

平成 28 年度
除染土壌等の減容等技術実証事業
報告書

平成 29 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除去土壌の土質判別システムの開発（株式会社大林組）	7
②アルカリ洗浄による粘土鉱物溶解および分級による除染土壌の減容化 （大成建設株式会社）	8
③除染土壌等に対する異物除去技術の開発 （J F Eエンジニアリング株式会社）	9
④熔融技術による分級後細粒土壌の高度減容化処理に関するプラント 実証評価（クボタ環境サービス株式会社）	11
⑤金属イオン含有亜臨界水による土壌分級物中のセシウムの高速イオン 交換回収と高減容ガラス固化（国立大学法人東京工業大学）	12
⑥連続式土壌濃度測定分別装置を用いた土壌分別および分別しやすい 土壌改質の実証（株式会社安藤・間）	14
(2) 再生利用等技術	16
①洗浄分級で発生する高含水比粘性土の減容化と脱水ケーキの人工碎石 としての再利用（りんかい日産建設株式会社）	16
4-2. 除染土壌等の輸送や中間貯蔵等の関連技術	18
(1) 除染土壌等の輸送技術	18
①除染土壌等の輸送路上に存在する「通信不感区域」に係る対策技術の実証 （N T Tコミュニケーションズ株式会社）	18
(2) 中間貯蔵・除染・廃棄物処理技術	19
①中間貯蔵施設における自動搬送実証（日立造船株式会社）	19

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	23
(3) 実装に向けた課題	28

付録1 Web用概要書

付録2 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 年程度目途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制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保管場が整備され、平成 27 年 3 月から除染土壌等の試験輸送を行ってきたところである。今後さらに、中間貯蔵施設の整備と除染土壌等の輸送を行っていく予定であり、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、同年 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「中間貯蔵施設安全対策検討会および環境保全対策検討会の検討結果取りまとめ（平成 25 年 10 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

今後の除染土壌等の減容等に活用しうる可能性のある技術の効果、経済性、安全性等を評価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

除染土壌等の減容等技術実証に係る技術提案書の公募を行い、提案書の受付を行った。なお、公募した技術分野は下記のとおりである。

①除染土壌等の減容・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除染土壌等の輸送や中間貯蔵等の関連技術

(ア) 除去土壌等の輸送技術

(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

応募された技術提案書について、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、作成した仕様書を基に採択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討し、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

中間貯蔵・環境安全事業株式会社では、環境省から委託を受け、今後の除染土壤等の減容等に活用し得る技術の実証試験を行い、その効果、経済性、効率性等を確認するため、「平成 28 年度除染土壤等の減容等技術実証事業」の対象となる技術を平成 28 年 4 月 1 日から 2 ヶ月間公募を行った。応募された 23 件の提案について、外部有識者により構成される委員会において厳正な審査を行い、実証事業の対象案件として表 1 に示す 9 件の技術を選定した。

本報告書は選定した 9 件の事業に対して、試験計画時、試験遂行時、成果の取りまとめ時の助言内容等の業務内容をまとめたものである。

表 1 平成 28 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	除去土壤の土質判別システムの開発	株式会社大林組
2			アルカリ洗浄による粘土鉱物溶解および分級による除染土壤の減容化	大成建設株式会社
3			除染土壤等に対する異物除去技術の開発	J F E エンジニアリング株式会社
4			溶融技術による分級後細粒土壤の高度減容化処理に関するプラント実証評価	クボタ環境サービス株式会社
5			金属イオン含有亜臨界水による土壤分級物中のセシウムの高速イオン交換回収と高減容ガラス固化	国立大学法人 東京工業大学
6			連続式土壤濃度測定分別装置を用いた土壤分別および分別しやすい土壤改質の実証	株式会社安藤・間
7	②除染土壤等の輸送や中間貯蔵等の関連技術	再生利用等技術	洗浄分級で発生する高含水比粘性土の減容化と脱水ケーキの人工砕石としての再利用	りんかい日産建設株式会社
8		除去土壤等の輸送技術	除染土壤等の輸送路上に存在する「通信不感区域」に係る対策技術の実証	N T T コミュニケーションズ株式会社
9		中間貯蔵・除染・廃棄物処理技術	中間貯蔵施設における自動搬送実証	日立造船株式会社

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除去土壌の土質判別システムの開発

(株式会社大林組) (付録 1-1 及び付録 2-1)

(ア) 試験の目的

中間貯蔵施設において除去土壌を対象に、二次分別処理する前の改質や、土壌を再生資材化する際の改良、減容化処理として考えられている分級処理を行う場合、砂質土よりも粘性土の方が処理費用が高い。除去土壌は異なる場所から発生した土壌であるため大型土のう袋ごとに土質が様々であり、先述の処理過程において混ざることになる。土壌を土質ごとに分別せずに全量に対して改質や分級処理等を行う場合と比べて、土質ごとに分別できれば、処理費用を低減できる。

除去土壌の土質判別システムでは、ベルトコンベア上を搬送される除去土壌に対し、その土の特性（堆積形状（断面積）、含水比、重量）を計測し、砂質土系又は粘性土系かを連続的かつ瞬時に判別することを目的とする。

(イ) 試験の内容

ベルトコンベア上を搬送される土の特性（堆積形状（断面積）、含水比、重量）を計測するシステムを実機コンベアの 1/2 幅のスケールで製作し、計測試験を行う。計測は、土が単一のケース（単一土）と、砂質土と粘性土を交互に流す複数のケース（複数土）とする。その計測結果をもとに、3 つの特性が砂質土系か粘性土系かを判別する指標として妥当かどうかを評価する。

(ウ) 試験の結果

- ・目標速度(0.31m/s)でベルトコンベア上を搬送される土の特性（判別指標）が、連続測定可能であることを確認した。その後、土の種類、含水比を変えた 36 ケースで試験した結果、改質不要な砂質土の判別指標は、断面積 0.04m² 以上かつ含水比 40%以下かつ乾燥密度 0.9g/cm³ 以上が適切であると判断した。
- ・土の投入方法によっては一袋ごとの境界が不明確となり、データ抽出方法、コンベア速度と投入方法の最適な組合せを検討する必要があることが分かった。
- ・砂質土系と粘性土系に大別して、土質の種類を判別できることが確認できた。

(エ) 評価結果

- ・減容：全ての土壌に改質材を添加する場合は 59 万 t、提案技術を適用して粘性土にのみ添加する場合は 32 万 t となり、およそ 46%を減容できる。
- ・土質判別コスト：提案技術では除去土壌 1m³ あたり 48 円と試算する。
- ・改質材の抑制によるコスト低減：全ての土壌に改質材を添加する場合は 402 億円、提案技術を適用して粘性土にのみ添加する場合に土質判別コストを加算して 227 億円となり、175 億円を低減できる。

