

個別試験結果と評価詳細

Web 用報告書

実施代表者：株式会社大林組

実証テーマ名：溶融スラグの再生利用等技術の実証

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（以下、「双葉町仮設処理第一施設」と記す）では、シャフト炉および表面溶融炉により除染廃棄物等やその焼却灰等が溶融処理され、安定した高品質の溶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溶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）に応じた再生利用品の安全性、安定性を確認することを目的として実施した。

今年度（3年計画の最終年度）は、室内試験、昨年度構築した盛土およびアスファルト舗装道路の供用時、解体時のモニタリング等を実施した。

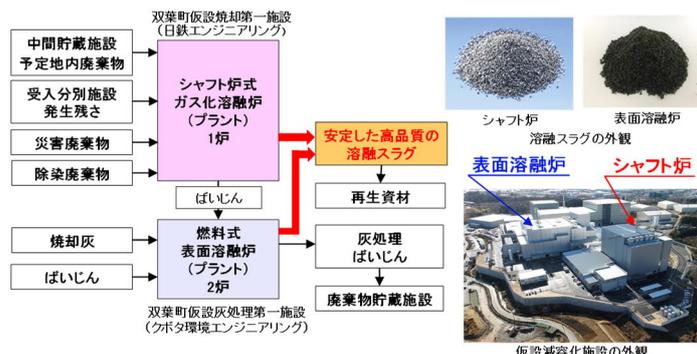


図1 双葉町仮設処理第一施設の概要

実施内容：

昨年度、国土交通省共通仕様書や関連仕様書に則って計画、構築した盛土、舗装道路を対象として、各種モニタリング（空間線量率、浸出水・浸透水の放射性物質濃度測定等）、舗装道路対象の定期的な促進荷重走行および機能確認試験（2カ月に1回程度の頻度で大型ダンプトラックを所定の回数走行させ、路面の変状等を確認）を行った。モニタリング期間終了後（令和5年1月）、盛土および舗装道路を解体し、解体時の空間線量率や粉じん濃度の測定等を行い作業員や環境への影響を評価した。また、コンクリート供試体の屋外暴露試験を継続し、耐久性を評価した。さらに、国道等で多く採用されている排水性舗装用骨材としての適用性を室内試験で確認した。

技術概要：

令和2、3年度実証事業の成果¹⁾²⁾をもとに、室内試験の試験項目等を選定し実施した。また、表1に示す内容で構築物（盛土、舗装道路）の供用時、解体時における各種モニタリングを実施した。コンクリートについては、技術実証フィールド内の屋外に保管したコンクリート供試体の強度試験（材齢1年）等を実施した。

表1 試験施工等の試験ケースと主な測定項目

対象	使用材料	主な測定項目	
		供用時	構築時 ²⁾ 解体時
試験盛土①	・シャフト炉スラグ ・除去土壌	・空間線量率 ・浸出水の放射性物質濃度	・空間線量率 ・作業員被ばく量 ・粉じん濃度 ・大気中放射性物質濃度 (盛土解体時)
試験盛土②	・表面溶融炉スラグ ・除去土壌	・外観観察 ・盛土沈下量、地表面変位	
舗装道路 (5工区)	・シャフト炉スラグ :アスファルト舗装、 路盤 ・表面溶融炉スラグ :路盤	・空間線量率 ・（促進荷重走行による機能確認試験） 表面形状、ひび割れ率、わだち掘れ量、 路面粗さ試験、FWD たわみ測定 ・浸透水の放射性物質濃度等	
コンクリート供試体	・シャフト炉スラグ ・表面溶融炉スラグ	・圧縮強度、曲げ強度、中性化深さ等 ・表面状態観察	

1), 2) いずれも除去土壌等の減容等技術実証事業。1) 令和2年度（その4）、2) 令和3年度（その2）

実証試験の結果：

1. 構築物（盛土、舗装道路）供用時・解体時のモニタリング結果

- ・ 盛土、舗装道路とも、モニタリング期間を通して空間線量率の変動は小さかった。盛土は、構築時の値よりも低い値が継続的に測定され、覆土（厚さ 50cm）の遮へい効果が確認された。
- ・ 舗装道路に対する促進載荷走行および機能確認試験の結果、舗装道路の品質は、溶融スラグ配合の有無や溶融スラグの種類によらず、全 5 工区とも同程度であることが確認された。溶融スラグを配合する場合でも、従来用いられている舗装道路の設計手法を適用できるものと考えられる。
- ・ モニタリング期間を通じて、盛土浸出水、舗装道路雨水表流水・浸透水（舗装直下の路盤・砕石層より採水）の水質は、放射性物質濃度は定量下限値未満であり、重金属等濃度も地下水環境基準に適合しており、人の健康保護および生活環境保全上の問題は認められなかった。
- ・ 粉じん濃度、大気中放射性物質濃度、作業員被ばく量の測定結果から、周辺環境や作業員への影響は低レベルであることが確認された。

2. 室内試験の結果

- ・ 国道等で多く採用されている排水性舗装用骨材として適用可能であることを確認できた。
- ・ 1 年間屋外暴露したコンクリート供試体について、圧縮強度の低下等、品質の低下や劣化は認められなかった。

3. 今後の展開

- ・ 今後の再生利用に向けて、これからも環境安全性に関するデータを蓄積し、評価していくとともに、3 年間の実証事業等で得られた成果を積極的に公表していく予定である。

減容等の評価：

溶融スラグを配合した盛土材、路盤材、アスファルト舗装、コンクリートが、土木資材として適用可能なことを確認できた。溶融スラグ再生利用先の拡大が期待できる。

作業員被ばく量評価：

放射性物質濃度が 3,000Bq/kg 程度の除去土壌、1,000Bq/kg 程度の溶融スラグが混合された盛土の解体等を担当した作業員の一日当たり平均被ばく線量の最大値は、上限値として設定した 75 μ Sv/d を大きく下回る 2.4 μ Sv/d であり、被ばく線量は低い。

コスト評価※：盛土材製造 645 円/t

歩掛り作業人工、作業速度等）：880t/日

コスト評価条件：稼働日数 240 d/y×1y、処理数量 211,200t

（除去土壌 118,080t、溶融スラグ 93,120t）

作業における安全上の注意：溶融スラグには放射性物質が含まれるため保護具を着用

試験場所（住所）：

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

除去物保管場所と保管状況：

技術実証フィールドヤード No.4 付近の管理道路に溶融スラグを配合した路盤材等を大型土のうの荷姿で保管。
溶融スラグを配合したコンクリート供試体は、同フィールド内第二資材置場に大型土のうの荷姿で保管。

1. 試験概要

(1) 試験の目的

双葉町仮設処理第一施設で生成される溶融スラグを対象に、再生利用品としての利用を円滑に進めるため、当該溶融スラグを実際に用いて、再生利用品としての製造方法や施工方法、品質管理方法を実証するとともに、施工中、供用中、解体時を通したサイクルでの安全性、安定性を評価することを目的として実施した。

(2) 実施内容と成果目標

実施内容と成果目標を表 1-1 に、試験の手順（3年間の期間全体）を図 1-1 に示す。最終年度の今年度は、昨年度構築した盛土、舗装道路の供用時、解体時の各種モニタリング（空間線量率、浸出水・浸透水の放射性物質濃度測定等）、舗装道路の品質確認等を行い、構造物の安定性・安全性、作業員や環境への影響を評価した。また、国道等で多く採用されている排水性舗装の骨材としての適用性を室内試験で確認した。

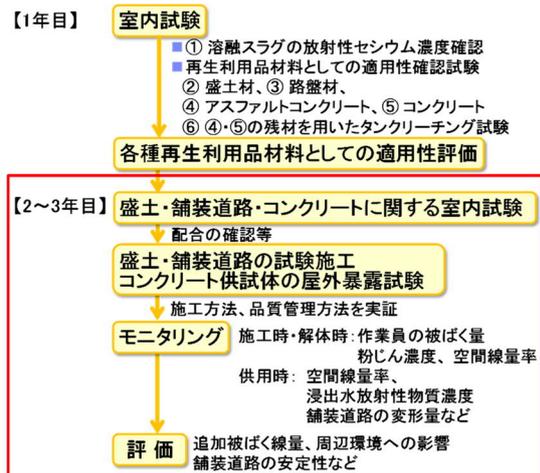


図 1-1 試験の手順（3年間の期間全体）

表 1-1 実施内容と成果目標

No	課題	実施内容	成果目標	供試 溶融スラグ	実施時期・場所等
1	溶融スラグの放射性物質濃度	サンプリング・測定 双葉町仮設処理第一施設取得データの活用	放射性物質濃度を踏まえた再生利用方法を提案	・シャフト炉 ・表面溶融炉	・令和 2,3 年度 (1,2 年目) ・技術実証フィールド
2	再生利用が可能な品目、適切な配合	再生利用品に応じた基準試験(配合試験)、タンクリーチング試験(溶出性確認)	各種再生利用品の材料としての適用性を評価	・シャフト炉 ・表面溶融炉	・令和 2 年度(1 年目) ・技術実証フィールド ・東京都清瀬市 ¹⁾ ・千葉県佐倉市
		再生利用品(排水性舗装骨材)としての適用性確認試験	排水性舗装骨材としての適用性を評価	・シャフト炉	令和 4 年度(3 年目) ・東京都清瀬市 ¹⁾
3	試験施工等で採用する配合	再生利用品に応じた基準試験(配合試験)	試験施工(盛土、舗装道路)、屋外暴露試験用コンクリート供試体の配合確認	・シャフト炉 ・表面溶融炉	・令和 3 年度(2 年目) ・技術実証フィールド ・福島県双葉郡双葉町 ・福島県郡山市 ・千葉県佐倉市
4	再生利用品の環境安全性、安定性(耐久性)	試験施工時、供用時、解体時の空間線量率、作業員被ばく量、浸出水の放射性物質濃度等モニタリング、道路の機能確認試験、コンクリート供試体屋外暴露試験	再生利用品を用いた盛土や舗装道路の環境安全性や安定性、コンクリート供試体の耐久性確認	・シャフト炉 ・表面溶融炉	・令和 3～4 年度 (2～3 年目) ・技術実証フィールド ・千葉県佐倉市

1)当場所では、放射性物質濃度が 100Bq/kg 未満の溶融スラグのみを試験に用いた

(3) 対象とした溶融スラグ

試験のためご提供いただいた溶融スラグおよび除去土壌の一覧を表 1-2 に示す。

表 1-2 ご提供いただいた溶融スラグ、除去土壌一覧表

名称	粒度調整 ¹⁾	放射性物質濃度 (Bq/kg)	重量 (t)	供試先	備考
シャフト炉スラグ	あり	530 ²⁾	118	盛土、路盤、アスファルト舗装	双葉町仮設焼却第一施設 生成品
		275 ³⁾	12	アスファルト舗装	
表面溶融炉スラグ	なし	999 ⁴⁾	123	盛土、路盤	双葉町仮設灰処理第一施設 生成品
	あり	1,000 ²⁾	0.9	コンクリート	
除去土壌	—	3,000 ²⁾	230	盛土	20mm 分級装置通過品

1) 溶融スラグの利用用途に応じ、生成施設の整粒器で実施 2) 技術実証フィールド分析室 分析結果
3) 双葉町仮設焼却第一施設 分析結果 4) 双葉町仮設灰処理第一施設 分析結果

2. 試験の内容と結果

(1) モニタリングの目的、測定項目

試験施工等の目的、舗装道路の仕様および試験盛土および舗装道路の断面図、構造物等配置平面図を表 2-1～表 2-2、図 2-1～図 2-3 に示す。

表 2-1 試験施工等の目的一覧表

構造物等	目的	
	個別	共通
盛土	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造物構築時・解体時の作業員被ばく量、粉じん発生量の評価 ・ 供用時の空間線量率の評価
舗装道路	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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 	
コンクリート供試体	<ul style="list-style-type: none"> ・ 屋外暴露試験による供試体の耐久性の評価 	

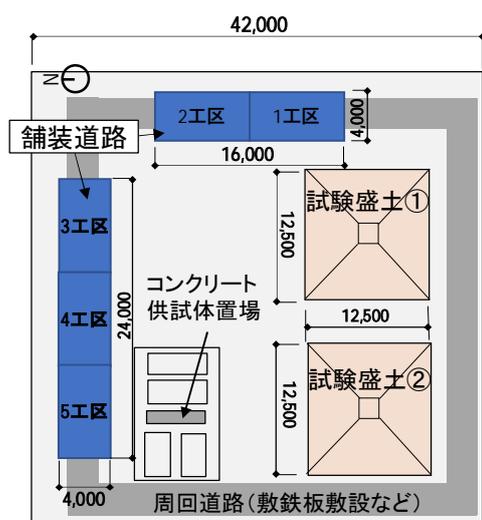


図 2-1 構造物等配置平面図

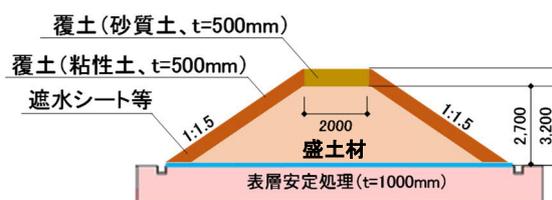


図 2-2 試験盛土断面図

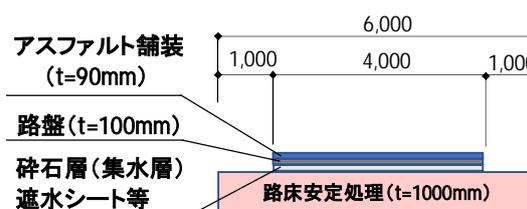


図 2-3 舗装道路断面図

表 2-2 舗装道路試験の仕様一覧表（設計交通区分：N1¹⁾）

工区 No.		1 工区	2 工区	3 工区 (対照区)	4 工区	5 工区
アス ファ ルト 舗装	表層 t=4cm 密粒度 (13)	シャフト炉 配合率 2)10%		スラグ 0%	シャフト炉 配合率 15%	
	基層 t=5cm 粗粒度 (20)	シャフト炉 配合率 10%		スラグ 0%	シャフト炉 配合率 15%	
路盤：t=10cm		シャフト炉 置換率 2)100%	表面熔融炉 置換率 75%	スラグ 0%	シャフト炉 置換率 100%	表面熔融炉置 換率 75%
基礎地盤		現場 CBR8%以上（中性固化材による地盤改良）				

- 1) 1日1方向あたりの大型交通量 15 台未満
- 2) 配合率・置換率は、室内で実施する基準試験結果に基づき設定
 配合率 (%) = 細骨材と置換したスラグの重量 / 全骨材質量 × 100 (%)
 置換率 (%) = スラグ重量 / スクリーニングス + スラグ重量 × 100 (%)

(2) 実施状況 (図 2-4 参照)



(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 2-4 モニタリング等実施状況写真

(3) モニタリング結果の概要

①空間線量率

技術実証フィールドヤード No.4 で測定した空間線量率を図 2-5 に示す。

試験盛土の構築に伴い、ヤード内の空間線量率も上昇したが、覆土の施工により、その空間線量率は低下した状態で推移し、盛土解体完了まで同様の傾向を示した。

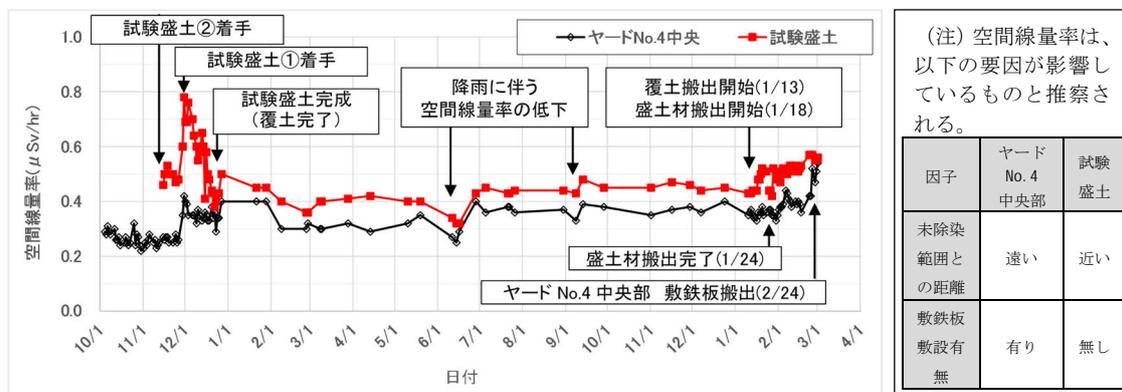


図 2-5 空間線量率測定結果

②盛土解体時の大気中放射性物質濃度

盛土解体時、「放射能濃度等測定方法ガイドライン第2版」（環境省、平成25年3月）に準拠して大気中の放射性物質濃度を測定した（図2-6参照）。

放射性セシウム（セシウム134、セシウム137）は検出下限値以下であった。

1) セシウム134：0.044Bq/kg、セシウム137：0.040Bq/kg

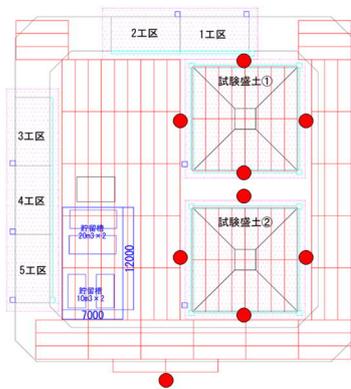


ハイポリウムサンプラー
図 2-6 ハイポリウムサンプラーによる試料採取状況

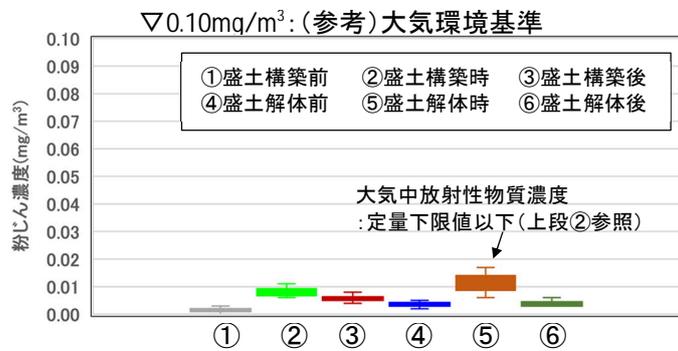
③粉じん濃度

盛土構築時、解体時等の粉じん測定結果を図2-7に示す。

粉じん濃度は、盛土作業（構築、解体）に伴い増加する傾向が伺えた。参考ではあるが、その値は大気環境基準（浮遊粒子状物質）の1/5以下程度であった。



(測定位置平面図)



(測定結果)

図 2-7 粉じん測定位置平面図と濃度測定結果の推移

④作業従事者の外部被ばく線量

外部被ばく線量測定結果を表2-3に示す。

作業担当者の外部被ばく量は、最大でも96.1 μSv/40日=2.4 μSv/日であり、当地で設定した上限値75 μSv/日^{注)}を大幅に下回っていた。

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 2-3 作業担当者の外部被ばく線量

(個人被ばく線量計を用いた測定結果、測定期間：令和4年4月～5年2月)

従事者	被ばく線量 a (μSv)	従事日数 b (d)	a/b (μSv/d)	担当	従事者	被ばく線量 a (μSv)	従事日数 b (d)	a/b (μSv/d)	担当
A	42.7	27	1.6	現場管理	E	96.1	40	2.4	解体
B	103.6	84	1.2		F	80.1	41	2.0	
C	26.1	32	0.8	定期点検・現場管理	G	81.6	35	2.3	
D	15.8	20	0.8		H	64.2	30	2.1	

⑤盛土浸出水、舗装道路雨水表流水・浸透水の水質

試験盛土および舗装道路の環境安全性を確認し、評価するため、**表 2-1** (前掲)、**表 2-4** に示す内容で盛土浸出水、舗装道路雨水表流水・浸透水の水質を分析した。

分析の結果、いずれの試料も、放射性物質濃度は定量下限値¹⁾

未満、pH は総理府令一般排水基準の範囲 (海域以外の公共用水域に排出されるものの許容限度：5.8～8.6) にあり、重金属等は地下水環境基準に適合していた。

1) セシウム 134 : 0.39～0.53Bq/L、セシウム 137 : 0.51～0.67Bq/L

2) 舗装直下の路盤・砕石層より採水

表 2-4 水質分析の概要

試料の種類		採取期間	試験数 (1 ケース 当たり)
盛土	浸出水	4 月～1 月	8
舗装道路	雨水表流水	9 月、10 月	2
	浸透水 ²⁾	9 月	1

⑥盛土沈下量の推移

盛土沈下量の推移を**図 2-8** に示す。

盛土の構築が完了した令和 3 年 12 月初め以降、盛土の基礎地盤は、20mm 程度の沈下が確認され、概ね収束の傾向が確認されていた。また、令和 4 年 3 月 16 日に発生した震度 6 弱の地震により、新たに 10mm 程度の沈下が確認された。

盛土中央深度の沈下量は、基礎地盤と同様に地震発生前に概ね収束の傾向が確認されており、震度 6 弱の地震に伴い、30mm 程度の沈下が確認された。なお、その後に発生した 2 度の震度 4 の地震による沈下は確認されなかった。

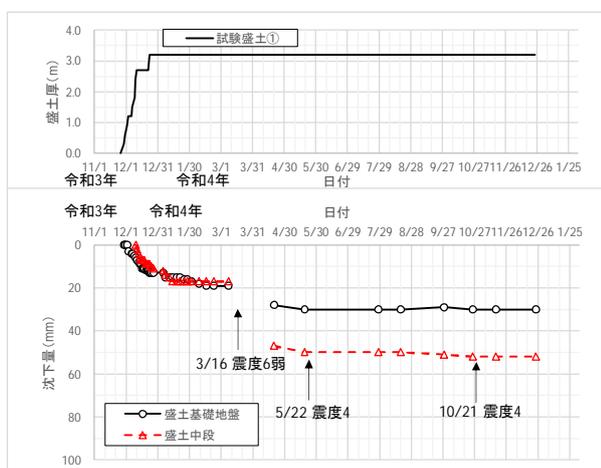


図 2-8 盛土沈下量の推移 (試験盛土①)

⑦舗装道路の機能確認試験

(ア) 検討フロー

本実証における検討フローを**図 2-9** に示す。

構築したアスファルト舗装道路は、T_A法 (路床の設計 CBR と設計交通量に応じて目標とする T_A (等値換算厚) を下回らないように舗装の各層の厚さを決定する手法) に基づき設計されており、供用時を想定した耐久性確認として、促進載荷走行と機能確認試験を定期的実施した上で、舗装道路を解体した。このうち、供用時に実施した促進載荷走行は、季節的な要因を考慮し、2 ヶ月間隔で合計 6 期実施し、合計走行回数は、交通区分 N1 の疲労破壊輪数 3,000 回/20 年¹⁾の 49kN 換算輪数に相当する 2,190 回以上とした (最終的には 2,271 回走行)。

1) 舗装設計施工指針 ((公社) 日本道路協会)

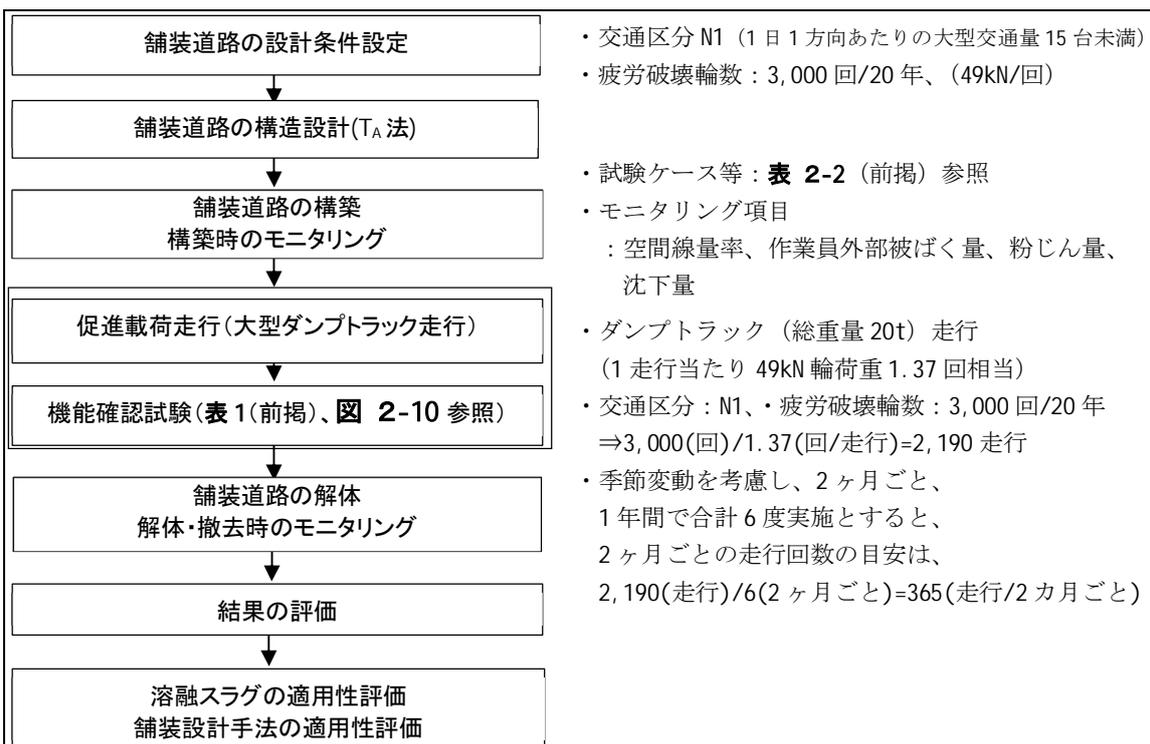


図 2-9 溶融スラグを配合したアスファルト舗装道路の適用性確認フロー

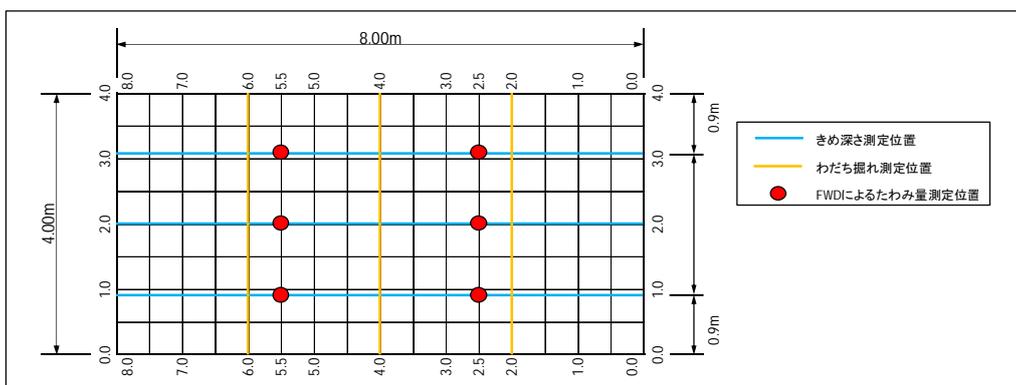


図 2-10 測定位置平面図

(イ) モニタリング結果とその考察

・表面形状

目視調査により、すべての工区において、車輪走行位置にわだち掘れやアスファルト被膜の摩耗が認められたが、舗装材の破壊に起因する大きなひび割れやポットホールは発生しなかった。また、工区ごとに比較した場合においても溶融スラグ配合の有無による有意な差は認められなかった。

・ひび割れ率

交通量区分 N1 の疲労破壊輪数 (3,000 回/20 年) を与えた場合の各工区のひび割れ率は、1 工区 (0%)、2 工区 (2.8%)、3 工区 (1.4%)、4 工区 (0%)、5 工区 (1.3%) とすべての工区において 3% 未満であり、交通量の少ない一般道路の修繕目標値 (40~50%) よりも大幅に低いレベルであった。

また、ひび割れが発生した箇所は、いずれも工区境の端部であった。この要因は路盤層に設置した遮水シート等の有無の影響によるものと考えられ、荷重車の走行に起因するものではないと考えられる。

・わだち掘れ量

わだち掘れの測定結果を図 2-11 に示す。

促進载荷走行（大型ダンプトラック走行）に伴ってわだち掘れが発生した。その値はすべての工区で 20 mm 未満で、交通量の少ない一般道路におけるわだち掘れ量の修繕目標値(40 mm)以内であることから、実装上問題のない範囲であった。

また、工区ごとに比較した場合においても、熔融スラグの配合に伴う耐塑性変形性能に有意な差は認められなかった。いずれの工区とも、対照区（熔融スラグを配合していない 3 工区）と同様の推移を示しており、熔融スラグ配合の有無による品質の相違は認められなかった。

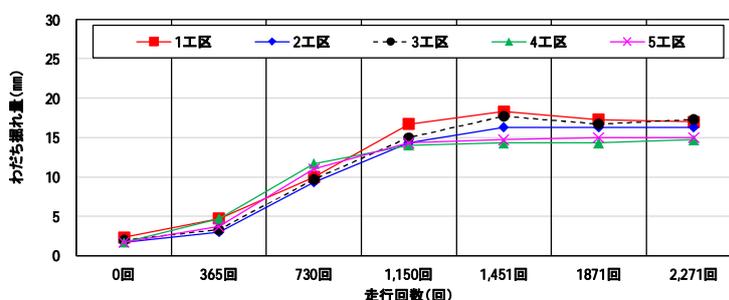


図 2-11 わだち掘れ量測定状況・結果

この他、路面粗さ試験、FWD たわみ測定についても、熔融スラグの配合による有意な差は認められなかった。

以上のように、熔融スラグの配合率および置換率を変えた路盤やアスファルト舗装を構築し、大型ダンプトラックによる促進载荷走行を実施し、車両走行に伴う路面の変状、損傷レベルの経時変化を確認した結果、一般骨材を用いた舗装材と同等の耐久性能を有することが確認されたものと考えられる。

(4) 排水性舗装の材料としての適用性に関する室内試験結果

国道等で多く採用されている排水性舗装の材料としての熔融スラグの適用性を確認するため、シャフト炉スラグを対象として供試体を作製し各種室内試験を行った。配合設計は、ポーラスアスファルト混合物の配合設計（「舗装施工便覧」（平成 18 年版、日本道路協会）に示された手順に従って行い、得られた最適アスファルト量（図 2-12 参照）の供試体を用いて密度試験、透水試験、マーシャル安定度試験、ホイールトラッキング試験等を行って設計アスファルト量を決定した。最適アスファルト量の供試体は表 2-5 に示すとおり各種規格値に適合していたため、設計アスファルト量は最適アスファルト量とした。

排水性舗装を浸透した雨水等への放射性物質や重金属等の溶出のおそれを確認するため、最適アスファルト量で作製したマーシャル安定度試験用供試体を用い、タン

クリーニング試験（8カ月間蒸留水に浸漬）を行った（図 2-13 参照）。その結果、供試体からの放射性物質や重金属等の溶出は確認されなかった。

以上の結果から、排水性舗装の材料として、溶融スラグが適用可能であるものと評価できる。

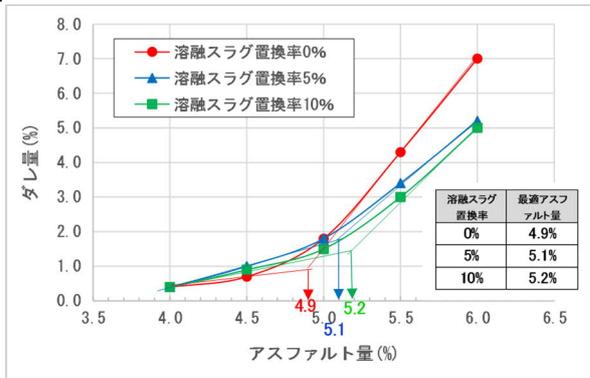
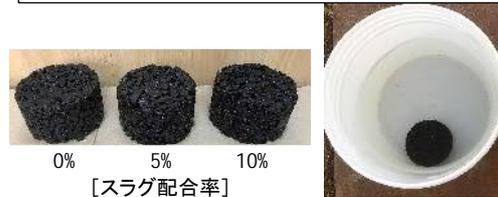


図 2-12 最適アスファルト量の算定

試験方法: マーシャル安定度試験で規定されている供試体を用い、タンクリーニング試験(塊状のまま溶媒水中に水浸して、試験開始から約1カ月ごとに浸漬水を採水して水中に溶出する放射性物質や重金属の量を分析(合計8回))
 ・試験期間: 令和4年6月14日(試験開始日)
 ~令和5年1月24日



(供試体の外観) (水浸状況)

図 2-13 排水性舗装供試体に対するタンクリーニング試験の状況

表 2-5 排水性舗装に関する室内試験結果一覧表

項目	溶融スラグ置換率0%		溶融スラグ置換率5%		溶融スラグ置換率10%		規格値・参考値
	試験結果	判定	試験結果	判定	試験結果	判定	
アスファルト量 (%)	4.9	—	5.1	—	5.2	—	-
理論密度 (g/cm ³)	2.497	—	2.493	—	2.492	—	-
密度 (g/cm ³)	2.007	—	2.004	—	1.992	—	-
空隙率 (%)	19.6	OK	19.8	OK	20.1	OK	20程度
連続空隙率 (%)	15.8	—	15.5	—	16.0	—	-
マーシャル安定度 (標準) (kN)	6.0	OK	5.5	OK	5.5	OK	3.43以上
残留安定度 (水浸) (%)	91.7	OK	90.9	OK	94.5	OK	75.0以上
フロー値 (1/100cm)	36	—	36	—	33	—	-
透水係数 K ₁₅ (cm/s)	0.213	OK	0.304	OK	0.334	OK	0.01以上
カンタブロ損失率 (20°C) (%)	5.4	OK	5.5	OK	5.4	OK	20以下
動的安定度 (回/mm)	6,000以上 (7000)	OK	6,000以上 (9000)	OK	6,000以上 (9000)	OK	3,000以上
すり減り量 (cm ²)	0.97	OK	1.19	OK	1.12	OK	1.3以下

(5) コンクリートに関する試験

①配合条件

屋外暴露試験および長期材齢供試体を用いた試験におけるコンクリートの配合条件と配合概要表を表 2-6、表 2-7 に示す。

表 2-6 コンクリートの配合条件

項目	仕様等	項目	仕様
種別	普通コンクリート	目標スランプ	8cm (規格値 8±2.5cm)
目標圧縮強度	30N/mm ² 1)	空気量	4.5% (規格値 4.5±1.5%)
水セメント比	55%以下 1)		

1) 「JIS A 5031 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を 溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材」の規定を準用

表 2-7 硬化コンクリート試験の配合概要表

スラグの種類	置換率 (%)	w/c	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						添加率(C×%)	
				W	C	S1	S2	S3	G	15S	303
				水	セメント	山砂	シャフト炉	表面溶融炉	砂利		
なし	0	55	46	155	282	853	—	—	1,009	1.2	0.002
シャフト炉	50	55	46	165	300	425	425	—	987	1.1	0.001
表面溶融炉	50	55	46	165	300	435	—	435	987	0.9	0.001

1) シャフト炉スラグ、表面溶融炉スラグとも「粒度調整あり」の試料を供試

②長期材齢供試体を用いた試験

アルカリシリカ反応性試験では、溶融スラグは無害であることが確認された。

長さ変化試験結果を図 2-14 に示す。材齢 52 週での長さ変化率は、溶融スラグの配合に伴う相違は 100×10^{-6} 程度のオーダーであり、同等の結果を示した。

促進中性化試験結果を図 2-15 に示す。促進期間の平方根と促進中性化深さの関係は概ね直線的であり、溶融スラグの配合有無に伴う相違はほとんど認められず、また、一般的なコンクリートと同様に \sqrt{t} 則が成り立っていた。

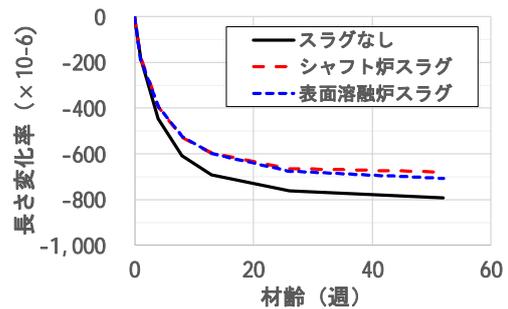


図 2-14 長さ変化試験結果

③供試体屋外暴露試験

長期材齢試験結果より、溶融スラグの有無で遜色ない結果を確認されたことから、技術実証フィールド（ヤード No.4）において、溶融スラグを用いたコンクリート供試体を 1 年間屋外で暴露した後、強度等の各種試験を実施した。

技術実証フィールドでの屋外暴露状況を図 2-16 に示す。約 1 年間屋外で暴露した供試体表面状態確認状況を図 2-17 に示す。供試体にひび割れや表面の劣化等、外観の変化は確認されなかった。

