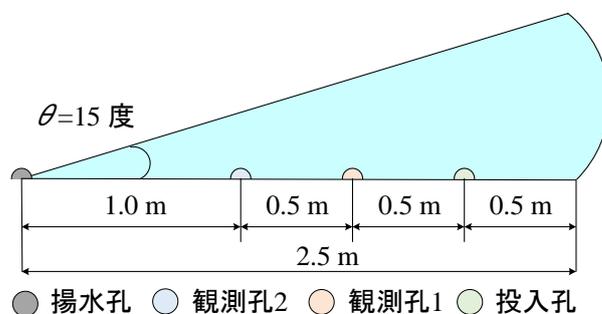


図 3.3-14 解析モデル図の概要

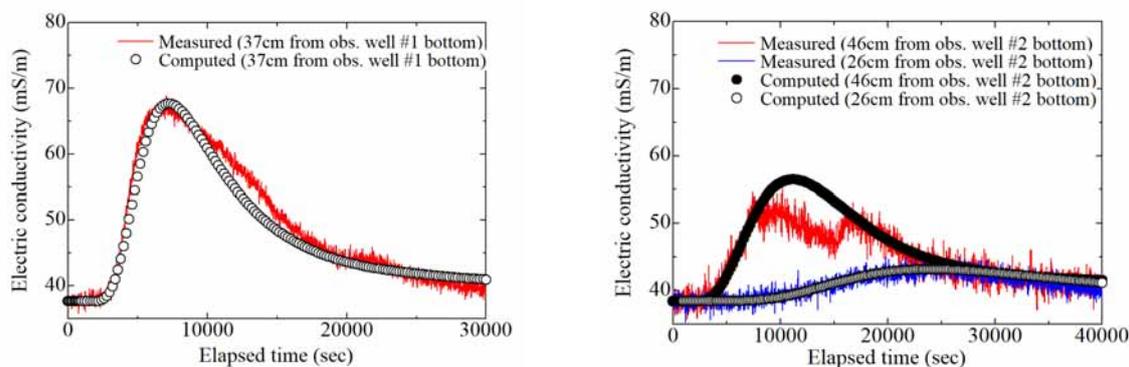
試験ではトレーサー剤の投入量に対して観測された量が少量であったため、平面 2 次元モデルを用いた解析では、移流分散パラメータを変化させるだけでは試験結果の再現が困

難であった。そこで、試験結果の経時変化の立ち上がり時とピーク時を概ね再現するような移流分散パラメータを設定した上で、ピーク値を再現するように投入量を調整することで、試験結果を再現できるようなパラメータを推定した。なお、調整した投入量は各観測孔における到達量と考えられるため、解析から各孔への物質の到達量を推測できると考えた。表 3.3-4 に設定した移流分散パラメータを示す。

表 3.3-4 解析に用いた移流分散パラメータ

対象深度	観測孔 1 37cm	観測孔 2 26cm	観測孔 2 46cm
有効間隙率	30 %	80 %	30 %
縦分散長	2.0×10^{-2} m	9.0×10^{-2} m	9.0×10^{-2} m
横分散長	4.0×10^{-3} m	9.0×10^{-3} m	9.0×10^{-3} m

図 3.3-15 は、電気伝導率計を観測孔 1 の有孔管下端から 37 cm、観測孔 2 の有孔管下端から 26 cm と 46 cm にて測定した際の試験結果と解析結果の経時変化を比較した図である。なお、解析値は投入量を 100 % としたとき、投入量を観測孔 1 の 37 cm と観測孔 2 の 46 cm の場合は 15 %、観測孔 2 の 26 cm の場合は 7 % に調整した際の値を示している。



(a) 観測孔 1 の有効管下端から 37cm (b) 観測孔 2 の有効管下端から 26cm と 46cm

図 3.3-15 試験と解析の経時変化の比較

2つのグラフが示す通り、投入量を調整する手法を用いることで、試験結果を概ね再現することができた。なお、解析結果からは、観測孔 1 への到達量が 15 % であるのに対し、観測孔 2 の総到達量は 22 % となったことから、投入孔から観測孔 1 を通過せずに観測孔 2 へ到達する水みちが存在することが推測される。

解析より得られた各測定深度における有効間隙率の値は、砂礫層における一般値 15～20 % と比較すると、観測孔 1 の 37 cm と観測孔 2 の 46 cm で 1.5～2.0 倍、観測孔 2 の 26 cm で 4.0～5.0 倍程度一般値よりも大きな値となった。この結果から、対象層における水みちは直線的ではなく、土粒子間の屈曲や大きく回り込むようにして直線距離よりも数倍程度長い水みちが存在することが推測される。但し、解析より得られた分散長は各観測孔

