

平成 29 年度
除染土壌等の減容等技術実証事業
報告書

平成 30 年 3 月

中間貯蔵・環境安全事業株式会社

平成 29 年度
除染土壌等の減容等技術実証事業
報告書

平成 30 年 3 月

中間貯蔵・環境安全事業株式会社

リサイクル適正の表示：印刷用の紙にリサイクルできます。
この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料〔A ランク〕のみを用いて作製しています。

目 次

1. 実証事業の目的と概要	1
(1) 目的	1
(2) 実証試験の要件	1
(3) 対象事業分野	2
2. 業務の概要	4
(1) 技術提案書の公募・受付	4
(2) 技術提案書の審査・選定・採択結果の公表	4
(3) 採択者との契約書締結・技術的助言等	4
(4) 技術実証結果の評価	4
(5) 技術報告書等の作成	5
3. 採択技術	6
4. 実証試験の結果	7
4-1. 除染土壌等の減容・再生利用等技術	7
(1) 減容技術	7
①放射性物質を含む焼却残渣の再生利用を想定したセシウム分離促進剤 添加焼却技術の実証（日立造船株式会社）	7
②泡浮遊選鉱による汚染土壌の浄化 （株式会社 AREVA ATOX D&D SOLUTIONS）	8
③磁気分離・マイクロバブル浮選を用いた放射性Cs含有細粒分の分離 による減容技術の検証（鹿島建設株式会社）	9
(2) 再生利用等技術	11
①除染土を布型枠内に固形化し再利用製品の製作技術の実証 （西松建設株式会社）	11
②ジオポリマー法による汚染材のコンクリート系遮蔽材等への有効活用法 の実証（大成建設株式会社）	13
③除染土壌の建設資材化のための品質調整システム技術実証 （株式会社大林組）	15
④焼却灰の放射性セシウム溶出抑制としての粘性土（除染土壌）の活用 （りんかい日産建設株式会社）	16
(3) 減容処理後の濃縮物等の放射線管理に資する技術	18
①空気中を浮遊する放射性セシウムの早期検知技術の確立 （東芝電力放射線テクノサービス株式会社）	18
4-2. 除染土壌等の輸送や中間貯蔵等の関連技術	20
(1) 中間貯蔵・除染・廃棄物処理技術	20

①汚染土の飛翔粉塵拡散分布の可視化モニタリングシステムの提案 （国立大学法人千葉大学）	20
5. まとめと実装に向けた課題	22
（1）採択技術と技術的助言実績	22
（2）個別事業の評価	22
（3）実装に向けた課題	27
付録1 平成29年度除染土壌等の減容等技術実証事業 Web用概要書	
付録2 個別試験結果と評価詳細 Web用報告書	
付録3 各技術のまとめ	

1. 実証事業の目的と概要

(1) 目的

平成 23 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故に由来する放射性物質による環境の汚染に対応するため、「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」が施行された。本法に基づき、国及び地方自治体等は、除染及び汚染された廃棄物の処理等を講じるとともに、国は、除染や汚染廃棄物の処理、除染により生じた除染土壌等の減容化等に関する技術開発を推進することとされた。

また、福島県内において生じた除染土壌等については、今後、中間貯蔵施設に輸送され、その最終処分については、「福島復興再生基本方針」（平成 24 年 7 月 13 日 閣議決定）等において、「中間貯蔵開始後 30 年以内に、福島県外で最終処分を完了するために必要な措置を講ずる」旨が明らかにされている。

これを更に明確化すべく、平成 26 年 11 月に成立した「日本環境安全事業株式会社法の一部を改正する法律」には、その内容が明記され、日本環境安全事業株式会社の社名が「中間貯蔵・環境安全事業株式会社」に変更されるとともに、その業務に、国等の委託を受けて中間貯蔵やこれに関する調査研究・技術開発を行う事業が追加されている。

本事業では、今後の除染や汚染廃棄物の処理及び中間貯蔵開始後 30 年以内の最終処分を見据えた除染土壌等の減容・再生利用等に活用し得る技術について実証試験を行い、その効果、経済性、効率性等について評価・広報することにより、効果的・効率的な除染を実施し、除染土壌等の減容・再生利用等の促進に資することを目的とする。

(2) 実証試験の要件

本事業は、その目的に照らし、以下の要件を満たしている実証試験であって、外部有識者による審査を経たものを対象とする。

- ①除染や汚染廃棄物の処理、除染土壌等の運搬・保管、中間貯蔵、減容・再生利用等を行う作業現場において、具体的な課題が存在し、又は今後想定され、それに応える技術提案であること。
- ②自ら又は第三者により、同じ原理や手法による本事業での実証試験が行われていないこと。
- ③施設内等で行い得るような規模の実証試験を想定するが、除染や汚染廃棄物の処理又は除染土壌等の運搬・保管、中間貯蔵、減容・再生利用技術としての活用が期待できること。なお、この場合の減容・再生利用技術としての活用には、基盤技術の開発を今後 10 年程度で完了するものを含む。
- ④国等が行う他事業において実施中又は終了したものではないこと（科学研究費助成事業（いわゆる「科研費」）を含む）。
- ⑤既に原理が解明されていること。
- ⑥同分野の一般的な方法との比較検討が行われるものであること。

- ⑦実証事業の主たる実施場所を確保していること。
- ⑧実証の実施又はその成果の活用が新たな環境負荷の増大につながらないこと。
- ⑨単に既製の設備備品の購入や試験設備製作を目的とするものではないこと。
- ⑩他の経費で措置されるのがふさわしい設備備品等の調達に必要な経費を、本事業により賄うことを想定しているものではないこと。
- ⑪除染電離則又は除染電離則ガイドラインに準じた放射線被ばく管理が行われていること。

(3) 対象事業分野

①除染土壌等の減容・再生利用等技術

福島県内において除染により生じた除染土壌等の最終処分については、中間貯蔵開始後 30 年以内に、福島県外で完了するために必要な措置を講ずるとされており、これを踏まえ、除染土壌等の減容、再生利用等の技術開発が必要となっている。

除染土壌についてはこれまでに、分級処理、化学処理、熱処理等の減容化に資する技術の実証を行い、焼却灰については洗浄処理（吸着材によるセシウム吸着等の減容化）や熔融等の熱処理による固化・不溶出化に資する技術の実証を行い、その技術的な効果・有効性は確認されてきている（「中間貯蔵除染土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会」を参照）。

今後の課題は、30 年先の最終処分を見据え、更に効果的・効率的な減容・再生利用等に資する技術の探索に加え、これらの処理を施した土壌や焼却灰の建設資材等への再生利用とそのための関係者・関係機関の理解の醸成が必要となる。

(ア) 減容技術

減容技術はこれまでに、分級処理、化学処理、熱処理等の実証を行ってきたが、分級処理では粘土分の割合が高いものについては効果的な処理が難しいこと、化学処理では薬剤の残留等環境面への対処が必要なこと、熱処理では相当量の反応促進剤が必要なこと、また、全ての技術について更なる処理コストの低減や減容処理で発生する濃縮物等の削減が必要である。このため、高濃度の除染土壌等や減容処理後の濃縮物等に対する減容処理技術の開発及び改善、環境対応に資する技術を対象とする。

また、減容処理の効率化等に資する付帯技術（前処理（異物除去等）、水処理（洗浄水、吸着剤、脱水等）、加熱方法（熔融・焼成等）、溶媒・反応促進剤、等）も対象とする。

この他、これまでに本事業で実証が行われていない新たな原理・手法を用いて、更に効果的・効率的に減容処理を行う技術も対象とする。

(イ) 再生利用等技術

減容処理を進めていくためには、除染土壌や焼却灰の減容処理で得られた浄化物を、再生資材や二次製品原料等（以下、再生利用品という。）として再生利用することが必要である。このため、二次製品化技術や再生利用品の粒度調整等の品質確保、均質化に向けた品質管理、添加物による品質調整、品質改良によるセシ

ウム溶出特性の確認等に資する技術を対象とする。

また、これまでに実証された技術等を用いて、自治体や住民等の再生利用に係る関係者・関係機関等と連携し、再生利用の用途開拓や要求品質の検証等までを含めた一連のプロセスの実証も対象とする。

(ウ) 減容処理後の濃縮物等の放射線管理に資する技術

中間貯蔵施設に一時保管された除染土壌等は減容処理を行い、浄化物は再生利用品として再生利用することが検討され、減容処理により生じた濃縮物等は中間貯蔵施設や最終処分場で管理することとなる。

