# 個別試験結果と評価詳細

Web 用報告書

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:分別後土壌の減容化・再生利用の促進を図ることを目的に、除染除去土壌および分別後土 壌を湿式洗浄して得た分級砂のコンクリート用細骨材への適合性を確認した。

実施内容:受入・分別施設より採取した分別後土壌を湿式分級した「①受分通常砂(UT)」、上記 ①を高度分級処理した「②受分高度砂(UK)」、既往実証試験の通常分級砂「③実証通常砂(JT)」、 上記③を高度処理した「④実証高度砂(JK)」を対象に以下の適合性確認試験を実施した。また、 将来的に帰還困難区域内に、分級砂を配合したコンクリート製造設備を運用することを想定し、 受入分別施設の井戸水のコンクリート用練混ぜ水適合性確認試験を行った。なお、除去土壌を解 砕した後、75µm~2 mm に分級した砂が「通常分級砂」、通常分級砂を「機械式研磨:擦合わ せ」や「流体式研磨: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。

令和4年度:練混ぜ水適合性確認試験、骨材品質試験(①,②,③,④)

令和5年度:配合・強度試験(③,④)、耐久性試験(④)、被ばく影響確認試験(④)

技術概要:各適合性試験の試験項目を以下に示す。



実証試験の結果:実証試験結果の概要を下表に示す。これより、分級砂がコンクリート用細骨材 に再利用可能なことが示された。また、分別後土壌の放射性 Cs 濃度を 1.0 とすると、湿式分級 により分級砂の放射能性 Cs 濃度は平均で 0.2 倍に低減することが見込まれる。また、山砂混合 による粒度調整の分級砂配合割合は平均で 0.5 倍、コンクリートへの細骨材配合割合は平均で 0.4 倍であり、配合割合に応じて放射性 Cs 濃度は低下する。このため、分別後土壌をコンクリート 製品に再利用すると、放射性 Cs 濃度は 1/25(0.2×0.5×0.4)程度に低下することが期待できる。

試験結果一覧

令 和	綬	東混ぜ水適合性 確認試験	帰還困難区域の地下水の代表試料として採水した受入・分別施設に併設された 井戸の水は,全ての項目で基準値に適合することを確認した。
4 年 度		骨材品質試験	分級砂は、山砂混合による粒度調整が必要であり、有機不純物が不適合となる ため、圧縮強度比率試験が必要となる課題があるが、細骨材として再利用可能 なことを確認した。
	Ē	配合·強度試験	基準適合:材齢28日強度が呼び強度 30 N/mmが以上を確認した。
숚	耐な	凍結融解試験	基準適合:耐久性指数60%以上を確認した。
和	く性ゴ	長さ変化試験	基準適合:建築学会・土木学会の基準に適合することを確認した。
5 年	<b></b> 〕 〕 験	促進中性化試験	基準適合:中性化深さ25mm以下(26週)の基準に適合することを確認した。
度		皮ばく影響試験	空間線量は0.26 μSv/h(BG 0.16 μSv/h)となった。また、放射性Csに加え、 放射性K、U系・Th系放射性物質を考慮したシミュレーションにより、コンクリー ト製品からの追加被ばく線量を精度よく予測できることを確認した。

まとめ:以下に示す。

・分級砂をコンクリート用細骨材として利用可能なことを示した。

・分別後土壌をコンクリート製品に加工することにより、放射性 Cs 濃度は分別後土壌に比較して 1/25 程度となることを示した。

・分級砂を配合したコンクリート製品からの追加被ばく線量の予測が可能なことから、コンク

リート製品の利用用途に応じた追加被ばく線量の管理が行えると考えられる。

技術の評価: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できることを確認した。

作業員被ばく量評価:作業時の被ばく量の平均値 0.8µSv/日、最大値 2.3µSv/日と低かった。

コスト評価 : コンクリート用	歩掛り:通常分級処理プラント(40t/h級)5系列、高度分級
細骨材製造費用 31,000 円/t	処理プラント(20t/h 級)1 系列、プラント稼働 250 日/年、8
(山砂購入費 3,980 円/t を含	時間/日、分級処理21人/日、粒度調整3人/日、スクリーニン
む、脱水土処分費は含まず)	グ3人/日

コスト評価条件:分別後土壤量132万㎡、処理期間5年間、山砂混合率50%

安全性の評価: 分別後土壌の放射性 Cs 濃度測定により、コンクリート製品からの追加被ばく線量が推定できるため、コンクリート製品の利用用途に応じた管理が可能となる。

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:技術実証フィール
町)、② (株)太平洋コンサルタント(佐倉市)	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 75µm 以上 2mm 未 満の砂分(以下「分級砂」という)を対象に、コンクリート用細骨材(以下「細骨材」 という)への適用性を実証した。なお、通常分級処理(解砕と分級による処理)および 除染率向上を目的に、通常分級処理した分級砂の表面に残留するシルト・粘土分を「機 械式研磨:擦合わせ」や「流体式研磨:衝撃力」を利用し、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

分級砂の細骨材への適用性を実証するため、以下に示す検討を行った。なお、本検討 は令和4年度~5年度の2ヶ年にわたり実施したため、各年度の成果目標を示す。 (令和4年度)

- ・コンクリート用練混ぜ水として使用されることが想定され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)のコンクリート用 練混ぜ水 JIS 規格への適合性について確認する。
- ・受入・分別施設から新規に採取した分別後土壌を、通常分級処理して得た分級砂(以下、「受分通常砂」という)、これを高度分級処理した分級砂(以下、「受分高度砂」という)、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4種類の分級砂の細骨材品質試験により、コンクリート用細骨材としてのJIS規格適合性を確認する。

(令和5年度)

- ・実証通常砂、実証高度砂を配合したコンクリートの配合・強度試験、耐久性試験を行い、 分級砂の細骨材への適用性を確認する。
- ・ 実証高度砂を配合したコンクリート土間(□4.0m×t0.15m)を設置し、追加被ばく線量 を確認する。

# 2. 試験方法

令和5年度に実施した試験の方法について述べる。

# (1) 配合・強度試験

実証通常砂1種類、実証高度砂4種類を、それぞれ配合したコンクリートが所定のフレッシュ性状、強度特性等を示すことを確認するため、**表 2-1**に示す試験を実施した。 なお、分級砂を含まない山砂のみを配合したコンクリートを比較対照(以下、「対照」という)とした。

Ē	試験項目		基 準							
経時変化	①スランプ	JIS A 1101	18±2.5cm							
(0分,30分,	②空気量	JIS A 1128	W/C55%:4.5±1.5%							
60分,90分)	③コンクリート温度	JIS A 1156	_							
凝結時間		JIS A 1147	基準なし、対照と同程度 目安(始発5~7時間、終結6~10時間程度) コンクリート標準示方書より							
圧縮強度(7,28,91日)		JIS A 1108	材齢28日強度が呼び強度以上 W/C55%:30N/mm <sup>2</sup>							
静弾性	係数(28日)*	JIS A 1149	_							
ブリー	ディング試験	JIS A 1123	基準なし(参考値:0.3㎡/㎡以下(建築学会))							
		n								

表 2-1 配合・強度試験項目一覧

\*:呼び強度以上となる材齢28日強度で静弾性係数試験を実施

## (2) 耐久性試験

分級砂を配合したコンクリートの耐久性を確認するため、**表 2-2**に示す耐久性試験を 行った。なお、試験対象は、実証高度砂1種類とした。

試験項目 供試体形状		試験開始材令	測定頻度	測定項目	基準	
凍結融解試験	100×100×400mm	28日材令	凍結融解36 サイクルを 超えない間隔	たわみ振動の 一次共鳴振動数、 質量、外観観察	300サイクル時点で 相対動弾性係数60%以上	
長さ変化試験 (乾燥収縮)	100×100×400mm	7日材令	測定材令 1,4,8,13,26週	長さ変化率	土木学会:1,000×10 <sup>-6</sup> 以下 建築学会: 800×10 <sup>-6</sup> 以下	
促進中性化試験	100×100×400mm	56日材令	促進期間 1,4,8,13,26週	中性化深さ	(100年の耐久性の目安) <sup>※</sup> 26週の中性化深さ 25mm以下	

表 2-2 耐久性試験項目の一覧

※建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)」

# (3) 被ばく影響確認試験

実証高度砂を配合したコンクリートを用いたコンクリート土間(□4.0m×t0.15m)を設置し、この土間の中心かつ高さ 0.3m の地点の空間線量の実測値と、シミュレーションの結果を比較すると共に、分級砂を配合したコンクリート製品の安全性を確認した。

# 付録2-1-4

#### 3. 実証試験結果

#### (1) 練混ぜ水適合性確認結果(令和4年度)

受入・分別施設である大熊2期3工区、大熊3期4工区、双葉2期1工区に併設した 井戸の水を令和4年10月11日、17日、24日の3回に分けて採取し、**表3-1**に示 す項目の適合性試験を行った。結果の概要を**表3-1**に示す。これより、分析した全ての ケースで基準の適合性が確認できた。このため、令和5年度に実施する配合・強度試 験、耐久性試験、被ばく影響評価試験で製造するコンクリートは、水量が豊富である双 葉2期1工区の井戸水を練混ぜ水として使用することとした。

	平均值	最小値	最大値	適合性	基準値	
懸濁物質の量(g/L)	0	0	0	0	2 g/L以下	
溶解性蒸発残留物の量	0.2	0.1	0.2	0	1 g/L以下	
塩化物イオン(Cl <sup>-</sup> )量		7	6	9	0	200 mg/L以下
モルタル圧縮強さの比	7日	99	97	102	0	
(%)	28日	99	96	102	0	90 %以上

