

平成28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  
地盤工学的新技术開発と人材育成プログラム

成果報告書

平成29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28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术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	v
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 本年度計画	2-2
2.3 平成 28 年度の成果の目標及び業務の実施方法	2-3
2.3.1 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム	2-3
2.3.2 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価（再委託先：早稲田大学）	2-3
2.3.3 地下水環境等の解析・調査技術と予測技術の高度化（再委託先：千葉工業大学）	2-4
2.3.4 研究推進	2-4
3. 平成 28 年度の実施内容及び成果	3-1
3.1 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム	3-1
3.1.1 廃炉地盤工学の構築と廃炉プロセス技術シナリオの評価	3-1
3.1.2 廃炉地盤工学教育システムの構築	3-16
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	3-18
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）	3-22
3.2.1 超重泥水と覆土材のガンマ線及び中性子線の遮蔽性に関するデータベース、並びに充填施工性に関する実験	3-22
3.2.2 早稲田大学大学院「地盤工学特論 B」における福島第一原子力発電所の廃止措置に関する人材育成	3-32
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）	3-37
3.3.1 室内土層実験による実流速の測定精度の検証	3-38
3.3.2 実験井戸による現場試験による透水性評価	3-42
3.3.3 浸透流解析・物質移行解析のための環境整備・構築	3-47
3.4 研究推進	3-52
3.4.1 廃炉地盤工学委員会	3-52
3.4.2 1F 申請者会合	3-53
3.4.3 地盤施工学 WG	3-54
3.4.4 関係機関協議	3-55
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	研究実施体制	3-1
図 3. 1-2	廃止措置に寄与可能な様々な地盤工学的技術	3-3
図 3. 1-3	地盤工学的技術の有効活用に向けた検討の観点	3-4
図 3. 1-4	基本的なシナリオ素案	3-6
図 3. 1-5	中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果①	3-7
図 3. 1-6	中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果②	3-8
図 3. 1-7	中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果③	3-9
図 3. 1-8	中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果④	3-10
図 3. 1-9	中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果⑤	3-11
図 3. 1-10	技術マップの情報項目	3-12
図 3. 1-11	技術マップに収められた技術情報の整理結果（抜粋）	3-13
図 3. 1-12	IAEA マドリッド会議風景	3-14
図 3. 1-13	IAEA マドリッド会議における製作ポスター	3-15
図 3. 1-14	福島第一原子力発電所視察状況	3-15
図 3. 1-15	特別セッション風景	3-18
図 3. 1-16	『廃炉地盤工学』講演会風景	3-19
図 3. 1-17	ホームページのコンテンツ構成一覧	3-19
図 3. 1-18	廃炉地盤工学 HP（1/4）	3-20
図 3. 1-19	廃炉地盤工学 HP（2/4）	3-20
図 3. 1-20	廃炉地盤工学 HP（3/4）	3-21
図 3. 1-21	廃炉地盤工学 HP（4/4）	3-21
図 3. 2-1	超重泥水の充填性実験装置の設計図	3-23
図 3. 2-2	超重泥水の充填性実験装置の全体写真	3-24
図 3. 2-3	超重泥水の充填性実験の様子	3-24
図 3. 2-4	覆土用土質材料の粒径過積曲線	3-26
図 3. 2-5	放射線遮蔽実験の概略図（ガンマ線）	3-26
図 3. 2-6	土質材料中のガンマ線の挙動 <sup>2)</sup>	3-27
図 3. 2-7	ガンマ線低減率と湿潤密度の関係	3-28
図 3. 2-8	土質材料中の中性子線の挙動 <sup>2)</sup>	3-28
図 3. 2-9	熱中性子線低減率、高速～速中性子線低減率、及び全中性子線低減率と体積含水率の関係	3-28
図 3. 2-10	ガンマ線低減率と超重泥水の厚さの関係	3-30
図 3. 2-11	熱中性子線低減率、高速～速中性子線低減率、及び中性子線低減率と超重泥水の厚さの関係	3-30



図 3.2-12	覆土式一時保管施設における放射線遮蔽用覆土 <sup>6)</sup> 及び原子炉建屋内 <sup>7)</sup> での 超重泥水の充填による遮蔽方策案	3-31
図 3.3-1	浸透模型水槽	3-38
図 3.3-2	測定法の違いによる流速の比較	3-39
図 3.3-3	トレーサー剤（左図：投入直後 右図：3 時間後）	3-40
図 3.3-4	解析モデル	3-40
図 3.3-5	珪砂 5 号解析結果（左図：投入直後 右図：3 時間後）	3-41
図 3.3-6	ガラスビーズ解析結果（左図：投入直後 右図：3 時間後）	3-41
図 3.3-7	地層区分	3-45
図 3.3-8	水位変化曲線（左図:GL-11~12m 右図:GL-15~16m）	3-46
図 3.3-9	地形及び水系図	3-47
図 3.3-10	地表面メッシュ図（全体）	3-48
図 3.3-11	地表面メッシュ図（福島第一原子力発電所周辺拡大図）	3-48
図 3.3-12	解析地下水位コンター図（全体）	3-49
図 3.3-13	地下水位コンター図（福島第一原子力発電所周辺拡大）	3-49
図 3.3-14	全水頭コンター図（東西方向鉛直断面）	3-50
図 3.3-15	領域分割数と計算効率	3-50
図 3.4-1	第 1 回廃炉地盤工学委員会の様子	3-52
図 3.4-2	第 3 回廃炉地盤工学委員会の様子	3-53
図 3.4-3	平成 28 年度成果報告会における製作ポスター	3-55

## 表一覧

表 2. 1-1	本事業の全体計画（5 カ年計画）	2-1
表 2. 2-1	平成 28 年度の業務実施計画	2-2
表 3. 1-1	廃炉地盤工学委員会構成メンバー	3-2
表 3. 1-2	「廃炉地盤工学」シラバスの基本構想	3-16
表 3. 1-3	廃炉地盤工学教育システムにおける取組み	3-17
表 3. 2-1	超重泥水の組成配合	3-25
表 3. 2-2	覆土用材料の基本物性	3-25
表 3. 2-3	放射線遮蔽実験の条件	3-26
表 3. 2-4	使用線源	3-27
表 3. 2-5	使用検出器	3-27
表 3. 2-6	地盤工学特論 B：2016 年度シラバスの概要	3-32
表 3. 2-7	地盤工学特論 B：2016 年度最終課題の概略（順不同）	3-33
表 3. 3-1	トレーサー試験結果	3-40
表 3. 3-2	調査数量表	3-42
表 3. 3-3	電気検層結果概要一覧	3-43
表 3. 3-4	流向流速測定結果一覧表	3-43
表 3. 3-5	現場透水試験結果一覧	3-44
表 3. 3-6	孔間透水試験結果一覧	3-44
表 3. 3-7	解析における水理定数	3-45
表 3. 3-8	スラグ試験（左：Hvorslev 法、右：Cooper 法）	3-45
表 3. 3-9	浸透流解析（左：Hvorslev 法 右：Cooper 法）	3-46
表 3. 3-10	設定水理定数	3-49

## 概略

地盤工学は原子力事業を支援する技術の一つとして、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・教育事項を取り入れた新しいカリキュラムの構築と実践が必要不可欠である。

このような背景及び実情の打開を目指し、本事業では「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2016, 2016年7月13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、現場指向と言う五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三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言う認識の下、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ンングに関する実現可能な技術の開発

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

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

以下に、5カ年計画の2年目である本年度業務成果の概略を述べる。

#### (1) 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム

(地盤工学会／個別基盤研究テーマiii及び成果総括)

##### 1) 廃炉地盤工学の構築と廃炉プロセス技術シナリオの評価

- ・地盤工学会に設けた「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」（「廃炉シナリオ検討委員会」は平成28年度に名称を変更、以下「廃炉地盤工学委員会」と言う。）の活動として、廃炉プロセス及び学問単位ごとの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ことにより、廃炉地盤工学の内容の充実を図った。
- ・これまでに提案されている廃炉シナリオ（またはそれに類したもの）を評価・検討し、廃炉地盤工学での地盤系技術の位置付けを基に、地盤工学的技術を活用したシナリオの創出を試み、その実効性を評価した。更にシナリオの検討の中で、廃炉地盤工学で位置付けられるべき地盤系技術の要求性能などを明確にし、新技術の抽出や既存技術改良等を試みると共に、デブリ等原子炉建屋解体に伴う放射性廃棄物区分のデータ拡充を含め、廃炉地盤工学技術のデータベースの設計・試作を行った。
- ・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、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IAEAのマドリッド会議などの機会を活用し、同会議に参加している海外の関連機関から情報を収集した。

##### 2) 廃炉地盤工学教育システムの構築

- ・廃炉地盤工学委員会で検討された内容に立脚し、廃炉地盤工学の教材やシラバスを試行的に作成した。更に試作した教材を基に、早稲田大学や千葉工業大学など複数の大学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

- ・地盤技術者や原子力技術者及び一般社会における認知度を向上させるために、廃炉地盤工学に関する講演会や地盤工学会年次大会における特別セッション等を開催した。また、新たに当プログラムのホームページを地盤工学会のホームページとリンクする形で開設し、学会員及び一般社会に対して業務内容や成果の情報発信を行った。一方、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の発信と関連情報の収

集を行うと共に、収集した情報は廃炉地盤工学委員会にフィードバックすることにより、委員会での情報の共有化を進め、委員会での検討の深化を図った。

## (2) 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価

(再委託先：早稲田大学／個別基盤研究テーマ ii・iii)

- ・デブリ取出し補助のためのガンマ線と中性子線両方の遮蔽性能を有する超重泥水や、構内除染廃棄物の一時仮置き施設のためのガンマ線遮蔽性能と遮水性能の両方を保有する覆土材の仕様設計に資するため、各材料仕様に応じた放射線遮蔽データ取得を行い、データベースの作成に着手した。
- ・各技術の施工性を検討するため、超重泥水の放射線遮蔽性及び充填施工性評価実験装置を用いて、超重泥水の充填施工性を定量的に評価した。
- ・覆土材の施工性については、土質材料の含水状態・保水状況の測定・評価を踏まえて整理した。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を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として試案を作成した。
- ・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、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、種々の試験装置(流向・流速計等)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問題点・課題を抽出・整理した。
- ・現場での地下水流動を把握するため、平成 27 年度の検討成果に基づき、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。更に広域・長期間の地下水環境変動予測技術を開発するため、地下水理をモデル化すると共に、浸透流解析・物質移行解析のためのハード(クラスタマシン)に静音対策を施した上で、概略地下水流動解析(数値解析のプロトタイプの開発)を実施し、並列計算の効率性も含め問題点を抽出した。
- ・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・資料の作成と共に人材育成を行った。

## (4) 研究推進

研究代表者の下、各研究項目間の連携を密にして研究に取り組むと共に広く意見を聴きつつ進めるため廃炉地盤工学委員会を開催した。同委員会では研究代表者及び再委託先の研究成果を取りまとめると共に、実効性の観点から議論を行い、より質の高い研究となるように努めた。また、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組んだ。

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、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）及び技術研究組合 国際廃炉研究開発機構（IRID）や当プログラム採択機関との協調強化のため、データベースの作成や機関担当者との打合せ等を通じて、廃炉地盤工学技術（地盤工学的技術）の見える化を進めると共に、現在まで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模擬的授業を行う。

(2) 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価においては、デブリ取出し補助のためのガンマ線と中性子線両方の遮蔽性能を有する超重泥水や、構内除染廃棄物の一時仮置き施設のためのガンマ線遮蔽性能と遮水性能の両方を保有する覆土材の仕様設計に資するため、各材料仕様に応じて取得した放射線遮蔽データを拡充すると共に、一次データベースの作成を進める。

(3) 地下水環境等の解析・調査技術と予測技術の高度化では、設置したボーリング孔を用いて現場実証試験を実施すると共に、サイト周辺の詳細地下水流動解析を実施し、非定常解析の可能性を検討する。

(4) 研究推進においては、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。また、「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次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス（NDEC）の運営にも取り組む。

## 1. はじめに

地盤工学は原子力事業を支援する技術の一つとして、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・教育事項を取り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する。

このような背景及び実情の打開を目指し、本事業では「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2016, 2016年7月13日, 原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF)」及びそれ以前に公開された戦略プランに基づき、実効性の高い研究及び技術開発を行うと共に、それを支える次代の技術者を育成する教育プログラムの構築を狙いとして研究を推進している。

戦略プラン2015では「福島第一原子力発電所の廃炉作業は、事故に由来する通常の原子力発電所にはない放射性物質によるリスクを継続的に下げるとの取組みであり、当該戦略プランは中長期のリスク低減戦略の設計と言え、その策定にあたり、安全、確実、合理的、迅速、現場指向と言う五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三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言う認識の下、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ンに関する実現可能な技術の開発

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

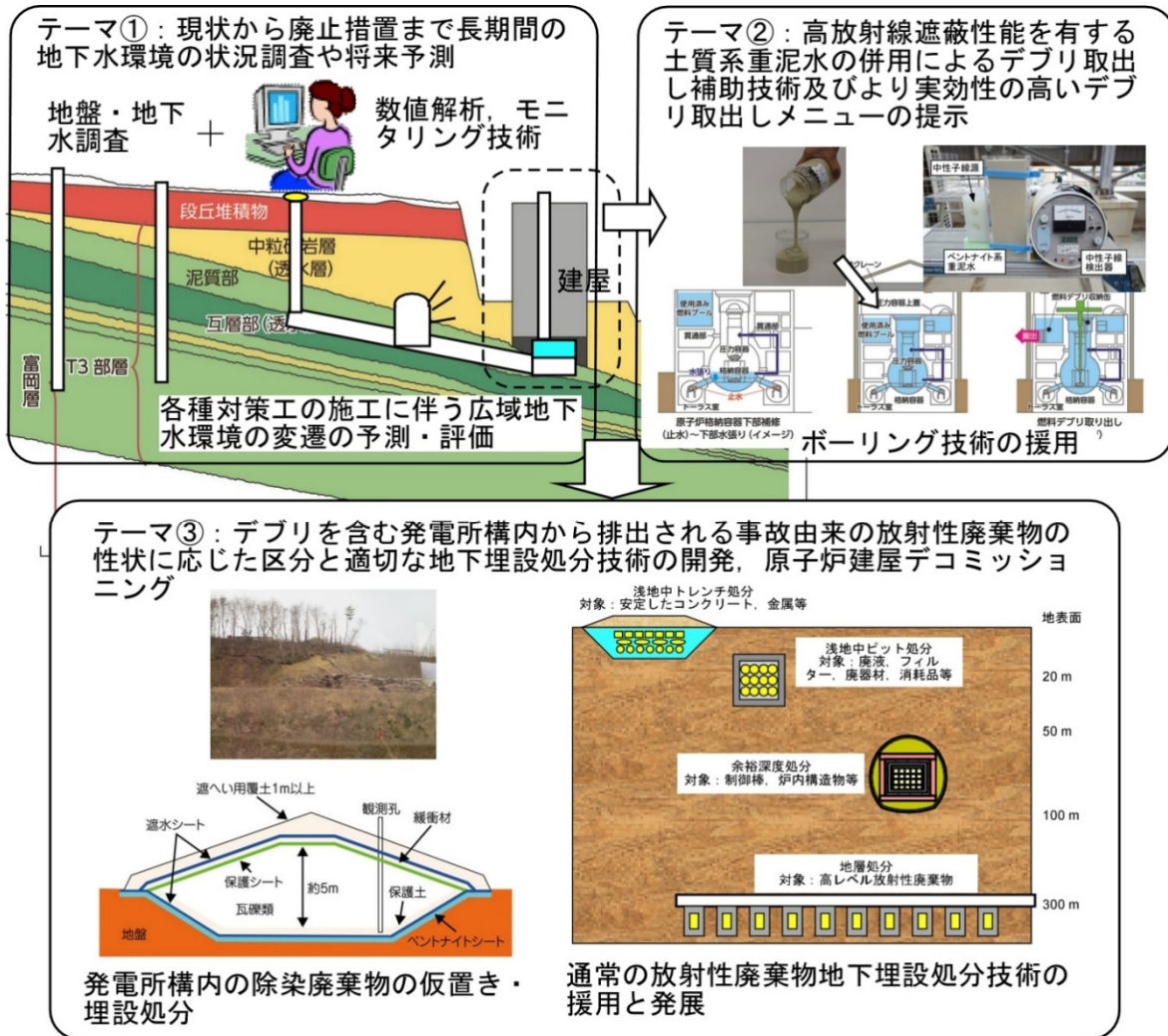


図 1-1 各基盤研究で予想される成果の福島第一原子力発電所廃止措置への適用に関する概念図

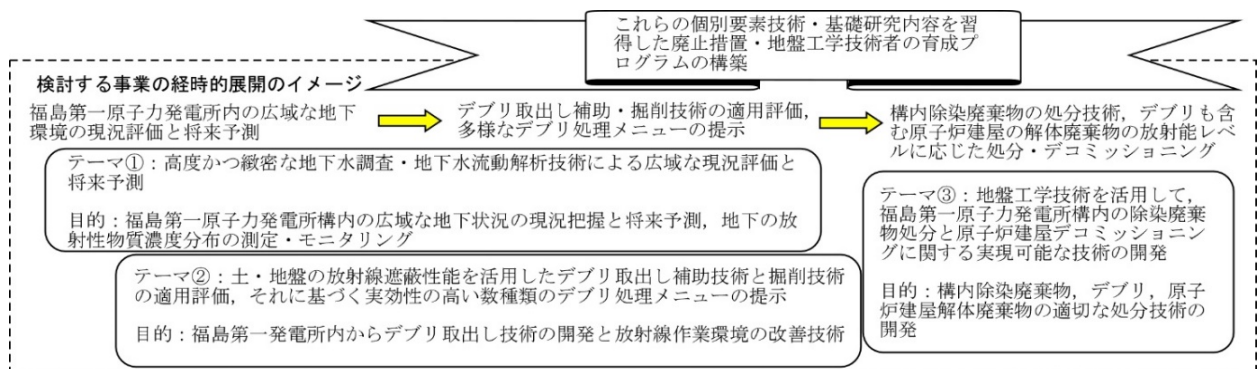


図 1-2 福島第一原子力発電所の現状評価からデブリ取出し、最終的な廃止措置に至るまでの時間経過における個別基盤研究テーマの位置付けと連結性



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

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

高精度かつ広域な地下水状況の把握、特に放射性物質濃度の地下分布の高精度測定と将来予測技術を開発する。また、福島第一原子力発電所構内で行われる工事の安全性や資材搬入経路選定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り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ン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ン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、及び取り出される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ン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、よりよ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



## 2.3 平成 28 年度の成果の目標及び業務の実施方法

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

### 2.3.1 廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム

#### (1) 廃炉地盤工学の構築と廃炉プロセス技術シナリオの評価

地盤工学会に設けた「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」（「廃炉シナリオ検討委員会」を平成 28 年度に名称を変更、以下「廃炉地盤工学委員会」と言う。）の活動として、廃炉プロセス及び学問單元ごとの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ことにより、廃炉地盤工学の内容の充実を図る。

また、これまでに提案されている廃炉シナリオ（またはそれに類したもの）を評価・検討し、廃炉地盤工学での地盤系技術の位置付けを基に、地盤工学的技術を活用したシナリオの創出を試み、その実効性を評価する。更にシナリオの検討の中で、廃炉地盤工学で位置付けられるべき地盤系技術の要求性能などを明確にし、新技術の抽出や既存技術改良等を試みると共に、デブリ等原子炉建屋解体に伴う放射性廃棄物区分のデータ拡充を含め、廃炉地盤工学技術のデータベースの設計・試作を行う。また、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う。その一環として、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 IAEA のマドリッド会議などの機会を活用し、同会議に参加している海外の関連機関から情報を収集する。

#### (2) 廃炉地盤工学教育システムの構築

廃炉地盤工学委員会で検討された内容に立脚し、廃炉地盤工学の教材やシラバスを試行的に作成する。更に試作した教材を基に、早稲田大学や千葉工業大学など複数の大学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

地盤技術者や原子力技術者及び一般社会における認知度を向上させるために、廃炉地盤工学に関する講演会や地盤工学会年次大会における特別セッション等を開催する。また、新たに当プログラムのホームページを地盤工学会のホームページとリンクして開設し、学会員及び一般社会に対して業務内容や成果の情報発信を行う。一方、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の発信と関連情報の収集を行う。収集した情報は廃炉地盤工学委員会にフィードバックすることにより、委員会での情報の共有化を進め、委員会での検討の深化を図る。

### 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）

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、これらの仕様設計に資するため、各材料仕様に応じた放射線遮蔽データ取得を行い、データベースの作成

に着手する。更に各技術の施工性を検討するため、超重泥水の放射線遮蔽性及び充填施工性評価実験装置を用いて、超重泥水の充填施工性を定量的に評価する。覆土材の施工性については、土質材料の含水状態・保水状況の測定・評価を踏まえて整理する。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として試案を作成する。また、大学における卒業研究・修士研究を通じて上記成果を得ることにより、人材育成を行う。

### 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）

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、種々の試験装置（流向・流速計等）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問題点・課題を抽出・整理する。また、現場での地下水流動を把握するため、平成 27 年度の検討成果に基づき、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。更に、広域・長期間の地下水環境変動予測技術を開発するため、地下水理をモデル化すると共に、浸透流解析・物質移行解析のためのハード（クラスタマシン）に静音対策を施した上で、概略地下水流動解析（数値解析のプロトタイプの開発）を実施し、並列計算の効率性も含め問題点を抽出する。

併せて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・資料の作成と共に人材育成を行う。

### 2.3.4 研究推進

研究代表者の下、各研究項目間の連携を密にして研究に取り組むと共に、広く意見を聴きつつ進めるため、廃炉地盤工学委員会を開催する。同委員会では研究代表者及び再委託先の研究成果を取りまとめると共に、実効性の観点から議論を行い、より質の高い研究の推進を図る。また、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組む。

### 3. 平成 28 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 27 年度に引き続き、地盤工学会に設けた「福島第一原子力発電所廃止措置に向けた地盤工学的新技术と人材育成に関する検討委員会」（「廃炉シナリオ検討委員会」を平成 28 年度に名称を変更、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位ごとの地盤系技術の位置付け、新技术の発掘及びその実現性について検討を行うことにより、廃炉地盤工学の内容の充実を図った。なお、平成 28 年度は当該委員会活動の更なる拡充を図るため、新規委員を公募し、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。

