

除去土壌の再利用に向けた技術の実証

－輸送管理へのVRの活用と破碎選別処理実証試験－

Technology Enabling Reuse of Cesium Contaminated Soil

- VR for Transport Management and Verification Testing of Crushing and Sorting Process -

今井亮介* 大塚義一* 白石祐彰** 小西正郎***

要 旨

平成 29 年から中間貯蔵施設が稼働しており、輸送対象の除去土壌等が放射性セシウム等を含むことから安心安全を担保するための輸送技術、大量の除去土壌等を連続的に処理する技術、及び 30 年後の県外処分を念頭に置いた長期安定的な埋立貯蔵のための可燃物分の除去技術が求められている。それに対処する技術として、運転手教育の充実を図るための輸送管理ツールの開発、及び高含水率の除染土壌を適切に改良するための方法や有機系可燃物の効率的分離方法に関する評価試験を実施した。輸送管理ツールに関しては、運転手等に高い関心を抱かせる効果が期待できる VR（バーチャルリアリティ）を導入した試走行学習素材を作成し、試験運用した。また、評価試験は、除去土壌を短時間で改質する資材選定のための室内試験、実規模機器を用いた大型土のうの荷下ろしと破碎性能、及び土壌試料を用いた改質効果発現性と模擬可燃物の分離性能に関する実証試験を実施し、中間貯蔵事業への適用可能性に関する知見を収集した。

キーワード：中間貯蔵施設、VR、破碎選別処理、改質材、実証試験

1. まえがき

除染で発生した約 2,200 万 m³の除去土壌等を中間貯蔵施設で処理する施設の稼働が平成 29 年から始まり、また、その翌々年度までに仮置場から同施設に除去土壌等を 1,250 万 m³ 輸送する計画が立てられている¹⁾。この計画を円滑に実施するために中間貯蔵事業では、安心安全を担保するための輸送の管理技術や大量の除去土壌を確実・連続的に破碎選別し、かつ将来の再利用に向けて可燃物等を適切に除去して長期安定的に埋立貯蔵するための技術が求められている。輸送時のトラブルは、平成 30 年 3 月現在でルート逸脱が 7 件発生していることが報告されている²⁾。輸送計画に基づくと、今後の中間貯蔵施設への受入れ量は加速度的に増大する。そのため、放射性物質を含む除去土壌等という特殊性に対処する点からは、輸送等の管理技術をさらに向上させることも重要な検討事項である。

また、受入れた除去土壌を中間貯蔵施設で分別処理する数量は、平成 29 年度までに約 50 万 m³、同 30 年度に 90～180 万 m³、次年度は 160～400 万 m³、その次の年度に 200～600 万 m³ とする計画が公表されている。現時点では、これらを 8 つの受入・分別処理施設で処理して埋

立貯蔵する計画であり、この大量の受入れ量を確実に迅速に処理できる施設の建設運営も求められている¹⁾。この実現のためには、用いる機器の組み合わせ構成とともに、機器性能を効果的に発現可能な機器配列について評価しておくことが重要である。

このような背景から、中間貯蔵事業に資するための技術として輸送管理ツールの構築、及び受入・分別処理施設において大量処理を具現化するための要素技術に着目した実証試験を実施した。前者については、間違いやすい侵入箇所を実際の動画で疑似体験する「VR を導入する方法で車両運転手教育を実施するツール」を作成し、試験運用した。後者については、「輸送車両からの迅速で安全な除去土壌（大型土のう）の荷下ろし方法」、「異物が除去土壌中に混在していた場合でも大型土のう破袋処理の連続性を維持するための破袋・破碎方法」、「2 次分別に障害を及ぼすような土質に対する効率的な改質方法」、及び「大型土のう破砕片等の可燃物が混在している場合の分離方法」に関する実証試験を実施し、より高い分別処理効果を実現するための技術的検証を行った。

以下に、これらに関する詳細を述べる。

* 土木本部環境技術室 ** 技術研究所環境研究グループ *** 東日本支社福島復興再生事務所

2. VR を用いた車両運転手の教育管理ツールの開発

2.1 目標とする教育管理ツール

運行車両のルート間違いは、しばしば起こり得る事象である。資機材を運搬する一般車両では、ルート間違いは元の道に戻ることで解消可能であり、大きな支障が生じることは殆どない。しかしながら、放射性物質を含む大型土のうの輸送車両がルート間違いをした場合は、線量による周辺環境への影響懸念を引き起こす等で沿道住民の方の不安をあおる契機となる。そのため、大型土のうの輸送車両のルート間違いを未然に防ぐことは非常に重要な安全管理要素の一つとなっている。一般的には、机上教育での運転手教育の実施やルート間違い発生後の周知教育等で是正する方法が用いられていることが多い。しかしながら、従事運転手数が多い場合にはこれらの教育形態が集合教育とならざるを得ず、また臨場感が乏しくなることや個々人の集中力が欠如する等で期待する効果を十分に発揮できない場合がある。そこで、臨場感と個々人の集中力を高める方法として VR を導入した安全管理方法を考案した。この方法による教育では、実際の運行経路と間違いやすい曲がり角等を動画で確認できるようにすること、及び個々人の集中力を高める方法とすることを目標とした。

2.2 教育管理ツール構築に用いた資機材

VR による教育管理用の動画素材をできるだけ簡便に作成するために、車両に搭載して対象ルートを撮影するための 360 度カメラ、その動画を学習者がゴーグル内で視聴して学ぶための VR ゴーグルと動画再生用のスマートフォンの 3 つを用いた。これらの資機材の仕様と用途を表-1 に示す。これらは、汎用品で入手も容易であり、費用面でも大きな障害になるようなものではない。写真-1 に VR ゴーグルの使用状況を示す。

2.3 教育管理ツールの構築方法

教育管理ツールの作成に当たっては、教育目的と対象者を明確にした上で教育内容を構築することが重要となる。当該試作においては、除去土壌等の輸送に従事する運転手を対象として輸送ルート上のトラブル対策を学ぶことを基本コンセプトとした。そのための教育カリキュラム例を図-1 に示す。カリキュラムは、一般教育、試走&危険体験教育及び再発防止教育の 3 教程とし、後者の 2 つについて VR を活用することとした。VR 動画の作成は、次に示す手順で作成した。