このため、濃縮物等の管理を安全に行うための管理技術、放射線の封じ込め等に資する技術を対象とする。

②除染土壌等の輸送や中間貯蔵等の関連技術

中間貯蔵施設については、今後さらに、施設整備と除染土壌等の輸送が進められる予定であり、除染土壌等の輸送や中間貯蔵施設の施工の効率化等に資する技術を対象とする。

(ア) 除染土壌等の輸送技術

中間貯蔵施設への除染土壌等の輸送の効率化等に資する技術を対象とする。

なお、技術提案に当たっては、仮置場から中間貯蔵施設への除染土壌等の輸送については「中間貯蔵施設への除染土壌等の輸送に係る検討会」や、関係機関からなる輸送連絡調整会議での地元からの意見を踏まえて「輸送基本計画（平成 26 年 11 月）」及び「輸送実施計画（平成 28 年 3 月策定、平成 29 年 12 月更新）」がとりまとめられていることから、これらの内容を踏まえた上で、その必要性、適用箇所、有効性等を示すこと。

(イ) 中間貯蔵・除染・廃棄物処理技術

中間貯蔵施設の施工管理を容易に行い、また、効果的・効率的な除染を実施するため、放射能濃度を効果的・効率的に低減させる技術、作業の効率化や作業者の負担軽減に資する技術、除染土壌等の発生抑制等に資する技術等を対象とする。

また、単純な焼却が困難な処理困難物や放射能濃度が高いことを理由に保管等を余儀なくされている不燃混合物等も存在しているため、これらを環境上適正に処理（減容・再生利用等を含む）する技術を対象とする。

この他、中間貯蔵施設における保管方法についても対象とする。技術提案に当たっては「除去土壌等の中間貯蔵施設の案について（平成 26 年 5 月）」において具体的な構造・方法が示されていることから、これらの内容を踏まえた上で、その必要性、適用箇所、有効性を示すこと。

2. 業務の概要

今後の中間貯蔵施設事業や除染土壤等の減容等に活用しうる技術の効果、経済性、安全性等を評価し、成果を実際の事業に実装することを目的として、以下の業務を行った。

(1) 技術提案書の公募・受付

除染土壤等の減容等技術実証に係る技術提案について平成 29 年 4 月 3 日から 5 月 10 日まで公募を行った。公募した技術分野は下記のとおりである。

①除染土壤等の減容・再生利用等技術

(ア) 減容技術

(イ) 再生利用等技術

(ウ) 減容処理後の濃縮物等の放射線管理に資する技術

②除染土壤等の輸送や中間貯蔵等の関連技術

(ア) 除去土壤等の輸送技術

(イ) 中間貯蔵・除染・廃棄物処理技術

(2) 技術提案書の審査・選定・採択結果の公表

応募された 19 件の技術提案について、中立的・公平かつ専門的知見を有した立場から審査・選定を行い、採択結果の公表を行った。

特に審査・選定の基準として、有効性が科学的知見からも証明出来るか、現地条件（対象規模、ライフライン状況、作業状況）への適合性・汎用性があるか、費用対効果に優れているか等を考慮した。その、審査・選定においては、外部有識者（6 名）から構成される委員会を開催し、9 件の実証対象技術を選定して頂いたうえで対象事業を決定した。

(3) 採択者との契約書締結・技術的助言等

採択した提案書について、その申請者（以下「事業者」という。）と実施計画を策定した。また、策定した実施計画を基に事業者から提出された見積書の金額が予定価格の範囲内であればその金額をもって契約金額とし、契約書を締結した。

実施計画策定への助言に当たっては、現地条件（対象規模、ライフライン状況、作業状況）への適合性・汎用性があるか、次項（4）に示す評価項目を適切に調査・検証した。

事業の実施に当たっては高い専門的知見を有した立場から検証・助言を行うとともに、現地調査として環境省担当官と事業実施場所へ同行し、採択した事業の実利用に向けた課題抽出及びその対策の検討を行った。

(4) 技術実証結果の評価

実証事業の終了後、事業者に成果報告書を提出させるとともに、取りまとめた結果をもとに、下記の項目について既存技術などと比較検証し、評価を取りまとめた。

- ・効果（除染効果、減容率 等）

- ・コスト（単位面積当たりのコスト、単位量当たりのコスト 等）

- ・作業人工、作業速度 等
- ・安全性評価（作業に伴う被ばく量評価 等）
- ・その他必要と認められる項目

評価に当たっては、上記（２）の委員会の外部有識者への個別ヒアリングを実施するとともに、（２）の外部有識者からなる委員会を開催し、その助言を得ながら行った。

（５）技術報告書等の作成

技術実証事業について、上記（４）で評価を行った結果を取りまとめるとともに、過去の技術実証事業の成果等を踏まえ、技術報告書の作成を行った。なお、（４）に掲げる項目のほか、実証事業の実用化にあたっての課題の抽出及びその他の課題の抽出についても検討の上、報告書に記載した。

なお、本報告書は、以下の構成としている。

- ①本文：中間貯蔵・環境安全事業株式会社が実施した業務全体の遂行に関して取りまとめた事項で、上記（１）～（４）項までの業務内容をまとめたもの。
- ②付録１：除染土壌等の減容等技術実証事業を受託した各事業の概要（実施内容、結果）を各事業者が関係者の助言を得てまとめたもので、これで事業の全体概要が把握できる。
（別途、「Web 用概要書」として JESCO ホームページで公表）
- ③付録２：各事業者が関係者の助言を得て実施した事業内容の骨子をまとめたもので、これで事業内容の要旨が把握できる。
（別途、「Web 用報告書」として JESCO ホームページで公表）
- ④付録３：中間貯蔵・環境安全事業株式会社が各事業の評価結果を一覧表にまとめたもの。

3. 採択技術

以下に採択した9件の事業の一覧を示す。

表1 平成29年度除染土壤等の減容等技術実証事業の採択技術

No.	事業分野	対象	実証テーマ名	所属機関名
1	①除染土壤等の減容・再生利用等技術	減容技術	放射性物質を含む焼却残渣の再生利用を想定したセシウム分離促進剤添加焼却技術の実証	日立造船株式会社
2			泡浮遊選鉱による汚染土壤の浄化	株式会社 AREVA ATOX D&D SOLUTIONS
3			磁気分離・マイクロバブル浮選を用いた放射性Cs含有細粒分の分離による減容技術の検証	鹿島建設株式会社
4		再生利用等技術	除染土を布型枠内に固形化し再利用製品の製作技術の実証	西松建設株式会社
5			ジオポリマー法による汚染材のコンクリート系遮蔽材等への有効活用法の実証	大成建設株式会社
6			除染土壤の建設資材化のための品質調整システム技術実証	株式会社 大林組
7			焼却灰の放射性セシウム溶出抑制としての粘性土（除染土壤）の活用	りんかい日産建設株式会社
8		減容処理後の濃縮物等の放射線管理に資する技術	空气中を浮遊する放射性セシウムの早期検知技術の確立	東芝電力放射線テクノサービス株式会社
9	②除染土壤等の輸送や中間貯蔵等の関連技術	中間貯蔵・除染・廃棄物処理技術	汚染土の飛翔粉塵拡散分布の可視化モニタリングシステムの提案	国立大学法人 千葉大学

4. 実証試験の結果

各事業者から提出された成果報告書の内容を以下に取りまとめた。

4-1. 除染土壌等の減容・再生利用等技術

(1) 減容技術

①放射性物質を含む焼却残渣の再生利用を想定したセシウム分離促進剤 添加焼却技術の実証

(日立造船株式会社) (付録 1-1 及び付録 2-1)

(ア) 試験の目的

中間貯蔵施設に搬入される除染廃棄物等の焼却処理により発生する焼却主灰中の放射性 Cs 濃度を低減し、土木資材等に再資源化することが検討されているため、Cs 分離促進剤を用いて焼却処理の段階で焼却主灰中の放射性 Cs 濃度を効率的に減容化するシステムを構築する。

(イ) 試験の内容

焼却対象物に非放射性 Cs 及び Cs 分離促進剤を添加し、ベンチスケールでの焼却試験、ラボ試験での焼却主灰洗浄試験、テストピースを用いた腐食ラボ試験を実施した。

(ウ) 試験の結果

- ・焼却試験においては、Cs 分離促進剤の添加により、Cs 除去率は最大 81.6%となり、Cs の揮発及び焼却主灰中 Cs の水溶性化の促進が確認された。
- ・焼却主灰洗浄試験においては、主灰洗浄試験で Cs 除去率は 30%程度となることが確認された。
- ・腐食試験においては、Cs 分離促進剤を添加した焼却処理においても、一般的な火格子温度である 450℃以下では問題はないことが確認された。