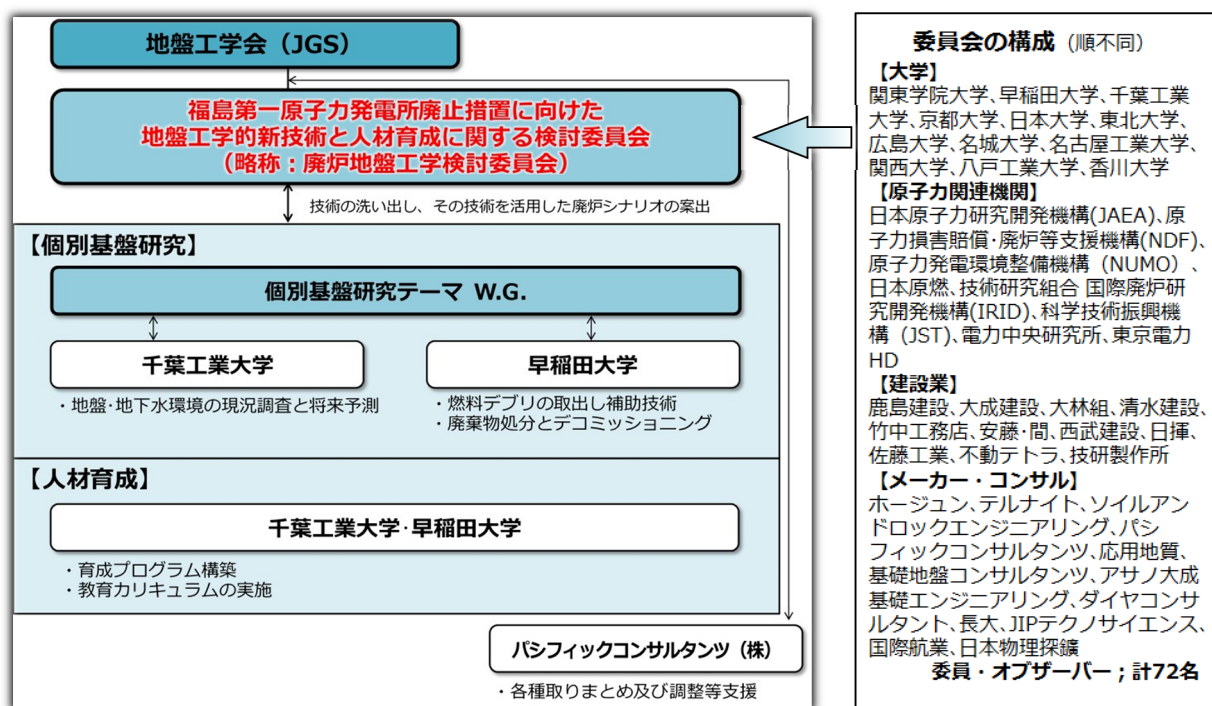


図 3.1-1 研究実施体制

本年度は、廃炉地盤工学委員会を計 3 回（2016 年 6 月 23 日、9 月 20 日、2017 年 3 月 3 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の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（以下、1F 申請者会合と記述する。）を 1.5 ヶ月に 1 回定期的に開催した。これらに加えて、地盤工学会主導の下、廃炉地盤工学のための地盤施工学ワーキンググループ（以下、地盤施工学 WG）を立ち上げ、活動を開始した。

これら委員会・WG における活動内容は、3.4 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

	会務	氏名	所属		会務	氏名	所属
1	委員長	東畑 郁生	関東学院大学	37	委員	塩月 正雄	(独)日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター
2	副委員長	鈴木 誠	千葉工業大学 創造工学部 都市環境工学科	38	委員	竹内 真司	日本大学 文理学部地球システム科学科 地圏環境研究室
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	39	委員	嘉門 雅史	京都大学名誉教授
4	幹事長	後藤 茂	地盤工学会/早稲田大学	40	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
5	幹事	高尾 肇	日揮(株) 第3事業本部 プロジェクト第1部 原子力ソリューショングループ	41	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
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	42	委員	土田 孝	広島大学 大学院工学研究院 地盤工学研究室
7	幹事	斉藤 泰久	パシフィックコンサルタンツ(株) 環境創造事業本部 地盤技術部	43	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
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	44	委員	木村 育正	(株)技研製作所 工法事業部
9	幹事	成島 誠一	西武建設(株) 環境エンジニアリング部	45	委員	進士 喜英	日本原燃(株) 埋設事業部 開発設計部
10	幹事	山田 淳夫	(株)安藤・間 技術本部 原子力部	46	委員	氏家 伸介	(株)ホージュン 応用粘土科学研究所
11	委員	末岡 徹	(株)地圏環境テクノロジー	47	委員	後藤 政昭	ソイルアンドロックエンジニアリング(株)
12	委員	浅岡 顕	公益財団法人地震予知総合研究振興会	48	委員	重富 正幸	ソイルアンドロックエンジニアリング(株)
13	委員	日下部 治	国際圧入学会	49	委員	須佐見 朱加	佐藤工業(株) 技術研究所 土木研究部
14	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	50	委員	原田 健二	(株)不動テトラ 地盤事業本部 技術部
15	委員	勝見 武	京都大学大学院 地球環境学学	51	委員	河井 正	東北大学 工学研究科 土木工学専攻
16	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	52	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
17	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	53	委員	片山 啓	(株)長大 海外事業本部 海外事業部海外技術1部
18	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	54	委員	内海 秀幸	千葉工業大学 工学部 建築都市環境学科
19	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	55	委員	中野 勝志	(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
20	委員	田中 耕一	鹿島建設(株) 土木設計本部 地盤基礎設計部	56	委員	千々松 正和	(株)安藤・間 技術本部 原子力部
21	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	57	委員	利藤 房男	応用地質(株) 技術本部
22	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	58	委員	平山 利晶	国際航業(株)
23	委員	須山 泰宏	鹿島建設(株) 原子力部 企画室	59	委員	加茂 由紀彦	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
24	委員	井尻 裕二	大成建設(株) 原子力本部 原子力技術第三部	60	委員	熊谷 浩二	八戸工業大学大学院 社会基盤工学専攻
25	委員	長峰 春夫	大成建設(株) 原子力本部 原子力技術第三部	61	委員	吉田 秀典	香川大学 安全システム建設工学科
26	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	62	委員	井上 誠	(有)地球情報・技術研究所
27	委員	奥野 哲夫	清水建設(株) 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
28	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	64	委員	内田 篤貴	日本物理探鑑(株) 企画本部
29	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	65	委員	長江 泰史	(株)テルナイト
30	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	66	オブザーバー	高橋 美昭	東京電力(株) 経営技術戦略研究所 土木・建築エンジニアリングセンター
31	委員	深谷 正明	(株)大林組 原子力本部 原子力環境技術部	67	オブザーバー	今津 雅紀	原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF) 技術グループ
32	委員	松田 隆	(株)大林組 技術研究所	68	オブザーバー	酒井 正彦	国立研究開発法人科学技術振興機構 環境エネルギー研究開発推進部 原子力研究グループ
33	委員	渡邊 康司	(株)大林組 東京本社技術本部 技術研究所 地盤技術研究部	69	オブザーバー	近藤 裕之	内閣府 廃炉汚染水対策チーム事務局(経産省資源エネルギー庁)
34	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	70	オブザーバー	今村 功	技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID) 開発計画部
35	委員	菱谷 智幸	(株)ダイコンサルタント ジオエンジニアリング事業本部 地圏環境事業部	71	オブザーバー	松元 慎一郎	技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID) 開発計画部
36	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	72	オブザーバー	高守 謙郎	技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID) 研究管理部長

## (2) 廃炉地盤工学の構築

### 1) 廃炉地盤工学創設の目的と意義

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的技術の位置付け（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。

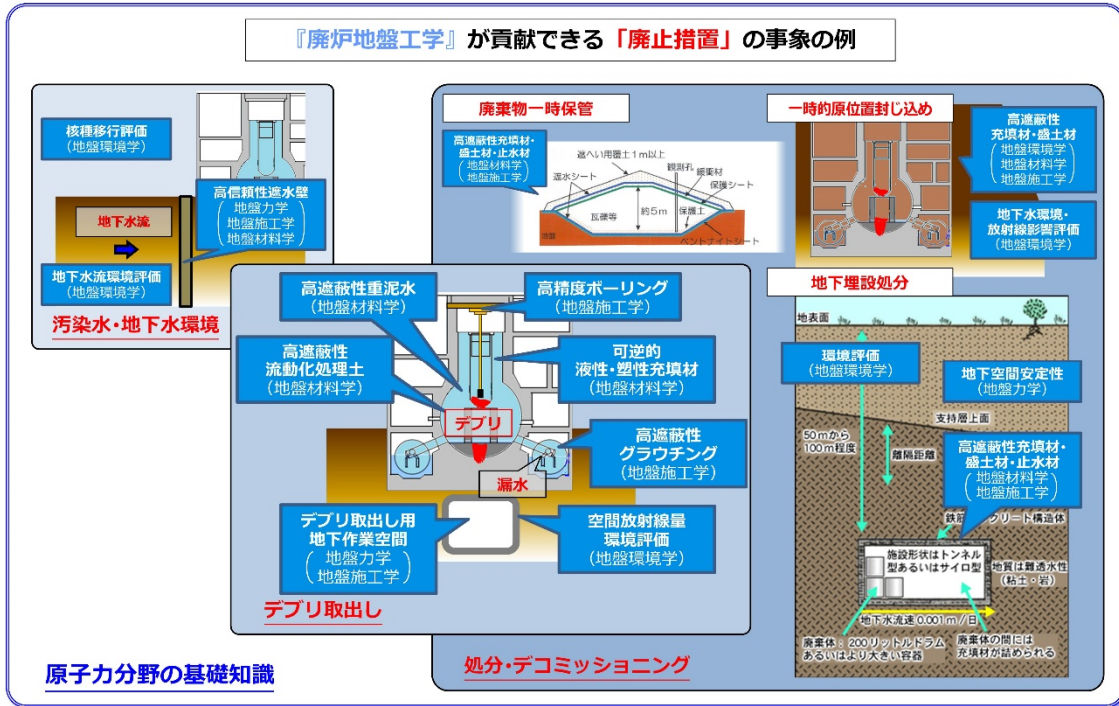


図 3.1-2 廃止措置に寄与可能な様々な地盤工学的技術

以下に廃炉地盤工学創設の目的を整理して示す。

- 廃炉技術の明日を担う地盤関連技術者の教育内容を整備する。
- 廃炉に関連するプロセスや技術の要求性能を明確にすることで、新技術を提案し易くする。
- 廃炉に寄与可能な地盤工学的技術の位置付けを明確にすることで、技術のアピール・相互の連携を行い易くする。
- 検討した廃炉関連の地盤工学的技術を、各種の関連会議等を通じて廃炉事業者・官庁へ展開するためのツールとする。

廃炉地盤工学とは、言い換えると『廃炉技術に関して原子力分野と地盤工学分野との橋渡し』の役割を担うもので「地盤工学的技術が原子力(廃炉)分野へ参入するための入口」「原子力(廃炉)関係者が、地盤工学的技術を知る窓口」である。そのためには、原子力分野と地盤工学分野の相互の可視化（何ができるか？何が必要か？）を必要とするため、本年度は図 3.1-3 に示すような観点により検討を進め、(事故)原子力発電所の廃止過程における地盤工学技術の有効活用を目指した。



- **地盤工学的技術を廃炉技術の観点から再評価（何ができるか）。**
  - ・作業空間改善のための空間放射線量の低減
  - ・周辺環境の防護のための放射能汚染物質の拡散防止
  - ・廃止処置に関連する他分野技術の活用容易化のための補助
- **廃止過程を時間軸で区分し、地盤工学的技術を位置付ける（何が必要か）。**
  - ① 原子力発電所建屋周辺の汚染水・地下水環境の制御
  - ② デブリの取出し（補助）
  - ③ 処理・処分・デコミッショニング

図 3.1-3 地盤工学的技術の有効活用に向けた検討の観点

## 2) 廃炉地盤工学の学問的位置付け

前述のとおり、廃炉に貢献する地盤工学的技術の立場を確立するためには、技術の伝承、活用可能技術の拡大といった観点からも、学問的な位置付けを必要とする。一方で、事故原発の廃炉までに要する 40 年と言う期間は、学問の寿命としては決して長くはなく、後継者の育成・継続に課題を抱える。

これらを踏まえ、廃炉地盤工学としては、まずは学問的な流れを構築し、その活用場面として事故原発の廃炉を捉えるべきと考え、検討を進めた。なお、通常廃炉への適用性についてはこの学問的な流れを構築する過程で明らかになるものと考えている。

## 3) 廃炉地盤工学の技術の属性・学問単元

以下に廃炉地盤工学を構成する技術の属性・学問単元と取り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り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言う意味では新しく、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。汚染物や廃棄物の処理に際して、地盤系材料を活用した取組みは、産業廃棄物処理分野等ですで行われており、研究成果・実績も豊富に存在する。また、廃炉問題に関連した放射性廃棄物の処理分野においても、取組みが進められており、研

究成果も増えつつある。

#### ④ 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り扱うものであるが、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は未経験な場面・事象が連続するものであるため、通常の施工学を適用するには困難が想定される。

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單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單元への取組み優先度を以下のとおりとした。

#### 🚧 地盤力学：取組み優先度「小」

廃止措置が進展し、課題が明確になった時点から取り組むことで対応可能と考えられる。

#### 🚧 地盤環境学：取組み優先度「中」

現状の技術の進展を進めていくことで対応できる可能性が高いことから、本プログラムの再委託先である千葉工業大学の実行グループを中心に検討を進める。

#### 🚧 地盤材料学：取組み優先度「中」

現状でも、盛んに技術が進展しており、これを進めていくことで廃止措置に向けた問題にも対応できる可能性が高いため、本プログラムの再委託先である早稲田大学の実行グループを中心に検討を行う。

#### 🚧 地盤施工学：取組み優先度「大」

経験工学的な側面が強く、学問としての普遍性と言う意味で現状のレベルは極めて低く、特に未経験な場面が連続する事故原発の廃止措置については対応できない可能性が高い。一方で、計画の具現化や新材料の適用には「施工」の概念が必須となるため、早急に取り組む必要がある。

以上から、本年度は地盤施工学の必要性和困難さに対応するため、前述のとおり、地盤工学会が中心となって様々な機関より現状の業務で原発廃炉施工に関する問題に直面している技術者を主体に人選を行い、地盤施工学 WG を立ち上げた。WG における活動内容等については、3.4.3 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。

### (3) 廃炉プロセス技術シナリオの創出・評価等に関する検討

昨年度検討・構築したシナリオ素案について、本年度7月に公開された戦略プラン 2016<sup>※1</sup>の内容を踏まえつつ、再構築を行った。図 3.1-4 に再構築したシナリオ素案を示す。

このシナリオ素案は、中長期ロードマップ<sup>※2</sup>及び戦略プラン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。

※1 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 2016

※2 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

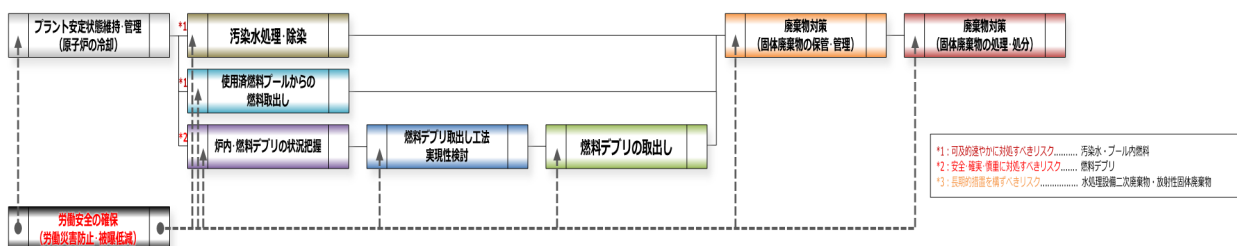
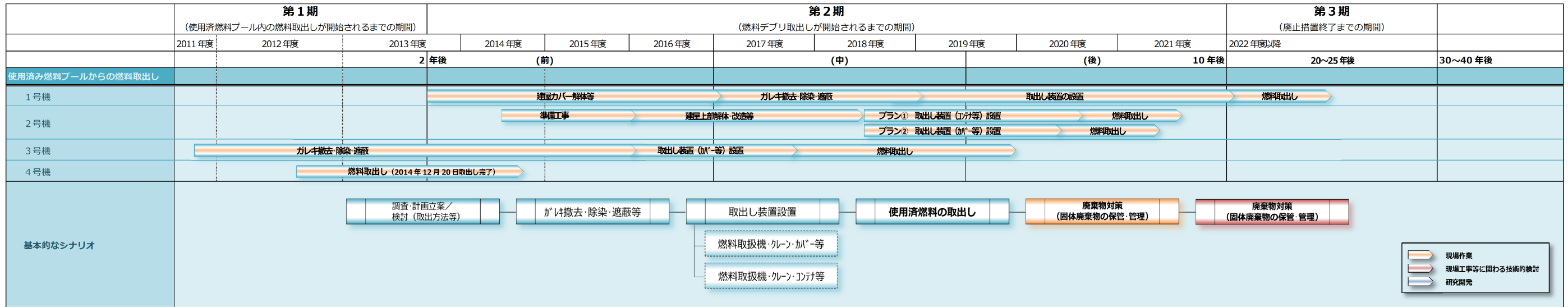


図 3.1-4 基本的なシナリオ素案

本年度は、この基本的なシナリオ素案の再構築に加え、上記の各作業項目以下に設定されたより細分化されたシナリオ（作業工程・項目）を図 3.1-5～図 3.1-9 に示すとおり構築した。これによって、後述する技術マップに挙げられた廃炉に寄与可能な地盤工学的技術を、より実情に則し、且つ説得力ある形で提示することが可能になるものと考えられる。

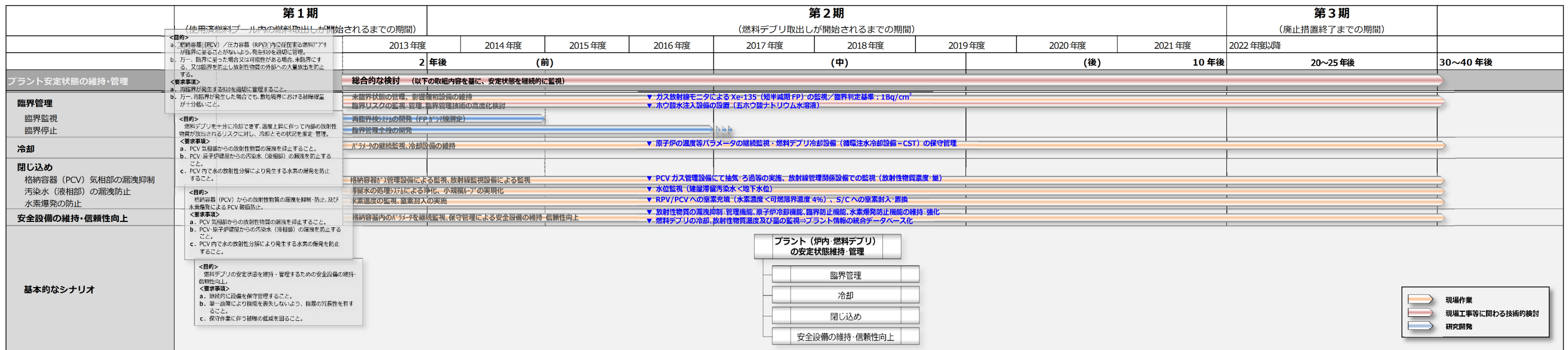
なお、中長期措置技術ロードマップや戦略プランなどを整理するにあたっては、全体的なシナリオ構築を念頭に置き、それぞれ異なる形式で取りまとめられていたものに対して、年代や項目、表現、書式などについて一定の統一化を図っている。

(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 28 年 6 月改訂案) に基づく

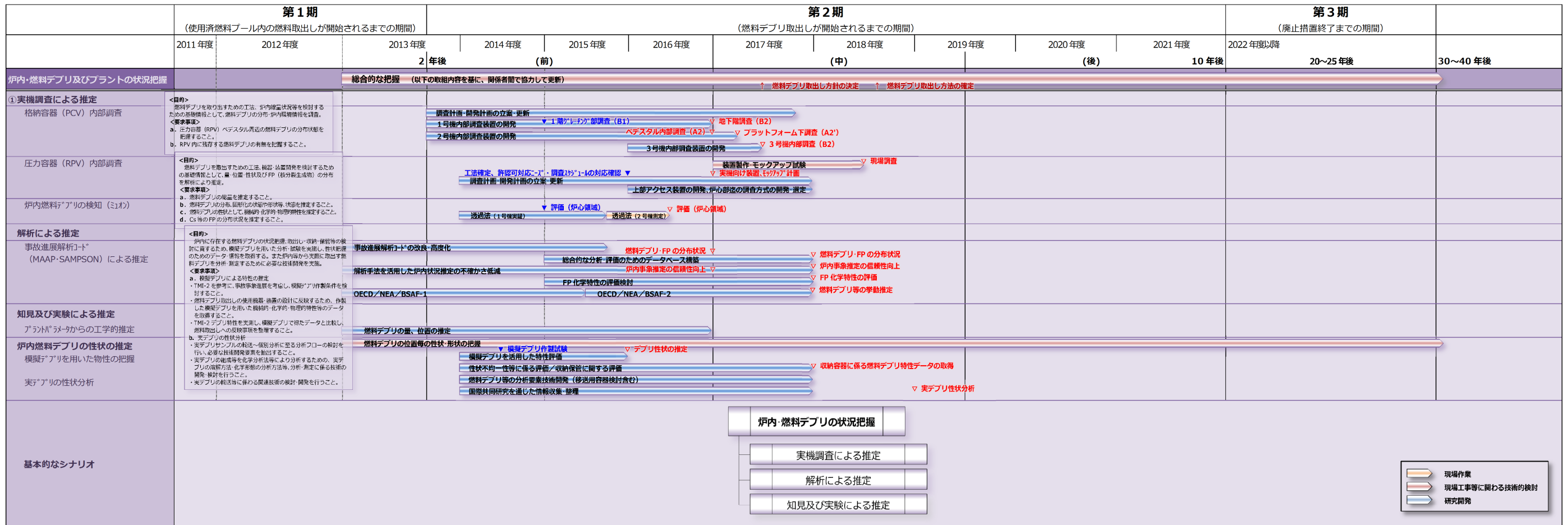
(2) プラント安定状態の維持・管理



※ 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 及び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 2016 に基づく

