

土壌洗浄法による放射性物質汚染土壌の 浄化・減容化および濃縮残渣処理の自動化

毛利 光男*、土田 充、馬場 直紀、中嶋 卓磨

清水建設株式会社 エンジニアリング事業本部 土壌環境事業部 (〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1)

Application of Soil Washing System to the Volume Reduction of Radioactively Contaminated Soils and Automated Treatment of Sludge Cake

Mitsuo MOURI*, Mitsuru TSUCHIDA, Naoki BABA, and Takuma NAKAJIMA

Soil Remediation Div., Engineering Hdqrs., Shimizu Corp. (2-16-1 Kyobashi, Chuo-ku, Tokyo 104-8370 Japan)

Summary

The pilot plant study was intended to evaluate; a) the removal efficiency of radioactive Cs, b) the volume reduction rate of feed soils, c) the volumetric rate and concentration rate of discharged sludge cake, and d) the effect of radiation exposure reduction by automated filter press unit and automated packing unit of sludge cake. As a result of this study, following observations were made; 1) the radioactive Cs content of clean sands ranged 882~2,940Bq/kg as compared to the feed soils of 8,790 to 26,270Bq/kg, 2) the removal efficiency of radioactive Cs ranged 84~92% of feed soils, 3) the volume reduction rate of feed soils ranged 70~86% (ave. 82%), and 4) the automated filter press unit and the automated packing system of sludge cake were helpful for workers in reducing radiation exposure. It is concluded that soil washing system can effectively reduce volume of radioactively contaminated soils and can be practically used in Fukushima for remediation of soils.

Key Words: Soil washing, Radioactively contaminated soil, Soil remediation, Volume reduction, Radiation exposure reduction

1. はじめに

環境省は、除染とは環境中にある放射性物質による被曝量を低減させる方法である「取り除く」、「遮蔽する」、及び「遠ざける」を組み合わせる対策を行なうことであると定義し、除染によって年間の追加被曝線量を1 mSv以下にすることを長期的目標としている。広範囲な地域で放射性Csを含む表層土壌、側溝の汚泥、草木類や落葉を取り除くため、膨大な量の汚染土壌と廃棄物（環境省の試算によると福島県内で2,800万 m^3 ）が集積することが予想される。除染によって発生する汚染土壌等は、各市町村の仮置き場で3年間保管された後、中間貯蔵施設へ搬出され、そこで30年間保管される。膨大な汚染土壌等を保管する中間貯蔵施設の建設には、広大な施設用地と莫大な建設費用が必要となる。このため、膨大な量の汚染土壌等を効率的に減容化する技術が強く望まれている。筆者らは重金属類や鉱物油による汚染土壌を対象としたオンサイト型土壌洗浄プラント（処理実績：累積300万ton）に携わってきたが、今まで培ってきた洗浄技術は放射性物質汚染土壌に対しても十分に適用できると考えている。

図1に示すように筆者らの試算では、除染によって発生する汚染土壌の95%は30,000 Bq/kg以下であり、この汚染土壌を土壌洗浄プラントで処理すると76%が公共工事において土木資材（砂）として活用できる3,000 Bq/kg以下の洗浄砂・砂利となる。すなわち、土壌洗浄を導入することによって、放射性物質

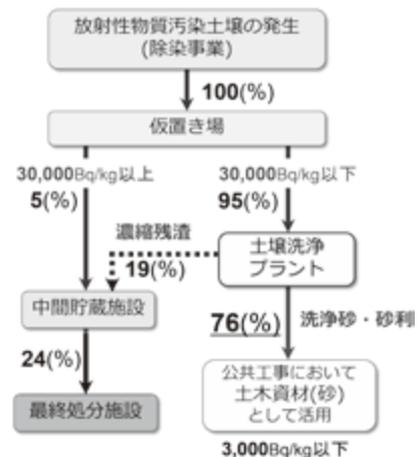


図1 土壌洗浄による放射性物質汚染土壌の減容化（筆者らの試算）

*Corresponding author: E-mail: mourim@shimz.co.jp

汚染土壌の減量率は76%となり、中間貯蔵施設への搬出量は発生土壌量の24%と大幅に低減されることが期待される。なお、図1の30,000 Bq/kg以下の割合(95%)は、文部科学省による放射性セシウムの土壌濃度マップ¹⁾を基に建物用地の除染対象面積と除染による除去土壌量(低濃度汚染土壌も含む)を試算した際に得られた値である。再利用率76%(=95%×0.8)は、洗浄処理における減量率を80%と仮定して得られた値である。

