平成 29 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 30 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 29 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 2.1-1
2.1 全体計画 2.1-1
2.2 本年度計画 2.2-1
2.3 平成 29 年度の成果の目標及び業務の実施方法 2.3-1
2.3.1 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム 2.3-1
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） 2.3-1
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） 2.3-2
2.3.4 研究推進 2.3-2

3. 平成 29 年度の実施内容及び成果 3.1-1
3.1 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム 3.1-1
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 3.1-1
3.1.2 廃炉地盤工学教育システムの構築 3.1-22
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 3.1-35
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） 3.2-1
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並びに覆土材のガンマ線・中性子線遮蔽性能の一次データベース 3.2-1
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 3.2-5
3.2.3 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としての超重泥水及び覆土材の活用方法と層厚設計法の構築 3.2-9
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
3.3.1 室内土層試験による実流速の測定方法の検討 3.3-1
3.3.2 実験井戸による現場試験 3.3-4
3.3.3 浸透流解析・物質移行解析のための環境整備・構築 3.3-10
3.4 研究推進 3.4-1
3.4.1 廃炉地盤工学委員会 3.4-1
3.4.2 申請者会合（コアメンバー会議）及びワーキング（WG）について 3.4-3
3.4.3 関係機関協議 3.4-3

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 1-2
図 3.1-1　業務実施体制（平成 29 年度） 3.1-1
図 3.1-2　廃止措置に寄与可能な地盤工学系技術 3.1-3
図 3.1-3　技術マップ rev.09.1（公開用）1/4 ..... 3.1-4
図 3.1-4　技術マップ rev.09.1（公開用）2/4 ..... 3.1-4
図 3.1-5　技術マップ rev.09.1（公開用）3/4 ..... 3.1-5
図 3.1-6　技術マップ rev.09.1（公開用）4/4 ..... 3.1-5
図 3.1-7　技術メニューDB（案）rev.H29（抜粋） 3.1-6
図 3.1-8　基本的なシナリオ 3.1-7
図 3.1-9　中長期ロードマップ（案）に基づく廃炉工程全体の枠組み 3.1-7
図 3.1-10　中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果（改訂版）① 3.1-8
図 3.1-11　中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果（改訂版）② 3.1-9
図 3.1-12　中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果（改訂版）③ 3.1-10
図 3.1-13　中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果（改訂版）④ 3.1-11
図 3.1-14　中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果（改訂版）⑤ 3.1-12
図 3.1-15　技術メニューDB（案）における情報項目 3.1-13
図 3.1-16　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（1/9） 3.1-13
図 3.1-17　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（2/9） 3.1-14
図 3.1-18　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（3/9） 3.1-14
図 3.1-19　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（4/9） 3.1-14
図 3.1-20　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（5/9） 3.1-15
図 3.1-21　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（6/9） 3.1-15
図 3.1-22　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（7/9） 3.1-15
図 3.1-23　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（8/9） 3.1-16
図 3.1-24　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（9/9） 3.1-16
図 3.1-25　福島第一原子力発電所視察状況 3.1-17
図 3.1-26　NAGRA 視察･ミーティング状況 3.1-21
図 3.1-27　TMI-2 における燃料デブリ取出し 3.1-27
図 3.1-28　作成した教材（放射線遮蔽の基礎知識）の一例 3.1-30
図 3.1-29　特別セッション風景 3.1-35
図 3.1-30　講習会風景（11 月 27 日） 3.1-36
図 3.1-31　講演会風景（12 月 20 日） 3.1-37
図 3.1-32　廃炉地盤工学ホームページ 3.1-38
図 3.2-1　ガンマ線低減率と湿潤密度の関係 （超重泥水） 3.2-2

図 3.2-2　全中性子線低減率と体積含水率の関係　（超重泥水）..... 3.2-2
図 3.2-3　高速中性子線低減率と体積含水率の関係　（超重泥水）..... 3.2-2
図 3.2-4　熱中性子線低減率と体積含水率の関係　（超重泥水）..... 3.2-2
図 3.2-5　ガンマ線低減率と遮蔽体厚さの関係　（超重泥水）..... 3.2-3
図 3.2-6　全中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係　（超重泥水）..... 3.2-3
図 3.2-7　高速中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係　（超重泥水）..... 3.2-3
図 3.2-8　熱中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係　（超重泥水）..... 3.2-3
図 3.2-9　ガンマ線低減率と湿潤密度の関係　（覆土材料）..... 3.2-4
図 3.2-10　全中性子線低減率と体積含水率の関係　（覆土材料）..... 3.2-4
図 3.2-11　高速中性子線低減率と体積含水率の関係　（覆土材料）..... 3.2-4
図 3.2-12　熱中性子線低減率と体積含水率の関係　（覆土材料）..... 3.2-4
図 3.2-13　ガンマ線低減率と遮蔽体厚さの関係　（覆土材料）..... 3.2-5
図 3.2-14　全中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係　（覆土材料）..... 3.2-5
図 3.2-15　高速中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係　（覆土材料）..... 3.2-5
図 3.2-16　熱中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係　（覆土材料）..... 3.2-5
図 3.2-17　泥水圧測定装置..... 3.2-6
図 3.2-18　タクタイルセンサによる Gs=1.8 の圧力分布の経時変化..... 3.2-7
図 3.2-19　容器側面における圧力の経時変化..... 3.2-7
図 3.2-20　水ポテンシャル測定装置..... 3.2-8
図 3.2-21　水ポテンシャルと含水比の関係..... 3.2-8
図 3.2-22　ガンマ線低減率と土質材料の総透過密度の関係..... 3.2-9
図 3.2-23　ガンマ線遮蔽設計フローチャート..... 3.2-9
図 3.2-24　総透過水分密度と高速～速中性子線低減率の関係..... 3.2-10
図 3.2-25　総透過水分密度と熱中性子線低減率の関係..... 3.2-10
図 3.2-26　総透過水分密度と全中性子線低減率の関係..... 3.2-10
図 3.3-1　室内土層試験装置..... 3.3-2
図 3.3-2　試験孔配置図..... 3.3-2
図 3.3-3　塩分濃度と電気伝導率の関係..... 3.3-2
図 3.3-4　水位差 4.81 cm の測定結果..... 3.3-3
図 3.3-5　井戸設置状況（左：井戸管材挿入状況　右：施工後）..... 3.3-4
図 3.3-6　観測井戸模式断面図(縦 S=1:100 横 S=1:20)..... 3.3-5
図 3.3-7　試験概要図..... 3.3-5
図 3.3-8　現場試験の実施状況..... 3.3-6
図 3.3-9　初期全水頭値..... 3.3-7
図 3.3-10　揚水量 20 L/min 時の全水頭値..... 3.3-7
図 3.3-11　揚水量 22 L/min 時の全水頭値..... 3.3-7
図 3.3-12　観測井戸③と④の測定結果..... 3.3-8
図 3.3-13　地表面メッシュ図（全体）..... 3.3-10
図 3.3-14　狭域モデル地表面メッシュ図..... 3.3-11

図 3.3-15　広域モデルにおける解析地下水位変動 3.3-11
図 3.4-1　第 1 回廃炉地盤工学委員会の様子 3.4-1
図 3.4-2　第 2 回廃炉地盤工学委員会の様子 3.4-2
図 3.4-3　第 3 回廃炉地盤工学委員会の様子 3.4-3
図 3.4-4　平成 29 年度成果報告会における制作ポスター 3.4-4
図 3.4-5　NDEC-3 用制作ポスター 3.4-5

表一覧

表 2.1-1　本事業の全体計画（5 カ年計画） 2.1-1
表 2.2-1　平成 29 年度の業務実施計画 2.2-1
表 3.1-1　廃炉地盤工学委員会構成メンバー（平成 29 年度） 3.1-2
表 3.1-2　廃炉地盤工学における学問単元の取組み優先度 3.1-23
表 3.1-3　施工技術の分類例 3.1-26
表 3.1-4　廃止措置における作業項目と類似一般工法（案） 3.1-26
表 3.1-5　廃止措置における特殊性の組込み事例 3.1-28
表 3.1-6　地盤工学特論 B の平成 29 年度シラバスの概要 3.1-31
表 3.1-7　廃炉地盤工学教育システムにおける取組み 3.1-34
表 3.1-8　廃炉地盤工学ホームページ更新コンテンツ一覧（平成 29 年度） 3.1-38
表 3.2-1　タクタイルセンサーによる測定条件 3.2-6
表 3.2-2　想定覆土材料の基本物性 3.2-8
表 3.3-1　測定結果 3.3-3
表 3.3-2　定常井戸理論式を用いた場合の透水係数の算出結果 3.3-7

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 Decommmissioning 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)
NAGRA ___放射性廃棄物管理共同組合（スイス）
(Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle)
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 Vesssel)
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)
FP _____核分裂生成物 (Fission Products)
MCCI ____溶融炉心－コンクリート相互作用 (Molten Core Concrete Interaction)
BSAF ____福島第一原子力発電所の事故進展挙動解析
(Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station)
NP _____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若しくは塑性限界が求められないとき、塑性指数では、液性限界若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 NP (Non-Plastic) と記載。

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㈱福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2017，2017 年 8 月 31 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ための取組みであり、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り上げ、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ニ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 カ年計画の 3 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

・廃炉地盤工学の内容の充実のために「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術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」を開催し、地盤系技術の位置付けや新技術の発掘及びその実現性について検討を行った。また、これまでの検討で浮上してきた地盤系新技術を用いた廃炉シナリオの検討を行い、その内容の充実と実効性の評価を行った。

・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（地盤工学系技術）の見える化を進めた。

・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など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。

2) 廃炉地盤工学教育システムの構築

・学問単元ごとの WG での検討により、シラバスの検討を進めると共に教材（教科書）の試作を行った。また、試作した教材を基に、早稲田大学などで廃炉地盤工学の模擬的授業を実施した。この結果は、廃炉地盤工学委員会にフィードバックすることで、廃炉地盤工学の構築に向けた内容の更なる充実に役立てた。

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（名古屋開催）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った。また、講演会を開催し、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ほか、平成 28 年度に立ち上げ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。

・土木学会など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、各材料の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。更に各材料仕様に応じた施工性を評価するため、平成 28 年度に導入し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タイルセンサシステムを用いて超重泥水の充填施工性と安定性を、水ポテンシャル測定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を作成した。また、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、得られた透水係数に基づく流速と種々の試験の測定値を比較し、現状把握と予測解析に展開するための課題をまとめた。
- 現場での地下水流動を把握するため、平成 28 年度に引き続き、今後数年間継続して使用可能であることを条件としたボーリング孔を用いて現場実証試験を実施した。ここでは、地下水流動による物質移動の評価を対象とした。
- サイト周辺の地下水環境変動予測技術を開発するため、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(数値解析のプロトタイプの開発)を実施し、非定常解析の可能性を検討した。
- 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、教材・資料の作成及び人材育成を行った。

(4) 研究推進

- 再委託先の研究等を取りまとめ、廃炉地盤工学委員会の幹部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。

以下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（地盤工学系技術）の見える化を更に進める。更に試構築したシラバスを基に教材（教科書）の試作を進め、内容の向上を図ると共に、試作した教材を基に早

稲田大学などで廃炉地盤工学の授業を実施する。また、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、燃料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 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。

(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。

(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・撤去など、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考える。

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㈱福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2017，2017 年 8 月 31 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ための取組みであり、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り上げ、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ニング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。

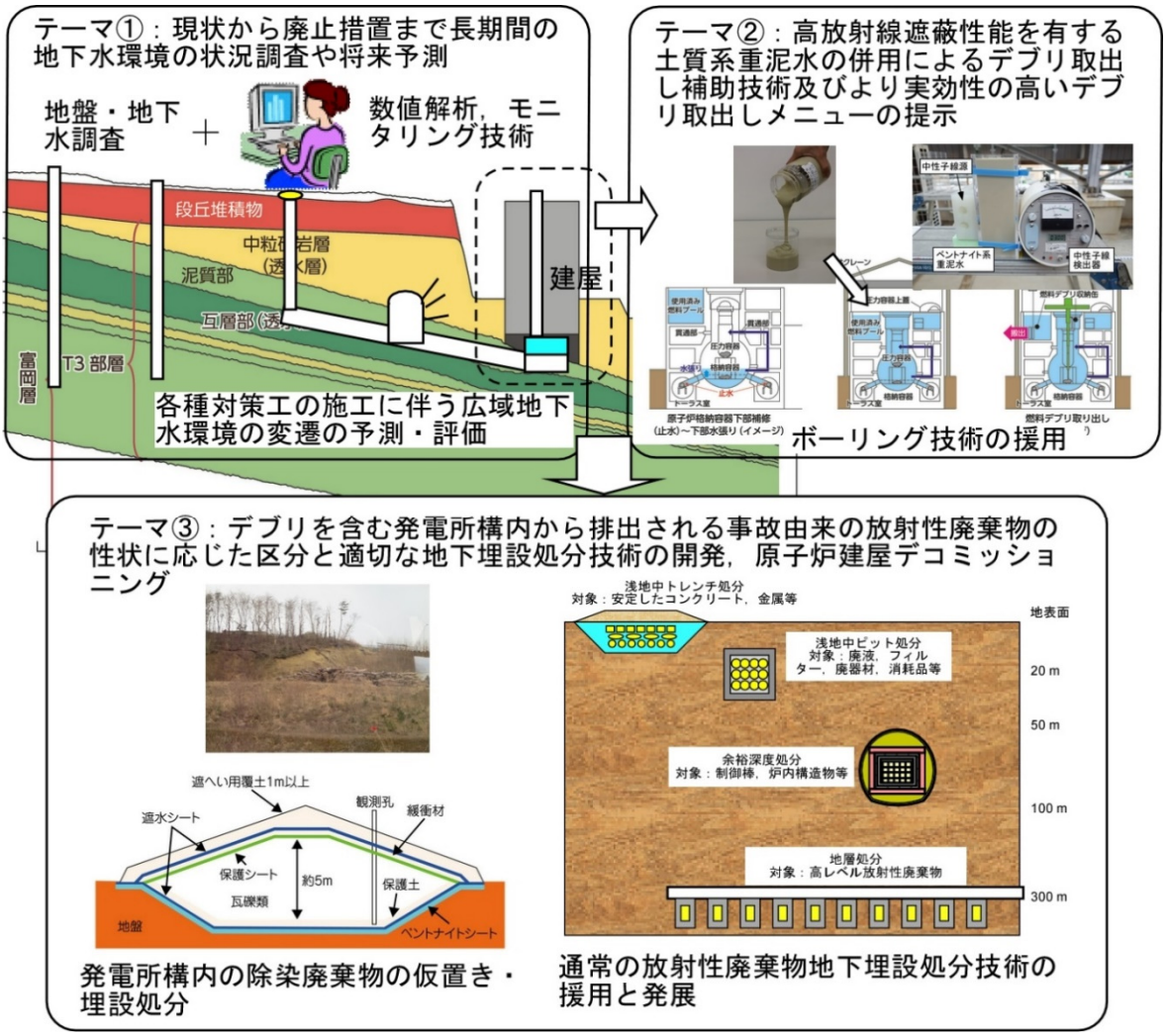


図 1-1　各基盤研究で予想される成果の福島第一原子力発電所廃止措置への適用に関する概念図

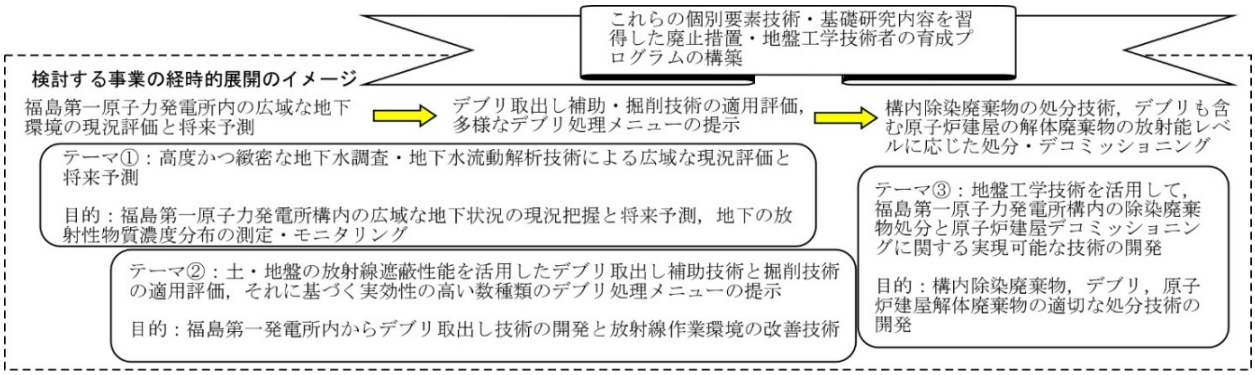


図 1-2　福島第一原子力発電所の現状評価からデブリ取出し、最終的な廃止措置に至るまでの時間経過における個別基盤研究テーマの位置付けと連結性

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などに活用するため、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カ年計画）を表2.1-1に示す。

表2.1-1　本事業の全体計画（5カ年計画）

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

2.2　本年度計画

5 カ年計画の 3 年目である、本年度の業務実施計画を表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1　平成 29 年度の業務実施計画

区分	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	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 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評価（早稲田大学）	◄	―	―	―	―	―	―	―	―	―	―	►
(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）	◄	―	―	―	―	―	―	―	―	―	―	►
(4)　研究推進	◄	―	―	―	―	―	―	―	―	―	―	►

2.3　平成 29 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

廃炉地盤工学の内容の充実のために「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術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」を開催し、地盤系技術の位置付けや新技術の発掘及びその実現性について検討を行う。また、これまでの検討で浮上してきた地盤系新技術を用いた廃炉シナリオの検討を行い、その内容の充実と実効性の評価を行う。

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（地盤工学系技術）の見える化を進める。

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などとの協議の機会を設け、有用な情報の収集に努める。更に廃炉廃棄物処分等の海外の関連機関からも情報を収集する。

(2) 廃炉地盤工学教育システムの構築

学問単元ごとの WG での検討により、シラバスの検討を進めると共に教材（教科書）の試作を行う。また、試作した教材を基に、早稲田大学などで廃炉地盤工学の模擬的授業を実施する。この結果は、廃炉地盤工学委員会にフィードバックすることで、廃炉地盤工学の構築に向けた内容の更なる充実に役立てる。

(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（名古屋開催）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。また、講演会を開催し、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ほか、平成 28 年度に立ち上げ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。更に土木学会など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、共有化することで、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、燃料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、各材料の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う。更に各材料仕様に応じた施工性を評価するため、平成 28 年度に導入し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タイルセンサシステムを用いて超重泥水の充填施工性と安定性を、水ポテンシャル測定装置により覆土材の保水性能を定量評価する。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を作成する。また、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、得られた透水係数に基づく流速と種々の試験の測定値を比較し、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、平成 28 年度に引き続き、今後数年間継続して使用可能であることを条件としたボーリング孔を用いて現場実証試験を実施する。ここでは、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(数値解析のプロトタイプの開発)を実施し、非定常解析の可能性を検討する。

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、教材・資料の作成及び人材育成を行う。

2.3.4　研究推進

再委託先の研究等を取りまとめ、廃炉地盤工学委員会の幹部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 の運営にも取組む。

3. 平成 29 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 28 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術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」と言う。)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、新技術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 29 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。

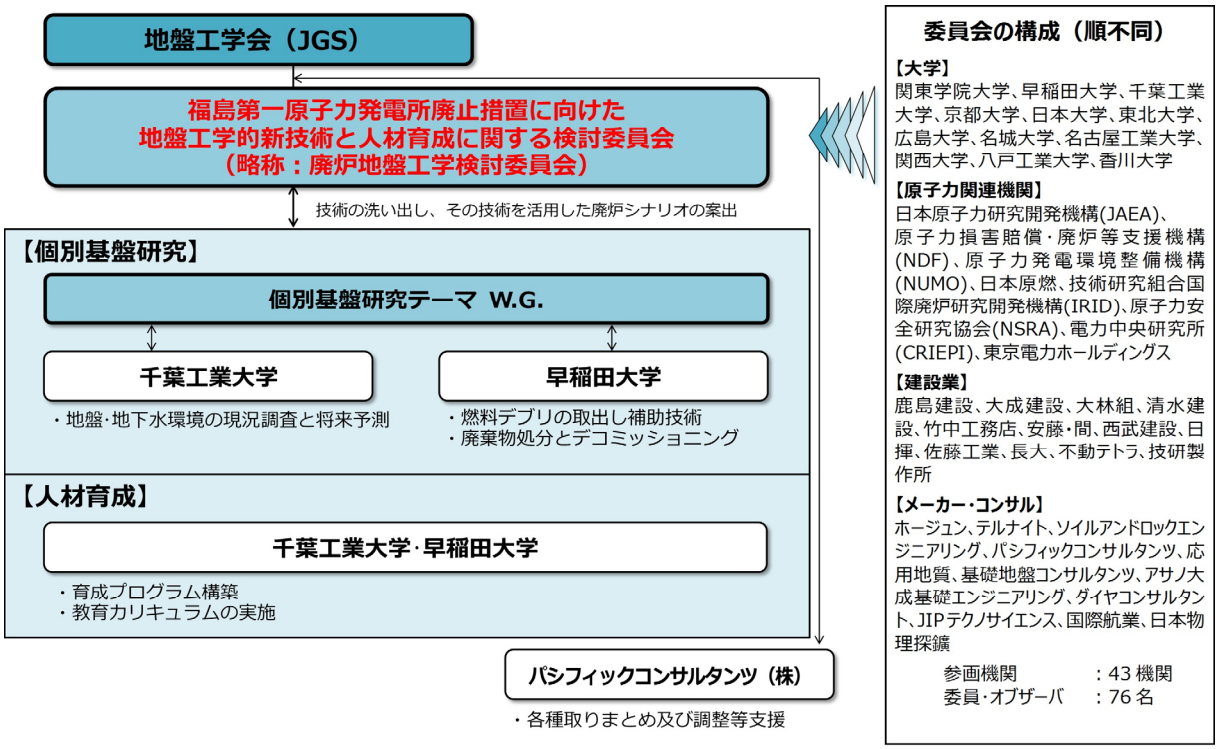


図 3.1-1 業務実施体制（平成 29 年度）

本年度は、廃炉地盤工学委員会を計 3 回（平成 29 年 6 月 26 日、10 月 16 日、平成 30 年 3 月 5 日）開催し、プログラム推進方向等の議論、及び NDF や IRID の担当技術者との廃炉技術開発に関する情報共有を実施した。また、委員会の運営方法等を協議するため、委員長・座長・幹事等で構成されるコアメンバー会議を 1.5 ヶ月に 1 回定期的に開催した。

これらに加え、昨年度に引き続き、廃炉地盤工学のためのワーキンググループ（以下、WG）における活動を継続して実施した。

これら委員会・WG における活動内容は 3.4 節に取りまとめたので、詳細についてはそちらを参照されたい。

表 3.1-1　廃炉地盤工学委員会構成メンバー（平成 29 年度）

	会務	氏名	所属
1	委員長	東畑 郁生	関東学院大学
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
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
4	幹事長	後藤 茂	地盤工学会／早稲田大学
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
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
7	幹事	斉藤 泰久	パシフィックコンサルタンツ(株) 環境創造事業本部　兼 技術研究センター
8	幹事	菱岡 宗介	パシフィックコンサルタンツ(株) 環境創造事業本部 地盤技術部 地盤環境マネジメント室
9	幹事	成島 誠一	西武建設(株) 環境エンジニアリング部
10	幹事	山田 淳夫	(株)安藤・間 技術本部 原子力部
11	幹事	竹内 真司	日本大学 文理学部 地球科学科
12	委員	末岡 徹	(株)地圏環境テクノロジー
13	委員	浅岡 顕	公益財団法人 地震予知総合研究振興会
14	委員	日下部 治	国際圧入学会
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
16	委員	勝見 武	京都大学大学院 地球環境学堂
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
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
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
20	委員	新貝 文昭	パシフィックコンサルタンツ(株) 環境創造事業本部 地盤技術部 地盤環境マネジメント室
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
22	委員	佐原 史浩	鹿島建設(株) 土木設計本部 地下空間設計部 原子力環境Gr
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
24	委員	須山 泰宏	鹿島建設(株) 原子力部 企画室
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
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
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
28	委員	奥野 哲夫	清水建設(株) 技術研究所
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
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
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
32	委員	深谷 正明	(株)大林組 原子力本部 原子力環境技術部
33	委員	松田 隆	(株)大林組 技術本部
34	委員	渡邉 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
35	委員	山本 彰	(株)大林組 東京本社技術本部 技術研究所
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
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 地圏環境事業部
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
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
40	委員	嘉門 雅史	京都大学名誉教授
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
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
43	委員	土田 孝	広島大学 大学院工学研究院 地盤工学研究室
44	委員	半井 健一郎	広島大学 大学院工学研究院 土木構造工学研究室
45	委員	木村 育正	(株)技研製作所 工法事業部
46	委員	進士 喜英	日本原燃(株) 埋設事業部 開発設計部
47	委員	氏家 伸介	(株)ホージュン　応用粘土科学研究所
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)
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)
50	委員	須佐見 朱加	佐藤工業(株) 技術研究所 土木研究部
51	委員	原田 健二	(株)不動テトラ 地盤事業本部 技術部
52	委員	河井 正	東北大学 工学研究科 土木工学専攻
53	委員	小林 晃	関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科
54	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
55	委員	内海 秀幸	千葉工業大学 工学部 建築都市環境学科
56	委員	千々松 正和	(株)安藤・間 技術本部 原子力部
57	委員	利藤 房男	応用地質(株) 技術本部
58	委員	平山 利晶	国際航業(株)
59	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
60	委員	熊谷 浩二	八戸工業大学大学院 社会基盤工学専攻
61	委員	吉田 秀典	香川大学 安全システム建設工学科
62	委員	井上 誠	(有)地球情報・技術研究所
63	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
64	委員	内田 篤貴	日本物理探鑛(株) 企画本部
65	委員	長江 泰史	(株)テルナイト
66	委員	加茂 由紀彦	八千代エンジニヤリング(株) 総合事業本部　地質・地盤部技術第2課
67	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
68	オブザーバ	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
69	オブザーバ	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
70	オブザーバ	山内　丈樹	原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF) 技術グループ
71	オブザーバ	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
72	オブザーバ	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
73	オブザーバ	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
74	オブザーバ	藤崎 三郎	(公財)原子力安全研究協会 研究支援部
75	オブザーバ	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
76	オブザーバ	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。