図 3.1-5 中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果①

(3) 炉内燃料デブリ及びプラントの状況把握

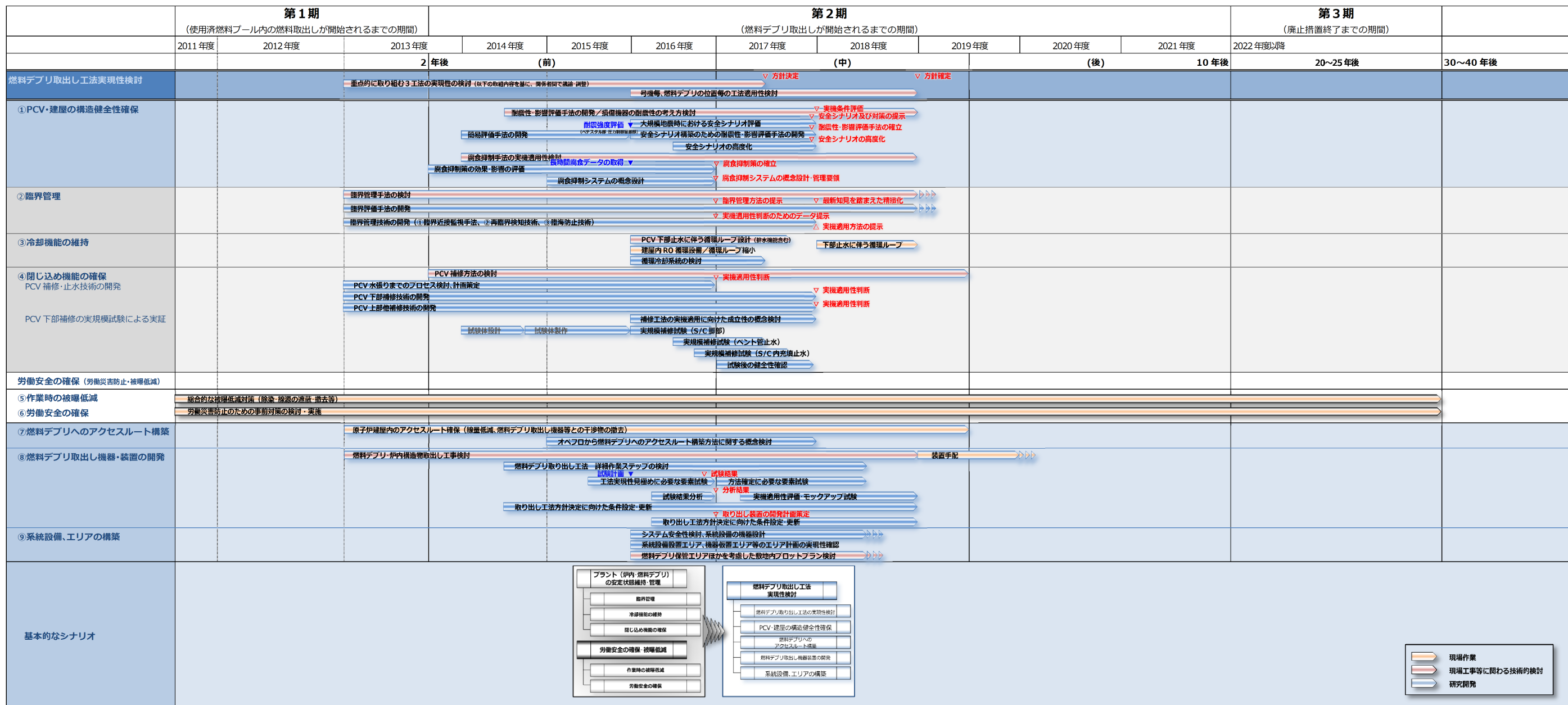


※東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2015 及び東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2016 に基づく

図 3.1-6 中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果②



(4) 燃料デブリ取り出し工法実現性検討



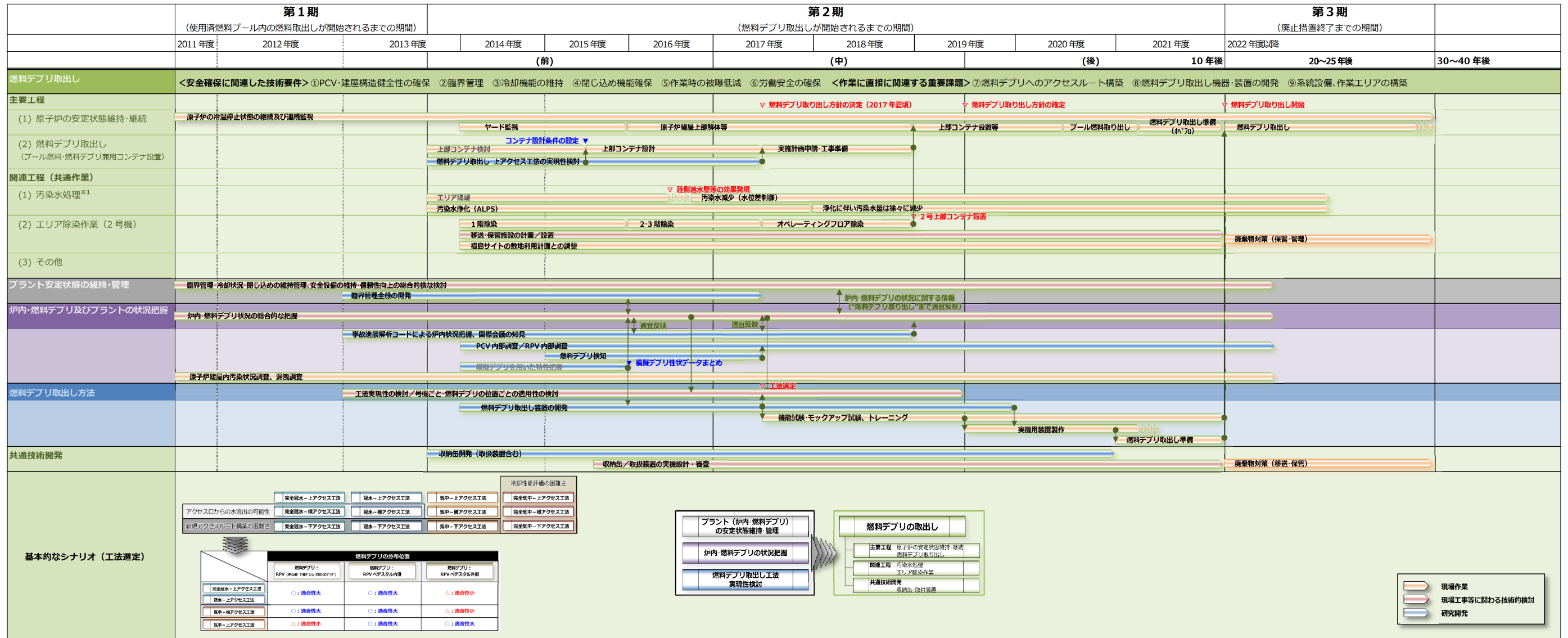
※東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2015 及び東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2016 に基づく

①～⑥：燃料デブリ取り出しの安全確保に関連した重要課題

⑦～⑨：燃料デブリ取り出しの作業に関連した重要課題

図 3.1-7 中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果③

(5) 燃料デブリ取出し

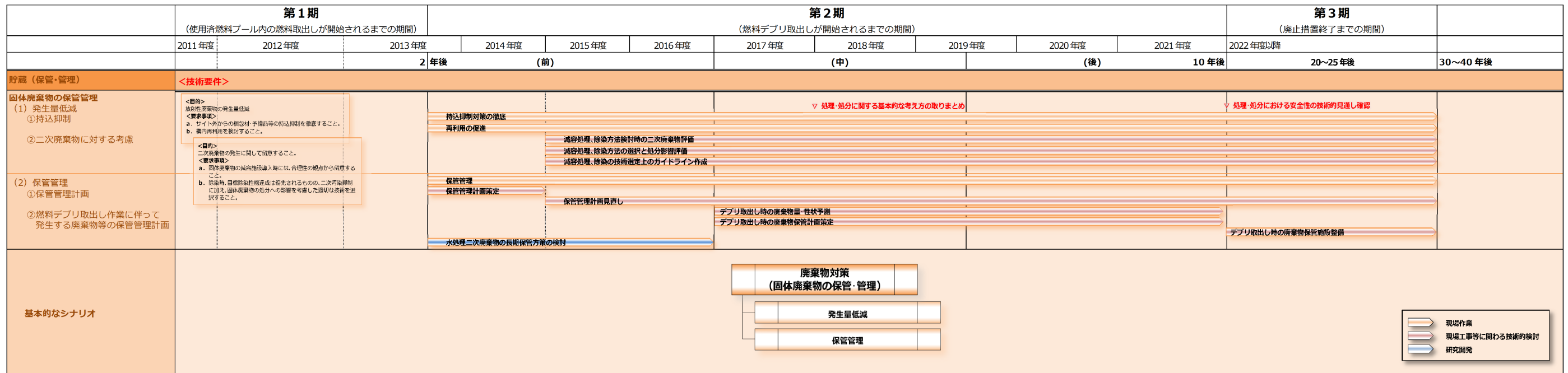


※東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2015 及び東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2016 に基づく

※1 東京電力株式会社福島第一原子力発電所における実施計画の変更認可申請 (陸側遊水壁の閉合) に係る面談, 平成 28 年 3 月 10 日, 原子力規制委員会

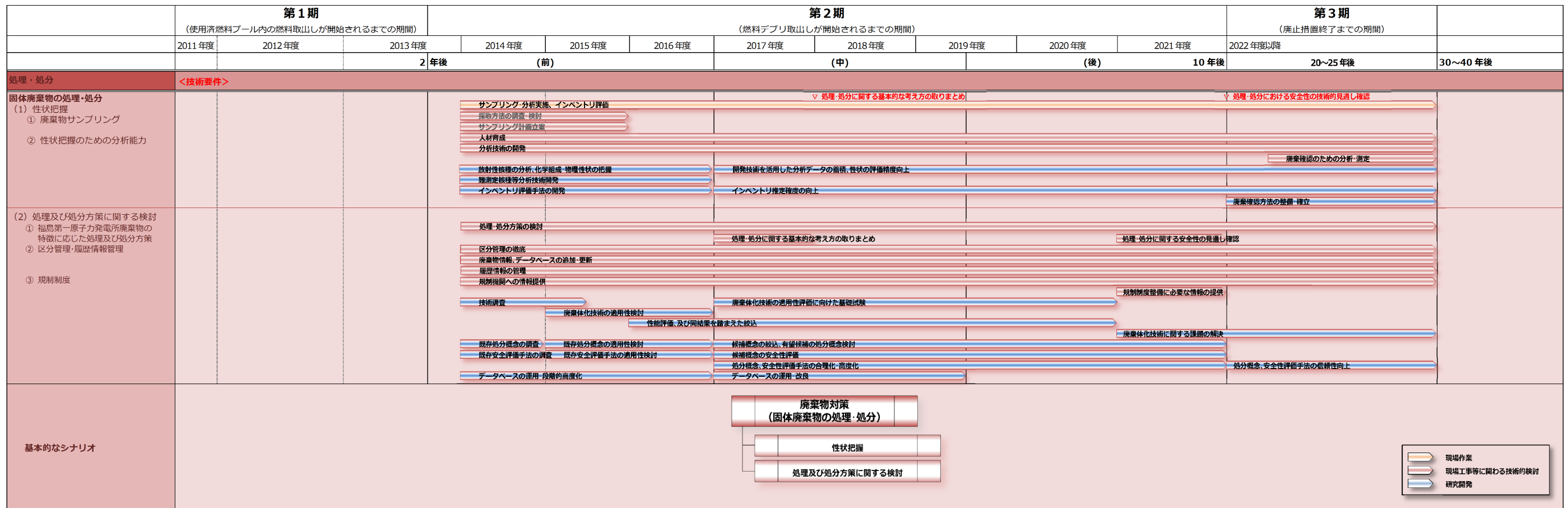
図 3.1-8 中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果④

(6) 廃棄物対策（固体廃棄物の保管・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 及び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 2016 に基づく

(7) 廃棄物対策（固体廃棄物の処理・処分）



※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 及び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 2016 に基づく

図 3.1-9 中長期ロードマップ及び戦略プランの整理結果⑤



#### (4) 技術マップの構築

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処置・処分・デコミッショニングに至る時系列な流れと前述の整理したシナリオを対比することで、昨年度構築した技術マップ内の廃炉に寄与可能と考えられる地盤工学的技術がどの作業項目において適用・貢献可能かについて、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。

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、収められた様々な技術情報を図 3.1-10 に示した情報項目の下、データベース化を念頭に置き、図 3.1-11 に示すとおり整理した。その際、上述の③に関連して、日本原子力研究開発機構（JAEA）廃炉国際共同研究センター（CLADS）が主催する「廃止措置及び廃棄物管理におけるセメント系複合材料に関する研究カンファレンス（RCWM2017）」の企画委員に、廃炉地盤工学委員会座長の小峯秀雄（早稲田大学）が参画し、デブリ等原子炉建屋解体に伴う放射性廃棄物区分のデータ拡充のための情報収集を行った。今年度実施した技術マップの構築においても、ここで収集された情報を参考に、非常に高レベルの放射能を有する吸着塔の処分と比較的低レベルの放射能を有する膨大な除染廃棄物を想定して、高レベル放射性廃棄物地層処分、中深度処分（余裕深度処分）、低レベル放射性廃棄物処分、更には環境省が主体となって実施している福島県内の除染事業において、実績のある地盤工学技術の情報を整理した。

なお、技術マップに整理したデータ件数は 88 である。

**【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 取出し技術	(C) 処置・処分・ デコミッショニング
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 3.1-10 技術マップの情報項目



## (5) 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、IAEA 主催の廃止措置・環境回復に関する国際カンファレンス（以下、IAEA マドリッド会議と記述する）では、その機会を活用し、同会議に参画している海外の関連機関からも情報を収集した。

以下に、その概略をまとめる。

### 1) IAEA マドリッド会議

廃炉地盤工学委員会の活動の一環として、標記の国際会議に参加し、活動成果を発表すると共に、他分野・他国の関係者と情報交換を行った。なお、同会議は、原子力発電所の廃炉、並びに原子力発電所敷地やウラン鉱山跡地の環境回復に向けた政策・管理・技術・社会的受容性について、過去の取組と最新の情報を共有し、安全且つ低コストでの事業推進に結びつけるための議論を目的としたものである。

会議では、福島第一原子力発電所に関連した日本のセッションも企画され、事故から現在に至るまでの福島県内の状況、中長期ロードマップと今後の取組みなどが紹介された。廃炉地盤工学委員会からは、「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」の成果として、廃炉に向けた地盤工学的観点からの課題や土の三相構造と放射線遮蔽の原理、新しい重泥水の開発、廃炉地盤工学の学問としての体系化に向けた取組みについて発表を行い（図 3.1-13 参照）、IAEA の職員からは取組みの内容が他にない特徴を有するだけでなく、若手が主体的に参画している点について評価を得た。

なお、当該情報は地盤工学会誌（平成 28 年 10 月）でも報告済みである。

- 開催日時 : 2016 年 5 月 23 日（月）～27 日（金）
- 開催地 : マドリッド（スペイン）
- 参加者 : 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）

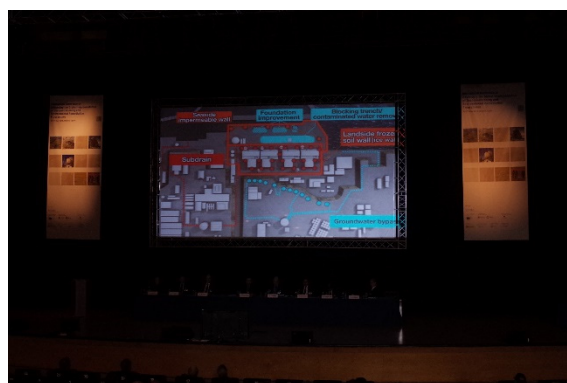
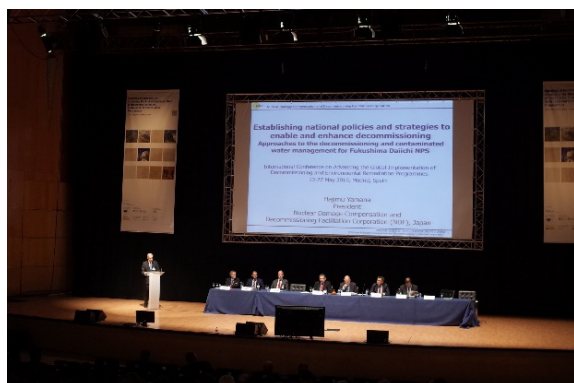


図 3.1-12 IAEA マドリッド会議風景

## Geotechnical Application and Education Initiatives to Recovery of Nuclear Power Plant Accident

Yasutaka Watanabe<sup>1)</sup>, Ikuo Towhata<sup>2)</sup>, Hideo Komine<sup>3)</sup>, Makoto Suzuki<sup>4)</sup> and Shigeru Goto<sup>5)</sup>



<sup>1)</sup> Researcher, Central Research Institute of Electric Power Industry, 1646 Abiko, Abiko-shi, Chiba 270-1196, Japan.  
<sup>2)</sup> President, The Japanese Geotechnical Society, 4-20-2 Tsukaguchi, Bunkyo-ku, Tokyo 112-0011, Japan.  
<sup>3)</sup> Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Waseda University, 3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan.  
<sup>4)</sup> Professor, Department of Architectural and Civil Engineering, Chiba Institute of Technology, 3-13, Inaba, Narashino-shi, Chiba 275-0262, Japan.  
<sup>5)</sup> Visited Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Waseda University, 3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan.

### 1. Background

By off the Pacific coast of Tohoku earthquake in Japan on March, 2011, the subsequent accident of nuclear power plants in Fukushima has been problematic. Nuclear reactors have been damaged, and surrounding environment has been contaminated by radioactivity.


**Tasks for solution of the severe accident:**

- (1) demolition of damaged facilities
- (2) remediation of contaminated site
- (3) waste management
- (4) preventing the spreading of contamination

The Japanese Geotechnical Society (JGS) has started a project to recover the accident that is being supported by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT).

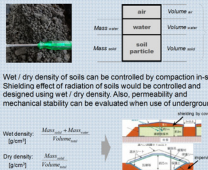
Geotechnical engineering has practical techniques and experiences which can be applied to the decommissioning.

- >controlling groundwater
- >ground stabilization
- >waste disposal, geological disposal




### 2. Soil

Soil is constituted by "solid (soil particle)", "liquid (water)" and "gas (air)" phases.



Wet / dry density of soils can be controlled by compaction in-situ. Shielding effect of radiation of soils would be controlled and designed using wet / dry density. Also, permeability and mechanical stability can be evaluated when use of underground.

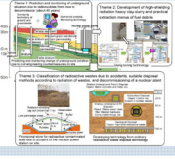


### 3. Geotechnical engineering for decommissioning

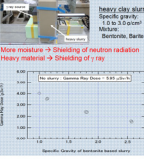
- Research and education project in Japan -

To make a variation of countermeasure against troubles in Fukushima, based on a mind of fault tolerance in civil engineering, JGS focused on three subjects:

- prediction for land and groundwater contamination by radionuclide from now until decommissioning
- development of boring technology and excavation methods such as tunnelling that can be used for excavation of the fuel debris remaining in the nuclear reactors
- planning and development for the disposal of large amounts of radioactive waste from the accident and decommissioning of the damaged nuclear power plant.



Graduate thesis program in Waseda Univ. (Yoshikawa et al., 2015)



### 4. Education initiatives

- Decommissioning geotechnical engineering -

Decommissioning geotechnical engineering will be developed and introduced to education through researches.

Civil/geotechnical engineering	Geotechnical application			
	contamination	demolishment	waste management	
Ex: System and technical seeds	impervious soil	use of local ground	ground management	
Mechanics	excavation for substructure	Nuclear structure by cover soil	deception disposal	
Environmental	Use permeable soil	High strength soil	Capillary barrier	
Material	Planning and total management to anti-radiation	Construction using hybrid construction	segment operation	
Operation				

### 5. Concluding remarks

Soil is composed by solid (soil particle), liquid (water) and gas (air) phases. The ratio of the three phases and wet / dry density of soil can be artificially controlled. Therefore, soil is a useful natural material which has a shielding potential against radiation.

To solve the issue caused by the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, geotechnical engineering must be developed continuously. The advanced geotechnical engineering for decommissioning will be established with both fundamental researches and in-situ education.

To produce technical seeds and human resources, big and consistent efforts are needed in the coming years or decades. JGS aims at cooperation with various academic fields, and networking to next generations, which are key toward the total solution of the severe accident such as a nuclear power plant in Fukushima.

図 3.1-13 IAEA マドリッド会議における製作ポスター

### 2) 福島第一原子力発電所視察

プログラムを推進するにあたっての人材育成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メンバー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。

当日は 1F 未来館で東京電力側視察担当者から現況について説明を受けた後、専用バスで 1F 構内へ向かった。構内では線量低減のためのフェーシング（表土剥ぎ・モルタル吹付・アスファルト舗装）が施されると共に大型休憩所などが整備され、作業環境の改善・向上が図られている様子が見られた。また、覆いが外され大型ガレキが撤去された 3 号機原子炉建屋、汚染水貯蔵タンクの更新、サブドレン・地下水ドレン並びに凍土壁などの汚染水対策状況、北側の瓦礫・伐採木等の保管エリアの整備状況など、廃炉に向けた取組みが少しずつではあるが着実に進んでいる状況を確認できた。

- 日時 : 2016 年 11 月 30 日（木）午後
- 場所 : 1F 未来館 ～ 福島第一原子力発電所構内
- 参加人数 : 28 名（うち、学生 5 名）



説明風景



原子炉建屋（3号機）の状況



凍土壁凍結状況確認箇所の状況

図 3.1-14 福島第一原子力発電所視察状況



### 3.1.2 廃炉地盤工学教育システムの構築

廃炉地盤工学委員会で検討された内容に立脚し、授業項目として「廃炉地盤工学」を独立した学問単位として扱う場合のシラバス案を試行的に作成した。

表 3.1-2 に「廃炉地盤工学」シラバスの基本構想を整理する。

表 3.1-2 「廃炉地盤工学」シラバスの基本構想

	項目	内容
1	廃炉地盤工学とは	廃炉地盤工学の目的・意義等
2	廃炉のための地盤力学（その1）	地盤力学の基礎設計と補強・対策の再確認
3	廃炉のための地盤力学（その2）	限られた材料定数情報の下での地盤力学に基づく基礎設計
4	廃炉のための地盤力学（その3）	限られた材料定数情報の下での地盤力学に基づく基礎補強・対策
5	廃炉のための地盤環境学（その1）	地下水の移流・物質拡散の基本的考え方の再確認
6	廃炉のための地盤環境学（その2）	放射性物質汚染評価のための流速の考え方と高精度評価法
7	廃炉のための地盤環境学（その3）	放射性物質汚染評価のための最新測定技術と利用方針
8	廃炉のための地盤材料学（その1）	廃炉のための材料開発における基本的事項と要求性能 ・基本的事項：状態量の再確認、放射線の基本、物質移行 ・要求性能：遮蔽、閉じ込め、移行抑制
9	廃炉のための地盤材料学（その2）	材料の放射線遮蔽特性及び遮水特性とそれぞれの評価方法
10	廃炉のための地盤材料学（その3）	放射線遮蔽特性に基づく材料仕様(密度や層厚)設計、 遮水特性に基づく材料仕様設計
11	廃炉のための地盤施工学（その1）	地盤施工学の考え方と基本事項と基本的な技術情報
12	廃炉のための地盤施工学（その2）	地盤施工学のための技術マップの構成と読み解き方
13	廃炉のための地盤施工学（その3）	技術マップの観点からの NDF 戦略プランの評価
14	廃炉のための地盤施工学	廃炉のための地盤施工学の実践的な展開事例
15	廃炉地盤工学演習	地盤力学、地盤環境学、地盤材料学及び地盤施工学を 総括した 1F 廃止措置シナリオの各自構想

本年度は、表 3.1-3 に示すような取組みを行った。早稲田大学大学院では、試行的に廃炉に関する事項を取り入れた講義を開催し（詳細は 3.2.2 を参照のこと）、千葉工業大学では、現場における調査や試験、室内実験を通じて、地盤環境学に主眼を置いた模擬授業を実施した。また、地盤工学会では電力会社や建設会社の技術者等を含む学会会員を対象に、上記のカリキュラムを念頭に置いた「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』」講演会を開催し、91名の参加者を集めた（詳細は 3.1.3 を参照のこと）。なお、講演会では、廃炉地盤工学委員会のメンバーである八戸工業大学の熊谷教授より、これらの講義内容を参考に同大学でも廃炉地盤工学の講義を行いたい旨、意見があった。

