

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  
【除染技術実証試験事業編】

報告書

平成 24 年 6 月

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

本報告書は、内閣府からの委託事業として、独立行政法人日本原子力研究開発機構が実施した「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」の成果を取りまとめたものである。

## 目次

1. 概要	1
2. 試験結果	6
3. まとめ	31

別紙 分級土壌の性能の評価方法について	38
---------------------	----

付録1 除染技術実証試験事業のまとめ	付1
付録2 平成23年度「除染技術実証試験事業」各案件の概要	付29
付録2-1 放射性物質汚染土壌等からの乾式セシウム除去技術の開発	付30
付録2-2 低線量汚染された土壌の放射性物質減量化	付32
付録2-3 植物が混入した放射性セシウム汚染土壌の多段階土壌洗浄処理	付34
付録2-4 特殊洗浄機による放射線汚染土壌の減容化および一時保管方法に関する実証試験	付36
付録2-5 土壌分級及び熱処理による汚染土壌減容化システムと汚染水処理システムの実証	付38
付録2-6 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	付40
付録2-7 高性能洗浄装置を用いた汚染土壌の除染および減容化技術	付42
付録2-8 汚染土壌からのセシウム回収技術の開発	付44
付録2-9 汚泥等からの除染除去物減容化技術の研究開発	付46
付録2-10 高圧洗浄を使わない除染作業と親水性塗膜による汚染軽減作業	付48
付録2-11 ナノバブル水を用いた放射性セシウムの直接洗浄効果の実証	付50
付録2-12 モルクラスターオゾン水による各種構造物の除染実証試験	付52
付録2-13 超高压水表面処理工法「Jリムーバー」による除染技術	付54
付録2-14 ウェットブラストによる道路の除染	付56
付録2-15 放射性物質の汚染廃棄物の洗浄による減容化技術	付58
付録2-16 ドライアイスを利用した「がれき」の除染	付60
付録2-17 宇宙農業研究の成果・高温好気堆肥菌システムによる放射能除染・減容化技術実証	付62
付録2-18 有機減容化システムを用いた減容化技術の実用化に向けた実証実験	付64
付録2-19 人工ゼオライトブロックを用いた住宅地排水溝の除染技術の実証試験	付66
付録2-20 フェロシアン化鉄配合吸着凝集沈殿剤を使用した放射能汚染水浄化システムの提案	付68
付録2-21 木質系廃棄物のチップ化に先立つ表面除染方法の検討	付70
付録2-22 放射能汚染された木材・樹皮の水洗及び焼却による除染・廃棄物減容化技術の実証	付72
付録2-23 放射能汚染された木質バイオマス(ガレキ・原木等)有効利用のための除染技術の実証試験事業	付74
付録2-24 森林の放射線量低減技術の開発に関する実証試験事業	付76
付録2-25 森林除染事業の効率化実証試験等	付78

## 1. 概要

### (1) 目的

環境中の放射性物質を除染する技術について確立された技術は多くないが、除染における洗浄、研磨、減容等の技術については、新たな技術の開発や、他分野における技術の転用等により実用化が期待できるものがあると考えられる。除染技術実証試験事業は、実用可能と考えられる新規の有望な除染技術を公募により発掘し、実証試験を行うことによりその有効性を評価することを目的とする。

### (2) 選考の概要

平成23年10月3日（月）～10月24日（月）に、本実証試験事業の趣旨に沿った除染技術の実証試験についての提案を募ったところ、305件の応募があった。外部専門家等による委員会を設け、この中から、科学的根拠に乏しいもの、科学的根拠はあるが基礎データが乏しく評価できないもの、既の実証されており結果が明らかなもの等を除き、また、同様の技術提案が複数ある場合には比較評価を行い、口頭審査を経て25件を採択した。表1-1に採択案件の一覧を示す。

表1-1 除染技術実証試験事業における採択案件

除染対象物	手法	特徴	No.	実施者	
土壌	熱処理	高性能反応促進剤	1	太平洋セメント(株)	
	分級	ポンプ分級	2	ロート製薬(株)	
		湿式分級		3	(株)竹中工務店
				4	(株)熊谷組
				5	(株)日立プラントテクノロジー
				6	(株)鴻池組
				7	佐藤工業(株)
	化学処理	有機酸処理	8	(株)東芝	
下水汚泥	溶出	有機物処理	9	新日鉄エンジニアリング(株)	
公園・道路・建物	切削・剥離	切削・ストリップペイント	10	志賀塗装(株)	
	特殊水洗浄	ナノバブル水	11	京都大学	
		高濃度オゾン水	12	ネイチャーズ(株)	
	高压洗浄	超高压 (280MPa)	13	(株)キクテック	
研削・剥離	ウェットブラスト	14	マコー(株)		
瓦礫	洗浄	磨砕洗浄	15	戸田建設(株)	
		ドライアイス分別	16	環テックス(株)	
植物・牛糞減容	堆肥化	100℃以上	17	(独)宇宙航空研究開発機構	
		50～60℃	18	日本ミクニヤ(株)	
水	捕集	ゼオライトブロック	19	前田建設工業(株)	
	吸着・凝集	フェロシアン化鉄	20	東京工業大学	
森林・木材	固化剥離	セメント剥離	21	大成建設(株)	
	洗浄	水洗浄・焼却	22	郡山チップ工業(株)	
		高压洗浄・水処理	23	(株)ネオナイト	
	間伐有	空間線量率変化	24	福島県林業研究センター	
間伐無	施工法の効率化	25	(株)大林組		

### (3) 実施工程

採択を決定した後、採択者に対する説明会を行い、原子力機構が有する既知の知見、測定方法、評価方法について説明を行った。また、各採択者に対し、実施計画策定、放射線・放射能の測定や評価のための確認を行うとともに、事業の実施中の安全確保の観点から、放射線防護に関する説明を行った。

その後、試験実施場所の所有者や自治体等との調整を行うとともに、試験の実施に際しては、試験現場への立ち会い、技術指導等を行った。

表 1-2 除染技術実証試験事業の実施工程

スケジュール	11月			12月			1月			2月		
JAEA	口頭審査 結果発表	契約説明会	個別ヒア	契約準備、 明、技術指導	実施計画書 確認、地元説		現場確認、試験立会、中間成果公開					評価
各実施者 (例)				準備		装置設置等		試験			まとめ	

(4) 実施場所

本実証試験事業において、福島県内で行った試験の除染対象は、年間追加被ばく線量が 1mSv を超える地域の実際に汚染されたものを用いており、図 1-1 に福島県内の各採択案件の実施場所を示す。応募の段階で提案者が試験の実施場所を確保するとともに、試験の過程で放射性物質を含む除去物等が発生する場合には提案者が適切な管理・対応を行うことを条件とした。福島県内で行った試験の除染対象は、年間追加被ばく線量が 1mSv を超える地域の実際に汚染されたものを用いた。図 1-1 に福島県内の各採択案件の実施場所を示す。

これらの実施場所において円滑に事業を進めていくために最も重要なことは、周辺住民の方々の理解を得ながら、試験の実施や除去物の保管管理を行うことである。このため、試験の実施場所等の確保については提案者が行うこととしたものの、福島県内で行うほとんどの提案について、採択後に関係自治体への説明や住民説明会の開催等の対応が必要となった。

また、除去物の保管場所等が確実に確保されるまでは、作業を開始しないことを徹底した。

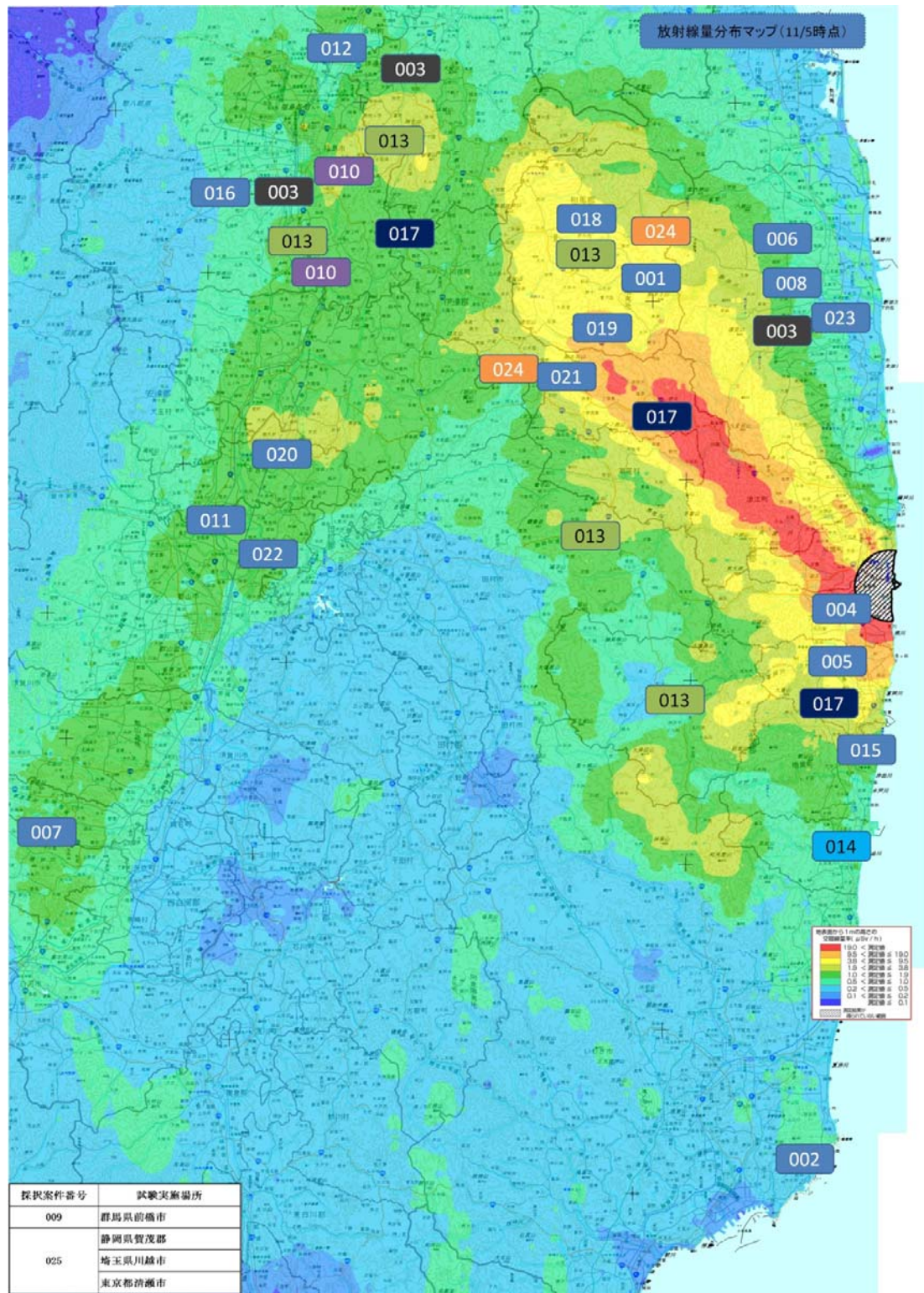


図 1-1 除染技術実証試験場所の位置図（図中の番号は採択番号を示す）

本実証試験事業の取組状況や成果については積極的な公表に努め、ウェブサイトにも各技術を紹介するわかりやすい資料や試験結果に関する速報等を掲載するとともに、マスコミ等からの取材要請への対応にも努めた。（表 1-3 は平成 24 年 2 月 29 日までの公表状況。）

表 1-3 試験速報等の公表状況（平成 24 年 2 月 29 日現在）

No.	実施者	公表状況
	全体	10/4 公募の案内, 11/10 採択 25 件が新聞各社に掲載, 1/20 平成 23 年度「除染技術実証試験事業」概要を WEB で公開開始
1	太平洋セメント(株)	2/22 毎日新聞等に記事掲載, 3/8-10 農水省の国際シンポジウムで成果を発表
2	ロート製薬(株)	—
3	(株)竹中工務店	—
4	(株)熊谷組	12/27, 2/8 福島民友, 福島民報に記事掲載
5	(株)日立プラントテクノロジー	12/27, 2/8 福島民友, 福島民報に記事掲載, 2/7 富岡町議会に公開
6	(株)鴻池組	2/15NHK クローズアップ現代で放送
7	佐藤工業(株)	2/11 福島民報, 2/14 建設工業, 建設通信に記事掲載
8	(株)東芝	2/15NHK クローズアップ現代で放送
9	新日鉄エンジニアリング(株)	—
10	志賀塗装(株)	11/26 いわき民放に記事掲載, 1/26 朝日新聞に記事掲載, 2/6NHK おはよう日本で放送
11	京都大学	1/19 朝日新聞に記事掲載
12	ネイチャーズ(株)	—
13	(株)キクテック	1/28 福島中央テレビで放送, 1/29 読売新聞, 朝日新聞, 福島民友, 福島民報で記事掲載
14	マコー(株)	11/22 日本経済新聞に記事掲載 12/27, 2/6 新潟テレビで放送
15	戸田建設(株)	12/27, 2/8 福島民友, 福島民報に記事掲載
16	環テックス(株)	—
17	(独)宇宙航空研究開発機構	1/26 朝日新聞に記事掲載
18	日本ミクニヤ(株)	1/11 福島民友に記事掲載
19	前田建設工業(株)	—
20	東京工業大学	2/15NHK クローズアップ現代で放送
21	大成建設(株)	—
22	郡山チップ工業(株)	1/26 朝日新聞に記事掲載
23	(株)ネオナイト	11/24 福島民報, 読売新聞に記事掲載, 11/30 山陰中央新報に記事掲載, 2/3NHK ニュースで放送
24	福島県林業研究センター	1/31「放射線関連研究成果等発表会」で報告（福島県林業研究センター主催）
25	(株)大林組	—



## 2. 試験結果

### (1) 土壌

#### ① 背景

水に溶けたセシウムは、土壌中で1価の陽イオンとして振る舞い、負に帯電している土壌粒子表面の粘土層である2:1型層状ケイ酸塩と呼ばれる薄い層状構造の間に取り込まれて、きわめて強く「固定」され、他の陽イオンによって簡単に置き換えることができなくなる（日本土壌肥料学会, 2011）。また、セシウムを吸着した土壌をセシウムの沸点である685℃（理科年表, 2010）、セシウムの化合物の融点や沸点（Cs<sub>2</sub>O：融点490℃, CsCl：融点645℃, 沸点1295℃, CsOH：融点272℃, 沸点990℃）を考慮した1300℃程度に加熱しても、放射能濃度の変化は、-9.8%～+14.0%の範囲でばらついている程度であり、セシウムの顕著な揮発挙動は見られないことが分かっている（原子力機構, 2011）。

一方、石井により、土壌粒径が小さいほどセシウムが良く吸着しており、分級により粘土のような極めて小さな粒径土壌を取り除くことで放射能濃度を低減できることが示された（原子力委員会, 2011）。

また、駒村ら（駒村ほか, 2006）による調査によれば、植物は、微量ではあるが長期的にきわめて強く「固定」されているはずの土壌からセシウムイオンをカリウムイオンなどの養分の代わりに吸収することが確認されている。これは、ムギネ酸等の有機酸が粘土表面を溶かし、養分と一緒にセシウムイオンを吸収する機構と同様であると予測でき（村田, 2010）、酸によって土壌内からセシウムイオンを溶出できる可能性を示している。

以上から、土壌からセシウムを取り除くには、粘土の層構造を破壊するか、粘土分を効率よく回収する技術が必要になると考えられる。

#### ② 実施内容

土壌からセシウムを除去する方法としては、大別して、①高性能反応促進剤を加え加熱によりセシウムを除去する方法（No.1）、②分級に加え様々な方法による洗浄によりセシウムを含む粘土のような細粒土壌を除去する方法（No.2, No.3, No.4, No.5, No.6, No.7）、③有機酸を用いて溶解により土壌内からセシウムを除去する方法（No.8）の3つの方法について実証した。

なお、土壌の減容化の一環として、除去土壌を詰めたフレキシブルコンテナが土工材料として利用し得るかについても試験を行った（No.25の一部）。

#### ③ 試験結果

除染技術実証試験事業において実施した土壌からセシウムを除去する各技術の特徴を表2-1にまとめる。

No.1（付録2-1）は、原土の土壌に高性能反応促進剤を添加し、加熱することによって放射性セシウムを原土から昇華するものである。回転式昇華装置により1,300℃以上に加熱した際に、除染係数（DF）2321（除染率99.9%以上）を達成した。放射能濃度はセシウムのクリアランスレベル（100Bq/kg）よりも低い50Bq/kg以下となった。

No.2（付録2-2）は、特殊ポンプを用いた分級洗浄である。26,991Bq/kgの原土に対し、除染後の粒径65μm～185μmの土壌は、657Bq/kgまで除染でき、除染率として97.8%を達成したが、試験データ数が少なく適用範囲を明確にできなかった。また、セシウム吸着促進鉱物（モンモリナイトを主成分とする黒鉛珪石配合粘土）の添加による効果はなかった。

No.3（付録2-3）は、鉄製ボールによる磨砕とドラムウォシャーによる洗浄である。12,000Bq/kg

の原土に対し、除染後の粒径 75 $\mu$ m を超える土壌は、一次洗浄で 2,800Bq/kg、二次洗浄で 1,300Bq/kg、最終的に仕上げ（すすぎ）洗浄により 670Bq/kg まで除染できる場合もあり、94.4% までのセシウム濃度の低減を達成した。鉄製ボールを用いた磨砕においても後述するハリケーン（磨砕洗浄機）による磨砕と同等の結果が得られ、仕上げ（すすぎ）洗浄によって約 5% 程度の除染向上効果があることがわかった。

No.4（付録 2-4）は磨砕洗浄装置を用いた磨砕である。対象とした原土の放射能濃度は 19,700～125,667Bq/kg であった。除染後の粒径 5mm 以上の粒子では 63～965Bq/kg まで、粒径 75 $\mu$ m～5mm までのものは 3,553～61,300Bq/kg まで低減できた。

No.5（付録 2-5）は磨砕、洗浄は実施せず、分級とその後の熱処理を組み合わせたものである。分級については、10,584Bq/kg の原土に対し、除染後の 300 $\mu$ m 以上の砂・礫について、4,362Bq/kg 程度まで除染でき、除染率として 58.8% を達成した。しかしながら、分級後に 700～800 $^{\circ}$ C までの熱処理を実施した場合の効果については、ほとんど変化が見られず数% の誤差の範囲にとどまった。このことから、本技術提案における除染効果は、分級（篩い分け）によるもののみであり、熱処理での土壌粒子からセシウムを分離する効果は認められなかった。

No.6（付録 2-6）は、磨砕洗浄装置による磨砕と、キャビテーションジェットによる磨砕と洗浄である。採取した土壌の粒径分布に応じ、分級（篩い分け）するだけでもある程度の除染効果が得られるが、さらに磨砕処理することにより 74.7～91.5% まで除染効果を向上させることが確認できた。これは、電子顕微鏡による表面観察結果から粒径表面の凹凸部に付着していた粒子を磨砕によって除去できたためと考えられる。

No.7（付録 2-7）は高圧ジェット水流とマイクロバブルによる洗浄である。6,600Bq/kg の原土に対し、除染後の粒径 300 $\mu$ m 以上の砂・礫について、943Bq/kg まで除染でき、減容率として 85.7% を達成した。

No.8（付録 2-8）は、有機酸を用いた酸洗浄である。4,853Bq/kg の原土に対し、除染後の粒径 100 $\mu$ m 以上の土壌について、340～1,116Bq/kg まで除染でき、減容率として最大 77～93% を達成した。

No.25（付録 2-25）は、フレキシブルコンテナにセメント固化剤を入れ、土工材料として利用できるかを確認したものである。

表 2-1 除染技術実証試験における土壌の除染に関する各技術の特徴 (1/2)

No.	事業者	件名	特徴	特徴				Cs の捕捉	シルト・泥処理方法	処理対象	処理手順概要	処理能力	
				分級	研磨	洗浄	加熱						
1	太平洋セメント株式会社	放射性物質汚染土壌等からの乾式 Cs 除去技術の開発	回転式昇華装置により昇華し Cs を分離	-	-	-	○	高性能反応促進剤+1300°C 加熱による Cs の揮発	昇華後のアルカリ塩化合物として濃縮・分離・回収	-	-	粉砕・ふるいにより粒径を選択 高性能反応促進剤と共に炉にて焼成, アルカリ塩基化合物は濃縮分離し回収	1kg/h
2	ロート製薬株式会社	低線量汚染された土壌の放射性物質減容化	特殊ポンプによる分離 処理水電界浄化	○	-	○	-	磨砕装置	Cs が吸着した粘土質の泥を利用 レキは表面を破砕分離後収集	電気分解吸着 or 凝集沈殿 無機系マグネシウムにて固化	20mSv/年程度の汚染土壌	特殊ポンプ処理後分級機にて 30 μm, 30 μm 以下のシルトを処理	
3	株式会社竹中工務店	植物が混入した放射性セシウム汚染土壌の多段階土壌洗浄処理	植物混合土壌の洗浄処理(処理工程内で植物除去)	○	○	○	-	鉄製ボールによる磨砕	Cs が吸着した粘土質の泥を利用 レキは表面を破砕分離後収集	凝集剤+フィルタ	緑地帯表土, 裸地表土, グランド表土 20,000~50,000 Bq/kg(3種類) 5,000~10,000 Bq/kg(1種類)	7 ケース(各 10kg)を採取し試験 9.5mm ふるい分け+1 次洗浄比重分離で植物を分離 湿式分級で 75 μm → 泥を処理。ふるい分けで 75,125,250,500 μm	分級~研磨 4h/工程で 10kg
4	株式会社熊谷組	特殊洗浄機による放射線汚染土壌の減容化および一時保管方法に関する実証試験	磨砕洗浄機	○	○	-	-	乾燥	Cs が吸着した粘土質の泥を利用 レキは表面を破砕分離後収集	凝集剤+沈降分離	生活圏, 農地(畑) 10, 20, 30 μSv 空間線量	6 ケース(各 200L)を採取し試験 振動ふるいおよび磨砕洗浄機にて分級 沈降分級後の泥を処理 処理水は, 幕分離ユニットにて処理	分級~研磨 1t/h

表 2-1 除染技術実証試験における土壤の除染に関する各技術の特徴 (2/2)

No.	事業者	件名	特徴	特徴				Cs の捕捉	シルト・泥処理方法	処理対象	処理手順概要	処理能力	
				分級	研磨	洗浄	加熱						
5	株式会社 日立プラント テクノロジー	土壤分級及び熱処理による汚染土壤減容化システムと汚染水処理システムの実証	分級後、疎粒・細粒土壤の Cs を加熱で分離	○	-	-	○	粗粒・細粒土壤の Cs を 700~800°C 加熱で分離	Cs が吸着した粘土質の泥を利用分離放射性ダストは、散水による水中補足+HEPA,活性炭による吸着	凝集剤+沈降分離 スクリュープレス(脱水) 排水を再度、吸着・凝集・沈殿	グラウンド 表土 10,000 Bq/kg	ドラムスクラバー+振動ふるいで 2000 μm サイクロン+振動ふるいで 75 μm → シルトを処理 75 μm 以上の疎粒・細粒は、加熱処理	分級 ~研磨 2t/h
6	株式会社 鴻池組	湿式分級に表面研磨を付加した土壤洗浄処理技術による放射能汚染土壤の減容化	磨砕洗浄機、キャビテーション洗浄	○	○	○	-	磨砕装置+キャビテーションジェット洗浄	Cs が吸着した粘土質の泥を利用レキは表面を破砕分離後収集	凝集沈殿+フィルタ	砂質土 10,000 Bq/kg	100~200kg を採取磨砕洗浄機+分級機で 5mm, 5mm 以上のレキを磨砕洗浄。5mm 以下および洗浄レキ 2mm 以下を研磨洗浄。洗浄水およびシルトを処理	分級 ~研磨 ~洗浄 150kg/h
7	佐藤工業 株式会社 技術研究所	高性能洗浄装置を用いた汚染土壤の除染および減容化技術	高圧ジェット水流、マイクロバブル渦崩壊による洗浄	○	-	○	-	高圧ジェット水流+マイクロバブル	Cs が吸着した粘土質の泥を利用レキは表面を破砕分離後収集	浮上分離(マイクロバブル) 脱水機能付き保管容器	グラウンド 砂質土	ふるい分けで礫 30mm 以上高圧ジェット水流洗浄で砂礫 30mm未満~700 μm 以上マイクロバブル渦崩壊洗浄で砂 700 μ~75 μm 以上 75 μm 以下のシルトを処理	分級 2t/h
8	東芝	汚染土壤からのセシウム回収技術の開発	シュウ酸による Cs の溶離と吸着剤による回収	-	-	○	-	シュウ酸による Cs の溶離	溶離した Cs を吸着剤(フェロシアン化物、ゼオライト)により除去	Cs が付着した吸着剤とシュウ酸溶液をろ過や磁気を用いて分離する。	汚染土壤	汚染土壤をシュウ酸溶液にて処理、固液分離した処理液から吸着剤にて Cs を除去する。使用済みの有機酸は、過酸化水素等により分解して、溶離液が無害化できることを確認する。	-

#### ④ 評価

土壌の除染に関する、高性能反応促進剤を加えた加熱によるセシウム昇華 (No.1), 分級に磨砕や洗浄を加えた方法 (No.2, No.3, No.4, No.5, No.6, No.7), 有機酸を用いた溶解によるセシウム除去 (No.8) の中で, 99.9%以上セシウムを除去できる手法はNo.1の技術のみであった。

No.1の技術は, 除染後の残渣を通常の復興資材として利用できる。無機物からセシウムを昇華できることから, 例えば, 下水汚泥の焼却灰 (主に無機物で構成) からのセシウムを除去する場合にも応用できると考えられる。試験では最大 67,300Bq/kg の原土を利用したが, この 1,000 倍までの汚染濃度の土は同様に処理ができると考えられる。なお, 本技術では除去する原土の 2 倍の重量の高性能反応促進剤を添加する必要がある。

No.2 から No.7 は土壌を分級する際に, 磨砕や洗浄等を実施するものである。「東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について (平成 23 年 10 月 29 日)」(環境省, 2011a) では, 除染によって発生した土壌は全て中間貯蔵施設に持ち込み, 減容後に最終処分場に移動する考え方であるが, 減容化に伴って放射性物質が濃縮される場合の放射能濃度限度等は示されていない。そこで, 本評価では, 図 2-1 を参考に, 追加被ばくが年間 5mSv に相当する 8,000Bq/kg と 1mSv に相当する 1,000Bq/kg を評価点とした。

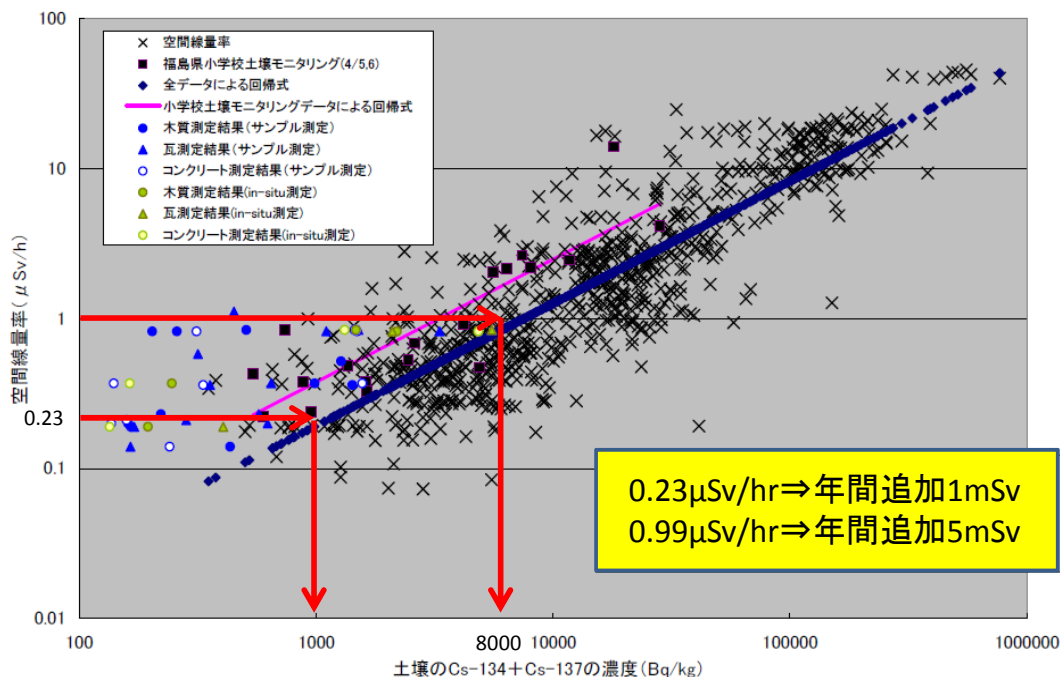


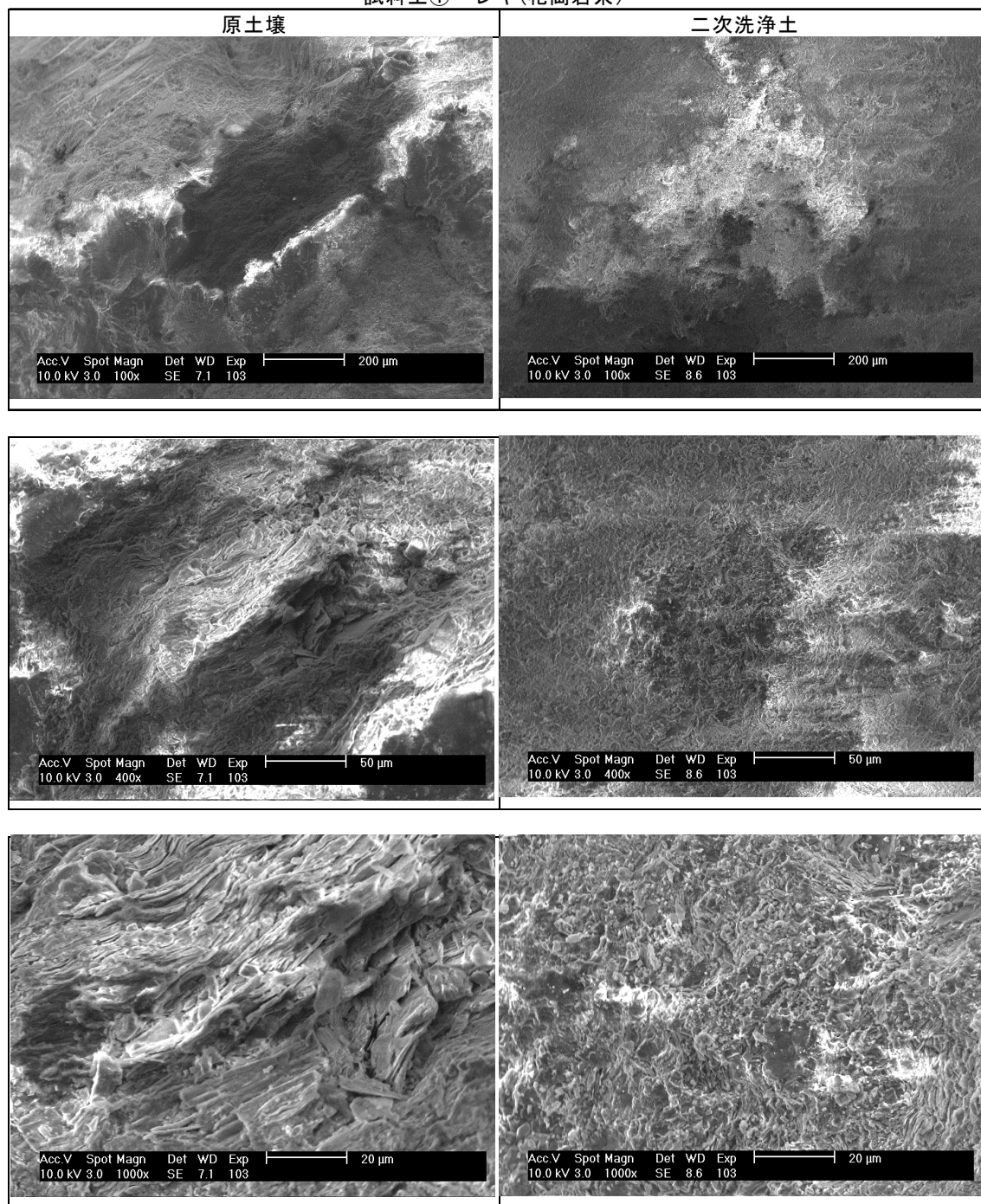
図 2-1 放射能濃度 (Bq/kg) と空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) の相関

(独) 原子力安全基盤機構・環境省災害廃棄物安全評価検討会資料 (環境省, 2011b) に加筆

土壌の分級・磨砕洗浄による除染効果は, 原土の放射能濃度と粒度分布に依存するため, 様々な粒度分布の土壌で技術の適用範囲を確認する試験を行う必要がある。付録 2-6 に No.6 で測定した原土壌の粒度成分毎に含まれる放射能セシウムの相対比率と二次洗浄後の粒度成分毎に含まれる放射性セシウム濃度の変化を示す。

分級・磨砕洗浄を行う装置は異なるものの, これらの技術は, 基本的には, 磨砕装置や高圧ジェットポンプ等により礫同士を衝突させることにより, 礫表面凹凸に付着したセシウムを吸着した微細粒子を削り取り, 分級によってこれを分離するものである (図 2-2 は, 礫表面の凹凸が削り取られた様子を示す電子顕微鏡写真)。

試料土① レキ(花崗岩系)



原土壌 (>5 mm)

二次洗浄土 (>5 mm)

図 2-2 礫表面の電子顕微鏡写真 (No. 6 の試験結果の例)

したがって No.5 のように磨砕装置や高圧ジェットポンプ等の研磨機能がシステム内に備えていないものは、篩い分けによる分級効果しか期待できない。

本実証試験事業では、放射能濃度が 3,970~12,5667Bq/kg の土壌を原土として分級を行った結果、これらの除染率は約 60~90%と幅があるものの、その値は原土の放射能濃度に依存せず一定の幅に収まった。これは、放射性セシウムが、土壌中の細粒分とそれ以外の大きな粒子に一定の割合で付着するため、分級によって細粒分を除いても、それ以外の粒子に付着した放射性セシウムが残るためと考えられる。低濃度から高濃度までの様々な汚染状況の土壌で分級・磨砕洗浄の

試験を行った結果においてもこの傾向は一致しており、概ね 80%程度以上の除染効果を得ることが困難であった。このように、分級・摩砕洗浄による方法が 80%程度の除染効果が得られる技術であると考えれば、本技術により図 2-1 で仮定した濃度限度（8,000Bq/kg または 1,000Bq/kg）以下にすることができる原土は、それぞれ 40,000Bq/kg または 5,000Bq/kg ということになる。

図 2-3 は、No.6 において、研磨と洗浄が行われるキャビテーションジェットで繰り返し洗浄を行った際の除染効果を示している。1 回の除染では 20%の除染率であったところ、複数回繰り返した場合、4 回程度までは除染率の向上が確認でき、40%までの除染率の向上が図られたが、4 回目以降は回数を増やしてもほとんど変化はみられなかった。これは表面の粘土分の除去は完了しても、砂礫表面のクラックなどに入り込んだセシウムが研磨・洗浄によっても、除去しにくいためと思われる。

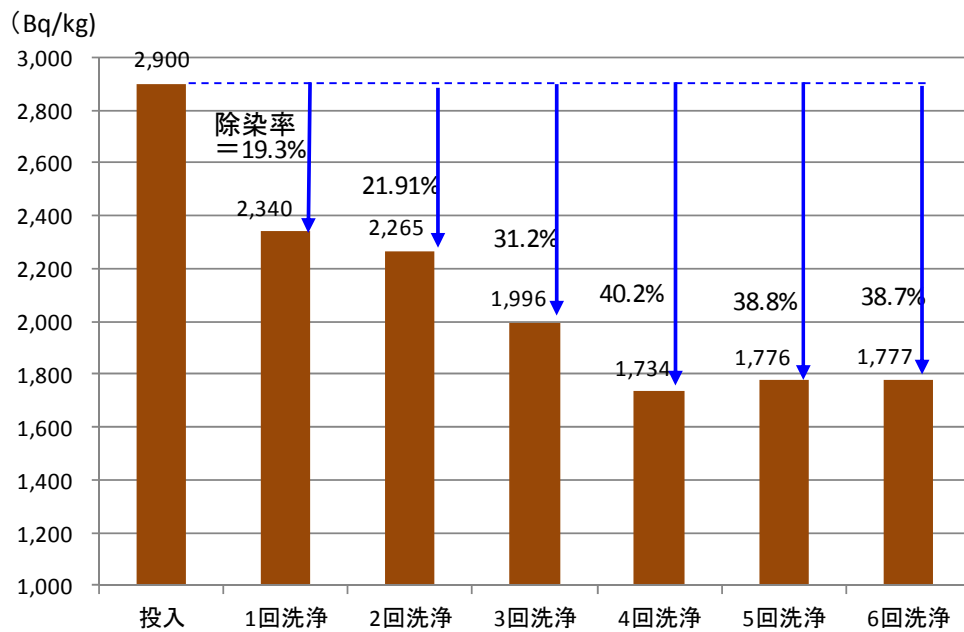


図 2-3 繰り返し洗浄による除染効果 (No.6 の試験結果の例)

図 2-4 は、No.3 における仕上げ（すすぎ）洗浄による除染効果である。仕上げ（すすぎ）洗いによって約 5%の除染効果の向上が確認できた。これは再付着した粘土分を仕上げ（すすぎ）洗浄で除去できたためと考えられる。

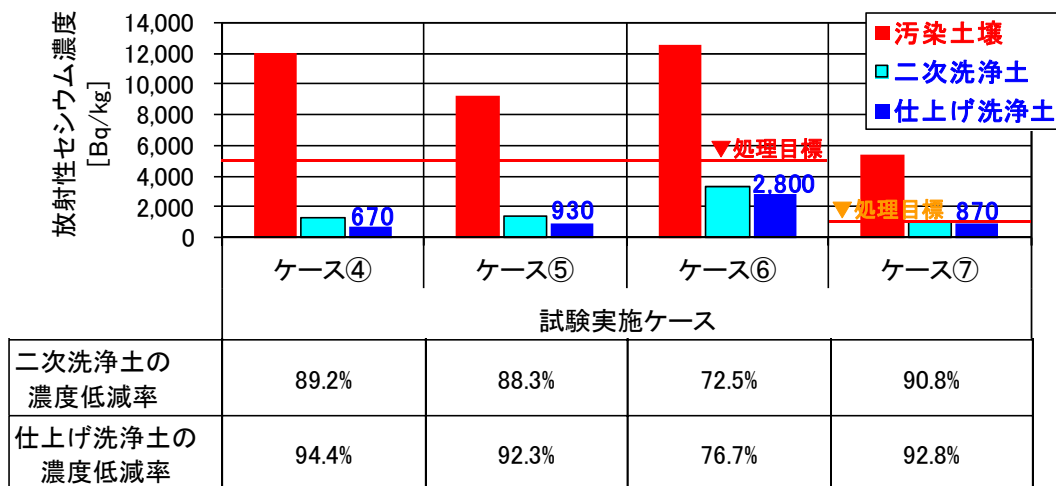


図 2-4 仕上げ（すすぎ）洗浄による除染効果 (No.3 の試験結果の例)

洗浄後の75 $\mu$ m未満の細粒分には、通常水分が50～60%含まれるため、この水分により細粒分の嵩が増える。すなわち、75 $\mu$ m未満の細粒分は、プレス処理による脱水をしなければ分級しても減容化には繋がらず、条件によっては管理が必要な土壤量を増やす結果となる。そこで、脱水後の細粒分（脱水ケーキ）を保管時に締固めを実施した場合の試算を表2-2に示す。表2-2では、分級による土壤除染を行わなかったときを「減容化なし」とし、分級を行い脱水後の状態（脱水ケーキの状態）を「締め固めなし」とした。また脱水ケーキの保管時に充填率を上げるため、重機等で締固めを行なった場合を「締固め時」とした。試算の結果、除染を行わなかったとき（「減容化なし」）は70.56Lであった試料土が、「締め固めなし」では28.70Lとなり、除染前の容積に対し、59.3%の減容となった。さらに「締め固め時」には、保管時容積は17.85Lとなり、減容化率で74.7%までの減容化が可能となることが確認された。

表 2-2 締固めによる更なる減容化（No.6の試験結果の例）

	媒体	種別	単位	試料土
減容化なし	保管容積		L	70.59
減容化後 (計算)	保管時容積	締め固めなし	L	28.70
		締め固め時	L	17.85
	減容化率	締め固めなし	%	59.3
		締め固め時	%	74.7

次に、分級をどの段階で導入することが最も経済的であるかについて評価した。評価に際し、原土の細粒分比率が多くなるほど保管する土壤量が多くなることから、原土細粒分比率（75 $\mu$ m未満の粘土粒子の割合）をパラメータとした。計算条件は、2年間で10万 $m^3$ の土壤（含水率10%）を分級処理し、放射性セシウムを含む土壤として保管する体積を約3万 $m^3$ （減容化率約70%）とした。評価は、減容化しなかった場合を100としてその比率を評価し、表2-3に示した。

この結果、分級を除染現場の近くで行うほど、減容化しないまま輸送・保管する土壤の量が小さくなるため、細粒分比率が30%と高く分級による減容化の効果が小さい土壤であってもコストメリットは生じるが、分級の実施場所を除染現場から離すほど、細粒分比率が小さく分級による減容化効果が高い土壤でなければコストメリットは得られない。すなわち、細粒分が30%を超えるとコスト削減効果がなくなることが分かる。

表 2-3 分級・洗浄場所とコストの関係（No.6の試験結果の例）

細粒分比率(%)	除染現場	仮置場	中間貯蔵施設	減容化なし
10	55.3	69.3	76.9	100.0
20	70.8	81.9	88.0	100.0
30	92.9	100.7	105.0	100.0
40	116.0	121.1	123.9	100.0

※計算条件：稼働期間2年で処理量10万 $m^3$ （原土土壤（含水率10%））、除染後の放射性セシウムを含む土壤を約3万 $m^3$ （減容化率約70%）として試算。但し、中間貯蔵施設までの運搬距離や除染後土壤の取り扱い方法などでコスト変動の可能性あり。



なお、土壌除染として要求の高い農地への適用については、本実証試験事業で実施した No.1 の手法では、高温加熱するため作物に必要な養分が失われる。No.8 についても有機酸による洗浄であるため同様である。No.2～No.7 の技術は、粒径の小さな粘土を取り除く技術であることから農地に対して重要である土壌を取り除くことになる。よって、いずれの技術も農地土壌の除染にはそのまま使えないと評価する。

No.25 は、フレキシブルコンテナ内の土壌にセメント固化剤を入れ、土木材料として利用できるかを確認したものである。津波汚泥などが処理される可能性もあることから、セメント固化剤として、普通セメント、フライアッシュ、海水等の混合材料を用いたところ十分な強度を有することを確認した。フレキシブルコンテナ内の土壌をセメント固化して土木材料とする施工手法はこれまで確立されていないため、セメント固化剤の再利用方法の一助になると考える。

## 参考文献

日本土壌肥料学会 (2011) : 原発事故関連情報 (2), セシウム (Cs) の土壌でのふるまいと農作物への移行, <http://jssspn.jp/info/secretariat/cs.html>.2011.