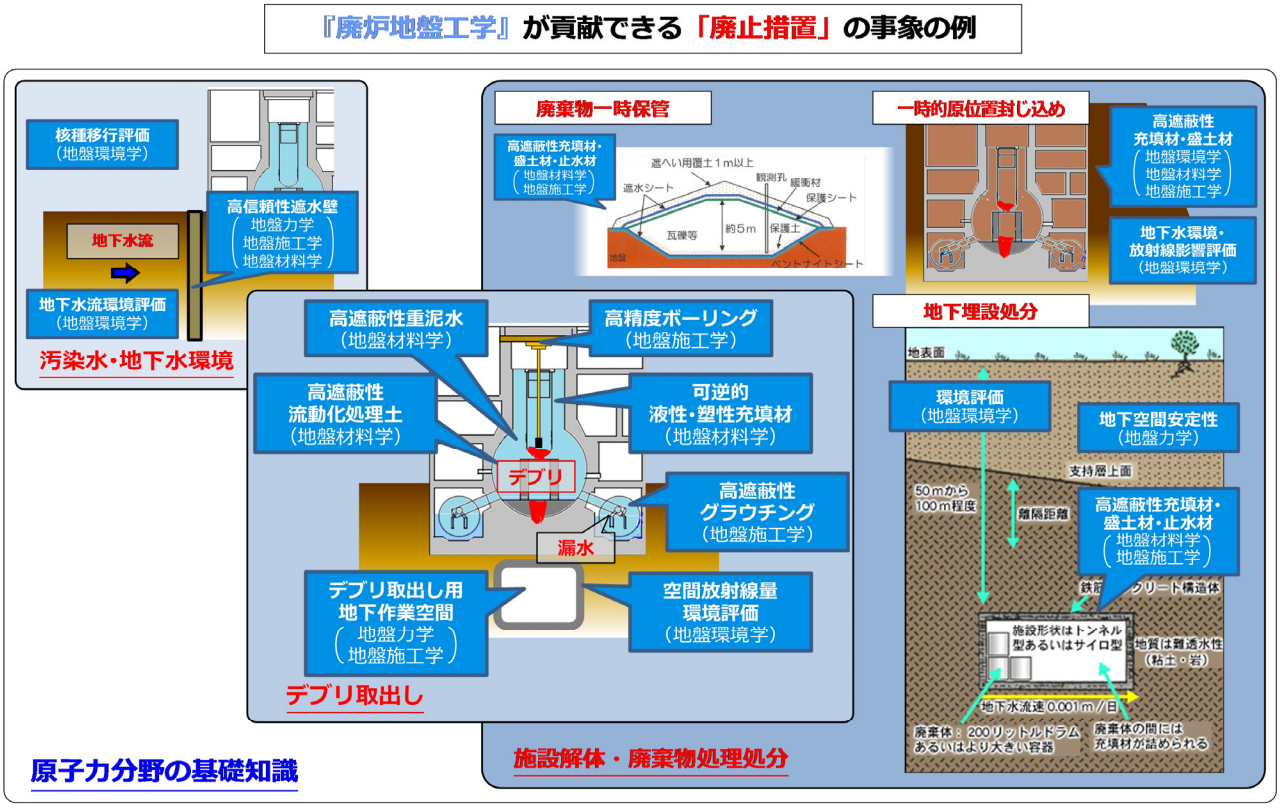


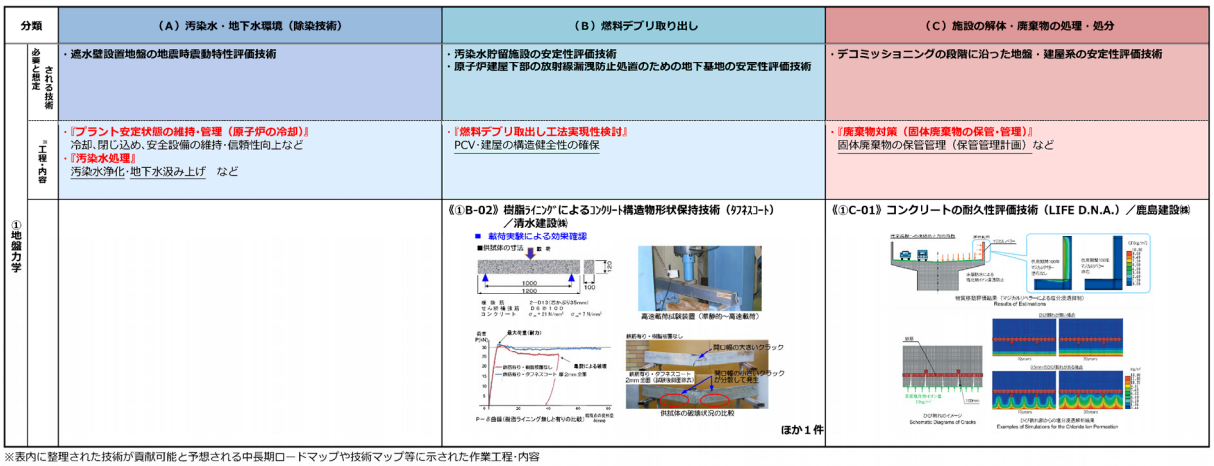
図 3.1-2　廃止措置に寄与可能な地盤工学系技術

このような考えの下、本年度は地盤工学系技術の位置付けや新技術の発掘及びその実現性について検討を行った。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

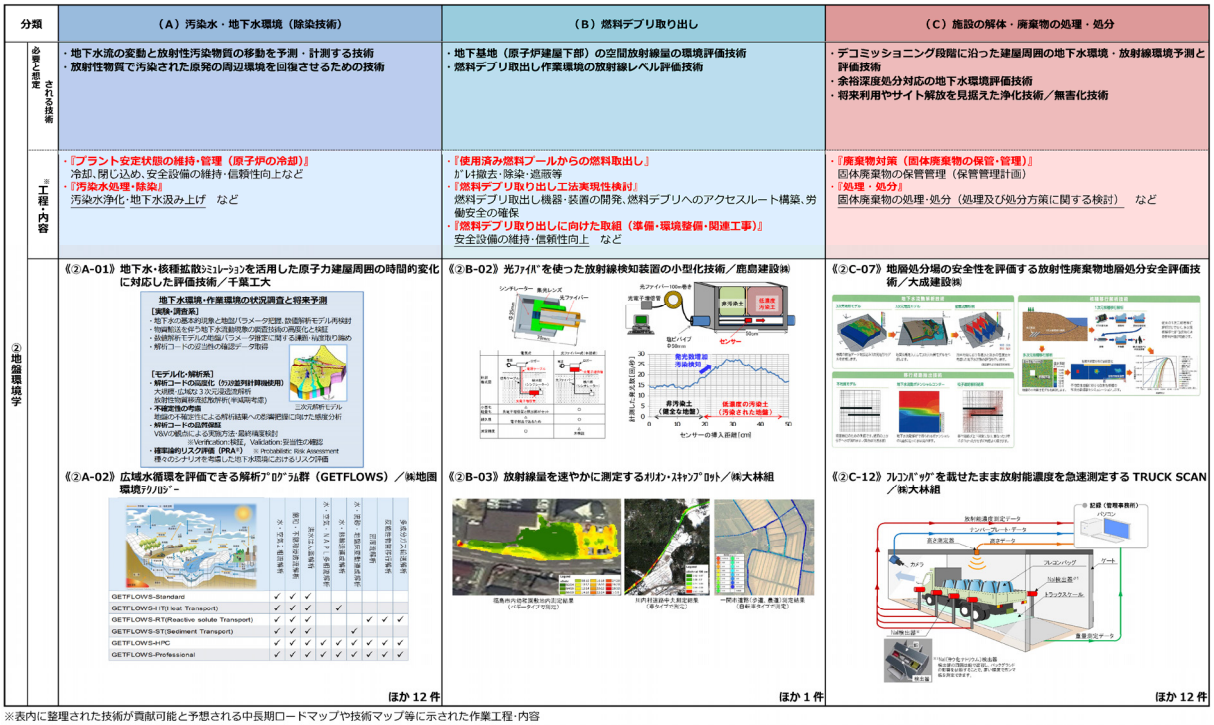
本年度は新たに収集・提供された技術情報に基づき、技術マップの更新を行うと共に、平成 28 年度にデータベース化を念頭に置きつつ整理・構築した技術メニューDB（案）について更新を行った。なお、技術マップに整理されたデータ件数は 93 件となっている。

以下に更新した技術マップ及び技術メニューDB（抜粋）を示す。



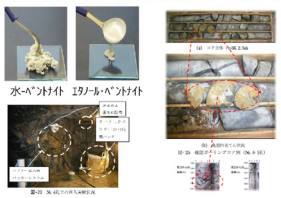
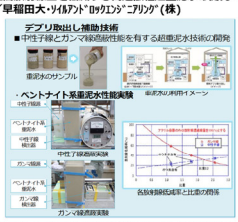
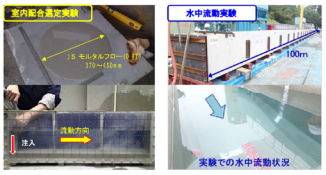
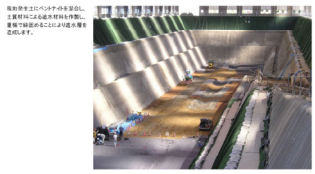
※表内に整理された技術が貢献可能と予想される中長期ロードマップや技術マップ等に示された作業工程・内容

図 3.1-3　技術マップ rev.09.1（公開用）1/4



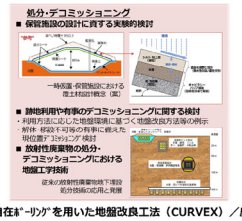
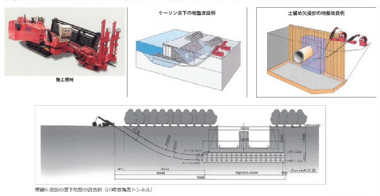
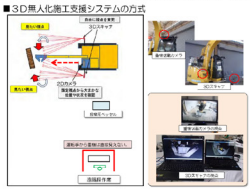
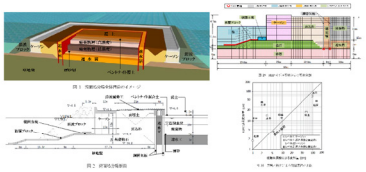
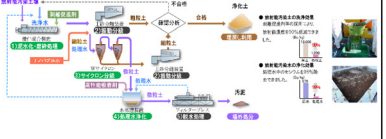
※表内に整理された技術が貢献可能と予想される中長期ロードマップや技術マップ等に示された作業工程・内容

図 3.1-4　技術マップ rev.09.1（公開用）2/4

分類	（A）汚染水・地下水環境（除染技術）	（B）燃料デブリ取り出し	（C）施設の解体・廃棄物の処理・処分
③地盤材料学 必要と想定される技術	・汚染水貯留プールに適用可能な高性能止水材料の開発 ・遮水壁の信頼性を高める高性能遮水壁材料の開発 ・瓦礫・伐採材保管に適した高遮蔽性覆土材料と止水材料の開発	・燃料デブリからの放射線遮蔽能力の高くボーリング等を容易にする格納容器充填材料（液体） ・格納容器水漏れ箇所対応可能な高遮蔽性固化泥水の開発 ・燃料デブリの一時的な封じ込めに対応可能な可逆的液性・塑性（高遮蔽性）充填材の開発	・瓦礫・伐採材保管に適した高遮蔽性覆土材料と止水材料の開発 ・余裕深度処分に対応した廃棄物空間充填材料の開発 ・安定的な閉じ込め・遮蔽に対応できる格納容器用高遮蔽性充填材料の開発 ・デコミッショニングにおける建屋全体を覆う高遮蔽性盛土材料の開発
※工程・内容	・『プラント安定状態の維持・管理（原子炉の冷却）』 冷却、閉じ込め、安全設備の維持・信頼性向上など ・『汚染水処理』 汚染水浄化・地下水汲み上げ　など	・『炉内・燃料デブリの状況把握』 実機調査による推定（RPV・PCV） ・『燃料デブリ取り出し工法実現性検討』 燃料デブリ取出し機器・装置の開発、燃料デブリへのアクセスルート構築、労働安全の確保 ・『燃料デブリ取り出しに向けた取組（準備・環境整備・関連工事）』 安全設備の維持・信頼性向上 ・『労働安全の確保（労働災害防止・被曝低減）』 作業員の被曝低減	・『貯蔵（保管・管理）』 固体廃棄物の保管管理（発生量低減・保管管理計画） ・『処理・処分』 固体廃棄物の処理・処分（処理及び処分方策に関する検討）
	《③A-03》地盤中の空隙、間隙を効率的に充填注入する可塑状ｸﾞﾗｳﾄ／鹿島建設㈱ 《③A-11》ｴﾀﾉｰﾙ・ﾍﾟﾝﾄﾅｲﾄｽﾗﾘｰ材料の遮水壁、ｸﾞﾗｳﾄ適用／清水建設㈱  水-ﾍﾟﾝﾄﾅｲﾄ　ｴﾀﾉｰﾙ・ﾍﾟﾝﾄﾅｲﾄ ほか 14 件	《③B-01》空間放射線量を低減する高遮蔽性超重泥水の開発（NBC）／早稲田大・ｼﾞｵﾃｸﾉｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ(株)  《③B-03》福島第一原子力発電所海水配管トレンチの置換えに使用した長距離水中流動充填材（Hilo）／鹿島建設㈱  ほか 3 件	《③C-04》狭隘部に高密度締固め土を構築する湿式高密度ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ系人工ﾊﾞﾘｱ構築工法（Shotclay）／鹿島建設㈱ 《③C-12》現地発生土を利用した土質遮水技術（ｴｺｼｲﾙﾗｲﾅｰ(ESL)工法）／㈱大林組  ほか 11 件

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

図 3.1-5　技術マップ rev.09.1（公開用）3/4

分類	（A）汚染水・地下水環境（除染技術）	（B）燃料デブリ取り出し	（C）施設の解体・廃棄物の処理・処分
④地盤施工学 必要と想定される技術	・地下水の流入を止める信頼性の高い遮水壁の構築工法 ・幅輳する地下埋設物に対応できる遮水壁構築工法 ・汚染水プールに敷設する自己診断機能付き遮水幕工法	・燃料デブリ取出しのための高精度ボーリング工法 ・燃料デブリ取出し時における地下基地の構築工法 ・格納容器水漏れ箇所封鎖のための高遮蔽性グラウチング工法 ・使用済燃料及び燃料デブリ取出し時における燃料建屋内の除染技術	・地下埋設処分施設の構築工法 ・高い放射能レベルの固形廃棄物・使用済み燃料等の処分技術 ・安定的な閉じ込め・遮蔽に対応できる格納容器用高遮蔽性充填工法 ・建屋全体の中詰めベントナイトを併用した鋼製外殻による封じ込め工法 ・瓦礫・伐採材の保管施設構築技術 ・汚染土壌の最小化のための減容技術 ・港湾底質の浄化／回収技術 ・将来利用の想定に応じた地盤改良・埋立て技術
※工程・内容	・『プラント安定状態の維持・管理（原子炉の冷却）』 冷却、閉じ込め、安全設備の維持・信頼性向上など ・『汚染水処理』 汚染水浄化・地下水汲み上げ　など ・『労働安全の確保（労働災害防止・被曝低減）』	・『炉内・燃料デブリの状況把握』 実機調査による推定（RPV・PCV） ・『燃料デブリ取出し工法実現性検討』 燃料デブリ取出し機器・装置の開発、燃料デブリへのアクセスルート構築、労働安全の確保 ・『燃料デブリ取り出しに向けた取組（準備・環境整備・関連工事）』 安全設備の維持・信頼性向上　など ・『労働安全の確保（労働災害防止・被曝低減）』	・『貯蔵（保管・管理）』 固体廃棄物の保管管理（保管管理計画） ・『処理・処分』 個体廃棄物の処理・処分（処理及び処分方策に関する検討） ・『労働安全の確保（労働災害防止・被曝低減）』
	《④A-01》ｷｬﾋﾞﾗｰﾊﾞﾘｱを利用した信頼性の高い瓦礫・伐採材の保管施設構築工法／早稲田大  《④A-06》自在ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞを用いた地盤改良工法（CURVEX）／鹿島建設㈱  ほか 18 件	《④B-05》代替工法のための燃料ﾃﾞﾌﾞﾘの切削・集塵技術／大成建設㈱ 《④B-09》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㈱  ほか 9 件	《④C-02》広域な海面を利用できる海面処分場の建設工法／広島大  《④C-18》分級・洗浄により放射性汚染土を 90%減容するｱｰﾙｷｭｰﾋﾞｯｸ DC（Decontamination）／㈱大林組  ほか 22 件

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

図 3.1-6　技術マップ rev.09.1（公開用）4/4

技術分類

	(A) 汚染水・地下水環境（除染技術）	(B) 燃料デブリ取り出し	(C) 施設の解体・廃棄物の処理・処分
① 地盤力学	①A	①B	①C
② 地盤環境学	②A	②B	②C
③ 地盤材料学	③A	③B	③C
④ 地盤施工学	④A	④B	④C

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)		理論	室内試験	実規模試験	実用	特許	on site	off site		
コンクリートの耐久性評価技術（LIFE D.N.A.）	鹿島建設(株)	①B-01 ①C-01		①	①	コンクリート（以下、CO）の耐久性を評価するために重要となる劣化因に着目。CO内部での廉価因子の移動を拡散･移流といった基本的な物質移動だけでなく、移動速度に関連するCO内の化学反応も考慮して把握することで精度良く解析し、高い精度でCOの耐久性を評価する。	○	○	○	○	○			鹿島建設㈱HP http://www.kajima.co.jp/tech/c_renewal/diagnosis/index.html	－
揚水量の抑制と安定した地下水位管理を行なうためのディープウエル工法自動制御システム（WIC）	鹿島建設(株)	②A-03 ②C-03	②		②	揚水井戸と観測井戸の水位データをもとに揚水井戸の稼動状態を自動運転管理すると共に、揚水ポンプをインバータ制御することにより効率的な排水を実現する。	○	○	○	○	○			鹿島建設㈱HP http://www.kajima.co.jp/tech/c_railway/eco/index.html#body_02	－
密度可変固体トレーサを用いた極低流速まで計測可能な地下水3次元流向・流速計測技術	鹿島建設(株)	②A-06 ②C-06	②		②	低流速地下水の流向流速計測方法及び装置のうち、特に地下深部における低流速の地下水流向及び流速を正確に計測する技術である。	○				○			[illegible] http://www.ekouhou.net/%E4%BD%8E%E6%B5%81%E9%80%9F%E5%9C%B0%E4%B8%8B%E6%B0%B4%E3%81%AE%E6%B5%81%E5%90%91%E6%B5%81%E9%80%9F%E8%A8%88%E6%B8%AC%E6%96%B9%E6%B3%95%E5%8F%8A%E3%81%B3%E8%A3%85%E7%BD%AE/disp-A,2007-256026.html	－
原位置における汚染水中のセシウムとストロンチウムの分別モニタリング	清水建設(株)	②A-10	②			原位置において汚染水中のSr とCs の放射能を分別し、且つ連続モニタリングを可能とするシステムを目的に開発された検出器メカニズム及び汚染水のモニタリングシステム。これにより、Srの測定結果の算出時間を短縮できる。	○				○			IRID HP http://irid.or.jp/cw/public/594.pdf	－
汚染水の取扱いに配慮した地下サンプリングシステム	清水建設(株)	②A-13	②			大気と非接触状態で地下水採水（サンプリング）を可能とする技術。従来と異なる観測井の構造で、耐圧性の袋状容器（パウチ）を採水容器として使用することで汚染水にも適用を可能とする。	○				○				特許出願済（特願2015-222293）
岩ずりなど様々な地盤をオーダーメイドで改良する大型径高圧噴射撹拌工法（JETCRETE）	鹿島建設(株)	③A-04 ④A-02	③ ④			砂質土や粘性土地盤だけでなく、従来改良が困難であった岩ずりを含む砂礫地盤など、様々な地盤を対象に、改良径(直径0.5～8.5m)と強度（0.1～10MN/m2）を任意に設定できるオーダーメイドの地盤改良工法。従来工法に比べて産業廃棄物量が少なく、高圧噴射の高性能化による工期の短縮、状況に応じた改良仕様の設定など、トータルコスト軽減を実現可能とする。	○	○	○	○	○			鹿島建設㈱HP http://www.kajima.co.jp/tech/c_soil_improvement/deep/index.html	※JETCRETEは鹿島建設㈱のグループ会社であるケミカルグラウトの開発
建屋内地下水経路空間のベントナイト・ペレット充てん止水方法	清水建設(株)	③A-09	③			建屋内部の空間が汚染水漏出経路となっており、且つ、水の流れが静止していない空間において、吸水膨張性を有するベントナイト･ペレットを投下充填することで止水処理する工法であり、高放射線環境下における作業時間の短縮化が望める。	○	○	○		○			IRID HP http://irid.or.jp/cw/public/596.pdf	－
凍土遮水壁の外周部に地下水流入抑制の補助とする粘土壁による遮水壁の構築	清水建設(株)	③A-10	③			凍土遮水壁の外周部にEC ウォール工法による粘土遮水壁を計画し、地下水流入抑制の補助を担うものである。なお、粘土遮水壁を凍土遮水壁に先立って施工すると、凍土促進に繋がる補助工法にもなる。	○	○	○		○			IRID HP http://irid.or.jp/cw/public/599.pdf	－
エタノール・ベントナイトスラリー材料の遮水壁、グラウト適用	清水建設(株)	③A-11	③			ベントナイト材料と工業用エタノール（商品名：ベントコールＦ／日本アルコール販売、エタノール58%、2%の添加剤～飲用防止のため）を混合して作成されたスラリー材。当該材料は打設後にエタノールと水の置換反応によりベントナイトが膨潤して低透水性を発揮する。なお、置換されたエタノールは微生物反応により消費されるため、自然界での影響は小さい。	○	○	○	○	○			IRID HP http://www.irid.or.jp/cw/public/601.pdf	－
建屋周辺からの地下水の流入の低減を図る建屋間ギャップ部の止水方法	清水建設(株)	③A-13	③			地下水の流入箇所として考えられている建屋間ギャップの端部の地下（地下水位～岩盤上部）を地盤改良･止水材を注入することで、建屋周辺からの地下水の流入の低減を図る止水方法。	○	○	○	○	○	○		IRID HP http://irid.or.jp/cw/public/591.pdf	－
自在ボーリングを用いた地盤改良工法（CURVEX）	鹿島建設(株)	④A-05	④			曲がりボーリング技術を用いることで、タンク･護岸･鉄道等の既設構造物の直下の軟弱地盤を改良することを可能とする。これにより、直上及び地下の障害物を避けながら、ボーリング孔を自在に削孔し、薬液注入工法による地盤改良を可能とする。	○	○	○	○	○			鹿島建設㈱HP http://www.kajima.co.jp/tech/c_railway/improvement/index.html#body_02	※鹿島建設㈱とケミカルグラウト㈱（鹿島グループ会社）の共同開発
埋設物による土留め壁欠損部に対応するラッピングウォール工法	鹿島建設(株)	④A-06	④			大深度の埋設物によって生じる欠損部に、確実で高品質な地中連続壁を構築を可能とする工法である。凍結工法や開削工法、地盤改良などの補修工法が不要で、短期間に構築可能である。さらに埋設物への影響を最小限に抑え、且つ高精度で止水性に優れた地中連壁を構築することを可能とする。	○	○	○	○	○			鹿島建設㈱HP http://www.kajima.co.jp/tech/c_railway/base_const/index.html#!body_04	－

図 3.1-7　技術メニューDB（案）rev.H29（抜粋）

2) 廃炉シナリオに関する検討

平成 28 年度に検討・構築したシナリオ素案について、本年度 8 月～9 月に公開された戦略プラン 2017 や中長期ロードマップ（案）の内容を踏まえ、再構築した。

図 3.1-8 に再構築した基本的なシナリオを示す。

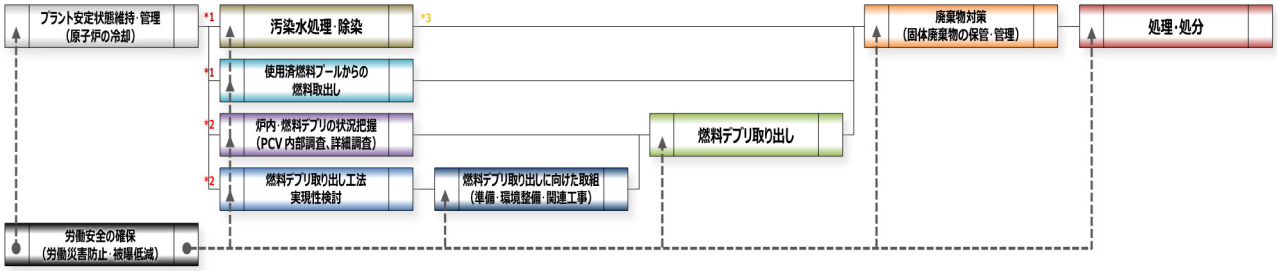


図 3.1-8　基本的なシナリオ

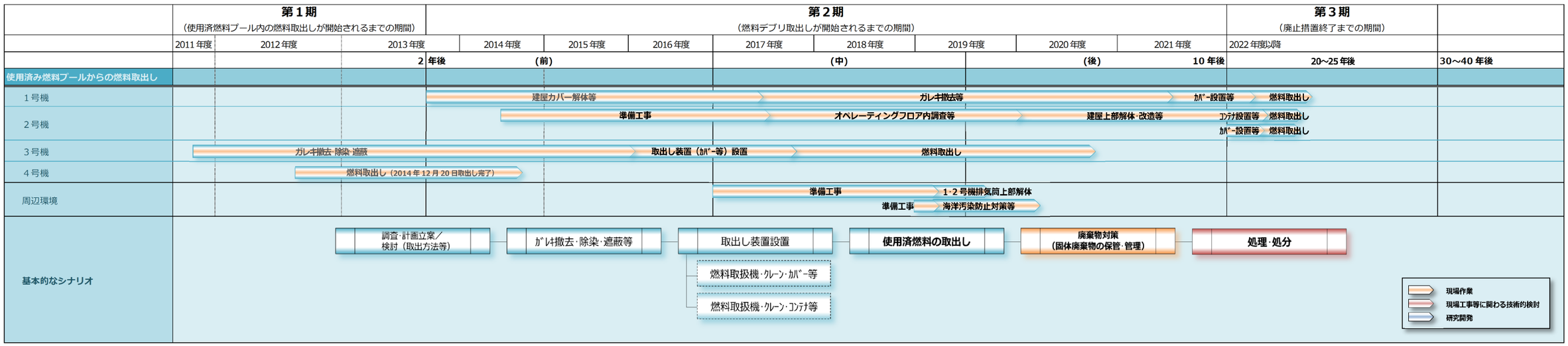
このシナリオ素案は、中長期ロードマップ[(1)] 及び戦略プラン[(2)] に示された廃炉までに必要な作業や内容を幾つかの作業グループごとに整理し、この結果より導かれた作業項目を時系列に沿って取りまとめたもので、『プラント安定状態維持・管理』以下に「臨界管理」「冷却」「閉じ込め」「安全設備の維持・信頼性向上」などが存在するように、各作業項目の下位にはより詳細な作業工程・項目が存在する構成となっている。

戦略プラン 2017 に基づく変更としては『炉内･燃料デブリの状況把握』が『燃料デブリ取出し工法実現性検討』と並行して継続的に実施される点と、『燃料デブリ取出し』に含まれていた『燃料デブリ取出しに向けた取組み（準備・環境整備・関連工事）』が具体化され、新たな作業項目としてまとめられた点である。

また、シナリオ素案における各作業項目以下まで細分化したシナリオ（作業工程・項目）についても、昨年度整理した内容を基に更新を行った。中長期ロードマップ（案）に基づく廃炉工程全体の枠組み（図 3.1-9 参照）と共に、これらの整理したシナリオを図 3.1-10～図 3.1-14 に示す。

