

平成 28 年度
除染土壌等の減容等技術実証事業

Web 用概要書

全体概要

中間貯蔵施設において、除去土壌を対象に、二次分別処理や再生資材化処理、分級処理を行う場合、砂質土より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、先述の処理過程で混ざることになる。土壌を土質ごとに分別せずに全量処理する場合と比べて、土質を分別できれば処理費用を低減できる。本事業では、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。

実施内容

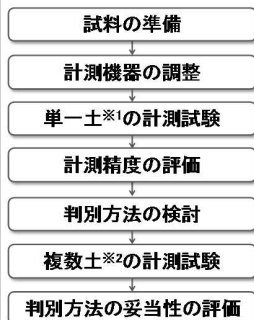
6種類の土砂を対象に、実機の1/2幅のベルトコンベアを用いて、ベルトコンベア上を搬送される土の特性(堆積形状(断面積)、含水比、重量)を計測可能かどうかを確認する試験を行った。その結果をもとに、土質の種類を判別する閾値を設定し、土質の異なる2種類の土砂を交互に搬送する条件で計測試験を行い、判別指標の妥当性を確認した。

事業の主な実施場所

埼玉県川越市

技術概要

1. 試験フロー



※1 単一土：同じ土質の土を搬送するケース
 ※2 複数土：土質の異なる2種類の土を交互に連続して搬送するケース

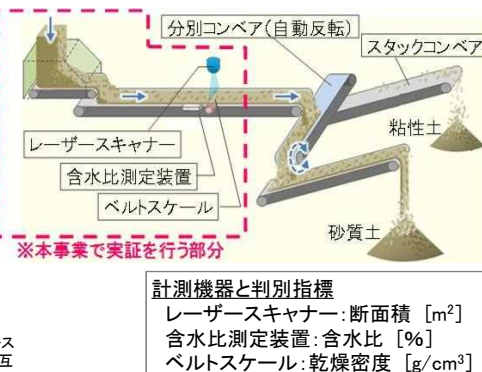


図1 試験フロー

図2 受入分別・土質判別のトータルシステムのイメージ

2. 試験目標

- ①ベルトコンベア上を搬送される土を対象に、その土質の種類を3つの指標により判別できることを確認し、その閾値を求める。
- ②判別指標により土質を連続判別できることを確認する。

3. 期待される効果

- ・二次分別のための改質材の抑制によるコスト低減
- ・改質材抑制に伴う中間貯蔵の対象土量の増加の抑制
- ・再生資材利用のための土質改良材(品質調整)の抑制によるコスト低減
- ・分級処理の効率化およびコスト低減

付録1-1-1

結果

1. 試験から得られた成果

- ・目標とした速度でベルトコンベア上を搬送される土の特性(判別指標)を連続計測可能であることを確認し、本試験設備における各指標の閾値(図1-1、図1-2)を見出した。
- ・見出した土質判別方法によって土質の種類を連続判別可能であることを確認した(判別例を図1-2に示す)。
- ・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、ベルトコンベア速度と投入方法の最適な組合せの検討が必要であることがわかった。

2. 評価

- ・技術的実現性：汎用的な装置で精度よく判別でき、可燃物分別、再利用時の品質調整や分級洗浄処理に組み込んで活用できる。
- ・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、46%を減容できる試算となる。[改質材添加量30kg/t、除去土壌1,973万tのうち粘性土1,063万t]
- ・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。[3年間(900日)稼働、処理数量63万m³と仮定]
- ・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できる場合は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試算となる。[一般的な改質材(石膏系)単価68円/kgを設定]
- ・分級処理の効率化およびコスト低減：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%、分級処理設備の必要セット数を33%低減できると試算する。[処理能力50m³/h(細粒分含有率20%)、対象土量336万m³]
- ・作業安全：完全無人化が可能であるため測定実施中の被ばくはない。保守および清掃(1日1時間程度)での被ばく線量も低い。原動機等のカバーおよび非常停止装置を設置する。

3. まとめ

- ・連続的な判別を行うにあたり、土の投入方法を今後検討する。
- ・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、含水比測定装置等の精度が高いため、より詳細な条件で土を分けられる可能性もあることがわかった。

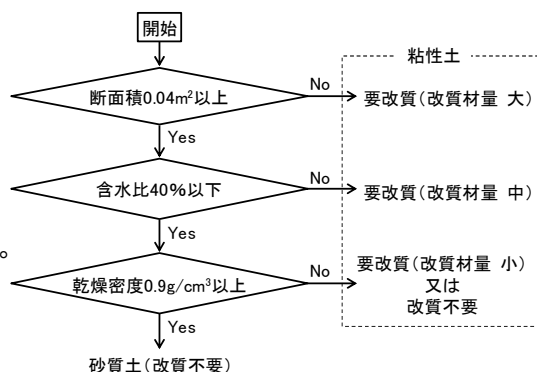


図1-1 計測試験結果から求めた土質判別フロー

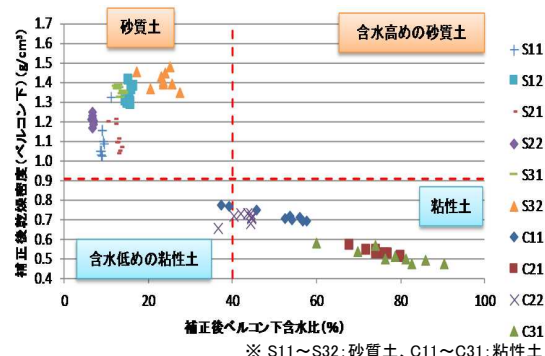


図1-2 計測結果に閾値を適用した土質判別の一例

付録1-1-2

No.3 除染土壌等に対する異物除去技術の開発

実施代表者：JFEエンジニアリング株式会社

全体概要

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」の組合せによる異物除去技術を実証し、浄化土壌中の異物混入率を低減させ、再利用用途の拡大を目的とする。

実施内容

1. 模擬土壌の作製
 - ・除染土壌をモデルとした模擬土壌の作製
2. ラボ試験（実験機によるパッチ試験）
 - ・ジェット流解砕試験による解砕条件の確認
 - ・重液選別試験による異物選別性能の確認
3. ベンチ試験（実証機による連続試験）
 - 「ジェット流解砕および重液選別技術」の組合せによる異物除去装置
 - ・異物除去性能の評価
 - ・物質収支の評価
 - ・放射能収支の評価
 - ・浄化土壌の品質確認
4. 経済性評価
 - ・中間貯蔵施設を想定した実規模の処理コストの試算