平成24年5月25日の環境省通知(東日本大震災からの復興復興のための公共工事における災害廃棄物由来の再生資材の活用について)には、「遮蔽効果を有する資材により地表面から30 cmの厚さを確保することで、およそ3,000 Bq/kg以下の再生資材を利用することが可能」と記載されている。これより、筆者らは3,000 Bq/kg以下を洗浄土として、例えば「津波防災緑地」の盛土の一部へ再利用することを提案している。また、平成24年4月10日の経済産業省通知(砕石及び砂利の出荷基準及び細則について)には「対象地域の屋外の公共工事に使用される製品については表面線量率が0.23 μSv/h以下であれば出荷可能」と記載されている。0.23 μSv/h以下、すなわち約1,000 Bq/kg以下の洗浄土はより広範囲な再利用が可能となる。

放射性物質汚染土壌の浄化・減容化を進める上での課題の中で、(1)高い放射性Cs除去率と高い減容率の両立と(2)作業員の被曝線量の低減は特に重要な課題であると考えている。洗浄土が3,000 Bq/kg以下を満足するためには、15,000 Bq/kgの汚染土壌に対しては80%以上、30,000 Bq/kgの汚染土壌に対しては90%以上の高い除去率が必要となる。一般に分級処理や表面摩擦を用いた浄化法では、放射性Cs除去率と洗浄土の回収率(=減容率)はトレードオフの関係にあるため、高い除去率と高い減容率を両立させること

は容易なことでは無い。また、濃縮残渣(脱水ケーキ)は放射性Csを高濃度に含有しているため、濃縮残渣処理に従事する作業員の被曝線量が増大することが懸念される。これを防ぐため、作業員の被曝線量を大幅に低減させる処置を洗浄システムに追加する必要がある。

本稿では、環境省の除染技術実証事業の一環として行った「減容率の最適化と濃縮残渣処理の自動化を特徴とする土壌洗浄技術」の実証試験の概要と主な結果について報告する。本実証試験では、図2に示すように(1)除去率と減容率を両立させるための表面処理後のスクラビング・フローテーションと(2)作業員の被曝線量を低減させるための濃縮残渣処理の自動化に関する技術の実証を主な目的とした。

2. 土壌洗浄技術と濃縮残渣処理の自動化の概要

(1) 土壌洗浄技術

放射性Cs汚染土壌の洗浄処理フローを図2に、土壌洗浄技術の基本概念を図3に示す。2段湿式フルイによって汚染土壌(feed)は、2 mm以上の礫・粗砂分と2 mm以下の土壌(feed < 2 mm)に篩い分けられる。2 mm以下の土壌スラリーは、ハイドロサイクロン(図4(a)を参照、HRT:数秒)によってオーバーフロー(細粒子分)とアンダーフロー(砂・細砂分)に分級される。放射性Csはその多くが細粒子分に付着・吸着しているため、細粒子分を分離することによって、土壌から放射性Csを効率良く分離、除去することができる。アンダーフロー中の砂・細砂分は、スクラバー(図4(b)を参照、HRT:4~6分)において複数の薬剤によって表面処理された後、スクラビングによって土壌粒子表面から汚染粒子が効果的に剥離される。続くフローテーション(図4(c)を参照、HRT:10~15分)において土壌中の放射性Cs吸着粒子は、清浄な土壌粒子との表面性状の違いを最大限利用して選択的に分離さ