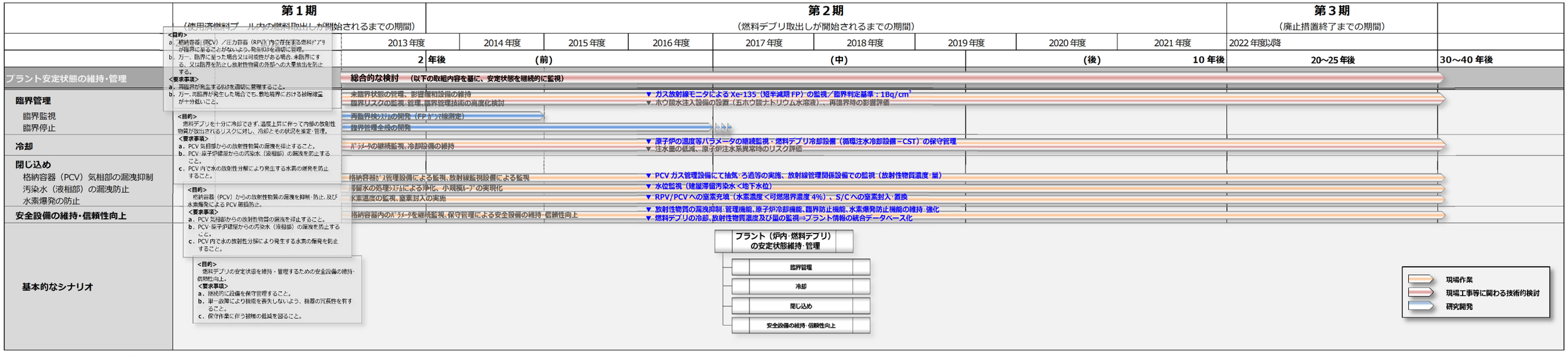
図 3.1-9　中長期ロードマップ（案）に基づく廃炉工程全体の枠組み

（1）使用済燃料プールからの燃料取出し



※ 中長期ロードマップ（平成 29 年 9 月改訂案）に基づく

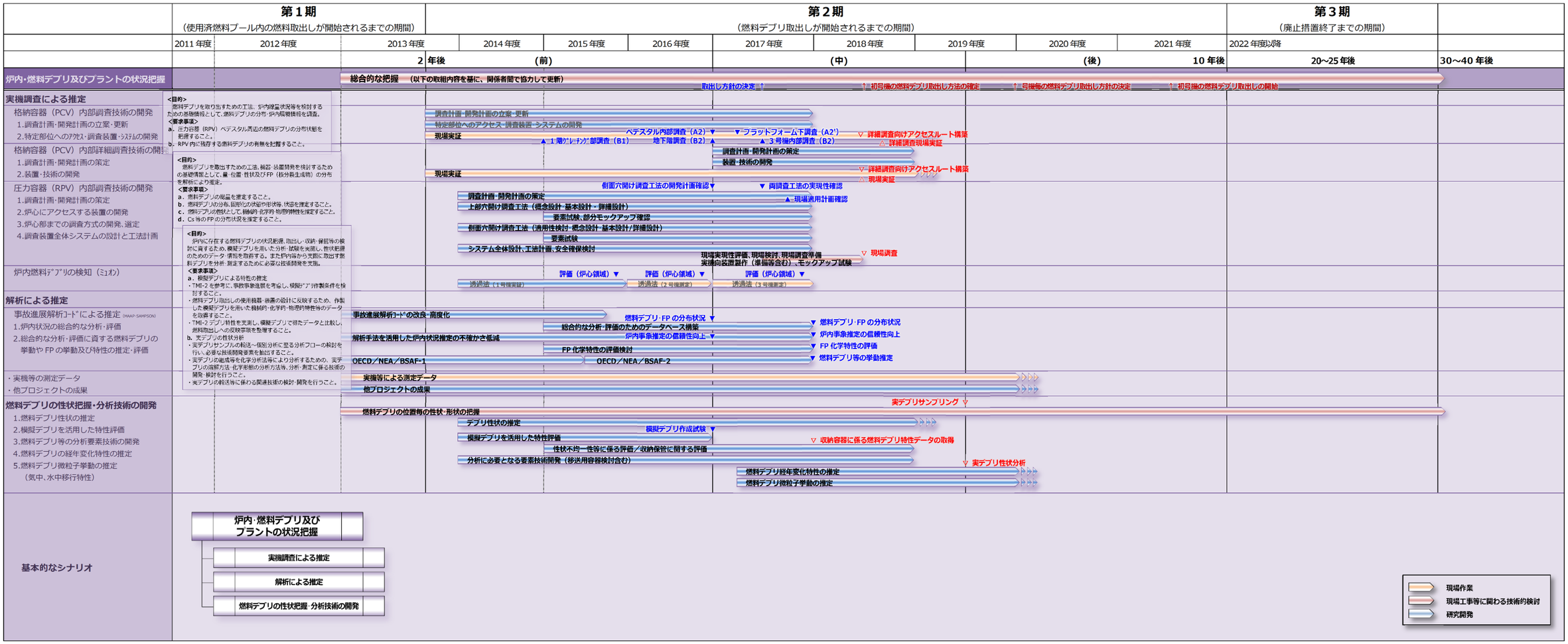
（2）プラント安定状態の維持･管理



※東京電力(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 2015～2017　に基づく

図 3. 1-10　中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果（改訂版）①

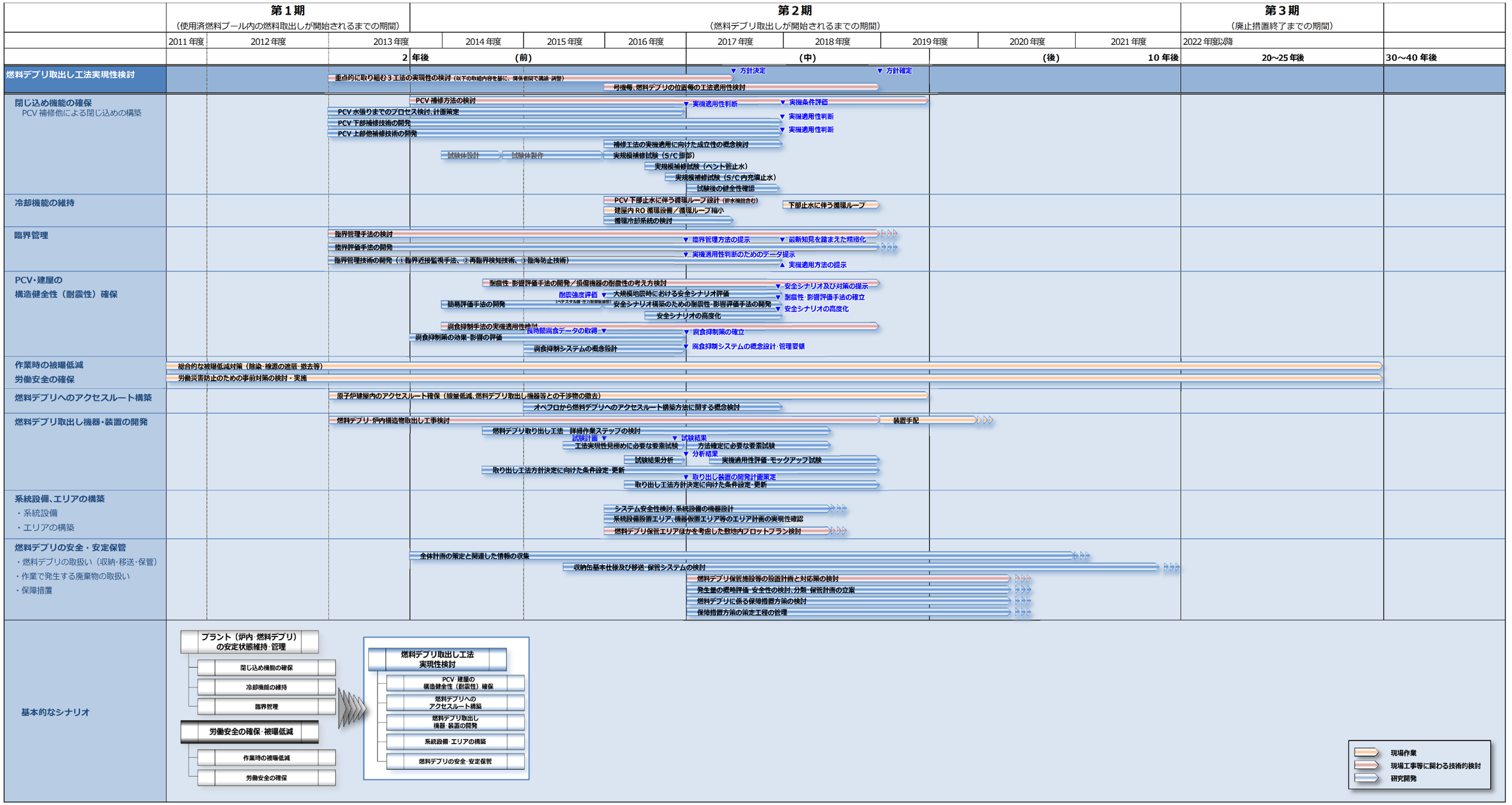
（3）炉内燃料デブリ及びプラントの状況把握



※中長期ロードマップ（平成 29 年 9 月改訂案）、及び東京電力(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 2015～2017　に基づく

図 3.1-11　中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果（改訂版）②

（4）　燃料デブリ取出し工法実現性検討

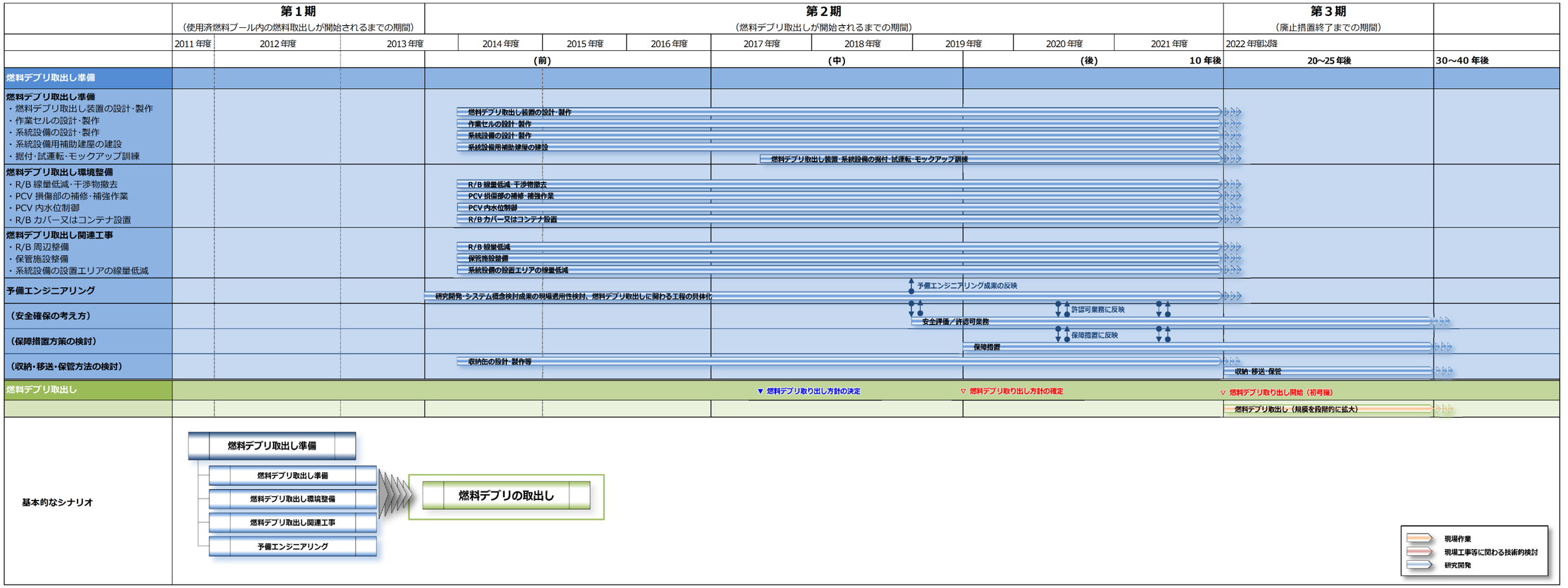


※東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2015～2017　に基づく

燃料デブリ取出しの安全確保に関連した重要課題と燃料デブリ取出しの作業に関連した重要課題

図 3.1-12　中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果（改訂版）③

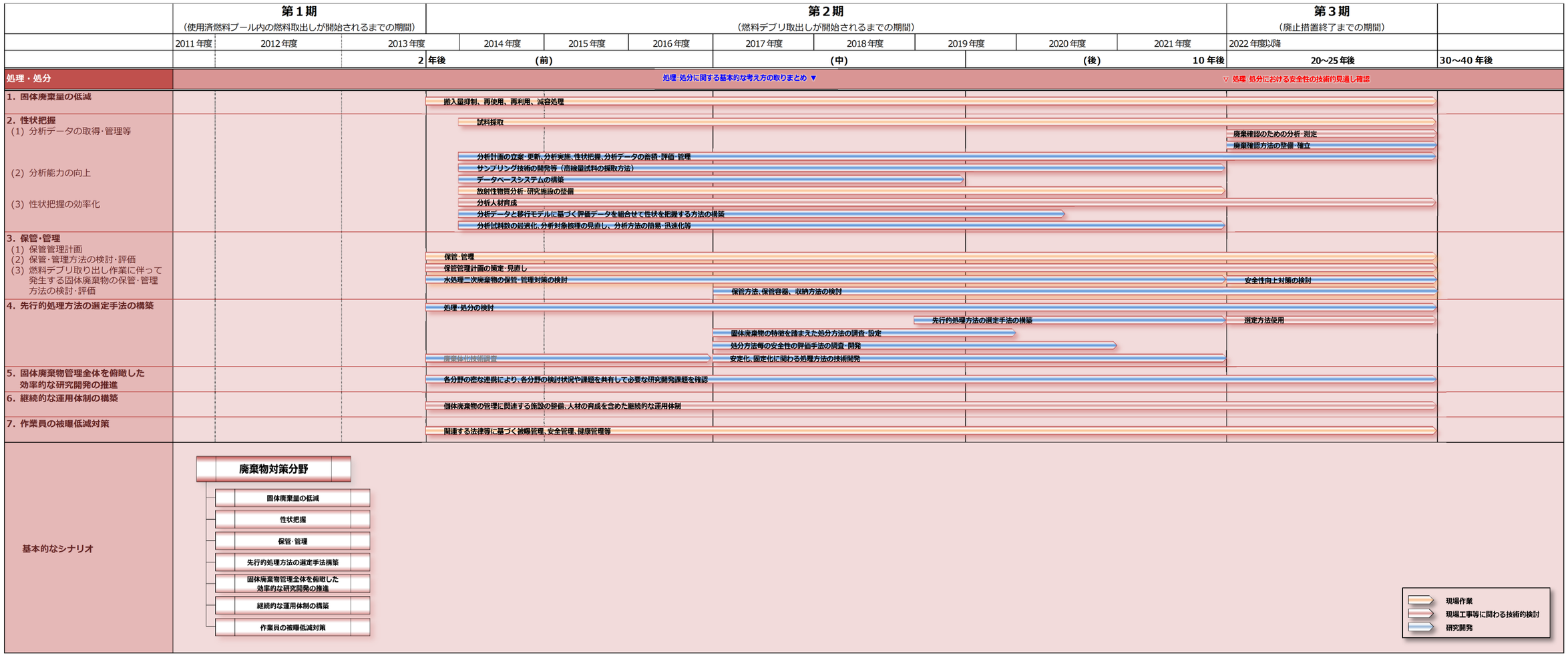
（5）燃料デブリ取出し及び燃料デブリ取出しに向けた取り組み（準備・環境整備・関連工事）



※中長期ロードマップ（平成 29 年 9 月改訂案）、及び東京電力(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 2015~2017　に基づく

図 3.1-13　中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果（改訂版）④

（6）廃棄物対策分野



※東京電力(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 2015～2017　に基づく

図 3.1-14　中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果（改訂版）⑤

3) 地盤工学系技術を活用した廃炉シナリオの検討

2)で整理したシナリオ（中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果）を踏まえることで、政府･国･東京電力などが考える廃炉までの事業の流れ･考え方を正しく理解・把握でき、これにより前述の技術マップで掲げた廃炉に寄与可能と考えられる様々な地盤工学系技術を実情に則し、かつ説得力ある形で提示できるものと考える。

本項では、技術マップに提示した様々な地盤工学系技術と整理したシナリオの融合を試みることで、同技術の利用場面やその適用性について検討した。図 3.1-16～図 3.1-24 に、【燃料デブリ取出し工法の実現性検討】段階や【廃棄物対策（固体廃棄物保管・管理）】段階などを例に、寄与可能な地盤工学系技術を整理した結果を示す。

なお、各技術名称の脇に記したコード（①A-01）は、技術メニューDB で使用しているコード番号であり、技術分類を意味する。また、赤字で記した技術は本研究で開発中の技術である。以下に技術メニューDB における情報項目の仕様を参考として示す。

【情報項目】

- 技術名称
- 技術保有（社名）
- 技術分類
  - 技術マップ及び廃炉地盤工学を構成する学問単元

	（A）汚染水･地下水環境（除染技術）	（B）燃料デブリ取り出し	（C）施設の解体･廃棄物の処理･処分
① 地盤力学	①A	①B	①C
② 地盤環境学	②A	②B	②C
③ 地盤材料学	③A	③B	③C
④ 地盤施工学	④A	④B	④C

- 概要
- 適用性①～②
  - ① 技術段階（開発レベル） ：理論・室内試験・実規模試験・実用
  - ② 1F での実績 ：on site・off site
- 出典
- 備考

図 3.1-15　技術メニューDB（案）における情報項目

①【燃料デブリ取出し工法の実現性検討】段階で寄与可能な地盤工学系技術（その１）

燃料デブリ取出しに際して求められる PCV（原子炉格納容器）や建屋の健全性確保に寄与可能と考えられる地盤工学系技術であり、上段は構造物自体の健全性に寄与する技術、下段は基礎部分の安定性に寄与する技術からなる。

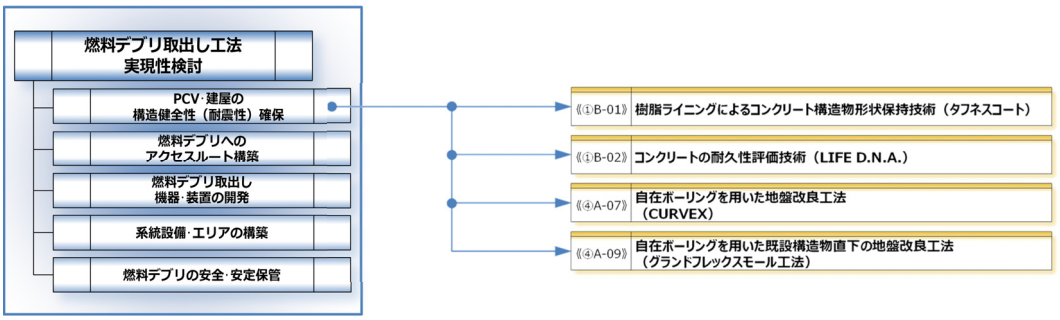


図 3.1-16　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（1/9）

② 【燃料デブリ取出し工法の実現性検討】段階で寄与可能な地盤工学系技術（その２）

燃料デブリの取出しに関わる技術群である。

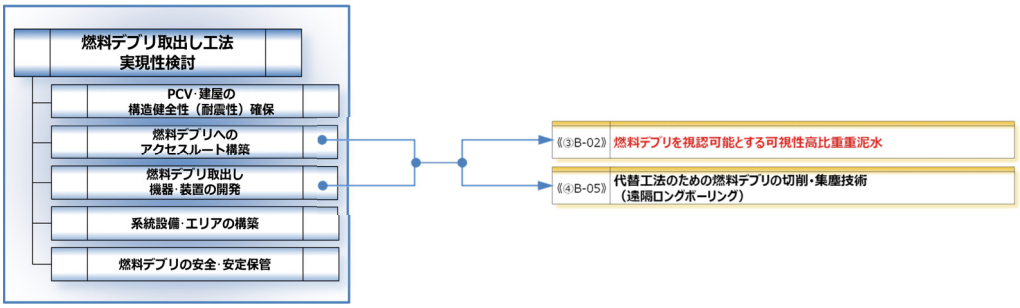


図 3.1-17　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（2/9）

③ 【燃料デブリ取出し工法の実現性検討】段階で寄与可能な地盤工学系技術（その３）

燃料デブリ取出し作業に伴う閉じ込め区画、PCV 内の水位管理等、安全に作業を行うための環境構築に寄与可能な技術群であり、「労働安全の確保･被曝低減」にも関係する技術である。

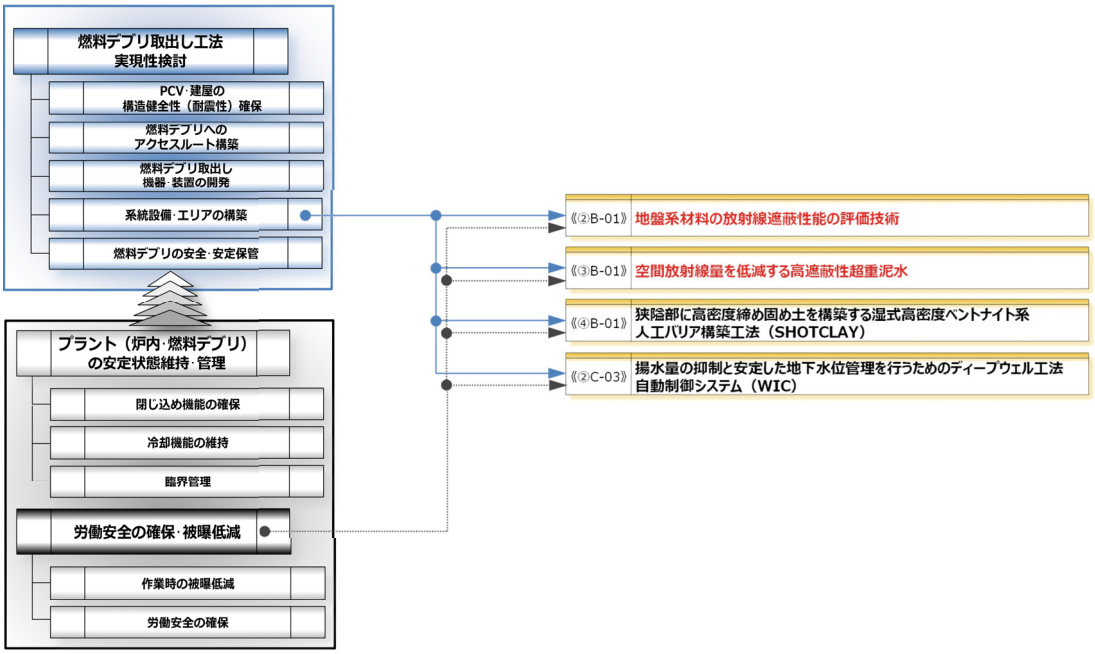


図 3.1-18　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（3/9）

④ 【プラントの安定状態維持･管理】段階で寄与可能な地盤工学系技術（その１）

臨界管理・冷却機能の維持に関わる PCV 等の止水に寄与可能な技術群である。

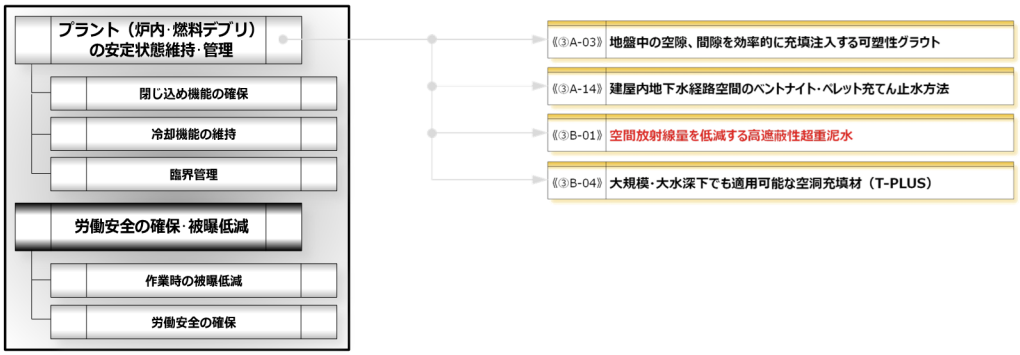


図 3.1-19　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（4/9）

⑤ 【プラントの安定状態維持･管理】段階で寄与可能な地盤工学系技術（その１）

労働安全の確保・被曝低減に寄与可能な技術群であり、1F 事故発生後のオフサイトにおける除染作業等に伴って開発されてきた技術である。

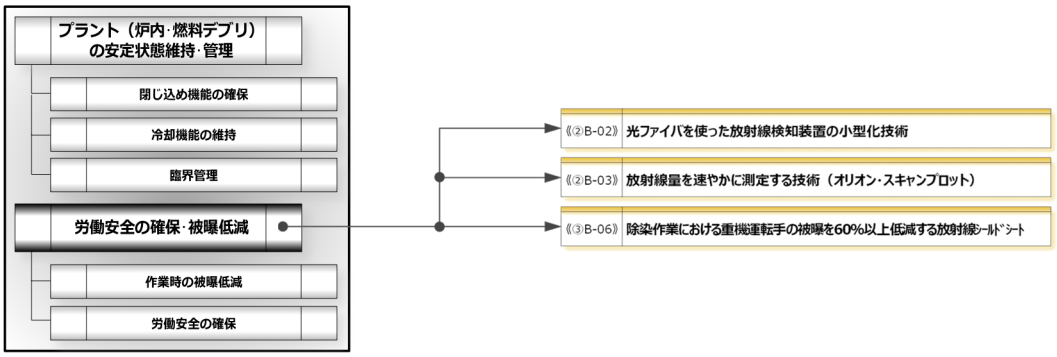


図 3.1-20　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（5/9）

⑥ 【廃棄物対策（固体廃棄物の保管･管理）】段階で寄与可能な地盤工学系技術（その１）

廃棄物量の低減に寄与可能と考えられる技術群であり、オフサイトの除染等に伴って培われてきた技術である。減容化技術のほかに再利用等の技術も含まれる。

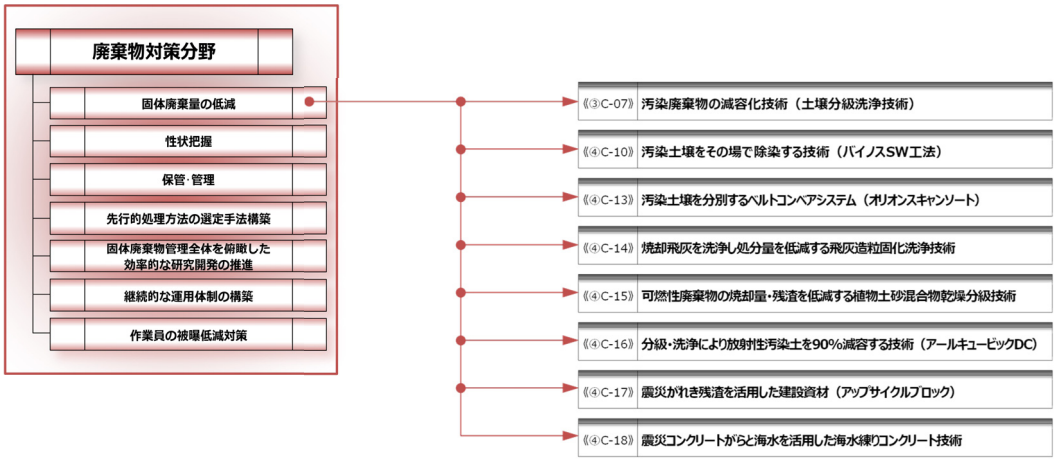


図 3.1-21　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（6/9）

⑧ 【廃棄物対策（固体廃棄物の保管･管理）】段階で寄与可能な地盤工学系技術（その２）

放射性物質の計測、分析、解析等が主体となるため、現状では技術マップ内に寄与可能な技術は収められていない。

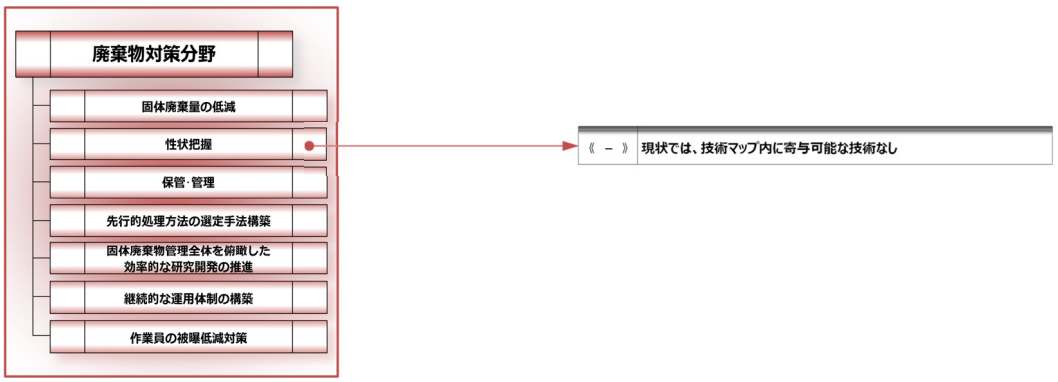


図 3.1-22　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（7/9）

⑦ 【廃棄物対策（固体廃棄物の保管･管理）】段階で寄与可能な地盤工学系技術（その２）

保管段階で寄与可能と考えられる技術群であり、廃棄物処分場や放射性廃棄物の処分（地層処分・余裕深度処分･浅地中トレンチ処分・浅地中ピット処分）で研究・開発が進められてきた技術である。

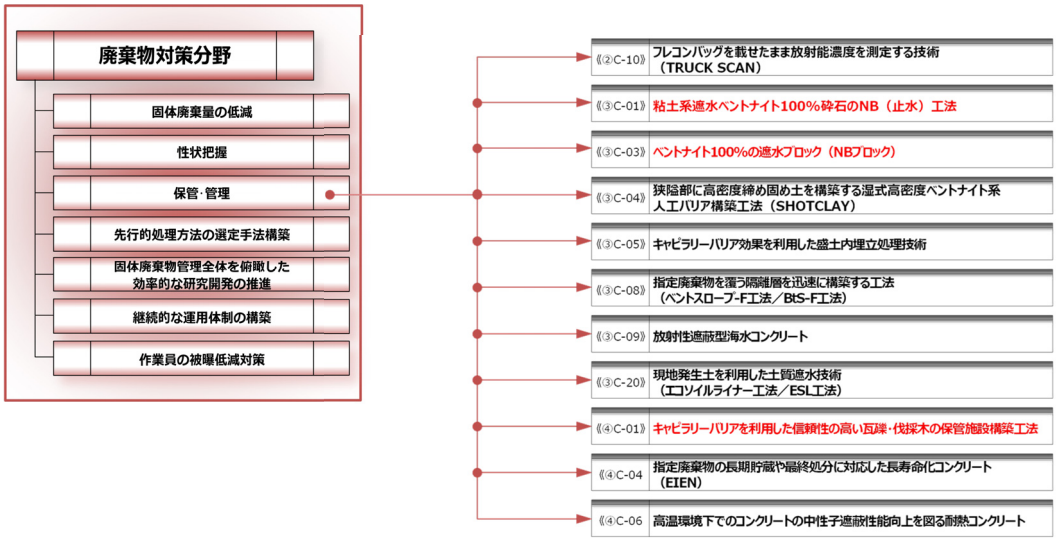


図 3.1-23　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（8/9）

一方、以下は主に保管中の管理面で寄与可能と考えられる技術群であり、先のものと同様に廃棄物処分場や放射性廃棄物の処分（地層処分・余裕深度処分･浅地中トレンチ処分・浅地中ピット処分）で研究・開発が進められてきた技術である。