(エ) 評価結果

- ・200t/日の焼却設備、20t/日の熱処理施設、8.13t/日の飛灰洗浄・Cs 濃縮固定化施設を想定し、建設費、運転及び維持管理費の処理コストを基に試算した結果、ごみトン当たりの処理費用は合計で 10.8 万円となった。ただし、本実証試験においては、飛灰洗浄は実施していないが、過去の実験データから飛灰洗浄施設を想定した。
- ・上記施設における空間線量率をシミュレーションした結果、コンクリート壁などによる遮蔽により、作業員の被ばく線量は、0.1～2 mSv/年程度と試算した。

(オ) まとめと課題

(a) まとめ

- ・Cs 分離促進剤を添加した焼却処理及び焼却主灰洗浄処理が、焼却主灰中の Cs 低減に有効であることを確認した。
- ・Cs 分離促進剤添加による火格子の腐食への影響はないことを確認した。

- ・実機ベースのトータルシステムの検討により、物質収支、処理コスト、作業員の被ばく線量を評価し、本技術による減容化の有効性、安全性を確認した。

(b) 課題

- ・焼却主灰や熱処理生成物の放射性 Cs 濃度を 8,000 Bq/kg 以下に処理することを目標とした場合、焼却対象物の放射性 Cs 濃度、灰分、Cl 濃度等の変動に応じて適正な運転が必要となる。また、Cs 分離促進剤の種類及び添加量については、Cs 除去率、コスト、ハンドリング性などを総合的に判断して選定することが必要となる。
- ・ラボ試験では腐食は無いが、最終的な評価には、実機焼却炉において火格子の交換頻度への影響を検証する必要がある。
- ・焼却主灰及び熱処理生成物の再生利用にあたり、用途に応じて環境基準や土木構造物の要求品質を満足することの検証が必要である。
- ・飛灰洗浄、Cs 濃縮・固定化処理施設の維持管理作業等、被ばく線量が高くなる恐れがある場合は、遠隔監視や自動化技術等の導入などが課題として挙げられる。

②泡浮遊選鉱による汚染土壌の浄化

(株式会社 AREVA ATOX D&D SOLUTIONS) (付録 1-2 及び付録 2-2)

(ア) 試験の目的

放射性 Cs によって汚染された土壌 (8,000Bq/kg 超) について、熱処理や酸による化学処理でなく、フランスで開発された微粒子泡浮遊選鉱技術を用いた試験装置で実際の除去土壌で試験を行い、試験装置の効率及び実用化にあたっての課題を抽出し、その対応策を検討・評価する。

(イ) 試験の内容

異なる 10 種類の除去土壌から、予備試験を行い農地 1 種類、宅地 2 種類、計 3 種類の土壌を選定した。これらの土壌で泡浮遊選鉱試験装置を用い「界面活性剤 (以下「TTAB」という。) の投入量」と「浮遊選鉱時の泡高さ」をパラメータとし、選別試験を実施する。

土壌 1 種類につき 4 回ずつ試験を実施し、試験前後における土壌の重量や放射能濃度等について測定し、除染効果や減容効果等について評価するとともに、実用化にあたっての条件等について検討する。

(ウ) 試験の結果

泡浮遊選鉱にて粒径ピーク 7~8 μ m の細かな粒子が回収できた。宅地土壌において、TTAB 投入量 0.21%~0.8%の条件で、カラムに投入した土壌に対する泡浮遊選鉱での Cs 抽出率が約 40%という結果が得られた。

(エ) 評価結果

減容率は 1/3.6~1/7.4。除去土壌中の全 Cs 放射能に対して泡浮遊選鉱による抽

出率 41.2～44.8%であった。目標の減容率 1/7、Cs 抽出率 90%に達成しなかった。原因は、浮遊選鉱で選別できない 75 μ m 以上の粒子に粘土粒子が付着しているためと考えられる。

また、処理コストは 1 時間に 100m³ を処理した場合、運転に係る人件費も含め 9,520 円/t と試算された。

(オ) まとめと課題

(a) まとめ

泡浮遊選鉱に適さない土質の土壤があることも本実証試験により確認できた。そのため、将来的に装置のスケールアップをした際にも、土壤の処理適性を素早く確認するための予備試験が必要であると考えられる。

(b) 課題

- ・除染効率や Cs 抽出率をさらに向上させるため、浮遊選鉱可能な粘土量を増加させることや、土壤懸濁液中の粘土を最大限分散させることが課題として上げられる。対策として、懸濁液に超音波照射を行い粘土の分散を促進させること等が考えられる。
- ・異物除去や分級処理が一切されていない除去土壤を対象とした場合、土壤乾燥や土壤の粉砕が対策として必要となる。土壤の乾燥は、石に付着している粘土を石からはがし、ふるいによって得られる粘土量を増やす効果に加え、ふるい作業をより効率的、効果的にすることができる。これらの対策の有効性はスケールアップ試験（パイロット規模での試験）で有効性の検証が可能である。

③磁気分離・マイクロバブル浮選を用いた放射性 Cs 含有細粒分の分離による減容技術の検証

(鹿島建設株式会社) (付録 1-3 及び付録 2-3)

(ア) 試験の目的

減容化の対象となる 2～8 万 Bq/kg の除去土壤（環境省による分類 C）は、その 8 割超が農地の土壤であるため、微粒分の多い粘性土と想定される。これらの粘性土に含まれる粘土のうち、放射性 Cs は磁場内で磁化される性質を持つ 2:1 型粘土に吸着していることが知られている。そこで、近年開発された磁気分離装置を用いて 2:1 型粘土のみを選択して捕捉し、さらにマイクロバブルによる浮選を行うことでこの粘土を効率よく回収し、減容化するシステムを構築する。また、大型の実用化システムに向けた具体的な課題を抽出した。

(イ) 試験の内容

(磁気分離)

市販の 2:1 型粘土を用いた予備試験を実施し、流速や磁気フィルターの違いによる最大捕捉可能量と捕捉率の変化等の基礎的データを獲得した上で、福島県内の農地から採取した土壤 5 種を用いた磁気分離試験を行い、捕捉した土粒子 (2:1

型粘土）と通過した土粒子（1:1 型粘土）の放射性 Cs 濃度等を測定し、選択的な分離の効果を確認した。

（マイクロバブル浮選）

微細粒子と気泡を結合させる薬剤を泥水に添加することにより、分離が難しい 20 μ m 未満の固体分を泥水から回収する試験を実施した。磁気分離と同様に福島県の農地から採取した土壌 5 種を用いた。

（ウ）試験の結果

（磁気分離）

- ・磁気分離（磁場強度 5T）による 2:1 型粘土の捕捉率の平均値は、20 μ m 未満で 62%、20～75 μ m で 76%であった。
- ・通過した土の放射能濃度の低減を示す除去率（（投入土壌濃度－通過土壌濃度）÷投入土壌濃度）は最大 67%（土壌 C の 20～75 μ m）が得られた。

（マイクロバブル浮選）

- ・微細土粒子の浮上分離のためには、薬剤量：200～300ppm、原水液固比：100～200 が適当であることを確認した。ただし、前処理として薬剤投入後 5 分間静置し凝集沈殿させ、その上澄み液をマイクロバブル浮選処理することを条件とした。
- ・起泡剤にはノニオン系界面活性剤と低級アルコールの混合物が、捕収剤にはカチオン系界面活性剤が適当であった。

（エ）評価結果

- ・75 μ m 未満の土壌をサイクロンにより 20 μ m で分級後、20 μ m 以上及び未満の各々の泥水へ磁気分離を実施し、次いで 20 μ m 未満の磁気分離後の通過泥水にマイクロバブル浮選を組み合わせた減容化システムを想定すると、処理コストは 8.7 万円/m³と試算できた。
- ・本システムによれば、75 μ m 未満の土壌 C の 153 万 m³のうち、再生利用可能な 8,000Bq/kg 以下となる土壌は 52 万 m³が得られ、減容率 34%と試算された。

（オ）まとめと課題

（a）まとめ

- ・放射性 Cs を強く吸着する 2:1 型粘土の磁気フィルターでの捕捉分離可能な磁気フィルター仕様、泥水流速、最大捕捉量（乾燥重量）を把握した。
- ・マイクロバブル浮選における使用薬剤種類及び添加率、液固比、必要な前処理等を明らかにし、分離が難しい 20 μ m 未満の固体分を泥水から回収する技術として有効であることを確認した。

