

放射性セシウム汚染土壌の洗浄処理に関する検討

Study of Soil Washing Treatment for Radioactive Cesium Contaminated Soil

中島 卓夫*1 田川 明広*2 松生 隆司*1
Takuo Nakashima Akihiro Tagawa Takashi Matsuike
大山 将*1 林 茂郎*3 高馬 崇*4
Sho Oyama Shigerou Hayashi Takashi Kouma

要旨

福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性セシウムにより広い範囲が汚染され、その除染が急務となっている。著者らは、放射性セシウムに汚染された土壌の浄化および減容化を図るため、従来から重金属汚染土壌の浄化に用いられている土壌洗浄工法に着目し、その適用を検討してきた。本報告は、実際の汚染土壌について、室内試験および土壌洗浄小型試験機を用いて実施した実証試験の内容およびその結果を報告するものである。

なお、本報告は、独立行政法人日本原子力研究開発機構が実施している内閣府委託事業「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務」の一部である平成23年度「除染技術実証試験事業」のうち、「湿式分級に表面研磨を付加した土壌洗浄処理技術による放射能汚染土壌の減容化」¹⁾として実施した成果を取りまとめたものである。
キーワード：土壌洗浄 放射能汚染土壌 減容化

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性セシウム等により広範囲の環境が汚染され、空間線量が高い地域が生じている。

これらの放射性セシウムによる空間線量が高い地域では、今後、除染等の措置により空間線量の低減が図られるが、その有力な除染手段の一つとして表土の除去が考えられる。このため、今後の除染作業により、大量の放射性セシウム含有土壌が生じることが想定されるが、効率的な除染を行うためには仮置きおよび中間貯蔵の量を圧縮できる経済的な減容化技術が求められている。

除染に伴い生じる放射性セシウム含有土壌は、主として民家や公共施設の周辺から回収されると想定されるが、それらの場所は日常生活における利便性から、砂や砂利等により被覆（舗装）されている場合が多く、回収土は粒度組成から考えると土壌洗浄処理技術による浄化・減容化に適するものと考えられる。

しかしながら、今回の事故に伴い土壌中に浸透した放射性セシウムは、一般的な重金属汚染土壌と比較して、レキや砂分にも比較的多く付着しており、これらから放射性セシウムを効果的に除去して除染率を向上させることが極めて重要と考える^{2),3)}。

本検討では、レキや砂の表面を研磨する機能を付加した土壌洗浄処理を行い、これにより放射性セシウムの除去率を向上させ、放射性セシウム含有土壌の減容化を図ることとした。なお、除染率は90%を目標とした。

2. 提案技術の概要

提案技術の概要を図1に示す。本技術は、従来、重金属汚染土壌の浄化に用いられてきた湿式分級洗浄に、ロータリー式洗浄機を用いたレキの研磨と、キャビテーションジェットによる砂の研磨洗浄を適用するものである。



図1 土壌洗浄の概要

*1 土木事業本部 環境エンジニアリング部
*4 技術研究所 土木・環境技術研究部門

*2 (独)日本原子力研究開発機構

*3 東京本店 土木部

土壌洗浄に使用した主な機械設備を写真 1～3 に示す。

として 4cm と設定した。各土壌の性状を表 1 および図 2 に示す。



写真 1 ロータリー式土壌洗浄機



写真 2 小型分離装置



写真 3 キャビテーションジェット装置

3. 試験方法

試験は以下の(1)～(7)の方法で行った。

(1) 試料土壌採取

試料土壌は実証試験設備を設置した南相馬市内で空間線量率が比較的高い地域 (1.0 μ Sv/h \sim 2.1 μ Sv/h 程度) の 4 箇所の民家ないし施設を選定し、その庭先や駐車場の土壌 (砂礫土、砂質土) を 120kg 程度採取し、搬入した。なお、採取深さは、実際の除染の際にバックホウ等の重機で掘削が行われることを想定し、効率的な最少はぎり深さ

表 1 試料土壌の性状

項目		試料土①	試料土②	試料土③	試料土④
土粒子密度	g/cm ³	2.703	2.761	2.904	2.685
含水比	%	4.05	9.77	5.06	11.1
強熱減量	%	4.32	5.56	2.72	2.39
粒度	レキ分	54.6	37.0	55.7	13.3
	砂分	33.2	51.3	35.1	68.7
	細粒分	12.2	11.7	9.2	18.0
嵩密度 (含水調整なし)	湿潤	1.44	1.26	1.52	1.12
	乾燥	1.38	1.15	1.45	1.01
締固め密度 (含水調整なし)	湿潤	2.12	2.18	2.27	2.16
	乾燥	2.04	2.16	1.99	1.94

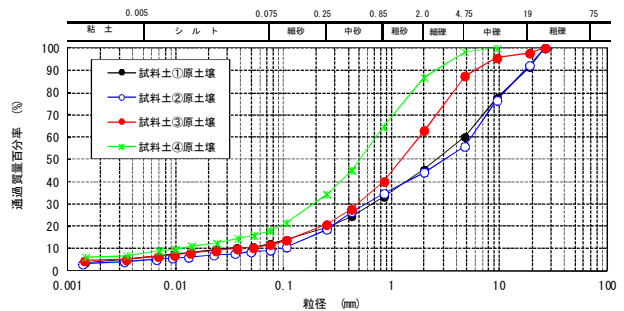


図 2 試料土壌の粒度分布

(2) 一次洗浄 (分級洗浄)

採取した試料土壌をロータリー式土壌洗浄機 (ハリケーン) に投入し、加水・スラリー化した後、分離装置に投入してレキおよび砂分を回収し、一次洗浄土壌とした。

(3) 二次洗浄 (レキ洗浄)

5mm 以上の一次洗浄土 (レキ) をロータリー式土壌洗浄機に再度投入し、研磨洗浄した。

(4) 二次洗浄 (砂洗浄)