- i. 走行ルートにおける間違いやすい箇所やトラブルが予測される箇所を抽出
- ii. 該当あるいは類似箇所を含む撮影ルートを選定
- iii. 360 度カメラを搭載した車両で選定ルートを走行して素材動画を撮影
- iv. 素材動画を市販ソフトで編集。編集においては、教育エッセンスを含みかつ受講者の飽きを招かない

表-1 VR教育管理ツール構築用資機材の仕様と用途

機材名	仕様	用途
360度カメラ	スマートフォンで再生可能な動画が撮影できるもの	学習ルートの動画撮影
スマートフォン	動画再生可能なもの（通信機能は不要）	VR ゴーグルで動画を再生
VR ゴーグル	スマートフォンを装着可能なもの	学習者がスマートフォン動画で疑似体験学習



写真-1 VR教育の状況

い程度の時間を設定（試作版では 10 分以下）

- v. 複数人で動画を見ながら「所定の教育コンテンツ映像となっているか」、及び「注意喚起文字や再発防止のための注意書きなどの挿入文言箇所」などを確認して動画最終版を作成
- vi. 特徴的な確認箇所や目印等を音声で案内する必要性を検討し、必要性が高い場合には動画に合わせたナレーションを挿入

2.4 展開状況と課題

VR を用いた教育は、実際の映像を用いた走行体験とトラブル遭遇時の体験ができるため、教育効果の向上が期待できる。ただ、作成に手間がかかることや受講者が VR ゴーグルの操作に慣れる必要があるなどの課題もある。また、作成した VR 動画を実際の除去土壌等を運搬する大型車両運転手に視聴してもらい、使い勝手を体験してもらった結果からも操作性の点などで改善の余地が

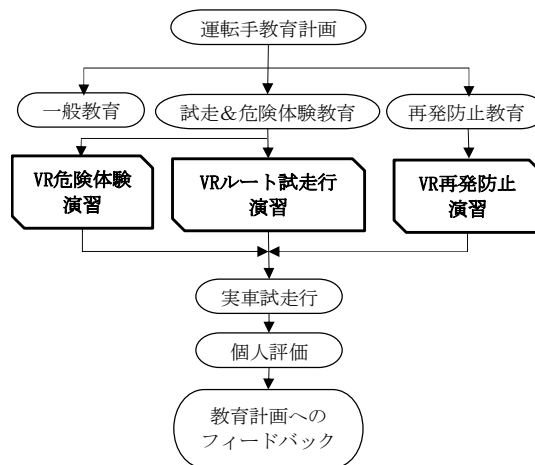


図-1 試作した教育管理ツールのカリキュラム例

あることが分かった。今後、実運用する該当現場で日常的に動画を撮影してそれを加工する運用も計画しており、より簡便にトラブル発生を回避するためのツールに改善する予定である。

3. 大型土のうの荷下ろしに関する実証試験

3.1 実証試験の概要

現在、仮置場に保管されている大型土のう（1袋当たりの容積は約1m³で重量は約1.4t）は、10t積みダンプトラック1台当たり原則として6袋を積載して中間貯蔵施設の受入・分別処理施設に搬出され、荷下ろし後は貯蔵施設に埋立てるための改質や可燃物分の分離・除去等の処理が施される。その処理量に関する現時点での中間貯蔵要求水準仕様は140t/hで、1日12時間の稼働が計画されている。そのため、搬入された大型土のうは1時間当たり100袋以上の荷下ろしが必要になる。また、除去土壌中には放射性セシウムが含まれており、長時間の近接作業が必要となる場合には被ばく量が增大するリスクがある。一般的な大型土のうの荷下ろしには、人力による玉掛け、クレーンでの吊り込み荷下ろし後に玉外しする方法が基本である。また、効率化を図るために複数袋の玉掛けや自動で玉外しする治具の導入等が実施されている実態もある³⁾。ここでの実証試験では、大型土のうを吊り具を用いずに把持できる装置（フレコンハンドラー）を用いて所要仕様以上の効率的な荷下ろしが可能かどうかを評価した。この方法による確実な荷下ろしが可能になれば、操作重機の運転手が、一人で遠隔で荷下ろしができ、玉掛け作業員が土のうに近づく必要がなくなるため、転落リスクや放射性物質による被ばくリスクを大きく低減できる。実証試験は、一般土壌で実施したことから被ばくについての評価は行っていないが、荷下ろし速度等について評価したのでその結果を以下に示す。

3.2 実証試験の方法

実証試験では、除去土壌を模擬した大型土のう6袋を積載したダンプトラックとフレコンハンドラーを装着した重機を用いて、大型土のうの荷下ろし速度と土のうがダンプトラックの荷台上で隙間なく積載された状況でもフレコンハンドラーによる把持が可能であることを確認した。荷下ろし重機は、産業廃棄物処理で使用されているキャビンが昇降するタイプのもを用いた。試験は、ダンプトラックに密な状態で積載された大型土のうを把持し、180度旋回で定位位置に荷下ろしするサイクルタイムを測定するとともに、フレコンハンドラーで把持して荷下ろしした後の大型土のうの損傷の有無及び把持重機の運転席からの遠隔操作性を評価した。実証試験状況を写真-2に示す。

3.3 実証試験の結果

サイクルタイム測定結果を表-2に示す。また、荷下



写真-2 フレコンハンドラー実証試験

表-2 大型土のう荷下ろしサイクルに関する測定結果

項目	数値
フレコンハンドラーによる荷下ろし平均サイクルタイムの実測値	42秒/袋
ダンプ1台分(6袋積載)の荷下ろし所要時間(計算値)	252秒
荷下ろし重機1台で1時間当たりの荷下ろし可能量(計算値)*	120 t/h