理科年表平成 22 年度版 (2010) .

原子力機構 (2011) : 土壌の原位置加熱による放射性セシウムの除去可能性の検討, JAEA-Research 2011-026 (<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Research-2011-026.pdf>) .

原子力委員会 (2011) : 第 34 回原子力委員会資料第 1 号, 水洗浄による放射性セシウム汚染土壌の除染方法について (<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2011/siryo34/siryo1.pdf>) .

駒村美佐子, 津村昭人, 山口紀子, 藤原英司, 木方展治, 小平潔 (2006) : わが国の米, 小麦および土壌における  $^{90}\text{Sr}$  と  $^{137}\text{Cs}$  濃度の長期モニタリングと変動解析, 農業環境技術研究所報告, 第 24 号, P1-21.

村田佳子 (2010) : ムギネ酸類によるイネ科植物の鉄取り込み機構, 化学と生物, Vol.48, No.8.

環境省 (2011a) : 東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について

環境省 (2011b) : 災害廃棄物の放射能濃度の推定方法について, 第 3 回災害廃棄物安全評価検討会

## (2) 公園・道路・建物

### ① 背景

原子力機構が学校（原子力委員会，2011），公園（原子力機構，2011a）等の除染を実施した経験等によれば，生活圏の除染における技術的課題のうち，特に公園・道路・建物を対象とした除染に関するものとしては，次のようなものがあった。

- a) 屋根瓦については，15MPa以上の回転式ノズルの高圧水洗浄により除染できた（原子力機構，2011b）が，高所作業で作業性が悪いことや二次的汚染防止の観点から水を利用しない除染方法が求められている。
- b) 路面については，15MPa以上の吸引式回転ノズルによる高圧水洗浄で除染できることは確認できたが，透水性の舗装等，舗装の種類によっては除染効果が低く（原子力機構，2011b），路面表面の切削除去は除染効果が高い反面，除去物量が多くなる。
- c) 公園については，芝生についてはその根を生かしながら除染する手法が実証（原子力機構，2011b；茂木，2011）されているが，遊具等の塗装等に固着している放射性物質の除去が容易でない。
- d) 建物や路面などの洗浄では，物理的な研磨などにより，大量の除去物の発生や，除染対象物の価値の低下や破損を防ぐ観点から，特殊水の効果の把握が望まれている。

### ② 実施内容

水を利用せずに屋根等を除染する手法や公園等の塗装を取り除く除染手法の実証（No.10），界面活性剤に代わる洗浄効果が期待されるナノバブル水（No.11），酸化剤としての効果が期待されるオゾン水（No.12）による除染効果の確認，道路について，水の圧力を最大280MPaにまで加圧して除染する手法（No.13），研磨剤による研削によって除染する手法（No.14）をそれぞれ実証した。

### ③ 試験結果

各技術の試験結果を表2-4，表2-5にまとめる。

No.10（付録2-10）は，高性能フィルタであるHEPA（High Efficiency Particulate Air）フィルタ付き吸塵器を備えた，吸塵式サンダーと，剥離型の除染剤を組み合わせることで除染を行うことによって屋根や建物の塗装面等に対し，50%～68%の除染率を達成することができた。

No.11（付録2-11）は，ナノバブル水による除染である。ナノバブル水は界面活性剤としての働きにより表面汚れを除去することで除染できる可能性があるが，表2-5によれば，かけ流しでは水道水との差は見られなかった。

No.12（付録2-12）は，高濃度オゾン水による除染である。数10ppm以上の高濃度オゾン水は，酸化力が強いので除染効果が期待された。表面状態によるばらつきが大きいものの，概ね高圧水洗浄と同程度の除染率であった。

No.13（付録2-13）は，最大280MPaの超高圧水による除染である。回転ノズルから水を噴射し，除染と同時に吸引器で回収するため，汚染された水を拡散させることがない。水は90%以上回収可能であり，水処理を実施することで放射能濃度が十分低いことを確認して再利用することができた。高線量地域から低線量地域までコンクリート，密粒アスファルト，透水性舗装，インターロッキングの全てで約90%以上の除染効果を発揮した。

No.14（付録2-14）は，密粒アスファルト，インターロッキングで約60～80%台の除染効果を示したが，ブラストで利用したアルミナ粒の回収に課題があった。

No.25（付録2-25）内の1テーマである切削アスファルトの洗浄では，溶剤を使わない燃焼法，

溶剤を再利用する遠心法，溶剤処理が必要なアブソン法の3種類の洗浄方式を実施した。溶剤処理は必要だが低減率が63%の除染効果のあったアブソン法が効果的であることを実証した。コストパフォーマンス等の総合評価では，遠心法が有効であることを確認した。

#### ④ 評価

特殊水の性能を評価するために，試験条件が類似の対象物として，平面上のコンクリートとアスファルトを対象として評価を行った。

No.10において，塗布式除染剤3種類と塗装業界で通常利用されているストリッパブルペイントの性能比較を行った結果，ストリッパブルペイントの除染率は25%程度であったが，平均除染率との比較によるコストパフォーマンスは最も高いことがわかった（表2-4）。なお，今回の試験は冬場を実施したことから，低温のためストリッパブルペイントの塗布後の固化が進まないという問題が生じた。通常の固化による作業性を得るためには，気温が5℃以上である必要があるため，固化促進剤を入れて試験を実施した。

表 2-4 除染剤のコスト評価

除染剤名	価格 (円/m <sup>2</sup> )	平均除染率(%)	コストパフォーマンス 平均除染率/価格 (万円)	特徴
アララデコン	10,000	59 (34~84%)	59	除染効果大
オライオン	9,500	56 (50~62%)	59	低温仕様
レジックス	6,500	28 (18~38%)	43	汎用粘土
ストリッパブル ペイント	2,900	25 (14~35%)	85	汎用塗装品 低温仕様

No.11のナノバブル水は，高い界面活性効果による洗浄力が期待されたが，試験では十分な除染性能が発揮されなかった。そのため，かけ流しにおいて水道水と比べても変化はなかったため，水の除染能力としては水道水と変わらないことが確認された。高圧水洗浄にナノバブル水を用いた場合には70%以上の除染効果があったが，これも水道水を用いた高圧水洗浄と数%の差しかなく，水道水等に対するナノバブル水の優位性は認められなかった。

No.12の高濃度オゾン水は，オゾンの酸化力による除染効果が期待でき，実際に水道水やナノバブル水よりも除染効果は認められたが，一般的な高圧水洗浄と比べれば同程度である。

一方で，作業管理としては，高濃度オゾン水を扱うことから安全面での配慮が必要である。厚生労働省が定める作業環境では，大気中のオゾン濃度が0.1ppm以下とするように定めている。No.12を環境中の除染として利用するには，数10ppmの高濃度オゾン水により大気中のオゾン濃度を0.1ppm以上となる恐れのあることから散布者は全面マスクに酸性物質吸収剤およびオゾン分解触媒を組み合わせた防護具を装着する他，除染エリア内に立ち入る者も酸性物質吸収材または活性炭を用いたマスクを着用する必要がある。さらに，作業場所周辺は人が立ち入る可能性がないように立ち入りを制限するとともに作業中は，空気中オゾン濃度，風向き，風速等をモニタリングすることにより安全を確認しつつ進める必要がある。

以上から，本実証試験事業で行われた特殊水を使用した除染では，水道水に比べ除染効果が高まる場合もあるが，測定誤差の範囲内であり著しい除染効果は認められなかった。（表2-5）

表 2-5 特殊水の性能比較

対象	コンクリート				アスファルト		
	水道水		NB 水	HO 水	水道水	NB 水	HO 水
条件	掛流	7MPa	掛流	0.45MPa	7MPa	7.5MPa	0.45MPa
除染前	1,370cpm	907cpm	1,570cpm	0.87 $\mu$ Sv/h*	999cpm	2,830cpm	0.49 $\mu$ Sv/h*
除染後	1,250cpm	288cpm	1,480cpm	0.71 $\mu$ Sv/h*	186cpm	430cpm	0.13 $\mu$ Sv/h*
減少率	9%	68%	6%	18%	81%	85%	73%
作業速度	90m <sup>2</sup> /h	90m <sup>2</sup> /h	90m <sup>2</sup> /h	60m <sup>2</sup> /h	90m <sup>2</sup> /h	90m <sup>2</sup> /h	60m <sup>2</sup> /h

単位：cpm，NB 水：ナノバブル水，HO 水：高濃度オゾン水，\*空間線量率（ $\mu$  Sv/hr）

No.13 は、路面の汚染による放射能濃度が高いところ（約 60,000cpm）から低いところ（約 300cpm）まで試験を実施した。従来手法では除染効果が上がらなかった、密粒アスファルト、透水性舗装、インターロッキング、コンクリートブロックの全てで 88.8%~99.9%の高い除染効果を発揮した。また、表面汚染密度でもほとんどが汚染濃度の高低によらず 500cpm 以下にできることを確認した。回収して処理した水の放射能濃度も検出下限値（10Bq/kg）未満であり、水の再利用も可能であることを実証した。除染効果はモデル実証で試験を行った道路表面を完全に削り取る切削機による除染と同程度だが、除去物重量は 5mm 深さの切削に比べて 6 分の 1 程度と少ないことを確認した。除染実施に際し、圧力のみならず、ノズル数や水量を変更し、極力路面を傷つけずに十分な除染効果が得られる最適な設定にしながら面的洗浄を実施した。路面の除染は、路面の劣化具合に応じ、現場で最適な設定を狭範囲で試し、最適化を図ることが重要である。

高圧水洗浄、ウェットブラスト、超高压水洗浄の適用範囲は、7MPa の通常の高圧水洗浄では約 70%、ウェットブラストでは約 80%、超高压水洗浄では 90%以上の除染率が得られており、絶対値としては数 100cpm まで低減させることが可能である（表 2-6、図 2-5）。

表面汚染の測定方法については、比較評価を実施するために図 2-6 の遮へい材を用い、図 2-7 の測定方法を実施した。

#### 参考文献

- 原子力委員会（2011）：福島における除染活動について（日本原子力研究開発機構），第 29 回原子力委員会資料第 3-1 号（<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2011/siryo29/siryo3.pdf>）。
- 原子力機構（2011a）：除染作業について（<http://www.jaea.go.jp/fukushima/josenvtr.html>）。
- 原子力機構（2011b）：様々な汎用機材を用いた除染方法について（<http://www.jaea.go.jp/fukushima/josenvtr.html>）。
- 茂木浩（2011）公園機能の回復に向けた芝生地の除染工事ならびに実験報告，（<http://www.ouse-park.sakura.ne.jp/pdf/sibahu.pdf>）。

表 2-6 アスファルトにおける除染手法毎のコストと適用範囲

手法	条件	歩掛 人工/m <sup>2</sup> * <sup>1</sup>	作業効率 m <sup>2</sup> /hr	除去物量 (kg/m <sup>2</sup> ) * <sup>2</sup>	除染効果 (%)	適用範囲 (目標 500cpm の 場合)	密粒アスファルト試験結果 (cpm) * <sup>3</sup>
高圧水洗浄	7MPa ストレートノズル	0.002	90	除去物未回収	81	～2600	除染前：999 除染後：186
超高压水洗浄	Max280MPa 吸引回転ノズル	0.022 水処理無 0.029 水処理有	70	2.4	99	～50000	除染前：53448 除染後：213
ウェット ブラスト	180～425 μ m アルミナ粒	0.026 水処理無	24	2.4	88	～4200	除染前：1002 除染後：118
切削機	5mm 切削	モデル実証参照		12	モデル実証参照		

\*1) 人工は作業時間 6.5 時間で評価 (放射線測定員は除く)

\*2) アスファルト比重：2.4 を利用。水は再利用可能なため重量に含めず

\*3) 測定方法：GM 計数管を用い周囲に 22 mm (1/10 価層) の鉛遮へい

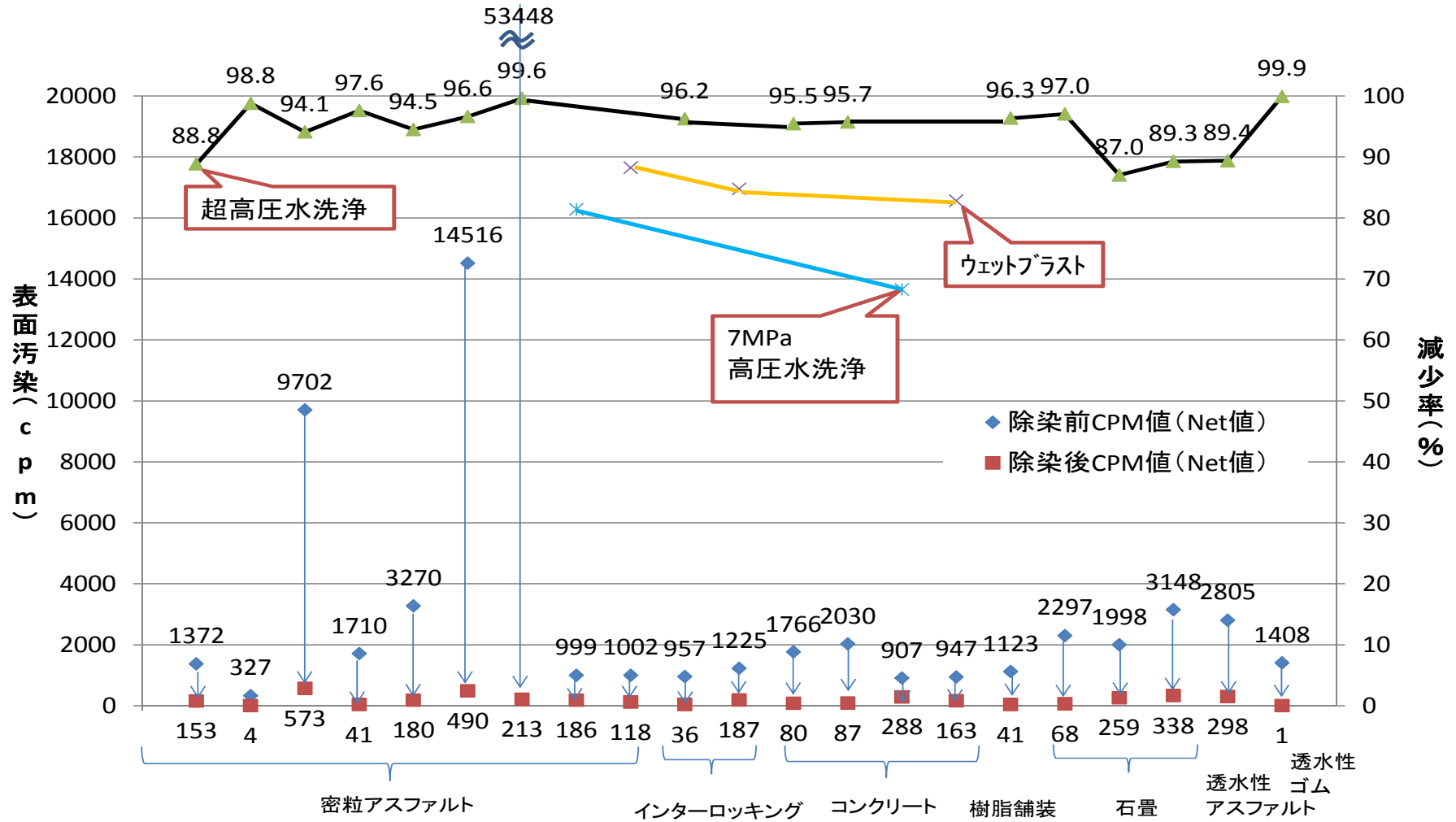


図 2-5 各除染技術による路面除染効果の比較

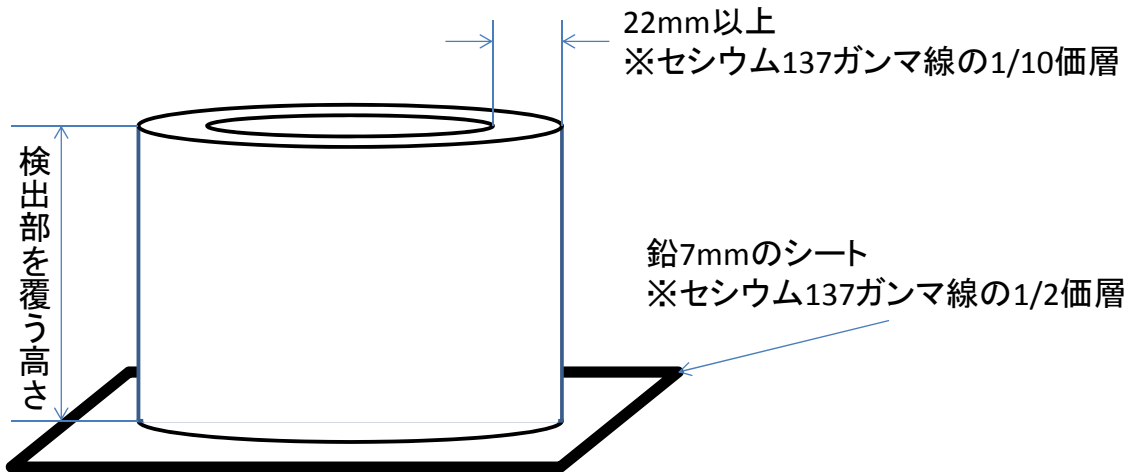
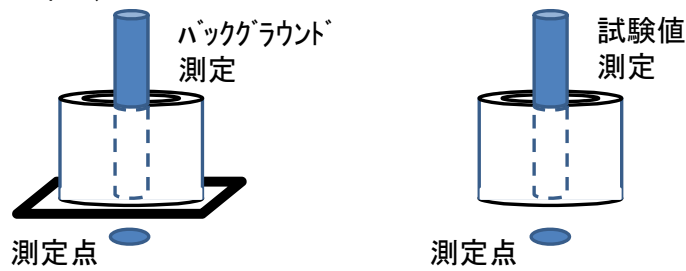


図 2-6 鉛遮への推奨仕様

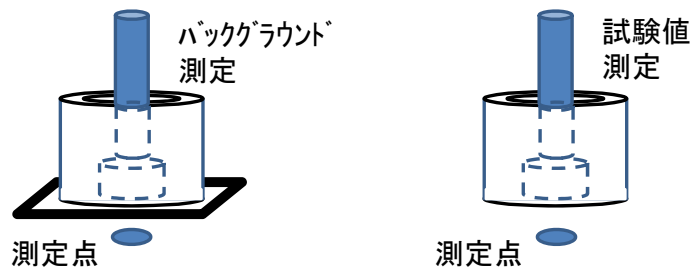
NaIシンチレーションサーベイメータ



時定数: 30秒

測定方法: 測定開始90秒後から5回測定し平均値を求める

GM計数管



バックグラウンド値:  $N_b$ [cpm]

測定値:  $N$ [cpm]

真の測定値:  $N - N_b$ [cpm]

信頼できる測定値かの判定方法:

$N > ND$ :  $ND = 4.653\sqrt{N_b} + 2.706$  (Currieの式)

図 2-7 土壌や路面表面汚染の測定方法

### (3) 瓦礫

#### ① 背景

地震や津波によって発生した大量の災害廃棄物（瓦礫）の処理については、被災した県のみならず、他の都道府県にも搬出し、実施しなければならない状況にある。このような中、放射性物質によって汚染されている瓦礫についても、受け入れや処理に支障をきたさないレベルまで除染を行うことが望まれている。また、特に津波瓦礫については、放射性物質のみならず、様々な化学物質等が汚泥とともに付着していること（廃棄物資源循環学会，2011）などから、瓦礫の除染に伴い発生する排水の処理量を減らすための前処理的な汚泥除去手法の開発も望まれる。

#### ② 実施内容

瓦礫（コンクリート，木材，プラスチック）について，磨砕により表面を研磨する技術を実証した（No.15）。津波瓦礫に付着する汚泥等の除去について，水を利用せずに乾式で実施可能なドライアイスによる乾式分別法（No.16）を実証した。

#### ③ 試験結果

No.15（付録 2-15）は，磨砕洗浄機を利用し物理的研磨によって瓦礫の除染を行うものである。瓦礫と洗浄水の容積比を 1 : 3 とし，10 分程度洗浄する。これによりコンクリートは 77%，木材は 41%，プラスチックは 26%の除染が可能であった（表 2-7）。

表 2-7 磨砕洗浄による洗浄効果

対象	コンクリート	木材	プラスチック	金属
除染前	8,250	2,635	5,080	1,242
除染後	2,235	1,552	3,775	576
除染率(%)	73	41	26	54

単位：Bq/kg

No.16（付録 2-16）は，木材，土壌，鉄等の不燃物などの瓦礫と重量比 30%のドライアイスを均等に混ぜ合わせることで瓦礫中の土壌等を凍結させ，篩によって粒径 2 mm以下の土壌を除去した。除染効果としては除染率約 65%であった。

#### ④ 評価

磨砕による除染の効果は，材質硬さ，研削の容易さによって決まる。ただし，瓦礫の凹部には，瓦礫同士の磨砕の効果が行き届かないため，最適化した研磨剤の導入が今後の課題として挙げられる。

ドライアイスによる除染は，水洗浄に比べ除染率が 29%と劣るものの，ドライアイスを混ぜることで小さな粒子を水処理なく除去できることは，水処理量を減らす上で重要である。様々な化学物質が含まれる津波瓦礫の除染前の前処理等に有効と考えられる技術である。今後，除染効率を上げるには，回収した細粒分をブラスト剤として利用するなどの工夫で除染率を上げることが期待される。

#### 参考文献

廃棄物資源循環学会「災害廃棄物対策・復興タスクチーム」（2011）：東日本大震災における堆積汚泥の化学性状について（<http://eprc.kyoto-u.ac.jp/saigai/report/2011/04/001397.html>）。



#### (4) 植物・牛糞

##### ① 背景

放射性物質を含む草木等の植物や家畜の畜糞等の有機物の処理については、焼却による減容化が有効な方法と考えられるが、焼却によって放射性物質が飛散するのではないかと不安から、焼却以外で処理・処分を実施したいという要望は強い。そこで、焼却せずに減容する方法として堆肥化による減容の実証試験を実施した。

##### ② 実施内容

実証試験としては、放射性物質を含む植物を試料として、これに畜糞等を混合して100℃程度の超高温好気堆肥菌を用いて徹底した減容化を目指す堆肥化の方法(No.17)と、60℃程度の高温好気堆肥菌を用いた一般的な落ち葉等の堆肥化と同様の方法(No.18)の2種類について行った。

##### ③ 試験結果

表2-8に発酵による減容化結果と表2-9にランニングコスト、図2-8に堆肥化結果の比較を示す。

表2-8 発酵による減容化結果

No.	菌種 発行温度	対象試料	投入量 (kg)	発酵時間 (hr)	減容(量)化率		
					wt(%)	dry(%)	体積(%)
17	超高温好気 堆肥菌 約100℃	落ち葉	0.206	120	-	50.0	-
18	高温好気 堆肥菌 約60℃	雑草	63	92	99.3	98.0	98.8
		根菜	70	66	96.4	92.8	95.4
		松葉	65	69	92.8	90.3	93.5
		杉葉	70	73.5	82.9	78.2	87.2
		腐葉土	40	69.5	85.4	84.8	94.4

表2-9 主なランニングコスト

No.	使用電力量	その他	備考
18	3,000kWh/月	杉チップ : ¥60,000/年 (1,060kg/年)	100 kgを2日置きに投入, 年間350日処理 杉チップは発酵菌生息環境維持に必要



No.	手法	発酵前	発酵後
17	超高温好気性発酵菌		
18	高温好気性発酵菌		

図 2-8 堆肥化結果の比較

No.17 (付録 2-17) は、超高温好気堆肥菌を用いた減容化である。処理時間は 5 日、乾質重量ベースで 50%の減量であった。ただし、堆肥菌の活動を活発化させるために外部から継続的に加熱し約 100°Cを維持していたため、評価の際には、その加熱に伴う水分蒸発の効果がこの減量に含まれている可能性があることにも留意が必要である。

No.18 (付録 2-18) は、処理時間は 3 日であったが、90%以上の減量、約 90%の減容（堆肥菌の生育環境である杉チップを除く）を達成した。杉の葉や腐葉土のように元の含水率が低い場合は減量率が低下する。

#### ④ 評価

一般に、堆肥化の効率は、湿度、pH、温度、炭素対窒素比等で決まり、炭水化物、タンパク質等を分解する際に二酸化炭素や酸素、アンモニアに分解され、分解熱によって水分が蒸発することで減量と減容の両方が進行する。焼却処理に比べ減容率は高くはないため、高濃度汚染物は発生しにくく、装置の操作方法も簡易である。そのため、廃棄物保管箇所に運搬する前に使用し、運送量の低減と保管場所の省スペース化を図るといった活用法が考えられる。共通の課題は、初期反応を促進するためにヒーターによる加熱が必要なこと、好気を維持するために堆肥を空気にさらすための攪拌が必要なことである。

本実証試験事業では、堆肥化に必要な窒素分を実際の畜糞を混合することで供給し、実際に堆肥化でき、植物と畜糞の両方を一度に減容できる可能性について確認した。ただし、生成された堆肥は放射性物質により汚染されているため、肥料としては利用できない。なお一例として No.18 のランニングコストを表 2-9 に示す。初期反応を促進するための電力や発酵菌生息環境維持に必要な杉チップがコストの対象となっている。

## (5) 水

### ① 背景

原子力機構がまとめた学校プールの除染の手引き（原子力機構，2011）では，ゼオライトを中心とした吸着・凝集剤により水中のセシウムを凝集沈殿させ処理すると，また，放射能が検出される水の測定データにおいては，粘土のような細かい粒子である SS（Suspended Solid）成分濃度と相関がみられることから，放射性物質は水中の SS 成分に多く含まれていると考えられている。実際，環境中の公共用水域については，環境中の水そのものにはほとんどセシウムが含まれていないことが分かっている（環境省，2011）。

このような中，除染後の排水が河川に流れ出て，田畑の再汚染につながる懸念も示されており，この対処方法の一つとして排水柵等でセシウムや SS 成分を回収する方法の開発が望まれている。

### ② 実施内容

人工ゼオライトをブロックの形状に成型した「人工ゼオライトブロック」について集水柵や排水側溝に設置することで，除染後の排水や降雨等から流入する放射性セシウムを吸着する排水のフィルタとしての機能について実証試験を行った（No.19）。

プールや防火水槽の水は，粘土などの SS 成分と接触する頻度が少なく，セシウムがイオンの状態で存在する可能性が否定できないことから，原子力機構が実証していない，ゼオライト以外の凝集沈殿材を用いた水の除染手法を実証した（No.20）。

### ③ 実験結果

表 2-10 に各技術における水処理手法の比較を行う。

No.19（付録 2-19）は，模擬水路を用い，その水路の途中に人工ゼオライトブロックを設置し，放射性セシウムを含む住居の樋下堆積物等を水に混合した汚染水を流下させ，人工ゼオライトブロックにより汚染水を除染するものである。その結果，人工ゼオライトブロックにより，汚染水の放射能濃度を 46.7%に低減することができた。また，人工ゼオライトを汚染地域の既存の排水柵に設置し，雨水等の環境水中のセシウムが下流側に流出するのを抑える効果を評価する試験も行った。この試験では，イオン化されたセシウムの人工ゼオライトブロックによる捕獲の効果を確認するために，土壌中の SS 成分を吸着できる砕石ブロック（ゼオライトを含んでいないため，水中のセシウムイオンの吸着能なし）も同時に対照試験体として排水柵へ設置し，試験を行った。設置後の人工ゼオライトブロックと砕石ブロックからは，放射性セシウムが確認された。

No.20（付録 2-20）は，プール除染の際に発生する汚染水の水処理を凝集剤とフェロシアン化鉄（プルシアンブルー）を用いて実施したものである。フェロシアン化鉄はセシウムイオンの吸着剤として用いているが，フェロシアン化鉄を配合しない場合であっても，除染後の水が検出下限値（20Bq/kg）未満であることを確認した。

### ④ 評価

No.19 では，模擬水路に人工ゼオライトブロックを設置した試験では，放射能濃度を 46.7%低減させることができ，人工ゼオライトブロックがセシウムを吸着することが確認できた（付録 2-19）。また，既存水路に人工ゼオライトブロックと，比較対象とした砕石ブロックを設置し，長期間設置による効果を確認する試験を行ったところ，汚染レベルは低いものの，人工ゼオライトブロックの方が砕石ブロックよりも多くの放射性物質を捕獲していた。実用として使用するためには，試験データの補完が必要であり，また，放射性セシウムを効率的に吸着させる条件の割り出しや，耐久性の確認等が必要である。

表 2-10 に、No.19、No.20 に加え、他の技術の中でも水処理を行っているものの結果を示す。セシウム吸着剤であるゼオライトやフェロシアン化鉄を投入する、しないに関わらず、処理後の水の放射能濃度は、例えば、飲食物の基準値である 100Bq/kg と比較しても、これを下まわっており、ほとんどは検出下限値 (20Bq/kg) 未満であった。なお、飛灰洗浄した水を処理した No.22 では他の水処理の結果に比べて高めの測定値になっているが、これは、有機物を焼却した後の飛灰では、有機物内のセシウムイオンが酸化物となり洗浄の際にイオン化するためと考えられる。

一方、No.20 においては、セシウムが、イオンの形で水中に存在せず SS 成分に吸着している場合には、セシウムイオンを選択的に吸着するフェロシアン化鉄を使用しなくとも、凝集剤による凝集沈殿により除去可能であることを確認した。これはセシウムイオンを吸着する性質があるゼオライトについても同様と考えられ、セシウムイオンが存在しない場合にはゼオライトを用いる必要がないことを示している。

今後、水処理においては、まず少量の処理対象の水を用いたビーカー試験を実施し、凝集剤による凝集沈殿だけで水中のセシウムが除去できるかどうかを確認することが、効率的な水処理方法を早期に選択する上で重要である。

#### 参考文献

- 原子力機構 (2011) : 学校プール水の除染の手引き～安全にプールの利用を再開するために～,  
(<http://www.jaea.go.jp/fukushima/pdf/josentebiki/01v2.pdf>) .
- 環境省 (2011) : 福島県内の公共用水域における放射性物質モニタリングの測定結果について,  
([http://www.env.go.jp/jishin/monitoring/result\\_pw111116.pdf](http://www.env.go.jp/jishin/monitoring/result_pw111116.pdf)) .

表 2-10 各技術の水処理手法の比較

No.	水処理		水処理	凝集剤			吸着剤	ss成分(mg/L)	Cs含有量(Bq/L)			備 考
	凝集	吸着		凝集剤名	投入量	単価			吸着剤名	凝集後	処理前	
2	○		処理水を凝集沈殿後、電気分解吸着	鋳物系	0.1% 未満	500円/kg	—		23649	ND	ND	最終値は電気分解吸着処理後 凝集後ND_Cs134:1395、Cs137:11.51 最終ND_Cs134:13.28、Cs137:11.04
3	○		処理水に凝集剤を投入し、凝集沈殿	PAC PGα21Ca	200mg/L 50mg/L	80円/kg 860円/kg	—	7~180	未計測	未計測	ND	ND_Cs134:12、Cs137:14
4	○		処理水に凝集剤を投入し、凝集沈降	ラサフロック S (高分子凝集剤)			—		33~161	未計測	ND	ND_Cs134:10、Cs137:10
5	○		処理水に凝集剤を投入し、凝集沈殿	高反応水酸化マグネシウム リン酸化合物 苛性ソーダ 希硫酸	630mg/L 290mg/L 2120mg/L 2410mg/L	170円/kg 230円/kg 50円/kg 45円/kg	—		1300~ 2775	未計測	6.3~ 11.1	土壌分級処理水には、水溶性の放射性物質はなく、凝集沈殿にて処理可能
6	○	○	処理水に凝集剤を投入し、凝集沈殿 凝集沈殿後上澄み液をゼオライト吸着塔に通水	塩化第二鉄	1000~ 2000mg/L		ゼオライト	7500~11000	169~850	ND	ND	凝集後、最終ND_Cs134:10、Cs137:10
7	○	○	浮上分離濁水処理+長繊維ろ過+ゼオライトろ過	—	—	—	ゼオライト					
8		○	シュウ酸による処理水中のCsをフェロシアン化ニッケル及びモルデナイトに吸着	—	—	—	フェロシアン化ニッケル モルデナイト	未計測	4853	未計測	340~ 1116	磁力による回収は、フェロシアン化ニッケルにはマグネタイトを担持
9		○	可溶化処理した汚水をグラウト重合布に通水	—	—	—	グラウト重合布		11	未計測	ND	Cs含有量は、下水汚泥を対象としたラポテストの値 ND_Cs134:5、Cs137:5
13	○		処理水をノッチタンクに収集/凝集沈殿後、 0.01ミクロンのフィルタに通水 フィルタろ過後活性炭処理(オプション)	凝集剤 + ゼオライト			—		6000~ 46600	ND~ 921	~25	処理水の状態によって、活性炭処理を追加 処理前46600Bq/Lは、フィルタ処理で排水基準を満たす ND_Cs134:3、Cs137:2
15		○	処理水をゼオライトを利用したろ過装置に通水 (通水前に凝集沈殿?)	塩化カルシウム			ゼオライト	未計測	29800	未計測	ND	ND_Cs134:10、Cs137:10
19		○	ブロック化したゼオライトに通水	—	—	—	人口ゼオライト(ブロック)	960	23230	未計測	12383	毎分10Lでブロックを4回循環通水
20	○	○	処理水をフェロシアン化鉄配合吸着凝集沈殿剤にて凝集沈殿 凝集は1次・2次の2段階	イオンリアクション + フェロシアン化鉄	0.20%	¥4,600~ (1kg)	—	7~9	34~675	未計測	ND	イオンリアクションのみの処理でも同様の放射能濃度低減 ができた ND_Cs134:10.5、Cs137:10.9
22	○	○	パーク洗浄水を凝集沈殿+吸着処理	無機系凝集沈殿剤	250mg/L		ブルシアンブルー(粉末)	未計測	236	27.4	14.76	凝集後の値は、凝集沈殿剤のみの処理を実施 最終は、吸着処理後に凝集沈殿処理を実施 排水基準には達している
		○	飛灰洗浄した水を吸着処理	—	—	—	ブルシアンブルー(粉末)	未計測	3020	未計測	97.8	処理後のCs137は92.8Bq/Lで排水基準には未達 吸着剤の投入量調整で改善可能と思われる
23	○		処理水にネオナイトを投入し凝集沈殿	ネオナイト-Cs	200mg/L	¥2,000~ (1kg)	—	5890	2236	未計測	ND	ND_Cs134:29.4、Cs137:29.4
								* 排水に対する基準 (平成 23 年環境省令第33号第 33条第1号 公共の水域中事故由来放射性物質濃度) $\frac{{}^{134}\text{Cs の濃度 (Bq/L)}}{60 \text{ (Bq/L)}} + \frac{{}^{137}\text{Cs の濃度 (Bq/L)}}{90 \text{ (Bq/L)}} \leq 1$				
								* NDは核種ごとの検出限界値(複数の場合は最大の値)				

## (6) 森林・木材

### ① 背景

森林伐採による除染は、大量の除去物を発生させることになり、土砂崩れ等の二次災害につながる可能性もあることから、安易な伐採は行わずに、幹、枝葉、下草、落ち葉等を効率よく除染する必要がある。

事故当初、落葉樹には葉がなかったことから、下草、腐葉土や樹木の幹に放射性物質が付着していることが考えられる。そのため、除染後の樹皮（バーク）の処理が滞り、一部では山積み状態になっている。常緑樹では、葉に放射性セシウムが付着したままになっていることから枝打ち等が有効であると考えられるが、除染後の枝等の処理が課題となる。除草後の雑草についても処理が滞っており、焼却による減容化についても、飛灰の飛散や放射能の濃縮に対する懸念から敬遠されており、焼却以外の方法による除染や減容化が望まれている。

また、下草除去や枝打ち、間伐といった取組は、森林中の放射性物質の低減に寄与する一方で、除去物量の増大、木自身による遮へい効果を低減させてしまう効果も指摘されていることから、樹木の伐採と空間線量率の低減効果との関係の正確な把握が必要である。加えて、広大な面積の下草除去等の作業については、作業員被ばく低減の観点からも効率化の実証が重要である。

### ② 実施内容

樹皮（バーク）については、木材に付着した丸太の状態を高圧水洗浄する手法（No.23）、木材チップに加工する際にセメント材を丸太の表面に塗布し、放射性物質とともに剥離・除去する手法（No.21）、チップ加工後の焼却等により処理する手法（No.22）を実証する。

また、下草除去、間伐による空間線量率の変化を調査し（No.24）、下草の除去・収集についてより効率的な手法（No.25）を実証する。

### ④ 試験結果

No.21（付録 2-21）は、セメント材にはカルシウムサルフォアルミネート系固化材（水/固化成分比：50%）を使用し、コテ塗りにより塗布・剥離させたところ、木材（サクラ）の処理前の推定放射能濃度 5,151Bq/kg に対し、処理後は 2,389Bq/kg（46%程度低減）となった。これは、同様の木材を使用してブラシで水洗浄した時の除染率とほぼ同程度である。

また、立木への応用を確認する適用性試験も実施した。立木を想定した試験では樹皮に直接セメントを塗布しハンマーで破碎した。ハンマーにより固化材を剥離することで、40～50%のセシウムを除去することができた。

No.22（付録 2-22）は、樹皮（バーク）について、温水による浸け置き洗い、流水洗浄、超音波洗浄を実施したところ、洗濯機を用いた攪拌洗浄が最も効果的で約 50%の除染率であった（表 2-11）。

焼却減容化試験では、広葉樹と針葉樹のバークを小型焼却炉で焼却処理した結果、減量率は 95%以上になり、バグフィルタ出口の排ガス放射能濃度は 0.4Bq/m<sup>3</sup> 以下※、運転中の空間線量もバックグラウンド程度であり、バークの減容化が可能であることが確認できた。

No.23（付録 2-23）は、木材の洗浄に、高圧洗浄車を使用し、水圧を 7.8MP として木材の樹皮を削らないようにし、常温（9.5℃）、40℃、80℃の水温でそれぞれ 20 分間行った。

木材を乾燥させた後の表面密度は、樹種によって異なるが、ナラの場合、洗浄前 10,012cpm に対し洗浄後は 892cpm となり、平均して 90%程度の除染率となった。

---

※環境省令第三十三号 33 条および 35 条に適合

また、水温によっても差が見られ、樹木の種類によっても除染率は1~20%程度の差はあるが、常温で洗浄した時よりも80℃で洗浄した方が総じて除染率の向上が図られた。

No.24 (付録 2-24) は、森林の落葉除去や間伐による線量率低減効果を調べたものであるが、常緑樹林 (スギ)、落葉樹林ともに落葉除去の効果が高いことがわかった。伐採による除去物の量は膨大となるため、除去物のエネルギーへの活用等、軽減化の手段を見出す必要がある。なお森林作業時に舞い上がる粉塵の調査では、1 $\mu$ Sv/hr 前後の森林においては放射能濃度が規程値を大きく下回ったが、少しでも被ばく量を低減する観点からマスク等の安全装備は必要と考える。

