# 放射性セシウム含有土砂の減容化に向けた分級洗浄システムの 開発と適用

Development and application of a decontamination system using the washing and classification method for radioactive cesium containing soil

石山 宏二 \* 石渡 寛之 \*
Koji Ishiyama Hiroyuki Ishiwata 佐藤 靖彦 \* 向井田 健 \*\*
Yasuhiko Sato Ken Mukaida 加藤 俊一 \*\*
Syunichi Kato Kenichiro Ito

#### 要 約

道路維持管理に伴い発生する放射性セシウムを含有した土砂の対処,減容(濃縮)化が福島県内において喫緊の課題となっている。本報告では、土壌汚染対策技術の一つである土壌洗浄法(湿式分級洗浄)の適用が、浄化した土壌の再生利用に対する可能性も含め、実用性、有効性のある処理方法であるかを検証するため、処理能力 200 kg/h のプラントによる実証実験を行った。本報告では、分級洗浄後の粒径区分毎の放射性セシウム濃度、回収率、減容化率、および採用した分級洗浄プラントを構成する各装置の解泥、磨砕効果等を得るために実施した工夫とその効果について述べる。

#### 目 次

- §1. はじめに
- § 2. 実験条件
- §3. 実験結果
- § 4. 考察
- § 5. おわりに

#### § 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事故により、福島県内をはじめとする広範なエリアに放射性セシウム(以後、放射性 Cs と称す)等の放射性物質が拡散、地表面に沈着した。この対策として国の責任の下、空間線量率が0.23 µSv/h 以上の地域では放射性物質汚染対処特別措置法(特措法)にしたがい除染実施計画が策定され、放射性 Cs を含有した土砂の除去、仮置場への集積・保管等、一連の除染作業が順次、進められている。その一方、除染実施計画が策定されていない地域での道路側溝や路面清掃等の道路維持管理に伴い発生した放射性 Cs 含有土砂は、基本的に特措法の対象外と

なっており、事業者の責任において処理、処分しなければならず、結果的に道路維持管理等、事業の停滞を招くなどの課題が生じている<sup>1)</sup>.

本報告では、土壌洗浄法の適用による分級洗浄により、放射性 Cs 含有土砂を再生利用可能な資材と、その処理過程で発生する廃棄物(濃縮物)とに分別できるとの考えに基づき、福島県内の道路維持管理で発生した放射性 Cs 含有土砂を対象に、処理能力 200 kg/h のプラントを構築して、浄化した土壌の再生利用に対する可能性も含め、処理方法の実用性、有効性を検証するために実証実験を行い、その成果について述べる<sup>2)</sup>.

なお、土壌洗浄法を適用するにあたって、放射性 Cs (134Cs 及び 137Cs) は土砂の表面に付着していること、また粘土・シルトの細粒分に吸着しやすく水に溶出しにくい性質に着目し、実験計画は立案された、分級洗浄後、粘土・シルト分( $< 0.075 \ mm$ )のみを抽出することで土壌全体に含まれた多くの放射性 Cs はその細粒分とともに濃縮・減容化される。その結果として、指定廃棄物(国の指定を受けた放射性 Cs 濃度  $8,000 \ Bq/kg$  以上の廃棄物)の指定が得られれば、除染土壌と同様に上記濃縮物も処理できる可能性が残されている。また、それ以外に回収される砂分( $0.075 \ mm \sim 2 \ mm$ )や礫分( $\ge 2 \ mm$ )の全て、あるいはその一部については、管理され

<sup>\*</sup> 技術研究所

<sup>\*\*</sup> 北日本(支)

た状態下,例えば,道路表面から 30 cm 下の下層路盤 材等として再生利用が可能とされる放射性 Cs 濃度 3,000 Bq/kg 以下  $^{3)}$  にまで浄化が可能になることを期待・想 定し,実証実験は行われた.