において等しい値となったことから、本実験における投入孔と観測孔の距離では地下水の経路が多少長くなっても分散長への影響は少ないものと考えられる。また、投入量を調整する評価手法を用いることで、各深度への物質の到達量を推測可能となったほか、各孔での到達量と推定された有効間隙率の値より、水みちの経路をある程度評価することが可能であることが分かった。

なお、昨年度と同様の方法で、降雨条件を変更して、サイト周辺の非定常解析を実施したが、地下水位に関しては殆ど影響が出なかった。

3.3.4 移流分散方程式の理論解と確認計算

トレーサー試験で用いられる移流分散方程式の理論解について、主要な国内書籍を調査・取りまとめ、その理論解の確認試験を行うことで、トレーサー試験の理論的評価に資する資料を作成した。なお、ここでは1次元と2次元の理論解のうち、1次元の概要のみを記載した。これらの結果は、有限要素法による移流分散解析の精度を検証するために利用するものである。

(1) 理論解調査

トレーサー試験で用いられる移流分散方程式の理論解について、主要な国内書籍を調査した。表3.3-5に調査した国内書籍の一覧を、以降にそれぞれの概要を述べる。

表 3.3-5 移流分散方程式の理論解について調査した国内書籍

	書籍名	著者	出版社	発行年
①	地下水汚染論 －その基礎と応用－	地下水問題研究会 編	共立出版 株式会社	1991
②	地下水資源・環境論 －その理論と実践－	水収支研究グループ 編	共立出版 株式会社	1993
③	地盤と地下水汚染の原理	福江正治、加藤義久、 小松田精吉 訳	東海大学 出版会	1995
④	地盤工学・実務シリーズ 15 土壌・地下水汚染の調査・予測・ 対策	地盤工学会 土壌・地下水 汚染の調査・予測・対策 編集委員会	社団法人 地盤工学会	2002
⑤	地盤工学・実務シリーズ 25 続・土壌・地下水汚染の調査・ 予測・対策	地盤工学会 土壌・地下水 汚染の調査・予測・対策 編集委員会	社団法人 地盤工学会	2008
⑥	パソコンによる地下水解析	上田年比古 監訳	森北出版 株式会社	1990
⑦	地下水中の物質輸送数値解析	神野健二 編著	九州大学 出版会	2001
⑧	実務者のための 地下水環境モデリング	岡山地下水研究会 訳	技報堂出版	2003
⑨	地下水のトレーサー試験 地下水の動きを知る	日本地下水学会 原位置トレーサー試験に関する ワーキンググループ編	技報堂出版	2009

- ・ ①では、1次元の理論解に関して、境界での濃度一定、物質連続注入、物質瞬時注入条件と線形吸着（遅延係数）を考慮した式が示されている。平面2次元については近似式のみであった。
- ・ ④では、平面2次元一様流物質瞬時注入条件での式が示されている。
- ・ ⑤では、付録に1次元、2次元、3次元でのいくつかの濃度及び物質注入条件での式が示されている。
- ・ ⑦では1次元境界濃度一定の式が示されている。
- ・ ⑧では、1次元、2次元、3次元での一様流物質瞬時注入条件での式が示されている。
- ・ ⑨では、1次元、2次元の一様流物質瞬時注入条件、1次元境界濃度一定条件の理論式、2次元の一様流点源濃度一定条件の近似式が示されている。

1次元理論解については、①、⑤、⑦、⑧、⑨のいずれも同様であった。また、1次元理論解については、国内書籍ではないがM. T. van Genuchten and W. J. Alves (1982)で初期条件、境界条件、吸着、減衰が整理されており、①、⑤、⑦、⑧、⑨の内容も包含していることから、この1次元理論解を引用することとした。

また、2次元理論解については、⑤の書籍の理論解を引用することとした。

(2) 1次元理論解

ここでは、1次元理論解を示す。式(3.3-2)に移流分散方程式を示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D \frac{\partial c}{\partial x} - qc \right) - \frac{\partial}{\partial t} (\theta c + \rho_s) = \mu_w \theta c + \mu_s \rho_s - \gamma_w \theta - \gamma_s \rho_s \quad \text{式(3.3-2)}$$