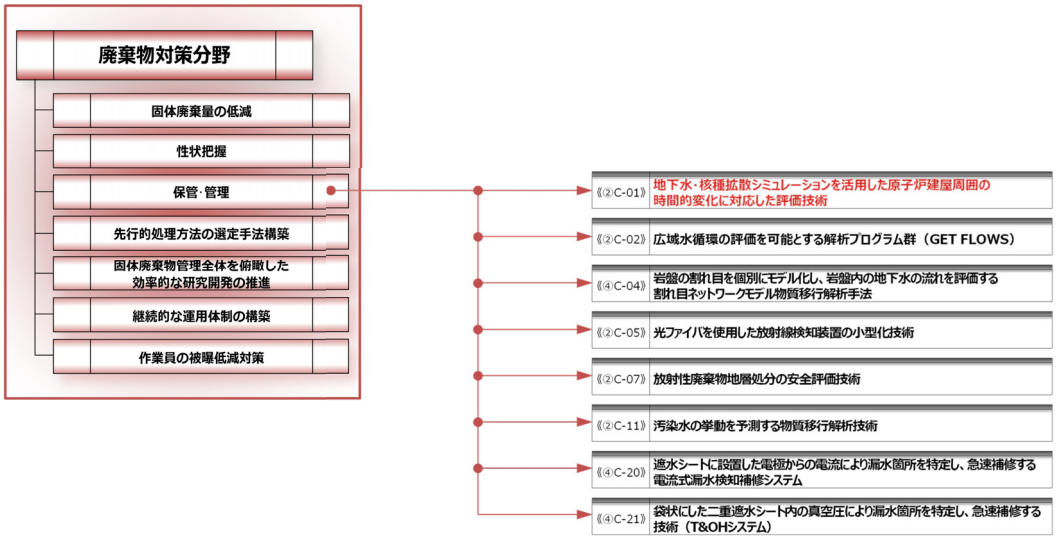


図 3.1-24　シナリオにおける地盤工学系技術の適用性（9/9）

以上のように、戦略プラン等から整理されたシナリオ下位の細分化した各作業項目に対して、技術マップに取りまとめた様々な地盤工学系技術の適用性について整理・検討した結果、選択肢としては十分ではないまでも、様々な段階・作業項目で活用可能な技術が存在していることが確認された。従って、次年度以降は個別の作業項目（固体廃棄物の低減など）に着目した地盤工学系技術を活用したシナリオ（案）の構築を進めると共に、WG や委員会でその実現性等について検証する方針とする。

(3) 関連する資料や情報の収集

廃炉地盤工学委員会における検討の深化のため、関連する資料や情報の収集を行った。その一環として、昨年度に引き続き福島第一原子力発電所の視察を行ったほか、関連する学術研究機関や企業などとの協議の機会を設け、有用な情報の収集に努めた。また、今年度は海外の放射性廃棄物処分に関わる機関との情報交換も実施した。

以下に、その概略をまとめる。なお、下記以外の情報収集活動、関連する学術研究機関等との協議については、3.1.3 (3)及び 3.4.3 項に記した。

1) 平成 29 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、1F 未来館において東京電力側視察担当者から各号機の最新状況など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、間近で 2 号機と 3 号機の損傷状況が確認できたほか、3 号機使用済燃料取出し用設備の設置状況や乾式キャスクの保管設備、建設中の固体廃棄物貯蔵庫に加えて、敷地北側で整備が進められている固体廃棄物（瓦礫・伐採木等）の保管エリアを確認した。

昨年度に引き続き、廃炉に向けた作業の着実な進展状況や作業環境の改善・向上の様子が見られた一方で、間近で見た 2･3 号機の壁面に残る生々しい損傷状況からは今後の廃炉までの困難さや長い道のりが想像された。

■日時　　：平成 30 年 1 月 11 日（木）午後

■場所　　：1F 未来館（旧：東京電力㈱福島第二原子力発電所エネルギー館）
～ 福島第一原子力発電所構内

■参加人数　：16 名（うち、学生 8 名）

図 3.1-25　福島第一原子力発電所視察状況

（左：視察参加者　中央：原子炉建屋壁面の状況　右：固体廃棄物保管エリアの整備状況）

2) NAGRA-JGS Workshop に関する報告

(a) 目的

福島第一原子力発電所の廃炉は、今後、廃棄物の処理・処分のフェーズにウェイトがシフトしていくことが想定されるため、通常廃炉の枠における廃棄物処分の技術や考え方をレビューした上で、廃炉における課題の整理や研究、教育プログラムへの反映を図っていくことが重要と考えられる。また、国際的な協働体制を構築できれば、研究・技術の視野を広げ、若手育成を推進する上で有効な手段となる。

以上から、欧州で放射性廃棄物処分をリードする NAGRA※1 を訪問し、地盤工学会の活動を紹介すると共に、地下研究設備の視察やディスカッションを通じて、今後の活動や人材育成の連携を築くことを目指した。

(b) 工程と参加者

工程と参加者は以下のとおり。

■日時　：平成 29 年 11 月 13 日（月）～17 日（金）
■訪問場所　：モンテリ実験場（Mont-Terri）※2、NAGRA 本部（Zürich）
■出席者（JGS）　：渡邊 保貴（廃炉地盤工学委員会幹事、(一財) 電力中央研究所）
鈴木 誠　（廃炉地盤工学委員会副委員長、千葉工業大学）
小峯 秀雄（廃炉地盤工学委員会座長、早稲田大学）
後藤 茂　（廃炉地盤工学委員会幹事長、早稲田大学）
吉川 絵麻（早稲田大学）
伊藤 大知（早稲田大学）
■出席者（NAGRA）　：Dr. Stratis Vomvoris
Dr. Ingo Blechschmidt
Mr. Hansruedi Fisch
Dr. Andrew Martin
Dr. Leupin Olivier

(c) Mont-Terri 地下研究施設の視察とディスカッション

スイスの放射性廃棄物処分に関する動向や Mont-Terri における研究・技術開発や協力体制について概略を伺い、地下研究施設を視察した。

施設内では、実規模での廃棄体（オーバーパック）の定置、埋戻しに関する施工試験とモニタリングを進めている Full-scale Experiment、発熱式のオーバーパック模型を含む縮小模型原位置試験に位置付けられる Heat Experiment のほか、工学的特性に及ぼす微生物活動の影響を調べる種々の試験（ガスモニタリング含む）等を視察した。その際、大規模な試験ほどベントナイトの飽和に長時間を要するため、試験中の状態管理が難しく、現実と乖離してしまう状況もあり得るため、ベントナイトの飽和は難しい問題とされていたことが印象的であった。また、振動計測等、国内の Ph.D. 学生による試験現場も視察した（平成 28 年度、同研究施設で取得したデータを活用して Ph.D. を取得した者は約 3 名とのこと。）。

なお、母岩となるオパリナスクレイはスメクタイト－イライト混合層が高い含有率で

含まれており、間隙率は 15～18 %、原位置の状態での透水係数は 10^{-13} m/s であることなどの説明を受けた。また、掘削により母岩の損傷領域（EDZ）が形成されるが、この程度や発生機構も調査が進められており、長期的にはオパリナスクレイの変形により亀裂部分は自己修復されると考えられているようであった。しかし、海水系地下水により EDZ 近傍の間隙で塩濃度が高まる、或いは沈殿物が空隙を埋めることにより、母岩本来の自己修復性が損なわれる可能性が懸念されており、訪問時点では検討中とのことであった。

(d) NAGRA 本部におけるミーティング

地盤工学会より、文科省・人材育成プログラムの概要、福島第一原子力発電所の廃炉の現状と課題、現存する地盤工学的な廃炉関連技術の紹介、そして、学会の取組みとして 3 つの着眼点（地下水環境モニタリング、デブリ取出しや建屋解体の補助、廃棄物の保管・処分）に応じた話題提供を行い、意見交換を行った。

一方、NAGRA からはグリムゼル（Grimsel）※3 における研究・技術開発の状況や、人材育成に関する取組みや考え方が説明された。以下に要点を整理する。

■ NAGRA における最近の取組み

光ファイバーを使ったひずみ・温度・熱伝導率のモニタリング技術の開発について紹介があり、基礎的な検討は既に行われているため、今後は原位置環境への本格的な適用に進んでいくとのことであった。なお、この技術を福島第一原子力発電所の廃炉に役立てられないかと NAGRA 側より提案があり、具体的には大寸法の遮水壁・凍土壁のモニタリングへの適用で、地盤工学会とのコラボレーションの 1 つとして考えてみたいとのことであった。

■ 地盤工学会の取組みに関するコメント等

地盤工学会で作成した技術マップに対し、廃炉に関する検討で使われている数値解析コード選定の考え方に興味を示し、GETFLOWS を事例として挙げていることについて、なぜこれを採用したのか理由を知りたいとの質問があった。これに対し、地盤工学会の取りまとめは、手法の 1 つを例示した形であること、GETFLOWS に関しては開発者が日本人であることを補足した。

また、ベントナイトとバライトの混合により作成した重泥水について、格納容器内の高温環境に耐えられるかどうか、材料にどういった変化が生じるか、といった質問があった。また、ベントナイトを使用していることから、膨潤性の程度、ディスアドバンテージ、コストに関する質問があった。これに対しては、現時点では検討できていないが、今後の課題とする旨、回答した。

■ グリムゼルでの取組みについて

NAGRA では、廃棄体の隔離距離など施設設計の最適化に必要との考えから、高温下での種々のデータ収集やデータベースの作成が重要と認識されているようであった。また、再冠水過程を含め、高温下での変質も視野に入れたベントナイトの種々のデータが不足しているという認識を持っており、廃棄物処分施設の最適化（コストや施設空間量や設置期間なども考慮。）を検討するために新しく原位置試験が実施される計画とのことであった。

また、グリムゼルやモンテリでは、境界条件をきちんと把握した上で種々の計測を行うことを重要視しており、数値解析やモニタリング技術の高度化は不可欠と考えられていた。一方でベントナイトの変質とこれに伴う挙動の変化は非常に重要で困難な課題と認識されていた。

■ 人材育成について

NAGRA では、グリムゼルを 1 つの研修場所とした Summer program を実施しており、これは学生を対象に 5 日程度で原位置試験の実習やデータ処理、議論を行うものであるとのことであった。（なお、Summer program という名称での正式実施は平成 29 年（2017 年）からであるが、それ以前から同様の取組みは続けられてきたとのこと。）。

以下に、人材育成に関する取組みで伺った事項を列記する。

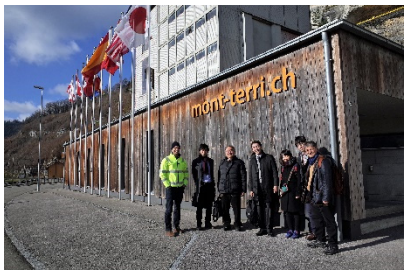
・平成 29 年（2017 年）には約 10 名の学生の参加者があり、平成 30 年（2018 年）にはボアホールを使った水理特性把握の原位置試験がトピックとして予定されている。
・同様の取組みは十数年前から実施しており、参加者の殆どは原子力分野の学生（学部、修士）で、処分分野のプロフェッショナルになることを前提に参加している。
・受け入れに制限は設けられていない。
・人数が多い場合は班や日程を分けて開催する。
・以前は中国からの参加者もあった。
・プログラムの参加者は全員が処分分野に就職しているとのことで、NAGRA では本プログラムがビジネスに直結することが重要と考えている。
・1 週間の短期実習ではあるが、ベントナイトの実験実習も計画されており、地下研究施設で行われている複数の原位置試験で原理や方法を学び、必要に応じて室内試験結果も使用できるようにして、学んでもらう方針。
・ベルン大学の修士には単位認定のインターンシップ（1 週間）があるほか、別途、Ph.D. の学生も受け入れていた。

NAGRA では、原位置試験を含め、このような様々な取組みを通じて、データや技術、ノウハウを集約しているとの考えであった。

(e) 今後の展開

地盤工学会がパイプとなってNAGRAのインターンシップへ学生を派遣することや若手を含めた定期的な情報交換会といった形式で人材育成の面で連携を図っていくことが今後の展開として考えられる。また、放射性廃棄物処分に関しては、NAGRA だけではなく他国の組織とも交流する必要がある。

なお、グリムゼルは地盤工学的にも新しいテーマがあると思われるため、学術的にも交流を持つことは重要であると考えられる。更に福島第一原子力発電所の廃炉に関しては NAGRA から提案はあったものの、直ぐに連携することはできないため、両国の現状や研究アプローチなど、できれば各機関の若手を含めて情報交換を進めることを検討する必要があると考えられる。



Member

Mont Terri Rock Laboratory

Workshop

図 3.1-26　NAGRA 視察･ミーティング状況

※1 NAGRA　：スイスの放射性廃棄物管理共同組合
（Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle）

※2 Mont-Terri 岩盤研究所　：スイス北部の堆積岩（ｵﾊﾟﾘﾅｽｸﾚｲ）分布域に建設された地下研究施設。

※3 Grimsel 試験サイト　：スイス南部の結晶質岩分布域に建設された地下研究施設。

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、廃炉地盤工学を構成する学問単元の現状などの評価を行った。構成する学問単元に関する内容と優先度の検討結果を以下に記す。

但し、この検討は主に昨年度行ったものをベースとし、補足事項等を加えたものである。

(1) 廃炉地盤工学を構成する学問単元と取組みの優先度

廃炉地盤工学を構成する技術の属性・学問単元と取組むべき技術課題を整理すると共に、各学問単元の現状の成熟度についてまとめる。

✏ **地盤力学**

原子炉廃止措置での各段階で生じる構造物及び地盤の形態変化について、**地震等に対する安定性**を検討するための技術群である。

学問としては、長い伝統と豊富な実績を有し、教育機関の土木工学科などで授業が行われている。廃炉問題に関しては、上述の技術課題や境界条件の整備といった課題を抱えるが、基本的には現状の技術の延長上で取組むことが可能と評価できる。

✏ **地盤環境学**

廃止措置過程において必要な地盤内（地下水、地下空洞等）の**放射線環境を予測・評価・改善**するための技術群である。

地盤掘削に伴う地下水挙動などにおいて研究実績が豊富に存在するが、実際の土粒子の間隙における水の動きについては不明な点も多い（3.3 参照）。空間放射線の問題に関連した環境評価という意味では新しく、教育機関でも殆ど取り上げられていない。

✏ **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**する技術群である。

汚染土壌や廃棄物の処理における地盤系材料を活用した取組みは、産業廃棄物の処分分野では既に行われており、研究成果・実績も豊富に存在する。また、高レベル放射性廃棄物やTRU 廃棄物などの放射性廃棄物の処分分野でも、研究・開発が進められており、研究成果も増えつつある。

✏ **地盤施工学**

廃止措置における環境的・構造的条件を考慮して、**最適な工法・材料を選択し、廃止措置過程を実体化**させるための技術群である。

施工学は通常の土木工事で行われる思考過程を取扱ったものであるが、経験工学的な色合いが強く、教育機関での取組みは進んでいない。特に事故原発の廃炉作業においては未経験な場面・事象が連続することが想定され、通常の施工学を適用するには困難と考えられる。

このように、学問としての成熟度や教育機関での取扱いは学問単元ごとに様々であることから、これらを鑑み、本研究ではこれら学問単元への取組み優先度を以下のとおり整理する。

表 3.1-2　廃炉地盤工学における学問単元の取組み優先度

学問単元	取組み優先度	解説
地盤力学	小	・廃止措置が進展し、課題が明確になった時点から取組むことで対応可能。
地盤環境学	中	・現状の技術の進展により対応できる可能性が高い。 ☞本プログラムでは再委託先の千葉工業大学の実行グループ（地盤環境学 WG）を中心に検討を実施。
地盤材料学	中	・現状でも技術の進展が盛んであり、これを進めていくことで廃止措置に向けた問題にも対応できる可能性が高い。 ☞本プログラムでは再委託先の早稲田大学の実行グループ（地盤材料学 WG）を中心に検討を実施。
地盤施工学	大	・経験工学的な面が強く、学問としての普遍性という意味で現状のレベルは極めて低い。特に未経験な場面が連続する事故原発の廃止措置については対応できない可能性が高い。 ・一方で、計画の具現化、新材料適用に際しては、施工の概念が必須となるため、早急に取組む必要がある。 ☞本プログラムでは地盤工学会の実行グループ（地盤施工学 WG）を中心に検討を実施。

(2) 廃炉地盤工学／地盤施工学の構築

上記検討の結果、学問単元のうちで地盤施工学の取組み優先度が最も高いことが明らかになった。そこで、施工に関わる業務に従事しているコアメンバーを選抜して地盤施工学 WG を結成し、教育としての地盤施工学の内容を検討した。

以下に検討結果の概要を示す。

1) 構築にあたって

廃炉に貢献する地盤工学系技術の立場を確立するためには学問的な位置付けが必要である（技術の伝承や活用可能技術の拡大）が、40 年かかると言われている事故原発の廃炉期間は学問の寿命としては長くはなく、後継者が続くためには長期的に活用可能な技術教育にすることが望ましい。従って、まずは学問的な流れを構築し、事故原発の廃炉をその活用場面の 1 つとして捉えることで学問としての普遍性を高め、長期的な教育を可能とすることを目指す。また、構築の端緒としては事故廃炉（福島原発）を対象に必要技術を考えるが、通常廃炉（事故原発以外の原発廃止措置）については、検討の流れから判断する。

2) 廃炉地盤工学における地盤施工学が目指すべきもの

- 廃止措置における環境的・構造的条件を考慮した最適な工法・材料を選択し、廃止措置過程を実体化させるために必要な技術群を体系化する（Construction management）。
- 地盤工学関連の施工技術である掘削や埋戻し、基礎構築、地盤・空隙への固化物注入及び地下構造物の構築等について、施工場所の状態に応じた最適な材料・工法の選択を行うと共に適正な実施・管理（調整）ができる能力を育成する。

3) （事故）原子力発電所における廃止措置技術の特殊性

原子力発電所（事故原発含む）の廃止措置において、通常の土木施工とは異なる特殊性を以下に整理する。

- 放射性物質の遮蔽･閉じ込めなど、**通常の工事では考慮されていない評価基準**を考慮する必要がある。
- **未経験の事象**であり、**類似事象も乏しい**（TMI-2：スリーマイル原発、チェルノブイリ原発など）ため、状況把握が困難であると共に最適判断基準が不明確である。
- 最終形態の具体性が欠如しており、また次工程の性能（制約条件に対する対応能力）も不明確であるため、**各施工要素の要求性能の把握（具体化）が困難**である。
- 原子炉施設に関する知識の絶対量が不足していること、事故後の原子炉内部状況が不明確であること、及び要求性能の不明確さに伴う建設要素の具体性欠如などが**制約条件の把握を困難**としている。

  （但し、知識不足は技術者の努力次第で解消可能であり、原子炉内の状況も時間と共に解明されていくことが見込まれる。）
- 建設要素の具体性が欠如しているため、**相互の関連性把握が困難**である。
- **他分野（主として原子力分野）要素との協働経験が欠如**している。

4) 構築方針

前項で整理した特殊性を踏まえ、廃炉地盤工学／地盤施工学の構築方針を以下のとおりとした。

＜方針１（基本）＞

廃止措置の過程を考慮しつつ、一般的な地盤施工との類似性について検討し、廃炉地盤工学／地盤施工学の学問的な流れを構築する。廃止措置の特殊性は制約条件、要求性能などから、品質管理項目や管理試験などで組込むこととする。

✏ **狙い：目的（要求機能）を単純化し、類型工事から学ぶ。**

＜方針２（上級）＞

廃炉プロセスの上流側概念から参画することにより、制約条件や要求性能を緩和し、工法や材料の選択肢を拡大する。

✏ **狙い：目的（要求機能）を広く捉え、工法・材料選択の柔軟性を高める。**

5) 地盤施工学の概略構成

これまでの検討結果を踏まえ、廃炉地盤工学における地盤施工学の構成を以下のとおりとする。

【Ⅰ．地盤施工学総論】
- **ⅰ．一般的な施工学としての内容**
- **ⅱ．地盤施工学とした場合の留意点**
- **ⅲ．廃炉地盤工学としての特殊性**

【Ⅱ．廃炉における事例検討】
- **ⅰ．汚染水・地下水制御**
- **ⅱ．燃料デブリ取出し**
- **ⅲ．廃棄物処理・処分**
- **ⅳ．施設解体**

6) 地盤施工学としての留意点の組込み

地盤や土の特性など、地盤施工学として組込むべき事項を以下に整理する。

(a) 構造物支持体としての特性（地盤）－構造物の重量支持、変位抑制(沈下･側方)

① 支持層の決定

② 荷重伝達方法（基礎形式）の決定

(b) 構造物自体の特性－河川堤防、道路・鉄道盛土など

① 要求機能・性能と変形特性

② 耐久性

③ 経済性（使用数量と単価）

④ 災害耐久性と復旧の容易さ

(c) 構築材料としての特性－覆土、充填材、泥水（安定液）

① 材料としての品質

② 入手の容易さと品質の安定性

③ 耐久性（長期信頼性）

(d) 特性ごとの管理項目、管理試験の方法

(e) 特性ごとのばらつきの考え方（許容幅）と解決方法（調査､工法､代替材料･工法）

7) 廃炉地盤工学としての特殊性の考慮

廃炉地盤工学として、原子炉廃止措置における特殊性をどのように考慮していくかについて、前述の方針１及び２それぞれの検討結果を示す。

＜方針１（基本）＞に対する対応

① 施工技術の分類

施工技術は多岐に亘るが、建設対象、建設行為、建設材料、建設工法などにより分類することができる。分類には大分類（例：道路工事等）と細分類（例：掘削工事、山止め工事等）があり、後者において、それぞれの建設技術は既に体系化や類型化、システム化されているものもあり、未経験の建設対象でも施工技術の細分化により類型化した施

工技術と共通点を見出せる可能性があることから、施工学の創設の参考にすることができると考えられる。

以下に、施工技術の分類例をまとめる。

表 3.1-3　施工技術の分類例

分類	施工技術
建設対象による分類	河川工事、道路工事、橋梁工事、建築工事、鉄道工事、港湾工事、空港工事、ダム工事、トンネル工事、造園工事 など
建設行為による分類	掘削工事、埋設工事、転圧工事、浚渫工事、組積み工事、打設工事、塗装工事、舗装工事 など
建設材料による分類	土工事、石工事、コンクリート工事、鋼工事、タイル工事 など
建設工法による分類	杭工法、ケーソン工法、シールド工法、沈埋工法、プレストレスト工法、プレキャスト工法、ナトム工法、バーチカルドレーン工法 など

② 事故原発の廃止措置における展開（試行）

廃止措置に至る過程において挙げられた代表的な作業項目と、これに対する類似した一般工法を下表に示すとおり、試行的に整理した。

表 3.1-4　廃止措置における作業項目と類似一般工法（案）

	作業項目	類似する一般工法
構造的及び環境安定性（安全性）の確保	地下水の流動制御	都市部山留め工事、産業廃棄物処理場
	構造耐震性の確保	（歴史的構造物等の）耐震補強／レトロフィット
	自然災害時の対応性向上	※一般的な仮設構造物でも考慮されるべきであるが実施事例なし。
燃料デブリの取出し	格納容器底部の燃料デブリ解体と取出し	－
	燃料デブリからの放射線遮蔽	－
	放射性物質の閉じ込め	－
圧力容器・格納容器の解体	格納容器の解体撤去	サイロ等の解体工事、ダイオキシン類に汚染された施設の除染・解体工事
	圧力容器の解体撤去	同上
解体放射性廃棄物の処理・処分	一次仮置施設	産業廃棄物処理場、一般的な覆土工事
	中間貯蔵施設	（一般的な）地下貯蔵施設
	地層処分施設	山岳トンネル工事、大深度立坑工事

③ 燃料デブリ取出し事例の検討

スリーマイル島の原子力発電所事故では、原子炉内の場所によって、デブリの形態が様々に異なっていたことが確認されており、それぞれの形態に適した方法で取出し作業が行われた。その方法の多くは、図 3.1-27 に示すとおり、通常の土木工法である。

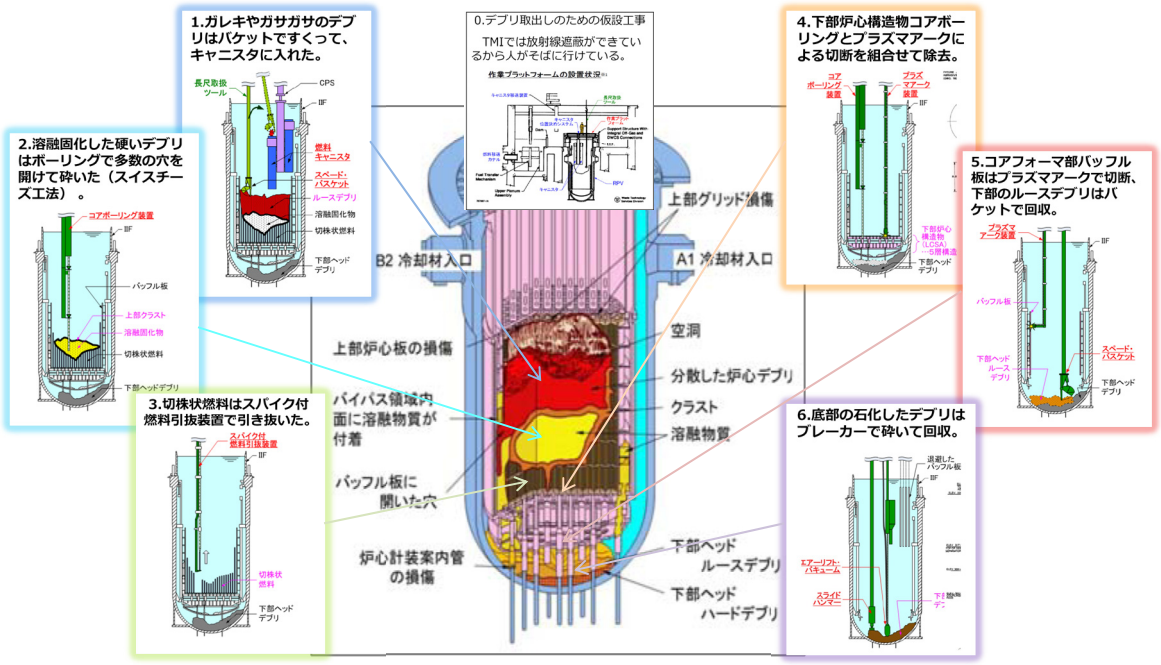


図 3.1-27　TMI-2 における燃料デブリ取出し

参考：燃料デブリの特性[1]

燃料デブリの特性

[性状や形態]

・燃料要素と構造材が混合溶融固化し、大きな塊状となったもの
・燃料ピンが崩落し、ペレット片の状態のもの
・溶融過程で崩落し、岩塊状となったもの
・溶融過程の冷却条件等により、粒状や粉状となったもの
・炉底部からPCVに流出したもの
・炉底部からPCVに流出し、コンクリートと混合溶融したもの（MCCI生成物） など

[存在場所]

・RPVに残存（燃料要素と被覆管や構造材が混合溶融したｳﾗﾝ･ｼﾞﾙｺﾆｳﾑ酸化物固溶体）
・PCVに流出（コンクリートと反応したMCCI生成物：知見少＝不確実性高い）

[崩壊熱の制御状態（冷却状態）]

冷却水かけ流し（RPV内）⇔循環冷却水の水位下（PCVに流出）

[燃料デブリ固有の不安定性（臨界性、放射能、崩壊熱、化学特性、幾何学形状等）]

・水の放射線分解･水素発生⇒内圧上昇に伴うRPV/PCVの損傷（窒素注入で対応）
・崩壊熱は、循環冷却系により制御中（時間経過に伴い低減し、今後も減少する）
・(時間経過に伴い)燃料デブリの一部溶出、移動性の高い形態（小破片状）に変化
　⇒ 循環冷却系に流出、（閉じ込め機能が損なわれると）冷却材･気体に随伴し漏洩
　⇒ 高濃度の核燃料物質を含む場合、一定箇所に滞留･集積し、局所的に臨界が発生