5mm 以下の一次洗浄土および二次洗浄 (レキ洗浄) で 5mm 以下となったレキをキャビテーションジェット装置に投入し、土粒子表面の研磨洗浄を行った。

(5) 水処理

土壌洗浄に伴い発生した濁水は、土壌ごとに全て混合して原水とし、凝集沈殿処理した。凝集沈殿処理に先立ち、試料土①の原水を用いて、3種類の凝集剤 (塩化第二鉄 [塩鉄]、ポリ硫酸第二鉄 [ポリ鉄]、ポリ塩化アルミニウム [PAC]) を比較したビーカーテストを実施し、凝集剤の選定、添加量の設定を行った。

(6) 脱水処理

水処理で回収したスラッジを高圧薄層フィルタープレス試験機 (打ち込み圧力 = 通常 1.5 MPa、最大 1.9 MPa) に投入し、脱水ケーキを作成した。助材として不溶化材を添加していない基本ケースと、脱水ケーキの強度および脱水性の向上を目的として、酸化マグネシウム系不溶化材 (MgO)

をスラッジ固形分あたり 3%および 6%添加したケースについて脱水処理を実施した。

(7) 室内試験

小型試験機での洗浄結果と室内試験結果を比較するため、原土壌を用いた土質試験や室内洗浄試験を実施した。

また、浄化土壌の再利用方法の検証のため、洗浄土を用いた土質試験やコンクリートの試験練りを行い、土質材料やコンクリート材料としての性状を確認した。

4. 試験結果

4.1 土壌の放射性セシウムの分析結果

土壌等（固形物）の放射性セシウムに関する分析結果を下表に示す。なお、放射性セシウムの量は ¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs の合計で示しており、分析時期は平成 24 年 1 月に集中して実施している為、測定時期による補正は行っていない。

表2 放射性セシウム含有量に関する分析結果 (¹³⁴Cs+¹³⁷Cs)

媒体	種別	区分	単位	土壌			
				試料土①	試料土②	試料土③	試料土④
原土	含有量	全体	Bq/kg	3,970	6,740	6,260	8,070
		>4.75mm		2,320	3,460	254	2,860
		4.75~2mm		2,540	1,054	1,468	2,980
		2~0.425mm		2,296	2,480	2,500	2,750
		0.425~0.075		3,440	5,330	5,610	5,020
		<0.075mm		15,520	30,600	40,700	28,500
室内洗浄土	含有量	全体	3,110	1,959	2,247	3,420	
		>2	1,625	717	596	2,890	
		2~0.425mm	2,274	2,390	2,110	2,620	
		0.425~0.075	2,800	4,570	5,140	4,570	
一次洗浄土	含有量	全体	1,641	2,136	1,043	2,900	
		>4.75mm	1,584	629	243	871	
		4.75~2mm	1,809	622	355	1,645	
		2~0.425mm	1,651	1,675	932	2,220	
		0.425~0.075	2,189	2,870	2,018	3,370	
二次洗浄土 (>5mm)	含有量	全体	555	655	167	※	
二次洗浄土 (≦5mm)	含有量	全体	1,102	1,272	649	1,777	
		5~2mm	991	396	317	1,752	
		2~0.425mm	1,125	1,335	813	1,696	
		0.425~0.075	1,651	2,077	1,330	2,145	
脱水ケーキ	含有量	不溶化材無	19,980	22,390	23,100	30,300	
		MgO3%	16,240	20,270	21,830	28,900	
		MgO6%	15,150	20,120	20,620	27,300	

※ 試料土④は5mm以上の成分が少なく、5mm以上の二次洗浄は実施できなかった。

表3 二次洗浄の繰り返し回数毎の分析結果 (¹³⁴Cs+¹³⁷Cs)

媒体	種別	区分	単位	土壌 試料土④
二次洗浄土 (≦5mm)	含有量	全体(1回目)	Bq/kg	2,340
		全体(2回目)		2,265
		全体(3回目)		1,996
		全体(4回目)		1,734
		全体(5回目)		1,776
		全体(6回目)		1,777

表4 溶出量に関する分析結果一覧 (¹³⁴Cs+¹³⁷Cs)

媒体	種別	区分	単位	土壌				備考
				試料土①	試料土②	試料土③	試料土④	
原土	溶出量	全体	Bq/L	N.D.	N.D.	20	N.D.	N.D.は不検出を表す。 ¹³⁴ Cs、 ¹³⁷ Csとも検出限界値は10Bq/L
二次洗浄土 (>5mm)	溶出量	全体		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
二次洗浄土 (≦5mm)	溶出量	全体		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
脱水ケーキ	溶出量	不溶化材無		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
		MgO3%	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		
		MgO6%	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		

4.2 水に関するセシウム分析結果

水に関する放射性セシウム含有量分析結果を表5に示す。洗浄後の濁水中には比較的高い濃度の放射性セシウムが確認されたが、凝集沈澱処理により検出限界値未満にまで浄化されることが確認できた。これより、濁水中の放射性セシウムのほとんどは濁水中の固形分に付着しているものと推定される。

表5 水に関する放射性セシウム分析結果 (¹³⁴Cs+¹³⁷Cs)

媒体	種別	区分	単位	土壌				備考
				試料土①	試料土②	試料土③	試料土④	
洗浄濁水	含有量	全体	Bq/L	169	466	566	850	N.D.は不検出を表す。 ¹³⁴ Cs、 ¹³⁷ Csとも検出限界値は10Bq/L
	SS		mg/L	7,500	8,900	11,000	7,900	
処理水 (凝集沈澱後)	含有量	全体	Bq/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
処理水 (濾過・吸着後)	含有量	全体		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	ろ液	含有量	全体	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