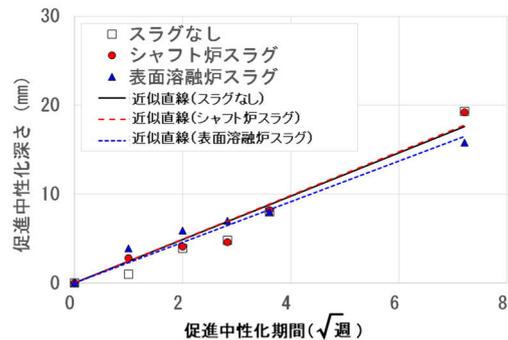


図 2-15 促進中性化試験結果



図 2-16 供試体の屋外暴露状況

圧縮強度試験の結果を図 2-18 に示す。いずれの配合においても、目標強度を満足し、かつ、材齢の増加とともに強度も増



(スラグなし) (シャフト炉スラグ) (表面溶融炉スラグ)
図 2-17 供試体表面状態確認状況 (材齢 361 日)

加しており、屋外暴露によるコンクリートの劣化等は確認されなかった。また、中性化深さは、いずれの配合も0mmであった。

以上のように、熔融スラグを配合したコンクリートの品質は、通常の骨材を配合したコンクリートと同等の品質を示し、コンクリート細骨材として適用可能であることを確認された。

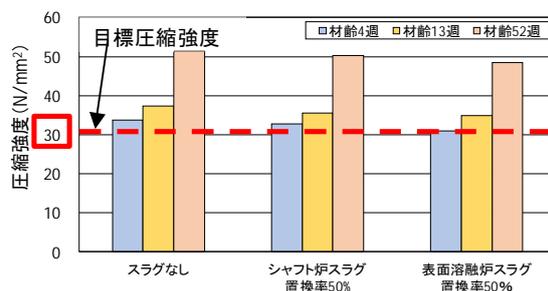


図 2-18 圧縮強度試験結果
(屋外暴露供試体)

3. まとめと今後の展開

(1) まとめ

①構築物（盛土、舗装道路）供用時・解体時のモニタリング結果

- ・ 盛土、舗装道路とも、モニタリング期間を通して空間線量率の変動は小さかった。盛土の構築においては、覆土（厚さ 50cm）の遮へい効果が確認された。
- ・ 舗装道路に対する促進載荷走行による機能確認試験の結果、舗装道路の品質は、熔融スラグ配合の有無や熔融スラグの種類によらず、全 5 工区とも同程度であることが確認された。熔融スラグを配合する場合でも、従来用いられている舗装道路の設計手法を適用できるものと考えられる。
- ・ モニタリング期間を通じて、盛土浸出水、舗装道路浸透水・表面水の水質は、放射性物質濃度は定量下限値未満であり、重金属濃度も地下水環境基準に適合しており、人の健康保護および生活環境保全上の問題は認められなかった。
- ・ 粉じん濃度、大気中放射性物質濃度、作業員被ばく量の測定結果から、周辺環境や作業員への影響は低レベルであることが確認された。

②室内試験の結果

- ・ 排水性舗装の骨材として適用可能であることを確認できた。
- ・ 1年間屋外暴露したコンクリート供試体について、圧縮強度の低下等、品質の低下や劣化は認められなかった。

③3年間の実証事業の成果

- ・ 双葉町仮設焼却第一施設・仮設灰処理第一施設で生成されたシャフト炉スラグおよび表面熔融炉スラグを用いて室内試験、試験施工等を行い、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、安定性を確認した。その結果、各種用途への適用が可能であるとともに、適用拡大に当たっての課題（例えば、熔融スラグの整粒器による粒度調整の度合い、寒冷地におけるコンクリート骨材利用等）を確認できた。
- ・ これらの熔融スラグについて、材料として構造物を構築したり、解体したりする場合における「使い易さ（勝手）」は、既に資源化が確立している製鋼スラグや都市ごみ熔融スラグ等と同等であった。

(2) 今後の展開

今後の再生利用に向けて、環境安全性に関するデータを蓄積し、評価していくとともに、3年間の実証事業等で得られた成果を積極的に公表していく予定である。

実施代表者：大成建設株式会社

実証テーマ名：

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

概要：

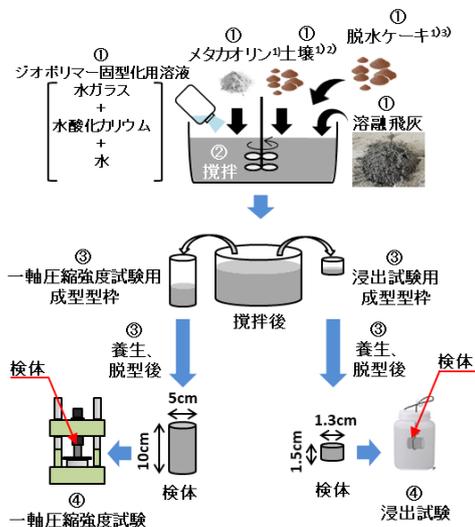
本技術実証は、放射性セシウム（Cs）が高濃度に濃縮された除去土壌、溶融飛灰、脱水ケーキについて、長期的な安定保管、Cs 浸出抑制の観点から、ジオポリマー固型化処理の試験を通じ、Cs 保持性の高い再生利用資材化技術の検討を行うことを目的とし、将来的に安定な保管と最終処分量の減量化および安全な処分を実現することを目標とする。

実施内容：

本試験は多様性のある溶融飛灰を材料としてジオポリマーを作製・試験・評価を行うため、コールド試験（非放射性）とホット試験（放射性）を並行して実施した。コールド試験では福島県内で入手した非放射性の溶融飛灰や福島県内で入手した土壌から脱水ケーキを製作し、それらを用いてジオポリマーを作製し、試験や評価を行った。ホット試験では福島県双葉町仮設灰処理施設から入手した放射性の溶融飛灰や除去土壌から脱水ケーキを製作し、それらを用いてジオポリマーを作製し、試験や評価を行った。

技術概要：

【試験全体の流れ】



- ① ジオポリマー固型化用溶液，メタカオリン，土壌 2)，脱水ケーキ 3)，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。

- 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

【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実用性、安全性等々を評価

【期待される成果】

- (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ない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

実証試験の結果：

(1) コールド試験／ホット試験

【物性測定試験】

- ・ 本試験に使用した熔融飛灰や一般／除去土壌には、ジオポリマーの固型化に寄与す「Al」や「Si」が含まれていることを確認した（一部片方の元素のみ）。

【ジオポリマー配合検討試験】

- ・ ジオポリマー固型化用溶液配合とバインダー量（熔融飛灰，メタカオリン，脱水ケーキ（分級処理後の細粒分に処理を加えたもの），土壌（分級処理後の細粒分））を変化させジオポリマー固型化体を作製し、強度評価を実施した。

【ジオポリマー性能試験】

<一軸圧縮強度試験>

- ・ ジオポリマー配合検討試験時に「堅固」（後述する）と評価された配合とメタカオリンの代替材として脱水ケーキ（分級処理後の細粒分に処理を加えたもの）を使用した配合に対し、一軸圧縮強度試験を実施した。一部の配合にて、目標強度（一軸圧縮強度 1,470kPa）以上になった。

<浸出試験>

- ・ 一軸圧縮強度試験にて目標強度以上かつ熔融飛灰の充填量が高いかつジオポリマー固型化体の作製コストが安価な配合とメタカオリンの代替材として脱水ケーキ（分級処理後の細粒分に処理を加えたもの）を使用した配合に対し、浸出試験を実施した。全ての配合にて、セメント固化体の浸出率（約 80%）未満になった。

(2) 最終処分の安全評価

- ・ 浸出試験にて取得した浸出率を用いて、経過時刻に対する年間被ばく線量を算出し、めやす線量である 10 μ Sv/y を下回った。

評価：熔融飛灰，脱水ケーキ，土壌を材料（再生利用）としたジオポリマー固型化体が目標強度以上であり、Cs の浸出率がセメント固化体より低い値になることを確認した。また、安全評価等を通じて、本技術が安定・安全に最終処分が可能なことを示せた。

作業員被ばく量評価：放射性的熔融飛灰を扱う試験より得られた情報を基に試算した結果、作業員の年間の外部被ばくは 8.960mSv/y 程度であった。よって、線量限度（20mSv/y）を超えないため被ばくの観点における安全性は確保できる。

コスト評価： 熔融飛灰（99,000t）を対象 3.94 万円/200L のドラム缶	歩掛り（作業人工、作業速度等）： 作業人工：57 人工（19 人×3 班） 作業速度：10 本（200L のドラム缶）/h
--	---

コスト評価条件：実機プラントの仕様は、熔融飛灰を材料としたジオポリマー固型化体（200L ドラム缶）を 228 本/d（24 時間操業）、10 年間製造とし、作業員は 57 人（19 人×3 班）で行うこととした。

作業における安全上の注意：実機製造プラントでは熔融飛灰や除去土壌、水酸化カリウム等を大量に取り扱うため、粉塵飛散防止策の強化、防護具着用の徹底等が必要となる。

試験場所（住所）：北海道札幌市、 神奈川県川崎市、福島県双葉郡等	除去物保管場所と保管状況：試験に使用した熔融飛灰は、JESCO と協議し適切に処分した。
-------------------------------------	--

1. 試験概要

(1) 背景と概要

現在、中間貯蔵開始後 30 年以内の 2045 年までに福島県外における最終処分の完了に向けて放射性 Cs が高濃度に濃縮された除去土壌、溶融飛灰、脱水ケーキ等に関する減容処理や最終処分等の技術開発が進められている。最終処分の技術としては、既に実用化されているセメント固化技術があるが、セメントマトリックスには放射性 Cs の保持性はほとんど期待できない。そこで、弊社はセメントと比較し、物理的・化学的に安定しており、放射性 Cs の封じ込め性が高いことが知られているジオポリマーに着目した。弊社は「令和 2 年度除去土壌等の減容等技術実証事業」では除去土壌を、「令和 3 年度除去土壌等の減容等技術実証事業」では溶融飛灰をジオポリマーの材料としたジオポリマー固型化体が最終処分技術として適用できる可能性を示せた。しかし、令和 3 年度では特定の溶融飛灰に対する実証に止めたため、多様性のある溶融飛灰等に対し適切に固型化を行うことが可能かを実証することに至っていない。

そこで、本技術実証では対象物（溶融飛灰等）の多様な条件に対し固型化の可否およびそれぞれの構成物質の組成に適応した配合を定め、ジオポリマーの配合設計を確立することを通して、ジオポリマー固型化技術が Cs の浸出率を低減する最終処分技術のオプションの一つとなることを目標とした。

(2) 提案技術の目的

本試験では、多様性のある溶融飛灰に対し、安定・安全に最終処分することが可能なジオポリマーの配合設計を確立することを目的とした。また、一部の配合に土壌（分級処理後の細粒分）を加え、土壌の吸着反応による Cs 浸出抑制効果の有無と脱水ケーキ（分級処理後の細粒分に処理を加えたもの）を入れ、メタカオリンの代替（活性フィラー：「2.技術概要」参照）としての再生利用の可否を確認した。

(3) 成果目標

本試験の成果目標を以下に示す。

- ・ 作製したジオポリマー固型化体の一軸圧縮強度が原子力規制庁の「廃棄物確認に関する運用要領」に記載された、セメント固化体の一軸圧縮強度 1,470kPa 以上となること。
- ・ 作製したジオポリマー固型化体の Cs の浸出率を把握し、セメント固化体の値より低くなること（セメント固化体の浸出率約 80%：図 2-2 参照）。
- ・ 作製したジオポリマー固型化体（検討するモデルは一部）を最終処分技術として活用する際の安全評価を実施すること。

2. 技術概要

セメントコンクリートとジオポリマー固型化体のそれぞれの反応と固型化に必要な材料を示した概略説明図を図 2-1 に示す。ジオポリマーの特徴としては、コンクリートに比べて Cs の浸出率が低いことである (図 2-2 参照)。

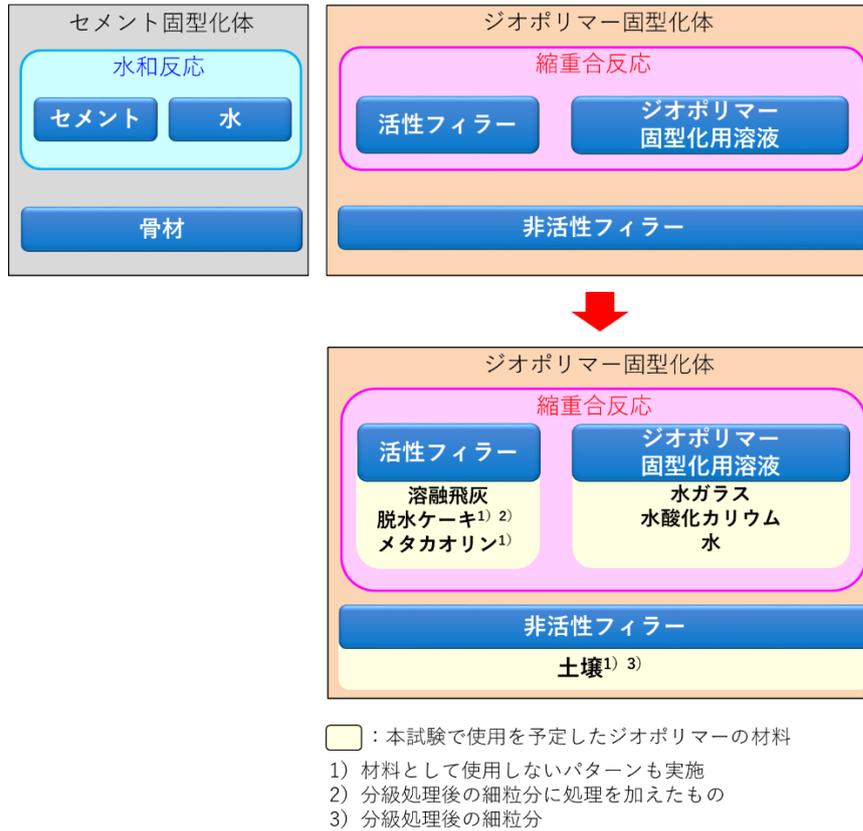


図 2-1 ジオポリマー技術の概略説明図

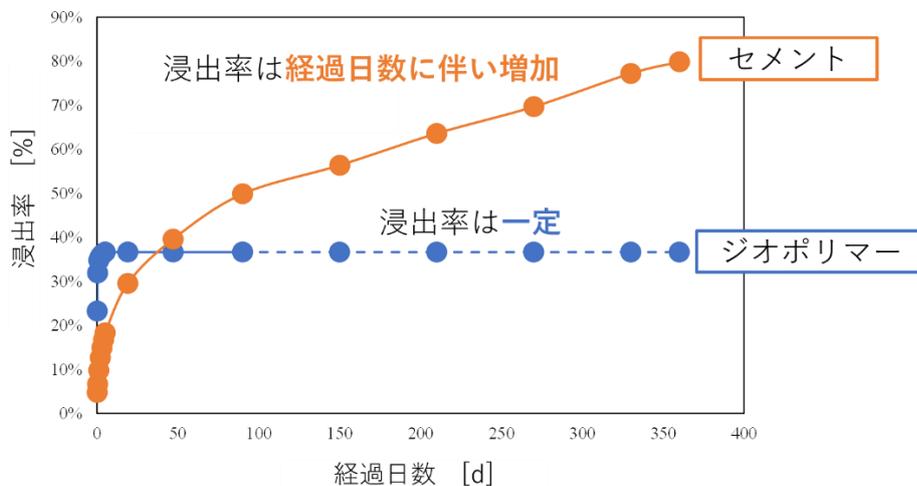


図 2-2 Cs の浸出試験結果の一例 (「令和 3 年度除去土壌等の減容等技術実証事業」)

3. 試験内容

(1) 試験の手順

試験の手順を図 3-1 に示す。

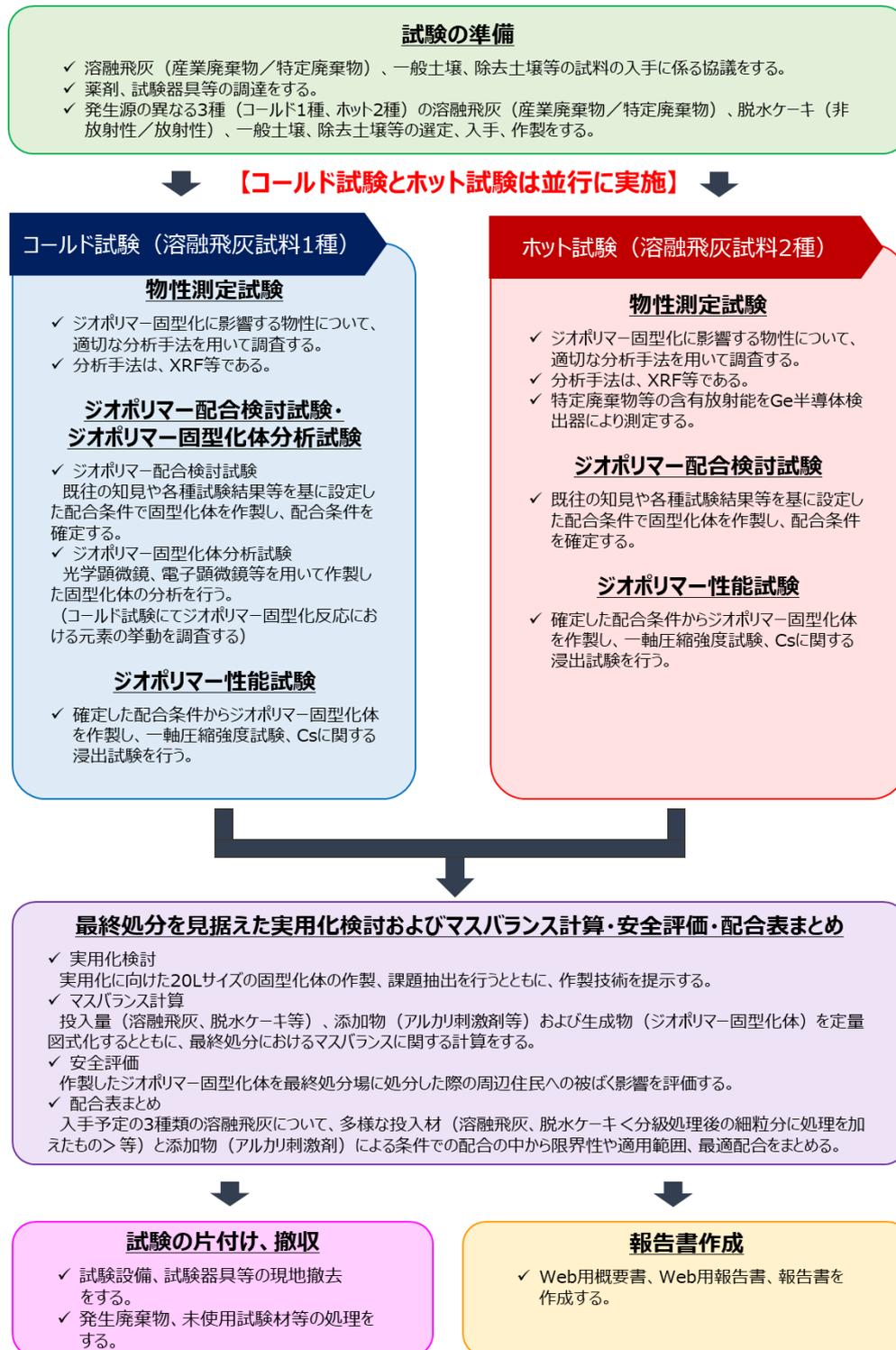


図 3-1 試験の手順

(2) 試料の準備

本試験にてジオポリマーの材料として使用した溶融飛灰 1 (非放射性), 溶融飛灰 2/3 (放射性), 土壌 (一般土壌/除去土壌) を入手・作製した。試料の情報を図 3-2~図 3-6 に示す。



図 3-2 溶融飛灰 1



図 3-3 溶融飛灰 2



図 3-4 溶融飛灰 3



図 3-5 一般土壌



図 3-6 除去土壌

(3) 試験の実施要領

①物性測定試験 (コールド/ホット試験)

ジオポリマーの材料として使用する溶融飛灰 (1/2/3), 一般土壌, 除去土壌に対し XRF を用いて元素組成の分析等を実施した。

②ジオポリマー配合検討試験 (コールド/ホット試験)

溶融飛灰, 土壌 (分級処理後の細粒分), 脱水ケーキ (分級処理後の細粒分に処理を加えたもの) を材料として、ジオポリマー固型化用溶液 (水ガラス: SiO_2 , 水酸化カリウム: K_2O , 水: H_2O) の配合割合を 5 段階、バインダー量 (溶融飛灰, メタカオリン, 脱水ケーキ, 土壌) の配合割合を 3 段階変化させ、ジオポリマー固型化体 (直径 1.3cm、高さ 1.5cm) を作製した。作製後、目視観察や触手による強度確認に対する結果 (評価) を 4 種類に分別した。また、一部の配合に土壌 (分級処理後の細粒分) を加え、土壌の吸着反応による Cs 浸出抑制効果の有無を確認するため、ジオポリマー固型化体を作製し、その結果 (評価) を 4 種類に分別した。

③ジオポリマー性能試験 (コールド/ホット試験)

【一軸圧縮強度試験】

コールド/ホット試験ともにジオポリマー固型化体 (直径 5cm、高さ 10cm) を作製し、一軸圧縮強度試験を実施し、原子力規制庁の「廃棄物確認に関する運用要領」に記載された、セメント固化体の一軸圧縮強度 1,470kPa と比較した。

【浸出試験】

コールド／ホット試験ともにジオポリマー固型化体（直径 1.3cm、高さ 1.5cm）を作製し、米国原子力学会 ANSI/ANS-16.1 に準拠して浸出試験を実施し、セメント固型化体の浸出率（約 80%：図 2-2 参照）と比較した。

④最終処分を見据えた実用化検討（コールド／ホット試験）

溶融飛灰 1/2/3 を材料として、20L（ドラム缶 200L の 1/10）サイズを計 3 検体作製し、作製の際の課題抽出と作製技術を提示した。

⑤最終処分の安全評価

【安全評価】

浸出試験にて取得した Cs の浸出率を入力値とした安全評価を実施し、溶融飛灰を材料としたジオポリマー固型化体を最終処分場に処分したときの周辺住民への被ばく影響を評価した。

4. 試験結果（ホット試験（溶融飛灰 3）を通じた代表的成果を示す）

（1）物性測定試験（溶融飛灰 3 と除去土壌）

<XRF>

溶融飛灰 3 と除去土壌の XRF による元素組成分析結果を図 4-1 に示す。図 4-1 に示すように、溶融飛灰 3 と除去土壌には、ジオポリマーの固型化に寄与する「Al」と「Si」が含有されている。

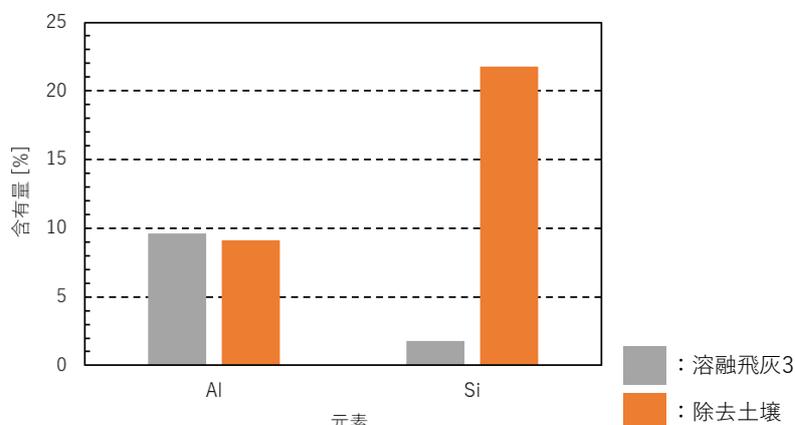


図 4-1 XRF による元素組成分析結果

（2）ジオポリマー配合検討試験（溶融飛灰 3）

本試験で計画した配合表と作製したジオポリマー固型化体の強度に関する結果を表 4-1（溶融飛灰 3）に示す（【凡例】は後述する表 4-2 も同様）。表 4-1 にあるバインダー量とは、溶融飛灰、メタカオリン、脱水ケーキ（分級処理後の細粒分に処理を加えたもの）、土壌（分級処理後の細粒分）のことである。また、セルの数値はジオポリマー固型化体に含まれる溶融飛灰の充填量（wt%）である。表 4-1 に示すように、黄色いセルは作製したジオポリマー固型化体が「堅固」という評価であり、一軸圧縮強度が 1,470kPa 以上になる可能性のある配合である。

表 4-1 溶融飛灰 3・メタカオリン

配合表
(溶融飛灰 100%, メタカオリン 0%)

溶融飛灰100% メタカオリン0%		バインダー量 [wt%]		
		40.0	50.0	60.0
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	40.0	50.0	60.0
	1 : 1 : 20	40.0	50.0	60.0
	1 : 1 : 25	40.0	50.0	60.0
	1 : 1 : 30	40.0	50.0	60.0
	1 : 1 : 35	40.0	50.0	60.0

試験結果
(溶融飛灰 100%, メタカオリン 0%)

溶融飛灰100% メタカオリン0%		バインダー量 [wt%]		
		40.0	50.0	60.0
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	40.0	50.0	60.0
	1 : 1 : 20	40.0	50.0	60.0
	1 : 1 : 25	40.0	50.0	60.0
	1 : 1 : 30	40.0	50.0	60.0
	1 : 1 : 35	40.0	50.0	60.0

配合表
(溶融飛灰 90%, メタカオリン 10%)

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
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	54.0
	1 : 1 : 20	36.0	45.0	54.0
	1 : 1 : 25	36.0	45.0	54.0
	1 : 1 : 30	36.0	45.0	54.0
	1 : 1 : 35	36.0	45.0	54.0

試験結果
(溶融飛灰 90%, メタカオリン 10%)

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
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	54.0
	1 : 1 : 20	36.0	45.0	54.0
	1 : 1 : 25	36.0	45.0	54.0
	1 : 1 : 30	36.0	45.0	54.0
	1 : 1 : 35	36.0	45.0	54.0

配合表
(溶融飛灰 80%, メタカオリン 20%)

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
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	48.0
	1 : 1 : 20	32.0	40.0	48.0
	1 : 1 : 25	32.0	40.0	48.0
	1 : 1 : 30	32.0	40.0	48.0
	1 : 1 : 35	32.0	40.0	48.0

試験結果
(溶融飛灰 80%, メタカオリン 20%)

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
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	48.0
	1 : 1 : 20	32.0	40.0	48.0
	1 : 1 : 25	32.0	40.0	48.0
	1 : 1 : 30	32.0	40.0	48.0
	1 : 1 : 35	32.0	40.0	48.0

【凡例】(表 4-2 も同様)

			
堅固	自立はしたが 圧すると崩壊	水が多く固型化せず	攪拌不可

次に、表 4-1 に示した試験結果から、「堅固」且つ溶融飛灰 3 の充填量が最も多い配合を 1 配合選定 (表 4-1 の青枠) し、その配合に対し、溶融飛灰のバインダー量を土壌 (分級処理後の細粒分) の 1.5wt% という 1 水準で置き換える、これは土壌 (分級処理後の細粒分) を加えることで、土壌の吸着反応による Cs の浸出抑制効果を後述する浸出試験にて確認するため、ジオポリマー固型化体を作製する。強度の結果を表 4-2 に示す。表 4-2 に示したセルの数値はジオポリマー固型化体に含まれる溶融飛灰の充填量 (wt%) と土壌の充填量 (wt%) である。表 4-1 から選定した 1 配合 (表 4-1 の青枠) と表 4-2 に示す強度が同一の評価 (「堅固」) のため、1.5wt%

の土壌（分級処理後の細粒分）を非活性フィラーとして添加してもジオポリマー固型化体の強度が減少しないことを確認できた。

表 4-2 溶融飛灰 3・土壌（※分級処理後の細粒分）

試験結果（溶融飛灰 98.5%，土壌※1.5%）

溶融飛灰98.5% 土壌（※）1.5%		バインダー量 [wt%]		
		40.0	50.0	60.0
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 : 30	—	—	59.1 (溶融飛灰) 0.9 (土壌)

■ : 非該当

(3) ジオポリマー性能試験（溶融飛灰 3）

①一軸圧縮強度試験

表 4-1 で示した黄色いセル（「堅固」）の範囲に対し、一軸圧縮強度試験用検体の作製と一軸圧縮強度試験を実施した。試験結果を表 4-3 に示す（【凡例】は後述する表 4-4 も同様）。セルの数値はジオポリマー固型化体に含まれる溶融飛灰の充填量（wt%）である。表 4-3 に示すように、「ジオポリマー配合検討試験」にて「堅固」にも拘わらず一部の配合で「攪拌不可（急結）」になった理由としては、攪拌中に固型化反応が進行し、ペーストの粘度が上昇し攪拌が不可になったためと考えられる。また、「1,470kPa 未満」になった理由としては、ジオポリマー配合検討試験での「堅固」という評価はジオポリマー固型化体の一軸圧縮強度が 1,470kPa 以上の可能性のある配合を探ることが目的なため、必ずしも 1,470kPa 以上とはならないためである。

表 4-3 溶融飛灰 3・メタカオリン

試験結果

(溶融飛灰 100%，メタカオリン 0%)

溶融飛灰100% メタカオリン0%		バインダー量 [wt%]		
		40.0	50.0	60.0
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 : 25	—	723kPa	急結
	1 : 1 : 30	—	—	541kPa

【凡例】（表 4-4 も同様）

- : 1,470kPa 以上
- : 1,470kPa 未満
- : 攪拌不可（急結）
- : 非該当

試験結果

(溶融飛灰 90%，メタカオリン 10%)

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
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	54.0
		急結	—	—
	1 : 1 : 20	36.0	45.0	54.0
		—	急結	—
	1 : 1 : 25	36.0	45.0	54.0
		—	1,499kPa	急結
1 : 1 : 30	36.0	45.0	54.0	
	—	1,486kPa	4,299kPa	
1 : 1 : 35	36.0	45.0	54.0	
	—	—	4,072kPa	

試験結果

(溶融飛灰 80%，メタカオリン 20%)

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
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	48.0
		急結	急結	—
	1 : 1 : 20	32.0	40.0	48.0
		—	急結	急結
	1 : 1 : 25	32.0	40.0	48.0
		—	—	急結
1 : 1 : 30	32.0	40.0	48.0	
	—	—	5,169kPa	
1 : 1 : 35	32.0	40.0	48.0	
	—	—	4,144kPa	

次に、表 4-3 の赤枠（「1,470kPa 以上」かつジオポリマー固型化体の作製コストが最も安価である水比が多い配合）に対し、メタカオリンの代替として、脱水ケーキ（分級処理後の細粒分に処理を加えたもの）をジオポリマーの材料として使用し、一軸圧縮強度試験用検体の作製と一軸圧縮強度試験を実施した。試験結果を表 4-4 に示す。セルの上段の数値はジオポリマー固型化体に含まれる溶融飛灰と脱水ケーキ（分級処理後の細粒分に処理を加えたもの）の充填量（wt%）であり、下段の数値は一軸圧縮強度である。表 4-4 に示したように、メタカオリンの代替として脱水ケーキ（分級処理後の細粒分に処理を加えたもの）を材料としたジオポリマー固型化体の一軸圧縮強度は全て「1,470kPa 以上」となった。故に、一軸圧縮強度に対し、脱水ケーキ（分級処理後の細粒分に処理を加えたもの）がメタカオリンの代替として利用できることを確認できた。そこで、これら 2 配合に対する Cs の浸出率を確認するため、後述する浸出試験にて試験を実施した。

表 4-4 溶融飛灰 3・脱水ケーキ（※分級処理後の細粒分に処理を加えたもの）

試験結果 (溶融飛灰 90%, 脱水ケーキ※10%) 試験結果 (溶融飛灰 80%, 脱水ケーキ※20%)

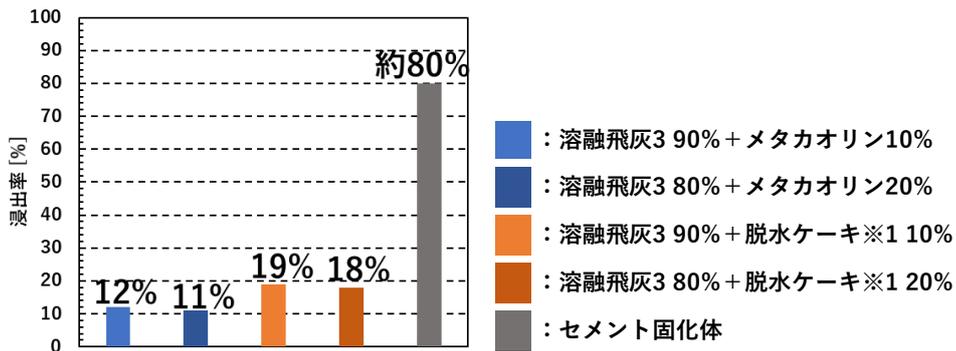
溶融飛灰90%		バインダー量 [wt%]		
脱水ケーキ (※) 10%		40.0	50.0	60.0
ジオポリマー固型化用溶液配合	1 : 1 : 35			54.0 (溶融飛灰)
SiO ₂ : K ₂ O : H ₂ O		—	—	6.0 (脱水ケーキ)
[mol比]				1,962kPa

溶融飛灰80%		バインダー量 [wt%]		
脱水ケーキ (※) 20%		40.0	50.0	60.0
ジオポリマー固型化用溶液配合	1 : 1 : 35			48.0 (溶融飛灰)
SiO ₂ : K ₂ O : H ₂ O		—	—	12.0 (脱水ケーキ)
[mol比]				2,297kPa

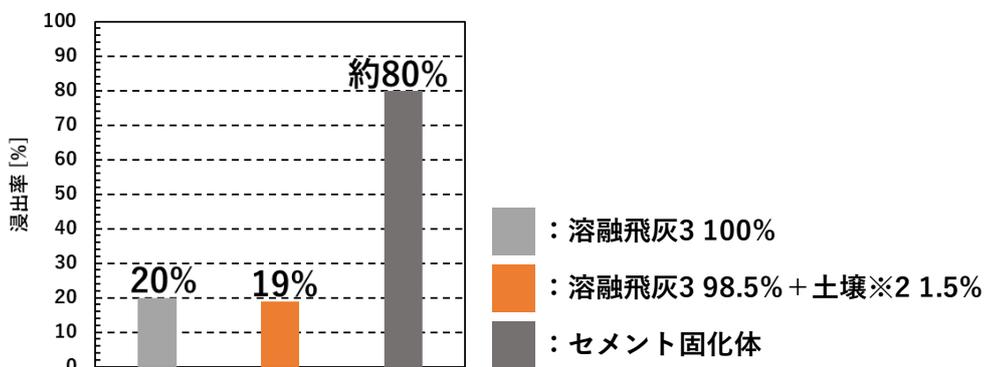
■ : 非該当

②浸出試験

表 4-3 の赤枠と表 4-4 に示した配合に対し、浸出試験を実施した。また、「ジオポリマー配合検討試験（溶融飛灰 3）」での表 4-2 に示した配合に対しても浸出試験を実施した（比較のため、溶融飛灰 100%, 土壌（分級処理後の細粒分）0%も実施）。試験結果を図 4-2 に示す。図 4-2 に示すように、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）を材料としたジオポリマー固型化体の浸出率は、溶融飛灰、メタカオリンを材料としたジオポリマー固型化体の浸出率より高く、セメント固化体の浸出率（約 80% : 図 2-2 参照）より低い値となった。また、1.5wt%の土壌（分級処理後の細粒分）添加の有無に対し、ジオポリマー固型化体の浸出率の差異は確認できなかった。これは、土壌の Cs 吸着という機能は瞬間的ではなく、「乾燥」と「湿潤」というフェーズ（乾湿処理）が土壌に対し、繰り返し行われることにより働くことが本実証事業により明らかとなった（乾湿処理 1 回実施した浸出率 : 39%, 乾湿処理 10 回実施した浸出率 : 10%）。



溶融飛灰 3+メタカオリン or 脱水ケーキ※1 分級処理後の細粒分に処理を加えたもの



溶融飛灰 3+土壌※2 分級処理後の細粒分

図 4-2 浸出試験の試験結果

(4) 最終処分の安全評価

試験により測定した浸出率を用いて、トレンチ処分をした場合に埋立後の地下水移行（井戸水利用）における被ばく評価を実施した（図 4-3 参照：被ばく線量への寄与が最も高い農作物摂取（成人）のみを図示）。図 4-4 に示すように、農作物摂取（成人）を対象とする年間被ばく線量がめやす線量である $10\mu\text{Sv/y}$ （特措法に基づく濃度基準）未滿になることを確認できた。故に、脱水ケーキ（分級処理後の細粒分に処理を加えたもの）が一軸圧縮強度試験，浸出試験，安全評価を通して、メタカオリンの代替として再生利用できることを確認できた。

