

**令和 4 年度
除去土壌等の減容等技術実証事業
Web 用概要書**

No.1 熔融スラグの再生利用等技術の実証

実施代表者：株式会社大林組

全体概要

双葉町仮設焼却第一施設および双葉町仮設灰処理第一施設では、除染廃棄物等やその焼却灰等をシャフト炉および表面溶融炉を用いて溶融処理し、安定した高品質の熔融スラグが生成されている。

本実証は、当該施設で生成される熔融スラグの再生利用を円滑に進めるため、利用用途（盛土材、路盤材、アスファルト舗装骨材、コンクリート骨材）に応じた安全性、安定性を評価することを目的とし、室内試験、試験施工等を実施したものである。

実施内容

- ①盛土・舗装道路・コンクリートに関する室内試験（基準試験、配合試験等）
- ②盛土・舗装道路の試験施工
 - ・施工方法、品質管理方法の実証
 - ・盛土・舗装道路構築時、供用時、解体時におけるモニタリング
- ③コンクリート供試体の屋外暴露試験

事業の主な実施場所

福島県双葉郡大熊町（技術実証フィールド）、東京都清瀬市、千葉県佐倉市

技術概要

1. 実証のフロー（図1参照）
室内試験を実施して熔融スラグおよびそれを用いた再生利用品の品質を確認した。
試験結果にもとづいて試験ケースを設定し、試験施工等、各種モニタリングを実施した。
2. 試験目的（表1参照）
 - ・熔融スラグを用いた再生利用品の施工方法、品質管理方法等を実証する。
 - ・試験施工や屋外暴露試験を行い、施工中・供用中の安全性、安定性を評価する。
3. 期待される効果
除染廃棄物等から生成される熔融スラグを用いた再生利用品の安全性、安定性を実証することで、熔融スラグの有効活用を促進できる。

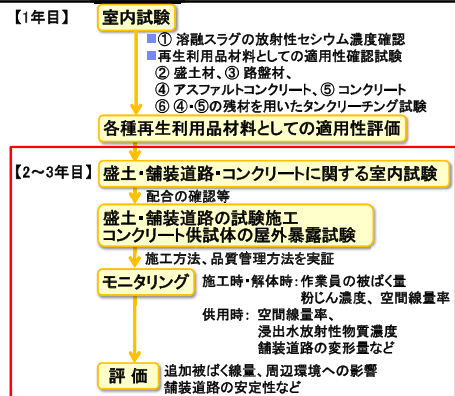


図1 実証事業のフロー

表1 試験施工等の目的一覧表

利用用途	目的	
	個別	共通
盛土	・長期的な盛土の安全性、安定性の評価 ・浸出水の放射性物質濃度等の評価	【構築物構築・解体時】 作業員被ばく量、 粉じん濃度、 空間線量率の評価
アスファルト舗装道路 ・アスファルト舗装 ・路盤	・道路の耐久性の評価 （舗装道路構造設計手法の適用性評価） ・表流水・浸透水の放射性物質濃度、 重金属濃度等の評価	
コンクリート	・屋外暴露試験による供試体の耐久性の評価	【供用時】 空間線量率の評価

付録1-1-1

結果

1. モニタリング実施概要

令和3年度実証事業で構築等を行った盛土・舗装道路、コンクリート供試体（試験ケース：表2～表4、図2～図5参照）について、1年間供用し、その後解体を行った。この供用から解体時に至るまでの期間において、環境影響に係るモニタリング調査を実施した。

2. モニタリング結果

盛土の浸出水、舗装道路の浸透水は、モニタリング期間を通じて、放射性物質濃度は定量下限値未満、重金属等は地下水環境基準に適合していた。また、解体時の作業員被ばく量は、最大でも96.1 μ Sv/40日＝2.4 μ Sv/日であり、当地で設定した許容値75 μ Sv/日を大きく下回っていた。

注）一労働日の被ばく線量上限値として設定されている「5年で100mSv」（国際放射線防護委員会（ICRP）の2007年勧告）を参考にした値

表2 盛土の試験ケース

名称	配合（乾土質量比）
試験盛土①	シャフト炉スラグ（A）（50%） 除去土壌（50%）
試験盛土②	表面溶融炉（B）（50%） 除去土壌（50%）

表3 舗装道路の試験ケース

工区		1	2	3	4	5
As舗装	表層	A(10%)		0%	A(15%)	
	基層	A(10%)		0%	A(15%)	
路盤		A	B	0%	A	B
		100%	75%		100%	75%

表4 コンクリート供試体試験ケース

名称	スラグ置換率
無配合	0%
シャフト炉スラグ（A）	50%
表面溶融炉スラグ（B）	50%

注）・スラグ置換率：細骨材中の熔融スラグの割合

注）・A：シャフト炉スラグ、B：表面溶融炉スラグ
・表層：密粒度アスファルトコンクリート（13）
・基層：粗粒度アスファルトコンクリート（20）
（）内はスラグ配合率（%）＝（スラグ質量）／（全骨材質量）
路盤欄百分率
：スラグ置換率（%）＝
（スラグ重量）／（スクリーニングス＋スラグ重量）

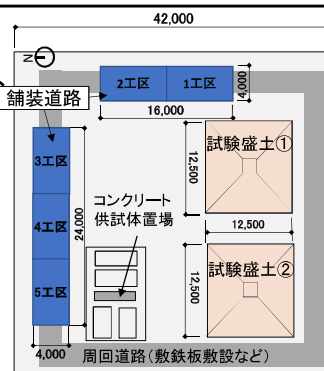


図2 構築物等配置平面図

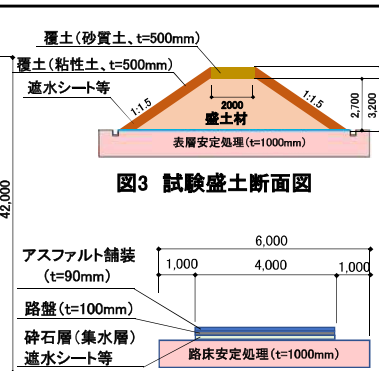


図3 試験盛土断面図



図4 舗装道路断面図



（試験盛土供用時の状況）



（試験盛土解体時の状況）



（アスファルト舗装品質確認状況）



（アスファルト舗装解体時の状況）

図5 試験施工等実施状況（技術実証フィールドヤードNo.4）

3. まとめ

令和3年度実証事業で構築した構築物（熔融スラグを配合した盛土、アスファルト舗装道路）の供用時、解体時の状況やモニタリングの結果等から、その安定性、安全性は、熔融スラグを配合しない構築物の場合と同等と評価できるものと考えられる。

付録1-1-2

No.2 除去土壌と溶融飛灰と脱水ケーキ等をジオポリマーの固型化材料として利用する技術

実施代表者：大成建設株式会社

全体概要

本技術実証は、放射性セシウム(Cs)が高濃度に濃縮された除去土壌、溶融飛灰、脱水ケーキについて、長期的な安定保管の観点から、ジオポリマー固型化試験を通じて、Cs保持性の高い再生利用技術の検討を目的とし、将来的に安定な保管と最終処分量の減量化および安全な処分を目標とする。

