

佐藤工業株式会社	正会員	○前田幸男	正会員	辻野修一
佐藤工業株式会社	正会員	歌川紀之		楠岡弘康
佐藤工業株式会社	正会員	片野富雄		
若築建設株式会社	正会員	森 晴夫	正会員	木俣陽一
筑波大学	正会員	京藤敏達		

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震に伴い発生した福島第一原子力発電所の事故により、放射性物質による広域の土壌汚染が問題となった。「除染関係ガイドライン」¹⁾に基づき実施される表土の削り取り、道路側溝汚泥の清掃、枝打ち・落葉除去などの除染作業で発生する膨大な量の除去土壌・廃棄物は約1,500万～2,800万m³と推定され²⁾、現地保管、仮置きー中間貯蔵施設ー最終処分地への運搬・貯蔵の際に、減容化が大きな課題となる。

このような観点から、放射能汚染土壌を特殊な薬品を用いず洗浄・分級し、放射性物質が吸着して濃度が高い微粒分を分別、除去することにより減容化を図るシステムの開発に着手し、福島県白河市で実施した平成23年度(独)日本原子力研究開発機構「除染技術実証試験事業」において、その効果が確認された^{3),4),5)}。

さらに、同実証実験の成果を踏まえ、処理能力向上のためのシステム構成設備の改良、機種変更、増設を行い、福島県「泉崎村公共施設除染作業業務委託」に実機プラントを製作・導入し、グラウンドの除染作業で発生した汚染土壌に対して洗浄・分級処理を行った。

ここでは、白河市での実証試験から泉崎村での除染作業への適用までの開発過程および処理システム概要、また、本システムの運転条件、汚染土壌性状に対する洗浄土の放射能濃度低減率、洗浄土／汚染土壌比などの除染・減容化の結果について報告する。

2. 白河市における実証実験

2.1 放射能汚染土壌の削り取り

実証試験は福島県白河市内の運動公園にプラントを設置し、処理対象の放射能汚染土壌は公園内の野球場の内野部400m²(=20×20m)より削り取り採取した(写真-1)。

放射性セシウムは地盤表層部に蓄積されることから、削り取り厚さを決定するため、グラウンド深さ方向ごとの放射能濃度を測定した。図-1に示すように、地表から10mm程度までは、13,000～20,000Bq/kg程度の比較的高い放射能濃度を示すが、20mm以深では1,000Bq/kg以下となり、地表付近の1/20～1/10と深さとともに減少する。これらの結果をもとに、削り取り厚さを地表から25mmとした。



写真-1 試験場所(破線内：野球場内野を削り取り)

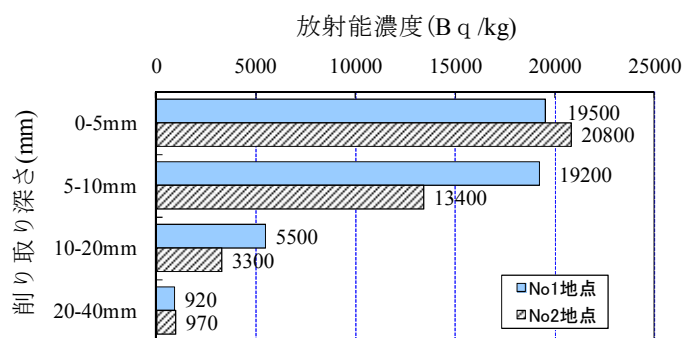


図-1 削り取り深さ方向の放射能濃度

キーワード 放射能汚染, 除染, 減容化, 高压洗浄, 分級, マイクロバブル

連絡先 〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山14-10 佐藤工業株式会社 技術研究所 TEL 046-270-3091

2.2 試料土の粒度と放射能濃度

厚さ 25mm 削り取りした処理対象の土壌（以下；原土）の粒度は図-2 に示すように、粒径 75 μ m 以下細粒分は平均 23%, 75 μ m～425 μ m 砂分は 27%, 425 μ m 以上の砂礫は 50%の粒度組成を示し、含水比は 17%であった。原土全体の平均放射能濃度は 6,600Bq/kg 程度の値を示し、この原土を手洗い洗浄後に各粒径ごとの放射能濃度を測定した結果を図-3 に示す。同図より 425 μ m 以上の砂～礫は 1,000Bq/kg 程度、粒径 75 μ m～425 μ m の細砂は 1,000～2,500Bq/kg 程度、75 μ m 以下のシルト、粘土の微粒分で 20,000Bq/kg 以上の高い値を示した。