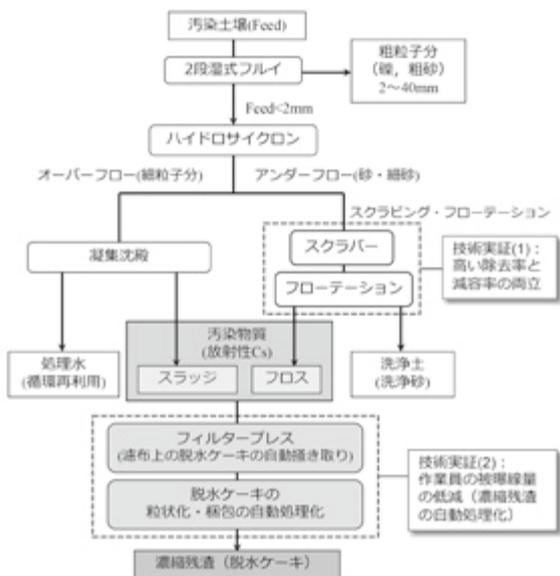


図2 放射性Cs汚染土壌の洗浄処理フローと技術実証の課題

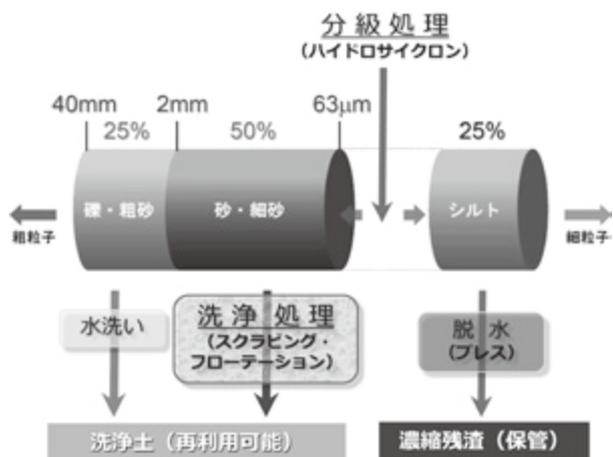


図3 土壌洗浄技術の基本概念

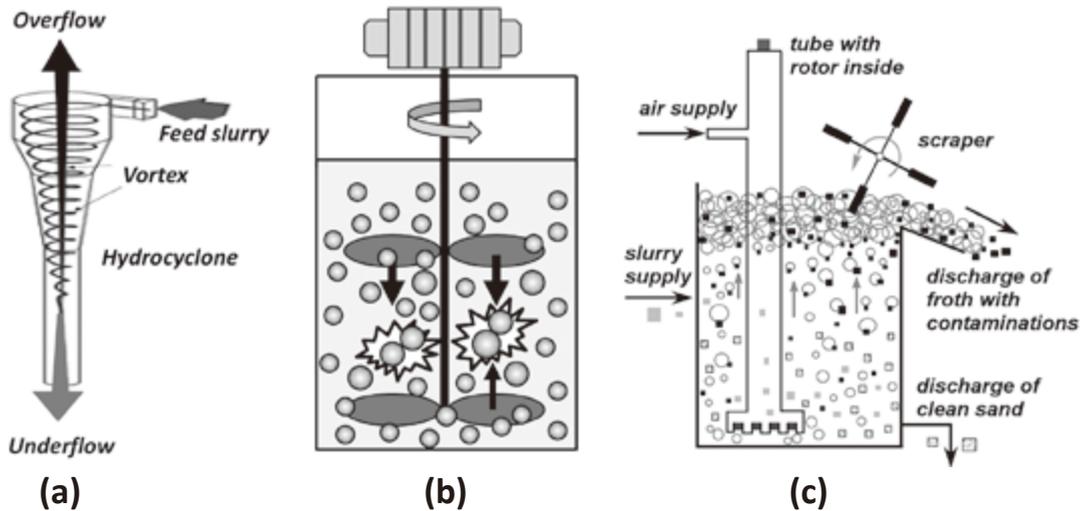


図4 土壌洗浄の主要プロセスの概要

- (a) ハイドロサイクロン
 - (b) スクラパー；薬剤による土壌粒子の表面処理後にスクラッピング（表面摩耗）を行うことで、土壌粒子の表面に強く付着しているCs吸着粒子を効果的に剥離する。
 - (c) フローテーション；放射性Cs吸着粒子は捕集剤を介して気泡に付着し、気泡とともにセル上部へ上昇し、フロス（froth）を形成する。汚染物質が付着しているフロスはスクレーパーによってかき取られる。汚染物質が除去された汚染土はセル底部から排出される。
- ※ (b) と (c) を合わせてスクラッピング・フローテーションと呼ぶ。