実施内容としては、令和3年度の実証事業にて得られた知見を基に、最終処分が行われる溶融飛灰、脱水ケーキ(分級処理後の細粒分に処理を加えたもの)や土壌(分級処理後の細粒分)を材料としてジオポリマー固型化体を作製し、性能試験を実施した。また、試験結果を用いてトレンチ処分した場合の周辺の人に対する被ばく評価(安全評価)を行い、本技術が最終処分技術として適用できる可能性を示す。

実施内容

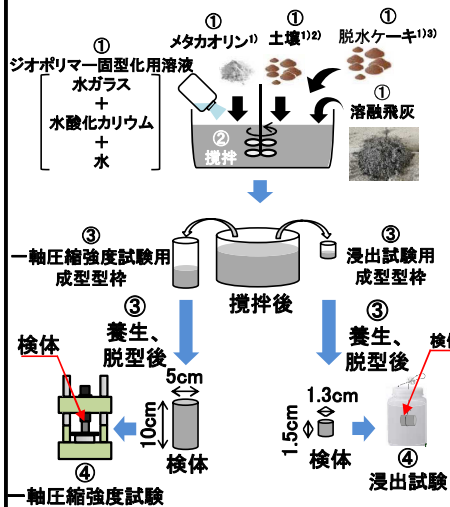
1. 試料の準備
2. コールド試験(非放射性)／ホット試験(放射性)
 - ・物性測定試験
 - ・ジオポリマー配合検討試験
 - ・ジオポリマー性能試験(一軸圧縮強度／浸出試験)
3. 最終処分の安全評価

事業の主な実施場所

コールド試験：北海道大学、富士電機(北海道)(神奈川県)
ホット試験：技術実証フィールド(福島県)

技術概要

1. 試験全体の流れ(コールド／ホット試験共通)



- 1) 材料として使用しないパターンも実施
- 2) 分級処理後の細粒分
- 3) 分級処理後の細粒分に処理を加えたもの
- ① ジオポリマー固型化用溶液、メタカオリン、土壌¹⁾、脱水ケーキ²⁾、溶融飛灰を準備する。
- ② 準備した材料を攪拌する。
- ③ 各種試験用の型枠に流し込み、その後養生、脱型する。
- ④ 脱型した固型化体(検体)に対し、性能試験(一軸圧縮強度試験、浸出試験)を実施する。

2. 成果目標

- (1) ジオポリマー固型化体を作製可能な配合の明示(一軸圧縮強度1,470kPa以上)
- (2) セメント固型化体よりも高いCs浸出抑制効果の確認(セメント浸出率約80%)
- (3) 最終処分技術として用いた際の適用性、安全性等を評価

3. 期待される効果

- (1) 放射能濃度の高い廃棄物を安定・安全に最終処分が可能
- (2) 最終処分をしなければならぬ放射能濃度の高い廃棄物をジオポリマーの材料として使用することによる廃棄物の減量化

付録1-2-1

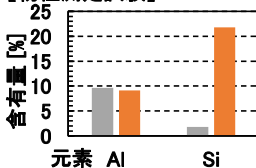
試験結果：ホット試験(溶融飛灰3)の結果を示す

1. 試料の準備：溶融飛灰、除去土壌を選定・入手した。

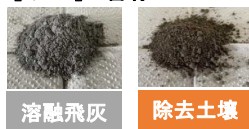
試料名称	放射性区分	入手先
溶融飛灰1	非放射性	溶融飛灰発生施設1(福島県いわき市)
溶融飛灰2	放射性	溶融飛灰発生施設2(福島県双葉町)
溶融飛灰3	放射性	溶融飛灰発生施設3(福島県双葉町)
一般土壌	非放射性	実証事業者採取土壌(福島県いわき市)
除去土壌	放射性	JESCO保管土壌(福島県大熊町)

2. ホット試験(放射性)

【物性測定試験】<XRF>



・溶融飛灰と除去土壌には、ジオポリマーの固型化に寄与する「Al」や「Si」が含有



【ジオポリマー配合検討試験】

セルの数値：溶融飛灰の充填量(wt%)

溶融飛灰100%・メタカオリン0%	バインダー量 [wt%]		土壌 (※1) 添加量 [wt%]
	40.0	50.0	1.5
ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ :K ₂ O:H ₂ O [mol比]	1:1:15	40.0	50.0
	1:1:20	40.0	50.0
	1:1:25	40.0	50.0
	1:1:30	40.0	50.0
	1:1:35	40.0	50.0

※1: 分級処理後の細粒分

溶融飛灰90%・メタカオリン10%	バインダー量 [wt%]		土壌 (※1) 添加量 [wt%]
	40.0	50.0	
ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ :K ₂ O:H ₂ O [mol比]	1:1:15	36.0	45.0
	1:1:20	36.0	45.0
	1:1:25	36.0	45.0
	1:1:30	36.0	45.0
	1:1:35	36.0	45.0

堅固

自立はしたが崩壊

溶融飛灰80%・メタカオリン20%	バインダー量 [wt%]		土壌 (※1) 添加量 [wt%]
	40.0	50.0	
ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ :K ₂ O:H ₂ O [mol比]	1:1:15	32.0	40.0
	1:1:20	32.0	40.0
	1:1:25	32.0	40.0
	1:1:30	32.0	40.0
	1:1:35	32.0	40.0

メタカオリンを脱水ケーク置き換え

※2: 分級処理後の細粒分

※1: 分級処理後の細粒分

堅固 自立はしたが崩壊 攪拌不可



メタカオリンを脱水ケーキ(※2)に置き換え

※2: 分級処理後の細粒分に処理を加えたもの

【ジオポリマー性能試験(一軸圧縮強度／浸出試験)】

溶融飛灰100%・メタカオリン0%		バインダー量（wt%）		溶融飛灰70%・脱水ケーキ（※2）		土壌（※1）添加量（wt%）		
		40.0	50.0	60.0			1.5	
		40.0（溶） 50.0（溶） 60.0（溶）		溶出率		19%		
ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ ：K ₂ O：H ₂ O [mol比]	1：1：25	723kPa 急結						
	1：1：30	40.0（溶） 50.0（溶） 60.0（溶） 541kPa 急結						
	1：1：35	急結 20%						
	1：1：40	急結						
溶融飛灰80%・メタカオリン20%		バインダー量（wt%）						
		40.0	50.0	60.0				
		40.0（溶） 40.0（溶） 48.0（溶）						
ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ ：K ₂ O：H ₂ O [mol比]	1：1：15	急結						
	1：1：20	急結						
	1：1：25	急結						
	1：1：30	急結						
ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ ：K ₂ O：H ₂ O [mol比]	1：1：35	急結						
	1：1：40	急結						
	1：1：45	急結						
	1：1：50	急結						
溶融飛灰90%・メタカオリン10%		バインダー量（wt%）						
		40.0	50.0	60.0				
		36.0（溶） 45.0（溶） 54.0（溶）						
ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ ：K ₂ O：H ₂ O [mol比]	1：1：15	急結						
	1：1：20	急結						
	1：1：25	急結						
	1：1：30	急結						
ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ ：K ₂ O：H ₂ O [mol比]	1：1：35	急結						
	1：1：40	急結						
	1：1：45	急結						
	1：1：50	急結						
溶融飛灰80%・脱水ケーキ（※2）20%		バインダー量（wt%）						
		40.0	50.0	60.0				
		48.0（溶） 12.0（粉）						
ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ ：K ₂ O：H ₂ O [mol比]	1：1：35	2,297kPa 18%						
	1：1：40	2,297kPa 18%						
	1：1：45	2,297kPa 18%						
	1：1：50	2,297kPa 18%						
溶融飛灰90%・脱水ケーキ（※2）10%		バインダー量（wt%）						
		40.0	50.0	60.0				
		54.0（溶） 6.0（粉）						
ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ ：K ₂ O：H ₂ O [mol比]	1：1：35	1,962kPa 19%						
	1：1：40	1,962kPa 19%						
	1：1：45	1,962kPa 19%						
	1：1：50	1,962kPa 19%						