事業の主な実施場所

福島県内

技術概要

1. 試験フロー

技術実証にあたっては、ラボ試験を通じてジェット流解砕と重液選別の個々の単体性能評価を行った後、図1に示す湿式分級を模したベンチ試験により異物除去性能、除去土壌の再利用用途の確認を実施する。最後に、本技術を用いた経済性の評価を実施する。

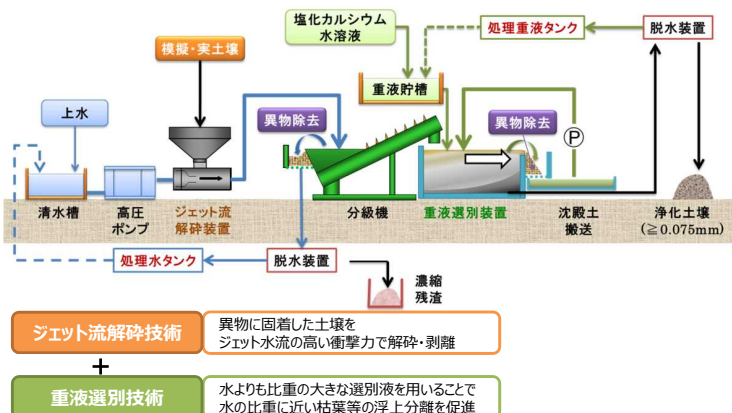


図1 提案技術のフローと特徴

2. 試験目標

- 除染土壌等を対象とした湿式分級処理における異物除去技術の確立
- 浄化土壌の異物混入率の指標となる強熱減量10%以下の達成
- 経済性の評価 ～実規模での設備費および運営費の試算～

3. 期待される効果

- 最終処分量の削減
除染土壌等の湿式分級における浄化土壌の品質が向上し、再生土壌としての利用用途が拡大することで、最終処分量が削減される。

付録1-3-1

結果

1. 模擬土壌の作製

実際の除染土壌は使用せずに、同様の除染対象範囲外地域の土壌（以下、実土壌と称す）を使用した。実土壌を使用する必要のない試験は、除染土壌の性状をモデルにした模擬土壌を作製し、実施する。
模擬土壌の配合割合と作製フローを図2に示し、粒度加算曲線を図3に示す。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。

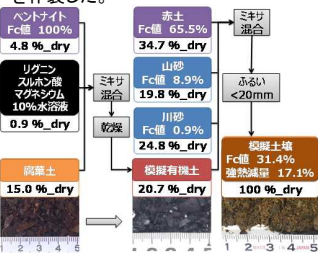


図2 Fe30%模擬土壌 作製フロー

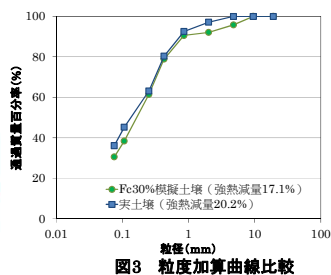


図3 粒度加算曲線比較

2. ラボ試験

- ・ジェット流解砕試験
ジェット流解砕の吹付流速・水量と沈殿土の強熱減量の関係を図4に示す。土壌の投入1,000kg/hに対して2,000~3,500kg/hの範囲が強熱減量が最も低くなる適正水量であることを確認した。
- ・重液選別試験
上水または重液の比重ごとの静置時間と沈殿土の強熱減量の関係を図5に示す。
溶液比重が大きいほどよく分離され、静置時間は約1minで十分であることを確認した。

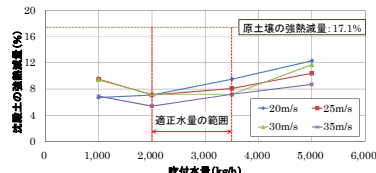


図4 吹付流速・流量と沈殿土の強熱減量

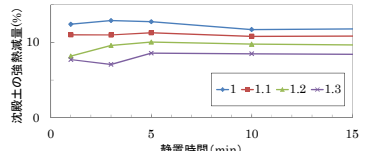


図5 静置時間・比重と沈殿土の強熱減量推移

3. ベンチ試験

＜異物除去性能の評価＞

「ジェット流解砕および重液選別技術」の組合せにより、植物系異物を多量に含む除染土壌から異物を効率的に除去し、浄化土壌の強熱減量を10%以下にできることが実証された。

図6に異物除去工程における強熱減量の推移を示す。

＜物質収支の評価＞

ベンチ試験では土壌中の異物除去と平行して分級処理を行い、異物は多量に除去されたものの、シルト・粘土の除去量は少なく、多量のシルト・粘土が浄化土壌中に残留した。これは、試験の簡便性を考えて重液選別装置の槽の底部からチューブポンプを用いて土壌を吸引したことにより槽内で浮遊するシルト・粘土が浄化土壌として砂・礫と共に吸引排出されたことが原因と考えられる。

＜放射能収支の評価＞

原土壌の放射能は約4倍の濃度でシルト・粘土に濃縮したが、浄化土壌にも多量のシルト・粘土が残留したため、浄化土壌の放射能濃度は原土壌の60~70%程度に留まった。これは、本試験が異物除去を目的とした試験のため簡便な装置で浄化土壌を搬出したためであり、実機では重液選別装置にスクリーンコンベアなどの分級機能を付与する等の対策によって浄化土壌へのシルト・粘土の残留量を抑制し、放射能濃度を低減できると考えられる。

＜浄化土壌の品質確認＞

河川築堤、土地造成（公園・緑地造成）、道路等の用途の盛土材料として再利用できることを確認した。
さらにリンス処理を3回実施すれば、塩化物の影響も排除でき、宅地造成盛土相当の要求品質も満足し、再利用用途の適用範囲が拡大できることを確認した。

4. 経済性評価

ジェット流解砕装置と重液選別装置を組み込んだ分級処理コストを試算した。
[対象土壌] 52.2万m³ 細粒分含有率Fc30%相当の砂質土
[想定規模] 50m³/h
[コスト] 約11,300円/t
(参考試算: リンス3回処理の追加コスト 約3,630円/t)

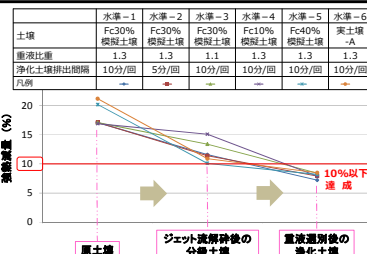


図6 異物除去工程中の強熱減量の推移

「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。
・試験結果を反映し、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約11,300円/tとなった。

