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。



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載荷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。

是在	(古田++*)	主な測定項目			
刘家	使用材料	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		
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 	・粉じん濃度 ・大気中放射性		
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 ・(促進載荷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 	物質濃度 (盛土解体時)		
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 ・表面状能観察 			
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	13年度(その2)		

表1 試験施工等の試験ケースと主な測定項目

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):	除去物保管場所と保管状況:
福島県双葉郡大熊町	技術実証フィールドヤード No.4 付近の管理道路に溶融
「技術実証フィールド」、	スラグを配合した路盤材等を大型土のうの荷姿で保管。
東京都清瀬市、千葉県佐倉市	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)

		X			
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	á 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	引いた

表	1 -1	実施内容と成果日	緸
- 12			7775

(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。

	1 - 2	長	ご提供し	いただいた	溶融スライ	ゲ、除っ	も土壌一間	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	ちり	530 ²⁾	118	盛土、路盤、アスファルト舗装	双葉町仮設焼却
スラグ	רי נש	275 ³⁾	12	アスファルト舗装	第一施設 生成品
表面溶融炉	なし	999 ⁴⁾	123	盛土、路盤	双葉町仮設灰処理
スラグ	あり	1,0002)	0.9	コンクリート	第一施設 生成品
除去土壤	_	3,0002)	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。

	目的				
伸 垣物寺	個別	共通			
盛土	 ・長期的な盛土の安全性、安定性の評価 ・浸出水の放射性物質濃度等の評価 	 構造物構築時・解体時の作業員 被ばく量、粉じん発生量の評価 			
舗装道路	 ・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 	 ・供用時の空間線量率の評価 			
コンクリート供試体	・屋外暴露試験による供試体の耐久性の評価				

表 2-1 試験施工等の目的一覧表



表 2-	-2 舗装道路	試験の仕様-	-覧表	(設計交)	夏区分:N1 ¹⁾)
工区 No.	1 工区	2 工区	3 工区	(対照区)	4 工区	5 工区
アス 表層 t=4cm	シャフ	ト炉	7=	ラグ 0%	シー	ャフト炉
ファ 密粒度 (13)	配合率	²⁾ 10%	~ / /	/ / 0/0	配	合率 15%
ルト 基層 t=5cm (20)	シャフ	ト炉	スラ	ラグ 0%	シー	ャフト炉 へ変 150
甜袋 租私度(20)	配合学	10%			配合	日平 15% まご次配に異
路盤:t=10cm	ンヤノト炉 置換率 ²⁾ 100%	衣田俗醜炉 置挽索 75%	スラ	ラグ 0%	ンヤノト炉 置換率 100%	衣田俗醜炉直
						沃平 / 5 /6
		現場 CBR8%」	以上 (甲1	生固化材に。	よる地盤改良)	
 1) 1日1万向あた(2) 配合率・置換率(配合率(%) =糸 置換率(%) = ス)の大型交通量 は、室内で実施 町骨材と置換した スラグ重量/スク	15 台末満 する基準試験約 こスラグの重量 7 リーニングス	詰果に基 ≧)/全' <+スラ	づき設定 骨材質量× グ重量×10	100 (%) 00 (%)	
(2)実施状況(図 2-4 参照)					
(試験盛	と土供用時の物	犬況)	(试験盛土	解体時の状	 況)
 (アスファルト舗 (3) モニタリン ①空間線量率 技術実証フィ 試験盛土の様 その空間線量率 	装品質確認れ 図 2-4 ヨ び結果の概要 イールドヤー 構築に伴い、キ 率は低下した料	��況) ■ニタリンク ド No.4 で測 マード内の空 犬態で推移し	(アス: 「等実施 に に した に した した した 二 、 広 土	ファルト領 マ間線量 空間線量 率も上昇 二解体完了	 ・ ・	の状況) の状況) に示す。 土の施工により、 傾向を示した。
10 試験盛土②着手		-	-ヤードNo.4	104 -	討論成十	(注) 空間線量率け
0.8 (14/\ST) (14/\ST) (14/\ST) (1 (1 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	注①着手 験盛土完成 覆土完了)	降雨に伴う 空間線量率の低下 マード Nc マード Nc	覆 盛 上 材搬 0 ⁽¹ 、1 ⁽¹⁾	土搬出開始(1) 上村搬出開始(1) 上村搬出開始(1) 山完了(1/24) 敷鉄板搬出(2)	/13) //18) //18)	メ下の要因が影響しているものと推察される。 因子 ヤード No.4 中央部 成正 ないのと推察される。 取子 シャード 中央部 成正 ないのと推察される。 取子 シャード 中央部 成正 ないののと前ののと推察される。 取扱数数 ないのののののののののののののののののののののののののののののののののののの
		日付				兼
	×	2-5 空間	線量率	測定結果		



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、

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				
<u> かやい+・>+・ロク</u>	雨水表流水	9月、10月	2				
舗装道路	浸透水 2)	9月	1				

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

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 図 2-8 盛土沈下量の推移(試験盛土①) 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。

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、TA法(路床の設計CBRと設計交通量に応じて目標とするTA(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に実施した上で、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10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)



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。

促進載荷走行(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20mm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(40mm)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、溶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(溶融スラグ を配合していない 3 工区)と同様の推移を示しており、溶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、溶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、溶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載荷走行を実施し、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溶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



表 2-5 排水性舗装に関する室内試験結果一覧表

	re 0		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%	11枚店 关考店
	頃日		試験結果	判定	試験結果	判定	試験結果	判定	况恰 恒• 参考恒
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	ОК	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	ОК	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)	ОК	6,000以上 (9000)	ОК	6,000以上 (9000)	ОК	3,000以上
すり減り量		(cm ²)	0.97	ОК	1.19	ОК	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。