表 3-1 練混ぜ水適合性試験結果

# (2) 細骨材品質試験結果(令和4年度)

細骨材品質試験の結果概要を表 3-2 に示す。各項目の試験結果については、平均値、 最小値、最大値を示し、基準不適合は赤字で示した。通常分級処理した受分通常砂、実 証通常砂では、粘土塊量が基準不適合となる事例がそれぞれ1件生じたが、高度分級砂 は全て基準値に適合する結果となった。また、有機不純物については、ほぼすべてのケ ースで基準不適合となった。このため、実証高度砂の内、強熱減量が最大値(3.8%)の JK4と、ほぼ中央値(2.2%)のJK2に対して圧縮強度比率試験を実施した。その結果を表 **3-3**に示す。これより、強熱減量が高いと圧縮強度比率が 90%を下回るが、強熱減量 2.2%程度であれば90%以上となり基準に適合するため、購入者の承認を得て用いても良 いことが分かった。また、塩化物量は、既往実証試験の全ての実証通常砂・実証高度砂 で基準不適合となった。既往実証試験では、分級処理に使用する洗浄水を循環利用して おり、分級処理した除染除去土壌に、肥料、農薬、凍結防止剤、津波の影響により含ま れていた塩化物が洗浄水に蓄積したことが要因と考えられた。このため、分級砂を細骨 材として再生利用する場合には、洗浄水の塩化物管理を行うことが必要であることが分 かった。以上より、分級砂を細骨材として再生利用するためには、粒度調整、有機不純 物、塩化物量などの課題が内在するものの、対処可能な課題であると判断し、配合・強 度試験以降の試験を実施することとした。

表 3-2 細骨材品質試験結果の概要															
		対照		受分通常砂	·		受分高度砂	実証通常砂			実証高度砂			++ >#+	
		(山砂)	平均值	最小値	最大値	平均值	最小値	最大値	平均值	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値	基準
<b>空座(</b>	絶乾	2.53	2.46	2.46	2.46	2.51	2.51	2.52	2.47	2.44	2.55	2.50	2.44	2.57	2.5g/cm <sup>3</sup> 以上 <sup>※1</sup>
密度(g/cm*)	表乾	2.58	2.53	2.53	2.53	2.57	2.57	2.57	2.54	2.52	2.62	2.57	2.52	2.62	-
吸水率	(%)	2.10	2.81	2.71	2.90	2.21	2.11	2.27	2.98	2.53	3.42	2.67	1.92	3.47	3.5%以下
微粒分量	量(%)	1.5	0.77	0.70	0.80	0.53	0.50	0.60	1.58	1.00	2.00	1.23	0.60	2.50	3.0%以下 <sup>**2</sup>
粘土塊量	量(%)	0.6	1.01	0.93	1.14	0.79	0.53	0.96	0.93	0.77	1.36	0.29	0.15	0.43	1.0%以下
単位容積質量	∎(g/cm <sup>3</sup> )	1.69	1.59	1.58	1.60	1.68	1.67	1.68	1.60	1.53	1.63	1.66	1.55	1.75	-
実積率	(%)	66.8	64.7	64.2	65.0	66.6	66.5	66.9	64.8	62.2	66.1	66.3	63.0	68.5	-
有機不	純物	淡い	濃い	同じ	濃い	同じまたは淡い <sup>※3</sup>									
塩化物量	量(%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.05	0.17	0.11	0.06	0.17	0.04%以下
安定性試	験(%)	2.9	3.4	3.1	3.9	2.8	2.3	3.7	4.2	3.8	4.8	3.5	3.3	3.9	10%以下
アルカリ骨材	Rc-Sc(mmol/L)	120-43	126-37	120-33	137-39	135-38	159-36	122-42	137-27	107-19	193-32	139-30	116-24	182-35	
反応(化学法)	区分	A 無害													
強熱減量	量(%)	1.6	2.5	2.4	2.6	1.7	1.6	1.8	2.3	1.8	2.5	2.4	1.5	3.8	
放射性Cs濃度(	Ba/ka-drv)	ND	1.688	1,509	1.845	1.342	1,239	1,545	2,410	1.647	3.833	2.330	1,210	3.827	_

※1 購入者の承認を得て、2.4 以上とすることが出来る ※2 すり減りを受ける場合、5.0%以下

※3 溶液の色が標準色に対し濃い場合でも、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

分級砂種		JK		JK4						
強熱減量(%)		2.	2		3.8					
材齢	71	ш	28日		7	Ш	28日			
アルカリ洗浄	前	後	前	後	前	後	前	後		
圧縮強度(N/mm)	26.7 28.8		36.2	40.4	19.5	24.3	26.0	33.7		
圧縮強度比率(%)	9	3	9	0	8	0	77			

表 3-3 圧縮強度比率試驗結果

# (3) 配合·強度試験結果(令和5年度)

①配合試験結果

高性能 AE 減水剤:SP、AE 減水剤(気泡連行剤):AE、消泡剤(空気除去剤):DFの 添加量を調整することにより、スランプ(18±2.5 cm)、空気量(4.5±1.5%)の目標値 を満足する配合を求めた。分別後土壌由来の分級砂の種類ごとの配合一覧を表 3-4 に、試 験状況を写真 3-1,写真 3-2 に示す。

_			表 3-4	配合	結果−	覽			
配合名	単位 水量 (W) (kg/m <sup>3</sup> )	単位 セメント量 (C) (kg/m <sup>3</sup> )	単位 細骨材量 (S) (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 表乾 密度 (g/cm)	単位 粗骨材量 (G) (kg/m <sup>3</sup> )	SP (C×%)	AE (C×%)	DF (C×%)	
対照	165	300	826	2.58	983	0.70	0.0010	0.0000	
JK1	165	300	838	2.53	983	0.65 0.0010		0.0010	
JK2	165	300	826	2.62	983	0.65	0.0010	0.0010	
JK3	165	300	810	2.58	983	1.40	0.0010	0.0015	
JK5	165	300	835	2.61	983	0.55	0.0015	0.0010	
JT6	165	300	810	2.53	983	0.75	0.0010	0.0025	
使用	セメント	セメント密 度(g/cm)	粗骨材表 (g/c	表密度 cm <sup>3</sup> )	水密度 (g/c㎡)	W/C(%)		s/a(%)	
	NC	3.16	2.6	62	1.0	5	5	46	
E	目標スランプ(cm)			〔量(%)		ミキサー			
	18.0±2.5			±1.5	55L強制	30L			





写真 3-2 スランプ測定状況 2 経時変化試験

前述の表 3-4 に示す配合で製造したコンクリートのスランプ、空気量の経時変化の測定 結果を図 3-1,図 3-2 に示す。なお、これ以降の試験結果等は、すべて表 3-4 に示す配合 で製造したコンクリートに対する結果を示している。図 3-1 より、JT6(実証通常砂)で 他のケースに比較し、スランプが急速に低下する傾向を示した。この原因を特定すること は困難であるが、JT6 は、粘土塊量が 0.87 %、強熱減量が 2.5 %とそれぞれ高い値を示し たことが要因の一つであると考えられた。なお、分級砂を配合するコンクリート製造を実 事業規模で実施する際には、必要に応じて遅延剤やスランプ保持型混和剤の利用により、 スランプの急激な低下を防止できると判断した。





③強度試験結果

圧縮強度試験結果を図 3-3 に、試験状況を写真 3-3 に示す。これより、28 日材齢の圧 縮強度は、全てのケースで基準とした 30 N/m m<sup>2</sup>以上を示した。分級砂を配合したコンク リートは、山砂のみを配合したコンクリート(以下、「対照」という)と同等以上の強度 を発現した。



# 付録2-1-7





⑤ブリーディング試験結果

ブリーディング試験結果を図 3-5 に、試験状況を写真 3-5 に示す。これより、全てのケースで 0.3 cm/cm以下\*となり、基準を満足した。JK3 でブリーディング量が低下する傾向を示したが、これは高性能 AE 減水剤:SP の配合量が多かったためと考えられた。





写真 3-5 ブリーディング試験状況

※ 建築学会 建築工事標準仕様書 同解説 JASS5の水密コンクリート、凍結融解作用を受けるコンクリートのブリーディング量の基準値

# (4) 耐久性試験結果(令和5年度)

①凍結融解試験結果

凍結融解試験結果を図 3-6,図 3-7 に、試験状況を写真 3-6 に示す。これより、実証高 度砂(JK1)を配合したコンクリートは、凍結融解サイクル 300 終了時点での耐久性指数(相 対動弾性係数)は 80%となり、基準とした 60%以上を満足するとともに、比較対照と同等 の結果であったことから、凍結融解抵抗性に問題がないことが分かった。



②長さ変化試験結果

長さ変化試験結果を図 3-8, 図 3-9 に、試験状況を写真 3-7 に示す。これより、実証高 度砂(JK1)を配合したコンクリートは、建築学会・土木学会の基準に適合し、かつ、比較 対照と同等の結果であったことから、乾燥収縮抵抗性に問題がないことが分かった。



③促進中性化試験結果

促進中性化試験結果を図 3-10 に、試験状況を写真 3-8 に示す。これより、実証高度砂 (JK1)配合したコンクリートは、基準値に適合し、かつ、比較対照と同等の結果であった ことから、中性化に対する抵抗性に問題がないことが分かった。



# ④ 放射能濃度測定結果

材齢28日の圧縮試験後の供試体の放射能濃度測 定結果を表3-5に示す(青色ハッチング)。また、 細骨材の放射能濃度も併記した(緑色ハッチング)。 供試体中の細骨材質量比率は36%であり、細骨材 を基準とした供試体の放射能濃度の低減率と概ね

#### 表 3-5 放射能濃度測定結果

表面 <sup>※1</sup> 線量率 (µSv/h)	溶出量 (Bq/L)	放射性Cs 濃度① (Bq/kg)	放射性Cs 濃度② (Bq/kg)	*3 低減率 (%)
28	日材齢供	試体	細骨材	(707
0.01	ND **2	459	1,135	40
0.01	ND	574	1,558	37
0.02	ND	1,133	2,703	42
0.01	ND	458	1,040	44
0.01	ND	669	1,768	38
	表面 <sup>*1</sup> 線量率 (µSv/h) 28 0.01 0.01 0.02 0.01 0.01	表面 <sup>*1</sup> 線量率 (µSyyh) 28日材齢供 0.01 ND*2 0.01 ND 0.02 ND 0.01 ND 0.01 ND	表面 <sup>≈1</sup> 線量率 (µSv/h) <sup>※</sup> <sup>※</sup> <sup>※</sup> <sup>3</sup> <sup>3</sup> <sup>3</sup> <sup>3</sup> <sup>4</sup> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <sup>1</sup>	表面**1 線量率         放射性Cs 過度② (Bq/L)         放射性Cs 濃度③ (Bq/kg)           28日         一次         一次         一次           0.01         ND**2         459         1.135           0.01         ND         574         1.558           0.02         ND         1.133         2.703           0.01         ND         458         1.040           0.02         ND         1.658         1.040           0.01         ND         6669         1.768