- ・分級処理の効率化及びコスト低減：土質を判別せずに分級洗浄を行うと、最も負荷の大きい高粘性土を想定した運用となり処理速度が低下する。提案技術を適用すれば処理速度を4倍程度に向上でき、処理費用を35%低減できると試算する。

(オ) まとめと課題

(a) まとめ

- ・砂質土系と粘性土系とに大別して土質の種類を判別できることが確認できた。
- ・測定に用いた含水比測定装置等の精度が高かったことから、砂質土系、粘性土系の2つだけでなく、より詳細な条件で土砂を分けられる可能性もあることがわかった。

(b) 課題

- ・粘性の高い土砂も容易に排出できるように、ホッパーの形状並びにホッパーへの投入方法の改良を行うとともに、要求される処理能力に応じたベルトコンベア速度とホッパーへの投入方法の最適な組合せの設計が必要である。
- ・実際の適用に際しては実規模設備による各指標のキャリブレーションを行うとともに、除去土壌に関する土質データを充実させ、含水比と細粒分含有率の関係式、乾燥密度と細粒分含有率の関係式を検討することになる。特に除去土壌には可燃物（有機物）が多く含まれると考えられ、それらの影響を考慮した判別指標の検討が必要となる。

②アルカリ洗浄による粘土鉱物溶解および分級による除染土壌の減容化

(大成建設株式会社) (付録 1-2 及び付録 2-2)

(ア) 試験の目的

除染土壌をアルカリ溶液で洗浄することで、放射性 Cs が吸着した粘土鉱物の末端部分や、腐植質（植物が分解した有機物）を土粒子から離脱させ、さらに適切な粒度で分級することにより、土壌から放射能濃度の高い部分を除去し、土壌の放射能濃度を低減させる技術を検討する。また、小型の土壌洗浄プラントにより、洗浄、分級、脱水の一連のシステムを検証する。

(イ) 試験の内容

(a) 試料土壌の性状評価

性状の異なる土壌を採取し、土壌の放射能濃度、粒度分布等の初期性状を調査する。

(b) 室内試験

4種の土壌を用い、アルカリ溶液による洗浄、分級によって、0.075mm未満の細粒分に放射能を濃縮、除去し、土壌の放射能濃度を低減するための、洗浄条件、土壌の組み合わせを検討する。

(c) 実証試験

小型の土壌洗浄プラントを用い、室内試験にて選定した条件にて運転し、ア

ルカリ洗浄、分級による除染土壌の減容化技術を検証する。

- ・処理土壌の放射能濃度低減効果、再生利用量の評価
- ・実機を想定したコスト評価
- ・実機を想定した被ばく量の評価

(ウ) 試験の結果

洗浄後土壌の放射能濃度の除去率は、水洗浄に対してアルカリ洗浄では最大で36%の増となり、アルカリ洗浄による土壌の放射能濃度低減の効果が認められた。

実証試験においては、21,347Bq/kgの土壌を洗浄し、7,895Bq/kgの土壌を70%の回収率で得ることができた。また、アルカリ洗浄、分級は発生場所で区分した粘性土扱いの除染土壌に有効であり、今回試験対象の放射能濃度20,000～30,000Bq/kgの土壌のように、水洗浄だけでは除去が難しい場合などに特に有効であった。

(エ) 評価結果

今回、4種の土壌についてアルカリ洗浄、分級を行った結果、腐植質等の有機物含有量の多い土壌において洗浄後土壌の放射能濃度の低減が顕著であった。

アルカリ洗浄では、粘土鉱物の溶解を示すSiの溶解も確認され、粘土鉱物の破壊も生じていたと考えるが、今回試験では腐植質の離脱の効果がより大きかった。

(オ) まとめと課題

粘土鉱物の溶解を示す洗浄液中へのSi、Alの溶出が確認され、粘土鉱物の末端部分の破壊、離脱が起きていた可能性があるが、土壌の放射能濃度低減に対しては腐植質の離脱による効果の方がより大きく、アルカリ洗浄、分級による減容化技術は、「放射性Csが吸着した腐植質が広い粒度範囲で存在する土壌」に対して効果が高いことが確認できた。しかし、粘土鉱物の影響については定量的な評価までは困難であった。

処理対象土壌量200万m³、処理期間10年と設定し、試験結果にて決定した薬剤使用量から処理コストを算定した結果、土壌1t当たりの処理単価は6,870円/tと試算された。

③除染土壌等に対する異物除去技術の開発

(J F Eエンジニアリング株式会社) (付録1-3及び付録2-3)

(ア) 試験の目的

既存の湿式分級の異物除去装置である「回転式スクラバー＋淡水比重選別」は、放射性セシウム等に汚染された土壌から汚染物質を多量に含有する細粒分を分級除去することで浄化する一般的な技術だが、以下の課題がある。

- ・浄化土壌中に植物系異物が多く残留し、再利用用途先が制限されてしまう。
- ・分級設備での異物目詰まり等により設備稼働率が低下する。

この課題を解決するため、除染土壌から木屑や枯葉等の植物系異物を効率的に

除去する「ジェット流解砕および重液比重選別技術」の組合せによる異物除去を実証することを目的とする。

(イ) 試験の内容

模擬土壌の作製、ラボ試験（実験機によるバッチ試験）、ベンチ試験（実証機による連続試験）、経済性評価の順で試験を行った。

はじめに、細粒分含有率（Fc）、強熱減量、粒度分布において除染土壌に近似した模擬土壌を作製した。次に、模擬土壌を用いたラボ試験として、ジェット流解砕技術（異物に固着した土壌をジェット水流の高い衝撃力で解砕・剥離）、重液選別技術（水よりも比重の大きな選別液を用いることで水の比重に近い枯葉等の浮上分離を促進）の単体試験を行い、吹付水量、吹付流速、重液比重、静置時間の適切な条件を選定した。続いて、ジェット流解砕と重液選別の組合せプロセスを用いたベンチ試験により、異物除去性能の評価、物質収支の評価、放射能収支の評価、浄化土壌の品質の確認を行った。最後に、中間貯蔵施設を想定した実規模の処理コストの試算を行った。

(ウ) 試験の結果

(a) ラボ試験

ジェット流解砕試験では、土壌 1,000kg/h に対して水量 2,000～3,500kg/h が適正水量であることを確認した。また、重液選別試験では、重液の比重が高いほど異物選別性能が高いこと、約 1 分の静置時間で比重分離が限界点に達することを確認した。