*中間貯蔵施設受入・分別処理施設においては、140t/hが要求水準仕様(処理必要量)として規定されている

ろし後の大型土のう表面の観察結果から、土のう表面に損傷が生じていないこと、及び見下ろすことのできるキャビンとフレコンハンドラーに装着したカメラで把持位置を確認しつつ差し込むことのできる機能により、隣接する3つの大型土のう間に発生する空隙を上手く活用して把持することが可能であることを確認できた。

表から、中間貯蔵施設の受入・分別処理施設で求められている処理必要量140t/hを実現するためには、フレコンハンドラー装着重機を2台配備する必要があること、及び荷下ろし施設においては最低2台分の荷下ろし場を設けた施設計画が必要であることなどが明らかになった。

4. 除去土壌に対する改質材の室内選定試験

4.1 改質材の室内選定試験の概要

中間貯蔵施設に搬入される除去土壌は除染で発生した表層土壌が主体であり、大型土のうへの封入時の状態が対象土地の地目（庭土や農地など）及び天候や季節要因（湿潤状態の差異など）で大きく異なり、適切な受入・分別処理を行うためには粘土分の改質や水分量の調整が必要になる。また、中間貯蔵要求水準仕様では、中間貯蔵受入・分別処理施設で処理して貯蔵施設に埋立てられる土壌は20mm以下のものとする、及び改質材添加量（石膏系）は3%以下とすることとされている。また、140t/hの受入・分別処理の連続性を維持しつつ改質を行うことも求められている。この仕様を満足させるためには、「高い分級効果が得られること」、「短時間で改質効

表-3 改質材に関する室内試験の結果

No	改質材の分類	摘要	記号	室内試験結果					評価			備考
				積算改質材添加量 (g)	改質材添加率 (%)	積算攪拌時間 (s)	改質土壌含水比 (%)	回収率 (%)	改質材添加量評価 ◎: 1.5%以下 ○: 3%未満 ×: 3%以上	攪拌時間評価 ◎: 60S以下 ○: 120S未満 ×: 120S以上	回収率評価 ◎: 99%以上 ○: 98%以下 ×: 95%以下	
0	-	土壌のみ(ブランク)	Soil-BK	-	-	-	-	49	-	-	×	水田表層土壌
1	セメント系	エントリンガイト系	Cem-Dn	134	13.4	129	65.3	98	×	×	○	
2	石灰系(lime)	生石灰	CaO-LM	162	16.2	221	43.1	96	×	×	○	
3	石膏系(plaster)	石膏系	Lime-EH	300	30	412	未計測	未計測	×	×	-	実証試験
4		石膏系(中性)	Lime-AN	6	0.6	265	23.1	99	◎	×	◎	
5	高分子ポリマー (polymer)+増量材系	石膏+ポリマー	LimeP-ZB	117	11.7	142	69.7	99	×	×	◎	
6		ゼオライト+ポリマー	ZeoP-SΣ	12.7	1.27	80	78.8	100	◎	○	◎	実証評価
7		ゼオライト+ポリマー	ZeoP-Sλ	6.2	0.62	89	79.1	99	◎	○	◎	
8		ポリマーのみ	P-AP	2	0.2	117	80.9	99	◎	○	◎	比較試験用
9		シリカアルミナ鉱物+ポリマー	SiOP-OK	19	1.9	38	65.2	99	○	◎	◎	実証評価
10	酸化マグネシウム系	MgO系	Mg-GL	36	3.6	52	79.2	98	×	◎	○	
11	ペーパースラッジ系	ペーパースラッジ系	Slug-MC	330	33	371	52	93	×	×	×	
12	炭酸カルシウム系	Ca系	Ca-Y	36	3.6	172	28.9	97	×	×	○	
13		Ca系+ポリマー	CaP-Y	15	1.5	96	32.5	99	◎	○	◎	実証後提供受

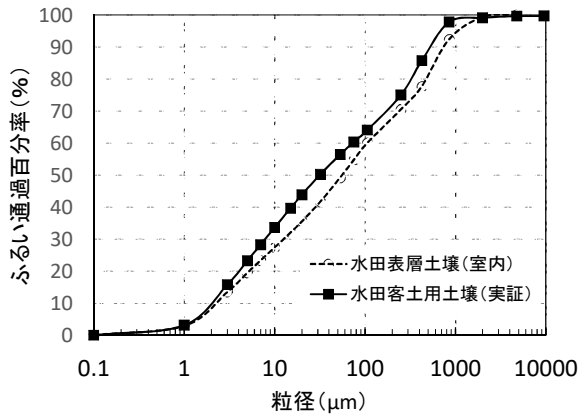


図-2 試験に用いた土壌の粒度分布

果を発現すること」及び「経済性も確保できること」の全てを満たす改質材の選定が必要となる。そのため、これらを実現可能な改質材を選定する室内試験を実施した。その試験結果を以下に示す。

4.2 改質効果を確認する室内試験

試験には、改質処理において障害が発生する懸念のある、粘性土系で含水率の比較的高い水田用地から採取した土壌を用いた。また、改質対象の土壌に添加する改質材は、改質土壌の初期含水比を高めないために粉末系で、短時間で改質効果が期待できるものを選定した。これらの室内試験結果から、実機を用いる実証試験で添加効果を確認するための改質材を絞り込んだ。室内試験に用いた土壌と選定した改質材、及び室内試験の方法を以下に示す。

a. 試験に用いた土壌

茨城県の休耕田表層土壌から採取した土壌（水田表層土壌）の粒度分布を図-2に示す。図には、実証試験に用いた水田客土用土壌の測定結果も示した。

b. 選定した改質材

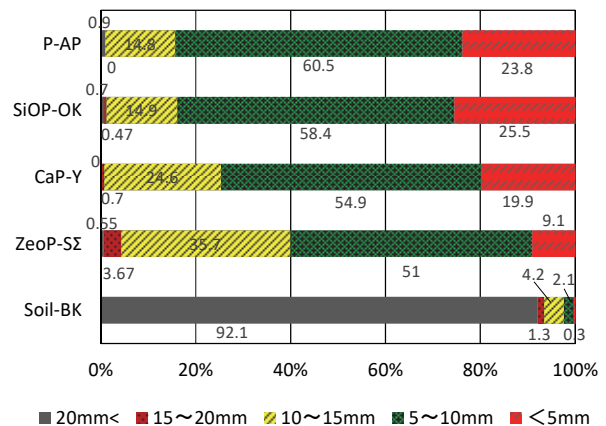


図-3 改質後土壌のふるい分け試験結果

改質材は表-3に示すように、セメント系1種類、石灰系1種類、石膏系2種類、高分子ポリマー+増量材系5種類、酸化マグネシウム系1種類、ペーパースラッジ系1種類及び炭酸カルシウム系2種類の計13種類を選定して、次に示す方法で改質効果を確認した。