No.25 (付録 2-25) は、吸引配管の途中に中間回収タンクを設けることにより、吸引作業の効率化を図るものである。作業効率は吸引するホースの長さによる圧損と関係があり、圧損により吸引量の低減が確認される 200 から 600m の範囲で吸引効率を確認したところ、約 600 m 以上でも吸引量は低下するが 100m 長さの通常バキュームによる回収作業よりも作業効率は 50%改善され、作業面積は 2.25 倍拡大した。

#### ④ 評価

No.21 では、セメント材の剥離状態は樹木の種類により異なるが、除染率としてはブラシで水洗浄した場合と同等であり、除染効果としては一定の効果があると言える。ただし、破碎する際に大量の粉塵が発生するため、粉塵対策を検討する必要がある。

また、今回は現地 (寒冷地) における凝結を重視してカルシウムサルフォアルミネート系のセメント材を使用しているが、材料コストは高価であるため、気温等の条件に合わせた材料の選定が必要である。

No.22 における攪拌洗浄による汚染バークの除染結果を表 2-11 に示す。常緑樹、落葉樹のバークともに 35℃で 1 時間攪拌洗浄の結果、約 50%の除染率であった。これは、汚染バークの放射能濃度によっては、バークを再利用可能なレベル (農林水産省が定めた、肥料・土壤改良材・培土の暫定許容値：400Bq/kg (製品重量) #) に除染することは、技術的には可能であることを示していると考えられる。

表 2-11 洗浄によるバークの除染率

	洗浄前(Bq/kg)	洗浄後(Bq/kg)	除染率(%)
常緑樹	1,035	517	50.0
落葉樹	2,804	1,300	53.6

洗濯機を用いて35℃で1時間攪拌

小型焼却炉による汚染バークの焼却は、減容化には有効な手段ではあるが、飛灰については表 2-12 バーク焼却試験結果にあるように、放射能濃度が非常に高く (~約 140,000Bq/kg) なるため、灰の拡散を防ぐ設備対策や運用に細心の注意が必要である。









例えば、小型焼却炉は気密性が高くないため、本実証試験事業では飛灰の噴出を抑えるためのシールを施したが、気密性を高くすると給気と排気アンバランスによって発生する炉内の圧力変動が生じやすくなるため、これを適切に制御する必要があった。また、冬場には、設計した排気ダクト内への入り口温度である 200℃まで温度を上昇させることができなかつたため、バグフィルタに結露が発生した。結露により、フィルタの目詰まりが発生する場合もあることから、結露対策として、冷却ダクトの短縮、ダクト保温ラッキングの設置等を行った。このような結

# 放射性セシウムを含む肥料・土壤改良資材・培土及び飼料の暫定許容値の設定について (平成 23 年 8 月 1 日付け農林水産省消費・安全局長、生産局長、林野庁長官及び水産庁長官通知)

露水への対応は、他の汎用的小型焼却炉を使用する場合においても有効な手法であると考えられる。

排気での放射能については、排気口にバグフィルタとその後段に高性能フィルタである HEPA フィルタを設置し、HEPA フィルタで放射能が検出されないことを確認して、バグフィルタに付着する放射能を測定した。バグフィルタは通常、新品では全てを集塵できない。バグフィルタによって汚染された飛灰の集塵率を向上させるため、使用前に非汚染物を焼却しバグフィルタに飛灰を吸着させる等の処置が必要となる。これを施すことで HEPA フィルタ側への放射能移行を抑えることができる。バグフィルタは原理上、目詰まりさせて集塵率を向上させるため焼却炉を新設する場合などには、HEPA フィルタも併設しバグフィルタ性能を確認した後で HEPA フィルタを撤去するなどの対策を施す必要がある。

表 2-12 バーク焼却試験結果

		バーク	主灰 (焼却炉内)	飛灰1 (焼却炉外)	飛灰2 (バグフィルタ捕捉)
針葉樹	減容化率: 96.4%				
	放射能濃度[Bq/kg]	986	4,010	8,110	37,900
	重量[kg]	111.2	1.37	2.21	0.41
広葉樹	減容化率: 95.4%				
	放射能濃度[Bq/kg]	2,020	14,900	20,300	137,000
	重量[kg]	151.1	2.76	3.74	0.39

No.23 では、当初の目標としていた「電離則の管理区域からの持ち出し基準 4Bq/cm<sup>2</sup> 以下」を満たす結果となり、洗浄能力としては十分期待ができるものとする。

No.24 では、落葉除去と間伐による除染効果が確認された (図 2-9, 図 2-10)。常緑樹であるスギ林では森林内は近くに葉はなくスギの幹に囲まれる環境であるため落葉除去が非常に効果的であることがわかった。一方、落葉樹でも放射性物質が降り注いだ落葉の除去は効果的であったが、幹の汚染具合が常緑樹に比べ高いと考えられる落葉樹ではわずかながらも樹木伐採の効果も確認できた。



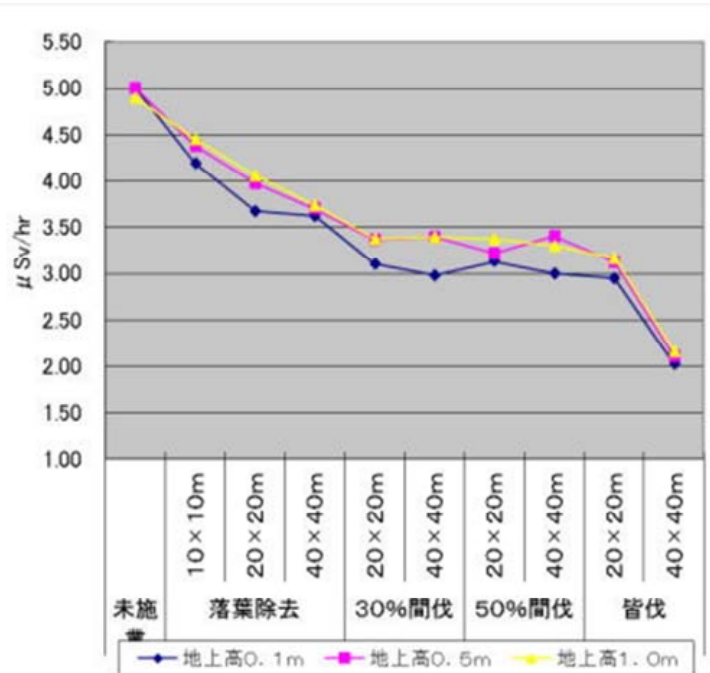


図 2-9 落葉層除去及び間伐率（スギ林）

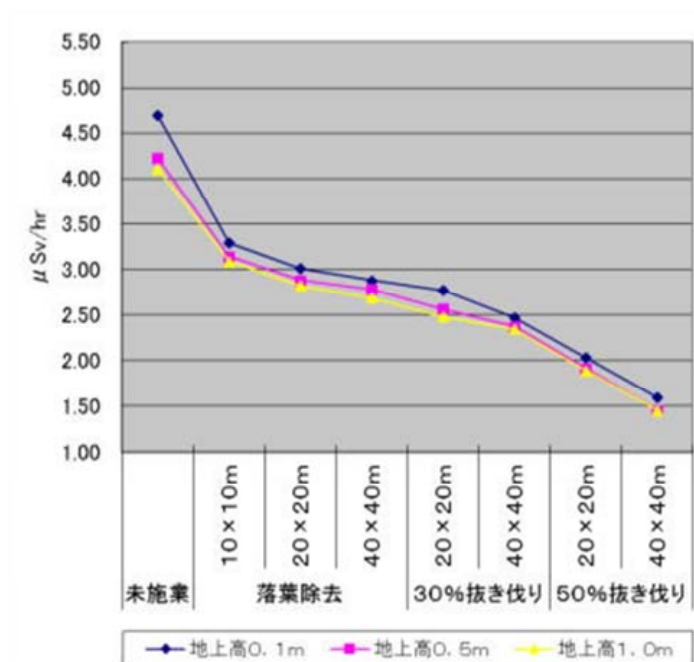


図 2-10 落葉層除去及び間伐率（落葉樹林）

No.25 では、落葉等の回収量に応じて適切なシステムを選択することにより、作業時間の短縮およびコストの削減が可能と考える。通常は、タンク内に落葉等を回収し、タンク内から落葉等をフレキシブルコンテナに移し替える作業が必要となる。本技術では、中間回収タンクにフレキシブルコンテナを設けることで、移し替える手間を省くことができた。また、中間回収タンクがあることでホース途中の詰まり等による吸引力低下を防止することができた。このため、吸引限界距離が通常の 400 m から 600m に改善したため、適用面積が 2.25 倍になり、回収量増加に応じ作

業単価が下がることがわかった（図 2-11）。

ただし、落葉と同じように堆積している枯れ枝、倒木等の長尺物は、ホースでの吸引回収が困難となるため、これらを回収するためにチップング破碎装置等の併用が必要となるが、粉塵等による二次汚染の可能性が懸念されるため、作業にあたっては作業場所の入念な事前調査および工法の安全性について検討が必要である。

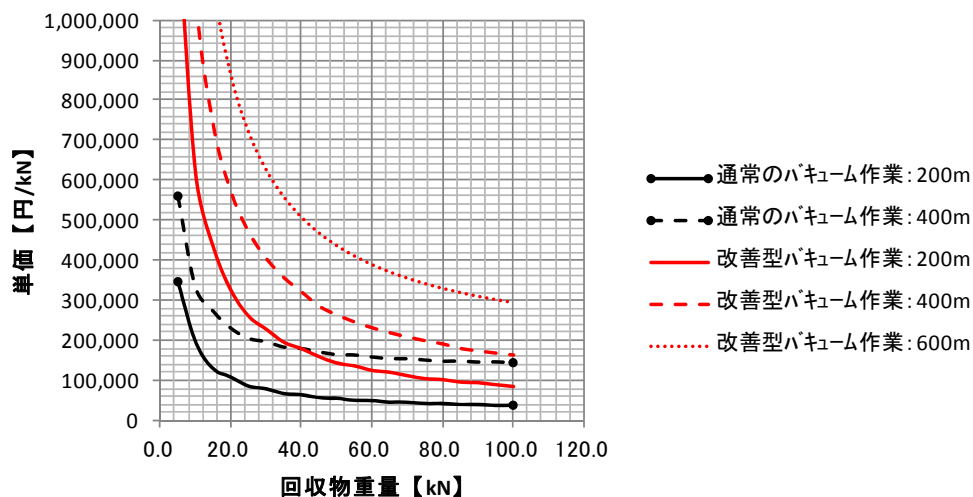


図 2-11 改善型パキューム作業、通常のパキューム作業の回収単価

#### 参考文献

福島県（2011）：福島県ホームページ（<http://wwwcms.pref.fukushima.jp/>）

### 3. まとめ

#### (1) 各技術の総合評価

各技術の総合評価を表 3-1 に示す。総合評価基準を表 3-2 に示す。

表 3-3 に各技術の詳細結果を示す。総合評価は、表 3-2、表 3-3 を用いて実施したものである。

本評価は、今回の実証試験を基にした除染効果やコスト評価であることから、今後の技術の発展によって評価は変更されるものである。今後、各技術とも課題を解決し、より高い除染効果、コスト低減を図り、本格除染に導入されることを期待する。

表 3-1 実施事業の総合評価

除染対象物	手法	No.	実施者	除染効果	設備投資	除去物量	コスト	評価
土壌	熱処理	1	太平洋セメント(株)	高	必要	極少	高	コスト低減。放射性Csの高濃縮除去物の取扱い。
	分級	2	ロート製薬(株)	中	既設有	少	中	特殊ポンプ、篩機の除染データの蓄積が必要。
		3	(株)竹中工務店	中	必要	中	低	80%程度の除染効果あり、除染現場での適用性あり。
		4	(株)熊谷組	中	必要	中	低	高濃度汚染土壌の場合、減量率低い。
		5	(株)日立プラントテクノロジー	低	必要	中	低	分級による除染効果あり。熱処理は効果なし。
		6	(株)鴻池組	中	必要	中	低	80%程度の除染効果あり、除染現場での適用性あり。
		7	佐藤工業(株)	中	必要	中	中	80%程度の除染効果あり、除染現場での適用性あり。
	化学処理	8	(株)東芝	中	既設有	極少	高	コスト低減。
下水汚泥	溶出	9	新日鉄エンジニアリング(株)	低	必要	中	評価不能	溶出効果のデータ蓄積が必要。
公園・道路・建物	切削・剥離	10	志賀塗装(株)	中	不要	少	低	50%程度の除染効果あり、即適用可。
	特殊水洗浄	11	京都大学	低	必要	少	高	水道水と同程度の除染効果。
		12	ネイチャーズ(株)	低	必要	少	高	高圧水洗浄と同程度。作業者の安全対策必要。
	高圧洗浄	13	(株)キクテック	高	既設有	少	中	様々な舗装面で90%以上の除染効果、即適用可。
	研削・剥離	14	マコー(株)	中	既設有	少	中	様々な舗装面で80%以上の除染効果、即適用可。
瓦礫	洗浄	15	戸田建設(株)	中	必要	少	中	研磨による除去物減少のための最適化必要。
		16	環テックス(株)	低	必要	中	中	除染効果低いが水処理量削減が可。
植物・牛糞減容	堆肥化	17	(独)宇宙航空研究開発機構	-	必要	評価不能	評価不能	堆肥化のデータ蓄積が必要。
		18	日本ミクニヤ(株)	-	必要	中	中	春夏植物でのデータ蓄積が必要。
水	捕集	19	前田建設工業(株)	低	必要	中	中	ブロックの最適化が必要。
	吸着・凝集	20	東京工業大学	高	既設有	少	中	シアン化物処理が課題だが、即適用可。
森林・木材	固化剥離	21	大成建設(株)	低	不要	多	高	ブラシ水洗と同程度の除染効果。コスト低減。
	洗浄	22	郡山チップ工業(株)	中	既設有	少	中	パークの洗浄除染、焼却減容を実証し即適用可。
		23	(株)ネオナイト	中	既設有	少	低	木材の種類データの蓄積が必要。水処理即適用可。
	間伐有	24	福島県林業研究センター	- (知見を得る試験のため)				森林除染における放射線等の基礎データを取得。
	間伐無	25	(株)大林組	-	既設有	-	中	土工材料、アスファルト除去試験では効率化必要。

表 3-2 実施事業の総合評価基準

除染対象物	手法	除染効果	設備投資	除去物量	コスト	
土壌	熱処理	高: 除染率 95%超+減量率 95%以上 中: 除染率 65-95% 低: 除染率 65%未満 ※試験数少の場合ワンランク下げ ※除去物量のバラツキ大きい場合ワンランク下げ	必要 不要 既設有	減量率 極少: 95%以上 少: 80-95% 中: 10-80% 多: 10%未満	高: 5万円/t 以上 中: 1-5万円/t 低: 1万円/t 未満	
	分級					
	化学処理					
下水汚泥	溶出					
公園・道路・建物	切削・剥離	高: 除染率 95%超+回収・再利用可 中: 65-95% 低: 65%未満 ※試験数少の場合ワンランク下げ ※7MPa 高圧水洗浄との組み合わせの場合, 水道水の高圧水洗浄による効果 75%と比較して 10%以上の向上がない場合は「かけ流し」で評価			多: 処理剤添加 少: 回収・再利用可・未回収	高: 0.1 人工/m <sup>2</sup> 以上 もしくは数百万円/月レンタル設備必要 中: 0.01-0.1 人工/m <sup>2</sup> 低: 0.01 人工/m <sup>2</sup> 以下 ※設備投資「不要」の場合ワンランク下げ
	特殊水洗浄					
	高圧水洗浄					
	研削・剥離					
瓦礫	洗浄	高: 80%超 中: 50-80% 低: 50%未満 ※瓦礫は非均質であるため		極少: 95%以上 少: 80-95% 中: 10-90% 多: 10%未満 ※試験数少の場合ワンランク下げ	高: 5万円/t 以上 中: 1-5万円/t 低: 1万円/t 未満	
植物・牛糞減容	堆肥化	—		高: 1000 円/kg 以上 中: 100-1000 円/kg 低: 100 円/kg 未満		
水	捕集	高: 除染率 95%超+減量率 95%以上 中: 65-95% 低: 65%未満 ※試験数少の場合ワンランク下げ ※減容率 95%以上の場合ワンランク上げ		極少: 95%以上 少: 90-95% 中: 70-90% 多: 70%未満 ※試験数少の場合ワンランク下げ ※凝集剤量が除去物量の 1/3 を超える場合はワンランク下げ ※定量評価困難な場合は個別評価	高: 1000 円/個 中: 500-1000 円/個 低: 500 円/個以下	
	吸着・凝集				高: 0.5 人工/m <sup>3</sup> 中: 0.2-0.5 人工/m <sup>3</sup> 低: 0.2 人工/m <sup>3</sup> 以下	
森林・木材	固化剥離	—		—	高: 5万円/t(m <sup>3</sup> ) 以上 中: 0.5-5万円/t(m <sup>3</sup> ) 低: 0.5万円/t(m <sup>3</sup> ) 未満	
	洗浄					
	間伐無					

表 3-3 実施事業の結果詳細 (1)

除染対象物	手法	特徴	No.	実施者	テーマ名	除染率※1(%)	設備投資	減容(量)率※2(%)	実機処理コスト(円/t)(m³/h)	評価条件
土壌	熱処理	反応促進剤	1	太平洋セメント(株)	放射性物質汚染土壌等からの乾式Cs除去技術の開発	99.8 ~99.9%	必要	98~99%	約17.4~20.8万円/t (400t/日、稼働10年)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・事業運営方式:公設公営方式(施設建設:国もしくは国有会社が民間へ発注、施設運転:国もしくは国有会社が運営主体)</li> <li>・処理対象物 除染に伴う土壌(1日平均 70,000Bq/kg以下を想定):約12万t/年(400t/日)</li> <li>・浄化処理品 砂礫状物(クリアランスレベル以下):約17万t/年(540t/日)</li> <li>・濃縮セシウム塩(約140万Bq/kgを想定):約6千t/年(20t/日)</li> <li>・工事期間 約27ヶ月(造成工事、環境アセス、負荷試験運転の期間は含まず)</li> <li>・運営条件 稼働日数 310日/年、運営期間 10年間、運転要員 86名</li> </ul>
			2	ロート製薬(株)	低線量汚染された土壌の放射性物質減量化	97.8% ※試験数少 ※しきい値 1,000Bq/kg	既設	90%	18,500円/t (8.9t/h、稼働3日)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・費用概算:33,300円/m³</li> <li>・土壌の種類などにより処理効率が大きく変わる可能性あり。</li> <li>・処理費用:約15,000円/m³~40,000円/m³と幅がある。</li> <li>・連続運転の場合大幅にコスト削減の可能性あり。1m³=1.8tとして計算。</li> </ul>
	分級	湿式分級	3	(株)竹中工務店	植物が混入した放射性セシウム汚染土壌の多段階土壌洗浄処理	87.8 ~91.7% ※しきい値 8,000Bq/kg	必要	48.7 ~60%	5,905円/t (20t/h、稼働1年)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・処理量 [t]: 30,000 t</li> <li>・処理能力 [t/h]: 20 t/h</li> <li>・運転時間 [h]: 7h/日(1日の最大処理量は100 t)</li> <li>・稼働日数 [日]: 25日/月(年間300日稼働)</li> <li>・処理期間 [年]: 1年(処理状況により変動あり)</li> <li>・二次洗浄土の回収率 [年]: 汚染土壌の70%</li> </ul>
			4	(株)熊谷組	特殊洗浄機による放射線汚染土壌の減容化および一時保管方法に関する実証試験	96.6% 99.2% ※しきい値 8,000Bq/kg	必要	91.9% 0.6%	3,480円/t (45t/h、稼働10年) 8,730円/t (45t/h、稼働2年)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・処理能力 45t/hr(日処理量 360t/日)</li> <li>・稼働時間 8hr/日×20日×12ヶ月×10年</li> <li>・運転管理費(作業員7名)</li> </ul>
			5	(株)日立プラントテクノロジー	土壌分級及び熱処理による汚染土壌減容化システムと汚染水処理システムの実証	58.8% ※しきい値 8,000Bq/kg	必要	12%	7,200円/t (8.9t/h、稼働1年)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・処理規模:120t/日(20t/h×6hとする)</li> <li>・処理方式:土壌分級+水処理(凝集沈殿処理+ろ過装置)</li> <li>・処理量:1年間の稼働率を300日として、処理量36,000t/年とする。</li> <li>・試算除外事項 A)放射線下作業用の特殊保護具費用、B)放射線管理業務全般に関わる費用 C)放射性廃棄物の処分・置き・保管・モニタリング費用</li> </ul>
			6	(株)鴻池組	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	74.7 ~91.5% ※しきい値 8,000Bq/kg	必要	66.7 ~75.6%	9,100円/t (16.6t/h、稼働2年)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・約2年間の工期で処理を行う場合の工事費を算出。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。</li> <li>・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。</li> <li>・処理規模:30m³/h(7(14)時間/日、24日/月、19月稼働)</li> <li>・処理方式:土壌分級+水処理(凝集沈殿処理+ろ過装置+脱水設備)</li> </ul>
			7	佐藤工業(株)	高性能洗浄装置を用いた汚染土壌の除染および減容化技術	85.7% ※しきい値 1,000Bq/kg	必要	65%	14,500円/t (30m³/h、稼働2年)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1時間当たり処理量 30m³</li> <li>・1日当たり作業時間 7時間</li> <li>・1ヶ月当たり稼働日数 24日</li> <li>・処理期間 19ヶ月(2年間)</li> <li>・全体処理量 95,760m³</li> </ul>
	8	(株)東芝	汚染土壌からのセシウム回収技術の開発	77%~ 93%	既設	95%	50,000円/t~ 100,000円/t (15t/日、稼働2年)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・溶離液 シュウ酸、1.0mol/L</li> <li>・液固比 50溶離液体積(L)/土壌重量(kg)</li> <li>・溶離温度 80~95℃</li> <li>・溶離時間 1時間</li> </ul>		
	化学処理	有機酸処理	8	(株)東芝	汚染土壌からのセシウム回収技術の開発	77%~ 93%	既設	95%	50,000円/t~ 100,000円/t (15t/日、稼働2年)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・溶離回数 1回</li> <li>・リサイクル回数 20回</li> <li>・吸着剤 ゼオライト(モルデナイト)、フェロシアン化物</li> <li>・過酸化水素量 1倍当量</li> <li>※ランニングコストと処分コストを評価し、シュウ酸処理は、処理なし(はつりのみ)の場合に比べて20分の1に低減できる。</li> </ul>
	下水汚泥	溶出	有機物処理	9	新日鉄エンジニアリング(株)	汚泥等からの除染除去物減容技術の研究開発	68% ※試験数少	必要	50%	評価不能

- 1 (処理前の濃度) - (処理後の濃度) / (処理前の濃度)  
□ 2 ((処理前の重量の合計) - (処理後の重量の合計)) / (処理前の重量の合計)

表 3-3 実施事業の結果詳細 (2)

除染対象物	手法	特徴	No.	実施者	テーマ名	除染率※1 (%)	設備投資	減容(量)率 ※2 (%)	実機処理コスト (円/t) (円/h)	評価条件	
公園・道路・建物	切削・剥離	ストリップペイント	10	志賀塗装(株)	高圧洗浄を使わない除染作業と親水性塗膜による汚染軽減作業	研削 32~53% ストリップペイント 14~35% 切削+除染剤組み合わせ 75%	不要	回収	研削 0.046人工/m <sup>2</sup> ストリップペイント 2900円/m <sup>2</sup>	・減少率50%の場合、5.5人工/120m <sup>2</sup> =0.046人工/m <sup>2</sup> ・減少率30%の場合、3.0人工/120m <sup>2</sup> =0.025人工/m <sup>2</sup>	
	特殊水洗浄	ナノバブル水	11	京都大学	ナノバブル水を用いた放射性セシウムの直接洗浄効果の実証	密粒AS:78%* コンクリ:78%*、6% ※ タイル:21%*、17% ※ 樹木:27% 砂利:35% *7MPa高圧水洗浄※かけ流し	必要	未回収	0.002人工/m <sup>2</sup> NB水製造装置 700万円/2か月レンタル	・作業速度:90m <sup>2</sup> /h ・施工範囲:585m <sup>2</sup> (6.5時間作業) ・必要人員:1人 ・測定員:含まず ・水処理:なし ・装置費:700万円/2か月レンタル	
		モルクラスターオゾン水	12	ネイチャーズ(株)	モルクラスターオゾン水による各種構造物の除染実証試験	コンクリ 18%※ 密粒AS 73%※ ※0.3MPa	必要	未回収	0.011人工/m <sup>2</sup> MO水製造装置 990万円/2か月レンタル (安全対策費別)	・作業速度:60m <sup>2</sup> /h ・施工範囲:585m <sup>2</sup> (6.5時間作業) ・必要人員:4.5人(作業員2名、補助者2名、監督者0.5人) ・測定員:含まず ・水処理:なし ・装置費:990万円/2か月レンタル ・安全対策費:別途必要(オゾン計、周辺立ち入り制限監視員等)	
		超高压 (280MPa)	(株)キクテック	超高压水表面処理工法「Jリムーバー」による除染技術	密粒AS 88.8~99.6% コンクリ 95.5~95.7% ILB 96.2% 樹脂 96.3% ILB 96.3%	既設有	回収 ・再利用可	0.028人工/m <sup>2</sup> 水処理 無 0.035人工/m <sup>2</sup> 水処理 有	・作業速度:62m <sup>2</sup> /h ・施工範囲:400m <sup>2</sup> (6.5時間作業) ・必要人員:14人(作業員2名、測定員2名、補助者3名、バキュームカー1名、給水車1名、ポンプ車1名、水処理3名、監督者1人) ・水処理:あり ・装置損料:含まず ※人工については、実証試験時の横並びを確認しJAEAで見積もり		
		ウエットブラスト	マコー(株)	ウエットブラストによる道路の除染	密粒AS 88.2% コンクリ 82.8% ILB	既設有	回収 ・再利用可	0.083人工/m <sup>2</sup> 水処理 無	・作業速度:24m <sup>2</sup> /h ・施工範囲:156m <sup>2</sup> (6.5時間作業) ・必要人員:13人(作業員4名、補助者4名、測定員2名、ユニック操作2名、監督者1人)	・水処理:なし ・装置損料:含まず ※人工については、実証試験時の横並びを確認しJAEAで見積もり	
瓦礫	水洗浄		15	戸田建設(株)	放射性物質の汚染廃棄物の洗浄による減容化技術	木材 41.1% 金属 53.6% コンク 72.9% プラ 25.7%	必要		11,091円/m <sup>3</sup> (30m <sup>3</sup> /h、3年)	・処理能力:洗浄施設30m <sup>3</sup> /時、水処理施設250m <sup>3</sup> /時 ・稼働時間:8h/日 ・稼働日:350日/年 ・年間処理量:洗浄施設84000m <sup>3</sup> /時、水処理施設700000m <sup>3</sup> /時	・処理期間:3年 ・総処理量:洗浄施設252000m <sup>3</sup> 、水処理施設2100000m <sup>3</sup> ・人件費:7500千円/年×2人 ※設置する土地の費用、土木工事費用、廃棄物の保管施設、周辺設備の費用は含まず
	ドライアイス		16	環テックス(株)	ドライアイスを利用した がれき の除染	43%	必要	72%	25,000円/t (87.6t/h、稼働3年、6基)	・運転期間:3年 ・処理能力:90t/h ・施設費用:4億円 ・ランニングコスト:275044千円/月(分別装置損料、ドライアイス等) ・処理コスト:24722円/t	
植物・牛糞 減容	堆肥化	100℃以上	17	(独)宇宙航空研究開発機構	宇宙農業研究の成果・高温好気堆肥菌システムによる放射能除染・減容化技術実証	—	必要	評価不能	評価不能	—	
		50~60℃	18	日本ミクニヤ(株)	有機減容化システムを用いた減容化技術の実用化に向けた実証実験	—	必要		ギンギン 99.3% 根菜類 96.4% 松葉 92.8% 杉葉 98.3% 腐葉土 85.3% ※試験数少	915.4円/kg (100kg/日、稼働1年)	・製作費:6700千円(処理量100kg/日) ・運搬・設置費:2500千円 ・稼働日:200日 ・ランニングコスト: ・人工:試料採取3名/班、装置管理1名/班(単価:10千円/日) ・メンテナンス費:25千円/月 ・使用電力量:3000kWh/月 ・杉チップ:30千円×2回/年

□ 1 (処理前の濃度) - (処理後の濃度) / (処理前の濃度)

□ 2 ((処理前の重量の合計) - (処理後の重量の合計)) / (処理前の重量の合計)

表 3-3 実施事業の結果詳細 (3)

除染対象物	手法	特徴	No.	実施者	テーマ名	除染率※1 (%)	設備投資	減容(量)率 ※2 (%)	実機処理コスト (円/t) (m <sup>3</sup> /h)	評価条件	
水	捕集	ゼオライトブロック	19	前田建設工業(株)	人工ゼオライトブロックを用いた住宅地排水溝の除染技術の実証試験	46.7% ※試験数少	必要	ブロック自体が廃棄物となる可能性 ※試験数少	900円/個 (製造ロット10~20万個/年間) ロット増でコスト減可能	製品形状 100×100×200 仕様 人工ゼオライト混入7号砕石ポーラスブロック (ポーラスブロックのバインダー部分に人工ゼオライトを配合) 製造ロット 100,000個/年 受注生産対応のため割高な試算。	
	吸着・凝集	フェロシアン化鉄	20	東京工業大学	フェロシアン化鉄配合吸着凝集沈殿剤を使用した放射能汚染水浄化システムの提案	99%以上	既設有	99.4% 除去物量 1800kg 凝集剤量 648kg	0.4人工/m <sup>3</sup> 4,600円/kg/m <sup>3</sup>	【作業人工】 総人工数257人工(プラント運転98人工) 水処理人工:0.4人工/m <sup>3</sup> ※定常運転で、作業効率向上の可能性 【凝集剤】 水量約300m <sup>3</sup> に対し凝集剤648kgを使用(実証試験実績) 凝集剤使用量は2.16kg/m <sup>3</sup> 、約10000円程度	
森林・木材	固化剥離	セメント剥離	21	大成建設(株)	木質系廃棄物のチップ化に先立つ表面除染方法の検討	84% ※試験数少	不要	セメント塗布分増量 ※試験数少	約250円/長さ1m、φ4~6cmの木材 20万円/t	処理コスト 労務:福島県、普通作業員 10,800円/8時間→225円/10分(建設物価2011.11月号) 材料:寒冷期(現地試験における材料の使用実績から)24円(=1324円/55本) 通常期(通常のセメントを主成分とする特殊固化材に変更)10円/本※比重0.36、処理規模等でコスト低減可能	
	洗浄	水洗浄・焼却	22	郡山チップ工業(株)	放射能汚染された木材・樹皮の水洗及び焼却による除染・廃棄物減容化技術の実証	常緑樹39% 落葉樹45% +焼却処理	既設有	95% (焼却処理)	9,071円/t	①/バーク洗浄処理 バーク洗浄処理量 7,000トン/年 28トン/日×250日 ②コスト 設備費(洗浄+水処理設備) 30,000,000円/年 設備300,000,000円、10年間稼働としてランニングコスト 23,500,440円/年 人件費 10,000,000円/年 5000000円/人×2人	
		高圧洗浄・水処理	23	(株)ネオナイト	放射能汚染された木質バイオマス(ガレキ・原木等)有効利用のための除染技術の実証試験事業	81~96%	既設有	水処理後 20Bq/L未満にできる	1,392円/m <sup>3</sup> (50m <sup>3</sup> /h、3年)	建設費306,700,000円 ランニングコスト:216,000円/日 処理速度:50m <sup>3</sup> /h 稼働日:1日8時間稼働×25日×12か月×3年=7,200時間(900日)	コスト合計:306,700,000+(216,000×900)=501,100,000円 処理量:50×7200=360,000 1m <sup>3</sup> 当たりのコスト:501,100,000/360,800=1391.9円=1,392円/m <sup>3</sup> ※基礎工事費、安全対策費、一般管理費、現場管理費、保守点検費、処分費は含まず
		間伐有	空間線量率変化	24	福島県林業研究センター	森林の放射線量低減技術の開発に関する実証試験事業	針葉樹 落葉除去29% 30%間伐29% 皆伐59% 広葉樹 落葉除去35% 30%間伐35% 皆伐62%	必要	-	-	-
		間伐無	施工法の効率化			森林除染作業の効率化実証実験	-	既設有	-	293,495円/kN =29,948円/t	・バキューム(基本料:930千円/回、吸引車:100千円/日、回収タンク:13千円/日、ホース:2.7千円/m) ・モノレール:(基本料:674千円/回、26千円/日、18千円/日、設置工事19.5千円/m、12千円/m) ・支障木伐採(基本料:70.5千円/回、歩掛4.8千円/m、損料1.5千円/日) ・処理量:600m <sup>3</sup> /100kN(kN:回収物重量)
-	フレキシブルコンテナの固化	フレキシブルコンテナ状態での利用	25	(株)大林組	放射性物質汚染土を用いたセメント固化物の土工材料としての利用技術	-	必要	-	10,760円/t	スラリー混合:フレコン充填後、路体として活用 固化体製作費:人件費:8t/日・3人、6万円/8t=7,500円/t 機械損量:(バックホウ)15,000円/8t=1,875円/t、(モルタルミキサー)1,400円/8t=175円/t	(発電機) 3600円/8t=450円/t ・施工費計 約10,000円/t ・材料費計 760円/t ※理立処分費用は除く
路面	アスファルト抽出	アスファルト洗浄			アスファルト舗装道路の切削除染に際して発生する放射性廃棄物の減容化	41~68%	必要	89%	34,660円/kg 38,511円/kg	・アスファルト抽出試験(アブゾン式) ・試験試料 1.8kg/回 ・溶剤使用量 0.22リットル/kg 0.4リットル/回 ・抽出時間 2時間 ・人件費 2人 × 2h ・電気代 0.9kwh ※但し、試験ベースで見積りのため実機ベースでは大幅に変更される	

- 1 (処理前の濃度) - (処理後の濃度) / (処理前の濃度)  
□ 2 ((処理前の重量の合計) - (処理後の重量の合計)) / (処理前の重量の合計)

(2) 相乗効果が期待される組み合わせ例

技術実証 25 件の技術のうち組み合わせることで相乗効果が期待される技術がある。

除去物量削減の観点で整理し、技術導入場所ごとに整理した組み合わせ例を表 3-4 に示す。検討する土台として、最終処分場で管理する廃棄物は不燃物と灰を前提として検討を実施した。

表 3-4 除去物量減少が期待できる組み合わせ例

対象物	除染現場	仮置場	中間貯蔵施設	メリット ・デメリット
土壌・路面	超高压水, ウェットブラスト (水処理・回収汚泥)	分級・脱水	回転加熱	メリット 除去物少ない デメリット 廃棄物の高濃度化
木材	丸太：高压洗浄 バーク：攪拌洗浄	焼却	-	
瓦礫 (可燃)	分別	焼却	-	
瓦礫 (不燃・非金属)	分別	ドライアイス ・研磨	-	



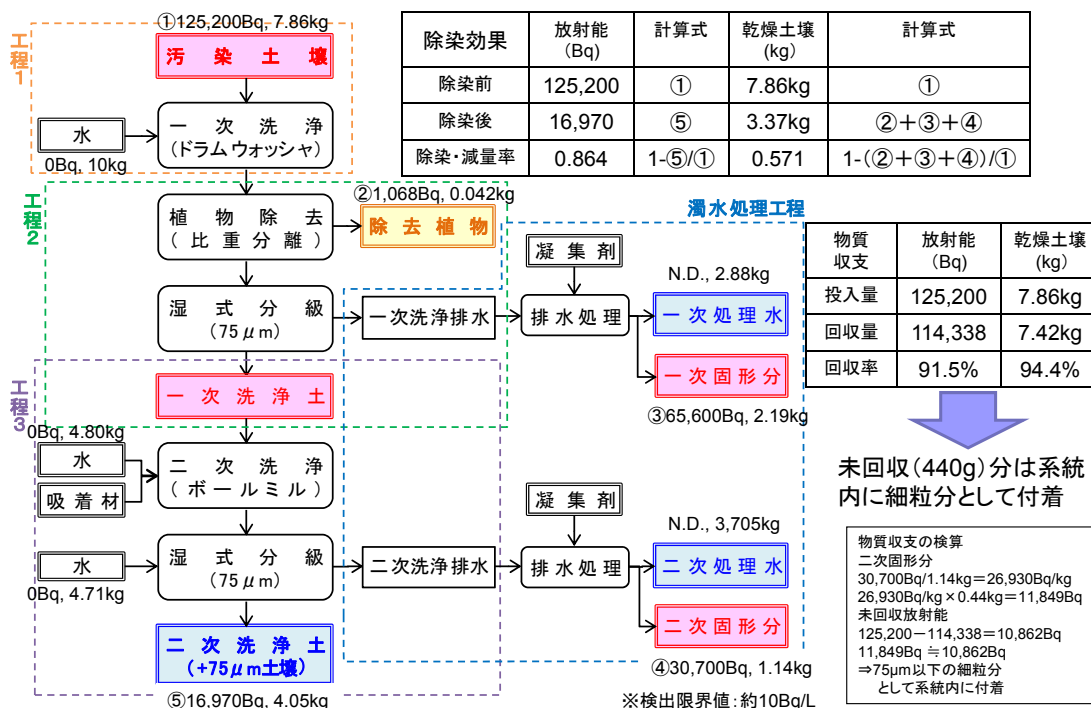
## 別紙

### 分級土壌の性能の評価方法について

### 分級土壌の性能の評価方法について

本実証試験事業の土壌の分級洗浄に対する試験を通じ、同様の技術についての標準的な評価方法の評価例を用いて示す。

1. 除染前の粒度分布，含水率，放射能濃度の測定を実施する。  
 粒度分布毎の放射能濃度を測定した場合，分級によって除染できる最低除染効果がわかる。  
 システム上の真の除染能力は，分級によって除染できる除染効果との差で求められる。
2. 除染効果，減量の評価方法

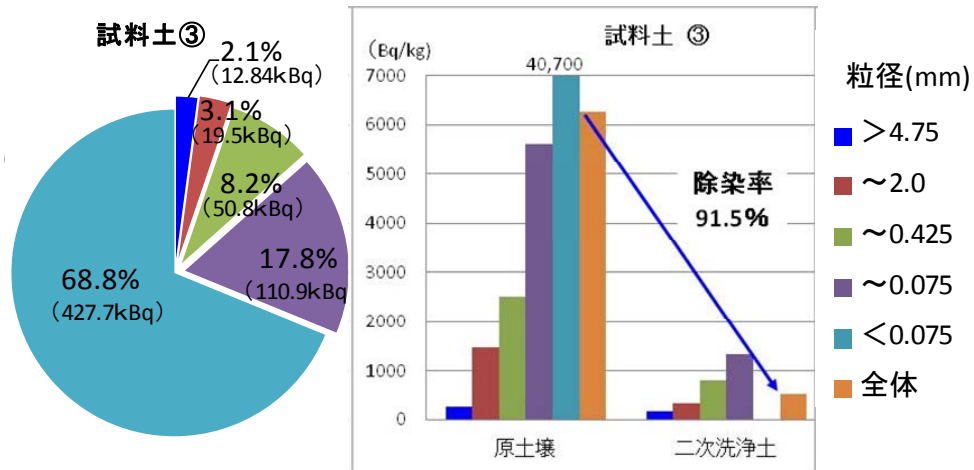


土壌分級洗浄の評価例

まずは，システム内の放射能と投入土壌が保存されることを回収率によって確認する。その後，除染効果，減量率を求める。減量率は乾燥重量で評価するため，含水率が重要である。土壌の減容率は，締固め率等を統一することが難しいため，基本的には乾燥重量で評価する。

3. 除染後の粒度分布，含水率，放射能濃度の測定

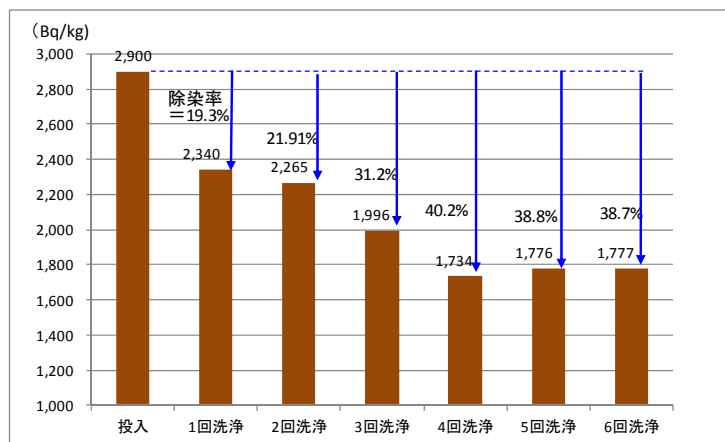
礫分の表面研磨などの場合，除染前より細粒側にシフトすることを確認する。



除染前後の粒度分布の変化例

4. 繰り返し洗浄効果，すすぎ効果の確認

繰り返し洗浄効果もしくはすすぎ効果で飽和する点进行评估



繰り返し洗浄効果の確認評価例

5. 脱水と減量率の評価

細粒分が多い場合，除染後の含水率によっては増量する場合もあるため，脱水と脱水による減量率进行评估する。

6. コストに対しての損益分岐点の評価

除染の限界点を求めること。

7. 課題

洗浄後の土壌について明確な再利用基準がないため，再利用基準を明確にする必要がある。

## 付録

付録 1 除染技術実証試験事業のまとめ

付録 2 平成 23 年度「除染技術実証試験事業」各案件の概要

付1

# 付録1

## 除染技術実証試験事業のまとめ

# 除染技術実証試験事業の概要

付2

## ● 除染技術実証試験の提案の概要と実施者一覧

「除染技術実証試験事業」は、今後の除染作業に活用し得る優れた技術を公募により発掘し、除染効果、経済性、安全性等を確認する観点から実証試験を行い、その有効性を評価するもの。

