

JCMA 報告

平成 25 年度 一般社団法人日本建設機械施工協会会長賞 受賞業績 (その 2)

平成 25 年度 一般社団法人日本建設機械施工協会 会長賞

放射性物質汚染土壌の効率的な浄化・減容化システムの開発

清水建設(株)

業績内容の概要

1. 技術の背景・必要性

福島県の除染事業によって、膨大な量の汚染土壌と廃棄物が集積することが予想される。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。

新しく開発した「放射性物質汚染土壌の効率的な浄化・減容化と残渣処理の自動化」が可能な洗浄技術は、(a) 汚染土壌を公共工事において土木資材として活用できる洗浄土とし、中間貯蔵施設への搬出量を大幅に低減すること、(b) 放射線に対する安全確保のため作業員の被曝線量を大幅に低減することを可能とする技術である。

2. 技術の特長

今まで培ってきた洗浄技術を基に、新たに放射性 Cs を対象とした (1) スクラビング・フローテーション技術と (2) 濃縮残渣処理の自動化技術を加えて、放射性物質汚染土壌の効率的な浄化・減容化と被曝線量の低減化による放射線に対する安全確保が可能な「放射性物質汚染土壌の浄化・減容化システム」全体を完成した。(1) スクラビング・フローテーション技術では 90% 以上の放射性 Cs 除去率と 80% 以上の土壌減容率を両立させるという高い性能を初めて実現し、(2) 濃縮残渣処理では自動化技術によって作業員の被曝線量を自動化前の 14% まで大幅に低減させた。

3. 導入の効果

本技術による放射性物質汚染土壌の減容化の効果を図-1 に示す。

業績内容

1. 業績の行なわれた背景

放射性物質によって汚染された地域の再生のためには、市街地や農耕地の表土と草木類、道路舗装面などを取り除く「除染」によって、人への追加被曝線量を年間 1 mSv 以下に低減することが望まれる。広範囲な地域で除染を行なうと、膨大な量の汚染土壌と廃棄物が集積され、これら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とが予想される。筆者ら

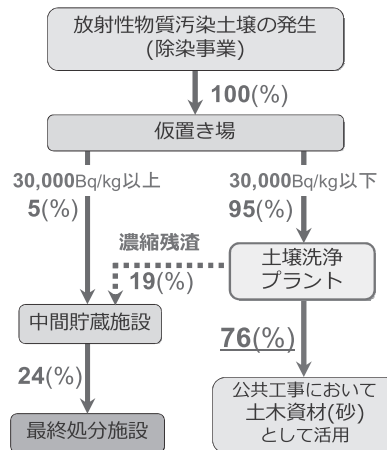


図-1 本技術による放射性物質汚染土壌の減容化 (筆者らの試算)

は、膨大な量の放射性物質汚染土壌を効率的に減容化するのには今まで培ってきた土壌洗浄技術が有効であると考え、放射性 Cs 汚染土壌に特化した洗浄技術の開発に取り組んできた。開発過程で数多くの課題が浮かび上がったが、特に大きな課題は、(a) 放射性 Cs の高い除去率と汚染土壌の高い減容率を両立させること、および (b) 放射線に対する安全確保のため作業員の被曝線量を大幅に低減させることの 2 つであった。

重金属類等の汚染土壌を対象とした経験豊富な洗浄技術を基に、新たに放射性 Cs を対象とした (1) スクラビング・フローテーション技術と (2) 濃縮残渣処理の自動化技術を加えることによって、上記の課題を解決した「放射性物質汚染土壌の浄化・減容化システム」全体を構築した。

環境省の除染技術実証事業 (その 5, 平成 24 年度) において、「放射性物質汚染土壌の浄化・減容化システム」の高い性能を実プラントに近いサイズのパイロットプラントにおいて実証した。

