

付録 2

個別試験結果と評価詳細

Web 用報告書

実施代表者：公益財団法人原子力安全研究協会
実証テーマ名：次世代を担う人材への除去土壌等の管理・減容化・再生利用等の理解醸成
概要： 除去土壌等の中間貯蔵施設への運搬、除去土壌等の再生利用や最終処分および除染や汚染廃棄物の処理等に対し、全国的な議論の進展が必要とされている。しかし、除去土壌等の再生利用や処理等に対して、これまでの議論は技術的な側面が中心であり、次世代を担う若手（学生）や地域住民の方に説明する自治体担当者などの人材育成および理解醸成を含めたコミュニケーションとその方法論は不足している状況にあった。 本プロジェクトは、3年計画で次世代を担う学生、若手技術者等の人材育成のため、(1)コミュニケーションツールの作成、(2)人材育成プログラムを実施する。これらの人材が『技術的内容への理解促進』と『本件に関わるステークホルダーの多面性、価値観の多様性を理解し、総合的に見られるようになる。』ことを目的としている。
実施内容： 1. コミュニケーションツールの作成（技術的内容への理解促進） コミュニケーションツールの改訂・公開用資料の作成 2. 大学生を対象とした人材育成プログラム (ア) 大学での講義、(イ) 現地見学、(ウ) ワークショップ、(エ) フォローアップ
技術概要： 1. コミュニケーションツールの作成 除去土壌等の中間貯蔵施設での保管、減容化、再生利用等の既往知見を集約した平成30年度に作成し、平成31年度に改訂したPhase3（専門性を持って問題の解決に取り組む実務者・技術者向け）について、同ツールを利用した講義受講者のアンケートを実施し、結果を踏まえて改訂した。また、平成31年度に作成したPhase2（自治体職員向け）については、Phase3と統一した資料として同時改訂、Phase1（一般向け）は、想定される利用者を対象としたアンケートに基づき改訂した。 2. 人材育成プログラム 『技術内容への理解促進』と『本件に関わるステークホルダーの多面性、価値観の多様性を理解し、総合的に見られるようになる。』ことを目的として、(1) 大学での講義、(2) 現地見学、(3) ワークショップ、(4) 知識定着や気付きに向けたフォローアップを実施した。大学生を対象にコミュニケーションツール全章を用いた事前講義、および現地見学、ワークショップ、フォローアップ（希望者）を実施した。また、大学の課外のセミナーなど多様な機会に講義・ミニワークショップ等を実施し、16大学の学生約220名を含む約240人余りに対してコミュニケーションツールを用いた講義を、新型コロナウイルス感染防止のために、同期型オンライン授業として実施した。現地見学は、大学別を基本とした小人数グループによる見学を実施した。ワークショップは、オンライン会議システムを使用し、(ア) 全体ワークショップ、(イ) フォローアップワークショップとして、学生が講義と現場見学を通して得た理解をより深める場を複数設定した。過年度の参加者もワークショップに参加し、関心意欲に応じたフォローアップを実施した。

実証試験の結果：

1. コミュニケーションツール作成

平成 31 年度、Phase3 の内容を整理して、自治体職員用のコミュニケーションツール（Phase2）を作成するために、複数名の自治体職員に対してアンケートを行ったところ、ほぼ全ての内容が必要という結果になったため、Phase3 と Phase2 は統一的な資料とした。その上で、令和 2 年度は、全 Phase を改訂し、公開用資料を作成した。

2. 人材育成プログラム

（1）大学での講義：16 大学の学生約 220 名を含む約 240 人余りに対してコミュニケーションツールを用いた講義を、新型コロナウイルス感染防止のために、同期型オンライン授業として実施した。長崎大学（福島県立医科大学との共同大学院）、早稲田大学、九州大学、東京大学、神戸大学、横浜国立大学では「単位認定授業」として講義を実施した。

（2）現地見学：事前講義を受講し、事前事後アンケートに回答した 5 大学の学生 24 名が参加した。新型コロナウイルス感染防止のために、大学別を基本とした小人数グループによる見学を実施した。

（3）ワークショップ、（4）フォローアップ：新型コロナウイルス感染防止のために、オンラインを使用し、過年度参加者の参加も得て（ア）全体ワークショップ、（イ）フォローアップワークショップとして、学生が講義と現場見学を通して得た理解をより深める場を複数設定した。

技術等の評価：

①技術的内容の理解度の確認：講義に参加した学生に対して、理解度を確認することを目的としたアンケートを講義後に実施し 9 大学 110 名の回答を得た。アンケートでは、コミュニケーションツールのテーマごとの設問に対する回答を求め、正解率で理解度を測った。理解度は 79%であり、目標とした理解度 80%をほぼ達成した。一方、テーマ別の正解率は、目標とした理解度 80%に 3 テーマで到達、3 テーマで及ばなかった。当該部分について、コミュニケーションツールの当該箇所を確認し、正確に伝わるように修正した。

②理解・認知レベルの変化：講義参加者に対して、「除去土壌等の減容・再生利用に関する」事前および事後アンケートを実施した。アンケートの結果はポジティブな回答が多く、オンライン講義においても対面と同等の満足度が得られていることが示唆されるとともに、今後の改善点が明確になった。また、事前事後両アンケートで同一回答者と確認できた 75 名の回答を用いて変化を検討した。技術的な内容と、人的な課題を克服する難しさの双方を理解したことがうかがえる結果となり、講義による人材育成プログラムの目標達成が確認できた。

作業員被ばく量評価：対象外

コスト評価：対象外

歩掛り（作業人工、作業速度等）：対象外

コスト評価条件：対象外

安全性の評価：対象外

試験場所（住所）：対象外

除去物保管場所と保管状況：対象外

1. 事業の背景と目的

除去土壌等の中間貯蔵施設への運搬、除去土壌等の再生利用や最終処分および除染や汚染廃棄物の処理等に対し、全国的な議論の進展が必要とされている。しかし、除去土壌等の再生利用や処理等に対して、これまでの議論は技術的な側面が中心であり、次世代を担う若手や地域住民の方に説明する自治体担当者などの人材育成および理解醸成を含めたコミュニケーションとその方法論は不足している状況にあった。

本プロジェクトは、次世代を担う学生、若手技術者、自治体担当者が『技術的内容への理解促進』と『本件に関わるステークホルダーの多面性、価値観の多様性を理解し、総合的に見られるようになる。』ことを目的とし、

- (1) 除去土壌等の中間貯蔵施設での保管、減容化、再生利用等の既往知見を集約したコミュニケーションツールの作成
- (2) コミュニケーションツールに基づく講義および現地見学・ワークショップによる人材育成プログラム

を3年計画で実施している。本報告は最終年度である令和2年度の報告である。

2. 令和2年度の実施内容の概要

本年度の実施内容の概要を以下に示す。

(1) コミュニケーションツールの作成

除去土壌等の中間貯蔵施設での保管、減容化、再生利用等の既往知見を集約した平成30年度に作成し、平成31年度に改訂したPhase3（専門性を持って問題の解決に取り組む実務者・技術者向け）について、同ツールを利用した講義受講者のアンケートを実施し、結果を踏まえて改訂した。また、平成31年度に作成したPhase2（自治体職員向け）については、Phase3と統一した資料として同時改訂、Phase1（一般向け）は、想定される利用者を対象としたアンケートに基づき改訂した。

(2) 人材育成プログラム

『技術内容への理解促進』と『本件に関わるステークホルダーの多面性、価値観の多様性を理解し、総合的に見られるようになる。』ことを目的として、(1) 大学での講義、(2) 現地見学、(3) ワークショップ、(4) 知識定着や気付きに向けたフォローアップを実施した。大学生を対象にコミュニケーションツール全章を用いた事前講義と現地見学・ワークショップ（希望者）を実施した。また、大学の課外のセミナーなど多様な機会に講義・ミニワークショップ等を実施し、16大学の学生約220名を含む約240人余りに対してコミュニケーションツールを用いた講義を、新型コロナウイルス感染防止のために、同期型オンライン授業として実施した。現地見学は、大学別を基本とした小人数グループによる見学を実施した。ワークショップは、オンラインを使用し、(ア) 全体ワークショップ、(イ) フォローアップワークショップとして、学生が講義と現場見学を通して得た理解をより深める場を複数設定した。過年度の参加者もワークショップに参加し、関心意欲に応じたフォローアップを実施した。

3. 令和2年度の成果目標および達成状況

今年度は、新型コロナウイルス予防の観点から人材育成プログラムの実施方法などに制約が生じたが、柔軟に対応することで設定した成果目標を達成することができた。

(1) コミュニケーションツールの作成

成果目標：除去土壌等の中間貯蔵施設での保管、減容化、再生利用等の既往知見を集約した平成30年度に作成し、平成31年度に改訂したPhase3（専門性を持って問題の解決に取り組む実務者・技術者向け）について、同ツールを利用した講義受講者のアンケートを実施し、結果を踏まえて改訂することとした。また、平成31年度に作成したPhase2（自治体職員向け）およびPhase1（一般向け）のツールについて、想定される利用者を対象としたアンケートおよび専門家の意見照会を実施し、結果に基づき改訂することとした。また、本コミュニケーションツールが広く使われるための方策についても検討することも目標とした。

達成状況：令和2年度は、全Phaseを改訂し公開用資料を作成した。また、ワークショップを通じて、広く理解醸成を進める方策を検討し示唆を得た。

(2) 人材育成プログラム

成果目標：人材育成プログラムの実証試験として、講義・現地見学・ワークショップ・フィードバック等を実施する。知識・認知レベルについては、授業前後での比較アンケートを実施する。また、最終年度として、講義に関して短時間で効果的に学べる方法、ワークショップ内容のブラッシュアップ、事業終了後の恒常的な人材育成プログラムへの展開について複数案を検討する。

達成状況：新型コロナウイルス感染予防の観点から、オンラインの使用など方法を変更しつつも、16大学の学生約220名を含む約240人余りに対してコミュニケーションツールを用いた講義を、同期型オンライン授業として実施した。現地見学は、大学別を基本とした小人数グループによる見学を実施した。ワークショップは、オンラインを使用し、学生が講義と現場見学を通して得た理解をより深める場を複数設定し、過年度の参加者もワークショップに参加した。

4. 事業の実施手順

(1) 事業の手順

本事業は、情報を利用する異なる主体に適したコミュニケーションツールおよび人材育成プログラム開発を3年間で段階的に実現する計画に沿って実施した。事業の3年間の手順を図4-1に示す。

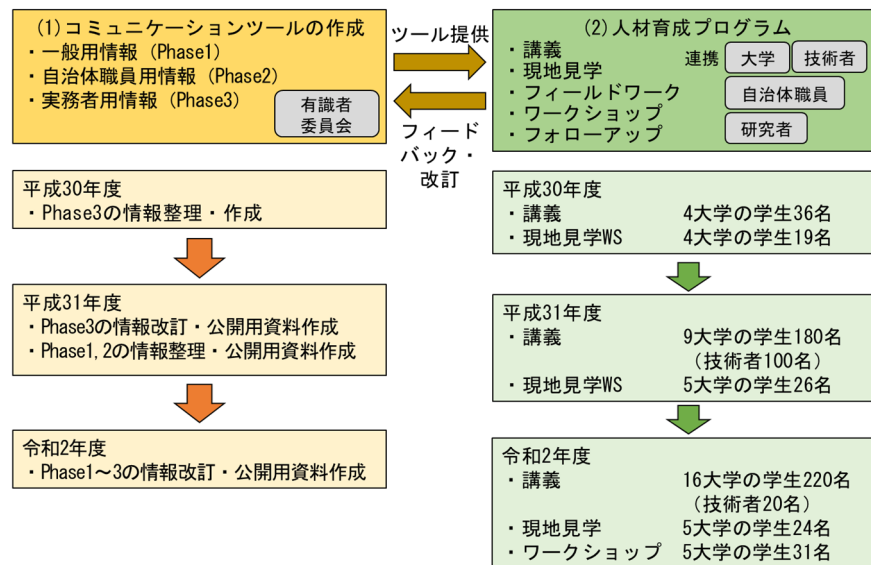


図 4-1 事業の手順（平成 30 年度～令和 2 年度）

① コミュニケーションツールの作成の手順

コミュニケーションツールの作成は、図 4-2 に示す手順で行った。

4 月～1 月：平成 31 年度の成果であるコミュニケーションツール Phase3（実務者向け）、Phase2（自治体職員向け）、Phase1（一般向け）について、同ツールに関するアンケートおよび有識者のコメント等を踏まえて改訂する。



2 月：全 Phase の公開用資料を作成する。

図 4-2 令和 2 年度コミュニケーションツールの作成の手順

② 人材育成プログラムの手順

人材育成プログラムは、図 4-3 に示す手順で行った。

（ア）講義：4 月～10 月



（イ）現地見学・（ウ）ワークショップ：9 月～11 月



（エ）フォローアップ：12 月～2 月

図 4-3 令和 2 年度人材育成プログラムの手順

（2）実施体制

本事業は、公益財団法人原子力安全研究協会による全体統括のもと、複数の機関

(2) 人材育成プログラム

① 講義

表 5-1 に示すとおり、16 大学の学生約 220 名を含む約 240 人余りに対してコミュニケーションツールを用いた講義を、新型コロナウイルス感染防止のために、同期型オンライン授業として実施した。長崎大学（福島県立医科大学との共同大学院）、早稲田大学、九州大学、東京大学、神戸大学、横浜国立大学では「単位認定授業」として講義を実施した。

表 5-1 令和 2 年度に実施した講義等一覧

大学名	実施日	受講者	カリキュラム上の位置づけ
長崎大学(福島県立医科大学との共同大学院)	4 月 23、30 日、 5 月 7、14 日	7 名	「リスクコミュニケーション学」の一環として講義実施(単位認定授業)
早稲田大学	6 月 1 日	4 名	「Advanced Earth and Environmental Engineering 1」の一コマとして実施(単位認定授業)
九州大学	6 月 6 日	約 20 名	「地域環境工学連携集中講義」の一環として講義実施(単位認定授業)
合同(茨城大学、東京大学、福島大学、京都大学、京都府立大学、大阪大学、北海道大学、広島大学)	6 月 20 日	約 90 名	特別セミナー(単位認定なし)
合同(茨城大学、北海道大学、広島大学)	7 月 13 日 7 月 14 日	4 名	特別セミナー(単位認定なし)
東京大学	7 月 18 日	約 25 名	「放射線リスクマネジメント学」の一環として講義実施(単位認定授業)
			
合同(福島大学)	7 月 26 日	3 名	特別セミナー(単位認定なし)
神戸大学	7 月 30 日	約 40 名	工学部「先端科学と福島の現実次世代人材育成」の一環で講義実施(単位認定授業)
NUMO	8 月 21 日	20 名	オンラインセミナー
静岡大学	10 月 10 日	3 名	教室ゼミ
神戸大学	11 月 5 日	5 名	教室ゼミ
横浜国立大学	11 月 9 日 11 月 16 日	15 名	「地盤環境工学」の一環として講義実施(単位認定授業)
信州大学	11 月 26 日	4 名	教室ゼミ
北海道大学	2 月 21 日	4 名	対面およびオンラインによる課外セミナー
環境放射能除染学会 第 9 回研究発表会	9 月 3 日	—	セッション 4 復興にて発表
日本リスク学会 第 33 回年次大会	11 月 22 日	—	企画セッション 5 にて発表

②現地見学

新型コロナウイルス感染防止のために、大学別を基本とした少人数グループによる見学を実施した。

(ア) 参加者

表 5-2 に示すとおり、講義を受講し、講義の事前事後アンケートに回答した 5 大学の学生 24 名が参加した。

表 5-2 現地見学参加者一覧

大学（学部）	実施日	参加人数
北海道大学（工学部）	9 月 10, 11 日	5 名
北海道大学（農学部）	10 月 14, 15 日	7 名
大阪大学	9 月 14, 15 日	2 名（および教員 1 名）
茨城大学	10 月 12 日	2 名（および教員 1 名）
京都大学	10 月 19, 20 日	5 名（および教員 1 名）
福島大学	11 月 19 日	3 名（および教員 1 名）

(イ) 内容

内容は、**表 5-3** のとおり、除去土壌の再生利用の実証実験および除去土壌に係る情報を提供する施設を訪問し、説明を受けた。また、車内から、避難指示が解除された地域および帰還困難区域を見学し、実施担当者の説明を受けた。

表 5-3 現地見学スケジュールの例

1 日目	
11:00~12:15 (75 分)	廃炉資料館
13:30~14:30 (60 分)	リプルンふくしま
15:00~15:40 (40 分)	中間貯蔵工事情報センター
16:00~17:00 (60 分)	東日本大震災・原子力災害伝承館
17:10~	南相馬市（宿泊施設）へ移動（車窓を説明）
2 日目	
9:00~9:40 (40 分)	南相馬市（宿泊施設）から移動 蕨平仮設焼却施設（事業説明、施設見学等）
10:00~11:00 (60 分)	飯館村長泥地区特定復興拠点整備（除染事業・環境再生事業） 長泥地区プレゼンルーム（事業説明、施設見学等）

③ワークショップ・フォローアップワークショップ

過年度は、ワークショップを現地見学と一続きのスケジュールとして現地において実施し、フォローアップを別途学校ごとに行っていたが、今年度は、新型コロナウイルス感染予防のために、オンラインを使用し、過年度参加者の参加も得て（ア）全体ワークショップ、（イ）フォローアップワークショップとして、学生が講義と現場見学を通して得た理解をより深める場を複数設定した。なお、フォローアップワークショップは、昨年度別日程で実施したフォローアップと現地見学後のワークシ

ヨップを統合したもので、3 回に分けて実施し、講義や現地見学に基づくディスカッションを通して、知識の定着や、気づきの確認を図った。

令和 2 年度の講義および現地見学の参加者 27 名および過年度参加者 4 名が参加した。参加者からは、現地を訪問したうえで自身が発表資料を作成するなどワークショップの準備をすることで、理解を深めるだけではなく、関心が高まり、当事者意識が芽生えたという意見が複数聞かれ、理解醸成の在り方にも示唆を得た。さらに過年度参加者からは、参加をきっかけに現地での調査を継続し、その中で得た知見の共有や、今年度の参加で詳細を理解できたという発言もあり、年度を超えたフォローアップの意義も確認できた。

(ア) 全体ワークショップ

次のとおり実施し、講義と現地見学を通して学んだ内容について、参加者の報告をもとにディスカッションを行った。過年度参加者は、参加を契機として継続した現地調査について報告した。

日 時：11 月 25 日 10:00～12:10

場 所：JESCO 本社、環境省会議室等（Webex を使用）

参加者：令和 2 年度参加学生 9（北海道大学 3、茨城 2、京都大学 2、大阪大学 2）、平成 31 年度参加学生 2（北海道大学、神戸大学）、大学教員 2（大阪大学、北海道大学）、JESCO3、環境省 3、事業実施担当者 4

(イ) フォローアップワークショップ

発展的な内容として、講義や現地見学を通して得た気づき等に加えて、「最終処分のメリットおよびデメリット」および「国民的な理解醸成をはかる方法」について検討するワークショップを行った。活発な討論を促すため、小グループでの実施とし、表 5-4 のとおり、過年度参加者 2 名を含む参加者 20 人を A～C の 3 グループにわけて、それぞれ異なる実施日とした。グループワークショップは、個人発表と、それらの発表に基づく議論で構成され、全グループ、活発な意見交換によって、知識の深化や気づきの共有ができた。

表 5-4 フォローアップワークショップ参加者一覧

グループ	実施日時	令和 2 年度対象者	過年度対象者	コメンテーター・実施担当者
A	1 月 12 日 10:30～15:30	北海道大学 4、京都大学 1	北海道大学 1	大学教員 1（北海道大学）、実施担当者 3
B	1 月 12 日 10:30～15:30	北海道大学 5、京都大学 2		大学教員 2（北海道大学、京都大学）、実施担当者 3
C	1 月 19 日 10:30～15:30	北海道大学 1、茨城大学 2、京都大学 1、大阪大学 2	京都大学 1	大学教員 2（北海道大学、大阪大学）、JESCO2、実施担当者 3

内容としては、個人発表に基づく議論を展開し、個人発表の課題として、次の 3 点に関して検討した結果を各自が発表した。

- ① 講義と現地見学を通じて得た気づきと今後に生かしたいこと
- ② 最終処分におけるメリットデメリットについて（演習で使用した一覧表をまとめ、自分で最も適切と考える方法を提案）
- ③ 今後、県外最終処分について、国民的な理解醸成の必要性（理由とともに整理し、国民的な理解醸成をはかる方法について提案）

	オプションA 1箇所で集中管理	オプションB 各県1箇所 46箇所で分散管理	オプションC 〇〇〇〇
オプション1 1300万tの低濃度 土壌			
オプション2 5万tの高濃度濃縮 物			
オプション3 〇〇〇〇			

図 5-3 課題「最終処分におけるメリットデメリットについて」ワークシート

6. 試験結果の評価

試験結果の評価として、（１）コミュニケーションツールの作成について理解度アンケート結果、および（２）人材育成プログラムについてはアンケートの結果に基づき評価した。

（１）コミュニケーションツールの作成

コミュニケーションツールを用いた講義に参加した学生に対して、理解度を確かめることを目的としたアンケートを 6 月から 8 月にかけて講義後に実施し 9 大学 110 名の回答を得た。アンケートでは、コミュニケーションツールのテーマごとの設問に対する回答を求め、正解率で理解度を測った。全体の理解度は 79%であり、目標とした理解度 80%をほぼ達成した。テーマ別の正解率は、「1.震災からこれまで」76%、「2.土の中の放射性セシウムの挙動」87%、「3.除染および除去土壌等の管理・保管」73%、「4.除去土壌等の減容化技術・再生利用」83%、「5.リスクコミュニケーション」92%、「6.安全と安心」78%であった。理解度が低い内容に関しては、コミュニケーションツールの当該箇所を確認・修正した。

（２）人材育成プログラム（理解・認知レベルの変化）

大学での講義に参加した学生の知識・認知レベルの変化を確認するため、授業参加者に対して、「除去土壌等の減容・再生利用に関する」事前および事後アンケートを実施し、事後アンケートにおいて、授業の感想と改善すべき点を質問し、今後の人材育成への示唆を得るとともに、事前・事後で同じ質問への回答を比較することで知識・認知レベルの変化を確認した。また、事後アンケートでは、授業の感想、授業で改善すべき点について、自由記述による回答を求めた。

①授業の感想と改善点

事後アンケートで得られた回答は、（ア）授業内容に関する感想、（イ）授業方法に関する感想、（ウ）認知の変化に関する感想、（エ）その他の 4 項目に分類できた。

（ア）授業内容に関する感想

関心を持った内容に関する感想が目立ち、中でも講師の経験に基づく内容に関しての関心を示す記述が複数見られた。また、知らなかった・普段学べないことを学んだという感想も複数見られた。

(イ) 授業方法に関する感想

授業の分かりやすさ、ディスカッション・双方向性の重要性などに言及していた。また、新型コロナウイルス感染予防のためにオンライン授業であったことに言及した回答もあった。

(ウ) 認知の変化に関する感想

課題が認識できたことや当事者意識を得たこと等に言及されていた。また、偏見の払しょくや、「福島の見捨てられた感」の軽減といった本プログラムが知識の伝達以外の機能を持つことを示唆するものだった。

(エ) 授業方法の改善点

ディスカッションや双方向性を求める声が目立ったが、オンライン授業の技術の高度化、また対面授業に戻すことで対応できると考える。

(オ) 授業計画の改善点

前年度から、対象とする大学および学生数が、大幅に増加したことに加え、オンライン授業となったために、学生への周知やコミュニケーション内容等が改善を要する点として挙げられた。

②事前と事後の変化

事前事後両アンケートで同一回答者と確認できた 75 名の回答を用いて検討した。技術的な側面と、人的な課題難の双方を理解したことがうかがえる結果となり、講義によって人材育成プログラムの目標『技術的内容への理解促進』と『本件に関わるステークホルダーの多面性、価値観の多様性を理解し、総合的に見られるようになる。』への達成が確認できた。

(ア) 除去土壌の再生資材化とその再生利用に関する現在の考え方

除去土壌の再生資材化とその再生利用に関する「現在の考え方」の変化として、「b.再生資材の利用は安全だ」について、事後には肯定側への変化が見られた。逆に「g.除去土壌の再生資材化とその再生利用を進めるうえでは技術的に難しい課題がある」に関しては、否定側に変化した。

(イ) 除去土壌の再生資材化とその再生利用における優先事項と難しい課題

最も優先して検討すべき事項、最も難しいと思う事項に関しては、双方に共通して、事後に、技術に関する事項の選択が減少し、「e.事業に対する住民の理解」、「f.事業実施者と住民との丁寧なコミュニケーション」といった人的な課題への取り組みの選択が増加した。

(ウ) 除去土壌等の身近での再利用について

除去土壌等が身近で再利用される場合「自宅から何 m 離れていれば、許容できるか」にいては、選択肢「隣接」、「100m」、「500m」、「1km」、「10km」、「距離に関係なく嫌である」から一択としたが、前後で顕著な差異は認められなかった。

(エ) 除去土壌等の最終処分に関する考え方

除去土壌等の中間貯蔵開始後 30 年以内福島県外での最終処分に関して、「a.最

最終処分は安全だ」、「b.県外最終処分を進めることは賛成だ」、「c.自身の身近で県外最終処分されていても構わない」、「d.県外最終処分を進めることは難しい課題がある」について回答を求めたところ、事後に d 以外は、「そう思う」、「どちらかというと思う」の肯定側が約半数を占めて否定よりも多いが、否定側も増えていた。いずれも「どちらともいえない」、「わからない・知らない」が、減少しており、その中から肯定側の選択肢に移動した回答者が、否定側よりも多かったと考えられる。d に関しては、事前から肯定が約 7 割以上で、事後は 9 割を占めた。

(オ) 除去土壌等の身近での最終処分

除去土壌等の最終処分施設については、「自分の家から何 m 離れていれば許容できるか」を質問し、事後に「隣接」～「1km」の近距離の選択が 29 から 43 に変化し全回答者の半数以上を占めた。

(カ) 現時点で特に関心のある事項

特に関心のある事項については、「土木工学的知識」が、事前事後ともに少ない。「住民とのコミュニケーション」および「避難指示区域の状況」が、事後に増加した。

7. 3 年間のまとめと今後

本プロジェクトは、除去土壌等の中間貯蔵施設への運搬、除去土壌等の再生利用や最終処分および除染や汚染廃棄物の処理等に対し、これまで議論の中心であった技術的な側面とともに、合意形成や価値観の多様性等の社会的な課題について、次世代を担う若手の理解を醸成することを目的として実施してきた。最終年度である令和 2 年度には、目標以上の成果が確認され、改訂を重ねたコミュニケーションツールと 3 年間で延べ約 500 人の学生・技術者の参加を得てコミュニケーションツールを用いた人材育成プログラムにより、目的とした理解醸成が果たせることが検証できた。

さらに、人材育成プログラムの一環であるワークショップにおいては、理解醸成の在り方について議論を展開した学生から多様な提案が示された。その過程で当事者意識を獲得できたという示唆が、学生の発表でも言及されたが、学生だけではなく実施担当者にとっても新たな知見が開かれ、今後の展開の示唆となった。特に、基礎知識を学んでから課題に取り組むという順序ではなく、まず課題について興味を持つことで、必要な知識を自ら調べるという学習過程の提案は、本人材育成プログラムでの経験に基づくものであり、今後の理解醸成の在り方で考慮すべきだと考える。また、SNS や動画配信サイトに馴染んだ世代らしい、それらの活用に関する詳細な提案もあり、新たなメディアとの関係構築が、最終処分に向けた取り組みの方向性に影響を与えうることが印象付けられた。

以上、本プロジェクトでは、コミュニケーションツールと同ツールを用いた人材育成プログラムにより、除去土壌等の中間貯蔵施設への運搬、除去土壌等の再生利用や最終処分および除染や汚染廃棄物の処理等に対し、これまで議論の中心であった技術的な側面とともに、合意形成や価値観の多様性等の社会的な課題について、次世代を担う若手の理解を醸成し、さらに、今後の理解醸成に資する具体的な提案を示した。

実施代表者：福島工業高等専門学校
実証テーマ名：除去土壌等の減容等技術実証事業（その2） 除去土壌の再生利用等に関わる理解醸成のための課題解決型アプローチの実践Ⅲ
概要：本校の準学士課程（4～5 学年）から専攻科（2 年）にわたる 4 年間（大学学部相当期間）の学生を対象として、学修プログラム、フィールド・ワークなどを踏まえ、除去土壌の中間貯蔵、減容・再生利用、最終処分に貢献できる人材の育成を図る。その上で、地域的な問題、課題を意識した除去土壌の再生利用等に関する理解醸成のための実践を試行し、その効果を検証する。
実施内容：再生利用等の地域住民等の理解向上に向けて、 高専生による①アクティブ・ラーニング、②安全に対する理解、③安全に関する住民等への説明、④対話を通じた地域住民等の感覚に基づく安全から安心へ橋渡しの可能性を追求する。下図参照。
目標の具体化 再生利用等の地域住民等の理解向上に向けて、①若者（福島高専）のアクティブ・ラーニング、②安全に対する理解、③安全に関する住民等への説明、④若者との対話を通じた地域住民等の感覚に基づく安全から安心へ橋渡しの可能性を追求する。 1
具体的な実施概要は以下の通り。
① 学修プログラム（集中講義） 除染による除去土壌の発生、再生利用技術や安全評価など 6 講義
② フィールド・ワーク 再生利用実証事業施設、中間貯蔵施設など 5 施設を視察し、各施設の目的、事業内容、現状などを把握
③ 課題解決型アプローチの実践 共同教育は 4 ヶ所、学生研究は 5 テーマ、学会は 7 学会（オンラインが主）、全国展開の模索は 2 高専、福島大学との交流、地域住民等との対話は大熊町で共同作業や勉強会形式で実施

実施結果： ① 本アプローチ実践を通じた住民や高専学生の意見、提案等 ➤住民からは、 ・大熊町・花舞台作業～勉強会は極めて有効であり、継続すべきである。 ・住民との交流の成果は国や首長に伝えてほしい。 ・再生された除去土壌を用いて、大熊町の災害公営住宅、大野駅、坂下ダムなどの周辺に花舞台を設置し、散歩道も設けてほしい。 ・学生との活動はとても素晴らしい時間だった、火を消さずに続けてほしい。 ・花舞台では野菜も栽培し、収穫祭り等を通じて安全性の PR を！ ➤学生からは、 ・除去土壌が再生利用されないと 30 年後、次の世代に負の遺産として引き継がれてしまう。 ・本活動をマスコミを通じて日本全国に発信してほしい。 ・学校で学んだことが、活動を通じ社会に直接役立っていると感じた。 ② まとめ（3 年間のまとめ） 除去土壌の再生利用等に関して、地域の次世代の若者（高専学生）による「知る」、「見る」、「伝える」の活動に加え、地域住民との「共同作業」による理解醸成のアプローチは、再生利用等について住民が正しく理解することに貢献するとともに、学生も住民との対話によりさらに理解を深めることができた。これにより、除去土壌の再生利用等に関する理解醸成に向けた本アプローチは有効であることが実証され、一つの方法が確立したといえる。
学修プログラムの評価：特に、グループ討論は除去土壌の再生利用等の現状や問題点を理解する上で効果的であった。
フィールド・ワークの評価：除去土壌の再生利用等の疑問点の解消等に効果的であった。
課題解決型アプローチの評価：除去土壌の再生利用等に関しての評価は下記の通り。 1. 共同教育：背景や動向を理解 2. 学会参加：関連技術情報の収集 3. 学生研究：自らの課題解決力の向上 4. 地域住民等との対話：自らの理解向上と再生利用に関する住民の前向きな評価
全体評価：アプローチ自体のおおよその効果を確認。今後の展開につなげ得る。
実施場所 福島工業高等専門学校 他

除去土壌の再生利用等に関わる理解醸成のための課題解決型アプローチの実践Ⅲの結果

1. 学修プログラム（集中講義）の実施結果

（１）集中講義後の討論会での主な意見

- ・再生利用による線量は、高専の線量より低くて安全だと感じた。このことを住民に伝えるべきだと思った。
- ・問題意識をもっと持ってもらうため、友人、家族に説明してみる。
- ・住民の目線で説明する必要があるし、再生利用について住民の方にも意見を持ってもらう。



集中講義の様子

- ・花畑に使うなら、プラスのイメージになるし、花なら風評が少ないし、観光地にもなる。

（２）集中講義による成果、課題

集中講義後の理解度等に関して学生のアンケート調査を行った。概要は以下の通りである。

- ・学生の理解力に最も貢献があったのは、頻繁に行ったグループ討論であった。
- ・理解度が高かったのは、除去土壌の発生量、再利用先であった。
- ・理解度が低かったのは低レベル廃棄物と除去土壌との違い等であった。
- ・地域住民等の懸念の解消では、住民と信頼関係の構築が必要との意見があった。

2. フィールド・ワークの実施結果

訪問先は以下の５ヶ所である（写真参照）。

- ①再生利用実証事業施設、②中間貯蔵施設、③飯舘村環境再生事業施設、
④東京電力福島第一原子力発電所、⑤大熊町特定復興拠点



再生利用実証事業施設



中間貯蔵施設



飯舘村環境再生事業施設

各訪問先（施設）のフィールド・ワークにおける学生の主な意見等は以下の通りであった。

- ・空間線量率はバックグラウンドと大差なく、安全上問題ないが、土壌中の放射能濃度が高くなっても問題ないのか不安に思った（再生利用実証事業施設）。
- ・除去土壌の膨大さを感じたが、関心のない人にも知ってもらいたい（中間貯蔵施設）。
- ・覆土なしで試験栽培が予定されていることなどから、説明や対話のやり方次第では再生利用も可能と感じた（飯舘村環境再生事業施設）。
- ・大熊町役場として「方針が定まらない」との問題点が上げられたことや新規の住民に住んでもらうための努力などの説明が印象に残った。（大熊町特定復興拠点）。
- ・テレビや新聞で見聞きしていた情報が大部分だったが、実際に見学をして、トリチウム水等の処理水問題の解決に関わる情報を取得できた（福島第一原子力発電所）。



大熊町特定復興拠点



福島第一原子力発電所

3. 課題解決型アプローチの実践 関係機関との共同教育の実施結果

共同教育先は、以下の4ヶ所である（写真参照）。

- ① 大林組、②日本原子力研究開発機構、③飯舘村役場、④大熊町役場



大林組



日本原子力研究開発機構



飯舘村役場



大熊町役場

各共同教育先における学生の主な意見等は以下の通りであった。

- ・双葉町減容化施設（中間貯蔵施設）の建物の大きさは圧巻であった（大林組）。
- ・飯舘村・長泥地区環境再生事業では除去土壌を使用しているのか分からないほどきれいな花が咲いており、全国の人にもこの取り組みを知ってもらいたいと感じた。また、環境再生事業を受け入れる際の住民の苦悩として、「再生利用に反対するのは簡単だ

が、反対するだけでは何も解決しない」などが印象に残った（大林組）。

- ・自ら手計算で被ばく計算を行い理解しやすかった。また、放射性廃棄物の処分施設を現場で目にし、勉強になったし、試験施設の線量は高専の半分程度であることに驚いた（日本原子力研究開発機構）。
- ・住民説明において重要なのは、10人以下の少人数で行うこと、共通点のある人をグループ化して行うことで、なかなか意見が言えずモヤモヤして帰ってしまう人を減らすことが重要であることが分かった（飯舘村役場）。
- ・全体のためには多少強引にでも話を進めないといけない時があるとか、町の人口が急激に減った後に元に戻すことの難しさなどを感じた（大熊町役場）。

4. 課題解決型アプローチの実践 ベースとなる学生研究の実施結果

以下の関連する5つの研究を通じ、背景、知識、技能を習得した。主な結果も示す。

- ・降雨強度の違いによる土構造物内の浸透評価に関する研究

（主な結果）降雨強度の違いによる間隙内における間隙水の移動やその浸潤面形成から移動評価を実験等により検討した。実験では、降雨強度 30mm/h の場合は、飽和度の上昇に伴い、サクションが低下していることが確認できた。降雨強度 120mm/h では、降雨の浸透に伴い盛土全域の飽和度が上昇し、法先のサクションが消失するために、法先を起点に盛土表層が崩壊する現象が確認された。

- ・異なる水分環境下における植物残渣を含む土壌内の放射性セシウムの挙動

（主な結果）Cs-137を含む植物残渣を水分状態の異なる土壌環境下に置いた場合の土壌内 Cs-137 の挙動を明らかにすることを目的とし、カラム実験、植物残渣からの Cs-137 の溶出実験、Cs-137 の土壌への吸着実験を実施した。その結果、植物残渣から放出された Cs-137 の土壌中の移行挙動は、土壌への吸着が支配的であると推察した。

- ・ジオポリマーの長期安定性の向上を目指した組成の最適化の検討

（主な結果）ジオポリマーの硬化反応について、反応溶液中のケイ素、アルミニウムの存在量、溶出量を ICP で用いて測定し、硬化性について検討した。その結果、水中養生が重要であること、ジオポリマーの圧縮強度には、メタカオリンの比表面積、原料カオリンの結晶構造や Si/Al が関係していることを確認した。

- ・除去土壌浸出水中に含まれる化学成分の『見える化』を目的としたイオンアッセイデバイスの開発

（主な結果）バイオ分野での多検体試料の分析に用いられる“マイクロプレート”を定量デバイスに応用し、可搬性に優れた電源不要の金属イオン目視定量デバイスを開発するため、クロムについて実験を行い、その見通しを得た。同じ方法で、鉛、カドミウムの分析に応用可能である。セシウムについても比色法の諸条件の検討を行うとともに、カリウムについては濁度計分析によるおおよその見通しを得た。

- ・再生利用を想定した樹木系の Cs 循環挙動に関する基礎研究

(主な結果) 再生利用土壌での樹木への放射性セシウムの移行を検討するため、これまでの森林生態系の研究から一般的に言えることを整理した。スギについては根系の深度分布の整理を行うとともに、スギ林やアカマツ林の土壌中の放射能濃度を測定した。マツについては土壌からの移行係数を求め、過去の知見と比較した。

5. 課題解決型アプローチの実践 若者（高専生や同年代の学生）と地域住民との対話の実施結果

(1) 学会参加

令和 2 年度の下記関連学会（オンライン形式が主）に参加し、再生利用、処分などに関連する情報収集と発表を行った。

- ・大学協働事業・福島復興知シンポジウム（8 月）、・環境放射能除染学会（9 月）、
- ・土木学 2020 年度会全国大会（9 月）、・化学系学協会東北大会（9 月）、
- ・「復興知」事業 特別セミナー（10 月、双葉町）、・日本社会学会（10-11 月）、
- ・高専シンポジウム（1 月）

(2) 共同作業

地域住民との勉強会に先駆けて、地域住民と学生の信頼関係を深めるため、共同で花畑作りの作業（イベント名として「大熊町・花舞台」と呼ぶ）を行った。実施場所は、大熊町役場との打合せを行い、以下の 2 ケ所で決定した。

- ・災害公営住宅内の農園 2 区画 ・やすらぎ霊園入口

大熊町・花舞台では、計 7 回作業を行った。参加者数は延べ人数 209 名で、内訳は、大熊町住民等 128 名、学生 51 名（1 回目はコロナ対策で学生不参加）教職員 30 名である。以下に、各回の作業の様子を写真で示す。

① 1 回目（5 月 16 日、花植え・種まき）



② 2 回目（6 月 13 日、水やり、草取り、懇談）



③ 3回目（7月11日、鉢植え、水やり、草取り、懇談）



④ 4回目（8月8日、開園、水やり、草取り、開園イベント、対話）



⑤ 5回目（9月5日、水やり、草取り、分析報告）



⑥ 6回目（10月17日、水やり、草取り、懇談）



⑦ 7回目（11月14日、後始末、懇談）



また、各回の作業後の懇談等で参加住民から再生利用等に関して出された主な意見を以下に示す。

- 原発事故直後のスクリーニングの数値（10,000 カウントなど）について意味もわからず、伝えられたが、行政担当者もちゃんと説明できず、避難後も政府への不信感がずっと残っている。
- 若い世代がこのような地味なことを継続していけば復興につながると思う。
- このような活動を通じ、一人ひとりが自分の意見をしっかりと持ってほしい。
- 果物より、花の栽培のほうが無害だし、花舞台をベースに展開したらどうか。
- 国は信用されてない。専門家はわかりにくい。学生（若者）がいろいろやって、花畑で無害なことが証明できるなら（5～6 年かかるかも）、住民も信頼したい。
- 若者が農地利用提案するなら（例えば、対役場）、住民はついてゆくし、支援もしたい。
- 坂下ダムの近くのホテルと花畑（ひまわり畑、花舞台）との組み合わせであれば人を集められるかもしれない。
- 次年度は花の種類を変えて、引き続き移行係数など安全性を検討してほしい。
- 高専生の測定結果の発表は、企業がやったものより受け入れやすい。
- 天然にある K-40 の測定結果と比較されており、わかりやすかった。
- 大熊町・花舞台を通じた若い高専生の活動に感謝したい。花舞台を通じて、災害公営住宅に入居した住民同士につながりが生まれた。
- 学生が花舞台のような活動を続けることは賛成。特に、勉強会も含めて学生なら気軽に話せる。
- 除去土壌で野菜を育てることも可能と思う。大熊町で育てた野菜は放射能が低い、山菜のコシアブラは放射能が高い。イノシシの肉も問題である。
- 次年度も大熊町・花舞台をやるのであれば、場所として帰還困難区域で試験的にやるという手もあるが、住民が参加するなら人が立ち入れる場所を中心にやるのが好ましい。
- 次年度も大熊町・花舞台をやるなら散歩コースに花を植えてくれると嬉しい
- 福島原発の廃炉後や 40 年先の姿をイメージして議論をすることも必要である。

（３）全国展開の模索

熊本高専および福井高専との交流を行い、除去土壌の再生利用について情報交換等を行った。10 月 31 日の熊本高専との交流では、訪問前に水俣病資料館やエコパーク水俣も見学し、水俣病の発生・拡大や被害の様子とともに多くの被害者の闘い、市民の活動が印象に残った。特に、水俣病で犠牲となったものの代償である水俣湾埋立地を後世に誇り得る遺産としていることである。その埋立地跡が公園、花畑、運動場などになり多くの方が訪れ楽しんでいる様子を目の当たり

にした。

熊本高専における意見交換では、福島高専より福島原発の事故や除去土壌の再生利用に関する活動の概要を紹介し、多くの質問を受けた。再生利用後の第三者や IAEA のチェックを受けたらどうかといった提案も頂いた。熊本高専からは、河川工学（洪水対策）や海岸工学における住民との交流の大切さ、エコパーク水俣における活動「もやい直



エコパーク水俣のモニュメント

し」などの紹介があった。「もやい直し」では「文句を言っても始まらない」「何かをしなければならない」との住民の思いから生じた活動のことである。交流後、熊本高専の先生より福島高専での取り組みが大変よく理解できたことや今後の交流の希望が述べられた。

福井高専との交流については、進め方などについて Web 上で議論した。特に福島県の間蔵貯蔵施設などへの福井高専生や教員の見学や意見交換の日程などを協議したが、コロナ禍のため実現には至らなかった。また、重金属の土壌汚染の発生や廃棄物などに伴う土壌環境保全技術協会との交流についても意見交換を行った。