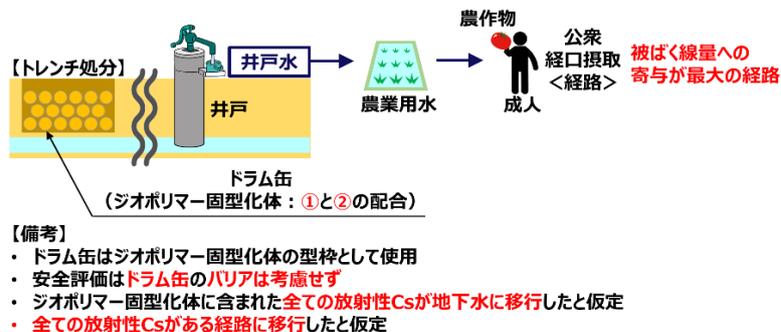


図 4-3 地下水移行（井戸水利用）

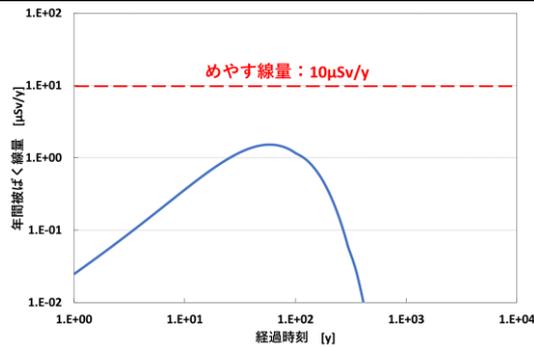


図 4-4 年間被ばく線量の経時変化<農作物摂取（成人）>

5. コスト／作業員被ばく量評価

(1) コスト評価

実証試験の結果および想定した実機製造プラントによる操作を基に、ジオポリマー固型化体を充填した 200L ドラム缶の製作コストを試算した。試算の内容は、イニシャルコスト、ランニングコスト等を求め、それらを基に 200L ドラム缶 1 本あたりのコストを試算した。その結果、200L ドラム缶 1 本あたり 3.94 万円となった。

(2) 作業員被ばく量評価

ホット試験にて測定した線量は約 $4.0\mu\text{Sv/h}$ であった。実機を想定し、1 日の作業時間を 8 時間、1 年の作業日数を 280 日とすると、作業員の 1 年あたりの外部被ばく線量は 8.960mSv/y となる。よって、線量限度である 20mSv/y の値より低くなり、本技術を実機に適用した場合に被ばくの観点における安全性は確保できる可能性があることを示せた。

6. まとめと今後の課題

(1) まとめ

- ・ 溶融飛灰の物性に依じて、バインダー量やメタカオリン、水比を調整することにより、ジオポリマー固型化体の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。
- ・ 最終処分しなければならない溶融飛灰、脱水ケーキを材料（再生利用）としたジオポリマー固型化体が安全評価等を通じて、安定・安全に最終処分が可能なことを示せた。

(2) 今後の課題

本技術を適用した実用段階の最終処分方法は、ジオポリマー固型化体を 200L のドラム缶に入れ、トレンチ処分するものであり（図 4-3 参照）、実用化に向け、必要サイズや量に対し安定性・安全性を満たす固型化体作製システムを構築する必要がある。また、目標強度（一軸圧縮強度 $1,470\text{kPa}$ ）以上に達しなかった溶融飛灰 2 などの配合調整が必要な溶融飛灰に対し、メタカオリンを添加させることで目標強度以上のジオポリマー固型化体を作製することができることを実証する必要がある。

実施代表者：除去土壌等減容化・再生利用技術研究組合(VOREWS)

実証テーマ名：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

概要：除去土壌を分級処理して得た分級砂の細骨材としての適合性を確認するため、①～④に示す分級砂の細骨材品質試験を行った。「①既往実証試験の通常分級砂」、「②既往実証試験の高度分級砂」、「③稼働中の受入・分別施設3か所から新規に採取した分別後土壌を湿式分級した通常分級砂」、「④上記③を高度処理した高度分級砂」。

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、得られた細骨材を使用したコンクリート製造を行うことを想定し、以下の試験を行った。

- ①練り混ぜ水適合性確認試験：受入・分別施設に併設した井戸の水について、コンクリート製造使用への適用性の可否を JIS で定められた項目について確認した。
- ②細骨材品質確認試験：受入・分別施設から採取した分別後土壌を分級処理した分級砂および既往受託事業の分級砂の細骨材としての適用性を JIS で定められた項目について確認した。
なお、除去土壌を解泥した後、湿式振動ふるいにより $75\mu\text{m}\sim 2\text{mm}$ にふるい分けした砂が「通常分級砂」、通常分級砂を「靱摺り洗い」や「衝撃力」を利用し、通常分級砂の表面に残った粘土分を除去することで、除染率の向上を図った分級砂が高度分級砂である。

技術概要：練り混ぜ水適合性試験の試験項目を表1に、細骨材品質試験の試験項目を表2に示す。これらの試験により、分級砂のコンクリート細骨材への適用性を確認した。



表1 練混ぜ水適合性項目一覧

項目	方法	基準
懸濁物質の量	JISA 5308	2g/l以下
溶解性蒸発残留物の量	JISA 5308	1g/l以下
塩化物イオン(Cl ⁻)量	JISA 5308	200mg/l以下
セメントの凝結時間の差	JISA 5308	始発は30分以内 終結は60分以内
モルタルの圧縮強度比	JISA 5308	材齢7日、28日で 90%以上

表2 細骨材品質試験項目一覧

試験項目	方法(JIS)
絶対密度	JIS A 1109
吸水率	JIS A 1109
有機不純物	JIS A 1105
塩化物量	JIS A 5002
安定性試験	JIS A 1122
微粒分量	JIS A 1103
粘土塊量	JIS A 1137
アルカリ骨材反応(化学法)	JIS A 1145
骨材のふるい分け試験	JIS A 1102
単位容積質量	JIS A 1104
実積率	JIS A 1104
強熱減量	JIS A 1226

実証試験の結果：

1. 練り混ぜ水適合性試験

全てのケースで JIS 規格に適合する結果となり、受入・分別施設に併設した井戸の水は、コンクリート練り混ぜ水として利用可能であることを実証した。

2. 細骨材品質試験

- ・ 各種分級砂の細骨材品質試験を行い、コンクリート細骨材としての JIS 適合性を確認した結果、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なことが示された。
- ・ 粒度調整した山砂を添加することで、細骨材適正粒度範囲に調整が可能である。
- ・ 高度分級処理により、粘土塊量は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場合が多いが、高度分級処理・ジグ選別処理で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場合がある。
- ・ 湿式分級処理する際には、洗浄水の塩化物量管理が必要であることが分かった。

3. 主な今後の課題

- ・ 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
- ・ 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

技術等の評価：分級砂は山砂混合による粒度調整により、再生細骨材に利用可能であることが示された。今後、配合・強度試験等による分級砂の再生骨材への適用性の検証を進める予定。

作業員被ばく量評価：作業時の被ばく量の平均値 $1.3 \mu\text{Sv}$ 、最大値 $3.0 \mu\text{Sv}$ と低かった。

コスト評価：湿式分級処費 26,200 円/t + 粒度調整費 4,650 円/t (山砂混合率 50%の場合)	歩掛り (作業人工、作業速度等) : 40t/h、「中間貯蔵 施設内における除去土壌の分級処理システム実証試 験」の検討結果より引用
--	--

コスト評価条件：通常分級処理プラント(40t/h 級)5 系列、高度分級処理プラント(20t/h 級)1 系列を建設し、土壌 C(132 万 m^3)を 5 年間で処理することを条件とした。

安全性の評価：湿式分級処理により $8,000\text{Bq/kg}$ 以下に除染した分級砂をコンクリート用細骨材に再生利用する技術。令和 5 年度にコンクリート製品の追加被ばく量について検討する予定。

試験場所(住所)：①技術実証フィールド(大熊町)、②(一財)ふくしま市町村支援機構(郡山市富田東)、③(株)太平洋コンサルタント(佐倉市大作)	除去物保管場所と保管状況：1 m^3 フレキシブルコンテナバック 8 袋に封入し、技術実証フィールド内第二資材置場に保管
---	---

1. 事業概要

(1) 背景と実施方針

環境省の中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略の一環として実施した『中間貯蔵施設内における除去土壌の分級処理システム実証試験 平成30年度 および同 平成31年度(以下「既往実証試験」という)』により、除去土壌の減容化技術として分級処理が有用であることを実証した。一方、この分級処理により得られた分級砂を、再生利用用途の一つとして考えられるコンクリート用細骨材に再生利用することは検討されていない。そこで、除去土壌を分級処理して得られた粒径75 μm 以上の砂分(以下「分級砂」という)を対象に、コンクリート用細骨材(以下「再生細骨材」という)への適用性を実証した。なお、分級には通常分級処理:解泥と分級による処理、除染率向上を目的に通常分級砂表面に残留するシルト・粘土分を「靱摺り洗い」や「衝撃力」を利用してさらに除去する高度分級処理の2通りの処理による分級砂を試験対象とした。

(2) 成果目標

分級砂の再生細骨材への適用性を実証することを目的に、以下に示す検討を行う。

- ・コンクリート練り混ぜ水の利用を想定する帰還困難区域内の地下水(本実証試験では、既存中間貯蔵施設の併設井戸から採水した井戸水)のコンクリート練り混ぜ水 JIS 規格への適合性について確認する。
- ・受入・分別施設で分別された粒径20mm以下の土壌(以下「分別後土壌」という)を対象に、通常分級処理および高度分級処理を行い、処理後に得られる分級砂(以下「受分通常砂」、「受分高度砂」という)の細骨材品質試験を行い、JIS規格への適合性を確認する。
- ・既往実証試験で得られた通常分級砂(以下「実証通常砂」という)、高度分級砂(以下「実証高度砂」という)の細骨材品質試験を行い、JIS規格への適合性を確認する。
- ・実証通常砂・実証高度砂・受分高度砂についてジグ選別処理を行い、実証通常ジグ選別砂・実証高度ジグ選別砂・受分高度ジグ選別砂を得たうえで、これに対して有機不純物・強熱減量の試験を行い、ジグ選別処理の適用性を検証する。

2. 試験方法

(1) 練り混ぜ水適合性確認試験

大熊2期3工区、大熊3期4工区、大熊3期5工区、双葉2期1工区の受入・分別施設に併設された井戸より、10月11日、17日、24日に井戸水を採水し、表2-1に示す項目の分析を行い、基準値と比較することでJIS適合性を評価した。

(2) 細骨材品質試験

前述した受分通常砂、受分高度砂、実証通常砂、実証高度砂を対象に、**表 2-2** に示す項目の分析を行い、基準値と比較することで JIS 適合性を評価した。なお、受分通常砂、受分高度砂は、新規に大熊 2 期 2 工区、大熊 3 期 4 工区、双葉 2 期 1 工区の受入・分別施設から分別後土壌を採取し、**図 2-1** に示す手順で処理した通常分級砂、**図 2-2** に示す手順で処理した高度分級砂を試験対象とした。試料の代表性を担保するため、分別後土壌は 10 回に分割して試料採取し、粒度分布、強熱減量、放射性 Cs 濃度分析を行い、既往実証試験で得た 42 検体の土質試験結果も含め、 $\pm 2\sigma$ 範囲外の土壌を除去した後、採取した受入・分別施設毎に混合して細骨材品質試験に供した。

表 2-1 練り混ぜ水適合性確認試験項目の一覧

項目	方法	基準
懸濁物質の量	JISA 5308 附属書 C	2g/L以下
溶解性蒸発残留物の量		1g/L以下
塩化物イオン(Cl-)量		200mg/L以下
セメントの凝結時間の差		始発は30分以内、終結は60分以内
モルタルの圧縮強度比		材齢7日、28日で90%以上

表 2-2 細骨材品質試験項目一覧

試験項目	方法(JIS)	基準
絶乾密度	JIS A 1109	2.5g/cm ³ 以上 ^{※1}
吸水率	JIS A 1109	3.5%以下
有機不純物	JIS A 1105	溶液の色が標準色に対し、同じまたは淡い ^{※2}
塩化物量	JIS A 5002の5.5	0.04%以下
安定性試験	JIS A 1122	10%以下
微粒分量	JIS A 1103	3.0%以下(すり減りを受ける場合)、5.0%以下
粘土塊量	JIS A 1137	1.0%以下
アルカリ骨材反応(化学法)	JIS A 1145	別表参照 ^{※3}
骨材のふるい分け試験	JIS A 1102	標準粒度範囲内
単位容積質量	JIS A 1104	—
実積率	JIS A 1104	—
強熱減量	JIS A 1226	
含水比	JIS A 1203	
放射性Cs濃度(有姿)	GE半導体検出器による測定	

※1 購入者の承認を得て、2.4以上とすることができる

※2 標準色より濃い場合でも、JIS A 1142に規定する圧縮強度分率が90%以上であれば、購入者の承認を得て用いてよい

※3 別表に示す判定基準により、無害、有害、評価不可を判定

(3) ジグ選別処理

分別土壌は、森林や農地の除染に由来することもあり、有機物含有量が多いと予測され、通常分級処理、高度分級処理だけでは、有機不純物が基準を満足しないことが予測

された。有機不純物が基準を満足しない場合、通常分級砂、高度分級砂に比重の軽い有機物が残留することが要因となると考え、主に鉱業分野で選鉱する際に用いられるジグ選別処理の効果を検証することとした。実証通常砂、実証高度砂、受分高度砂の3種類の分級砂を対象に、**図 2-3** に示す手順によりジグ選別処理を行い、有機不純物、強熱減量の分析により効果検証することとした。**図 2-4** にジグ選別処理の概要を示す。

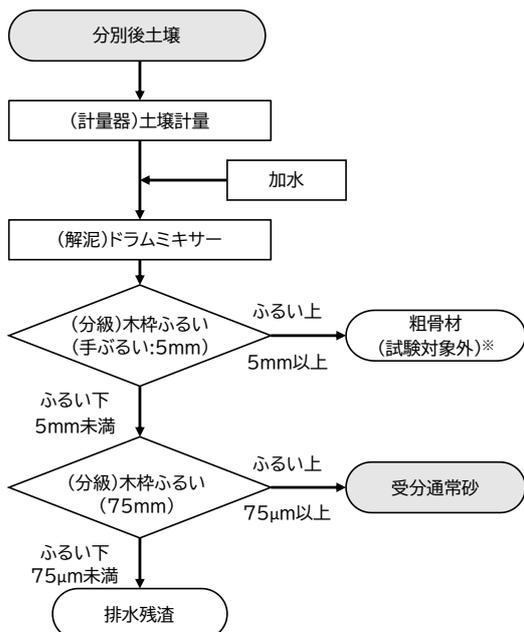


図 2-1 通常分級処理の手順

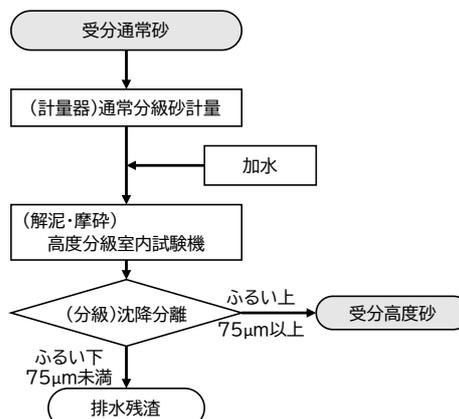


図 2-2 高度分級処理の手順

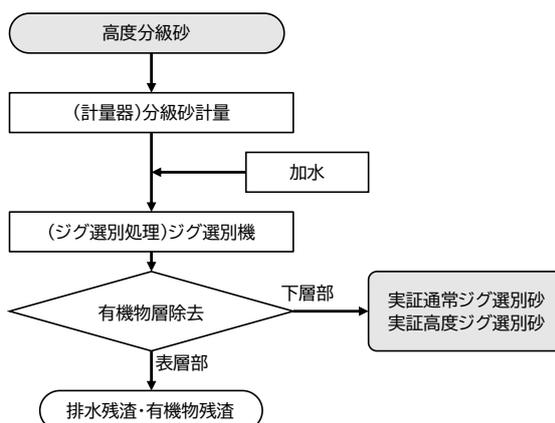
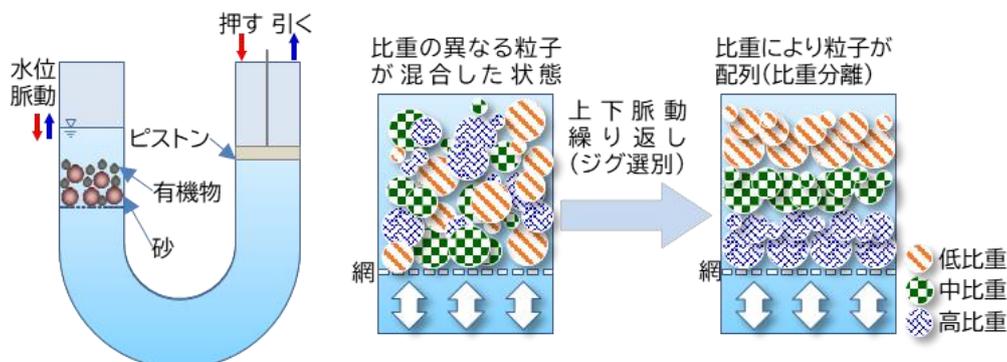


図 2-3 ジグ選別処理の手順



U字管内の水をピストンで脈動させて、他方の有機物、砂を脈動させることで比重の軽い有機物を上層へ、比重の重い砂を下方に移送させる比重差分離処理

図 2-4 ジグ選別技術の概要

3. 実証試験結果

(1) 練り混ぜ水適合性確認結果

井戸水サンプリング状況例を**写真 3-1**に、分析結果を**表 3-1**に示す。これより、分析したすべてのケースにおいて、基準超過は認められなかったため、今回分析した帰還困難区域内の井戸水は、コンクリート練り混ぜ水に利用可能であると判断した。なお、今後予定している配合・強度試験、耐久性試験、被ばく影響確認試験では、水量が豊富な双葉2期1工区の井戸水を使用する計画とする。



表 3-1 練り混ぜ水適合性確認試験結果一覧

項目	基準	大熊2期3工区			大熊3期4工区			大熊3期5工区			双葉2期1工区			
		1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	
試験対象	懸濁物質の量(g/L)	2g/L以下	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
		判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	溶解性蒸発残留物の量(g/L)	1g/L以下	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
		判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	塩化物イオン(CL)量	200mg/L以下	8	8	8	9	8	8	6	6	6	7	7	
		判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	セメント凝結時間の差(分)	始発	30分以内	5	10	5	10	10	10	0	5	10	5	0
			判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		終結	60分以内	10	0	0	10	5	10	10	10	5	5	0
			判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	モルタルの圧縮強さの比(%)	7日	90%以上	100	100	100	98	97	100	99	98	98	98	99
			判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
28日		90%以上	99	100	100	99	96	101	99	98	98	98	99	
		判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
セメント凝結時間	始発	—	165	135	145	150	135	150	160	140	150	155		
	終結	—	260	260	265	260	265	275	280	270	270	265		
モルタルの圧縮強さ(N/mm ²)	7日	—	44.6	44.1	45.5	44	42.9	45.2	44.2	43.5	44.5	43.9		
	28日	—	61.4	61.1	62.5	61.7	58.9	63.1	61.6	60.1	61.2	60.8		
基準水	セメント凝結時間	始発	—	160	145	140	160	145	140	160	145	140	160	
		終結	—	270	260	265	270	260	265	270	260	265	270	
	モルタルの圧縮強さ(N/mm ²)	7日	—	44.7	44.2	45.3	44.7	44.2	45.3	44.7	44.2	45.3	44.7	
		28日	—	62.3	61.2	62.6	62.3	61.2	62.6	62.3	61.2	62.6	62.3	

(2) 細骨材品質試験結果

① 分別後土壌の土質試験結果

大熊2期2工区・大熊3期4工区・双葉2期1工区より、10月3、5、7、12、14、18、20、25、27、31日の10日間にわたり分別後土壌を採取した。採取時の代表的な写真を**写真 3-2**にまた、土質試験結果の一覧を**表 3-2**、**図 3-1**に示す。



大熊2期2工区での採取状況 大熊3期4工区での採取状況 双葉2期1工区での採取状況
写真3-2 受入・分別施設での分別後土壌採取状況

表3-2 土質試験、放射性Cs濃度の分析結果一覧

試料名	含水比 (%)	強熱減量 (%)	細粒分含有率 (%)	放射性Cs濃度 (Bq/kg-dry)	大熊2期2工区			大熊3期4工区			双葉2期1工区		
					含水比 (%)	強熱減量 (%)	細粒分含有率 (%)	含水比 (%)	強熱減量 (%)	細粒分含有率 (%)	含水比 (%)	強熱減量 (%)	細粒分含有率 (%)
大熊2期2工区	1回目	41.3	11.5	45.2	13,370								
	2回目	37.5	10.4	42.0	16,410								
	3回目	37.7	12.4	42.0	14,370								
	4回目	34.0	10.0	39.3	13,350								
	5回目	35.2	10.7	42.6	13,380								
	6回目	26.8	10.8	39.7	15,370								
	7回目	33.0	11.7	39.1	15,370								
	8回目	32.5	10.4	40.0	13,350								
	9回目	29.2	10.9	39.6	16,320								
	10回目	34.3	10.4	39.6	18,420								
大熊3期4工区	1回目	38.9	12.9	44.0	26,710								
	2回目	43.6	14.1	47.1	24,630								
	3回目	46.8	15.9	56.6	25,730								
	4回目	46.5	12.6	50.3	28,690								
	5回目	39.7	11.4	38.0	17,430								
	6回目	39.2	13.2	38.3	17,470								
	7回目	38.0	14.0	49.3	17,400								
	8回目	40.7	12.3	46.1	24,530								
	9回目	36.1	13.6	44.9	19,410								
	10回目	35.9	12.1	52.2	23,560								
双葉2期1工区	1回目	43.6	11.9	45.2	17,400								
	2回目	45.6	11.7	41.9	15,440								
	3回目	33.9	10.2	31.1	11,290								
	4回目	23.1	7.2	20.7	28,740								
	5回目	28.4	7.4	19.4	21,450								
	6回目	34.0	9.5	25.1	15,370								
	7回目	30.9	9.5	27.4	13,390								
	8回目	39.9	11.3	32.1	12,250								
	9回目	36.4	12.5	43.5	16,390								
	10回目	39.2	10.9	38.1	13,250								

図3-1 土質試験、放射性Cs濃度の分析結果一覧

当該土質試験で得た除去土壌の細粒分率、強熱減量の分析結果および既往実証試験の結果より、細粒分率では 19.5~63.4%を、強熱減量では 5.4~18.0%を 2σ の範囲と設定した。その結果、表 3-2 中の双葉 2 期 1 工区 5 回目採取した試料の細粒分率が 2σ を下回ったため、通常分級処理以降の工程においては、当該分別後土壌を除外することとした。

② 通常分級処理・高度級処理の結果

通常分級処理および高度分級処理したそれぞれの分級砂の強熱減量、放射性 Cs 濃度、除染率の一覧を表 3-3 に示す。これより、通常分級処理による除染率は 43.8~70.9%、高度分級処理による除染率は 76.1~77.6%となった。

表 3-3 分級処理結果一覧

	分別後土壌			受分通常砂			受分高度砂		
	強熱減量 (%)	細粒分率 (%)	放射性Cs濃度 (Bq/kg-Dry)	強熱減量 (%)	放射性Cs濃度 (Bq/kg-Dry)	除染率 (%)	強熱減量 (%)	放射性Cs濃度 (Bq/kg-Dry)	除染率 (%)
大熊2期2工区	10.9	40.9	14,977	4.2	6,440	57.0	1.9	3,563	76.2
大熊3期4工区	13.2	46.5	22,460	5.3	6,500	71.1	2.3	5,000	77.7
双葉2期1工区	10.2	31.3	16,937	4.4	9,550	43.6	2.2	4,000	76.4

③ 粒度調整

粒度分布測定の結果、分級砂は細骨材の適正粒度範囲に比較し、粒径が細かく JIS 規格を満足しない結果となった。このため、市場で入手できた静岡県掛川市産の山砂を混合することにより粒度調整を行った。なお、受分通常砂、受分高度砂では、前述山砂 0.6mm ふるい上を、実証通常砂、実証高度砂では、前述山砂 0.3mm ふるい上を使用した。これら山砂の粒度分布の一覧を表 3-4 に示す。また、粒度調整前の細骨材の粒径分布、粒度調整後の粒径分布を図 3-2~3-5 に、粒度調整用に添加した山砂の混合率を各分級砂毎に、表 3-5~3-8 に示す。

表 3-4 粒度調整用山砂の粒径分布

	10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	受皿
粒度調整前	0	1	13	15	16	22	23	10
受分通常・高度砂粒度調整用	0	3	45	52	0	0	0	0
実証通常・高度砂粒度調整用	0	2	29	33	36	0	0	0

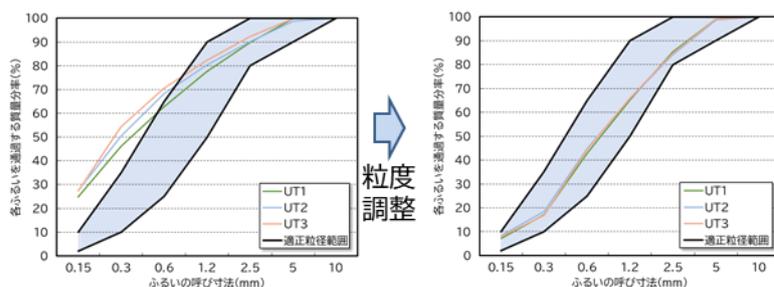


図 3-2 受分通常砂の粒度調整結果

表 3-5 山砂混合率

試料名	分級砂重量 (kg)	山砂添加量 (kg)	混合後重量 (kg)	山砂混合率 (%)
UT1	3.6	8.4	12	70
UT2	3.6	8.4	12	70
UT3	3.6	8.4	12	70

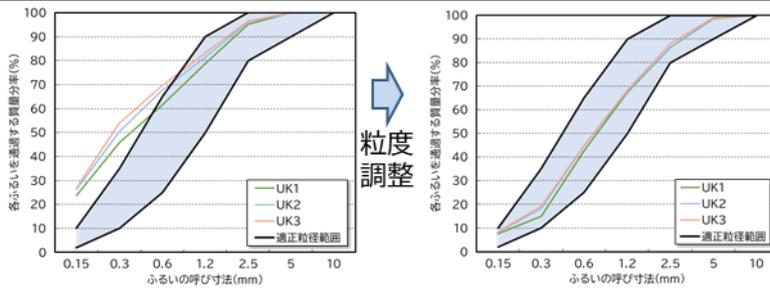


図 3-3 受分高度砂の粒度調整結果

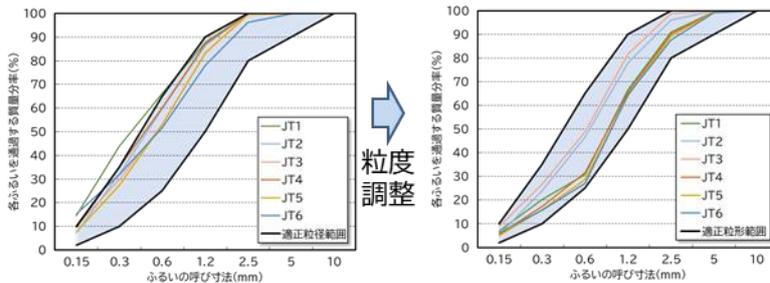


図 3-4 実証通常砂の粒度調整結果

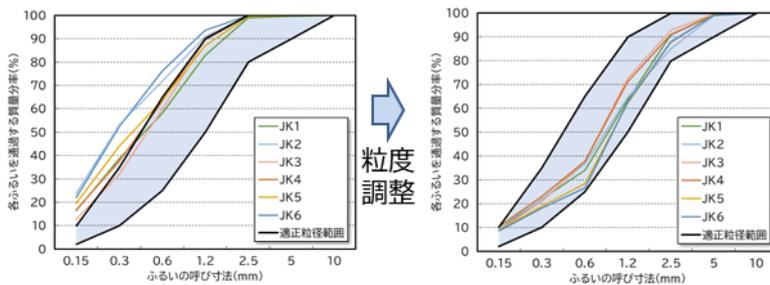


図 3-5 実証高度砂の粒度調整結果

表 3-6 山砂混合率

試料名	分級砂重量 (kg)	山砂添加量 (kg)	混合後重量 (kg)	山砂混合率 (%)
UK1	3.6	8.4	12	70
UK2	3.6	8.4	12	70
UK3	3.6	8.4	12	70

表 3-7 山砂混合率

試料名	分級砂重量 (kg)	山砂添加量 (kg)	混合後重量 (kg)	山砂混合率 (%)
JT1	8.5	10.2	18.7	55
JT2	14.0	4.2	18.2	23
JT3	14.5	1.5	16.0	9
JT4	19.3	17.4	36.7	47
JT5	24.5	24.5	49.0	50
JT6	113.3	89.5	194.8	46

表 3-8 山砂混合率

試料名	分級砂重量 (kg)	山砂添加量 (kg)	混合後重量 (kg)	山砂混合率 (%)
JK1	17.6	12.4	30.0	41
JK2	12.0	18.0	30.0	60
JK3	18.0	12.0	30.0	40
JK4	16.7	13.3	30.0	44
JK5	12.0	18.0	30.0	60
JK6	10.0	20.0	30.0	67

図 3-2～3-5、表 3-5～3-8 より、粒度調整をした山砂を混合することにより、分級砂の粒度を再生細骨材の適正粒度範囲に調整出来ることが分かった。なお、山砂混合率の平均値は 53%であった。

④ 細骨材品質試験結果

細骨材品質試験の結果の内、受分通常砂、受分高度砂を表 3-9 に、実証通常砂、実証高度砂を表 3-10 に示す。これにより、以下に示すことが分かった。

- ・有機不純物で JIS 不適合となるケースが認められた。
- ・通常分級砂で JIS 不適合が生じた粘土塊量は高度分級砂ではすべてのケースで JIS 適合となり、高度分級処理の有効性が示された。
- ・塩化物量は、実証通常砂、実証高度砂で基準超過が確認される一方で、受分通常砂、受分高度砂では基準適合する結果となった。実証通常砂、実証高度砂は、既往実証試験に

より得た分級砂である。この既往実証試験では、湿式分級処理する際の洗浄水を凝集沈殿処理し繰り返し利用した。湿式分級処理した除去土壌には、肥料、農薬、融雪剤、津波の影響による塩化物が含まれていたと思われる。塩化物は土壌吸着されにくいいため、これら塩化物が循環利用した洗浄水に蓄積し、実証通常砂、実証高度砂の塩化物量が基準不適合となった可能性が考えられる。その場合、除去土壌を湿式分級する際には、洗浄水の塩化物量の濃度管理が必要であり、洗浄水の交換や分級砂のリンシングが対応策として考えられる。一方、受分通常砂、受分高度砂では、洗浄水を繰り返し利用していないため、細骨材品質試験における塩化物量の基準超過がなかったものと考えられる。

・上述の試験結果により、分級砂が再生細骨材に再生利用可能なことが示された。

表 3-9 受分通常砂・受分高度砂の細骨材品質試験結果一覧

項目	山砂	受分通常砂			受分高度砂			基準	
		大熊2期 2工区	大熊3期 4工区	双葉2期 1工区	大熊2期 2工区	大熊3期 4工区	双葉2期 1工区		
		UT1	UT2	UT3	UK1	UK2	UK3		
密度(g/cm ³)	絶乾	2.53	2.5	2.5	2.5	2.52	2.5	2.5	2.5g/cm ³ 以上 ^{※1}
	表乾	2.58	2.5	2.5	2.5	2.57	2.6	2.6	—
吸水率(%)		2.1	2.7	2.9	2.8	2.11	2.3	2.3	3.5%以下
微粒分量(%)		1.5	0.8	0.8	0.7	0.5	0.6	0.5	3.0%以下(すり減りを受ける場合)、5.0%以下
粘土塊量(%)		0.6	0.9	1.0	1.1	0.53	0.9	1.0	1.0%以下
単位容積質量(g/cm ³)		1.7	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	—
実積率(%)		66.8	64.2	65.0	65.0	66.5	66.9	66.5	—
有機不純物		薄い	濃い	濃い	濃い	濃い	濃い	濃い	溶液の色が標準色に対し、同じまたは薄い ^{※2}
塩化物量(%)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04%以下
安定性試験(%)		2.9	3.1	3.9	3.3	2.3	3.7	2.5	10%以下
アルカリ骨材反応(化学法)		120-43	120-43	120-43	120-43	125-37	159-36	122-42	別表参照 ^{※3}
強熱減量(%)		1.6	2.6	2.4	2.5	1.6	1.8	1.7	—
放射性Cs濃度(Bq/kg-dry)		ND	1,509	1,845	1,710	1239	1,243	1,545	—

※1 購入者の承認を得て、2.4以上とすることができる

※2 標準色より濃い場合でも、JIS A 1142に規定する圧縮強度比率が90%以上であれば、購入者の承認を得て用いても良い

表 3-10 実証通常砂・実証高度砂の細骨材品質試験結果一覧

項目	山砂	実証通常砂						実証高度砂						基準	
		JT1	JT2	JT3	JT4	JT5	JT6	JK1	JK2	JK3	JK4	JK5	JK6		
密度(g/cm ³)	絶乾	2.53	2.45	2.46	2.55	2.44	2.46	2.46	2.57	2.52	2.46	2.44	2.56	2.46	2.5g/cm ³ 以上 ^{※1}
	表乾	2.58	2.53	2.53	2.62	2.52	2.53	2.53	2.62	2.58	2.53	2.52	2.61	2.54	—
吸水率(%)		2.10	3.06	2.92	2.53	3.42	2.95	2.98	1.92	2.33	3.03	3.47	1.96	3.32	3.5%以下
微粒分量(%)		1.5	1.6	2.0	1.8	1.8	1.3	1.0	0.6	0.7	0.7	2.5	1.0	1.9	5.0%以下
粘土塊量(%)		0.60	0.92	1.36	0.87	0.77	0.79	0.87	0.15	0.43	0.36	—	0.26	0.24	1.0%以下
単位容積質量(g/cm ³)		1.69	1.62	1.53	1.63	1.60	1.62	1.60	1.75	1.73	1.55	1.64	1.70	1.60	—
実積率(%)		66.8	66.1	62.2	63.9	65.4	65.9	65.0	67.9	68.5	63.0	67.2	66.4	65.0	—
有機不純物		薄い	濃い	濃い	濃い	濃い	濃い	濃い	同じ	濃い	濃い	濃い	同じ	濃い	同じまたは薄い ^{※2}
塩化物量(%)		0.00	0.00	0.09	0.17	0.14	0.07	0.11	0.12	0.07	0.17	0.15	0.06	0.1	0.04%以下
安定性試験(%)		2.9	2.9	4.7	3.8	3.9	4.8	3.8	3.3	3.7	3.5	3.9	3.3	3.5	10%以下
アルカリ骨材 反応(化学法)	Rc-Sc(mmol/L)	20-43	120-43	193-19	123-25	120-23	127-32	107-32	120-43	116-29	131-25	182-24	148-35	121-32	—
	区分	A 無害	A 無害	A 無害	A 無害	A 無害	A 無害	A 無害	A 無害	A 無害	A 無害	A 無害	A 無害	A 無害	—
強熱減量(%)		—	2.5	2	2.5	2.3	1.8	2.5	2	2.2	2.8	3.8	1.5	2	—
放射性Cs濃度(Bq/kg-dry)		ND	2,785	3,833	1,871	2,476	1,647	1,846	1,349	2,218	3,827	2,072	1,210	3,306	—

※1 購入者の承認を得て、2.4以上とすることができる

※2 標準色より濃い場合でも、JIS A 1142に規定する圧縮強度比率が90%以上であれば、購入者の承認を得て用いても良い

⑤ ジグ選別処理の結果

有機不純物試験の溶液の呈色状況の代表事例として、受分通常砂、受分高度砂、受分ジ

ジグ選別砂の溶液呈色状況を**写真 3-3**に示す。これより、溶液の呈色は、通常分級処理>高度分級処理>ジグ選別処理の順で濃くなり、段階的に溶液の呈色が薄くなることが確認できたが、ジグ選別処理を施しても、有機不純物が基準適合するには至らなかった。

一方、有機不純物と関連性が高いと考えられる強熱減量の分析結果を**表 3-11**、**図 3-6**に示す。これより、ジグ選別前の強熱減量と強熱減量の除去率には、ジグ選別処理前の強熱減量が高いほど、除去率も高くなる正の相関が成立することが分かった。ジグ選別処理は、有機物の除去効果はあるものの、有機不純物試験が基準適合するまでの効果は認められない結果となったが、呈色状況の改善が進んだことから、購入者の承認により利用可能となると見込んでいる。