一致した。表面線量率は 0.04 µSv/h 程度、放射性 Cs の溶出量は非検出であった。

# (5) 被ばく影響確認試験結果(令和5年度)

①細骨材品質試験結果

コンクリート土間の製造には、実証高度砂であるJK1,JK3,JK5を、混合・均一化した 分級砂に、山砂(静岡県掛川市産:5mm:2%,2.5mm:29%,1.2mm:33%,0.6mm:36%, 0.3mm:0%)を45%混合する粒度調整を行った細骨材を配合した。粒度調整前後の細骨 材の粒度分布を図3-11に、細骨材品質試験結果を表3-6に示す。図3-11より、山砂を 45%混合することにより、適正粒径範囲となる粒度調整が可能であった。また、細骨材 の品質は表3-6に示すように、有機不純物と塩化物量で基準不適合となったが、令和4年 度に実施した実証通常砂、実証高度砂の骨材品質試験結果と同様の結果となったことか ら、コンクリート製造には品質上の問題はないと判断した。



衣	衣 370 和月州 而貝 訊 歌 桁 朱									
測定	項目	粒度調整	結果	基準						
	络去生	山砂混合前	2.6							
密度(a/a㎡)	市巴早乙	山砂混合後	2.6	2.5以上						
密皮(g/cm)	主故	山砂混合前	2.6							
	10.42	山砂混合後	2.6							
ミング	e (0/)	山砂混合前	2.1	2 5 11 7						
	<u>~(70)</u>	山砂混合後	1.8	5.5以下						
安定性	ŧ(%)	山砂混合後	3.3	10以下						
微粒分	山砂混合後	0.6	3.0以下 <sup>※2</sup>							
粘土塊	山砂混合後	0.5	1.0以下							
有機7	「純物	山砂混合後	濃い	溶液の色 <sup>※3</sup>						
塩化	:物量(%)	山砂混合後	0.053	0.04以下 <sup>※4</sup>						
単位容積質	量(g/cm)	山砂混合後	1.70	_						
実積率	⊈(%)	山砂混合後	66.2	_						
アルカリ骨材反	Rc-Sc(mmol/L)	山砂混合後	35-72	主2 6 分昭※5						
応(化学法)	区分	山砂混合後	無害	衣2-0 参照						
強熱減	量(%)	山砂混合後	2.1	_						
放射性Cs濃度	(Ba/ka-Dry)	山砂混合前	2,945	_						
		山砂混合後	1,683	_						
※1 購入者の承	、認を得て2.4以	上とすることカ	が出来る							
※2 コンクリー	トの表面がすり減	り作用を受け	ない場合5	5.0以下とする						
※3 溶液の色カ	「標準色に対し、同	『じまたは濃い	い(標準色し	い濃い場合で						
も、JIS A 1142に規定する圧縮強度比率が90%以上あれば、購入										
者の承認を	そのは購入する	,)) )	. + 7 + 1 5							
※4 0.04を超	9 ものは購入者の	) 承認を必要と	こりるか、原	泉工は1.0とする						
※5 表2-6に元	す判定其進により	) 無実 無実	でかい 評	価しないを判定						

# 表 3-6 細骨材品質試験結果

②配合試験結果

配合試験により、**表 3-7**に示す配合を決定し、コンクリート土間製造を行った。土間コンクリートの練混ぜは、5回に分けて実施したが、全ての練混ぜで、フレッシュ性状(スランプ、空気量)は、目標値を満足していることを確認した。

使用 セメント	目標 スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (W) (kg/m <sup>3</sup> )	単位セメン ト量(C) (kg/m <sup>3</sup> )	単位細骨 材量(S) (kg/m <sup>3</sup> )	単位粗骨 材量(G) (kg/m <sup>3</sup> )	SP (C×%) (g)	AE (C×%) (g)	DF (C×%) (g)
NC	18.0±2.5	4.5±1.5	55.0	46.0	165	300	835	983	0.55	0.0010	0.0015
細骨材表 粗骨材表	該密度(g/cm) 2.61 該密度(g/cm) 2.62	3.16	水密度 (g/c㎡)	1.0	ミキサー	55L引 パン型3	≜制練 ミキサー	練量	35L		

表 3-7 配合表

③放射能濃度測定結果

コンクリート土間製造の各材料および土間(コンクリート)の放射能濃度測定結果を表 3-8に示す。後述するコンクリート土間の空間線量率を測定(図 3-14)したところ、コンク リート中の放射性 Cs 濃度に比較して、空間線量率が高くなる傾向があった。このため、 各材料の放射性 K40を測定したところ、粗骨材で 843 Bq/kg を検出した。

また、細骨材、コンクリートとも、分級砂の配合比(質量比)から放射性 Cs 濃度が予測 でき、実測値と強い相関があることが示された(図 3-12)。

200		小人们 6 使 天 庆	
		放射能濃度(B	Bq/kg(Dry))
		Cs濃度	K <sub>40</sub> 濃度
	セメント	<63	<434
	粗骨材	<47	843
	細骨材	1,683	326
	練り混ぜ水	<1.1	<7.9
	コンクリート	549	581

表 3-8 放射能濃度測定結果



④ 追加被ばく線量とシミュレーションの比較

追加被ばく線量測定結果およびシミュレーション結果を図 3-13, 図 3-14 に示す。図 3-13 より、コンクリートタイルの設置により、0.16 μSv/h の空間線量率が、0.26 μSv/h に 上昇した。また、放射性 Cs に加えて放射性 K、U(ウラン)系、Th(トリウム)系の放 射能濃度も考慮した空間線量率のシミュレーションの結果は、実測値と良く一致した。

# 付録2-1-11



4. まとめ

上述の検討により、以下に示すことが分かった。

- ・分別後土壤等を分級処理して得た分級砂は、山砂混合による粒度調整が必要なこと、有機 不純物が基準不適合となる場合があり、その場合、圧縮強度比率試験による確認と購入者 の承認が必要になるなどの骨材の品質上の課題を内包するものの、コンクリート細骨材と して再生利用可能なことを確認した。
- ・分級砂を配合したコンクリートは、対照と同等以上の強度発現(図 3-3)、耐久性(図 3-16~ 図 3-10)を有する結果を得た。
- ・分別後土壌を分級処理・粒度調整によりコンクリート用細骨材に加工し、コンクリートに 配合することで、放射性 Cs 濃度の低減率は 1/25 程度が見込まれることが分かった(各工程 における放射性 Cs 濃度低減率の平均値:通常・高度分級処理 0.2 倍、粒度調整 0.5 倍、コ ンクリート配合 0.4 倍)。
- ・分級砂を配合したコンクリート製品の追加被ばく線量のシミュレーションが可能なため、 コンクリート製品の利用用途に応じた追加被ばく線量の管理が可能と考える(図 3-14)。

# 5. 今後の課題

分級砂の再生利用を促進するためには、再生利用に対する理解醸成を深めることが肝要である。そのためには、以下の2点が今後の課題となると考える。

- ・帰還困難区域に新規に設ける処理設備のコンクリート土間などに、分別後土壌を湿式分級し て得た分級砂を配合したコンクリートを活用することにより、実績データの積み重ねと技術 研鑽により、分級砂を配合したコンクリート製品の品質と安全性の向上
- ・分級砂を配合したコンクリート製品のトレーサビリティーと透明性の担保

# 付録2-1-12

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、 10,000Bq/kg 以上の除去土壌を想定し、福島県内の土壌中の放射性セシウムのロータリ ーキルン炉による連続溶融塩処理と酸処理による脱離、ゼオライトによる回収・安定化に 関する実証試験を実施する。

実施内容:

福島県浪江町の2地点の放射性土壌と非放射性土壌3種を採取し、連続処理を想定した小型ロータリーキルン炉を用いた溶融塩処理・酸処理の条件出しを行う。その結果を踏まえてベンチスケールのロータリーキルン炉を用いた溶融塩処理を行い、本処理の有効性を検証する。また、酸溶液中の放射性セシウムのモルデナイトによる回収、アルカリ水熱処理によるポルサイト化を行うと共に得られたポルサイトの溶液安定性を評価する。上記検討結果や同関係の技術情報等に基づき、実機処理プロセスについて検討す

る。

技術概要:

(1) ロータリーキルン炉を用いた溶融塩処理 (CaCl<sub>2</sub>)と、酸処理(HCl(1 M 以下))による土壌中の Cs 脱離

(2) ゼオライト (モルデナイト(MOR)) による回収

(3) ポルサイト(POL)による固定・溶液安定性評価

1. 試験フロー





2. 成果目標

除染率 95%以上、5 千 Bq/kg 以下の浄化物、減量率 1/10、処理設備の大型化・連続処 理に対応する実機処理プロセスの構築、運転に係る概略費用(15 万円/t 以下を目標)を 試算することを目標とする。 実証試験の結果:

浪江町の3種の土壌を小型ロータリーキルン炉を用いて溶融塩処理し、その後酸処理 することより一定のCs除去効果が得られ、放射性土壌については放射性Cs(RCs)濃度を 5,000 Bq/kg以下に減少できた。しかし、除染率は最大85%となり目標値にはとどかなか った。ベンチスケールキルンを用いた処理では、今回の試験条件においては小型キルンと 比較して除染率が低下する結果(63.6%)となった。酸処理とモルデナイト吸着に関して は連続処理装置を製作し、その装置を用いた効率的な処理が可能なことがわかった。アル カリ水熱処理によるモルデナイトのポルサイト転換も確認でき(減量率96%以上)、浸出 試験の結果からはRCsをポルサイト中に安定保持できることがわかった。また、本処理 の概略系統図を作成し、処理費用を試算した結果、13.6万円/t以下で処理できることが 明らかになった。