	式 Z=0 コンプ					
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)}	<i>本仁昌</i>	4.50/ (担按/武 4.5,1.50/)			
水セメント比	55%以下 1)	里灰仝	4.5% (观俗他 4.5±1.5%)			
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 2-6 コンクリートの配合条件

表 2-7 硬化コンクリート試験の配合概要表											
	置					単位量	±(kg/m³)			添加率	≝(C × %)
スラグの	換	W/C	s/a	W	С	S1	S2	S3	G		
種類	率 (%)		(%)	水	セメント	山砂	シャフト 炉	表面 溶融炉	砂利	15S	303
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√t 則が成り立っていた。

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。

E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





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



(スラグなし) (シャフト炉スラグ)(表面溶融炉スラク)
 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Ommであった。

以上のように、溶融スラグを配合し 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。

- 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、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 よび表面溶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、溶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。
- これらの溶融スラグについて、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溶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】



- 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 準備した材料を撹拌する。
- 各種試験用の型枠に流し込み、
 その後養生、脱型する。
- ・・・・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
- 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

付録2-2-1

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】
 - ・本試験に使用した溶融飛灰や一般/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(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)) 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溶融飛灰の充填量が高いかつジオポリマ
 一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

神奈川県川崎市、福島県双葉郡等

・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 10μSv/y を下回った。

評価:溶融飛灰,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:放射性の溶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。

C C					
コスト評価:	歩掛り(作業人工、作業速度等):				
溶融飛灰(99,000t)を対象	作業人工: 57人工(19人×3班)				
3.94 万円/200L のドラム缶	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、溶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溶融飛灰や除去土壌、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。					
試驗場所(住所):北海道札幌市、	除去物保管場所と保管状況:試験に使用した溶融飛				

|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、弊社ら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。弊社らは「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)。



付録2-2-4



(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 一般土壤 図 3-6 除去土壤

(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:SiO2,水 酸化カリウム:K₂O,水:H₂O)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、原子力規制庁殿の「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 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。





(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。

(溶融飛灰 100%,	メタカオリン 0%)	(溶融飛灰 100%, メ	タカオリン 0%)
溶融飛灰100% メタカオリン0%	パインダー量 [wt%] 40.0 50.0 60. 1:1:1:0 40.0 50.0 60.	溶融飛灰100% メタカオリン0% 1:1:1:	バインダー量 [wt%] 40.0 50.0 60 15 40.0 50.0 60
シオホリマー回至10日落夜町合 SiO2:K2O:H2O [mol比]	1:1:20 40.0 50.0 60. 1:1:25 40.0 50.0 60. 1:1:30 40.0 50.0 60. 1:1:33 40.0 50.0 60. 1:1:35 40.0 50.0 60.	0 シスホリマー回至10月落秋町合 1:1: 0 SiO ₂ : K ₂ O: H ₂ O 1:1: 0 [mol比] 1:1: 0 1:1: 1:1:	20 40.0 50.0 60.0 25 40.0 50.0 60.0 30 40.0 50.0 60.0 35 40.0 50.0 60.0
	合表	試験結:	果
(溶融飛火 90%,	メタカオリン10%)	(溶触飛火 90%, メタ	'カオリン 10%)
メタカオリン10% ジオポリマー固型化用溶液配合	40.0 50.0 60. 1:1:1:5 36.0 45.0 54. 1:1:20 36.0 45.0 54.	内配示化バンSU% メタカオリン10% ジオポリマー固型化用溶液配合	40.0 50.0 60 15 36.0 45.0 54 20 36.0 45.0 54
SiO ₂ :K ₂ O:H ₂ O [mol比]	1:1:25 36.0 45.0 54. 1:1:30 36.0 45.0 54. 1:1:35 36.0 45.0 54.	0 SiO ₂ : K ₂ O : H ₂ O 1 : 1 : 1 [mol比] 1 : 1 : 1 0 1 : 1 : 1	25 36.0 45.0 54 30 36.0 45.0 54 35 36.0 45.0 54
西日	合表	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%)
溶融飛灰80% メタカオリン20% ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ :K ₂ O:H ₂ O [mol比]	パインダー量 wt% 40.0 50.0 60.0 1:1:15 32.0 40.0 48.0 1:1:20 32.0 40.0 48.1 1:1:25 32.0 40.0 48.1 1:1:30 32.0 40.0 48.1 1:1:35 32.0 40.0 48.1	溶融飛灰80% メタカオリン20% ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ : K ₄ O: H ₂ O [mol比] 1:1:3	バインダー量 [wt%] 40.0 50.0 60. 5 32.0 40.0 48. 70 32.0 40.0 48. 75 32.0 40.0 48. 80 32.0 40.0 48. 80 32.0 40.0 48. 81 32.0 40.0 48. 82 32.0 40.0 48.
	【凡例】(表 4-2 も同様)	
8	1 miles		
堅固	自立はしたが 圧すると崩壊	水が多く固型化せず	撹拌不可
次に、 表 4- 1	しに示した試験結果か	ら、「堅固」且つ溶融飛灰3	の充填量が最も貧
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
を土壌(分級対	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
(分赦处理依)	り神私分)を加えるこ	とじ、工場の吸着区応による	US の 夜田抑制 系

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%, 土壤※1.5%)

溶融飛灰98.5%			バインダー量 [wt%]	
土壌(※)1.5%	40.0	50.0	60.0		
ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO₂:K₂O:H₂O [mol比]	1:1:30	-	-	59.1(溶液飛灰) 0.9(土壌)	:非