c. 改質効果確認試験の方法

改質効果確認試験は、まず水田表層土壌 1kg をモルタルミキサーに投入して1分30秒攪拌した。その後改質材を適量添加投入してモルタルミキサーを攪拌させ、目視で改質効果を確認し、土質の改質が観察されるまで改質材を少量ずつ追加添加する方法とした。攪拌を終了した改質後の土壌は、目開き 20mm、15mm、10mm、5mm の4種類をふるい試験にかけ、それぞれの通過重量の測定と回収した試料の含水率を測定した。

改質効果の悪い改質材では、ミキサー攪拌翼への付着土壌やふるい目への付着で回収率が低下する。そのため、改質材の改質効果は、改質効果が得られた時点の積算添加量、積算攪拌時間及び回収率で評価することとした。

回収率は、ふるいを通過した総回収重量と投入量の比で求まる値とした。

試験の手順を i ~ x に示す。

- i. ミキサーに土壌を 1 kg 入れ、1 分 30 秒間攪拌し、攪拌翼についた泥の塊を形成させる
- ii. 改質材を 3g 分取する
- iii. 改質材を小さじで適当量ミキサーに入れ攪拌する
- iv. 攪拌を中止し、土壌の性状変化を観察する
- v. 改質材を 3g 入れ終わったら ii ~ iv を繰り返す
- vi. 土壌の改質が観察されれば、改質材の投入を中止する
- vii. 攪拌時間の累計、及び改質材の投入量を記録する
- viii. 土壌をふるい振とう機に投入する
- ix. 振とうの目盛を最大にして 10 秒間運転する
- x. 各ふるいに残った（または通過した）土壌の重量と含水比を測定する

4.3 試験結果

水田表層土壌のみを用いた攪拌試験結果（ブランク）と 13 種類の改質材の改質効果を確認した室内試験結果を表-3 に示す。改質材を添加した土壌の回収率はいずれも 90% 以上の数値を得ており、ブランク（Soil-BK）のふるい後の回収率が 49% であることから、改質材種類による差異はあるものの、改質材を添加することで分級効果が発現する結果を確認できた。また、改質材種類により積算改質材添加量と積算攪拌時間には大きな差が生じる結果が得られた。特に、中間貯蔵での現状仕様である石膏系（Lime-EH）は、ミキサー攪拌翼への付着が生じて攪拌後試料の採取が困難になる結果が得られた。中間貯蔵施設要求水準仕様、及び実機を用いた場合の許容攪拌時間等から、少量での改質効果が望ましい積算改質材添加量は、土壌に対する重量比について 1.5% 以下を◎、3% 未満を○及び 3% 以上を×とし、短時間での処理

効果発現が望ましい積算攪拌時間について 60 秒以下を◎、120 秒未満を○及び 120 秒以上を×とし、改質効果発現で値が大きくなる回収率について 99% 以上を◎、98% 以下を○及び 95% 以下を×とした定性評価を実施した。また、×を呈する改質材を実際の受入・分別処理に適用した場合、処理プロセスへの悪影響が発生する危険があることから、一つでも×の評価となったものは選定対象から外すこととした。その結果、No.6、7、8、9 及び 13 の改質材で 3 つの評価に×がない結果となった。この内の No.7（No.6 と同系統）を除く 4 試料の改質後土壌のふるい分け試験結果、及びブランクの結果を図-3 に示す。中間貯蔵の貯蔵施設には、20mm ふるいを通過した処理土壌が貯蔵されることから 20mm 以上の割合を少なくする改質結果が望ましい。図-3 から明らかなように Soil-BK（ブランク）では 20mm 以上が 92.1% の値を示したことに對し、P-AP（No.8）、SiOP-OK（No.9）、CaP-Y（No.13）及び ZeoP-SΣ（No.6）はそれぞれ 0.9、0.7、0 及び 0.55 と、いずれも 20mm 以上は 1% 以下に改質されることが分かる。