(b) ベンチ試験

上記の結果を踏まえたベンチ試験の結果、本プロセスは、細粒分含有率 Fc10～40%相当の砂質土に対して植物系異物を効率的に除去し、異物除去後の浄化土壌は復興資材として活用する場合の目安である強熱減量 10%以下を達成した。また、浄化土壌の土質評価も実施し、河川築堤、土地造成（公園・緑地造成）、道路等の盛土材料として使用可能なことを確認した。

(エ) 評価結果

本技術を実規模に適用した場合の設備費、運営費等を含んだ湿式分級処理コストを試算した。評価条件は、対象土量 52.2 万 m³（Fc30%、含水率 15%）に対して、設備能力 50m³/h（ジェット流解砕装置は 2 系列、上水や重液は循環再利用）、稼働日 240 日/年、稼働時間 8 時間/日、実運転効率 80%とした。

評価の結果、湿式分級処理コストは 11,300 円/t となった。また、再利用用途の拡大を目的に宅地造成盛土の要求品質相当の土壌を得るためのリンス処理費用を試算した結果、リンス 3 回処理の追加コストは 3,630 円/t となった。

(オ) まとめと課題

(a) まとめ

- ・「ジェット流解砕および重液選別技術」の組合せによる新しい異物除去プロセスを適用し、砂質土 Fc10～40%相当に含まれる植物系異物の除去技術を確立した。
- ・浄化土壌について、復興資材として活用する場合の目安とされる強熱減量 10%以下を達成した。また、再生土壌の用途別の要求品質を確認し、河川築堤、土地造成（公園・緑地造成）、道路等の盛土材料に適用できることを確認した。
- ・中間貯蔵施設を想定した実規模の湿式分級処理費用を試算した結果、湿式分級処理費用は 11,300 円/t となった。

（b）課題

主な課題・改善点としては、ジェット流解砕装置の吹付水量の低減、重液選別装置の最適化、重液比重・使用量の低減、適用土壌の拡大が挙げられる。

④溶融技術による分級後細粒土壌の高度減容化処理に関するプラント実証評価

（クボタ環境サービス株式会社）（付録 1-4 及び付録 2-4）

（ア）試験の目的

分級処理後の細粒土壌を処理対象とし、前処理の最適化と高度減容化溶融システムの実証を目的とした。

（イ）試験の内容

細粒土壌は粘土が多く、「粘い（可塑性が高い）」、「固結しやすい」という性質を有するため、搬送や前処理（脱水・乾燥、薬剤混合）におけるハンドリング性が悪い。そのため、前処理工程各プロセスの手法及び条件の最適化を検討した。

細粒土壌約10 t を前処理し、非放射性Cs を添加して3 t/日の回転式表面溶融処理施設を用いて、処理対象の固形物に塩化物、可燃物を共存させて溶融処理を行った。固形物に含まれるアルカリ金属、重金属を塩化揮発の原理に基づき低沸点の塩化物に変化させて揮散分離し、溶融飛灰中に濃縮した。

Cs もアルカリ金属で同様の揮散分離が可能であるため、様々な固形物を対象としてCs の高効率分離を実証するための基礎試験、プラント試験を今まで行ってきた結果、反応促進剤（ CaCl_2 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）の添加により最大99.9%のCs 揮散率を得ている。

本実証においては、細粒土壌を対象とし、99%以上の揮散分離できるシステムの構築を図った。

（ウ）試験の結果

（a）放射性 Cs を含む細粒土壌での加熱試験

反応促進剤として $\text{Ca}(\text{OH})_2$ のみを添加した条件では、Cs 揮散率はかなり低かったが、併せて CaCl_2 を添加することで Cs 揮散率が 97%以上に増加し、塩化揮発の原理を活用することで Cs の高効率揮散分離が可能であることが示さ

れた。

(b) 前処理工程の最適化検討試験

スプレードライヤ技術を選定した。脱水・乾燥工程については、スラリー含水率 50%、加熱温度 260℃条件において低エネルギー使用量で細粒土壌を顆粒状に乾燥できることが示された。

薬剤混合工程については、スプレードライヤ乾燥は土壌単独で行い、反応促進剤の混合はその後に行うことが良いとの結果になった。

(c) 非放射性 Cs を添加した細粒土壌でのプラント溶融実証試験

溶融炉での Cs 揮散率は 96～97%となり、(a) の加熱試験と比べると Cs 存在形態等の違いによりやや低かったが、高い値を示した。

溶融スラグ（浄化物）については、環境安全性は溶出試験により、資材品質については骨材試験により評価し問題ないことが確認された。

No.1BF 灰（濃縮物）については、Cs の水溶性に関する調査を行ったが、不溶率は 1%未満と低かった。

(エ) 評価結果

No.1BF 灰の湿式吸着処理を行えば、容積は約 1/1,500、減容化率は 99.94%と推算され、溶融システムでの減容効果は高いことが示された。

本実証試験結果の物質収支等を元に、放射能濃度 50,000 Bq/kg(dry)の放射性 Cs 細粒土壌を処理対象とした 80 t/日×2 系列の溶融システムについて、豊島プラントのデータを参考にしてコスト試算を行った。

設備費は、400 億円と概算された。運転・維持管理費は、豊島プラントの約 1.9 倍の 78,000 円/t と推算された。Cs 高度濃縮に関しては、設備費を含めて 2～4 万円/t・細粒土壌と推算された。

この結果を元に、豊島プラントと同一の溶融炉を用いて乾燥細粒土壌 160 t/日（含水率 50%の細粒土壌スラリーベースでは 320 t/日）を年間 280 日稼働で 5～20 年間処理した場合のコスト原単位を試算した。20 年間の処理でのコスト原単位は、乾燥細粒土壌ベースで 22.4 万円/t、細粒土壌スラリーベースで 11.2 万円/t と算出された。

(オ) まとめと課題

分級処理後の細粒土壌を溶融処理することにより、放射性 Cs が高効率に No.1BF 灰として分離され、それを湿式吸着処理することで大幅な減容化が可能であることが示された。今後は、実際の放射性 Cs を含む細粒土壌を用いたプラント実証試験、さらに、そこで発生する No.1BF 灰を用いた Cs 高度濃縮の実証試験が必要であると考えられる。

⑤金属イオン含有亜臨界水による土壌分級物中のセシウム的高速イオン交換回収と高減容ガラス固化

（国立大学法人東京工業大学）（付録 1-5 及び付録 2-5）

(ア) 試験の目的

汚染土壌をアルカリ土類金属などのイオンを含有する亜臨界水で洗浄し、金属イオンとの高速イオン交換により土壌から Cs を脱離させ、その洗浄水から Cs を吸着分離・ガラス固化することにより、放射性 Cs 廃棄物の高減容化と安定固定化を実現する技術の実用性を実証することを目的とする。加えて、その実規模システムにおける物質収支、コスト、安全性を評価する。