## § 2. 実験条件

## 2-1 実験に供した原土試料

実証実験に供した試料 (写真-1) は、福島県から提供された表-1及び図-1に示す3種類の原土 (フレコンバック収納)であり、試料①、②は路面清掃により、試料③は側溝の清掃により集積された土砂である。側溝から集積された試料③の放射性 Cs 濃度は10,000 Bq/kgwet を超えていた。その結果、本実証実験は「事故由来廃棄物等処分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」対象事業となり、管理区域の設定・明示、被ばく線量や空間線量等作業環境の測定・記録・管理等の実施が必要となった。

## 2-2 分級洗浄プラント

本実証実験では、将来的な事業化を想定し汎用性のある機材・装置で構成した比較的小規模(処理能力 200 kg/h)なプラントを使用した(写真-2)。分級洗浄プラントの処理フローを図-2に示す。洗浄水は循環利用し、全ての実験が終了後、循環水槽内の水を採取し、放射性 Cs 濃度が下記算出式に基づく維持管理基準値以下であることを確認の上、排水・放流を行った。なお、測定結果は 134Cs 及び 137Cs ともに検出限界値(134Cs:5.0 Bq/L, 137Cs:5.7 Bq/L) 未満であった。

$$\frac{^{134}\text{Cs}$$
 の濃度(Bq/L)}{60 (Bq/L)} + \frac{^{137}\text{Cs} の濃度 (Bq/L)}{90 (Bq/L)} \le 1 (1)

本プラントによる湿式分級洗浄後の回収物は、粒径区分により、a)回収礫 ( $\geq 2$  mm)、b)回収砂 (0.075 mm  $\sim 2$  mm)、c) 濃縮物 (粘土・シルト分の脱水ケーキ: < 0.075 mm) の3つと、本プラントの特徴の1つであり処理フローの上流側に位置する「②比重選別機」で回収される d)軽比重物 (主として木枝や枯葉等の有機物)の計4種類である.

また、湿式分級における除染率向上を目的として本プラントの構成装置に実施した主な工夫は、以下に示す3点である.

- 1) 保管中のフレコンバック内部で固結した団粒土砂の 解砕・解泥を図るために、処理フローの上流側に「② 比重選別機」(**写真-3**) を新たに開発、配備した.
- 2) 砂や礫を破砕することなく砂・礫表面に付着した細粒分を効果的に洗浄剥離させるために、ドラム式洗浄機「③ドラムウォッシャー」(**写真-4**) 内に粒径の異なる複数の硬質ゴム被覆ボールを投入した.
- 3) 処理フローの下流側にて、砂分表面を磨砕し付着し





写真-1 フレコンバッグに収納された3種類の原土試料

表-1 事前に測定された各原土試料の放射性 Cs 濃度

試料No.	試料重量	放射性セシウム(Cs)濃度 (Bq/kg-wet)					
	(g)	<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	Cs合計			
1	1,168	1,600	3,900	5,500			
2	1,163	1,900	4,900	6,800			
3	1,132	5,400	13,000	18,400			

測定器: RT-30(Georadis s.r.o.)

測定法: NaI(TI)シンチレーションスペットロメータ機器分析法(昭和49年1月 文部科学省放射能測定法シリース。6)

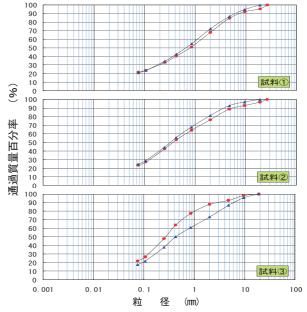


図-1 事前に測定された各原土試料の粒径加積曲線



(a) プラント用テント(管理区域)



(b) 分級洗浄プラント概観

写真-2 実証実験に使用した分級洗浄プラント

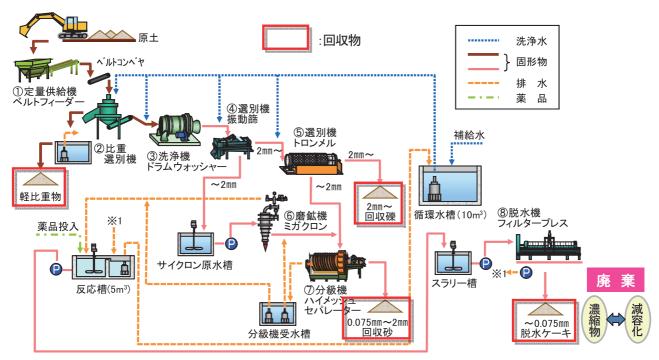


図-2 実証実験に使用した分級洗浄プラントの処理フロー





写真-3 「比重選別機」





写真-4 洗浄機「ドラムウォッシャー」





写真-5 磨鉱機「ミガクロン」

た細粒分のみを効率的に剥離させるために,湿式サイクロンの円筒部を延伸・改良し,遠心力による装置内の側壁と砂分の接触時間の増大を図った磨鉱機「⑥ミ

表-2 実証実験ケース (計 15 ケース)