写真-3 実証試験における機器配置状況

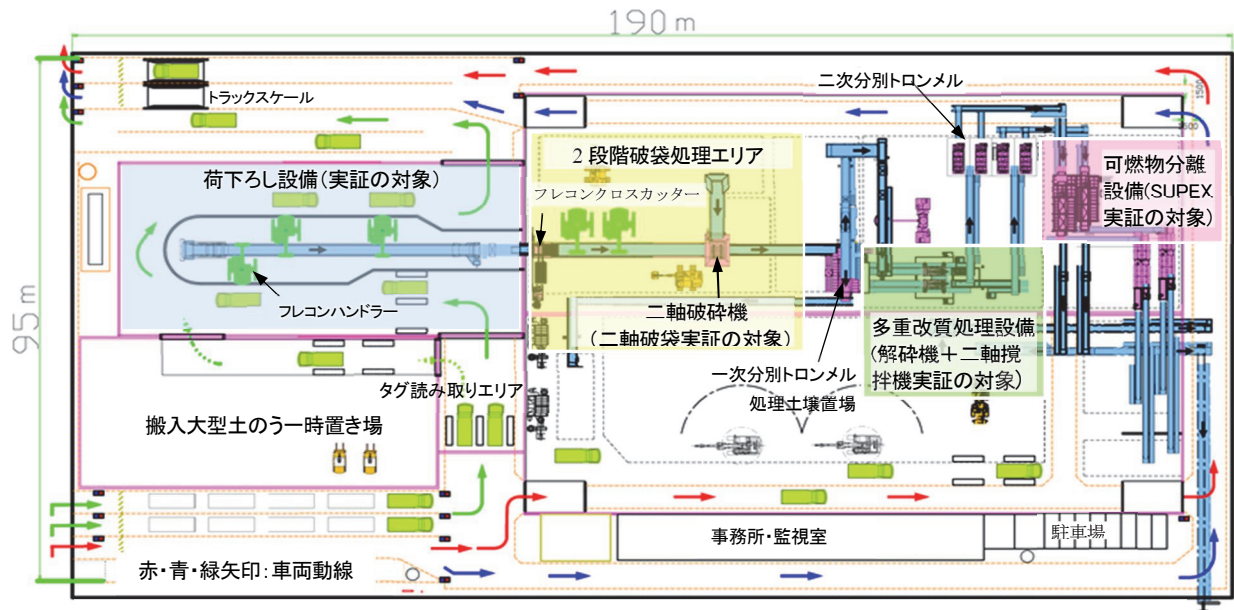


図-4 中間貯蔵施設における受入・分別処理の機器配置計画平面図案と実証試験の対象設備

これらの結果と、No.7 は No.6 と同系統であること、No.8 は高分子ポリマー単体で添加量が少なくなり実機適用時の攪拌性に危惧があること、及び No.13 は実証試験後に提供を受けたことなどにより、実証試験で評価する改質材としては、石膏単味の No.3、No.6 及び No.9 の 3 種類とすることとした。

解砕機とパドルミキサーを組み合わせた改質処理の「多重改質システム」、20mm 以下の通過分を回収するための「トロンメルによる二次分別」、及び「SUPEX（熊手式ふるい）による可燃物分離処理」を最終工程とする一連の組み合わせとした。計画した機器配置計画平面図と実証試験の対象とした設備を図-4 に示す。また、実証試験の機器配置状況を写真-3 に示す。これらの機器構

5. 大型土のう破砕処理、土壌改質処理及び可燃物分離に関する実証試験

5.1 実証試験の概要

実際の中間貯蔵受入・分別処理施設に配置することを想定した機器構成は、フレコンハンドラーによる搬送バルコンへの大型土のうの「荷下ろし設備」、フレコンクロスカッターと二軸破砕機を組み合わせる大型土のうの破袋処理する「2 段階破袋システム」、トロンメルによる 100mm 以上の夾雑物を取り除く「一次分別処理」、

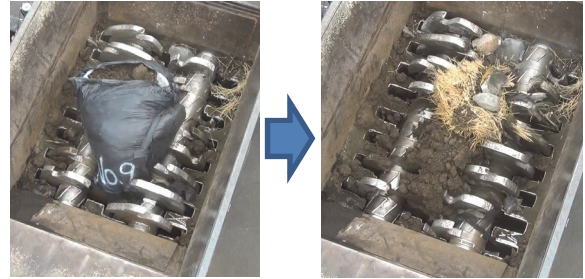


写真-4 二軸破砕機による破砕試験状況
(自然石混入土のう：破袋時間 22 秒 (164 袋/h))

表-4 実証試験の実施試験ケース及び実証（二軸破砕、改質効果、可燃物分離）試験の結果

a. 二軸破砕機による大型土のうの破砕性能評価試験

試験-土壌試料名	摘要	破砕前の大型土のう内容物		破砕後の計測値					破袋処理		備考		
		土壌試料種類	重量 (kg)	模範夾雑物 (重量は下記に加え封入のう1袋含む)		10mm以上			0mm未満	大型土のうの約9割が呑み込まれるまでの時間 (秒)		破袋処理可能量 (袋/時間)	
				種類	重量 (kg)	回収物量②	可燃物量③ = ②-④	不燃物量④	⑤ = ④/②				回収物量⑥
破袋T1-SA	大型土のう3袋を一つの土のうに封入したもの	川砂 (SA)	918	大型土のう3袋	15.8	16.6	14.3	2.3	13.8%	852.6	11	327	・多重袋を確実に破袋した ・10mm以上のうち14%が不燃物
破袋T2-SB	夾雑物入り大型土のう3袋を一つの土のうに封入	川砂 (SB)	1022	稲わら(2kg), 土のう大3袋+ 小10袋	18.2	60.6	-	-	-	894.6	10	360	・土のうを含む多重袋を確実に破袋
破袋T3-PA	大型土のうに可燃物混合して封入	水田客土 (PA)	1164	稲わら(2kg)	6	36.6	11.8	24.8	67.8%	1114.6	-	-	・10mm以上のうち68%が不燃物
破袋T4-PB	大型土のうに可燃物+ブロック混合を封入	水田客土 (PB)	1038	稲わら(2kg), ブロック(55.8kg)	61.8	62.6	-	-	-	1038.6	22	164	・コンクリートブロックを確実に破砕
破袋T5-PC	大型土のうに可燃物+自然石混合封入	水田客土 (PC)	1034	稲わら(2kg), 自然石5個(77.9kg)	83.9	70.6	-	-	-	1012.6	22	164	・自然石を確実に破砕