※ 洗浄濁水以外では濁度成分は認められず、SS(浮遊物質質量)は測定せず

5. 考察

5.1 洗浄による除染率評価

各測定結果を基に、土壌からの放射性セシウムの除染率を次式で計算し、室内分級洗浄土、一次洗浄土、二次洗浄土と比較検討した。

$$\text{除染率} = \frac{(\text{原土壌 Cs 濃度} - \text{浄化土壌 Cs 濃度})}{\text{原土壌 Cs 濃度}} \quad (1)$$

5.1.1 洗浄システム全体の除染率について

表6に実証試験における除染率および土壌と放射性セシウムの収支検討結果を示す。二次洗浄土の除染率は74.7%~91.5%、平均81.5%であり、当初、目標とした「除染率90%」は4種類の土壌の内1種類で達成できた。詳細な検討については次項以降に示すが、想定した以上にレキや砂への放射性セシウムの付着があったものの、目標に近い除染率を達成できた。また、実証試験全体での土壌の収支は101.5%、放射性セシウムの収支は92.8%であった。これらは通常の誤差範囲内と考えている。個々の試験で見ると、初期に行った試料土①および試料土②の回収率が悪い。これは、初期の試験時に排水用の配管内等の清掃できない部分に濁水中の固形分が堆積・残留したためと考える。

表6 除染率および収支

項目		単位	試料土①	試料土②	試料土③	試料土④	除染時	合計 ないし 平均	備考
①汚染土壌	Cs合計濃度	Bq/kg	3,970	6,740	6,260	8,070			
	投入合計	重量	kg-dry	115.63	109.86	115.12	107.79	0.42	448.82
②一次洗浄土	Cs合計濃度	Bq/kg	1,641	2,136	1,043	2,900			
	除染率		58.7%	68.3%	83.3%	64.1%		68.6%	※1
③二次洗浄土	Cs合計濃度	Bq/kg	1,003	1,240	531	1,777			※2
	除染率		74.7%	81.8%	91.5%	78.0%		81.5%	※1
④二次洗浄土合計	Cs総量	kBq	90.5	107.1	49.8	148.8		396.2	
	Cs除去率	※投入量	80.2%	85.5%	93.0%	82.8%		85.4%	※3
④脱水ケーキ	Cs合計濃度	Bq/kg	17,513	20,708	21,479	28,409	16,570		※4
	Cs総量	kBq	239.8	318.9	574.3	671.3	367.4	2,171.7	
バランス	回収総重量	kg-dry	103.90	101.74	120.46	107.39	22.17	455.66	
	土壌量収支		90.1%	93.1%	105.5%	100.3%		101.5%	
	回収Cs総量	kBq	330.3	426.0	624.1	820.1	367.4	2,567.9	
	Cs収支		72.1%	57.8%	87.3%	94.9%		92.6%	

※1 除染率 = (汚染土壌Cs合計濃度 - 洗浄土壌Cs合計濃度) / 汚染土壌Cs合計濃度

※2 二次洗浄土(5mm以上)と二次洗浄土(5mm以下)の測定値の加重平均濃度

※3 Cs除去率 = (汚染土壌中のCs総量 - 二次洗浄土中のCs総量) / 汚染土壌中のCs総量

※4 不溶化材(MgO)無添加、3%添加、6%添加の各ケースの加重平均濃度

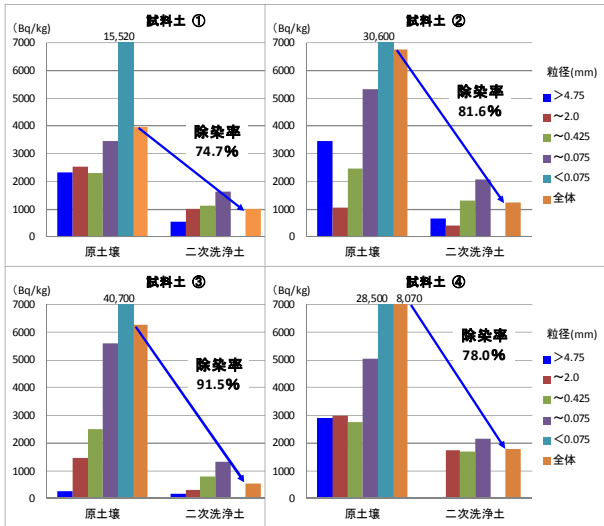


図3 土壌洗浄に伴う除染率

5.1.2 原土壌の粒度成分毎の放射性セシウム濃度について

図4は、各粒度成分に含まれる放射性セシウムの相対比率を示したものであるが、細粒分に含まれる放射性セシウムは、最も少ない試料土①では46.2%と半分以下である。当初、砂およびレキ分の放射性セシウム含有率は30%程度と想定していたが、これを上回る土壌を用いて実証試験を行っていた。このことから、細粒分を取り除くだけの単なる分級洗浄では、十分な除染効果が得られるとは考えられず、表面研磨などによるレキおよび砂の除染率向上が不可欠であると言える。