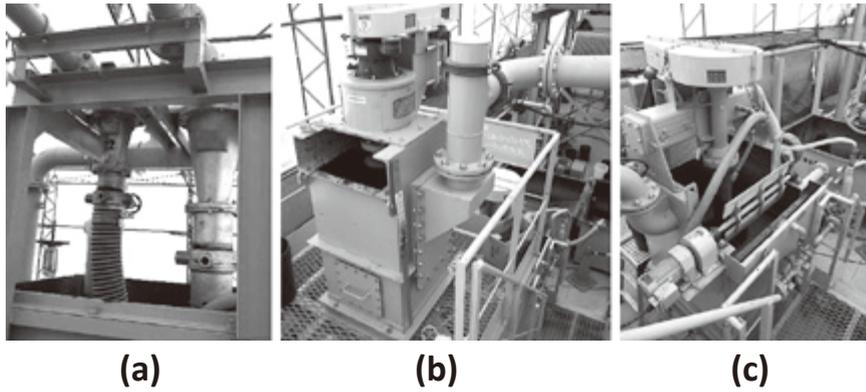
写真1 土壌洗浄技術の実証試験プラント

れる。フローテーションによって洗浄された砂・細砂分は、脱水工程を経て洗浄土となる。今回の実証試験では、pH調整剤、洗浄薬剤（アニオン系、カチオン系）、促進剤、抑制剤などを適宜使用した。放射性Csが濃縮されている濃縮残渣（濃縮汚染土）は脱水ケーキとして中間貯蔵施設へ搬出される。図3に示すように、粒度構成（乾燥重量比）が、礫・粗砂分25%、砂・細砂50%、細粒子分25%の場合では、再利用可能量が75%、保管が必要な濃縮汚染土量が25%となる。福島県双葉郡広野町に設置した土壌洗浄技術の実証試験プラントを写真1に示す。実証試験で使用した主要な試験装置を写真2に示す。

(2) 濃縮残渣処理の自動化

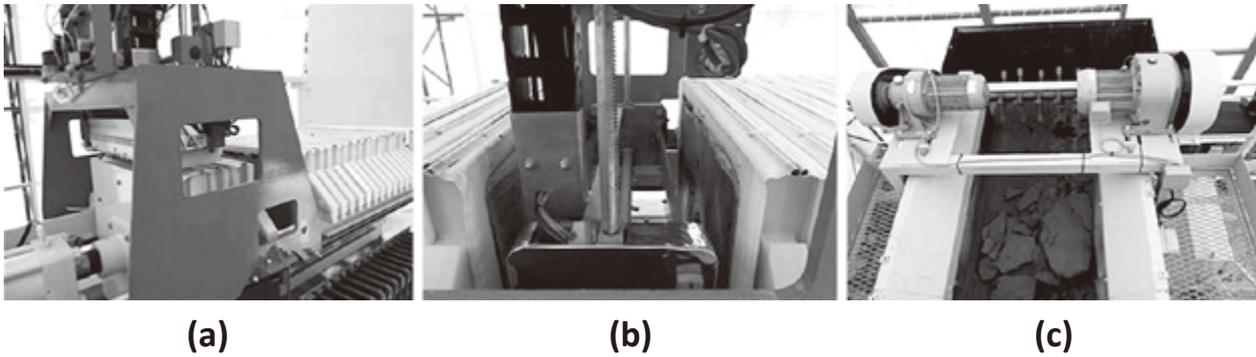
作業員の被曝線量を大幅に低減させるため、高濃度の放射性Csを含む濃縮残渣の一連の処理の無人化を図った。脱水

ケーキの自動掻取り機能、脱水ケーキを粒状に加工する造粒装置、および脱水ケーキのフレコンバッグへの自動梱包機能を追加することで、濃縮残渣処理の自動化の検討を行なった。フィルタープレスと新たに追加した脱水ケーキ（濃縮残渣）の自動掻取り装置を写真3(a)に、脱水ケーキの自動掻取り状況を写真3(b)に示す。通常はフィルタープレスの濾布に付着して残った脱水ケーキの掻取りは作業員が手作業で行う。フィルタープレスで強く脱水された脱水ケーキは、含水率35～40%の固く大きな板状のものであるため、そのままフレコンバックに詰めると脱水ケーキは嵩張って（空隙が非常に大きくなって）しまい、減容化の意味を損ねることになる。脱水ケーキは写真3(c)に示す破碎装置によって細かく破碎された後、写真4(a)に示す造粒装置によって小さなペレットに粒状化される（写真4(b)）。写真4(c)に示すように粒状化された濃縮残渣は、フレコンバックに隙間なく充填される。