技術等の評価:

RCs 除染率は 85%であり 95%の目標は達成できていないが、それ以外の目標は達成で きた。ベンチスケールキルンでは更に除染率が低下し、電気炉とは異なりロータリーキル ン炉による連続処理では課題が残った。しかし、それ以外の処理工程においては高い Cs 分配比を示している。RCs 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:

1万 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:
 13.6 万円/t(土壌) (設備費、
 薬品費、人件費、廃液処理費等か
 ら算出))

歩掛り(作業人工、作業速度等): 運転員10人 1.5t/hを処理。 主な4作業工程を1日で実施。

コスト評価条件:

設備稼働は10年で評価、設備費、薬剤費、人件費(10人)、電気代、建屋費、設計 費、設備メンテ費、廃液処分費から算出した。なお、水道料金、放射線管理費は考慮し 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り、浄化 装置により廃液を循環利用すれば更に低コストな処理が期待できる。

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	処理後の土壌と濃縮物(ゼオライト)は、混合
(東京都小金井市梶野 3-7-2)	し、8,000Bq/kg以下として指定業者にて産廃処
物質・材料研究機構並木地区	分を依頼する。廃液は検出限界以下であること
(茨城県つくば市並木 1-1)	を確認し大学にて産業廃棄物として処分する。

# 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(RCs)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

「令和4年度除去土壤等の減容等技術実証事業(その5)」において、浪江町の11 種の土壌を用いて、「溶融塩・酸処理によるRCsの脱離」、「天然モルデナイト(MOR) によるRCsの回収」、「RCs回収天然MORのポルサイト(POL)化による安定化」 の一連のバッチ試験を行い、本技術の有用性を確認した。また、洗浄液と浄化物の 再生利用が可能なことも実証した。今年度は、溶融塩処理に関して、福島県浪江町 の放射性と非放射性土壌を用いたロータリーキルン炉によるベンチスケール連続 処理と、酸処理及び天然MORによる連続回収処理を行い、目標とする連続処理シ ステムを達成できるかを検証する。

上記、ベンチスケール試験を円滑に実施するにあたっては、事前に条件を絞り込む必要があるため、事前試験を小型ロータリーキルン炉で実施し、一連の処理を検証する。また、アルカリ水熱処理による天然 MOR の POL 転換においては、POL 中のセシウムイオンの溶液安定性を溶出試験により評価する。

得られた溶融塩・酸処理及び安定化処理試験の結果や同関係の技術情報等に基づき、処理設備の大型化・連続処理に対応する実機処理プロセスについて検討し、 概略フロー作成、課題整理を行う。また、実機処理を行う場合の設備、運転に係る 概略費用を試算する。

(3)目標

本年度は、除染率 95%以上、5 千 Bq/kg 以下の浄化物、減量率 1/10、処理設備の大型化・連続処理に対応する実機処理プロセスの構築、運転に係る概略費用(15 万円/t 以下を目標)を試算することを目標とする。

# 2. 試験の手順

浪江町の放射性土壌及び非放射性土壌を用いた試験のフローを図2-1に示す。浪江 町土壌については、放射性土壌1種と非放射性土壌2種を用いて行った。非放射性土 壌は、安定セシウムを吸着させて用いた。ラボスケール事前試験では、小型ロータリ ーキルン炉を用いて詳細に処理条件を検討すると共に、その後の一連の処理を行い、 アルカリ水熱処理後に得られるポルサイトに関しては、浸出試験(溶液安定性試験) を、米国原子力学会の動的 Cs 浸出試験法(ANSI/ANS-16.1-2019)に準拠した方法で 行う。ベンチスケール試験では、事前試験で得られた試験結果をもとに、ベンチスケ ールロータリーキルンを用いて連続処理を行い、また、その後の酸処理とゼオライト 吸着に関しても大型の処理装置を用いて連続処理を行う。



#### 3. 試験の実施方法・測定方法と実験結果

## (1)土壌の評価

浪江町から採取した放射性土壌及び非放射性土壌の含水率の測定、強熱減量の 測定(乾燥機、電気炉)、構造解析(粉末X線回折装置(XRD)、熱特性を熱重量示差 熱分析装置(TG-DTA))、化学組成分析(エネルギー分散型X線分析(EDX))を 用いて実施した。また、RCs含有土壌については、NaIシンチレーション測定器(以 下 Na-I 検出器と記す)またはゲルマニウム半導体検出器(CANBERRA 製 以下 Ge 検出器と記す)で RCs 濃度の分析を実施した。表 3-1 に各土壌の現地、浪江町役場、 大学における線量率(放射能濃度)の測定結果及び、大学研究室持ち込み量を示す。 採取地点では空間線量率(ブランク値)が高く、放射性土壌では 0.03 µ Sv/hを基準 として土壌を採取した。実際、線量率の低い浪江町役場における測定では 0.05 µ Sv/h(予測値 4,900Bq/kg)と増加し、大学研究室での NaI 測定では浪江町役場に近い 4,994 Bq/kg となった。この土壌を 1.8 kg (8,989.2 Bq (10,000 Bq 以下))大学研究 室に持ち込み試験を行った。

**表 3-1** 各土壌の現地、浪江町役場、大学における線量率(RCs 濃度)の 測定結果及び、大学研究室持ち込み量

	採取地点			浪江町役場での測定			大学測定値		
	空間線量率 ( <i>μ</i> Sv/h) BG測定	土壤線量率 ( <i>μ</i> Sv/h)	予測値	空間線量率 (μ Sv/h) BG測定	土壤線量率 ( <i>μ</i> Sv/h)	予測値	持ち込み量 (kg)	NaI測定器 (Bq/kg)	持ち込み Bq
① 表層土壌 放射性土壌	0.51	0.54	0.03 µ Sv∕h (2,900Bq/kg)	0.05	0.1	0.05 µSv∕h (4,900Bq/kg)	1.8	4,994	8,989
① 30 cm以深土壌 非放射性土壌	0.51	0.51	0.00 μ Sv/h (0 Bq/kg)	0.05	0.05	0.00 <i>µ</i> Sv/h (0 Bq/kg)	20	検出限 界未満	0
⑥ 30 cm以深土壌 非放射性土壌	0.56	0.56	0.00 µ Sv/h (0 Bq/kg)	0.05	0.05	0.00 µ Sv/h (0 Bq/kg)	20	検出限 界未満	0

図 3・1 に 1 mm 以下の⑪放射 性土壌、⑪非放射性土壌及び、⑥ 非放射性土壌の XRD パターン を示す。いずれの土壌にも Cs 固 着能力の高い風化黒雲母(WB)や 雲母鉱物(I)の回折線が見られ た。また、⑪土壌に関しては放射 性、非放射性土壌で構成鉱物量 はほぼ変わらないことがわかっ た。⑥は風化黒雲母(WB)と雲母 鉱物(I)の高い回折線を示した。 この結果は有機物量や水分量が 少なく相対的に高くなったとこ とも考えられるが、雲母鉱物(I)



の回折線は他の試料と比較して、非常に高く、鋭い回折線のため、雲母鉱物を多く含 有していることが示唆された。表 3-2 に⑪非放射性土壌及び⑥非放射性土壌の Cs 吸 着率及び吸着量を示す。各土壌 1 kg と塩化セシウム水溶液(Cs 濃度 1,000 mg/L) を 24 時間接触させた結果である。⑪土壌が 96.0% (921.3 mg/kg)、⑥土壌が 89.1% (855.3 mg/kg) と高い Cs 吸着率を示した。

表 3-2 ⑪非放射性土壤及び⑥非放射性土壌の Cs 吸着率及び吸着量

	Cs吸着率(%)	Cs吸着量(mg/kg)
⑪非放射性土壌	96.0	921.3
⑥非放射性土壤	89.1	855.3

表 3-3 に Cs 吸着前後の非放射性土壤①、⑥のかさ密度と安息角測定結果を示す。 これらの測定値はキルン試験時の処理時間と充填率に関わる重要な因子である。 ⑥土壌と比較して①土壌はかさ密度と安息角が小さかった。土壌①は有機物を多 く含み、低密度で、流動性は高い土壌であり、土壌⑥は土壌①と比較して高密度 で、粘土を多く含むため流動性が悪くなっていると考えられる。Cs 吸着後は振と う時に、粒子が細かくなるため、流動性が上がり若干安息角が減少していると考え られる。

表 3-3 Cs 吸着前後の非放射性土壌⑪、⑥のかさ密度と安息角測定結果

	かさ密度(g/cm <sup>3</sup> )	安息角(゜)
⑪非放射性土壌	0.84	29
⑪非放射性土壤(Cs吸着後)	0.84	24
⑥非放射性土壤	1.34	34
⑥非放射性土壤(Cs吸着後)	1.29	30

# (2)溶融塩・酸処理

小型ロータリーキルンによる 溶融塩処理の基準条件は、土壌量 5.0g(充填率16.1%)、CaCl2添加 量 10%、焼成温度(炉外温度) 800℃、焼成時間1hとし、基準 条件からそれぞれのパラメータ を変えて評価した。

図 3-2 に⑪放射性土壌を各条 件で溶融塩・酸処理した後の写真 を示す。土壌量に関しては 10 g では処理前土壌に近い色を示し、 充填率が 30%以上と高いため、



図 3-2 ⑪放射性土壌を各条件で 溶融塩・酸処理した後の写真

焼成が十分でなかったと考えられる。一方 1g では、黒色を示さず焼成が十分に 進み有機物量が減少していると推測される。CaCl2添加量に関しては、40%から顆

# 付録2-2-6

粒状になり、土壌粉末が凝集していることが示唆された。各土壌の物性評価の結果 とも良く一致した。焼成温度に関しては大きな差異は認められなかった。焼成時間 に関しては 0.5h, 1h では大きな変化はなく、4h の焼成では黒色を示さず、土壌量 1g と同様に焼成が十分に進んだためと考えられる。