(イ) 試験の内容

はじめに、イオン含有亜臨界水による Cs 脱離試験を行った。続いて、亜臨界処理水中の Cs の吸着分離・ガラス固化試験として、【固化法-1】亜臨界処理水からの Cs 選択回収による Cs ガラス固化、【固化法-2】固体酸含有高珪酸ガラスへの Cs ガラス固化を行った。最後に、実規模システムの検討を行った。

成果目標は、汚染した細粒物からの放射性 Cs の脱離率が 95%以上、また、最終廃棄物（ガラス固化体）の体積が試験試料（細粒物）の 5 千分の 1 以下（分級前の土壌の 2 万分の 1 以下）とした。

(ウ) 試験の結果

(a) Cs 脱離試験

イオン含有亜臨界水による Cs 脱離試験では、模擬汚染土壌及び実汚染土壌に対して Mg イオンを含有した亜臨界水による Cs 脱離試験を実施したところ、液固比 L/S [mL/g] の増加や繰り返し処理などにより Cs 回収率が概ね 100% になることを確認した。

(b) Cs の吸着分離・ガラス固化試験

次に、亜臨界処理水中の Cs の吸着分離・ガラス固化試験では、【固化法-1】Cs 脱離後の亜臨界水中の Cs をフェロシアン化鉄系吸着剤による吸着→吸着剤の熱分解→熱分解残渣からの Cs 溶出→ガラス固化という方法で回収する試験を行ったところ、吸着から溶出までについては、全量に近い Cs を回収可能であることを確認した。また、【固化法-2】固体酸含有高珪酸ガラスにより亜臨界水中の Cs を直接選択吸着しガラス固化する方法による試験結果においても、94%の Cs 吸着率を確認した。また、固化法-1、2 について回収された Cs のガラス固化を行ったところ、Cs を含む固化体のガラス化が確認され、安定的に固化していることが示唆された。

(エ) 評価結果

技術評価では、試験結果に基づき Cs 脱離工程と固化法-1 又は 2 を連結したシステムにおける物質収支を試算したところ、1 万 m³ の汚染土壌（細粒物）が最終的に 0.54m³ のガラス固化体となり、約 18,700 分の 1 に高減容化できる見通しを得た。

コスト評価では、汚染濃度が高く（10 万 Bq/kg 超）、粘土成分の多い粘性土（約 1 万 m³）を処理対象土壌とした。Cs 脱離+固化法-1 のシステムフローを設定し、

最終処分前処理を想定したシナリオ（Cs 回収率：50%、L/S：20、処理回数：1回、処理能力：14.4t/日）における Cs 脱離処理コスト を試算したところ、処理単価は約 21 万円/t となった。同様に土壤再利用を想定したシナリオ（Cs 回収率：95%、L/S：100、処理回数：3 回、処理能力：1.0t/日）では処理単価は約 310 万円/t となった。

（オ）まとめと課題

（a）まとめ

本事業においては、Cs 脱離・吸着・ガラス固化工程からなる汚染土壤二次減容化システムに対して設定した 2 つの試験目標（汚染した分級細粒物からの放射性 Cs 脱離率が 95%以上、ガラス固化体の体積が分級細粒物の 5 千分の 1 以下）を達成した。特に減容率は目標よりも大幅に上回る見通しを得た。

（b）課題

多様な汚染土壤の処理への対応、連続回収技術（カラム法）による処理システムの高度化、水相に回収した Cs の固定化技術の高度化、が挙げられる。

⑥連続式土壤濃度測定分別装置を用いた土壤分別および分別しやすい土壤改質の実証

（株式会社安藤・間）（付録 1-3 及び付録 2-3）

（ア）試験の目的

石こう系の改質材による粘性土等の改質及び土壤の放射能濃度分別について、環境省発注の「平成 28 年度中間貯蔵施設の土壤貯蔵施設等工事：受入・分別処理工事」の要求水準書に基づいた実規模施設（70t/h 級）による実証試験を行い、その改質効果や分別精度を確認することを目的とする。

（イ）試験の内容

大量供給が可能な 3 社 6 種類の石こう系改質材を用い、水田土壤、宅地土壤、畑土壤を対象とした室内試験を行い、各改質材の性能と使用条件を把握する。その後、最適と判断された改質材及び使用条件にて実規模の土質改良機で実際の除染土壤の改質を行い、その効果を検証する。

さらに、土壤重量測定器と CsI シンチレーターによる放射線量測定器、分別シュート等から構成される分別装置にて改質土壤の放射能濃度分別を行い、その測定値と分別の精度を明らかにする。

（ウ）試験の結果

（a）ふるい分け試験による改質材の性能確認試験

石こう系改質材による改質効果を 19mm ふるい上残割合で評価した結果、添加量 30～40kg/t、混合時間 0.5 分、養生時間不要が最適改質条件であった。また、石こう系改質材製品間の改質効果の差は小さいことが判明したため、コスト等の評価から A 社の石こう系 1 改質材を選定した。なお、水田土壤のような

粘土系土壌では改質効果が見られるものの、宅地土壌や畑土壌では改質が必ずしも必要でないことが分かった。

(b) 粘性土の実規模改質試験

二軸パドルミキサ方式の土質改良機を用いて 70t/h 規模の実規模改質試験を行い、添加量 30kg/t、混合回数 1 回にて適当な改質結果を得た。

(c) 検出器特性確認試験、改質済み土壌を用いた土壌濃度測定分別試験

改質された除去土壌を用いて分別装置の放射能濃度測定値と Ge 半導体検出器測定値との相関を確認した。その結果、約 3,000～25,000Bq/kg の放射能濃度の土壌 31 試料の土壌測定の誤差平均（誤差の絶対値の平均）が 8.1%となり、目標とした測定精度（誤差平均 10%以下）を満足した。ただし、3,000Bq/kg 程度の低濃度域の土壌のみに注目すると、測定精度が 15.6%とやや劣ることが判明した。

また、放射能濃度分別された土壌の放射能濃度を確認したところ、超過混入率（低濃度側に混入した高濃度検体の割合）10%、未満混入率（高濃度側に混入した低濃度検体の割合）0%であり、要求水準書を満足する分別精度を有することを実証した。

(エ) 評価結果

実際の除去土壌を対象とし、石こう系改質材の最適使用条件を明確化した。また、土壌の濃度測定分別装置での測定値及び分別精度の平均誤差 10%以下を達成することができた。但し、3,000Bq/kg 程度の低濃度域の土壌の測定精度は 15.6%とやや劣る。

土質改質～濃度測定分別までのランニングコストは、昼間 8 時間/日作業時の場合 3,550 円/t、昼夜 24 時間/日作業時の場合 2,700 円/t(いずれも直接工事費のみ)と試算された。