（４）福島大学との交流

12 月 5 日の大熊町での勉強会への福島大学の参加をコロナ禍により見合わせたため、高専生が福島大学を訪問し、環境回復の研究テーマに関する報告会や環境放射能研究所等の見学などの交流を行った。福島大学からは、海洋での環境動態研究などの報告があった。海洋での研究ではトリチウムや Cs-137 のバックグラウンドとしての自然界での存在量との比較が報告され、バックグラウンドの方が大きいことなどが報告された。

（５）地域住民との対話（勉強会）

①企画

（ア）趣旨等

- ・除去土壌等の再生利用など除去土壌を取り巻く問題は浜通り地域の環境回復にとって重要な課題である。
- ・福島高専では、住民との勉強会に向けて学生を中心に企画検討を行い発表準備やリハーサルを数回行った。大熊町の参加住民は、大熊町・花舞台参加者を中心とした。コロナ禍も考慮し、H30 年度、H31 年度と比べ規模を縮小した。勉強会後にはアンケート結果を回収する。

（イ）目的

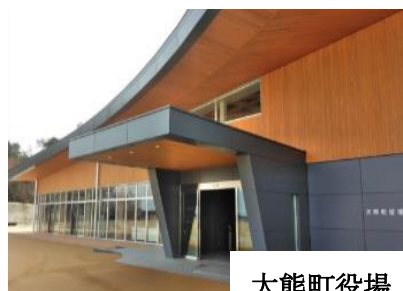
除去土壌の再生利用について正しく理解すること（再生利用とは何か、安全なのか、緊急性は、経済性は など）を目的とした。

(ウ) 日程、参加者

- ・日時：令和2年12月5日（土）13：30～16：45
- ・場所：大熊町役場新庁舎
- ・参加者：福島高専学生14名、大熊町住民15名 合計29名（福島高専教職員7名）

(エ) 議事次第

- ・開会あいさつ、勉強会の趣旨等の説明
- ・学生の取り組み紹介（福島高専）
- ・グループ討論（テーマ例：再生利用の安全性、再生利用技術の内容、信頼性、除去土壌の処分の経済性、現実性、放射線モニタリング、再生利用の進め方、再生利用と復興）
- ・全体のまとめ、アンケート回収、閉会あいさつ



大熊町役場

① 実施結果

4班に分けて行ったグループ討論に関する各班のまとめは以下の通りである。

(ア) 各班の議長からのまとめ

(a) 1班

- ・再生利用の提案としては、散歩コースと公園を組み合わせたらどうか。大野駅や役場周辺、それ以外にも展開すべきである。散歩コースは、災害公営住宅を起点にイノシシが出るようなところも含めて検討すべきである。
- ・上からの言いなりではなく、飯舘村のような行動も必要であり、大熊町も見習うべきではないか。
- ・一般の人も含めてそれぞれの人たちがわかるような説明が必要である。聞く人の年代に合わせた説明も重要である。説得力ある人の説明も必要である。
- ・高速や国道から見えるような施設を造ることも重要である

(b) 2班

- ・花だけでなく、野菜も栽培し、食べることも企画したらどうか。芋煮会などを開催し、地域の人と付き合うことも重要である。
- ・農地や高速道路、発電所を造る時にも利用したらいい。また、プランターなどの土にも利用可能ではないか。
- ・河川堤防への利用もありうるが、流出のことを考えるとやはり道路に使うのがいいんじゃないか。



勉強会におけるグループ討論の様子

- ・県外処分はやっぱり困難だと思うので、県内で使うべきだと思う。
- ・地道な努力、説明も必要だが、花舞台に加えて、野菜栽培も行い食べて安全性を実証し、信頼を獲得することが必要だと思う。

(c) 3 班

- ・再生利用について賛成か反対か聞いたら、全員賛成で安全だとわかった。東京ドーム 11 個分を処分するのは大変だし、金もかかる。まして覆土までするなら何でもいい。
- ・大野駅周辺にナシの道を造れば、春は花、秋はナシのいい香りがする。冬はイルミネーションの道路にしたらいい。
- ・坂下ダムの近くに花舞台の丘を造り、イベント、コンサート、釣り大会などを開催すべきである。
- ・花舞台はとてもいい活動だ。大熊町を離れた人も気になってる。今後の活動に誘ってみたらどうか。

(d) 4 班

- ・再生利用の手前の課題として安心まで行ってないと思う。放射線の教育や周知の仕方などを考えないといけない。人体への影響については 8,000Bq/kg だとなぜ安全といえるのか説明が理解されていない。野菜は 100 Bq/kg なのに、土は 8,000 Bq/kg は高すぎないか。
- ・再生利用するとどういうメリットがあるのかが重要である。観光地化する、高齢者が住みやすい街にする、自然を生かして遊歩道を造るなど。
- ・実証事業として農地開発は重要であり、農業高校や研究施設の誘致も必要である。

最後に本勉強会の全体司会者が以下のようなまとめを述べた。

「除去土壌の再生利用に関する提案では農地利用と災害対策を結びつけるものが多かった。特に、花を中心に自然を利用した皆が利用できる施設を多くの人が希望している。その上で、観光地化しイベントも開催すべきだと思う。問題はこれをどう実現するかだ。一方、安全は理解できるが、安心のゴールまでには至っていない。情報発信や伝え方にも工夫が必要である。大熊町以外の県内外への発信も重要である。」

(イ) アンケートの回収結果

勉強会の後、福島高専の学外と学内に分けてアンケート結果を整理した。

アンケート結果によれば、学生が行ったプレゼンテーションの内容については、学外からの勉強会参加者の 8 割が「再生利用について理解を深めることができた」と回答していた。また同じく 9 割が「再生利用は必要だと思う」と回答していた。ともに 8～9 割程度が再生利用について肯定的であることから、学生のプレゼンテーションの効果は一定程度あったものとする。一方、再生利用の安全

性については 8 割の人がそう思うと回答していた。このように学生の取り組みを通じた肯定的な意見については、大熊町・花舞台の共同作業による効果が大きいものと考えられる。このことは、自由記述でも、大熊町・花舞台とそれに続く勉強会は極めて有効で継続すべきといった意見や大熊町民と学生との交流成果を国や首長に伝えて欲しいといった意見に表れている。

学生からは、住民の意見とほぼ同じであるが、本活動をマスコミを通じて多くの人に知って欲しいこと、住民も交えた発表会の必要性などが上げられた。

地域住民とのグループ討論は、再生利用に関する地域住民の意見などを聞いて、学生にとってはさらに理解を深める機会となった。何より大熊町・花舞台の活動が好評で驚いたとか、自分たちが学んだことや活動することが社会で直接役立っていることが感じられてうれしいといった意見は特筆すべきである。

再生利用を進める上での環境的観点、経済的観点、社会的観点的優先順位については、学内外ともに環境的観点（人や自然環境への配慮など）と社会的観点（地域の復興など）を経済的観点より優先させる事項として挙げていた。

6. 本アプローチを通じた参加学生等の意見、提案等

住民からは、

- ・大熊町・花舞台作業～勉強会は極めて有効であり、継続すべきである。
- ・住民との交流の成果は国や首長に伝えてほしい。
- ・再生された除去土壌を用いて、大熊町の災害公営住宅、大野駅、坂下ダムなどの周辺に花舞台を設置し、散歩道も設けてほしい。
- ・学生との活動はとても素晴らしい時間だった、火を消さずに続けてほしい。
- ・花舞台では野菜も栽培し、収穫祭り等を通じて安全性の PR を！

学生からは、

- ・除去土壌が再生利用されないと 30 年後、次の世代に負の遺産として引き継がれてしまう。
- ・本活動をマスコミを通じて日本全国に発信してほしい。
- ・学校で学んだことが、活動を通じ社会に直接役立っていると感じた。

7. まとめ（3年間のまとめ）

除去土壌の再生利用等に関して、地域の次世代の若者（高専学生）による「知る」、「見る」、「伝える」の活動に加え、地域住民との「共同作業」による理解醸成のアプローチは、再生利用等について住民が正しく理解することに貢献するとともに、学生も住民との対話によりさらに理解を深めることができた。これにより、除去土壌の再生利用等に関する理解醸成に向けた本アプローチは有効であることが実証され、一つの方法が確立したといえる。

実施代表者：株式会社奥村組

実証テーマ名：膨潤抑制剤添加処理により除去土壌の再利用を効率化する技術

全体概要：

除去土壌の減容・再生利用技術の一つとして湿式分級処理が検討されている。一方、中間貯蔵施設の受入分別における除去土壌からの異物除去には改質材が用いられ改質材には SAP（Super Absorbent Polymer、以下、SAP）を含むものがある。SAP は数百倍に及ぶ吸水膨潤性があり、湿式分級処理で回収・再利用される土壌（以下、回収粗粒土壌）の品質に影響を及ぼす懸念がある。この SAP の吸水膨潤性は多価陽イオン（以下、抑制剤）を添加することで抑制可能であり、本技術はこの原理を利用したものである。本実証は 2 年かけて実施し、昨年度は SAP を含む除去土壌の湿式分級処理、SAP が分配された場合の影響、抑制剤の添加効果の評価等と回収粗粒土壌を用いて実証盛土を構築した。今年度は、抑制剤添加による盛土材料としての品質への影響について評価した。

実施内容：

- ①サイト外室内試験と現地トリータビリティ試験：改質材の特性と抑制剤の効果を検証
- ②湿式分級処理試験：回収粗粒土壌を用いて改質材の混在性評価や抑制剤効果の検証【①②は、平成 31 年度に実施】
- ③実証盛土試験：②試験の回収粗粒土壌を用いた盛土での改質材中の SAP が再生資材に与える影響と抑制剤による品質向上効果についての検証。具体的には、下表に示す 3 山の実証盛土をそれぞれ 2 分割し、片方には抑制剤を添加することで、計 6 ケースの条件下、沈下量や浸出水の水質、土質試験等のモニタリングを実施した。

盛土名	A		B		C	
ケース番号	1	2	3	4	5	6
湿式分級処理	あり	あり	あり	あり	なし	なし
改質材の追添加	なし	なし	あり	あり	あり	あり
抑制剤の添加	なし	あり	なし	あり	なし	あり

技術概要：

本技術は、湿式分級処理された回収粗粒土壌に SAP が分配される場合を想定し、その SAP の膨潤を抑制して再生資材の品質向上に繋げることを目的として、湿式分級処理の解泥処理工程で抑制剤を添加する方法である（図 1）。なお、SAP による膨潤性を呈するものに対して効果の発現を期待するものであり、事前に対象土壌を用いて、75 μ m 篩上の土壌の膨潤性やその含水率等で確認（膨潤性確認試験）する等が重要である（図 2）。

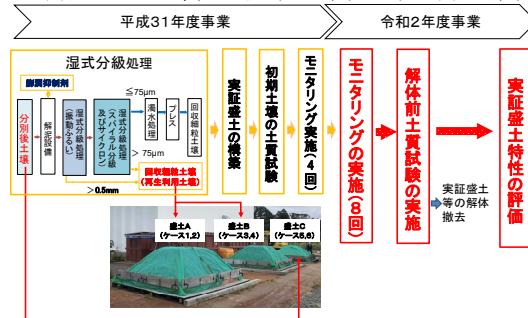


図 1 実証技術の概要



図 2 ふるいを用いた膨潤性確認試験による SAP の膨潤性

実証試験の結果：以下、①②は平成 31 年度に実施

①サイト外室内試験と現地トリータビリティ試験：総合評価の結果、主として改質材 C と抑制剤（硫酸第一鉄）にて検討を進めた。

②湿式分級処理試験：回収粗粒土壌（75 μ m 以上）の含水率は、改質材 C を追添加すると増大し、抑制剤を 0.5wt%添加すると低減すること等を確認した。

③**実証盛土試験（今年度）：**平成 31 年 12 月に回収粗粒土壌を用いて構築した高さ約 1m の実証盛土のモニタリングを継続し、1 年間に及ぶ盛土沈下量や浸出水分析等を実施した。その結果、抑制剤を添加したケースで土質特性等の向上効果を確認した。

盛土沈下量：各盛土共通して抑制剤を添加したケースの方が、沈下量が抑制される結果となった（**図 3**）。

浸出水分析：①環境への影響：盛土構築直後の全鉄（2 検体）を除き放射性物質を含む有害物質の排水基準超過は認められなかった。②浸出水量：浸出水採取量の累積値は、抑制剤を添加したケースの方が多い結果となった（**図 4**）。

土質特性：原位置コーン貫入試験、一面せん断試験測定値（229→258kN/m²）などで土質特性の向上効果を確認した（**図 5**）。

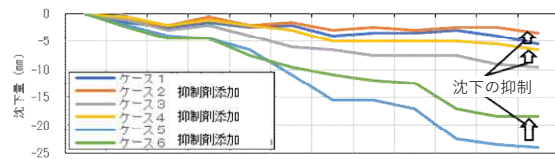


図 3 実証盛土の沈下量測定

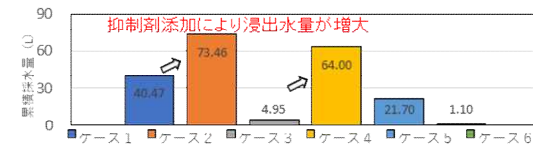


図 4 浸出水の累積採水量

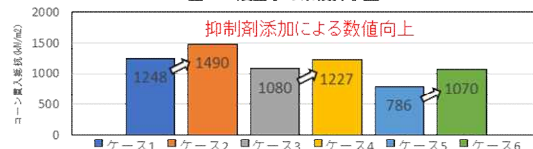


図 5 原位置コーン貫入試験

技術等の評価：再生利用対象となる粗粒分（75 μ m 以上）に膨潤性を呈する量の SAP が含まれた場合、初期の比容積の増大（単位体積重量の低減）、原位置コーン貫入値の低減等の品質に影響を及ぼす恐れがある。これに、硫酸第一鉄等の抑制剤を加える本技術は、長期的沈下の抑制や浸透性等の土質特性を向上するための一つの手段となる。

作業員被ばく量評価：本年度事業での被ばく量最大値は 1.62 μ Sv/日で、除去土壌搬入、湿式分級処理、盛土解体の間の最大被ばく量は 1.88 μ Sv/日と全体を通して大きな被ばく作業はない。仮に、ある個人が 1 年間（276 日稼働）同様の条件下で同様の作業に従事したとしても被ばく量は 0.52 mSv/年となり、被ばくリスクは小さいことを確認した。

コスト評価：湿式分級処理費用に、抑制剤添加費用として分級前土壌 1t 当たり 887 円追加される。

歩掛り（作業人工、作業速度等）：自動添加設備の維持手間は微小

コスト評価条件：湿式分級処理プラント処理能力は 30m³/時間、稼働時間は 6 時間/日
抑制剤添加量は分別土壌 1m³に対し 5kg（粉体）を 2 倍の水で希釈して添加
抑制剤添加設備は 700L/時間の調整・送液可能な設備（自動で稼働）2 年間で償却

安全性の評価：盛土の浸出水採取・沈下計測、湿式分級処理時の抑制剤添加等は自動化が可能であり、試算値よりも更に被ばくリスクを抑えることも可能であり、被ばくに対する安全性は十分に確保することができる。

試験場所（住所）：技術実証フィールド（大熊町）、奥村組技術研究所（つくば市）

除去物保管場所と保管状況：該当なし

1. 試験の目的

(1) 背景と実施方針

減容・再生利用技術開発戦略検討会等で、1万5千～6万2千Bq/kg（平成30年10月時点）の除去土壌（土壌C：134万m³）を再生資材として利用するために湿式分級処理（土壌Cの内の132万m³）する方法が検討されている。一方、中間貯蔵施設における受入分別時の異物除去には、改質材が用いられており、改質材にはSAPが数%配合されているものがある。SAPは数百倍に及ぶ吸水膨潤性があるため、改質材に含まれるSAPが微量であったとしても、回収される分別後土壌の土質特性に影響を及ぼす懸念がある。平成31年度除去土壌等の減容等技術実証事業において、この影響を調べるために、分別後土壌を湿式分級処理した回収粗粒土壌を用いた実証盛土、およびSAPの膨潤性を打ち消す抑制剤を適用した実証盛土等の6種類の実証盛土を技術実証フィールドに設置した。

(2) 提案技術の目的と目標

本年度の事業では、昨年度に構築した6種類の実証盛土に対して1回/月の頻度でモニタリングを実施し、目標③として設定した「土質特性の違いを評価すること」を遂行した。なお、昨年度の目標①および②については、平成31年度除去土壌等の減容等技術実証事業（その7）において技術的成果を既に報告済みである。

項目①：湿式分級処理における改質材中のSAPの分配挙動を明らかにするとともに、回収土壌の膨潤性を確認する

目標①：湿式分級処理前後の回収土壌の含水率、単位体積重量の変化から回収土壌の膨潤性の有無を確認する

項目②：分別後土壌に対する抑制剤の膨潤抑制効果の発現性を確認する

目標②：抑制剤により含水率が処理前の土壌と同程度となることを確認する

項目③：湿式分級処理により回収した土壌の盛土材料としての品質へ改質材が与える影響と抑制剤添加による向上効果について確認する

目標③：抑制剤添加の有無により実証盛土の沈下量や盛土材料に関するコーン指数などの土質特性の違いの有無を確認する

2. 試験の内容

(1) 試験の流れ

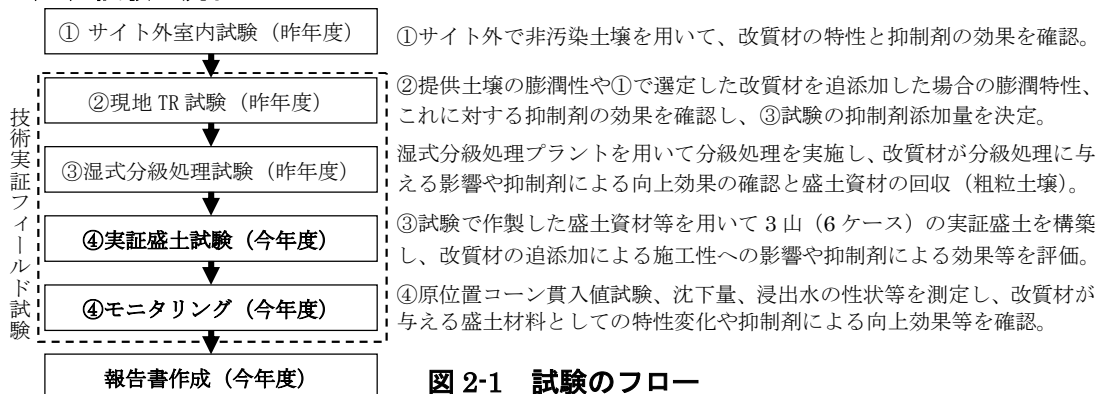


図 2-1 試験のフロー

(2) 平成 31 年度実証事業の結果の概要

今年度の実証事業は、昨年度の成果を前提条件として継続実施したものであり、以下に平成 31 年度の目標①および②とその成果概要を紹介する。

目標①：湿式分級処理前後の回収土壌の含水率、比容積の変化から回収土壌の膨潤性の有無を確認する

目標①に対して得られた成果の概要：

- ・サイト外室内試験により、3 種類の SAP を含む改質材を混合した土壌は、いずれも膨潤する（ふるい残留分の含水率・比容積が増大）ことを確認した。
- ・現地トリータビリティ試験により、改質材（3 種類の内の一つ）を追添加した提供土壌も膨潤する（ふるい残留分の含水率・比容積が増大）ことを確認した。なお、改質材を追添加しなかった提供土壌（改質材を 1～2%含む情報を得ているもの）に関しての膨潤性を明確に確認できなかった。
- ・技術実証フィールドでの湿式分級処理には予め所定量の追添加用改質材を準備しておく必要があったこと等から、「調達が容易であること」および「過去に実験事業等で評価されていること」等から改質材 C※を採用した。
- ・改質材を追添加した提供土壌を対象とした湿式分級処理試験では、回収粗粒土壌が膨潤し（含水率と比容積が増大）、更に回収細粒土壌（プレス後の土壌）の含水率が増加することが確認された。この点から、SAP は粗粒土壌と細粒土壌の両方に分配され、盛土資材として用いた回収粗粒土壌中にも SAP が含まれていることを確認した。

※改質材 C：受託者保有の資材、主な仕様はワンスルー施設使用薬剤あるいは相当品（シリカ系等）である。

目標②：抑制剤添加により含水率が湿式分級処理前の土壌と同程度となることを確認する

目標②に対して得られた成果の概要：

- ・サイト外室内試験により、試験に用いた 3 種類の改質材に対し、3 種類の抑制剤全てで膨潤抑制効果が発現することを確認した（図 2-2）。
- ・技術実証フィールドでの湿式分級処理には予め所定量の抑制剤を準備しておく必要があったため、回収粗粒土壌への影響等の項目を比較検討した結果から硫酸第一鉄を選定した。
- ・現地トリータビリティ試験により、改質材を追添加した提供土壌に対して、硫酸第一鉄（抑制剤）による膨潤抑制効果が発現することを確認した（図 2-3）。

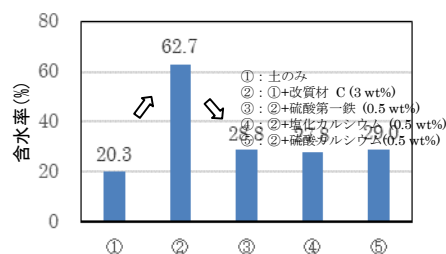


図 2-2 ふるい上残留物の含水率

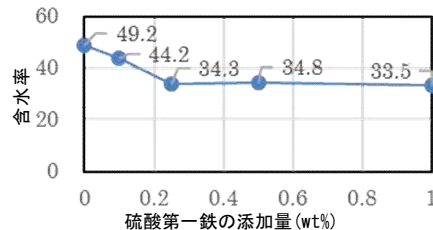


図 2-3 抑制剤添加量とふるい上残留物の含水比

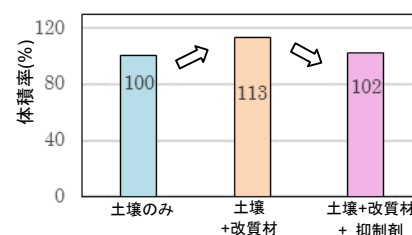


図 2-4 回収粗粒土壌の体積変化

- ・提供土壌に改質材を追添加したものを対象とした湿式分級処理試験では、増大した回収粗粒土壌の含水率および比容積が、抑制剤の添加により改質材を追添加しなかったケースと同程度まで低減することを確認した（図 2-4）。

（3）実証盛土の仕様

実証盛土の仕様、配置図および模式図を表 2-1、図 2-5～図 2-9 に示す。

表 2-1 実証盛土の仕様

盛土名	A (盛土を仕切板で区切り 2種類の土壌で構築)		B (盛土を仕切板で区切り 2種類の土壌で構築)		C (盛土を仕切板で区切り 2種類の土壌で構築)	
ケース番号	1	2	3	4	5	6
湿式分級処理	あり				なし	
改質材※1の追添加	なし		あり			
抑制剤※2の添加	なし	あり	なし	あり	なし	あり
底面寸法(m)	W:1.5 L:3.0	W:1.5 L:3.0	W:1.5 L:3.0	W:1.5 L:3.0	W:1.5 L:3.0	W:1.5 L:3.0
上面寸法(m)	W:0.5 L:1.1	W:0.7 L:1.1	W:0.5 L:1.1	W:0.7 L:1.1	W:0.4 L:1.1	W:0.5 L:1.1
高さ(m)	1	1	1	1	1	1
材料湿潤重量 (t)	5.4	4.7	4.5	5.4	2.7※3	3.4※3
盛土体積(m³)	2.22	2.37	2.21	2.36	2.08	2.23
単位体積重量(t/m³)	2.43	1.98	2.04	2.29	1.30	1.53
土質区分	細粒分まじり 礫質砂 {SG-F}	細粒分まじり 礫質砂 {SG-F}	細粒分質 礫質砂 {SFG}	細粒分質 礫質砂 {SFG}	砂まじり 細粒土 {F-S}	砂まじり 細粒土 {F-S}
細粒分混入率(%)	13.0	14.0	16.9	16.9	87.7	86.1
締固めの方法	・ 一層のまき出し厚は約 35cm ・ 転圧は各層をバックホウのバケットにて抑え、表面は手作業にて法表面等を仕上 ・ ケース 1 から 6 の 1 層目を構築後、ケース 1 に戻り 2 段目の構築といった手順で各盛土を構築					
沈下板	・ 各ケース 2 個×6 ケース＝12 個を設置 ・ 沈下板寸法はロッド (L=0.4m) 付き鋼板 (40cm×40cm) で、天端より深さ 30cm に埋設設置					

※1：改質材を原料土壌に対して湿潤重量比で 3wt%添加

※2：硫酸第一鉄を原料土壌に対して湿潤重量比で 0.5wt%添加

※3：追添加した改質材と抑制剤量は含まない

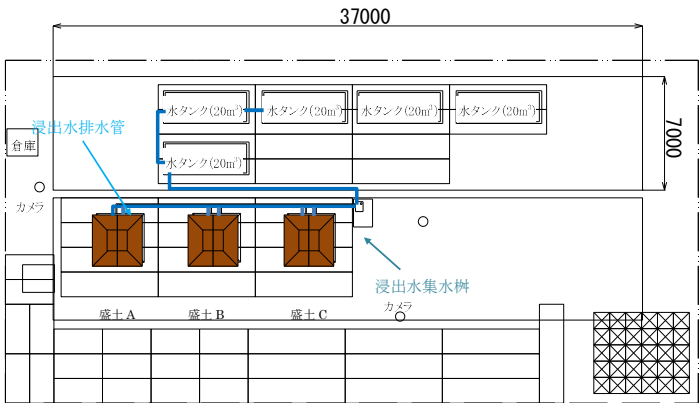
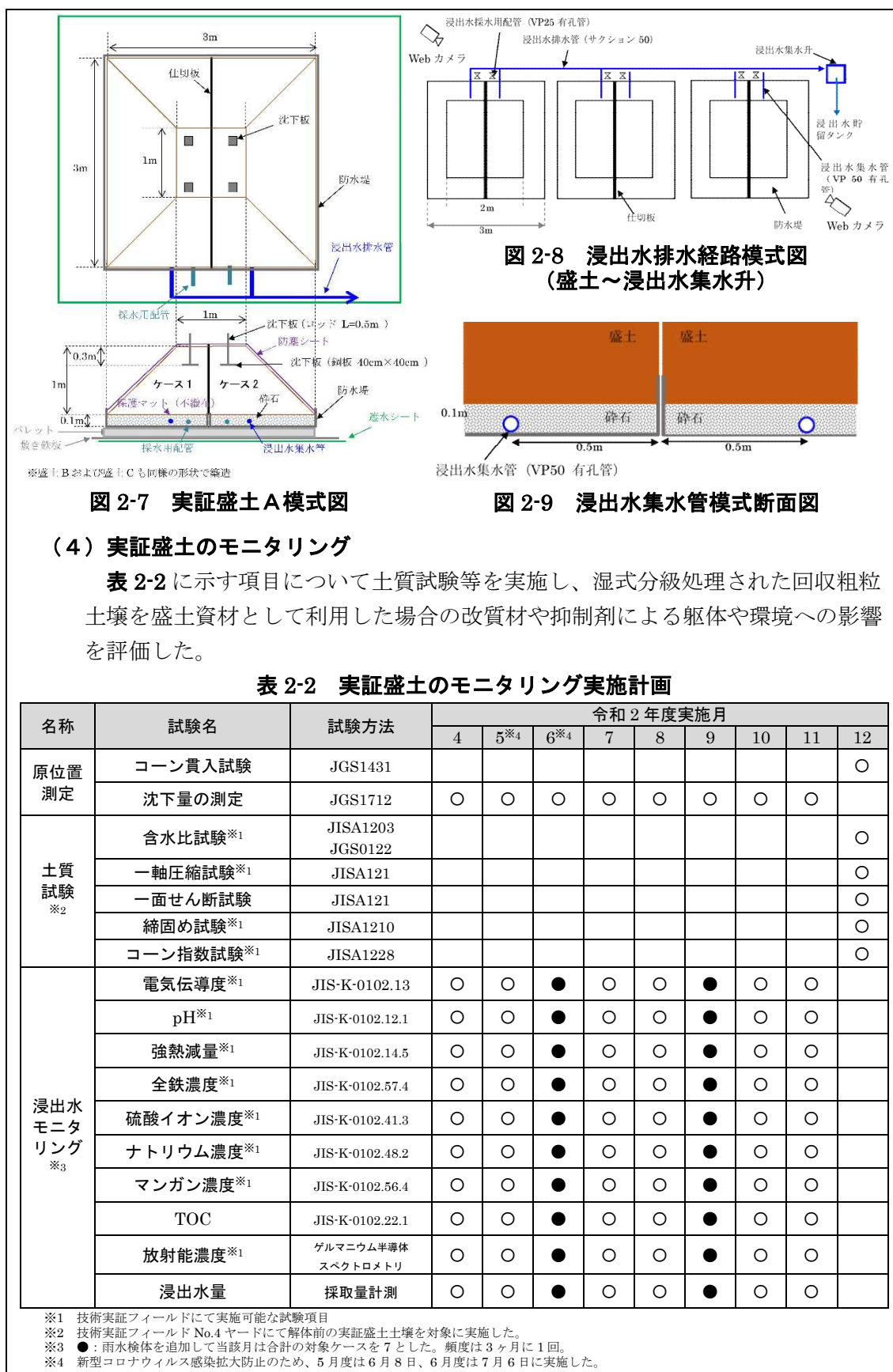


図 2-5 実証盛土配置図



図 2-6 構築直後の実証盛土



3. 試験結果と考察

(1) 沈下量測定

図 3-1 に沈下量測定結果を示す。測定結果より、湿式分級処理をした土壌（粗粒分、実証盛土 A,B）に対して、湿式分級していない土壌（盛土 C）が大きく沈下した。これは土質及び実証盛土構築時の含水率が高かったことによるものと考えられる。

一方、実証盛土 A（ケース 1,2）、盛土 B（ケース 3,4）および実証盛土 C（ケース 5,6）の各盛土において、抑制剤を添加していないケース（ケース 1,3,5）に比べ、抑制

剤を添加したケース（ケース 2,4,6）の方が沈下量は抑制される結果が得られた。

この要因として、改質材を含む土壌は、盛土構築時（初期）に通常（改質材や SAP 等を含まない状態）以上の含水（非自由水）があり、この水分が放出されることで、沈下量は通常よりも大きくなったこと、一方、抑制剤を添加した土壌は、初期含水（非自由水）が少なくなった状態で盛土利用されたために、沈下量が相対的に少なくなったものと推察されるものの、明確な原因は明らかでない。

原因は明らかではないが、これらの結果からは改質材を含む土壌に抑制剤を添加することにより構築後の実証盛土等の沈下を抑制できることが示唆された。

(2) 浸出水測定

排水基準が設定されているなど周辺環境への影響が懸念される浸出水測定項目について、以下のように初期以外は影響発生リスクがない結果が得られたことから、抑制剤添加による周辺環境への悪影響は殆どないと考えられる。

【放射能濃度】全ての試料において不検出であったことから、湿式分級処理や抑制剤添加により放射性物質の流出が促進されることはないと考えられる。

【全鉄濃度】ケース 2 において、盛土構築後 1 ヶ月後までは排水基準（溶解性鉄：10mg/l 以下）を超える濃度相当の全鉄が検出されたが、以降は不検出あるいは排水基準以下であった。ケース 2 の土壌に含まれる SAP は少ないと推測され、SAP 結合しない抑制剤由来の鉄分が存在し、湿式分級回収粗粒土壌の埋戻し直後に土壌と共存する鉄を含む洗浄水が流出した可能性がある。この点から、抑制剤の添加量には十分注意が必要であるとともに、浸出水のモニタリングと鉄の測定結果に応じて水処理が必要になることも想定される。ただし、一旦低下した鉄の濃度が再び上昇することは確認されておらず、長期的に鉄の流出が続く可能性は低いと考える。

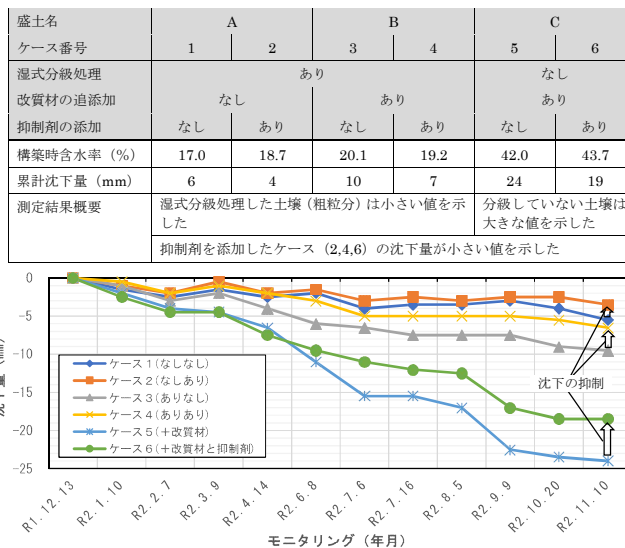


図 3-1 沈下量測定結果

【マンガン濃度】盛土構築直後にケース 2 および 4 で若干高い濃度で検出されたが、全ての試料で排水基準（溶解性マンガン：10mg/l 以下）以下あるいは不検出であった。このことから抑制剤添加により土壌中のマンガンの溶出が促進される可能性は低いと言える。

【pH】pH は 7.2～8.7 の範囲であった。1 検体のみ排水基準（pH：5.8～8.6）を満たさなかったものの、添加した抑制剤は酸性であり、その添加による pH の低下は確認されなかったことから、pH 低下の要因となる可能性は低いと考える。

【硫酸イオン】抑制剤を添加したケースで高い硫酸イオン濃度が確認された。盛土構築直後のケース 2 で最高 1300mg/L で検出されているものの、海水の硫酸イオン濃度が約 2600mg/L※であることを鑑みると周辺環境への悪影響は低いと考える。※出典：国土交通省水文水質データベース（<http://www1.river.go.jp/100308.html>）

表 3-1 に浸出水測定結果の概要を示す。なお、主に比較対象となる盛土毎（ケース 1 と 2、ケース 3 と 4 及びケース 5 と 6）に記述する。

表 3-1 浸出水測定結果の概要

盛土名		A		B		C	
ケース番号		1	2	3	4	5	6
湿式分級処理		あり				なし	
改質材の追添加		なし		あり			
抑制剤の添加		なし	あり	なし	あり	なし	あり
累計採水量 (L)		40.47	73.46	5.95	64	21.7	1.1
		中	多	少	多	中	少
電気伝導度(mS/m)		抑制剤を添加したケースが高い傾向を示した					
pH	排水基準： 5.8～8.6	測定値は 7.2～8.7（排水基準超過は 1 検体）であった ケースによる差異は認められなかった					
強熱減量		抑制剤を添加したケースが高い値を示した		ケースによる顕著な差異は認められなかった		比較するデータを得ることができなかった	
全鉄濃度 (mg/L)	排水基準： 10m g/L	盛土築造 2 か月は抑制剤を添加したケースで排水基準を超過した		盛土築造 2 か月は抑制剤を添加したケースで高い値を示した （排水基準は適合）		比較するデータを得ることができなかった	
硫酸イオン濃度 (mg/L)	海水濃度： 2,600mg/L	抑制剤を添加したケースが高い値を示した（最大 1,300mg/L）					
ナトリウム濃度 (mg/L)		抑制剤を添加したケースが高い値を示した。					
マンガン濃度 (mg/L)		盛土築造 1 か月は抑制剤を添加したケースで高い値を示した（最大 1.75mg/L）					比較するデータを得ることができなかった
TOC (mg/L)		ケースによる差異は認められなかった					
放射能濃度 (Bq/L)		すべての試料で不検出であった。					

図 3-2 にケース 1～4 の浸出水採水量の累積値を示す。図より、抑制剤を添加したケース 2 の方が、浸出水量が多いことが分かる。一方、各ケースの土質として細粒分混入率結果はケース 1 と 2 (盛土 A) でそれぞれ 13% および 14%、ケース 3 と 4 (盛土 B) で、それぞれ 16.9% および 16.9% であり、その数値的差異は殆どない。それにも拘わらず、抑制剤を添加したケース 2 と 4 の浸出量が多いことから、抑制剤が SAP の保水性を抑制している可能性が推察される。特に、盛土 B のケース 3 と 4 は、追添加した改質材には SAP が成分として配合されていることを確認済みであることから、抑制剤によって SAP の吸水機能が抑制され、盛土中の余剰水が下方流下し易くなった可能性が考えられる。

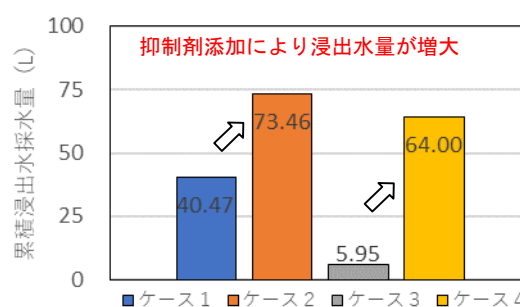


図 3-2 累積浸出水採水量の比較

(3) 土質試験

改質材の追添加と抑制剤の添加の有無に着目した土質試験結果の概要を表 3-2 に示す。なお、結果の概要は、主に比較対象となる盛土毎 (ケース 1 と 2、ケース 3 と 4 及びケース 5 と 6) に示した。

表 3-2 土質試験結果の概要

盛土名		A		B		C	
ケース番号		1	2	3	4	5	6
湿式分級処理		あり				なし	
改質材 ^{*1} の追添加		なし		あり			
抑制剤 ^{*2} の添加		なし	あり	なし	あり	なし	あり
原位置コーン貫入試験値 (kN/m ²)	盛土撤去時	抑制剤を添加したケース（2,4,6）が大きな値（14～36％）を示した					
締固め試験 最適含水比（％）	〃	抑制剤を添加したケース（2,4,6）が若干大きな値（3～8％）を示した					
締固め試験 最大乾燥密度（g/cm ³ ）	〃	湿式分級した土壌（粗粒分）は 1.635～1.731、分級していない土壌は 1.012、1.004 となった。抑制剤の添加による差異はなかった。					
一面せん断試験から求められるせん断応力 τ (kN/m ²)	盛土撤去時 攪乱試料	高いせん断応力（229～365）が測定された				せん断応力は低い値（16.1、8.9）であった	
	クーロン強度式より算出（垂直応力 200kN/m ² ）	抑制剤を添加したケースで低下した（-12％）		抑制剤を添加したケースで増加した（+43％）		抑制剤を添加したケースで低下した（-55％）	
一軸圧縮強度（kN/m ² ）	盛土撤去時 攪乱試料	低い値（4.45～7.50）であった				比較的高い値であった（18.78,20.91）	
		抑制剤を添加したケースで増加した（+17％）		抑制剤を添加したケースで増加した（+6％）		抑制剤を添加したケースで低下した（-10％）	
	盛土撤去時 不攪乱試料	ケース 1,5 では試料採取できなかった。ケース 3,4 の比較ではケース 4 が大きな値（9％）を示した					
コーン指数（kN/m ² ）	盛土撤去時 攪乱試料	抑制剤を添加したケースで低下した（-33％）		抑制剤を添加したケースで低下した（-8％）		抑制剤を添加したケースで低下した（-8％）	
	盛土撤去時 不攪乱試料	抑制剤を添加したケースで増加した（+4％）		抑制剤を添加したケースで低下した（-2％）		抑制剤を添加したケースで増加した（+35％）	
含水率（％）		湿式分級土壌（粗粒分）に比べ、分級していない土壌は高い値を示したが、抑制剤の添加による差異はなかった。					

土質試験の結果より、原位置コーン貫入試験（図 3-3）、一面せん断試験から求められるせん断応力値（図 3-4）において、抑制剤の添加による土壌品質の向上が認められた。この結果から抑制剤の添加による土質特性の向上効果は確認出来たが、その数値的効果は比較的小さいことも確認した。

【原位置コーン貫入試験】

抑制剤を添加したケース（2,4,6）の方がより大きな値（14～36%）を示したことより、抑制剤の添加がコーン貫入値の増大に繋がったと考えられる。

【一面せん断試験】

一面せん断試験から求められる、全応力 C と内部摩擦角 ϕ を用いて、クーロン(Coulomb)の強度式より、垂直応力 σ を 200kN/m^2 （10m程度の盛土を想定）したときのせん断応力 τ を算出し、その数値の差異について評価した。ケース 1 に対し、改質材を追添加したケース 3 のせん断応力が低下しているのは改質材に含まれる SAP の追添加によるものと推測される。また、ケース 3 とケース 4 を比較すると、ケース 4 のせん断応力が高いことは抑制剤の添加効果と考えられる。一方、ケース 1 に対して、抑制剤を添加したケース 2 のせん断応力は低い値を示している。平成 31 年度の結果からケース 1 及び 2 に含まれる SAP は微量と推測しているので SAP と結合しない過剰な抑制剤が存在した場合には、せん断応力などの土質特性が低下する可能性がある点についても考慮する必要がある。

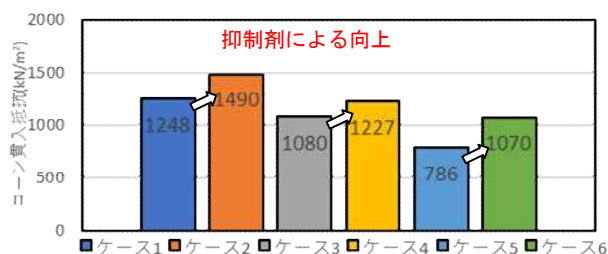


図 3-3 原位置コーン貫入試験結果

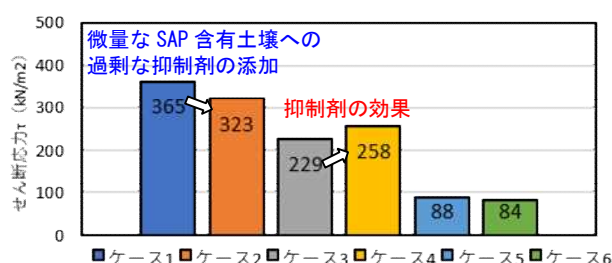


図 3-4 一面せん断試験（攪乱）結果

4. 作業員被ばく量評価

湿式分級処理業務、その後の実証盛土構築・モニタリング・解体業務を通して、本技術の適用にあたっての最大の被爆リスクは受け入れ土壌との長時間に及ぶ接触リスクやモニタリングの採水作業時に生じており、それぞれ $1.88\mu\text{Sv/日}$ および $1.62\mu\text{Sv/日}$ である。前者について 1 年間の作業（276 日稼働）をある個人が継続従事したとしても、作業員の年間被ばく量は、 0.52 mSv/年 であり放射線障害防止規則に規定されている 50 mSv/年 のおよそ 1/100 である。また、該当業務については何れも自動制御で行う設備として低減策を講じることも可能であり、本技術の全作業について増加被ばく量リスクは少ないものと考えられる。