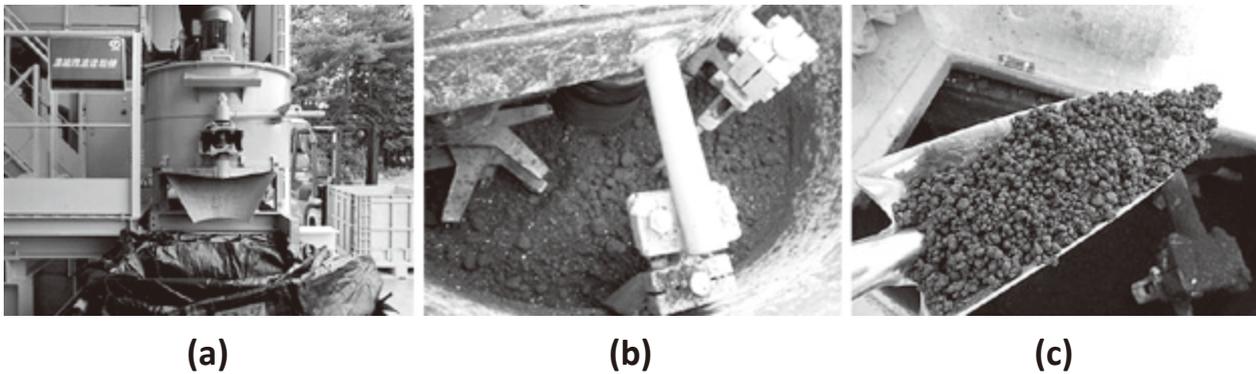
(a) (b) (c)

写真2 実証試験で使用了した試験装置
(a) ハイドロサイクロン、(b) スクラバー、(c) フローテーション



(a) (b) (c)

写真3 濃縮残渣(脱水ケーキ)の自動掻取りと破碎の状況
(a) フィルタープレスと自動掻取り装置
(b) 濃縮残渣(脱水ケーキ)の自動掻取り状況
(c) 濃縮残渣(脱水ケーキ)の破碎状況



(a) (b) (c)

写真4 濃縮残渣(脱水ケーキ)の粒状化
(a) 濃縮残渣(脱水ケーキ)造粒装置
(b) 濃縮残渣(脱水ケーキ)の造粒状況
(c) 粒状化された濃縮残渣(脱水ケーキ)

3. 土壤洗浄による浄化・減容化、濃縮残渣処理の自動化による被曝線量の低減

(1) 土壤洗浄による浄化・減容化

含有放射エネルギーが8,790～26,270 Bq/kgの7試料の元土壤(feed)を用いて、土壤洗浄の実証試験を行った。元土壤には砂利などの粗粒子分、植物片や腐植質が含まれており、強熱

減量の値は概ね12% (9～17%)であった。また、2 mm以下の土壤(feed < 2 mm)に含まれる63 μm以下の細粒子分の割合は概ね28% (14～43%)であった。元土壤と洗浄処理された洗浄土の含有放射エネルギーを図5(a)に示す。これらの7試料(Soil A～G)の含有放射エネルギーの除去率を図5(b)に示す。洗浄土の含有放射エネルギーは、Soil Eが882 Bq/kg、Soil BとSoil F