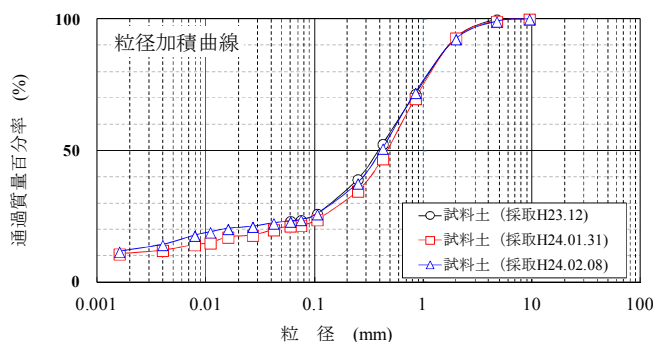


図-2 削り取り土壌（原土）の粒度分布

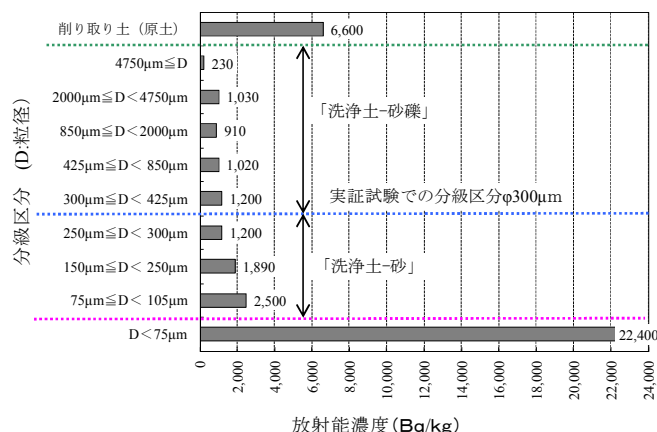


図-3 原土の粒径別 放射能濃度

2.3 実証試験に用いた処理システムの概要

(1) 処理システムの概要

実証試験に用いた処理システムは、地表部の削り取り土壌中の放射性セシウムが付着しやすい細粒分を取り除くことを目的とし、水洗いとふるい分けを組み合わせる方法とした。洗浄は特殊薬剤等を用いず、土粒子の粒径に合わせ、高压ジェット水流洗浄とマイクロバブル渦崩壊洗浄の2段階とし、ふるい分けは2段階の目開きの振動ふるい、サイクロンを用いφ75 μ m以上の砂分を分級した。φ75 μ m以下の微粒分は沈降分離の後、遠心分離装置で脱水し放射性廃棄物として保管し、分離水はマイクロバブル浮上分離濁水処理装置により濁水処理をして再利用する方式とした（図-4）。

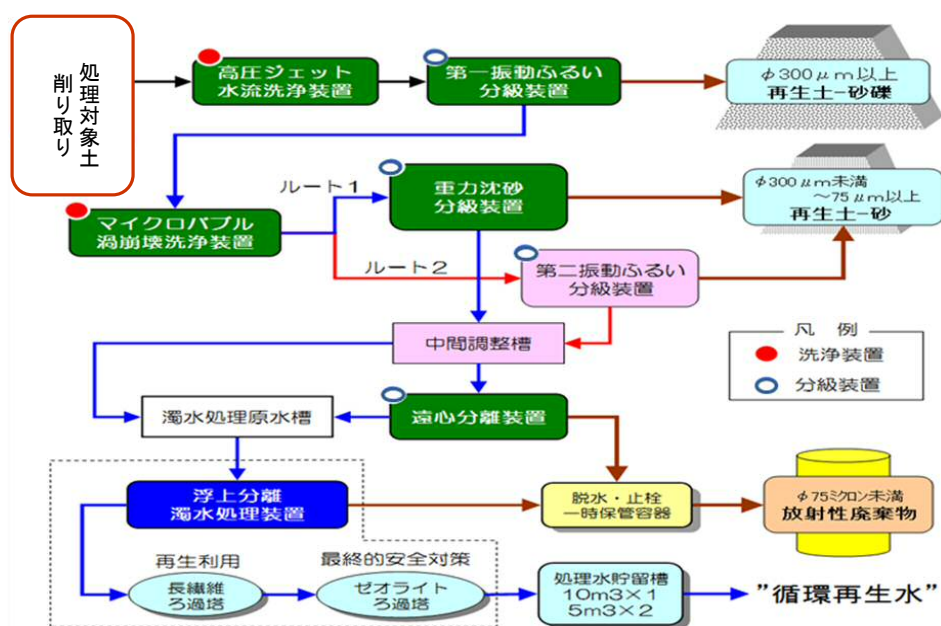


図-4 実証試験における処理フロー

本システムを構成する装置のうち、①高圧ジェット水流洗浄装置、②マイクロバブル渦崩壊洗浄装置、③マイクロバブル浮上分離濁水処理装置の3装置以外は、一般に用いられる泥水処理装置の振動ふるい（サイクロン含む）、遠心分離（スクリーデカンタ）などの汎用機械を用いた（写真-2）。

(2) 高圧ジェット水流洗浄装置

高圧ジェット水流洗浄装置は、写真-3に示すように、プランジャーポンプより吐出される高圧水流（15MPa）により発生する負圧で土壌を吸引させ、静止型混合器の配管内で洗浄する。管を通過する際の水流、土粒子同士または土粒子と管内表面との接触などによって、土塊の溶解、土粒子表面の細粒分を剥離させる。