作業員の年間被ばく線量は 2.94mSv/年と想定できる。また、今回の試験にて測定された作業時の粉じん濃度は最大 5.8mg/m³、空气中放射能濃度は 1Bq/m³未満であり、いずれも基準を満足する。

(オ) まとめと課題

(a) まとめ

実際の除去土壌を対象とし、施工能力 70t/h の実規模の装置を構築して土質改質及び濃度測定分別を行い、「平成 28 年度中間貯蔵施設の土壌貯蔵施設等工事：受入・分別処理工事」の要求水準書を満足する性能を有することを実証した。

(b) 課題

改質を必要しない土壌も存在することから、改質要否を自動的、かつリアルタイムに見分ける技術確立する必要がある。また、畑土壌や宅地土壌を水田土壌に混合するのみで十分な改質効果を得られることがあり、今後、土壌同士を混合する機械装置の選定と処理フローの策定が必要である。

濃度測定分別装置において、特に、3,000Bq/kg といった低濃度域の土壌の測定精度を向上させるためには、シンチレータ個数の増加やベルトコンベアの最適化（幅広化、低速化）、シンチレータで得られた計数率を換算する測定値の校正の最適化等が必要である。そのためには、多くの測定データを蓄積しなければならない。

なお、濃度測定分別装置の運用にあたっては、本装置が有する分別精度（測定誤差）を考慮して、高濃度の土壌が低濃度側に分別しないよう基準値を低く設定するか、その際にどの程度の誤混入まで許容するかなどの濃度測定分別装置運用上のルールを決める必要があると考えられる。

（２）再生利用等技術

①洗浄分級で発生する高含水比粘性土の減容化と脱水ケーキの人工碎石としての再利用

（りんかい日産建設株式会社）（付録 1-6 及び付録 2-6）

（ア）試験の目的

除染土壌の洗浄分級の結果として放射性セシウムを含む高含水比粘性土（以下、軟泥という）の発生が想定される。

この軟泥にセメントを添加後、高圧フィルタープレスにて脱水し、脱水ケーキを製作する。脱水ケーキはセメントの作用により脱水固化碎石となるが、これが中間貯蔵施設の排水層の資材（以下、ドレーン材）として使用できる強度品質と環境安全性を満たしているかどうか実証する。

（イ）試験の内容

採取した土壌から軟泥を作り、セメントを混合した後に高圧フィルタープレスにて脱水固化碎石（サイズ： $\phi 60\text{mm} \times t 23\text{mm}$ ）を製作し、その強度品質及び環境安全評価に関する試験を実施した。具体的には、一軸圧縮強度、粒度、透水性等の強度品質及び放射性セシウムの溶出や土壌環境基準等の環境安全性について評価を行った。

また、脱水時に発生するろ水の放射性セシウム含有量、「福島県生活環境の保全等に関する条例」に規定されている排水基準の遵守可否についても確認した。

さらに、脱水固化碎石の製作コストと再利用に関わる費用対効果について試算を行った。

（ウ）試験の結果

（a）脱水固化碎石

高圧フィルタープレスを用いて製作した脱水固化碎石（セメント添加率：40%/ds、種類：高有機質用）は必要な透水係数 $1.0 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ を確保しつつ、土被り 20m 相当の載荷状態でも圧壊しない強度品質を有している。また、土壌環境基準を満足すると共に、放射性セシウムの溶出は ND であることを確認した。

(b) ろ水处理

脱水時に発生するろ水は、今回採用した水处理装置により「福島県生活環境の保全等に関する条例」の排水基準を満足するまでに浄化可能であった。また、ろ水には放射性 Cs は認められなかった。

(エ) 評価結果

高圧フィルタープレスで製造した脱水固化碎石は、その品質と環境の面から中間貯蔵施設のドレーン材として利用可能性を有すると考えられる。

試算の結果、脱水固化碎石の製造コストは 1.3 万円/m³（軟泥当り）と計算された（その他水处理費用：260 円/m³）。さらに、ドレーン材として購入材を用いる場合と、貯蔵する土壌の一部から製作した脱水固化碎石をドレーン材として再利用する場合を比較すると、土壌貯蔵施設の建設コストの 11%が削減でき、かつ、貯蔵容量に 15%の余裕を確保することが可能であると試算された。

なお、減容化（脱水固化）することにより、脱水固化碎石の放射性セシウム濃度は軟泥（脱水固化処理前）より高くなるが、物質収支精度が高いことから、製造する脱水固化碎石の放射性セシウム濃度の管理が可能である。

脱水固化碎石の製作にかかわる最大被ばく線量は、4 万 Bq/kg の濃度の脱水固化碎石を扱うケース（高圧脱水処理及び運搬）で保守的な試算で最大 9.6mSv/年と想定され、作業員被ばく基準値の 20mSv/年を下回った。

(オ) まとめと課題

(a) まとめ

高圧フィルタープレスで製造した脱水固化碎石は貯蔵施設のドレーン材として利用可能性があると判断できる。また、貯蔵する土壌の一部から製作した脱水固化碎石をドレーン材として再利用することにより、土壌貯蔵施設の建設コストの削減、貯蔵容量の余裕確保を実現することが可能と考えられる。

(b) 課題

土壌貯蔵施設の採用に際し、今後の課題として以下が挙げられる。

- ・より広範囲の除去土壌から発生する軟泥の高圧フィルタープレス試験（添加するセメント選定含む）
- ・脱水固化碎石には放射性セシウムが濃縮されることから、その再利用の在り方や運用方法の整理
- ・（今回の放射能濃度域では問題がなかったが）より高濃度の放射性セシウムを含む脱水固化碎石からの放射性物質の溶出性を確認する必要がある。
- ・脱水固化碎石は放射能濃度が高くなる。作業員の放射線被ばく量軽減化のため、さらなる高圧フィルター施設のオートメーション化、各機器の耐久性向上及びメンテナンスの軽減化が求められる。

4-2. 除染土壌等の輸送や中間貯蔵等の関連技術

(1) 除染土壌等の輸送技術

①除染土壌等の輸送路上に存在する「通信不感区域」に係る対策技術の実証

(NTTコミュニケーションズ株式会社) (付録 1-7 及び付録 2-7)

(ア) 試験の目的

除染土壌等の輸送経路上に存在する「通信不感区域」において、Wi-Fi 及び FWA (Fixed Wireless Access) 等の通信方式を組み合わせ、通信不感区域を補完することの実現可能性を実証する。一般的に Wi-Fi は移動を伴わない環境下で使用されるため、走行中の輸送車両であっても一定の通信品質が確保可能か実証を通じ評価を行う。