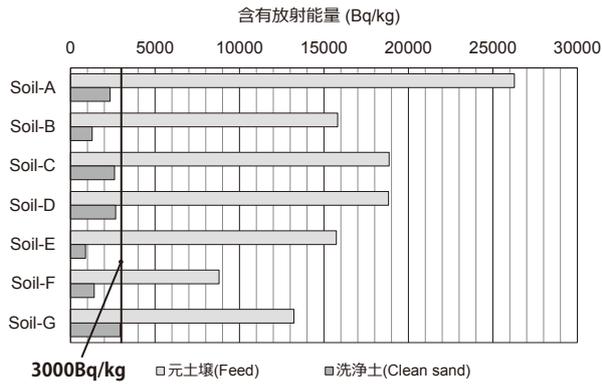


図 5 (a) 元土壌と洗浄土の含有放射能

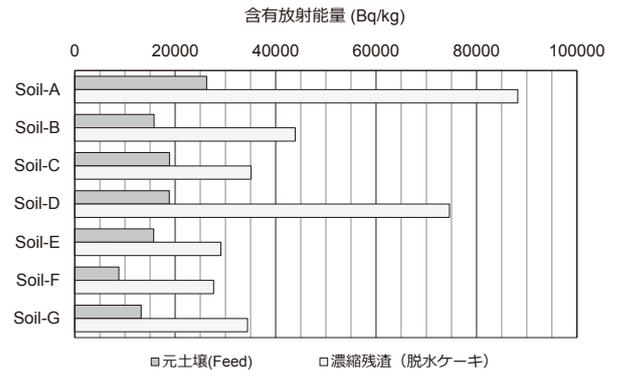


図 6 (a) 元土壌と濃縮残渣の含有放射能

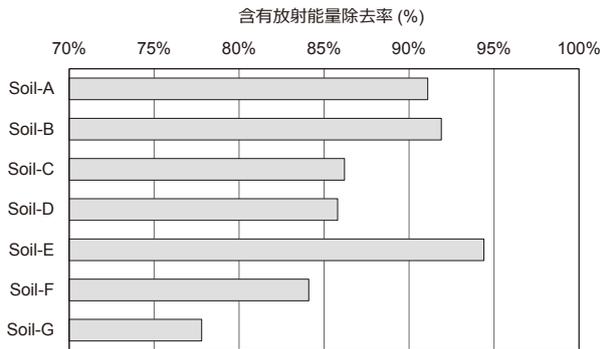


図 5 (b) 含有放射能の除去率

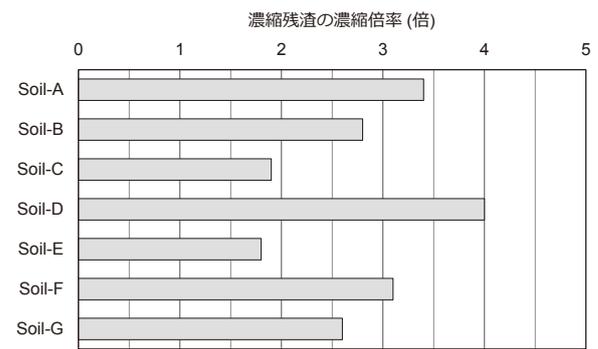


図 6 (b) 濃縮残渣の放射性 Cs の濃縮倍率

が1,277～1,398 Bq/kg, Soil A, Soil C, Soil Dが2,339～2,669 Bq/kg, Soil Gが2,940 Bq/kgと7試料全ての洗浄土が3,000 Bq/kg以下であった。本洗浄技術によって放射性物質汚染土壌の洗浄土が3,000 Bq/kg以下となること、すなわち再生資材として活用可能であることが確認された。含有放射能の除去率は最小が77.8% (Soil G)、最大が94.4% (Soil E)であり、他の5試料が84～92%であった。

元土壌と一連の洗浄処理によって分離・除去された濃縮残渣の含有放射能を図6(a)に、濃縮残渣の含有放射能の

濃縮倍率を図6(b)に示す。濃縮残渣の放射性Csの濃縮倍率は最小が1.8倍、最大が4倍であり、概ね2～3.4倍であった。

土壌洗浄による放射性物質汚染土壌の減量率(乾燥重量ベース)と減容率を表1に要約して示す。土壌洗浄による減量率は平均84%(74～88%)であった。嵩比重によって減量率を減容率に換算すると、減容率は平均82%(70～86%)であった。試算例(図1参照)に示した発生土壌量全体に対する減量率76%(=95%×0.8)は、洗浄処理における減量率を80%として得られた値である。今回の試験での減量率は平均

表1 土壌洗浄による放射性物質汚染土壌の減量率、減容率

	土壌乾燥重量 (kg-dry)	土壌容積 (m ³)	嵩比重	強熱減量 (%)	備考 (目視観察)
元土壌 (Feed)	100	100	1.19	9～17	植物片、腐植質を含む
2 mm以下の土壌	67(56～76)	—	—	—	腐植質を含む
粗粒子分(2～4 mm)	16(10～26)	—	—	—	植物片を含む
粗粒子分(4 mm以上)	17(11～23)	—	—	—	少量の植物片を含む
洗浄土	52(42～61)	39(32～46)	1.60	1～3	—
濃縮汚染土	16(12～26)	18(14～30)	1.05	22～32	腐植質を含む
減量率 (%)	84(74～88)	—	—	—	—
減容率 (%)	—	82(70～86)	—	—	—