（b）課題

（磁気分離）

- ・有機物に起因して 2:1 型粘土が 1:1 型粘土等と凝集・団粒化しているため、2:1 型粘土のみを（放射性 Cs のみを）高濃度に捕捉することが難しい。よって、

有機物による団粒を事前に解砕するための前処理技術（アルカリ洗浄、ボールミル等）の確立が課題である。

- ・実機化する場合、磁気フィルターに捕捉された土粒子を離脱させ回収するより効率的な方法について、具体的仕組みの実証が課題として残る。

（マイクロバブル浮選）

- ・マイクロバブル浮選の性能発揮に不可欠な薬剤（起泡剤＋捕収剤）の及ぼす影響（BOD 増加など）についての詳細な確認とその対策検討が必要である。
- ・処理水を循環利用することによる、薬剤や土壌に含まれる塩類等の濃縮の影響と対策検討（放流頻度等）が必要である。

（実用化システム）

- ・本実証事業の結果に基づいて構築したが、現状では主要装置の台数が多い。実用化においては主要装置のさらなる大型化や集約化が課題となる。
- ・磁気分離に関してより高い減容化を実現するには、原土放射能濃度として例えば 4 万 Bq/kg 未満のみを対象とする、捕捉し易い 20～75 μ m のみを対象とすることなどが考えられる。このような対象土壌の絞り込みの検討も重要である。

（２）再生利用等技術

①除染土を布型枠内に固形化し再利用製品の製作技術の実証

（西松建設株式会社）（付録 1-4 及び付録 2-4）

（ア）試験の目的

除染土壌を公共工事等へ再生利用する際、運搬・施工時だけでなく将来の長期にわたり、土壌に含まれる放射性 Cs の溶出・飛散リスクが懸念される。

そこで、除染土壌に固化材、調整水を加えスラリー状にし、遮水性が高い高強度の布型枠に注入・固形化することで環境中への放射性 Cs 拡散リスクを低減できる布型枠製品の製作技術の実証を行った。

（イ）試験の内容

製作実証試験のための管理基準値の設定、配合試験の基礎データを予備試験として取得し、次に室内土質試験として、土壌の物性を把握し、固化材選定後、スラリーの配合試験を実施した。引き続き、布型枠製品の製作実証試験（放射性 Cs 土壌試験、通常土壌試験）として、布型枠製品化の出来形、漏水量等や性状の異なる土壌を使用した製品の強度、及び放射性 Cs による環境影響の測定・評価を実施した。

（ウ）試験の結果

- ・実証プラント設備を使用して、放射性 Cs 土壌及び通常土壌に固化材及び調整水を加えスラリー化し、布型枠に注入・固形化する布型枠製品（再生利用製品）の製作技術を確認した。課題は残るものの一貫製作の妥当性は確認できた。
- ・布型枠製品の出来形や強度は、土壌の物性、スラリーの流動性及び施工方法によりバラツキが生じたが、その出来形は管理基準値を満足した。

- ・放射性 Cs 土壌試験では、目標強度を得るために固化材添加量が多くなりスランプ値が管理基準値内の下限値近傍にあり、スラリーの注入・充填性が低下した。その対処のため、計画配合より調整水量が増え、結果的に目標強度 $1,500\text{kN/m}^2$ に至らなかった。
- ・通常土壌試験では一般的な特殊土用固化材を選定し、計画通りの配合により、 500 、 $1,000$ 、 $1,500\text{kN/m}^2$ 各々の目標強度を達成することができた。
- ・福島県採取土壌は著しく不均質であった。布型枠製品の目標強度を得るためには、試験に必要な土壌を予め全量確保し、均質化した上で土質試験、固化材の選定等を実施し、計画配合に沿って製品化すべきであった。
- ・放射性 Cs 土壌（約 $3,000\text{Bq/kg}$ ）を使用した布型枠製品に対して、覆土試験による遮蔽効果を表面線量率で確認した結果、 20cm の厚さであった。また、 28 日間水中養生した結果、放射性 Cs の水中溶出は見られず、製品の封鎖性を確認できた。

（エ）評価結果

- ・盛土構造物とした場合、従来工法と比べ約 4 倍のコストとなるが、放射性 Cs の飛散・溶出がない固形物となり、運搬、施工、供用時における住民の安全・安心が得られる。布型枠製品を盛土構造物に再生利用する際の製作・施工コストは $54,000$ 円/ m^3 。
- ・除染土壌に対して固化材を必要とすることからボリュームは増加するものの、布型枠内に除染土壌を封じ込めできるメリットがある。
- ・布型枠製品の製作における作業員の被ばく量は、放射性 Cs 濃度が $8,000\text{Bq/kg}$ において 0.91mSv/年 、放射性 Cs 濃度が $50,000\text{Bq/kg}$ において 3.94mSv/年 であり、職業被ばくの線量限度 20mSv/年 を下回る。

（オ）まとめと課題

（a）まとめ

- ・実証プラント設備を使用して、放射性 Cs 土壌及び通常土壌に固化材及び調整水を加えスラリー化し、布型枠に注入・固形化する布型枠製品（再生利用製品）の製作技術を確認した。
- ・強度については土壌の種類・物性に大きな影響を受けるが、スラリー化に際して適切な固化材選定・配合設計により、布型枠内の土壌強度 qu_{28} （材令 28 日）を $1,500\text{kN/m}^2$ 以上に設定できることを確認した。
- ・福島県採取土壌は著しく不均質であった。布型枠製品の目標強度を得るためには、試験に必要な土壌を予め全量確保し、均質化した上で土質試験、固化材の選定等を実施し、計画配合に沿って製品化すべきであった。
- ・放射性 Cs 土壌（約 $3,000\text{Bq/kg}$ ）を使用した布型枠製品に対して、 28 日間水中養生した結果、放射性 Cs の水中溶出は見られず、製品の封鎖性を確認できた。
- ・布型枠製品を盛土構造物に再生利用する場合、従来工法と比べ約 4 倍のコス

トとなるものの、放射性 Cs の飛散・溶出がない固形物となり、運搬、施工時及び供用時における住民の安全・安心が得られる製品が確認できた。

(b) 課題

- ・高強度の構造物を目標として強度設定したが、今後は再生利用先の必要強度に応じた目標強度の設定を検討する必要がある。
- ・物性値のバラツキが大きい土壌を使用する場合は、対象土壌を均質化したうえで複数回の土質試験を行い土壌の性状の把握を行う必要がある。
- ・製品製作時には固化材添加量が多い場合や土壌物性によってはスラリー流動性が急激に低下する場合があります、流動性が確保できるように留意する必要がある。

②ジオポリマー法による汚染材のコンクリート系遮蔽材等への有効活用法の実証

(大成建設株式会社) (付録 1-5 及び付録 2-5)

(ア) 試験の目的

福島県内の可燃性除染廃棄物の焼却処理により発生した飛灰・主灰を、ジオポリマーの材料として有効活用する技術の適用性について実証した。すなわち、性状の異なる放射性飛灰・主灰をジオポリマーとして固化させるための配合、固化体の性能や安定性等を確認し、得られた知見から本技術の実用性、経済性、安全性について検討した。

(イ) 試験の内容

試料・材料となる各種飛灰・主灰の性状確認試験を実施し、ジオポリマーに必要な元素等の含有量を把握した。次いで、ジオポリマー固化体として所定の強度を確保できる配合を見出すための試験を行った後、適当な配合にて製作したジオポリマー固化体の性能や安定性（重金属・Cs 溶出、中性化等への抵抗性、塩化物イオン等の影響）を確認した。最後に、ジオポリマーによる実規模の貯蔵容器（容量 1m³）の製作性及び放射線遮蔽性能等を確認した。

(ウ) 試験の結果

- ・放射性飛灰・主灰は非放射性飛灰・主灰に比べ、ジオポリマー固化に必要な Si、Al を多く含有している。ただし、ジオポリマー固化させるためには石炭灰の添加が必須である。
- ・40℃加温の 1 週間養生の条件では、飛灰・主灰が約 30%及び石炭灰が約 30%（その他水ガラス、水酸化ナトリウム等）の配合で目標強度を達成可能であった。また、常温での 1 週間養生の条件では、飛灰・主灰が約 6%及び石炭灰が約 56%（その他水ガラス、水酸化ナトリウム等）の配合で目標強度以上を達成可能であった。なお、常温養生で飛灰・主灰の配合率をより上げるためには、高炉スラグを新たに配合することが有効であることが分かった。
- ・一般環境化において 30 年間で厚さ 5cm が中性化することに相当する中性化促進環境下での中性化速度係数 12.7mm/√週¹（コンクリートにおける上限値）と