b. 多重改質システム(RMZ+PM)による改質効果評価試験

試験-試料名	土壌試料の記号	改質材種類	土壌試料重量	改質材添加量 (%)	解砕機 (RMZ) 回転数 (rpm)	パドルミキサー (PM) 回転数 (rpm)	攪拌時間 (s)	含水比 (改質前) (%)	ふるい分けサンプリング重量 (改質前)					ふるい分けサンプリング重量 (改質後)					試験の結果				
									①初期未満	②10mm未満	③10~20mm	④20mm以上	⑤20mm通過率 = ①-④/①	⑥初期未満	⑦10mm未満	⑧10~20mm	⑨20mm以上	⑩20mm通過率 = ①-⑩/①					
									=②+③+④	(kg)	(kg)	(kg)	(%)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(%)					
改質T1-OK	PA	SiOP-OK	80	3	35	50	30	20.9	-	-	-	-	-	7.96	5.28	1.42	1.26	84%	室内結果等から比較ケース (SiOP-OK3%+RMZ35Hz+PM30s) とした標準値 (図-5.6)				
改質T2-BK	PA	ブランク	なし	なし	なし	なし	なし	20.9	-	-	-	-	-	13.96	1.82	2.34	9.80	30%	水田客土のみでは⑩は30% (図-5.6)				
改質T3-OK	PA	SiOP-OK	80	3	35	50	30	20.9	-	-	-	-	-	10.89	6.43	2.56	1.90	83%	改質T1-OKの再現性あり (図-5)				
改質T4-OK	PA	SiOP-OK	80	3	35	50	90	20.9	-	-	-	-	-	13.95	9.60	2.65	1.70	88%	PM攪拌時間増で⑩が増え若干改善 (図-5)				
改質T5-OK	PA	SiOP-OK	80	3	35	50	0	20.9	-	-	-	-	-	10.38	6.49	2.18	1.71	84%	PM攪拌なしでも標準と変わらず (図-6)				
改質T5'-OK	PA	SiOP-OK	80	3	35	50	15	20.9	-	-	-	-	-	11.71	8.17	2.03	1.51	87%	PM攪拌時間15sでも一定の効果 (図-5)				
改質T5''-OK	PA	SiOP-OK	80	3	35	50	30	20.9	-	-	-	-	-	12	9.92	1.40	0.68	94%	PM攪拌時間30sで効果増 (図-5)				
改質T5'''-OK	PA	SiOP-OK	80	3	35	50	60	20.9	-	-	-	-	-	13.61	10.98	1.73	0.90	93%	PM攪拌時間60sで効果増 (図-5)				
改質T6-OK	PA	SiOP-OK	30	4	なし	なし	なし	20.9	-	-	-	-	-	12.76	4.12	2.74	5.90	54%	RMZ処理なくとも⑩が急減する (図-6)				
改質T7-OK	PA	SiOP-OK	80	3	35	50	15	19.8	-	-	-	-	-	14.8	9.02	2.72	3.06	79%	PM攪拌時間15sでも一定の効果 (図-5)				
改質T8-OK	PB	SiOP-OK	50	3	なし	なし	45	19.8	-	-	-	-	-	14.64	9.64	2.46	2.54	83%	PM攪拌時間増で⑩ほぼ標準値 (図-5)				
改質T9-OK	PB	SiOP-OK	80	3	なし	なし	60	19.8	-	-	-	-	-	13.66	8.22	2.86	2.58	81%	PM攪拌時間増で⑩ほぼ標準値 (図-5)				
改質T10-EH	PB	Lime-EH	なし	3	なし	なし	30	19.8	-	-	-	-	-	12.08	5.10	3.64	3.34	72%	石灰系改質材の効果少ない (図-5)				
改質T11-BK	PB	ブランク	なし	なし	なし	なし	なし	21.1	-	-	-	-	-	10.4	3.64	3.26	3.50	66%	水田客土のみでの再測定				
改質T12-AP	PB	P-AP	なし	1	なし	なし	なし	21.1	-	-	-	-	-	9.52	3.64	2.72	3.16	67%	ホリマのみはPM30sでは効果小 (図-5)				
改質T13-AP	PB	P-AP	なし	1.0	なし	なし	90	21.1	-	-	-	-	-	11.86	6.52	3.28	2.06	83%	ホリマのみはPM90sで効果発見 (図-5)				
改質T14-SΣ	PB	ZeoP-SΣ	なし	2	なし	なし	30	21.1	-	-	-	-	-	10.46	4.62	2.92	2.92	72%	ゼオライト系改質効果少ない (図-5)				
改質T15-SΣ	PB	ZeoP-SΣ	なし	4	なし	なし	なし	21.1	-	-	-	-	-	11.32	4.98	3.34	3.00	73%	なし				
改質T16-SΣ	PB	ZeoP-SΣ	なし	2	なし	なし	60	21.1	-	-	-	-	-	11.76	5.42	2.96	3.38	71%	ゼオライト系改質効果少ない				
改質T17-BK	PB	ブランク	80	なし	なし	なし	30	11.5	-	-	-	-	-	18.42	15.88	2.18	0.36	98%	写真画像による表面観察のために実施				
改質T18-OK	PB	SiOP-OK	50	3	45	なし	なし	11.5	-	-	-	-	-	16.84	12.14	2.56	2.14	87%	RMZ回転数増で標準より⑩が3%改善 (図-5)				
改質T19-OK	PB	SiOP-OK	80	なし	なし	81	なし	11.5	13.86	1.90	3.52	8.44	39%	16.48	12.18	2.72	1.58	90%	PA回転数併用で標準より⑩6%改善 (図-5)				
改質T20-OK	PB	SiOP-OK	80	5	なし	50	なし	11.5	-	-	-	-	-	19.46	14.80	2.34	2.32	88%	改質材量増で標準より⑩が4%改善				
改質T21-OK	PB	SiOP-OK	80	2	なし	なし	なし	11.5	-	-	-	-	-	18.72	13.14	3.32	2.26	88%	改質材量減の影響少ない				
改質T22-OK	PB	SiOP-OK	80	1	なし	なし	なし	11.5	11.82	3.08	3.36	5.38	54%	19.4	11.10	5.16	3.14	84%	団粒土壌を追加すると改質効果減				
改質T23-OK	PB	SiOP-OK	80	3	なし	なし	なし	11.5	-	-	-	-	-	19.96	11.94	4.12	3.90	80%	団粒土壌を追加すると改質効果減 (図-5)				
改質T24-OK	PB	SiOP-OK	80	3	なし	なし	なし	11.5	-	-	-	-	-	19.16	12.80	3.28	3.08	84%	標準の再現性が確認された (図-5)				
改質T29-OK	PC	SiOP-OK	60.4	3	なし	なし	なし	25.1	-	-	-	-	-	50.40	-	-	-	85%	25.1%に含水調整した土の改質効果も確認				
改質T30-BK	PC	ブランク	20	なし	45	なし	なし	25.1	-	-	-	-	-	9.86	1.76	2.40	5.70	42%	17.48	43.0	7.44	48%	BKの再測定