84% (74 ~ 88%) であったため、試算例のように汚染土壌を効果的に減容化することは十分可能であると判断された。

(2) 濃縮残渣処理の自動化による被曝線量の低減

作業員の被曝線量率が特に高い作業は、(1) フィルタープレスの濃縮残渣 (脱水ケーキ) の掻取り作業と (2) 濃縮残渣の袋詰め作業と想定された。このため、「2 (2) 濃縮残渣処理の自動化」で述べたように濃縮残渣処理の自動化を実施した。これによる作業員の被曝線量の低減効果を把握するために、(1) 脱水ケーキが枠内に入っているフィルタープレスの線量率と (2) 濃縮残渣が詰め込まれているフレコンバックの表面線量率の測定を実証試験期間中に 3 回実施した。フィルタープレスの線量率の測定状況を写真 5 に示す。3 回のフィルタープレスの線量率の測定値は、1.15 μSv/h、1.23 μSv/h、1.04 μSv/h であった。3 回のフレコンバックの表面線量率の測定値は、4.9 μSv/h、5.8 μSv/h、6.0 μSv/h であった。濃縮残渣処理の自動化による 1 年間当たりの被曝線量の低減効果を表 2 に算出して示した。被曝線量の低減効果の計算は、実測した被曝線量率の最大値 (フィルタープレス:1.2 μSv/h、フレコン



写真 5 フィルタープレスの線量率の測定

バック:6.0 μSv/h) と平均値 (1.1 μSv/h と 5.6 μSv/h) の 2 条件で行なった。

表 2 に示したように、濃縮残渣の自動化処理によって作業員の被曝線量は 1 年間当たり 24,180 μSv ~ 25,920 μSv から 3,375 μSv ~ 3,585 μSv へと自動化前の約 14% まで小さくなること、年間の被曝線量の低減効果は 20,805 μSv ~ 22,335

表 2 濃縮残渣処理の自動化による被曝線量の低減効果 (1 年間)

(a) 被曝線量率：実測値の最大値で評価

作業内容	作業員 (名)	1日の 作業時間 (hr)	年間の 作業時間 (hr)	1日の 待機時間 (hr)	年間の 待機時間 (hr)	被曝線量率 (最大値) (μSv/hr)	バックグラウンド 線量率 (実測値) (μSv/hr)	年間の 被曝線量 (μSv)
従来作業	(1) 掻取り作業	1	2	600	—	—	1.2	720
	(2) 袋詰め作業	2	7	4,200	—	—	6.0	25,200
従来作業の年間被曝線量								25,920
自動化後	(1) 掻取り作業	—	—	0	2	600	—	120
	(2) 袋詰め作業	1	1.75	525	5.25	1,575	6.0	3,465
自動化後の年間被曝線量								3,585
自動化による低減効果								▲ 22,335

(b) 被曝線量率：実測値の平均値で評価

作業内容	作業員 (名)	1日の 作業時間 (hr)	年間の 作業時間 (hr)	1日の 待機時間 (hr)	年間の 待機時間 (hr)	被曝線量率 (最大値) (μSv/hr)	バックグラウンド 線量率 (実測値) (μSv/hr)	年間の 被曝線量 (μSv)
従来作業	(1) 掻取り作業	1	2	600	—	—	1.1	660
	(2) 袋詰め作業	2	7	4,200	—	—	5.6	23,520
従来作業の年間被曝線量								24,180
自動化後	(1) 掻取り作業	—	—	0	2	600	—	120
	(2) 袋詰め作業	1	1.75	525	5.25	1,575	5.6	3,255
自動化後の年間被曝線量								3,375
自動化による低減効果								▲ 20,805