土段：充填量（wt%）
中段：一軸圧縮強度
下段：CS浸出率

1,470kPa以上
1,470kPa未満

撾拌不可
非該当

【試験による成果】

上段：充填量(wt%) 1,470kPa以上 攪拌不可
中段：一軸圧縮強度 1,470kPa未満 非該当
下段：Cs浸出率

【試験による成果】

- ・設定した条件による配合表を確立
- ・脱水ケーキ(※2)がメタカオリンの代替として再生利用可能
- ・土壌(※1)を1.5%添加してもCs浸出率の差異無し

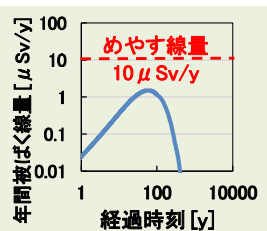
3. 最終処分の安全評価

被ばく線量への寄与が最大

【トレンチ処分】

●: 200Lドラム缶 (ジオポリマー固型化体)

井戸水 農業用水



【まとめ】

- ・溶融飛灰の物性に依りて、バインダー量や水比を調整することにより、一軸圧縮強度や浸出率をコントロールできる道筋を示せた。
- ・溶融飛灰、脱水ケーキを材料(再利用)としたジオポリマー固型化体が安定・安全に最終処分が可能であることを示せた。

付録1-2-2

No. 3 除去土壌を分級処理した砂をコンクリート用細骨材に 利用するための技術実証

実施代表者：VOREWS

全体概要

国は中間貯蔵開始後30年以内に福島県外で最終処分を完了するため、除去土壌等の減容化・再生利用技術の開発を2024年度に完了するとしている。除去土壌等減容化・再生利用技術研究組合(略称：VOREWS)では、除去土壌の減容化技術の一つとして、湿式分級処理技術が有効であることをH30～H31年度に実証したが、再生利用技術について十分な検討を行っていない。このため、分別後土壌等の湿式分級処理して得た礫・砂の「コンクリート用細骨材」としての適用性を細骨材品質試験等により検討する。

実施内容

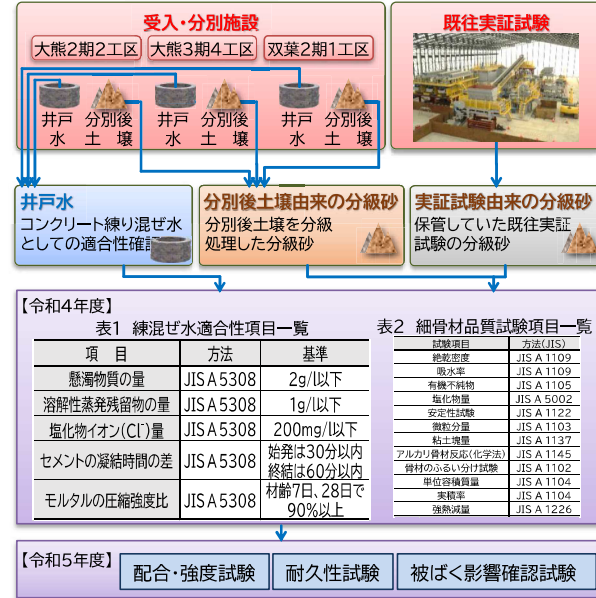
- 将来的に、帰還困難区域内で除去土壌を分級処理し、コンクリート製造を行うことを想定し、以下の試験を行う。
- ①練混ぜ水適合性確認試験(令和4年度)
受入・分別施設に併設されている井戸の水が、コンクリート製造に使用できることを確認する。
 - ②細骨材品質確認試験(令和4年度)
受入・分別施設から新規に採取した分別後土壌を分級処理した分級砂、および既往実証試験の分級砂を対象に、細骨材品質試験を行う。
 - ③配合・強度試験(令和5年度)
分級砂を用いた配合・強度試験、耐久性試験による分級砂のコンクリート細骨材への詳細な適用性を確認する。
 - ④被ばく影響確認試験(令和5年度)
分級砂を用いたコンクリート製品からの追加被ばく線量測定により安全性を評価する。

事業の主な実施場所

福島県双葉郡大熊町(技術実証フィールド)

技術概要

受入・分別施設に併設した井戸水のコンクリート練混ぜ水適合性試験(表1)を実施する。また、受入・分別施設から新規に採取した分別後土壌から得た分級砂、および、既往実証試験の分級砂の細骨材品質試験(表2)を行う。なお、分級は以下の2通り。
通常分級：土壌を湿式で解泥した後、ふるい分け
高度分級：通常分級砂を更に粗摺り洗いや衝撃力を与えた後にふるい分け



付録1-3-1

結果

1. 練混ぜ水適合性確認結果
4か所の受入・分別施設から、3回にわたり井戸水を採取し、練混ぜ水適合性確認試験を行った結果、全てのケースでJIS規格に適合する結果となり、コンクリート練混ぜ水として利用可能であることを実証した。
2. 骨材品質適合性確認結果
(1)試験対象
以下に示す4種類の分級砂に対し、細骨材品質試験を実施した。
①受分通常砂(UT)：受入・分別施設の分別後土壌を通常分級した分級砂
②受分高度砂(UK)：受分通常砂を更に高度分級処理した分級砂
③実証通常砂(JT)：既往実証試験による通常分級砂
④実証高度砂(JK)：既往実証試験による高度分級砂
なお、受分高度砂に対して比重分離処理(ジグ選別)した受分ジグ選別砂については、有機不純物試験を実施した。
(2)細骨材品質試験結果一覧
細骨材品質試験の基準適合条件の一覧を表3に示す。この結果、若干の課題があるものの、分級砂がコンクリート細骨材として利用可能であることを確認した。以下に、要点を示す。
・分級砂の粒度は、コンクリート用細骨材の適正粒度範囲に比較して細かく、JIS規格を満足しない結果となったが、粒度調整した山砂の添加により、細骨材適正粒度範囲に調整が可能であることが分かった(図1)。
・粘土増量は通常分級処理ではJIS規格を満足しない試料があったが、高度分級処理により、基準適合することが分かった。
・有機不純物が基準不適合となる試料が多いが、高度分級やジグ選別処理により有機物を除去することで、呈色状況が改善されることから、購入者の承認により再生骨材として利用できると判断した(写真1)。
・受分通常砂・高度砂では塩化物量がJIS規格に適合するものの、実証通常砂・高度砂では塩化物量が基準不適合となった。実証通常砂・高度砂は、湿式分級処理する際の洗浄水を循環利用しており、土壌に肥料・農薬・融雪剤・津波により混入した塩化物が、洗浄水の循環利用により、洗浄水中に濃縮したことが要因と考えた。このため、分級砂をコンクリート用細骨材に再生利用する際には、洗浄水の塩化物濃度管理が必要であることが分かった。