*: 水田客土用土壌 (PC) に水分を添加して含水比調整したものを

c. SUPEX実証機による可燃物分離性能試験

試験名	サンプリングした試料 (改質後)	改質後土壌投入重量 (kg)	SUPEX熊手式ふるい分別物				SUPEX通過物		備考
			分別物の総量②	可燃物分③ (手選別)、割合: ③/②	不燃物分④ (手選別)、割合: ④/②	通過物量⑤と割合 (⑤/①)			
可燃分離T1	改質T26.27.28-OK	32.46	1.76 kg	0.54 kg	1.66 %	30.56 kg	3.75 %	30.56 kg	94.1 %
可燃分離T2	改質T25.29-OK	29.34	29.34 kg	0.44 kg	1.89 %	28.06 kg	2.88 %	28.06 kg	95.6 %

成のうちの 2 段階破袋システムの後段に配置する二軸破砕機による大型土の破袋性能、多重改質システムによる改質効果及び SUPEX 実証機による可燃物分離性能を評価するための実証試験を実施した。

5.2 実証試験の方法

実証試験は、次の a～c に示す 3 つの評価試験を実施した。実証試験に用いた模擬の除去土壌は水田や校庭土壌を除染で剥ぎ取ったものを模擬するために、水田客土用の土壌及び川砂を大型土のうに充填したものをを用いた。また、模擬可燃物としては、稲わらを大型土のう 1 袋に 2kg を混ぜ込み、異物としては、ブロックあるいは自然石 5 個を大型土のうに詰め込んだ。実証試験で実施した試験ケースを表-4 にまとめて示す。

a. 二軸破砕機による大型土のうの破砕性能評価試験

除去土壌を詰め込んだ大型土のうは、複数土のうが収納されたものやブロックなどが混在している可能性があることから、受入・分別処理施設では大型土のうからの除去土壌の取り出しと混在物を除去して、貯蔵に適するように処理（20mm 以下に分別し可燃物を除去）する必要がある。また、放射性物質を含むことから、人力作業を極力回避することや大量処理を実現するために連続処理を損なわない機器配置が求められている。そのため、大型土のうからの除去土壌の取り出しは、ウォータージェット切断で土のう底部を切り裂いて剥ぎ取る初段処理に加えて、小型土のう、自然石やブロック片等の異物が入っていた場合でも破袋処理することが出来るように、後段に二軸破砕機を直列に配置した「2 段階破袋システム」の導入を想定した。一方、ウォータージェット切断処理は実績⁴⁾や著者らの知見（実機は当社らの工事所で稼働中）があることから、実証試験では、同システムの後段に配置した二軸破砕機を用い、自然石等が混在した場合の破砕性能の確認を目的として実施した。二軸破砕機は、M&J イータプレシュレッド 4000（産廃に対し 35t/h の処理能力を有するもの）を用いた。

b. 多重改質システムによる改質効果評価試験

中間貯蔵の受入・分別処理施設の要求水準書仕様では、土壌の含水率を調整するための設備として、石膏系改質材を 30kg/t 添加したものを効率よく攪拌混合できる設備 2 基の配置と、改質材の添加量を必要最小限とすることが示されている。そのため、一般的に用いられている二軸の攪拌翼で混合する方式のパドルミキサーに加え、その前段に攪拌混合効果を高めるための土壌を解砕して比表面積を大きくする高機能土壌改質解砕機（RMZ マゼタロウ）を導入する方法を考案した。実証試験では、解砕処理の有無による改質効果と室内試験で選定した改質材の適用性を評価した。

c. SUPEX 実証機による可燃物分離性能試験

土の除染は表層土壌の剥ぎ取りであることから、発生した除去土壌中には枯葉や木の枝などの可燃物が相当量

混在している。これらは長期の中間貯蔵中に腐食等で分解してガス化するため混入量を抑えることが望ましい。中間貯蔵要求水準書仕様でも極力除去することが求められている。一般的な可燃物分離装置は、一次分別処理したものをふるい目のより小さなトロンメルや振動ふるい等の二次分別処理装置を配置して分別する方法が多いが、著者らは災害廃棄物処理で導入した熊手式ふるい機構の SUPEX を用いた方法で高い分別効果が得られる知見⁵⁾を有していることから、中間貯蔵施設における可燃物の除去分離に対しても SUPEX を導入することを想定した。SUPEX 実証試験には熊手式ふるいを一段とした実証機を用いて、除去土壌中に混在させた稲わらの分別効果を評価した。

d. 実証試験に用いた模擬除去土壌

実証試験に用いた川砂と水田客土用の土壌について、それぞれの土壌物性を表-5 及び図-2 に示す。図から、室内と実証試験で用いた土壌は、ほぼ同様の粒度分布特性を示し、実証試験でも室内試験結果と同様の改質効果を発現する土壌であると理解できる。

5.3 実証試験の結果

二軸破砕機による破砕試験状況を写真-4 に示す。小型土のうを 10 袋詰め込んだ多重袋（表-4 の破袋 T2-SB）の破袋を初め、最も破砕が困難と想定した自然石を含む大型土のうも 22 秒で破袋できることなどを確認できた。この破袋処理速度に基づけば、164 袋/h（約 230t/h）での処理が可能であり、中間貯蔵施設の要求水準書仕様である 140t/h を十分上回る能力があることを確認できた。

中間貯蔵要求水準仕様による破袋された後の除去土壌の分別処理は、ふるい目開き 100mm のトロンメル等で破袋土のう片等を除去する一次分別処理、その後改質材の添加・攪拌処理、さらに二次分別処理としてトロンメル等による 20mm ふるい分別で、その通過分が貯蔵施設埋立て用の土壌として取り扱われる。そのため、改質材の添加では、20mm ふるい通過分の回収率の高い改質材を採用することが望ましい。この前提条件で、改質材種類を変えて解砕機を通過させ、その後パドルミキサーで攪拌し、攪拌後の土壌を 20mm ふるいで手動分別した試験結果を図-5 及び表-4 b に示す。図より、SiOP-OK 改質材を添加したものは何れも 80%以上が 20mm ふるいを通過する結果が得られた。改質材未添加のブランク（表-4 改質 T2-BK 及び改質 T11-BK）は 20mm 通過分が 30%及び 66%であり、その他の改質材で