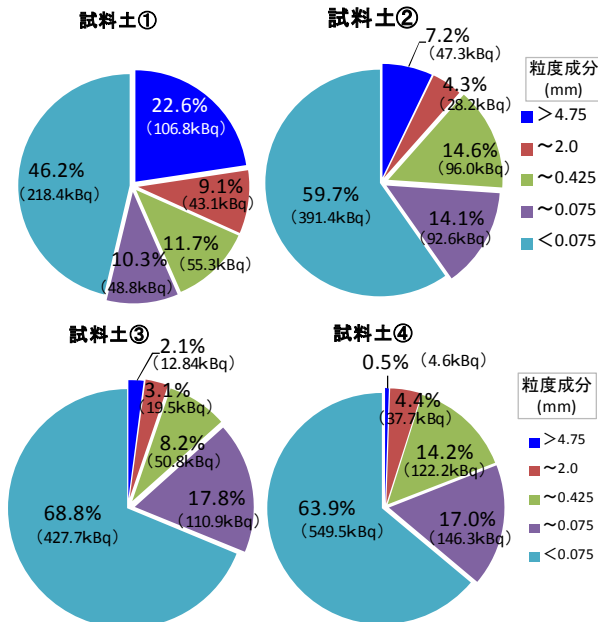


図4 粒度成分毎に含まれる放射性セシウムの相対比率

5.1.3 一次洗浄の効果

図5に室内洗浄と一次洗浄の結果の比較を示す。一次洗浄は解さい（塊状の土壌に水を加えてスラリーとして、土

粒子間の結合を解く行為）を行った後、分離装置内での沈降速度の差や清水によるすすぎ効果により細粒分を除去するものであるが、解さいにロータリー式土壌洗浄機を用いることで、表面研磨効果も付加される。このため、細粒分のみを取り除いた室内洗浄土に比べると、全体的に除染率が向上している。

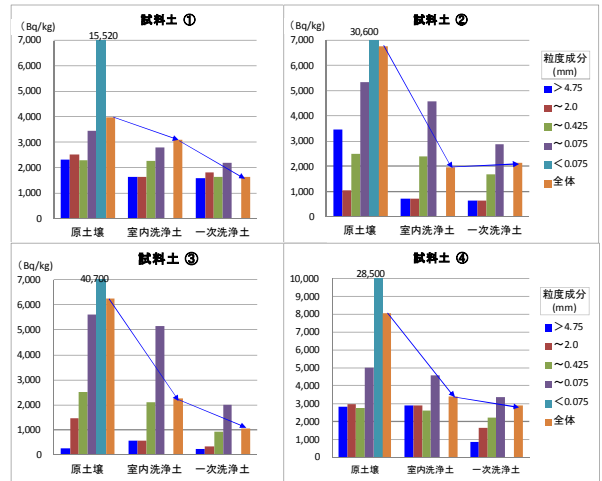


図5 一次洗浄による除染効果

5.1.4 二次洗浄の効果

二次洗浄は5mm以上のレキを対象としたロータリー式洗浄機による研磨洗浄と、5mm未満の成分を対象としたキャビテーションジェットによる研磨洗浄のそれぞれについて考察する。

a) 5mm以上のレキの洗浄効果

図6に土壌中にレキが多かった試料土①および試料土③の原土壌、一次洗浄土、二次洗浄土に関する放射性セシウム濃度を示す。

試料土①、試料土③とも、二次洗浄によりセシウム濃度は低下しており、試料土①では44.4%、試料土③は30.0%の除染率向上効果が認められた。

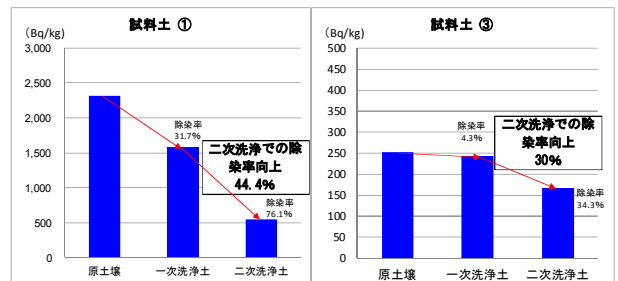


図6 5mm以上のレキの除染効果

b) 5mm以下のレキおよび砂の洗浄効果

図7に5mm以下の成分の放射性セシウム濃度の変化を示す。図中の矢印は、重量の構成割合が最も多い2.0~0.425mmの成分の濃度変化を示したものである。

概ね、放射性セシウム濃度の低下（除染率の向上）が認められ、キャビテーションジェットによる二次洗浄（研磨洗浄）は除染率の向上に有効であることが確認できた。

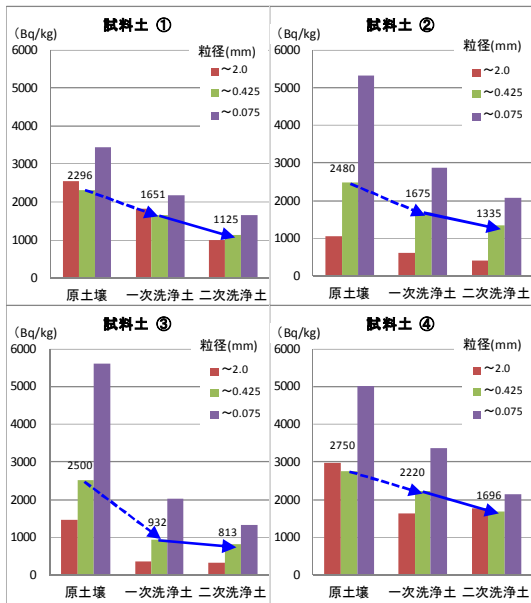


図7 5mm以下の成分の除染効果

今回の実証試験では、実用機と同等の除染効果が得られるように、キャビテーションジェットによる洗浄回数を4回と設定したが、砂分が主体であった試料土④では6回まで繰り返し洗浄を行い、各回の洗浄土の放射性セシウム濃度を測定した。結果を図8に示す。