(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「撹拌不可(急結)」になった理由としては、撹拌中に固 型化反応が進行し、ペーストの粘度が上昇し撹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%	バイン	ダー量 [wt%]	
メタカオリン0%	40.0	50.0	60.0	
	1 • 1 • 25	40.0	50.0	60.0
	1 • 1 • 25	-	723kPa	急結
SIO_2 : K_2O : H_2O	1 • 1 • 20	40.0	50.0	60.0
[110]26]	1.1.30	-	-	541kPa
(溶融飛灰 90%,	カオリ	ン10)%)	
· 滚融歌 应 90 %		バイ	ンダー量	[wt%]
溶融飛灰90% メタカオリン10%		バイ) 40.0	ンダー量 50.0	[wt%] 60.0
溶融飛灰90% メタカオリン10%		バイ 40.0 36.0	ンダー量 50.0 45.0	[wt%] 60.0 54.0
溶融飛灰90% メタカオリン10%	1:1:15	バイ 40.0 36.0 急結	ンダー量 50.0 45.0 一	[wt%] 60.0 54.0
溶融飛灰90% メタカオリン10%	1:1:15	バイ 40.0 36.0 急結 36.0	ンダー量 50.0 45.0 - 45.0	[wt%] 60.0 54.0 -
溶融飛灰90% メタカオリン10% ジオポリマー因型化田湾流配会	1:1:15 1:1:20	バイ 40.0 36.0 急結 36.0 一	ンダー量 50.0 45.0 - 45.0 急結	[wt%] 60.0 54.0 - 54.0 -
溶融飛灰90% メタカオリン10% ジオポリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ : K ₂ O: H ₂ O	1:1:15 1:1:20	バイ 40.0 36.0 急結 36.0 - 36.0	ンダー量 50.0 45.0 - 45.0 急結 45.0	[wt%] 60.0 54.0 54.0 54.0
溶融飛灰90% メタカオリン10% 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 1:1:20 1:1:25	バイ 40.0 36.0 急結 36.0 一 36.0 一	ンダー量 50.0 45.0 一 45.0 急結 45.0 1,499kPa	[wt%] 60.0 54.0 54.0 54.0 急結
溶融飛灰90% メタカオリン10% 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 1:1:20 1:1:25 1:1:30	バイ 40.0 36.0 急結 36.0 一 36.0 36.0	ンダー量 50.0 45.0 45.0 急結 1,499kPa 45.0 1,499kPa	[wt%] 60.0 54.0 一 54.0 一 54.0 急結 54.0
溶融飛灰90% メタカオリン10% 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 1:1:20 1:1:25 1:1:30	バイ 40.0 36.0 急結 36.0 一 36.0 - 36.0 -	ンダー量 50.0 45.0 45.0 急結 1,499kPa 45.0 1,486kPa	[wt%] 60.0 54.0 54.0 54.0 急結 54.0 8結 54.0 4,299kP
溶融飛灰90% メタカオリン10% 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 1:1:20 1:1:25 1:1:30 1:1:35	バイ 40.0 急結 36.0 一 36.0 一 36.0 一 36.0	ンダー量 50.0 45.0 45.0 急結 45.0 1,499kPa 45.0 1,486kPa 45.0	[wt%] 60.0 54.0 54.0 急結 54.0 4,299kP 54.0



試験結果

(溶融飛灰 80%, メタカオリン 20%)

溶融飛灰80%	バイン	/ダー量	[wt%]	
メタカオリン20%		40.0	50.0	60.0
	1 · 1 · 15	32.0	40.0	48.0
ジオポリマー固型化用溶液配合 SiOz:KzO:HzO [mol比]	1 • 1 • 15	急結	急結	-
	1 · 1 · 20	32.0	40.0	48.0
	1 · 1 · 20	- 急結		急結
	1 · 1 · 25	32.0	40.0	48.0
	1 • 1 • 25	-	-	急結
	1 · 1 · 20	32.0	40.0	48.0
	1.1.50	-	-	5,169kPa
	1 • 1 • 35	32.0	40.0	48.0
	1.1.55	_	—	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 試験結果

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

脱水ケーキ(※)10% 40.0 50.0 60.0 脱水ケーキ(※)20% 40.0 50.0 6 ジオボリマー固型化用溶液配合 SiO ₂ : K ₂ O: H ₂ O 1:1:35 - - - - - 48.0 (溶液飛灰) SiO ₂ : K ₂ O: H ₂ O 1:1:35 - - - - - 12.0 (脱水ケーキ)	溶融飛灰90%			バイン	ダー量 [wt%]	溶融飛灰80%			バイン	ダー量 [wt%]
ジオボリマー固型化用溶液配合 54.0 (溶液飛灰) ジオボリマー固型化用溶液配合 48.0 (溶液飛灰) SiO ₂ : K ₂ O: H ₂ O 1:1:35 - - 12.0 (脱水ケーキ) SiO ₂ : K ₂ O: H ₂ O 1:1:35 - - 12.0 (脱水ケーキ)	脱水ケーキ(※)10%	4	40.0	50.0	60.0	脱水ケーキ(※)20%		40.0	50.0	60.0
SiO ₂ : K ₂ O: H ₂ O 1:1:35 <u>6.0 (脱水ケーキ)</u> SiO ₂ : K ₂ O: H ₂ O 1:1:35 - <u>12.0 (脱水ケーキ</u>)	ジオポリマー固型化用溶液配合				54.0(溶液飛灰)	ジオポリマー固型化用溶液配合				48.0(溶液飛灰)
	SiO ₂ : K ₂ O : H ₂ O 1 : 1	1:35	-	-	6.0(脱水ケーキ)	SiO ₂ : K ₂ O : H ₂ O	1:1:35	-	-	12.0(脱水ケーキ)
[mol批] [mol批] [mol批] [mol批] [mol批] 2,297kPa	[mol比]				1,962kPa	[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%)。





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業を基に、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4.0µSv/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

- ・溶融飛灰の物性に応じて、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 1,470kPa)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:除去土壤等減容化・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 µ m~2mm にふるい分けした砂が 「通常分級砂」、通常分級砂を「籾摺り洗い」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。