	15 2	- 大皿ラ	C-5/C /	<b>Д</b>		• • •	
		原土試料		分級洗浄条件			
Case	実施日	試料No.	投入量 (kg-wet)	摩 砕1)	繰返し <sup>2)</sup>	目的	
Case1	11/25(月)		199.45		無	試料①に対する	
Case	11/26(火)		136.73	有			
Case2	11/27(水)	試料①	134.58		有	最適処理条件	
Case3	11/28(木)		186.10	無	無	の確認	
Case4	11/20(水)		89.10		有		
	11/29(金)		試料変				
Case5	12/3(火)		181.81	有	無		
Case6	12/3(火)	=+1/1	141.75		有	試料②に対する	
Case7	12/2(月)	試料②	181.85	無	無	最適処理条件 の確認	
Case8	12/2(月)		122.75		有		
	12/4(水)		試料変	料入れ替え	え運転 <sup>3)</sup>		
Case9	12/5(木)		142.90	有	無		
Case10	12/6(金)		68.29	相	有	試料③に対する 最適処理条件	
Case11	12/9(月)	試料③	157.00	無	無	一	
Case12	12/9(月)		110.67		有		
Case13	12/10(火)		146.50	有	無	安定性·再現性確認	
	12/11(水)	試料変更に伴う試料入れ替え運転 <sup>3)</sup>					
Case14	12/12(木)	試料①	200.00	有	無	安定性·再現性確認	
Case15	12/13(金)	試料③	80.00	有	無	女正性 冉現性傩認	
1) 麻酔しけ、牡果「ミザクロン」な楽田」 かのまずにけ着した射土 ショトの公舗・除土を促進することをデオ							

- 1) 摩砕とは、装置「ミガクロン」を適用し、砂の表面に付着した粘土、シルトの分離・除去を促進することを示す。
- 2) 繰返しとは、一度分級洗浄し回収した礫・砂分を混合後、再度投入原土として分級洗浄することを示す。
- 3) 試料が入れ替わる際に試料のコンタミネーションを防ぐため、30分以上の入替運転を実施。

# ガクロン」(写真-5)を使用した.

なお、特に本装置による回収砂に対する摩砕(除染) 効果を確認するため、2-3節で述べるように、図-2に示す処理フロー内で「⑥ミガクロン」を使用するケースと使用しないケースを実施した.

# 2-3 実験方法

実験は、表-2に示すように、試料土毎に最適処理 条件(摩砕効果〔⑥ミガクロンの有/無〕、繰返し洗浄

75.4

効果〔繰返し洗浄の有/無〕)を確認する12ケース,実験後半に処理の安定性と再現性を確認する3ケース,計15ケースを実施した.

なお、繰返し洗浄とは、**図-2**に示す処理フローにしたがい、一度分級洗浄し回収された礫・砂を再度混合し、あらためて「③ドラムウォッシャー」から投入、分級洗浄する方法とした。

実験ケース毎に投入原土および分級洗浄後の各粒径区分等の回収物の重量、放射性 Cs 濃度等を測定し、各々の効果を確認、評価した、放射性 Cs 濃度については、500 ml ポリビンに各試料を採取し、110℃で 24 時間乾燥後、全量粉砕し U-8 容器に移して 1000 秒間、ゲルマニウム半導体検出器による核種測定分析を行い求めた。

#### § 3. 実験結果

投入原土と分級洗浄後の各粒径区分等の回収量と浄化土の回収率,およびそれぞれの放射性 Cs 濃度を表-3,表-4に示す.ここで浄化土とは、分級洗浄後に資材

として再生利用の可能性がある 0.075 mm 以上の粒径区 分となる回収土 (回収砂 (**写真-6**)+回収礫 (**写真-7**)) を示す.