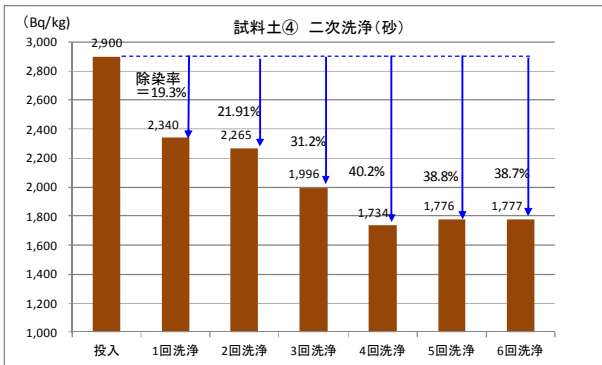


図8 キャビテーションジェット洗浄の繰り返し回数に伴うセシウム濃度の低下

キャビテーションジェットによる洗浄の1回目から4回目まではセシウム濃度の低減は見られるが、それ以上では低減効果が認められず、キャビテーションジェット洗浄の回数は4回（実用機では2回に相当）が最適であることを確認した。

c) 電子顕微鏡での観察

写真4にレキ表面の電子顕微鏡写真を示す。写真4上段（約35倍）の原土壌では表面に凹凸が認められるが、洗浄土では凹凸が少なくなっているように見える。一方、下段

（約350倍）の表面には原土壌、洗浄土ともに表面に凹凸部分が認められる。これは、岩石の構成鉱物の結晶構造と考えられる。放射性セシウムやそれらを含む粘土・コロイド分が、この凹凸に付着してレキが汚染している場合、研磨洗浄によりこれらの結晶の一部が剥離することで放射性セシウムが取り除かれ、除去率が向上すると考えられる。一方、鉱物の隙間深くに浸透した放射性セシウムは除去できない為、研磨洗浄後のレキにも放射性セシウムが残留するものと推定する。

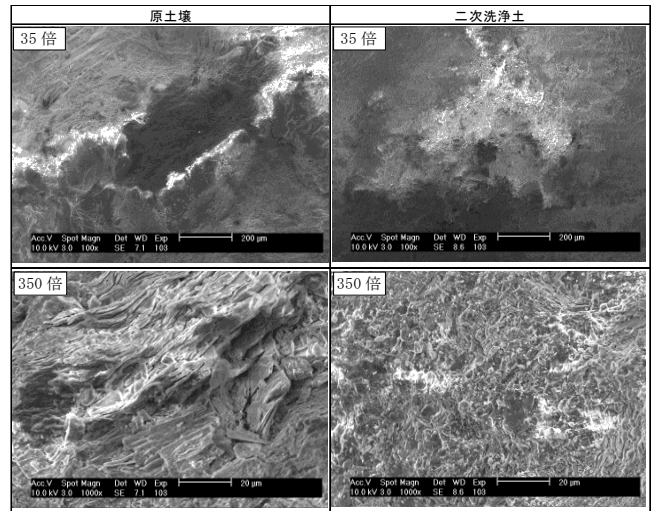


写真4 レキ表面の電子顕微鏡写真

5.2 廃棄物量評価

原土壌や洗浄土、脱水ケーキの重量等より、減容化率、減量化率を検討した。結果を表7に示す。

表7 減容化率等一覧表

媒体	種別	単位	試料土①	試料土②	試料土③	試料土④	除染時	合計	備考	
減容化なし	汚染土壌	乾燥重量	kg	115.33	109.32	114.22	107.11			
	不溶化材	乾燥重量	kg	0.30	0.54	0.90	0.68	0.42		
	投入量合計	乾燥重量	kg	115.63	109.86	115.12	107.79	0.42	448.81	
	保管容積	L	75.47	73.17	70.59	73.46		292.69		
二次洗浄土	乾燥重量	kg	90.21	86.34	93.72	83.76		354.03		
	回収率	%		78.22	78.98	82.05	78.20		平均= 79.4%	
減容化後（計算）	回収分以外	乾燥重量	kg	25.12	22.98	20.50	23.35		91.95	
		湿潤重量	kg	37.45	40.02	29.27	35.07		141.81	
保管時容積	締固めなし	L	40.27	42.57	28.70	38.97				
	締固め時	L	24.01	26.68	17.85	21.38				
減容化率	締固めなし	%	46.6	41.8	59.3	47.0		平均= 48.7%		
	締固め時	%	68.2	63.5	74.7	70.9		平均= 69.3%		
減量化率	乾ベース	%	78.2	79.0	82.1	78.2		平均= 79.4%		
	湿ベース	%	68.8	66.7	75.6	70.5		平均= 70.4%		

減容化率 (%) = (洗浄前土壌体積(L) - 脱水ケーキ体積(L)) / 洗浄前土壌体積(L)
 洗浄前土壌体積(L) = 洗浄前土壌重量(kg-wet) / 保管時想定密度(kg-wet/L)
 保管時の想定密度(kg-wet/L) = 地山の密度(kg-wet) / 土量変化率(L)
 地山の密度(kg-wet/L) = 締固め密度(kg-wet/L) / 土量変化率(C)
 土量変化率: L=1.2, C=0.9(レキ質土、国土交通省土木工務積算基準)
 脱水ケーキ体積(L) = 脱水ケーキ重量(kg-wet) / 脱水ケーキの密度(kg-wet/L)
 減量化率 (%) = (洗浄前土壌量(kg) - 脱水ケーキ重量(kg)) / 洗浄前土壌重量(kg)

減容化率は、濃縮汚染物である脱水ケーキを締固めない状態で保管した場合は平均48.7%であり、締固めた場合は平均69.3%であった。一般的に脱水ケーキの締固めは行わないが、その場合には元の土壌をそのまま運搬する場合に比べて半分程度にしか減容化できないが、脱水ケーキの締固めを行えば約1/3に減容化が可能であり、十分な減容化効果が期待できることが分かる。重量に注目した減量化率

は、湿潤ベースで70.4%であり、十分な減量化効果が得られている。

5.3 コスト評価

約2年間の工期で処理を行う場合の工事費を算出し、処理土量より処理単価を算出した。算出に当たっては、実証試験に用いた土壌と同等の汚染土壌を想定し、昼間のみ運転を行う場合と、2交替で運転を行う場合の2ケースで検討した。