除染作業効率化や除染除去物減容化等に関する25件の技術提案について実証試験を実施。

### <公募概要>

○対象事業分野：除染作業効率化技術、土壌等除染除去物減容化技術、除去物の運搬や一時保管等関連技術、除染支援等関連技術

○採択件数：25件

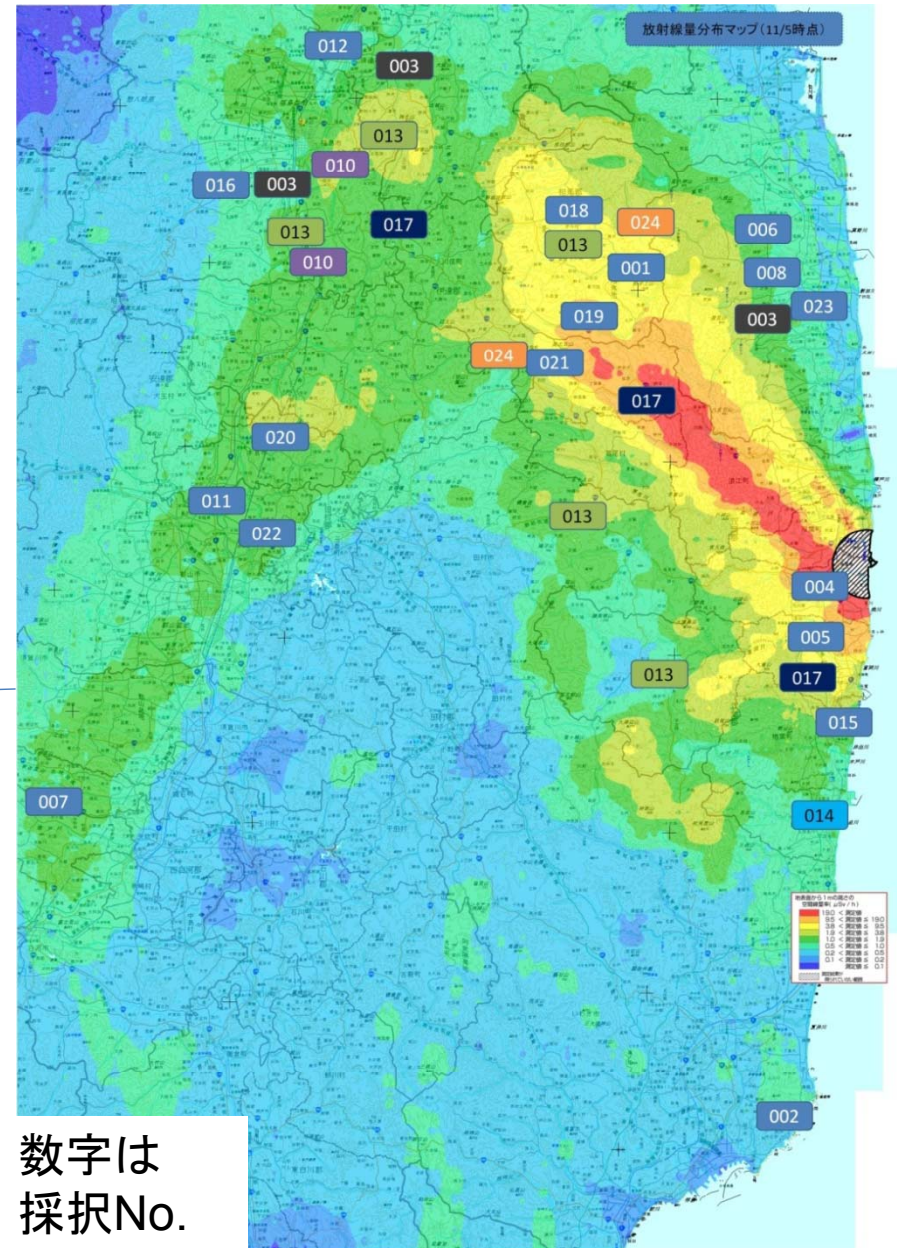
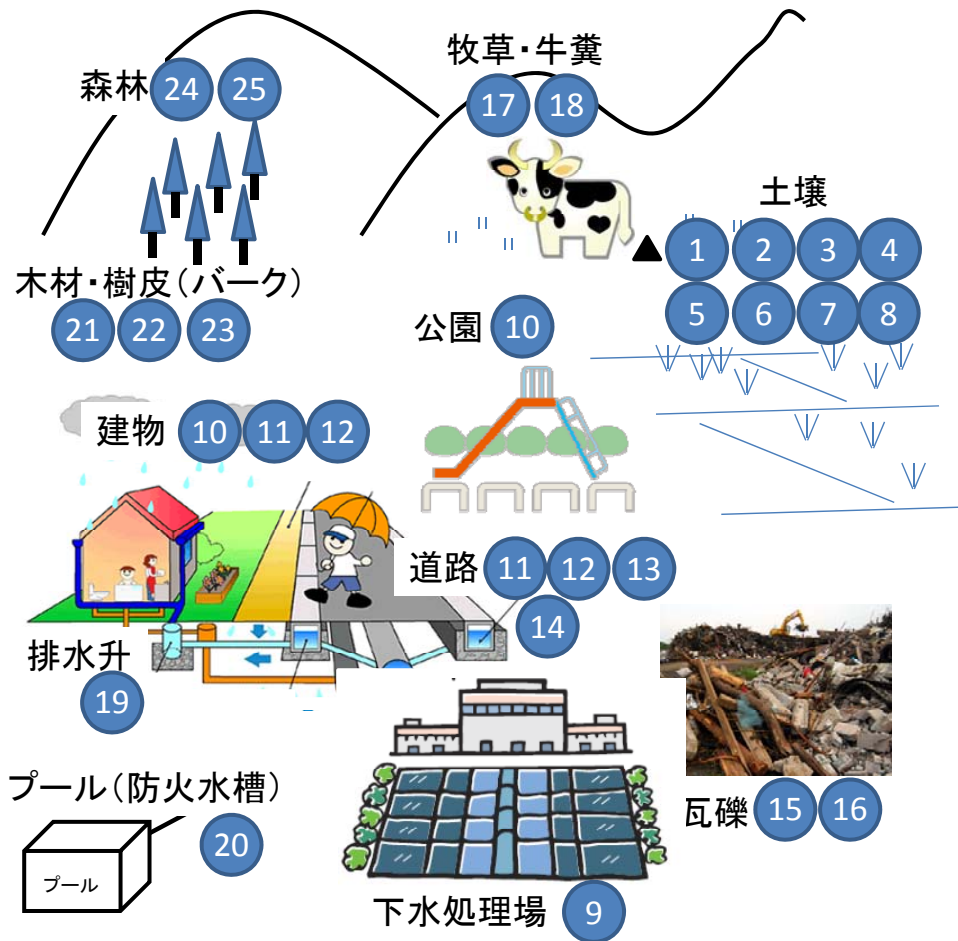
○実証試験事業予算：1件当たり原則2000万円程度

○実施期間：平成23年11月～平成24年2月末

除染対象物	手法	特徴	No.	実施者
土壌	熱処理	反応促進剤	1	太平洋セメント(株)
	分級	湿式分級	2	ロート製薬(株)
			3	(株)竹中工務店
			4	(株)熊谷組
			5	(株)日立プラントテクノロジー
			6	(株)鴻池組
			7	佐藤工業(株)
	化学処理	有機酸処理	8	(株)東芝
下水汚泥	溶出	有機物処理	9	新日鉄エンジニアリング(株)
公園・道路・建物	切削・剥離	ストリップペイント	10	志賀塗装(株)
	特殊水洗浄	ナノバブル水	11	京都大学
		モルクラスターオゾン水	12	ネイチャーズ(株)
	高压洗浄	超高压(280MPa)	13	(株)キクテック
	研削・剥離	ウェットブラスト	14	マコー(株)
瓦礫	洗浄	水洗浄	15	戸田建設(株)
		ドライアイス	16	環テックス(株)
植物・牛糞減容	堆肥化	100℃以上	17	(独)宇宙航空研究開発機構
		50～60℃	18	日本ミクニヤ(株)
水	捕集	ゼオライトブロック	19	前田建設工業(株)
	吸着・凝集	フェロシアン化鉄	20	東京工業大学
森林・木材	固化剥離	セメント剥離	21	大成建設(株)
	洗浄	水洗浄・焼却	22	郡山チップ工業(株)
		高压洗浄・水処理	23	(株)ネオナイト
	間伐有	空間線量率変化	24	福島県林業研究センター
	間伐無	施工法の効率化	25	(株)大林組

# 適用範囲例と試験実施場所

付3



# 土壌の除染・減容化

付4

- ✓ 水溶したセシウムは、粘土の構造の間に取り込まれ、極めて強く「固定」される。
- ✓ 土壌粒径が小さいほどセシウムを良く吸着。



## 土壌の分級、研磨、洗浄、加熱を軸とした除染技術の提案

No.	事業者	特徴	分級	研磨	洗浄	加熱
1	太平洋セメント	回転炉により昇華しセシウム分離	—	—	—	○
2	ロート製薬	特殊ポンプと篩機による小型分級システム	○	—	○	—
3	竹中工務店	ボールミル・ドラムウォッシャ	○	○	○	—
4	熊谷組	摩砕洗浄機	○	○	—	—
5	日立プラントテクノロジー	分級後、700℃で加熱	○	—	—	○
6	鴻池組	摩砕洗浄機、キャビテーション洗浄	○	○	○	—
7	佐藤工業	高圧ジェット水流、マイクロバブル洗浄・分離	○	○	○	—
8	東芝	シュウ酸によるCs溶離	—	—	○	—

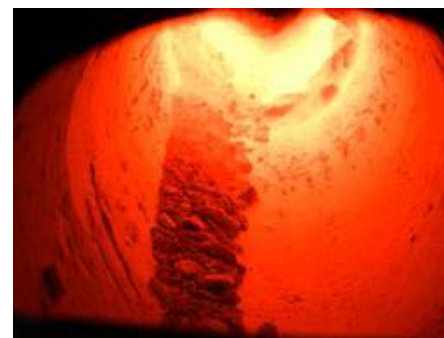
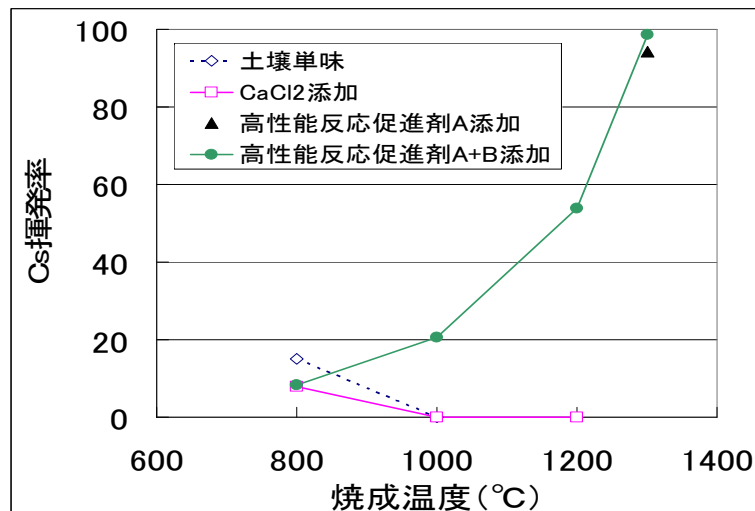
No.1は加熱、No.2～7は分級、No.8は酸溶解



# 回転加熱によるセシウム昇華技術

付5

## ● 添加物のセシウム昇華率寄与



昇華装置内部



浄化処理物

- 高性能反応促進剤添加でCs揮発率大幅向上
- 急激な温度上昇は、ケイ素が溶出しガラス固化するため、均一に熱を加えることが重要

## ● 回転式昇華装置による結果

- バグフィルター出口の排ガス中Cs濃度は検出限界(0.1Bq/m<sup>3</sup>)以下であった。
- 昇華したCsは、塩化物として濃縮、バグフィルタにて捕集できた。

	汚染土壌 (Bq/kg)			浄化処理物 (Bq/kg)		
	Cs134	Cs137	合計	Cs134	Cs137	合計
実汚染土壌①	27,100	28,900	56,000	<26	19	<45
実汚染土壌②	33,000	34,300	67,300	<17	29	<46

## ● 試験結果

No.	実施者	特徴	除染前 Bq/kg	除染後 Bq/kg	除染率 %	減量率 %	実証試験速度
1	太平洋セメント	反応促進剤	56,000 67,300	<46 <47 しきい値 100	99.8 ~99.%	98~99	1kg/hr

高性能反応促進剤の添加により、1300°C以上で土壌内のセシウム昇華  
浄化処理物は極めて低いレベル(100Bq/kg以下)であった。

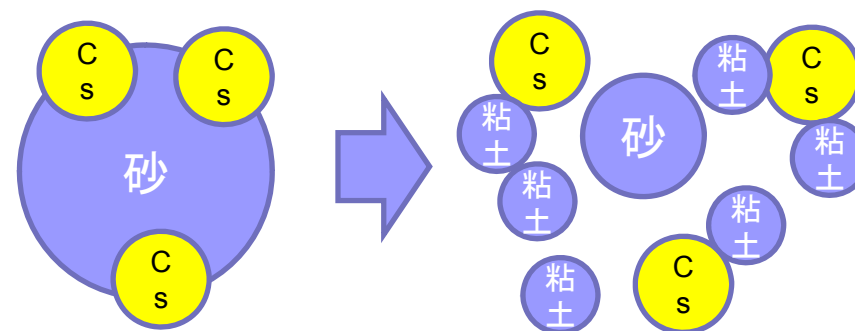
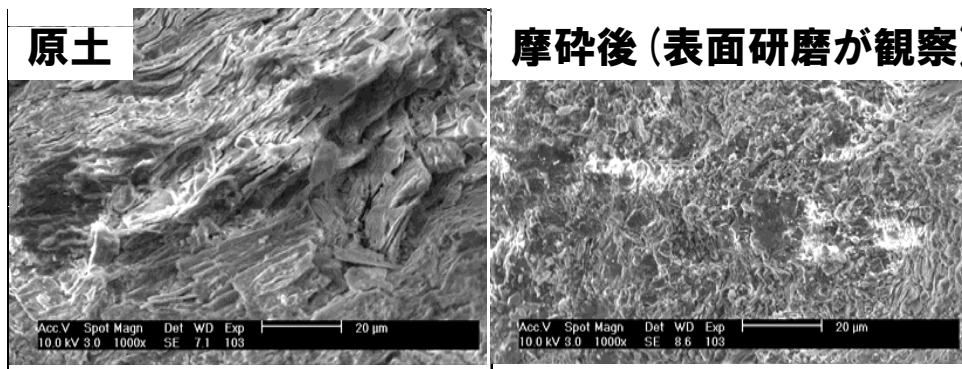
# 分級によるセシウム除去技術

付6

## ●分級技術の特徴

No.	事業者	分級	研磨	洗浄	加熱
2	ロート製薬	篩	—	特殊ポンプ	—
3	竹中工務店	篩 比重分離	ボールミル	ドラムウォッシャ	—
4	熊谷組	篩 サイクロン	摩砕装置	—	—
5	日立プラントテクノロジー	篩 比重分離	—	—	700℃
6	鴻池組	篩	摩砕装置 キャビテーションジェット	キャビテーションジェット	—
7	佐藤工業	浮上分離	高圧ジェット	マイクロバブル	—

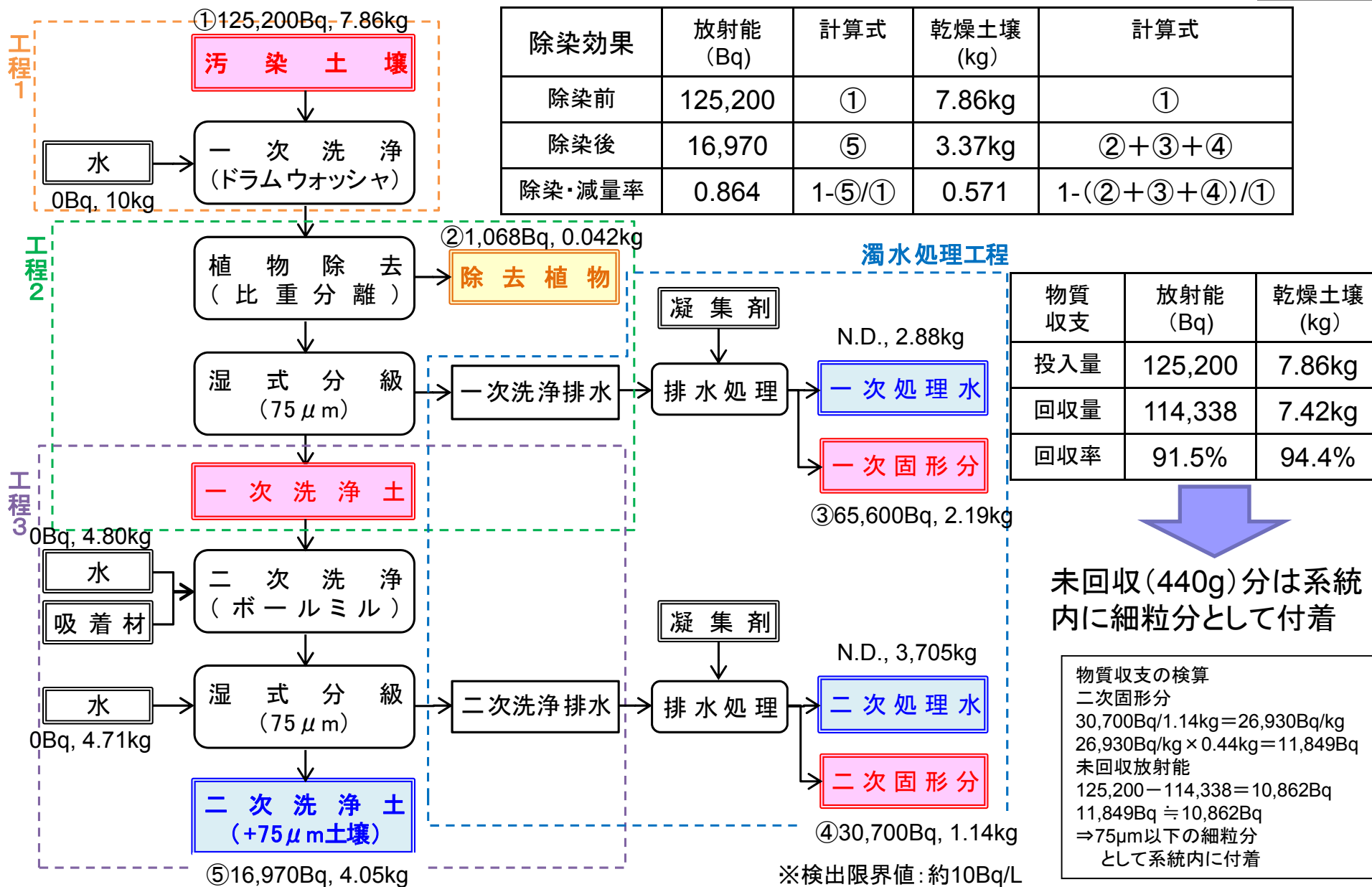
## ●研磨効果 礫表面、電子顕微鏡写真



粒度分布は細粒側にシフトする

# 分級評価の例

付7



# 分級によるセシウム除去技術の比較

付8

## ● 除染率、減量率、試験速度の比較

No.	実施者	特徴	除染前 Bq/kg	除染後 Bq/kg	除染率 %	減量率 %	実証試験 速度
2	ロート製薬	分級・洗浄	26,991	657 しきい値1,000	97.8	90	16m <sup>3</sup> /h
3	竹中工務店	分級・研磨・ 洗浄	12,500 12,600	1,530 1,040 しきい値8,000	87.8 ~91.7	48.7 ~60	2.5kg/h
4	熊谷組	分級・研磨	19,700 125,667	663 965 しきい値8,000	89.0 99.0	91.9 0.6	1t/h
5	日立 プラントテクノロジー	分級・加熱	10,584	4,362 しきい値8,000	58.8	12	2t/h
6	鴻池組	分級・研磨・ 洗浄	3,970 ~8,070	531 ~1,777 しきい値8,000	74.7 ~91.5	66.7 ~75.6	150kg/hr
7	佐藤工業	分級・洗浄	6,600	943 しきい値1,000	85.7	65	0.5m <sup>3</sup> /h

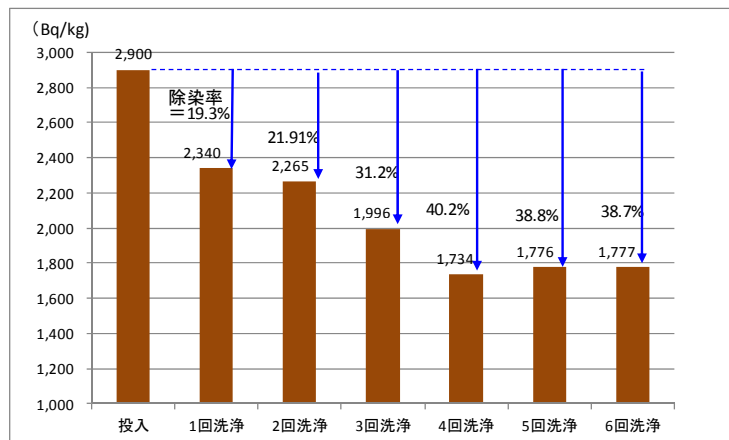
除染率、減量率、コストで総合的に評価、除染率は約60~90%。  
分級だけの効果は原土の粒度分布で決定される。

# 繰り返し研磨・洗浄の効果

付9

## ● 研磨と仕上げ洗浄の比較

### 研磨 + 洗浄

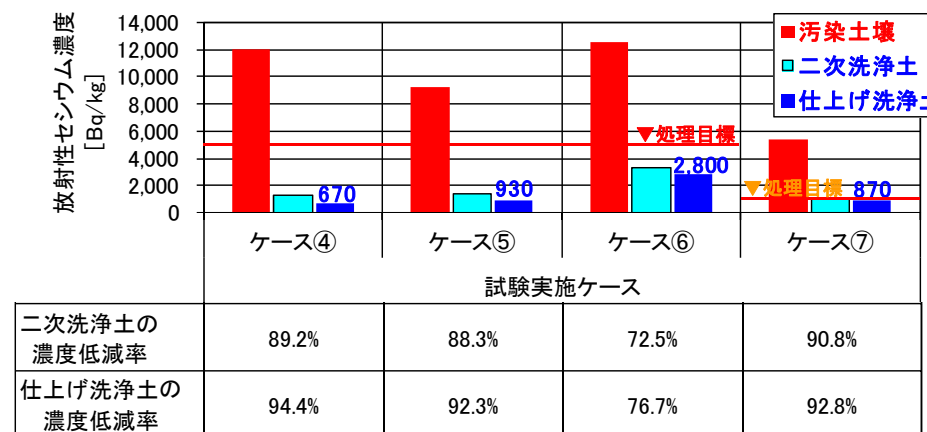


キャビテーションジェット洗浄の繰り返し回数に伴うセシウム濃度の低下



4回程度で飽和

### 仕上げ(すすぎ)洗浄



仕上げ(すすぎ)洗浄の効果

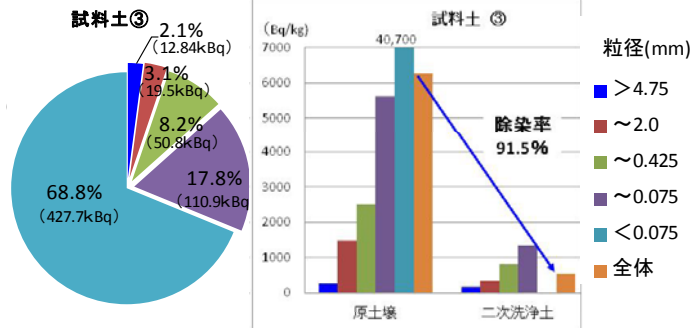


仕上げ(すすぎ)は有効

砂表面のクラックなどに入り込んだセシウムは研磨では除去されにくい。  
再付着した粘土分を仕上げ(すすぎ)洗浄で除去。  
細粒分の含水率が多くなると、増容する場合もある。減容のために脱水が重要

# 分級除染技術の目標と適用範囲

## ●処理土壌の脱水による更なる減容化

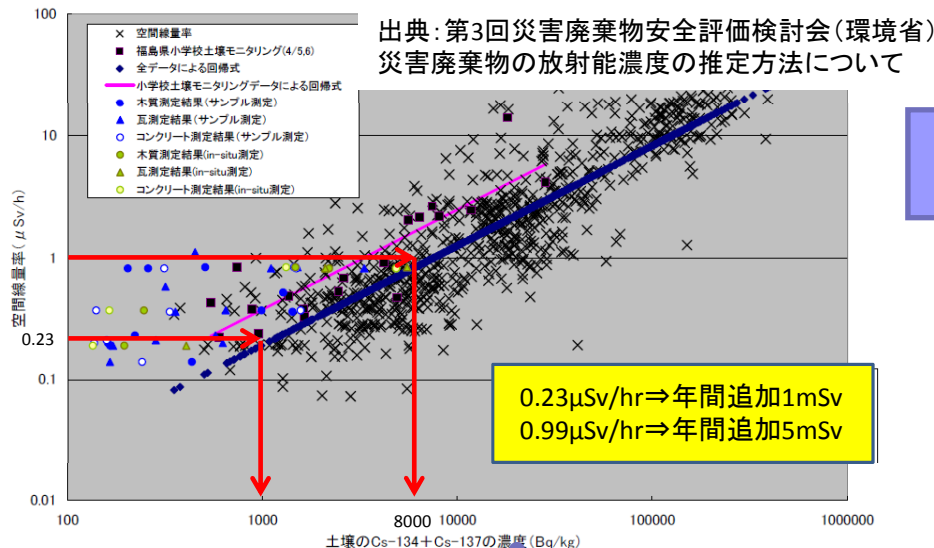


粘土質に多く付着している放射性セシウムを分級によって除去することで除染が可能。

	媒体	種別	単位	試料土③
減容化なし	保管容積		L	70.59
減容化後 (計算)	保管時容積	締固めなし	L	20.70
		締固め時	L	17.85
	減容化率	締固めなし	%	59.3
		締固め時	%	74.7

脱水ケーキの締固めにより、約75%まで減容化可能。

## ●洗浄後土壌の再利用目安



0.23μSv/hを目標, 1,000Bq/kgに相当  
約1μSv/hを目標, 8,000Bq/kgに相当

除染効果80%とすると  
再利用土壌の放射能濃度  
1,000Bq/kgの場合5,000Bq/kg  
8,000Bq/kgの場合40,000Bq/kg

### 土壌分級の適用範囲

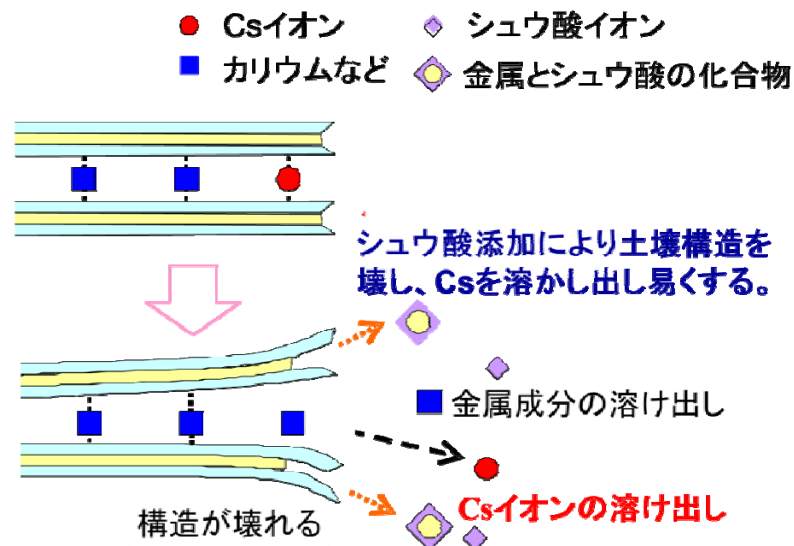
減容化には、締固め等が必要。原土の細粒分が多い場合、増容する場合もある。除染目標1,000または8,000Bq/kgである場合、除染効果約80%であることから5,000または40,000Bq/kgまでの原土。分級実施場所は、除染現場もしくは仮置場が経済的。

# 有機酸を用いた土壌溶解によるセシウム遊離技術

付11

製品化例 (SARRY-Soil)

## ●セシウム溶離原理



写真提供: (株)東芝

- セシウム溶離 : 土壌は外観上変化なく、土壌中のCsを最大**93%**除去できることを確認。
- セシウム回収 : 吸着剤を用いることで、二次廃棄物発生量が少なく、減容が可能であることを確認。
- シュウ酸分解 : シュウ酸は水と二酸化炭素に分解可能なことを確認。
- システム成立性 : 基本設計条件で、処理容量5トン/日の処理装置の概念設計を実施。

## ●試験結果とコスト評価

No.	実施者	特徴	除染前 Bq/kg	除染後 Bq/kg	除染率 %	減量率 %	実証試験 速度
8	東芝	有機酸	4,853	340~ 1,116	77%~ 93%	95%	600kg/h

**シュウ酸(有機酸)による溶離によって、93%のセシウムが回収できることを実証した**

## 成果

- 回転加熱による昇華、酸による除染は90%以上の除染効果。回転加熱は、下水汚泥にも応用可能
- 減容化には、締固め等が必要。  
除染目標1,000または8,000Bq/kgの場合、  
除染効果約80%では5,000または40,000Bq/kgまでの原土が適用範囲。
- 細粒分を除去するため、いずれの技術も農地へは適用が難しい。

## 課題

- コスト低減が課題
- 農地除染技術の開発が必要
- 減容技術適用場所の最適化



# 建物・道路等の除染

付13

- ✓ 水をなるべく利用しない除染方法への期待。
- ✓ 遊具の塗装等の除染方法を望む声あり。
- ✓ アスファルト,透水性舗装,インターロッキング等では高圧水洗浄の効果が低い。



## 研磨、洗浄水の回収、超高圧水による洗浄等の除染技術の提案

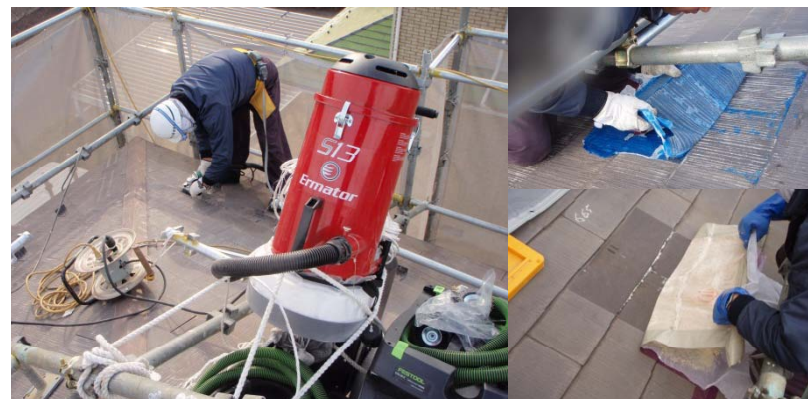
No.	事業者	特徴	建物		道路	
			切削	剥離	特殊水	切削
10	志賀塗装(株)	切削:吸塵式サンダー 剥離:ストリップペイント	○	○	—	—
11	京都大学	ナノバブル水	—	—	○	—
12	ネイチャーズ(株)	高濃度オゾン水	—	—	○	—
13	(株)キクテック	超高圧水洗浄	—	—	—	○
14	マコー(株)	ウェットブラスト	—	—	—	○

# 建物等の切削・剥離除染技術

付14

## ●切削除染

- 屋根での試験結果390～3,523cpm  
除染後318～1,973cpm 32～75.5%減少
- 施工面積4m<sup>2</sup>/h



## 安全上の注意点

- 吸塵器排気口にはバグフィルタやHEPAフィルタ等を設置する。
- フィルタ交換時に粉塵が舞上るので、内部被ばくに注意する。

## ●剥離除染の比較

除染剤	価格(円/m <sup>2</sup> )	平均減少率(%)	
除染剤A	10,000	59	(34～84%)
低温仕様除染剤B	9,500	56	(50～62%)
汎用粘土	6,500	28	(18～38%)
ストリップペイント	2,900	25	(14～35%)

5℃以下では固化促進剤必要。冬場の使用は温度に留意

## 切削・剥離除染の適用範囲

切削除染の効果は、バラツキ大きく、効果としては50%程度である。  
剥離除染については、一定の除染効果はあるが、除染剤はコストが高い。

# 道路の特殊水による除染技術

## ●水道水、高圧水洗浄との比較

- 界面活性効果が期待されるナノバブル水(NB水)
- 酸化力を有し漂白剤にもなる高濃度(60ppm)オゾン水(HO水)
- 水道水によるかけ流しと高圧水洗浄で比較

\*シンチレーションサーベイメータで測定

対象	コンクリート				アスファルト		
	水道水		NB水	HO水	水道水	NB水	HO水
媒体	水道水		NB水	HO水	水道水	NB水	HO水
条件	掛流	7MPa	掛流	0.45MPa	7MPa	7.5MPa	0.45MPa
除染前	1,370cpm	907cpm	1,570cpm	0.87 $\mu$ Sv/h*	999cpm	2,830cpm	0.49 $\mu$ Sv/h*
除染後	1,250cpm	288cpm	1,480cpm	0.71 $\mu$ Sv/h*	186cpm	430cpm	0.13 $\mu$ Sv/h*
減少率	<b>9%</b>	<b>68%</b>	<b>6%</b>	<b>18%</b>	<b>81%</b>	<b>85%</b>	<b>73%</b>
作業速度	90m <sup>2</sup> /h	90m <sup>2</sup> /h	90m <sup>2</sup> /h	60m <sup>2</sup> /h	90m <sup>2</sup> /h	90m <sup>2</sup> /h	60m <sup>2</sup> /h

## 安全上の注意点(高濃度オゾン水)

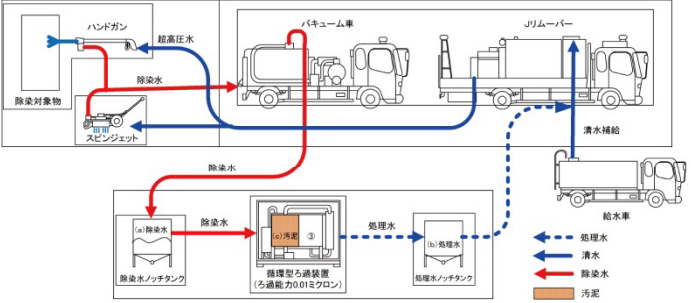




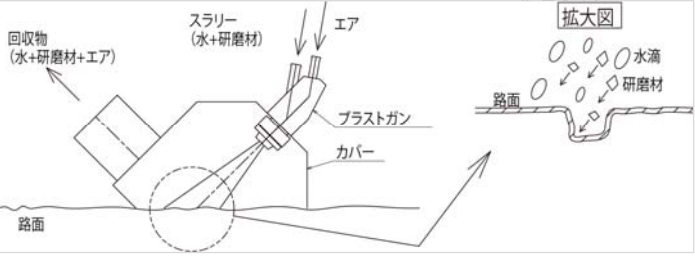

- 高濃度オゾン(60ppm)水散布により、除染中の大気オゾン濃度が0.1ppmになる可能性高いため、送気マスク必要
- 作業環境では、大気中オゾン濃度が0.1ppm以下(厚生労働省)
- 無管理状態での環境中の使用は不適

特殊水はいずれも高圧水洗浄と同程度の除染効果



# 道路の超高压水とウェットブラストによる 切削除染技術について

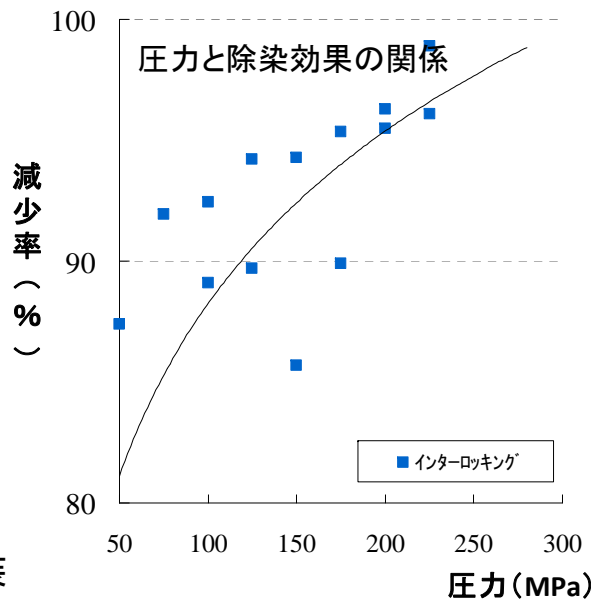
付16

項目	超高压水	ウェットブラスト
条件	最大280MPa, 水量30L/min	ブラスト材: アルミナ
水処理	凝集沈殿+フィルタ(UF+活性炭)	なし
作業速度	62m <sup>2</sup> /h	24m <sup>2</sup> /h
装置	   	  

# 超高圧水による除染結果

## インターロッキング

除染前 除染後

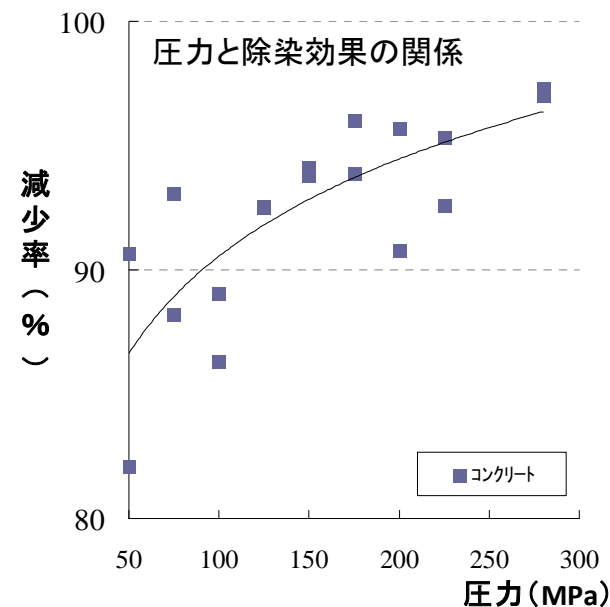


## コンクリート舗装

除染前 除染後



2,030→87cpm  
53,180→1,438cpm



## 密粒アスファルト舗装

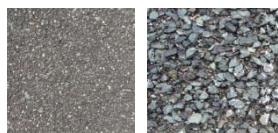
除染前 除染後



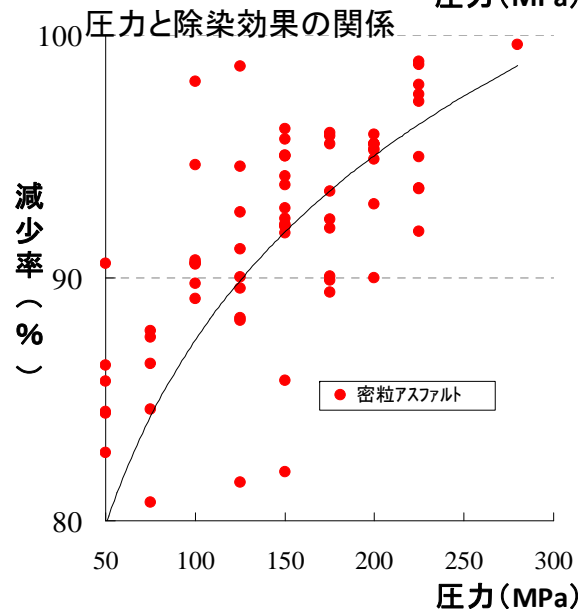
0.6μSv/hr 225MPa  
1,710→41cpm



3.3μSv/hr 225MPa  
9,702→573cpm



3.3μSv/hr 280MPa  
53,448→213cpm

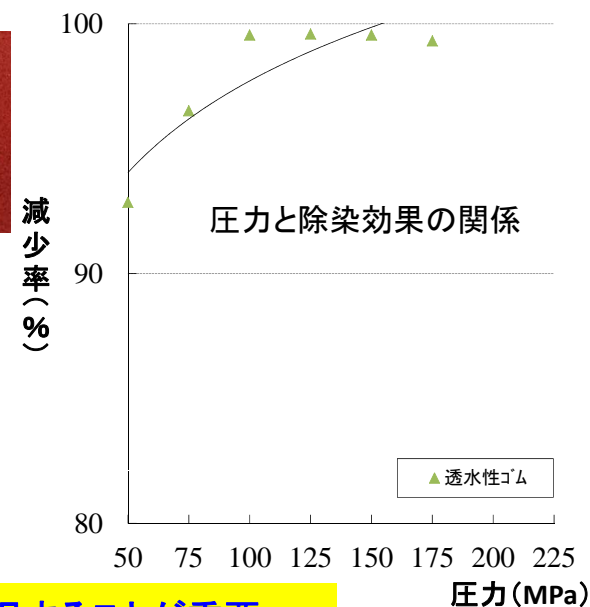


## 透水性ゴム

除染前 除染後



1,408→1cpm



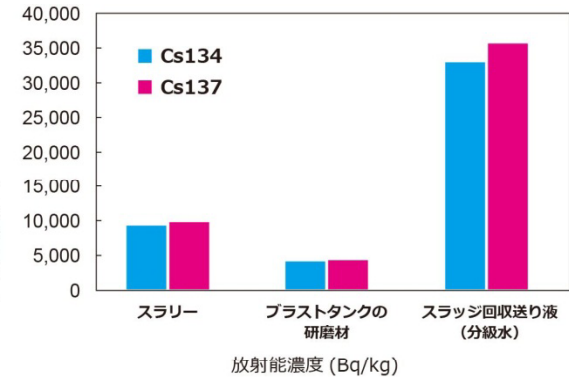
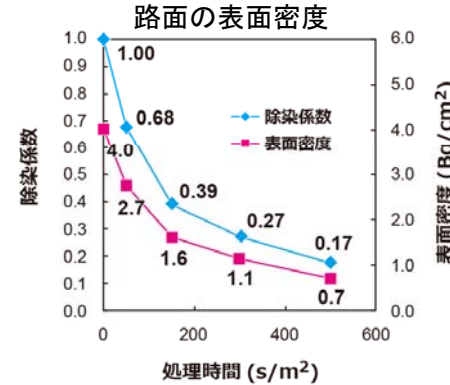
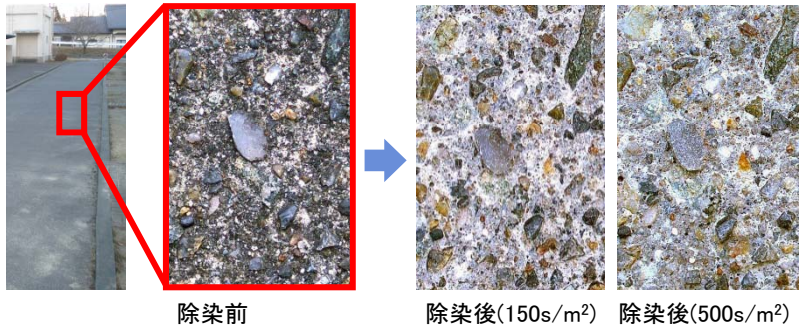
高除染率かつ表面ダメージを抑えた最適水圧を選択することが重要