受入 大熊2期2工区 大熊 井戸 分別後 水 土 壌 水	受入・分別施設 既往実証試験 大熊2期2工区 大熊3期4工区 双葉2期1工区 井戸 分別後 井戸 分別後 井戸 分別後 水 土 壌						
井戸水 コンクリート練混ぜ水と ての適合性確認	井戸水 分別後土壌由来の分級砂 コンクリート練混ぜ水とし 分別後土壌を分級 ての適合性確認 処理した分級砂						
表1 練混せ	▼ 水適合性項	目一覧	表2 細骨材品質試	験項目一覧			
項 目	方法	基準	試験項目 絶乾密度	方法(JIS) JIS A 1109			
懸濁物質の量	JISA5308	2g/l以下	<u>吸水率</u> 有機不純物	JIS A 1109 JIS A 1105			
溶解性蒸発残留物の量	溶解性蒸発残留物の量 JISA5308		塩化物量 安定性試験	JIS A 5002 JIS A 1122			
塩化物イオン(Cl ⁻)量	塩化物イオン(Cl ⁻)量 JISA5308		微粒分量	JIS A 1103			
セメントの凝結時間の差	JISA5308	始発は30分以内 終結は60分以内	和工場里 アルカリ骨材反応(化学法) 骨材のふるい分け試験	JIS A 1145 JIS A 1145 JIS A 1102			
モルタルの圧縮強度比	JISA5308	材齢7日、28日で 90%以上	 実積率 強熱減量	JIS A 1104 JIS A 1104 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 µ Sv、最大値 3.0 µ Sv と低かった。

コスト評価:湿式分級処費 26,200 円/t	歩掛り(作業人工、作業速度等):40t/h、「中間貯蔵
+粒度調整費 4,650 円/ t (山砂混合率	施設内における除去土壌の分級処理システム実証試
50%の場合)	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㎡)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8,000Bq/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	除去物保管場所と保管状況:1 m ³ フレキシブ
町)、②(一財)ふくしま市町村支援機構(郡山市富	ルコンテナバック8袋に封入し、技術実証フ
田東)、③(株)太平洋コンサルタント(佐倉市大作)	ィールド内第二資材置場に保管

付録2-3-2

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 75µm 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「籾摺り洗い」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、±2σ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		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	JISA5308 附尾圭C	200mg/L以下		
セメントの凝結時間の差	的海首で	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		

	F	
試験項目	方法(JIS)	基準
絶乾密度	JIS A 1109	2.5g/cm ^{议上^{※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	

表 2-2 細骨材品質試験項目一覧

※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。



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。









双葉2期1工区

大熊3期4工区 大熊3期5工区 **写真 3-1 受入・分別施設での採水状況**

	75 D	# 3#	大熊2期3工区			大熊3期4工区			大負	㎏3期5⊐		双葉2期1工区			
	坦日		奉华	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
			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	0.0
	燃)例(0)里(9/L)	判定	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			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	0.2
			判定	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	塩化物イオン(CL-)号		200mg/L以下	8	8	8	9	8	8	6	6	6	7	7	7
			判定	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		始発	30分以内	5	10	5	10	10	10	0	5	10	5	0	10
試験対免	セメント凝結時間の差(分)	хиль	判定	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		終結	60分以内	10	0	0	10	5	10	10	10	5	5	0	5
		#2#H	判定	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
*	モルタルの圧縮強さの比(%)	78	90%以上	100	100	100	98	97	100	99	98	98	98	99	102
			判定	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		280	90%以上	99	100	100	99	96	101	99	98	98	98	99	102
		201	判定	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	セメント海結時間	始発	_	165	135	145	150	135	150	160	140	150	155	145	150
		終結	-	260	260	265	260	265	275	280	270	270	265	260	260
		7日	-	44.6	44.1	45.5	44	42.9	45.2	44.2	43.5	44.5	43.9	43.9	46.4
		28日	-	61.4	61.1	62.5	61.7	58.9	63.1	61.6	60.1	61.2	60.8	60.8	63.8
	セメント凝結時間	始発	-	160	145	140	160	145	140	160	145	140	160	145	140
基準		終結	—	270	260	265	270	260	265	270	260	265	270	260	265
水	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	44.2	45.3
	28日		—	62.3	61.2	62.6	62.3	61.2	62.6	62.3	61.2	62.6	62.3	61.2	62.6

表 3-1 練り混ぜ水適合性確認試験結果一覧

(2) 細骨材品質試験結果

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。

付録2-3-6



大熊2期2工区での採取状況

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



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 2 σ 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 回目に採取した試料の細粒分率が 2 σ 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。

付録2-3-7

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。

	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

表 3-4 粒度調整用山砂の粒径分布





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

付録2-3-9

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。

				受分通常砂	>		受分高度砂	>				
		山砂	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	基準			
			UT1	UT2	UT3	UK1	UK2	UK3				
应度 (a/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}			
密度(g/cm)	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	淡い	濃い	濃い	濃い	濃い	濃い	濃い	溶液の色が標準色に対し、同じまたは淡い ^{※2}			
塩化物量	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	瓦応(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	購入去のう	副た但て	2 1 N F	レオスーレ・	がでキス						

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

※1 期入省の承認を得て、2.4以上にすることができる ※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

		117/	実証通常砂								甘淮				
		ЩФ	JT1	JT2	JT3	JT4	JT5	JT6	JK1	JK2	JK3	JK4	JK5	JK6	举 华
∞ 庄 (α / a m 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}
密度(g/cm ⁻)	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2	k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	-
実利	責率(%)	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	—
有柄	機不純物	淡い	濃い	濃い	濃い	濃い	濃い	濃い	同じ	濃い	濃い	濃い	同じ	濃い	同じまたは淡い ^{※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	生試験(%)	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	Rc-Sc(mmol/L)	120-43	120-43	193-19	123-25	120-23	127-32	107-32	120-43	116-29	131-25	182-24	148-35	121-32	
反応(化学法)	区分	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
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