5. まとめ

（1）令和 2 年度実証事業のまとめ

令和 2 年度実証事業の成果目標とした「抑制剤添加の有無により実証盛土の沈下量

や盛土材料に関するコーン指数などの土質特性の違いの有無を確認する」ことに関する取りまとめ結果を以下に示す。

- ① 改質材を追添加した盛土試験体（ケース 3）に比べて、SAP の膨潤性を抑制可能な抑制剤を追添加した実証盛土土壌（ケース 4）の土質特性は、沈下量（1 年後）、コーン貫入値、一面せん断試験測定値などで、大きな差異ではないものの、土質特性が向上することを確認した。この点から、一定量以上の SAP を含んで膨潤性を呈する分別後土壌（膨潤性確認試験※等で事前確認）を湿式分級処理する場合には、抑制剤の添加が再生土壌の品質向上に寄与する方法となること確認した。
- ② 平成 31 年度事業において得られた成果であるが、湿式分級処理では改質材中の SAP は粗粒分だけでなく細粒分（プレス汚泥等）にも分配されることを確認している。そのため、湿式分級処理過程を経て更に SAP 含有量が少なくなった回収粗粒土壌は、膨潤性が少なくなることが推測される。本事業における実証盛土 A（ケース 1 及び 2）は、このような湿式分級回収土壌であったと推定しており、抑制剤を未添加のケース 1 より添加したケース 2 の沈下量はほぼ同等かつ何れも抑制できる（盛土高さ比で前者が 0.6%、後者が 0.4%）ことを明らかに出来た。このことから、膨潤性確認試験※等で膨潤性を呈さない場合（分別後土壌中の SAP 含有量が少ない等）には、沈下量に及ぼす抑制剤の添加効果が少ないため同材の添加の必要性は少ないと言える。
- ③ 沈下挙動に関する実証盛土 A（ケース 1 及び 2）の差異が少ないという知見を上述したが、抑制剤を添加したケース 2 で浸出水中に SAP 由来と推定される Na が増加し、SAP 保水力低減による浸出水量の増大（約 2.2 倍）などの浸透性の向上効果を確認できた。このことから、再生資材化した土壌中に SAP を含む場合（室内試験等で事前確認）で、抑制剤の適用により、雨水等の浸透性を向上させる可能性がある知見を得た。
- ④ 浸出水の分析結果では、提供土壌に抑制剤のみを添加したケース 2 について、構築直後で溶解性鉄濃度が排水基準を超過する結果が得られた。これを除きセシウムを含むその他の項目で基準超過や水質に悪影響を与える結果は確認されなかった。溶解性鉄の超過は、少量しか存在しない SAP に対して投入した抑制剤由来の鉄分が過剰に存在したためと推測しており、SAP 量に見合う抑制剤の適正な添加量の確保が重要であり、その点を考慮すれば本技術の適用は周辺環境や人の健康に悪影響を及ぼさないことが分かった。
- ⑤ 湿式分級から実証盛土構築、解体の一連の作業で空間線量の変化や作業員の被ばく量の増加は確認されなかったことから、本技術適用に伴う被ばくリスクは、いずれの作業に従事するとしても小さいことが明らかとなった。湿式分級から実証盛土構築、解体の一連の作業で空間線量の変化や作業員の被ばく量の増加は確認されなかったことから、本技術適用に伴う被ばくリスクは、いずれの作業に従事するとしても小さいことが明らかとなった。

上述の①～⑤では、抑制剤の添加によって土質特性を向上できる知見と添加によ

って影響が発生する場合があること等を示した。これらは、SAP の存在量や膨潤性の度合いなどで効果の発現性に違いが発生する可能性が高いという知見である。そのため、本剤適用の前提として、事前の室内試験（膨潤性確認試験※等）を実施して、膨潤性と膨潤抑制効果を予め確認して適用することが重要と考えられる。

※対象土壌と水を固液比 1:5 として 75 μ m ふるいでふるい分けしてふるい上に残留する土壌の含水比等から膨潤挙動を確認する試験。詳細は「平成 31 年度除去土壌等の減容等の技術実証（その 7）抑制剤添加処理により除去土壌の再利用を効率化する技術報告書」p13 等参照

（２）総合評価

令和 2 年度および昨年度の平成 31 年度実証事業の結果を総括して、下記の 3 点に関する取りまとめ結果を以下に示す。

① 湿式分級処理を実施する際に、分別後土壌が SAP によって膨潤挙動を呈する可能性

- ・昨年度実施した湿式分級処理試験において、改質材を追添加したケースで回収粗粒土壌と同細粒土壌の何れの含水率も増加する結果を得たことから、改質材中の SAP は回収粗粒土壌と同細粒土壌の両方に分配され、SAP によって膨潤挙動を呈する可能性が考えられる。
- ・改質材の追添加により回収粗粒土壌の含水率は増大し、さらに抑制剤を添加することで含水率を低減できる結果が得られた。このことは、SAP を成分とする改質材で処理された分別後土壌を湿式分級処理する場合、抑制剤添加過程を導入することで、より密度の高い回収粗粒土壌を得る方法となると言える。
- ・改質材を追添加したケースは、それが未添加のケースに対し、湿式分級処理の回収粗粒土壌の細粒分混入率および放射性セシウム濃度が高くなった。改質材追添加と同時に抑制剤を添加したケースでも同様であり、抑制剤の添加自体は放射性セシウムの分配に影響するものではないと推測される。

② 分別後土壌を用いた盛土の品質に SAP の膨潤性が及ぼす影響度合い

- ・膨潤性を呈する分別後土壌については、抑制剤を添加することで、初期沈下量、コーン貫入値、一面せん断試験などの土質試験測定結果が増大した点から、土質特性の向上に寄与する効果が期待できる。
- ・分別後土壌に用いられる改質材中に SAP が含まれていた場合とそれに抑制剤を添加したものの一面せん断強度は、後者の方が大きくなり、斜面安定性の向上に寄与する可能性がある結果を得た。一方、改質材の膨潤性や膨潤抑制剤効果が明確に得られない分別後土壌に対しての同剤の適用による土質の力学性状の向上効果は確認できておらず、室内試験等において事前に適用効果を確認・評価することが重要である。

③ SAP の膨潤性が盛土品質等に影響を及ぼす懸念がある場合の抑制剤の適用効果

- ・膨潤性を呈する分別後土壌を湿式分級処理の対象とする場合には、回収される粗粒土壌にも SAP の分配による膨潤性を示すおそれがあるため、抑制剤の適用を検討することが望ましい。但し、膨潤性が顕著に認められない分別後土壌に対しては、土質特性の向上効果が得られない結果も得られており、その適用を考慮する必要性は少ない。
- ・抑制剤の適用に際しては、事前の室内試験（膨潤性確認試験等）を実施して膨潤性と膨潤抑制効果を予め確認して適用することが重要である。

以上

実施代表者：株式会社大林組		
実証テーマ名：溶融スラグの再生利用等技術の実証		
概要： 双葉町仮設焼却第一施設および双葉町仮設灰処理第一施設（以下、「双葉町仮設処理施設（その 1）」と記す）では、シャフト炉および表面溶融炉により除染廃棄物等やその焼却灰等が溶融処理され、安定した高品質の溶融スラグが生成されている。 本実証は、当該施設で生成される溶融スラグの再生利用を円滑に進めるため、利用用途（盛土材、路盤材、アスファルト舗装骨材、コンクリート骨材）に応じた再生利用品の安全性、安定性を確認することを目的としている。今年度は、室内試験を実施した。		
図 1 双葉町仮設処理施設（その 1）の概要		
実施内容： 双葉町仮設処理施設（その 1）で生成した溶融スラグの放射性物質濃度、重金属溶出量、含有量および物理性状を確認するとともに、当該溶融スラグを配合した盛土、路盤、アスファルト舗装、コンクリートの供試体を作製して室内試験を実施し、各種基準等と比較することで、各用途への適用性を評価した。得られた試験結果をもとに、再生利用方法について検討した。		
技術概要： 室内試験の概要を表 1 に示す。国土交通省 土木工事共通仕様書（以下、「共通仕様書」）や品質管理基準及び規格値（案）（以下、「品質管理基準」）、JIS A 5031¹⁾、JIS A 5032²⁾ などの JIS 規格等を参考にして試験項目を設定し、結果を評価した。		
表 1 実施試験一覧		
実施内容	区分	試験項目、方法等
溶融スラグの性状確認	放射性物質濃度	放射能濃度等測定方法ガイドライン（第 2 版）
	重金属溶出量および含有量試験	JIS A 5031、JIS A 5032、平成 15 年環境省告示第 18 号、19 号。項目：カドミウム、鉛、六価クロム、砒素、水銀、セレン、ふっ素、ほう素
	物理性状確認	各種 JIS 規格
再生利用品の安全性・安定性確認	再生利用材料としての適用性確認 ・盛土材 ・路盤材 ・アスファルト舗装 ・コンクリート骨材	JIS A 5031、JIS A 5032、各種 JIS 規格、共通仕様書、品質管理基準、舗装調査・試験法便覧、
	安全性および安定性の確認	表面線量測定、タンクリーチング試験
1) JIS A 5031（一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材） 2) JIS A 5032（一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグ）		

実証試験の結果：

1. 室内試験の結果

- ・ 溶融スラグの放射性物質濃度および重金属溶出量、含有量を測定した。重金属溶出量、含有量は、環境安全品質（JIS A 5031、JIS A 5032）、土壤汚染対策法に基づく溶出量基準、含有量基準に適合していた。アスファルト舗装およびコンクリートの供試体を用いたタンクリーチング試験の結果、4, 8, 12 週浸漬した水の放射性物質濃度は水道水の管理目標値に、重金属の濃度は上記基準に適合していた。
- ・ 溶融スラグの含水比、粒度分布、締固め特性、pH などを確認した。
- ・ 溶融スラグの再生利用の用途として、盛土材、路盤材、アスファルト舗装骨材およびコンクリート骨材を選定し、JIS 規格や国土交通省 共通仕様書、品質管理基準などを参考にして配合試験、基準試験を行った。その結果、各用途とも配合等を調整することで、各種基準に適合する再生利用品を製造できることを確認した。得られた結果を以下に例示する。

路盤材：スクリーニングスの 50%、75%（重量比）を溶融スラグで置換した路盤材は、粒度調整砕石(M-40)として活用可能な品質を有していた。

アスファルト舗装：溶融スラグの配合率を 0～15%とした粗粒度アスファルト混合物(20^注)および密粒度アスファルト混合物(13^注)は、所定の耐久性、耐水性を有していた。注) 骨材の最大粒径（20mm あるいは 13mm）を示す

コンクリート：細骨材の 50%（重量比）を溶融スラグで置換したコンクリートは、圧縮強度（30N/m²以上）など、概ね所定の品質を有していた。

2. 再生利用方法の検討

- ・ 盛土材、路盤材、アスファルト舗装骨材およびコンクリート骨材としての再生利用について、施工方法、品質管理方法の検討、再生利用に関するコスト試算を行った。
- ・ 大量のスラグの放射性物質濃度測定方法に関する検討として、5 種類の測定方法（放射能濃度分別機、バルクスキャン、TRUCKSCAN®、サンプル測定：NaI 検出器、Ge 半導体検出器）について、測定方法、時間当たり測定可能量などの情報を整理するとともに、溶融スラグの放射性物質濃度を 100Bq/kg あるいは 8,000Bq/kg で仕分けする場合の適用性を評価した。

3. 今後の展開

今年度の成果をもとに、次年度は、配合試験および盛土、アスファルト舗装、コンクリートを対象とした試験施工を行って、施工方法、品質管理方法を実証するとともに、供用中を想定した促進載荷試験やモニタリングを行い、安全性・安定性を確認する。

減容等の評価：

溶融スラグの盛土材、路盤材、アスファルト舗装、コンクリートの材料としての適用性を確認できた。溶融スラグを再生利用することで中間貯蔵施設への搬入量を低減できる。

作業員被ばく量評価：

100Bq/kg および 3,300Bq/kg 程度の放射性物質濃度の溶融スラグを用いた室内試験を担当した試験員の一日当たり平均被ばく線量の最大値は、上限値として設定した 80 μ Sv/d を大きく下回る 1.75 μ Sv/d であり、被ばく線量は低い。

コスト評価：盛土材製造 609 円/t 歩掛り（作業人工、作業速度等）：880t/日

コスト評価条件：稼働日数 240 日/年 × 1 年

処理数量 211,200t（除去土壌 105,600t、溶融スラグ 105,600t）

作業における安全上の注意：溶融スラグには放射性物質が含まれるため保護具を着用

試験場所（住所）：福島県双葉郡大熊町（技術実証フィールド）、東京都清瀬市、千葉県佐倉市

除去物保管場所と保管状況：技術実証フィールド内第二資材置場に土のう袋詰めなどで保管

1. 試験概要

(1) 試験の目的

双葉町仮設処理施設（その1）で生成される熔融スラグを対象に、再生資材や二次製品原料等（以下、「再生利用品」という。）としての利用を円滑に進めるため、実際に生成した熔融スラグを用いて再生利用品としての製造方法や施工方法、品質管理方法を実証するとともに、施工中および供用中における安全性、安定性を確認することを目的としている。

今年度は、室内試験により、盛土材、路盤材、アスファルト舗装骨材、コンクリート骨材としての適用性を確認することを目的として実施した。

(2) 実施内容と成果目標

実施内容と成果目標を表 1-1 に示す。また、試験の手順（3年の想定期間全体）を図 1-1 に示す。

今年度は、双葉町仮設処理施設（その1）で生成された熔融スラグを用いた再生利用品製作に向けて、必要となる物性や放射性物質濃度、放射性物質溶出量について室内試験を行って確認した。利用先は、盛土材、路盤材、アスファルト舗装骨材、コンクリート骨材を想定した。

室内試験から得られた再生利用品の物性を踏まえて、利用先に応じた施工方法、品質管理方法を提案する。

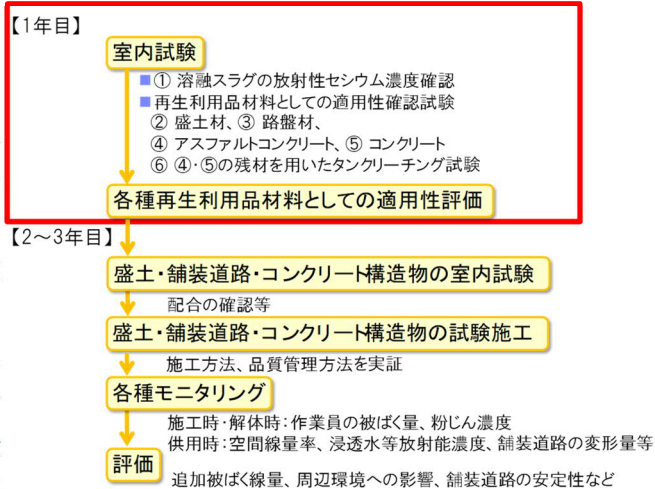


図 1-1 試験の手順（3年の想定期間）

表 1-1 実施内容と成果目標

No	課題	実施内容	成果目標	供試 熔融スラグ	実施時期・場所等
1	熔融スラグの放射性物質濃度	サンプリング・測定 双葉町仮設処理施設（その1）取得データの活用	放射性物質濃度を踏まえた再生利用方法を提案	・シャフト炉 ・表面熔融炉	・令和2年度（1年目） ・技術実証フィールド
2	再生利用が可能な品目、適切な配合	再生利用品に応じた基準試験（配合試験）、タンクリーチング試験（溶出性確認）	各種再生利用品の材料としての適用性を評価	・シャフト炉 ・表面熔融炉	・令和2年度（1年目） ・技術実証フィールド ・東京都清瀬市 ¹⁾ ・千葉県佐倉市
3	再生利用品の環境安全性、安定性（耐久性）	実規模大の盛土や舗装道路を施工し、空間線量率や浸出水の放射性物質濃度等モニタリング、道路の機能確認試験	再生利用品を用いた盛土や舗装道路の環境安全性、安定性を確認	・シャフト炉 ・表面熔融炉	・令和3～4年度（2～3年目） ・技術実証フィールド ・外部試験機関

1) 当地では、放射性物質濃度が 100Bq/kg 未満の熔融スラグのみを試験に用いた

(3) 対象とした溶融スラグ

試験のためご提供いただいた溶融スラグを表 1-2 に示す。

スラグの種類ごとの試験内容を表 1-3 に示す。

表 1-2 ご提供いただいた溶融スラグ一覧表

名称	粒度調整 ¹⁾	放射性物質濃度(Bq/kg)	重量	入手日	搬入元
シャフト炉スラグ	あり	86	1,490kg ²⁾	10/2	陳場沢灰処理生成物保管施設 b S①、S②
	あり	58	309kg	11/13,19	双葉町仮設焼却第一施設
	小計	—	1,799kg	—	
表面溶融炉スラグ	なし	2,520	920kg ²⁾	10/2	陳場沢灰処理生成物保管施設 b S①、S②
	あり	2,510	118kg	11/19	双葉町仮設灰処理第一施設
	小計	—	1,038kg	—	
合計			2,837kg		

1) 整粒器による粒度調整

2) 陳場沢灰処理生成物保管施設 bS②（西松・五洋・フジタ JV）のトラックスケール計量値

表 1-3 試験で使用する溶融スラグおよび購入材と試験内容等一覧

スラグの種類	整粒器による粒度調整	試験内容
シャフト炉スラグ	あり	・ 放射性物質濃度、重金属溶出量・含有量、各種物理試験 ・ 基準試験・配合試験（盛土材、路盤材、アスファルト舗装、コンクリート） ・ アスファルト舗装・コンクリート試験体のタンクリーチング試験
表面溶融炉スラグ	なし	・ 各種物理試験、基準試験・配合試験（盛土材、路盤材）
	あり	・ 放射性物質濃度、重金属溶出量・含有量、各種物理試験

2. 試験の方法と結果

(1) 溶融スラグの品質確認

①試験概要

溶融スラグの品質を確認するため、以下の試験を実施した。

表 2-1 溶融スラグの放射性物質濃度および重金属溶出量、含有量試験方法一覧表

測定項目	測定方法
放射性物質濃度	放射能濃度等測定方法ガイドライン（平成 25 年 3 月、第 2 版）
重金属溶出量	JIS K 0058-1、平成 15 年環境省告示第 18 号
重金属含有量	JIS K 0058-2、平成 15 年環境省告示第 19 号

②試験結果

(ア) 放射性物質濃度

シャフト炉スラグは 100Bq/kg 程度、表面熔融炉スラグは 2,500～3,350Bq/kg 程度の値を示した。

(イ) 重金属溶出量、含有量

シャフト炉スラグ、表面熔融炉スラグとも、環境安全品質（表 2-2 参照）、土壌汚染対策法に基づく溶出量基準、含有量基準に適合していた。

表 2-2 環境安全品質基準（JIS A 5031、JIS A 5032）

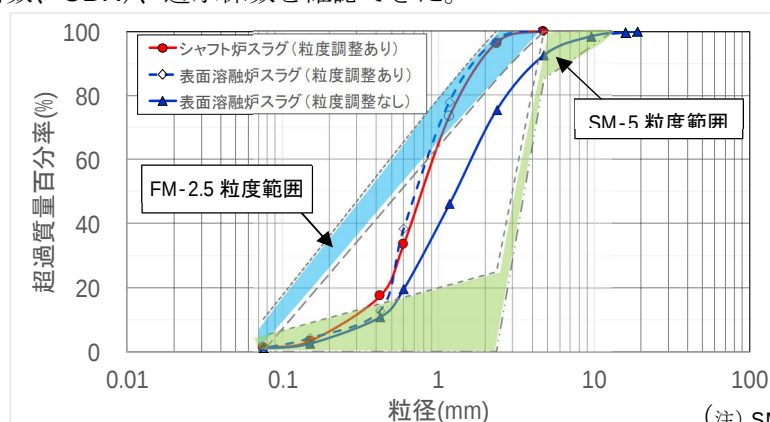
No.	項 目	溶出量(mg/L)	含有量 (mg/kg)
1	カドミウム	0.01 以下	150 以下
2	鉛	0.01 以下	150 以下
3	六価クロム	0.05 以下	250 以下
4	砒素	0.01 以下	150 以下
5	水銀	0.0005 以下	15 以下
6	セレン	0.01 以下	150 以下
7	ふっ素	0.8 以下	4,000 以下
8	ほう素	1 以下	4,000 以下

(ウ) 物理性状

シャフト炉スラグ（粒度調整あり）、表面熔融炉スラグ（粒度調整あり、なし）について、物理的性状を室内試験により確認した。

粒度試験結果を図 2-1 に示す。これらのスラグは、例えば JIS A 5032 で規定される単粒度熔融スラグ（SM-5）や熔融スラグ細骨材（FM-2.5）の粒径範囲には入っていなかったが、これは、これらのスラグが現在の用途（中間貯蔵施設の中間排水材）に適合するように処理されているためと考えられる。スラグ産出時の粒度調整や、粒径分布の異なる土質材料の混合などを実施できることから、活用用途に応じた粒径分布とすることは可能と考えられる。

その他、熔融スラグ単体のコンシステンシー特性、締固め特性、強度特性（コーン指数、CBR）、透水係数を確認できた。



（注）SM-5、FM-2.5：JIS A 5032 道路用スラグ細骨材の規格

図 2-1 熔融スラグの粒径加積曲線

(2) 盛土材としての適用性確認試験

①試験概要

粘性土と珪砂を用いて作製した母材（中間土）に、シャフト炉スラグあるいは表面溶融炉スラグを混合して供試土を作製し、表 2-3 に示す試験を実施した。

表 2-3 盛土試験の試験項目・数量一覧表

項目	試験規格	試料数					
		粘性土	珪砂	母材 (中間土)	混合土 ¹⁾		合計
					25%	50%	
土粒子の密度試験	JIS A 1202	1	—	1	2	2	6
土の含水比試験	JIS A 1203	1	—	1	2	2	6
土の粒度試験	JIS A 1204	1	—	1	2	2	6
土の液性限界・塑性限界試験	JIS A 1205	1	—	1	2	2	6
CBR試験(締め固めた土)	JIS A 1211	—	—	1	2	2	5
突固めによる土の締め固め試験(A-c 法)	JIS A 1210	1	—	1	2	2	6
土のコーン指数試験	JIS A 1228	1	—	1	2	2	6
土懸濁液の pH 試験	JGS 0211	1	—	1	2	2	6
土の透水試験	JIS A 1218	1	—	1	2	2	6

1) 各項目とも、シャフト炉スラグを用いたもの 1 試料、表面溶融炉スラグ（整粒器による粒度調整なし）を用いたもの 1 試料の合計 2 試料

②試験結果

溶融スラグの盛土材としての適用性確認試験の結果、母材（中間土）に溶融スラグを配合した盛土材は、粒度分布が改良されるとともに（図 2-3 参照）、建設発生土の基準（今回は第二種）を満足し、pH はほぼ中性であり自然地盤でも出現するオーダーの値であることから、盛土材として適用可能であることが確認できた。得られた締め固め曲線を図 2-2 に示す。

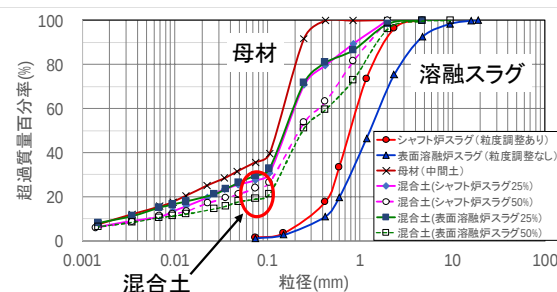


図 2-3 盛土材等の粒径加積曲線

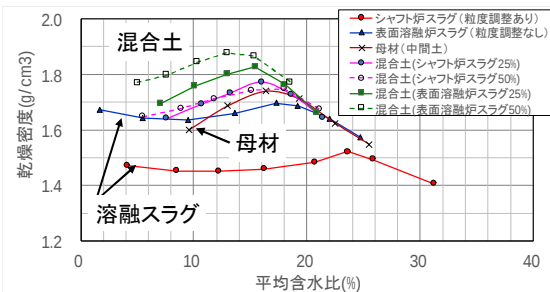


図 2-2 盛土試験で得られた締め固め曲線

(3) 路盤材としての適用性確認試験

①試験概要

路盤材料としての適用性を確認するため、上層路盤を対象とした粒度調整工法を想定し、基準試験を行った。試験項目等を表 2-4 に示す。

粒度調整工法は、所定の粒度になるように数種の骨材を混合して敷均し、最適含水比付近で締固める工法である。骨材としては碎石、スラグ、砂利、切り込み砂利、砂などがある。これらの粒状材料を混合したものの粒度は、粒度調整碎石(M-40 等)として規格化されている。

本実証では、クラッシャラン (C-40)、スクリーニングスおよび溶融スラグを配合して粒度調整碎石 (M-40) に該当する粒度範囲の供試体を作製し、試験を実施した。

表 2-4 路盤材試験の試験項目・数量一覧表

項目	試験規格	試料数			
		スラグ置換率(%) ²⁾			合計
		0	50	75	
骨材のふるい分け試験	JIS A 1102	2	2	2	6
絶乾比重、吸水率	JIS A 1110	2	2	2	6
土の液性限界・塑性限界試験	JIS A 1205	2	2	2	6
修正 CBR 試験	舗装調査・試験法便覧 ¹⁾ [4]-68	2	2	2	6
硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験	JIS A 1122	1	1	1	3

1) 舗装調査・試験法便覧 (平成 31 年版) ((公社) 日本道路協会)

2) スラグ置換率(%)= (置換したスラグ質量) / (全路盤材質量) × 100 (%)

②試験結果

スクリーニングスの 50%、75% (重量比) を溶融スラグで置換した路盤材試験体は、下層路盤材および上層路盤材として求められる規格値¹⁾を満足しており (図 2-4、図 2-5 を例示)、粒度調整碎石として適用可能であることを確認できた²⁾。また、シャフト炉スラグや表面溶融炉スラグを用いた路盤材供試体の締固め曲線を取得できた。

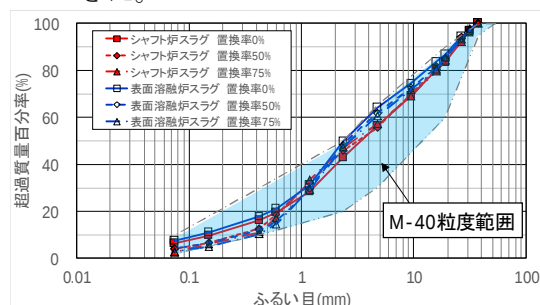


図 2-4 路盤材試験供試体の粒径加積曲線

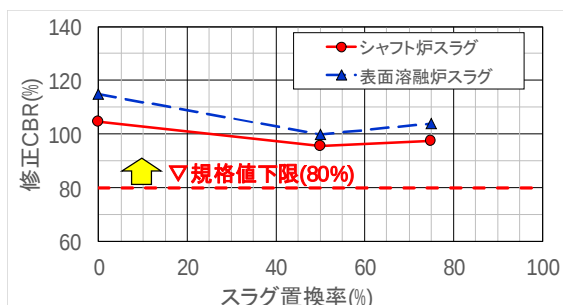


図 2-5 スラグ置換率と修正 CBR(95)

1) ・国土交通省「土工工事施工管理基準及び規格値 (案) 品質管理基準及び規格値 (案)」(令和 2 年 3 月)、
・ (公社) 日本道路協会「舗装施工便覧 (平成 18 年度版)」

2) 外部試験機関の受入基準に適合せず、実施できなかった表面溶融炉スラグの硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験を除く

(4) アスファルト舗装骨材としての適用性確認試験

①試験概要

アスファルト舗装骨材としての適用性を確認するため基準試験を行った。

溶融スラグの配合量が増加すると、マーシャル安定度、動的安定度、およびはく離抵抗性が低下する傾向があることが知られており、溶融スラグの配合率は全骨材質量に対して安全をみて全骨材質量の 10%以下とされている例が多い。ただし、耐水性・耐久性等の性能を確認した場合は、混入率 10%以上も可能とされていることから、ここでは、表 2-5 に示すようにシャフト炉スラグの配合率を 0～15%の 4 レベル設定し、表 2-6 に示す試験を行った。

表 2-5 アスファルト舗装の仕様等

項目	仕様等	試験パラメータ
アスファルトの種類	ストレートアスファルト 60/80	
混合物の種類	粗粒度アスファルト混合物(20)	スラグ配合率 ¹⁾ 0%、5%、10%、15%
	密粒度アスファルト混合物(13)	同上

1) スラグ配合率(%)= (細骨材と置換したスラグの質量) / (全骨材質量) × 100 (%)

表 2-6 アスファルト舗装の試験項目・数量一覧表

項目	試験規格	数量 (試料)				
		スラグ配合率(%) ¹⁾				数量
		0	5	10	15	
マーシャル安定度試験	舗装調査・試験法便覧 B001 (突固め回数 50 回)	2	2	2	2	8
水浸マーシャル安定度試験	舗装調査・試験法便覧 B001	2	2	2	2	8
ホイールトラッキング試験	舗装調査・試験法便覧 [3]-44	2	2	2	2	8

②試験結果

マーシャル試験およびホイールトラッキング試験の結果 (図 2-6、図 2-7 を例示) より、溶融スラグの配合率が 0～15%において、粗粒度および密粒度とも、マーシャル安定度やフロー値、強度残留率は設計図書に示される一般的な品質上の諸基準に適合しており、室内試験で検討した範囲では耐久性、耐水性に関する問題はないものと評価された。

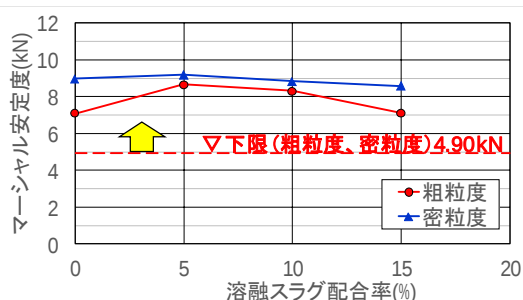


図 2-6 溶融スラグ配合率とマーシャル安定度

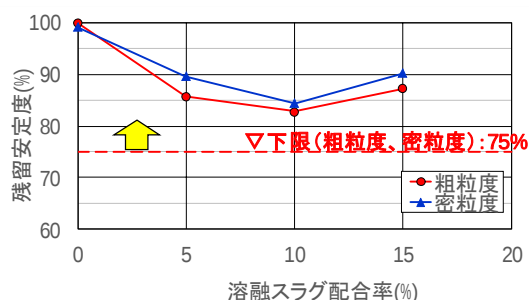


図 2-7 溶融スラグ配合率と残留率

(5) コンクリート骨材としての適用性確認試験

①試験概要

コンクリート骨材としての適用性を確認するため、(ア) 溶融スラグの物理性状確認、(イ) フレッシュコンクリート、硬化コンクリートに関する試験を行った。今回設定したコンクリート配合条件を表 2-7 に示す。フレッシュコンクリートに関する試験の結果に基づき、溶融スラグの置換率は 50%と定め、溶融スラグを配合したコンクリートの品質を確認した。

表 2-7 コンクリートの配合条件

項目	仕様等	備考
種別	普通コンクリート	
目標圧縮強度	30N/mm ²	「JIS A 5031 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を 溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材」の規定を準用
水セメント比	55%以下	
目標スランプ	8cm	規格値 8 ± 2.5cm
空気量	4.5%	規格値 4.5 ± 1.5%

②試験結果

(ア) 溶融スラグの物理性状確認

試験項目及び試験結果を表 2-8 に示す。JIS A 5031 を参考に、溶融スラグ骨材の物理性状確認を確認した結果、粒形判定実積率を除き、規格値を満足していた。なお、粒形判定実積率への対応は、今後検討していく。

表 2-8 溶融スラグ物理性状確認試験結果

項目	単位	規格値 ¹⁾	シャフト炉スラグ (粒度調整あり)	判定
細骨材の密度	g/cm ³	2.5 以上	2.620	OK
吸水率	%	3.0 以下	1.91	OK
骨材の微粒分量	%	7.0 以下	1.4	OK
粒形判定実積率	%	53 以上	48.3	NG
硫酸ナトリウムによる 骨材の安定性	%	10 以下	3.0	OK
銅スラグ細骨材の化学 成分及び塩化物分析	%	酸化カルシウム 45.0 以下	39.3	OK
		全硫黄 2.0 以下	0.6	
		三酸化硫黄 0.5 以下	0.1	
		塩化物量 0.04 以下	0.002	
(化学成分) 金属鉄の含有量	%	金属鉄 1.0 以下	0.3	OK
骨材のアルカリシリカ 反応性 (化学法)	—	無害	無害	OK
膨張性	%	0	0	OK
ポップアウト確認	—	ポップアウトなし	ポップアウトなし	OK

1) 「JIS A 5031 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を 溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材

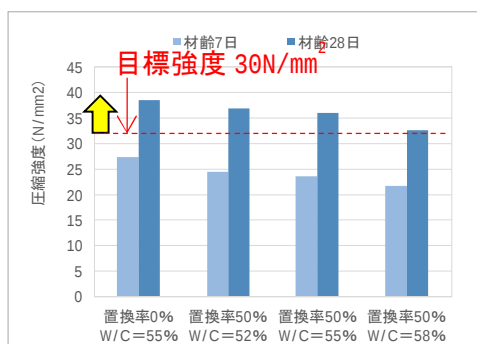
(イ) フレッシュコンクリート、硬化コンクリートに関する試験

単位水量や骨材量などの配合を調整し、スラグ置換率 50%において、所定のフレッシュコンクリートの性状を満たすことを確認した（表 2-9 参照）。

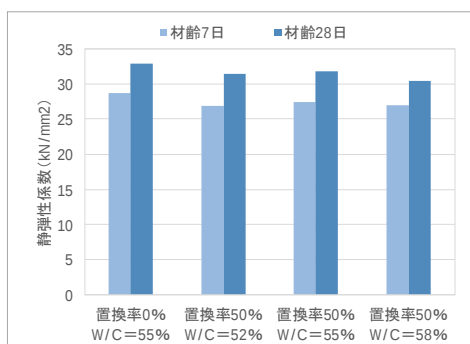
スラグ置換率 0%（W/C=55%）とスラグ置換率 50%(W/C=52, 55, 58%の 3 レベル)について各種強度試験を行い、強度特性を確認した（図 2-8 参照）。W/C=55%の配合について、中性化深さ、塩化物イオン、凍結融解抵抗性などを確認した。今年度得られた成果をもとに、次年度も検討を行う計画である。

表 2-9 フレッシュコンクリート試験結果

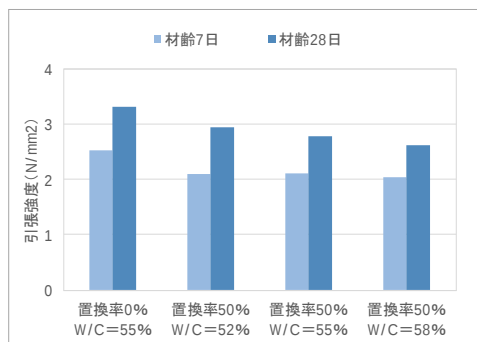
スラグ置換率 (%)	W/C	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					試験結果			
			W 水	C セメント	S1 山砂	S2 スラグ	G 砂利	スランプ (cm)	空気量 (%)	ブリーディング (%)	終結時間 上：始発 下：終結
0	55	46.0	155	282	857	—	1,009	8.5 (OK)	4.5	3.20	5 時間 25 分 7 時間 20 分
50			165	300	419	419	987	7.0 (OK)	5.0	2.43	8 時間 30 分 10 時間 55 分
75			170	309	207	621	976	3.5 (NG)	4.8	—	—
100			160	291	—	847	998	1.0 (NG)	8.5	—	—



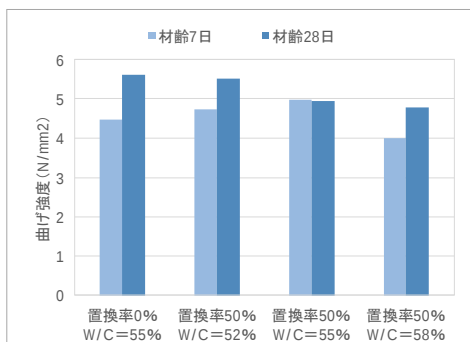
(圧縮強度)



(静弾性係数)



(引張強度)



(曲げ強度)

図 2-8 硬化コンクリートに関する試験結果

(6) タンクリーチング試験

①試験概要

水に浸漬した再生利用品からの重金属の溶出特性を確認するため、表 2-10 に示すアスファルト舗装試験、コンクリート試験で得られたシャフト炉スラグ配合供試体を塊状のまま溶媒水中に水浸し、試験開始から 4、8、12 週後に浸漬水を採取して水中に溶出する放射性物質や重金属の濃度を分析した。試験は、国土交通省「セメント及びセメント系固化材を使用した改良土の六価クロム溶出試験実施要領（案）」添付資料 2「タンクリーチング試験について」を参考にして実施した。

表 2-10 タンクリーチング試験 試験ケース一覧表

再生利用品	ケース数	試験ケース
アスファルト舗装	8	スラグ配合率 (0%、5%、10%、15%) × (粗粒度、密粒度)
コンクリート	3	スラグ置換率 (0%、50%、100%)

②試験結果

試験結果および試験実施状況を表 2-11～表 2-12、図 2-9 に示す。すべての試験ケースで、放射性物質濃度は水道水の管理目標値に適合し、重金属の濃度は地下水環境基準に適合していた。

表 2-11 タンクリーチング試験結果（放射性物質濃度）（単位：Bq/L）

養生期間	粗粒度アスファルト				密粒度アスファルト				コンクリート		
	スラグ配合率(%)				スラグ配合率(%)				スラグ置換率(%)		
	0	5	10	15	0	5	10	15	0	50	100
4 週	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
8 週	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
12 週	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

(注) ND：セシウム 134、セシウム 137 とも定量下限値未満であることを示す。

定量下限値；セシウム 134：0.34～0.65Bq/L、セシウム 137：0.42～0.63Bq/L

表 2-12 タンクリーチング試験結果（養生期間：12 週）

項目	粗粒度アスファルト				密粒度アスファルト				コンクリート			定量 下限値 (mg/L)
	スラグ配合率(%)				スラグ配合率(%)				スラグ置換率(%)			
	0	5	10	15	0	5	10	15	0	50	100	
カドミウム	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.003
鉛	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.01
六価クロム	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.05
砒素	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.005
全水銀	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0005
セレン	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.002
ふっ素	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.09	0.08
ほう素	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.03	ND	ND	ND	0.02

(注) ND：定量下限値未満、地下水環境基準：ふっ素 0.8mg/L 以下、ほう素 1mg/L 以下



図 2-9 タンクリーチング試験実施状況

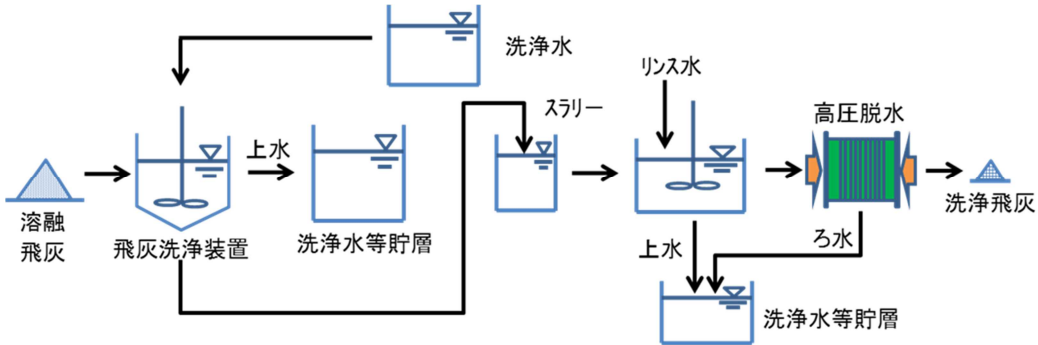
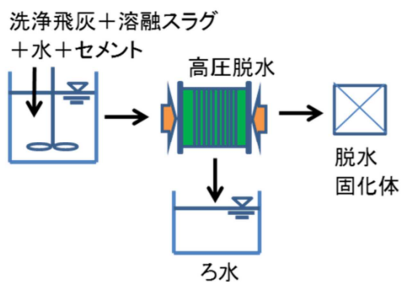
3. まとめと今後の課題

(1) まとめ

- ・ 溶融スラグの放射性物質濃度及び重金属の溶出量、含有量を測定した。重金属の溶出量、含有量は、環境安全品質（JIS A 5031、JIS A 5032）, 土壌汚染対策法に基づく溶出量基準、含有量基準に適合していた。また、アスファルト舗装およびコンクリートの供試体を用いたタンクリーチング試験の結果、4, 8, 12 週経過後に採取した水の放射性物質濃度は水道水の管理目標値に適合し、重金属の濃度は地下水環境基準に適合していた。
- ・ 溶融スラグの物理的性状として、含水比、粒度分布、締固め特性、pH などを確認した。
- ・ 溶融スラグの再生利用の用途として、盛土材、路盤材、アスファルト舗装骨材およびコンクリート骨材を選定し、JIS 規格や国土交通省「土木工事 品質管理基準及び規格値（案）」などを参考にして配合試験、基準試験を行った。その結果、各用途とも配合等を調整することで、各種基準に適合する再生利用品を製造できることを確認した。コンクリート骨材としての適用については、次年度への検討課題を抽出した。
- ・ 盛土材、路盤材、アスファルト舗装骨材およびコンクリート骨材としての再生利用について、施工方法、品質管理方法を検討するとともに、再生利用に関するコストを試算した。
- ・ シャフト炉スラグおよび表面溶融炉スラグを取り扱った作業員の被ばく量を測定し、放射性物質濃度が最大で 3,300Bq/kg 程度の溶融スラグを用いた室内試験等では、溶融スラグに起因する被ばく量は日上限值として設定した 80 μ Sv/d を大きく下回るという結果が得られた。
- ・ 大量のスラグの放射性物質濃度測定方法に関する検討として、5 種類の測定方法（放射能濃度分別機、バルクスキャン、TRUCKSCAN®、サンプル測定：NaI 検出器、Ge 半導体検出器）について、測定方法、時間当たり測定可能量などの情報を整理するとともに、溶融スラグの放射性物質濃度を 100Bq/kg あるいは 8,000Bq/kg で仕分けする場合の適用性を評価した。

(2) 今後の課題

- ・ 溶融スラグの再生利用に向けて、室内試験で得られた情報に基づき、実際に使用する材料を用いて配合試験を行って試験施工を行い、施工方法や品質管理方法などを確認することが必要と考えられる。
- ・ 今後の再生利用に向けて、溶融スラグの品質や環境安全性に関するデータの蓄積などを行っていくことが重要と考えられる。

実施代表者：国立大学法人 九州大学
実証テーマ名：溶融スラグ及び洗浄飛灰を用いた高压脱水ブロック製作による再生利用
概要：仮設灰処理施設から発生する溶融スラグと溶融飛灰を用いて、有害物質の溶出等がなく、かつ、必要な強度を有するブロック製品の製造実証試験を行う。 本実証試験では、水洗浄により放射性 Cs の濃度及びその溶出性の低減化をはかった溶融飛灰に、溶融スラグ、セメントおよび水を混合しスラリー状にした後、排水機能を有した鋼製型枠内に打込み、高压脱水しながらブロックを製作する。 このブロックの放射性 Cs 濃度が 8,000Bq/kg 以下になること、放射性 Cs の溶出量が一定以下であること、一軸圧縮強度が 18.0MN/m² (σ28) 以上であることを確認した。
実施内容： ① 溶融飛灰および溶融スラグの基本性状の確認 ② 溶融飛灰の洗浄方法とリンス効果の確認 ③ 洗浄飛灰と溶融スラグとセメントによる高压脱水ブロックの作成
技術概要： 1. 溶融飛灰の水洗浄 溶融飛灰を洗浄した後、脱水を行う。洗浄後の飛灰に更にリンスを行うことにより飛灰粒子間の洗浄水を置換し、放射性 Cs 濃度と溶出量を低減させる。  2. 高压脱水によるブロックの製造 圧力 4MPa の高压ポンプで強制的にスラリー（洗浄溶融飛灰、溶融スラグ、水、セメントの混合物）を脱水機モールド内部に打ち込むと、モールド内部に張られたろ布を通じて水分だけが排水・脱水され、ブロックが製造できる。  3. 試験目標 ① 製作した高压脱水ブロックの放射性 Cs 濃度が 8,000Bq/kg 以下になること ② 製作した高压脱水ブロックの放射性 Cs の溶出量が一定以下であること ③ 製作した高压脱水ブロックの一軸圧縮強度が 18.0MN/m² (σ28) 以上であること 4. 期待される効果 溶融飛灰および溶融スラグの有効活用