④ 品質管理項目･管理試験などへの組込み

2 つの例題を基に、廃止措置における特殊性を品質管理項目や管理試験への組込んだ場合の検討結果を以下に示す。

表 3.1-5　廃止措置における特殊性の組込み事例

例題-1：冠水工法の水の代わりに、超重泥水を用いた場合の効果を想定

	要件	真の特性	代用特性
【S】	燃料デブリからの放射線を遮蔽できる	放射線遮蔽特性	密度、含水率
【S】	粉塵や燃料デブリ切削時の飛散を抑止できる	粉塵抑止特性	気相／液相、粘性、比重
【D】	切削粉等を取出す媒体にできる	粉塵等の保持能力	粘性、比重、（粉塵の）分離性
【Q】	格納容器の漏水を抑止できる	遮水性	泥膜の生成能力 泥膜の透水性や強度

＊Q：品質　C：コスト　D：工期　S：安全

例題-2：ベントナイト混合土を放射性廃棄物の一次仮置施設や中間貯蔵施設の覆土に用いた場合を想定

	要件	真の特性	代用特性
【S】	雨水や地下水の浸入を抑制できる	遮水性（透水性）	密度、厚さ、ベントナイト量
【Q】	雨・風等の天候による経年劣化を抑制できる	耐浸食性	密度、厚さ、鉱物組成、スレーキング特性(材料強度等)
【Q】	凍結融解などによる劣化を抑止できる	耐凍上害能力	凍結膨張性(粒度、細粒分組成、拘束状態)、水密性(耐ひび割れ?)、固結性(材料強度等)
【S】	廃棄物からの放射線を遮蔽できる	放射線遮蔽特性	密度、厚さ、含水状態、土の種類?
【S】	放射性廃棄物の漏洩を防止できる	地下水流との隔離能力	透水性と同様
【Q】	地震や外乱に対して耐久性がある	耐久性、自然治癒性	強度、厚さ、ベントナイトの種類･量

＊Q：品質　C：コスト　D：工期　S：安全

＜方針２（上級）＞に対する対応

工法や材料の選択肢が拡大した場合として、遮水壁の選択を例として取り上げ、試行的に検討した結果を以下に示す。

■ 要求事項　　：建屋への地下水流入を抑制したい。

【上位の概念】燃料デブリを冷却した汚染水が（地下水と混ざって）増加するのを防ぎたい。

【対策】　・燃料デブリに接触した水の建屋外への漏洩を防止する。

・地下水が建屋周辺に到達しないようにする（地下水バイパス）。

【下位の概念】汚染水貯蔵量（タンク増設）を増やしたくない。

【対策】　・汚染水貯蔵方法を変更する。

・汚染水の破棄（海洋投棄）できるようにする。

■ 遮水壁構築のための諸元

・要求機能　　：地下水の流入を抑制する

・要求性能　　：（遮水壁の）遮水性　①材料･部材の透水係数　②工法の確実性

・制約条件①　　：高放射線線量下での施工⇒施工機械の規模

・制約条件②　　：地下埋設物が輻輳して存在する状況下での施工

☞上記制約を回避（緩和）するための選択肢（構築方法）

✓ 地中構造物が設置されていない（或いは少ない）場所で構築する。

✓ 地中構造物撤去後に構築する。

✓ 地中構造物に影響を与えない工法で構築する。

■ 遮水壁の工法と制約条件

・工法１：地中構造物を撤去してから（または、破壊しても良い状態にしてから）遮水壁を建設する。

（時間的問題がクリアできる場合）

・工法２：地中構造物を壊さない方法で遮水壁を建設する。

（工法･材料の特性に起因する制約条件への対処）

✓ 鋼矢板･コンクリート壁　⇒　工法の大幅改良が必要。

（鋼管を用いた工法の対応可能性、施工機械も小型となる）

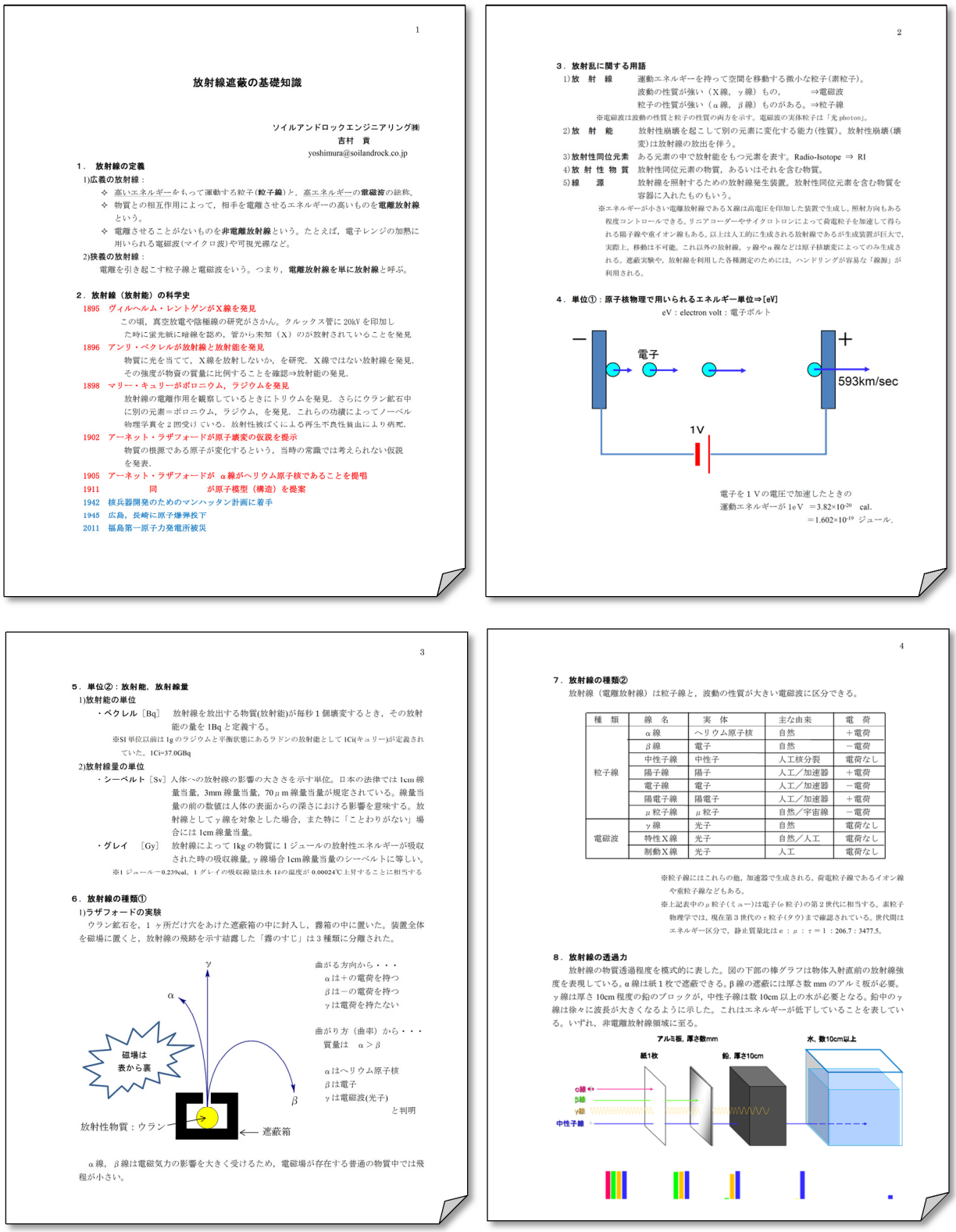
✓深層混合攪拌工法、薬液注入工法、地盤凍結工法

（壁材料の遮水性　⇒　凍結工法）

(3) 教材の試作

廃炉地盤工学授業の次年度からの本格授業開始に対応するため教材の試作・整備を開始し、放射線遮蔽の基礎知識等の教材はほぼ作成できた。

以下に作成した教材を抜粋して示す。



1

放射線遮蔽の基礎知識

ソイルアンドロックエンジニアリング㈱
吉村　貢
yoshimura@soilandrock.co.jp

1．放射線の定義

1)広義の放射線：

- ✧ 高いエネルギーをもって運動する粒子(**粒子線**)と，高エネルギーの**電磁波**の総称。
- ✧ 物質との相互作用によって，相手を電離させるエネルギーの高いものを**電離放射線**という。
- ✧ 電離させることがないものを**非電離放射線**という。たとえば，電子レンジの加熱に用いられる電磁波(マイクロ波)や可視光線など。

2)狭義の放射線：

電離を引き起こす粒子線と電磁波をいう。つまり，**電離放射線を単に放射線**と呼ぶ。

2．放射線（放射能）の科学史

1895　ヴィルヘルム・レントゲンがX線を発見
　この頃，真空放電や陰極線の研究がさかん。クルックス管に 20kV を印加した時に蛍光紙に暗線を認め，管から未知（X）のが放射されていることを発見
1896　アンリ・ベクレルが放射線と放射能を発見
　物質に光を当てて，X線を放射しないか，を研究。X線ではない放射線を発見．その強度が物資の質量に比例することを確認⇒放射能の発見．
1898　マリー・キュリーがポロニウム，ラジウムを発見
　放射線の電離作用を観察しているときにトリウムを発見．さらにウラン鉱石中に別の元素＝ポロニウム，ラジウム，を発見．これらの功績によってノーベル物理学賞を２回受け ている．放射性被ばくによる再生不良性貧血により病死．
1902　アーネット・ラザフォードが原子壊変の仮説を提示
　物質の根源である原子が変化するという，当時の常識では考えられない仮説を発表．
1905　アーネット・ラザフォードが　α線がヘリウム原子核であることを提唱
1911　　同　　が原子模型（構造）を提案
1942　核兵器開発のためのマンハッタン計画に着手
1945　広島，長崎に原子爆弾投下
2011　福島第一原子力発電所被災

2

3．放射乱に関する用語

1)放　射　線　運動エネルギーを持って空間を移動する微小な粒子(素粒子)。
　波動の性質が強い（X線，γ線）もの，　⇒電磁波
　粒子の性質が強い（α線，β線）ものがある。⇒粒子線
　※電磁波は波動の性質と粒子の性質の両方を示す。電磁波の実体粒子は「光 photon」。
2)放　射　能　放射性崩壊を起こして別の元素に変化する能力(性質)。放射性崩壊(壊変)は放射線の放出を伴う。
3)放射性同位元素　ある元素の中で放射能をもつ元素を表す。Radio-Isotope ⇒ RI
4)放 射 性 物 質　放射性同位元素の物質，あるいはそれを含む物質。
5)線　源　放射線を照射するための放射線発生装置。放射性同位元素を含む物質を容器に入れたものもいう。

※エネルギーが小さい電離放射線であるX線は高電圧を印加した装置で生成し，照射方向もある程度コントロールできる。リニアローダーやサイクロトロンによって荷電粒子を加速して得られる陽子線や重イオン線もある。以上は人工的に生成される放射線であるが生成装置が巨大で，実際上，移動は不可能。これ以外の放射線，γ線やα線などは原子核壊変によってのみ生成される。遮蔽実験や，放射線を利用した各種測定のためには，ハンドリングが容易な「線源」が利用される。

4．単位①：原子核物理で用いられるエネルギー単位⇒[eV]

eV：electron volt：電子ボルト

電子を１Vの電圧で加速したときの
運動エネルギーが 1eV　＝3.82×10^{-20}　cal.
　　＝1.602×10^{-19} ジュール．

3

5．単位②：放射能，放射線量

1)放射能の単位

・ベクレル［Bq］　放射線を放出する物質(放射能)が毎秒１個壊変するとき，その放射能の量を 1Bq と定義する。

※SI 単位以前は 1g のラジウムと平衡状態にあるラドンの放射能として 1Ci(キュリー)が定義されていた。1Ci=37.0GBq

2)放射線量の単位

・シーベルト［Sv］人体への放射線の影響の大きさを示す単位。日本の法律では 1cm 線量当量，3mm 線量当量，70μm 線量当量が規定されている。線量当量の前の数値は人体の表面からの深さにおける影響を意味する。放射線としてγ線を対象とした場合，また特に「ことわりがない」場合には 1cm 線量当量。

・グレイ　［Gy］　放射線によって 1kg の物質に１ジュールの放射性エネルギーが吸収された時の吸収線量。γ線場合 1cm線量当量のシーベルトに等しい。

※1 ジュール＝0.239cal。１グレイの吸収線量は水 12の温度が 0.00024℃上昇することに相当する

6．放射線の種類①

1)ラザフォードの実験

ウラン鉱石を，１ヶ所だけ穴をあけた遮蔽箱の中に封入し，霧箱の中に置いた。装置全体を磁場に置くと，放射線の飛跡を示す結露した「霧のすじ」は３種類に分離された。

曲がる方向から・・・
　αは＋の電荷を持つ
　βは－の電荷を持つ
　γは電荷を持たない

曲がり方（曲率）から・・・
　質量は　α＞β

　αはヘリウム原子核
　βは電子
　γは電磁波(光子)
と判明

α線，β線は電磁気力の影響を大きく受けるため，電磁場が存在する普通の物質中では飛程が小さい。

4

7．放射線の種類②

放射線（電離放射線）は粒子線と，波動の性質が大きい電磁波に区分できる。

種　類	線　名	実　体	主な由来	電　荷
粒子線	α線	ヘリウム原子核	自然	＋電荷
	β線	電子	自然	－電荷
	中性子線	中性子	人工核分裂	電荷なし
	陽子線	陽子	人工／加速器	＋電荷
	電子線	電子	人工／加速器	－電荷
	陽電子線	陽電子	人工／加速器	＋電荷
	μ粒子線	μ粒子	自然／宇宙線	－電荷
電磁波	γ線	光子	自然	電荷なし
	特性X線	光子	自然／人工	電荷なし
	制動X線	光子	人工	電荷なし

※粒子線にはこれらの他，加速器で生成される，荷電粒子線であるイオン線や重粒子線などもある。

※上記表中のμ粒子(ミュー)は電子(e 粒子)の第２世代に相当する。素粒子物理学では，現在第３世代のτ粒子(タウ)まで確認されている。世代間はエネルギー区分で，静止質量比は e：μ：τ＝1：206.7：3477.5。

8．放射線の透過力

放射線の物質透過程度を模式的に表した。図の下部の棒グラフは物体入射直前の放射線強度を表現している。α線は紙１枚で遮蔽できる。β線の遮蔽には厚さ数 mm のアルミ板が必要。γ線は厚さ 10cm 程度の鉛のブロックが，中性子線は数 10cm 以上の水が必要となる。鉛中のγ線は徐々に波長が大きくなるように示した。これはエネルギーが低下していることを表している。いずれ，非電離放射線領域に至る。

図 3.1-28　作成した教材（放射線遮蔽の基礎知識）の一例

(4) シラバスの基本構想に基づく模擬的授業

各 WG や過年度までに構築したシラバスの基本構想に基づき、本年度も早稲田大学大学院で模擬的授業「地盤工学特論 B」を実施した。

以下にその概略を取りまとめる。

1) 講義内容と最終課題

「地盤工学特論 B」では、学部において地盤工学の基礎を習得済の学生を対象に、地盤工学をより深く理解し、視野を広げることで、実践的な応用力を養うことを狙いとして、地盤力学・地盤環境・労働安全衛生の観点から講義を行った。平成 29 年度は表 3.1-6 に示すように、構造物の基礎、土中の固液反応や廃棄物の利用、擁壁やトンネルなどの災害事例と対策などについて、理論と実践の両側面からの講義内容としている。

表 3.1-6　地盤工学特論 B の平成 29 年度シラバスの概要

大項目	小項目	キーワード
地盤力学	基礎構造物の設計①	基礎構造物，支持力
	基礎構造物の設計②	基礎構造物，支持力
	杭基礎の研究開発事例	杭基礎，支持性能
	遠心模型実験手法	遠心模型実験，相似則，相互作用
地盤環境	土の微視構造	結晶，固相分析
	土中の固液反応	化学平衡，反応速度
	廃棄物の地盤工学的利用における特殊性	溶出，有機物
	地盤環境工学に関する国際セミナーへの参加（国外の学生との意見交換など）	
労働安全衛生	事例① 溝掘削災害	溝掘削，斜面安定
	事例② 擁壁倒壊災害	擁壁倒壊
	事例③ トンネルの崩壊災害	切羽
	災害を減らすために	労働災害

講義後、受講生には講義の内容や観点を踏まえて、1 つのテーマ（課題）の下に演習に取組んでもらい、その成果（レポート、口頭発表、討論）から成績評価を行った。

過年度のテーマ（課題）は以下のとおりである。

・平成 27 年度：都内のあるエリアに高層構造物を建築することを想定した課題設定と解決方策
・平成 28 年度：福島第一原子力発電所の廃炉に関する課題設定と解決方策

これまでの取組み状況を見ると、平成 28 年度の課題は現在進行形の話題であったため、情報収集に困難は伴ったものの、危機感や現実味を帯びた発表であった印象を受けた。このような状況を踏まえ、受講者には本年度の演習でも昨年度と同様、福島第一原子力発電所の廃炉を課題として設定した。

なお、講義の初回には課題の内容と趣旨について説明し、講義の途中には廃炉に関連

すると思われる内容については解説等を補足するようにした。また、最終課題の発表後には、発表ごとに学生と講師が一緒に議論する時間を設けると共に、発表内容よりも、この内容を基に参加者間で議論が発展し、議論の中で解決に向けて前進することが特に重要と考え、質疑応答の時間は十分に確保した。

2) 学生による最終課題から得られた廃炉地盤工学カリキュラムの要点

最終課題で学生が着目した廃炉に向けた課題としては、燃料デブリの取出しに関連するものに集中した。また、課題の解決にあたり、原子炉の汚染状況や原子力発電所の構外・沿岸域を含む地理条件を調べ、地盤掘削や遠隔操作などの既存技術に関する情報を収集した上で、既存技術を適用する上で生じる可能性のあるトラブルやリスクの分析に焦点を当てた学生と、新しいアイデアで解決を図ろうとする学生がいた。

以下に、着目された課題ごとに概要や質疑応答における議論内容を整理する。

・既存技術を適用した場合のリスク分析

一種の思考実験のようで、廃炉作業において、やや大胆に事故の種類を想定し、そこから想定した事故の原因を遡って考えていき、実施段階で事故の根源をなくそうとするものであった。これは労働安全の分野において、実際に事故が起きた場合に事後調査として行われる方法と類似している。事故の予測は、廃炉に限らず作業の実施前には当然行われる作業であり、学生が行ったようなバックキャストによる分析手法も重要とされている。

経験的或いは積み上げ式に事故の想定をしようとすると、どうしても見落としの発生や想定の範囲を無意識に設定してしまうことは否定できないものである。従って、経験則や常識に囚われない視点から、論理的にやや飛躍した事故の想定からバックキャスティングするリスク分析は、事業の確度や安全性を高めるためには重要な作業と思われた。

・燃料デブリの取出しに向けた新しい解決方策

原子炉下方からのアプローチに関する発表、取出した燃料デブリの運搬先に関する発表、燃料デブリの取出しが難航した場合の状態の安定化に関する発表が行われた。それぞれ別の学生によるものであったが、発表後の質疑応答を繰り返す過程で、各発表を組合せるとワンスルーの工程管理となることが参加者間で共有されていた。

原子炉下方からのアプローチに関しては、危険を伴うことも熟考された上で、放射線防護のために地下空間を活用する利点を主張する内容であった。また、地下空間の構築は、地盤掘削技術等により十分な実現性がある一方、燃料デブリを取出すために原子炉の構造部材を切断する点が難しく、複数の方法を組合せる必要があるといった発表であり、力学的な安定性を確保しながら、燃料デブリの近傍へどういったアプローチをするかが議論となった。

・燃料デブリ取出し後の運搬

運搬ルートでも放射線防護が重要であり、地理条件を踏まえた上で陸側に向かう地

下運搬ルートのほかに福島県沖の海底地盤に想定した一時保管に続く地下運搬ルートも挙げられていた。一時保管までの運搬を考えても、地下を活用する点で原子炉下方からのアプローチには利点があるのではないか、といった議論もあった。

・燃料デブリの取出しにおいて不具合が生じた場合の状態の安定化

非常時における放射線防護のため、原子炉建屋を物理的に遮蔽（建屋の力学的支持を確保した上で土等により建屋全体を遮蔽。）するといった発表内容で、既存技術の組合せで実現することが検討されており、地盤力学・地盤環境・労働安全衛生の観点を踏まえた課題の抽出と整理がなされていた。

こうしたアイデアは、世間一般ではチェルノブイリを想像させる方法に思われるかもしれないが、有事の想定と対策としては、備えておくべき技術オプションの 1 つと思われた。質疑応答では、土による遮蔽により原子炉建屋が地下に位置することとなれば、地盤の安定性も活用して次なる燃料デブリ取出しの手段を講じることができるかもしれない、といった議論にも発展した。

以上は、講義の一環として実施したものであり、既に専門家等により議論されている内容や、技術的・社会的にハードルが高い内容も含まれていることを、ここで断っておく。しかしながら、類似の着眼点でテーマ選定した学生が多かったことも功を奏し、各自の発表の内容を組合せながら、解決方策の成立性や優先度を多角的かつ活発に議論できたことは、実践的な応用力を養うことを狙いとした「地盤工学特論 B」において意義深い教育効果であったし、廃炉地盤工学カリキュラムにおいても重要な人材育成プロセスになると考えられる。

3) 学生の感想から廃炉地盤工学カリキュラムへのフィードバック

講義全体を通じて、受講生からは以下のような感想が述べられた。

・受講生は地盤を専攻にする人ばかりだったが、他の専攻の人たちと一緒に演習課題をできたらもっと幅が出て面白いと思う。
・技術者として知らなければならないことを感じることができた。
・講義を通じて、基本的な考え方が重要と感じた。課題に関しては、自分以外の人たちが短時間で高いクオリティの発表をしていて刺激になった。
・福島の廃炉を考えることで当事者意識が強まった。長い事業になると思うので、何らかの形で関わっていきたいと思った。
・教科書で学ぼうという授業とは毛色が違う。労働安全衛生の授業は専攻のカリキュラムにはなかったので新しく感じたし、全体的に楽しかった。
・社会を考える授業であった。学生として授業を受けているのとは違った。受け身ではなく、社会人と話しながら自ら考えることができた講義であった。

講師 3 名が別々の観点から実務経験を交えて講義を行ったことに加えて、現在進行形の廃炉事業を演習課題にしたことにより、基本の重要性や社会のために学問を役立てることの重要性を、他の講義とは異なる意識で感じたのだと推察される。また、視点や価

値観の異なる人との意見交換により、自らの思考が整理され発展していくことも実感してもらえたようであった。特に実際に廃炉に関わりたいという意識が芽生えたことは、社会との接点を意識する機会を提供できた意味として、更に廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラムとしても重要な成果であったと考えられる。

なお、「地盤工学特論 B」が成立したのは学科・専攻で習得してきた基礎学力や教養があったためである。従って、廃炉地盤工学カリキュラムにおいても、基礎を固めることは必要不可欠であり、その上で、演習問題やケーススタディなどを通じて、課題設定と解決方策をロジカルに考えること、そして、関係者間での意見交換をしながら自他のアイデアをより良い内容へとブラッシュアップすることが、理論から実践への架け橋となる教育効果になると考えられる。演習を通じた教育は、既に数多く行われている方式であるが、廃炉地盤工学の場合には、原子力分野の知識や思想を交えなければならない点と、経験工学が必ずしも通用しない点において特殊性があるため、演習問題の設定や関係者の選出において、分野間の垣根と分野内の常識を外す工夫が求められる。

(5) 廃炉地盤工学教育システムにおける取組み

前述の早稲田大学大学院における模擬的授業のほか、本研究プログラムで実施した取組みを表 3.1-7 に整理する。

表 3.1-7　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 52 回 地盤工学研究発表会 特別セッション	・『廃炉地盤工学』を構成する学問単元「地盤施工学」の WG 活動報告や若手技術者の育成等に関して議論	・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）	・地盤力学・地盤環境学・労働安全衛生に焦点を当てた講義 ・演習課題「福島第一原子力発電所の廃炉に関する課題設定と解決方策」	・学生（院生）	7 名
3	「現場実験から把握する地下水の実流速」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	31 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～」講演会	・『廃炉地盤工学』を構成する学問単元「地盤施工学」に焦点を当てた講演	・地盤工学関連技術者 ・学生	63 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、下記に示すような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講演会の開催など、様々な取組みを行った。

以下にこれら取組みに関する概要を述べる。

1) 第 52 回 地盤工学研究発表会 特別セッション「原子力発電所廃止措置のための地盤工学（廃炉地盤工学）の創出と人材育成」

平成 29 年度の地盤工学研究発表会（名古屋国際会議場）において、標記特別セッションを開催した。本セッションでは、前年度までのプロジェクトの成果を報告した後、「廃炉地盤工学」を構成する 4 つの学問単元の 1 つ「地盤施工学」について、これまで WG で討議されてきた内容として、人材育成の観点から「地盤施工学」が目指すべきところや福島第一原子力発電所の廃止措置における従来の施工学適用の困難さ（特殊性）が TMI-2 等の既往事例を混じえつつ説明された。また、早稲田大学大学院で試行された「廃炉地盤工学」を取入れた講義についての紹介があり、その講義で与えられた演習課題「福島第一原子力発電所の廃炉に関する課題設定と解決方策の提案」に対するレポートが学生本人より発表された。

その後、廃炉地盤工学若手技術者の会の議論内容の紹介・募集が行われた後、企業・大学における若手技術者の育成及び経産省･文科省等の技術開発プロジェクトへの申請（提案）などを議題としたフロアディスカッションが行われ、会員から様々な意見や技術情報が提示された。

■日時　　：平成 29 年 7 月 13 日（木）9:00～10:30

■場所　　：名古屋国際会議場　第 12 会場

■フロアディスカッションの概略：

・40 年の長期に亘る廃炉作業において、地盤工学分野の活動をどのように維持していくかとの議論では、独立大学院を設ける努力をすべきといった意見が出された。

・海外における事故原発（スリーマイル島、チェルノブイリ）の廃炉で用いられた技術・経験をどのように活かすのかとの視点から議論が行われた。

図 3.1-29　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」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。従って、地下水による汚染物質等の広がりを把握するためには、この実流速が重要となる。

本講習会は午前の座学と午後の実験からなる。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する。実験では現場のボーリング孔を使用して、水理試験（スラグ試験、揚水試験）により現場の対象土層の透水係数を把握し、トレーサー試験により平均実流速を把握した。但し、今回の実験は、揚水により対象土層に動水勾配をつけた一種の加速試験であり、動水勾配や流速が場所により変化するため、測定結果からだけで実流速は評価せず、モデル解析を併用して結果の解釈を行った。

以上の講習を通じ、参加者は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した。

■日時　　：平成 29 年 11 月 27 日（月）9:00～17:00
■場所　　：日本大学文理学部 1 号館 119 教室・百周年記念館敷地内
■参加人数　：31 名

図 3.1-30　講習会風景（11 月 27 日）
（左：座学の状況　中央：現場実習の状況①　右：現場実習の状況②）

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』～地盤施工学の創設～」講演会

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」を通じて福島第一原子力発電所の廃止措置に向け、地盤工学系技術の貢献を促進するべく活動を行っており、この一環として『廃炉地盤工学』を構成する学問単元の「地盤施工学」に焦点を当てた講演会を開催した。

本講演会では廃炉地盤工学委員会･地盤施工学 WG において検討･議論してきた「地盤施工学の概要」や「廃止措置に関連した事例検討結果」について報告すると共に、様々な施工経験・概念を有する参加者と情報交換を行った。

■日時　　：平成 29 年 12 月 20 日（水）13:30～17:30
■場所　　：地盤工学会（JGS 会館）　地下大会議室
■参加人数　　：63 名
■講演会における演題と講演者一覧

① 廃炉地盤工学における地盤施工学（総論）　＿＿＿＿＿＿　後藤 茂（早稲田大学）
② 廃炉までのシナリオと技術マップの活用　＿＿＿＿＿＿　菱岡 宗介（ﾊﾟｼﾌｨｯｸｺﾝｻﾙﾀﾝﾂ）
③ デブリ取出しにおける超重泥水の活用方法　＿＿＿＿＿　成島 誠一（西武建設）
④ 地下水対策における施工学的アプローチの実際　＿＿＿　片山 啓（長大）
⑤ ベントナイト混合土の締固め施工での適用事例の紹介　＿＿　山田 淳夫（安藤ハザマ）
⑥ 通常のデコミッショニングと廃棄物処分から思考する施工学の要点
＿　渡邊 保貴（電力中央研究所）