図 3-3 に酸処理後⑪放射性土壌の処理量と除染率及び RCs 濃度の関係を示す。 5 g で 56.8%の除染率を示し、処理量 1 g と 10 g では除染率が大きく低下した。 酸処理後の写真からもわかるように、1 g では反応が進み、析出したケイ酸塩鉱物 等に Cs が取り込まれ除去できなくなったと考えられる。一方 10 g では充填率が 高く、焼成が進まなかったためと考えられる。また、5 g においても目標の 5,000 Bq/kg 以下は達成できていない。これはキルン炉心管温度を 800℃に設定している こと、炉心管内で石英ソケットを利用していることにより内部実温度が低下して いるためと考えられる。

図 3-4 に酸処理後⑪放射性土壌の CaCl<sub>2</sub> 添加率と除染率及び RCs 濃度の関係 を示す。添加なし(0%)、5%では除染率が低く、10%で大きく減少し、20%で最大 値(除染率 72%)を示し、

(%)

樹

头

Cs际

4,000Bq/kg以下となり目 標値に達した。しかし、 40%では再び低下した。昨 年度の電気炉での実験で は、10%が最大値を示した が、本研究では先に述べた ようにキルン炉内温度が 800℃以下であることが予 想され、CaCl<sub>2</sub>10%では十 分な溶融状態にならなかっ たため、20%の CaCl<sub>2</sub> が必 要であったと考えられる。 なお、40%では、粉末から 顆粒状になり、内部まで十 分に反応しなかったことや 難溶解性のケイ酸塩鉱物が 形成して RCs が取り込ま れ溶出しなかったことが原 因と考えられる。40%で除 染率が低下した結果は、昨 年度の電気炉における結果 とも一致する。



図 3-3 酸処理後⑪放射性土壌の処理量と 除染率及び RCs 濃度の関係



図 3-5 に酸処理後<sup>①</sup>放射性土 壌の処理温度と除染率及び RCs 濃度の関係を示す。CaCl<sub>2</sub>の融 点より低い 700℃では、除染率 が低く800℃、900℃と処理温度 の増加により除染率はあがり、 900°Cで80%以上、3,000 Bq/kg 以下を達成した。900℃で最大値 を示したのは 800℃ではキルン 内温度が 800℃以下であること が原因と考えられる。しかし、溶 融塩処理において 900℃では RCs濃度が若干減少する傾向がみ られており、放射性 Cs の放出が 僅かに起きている可能性も考えら れる。

図 3-6 に酸処理後⑪放射性土壌 の処理時間と除染率及び RCs 濃 度の関係を示す。0.5hの処理時間 が最も除染率が高く、処理時間が 長いほど除染率が低いことがわか る。4hの焼成では土壌の黒色が消









失しており、反応が進みケイ酸塩鉱物等に放射性 Cs が取り込まれて溶出しにくくなった可能性が考えられる。

各処理後の XRD パターンは酸処理前(溶融塩処理後)とほとんど変わらない XRD パターン(WB と I のピーク減少)を示し、大きな鉱物量の変化は見られなか った。①と⑥の非放射性土壌に関しても①放射性土壌とほぼ同様な傾向が見られ た。なお、①放射性土壌の N<sub>2</sub> 雰囲気による試験で放射性 Cs 除染率が向上するこ とが明らかになっており、ベンチスケール試験では N<sub>2</sub> 雰囲気の試験も実施した。

(処理量 5g、CaCl<sub>2</sub>10%、処理温度 900℃、処理時間 0.5h、酸処理 0.01MHCl 処 理時間 10min (室温)、雰囲気 (N<sub>2</sub>フロー 0.1L/min.)

⇒ 除染率 85.1 % 処理後土壤放射性 Cs 濃度 2,040 Bq/kg)

# (3) ゼオライト吸着処理

図 3-7 に①放射性土壌の各処理後酸溶液を通水後の MOR の RCs 濃度を示す。 土壌中からの脱離量(酸処理溶液中の RCs 濃度)に応じた RCs 濃度を示し、ま た溶液中の RCs 濃度は 10 g 処理(43.6 Bq/kg)以外は検出限界以下となり、ほ ぼ 100% 酸溶液中から RCs が移行したことを示している。①と⑥の非放射性土 壌に関しても各処理後酸溶液中の Cs を MOR カラムでほぼ 100%回収できている ことが明らかになっている。



図 3-7 各処理後酸溶液を通水後の MOR の放射性 Cs 濃度

(4) 安定化 (ポルサイト化) 試験 図 3-8 に⑪放射性土壌におい て Cs 除染率の高かった 5 条件で 放射性 Cs を吸着させた MOR の アルカリ水熱処理後の XRD パタ ーンを、図 3-9 に基準条件で得ら れた生成物の SEM 像を示す。 XRD からいずれも POL 単相で あることがわかり SEM 像から POL 特有の多面体結晶が観察さ れた。以上より、RCs を安定保持 可能な POL に転換できているこ とがわかる。







図 3-9 基準条件で得られた生成物の SEM 像

表 3-4 に POL 中の RCs 濃度を示す。MOR から POL に RCs が移行できている ことがわかる。しかし、溶融塩・酸処理時の除染率が低いこと、各プロセスでのわ ずかなロスなどにより最大 25,000 Bq/kg の約半分となった(RCs 吸着 MOR2.0 g からの転換)。 図 3-10 に上記①~⑤の POL の RCs 浸出量を示す。表 3-4 に示した RCs 保持 量に対してほぼ検出限界以下(200 Bq/kg 以下)の値を示し、POL の溶液安定性が 確認された。

表 3-4 各 POL 中の RCs 濃度(Bq/kg)

	放射性Cs濃度(Bq/kg)
①CaCl <sub>2</sub> 10% 800°C 1h (基準条件)	11479
@CaCl <sub>2</sub> 10% 800°C 0.5 h	13643
③CaCl <sub>2</sub> 10% 900°C 1h	11852
④CaCl₂ 20% 800°C 1h	14450
⑤CaCl <sub>2</sub> 10% 800°C 1h 窒素ガス 0.1 L/min.	12760



# (5) ベンチスケール試験

図 3-11 にベンチスケールロータリーキルン 炉の写真を示す。表 3-5 に⑪放射性土壌の処 理条件を、表 3-6 に処理前、溶融塩処理後、 酸処理後の土壌の RCs 濃度と土壌減量率及び RCs 除染率を示す。なお、放射性土壌は少量 のため螺旋羽を炉心管に入れ、中心部で充填 率を保持しながら加熱する方法で行った(半 バッチ式)。

全体的に RCs 除染率は低い結果となった が、30 分, 800℃, N<sub>2</sub> 雰囲気処理(No.8)と 60 分, 800℃, N<sub>2</sub> 雰囲気処理(No.9)が高い RCs 除 染率を示した。



図 3-11 ロータリーキルン炉

表 3-5 ⑪放射性土壌の処理
-----------------

処理条件						
試料No.	焼成時間(min)	焼成温度(℃)	雰囲気	CaCl <sub>2</sub> (%)	充填率(%)	
8	30	800	N2	10	8	
9	60	800	N2	10	8	
10	30	850	N2	10	8	
11	30	800	Air	10	8	

表 3-6 各⑪放射性土壌の RCs 濃度と土壌減量率及び RCs 除染率

試料No.	処理前土壌 (Bq/kg)	溶融塩処理後土壌 (Bq/kg)	酸処理後土壌 (Bq/kg)	酸処理後土壌減量率(%)	除梁平 (%)
8	10,085	9,634	6,260	24.4	53.1
9		7,703	4,651	21.1	63.6
10		7,799	7,782	28.5	44.9
11		13,393	11,292	26.1	17.3

No.9 試料では除染率 61%で, RCs 濃度 5,000 Bq/kg 以下であったが、溶融塩 処理による RCs の脱離も見られ、長時間の処理は RCs 放出を引き起こすと考えら れる。今回 N<sub>2</sub> 雰囲気にするため、3.7 L/min に流量を増加したことも RCs の放出 の一因と考えられる。また、放射性土壌持ち込み量の制限のため、充填率 8%での 実験となったことも RCs 除染率が上がらなかった原因と考えられる。一方、850°C (No.10)の試験では溶融塩処理による RCs 脱離が進み、また酸処理での RCs 除染 率も上がらず、融点を大幅に超える処理は適さないことがわかった。Air 雰囲気 (No.11)の試験においても、充填率の影響も一因として考えられるが、溶融塩・酸 処理の効果がほとんど見られなかった。安定なケイ酸塩鉱物に取り込まれたこと が一因と考えられる。

なお、その後のゼオライト吸着工程は、ほぼ 100%の Cs 吸着を示し、安定化 (POL 化)処理工程では、若干アルカリ水溶液中に Cs が溶出するものの大半は POL へ移行することがわかった。

図 3-12 に本処理の概略系統図の一部を示す。①土壌搬入機、②土壌受入れバン カー、③土壌定量供給機、④CaCl2 混合ミキサー、⑤CaCl2 ホッパー、⑥CaCl2 投 入機、混合土壌バンカー、⑦混合土壌移送コンベアからなるキルン投入前の工程、



⑧ロータリーキルン(電気式炉)、⑨フィルタ、⑩ロータリーフィーダ、⑪ガ ス冷却器、⑫空気加熱器からなるキルン処理工程を示している。その他酸処理 工程、ゼオライト吸着工程、安定化(ポルサイト化)工程の概略系統図を作成 している。

上記処理による土壌 1t 当たりの概算費用(設備稼働 10 年)(薬品費、ゼオ ライト、電気代、人件費、設備費、酸廃液処理費、建屋費用等)は、13.6 万円 /t 以下で処理が可能であることがわかり、目標の 15 万円/t 以下を十分下回る 結果となった。浄化装置による廃液の循環利用により更なるコスト削減が期待 できる。