(イ) 試験の内容

Wi-Fi 方式の有効性を評価する観点から、以下の 2 項目について実証を行い、これらの結果をもとに実環境への導入検討(置局設計)を行う。

- ・実証 A 走行中の輸送車両における通信品質の測定評価
- ・実証 B 主要な通信不感区域の調査(サイトサーベイ)

(ウ) 試験の結果

- ・速度に比例し電波が干渉し合う影響が顕著に表れると推定したが、実運用を見据えた小容量データ通信、移動速度 60km/h 以下の実験環境下では影響はなかった。
- ・通信方式や Wi-Fi AP(Access Point)が切り替わる際に発生する通信断時間は 3G/LTE→Wi-Fi で 1~5 秒、Wi-Fi→Wi-Fi で 1~10 秒、Wi-Fi→3G/LTE で 7~16 秒であった。これにより置局設計では定数値として 7 秒以下(確率:75%)を用いた。
- ・端末側の接続タイミングにより最大 360 秒程度の待ち時間が発生することが判明したが、端末へのアプリケーション実装により待ち時間の大幅な短縮が可能と考えられる。
- ・Wi-Fi からインターネットに接続する回線として、光ファイバ、FWA、衛星回線が使用可能である。

以上から本方式が輸送路上の「通信不感区域」を補完し輸送管理の精度向上に一定の効果があることを確認したとともに、実導入に向けてさらに検討すべき事項を明確化できた。

(エ) 評価結果

実証 A と B の結果から、導入に向けての留意事項の確認と国道 288 号線における置局設計を実施した。

(a) 留意事項

- ・Wi-Fi ゾーンの切り替わり時に通信断が発生するため、Wi-Fi ゾーンは可能な限り大きなゾーンを確保し、各 Wi-Fi ゾーンにおいて走行車両が 7 秒以上

滞在可能となるような置局設計とする。

- ・ 車載端末が常に最適な Wi-Fi AP のみに接続するよう、Wi-Fi ゾーンが重ならない（複数 AP を検知しない）置局設計とする。
- ・ 建柱作業時に道路の通行規制が必須となり、通行車両への影響が懸念されるため建柱数を可能な限り削減するよう配慮が必要。
- ・ 光ファイバのサービスエリア外において、FWA や自営光ファイバ敷設のハードルが高い場合は、衛星などの使用が必要となる。

（b）置局設計

国道 288 号における現地調査の結果、当該区域を含めた完全な解消を実現するには、一部区間において沿道に十分なスペースが確保できないため、森林の伐採・斜面の切り崩し等、大規模な土木工事が必要となることが判明した。工期の長期化、費用の増加、長期にわたる車両通行規制等、実現性のハードルが極めて高くなることから、一部区間で通信不感区域が残るものの実現性の高さに重点を置いた設計として、カバー率を重視した案、鉄塔建設を回避した案、衛星回線を利用した案の 3 案をまとめた。

その結果、国道 288 号の通信不感区域全体でエリアカバー率 60～92%、位置情報送信回数は往路 5～7 回以上、復路 4～6 回以上となることが分かった。

（オ）まとめと課題

今回の実証実験を通じて、Wi-Fi 方式が通信不感区域の解消に一定程度効果があることは確認できたが、本方式の導入により最大限の効果を得るためには、さらなる検証・評価・検討等が必要であり、取り組むべき具体的な事項を以下に示す。

（a）通信品質や導入工事

- ・ Wi-Fi 方式による車載端末と輸送管理システム間のアプリケーション検証
- ・ 実際の通信不感区域における通信品質評価
- ・ 車載端末の適合条件あるいは制約条件等の検討
- ・ 工期短縮とコスト低減にむけた簡易型設置方式の検討
- ・ 各通信不感区域における導入環境の詳細調査（地盤調査・地権者調査等）

（b）放射線対策

- ・ 施工場所における土壌の放射能濃度の測定評価
- ・ 避難指示区域内の作業で発生した残土等の処分方法の検討
- ・ 施工時の作業員や運用開始後の保守員を対象とした被ばく低減対策の検討等
また、本方式の応用としては以下が考えられる。
- ・ 保管場あるいは中間貯蔵施設内における携帯キャリア網の輻輳対策
- ・ 仮置場や搬出路等における通信不感区域の対策

（2）中間貯蔵・除染・廃棄物処理技術

①中間貯蔵施設における自動搬送実証

（日立造船株式会社）（付録 1-8 及び付録 2-8）

(ア) 試験の目的

中間貯蔵施設において、安全・確実な搬送を実施する観点から作業者の安全性向上を図り、搬送の効率化・省力化を推進するため、自動で搬送物等を搬送するシステムの試験を行い、安全性・実用化等の評価をおこなう。

(イ) 試験の内容

- ・ 中間貯蔵施設において安全・確実かつ搬送の効率化・省力化を可能にするために搬送物等を完全自動走行で搬送可能なシステムを構築し、自動搬送システムが複数台での運用も可能なことを実証する。
- ・ 実運用を想定し、自動搬送システムは、管制システムからの走行ルート指令にもとづき、自由に走行ルートを設定・走行できることを実証する。
- ・ 24 時間搬送を具体化し、夜間走行の操業になっても対応できるシステムであることを実証する。
- ・ 人、モノの接近を検知した場合、停止等の命令が働く、自動走行車に必要な安全系を備えたシステムであることを実証する。
- ・ 本システムを利用することで、運転手が不要になり、中間貯蔵施設に係る運転手の被ばく量を低減可能なことを実証する。
- ・ 実証試験を通して、実運用を行うために必要な課題を洗い出し、その対応策を検討する。

(ウ) 試験の結果

- ・ 完全自動走行で搬送可能なシステム：搬送物を搬送する車両として、クローラを採用し、完全自動で走行精度 1m 以下で走行することを実証した。
- ・ 走行ルートの変更・設定：管制ソフトウェアの画面上で、自由に走行ルートを設定できる機能を製作し、実施した。
- ・ 夜間操業：夜間においても昼間と同等に安全系センサが動作することを確認し、クローラの自動走行を行うことができた。
- ・ 安全なシステム：無線タグによる人検知、レーザ距離計による物体検知によってクローラが停止する安全なシステムであることを実証した。
- ・ 複数台の運用：実用化において、クローラが複数台稼働すると想定される。渋滞、交差点に複数台が進入する想定をし、クローラが想定通り制御されることを確認した。

(エ) 評価結果

- ・ コスト評価：コストは 5 年間で考えれば、システムを導入した方が安くなる。システムを導入しない場合のコストを 100 とすると、1 年目で 106、4 年目で 100 を下回り、5 年後には 99 となる。
- ・ 被ばく量評価：運搬車の運転手が不要になるため、運転手の被ばく量が低減される。