付録1-3-2

No.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

実施代表者：クボタ環境サービス株式会社

全体概要

細粒土壌を処理対象とした高度減容化溶融システムの実証を目的とした。細粒土壌の前処理工程を構成する脱水・乾燥、薬剤混合の各プロセスの手法、条件の最適化を検討した上、非放射性Csを添加した細粒土壌を溶融テストプラントで実証試験を行った。溶融炉でのCs分離率、浄化物（溶融スラグ）・濃縮物（No.1バグフィルタ（BF）灰）についての評価および物質収支・コスト・安全性に関する評価を行った。

実施内容

- ①放射性Csを含む細粒土壌での加熱試験（ラボ試験でのCs揮散効果検証）
- ②前処理工程（脱水・乾燥、薬剤混合）の最適化検討試験
- ③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
- ④まとめ（試験結果の評価：溶融システムでの減容効果）

事業の主な実施場所

千葉県千葉市、大阪府大阪市

技術概要

1. 試験フロー

処理対象物に反応促進剤（ CaCl_2 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）を共存させて溶融処理を行うことで、固形物に含まれるCsを低沸点の塩化物に変化させて揮散分離し、No.1BF灰に濃縮することができるとの。

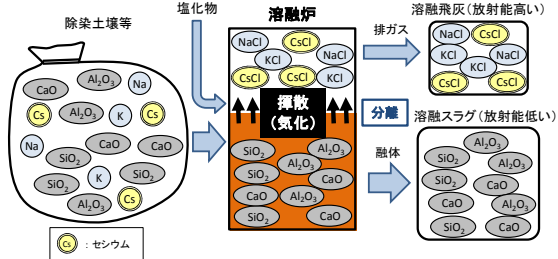


図1 溶融炉によるCsの分離イメージ

2. 試験目標

放射性Csの99%以上を揮散分離できる溶融システムの構築を目標とした。

3. 期待される効果

- ①溶融処理による高いCs揮散率により、細粒土壌が再生利用可能な浄化物（溶融スラグ）に生成される。
- ②溶融スラグが再生利用されることで、貯蔵量が低減される。
- ③ No.1BF灰から更にCsを抽出させCs吸着塔で保管することで、更なる貯蔵量の低減が可能。

付録1-4-1

結果

1. 放射性Csを含む細粒土壌での加熱試験（ラボ試験でのCs揮散効果検証）

全ての反応促進剤添加条件について97%以上の高いCs揮散率が得られ、細粒土壌の粘土鉱物等に吸着した放射性Csについても溶融技術による高効率揮散分離が可能であることが示された。

反応促進剤の合計添加率が高い条件ほど、Cs揮散率は全体的に高い結果となった。また、同一の合計添加率条件においては、 CaCl_2 比率が高い条件ほどCs揮散率が高い訳ではなく、最適な CaCl_2 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 添加比率があることが示された。これは、スラグ塩基度（ CaO/SiO_2 重量比）の影響によると考えられる。

草木類としておがくずを10%添加した条件では、概ね、おがくず添加によりCs揮散が促進される結果となり、既往の知見と符合した。

2. 前処理工程（脱水・乾燥、薬剤混合）の最適化検討試験

①脱水・乾燥工程の検討

スプレッドライヤ装置で試験を行った。運転条件として、スラリー含水率を65%、50%、加熱温度を400℃、260℃と変化させたが、いずれの条件でも含水率は目標の10%以下となり、付着性も見られず、顆粒状の乾燥物になることが確認された。

②薬剤混合工程の検討

細粒土壌スラリーに反応促進剤を事前混合して調査した。 CaCl_2 の事前混合は、スプレッドライヤでの閉塞および保管における固結の観点から、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の事前混合は、ランニングコスト増加の観点から、どちらも不適であり、土壌単独でスプレッドライヤ乾燥を行い、その後反応促進剤を混合することが望ましいと考えられた。

3. 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

①溶融炉でのCs揮散率

鉱物元素（Si、Al、Ca）の揮散率は低かったが、アルカリ金属（Na、K、Cs）および重金属（Zn、Pb）の揮散率は高かった。Cs揮散率は96~97%と高かったことから、プラントレベルの試験においても、反応促進剤の添加によりCsを塩化揮発により高効率に揮散分離できることが実証された。

②溶融スラグ（浄化物）の再生利用に関する評価

スラグについては、土木資材として有効利用することを想定しているため、環境安全性、資材品質に関する調査を行った。環境安全性、資材品質とも細骨材としての品質を有することが示唆された。

4. まとめ

プラント実証試験での物質収支を元に、放射能濃度50,000 Bq/kg(dry)の放射性Cs細粒土壌を100 t(dry)/日で溶融処理した場合の物質収支を算出した。その結果から、Cs吸着塔の年間保管量および二次廃棄保管物（耐火物）の量を用いて、溶融システム全体での減容化率を算出した。

保管物の容積は細粒土壌に対して約1/1,500となり、減容化率は99.94%と算出され、溶融システムでの減容効果は非常に高いことが示された。

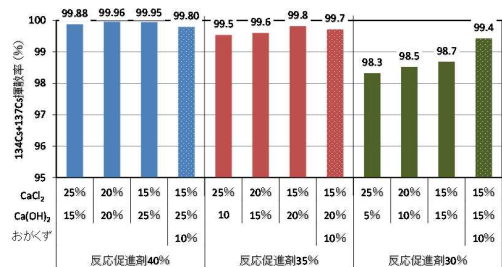


図2 加熱試験でのCs揮散率【細粒表層土壌】

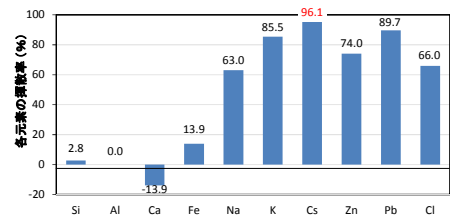


図3 プラント実証試験での各元素の揮散率

表1 溶融システムでの減容効果

項目	単位	INPUT 投入物		OUTPUT 排出物	
		細粒土壌 A	反応促進剤	スラグ（浄化物） B	保管物 C
重量	t(dry)/20年	600,000	405,195	808,077	174
容積	m ³ /20年	834,078	526,227	593,434	173
容積比 [A/(B+C)]	-	1.546			
減容化率 [(1-(B+C)/A)×100]	%	99.94			