- (3)放射性Cs濃度測定結果
湿式分級処理と粒度調整により分別後土壌をコンクリート細骨材に調整することにより、放射性Cs濃度が低下することが確認された(図2)。
3. 今後の予定
配合・強度試験、耐久性試験による分級砂の再生細骨材への詳細な適用性の確認と、分級砂を用いたコンクリート製品からの追加被ばく線量測定による安全性評価を実施する予定である。

表3 細骨材試験の結果一覧(合格数/検体数)

試験項目	実証通常砂(JT)	実証高度砂(JK)	受分通常砂(UT)	受分高度砂(UK)
乾燥密度	6/6	6/6	3/3	3/3
吸水率	6/6	6/6	3/3	3/3
有機不純物	0/6	2/6	0/3	0/3
塩化物量	0/6	0/6	3/3	3/3
安定性試験	6/6	6/6	—	—
微粒分量	6/6	6/6	3/3	3/3
粘土増量	5/6	5/5	2/3	3/3
アルカリ骨材反応(化学法)	6/6	6/6	—	—
骨材のふるい分け試験	要調整	要調整	要調整	要調整

※1検体のデータエラーを含むため基準適合データ数が5検体となった

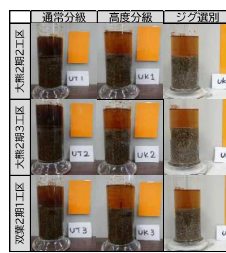


写真1 有機不純物試験
呈色状況例

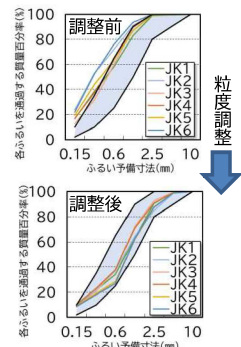


図1 粒度調整例(実証高度砂:JK)

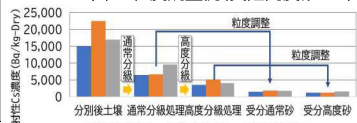


図2 分別後土壌の放射性Cs濃度測定結果例

- ・分級砂の粒度分布はJIS粒度範囲より細かく、山砂を添加して粒度調整することでJIS範囲に適合できた(山砂混入率平均値53%)。
- ・通常分級砂の一部で粘土増量がJIS不適合となったが、高度分級砂ではすべてJIS適合となり、高度分級処理の有効性が示された。
- ・有機不純物がJIS不適合となるケースが認められたが、購入者の承認により利用可能となると見込まれる。
- ・湿式分級処理する際の洗浄水の塩化物濃度管理が重要となる。
- ・今年度の試験により、分級砂のコンクリート用細骨材への適用性が示された。今後、配合・強度試験、耐久性試験により、分級砂のコンクリート細骨材への適用性検証を進めるとともに、分級砂を使用したコンクリート製品の安全性評価を実施する。

付録1-3-2

No.4 高吸水性樹脂含有改質材を含む低放射能濃度除去土壌を大量に再生資材化するための品質調整技術の実証

実施代表者：鹿島建設株式会社

全体概要

再生資材としての利用が検討されている土壌Aおよび土壌Bの合計は1,140万m³であり、除去土壌全体の86%を占めている。再生利用事業を推進するためには、再生資材が利用用途に応じて必要とされる強度を有し、環境面でも問題ないことが前提となるが、田畑や山林由来の土壌を多く含む多量の除去土壌を再生資材化する技術は確立されていない。本実証試験では土木資材としての除去土壌の有効利用を念頭において、強度および環境面を中心に改良材の選定を行った。そして、改良プラント実機での改良試験を行い、プラントで製造した改良土が盛土材として安定して使用できるかを盛土試験およびカラム試験により評価した。

実施内容

1. 室内配合試験による改良材の選定(2.以降で使用)
2. 改良プラント実機での改良試験
3. 改良土を用いた盛土の試験施工
4. 盛土の沈下量および発生ガスのモニタリング
5. カラム試験による浸出水評価

事業の主な実施場所

- ・技術実証フィールド
- ・中間貯蔵施設大熊1工区

技術概要

1. 試験フロー

改良材の選定
(室内配合試験)

改良プラント実機での
改良試験

盛土材としての安定性評価

改良プラント実機で改良土製造

盛土試験施工

盛土沈下量・ガスの
モニタリング

カラム試験
浸出水評価

2. 試験目標

室内配合試験における改良材の主な選定基準

力学特性	・コーン指数 q_c : 1,200kN/m ² 以上 (第2種建設発生土800kN/m ² を現場／室内強度比0.67で割戻し)
環境安全性	・六価クロム溶出 土壌環境基準値(0.05mg/L以下) ・溶出水中のBOD 【参考】排水基準120mg/L以下

盛土試験の主な評価項目

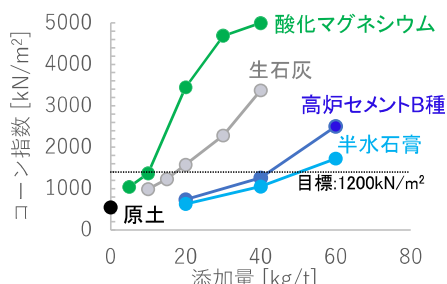
施工	・転圧後の締固度(90%以上) ・コーン指数測定(第2種建設発生土800kN/m ² 以上)
モニタリング	・盛土沈下量 ・盛土内部の有害ガス(硫化水素・メタン)
浸出水評価	・六価クロム溶出 環境基準値(0.05mg/L以下) ・BOD 【参考】排水基準120mg/L以下

以上の試験により、除去土壌を再生資材化する改良材の配合の提案・改良方法の立証・盛土材として安定的に使用できるかの検証を行う。

付録1-4-1

結果

1. 改良材の選定(室内配合試験)



2. 改良プラント実機での改良試験

室内混合試験の結果と同様に、**酸化マグネシウムは10kg/t、高炉セメントB種は40kg/t**の添加量で1200kN/m²を満たした

- ・酸化マグネシウム(10kg/t)
 - ・高炉セメントB種(40kg/t)
- の2種類を選定(2.以降の試験に使用)
※生石灰は溶出液中BOD・排水基準超過、その他添加量×コストなども考慮して選定した