洗浄後、第一振動ふるいで分級し、ふるい残留の砂礫（ $\phi 300\mu\text{m}$ 以上）を回収、ふるい通過分の $\phi 300\mu\text{m}$ 以下粒子の泥水は、次工程のマイクロバブル渦崩壊洗浄装置で処理を行った。

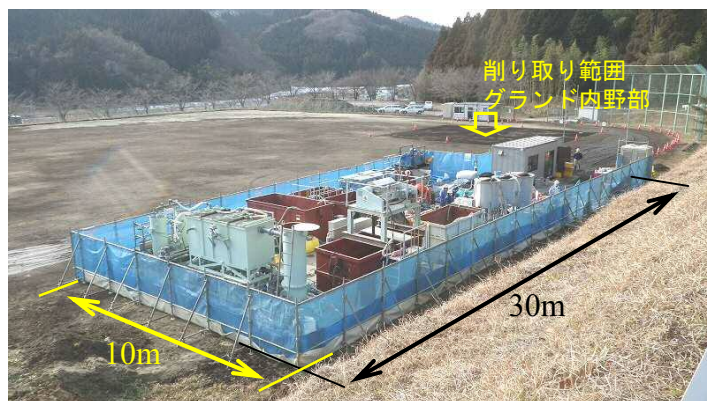


写真-2 プラント全景（実証試験：白河市）

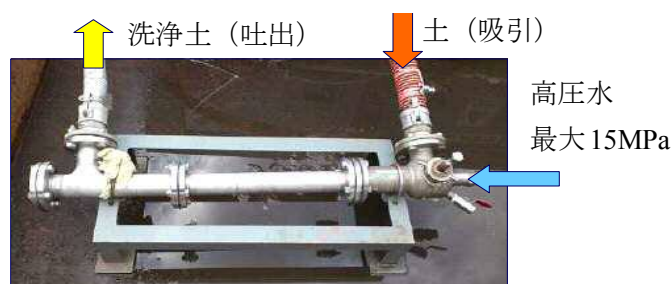


写真-3 高圧ジェット水流洗浄装置

(3) マイクロバブル渦崩壊洗浄装置

マイクロバブル発生装置は、ノズル先端部で毎秒500回転の高速旋回流とマイクロバブルが発生時のキャビテーションにより、水流、土粒子同士あるいは土粒子と装置部材の摩擦によって、砂粒子表面の研磨、粒子に付着する微粒分の物理的洗浄を行う（写真-4）。洗浄は粒径 $300\mu\text{m}$ 未満の泥水を対象とし、洗浄後はサイクロン・第二振動ふるいで分級し、ふるい残留の砂（ $\phi 75\mu\text{m}$ 以上）は回収し、 $\phi 75\mu\text{m}$ 以下粒子が主体の泥水は、次工程の処理を行った。

マイクロバブル渦崩壊洗浄の土粒子の研磨効果の確認ため実証試験とは別途実施した実験の概要を図-5に示す。



写真-4 マイクロバブル渦崩壊洗浄装置

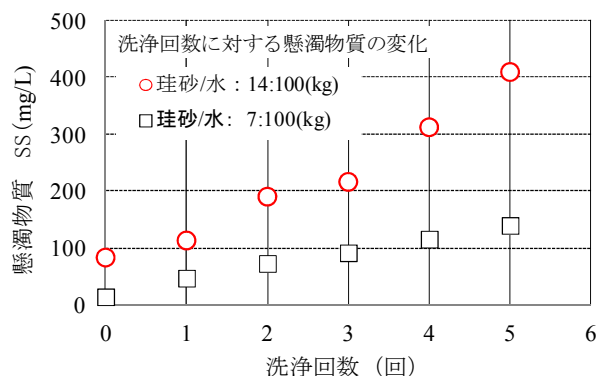


図-6 マイクロバブル渦崩壊洗浄装置による土粒子の研磨効果確認

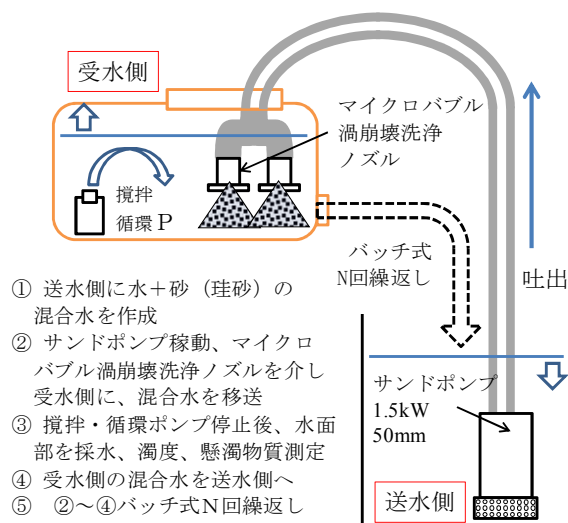


図-5 マイクロバブル渦崩壊洗浄装置の研磨効果確認実験の概要

実験は、細粒分が少なく粒径が均一な珪砂と水を所定比率で混合した泥水を同装置によりバッチ式で洗浄した。洗浄によって受水側に移送された泥水を水面付近より攪拌循環ポンプ停止後の所定時間に採水し、懸濁物質を測定した。この後、送水側に混合泥水を移し、N回の洗浄を行い、洗浄回数と懸濁物質の変化を調べた。