No.5 金属イオン含有亜臨界水による土壌分級物中のCsの高速イオン交換回収と高減容ガラス固化

実施代表者：国立大学法人 東京工業大学

全体概要

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検証するとともに、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。

実施内容

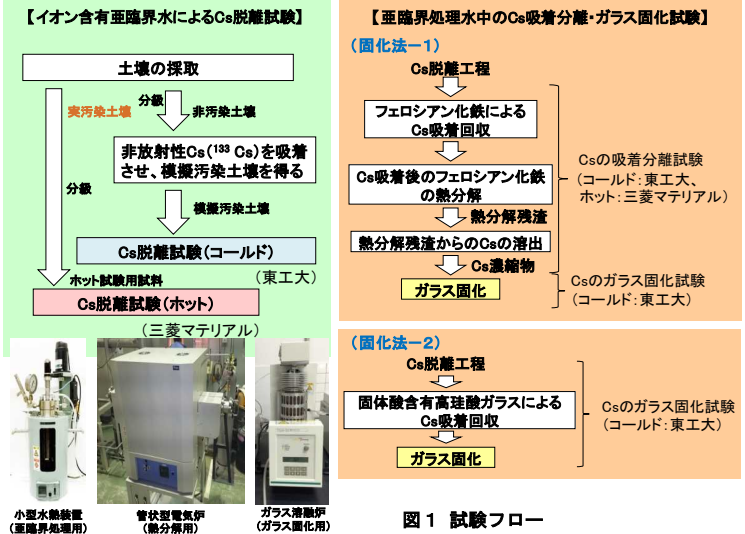
1. イオン含有亜臨界水によるCs脱離試験
2. 亜臨界処理水中のCsの吸着分離・ガラス固化試験
 - ① 亜臨界処理水からのCs選択回収によるCsガラス固化：【固化法-1】（フェロシアン化鉄系吸着剤によるCs吸着→吸着剤の熱分解→熱分解残渣からのCs溶出→ガラス固化）
 - ② 固体酸含有高珪酸ガラスへのCsガラス固化：【固化法-2】（固体酸含有高珪酸ガラスによるCsの直接吸着→ガラス固化）
3. 実規模システムの検討

事業の主な実施場所

東京都目黒区（東京工業大学）
茨城県那珂市（三菱マテリアル）

技術概要

1. 試験フロー



2. 試験目標

- ・ 亜臨界処理による汚染した細粒物からの放射性Csの脱離率が95%以上
- ・ 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）に減容

3. 期待される効果

- ・ 粘土鉱物の微細結晶構造に入り込み取れにくくなった放射性Csを、金属イオンとの高速イオン交換により高率かつ容易に回収できる。
- ・ 回収されたCsを吸着分離・ガラス固化することにより、元の土壌に対して大幅に減容化し安定的に固定化できる。

付録1-5-1

結果

1. 試験結果

(1) イオン含有亜臨界水によるCs脱離試験結果

- ・ 本試験に使用する放射性Csによる汚染土壌 (0.075mm以下: $1.99 \times 10^4 \text{ Bq/kg}$) および非汚染土壌 (2mm以下: $2.12 \times 10^4 \text{ Bq/kg}$) を三菱マテリアル 那珂エネルギー開発研究所敷地内に採取した。
- ・ **模擬汚染土壌によるコールド試験**では、液固比 (L/S): 100 (mL/g)、添加Mgイオン濃度: 0.5M (mol/L)、保持温度: 250°Cのときに、1回の亜臨界処理により100%のCsを回収できた (表1)。
- ・ L/Sの増加、添加Mgイオン濃度の増加により、Cs回収率が向上することを確認した。
- ・ **実汚染土壌を用いたホット試験**では、L/S=100のときに80%弱の放射性Csを回収できた。また、3回の繰り返し処理により、L/S: 100の場合に98%、L/S: 20の場合に60%の放射性Csを回収できた (表1)。
- ・ L/Sの増加によるCs回収率の増加、およびMgイオン濃度のCs回収率への影響が小さいことを確認した。
- ・ **Cs脱離機構から見た考察**: 図2に示すパーミキュライトへのCs吸着過程の(c)の状態が、コールド試験の模擬汚染土壌 (層間の金属イオンを全てCsに置き換えた状況) と類似していることが分かり、模擬汚染土壌を用いた亜臨界処理試験により、実汚染土壌に対するホット試験を模擬できることが判明した。

(2) 亜臨界処理水中のCsの吸着分離・ガラス固化試験結果

- ・ **固化法-1のコールド試験**では、フェロシアン化鉄系粒状吸着剤: MC-Bにより、1回のバッチ処理にてCs吸着率: 97%を達成し、その吸着剤の熱分解残渣からのCs溶出試験を行い、溶出後に3回の水洗浄を行うことで溶出率: 99.8%を達成した (表2)。また、その溶出液模擬塩のガラスへの固定化を確認した。
- ・ **固化法-1のホット試験**では、MC-Bによる吸着試験によりCs吸着率: 94%を達成した。また、その吸着剤の熱分解残渣からのCs溶出試験を行ったところ、水と硝酸 (0.5N) によりCsをほぼ全量を溶出できることを確認した (表2)。
- ・ **固化法-2のコールド試験**では、固体酸含有高珪酸ガラスによる1回のバッチ処理でCs吸着率94%を達成した (表2)。
- ・ Cs吸着率はL/S (10~100) によらず約90%であること、繰り返し処理により吸着率が向上すること、および亜臨界処理水中Csの吸着後模擬塩の高珪酸ガラスへの固定化を確認した。

2. 評価結果と課題

技術評価

- ・ 試験結果に基づき、Cs脱離と固化法-1または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の減容率となった。
- ・ この結果より、減容率は試験目標の「細粒物の減容率: 5千分の1」よりも大幅に上回る見通しを得た。

シナリオとコスト評価

- ・ 本法の特徴を考慮すると、処理対象となる土壌は汚染濃度が高く (10万Bq/kg超)、粘土成分の多い粘性土 (約1万m³) への適用が相応しい。
- ・ 上記の対象土壌に対し、図3に示すシステムフロー (Cs脱離+固化法-1) 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/d) 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。同様に土壌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/d) では処理単価は約310万円/tとなった。