3. 盛土材としての安定性評価

● 3種類の土壌で盛土

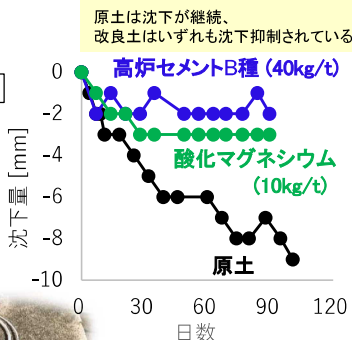
● 原土・高炉セメントB種・酸化マグネシウム

いずれの盛土でも転圧後の締固め度90%、コーン指数800kN/m²を満たすことを確認



沈下量計測板

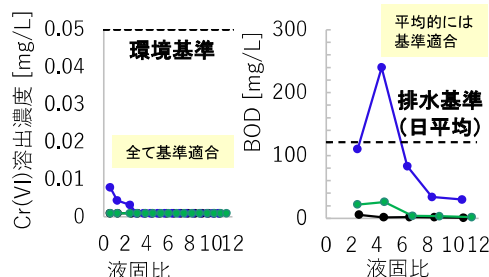
ガス採取管



原土は沈下が継続、改良土はいずれも沈下抑制されている

※ガス測定ではいずれの盛土も硫化水素・メタン検出されず

● 浸出水評価(カラム試験)



- 除去土壌の再生資材化が可能になる改良材の配合を提案し、実機でも同様の強度が得られ、土木資材として使用できることを確認した。
- 盛土試験により、原土と比べて改良により沈下を抑制できること、そして有害ガスが発生しないことを確認した。
- 浸出水の六価クロムは環境基準を満たしており、BODは1点のみ排水基準超過があったものの低下して平均的には基準を下回った。

付録1-4-2

No.5 除去土壤中の放射性セシウム・酸処理法による脱離とゼオライトを用いた回収・安定化による減容・再生利用技術の開発 実施代表者：法政大学

全体概要

除去土壤の多くは中間貯蔵施設に持ち込まれ、今後はこの土壤の再生利用を推進すると共に放射性セシウムを除去・濃縮し、最終処分量を減らすことが求められる。本事業では高効率かつ低コストな除去土壤の減容・再生利用を推進することを目的に、放射能濃度1.5万Bq/kg以上の除去土壤を想定し、福島県内の土壤中の放射性セシウムの溶融塩・酸処理による脱離、ゼオライトによる回収・安定化および浄化物の再生利用に関する実証試験を実施する。

実施内容

鉱物組成、有機物含有量および放射能濃度が異なる様々な土壤について、本処理が有効であることを検証するため、福島県浪江町の11地点の土壤を採取し、本処理を実施し評価した。
・高効率かつ低コストな処理条件を検討するため、約1.8万Bq/kgの土壤及び非放射性土壤を用いて、様々な条件で本処理を実施した。
・浄化物と酸廃液の再生利用を目的に、浄化物のゼオライト化と植物栽培培地としての評価および酸廃液の本処理への繰り返し利用を実施した。

事業の主な実施場所

1. 法政大学 小金井キャンパス（東京都小金井市）
2. 物質・材料研究機構並木地区（茨城県つくば市）

技術概要

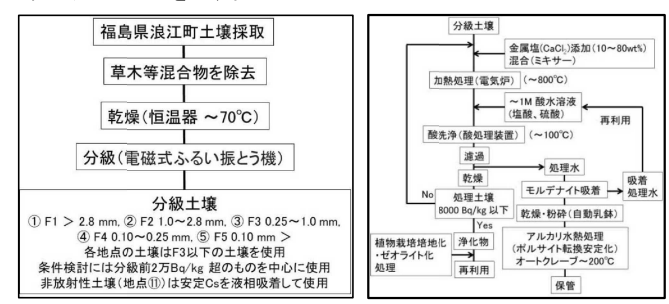
- (1) 溶融塩(CaCl_2)・酸(HCl , H_2SO_4 (1 M以下))処理による土壤中のCs脱離
- (2) 溶融塩中の Ca^{2+} の層間導入と低濃度の酸処理によるAl溶脱の効果
- (3) ゼオライト(モルデナイト(MOR))による回収
- (4) 耐酸性があり、Csに対して高選択性を有するMORによるCs濃縮の効果
- (5) ポルサイト(POL)による固定
- MORをアルカリ水熱処理することでCsが固定可能なPOLへ転換
- (6) 浄化物・酸廃液の再生利用

浄化物中のSiとAlを用いたMOR化。

浄化物に肥料成分を担持し植物栽培培地として利用。

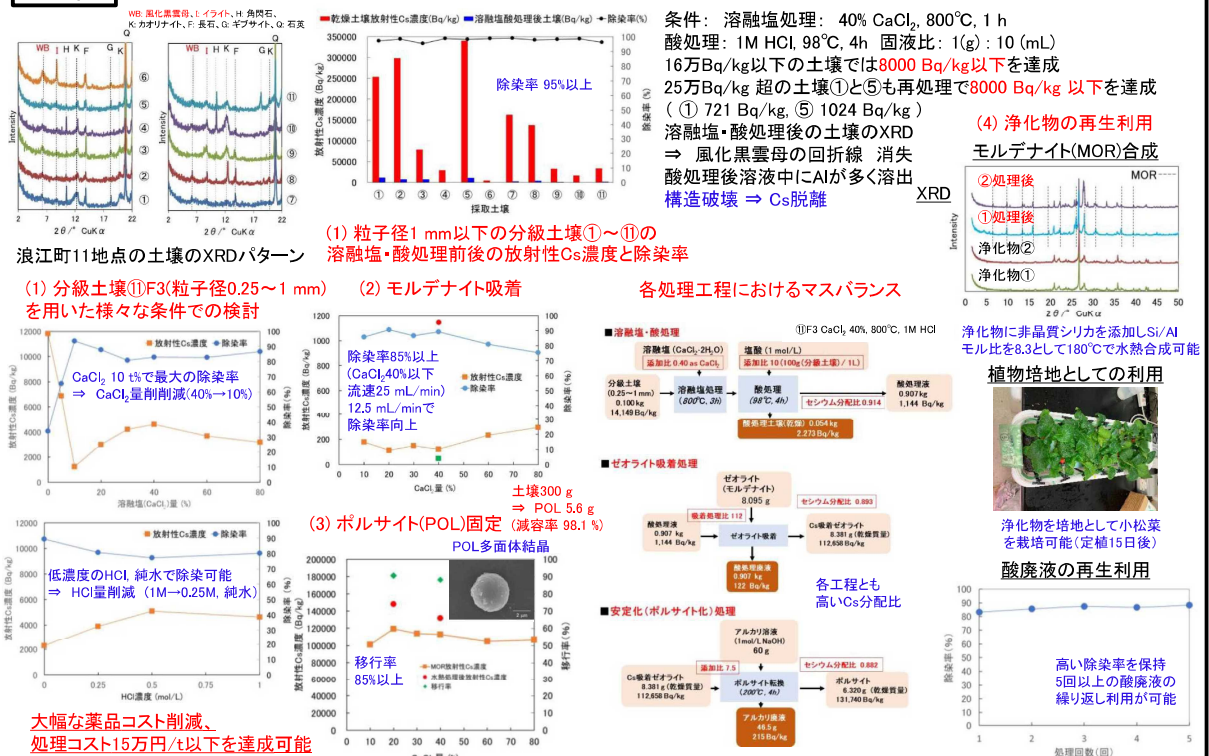
MORの吸着・酸添加により廃液の再利用が可能。

下記に処理フローを示す。



付録1-5-1

結果



まとめ 浪江町の各土壌を溶融塩・酸処理することにより、放射性Cs濃度を8,000 Bq/kg以下に減少できた。また、2万Bq/kg 程度の土壌であれば、10% 溶融塩(CaCl_2)かつ低濃度の酸で処理可能であり、処理コスト15万円/t 以下を達成できることが確認できた。減容率は最大98.1%であり、マスバランス計算により本技術の有効性も明らかにした。実装装置の簡素化も期待できる。さらに、浄化物のゼオライト(MOR)化や植物栽培培地としての有用性、酸廃液の再利用性が実証された。