(オ) まとめと課題

(a) まとめ

本システムを用いることで、中間貯蔵施設における運搬作業の自動化が可能となり、作業の効率化、及び運転手の被ばく量の低減や安全操業（交通事故等）を行うことができる。

(b) 課題

- ・ハードウェア：センサ類の取り付け位置改善
- ・ソフトウェア：管制ソフトウェアの機能の充実、屋内での自動走行
- ・運用：積み降ろし場所・置場の管理手法、一般車両の入場ルール等

5. まとめと実装に向けた課題

(1) 採択技術と技術的助言実績

「平成 28 年度除染土壌等の減容等技術実証事業」に対して応募された 23 件の提案について、外部有識者により構成される委員会において厳正な審査を行い、実証事業の対象案件として 9 件の技術が採択された。

この採択された 9 件の事業に対して、環境省及び国立研究開発法人日本原子力研究開発機構福島環境安全センターの支援を受け、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 28 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	除去土壌の土質判別システムの開発	株式会社大林組	7月20日 8月10日 9月26日	11月14日 1月10日 1月18日	10月25日 12月2日
2			アルカリ洗浄による粘土鉱物溶解および分級による除染土壌の減容化	大成建設株式会社	7月19日 8月1日 12月22日	1月13日 1月20日	10月18日 11月25日
3			除染土壌等に対する異物除去技術の開発	JFEエンジニアリング株式会社	7月21日 8月9日 10月21日	12月20日 1月16日	9月29日 11月18日
4			溶融技術による分級後細粒土壌の高度減容化処理に関するプラント実証評価	クボタ環境サービス株式会社	7月19日 8月4日 10月4日	12月6日 1月12日	9月6日 11月9-10日
5			金属イオン含有亜臨界水による土壌分級物中のセシウムの高速イオン交換回収と高減容ガラス固化	国立大学法人東京工業大学	7月20日 8月3日 10月31日	12月20日 1月18日	9月30日 11月29日
6			連続式土壌濃度測定分別装置を用いた土壌分別および分別しやすい土壌改質の実証	株式会社安藤・間	7月20日 8月4日 8月24日 9月7日	1月6日 1月12日 1月17日	10月7日 11月7日 12月8日
7		再生利用等技術	洗浄分級で発生する高含水比粘性土の減容化と脱水ケーキの人工砕石としての再利用	りんかい日産建設株式会社	7月19日 8月8日 12月12日	12月20日 1月13日 1月20日	9月28日 10月14日 11月24日
8	除染土壌等の輸送や	除染土壌等の輸送技術	除染土壌等の輸送路上に存在する「通信不感区域」に係る対策技術の実証	NTTコミュニケーションズ株式会社	7月21日 8月9日 9月13日 9月21日	10月11日 12月15日 1月16日 1月26日	10月27日 11月16日
9	中間貯蔵等の関連技術	中間貯蔵・除染・廃棄物処理技術	中間貯蔵施設における自動搬送実証	日立造船株式会社	7月21日 8月2日 9月2日 10月3日	11月1日 1月10日 1月19日	12月5-6日 12月14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

採択された 9 件の実証事業の成果概要と評価を下記に示す。

①除去土壌の土質判別システムの開発

(株式会社大林組)

(ア) 成果概要

ベルトコンベア上を搬送される除去土壌に対し、その土の特性を瞬時に計測し、土質の種類を連続的に判別する技術を実証した。

土質判別方法により土質種類を連続判別可能。改質不要な砂質土の判別指標は、断面積 0.04m^2 以上、含水比 40% 以下、乾燥密度 0.9g/cm^3 以上が適切であると判断した。

(イ) 評価

- ・中間貯蔵施設全体システムから見た場合、土質判別という部分的なシステムについての実証事業であるため、全体最適化・前後システムとの調整等に課題がある。
- ・砂質土と粘性土を判別する精度を明確にする必要がある（どの程度の混在まで許容できるか等）。

②アルカリ洗浄による粘土鉱物溶解および分級による除染土壌の減容化

(大成建設株式会社)

(ア) 成果概要

除染土壌をアルカリ洗浄し放射性 Cs が吸着した粘土鉱物の末端部分や腐植質を離脱後、粒度分級で放射能濃度を低減させる技術を実証した。

アルカリ洗浄は水洗浄より低減効果があり、有機物量の多い土壌でより効果があった。21,347Bq/kg の土壌を洗浄した結果、8,000Bq/kg 以下の土壌を 70% の回収率で得た。

(イ) 評価

- ・設備の規模を大きくし、かつ連続処理する実証試験を行い、運転時における課題や問題点等を確認する必要がある。
- ・過酸化水素は化学物質の管理に関する各種法規に該当するので、実規模処理プラントにおいては、設備管理や取扱いに関して十分な安全対策を実施する必要がある。
- ・脱水した汚泥は放射能濃度が高くなるので、その取扱いや作業員の放射線管理等に配慮する必要がある。

③除染土壌等に対する異物除去技術の開発

(JFE エンジニアリング株式会社)

(ア) 成果概要

除染土壌から木屑や枯葉等の植物系異物を効率的に除去することを企図とした

「ジェット流解砕および重液選別技術」の組合せ技術を実証した。

砂質土 Fc10～40%相当に含まれる植物系異物の除去技術を確立し、浄化土壤について、復興資材として活用する場合の目安とされる強熱減量 10%以下を達成した。

(イ) 評価

- ・コスト面と環境面に関する課題がある。この課題への対応として「重液を使用しないシステムの開発」により、処理コストで大きな割合を占める重液のコストが削減され、浄化土壤のリンス（塩化物除去）に要する追加コストが抑えられる。
- ・分級機の異物排出を適正化することで、「上水を用いたジェット流解砕装置＋上水の選別装置システム」による強熱減量の低減は可能であると考えられる。これにより、浄化土壤の品質（塩化物残留）や廃重液の処理等による環境負荷を下げることに繋がると考えられる。
- ・ジェット流解砕装置自体の改良に関する研究が望まれる。

④溶融技術による分級後細粒土壤の高度減容化処理に関するプラント実証評価

（クボタ環境サービス株式会社）

(ア) 成果概要

非放射性 Cs を添加した細粒土壤で、溶融炉での Cs 分離率、浄化物、濃縮物についての物質収支、コスト、安全性評価を実施した。

試験での物質収支を基に 50,000Bq/kg の細粒土壤を 100t/日で溶融処理した場合の物質収支を算出。保管物の容積は細粒土壤に対して 1/1,500 となり、減容化率は 99.94%と推算された。