# 4. まとめ

浪江町の⑪放射性土壌、⑪非放射性土壌、⑥非放射性土壌を用いた小型ロータリーキルンを用いた溶融塩処理では、昨年度の電気炉試験と比較して除染率が低下するものの、一定の除染効果(85%)が見られた。また、ゼオライト吸着工程は、ほぼ 100%の Cs 吸着を示し、ポルサイト安定化処理では、若干アルカリ水溶液中に Cs が溶出するものの大半はポルサイトへ移行することがわかった。ポルサイトの浸出試験では、非常に低い Cs 浸出率を示し、安定に Cs をポルサイト構造内に保持していることがわかった。

ベンチスケールロータリーキルンを用いた試験では、昨年度の電気炉によるバッチ処 理や本年度の小型キルンでの事前試験と比較して除染率が低下することがわかった (63.6%)。しかし、いずれの土壌でも一定の Cs 除去率を示したため、詳細に条件を検討 することにより、除去率を向上できると考えられる。酸処理とゼオライト(モルデナイ ト)吸着に関しては、連続装置を製作し、その装置を用いた効率的な処理が可能なことが 明らかになった。アルカリ水熱処理によりモルデナイトのポルサイト転換も確認でき、 RCs を安定保持できることがわかった。また、本処理の概略系統図を作成でき、それに 基づいた処理費用を試算した結果、13.6 万円/t 以下で処理できることが明らかになった。 5 千 Bq/kg 以下の浄化物、減量率 1/10、15 万円以下の処理費用は達成できた。しかし、 RCs 除染率は最大 85%となり、目標値(95%以上)にとどかず課題が残った。

#### 実施代表者: 鹿島建設株式会社

実証テーマ名:分級処理に伴い発生する細粒分の処分に関する技術的実証

~ (その1)シルト分の再生資材化と細粒分中の有機物分離の検討~

#### 概要:

分級処理によって発生する細粒分(高濃度土壌)を最終処分する上でできるだけ再生利用量 を増やして処分量を減量化することは事業全体のコスト削減に有効である。また土壌中の有機 物量を削減することは処分後の土壌の安定化のため有効である。そこで、本実証事業ではシル ト分の再生資材化と、遠心分離機による細粒分中の有機物分離について検討した。

#### 実施内容:

- ・ 分級洗浄において発生した 75µm 以下の泥水をさらに 20µm で分級し、20-75µm のシルト 分の再生資材としての利用可能性について検証する。
- ・ 20µm 以下の細粒分をデカンタ式遠心分離機で処理し、土粒子と有機物の分離を試行する。

※【次年度】20μm 以下の細粒分から生成した脱水ケーキについて、Cs 溶出に関する安定性 評価を実施する予定である。

# 技術概要:

環境省・戦略検討会で示された土壌Cは、その分級処理によって発生する細粒分(高濃度 土壌)の処理について、熱処理をすることが1つのシナリオとして検討されているが、費用が 高いことが大きな課題である。本実証は、(1)シルト分も可能なかぎり再生利用するために分 級処理フローに20µm分級を追加して(下図の(1))20~75µmのシルト分も再生資材に加える こと、(2)20µm分級後の細粒分について遠心分離により有機物を除去し(下図の(2))、有機物 除去後の脱水ケーキを直接埋立処分するシナリオの技術検証を行うものである。セシウムは除 去土壌中の粘土粒子に吸着すれば溶出しにくくなることは確認されているものの、分級処理後 の細粒分(脱水ケーキ)では、分級処理の過程で含まれる薬剤の影響や細粒分の流出などによ るセシウム溶脱の懸念があり、長期安定性については十分に検証されていない。そのため、埋 立処分を想定し、細粒分流出に伴う放射性物質の拡散や、受入分別・分級処理等の各段階で添 加される薬剤がセシウムの溶出に及ぼす影響について検証する必要がある。

本実証事業の目的は、(1) 20µm 分級により得られた 20~75µm 分画の再生利用の検討、 (2) 遠心分離による有機物除去効果の検証および有機物を除去した 20µm 以下細粒分より生成した脱水ケーキからの放射性セシウムの溶出・溶脱挙動を評価・検証することである。

令和5年度は分級プラントを設置して実際の除去土壌を用いた分級処理を実施し、(1)に対して20-75µmの再生資材化の検討、(2)に対して遠心分離機による有機物分離効果の検証を行い、令和6年度には(2)の脱水ケーキの長期安定性評価を実施する。



実証試験の結果:

1. 20-75µm(シルト分)を含む除去土壌の再生資材としての有効評価

1 1 1

- ・本実証の土壌(粒度構成 20µm 以下: 37.4%)の場合、分級点: 20µmとすると 35.0%が処分となり、残りの 65.0%が再生利用できる結果となった(右図)。
- ・20-75µmのシルト分を再生資材に 含めることで、分級点:75µmと した場合(処分:46.5%、再生利用: 53.5%)と比較して再生利用量を 11.5%増やすことができた。
- ・処分量が46.5%から35.0%となり、
   約25%削減できる結果となった。
- ・砂分・シルト分合算の放射性物質 濃度は4,730Bq/kgとなり、除染率



は 48.5% となった。この除染率で算定すると、再生利用基準である 8,000 Bq/kg-w を目標値 とした場合 15,400 Bq/kg-w までの土壌を処理可能と算定できる。

分画	粒度	分級後	Cs-137	含水比	Cs-137	Cs-137 合算
	構成	重量比(d)	[Bq/kg-d]		[Bq/kg-w]	[Bq/kg-w]
75µm-2mm	44.6%	53.5%	7,170	48.5%	3,750	4,730
20-75µm	18.0%	11.5%	13,910	66.6%	8,800	
0-20µm	37.4%	35.0%	(約 20,000)	(約100%)	(約 10,000)	(約 10,000)

- 2.20μm以下細粒分中からの有機物分 離試験
  - ・デカンタ式遠心分離機により、強熱減量としてカウントされる有機物を脱水ケーキB(オーバーフロー側)に30~55%の範囲で集めることが可能であることが確認された。 (右図は代表1ケース)
  - ・脱水ケーキAの有機物含有量を低 減できることを確認した。これが 埋立処分時の脱水ケーキに安定性 に影響を及ぼすかについて、来年 度事業で確認する。

分級後の各分画の強熱減量と重量の積の比率



技術等の評価: 20-75µmのシルト分の分画を再生資材化し、熱処理の対象となる処分量を約 25%削減することが可能となる。

作業員被ばく量評価: 線量の高い脱水ケーキとして集積することで近傍の空間線量は最大 0.5µSv/hまで上がる。さらに脱水ケーキを封入したフレコンの表面線量率は1.37µSv/hであっ た。脱水ケーキの封入作業を行っていた作業員の1日の最大被ばく量は5.6µSvであった。

コスト評価:	歩掛り(作業人工、作業速度等):				
・付着粒子分離+20µm 分級:4.6 万円/t	運転員:6人、処理能力:除去土壤 40t/h				
・有機物分離追加:5.8 万円/t					
コスト評価条件:5年稼働(250日/年、8h/日)、有機物分離用デカンタ式遠心分離機5台、ボ					
ールミル(φ2m)2 台、薬剤、後処理設備、建屋並びに運転・維持管理費					
安全性の評価: 一般的な分級処理における安全管理に加えて、高線量となる脱水ケーキの取					
り扱いはできるだけ機械で行うこととして	作業員の被ばくを低減する対策が必要				

試験場所(往所):技術実証フィールド、	除去物保管場所と保管状況:作製した脱水ケーキ
他(福島県双葉郡大熊町)	は次年度実証事業の試験に供するため技術実証フ
	イールドで保管中

# 試験目的

環境省・戦略検討会で示された土壌Cは、その分級処理によって発生する細粒分(高濃度 土壌)について熱処理をすることが1つのシナリオとして検討されているが(図-1)、熱処理 は費用が高いことが大きな課題である。本実証では(1)シルト分も可能なかぎり再生利用する ため、分級処理フローに20µm分級を追加して(図-2の(1))20~75µmのシルト分も再生資材 に加えること、(2)さらに20µm分級後の細粒分を熱処理する前に遠心分離により有機物を除去 し(図-2の(2))、有機物除去後の脱水ケーキを直接埋立処分するシナリオの技術検証を行うも のである。セシウムは除去土壌中の粘土粒子に吸着すれば溶出しにくくなることは確認されて いるものの、分級処理後の細粒分(脱水ケーキ)の長期安定性については十分にされていると はいえない。そのため、埋立処分を想定し、細粒分流出に伴う放射性物質の拡散や、受入分 別・分級処理等の各段階で添加される薬剤がセシウムの溶出に及ぼす影響について検証してお く必要がある。また、埋立処分後の安定性の観点からは有機物が除去されていることが望まし いと考えられるが、残留する有機物の影響については正確に把握されていない。

本実証事業の目的は、(1) 20µm 分級により得られた 20~75µm 分画の再生利用の検討、 (2) 遠心分離による有機物除去効果の検証および有機物を除去した 20µm 以下細粒分より生成した脱水ケーキからの放射性セシウムの溶出・溶脱挙動を評価・検証することである。 令和5年度は分級プラントを設置して実際の除去土壌を用いた分級処理を実施し、(1)に対

して 20-75µm の再生資材化の検討、(2)に対して遠心分離機による有機物分離効果の検証を行い、令和6年度には(2)の脱水ケーキの長期安定性の評価を実施する。



以降では令和5年度の結果を報告する。

付録2-3-3



付録2-3-4



写真-6 分級後の各分画

付録2-3-5

#### 【試験ケース】

除去土壌の受入分別施設で使用された改質材には、各社で多少の差異はあるが、高吸水性 樹脂や高分子凝集剤が含まれている。そのため、分級処理に際して除去土壌に加水し、泥水 状にすると、高吸水性樹脂が再生資材に残留して長期的に土質性状を変化させる可能性や、 凝集沈殿により細粒分が効果的に分離できない可能性がある。

分級処理において改質材の無効化剤を泥水に混合することで、高吸水性樹脂や凝集剤の効 果を無効化して分級洗浄の本来の効果を発揮させることが期待できる。硫酸第一鉄や消石灰 といった塩を加えると無効化剤として機能することが過去の実証事業等で確認されている (硫酸第一鉄:H31年度実証事業(奥村組)、消石灰:環境放射能除染学会誌 2020 Vol.8,