図 3.1-31　講演会風景（12 月 20 日）

(2) 廃炉地盤工学ホームページの更新

昨年度構築した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以下のとおりである。

表 3.1-8　廃炉地盤工学ホームページ更新コンテンツ一覧（平成 29 年度）

No.	更新コンテンツ
2-1-3	平成 28 年度 成果報告書
2-2-5	平成 29 年度 第 1 回廃炉地盤工学委員会
2-2-6	平成 29 年度 第 2 回廃炉地盤工学委員会
2-2-7	平成 29 年度 第 3 回廃炉地盤工学委員会
2-3-10	第 52 回 地盤工学研究発表会特別セッション
2-3-11	NAGRA-JGS Workshop に関する報告
2-3-12	「現場実験から把握する地下水の実流速」廃炉地盤工学委員会講習会
2-3-13	「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～」講演会
2-3-14	平成 29 年度福島第一原子力発電所視察
3-2	廃炉プロセス技術シナリオ
3-3	地下水移行や土・重泥水の放射線遮蔽実験、廃炉に寄与可能な地盤工学技術に関するデータベース（案） など
3-4	超重泥水・各種覆土の 放射線遮蔽性能評価

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 3.1-32　廃炉地盤工学ホームページ

(3) 関連学会への参加、活動内容の発信・情報収集

土木学会など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を示す。

- 日本原子力学会「福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会 第3回全体会」
  : 平成29年4月6日（木）13:00～15:00
- 土木学会「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」
  : 平成29年4月12日（水）13:00～17:00
- 土木学会 平成29年度全国大会 第72回年次学術講演会
  : 平成29年9月11日（月）～9月13日（水）
- 第19回 国際地盤工学会（ソウル会議）
  19th international Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
  : 平成29年9月17日（日）～9月22日（金）

(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、廃炉地盤工学委員会(3.4.1参照)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。

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（案）（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2017、2017年8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ニ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タイルセンサシステムを用いて超重泥水の充填施工性及び安定性を検討し、水ポテンシャル測定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を作成した。

具体的な内容は、以下に述べる。なお、これらは本節の参考文献(1)～(3)に例示するように、学生が卒業研究・修士研究・博士研究を通じて、第一筆者として学術論文を発表できるように指導を進めてきた人材育成の成果でもある。

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並びに覆土材のガンマ線・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

超重泥水が有するガンマ線及び中性子線の遮蔽性能を現象メカニズムに基づき検討するため、本試験において遮蔽割合の差異が最も顕著に現れた最小厚さにおける結果を比較した。

図 3.2-1 に遮蔽体厚さ 10 cm におけるガンマ線低減率と湿潤密度の関係を示す。超重泥水は、比重が大きいものほど高いガンマ線低減率を示しており、水道水と比較すると最大 2 倍程度の大きい遮蔽性能を有することが明らかとなった。

図 3.2-2、図 3.2-3 及び図 3.2-4 に全中性子線、高速中性子線及び熱中性子線低減率と体積含水率の関係を示す。質量を有する粒子である中性子線のエネルギー減衰は、運動量保存の法則に従うことから、減速材料としては一般に、中性子粒子と質量がほぼ同等である水素原子を多く含む水が液体状態で用いられる。そこで、本研究では、水分子の存在度を表す指標として体積含水率を用いて整理した。図 3.2-2 より、固相割合が大きい超重泥水は、含有する水素原子の個数で劣るにもかかわらず、全試料において水道水とほぼ同等の全中性子線遮蔽性能を示した。これは、中性子粒子と超重泥水中の固相分の衝突による運動方向の変化に起因すると考えられる。一方、図 3.2-3 及び図 3.2-4 より、高速、熱中性子線低減率共に体積含水率の減少に伴い低下した。超重泥水の高速及び熱中性子線遮蔽

性能は、水分子の個数の差により水道水よりも劣るにもかかわらず、その差は 20 %未満であることが示された。また、図 3.2-4 より、ホウ素含有の超重泥水は、同体積含水率の試料と比較して 70 %程度大きい熱中性子低減率を示した。これは、熱中性子レベルまで運動速度が低下した中性子粒子をホウ素が捕獲したことに起因する。

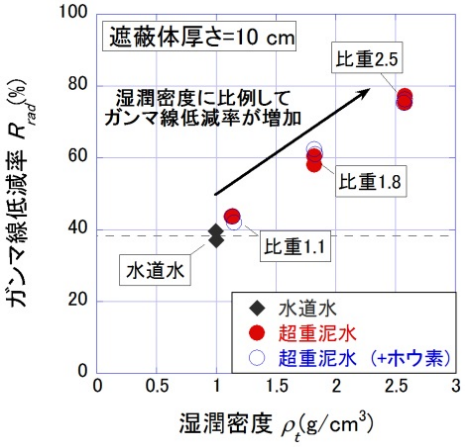


図 3.2-1　ガンマ線低減率と湿潤密度の関係（超重泥水）

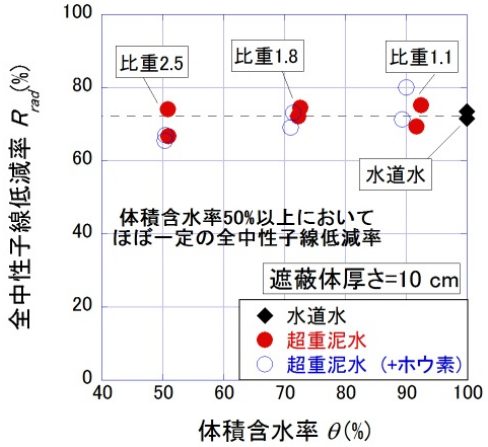


図 3.2-2　全中性子線低減率と体積含水率の関係（超重泥水）

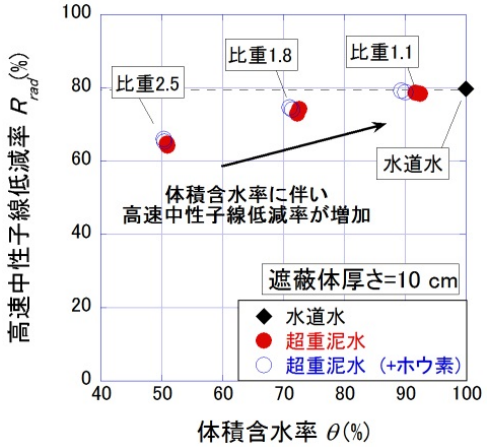


図 3.2-3　高速中性子線低減率と体積含水率の関係（超重泥水）

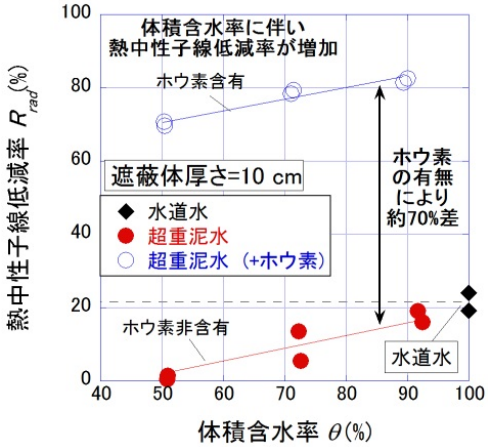


図 3.2-4　熱中性子線低減率と体積含水率の関係（超重泥水）

各放射線が電子や水素原子と衝突する確率は、放射線の運動経路上の電子或いは水素原子の個数に依存するため、遮蔽体の厚さは重要な要素である。図 3.2-5 から図 3.2-8 は、遮蔽体厚さの観点からのデータベースを示す。ガンマ線及び各中性子線は遮蔽体厚さの増加と共にその低減率が増加し、今回使用した線源の強さでは厚さ 40 cm においてほぼ 100 %の低減率を示した。

以上から、超重泥水のように高い湿潤密度及び体積含水率を有する遮蔽材料を用いると共に、十分な厚みを確保することで、高線量下における事故炉の廃止措置に伴う作業員や機材に対する放射線被ばくのリスクが低減できると考えられる。

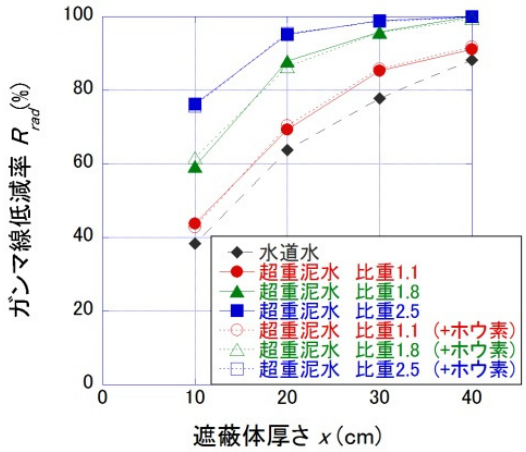


図 3.2-5　ガンマ線低減率と遮蔽体厚さの関係（超重泥水）

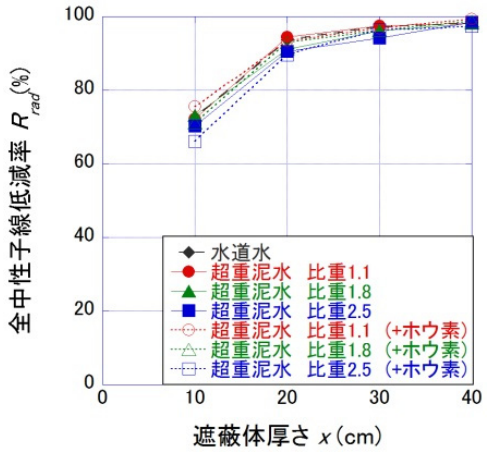


図 3.2-6　全中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係（超重泥水）

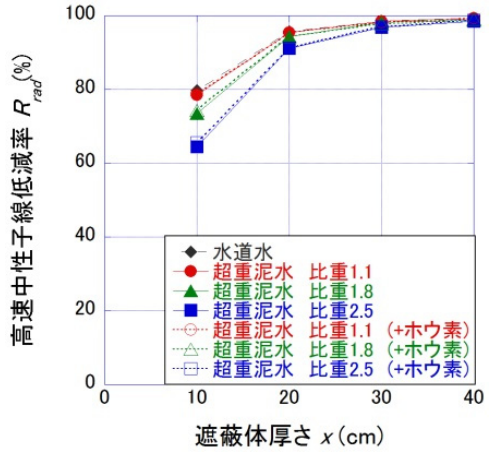


図 3.2-7　高速中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係（超重泥水）

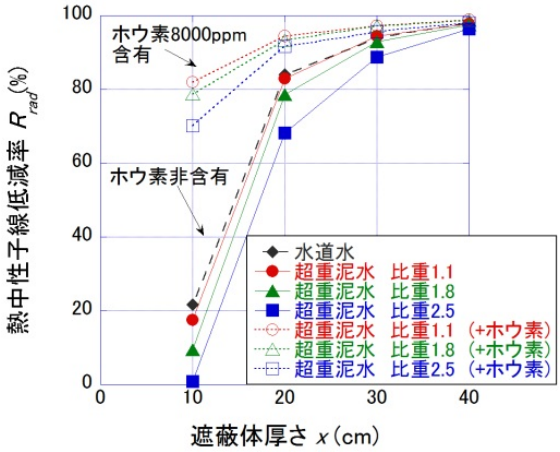


図 3.2-8　熱中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係（超重泥水）

(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

図 3.2-9～図 3.2-12 に、関東ロームの厚さ 10 cm における各放射線の低減率を示す。図 3.2-9 より、湿潤密度に比例してガンマ線低減率が増加した。図 3.2-10 及び図 3.2-11 より、層厚 10 cm における関東ロームの全中性子線及び速中性子線の低減率は、体積含水率 θ =0～30 %と 30 %以上で低減率の増加傾向が異なることが分かった。θ =0～30 %では体積含水率に伴う急激な増加が確認され、θ =30 %以上では比較的緩やかな増加傾向が示された。体積含水率 θ =0 %において、全中性子線低減率は約 15 %、速中性子線低減率は 15～25 %の範囲であることから、工学的な水分を保有しない状態においてもある程度の中性子線が遮蔽可能であることが示唆された。

図 3.2-12 より、θ =0～55 %の間で熱中性子線低減率は負の値を示しており、熱中性子の線量が増加したことが分かる。この原因として、土中水の増加に伴い速中性子が熱中性子のエネルギーレベルに減衰し、速中性子由来の熱中性子が増加したと考えられる。また、体積含水率 55 %以上においては、熱中性子線の低減が速中性子由来の熱中性子の増加量を上回ったと考えられる。

平成 29 年度の試験では、工学的に水分として扱われる範囲で土中水を評価したが、特に粘性土はその骨格構造に結晶水を多く保有している。このため、強熱減量試験等で結晶水の評価を行い、中性子線の低減に対する結晶水の影響を確認する必要がある。

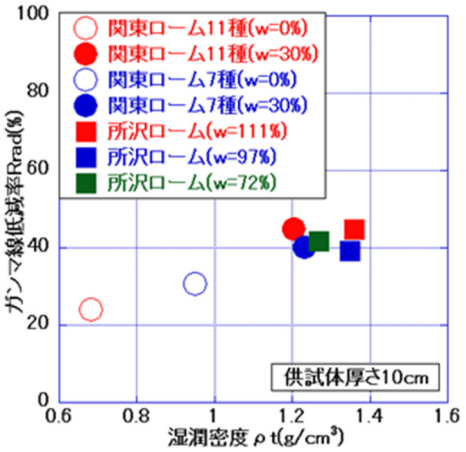


図 3.2-9　ガンマ線低減率と湿潤密度の関係（覆土材料）

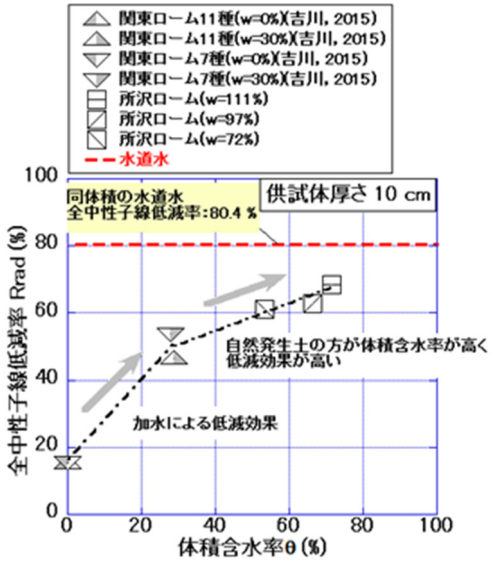


図 3.2-10　全中性子線低減率と体積含水率の関係（覆土材料）

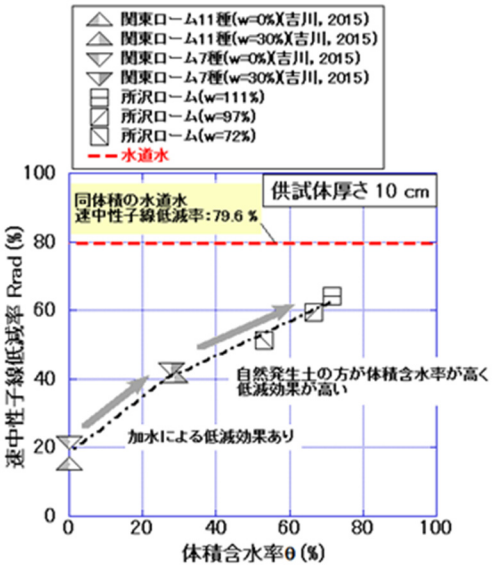


図 3.2-11　高速中性子線低減率と体積含水率の関係（覆土材料）

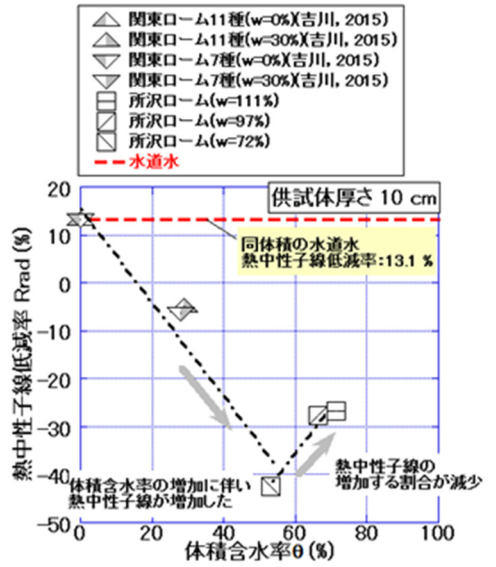


図 3.2-12　熱中性子線低減率と体積含水率の関係（覆土材料）

図 3.2-13～図 3.2-16 に想定覆土材料の層厚と各放射線の低減率の関係を示す。ガンマ線、全中性子線、速中性子線については、層厚の増加に伴い各放射線の低減率が増加した。一方、熱中性子線については、層厚 10 cm で負の値を示した材料も、層厚 20 cm では正の低減率を示した。以上の結果から、層厚が 20 cm 以上において、覆土材料は適切に放射線遮蔽性能を発現すると考えられる。

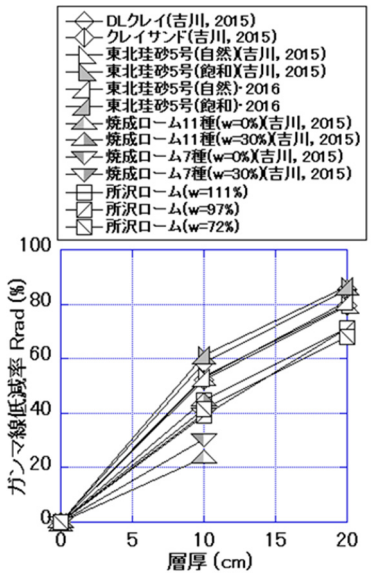


図 3.2-13　ガンマ線低減率と遮蔽体厚さの関係（覆土材料）

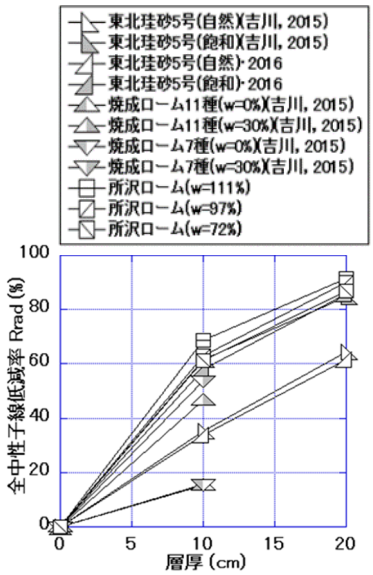


図 3.2-14　全中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係（覆土材料）

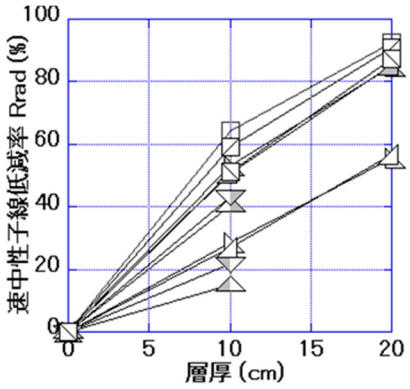


図 3.2-15　高速中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係（覆土材料）

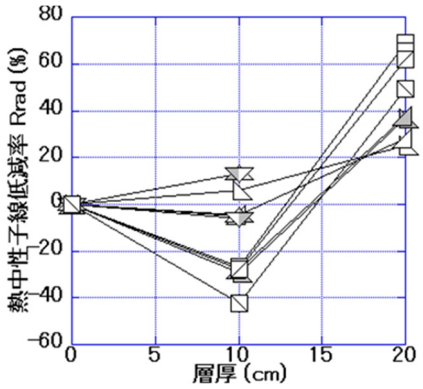


図 3.2-16　熱中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係（覆土材料）

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、充填施工性や充填後材料安定性を評価するためのタクタイルセンサーによる超重泥水の泥水圧変化の測定結果、及び覆土材料の放射線遮蔽性能の判断要素として測定した保水性データについて論じる。

(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及び安定性評価

平成 28 年度に示した超重泥水の送泥試験の知見を踏まえ、送泥箇所に対する超重泥水の充填状況を定量的に評価するため、タクタイルセンサシステムを導入し泥水圧測定装置を作製した。タクタイルセンサーは、2 枚のフィルムにそれぞれ、行、列の銀電極が配線されており、電極の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。泥水圧の測定では、タクタイルセンサーと埋込み型土圧計を併用することで、充填時の泥水圧分布とその具体的な数値を取得できたので、ここではその結果について論じる。なお、充填後も継続して泥水圧の変化を測定することで、超重泥水の経時的な性状変化も確認している。

1) 試験方法

図 3.2-17 に泥水圧測定装置、表 3.2-1 に測定条件を示す。タクタイルセンサーはアクリル容器側面、埋込み型土圧計は側面及び容器底面に設置した。泥水圧の測定に使用した試料は、平成 28 年度に示した比重 1.8 の超重泥水である。

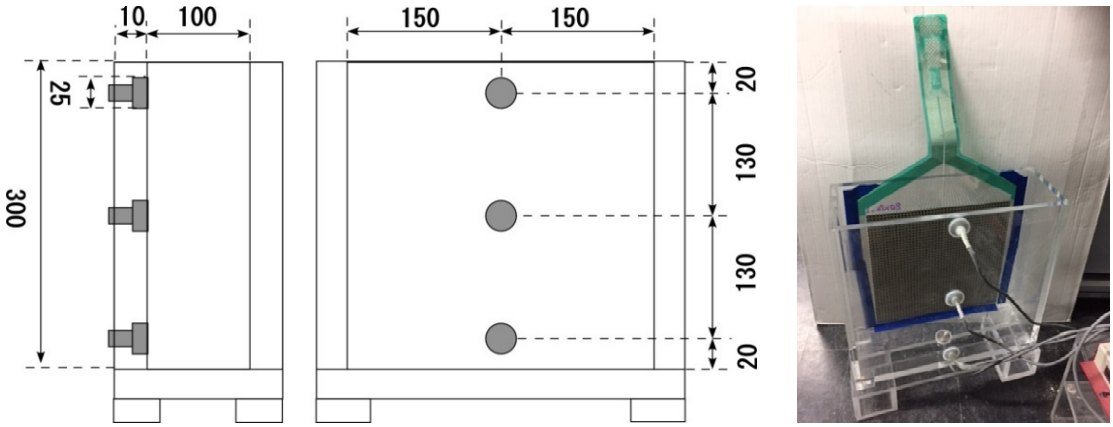


図 3.2-17　泥水圧測定装置

表 3.2-1　タクタイルセンサーによる測定条件

使用装置	タクタイルセンサー 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
試験期間	21 日間
測定間隔	1 回/day

2) 試験結果

図 3.2-18 及び図 3.2-19 にタクタイルセンサーによる圧力分布及び土圧計による泥水圧の経時変化の測定結果を示す。2 種類の圧力計を併用することで、超重泥水はその高粘性により、充填直後から容器に泥水圧が掛かるまでの時間依存性があることが明らかになった。なお、平成 29 年度に使用した比重 1.8 の試料は、超重泥水の中で最も粘性が低く、静置による内部構造形成の可能性が低い材料である。従って、本結果は超重泥水のレオロジー特性とも整合性があることから、圧力の経時変化の評価は、材料としての性状判断の一助になると考えられる。

今後は、この成果を踏まえ、一定流量の送泥が可能なモーノポンプを組込んだ充填試験装置と併せて試験を行うことで、より施工への適用性が高いデータを得る必要がある。

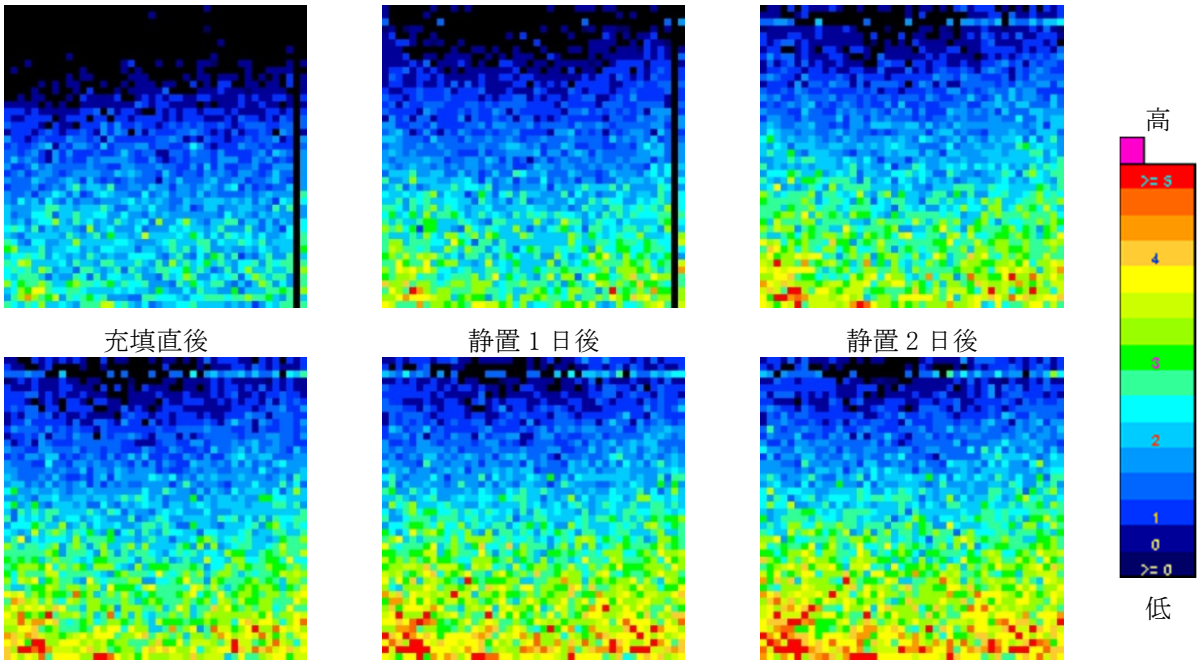


図 3.2-18　タクタイルセンサによる Gs=1.8 の圧力分布の経時変化

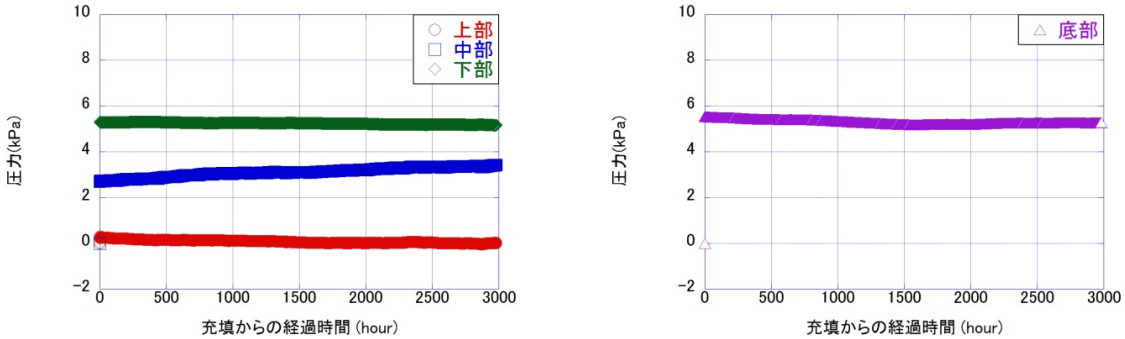


図 3.2-19　容器側面における圧力の経時変化

(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

3.2.1 項より、土質材料による中性子線の遮蔽割合は、土中の水分子数の代替指標である体積含水率に依存することが明らかになっている。その知見から、高い保水性を有する土質材料は、遮蔽用土構造物として高い中性子線遮蔽性能を安定して発現することが予想される。本項では、保水性試験によって取得した各種土質材料及び復興資材の水分保持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 29 年に使用した想定覆土材料は、東北珪砂 5 号、DL クレー、クレーサンド及び復興資材である。なお、復興資材は、宮城県気仙沼市で採取された津波堆積物から生成された分別土 A 種及び災害廃棄物から生成された分別土 B 種を使用した。

表 3.2-2 に使用した想定覆土材料の基本物性を、図 3.2-20 に水ポテンシャル測定装置(METER 社：WP4C)を示す。

表 3.2-2　想定覆土材料の基本物性

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 (%)
分別土 A 種	復興資材	2.684	56.2	33.7	22.5	12.9	30.9
分別土 B 種	復興資材	2.648	56.9	34.5	22.4	12.7	29.9
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 3.2-20　水ポテンシャル測定装置

2) 試験結果

図 3.2-21 に各種土質材料の含水比と水ポテンシャルの関係を示す。2 種類の分別土と土粒子の比表面積が大きい粘性土であるクレーサンドは、高い保水性を有することが明らかになった。従って、これらの材料を放射線遮蔽材料として使用した場合、長期間高い中性子線遮蔽性能を保つことが期待される。

また、分別土 A 種及び分別土 B 種は、含水比が w=40 %以上において水ポテンシャル 0.15 MPa 付近の一定値を示した。これらの分別土は、津波堆積物を処理したものであることから、土粒子に付着した塩分が影響している可能性があり、含有塩分が水ポテンシャルに与える影響について検討する必要がある。