# ウェットブラストによる除染結果

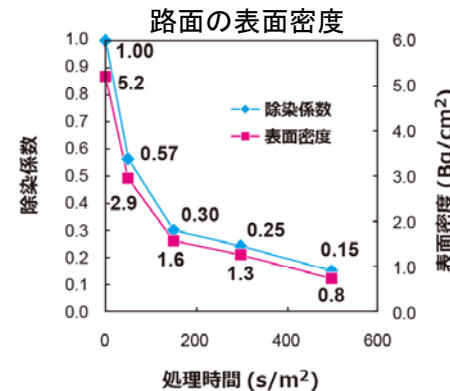
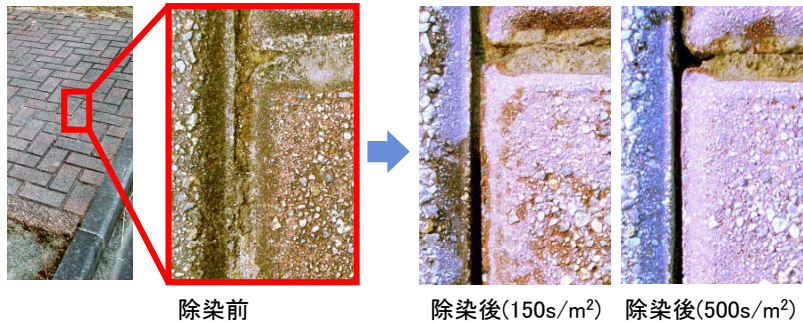
## コンクリート舗装

※1 鉛遮蔽による測定をし、バックグラウンドを補正した。

※2 除染係数 = 除染後 / 除染前

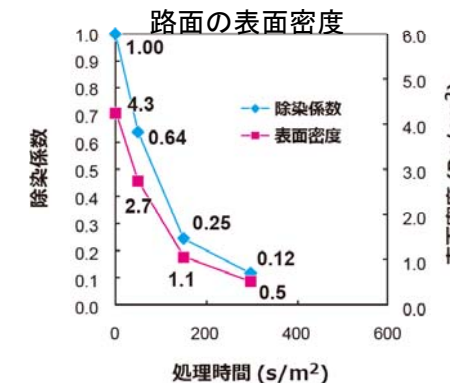
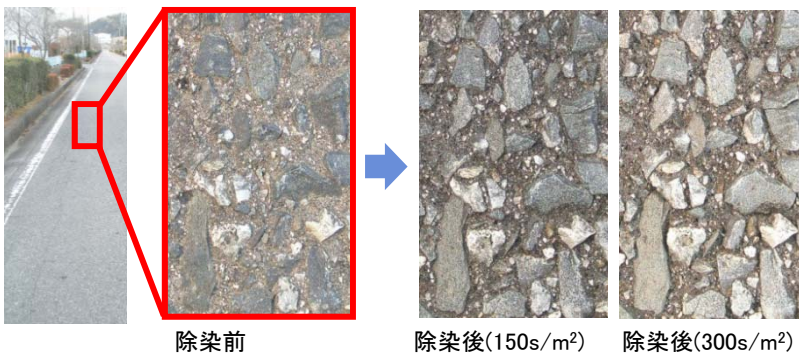


## インターロッキング



いずれのサンプルも、0.2μmのフィルタによるろ過により分離された水の放射能濃度は、すべて検出限界以下。

## 密粒アスファルト舗装

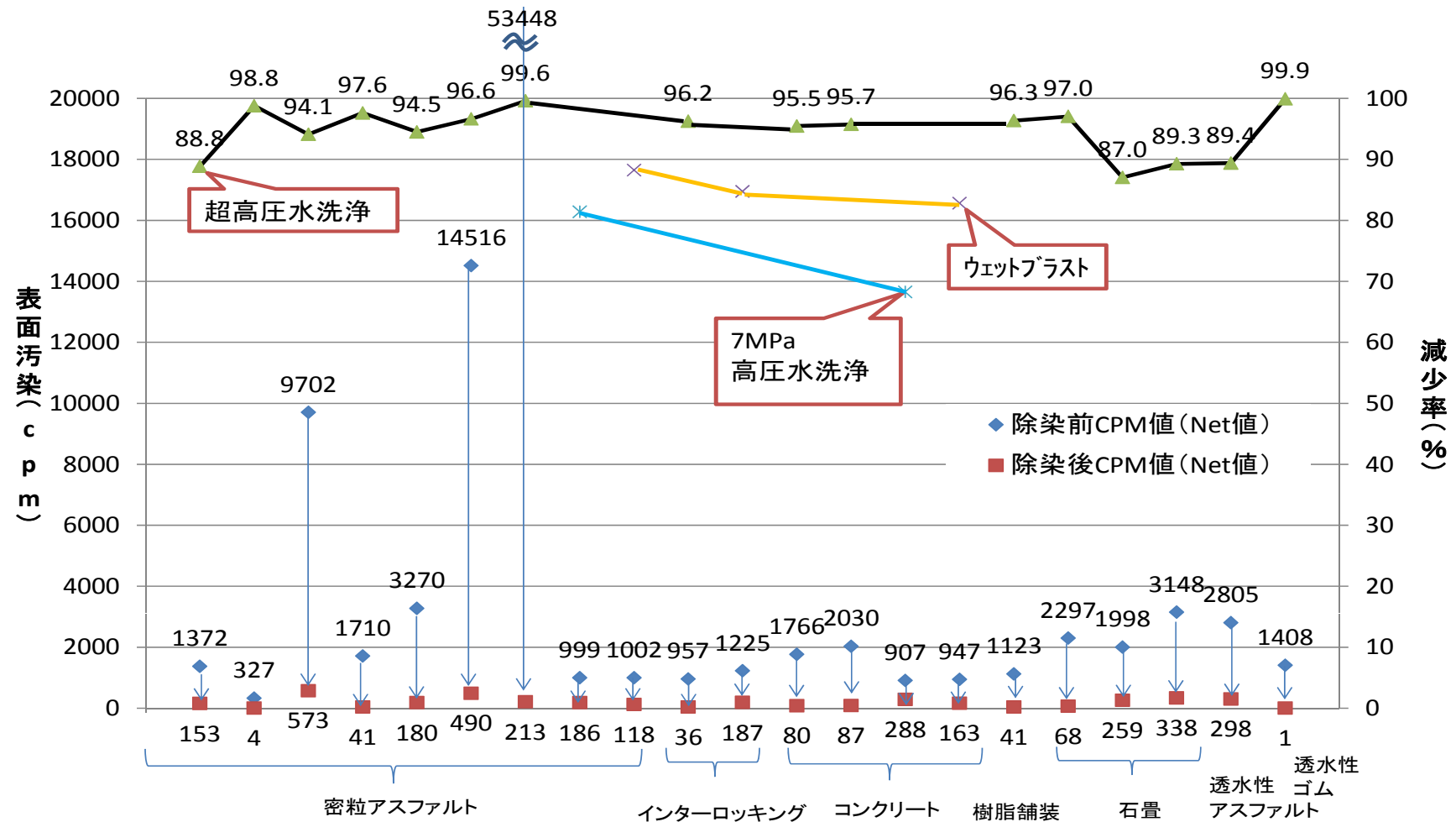


◎ウエットブラストでは、コンクリート、インターロッキング、アスファルトいずれの路面においても1㎡当たり約150秒で放射性物質の60～70%を除去可能。

◎回収した水・研磨剤等からの放射性物質の除去が可能。

# 超高压水とウェットブラストによる 除染効果の比較

付19



## 道路除染の適用範囲

超高压水洗浄は、舗装の種類に関係なく90%以上の効果。ウェットブラストは60%以上の効果。いずれも水は90%以上回収し、処理することで再利用可能。

## 成果

- 切削・剥離除染による建物の除染効果は約50%
- 特殊水による道路の除染効果は高圧水洗浄(7MPa)と同程度
- 超高圧水では、いずれの路面も150Mpa以上の圧力により、1時間あたり62m<sup>2</sup>で放射性物質の90%以上を除去可能。
- ウェットブラストでは、いずれの路面(透水性舗装を除く)においても1時間あたり24m<sup>2</sup>で放射性物質の60～70%を除去可能。

## 課題

- 建物屋根については、より高除染率化とバラツキを抑えた安定的な除染手法の開発が必要。
- 超高圧水洗浄、ウェットブラストはコストが課題。  
本格除染に適用するには、さらに効率化を図る必要がある。



- ✓環境中の水の中にはセシウムはイオンの形ではほとんど含まれていない。
- ✓各除染技術の中でも除染に伴う排水処理を必要とするものが複数存在。



## 吸着、凝集沈降を活用した水の浄化技術の提案

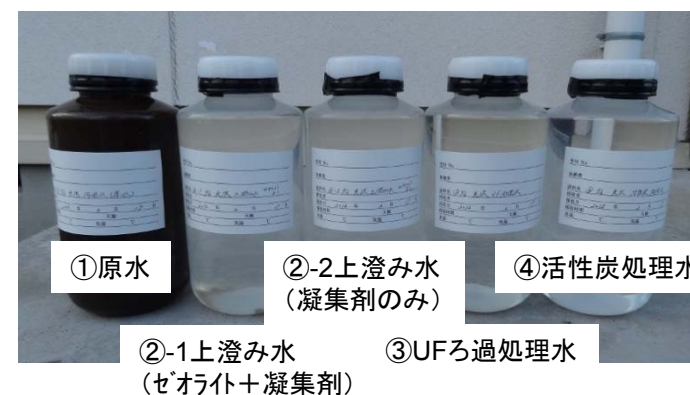
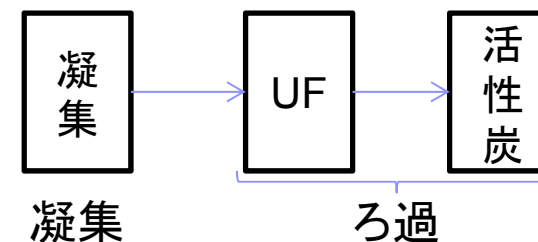
No.	事業者	特徴	捕集	水処理 (凝集・吸着)
19	前田建設工業(株)	ゼオライトブロック	○	—
20	東京工業大学	フェロシアン化鉄	—	○
2,3,4,5,6,9,13, 14,15,22,23	他技術で水処理を要するもの	凝集剤＋ゼオライト、凝集剤＋フィルタ等	—	○

# 水処理例

付22

## ● ゼオライトを利用した水処理 (超高圧水洗浄後の回収水) 《路面形態:密粒アスファルト》 検出限界値 (20Bq/L)

工程		セシウム (Cs134+137) (Bq/kg)
①	原水	17,290
②-1	上澄み水(ゼオライト+凝集剤)	29
②-2	上澄み水(凝集剤のみ)	57
③	UF(ウルトラフィルタ)ろ過処理水	25
④	活性炭処理水	N.D.



## ● フェロシアン化鉄を使用した水処理 (超高圧水洗浄後の回収水)



《プール》 検出限界値 (20Bq/L)

工程	原水 (Bq/L)	処理水 (Bq/L)
凝集剤+フェロシアン化鉄	1,116	N.D.
凝集剤のみ	1,116	N.D.

処理水の放射能濃度は検出限界値(約20Bq/L)以下を達成。  
ゼオライト、フェロシアン化鉄を使用しない場合も結果は同じであったことを確認。

## 成果

- 事前にビーカー試験でセシウム吸着剤の要否を確認すれば、セシウム吸着剤は利用しなくてもよい。
- 土壌洗浄などで濃縮された土壌を扱った水中にも100Bq/kgを超えるセシウムイオンは確認されなかった。
- 凝集作用と細微粒分(SS成分)を捕獲するろ過の組み合わせを推奨する。

## 課題

- 環境中の水処理においては、処理する水の性状確認を行うことが必要。

- ✓ 汚染された樹皮(バーク)が野積みとなっている。
- ✓ 加工前に洗浄し輸送等をスムーズに実施したい。



## 木材樹皮の洗浄を軸とした除染技術の提案

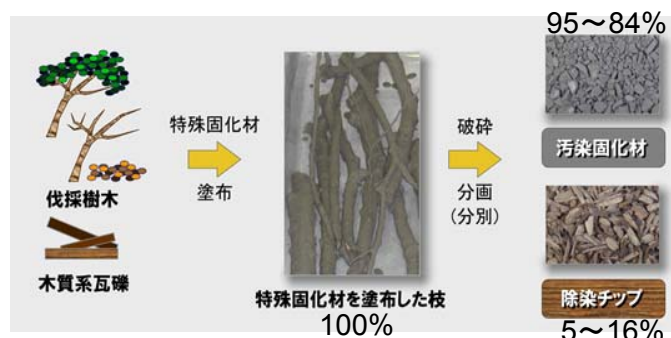
No.	事業者	特徴	洗浄	剥離	焼却
21	大成建設	セメント塗布	—	○	—
22	郡山チップ	樹皮(バーク)洗浄、小型焼却炉	○	—	○
23	ネオナイト	樹皮(丸太)高圧水洗浄	○	—	—

# 木材除染によるセシウム除去技術の比較

付25

No.	実施者 および除去技術	除染前Bq/kg	除染後Bq/kg	除染率%
21	大成建設(株) : 木質がれき等へのセメント塗布	8,320	1,373	84%
22	郡山チップ工業(株) : 樹皮(バーク※)の攪拌洗浄	703	432	39%
23	(株)ネオナイト : 木質がれき等の高圧水洗浄	28Bq/cm <sup>2</sup>	1.6Bq/cm <sup>2</sup>	94%

## ●木質がれきへのセメント塗布

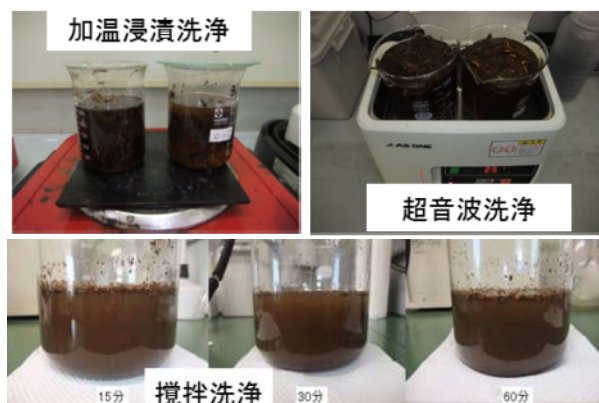


## ●木質がれき(丸太)の高圧水洗浄



	洗浄条件	表面汚染密度 (Bq/cm <sup>2</sup> )		洗浄率 (%)
		洗浄前	20分洗浄	
ナラ	80°C	28	1.6	94
ミズキ	80°C	27	1	96
スギ	80°C	4.3	0.8	81
クリ	80°C	0.5	0.09以下	82

## ●樹皮(バーク)※洗浄(攪拌洗浄等)



処理時間		458時間	1時間	1時間	1時間
その他の条件		室温	40~100°C	攪拌時間 15~60分	周波数 28~100kHz
除去率	常緑樹 約700Bq/kg	38%	—	39%	17~33%
	落葉樹 約2,000Bq/kg	20%	5~32%	45%	13~21%

※バーク: チップ等の生産過程で発生する樹皮。

## 成果

- 樹皮表面は水洗によって80%以上の洗浄効果が認められた。
- 小型焼却炉で大幅に減容できることを実証。  
但し、小型焼却炉は飛灰飛散防止のための圧力制御や排気にフィルタを取り付けるなどの対策が必要であることがわかった。

## 課題

- 樹皮(バーク)の再利用を進めるためには、試験結果の周知が必要。
- 今後、規模拡大と効率化が必要。

- ✓ 土壌除染: 80%以上の除染効果あり。本格除染では、適用範囲、設備、コストを見極めることで利用可能。
- ✓ 道路除染: 80%以上の除染効果あり。本格除染では、最適化を図り、コストを下げることで利用可能。
- ✓ 水処理: 高濃度に汚染した土壌を処理した水であっても100Bq/kg以下にする技術が複数あることを実証。セシウム吸着剤を使用せずとも、凝集作用とろ過の組み合わせで放射能濃度は十分低減可能。本格除染では、最適化を図ることで適用できる。
- ✓ 木材除染: 水洗により、樹皮(バーク)では30%以上、木質がれき(丸太)では80%以上の除染効果あり。飛灰飛散防止、排気フィルタ等の対策を行った小型焼却炉で高減容可能。

# 総合評価

付28

除染対象物	手法	No.	実施者	除染効果	設備投資	除去物量	コスト	評価	
土壌	熱処理	1	太平洋セメント(株)	高	必要	極少	高	コスト低減。放射性Csの高濃縮除去物の取扱い。	
	分級	2	ロート製薬(株)	中	既設有	少	中	特殊ポンプ、篩機の除染データの蓄積が必要。	
		3	(株)竹中工務店	中	必要	中	低	80%程度の除染効果あり、除染現場での適用性あり。	
		4	(株)熊谷組	中	必要	中	低	高濃度汚染土壌の場合、減量率低い。	
		5	(株)日立プラントテクノロジー	低	必要	中	低	分級による除染効果あり。熱処理は効果なし。	
		6	(株)鴻池組	中	必要	中	低	80%程度の除染効果あり、除染現場での適用性あり。	
		7	佐藤工業(株)	中	必要	中	中	80%程度の除染効果あり、除染現場での適用性あり。	
	化学処理	8	(株)東芝	中	既設有	極少	高	コスト低減。	
下水汚泥	溶出	9	新日鉄エンジニアリング(株)	低	必要	中	評価不能	溶出効果のデータ蓄積が必要。	
公園・道路・建物	切削・剥離	10	志賀塗装(株)	中	不要	少	低	50%程度の除染効果あり、即適用可。	
	特殊水洗浄	11	京都大学	低	必要	少	高	水道水と同程度の除染効果。	
		12	ネイチャーズ(株)	低	必要	少	高	高圧水洗浄と同程度。作業者の安全対策必要。	
	高圧水洗浄	13	(株)キクテック	高	既設有	少	中	様々な舗装面で90%以上の除染効果、即適用可。	
	研削・剥離	14	マコー(株)	中	既設有	少	中	様々な舗装面で80%以上の除染効果、即適用可。	
瓦礫	洗浄	15	戸田建設(株)	中	必要	少	中	研磨による除去物減少のための最適化必要。	
		16	環テックス(株)	低	必要	中	中	除染効果低いが水処理量削減が可。	
植物・牛糞減容	堆肥化	17	(独)宇宙航空研究開発機構	-	必要	評価不能	評価不能	堆肥化のデータ蓄積が必要。	
		18	日本ミクニヤ(株)	-	必要	中	中	春夏植物でのデータ蓄積が必要。	
水	捕集	19	前田建設工業(株)	低	必要	中	中	ブロックの最適化が必要。	
	吸着・凝集	20	東京工業大学	高	既設有	少	中	シアン化物処理が課題だが、即適用可。	
森林・木材	固化剥離	21	大成建設(株)	低	不要	多	高	ブラシ水洗と同程度の除染効果。コスト低減。	
	洗浄	22	郡山チップ工業(株)	中	既設有	少	中	バークの洗浄除染、焼却減容を実証し即適用可。	
		23	(株)ネオナイト	中	既設有	少	低	木材の種類データの蓄積が必要。水処理即適用可。	
	間伐有	24	福島県林業研究センター	- (知見を得る試験のため)					森林除染における放射線等の基礎データを取得。
	間伐無	25	(株)大林組	-	既設有	-	中	土工材料、アスファルト除去試験では効率化必要。	

※ 除染効果、設備投資、除去物、コスト、評価については、同分野の技術の相対評価。  
 ※ 今後、技術の進展等により評価は変わり得る。

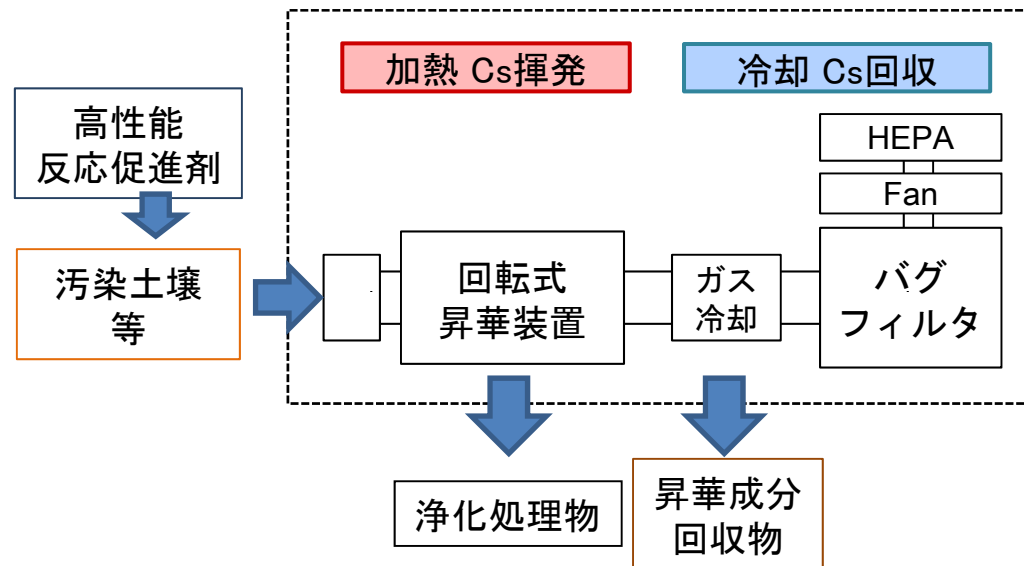


平成23年度  
「除染技術実証試験事業」  
各案件の概要

### 事業の概要

放射性セシウムを含む土壌等に高性能反応促進材を添加して加熱し、セシウムを昇華させて冷却回収することにより、除染で生じた除去物(汚染土壌)よりセシウムを熱処理により効率よく昇華させて分離し、クリアランスレベル(100Bq/kg)以下とすることを目的とする。

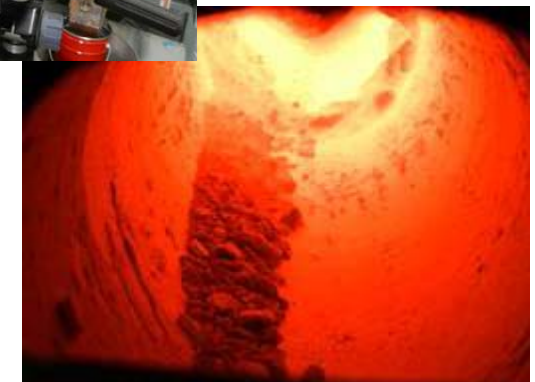
### 実施内容



- ラボ試験にてセシウムの最適昇華条件を把握する。
- フィールド試験にて、クリアランスレベル以下への浄化を確認する。
- 排気の放射能濃度を確認する。

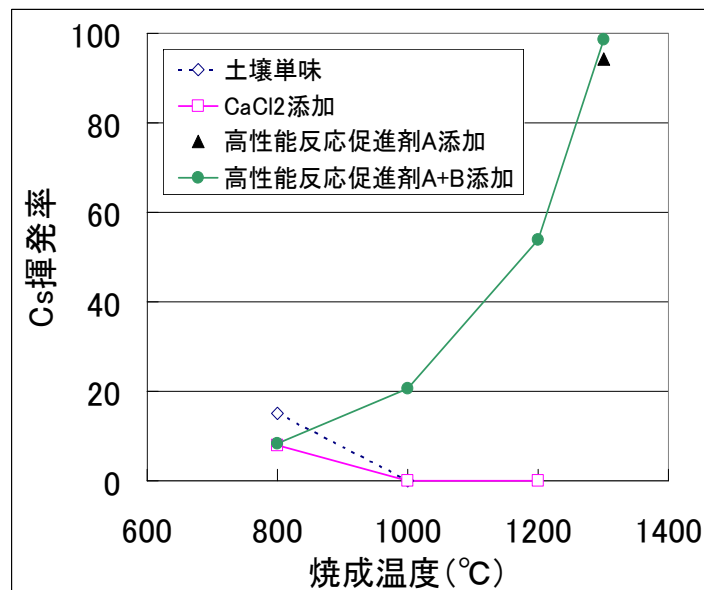


回転式昇華装置



昇華装置内部

●高性能反応促進剤の効果



- セシウムを吸着した土壌単味の揮発率は低い。また、塩化物を添加した場合でも揮発率は低い。
- 無機系の高性能反応促進剤を添加するとセシウムの揮発率が大幅に向上。



浄化処理物

●回転式昇華装置による処理の結果

汚染土壌を、1300°Cで毎時2kgの速度で加熱処理した結果。

	浄化前土壌 (Bq/kg)			浄化処理物 (Bq/kg)			除去率 (%)
	Cs134	Cs137	合計	Cs134	Cs137	合計	
汚染土壌①	27,100	28,900	56,000	<26	19	<45	99.9<
汚染土壌②	33,000	34,300	67,300	<17	29	<46	99.9<

- 約60,000Bq/kgの汚染土壌を100Bq/kg以下(除去率99.9%以上)にすることができた。
- 昇華したセシウムはバグフィルタにて十分捕集でき、フィルター出口の排ガス中セシウム濃度は検出限界(0.1Bq/m<sup>3</sup>)以下であった。

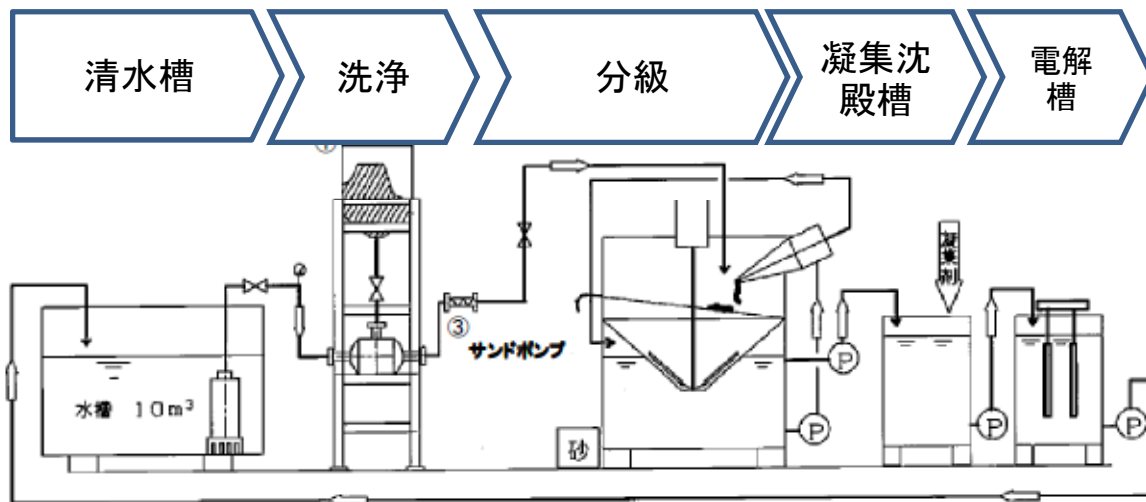
汚染土壌中のセシウムは良く揮発し、目標である100 Bq/kg以下を達成した。

事業の概要

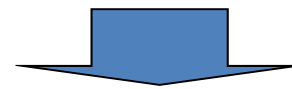
特殊(BAT: Blend Air Tornado)ポンプと分級機から構成される土壌洗浄システムにより、土壌の洗浄を行う。粘土分を含む濁水は、凝集沈殿処理を行い、粘土分と処理された水とに分ける。

実施内容

- BATポンプに汚染土壌と水を吸い込み、砂・鉱物等を混合衝突させることによって汚染物質を剥離する。
- 分級により、砂、粘土を分別する。また、粘土質は凝集剤等により分離する。
- 除染で利用した水を凝集沈殿等により処理し検出限界以下とする。



- ①BATポンプのマイクロバブルで洗浄
- ②篩機のサイクロンで洗浄し、篩で分級
- ③凝集沈殿
- ④電解槽によりセシウムを吸着
- ⑤再利用



サンドミキサーの距離を変更することでマイクロバブル洗浄効果を高める



表. 土壌の洗浄率

サンドミキサー長さ※1	原土 (Bq/kg)	砂65-185 $\mu$ m (Bq/kg)	粘土 (Bq/kg)	洗浄率(%)
400mm	15,309	330	83,738	98
800mm		387	84,875	97
1200mm		377	57,978	98
BS※2 1200mm		343	65,647	98

※1 サンドミキサーの長さを変更することで、マイクロバブル接触時間が変更することによる洗浄効果を確認。

※2 セシウム吸着促進鉱物(モンモリナイトを主成分とする黒鉛珪石配合粘土)を添加

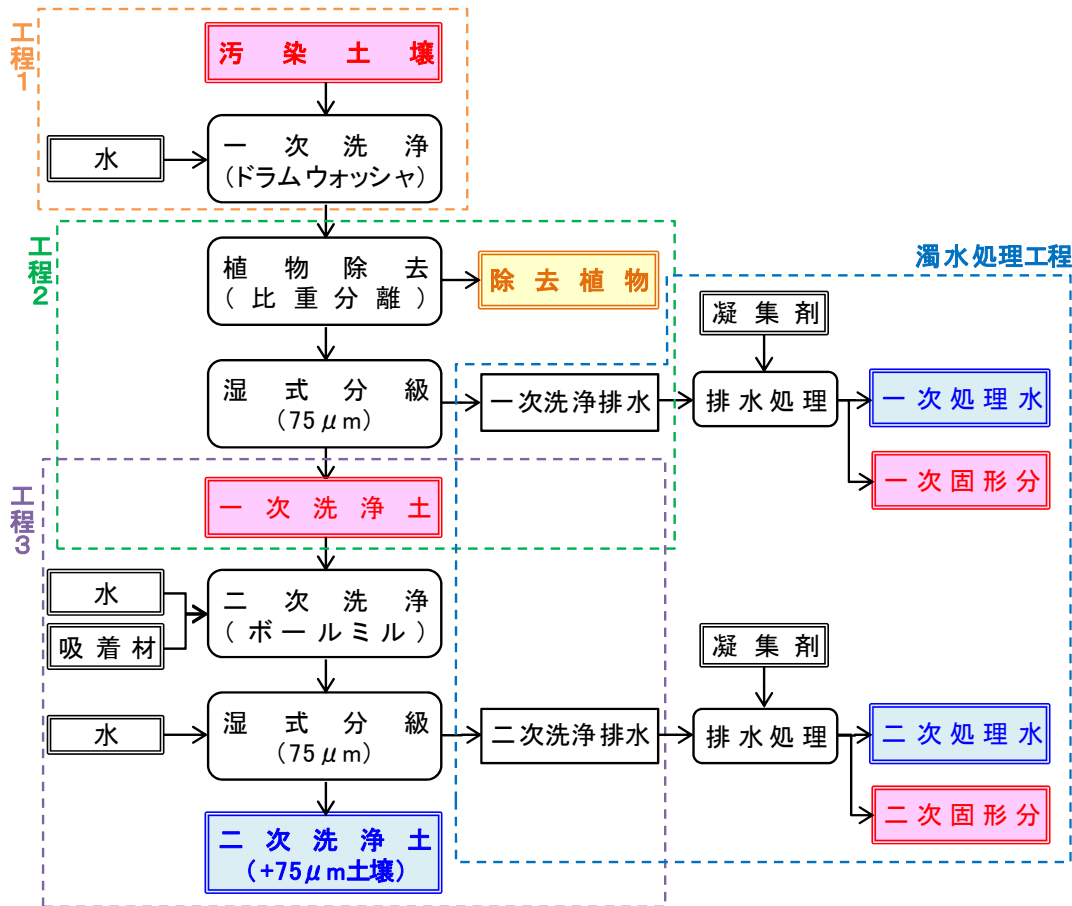
- サンドミキサーの長さ変更により土壌とマイクロバブルの接触時間を変えた範囲では、洗浄効果に差異は見られなかった。
- 洗浄におけるセシウム吸着促進鉱物の添加では、洗浄効果に変化はなかった。
- 水処理では、凝集沈殿で水は検出限界未満となり、電解槽でのセシウム吸着による効果の検証に至らなかった。

- BATポンプによる洗浄効果と、篩機(サイクロン)による粒子の衝突・分級効果により、洗浄率は97%以上であった。水処理では沈殿槽のみで十分処理でき、電解槽は不要であった。
- 分級処理後の砂65  $\mu$  m~185  $\mu$  mの土壌の放射能濃度は原土に比べて大きく低下することが確認されたが、試験データの蓄積により洗浄効果に効くプロセスの分析・評価が必要。

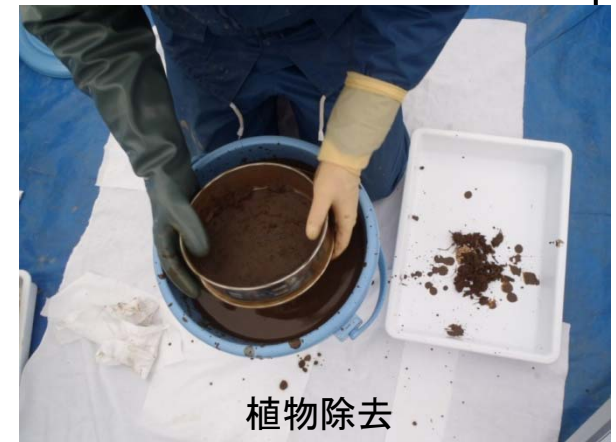
事業の目的

多段階に分級や洗浄系を設けることにより、植物が混入した土壌を洗浄し、放射性セシウムを分離することで除去物を減容化する。

実施内容



土壌洗浄処理装置



植物除去

- 多段階土壌洗浄処理方法において、植物除去工程及び二次洗浄工程の条件を判断する。
- 異なる汚染土壌を処理して本技術の適用範囲を判断する。

表. 放射能濃度(134Csと137Csを対象)の分析結果と濃度低減率

	土壌A	土壌B	土壌C	土壌D
	Cs濃度 (Bq/kg)	Cs濃度 (Bq/kg)	Cs濃度 (Bq/kg)	Cs濃度 (Bq/kg)
(1)原 土	12000	9200	12500	5400
工程1～2	洗浄＋植物除去			
(2)植 物	30000	7700	6100	24000
一次洗浄土	2800	2110	4500	1880
濃度低減率* <sup>2</sup>	76.7%	77.1%	64.0%	65.2%
濁水処理後の一次洗浄排水	不検出* <sup>1</sup>	不検出* <sup>1</sup>	不検出* <sup>1</sup>	不検出* <sup>1</sup>
工程3	磨砕＋吸着			
(3)二次洗浄土	1300	1400	3300	1110
濃度低減率* <sup>2</sup>	89.2%	84.8%	73.6%	79.4%
濁水処理後の二次洗浄排水	不検出* <sup>1</sup>	不検出* <sup>1</sup>	不検出* <sup>1</sup>	不検出* <sup>1</sup>
(4)仕上げ洗浄土	仕上げ洗浄(すすぎ洗い)			
濃度低減率* <sup>2</sup>	94.4%	89.9%	77.6%	83.9%

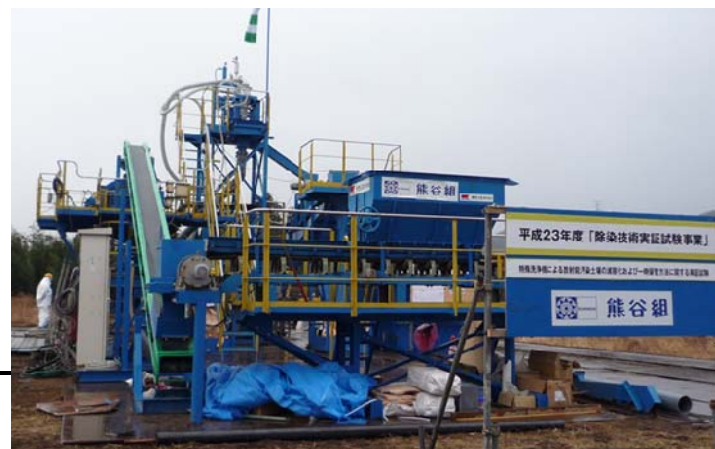
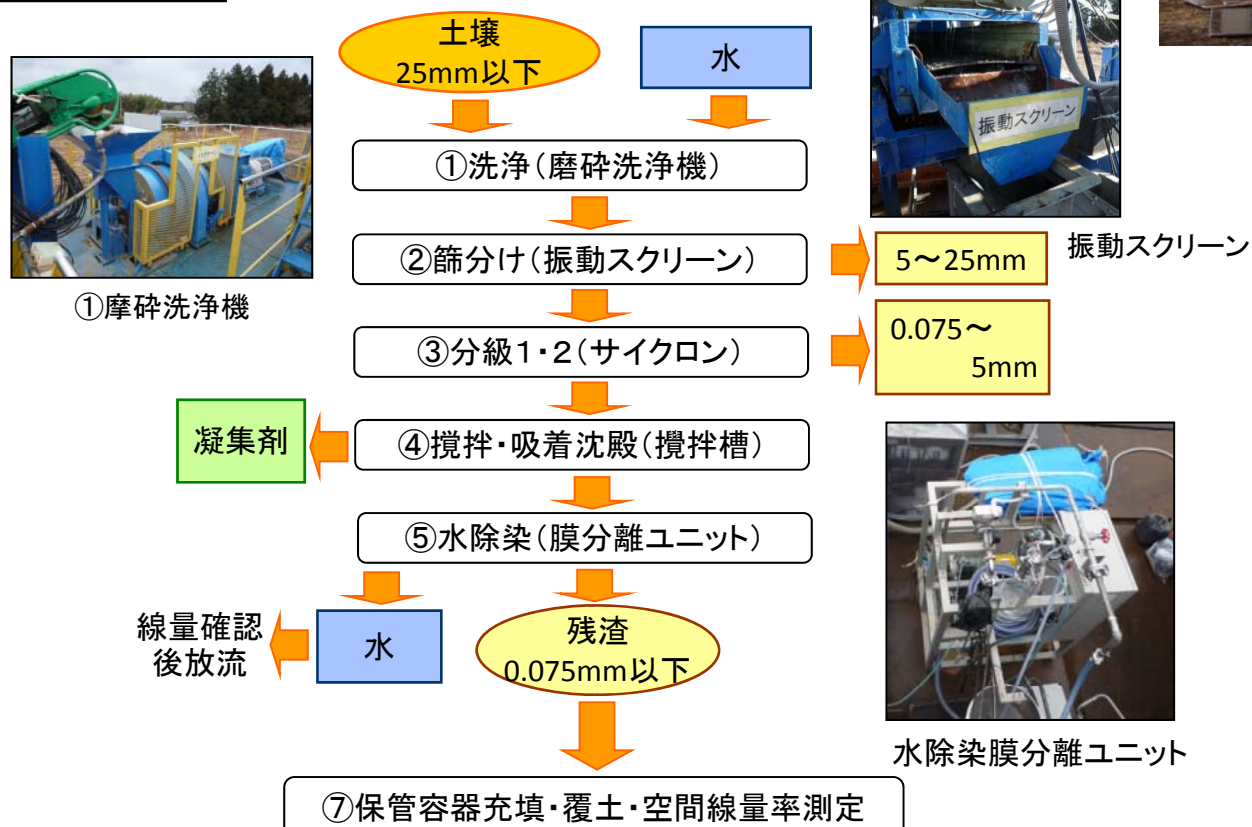
- 植物除去および一次洗浄により放射能濃度は約71%低減。
- 二次洗浄(磨砕処理)、仕上げ洗浄により、放射能濃度はさらに低減。
- 凝集処理後の排水濃度は「不検出」