表 3.1-3 廃炉地盤工学教育システムにおける取組み

	講演会名称	内容	対象	参加人数
1	第 51 回 地盤工学研究発表会 特別セッション	・「廃炉地盤工学」が包括する 技術内容や教育方針・方法等 について議論	・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・地盤環境学に焦点 を当てた講義を試行	・学生 (院生)	7 名
3	現場での試験・調査及び室内試験を 通じた模擬授業 (千葉工業大学)	・地盤環境学に主眼を置いた 模擬授業を実施	・学生 (学部生)	10 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』」 講演会	・「廃炉地盤工学」の基本概念 や原子力分野(放射線遮蔽) の基礎知識について講演	・地盤工学関連技術者 ・学生	91 名

来年度は、この基本構想を基に、実施できる授業内容について検討を行った上で、シラバスの改良を図ると共に、上記カリキュラム案を「平成 29 年度 地盤工学研究発表会 (2017 年 7 月, 名古屋国際会議場開催)」特別セッションにおいて、広く全国の地盤工学会会員に周知する予定である。また、当セッションでは、本カリキュラムと後述の「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』」講演会での資料に基づき、廃炉地盤工学委員会メンバーの大学教員はもちろん地盤工学関連の講義を行っている大学でも、関連講義を展開してもらうよう、併せて案内する予定である。

### 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

地盤工学分野や原子力分野の技術者及び一般社会における「廃炉地盤工学」の認知度を向上させるため、講演会や地盤工学年次大会における特別セッション等を開催したほか、土木学会など関連学会の大会にも参加し、当該プロジェクトの活動内容の発信や関連情報の収集を行った。なお、収集した情報は廃炉地盤工学委員会へフィードバックすることにより、委員会での情報共有を進めると共に、検討の深化を図った。

以下に認知度向上に向けた活動について詳述する。

#### (1) 廃炉地盤工学の認知度向上に向けた活動

##### 1) 第51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28年度の地盤工学研究発表会（岡山大学）において、標記の特別セッションを開催した。本セッションでは、今後の廃炉過程において地盤工学の観点から貢献しうる人材の育成と原子力技術者との協働に主眼を置いて、「廃炉地盤工学」が包括する技術内容や教育方針・方法等について議論がなされた。会場には50名以上の参加者があり、バックエンド以外の研究者や実務者も半数ほど見受けられた。

また、フリーディスカッションでは、「廃炉」という言葉の一般的な捉えられ方や事故時廃炉からの放射性廃棄物への現基準（通常廃炉）の適用性、「廃炉地盤工学」の認知等に関して意見交換がなされた。

■日時 : 2016年9月14日（水）10:40～12:10

■場所 : 岡山大一般教育棟E棟1階E11



図 3.1-15 特別セッション風景

##### 2) 「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』」講演会

活動の一環として、原子力及び地盤工学の双方に精通した人材育成の基盤とすることを目的とした新しい学問体系である「廃炉地盤工学」の構築を念頭に置いた講演会を下記日程で開催し、91名の参加者を集めた。1回目となる本講演会では「廃炉地盤工学」の基本概念を紹介すると共に、これを構成する基本的な学問單元ごとに廃炉と地盤工学技術の関係理解が深まるような演題とした。

なお、講演会では、参加者の八戸工業大学・熊谷教授より、同大学でも本講演会資料を参考に講義を行いたい旨の発言があり、了承した。

■日時 : 2016年12月22日(木) 14:00~17:30

■場所 : 地盤工学会(JGS会館) 地下大会議室

■講演会における演題と講演者一覧

- ① 廃炉地盤工学設立の目的と概要 \_\_\_\_ 後藤 茂 (早稲田大学)
- ② 放射線遮蔽の基礎知識 \_\_\_\_\_ 吉村 貢 (ソイルアンドロックエンジニアリング)
- ③ 地盤環境学 \_\_\_\_\_ 鈴木 誠 (千葉工業大学)
- ④ 地盤材料学(デブリ取出し関連) \_\_ 小峯 秀雄 (早稲田大学)
- ⑤ 地盤材料学(処理・処分、デコミッションング関連) 渡邊 保貴 (電力中央研究所)
- ⑥ 地盤施工学 \_\_\_\_\_ 後藤 茂 (早稲田大学)



図 3.1-16 『廃炉地盤工学』講演会風景

## (2) ホームページの構築

地盤工学会のホームページとリンクする形で、新たに当該プログラムのホームページを開設し、学会員及び一般社会に対して、当プロジェクトの概要や成果についての情報を発信した。

図 3.1-17 にホームページのコンテンツ構成を、次頁以降に構築したホームページを示す。

### <トピックス一覧: TOP ページ>

#### 1. はじめに(廃炉地盤工学の紹介)

#### 2. 主な研究・活動報告

- ・廃炉PJ 成果報告書
- ・廃炉地盤工学委員会
- ・シンポジウム・1F 見学・セッション等の開催・参加報告

#### 3. 研究開発成果の紹介

- ・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)
- ・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)
- ・廃炉地盤工学を通じた人材育成プログラム
- ・廃炉プロセス技術シナリオ
- ・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

#### 4. その他

- ・関連用語集
- ・福島第一原子力発電所事故の経緯概略
- ・リンク

図 3.1-17 ホームページのコンテンツ構成一覧

なお、構築したホームページの URL を以下に示す。

<https://www.jiban.or.jp/haio/>

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



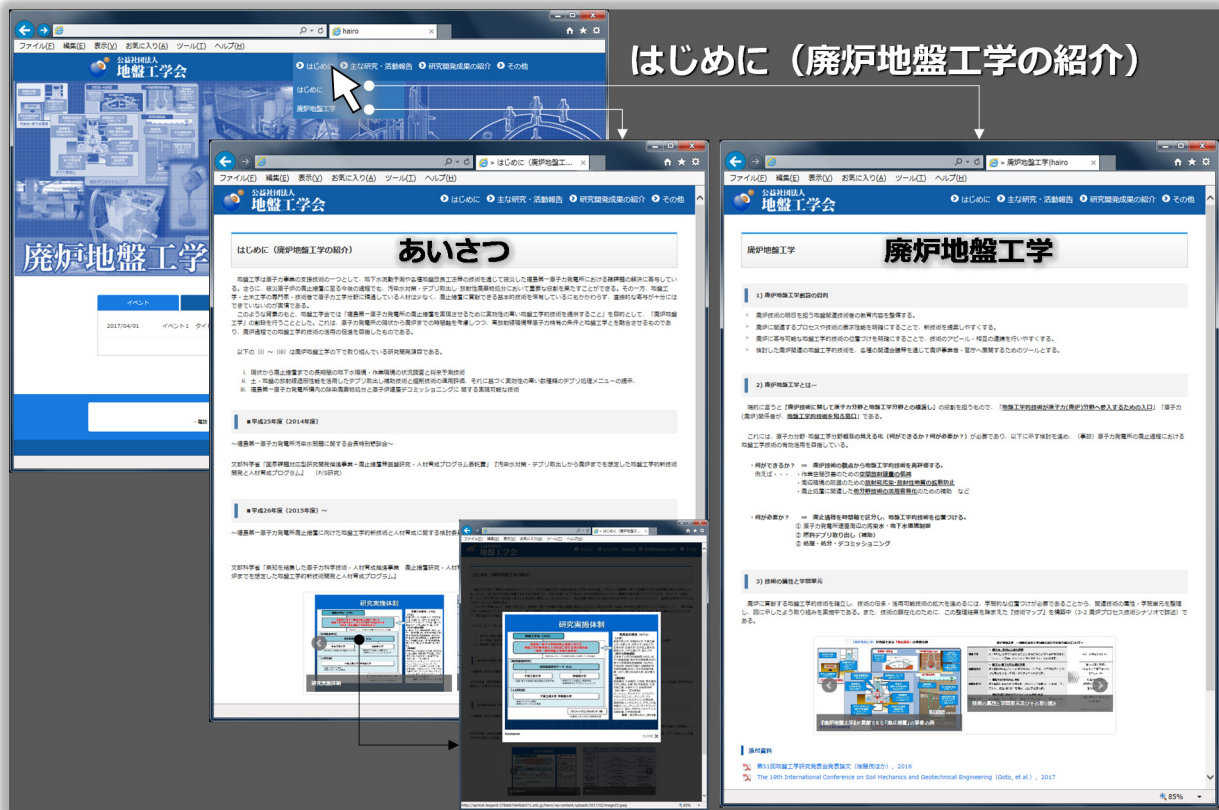


図 3.1-18 廃炉地盤工学 HP (1/4)



図 3.1-19 廃炉地盤工学 HP (2/4)



図 3.1-20 廃炉地盤工学 HP (3/4)



図 3.1-21 廃炉地盤工学 HP (4/4)

### 3.2 超重泥水・各種覆土の放射線遮蔽性能評価（再委託先：早稲田大学）

早稲田大学では、個別基盤研究テーマ「(ii)土・地盤の放射線遮蔽性能を活用したデブリ取出し補助技術と掘削技術の適用評価、それに基づく実効性の高い数種類のデブリ処理メニューの提示」、及び「(iii)福島第一原子力発電所構内の除染廃棄物処分と原子炉建屋デコミッションングに関する実現可能な技術の開発」に関して、デブリ取出し補助のためのガンマ線と中性子線両方の遮蔽性能を有する超重泥水や、構内除染廃棄物の一時仮置き施設のためのガンマ線遮蔽性能と遮水性能の両方を保有する覆土材の仕様設計に資するため、各材料仕様に応じた放射線遮蔽データ取得を行い、データベースの作成を進めた。また、超重泥水の充填施工性評価実験装置を製作し、これを用いて超重泥水の充填施工性を評価した。また、大学における卒業研究・修士研究を通じて上記成果を得ることにより人材育成を行うと共に、平成28年度は大学院の地盤工学特論Bは福島第一原子力発電所の廃止措置を課題テーマとして開講した。

具体的な内容は、以下に述べる。

#### 3.2.1 超重泥水と覆土材のガンマ線及び中性子線の遮蔽性に関するデータベース、並びに充填施工性に関する実験

本項では、ガンマ線と中性子線両方の遮蔽性能を有する超重泥水についてデブリ取出し補助のため、そしてガンマ線遮蔽性能と遮水性能の両方を保有する覆土材については構内除染廃棄物の一時仮置き施設のための仕様設計に資するため、それぞれ各材料仕様に応じた放射線遮蔽データ取得を行い、整理したデータベースについて論じる。

また、超重泥水の放射線遮蔽実験を行うに際して、本材料の施工性を確認することを目的とした充填施工性評価実験装置を製作し、これを用いて超重泥水の充填施工性を評価したので、その結果についても論じる。

##### (1) 超重泥水の充填施工性実験装置の設計・製作

平成27年度の超重泥水の放射性遮蔽実験の際の知見を踏まえ、図3.2-1に示す超重泥水の充填性を評価する実験装置を設計した。放射線遮蔽実験用の4連式容器を保有し、超重泥水の作泥用タンクと送泥用ロータリーポンプを連結した装置であり、4連式容器を設置する架台は、油圧ジャッキにより、放射線遮蔽実験に必要な床面からの距離を確保できるように設計した。

図3.2-1に基づき製作した装置の外観を図3.2-2に示す。

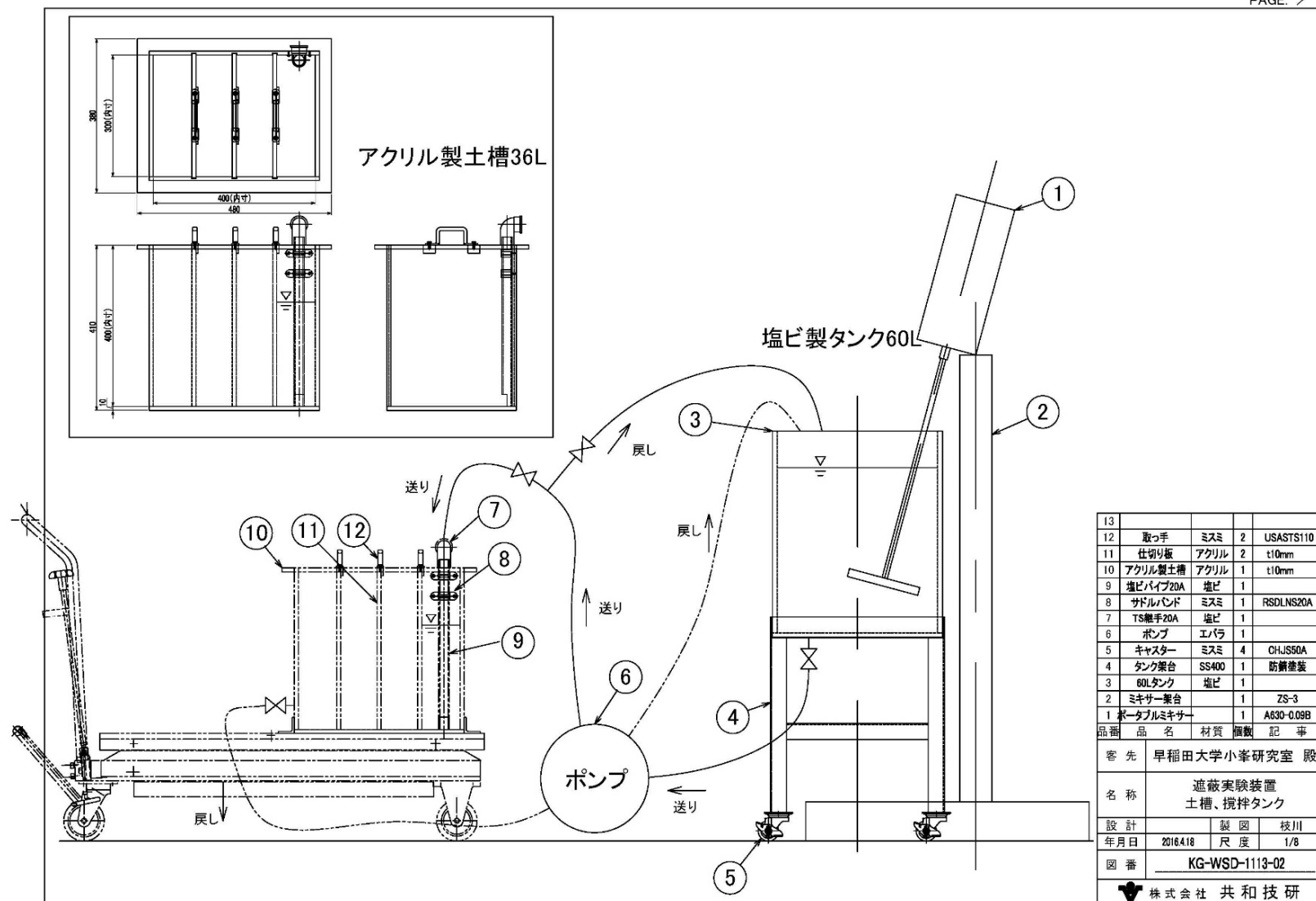


図 3. 2-1 超重泥水の充填性実験装置の設計図





図 3.2-2 超重泥水の充填性実験装置の全体写真

この装置を使って、超重泥水の作泥と送泥を一連の作業とした場合の施工可能性について確認実験を行った。実験の様子の一例を図 3.2-3 に示す。本図に示したとおり、超重泥水の作泥と送泥を一連の作業で実施できることを確認した。

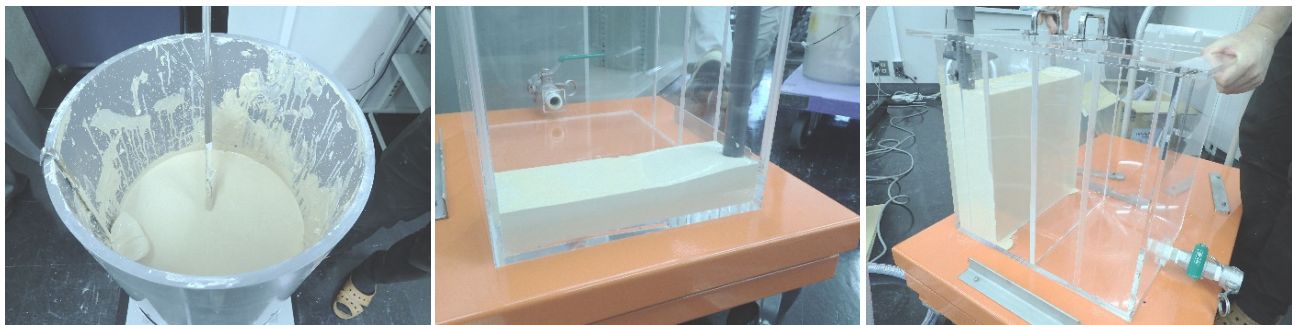


図 3.2-3 超重泥水の充填性実験の様子

上記の確認実験では、次の 3 種類の超重泥水に対して送泥確認を行った。すなわち、①比重 2.5、B 型粘度計による回転速度 60 (rpm) 時の粘度=3.24~3.81 (Pas)、②比重 1.8、B 型粘度計による回転速度 60 (rpm) 時の粘度=2.33~3.79 (Pas)、③比重 1.1、B 型粘度計による回転速度 60 (rpm) 時の粘度=5.12~7.57 (Pas) の超重泥水に対して実施したところ、今回のすべてのケースで、図 3.2-3 に示した容器の隅角部への充填と良好な送泥が確認できた。

このことから上記①~③に示した比重及び粘度を有する超重泥水であれば、比較的良好的な充填施工性があるものと考えられる。その一方、③に示すように比較的粘度の値が高い場合には送泥用のロータリーポンプにかなりの負荷がかかることが認められた。特にポンプ圧送の際における脈動の影響が考えられたことから、より高性能で無脈動のポンプであるモノポンプ使用の優位性なども併せて確認した。

なお、今年度確認したケースは限られた容器形状と超重泥水の配合条件及び送泥時間により確認したものである。従って、送泥時間の延長により、超重泥水の粘度の変化とそれに起因する充填性の変化も考えられることから、引き続き多様な条件を設定した上で、充填施工性について検討する必要がある。

(2) 超重泥水及び覆土材の放射線遮蔽特性データベース

1) 放射線遮蔽特性データベースに使用した各種土質材料及び超重泥水の仕様と

放射線遮蔽実験の概要

平成 28 年度に使用した超重泥水は、Na 型ベントナイト（製品名：スーパークレイ／株式会社ホージュン製）懸濁液に、加重材であるバライト（製品名：テルバー／テルナイト株式会社製）及び粘性の調整と安定を保つための分散剤である二リン酸ナトリウムを加えた泥水である。超重泥水は流動性を持つ範囲で比重 1.1 から比重 2.5 まで調整することが可能である。

本研究では、比重 1.1、1.8 及び 2.5 の 3 種類の超重泥水に加えて、中性子捕獲に有効である五ホウ酸ナトリウムを添加した 3 種類の計 6 試料を用いた。表 3.2-1 に本研究で使用した超重泥水の組成配合を示す。五ホウ酸ナトリウムの添加量は、超重泥水中のホウ素水が福島第一原子力発電所における  $^{235}\text{U}$  濃縮度 5wt% より推定された必要ホウ素濃度 8000 ppm となるように算出した<sup>1)</sup>。

一方、平成 28 年度に使用した覆土用材料は、現地での使用が予想される材料を中心として、粘性土であるクレーサンド及び 800℃で焼成処理された焼成関東ローム、シルト質土である昭和 DL クレー、砂質土である東北珪砂 5 号を用いた。焼成関東ローム及び東北珪砂 5 号は、含水状態の差異による放射線遮蔽性能の相違を調査した。

表 3.2-2 に覆土用材料の土質分類、土粒子の密度、塑性指数を、図 3.2-4 には使用した覆土用材料の粒径過積曲線を示す。

表 3.2-1 超重泥水の組成配合

比重 (g/cm <sup>3</sup> )	水道水 (g)	バライト (g)	Na 型 ベントナイト (g)	五ホウ酸 ナトリウム (g)	二リン酸 ナトリウム (g)
2.5	100	400	7	0.00	0.2
2.5	100	400	7	4.37	0.2
1.8	100	140	10	0.00	0.2
1.8	100	140	10	4.37	0.2
1.1	100	10	12	0.00	0.2
1.1	100	10	12	4.37	0.2

表 3.2-2 覆土用材料の基本物性

	土質分類	土粒子密度 $\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	塑性指数
東北珪砂 5 号	砂質土	2.62	NP
DL クレー	シルト質土	2.62	NP
クレーサンド	粘性土	2.60	20.2
焼成関東ローム A	粘性土	2.90	NP
焼成関東ローム B	粘性土	3.00	1.47

NP：液性限界を実験的に取得できないことにより、塑性指数が算出できないことを意味する。

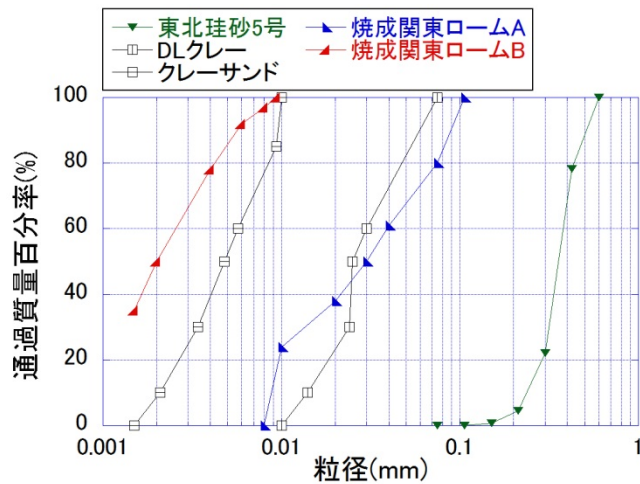


図 3.2-4 覆土用土質材料の粒径過積曲線

図 3.2-5 は、平成 28 年度に実施した放射線遮蔽実験の様子である。本実験では、土質材料を充填したアクリル容器（内寸：縦 300mm、横 300mm、奥行 100mm）を 4 個用意し、図に示すように配列し、遮蔽体厚さ 10cm、20cm、30cm 及び 40cm における透過線量を測定した。なお、地表面による放射線反射作用の影響を受けないように土台（ベース）高さは底面から約 1m に設置した。各線源はアクリル容器の放射線透過面中央に接するように設置し、線源位置から 500mm の地点に固定した各検出器により透過線量の測定を行った。表 3.2-3 に放射線遮蔽実験の条件を示す。また、検出放射線について表 3.2-4 及び表 3.2-5 に本実験で用いた線源と検出器を示す。