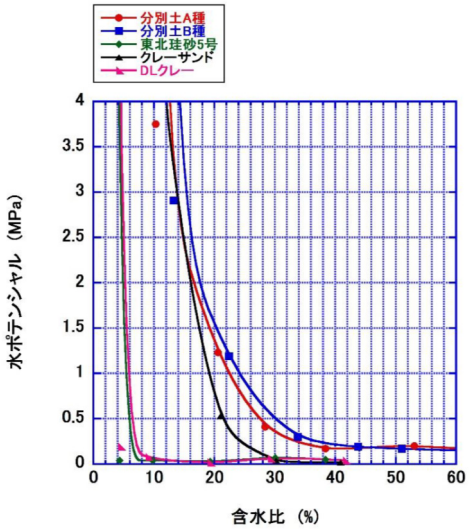


図 3.2-21　水ポテンシャルと含水比の関係

3.2.3　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としての超重泥水及び覆土材の活用方法と層厚設計法の構築

本項では、3.2.1 項に示した土質材料が有する放射線遮蔽性能の一次データを用いてガンマ線遮蔽の観点における層厚設計フロー及び中性子線遮蔽設計に向けた試みについて論じる。

(1) ガンマ線遮蔽設計のための物理量の特定と設計フロー

土の状態を表す基本量を用いた遮蔽設計を行うにあたり、全ての土質系材料について各放射線低減率と一義的な関係にある物理量を特定する。そこで、ガンマ線が透過した全ての物質に関して、湿潤密度に厚さを乗じた値の総和を“総透過密度”として定義する。なお、総透過密度はガンマ線が厚さ x cm の土質系材料を透過する際に衝突する電子の存在度を表す関数である。図 3.2-22 にガンマ線低減率と総透過密度の関係を示す。

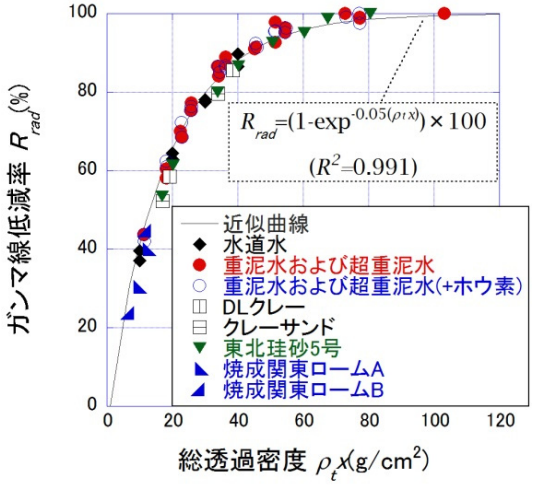


図 3.2-22　ガンマ線低減率と土質材料の総透過密度の関係

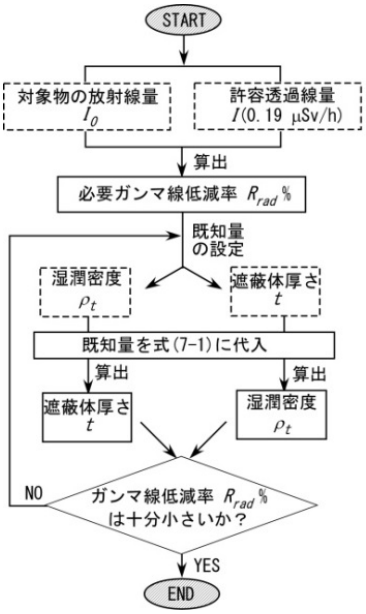


図 3.2-23　ガンマ線遮蔽設計フローチャート

総透過密度に伴うガンマ線低減率の変化は、式(3.2-1)のように近似(R^2=0.991)することができる。

$$R_{rad} = \{1 - exp(-0.05\rho_t x)\} \quad \cdots\cdots (3.2\text{-}1)$$

ρt ： 遮蔽体の湿潤密度

x ： 遮蔽体距離

このように、構成元素が異なる粘土、シルト、砂、超重泥水のガンマ線遮蔽性能は、ある指数関数により一括して表現できることから、土構造物による遮蔽設計では土粒子の構成元素ごとに線吸収係数を考慮する必要はなく、1 つの設計手法が適用できると考えられる。

環境省が設定する人体への追加被曝許容線量は 0.23　μSv/h であり、そのうち 0.04　μSv/h が自然由来のガンマ線であることから、遮蔽材料からの透過が許容される線量値は 0.19　μSv/h となる。本研究結果より、^{137}Cs によるガンマ線量と透過許容線量から必要低減率が R_{rad} として算出できるため、遮蔽対象物が放出するガンマ線量が既知であるならば

式(3.2-1)より設計に必要となる未知数が算出できる可能性がある。

本研究は ^{137}Cs を線源として用いた結果であるため、覆土式一時保管施設のような ^{137}Cs による汚染瓦礫の管理施設への適用は有意であると考えられる。しかし、超重泥水の導入を想定した原子炉建屋では、原子炉圧力容器の外側で 70～80 Sv/h の放射線量率が計測されており(東京電力、平成 29 年 7 月)[4]、実際の圧力容器中心、或いはデブリがあるとされる格納容器底部においては、線量はこの値をはるかに超えているものと推察される。一方、本研究の実験環境は最大 1 μSv/h の線量当量率であるため、現実の 1 億分の 1 以下のレベルである。従って、燃料デブリ付近など高線量、高エネルギー下を想定して土の遮蔽性能を算出するためには、異なる線量及びエネルギー条件の実験結果を用いて外挿を行う必要がある。

(2) 中性子線遮蔽設計のための物理量の特定

全土質系材料が示す中性子線低減率と一義的な関係にある物理量を特定するため、中性子線が透過した全ての物質の水分密度 ρm（体積含水率/100× ρw）に厚さ x cm を乗じた値の総和を“総透過水分密度”として定義する。総透過水分密度は中性子線が厚さ x cm の材料を透過する際に衝突する水分子の存在度を表す。図 3.2-24、図 3.2-25 及び図 3.2-26 は各中性子線低減率と総透過水分密度の関係を示す。

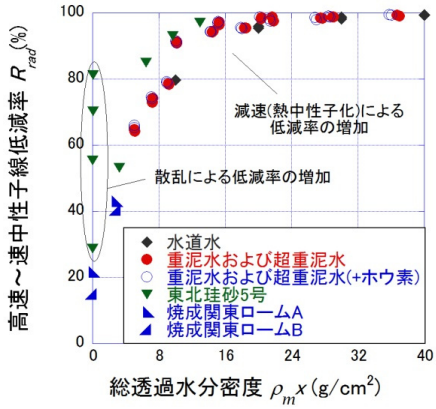


図 3.2-24　総透過水分密度と高速～速中性子線低減率の関係

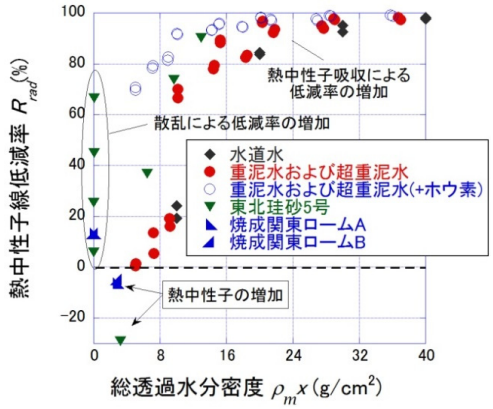


図 3.2-25　総透過水分密度と熱中性子線低減率の関係

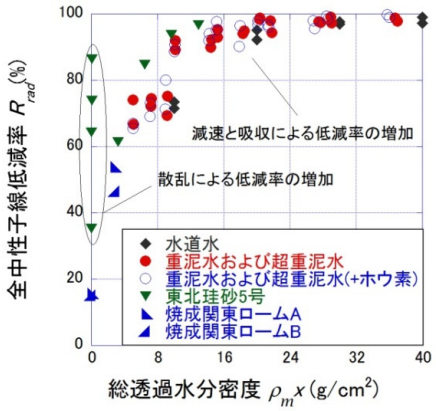


図 3.2-26　総透過水分密度と全中性子線低減率の関係

全体的に総透過水分密度に依存する傾向は認められるが、土質系材料の種類ごとにばら

つきを示した。また、図 3.2-24、図 3.2-25 及び図 3.2-26 から、総透過水分密度 0 g/cm^2 付近の東北珪砂 5 号の乾燥試料は、他材料と異なる挙動を示しており、同一の総透過水分密度でも厚さによって低減率が異なる。それぞれのプロットは、低減率が小さい方から順番に厚さ x =10 cm, 20 cm, 30 cm 及び 40 cm である。乾燥状態の東北珪砂 5 号は、間隙水や吸着水による水素原子を有していないにもかかわらず、遮蔽体厚さの増加に伴い検出器に到達する中性子が減少している。従って、ここで生じた低減は、中性子の減速や吸収と言うよりは、水素原子よりも重い原子核と衝突することで生じた散乱に起因すると考えられる。なお、放射線低減率と散乱に関しては、今後の研究において実験的調査を行う必要がある。

以上より、土が有する中性子線遮蔽性能は主に含水量が支配的であることから、その長期的変化に関しては各土質材料の保水性の調査が不可欠である。また、中性子線は水素原子の形態によらず作用するため、地盤工学分野で一般的に扱う工学的水分（110 ℃で 24 時間乾燥）に限らず、強熱減量水分に関しても検討する必要がある。

参考文献

(1) 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.

(2) 那須郁香、吉川絵麻、小峯秀雄、後藤茂、新井靖典、氏家伸介、吉村貢：各種土質材料の放射線遮蔽性能の実験的研究、第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp. 145-150、2017.

(3) 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.

(4) 東京電力ホールディングス株式会社：2 号機原子炉格納容器内部調査　線量率確認結果について、http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2017/07/20170728_2. pdf（閲覧日：2017 年 7 月 28 日).

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）

廃炉に向けた地下水環境等の現状把握と予測を行うためには、地下水流動に関して、一般土木の地盤調査・解析に比べて検討しなければいけない課題が 3 点ある。

以下にその 3 点の課題を示す。

① 原子炉施設内への地下水流入出をより精緻に予測することが求められることから、個々の調査技術の分解能や手法の確からしさを向上させること及び主要な水みち等の構造や性状の空間的な不均質性を精度良く把握すること

② 最終的には核種移行を評価することが必須となるため、物質移行の調査解析技術を含めた体系を整えること

③ 廃炉までの長期間に亘るモニタリングを実現できる観測技術を整備すること

以上の課題を踏まえ、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り物質移行に関係する地下水の実流速測定方法を試みた。また、現場での地下水流動を把握するため、昨年度の検討成果に基づいてボーリング孔を 3 孔追加設置し、それらを用いて水理特性試験とトレーサー試験を実施した。更に広域・長期間の地下水環境変動予測技術である浸透流解析・物質移行解析のため、広域を粗いメッシュ構造で解析し、詳細に検討したい領域に対して広域解析結果から詳細解析のための境界条件をつなぐネスティングを取入れ、非定常浸透流解析（数値解析のプロトタイプの開発）を実施し、その効率と解析精度を検討した。

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、教材や資料の作成、対外発表を行うことにより人材育成も進めた。対外発表の例については参考文献に示す。

3.3.1　室内土層試験による実流速の測定方法の検討

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、実流速の測定が可能であることを確認した。また、間隙率と有効間隙率に着目して実流速測定評価の妥当性を検討し、十分な精度が得られることが判明した。

(1) 室内土層試験の概要

室内土層試験装置の設計図面を図 3.3-1 に示す。水槽内には幅 100 cm、奥行き 60 cm、高さ 50 cm の土層を、珪砂 5 号を間隙率約 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。また、土槽水槽に図 3.3-2 に示すように投入孔と観測孔を配置し、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、トレーサー剤は塩水に無水エタノールを混合し、比重 1.0 になるように調整した混合液を使用し、測定では水位差を数段階に変化させて実施した。

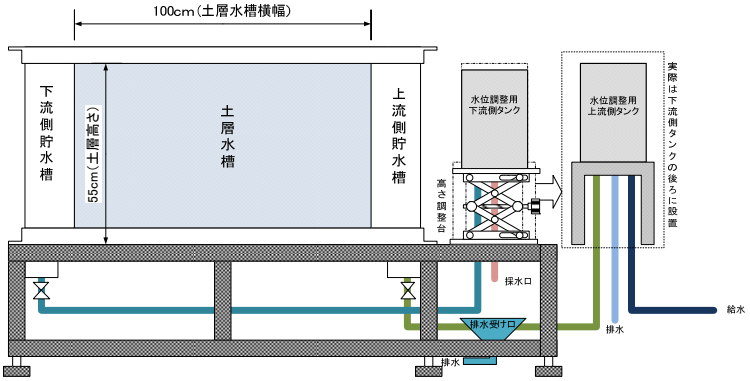


図 3.3-1　室内土層試験装置

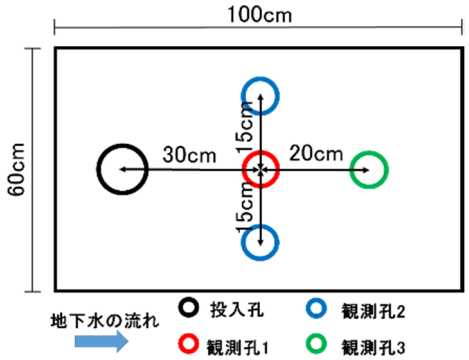


図 3.3-2　試験孔配置図

(2) トレーサー試験の評価方法

トレーサー試験では、各孔内の電気伝導率の変化から実流速を算出し、間隙率と有効間隙率の関係から、算出された実流速の妥当性を評価する。具体的には、初めに土層内を流れる流量からダルシー流速 v を算出する。次にトレーサー剤を投入し、観測孔 1、2、3 に設置した電気伝導率計の測定結果で立ち上がり時間とピーク時間の 2 パターンで実流速 v' を算出する。その後、式(3.3-1)から有効間隙率 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する。

$$n_e = v / v' \tag{3.3-1}$$

また、使用する全ての電解伝導率計に対して、0 から 2.50 %間の塩分濃度に対する電気伝導率の測定値をプロットし、近似式を算出した。これにより、各観測孔内の電気伝導率よりトレーサー剤の濃度を把握でき、流れの中で濃度の変化を測定できる。

一例として、投入孔に設置した電気伝導率計の電気伝導率と塩分濃度の関係を図 3.3-3 に示す。近似式は 2 次関数となったが、主にトレーサー試験で測定される電気伝導率 1.0 S/m までは線形に近い関係となった。なお、他の 3 本の電気伝導率計にもほぼ同様の関係が見られた。

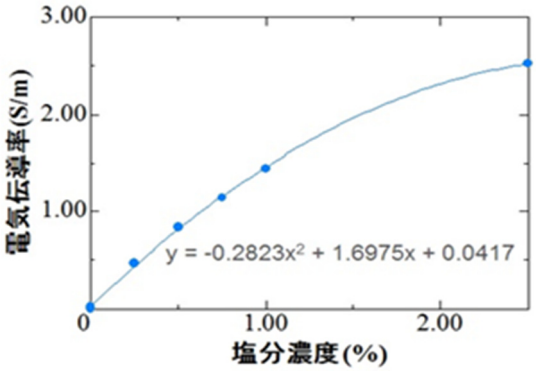


図 3.3-3　塩分濃度と電気伝導率の関係

(3) トレーサー試験結果

図 3.3-4 に珪砂孔内設置後の水位差 4.81 cm における測定結果を、表 3.3-1 に各水位差のダルシー流速、実流速、式(3.3-1)から算出される有効間隙率を示す。

有効間隙率は間隙率 30～40 %の砂層における一般値 30 %と同程度となった。ピーク時の濃度を比較すると、どの水位差においても観測 1 より観測孔 3 の濃度が低くなっていることが確認された。

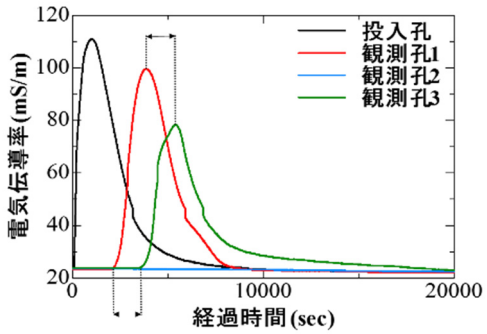


図 3.3-4　水位差 4.81 cm の測定結果

表 3.3-1　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
3.66	3.17×10^{-5}	9.16×10^{-5}	1.20×10^{-4}	34.61	26.48

(4) 考察とまとめ

測定された実流速を用いて算出した有効間隙率は、一般的な有効間隙率と同程度となったことから、測定された実流速は妥当であると言える。

投入孔の塩分濃度を 1.0 として、観測孔の塩分濃度のピーク値の割合を比較すると、観測孔 1、3 でそれぞれ 0.87、0.50 となっており、観測孔 1 より観測孔 3 の濃度が低くなっているのは分散の影響であると考えられる。なお、立ち上がりとピークで異なる実流速が算出されているが、この要因としては縦分散が影響していると考えられる。また、観測孔 2 の位置では電気伝導率の反応が確認できなかったことから、物質移行においては、縦分散に比べて横分散の影響が小さいことが考えられる。

物質移行の検討のために実施した本試験では、各観測孔における電気伝導率の測定結果で一般的に言われているピーク時間から妥当な実流速の測定をすることができた。今後は、縦分散と横分散の分散長を測定するため、数値解析を併用した評価方法を検討する。

3.3.2　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て、次世代の技術者を育成する環境を整える必要があるため、実験井戸を用いて、現場調査・試験を実施した。

現場試験では、再度帯水層を確認する目的で、追加の観測井戸を設置するときに電気検層と流向流速測定を実施した。また、現場トレーサー試験については、自然地下水流の流速が遅いため、1 つの観測井戸（⑤）を揚水井戸として人工的に動水勾配をつけ、放射状収束試験として実施した。

なお、試験では最初に原位置透水試験を行い、地下水流の流れ場を評価した後、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て、トレーサー試験を実施した。

(1) 実験井戸設置と流向流速試験

昨年度に引き続き、各種水理試験の実施及び地下水位のモニタリングのために観測井戸 3 本（観測井戸③～⑤）を新設した。観測井戸は長期使用を考えた仕上げとし、塩ビ管（VP50）と 1 m のストレーナー（開孔率 30 %）を使用した。なお、ストレーナーは観測対象とした GL-11.5 m～12.5 m の帯水層が分布する区間のみに設置し、ストレーナーの上下部には地下水の遮断を目的としてシール材（ベントナイトペレット）を使用した。

以下に井戸の設置状況を示す。

図 3.3-5　井戸設置状況（左：井戸管材挿入状況　右：施工後）

図 3.3-6 に昨年度設置した 2 つの観測井戸も含めた模式断面図を示す。なお、今年度は昨年度より 50 cm 下方の帯水層分布区間にスクリーンを設置した。

地下水の流向流速の測定では、観測井戸①を利用し、礫質土層（Dg）を対象として実施した。測定の結果、流向は昨年度の結果とほぼ同様の南方向～南南東方向であった。また、自然地下水流の流速は $1.18\times1^{0-6}$ m/s であったことから、有効間隙率を 15 %または 20 %と仮定すると実流速は 7.87×10^{-6} m/s または 5.90×10^{-6} m/s となる。

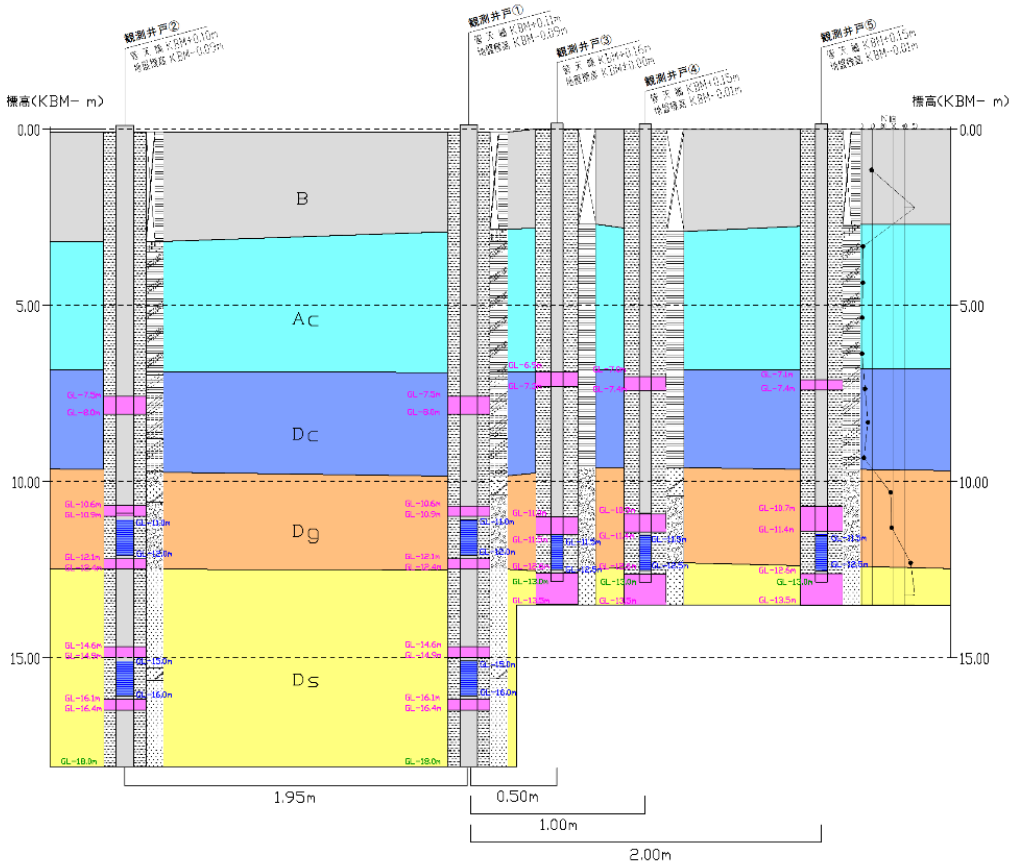


図 3.3-6　観測井戸模式断面図(縦 S=1:100　横 S=1:20)

(2) 原位置透水試験とトレーサー試験

原位置透水試験とトレーサー試験は、被圧帯水層の観測井戸を用いた放射状収束試験であり、図 3.3-7 に示すように配置した観測井戸①、③、④、⑤の 4 本で実施した。なお、対象とする試験区間は事前の水理試験において透水性が良好であった GL-11～12　m 付近の砂礫層とし、各井戸で 1 m のストレーナーを設置した。

現場試験の実施状況を図 3.3-8 に示す。

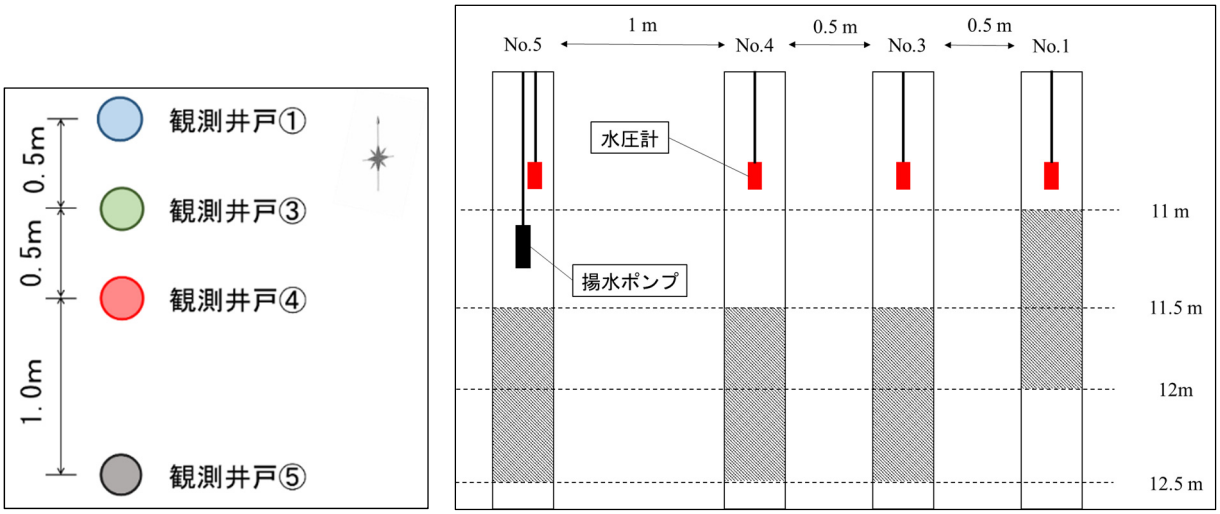


図 3.3-7　試験概要図

図 3.3-8　現場試験の実施状況

1）原位置透水試験

原位置透水試験は、観測井戸⑤で揚水し、揚水開始から地下水位が定常状態に達するまでの水位を観測井戸①、③、④に設置した水圧計により観測し、初期水圧から定常状態までの水圧変化より対象地盤における透水係数を算出する。また、揚水量は、事前の水理試験から 20 L/min と 22 L/min とする。

各観測井戸に設置した水圧計から観測された水圧変化値を用いて、被圧帯水層における定常井戸理論式（3.3-2）より透水係数を算出する。

$$k = \frac{Q}{2\pi D\left(h_2 - h_1\right)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \tag{3.3-2}$$

k：透水係数

Q：揚水量

h：各観測井戸における全水頭値

D：帯水層の長さ

r：揚水井戸から各観測井戸までの距離

これにより、被圧帯水層の透水係数 k は、観測値の 2 点の選択に対して複数の値が得られることになる。ここでは、式(3.3-2)を用いて、最小二乗法により全水頭の観測誤差を考慮した透水係数を算出した。

対象地盤における GL-12.5 m からの初期全水頭値を図 3.3-9 に、揚水量 20 L/min と 22 L/min で揚水し、定常状態に達した際の GL-12.5 m からの全水頭値を図 3.3-10 と図 3.3-11 に示す。

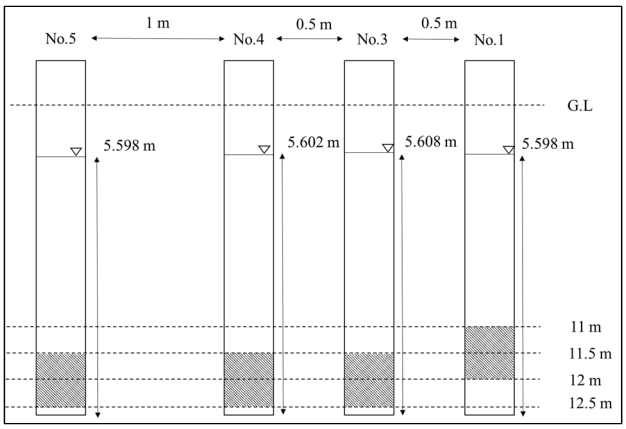


図 3.3-9　初期全水頭値

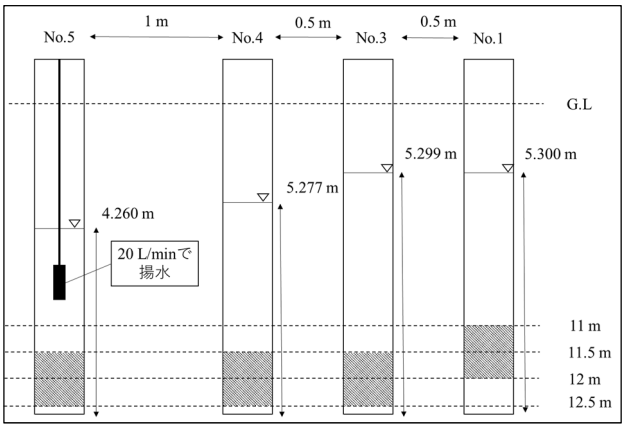


図 3.3-10　揚水量 20 L/min 時の全水頭値

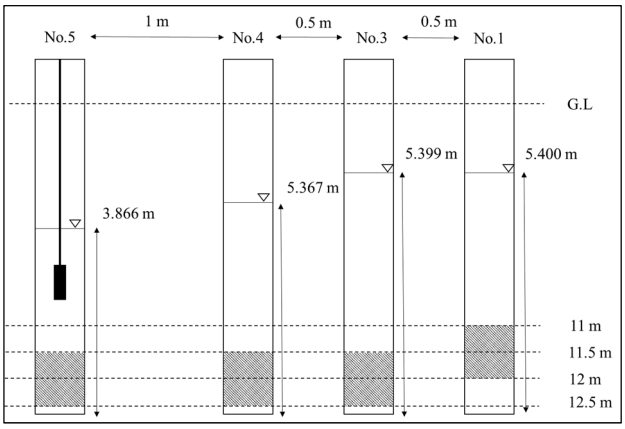


図 3.3-11　揚水量 22 L/min 時の全水頭値

図 3.3-10、図 3.3-11 の全水頭値を用いて式(3.3-2)から透水係数を算出する場合、観測点 2 点を選択しなければならない。そこで、表 3.3-2 に示した 6 パターンについて検討した。その結果、観測井戸⑤を基準とした透水係数はどのパターンでも同じオーダーの値となったが、観測井戸①や③を基準とした透水係数は値がばらつく結果となった。