投入量

土壌

ボールミル

No.1, pp.17-31, 日下ら)。 本実証事業では分級洗浄により脱水ケーキ を作製する上でこのような薬剤を添加するこ とを想定し、薬剤なしの試験ケースと、消石 灰・硫酸第一鉄の薬剤を使用した試験ケース の3ケースを実施する。



試験ケース	使用する薬剤
1	なし
2	消石灰
3	硫酸第一鉄

分級洗浄後の各分画

礫 (2mm以上) +ボールミル

砂 (75µm-2mm)

シルト (20-75µm)

脱水ケーキA (0-20µm)

脱水ケーキB(0-20µm)

ろ水

・有機物量(強熱減量として把握)

物質収支の確認

・放射性物質(Cs-137)

図-5 試験結果の確認方法

3. 分級洗浄処理の結果

分級洗浄後の各分画の重量、放射性 物質濃度、強熱減量を測定し、それぞ れの物質収支を確認する。さらに、除 染率や減量効果を評価した。次に、本 実証事業の主目的であるシルト分の再 生資材化について検証した。また、粘 土分(0-20µm)については遠心分離を行 い、脱水ケーキ(A:アンダー側・B:オ ーバーフロー側)に含まれる有機物量 を評価した。有機物量は強熱減量の値 を有機物量として評価した。

なお、脱水ケーキを作製する際に実 施したフィルタープレスではろ水が発 生するが、これらは全ての試験ケース において放射性物質が検出されなかっ

た(ND)。そのため、以降の物質収支の計算ではろ水を対象外とする。

 ・① 重量の物質収支
 ・

下図に除去土壌の粒度構成と各試験ケースで得られた分画の重量比を示す。除去土壌の粒度構成 は 20-75µm をシルト分、0-20µm を粘土分として表している。礫は表面破砕用に添加したボールミ ルを含んで回収されることから重量の計算対象にいれると収支誤差が大きくなるため、物質収支の 計算においては対象外とした。

たところ、砂分に 75µm 以下の粒子が 120 13~23%含まれていることが確認され 100 80 分は元の粒度構成の18%から12%程 8 度に減少した。 60 ПĦ HIIII 40 ■砂分 20 Ω 粒度構成 ケース1 ケース2 ケース3

いずれの試験ケースも砂分がもとの粒度構成より多くなっている。砂分中の粒度構成を確認し

- たため、そのことが影響したと考え られる。 ・ 細粒分が砂分に混入した分、シルト
- 粘土分はデカンタ式遠心分離機によ って脱水ケーキAとBに分離され た。その重量比はA:B=1:1.7~5.1 程度であった。
- ・ 草木類の割合はいずれも2~3%程度 であった。
- ケース1~3で分級後の重量に明瞭 な差はなく、本試験における物質収 支の担保を確認した。



付録2-3-6

## ② 放射性物質(Cs-137)の物質収支

表-4 に各分画の放射性物質(Cs-137)と、物質収支の計算結果を示す。放射性物質濃度は乾燥重量 あたり(添え字-d)で示す。また、図-7 に各試験ケースの除去土壌の放射性物質(Cs-137)の収支を 示す。礫の分画では除去土壌由来の礫とボールミルが含まれるが、ボールミルには放射性物質が含ま れていないため、礫の分画で確認された放射性物質は除去土壌由来の礫ということになる。

Cs-137の半分以上が脱水ケーキAと脱水ケーキBに濃縮したことが分かる。特にケース1では半分以上を脱水ケーキBが占めており、ケース2でも脱水ケーキBが半分近くを占めている。

項目	分画	単位	1	2	3
投入量	土壌	[%]	100	100	100
放射性物質濃度 (Cs-137)	土壤	[Bq/kg-d]	13,900	13,900	13,900
	礫+ボールミル	[%]	447.4	448.8	431.9
	砂	[%]	49.5	51.4	47.6
回収率	シルト	[%]	11.4	10.2	11.6
(重量)	脱水ケーキ A	[%]	6.3	11.7	10.1
	脱水ケーキ B	[%]	32.5	22.2	17.0
	草木類	[%]	1.7	2.9	2.0
放射性物質	礫+ボールミル	[Bq/kg-d]	99	136	179
(Cs-137)	砂	[Bq/kg-d]	5,764	5,216	5,613
	シルト	[Bq/kg-d]	17,000	13,000	14,000
	脱水ケーキ A	[Bq/kg-d]	18,744	18,856	21,480
	脱水ケーキ B	[Bq/kg-d]	26,929	26,059	26,334
	草木類	[Bq/kg-d]	4,060	3,108	3,710
	礫	[Bq/投入 1kg-d]	442	611	773
	砂	[Bq/投入 1kg-d]	2,850	2,680	2,672
	シルト分	[Bq/投入 1kg-d]	1,942	1,322	1,623
濃度×回収率	脱水ケーキ A	[Bq/投入 1kg-d]	1,186	2,215	2,168
	脱水ケーキ B	[Bq/投入 1kg-d]	8,761	5,773	4,478
	草木類	[Bq/投入 1kg-d]	69	89	74
	合計	[Bq/投入 1kg-d]	15,300	12,700	11,800

# 表-4 Cs-137 の物質収支の計算



付録2-3-7

 (3) 有機物分離の結果

デカンタ式遠心分離機による有機物分離の効果を表-5に示す。ケース1およびケース2では分離前に比べて脱水ケーキAでは強熱減量が低下し、脱水ケーキBでは強熱減量が増加していることから、脱水ケーキBに濃縮したことが分かる。

20 温烈派里の試験和未												
分画		強熱減量の結果										
	ケー	ス1	ケー	・ス2	ケース3							
	分離前	分離後	分離前	分離後	分離前	分離後						
脱水ケーキ A	19.4%	17.0%	17.9%	14.8%	18.9%	20.6%						
脱水ケーキB		20.3%		19.8%		19.5%						

表-5 強熱減量の試験結果

有機物の物質収支として、各分画の強熱減量と重量の積の比率を図-8に示す。ケース1とケース 2では脱水ケーキBでの割合が高くなっており、有機物が濃縮していることが分かる。





- 4. 事業性の評価
- (1) コストの評価
- ①前提条件
- ・実機の想定には、市場に流通している標準機を組み合わせて利用することを想定し、プラントの標準処理能力は、除去土壌 40t/hr とする。
- ・実際の事業規模が大きい場合は、標準処理能力のプラント数を増やすことで対応する。
- ・本実証で利用した機器構成とし、それらを大型化した試算とする。
- ・本実証では除去土壌の塊をプラントに投入する際に解砕(前処理)が必要な事や除去土壌中の草 木等の夾雑物除去が多い事への対応が必要などの課題が得られたが、試算に際しては別途対応 と想定した。

②設計条件

・処理期間:5年、年間稼働日数:250日、日稼働時間:8hr(一部 11hr 稼働)

③総処理量、総コストと処理単価の計算

・総処理量: 1系列当たりの処理量: VOREWSのH31年度成果と同様に37万tとした。

(132 万 m3×1.4t/m3=185 万 t、185 万 t÷(5 年×250 日/年×8hr/日)÷40t/hr

= 4.62≒5系列、185万t/5系列=37万t/1系列)

- ・総コスト:212.9億円(表-6)
- ・処理単価 5.8 万円/t、8.1 万円/m3 であった。

(参考)20µm 未満の泥水をデカンタ式遠心分離機で有機物分離せずに脱水する場合の処理単価は試算 の結果、4.6 万円/t、6.4 万円/m<sup>3</sup>となった。

# 付録2-3-8

	5 年間)
--	-------

項目	コスト (億円)	備考
建設費	124.8	底面コンクリート、テント、プラント
運転・維持管理費	88.1	除去土壤 37 万 t 处理。5 年間。
合計	212.9	処理単価:5.8万円/t、8.1万円/m <sup>3</sup>

(2) 事業性

図-6 と図-7 から分級点を 75µm として礫・砂(75µm 以上)を再生利用分画とした場合と 20µm を 分級点として砂に加えて 20-75µm も再生利用分画とした場合について、それぞれの再生利用する分 画の重量の比率と放射性物質濃度を求めた。なお、礫は割合が少ないことと、ボールミルと一緒に回 収されて再生利用の数量が正確に把握されないため計算から省いた。図-9 には試験ケースそれぞれ で求めた値の平均値を示す。その結果、75µm 分級の場合は再生利用側の放射性物質濃度が 3,750Bq/kg-w、20µm の場合は 4,730Bq/kg-w となり、20µm 分級では細粒分比率が多くなることから 推察されるとおり濃度が高い結果となった。再生利用側の重量比は 75µm 分級の場合が 53.5%、20µm の場合が 65.0%となり、11.5%増加する結果となった。処分量が 75µm 分級の場合: 46.5%から 20µm 分級の場合: 35.0%となり、約

25%削減できる結果となった。

元の土壌の 20µm 以下の割 合が 37.4%だったのに対して 20µm 分級の場合の処分側の 比率は 35%であり、細粒分が 再生利用側に若干混入してい るものの、分級後の重量比率 は概ね粒度分布に従う比率と なった。

ПШ

ЛШ

この結果から算定した 20µm 分級における除染率は 48.5%<sup>\*2</sup>となり、再生利用の基 準である 8,000Bq/kg-w を目標 値として分級処理する場合 は、15,400Bq/kg-wの土壌まで 対応できることとなる。

図-10 は戦略検討会で示された 2022 年 度末時点の除去土壌の放射能濃度分布で あり、8,000Bq/kg-w 超は全体の 24.5%であ る。放射能濃度は時間経過に伴い減少する ため、事業開始時を想定して 2041 年時点 を対象に除去土壌の放射能濃度分布の変 化をシミュレーションし、2041 年時点で の分級洗浄の適用範囲を試算した。その結 果を図-11 に示す。シミュレーションに際 し、8,000Bq/kg-w 以上の分画は過去の資料 等を参照して按分した。

※2 除染率の計算は他の事例に倣って乾燥重量あたりで計算した。図-9の放射性物質濃度は利用時の状態を想定して湿潤重量あたりで示しているため、混同されないよう注意されたい。