また, 分級洗浄後の濃縮物 (脱水ケーキ, **写真-8**) の発生率を**表-5**に示す.

実験の結果、浄化土の回収率は概ね70%前後、濃縮物の発生率は概ね20%(減容化率80%)前後で、いずれもケース毎にばらつきが大きく、回収ロスも見られること、また放射性 Cs 濃度については、原土が高い値を示すと分級洗浄後の回収物も相対的に高くなる傾向が示された。また、軽比重物(有機物、写真-9)に関しては、乾燥表記ではあるが濃縮物の放射性 Cs 濃度を上回る程高い値を示すことがあり、濃縮物同様、被ばく防止の観点から取扱いには注意を要することがわかった。

なお, 浄化土の回収率と放射性 Cs 濃度, 濃縮物の発生率を算出するにあたっては, 「放射性セシウム含有土壌の土壌洗浄法の適用性評価試験方法 (案)」(JGS 震災対応地盤環境研究委員会 TF-N1, 2013 年 1 月 15 日版)を参考にした.

		試料原土の	各粒径区分等の回収量 (kg-dry)				浄化土(※1+※2)	
試料土	ケース名	投入量	軽比重物	濃縮物	回収砂※1	回収礫**2	質量	回収率
		(kg-dry)	(有機物)	$(\sim 0.075 \text{mm})$	(0.075~2mm)	(2mm∼)	(kg-dry)	(%)
	Case 1	273.65	1.20	8.90	97.56	27.26	124.82	45.6
試料①	Case 2	106.59		10.90	52.34	19.14	71.48	67.1
武科①	Case3	150.93	0.54	17.90	102.39	39.29	141.68	93.9
Ī	Case4	71.19		12.00	48.59	7.34	55.93	78.6
試料②	Case5	143.99	0.83	39.50	96.79	27.21	124.00	86.1
	Case6	119.98		20.50	70.93	8.28	79.21	66.0
	Case7	145.48	0.99	17.90	89.77	17.69	107.46	73.9
	Case8	96.48		8.60	68.05	5.19	73.24	75.9
試料③	Case9	125.47	1.81	21.80	54.85	10.47	65.32	52.1
	Case 10	55.45		10.40	32.56	3.27	35.83	64.6
	Case 11	132.04	1.86	14.70	88.82	14.09	102.91	77.9
	Case 12	93.52		5.00	63.47	5.07	68.54	73.3
	Case 13	103.87	1.24	16.10	73.69	12.06	85.75	82.6
1441(1)	Caca 1.4	164.00	0.20	27.20	73.56	20.01	10257	62.5

表-3 原土試料の投入量と分級洗浄後の各粒径区分等の回収量及び浄化土回収率

0.50

54 80

試料③ Case15

表-4 原土試料,分級洗浄後の各粒径区分等の回収物及び浄化土の放射性 Cs 濃度

32 66

15 20

試料土 ケーク		: 一ス名 放射性Cs濃度 (Bq/kg-dry)	各粒径区分等の放射性Cs濃度 (Bq/kg-dry)				浄化土 (※1+※2)	
	ケース名		軽比重物	濃縮物	回収砂 <sup>※1</sup>	回収礫**2	総放射性Cs	放射性Cs濃度
			(有機物)	$(\sim 0.075 \text{mm})$	(0.075~2mm)	(2mm~)	(Bq)	(Bq/kg-dry)
	Case 1	13,500	21,100	44,000	2,140	560	224,044	1,790
試料①	Case 2	2,150		45,000	1,300	460	76,846	1,070
武科①	Case3	14,200	23,300	46,000	2,650	560	293,336	2,070
	Case4		===	50,000	1,400	520	71,843	1,280
	Case 5	10,200	12,500	28,700	2,100	340	212,510	1,710
試料②	Case6	1,850		23,000	1,430	380	104,576	1,320
和什么	Case 7	14,300	25,900	34,000	2,150	490	201,674	1,870
	Case8	2,590		20,200	1,440	340	99,757	1,360
試料③	Case9	25,700	115,000	74,000	7,800	1,080	439,138	6,720
	Case 10	7,000	===	58,000	4,600	1,110	153,406	4,280
	Case 11	25,200	91,000	108,000	5,700	1,310	524,732	5,090
	Case 12	5,100		56,000	3,700	1,300	241,430	3,520
	Case 13	22,700	69,000	99,000	6,100	1,210	464,102	5,410
試料①	Case 14	12,200	13,900	61,000	2,250	560	181,756	1,770
試料③	Case 15	24,500	63,000	48,000	3,220	560	110,015	2,660