表 3.3-2　定常井戸理論式を用いた場合の透水係数の算出結果

(左表：揚水量 20 L/min の時　右表：揚水量 22 L/min の時)

20 L/min	
選択パターン	**透水係数 (m/s)**
①～③	1.52×10^{-2}
③～④	6.72×10^{-4}
①～④	1.11×10^{-3}
⑤～④	1.29×10^{-4}
⑤～③	1.40×10^{-4}
⑤～①	1.50×10^{-4}

22 L/min	
選択パターン	**透水係数 (m/s)**
①～③	1.68×10^{-2}
③～④	7.40×10^{-4}
①～④	1.23×10^{-3}
⑤～④	1.42×10^{-4}
⑤～③	1.55×10^{-4}
⑤～①	1.65×10^{-4}

そこで、全水頭値の観測誤差を種々の条件で考慮して、最小二乗法により透水係数を算出した。全水頭 h_1 と透水係数 k を未知数とした場合は、観測誤差も小さく、透水係数の値も一般値と同程度となる結果となった。なお、透水係数は揚水量 20 L/min のときに

2.00×10^{-4} m/s、揚水量 22 L/min のときに 1.49×10^{-4} m/s であり、この値は今回対象とした地盤における妥当な値であると考えられる。

2) トレーサー試験

トレーサー試験は、4 本の観測井戸を使用する放射状収束試験として、観測井戸⑤（揚水孔）から一定流量で揚水し、各観測井戸の水圧がほぼ定常状態に達した後、観測井戸①（投入孔）からトレーサー剤を投入する形で実施した。

今回対象とした帯水層は、事前の水理試験で透水係数が 10^{-4} m/s 程度で透水性が良好であった GL-11～12 m 付近の砂礫層の 1 m 区間である。試験では、塩水とエタノールの混合液をトレーサー剤として注入した風船を観測井戸①の試験区間で破裂させ、放出されたトレーサー剤を各観測井戸の試験区間に設置した電気伝導率計によって測定した。この測定値の変化から実流速を算出し、更に実流速から有効間隙率を導いた上で、測定結果の妥当性を評価した。

トレーサー試験の手順を以下に整理する。

- ✎ 観測井戸⑤において周辺地盤の地下水位が定常状態(図 3.3-8)に達するまで揚水量 20 L/min で揚水。
- ✎ 観測井戸①の試験深度にトレーサー剤を投入し、観測井戸③と④に設置した電気伝導率計で電気伝導率の変化曲線を測定。
- ✎ 各観測井戸における変化曲線の立ち上がり間の時間とピーク間の時間の 2 パターンで実流速 v_2 を算出。
- ✎ 実測値と平均ダルシー流速 v_1 を用いて有効間隙率 n_e を導き、測定結果の妥当性を評価。（平均ダルシー流速は、揚水量を観測井戸⑤から各観測井戸の距離を半径 r とした円柱の側面積で割り、各観測井戸におけるダルシー流速を求め、ダルシー流速と各観測井戸間の距離から成り立つ関数を距離で積分し、各観測井戸間の距離で割ることで算定。）

トレーサー試験から得られた電気伝導率の変化曲線を、図 3.3-12 に示す。

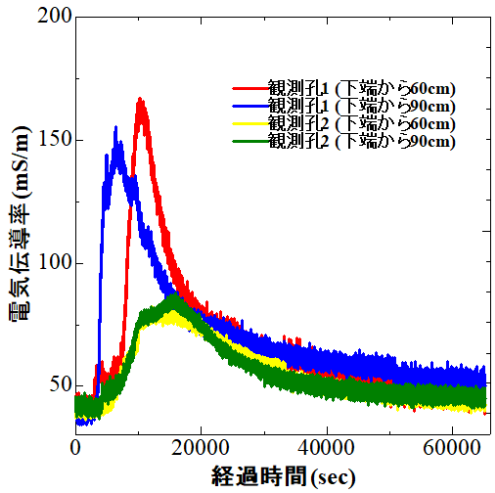


図 3.3-12　観測井戸③と④の測定結果

図 3.3-12 は、トレーサー剤として塩分濃度 40 g/m^3 の溶液を使用し、電気伝導率計を観測井戸③と④のストレーナー下端から 60 cm と 90 cm に 2 個ずつ設置した際の測定結果である。

観測井戸④では、どちらの設置位置の電気伝導率計でも同様の変化が測定されたが、観測井戸③では設置位置によって立ち上がりの時間やピークに達するまでの時間が異なることが確認された。その際の電気伝導率の変化曲線の立ち上がり間とピーク間の時間から算出した有効間隙率は、それぞれ 14.5～19.7 %と 33.7～57.4 %であった。立ち上がりから求めた有効間隙率は砂礫層における一般値 15～20 %と同程度であったが、ピークから求めた有効間隙率は、一般値よりも大きな値となった。

塩分濃度と電気伝導率の関係を用いて、各観測孔における塩分濃度を求め、投入孔の塩分濃度を 1.0 とした場合の各観測孔における塩分濃度の割合を比較すると、電気伝導率計の設置位置によらず、観測井戸④の値の方が観測井戸③よりも小さな値となった。

観測井戸③において電気伝導率計の設置位置によって電気伝導率の変化曲線の立ち上がりの時間やピークに達するまでの時間が異なる結果となった。これは、同一と考えていた帯水層中でも透水係数が異なるなど、地盤の不均質性があることを示唆していると考えられる。また、ピークから求めた有効間隙率が、砂礫層における一般値よりも大きな値となった要因としては、分散の影響が大きく電気伝導率の変化曲線から明瞭なピークを確認することができなかった可能性が考えられる。

以上の結果から、測定結果の評価方法の検討や地盤の不均質性を把握するための水理試験などを今後実施する必要がある。

3.3.3　浸透流解析・物質移行解析のための環境整備・構築

地下水流動及び移流分散解析プログラムとして公開されている Dtransu-3D･EL での計算効率を向上させるため、広域を粗いメッシュ構造で解析し、詳細に検討したい領域に対して広域解析結果から詳細解析のための境界条件を抽出する機能を追加した。これは、非定常問題で、広域モデルの計算結果を詳細モデルに引き継ぐ（ネスティング）ことにより、解析モデルの規模を実用上、計算効率が良い規模に縮小しつつ精度良い解析を可能としたものである。

ネスティング解析では広域モデル非定常解析で行った全ての時間の解析結果が必要となるため、全ての解析時間での解析結果出力機能を追加した。次に、非定常解析結果からネスティング解析の境界条件を設定する節点の座標の圧力水頭を全解析ステップ抽出し、非定常境界条件圧力水頭ファイルを作成した。この抽出された非定常境界条件圧力水頭ファイルを狭域モデル非定常解析時に読込みながら、狭域モデル外周に水頭既知境界を設定して解析が行えるよう機能を追加した。

なお、1F 施設周辺の詳細化された平成 28 年度作成モデルを用いて、この追加機能の精度の確認を行った。

(1) 解析条件

広域モデルの解析メッシュは福島第一原子力発電所建屋付近を細かく分割し、その周りを徐々に粗く分割する方針とし、建屋付近を 10 m グリッド、その外側を 25 m グリッド、同様に 50 m、100 m、200 m とグリッド間隔を広げ平面メッシュで 61,203 節点、122,099 要素に分割した。この平面メッシュを基に 3 次元に要素分割を行い、解析領域全体を 3,097,006 節点、6,247,805 要素に分割した。

地表面メッシュ図を図 3.3-13 に示す。

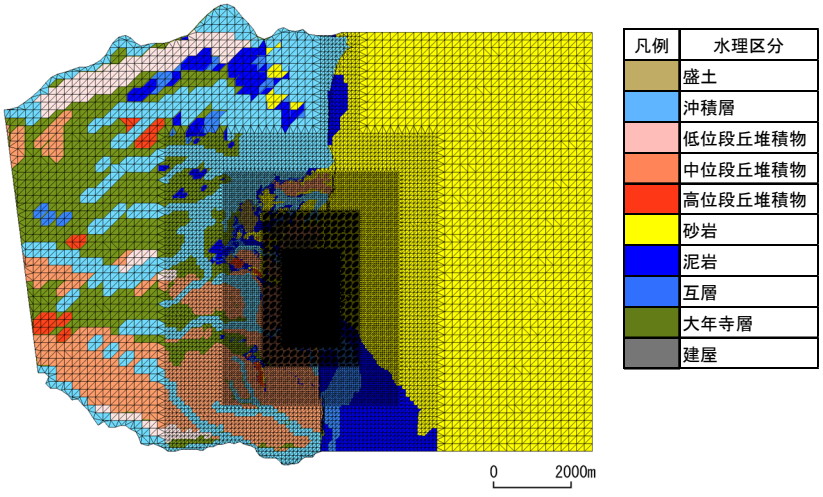


図 3.3-13　地表面メッシュ図（全体）

狭域モデルは広域モデルから切り出し、50 万節点程度の規模として作成した。狭域解析モデルの解析メッシュ図を図 3.3-14 に示す。

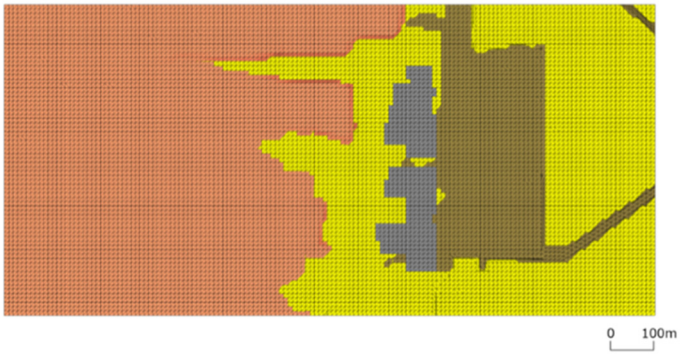


図 3.3-14　狭域モデル地表面メッシュ図

狭域モデルの側面は、水頭既知境界として非定常境界条件圧力水頭ファイルから時間ステップごとに読込み、地表面から降雨浸透境界として福島県浪江（アメダス）の平成 23 年 4 月の日降水量を設定した。また、底面は不透水境界、海底面は海水位として E.L.0 m の水頭固定境界とした。

非定常解析は昨年度の定常解析で得られた水頭分布を初期条件として実施し、解析時間間隔は 12 時間ピッチで 30 日間（60 ステップ）実施した。

(2) 解析結果

広域モデルの 1F 建屋上流側 35 m 盤での解析地下水位変動を図 3.3-15 に示す。

狭域モデルの同一ポイントでの地下水変動も同じ値が計算されており、ネスティング解析が精度良く機能していることが分かった。

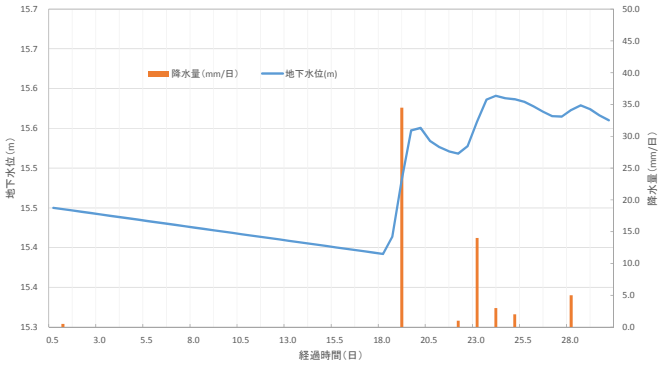


図 3.3-15　広域モデルにおける解析地下水位変動

また、広域モデルでは 30 日（60 ステップ）の解析に 8 時間 30 分の計算時間が必要であったが、狭域モデルでは 1 時間 30 分と解析規模に対してほぼリニアに計算時間が短縮され、ネスティング機能追加の有効性が確認された。

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) 時津光、竹内真司、鈴木誠、齋藤裕己、大瀧修平、田嶋康史郎、吉田竜矢、後藤和幸：浅層帯水層におけるトレーサ試験、第 27 回環境地質学シンポジウム論文集、pp. 5-10、2017.

(4) 齋藤裕己、鈴木誠、菱谷智幸：地盤における透水係数の検証、第 52 回地盤工学研究発表会、pp. 901-902、2017.

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申請者会合（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。以下にそ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 29 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術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 29 年度の 1 回目となる廃炉地盤工学委員会では、東京大学の鈴木俊一特任教授を迎え、「福島第一廃炉研究マップの俯瞰的アプローチー燃料デブリ取出し代替工法ー」と題し、演者が東京電力時代に従事したトラブル対応の経験に基づくリスク管理の考え方やチェルノブイリでの事例などの様々な情報を混じえつつ、最新の知見から想定される 1F の格納容器や圧力容器内におけるデブリの状況やジオポリマーによる放射性物質の飛散防止策（燃料デブリの準安定化）、主題である燃料デブリの取出し代替工法についての説明を受けた。

質疑応答では、飛散防止のために負圧にする方法や汚染の拡散防止につながるボーリング工法などについて意見が交わされた。また、座長からは委員をはじめとする参加者に向けて、本日の内容を踏まえた廃炉へ寄与可能な地盤工学技術について改めて考えてほしい旨、及び技術提案に向けた更なる情報提供を行ってほしい旨の依頼がなされた。

■日時　：平成 29 年 6 月 26 日（月）15:00～17:00
■場所　：地盤工学会（JGS 会館）　地下大会議室

図 3.4-1　第 1 回廃炉地盤工学委員会の様子

(2) 平成 29 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術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 29 年度の 2 回目となる廃炉地盤工学委員会では、東京電力 HD の小野文彦氏と IRID/JAEA の芦田敬氏を迎え、固体廃棄物の保管･管理状況やその処理･処分に関する研究開発状況について情報提供を受けた。

前半は、「福島第一原子力発電所における個体廃棄物の保管管理について」と題し、1F

における事故前と事故後での廃棄物の保管･管理方法等における変化や、個体廃棄物（瓦礫等及び水処理二次廃棄物）の保管状況・量や今後の処理･保管管理計画や将来的な見通しについての詳細な情報提供に加え、戦略プラン 2017 における廃棄物対策分野の検討方針や取組みの現状について説明がなされた。後半は「福島第一原子力発電所の固体廃棄物の処理･処分に関する研究開発」との題目で、中長期ロードマップに示された廃棄物対策の処理･処分に関する内容や 1F 事故廃棄物の特徴などについて説明が行われた後、性状把握･廃棄物の処理及び長期保管方策の検討･廃棄物の処分に関する検討･研究開発成果の統合と題し、それぞれの研究開発内容について報告がなされた。

その後、これらの情報提供を受けて、地盤工学･土木工学技術の観点からの意見や技術情報の提供、同学問分野への要望･期待といったことを主眼にブレーンストーミングが行われ、委員側からは環境省のオフサイトにおける研究事例として、発生土の分級による減容化技術に関する知見などが紹介された。

■日時　：平成 29 年 10 月 16 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 29 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術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 29 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。質疑応答では、IRID 職員より、人材育成の効果や 1F 視察の評価などについて質問があり、本教育プログラムの効果として早稲田大学・千葉工業大学の卒業生の進路などが報告された。また、廃止措置の分野で一般的となっている不確実性（Uncertainty）を取入れた考え方を廃炉地盤工学教育プログラムにも反映していくべきといった意見が聴かれた。

次いで、本プロジェクトの啓発活動の一環として昨年 12 月に開催された廃炉地盤工学講演会の概要や「廃炉地盤工学と超重泥水の技術の適用例の紹介」と題した NDF での講演会に関する報告が行われ、オブザーバとして参加していた NDF 職員からは同講演会における聴講者の反応などが紹介された。

その他、若手の会における活動内容や次年度委員会で予定している内容について説明が行われると共に、昨年秋に実施された中間評価に対するコメント、PO（プログラムオフィサー）中間フォローにおける指摘･助言事項などについても報告がなされた。

■日時　：平成 30 年 3 月 5 日（月）15:00～17:00

■場所　：地盤工学会（JGS 会館）　地下大会議室

図 3.4-3　第 3 回廃炉地盤工学委員会の様子

3.4.2　申請者会合（コアメンバー会議）及びワーキング（WG）について

委員会の運営方法等の実務面の取り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、幹事等で構成される申請者会合（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 10 回廃炉 PJ 申請者会議　：平成 29 年 5 月 16 日（木）15:30～17:30
- 第 11 回廃炉 PJ 申請者会議　：平成 29 年 11 月 21 日（火）15:00～17:00
- 第 12 回廃炉 PJ 申請者会議　：平成 30 年 2 月 5 日（月）15:00～17:00

また、昨年度に引続き、以下のとおり地盤施工学 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。なお、本 WG における研究成果については 3.1.2 項で取りまとめたとおりである

- 第 7 回廃炉地盤施工学 WG　：平成 29 年 6 月 14 日（水）15:00～17:00
- 第 8 回廃炉地盤施工学 WG　：平成 29 年 9 月 5 日（火）15:00～17:00
- 第 9 回廃炉地盤施工学 WG　：平成 29 年 11 月 21 日（火）15:00～17:00
- 第 10 回廃炉地盤施工学 WG　：平成 30 年 2 月 5 日（月）15:00～17:00

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の参画、関連機関との協議を実施した。関連する会議を以下に列記すると共に、同会議等で作成した説明用ポスターを図 3.4-4～図 3.4-5 に示す。

- 平成 29 年度原子力システム研究開発事業／英知を結集した原子力科学技術･人材育成推進事業合同成果報告会及びワークショップ
  ：平成 30 年 1 月 23 日（火）12:50～14:20
- 廃炉基盤研究プラットフォーム第 6 回運営会議（JAEA･CLADS）
  ：平成 29 年 8 月 10 日（木）15:30～17:30
- 廃炉基盤研究プラットフォーム第 7 回運営会議（JAEA･CLADS）
  ：平成 29 年 11 月 20 日（木）15:30～17:30

・ 廃炉基盤研究プラットフォーム第８回運営会議（JAEA･CLADS）

：平成 30 年 2 月 16 日（金）16:00～18:00

・ 次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス（NDEC3）

：平成 30 年 3 月 19 日（月）

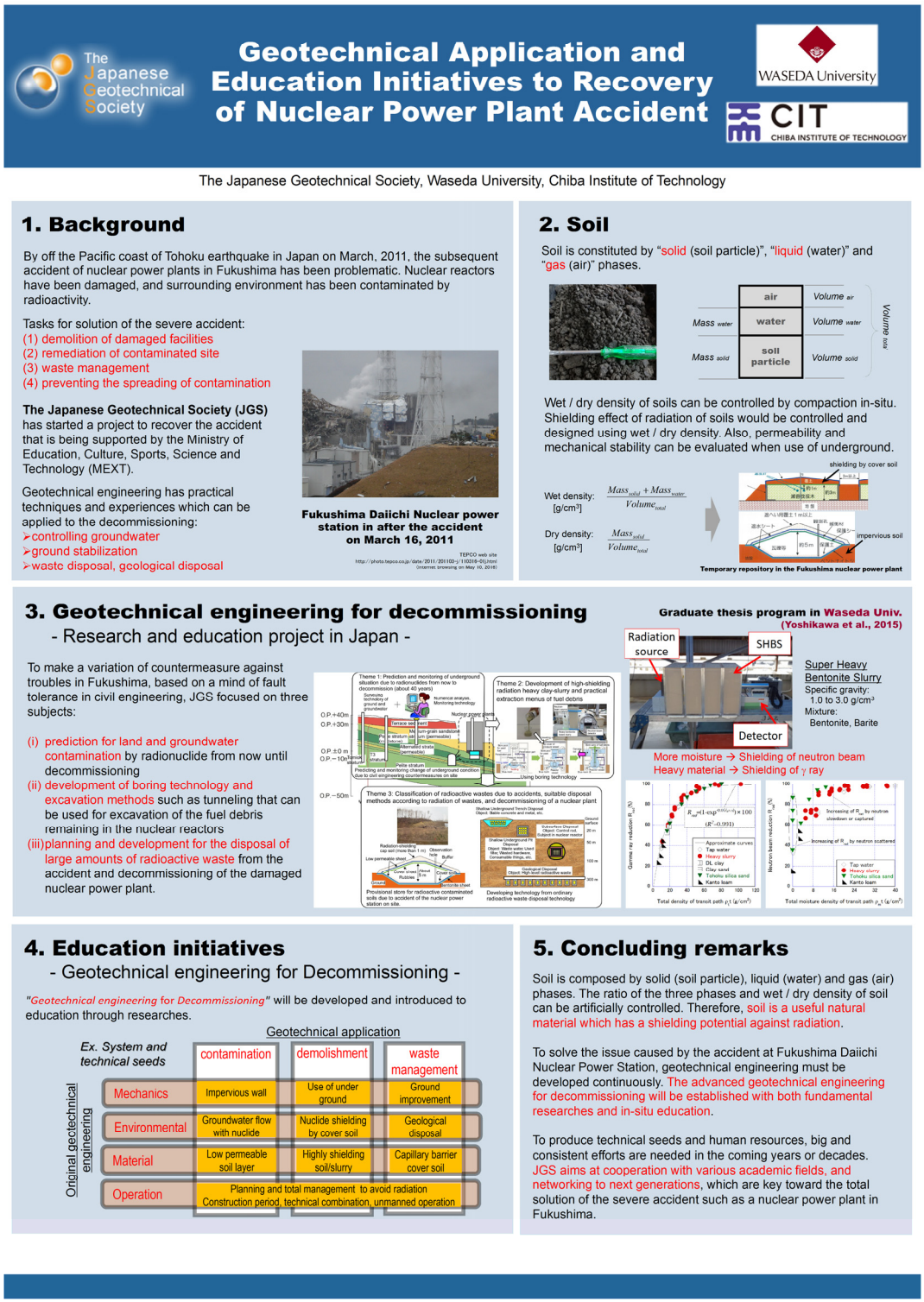


図 3.4-4　平成 29 年度成果報告会における制作ポスター

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

公益社団法人 地盤工学会 http://www.jiban.or.jp/

WASEDA University 千葉工業大学 Chiba Institute of Technology

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盤研究を推進する**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の集約体制の構築

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

図1 技術の見える化（公開用技術マップrev.09.1）

- 廃炉地盤工学委員会において、廃止措置に寄与可能な地盤工学的技術の位置付けや技術発掘を継続的に実施すると共にその実現性について検討。

図2 技術の見える化（技術メニューDB）

- 研究で浮上してきた地盤工学的新技術を用いた廃炉シナリオについて検討し、その内容の拡充と実効性を評価。

図3 ロードマップ・戦略プラン等より導かれた基本的なシナリオ構成

③ 廃炉地盤工学教育システムの構築

- 学問単元ごとのWGにおける検討成果をもとに、シラバスの構築・教材の試作を実施。
- 試作した教材を用いて、早稲田大学などで廃炉地盤工学の模擬的授業を開催。

☞ 結果を委員会にフィードバックすることで、廃炉地盤工学の内容の充実・深化へ。

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における廃炉地盤工学に関する特別セッション、廃炉地盤工学講習会を開催。
- 福島第一原子力発電所の視察、関連する学術研究機関や企業との情報交換、海外関連機関（NAGRA）から情報収集等を行い、委員会において情報を共有。
- 関連学会（土木学会等）に参加し、関連情報の収集・活動内容を発信したほか、構築した廃炉地盤工学HPの内容を拡充し、広く一般社会に対して情報を発信。

廃炉地盤工学HP（https://www.jiban.or.jp/hairo/）

特別セッション（平成29年7月13日）

スイスNagraとの情報交換（平成29年11月13日～17日）

廃炉地盤工学講習会（平成29年12月20日）

福島第一原子力発電所視察（平成30年1月11日）

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被曝の回避および放射性物質の拡散防止のための材料開発

② 充填型土質材料「超重泥水」

- 損傷した原子炉建屋の廃止措置に有効な様々な特性(表1)を有する充填型土質材料「超重泥水」。
- ベントナイト懸濁液にパ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。

図2 超重泥水

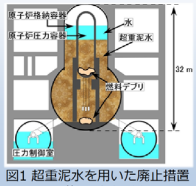


図1 超重泥水を用いた廃止措置の施工イメージ

表1 超重泥水の特性と期待される効果

特性	用途・効果
流動性	充填施工（ポンプ圧送） デブリや切削粉の取り出し媒体
低透水性	汚染水漏洩の防止
粘土粒子含有	放射性物質吸着・拡散防止
高比重	ガンマ線遮蔽
高含水	中性子線遮蔽，粉塵飛散防止

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。
- 水分子を多く含有⇒中性子線遮蔽に有効。

<放射線遮蔽実験>

- 各放射線遮蔽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）。

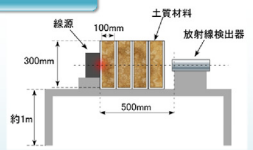


図3 放射線遮蔽実験装置

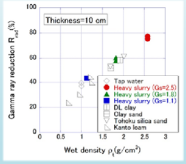
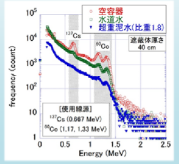


図4 ガンマ線低減率と湿潤密度



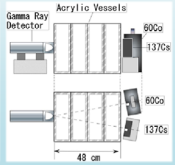


図5 ガンマ線エネルギースペクトル分析

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間隙率を算出し、一般値と比較することで試験方法の妥当性を評価。

<試験装置>

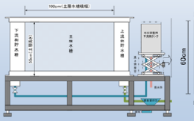


図1 試験水槽　図2 観測孔配置図

<実験結果>

表1 室内試験の有効間隙率

珪砂5号（40%）

水位差 (cm)	有効間隙率 (%) 立ち上がり	有効間隙率 (%) ピーク	砂層における一般値 (%)
4.81	33.42	35.04	間隙率 30-40
3.68	30.72	33.95	有効間隙率 30
3.66	26.48	34.61	

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礫層の1m区間を対象とし、実施・評価（図4）。
- 実流速と揚水量から導いた平均ダルシー流速を用いて有効間隙率を算出し、試験結果の妥当性を評価。

<試験結果（揚水量20L/minの時）>

電気伝導率計設置位置

<観測孔1> 60,80,100cm　<観測孔1-2> 60,90cm

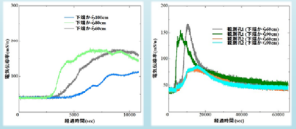


図4 電気伝導率の経時変化

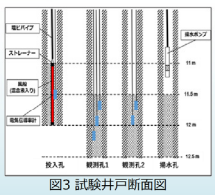


図3 試験井戸断面図

表2 現場試験の有効間隙率

設置位置	有効間隙率 (%) 立ち上がり	有効間隙率 (%) ピーク	砂礫層における一般値
投入孔-観測孔1 60cm	15.3	57.4	15~20%
観測孔1 90cm	19.7	33.7	
投入孔-観測孔2 60cm	16.1	48.6	
観測孔2 90cm	14.5	54.9	

図 3.4-5　NDEC-3 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ニ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 3 年目である本年度の研究・業務の実績としては、廃炉地盤工学の内容の充実のために地盤工学会に設置した「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術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」を開催し、地盤系技術の位置付けや新技術の発掘及びその実現性について検討を行った。また、これまでの検討で浮上してきた地盤系新技術を用いた廃炉シナリオの検討を行い、その内容の充実と実効性の評価を行った。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（地盤工学系技術）の見える化を進めた。加えて、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などとの協議の機会を設け、有用な情報の収集及び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。

廃炉地盤工学教育システムの構築として、学問単元ごとの WG での検討により、シラバスの検討を進めると共に教材（教科書）の試作を行った。また、試作した教材を基に、早稲田大学などで廃炉地盤工学の模擬的授業を実施した。この結果は、廃炉地盤工学委員会にフィードバックすることで、廃炉地盤工学の構築に向けた内容の更なる充実に役立てた。

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（名古屋開催）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った。また、講演会を開催し、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ほか、平成 28 年度に立ち上げ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。更に土木学会など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。

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。更に各材料仕様に応じた施工性を評価するため、平成 28 年度に導入し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タイルセンサシステムを用いて超重泥水の充填施工性と安定性を、水ポテンシャル測定装置により覆土材の保水性能を定量評価した（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、得られた透水係数に基づく流速と種々の試験の測定値を比較し、現状把握と予測解析に展開するための課題をまとめた。ま

た、現場での地下水流動を把握するため、平成 28 年度に引き続き、今後数年間継続して使用可能であることを条件としたボーリング孔を用いて現場実証試験を実施した。ここでは、地下水流動による物質移動の評価を対象とした。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、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(数値解析のプロトタイプの開発)を実施し、非定常解析の可能性を検討した（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、新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。