実験の結果、図-6 に示すように混合泥水の懸濁物質は洗浄回数に伴って増加し、この傾向は混合泥水中の土粒子量が多い珪砂／水：14:100(kg)の場合で大きくなることが認められた。

(4) マイクロバブル浮上分離濁水処理装置

前工程で砂分（φ75μm 以上）が除去された泥水は中間調整槽で沈降分離し、遠心分離脱水処理（スクリュデカンタ）を行い、沈降分離の分離水および遠心分離脱水の排出濁水に対してマイクロバブル浮上分離濁水処理を行う。

写真-5 に示す同処理装置は、凝集剤を添加した濁水にマイクロバブルを混入して、濁水中の放射性セシウムが吸着した粘土・シルトの細粒分をフロックとして浮上分離させて回収し、放射性廃棄物として保管・仮置きした。また、懸濁物質を除去した処理水は、再度洗浄水として利用、また、プラント撤去時には、放流基準、放射能濃度の基準を満たすことを確認して処分する。

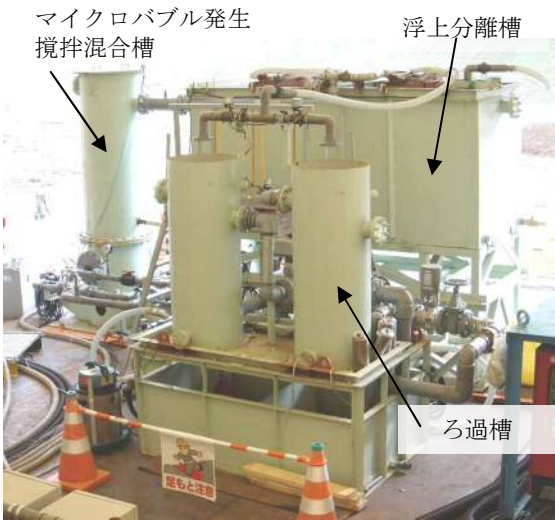


写真-5 マイクロバブル浮上分離濁水処理（泉崎村設置状況）

2.4 白河市における実証試験結果

(1) 洗浄方法に対する放射能濃度

運転条件に対する放射能濃度は、図-7 に示すように原土（処理対象の削り取り土）6,200～6,900Bq/kg を洗浄・分級した場合、砂礫は約1,000Bq/kg 程度、砂は1,000～2,000Bq/kg の値を示し、ABD のケースの高圧ジェット水流、マイクロバブル渦崩壊の2段階洗浄の場合（平均1,175Bq/kg）に比べ、CE ケースの高圧ジェット水流のみの1段階洗浄（平均1,641Bq/kg）、手洗いの場合（1,851Bq/kg）に比べて低い濃度を示した。

原土に対する洗浄土の放射能濃度比（図-7 中の下表）をみると、粒径 φ300μm 以上の砂礫の場合は大差が無いが、粒径 φ75～300μm の砂では、手洗い>1 段階洗浄>2 段階洗浄の順に放射能濃度比が小さく、洗浄の効果が認められた。

(2) 放射能、土量の変化

粒径 φ75μm 以下の廃棄脱水汚泥の放射能濃度は平均 26,714Bq/kg、原土 1m³（湿潤重量 1.8t）に対する廃棄脱水汚泥の発生量は 564.1kg、0.35m³（平均含水率 43%、湿潤単位体積重量 1.6t/m³）となり、脱水汚泥以外の洗浄土（砂・砂礫）を再生土とすると、表-1 に示すように、減量率は 68.7%、減容率は 65.0%、また、放射能濃度の低下率は 85%となった。