付録1-5-2

No. 6 除去土壌Cに対して20 μ mを分級点とする分級と脱水処理システム

実施代表者：株式会社不動テトラ

全体概要

中間貯蔵受入分別施設では各工区で保管された除去土壌を高分子系土質改質材で改質した上で濃度選別や異物除去を行っている。除去土壌のうち土壌Cは、農地由来の粘性土が多くを占める。したがって、75 μ m以下の土壌と有機物を多く含む、この有機物が原因となって団粒化していることが多い。そこで、有機物を分解すると、細砂とシルト・粘土の分級処理精度を向上することが期待できる。また、放射性セシウムは主に20 μ m以下の粘土鉱物に強く吸着していることから、分級点を75 μ m未満とした新たな減容化技術が開発できれば、処理コストの低減と共に除染率の向上も見込むことができ、再生利用可能な分級土壌の対象を広げることができる。

提案技術は、分級処理の前処理としてオゾンと過酸化水素を添加することで、促進酸化処理により有機物を分解する。これにより、団粒化している有機物・粘土鉱物を除去した後、分級点を20 μ mとする高性能固液分離機を用いた分級処理で減容化率と除染率を向上させる。

実施内容

1. 通常土壌を用いた有機物分解試験
有機物1mg分解に必要なオゾン量とオゾンと過酸化水素の添加量の最適比を検証した。
2. 通常土壌を用いた固液分離機による分級処理試験
コンタミ改善対策を物質収支で検証した。
3. 低濃度放射性セシウム含有土壌を用いた有機物分解試験
①有機物1mg分解に必要なオゾン量とオゾンと過酸化水素の添加量の最適比を検証した。
②高分子系土質改質剤のSAP成分の分解を検証した。
③溶存有機態炭素分離測定装置（LC-OCD）により分子量ごとの有機態炭素を測定し、溶存有機態炭素を成分ごとに定性・定量分析することで有機物分解特性を評価した。
4. 低濃度放射性セシウム含有土壌を用いた分級処理試験
①遠心力G・差速・投入流量を変化させた分級処理により分級物の減容率と除染率を検証した。
②分級物の電子顕微鏡観察（SEM-EDX）により、砂粒子への有機物や粘土の付着状況を直接確認することで有機物分解の評価をした。

事業の主な実施場所

1. 株式会社不動テトラ総合技術研究所（茨城県土浦市）
2. 福島県双葉郡浪江町内の畑地

技術概要

1. 有機物分解

有機物の分解には、オゾンと過酸化水素を併用して発生させた強力な酸化作用を持つヒドロキシラジカル（ $\cdot$ OH）により有機物を酸化分解させる促進酸化法を用いた。

有機物分解処理には、密閉式反応槽を用いて、以下の手順で実施した。

- ①畑地表層土壌を含水率8%の泥水とする。
- ②この泥水を密閉式反応槽内に投入する。
- ③泥水を反応槽外のサンドポンプにて吸い込み、エジェクターを介して泥水中に高圧噴射する。
- ④エジェクター内でオゾンと過酸化水素を添加・接触反応させることで泥水中の有機物を酸化分解する。
- ⑤③、④を繰返して泥水を循環させ9h反応させる。ケースにより24h、78h実施する。

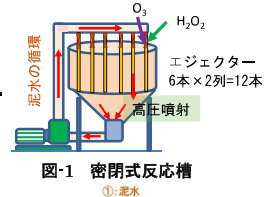


図-1 密閉式反応槽

放射性Csは主にシルト・粘土・有機物に吸着している。また、有機物を介して細砂にも吸着している。

有機物を分解することで高圧水による物理的解泥が容易となり、細砂とシルト・粘土の分級処理精度を向上することができる。これにより除染率の向上も見込むことができ、再生利用可能な分級土壌の対象を広げることができる。



図-2 固液分離機

2. 分級処理

分級処理には固液分離機を用いた。この固液分離機は、従来の横型サイクロン方式の遠心力でなく、縦型の出力二軸の差速装置により回転筒と内部のスクリーが高速回転（遠心力最大3,000G）する。この回転筒とスクリーは僅かな回転差をつけて同じ方向に高速回転し、遠心力数百Gと比重差によりシルト・粘土の分級・分離が可能である。今回は、20 μ mで分級することで、さらに減容化を図ることを目標とした。濃縮した粘土は、同じ固液分離機で遠心力を1,800Gで脱水処理され、フィルタープレスの必要もなくなる。



写真1 実証試験状況

付録1-6-1

結果

1. 通常土壌を用いた有機物分級試験

- ①オゾンと過酸化水素の添加量の最適比は15~20mol%であることが確認できた。（図-3）
- ②有機物の分解率は、過酸化水素15mol%の時に目標の80%を達成できた。これより、有機物1mg分解するために必要なオゾン量が56.2mgであることが確認できた。（図-4）

2. 通常土壌を用いた分級処理試験

- ①乾燥重量に対する物質収支の誤差は4.6%でコンタミの改善ができた。
3. 低濃度放射性セシウム含有土壌を用いた有機物分解試験（含水率8%、200L）
①最適比の範囲で低濃度放射性セシウム含有土壌でも分解率80%以上となることを確認した。
②溶存有機態炭素分離測定（LC-OCD）：酸化分解は、高分子有機化合物から始まり、低分子化合物となる。同時に難分解性のフミン酸類が分解され、フミン酸崩壊物質を経由して低分子有機物および低分子有機酸となり水と二酸化炭素に分解される傾向が確認できた。（図-5）
- ③除去土壌に使用されている土質改質剤のSAP成分は、有機物分解に比べて少ないオゾン量で容易に99%以上の分解率を達成できた。これより、分級物の再生利用における品質などへの影響は除外できることを確認した。
- ④SEM-EDX分析結果より、有機物分解による砂粒子への細粒付着と有機物の付着がないことが確認できた。

4. 低濃度放射性セシウム含有土壌を用いた分級処理試験

- ①減容率と除染率（図-6）：減容率と除染率は、同時に目標を達成することでの評価となるが、最大は減容率69.5%、除染率68.5%であった。また、除染率については、分級物に選択的に吸着した粘土鉱物（黒雲母等）が存在することにより放射性Cs濃度に下限値（1,000Bq/kg・乾土程度）がある可能性についての検証が必要。【その他】固液分離機による脱水処理で回収した脱水粘土は、含水量も低くフィルタープレスは必要ないことを確認した。また、有機物は80%以上に分解することで、減容率・除染率が向上し、脱水処理後の処理水のpH、浮遊物質SS、放射能濃度も全て排水基準に適合する。