土壌1t当たりの処理コストは、昼間のみ処理を行う場合は約9,100円、2交替（運転時間14時間）で処理を行う場合は5,900円であった。

表8 処理コスト試算結果

No	名 称	昼間稼働		昼夜二交替稼働	
		金額 (千円)	内訳 (千円)	金額 (千円)	内訳 (千円)
1	直接工事費合計	1,220,500		1,593,900	
	土壌洗浄運転費		977,200		1,350,600
	洗浄設備設置撤去費		243,300		243,300
2	共通仮設費	58,218		76,029	
3	現場管理費	176,207		230,116	
4	一般管理費	105,046		137,183	
	工事費	1,559,971		2,037,228	
	処理単価(円/t)	9,100		5,900	

共通仮設費、現場管理費、一般管理費は国土交通省積算基準（河川工事）よりそれぞれ4.77%, 10.78%, 7.22%と想定

この結果をもとに、本土壌洗浄システムで減容化を行った場合と行わなかった場合の除染事業全体のコスト比較を行った。対象規模はコスト試算（昼間のみ）の場合とほぼ同等の100,000m³の汚染土壌を処理する場合を想定した。

土壌洗浄による減容化処理は、a) 仮置き保管する前に行う場合、b) 仮置き保管後中間貯蔵施設搬出時に行う場合、c) 中間貯蔵施設で行う場合の3ケースを想定し、減容化処理を全く行わず中間貯蔵施設に全量搬出する場合と比較した。結果を表9に示すが、減容化を仮置き時に行えば、コストを4割以上低減でき、仮置き場自体も圧縮できることが分かる。

表9 土壌洗浄による減容化に関するコスト比較

対象土量(m ³)	処理単価(円/t)	100,000				備考
		a)減容化後仮置き	b)仮置き後減容化	c)中間貯蔵施設で減容化	減容化なし	
		処理費用(千円)				
土壌洗浄処理	9,100	1,638,000	1,638,000	1,638,000	-	
仮置き、保管	5,500	244,530	990,000	990,000	990,000	耐核性土のう 6700円/1.5t ハンドリング 1000円/t想定
仮置き場→ 中間貯蔵施設 移動	3,000	133,380	133,380	540,000	540,000	掘削積み込み 1000円/t 運搬 2000円/t 想定
中間貯蔵施設保管	21,200	942,552	942,552	942,552	3,816,000	21200円/t(公共最終処分場での無機性汚泥処分単価を参照)
合計(千円)		2,958,462	3,703,932	4,110,552	5,346,000	
コスト比(%)		55.3	69.3	76.9	100.0	

対象土壌の細粒分含有率が変化した場合の処理コストの増加を考慮してコスト削減効果を検討した。結果を図9に示す。細粒分の増加に伴い処理コストは増加し、細粒分が

30%を超えるとコスト削減効果が無くなる事が分かる。

したがって、除染時には洗浄に適する砂質土と洗浄に適さない粘性土とを区別して回収することが必要である。

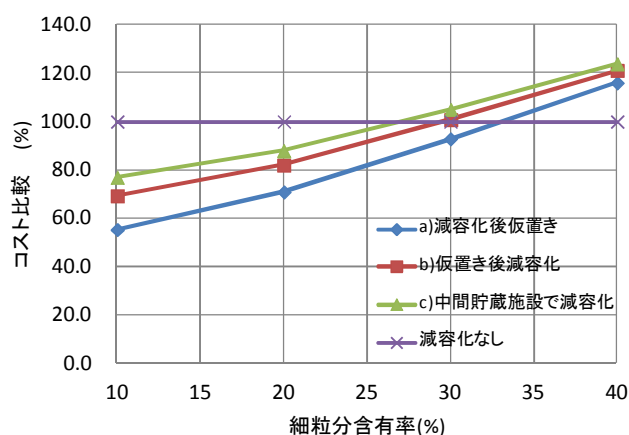


図9 汚染土壌中の細粒分と処理コストの関係

5.4 土壌洗浄適用可能性評価手法の検討

実証試験結果およびこれまでの知見をもとに、土壌洗浄処理の適用可能性評価方法を検討した。

5.4.1 土壌中の放射性セシウム濃度の推定

設計には、土壌の放射性セシウム濃度を把握することが必要であるが、すべての土壌について分析することは困難なので、簡易推定式により放射性セシウム濃度を推定することとする。

簡易推定式としては、ガイドライン⁵⁾ 別紙-6 に示された方法があるが、下式でも確認することが望ましいものとする。

$$\text{空間線量率} (\mu\text{Sv/h}) = \sum C_{F3i} \times D_i \quad (2)$$

C_{F3i} : 各放射性核種の表面汚染度係数⁴⁾

$$C_{F3} (^{134}\text{Cs}) = 5.4 \times 10^{-6} \quad \{ (\mu\text{Sv/h}) / (\text{Bq/m}^2) \}$$

$$C_{F3} (^{137}\text{Cs} + ^{137m}\text{Ba}) = 2.1 \times 10^{-6} \quad \{ (\mu\text{Sv/h}) / (\text{Bq/m}^2) \}$$

D_i : 各放射性核種の表面汚染濃度 (Bq/m²)

セシウム134とセシウム137の比率を0.8:1.0(実証試験を行った平成24年1月時点での比率、測定時期の比率で調整が必要)とすると、それぞれの核種による表面汚染濃度はその成分割合に比例することから以下ようになる。

$$\begin{aligned} \text{空間線量率} &= 5.4 \times 10^{-6} \times ^{134}\text{Cs 表面汚染濃度} \\ &\quad + 2.1 \times 10^{-6} \times ^{137}\text{Cs 表面汚染濃度} \\ &= 3.57 \times 10^{-6} \times D \end{aligned}$$

これより

$$D = \text{放射性セシウム濃度 (Bq/kg)} \times \text{汚染深さ (m)} \times \text{単位体積重量 (kg/m}^3) \quad (3)$$