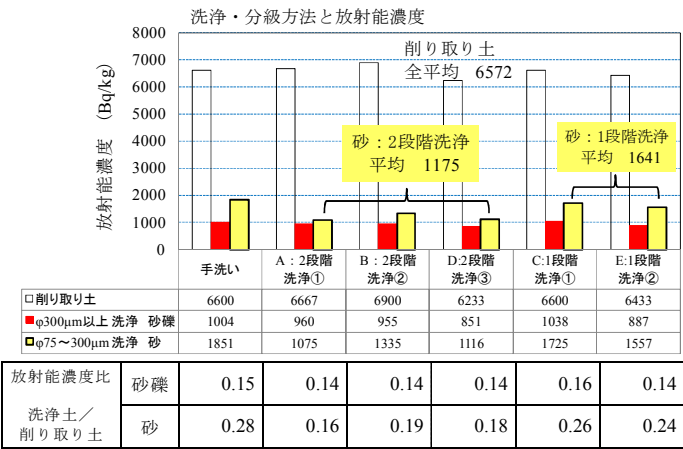


図-7 洗浄・分級方法に対する放射能濃度

表-1 処理結果（放射能、土量の変化）

放射能濃度低下率	減量率（重量比）	減容率（容積比）
（原土-洗浄土）／原土	（原土－廃棄脱水汚泥）／原土	
（6600-1000）／6600＝	1-564.1／1800＝	（1-0.35）／1＝
85%	69%	65%

注：原土：処理対象の（2.5cm）削り取り土
洗浄土：φ 300 μ m以上の砂礫、粒径 φ 75～300 μ mの砂の混合砂
廃棄脱水汚泥：粒径 φ 75 μ m以下のスクリュデカンタ排出土（脱水汚泥）

(3) 除染による空間線量率の推移

除染前後のグラウンドの削り取り範囲 20×20m の空間線量率の推移を図-8 に示す。GL+0.5m における測定値の平均は、除染前 1.225 から除染後 0.707μSv/h となった。なお、バックグラウンド分布は 0.4～0.6μSv/h, 領域付近の法面法尻側に近い 3 塁側が高い値を示した (写真-1, 2 参照)。

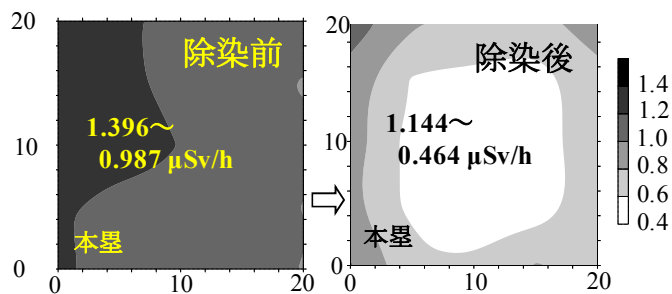


図-8 除染範囲の空間線量率の変化 (GL+0.5m)

(4) マイクロバブル浮上分離濁水処理後の

放射能濃度

図-9 にマイクロバブル浮上分離濁水処理前の原水 (遠心分離の排水, 中間調整槽のうわ水), 浮上分離処理水 (浮上懸濁物除去後), 長繊維ろ過処理水の濁度の測定結果を示す。原水中の懸濁物を浮上分離～ろ過処理工程 (図-4 参照) において除去し, 表-2 に示すように処理水の放射能濃度は不検出 (検出下限値: 1Bq/L) となることが確認された。

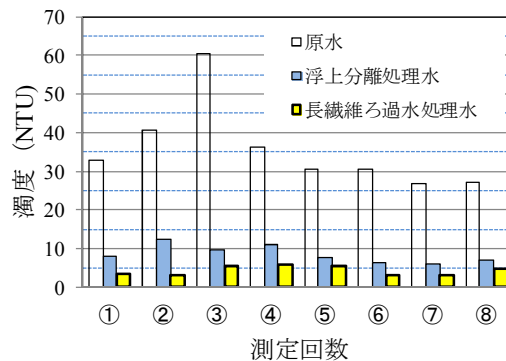


図-9 マイクロバブル浮上分離濁水処理時の濁度

3 除染業務におけるプラント稼働

3.1 除染業務に用いた減容化プラント

前述の白河市における「除染技術実証試験」の結果を踏まえ, 処理量 15～20m³/日の実機プラントを製作し, 同プラントを

表-2 マイクロバブル浮上分離濁水処理時の放射能濃度

		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
放射能濃度 Bq/L	原 水	ND	ND	4	ND	4	1	ND	ND
	浮上分離処理水	ND	ND	1	ND	ND	ND	ND	ND
	長繊維ろ過処理水	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
ND: 検出下限値 (1Bq/L以下)									