5. 試験結果

(1) 溶融飛灰の水洗浄

溶融飛灰は洗浄後、17.8%に重量が減ることが分かった。

初期放射性 Cs 濃度 240,000Bq/kg の溶融飛灰を洗浄とリンスを組み合わせる洗浄を行うことにより、液固比 12 で残渣の放射性 Cs 濃度を 4,264Bq/kg に低減できた。水量を抑制しつつ洗浄効果を得るには、洗浄とリンスを組み合わせることが有効である。

(2) 高圧脱水によるコンクリートブロックの製造

施工性・経済性・再生利用の観点から品質目標を満たす最も適した配合は、質量比率で、洗浄飛灰 3%：溶融スラグ 19%：セメント 58%：水 20%と考えられる。

洗浄飛灰の添加率は 3%程度にとどまった。その理由は洗浄飛灰に含まれる亜鉛や鉛などのセメント固化を阻害する物質の存在と考えられる。

溶融スラグの添加率は 19%であったが、洗浄飛灰を添加しない場合、溶融スラグは天然砂と同様に使用でき、さらに添加率を向上できるものとする。

本試験における目標と成果

目的	項目	目標値	試験結果
放射性 Cs 濃度が基準値以下	高圧脱水ブロックの放射性 Cs 濃度を確認	・高圧脱水ブロックの放射性 Cs 濃度が 8,000Bq/kg 以下	130Bq/kg O.K
放射性 Cs 溶出量が一定以下	高圧脱水ブロックの放射性 Cs 溶出量を確認	・高圧脱水ブロックから放射性 Cs が溶出しない (10~20Bq/L 以下) ※1	2.4Bq/L O.K
必要な強度が得られること	採取した供試体の一軸圧縮強度を確認	・高圧脱水ブロックの材令 28 日の一軸圧縮強度が 18.0MN/m ² 以上※2	19.4MN/m ² O.K

※1 「放射能濃度等測定方法ガイドライン」平成 25 年 3 月／環境省 第 8 章溶出量 8.3 分析条件及び検出下限値に準拠 (検出下限値はセシウム 134 と 137 の合計 が 10~20Bq/L)

※2 一軸圧縮強度の 18.0MN/m² (σ 28) は、一般的な無筋コンクリートの設計基準強度 (一軸圧縮強度) の 18N/mm² =18.0MN/m² より設定

(3) 洗浄水等の処理

今回のシステム:アルカリ凝集→フィルタープレスによる脱水・ろ過→凝集沈殿(濁質除去)→プルシアンブルー吸着(放射性 Cs 吸着)→キレート吸着(重金属吸着)により処理水は一律排水基準と放射性 Cs の排水基準 ($^{134}\text{Cs}/60 + ^{137}\text{Cs}/90 < 1$) を満たすことができた。

作業員 1 人当りの被ばく線量評価:最も被ばくが高いと思われる飛灰採取時の最大被ばく $11.3 \mu\text{Sv/日} \times 200 \text{ 日/年} = 2,260 \mu\text{Sv/年} = 2.2\text{mSv/年} < 20\text{mSv/年}$

高圧脱水ブロック 1t 当りの製作コスト : 114,600 円/t	歩掛り : 飛灰洗浄 8 人工/日、高圧脱水ブロック製作 10 人/日、水処理 8 人/日
------------------------------------	---

コスト評価条件:溶融飛灰の処理量は 30 t/日、プラントの稼働は 333 日/年、10 年間で 10 万 t 処理する。10 万 t の溶融飛灰は洗浄により 17,800t の洗浄飛灰となり、そこから 593,333t の高圧脱水ブロックを製作する。

作業における安全上の注意:飛灰の放射能濃度が高く粉体で飛散しやすいため、仮設テント内に放射線管理区域を設定する他、適切な保護具を用いる必要がある。

試験場所:技術実証フィールド (福島県双葉郡大熊町)	除去物保管場所と保管状況:20L の SUS ペール缶に封入して JESCO 資材置場に保管
-------------------------------	--

1. 事業概要

(1) 背景と目的

仮設灰処理施設から発生する溶融スラグと溶融飛灰を用いて、有害物質の溶出等がない化学的に安定したブロック製品を製造することができれば、帰還困難区域での太陽光発電の基礎や土留め用の擁壁などに活用できる可能性がある。しかし、溶融飛灰は放射性セシウム（以下「放射性 Cs」という。）濃度が高いことから、ブロック製品からの放射性 Cs の溶出が懸念されるため、その溶出抑制が課題となる。そこで、事前の洗浄により溶融飛灰中の放射性 Cs の濃度及びその溶出性の低減化を図る。さらに、溶融スラグや洗浄溶融飛灰を用いたブロック製品が必要な強度を満足できるような適正な配合を見いだすことが課題である。

本技術実証では、溶融飛灰を洗浄した洗浄飛灰に、溶融スラグとセメントと水を混合しスラリー状にした後、排水機能を有した鋼製型枠内に打込み、高圧脱水しながら高圧脱水ブロックを製作し、この高圧脱水ブロックの放射性 Cs 濃度が 8,000Bq/kg 以下になること、放射性 Cs の溶出量が一定以下であること、一軸圧縮強度が 18.0MN/m²（ σ_{28} ）以上であることを確認する。

(2) 実施フローと試験目標

試験の実施フローを図 1-1 に、本試験における試験目標を表 1-1 に示す。

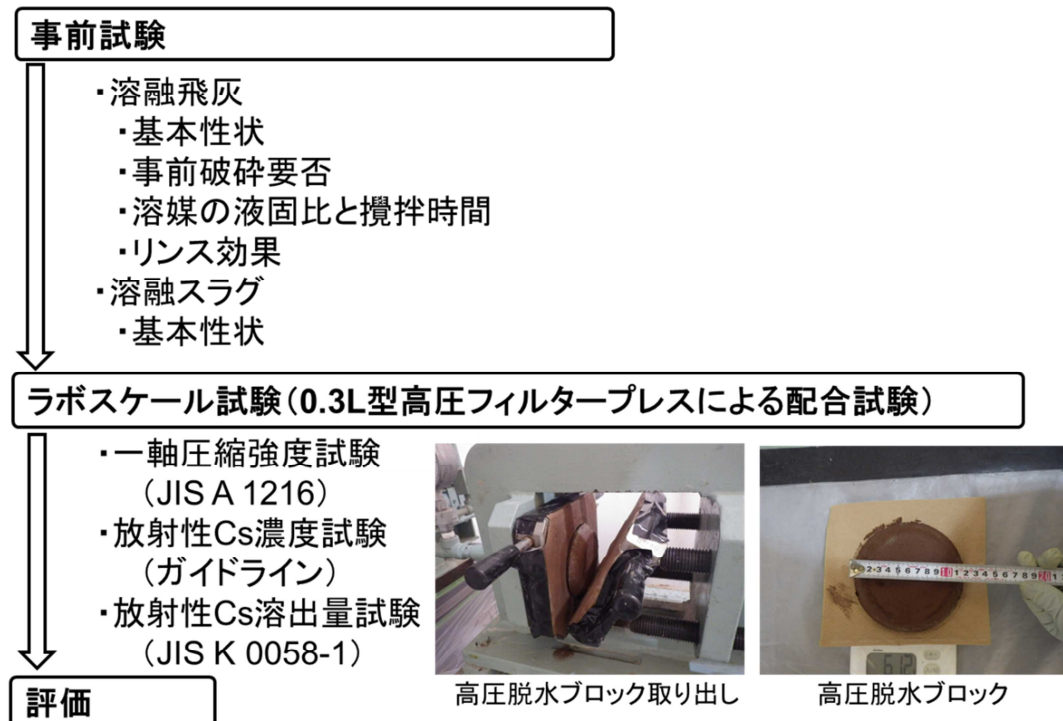


図 1-1 試験の実施フロー

表 1-1 本試験における試験目標

No	目的	項目	目標値
①	放射性 Cs 濃度が基準値以下であること	高圧脱水ブロックの放射性 Cs 濃度を確認する	・高圧脱水ブロックの放射性 Cs 濃度が 8,000Bq/kg 以下であること
②	放射性 Cs の溶出量が一定以下であること	高圧脱水ブロックの放射性 Cs 溶出量を確認する	・高圧脱水ブロックから放射性 Cs が溶出しないこと※1
③	必要な強度が得られること	高圧脱水ブロックから採取した供試体の一軸圧縮強度を確認する	・高圧脱水ブロックの材令 28 日の一軸圧縮強度が 18.0MN/m ² 以上であること※2

※1 第五部「放射能濃度等測定方法ガイドライン」平成 25 年 3 月／環境省 第 8 章溶出量 8.3 分析条件及び検出下限値に準拠（検出下限値は 10～20Bq/L）

※2 一軸圧縮強度の 18.0MN/m²（ σ_{28} ）は、一般的な無筋コンクリートの設計基準強度（一軸圧縮強度）の 18N/mm²=18.0MN/m² より設定

2. 実施試験の内容とその結果

（1）基本性状

溶融飛灰、溶融スラグ、セメントの基本性状を表 2-1 に、溶融飛灰の含有成分分析例を表 2-2 に示す。

表 2-1 基本性状

試験名	試験方法	試験結果				
		単位	溶融飛灰	洗浄飛灰	溶融スラグ	セメント
密度試験	JIS A 1202	g/cm ³	—	3.267	2.818	3.04
含水比試験	JIS A 1203	%	0.7	209	0.4	—
放射性Cs濃度試験	※1	Bq/kg	240,000	4,264	148	N.D
放射性Cs溶出量試験	JIS K 0058-1	Bq/L	23,000	288	N.D	—

表 2-2 溶融飛灰の含有成分分析例

元素	単位	試験結果
Zn	mg/L	11,000
Pb		8,000
Mn		700
Cd		83

※ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトロメトリー

（試験結果）

溶融飛灰は初期の放射性 Cs 濃度が 240,000Bq/kg であった。溶融飛灰を水洗浄することにより、洗浄飛灰（残渣）の放射性 Cs 濃度は 4,264Bq/kg になった。水洗浄することにより、溶融飛灰に含まれる放射性 Cs の 98.2%が水分に移行する。

溶融飛灰に含まれる水溶性の塩類の溶解は、溶融飛灰の粒径、溶媒の液固比、攪拌時間などとの関係があるといわれている。このため、洗浄方法について最適な条件設定が必要と考えられる。また、残留含水を追い出すためのリンスも重要と考えられる。

(2) 事前破碎の要否

溶融飛灰中に含まれる水溶性の塩類の溶解に関して、粒径の影響を確認した。

バイブロミルで破碎した溶融飛灰と鋼製容器から取り出したままの溶融飛灰で試験を実施した。なお、塩類の溶解性については、過年度の試験により電気伝導率との相関が確認されていることから、今回も電気伝導率で評価した。

(試験結果)

事前破碎の要否の確認結果を図 2-1 に示す。破碎の有無による電気伝導率の相違は僅かであり、溶融飛灰からの水溶性の塩類の溶解性に関して事前破碎の影響はほとんどないという結果となった。

これは、溶融飛灰がもともと粒度の細かい粉体状であったので、今回の解砕の条件では溶解性向上の効果が出なかったものと考えられる。よって、本試験では溶融飛灰を事前破碎せずに試験を実施することとした。

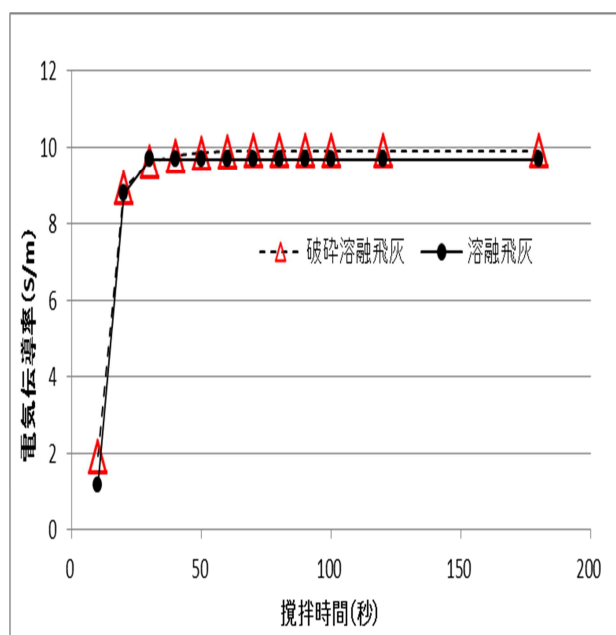


図 2-1 事前破碎の要否の確認

(3) 溶媒の液固比と攪拌時間

溶融飛灰中に含まれる水溶性の塩類の溶解に関して、攪拌時間の影響を確認した。溶融飛灰の溶媒は液固比が 6、10、20 となるように、溶融飛灰 100g に対して純水を加えた。攪拌時間は 3 分、60 分、360 分とした。残渣の重量は、攪拌後の溶液を $0.45\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターを使用し、固液分離後の残渣の重量と含水率を測定して計算した。溶媒の液固比と攪拌時間の関係を図 2-2 に示す。

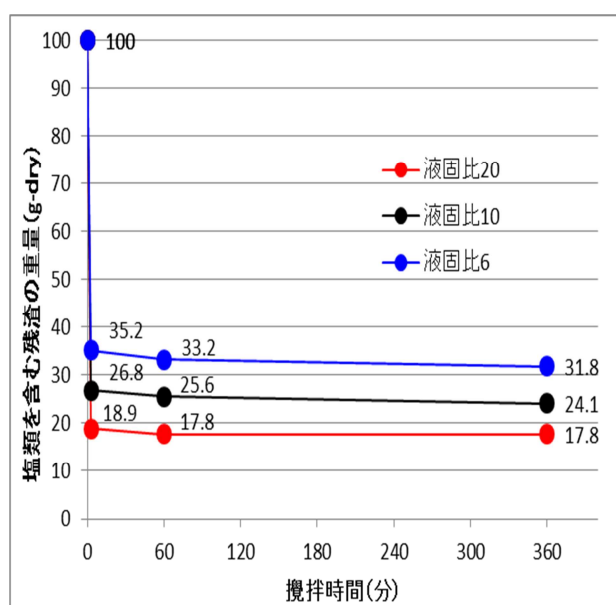


図 2-2 溶媒の液固比と攪拌時間の関係

(試験結果)

液固比を 20 とした場合、元の溶融飛灰の重量 100g-dry に対して攪拌 60 分後も 366 分後も残渣の重量は 17.8g-dry と変わらない。一方、液固比 6 の場合、残渣の重量は 60 分後で 33.2g-dry、360 分後で 31.8g であり、洗浄時間の経過により溶媒へ僅かではあるが残渣中の塩類が溶解することが確認された。

以上より、溶融飛灰をより完全に洗浄するためには液固比 20 という高液固比がベターであると考えられるが、水処理の負荷が増大して非合理的なプラントになってしまう。そこで、洗浄後の脱水工程において間隙水のみを清水に置き換えるリンスを適用することにし、今回は液固比 6+リンスで試験を行うことにした。

なお、洗浄時間については 60 分以降、残渣の重量変化が僅かであることから 60 を採用することとした。

(4) リンス効果

当初、高压フィルタープレスに洗浄飛灰を入れたままリンスする計画でいたが、この方法では脱水固化物が固く締まっているため、リンス効果が十分でないことが分かった。そこで、高压フィルタープレス投入前のスラリーを水槽に入れてリンスを行うこととした。

具体的には、液固比 6 で洗浄し、1 日沈降させたスラリー（含水比 209%）に対して、リンス水をスラリーの残水重量に対して 4 倍加えて再洗浄し、上水を排水することを 2 回繰り返し行った。飛灰洗浄方法の模式図を図 2-3 に示す。

(試験結果)

リンスの採用により、残渣の放射性 Cs 濃度を 4,264Bq/kg まで低下させることができた。溶融飛灰 100g 洗浄するのに必要な水量は、1,160cm³ となり液個比 11.6≒12 の水量で洗浄が可能であることが確認でき、洗浄+リンスが有効であることが分かった。

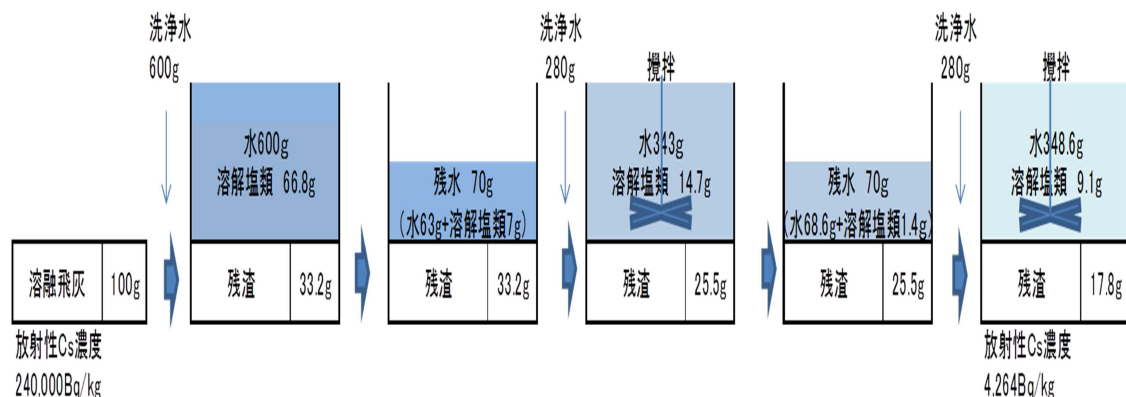


図 2-3 飛灰洗浄方法の模式図（溶融飛灰 100g 当り）

なお、高压フィルタープレス内での効果的なリンス条件については今後改めて探索していく予定である。

(5) ラボスケール試験

①一軸圧縮強度試験による配合検討

σ28 における一軸圧縮強度が目標強度の 18.0MN/m² 以上となるような配合を検討した。配合は、熔融スラグとセメントの重量比を 1:3、1:5、1:6 とし、洗浄飛灰は熔融スラグとセメントの重量に対し 1～5%の重量率で添加した。一軸圧縮強度試験の結果を図 2-4 に示す。

(試験結果)

施工性・経済性・再生利用の観点から、品質目標を満たす最も適した配合は、質量比率で、洗浄飛灰 3%：熔融スラグ 19%：セメント 58%：水 20%となった。

洗浄飛灰の添加率は 3%程度にとどまった。その理由は洗浄によっても除去されない洗浄飛灰に含まれる亜鉛や鉛などのセメント固化を阻害する物質の存在と考えられる。

熔融スラグの添加率は 19%であったが、洗浄飛灰を添加しない場合、熔融スラグは天然砂と同様に使用でき、さらに添加率を向上できるものとする。

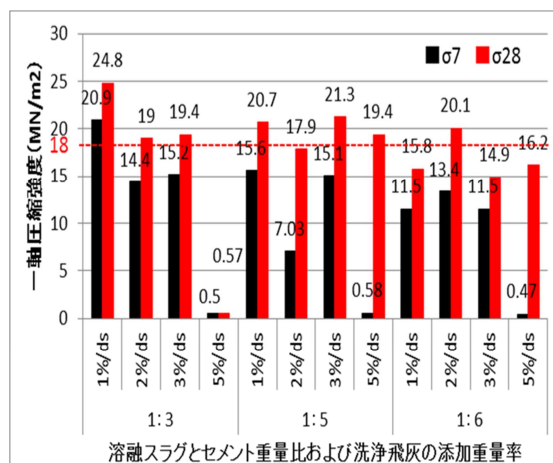


図 2-4 一軸圧縮強度試験の結果

②放射性 Cs 濃度と放射性 Cs 溶出量試験

による配合検討

脱水固化体の放射性 Cs 濃度と放射性 Cs 溶出量を図 2-5 に示す。

(試験結果)

熔融スラグとセメント重量比がどの組み合わせでも、脱水固化体の放射性 Cs 濃度は 55～230Bq/kg であり、目標値 8,000Bq/kg を大幅に下回った。放射性 Cs 溶出量も目標値 10～20Bq/L を満たした。これは、洗浄飛灰の添加率を低く設定したためである。

以上の結果から配合を表 2-3 の通りと決定した。

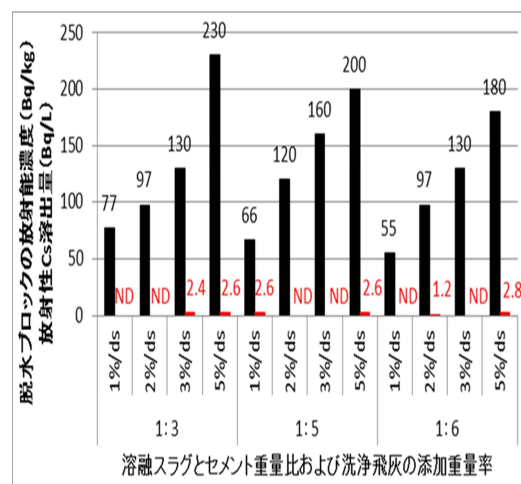


図 2-5 脱水固化体の放射性 Cs 濃度と放射性 Cs 溶出量

表 2-3 高圧脱水ブロック 1.0m³ の配合内訳

項目	洗浄飛灰	熔融スラグ	セメント	水	合計
容量 (m ³)	0.018	0.149	0.403	0.430	1.000
質量 (t)	0.049(3%)	0.409(19%)	1.227(58%)	0.430(20%)	2.115(100%)

(6) 洗浄水等の処理

洗浄水等の処理設備の写真を図 2-6 に示す。



図 2-6 洗浄水等の処理設備

洗浄水等の処理フローを図 2-7 に示す。

本試験では、飛灰洗浄水等の処理に使用するアルカリ反応槽に添加するポリ硫酸第二鉄、苛性ソーダ及び高分子凝集剤の添加量と、凝集沈殿槽に添加する PAC、希硫酸及び高分子凝集剤の添加量を把握することを目的として、飛灰洗浄水等貯槽の貯留水に対してビーカー試験を実施した。

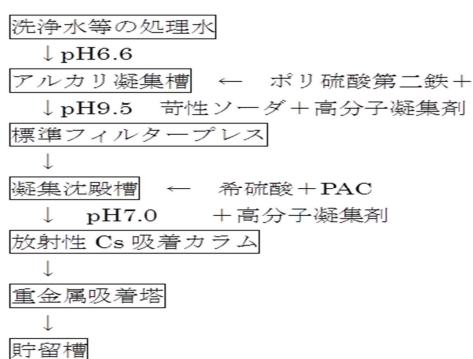


図 2-7 洗浄水等の処理フロー

①アルカリ凝集試験（アルカリ凝集槽）

アルカリ凝集試験状況を図 2-8 に示す。本試験では、水に含まれる重金属をアルカリ領域で析出除去することを目的としている。また、pH 調整のための苛性ソーダ添加量を把握するための試験及びジャーテスターによる高分子凝集剤の凝集性能の確認を実施した。

（試験結果）

アルカリ凝集試験において、洗浄水を凝集するために必要なポリ硫酸第二鉄（原液）は洗浄水 1L に対して 1,500mg、pH を 9.5 にするために必要な苛性ソーダ（25% 溶液）は洗浄水 1L に対して 9mL、高分子凝集剤はごみ浸出水処理等の実績から洗浄水 1L に対して 5mg とした。なお、高分子凝集剤はハイモロック SS-100（中アニオン）を使用した。



洗浄水の状況

ポリ硫酸第二鉄添加直後

苛性ソーダ（25%）添加直後

図 2-8 アルカリ凝集試験

②凝集試験（凝集沈殿槽）

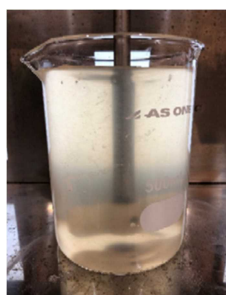
前記①のアルカリ凝集処理水（アルカリ凝集＋標準フィルタープレスによる脱水・ろ過）に残留した重金属や濁質などを更に除去するための処理である。先ず、アルカリ凝集処理水に対して pH を中性域にするための希硫酸や PAC 及び高分子凝集剤などの添加量を設定した。また、ジャーテストでは PAC 添加時のフロック形成状況及び高分子凝集剤の添加時のフロック沈降状況を確認した。

（試験結果）

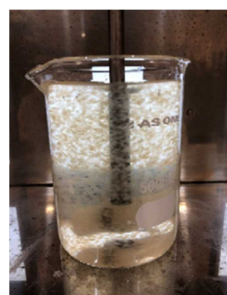
アルカリ凝集処理水を凝集するために必要な PAC（原液）は、過去の類似事例から 1L に対して 1,000mg とした。また、pH を 7.5 にするために希硫酸の追加添加が必要と考えられたが、PAC のみで pH 調整可能であることが確認された。なお、高分子凝集剤はアルカリ凝集と同様に洗浄水 1L に対して 5mg とした。本システムにより、処理水に含まれる重金属類を含め一律排水基準値未満にできた（表 2-4 参照）。



アルカリ凝集処理水



PAC 添加後



高分子凝集剤添加直後



30 分後

図 2-9 中性凝集試験

③放射性 Cs 吸着処理

前項に示すアルカリ沈殿処理と凝集処理を行った処理水に対して放射性 Cs を吸着処理するため、図 2-10 に示すプルシアンブルー吸着カラムを使用した。

吸着カラムはφ100mm×H300mm の円筒形で、内部にφ3mm 程度のプルシアンブルーの粒状吸着剤を入れたものを 9 本（3 筒直列×3 系列、吸着材の総重量：13kg）を使用した。使用後の吸着剤は平均 280 万 Bq/kg となった。放射性 Cs 吸着後の処理水は $^{134}\text{Cs}/60 + ^{137}\text{Cs}/90 < 1.0$ となった（表 2-4 参照）。



図 2-10 プルシアンブルー吸着カラム

表 2-4 重金属および放射性 Cs 吸着処理前後の水質

測定項目	単位	処理前	処理後	測定項目	単位	処理前	処理後
放射性Cs	Bq/L	3,860～11,280	N.D～40	水銀	mg/L	0.002～0.004	N.D
カドミウム	mg/L	2.4～3.2	N.D	セレン		0.004	N.D
鉛		1.0～3.6	N.D	亜鉛		220～480	1.6
六価クロム		N.D	N.D	マンガン		7.5～9.2	N.D
砒素		N.D	N.D				

3. 物質収支

固形分収支は 90.6 %～99.7%、水分収支は 90.6%～98.4%、放射能収支は 90.5%～97.9%であった。表 3-1 に脱水前後の物質収支（固形分・水分）を、表 3-2 に脱水前後の放射能収支を示す。

表 3-1 脱水前後の物質収支（固形分・水分）

試験ケース	配合		脱水処理前		脱水処理後				回収率	
	溶融スラグ：セメント重量比	溶融飛灰添加率（%/ds）	①飛灰スラリー		②脱水固化体		③ろ水		(②+③/①) ×100%	
			固形分重量（g）	水分重量（g）	固形分重量（g）	水分重量（g）	固形分重量（g）	水分重量（g）	固形分	水分
No.1	1:3	0	438	293	408	85	4	194	94.1%	95.2%
No.2	1:3	1	480	316	459	100	4	186	96.3%	90.6%
No.3	1:3	2	466	306	429	94	4	196	93.0%	94.7%
No.4	1:3	3	466	300	421	108	4	176	91.1%	94.8%
No.5	1:3	5	443	278	406	113	3	157	92.4%	96.9%
No.6	1:5	0	468	194	423	112	2	78	90.6%	98.4%
No.7	1:5	1	450	331	408	112	4	201	91.4%	94.7%
No.8	1:5	2	427	312	387	114	4	176	91.5%	93.0%
No.9	1:5	3	439	315	399	118	4	176	91.6%	93.6%
No.10	1:5	5	473	333	463	124	4	196	98.8%	96.0%
No.11	1:6	0	475	363	435	108	5	226	92.7%	92.0%
No.12	1:6	1	436	330	405	120	4	196	93.8%	95.7%
No.13	1:6	2	456	340	450	114	4	201	99.7%	92.5%
No.14	1:6	3	446	332	420	106	4	216	95.1%	97.0%
No.15	1:6	5	465	336	426	106	4	221	92.6%	97.1%
平均									93.6%	94.8%

表 3-2 脱水前後の放射能収支

試験ケース	脱水処理前				脱水処理後						回収率 (②+③)/①
	①飛灰スラリー				②脱水固化体			③ろ水			(%)
	洗浄飛灰の放射能 (Bq)	スラグの放射能 (Bq)	水+セメントの放射能 (Bq)	放射能総量 (Bq)	脱水固化体の重量 (g-wet)	脱水固化体の放射能濃度 (Bq/kg-wet)	放射能総量 (Bq)	ろ水重量 (g)	放射能Cs濃度 (Bq/kg)	放射能総量 (Bq)	
No.1	0	17	0	17	493	31	15	198	0	0	90.5%
No.2	59	18	0	77	559	55	31	190	220	41	93.5%
No.3	88	17	0	105	523	97	51	200	260	51	96.7%
No.4	147	17	0	164	529	130	69	180	520	92	97.9%
No.5	235	16	0	251	519	230	119	160	704	110	91.6%
No.6	0	12	0	12	535	21	11	80	0	0	96.9%
No.7	59	11	0	70	520	66	34	205	164	33	96.1%
No.8	88	10	0	99	501	120	60	180	198	35	96.5%
No.9	147	11	0	158	517	160	83	180	400	71	97.2%
No.10	235	11	0	246	587	200	117	200	534	105	90.2%
No.11	0	10	0	10	543	19	10	231	0	0	97.2%
No.12	59	9	0	68	525	55	29	200	168	33	91.0%
No.13	88	10	0	98	564	97	55	205	180	36	93.0%
No.14	147	9	0	156	526	130	68	220	340	73	90.8%
No.15	235	10	0	245	532	180	96	225	594	131	92.7%
平均										94.1%	

4. 飛灰 10 万 t から高圧脱水ブロックを製作するためのトータルコスト

- ・溶融飛灰の処理量は 30 t/日とし、プラントの稼動は 333 日/年、10 年間で 10 万 t 処理するものと設定した。
- ・10 万 t の溶融飛灰は水洗浄により、17,800t の洗浄飛灰となる。
- ・17,800t の洗浄飛灰、112,733t の溶融スラグ、344,133t のセメント、118,667t の水を

使用し、高圧脱水ブロックを 593,333t 製作する。

- ・高圧脱水ブロックは、溶融飛灰を洗浄し、洗浄飛灰（洗浄後の残渣）、溶融スラグとセメントを混合した含水率 67%（含水比 200%）のスラリーを含水率 20.4%まで脱水をおこない、高圧脱水ブロックを製作する。

- ・高圧脱水ブロックの寸法は 1.0m×1.0m×1.0m を想定した。

- ・高圧脱水ブロック製作機の実機は 1 バッチ当り 1.0m³ の高圧脱水ブロックを 7 個作成でき、1 日当り 6 バッチ（42m³/日）の施工とした。

表 4-2 各作業工程における人員構成

作業工程	人員構成	人工/日
飛灰洗浄工程	土木一般世話役	1
	普通作業員	6
	放射線管理者	1
高圧脱水ブロック製作工程	土木一般世話役	2
	普通作業員	8
水処理工程	土木一般世話役	1
	普通作業員	6
	放射線管理者	1
合計		26

**表 4-3 飛灰 10 万 t から高圧脱水ブロックを製作するためのトータルコスト
（高圧脱水ブロック 593,333t 当り）**

作業工程	費目	金額（百万円）	トータルコスト（百万円）
飛灰洗浄工程	設備費（建設費含む）	2,253	7,362
	ランニング費	2,684	
	メンテナンス費	225	
	人件費	2,200	
高圧脱水ブロック製作工程	設備費（建設費含む）	6,118	20,997
	ランニング費	13,300	
	メンテナンス費	612	
	人件費	967	
水処理工程	設備費（建設費含む）	21,000	57,448
	ランニング費	34,038	
	メンテナンス費	210	
	人件費	2,200	
合計			85,807

高圧脱水ブロックの製作コストは以下のように試算された。

高圧脱水ブロック 1t 当り製作するためのトータルコスト：114,600 円/t

内訳（高圧脱水ブロック 1t 当り）

- ・ 溶融飛灰の洗浄：7,362 百万円 ÷ 593,333t ≒ 12,400 円/t
- ・ 高圧脱水ブロックの製作：20,997 百万円 ÷ 593,333t ≒ 35,400 円/t
- ・ 水処理：57,448 百万円 ÷ 593,333t ≒ 96,800 円/t

5. まとめと今後の課題

（1）まとめ

①溶融飛灰の水洗浄

溶融飛灰は洗浄後、17.8%に重量が減る。

初期放射性 Cs 濃度 240,000Bq/kg の溶融飛灰を洗浄とリンスを組み合わせる洗浄を行うことにより、液固比 12 で残渣の放射性 Cs 濃度を 4,264Bq/kg に低減できた。水量を抑制しつつ洗浄効果を得るには、洗浄とリンスを組み合わせることが有効である。

②高圧脱水によるコンクリートブロックの製作

施工性・経済性・再生利用の観点から品質目標を満たす最も適した配合は、質量比率で、洗浄飛灰 3%：溶融スラグ 19%：セメント 58%：水 20%と考えられる。

洗浄飛灰の添加率は 3%程度にとどまった。その理由は洗浄飛灰に含まれる亜鉛や鉛などのセメント固化を阻害する物質の存在と考えられる。

溶融スラグの添加率は 19%であったが、洗浄飛灰を添加しない場合、溶融スラグは天然砂と同様に使用でき、さらに添加率を向上できるものとする。

③洗浄水等の処理

今回のシステム：アルカリ凝集→フィルタープレスによる脱水・ろ過→凝集沈殿（濁質除去）→プルシアンブルー吸着（放射性 Cs 吸着）→キレート吸着（重金属吸着）により処理水は一律排水基準と放射性 Cs の排水基準（ $^{134}\text{Cs}/60 + ^{137}\text{Cs}/90 < 1$ ）を満たすことができた。

④物質収支

固形分収支は 90.6 %～99.7%、水分収支は 90.6%～98.4%、放射能収支は 90.5%～97.9%であり、回収率の良いシステムである。

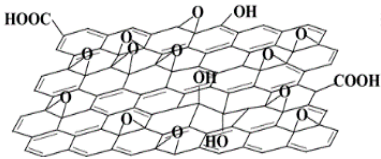
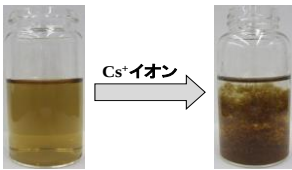
（2）今後の課題

①洗浄飛灰配合率の向上

セメント固化を遅延させる亜鉛などにより洗浄飛灰の配合率が低いのが課題である。キレート剤などを混合させ、洗浄飛灰の添加率を向上させる必要がある。

②放射性 Cs 吸着材の取り扱い

今回の場合、24 万 Bq/kg × 159.2kg ≒ 38 百万 Bq の放射能を 13kg の吸着剤に吸着させた（平均濃度約 280 万 Bq/kg）。表面線量が 70 μSv/h 程度となり、放射線防護の観点から吸着カラムの取り扱いについて考慮する必要がある。

実施代表者：株式会社三菱総合研究所
実証テーマ名：酸化グラフェンを利用した熔融飛灰洗浄水の減容化に関する研究
概要：仮設灰処理施設から発生する熔融飛灰に含まれる高濃度の放射性セシウムは、洗浄操作によって放射性セシウムを洗浄水中に移行させ、その放射性セシウムを吸着材によって洗浄水から除去・濃縮すれば放射性セシウムを含む廃棄物を減容化することが可能となる。セシウム吸着材として従来はプルシアンブルー、ゼオライト等が用いられていたが、酸化グラフェンを用いれば比較的容易な方法で同等の効果が得られる可能性がある。本研究では、酸化グラフェンによる放射性セシウムの吸着能力を評価し、その実用化の可能性について検討する。
実施内容： （１）実証試験によるセシウム吸着性能の評価 安定セシウムを含む模擬溶液等によるコールド試験を行い、安定セシウムの吸着能力、共存イオン存在下での安定セシウムの吸着特性、安定セシウムの再溶出特性を評価する。また、放射性セシウムを含む模擬溶液等によるホット試験を行い、放射性セシウムの吸着能力、放射性セシウムの再溶出特性を評価する。 （２）熔融飛灰洗浄水処理方法の検討 酸化グラフェンを吸着材として使用する洗浄水処理方法について、工学的実現性および放射線安全性に関して検討する。
技術概要： 酸化グラフェン（GO）は、厚みが1nmで、サイズは1μm程度のナノシートであり、表面が多数の酸素官能基で覆われているため、負の電荷を有している。そのためGOは静電的相互作用によりセシウムイオンなどの陽イオンを吸着することができる。また、GOは、水溶液中に沈殿することなく用いることができ、比表面積が高く、陽イオンに対して優れた吸着特性を有しているため、飛灰洗浄水の放射能濃度を低減できることが期待される。  図1 GOナノシートの構造  図2 GOのCsイオンの吸着 成果目標： 熔融飛灰洗浄水中の放射性セシウム（ここではCs-137のみとする）の放射能濃度を25,000Bq/Lと想定した場合に、GOにより、その放射能濃度を環境放流基準である90Bq/L以下に低減することを目指す。また、GOを吸着材として使用する場合の熔融飛灰洗浄水の処理フローについて検討し、その処理に必要となる設備、機器の仕様等を明確化しつつ、処理等に係る費用について試算するとともに、放射線安全性に係る対策を明らかにする。 期待される効果： 最終処分量の低減

実証試験の結果： (1) 実証試験によるセシウム吸着性能の評価 ①コールド試験 安定セシウムのみが溶解している溶液の場合、GO による安定セシウムの回収率は最大で 40%程度と評価された。GO 分散液中に存在しているカリウム等の陽イオンが安定セシウムの回収率の低下の原因と推測された。そのため、GO 分散液（原液）を純水により洗浄することでカリウム等を取り除いた結果、安定セシウム単体の溶液での回収率は 90%になることを確認した。しかし、溶融飛灰洗浄水を模擬した溶液ではセシウム以外の陽イオンが共存していることにより安定セシウムの回収率は 20%程度と評価された。また、セシウムを吸着させた GO 残渣からのセシウムの再溶出性について試験した結果、海水を模擬した溶液に対してはほぼ 100%、純水の場合でも最大 30%のセシウムが再溶出する結果となった。 ②ホット試験 放射性セシウムの放射能濃度が 25,000Bq/L で調整した模擬洗浄水で試験した結果、吸着性能はコールド試験と同様な傾向を示した。また、再溶出性能についても、コールド試験と同様な傾向を示した。 (2) 溶融飛灰洗浄水処理方法の検討 溶融飛灰洗浄水中の放射性セシウムを吸着した GO 残渣の固液分離は遠心分離機により行うこととし、繰り返し吸着処理する回数を 6 回とした処理プラントの検討を行い、放射線安全対策について検討した。	
技術等の評価：セシウム吸着特性に着目した酸化グラフェンの品質（分散液中の陽イオン濃度、酸素官能基の量、ナノシート形状等）の最適化が必要である。	
作業員被ばく量評価：本格設備の想定では、固形化物貯蔵室内の空間線量率が最大で 20 μ Sv/h となるため、固形化物貯蔵室内の年間の作業時間を 1,000h 以内に制限する。	
コスト評価： 建設・設備費： 998 百万円 運転・維持管理費：16,810 百万円/年 ※別途放射線管理費用が必要	歩掛り（作業人工、作業速度等）： 運転時作業体制 管理者 1 名、スタッフ 1 名、運転員 8 名 ※放管要員数名程度必要
コスト評価条件：洗浄水の処理能力は 160t/日とし、施設の稼働は、年間 250 日、24 時間連続運転とした。処理水は、重金属イオン等の処理を行い、環境基準を満たしていることを検査した上で、一般環境に放流するものとする。なお、放射性セシウムを吸着して安定化し、保管する費用を含まない。GO の費用は現時点での購入価格を基に今後 GO の市場規模が大きくなり価格が下がることを想定したものとした。	
安全性の評価：固形化物貯蔵室外の線量を低減させるために 20cm 厚コンクリート壁の設置等が必要である。また、処理機器の周辺に接近しないように防護柵などを設置するなどの対策が必要である。	
試験場所（住所）： 熊本県熊本市	除去物保管場所と保管状況：放射性セシウムに汚染された廃棄物は RI 廃棄物として日本アイソトープ協会に引き渡し処理した。汚染されていない廃棄物は産業廃棄物として処理した。

1. 概要

(1) 背景

放射性セシウム（以下、「セシウム」は「Cs」という。）を含む焼却灰を熔融処理した場合、放射性 Cs の大部分は熔融飛灰に移行する。この放射性 Cs を含む熔融飛灰の減容方法として水洗浄が有効な方法の一つと考えられており、洗浄水中の放射性 Cs を吸着・濃縮することで、保管・処分すべき廃棄物の容積を減らすことができる。この洗浄水からの放射性 Cs の吸着・濃縮には、ゼオライト（以下、「ZL」という。）、プルシアンブルー（以下、「PB」という。）、RO 膜（逆浸透膜）などを用いる方法が検討されているが、現時点では最適な吸着材と処理方法は確立されていない。さらに、洗浄水から放射性 Cs を除去した処理水について放流など減容化する決定的な方法も確立されていない。

天然グラファイトを化学的に酸化して合成する酸化グラフェン（以下、「GO」という。）は、ナノシート状のナノ材料であり、グラフェン表面上に多数の酸素官能基（O/C = 30 - 40 %）を有しており、負に帯電している。そのため、GO は、静電氣的相互作用により、Cs イオンなどの陽イオンを吸着することができる。GO を吸着材として利用することで、熔融飛灰をさらに減容化し、最終処分する物量の低減が期待される。また、GO は、水溶液に分散させて用いることができ、比表面積が高く、Cs イオンに対して優れた吸着特性を有していることから、比較的容易な方法で飛灰洗浄水の放射能濃度を大幅に低減することも期待される。

(2) 目的

本業務は、GO が熔融飛灰洗浄水中に存在する放射性 Cs を効率的に吸着し、最終処分の対象となる廃棄物（放射性 Cs を含む）の容量を減らすことができるとともに、熔融飛灰洗浄水中の放射性 Cs の放射能濃度を低減できることを示す基礎データを取得することを目的とする。なお、GO は、低濃度時の Cs 吸着性能、Cs を吸着し上澄み液と分離した GO の残渣（以下、「吸着残渣」という。）の安定性・取り扱い易さ、洗浄水中の Cs を吸着した吸着残渣と分離した上澄み液（以下、「吸着処理液」という。）中の有害物質濃度の低さ、などにおいて、他の吸着材（ZL、PB 等）と比較して優位性があると期待されることから、Cs 吸着に対する GO の特徴を明らかにする。