※自動化された場合でも、待機時間 (洗浄プラント内) にバックグラウンドの線量を被曝する。

※袋詰め作業が自動化された場合でも、袋とじの確認作業など (1.75 hr) が必要と考えた。

μSv と非常に大きなことが判明した。

4. まとめ

含有放射エネルギーが8,790～26,270 Bq/kgの7試料の元土壌 (feed)を用いて、土壌洗浄の実証試験を行った。主な結果を以下に要約する。

- 1) 洗浄土の含有放射エネルギーは882～2,940 Bq/kgと7試料全ての洗浄土が3,000 Bq/kg以下であった。本洗浄技術によって放射性物質汚染土壌の洗浄土が3,000 Bq/kg以下となり、再生資材として活用可能であると考えられた。放射性Csの除去率は最小が77.8%、最大が94.4%であり、概ね84～92%であった。
- 2) 濃縮汚染土(濃縮残渣)の濃縮率は最小が1.8倍、最大が4倍であり、概ね2～3.4倍であった。土壌洗浄による減量率は84% (74～88%)、嵩比重によって減容率に換算すると82% (70～86%)であった。
- 3) 作業員の被曝線量を低減させるため、高濃度の放射性Csを含む濃縮残渣処理の自動化の検討を行なった。濃縮残渣の自動化処理によって作業員の年間の被曝線量は24,180～25,920 μSv から3,375～3,585 μSv へと自動化前の約14%まで小さくなること、年間の被曝線量の低減効果は20,805～22,335 μSv と非常に大きなことが判明した。

なお、実証試験は、環境省の「平成24年度(平成23年度からの繰越分)除染技術実証事業(その5)」の一環として実施した。

参考文献

- 1) 文部科学省：文部科学省による放射線量等分布マップ(放射性セシウムの土壌濃度マップ)の作成について http://radio-activity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5043/24/11555_0830.pdf (2011)
- 2) 環境省：除染関係ガイドライン(第2版) 2-5～2-126 (2013)
- 3) 毛利光男：スクラビング・フローテーションを用いた土壌洗浄法による放射性物質汚染土壌の効率的な浄化と減容化 建設の施工企画、754, 65-71 (2012)
- 4) B. C. Bostick, M. A. Vairavamurthy, K. G. Karthikeyan, J. Chorover : Cesium adsorption on clay minerals: An EXAFS spectroscopic investigation. *Environ. Sci. Technol.* 36, 2670-2676 (2002)
- 5) B. L. Sawhney : Selective sorption and fixation of cations by clay minerals : A review. *Clay Clay Miner.* 20, 93-100 (1972)
- 6) 山口紀子、高田裕介、林健太郎、石川覚、倉俣正人、江口定夫、吉川省子、坂口敦、朝田景、和穎朗太、牧野知之、赤羽幾子、平橋俊太郎：土壌-植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因 農業環境技術研究所報告、31, 75-129 (2012)
- 7) H. Tsukada, A. Takeda, S. Hisamatsu, J. Inaba: Concentration and specific activity of fallout ^{137}Cs in extracted and particle-size fractions of cultivated soils. *J. Environ. Radioactiv.* 99, 875-881 (2008)
- 8) R. M. Cornell : Adsorption of cesium on minerals : A review. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 171, 483-500 (1993)
- 9) K. M. Rosso, J. R. Rustad, E. J. Bylaska : The Cs/K exchange in muscovite interlayers: An ab initio treatment. *Clay Clay Miner.* 49, 500-513 (2001)
- 10) 毛利光男、土田充、保坂幸一、馬場直紀、中嶋卓磨：土壌洗浄による放射性物質汚染土壌の浄化・減容化 第18回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 (CD-ROM), S1-12, 55-58 (2012)

2013年3月25日受付

2013年10月10日受理

和文要約

土壌洗浄法による放射性Cs汚染土壌の浄化・減容化および濃縮残渣処理の自動化に関して、パイロットプラント規模の実証試験を行なった。実証試験は、(a) 放射性Csの除去率、(b) 汚染土壌の減容率、(c) 濃縮残渣(脱水ケーキ)の放射性Cs濃縮倍率、および (d) 濃縮残渣処理の自動化による作業員の被曝線量の低減効果を評価する目的で行なった。実証試験の主な結果を以下に要約する。1) 含有放射エネルギーが8,790～26,270 Bq/kgの7試料の元土壌(feed)は、洗浄処理によって882～2,940 Bq/kgと全て3,000 Bq/kg以下の洗浄土となった、2) 放射性Csの除去率は概ね84～92%であった、3) 汚染土壌の減量率は74～88%(ave. 84%)、嵩比重によって減容率に換算すると70～86%(ave. 82%)であった、4) 濃縮残渣の自動化処理によって、作業員の年間の被曝線量は自動化前の14%まで小さくなった。一連の試験によって、土壌洗浄によって放射性Cs汚染土壌の浄化・減容化が効率的に行なえること、および濃縮残渣処理の自動化によって作業員の被曝線量が大幅に低減することが実証された。