(イ) 評価

- ・最終処分量の低減が期待できるが、本実証では安定性 Cs を愛知県内の細粒土壤と混合した土壤を用いて実証した結果であるので、長期間保管された実際の放射能濃度の高い除染土壤で取扱い方法を確認し、検討することが必要である。
- ・高効率の放射性 Cs の分離を図るためには、排水中の高濃度 Cs の吸着処理について吸着性能を検証する必要がある。

⑤金属イオン含有亜臨界水による土壤分級物中のセシウムの高速イオン交換回収と高減容ガラス固化

（国立大学法人東京工業大学）

(ア) 成果概要

放射性 Cs 廃棄物の高減容化と安定固定化を実現する、イオン含有亜臨界水による洗浄、ガラス固化技術の実用性を実証した。

Cs 脱離工程とガラス固化法を連結したプロセスで、分級後の汚染土壤（細粒物）に対して 2 万分の 1 程度に高減容化できる見通しを得るとともに、高コスト要因

の改善策を明確化した。

(イ) 評価

- ・現在はバッチ処理の制約から複数回の処理が必要であるが、連続化すると 1 回処理で済むためコストが下がり、かつ処理量が上がる見込みが得られているので、連続回収技術（カラム法）による処理システムの高度化が必要である。
- ・高温高压が掛かるプラントを連続化するのは技術的にも難しく、高コストになるので、更なる検討が必要である。
- ・ガラス固化を行わずフェロシアン化物のまま保存する方法の検討が必要である。
- ・管理上の安全性（自己遮蔽）を考慮して、フェロシアン化鉄の代わりにフェロシアン化銅などの重い金属を使用する方法の検討等が必要である。

⑥連続式土壌濃度測定分別装置を用いた土壌分別および分別しやすい土壌改質の実証（株式会社安藤・間）

(ア) 成果概要

石こう系改質材による土壌改質、放射能濃度測定分別装置による分別を実規模で行い、改質効果や分別精度等を確認した。

改質材添加量 30kg/t、混合回数 1 回が適当であった。また、土壌濃度分別装置による分別誤差 10%以下を達成。土壌改質から濃度分別に係る一連の処理コストは 3,550 円/t と算出した。

(イ) 評価

- ・中間貯蔵施設に適用される当該施設と同じ土量規模にて、土壌の改質と放射能濃度分別の一連の処理工程を試験実証し、所定の性能を達成することを確認しているので、実用化に向けての距離が近い。
- ・改質を必要しない土壌も存在することから、受け入れた土壌の改質要否を判断できる自動化装置の開発が望まれる。
- ・改質材を使用せずに粘性土に砂質土を混合することで改質する方法も提案しているが、その後段で分級が計画されている場合には、再び粘性土と砂質土を分離することにもなり、本方法の意味が薄いものと考えられるため、本方法の採用は総合的かつ慎重に検討する必要がある。

⑦洗浄分級で発生する高含水比粘性土の減容化と脱水ケーキの人工砕石としての再利用

（りんかい日産建設株式会社）

(ア) 成果概要

土壌洗浄で発生する高含水比粘性土を高圧フィルタープレスして製作した脱水固化砕石の中間貯蔵施設のドレーン材としての適用性を検証した。

土被り 20m 相当の載荷条件での透水性を満足するほか、放射性 Cs の溶出も ND であり、脱水固化砕石のドレーン材としての適用性を確認した。製作費用は

1.3 万円/m³と試算された。

(イ) 評価

- ・ 土壌貯蔵施設に作られる排水層のドレーン材に当該脱水固化碎石を使用することは、1つのオプションとして有効と考えられる。
- ・ 土壌貯蔵施設での適応に向けた課題としては、セメント混入率の低下等による更なるコストダウン、浸出水への影響（放射性 Cs が高濃度に含有する脱水固化碎石による放射性 Cs の溶出、アルカリ化による障害の有無等）の精査があげられる。さらには、放射性 Cs 濃度の低い、あるいは放射性 Cs の溶出のない人工固化碎石の製造に向けた検討も求められる。
- ・ 土壌分別の結果として発生する栗石等をドレーン材に使用する場合との比較など、様々なケースとの比較評価を行い、本法の利害得失を明確化することも重要と考えられる。

⑧除染土壌等の輸送路上に存在する「通信不感区域」に係る対策技術の実証

(NTT コミュニケーションズ株式会社)

(ア) 成果概要

通信不感地域において、Wi-Fi 及び FWA などの通信方式を組合せ、通信不感区域解消の可能性を実証した。

通信方式や Wi-Fi AP の切替時に数秒～十数秒程度の通信断があるものの、一定間隔で輸送車輛の位置情報を送信する輸送管理システムの利用において有効であることを確認した。また、現地調査の結果を踏まえ、置局設計案を検討した。

(イ) 評価

輸送路を網羅的にカバーするには、今回の手法ではコスト面等に課題があるため、費用対効果を勘案した実現可能な手法を検討する必要がある。

⑨中間貯蔵施設における自動搬送実証

(日立造船株式会社)

(ア) 成果概要

汚染土壌等の搬送作業を道路が整備されていない場所でも走行可能なキャタピラ式搬送車であるクローラキャリアでの自動化技術を実証した。

完全自動で精度 1m 以下で走行することや走行ルート変更・設定、夜間操業、複数台運用も実証。非常停止、人や物体を検知し停止する安全なシステムであることを確認した。

(イ) 評価

- ・ 中間貯蔵施設の中で、どこで活用できるかを明確にする必要がある。中間貯蔵施設の各施設の機能・仕様を具体的に設定して検討する必要がある。
- ・ 現状システムの高度化及び効果が発揮できる範囲を拡大して、メリットを大き

くできる条件を設定した方がよい。

- もう少し精度を上げる必要がある。GPS では精度が悪いので、ロボットセンサ等を使って高度化する必要があり、工夫が必要である。

(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 年度から中間貯蔵に関する内容を主なテーマとして公募を行った。採択された 9 件の事業分野は、除染土壌等の減容・再生利用等技術が 7 件、除染土壌等の輸送や中間貯蔵等の関連技術が 2 件であり、減容技術、再生利用等技術のテーマが多かった。

これまでの実証試験の成果及び外部有識者で構成される委員会での下記意見等を踏まえ、今後、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。

- ・濃度の高い土壌を輸送する技術
- ・中間貯蔵施設の管理やモニタリングに関する技術
- ・濃度の高い土壌を対象にした技術
- ・分級後に高レベルの濃度になる土壌の管理技術
- ・焼却灰等を濃縮する技術
- ・既存の減容化に関する技術をより深めていく技術
- ・既存の処理技術のコストを削減していく技術
- ・濃度の低い土壌の再生利用用途開発に関する技術
- ・除染廃棄物を処理する技術

今年度実施された実証試験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。