また	有機不純物		強熱	除去率	
 訊 科 石	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
11K3	通こ	遣い	17	16	59



表 3-11 ジグ選別試験結果一覧

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 濃度測定の代表的な結果を表 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。



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:土壤Aおよび土壤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 土壤全体の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 の目的は土壤Aおよび土壤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。

実施内容:本実証試験で実施した内容を以下に示す。

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

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。

A. 室内配合試験による改良材の選定

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 (qc=800kN/m²)を現場/室内強度比 0.67で割り戻して qc=1,200kN/m²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。

B. 混練機プラント実機を用いた改良土製造

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。

C. 改良材を添加した土壌の物理的・化学的な安定性評価

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。

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。

付録2-4-1

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)	0	0	Ø	0
生石灰	Ø	\times (BOD)	Ø	×
酸化マグネシウム	Ø	0	0	0

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 qc=800kN/m²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:盛土工作業ヤード内空間線量率 最大 0.42µSv/h							
作業員被は	ごく量の最大 72.5μSv(実働 26 日間)						
コスト評価:土壌 1m³ あたり	歩掛り(作業人工、作業速度等):						
材料費:800~1,600円	処理速度:80m³/h(自走式土質改良機)						
改良工:約2,000円	~250m³/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): 除去物保管場所と保管状況:試験後の土壌は、土							
技術実証フィールド、他	貯蔵施設大熊3工区へ返却した。						
(福島県双葉郡大熊町)							

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。



林地部の除染(表層:5cm)

フレコン内の除去土壌

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 m³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。

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/m²)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	土壤環境基準
その他の重金属類	重金属類により異なる	土壤環境基準
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

表1 本試験で設定した主な目標値

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)。



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	рH	重金属	長期的な 安定性
セメント(高炉 B)	0	Δ	Δ	Δ	_
地盤改良材	0	Δ	Δ	Δ	_
生石灰	0	×	Δ	Δ	_
酸化マグネシウム	0	Δ	Δ	0	_
半水石膏	0	0	0	0	溶解性、硫化水素ガス[4]
スラグ	0	Δ	Δ	Δ	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 部には撹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



る。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)



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。



(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 0.23~0.28µSv/h であった盛土付近の空間線量率が施 工中には 0.25~0.42µSv/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840µSv 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

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、



時間は 250~300 分) の試験結果を示す。pH、 図 10 カラム試験の様子 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 ては土壌 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)からも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



付録2-4-10

壌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。

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3 コスト試算における条件設定

表4 コスト試算結果

使用する改良材	500m ³ あたり	1m ³ あたり	【内訳】	
	処理費用	処理費用	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。

	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	所定の強度を満たすための材料費が					
	能、	比較的安価、					
	土壌の種類によっては効果なし	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	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	フッ素・ヒ素の溶出促進効果があり、					
	ントB種と比較すると低濃度	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	排水基準に不適合するケースがあ					
	の、原土よりは上昇しており、対応	り、浸出水の対応が必要					
	が必要であるかは要検討						

表5 本試験における各改良材の特徴

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] 反町容ら、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] 鐵鋼スラグ協会、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 一選別補助材(泥 DRY)を用いた異物除去と改質上の物性評価一、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: 除去土壌中の放射性セシウムの溶融塩・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:

除去土壌の多くは中間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 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(環境省技術戦略における土壌 C、D)を 想定し、福島県内における土壌中の放射性 Cs の溶融塩・酸処理による脱離、ゼオライ トによる回収・安定化および浄化物の再生利用に関する実証試験を実施する。

実施内容:

除去土壌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地点の土壌について、本処理の有効性 を検証した。また、約1.8万 Bq/kgの土壌および非放射性土壌を用いて、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) 溶融塩(CaCl₂) · 酸(HCl, H₂SO₄)処理 による土壌中の放射性 Cs の脱離 細孔径: 0.67×0.70 nm 0.29×0.57 nm 酸添加による酸性溶液 の繰り返し利用 細孔径: (Cs'直径: 0.26 nm 約0.36 nm) よイオン交換促進 CaCl (2) ゼオライト (モルデナイト) 20501) 溶融 800 1M NaOH による回収 酸性溶液中 AI溶脱A 🐼 水熱処理 OCs (3) ポルサイトによる固定 200°C 酸処理 (1MHCI 福島土壌 (2)モルデナイトによる (3)ポルサイトによる (4) 浄化物・酸廃液の再生利用 浄化物の再生利用 🕈 回収 (粘土鉱物 固定 0.5 MH, SOA) (さび空間)の (1)溶融塩・酸処理 植物栽培培地としての利用 再生利用 1. 試験フロー 分級土壤 福島県浪江町土壌採取 金属塩(CaCl₂)添加(10~80wt%) 混合(ミキサー) 加熱処理(電気炉) (~800°C) 草木等混合物を除去 ~1M 酸水溶液 (塩酸、硫酸) ◀ 再利用 乾燥(恒温器 ~70℃) 酸洗浄(酸処理装置) (~100℃) 濾過 分級(電磁式ふるい振とう機) 処理水 乾燥 モルデナイト吸着→ 処理水 処理土壌 8000 Bq/kg以下 乾燥・粉砕(自動乳鉢) No 分級土壤 ① F1 > 2.8 mm, ② F2 1.0~2.8 mm, ③ F3 0.25~1.0 mm ④ F4 0.10~0.25 mm, ⑤ F5 0.10 mm > Yes アルカリ水熱処理 植物栽培培地化 净化物 (ポルサイト転換安定化) 各地占の十達はF3以下の十達を使用 ゼオライト化 > オートクレーブ~200°C 条件検討には分級前2万Bq/kg超のものを中心に使用 非放射性土壌(地点⑪)は安定Csを液相吸着して使用 再利用 処理 保管
- 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壌を減容化して最 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。 実証試験の結果:

・福島県浪江町の性状の異なる 11 試料を所定条件で溶融塩・酸処理した結果、いずれの 土壌も 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 程度の土壌であれば、溶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。

技術等の評価:

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。

作業員被ばく量評価:

2万 Bq/kg 程度の放射能濃度の除去土壌では、一人当たり年間1mSv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壌に対しても対応できるように年間作業時間を管理する。

コスト評価:

13 万円/t(土壌) (設備費、薬 剤費、人件費、光熱費から算出。) 歩掛り(作業人工、作業速度等): 管理者1名、作業員3名 主な4作業工程を1日で実施。

コスト評価条件:

設備費は20年で減価償却、薬剤費は土壌に対して10%塩化カルシウム添加、0.01 M 塩酸を土壌の10倍量(20g/200mL)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。

安全性の評価:

土壌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。

試験場所(住所):	除去物保管場所と保管状況:
法政大学小金井キャンパス東館	濃縮物(ゼオライト)は、土壌採取場所の管轄
(東京都小金井市梶野 3-7-2)	の役場と道路管理事務所に許可を得た後に浄化物
物質·材料研究機構並木地区	または非放射性土壌と混合し、元の放射能濃度以
(茨城県つくば市並木 1-1)	下になったことを確認後、採取場所に戻した。

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、溶融塩(CaCl₂ 40% 800℃焼成)・酸処理(1 M 硫酸, 100℃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あり、鉱物組成や水・ 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 の溶融塩・酸処理による脱離、ゼオライトによる回収・安定化、および 浄化物、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⑪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



付録2-5-4

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(¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs)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

■水分含有率 — 放射性Cs濃度 350000 45 40 試料 減量率(%) 300000 kg 4/bg) 35 1 15.6 30 🕄 200000 2 27.4 水分含有率 25 放射性Cs濃 120000 120000 3 23.6 20 4 15 14.0 10 5 28.5 50000 5 6 5.73 0 1 30.4 (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) 10 11 (8) 934 各採取地点の土壌 9 9.39 図 3-2 各採取地点の土壤の水分含有率 (10) 13.4 と放射性 Cs 濃度 1 31.4

表 3-1 800℃で焼成時の 各土壌の減量率(強熱減容率)

付録2-5-5

(2) 各地点の分級土壤の評価

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 要があり、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 り扱える土壌印F3 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





(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
1X U Z	冶瓶恤	-	設定生の本午末日

	 奶理		₽
CaClo量(土壌に			
対する割合%)	40%	酸濃度	1 mol/L
焼成時間	3 h	酸処理時間	4 h
処理温度	800°C	酸処理温度	98°C

である。酸処理は固液比(土壤 (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印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 壤①、⑤、①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①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 8.00

■乾燥土壤放射性Cs濃度(Bq/kg) ■溶融塩酸処理後土壤(Bq/kg) ◆除染率(%) 350000 100 90 300000 80 kg) 1√b 250000 ∰ 70 (%) 60 200000 樹 50 .Cs濃 除染 150000 40 30 100000 放射 20 50000 10 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 採取土壤 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 再処理前後の土壤①、⑤、①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

処理で 8,000 Bq/kg 以下を達	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(%)
成できると考え	Ð	11412	721	1170	95.6
られる。	5	10940	1660	1024	89.5
	1	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。







(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、8.0gの MOR を充填したガラス 製カラム(ϕ 18 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 3-9 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℃、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℃、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 各土壤中の放射性 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 3-12 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

(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



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 3-13 ⑪F3 (基準条件)の各工程 のマスバランス

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。本処理を実施設で土壌 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⑪と土壌⑪(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⑪と肥料処理を施した非 放射能土壤印を用い、本処理後の土壤で小松菜が生育可能か検証した。各土壤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1kg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 (土壤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⑪F3(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。 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。





③酸廃液の再利用評価

溶融塩・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⑪F3 20g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 8.0g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⑪F3 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1M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。



4. まとめ

浪江町の各土壌を溶融塩・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%の溶融塩(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:除去土壤 C に対して 20μm 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、75µm 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 20µm 以下の粘土鉱物に強く吸着していることから、 分級点を75µm 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 20µm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壤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(・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ューが高速回転する。この回転筒とスクリュ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20µm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 0.3~1.7µSv であった。

コスト評価:実用化時の概算処埋費は、lt 当	歩掛(作業人丄、作業速度): 連続運転			
たり概算で 32,000 円となる。	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				
(80m ³ ×4 台)/6h×4 回/日)、固液分離器による分級処理(40m ³ ×1 台×泥水投入 700L/				
分)、脱水処理(40m ³ ×2 台×泥水投入 50L/分)	6 セット 15 年で 65 万 m3 (124t) 処理。			
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):	除去物保管場所と保管状況:			
㈱不動テトラ総合技術研究所(茨城県土浦市)	該当なし			
福島県双葉郡浪江町大字酒田字堂ノ内				

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 75µm 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 75µm 以下の粒径の土壌を多く含むため、75µm を分級点とする 分級だけでなく、75µm 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 20µm 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、20~75µm 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 20µm の分級により、20~75µm 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~

75um 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 20µm で分級処理することで、減容化率が向上するかの検証を行った。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 20µm 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 20µm 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。





3. 実証試験結果と考察

(1) 使用土壤

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。75µm 以下の細粒分が 53.2%と多い。また、20µm 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 畑地1と2の 測定項目 混合畑地土壌 放射能濃度 平均 3,130 Bq/kg Bq/kg-乾土 4 068 9 有機体炭素量 20.000 mg/kg-dry 7.1g/cm3 2.576**礫分**(2-75mm)% 0 **砂分**(0.075-2mm)% 46.8シルト分 50.0

3.2

2

6.50

0.067

NP

NP

(5-75um)%

(5µm**以下**)%

粘土分

mm

mm

%

%



(2)使用材料

最大粒径

均等係数

50%粒径

液性限界

塑性限界

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) 試料土壤

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 ースレフォール: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。

衣 3-2 使用材料(高方于米工具以具剂)					
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 %		
アースレフォール	45,000	10.1	カルシウムCa: 82.8 % ケイ素Si: 11.6 % アルミニウムAI: 2.43 % ナトリウムNa: 1.08 % カリウムK: 0.85 % 鉄Fe: 0.67 % マクネシウムMg: 0.26 %		

佐田井村 (古ハマズ上所で成文)

表 3-3 試験試料一覧

± . . .