課題

- ・ 本法の課題として、(a)連続回収技術 (カラム法) による処理システムの高度化、(b)多様な汚染土壌の処理への対応、(c)水相に回収したCsの固定化技術の高度化、の3つがあげられる。特に (a) はカラムを用いてイオン交換の高速性を活かした高速・高効率のCs脱離連続処理を実現するとともに、本法の高コスト要因となっている大量の水処理量およびそのための設備の大幅低減による低コスト化を図ることができる。

3. まとめ

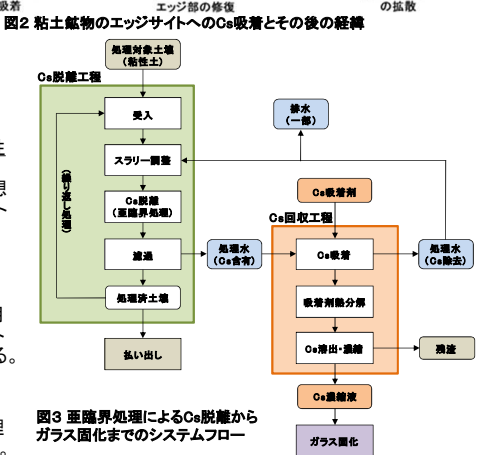
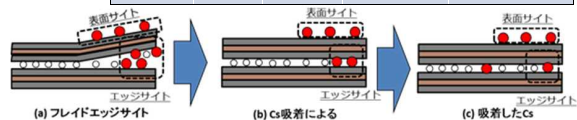
- ・ 本実証試験において試験目標を達成した。特に減容率は目標よりも大幅に上回る見通しを得た。
- ・ 本法の特徴を踏まえたシステムフローと対象土壌および処理シナリオを明確化するとともに、妥当な処理単価となる設定条件、および高コスト要因とその改善策 (Cs脱離処理の連続化等) について明らかにした。

表1 亜臨界水によるCs脱離試験結果

試験区分	試験対象	Cs回収率 (%)	備考
コールド試験	模擬汚染土壌 (非放射性Csを十分に浸透させた非汚染土壌: $2.12 \times 10^4 \text{ Bq/kg}$)	100	L/S=100, 250°C Mgイオン濃度=0.5M
		79	L/S=10, 250°C Mgイオン濃度=2.0M
ホット試験	実汚染土壌 ($1.55 \times 10^4 \text{ Bq/kg}$)	98	L/S=100, 250°C Mgイオン濃度=0.5M 繰り返し処理: 3回
		78	同上, 処理: 1回

表2 亜臨界水中のCs吸着分離・溶出試験結果

試験区分	Cs吸着率 (%)	熱分解残渣からのCs溶出率 (%)	備考
固化法-1	コールド試験	97	残渣からの溶出+水洗浄3回
	ホット試験	94	99.8
固化法-2	コールド試験	94	水溶出: 94.5% 硝酸溶出: 5.3%
		—	L/S=10 吸着時間: 3時間



付録1-5-2

No.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

実施代表者：株式会社安藤・間

全体概要

土質改良機を使用して石こう系改質材により放射能汚染土壌を改質処理し、新たに構築した放射能濃度測定分別装置により、所定の放射能濃度による分別を実規模で行い、改質処理および濃度測定分別技術の確実性や有効性を確認する。

実施内容

- ・大量供給可能な6種類の石こう系改質材を用い、水田土壌、宅地土壌、畑土壌を対象とした室内改質試験により改質材の性能を把握する。
- ・室内試験で最適とされた改質材を用い、現場において実規模土質改良機で放射能汚染土壌の改質を行い、さらに改質した土壌を対象に、土壌重量測定機能を付加した自社構築の濃度測定分別装置により所定の濃度で土壌分別する。
- ・改質材の改質効果を定量的に把握し、さらに濃度分別装置の測定精度や処理能力を実証試験により明らかにする。

事業の主な実施場所

茨城県つくば市、大阪府大阪市、福島県浪江町

技術概要

1. 試験フロー



② 実規模改質試験状況



④ 濃度測定分別試験状況

③ 検出器(現場)試験状況

注) [] 内は、除染特別地域内で実施

2. 試験目標

- (1) 石こう系改質材による粘性土等の改質効果の確認
- (2) 汚染土壌の濃度測定精度が誤差平均10%以下
- (3) 実規模改質および濃度分別の処理能力がそれぞれ70t/h以上
- (4) 作業中の装置近傍の粉じん濃度が10mg/m³以下

3. 期待される効果

土壌を改質することで、濃度測定分別処理を精度よく安定的に行うことができる。また、汚染土壌を所定の濃度で精度よく分別することで、貯蔵土壌の再生利用の促進に寄与する。

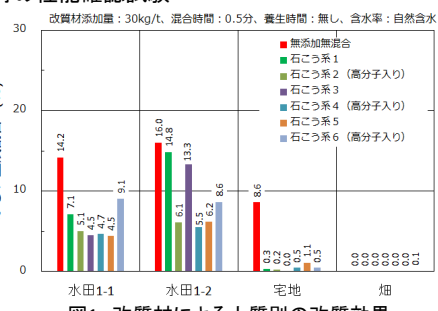
付録1-6-1

結果

① ふるい分け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、水田土壌のような粘土系の土壌について石こう系改質材による改質効果を確認した。また、宅地土壌や畑土壌では改質の必要性が小さいことを確認した。石こう系改質材の種類(製品)による改質効果の差は小さかった(図1)。

図1 改質材による土質別の改質効果



③ 検出器特性確認試験

濃度測定分別装置を構築して工場内試験により性能を確認し、幅900mmの搬送ベルトコンベアに9個のCsIシンチレータから構成される濃度測定検出器とした。この検出器により、現場試験にて放射能汚染土壌を用いた測定を行った結果(図2)、誤差平均10%を満たす精度で測定できることを確認した。

図2 濃度分別装置による現場試験



⑤ 経済性評価

今回の試験で実証した土質改良機による土壌改質、回転式ふるい機による二次分別、濃度測定分別装置による土壌分別の一連の処理について経済性(ランニングコストのみの直接工事費)を評価した結果は以下のように試算された。