2. 業績の詳細な技術的説明

(1) スクラビング・フローテーション技術

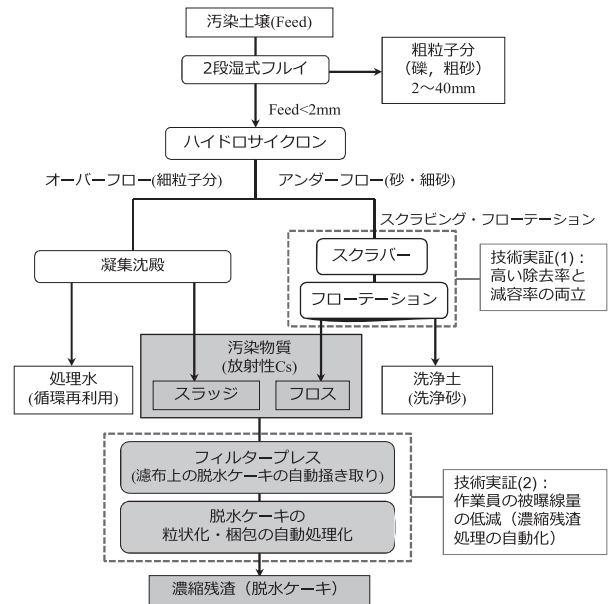
スクラビング・フローテーション技術とは、薬剤による土壌処理後にスクラビング (表面摩耗) を行なって放射性 Cs 吸着粒子を効果的に剥離し、続くフローテーションに

において剥離した放射性 Cs 吸着粒子のみを選択的に分離する技術であり、放射性 Cs への高い選択性を達成できると、除去率と減容率の両立が可能となる。

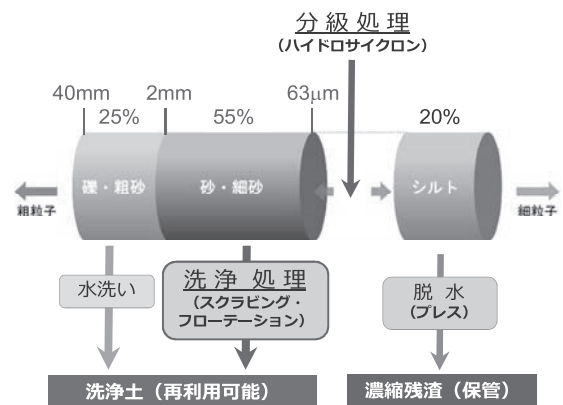
スクラバーによる機械的なスクラビングの説明を図一2 (a) に示す。強固なスクラビングによって、砂表面の付着粒子の剥離に加えて砂そのものの摩耗が起こり、大量の摩耗粒子が発生する。機械的なスクラビングのみでは放射性 Cs の低減に効果がある反面、砂そのものも摩耗して大量の摩耗粒子を発生させ減容効果を著しく損なうという欠点があった。

これに対して、本スクラビング・フローテーション技術では、図一2 (b) に示すような化学的なスクラビング、すなわち薬剤による土壌粒子の表面処理後にスクラビングを行なうことによって放射性 Cs 吸着粒子（粘土鉱物等）のみを効果的に剥離させることを特長としている。この表面処理後のスクラビングはスクラバー（図一3、5 (b) を参照）において実施される。表面処理後のスクラビングに続けて放射性 Cs に対する選択性が高いフローテーション（図一3、5 (c) を参照）を行なうことによって、放射性 Cs 汚染土壌に対して概ね 90% 以上の高い除去率と 80% 以上の高い減容率を両立することが可能となる。

本スクラビング・フローテーション技術を核とした洗浄処理フローを図一3 に、土壌洗浄技術の基本概念を図一4 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 以下の土壌は、ハイドロサイクロン（図一5 (a) を参照）によってオーバーフロー（細粒子分（シルト））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（図一5 (b) を参照）において複数の薬剤により表面処理された後、化学的なスクラビングによって土壌粒子表面から汚染粒子が