ここに、 c は液相濃度[ML⁻³]、 s は固相濃度[MM⁻¹]、 θ は体積含水率[L³L⁻³]、 D は分散係数[L²T⁻¹]、 q は水体积フラックス（ダルシー流速）[LT⁻¹]、 ρ は多孔質媒体のバルク密度[ML⁻³]、 x は1次元離れ（座標）[L]、 t は時間[T]、 μ_w と μ_s は液相と固相の一次減衰定数[T⁻¹]、 γ_w と γ_s は液相と固相の源泉項の係数で γ_w は[ML⁻³T⁻¹]、 γ_s [T⁻¹]である。

式(3.3-3)の固相濃度と液相濃度に平衡状態式として1次式を仮定すると次式となる。

$$s = k_d \cdot c \quad \text{式(3.3-3)}$$

k_d は分配係数[M⁻¹L³]である。

式(3.3-3)を式(3.3-2)に適用すると次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D \frac{\partial c}{\partial x} - qc \right) - \frac{\partial (\theta R c)}{\partial t} = \mu \theta c - \gamma \theta \quad \text{式(3.3-4)}$$

ここに、遅延係数 R は次式で与えられる。

$$R = 1 + \frac{\rho k_d}{\theta} \quad \text{式(3.3-5)}$$

また、新たに導入された減衰係数 μ と源泉項係数 γ は次式で与えられる。

$$\mu = \mu_w + \frac{\mu_s \rho k_d}{\theta} \quad \text{式(3.3-6)}$$

$$\gamma = \gamma_w + \frac{\gamma_s \rho}{\theta} \quad \text{式(3.3-7)}$$

ここで、式(3.3-3)の体積含水率とダルシー流速が時間と空間で一定（定常状態）と仮定

すると、式(3.3-4)は次式で与えられる。

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - V \frac{\partial c}{\partial x} - R \frac{\partial c}{\partial t} = \mu c - \gamma \quad \text{式(3.3-8)}$$