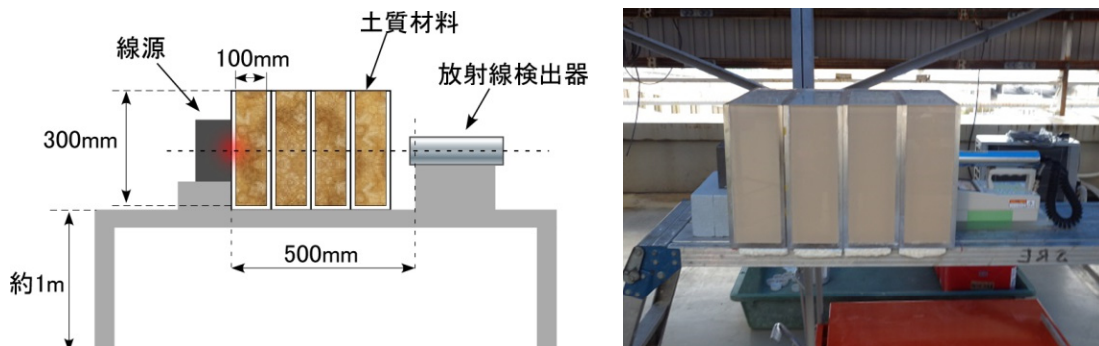


図 3.2-5 放射線遮蔽実験の概略図（ガンマ線）

表 3.2-3 放射線遮蔽実験の条件

装置 配置	線源と検出器の間隔	500 mm
	線源と容器の間隔	0
	底面からの高さ	1000 mm
容器	板厚	10 mm
	透過面	$9.0 \times 10^4 \text{ mm}^2$ (300 mm × 300 mm)
	遮蔽体（試料）厚さ	100 mm/容器 1 個
	アクリル密度	1.19 g/cm <sup>3</sup>
	容量	9 L
	個数	1～4 個

表 3.2-4 使用線源

対象放射線	線源	放射能 (MBq)	線量 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	エネルギー (MeV)
ガンマ線	$^{137}\text{Cs}$	3.68	1.13	0.662
中性子線	$^{252}\text{Cf}$	1.067	5.18	1.406

※線量は線源と検出器の距離が 500 mm のときの値

表 3.2-5 使用検出器

検出項目	サーベイメータ	検出器	測定範囲 (単位)
ガンマ線	TCS-172B (アロカ製)	NaI シンチレーション	B.G.*~30 ( $\mu\text{Sv/h}$ )
全中性子線	TPS-451C (アロカ製)	$^3\text{He}$ 比例計数管	0.01~10000 ( $\mu\text{Sv/h}$ )
高速~速中性子線	ANDES (SRE 製)	$^3\text{He}$ 比例計数管	0~655310 (cpm)
熱中性子	WARP (SRE 製)	$^3\text{He}$ 比例計数管	0~655310 (cpm)

※B.G. : バックグラウンド値

## 2) 土の状態量による各種土質材料の放射線遮蔽性能

覆土材に用いられる各種土質材料の放射線遮蔽性能は、土質材料の含水状態・保水状態に依存することが予想される。ここでは、土質材料の含水状態・保水状態について、それぞれ測定される含水比、湿潤密度、乾燥密度、及びこれらから算出される体積含水率など「土の状態量」との関係で整理した。また、ガンマ線及び中性子線の遮蔽にどの物質成分が寄与するかを明らかにすると共に、その寄与度合いを適切に評価する状態量について考察を行った。

ガンマ線のエネルギーは、物質を透過する際に生じる軌道電子との衝突によって減衰する。従って、ガンマ線の線量低減割合は、透過物質中の電子の存在度に依存すると考えられる。同一厚さの物質において、電子の存在度に相当する状態量は試料全体の平均密度であり、土質材料における湿潤密度に当たる。図 3.2-6 に土中のガンマ線の挙動を示す<sup>2)</sup>。

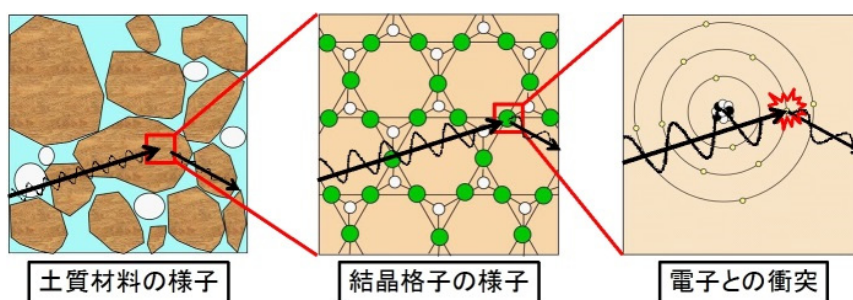


図 3.2-6 土質材料中のガンマ線の挙動<sup>2)</sup>

遮蔽体厚さ 10cm におけるガンマ線低減率と湿潤密度の関係を図 3.2-7 に示す。この図から、厚さ 10cm の土質材料の湿潤密度に対してガンマ線低減率が正比例的に増加することが確認できる。本実験で用いた土質材料はそれぞれ異なる元素で構成されるが、低減率の誤差は微小であることが確認できる。従って、土質材料のガンマ線遮蔽性能は、土の組成によらず湿潤密度により評価できることが明らかとなった。



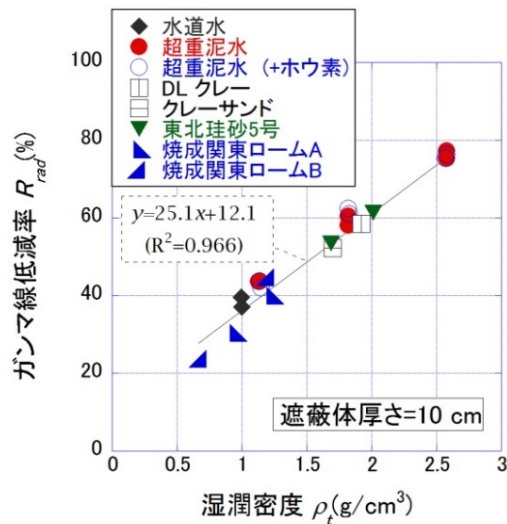


図 3.2-7 ガンマ線低減率と湿潤密度の関係

一方、熱的なエネルギーレベルで中性子線の実体は粒子であり、弾性体としての古典力学に従うため、運動量保存の法則より中性子線の遮蔽は中性子と質量が概ね等しい水素原子、つまり陽子との弾性衝突が最も効果的であると言える<sup>3)</sup>。

図 3.2-8 に土中の中性子線の挙動を示す<sup>2)</sup>。また、図 3.2-9 は水素原子の存在度を水分子の体積割合として捉えて、遮蔽体厚さ 10cm における各中性子線低減率を体積含水率で整理した結果である。

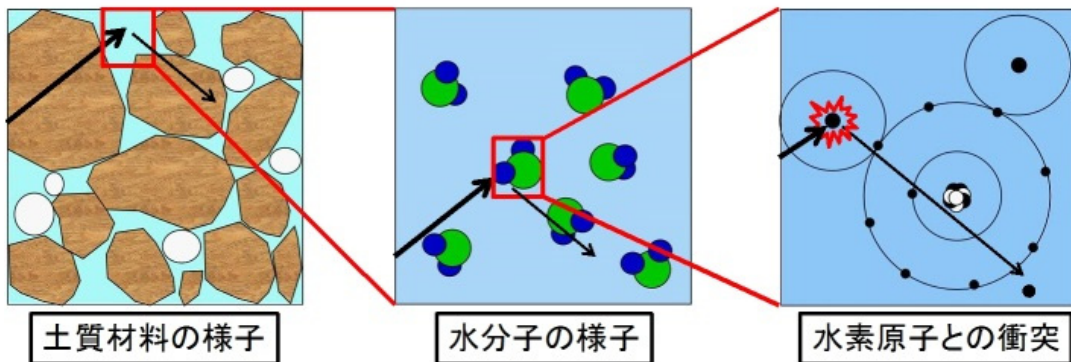


図 3.2-8 土質材料中の中性子線の挙動<sup>2)</sup>

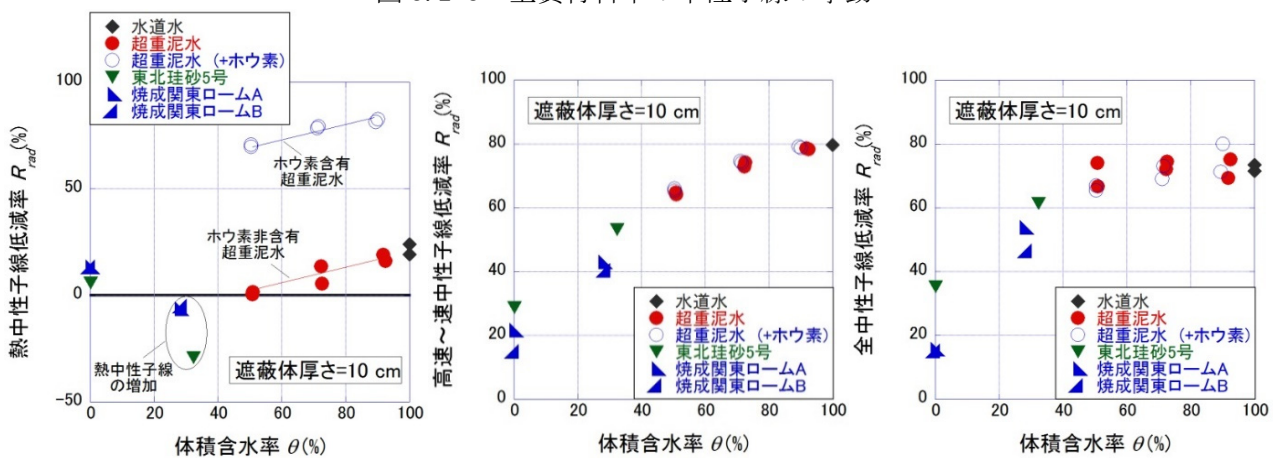


図 3.2-9 熱中性子線低減率、高速～速中性子線低減率、及び全中性子線低減率と体積含水率の関係

図 3.2-9 左は熱中性子線低減率と体積含水率の関係である。超重泥水と覆土用材料（東北珪砂 5 号、焼成関東ローム）は異なる低減傾向を示した。超重泥水の熱中性子線低減率は、体積含水率に伴い増加した。また、熱中性子吸収断面積が大きいホウ素を含有する超重泥水は、非含有の試料に比べて 70%程度大きい低減率を示した。一方、東北珪砂 5 号及び焼成関東ロームにおいて、体積含水率 30%付近の試料は負の熱中性子線低減率を示した。これは、線源を設置しない自然環境下よりも熱中性子線の線量が増加したことを意味する。なお、熱中性子線増加の原因としては、高速で運動する中性子が土質材料中の原子核との衝突により減速することで熱中性子に転じたことが考えられる。今後、上記の影響因子を特定することで、中性子線遮蔽における材料選定の一助になると予想できる。

また、熱中性子線低減率と体積含水率の関係からは、ホウ素などの熱中性子捕獲を起こす物質を添加していない土質材料では、遮蔽体厚さ 10cm で体積含水率が 50%未満である場合、熱中性子線遮蔽性性能を殆ど持たないことが明らかとなった。これは、周囲の熱運動と平衡状態にある熱中性子は、原子核との衝突による運動方向の変化と比較して、他原子による捕獲が優位となり、中性子捕獲能力が小さい物質は、厚さが十分でない場合、熱中性子に対する遮蔽性能を殆ど有さないためである。

図 3.2-9 中央は、高速～速中性子線低減率と体積含水率の関係である。この図から、土質材料の高速～速中性子線低減率は、概ね体積含水率に依存することが分かる。しかし、同等の体積含水率を有する土質材料であっても、東北珪砂及び関東ロームの高速～速中性子線低減率に差異が確認できる。この原因の一つとして、覆土用土質材料の不均一性が挙げられる。また、土質系材料は体積含水率 0%において 10%～30%程度の低減率を有することから、光速に近い速度で運動する中性子は、水素原子以外の原子核との衝突においてもある程度のエネルギー減衰を引き起こすことが分かる。このとき、中性子は 2.2km/s 以下に減速しており、その速度変化は運動量保存則に従って、中性子粒子と土粒子を構成する原子との質量差に影響されると考えられる。

図 3.2-9 右は、全中性子線低減率と体積含水率の関係である。図 3.2-9 中央と同様に、材料の体積含水率の増加に伴い中性子線低減効果が大きくなる傾向が確認できる。また、全中性子線の低減率は全体的な変動幅が大きくなっており、その原因としては図 3.2-9 左及び図 3.2-9 中央において、熱中性子及び高速～速中性子線として検出されない中性子の検出や、検出範囲外への散乱など、複数の要因が重なることが考えられる。中性子線の照射範囲と検出範囲の相違による影響については、遮蔽体中の中性子の反射や散乱の回数に関係するため、線源と検出器の距離が近づくにつれてばらつきは減少すると考えられる。齋藤ら(2014)による超重泥水の放射線遮蔽実験では、線源と検出器の距離を本研究よりも短い 150 mm に設定しており、遮蔽体厚さ 10 cm において全中性子線低減率が体積含水率に正比例する結果が得られている<sup>4), 5)</sup>。

以上から、各速度における中性子線低減率は、覆土用材料や泥水などの材料形態によらず概ね体積含水率に依存する傾向があることが分かった。しかし、体積含水率が小さい遮蔽材料においては、他の要因による影響が顕著であると考えられるため、土の性質が中性子線の低減に与える影響を明確にする必要がある。

### 3) 超重泥水の厚さの変化に伴う放射線低減率

超重泥水を用いて測定した遮蔽体厚さの変化に伴う放射線低減率について論じる。図 3.2-10 はガンマ線低減率と超重泥水の厚さの関係を示したものである。

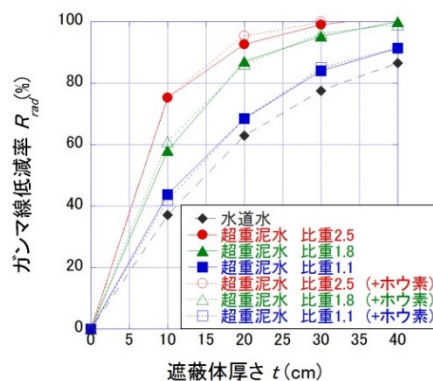


図 3.2-10 ガンマ線低減率と超重泥水の厚さの関係

図 3.2-10 において、厚さに伴うガンマ線低減率の大小関係は、図 3.2-7 に示したガンマ線低減率と湿潤密度の関係に従った。遮蔽体すなわち超重泥水の厚さの増加に伴い、湿潤密度による差異が徐々に小さくなることから、透過距離の増加によるガンマ線の低減が顕著であることが示された。また、厚さが 40cm のとき、超重泥水—比重 2.5 及び超重泥水—比重 1.8 による遮蔽が 100%となる一方で、超重泥水—比重 1.1 及び水道水による遮蔽では低減率 90% 未満を示した。本研究によって、いずれの比重の超重泥水も、水道水より優れたガンマ線遮蔽性能を有することが確認できた。

図 3.2-11 は各中性子線低減率と超重泥水の厚さの関係を整理した結果である。

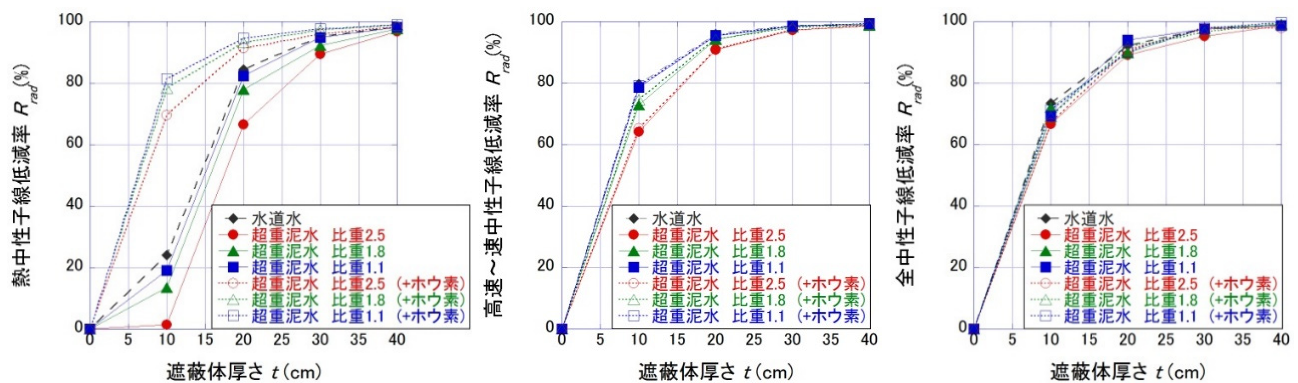


図 3.2-11 熱中性子線低減率、高速～速中性子線低減率、及び中性子線低減率と超重泥水の厚さの関係

図 3.2-11 左から、ホウ素含有と非含有の超重泥水において、厚さの変化に伴い異なる低減挙動が確認された。ホウ素による熱中性子線の遮蔽は、特に遮蔽体厚さが小さいときに有効であり、本研究で用いた  $^{252}\text{Cf}$  から放出される熱中性子線については、厚さ 10cm において確認できた低減率の差異が厚さの増加に伴って徐々に小さくなった。熱中性子線は 2.2km/s 以下にならないため、減速による低減が生じない。このような粒子線の遮蔽には、粒子の捕獲が有効であるが、捕獲が生じない場合でも原子核との衝突により運動方向が変化するため、遮蔽体の厚さ増加と共に検出器に到達する個数が減少したと考えられる。従って、点線源の

直線上においては、距離を十分に設けることで、ホウ素による中性子の捕獲を行わずとも遮蔽が可能であることが示された。また、水道水と比較すると、ホウ素含有の超重泥水の熱中性子線低減率が大きく、ホウ素非含有の超重泥水の熱中性子線低減率が小さいことが明らかとなった。

図 3.2-11 中央から、遮蔽体厚さ 10cm において体積含水率による高速～速中性子低減率の差が確認できる。しかし、遮蔽体厚さの増加による衝突確率と運動方向変化の関係から、遮蔽体厚さの増加と共に遮蔽性能の差異が減少する。また、高速～速中性子線の低減にホウ素含有の影響が殆ど存在しないことが認められる。超重泥水の高速～速中性子線低減率は、いずれも水道水と同等もしくはそれ以下であった。

図 3.2-11 右では、体積含水率の相違による全中性子線低減率の差は微小であり、超重泥水は概ね水道水と同等の性能を示した。

以上から、放射線エネルギーの減衰に関して、物質の湿潤密度及び体積含水率と共に、放射線の透過距離が重要な要素であることが示された。また、東北珪砂 5 号を用いた同実験においても、厚さの変化に伴う低減率の挙動は同様であることが確認された。

#### 4) 平成 28 年度の放射線遮蔽特性データベースの活用方針と次年度の展開

3) までに述べた内容に基づけば、放射線遮蔽のメカニズムと土質系材料で構築される土構造物の施工管理に用いる状態量が関連付けられる。従って、今回取得した土質系材料の放射線遮蔽実験の結果から要求される放射線遮蔽性能を基に、図 3.2-12 に示す福島第一原子力発電所構内で構築が進められている覆土式一時保管施設について、放射線遮蔽用覆土の必要層厚や締固め密度の設計、更には原子炉建屋内に超重泥水を充填することを想定した場合に要求される配合設計等への活用が考えられる。

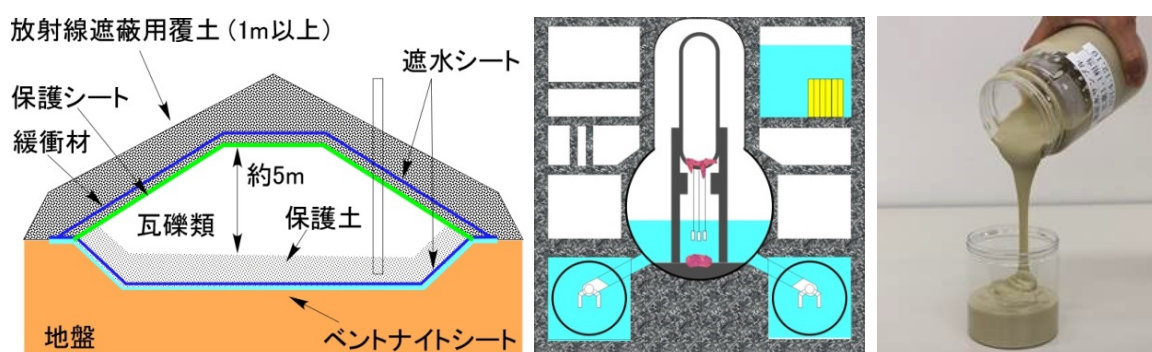


図 3.2-12 覆土式一時保管施設における放射線遮蔽用覆土<sup>6)</sup>及び原子炉建屋内<sup>7)</sup>での超重泥水の充填による遮蔽方策案

次年度は、平成 28 年度に取得した各種放射線遮蔽特性データの精査と拡充を進めると共に、上記の観点からの設計フローの構築を行う。更に各材料仕様に応じた施工性を評価するため、液圧測定のできるタクト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定量評価すると共に、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。



### 3.2.2 早稲田大学大学院「地盤工学特論B」における福島第一原子力発電所の廃止措置に関する人材育成

#### (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した学生を対象に、地盤工学をより深く理解し、視野を広げることにより、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、講義を行うこととなっている。

2016年度は表3.2-6に示すように、建物の基礎に関わる設計や研究開発、土中の固液反応や廃棄物の利用と処分、擁壁やトンネルなどの災害事例を通じた対策について、7名の大学院受講生に対し講義を行った。また、本年度は表3.1-2に示した「廃炉地盤工学」シラバスの基本構想のうち、特に地盤力学と地盤環境学に焦点を当てた講義内容とした。

受講生には講義の内容や観点を踏まえ、一つのテーマの下に演習に取り組んでもらい、その成果（レポート、口頭発表、討論）から成績評価を行うこととし、本年度は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を課題とした。なお、受講生には初回講義において課題の内容と趣旨を説明しており、講義の途中、廃炉に関連すると思われる内容については、解説を補足するようにした。

表 3.2-6 地盤工学特論B：2016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
	超長期間問題への挑戦	放射性廃棄物処分
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

#### (2) 学生による発表・レポートの概要

最終課題に対する受講生の口頭発表とレポートを通じて、学生が自ら福島第一原子力発電所の現状と向き合って設定した課題と解決方が示された（表3.2-7参照）。

挙げられた課題や解決方は既に国や事業者等により示されているものも含まれるが、課題の抽出や解決方は論理的に根拠をもって説明されたものであり、そこには少なからず講義の中で主張した地盤力学・地盤環境・労働安全の観点が含まれていた。地盤工学特論Bの当初の狙いでもあった視野を広げて地盤工学を活用する点では、例えば、輸送、放射性核種、放射線防護といった項目に対して、論文等をレビューし、解決方のロジックを組んでいた。また、一つの課題に対して一つの解決策を挙げることに留まらず、その策が上手くいかなかった場合を想定した多