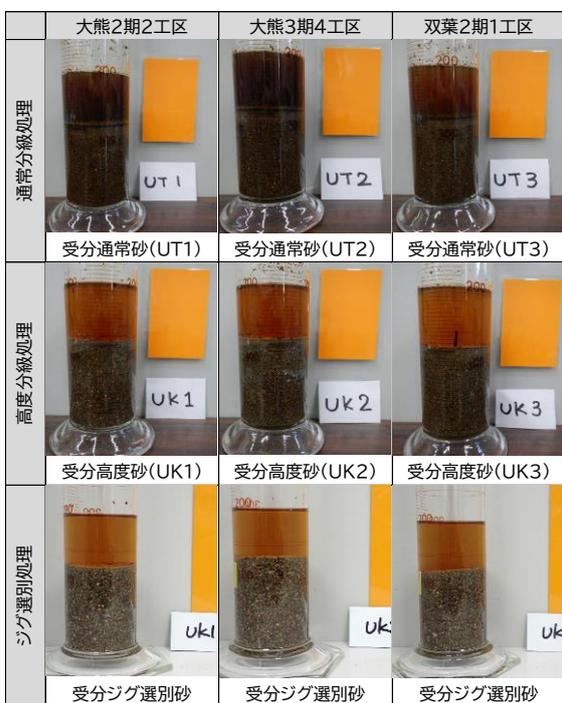


写真 3-3 有機不純物試験の呈色状況

表 3-11 ジグ選別試験結果一覧

試料名	有機不純物		強熱減量		除去率 (%)
	ジグ選別前	ジグ選別後	ジグ選別前	ジグ選別後	
JT1	濃い	濃い	2.5	2.1	16.0
JT2	濃い	濃い	2.0	1.8	10.0
JT4	濃い	濃い	2.3	1.9	17.4
JK3	濃い	濃い	2.8	2.1	25.0
JK4	濃い	濃い	3.8	2.0	47.4
JK6	濃い	濃い	2.0	1.7	15.0
UK1	濃い	濃い	1.6	1.5	6.3
UK2	濃い	濃い	1.8	1.5	16.7
UK3	濃い	濃い	1.7	1.6	5.9

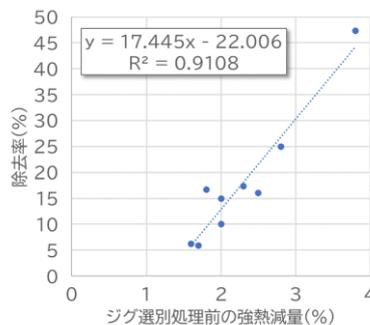


図 3-6 処理前強熱減量と除去率の関係

⑥ 放射性 Cs 濃度の測定結果

放射性 Cs 濃度測定の結果を**表 3-12**、**図 3-7**に示す。前述したとおり、除染率は、通常分級処理で除染率 43.8～70.9%、高度分級処理で 76.1～77.6%となった。また、分級砂は再生細骨材の適正粒度範囲より粒径が細かいため、山砂添加による粒度調整を行う必要があった。この山砂添加により、さらに放射性 Cs 濃度は低下した。コンクリート製品中の細骨材の重量割合は、コンクリート製品重量の約 1/3 程度であるため、分別後土壌由来の細骨材を利用したコンクリート製品の放射性 Cs 濃度は、さらに 1/3 程度に低下するため、結果的にコンクリート製品の安全性は改善すると考えられる。

表 3-12 新規に採取した分別後土壌の放射性 Cs 濃度測定結果一覧

受入・分別施設	粒度調整前(山砂添加前)							粒度調整後(山砂添加後)	
	分別後土壌	通常分級処理(受分通常砂)			高度分級処理(受分高度砂)			受分通常砂	受分高度砂
	放射性Cs濃度 (Bq/kg-Dry)	試料名	放射性Cs濃度 (Bq/kg-Dry)	除染率 (%)	試料名	放射性Cs濃度 (Bq/kg-Dry)	除染率 (%)	放射性Cs濃度 (Bq/kg-Dry)	
大熊2期2工区	14,974	(UT1)	6,440	57.0	(UK1)	3,563	76.2	1,509	1,239
大熊3期4工区	22,489	(UT2)	6,640	70.5	(UK2)	5,130	77.2	1,845	1,243
双葉2期1工区	16,952	(UT3)	9,550	43.7	(UK3)	4,071	76.0	1,710	1,545

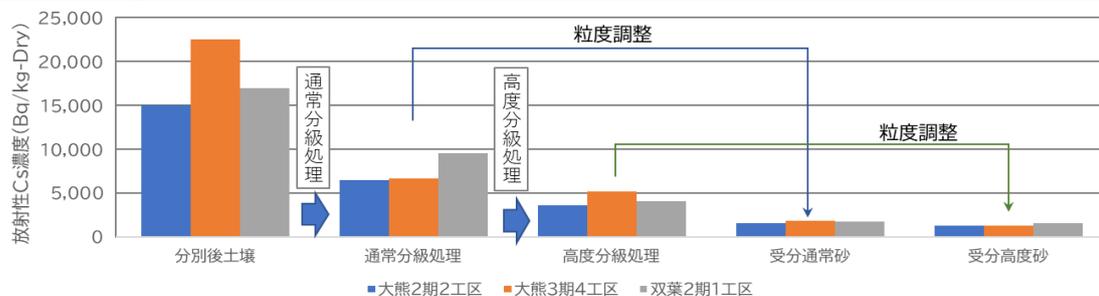


図 3-7 新規に採取した分別後土壌の放射性 Cs 濃度測定結果

4. まとめ

練り混ぜ水および分別後土壌を湿式分級して得た分級砂の再生細骨材のコンクリート細骨材としての JIS 適合性について、以下の知見を得た。

【練混ぜ水】

- ・ JIS で規定されている全項目で基準適合した。

【細骨材】

- ・ 粒度調整した山砂を添加することで、細骨材適正粒度範囲に調整が可能である。
- ・ 高度分級処理により、粘土塊量は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場合が多いが、高度分級処理・ジグ選別処理で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見込まれる。
- ・ 湿式分級処理する際には、洗浄水の塩化物量管理が必要であることが分かった。
- ・ 今年度試験より若干の課題はあるが、分級砂が細骨材として利用可能なことが示された。

5. 今後の課題

配合・強度試験、耐久性試験を行い、コンクリート細骨材に再利用可能なことをより詳細に実証すると共に、圧縮強度試験後のコンクリート供試体の表面線量率の測定や、4m 角程度のコンクリート土間を製造し、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を評価することで、安全性に関するデータを収集することが課題である。

実施代表者：鹿島建設株式会社
実証テーマ名：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
概要：土壌 A および土壌 B は再生資材としての利用が検討されており、その合計は除去土壌全体の 86%を占めていることから効率的な品質調整技術が求められる。本実証試験の目的は土壌 A および土壌 B の土木資材としての有効利用するための改良技術の立証である。除去土壌を用いて改良材の配合試験を行い、強度や環境安全性の観点から改良材を選定した。また混練機プラント実機での改良試験運転、盛土試験およびカラム試験による改良土の物理・化学的安定性の評価を行った。
<p>実施内容：本実証試験で実施した内容を以下に示す。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 室内配合試験による改良材の選定 2. 混練機プラント実機を用いた改良試験および改良土製造 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の水質モニタリング
<p>技術概要：除去土壌は農地・林地等の表層土を多く含むために品質が安定しておらず、そのまま土木資材として使用することは難しい。本実証試験では、除去土壌を改良して土木資材として必要な強度を有する資材に品質調整する技術について実証を行った。主な検討項目とそれぞれの数値目標を以下に示す。</p> <p>A. 室内配合試験による改良材の選定</p> <p>セメント系改良材、酸化マグネシウム、生石灰を含む複数の改良材を候補として取り上げ、改良材の種類および添加量がコーン指数や六価クロム溶出量や浸出水中の BOD などに与える影響を評価して、適切な改良材を選定する。第 2 種建設発生土の基準 ($q_c=800\text{kN/m}^2$) を現場/室内強度比 0.67 で割り戻して $q_c=1,200\text{kN/m}^2$ を数値目標とする。六価クロムの溶出については土壤環境基準である 0.05mg/L 以下を目標とする。</p> <p>B. 混練機プラント実機を用いた改良土製造</p> <p>A. で選定した改良材を用いて混練機プラントで改良土の製造を行い、強度が得られることや性状などを確認する。本実証事業では時間当たり処理量が多い回転筒式混合方式を使用する。</p> <p>C. 改良材を添加した土壌の物理的・化学的な安定性評価</p> <p>盛土試験およびカラム試験を行い改良土の物理的・化学的な安定性を評価する。盛土試験における沈下挙動については沈下量に関する定量的な情報の取得を目標とする。土中の有機物の分解に伴い発生する懸念がある有害ガス（硫化水素とメタン）については盛土における規制や基準等はないため、発生が認められないことを目標とする。カラム試験では重金属類および BOD の溶出挙動を確認する。</p> <p>以上の結果を用いて再生資材の品質調整効果、費用、単位時間当たりの製造量を含む技術的・経済的な観点から、本試験が提案する処理フローの事業性を評価する。</p>

実証試験の結果：主な検討項目の結果を以下に示す。

A. 改良材の選定

6 種類の改良材から、強度面・環境安全面・コスト等を比較し、改良材の選定を行った（下表は代表 3 種類）。本試験では酸化マグネシウムとセメントの 2 種類を選定し、B. 改良試験と C. 盛土試験に適用した。

改良材の種類	強度面	環境安全性	コスト	選定結果
セメント（高炉 B）	○	○	◎	○
生石灰	◎	× (BOD)	◎	×
酸化マグネシウム	◎	○	○	○

B. 実機を用いた改良土製造

本実証事業では時間当たり処理量が多い回転筒式混合方式を使用して、混練機プラントでの改良試験を行った。A で選定した 2 種類の改良材を用いて改良土を製造し、いずれの場合も所定のコーン指数が得られたことを確認した。

C. 改良材を添加した土壌の物理的・化学的な安定性評価

改良土 2 種類と原土の 3 種類の土壌で盛土を構築し、施工においては締固度 90%以上、改良土のコーン指数 $q_c=800\text{kN/m}^2$ 以上となることを確認した。3 か月間の盛土試験の結果、原土は 3 か月間で 9mm 沈下した一方で、改良土では約 30 日目までの 2~3mm 沈下したのにとどまり、その後は安定していることが確認された。いずれの盛土内でも硫化水素やメタンといった有害ガスの発生は認められず、盛土材として安定して使用できることを確認した。カラム試験では改良土の方がヒ素やフッ素、BOD の濃度が高くなる傾向があった。本試験では土壌環境基準相当よりは低い濃度であったものの実際に使用するときには事前試験するなど検討が必要であることが分かった。当初懸念されていた六価クロムはほとんど溶出していないことを確認した。

技術等の評価：酸化マグネシウムおよびセメントを選定して実機で改良試験を行い、除去土壌の改良が適用可能であることを示すことができた。また盛土試験やカラム試験で強度面・環境安全性の面での安定性を評価するためのデータが取得できた。

作業員被ばく量評価：盛土作業ヤード内空間線量率 最大 $0.42\mu\text{Sv/h}$
 作業員被ばく量の最大 $72.5\mu\text{Sv}$ （実働 26 日間）

コスト評価：土壌 1m^3 あたり 材料費：800~1,600 円 改良工：約 2,000 円	歩掛り（作業人工、作業速度等）： 処理速度： $80\text{m}^3/\text{h}$ （自走式土質改良機） ~ $250\text{m}^3/\text{h}$ （回転筒式ミキサ）
--	--

コスト評価条件：
 材料費 高炉セメント B 種（添加量 40kg/t ）~酸化マグネシウム（添加量 10kg/t ）
 自走式土質改良機改良機(1)、0.8 級 BH(投入 1 積込 1)、10tDT(場内運搬 6)

安全性の評価：改良材を使用する作業では粉じん対策（保護マスク等）を実施する。プラントは土木工事で実績がある機械であるが、挟まれ事故等の対策を実施する。

試験場所（住所）： 技術実証フィールド、他 （福島県双葉郡大熊町）	除去物保管場所と保管状況：試験後の土壌は、土壌貯蔵施設大熊 3 工区へ返却した。
---	--

1. 試験目的

この実証試験の目的は三つある。まず一つ目は地盤強度を確保するための改良材の種類および添加量の決定である。除去土壌は有機物含有量が高い農地・林地等の表層土であり、さらに異物を除去するために有機成分を含む改質材で改質されている（図1）。このような有機物を大量に含む土壌は一般的に固化が難しく、セメント系改良材を使用した場合は多くの添加を必要とする場合も多い。また、セメント系改良材を使用した場合には改良材中のセメントに由来する六価クロムが溶出する場合がある。つまり、本試験で取り扱うような有機物含有量が高く固化が難しいとされる土壌を対象とする場合は、特に六価クロムの溶出に注意を払いながら改良材の選定を進める必要がある。



図1 本試験で対象とする有機物含有量が高い除去土壌の概要

二つ目の目的は、除去土壌と改良材を均質かつ大量に混合処理できる施工方法の確立である。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 m^3 にも及ぶ[1]。この大量の土壌と改良材との迅速かつ均質な混合処理を可能とする施工方法を確立することは、除去土壌を安定して土木資材として再生利用して県外最終処分量を減らすためには不可欠な要素技術である。

三つ目の目的は、改良材を添加した土壌の物理的・化学的な長期安定性の評価である。改良土を盛土として利用した際には、長期的な沈下量が許容値内に収まることが物理的安定性として求められる。一般的に有機質土は圧縮性が高く軟弱なため、盛土に利用する際に地盤改良を検討する事例も多い[2]。しかしその一方で、改良材の添加により改良土の pH が高くなると除去土壌由来の有機物が溶解して浸出水の生物化学的酸素要求量 (BOD) 上昇に寄与する可能性がある。また改質材添加の有無に関わらず、盛土内で有機物の嫌気分解が進行して硫化水素やメタンが発生する可能性もある。そのため、物理的な安定性のみならず化学的な観点からも改良後の土壌安定性を示すことが必要である。

本試験では上述した三つの目的に対して、表1に示す基準および数値目標を設定して試験を実施した。そして、再生資材の品質、費用、単位時間当たりの製造量を含む技術的・経済的な観点から提案する処理フローの事業性を評価した。

2. 試験内容

試験の手順を図2に示す。まず改良材の室内配合選定試験を実施し、表1で設定し

たコーン指数および六価クロムの溶出量の数値目標を満たす改良材を選定した (①)。また選定試験に使用した土壌と別の土壌を使用して、土壌の種類による改良効果の検証も実施した。

表 1 本試験で設定した主な目標値

指標	数値目標・基準	数値目標の根拠・備考
● 物理的な指標		
コーン指数	1,200kN/m ²	・ 第2種建設発生土の基準 (800kN/m ²) を現場/室内強度比 0.67 で割戻し ・ ダンプ走行が可能となるコーン指数
● 化学的な指標		
六価クロム	0.05mg/L	土壌環境基準
その他の重金属類	重金属類により異なる	土壌環境基準
生物化学的酸素要求量 (BOD)	120mg/L	排水基準 (日平均)
メタン・硫化水素	発生しない	最終処分場の廃止基準[5]を参照

次に実規模の試験として、混練機プラント実機を現場に設置して改良試験を実施した (②)。盛土の安定性評価の試験として、プラントでの改良土を製造 (③)、そして製造した改良土を用いて盛土を構築し (④)、約 3 カ月にわたり沈下量や土壌ガスをモニタリングした (⑤)。また、カラム試験を実施して、浸出水の水質をモニタリングした (⑥)。

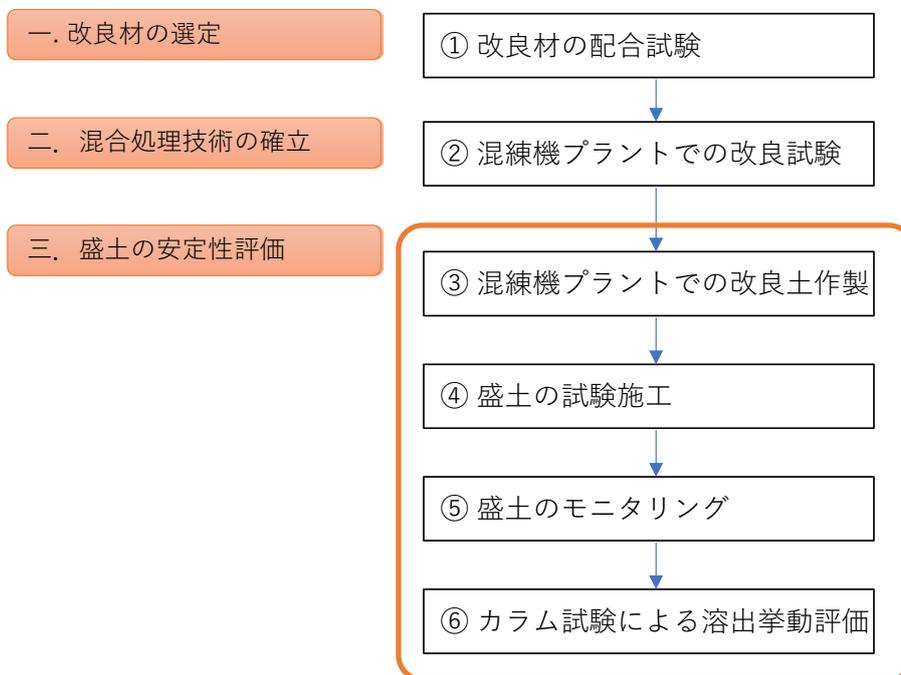


図 2 試験の手順

3. 試験の結果

(1) 改良材の選定

①入手した受入分別後処理土壌の含水比調整

本試験では主に大熊 2-1 工区から入手した受入分別後処理土壌を用いて試験を行った。この土壌は受入処理施設で処理する際に異物を除去するための選別補助材として泥 DRY[6]を添加しており、一部の土壌は改良材を添加する前から800kN/m²程度の本事業の数値目標（1,200kN/m²、表 1）に比較的近いコーン指数を示した。そのため、600kN/m²以上のコーン指数を示した場合は加水により含水比を400～600kN/m²の範囲に調整してから②以降の試験に供した。

②改良材の選定試験

6種類の改良材を用いて室内配合試験を行った結果を図3に示す。酸化マグネシウムと生石灰では少ない添加量でも添加量の増加に伴い強度が増加し、20kg/tの添加量で目標強度（1,200kN/m²）を満たした。地盤改良材、セメント、半水石膏は20kg/tの添加量ではほぼ強度は増加しなかったが、40kg/tの添加量で地盤改良材とセメントが1,200kN/m²を満たし、60kg/tの添加量では半水石膏も1,200kN/m²を満たした。スラグは強度増加の効果が小さかった。

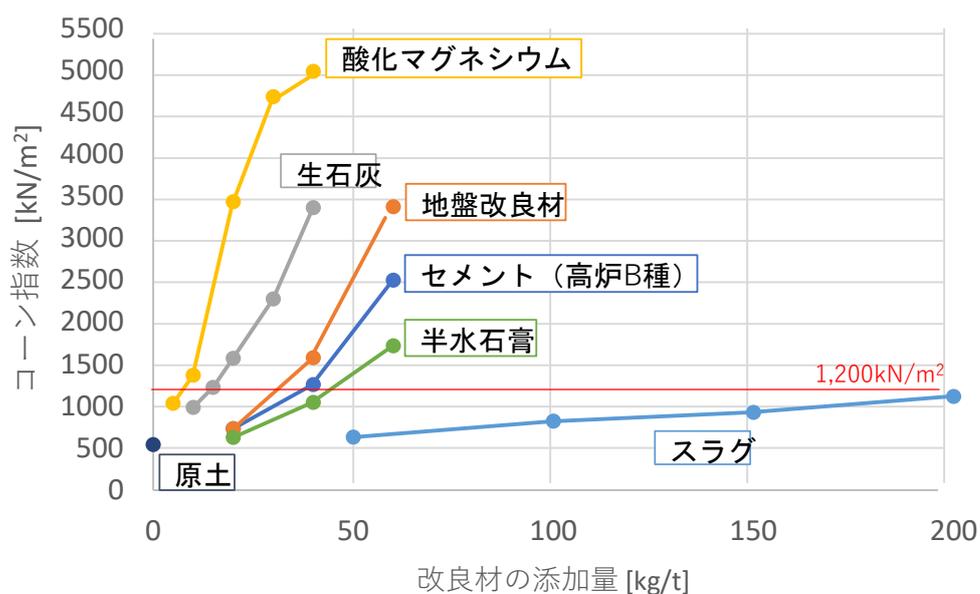


図3 改良材の添加量がコーン指数に与える影響（養生期間：7日間）

次に、環境安全性の試験から得られた評価と長期的な安定性に関する留意事項について表2に示す。懸念していた六価クロムは全種類の改良材で検出されなかった（<0.02mg/L）。BODは生石灰が排水基準相当の値を示し（×）、一方飯水石膏は河川レベル（1～10mg/L）の値であった（○）。それ以外はその中間の値となった（△）。pHはほとんどアルカリ性を示したものの、一般に地盤改良工では土の緩衝作用で影響が限定的とされるため△とした。重金属は酸化マグネシウムが不溶化材として機能することや、半水石膏は中性であるため溶出に影響しないことから下記のように評した。ほかの資材はアルカリ性であるため溶出促進する可

能性があるため△とした。

表 2 環境安全性の試験から得られた評価と長期的な安定性に関する留意事項

改良材の種類	六価クロム	BOD	pH	重金属	長期的な安定性
セメント（高炉B）	○	△	△	△	—
地盤改良材	○	△	△	△	—
生石灰	○	×	△	△	—
酸化マグネシウム	○	△	△	○	—
半水石膏	○	○	○	○	溶解性、硫化水素ガス[4]
スラグ	○	△	△	△	膨張性[3]

以上の結果を踏まえて、以降の試験に用いる改良材の選定を行った。高炉セメント B 種（添加量は 40kg/t）と酸化マグネシウム（添加量は 10kg/t）の 2 種類の改良材を用いて以後の試験を進めることにした。

③選定した 2 種の改良材による他の 4 種類の除去土壌の処理

②で選定した 2 種類の改良材が他工区の土壌 4 種類に対しても大熊 2-1 工区の土壌と同様の効果を発揮することを確認するため、同じ添加量で改良を行った改良土を対象として土質試験および環境試験を実施して強度および環境安全性を評価した。その結果、コーン指数、六価クロム、そして BOD について表 1 の数値目標を満たすことが確認できた。コーン指数については、高炉セメント B 種はすべての土壌に対して効果があった一方で、酸化マグネシウムは双葉 2-2 のように改良効果がないケースもあった（図 4）。

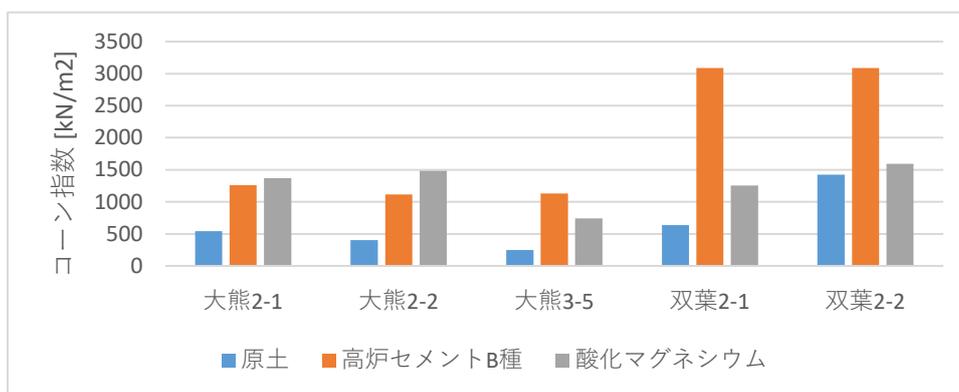


図 4 他工区の土壌の改良結果

(2) 混練機プラントでの改良試験

本実証事業で使用したのは回転筒式混合方式のプラント（SP ミキサ：図 5、図 6）で、時間当たり処理量が多いことから選定した。通常ダム工事で CSG 製造に使用されるものであり、それぞれ反転する回転筒から構成されている。回転筒内部には攪拌羽根が配置されており、上部から投入された材料は各回転筒で重力に

よる攪拌と回転筒内部の攪拌羽根により強制攪拌される。また、上部2連の回転筒は給水せずに材料を攪拌混合（ドライミックス）し、下部3連の回転筒は給水して攪拌混合（ウェットミックス）することで、投入された材料とセメント、水を十分に攪拌・混合することができる。回転筒Φ1,200・5連の大型のプラントであれば時間あたり 250m³ の処理実績がある。

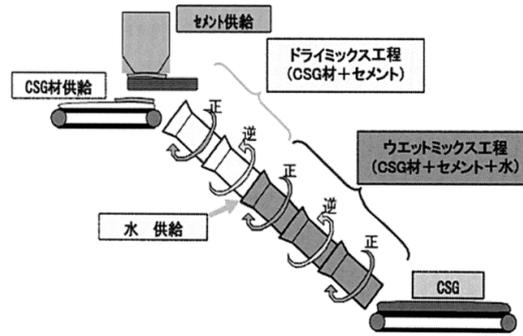


図5 SP ミキサの概要 [7]

本実証事業ではΦ700 のプラントとし、土壌が最初から水分を含んだ状態であるため3連のプラントを使用して適用性を確認した。

プラント実機で製造した改良土のコーン指数試験結果を、室内配合試験で得ら

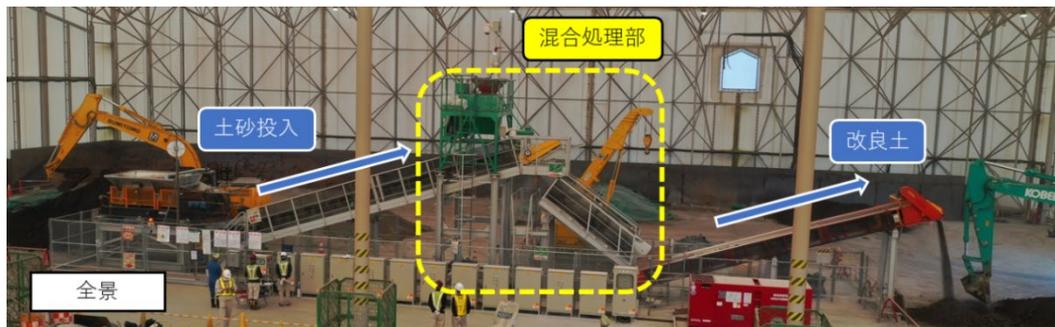


図6(a) SP ミキサの設置状況（全景）



図6(b) SP ミキサの混合処理部

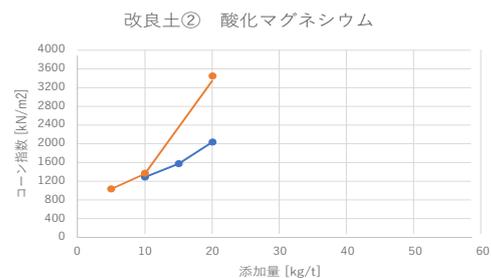
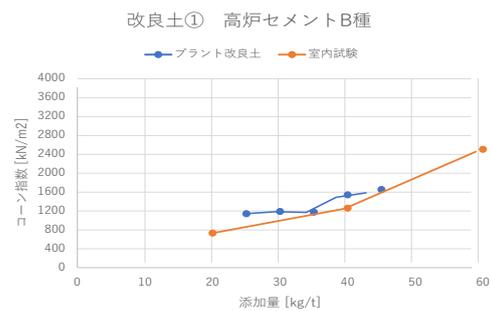


図7 SP ミキサでの改良試験結果

れた結果と合わせて図 7 に示す。高炉セメント B 種では、実機を用いた場合は室内配合試験で得られた場合に比べて若干高いコーン指数を示したが大きくは異ならず、40kg/t の添加量でコーン指数 1,200kN/m² を上回った。また、酸化マグネシウムでは、室内配合試験の結果を同様に 10kg/t の添加量でコーン指数 1,200kN/m² を上回った。

(3) SP ミキサを用いた改良土製造

高炉セメント B 種を 40kg/t 添加した改良土および酸化マグネシウムを 10kg/t 添加した改良土を、約 72t/h (原土量ベース) の処理速度でそれぞれ約 72t 製造した。

(4) 盛土の試験施工

原土と (3) で製造した 2 種類の改良土を用いて、図 8 に示すような仕上がり 20cm×10 層の盛土を構築した。各層の締固めには小型転圧機械 (前後進コンパクタ) を使用し、転圧回数は 90% の締固め度を満たして沈下量が収束傾向を示す 4 回 (原土)、6 回 (高炉セメント B 種 40kg/t)、8 回 (酸化マグネシウム 10kg/t) とした。なお、改良により 90% の締固め度を満たすのに要する転圧回数が増加した要因としては、改良土では固化した土塊が徐々にほぐれた後に締め固まるために原土より大きな締固めエネルギーが必要となったことが考えられる。この盛土の内部には、沈下挙動および有害ガスの発生をモニタリングできるように沈下板 (A、B) およびガス採取管を設置し、沈下板 A と沈下板 B の高さの差をモニタリングすることで、盛土の沈下挙動を観察した。

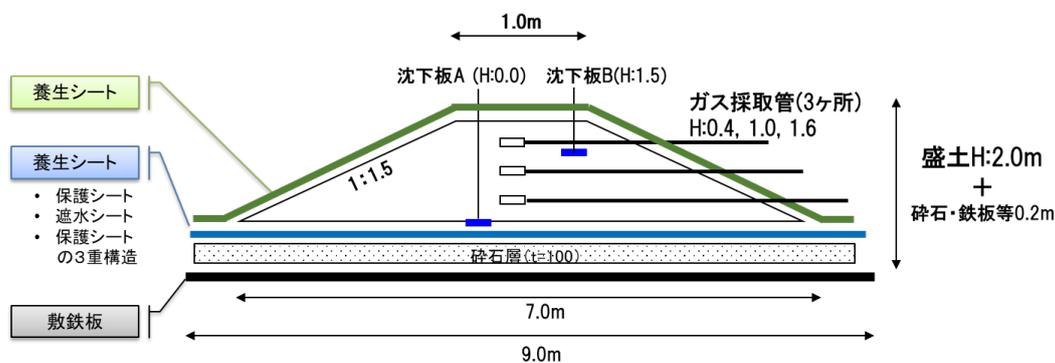


図 8 (上) 盛土の断面図 (下) 構築した盛土の写真

(5) 盛土のモニタリング

① 空間線量率

地上高さ 1m の位置でシンチレーション式サーベイメータを用いて空間線量率を測定した。施工前は $0.23\sim 0.28\mu\text{Sv/h}$ であった盛土付近の空間線量率が施工中には $0.25\sim 0.42\mu\text{Sv/h}$ の範囲に上昇し、供用中も同レベルを保った。この線量下で 1 年間従事した場合の被ばく量は約 $840\mu\text{Sv}$ であり、電離則に抵触しないことが確認できた。

② 沈下計測

盛土の沈下挙動を観察した結果を **図 9** に示す。原土で構築した盛土では 3 カ月間沈下し続けて 3 か月後には約 8mm 沈下したのに対し、改良土は 40kg/t の高炉セメント B 種を添加した場合でも 10kg/t の酸化マグネシウムを添加した場合でも初期のわずかな 2~3mm の沈下にとどまり、その後は安定していることが確認された。

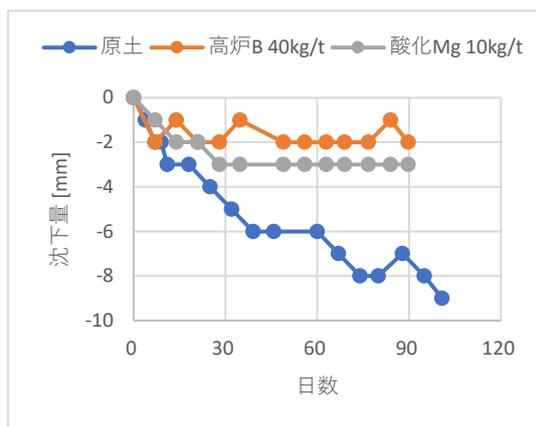


図 9 3種類の土壌の沈下挙動

③ ガス測定

図 8 (上) に示した底面からの高さに 0.4m、1.0m、1.6m の高さに設置したガス採取管よりガスを採取し、ガス検出器 (ポータブルマルチガスモニター GX-3R PRO あるいはエコプローブ 5) の吸引ポンプにより盛土内ガスを吸引してガス濃度を測定した。土壌中の有機物が多量に存在し、地表面からの酸素の流入以上の速度で土中の微生物群が酸素を消費して有機物を分解する場合、硫化水素とメタンを各々生成する硫酸還元菌とメタン生成菌が活性化できる環境となる可能性がある。しかし、盛土完成後 90 日以上にわたりガス濃度をモニタリングした結果、有機質土壌において発生が懸念される硫化水素とメタンは、すべての盛土において、検出限界未満であった。

(6) カラム試験

原土および 2 種類の改良土を 70~75% の締固め度になるようにカラムに充填し、上向流で通水して透過液の水質モニタリング (pH、電気伝導度、重金属類、BOD) を行った (**図 10**)。土壌と水の接触時間が与える影響を評価するために 3 パターンのカラムの大きさで試験を実施したが、本報告書では直径×高さが 10×18cm のカラム (土と水の接触時間は 250~300 分) の試験結果を示す。pH、電気伝導度、BOD については浸出水の測定値、六価クロム、フッ素、ヒ素につい



図 10 カラム試験の様子

では土壌 1kg あたりからの累積溶出量に換算して示す (図 11)。まず、六価クロムについては、高炉セメント B 種で改良した土壌から若干溶出したものの、室内配合試験で得られた結果 (表 2) から予想されるように環境基準を十分に下回る低い濃度であった。次にフッ素およびヒ素については、土壌環境基準相当レベルよりは低い溶出量であるものの、高炉セメント B 種、酸化マグネシウム、原土の順で溶出していることが確認された。高炉セメント B 種で改良を行った場合は pH が約 11 と高く、アニオンとして存在するフッ素およびヒ素が溶出しやすい土

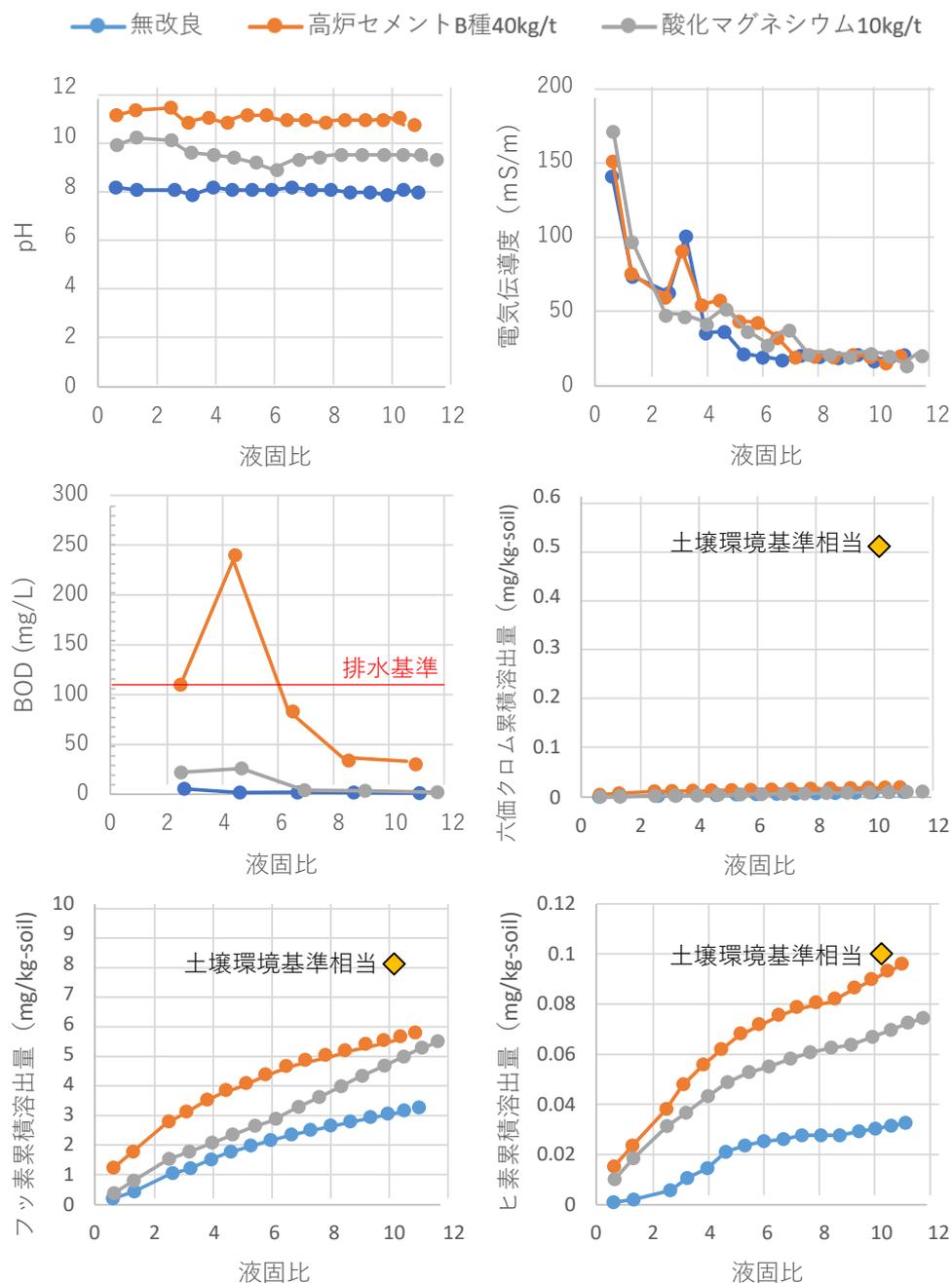


図 11 3種類の土壌の沈下挙動

壤環境であることが要因である。それに対して、酸化マグネシウムで改良を行った場合は、pHが高炉セメント B種より低く（約 10）これらの重金属類が溶出しにくい環境であること、そして酸化マグネシウムがこれらの重金属類に対して不溶化効果[8]を示すことから溶出が抑制されたと考えられる。