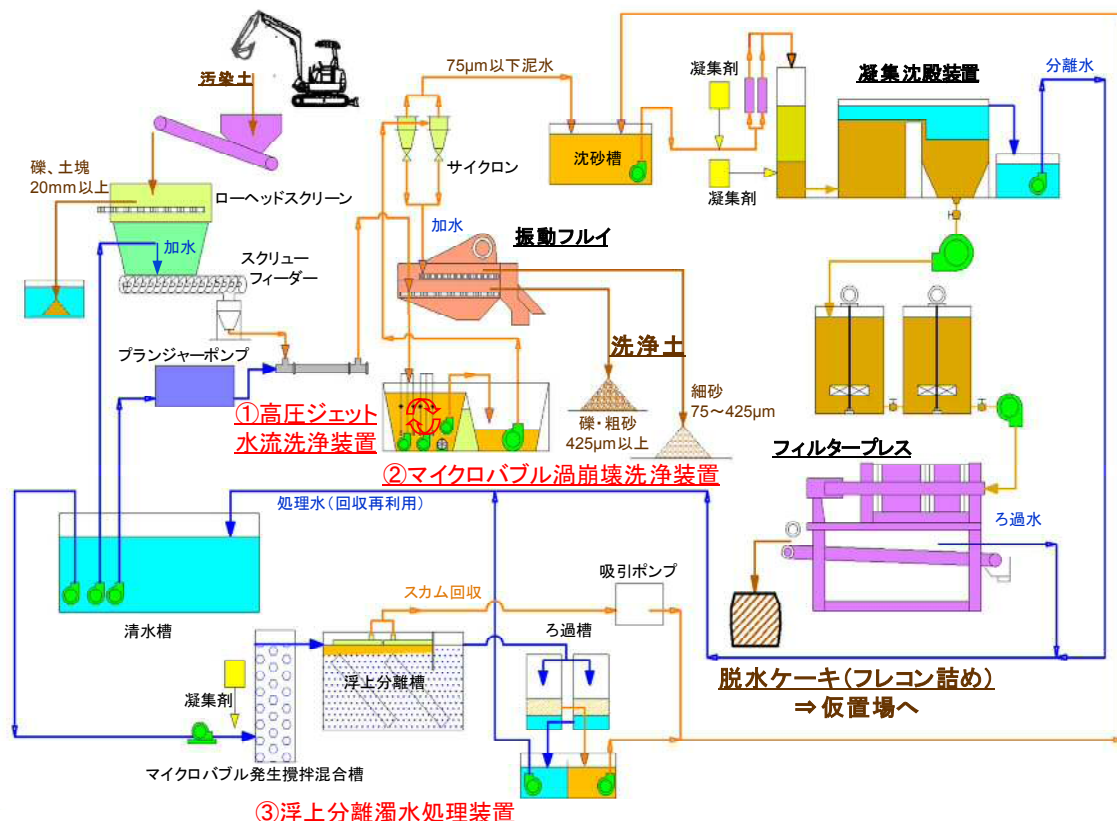


図-10 実機プラントの処理フロー

「福島県泉崎村公共施設除染作業業務」に導入し、グラウンドの削り取り土の減容化処理を実施した。なお、実機プラントでは処理量向上のため、図-10の処理フローに示すように、ベルコン、ローヘッドスクリーン、凝集沈殿装置、フィルタープレスの導入、高圧ジェット水流洗浄装置の機種変更、水槽・スラリー槽等の増設を行った。なお、洗浄土の仮置き、除染作業の側溝洗浄の廃水用水槽（20m³×2 槽）を除き、プラントの各設備は30×15mのテント内に設置した（写真-6）。



写真-6 プラント設置状況

3.2 実機プラントによる処理

(1) 対象汚染土壌の性状（粒度、放射能濃度）

処理対象の汚染土壌（原土）は、除染対象のグラウンド等からの削り取り土である。削り取り深度ごとの放射能濃度は、図-11に示すように地表面で高く、表層 0～20mm で 2,000～4,000Bq/kg 程度で、20mm 以深は低い値であった。汚染土壌原土は、表層 50mm を削り取ったもので、平均 1,100Bq/kg 程度であった。原土および各処理段階の粒度分布を図-12に示す。

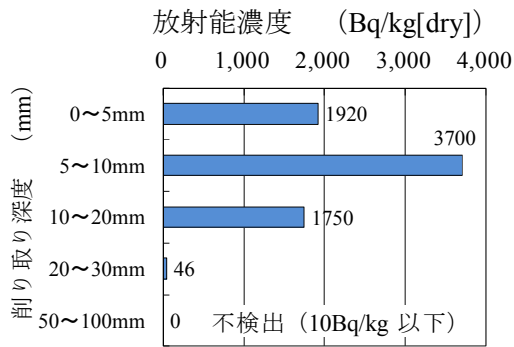


図-11 削り取り深度ごとの放射能濃度

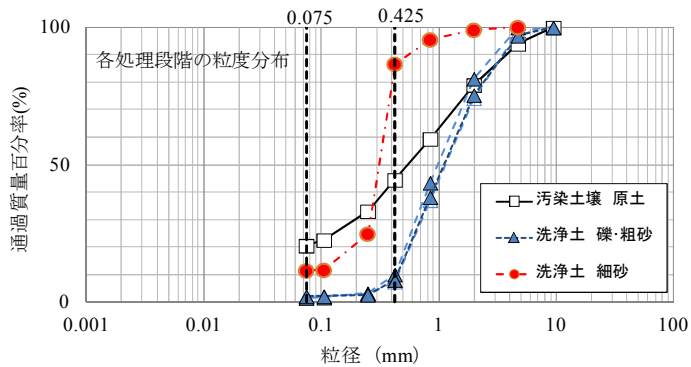


図-12 各処理段階の粒度

(2) 処理結果（放射能濃度低下率、減量・減容化率）

処理結果を表-3に、原土（洗浄前）および各処理段階後の放射能濃度、粒度組成を図-13に示す。

同図より振動フルイ下段で分級される洗浄土礫・粗砂は原土の 55%（粒径 0.425mm 以上主体）で 169Bq/kg、フルイ上段の洗浄土細砂は原土の 27%（粒径 0.075～0.425mm 主体）で 450Bq/kg、仮置土の脱水ケーキは原土の 17%（粒径 0.075mm 以下主体）で 4,150Bq/kg となった。