比較し、ジオポリマー固化体の中性化の進行は十分遅い。

- ・5%硫酸への浸漬試験の結果、モルタル（W/C=50%、OPC：標準砂=1：3）の4週間の質量減少量の約30%に対し、ジオポリマー固化体は約10%であり、非常に耐酸性が強い。
- ・乾燥収縮は加温養生のジオポリマー固化体（非放射性灰を使用）の場合で約360 μ であり、建築物の標準設計値800 μ （JASS5）と比較して十分に小さい。但し、常温養生のジオポリマー固化体の場合、収縮ひずみはやや大きくなる。
- ・非放射性灰と比較して放射性灰を用いた場合には、ジオポリマー固化体の塩化物イオンの溶出量が非放射性灰使用時より少ないため、腐食発生限界塩化物イオン濃度が1.2kg/m³以下であり、鉄筋の腐食に影響しない。
- ・飛灰・主灰を用いたジオポリマー貯蔵容器（内寸1m³、厚さ0.15m）の製作は可能であった。また、貯蔵した放射性物質の表面線量率を約90%低減させる遮蔽性能を有す。

（エ）評価結果

- ・40℃加温養生を条件として放射性飛灰・主灰を1m³ジオポリマー容器1個あたり約30%（682kg）混入可能と想定し、貯蔵容器を1日10個、年間3,000個を製作できる設備の生産能力とすると、放射性飛灰・主灰を年間2,046tの再利用が可能である。
- ・実機製造プラントにおける飛灰・主灰を用いたジオポリマー製容器の製作費は約38.5万円/容器となり、コンクリート製容器に比べ約1.6倍と割高となった。
- ・取り扱う飛灰・主灰の放射能濃度を10万Bq/kgとした場合、実機製造プラント内の評価位置の空間線量率を試算すると、高線量と想定される範囲内でも最大で年間4.2mSvとなり、電離則の年間線量限度以下である。
- ・50万Bq/kgの飛灰・主灰を貯蔵した場合でも、ジオポリマー製容器の表面線量率は12.5 μ Sv/hと算定された。
- ・貯蔵終了後（30年後）には含有する放射能灰の放射能濃度が半減するため、ジオポリマー製容器を粉砕処理して路盤材等として使用できる可能性がある。

（オ）まとめと課題

（a）まとめ

- ・福島県内の廃棄物を焼却した放射性飛灰・主灰は福島県外の非放射性飛灰・主灰に比べてジオポリマーに必要なSi、Alの含有量が多く、ジオポリマーの製作が可能である。但し、石炭灰の添加を要する。
- ・放射性飛灰・主灰の配合試験を行い、40℃加温の場合に約30%、常温の場合に約6%の飛灰・主灰の配合量で目標強度18N/mm²を達成できた。また、常温固化及び目標強度を達成しつつ、飛灰・主灰の配合率を上げるためには高炉スラグを追加配合することが有効であった。
- ・ジオポリマー固化体の性能や安定性は、コンクリート固化体と比較しても優位性があることを確認した。

- ・実際にジオポリマーによる貯蔵容器を製作できることを実証した。

(b) 課題

- ・使用する飛灰・主灰の性状や配合・養生の条件によって固化や強度発現状況が異なることが懸念されるため、安定した品質の容器製作の実現には多種多様な条件での性状分析や配合検討が必要である。
- ・ジオポリマー製容器の長期安定性については、乾燥収縮によるひび割れが懸念されるため、その対策を検討する必要がある。また、容器の段積み時、衝撃時及び地震時を想定した耐荷性等の確認の余地が残っている。
- ・中間貯蔵期間終了後のジオポリマー製容器の再利用については、使途に合わせて必要な試験を行い、その適用性を検討する必要がある。
- ・経済性については、主に材料コストがコンクリート容器製作と大きく異なる部分であり、材料のコストダウンに向けた検討が課題となる。
- ・製造時の安全性という観点から、使用する薬剤（特に水酸化ナトリウム）や灰の放射能濃度に応じた人力作業の排除（自動化）、粉塵飛散防止策の強化、遮蔽体の構築等の具体化が課題となる。

③除染土壌の建設資材化のための品質調整システム技術実証

（株式会社大林組）（付録 1-6 及び付録 2-6）

(ア) 試験の目的

盛土等の土工事に用いる土壌はその性状が変化する場合、締固め試験等の各種試験が必要となるため、土壌を一定の品質にして出荷することが現場の負担軽減と安定した施工品質にとって重要である。

そこで、細粒分含有率及び強度と相関の高い含水比に着目し、従来の土質試験に代わり、自動測定可能な含水比測定装置を用い、除染土壌の含水比測定から適切な配合までを自動的に行って利用目的に応じた安定した品質の混合材（砂質土＋粘性土）を製造する技術の実証を行った。

(イ) 試験の内容

砂質土と粘性土を組み合わせた混合材 24 ケースの含水比とコーン指数を測定して相関関係を把握し、必要なコーン指数（グループ B：第 2 種、第 3 種建設発生土相当、コーン指数 800kN/m^2 あるいは 400kN/m^2 ）を満足する目標合成含水比を求め、配合割合計算手法を確立する。試験装置を用いて、目標合成含水比の混合材を製造できるか、また、製造した混合材が必要なコーン指数を満足するかを確認した。

(ウ) 試験の結果

- ・砂質土と粘性土のいずれの組合せにおいても、合成含水比が小さくなる（砂質土系が多くなる）とコーン指数が大きくなることがわかった。
- ・最も強度を得られにくいケースの結果を安全側の値であると判断して、本試験で製造する混合材の目標合成含水比を 24.5%と設定した。

- ・砂質土より粘性土の方が RI 計測含水比にバラツキがあった。RI 含水比測定装置の測定結果は、設置位置の影響を受けるため、設置位置に注意を要する。
- ・製造した混合材は、目標としたグループ B 相当のコーン指数 800kN/m^2 以上の値が得られた。土の含水比を基にした配合割合計算によって所定の品質を満足する混合材の製造が可能であることを確認した。

(エ) 評価結果

- ・連続化には課題があるが大型化は可能であり、本試験装置を大型化することで、施工量 277t/日 が実現できる。この場合の混合材製造コストは、 994円/t 。
- ・グループ A (第 1 種建設発生土相当) を土質改良の材料として活用できるため、土質改良のための固化材の購入量を削減できる。
- ・グループ C (第 4 種建設発生土相当、コーン指数 200kN/m^2 以上) をグループ A と混合することで再生利用に適したグループ B にでき、グループ C と固化材を削減できる。

(オ) まとめと課題

(a) まとめ

- ・土の合成含水比とコーン指数に相関関係があることを明らかにした。
- ・混合材の目標合成含水比を任意に変更することが可能であり、様々な強度の混合材を製造することが可能である。
- ・いずれのケースも目標のコーン指数 800kN/m^2 以上の値が得られたが、最も安全側の合成含水比の値を目標値に採用したためであり、実運用においては、目標合成含水比をより大きな値に設定できる可能性がある。

(b) 課題

- ・提案技術によりグループ D (泥土、コーン指数 200kN/m^2 未満) をグループ C まで向上させ、その後、薬剤添加などで強度を向上させ再生利用に供することができれば、さらなる減容化につながる。
- ・大型化する際、ホッパー容量を増やす必要があるが、その場合、1 回に測定する土の量が増えるため、含水比の測定精度の確認を行う必要がある。
- ・混合材の製造量を増加させるには、連続処理する必要があるが、その際、リアルタイムの含水比計測に加え、砂質土と粘性土の 2 種類の試料の含水比の変化に追従可能なシステムを構築する必要がある。また、処理速度に応じた土の供給方法についても検討を行う必要がある。

④焼却灰の放射性セシウム溶出抑制としての粘性土（除染土壌）の活用

(りんかい日産建設株式会社) (付録 1-7 及び付録 2-7)

(ア) 試験の目的

放射性 Cs を含む廃棄物等の焼却処理で発生する飛灰と土壌の分級洗浄で発生する高含水比粘性土 (以下「軟泥」という。) を混合したものにセメントを添加し、高圧フィルタープレス機で脱水固化処理をおこない、脱水固化碎石を製作する。