以上より、除去土壌を改良した場合は、浸出水中の BOD の上昇や重金属の溶出の可能性が明らかになったため、今後対策について検討する必要があると考えられる。

4. 事業性の評価

(1) コストの検討

表 3 のように条件を設定してコストの検討を行った。使用する薬剤は高炉セメント B種と酸化マグネシウムの 2 種類とした。コスト試算の対象となるのは、プラントでの改良と土壌貯蔵施設からの運搬を含み、土壌貯蔵施設での積込・場外への運搬は含まない。この条件で試算した結果、高炉セメント B種を用いた場合は 1 日 500m³ の処理費は 132.6 万円となり、1m³あたり約 2,650 円となった。酸化マグネシウムを使用した場合は 172 万円となり、1m³あたり約 3,450 円となった（表 4）。試算では令和 2 年度 建設機械等損料表、建設物価（2020 年 10 月）などを参照した。

表 3 コスト試算における条件設定

項目	条件設定
プラント	自走式土質改良機（機械＋世話役 1・作業員 2）
使用する改良材①	高炉セメント B種（40kg/t）
使用する改良材②	酸化マグネシウム（10kg/t）
1 日当たりの処理量	500m ³ /日（場外へ運搬できる数量として想定）
場内運搬	往復 30 分：1 日 14 往復、1 台あたり運搬量 6m ³
場内運搬のダンプ台数	6 台
使用するバックホウ	0.8m ³ バックホウ（投入／積込 計 2 台）
処理プラント建屋	既存の建屋を使用すると仮定し、省略する
回送費、建屋管理等	必要となるが、今回は考慮しない

表 4 コスト試算結果

使用する改良材	500m ³ あたり 処理費用	1m ³ あたり 処理費用	【内訳】	
			材料費	その他
高炉セメント B種（40kg/t）	132.6 万円	2,650 円	832 円	1,818 円
酸化マグネシウム（10kg/t）	172.3 万円	3,450 円	1,632 円	1,818 円

(2) 改良の評価について

これまでの試験で得られた各改良材の特徴を表 5 にまとめる。強度面に関しては高

炉セメント B 種の方が低コストかつ汎用的に使用できるといえる。施工性・沈下量・発生ガスの評価では有意な差がなく、いずれも盛土材を含む土木資材として十分に使用できる材料であることが分かった。一方で、重金属・BOD の面を考慮すると高炉セメント B 種は懸念事項があり、環境影響も踏まえた対策も考慮すると酸化マグネシウムの方が有効であると考えられる。

表 5 本試験における各改良材の特徴

	酸化マグネシウム	高炉セメント B 種
強度面	少ない添加量で所定の強度発現可能、 土壌の種類によっては効果なし	所定の強度を満たすための材料費が比較的安価、 どの土壌に対しても一定の効果あり
施工性	転圧回数 8 回で施工可能	転圧回数 6 回で施工可能
盛土沈下量	沈下量に有意な差がなく、施工後 30 日以降は全く沈下せず、盛土材として安定して使用可能	
盛土内発生ガス	いずれも有害ガス（硫化水素・メタン）がなく、盛土材として使用しても問題なし	
重金属	ヒ素の溶出促進するものの高炉セメント B 種と比較すると低濃度	フッ素・ヒ素の溶出促進効果があり、対策が必要かの検討が必要
BOD	排水基準と比較すると値は低いものの、原土よりは上昇しており、対応が必要であるかは要検討	排水基準に不適合するケースがあり、浸出水の対応が必要

参考文献

- [1] 環境省、2018 年 12 月、中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会（第 9 回）、資料 4、p.52
- [2] 反町倉ら、2002 年、高有機質地盤に対するセメント安定処理効果、こうえいフォーラム、10 号、p.105-110
- [3] 鉄鋼スラグ協会、鉄鋼スラグ製品の管理に関するガイドライン、 p.13
- [4] 国立研究開発法人国立環境研究所、2019 年 5 月、再生石膏粉の有効利用ガイドライン、 p.36
- [5] 総理府・厚生省令、昭和 52 年、一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令、第 1 条第 3 項の七
- [6] 小澤一喜ら、2021 年、除去土壌の改質と再生資材としての適用検討 —選別補助材(泥 DRY)を用いた異物除去と改質上の物性評価—、環境浄化技術、20 号 3 巻、p.12-17
- [7] 高田悦久、2012 年、連続・高速・大量 CSG 製造設備の開発と合理化システム-世界初となる台形 CSG ダム-、建設の施工企画、753 号、p. 89-94
- [8] Suzuki, T. et al., Immobilization of fluoride in artificially contaminated kaolinite by the addition of commercial grade magnesium oxide. *Chemical Engineering Journal*. 2013, 233, 176-184

実施代表者：法政大学

実証テーマ名： 除去土壤中の放射性セシウム(Cs)の熔融塩・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

概要：

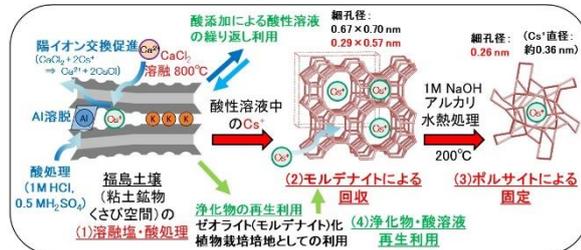
除去土壤の多くは中間貯蔵施設に持ち込まれ、今後はこの土壤の再生利用を推進すると共に放射性セシウム(Cs)を除去・濃縮し、最終処分量を減らすことが求められる。本事業では、高効率かつ低コストな除去土壤の減容・再生利用を推進することを目的に、放射性Cs濃度1.5万Bq/kg以上の除去土壤（環境省技術戦略における土壤C、D）を想定し、福島県内における土壤中の放射性Csの熔融塩・酸処理による脱離、ゼオライトによる回収・安定化および浄化物の再生利用に関する実証試験を実施する。

実施内容：

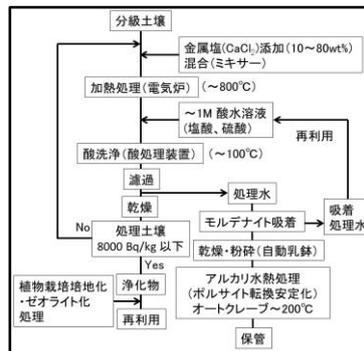
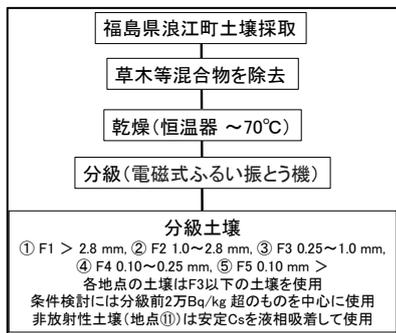
除去土壤には様々な性状のものが存在することを想定し、本年度は、鉱物組成、水分・有機物含有量および放射能濃度の異なる11地点の土壤について、本処理の有効性を検証した。また、約1.8万Bq/kgの土壤および非放射性土壤を用いて、様々な条件で本処理を検討し、高効率かつ低コストな処理条件を検討した。さらに、浄化物と酸廃液の再生利用を目的に浄化物のゼオライト化と植物栽培培地としての評価および酸廃液の本処理への繰り返し利用を検討した。

技術概要：

- (1) 熔融塩(CaCl₂)・酸(HCl, H₂SO₄)処理による土壤中の放射性Csの脱離
- (2) ゼオライト（モルデナイト）による回収
- (3) ポルサイトによる固定
- (4) 浄化物・酸廃液の再生利用



1. 試験フロー



2. 成果目標

8千Bq/kg以下の浄化物、減容率95%以上、処理コスト15万円/t以下、浄化物・酸廃液の再生利用の実証。本検討により、高効率かつ低コストに除去土壤を減容化して最終処分量を減らすと共に浄化物の再生利用量の増加が期待できる。

<p>実証試験の結果：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・福島県浪江町の性状の異なる 11 試料を所定条件で熔融塩・酸処理した結果、いずれの土壤も 95%以上の放射性 Cs 除染率、8 千 Bq/kg 以下の放射性 Cs 濃度、98%以上の減容率を達成した。また、2 万 Bq/kg 程度の土壤であれば、熔融塩量と酸濃度を減少させても、高い除染率を示すことが分かった。 ・モルデナイトカラムにより、酸廃液中の放射性 Cs を 85%以上回収できることが明らかになった。 ・モルデナイトのアルカリ水熱処理により、Cs を固定可能なポルサイトに転換でき、平均 90%の高い放射性 Cs 移行率を示した。 ・マスバランスの計算結果から、いずれの工程も 0.8 以上の高い Cs 分配比を示すことが明らかになった。 ・浄化物は、小松菜やビオラ等の植物栽培培地に利用でき、また、アルカリ水熱処理により、Cs 吸着材等として利用できるモルデナイトへ転換できることも明らかになった。 ・酸廃液を酸処理工程において、5 回繰り返し利用しても高い除染率を保持した。 	
<p>技術等の評価：</p> <p>本年度の目標を達成でき、いずれの処理工程においても高い Cs 分配比を示すことを明らかにした。放射性 Cs 濃度によっては大幅な薬品コストの削減ができ、処理装置の簡素化も期待できる。浄化物や酸廃液の再生利用も可能なことから、有用な減容・再生利用技術として期待できる。</p>	
<p>作業員被ばく量評価：</p> <p>2 万 Bq/kg 程度の放射能濃度の除去土壤では、一人当たり年間 1 mSv 以下の被ばく量になるが、それ以上の放射能濃度の除去土壤に対しても対応できるように年間作業時間を管理する。</p>	
<p>コスト評価：</p> <p>13 万円/t(土壤) (設備費、薬剤費、人件費、光熱費から算出。)</p>	<p>歩掛り (作業人工、作業速度等)：</p> <p>管理者 1 名、作業員 3 名 主な 4 作業工程を 1 日で実施。</p>
<p>コスト評価条件：</p> <p>設備費は 20 年で減価償却、薬剤費は土壤に対して 10%塩化カルシウム添加、0.01 M 塩酸を土壤の 10 倍量(20 g/200 mL)添加、人件費は 4 名(各工程 1 名) 8h/d)として算出した。なお、水道料金や廃棄物処分費は考慮していない。従来の化学処理より低環境負荷かつ低コストな処理が実現可能である。</p>	
<p>安全性の評価：</p> <p>土壤微粉末を扱うときは、防護マスクをしてドラフト内で作業する必要がある。特に濃縮物を取り扱うときは注意する必要がある。</p>	
<p>試験場所 (住所)：</p> <p>法政大学小金井キャンパス東館 (東京都小金井市梶野 3-7-2) 物質・材料研究機構並木地区 (茨城県つくば市並木 1-1)</p>	<p>除去物保管場所と保管状況：</p> <p>濃縮物 (ゼオライト) は、土壤採取場所の管轄の役場と道路管理事務所に許可を得た後に浄化物または非放射性土壤と混合し、元の放射能濃度以下になったことを確認後、採取場所に戻した。</p>

1. 試験概要

(1) 背景と実施方針

福島県内の除染作業で発生した除去土壌の多くは中間貯蔵施設区域内の土壌貯蔵施設に持ち込まれ、今後はこの土壌の再生利用を推進することが重要となってくる。最終処分量を減らすためには除去土壌に含まれる放射性 Cs を除去・濃縮する必要がある。既に低コストな技術である土壌分級処理の実証試験が行われているが、除染率に限界があり、放射能濃度が高い土壌から分級のみで放射能濃度の低い再生資材を得ることは難しい。除染率の高い処理方法として熱処理方式があり、廃棄物処理では既に実機が稼動しているが、高温処理のため高コストになる。その他の処理方法として化学処理方式があるが、今のところ大規模処理への対応、環境への影響、コストパフォーマンスに課題が残るとされている。

除去土壌の処分問題は、最終的な保管技術、浄化物の再生利用技術までを一気通貫に実証することが重要で、本事業では、これまでの基礎研究成果を踏まえて、経済性を勘案した高効率な減容・再生利用技術の実証を目指す。

(2) 目的

これまでに 18 万 Bq/kg 超の分級土壌 (0.1 mm 以下) に関して、熔融塩(CaCl₂ 40% 800°C 焼成)・酸処理(1 M 硫酸, 100°C 以上)により 8 千 Bq/kg 以下にすることに成功している。しかし、除去土壌には様々な性状のものがおり、鉍物組成や水・有機物含有量の異なる様々な土壌に関して、本処理が有効であるか、大規模な試験を実施する前に実証する必要がある。また、2 万 Bq/kg 程度の土壌であれば、上記条件よりマイルドな処理条件で除染できる可能性もあり、薬品コストやエネルギーコストの削減、装置の簡素化に繋がる。

本事業では、高効率かつ低コストな除去土壌の減容・再生利用を推進することを目的に、放射性 Cs 濃度 1.5 万 Bq/kg 以上の除去土壌を分級した濃縮土壌(2 万 Bq/kg 以上、約 77 万 m³ (約 116 万 t) を対象)を想定し、福島県浪江町土壌中の放射性 Cs の熔融塩・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、酸廃液の再利用に関する実証試験を実施する。

(3) 目標

本年度は、8 千 Bq/kg 以下の浄化物、減容率 95%以上、処理コスト 15 万円/t 以下、浄化物・酸廃液が再生利用可能なことの実証を目標とし、効率化した処理装置 (1t/d 処理 (実用レベルの 1/100)) を関連企業と一緒に検討し、令和 5 年度と令和 6 年度の技術実証フィールドでの試験に繋げる。

2. 試験の手順

試験に用いる土壌は浪江町周辺 11 か所から採取した (以下土壌①～⑪と表記)。各土壌採取地点は、環境放射線モニタを用いて線量を確認しながら決定し、それぞれの地点で 20 g～50 g の表層土壌を採取した。また、土壌⑩については、条件出しに用いるため、さらに表層土壌を合計 500 g 程度採取すると共に表層 30 cm 以深の土壌を約 100

kg 採取した。表層 30 cm 以深の土壌⑩は放射性 Cs 濃度が検出限界以下であることを確認し、非放射性土壌として実験に用いた。

図 2-1、図 2-2 に土壌および分級土壌の処理手順をそれぞれ記す。

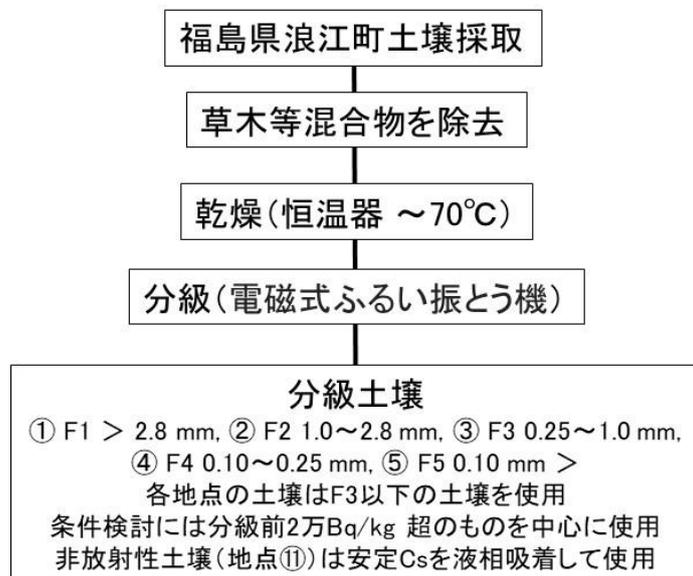


図 2-1 土壌の処理手順

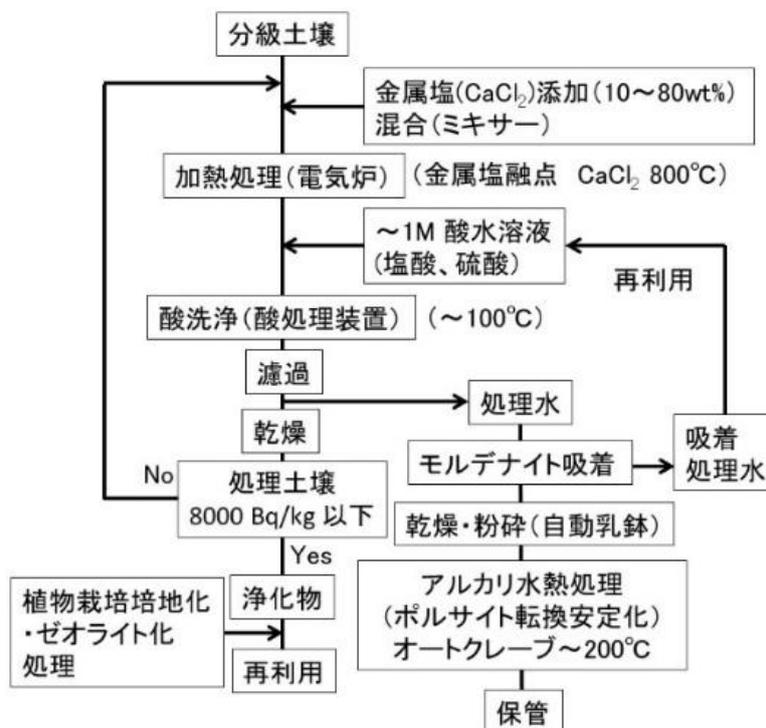


図 2-2 分級土壌の処理手順

3. 試験の実施方法・測定方法と実験結果

(1) 土壌の評価

研究室に持ち帰った土壌は、原土から草木等混合物を除去した後、大型乾燥機を用いて 70℃で 48 時間乾燥した。乾燥前後の質量は電子天秤を用いて測定し、質量変化から水分減少率を算出した。乾燥後の土壌は、粉末 X 線回折装置(XRD)を用いて物質同定を行った。また、有機物の含有量を確認するため、800℃までの昇温を熱重量示差熱分析装置(TG-DTA)または電気炉を用いて行い、強熱減少率を算出した。乾燥前後および強熱後の土壌の放射性 Cs (^{134}Cs , ^{137}Cs)濃度は、NaI (TI)シンチレーション検出器またはゲルマニウム(Ge)半導体検出器を用いて測定した(以下、放射性 Cs 濃度はこれらの検出器で測定)。図 3-1 に乾燥後の各土壌の XRD パターンを示す。いずれの土壌にも Cs の固着能力の高い風化黒雲母(WB)、イライト(I)の回折線が見られた。また、その他に角閃石、カオリナイト、長石、ギブサイト、石英の回折線が見られた。これらの回折線から土壌によって、各鉱物の含有量が異なることが分かった。図 3-2 に各土壌の水分含有率と放射性 Cs 濃度の関係を示す。水分含有率と放射性 Cs 濃度の関係に相関があり、水分の多い粘土鉱物中の放射性 Cs が保持されていることを示唆した。表 3-1 に各土壌の強熱減容率を示す。有機物量を示す値であり、試料により有機物量が大きく異なることが分かった。水の含有量と相関があり、粘土鉱物を多く含有するものは、腐植土など由来の有機物も多いと考えられる。このように、各採取地点の土壌の水分量と有機物量は様々であり、各鉱物の量も異なることが明らかになった。

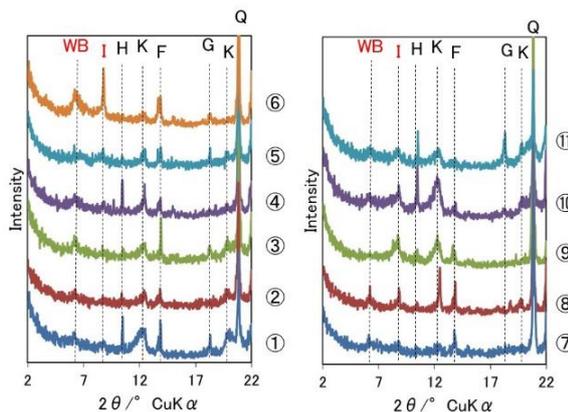


図 3-1 各採取地点の土壌の XRD パターン
WB: 風化黒雲母、I: イライト、H: 角閃石、K: カオリナイト、F: 長石、G: ギブサイト、Q: 石英

表 3-1 800℃で焼成時の
各土壌の減量率 (強熱減容率)

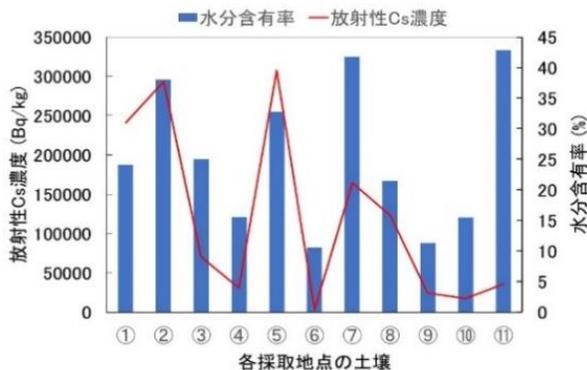


図 3-2 各採取地点の土壌の水分含有率
と放射性 Cs 濃度

試料	減量率 (%)
①	15.6
②	27.4
③	23.6
④	14.0
⑤	28.5
⑥	5.73
⑦	30.4
⑧	9.34
⑨	9.39
⑩	13.4
⑪	31.4

(2) 各地点の分級土壌の評価

乾燥後の土壌は電磁式ふるい振とう機を用いて粒径をふるい網目サイズ① >2.8 mm, ② 1.0~2.8 mm, ③ 0.25~1.0 mm, ④ 0.10~0.25 mm, ⑤ <0.1 mm の5段階に分級し、それぞれの分級土壌の質量、および放射性 Cs 濃度を測定した。なお、以下①, ②, ③, ④, ⑤の分級土壌をそれぞれ F1, F2, F3, F4, F5 と表記する。図 3-3 と図 3-4 に土壌⑥と土壌⑪の各分級土壌の質量比と放射性 Cs 濃度を示す。土壌⑥、⑪共に粒子の細かい土壌(F3, F4, F5)の放射性 Cs 濃度が高いことが分かり、一定の分級による除染効果が確認された。特に⑥の土壌では F3 以下の土壌に Cs 選択性の高い風化雲母やイライトが集まり、高い分級効果が見られた。15,000 Bq/kg 以上の土壌を本処理の対象とすると、土壌⑥では F5 が対象となり処理する量は全体の 31.8%、土壌⑪では、F4, F5 が対象となり、処理する量は全体の 26.6%となる。

また、8,000 Bq/kg 以上を本処理の対象とすると、土壌⑪に関してもいずれの分級土壌も処理する必要がある、土壌⑥については F3, F4, F5 が対象となり、全体の 41.2%となる。このように分級(乾式)においても一定の除染効果が確認されたが、粗い粒子にも風化黒雲母やイライトが存在するため、大きな除染効果は期待できない。なお、本処理の条件出しは、試料量も多く放射性 Cs 濃度が比較的低く、研究室でも取り扱える土壌⑪F3 を中心に用いた。

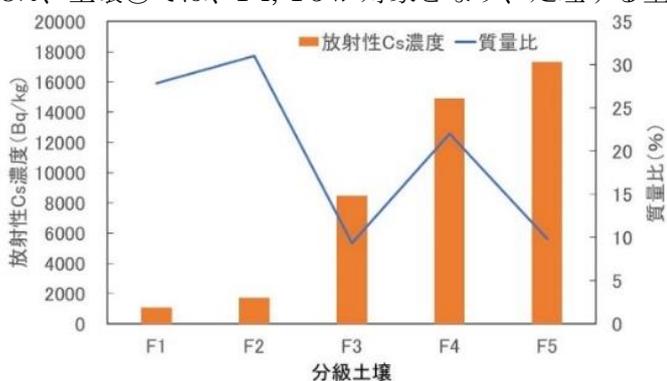


図 3-3 土壌⑥の各分級後の放射性 Cs 濃度と質量比
*分級前乾燥土の放射性 Cs 濃度: 9,730 Bq/kg

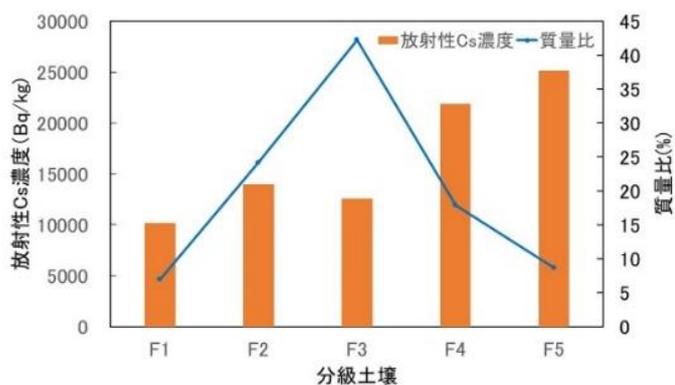


図 3-4 土壌⑪の各分級後の放射性 Cs 濃度と質量比
*分級前乾燥土の放射性 Cs 濃度: 21,241 Bq/kg

(3) 溶融塩・酸処理試験結果

土壌①～⑪(F3以下(0.1 mm以下))の分級土壌を用いて溶融塩・酸処理を行った。試験は、従来からの検討結果を踏まえて基準条件を表 3-2 のように設定して行った。溶融塩に CaCl₂を選定した理由は、浄化物として植物栽培培地に使用する際に Ca が比較的影響を受けにくいためであり、焼成温度 800℃を基準条件としたのは、CaCl₂の融点が 772℃のため

表 3-2 溶融塩・酸処理の基準条件

溶融塩処理		酸処理	
CaCl ₂ 量(土壌に対する割合%)	40%	酸の種類	塩酸
焼成時間	3 h	酸濃度	1 mol/L
処理温度	800℃	酸処理時間	4 h
		酸処理温度	98℃

である。酸処理は固液比(土壌(g):酸溶液(mL))1:10で行い、98℃の乾燥器で所定時間反応させることにより行った。なお、処理後に放射性 Cs 濃度が 8,000 Bq/kg 以上となった土壌と土壌⑪については再度基準条件で処理した。図 3-5 に溶融塩・酸処理前後の各土壌の放射性 Cs 濃度と除染率、表 3-3 に再処理前後の土壌①、⑤、⑪の放射性 Cs 濃度、処理後酸溶液の放射性 Cs 濃度および除染率を示す。溶融塩・酸処理により、20~60%の質量減少があり、本処理後の放射性 Cs 濃度は大幅に減少し、除染率は 95%以上を示した。また、再処理後はいずれの土壌も除染率 89%以上、土壌①と⑤は 8,000 Bq/kg 以下を示し、土壌⑪はさらに放射性 Cs 濃度が減少することが分かった。この結果は、再処理することにより、溶融塩・酸処理後の土壌中に

残った放射性 Cs も一定の割合で土壌から除去できることを示している。処理にコストはかかるが繰り返し処理によりクリアランスレベル以下(100 Bq/kg 以下)まで放射性 Cs 濃度を減少可能であることが明らかになった。なお、除去土壌には土壌①や⑤(表層土壌)のような高濃度の土壌は少ないと考えられ、1度の処理で 8,000 Bq/kg 以下を達成できると考えられる。

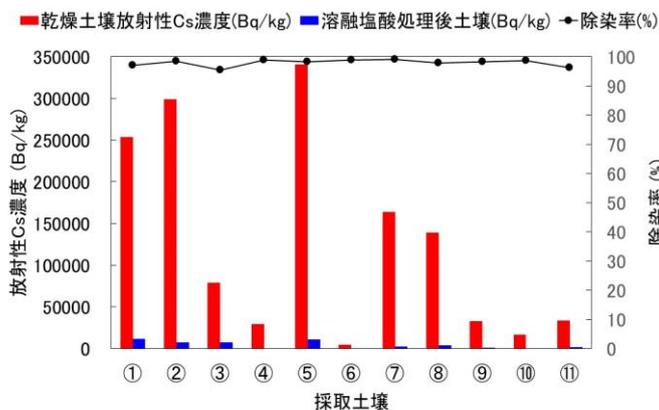


図 3-5 溶融塩・酸処理前後の各土壌の放射性 Cs 濃度と除染率

表 3-3 再処理前後の土壌①、⑤、⑪の放射性 Cs 濃度、処理後酸溶液の放射性 Cs 濃度および除染率

採取地点	処理前土壌放射性Cs濃度 (Bq/kg)	酸処理後土壌放射性Cs濃度 (Bq/kg)	酸処理後酸溶液放射性Cs濃度 (Bq/kg)	除染率 (%)
①	11412	721	1170	95.6
⑤	10940	1660	1024	89.5
⑪	1917	111	207	97.1

図 3-6 に酸処理後の各土壌の XRD パターンを示す。風化黒雲母(WB)とイライト(I)の回折線はほぼ消失しており、これらの構造破壊により、放射性 Cs が脱離したと考えられる。酸処理後の固相の EDX 化学分析結果からは、いずれの土壌においても処理前と比較して大幅な Al と Fe の減少が見られ、風化黒雲母やイライト中の Al や Fe が溶脱することにより放射性 Cs が脱離したと考えられる。図 3-7 に土壌⑪F3 の基準条件から CaCl₂ 添加率と酸濃度を変えた時の、放射性 Cs 濃度と除染率を示す。本土壌においては、CaCl₂ 添加率 10%で高い除染率を示し、10%以下では大幅に減少することが分かった。また、酸濃度においても希薄な HCl 濃度（この場合は、純水で最大値）で十分処理できることが分かった。なお、純水、室温 10 分の処理においても除染率 93.5%、処理後土壌の放射性 Cs 濃度 1,150 Bq/kg を示し、除去土壌の放射 Cs 濃度によっては本処理で十分であると考えられる。また、⑪F4, F5 (0.25 mm 以下の粒子) においても同様な処理で高い除染率が得られている。

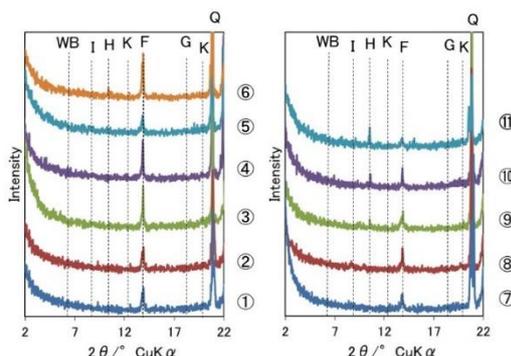


図 3-6 採取地点①～⑪の溶融塩・酸処理後の土壌の XRD パターン

WB: 風化黒雲母、I: イライト、H: 角閃石、K: カオリナイト、F: 長石、G: ギブサイト、Q: 石英

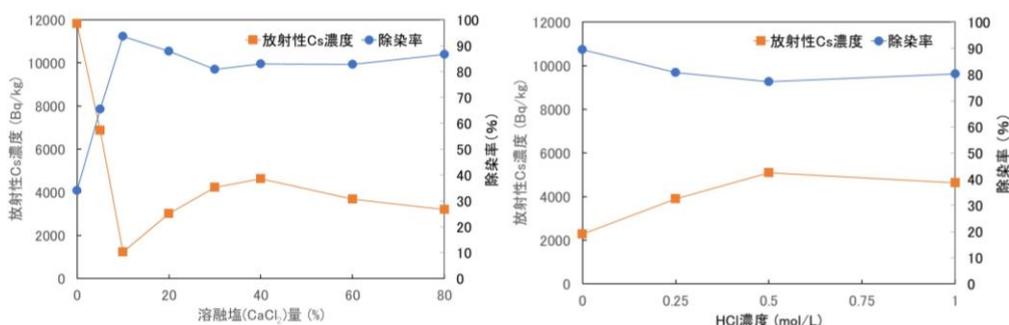


図 3-7 土壌⑪F3 の放射性 Cs 濃度と除染率（溶融塩 (CaCl₂) 依存性と酸処理濃度依存性結果）

(4) モルデナイトによる放射性 Cs 回収試験結果

ゼオライトは、粒子径 0.5~1 mm の新東北化学工業（株）の宮城県愛子産天然 MOR を用いた。MOR カラムによる吸着処理は、8.0 g の MOR を充填したガラス製カラム (φ18 mm × 80 mm) にポンプを用いて流速 25.0 mL/min. または 12.5 mL/min. で溶融塩・酸処理後の溶液を通水させることにより行った。図 3-8 に MOR カラムによる各土壌処理水中の放射性 Cs の吸着率を示す。土壌⑥を除いて 90% 以上の高い Cs 吸着率を示した。土壌⑥に関しては、放射性 Cs 濃度が低く低濃度まで除去できなかったため若干減少したが、80%程度の高い Cs 吸着率であった。

図 3-9 に土壌⑪F3 の溶融塩処理時の CaCl₂ 量を変えて得られた処理水中の放射性

Cs の MOR カラムによる吸着率とカラム通水後の放射性 Cs 濃度を示す。なお、グラフ上の赤と緑のプロットは 12.5 mL/min.、青と橙色のプロットは流速 25 mL/min.時の結果である。処理水中に多くの CaCl₂ が存在する 60%、80%の添加では、若干除染率が減少するものの、70%以上の除染率を保持し、MOR の放射性 Cs 選択性が高いことが明らかになった。また、流速を遅くすることで除染率が高くなることが分かった。

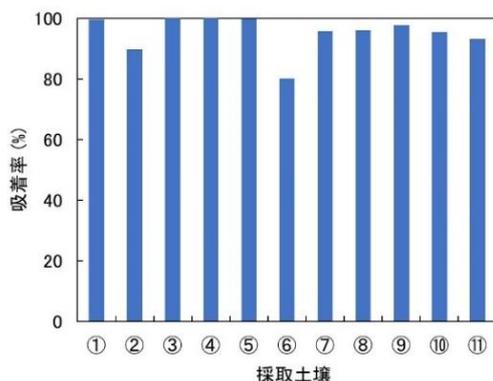


図 3-8 モルデナイトカラムによる各土壌処理水中の放射性 Cs 吸着率

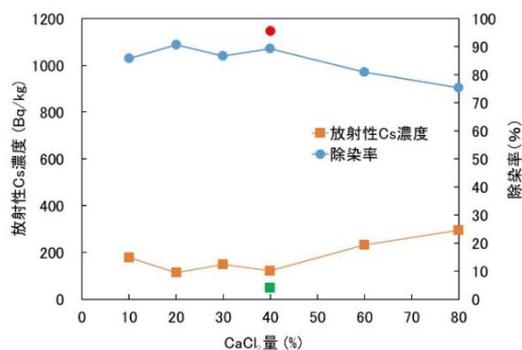


図 3-9 モルデナイトカラムによるCs 除染率と吸着後溶液中の放射性 Cs 濃度

(5) ポルサイトによる固定化試験

放射性 Cs 吸着 MOR のポルサイト (POL) 転換は、100 mL のテフロン容器または 75 mL 容量のオートクレーブで行った。テフロン容器の場合 MOR2.0 g に 30 mL の 1 M NaOH を入れ 200°C、24 時間静置、オートクレーブの場合は MOR 6.5 ~8.0 g (吸着後の全量)と 60 mL の 1 M NaOH 水溶液を入れ、200°C、4 時間攪拌しながら反応させることにより行った。図 3-10 に各土壌中の放射性 Cs を吸着した MOR の POL 転換における放射性 Cs 移行率を示す。土壌⑥と土壌④は他の試料と比較して移行率が低い。この結果は、放射性 Cs 濃度が低い土壌であり、MOR の吸着量も低いいため、NaOH 中の Na 過剰条件では POL に取り込まれにくかったことが原因と考えられる。その他の土壌では平均 90%の移行率を示し、POL 中に大半の放射性 Cs が取り込まれることが明らかになった。