また、本業務で得られた GO に関する基礎的なデータ等に基づいて、GO を吸着材として利用した熔融飛灰洗浄処理方法について検討し、その実用化について明確化する。

(3) 実施内容

熔融飛灰洗浄水を模擬した溶液（放射性 Cs を含む）等を作成し、GO を吸着材として添加した場合の Cs（放射性 Cs を含む）を吸着する能力について、最大吸着量、pH 依存性、共存イオン濃度依存性等の特性を評価するとともに、Cs（放射性 Cs）の再溶出特性についても評価するのに必要なデータ等を実験室レベルでの試験としてデータを取得する。なお、現在吸着材として候補にあがっている ZL 及び PB についても、GO の場合と同様の試験を一部実施することにより、放射性 Cs の吸着特性について比較検討する。

さらに、これらの試験で得られた GO による放射性 Cs の吸着特性及び再溶出特性などに基づいて、GO を用いた熔融飛灰洗浄水の処理方法と、放射性 Cs を吸着した GO を安定化する方法について技術的検討を行い、その実用性・適用性を評価する。

(3) 成果目標

福島県内で発生した事故由来放射性物質を含む溶融飛灰の洗浄については洗浄方法を含め様々な手法が検討されているところであり、実際の溶融飛灰を洗浄して生成される溶融飛灰洗浄水の性状については現時点では明らかにはなっていない。本業務では、溶融飛灰中の放射性 Cs（ここでは Cs-137 のみとする）の放射能濃度を 150,000Bq/kg とし、その溶融飛灰を洗浄して生成される溶融飛灰洗浄水中の放射性 Cs の放射能濃度を 25,000Bq/L とした場合に、GO により、その放射能濃度を 90Bq/L 以下に低減することを目指す。

また、GO を吸着材として使用する場合の飛灰洗浄処理フローについて検討するとともに、その処理システムとして実現するために必要な課題（処理方法、固液分離方法、吸着材の安定化方法、等）を整理し、それらの実現性、放射線安全性に係る方針を明らかにすることを目指す。

2. 試験実施方法

(1) コールド試験

調査社員からの情報等を基に飛灰洗浄水の実組成を想定し、安定 Cs、カリウム (K)、ナトリウム (Na)、カルシウム (Ca) の添加量を調整して作成した模擬水（以下、「コールド模擬水」という。）を用いた試験を、以下の手順で実施する。

①安定 Cs 吸着能力の評価

(ア) 想定される安定 Cs 濃度における吸着能力

安定 Cs 単体の溶液に 3 種類の吸着材 (GO、ZL、PB) を 5 水準 (GO の場合で例えば 50mg、100mg、150mg、200mg、250mg など) 添加し、溶液中に残存する安定 Cs 濃度を分析することによって、安定 Cs 吸着能力を評価する。なお、吸着材の最大添加量は吸着処理水中の安定 Cs 濃度がその濃度を分析する装置の検出下限値以下になる量、または、吸着処理水中の安定 Cs 濃度が変化しなくなる量とする。

想定濃度で試験した場合に吸着後の安定 Cs 濃度が高分解能 ICP 質量分析装置（以下、「ICP-MS」という。）の定量限界未満になり、吸着能力を精度良く評価できない場合を考慮し、想定した安定 Cs 濃度（例えば、0.1mg/L）と、その濃度の 10 倍（1mg/L）、100 倍（10mg/L）で試験を行う。このことにより、ICP-MS 等で分析可能な安定 Cs 濃度を確認し、GO について安定 Cs を 99.96%以上吸着することを確認できる安定 Cs 濃度を明確化する。

実験の操作手順を図 1 に示す。なお、回収率は、以下の式で評価する。

$$\text{回収率} = \text{吸着量} / \text{加えた Cs 量}$$

吸着量は、以下の式による。

$$\text{吸着量} = \text{加えた Cs 量} - \text{上澄みの Cs 量}$$

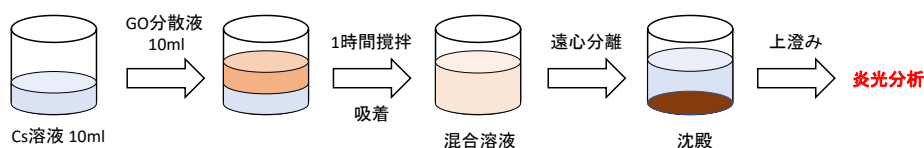


図 1 GO 吸着性能評価のための実験操作

(イ) pH 依存性

調査社員からの情報等を基に飛灰洗浄水の組成を想定し、コールド模擬水の pH を調整し、pH3 水準で 3 種類の吸着材 (GO、ZL、PB) での吸着試験を行い、各吸着材の pH 依存性について評価する。なお、(ア) の結果より安定 Cs 濃度及び吸着材の添加量は 1 水準に絞って試験を行う。実験操作および安定 Cs 回収率の算定方法は、上述した吸着能力の試験と同じである。

(ウ) 静置分離と遠心分離との比較

GO を用いた代表的な条件で吸着操作を行い、吸着後の GO を静置沈殿して固液分離する場合と遠心分離により加速させて分離する場合について、分離に必要な時間等を比較評価する。なお、遠心分離する際の条件と必要な時間、静置沈殿に必要な時間などについて整理し、その評価結果については、熔融飛灰処理の固液分離方法の検討に活用する。

②共存イオン存在下での安定 Cs 吸着特性の評価

3 種類の吸着材 (GO、ZL、PB) について、前述 i) の試験で用いたコールド模擬水及び安定 Cs 以外の共存イオン (Na、K、Ca) を 2 ケースの濃度に調整したコールド模擬水 (計 3 種類) を作成し、共存イオン存在下での安定 Cs 吸着能力を評価するための吸着試験を行う。安定 Cs の濃度は、前述 i) の試験において吸着能力を精度良く評価できた最低濃度とする。溶液中のカチオン濃度は、熔融飛灰洗浄水の分析結果を参考に表 1 に示す組成になるように調整する。

表 1 熔融飛灰洗浄水の組成

模擬溶液その 1		模擬溶液その 2	
元素	濃度(mg/L)	元素	濃度(mg/L)
Na	22,000	Na	450
K	36,000	K	1,000
Ca	1,500	Ca	2,000
Cl	66,563	Cl	4,231
SO ₄	3,595	SO ₄	1,228
Sr	0.8	Sr	7.2
Cs	1.7	Cs	0.9

③安定 Cs 再溶出特性の評価

安定 Cs 等を吸着し分離した GO (吸着残渣) に再度純水を加えて分散させ、その際の安定 Cs 再溶出量を評価する。純水の添加量は、吸着材 1g あたり 50mL から数 100mL までの範囲で 3 水準とし、分散後再び吸着材と水を分離し、分離した水中の安定 Cs 濃度を ICP-MS で分析する。さらに、純水での実験結果に基づき、海水などを模擬した水でも同様の試験を行う。なお、吸着残渣については加熱処理等を行わないものとする。実験の操作手順を図 2 に示す。なお、保持率は、以下の式で評価する。

$$\text{保持率} = \frac{\text{再溶出後の吸着残渣中の安定 Cs 濃度}}{\text{吸着残渣中の安定 Cs 濃度}}$$

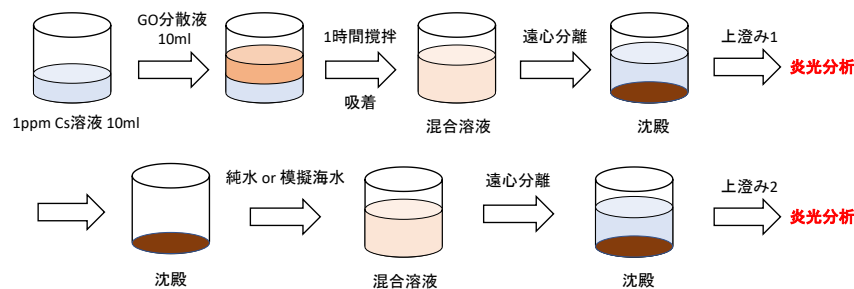


図 2 GO からの吸着した Cs の再溶出試験の手順

表 2 海水の成分

(出典：一般社団法人日本埋立浚渫協会 HP

<https://www.umeshunkyo.or.jp/207/259/index.html>)

	割合(塩分中の割合)
水分	96.5%
塩分	3.5%
塩化ナトリウム(NaCl)	(77.9%)
塩化マグネシウム(MgCl ₂)	(9.6%)
硫酸マグネシウム(MgSO ₄)	(6.1%)
硫酸カルシウム(CaSO ₄)	(4.0%)
塩化カリウム(KCl)	(2.1%)
その他	(0.3%)

(2) ホット試験

前述の②で使用したコールド模擬水に放射性 Cs を添加して放射性 Cs 濃度が 25,000Bq/L となるように調整した模擬水（以下、「ホット模擬水」という。）を用いた試験を以下の手順で実施する。

①放射性 Cs 吸着能力の評価

Ge 半導体測定器の検出下限値を考慮し、放射性 Cs の濃度を基準濃度（25,000Bq/L）、その 5 倍、10 倍とした濃度のホット模擬水を作成し、それぞれの溶液について、3 種類の吸着材（GO、ZL、PB）で吸着試験を行う。放射能濃度の分析結果から、放射性 Cs 吸着性能を評価する。実験の操作手順を図 3 に示す。

②放射性 Cs 再溶出特性の評価

Cs 等を吸着し分離した GO に再度純水を加えて分散させ、その際の放射性 Cs 再溶出量を評価する。純水の添加量は、吸着材 1g あたり 50mL から数 100mL までの範囲で 3 水準とし、分散後再び吸着材と水を分離し、分離した水中の放射性 Cs 濃度を Ge 半導体測定器で分析する。さらに、純水での実験結果に基づき、海水などを模擬した水でも同様の試験を行う。

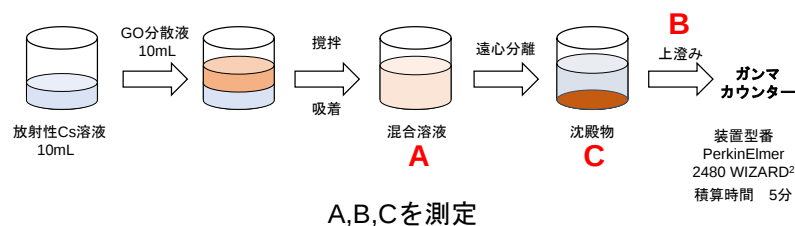


図3 放射性Cs吸着試験の操作手順

3. 試験結果の評価

(1) コールド試験

GO分散液には生成過程で含まれたK等の陽イオンが残存し、これらの陽イオンがCsの吸着を阻害させて、吸着特性が低下している可能性があることがGO分散液の成分分析結果からわかった、そこで、図4に示す方法でGOを洗浄し、分残液中の陽イオン等を取り除く操作を行った。

洗浄したGOにより安定Cs単体の溶液に対する安定Csの回収率を評価した結果を図5に示す。その結果、安定Csの回収率は改善され、PBやZLの場合と比較しても遜色ない結果になった。

安定Csを吸着したGOの吸着残渣に、純水と模擬海水を加えて、安定Csの再溶出性を評価した結果を図6に示す。GOに吸着した安定Csは、模擬海水へは100%再溶出したことから、イオン交換が行われていると推測される。

(2) ホット試験

前述したコールド試験結果から、GOを洗浄した場合にCsの回収率が向上することが確認できたため、同様に、放射性Csの場合でも同様な試験を行い、洗浄したGOによる放射性Csの回収率を評価した結果を図7に示す。放射性Cs単体の溶液の場合、洗浄したGOによる放射性Csの回収率が向上することを確認できたが、模擬溶液ではそのような傾向は見られず、模擬溶液中のCs以外のカチオンにより回収率の改善は見られなかった。

放射性Csを吸着したGOの吸着残渣に、純水と模擬海水を加えて放射性Csの再溶出性を評価した結果を図8に示す。安定Csの場合と同様の再溶出特性であることが確認された。

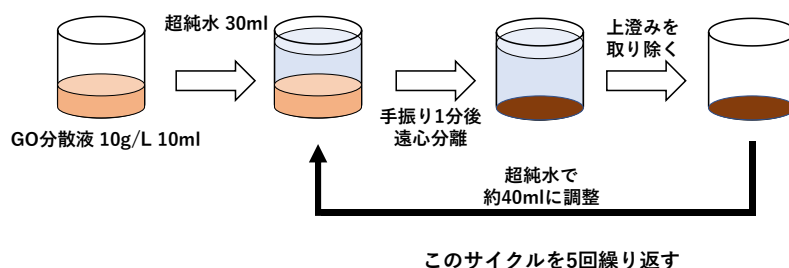


図4 GOの洗浄手順

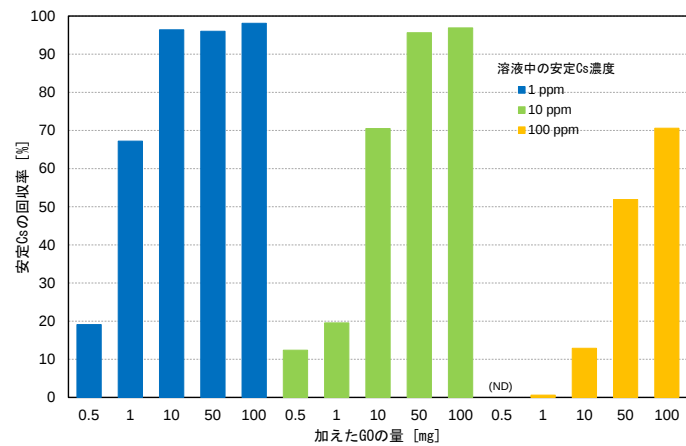


図5 安定Cs単体溶液の場合の洗浄したGOによる安定Csの回収率

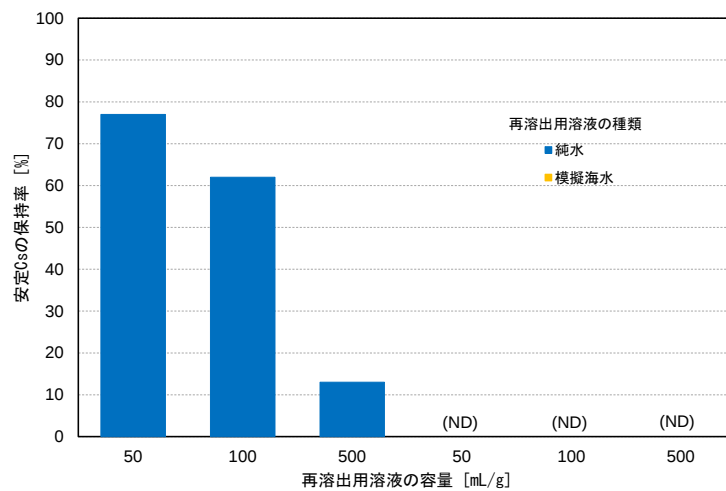


図6 再溶出試験用溶液下でのGOに吸着した安定Csの保持率

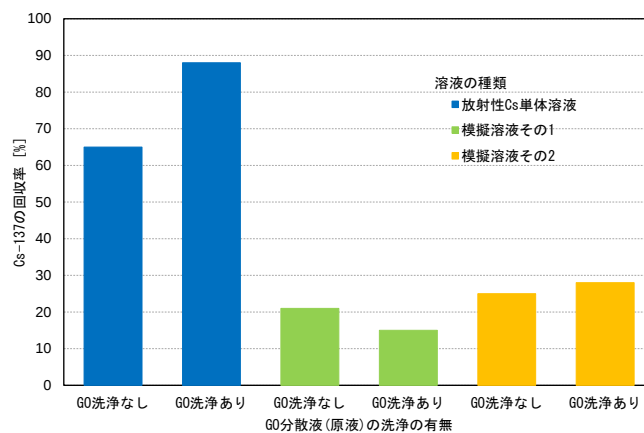


図7 洗浄あり／なしのGOによる放射性Csの回収率の比較

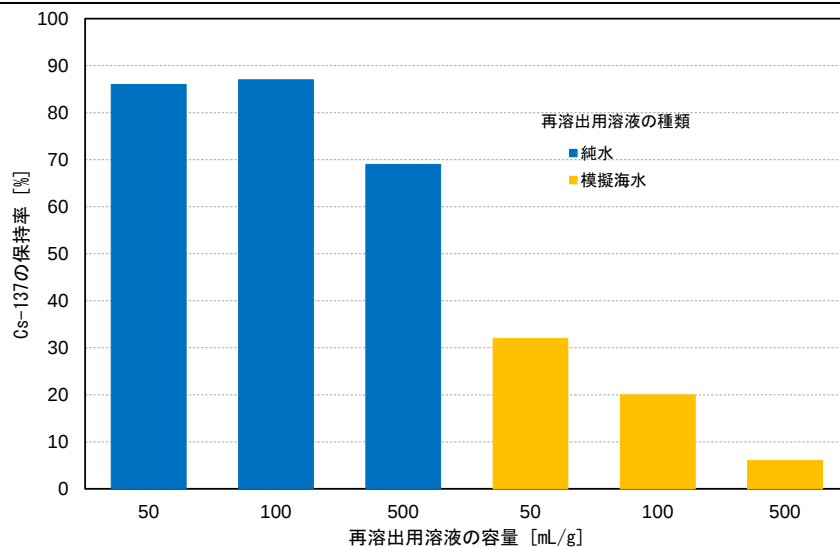


図 8 再溶出試験用溶液下での GO に吸着した安定 Cs の保持率

4. 溶融飛灰洗浄水処理方法の検討

(1) 工学的実現性に関する検討

①本格設備の検討

GO の放射性 Cs 及び共存イオンの吸着性の吸着特性の結果に基づいて、溶融飛灰洗浄水処理方法について本格設備の検討を行った。

GO 吸着試験結果より Na、K 等のイオン共存下での GO の Cs 吸着率が約 20%であったため、放射性 Cs を含んだ溶融飛灰洗浄水の GO 吸着処理を繰り返す事で無害化できるとし、処理フローを検討した。尚、GO 吸着率は 20%より向上することを前提に、必要な繰り返し吸着回数は 6 回と設定した。この条件として場合、GO の Cs 吸着率は 65%である必要がある。

溶融飛灰洗浄水に GO 分散液を添加後、攪拌翼にて攪拌。攪拌後、遠心分離機にて重液（GO 残渣＝以下、「スラッジ」という。）と軽液（＝処理水）に分離し、スラッジは固形化処理へ、軽液は再度 GO 分散液の添加、攪拌、固液分離を計 5 回繰り返す。合計 6 回処理し、無害化した軽液を放流するというフローを設計した。図 9 にフロー図を示す。

実証試験による Cs 吸着性能の評価と溶融飛灰洗浄水の処理フローから本格設備を想定したマスバランス（溶融飛灰洗浄水の処理に伴う GO の必要量やスラッジの発生量等）を試算した。尚、実証試験による Cs 吸着性能の評価結果より GO 1mg に対して安定 Cs の吸着量は 0.0036mg の結果を採用した。その他の共存イオンの吸着量も表 3 に示す。

溶融飛灰洗浄水処理等で想定されている提条件に基づいて、洗浄水中の Cs 等の吸着処理のマスバランスを算出した。その結果を表 4 に示す。1 日当たりの排水量は 196m³、必要 GO 量は 553kg、発生スラッジ量は 20t の試算結果となった。

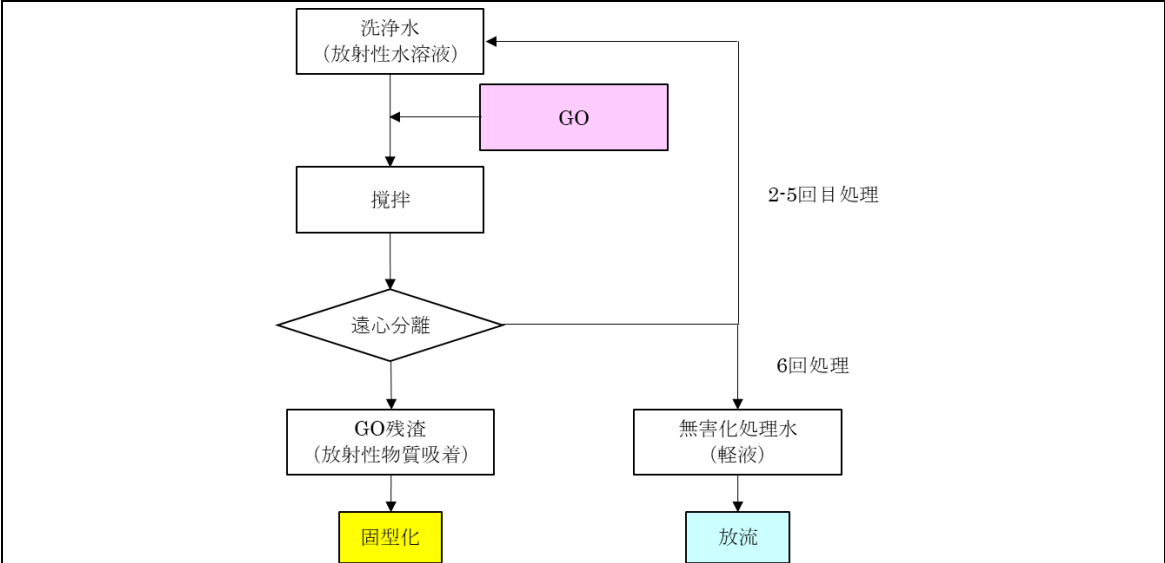


図 9 溶融飛灰洗浄水の処理フロー

表 3 GO1mg の吸着量 (mg)

(出典：速水真也（熊本大学）、私信)

GO 量 (mg)		0	30	100	150	200	250	Δ	GO 1mg の吸着量 (mg)	選択率
濃度 (ppm, mg/L)	Cs	0.9	0.83	0.5	0.34	0.19	0	0.9	0.0036	1
	Ca	4,026	2,447	2,323	2,076	1,761	1,193	2,833	11.3305	3,147
	Na	9,897	9,697	6,213	5,524	4,788	2,840	7,056	28.2244	7,840
	K	10,470	10,392	4,135	2,176	1,232	88	10,382	41.5280	11,536
		合計							82	

表 4 溶融飛灰洗浄水処理のマスバランス（本格設備想定）

		単位	処理前	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	合計
攪拌	洗浄水	m ³	160	183	191	194	195	195	195	—
	Na 絶対量	kg	3,520	1,232	431	151	53	18	6.5	—
	K 絶対量	kg	5,760	2,016	706	247	86	30	11	—
	Ca 絶対量	kg	240	84	29	10	3.6	1.3	0.44	—
	Cs 絶対量	kg	0.272	0.10	0.033	0.012	0.0041	0.0014	0.00050	—
	処理中 Cs 濃度	mg/L	1.7	0.52	0.17	0.06	0.021	0.0073	0.0026	—
	放射性 Cs 濃度	Bq/L	25,000	8,750	3,063	1,072	375	131	46	—
	GO 分散液	10 g/L	—	—	—	—	—	—	—	—
	GO 量	kg	—	360	126	44	15	5	2	553
	必要水量	L	—	36,015	12,605	4,412	1,544	540	189	15,306
固液分離	合計量	m ³	—	36	13	4	2	1	0.2	56
	仕込合計	m ³	—	196	196	196	195	195	195	—
	GO 残渣量 (含水率 50%)	t	—	13	5	2	0.6	0.2	0.1	20
	処理液量	m ³	—	183	191	194	195	195	195	—

②処理費用に係る検討

溶融飛灰洗浄水の処理費用について、機器、土建、計装、電気工事費のイニシャルコストを 998 百万円、ランニングコストを 16,810 百万円/年と試算した。なお、GO の費用は今後大量合成されるようになると価格が下がることが期待されるため、現状の購入価格の 1/10 になるとして 100 円/g を購入価格とした。

実証設備のイニシャルコスト試算内容としては、土建は必要敷地面積より、m² 当たりの

建築コスト金額にて算出した。機械は、主要機器をメーカーへの聴取及びコストハンドブック[3.2]より算出した。計装、電気は係数計算にて算出した。放射線管理・モニタリング費用をさらに見込む必要がある。

(2) 放射線安全性に関する検討

①線量率評価

溶融飛灰洗浄水処理施設の機器配置に基づき、施設内の実効線量率分布を、三次元モンテカルロ法によるシミュレーション計算により評価した。図 11 に溶融飛灰洗浄水処理施設 1 階部分の実効線量率分布を示す。固化化物貯蔵庫の周辺、セシウム濃度が高い系列 1 の GO 反応槽や貯蔵槽の近辺で高い線量率を示している。系列 6 の GO 反応槽はセシウム濃度が非常に低くなっているため、線源としてよりも遮蔽体として寄与している。

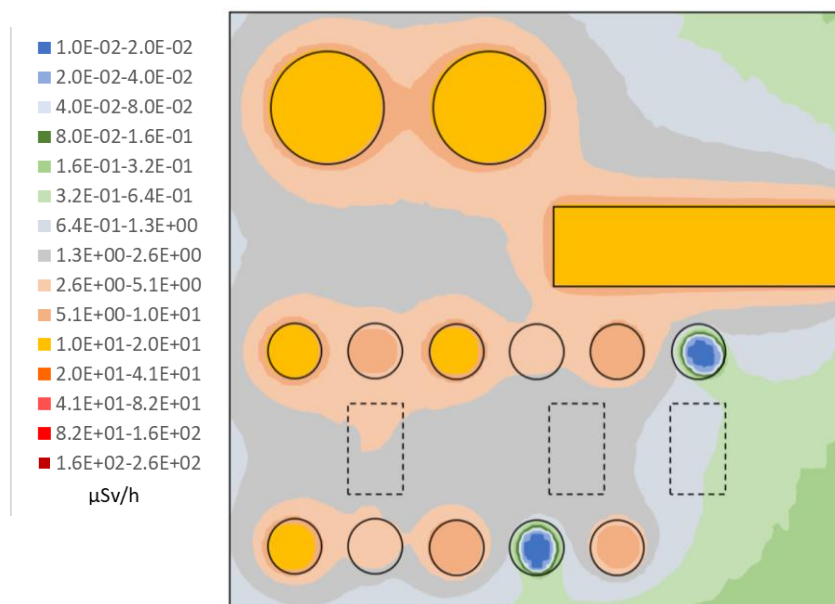


図 11 モンテカルロ法シミュレーションにより計算した 1 階の実効線量率分布

①被ばく線量の実測結果の評価

GO を用いた溶融飛灰洗浄水の処理施設の放射線安全性評価に用いたシミュレーション手法を確認するために、ビーカーに Cs-137 を含む GO 吸着残渣（スラッジ）を入れて、その周囲の線量率を NaI シンチサーベイメータで実測し、シミュレーションにより求めた線量率と比較した。比較結果を図 12 に示す。

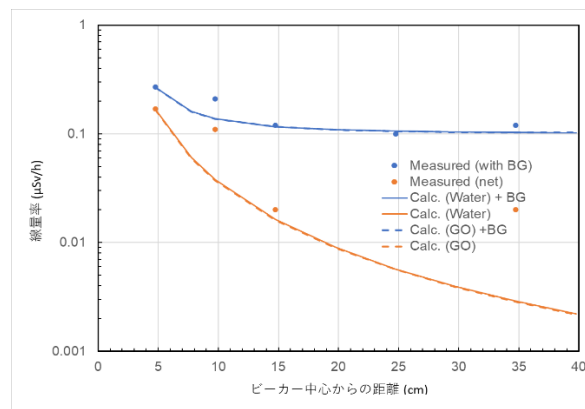


図 12 Cs-137 を含む GO 吸着残渣を入れたビーカー表面からの距離と線量率の測定値と計算値との比較結果

②作業員の被ばく線量の検討

放射線障害防止法で定められた管理区域境界の線量は三ヶ月間で 1.3 mSv 以下である。管理区域外での一般的な労働者の作業時間としては、三ヶ月間で 500 時間が想定され、したがって、管理区域境界での実効線量率の上限値は $1.3 \text{ mSv} / 500 \text{ h} = 2.5 \mu \text{ Sv/h}$ となる。

系列 6 を除く GO 反応槽や貯蔵槽、洗浄水貯蔵槽の周辺では $2.5 \mu \text{ Sv} / \text{h}$ を超える線量率を示す。また、最も線量率が高いのは固形化物貯蔵室の周辺で、貯蔵室の壁際で $80 \mu \text{ Sv} / \text{h}$ 程度の線量率を示している。放射線作業従事者の年間の線量限度 20mSv を考えると、この固形化物貯蔵室の周辺では年間に 250 時間程度しか作業が出来なくなる。

③放射線安全対策の検討

施設内を管理区域とせずに、24 時間・三交代で稼働させるためには、機器周辺での線量率を 1/30 程度に低減する必要がある。このために、次のような対策を考える必要がある。

(ア) 固形化物貯蔵室の壁による遮蔽

固形化物貯蔵室に線量を 1/4 程度に低減する壁（コンクリートで厚さ 20cm 程度）を設けて、室外の線量率を低減する。

(イ) 固形化物貯蔵室内での作業時間の制限

固形化物貯蔵室内では、最大 $20 \mu \text{ Sv/h}$ 程度の高線量率となるため、年間での一人の作業時間を 1000h 以内に制限する。

(ウ) 機器への遮蔽体設置と接近防止策の実施

系列 1 の機器など、放射能濃度が高くなる機器には遮蔽体を設置すると共に、線量率が $2.5 \mu \text{ Sv/h}$ を超えるような場所に接近しないための防護柵などの対策を検討する。

実施代表者：国立大学法人 東京工業大学
実証テーマ名：飛灰洗浄水中の放射性 Cs 安定固化のためのインドラム式 ガラス固化技術の開発
概要： 汚染土壌や焼却残渣の熱処理で発生する飛灰から水洗浄で回収された Cs の安定固定化及び廃棄物の高減容化を達成するために「インドラム式ガラス固化技術」の導入を提案する。飛灰洗浄水から、PB-MC（プルシアンブルーナノ粒子の造粒体）を用いて Cs を回収し、ホウケイ酸ガラスフリットを混合、溶解させることでガラス固化体の作製を行う。インドラム式ガラス固化プロセスでは、放射性物質を全てドラム内処理し、ドラムをそのまま最終処分する。そのために、本実証事業では、安定固化体の作製を目的として条件を検討し、「インドラム式ガラス固化技術」の実用性を実証する。
実施内容： ①模擬飛灰洗浄水からの固化体作製用 Cs 混合物の回収 ②インドラムガラス固化体の作製 ③インドラムガラス固化体からの水への Cs 浸出速度の評価 ④排ガス処理を含んだインドラムガラス固化プロセスの Cs 物質収支の評価
技術概要： 1. 試験フロー <pre> graph TD subgraph Step1 [① 模擬飛灰洗浄水からの固化体作製用 Cs 混合物の回収] A[ア 模擬飛灰洗浄水の作製] --> I[イ 模擬飛灰洗浄水からの Cs 混合物回収] I --> U[ウ 模擬 Cs 混合物水溶液の作製] I_text["・ PB-MCビーズを用いたCs吸着 ・ Cs吸着後の熱分解 ・ 熱分解残渣からのCs溶出 (Cs混合物水溶液)"] end subgraph Step2 [② インドラムガラス固化体の作製] A2[ア ガラス固化体作製条件検討のための基礎試験] --> I2[イ 均質なCs固定化ガラス作製条件の検討] I2_text["・ 本実証事業のためにインドラム固化装置に必要な排ガス処理系を装備し、ガラス固化体を作製する。 ・ ホルサイト微粒子のガラス中への均質な分散を目指す。 ・ 固化体容器は本事業に適した固化体が得られるように設計したものを使用する。"] end subgraph Step3 [③ インドラムガラス固化体のCs浸出速度評価] I3["・ 米国原子力学会の浸出試験条件に準拠した動的浸出試験を行う。"] end subgraph Step4 [④ インドラムガラス固化プロセスの物質収支] I4["・ 排ガス処理を含んだインドラムガラス固化プロセスの物質収支を評価する。"] end Step1 --> Step2 Step2 --> Step3 Step3 --> Step4 </pre> 2. 成果目標 インドラム式ガラス固化技術による廃棄物に対する体積減容率として、熱処理前の廃棄物量の 12000 分の 1 以下を目指す。また、ガラス固化体からの水への Cs 浸出速度の評価として、規格化浸出率、浸出指数を評価する。

実証試験の結果： 模擬飛灰洗浄水に対して、PB-MC による Cs 選択吸着、燃焼、水溶出を経て得られた Cs 混合物を使って、インドラム方式でガラス固化体を製造し、固化体中に Cs を安定的に固定化することに成功した。900℃ でガラス固化体を作製した結果、スケールを大きくしても Cs はポルサイトとしてガラス中に分散保持された。固化温度を 950℃にすることで、固化体はガラス化した。飛灰洗浄水中に、多量に含まれる K は、ガラス固化において均質性を阻害し、固化体の相分離傾向を強めることが分かった。したがって、Cs 吸着量を増やして PB-MC 内に含有する K 量を減らす必要であることが明らかになった。さらに、減容化と Cs 揮発量とのバランスを考慮した場合、固化体への Cs 充填量は、Cs₂O 換算で、15 wt% 程度が最適値であると言える。また、ガラス固化における Cs 揮発は、900℃作製で、1.47%、950℃作製で 3.93%程度であり、気相ガストラップ内水を、濃縮した後プロセスに戻すことで全量回収が可能である。規格化浸出率は、どちらの固化体でも低い値であり、高い耐水性を示した。さらに、インドラム方式ガラス固化プロセスの物質収支、放射能収支を検討した結果、インドラム数量は 114 本で有り、インドラム方式ガラス固化プロセス導入により廃棄物の安全かつクローズドな高減容化が可能である。	
減容等の評価： 灰、土壌処理の最終処分形態としてのインドラム数量は 114 本で有り、低レベル放射性廃棄物としての保管スペースは 10m×10m程度に縮小できる見通しを得た。	
作業員被曝量評価： 対象汚染物が 10 万 Bq/kg 超の場合は、装置周辺の空間線量が極めて高くなるので、遠隔操作が前提となる。	
コスト評価（インドラム式ガラス固化体プロセス）：T-Cs 処理量当たり コスト：12.4 百万円/kg、ドラム当たりコスト：251 百万円/ドラム、ドラム内容物当たりコスト：1.46 百万円/kg（設備費：43.4%、ユーティリティ費：12.3%、消耗品費：27.5%、人件費：16.8%）	歩掛り： 作業人工：20 人 日/Cs・kg
コスト評価条件（インドラム式ガラス固化体プロセス）：インドラム寸法：φ400×H1500mm、インドラム内蔵ガラス量：150kg/本、インドラムガラス固定化 Cs 量：20.5kg/本（ガラスの約 13.6wt%）、インドラム数量：灰処理＋土壌処理：114 本（灰処理のみ：30 本）、インドラム装置運転：7 日/本、15 年稼働、ガラス固化体装置：2 基（交互 1 基運転）、ガラス固化体放射能濃度：0.91GBq/内容物 kg、155.8GBq/インドラム	
安全性の評価： 灰、土壌処理の最終処分形態としてのインドラム数量は 114 本で有り、低レベル放射性廃棄物（ピット処分制限 100 GBq/kg 以下）としての保管スペースは 10m×10m程度に縮小でき、保管形態、保管場所の選定に安全の上でも有意義な方向を示すものとなった。	
試験場所（住所）： 東工大：東京都目黒区	除去物保管場所と保管状況： 試験で生成した廃棄物は、当面東工大実験室に保管する。

1. 事業の概要

(1) 目的

汚染土壌や焼却残渣の熱処理で発生する飛灰から水洗浄で回収された Cs の安定固定化及び廃棄物の高減容化を達成するために「インドラム式ガラス固化技術」の導入を提案する。以下の 4 課題、(1) 模擬飛灰洗浄水からの固化体作製用 Cs 混合物の回収、(2) インドラムガラス固化体の作製（均質な Cs 固定化ガラス作製条件の検討）、(3) インドラムガラス固化体からの水への Cs 浸出速度の評価、(4) 排ガス処理を含んだインドラムガラス固化プロセスの Cs 物質収支の評価、を実施し、「インドラム式ガラス固化技術」の実用性を実証する。

(2) 試験の内容

本事業の試験全体フローを図 1-1 に示す。

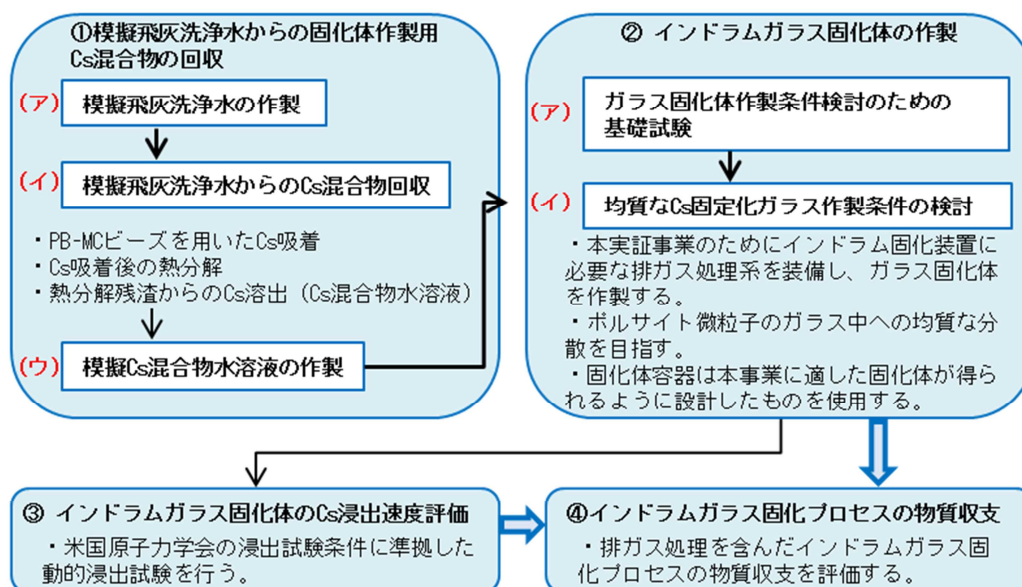


図 1-1 試験全体のフロー

① 模擬飛灰洗浄水からの固化体作製用 Cs 混合物の回収

(ア) 模擬飛灰洗浄水の作製

飛灰洗浄水の組成、濃度に関する情報を調査社員から取得し、市販試薬 (CsCl 等) を混ぜ合わせ、模擬飛灰洗浄水を作製する。

(イ) 模擬飛灰洗浄水からの Cs 混合物回収

(ア) で得られた模擬飛灰洗浄水に、PB-MC を加えて Cs を吸着させる。Cs 吸着後の PB-MC をロータリーキルンに入れ加熱し、約 360° C で完全に熱分解させる。熱分解残渣 (酸化鉄) は水で洗浄し、Cs を溶出させる。溶出液中 (Cs 混合物水溶液) の陽イオン濃度を測定し、Cs の定量および組成分析を行う。

(ウ) 模擬 Cs 混合物水溶液の作製

(イ) において明らかとなった熱分解残渣からの Cs 含有溶出液 (Cs 混合物水溶液) の組成情報を元に、市販試薬を用いて模擬 Cs 混合物水溶液を作製する。

②インドラムガラス固化体の作製

(ア) ガラス固化体作製条件検討のための基礎試験

ガラス固化体への Cs 取り込み状態と、非晶質部とポルサイト部の融合状態の把握のために、ガラス原料と、平成 31 年度実証事業において合成したガラス固化体の非晶質部およびポルサイト部の軟化点と融点を測定する。また、電子顕微鏡観察 (SEM-EDS 等) を行う。

ガラス固化体作製時のセシウム揮発量を極力少なくする条件を検討するために、模擬飛灰洗浄水から回収される Cs 混合物の主成分である CsNO₃ と NaNO₃ の加熱時におけるガスの発生挙動の把握を行う (EGA-MS 分析)。

Cs 混合物は、ガラス固化体作製の際、水溶液として固化容器 (ドラム) 内へ投入され、水分を蒸発させて乾燥させることによりガラスカレットと混合させる。その時の容器内の析出塩の分布状態を調べ、析出塩とガラスが均一に混合された状態となるかどうかを確認する。

(イ) 均質な Cs 固定化ガラス作製条件の検討

インドラムガラス固化装置は、平成 31 年度の実証事業で用いた装置に排ガス処理系 (気相ガストラップ装置) を増設した改良版装置を用いる。固化容器 (ドラム) は、V-50 (直径 60.5 mm)、V-100 (直径 114.3 mm)、V-150 (直径 165.2 mm) を使用し、模擬 Cs 混合物水溶液、ガラスカレット PF798-N10 (Na₂O : 10wt%) の混合物を、900 °C 前後で熔融後、冷却させることによりガラス固化体 (Cs 含有割合 10wt%前後) の作製を行う。Na 添加量、Cs 含有割合、熔融温度等の条件を変化させてガラス固化体の作製を行うことにより、ポルサイト微粒子のガラス中への均質な分散を目指す。

③インドラムガラス固化体の Cs 浸出速度評価

② (イ) で作製したインドラムガラス固化体を切り出し、低レベル放射性廃棄物固化体の浸出性能評価で用いられる「米国原子力学会の ANSI・ANS-16.1-2019」に準拠して動的浸出試験を行う。

④インドラムガラス固化プロセスの物質収支

② (イ) の試験結果 (Cs マスバランス) を基に、実機規模のインドラムガラス固化プロセスの Cs 物質収支を評価する。

2. 試験結果

①模擬飛灰洗浄水からの固化体作製用 Cs 混合物の回収

(ア) 模擬飛灰洗浄水の作製

飛灰洗浄水の組成、濃度の設定について JESCO 調査社員と協議し、本試験における模擬飛灰洗浄水は、表 2-1 に示した組成とした。この情報をもとに、市販試薬を用いて飛灰洗浄水を作製した。原料試薬は、NaCl、KCl、CaCl₂、MgCl₂、CsCl (富士フイルム和光純薬) を使用した。以下、この組成の水溶液を飛灰洗浄水組成水溶液とする。

表 2-1 模擬飛灰洗浄水組成

	含有量 (g/L)	濃度 (mol/L)
NaCl	60	1.03
KCl	80	1.07
CaCl ₂	0.5	4.51×10^{-3}
MgCl ₂	0.055	5.78×10^{-4}
CsCl	0.008	4.75×10^{-5}

(イ) 模擬飛灰洗浄水からの Cs 混合物回収

(ア) で得られた 1.飛灰洗浄水組成水溶液および 2.目標 Cs 量吸着組成水溶液からの Cs 回収を目的として、PB-MC(関東化学)吸着剤による吸着試験を行った。

Cs の吸着量が 20 および 40 g(Cs)/1 kg(PB-MC)を想定した 2 種の水溶液について、PB-MC による Cs の吸着試験を実施した。吸着試験後、それぞれ、吸引濾過により固液分離し、液相の残存カチオン量を ICP-AES にて分析した。Na、K、Mg については、水溶液成分によらず同じ傾向となり、これらのカチオン種は PB-MC にほとんど吸着していない事が分かった。一方で Ca は、目標 Cs 吸着組成水溶液において 100 %を超え、PB-MC から溶出を確認した。これは、造粒に使用されているアルギン酸カルシウム由来の Ca が溶出しているものと考えられる。Cs については、ICP-MS 測定を行い、液相残存 Cs 量の定量を行った。また、吸着前後における PB-MC 吸着剤の粉末 XRD 測定結果から、Cs 吸着前後で大きな構造変化はない事を確認した。