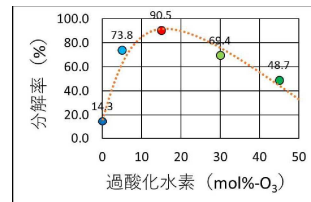


図-3 オゾン/過酸化水素比と分解率

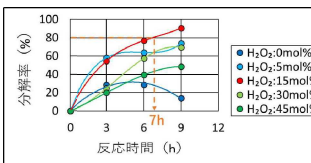


図-4 反応時間と分解率

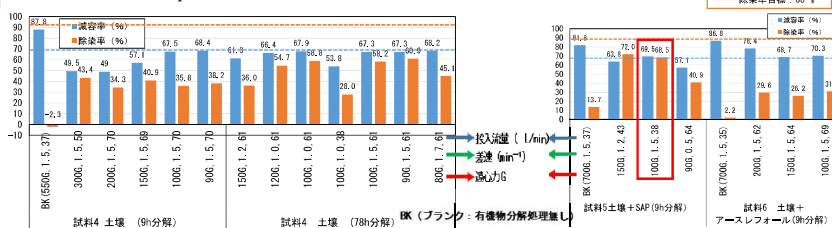


図-6 減容率と除染率（浪江町畑地土壌のCs濃度：4,068.9Bq/kg・乾土）

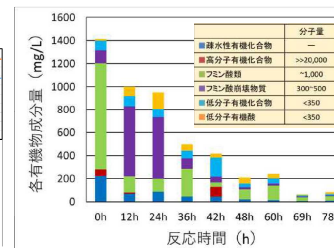


図-5 LC-OCD測定結果

まとめ

低濃度放射性Cs含有土壌（畑地）に対して、減容率と除染率の向上を目的として、促進酸化法を用いた有機物分解処理と固液分離機を用いた分級処理による実証試験を実施した。有機物の分解は、有機物を1mg分解するための必要オゾン量とオゾンと過酸化水素の添加量の最適比が確認できた。また、除染土壌に含まれる高分子系の改質剤も容易に分解ができることを確認した。固液分離機による分級処理では、コンタミの改善対策により物質収支も合った。遠心力Gが100G前後で投入量を増やすことで目標の減容率68.5%を達成した。除染率は目標88%に対して最高で70%程度で未達であったが、その原因が推察できた。また、脱水処理粘土の含水量からフィルタープレスも必要ないことが分かった。これにより、有機物分解処理→分級処理→脱水処理と1年間24時間連続処理運転が可能となり、遠隔操作することで放射能に対する作業環境の安全性確保（被ばくリスクの低減等）が図れる。

付録1-6-2

No. 7 湿式比重選別法および吸水性固化材を用いた再生土品質の向上

実施代表者：早稲田大学

全体概要

概要：中間貯蔵施設内では多くの除去土壤に高吸水性ポリマーなど有機成分を含む改質材が添加されている。このため湿式分級後の回収粗粒分にポリマー成分が残留し、放射性物質濃度が高く、高含水で軟弱化する傾向が認められる。下記の技術を用いて、回収粗粒土の放射性物質濃度低減、締固め強度改良を図り、再生土の品質向上を目指した。

- ①湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減
- ②吸水性固化材による再生資材の強度向上

実施内容

①ラボ試験

容量5 Lの加圧浮上試験装置を使用して、基礎的試験を実施した。粘性土、砂質土の2種の試料を用いて、除去土壤を処理するための加圧浮上処理の制御条件を確認した。また、強熱減量測定、示差熱分析により、土壤からの有機物質等の分離効果を確認した。

②現地試験

福島県内山林より、放射性物質を含む土壤を3種採取した。湿式分級後の回収粗粒土に対して、加圧浮上処理を行うことにより、放射性物質濃度の低減効果を確認した。

回収粗粒土、加圧浮上処理沈殿物を用いて、吸水性固化材による強度改良試験および放射性物質、フッ素、六価クロムの溶出試験等を実施した。また、高炉セメントを用いた比較試験を実施した。

事業の主な実施場所

福島県 及び 早稲田大学

技術概要

技術の概要と特徴

①湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減

回収粗粒土からポリマー成分が付着した微細土粒子を除去すれば、放射性物質濃度の低減が可能と考え、湿式比重選別の一種である加圧浮上法による試験を実施した。加圧浮上法は、空気と水を共存させ加圧し、水中に空気を過飽和溶解させ放出することで発生する直径100 µm程度の気泡により、比重の小さい有機物等を浮上させ分離する原理である。図1に加圧浮上法によるポリマー成分分離のイメージ、図2に現地試験加圧浮上試験装置を示す。

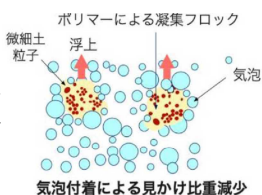


図1 加圧浮上法によるポリマー成分分離のイメージ図

②吸水性固化材による再生資材の強度向上

ペーパースラッジ焼却灰を基材とする吸水性固化材を利用して、強度改良試験を実施した。本固化材は吸水改質作用を主とするため、化学的改質を原理とするセメントや石灰では処理が難しい有機物質を含む土の固化に有効である。また、改良土のpHは弱アルカリ性となり周辺地盤に与える影響が少なく、経済性も高い。図3に吸水性固化材による有機汚泥改質試験例を示す。



図2 加圧システム、浮上槽（62L）、加圧水供給装置（圧力0.6 MPa2）

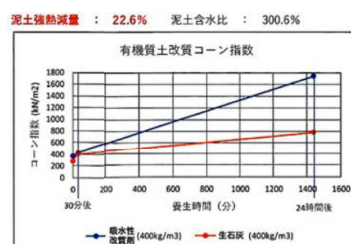


図3 吸水性固化材による有機汚泥改質試験例

付録1-7-1

結果

①試験結果

(1)湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減

福島県内の山林から3種類の土壤を採取した。改質材を2 wt%添加して、湿式分級後、回収粗粒土（粒径75 µm-2 mm）を調製した。

この回収粗粒土を用いて加圧浮上試験を行った。主な試験条件は、加圧水圧力0.6 MPa、固形分濃度3~5 wt%など。代表的な試験結果を図4、表1に示す。加圧浮上処理により、沈殿物の強熱減量は低下、浮上物、懸濁物の強熱減量は増加する。また、沈殿物の放射性物質濃度は減少し、懸濁物、浮上物に放射性物質が濃縮する結果となった。処理前の土壤からの放射性物質濃度低減率は27~44%の試験結果となった。

(2)吸水性固化材による再生資材の強度向上

現地試験の採取土壤から得た回収粗粒土、加圧浮上処理沈殿物、6種の土壤に対して、吸水性固化剤、セメントを添加した強度改良試験を実施した。図5に養生期間7日でコーン指数800 kN/m²まで改良する固化材添加量の比較を示した。今回試験した1ケースを除いた全ての試験例で、吸水性固化材の必要添加量が高炉セメントB種を下回る結果となった。

②試験結果の評価

(1)湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減

加圧浮上処理により土壤中の有機物・微細粒子が浮上分離し、放射性物質濃度が低下するメカニズムであり、除去土壤の処理に有効である。処理前土壤から概ね30%以上の低減率を示し、計画目標を達成した。この技術は特に砂質土における処理効果が大きく、再生土はコンクリート・アスファルト骨材などの利用用途への展開が期待できる。