\*1: 検出限界値は約10Bq/L、\*2: 原土に対するCs濃度の低減率(%)。

事業の目的

特殊土壌洗浄システム(SRS)を用い、土壌を洗浄・分級することにより、粘土に付着している放射性セシウムを分離し、除去物を減容化する。また、減容化後の高濃度汚染土壌の保管方法について検証する。

実施内容



特殊土壌洗浄システム(SRS)

- SRSとセシウム除去のための水処理施設を組み合わせたシステムにより汚染土壌を洗浄・分級し、分級レベルごとに洗浄効果を確認する。
- 粘性土主体の高濃度汚染土壌の保管について、コンクリート製容器と覆土方法の条件の組み合わせと空間線量率を把握・検証する。



# 結果

付37

## ●放射能濃度と減容化

試料No. (採取場所の空間線量率)	分級レベル	乾燥状態の放射能濃度 (Bq/kg)	除染率 (%)	粒径0.075mm以下放射能濃度割合 (%)
5-1 (5 μ Sv/h)	未洗浄	19,700		87.4
	5mm以上	663	96.6	
	0.075~5mm	3,553	82.0	
	0.075以下	228,333	—	
10-1 (10 μ Sv/h)	未洗浄	106,333		94.1
	5mm以上	5,760	94.6	
	0.075~5mm	7,317	93.1	
	0.075以下	363,000	—	



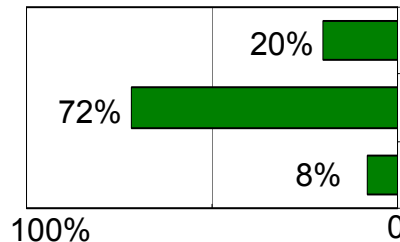
No.5-1 洗浄・分級後の試料



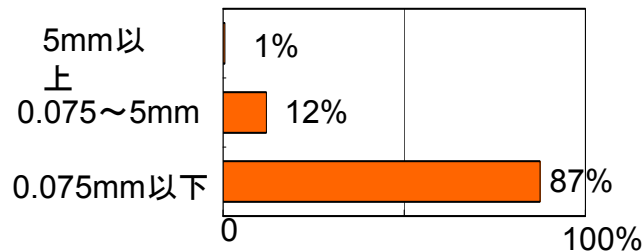
No.10-1 洗浄・分級後の試料

左から未洗浄、粒径5mm、粒径0.075~5mm、粒径0.075mm以下

分級後土壌量割合 (%)



分級後放射能残留割合 (%)



減容化と放射能濃度(試料No.5-1の場合)

## ●保管方法の検討



厚 6cm容器 : 遮へい率 75%~80%  
 厚10cm容器 : 遮へい率 85%~90%  
 厚15cm容器 : 遮へい断率 95%程度

- ◎ 放射能濃度が100,000Bq/kg程度の土壌では、特殊土壌洗浄システムにより洗浄・分級処理することで高放射能濃度の微粒子(粒径0.075mm以下)と粗粒子(粒径0.075mm以上)に分別することができた。
- ◎ 土壌の洗浄効果は、汚染濃度によって異なる傾向がみられる。

# 土壌分級及び熱処理による汚染土壌減容化システムと 汚染水処理システムの実証

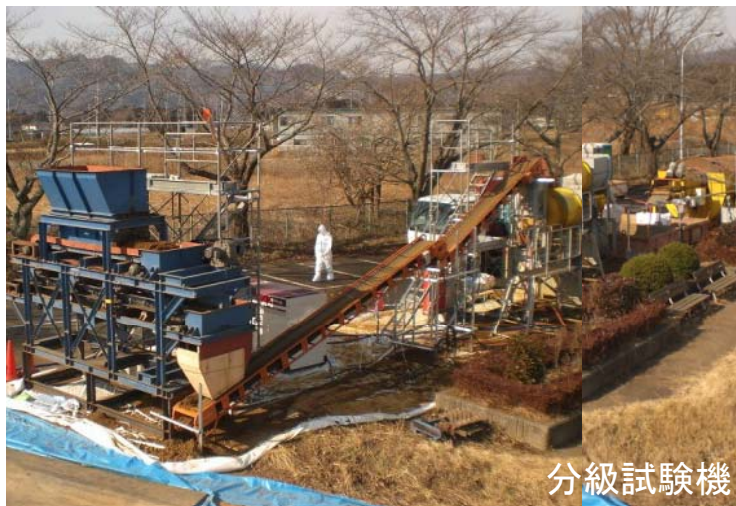
付録2-5

付38

受託者:(株)日立プラントテクノロジー

## 事業の目的

汚染土壌を分級し、分級後の土壌の水洗浄や加熱により放射性セシウム(Cs)の分離性能を確認し、さらに水処理設備による汚染物質の分離性能と減容化性能を確認する。

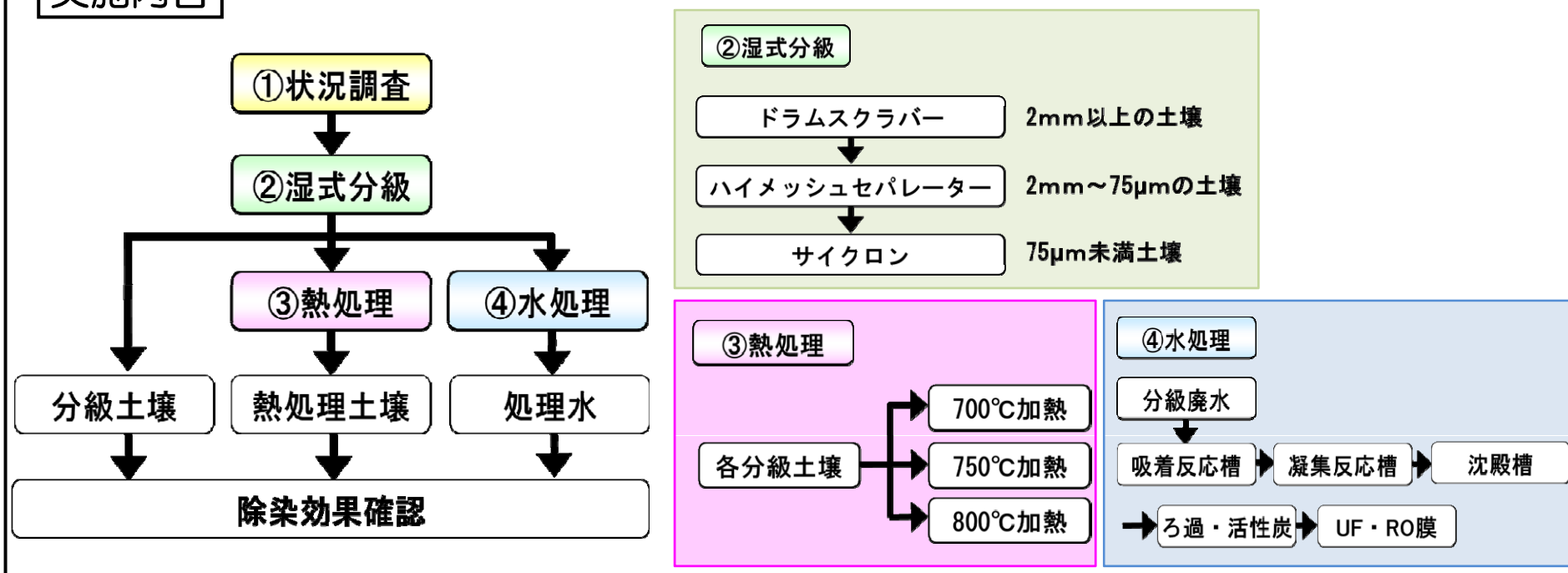


分級試験機

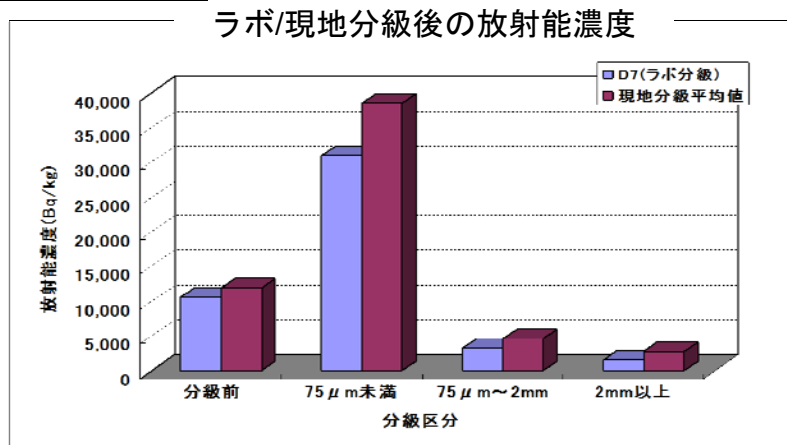


水処理試験機

## 実施内容

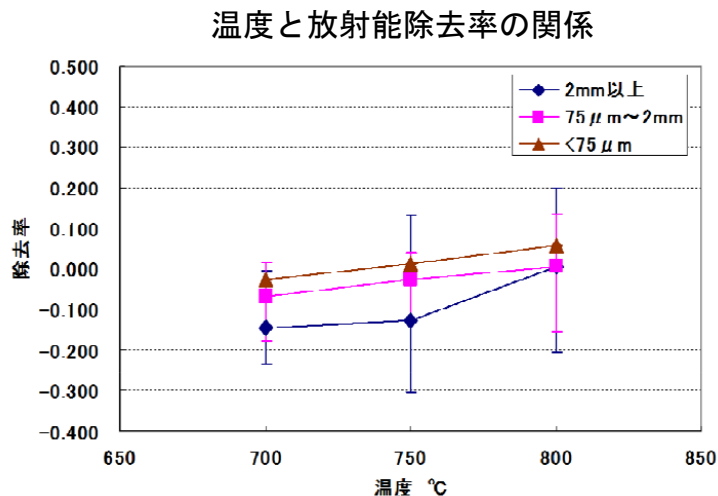


●湿式分級



- 分級後75 μ m未満の土壌の放射能濃度は圧倒的に高い。
- 現地分級試験では、
  - ・75 μ m未満の土壌: 約40000Bq/kg
  - ・75~2000 μ mの土壌: 60%の低減率
  - ・2000 μ m以上の土壌: 77%の低減率

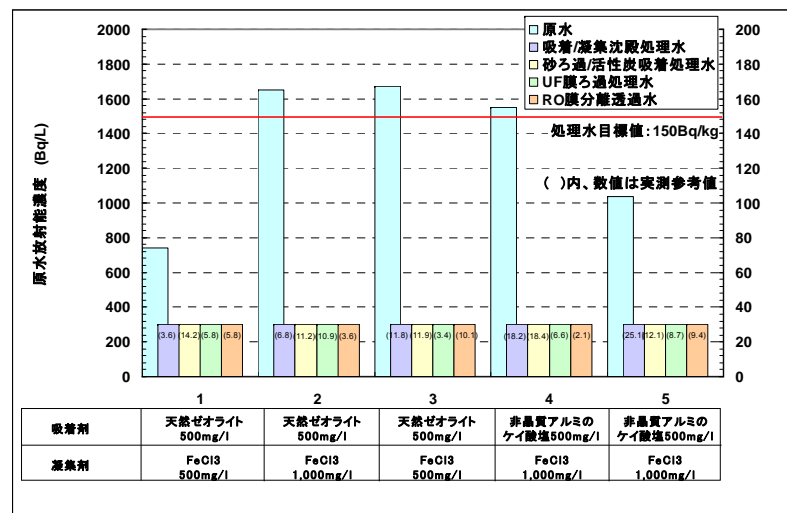
●熱処理



- 800°C、750°C、700°Cのいずれの温度でも除去率はほぼゼロと変化はなく、Csの除去は確認されなかった。

●水処理

図. 水処理各工程における放射能濃度



吸着剤	天然ゼオライト 500mg/l	天然ゼオライト 500mg/l	天然ゼオライト 500mg/l	非晶質アルミのケイ酸塩500mg/l	非晶質アルミのケイ酸塩500mg/l
凝集剤	FeCl3 500mg/l	FeCl3 1,000mg/l	FeCl3 500mg/l	FeCl3 1,000mg/l	FeCl3 1,000mg/l

- 粒径75 μ m未満の土壌が混在する泥水(約700~1600Bq/Kg)を水処理した結果、吸着+凝集沈殿によって定量下限値(30Bq/L)以下となった。

付録2-6 湿式分級に表面研磨を付加した土壤洗浄処理技術による  
放射能汚染土壤の減容化

受託者:(株)鴻池組

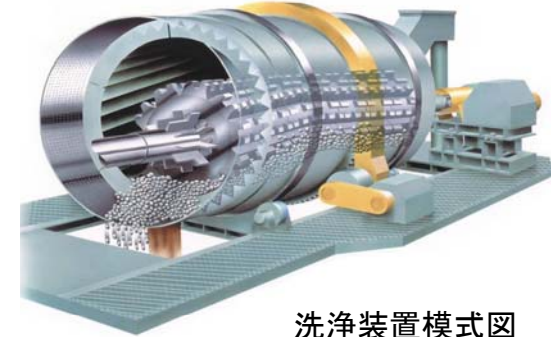
付40

事業の概要

表面研磨が可能な土壤洗浄設備により、除染で発生する汚染土壤を洗浄処理し、浄化土壤と放射性セシウムが濃縮した少量の脱水ケーキに分離する。浄化土壤は再利用し、脱水ケーキは汚染物として仮置き場や一時保管設備などで保管・管理する。汚染土壤をそのまま保管する場合に比べ、コストおよび保管容量の削減ができる。



ロータリー式土壤洗浄機



洗浄装置模式図

実施内容

福島県内に設ける試験場に土壤洗浄試験設備を設置し、現地の数種類の土壤を用いた実証試験を実施。提案する土壤洗浄処理の洗浄効果を検証する。

項目	内容	分析試料
①試料調整	概ね10,000Bq/kg以上となるように土壤を採取・均質化する	原土壤
②1次洗浄 (分級洗浄)	ロータリー洗浄機を用いて土壤をスラリー化した後、分級機で細粒分を除去	一次洗浄土
③二次洗浄 (>5mm)	5mm以上のレキをロータリー洗浄機で研磨洗浄し5mm以上を回収	二次洗浄土 (>5mm)
④二次洗浄 (≤5mm)	残りのレキと砂を、キャビテーションジェット洗浄機で洗浄	二次洗浄土 (≤5mm)
⑤水処理	洗浄後の濁水を凝集沈殿処理装置で浄化	原水 処理水
⑥脱水ケーキ 作成	スラッジを、小型フィルタープレスにかけて脱水ケーキを得る	脱水ケーキ



小型土壤分離装置



キャビテーションジェット装置



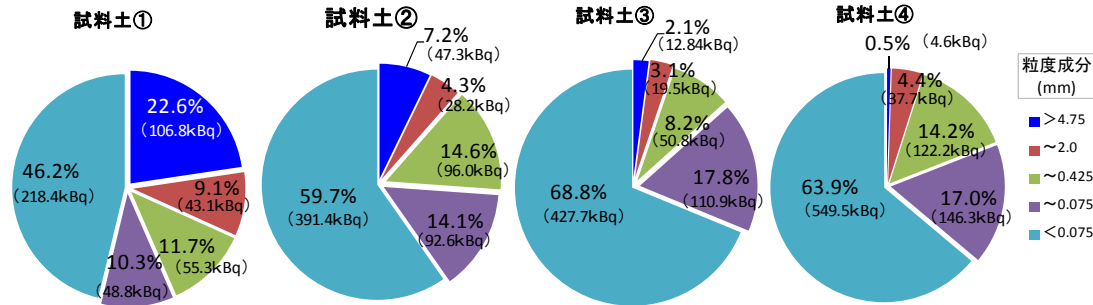
水処理装置



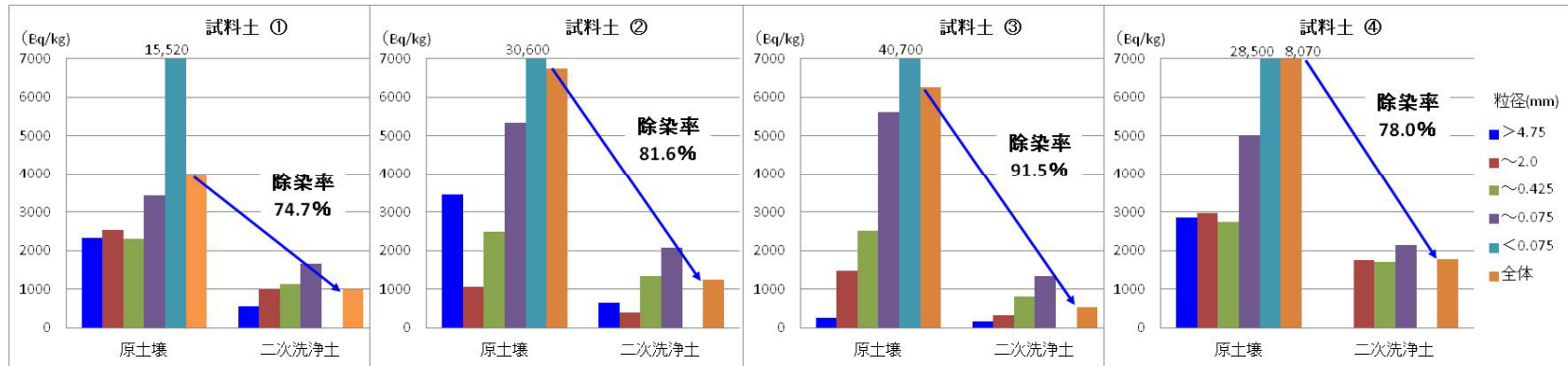
小型フィルタープレス

# 結果

## ●分級・洗浄による放射能濃度の低減効果



原土壌の粒度成分毎に含まれる放射性セシウムの相対比率



二次洗浄後の粒度成分毎に含まれる放射性セシウム濃度の変化

## ●減容化効果の検証

### 減容化効果の検証

	媒体	種別	単位	試料土①	試料土②	試料土③	試料土④	備考
減容化なし	保管容積		L	75.47	73.17	70.59	73.46	
減容化後 (計算)	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%

- ① レキ・砂分(粒度0.075mm以上)には土壤中の放射性セシウムの30%以上が含まれるため、これらの**研磨洗浄は有効**。研磨洗浄により、**レキ・砂分の放射性セシウムを約50%除去**できた。
- ② **分級・洗浄により土壤容積は40~50%程度減容化**することができ、**脱水ケーキの締固めにより、70%程度減容化**することが可能。

## 事業の概要

放射性物質が付着した土壤の水洗浄による除染・減容化技術の適用性を確認する。また、除染・減容化技術の概要と除染効率、さらに、洗浄により発生した濁水の処理・再利用技術とその効果を確認する。



マイクロバブル  
渦崩壊洗浄装置

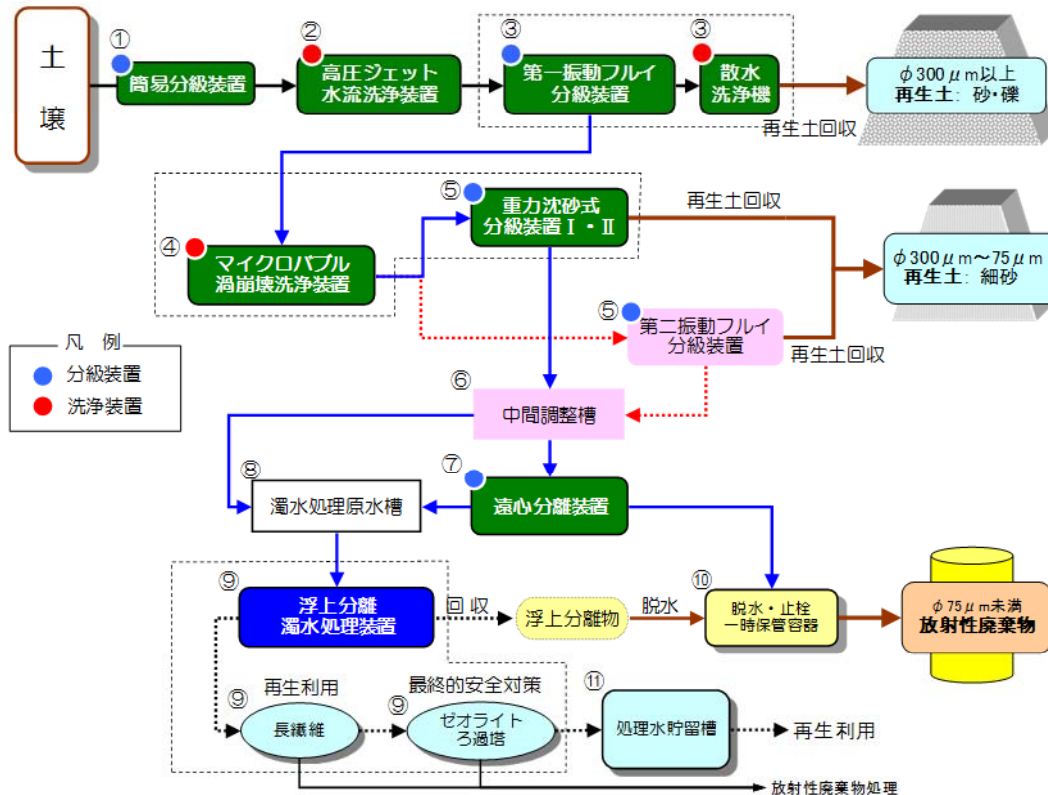


試験装置全景



浮上分離濁水処理装置

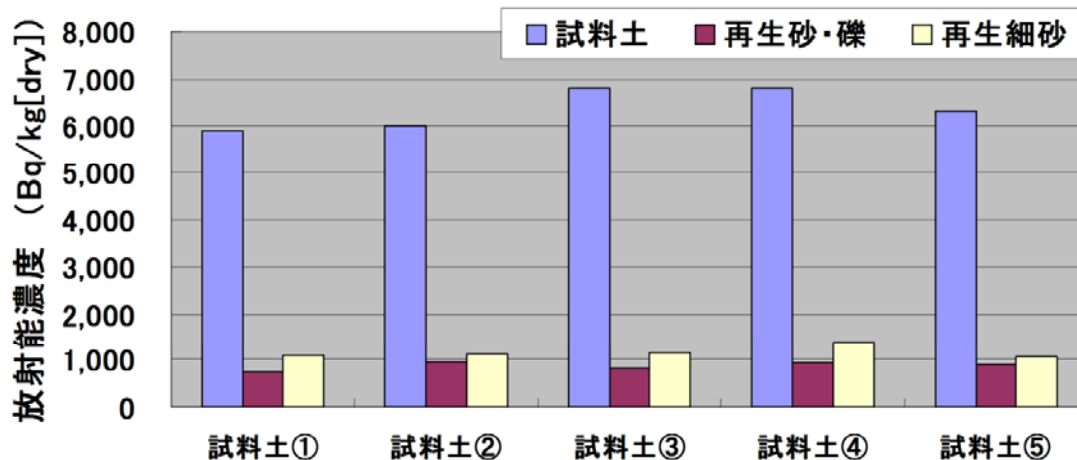
## 実施内容



小規模で機動力のある「高圧ジェット水流洗浄装置」や「マイクロバブル渦崩壊洗浄装置」「浮上分離濁水処理装置」により、放射性物質を分離する。

- ① 除染で発生する放射性廃棄物(土壤)を減容化する。
- ② 放射性物質が含まれる分級(粒度)区分の検証と含有量を把握する。
- ③ 洗浄により発生した放射性物質を含む水の処理技術を実証する。

## 2種類の洗浄装置による洗浄効果



試料土および洗浄後の再生砂等の放射能濃度  
(再生砂・礫: 粒径300μm以上、再生細砂: 粒径75~300μm)



試料土



再生土-砂礫  
(φ 300 μ m以上)



再生土-砂  
(φ 300~75 μ m以上)

高圧ジェット水流洗浄装置で洗浄後分級されたもの  
マイクロバブル渦崩壊洗浄装置で洗浄後分級されたもの

## 浮上分離濁水処理効果



濁水 SS: 50~100mg/L  
放射能濃度: 1~5 Bq/L



浮上分離後 SS: 20~30mg/L  
放射能濃度: 1Bq/L未満



浮上分離物  
放射能濃度: 22800Bq/kg

○高圧ジェット水流洗浄装置、マイクロバブル渦崩壊洗浄装置による洗浄により、土壌の放射能濃度を平均88%低減。

除染率: 再生砂・砂礫: 84~87%  
再生細砂: 76~81%

○浮上分離処理装置による濁水処理により、処理水の放射能濃度は検出限界以下(1Bq/L)を達成。

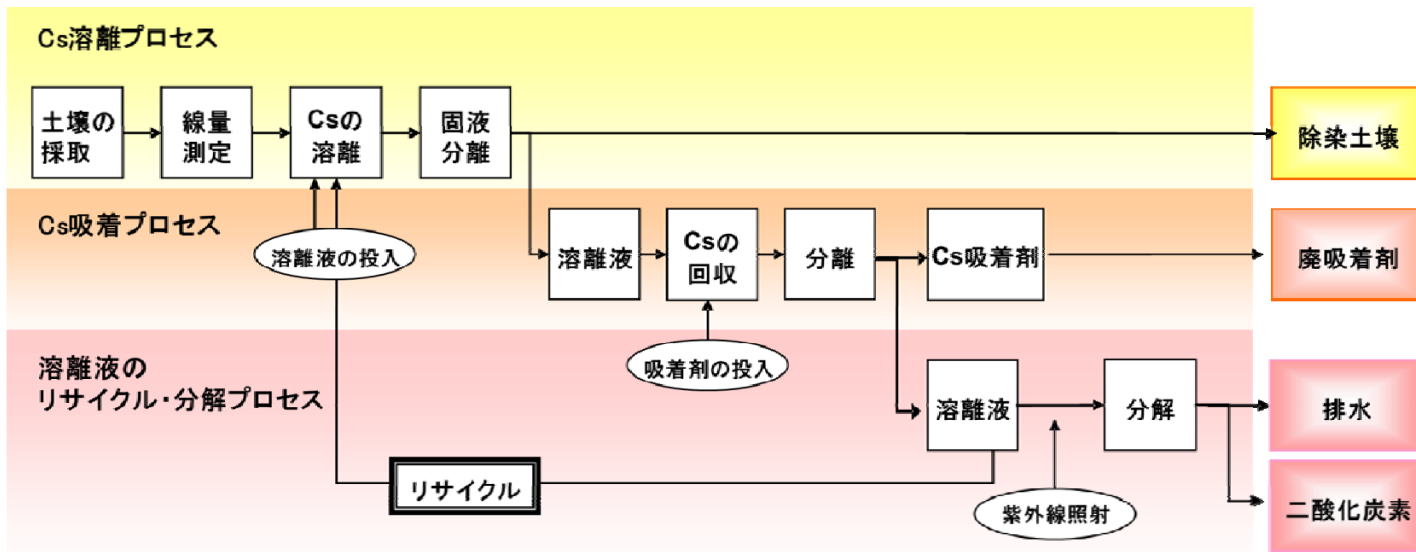
事業の概要

大量発生が予想される汚染土壌に対し、簡便で効率的な除染システム的确立に必要な技術を開発するため、有機酸によるセシウムの溶離・回収を検討する。

実施内容

常圧処理による安全・簡易な手法として、有機酸であるシュウ酸による、汚染土壌からのセシウム溶離および溶離液のリサイクル・分解の効果を確認する。

- ① ラボ試験：実験用土壌による効果の確認
- ② 実証試験：福島県で採取した汚染土壌による実証



土壌からセシウム除去フロー



セシウム溶離試験の状況

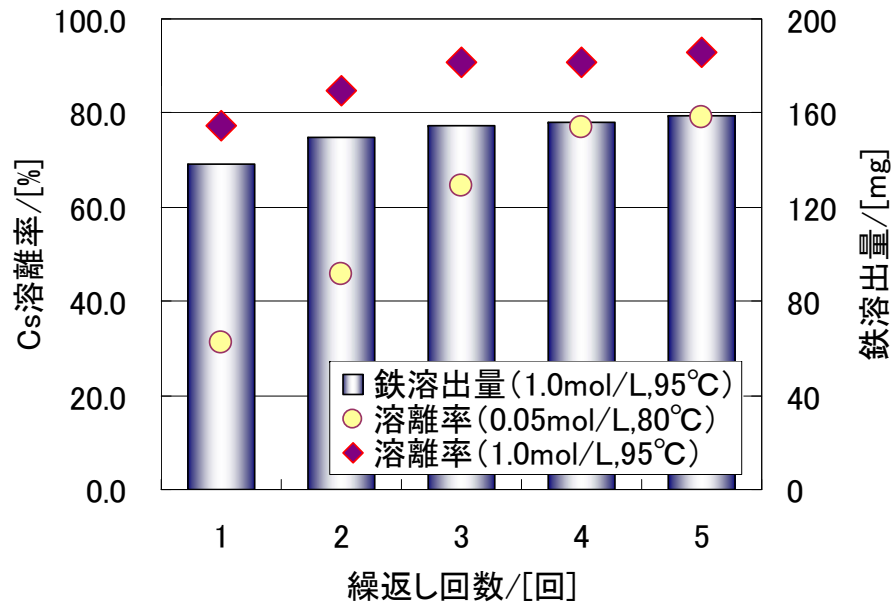


# 結果

## ●シュウ酸によるセシウムの溶離処理

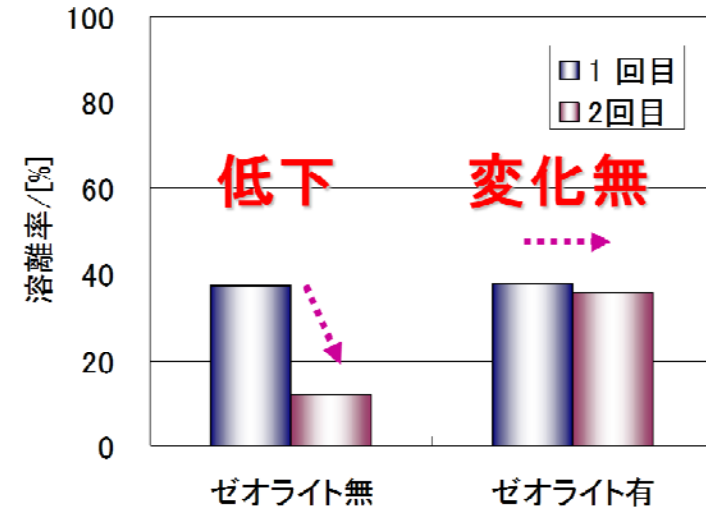


処理前 約5000Bq/kg 処理後 約450Bq/kg 処理前後の溶離液

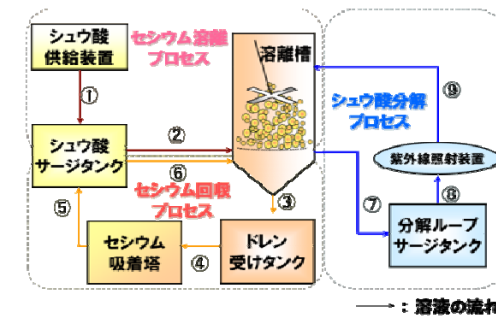


土壌からのセシウム溶離率は93%。  
(条件: 1.0mol/Lシュウ酸、処理温度95°C、繰り返し回数5回)

## ●溶離液のリサイクル



ゼオライトを用いて溶離したセシウムを回収すれば、シュウ酸が浄化され、繰り返し利用が可能。



## 土壌からのCs回収システム(概念設計)

基本設計条件で、処理容量5トン/日の処理装置の概念設計を実施した。

事業の概要

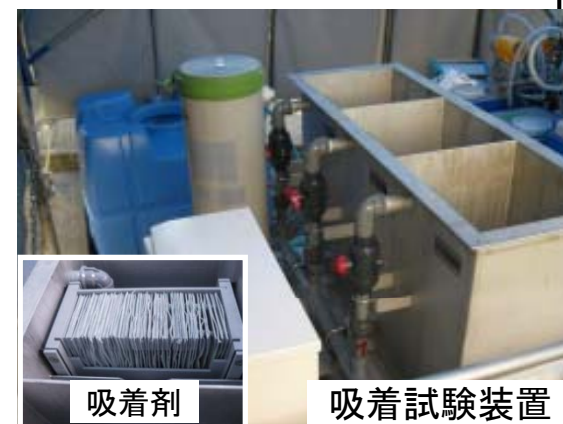
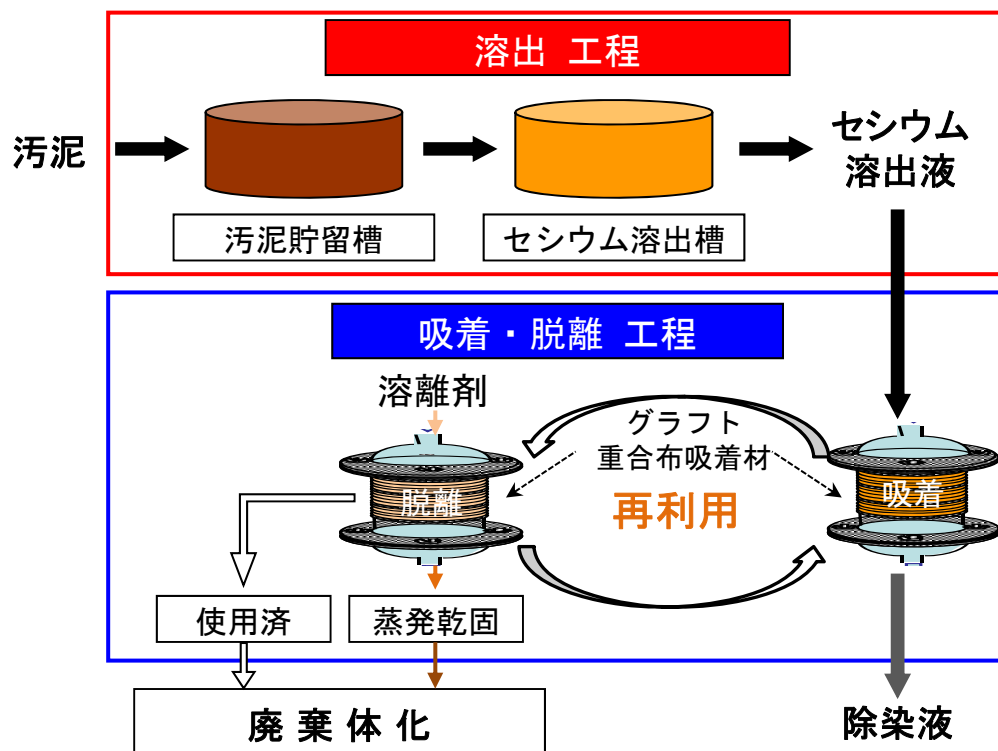
放射性セシウム(Cs)を含む下水処理施設の汚泥等から、汚泥可溶化剤(酸またはアルカリ溶液)を使用してCsを溶出し、特殊な吸着材で吸着回収する。

吸着したCsを溶離剤により脱着させることで、吸着剤の再利用を図る。



溶出試験装置

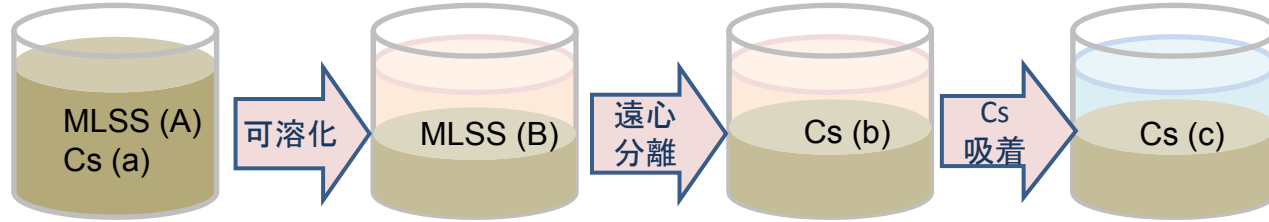
実施内容



吸着剤

吸着試験装置

- テーブルテストにより、下水汚泥からCsの溶出方法の検討、溶出液からのCs吸着特性把握等の評価を行う。
- 下水処理施設より発生する汚泥を、試験装置により処理を行い、除染効果等の評価を行う。



A : 原汚泥のMLSS  
a : 原汚泥のCs濃度

B : 汚泥溶解液  
のMLSS

b : 汚泥溶解液の  
溶解性Cs濃度

c : 吸着後の溶解  
性Cs濃度

汚泥可溶化およびCs溶出率、吸着率の結果

表1. 汚泥減容率

可溶化試験	原汚泥のMLSS (A)mg/L	汚泥溶解後のMLSS (B)mg/L	汚泥減容率 (A-B)/A × 100
テーブルテスト (模擬汚泥+安定性Cs)	10100	920	91 %
実証試験 (汚染汚泥)	39000	19000	50 %

表2. Cs溶出率

溶出試験	原汚泥のCs濃度(a)	汚泥溶解液の溶解性Cs濃度(b)	Cs溶出率 b/a × 100
テーブルテスト (模擬汚泥+安定性Cs)	130µg/L	120µg/L	92 %
実証試験 (汚染汚泥)	16Bq/kg	11Bq/kg	69%

表3. Cs吸着率

吸着試験	吸着前濃度 b	吸着後濃度 c	吸着率 (b-c)/b × 100
テーブルテスト (模擬汚泥+安定性Cs)	90µg/L	50µg/L	44 %
実証試験 (汚染汚泥)	11Bq/kg	< 5Bq/kg	> 55%

MLSS: Mixed Liquor Suspended Solidsの略。活性汚泥法のばっき槽内混合液中の浮遊物量 (mg/L) をいう。この浮遊物にあたるのが汚泥であり、汚泥が可溶化されるとMLSSの値が低くなる。このことから、MLSSの変化から汚泥の増減を把握できる。

- 汚泥可溶化剤による汚泥可溶化により、汚染汚泥を50%減容化できた。
- 可溶化処理によって溶出させたCsは、グラフト重合布吸着材によって吸着が確認された。  
\*注: 本実験では、原汚泥のCs濃度が低いため、溶出量は微量であった。
- 汚泥可溶化処理とCs吸着処理により、汚泥の放射能濃度の低下がみられた。