図 3-11 に各土壌中の放射性 Cs を吸着した MOR の POL 転換後の XRD パターンを示す。いずれの MOR もほぼ POL に転換できていることが分かる。図 3-12 に代表例として土壌⑪中の放射性 Cs を吸着した MOR から転換後の SEM 像を示す。POL 特有の多面体結晶が観察され、POL の生成を示唆した。なお、他の試料でも同様な結晶が観察されており、XRD の結果ともよく一致する。

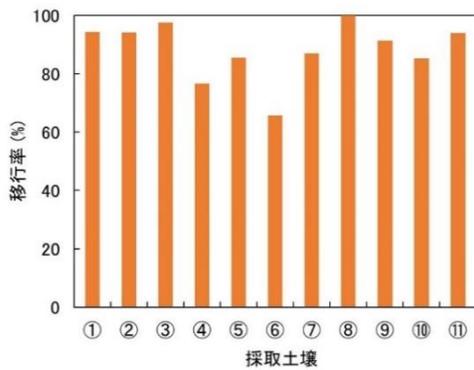


図 3-10 各土壌中の放射性 Cs を吸着したモルデナイトのポルサイト転換における放射性 Cs 移行率

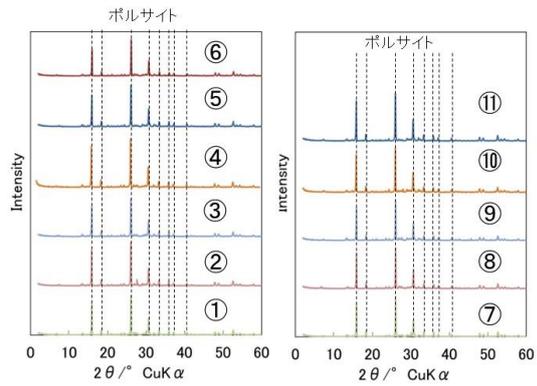


図 3-11 各土壌中の放射性 Cs を吸着したモルデナイトのポルサイト転換後の XRD パターン

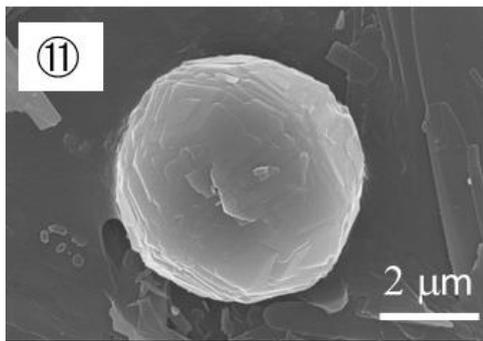


図 3-12 土壌⑪中の放射性 Cs を吸着したモルデナイトのポルサイト転換後の SEM 像

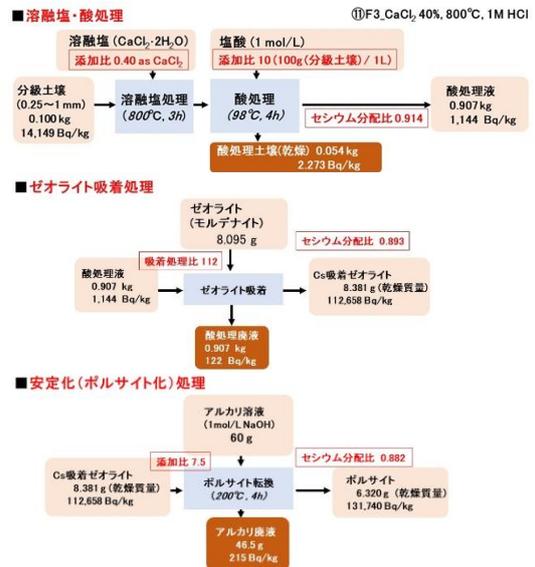


図 3-13 ⑪F3(基準条件)の各工程のマスバランス

(6) マスバランスの評価

図 3-13 に⑪F3 基準条件の各処理工程におけるマスバランスを示す。溶融塩・酸処理工程、ゼオライト (MOR) 吸着処理工程、安定化 (POL 化) 処理工程の放射性 Cs 濃度と質量に関するマスバランスが計算でき、各工程の Cs 分配比が 0.88 以上と効率的な処理工程であることが明らかになった。また、トータルプロセスとして 100 g の土壌を 6.32 g の POL に減量でき、放射性 Cs 濃縮は 9.3 倍であった。酸廃液は 5 回以上繰り返し利用した後は、塩化物イオン、カルシウムイオン、アルミニウムイオンが濃縮されるため、酸廃液として処理する必要がある。また、酸処理土壌 (浄化物) は 8,000 Bq/kg 以下なので植物栽培培地として再生利用可能である。放射性 Cs を吸着した MOR に関してはすべて POL に転換するため、廃棄物は POL(6.32 g, 131,740 Bq/kg)とアルカリ廃液(46.5 g, 215 Bq/kg)となる。本処理を実施して土壌 1t を処理することを想定すると、最終処分が必要な廃棄物(POL)が 632 g、酸廃液は 1814 kg、アルカリ廃液は 465 kg となる。

(7) 浄化物・酸廃液の再生利用の評価

①浄化物の植物栽培培地としての評価

本試験では、溶融塩・酸処理後の非放射性土壌⑩と土壌⑩（浄化物）を用いた。浄化物の植物栽培培地としての利用では、非放射性土壌⑩と肥料処理を施した非放射性土壌⑩を用い、本処理後の土壌で小松菜が生育可能か検証した。各土壌 3 kg を栽培培地として、小松菜の苗を定植した。なお、肥料処理は、浄化物 1 kg に対して、りん酸アンモニウムと硝酸カリウムの混合水溶液（N, P および K がそれぞれ約 15 mol（土壌に対して十分な肥料量）, pH 8.05）中に浸漬し、40℃、6 時間反応させ、ろ過分離し、乾燥させることにより行った。栽培試験は屋内で行い、LED 中で生育した。栽培は自動灌水装置により 1 株当たり 50 mL/d 水道水を供給し、LED 常時点灯下で行った。定期的に生育状況の写真を撮影すると共に、草丈と葉緑素値を測定した。またプランター下部から採取した排液の pH と電気伝導度(EC)を測定した。図 3-14 に定植 15 日後の各培地で生育した小松菜の写真を示す。肥料処理をしていない土壌は葉が黄化し生育不良を起こしているのに対して、肥料処理をした土壌および浄化物は良好に生育できていることが分かった。浄化物の葉緑素値は、56.3 と他の小松菜と比較して低かったが、草丈は 12 cm と最もよく成長していた。廃液の pH は 4.52 で EC は 2.55 であり、他の培地より低い pH であったが生育には影響しなかった。肥料成分放出の目安となる EC 値も安定しており、小松菜を生育できたと考えられる。本試験では 1 M の酸処理後の培地を利用しているが、2 万 Bq/kg 程度の土壌であれば、低濃度の酸でも処理可能なため、pH も中性付近に維持でき、さらに良好な栽培が期待できる。なお、浄化物を用いたビオラ栽培も検討したが、同様に浄化物で生育できることを確認している。



図 3-14 浄化物を用いた小松菜栽培結果（定植後 15 日）

②浄化物を用いたモルデナイト合成

浄化物の MOR 転換試験には、溶融塩・酸処理後の土壌⑩F3（基準条件、10%CaCl₂ に変更した基準条件）を用い、非晶質シリカを添加して MOR が合成可能な Si/Al モル比 8.3 に調製して 180℃で 24 時間アルカリ水熱処理を行った。

図 3-15 に浄化物と水熱処理前後の各浄化物の XRD パターンを示す。反応前の石

英等の回折線が残るものの MOR を示す回折線が見られ、土壌成分の一部を利用してゼオライト(MOR)化が可能なことが分かった。

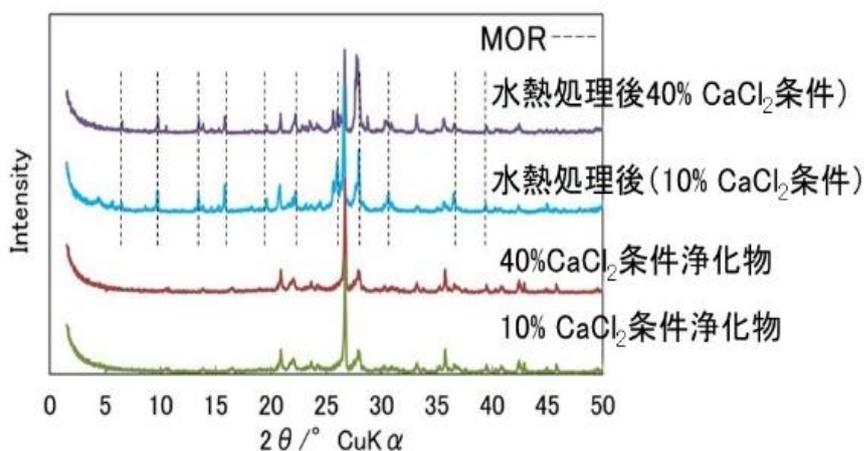


図 3-15 アルカリ水熱処理前後の浄化物の XRD パターン

③酸廃液の再利用評価

熔融塩・酸処理後の酸廃液として、基本条件で処理して得られた廃液を用いた。なお、土壌は①F3 20 g を用い、酸溶液は 200 mL で行い、MOR カラム吸着工程は粒子径 0.5~1 mm の MOR 8.0 g を用いて行った。再生利用の検討は、酸廃液に塩酸を添加し、土壌①F3 を 4 回再処理(計 5 回)することにより行った。なお、処理後の酸廃液の酸濃度は考慮せずに 1 M なるように塩酸を添加し、カラム中の MOR と土壌①F3 は毎回新しいものを用いた。図 3-16 に処理回数と除染率の関係を示す。5 回の繰り返し処理においても除染率は変わらず、本酸廃液は循環利用できることが明らかになった。酸処理において、酸溶液中のイオン種の影響はほとんど受けないことを示している。

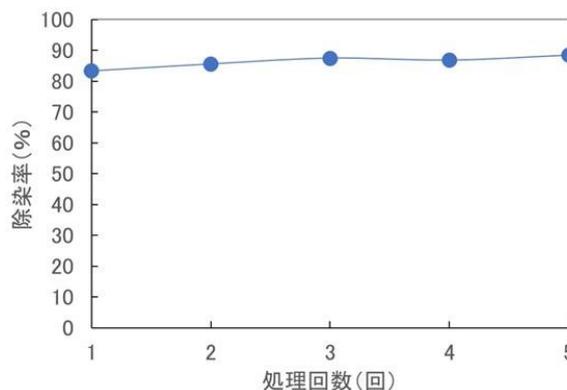


図 3-16 廃液の繰り返し利用回数と除染率の関係

4. まとめ

浪江町の各土壌を熔融塩・酸処理することより、放射性 Cs 濃度を 8000 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%の熔融塩(CaCl₂)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分かった。減容化率は最大 98%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。

実施代表者：株式会社不動テトラ

実証テーマ名：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

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み、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：浪江町での実証試験

1. 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

土壌、土壌＋高吸収性樹脂 (SAP)、土壌＋高分子系土質改質剤の 3 試験試料に対して下記の条件で実施した。

- ①A 反応槽および B 反応槽の有機物分解試験 (9h 反応) を実施し、分解率を TOC で評価することで、オゾンと過酸化水素の最適比を検証した。
- ②オゾンと過酸化水素の最適比の添加量で長時間 (24h、78h) の有機物分解試験を実施し、分解率の目標である 80% を達成する必要オゾン量を求めた。
- 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。

2. 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 (min^{-1})、投入流量 (L/min) を変化させた分級処理により、分級物と脱水粘土をレーザー回折法による粒子径分布、放射性 Cs 濃度、重量、全有機物量 TOC を測定し、物質収支・減容率・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。
- ③除染率に影響を及ぼす土壌に含まれる黒雲母濃度 (%) を X 線回折法と RIR 法を用いて評価した。

技術概要：

1. 有機物分解処理

有機物の分解は、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 ($\cdot\text{OH}$) により有機物を酸化分解させる促進酸化法を採用した。

分解試験は、ステンレス製の密閉式反応槽 (300L) を用いて、以下の手順で実施した。

- ①畑地表層土壌を含泥率 8% の泥水とする。
- ②この泥水を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エジェクター部でオゾンと過酸化水素を添加することで泥水中の有機物を酸化分解する。
- ⑤ ③、④を繰返して泥水を循環させて反応させる。

2. 分級処理・脱水処理

分級処理には固液分離機を用いた。この固液分離機は、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 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、有機物分解後の泥水の投入量と遠心力 G および差速を変えて 20 μ m で分級処理した。濃縮した粘土は、同じ固液分離機を用いて遠心力 1,800G で脱水処理した。

実証試験の結果：

1. 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酸化分解による有機物の分解率は、目標 80%以上を達成するための必要オゾン量 (TOC で 1mg 分解するために必要なオゾン量) を確認した。また、オゾンと過酸化水素の添加量の最適比が 15~20mol%であることが確認できた。

②溶存有機態炭素分離測定 (LC-OCD)：酸化分解により、高分子有機化合物から分解が進行し、フミン酸類からフミン酸崩壊物質を経て低分子有機化合物・低分子有機酸へと分解し、二酸化炭素と水に分解していた。

2. 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：減容率は、目標の 68.5%を達成できたが、除染率は 35%~70%で目標の 88%に未達で、減容率と除染率の目標値を同時に達成できなかった。除染率が目標を達成できなかった原因は、土壌の初期濃度が低濃度の土壌であること、土壌に存在する黒雲母が選択的に Cs を吸着し分級物の放射性 Cs 濃度に下限値があることが原因であるが判明した。したがって、土壌が高濃度であれば、除染率も目標の 88%を容易に達成できると考えられる。

②SEM-EDX 試験：有機物の指標である炭素濃度 (質量濃度) の比較から、酸化分解により炭素濃度は減少し、砂粒子への有機物の付着が減少していることが確認できた。

技術等の評価：促進酸化法による有機物の分解率は、目標 80%を達成するために必要なオゾン量とオゾン/過酸化水素の添加量の最適比が求まった。固液分離機による分級処理は、減容率は目標 68.5%を達成した。除染率は最大 70%程度で目標 88%の達成には至らなかったが、その原因は特定でき、実用化では除染率も達成可能なことが判明した。脱水処理の含水率からフィルタープレスを必要としないことが確認でき、連続運転が可能である。

作業員被ばく量評価：実証試験場所は居住制限区域外であった。ポケット線量計で日常管理の結果した結果、全作業員・全日で線量等量は 0.3~1.7 μ Sv であった。

コスト評価：実用化時の概算処理費は、1t 当たり概算で 32,000 円となる。

歩掛 (作業人工、作業速度)：連続運転とすることで作業人工を削減できる。

コスト評価条件：含泥率 8%、稼働率 0.9、24h 連続運転。反応槽による有機物分解処理 (80m³×4 台) /6h×4 回/日)、固液分離器による分級処理 (40m³×1 台×泥水投入 700L/分)、脱水処理 (40m³×2 台×泥水投入 50L/分) 6セット 15年で 65 万 m³ (124t) 処理。

安全性の評価：有機物分解、分級処理、脱水処理まで 24h 連続運転が可能で、遠隔操作で放射能に対する被ばくリスクは小さく、作業環境の安全性も確保することができる。

試験場所 (住所)：

(株)不動産総合技術研究所 (茨城県土浦市)
福島県双葉郡浪江町大字酒田字堂ノ内

除去物保管場所と保管状況：

該当なし

1. 実証試験の目的

(1) 背景と方針

中間貯蔵受入分別施設では各工区にてフレコンバッグにて保管された除去土壌を破袋し、改質して濃度選別や異物除去を行っている。除去土壌のうち除去土壌 C (15,000Bq/kg～62,000Bq/kg) は約 131.8 万 m³ 存在するが、その多くを占めるのは農地由来の土壌であり、細粒分と有機物を多く含む。

中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会で検討されている処理ケース IV では除去土壌 C に対し 75 μ m を分級点とする高度分級処理等を行うことで、放射性 Cs 濃度の低い土壌に選別された分級処理土壌を再生資材とする計画がされている。

除去土壌 C は 75 μ m 以下の粒径の土壌を多く含むため、75 μ m を分級点とする分級だけでなく、75 μ m 以下の土壌の新たな減容化技術が開発できれば最終処分量を低減できる。放射性 Cs が 20 μ m 以下の粘土鉱物や有機物に強く吸着するという知見と、細粒分が多く有機物に富む土壌では有機物と細砂あるいは有機物に吸着した粘土と細砂は異符号に電荷し静電引力の働きで吸着していることが原因で団粒化していることが多い。したがって、20～75 μ m の土粒子にも放射性 Cs を吸着した粘土鉱物が付着していると考えられる。よって、有機物を分解することで、この団粒化を崩すことで、分級点 20 μ m の分級により、20～75 μ m の土粒子の放射性 Cs の分離が進む可能性が示唆されている。

本実証試験は、この除去土壌 C を対象とし、減容率と除染率の向上を検証した。

(2) 提案技術の目的

本実証試験では、分級処理の前処理として、反応処理槽内でオゾンと過酸化水素を添加し、エジェクターを介して高圧噴射することで、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・粘土鉱物を解泥・除去し、20～75 μ m の土壌の除染率を向上できることを検証することを目的とした。

さらに、高性能固液分離機を用いて分級点 20 μ m で分級処理することで、減容化率が向上するかを検証を行った。また、同じ高性能固液分離機を用いて遠心力 1,000G～2,000G で脱水処理することで、フィルタープレスを用いないで 20 μ m 以下の土壌を含む泥水の脱水処理が可能なことを検証することを目的とした。

(3) 成果目標

土壌 C の分級処理による減容率 51.1%を、促進酸化法による有機物の酸化分解と 20 μ m の分級点までの細砂を高度分級処理することで 68.5%まで減容化することを目標とした。また、回収した細砂の除染率は 88%を目標とした。この時の有機物の分解率は 80%を目標としている。

2. 試験の内容

実証試験の流れを図 2-1 に示す。

低濃度放射性セシウム含有土壌の採取・調整と土壌試料の作成

↓土壌とSAP、高分子系土質改質剤の混合

A反応槽による有機物分解処理(オゾンと過酸化水素の最適比の確認)

↓

B反応槽による有機物分解処理(オゾンと過酸化水素の最適比)

↓

高性能固液分離機による分級処理・脱水処理試験

図 2-1 浪江町実証試験の流れ

有機物分解試験に用いた密閉式A反応槽を図2-2に、B反応槽を図2-3に示した。反応槽の仕様は、A反応槽は容量5Lでエジェクター1本、B反応槽は容量300Lでエジェクター12本となっている。

また、図2-4に高性能固液分離機を示す。固液分離機の制御は、遠心力Gと差速(min⁻¹)のみのシンプルな制御となっている。その他に調整できるのは、泥水の含泥率(%)と投入流量(L/min)である。

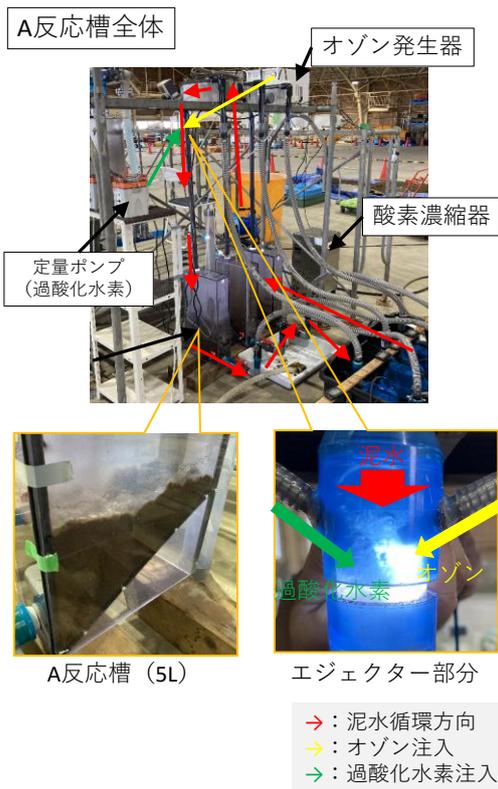


図 2-2 密閉式 A 反応槽 (5L)

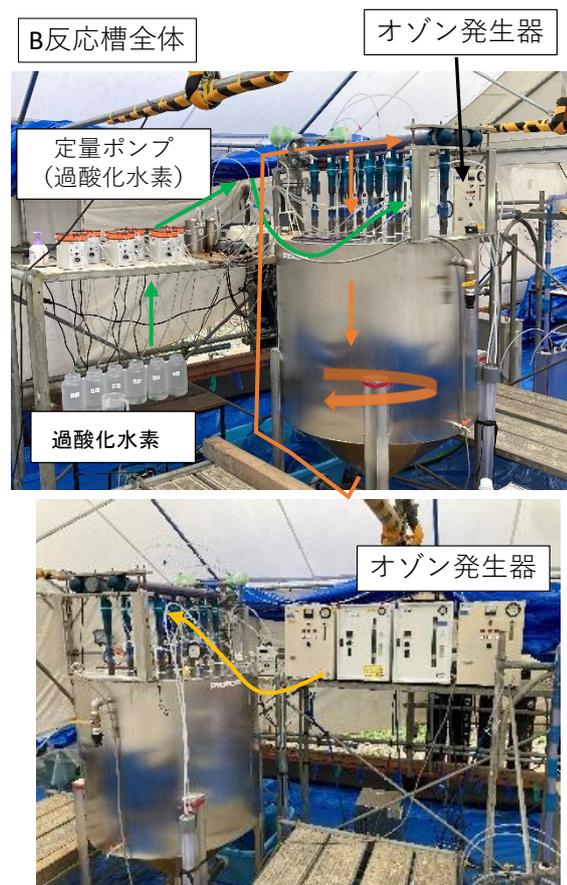


図 2-3 密閉式 B 反応槽 (200L~300L)

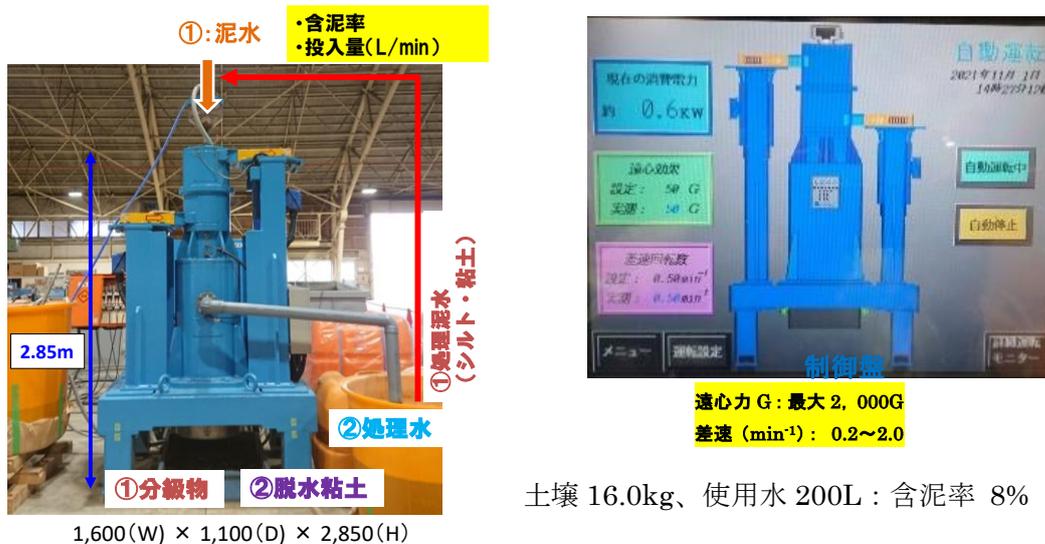


図 2-4 高性能固液分離機

3. 実証試験結果と考察

(1) 使用土壌

浪江町の除染済み（表層混合）の畑地の表層土壌を採取し、これを 2mm アンダーとした土壌を試験試料とした。試験試料の土質データを表 3-1 に示した。図 3-1 に粒度試験結果を示す。図中の●が今回使用した試験土壌である。75 μ m 以下の細粒分が 53.2%と多い。また、20 μ m 以下は 10%であった。有機物は全有機体炭素量 TOC が 2.0%で、放射能濃度は平均で 3,13Bq/kg (4,068.9Bq/kg・乾土) であった。

表 3-1 試験土壌の土質データ

測定項目		畑地1と2の 混合畑地土壌
放射能濃度	Bq/kg	平均 3,130
	Bq/kg・乾土	4,068.9
有機体炭素量	mg/kg-dry	20,000
pH	-	7.1
土粒子の密度	g/cm ³	2.576
土の粒度	礫分(2-75mm)%	0
	砂分(0.075-2mm)%	46.8
	シルト分 (5-75 μ m)%	50.0
	粘土分 (5 μ m以下)%	3.2
最大粒径	mm	2
均等係数		6.50
50%粒径	mm	0.067
液性限界	%	NP
塑性限界	%	NP

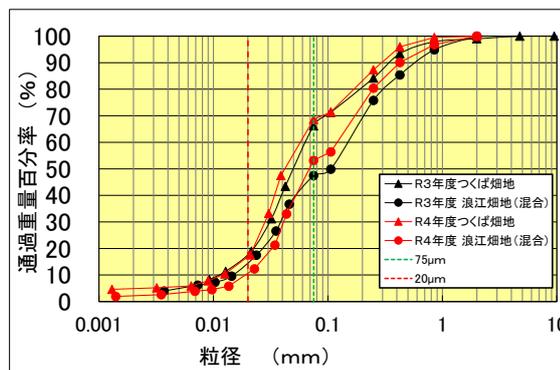


図 3-1 粒径加積曲線

(2) 使用材料

除去土壌は、高分子系土質改質剤で改良されている。そこで、土壌に混合する材料として、表 3-2 に示した 2 種類の材料を用いた同表より、アースレフォールは SAP とゼオライト、炭酸カルシウムが配合されているが、SAP 成分は 20%程度配合されていると推定される。

(3) 試験土壌

土壌は通常土壌と放射性セシウム含有土壌の 2 種類を使用した。これに改質剤の主成分であるポリアクリル酸ナトリウム（以下、SAP）を混合した土壌と高分子系土質改質剤（アースレフオール：アースプロテクト製）を混合した土壌を作製し、表 3-3 の計 6 試料を試験試料とした。

表 3-2 使用材料（高分子系土質改質剤）

材料名	有機炭素量 mg/kg - dry	強熱原料 %	蛍光X線分析 検出元素(主成分)
ポリアクリル酸ナトリウム(SAP)	260,000	45.7	ナトリウムNa : 98.7 % ケイ素Si : 0.43 % 硫黄S : 0.40 % カリウムK : 0.28 % 鉄Fe : 0.16 %
アースレフオール	45,000	10.1	カルシウムCa : 82.8 % ケイ素Si : 11.6 % アルミニウムAl : 2.43 % ナトリウムNa : 1.08 % カリウムK : 0.85 % 鉄Fe : 0.67 % マグネシウムMg : 0.26 %

表 3-3 試験試料一覧

土壌		試料	
土壌 1	つくば市 畑地の表土 (766kg×1.1)	試料 1	土壌 1 のみ
		試料 2	土壌 1+SAP
		試料 3	土壌 1+アースレフオール
土壌 2	福島県 畑地の表土 (1,090kg×1.1)	試料 4	土壌 2 のみ
		試料 5	土壌 2+SAP
		試料 6	土壌 2+アースレフオール

(4) 有機物分解試験と分解率

① 高分子材料の分解試験

除去土壌の土質改質に使用されている高分子材料に対する分解を評価することを目的とし、ポリアクリル酸ナトリウム (SAP) 水溶液を用いた分解試験を A 反応槽 (5L) で実施した。反応時間は 3h とした。

図 3-2 にオゾン量と分解率の関係を示す。注入するオゾン量が増えるほど高分子材料が分解される傾向にあり、オゾン 10g/h で 3h 反応することで高分子成分、低分子の有機物や有機酸としても残っていないこと、TOC としてほぼすべての SAP を分解することが確認できた。

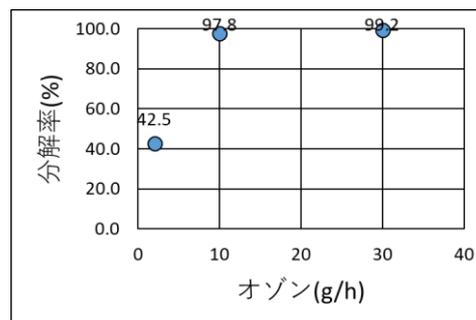


図 3-2 オゾン量と分解率

② O₃/H₂O₂ の最適比

試料 1 を用いて、オゾン/過酸化水素の最適比確立を目的とした有機物分解試験を A 反応槽で実施した。泥水は含泥率を 8% とし、反応時間は 9h とした。

図 3-3 にオゾン/過酸化水素比と分解率の関係を示す。オゾンのみの添加では分解率 14.3%であったのに対し、過酸化水素を 15mol%-O₃ で添加したケースでは 90.5% となり極大を示し、更に過酸化水素濃度を上げると分解率は減少した。以上の結果

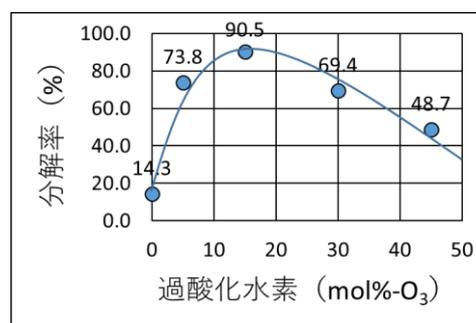


図 3-3 O₃/H₂O₂ 比と分解率

から、オゾン/過酸化水素の最適比は 15~20mol%付近にあることを確認した。

③必要 O₃ 量の推定

過酸化水素を 15mol%としたケースでは目標とする分解率 80%には約 7 時間で到達しており (図 3-4)、その時の使用オゾン量から有機物を 1mg 分解するのに必要なオゾン量を以下の式 (1) より算出すると、56.2mg であった。また、その時に添加した過酸化水素添加量は 28.9mg であった。

$$(\text{注入オゾン量} - \text{排出オゾン量}) \div \text{有機物分解量 mg} \dots\dots\dots (1)$$

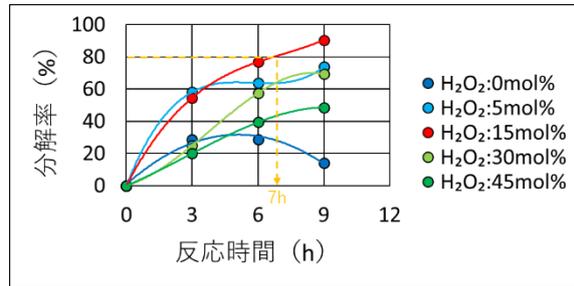


図 3-4 反応時間と分解率

④放射性セシウム含有土壌での有機物分解

B 反応槽 (200L) を用いて放射性セシウム含有土壌の有機物分解処理を実施した。反応時間は 9h 分解と②での結果より 78h として実施した。反応時間と分解率の関係を図 3-5 に示す。また、採取した試料を静置した際の有機物分解による沈降速度の変化と沈降・沈殿状況を図 3-6、図 3-7 に示す。さらに、有機物成分ごとの分解状況を確認するため 78h での有機物分解処理したケースでは LC-OCD 分析を実施した。その結果を図 3-8 に示す。

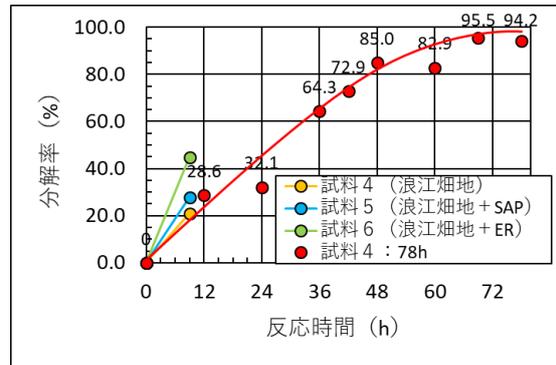


図 3-5 反応時間と分解率

9h での分解試験では試料 4 で約 25%、試料 5 で約 35%、試料 6 で約 45%の分解率であった。試料 4 と比較し、試料 5、試料 6 で有機物分解がより進行しているのは分解が容易な高分子材料が含まれること、泥水の粘性が上がることでオゾンが気

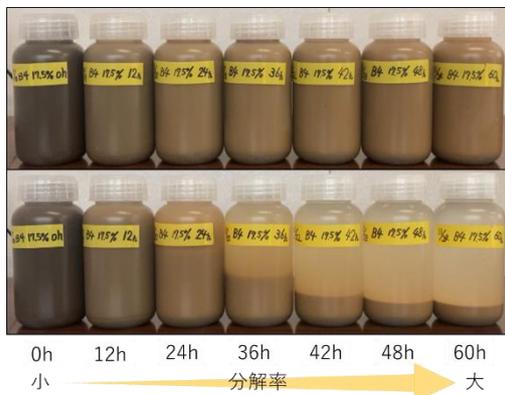


図 3-6 有機物分解による沈降状況の変化
(上: 静置直後、下: 静置後 30 分)

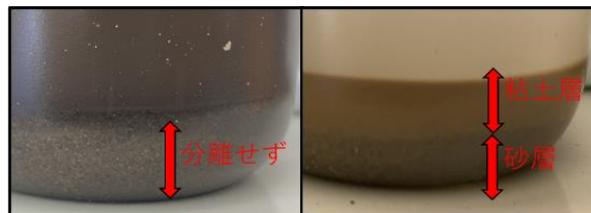


図 3-7 沈殿状況
(左: 反応前、右: 反応 60h 後)

中に逃げにくくなることが考えられる。78hでの試験では9hと比較して反応初期ではやや緩やかな曲線となるが同様の傾向を示し、45hで分解率80%に到達した。このときの必要オゾン量は(1)式より、27.2mgであり、添加した過酸化水素は4.0mgであった。

次に図3-8より酸化分解が進行するにつれ沈降速度が上昇することが確認できた。これは有機物の分解により界面活性能力が失われたこと等が原因と考えている。また、図3-7より、沈殿物を比較すると反応前の試料は均一に堆積するのに対し、反応60h後の試料では二層に分かれ、粒径の大きい細砂から沈殿し、後に粘土が堆積しているのが確認できた。これより、有機物分解で砂と細粒分が分離しやすくなることが分かる。

	分子量
■疎水性有機化合物	—
■高分子有機化合物	>>20,000
■フミン酸類	~1,000
■フミン酸崩壊物質	300~500
■低分子有機化合物	<350
■低分子有機酸	<350

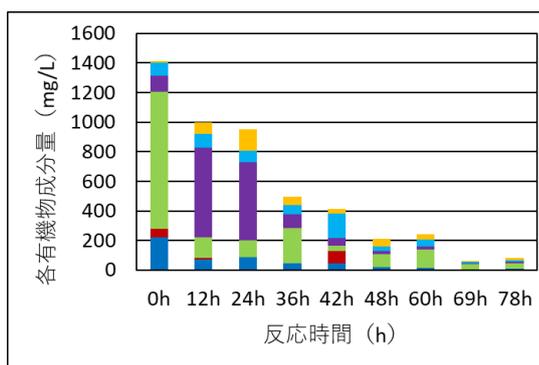


図 3-8 LC-OCD 分析結果

次に、LC-OCD 分析結果から、有機物の分解は高分子有機化合物の分解から始まり、低分子有機物となる。次にフミン酸類が分解され、フミン酸崩壊物質を經由し、低分子有機化合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。

(5) 固液分離機による分級処理試験

表 3-4 物質収支のまとめ

①物質収支

令和3年度は、分級処理に際してコンタミが生じたため、今回は、「バイブレーターを設置し、常に振動を加える」「スクリーンの各所に噴射ノズルを取付け内部洗浄しながら分級処理・脱水処理をする」等の対策を実施した。

試料	有機物分解	誤差 (%)		分解率 (%)
	有機物分解	乾燥重量 kg	放射性セシウム 濃度 Bq/kg-乾土	全有機炭素量 mg/kg-dry
4	ブランク	0.3	-10.3	11.9
	9h分解処理	14.4	20.9	62.6
	78h分解処理	3.6	13.9	88.5
5	ブランク	0.6	4.8	2.6
	9h分解処理	7.8	30.6	54.6
6	ブランク	0.7	-4.3	5.8
	9h分解処理	2.1	1.1	38.7