ここで V は $(= q/\theta)$ で、実流速（間隙内平均流速）となり、式(3.3-8)は地下水分野で一般的な移流分散方程式となる。

この式(3.3-8)に対して、初期条件、境界条件を適用して1次元理論解を求めた。

(3) 1次元確認計算

1次元の理論解の確認計算の一部として異なる時間の濃度分布を図3.3-16に示す。

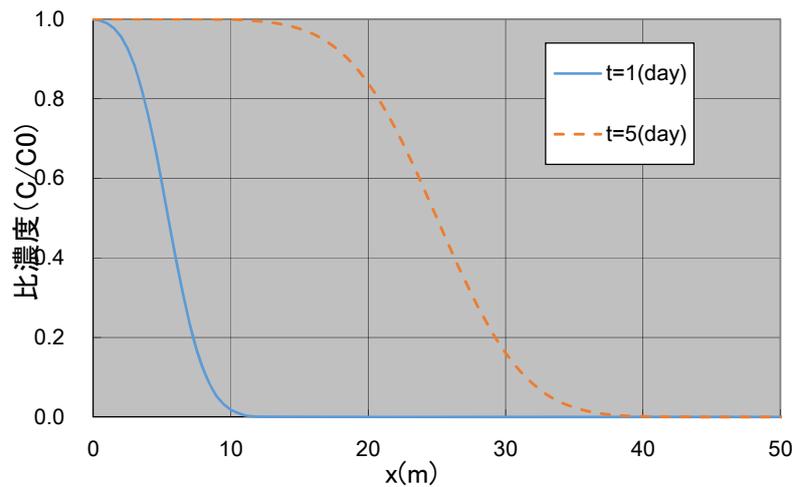


図 3.3-16 異なる時間の濃度分布

また、 $x=10$ mにおける時間濃度分布を図3.3-17に示す。

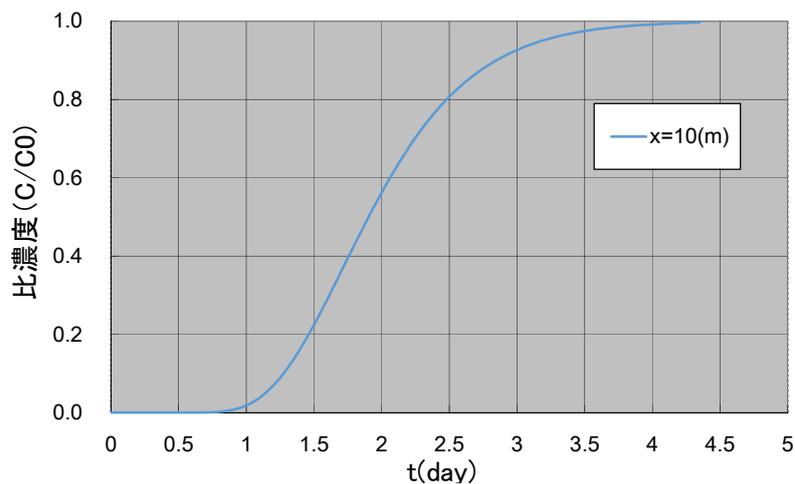


図 3.3-17 $x=10$ mにおける時間濃度分布

上記の通り、濃度分布の時間変化の理論解が求められたことから、次年度はこの結果を踏まえ、有限要素法による移流分散解析の精度検証を行う。

参考文献

- (1) 日本地下水学会：地下水のトレーサー試験，第1章 原位置トレーサー試験概説，技報堂出版，pp. 3-4，2009.
- (2) 日本地下水学会：地下水のシミュレーション，第3章流れを支配するパラメータ，技報堂出版，p. 87，2010.
- (3) M. Th. van Genuchten and W. J. Alves.: Analytical. Solutions of the One-Dimensional Convective-Dispersive Solute. Transport Equation. U.S. Department of Agriculture, Technical. Bulletin No. 1661, 151 p., 1982.
- (4) 竹内真司・鈴木誠・後藤和幸・齋藤裕己・大瀧修平：トレーサ試験のための水理地質構造の把握 ～水みち検層結果を中心に～，日本地下水学会，秋季講演会講演予稿，34，pp. 136-139，2018.
- (5) 齋藤裕己・大瀧修平・鈴木誠・竹内真司・後藤和幸：地盤の不均質性や観測孔の仕様がトレーサ試験に与える影響に関する検討，日本地下水学会，秋季講演会講演予稿，35，pp. 140-143，2018.
- (6) 齋藤裕己・大瀧修平・鈴木誠・竹内真司・田岸宏孝：試験井戸を用いた地下水による物質移行の検討，第53回地盤工学研究発表会，D-04 0467，pp. 931-932，2018.
- (7) 大瀧修平・齋藤裕己・鈴木誠：室内トレーサー試験を用いた物質移行の測定方法の検討，第53回地盤工学研究発表会，D-04 0468，pp. 933-934，2018.
- (8) 鈴木誠・齋藤裕己・大瀧修平・菱谷智幸：原位置トレーサー試験を用いた移流分散解析の妥当性の検討，第53回地盤工学研究発表会，D-04 0469，pp. 935-936，2018.

3.4 研究推進

研究推進にあたっては、研究代表者の下、各研究項目間における連携を密にして研究に取り組むと共に、廃炉地盤工学委員会を開催し、交わされる幅広い意見を聴きつつ研究を進めた。また、同委員会では再委託先の研究成果を取りまとめると共に、同委員会幹部で構成されたコアメンバー会議では、実効性の観点から議論を行い、より質の高い研究の推進に努めた。更に「廃炉地盤研究プラットフォーム」等に積極的に参画すると共に、採択機関が主催する NDEC の運営にも取り組んだ。

以下にこれらの概要を整理して示す。

3.4.1 廃炉地盤工学委員会

(1) 平成 30 年度 第 1 回 福島第一原子力発電所廃止措置に向けた地盤工学的新技术と人材育成に関する検討委員会（略称：廃炉地盤工学委員会）

平成 30 年度の 1 回目となる廃炉地盤工学委員会では、本プロジェクトの背景・目的や廃炉地盤工学の概要について、地盤工学会・早稲田大学・千葉工業大学の各担当より説明が行われた後、長崎大学・福島県立医科大学の山下俊一副学長を迎え、「原子力災害と放射線健康リスク」と題した講演が行われた（図 3.4-1）。

講演では、医療分野における広島・長崎やチェルノブイリにおける様々な調査研究で得られた根拠をまじえながら、原子力災害に対する取組み、福島第一原子力発電所事故後に見られた専門家と一般住民との間での放射線の健康影響に対する相場観の大きな相違、現在使用されている基準が設定された背景や不確実・不確定な領域でのリスク管理の基本的な考え方等について、貴重かつ有益な話を伺った。その後、質疑応答を経て、幹事団より、本プロジェクトの平成 30 年度活動計画について説明が行われた。