# 付録2-3-9

2023年3月時点では全体の24.5%、300万m を占めていた 8,000Bq/kg-w 超の割合が 2041 年 には減衰により142万m<sup>3</sup>まで低下する。

本技術実証で示した 20µm を分級点とする分 級処理では 15,400Bq/kg まで対応できるため、 その対応可能処理量は113.5万m<sup>3</sup>、割合では高 濃度の80%を処理可能という結果となる。

表-7に事業コストの試算結果を示す。

A 案は、国立環境研究所で行われた減容化処 理に関する経済性の試算のうち、75µm を分級点 とした分級処理のコストを現在の価格で推定し た案、B 案は A 案をベースに分級点を 20µm に 小粒径化した案であり、C 案は本実証内容であ りB案と同様に分級点を20µmに小粒径化し、 さらにデカンタ式遠心分離により、有機物を分 離する案である。

A 案と比較して、B 案、C 案では熱処理量を 削減することにより大幅に事業コストを低減で き、その削減効果は B 案で 313 億円 (A 案比で <sup>当システムでは、15400Bq/kgの除去土壌を8,000Bq/kgにできる。</sup> ー7%)、 C 案で 472 億円(A 案比でー10%)と <sup>ょり高濃度である15400Bq/kg以上の除去土壌は濃度階級を分ける</sup> なる。

3	2023.03	3時点							
		放射能濃度の 濃度階級 (Bq/kg)	D	割合 (%)	土量 (m3)				
-		~	1000	12.70	1,560,000				
	低油中	1000 $\sim$	3000	39.90	4,910,000	9 300 000			
:	四版反	3000 ~	5000	13.80	1,700,000	5,500,000			
J		5000 $\sim$	8000	9.00	1,110,000				
	宣濃度	8000 ~	20000	20.20	2,490,000	3 000 000			
	尚濃度	20000 $\sim$		4.30	530,000	3,000,000			
L	)	÷ 🔲							

減衰、 2023年: 8,000~20,000Bq/kg

⇒ 2041年: 5,200~11,800Bq/kg に減衰

2041.03時点	
-----------	--

)		放射能濃度 濃度階級 (Bq/kg)	この と	割合 (%)	土量 (m3)				
		~	600	12.70	1,560,000				
•		$_{600}$ $\sim$	1900	39.90	4,910,000	_			
	低濃度	1900 $\sim$	3200	13.80	1,700,000	-			
		3200 $\sim$	5200	9.00	1,110,000				
		5200 ~	12800	20.20	2,490,000				
:	高濃度	12800 $\sim$		4.30	530,000	-			



# 分級処理対象量の試算(2041.03時点)

【補足】

B 案では熱処理量は A 案と比べて、約84%と なり、さらに次年度の安定性評価により脱水ケ ーキを直接埋立処分可能とすると、熱処理量を 約 70%に削減できる。この分 CO2 排出量の削 減効果も期待できる。

	放射能濃度	の	割合	+	믑				
	濃度階級		(%)	(m3)					
	(Bq/kg)		(70)	(115)					
	~	600	12.70	1,560,000					
	600 $\sim$	1900	39.90	4,910,000					
低濃度	1900 $\sim$	3200	13.80	1,700,000	10,400,000				
	3200 $\sim$	5200	9.00	1,110,000					
	5200 $\sim$	8000	13.01	1,600,000					
高濃度	$8000 \sim$	12800	7.24	890,000					
	12800 $\sim$	17100	1.99	148,000	1 420 000				
	17100 $\sim$	34200	1.50	282,000	1,420,000				
	34200 $\sim$		0.81	100,000					
は、本実証での分級処理実績から推定した処理可能土量。(89.0+14.8)/142=73%									
	は、解泥時間の調整で	対応できる	可能性あり						

図-11 分級洗浄(20um 分級)の適用範囲

表7	当技術を適用した場合	合の事業コスト試算

	F	国立理谙研究所資料**1			A案			B案				C案:本実証内容				
	<u>تا</u>	111/1采現1	则九別貝	γ-μ×1	(分	級処理単	単価の見直	īι)	(A案に	分級点	の小粒径(	とを追	(B案に、有機物分離を追加)			追加)
対象となる除去土壌								土壤C、	、土壌D							
分級処理方法		高度分級( <b>付着粒子の分離</b> )								高度分	級( <b>付着</b> :	粒子の分	·離+分級	点の小精	<b>粒径化</b> )	
分級点				分級点	:75µm							分級点	:20µm			
20-75µmの処理方法				熱久	心理							再生利用	+熱処理	1		
													遠心	分離によ	くる有機物	<b>]</b> 分離
<20µmの処理方法				熱久	心理					熱	処理		・埋	立処分	(脱水ケ-	-+A)
													・熱	処理(胞	党水ケーキ	FB)
	土壌C	土壌D	単価	合計	土壌C	土壌D	単価	合計	土壌C	土壌D	単価	合計	土壌C	土壌D	単価	合計
A //	(万m3)	(万m3)	(万円/m3)	(億円)	(万m3)	(万m3)	(万円/m3)	(億円)	(万m3)	(万m3)	(万円/m3)	(億円)	(万m3)	(万m3)	(万円/m3)	(億円)
全体	132.0	10.0	-	-	<b>≈2</b> 132.0	10.0	-		<b>≈2</b> 132.0	10.0	-	-	<b>≈2</b> 132.0	10.0	-	-
分級処理(75μm)	132.0	0.0	3.6	480	132.0	0.0	<b>∗3</b> 4.3	573	28.2	0.0	<b>∗3</b> 4.3	121	28.2	0.0	<b>∗3</b> 4.3	121
>75μm (低濃度、再生利用費)	67.0	0.0	7.0	469	67.0	0.0	7.0	469	14.3	0.0	7.0	100	14.3	0.0	7.0	100
<75μm (高濃度、熱処理費等)	65.0	10.0	44.1	3,305	65.0	10.0	44.1	3,305	13.9	10.0	44.1	1,053	13.9	10.0	44.1	1,053
<75µm (スラグ利用費)	65.0	10.0	5.2	393	65.0	10.0	5.2	393	13.9	10.0	5.2	125	13.9	10.0	5.2	125
分級処理(20μm)									103.8	0.0	<b>∗4</b> 6.2	644	103.8	0.0	*5 8.1	843
20-75μm (低濃度 再生利田毒)									64.6	0.0	7.0	452	64.6	0.0	7.0	452
(高濃度、熱処理費等)									39.2	0.0	44.1	1,726	28.4	0.0	44.1	1,252
<20µm (スラグ利用費)									39.2	0.0	5.2	205	28.4	0.0	5.2	149
<20µm (高濃度埋立費)													10.8	0.0	16.0	172
合計(億円)				4,647				4,740	0 4,427 4,268							
※1:県外最終処分に向け	※1:県外最終処分に向けた技術開発戦略の在り方に関する研究会活動報告書 Ver.2 2021年 P48-64国立環境研究所															

※2:国環研の試算と比較するために、対象土量を同じとした。

※3:物価高による分級処理単価2割程度上昇と仮定 ※4デカンタによ デカンタによる有機物分離有り 付録2-3-10

5. 線量モニタリング

分級プラントでの処理運転中および運転後の保管場所近傍などの空間線量を測定した。測定位置 を図-12に示す。各位置での測定結果は図-13に示す。○3地点と○6地点以外は、試験期間を通 して空間線量 0.1~0.2µSv/h を推移しており、これは管理区域境界の空間線量とほぼ同等であっ た。

○3地点は11/18以降で線量が増加しており、これは脱水ケーキなど分級処理で得られた分画の 袋詰めを行っていたため、その影響によるものであると考えられる。○3地点の空間線量は試験に 使用した土壌の撤去が完了する12/25まで高い状態が継続した。また○6地点では11/28だけ値が 高くなっており、これは原土を保管していた他に脱水ケーキの重量測定で一時的に線量の高い脱水 ケーキを保管した影響であると考えられる。

以上の結果から、原土や礫・砂の保管による影響は小さいが、脱水ケーキのように線量の高い分 画をフレコンに集積することで、そのエリアの空間線量が高くなることが確認された。



#### 6. 被ばく線量

日々の線量計データから各作業員の被ばく量を評価した。作業員は常時3~4名程度テント内に おり、プラント運転員は常時1~2名が常駐していた。図-14の作業員は各日3~4名のうちの最大 値、プラント運転員も同じように各日1~2名のうちの最大値をプロットした。作業員の被ばく線 量は11/26までは2~3µSvとなっており、11/27以降は最大で5.6µSvとなる日もあった。プラント 運転員は試験期間を通して1~3µSvを推移していた。

図-13から予想される被ばく線量は、一日8時間従事した場合、空間線量が0.2µSv/hの場合は8×0.2=1.6µSv、空間線量が0.4µSv/hの場合は8×0.4=3.2µSvとなる。期間などを照らし合わせても、空間線量から予想されるより若干多く被ばくしている結果となった。脱水ケーキを封入したフレコンでは、最大で表面線量率は1.37µSv/hとなっており、作業員はこのフレコンへの脱水ケーキの袋詰めや運搬作業をすることもあったため、空間線量から予想されるよりも多く被ばくしたと考えられる。

「除染電離則」適用となる作業員の法令職業被ばく限度としては5年で100mSv かつ1年間に つき50mSvという基準がある。今回実証試験では1日の被ばく量が最大5.6µSvであったため、年 間250日従事した場合は5.6×250=1400µSv/年=1.4mSv/年=の被ばく線量になると計算される。 「除染電離則」適用基準には抵触しないものの比較的高い数値であり、適用対象外であるものの

「再生利用に係る周辺住民・ 施設利用者及び作業者」の追加被ばく線量としての基準である1 mSv/年を超えるため、脱水ケーキの取り扱いはできるだけ機械で行うようにして人が近づかないように対策し、1日の被ばく量が4µSvを超えない程度(→250日従事で1mSv/年以下)に管理することが望ましいと考えられる。



#### 図-14 被ばく線量の推移