表3-4に分級物と脱水粘土、処理水に対して乾燥重量、放射性Cs濃度の物質収支の誤差と全有機炭素量の物質収支から見た分解率についてまとめた。同結果より、乾燥重量での誤算は小さくコンタミの改善ができていた。放射性Cs濃度は少し誤差が大きい。また、全有機炭素量については、ブランクの分解率は小さいが、有機物分解処理した場合は、二酸化炭素と水に分解することで分解率は大きい。特に試料4の78h分解処理のケースは分解率が88.5%と非常に大きい。

②減容率と除染率

図 3-9 に減容率と除染率をまとめた。減容率と除染率は同時に目標を達成することで評価される。これ

らの結果から、各試料の最大結果は、表 3-5 の通りであった。

減容率は目標を達成できたが、除染率は未達であった。この原因としては、図 3-10 の模式図のとおり今回使用した土壌が低濃度 (4,068.9Bq/kg-乾土) の土壌であったこと、土壌に存在する粘土鉱物 (黒雲母等) が選択的に放射性 Cs を吸着し、下限値 (今回使用した低濃度 Cs 含有土壌では 1,000Bq/kg-乾土程度) がある可能性が考えられる。X 線回折法-RIR 法での分級物の黒雲母濃度は 0.7%、分級物から取り除いた磁着物の黒雲母濃度は 0.6%であった。

また、試料 4 の 9h 分解処理と 78h 分解処理を比較より、有機物の分解率が 80% 以上の方が除染率は高いことが分かる。また、試料 4 の 78h 分解処理の結果から、遠心力 G が 150G から 90G と小さくなるにつれ Cs 濃度が低下して除染率が上がること、同じ遠心力 100G で投入流量が 61L/min から 38L/min と減少すると除染率は大きく下がることが確認できた。減容率・除染率の目標達成のためには、遠心力 G は 100G より若干小さく、投入流量はで分級が可能な範囲できるだけ多くすることが重要である。

表 3-5 減容率と除染率 (最適)

試料	有機物分解 目標 80.0	遠心力 G	減容率(%) 目標 68.5	除染率(%) 目標 88.0
試料 4 (土壌)	78h	90	67.3	60.9
試料 5 (土壌+SAP)	9h	100	69.5	68.5
試料 6 (土壌+アスレフォル)	9h	100	70.3	31.1

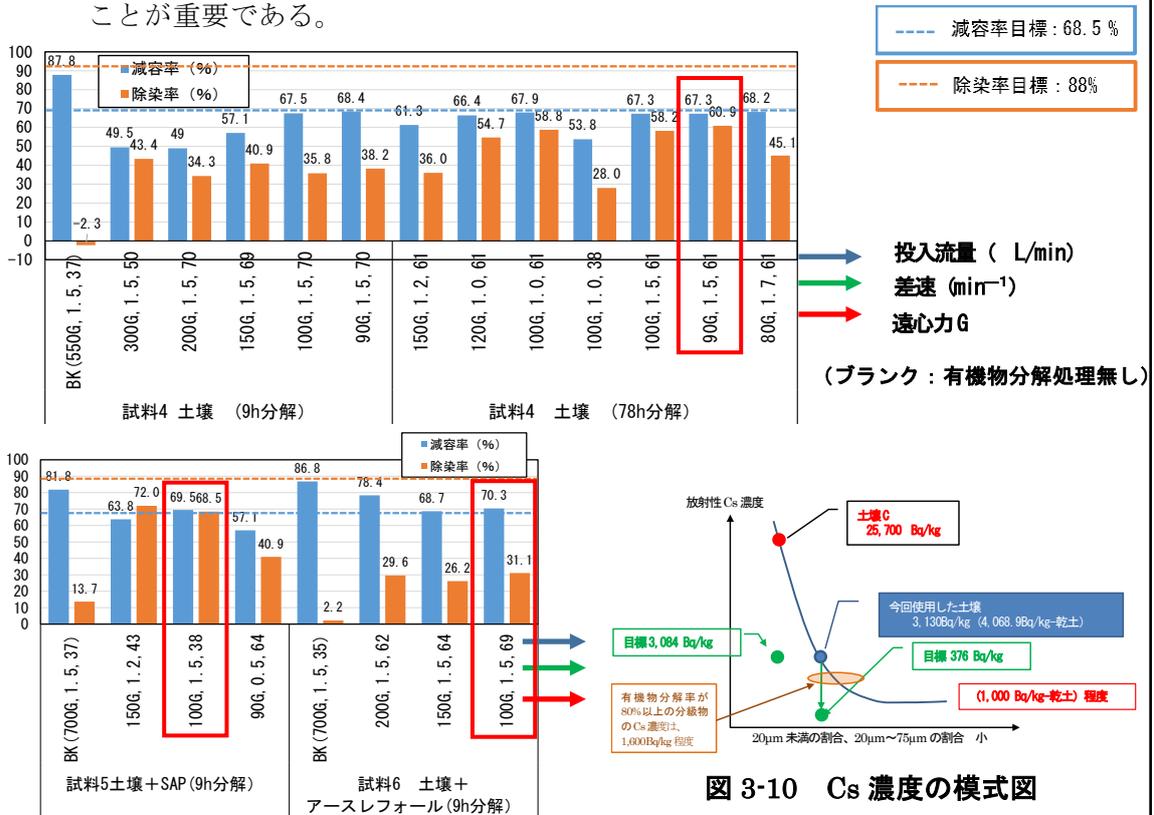


図 3-10 Cs 濃度の模式図

図 3-9 減容率と除染率のまとめ

SAP のみを添加混合した試料 5 と高分子系土質改質剤を添加混合した試料 6 の比較から、試料 6 の除染率は半減するくらい低くなる結果となった。高分子系土質

改質剤の成分に SAP の他にゼオライトが配合されており、このゼオライトに放射性 Cs が吸着されたことが要因と考えられる。

③分級物の粒径分布

図 3-11 に試料 4 の 78h 分解処理したケースの分級物のレーザー回折/散乱法による粒子径分布の例を示した。

同図から、20 μm を下回る体積割合は小さく、精度よく分級処理できていることが確認できた。

また、遠心力 G が低下するにつれて分布図は右にずれて 20 μm 未満の割合が小さくなり、放射性 Cs 濃度が下がることが確認できた。ただし、80G では反転する結果となっており遠心力 G にも下限値があることが確認できた。

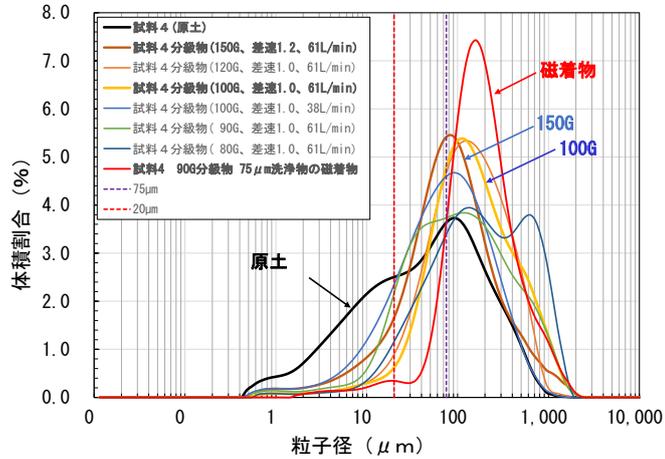


図 3-11 粒子径分布図 (試料 4、78h 分解処理)

④分級物の電子顕微鏡観察 (SEM-EDX)

図 3-12 に SEM 観察結果の一例を示す。

ブランクでは砂粒子表面に細粒分の付着が見られるが、有機物分解処理後の分級物は、砂粒子表面に細粒分の付着は見られない。また EDX 定性・定量分析結果からは、有機物を表す炭素元素の質量濃度は、ブランクの 1%程度に対して有機物分解処理後は 0% (実質的には全く炭素が含まれてないということではないが濃度が 1%未満と低いいため定量検出できずにゼロとなった) と明確な差が見られた。

試料 4 ブランク 550G	試料 4 9h 反応、100G (分解率 21.4%)	試料 4 78h 反応、90G 分解率 (94.2%)

図 3-12 分級物の SEM 観察結果

(6) 固液分離器による脱水処理

表 3-5 に脱水処理試験の結果をまとめた。表中の赤字は排水基準を超過している。

有機物分解処理をした場合は、脱水処理による脱水粘土の含水量はフィルタープレスと同程度の含水量となっており、普通ダンプで運搬可能な土質性状となっていた。したがって、フィルタープレスが必要ないことが確認できた。

また、表中の有機物の分解率が80%以上となっている78h分解処理したケースの処理水はpH、浮遊物質量SS、放射性Cs濃度ともに排水基準に適合している。脱水処理による処理水は泥水の作泥に再利用するが、最終的な排水と、先述した分級物の減容率・除染率の向上のためには、有機物の分解は80%以上が必要であると考えられる。試料6も各項目で排水基準に適合している。これは、ゼオライトにより浮遊物質SSが吸着された効果と考えられる。ただし、分級物に関しては先述したとおりゼオライトによりCs濃度は高くなることに留意が必要である。

表 3-5 脱水処理のまとめ

試料	有機物分解処理	分級処理条件			脱水粘土 含水量 %	処理水			
		遠心力G	差速 (min ⁻¹)	投入流量 (L/min)		pH	浮遊物質量SS mg/L	濁度 度	放射性Cs濃度 Bq/L
					海域： 5.0以上9.0以下 海域以外 5.8以上8.6以下	200mg/L (日間平均150mg/L)	Cs134: 60Bq/L Cs137: 90Bq/L		
4	ブランク	1,800	1.0	5.0	49.4	7.4	780	1,200	3.13
	9h	1,800	1.0	5.0	—	7.5	380	500	N. D.
		1,800	1.0	10.0	44.3	7.3	580	980	2.33
	78h	1,800	1.0	2.3	—	7.4	80	99	N. D.
		1,800	1.0	5.0	—	7.4	44	53	7.58
		1,800	1.0	10.0	42.0	7.3	96	300	4.56
5	ブランク	1,800	1.0	5.0	50.1	7.5	850	1,600	10.2
	9h	1,800	1.0	10.0	32.6	7.1	300	660	5.76
6	ブランク	1,800	1.0	5.0	50.5	7.6	310	430	6.47
	9h	1,800	1.0	10.0	40.3	7.9	92	710	3.22

4. 作業員被ばく評価

今回、実証試験を実施した場所は、浪江町の居住制限区域も解除された区域であった。既に除染済みで、空間線量も0.11~0.35 μ Sv/h程度と低かった。

作業中は、ポケット線量計を体幹部に装着し個人の積算線量当量を日々測定した。その結果、線量等量は0.3~1.7 μ Svと問題ない値であった。

今回の実証場所は、制限区域外で問題区域であったが、制限区域内など、実用レベルでは今回提案している処理システムは1年間24時間の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。

5. まとめと課題

(1) まとめ

①有機物分解処理

・促進酸化処理による有機物の分解率は、目標80%以上を達成するための必要オゾ

ン量（TOCで1mg分解するために必要なオゾン量）を確認した。また、オゾンと過酸化水素の添加量の最適比が15～20mol%であることが確認できた。したがって、実用化の際に工期と反応時間の設定から時間当たりのオゾンオゾン発生量（g/h）等のオゾン発生器の仕様が決定できる。

- ・難分解性有機物（フミン酸等）に比べて、除去土壌の土質改質で使用されている高分子系土質改質剤（SAP含有）は、容易に酸化分解できた。これより、分級物の再生利用においての品質などへの影響は除外できることを確認した。
- ・LC-OCD分析結果より、高分子有機化合物の分解から始まり、低分子有機物となる。次にフミン酸類が分解され、フミン酸崩壊物質を経由し、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。

②固液分離機による分級処理と脱水処理

- ・令和3年度の実証事業での課題であったコンタミに対して対策を実施した結果、物質収支も誤差も小さく、コンタミを改善できたことを確認した。
 - ・減容率と除染率の最大は、減容率69.5%、除染率68.5であった。粒子径分布からは20 μ mで精度良く分級処理ができていたが、除染率が目標に未達であった原因は、土壌に含有する粘土鉱物（黒雲母等）に選択的に放射性Csが吸着することで分級物の放射性Cs濃度に下限値がある可能性が考えられた。したがって、土壌Cのような高濃度Cs含有土壌での検証が必要である。
 - ・減容率と除染率の目標値の達成および脱水処理の処理水の排水基準に適合するためには、有機物の分解率が80%以上とすることが必要であることが確認できた。
 - ・脱水処理は、回収された脱水粘土の含水量はフィルタープレスと同等の含水量となっており、普通ダンプで運搬できる土質性状であった。したがって、フィルタープレスが必要ないことを確認した。
- 以上より、1年間24時間の連続処理運転が可能となる。また、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（被ばくリスク低減等）が図れる。

（2）今後の課題

①有機物分解処理

- ・中間貯蔵施設に保管している放射性Cs濃度が高濃度の土壌Cに対して、促進酸化法によるオゾン/過酸化水素の添加量の最適比や、TOC1mg分解するための必要オゾン量の検討など、実除去土壌への適用性の確認が必要となる。
- ・実用レベルでの密閉式反応槽の設計、特にエジェクターの仕組みが課題となる。

②固液分離機による分級処理

- ・中間貯蔵施設に保管している放射性Cs濃度が高濃度の土壌Cを用いた分級処理により、除染率が目標を達成できるか確認する。
- ・除染率の目標達成のために、黒雲母濃度と放射性Cs濃度の関係の確認が必要。
- ・従来の高度分級A、Bと分級点・有機物分解の有無の違いがあり、直接の比較ができないため、促進酸化法による有機物の分解処理後の固液分離機を用いた分級点75 μ mの実証との比較も必要となる。

実施代表者：早稲田大学									
実証テーマ名：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									
<p>概要：中間貯蔵施設内では、多くの除去土壌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土にはポリマー成分が残留し、放射性物質濃度が高く、軟弱化する傾向が認められる。下記の2つの技術を用いて、回収粗粒土の放射性物質濃度低減、締固め強度の改善を図り、再生土の品質向上を目指した。</p> <p>①湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減</p> <p>②吸水性固化材による再生資材の強度向上</p>									
<p>実施内容：</p> <p>① ラボ試験：容量5Lの加圧浮上試験機を使用して基礎的試験を実施し、除去土壌を処理するための制御条件を検討した。強熱減量測定、示差熱分析等により加圧浮上処理による有機物質の分離効果を確認した。</p> <p>② 現地試験：放射性物質を含む土を3種採取し、加圧浮上処理による放射性物質濃度の変化を分析した。また、採取土から得た回収粗粒土、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を実施した。</p>									
<p>技術概要：</p> <p>① 湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減</p> <p>回収粗粒土からポリマー成分、付着した微細土粒子を除去すれば放射性物質濃度を低減可能であると考えられる。本実証では湿式比重選別の一種である加圧浮上法を適用した試験を行った。加圧浮上法は、空気と水を共存させた状態で加圧し、水中に空気を過飽和溶解させ、その後減圧することで発生する直径100 μm 程度の気泡を利用して、比重の小さい有機物などを浮上させ分離する原理である。</p> <p>② 吸水性固化材による再生資材の強度向上</p> <p>ペーパースラッジ焼却灰を基材とする、高い吸水性をもつ吸水性固化材を利用して強度改良試験を実施した。この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困難な有機物質を含む土の固化処理に有効である。また、改良土は弱アルカリ性となり周辺地盤への影響が少ない特徴を有している。</p> <div data-bbox="957 1008 1356 1344" data-label="Diagram"> <p>図1 加圧浮上法によるポリマー成分分離のイメージ図</p> </div> <div data-bbox="877 1388 1356 1702" data-label="Figure"> <p>泥土強熱減量：22.6% 泥土含水比：300.6%</p> <table border="1"> <caption>有機質土改質コーン指数 (kN/m²) vs 養生時間 (分)</caption> <thead> <tr> <th>養生時間 (分)</th> <th>吸水性改質剤 (400kg/m³)</th> <th>生石灰 (400kg/m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30分後</td> <td>~300</td> <td>~200</td> </tr> <tr> <td>24時間後</td> <td>~1600</td> <td>~600</td> </tr> </tbody> </table> <p>図2 吸水性固化材による有機汚泥改質試験例</p> </div>	養生時間 (分)	吸水性改質剤 (400kg/m³)	生石灰 (400kg/m³)	30分後	~300	~200	24時間後	~1600	~600
養生時間 (分)	吸水性改質剤 (400kg/m³)	生石灰 (400kg/m³)							
30分後	~300	~200							
24時間後	~1600	~600							

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

現地試験における加圧浮上処理沈殿物の放射性物質濃度は処理前の土壌から概ね30%以上の低減率を示し、設定目標を達成した。処理により土壌中の有機物質、微細土粒子が分離し、放射性物質濃度は浮上物・懸濁物に濃縮する効果を確認した。

② 吸水性固化材による再生資材の強度向上
養生日数3～7日の強度試験結果において、全サンプル土壌について高炉セメントB種より吸水固化材の改良効果が高い結果となった。懸濁液pH測定、有害物質の溶出試験結果から、環境調和性に優れており、経済性についても当初目標である固化材コスト3,000円/m³以下を達成した。

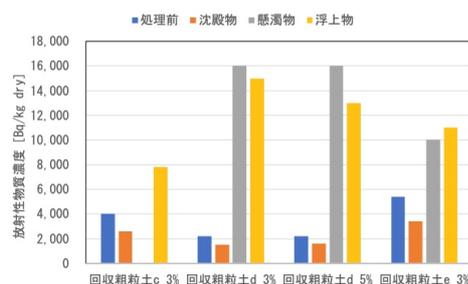


図3 加圧浮上処理による放射性物質濃度の変化

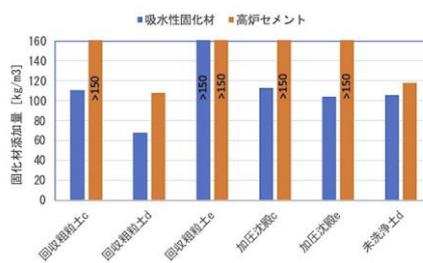


図4 養生7日800 kN/m²改良添加量の比較

技術等の評価：①湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減

加圧浮上処理沈殿物の放射性物質濃度は処理前の回収粗粒土から概ね30%以上低下し、設定目標を達成した。沈殿物から20μm未満の土粒子が除去されており、微細土の分離技術としても有効な結果を示した。

② 吸水性固化材による再生資材の強度向上

養生日数3～7日で高炉セメントB種より強度改良効果が高く、経済性に優れる結果となった。また、有害物溶出など環境調和性についても良好な評価結果となった。

作業員被ばく量評価：回収粗粒土の処理を行う本技術では、扱う土壌の放射性物質濃度は1万Bq/kg程度と予想される。加圧浮上処理、吸水性固化材による固化処理とも最大年間被ばく量は0.74mSVと推定され、安全性に問題ないと判断される。

コスト評価：加圧浮上処理コストは回収粗粒土処理費（有姿）21,000円/トン。吸水性固化材材料コスト：養生7日800kN/m²、1,260～1,640円/m³

歩掛り（作業人工、作業速度等）：プラント運用8名、管理者2名、処理量105トン/日とした

コスト評価条件：1日当たり7時間作業、月22日、5ヶ月間で1万トンを処理。主要構成機器は、土壌供給装置、加圧浮上装置、凝集沈殿水処理設備、脱水装置等である。ランニングコストとして、燃料費、凝集剤、用水費等を計上した。

安全性の評価：湿式処理であるため、放射性物質を含む粉塵が飛散せず、適切な保護具着用して作業をすれば、被ばくに対する安全性を確保することができる。

試験場所：

ラボ試験：東京都 早稲田大学
現地試験：福島県内

除去物保管場所と保管状況：

採取土壌：地権者と協議して採取場所に戻し処理をした
廃液：産廃業者により適正に処分

1. 試験の目的

(1) 背景と取組み

平成 30 年 10 月時点で推定された除去土壌、土壌 C の物量は 133.7 万 m^3 である。現在、中間貯蔵施設内で 200mm ふるいを用いた異物除去が行われており、高含水な除去土壌を分級するために、高吸水性ポリマーなど有機成分を含む改質材が除去土壌に添加されている。改質材を添加した除去土壌は、湿式分級後もポリマー成分が残留して放射性物質濃度が高くなり、高含水で軟弱化する傾向がある。このような課題に対応し、再生土の品質向上を図るため、下記技術の実証を行った。

① 湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減

本実証では湿式比重選別的一种である加圧浮上法を適用して試験を行った。加圧浮上法は、空気と水を共存させた状態で加圧し、水中に空気を過飽和溶解させ、その後減圧することで発生する直径 100 μm 程度の気泡を利用して、比重の小さい有機物などを浮上し分離する原理である。

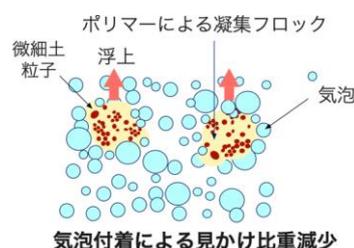


図 1-1 加圧浮上法によるポリマー成分分離のイメージ図

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し、高い吸水性をもつ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困難な有機物質を含む土の固化に有効であり、また、改良土は弱アルカリ性となり、周辺地盤への影響が少ない特徴を有する。

泥土強熱減量 : 22.6% 泥土含水比 : 300.6%

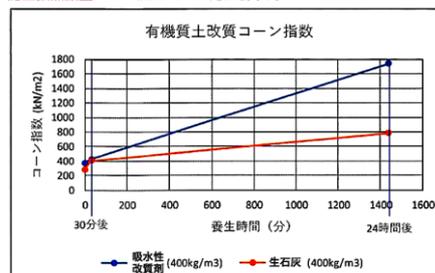


図 1-2 吸水性固化材による有機汚泥改質試験例

(2) 提案技術の目的

湿式分級後の回収粗粒土を加圧浮上法で処理することにより、再生土の放射性物質低減、有機物質除去による改質を図ることを目的とする。

分級後の再生土はポリマー成分の残留により、締固め強度が不足する恐れがある。吸水性固化材を用いて、低コストで再生土の締固め強度を改良することを目的とする。

(3) 成果目標

① 湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減

改質材由来のポリマーを加圧浮上法で除去し、湿式分級により得られた回収粗粒土の放射性物質濃度をさらに 30 %以上低減することを目標とする。

② 吸水性固化材による再生資材の強度向上

再生土の強度改良に使用する固化材コスト 3,000 円/ m^3 以下を目指す。

2. 試験の内容

(1) 試験のフロー

試験のフローを図 2-1 に示す。

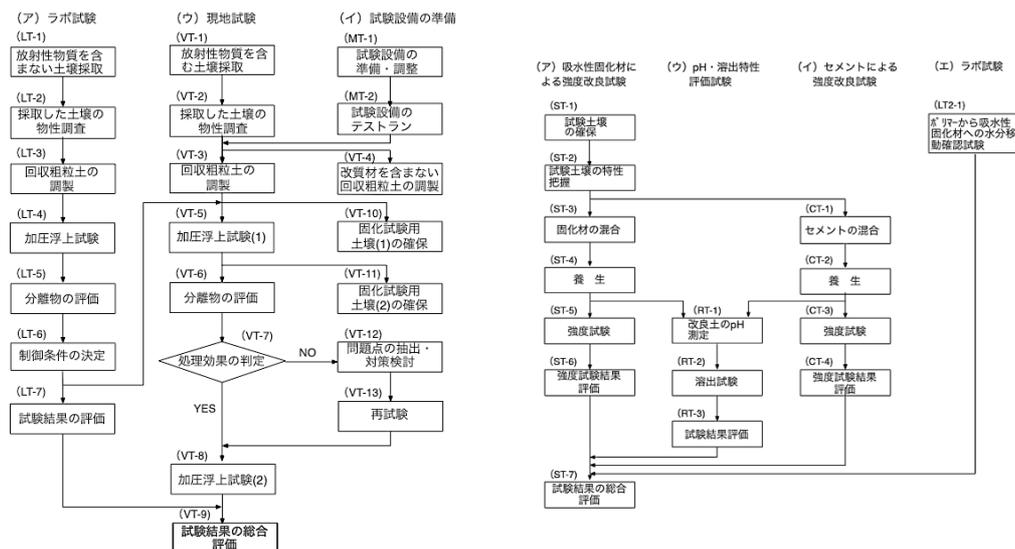


図 2-1 試験の進め方（左：湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減、右：吸水性固化材による再生資材の強度向上）

(2) 使用した設備、機器等

主要設備、機器等を表 2-1 に示す。

表 2-1 主要設備、機器

名称		主な仕様	単位	数量
湿式分級装置	駆動ポンプ	最大 14.7 MPa、110 L/min	式	1
	解砕用エジェクター	Φ 60.5、180 × 950 × 120		
	振動ふるい	網目 20 mm 1 段		
	振動ふるい	網目 0.075 mm、2 mm 2 段		
水中ポンプ		Φ 50mm、200 V × 0.75 kW × 0.18 m ³ /min	台	2
水槽（廃液貯留用）		容量 10 m ³ 、鋼板製	台	1
水槽（廃液貯留用）		容量 5 m ³ 、鋼板製	台	1
発電機		75 kVA、ディーゼル	台	1
粒度分布測定器		堀場製作所製 LA920	台	1
揺動型ふるい振とう機		0~1400 rpm(50 Hz)、100 W	台	1
コーン貫入試験機		JISA1228	式	1
加圧浮上試験装置（ラボ試験用）		浮上槽 4 L、圧力 0.1~0.6 MPa、流量 0.4 L/min	式	1
加圧浮上試験装置（現地試験用）		浮上槽 60 L、圧力 0.1~0.6MPa、流量 26L/min	式	1

薬剤は、酸化剤として次亜塩素酸ナトリウム、アルミニウム系無機凝集剤を使用した。

(3) 試験の実施場所

- ①ラボ試験 東京都（早稲田大学リサーチイノベーションセンター）
- ②現地試験実施場所 福島県

(4) 試験の実施要領

- ①試験実施体制：試験実施体制は業務管理者の下、主任技術者、照査技術者、研究員(3名)と協力会社（松蔵技建(株)、ジャイワット(株)）で構成した。業務担当を表 2-2 に示す。

表 2-2 業務担当

事業者	業務内容
早稲田大学	総合監理、試験計画立案、加圧浮上ラボ試験、現地試験、試験結果の解析、取りまとめ
松蔵技建株式会社	現地試験、プラント運転、プラント試作、試験作業の補助業務、放射線管理者の配置
ジャイワット株式会社	吸水性固化材による再生土強度改良試験

- ②試験の実施方法：試験は図 2-1 試験の進め方に従い実施した。

3. 試験結果

(1) ラボ試験

図 3-1 に示した加圧浮上試験装置を用いて 2 種の土壌（粘性土、細粒分 34% を含む砂質土）を用いて加圧浮上試験を実施した。試験では加圧水圧力、固形分濃度などを変化させた。また、改質材の変更、酸化剤（次亜塩素酸ナトリウム）を添加した試験についても実施した。

表 3-1、図 3-3 に試験結果例を示した。試験結果が示すように、改質材を含む回収粗粒土を加圧浮上処理すると、沈殿物の強熱減量が小さく、また、浮上物の強熱減量は大きくなる。このことから処理に伴って、有機物が浮上分離したと考えられた。

図 3-2 にはラボ試験で観察された浮上物の写真例を示した。水面に白濁膜状のポリマー、白色紐状・粒状のポリマー、土壌中の有機物が浮上していることが観察され、土壌中のポリマーなどの軽質物を分離できることを確認した。

ラボ試験結果より、固形分濃度 3～5 %、加圧水圧力 0.45 MPa 以上の条件

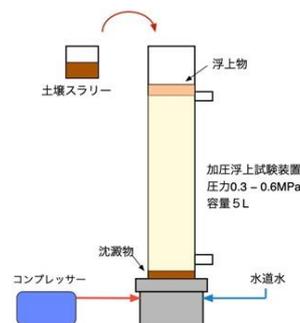


図 3-1 ラボ試験加圧浮上装置図



図 3-2 加圧浮上試験水面写真

で、土壌中の有機物分離が可能であると判断した。また、酸化剤、次亜塩素酸ナトリウムの添加では、沈殿物の強熱減量が低下し、浮上物重量が増加する効果が確認された。

表 3-1 加圧浮上試験による沈殿物、浮上物の強熱減量

土壌種類	試験No	加圧水圧力 [MPa]	固形分濃度 [%]	次亜塩素酸ナトリウム添加量 [%]	浮上物 強熱減量 [%]	沈殿物強熱減量 [%]	改質材
粘性土	1	0.35	1		37.50	11.14	T社
	2	0.60	1		34.78	11.68	〃
	3	0.45	3		25.58	10.70	〃
	4	0.60	3		39.06	12.56	〃
	5	0.60	3		29.53	11.92	〃
	6	0.45	5		25.84	11.09	〃
	7	0.60	5		30.66	11.13	〃
	8	0.60	7		29.49	11.42	〃
	K1	0.45	1		41.38	12.79	K社
	K2	0.45	3		40.00	9.89	〃
	次亜0.1	0.60	3	0.1	30.58	10.07	T社
	次亜0.3	0.60	3	0.3	31.34	9.64	〃
	次亜1.0	0.60	3	1.0	29.00	10.01	〃
	砂質土	S1	0.35	3		22.06	4.04
S2		0.45	3		27.59	3.73	〃
S3		0.60	3		27.22	3.77	〃
S4		0.60	5		29.17	5.62	〃

※次亜塩素酸ナトリウム添加量は、添加土壌の有姿重量に対するCl濃度として設定した

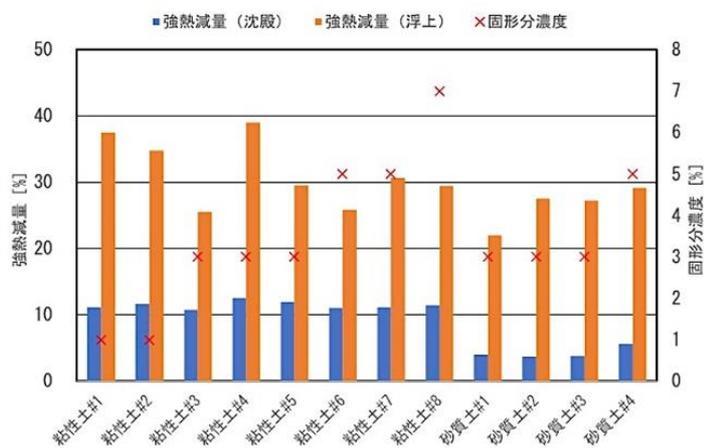


図 3-3 沈殿物、浮上物の強熱減量測定結果 (ラゴ試験)

(2) 現地試験

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5種の土壌を採取し、粒度分布、放射性物質濃度を勘案して試験試料3種を採用した。この特性を**表 3-2**に示した。また、**図 3-4**に粒度分布、**表 3-3**に採取土から調製した回収粗粒土の特性を示した。

表 3-2 採取土壌の特性

採取土	分類名	細粒分含有 [%]	放射性物質濃度 [Bq/kg dry]	含水率 [%]	強熱減量 [%]
c	礫まじり砂質細粒土	64.2	5,700	34.9	19.3
d	礫まじり細粒分質砂	25.1	4,300	32.2	6.7
e	礫まじり砂質細粒土	54.8	5,500	34.3	13.1

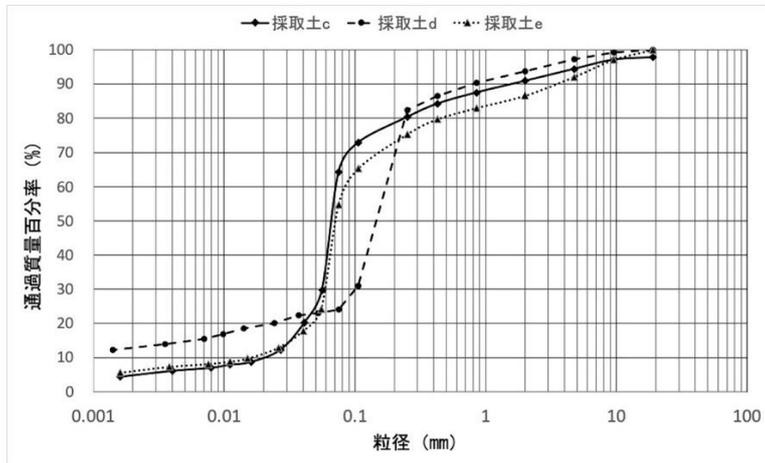


図 3-4 採取土 c、d、e の粒径加積曲線図

表 3-3 回収粗粒土の特性

採取土	放射性物質濃度 [Bq/kg dry]	含水率 [%]	強熱減量 [%]
c	4,000	33~45	17.6
d	2,200	24~32	5.8
e	5,400	37~47	13.1

表 3-5 より回収粗粒土は、湿式分級後も有機物質、放射性物質が残留し、また、高含水な特性であることが分かる。

図 3-5 に現地試験加圧浮上試験装置を示した。現地試験では、ラボ試験で得た制御条件を参考にして、固形分濃度、処理土スラリー注入速度を変化させ、各採取土について加圧浮上試験を行った。加圧浮上試験では、固形分濃度 3~5 重量%、加圧浮上槽滞留時間 4~5 分、加圧水圧力 0.6MPa 等を主な処理条件としてバッチ式試験を行った。

浮上物については、樹脂製容器に貯留後、凝集剤を添加して凝集処理を行い、不織布製フィルターバッグ（網目 25 μ m）にて脱水・回収した。懸濁物は加圧浮上装置の運転を停止した後に、ポンプで排出後に凝集処理し、フィルターバッグにて脱水・回収を行った。沈殿物は下部のバルブより排出し、トレイの中に貯留、水切りを行った後に回収を行った。

代表的な試験結果を図 3-6、表 3-4 に示す。加圧浮上処理により、沈殿物の強熱減量は減少し、浮上物、懸濁物の強熱減量は増加した。処理に伴う有機物質の浮上分離が生じた。

また、沈殿物の放射性物質濃度は低下し、懸濁物、浮上物に放射性物質が濃縮する結果となった。試験結果による処理前土壌からの放射性物質濃度低減率は 27~44%の範囲となった。



図 3-5 現地試験加圧浮上装置

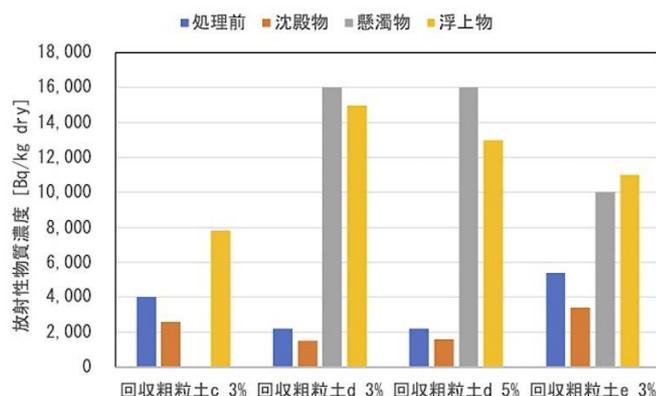


図 3-6 加圧浮上処理による放射性物質濃度の変化（現地試験）

表 3-4 加圧浮上分離物の強熱減量測定結果

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

②吸水性固化材による再生資材の強度向上

現地試験で3種の採取土から得た回収粗粒土・加圧浮上沈殿物に対して、吸水性固化材を用いた固化試験を実施した。また、高炉セメント B 種を用いた比較試験を実施した。

試験結果の一例として、回収粗粒土 c の強度改良試験におけるコーン指数経時変化を図 3-7、目標改良強度を得るために必要な固化材添加量を表 3-6 に示した。他の土壌についても同様に吸水性固化材の優れた効果を確認した。

表 3-5 試験対象土の特性

	コーン指数 [kN/m ²]	含水率 [%]	単位容積質量 [t/m ³]
回収粗粒土c	99.2	44.3	1.460
回収粗粒土d	118.1	27.8	1.710
回収粗粒土e	28.3	43.9	1.495
加圧浮上沈殿c	94.4	35.3	1.595
加圧浮上沈殿e	151.1	38.0	1.590
未洗浄土d	80.3	36.2	1.680

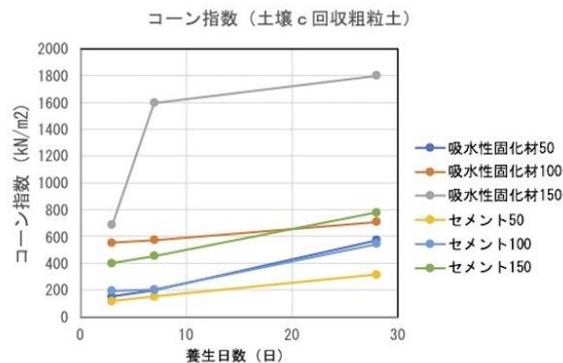


図 3-7 改良土コーン指数の変化 (回収粗粒土 c)