■日時 : 平成 30 年 6 月 21 日 (木) 15:00~17:00

■場所 : 地盤工学会 (JGS 会館) 地下大会議室



図 3.4-1 第 1 回廃炉地盤工学委員会の様子

(2) 平成 30 年度 第 2 回 福島第一原子力発電所廃止措置に向けた地盤工学的新技术と人材育成に関する検討委員会（略称：廃炉地盤工学委員会）

平成 30 年度の 2 回目となる廃炉地盤工学委員会では、福島県土木部の高畑修主任主査を迎え、「福島県土木部管轄内における放射性物質汚染土の処理に対する技術的知見」と題した講演が行われた（図 3.4-2）。

講演では、震災直後の関係機関・関係各所との運用調整内容に始まり、陸上自衛隊と協力して実施された同行調査等の初動対応、関わった人々の思い等と共に、得られた教訓が

述べられたほか、震災に関連する福島県内の教育状況や学部志向の変化等が示された後、本委員会に対する要望が伝えられた。次いで、オフサイトとオンサイトにおける対処方針や作業環境の違いや自衛隊との協働で得たプロジェクトに対する取り組み方、住民感情に起因する行政や科学技術への疑念や不信等について述べられた後、福島県内の除染状況や建設副産物（廃棄物）処理の実態等、放射性物質汚染土の処理に関する背景について事例をまじえつつ、詳しい説明が行われた。

■日時 : 平成 30 年 10 月 22 日 (月) 15:00~17:00

■場所 : 地盤工学会 (JGS 会館) 地下大会議室



図 3.4-2 第 2 回廃炉地盤工学委員会の様子

(3) 平成 30 年度 第 3 回 福島第一原子力発電所廃止措置に向けた地盤工学的新技术と人材育成に関する検討委員会（略称：廃炉地盤工学委員会）

平成 30 年度の 3 回目となる廃炉地盤工学委員会では、各担当より本年度検討成果の概要について紹介が行われた。その後の質疑応答では、早稲田大学が研究開発を進めている超重泥水に関して、使用後の回収・処分に関する研究の必要性に関する質問があり、従来技術（泥水シールドトンネル）を活用・応用するような方向で今後検討を進めて行く考え等が述べられた。また、超重泥水の核種吸着特性を利用して、格納容器内を循環させて除染するようなアイデアが提示されたほか、超重泥水使用時における再臨界に関する懸念等、活発な意見交換が行われた（図 3.4-3）。

その他、今年度開催した廃炉地盤工学講習会の実施概要や早稲田大学大学院で開講された地盤工学特論 B のオンデマンド化に関する説明、P0（プログラムオフィサー）による中間フォローや成果報告会に関する報告、次年度の JGS 特別セッションの案内等が行われた。

■日時 : 平成 31 年 3 月 12 日 (火) 15:00~17:00

■場所 : 地盤工学会 (JGS 会館) 地下大会議室



図 3.4-3 第 3 回廃炉地盤工学委員会の様子

3.4.2 コアメンバー会議及びワーキング（WG）について

(1) コアメンバー会議（計4回：第13回～第15回）

委員会の運営方法等の実務面の取決め等を行うと共に、本研究に関する様々な議論・協議を行い、本研究を円滑に進めるため、1～2ヶ月に1回程度、委員長や座長、幹事等で構成するコアメンバー会議を開催した。

本年度の開催状況を以下に列記する。

- ・ 第13回コアメンバー会議 : 平成30年4月23日（月）
- ・ 第14回コアメンバー会議 : 平成30年7月9日（月）
- ・ 第15回コアメンバー会議 : 平成30年10月3日（水）
- ・ 第16回コアメンバー会議 : 平成31年1月29日（火）

(2) 廃炉地盤工学ワーキング（WG）

昨年度に引き続き、地盤施工学WGを開催し、廃炉地盤工学における地盤施工学についての議論を深めた。また、地盤材料学及び地盤環境学についても、同様にWGを開催し、議論の深度化を図っている。