- ・昼間のみ操業700t/日処理とした場合: 3,550円/t
- ・3交代24時間操業2,380t/日処理とした場合: 2,700円/t

■まとめ

- 1) 石こう系改質材を用いた改質試験を行い、最適な改質材や改質条件を明らかにした。その条件で実規模機械による改質を行い、良好な改質効果を得た。
- 2) 土壌重量の測定機能を付加した土壌濃度測定分別装置を構築し、誤差平均10%以下で測定できることを確認した。また処理能力は70t/h以上であった。
- 3) 土壌改質から濃度分別に係る一連の処理コスト(ランニングコスト)は3,550円/tと算出された。本作業の被ばく量は9.8μSv/日であった(延べ443人日の平均)。
- 4) 今後の課題として、土壌改質の要否自動判定技術の検討、および濃度分別精度向上のための測定データ蓄積と校正方法の最適化が必要である。
- 5) 土壌改質で得られた知見は工事の設計・施工計画の基礎データとして活用でき、濃度測定分別装置は測定精度、処理能力ともに実工事に使用できる。

② 粘性土の実規模改質試験

二軸バドルミキサ方式の土質改良機を使用して、70t/h規模の実規模混合を行った。

①の改質材の性能確認試験結果から選定した石こう系1改質材により、水田土壌に関する良好な改質結果を得た。土壌1tあたりの添加量が30kg/t、改質のための混合回数は改質機1回通しという施工条件が適当と考えられ、①の試験と同様の結果を得た。また、宅地土壌などの砂質系の土壌では、改質材による改質が必ずしも必要ではないことを確認した(表1)。

表1 実規模改質試験結果(ふるい上残割合%)

土壌	改質前(原土)	改質1回後
水田	34.8	3.5
宅地	3.5	1.4
畑	0.8	4.3

④ 土壌濃度測定分別試験

3,000~25,000Bq/kg程度の汚染土壌を用いて、濃度測定分別装置による放射能濃度とGe半導体検出器による相関を確認した結果、全測定(N=31)の誤差平均(誤差の絶対値を平均したもの)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。

表2 分別精度の確認結果

分別設定濃度(Bq/kg)	超過混入率	未満混入率
8,000	0/2検体=0%	0/4検体=0%
5,000	1/2検体=50%	0/2検体=0%
3,000	0/6検体=0%	0/6検体=0%
合計	1/10検体=10%	0/12検体=0%

分別濃度を8,000、5,000、3,000Bq/kgに設定して分別した結果の合計は、超過混入率(低濃度側への高濃度検体の混入)は1検体/10検体=10%、未満混入率(その逆の混入)は0検体/12検体=0%であった(表2)。

また、35~40tの土壌を用いて測定分別装置を30分間以上連続運転した結果、本装置が70t/h以上の測定分別処理能力を有していることを確認した。

連続運転時の粉じん濃度は最大5.8mg/m³で、高濃度粉じん作業の基準値10mg/m³を下回することを確認した。空气中放射能濃度は1Bq/m³未満であった。

No.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

実施者代表者：りんかい日産建設株式会社

全体概要

土壌の洗浄分級処理の結果として発生する放射性セシウムを含む高含水比粘性土に、セメントを添加後、高圧フィルタープレス機にて脱水し、脱水ケーキを製作する。脱水ケーキはセメントの効果により脱水固化砕石となるが、これが中間貯蔵施設の排水層のドレーン材として使用できる人工砕石の品質と安全性を満たしているかを実証する。また、本処理過程で発生するろ水の処理水が、自然放流の水質基準を満たしているかについても検証する。

実施内容

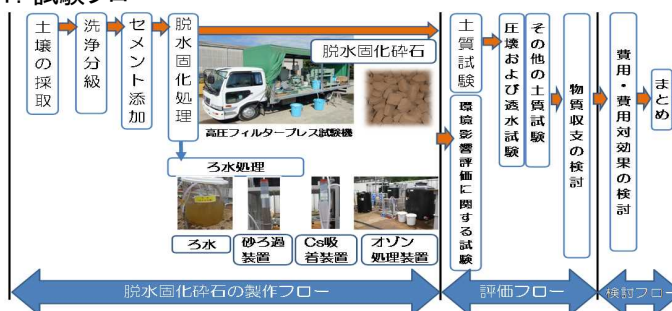
1. 脱水固化砕石の土質強度試験
2. 脱水固化砕石の環境影響評価試験
3. ろ水の処理水の環境影響評価試験
4. 脱水固化処理における物質収支の確認
5. 脱水固化砕石の利用方策の費用対効果の検討

事業の主な実施場所

福島県南相馬市

技術概要

1. 試験フロー



2. 試験目標

- ①脱水固化砕石（集合体）の透水係数が、想定される土被り条件下で $1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 以上であること
- ②脱水固化砕石から、放射性セシウムが溶出しないうこと
また、土壤環境基準を超える物質が溶出しないうこと
- ③ろ水の処理水の水質が「福島県生活環境の保全等に関する条例44項目」などの排水基準を満足していること

3. 期待される効果

- ①高含水比粘性土を脱水固化処理することにより、一般の建設系車両での取り扱いが可能になること
- ②脱水固化砕石をドレーン材として利用することにより、中間貯蔵施設の建設コストの削減と施設容量の確保が可能になること

付録1-7-1

結果

■脱水固化砕石の土質強度試験

脱水固化砕石（ $\square 60 \text{mm} \times t 23 \text{mm}$ ）のドレーン材としての品質を評価するために、JIS規格の土質試験と「圧壊および透水試験（土被り相当の荷重条件下で透水試験を実施する試験）」を実施した。なお、使用セメントは、福島県内で採取した畑土に、アロフェンと腐植酸が多く含まれていたため、高有機質土用固化材を用いた。



図-1 圧壊および透水試験フロー

表-1 土質強度試験の目標値と結果

試験項目	目標値	20%/ds	40%/ds	60%/ds
一軸圧縮強度試験	9.8MN/m^2	1.57	6.65	12.71
粒度試験（圧壊前）	～2.00mm、5%未満	3.6	1.7	1.0
粒度試験（圧壊後）	～2.00mm、5%未満	43.4	4.0	1.0
圧壊および透水試験	$k=1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 以上	2.2×10^{-3}	4.5×10^{-4}	5.4×10^{-4}
スレーキング率試験	1.0%以上	1.1%	0.2%	0.1%
一面せん断試験	30～35°以上	32.11°	30.81°	38.91°
すり減り減量試験	50%以下	99.8%	85.5%	64.8%