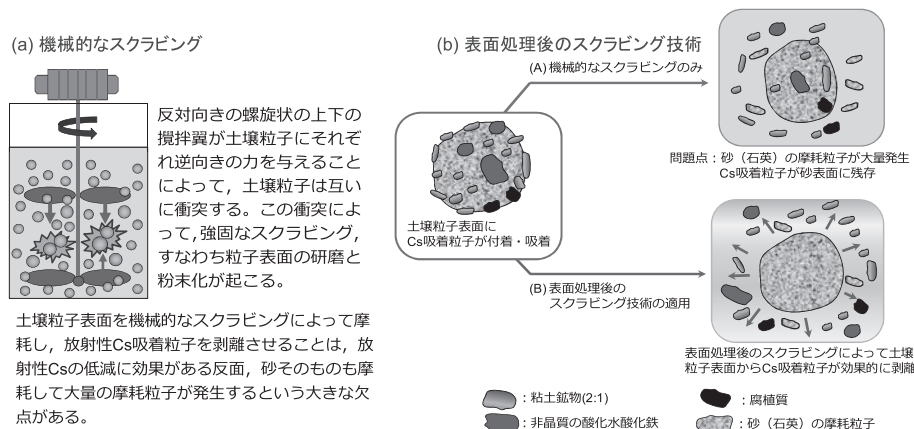


図一3 土壌洗浄の処理フローと技術実証の課題



図一4 土壌洗浄技術の基本概念

効果的に剥離される。続くフローテーション（図一5 (c) を参照）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れる。土壌洗浄技術の実証試験プラントを写真一1 に示す。実証試験で使用したハイドロサイクロン、スクラバー、フローテーションなどの試験装置を写真一2 に示す。



図一2 機械的なスクラビングおよび表面処理後のスクラビング技術の概要

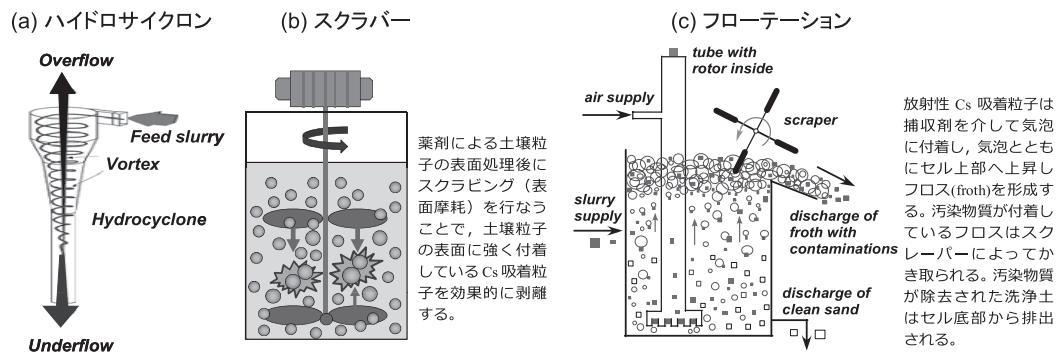


図-5 ハイドロサイクロン、スクラビング・フローテーション（スクラバー+フローテーション）の概要

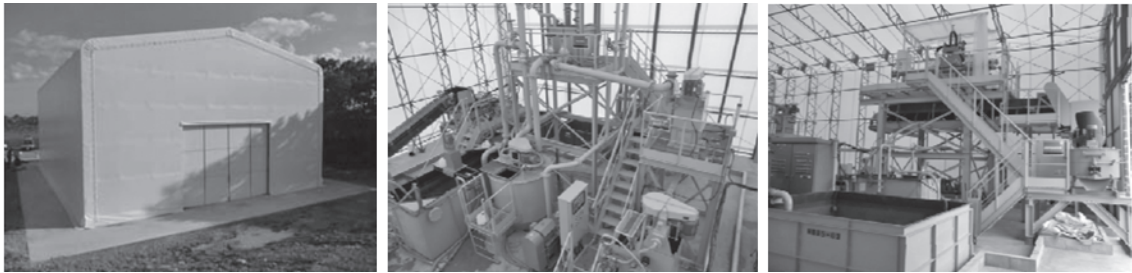


写真-1 土壌洗浄技術の実証試験プラント



写真-2 ハイドロサイクロン、スクラバー、フローテーション（左から順に）

(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 (c) 濃縮残渣の破碎状況



写真-3 濃縮残渣（脱水ケーキ）の自動掻取りと破碎の状況

## (2) 濃縮残渣処理の自動化技術

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（脱水ケーキ）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を図った。フィルタープレスと新たに追加した脱水ケーキ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高張って（空隙が非常に大きくなって）しまい、減容効果を大きく損ねてしまう。本自動化技術では、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