以下に各WGの実施状況をまとめる。なお、地盤施工学WGについては、前述のコアメンバー会議とメンバーの大部分が重複することから、同日に開催している。

- ・ 第11回廃炉地盤施工学WG : 平成30年4月23日（月）15:00～17:00
- ・ 第12回廃炉地盤施工学WG : 平成30年7月9日（月）15:00～17:00
- ・ 第13回廃炉地盤施工学WG : 平成30年10月3日（水）15:00～17:00
- ・ 第14回廃炉地盤施工学WG : 平成31年1月29日（火）15:00～17:00
- ・ 第1回廃炉地盤材料学WG : 平成30年5月11日（金）10:00～17:00
- ・ 第2回廃炉地盤材料学WG : 平成30年5月21日（月）
~平成30年5月25日（金）終日
- ・ 第3回廃炉地盤材料学WG : 平成30年6月20日（水）13:00～17:00
- ・ 第4回廃炉地盤材料学WG : 平成30年9月9日（日）
~平成30年9月12日（水）終日
- ・ 第5回廃炉地盤材料学WG : 平成30年11月12日（月）
~平成30年11月16日（金）終日
- ・ 第6回廃炉地盤材料学WG : 平成30年12月21日（金）終日
- ・ 第9回廃炉地盤環境学WG : 平成30年5月10日（木）14:00～16:00
- ・ 第10回廃炉地盤環境学WG : 平成30年6月26日（火）15:00～17:30
- ・ 第11回廃炉地盤環境学WG : 平成30年8月8日（水）15:00～17:00
- ・ 第12回廃炉地盤環境学WG : 平成30年9月12日（水）15:00～17:30
- ・ 第13回廃炉地盤環境学WG : 平成30年12月10日（月）15:00～18:30

3.4.3 関係機関協議

本研究を推進するにあたり、廃炉基盤研究プラットフォームやNDECをはじめとする会議へ参画すると共に、関連機関との協議を実施し、議論を深めるための貴重な意見や様々な情報を収集した。

以下に関連する会議を列記すると共に、図 3.4-4 には会議で使用したポスターを示す。

- ・ 平成 30 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業／
第 1 回ワークショップ
：平成 30 年 11 月 9 日（金）9:00～14:30
- ・ 平成 30 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業／成果報告会
：平成 31 年 1 月 23 日（水）
- ・ 廃炉基盤研究プラットフォーム第 9 回運営会議（JAEA・CLADS）
：平成 30 年 7 月 3 日（火）13:30～15:30
- ・ 廃炉基盤研究プラットフォーム第 10 回運営会議（JAEA・CLADS）
：平成 30 年 11 月 9 日（金）15:00～17:00
- ・ 廃炉基盤研究プラットフォーム第 11 回運営会議（JAEA・CLADS）
：平成 31 年 1 月 21 日（月）10:00～12:00
- ・ 次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス（NDEC4）
：平成 31 年 3 月 23 日（土）

課題目標

今後40年にわたる福島第一原子力発電所の廃炉事業において、廃止措置に向け必要不可欠な技術事項である**地盤工学分野の個別基礎研究を推進する**とともに、この研究活動を通じて、同事業に貢献可能な実践力と横断的基礎知識を有した**本格的技術者の育成を目的とした教育プログラムを構築し、志の高い学生を育成する**。さらに、**地盤工学的技術の廃止措置への貢献を主眼とした廃炉地盤工学を創出し、廃炉事業を推進する企業や関連機関、さらには今後世界的に需要増加が見込める廃炉産業への人材輩出及び実効的な技術支援を行う**。この課題は、文部科学省/廃止措置研究・人材育成プログラムにより実施しているものである。

1. 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム

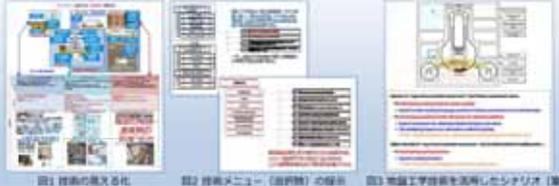
【(公社)地盤工学会】

1) 研究背景・内容

- ・廃炉地盤工学の構築と廃炉プロセス技術シナリオの評価
- ・廃炉地盤工学教育システムの構築
- ・廃炉地盤工学に関する認知度の向上と技術集約体制の構築

2) 廃炉地盤工学の構築と廃炉プロセス技術シナリオの評価

- ・廃炉地盤工学委員会では、昨年度に引き続き、廃止措置に密着可能な地盤工学的技術の位置付けや技術集約を継続的に実施し、技術マップ等を更新。
- ・技術メニュー（選択版）を提示すると共に、WG等での活発な議論に基づき、廃炉シナリオへの地盤工学技術の適用性について検討し、シナリオ（案）を構築。



3) 廃炉地盤工学教育システムの構築

- ・学同単位ごとのWGにおける検討成果をもとに、シラノスの構築-教材の実施。
- ・平成30年秋季学期に早稲田大学大学院で、廃炉地盤工学の講義（地盤工学特論B）を開講。
- ・また、大学以外への開講を念頭に、授業のオンデマンド化について検討を実施し、一部授業を対象に映像化を試行。