<sup>\*</sup> Case 2, 4, 6, 8, 10, 12 は、繰返し洗浄条件で実施したため、軽比重物の回収は無く、濃縮物もスラリーとしてのみ回収

<sup>\*</sup> Case2, 4, 6, 8, 10, 12は、繰返し洗浄条件で実施したため、軽比重物の回収は無く、濃縮物もスラリーとしてのみ回収

<sup>\*\*</sup>Case3, 4, 7, 8, 11, 12は、摩砕無し(ミガクロン不使用)条件で実施

<sup>\*\*</sup>Case3, 4, 7, 8, 11, 12は、摩砕無し(ミガクロン不使用)条件で実施









写真-6 回収砂

写真-7 回収礫

写真-8 濃縮物(脱水ケーキ) 写真-9

写真-9 軽比重物(有機物)

表-5 分級洗浄後の濃縮物(脱水ケーキ)の発生率

		試料原土		濃縮物(脱水ケーキ)		
試料土	ケース名	投入量	含水率	回収量	含水率	発生率
		(kg-wet)	(%)	(kg-wet)	(%)	(%)
試料①	Case 1	336.18	18.6	15.3	41.6	4.6
	Case3	186.10	18.9	32.2	44.2	17.3
試料②	Case5	181.81	20.8	69.9	43.5	38.4
	Case 7	181.85	20.0	31.7	43.5	17.4
試料③	Case 9	142.90	12.2	37.9	42.4	26.5
	Case 11	157.00	15.9	26.3	44.0	16.8
	Case13	146.50	29.1	29.2	44.8	19.9
試料①	Case14	200.00	18.0	50.6	46.0	25.3
試料③	Case 15	80.00	31.5	26.7	43.1	33.4

\*回収スラリーに対し、フィルタープレスにより脱水ケーキを得たCaseのみを対象

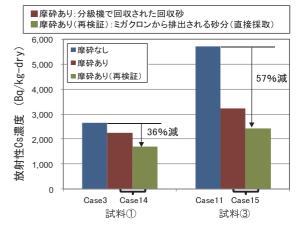
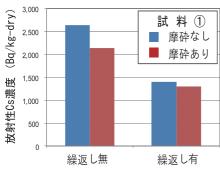
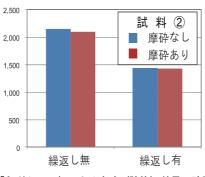


図-4 摩砕 (除染) 効果の再検証結果





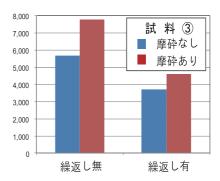


図-3 「ミガクロン」による摩砕(除染)効果の確認結果

# § 4. 考察

# 推測通り、試料③でも摩砕効果が確認された.

# 4-1 砂分に対する磨砕(除染)効果とその再検証

磨鉱機「⑥ミガクロン」の摩砕(除染)効果を試料土毎に比較検討した結果を図ー3に示す。図から、試料①、②では磨鉱機を使用した方が使用しない場合より放射性 Cs 濃度が低下し、摩砕効果は確認されたが、試料③では認められなかった。その原因として、プラントの送水バランスの都合上、回収礫の洗浄分級フロー後段に設置した選別機「⑤トロンメル」の洗浄水を磨鉱機を通さず分級機「⑦ハイメッシュセパレーター」へ移送し、結果的に洗浄水に含まれる摩砕されていない砂分が分級機に混入することで回収砂の放射性 Cs 濃度に影響したと考えられた。そこで、この推測を検証すべく、試料土の異なる Case14 と Case15 において、磨鉱機から排出される砂分を直接採取し、分級機からの回収砂との放射性 Cs 濃度を比較検証した。その結果、図ー4に示すように、