次に、塩吸着後 PB-MC について、燃焼試験を行った。いずれの試料においても、熱分解によりシアンガス等が発生することで、約 50 wt%程度の重量減少が見られた。この重量減少は、塩吸着量に依存せず概ね一定であることから、PB-MC 由来のものであり、今回の燃焼条件において、Cs 等の塩の脱離は無いものと考えられる。

吸着および燃焼試験により得られた熱分解残渣について、水洗で塩を溶出させ、吸着量を ICP-MS により定量した。溶出試験結果から、20 および 40g (Cs)/ kg (PB-MC)想定試料の Cs 吸着量は、それぞれ、28 g(Cs)/1 kg(PB-MC)、54 g(Cs)/1 kg(PB-MC)であった。想定目標吸着量よりも多く吸着しているが、概ね比は同程度であることから、本試験において問題ないと考えられる。Cs 量に対して、K、Na 量は、20 gCs 吸着想定試料で 2.35、0.71 倍、20 gCs 吸着想定試料で 1.08、0.36 倍であった。このことから、Cs 吸着量を増やすことで、K、Na 吸着量は低減できることが示唆された。

(ウ) 模擬 Cs 混合物水溶液の作製

(イ) で明らかになった通り、Cs 含有溶出液 (Cs 混合物水溶液) 中に含まれる K、Na 量を考慮すると、そのままの組成で、ガラス固化することは難しい。したがって、カラムによる多段吸着および減塩操作を想定して、市販試薬 (硝酸塩) を用いて模擬 Cs 混合物水溶液を作製した。組成比の詳細については、②インドラムガラス固化体の作製の項で述べる。作製した水溶液中の Cs 濃度の指標として、導電率を調べ、導電率と Cs 濃度の関係性を調べた。目的に合わせて、1.CsNO₃ 単一成分水溶液、2.飛灰洗浄水組成、

3.塩吸着および燃焼後の溶出液組成、4.ガラス固化用組成の 4 種水溶液の電気伝導度を測定し、濃度-電気伝導度曲線を算出した。1-3 については、増加指数感により、4 については、漸近曲線でモデル化された。また、表 2-1 に記載した飛灰洗浄水組成水溶液の電気伝導度は、179.4 mS/cm であった。

②インドラムガラス固化体の作製

(ア) ガラス固化体作製条件検討のための基礎試験

ガラス固化体への Cs 取り込み状態と、非晶質部とポルサイト部の融合状態の把握のために、ガラス原料である PF798-N10 (Na_2O : 10wt%) と、平成 31 年度実証事業において合成したガラス固化体である G10 (V-100 容器、非晶質ガラス) と、G11 (V-150 容器) の非晶質部およびポルサイト部の軟化点と融点を、熱重量示差熱分析装置 (TG-DTA) を用いて測定した。さらに、今年度の固化体作製条件におけるガラス、Cs、Na、K 配合比で TG-DTA を測定し、軟化点および融点等を調べた。測定は、 N_2 ガスを 100 mL/min.の流量で流し、10 °C/min.の昇温速度で、1000 もしくは 1350°Cまで測定した。また、最高温度で 30 分間保持した。ガラスの軟化点および融点は、それぞれ、約 600°Cおよび 900°Cであった。また、ガラス相およびポルサイト結晶相いずれにおいても、Cs の脱離は 1100°C以上であることが分かった。さらに、今年度使用ガラス原料と Cs、Na、K 硝酸塩混合物の TG-DTA 結果から、600°C付近から硝酸塩由来の NO_x ガス放出が始まり、固化温度直下約 800°C付近に硝酸塩の分解点があることが分かった。

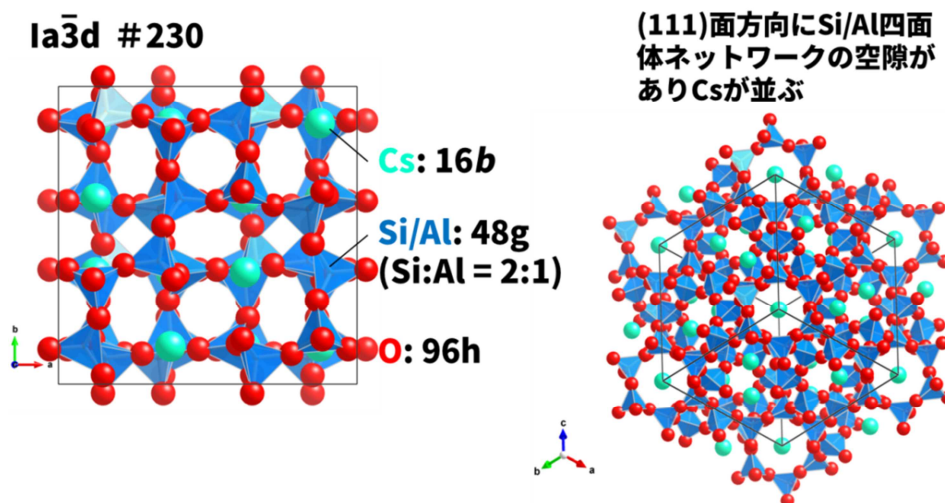


図 2-1 ポルサイトの結晶構造の模式図

さらに、粉末 XRD により結晶相ポルサイトを解析した。ポルサイトは、図 2-1 に示す立方晶系を有しており、(111)面方向に Si/Al 四面体ネットワークの空隙がある。リートベルト解析の結果、主成分相であるポルサイト($\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$)相と 2 次相として SiO_2 過剰の $\text{Cs}_{1-x}\text{Al}_{1-x}\text{Si}_{2+x}\text{O}_{6+6x}$ 相が混在することが分かった。

さらに、ガラス固化体作製時の Cs 揮発量を極力少なくする条件を検討するために、模擬飛灰洗浄水から回収される Cs 混合物の主成分である CsNO_3 と NaNO_3 の加熱時におけるガスの発生挙動の把握を行った。 CsNO_3 と NaNO_3 の混合物(試料 1)、ガラスと CsNO_3 と NaNO_3 の混合物 (Cs: 10 wt%、試料 2) について、EGA-MS 分析を行った。

その結果を図 2-2 に示す。NO、NO₂ ガスは、600 °C 付近から発生し始め、800 °C 程度まで発生が続くことが分かった。さらに、700 °C 付近から N₂ 発生が観測された。不活性雰囲気下で発生するガスの主成分は NO であった。これらの結果は TG-DTA 測定の結果と同じ傾向である。ガラス固化温度である 900 °C もしくは 950 °C 以下で、NO_x ガスの発生が起こることから、固化時における NO_x のガス抜けが重要になると考えられる。

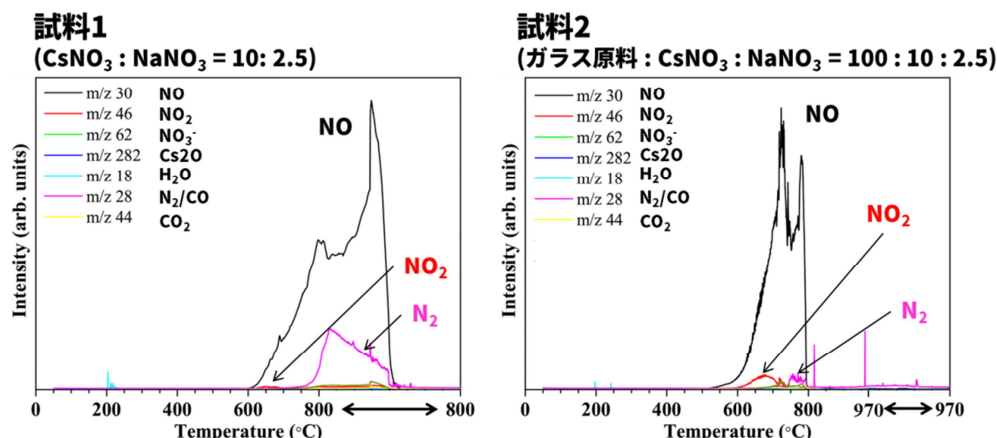


図 2-2 試料 1 および 2 の加熱時におけるガス発生挙動

次に、固化体作製における Cs 混合物水溶液乾固時の塩濃度勾配について検討した。Cs 吸着後 PB-MC の熱分解・水洗浄によって得られる Cs 混合物は、ガラス固化体作製の際、水溶液として固化容器内へ投入され、水分を蒸発させて乾燥させることによりガラスカレットと混合させる。昨年度の実証事業では、乾燥時間短縮のため、水溶液投入 1 回でガラスに対する Cs 量が 10wt% となるように調整したため、固化容器内上層部の析出塩量が多く、不均一な状態となった。この現象の解消を目的に、上層部の析出塩が下層部にも均一に拡散することを目指し、1 回目の乾燥後、容器内に約 80 °C の水を投入し、上層部の塩を溶解後、再度乾燥させた。G213 ガラス固化作製時に、サンプル検出スパーテルを用いて、容器内の上層部（下端より 14 cm）、中間部（下端より 7 cm）、下層部（下端より 1 cm）のガラスと析出塩の混合試料を、それぞれ、61.4、20.7、57.0 mg 取り出した。これらの試料に蒸留水を加え析出塩を溶解させ、溶解液の Cs 濃度を ICP-MS により定量することにより分析を行った。ICP-MS による分析の結果は、上層部、中間部、下層部で、それぞれ、9.2、3.0 および 14 mg/L であった。これらをガラス 1 mg 当たり換算すると、それぞれ、0.15、0.14 および 0.24 ppm/mg となった。下層部が最も濃い状態であるが、その濃度差は、1.6 倍程度と小さく、洗い流し効果であると言える。H31 年度試験において、洗い流しを行わなかった場合は、上端と下端で約 7 倍の濃度差があったことから、一回の湯洗浄で、硝酸塩の均質化が図れることが分かった。

(イ) 均質な Cs 固定化ガラス作製条件の検討

平成 31 年度の実証事業では、Cs 揮発を避けるため 900 °C 程度の低温ガラス固化を試みた結果、Cs はガラス成分の Al や Si と反応しポルサイト (CsAlSi₂O₆) を形成してガラス内に分散固定化されたが、一部の条件下でポルサイトとガラスが相分離する傾向が

見られた。この結果を踏まえて、ポルサイト微粒子がガラスに均質に分散保持されるためのホウケイ酸ガラス組成を調べて、均質に Cs を分散固定化したガラス固化体を作製した。平成 31 年度の実証事業の試験結果から、ガラスへの Na 含有量 (Na_2O 換算) が 10 wt% の場合にポルサイトとガラスの分相が見られ、12 wt% の場合は、融合相が見られた。よって、ポルサイト微粒子のガラス中への均質な分散には、Na 含有量が影響している可能性があるため、添加 NaNO_3 量を調整し、その影響を調べた。

インドラムガラス固化装置は、平成 31 年度の実証事業で用いた装置と同様の装置に排ガス処理系（気相ガストラップ装置）を増設した改良版装置を用いた。この装置の全体像写真を図 2-3 に示す。図中赤枠で囲んだ部分が、本年度増設した気相ガストラップ装置である。本装置を使ったガラス固化試験では、炉内部（TI 12）、ドラム内部（TI 12）、炉出口部（TI 81）、気相トラップ入口部（TI 41）、気相トラップ水内部（TI 21）、冷却水出口部（TI 25）の 6 カ所で温度をモニターした。



図 2-3 排ガス処理系（気相ガストラップ装置）を増設した改良版ガラス固化装置

V-50 容器、模擬 Cs 混合物水溶液、ガラスカレット PF798-N10 (Na_2O : 10wt%) を用い、熔融温度 900 °C におけるガラス固化体 (Cs 含有割合 14.5、15.9 wt%) の作製を行った。添加 NaNO_3 量は、 Na_2O 換算で、11.82、12.01 wt% の 2 点とし、Cs 含有量が多くなった場合の影響を調べるために、Cs 含有量の異なる 2 種の固化体を作製した。さらに、飛灰洗浄水中に K を多く含有していたことから、K を K_2O 換算で、0.93、1.02 wt% 含有する固化体を作製し、K 含有効果を検証した。また、熔融温度 950 °C の条件でガラス固化体作製を行い、熔融温度の影響を調べた。温度は、TG-DTA のデータおよび昨年度試験を基に決定した。以上、合計 5 点のガラス固化体作製試験を行った。これらの固化体 ID は、G21-G25 とした。V-50 ドラムを用いた固化体作製条件を表 4-8 に示す。また、充填量を増やすために、原料スケールを昨年度の 2 倍に増加させた。

固化体作製手順は以下の通りである。①ガラス (PF798-N10) を V-50 ドラムへ投入し、ガラスのかさ高さを測定したところ、約 11 cm であった。ここに、②表 2-2 に示した配合比で塩水溶液を投入、90 °C 湯浴中で真空引き (-0.06 MPa) し、 H_2O を蒸発乾固 (約 180 分) させた③。その後、約 90 °C の水 100 mL を追加し、上部に溜まった塩を洗い落とし、 H_2O を再度蒸発乾固 (約 180 分) させた④。これらの①から④の過程の写真を図 2-4 に示す。この原料入 V-50 ドラムを図 2-3 で示した固化体作製装置の電気炉内にセットし、気相ガストラップ装置内に 20.5 L の水道水を入れ、冷却水温度は 20 °C に設定した。 N_2 ガスを 100 mL/min. で流し固化体を作製した。炉内温度 (TI 12) の PID 制御は、30 分で 300 °C まで昇温 (10°C/min.) し、30 分間保持した後、1 時間で 900 もしくは 950 °C まで昇温 (10°C/min.) して 3-5 時間保持、その後室温まで自然冷却とした。ガス発生挙動分析および TG-DTA 測定の結果から、 NO_x ガスの発生や吸熱を伴う硝酸塩の分解点 が 600~800 °C の間にあることが判明したため、これらの反応をより穏やかに進行させ

ることを目的に、昇温速度を H31 年度の 1/2 に落とした。

表 2-2 V-50 ドラムを用いた固化体作製条件

固化体 ID	G21	G22	G23	G24	G25
ドラム径 (cm)	5	5	5	5	5
Glass (g)	300	300	300	300	300
CsNO ₃ (g)	60	66	60	66	66
NaNO ₃ (g)	15	16.5	15	16.5	16.5
KNO ₃ (g)	0	0	6	0	6.6
CsNO ₃ wt% (Cs ₂ O 換算 wt%)	20 (14.5)	22 (15.9)	20 (15.9)	22 (15.9)	22 (15.9)
NaNO ₃ wt% (Na ₂ O 換算 wt%)	5 (1.82)	5.5 (1.82)	5 (1.82)	5.5 (1.82)	5.5 (1.82)
KNO ₃ wt% (K ₂ O 換算 wt%)	0 (0)	0 (0)	2 (0.93)	0 (0)	2.2 (1.02)
H ₂ O (mL)	270	270	270	270	270
作製温度 (°C)	900	900	900	950	950
保持時間 (h)	3	3	3	5	5

固化体作製手順は以下の通りである。①ガラス (PF798-N10) を V-50 ドラムへ投入し、ガラスのかさ高さを測定したところ、約 11 cm であった。ここに、②表 2-2 に示した配合比で塩水溶液を投入、90 °C湯浴中で真空引き(-0.06 MPa)し、H₂O を蒸発乾固(約 180 分)させた③。その後、約 90 °Cの水 100 mL を追加し、上部に溜まった塩を洗い落とし、H₂O を再度蒸発乾固(約 180 分)させた④。

この原料入 V-50 ドラムを図 2-3 で示した固化体作製装置の電気炉内にセットし、気相ガストラップ装置内に 20.5 L の水道水を入れ、冷却水温度は 20 °Cに設定した。N₂ ガスを 100 mL/min.で流し固化体を作製した。炉内温度 (TI 12) の PID 制御は、30 分で 300 °Cまで昇温 (10°C/min.) し、30 分間保持した後、1 時間で 900 もしくは 950°Cまで昇温 (10°C/min.) して 3-5 時間保持、その後室温まで自然冷却とした。ガス発生挙動分析および TG-DTA 測定の結果から、NO_x ガスの発生や吸熱を伴う硝酸塩の分解点が 600~800 °Cの間にあることが判明したため、これらの反応をより穏やかに進行させることを目的に、昇温速度を H31 年度の 1/2 に落とした。

V-50 ドラムを用いた固化体作製についてまとめる。図 2-4 に、ウォータージェット法により切断した G21~G25 固化体を並べた写真を示す。900 °Cでの作製で、ポルサイト多結晶の微粒子がガラスに均質に分散保持されたコンポジット型固化体ができ、950 °Cの作製でガラス固化体となる。コンポジット型固化体において、Cs 含有量を 14.5 wt%

から 15.9 wt% (Cs₂O 換算) に増やすと、2 相分離傾向が強くなり均質性が悪くなる。したがって、均質なコンポジット型固化体作製のための Cs 含有量の限界値は、15 wt% 程度であると言える。一方で、ガラス固化体の場合は、Cs 含有量が 15.9 wt% まで増えても、概ね均質なガラス固化体が作製できる。K の添加については、コンポジット型、ガラス固化体いずれにおいても、均質性を阻害し、相分離傾向を強める。したがって、飛灰洗浄水中に多量に含まれる K は、減塩処理等が必要であると考えられる。NO_x ガス発生は、600~800℃の間で起こるが、その後、ガラスカレット内からのガス抜けの問題で、ガラス熔融塩内に残存し、固化体内にも取り込まれているものと考えられる。特に、コンポジット型固化体において、黄色の着色が目立つことから、ポルサイト多結晶層への取り込みが起こっていると考えられる。

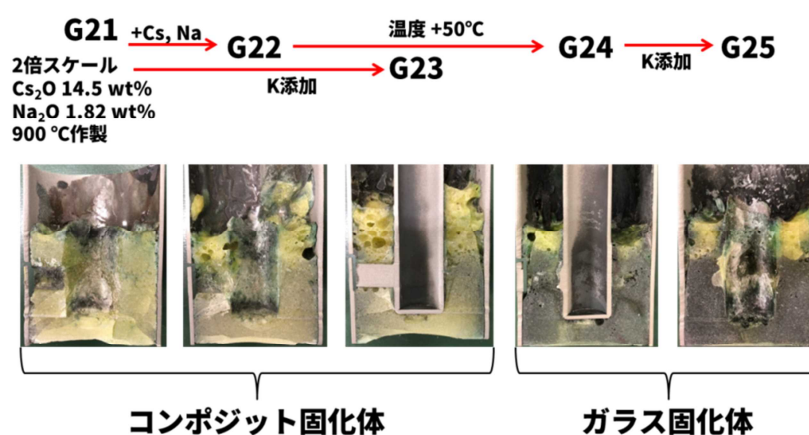


図 2-4 ウォータージェット法により切断した G21~G25 固化体

V-50 ドラムを用いた固化試験結果を基に、容器を大きくした場合のスケールアップ効果の確認を行った。飛灰洗浄水組成を考慮して、K を含有したコンポジット型固化体およびガラス固化体の 2 種の作製を試みた (G211、G212)。G211 作製において、スケールアップによる K 含有量の増加に伴い、固化体の均質性が悪化したため、Na 含有量を増やし、コンポジット型固化体 (G211b、900℃、Na₂O 添加量 2.50 wt%) およびガラス固化体 (G212、950℃、Na₂O 添加量 2.50 wt%) を作製した。ガラス固化体の分析は、ウォータージェット法によるガラス固化体の切断後、目視による状態観察、XRD および全溶解成分分析により行った。これらの固化体 ID は、G211、G211b、G212 とした。V-100 ドラムを用いた固化体作製における原料ガラス充填量は、V-50 使用時の 4 倍(ガラス 1200 g)である。

V-100 ドラムを用いた固化体作製についてまとめる。図 2-5 に、ウォータージェット法により切断した G211、G211b、G212 固化体を並べた写真を示す。Na 添加量が 2.01 wt% の G211 では、Cs および K 量が増加したことが固化体の均質化に悪影響を与え、相分離傾向が強まり、均質なコンポジット型固化体とはならなかった。Na 添加量を、Na₂O 換算で 2.50 wt% まで増やすことにより、900℃での作製で、ポルサイト多結晶の微粒子がガラスに均質に分散保持されたコンポジット型固化体ができ、950℃の作製でガラス固化体となった。したがって、Na₂O 添加量を 2.50 wt% 程度まで増やせば、Cs

含有量が 15.9 wt%まで増えても、均質なコンポジット型固化体作製およびガラス固化体が作製は可能であると言える。また、V-100 ドラムを用いた固化体作製では、排ガス輸送配管の詰まりがみられた。このことから、800 °C付近の吸熱反応時に発生する大量のガスと、それに付随する固形物質を処理する必要があると考えられる。これについては、防止策として、炉上部の排ガス出口に外部より冷却ガスを導入吹付け、配管内での固形物質の付着成長を抑制するラインを設けている。本試験は、V-50 ドラムでのテストで問題がなかったことから、試験中このラインを活かしていなかった。この機能を活かせば、気相ガストラップ内へ排ガスを安定的に輸送することができると考えられる。実装置でもこの機能は設置され、更に毎バッチガラス固化体生成終了後、インドラム取り外し、炉上部の排ガス出口ラインの水循環洗浄を行う機能を設置している。

さらに、XRD の結果より、昨年度観測された SiO_2 過剰相は観測されず、昇温速度を落としたことにより、結晶相が単相に近づいたと考えられる。一方で、G212 は、そのほとんどが非晶質ガラス成分であり、950 °Cでの作製でガラス化されることが実証された。

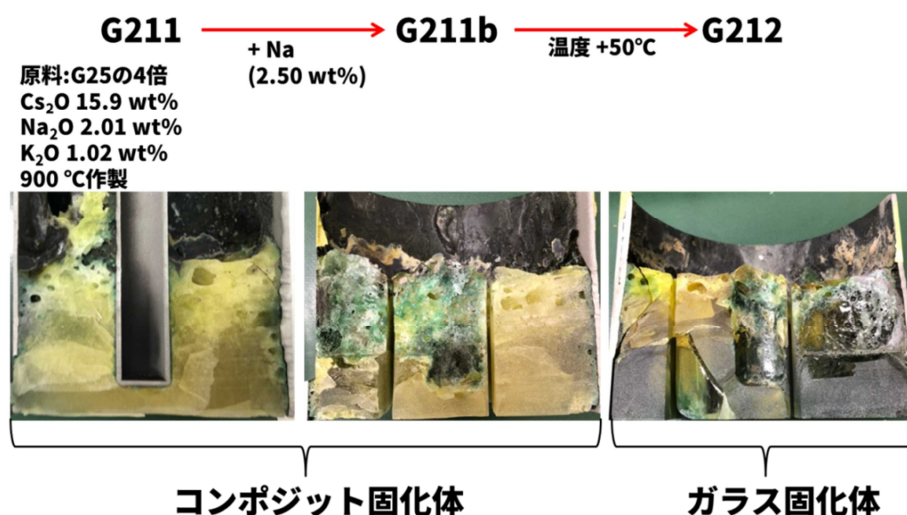


図 2-5 ウォータージェット法により切断した G211、G211b、G212 固化体

③インドラムガラス固化体の Cs 浸出速度評価

②で作製した G211b および G212 インドラムガラス固化体を 1 辺約 1 cm の立方体で切り出し、低レベル放射性廃棄物固化体の浸出性能評価で用いられる「米国原子力学会の ANSI・ANS-16.1-2019」12)に準拠して動的浸出試験を行い、Cs に対する規格化浸出率 ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{day}$)を求め、浸出指数 (L 値: $L = \log(1/\text{De})$ 、ここで De は Cs 浸出に対する有効拡散係数)を評価した。浸出試験は、ポルサイト多結晶の微粒子がガラスに均質に分散保持されたコンポジット型固化体とガラス固化体とを比較するために、V-100 ドラムで作製した G211b (コンポジット型固化体) と G212 (ガラス固化体) について行った。

G211b および G212 の規格化浸出率は、それぞれ、 2.5×10^{-6} 、 $6.8 \times 10^{-6} \text{ g}/\text{cm}^2/\text{day}$ であった。僅かではあるが、コンポジット型固化体の方がガラス固化体よりも浸出量は少

ない結果となった。この値は、セメントやセラミックス固化体と比較すると、4桁程度小さい値である¹³⁾。さらに、米国原子力学会の「ANSI・ANS-16.1-2019」¹²⁾に準拠して浸出指数 L を評価した。L 値は、G211b および G212 で、それぞれ、13.4 および 12.8 であった。L 値は、6 以上であると低レベル放射性廃棄物の固化体として有効であるとされていることから、本試験で作製したコンポジット型およびガラス固化体のいずれにおいても Cs の安定固化が可能である。

④インドラムガラス固化プロセスの Cs 物質収支

V-100 ドラムを用いた 900 および 950 °C での固化体作製において、固化後、気相ガストラップ内に捕獲された Cs 量は、それぞれ、129、345 mg/L であった。いずれの試験においても、気相ガストラップ内の水量は 20.5 L であることから、揮発しトラップされた Cs 全量は、G211b で 2.64 g、G212 で 7.07 g である。いずれの試験においても Cs 初期量は、Cs 換算で 180.0166 g (CsNO₃:264 g) であることから、G211b で 1.47 %、G212 で 3.93 %の揮発割合であった。以上の結果から実機規模のインドラムガラス固化プロセスの Cs 物質収支を評価した。V-100 ではガラス 1.2 kg を充填している。実機規模では、直径 40 cm のドラム径の容器にガラス 150 kg の充填を想定している。したがって、ガラス量は V-100 ドラムの 125 倍となる。充填原料量も、125 倍規模を想定すると、CsNO₃ 量は 33 kg (Cs 換算で 22.5 kg) である。揮発割合が同程度であるとする、900 および 950°C での固化体作製で、それぞれ、331、884 g 程度が気相ガストラップ内にトラップされることが想定される。トラップされた Cs は全量 Cs 濃縮工程に戻され、次のガラス固化充填原料となる。

⑤最終処分形態の評価

JESCO との協議により設定された、飛灰の放射線濃度 24 万 Bq/kg、灰洗浄水に溶存する塩類組成、量 (表 2-1) を用いて、灰処理と土壌処理の洗浄水合計 36.6 万 m³ の物質収支、放射能収支を評価した。灰、土壌処理の最終処分形態としてのインドラム数量は 114 本で有り、低レベル放射性廃棄物としての保管スペースは 10m×10m 程度に縮小でき、保管形態、保管場所の選定に有意義なものとなった。

3. まとめと今後の課題

インドラム式 Cs 処理システムについてのまとめは以下の通りである。

1. PB-MC による Cs 選択吸着、熱分解、水溶出方式は、飛灰洗浄水組成水溶液から、他の組成に影響されることなく、Cs を CsNO₃ として回収できる。
2. インドラム式ガラス固化は CsNO₃ のみ (数%の Na 塩は含む) ガラス固化する為、安定したガラス組成の固化体を作製でき、実績のある従来のガラス固化体より、高度に精製されたガラスとなる。
3. Cs 固定化量は Na 含有量、固化温度の選定により自由に設定できる。
4. インドラム式ガラス固化は従来のガラス熔融炉を用いない、安全で、簡便な放射性廃棄物固化方式である。
5. 灰、土壌処理の最終処分形態としてのインドラム数量は 114 本で有り、低レベル放射性廃棄物としての保管スペースは 10m×10m 程度に縮小できる。

実施代表者：大成建設株式会社
実証テーマ名： 微粉碎土壌をジオポリマーの固化材料として利用する技術
概要： 本事業は、放射性セシウム（Cs）が高濃度に濃縮された細粒分に対し、細粒分を構成する層構造を微粉碎処理により破壊する。それにより層間に取り込まれた Cs を遊離させるとともに、その粉碎試料を材料としたジオポリマー固化体が安定・安全に最終処分が可能かを検討・評価した。
実施内容： 本試験では 2 段階に分けて試験を実施した。第 1 段階では福島県内の一般土壌を用いて試験や評価を行い、第 2 段階では除去土壌を用いて第 1 段階の結果を基に試験や評価を行った。さらに最終処分に供する場合の実用化検討と安全評価を行った。
技術概要： 【試験全体の流れ】 ① 分級処理した細粒分をビーズミルにより微粉碎する。 ② ミキサーに一般土壌／除去土壌（粉碎後のスラリー状、非粉碎の粉末状）、ジオポリマー固化用溶液を投入し攪拌する。 ③ 各種試験用の型枠に流し込み、その後養生する。 ④ 硬化後、脱型し、Cs 浸出試験、圧縮強度試験の性能試験を実施する。 【試験目標】 (1) ジオポリマー固化体を製作できる固化方法の明示（目標圧縮強度 1,470kPa 以上） (2) セメント固化よりも高い Cs 浸出抑制効果の確認 (3) 最終処分したときの実用性、安全性等を評価 【期待される成果】 (1) 安定・安全に最終処分可能 (2) 最終処分量の減量化

実証試験の結果： (1) 物理・化学性測定試験 - 一般／除去土壌ともにジオポリマー固化に必要な Si、Al を多く含有していた。 (2) 微粉碎試験 - 一般／除去土壌ともに微粉碎により XRD のピークが減少等し、非晶質化が進行することでジオポリマー固化への反応性が上昇することを確認できた。 (3) ジオポリマー固化試験および性能試験 【固化試験】 - アルカリ刺激剤に微粉碎処理したスラリー状土壌と非粉碎の粉末状土壌を加えることで、ジオポリマー固化体を製作することができた。 【性能試験（浸出）】 - 一般土壌を使用したジオポリマー固化体の浸出率は 40%以下であった。 - 除去土壌を使用したジオポリマー固化体の浸出率は 10%以下であった。 【性能試験（圧縮強度）】 - 一般／除去土壌ともに目標圧縮強度である 1,470kPa 以上のジオポリマー固化体を製作することができた。 (4) 最終処分を見据えた実用化検討および安全性評価 【実用化検討】 - スケールアップを見据え 2L サイズのジオポリマー固化体を製作した。 【安全性評価】 - 浸出試験にて取得した浸出率を用いて、経過時刻に対する年間被ばく線量を算出し、めやす線量である 10μSv/y を下回った。	
評価：微粉碎土壌を用いて、目標圧縮強度 1,470kPa 以上でセメントより低い Cs 浸出率のジオポリマー固化体を製作することができた。また、本事業で測定した浸出率を用いて、ジオポリマー固化体のトレンチ浅地層処分の安全性評価を実施し、年間被ばく線量が 10μSv/y 未満になることを確認した。	
作業員被ばく量評価：除去土壌を扱う試験より得られた情報を基に試算した結果、作業員の年間の外部被ばくは 11.2mSv/y 程度であった。よって、線量限度（20mSv/y）を超えないため被ばくの観点での安全性は確保できる。	
コスト評価： 土壌 D（10.4 万 m³）を対象 約 2.0 万円/200L ドラム缶	歩掛り（作業人工、作業速度等）： 作業人工：60 人工（20 人×3 班） 作業速度：13.4 缶/h
コスト評価条件：実機プラントの仕様は、土壌 D を材料としたジオポリマー固化体（200L ドラム缶）を 321 缶/d（24 時間操業）、10 年間製造とし、作業員は 60 人（20 人×3 班）で行うこととした。	
作業における安全上の注意：実機製造プラントでは除去土壌、水酸化カリウム等を大量に取り扱うため、粉塵飛散防止策の強化、防護具着用の徹底等が必要となる。	
試験場所（住所）：北海道札幌市、愛知県名古屋市、福島県双葉郡等	除去物保管場所と保管状況：試験に使用した除去土壌は、JESCO と協議し適切に処分した。

1. 試験概要

(1) 背景と概要

現在、中間貯蔵開始後 30 年以内の 2045 年までに福島県外における最終処分の完了に向けて除去土壌に関する減容処理や最終処分等の技術開発が進められている。そのような中で除去土壌の減容処理技術として、放射性 Cs が濃縮している除去土壌細粒分に対し、微粉碎により約 50%の放射性 Cs を抽出させる技術を北海道大学の佐藤教授を代表とするグループが開発した。例えば 10,000Bq/kg 程度の土壌であれば微粉碎処理を実施すれば再生利用が可能となる。しかし、減容処理後のスラリー状土壌の取り扱いに対し課題が残っていた。そのスラリー状土壌を最終処分した場合、最終処分の技術としては既存にセメント固化技術があるが、放射性 Cs の保持性はほとんど期待できない。そのため、既存のセメント固化に替わる最終処分に関する技術開発が求められている。

そこで、本事業では微粉碎後のスラリー状土壌を使用し、長期的な安定保管、浸出抑制の観点から、ジオポリマー固化処理の試験を通じて、放射性 Cs 保持性の高い再生利用資材化技術の検討を行うことを目的とし、将来的に安定な保管と最終処分量の減量化および安全な処分を実現することを目標とする。

(2) 提案技術の目的

本試験では、福島県内の一般土壌と除去土壌を用いて各種試験や評価を行い、実用性、安全性など、本技術による除去土壌の再生利用の方法と、その効果を明確にすることを目的とした。

(3) 成果目標

本試験の成果目標を以下に示す。

- ・ 福島県内の除去土壌について、ジオポリマー技術を用いて固化体を製作したことがないため、その固化方法を示すこと。
- ・ 固化体から放射性 Cs の浸出が懸念されるため、前項の方法で製作した固化体は、セメント固化に比べて、高い浸出抑制効果を有すること。
- ・ 原子力規制庁の「廃棄物確認に関する運用要領」に記載された、セメント固化体の圧縮強度 1,470kPa 以上であること。
- ・ 最終処分の固化材として活用する際の実用性、安全性等を経験すること。

2. 技術概要

(1) 微粉碎処理技術

微粉碎処理による Cs 遊離の概略説明図を図 2-1 に示す。Cs は、風化黒雲母あるいはバーミキュライトの層構造に取り込まれ、それらは土壌の細粒分に濃縮されている。本技術は、風化黒雲母あるいはバーミキュライトの層構造を微粉碎処理により破壊し、層間に取り込まれた Cs を遊離させることを特徴とする。



図 2-1 微粉砕処理による Cs 遊離の概略説明図

(2) ジオポリマー技術

セメントコンクリートとジオポリマー固化体のそれぞれの反応と固化に必要な材料を示した概略説明図を図 2-2 に示す。ジオポリマーの特徴としては、コンクリートに比べて Cs の浸出率が低いことである (図 2-3 参照)。

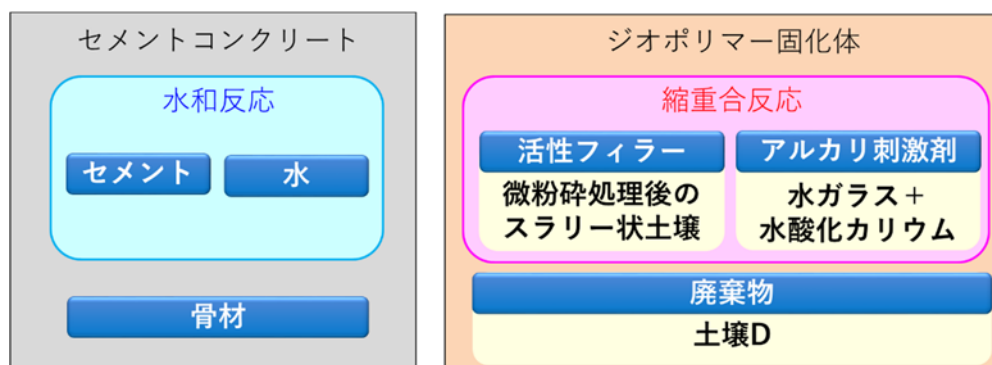


図 2-2 ジオポリマー技術の概略説明図

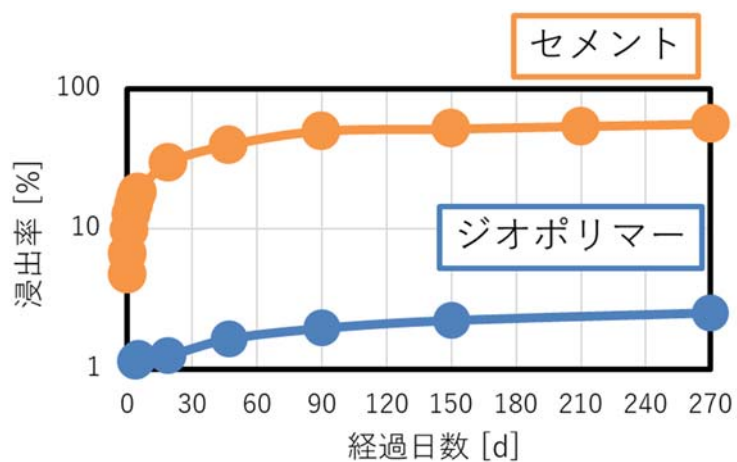


図 2-3 Cs の浸出試験結果の一例

3. 試験内容

(1) 試験の手順

試験の手順を図 3-1 に示す。



図 3-1 試験の手順

(2) 試料の準備

本試験の試料として一般土壌 2 種類、除去土壌 2 種類をそれぞれ選定・入手した。試料の情報を表 3-1、表 3-2 に示す。

表 3-1 試料（一般土壌）

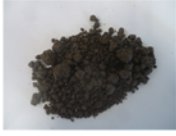
試料名称	放射性区分	条件	写真
一般土壌1	非放射性	玄武岩質	
一般土壌2	非放射性	花崗岩質	

表 3-2 試料（除去土壌）

試料名称	放射性区分	条件	写真
除去土壌1	放射性	細粒分 56.9%	
除去土壌2	放射性	細粒分 34.9%	

（３）試験の実施要領

①一般／除去土壌の物理・化学性測定試験

使用する一般土壌の試料に対し XRF を用いて元素組成の分析等を実施した。

②一般／除去土壌の微粉碎試験

ビーズミル式湿式微粉碎機を用いて微粉碎処理を実施し、得られた粉碎物に対し XRD 分析等を実施した。分析結果等から微粉碎の基礎条件を決定し、その基礎条件を基にジオポリマー固化体へ供する材料を製作した。

③一般／除去土壌のジオポリマー固化試験および性能試験

【固化試験】

一般土壌に関して微粉碎試料を用いて固化試験を行った。その後、強度の確認をし 3 種類の配合を選定した。選定した 3 種類の配合を用いて除去土壌に関しても固化試験を実施した。

【性能試験（浸出）】

一般土壌に関しては非放射性 Cs を吸着させ、製作した 6 検体（一般土壌 2 種類 × 1 配合 × 3 検体）に対し浸出試験を実施した。また、除去土壌に関しても 6 検体（除去土壌 2 種類 × 1 配合 × 3 検体）に対し浸出試験を実施した。

【性能試験（圧縮強度）】

一般／除去土壌ともに製作した 18 検体（土壌 2 種類 × 3 配合 × 3 検体）に対し圧縮強度試験を実施した。

④最終処分を見据えた実用化検討および安全性評価

【実用化検討】

固化処理量を 2L に拡大化した試験体を一般土壌により製作した。その製作方法についての課題等を抽出し、処理量増大時の手法を検討した。

【安全性評価】

試験にて取得したジオポリマー固化体からの Cs の浸出率を入力値とした安全評価を実施し、除去土壌を含むジオポリマー固化体を最終処分場に処分したときの周辺住民に与える放射線影響を評価した。

4. 試験結果

(1) 一般／除去土壤の物理・化学性測定試験

一般土壤、除去土壤ともに2種類を用いた。

①XRF

一般／除去土壤のXRFによる元素組成分析結果を図4-1に示す。どちらの一般土壤もSiが主成分であり、次いでAlが多く観察された。これらの2元素は、ジオポリマー固化に寄与する元素であり、ジオポリマーの材料として適用できる可能性があることを示唆している。

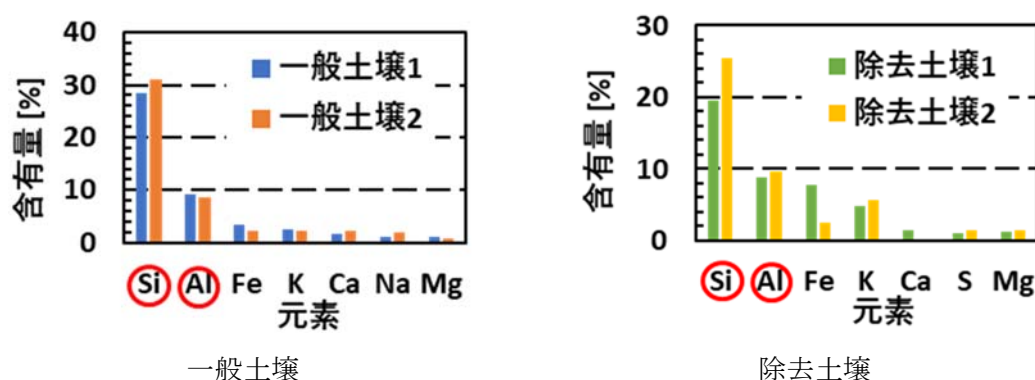


図 4-1 XRF による元素組成分析結果

(2) 一般土壤／除去土壤の微粉碎試験

分級処理にて得られた一般土壤／除去土壤の75 μ m以下の画分について、ビーズミル式湿式微粉碎機を用いて微粉碎試験を行った。試験は中程度粉碎したケース（メジアン径10 μ m以下）と十分に粉碎したケース（メジアン径1 μ m以下）を実施した。粉碎により、土壤中の鉱物にどのような変化が生じたかをチェックするために、粉碎後の土壤のXRDパターンを測定した（一般土壤：図4-2参照、除去土壤：図4-3参照）。一般土壤、除去土壤ともに粉碎時間が長いほどXRDパターンに認められるピークが消失または減少していることがわかる（ピークがブロード（広がる）している）。XRDのピークの消失または減少は、構造が壊れて非晶質化が進んでいることを示していると考えられる。また、非晶質化の進行に伴い、ジオポリマー固化への反応性が上昇した（図4-4参照）。