※ 色部は目標達成個所を示す。

■脱水固化砕石の環境影響評価に関する試験

①脱水固化砕石の放射性セシウム溶出量試験

- ・放射性セシウムの溶出は検出されなかった。
- ・溶液のpHを4～12とした場合でも、放射性セシウムの溶出は検出されなかった。

②脱水固化砕石からの土壤環境物質の溶出試験

土壤環境基準値を超える、物質の溶出は検出されなかった。

■「ろ水」の処理水の環境影響評価に関する試験

- ・放射性セシウムの溶出は検出されなかった（「ろ水」そのものに放射性セシウムは含まれていなかった）。
- ・「生活環境・健康項目」に関する代表的な7項目を満足した。
- ・「福島県生活環境の保全に関する条例」の全44項目を満足し、自然放流が可能ながわかった。

■物質収支の検討

脱水固化処理による放射性セシウムの移行割合は、原泥のセシウムを100とした場合、脱水固化砕石：ろ布：ろ水＝99.8：0.2：0
なお、放射性セシウムの物質収支のばらつき（9回）は、91.1%～104.0%の範囲で、平均値98.8%であった。

■費用・費用対効果の検討

- ・脱水固化処理費用：1.3万円/㎡³
（その他の水処理費用：260円/㎡³）
製作条件：高圧フィルタープレス機（6.4m³型）5基、稼働年数は5年間、稼働時間は4,000時間/年、軟泥処理数量：110万m³
- ・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砕石をドレーン材として有効な場合を比較すると、建設コストを11%削減できる。また、設備容量に16%の余裕ができる。

■課題

- ・福島県内の畑土の違いによる脱水固化砕石の品質のばらつきを把握するため、広範囲の畑土の脱水実験が必要である。
- ・脱水固化砕石は減容化により放射性セシウム濃度が濃縮されることから、再利用のあり方を考える必要がある。
- ・（今回の濃度域では問題なかったが）より高濃度の放射性セシウムを含む脱水固化砕石からの放射性物質の溶出について、別途検討する必要がある。

■まとめ

- ・脱水固化砕石（セメント添加率40%/ds）は、400kN/㎡（土被り20m相当）の荷重状態で、目標値をほぼ達成でき、ドレーン材として利用できる。
- ・脱水固化砕石からは放射性セシウム、土壤環境物質の溶出は検出されなかった。
- ・脱水固化直後のろ水そのものには放射性セシウムは含まれていなかった。
- ・ろ水の処理水は、「福島県生活環境の保全に関する条例」の全44項目を満足し、自然放流が可能である。

付録1-7-2

No.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

全体概要

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および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、走行中の輸送車両を通じ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。

实施内容

1. 走行中の輸送車両における通信品質の測定(実証A)
通信品質試験、IP電話の通話品質試験
2. 主要な通信不感区域の調査(実証B)
携帯キャリア電波調査、基盤インフラ調査(商用電力・光ファイバ)、FWA等の置局設計調査
3. 導入に向けての留意事項
置局設計案の作成、コスト試算
※対象：国道288号

事業の主な実施場所

福島県：浪江町、大熊町、富岡町、福島市
千葉県：浦安市

技術概要

1. 処理フロー

(実証A)通信品質試験

プレ実証:乗用車を用いた基礎情報取得

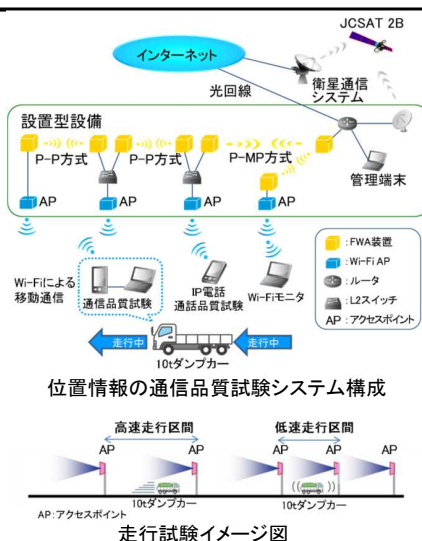
**本実証: 10tダンプカーを
用いた検証**

(実証B)不感区域の調査

携帯電波調査

基盤インフラ調査
(電力・光ファイバ)

**FWA等の
置局設計調査**



2. 試驗目標

実証Aと実証Bの結果をもとに、Wi-Fi方式による通信不感区域を補完することの実現可能性を実証し、本方式の導入をした場合のコスト等の概算額を試算し、具体的な導入に向けての留意事項を整理する。

3. 期待される効果

通信不感区域の解消によりシームレスな輸送管理が可能となり、Wi-Fi方式により携帯キャリアを問わず共通的に利用できることが期待される。

結果

1. 実証A

分類	成果・得られた知見	備考
車両走行速度 (10〜60km/h)	60km/hでも顕著な通信品質の低下は未検出	—
ハンドオーバー等の通信断	通信断時間は概ね1〜5秒程度 ただしWi-Fiの接続に要する時間は概ね数秒〜数分(端末の機種や状態で変化)	接続に要する時間の短縮について、端末のアプリケーションによる対処が必要
	Wi-Fi →Wi-Fi	通信断が生じない場合や通信断が十数秒に及ぶ場合もあり
	Wi-Fi →3G/LTE	通信断が生じない場合もあり
	完全不感 →Wi-Fi	端末のアプリケーションによる対処が必要
通信端末種別 (Android /iOS)	通信端末種別により切替時間に差がある	Wi-Fiの切替時間について端末のアプリケーションによる対処が必要

2. 実証B

分類	国道114号	国道288号	県道36号
携帯電波	測定全キャリアで不感区域あり(B社CDMA方式で一部対応)	測定全キャリアで不感区域あり(A社、B社一部対応)	測定全キャリアで不感区域あり(A社、B社は断続的に存在)
電力	全区間にわたって個別協議が必要	不感区域の約40%で商用電源利用可	全区間にわたって個別協議が必要
光ファイバ	不感区域の約60%で光ファイバあり	不感区域の約5%で光ファイバあり	不感区域の全域で光ファイバ無し

3.導入に向けての留意事項

- ・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秒以上滞在可能な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、衛星回線などの使用が必要