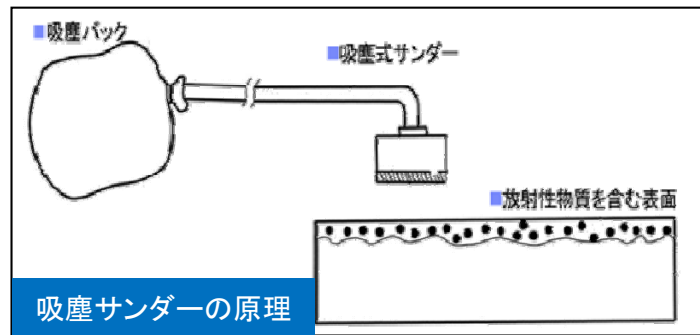
### 事業の概要

吸塵式サンダーやストリップペイントを用いて、汚染された建物の塗装面等についての、水を用いない除染方法を実証する。

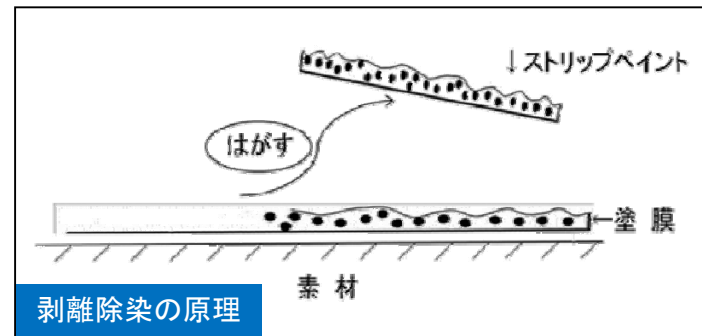
※ -特許出願中- 特願2011-242921

### 実施内容

#### 実施内容① 研削による除染



#### 実施内容② 剥離による除染



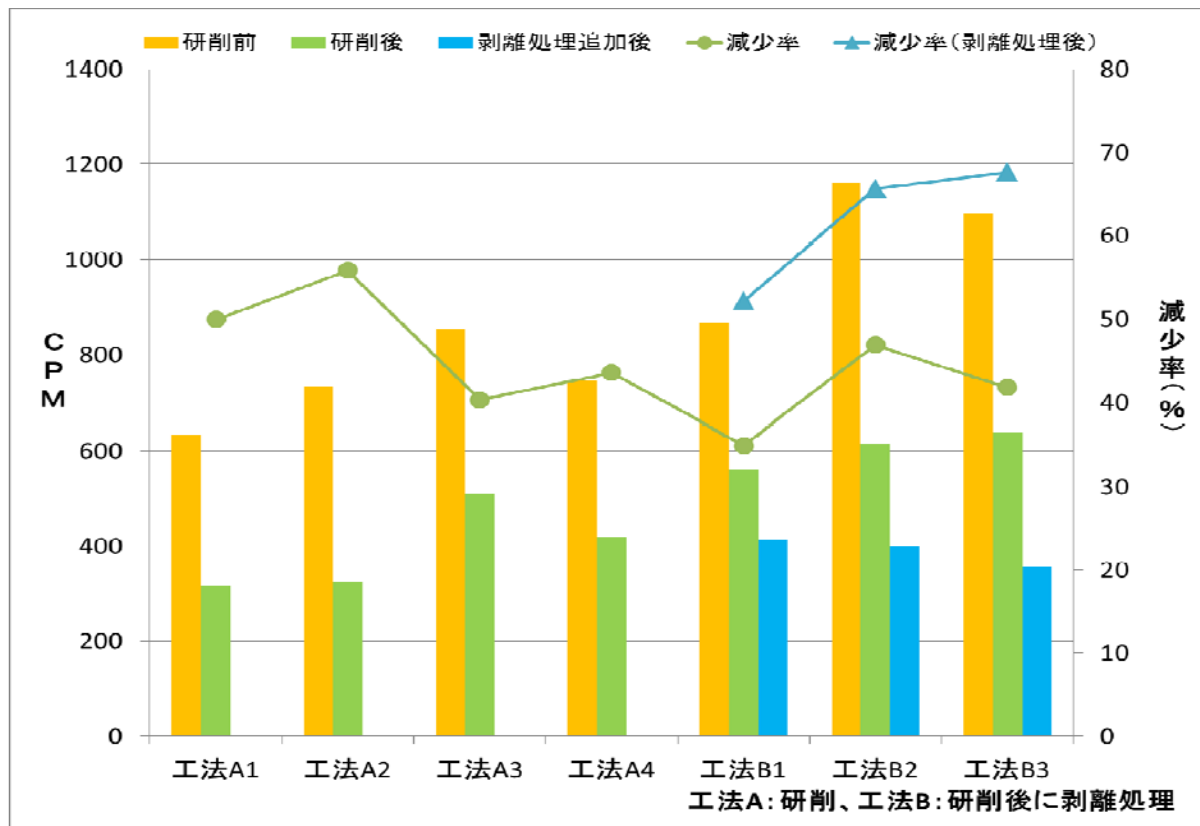


図. 研削および剥離除染による表面汚染の減少率

表. 剥離除染剤の種類によるコストの比較

除染剤名	価格(円/m <sup>2</sup> )	表面汚染の減少率(%)	
除染剤A	10,000	59	(34~84%)
ストリップペイント	2,900	25	(14~35%)

● 吸塵式サンダーによる研削除染により、35～56%の表面汚染の減少率が確認された。また、研削後にストリップペイントによる剥離除染を行うことで、研削前に比べ50～68%の表面汚染の減少率が得られた。

● 塗料の剥離剤であるストリップペイントの除染効果(表面汚染濃度の減少率約25%)は、専用の除染剤の除染効果(同59%)に比べ、半分以下。ただし、コストは3割以下であり、吸塵式サンダーとの併用が効果的。

### 事業の概要

機械的摩擦などの物理的な除去が困難な汚染対象物を、水と空気だけで生成可能な洗浄力のあるナノバブル水を用いて直接洗浄し、除染効果を評価する。

### 実施内容

- 通常の水道水を使って生成させたナノバブル水を用いて除染試験を行う。
- 様々な対象物に対して洗浄試験を行い、除染効果を確認する。
  - 高圧洗浄(コンクリート、樹皮)
  - 拭き取り(ウッドデッキ)
  - 浸漬(砂利)



ナノバブル生成装置

ナノバブル水(空気)  
(直径1/1,000,000mmの気泡)



ナノバブル水によるコンクリート洗浄



樹皮



ウッドデッキ

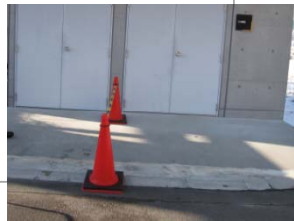
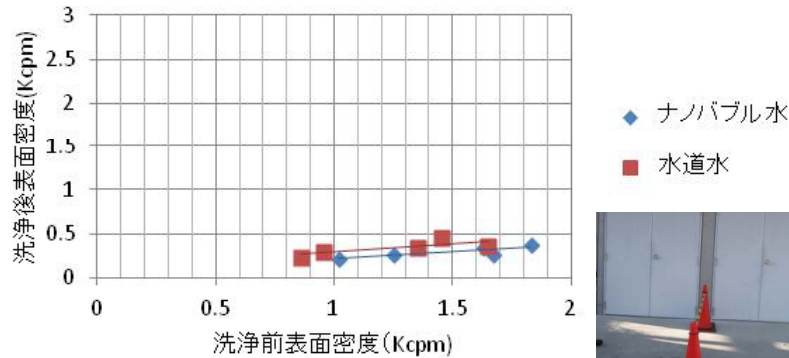


砂利

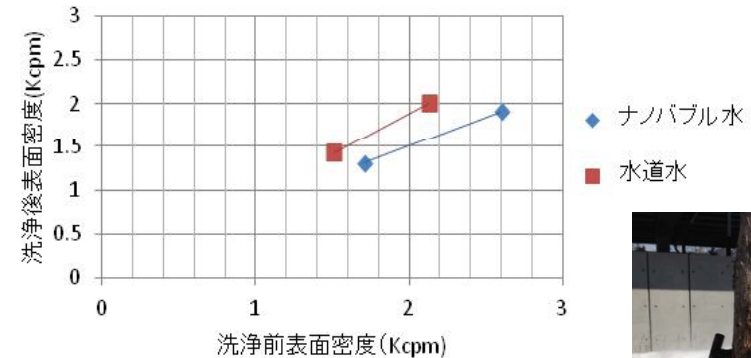
# 結果

付51

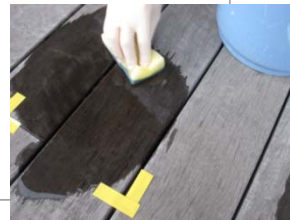
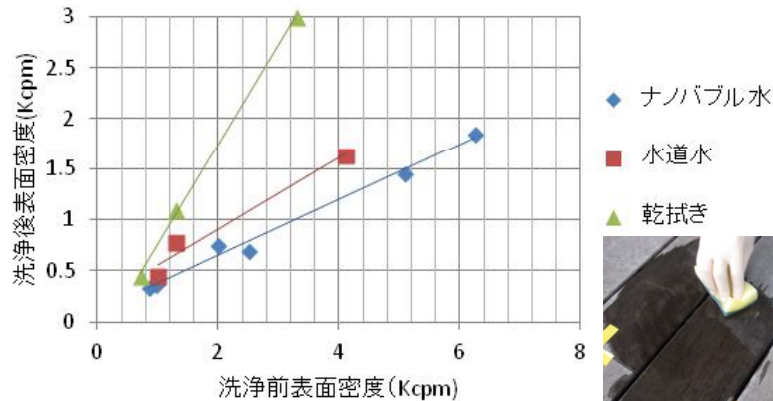
コンクリート舗装面の高圧洗浄  
(2cmより7.5MPaで10秒)



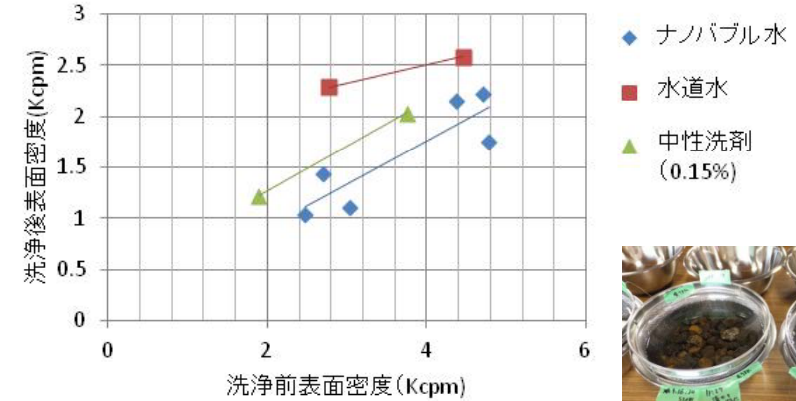
樹木表面の高圧洗浄  
(5cmより7.5MPaで10秒)



ウッドデッキ拭き取り(スポンジ使用)



砂利の浸漬洗浄(3時間)



- コンクリート舗装面の高圧洗浄の場合、ナノバブル水と水道水はほぼ同等だった。また、樹木表面の高圧洗浄、ウッドデッキ拭き取りの場合についても、ナノバブル水の優位性は僅かであった。
- 砂利をナノバブル水に浸漬した場合には、水道水よりも洗浄効果は高い傾向が見られた。

### 事業の概要

強力な酸化剤であるオゾン水を用いて、コンクリートやアスファルトに結合している放射性セシウムを構造物から化学的に遊離させ除染する方法について検討する。

### 実施内容

モルクラスターオゾン水(高濃度オゾン水)による酸化分解反応が、どのような材質・形状でも、除染に応用できることを実証するため、路面等にオゾン水を噴霧し、除染効果の確認を行う。

#### 【試験条件】

- |                    |                |
|--------------------|----------------|
| ○モルクラスターオゾン水       | ○高圧水道水         |
| ・ 約40~60ppm        | ・ 8.8MPa, 6L/分 |
| ・ 0.3MPa, 数L~数十L/分 |                |

※モルクラスターオゾン水:  
オゾン分子を水クラスターの中に高密度で溶解させたもの。

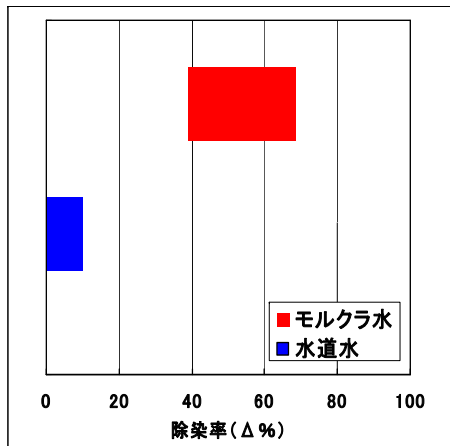


オゾン水生成装置の本体

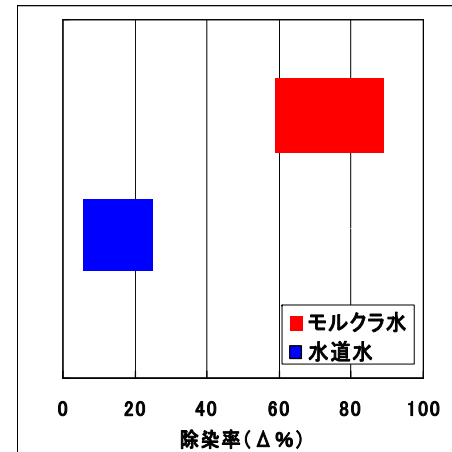


路面・建物の除染

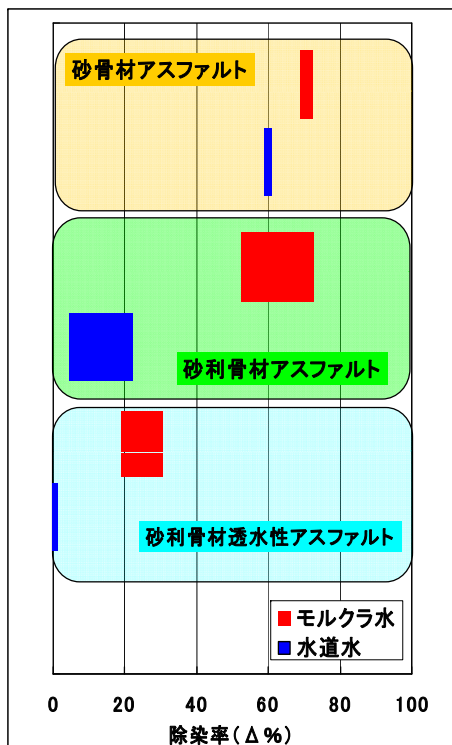




- 硬質コンクリート
  - ・ 高圧水道水洗浄の除染率は10%以下。
  - ・ モルクラスターオゾン水の除染率は平均60%。



- 建物
  - ・ 高圧水道水洗浄の除染率は20%程度。
  - ・ モルクラスターオゾン水の除染率は約70%。
  - ・ 平滑な塗装面の場合、除染率が高かった。



- アスファルト
  - ・ 砂を骨材とする仕上げアスファルト面は高圧水道水でも洗浄できる。
  - ・ 砂利を骨材とする一般的な道路アスファルト面は高圧水道水では20%程度の除染率だが、モルクラスターオゾン水では70%。
  - ・ 砂利を骨材とする透水性アスファルト面は高圧水道水では殆ど除染できなかった。モルクラスターオゾン水では30%程度の除染率。洗浄水が浸透しなくなると除染率は低下。

【安全上の注意点】

- 厚労省の作業環境基準に準拠(環境濃度0.1ppm以下)
- ・ 除染区域を設け、人が侵入しないよう管理
- ・ 除染作業者はオゾン分解マスクを着用
- ・ 環境オゾン濃度, 風向, 風速を常時監視

- モルクラスターオゾン水による洗浄は、コンクリート、アスファルト、建物等の洗浄において、高圧水道水に比べて除染効果は高い。
- 削取り等構造物の形状を変えずにコンクリートやアスファルト等を除染できる。
- ガス化するオゾンの安全対策が必要。

事業の概要

超高圧(最大280MPa)水表面処理工法を用いた高圧洗浄により、汚染された舗装面等を除染する。また処理水は除染と同時に吸引回収され、Csの除去のための水処理を行う。

Jリムーバー



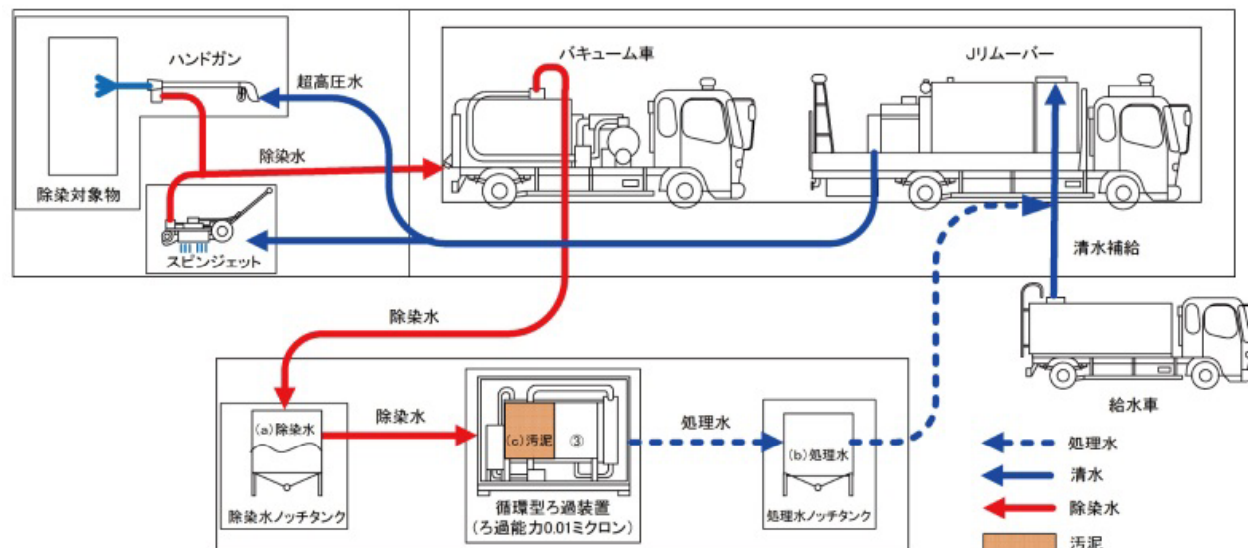
ストライプ  
ジェット



スピンジェット  
福島大学 インターロッキング

実施内容

道路清掃及び路面標識消去に用いる既存の高圧洗浄機を応用し、様々な形態の舗装面での除染効果を、様々な吸引圧力別の実証する。また、処理水のリサイクル技術も確立する。



# 結果

## ●インターロッキングの除染

表1. 目地砂(乾燥土)の深さ方向の汚染状況

深さ (cm)	134Cs (Bq/kg)	137Cs (Bq/kg)	134Cs+137Cs (Bq/kg)
1	163,000	212,500	375,500
2	70,000	90,900	160,900
3	14,850	19,050	33,900



除染前 1777cpm → 101cpm



目地深さ約3cm

## ●密粒アスファルトの除染

《線量 低》

除染前

除染後

0.55μSv/h  
(高さ1m)



1710cpm

41cpm

《線量 中》

3.30μSv/h  
(高さ1m)



9702cpm

573cpm

《線量 高》

45.66μSv/h  
(高さ1m)



53448cpm

213cpm

●インターロッキングの目地砂を超高圧水洗浄で除去することにより、表面汚染を94%低減できた。

表2. 密粒アスファルトの除染(225MPa)

	除染前 cpm	除染後 cpm	低減率 %
線量 低	1710	41	97.6
線量 中	9702	573	94.1
線量 高	53448	213	99.6

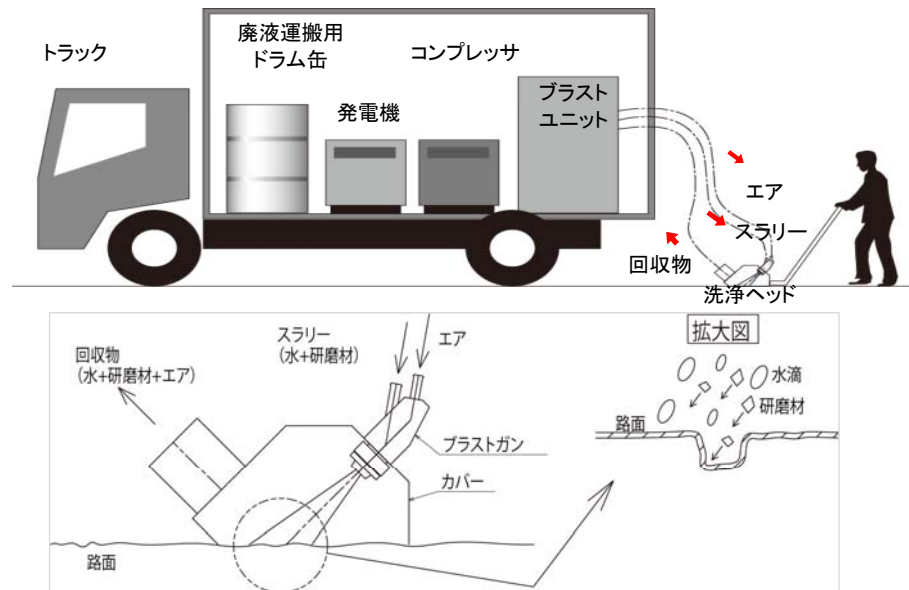
●密粒アスファルトの超高圧水除染により、1710～53448cpmの表面汚染が41～513cpmに低減。減率はいずれも94%以上であった。

事業の概要

汚染された舗装面の高圧洗浄は、除染の不十分さや、処理水の漏えいによる二次汚染が危惧される。この解決のためにウェットブラスト装置の製作・試験を実施し、路面の高い除染効果と循環運転の可能性を実証する。

実施内容

水と研磨剤の混合液(スラリー)を高速で噴射し、路面を洗浄・削除するウェットブラスト装置の試作し、実際の道路での除染実証を行う。

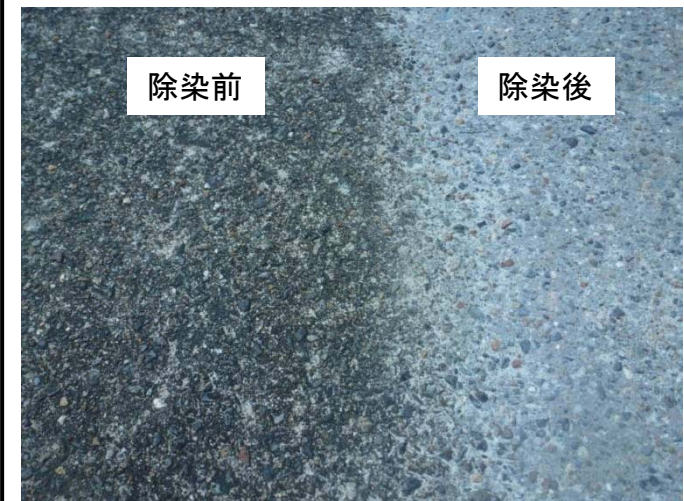


<試験の内容>

- ① 試作した洗浄機が実際の使用に問題が無いか、実用性の確認。
- ② 路面の種類・ブラスト時間の違いによる効果の確認および把握。
- ③ スラッジ回収システムによるスラリー中の微細粒子の回収・除去。



団地内舗装面の除染作業



除染前後の舗装面

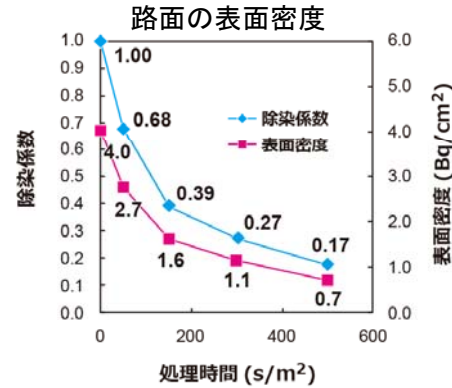
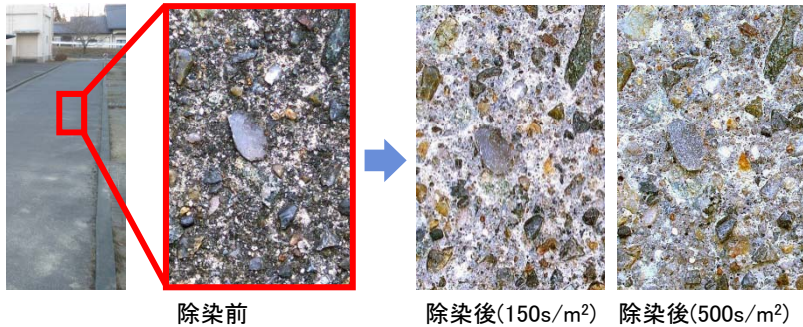
# 結果

## 処理時間と除染効果の関係

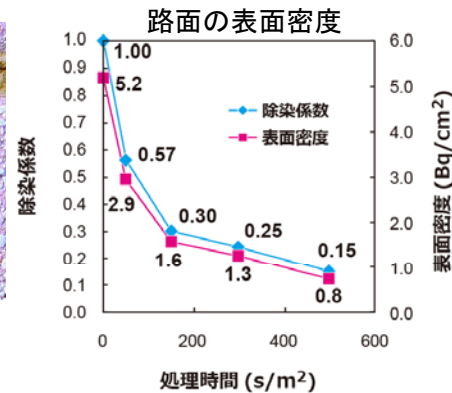
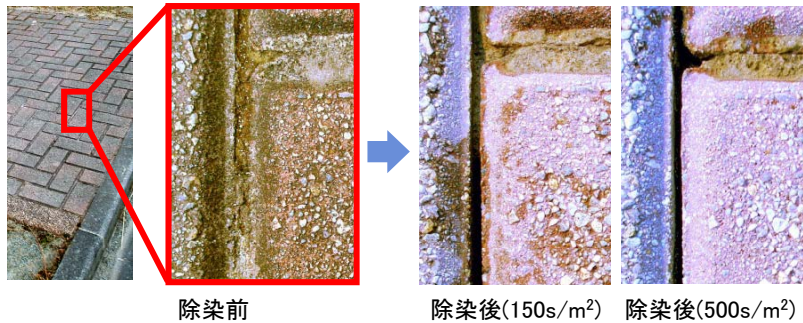
※1 鉛遮蔽による測定をし、バックグラウンドを補正した。  
 ※2 除染係数 = 除染後 / 除染前

付57

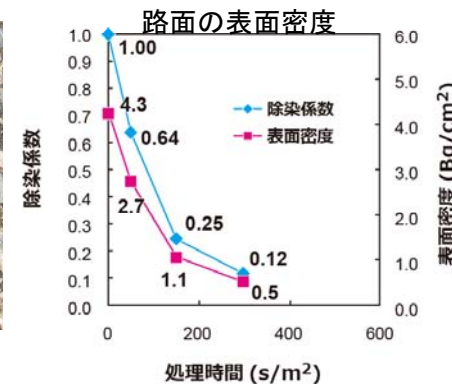
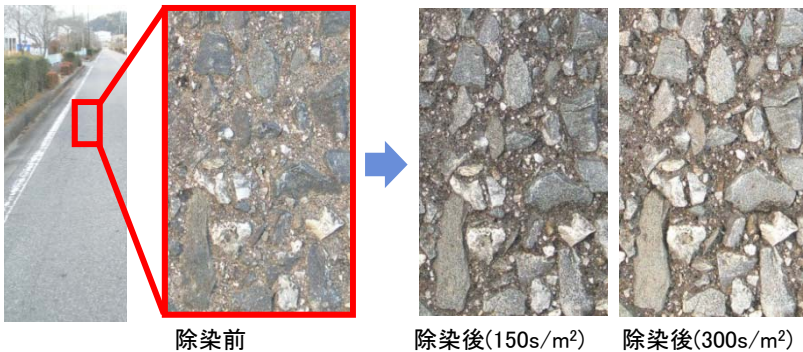
### コンクリート舗装



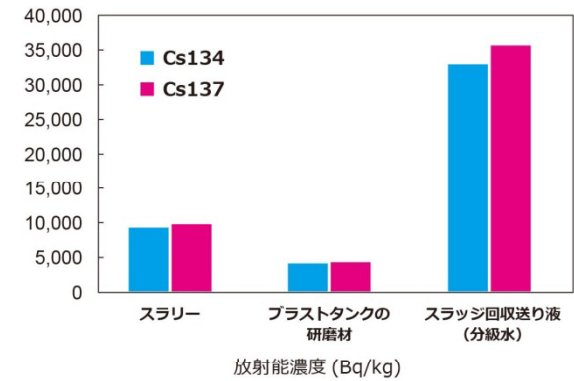
### インターロッキング



### アスファルト舗装



## 回収水の処理の結果



いずれのサンプルも、0.2μmのフィルタによるろ過により分離された水の放射能濃度は、すべて検出限界以下。

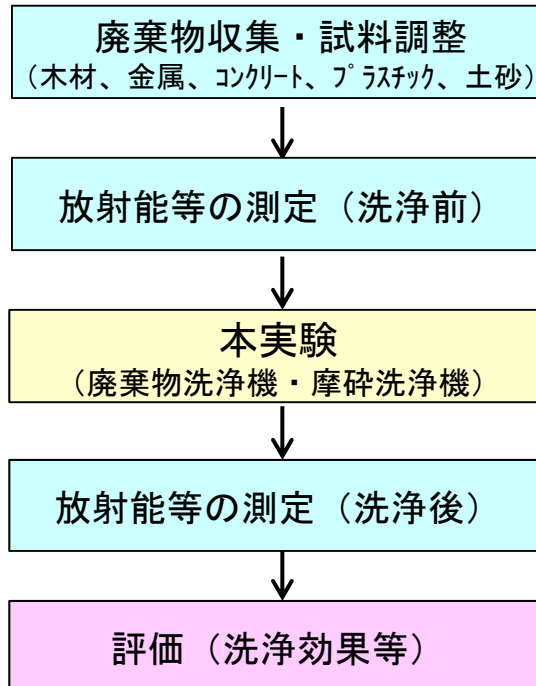
◎ウエットブラストでは、コンクリート、インターロッキング、アスファルトいずれの路面においても1m<sup>2</sup>当たり約150秒で放射性物質の60~70%を除去可能。  
 ◎回収した水・研磨剤等からの放射性物質の除去が可能。

事業の目的

放射性物質で汚染された廃棄物を「廃棄物洗浄機」および「摩砕洗浄機」を使用して洗浄し、対象瓦礫の放射能濃度を低下させ、一般の焼却施設にて焼却等が可能な廃棄物にするなど、中間貯蔵施設へ搬入する廃棄物の量を減らすことを目的とする。

実施内容

- 洗浄は、警戒区域内の瓦礫を対象として、試験用の廃棄物洗浄機及び摩砕洗浄機を用いて洗浄試験を行う。
- 洗浄水はゼオライトろ過を行い、放射能濃度計測後、放水する。
- 洗浄方法、洗浄回数を変更し、洗浄された廃棄物の表面汚染密度、放射能濃度を測定し、洗浄の有効性を検証する。



廃棄物洗浄機  
(洗浄部分：60cm×100cm)

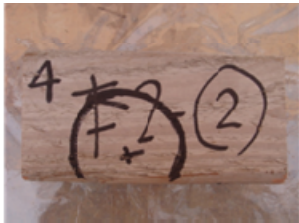


摩砕洗浄機  
(洗浄部分：60cm×100cm)

結果



コンクリート (左: 洗浄前、右: 洗浄後)



木材 (左: 洗浄前、右: 洗浄後)



プラスチック (左: 洗浄前、右: 洗浄後)



金属 (左: 洗浄前、右: 洗浄後)



土砂 (左: 洗浄前、右: 洗浄後) (摩砕洗浄)

		コンクリート	木材	プラスチック	金属	土砂
洗浄前	放射能濃度平均(Bq/kg)	8,250	2,635	5,080	1,242	16,720
洗浄後	放射能濃度平均(Bq/kg)	2,235	1,552	3,775	576	3,860
放射能濃度低減率		73%	41%	26%	54%	77%

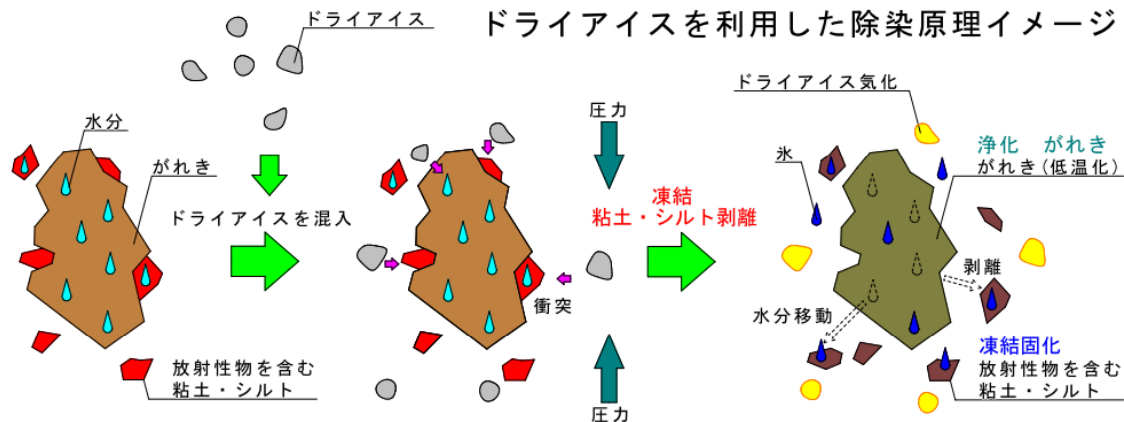
\*1: 廃棄物洗浄後の細粒分をふるい分けした0.5mm以上の土壌際留分をふるい分け前の土壌は20,740(Bq/kg)

\*2: 摩砕洗浄後の細粒分をふるい分けした0.5mm以上の砂

- コンクリート、木材、プラスチック、金属について廃棄物洗浄機で洗浄することによって、放射能濃度を低減させることができる。
- 材質によって放射能濃度の低減率は26%～77%と異なる。
- 土砂について、摩砕洗浄機で洗浄することによって、放射能濃度を減少させることができる。

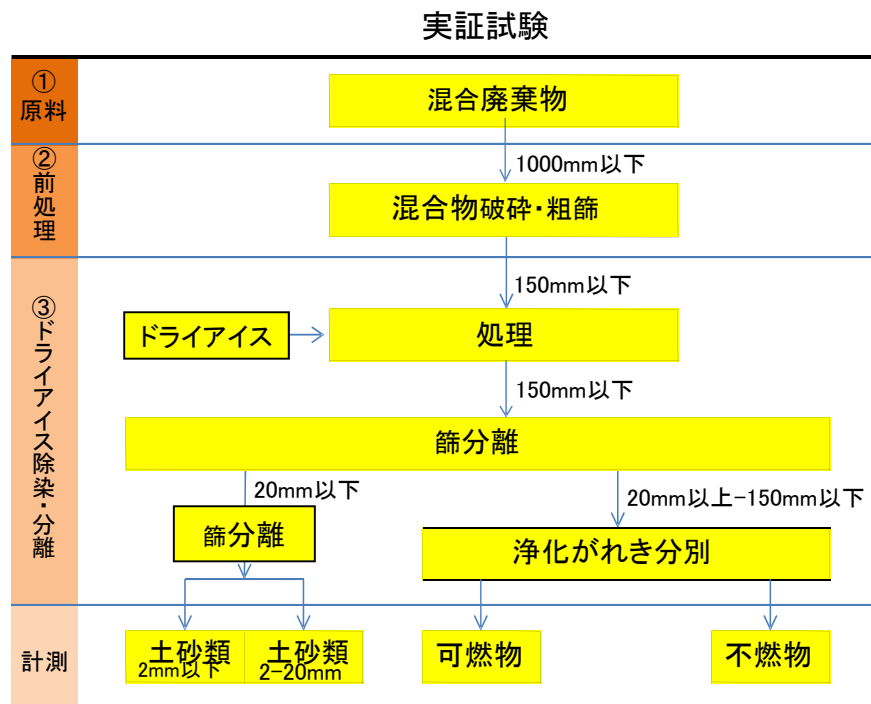
事業の概要

放射性物質に汚染された津波等による災害廃棄物(がれき)を、ドライアイスを利用した乾式方法によって、除染する方法を確立することを目的とする。



実施内容

- ① 放射性物質を含んだ「がれき」を破碎、粗篩の後、ドライアイスと混合する。「がれき」に付着した、粘土・シルトを剥離させ、浄化された「がれき」と放射性物質を含む土砂類を分離する。
- ② 土砂類については、さらに2mmを分級点として篩分離し、2mm以下の土砂類、2mm～20mmの土砂類、20mm以上の可燃物、不燃物の放射能濃度を測定する。





●ドライアイス利用による乾式摩砕除染工程



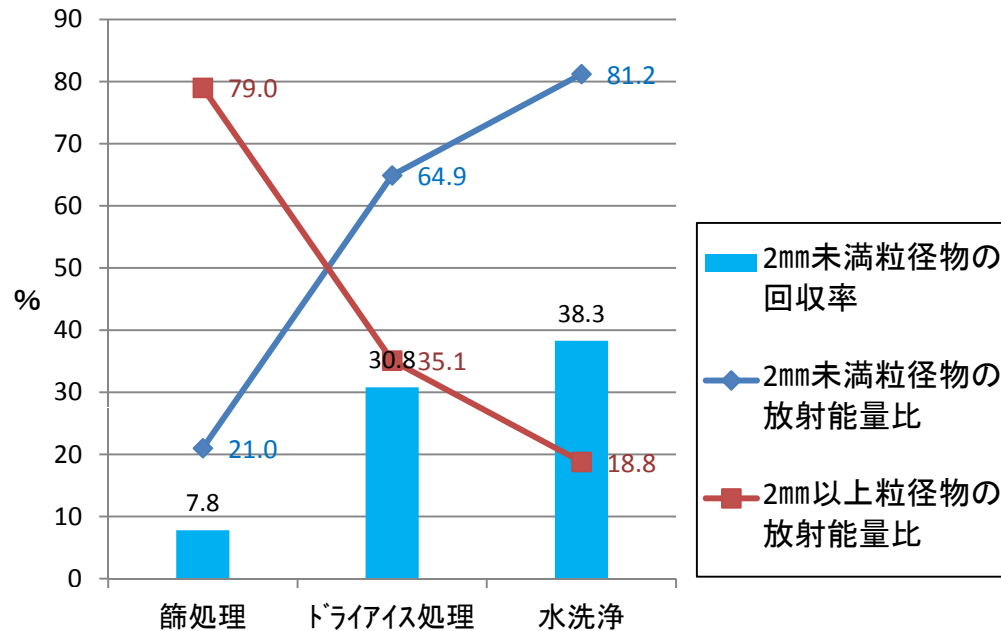
①ドライアイス投与



②磨砕洗浄機ハリケーンによる洗浄



③分級された2mm以下のガレキ



- ドライアイス処理における2mm未満の粒径物の放射エネルギー比は、篩処理の約3倍高い。
- ドライアイス処理は、水洗浄よりも除染効果が低い。2mm未満粒径物の回収率が水洗浄より低く、がれきに付着した、粘土・シルトを剥離させる効果が十分機能していないと考えられる。

ドライアイス処理によるガレキの洗浄は、篩処理よりも除染効果は高いが、水洗浄よりも除染効果は低かった。

図. ドライアイス利用と他の方法による土壌の洗浄の効果比較

# 宇宙農業研究の成果・高温好気堆肥菌システム による放射能除染・減容化技術実証

付録2-17

付62

受託者：(独)宇宙航空研究開発機構

## 事業の概要

宇宙農業構想では、高温好気堆肥菌システムを閉鎖生態系における物質の再生循環利用の要として研究してきた。この宇宙農業研究の堆肥菌システムの成果を活用し、放射性核種で汚染された植物体などを高温好気堆肥菌により生物学的に燃焼して減容化する有効性について実証する。

## 実施内容

高温好気堆肥菌システムにより、広葉樹の落ち葉、風乾イネ科牧草、野菜等の堆肥化を行う。

高温好気堆肥菌を用いた減容化が、放射能によって大きな変化がなく微生物燃焼(代謝反応によりバイオマスを酸化して水と炭酸ガスを生成)で進むことを確認する。



放射性物質で汚染された植物体



高温好気堆肥菌処理システム



減容化

広葉樹の落ち葉、風乾イネ科牧草、野菜などを、80~100℃の温度で処理したところ、暗色の細かな顆粒と難分解性の硬いセルロース繊維に分解し減容した。



小型減容化装置のなかに落ち葉や種菌などの資材を投入し攪拌。



1日後 落ち葉は小片に分解した。



4日後 落ち葉は顆粒と繊維に分解され反応槽の底部に収まるほどに減容した。

- 処理開始1日以内に水分の蒸発と易分解性成分が分解され乾量ベースで50%減少した。
- 乾量を短期間に減少させるには、高温好気堆肥菌システムの菌叢を処理物の種類にあわせて最適なものとするよう馴化させたり、菌の栄養要求にあわせて適切な副資材を使用しなければならないことが明らかになった。
- 放射能の堆肥菌による減容化への影響は試験した条件の範囲ではみられなかった。

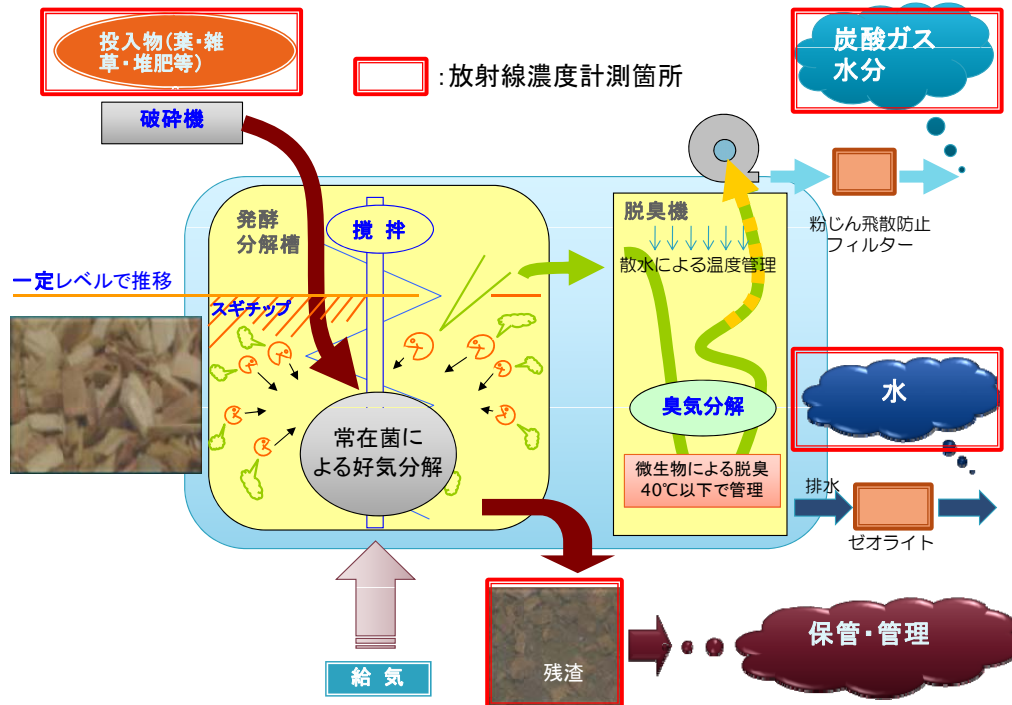
事業の概要

放射性物質を吸収・含有した有機物(除染作業等で発生する伐採樹木や庭木, 放棄農地等で発生する野菜や雑草など)を発酵分解により減容化することで、効率的な除染活動の実現可能性について検討する。