飛灰には水溶性の放射性セシウム（以下「Cs」という。）が多く含まれており、軟泥には放射性 Cs 吸着性がある。

そこで、軟泥を飛灰の放射性 Cs 溶出抑制材として活用することにより、放射性 Cs が溶出しにくい減容化された脱水固化碎石の製作を実証した。

さらに、この脱水固化碎石が建設用資材としての品質と安全性を満たしていることも実証した。

（イ）試験の内容

飛灰及び軟泥の物性確認と軟泥の放射性 Cs 吸着性の確認を行った。その後、脱水固化碎石の放射性 Cs 濃度及び放射性 Cs 溶出量や、脱水固化処理で発生したろ水の放射性 Cs 濃度を確認した。

また、脱水固化処理における物質収支の確認をし、脱水固化碎石製作コストと再生利用等に関わる費用対効果を検討した。

（ウ）試験の結果

飛灰と軟泥の乾土重量当たりの混合率 50 : 50 の供試泥にゼオライトを 8%/ds（乾基準）混合した試料にセメント（20、40、60%/ds）を添加し、高圧フィルタープレス機で、脱水固化処理することを条件として、

- ・脱水固化碎石に捕捉された水溶性の放射性 Cs は σ 28（材令 28 日）以降であれば、脱水固化碎石から放射性 Cs の溶出はなかった。
- ・飛灰に含まれる水溶性の放射性 Cs は、その殆どが脱水固化碎石に捕捉され、ろ水は排水基準（ ^{134}Cs 濃度 (Bq/L)/60 + ^{137}Cs 濃度 (Bq/L)/90 $\leq$ 1）を満たした。
- ・環境負荷として、1 日 4 回の乾湿繰り返しを材令 91 日まで行った場合でも、放射性 Cs 溶出率は、有姿攪拌では、ND（検出下限値未満）となった。
- ・環告 46 号溶出試験の溶媒水の pH を 4~12 に変化させた pH 変化試験では、有姿攪拌では ND となった。
- ・脱水固化碎石はリサイクル基準を満たしており、道路用盛土材として再生利用できることを確認した。

（エ）評価結果

- ・飛灰と脱水処理された軟泥をそれぞれ貯蔵する場合と、軟泥を飛灰の放射性 Cs 溶出抑制材として利用し、脱水固化体を製作して貯蔵する場合を比較すると、建設コストを 24%削減でき、設備容量に 11%の余裕ができるものと試算される。この場合の脱水固化碎石の製造コストは、14,000 円/ m^3 （飛灰 + 軟泥当り）である。
- ・作業員被ばく量評価：脱水固化碎石の製作に関わる被ばく線量は、7.8mSv/年と想定される（法令上の線量限度 20mSv/年）。前提条件：線源の放射能濃度を 60,000Bq/kg、量を 10,880kg（高圧フィルタープレスの容量/基）とした場合（線源自体や機材による遮へい効果は見込んでいない）。

(オ) まとめと課題

(a) まとめ

飛灰：軟泥＝50：50 の供試泥にゼオライトを 8%/ds 添加した試料にセメント（20、40、60%/ds）を添加し、高圧フィルタープレス機で脱水固化処理する条件下で、以下のとおりであった。

- ・脱水固化碎石は、すべてのセメント添加率において、道路用盛土材としての品質を満足する。
- ・飛灰と脱水処理された軟泥をそれぞれ貯蔵する場合と、軟泥を飛灰の放射性 Cs 溶出抑制材として利用し、脱水固化碎石を製作して貯蔵する場合を比較すると、建設コストを 24%削減でき、設備容量に 11%の余裕ができるものと試算される。

(b) 課題

- ・飛灰の主成分は、焼却対象物と排ガス中和剤に依存し、軟泥の放射性 Cs 吸着性は粘土鉱物に依存する可能性があるため、飛灰や軟泥の違いによる脱水固化碎石の品質のばらつきを把握するため、数種類の飛灰と軟泥を組み合わせた脱水固化試験が必要である。
- ・今回の土壌の放射性 Cs 濃度域では問題なかったが、より高濃度の放射性 Cs を含む脱水固化碎石からの放射性 Cs の溶出、ろ水の放射性 Cs の吸着対策など別途検討が必要である。

(3) 減容処理後の濃縮物等の放射線管理に資する技術

①空気中を浮遊する放射性セシウムの早期検知技術の確立

(東芝電力放射線テクノサービス株式会社) (付録 1-8 及び付録 2-8)

(ア) 試験の目的

中間貯蔵事業や廃炉作業が行われる区域と隣接する帰還困難区域においては、放射性物質が飛散する潜在リスクを認識しておくことが必要である。すなわち、施設の安全確保は元より、屋内退避が困難なことから、万一の場合に備え、早期に異常の兆候をとらえ、迅速に避難等の判断を行うことが重要である。

現在、空気中の放射能濃度の異常検知には放射性ダストモニタが利用されており、高精度の定量測定ができるが、測定に 2 時間以上を要するため、早期に異常の兆候をとらえることができない。

本試験では、空気中の放射性セシウムの存在を直接観測する装置技術を用いて、帰還困難区域での連続測定によるデータ取得・評価を行い、環境中の天然放射性核種の変動に伴う性能影響がない事を確認する。

(イ) 試験の内容

- ・天然放射性核種の影響評価（昼夜・気象変動）
- ・周囲線量率（バックグラウンド）条件の影響評価
- ・局所的舞上りの影響評価
- ・帰還困難区域での検知性能評価

・導入に向けてのコスト・被ばく線量評価

(ウ) 試験の結果

(a) 天然放射性核種の影響評価（昼夜・気象変動）

昼夜変動の影響は受けない。また、降雨に伴うビスマス 214 の一時的計数増加が見られたが、ピーク識別により誤検知は無い。

(b) 周囲線量率（バックグラウンド）条件の影響評価

帰還困難区域内の評価地点の最大空間線量率 $8\mu\text{Sv/h}$ を超える約 $12\mu\text{Sv/h}$ 条件であっても適用可能であった。

(c) 局所的舞上りの影響評価

局所的な 30Bq/m^3 （警戒判断の水準レベル 1：一般の区域）程度での舞上り誤検知は無い。 300Bq/m^3 （警戒判断の水準レベル 2：周辺監視区域内で管理区域の 10 分の 1 の水準）の場合は、局所的でも検知可能であった。

(d) 帰還困難区域での検知性能評価

15 分測定での全期間を通した検出限界は 15Bq/m^3 未満であった。警戒水準レベル 1 (30Bq/m^3) の検知時間は、降雨なし条件で 3 分以内、降雨あり条件で 4 分以内であり、目標検知時間（15 分）に対して、3～4 倍の余裕時間を確保することが可能であった。

(エ) 評価結果

(a) コスト評価

- ・機器導入から 5 年間のランニングコストを含めた比較をすると、本技術はダストモニタの既存技術に比べてトータル約 50% の大幅なコストダウンを実現できる。
- ・ポンプ等の動的機器を撤廃した事により、機器の故障、ポンプ流量低下等のトラブルの発生がなく、長期運用における信頼性向上も期待できる。

(b) 被ばく線量評価

- ・点検等の装置運用時における年間の被ばく線量を比較すると、本技術は現地作業が減少することから、既存技術に比べて約 60% に低減できる。
- ・装置構成上、帰還困難区域に立入らず、遠隔操作による一時保守にも対応できる。

(オ) まとめと課題

(a) まとめ

帰還困難区域での適用・導入を目指して実証試験を行い、環境影響等の評価の結果、性能を把握した。また、帰還困難区域に降下した放射性セシウムや、環境条件に応じて変動する天然放射性核種の影響を受けず、設定した目標検知時間に対し、3～4 倍の余裕を持つことを確認した。

本試験で空気中に存在する放射性セシウムの有無を早期に検知する技術と装置を確立した。

(b) 課題

強風や除染作業等によって舞上った放射性セシウムを含む粉じん等が、検出部上部に降下・付着した場合の影響の把握、特に清掃間隔の検討などが必要である。また、検出部上部へ雪が降り積もる地域で運用する場合に、雪による感度低下の把握と融雪対策の検討などが必要である。

4-2. 除染土壌等の輸送や中間貯蔵等の関連技術

(1) 中間貯蔵・除染・廃棄物処理技術

①汚染土の飛翔粉塵拡散分布の可視化モニタリングシステムの提案

(国立大学法人千葉大学) (付録 1-9 及び付録 2-9)

(ア) 試験の目的

飛散した汚染粉塵の空間分布をリアルタイムで計測可能な小型偏光ライダー(以下「ライダー」という。)とダストサンプラを併用する汚染土の飛翔粉塵拡散分布の可視化モニタリングシステムを除去土壌を取り扱う作業現場に適用し、その実用性を実証する。