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

(4) 有機物分解試験と分解率

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。

$2O_3/H_2O_2$ 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 O₃/H₂O₂比と分解率

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

付録2-6-6

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。



図 3-4 反応時間と分解率

(注入オゾン量-排出オゾン量)÷有機物分解量 mg ・・・・・・・・・(1)

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



図 3-5 反応時間と分解率

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。 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



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経由し、 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

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」 「スクリューの各所に噴射ノ 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。

表 3-4 物質収支のまとめ

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	
	ブランク	0.3	-10.3	11.9	
4	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。

付録2-6-8

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

衣 3-5 减谷平と际栄平(菆週)				
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+アースレフォール)	9h	100	70.3	31.1

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あが 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。



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、20µm 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 20μm 未満の割合が 小さくなり、放射性 Cs 濃



図 3-11 粒子径分布図(試料 4、78h 分解処理)

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。

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。



(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。

		分級処理条件			脱水粘土				
						рН	浮遊物質量SS mg/L	濁度 度	放射性Cs濃度 Bq/L
試料	有機物分解処理	遠心力G	差速 (min-1)	投入流量 (L/min)	K流量 含水量 min) %	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
	ブランク	1, 800	1.0	5.0	49.4	7.4	780	1, 200	3. 13
	04	1, 800	1.0	5.0	-	7.5	380	500	N. D.
4	911	1, 800	1.0	10. 0	44. 3	7.3	580	980	2. 33
4		1, 800	1.0	2. 3	-	7.4	80	99	N. D.
	78h	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
F	ブランク	1, 800	1.0	5. 0	50. 1	7.5	850	1, 600	10. 2
5	9h	1, 800	1.0	10. 0	32.6	7.1	300	660	5. 76
G	ブランク	1, 800	1.0	5.0	50.5	7.6	310	430	6. 47
0	9h	1, 800	1.0	10. 0	40.3	7.9	92	710	3. 22

表 3-5 脱水処理のまとめ

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0.11~0.35µSv/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 0.3~1.7μSv 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 20µm 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 75µm 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 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。 ①湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減

②吸水性固化材による再生資材の強度向上

実施内容:

- 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。
- 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。

技術概要:

 湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減 回収粗粒土からポリマー成分、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
 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。

②吸水性固化材による再生資材の強度向上 ペーパースラッジ焼却灰を基材とする、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。



試験結果:

 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。



技術等の評価:①湿式比重選別による再	手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	句上			
養生日数 3~7 日で高炉セメント B 種	は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	竟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 0.74 mSV 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国	回 歩掛り(作業人工、作業速度等):プラ			
収粗粒土処理費(有姿)21,000円/ト	・ ント運用 8 名、管理者 2 名、処理量 105			
ン。吸水性固化材材料コスト:養生7	トン/日とした			
日 800 kN/m ² 、1,260~1,640 円/m ³				
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:	除去物保管場所と保管状況:			
ラボ試験:東京都 早稲田大学	採取土壌:地権者と協議して採取場所に戻			
現地試験: 福島県内	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 m³ 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の一種である加圧 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。

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。



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怖れ 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/m³以下を目指す。



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。

	名称	主な仕様	単位	数量
駆動ポンプ		最大 14.7 MPa、110 L/min		
湿式分級	解砕用エジェクター Φ60.5、180 × 950× 120		+	1
装置	振動ふるい	網目 20 mm 1 段	IL.	1
	振動ふるい	網目 0.075 mm、2 mm 2 段		
水中ポンプ		$\Phi50\text{mm}$ 200 V×0.75 kW×0.18 m³/min	台	2
水槽(廃液貯留用)		容量 10 m ³ 、鋼板製	中	1
水槽(廃液貯留用)		容量 5 m ³ 、鋼板製		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	巾	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		1
加圧浮上試験装置(ラボ試験用)		浮上槽4L、圧力0.1-0.6 MPa、流量0.4L/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	- 0

表 2-1 主要設備、機器

(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。

	我22 未初连马				
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	吸水性固化材による再生土強度改良試験				
株式会社					

長2-2 **業務**担当

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



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

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

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。

土壤種類	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	11
	3	0.45	3		25.58	10.70	"
	4	0.60	3		39.06	12.56	11
	5	0.60	3		29.53	11.92	11
	6	0.45	5		25.84	11.09	11
	7	0.60	5		30.66	11.13	"
	8	0.60	7		29.49	11.42	11
	K1	0.45	1		41.38	12.79	K社.
	K2	0.45	3		40.00	9.89	11
	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	11
	次亜1.0	0.60	3	1.0	29.00	10.01	"
	S1	0.35	3		22.06	4.04	T社
砂質土	S2	0.45	3		27.59	3.73	"
	$\mathbf{S3}$	0.60	3		27.22	3.77	"
	S4	0.60	5		29.17	5.62	11
※次亜塩	※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 C1 濃度として設定した						
■強熱減量(沈殿) ■強熱減量(浮上) ×固形分濃度							
		50				8	
		40	-		×	7	
				× ×		6	
		Z 30				° ≥	