(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)



写真—4 濃縮残渣(脱水ケーキ)の粒状化

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することができる。今回開発した濃縮残渣処理の自動化技術によって、作業員の被曝線量を自動化前の14%まで大幅に低減(低減率:86%)することを実証した。

3. 技術的効果

(1) 土壌洗浄による浄化・減容化の効果

今回開発した「スクラビング・フローテーション技術」によって、高い除去率(90%以上)と高い減容率(80%以上)を両立することが可能となると、除染事業によって発生する放射性物質汚染の減容化を極めて効果的に進めることができる。例えば図—6に示すように当社の試算では、除染によって発生する汚染土壌等の95%は30,000 Bq/kg以下であり、この汚染土壌を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)として活用できる洗浄土となる。

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。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。放射性物質汚染土壌の浄化・減容化については、全てが初めて行なう試みであるため、開発した技術の実証試験が極めて重要となる。このため、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なった。

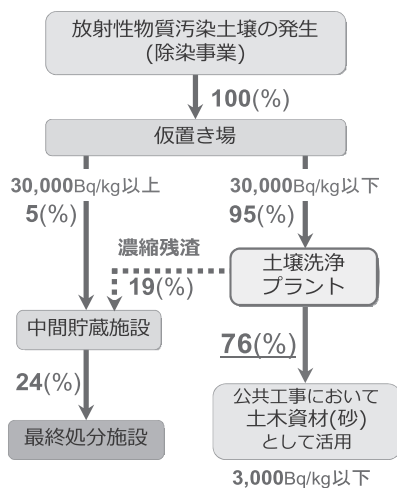
元土壌(feed)と洗浄処理された洗浄土(clean sand)の含有放射エネルギーを図—7(a)に示す。これらの7試料(Soil A~G)の含有放射エネルギーの除去率を図—7(b)に示す。

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以下となることが確認された。含有放射エネルギーの除去率は最小が77.8%(Soil-G)、最大が94.4%(Soil-E)であり、他の5試料が84~92%であり、スクラビング・フローテーション技術によって概ね90%以上の高い除去率が達成できることが実証された。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)は、平均84%(74~88%)であった。嵩比重(1.19)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—6参照)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。実証試験での減量率は平均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。スクラビング・フローテーション技術のように、高い除去率と高い減容率を両立できる技術が、将来の放射性物質汚染土壌の浄化・減容化の効率を左右すると考える。

(2) 濃縮残渣処理の自動化による被曝線量の低減効果

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—1に算出して示す。

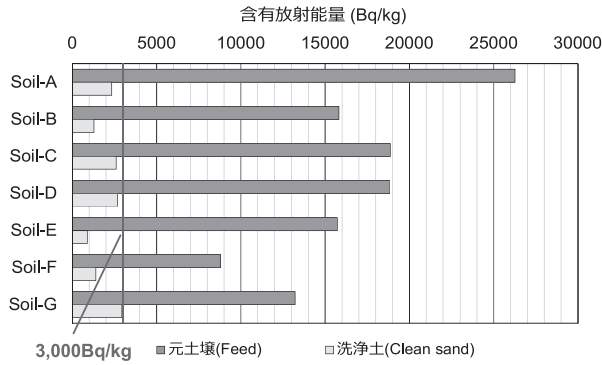
濃縮残渣の自動化処理によって作業員の被曝線量は1年間当たり25,920 μSv(=720 μSv + 25,200 μSv)から3,585 μSv(=120 μSv + 3,465 μSv)へと自動化前の14%まで大幅に低減(低減率:86%)すること、被曝線量の低減効果は22,335 μSvと非常に大きなことが判明した。濃縮