(イ) 試験の内容

パルス化されたレーザ光を大気中の散乱体(粉塵等)に照射し、その散乱光を捉え、散乱体の空間分布を観測できるライダーを使用し、粉塵量をライダーカウントとして数値化する。次に、ライダーとダストサンプラ両者の観測地点が重なる時空間における粉塵量とその放射能濃度との相関関係を見出し、その相関関係を適用することにより、ダストサンプラが設置されていない空間を含め、ライダーが計測する領域全体の粉塵の放射能濃度を可視化して表示する。

(ウ) 試験の結果

ライダー1台とダストサンプラ3台を配置し、ライダーのスキャン範囲を定めた後、ライダーとダストサンプラの同期計測を行い、風向(北西-西の風)が揃っていた6日間を対象として統計的な相関を考察し、ダストサンプラが捕集した粉塵濃度とライダーカウントとの換算のための検量線($0.001\text{mg}/\text{m}^3/\text{count}$)を作成した。

さらに、土壌の放射能濃度が同様であった3日間を抽出し、ダストサンプラで捕集した粉塵濃度と空気中放射能濃度の関係(粉塵濃度 $0.001\text{mg}/\text{m}^3$ あたり、 $0.474 \times 10^{-10}\text{Bq}/\text{cm}^3$)を得た。これらより、ライダーカウント換算による空気中放射能濃度分布図を作成した。

この結果、埋設作業由来の浮遊粉塵は、放射性同位元素等の関係法令に定める空気中濃度限度に比べ十分に低いこと、また作業場所から離れた場所に粉塵は、ほとんど達していないことが確認できた。

(エ) 評価結果

ライダーとダストサンプラを併用する技術は、モニタリング対象エリア全体を

網羅でき、粉塵の空間分布及び空气中放射能濃度分布の逐次変化を把握できることが明らかになった。これら分布図については、コミュニケーションツールとして活用し易いように今後改良を行う。

また、ライダーとダストサンプラを併用するシステムは、ダストサンプラのみとのシステムと比較して、ランニングコストの面で優位性があることが分かった。

(オ) まとめと課題

(a) まとめ

- ・ライダーとダストサンプラの同期計測結果から、捕集粉塵とライダーカウントとの相関が得られた。
- ・ライダーカウント換算による空气中放射能濃度分布図が得られた。
- ・ダストサンプラが設置されていない空間を含め、ライダーが計測する領域全体の粉塵の放射能濃度の分布を可視化（表示）できた。

(b) 課題

ライダーは、あくまで粉塵濃度を介した間接的な計測であるため、状況（発塵源土壌の特性等）の変化に応じた調整・校正が必要となる。運用面での管理計画を現場の状況に合わせて適切に設定する必要がある。

また、粉塵の空間分布図及び空气中放射能濃度分布図の読み取り評価について、コミュニケーションツールとして簡便に利用できるように、分布図の表記方法等の改良が必要である。

5. まとめと実装に向けた課題

(1) 採択事業者に対する技術的助言実績

採択された9事業者に対して、環境省の支援を受け、各事業者に対して業務計画書作成時、試験遂行時、現地立会い時、成果報告書作成時等に助言等を実施した。技術的助言を行った実績を表2に示す。

これらの成果を報告書としてまとめるとともに、その技術概要は中間貯蔵・環境安全事業株式会社のホームページで公開する「Web 用概要書（付録1）」及び「Web 用報告書（付録2）」として作成した。

表2 平成29年度除染土壌等の減容等技術実証事業の技術的助言実績

No.	事業分野	対象	実証テーマ名	所属機関名	打合せ ¹⁾			現地調査
1	除染土壌等の減容・再生利用等技術	減容技術	放射性物質を含む焼却残渣の再生利用を想定したセシウム分離促進剤添加焼却技術の実証	日立造船株式会社	7月5日 8月1日 9月11日	9月25日 10月5日 10月16日	11月20日 12月15日 1月10日	9月14日 10月12日
2			泡浮遊選鉱による汚染土壌の浄化	株式会社AREVA ATOX D&D SOLUTIONS	7月5日 8月2日 9月7日 9月12日	9月20日 10月23日 11月27日 12月13日	1月9日 1月17日	11月15日
3			磁気分離・マイクロバブル浮選を用いた放射性Cs含有細粒分の分離による減容技術の検証	鹿島建設株式会社	7月5日 8月4日 9月20日	10月10日 11月14日 12月12日	1月10日	8月28-29日 10月4日 10月26日
4		再生利用等技術	除染土を布型枠内に固形化し再利用製品の製作技術の実証	西松建設株式会社	7月6日 8月2日 11月10日	12月14日 12月22日 1月12日	1月22日	9月5日 9月29日 10月13日
5			ジオポリマー法による汚染材のコンクリート系遮蔽材等への有効活用方法の実証	大成建設株式会社	7月6日 8月1日 12月26日	1月11日 1月19日		9月6日 10月20日 12月8日
6			除染土壌の建設資材化のための品質調整システム技術実証	株式会社大林組	7月6日 8月3日 9月27日	10月23日 12月20日 1月15日	1月23日	11月22日
7			焼却灰の放射性セシウム溶出抑制としての粘性土（除染土壌）の活用	りんかい日産建設株式会社	7月7日 8月2日 12月15日	12月27日 1月15日 1月19日		9月12日 9月21日 11月2日
8		減容処理後の濃縮物等の放射線管理に資する技術	空気中を浮遊する放射性セシウムの早期検知技術の確立	東芝電力放射線テクノサービス株式会社	7月7日 8月4日 9月1日	12月6日 12月26日 1月12日	1月19日	10月19日 11月15日
9	除染土壌等の輸送や中間貯蔵等の関連技術	中間貯蔵・除染・廃棄物処理技術	汚染土の飛翔粉塵拡散分布の可視化モニタリングシステムの提案	国立大学法人 千葉大学	7月7日 8月4日 12月27日	1月15日		9月4日 10月31日 11月28日

1) 打合せ内容：実施計画の策定、実証試験の進捗状況確認、現地確認の事前打合せ、報告書の作成、等（メール、電話による助言除く）

(2) 個別事業の評価

9事業の成果概要と外部有識者から構成する委員会による評価を下記に示す。

①放射性物質を含む焼却残渣の再生利用を想定したセシウム分離促進剤添加焼却技術の実証

（日立造船株式会社）

(ア) 成果概要

実証炉でCs分離促進剤を添加した非放射性Csを混合した焼却対象物について、Cs除去率最大81.6%となり、概ね実験室レベルでの結果と同等な成果であった。焼却主灰洗浄試験においても、Cs除去率は30%程度となった。低融点塩化物で

ある Cs 分離促進剤による火格子の腐食試験において腐食はほとんど見られなかった。

(イ) 評価

- ・ ストーカ炉での Cs 分離促進剤を添加した実証はほとんど実施されたことがなかったが、概ね目標通りの結果であった。
- ・ 実際の可燃性除染廃棄物は、土壌が多く含まれており、発熱量がかなり低いため、実除染廃棄物での検証が必要である。
- ・ 飛灰洗浄後は放射能濃度がかなり高くなるので、自動化やシステムの細分化が必要となる。

②泡浮遊選鉱による汚染土壌の浄化

(株式会社 AREVA ATOX D&D SOLUTIONS)

(ア) 成果概要

粒径が 75 μ m 未満の土壌を効率よく選鉱でき、目標とした減容率 1/7、抽出率 90%に対し、減容率は 1/3.6～1/7.4、抽出率は約 40%であり、抽出率は目標を達成出来なかった。浮遊選鉱で比較的大きな粒子に放射性 Cs が付着している場合、適切な前処理が必要となる。

(イ) 評価

- ・ 本技術は粘土粒子を更に選鉱するための高度分級処理の一方式であり、比較的低コストで処理が出来る。
- ・ 界面活性剤には臭素が含まれており、土壌を再生利用した場合の環境への影響に対する検証が必要である。
- ・ 既存の鉱物処理産業等で広く用いられており、大型化へのハードルは低いと思われる。

③磁気分離・マイクロバブル浮選を用いた放射性 Cs 含有細粒分の分離による減容技術の検証

(鹿島建設株式会社)

(ア) 成果概要

磁気分離（磁場強度 5T）による 2:1 型粘土の捕捉率の平均値は、20 μ m 未満で 62%、20～75 μ m で 76%であった。また、通過した土の放射能濃度の低減を示す除去率は最大 67%であった。