表 3-1 加圧浮上試験による沈殿物、浮上物の強熱減量



(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。

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 [%]
с	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
е	礫まじり砂質細 粒土	54.8	5, 500	34. 3	13. 1

表 3-2 採取土壌の特性



図 3-4 採取土 c、d、eの粒径加積曲線図

採取土	放射性物質濃度 [Bq/kg dry]	含水率 [%]	強熱減量 [%]
С	4, 000	33~45	17.6
d	2, 200	24~32	5.8
е	5, 400	37~47	13. 1

表 3-3 回収粗粒土の特性

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。

付録2-7-7

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 25µm)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。 シンク 浮上物採取パルプ



ファインパブルポンプ

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)

衣い	4 加圧仔工力	南田がりりつ虫がい	鱼则足帕木
採取土	浮上物	懸濁物	沈殿物
с	29.7	25.1	9.0
d	20.2	19.1	2.6
е	40.9	30.1	7.3

表 3-4 加圧浮上分離物の強熱減量測定結果

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。

	コーン指数 [kN/m ²]	含水率 [%]	単位容積質量 [t/m³]
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

表 3-5 試験対象土の特性



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
---	-----	-------	-----	----	----	----

	:	必要添加量	$[kg/m^3]$			
目標強度	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

+	
表 4-1	処埋コスト試算
(伽理	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

果を表 4-1 に示す。

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 0.74 mSV/年と推定され、女性放射線業務従事 者の基準 5 mSV/3 ヵ月以下であり、安全性に問題はないと考えられる。

	実証試験測	除染事業における推定値				
作業内容	定空間線量 [µSV/h]	作業時間 [h/月]	推定空間線量 「uSV/h]	被ばく量 [uSV/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		

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

※作業員最大年間被ばく量:740 µSV=61.6µSV/h×12 ヵ月

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 20µm 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 5-2 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800kN/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

付録2-7-11



(2) 今後の課題

 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1µm~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。



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 全体工程

全体工程を見極めた上で評価予定

歩掛り(作業人工、作業速度等):

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):

除去物保管場所と保管状況:

JESCO 技術実証フィールド

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エ区処理工程



図 1-2 大熊①エ区 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	大型土のう袋一土壤 の分離方法
大熊①エ区	鹿島 」v	<u>低</u> 線量	ワイヤーソーによるカット
大熊②工区	清水」v	高線量	ウォーターカット
大熊③工区	大林」v	<u>低</u> 線量	<u>2軸破砕機</u> +バリセパ
双葉①エ区	前田」v	高+低線量	破砕機+トロンメル
双葉②工区	大成」	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。

```
付録2-8-3
```

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、分離した土壌類は全体の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。

サンプル	搬入元	数量(kg)	表面線量率 (µSv/h) ()バックグラウンド値
K-1	大熊①	200	0.30(0.26)
K-2	IZ	178	0.27(0.26)
0-1	大熊③	256	0.23(0.18)
0-2	IZ	218	0.23(0.18)

表 1-2 受領サンプルの重量および表面線量率

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

土壌が付着した大型土のう袋から、土壌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

比較的土壌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。



付録2-8-4

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。





(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		訪 慢+撞	乾燥後	乾式分離後	洗浄後		
92710	7247		北林工场	大型土のう袋	大型土のう袋	大型土のう袋		
		1	1,400	470	210	<100		
	外袋	2	1,800	530	180	<94		
K 1		3	1,000	240	150	<82		
r\-1		1	3,200	1,000	360	<92		
	内袋	2	2,600	1,700	400	110		
		3	3,100	650	330	<82		
0.1	外袋	1	1,500	600	460	<57		
0-1	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)	実フレコン (g)	土付着量 (推定g)	土付着率 (推定%)	結果	備考
外袋	1	3.58	10.56	6.98	57	沈降		1		1.62	0.91	56	沈降	
	2	4.75	9.39	9.39 4.64 40 沈降 外	外袋			0.96	0.25	26	浮上	もみ後		
	3	4.66	8.3	3.64	34	沈降		2	0.71	1.07	0.36	34	浮上	
	4	4.59	6.73	2.14	24	浮上		3	0.71	0.95	0.24	26	浮上	
	5	2.83	4.05	1.22	22	浮上		4		1.6	0.89	56	中間	
外袋	1	0.69	2.38	1.69	62	沈降		5		1.32	0.61	46	浮上	
(シート)	2	0.73	2.13	1.4	56	沈降	内垈	1		1.01	0.55	54	沈降	
	3	0.69	1.37	0.68	40	沈降	11.132		0.46	0.58	0.12	21	浮上	もみ後
	4	0.71	1.65	0.94	47	浮上		2	0.46	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0-1 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。



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。



付録2-8-7

(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。

			ţ	汝射線量	륕(Bq/kg)	土壤付	着率(%言	+算値)
			乾燥	7	型土の対	2. .	ブ	↓型土のう袋	ż
		NU	土壤	乾燥後	乾式分離換	洗浄後	乾燥後	乾式分離發	洗浄後
К-1		1	1,400	470	210	<100	34%	15%	7%
`` 1	外袋	2	1,800	530	180	<94	29%	10%	6%
		3	1,000	240	150	<82	24%	15%	10%
		1	3,200	1.000	360	<92	31%	11%	3%
	内袋	2	2,600	1,700	400	110	65%	15%	4%
		3	3,100	650	330	<82	21%	11%	3%
0-1	外袋	1	1,500	600	460	<57	40%	31%	7%
	内袋	1	2,000	1,500	120	<58	75%	6%	5%

表 3-2 放射能濃度変化結果(土付着量試算評価)

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 ϕ 400×L800)

付録2-8-8



(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。







大型土のう袋表面に付着する土壌を、水のみの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 4-8 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 土壤付着率試算

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) 放射能量収支

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能量収支は、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能量 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(µSv/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