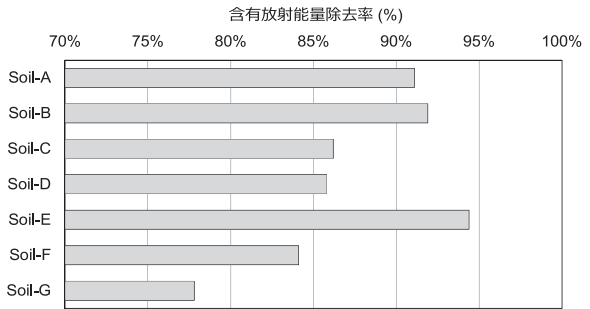
図—6 土壌洗浄による放射性物質汚染土壌の減容化(筆者らの試算)

除去率が高いほど、高濃度の汚染土壌を減容化の対象にすることができる。平成24年5月25日の環境省通知(東日本大震災からの復旧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30cm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。土壌に基準は無いが上記の災害廃棄物由来の再生資材に準じて考えて、筆者らは3,000 Bq/

(a) 元土壌(feed)と洗浄土(clean sand)の含有放射能



(b) 含有放射能の除去率



図一七 元土壌と洗浄土の含有放射能，含有放射能の除去率

表一 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)

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 (実測値) ( $\mu$ Sv/hr)	バックグラウンド 線量率 (実測値) ( $\mu$ Sv/hr)	年間の 被曝線量 ( $\mu$ Sv)
掘取り作業 (従来作業)	1	2	600	—	—	1.2	0.2	720
掘取り作業 (自動化後)	—	—	0	2	600	—	0.2	120
低減効果(1)								▲ 600
袋詰め作業 (従来作業)	2	7	4200	—	—	6.0	0.2	25200
袋詰め作業 (自動化後)	1	1.75	525	5.25	1575	6.0	0.2	3465
低減効果(2)								▲ 21735
低減効果 合計								▲ 22335

※ 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は被曝する。

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



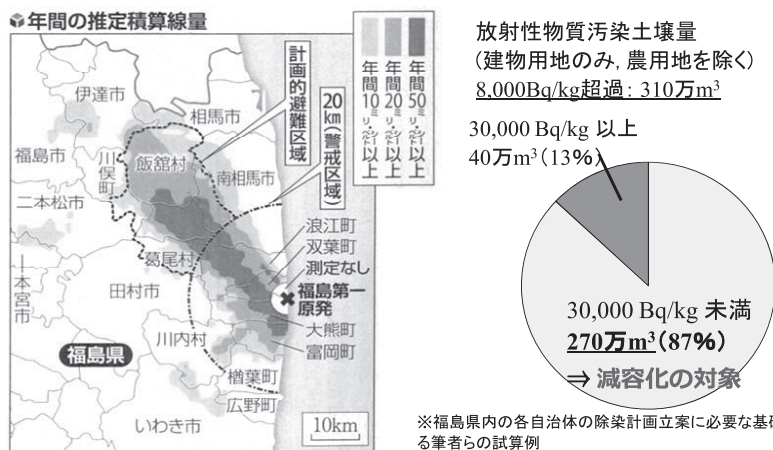
写真一五 フィルタープレス近傍の空間線量率の測定

残渣処理の自動化技術によって、作業員の放射線に対する安全性が著しく改善された。濃縮残渣は、土壌中の放射性Csが濃縮されたものであるため、非常に高濃度の放射性Csを含有している。作業員の被曝線量の低減には、濃縮残渣処理の自動化(無人化)が極めて効果的であることが実証された。

4. 経済的効果(放射性物質汚染土壌の処分費用の低減効果)