# 4-2 繰返し洗浄効果

繰返し洗浄の効果を試料土毎に比較検討した結果を図 -5に示す。図から、試料土に関係なく、回収砂については、明らかに放射性 Cs 濃度が低減され、繰返し洗浄効果が確認された。一方、回収礫については、1回の洗浄で濃度は既に低く、試料①で若干の低下は確認されたが、試料②、③では繰返し洗浄による有意な差は認められなかった。

#### § 5. おわりに

土壌汚染対策技術の一つである土壌洗浄法を適用することで、放射性 Cs 含有土砂を再生利用可能な資材(放射性 Cs 濃度 3,000 Bq/kg 以下)と、その処理過程で発生する廃棄物(放射性 Cs 濃度 8,000 Bq/kg 以上)とに

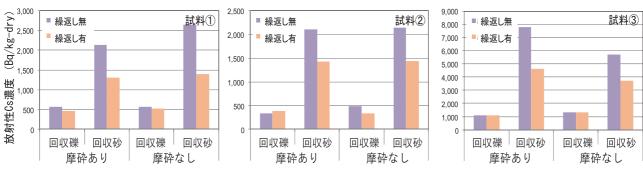


図-5 「ミガクロン」による摩砕(除染)効果の確認結果

分別できるとの考えに基づき、福島県内の道路維持管理 で発生した放射性 Cs 含有土砂を対象に、除染・減容化 を目的とした分級洗浄プラントを構築して、処理方法の 実用性、有効性を検証するための実証実験を行った.

その結果、路面清掃土砂(放射性 Cs 濃度: $10,200 \sim 14,300~Bq/kg-dry$ )について、濃縮物(<0.075~mm)は 8,000~Bq/kg-dry以上、浄化土( $\ge 0.075~mm$ )は 3,000~Bq/kg-dry以下に処理ができ、実用性、有効性を確認できた。また、側溝土砂(放射性 Cs 濃度: $22,700 \sim 25,700~Bq/kg-dry$ )については、比較的木っ端や金属片等の異物が多く、手選別等前処理が必要であるが、浄化土のうち回収礫( $\ge 2~mm$ )は 3,000~Bq/kg-dry以下に、また回収砂は 8,000~Bq/kg-dry以下に処理できたことから、概ね実効性、有効性は示された。

除染土壌を含めた放射性 Cs 含有土砂の減容化・再生利用の事業化(プラントの大型化)を見据えると、フレコンバック内に異物とともに長期保管され団粒状となっている放射性 Cs 含有土砂の中から簡便に比較的大きな異物(写真-10)を取除き、分級洗浄システムの目詰まり等トラブルを予防する前処理施設、ならびに今回新たに開発した装置「比重選別機」の大型化、あるいは放射性 Cs 濃度が極めて高い濃縮物(脱水ケーキ)や軽比重物(有機物)に対する自動回収及び容器保管システム等の開発、効果の検証が必要であり、今後の課題と考える.

謝辞:本実証実験は、福島県土木部発注の「H25 減容化 実証実験業務委託(道維・災防)」として実施した、福 島県土木部の方々をはじめとした関係各位の皆様には、



写真- 10 手選別により放射性 Cs 含有土砂の中から回収した比較的大きな異物

実証実験に際して多大なご指導,ご助言,ご協力をいただいた.ここに、厚く御礼申し上げます.

#### 参考文献

- 1) 熊田正次郎,高畑修,安藤淳也,宮口新治,石山宏二, 保高徹生,小峯秀雄:福島県内の道路維持管理発生 土砂における放射性物質の影響と対応,日本材料学 会第11回地盤改良シンポジウム,2-8, pp.101-104, 2014
- 2) 佐藤靖彦,石山宏二,石渡寛之,安藤淳也:道路維持管理に伴い発生する放射性セシウム含有土砂の分級洗浄処理実験,第49回地盤工学研究発表会,B-12,pp.2019-2020,2014.
- 3) 環境省:管理された状態での災害廃棄物(コンクリートくず等) の再生利用について、H23.12.27.