重の解決策を示した学生も複数いた点については、地盤内の挙動や問題を取り巻く事象を幅広く捉えるセンスが養われつつあるものと感じられた。

表 3.2-7 地盤工学特論 B：2016 年度最終課題の概略（順不同）

廃炉に関する課題	課題に対する解決策
・切削や取出しを行う機械を支持するための構造物、空間的余裕	・デブリ取出し中に、放射性物質を直接大気中に拡散しないための対策として地中に取出し作業空間を設けること
・高温になることで燃料デブリが臨界に達する可能性	・切削時に摩擦熱が発生するような直接的な接触は避けるべき、燃料デブリが分布する周辺の構造物ごと切り出すこと
・燃料デブリ取出し時のリスクとして「放射線の漏れ」「粉塵の飛散」、人体への影響	・原子炉格納容器を可能な限り止水し水位を上昇させ、水中で作業を実施すること ・燃料デブリ取出し作業による状態変化や地震の影響による再臨界の発生可能性への対応の検討
・燃料デブリ取出し後の屋外移送時の積載能力、海上輸送能力、直接基礎に固定されていない構造物特有の挙動 ・天候及び海上不良による船舶の転覆・沈没、衝突による亀裂、電源喪失等 ・輸送容器が密閉性を保てなくなった場合の乗組員の被曝のリスク	・建設の際に、1F 近辺の地盤状況を調査し、状況にあった地盤改良やレール基礎の選択、免震を実施すること ・超大型浮体式構造物の使用や船側及び船底を二重構造にすることによるリスク低減 ・海水と遮蔽性の船殻構造による放射線遮蔽性能の向上
・燃料デブリは、海水塩やステンレス鋼、コンクリート等を溶融しているため使用済み燃料には見られない特性を有していると想定されること	・燃料デブリをサンプリングし、性状を調査することで処置あるいはバリア材への影響を調査しておくこと
・保管している汚染水が漏れだしてしまった時の対策、地震への対策	・液状化の発生を防ぐための地盤改良、低透水性のもので覆う、流入抑制
・凍土により土が長期間低温に曝された時に土に生じる影響の不確実性	・凍土のでき方と強度の関係などは研究課題
・地中の配管の破損への対処	・交換できることを想定した設計施工の検討
・燃料取出し時の建屋の崩壊、大規模地震への対応	・軽量な部材の選定や開発、支持力確保のための基礎の根入れ
・廃棄物処分場の確保、建設	・鋭利な物質や重機荷重等による遮水層の破損、その検知のためのセンサー開発、電気探査の適用 ・遮水機能が低下した時のための外側の低い透水性の材料設置
・汚染水、トリチウムの拡散と人体影響	・トリチウム除去技術の開発 ・海洋放出の意思決定で必要となる科学的根拠 ・自然災害やヒューマンエラーへの事前対応
・建屋の破断部の止水、破断部の特定、周辺地盤から独立させること	・地盤の大幅な掘削をせずに破断部を塞ぎ、水のやりとりをなくす工法の開発 ・技術適用にあたって建屋に変位をきたす可能性（掘削や注入など地盤に干渉する作業の場合）、地下水の噴出（掘削時）、燃料デブリの露出 ・深層まで打ち込む矢板による止水
・デブリ露出の可能性、作業員の被ばく	・デブリの位置を特定する技術の更なる開発

### (3) 最終課題の発表を通じた所感と廃炉地盤工学創生に向けた要点

学生の口頭発表の後に質疑応答の時間を設け、学生同士あるいは講師と学生の間で議論を行った。それを通じて感じた点を以下に示す。ただし、本件は講義の最終課題であったことから、時間の制約等もあり、以下に示した点は成績評価には含めていない。ここでは、廃炉地盤工学を創生し、実務に活かしていく上で重要と思われる点を列記する。

- ・ 講義の課題に着手する前に情報を集めることは当然ながら実施されていたが、それと比べると、課題を進めていく過程で追加的に情報を集めることはあまり実施されていなかった。そのため、事前に集めた情報の整理・処理能力は素晴らしいと思える一方で、検討過程において、軌道修正や論理の補強に意識を配ることが実務では重要と思われた。
- ・ 福島第一原子力発電所の現状が不明であることに困難さを感じる学生は多かった。現状把握の為の調査技術を活用すること、あるいは、調査技術を開発することへのモチベーションは高いように感じられた。
- ・ 情報を整理する能力が非常に高い一方で、その中で自らの考えを表現し、具体化するには、講師・学生共に工夫が要るように思われた。
- ・ 事業や何かしらの行為に対するメリットを示すことで、デメリットを受け入れられる社会に近づくと言う学生の主張が見られた。その点において、ネガティブな側面を有する事業であっても、恩恵や利益を考え、それを知り得た人物が周囲に説明することは重要であると感じられた。
- ・ 制度の枠の中でできること、制度や制約を外した時にできること（技術的にローリスクでできる理想的なこと）をそれぞれ個別に考えることはできるようであったが、両者を同時に考えること、統合することはまだ難しいようであった。そのため、いずれかに偏らない思考や判断ができるようになることが必要と思われた。
- ・ 斬新なアイデアも示されていた。しかし、それが単発となってしまう、思考が完結する傾向も見られた。斬新であるが故に関連事例調査は難しくなるが、工法や事例を組み合わせるなどでアイデアを補強することが重要であると思われた。
- ・ 質疑応答の時間のように、共に議論する人に適度に情報を与え、問題を共有し、提示したアイデアを議論の中で発展させていくことが大事である。そのため、議論の時間に守備に徹しすぎると良くないこともある。
- ・ 専門外の現象に対して積極的に関与する姿勢は素晴らしいと感じた。一方で、地盤工学との関連への意識が弱まっている部分も見受けられた。専門を軸に幅広く課題に対応できることが望ましいと思われた。
- ・ ディスカッションの場面において技術者としての正論はとても大事である。一方で、それが話し相手のスキルレベルによって受け止め方や理解度が異なることも話しながら計らなければならない。物事をどのように伝えるかを工夫してもらいたいと感じた。
- ・ リスクの抽出、説明、許容可能リスクの模索、そして、技術レベルがどのくらいでリスクをどこまで減らせるか、といった思考が大事と思われた。それは技術者にしか提示できない情報になりうる。技術者の役割として意識してもらいたいと感じた。



#### (4) 学生の感想

講義後、講義全体を通して学生から感想を述べてもらった。概略を以下に示す。

- ・ 普段の講義では触れられないテーマを新たに学ぶことができた。
- ・ 実際に起こったことに対して考えを深めることは今までやってこなかった。
- ・ 既存の考えや技術に捕らわれることもあることを感じた。
- ・ 普段とは異なる観点から課題を考えることができた。
- ・ 色々な分野の話聞いて視野が広がり、更に、実際の事例に対して学んだことを当てはめることの重要性に気づけた。
- ・ 学ぶだけでなく考えることが大事だと実感した。
- ・ 福島第一原子力発電所の事故が大きな出来事だとは分かっていたが、講義の最終課題を通じて、今まで深く考えていなかったことを実感した。
- ・ 調べなければできない課題は初めて経験した。
- ・ 自ら学んで知識をつけることが大事だと思った。

福島第一原子力発電所の事故とは物理的あるいは時間的に距離のある学生が少なくなかったが、現在進行中の出来事を最終課題の題材とすることで、現実味を持って思考を深める機会を与えることができたと思われる。

#### (5) 地盤工学特論 B のまとめ

地盤工学特論 B では、90 分×15 コマの限られた時間で情報を提供し、学生と議論をしてきた。この時間では、福島現状を理解してもらい、次世代に向けてすべきことを議論するには、決して十分ではない。しかしながら、学生は短時間で数多くの事柄に気づき、表現することに努めていたと思われる。廃炉地盤工学の発展、更には廃炉と復興に向けて結集された行動力を発揮するためには、短期的な教育効果ではなく、長期的に各自の専門分野を軸として、幅広い教養を得た人材が様々な分野に拡がり、近くの人間と議論を重ねることが不可欠であると考えられる。

その意味において、地盤工学特論 B で得た経験を基に、原子力分野を含め様々な分野に進路をとり、行き先での理解度を高める中心人物に育ててもらいたいことを希望している。国等の方針をブレークダウンし、質と効率を高める活動を実現するためには、情報の受け手側のスキルアップは不可欠であり、それが人材育成の長期的な効果の一つではないかと考えている。前述したように、2016 年度の地盤工学特論 B は試行的な要素もあり、工夫すべき点はいくつも列挙されたが、人材育成の目指すところを断片的ではあるが示すことができた。これらを次年度の講義、並びに本プログラムの推進に反映する。

## 参考文献

- 1) 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所の廃止措置技術に係る原子力機構の取り組み 2013年度版，pp. 40-41，2013.
- 2) ソイルアンドロックエンジニアリング㈱：技術資料(RI コーン貫入試験調査) ， 2005
- 3) 土質工学会：土工管理とラジオアイソトープ 表面型密度計・水分計の取扱い手引き，pp. 27-55，1974.
- 4) 齋藤祐磨，小峯秀雄，成島誠一，新井靖典，水野正之，氏家伸介，佐古田又規，吉村貢，鈴木聡彦，井上恵介，後藤茂：福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出し・事故由来廃棄物を想定した重泥水・土質材料の放射線遮蔽効果の評価，第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 483-488，2015.
- 5) Komine, H. : Radiation shielding experiments of geo-material for recovery from the Fukushima I nuclear power plant accident, Geo-Environmental Engineering 2015.
- 6) 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所覆土式一時保管施設の増設について，pp. 3-6，2013.
- 7) 原子力災害対策本部：東京電力㈱福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ，2015.

### 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のために、地下水流動に関しては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点あると考えている。

以下にその3点の課題を整理する。

- 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よく把握すること
- 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、平成28年度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、平成27年度に引き続き室内土層実験を実施し、現場で用いる試験装置（流向流速計等）の測定精度を検証すると共に、トレーサー試験によって物質移行に関する地下水の実流速測定を試みた。一方で、現場での地下水流動を把握するため、平成27年度の検討成果に基づき、今後数年間は継続使用が可能であることを条件としたボーリング孔（観測井）を設置し、水理特性把握のための各種試験を実施した。更に広域・長期間の地下水環境変動予測技術を開発するため、福島第一原子力発電所周辺の地下水理をモデル化し、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、領域分割法による並列計算の効率性や問題点を抽出した。なお、浸透流解析・物質移行解析のためのハード（クラスタマシン）には静音対策を施した。

また、上記成果を得ることで、大学における卒業研究を通じて、資料作成や対外発表を行うことによる人材育成を行った。

### 3.3.1 室内土層実験による実流速の測定精度の検証

#### (1) 概要

汚染物質は地下水により移流分散すると考えられるが、現場調査で使える方法は限りがある。そこで、現場で用いるダルシー流速の試験装置（流向流速計等）の測定精度を検証すると共に、トレーサー試験により移流分散に関する地下水の実流速測定を試みた。

その結果、流向流速計は、流速が遅いところでは精度が下がることが分かった。また、実流速の評価では間隙率と有効間隙率に着目し妥当性を検討したが、今回の方法では十分な精度が得られないことが判明した。

#### (2) 浸透模型実験の概要

浸透模型水槽の設計図面を図 3.3-1 に示す。土層水槽は 100cm（横幅）×55cm（高さ）×60cm（奥行）で、一定の動水勾配を与えて流量を測定し、ダルシー流速を導くものである。

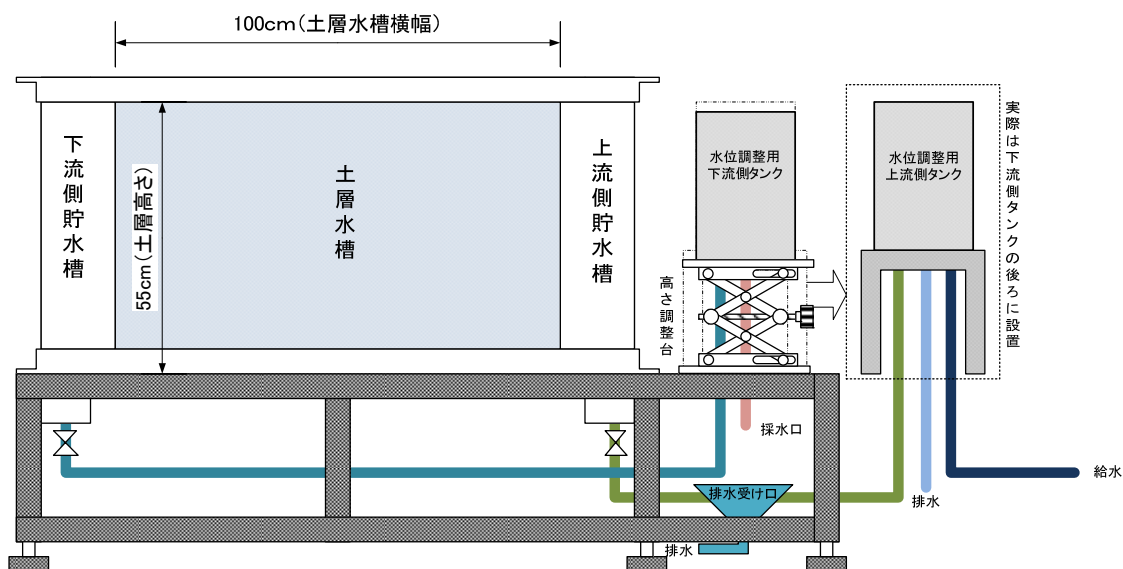


図 3.3-1 浸透模型水槽

#### (3) 流向流速計の測定精度の検証

室内土層実験を用いて、流量から導く方法と流向流速計を用いる方法の 2 通りの方法から求めたダルシー流速を比較し、測定精度を検証する。ここで流速を測定する 2 通りの方法は以下のような手順で実施した。なお、流向流速計は純水の伝導率の変化から計測するタイプである (LD-60 型)。

はじめに土層内を流れる流量を測定し、流量から導く流速  $v_1$  を求める。次に、水槽の中心に設置した、流向流速計を用いて流速  $v_2$  を測定する。そして、この 2 通りの流速について、水位差を変化させて測定し、それぞれの水位差ごとで流速の比較をして、測定精度を検証する。また、この測定を水槽内の試料を変化させた場合でも実施し、流速の測定精度に違いがあるか検証する。図 3.3-2 に、流量から得られた流速  $v_1$  と流向流速計から得られた流速  $v_2$  の測定値を比較した。

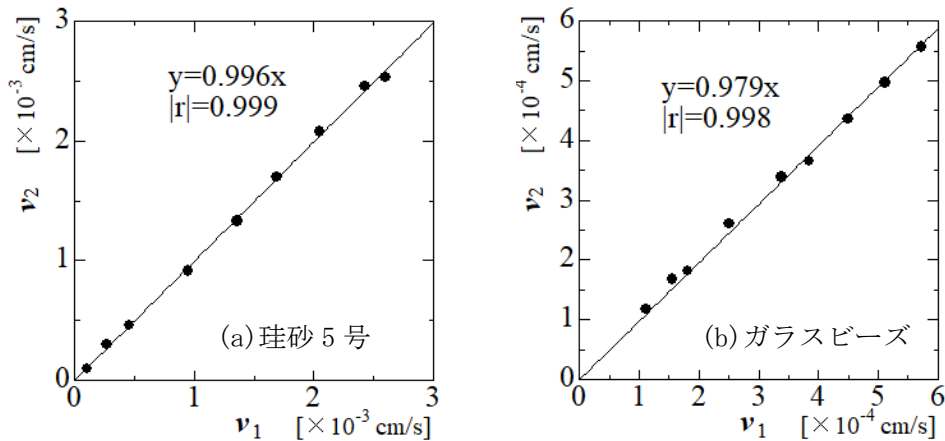


図 3.3-2 測定法の違いによる流速の比較

これらの結果より、珪砂 5 号、ガラスビーズ共に、二つの方法で測定した流速は、ほぼ等しい値となり、流向流速計で精度よく測定可能であることが分かった。しかし、どちらの試料の場合でも、水位差が小さく流速が遅い部分では、二つの流速が等しくなることを確認することができなかった。流向流速計の測定結果によると、ダルシー流速が  $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$  より速いときは精度よく測定することが可能であり、ガラスビーズの流速でも、珪砂 5 号の流速の 1/10 程度であることが確認された。

流速が遅くなると精度が悪くなる要因は、分子拡散や温度の影響を強く受けてしまったことが考えられる。また、同様の間隙率でも流速が大きく異なる要因には、屈曲率や土の粘性抵抗、有効間隙率などが挙げられ、間隙率が同程度でもガラスビーズの方が珪砂 5 号よりも流れる流量が少ないことから、実際に水が流れることのできる空隙が少なく流速が遅くなっているのではないかと考えられる。

#### (4) 実流速の検討

現在、実流速を直接測定することは困難なため、実流速はダルシー流速と有効間隙率から推定されている。しかし、この有効間隙率も実際に測定することは難しいとされているため、実流速を求める際には、土質試験から測定される間隙率で代用されることが多い。そこで、本研究では、実験的アプローチと解析的アプローチの結果から、実流速を求める際に使用される間隙率と有効間隙率の関係を検証することで、実流速を推定した。

実験的アプローチにはトレーサー試験を用いる。この試験では、実流速  $v'$ 、ダルシー流速  $v$  を測定し、以下の(1)式より土層の有効間隙率  $n_e$  を導き、間隙率  $n$  との関係を検証する。

$$n_e = v/v' \quad (1)$$

ここでは、まず水位差を付けた状態で水槽内の流れる流量を測定し、これからダルシー流速  $v$  を求める。次に、水槽上部から図 3.3-3 のようにトレーサー剤を投入する（矢印は地下水の流れである）。投入後、10 分ごとに写真を撮影し、トレーサー剤がどの程度移動したかで、実流速  $v'$  を測定する。その後、式(1)から有効間隙率  $n_e$  を導き、間隙率  $n$  との関係性を検証する。また、この測定を水槽内の水位差、試料を変化させた場合で試験を実施し、間隙率と有効間隙率の関係に変化が生じるか検証する。

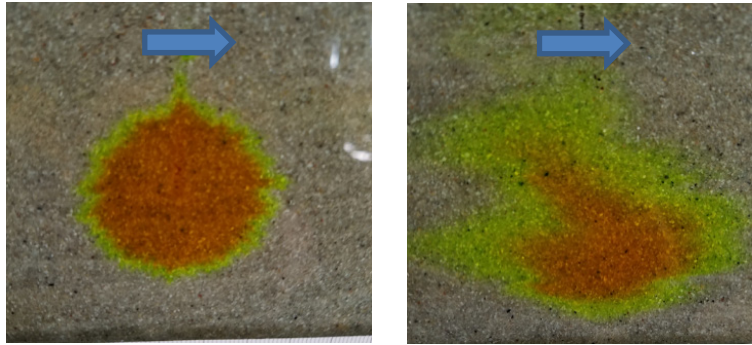


図 3.3-3 トレーサー剤（左図：投入直後 右図：3時間後）

間隙率 40%の珪砂 5 号、間隙率 38%のガラスビーズを試料として用いた際の測定結果を表 3.3-1 に示す。通常、間隙率と有効間隙率の値を比較すると、間隙率より有効間隙率の値の方が小さくなるとされているが、本研究では、珪砂 5 号、ガラスビーズのどちらの試料を用いた場合でも、間隙率より有効間隙率の方が大きくなることが確認された。

表 3.3-1 トレーサー試験結果

	間隙率(%)	有効間隙率(%)
珪砂5号	40	46.16
ガラスビーズ	38	42.06

解析的アプローチでは、上述したトレーサー試験を対象に、軸対称による移流分散解析を実施する。縦 20cm、横 10cm の解析モデルを作成し、そのモデルを 1mm 間隔でメッシュを切り解析で使用する。図 3.3-4 は解析モデルの一部で、黄色の点はトレーサー剤、矢印は地下水の流れを表している。また、材料物性値の透水係数や有効間隙率の値は、トレーサー試験から得られた値を用いた。

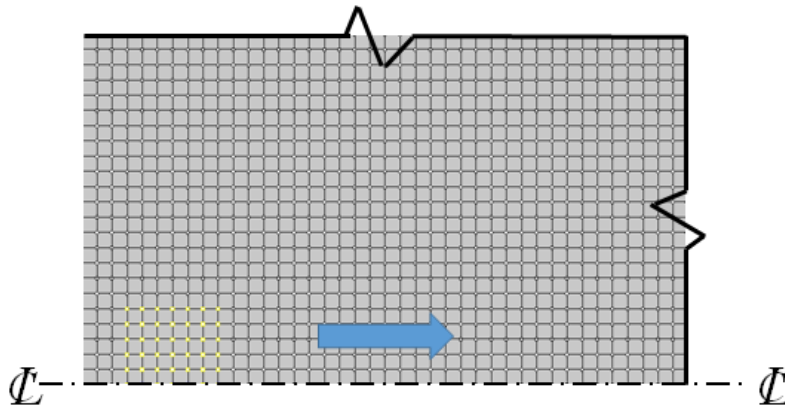


図 3.3-4 解析モデル

珪砂 5 号とガラスビーズを用いたトレーサー試験を対象として解析した解析結果を図 3.3-5、図 3.3-6 に示す。動水勾配と材料物性値の透水係数と有効間隙率の値は、珪砂 5 号の時 0.01、 $6.1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 、46%、ガラスビーズの時 0.05、 $6.9 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 、42%である。



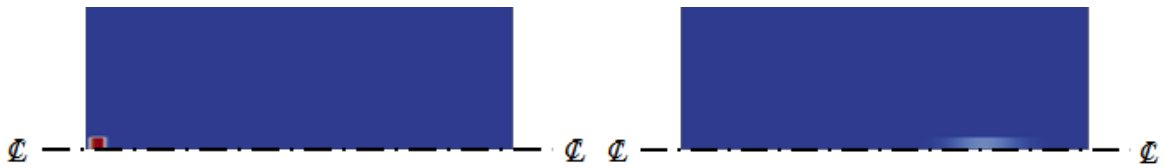


図 3.3-5 珪砂 5 号解析結果（左図：投入直後 右図：3 時間後）

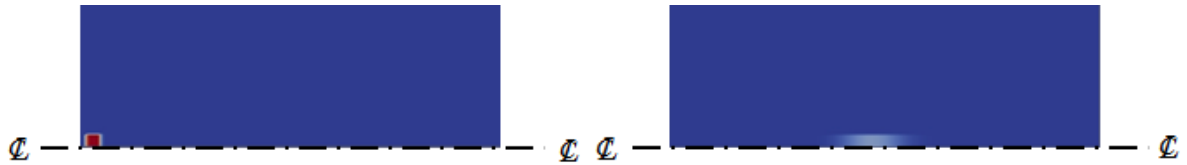


図 3.3-6 ガラスビーズ解析結果（左図：投入直後 右図：3 時間後）

この二つの解析結果の図から、珪砂 5 号、ガラスビーズのトレーサー剤は、それぞれ約 15cm と 10cm 移動していることが確認できる。また、動水勾配、透水係数、有効間隙率から実流速を求めトレーサー剤の移動距離を導くと、珪砂 5 号、ガラスビーズのどちらの場合も解析結果と同程度となるため、本解析での解析結果は妥当であると判断できる。しかし、解析結果と実験の場合のトレーサー剤の様子を比較すると、実験の場合と解析結果では、分散の影響が異なり、解析結果の方が、縦分散の影響が強くなる結果となることが確認された。

実流速の推定の実験的アプローチにおいて、珪砂 5 号、ガラスビーズのどちらの試料を用いた場合でも、間隙率より有効間隙率の方が大きくなった要因は、トレーサー剤を観察する面がガラス面であったため、土粒子部分とガラス面で間隙率が異なり、正確な実流速が測定できなかったためと考えられる。また、解析結果と実験結果で分散の影響に違いが生じた要因は、分散値を無視して、離散化による数値誤差の影響があると考えられる。

## (5) まとめ

基本的な地下水の流向・流速を測る試験装置の測定精度を検証するため、室内土層実験を実施した。本研究において、ダルシー流速の測定は、精度良く測定することが可能だと言うことが確認できた。しかし、実流速の推定において、移流分散解析は比較的精度良く解析ができたと判断できるが、トレーサー試験では実流速が精度良く測定できなかったため、確かな間隙率と有効間隙率の関係を検証することができなかった。この要因は、考察でも述べたように、トレーサー剤の観察をガラス面で行っているため、土粒子部分と間隙率が異なったためだと考えられる。そのため、測定環境が一樣となる測定方法で、再度測定する必要がある。