除染によって被曝線量を低減することが強く求められる

場所は、当然の事ながら、住民の生活空間である居住地である。図一八に示すように福島県内の建物用地(農用地を除く)の内、8000 Bq/kgを超えて除染の対象となる放射性物質汚染土壌量は310万 $m^3$ と推定されている。この310万 $m^3$ の内、減容化の対象となる30,000 Bq/kg未満の土壌は270万 $m^3$ と試算されている。除染によって発生する放射性物質汚染土壌を「減容化しない場合」と「新技術で減容化する場合」のコスト比較の試算例を表一二に示す。減容化しない場合の処分総費用は5,400億円であるが、減容率80%が可能な新技術で減容化を行なうと、処分総費



※福島県内の各自治体の除染計画立案に必要な基礎情報に関する筆者らの試算例

※ここでは、8,000～30,000Bq/kgの汚染土壌を減容化の対象とした。

図一八 福島県内の放射性物質汚染土壌量の試算例(建物用地のみ、農用地を除く)

表一 放射性物質汚染土壌の処分費用低減効果の試算例

	減容化しない	新技術で減容化	備考
除染土壌量 (万m <sup>3</sup> )	270	270	--
減容率 (%)	0%	80%	洗浄砂: 80%, 濃縮残渣: 20%
洗浄土壌量 (万m <sup>3</sup> )	--	270	--
洗浄単価 (円/m <sup>3</sup> )	--	20,000	--
洗浄費用 (億円)	--	540	--
処分土壌量 (万m <sup>3</sup> )	270	54	濃縮残渣54万m <sup>3</sup> の処分
処分単価 (円/m <sup>3</sup> )	200,000	200,000	管理型及び遮断型の処分場が混在するため、20万円/m <sup>3</sup> と仮定した。
処分費用 (億円)	5,400	1,080	--
総費用	5,400億円 (100%)	1,620億円 (30%)	3,780億円の低減 (▲70%)

用は70%低減し1,620億円となる。

今回開発した新技術による減容化の経済効果は非常に高い。

5. 施工または生産・販売実績

(1) 放射性物質の除染関連事業の実績

- ・福島県除染技術実証事業 (福島県):  
期間 2011年11月～2012年2月
- ・焼却灰セメント固化処理業務 (環境省):  
期間 2012年1月～6月
- ・広野町除染作業業務 (広野町):  
期間 2012年2月～2014年3月
- ・平成24年度除染技術実証事業 (その5, 環境省):  
期間 2012年5月～9月
- ・楢葉町除染作業業務 (環境省):  
期間 2012年4月～10月

- ・伊達市除染作業業務 (伊達市):  
期間 2012年5月～2014年3月
- ・いわき市除染作業業務 (いわき市):  
期間 2012年12月～2013年3月
- ・大熊町除染作業業務 (環境省):  
期間 2012年12月～2014年3月

(2) 土壌洗浄の実績 (2013年6月現在, 約300万 ton)

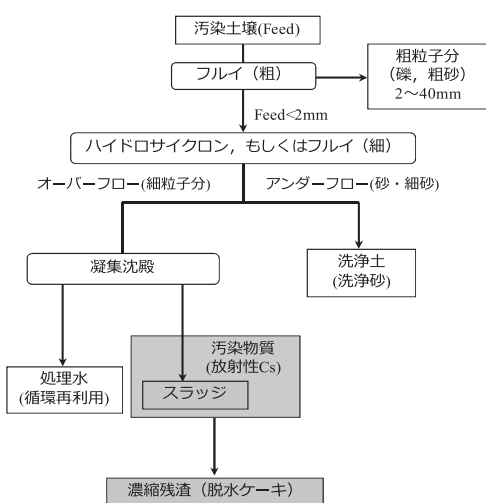
- ・洗浄処理した土壌量 (過去の実績): 累計210万 ton  
内訳: (a) オンサイト型: 110万 ton (全国11箇所),  
(b) 据え置き型: 100万 ton
- ・現在稼働中の洗浄プラント  
(a) 南三陸町のがれき処理工事でオンサイト型洗浄プラントが稼働中  
(b) 豊洲新市場土壌汚染対策工事でオンサイト型洗浄プラントが稼働中