また、マイクロバブル浮上分離濁水処理後の水の放射能濃度は不検出（検出下限値：1Bq/L）となることが確認された。

表-3 処理結果（放射能濃度低下率、減量・減容化率）

変化率	放射能濃度 低下率	減量率 (乾燥重量比)	減容化率 (容積比)
	(原土-洗浄混合砂) / 原土	(原土-脱水ケーキ) / 原土	(原土-脱水ケーキ) / 原土
	(1093-254)/1093=	(100-17)/100=	(1-0.24)/1=
	77%	83%	76%
備考	混合砂は礫・粗砂と細砂の重み付平均 ケーキw=70%、 $\gamma_t=1.58\text{ t/m}^3$ 原土w=13%、 $\gamma_t=1.5\text{ t/m}^3$		

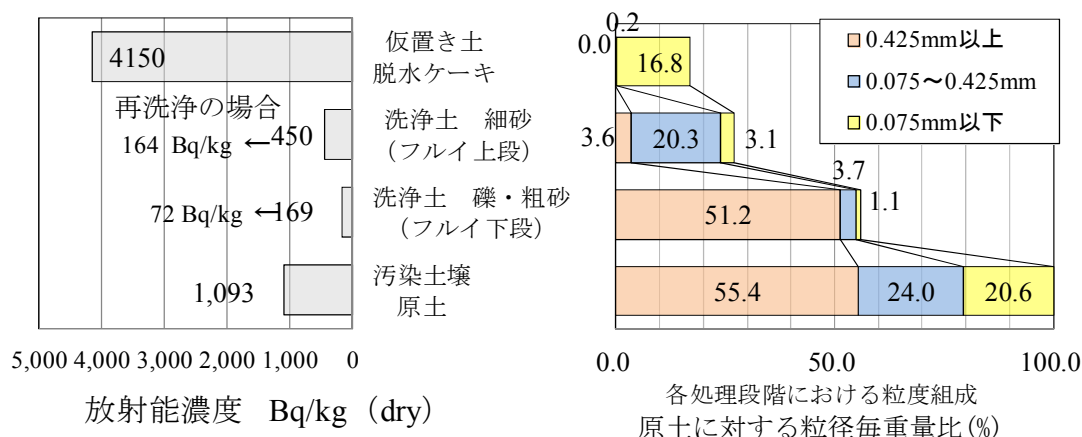


図-13 各処理段階における放射能濃度，粒度組成

(3) 洗浄方法による放射能濃度の低下

本プラントでの通常の 2 段階洗浄に対して，洗浄方法を変えた場合の放射能濃度測定結果を表-4 および図-14 に示す．同表の「再洗浄（手洗い）」とは，通常洗浄後の礫・粗砂，細砂を混合した洗浄土を 75 μ m ふるいで水洗いした場合，「2 回洗浄（2 段階洗浄を 2 回）」とは，通常洗浄後の細砂と粗砂の混合砂を再度，「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」で洗浄後，振動ふるいで分級した場合，「50%送土（通常）」とは，通常運転 14.1t/hr (12.2m³/hr) のベルコンの送土量に対して 54%にした場合である．

「2 回洗浄」の場合，通常洗浄 100 に対して放射能濃度は約 40%となり，粗砂（砂礫）の場合には，通常の安全基準の 100Bq/kg 以下の値となった．また，「再洗浄（手洗い）」については，洗浄砂・砂礫中の微粒分 (ϕ 75 μ m 以下) の濯ぎ効果，「50%送土（通常）」については，振動ふるい上の土量による水切，分級効果の影響により放射能濃度の低下が認められた．

表-4 洗浄方法による放射能濃度の低下

洗浄方法	細砂 (0.075~0.425mm主体)		礫・粗砂 (0.425mm~20mm主体)	
	放射能濃度 Bq/kg	通常洗浄 に対する比	放射能濃度 Bq/kg	通常洗浄 に対する比
通常洗浄	450	100.0%	169	100.0%
再洗浄 (手洗い)	210	46.7%	93	55.0%
2回洗浄 (2段階洗浄を2回)	164	36.4%	72	42.6%
50%処理量 (通常洗浄)	340	75.6%	123	72.8%