マイクロバブル浮選は、薬剤量 200～300ppm、原水液固比 100～200 が適当であることを確認した。起泡剤はノニオン系界面活性剤と低級アルコールの混合物が適当であり、捕収剤はカチオン系界面活性剤が適当であった。

(イ) 評価

- ・ 対象土壌に含有する磁性体である砂鉄の 2:1 型粘土回収率への影響を明確化することが必要である。また、土壌中の 2:1 型粘土の含有量と放射性 Cs 吸着と

の関係等について、更なる知見の蓄積が必要である。

- ・磁気フィルターに捕捉された土粒子を離脱させ回収する機構について、実証検討が必要である。
- ・対象土壌等の選定等、本技術の優位性が見いだせるターゲットの見極めを行うことが望まれる。
- ・今回の実機化の検討結果では、磁気分離、マイクロバブル浮選ともに装置の基数が多いため、それらの装置の大型化や集約化が必要である。また、コスト低減化に向けた検討も必要である。

④除染土を布型枠内に固化し再利用製品の製作技術の実証

(西松建設株式会社)

(ア) 成果概要

放射性 Cs 土壌及び通常土壌に固化材及び調整水を加えスラリー化し、布型枠に注入・固化する布型枠製品（再生利用製品）の製作技術を確認した。福島県で採取した土壌は、目標強度 $1,500\text{kN/m}^2$ を達成できなかったが、購入土（砂質土・粘性土）では達成できた。

目標強度を得るためには、試験に必要な土壌を予め全量確保し、均質化した上で土質試験、固化材の選定等を実施し、計画配合に沿って製品化する必要がある。

(イ) 評価

- ・布型枠という形で、製作できることは確認できた。
- ・本技術の優位性が活用できる利用先を見いだすことが必要である。

⑤ジオポリマー法による汚染材のコンクリート系遮蔽材等への有効活用法の実証

(大成建設株式会社)

(ア) 成果概要

福島県内の放射性飛灰・主灰を利用し、ジオポリマー固化体の製作を実施し、コンクリート固化体と比較して強度、性能に優位性があることを確認した。

飛灰・主灰の配合率は 40°C 加温の場合に約 30%、常温の場合に約 6%であった。また、ジオポリマー固化体は貯蔵した放射性物質の表面線量率を約 90%低減させる遮蔽性能を有していた。

(イ) 評価

- ・強度、性能に優れたジオポリマー固化体の製造に成功し、今後、期待が持てる技術である。
- ・飛灰・主灰の性状から配合や養生の条件設計ができる等、実用化レベルに仕上げるためには、より一層の技術知見の蓄積が必要と考えられる。
- ・容器以外のジオポリマーの適用先について、探索する余地がある。

⑥除染土壌の建設資材化のための品質調整システム技術実証

(株式会社大林組)

(ア) 成果概要

土の合成含水比とコーン指数に相関があることを明らかにした。また、本試験では製造する混合材の目標合成含水比は 24.5% と設定したが、目標合成含水比を任意に変更することで、様々な強度の混合材を製造できることを確認した。

連続化には課題があるが大型化は可能であり、本試験装置を大型化することで、施工量 277t/日 が可能であり、この場合の混合材製造コストは、土壌 1t あたり 994 円と試算した。

(イ) 評価

- ・ グループ A (第 1 種建設発生土相当) とグループ C (第 4 種建設発生土相当) を混合して再生利用に適した土壌になるのは成果であり、用途に合わせて混合することができれば、すぐに実用化できる技術である。
- ・ 原料土の含水比、細粒分含有率は様々であるが、混合土がある一定の範囲内に収まるシステムであれば、より信用度は高くなる。

⑦焼却灰の放射性セシウム溶出抑制としての粘性土（除染土壌）の活用

(りんかい日産建設株式会社)

(ア) 成果概要

飛灰：軟泥＝50：50 の供試泥にゼオライトを 8%/ds 添加した試料にセメント (20、40、60%/ds) を添加し、高圧フィルタープレス機で脱水固化処理する条件下で、脱水固化砕石は、道路用盛土材としての品質を満足する。また、飛灰と脱水処理された軟泥をそれぞれ貯蔵する場合と、軟泥を飛灰の放射性 Cs 溶出抑制材として利用し、脱水固化砕石を製作して貯蔵する場合を比較すると、建設コストを 24%削減でき、設備容量に 11%の余裕ができると試算した。

(イ) 評価

- ・ 適切な活用先があれば、減容化・低コスト化等が可能と思われるが、現状の中間貯蔵事業では、位置づけが難しい。
- ・ システム的には、シンプルでトラブルもほとんどなく、安定しているので、実機化していくことは可能である。
- ・ データ解析や知見の整理等を十分行い、活用できる場の創出が必要である。

⑧空气中を浮遊する放射性セシウムの早期検知技術の確立

(東芝電力放射線テクノサービス株式会社)

(ア) 成果概要

環境条件に応じて変動する天然放射性物質の自然変動の影響を受けず、空气中に存在する放射性セシウムの有無を早期に検知する技術と装置を確立した。

帰還困難区域において、目標とした検知時間に対し、3～4 倍の十分な余裕を持つことを確認した。また、同区域での放射線環境下であっても柔軟な運用が可能

であることを把握した。

(イ) 評価

- ・装置の設置場所や電源の確保等、より実用化に向けた具体的な検討が必要と考えられる。
- ・現状飛散している粒子の濃度を検知するためには、どれくらいの時間がかかるかという切り口での検討も必要と思われる。
- ・モニタリング系技術は具体的な目標を設定すれば活用することができるので、目標の整理が必要である。

⑨汚染土の飛翔粉塵拡散分布の可視化モニタリングシステムの提案

(国立大学法人千葉大学)

(ア) 成果概要

飛散した汚染粉塵の空間分布をリアルタイムで計測可能な小型偏光ライダーとダストサンプラを併用する汚染土の飛翔粉塵拡散分布の可視化モニタリングシステムを構築した結果、ライダーとダストサンプラの同期計測結果から、捕集粉塵とライダーカウントとの相関が得られた。これにより、ライダーカウント換算による空气中放射能濃度分布図を得た。さらに、ダストサンプラが設置されていない空間を含め、ライダーが計測する領域全体の粉塵の放射能濃度の分布を可視化(表示)できた。

(イ) 評価

- ・現場作業中に粉塵が上がった際、ライダーでモニターする使用方法是有用である。
- ・空気中にある粒子、例えば霧と土壤粉塵の区別ができることは有用である。
- ・ライダーカウントと放射能濃度を関連づけるのは難しい面もあるが、再生利用の現場では土壤の放射能濃度の上限が決まっているので、最大濃度で換算した場合の人的な影響を評価することができる。

(3) 実装に向けた課題

実証テーマは、平成 27 年度までは除染を主な対象技術として応募していたが、平成 28 年度から中間貯蔵施設事業に関する内容を主なテーマとして公募を行った。

平成 29 年度に採択された 9 件の事業は、除染土壌等の減容・再生利用等技術が 8 件、除染土壌等の輸送や中間貯蔵等の関連技術が 1 件であり、減容技術、再生利用等技術のテーマが多かった。

これまでの実証事業の成果及び外部有識者で構成される委員会等での意見等を踏まえ、今後の実証事業の実施においては、中間貯蔵施設事業や除染土壌の減容・再生利用に、より即応性のある技術を深めていくことが望まれる。

<対象技術等について>

- ・濃度の高い土壌の輸送に関する技術
- ・中間貯蔵施設の管理やモニタリングに関する技術
- ・除染土壌等の運搬・保管、中間貯蔵、減容・再生利用等を行う作業現場において安全性、確実性、効率性を向上させる技術
- ・分級後に高レベルの濃度になる土壌の管理技術
- ・焼却灰等の濃縮等、既存の減容化に関する技術をより深める技術
- ・既存の処理技術のコストをより削減する技術
- ・土壌、不燃物の再生利用用途の開発に関する技術
- ・除染廃棄物を処理する技術
- ・中間貯蔵施設事業や最終処分、再生利用等の事業に対する理解の醸成を図るための手法検証

<運営について>

- ・複数年度で実施する技術テーマの公募
- ・実証試験の期間をできるだけ長く取る

今年度実施された実証事業を通して得られた成果については、用途や対象物に応じて単独としての利用のみならず、総合的かつ有効的なシステムとして組み合わせて利用していく等の継続的検討が必要であると考えられる。

また、過去の実証事業で実施されたテーマについて、現状の活用状況等について確認していくことも必要である。