表 3-6 回収粗粒土 c 改良必要添加量

目標強度	必要添加量 [kg/m ³]					
	400 kN/m ²			800 kN/m ²		
養生日数	3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
吸水性固化材	81	77	32	-	111	104
高炉セメント	150	139	68	-	-	-

4. 試験結果の評価

(1) 技術の評価

①湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減

現地試験における加圧浮上処理沈殿物の放射性物質濃度は処理前土壌から27～44%低減し、提案技術の有効性を確認した。

②吸水性固化材による再生資材の強度向上

強度試験では養生日数3～7日で高炉セメントB種より改良効果が高く、優れた処理効果を確認した。当初設定目標である固化材コスト3,000円/m³以下を達成し、経済性に優れた結果となった。懸濁pH測定、有害物質の溶出についても良好な試験結果を示した。

(2) コストの評価

①湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減

中間貯蔵施設内で、提案した加圧浮上システムを用いて、処理量105トン/日、1日7時間、月22日、5ヶ月運転の条件で土壌Cを1万トン処理する条件から、土壌1トン(有姿重量)当たりの処理コストを試算した。処理コストは、公共工事単価、機械損料表、建設物価版等の資料により算出した。この結果を表4-1に示す。

表4-1 処理コスト試算
(処理1万トン当たり)

項目	金額
装置設置費	2,400千円
機械損料	91,520千円
ランニングコスト	61,400千円
人件費	19,800千円
諸経費(直接費用の20%)	35,000千円
計	210,120千円
汚染土1トン当たり処理コスト	21,000円

②吸水性固化材による再生資材の強度向上

吸水性固化材材料コスト：養生7日800kN/m²、1,260～1,640円/m³

吸水性固化材材料コスト：養生3日400kN/m²、1,080～2,190円/m³

(3) 安全性の評価

実証試験における各作業時における空間線量、被ばく量を測定し、その結果を踏まえて、提案技術による作業員の被ばく量を推定した。検討の結果、作業員の最大年間被ばく量は0.74mSV/年と推定され、女性放射線業務従事者の基準5mSV/3ヵ月以下であり、安全性に問題はないと考えられる。

表4-2 作業員被ばく量の測定値及び事業における試算値

作業内容	実証試験測定空間線量 [μSV/h]	除染事業における推定値		
		作業時間 [h/月]	推定空間線量 [μSV/h]	被ばく量 [μSV/月]
採取土壌の投入	0.2	154	0.4	61.6
プラント運転	0.05	154	0.1	15.4
沈殿物、浮上・懸濁物汚泥の回収・移設	0.2	154	0.4	61.6
業務管理	0.2	154	0.4	61.6

※作業員最大年間被ばく量：740 μ SV=61.6 μ SV/h \times 12 カ月

5. まとめと今後の課題

(1) 試験結果のまとめ

①湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減

福島県内の粘性土を主とする3種の採取土壌を用いて実証試験を実施した。加圧浮上処理により、処理前の回収粗粒土の放射性物質濃度を30%以上低減することができ、本技術の有効性を確認することができた。

このメカニズムは、処理により土壌中の有機物・微細粒子が浮上分離するためであると考えられる。図5-1にラボ試験における加圧浮上分離物の粒径分布図を示す。また、図5-2に現地試験加圧浮上沈殿物の粒度分布を示した。

現地試験の加圧浮上沈殿物に含まれる20 μ m未満の土粒子の割合はc:2.0 vol%、d:0.2 vol%、e:4.4 vol%となっており、細粒土粒子は加圧浮上処理により浮上分離されていることを確認した。本技術は特に砂質土における処理効果が高く、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。

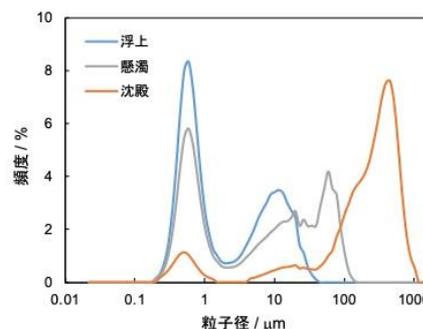


図 5-1 加圧浮上分離物の粒径分布 (ラボ試験、砂質土)

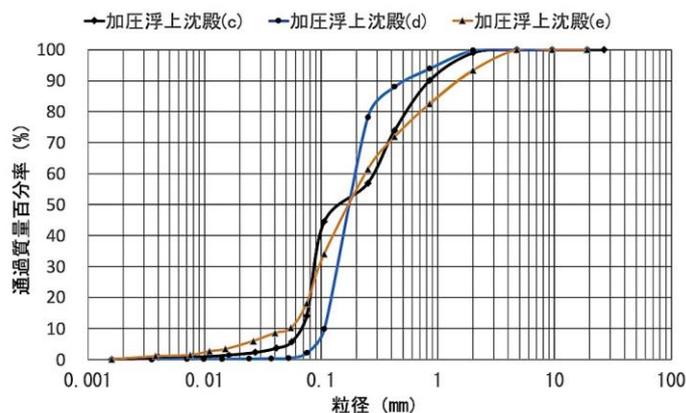


図 5-2 回収粗粒土沈殿の粒径加積曲線

②吸水性固化材による再生資材の強度向上

現地試験の採取土壌から得た回収粗粒土、加圧浮上処理沈殿物など6種の土壌を用いて、吸水性固化剤、セメントを用いて強度改良試験を実施した。図5-3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で、吸水性固化材の必要添加量が高炉セメントを下回る結果となった。回収粗粒土の改良では、強熱減量値が大きい採取土c、eにおいて高炉セメントは添加量150 kg/m³で

も目標強度が得られない結果となった。

養生 28 日のサンプルを用いて、pH 測定、フッ素・六価クロム・シリカの溶出試験、放射性物質の溶出試験を実施した。溶出液の放射性物質濃度は全サンプルにおいて検出限界以下であった。溶出試験では、高炉セメントを使用した改良土で六価クロム溶出量の土壌環境基準超過が散見された。吸水性固化材改質土では懸濁液 pH = 8.4~9.3、高炉セメントでは pH=10.6~11.6 の範囲となり、後者ではシリカの溶出が見受けられた。懸濁液 pH、有害物質の溶出試験結果より、吸水性固化材は環境調和性が高いと評価した。

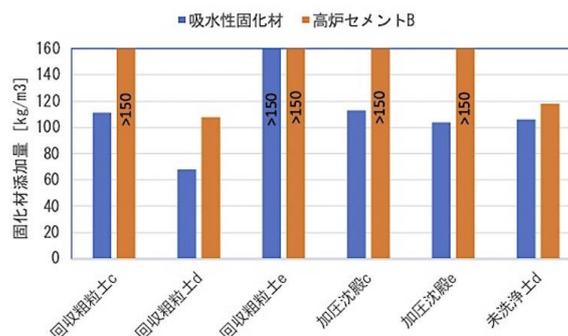


図 5-3 必要添加量の比較 (養生 7 日、目標コーン指数 800KN/m²)

(2) 今後の課題

① 湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減

今回の試験により、除染土の処理に加圧浮上処理技術を適用する有効性を確認した。今後の実用化に向けて、連続処理装置で試験を実施する必要がある。このためには、粒径が 1 μm~2mm の土粒子が混在する泥水を分離することなく、精度良く送水制御が可能なポンプ、泥水・気泡を含む流量の正確な測定など技術的な課題が多い。また、制御に必要なセンサー類を考慮しながら、実験用設備を設計する必要がある。

次に今回の現地試験装置では、加圧水を下方から噴出し、泥水スラリーを上方から注入する形式としたため、噴出孔が閉塞するケースがあった。また、今回の試験装置では、沈殿物の採取は、加圧浮上装置の運転を停止し、懸濁液を小型ポンプで抽水した後に行う必要があった。この間に懸濁している土粒子が沈降し、沈殿物の放射性物質濃度が高くなる影響があったと考えられた。サンプルの採取方法についても今後検討する必要がある。

本実証試験で処理対象とした採取土は森林から採取した粘性土が主であり、技術を実用化するためには、農地由来の土壌など、幅広い土壌を用いて試験を実施する必要がある。

② 吸水性固化材による再生資材の強度向上

吸水性固化材は高含水の土、有機物を含む土の固化処理に優れた効果を発揮し、セメントに匹敵する経済性を有している。また、環境調和性にも優れているため、除去土壌の処理に適した材料であると考えられる。今後は、様々な除去土壌を用いて処理を実施し、評価を重ねていくことが必要である。

実施代表者：J&T 環境株式会社

実証テーマ名：令和4年度除去土壌等の減容等技術実証事業（その8）

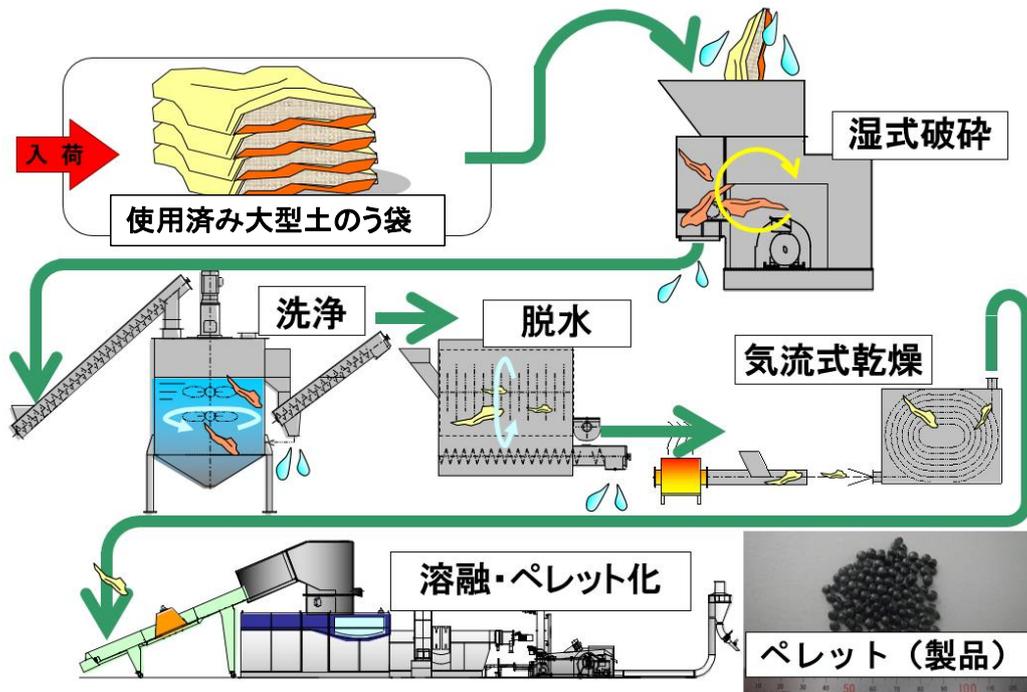
保管大型土のう袋再資源化の技術実証検討

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）や放射能濃度がどの程度か、また簡易な方法で土壌分離・線量低減できるか評価する。

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している。本検討では、低線量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。



当社工場フロー

実証試験の結果：

中間貯蔵施設に持ち込まれた大型土のう袋は、受入分別施設にて、おおよそ2つの方式（カッター式・破砕機式）で、土壌と分離され、袋詰めの上、一時保管されている。本実証事業においては、それぞれの方式で発生した低線量大型土のう袋を利用して、試験を実施した。

大型土のう袋に着する土壌を「乾燥・乾式分離・洗浄」操作で分離することにより、再生プラスチック原料として利用可能性があることが判った。また土壌分離を確実に行うことで、放射能濃度が100（Bq/kg）以下となる可能性も見いだせた。

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による処理性能把握、水洗浄の必要性、高線量大型土のう袋の場合での挙動確認などが挙げられる

技術等の評価：保管大型土のう袋の実態調査、単位操作における土壌・放射能濃度評価

作業員被ばく量評価：試験期間（約3カ月）中被ばく量0（mSv）

コスト評価：

設備 約10億円 運用 約5億円/年

歩掛り（作業人工、作業速度等）：

全体工程を見極めた上で評価予定

コスト評価条件：

6,000t/年（稼働300日）、乾式処理のみ（据付工事まで、建築・土木・受電設備除く）

安全性の評価：設備構成および線量影響を精査の上、評価予定

試験場所（住所）：

JESCO 技術実証フィールド

除去物保管場所と保管状況：

搬出元に返却済み

1. 汚損状況調査

処理対象となる廃大型土のう袋の処理状況、保管状況の確認を目的とした実態調査、および保管大型土のう袋内の内容物および放射能濃度の把握、試験サンプル選定を目的に、汚損状況調査を実施した。

(1) 実態調査

受入分別施設のうち、稼働4カ所で工場調査を行った結果を表1-1に示す。施設での土壌分離が比較的良好で、土のうシート表面に土壌が湿潤状態で付着するものが多かった。土のう破袋方式は、カッター方式と破砕機方式があり、個体差はあるが、カッター方式の汚損程度が比較的軽い状況であった。

試験用には、低線量品かつ破袋方法の異なるサンプルを選定することとし、大熊①工区および大熊③工区から各2サンプル、計4サンプルを技術実証フィールドに搬入した。



図 1-1 大熊①工区処理工程



図 1-2 大熊①工区 土のう袋内容物

表 1-1 各受入分別施設 実施状況

受入分別施設	主会社	線量レベル	大型土のう袋—土壌の分離方法
大熊①工区	鹿島JV	低線量	ワイヤーソーによるカット
大熊②工区	清水JV	高線量	ウォーターカット
大熊③工区	大林JV	低線量	2軸破砕機+バリセパ
双葉①工区	前田JV	高+低線量	破砕機+トロンメル
双葉②工区	大成JV	調査実施なし(事業終了)	

(2) 汚損状況調査

受領した計4サンプルについて、大熊①工区からのサンプルをK-1、K-2、大熊③工区からのサンプルをO-1、O-2とした。各サンプルの重量、表面線量率を表1-2に示す。

また、サンプル内容物を展開調査し、分別した内容について、K-1 を例に表 1-3 に示す。K-1 の場合、外袋と内袋の重量は同程度、分離した土壤類は全体の 2 割程度であった。比較的有姿の袋が多く、封入されていた袋数は、おおよそ 15 袋程度と推定された。

表 1-2 受領サンプルの重量および表面線量率

サンプル	搬入元	数量(kg)	表面線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) ()/バックグラウンド値
K-1	大熊① 工区	200	0.30(0.26)
K-2		178	0.27(0.26)
O-1	大熊③ 工区	256	0.23(0.18)
O-2		218	0.23(0.18)

表 1-3 K-1 内容物調査結果

K-1	外袋	内袋	土壤・石他
重量(kg)	71.6	74.4	40.6
放射能(Bq/kg)	370	1,400	1,500

2. 簡易分離試験

土壤が付着した大型土のう袋から、土壤の分離とそれに伴う放射能濃度変化を、小サンプルで正確に把握する目的で、本試験を実施した。

(1) 重量変化確認

比較的土壤付着量の多い土のう袋シートの一部を、試験用サンプル（B5 サイズ程度）として切り出し、乾燥・人力での乾式分離・水洗浄を行った。

図 2-1 に、内袋サンプルの各工程のシート状態を示した。

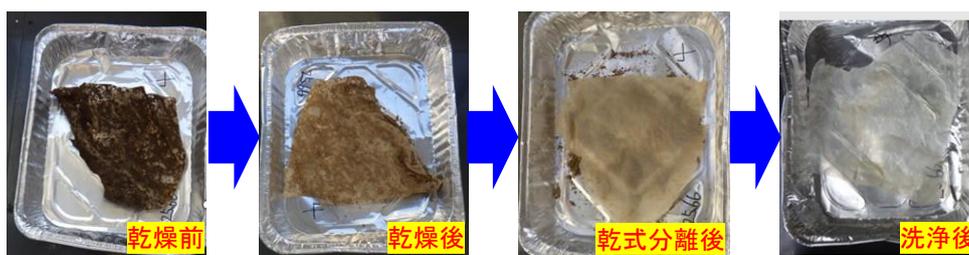


図 2-1 簡易分離試験 状態変化 (内袋)

図 2-2 に、K-1 サンプルの内袋・外袋の重量変化を示した。各 3 サンプルで実施したが、いずれも同様な傾向を示しており、それぞれ重量減少しているが、内袋の重量変化量が大きいことが判った。

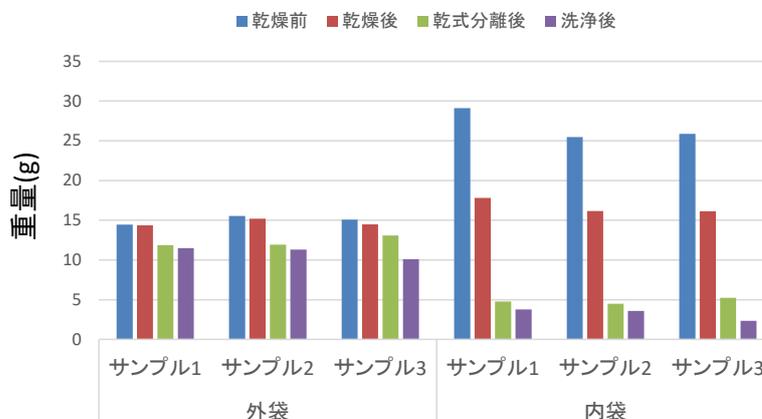


図 2-2 簡易分離試験・重量変化 (K-1)

表 2-1 に、乾燥前大型土のう袋の重量構成比を示す。外袋は、K-1 では 10%程度、O-1 では 45%程度と、土壌付着量に幅があった。

内袋は、土壌を除去することで、当初重量の 10~20%程度となった。

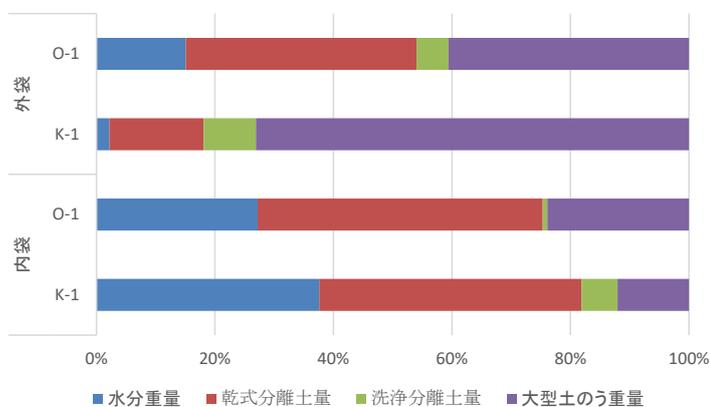


図 2-3 大型土のう袋サンプル重量構成比 (重量変化試験ベース)

(2) 放射能濃度変化確認

表 2-2 に、(1) と同処理した場合の放射能濃度変化結果を示す。

操作が進むと、大型土のう袋の放射能濃度値が減少した。放射能は土壌由来であり、土壌を落とすことで線量低減につながると推定された。

また水洗浄で土壌を極力取り除くことで、100(Bq/kg)以下まで低減するサンプルも見られた。

表 2-2 放射能濃度結果

サンプル	形状	NO	放射能濃度(Bq/kg)			
			乾燥土壌	乾燥後 大型土のう袋	乾式分離後 大型土のう袋	洗浄後 大型土のう袋
K-1	外袋	1	1,400	470	210	<100
		2	1,800	530	180	<94
		3	1,000	240	150	<82
	内袋	1	3,200	1,000	360	<92
		2	2,600	1,700	400	110
		3	3,100	650	330	<82
O-1	外袋	1	1,500	600	460	<57
	内袋	1	2,000	1,500	120	<58

3. 再生品質評価

再生プラスチック原料として利用可能な土のう袋土壌付着率の確認、および放射能濃度からの土壌付着率算出を目的に、以下試験を行った。

(1) 浮上試験

弊社工場では、廃大型土のう袋を破砕した後、洗浄水槽内で洗浄・比重差分離し、浮上したものを再生プラスチック原料として利用している。

再生利用できる土壌付着率を確認する目的で、上水での浮上試験を実施した。

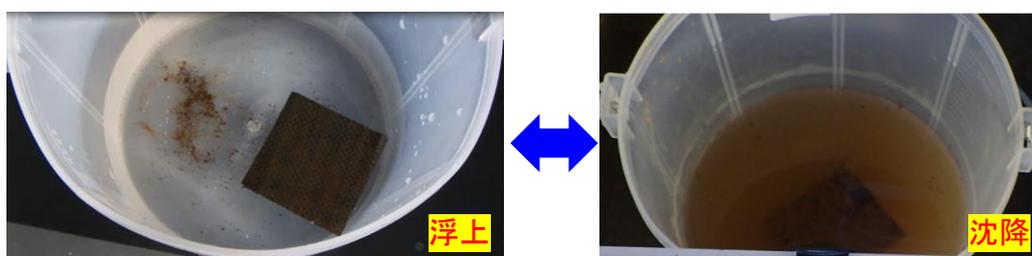


図 3-1 浮上試験

表 3-1 は、新品袋にサンプル土壌を付着させた場合（試験その 1）、および新品袋・サンプル内外袋を同寸大に切り出し、新品とサンプルとの重量差を土壌付着量とした場合（試験その 2）で試験を行った。

両試験結果より、土壌付着率が 30%程度までであれば浮上することから、そのレベルを再生利用可能と判断した。

表 3-1 浮上試験

その 1：新品大型土のう袋+乾燥土壌 その 2：新品同寸大型土のう袋

	No	新品 (g)	土付着後 (g)	実付着量 (g)	土付着率 (%)	結果		No	新品 (g)	実フロン (g)	土付着量 (推定g)	土付着率 (推定%)	結果	備考
外袋 (帯)	1	3.58	10.56	6.98	57	沈降	外袋	0.71		1.62	0.91	56	沈降	
	2	4.75	9.39	4.64	40	沈降				0.96	0.25	26	浮上	もみ後
	3	4.66	8.3	3.64	34	沈降				1.07	0.36	34	浮上	
	4	4.59	6.73	2.14	24	浮上				0.95	0.24	26	浮上	
	5	2.83	4.05	1.22	22	浮上				1.6	0.89	56	中間	
外袋 (シート)	1	0.69	2.38	1.69	62	沈降	内袋	0.46		1.32	0.61	46	浮上	
	2	0.73	2.13	1.4	56	沈降				1.01	0.55	54	沈降	
	3	0.69	1.37	0.68	40	沈降				0.58	0.12	21	浮上	もみ後
	4	0.71	1.65	0.94	47	浮上				0.84	0.38	45	沈降	
	5	0.69	1.29	0.6	37	浮上				0.48	0.02	4	浮上	もみ後

(2) 放射能濃度と土壌付着量相関試験

放射能は土壌由来と推定されたため、放射能濃度から土壌付着率が判定できるか確認した。

ゲルマニウム半導体検出器用の測定容器に、新品大型土のう袋（内袋・外袋）と O-1 から採取した乾燥土壌（放射能濃度測定済み）をそれぞれ重量測定して同封し、放射能濃度測定を行った。

土壌付着量の算出式は、以下の通りである。

$$\text{土壌付着量(計算値)}(g) = \frac{\text{大型土のう袋放射能濃度}(Bq/kg)}{\text{乾燥土壌放射能}(Bq/kg)} \times \text{全体重量}(g)$$

放射能測定値から土壌付着量を計算した値と、実際の重量測定値との相関を図 3-2 に示す。両数値は比例関係となっており、放射能濃度から土壌付着量をほぼ推定可能と考える。

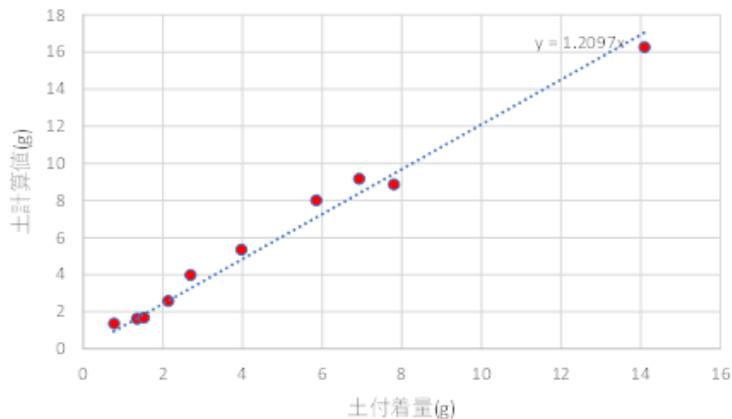


図 3-2 土付着量と計算値（放射能濃度から算出）との相関

(3) 簡易分離試験結果の評価

表 2-2 の簡易分離試験における放射能濃度変化を、図 3-2 の相関結果を利用して、再利用評価した結果を表 3-2 に示す。なお洗浄後大型土のう袋の放射能濃度は定量下限値以下の場合、100 (Bq/kg) として評価した。土壌付着率 30%を目安に評価すると、

- ・乾燥後：一部使用可能
- ・乾燥+乾式分離後：ほとんど使用可能
- ・洗浄後：使用可能

という結果となった。

表 3-2 放射能濃度変化結果 (土付着量試算評価)

		NO	放射線量(Bq/kg)			土壌付着率(% 計算値)			
			乾燥 土壌	大型土のう袋		大型土のう袋			
				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%
O-1	外袋	1	1,500	600	460	<57	40%	31%	7%
	内袋	1	2,000	1,500	120	<58	75%	6%	5%

4. 小型装置試験

乾式分離操作および洗浄操作を、実機を想定した小型試験装置を用いて実施した。

(1) 小型トロンメル試験

土壌付着量の多いサンプルを B5 サイズに切り出し、乾燥後、5 枚を 1 セットとして、トロンメルに 3 回繰り返し投入した。トロンメルに投入する際にサンプルが変形し、表面に付着した土壌が落ちる場合がほとんどで、回転時における土壌分離量は軽微であった。

図 4-2 に示すように、投入後の大型土のう袋放射能濃度は、100 (Bq/kg) 以下を達成できなかった。図 4-3 に示す土壌付着率については、内袋は再生可能レベルとなった。

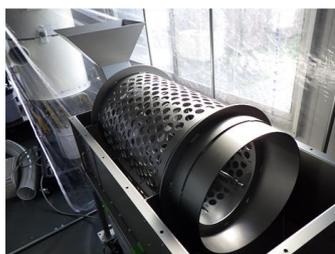


図 4-1 小型トロンメル装置 (15rpm φ400×L800)

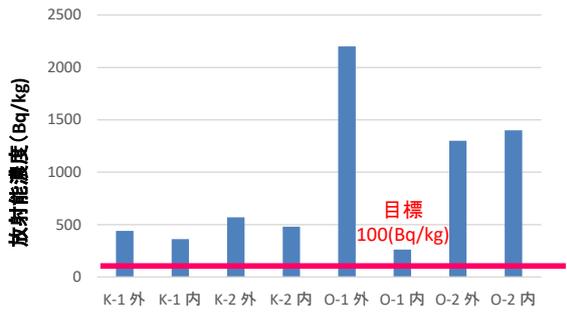


図 4-2 トロンメル試験 放射能濃度結果

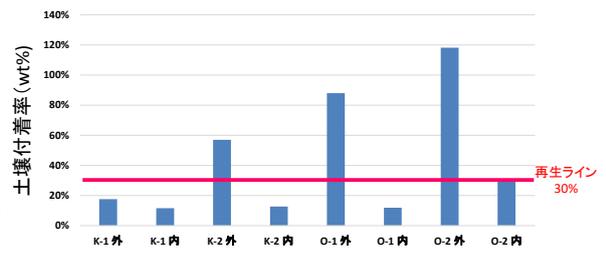


図 4-3 トロンメル試験 土壌付着率試算

(2) 振動ふるい試験

土壌付着量の多いサンプルを 5cm 角に 15 枚切り出し、乾燥後、1cm 径のタッピングボール 16 個と一緒にセットし、1 分・5 分・10 分間でふるい操作を行った。

投入後の放射能濃度を計測した結果を図 4-5 に示す。トロンメル試験同様、100(Bq/kg)は達成できなかった。図 4-6 に示す土壌付着率では、内袋は一部が再利用可能なレベルだが、外袋は、ふるい振動力では分離が進まず、追加の剥離操作が必要と思われた。



図 4-4 振動ふるい装置 (径 φ500mm 目開 7.266mm)



図 4-5 ふるい試験 放射能濃度結果

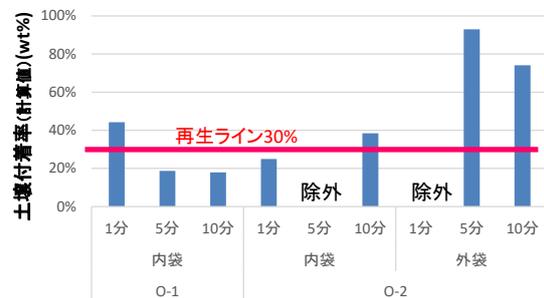


図 4-6 ふるい試験 土壌付着率試算

(3) 洗浄試験

大型土のう袋表面に付着する土壌を、水のみ回転流で洗い流す洗浄試験を行った。

前処理条件（乾燥前、乾燥後、乾燥+乾式分離）を変えたサンプル（B5サイズ程度）を作成し、1枚ずつ水流中につけ洗いし、洗浄効果を検証した。

図4-7に洗浄試験装置を示す。攪拌水量を60L一定、攪拌機300rpm（攪拌動力0.07kW）一定とした。



図4-7 洗浄試験装置



図4-8 洗浄試験状況

洗浄・乾燥後の各大型土のう袋の放射能濃度測定結果を図4-9に示す。ほとんどのサンプルで100（Bq/kg）を達成できなかった。乾燥前品、乾燥後品は、洗浄後も表面に土壌が残り、また乾燥+乾式分離品でも、わずかながら表面に土が残る結果となった。洗浄には水流による押し流しに加えて、表面を擦り取る洗浄（例えばもみ洗い）が必要と思われた。

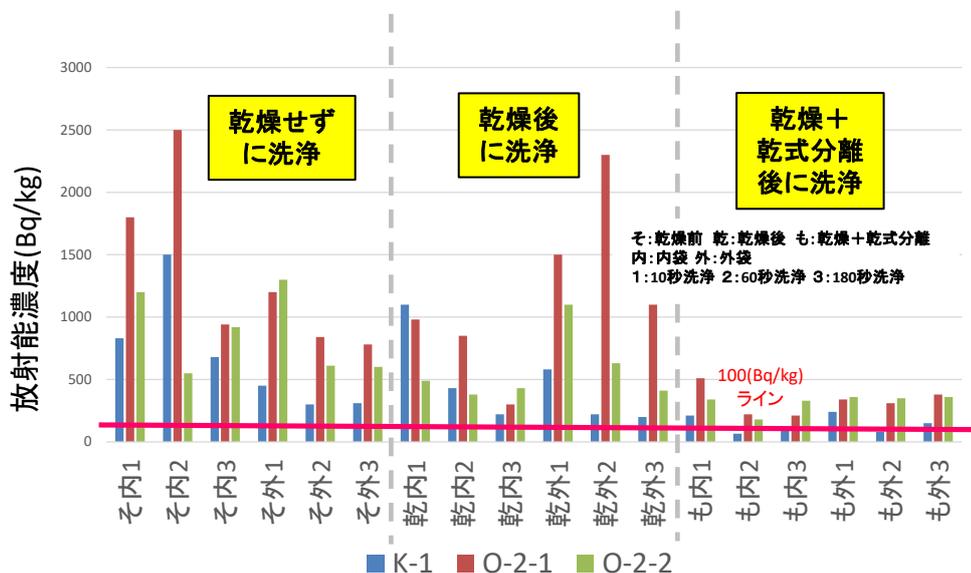


図4-9 洗浄試験 放射能濃度変化

乾燥土壌の放射能濃度から、各大型土のう袋の土壌付着率を試算した結果を図4-10に示す。乾燥前品、乾燥後品でも再生利用可能な土壌付着率30%を達成する場合もあるが、乾燥+乾式分離品になると再利用はほぼ問題ないと考えられた。

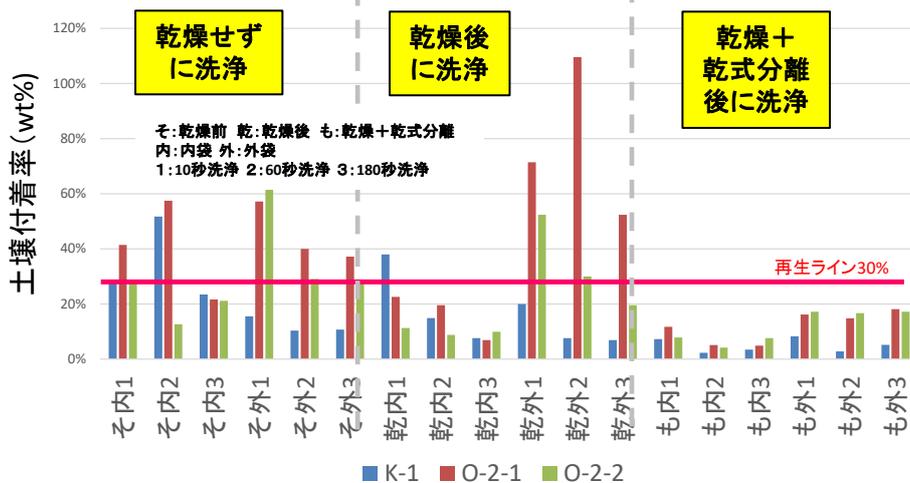


図 4-10 洗浄試験 土壌付着率試算

5. 試験結果の評価

(1) 物質収支

個体差はあるが、内袋に泥土分がフレコン重量比で多く残留する傾向にあった。表 2-1 の結果から、サンプル評価ではあるが、内袋では乾燥操作により全重量比 30~40% が水分として除去され、乾式分離操作で土壌が全重量比 40~50%、洗浄操作では数% 除去された。外袋は内袋ほど土壌付着量が多くないため、乾燥操作で全重量比 2~15%、乾式分離で 15~40%、水洗浄で 5~9% 除去された。

人力による小型サンプルでの結果であり、機械的な大規模処理の場合は、さらに装置設定、処理フローの検討が必要である。

(2) 放射エネルギー収支

大型土のう袋の放射能濃度は土壌由来であることを、3. (2) 放射能濃度と土壌付着量相関にて検証した。ここで土壌の物質収支と放射エネルギー収支は、一定の比率で相関がみられたことから、(1) の物質収支結果を用いて、土壌重量収支を放射線量収支として評価した。

処理前後の大型土のう袋放射能濃度を 1,000Bq、100Bq と仮定した場合の放射エネルギー収支例を図 5-1 に示す。

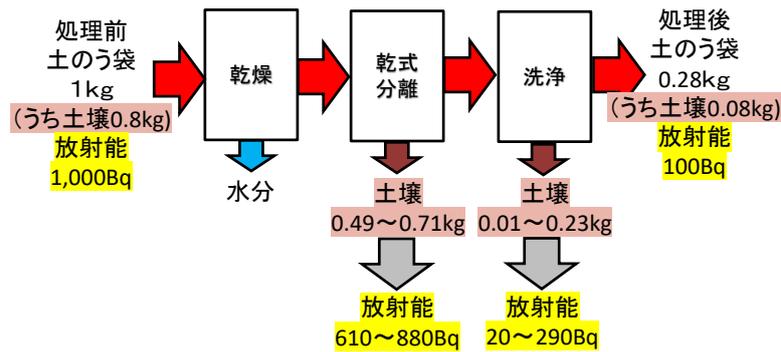


図 5-1 洗浄試験 放射能濃度変化

(3) 空間線量率評価

使用した大型土のう袋サンプルは、持込時の表面線量率がバックグラウンド比+0.04~0.05 ($\mu\text{Sv/h}$) であり、作業環境測定による線量変化は期間中ほぼ見られなかった。

6. 再生利用の評価

プラスチック再生利用の観点で評価した場合、各サンプルの放射能濃度から推測した土壌付着率は、乾燥+乾式分離で、多くが 30%以下になった。さらに洗浄操作を加えることでほとんどの土壌付着率が 30%以下となり、再生原料として利用可能と考えられる。

一方、放射能濃度の観点で評価した場合、低濃度品では、土のう袋表面から土壌を丁寧に擦り取りながら、乾燥+乾式分離+洗浄すると 100 (Bq/kg) 以下になる可能性が示されたが、付着量や分離のばらつきを考慮すると、300~500 (Bq/kg) 程度と想定された。

7. コスト評価

年間 6,000t 処理 (20t/日) として、乾式処理のみとした場合の設備コストは約 10 億円 (据付工事まで、土木・建築・給排水・受電設備を除く)、年間運用コスト約 5 億円と推定した。今後の検討にあたっては、乾式処理での性能確認、洗浄工程の要否、高線量品・高汚損品の条件をふまえた追加設備の要否、工場の立地条件を考慮した上でのユーティリティコストなどを精査していく必要がある。

8. 作業員被ばく評価

実証試験期間を通して、対象者 6 名の被ばく線量は 0(mSv)となっている。

以上