表-5 実証試験に用いた土壌の特性

土壌名称	川砂	水田客土用土壌	
土粒子密度	g/cm ³	2.72	2.59
自然含水比	%	14.3	27.0
コーン指数	kN/m ²	5074	586
強熱減量	%	1.8	5.3
土質分類		礫質(SPG)	細粒分質砂(SF)

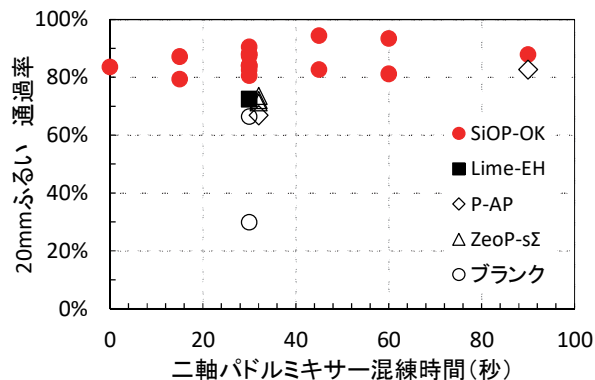


図-5 二軸パドルミキサーによる改質材評価試験

は72% (同表改質 T10-EH 他) 以下であることから、相対的に SiOP-OK 改質材の適用により高い分別回収効果が得られることが分かった。この結果から、室内試験結果と同様に実機でも同改質材の適用が望ましいことを評価・確認できた。

また、解砕機による改質の改善効果について測定した結果を図-6に示す。図には20mmふるいを通したものととも10mmふるいの通過分を測定した結果も示した。図より改質材添加のない改質 T2-BK の20mmふるい通過率は30%以下であること及び解砕機処理のない改質 T6-OK で54%以下であることが分かる。また、解砕機処理した改質 T5-OK と同 T1-OK の20mmふるい通過率が80%以上の結果が得られ、解砕機処理の効果は約30ポイントあることが分かる。このことから解砕機の導入で改質材の攪拌効果が大きく改善されることを確認でき、実機の設備に解砕機を配置する効果が高いことが分かった。

SUPEX による可燃物の分離試験結果は、表-4cの可燃分離 T1 及び同 T2 に示すようである。大型土のうへの可燃分 (土壤重量 1.4t に対して稲わら 2kg) の初期混合率は0.14%であり、改質処理後にサンプリングしてSUPEX 処理した後の回収率は1.66%及び1.89%となった。この結果、初期混合率が微小であったことから適切な定量評価に至らなかったが、稲わらを熊手式ふるいで有効に回収できることを、目視により確認した。この点から、SUPEX の適用は有効と考えられるが、課題としては評価試験方法自体を再考する必要性が挙げられる。

6. まとめ

中間貯蔵事業に資するための技術として、輸送管理における教育ツールの開発及び処理性能が高かつ連続処理を可能にする受入・分別処理の機器構成に関する実証評価試験を実施した。これらに関する試験検討の結果、次のことを明らかにできた。

- i. VR は比較的簡便に安全運行教育に活用でき、実際の運行ルート映像の視聴覚体験や特徴的な目印

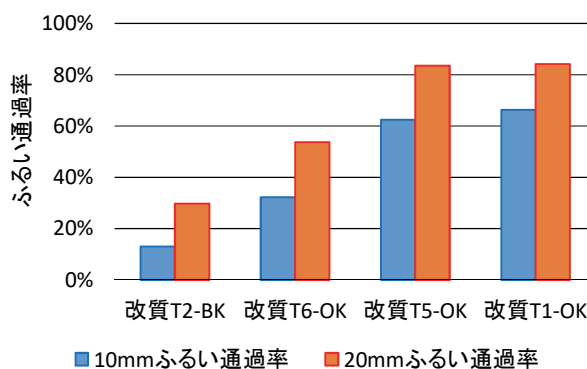


図-6 解砕機処理の有無による改質効果評価試験

- の確認が可能で、リスク回避教育ツールの一つとなり得る。一方、映像作成をさらに簡便にすることや受講者の操作性の容易化を図る必要もある
- ii. フレコンハンドラー1台の導入で、大型土のうに近づくことなく120t (約85袋) /hの効率で運搬車両からの荷下ろしが可能で、2台配置で中間貯蔵要求水準仕様を満たす。また、車両からの転落リスクや放射線被ばくリスクも低減できる
- iii. 改質材を用いた室内試験結果より、除去土壤等を模擬した水田系土壤の改質には、シリカアルミナ鉱物にポリマーを配合したものの適用効果が高い
- iv. 水田客土土壤等を用いた実証試験結果より、二軸破砕機を付加する2段階破袋で大型土のうの内容物に拘わらず連続的に破袋処理が可能である。また、改質処理には解砕機と二軸破砕機を直列配置する多重改質により、140t/h以上の処理が実現可能である

今後は、これらについて実適用する機会を見出すとともに明らかになった課題を解決していく必要がある。

最後に本実証試験を適切に遂行できたことは、計画への助言をはじめ、試料やサイトの調達・調整など、関係各位と諸機関からの助力と協力の賜物である。この場を借りてお礼申し上げる。

【参考文献】

- 1) 環境省 HP、環境回復検討会 (第18回)、「中間貯蔵施設の進捗状況について」、2017.12.27
- 2) 環境省 HP、中間貯蔵施設環境安全委員会 (第10回)、資料「中間貯蔵施設事業の状況について」、2018.3.22
- 3) 伊藤秀樹、布宮明道、下田一朗、「遠隔操縦式バックホウ用大型土のう設置装置の開発」など、<http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/happyoukai/H27/2-11.pdf>
- 4) <https://www.shimztechnonews.com/hotTopics/news/2014/s140930.html#13>
- 5) 大矢好洋、埜本雅春、大塚義一、「東日本大震災の災害廃棄物の密度と組成に関する考察」、奥村組技術研究年報 No.39、2013.9