### 3.3.2 実験井戸による現場試験による透水性評価

#### (1) 概要

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。このため、実験井戸を用いた現場調査・試験を実施した。観測井戸を2本掘削し、長期の使用を考えた井戸仕上げとした。塩ビ管(VP75)を用い、観測対象とする11-12mと15-16mの二つの帯水層のみに開孔率30%のストレーナーを設置し、地下水の遮断を目的にストレーナー上下部にはシーリング材を使用した。

調査・試験の実施項目を表3.3-2に示す。

表3.3-2 調査数量表

項目		単位	観測孔①	観測孔②	合計	
機械ボーリング	φ66mm コアボーリング*	粘性土	m	9.75	9.65	19.40
		砂質土	m	6.15	6.05	12.20
		礫質土	m	2.10	2.30	4.40
		小計	m	18.00	18.00	36.00
	φ130mm ソコアボーリング*	粘性土	m	9.75	9.65	19.40
		砂質土	m	6.15	6.05	12.20
		礫質土	m	2.10	2.30	4.40
		小計	m	18.00	18.00	36.00
合計		m	36.00	36.00	72.00	
掘削中	電気検層	m	18.0	18.0	36.0	
	観測井戸設置	m	18.0	18.0	36.0	
観測井戸	流向流速測定	回	2	0	2	
	現場透水試験(非定常法)	回	2	0	2	
	フローメータ検層	回	2	0	2	
	水位(水圧)観測	回	0	2	2	
	孔間透水試験	回	2	0	2	
室内土質試験(粒度試験)			10	0	10	
水質分析		回	2	1	3	

土の透水性を表す透水係数は、一般的に実験室内で測定する室内透水試験の方法と現場で行う原位置透水試験から定められる。このような方法により得られた透水係数の値から、地盤内の地下水状況は予測されるが、地盤特性の不均質性や水理境界条件の設定によって、試験から確かな透水係数の値を得ることは困難な場合がある。また、現場透水試験の結果だけから求められた透水係数も算定方法によって一つの評価に定まらない。そこで、本研究では実際に現場で実施した透水試験を対象とした浸透流解析から透水係数を導き、現場透水試験の値と比較して算定方法の差異を評価した。

## (2) 調査・試験の実施内容と結果

### 1) 電気検層

掘削後のボーリング孔（裸孔）を利用して、地層固有の電気的比抵抗の鉛直分布を求めた。これは、地層の比抵抗及び自然電位の測定値から、帯水層の検出と層厚の確認を目的に実施したものである。比抵抗法とは、電流電極を通じて地中に電流を流し、電位電極間の電位差を測定することにより、地層の見掛比抵抗を測定する方法である。測定では、電極間隔の広いノルマル法は比抵抗による大まかな地層区分に、狭いマイクロ法は地層中の挟みや不均質さの評価にそれぞれ使用される。

検層結果を表 3. 3-3 にまとめる。

表 3. 3-3 電気検層結果概要一覧

地層区分 (記号)	主な土質	マイクロ検層	ノルマル検層	地層の特徴
Ac	凝灰質粘土	全体に低い比抵抗値を示し、層下部に従い若干の値の上昇が認められる	全体に低い比抵抗値を示し、変化の少ない波形となる	全体に少量の砂や粘土化したスコリア、炭化物を混入する粘性土
Dc	シルト質粘土 砂混り 粘土質シルト 砂質シルト	全体に低い比抵抗値を示し、層下部の砂質シルトで砂分の混入に従い値の上昇が認められる	全体に低い比抵抗値を示し、砂分の混入に従い値の上昇が認められる	層下部に従い細砂を不規則に混入する粘性土
Dg	砂礫 礫混り砂	全体に高い比抵抗値を示し、礫混り砂で若干の値の低下が認められる	全体に高い比抵抗値を示す。	φ 2～40mm 程度の垂円～垂角礫が主体で、層上部で礫の混入が少なく礫混り砂となる。
Ds	細砂 礫混り砂 中砂	全体に高い比抵抗値を示し、両孔ともに GL-15m 以深で若干の値の上昇が認められる	全体にやや高い比抵抗値を示し、変化の少ない波形となる。比較的均質な状態を示している。	全体に比較的粒径が均一な細砂を主体とする。GL-15～16m間、礫混り砂・中砂となる。

### 2) 流向流速測定

流向流速測定は、観測孔を利用して地下水の流れを電極間での抵抗変化によって検出する「地下水流向流速計 (Type-LD60)」を用いて実施した。観測孔①の礫質土層 (Dg) 及び砂質土層 (Ds 層) を対象に実施した測定結果一覧を表 3. 3-4 に示す。

表 3. 3-4 流向流速測定結果一覧表

測定孔	深度 (GL-m)	土層 (土質)	測定結果	
			流向 (磁北 : N)	流速 (ダールシー流速) (cm/sec)
観測孔①	11.30	Dg (砂礫)	S	$4.86 \times 10^{-5}$
	11.70	Dg (砂礫)	S	$3.61 \times 10^{-5}$
	15.30	Ds (礫混り砂)	S	$2.73 \times 10^{-5}$
	15.70	Ds (中砂)	S15°W	$3.35 \times 10^{-5}$

### 3) 現場透水試験（単孔式）

現場透水試験は、単孔式透水試験のスラグ試験（観測孔内水位を瞬時に変化させて、その後の水位変化を観測する変水頭試験）を観測孔①のスクリーンを設置した G.L. -11.00～12.00m 区間と G.L. -15.00～16.00m 区間の 2 区間を対象に実施した。表 3.3-5 に試験結果を示す。

現場透水試験時は、透水性が高いため、試験装置のバルブ等での圧力損失抵抗を受けた。よって、回復過程の後半より透水量係数を求めた。

表 3.3-5 現場透水試験結果一覧

区間名 試験深度		最大水位低下量 (cm)	回復過程
			Hvorslev 解析結果 透水量係数 T (m <sup>2</sup> /sec)
観測孔①	G.L.-15.0～16.0m	91.2	4.58×10 <sup>-5</sup>
観測孔①	G.L.-11.0～12.0m	25.7	1.68×10 <sup>-4</sup>

### 4) 孔間透水試験

孔間透水試験は、観測孔①に設置したスクリーン区間である上部 G.L. -11.00～12.00m 区間と下部 G.L. -15.00～16.00m 区間をそれぞれ発信区間とし、観測孔②に設置した水位（水圧）観測を応答孔として試験を実施した。表 3.3-6 に試験結果を示す。

孔間水理試験では、長時間揚水を行うことで、近傍から遠方までの透水性が得られる。観測孔①の下部試験区間では、試験孔近傍と遠方で透水性が異なること、並びに下部と上部共に現場透水試験より透水性が高いことが判明した。

表 3.3-6 孔間透水試験結果一覧

試験孔名、区間名 試験深度			揚水量 平均	Shut-in 時水位	揚水過程		回復過程		備考
					Jacob 解析結果		Agarwel 解析結果		
					透水量 係数 T	貯留係数 S	透水量 係数 T	貯留係数 S	
			L/min	cm	m <sup>2</sup> /sec	-	m <sup>2</sup> /sec	-	
揚水 区間	観測孔 ①下部	GL-15.0～ 16.0m	3.15	41.0	2.54×10 <sup>-4</sup>	6.29×10 <sup>-4</sup>	2.78×10 <sup>-4</sup>	1.75×10 <sup>-11</sup>	近傍
					1.81×10 <sup>-3</sup>	計測不能	2.95×10 <sup>-3</sup>	計測不能	遠方
観測 区間	観測孔 ②下部	GL-15.0～ 16.0m		3.6	1.52×10 <sup>-3</sup>	8.04×10 <sup>-5</sup>	1.63×10 <sup>-3</sup>	1.65×10 <sup>-5</sup>	
揚水 区間	観測孔 ①上部	GL-11.0～ 12.0m	14.15	23.0	2.00×10 <sup>-3</sup>	2.08×10 <sup>-7</sup>	2.96×10 <sup>-3</sup>	1.11×10 <sup>-11</sup>	
観測 区間	観測孔 ②上部	GL-11.0～ 12.0m		6.2	3.80×10 <sup>-3</sup>	8.14×10 <sup>-7</sup>	3.84×10 <sup>-3</sup>	1.88×10 <sup>-4</sup>	

### (3) 調査・試験の透水性の検証

#### 1) 評価方法

図 3.3-7 のような地盤に深さ 20m、直径 0.072m の井戸を 2 本掘削し、GL-11~12m と GL-15~16m 部分にストレーナーを設置して、この 2 層を対象とした現場透水試験と浸透流解析を実施し、透水係数や比貯留係数の整合性を検討した。浸透流解析では、単孔式透水試験で実施したスラグ試験を対象に、軸対称モデルを用いて実施した。解析モデルは、図 3.3-7 のように縦 20m、横（半径方向）500m のモデルを作成し、中心から 1m までは、縦横 10cm 間隔でメッシュを切り、中心から 1m 以上の離れた場所については、縦方向を 10cm 間隔、横方向を対数で 10 分割したものを使用した。ここで、水理定数の値は図 3.3-7 の①~⑥のように区分し、値を変化させ水位回復過程を再現するように設定した。初期条件は、地盤内に平衡状態の水位を与え、井戸内水位のみ水位低下時の値を設定し、境界条件は遠方境界としてモデル外周に平衡状態水位で水頭固定した。解析では、井戸内水位を初期値として、水位が平衡状態になるまでの回復過程について井戸貯留を考慮して計算し、計算された井戸内水位変化を基に透水係数を求め、透水試験結果と比較した。

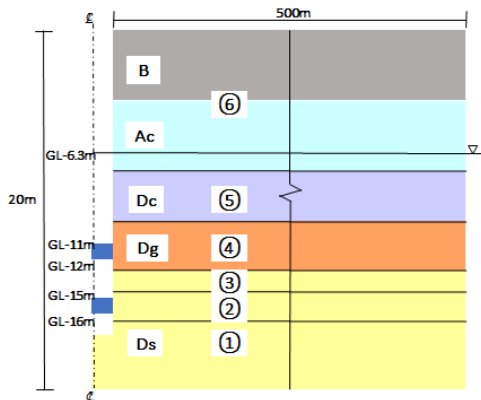


図 3.3-7 地層区分

表 3.3-7 解析における水理定数

材料区分	透水係数(m/sec)	比貯留係数(l/m)
①	$2.00 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-5}$
②	$9.00 \times 10^{-5}$	$2.00 \times 10^{-7}$
③	$5.00 \times 10^{-5}$	$3.00 \times 10^{-6}$
④	$2.40 \times 10^{-4}$	$2.00 \times 10^{-7}$
⑤	$2.50 \times 10^{-6}$	$5.00 \times 10^{-4}$
⑥	$2.50 \times 10^{-7}$	$5.00 \times 10^{-4}$

#### 2) 透水性の検証

スラグ試験結果に定常性を仮定した Hvorslev 法を適用させた場合と貯留性を考慮した Cooper 法を適用させた場合の二つの方法で対象地盤の透水係数を求め、対象地盤の透水係数を評価した。表 3.3-8 左が Hvorslev 法の場合、表 3.3-8 右が Cooper 法の場合の結果をまとめたものである。二つの試験深度で結果を比較すると、どちらの方法で透水係数を求めた場合でも、試験深度 GL-15~16m の方が小さい値になることが確認された。しかし、二つの方法で求めた値を比較すると、Cooper 法で求めた値は Hvorslev 法で求めた値の約 2 倍となった。

表 3.3-8 スラグ試験（左：Hvorslev 法、右：Cooper 法）

試験深度(m)	透水係数(m/sec)	試験深度(m)	透水係数(m/sec)	比貯留係数(l/m)
GL-11~12	$1.64 \times 10^{-4}$	GL-11~12	$3.20 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^{-7}$
GL-15~16	$4.58 \times 10^{-5}$	GL-15~16	$9.71 \times 10^{-5}$	$2.22 \times 10^{-7}$

浸透流解析では、スラグ試験と同様に、解析結果に Hvorslev 法を適用させた場合と Cooper 法を適用させた場合の二つの方法で対象地盤の透水係数を求め、対象地盤の透水係数を評価した。表 3.3-7 の値はスラグ試験の水位回復過程を再現するように設定した水理定数の値で、

図 3.3-8 が解析における水位の回復過程を試験時の水位回復過程と比較したものである。また、この水位変化曲線に対して、表 3.3-9 右が Cooper 法を適用した場合、表 3.3-9 左が Hvorslev 法を適用した場合の結果をまとめたものである。表 3.3-7 で設定した水理定数で解析することで、試験結果とほぼ同様の水位変化曲線が得られていることが分かった。

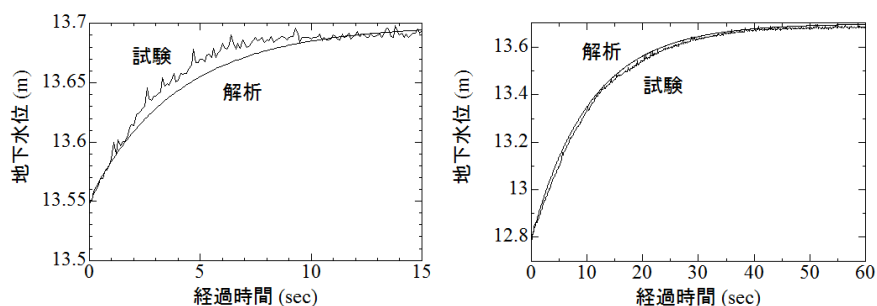


図 3.3-8 水位変化曲線 (左図:GL-11~12m 右図:GL-15~16m)

表 3.3-9 浸透流解析 (左: Hvorslev 法 右: Cooper 法)

試験深度(m)	透水係数(m/sec)	試験深度(m)	透水係数(m/sec)	比貯留係数(l/m)
GL-11~12	$1.27 \times 10^{-4}$	GL-11~12	$2.67 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^{-7}$
GL-15~16	$4.84 \times 10^{-5}$	GL-15~16	$1.07 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^{-7}$

試験と解析で得られた水位変化曲線を用いて評価した透水係数の値を比較すると、この場合どちらの方法を適用した場合でも、試験と解析の透水係数に約 1 割程度の誤差はあるものの、同程度の値となった。

浸透流解析時に入力した透水係数を真値として解析の水位変化曲線から得られた透水係数の値を比較すると、Cooper 法を適用した場合は、透水係数、比貯留係数の値はどちらも入力値と約 1 割程度の誤差はあるが同程度の値となった。しかし、Hvorslev 法を適用した場合の透水係数は数倍程度入力値と異なる値となった。

スラグ試験とその解析結果において、Hvorslev 法と Cooper 法を適用した場合、透水係数の値に 2 倍から 5 倍程度の違いが生じた。これは地盤の貯留性や透水性の異なる層状の水理構造が影響していると考えられる。また、今回対象とした地盤の透水性が高く、スラグ試験での水位差が小さかったことや試験時間が短時間であったことも影響している可能性がある。これに対して Cooper 法を適用して求めた透水係数は浸透流解析での入力値と整合性が良いことから、これらの値は妥当な値と考えられる。

### 3) まとめ

現場試験では、観測井戸を 2 本掘削し、これを用いて地盤の水理特性を把握する試験を実施した。特に現場試験からまとめられた試験結果を浸透流有限要素法解析でシミュレーションすることにより、透水係数や比貯留係数などの評価方法の差異や値の妥当性を検討した。スラグ試験の結果では、Cooper 法を適用した場合で対象地盤における妥当な透水係数が得られた。他方、Hvorslev 法を適用した場合は Cooper 法に対して数倍程度の差があったことから、要求精度によって評価手法を選定する必要がある。



### 3.3.3 浸透流解析・物質移行解析のための環境整備・構築

#### (1) 領域分割手法の適用

広域・長期間の地下水環境変動予測技術を開発するため、地下水理をモデル化すると共に、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、領域分割法による並列計算の効率性を検討した。日本国内で公開され実績を有する領域分割ライブラリとしては、地球シミュレーター用に作成され、公開中の HPC-MW がある。これは、既往の有限要素解析プログラムにサブルーチンを組み込むことで容易に領域分割へ対応することができることから、Dtransu-3D・EL に実装することとした。ただし、領域分割手法は Dtransu の移流方程式の離散化で用いられているラグランジュ手法に適用することが困難なため、本研究では浸透流解析機能に特化して実装した。

#### (2) 定常浸透流解析

3次元飽和・不飽和定常浸透流解析を対象に、導入した Dtransu-3D の基本性能を把握した。今回は、1node、2CPU、8core(=16core)の並列化で計算した。これは、現在のシステム構成では、2nodeで32coreまで計算が可能な構成であるが、ノード間の通信速度がボトルネックとなっている。このため、最大の効率ができる16coreでコンパイルし、解析を実施した。

##### 1) 解析モデルと解析条件

解析領域の北限は高瀬川～請戸川、南限は熊川とし、河川分水界とした。また、西限は双葉断層とし、不透水境界とした。東限は陸域とほぼ同等の範囲として海岸線から7kmの位置に設定した。図3.3-9に地形及び水系図を示す。

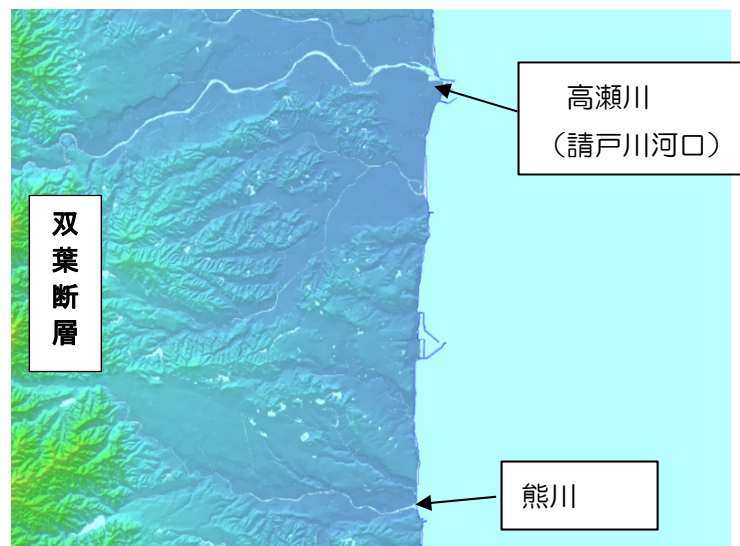


図 3.3-9 地形及び水系図

福島第一原子力発電所周辺では汚染水処理対策委員会サブグループ①「地下水・雨水等の挙動等の把握・可視化」中間報告、2013年11月15日（以下、サブグループ①中間報告）に示されている水理区分（平面、断面）を参考に水理区分を設定した。また、福島第一原子力発電所周辺の外側については、（国研）産業技術総合研究所地質調査総合センター5万分の1

地質図幅（浪江及び磐城富岡 1994）の地表地質を基に、前述の水理区分を参考にしつつ、水理区分を推定し、設定した。

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 10m グリッド、その外側を 25m グリッド、同様に 50m、100m、200m 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。作成した地表面メッシュ図（全体）を図 3.3-10 に、福島第一原子力発電所周辺の拡大図を図 3.3-11 に示す。

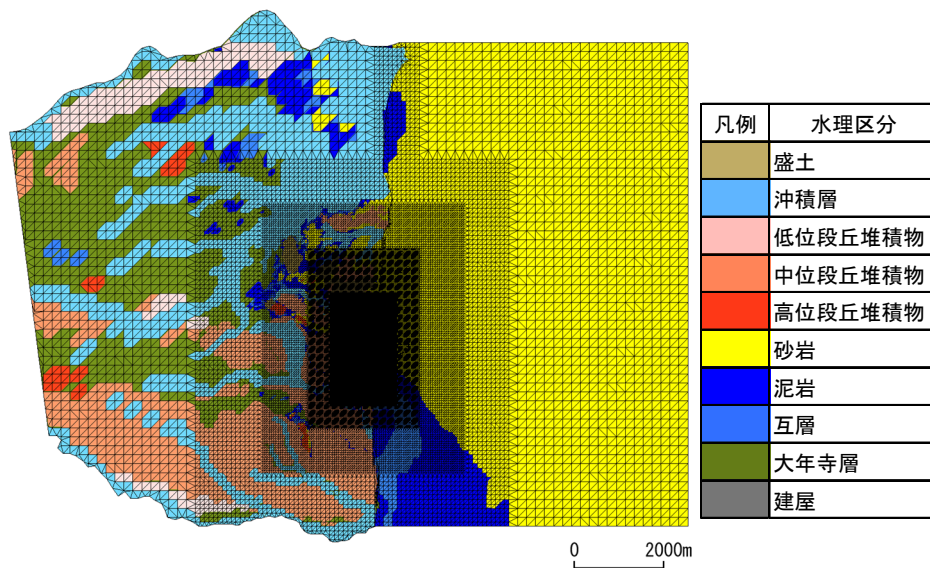


図 3.3-10 地表面メッシュ図（全体）

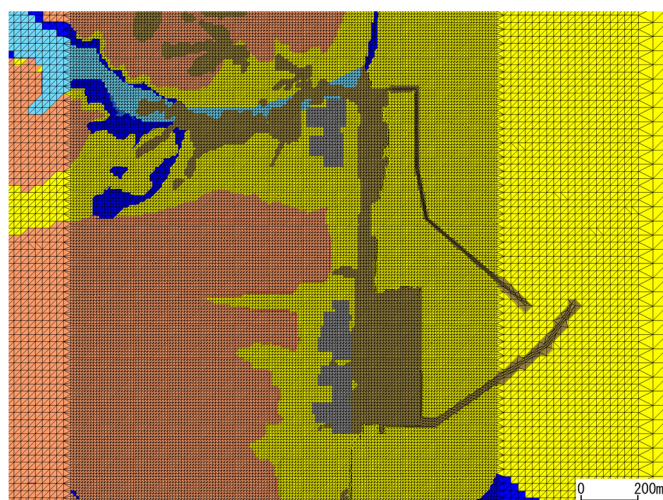


図 3.3-11 地表面メッシュ図（福島第一原子力発電所周辺拡大図）

水理定数はサブグループ①中間報告で設定された値を基に表 3.3-10 のように設定した。境界条件は、北側側面は高瀬川を、南側側面は熊川を、西側側面は双葉断層を分水界として不透水境界面とした。また、東側側面は海域の遠方境界として不透水境界面とし、地表面には降雨浸透境界を設け、降雨浸透量はサブグループ①中間報告の設定値と同じとして、年平均降水量 1,545mm/年に降雨浸透率 55%を乗じた 850mm/年とした。また、海底面には海水位として E. L. 0m の水頭固定境界を与えた。