汚染深さを0.04m(除染時の表土剥ぎ取り深さ)、単位体積重量を1,800kg/m³(地山での乾燥密度)とすると剥ぎ取っ

た土の放射性セシウム濃度は下式により求められる。

$$\begin{aligned} & \text{放射性セシウム濃度 (Bq/kg)} \\ &= \text{空間線量率 } (\mu\text{Sv/h}) / \{ (3.57 \times 10^{-6}) \times 0.04 \\ & \quad \times 1,800 \} \\ &= 3,890 \times \text{空間線量率 } (\mu\text{Sv/h}) \quad (4) \end{aligned}$$

実証試験試料採取場所の土壌表面の空間線量率から、(4)式により試料土壌の放射性セシウム濃度を推定し、実測値と比較した。結果を表 10 に示すが、両者はほぼ一致している。

表 10 空間線量推定式の検証

場所	空間線量 (地表面5cm)	実測濃度	推定式の濃度
	$\mu\text{Sv/h}$	Bq/kg	Bq/kg
試料土①	1.07	3,970	4,162
試料土②	1.43	6,740	5,563
試料土③	1.42	6,260	5,524
試料土④	2.07	8,070	8,052

5. 4. 2 粒度毎のセシウム含有比率と分級後の濃度推定

粒度成分毎の放射性セシウム含有比率について、土粒子表面積との関係について検討した。

結果を表 11 に示す。このうち 5mm 以上のレキ分の平均粒径は 8mm と想定した。一方 0.075mm 以下の成分の平均粒径については、これらの成分が地盤中では団粒化しており、雨水等が浸透する際の見かけの表面積は団粒化した状態の表面積に支配されるものと考えて、団粒化した状態の粒子の径として 0.04mm と設定した。

表 11 粒度成分毎の表面積と放射性セシウム含有量の比

粒度 (mm)	想定粒径 (mm)	試料土① 土壌1kg-dry当たりの土粒子表面積(cm ²)	試料土②	試料土③	試料土④
>5	8.0	1,107	340	1,139	42
~2	2.9	1,119	1,826	822	904
~0.425	0.92	5,032	8,344	3,989	10,059
~0.075	0.18	15,293	19,353	20,021	34,045
<0.075	0.04	67,703	63,564	47,521	100,559
合計		90,254	93,427	73,491	145,609
表面積比率(%)					
>5	8.0	1.2	0.4	1.5	0.0
~2	2.9	1.2	2.0	1.1	0.6
~0.425	0.92	5.6	8.9	5.4	6.9
~0.075	0.18	16.9	20.7	27.2	23.4
<0.075	0.04	75.0	68.0	64.7	69.1
各粒度毎のセシウム含有比率(%)					
>5	8.0	22.6	7.2	2.1	0.5
~2	2.9	9.1	4.3	3.1	4.4
~0.425	0.92	11.7	14.6	8.2	14.2
~0.075	0.18	10.3	14.1	17.8	17.0
<0.075	0.04	46.2	59.7	68.8	63.9

図 10 は、実証試験に用いた試料土①~④および別途採取した洗浄可能と思われるレキ質土~砂質土について、粒度成分毎の表面積比率と放射性セシウムの含有比率を示したものであるが、試料土①を除き、両者にはほぼ 1 : 1 の比例関係が見られる。試料土①については、地表面にレキ分が卓越するため、降雨等によって降下した放射性セシウムが最初に接触したレキ分に多く付着したものと考えられる。

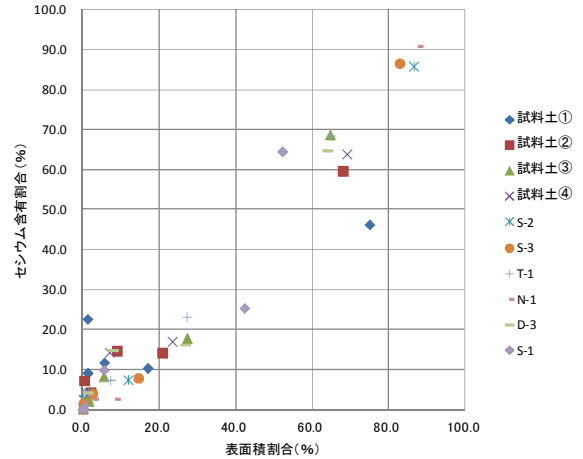


図 10 セシウム含有割合と比表面積の関係

これより、粒度成分毎の放射性セシウム含有比率は、各粒度成分の表面積比率に比例するものと考え、粗粒分と細粒分に含まれる放射性セシウム含有比率を確認する。なお、碎石舗装の場合は、地表面の碎石に特異的に放射性セシウムが付着するため、該当する粒度の成分の表面積に補正係数をかけて補正する。

粒度成分のセシウム含有比率

$$= \text{粒度成分の表面積比率} = A_n / \sum A_i \quad (5)$$

$$A_i = n \times 4 \cdot \pi \cdot r_i^2$$

n = 土壌1kg中の各粒度成分の個数

$$= 1000 \times \alpha_i / (G_s \cdot (4/3) \cdot \pi \cdot r_i^3)$$

G_s : 土粒子密度 (g/cm^3)

α_i : 各粒度成分の重量割合

r_i = 粒度成分の平均粒径

$$= 10^{\{ [\log(r_{i上}) + \log(r_{i下})] / 2 \}}$$

$r_{i上}$ 、 $r_{i下}$: 各粒度成分の最大、最少粒径

(ただし、75 μm 以下の成分は、平均を40 μm と設定)