6. 既存工法または機械との比較

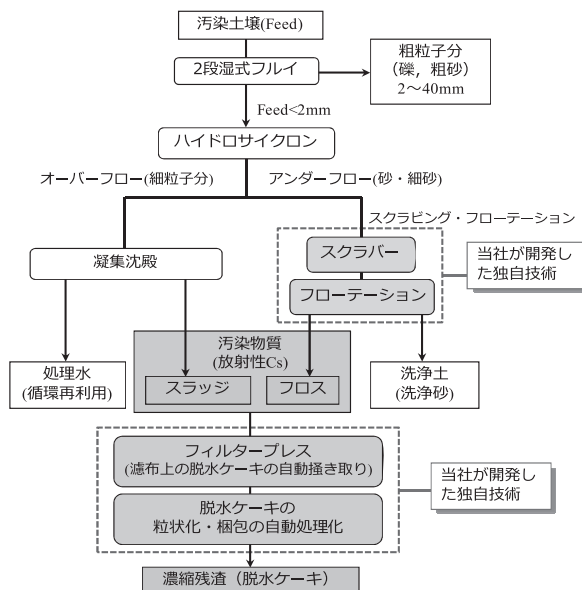
土壌洗浄は広く使われている技術であるが、一般的な既存技術は図一9 (a) に示したようにフルイとサイクロン、もしくはサイズの異なるフルイのみの分級 (篩い分け) プロセスのみで構成されている。筆者らはフローテーション技術を有効に活用し、分級処理のみでは達成できない高い浄化率を誇ってきた。今回は今まで培ってきた洗浄技術に加えて、図一9 (b) に示すように新たに (1) スクラビング・フローテーション技術と (2) 濃縮残渣処理の自動化技術を開発した。

含有放射エネルギーの除去率は分級処理のみのものより高くなり、スクラビング・フローテーションによる洗浄処理では概ね90%の高い除去率を得ることが可能である。

(a) 既存技術



(b) 開発した新技術



図一9 既存技術と開発した新技術との比較

## 7. 波及効果

本技術は、今まで培ってきた洗浄技術を基に、放射性 Cs 汚染土壌の効率的な浄化・減容化と被曝線量の低減化が行なえるように、新たに放射性 Cs に特化した (1) スクラビング・フローテーション技術と (2) 濃縮残渣処理の自動化技術を加えたものである。

この 10 年の間、様々な汚染土壌、すなわち重金属類（水銀、シアン、フッ素など）、鉍物油、農薬、ダイオキシン類によって汚染された土壌の洗浄処理に取り組んできた。

本技術は、幅広い種類の汚染土壌の洗浄処理に適用可能であり、波及効果が極めて高い。現在、都市部における開発において「自然由来の汚染土壌」が大量に発生し、その低コスト処理の要望が高まっている。このような低濃度汚染土壌の効率的かつ安価な処理に対しても、本技術の一部を適用することができる。

### 発表論文

- (1) 毛利光男・土田充・中嶋卓磨, 土壤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, 平成 24 年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集 I, pp.7-

12, 2012.11.

※論文賞を受賞

- (2) 毛利光男, スクラビング・フローテーションを用いた土壤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, No.754, pp.65-71, 2012.12
- (3) 毛利光男・貫上佳則, 改良 BCR 逐次抽出法による鉛・フッ素汚染土壌の形態分析と土壤洗浄の処理特性解析, 土木学会論文集 G, Vol.64, No.4, pp.314-326, 2008.12.
- (4) 毛利光男・土田充・馬場直紀・保坂幸一・中嶋卓磨, 土壤洗浄を用いた放射性 Cs 汚染土壌の減容化と濃縮残渣処理の自動化について, 第 19 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集 (CD-ROM), S5-20, pp.493-497, 2013.6.

毛利 光男 (もうり みつお) : 応募代表者

清水建設株

エンジニアリング事業本部 土壤環境事業部

博士 (地球環境学)

### お断り

この JCMA 報告は、会長賞を受賞した原文とは一部異なる表現をしてあります。