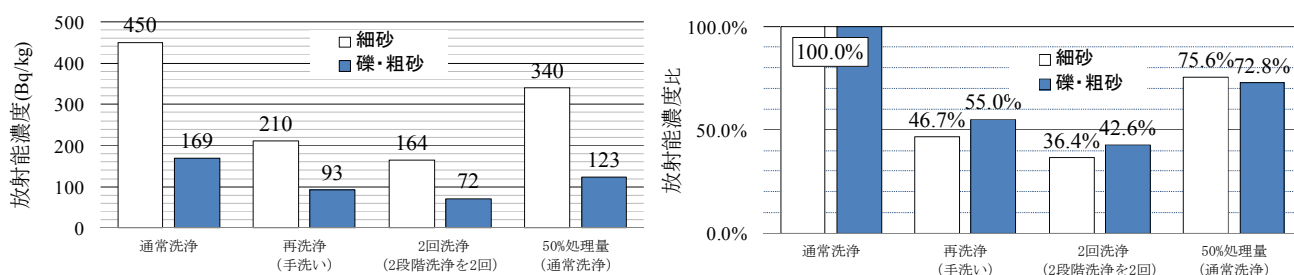


図-14 洗浄方法による放射能濃度および低減率

図-15 に示すように、洗浄土（粗砂、細砂、混合砂）中の細粒分含有率の増加に伴い放射能濃度は増加するため、洗浄後の濯ぎ、分級による細粒分の除去が放射能濃度の低下に必要となる。なお、同図の換算放射能濃度とは、空間線量率－放射能濃度の相関より求めた値である。

なお、洗浄水については、白河市における実証実験と同様に、所定基準を満たすまでマイクロバブル浮上分離処理を行った後に放流処分した。また、泉崎村においては、バキューム車で搬入された除染作業の洗浄排水を再利用したため、プラント始動時以外は水道水の給水を行わなかった。

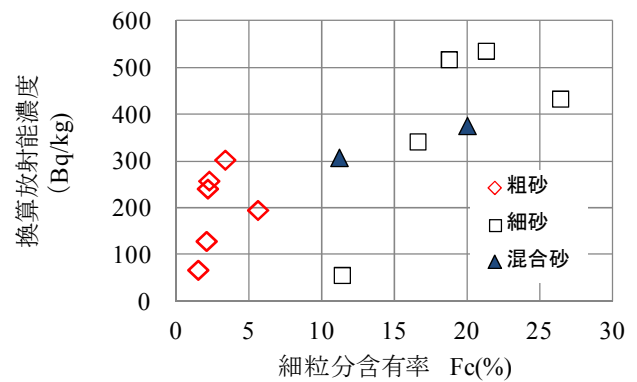


図-15 洗浄土中の細粒分含有率と放射能濃度

4. おわりに

(独)日本原子力研究開発機構「平成 23 年度 除染技術実証試験事業」の試験において、薬剤等を使用しない 2 段階（高圧ジェット水流洗浄およびマイクロバブル渦崩壊洗浄）の水洗浄ならびにマイクロバブル浮上分離濁水処理を用いることを特徴とするシステムを開発した。さらに、同実証試験結果を踏まえて、処理量 15～20m³/日の実機プラントを製作し、「福島県泉崎村公共施設除染作業業務」に導入、グラウンドの削り取り土の減容化処理を実施し、プラント運転条件、汚染土壌性状に対する処理能力、操作性の確認を行った。

この結果、6,000～7,000Bq/kg の処理対象原土（白河市）の場合には 85%、1,000Bq/kg の処理対象原土（泉崎村）の場合には 77%の洗浄土の放射能濃度の低下が確認された（表-1、表-3 参照）。

なお、白河市での実証試験は、内閣府委託業務「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務」の一部として、独立行政法人 日本原子力研究開発機構より公募された、平成 23 年度「除染技術実証試験事業」に採択された、「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」の成果を取りまとめたものである。

最後に、本除染業務において、ご指導・協力頂きました福島県白河市、泉崎村の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：除染関係ガイドライン，平成 25 年 5 月 第 2 版
- 2) 環境省ホームページ：http://josen.env.go.jp/area/processing/interim_storage_facility.html
- 3) 佐藤工業：高性能洗浄装置洗浄装置を用いた汚染土壌の除染および減容化技術報告書，2012.2.29
- 4) 独立行政法人日本原子力研究開発機構 福島技術本部ホームページ，2012.3.26 除染モデル実証事業等の成果報告会 (3)除染技術実証試験事業の結果報告：<http://www.jaea.go.jp/fukushima/decon04/ke05.pdf>，またはポスターセッション <http://www.jaea.go.jp/fukushima/decon04/ps07.pdf>
- 5) 前田幸男，辻野修一 他：高性能洗浄装置を用いた放射能汚染土壌の除染および減容化技術，技術研究所報 No.37，pp.45 - 52，2012