4) 廃炉地盤工学に関する認知度向上と技術集約体制の構築

- ・地盤工学研究発表会での廃炉地盤工学に関する特別セッションや廃炉地盤工学に関する講習会を開催し、認知度向上に努めると共に、学会会員からは廃炉地盤工学に対する意見や技術情報等を取得。また、関連学会では、情報収集に加え、活動内容を発信する一方で、廃炉地盤工学HPも更新し、広く一般社会に対して情報発信。



2. 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価

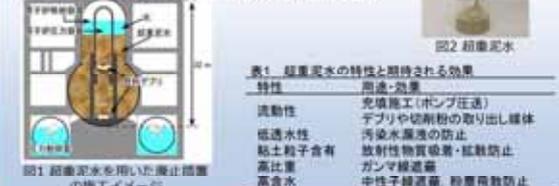
【受託機関：早稲田大学】

1) 研究背景・内容

- ・地盤工学に基づく土質材料による放射線遮蔽設計方法の検討
- ・廃止措置に伴う作業現場の防護および放射性物質の低放射防止のための材料開発

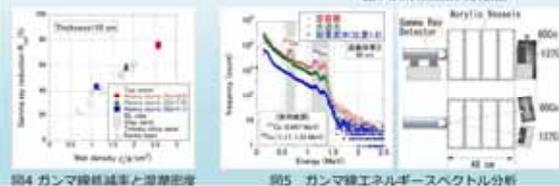
2) 充填型土質材料「超重泥水」

- ・崩壊した原子炉建屋の廃止措置に有効（図1）な様々な特性（表1）を有する充填型土質材料「超重泥水」。
- ・ペントナイト懸濁液に（ライト粉末を添加した材料。
- ・体積含水率50%以上、最大比重2.58の高比重を有する。



3) 放射線遮蔽性能評価

- <超重泥水が有する放射線遮蔽性能>
- ・最大2.58の高比重→ガンマ線遮蔽に有効。
- ・水分子を多く含む→中性子線遮蔽に有効。
- <放射線遮蔽実験（図3）>
- ・各放射線源割合と土の状態を表す基本量との関連性を実験的に評価（図4）。
- ・遮蔽体透過に伴う放射線エネルギーの影響の検討（図5）。



3. 地下水環境等の解析・調査技術と予測技術の高度化

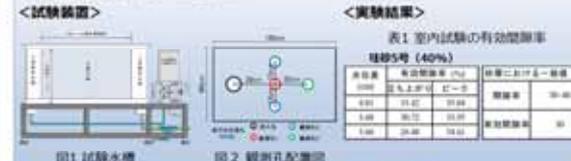
【受託機関：千葉工業大学】

1) 研究背景・内容

- ・地下水による放射性物質の移行、現場での地盤環境の把握を目的に実証試験を実施
- ・試験水槽と試験井戸を用いたトレーサー試験により実流速の測定方法を検討

2) 試験水槽を用いた物質移行の測定検討

- ・試験水槽（図1）に観測孔を配置（図2）し、塩水を用いたトレーサー試験を実施。
- ・各孔に設置した電気伝導率計で伝導率の変化でトレーサー剤を測定し、変化曲線の立ち上がりとしピークから実流速を算出。
- ・実流速とダルシー流速を用いて有効閉鎖率を算出（表1）し、一般値と比較することで試験方法の妥当性を評価。



3) 実験井戸による物質移行の現場試験

- ・4本の試験井戸（図3）を用いて放射状収束試験で塩水トレーサー試験を実施。
- ・試験区間は水理試験で良好な透水性が確認された砂層の1m区間を対象とし、実施・評価（図4）。
- ・実流速と掘水量から導いた平均ダルシー流速を用いて有効閉鎖率を算出し、試験結果の妥当性を評価。

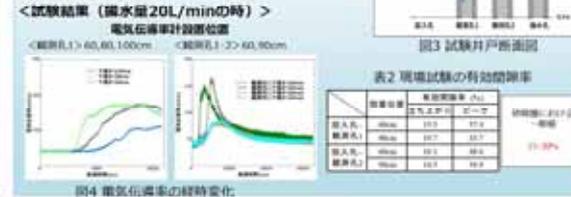


図 3.4-4 平成30年度成果報告会用制作ポスター

4. 結言

本研究課題では、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、(i) 現状から廃止措置までの長期間の地下水環境・作業環境の状況調査と将来予測、(ii) 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、(iii) 福島第一原子力発電所構内の除染廃棄物処分と原子炉建屋デコミッションングに関する実現可能な技術開発を実施している。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」の構築を進めるものである。