(2)吸水性固化材による再生資材の強度向上

高含水、有機質、改質材成分が残留した除去土壤の処理に有効である。セメントより改良効果が高い。また、有害物質の溶出がなく、改良土のpHは弱アルカリ性となる。

③提案システムの処理能力、処理コスト及び安全性

(1)湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減

- ・加圧浮上システム1基の処理能力は105t/日。処理コスト：汚染土（有姿）21,000円/トン
- ・作業員の被ばく量は最大年間被ばく量は0.74mSv/年となり、安全性は確保できる。

(2)吸水性固化材による再生資材の強度向上

吸水性固化材コスト：養生7日 目標強度 800 kN/m²：1,260~1,640 円/m³、養生3日 目標強度 400 kN/m²：1,080~2,190 円/m³

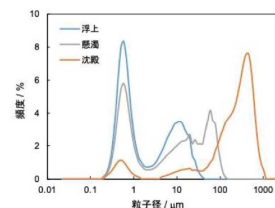


図5 加圧浮上処理物の粒径分布（ラボ試験）

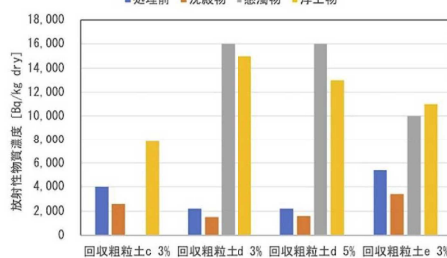


図4 加圧浮上処理試験結果例

表1 加圧浮上分離物の強熱減量

採取土	浮上物	懸濁物	沈殿物
c	29.7	25.1	9.0
d	20.2	19.1	2.6
e	40.9	30.1	7.3

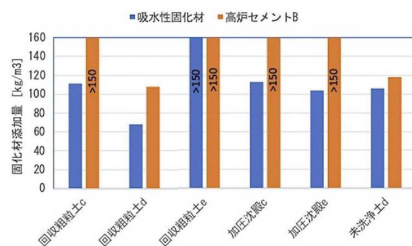


図6 必要添加量の比較（養生7日、800 kN/m²）

まとめ／・森林から3種の土壤を採取して調製した回収粗粒土を処理
・湿式分級で残留した放射性物質濃度を加圧浮上処理により、処理前の27~44%まで低減可能。細粒土、有機物質を浮上分離し、強熱減量も大きく低下
・砂質土の処理に高い効果

- ・ペーパースラッジ灰を基材とする吸水性固化材を用いて、有機分の多い除去土壤の強度改良
- ・吸水による改質が主であり、高含水土、有機質土の処理に有効。セメントより改良効果大
- ・経済性も高く、pH特性、有害物質の溶出抑制など環境調和性に優れている

付録1-7-2

No.8 保管大型土のう袋再資源化の技術実証検討

J&T環境株式会社

全体概要

除去土壌搬入に伴い、中間貯蔵施設には使用済み大型土のう袋が大量に保管されている。一部は焼却処理されているが、処理量に限界がある。

大型土のう袋はほとんどがプラスチック材（ポリエチレン・ポリプロピレンなど）で出来ており、有益な資源として素材でのリサイクル、熱源でのリサイクルが望ましい。

実施内容

保管されている大型土のう袋をサンプル調査し、内容物を確認する。また大型土のう袋の付着物（主に土壌）や線量がどの程度か、また簡易な方法で分離・低減できるか評価する。

事業の主な実施場所

JESCO技術実証フィールド内

技術概要

大型土のう袋の再利用には、付着する土壌と放射能の除去が必要である。当社では実際に大型土のう袋を用いた再生プラスチック原料を製造しており、プラスチックパレットや資材等に活用されている。

本検討では、大型土のう袋の実際の汚損程度を確認し、乾燥・分離・洗浄といった要素技術を用いて、再利用の可能性と放射能の除去程度を検証する。

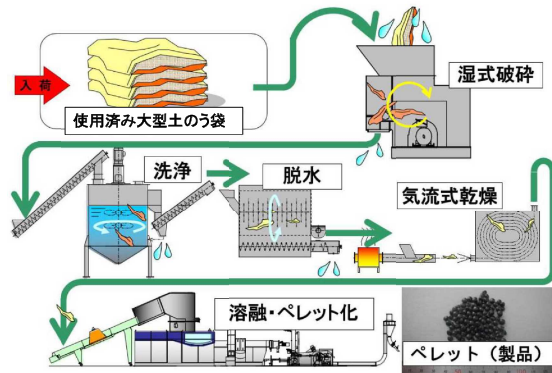


図 弊社福山工場における廃大型土のう袋処理フロー

付録1-8-1

結果

本実証事業では、保管大型土のう袋のうち低線量の4袋を技術実証フィールドに移送し、内容物を確認するとともに、試験サンプルとして利用した。

○保管土のう袋について

- 1) 受入分別施設にて2種の方式（カッター式・破碎機式）で土壌を分離
- 2) 保管内容物は、内袋付大型土のう袋が主体
- 3) 受分施設での分別が進んでおり、土壌は袋表面への付着が主体
- 4) 付着する土壌は水分を含むが、乾燥すると分離が容易
- 5) 内袋は平滑シートで土壌分離が容易、外袋は織布かつ強度があり土壌分離がやや難

○土壌除去について

- 1) 放射能濃度で土壌付着率をおおよそ推定可能
- 2) 乾燥＋乾式分離で土壌除去効果があり、再生プラスチック原料として利用可能性大
- 3) 100(Bq/kg)以下は表面土壌を洗浄＋確実に落とすことで可能性有（低線量の場合）

今後の課題としては、大量処理に向けての装置選定、スケールアップ試験の実施、水洗浄の必要性、高線量品の挙動確認が挙げられる

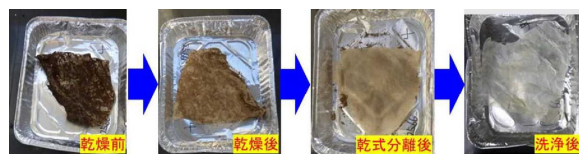


図 小サンプルによる状態変化（内袋の場合）

		NO	放射能濃度(Bq/kg)				土壌付着率(% 計算値)		
			大型土のう袋		大型土のう袋				
			乾燥土壌	乾燥後	乾式分離後	洗浄後	乾燥後	乾式分離後	洗浄後
K-1	外袋	1	1,400	470	210	<100	34%	15%	7%
		2	1,800	530	180	<94	29%	10%	6%
		3	1,000	240	150	<82	24%	15%	10%
	内袋	1	3,200	1,000	360	<92	31%	11%	3%
		2	2,600	1,700	400	110	65%	15%	4%
		3	3,100	650	330	<82	21%	11%	3%

図 小サンプルによる放射能濃度変化・土壌付着率（計算値）

保管大型土のう袋について、付着する土壌を「乾燥・乾式分離・洗浄」による分離操作により、再生プラスチック原料の利用可能性を見出すことが出来た。

付録1-8-2