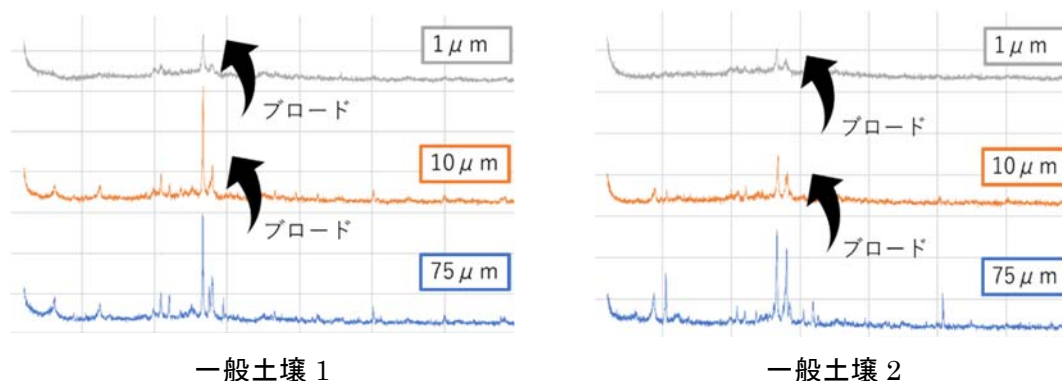


図 4-2 微粉碎試験のXRD変化（一般土壤）

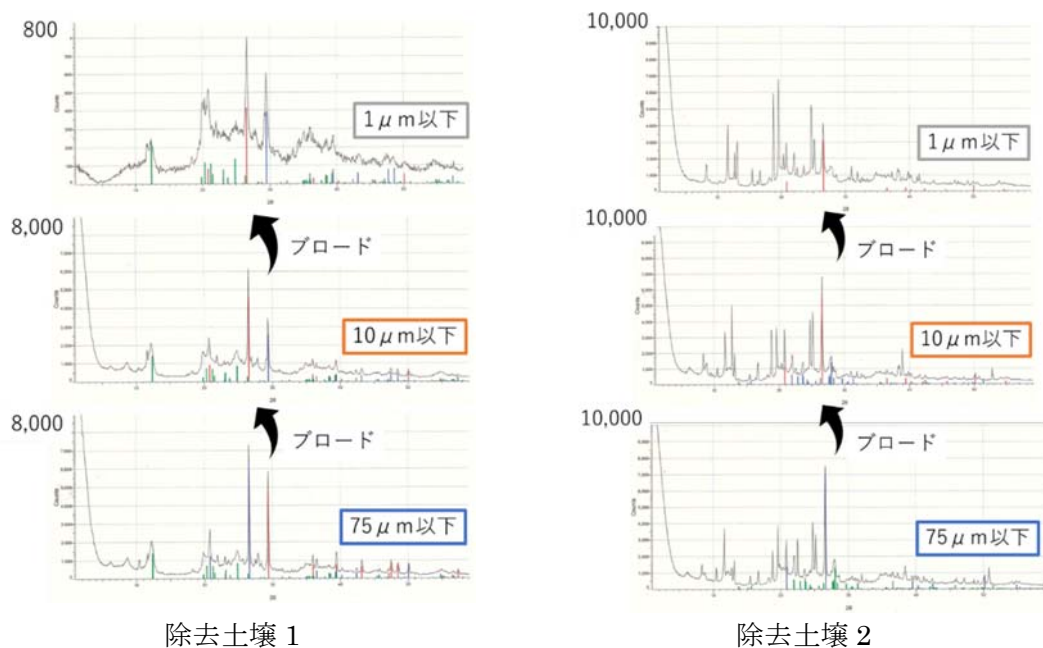


図 4-3 微粉碎試験の XRD 変化（除去土壌）

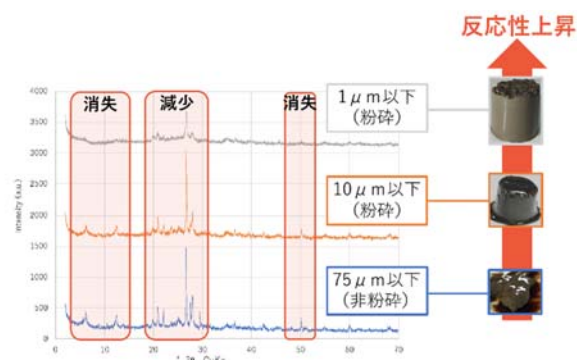


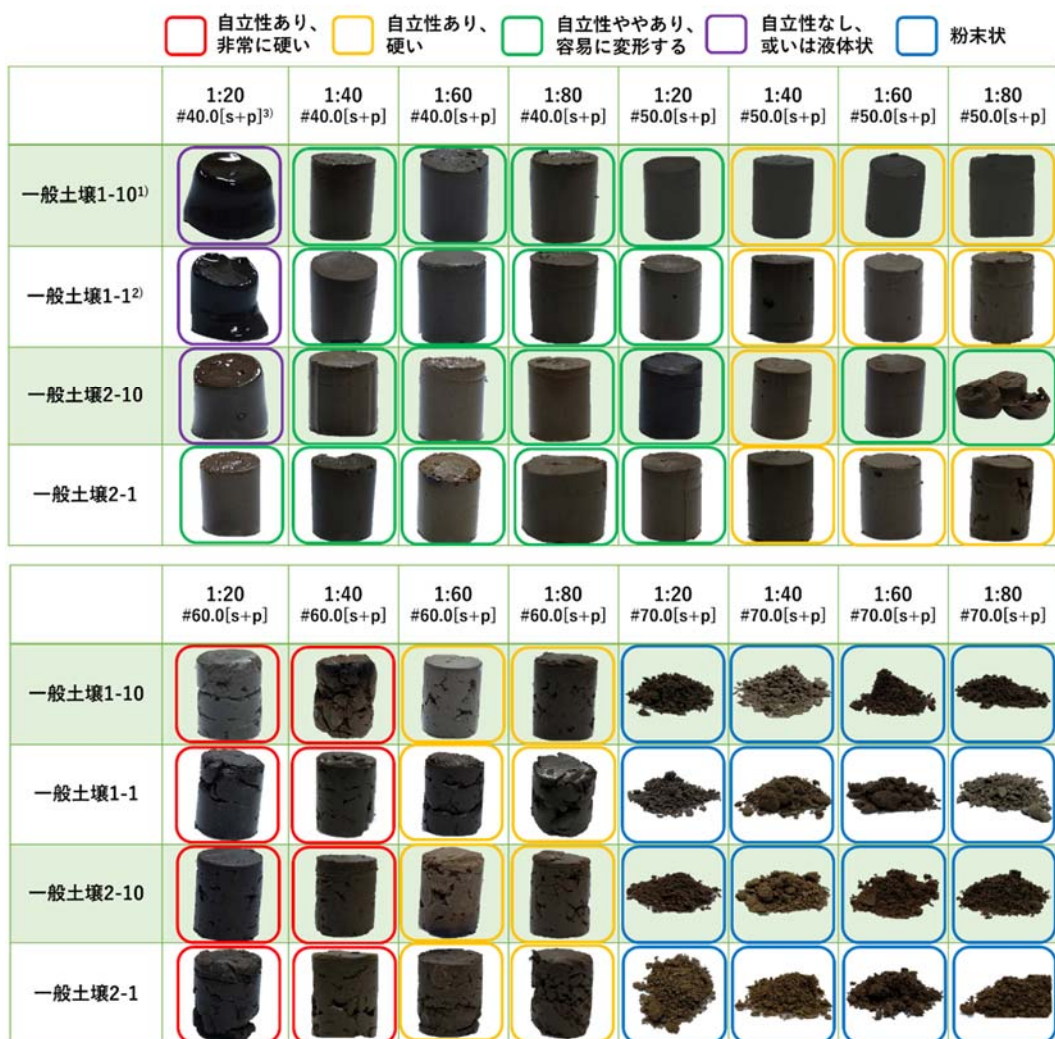
図 4-4 微粉碎によるジオポリマー固化への反応性上昇

（３）一般／除去土壌のジオポリマー固化試験および性能試験

①固化試験

一般土壌に関してスラリー状土壌に粉末状土壌を加え土壌含有量を増やしジオポリマーを製作した。ジオポリマー製作の際は、アルカリ刺激剤中の水分量と土壌含有量の２つのパラメータを変化させた（図 4-3 参照）。ジオポリマー製作後、目視による自立性や手の感触による強度の確認等を行い、強度が最も高かった２種のうちより強度の高かった配合１種類を浸出試験に供した。圧縮強度試験に関しては、浸出試験に使用する配合１種類、そしてもう一つの強度が高かった配合のものとそれと同じ水分比で土壌含有量が少なく十分な強度が出ていなかった配合の３種類の配合で作製した試験体について実施した（表 4-1 参照）。

次に、除去土壌に関して一般土壌での試験にて選定した３種類の配合に関してジオポリマーの製作を実施した（図 4-4 参照）。



- 1) メジアン径10 μ m以下に粉砕した試料をジオポリマーの材料として使用
 2) メジアン径1 μ m以下に粉砕した試料をジオポリマーの材料として使用
 3) 1:20 = 「アルカリ刺激剤」：「水」、#40.0[s+p]：土壌含有量40%

図 4-3 製作したジオポリマー

表 4-1 選定した配合

メジアン径	配合	試験
1 μ m 以下	1:20#60.0 [s+p]	浸出 圧縮強度
1 μ m 以下	1:40#60.0 [s+p]	圧縮強度
1 μ m 以下	1:40#50.0 [s+p]	圧縮強度

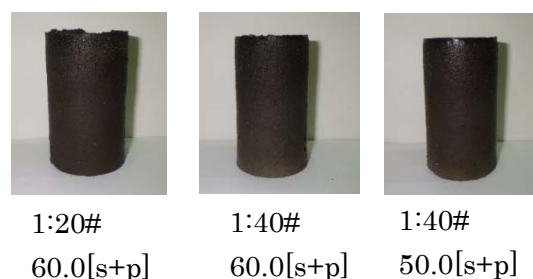


図 4-4 固化試験（除去土壌）

②性能試験（浸出）

浸出試験は一般土壌、除去土壌ともに表 4-1 に示した「1:20#60.0[s+p]」の配合を用いて実施した。一般土壌に関しては図 4-6 に非放射性 Cs を事前に土壌に吸着させた試料で製作した試験体の浸出曲線を示す。実験開始から 90 日間での浸出率はいずれの試料でも 40%以下であった。

除去土壌に関しては、浸出率はいずれの試料でも 10%以下であった。ただし、検出結果が ND の場合は 0 とし、ND の場合は一般土壌の浸出率の結果の知見を基に、除去土壌の浸出率を推測した（2h, 7h に対しては測定した値を使用した）。一般土壌 1/2、除去土壌 1/2 ともに、セメントの Cs 浸出率 79.9%と比較しても 1/2 以下であった。

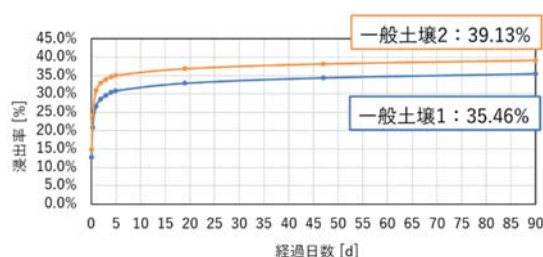


図 4-6 浸出試験結果（一般土壌）

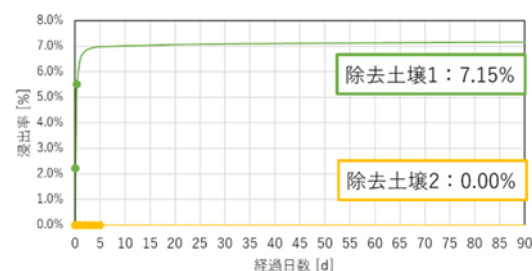


図 4-7 浸出試験結果（除去土壌）

③性能試験（圧縮強度試験）

圧縮強度試験は一般土壌、除去土壌ともに表 4-1 に示した「1:20#60.0[s+p]」、「1:40#60.0[s+p]」、「1:40#50.0[s+p]」での配合で実施した。表 4-2 に示すように、実施した全ての土壌、配合で目標圧縮強度である 1,470kPa を超えたことを確認できた。

表 4-1 圧縮強度試験結果

土壌	配合	圧縮強度 [kPa]
一般土壌 1	1:20#60.0[s+p]	1,811
	1:40#60.0[s+p]	1,877
	1:40#50.0[s+p]	1,914
一般土壌 2	1:20#60.0[s+p]	1,781
	1:40#60.0[s+p]	1,819
	1:40#50.0[s+p]	1,735
除去土壌 1	1:20#60.0[s+p]	2,265
	1:40#60.0[s+p]	2,104
	1:40#50.0[s+p]	2,018
除去土壌 2	1:20#60.0[s+p]	1,594
	1:40#60.0[s+p]	1,782
	1:40#50.0[s+p]	1,697

(4) 最終処分を見据えた実用化検討および安全性評価

①実用化検討

最終処分方法として検討している、ジオポリマー固化体をドラム缶（200L）に充填させることを見据えて、ドラム缶の 1/100 サイズである 2L の大きさにジオポリマー固化体を製作した（図 4-8 参照）。その結果、ジオポリマー固化体の表面にひび割れが見られたが、脱型が可能な強度を得られた。このひび割れは完成後に乾燥により発生したものである。つまり、ドラム缶にジオポリマー固化体を封入した場合はドラム缶内で湿潤が維持されるため、乾燥も緩慢に進行するため、ひび割れの影響は少なくなると考えられる。仮に経年変化によりドラム缶が腐食し、ジオポリマー固化体が地下水の浸入を許した場合は、その地下水の浸入によりジオポリマー固化体の湿潤が保たれひび割れの発生は抑制されることが考えられる。

②安全性評価

試験により測定した浸出率を用いて、トレンチ処分をした場合に埋立後の地下水移行（井戸水利用）に対する被ばくに関する安全性評価を実施した（図 4-9 参照、除去土壌の物量：約 75 万 m^3 （土壌 C の脱水ケーキ：64.5 万 m^3 ，土壌 D：10.4 万 m^3 ），平均放射能濃度：50,000Bq/kg，Cs-134 と Cs-137 の存在割合が 1:1 として計算を実施した）。その結果、図 4-10 に示すように年間被ばく線量がめやす線量である $10\mu\text{Sv/y}$ （再生利用を考慮する際の 1mSv/y に対し、クリアランスレベルと同等のものとして $10\mu\text{Sv/y}$ を目やす線量としている）未満になることを確認できた。



図 4-8 ジオポリマー固化体
(2L サイズ)

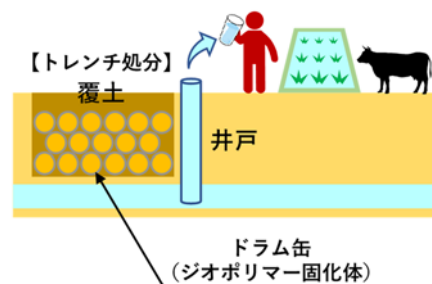


図 4-9 地下水移行のイメージ

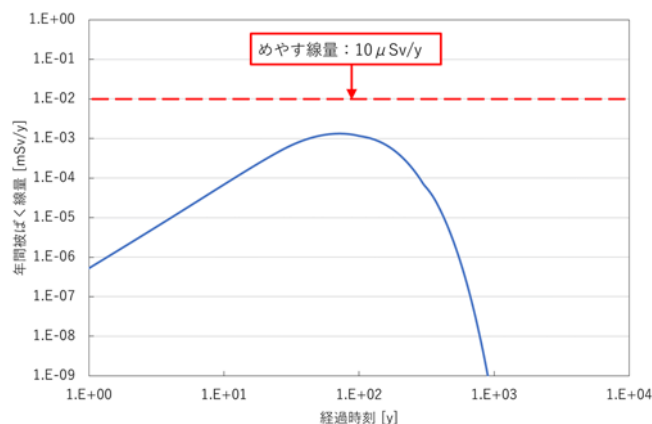


図 4-10 安全性評価の結果

5. コスト／安全性の評価

(1) コストの評価

実証試験の結果および想定した実機製造プラントによる操業を基に、ジオポリマー固化体を充填したドラム缶の製作コストを試算した。試算の内容は、イニシャルコスト、ランニングコスト等を求め、それらを基にドラム缶 1 缶あたりのコストを試算した。その結果、ドラム缶 1 缶あたり約 2.0 万円となった。

(2) 安全性の評価

除去土壌を扱う試験では、測定した線量は約 $0.5\mu\text{Sv/h}$ であった。実機においては、様々な変動が考えられる。そこで、空間線量率の測定値を $0.5\mu\text{Sv/h}$ の 10 倍である $5\mu\text{Sv/h}$ とし、1 日の作業時間を 8 時間、1 年の作業日数を 280 日と想定すると、作業員の 1 年あたりの外部被ばく線量は 11.2mSv/y となる。よって、線量限度である 20mSv/y の値より低くなると考えられる。

6. 再生利用の検討

本事業で対象としているのは「最終処分」と分類されている除去土壌を微粉碎あるいはそのままアルカリ刺激剤と攪拌し、必要であれば Cs 吸着材等の他の廃棄物も混合してドラム缶等に封入して固化体を製作するケースである。それにより、この固化体のマトリックス材として再生利用することができる。

7. まとめと今後の課題

(1) まとめ

- ・ 微粉碎土壌を用いて、目標圧縮強度 $1,470\text{kPa}$ 以上でセメントより低い Cs 浸出率のジオポリマー固化体を製作することができた。
- ・ 本事業で測定した浸出率を用いて、ジオポリマー固化体のトレンチ浅地層処分の安全性評価を実施し、年間被ばく線量が $10\mu\text{Sv/y}$ 未満になることを確認した。

(2) 今後の課題

① ジオポリマーの固化材料として脱水ケーキの利用の可否を実証

本事業では最終処分の対象物である土壌 D をジオポリマーの材料として想定したが、最終処分の対象物には土壌 C を分級処理・高度分級して得られる濃縮物（脱水ケーキ）もある。本事業で実施したように、脱水ケーキも微粉碎処理やその粉碎物をアルカリ刺激剤とともに攪拌等を実施することで、ジオポリマー固化体を製作できる可能性がある。そのため、今後実証する必要があると考える。

② ジオポリマーの固化材料として焼却灰の利用の可否を実証

除去土壌に加え廃棄が必要で大量に発生する焼却灰も、ジオポリマーの材料として使用できるかを検討する必要がある。本試験で実施したスラリー状土壌、非粉碎の粉末状土壌と焼却灰のハイブリッドの材料でジオポリマー固化体が製作でき、目標としている性能を達することができれば新たな減容の道筋を作ることにもつながると考えられる。

実施代表者：株式会社東日本計算センター
実証テーマ名：ドローンによる広域多点撮影と AI 技術による中間貯蔵施設維持管理業務の高度化・効率化
概要：中間貯蔵施設の維持管理の課題に対して、維持管理の高度化・効率化を図るためのドローンと AI 技術を活用したシステムの開発を行う。あわせてドローンを活用した地域貢献策、中間貯蔵事業に対するリスクコミュニケーション方策についても検討した。
実施内容： ①ドローンによる中間貯蔵施設の点検項目等の精査 ②AI 用学習データの作成 ③異常検出プロトタイプシステム開発 ④隊列飛行による多点連続静止画撮影プロトタイプシステム開発 ⑤中間貯蔵施設全体を対象とした災害発生後のドローンによるパトロール設計 ⑥ドローンを活用した地域貢献策およびリスクコミュニケーション策の検討
技術概要： 1. 実施内容 本事業では、土壌貯蔵施設の模擬施設（図 1）を製作した。まだ最終型となっていない土壌貯蔵施設の異常箇所候補を出力するための AI 学習データを収集するためである。模擬施設より作成した画像データに加え、画像加工プログラムを開発し、人工近似データを生成することにより大量の AI 学習データを用意し、異常検出プロトタイプシステムの検出精度を向上させた。 異常検出プロトタイプシステムに入力する画像はドローンにより撮影する。広大な土壌貯蔵施設の微細な異常を検知するための画像をドローンで撮影するために、複数機のドローンによる多点連続静止画撮影プロトタイプシステムを開発し、撮影・飛行計画自動生成機能も開発した。（図 2） また、このシステムは、災害発生後のドローンによるパトロールや、ドローンを活用した地域貢献策およびリスクコミュニケーション策の実現でも活用する。 2. 試験目標 ①最小長 3cm の異常候補を 80%以上の精度で自動出力する異常検出プロトタイプシステムの開発 ②①の異常候補検出のための静止画を撮影するドローン隊列飛行による多点連続静止画撮影プロトタイプシステムの開発 ③ドローンを活用した地域貢献策およびリスクコミュニケーション策の導出

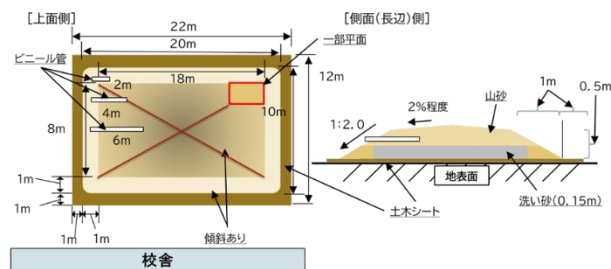


図 1 模擬施設完成図

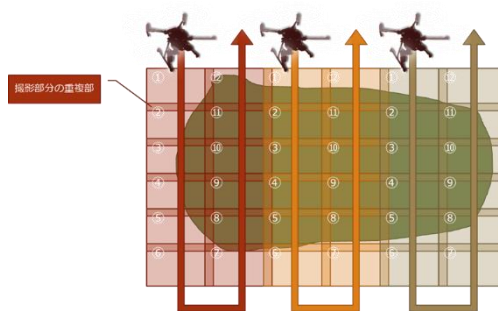


図 2 隊列飛行による
多点連続静止画撮影イメージ

実証試験の結果：

1. 異常検出プロトタイプシステム

3つのプログラムからなる異常検出プロトタイプシステム（図3）を開発した。

18,310 画像の学習データで、学習モデルを 150 回訓練し、正解率 95.3%を得た。

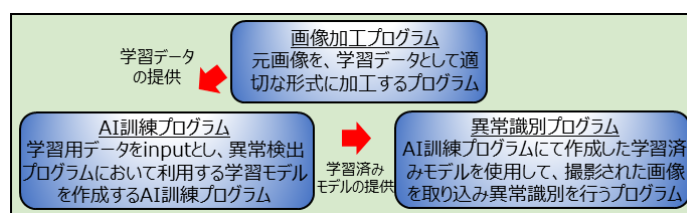


図3 異常検出プロトタイプシステムの構成

2. ドローン隊列飛行による多点連続静止画撮影プロトタイプシステム

広大な中間貯蔵施設での撮影を自動化し、撮影時間の短縮および異常検出プロトタイプシステムに画像を提供する多点連続静止画撮影プロトタイプシステム（図4）を開発した。



図4 連続撮影設定画面

また、撮影範囲、飛行高度、撮影重複率、飛行速度、飛行時間、カメラ画角を設定するとドローンの飛行計画を自動生成する Coverage Flight Planning System を開発した。

3. ドローンを活用した地域貢献策・リスクコミュニケーション策の導出

公開資料の分析、関連自治体、有識者、住民等へのヒアリングにより、ドローン活用における「外部環境」「ニーズ」「シーズ」を整理し、ドローンを活用した地域貢献策案・リスクコミュニケーション案（図5）を導出した。



図5 各方策案の時間的展開イメージ

技術等の評価： 模擬施設に模擬異常を配置し、ドローンによる多点連続静止画撮影プロトタイプシステムにより実際に撮影した静止画を、異常検出プロトタイプシステムに投入して総合評価を実施し、再現率の目標 80%以上に対し 96.43%、適合率 30.49%の検出精度を確認した。

作業員被ばく量評価： 該当なし

コスト評価： ドローンによる点検工数
1台：34人日、2台：17人日、3台：11人日

歩掛り（作業人工、作業速度等）：
人による点検工数：50人日

コスト評価条件： 櫛葉総合グラウンドを対象として、模擬異常を 19 個配置し、3cm の異常を識別するためドローン飛行高度 5m、最大飛行速度 15m/s で、撮影重複率 30%で撮影を行い、撮影所要時間を実測した。また実際に 3 名での歩行による点検を実施し、点検所要時間を計測した。この時間を中間貯蔵施設の全工区面積に換算して、1人日 7.5 時間として作業工数を算出した。

安全性の評価： 該当なし

試験場所（住所）：

- ・ながとイノベーションセンター（福島県いわき市）
- ・櫛葉町総合グラウンド陸上競技場（福島県双葉郡櫛葉町）

除去物保管場所と保管状況：
該当なし

1. 背景と目的

(1) 背景と実施方針

中間貯蔵施設への除去土壌等の搬入は令和 2 年度にピークを迎え、今後約 20 数年間は、中間貯蔵施設は「貯蔵」フェーズへ移行する。そのため、土壌貯蔵施設等における貯蔵フェーズでの主要業務は維持管理業務へ移行する。しかしながら、広大な土壌貯蔵施設等の点検業務を目視で確実かつ高頻度を実施することは労力と費用の点から難しい。

本実証事業はこのような維持管理の課題に対して、維持管理の高度化・効率化を図るためのドローンを活用したシステムの開発を行う。あわせてドローンを活用した地域貢献策・中間貯蔵事業に対するリスクコミュニケーション策についても検討することとする。

具体的には、まずドローンによる中間貯蔵施設の点検項目等の精査を行う。次に AI 技術等による土壌貯蔵施設等の異常検出を可能とするため、模擬施設を弊社管理施設内に実際に製作し、多量の AI 学習用データを作成し、異常検出プロトタイプシステムを開発する。さらに、土壌貯蔵施設等の画像データ取得に係る時間短縮のため、複数台のドローンを利用した隊列飛行による多点連続静止画撮影プロトタイプシステムを開発する。加えて、中間貯蔵・環境安全事業株式会社（以下、JESCO）の経営課題の一つである地域貢献策へのドローン技術の展開として、近隣自治体におけるドローン活用ニーズおよびドローンによって得られるデータの中間貯蔵施設に係るリスクコミュニケーションへの活用を検討する。

(2) 提案技術の目的

本実証事業は、中間貯蔵施設の維持管理の課題に対して、維持管理の高度化・効率化を図るためのドローンを活用したシステムの開発を行うことを目的とする。あわせてドローンを活用した地域貢献策・中間貯蔵事業に対するリスクコミュニケーション策についても検討することを目的とする。

(3) 成果目標

異常検出プロトタイプシステムの開発、隊列飛行による多点連続静止画撮影プロトタイプシステムの開発と活用方法策定、および地域貢献策・リスクコミュニケーション策に資するニーズ調査とする。

また、異常検出プロトタイプシステムおよび隊列飛行による多点連続静止画撮影プロトタイプシステムを使用した点検の異常検出精度としては、「漏れなく検知できること」を重視した再現率に対し 80%以上を目標とする。

2. 実施概要

(1) 事業全体像

実施する内容の全体像を図 2-1 図に示す。

- 1) ドローンによる中間貯蔵施設の点検項目等の精査
- 2) AI 用学習データの作成
- 3) 異常検出プロトタイプシステム開発
- 4) 隊列飛行による多点連続静止画撮影プロトタイプシステム開発

- 5) 中間貯蔵施設全体を対象とした災害発生後のドローンによるパトロール設計
- 6) ドローンを活用した地域貢献策の検討
- 7) 中間貯蔵施設に係るリスクコミュニケーションの検討

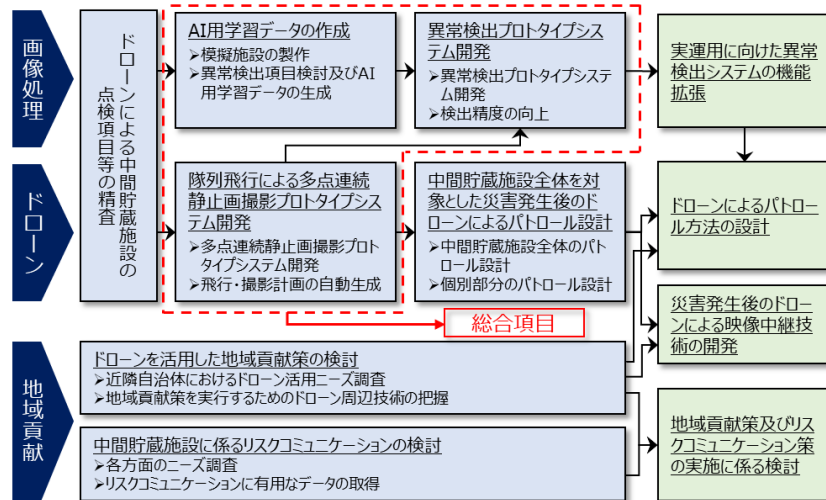


図 2-1 試験実施内容の全体像

3. 実施内容

(1) ドローンによる中間貯蔵施設の点検項目等の精査

① ドローンによる中間貯蔵施設の点検項目等の精査

中間貯蔵施設全体の施設は、図 3-1 のとおりである。

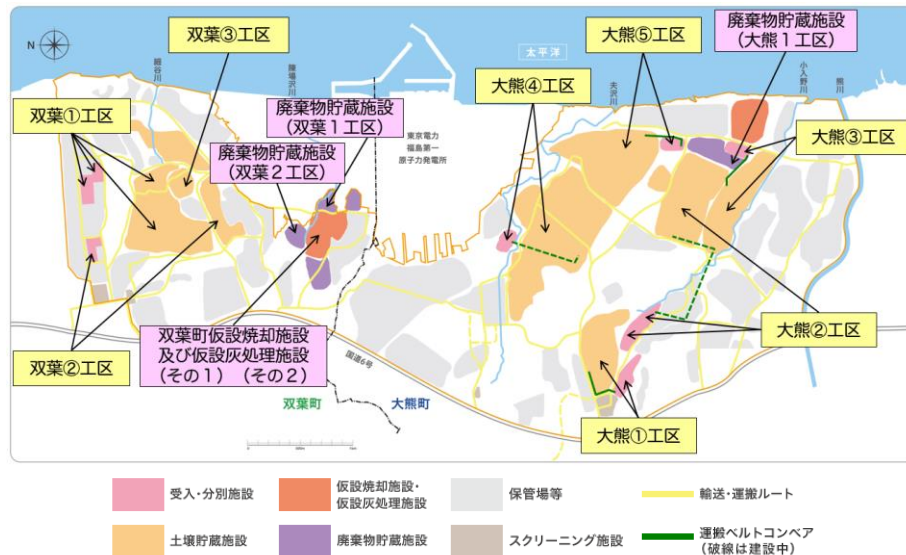


図 3-1 中間貯蔵施設全体図（環境省中間貯蔵施設情報サイトより）

JESCO 区域管理室へのヒアリングにより、保管場等と土壌貯蔵施設の特徴および維持管理方法を整理すると表 3-1 のようになる。

表 3-1 保管場等と土壌貯蔵施設の特徴および維持管理方法

	特徴	維持管理方法
保管場	● 小規模な保管場が多数 ● 構造は除去土壌等の仮置き場 ● 高さは 5m 未満	● 維持管理方法は確立 ● 既にドローン撮影による点検を実施中 ● 7m の自撮り棒による撮影により上部の安定した点検を実施
土壌貯蔵施設	● 広大な面積 ● 現在も貯蔵を継続中 ● 天部は被覆工で植生工の予定 ● 植生の種類は未定	● 点検方法とその頻度を検討中

本事業では、土壌貯蔵施設被覆工上の異常検出手法を実証することとする。

②中間貯蔵施設場所特定ルール の策定

管理台帳にて活用されているメッシュ図は、縦約 650m×横約 518m となっている。一方で、最小長 3cm の異常候補を検出することを目標とする場合、その場所を人間に認知させるためには、1m×1m 程度のメッシュ情報が必要である。中間貯蔵施設内における緯度経度による距離間隔は 1 秒約 30m 程度で、秒において小数点第 2 位まで指定することができれば、数 m 単位での位置特定が可能となる。

以上の考察により、現状メッシュの細分化により異常候補位置を表現するのは現実的ではない。一方、GPS 端末等を利用して緯度経度情報により異常候補位置に誘導することは十分可能である。実際の運用としては、既存メッシュは多くの JESCO 関係者に根付いていることから、既存メッシュで中間貯蔵施設内の大まかな位置を共有しつつ、緯度経度情報により異常候補位置を特定する方法が現実的である。

(2) AI 用学習データの作成

①模擬施設の製作

AI 技術を利用するには実際の土壌貯蔵施設において、

- ・ AI に学習させるための検出したい異常項目の画像
- ・ ドローンによって撮影された土壌貯蔵施設の画像

が必要となるが、中間貯蔵施設は整備途中であり、かつ設備の性質上容易に撮影することは難しいため、弊社管理施設（な

がとイノベーションセンター）に模擬施設

（図 3-2）を製作し、プロトタイプシステムの開発および、検証に必要な画像を容易に取得できるようにした。

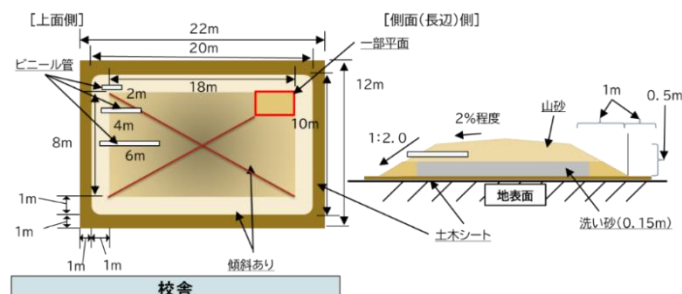


図 3-2 模擬施設完成図

②異常検出項目検討および AI 用学習データの生成

本実証事業において開発する異常検出プロトタイプシステム（図 3-3）は AI 技術を利用する。

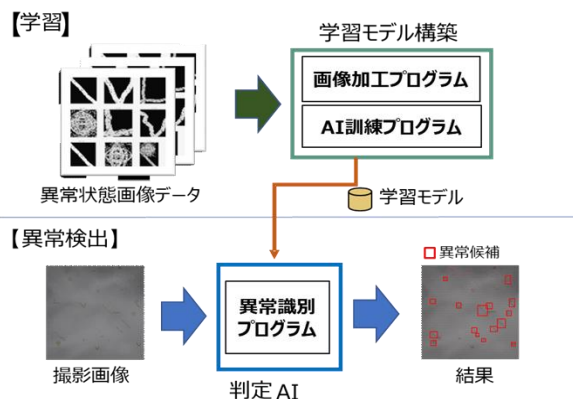


図 3-3 異常検出プロトタイプシステム概要

画像データの集積は、次の 2 つの方法によって蓄積した。

- 1) 模擬施設において撮影した画像から異常対象のサイズ、天候、日照方向などを考慮した上で切り出し蓄積
- 2) 開発する画像処理プログラムを用いて、人工的に近似データを生成し蓄積



図 3-4 模擬施設で作成した異常識別項目例（亀裂・穴）



図 3-5 人工近似データの生成イメージ

これらの方法により、異常項目ごとに 6 クラスに分けた AI 学習用データを表 3-2 のとおり、訓練用 10,310 画像、検証用 8,000 画像を作成した。

表 3-2 異常識別項目と学習データの作成枚数

分類		学習データ					
		模擬施設			人工近似		合計
		取得 (ネット上 も含む)	訓練用 (加工後)	検証用 (加工後)	訓練用	検証用	
名称	クラス						
異常なし	クラス0	10	2,000	2,000	0	0	2,000
亀裂（直線）	クラス1	20	582	0	1,200	1,200	1,782
亀裂（60 or 120分岐）	クラス2	0	0	0	1,200	1,200	1,200
亀裂（90分岐）	クラス3	0	0	0	1,200	1,200	1,200
穴・陥没	クラス4	36	1,019	0	1,200	1,200	2,219
押出・浸みだし	クラス5	24	709	0	1,200	1,200	1,909
総計							10,310
							8,000

(3) 異常検出プロトタイプシステム開発

①異常検出プロトタイプシステム開発

異常検出プロトタイプシステム開発では、「画像加工プログラムの開発と AI 用学習データの作成」・「AI 訓練プログラムの開発と学習の実施」・「異常識別プログラムの開発と異常識別の実施」を行った。

表 3-3 開発プログラム

名称	入力	出力	説明
画像加工プログラム	未加工画像	学習データ (加工済み画像)	撮影データから切り出した元画像を、学習データとして適切な形式に加工するプログラム。
AI 訓練プログラム	学習データ	学習済みモデル	学習用データをインプットとし、異常検出プログラムにおいて利用する学習モデルを作成する VGG16 をベースとした AI 訓練プログラム。
異常識別プログラム	撮影画像	識別済画像、識別情報 (種別、精度)	AI 訓練プログラムにおいて作成された学習済みモデルを使用して、撮影された画像を手動にて取り込み異常識別を行うプログラム。

AI 学習データを繰り返しかつ効率的に作成できるように画像加工プログラムを開発した。

学習データを取り込み、異常検出識別対象の検出を行うための要となる「学習モデル」を作成するのが AI 訓練プログラムである。「学習モデル」は、いくつかのパラメータにより正解率が変わるが、訓練回数を 150 にすることで、訓練データの正解率 95.3%、検証データの正解率 96.9%となり、過学習となっていない適切な「学習モデル」が構築されたことを確認した。

AI 訓練プログラムによって構築した「学習モデル」を用いて、異常候補を検出する機能を持つ異常識別プログラムを開発し、識別対象となる画像を取り込み、画像処理および「学習モデル」での解析を行った結果、異常と思われる部分が検出された場合、異常検出識別対象の位置 (物体を囲った矩形の領域) とラベル (異常検出識別対象のいずれにあたるか) を示す表示 (図 3-6) を行った。

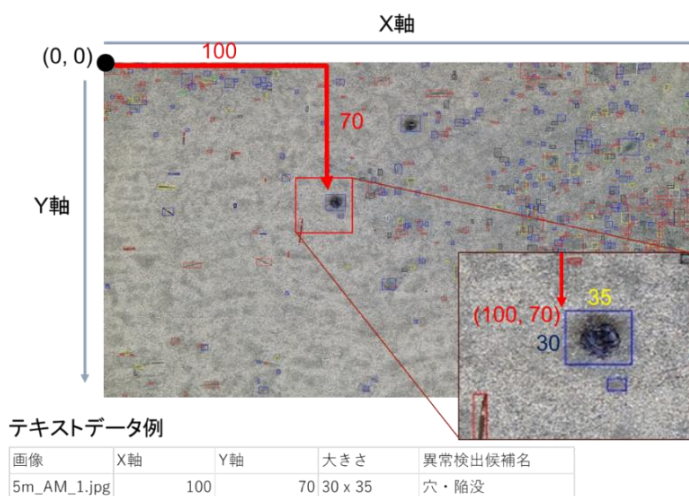


図 3-6 異常識別プログラム出力結果の突合イメージ

②検出精度の向上

模擬施設にて撮影した画像を用いて、異常があるかないかを判別する最終確認データ（テストデータ）（表 3-4、図 3-7）を作成し、作成した学習モデルに取り込み、結果を評価した。

表 3-4 テストデータ構成

項目	クラス	枚数
異常なし	クラス 0	21
亀裂（直線）	クラス 1	4
亀裂（分岐）	クラス 2	7
亀裂（垂直分岐）	クラス 3	7
穴・陥没	クラス 4	23
押出・浸み出し	クラス 5	20

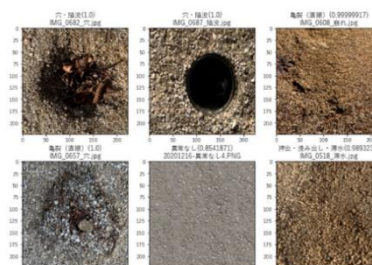


図 3-7 テストデータ（一部）と識別（予測）結果

テストデータの識別結果は、表 3-5 のとおりである。本事業の目標である「漏れなく異常が検知できること」を、再現率 100%、適合率 77.2%で達成した。

表 3-5 テストデータの識別（予測）結果

			識別値（予測値）					
			①	②	③	④	⑤	⑥
正解値	① 異常なし	21	3	10			1	7
	② 亀裂（直線）	4		2				2
	③ 亀裂（分岐）	7		5				2
	④ 亀裂（垂直）	7		3		1	1	2
	⑤ 穴・陥没	23		5		1	16	1
	⑥ 押出・浸み出し	20		6			6	8
識別値合計			3	31		2	24	22

			識別値（予測値）	
			①	②
正解値	① 異常なし	21	3	18
	② 異常あり	61		61
識別値合計			3	79

再現率 100%
適合率 77.2%

（４）隊列飛行による多点連続静止画撮影プロトタイプシステム開発

①隊列飛行による多点連続静止画撮影プロトタイプシステム開発

本システム開発では弊社が保有する隊列飛行システムをベースとし、本実証事業では新たに以下の機能について開発を行う。

- ・ドローンの制御機能
- ・飛行・撮影計画実行機能
- ・カメラの制御機能
- ・飛行・撮影計画作成 UI
- ・静止画撮影機能
- ・飛行・撮影計画の自動生成機能

本事業で使用した DJI 製ドローンのほか、オープンソースで開発が行われている「PX4/Autopilot」や「APM/Ardupilot」といった他の飛行制御プログラムが搭載されるドローンにも容易に対応することが可能であり、同一機種のドローンでの隊列飛行のみならず異なる機種のドローンでの隊列飛行も可能である。そのため、長期間に及ぶ中間貯蔵施設の維持管理業務において故障や破損等で新しいドローンの調達が必要とされた場合においても、同一機種にこだわることなくその時点で最良なドローンを選定可能であり、容易に「隊列飛行による多点連続静止画撮影

プロトタイプシステム」にて運用することが可能である。

開発したシステムでの隊列飛行による多点連続静止画撮影は、運用台数、飛行・撮影計画を指定することで実行可能であり、飛行中の一時停止や帰還操作等の機能を備える。また、バッテリー残量低下や通信途絶時における自律帰還等のフェイルセーフ機能も備える。



図 3-8 多点連続静止画撮影プロトタイプシステムメイン画面

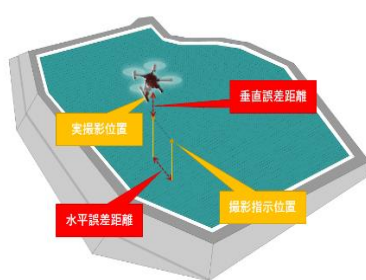


図 3-9 撮影時の誤差距離

表 3-6 撮影誤差距離計算結果

	平均 水平誤差	平均 垂直誤差	最大 水平誤差	最大 垂直誤差	最小 水平誤差	最小 垂直誤差
1回目	0.27	0.05	0.59	0.11	0.07	0
2回目	0.27	0.03	0.45	0.09	0.09	0
3回目	0.26	0.04	0.48	0.13	0.09	0
4回目	0.26	0.04	0.54	0.12	0.09	0
5回目	0.25	0.05	0.61	0.1	0.05	0
全体	0.26	0.04	0.61	0.13	0.05	0

撮影位置誤差精度は、平均水平誤差距離 0.25m、平均垂直誤差距離 0.04m との結果が得られた。撮影を網羅するにあたり、効率的な撮影重複率の設定を行うためにはどの程度まで撮影位置の誤差を考慮しなければならないかの検討を行ったが、誤差確認結果より最大水平誤差は 0.61m を考慮し 0.7m、最大垂直誤差は 0.13m を考慮し 0.2m の誤差を考慮すれば問題無いと考えられる。

②飛行・撮影計画の自動生成

飛行・撮影計画が自動生成されることにより、平時の土壌貯蔵施設の撮影のみならず災害時等の突発的な中間貯蔵各施設の状況把握等への活用も考えられる。

設定した点検範囲の撮影を網羅するために開発した「Coverage Flight Planning System」では、以下の情報を入力するだけで自動的に撮影位置情報の算出を行うことが可能である。