5ヵ年計画の4年目である本年度の研究・業務の実績としては、地盤工学会における広い分野の人材を集結した「福島第一原子力発電所廃止措置に向けた地盤工学的新技术と人材育成に関する検討委員会、略称；廃炉地盤工学委員会」において、廃炉地盤工学の内容の充実を図るために再委託先等で新たに開発された技術の組み込み等を検討し、これまでの活動で作成した技術マップを拡充すると共に、NDF等から提示される廃炉シナリオに対する適用性の検討を行った。更にNDF及びIRIDや当プログラム採択機関との協調強化のため、データベースの作成や機関担当者との打合せ等を通じて、廃炉地盤工学技術（地盤工学的技術）の見える化を更に進めた。加えて、廃炉や放射性廃棄物処分等に携わる海外の関連機関からも情報を収集し、処分シナリオの検討を行った。

廃炉地盤工学教育システムの構築として、昨年度試構築したシラバスを基に教材（教科書）の試作を進めると共に、内容の向上を図った。更に、試作した教材を基に早稲田大学等で廃炉地盤工学の授業を実施した。また、地盤工学会組織を通じた他教育機関への展開や授業での繰り返し使用の可能性を考慮し、上記授業のビデオ化について実施方法等を検討した。なお、初年度より実施している講習会については、受講者にG-CPD（継続的専門能力開発（CPD）の地盤工学会版）を付与することで、主に若手技術者の専門能力の継続的な維持・向上にも努めた。

廃炉地盤工学に関する認知度の向上と技術の集約体制の構築として、地盤工学研究発表会（高松開催）において廃炉地盤工学に関する特別セッション等を開催し、全国レベルでの認知度向上を図ると共に、このような場を活用して広く学会会員からの廃炉地盤工学に関する意見や技術情報の集約を行った。また、当プログラムホームページの内容を拡充し、学会会員や一般社会に対し業務内容や成果に関する情報を発信した。更に土木学会等の関連学会の大会に参加し、当プロジェクトの活動内容を発信すると共に関連情報を収集した。

再委託先の早稲田大学においては、デブリ取出し補助のためのガンマ線と中性子線両方の遮蔽性能を有する超重泥水や、構内除染廃棄物の一時仮置き施設のためのガンマ線遮蔽性能と遮水性の両方を保有する覆土材の仕様設計に資するため、各材料仕様に応じて取得した放射線遮蔽データの一次データベースの拡張を行った。更に各材料仕様に応じた施工性を評価するため、平成29年度までに導入した超重泥水の充填施工性評価実験装置とタクトイルセンサシステムを活用すると共に平成30年度に導入するテクスチャーアナライザーでは詳細な超重泥水の充填施工性と安定性を、平成29年度までに導入した保水性試験装置及び水ポテンシャル測定装置では覆土材の保水性をそれぞれ定量測定し、一次データベースの作成を行った（個別基盤研究テーマ(ii)・(iii)）。

もう1つの再委託先である千葉工業大学では、長期間の地下水環境・作業環境状況を調査するための地下水流動評価技術の開発基盤として室内土層実験を実施し、地下水流動によって物質が移

動する移流分散現象の測定方法を検証し、現場実験に展開するための課題をまとめた。また、現場での詳細な地下水流動を把握するため、平成 29 年度までに設置したボーリング孔を用いて、物質移動評価を対象とした現場実証試験を実施した。なお、同試験では、過年度の研究において同一層内で地下水流動特性が異なることが判明したことを受け、新たに水みち調査を実施した。更にサイト周辺の地下水環境変動予測技術を開発するため、サイト周辺の地下水流動の非定常解析を実施すると共に、基本的な物質移動に関して、有限要素法による移流分散解析結果と理論式に基づく計算結果とを比較することにより、解の検証を行った（個別基盤研究テーマ(i)）。

次年度は今年度までの成果を踏まえ、地盤工学会において「(1) 廃炉地盤工学の構築と廃炉プロセス技術シナリオの評価」、「(2) 廃炉地盤工学教育システムの構築」、「(3) 廃炉地盤工学に関する認知度の向上と技術の集約体制の構築」をより実効性の高いものに発展させると共に、構築した廃炉地盤工学カリキュラムによる人材育成の実践を高める。再委託先の早稲田大学では、超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価を更に深化させ、実設計や実施工に対応できる成果に高める。同じく千葉工業大学では、室内実験及び原位置調査を更に整備促進・データの充実を図り、過年度の研究より明らかとなった課題の観点から地下水環境等の解析・調査技術と予測技術の高度化を進める。