- 費用、工事難易度、エリアカバー率、位置情報送信率等を勘案して検討した結果の一例として、以下(図1)の置局案を参考として示す。

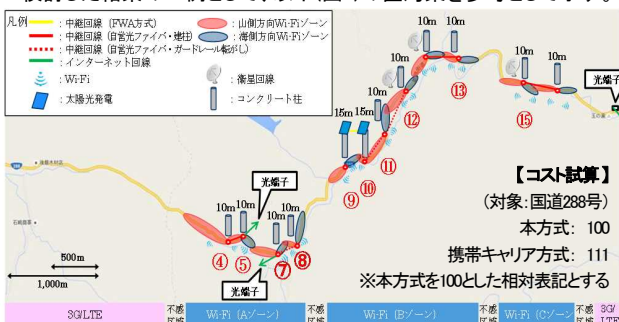


図1 国道288号の置局設計案の一例

■まとめ

走行中の10tダンプカーに搭載した車載端末からWi-Fi方式によるインターネットへの通信試験を実施した結果、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発生するものの、一定間隔で輸送車両の位置情報を送信する輸送管理システムでの利用においては、輸送管理の精度向上に有効であることが確認できた。また現地調査の結果、通信不感区域の完全な解消を実現するには一部区間で大規模な土木工事等が必要となることが判明したため、本方式の導入に際しては費用対効果を考慮した総合的な判断が必要となり、本実証ではこれらを踏まえたより現実的な配置局設計案を検討した。

■今後の課題

本方式の導入により最大限の効果を得るために、さらなる検証・評価・検討が有効であり、輸送管理システムとの接続検証、簡易型設置方式の検討、中間貯蔵施設における機帯キャリア網の輻輳(ふくそう)対策での応用等について継続検討すべきである。

全体概要

中間貯蔵施設において安全・確実かつ作業の効率化・省力化を可能にするためにクローラキャリア（以下、クローラ）を自動運転制御するシステムを導入し、汚染土壌等の搬送作業の自動化技術の実証を行う。搬送車両として道路が整備されていない場所（悪路）でも走行可能なキャタピラ式搬送車であるクローラを選定した（公道の走行は基本的にできない）。また、自動搬送技術導入によるコスト評価、作業員の被ばく量低減評価を行う。

実施内容

1. 実施項目
 - ・自動走行試験
 - ・安全性検証試験
 - ・複数台運用試験
2. 評価
 - ・実施項目の評価
 - ・コスト評価
 - ・被ばく量評価

事業の主な実施場所

福井県高浜町

技術概要

1. 試験フロー

【実施項目】

- (1) 自動走行試験
 - ① 走行精度確認
 - ② ルート変更確認
 - ③ 夜間走行確認

- (2) 安全性検証試験
 - ① 非常停止
 - ② 人検知
 - ③ 物体検知

- (3) 複数台運用試験
 - ① 渋滞制御
 - ② 交差点制御

【評価】

- (1) 実施項目の評価
 - ① 自動走行
 - ② 安全性
 - ③ 複数台運用

(2) コスト評価

(3) 被ばく量評価

2. 試験目標

- ① 自動走行の位置精度は、位置誤差が1m以下を目指す。
- ② 中間貯蔵施設における実運用を想定し、管制システムにより走行ルートが自由に設定でき、設定された走行ルートを走行することができることを実証する。
- ③ 中間貯蔵設備の24時間搬送を具体化し、夜間走行の作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。
- ④ 人、物体の接近を検知した場合、停止させる等の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。
- ⑤ 渋滞、交差点における複数台での運用も可能なことを実証する。
- ⑥ 本システム導入のコスト評価を実施する。
- ⑦ 搬送車の運転手が不要になり、運転手の被ばく量を低減することが可能なことを実証する。

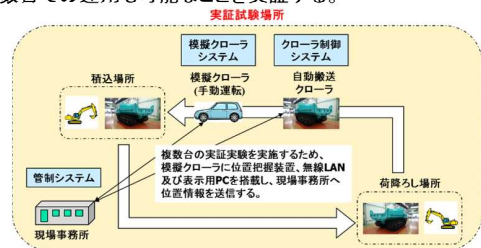


図1 システム全体構成

3. 期待される効果

- ・安全、安心なシステム
- ・運転手の被ばく量低減

付録1－9－1

結果

(1) 自動走行試験

クローラにGNSS受信機、傾斜計、レーザ距離計、無線タグリーダー、カメラ、自動走行制御システムを搭載し、管制システムからの走行ルート指示、制御指示により、クローラの自動走行を行うことができた。走行位置精度は目標とした1m以内（最大誤差22cm）を達成することができた。また夜間走行も確認した。



図2 自動走行クローラ



図3 管制システム



図4 自動走行

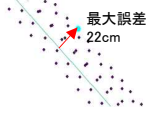


図5 精度確認結果



図6 夜間走行

(2) 安全性検証試験

安全系として、非常停止、人や物体を検知し停止することを確認した。



図7 人の検知試験

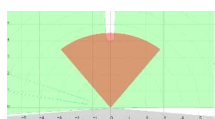


図8 物体の検知試験

(3) 複数台運用試験

- ① 渋滞が発生した場合、あるいはクローラが交差点に進入した場合、管制システムの制御ロジックに基づいて自動走行の停止、再開することを確認した。
- ② 非常停止後、管制システムからの遠隔操作にて、障害物を避け、走行ルート復帰後、自動走行が再開されることを確認した。



図9 交差点での制御

(4) コスト評価

導入しない場合のコストを、100とした場合、導入費と運用費にかかるコストは、1年目では106であるが、4年目では100を下回り、5年後には、99となる。本システムを導入することで、被ばく量の低減、運転手の負担低減、安全運行（事故の低減）さらに夜間の作業が可能となり、コストの差以上に全体的に与えるメリットは、大きいと考える。

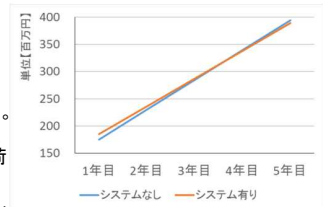


図10 コスト比較

(5) 被ばく量評価

被ばく量：運転手が不要になることにより、運転手の被ばく量を大幅に低減できる。

- ① 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。
- ② 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。
- ③ 夜間搬送：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。
- ④ 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。
- ⑤ 複数台の運用：実用化において、クローラが複数台移動すると想定される。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。
- ⑥ コスト評価：コストは、5年間で考えれば、導入した方が安くなる。本システムを導入することで、コストの差以上に全体的に与えるメリットは、大きいと考える。
- ⑦ 被ばく量の低減：本システムを用いることで、自動走行時は、運転手の運転手が不要になる。従って、自動走行中は、運転手の被ばく量を低減できることを検証した。

【課題】一般車両の入場ルール、システムオペレータと現場作業員間の作業ルールなど、運用のためのルール策定が必要となる。