表 3.3-10 設定水理定数

水理区分	透水係数 (m/sec)		間隙率 (-)	備考
	水平方向	鉛直方向		
盛土	$2.8 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-5}$	0.46	1F解析設定値
沖積層	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	0.41	1F解析設定値
低位段丘堆積物	$3.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$	0.41	1F解析設定値(段丘堆積物)
中位段丘堆積物	$3.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$	0.41	1F解析設定値(段丘堆積物)
高位段丘堆積物	$3.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$	0.41	1F解析設定値(段丘堆積物)
砂岩層	$3.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$	0.41	1F解析設定値
泥岩	$1.1 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-8}$	0.54	1F解析設定値
互層	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-8}$	0.41	1F解析設定値
表土(大年寺層風化部)	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	0.41	沖積層相当として設定
大年寺層	$1.1 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-8}$	0.54	泥岩と互層から推定
建屋	$1.0 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-8}$	0.3	1F解析設定値

## 2) 解析結果

解析地下水位分布を図 3.3-12 と図 3.3-13 に、3 号建屋付近の東西断面での全水頭コンター図を図 3.3-14 に示す。なお、図 3.3-14 は、水平方向の長さに対して鉛直方向の高さが少ないことから、鉛直方向を水平方向に対して 10 倍に拡大して表示している。図中、黒実線で全水頭コンター、水色実線で解析地下水位を示している。全水頭コンター分布を見ると、互層部で屈曲しており、互層から上部の砂岩に対しての被圧状態が計算されているのが分かる。

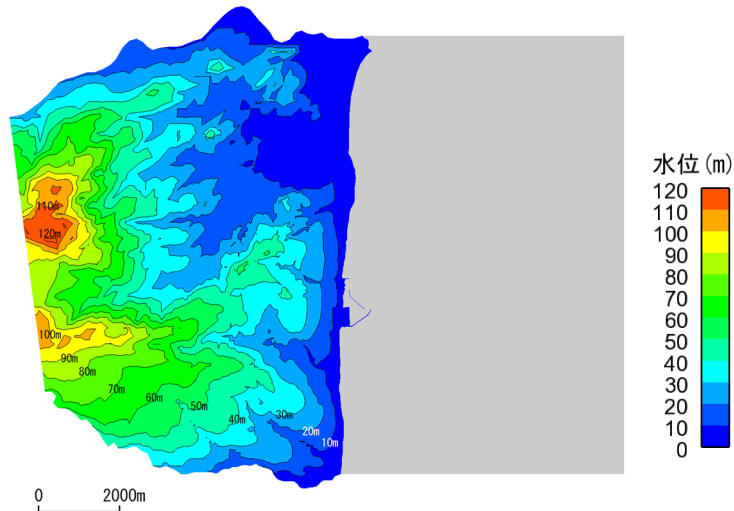


図 3.3-12 解析地下水位コンター図 (全体)

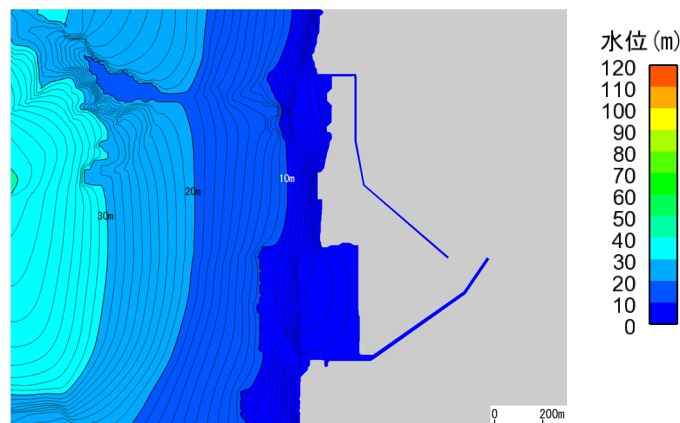


図 3.3-13 地下水位コンター図 (福島第一原子力発電所周辺拡大)

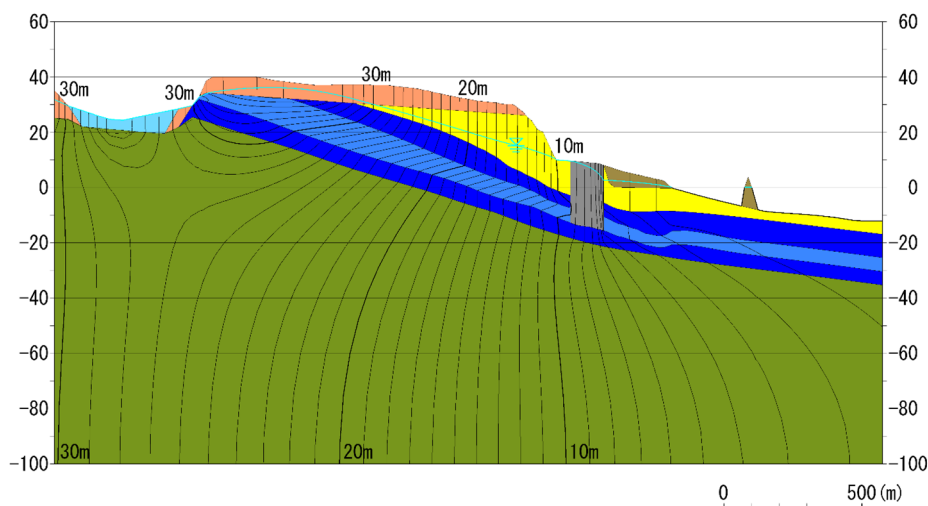


図 3.3-14 全水頭コンター図（東西方向鉛直断面）

### 3) 計算効率

定常浸透流解析モデルを対象として、MPIによる領域分割数による計算効率について、領域分割をしない1領域の実行時間（Elapsed Time）に対する領域分割時の実行時間の比で検討した。現状の領域分割手法では、領域分割数は2の $n$ 乗に限定されるため、1領域、2領域、4領域、8領域とし、領域分割数と実行時のCPU数は同じとなる。

図 3.3-15 に領域分割数と実行時間、計算効率を示す。領域分割数に比例して計算効率が向上するのがベストであるが、領域分割の際、領域の重ね合わせ領域が必ず付加されるため、領域分割数が増えるほど全体で計算する節点数、要素数が増えるため線形には計算効率が向上しない。また、領域間で計算情報の通信が行われるため、このオーバーヘッドもあり、本計算では8領域で計算効率が3.2倍となった。

同じモデルによる OpenMP による並列計算の場合、8CPU で計算効率は2.6倍であり、領域分割の方が良い結果となった。ただし、今回の計算は1ノード内の計算結果であり、ノード間通信が入る場合は通信速度の性能によって計算効率が変わる可能性がある。

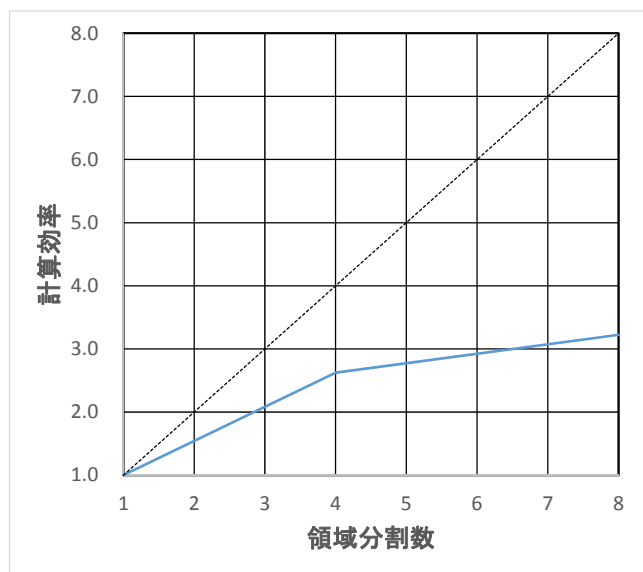


図 3.3-15 領域分割数と計算効率

### (3) まとめ

広域モデルの3次元飽和・不飽和定常浸透流解析を対象に、Dtransu-3Dに領域分割法を採用した時の計算効率を把握した。今回は、1node、2CPU、8core(=16core)の並列化で計算した。その結果、オイラー手法での解析手法である浸透流解析では、領域分割法は一定の速度向上が図れることが分かった。

今後は非定常解析への拡張を図るため、広域からサイト周辺に絞り込むような解析を実施するためのネスティングが行えるようなプログラム改良と速度向上を検討する予定である。また、ネットワークを Infiniband に変更することで、ノード間通信を行うプログラムに関しては、性能向上が期待できるので 2node、32core で速度向上も図っていく。

### 参考文献

- 1) 汚染水処理対策委員会サブグループ①(2013)：地下水・雨水等の挙動等の把握・可視化，中間報告，2013年11月15日
- 2) (株)アサノ大成基礎エンジニアリング(2015)：日本大学 地中熱ヒートポンプの導入（業務委託報告書）
- 3) 公益財団法人 地盤工学会(2013)：地盤調査の方法と解説 二分冊の1, 第7編 pp471-659.



### 3.4 研究推進

研究推進にあたっては、研究代表者の下、各研究項目間の連携を密にして研究に取り組むと共に広く意見を聴きつつ進めるため廃炉地盤工学委員会を開催した。同委員会では研究代表者及び再委託先の研究成果を取りまとめると共に、実効性の観点から議論を行い、より質の高い研究となるように努めた。また、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」等の関連会議に参画し、情報の発信や廃炉地盤工学の認知度向上に努めた。

これら研究推進にあたり取り組んだ事項を以下に整理して示す。

#### 3.4.1 廃炉地盤工学委員会

##### (1) 平成 28 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 28 年度の 1 回目となる廃炉地盤工学委員会では、福島第一原子力発電所廃炉事業の背景や本研究プロジェクトの課題目標、研究経緯やこれまでの成果概略、本年度実施内容に加え、廃炉地盤工学委員会メンバーに期待するところや当該委員会の意義などについて説明が行われた後、地盤工学会・早稲田大学・千葉工業大学より前年度成果及び今年度の計画について、詳細な報告がなされた。

その後、廃炉における地盤工学系技術の活用促進のために構築した技術マップの更なる拡充に向けての考え方や方針について、並びに「廃炉地盤工学」の学問単元の一つである地盤施工工学を例とした地盤工学技術の体系化に向けた狙いや意図について、それぞれ説明が行われた後、活発な議論が交わされた。更に本委員会への若手技術者の関与方法や若手の会設立に関して、参加者から意見が募られた。

■日時 : 2016 年 6 月 23 日（木）10:00～12:00

■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 28 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 28 年度 2 回目となる廃炉地盤工学委員会では、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）及び、技術研究組合国際廃炉研究開発機構（IRID）の職員を迎え、各機関の設立経緯や事業概要、



1F 廃炉事業における役割や研究開発状況についての話題提供がなされた。

NDF からは「戦略プラン 2016<sup>\*</sup>」の策定目的・方針や「中長期ロードマップ」との関係などについて、IRID からは地盤工学に関連した研究開発項目として、原子炉格納容器漏えい箇所補修技術の開発のうち S/C 脚部補強技術と PCV 下部補修におけるベント管止水と S/C 内充填止水に関する開発概要・課題について説明が行われ、活発な議論がなされた。

※東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2016

- 日時 : 2016 年 9 月 20 日 (火) 15:00~17:30
- 場所 : 地盤工学会 (JGS 会館) 地下大会議室

### (3) 平成 28 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 28 年度 3 回目となる廃炉地盤工学委員会では、JST プロジェクトの概略及び本年度の検討成果について、地盤工学会・早稲田大学・千葉工業大学の各担当より報告がなされたほか、廃炉地盤工学の学問単元の一つである地盤施工学 WG の活動状況に関する説明が行われた。

また、第 2 回委員会に引き続き、若手の会設立に向けての課題を踏まえた活動の方向性などについて議論が交わされたほか、昨年度開催された廃炉地盤工学講演会に関する報告、次年度委員会で予定されているテーマに関する説明、関係会議についての告知等がなされた。

- 日時 : 2017 年 3 月 3 日 (金) 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 3 回廃炉地盤工学委員会の様子

#### 3.4.2 1F 申請者会合

本研究を円滑に進めると共に委員会の運営方法等を協議するため、1~2 ヶ月に 1 回程度、委員長や座長、幹事等で構成される 1F 申請者会合を開催した。

本年度の開催状況は以下のとおり。

- ・平成 28 年度 1 回 (第 6 回) 1F 申請者会合: 平成 28 年 4 月 18 日 (木) 15:00~18:00
- ・平成 28 年度 2 回 (第 7 回) 1F 申請者会合: 平成 28 年 6 月 6 日 (木) 15:00~17:00
- ・平成 28 年度 3 回 (第 8 回) 1F 申請者会合: 平成 28 年 11 月 29 日 (火) 15:00~17:00
- ・平成 28 年度 4 回 (第 9 回) 1F 申請者会議: 平成 29 年 2 月 22 日 (木) 10:00~13:00

※()内は当該プロジェクト 1 年目からの通算回数

### 3.4.3 地盤施工学 WG

当該WGの活動としては、約2箇月に1回打合せを行い地盤施工学に関する議論を実施した。本年度は、まず話題提供による情報共有（①施工学の概念、②現行のデコミッショニング・廃棄物処分、③廃炉シナリオと廃炉地盤工学技術マップ、他）を行い、次段階として、廃止措置における3段階（①汚染水・地下水制御、②デブリ取出し、③処理処分・デコミッション）に対して、それぞれの施工学の検討事例を考えることとした。

以下に、本年度の活動内容をまとめる。

#### (1) 第1回 2016年4月20日

〔話題提供〕 後藤 茂（早稲田大学）「廃炉地盤工学における地盤施工学の概念」

- ・ 地盤施工学の概念
- ・ 施工の管理項目と施工計画・管理の範囲
- ・ 施工計画の作成と要求性能・制約条件
- ・ 廃炉地盤工学の特殊性と課題

#### (2) 第2回 2016年6月8日

〔話題提供〕 渡邊 保貴（電力中央研究所）「現行のデコミッショニング・廃棄物処分」

- ・ 廃炉・デコミッショニングの意味
- ・ 平常時のデコミッショニングにおける基本的考え方と例示
- ・ 我が国における放射性廃棄物処分の概要

#### (3) 第3回 2016年8月5日

〔話題提供〕 菱岡 宗介（パシフィックコンサルタンツ）

「本研究プログラムで進めている技術マップ・シナリオの整理結果等」

- ・ 1F事故後の対応経緯、背景等について
- ・ 中長期ロードマップ・戦略プラン及び整理されたシナリオ（案）について

#### (4) 第4回 2016年10月13日

〔話題提供〕 高尾 肇（日揮）「L3 処分施設について」

- ・ 解体廃棄物の放射能レベル区分別発生量
- ・ 放射性廃棄物の濃度区分及び処分方法
- ・ 国内外の低レベル放射性廃棄物関連施設例

#### (5) 第5回 2016年12月8日

〔話題提供〕 山田 淳夫（安藤ハザマ）「ベントナイト混合土の締固めの技術」

- ・ 技術ツリー（混合土製造・敷均し・転圧・吹付け・性能・品質確認・施工仕様の設定・施工計画）
- ・ 施工技術の問題点（機械と転圧回数の設定方法、機械のエネルギーと乾燥密度で評価される締固めエネルギーの関係、転圧エネルギーの評価方法・与え方と締め固め効率）

#### (6) 第6回 2017年3月16日

〔話題提供〕 成島・新井（西武建設）「超重泥水の活用方法について」

- ・ 廃止措置での超重泥水の使い方の例
- ・ 超重泥水の止水機能のメカニズム
- ・ 対放射線の実験的検討方法

### 3.4.4 関係機関協議

本研究を推進するにあたり様々な関連機関との協議を実施した。参画した会議を以下に列記すると共に、参考として成果報告会用に作成した説明用ポスターを図 3.4-3 に示す。

- ・平成 28 年度成果報告会 : 平成 28 年 9 月 5 日 (月)
- ・CLADS (JAEA) 情報交換会 : 平成 28 年 10 月 19 日 (水) 15:00~17:00
- ・廃炉基盤研究プラットフォーム第 3 回運営会議 (JAEA・CLADS) : 平成 28 年 7 月 29 日 (金) 10:00~12:00
- ・廃炉基盤研究プラットフォーム第 4 回運営会議 (JAEA・CLADS) : 平成 28 年 11 月 18 日 (金) 15:30~18:00
- ・廃炉基盤研究プラットフォーム第 5 回運営会議 (JAEA・CLADS) : 平成 29 年 2 月 10 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 (NDEC-2) : 平成 29 年 3 月 7 日 (火) 9:00~18:00

## 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 地盤工学的な新技術開発と人材育成プログラム

公益財団法人  
**地盤工学会**  
http://www.jdan.or.jp/

WASEDA University  
**千葉工業大学**

**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**

- ・ 委員会において、廃炉プロセスと体系化した学問単位に基づく、廃炉事業における地盤工学系技術の位置付けや技術の発展を実施。
- ・ 福島第一原子力発電所廃止措置に際して地盤工学系技術と、廃炉事業に関する関係者(産学)・(産地)工学系(産学)の検討成果を踏まえ、廃炉地盤工学技術マップの内容を拡充。

**③ 廃炉地盤工学教育システムの構築**

- ・ 廃炉地盤工学委員会での検討結果に立脚し、廃炉地盤工学のシラバスを試作。
- ・ 早稲田大学・千葉工業大学等における模擬的授業の実施による内容の深化。
- ・ 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更なる充実へ。

**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**

- ・ 講演会や地盤工学会年次大会における特別セッション等を開催。
- ・ 地盤工学会ホームページ内に廃炉地盤工学に関するページを開設。
- ・ 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、IAEA マドリード会議における海外関連機関からの情報収集等を行い、委員会において情報の共有を図る一方で、関連学会(土木学会等)に参加し、プロジェクトの活動内容の発信、関連情報の収集を実施。

**2. 遮水性と放射線遮蔽性を有する超重泥水を用いた廃炉技術** 【受託機関：早稲田大学】

**① 研究背景・内容**

- ・ 燃料デブリ取り出しのため、冠水工法に代わり作業被曝の危険性低下を目指す「ベントナイトの遮水性と放射線遮蔽性能を活かした超重泥水の開発

**② 超重泥水について**

- ・ ベントナイト懸濁液に、加重材(バライト)と分散材を添加したもの。
- ・ 高比重かつ水を多く含む、ガンマ線と中性子線の遮蔽に効果がある。
- ・ 廃炉作業の施工には、材料特性の評価が不可欠。




**③ 放射線遮蔽性能**

**<超重泥水が有する遮断性能>**

- ・ バライトにより比重を維持し、ガンマ線の遮断に効果がある。
- ・ 水分子を多く有するため、中性子線の遮断に効果がある。

**<放射線遮蔽実験>**

・ 超重泥水の厚さに応じて、放射線量がどの程度減衰するか調べる実験を実施した。

**④ 放射線遮蔽実験結果**



図3 放射線遮蔽実験結果

図4 ガンマ線減速率と比重の関係 (厚さ10cm) 体積含水率の関係 (厚さ10cm)

図5 全中性子線減速率と比重の関係 (厚さ10cm) 体積含水率の関係 (厚さ10cm)

図6 ガンマ線と中性子線の放射線減速率をまとめたものである。この結果から、ガンマ線は比重が大きいほど遮断性能が大きいことが分かる。また、中性子線に対しては、水と比重の遮断性能を示すことを確認した。

**3. 地下水環境の状況調査・将来予測** 【受託機関：千葉工業大学】

**① 研究背景・内容**

- ・ 浸透型水構を用いた室内土層実験による実流速の測定精度の検証
- ・ 実験井戸による現場試験計画の策定

**② 室内土層実験による実流速の測定精度の検証**

・ 浸透型水構 (土層実験) により、地下水の流向や流速の実流速測定方法を検証。

**<実験装置>**



図1 浸透型水構 (正面図・側面図) 図2 実験装置写真

**<実験結果>**



図3 実流速とダグラス流速/飽和度 図4 粒径分布曲線 (注砂5時)

・ 注砂5時では、飽和率によって実流速とダグラス流速を関連付けることができた。  
・ 今後は、この関係が土の飽和率を変えた場合でも得られるかについて検討する。

**③ 実験井戸による現場試験計画**

- ・ 単一孔～複数孔試験と段階的なアプローチを経ることで、地下水場を定量的に把握し、核種移行評価を可能とする長期モニタリング環境を構築。
- ・ **<試験孔の配置計画>**
- ・ 試験候補地点の形状を把握 (地形・地質)。
- ・ 数mの範囲で直線的に3本配置可能な距離を確保。
- ・ 同心円状または格子状となる配置計画。



図5 試験候補所候補地点 図6 試験孔配置計画 図7 候補地の地質

図 3.4-3 平成 28 年度成果報告会における製作ポスター

#### 4. 結言

本研究課題では、実効性の高い技術に基づき福島第一原子力発電所の廃止措置を実現することを目指し、高放射線環境下など原子力分野特有の条件を地盤工学へ融合すると共に、現状から廃炉までの時間軸を考慮しながら、個別基盤研究テーマ「(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」、「(ii)：土・地盤の放射線遮蔽性能を活用したデブリ取出し補助技術と掘削技術の適用評価、それに基づく実効性の高い数種類のデブリ処理メニューの提示」、「(iii)：福島第一原子力発電所構内の除染廃棄物処分と原子炉建屋デコミッションに関する実現可能な技術の開発」の技術開発を実施している。更に、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を育成するプログラム「廃炉地盤工学」の構築を進めるものである。

5カ年計画の2年目である本年度の業務実績としては、地盤工学会に設けた「福島第一原子力発電所廃止措置に向けた地盤工学的新技术と人材育成に関する検討委員会」の活動として、廃炉プロセス及び学問単位ごとの地盤系技術の位置付けや新技术の発掘及びその実現性について検討を行うことにより、廃炉地盤工学の内容の充実を図った。また、これまでに提案されている廃炉シナリオ（またはそれに類したもの）を評価・検討し、廃炉地盤工学での地盤系技術の位置付けを基に、地盤工学的技術を活用したシナリオの創出を試み、その実効性を評価した。更にシナリオの検討の中で、廃炉地盤工学で位置付けられるべき地盤系技術の要求性能などを明確にし、新技术の抽出や既存技術改良等を試みると共に、デブリ等原子炉建屋解体に伴う放射性廃棄物区分のデータ拡充を含め、廃炉地盤工学技術のデータベースの設計・試作を行った。加えて、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、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IAEAのマドリッド会議などの機会を活用し、同会議に参加している海外の関連機関から情報を収集した。

また、上記と併行して、廃炉地盤工学の教材やシラバスを試行的に作成し、廃炉地盤工学講演会等を実施することにより廃炉地盤工学教育システムの構築を試行し、専用のホームページの製作や関連学会での特別セッションなどを通じて、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進めた。

再委託先の早稲田大学では、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、各材料仕様に応じた放射線遮蔽データ取得を行い、データベースの作成に着手した。更に各技術の施工性を検討するため、超重泥水の放射線遮蔽性及び充填施工性評価実験装置を用いて、超重泥水の充填施工性を定量的に評価した（個別基盤研究テーマ(ii)・(iii)）。もう一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、種々の試験装置(流向・流速計等)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問題点・課題を抽出・整理した。また、現場での地下水流動を把握するため、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と共に、広域・長期間の地下水環境変動予測技術を開発するため、地下水理をモデル化し、浸透流解析・物質移行解析のためのハード(クラスタマシン)に静音対策を施した上で、

概略地下水流動解析(数値解析のプロトタイプの開発)を実施し、並列計算の効率性も含め問題点を抽出した(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」を更に発展させると共に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、設計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し、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。