75 μm 以下を除去する分級洗浄後の放射性セシウム濃度は以下の式で算定される。

分級洗浄後の濃度 (Bq/kg)

$$= \text{汚染土壌濃度} \times A / W_g \quad (6)$$

A : 粗粒分 (75 μm 以上) に含まれる放射性セシウム割合

W_g : 汚染土壌中の粗粒分の重量構成比率

仮に、分級洗浄後の放射性セシウム濃度が目標値を下回れば、表面研磨の必要はない。

5. 4. 3 表面研磨後の放射性セシウム濃度の推定

表面研磨後の放射性セシウム濃度を次式で計算し、その値が目標濃度以下に低下することを確認する。

表面研磨後濃度 (Bq/kg)

$$= \text{汚染土壌濃度 (Bq/kg)} \times \{ (1 - \alpha) \times A \} / \{ (1 - \beta) \times W_g \} \quad (7)$$

α : 表面研磨による除染効果 (0.55)

[室内洗浄→二次洗浄の除染率向上が平均 57.2%より]

β : 表面研磨による研磨率 (実証試験の実績値 0.09)

研磨洗浄後の濃度が目標濃度を上回る場合は、低濃度の汚染土壌と混合して洗浄することで洗浄土のセシウム濃度の低減を計ることも出来るが、目標値を大幅に上回る場合には適用範囲外と判断し洗浄処理を断念する。

5.4.4 発生廃棄物量の検討

発生廃棄物量および減容化率は下式で検討する。

$$\begin{aligned} \text{発生廃棄物量 (m}^3\text{)} \\ &= \text{汚染土壌量 (m}^3\text{)} \times (1 - \text{減容化率}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{減容化率} &= 1 - (1 - \text{減量化率}) \times \\ &\quad \left\{ \gamma_t / (1 + w_t) \right\} / \left\{ \gamma_k / (1 + w_k) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

γ_t : 汚染土壌単位体積重量 (通常 1.6~1.8t/m³)

γ_k : 脱水ケーキの保管時の単位体積重量 (締めめを行う場合 1.6t/m³程度)

w_t : 汚染土壌の含水比 (砂質土は通常 20%程度以下)

w_k : 脱水ケーキ含水比 (本実証試験では 50%、フィルタープレスの性能等で変動)

$$\text{減量化率 (乾)} = 1 - (F_c + (1 - F_c) \times \beta) \quad (10)$$

F_c : 細粒分含有率

β : 表面研磨率 (実証試験の実績値 0.09)

(10)式により、汚染土壌の単位体積重量および含水比を変化させた場合の廃棄物発生率 (=1-減容化率) について検討した結果を図 11 に示す。

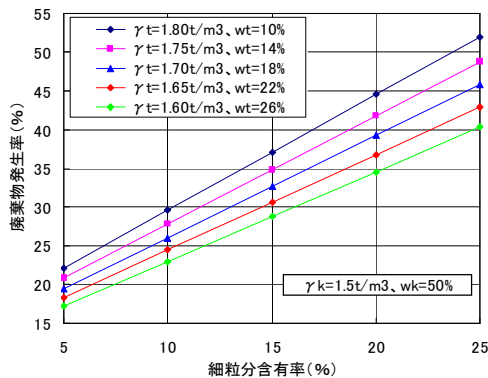


図 11 細粒分含有率と研磨洗浄時の廃棄物発生率

5.4.5 評価

求めた結果より、減容化率が高く、浄化後の土壌の放射性セシウム濃度が目標値を下回れば土壌洗浄効果が認められることとなる。

なお、別途、処理コストの面からの検討も必要である。

6. まとめ

放射能汚染土壌の土壌洗浄による減容化について、実汚染土壌を用いた実証試験を行って検討した。その結果、以下の点が確認された。

- ・放射性セシウムは、レキや砂分にも比較的多く付着していた。このため、従来より重金属汚染土壌の浄化に用いられてきた分級洗浄では高い除染率は望めないことを確認した。このため、より高濃度の汚染土壌を減容化するためには、分級洗浄に表面研磨を付加して除染率の向上を図る必要があった。
- ・表面研磨による除染率の向上効果は 55%程度認められた。一方、キャビテーションジェットによる繰り返し洗浄を行ったところ、一定の洗浄回数を超えると除染効果が認められなくなる現象が確認された。
- ・放射能汚染土壌の洗浄処理のコストは、実証試験と同等の土壌で、設備設置～撤去までを 2 年間とした場合、昼間のみ処理であれば 9,100 円/t、2 交替で 14 時間処理を行う場合で 5,100 円/t 程度と想定された。
- ・細粒分含有率が増加すると経済性が低下するため、経済的な適用範囲を検討した。その結果、経済的な適用範囲は、細粒分含有率が 30%程度までと想定された。
- ・土壌洗浄による減容化処理は仮置き場搬入時等、早期に行うことが経済的な除染に結びつくことを確認した。
- ・土壌の粒度および空間線量より、土壌洗浄による浄化・減容化の適否を検討する手法を提案した。

参考文献

- 1) 独立行政法人 日本原子力研究開発機構 委託事業 平成 23 年度「除染技術実証試験事業」湿式分級に表面研磨を付加した土壌洗浄処理技術による放射能汚染土壌の減容化 実証試験報告書：平成 24 年 2 月 29 日、株式会社鴻池組
- 2) 大山将ほか：放射性セシウム含有土壌の対策技術に関する基礎的検討 (その 1)、第 18 回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、pp. 88-93、2012. 6
- 3) 中島卓夫ほか：放射性セシウム含有土壌の対策技術に関する基礎的検討 (その 2)、第 18 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研修集会講演集、pp. 480-485、2012. 6
- 4) 放射線緊急事態時の評価および対応のための一般的手順 IAEA 2008/8[放射線医学総合研究所緊急被ばく医療研究センター 線量評価研究部訳]p. 99
- 5) 厚生労働省労働基準局長発都道府県労働局長宛通知 「除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン：平成 23 年 12 月 22 日、基発 1222 第 6 号」