- ・ 撮影対象範囲
- ・ 最大飛行速度
- ・ カメラ水平画角
- ・ 飛行高度
- ・ 最大飛行時間
- ・ カメラ垂直画角
- ・ 撮影重複率

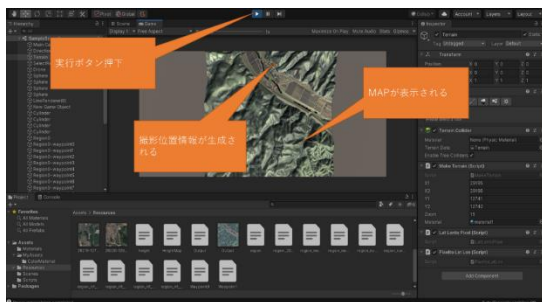


図 3-10 Coverage Flight Planning System



図 3-11 飛行・撮影計画

(5) 中間貯蔵施設全体を対象とした災害発生後のドローンによるパトロール設計

① 中間貯蔵施設全体のパトロール設計

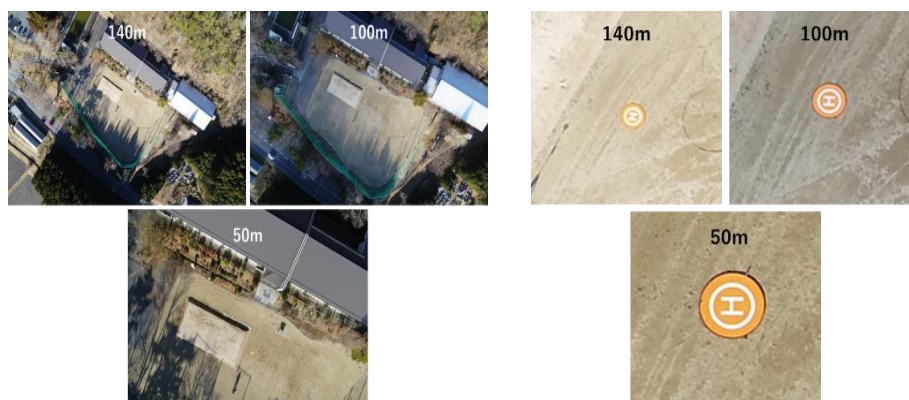


図 3-12 ながとイノベーションセンター上空から撮影された画像

中間貯蔵施設全体のパトロールにおけるドローン飛行高度について、ながとイノベーションセンターにて高度を変えて撮影した画像を確認した結果、幅 5cm で印刷されているランディングマットの H マークが高度 140m でも問題なく識別できることが判明した。高度 140m から撮影された画像でも 5cm 程度の分解能を有していることから、災害時の土砂崩れ、河川氾濫、火災や人物の存在等は把握が可能であり、災害時の 1 次調査には問題ないレベルと判断し、中間貯蔵施設全体のパトロールでの飛行高度は 140m と決定した。

高度 140m での撮影を前提として、JESCO 管理台帳に示されるメッシュ図にある区画毎に、飛行ルート定義、離発着地点、所要時間の飛行設計項目を検討し、設定情報を Coverage Flight Planning System に入力し飛行・撮影計画を作成した。



図 3-13 飛行撮影計画（区画 A4）

表 3-7 全体パトロール撮影時間試算結果

撮影対象	運用台数	撮影時間
区画A4	1	約13分
撮影対象全区画	1	約572分 (約9.5時間)
	3	約191分 (約3.2時間)

1 区画当たりの撮影時間は 13 分とある程度現実的な撮影時間となるが、中間貯蔵施設全体でみると 9 時間半程度を要することとなり、ドローン 3 台を利用した隊列飛行による撮影を実施することにより、撮影時間は短縮され、3 時間程度で撮影を終えることが可能である。刻々と変化する災害状況を、広大な敷地を有する中間貯蔵施設全体の状況把握を鑑みれば妥当な時間であろうと推察できる。

②個別部分のパトロール設計

中間貯蔵施設全体のパトロールを実施し明らかになった要調査箇所に対して、2 次調査である個別のパトロール設計が必要であると考えていたが、高度 140m で撮影された画像が 5cm 程度の分解能を有することが明らかになった。この分解能で得られる画像では様々なものがある程度確認でき、被災した状況を確認するためには十分であり、より低い高度からの静止画の撮影は不要と考えられる。

ただ、2 次調査が必要ないと考えているのではなく、俯瞰画像からでは得られない情報の収集は必要である。たとえば被災した建物の 2 次調査が必要である場合、詳細な状態等は俯瞰画像のみでは把握が困難であろう。プロポによる操作を行い建物正面からの撮影や必要な箇所、状況に応じた撮影を個別に行う方がむしろ好ましい。

(6) 地域貢献策およびリスクコミュニケーションに関する検討

ドローンを活用した中間貯蔵事業としての地域貢献策およびリスクコミュニケーション策の検討にあたっては、公開情報を基にした外部環境の整理、本実証チームが有する技術、リソース、実績等のシーズの整理、ヒアリング調査を基にしたニーズの整理を行い、それらの結果を踏まえて方策案を導出した。

調査した外部環境・ニーズ・シーズから、以下の方策を提案する。

- ・ドローンを用いた 1) 害獣対策、2) 体験学習、3) 物資運搬
- ・理解促進に資する 1) AR アプリの製作、2) 出前授業へのコンテンツ提供

これらの実施方策について、実装に向けた時間的な展開イメージを図 3-14 に示す。前述の有識者へのヒアリングでは、スピード感をもって小規模かつ障壁の低い取組みを実行に移すことの重要性が指摘された。ドローンを用いた体験学習や出前授業へのコンテンツ提供に関しては、新規に必要な開発要素はほとんどなく、企画の検討が主な検討事項となる。そこで、スモールスタートながら着実な実施に力点を置きつつ、これらの方策をより優先的に実現できるとよいと考えられる。一方で、その他の方策については、開発要素が含まれるため、引き続き実証事業での技術開発および現地での実験等を継続し、中長期的な視野で実現を目指す必要があると考えられる。

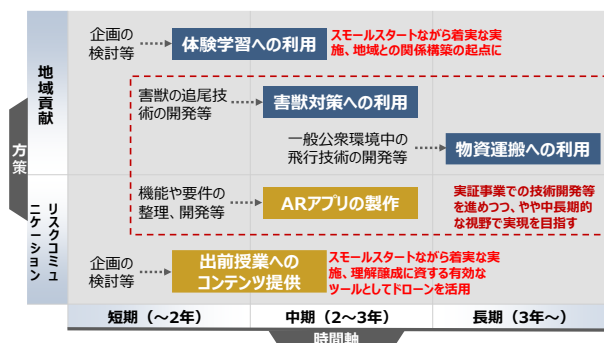


図 3-14 各方策案の時間的な展開イメージ

(7) 総合評価

総合評価として、ながとイノベーションセンターにて模擬異常を 44 個配置し、ドローンにより撮影した画像に対する精度検証を行った。計 3 回のテストの結果、再現率 96.43%および適合率 30.49% (表 3-8) となり、再現率の目標であった 80%以上を達成した。

表 3-8 再現率と適合率 (ながとイノベーションセンター 総合)

項目	内容	値
再現率	3 回のテストで画像から模擬異常が検出された割合	96.43% (216/224)
適合率	3 回のテストで検出された異常が正しく識別された割合	30.49%

また、檜葉総合グラウンドにて、模擬異常を 13~18 個配置し、3cm の異常識別を想定し、多点連続静止画撮影プロトタイプシステムによる異常検出にかかる工数と人による点検にかかる工数との比較を行った。檜葉総合グラウンドでそれぞれ 3 回のテストを行い、実測した結果をもとに、中間貯蔵施設全工区に換算して、人による点検とドローン台数の違いによる点検工数を算出した。さらに最小検出異常サイズの違いによる点検工数についても検証した。

図 3-15 に示すとおり結果となり、広大な中間貯蔵施設全体の点検には、複数台のドローンによる点検が効果的であることが確認された。さらに AI の最小検知異常サイズの再検討により、さらに効率的な点検が可能である。

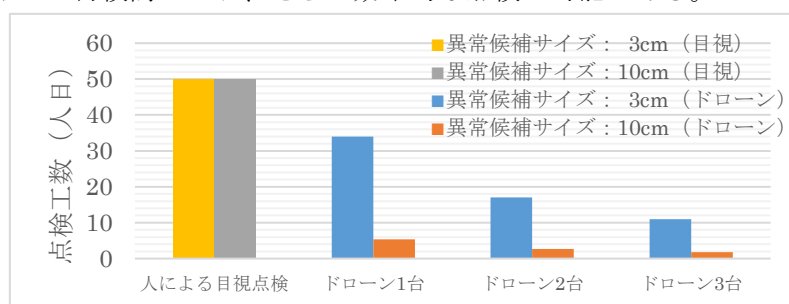


図 3-15 ドローン台数・異常候補サイズからみる点検工数

4. まとめ

ドローンによる広域多点撮影を可能とする「多点連続静止画撮影プロトタイプシステム」、最低限の設定でドローン撮影・飛行計画を自動生成する「Coverage Flight Planning System」を開発した。これらシステムによって飛行するドローンからの画像より、最小長 3cm の異常を AI 技術にて自動検出する「異常検出プロトタイプシステム」を開発し、総合評価として再現率 (異常を異常として検出) 96.43%、適合率 (どんな異常かを検出) 30.49%の結果を得た。また、中間貯蔵施設を取り巻く「外部環境」「ニーズ」「シーズ」を整理し、計 5 件の地域貢献策・リスクコミュニケーション策を提案した。今後の課題は、実運用を見据えたプロトタイプシステム化 (検出精度最大化のためのパラメータチューニング等による精度向上、実運用プロトタイプシステムの開発、タブレットアプリのプロトタイプ開発) および開発したプロトタイプシステムの高付加価値化 (リスクコミュニケーションへの適用等) である。

実施代表者 アジア航測株式会社
実証テーマ名： 中間貯蔵施設の維持管理におけるUAV（ドローン）を用いた点検・監視の効率化手法実証
概要： 近年、インフラ施設等の維持管理における無人航空機（UAV：Unmanned Aerial Vehicle、ドローン）の活用に対する期待が大きい。本実証事業では、中間貯蔵施設の安全で効率的な点検・監視や迅速な異常検知の実現に向け、①UAVを用いた施設の変状把握技術、②UAVを用いた施設の放射線計測技術、③取得した監視情報の管理・提供技術に関する実証試験を実施し、中間貯蔵施設の維持管理におけるUAV活用の有効性や実用化に向けての課題を明らかにした。
実施内容： 「①UAVを用いた施設の変状把握技術」では、今後長期にわたる中間貯蔵施設の稼働において生じると考えられる施設の劣化のうち、土壌貯蔵施設の浸食や崩壊、野生動物による損傷等に着目し、UAVにより取得した二時期の画像およびレーザ計測データから得られる変化量から施設の変状箇所を抽出する手法について検討を行った。 「②UAVを用いた施設の放射線計測技術」では、覆土が壊れた箇所や谷筋などでの放射線量の異常値の検出条件、将来の中間貯蔵施設の維持管理の一つとしてUAVによる放射線計測を実施する場合の放射線計測業務を想定した業務の具体化について検討を行った。 「③取得した監視情報の管理・提供技術」では、施設の変状箇所や放射線計測結果等、施設の状況を関係者で共有するための分かりやすい表現方法や、時系列的な情報の蓄積・管理の方法等、監視情報のプラットフォーム構築に向けた検討を行った。
技術概要： 「①UAVを用いた施設の変状把握技術」では、SfM (Structure from Motion) 技術を用いた三次元点群データとレーザ点群の2つの手法で、二時期の差分量から変状を抽出した。変状箇所の自動抽出では、変化と考える差分量の閾値（地形変化量）とマス目の大きさ（メッシュサイズ）をパラメータとして、最適条件を検討した。 「②UAVを用いた施設の放射線計測技術」では、UAVに積載する放射線検出器の特性を把握するため、5m、7.5m、15m上空での測定を行った。また、各測定点において、UAV測定と歩行サーベイを実施し、両者の結果を比較し検量線を導出した。さらに、汚染源を模擬した標準線源を用いて土壌貯蔵施設での適用範囲を検討した。 「③取得した監視情報の管理・提供技術」では、土壌貯蔵施設全体のUAV撮影を実施し、SfM手法により施設全体の3D画像を作成した。それらを表示・共有するための3Dビューア(エンジン)をライセンス費用、標準APIによる解析機能の充実度、搭載可能データの多様性等の観点から検討した。

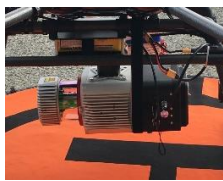
実証試験の結果： 1. 施設の変状把握技術実証： ・二時期点群の差分量から、模擬変状箇所が明瞭に確認できた。模擬変状の自動抽出手法として、「画像を用い・地形変化量 5cm・マス目大きさ 5cm」のときに抽出精度（F 値）が 76.2%と最も高い値であったことが分かった。 2.施設の放射線計測技術実証： ・UAV 測定の測定時間が飛行高度によらず 20 秒で概ね妥当であることを確認した。 ・土壌貯蔵施設の貯蔵が完了している箇所および堰堤において、飛行高度によらず UAV 測定結果が歩行サーベイの結果とほぼ一致することを確認した。 ・放射線量異常値を UAV 測定で明瞭に検出可能な条件は、「未除染箇所からの放射線影響が小さい天端部から法肩部で、飛行高度 5m、線源強度 10MBq」であった。 3.取得した監視上法の管理・提供技術実証： ・3D ビューア「Cesium」を用いた Web サイトを試作し、表示に適したデータ形式として、「標高タイル形式（DSM）+オルソモザイク画像」を選定した。また、変状箇所（ポリゴン表示）、線量マップ（メッシュ表示）を重ね合わせ表示可能とした。	
技術等の評価： 1. 施設の変状把握技術実証： ・変状箇所の自動抽出に関しては、最適なパラメータについては検討の余地がある。 ・人間の巡回による目視との比較ではコスト面では、目視巡回のほうが優れているが、再現性や安全性、データの利活用などの面では UAV が優位であった。今後 UAV の完全自律飛行や処理の高速化、自動化が課題である。 ・植生が繁茂している状況においては、画像を用いる方法では地表面の状態が把握できないため、今後は植生繁茂下でのレーザ計測の詳細検討が必要である。 2.施設の放射線計測技術実証： ・標準線源（10MBq）を用いた試験結果から、土壌貯蔵施設の天端部に対して異常値を検知する運用が充分可能であった。 ・汚染箇所の迅速な特定を目指す場合、マルチ・ディテクター等の検討が求められる。 3.取得した監視上法の管理・提供技術実証： ・3D 画像作成時間・データ容量・Web サイトで表示した際の見え方、表示速度、変状・線量情報の見え方から 3D 表示に適した解像度を検証し、10cm が適当であった。	
作業員被ばく量評価：現地作業時間の軽減により、変状把握および線量測定ともに作業員の被ばく線量は低減された（線量測定では約 1/10 に低減）。	
コスト評価（大熊 3 工区全体の年間コスト）： ・変状把握：100～150 万程度 ・線量測量：32 万程度	歩掛り（大熊 3 工区全体の作業時間）： ・変状把握：7～10 日程度 ・線量測量：10 分程度
コスト評価条件：（変状把握）UAV 運行は 2 名体制で基準点測量は含まない。 （線量測量）UAV 運行は自動運転で遠隔地での監視員 1 名体制を想定。	
安全性の評価：UAV の運行に係わる安全管理が必要となる。	
試験場所（住所）：大熊 3 工区中間貯蔵施設（福島県双葉郡大熊町）	除去物保管場所と保管状況：（対象外）

1. 施設の変状把握技術実証

(1) 試験の準備

試験に仕様した UAV および搭載したセンサを表 1-1 に示す。

表 1-1 UAV 関連設備装置一覧

写真撮影用 UAV		レーザ計測用 UAV	
機体	カメラ	機体	レーザスキャナ
Inspire2	X5s	X-F1-PRO	RIEGL VUX-1
			

(2) 実証試験

① 想定される施設の変状パターンと監視レベルの整理

土壌貯蔵施設の維持管理段階で想定される施設の変状内容について、これまでの土壌貯蔵施設の維持管理において確認された事例や河川堤防等の同種施設の事例を調査し、本実証で対象とする変状の種別と規模を表 1-2 とした。

表 1-2 土壌貯蔵施設で想定される変状の類似例と想定規模

変状種別	想定規模
浸食（ガリ）	幅 10cm 程度～、長さ 1m 程度～
陥没・イノシシによる掘り返し	面積 1m ² 程度～、深さ 30cm 程度～
膨張（はらみ出し）	幅 10cm 程度～、長さ 1m 程度～
漏水	幅 10cm 程度～、長さ 1m 程度～
沈下（寺勾配）	面積数 m ² 程度～、沈下量 10cm 程度～
すべり	面積数 m ² 程度～、沈下量 10cm 程度～

② 変状把握手法の選定

UAV を用いた施設の変状把握手法について、画像解析やレーザ計測等の最新の手法について情報収集を行った結果、本実証に適した以下の二つの手法を選定した。

- UAV で撮影した二時期の画像それぞれに対し SfM（Structure from Motion）技術を用いて三次元点群データを作成し、得られた二時期の点群データから差分量を計算して変状を抽出する手法
- UAV で計測した二時期のレーザ点群の差分量から変状を抽出する手法

③ 模擬的な変状箇所の造作と UAV 撮影・計測の実施

土壌貯蔵施設において発生が想定される変状について、変状度合いの異なる複数ケースを想定し現地にて模擬的な変状（亀裂、浸食、膨張等）を造作した。

図 1-1 に造作した模擬変状の一例を示す。

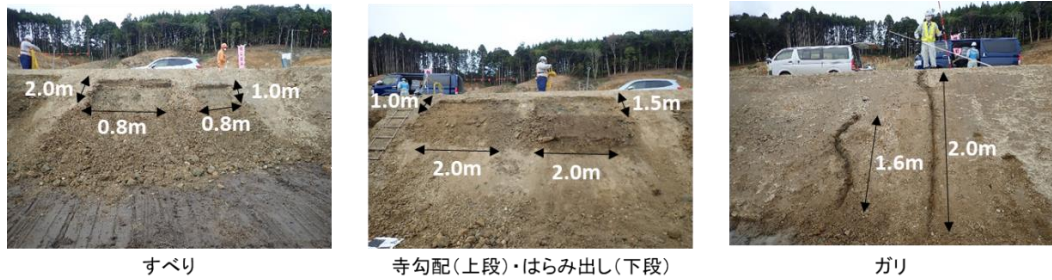


図 1-1 造作した模擬変状例の写真

UAVの画像・レーザそれぞれで模擬変状造作前後にて二時期の計測を行った。計測諸元を表 1-3 に示す。

表 1-3 UAV 写真撮影（画像）とレーザ計測の諸元

画像		レーザ	
項目	設定値	項目	設定値
オーバーラップ	80%	パルスレート	550kHz
サイドラップ	60%	コース間重複度	60%
対地高度	20m	対地高度	100m
飛行速度	4.0m/s	飛行速度	4.0m/s
コース数	7 コース	コース数	3 コース
地上画素寸法	0.5cm/pixel	想定点密度	420 点/m ²

④ 変状箇所の差分解析

表 1-4 に画像、レーザそれぞれの手法で作成・取得した点群データに関する位置精度の検証結果を示す。位置精度は、画像のほうが良好な結果となっている。

表 1-4 位置精度の検証結果

画像				レーザ			
水平方向		鉛直方向		水平方向		鉛直方向	
RMSE ^{※1}	最大	RMSE ^{※1}	最大	RMSE ^{※1}	最大	RMSE ^{※1}	最大
4.3cm	9.9cm	3.2cm	7.0cm	7.4cm	13.0cm	6.1cm	9.0cm

※1 RMSE : Root mean square error (二乗平均平方根誤差)

二時期点群から差分量を算出し、その大きさに応じて色付けを行ったものを図 1-2 に示す。模擬変状箇所が明瞭に確認できることがわかる。

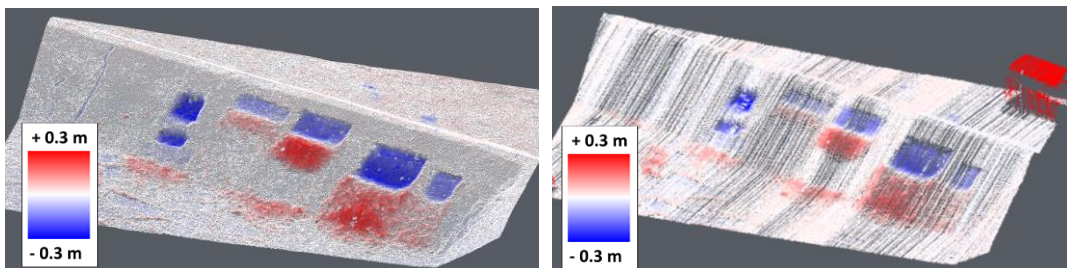


図 1-2 二時期点群の差分量の可視化例（左；画像 右：レーザ）

⑤ 変状箇所の自動抽出手法の検討と試行結果

図 1-3 に変状箇所の自動抽出手法を示す。変化と考える差分量の閾値（地形変化量）とマス目の大きさをパラメータとしている。

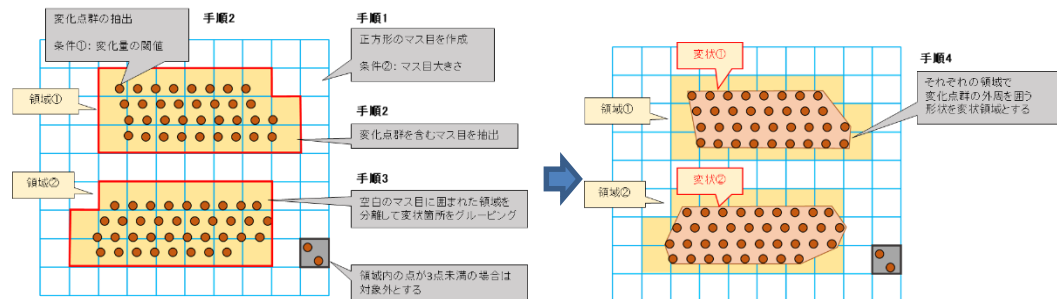


図 1-3 変状箇所の自動抽出手法

パラメータを変化させて模擬変状の自動抽出を試みた結果を図 1-4 に示す。条件 a-iii（画像、地形変化量 5cm、マス目大きさ 5cm）のときに抽出精度（F 値）が 76.2%と最も高い値であった。この a-iii での自動抽出結果を図 1-5 に示す。

抽出漏れの少なさを表す指標（抽出再現率）を重視する場合は他の条件の方が良く、最適なパラメータについては検討の余地が残されている。

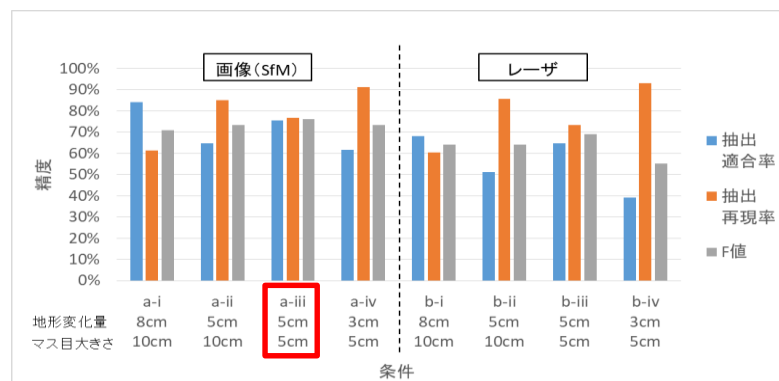


図 1-4 各条件における変状自動抽出の精度指標

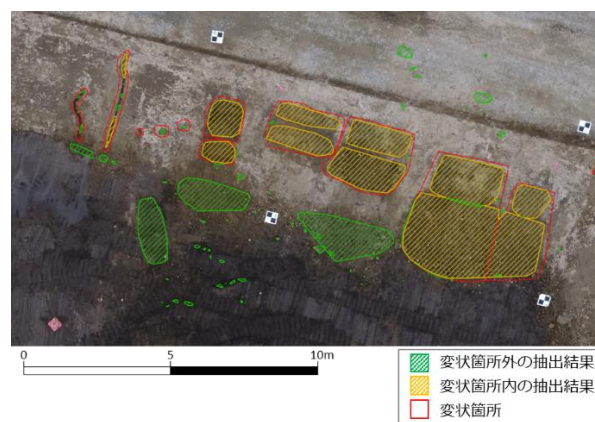


図 1-5 条件 a-iii（画像、地形変化量 5cm、マス目大きさ 5cm）における変状自動抽出結果

(3) 評価・検証

① 変状抽出精度の検証

画像による手法では最も良い条件での抽出精度（F 値）が 76.2%、レーザによる手法では 68.9%であり、画像のほうが良好な結果を得られた。なお、評価する変状領域を適正化することにより、抽出精度（F 値）は 90%程度まで向上する可能性がある。

② 作業員数、作業時間の検証とコスト評価

本実証の作業時間およびコストを目視点検と比較した結果、UAV を用いるよりも目視点検の方がコスト面では優れている結果となった（表 1-5）。しかし、再現性や安全性、データの利活用などについては UAV が優れている。今後 UAV の完全自律飛行や処理の高速化、自動化により、安全かつ効率的な変状把握が可能になると考えられる。

表 1-5 作業時間・作業員数・コストの比較

点検方法	1 回あたり			年間コスト
	時間	作業員数	コスト	
UAV（画像）	64 時間 55 分	7.0 人日	241,500 円	966,000 円
UAV（レーザ）	40 時間 50 分	10.5 人日	362,250 円	1,449,000 円
目視	約 12 時間	2 人日	69,000 円	276,000 円

(4) まとめ

①本実証では、1) SfM 技術により UAV 画像から作成した二時期点群（SfM 点群）の差分を抽出する手法、2) UAV レーザ計測による二時期点群（レーザ点群）の差分を抽出する手法を選定した。

②模擬変状の自動差分抽出により、最も精度が良かったパラメータで、SfM 点群では抽出精度（F 値）が 76.2%、レーザ点群では 68.9%であり、SfM 点群のほうが良い結果を得られた。また、抽出漏れが少ない方を高く評価するようにパラメータの重みを調整した場合では、SfM 点群では抽出精度（F 値）は 79.4%（抽出漏れは 8.9%）、レーザ点群は 71.0%（抽出漏れは 14.4%）となった。適切なパラメータ設定には更なる検討の余地があると考えられる。

③人の巡回による目視と比較すると、目視巡回のほうがコスト面で優れているという結果となったが、一方で再現性や安全性、データの利活用の面では UAV が優れている。今後 UAV の自律飛行や処理の高速化、自動化を進めることで、安全かつ効率的な変状把握が可能になると考えられる。

④植生が繁茂している状況では画像では地表面の状態が把握できないため、その場合は植生を透過して地表面の地形を計測できるレーザが画像よりも優位となる。場所や状況に応じて画像とレーザを使い分けることが効果的だと考えられる。

2. 施設の放射線計測技術実証

(1) 試験の目的

本技術実証試験では、土壌貯蔵施設において、①UAV を用いて放射線測定を行い、歩行サーベイから得られる線量率を再現できること、②汚染源を模擬した標準線源を UAV の放射線測定データから把握できることを実証する。また、①の再現性に影響する因子とその影響度合い、②の把握できる条件や把握を困難にする因子についてまとめ、用いた UAV 放射線検出器の土壌貯蔵施設での適用範囲を提示する。

(2) 実証試験

① 試験区域の選定

予備試験と本試験を行う試験区域を以下の考えに基づき選定した。

予備試験の試験区域は、UAV に積載する放射線検出器の特性（空間線量との相関性）や線量が急激に変化する不連続な放射線場に対する応答特性の高度による違いを把握するニーズに基づき、前者に対しては、18m 四方以上の広く均一な空間線量を示す区域を複数箇所、後者に対しては、造成・未造成箇所を含む区域を1箇所選定した。

本試験の試験区域は、単純な平場、斜面効果による補正が想定される法面、施設周辺の放射線影響が懸念される敷地境界付近の傾向を把握するニーズに基づき、土壌貯蔵施設天端覆土完了区域（天端区域）、堰堤傾斜地区域（法肩区域、法尻区域）を土壌貯蔵施設の工事の進捗も踏まえて選定した。

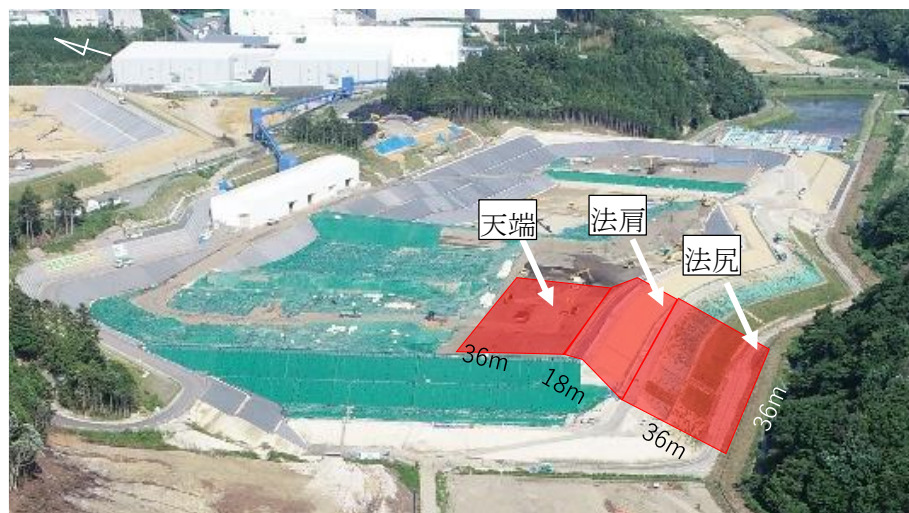


図 2-1 本試験の試験区域（大熊 3 工区土壌貯蔵施設）

②予備試験

UAV に積載する放射線検出器の特性を把握するため、同じ地上測定位置で 5m、7.5m、15m 上空での測定を、測定時間 20 秒の条件で 10 回繰り返し行った（表 2-1 参照）。その結果、標準偏差は概ね 3%程度と小さかったため、測定時間は 20 秒で充分であると判定した。

表 2-1 測定高度別の放射線量繰り返し測定結果（全 10 回）

高度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	平均	標準偏差	
5m	2775	2713	2910	2898	2948	2973	2840	2669	2855	2656	2823.7	114.8	4.07%
7.5m	2405	2354	2354	2431	2461	2386	2495	2409	2400	2340	2403.5	49.1	2.04%
15m	1898	1988	1960	1895	1926	1852	1992	1961	1987	1959	1934.8	44.1	2.28%

③本試験

『UAV を用いて放射線測定を行い、歩行サーベイから得られる線量率を再現する試験』を行った。

UAV に搭載した GPS 測定器により、基準点において GPS 位置座標を計測し、各測定点の座標を決定し、飛行高度 5, 7.5, 15m で UAV 測定を行った。各測定点において、NaI シンチレーション・カウンタ放射線検出器を用い、時定数 10 秒の測定条件で歩行サーベイを実施し、両者の結果を比較し、検量線を導出した（図 2-2 参照）。

検量線の換算式 $y=0.0149x+0.3178$ を適用した UAV 測定の線量換算値と歩行サーベイの測定値との比較を行い、①斜面効果は無視できる、②未除染箇所からの影響で UAV 測定結果と歩行サーベイに差異が生じているが、線量が増加する傾向は同じという結果を得た（図 2-3 参照）。

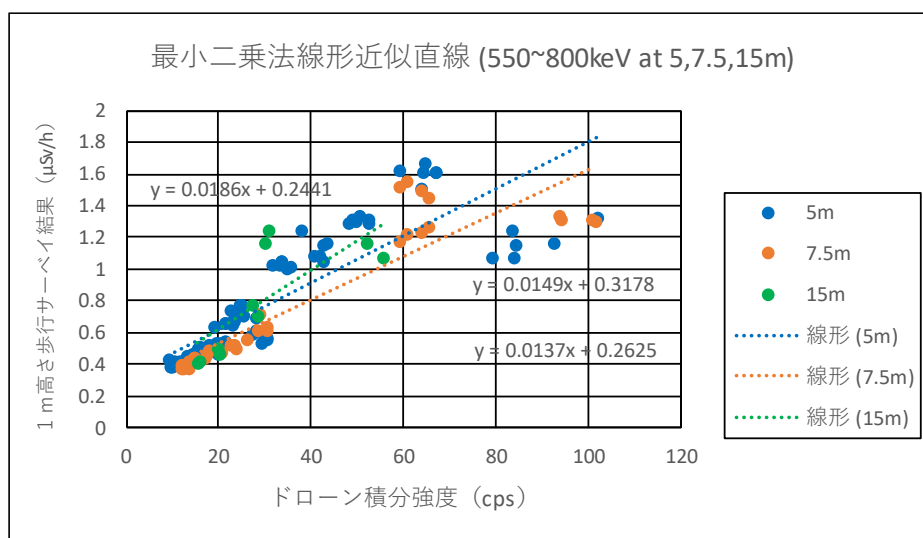


図 2-2 空間線量（1 m高さ）と積分強度（敷地境界除く）

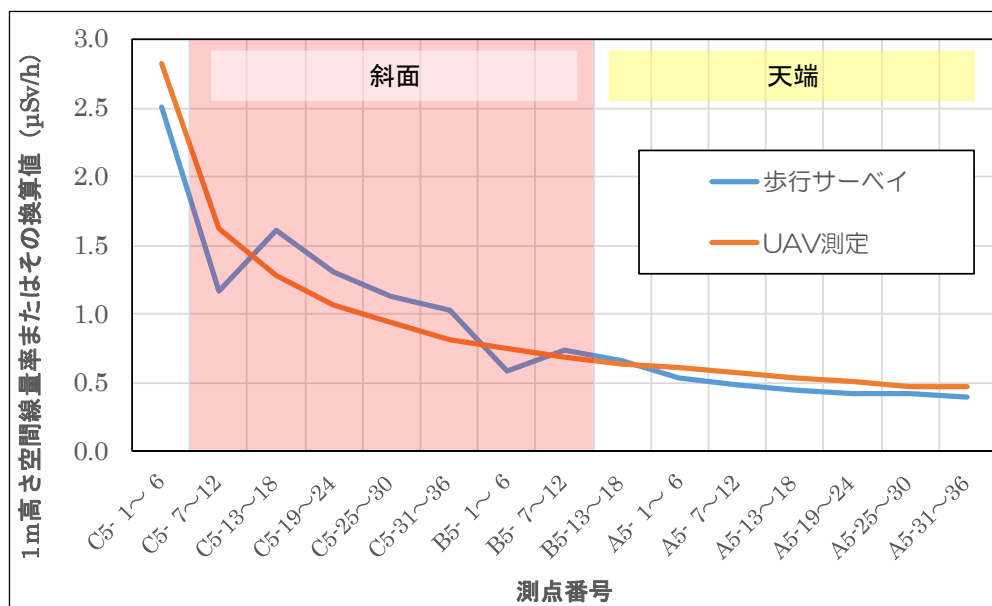


図 2-3 UAV 測定と歩行サーベイの比較と未除染箇所からの影響

『汚染源を模擬した標準線源を UAV の放射線測定データから把握する試験』を行った。

A 区域（天端部）の A5-1 において標準線源を配置し、UAV 測定における線量率換算値が増加傾向にあり線源の判定が可能か、増加傾向が見られず線源の判定が困難かについて、様々な高度条件と標準線源強度の組み合わせ条件に対して確認した。

A 区域の A5-1 地点の例を図 2-4 に示す。この地点は、土壌埋設、覆土、シート掛けが完了した平坦地の最も堰堤より位置した場所で、多少未除染の山林からの放射線影響が観察された地点である。それでも、高度 5m、10MBq の条件であれば、線源の存在の判定が可能であった。

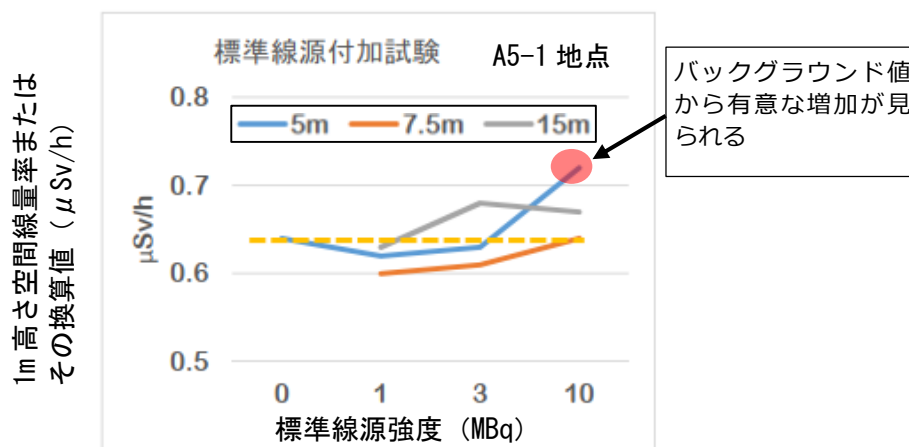


図 2-4 A 区域 A5-1 での空間線量率換算値

(3) 評価・検証

覆土が壊れた箇所での放射線量の異常値を検知できる飛行高度、測定時間を検証し、未除染箇所からの放射線影響が小さければ、飛行高度 5m、10MBq の線源強度で把握できることを確認した。この結果を踏まえ、土壌貯蔵施設の天端部から法肩までの範囲を、異常値の検知できる区域として表 2-2 の評価結果に示した。なお、この評価結果は測定機器の構造（CsI シンチレーターの大きさや鉛遮へいのシンチレーターまでの距離やシンチレーターからの広がりなど）に依存するものと考えられる。

表 2-2 飛行高度、測定時間の区域ごとの評価結果

評価結果※1	代表点	高度	計測時間	備考
◎	天端部	およそ 5m	20 秒	15m 高さの範囲を 9 分割して測定
○	天端部	およそ 7.5m	20 秒	15m 高さの範囲を 4 分割して測定
×	天端部	およそ 15m	20 秒	分割せず
○	法肩付近	およそ 5m	20 秒	15m 高さの範囲を 9 分割して測定
△	法肩付近	およそ 7.5m	20 秒	15m 高さの範囲を 4 分割して測定
×	法肩付近	およそ 15m	20 秒	分割せず
×	法尻付近	およそ 5m	20 秒	15m 高さの範囲を 9 分割して測定
×	法尻付近	およそ 7.5m	20 秒	15m 高さの範囲を 4 分割して測定
×	法尻付近	およそ 15m	20 秒	分割せず

※1 ◎：異常値の把握が非常に良好に行える。高度を上げても、もしくは、異常値が小さくても把握が可能と考えられる
○：異常値の把握が非常に良好に行える。高度を上げると、もしくは、異常値が小さくなると、把握が難しくなる場合も考えられる
△：異常値の把握が行える。ただし、測定結果のばらつきに埋もれてしまう可能性もあるので、繰り返し測定し異常値として抽出する運用が必要と考えられる
×：異常値の把握が行えない

(4) まとめ

- ①UAV 測定の線量換算値と歩行サーベイの線量測定値は、土壌貯蔵施設内の天端部では、良好な相関があった。
- ②高濃度汚染範囲が測定地点に隣接、あるいはごく近くに位置する場合、線量換算値と線量測定値の差異が拡大することを把握する必要があった。
- ③土壌貯蔵施設天端部において 10MBq 以上の汚染源があれば、充分検出できることが確認できた。
- ④中間貯蔵施設の放射線管理で、ホットスポット状の漏えい箇所の検出を目的とする場合は、複数のシンチレーターを整列して配置し、位置分解能を向上させることが可能なマルチ・ディテクターの適用検討も必要となる。

3. 取得した監視上法の管理・提供技術実証

(1) 試験の準備

試験に使用する設備等の準備を行う。表 3-1 に使用予定の設備・装置等を示す。

表 3-1 UAV 関連設備・調整用基準点・検証点設備・装置一覧

名称	主な仕様	数量	単位
写真撮影用 UAV 機体	施設の変状把握技術実証と同機種	1	台
搭載カメラ	施設の変状把握技術実証と同機種	1	台
GNSS 測量機器	施設の変状把握技術実証と同機種	1	台
対空標識	サイズ：45cm×45cm 設置方法：地面に固定	6	台

(2) 実証試験

① 3D画像作成のための UAV 撮影の実施

土壌貯蔵施設の変状発生状況等を関係者で共有するため、大熊 3 工区土壌貯蔵施設全体を対象に 3D 画像作成のための UAV 撮影を 1 回実施した。

② 3Dビューアの比較と選定

Web サイト試作にあたりブラウザでの 3D データの描画に適した主要な 3D ビューア(エンジン)の比較を実施した。開発にあたりライセンス費用、標準 API による解析機能の充実度、搭載可能データの多様性等の観点から評価項目を洗い出し、Cesium を選定した。

③ 土壌貯蔵施設の 3D 画像作成

UAV 画像データに SfM 処理を実施し、3D 画像を作成した。Cesium を用いた Web サイトでの表示に適したデータ形式として、標高タイル形式 (DSM) + オルソモザイク画像を選定した。3D 画像の解像度の差異による土壌貯蔵施設の見え方・表示速度・データ容量を調査した。



図 3-1 中間土壌施設の 3D 画像表示例

④ Web サイトの試作

Web サイトはシームレス視点変更が可能な 3D マップ表示機能、異なる解像度の 3D 画像表示、変状位置のポリゴン表示、線量の情報の重ね合わせ表示機能を搭載した。3D マップ上に仮の変状および線量情報をサンプル表示した図を図 3-2 に示す。

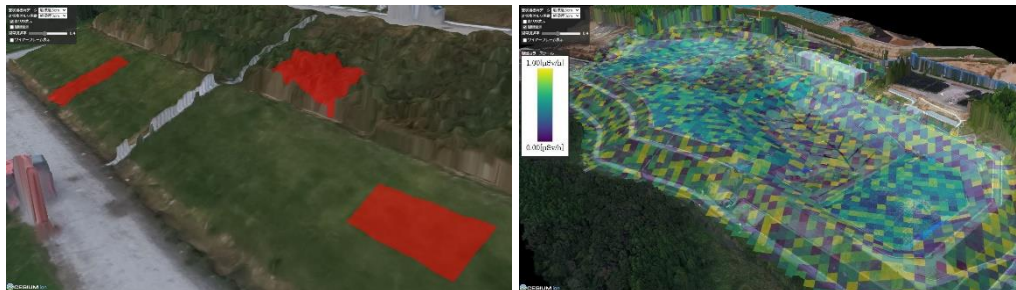


図 3-2 変状のポリゴン・線量メッシュの重畳表示例

(3) 評価・検証

①ビューアに搭載する解像度の検討

実証試験の各解像度の 3D 画像作成時間・データ容量・Web サイトで表示した際の見え方、表示速度、変状・線量情報の見え方から土壌貯蔵施設の 3D 表示に適した解像度を検証し、10cm が適当であると判断した。10cm 解像度の航空写真が撮影できると仮定した場合、撮影枚数を本試験の約 1/11 に抑制することが可能となり、撮影コストの低減、3D 画像作成時間の短縮が見込まれる。

②機能の拡張性

来年度以降の実装検討項目として、土壌貯蔵施設の断面表示・変状ポリゴン選択時の変状斜め写真表示は CesiumAPI を利用することにより、実現可能と考えられる。過去の収集データとの DB 連携を想定した複数時系列データの管理・見せ方、土壌貯蔵施設地中内の線量分布表示機能の実装を検討する。

(4) まとめ

- ①土壌貯蔵施設の変状発生状況等を関係者で共有するために UAV 撮影を実施し、施設の 3D 画像を変状・線量とともに表示する試作 Web サイトを作成した。
- ②費用面や地理院での採用実績から「Cesium」を 3D エンジンとして選定し、ブラウザでの見え方から搭載データ形式を「DSM+オルソモザイク画像」とした。
- ③3D 画像をブラウザで表示した際の解像度の違いによる見え方・表示速度の違い及び変状・線量情報の重畳表示から、3D 画像作成に必要とされる解像度について検討し DSM・オルソモザイク画像の解像度は 10cm が適当であると判断した。
- ④今後、試作サイトの機能拡張に向けて実装が可能な機能・検討が必要と考えられる試作サイトの構成を整理した。