高温好気発酵分解システム



実施内容



- 冬季に落葉しない樹木(葉)や腐葉土、野菜(主に根菜)等を対象とし処理を行い、減容化が高い植物を明らかにする。
- 収集・運搬は、作業効率の向上を図るため、生分解性の袋を用い、袋自体の分解の程度も確認する。
- 処理試料の減容化率と必要日数を把握、評価する。

## ●各試料の減容化率(重量・体積)

表. 減容化率(重量・体積)

試料名	投入量 (Kg)	処理 時間 (h)	重量 減容化率 (wt%)	減容化率 [乾燥重量] (Drywt%)	投入体積 [破碎後] (L)	残渣体積 (L)	体積 減容化率 (%)
ギンギシ	63	92.0	99.3	98.0	400.0	5.0	98.8
根菜	70	66.0	96.4	92.8	130.0	6.3	95.2
松葉	65	69.0	92.8	90.3	430.0	28.0	93.5
杉葉	70	73.5	82.9	78.3	470.0	60.0	87.2
落葉	40	69.5	85.4	84.8	540.0	30.0	94.4



- ギンギシ、根菜、松葉、杉葉、落葉のいずれも、重量減容化率は82%以上、体積減容化率は87%以上であった。またいずれも3~4日以内で減容化することができた。
- 本システムの処理によって発生する排気および排水の分析結果はいずれも検出下限値未満であり、放射性物質を外部に飛散させることなく処理できることが確認された。

# 人工ゼオライトブロックを用いた住宅地排水溝の除染技術の実証試験

付録2-19

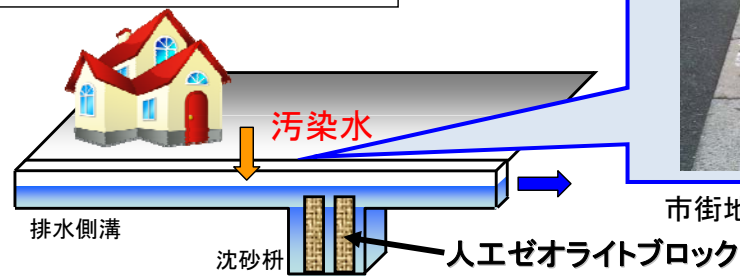
付66

受託者: 前田建設工業(株)

## 事業の概要

住宅地の排水側溝や集水柵に『人工ゼオライトブロック』を設置し、降雨や洗浄水などから流入する放射性汚染物質を吸着させ、側溝内での汚染物質の堆積や拡散を抑制する。

人工ゼオライトブロック敷設時



市街地の排水側溝と集水柵

人工ゼオライトブロックによる放射性物質の吸着



## 実施内容

### 現地実証試験①(除染工模擬試験)

現地住居の樋下堆積物などを水に混合し、除染の際に発生する高濃度の模擬汚染水を作製し、人工ゼオライトブロックを設置した模擬水路を流下させることで、除染時のセシウム低減性能を把握する。

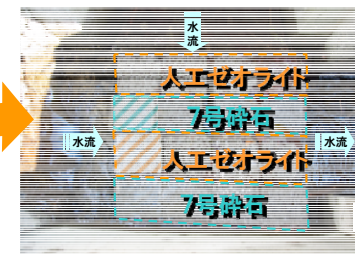


模擬汚染水作製状況

模擬水路による吸着効果確認試験

### 現地実証試験②(既存水路における吸着試験)

既存の水路柵等に人工ゼオライトブロックを設置することで、汚染地域の環境水(通常の雨水、湧水等)に含まれる低濃度放射性セシウムを簡易にかつ恒常的に除去し、周辺への汚染拡散を低減できることを確認する。なお人工ゼオライトブロックの性能を確認するため、砕石ブロックを対照試験体として設置する。



計

表1. 模擬水路による浄化実験結果

試料	取水位置	Ge半導体検出器 放射能濃度(Bq/l)			低減率
		Cs-134	Cs-137	計	
ゼオライトブロック	通過前(原水)	9,989	13,241	23,230	46.7%
	通過後	5,239	7,143	12,382	

- 人工ゼオライトブロックで放射能濃度を46.7%低減させる効果が確認できた。

表2. 既存水路設置ブロックの放射能測定結果

試料	重量 (kg/ブロック)	Ge半導体検出器 放射能濃度(Bq/kg)		
		Cs-134	Cs-137	計
ゼオライトブロック	2.191	1341	1775	3116
7号砕石ブロック	3.548	563	757	1320

- 人工ゼオライトブロックは砕石ブロックの約2倍以上の放射能濃度の低減効果があることが確認できた。

- 人工ゼオライトブロックを集水柵等に設置することにより、環境水中の放射性セシウムの低減効果が期待できる。

# フェロシアン化鉄配合吸着凝集沈殿剤を使用した 放射能汚染水浄化システムの提案

付録2-20

付68

受託者: 東京工業大学

## 事業の概要

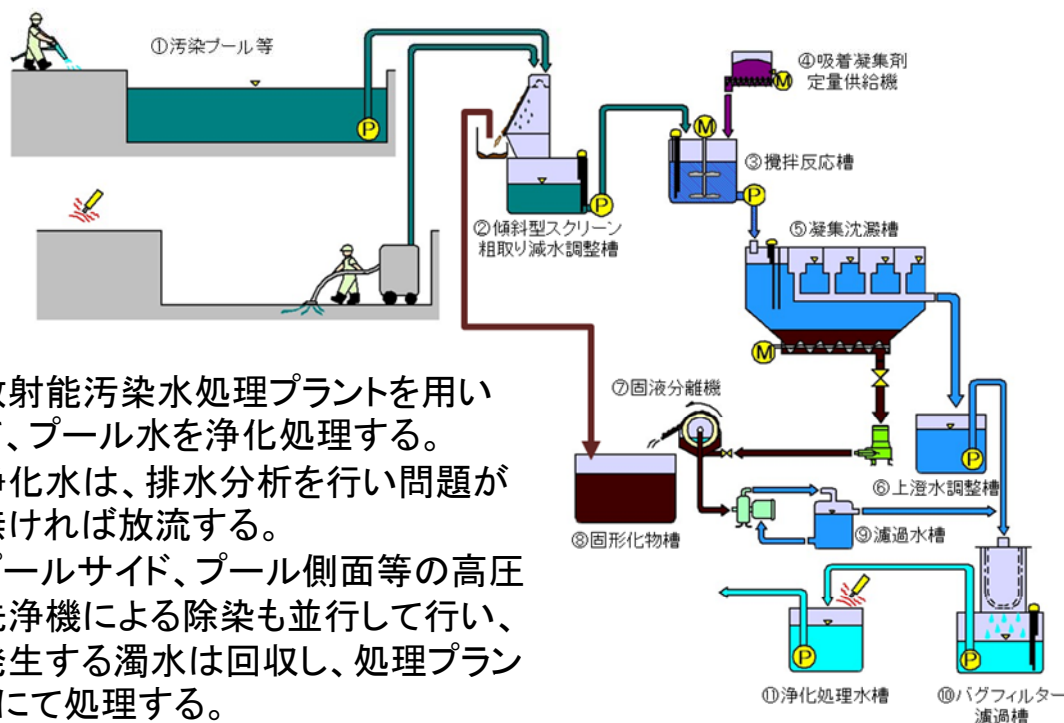
フェロシアン化鉄配合吸着凝集沈殿剤による水溶液中のイオン化した放射性セシウムの吸着と、浮遊物質の凝集により、放射性物質を回収する放射能汚染水浄化システムを実証する。また高圧洗浄機の除染の検証を行う。

水処理システム



## 実施内容

放射能汚染水処理システム(プール除染)フロー図



- 放射能汚染水処理プラントを用いて、プール水を浄化処理する。
- 浄化水は、排水分析を行い問題が無ければ放流する。
- プールサイド、プール側面等の高圧洗浄機による除染も並行して行い、発生する濁水は回収し、処理プラントにて処理する。



自走式高圧洗浄機による除染



ハンドアクアブラスト



スピンジェット



## ● プール水浄化試験結果概要

処理量	10m <sup>3</sup> /h
吸着凝集剤添加量	0.2%
原水放射能濃度	34 Bq/ℓ ~ 1116 Bq/ℓ
浄化水放射能濃度	ND(10Bq/ℓ以下)
脱水汚泥放射能濃度	29,100 Bq/kg ~ 683,000 Bq/kg
シアン	0.28 mg/ℓ ~ 0.44 mg/ℓ (※フェロシアン化鉄20%配合時)
浮遊物質	7 mg/ℓ ~ 9 mg/ℓ
透視度	0.7 m ~ 1.1 m

- プール水240m<sup>3</sup>を処理した結果、浄化水の放射能濃度は検出限界値(約10Bq/L)以下を達成。
- セシウムイオンが存在しない場合には、フェロシアン化鉄を使用しない場合でも放射性物質の除去が可能。

## ● 高圧洗浄試験結果概要

No.	状況	空間線量 $\mu$ Sv/h			表面汚染密度 Bq/cm <sup>2</sup>
		1cm	50cm	100cm	
高圧 洗浄 25~ 30MPa	除染前	0.869	0.733	0.647	13.12
	除染後	0.527	0.518	0.544	3.51
	除染前	1.138	1.497	1.239	14.94
	除染後	0.617	0.905	0.907	6.40
	除染前	0.772	0.778	0.788	10.19
	除染後	0.544	0.658	0.692	4.57
超高压 洗浄 250MPa	除染前	アスファルト 削り厚 0.5mm			40.07
	除染後	アスファルト 削り厚 0.5mm			1.54
	除染前	コンクリート 削り厚 0.5mm			16.34
	除染後	コンクリート 削り厚 0.5mm			1.59

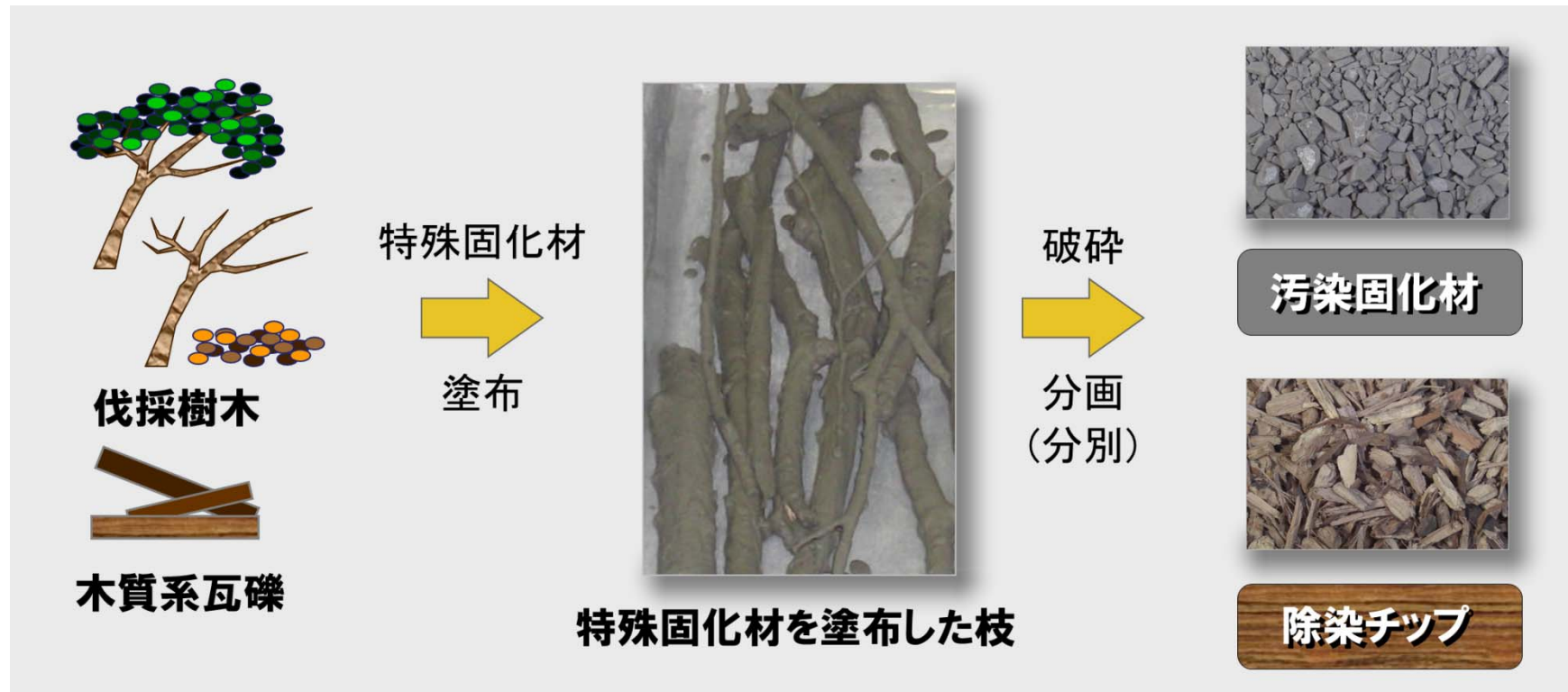
- 高圧洗浄機での除染率は概ね45%程度。除染対象の表面に傷や割れがある場合には除染効果が低下した。
- 超高压洗浄を行った路面では、アスファルトもコンクリートも除染率は90%以上であり、2Bq/cm<sup>2</sup>以下まで低下した。

## 事業の概要

伐採樹木や木質瓦礫の表面に固化材を塗布した後、チップパーにより破碎し、固化材(放射性セシウムを吸着)と除染されたチップとして分画・回収する方法について実証試験を行う。

## 実施内容

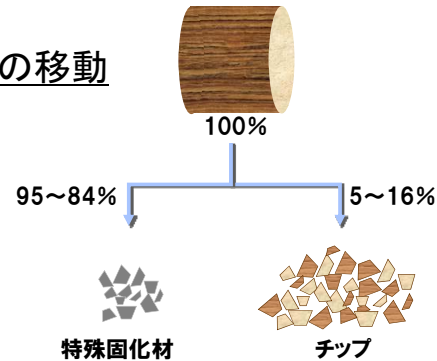
- ① 固化材の選定と散布方法の検討および破碎時の固化材の把握
- ② 固化材と木質チップの破碎状況に応じた分画方法の検討および分画装置を用いた分離効果、回収率の確認
- ③ 本工法の適用による除染効果、作業効率等の測定



## 結果

- 放射性セシウムへの移行  
固化材には普通ポルトランドセメント等3種類を選定し、塗布方法はコテ塗りを採用。

### 放射性セシウムの移動



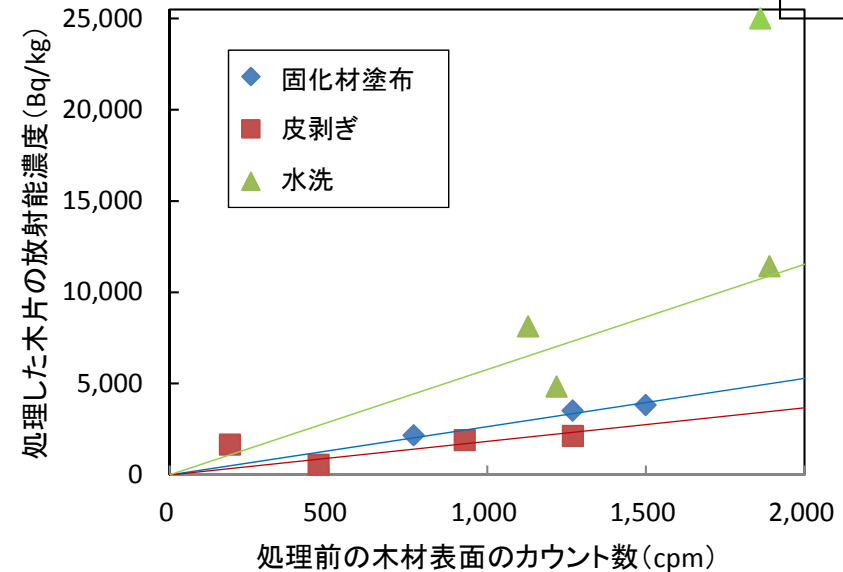
### ● 立ち木への適用を模擬

- 立ち木を想定し、固化材を木(コナラ)へ塗布し、乾燥後ハンマーで木を叩いて回収。
- 除染後、木の表面線量率は約80%低減。



樹皮剥離の跡

### ● 固化材と他の手法との比較



固化材塗布は、皮剥ぎに比べて除染効果が多少劣るが、水洗に比べれば除染効果は2倍程度高い。(直線の傾きが大きいほど除染効果は小さい。)

- 回収した固化材に移行した放射性セシウムは、固化剤分離前の84~95%であり、固化材の塗布、破碎、剥離により放射性セシウムが除去できることが確認された。
- 固化材塗布は、水洗よりも除染効果が高いが、皮剥ぎに比べると除染効果は劣る。
- 立ち木への適用については、幹に塗布した固化材をハンマーで破碎することにより、表面線量率は約80%低減。樹皮の剥離等を伴うことに注意が必要。

## 事業の概要

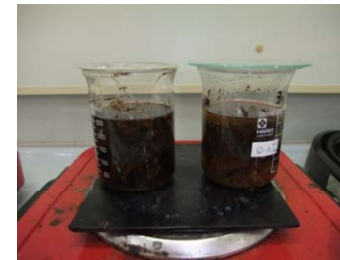
チップの生産過程で発生する樹皮(バーク)の水洗浄による除染およびその効果確認を行う。除染効果が低く再利用\*1不可能なバークは小型焼却炉による焼却処理、減容率の確認を行う。

## 実施内容

- 木材・樹皮に対し、各種洗浄方法を実施し、除染の効果を確認する。
- 洗浄による除染効果の低いバークの、小型焼却炉による焼却処理の実施。
- バグフィルタおよびHEPAフィルタの放射性Cs補足状況\*2を調査し、焼却炉に必要な機能の検証を行う。

\*1 肥料・土壌改良資材・培土中に含まれることが許容される最大値400ベクレル/kg(製品重量)  
「放射性セシウムを含む肥料・土壌改良資材・培土及び飼料の暫定許容値の設定について」(平成23年8月1日農林水産省)。

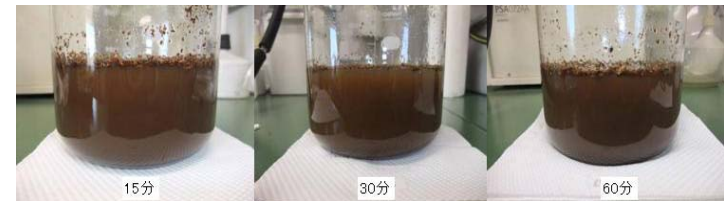
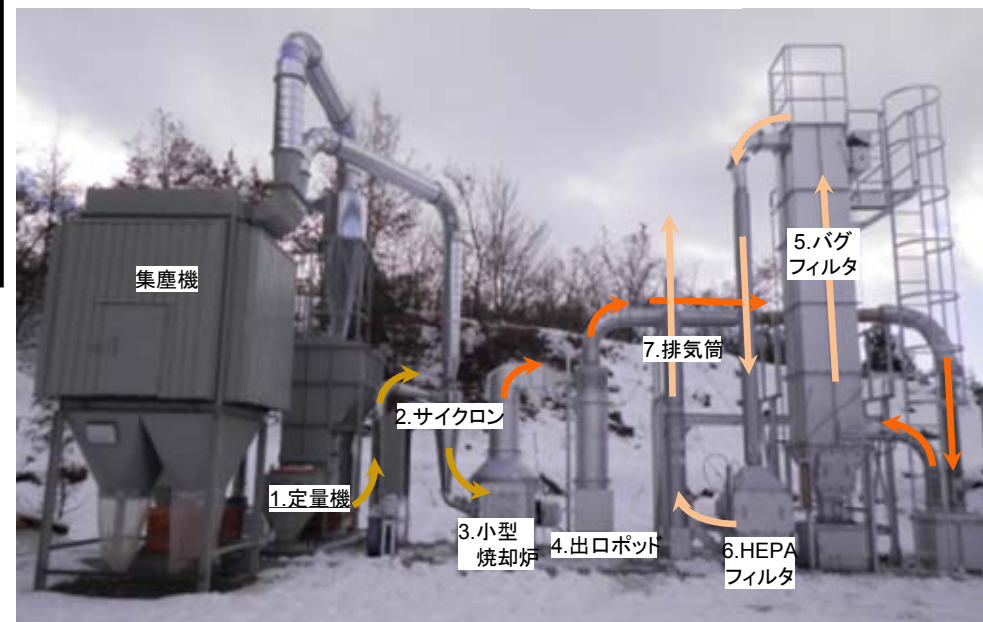
\*2 排ガス中の放射能濃度基準  
 $Cs134$  の濃度/20 +  $Cs137$  の濃度/30  $\leq$  1  
「平成23年環境省令第33号 第33および35条」より



加温浸漬洗浄



超音波洗浄

15分 30分 60分  
攪拌洗浄









小型焼却炉外観

●バーク洗浄試験結果(除染率)

		浸け置き		攪拌洗浄	超音波洗浄
処理時間		458時間	1時間	1時間	1時間
その他の条件		室温	40-100℃	攪拌時間15-60分	周波数28-100kHz
除染率	常緑樹 約700Bq/kg	38%	—	39%	17~33%
	落葉樹 約2000Bq/kg	20%	5-32%	45%	13~21%

- 浸け置き、攪拌洗浄、超音波洗浄の中では、攪拌洗浄の除染率が高く、1時間で放射能濃度は約50%低減。
- 洗浄水の温度が高いほど除染効果は大きい。
- 超音波洗浄では、顕著な周波数依存はみられない。

●バーク燃焼試験結果

		バーク	主灰 (焼却炉内)	飛灰1 (出口ポット)	飛灰2 (バグフィルタ捕)
常緑樹	減容化率: 96.4%				
	放射能濃度[Bq/kg]	986	4010	8110	37900
	重量[kg]	111.2	1.37	2.21	0.41
落葉樹	減容化率: 95.4%				
	放射能濃度[Bq/kg]	2020	14900	20300	137000
	重量[kg]	151.1	2.76	3.74	0.39

- バグフィルタ出口にて採取した排気ガスの放射能濃度は検出限界未満(約0.4Bq/m<sup>3</sup>)。
- 運転中の空間線量もバックグラウンド程度であった。
- バークなどの可燃物減容化が確認できた。
- 焼却炉を長時間運転させる際の管理方法等については今後の検討が必要。

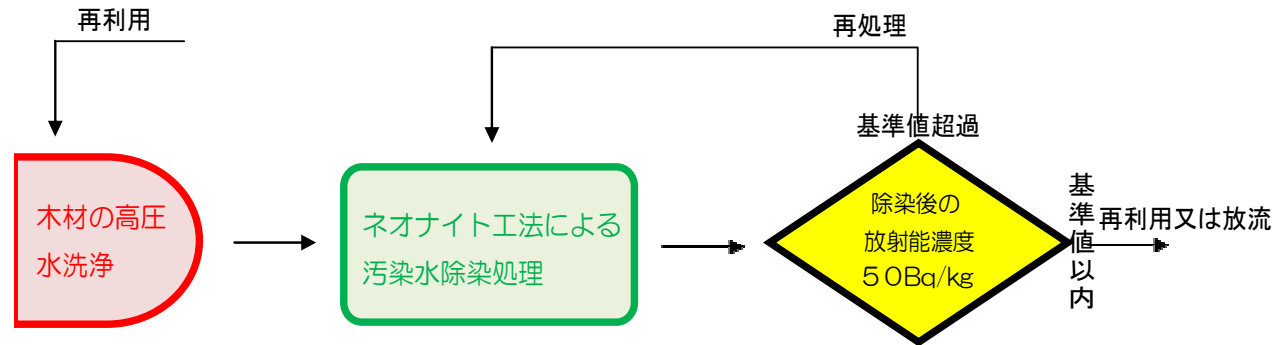
事業の概要

放射性物質で汚染された原木やガレキ等の木質資源を除染しながら、有効利用するしくみを検討する。  
また除染により発生した汚染水を吸着剤(ネオナイト)で処理する方法を実証する。



除染設備全体

実施内容



木材洗浄ユニット  
(高圧水洗浄)

- ① 汚染された木質バイオマスを、高圧水洗浄で除染する。
- ② 除染で発生した汚水・汚泥等は吸着材により放射性物質を吸着させ分離する。処理後の水が基準値以内であれば再利用または放流する。



吸着剤

表. 木材の洗浄率

	洗浄条件	表面汚染密度 (Bq/cm <sup>2</sup> )		除染率 (%)
		洗浄前	20分洗浄後	
ナラ	常温	36	2.4	93
	40℃	29	2	93
	80℃	28	1.6	94
ミズキ	常温	3.8	0.9	76
	40℃	4.4	1.1	75
	80℃	27	1	96
スギ	常温	34	7.2	79
	40℃	22	4.1	81
	80℃	4.3	0.8	81
クリ	常温	2.3	0.2	91
	40℃	0.3	0.09以下	70以上
	80℃	0.5	0.09以下	82以上

木材の洗浄では、除染率は木材の種類によって異なったが、温度が高く、洗浄時間が長い(今回の試験では最大20分)ほど除染の効果が高くなった。このため、洗浄時間を20分で行うこととした。



洗浄後の木材



木材の除染により発生した水



吸着剤により処理された水

※ 除染により発生した水の放射能濃度

最大5,890Bq/kg → 検出限界値(約30Bq/kg)以下

- 高圧水洗浄により木材を70～96%の洗浄率で除染できることが確認された。
- 吸着剤により除染により発生した汚染した水を検出限界値未満に処理することができ

### 事業の概要

森林内の間伐量等による空間線量率の変化を確認することにより、森林の放射線量低減技術の実証を行う。

また森林作業(下刈、除伐、間伐)に伴う粉塵等の飛散量および放射性物質濃度を確認する。



下草・落葉層の除去作業



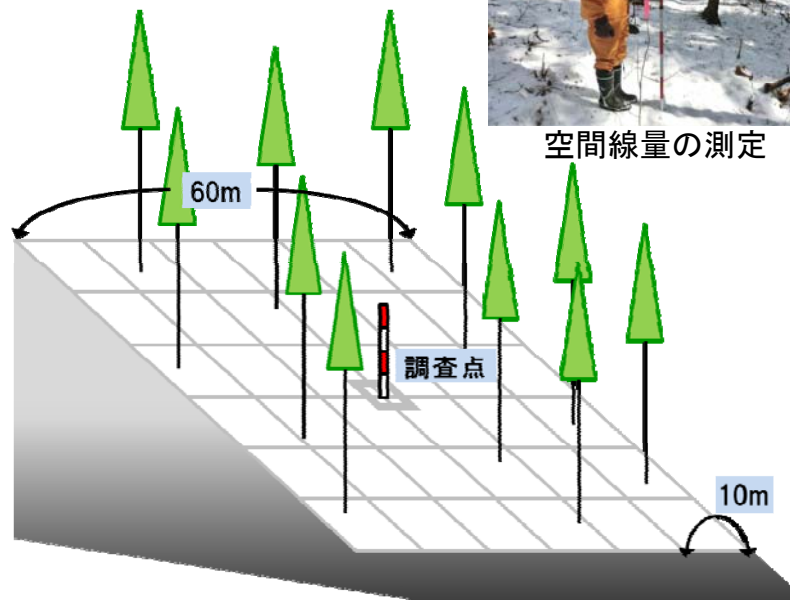
間伐木の搬出

### 実施内容

以下のような森林内間伐等により空間線量率の変化を確認する。

- ① 60m×60m程度の森林内の落葉層除去、間伐による空間線量率の変化。
- ② 里山の落葉層除去、枝打ち、間伐による空間線量率の変化。
- ③ 森林内の実証作業中の粉塵の吸い込み評価。

#### 実施内容のイメージ



空間線量の測定



ハイボリュームエアサンプラー



粉塵測定



# 結果

## 【空間線量の推移】

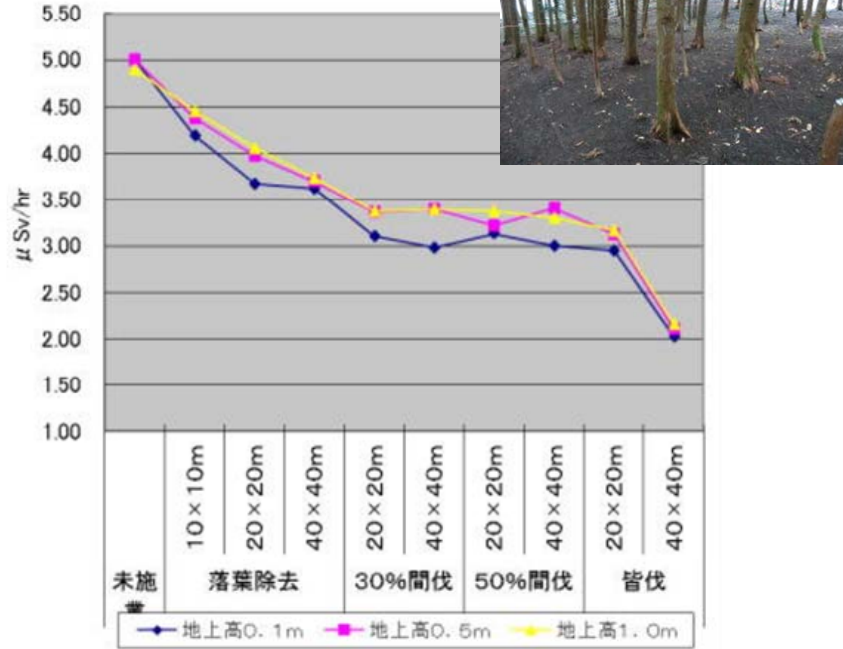


図1. 針葉樹林

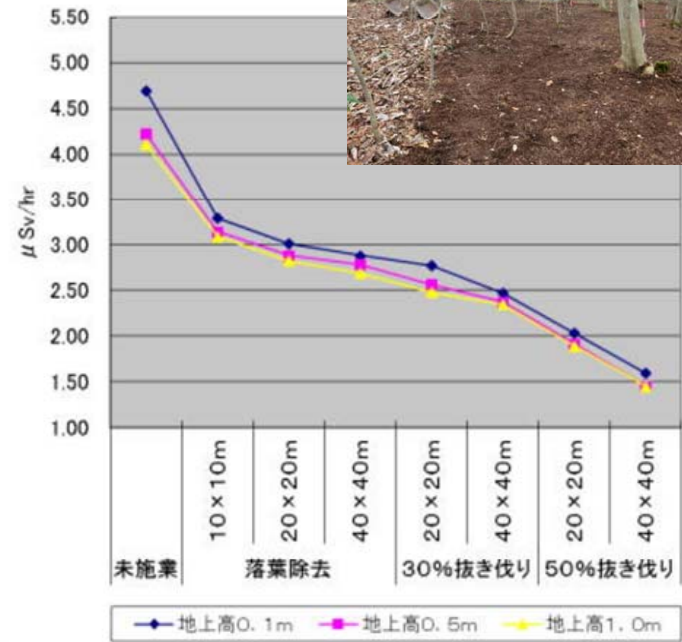


図2. 広葉樹林

## 【粉塵等の調査】

- 森林作業時に舞いあがる粉塵調査では、1μSv前後の森林においては、放射能濃度は<sup>134</sup>Csで $1.7 \times 10^{-7}$ から $6.9 \times 10^{-6}$ Bq/L、<sup>137</sup>Csで $3.9 \times 10^{-7}$ から $9.8 \times 10^{-6}$ Bq/Lであった。これらは規定値<sup>134</sup>Csで $2 \times 10^{-3}$ Bq/cm<sup>3</sup>、<sup>137</sup>Csでは $3 \times 10^{-3}$ Bq/cm<sup>3</sup>よりも大きく下回った。

- 落葉除去と30%間伐を組み合わせれば、針葉樹林で約30%、広葉樹で約40%の低減化が図られる。伐採による除去物の量は膨大となるため、除去物のエネルギーへの活用等、軽減化の手段を見いだす必要がある。
- 1μSv前後の森林では、森林作業時に舞い上がる粉塵による被ばくの影響は小さいが、マスク、簡易防護服、ゴーグル、ゴム手袋等を装備することが必要。

事業の概要

汚染された森林内落葉等を安全かつ効率的に除去・回収する技術の確立。3つの技術を組み合わせることで効率化を図る取り組みの継続的な活用を実規模で確認する。

- ・ 一般的なバキュームカーを用いた落葉吸引除去
- ・ 吸引配管途中に設けたタンクによる中間回収
- ・ モノレールによる回収物の運搬

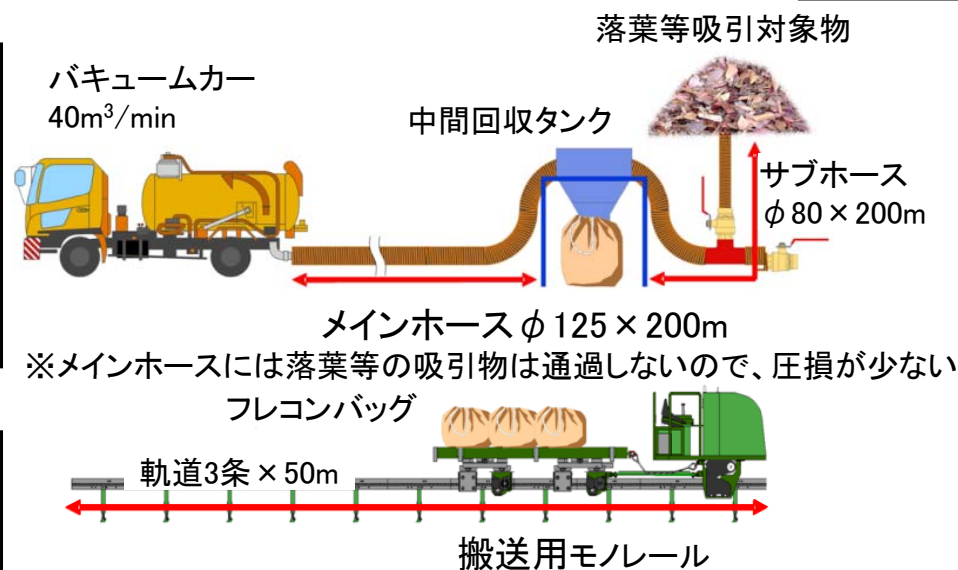
実施内容

- ホース長さを変数とした吸引量試験  
メインとサブのホースの組合せ18ケースについて、同量の落葉に対する吸引時間を測定した。
- 林野における作業効率試験  
通常型および改善型(図1-2)それぞれで10m×10mのエリア内で吸引回収を行い、回収物重量と作業時間を測定した。

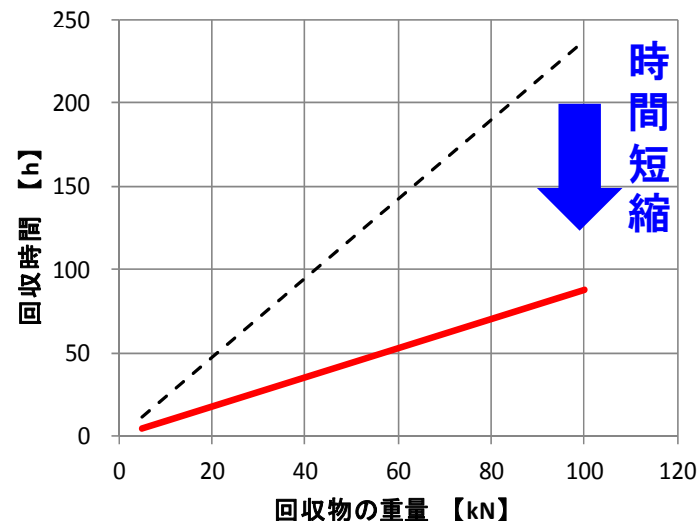
結果

中間回収タンクおよびモノレールのない通常型と本提案の改善型で比較した結果。

- 吸引作業の限界距離: 150%向上(最小吸引量を0.03kN/minとした場合)通常型400mに対して改善型600mの結果が得られた。
- 作業効率(右図): 37%向上(回収重量を100kNとした場合)
- 落葉回収作業のコスト: 同等(多量の落葉等を回収する場合)



◎落葉回収作業の作業効率の比較



# 森林除染事業の効率化実証試験等

## ②放射性物質汚染土を用いたセメント固化物の土工材料としての利用

付79

### 事業の概要

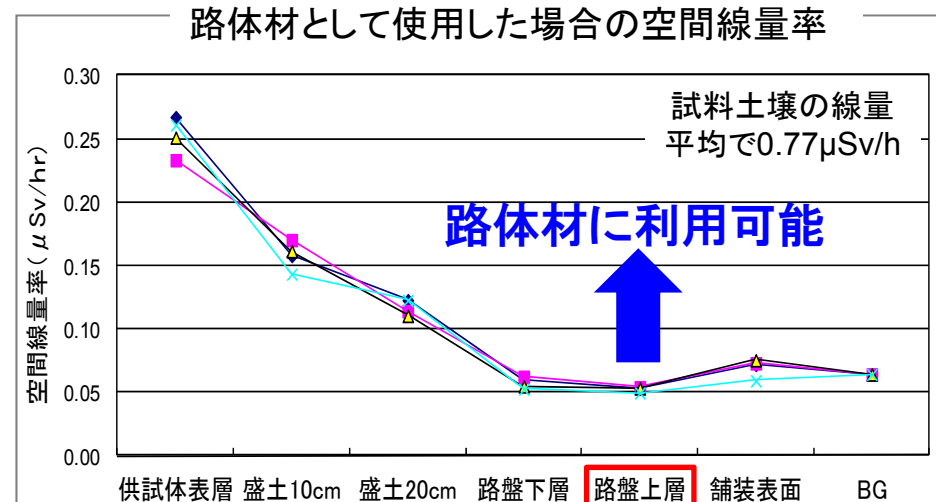
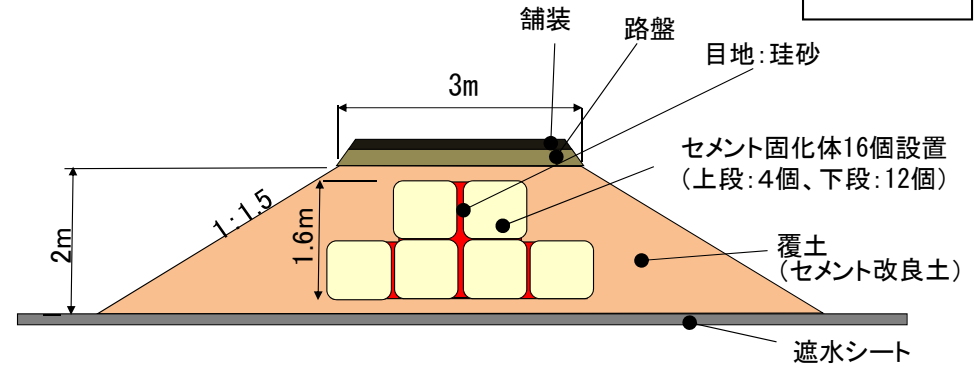
低濃度の汚染土をセメント等の固化材を混合して固化し、路体材として安全に活用する技術の確立を目指す。現地で有効利用が求められる高炉スラグやフライアッシュ、地域によっては調達しやすい海水を使用し、安価で効率的な改良方法を確認した。

### 実施内容

- 固化材配合選定  
固化後の強度、放射能濃度、材料コストを比較する。
- 固化体の製作しやすさ確認  
土壌の配合・フレコンバッグ詰込作業の所要時間を測定する。
- 実規模モデルの道路盛立て施工性確認  
実際のサイズで道路盛立てをし作業性を確認する。

### 結果

- 最適な固化材の配合(目標強度の2倍を確保)  
普通セメント75%、フライアッシュ25%、  
添加量270kg/m<sup>3</sup>(スラリー添加)
- 固化体製作の所要時間: 1固化体あたり45分
- 路体材に利用した場合の空間線量率:  
バックグラウンドと同程度
- コストメリット: 産業廃棄物処分費用と同等以上



# 森林除染事業の効率化実証試験等

## ③アスファルト舗装道路の切削除去に際して発生する放射性廃棄物の減容化

付80

### 事業の概要

道路舗装合材からストレートアスファルトを抽出することにより、放射性物質が付着しているストレートアスファルトと骨材を分離し、骨材を有効利用することで除去物を減容する技術の確立を目指す。



アブソン式

遠心分離式

### 実施内容

- 切削深さ確認試験  
舗装合材の種類による放射性物質の浸透深さの違いを確認する。
- アスファルト抽出試験  
3種類の抽出方法について試験を実施。
  - ・燃焼式抽出(高温でアスファルトを燃焼させて分離)
  - ・アブソン式抽出(溶剤を混合して過熱して分離)
  - ・遠心分離式抽出(溶剤を混合しながら遠心力を加えて分離)

### 結果

- 舗装種類による放射性物質の浸透深さの違いを定量的に確認。  
⇒汚染度合の深さに対応した切削深さを設定することで除染率を効率的に向上できる。
- ストレートアスファルトと骨材との分離により、放射能濃度を低減でき、放射性廃棄物を減容できることを確認した。また、分離後の骨材を水洗いし、細粒分を除去すると、放射能濃度がさらに低減することを確認した。  
⇒ストレートアスファルトに限らず、75 $\mu$ m以下の細粒分にも放射性物質が付着していると推定される。  
⇒減容率:89.6%(抽出後水洗いした場合)

