

放射性セシウム含有土壌の土壌洗浄法の適用性評価試験方法(案)

【JGS 震災対応地盤環境研究委員会 TF-N1】

1. 目的

本文書は、放射性セシウム（以下、放射性 Cs）含有土壌の減容化手法の一つである土壌洗浄法を対象として、その適用を検討する際の事前の判断基準を提供することを目的として、実証試験等を行う前に適用性の可否を判断するための事前試験方法について取りまとめたものである。

なお、本試験を実施する際には、放射性 Cs 含有土壌の採取、移動、試験、保管等の作業を含むことから、以下の点に注意が必要である。

- ・ 試験実施の際には、これらの試験を適切に実施できる場所・機関において、各種法令および実験実施施設での自主管理基準に従って実施すること
- ・ 放射性 Cs 含有土壌等の移動、試験、保管時には、放射性 Cs が適切に管理された状態で行うと共に、採取、試験時には作業者の追加被ばく線量を出来るだけ低減すること
- ・ 試験に使用する土壌については、事前に 1 cm 表面線量を測定すると共に、試験実施機関・場所において受入可能かどうかを事前に確認をすること

2. 土壌洗浄法の適用可能性評価方法

放射性 Cs 汚染土壌に土壌洗浄法を適用した際の処理フロー図を図-1 に示す。放射性 Cs 汚染土壌に土壌洗浄法（湿式分級法）を適用すると、結果として放射性 Cs の吸着量が多い細粒分から構成される濃縮物と、放射性 Cs の吸着量が少ない粗粒分から構成される浄化土壌に分類される。

土壌洗浄法の適用性については、濃縮物の発生率、放射性 Cs 濃度・溶出特性および、浄化土壌の回収率、放射性 Cs 濃度・溶出特性、物理化学性から評価される。

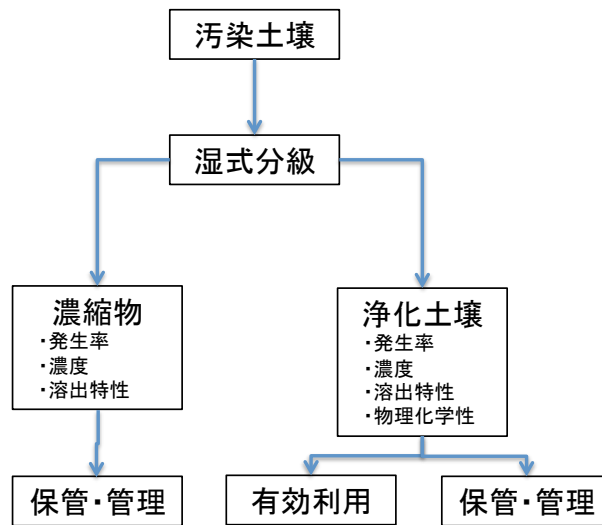


図-1 放射性セシウム汚染土壌に土壌洗浄法を適用した場合のフロー

土壌洗浄法は全ての土壌に適用できるわけではない。例えば、減容化、という観点からは濃縮物発生率（汚染土壌量に対する濃縮物発生量）が1を超える場合は汚染物自体が増えることから、その適用の可否は目的に応じて十分な検討が必要である。また、有効利用の観点からは、浄化土壌の放射性 Cs 濃度が再利用可能な濃度である必要がある。そのため、放射性 Cs 汚染土壌に対して土壌洗浄法を適用する際には、事前に適用性評価試験を行い、有効性を確認する必要がある。

2.1. 試験方法の構成

本試験方法では、初期段階において、土壌洗浄法の適用可能性評価のためのスクリーニング試験および、スクリーニング試験の結果、適用可能と判断された場合に実施する本試験（詳細な回収率や性状評価を含め評価）の2つから構成される。適用可能性が見込まれる土壌であれば、スクリーニング試験を省略し、本試験から実施することも考えられる。

2.2. スクリーニング試験

スクリーニング試験は、初期段階において土壌洗浄法の適用可能性を簡便・迅速に判断するために実施する試験である。土壌洗浄処理後の浄化土壌濃度および回収率を推定し、その適用性を判断する。

2.2.1. サンプルング方法

汚染土壌がフレキシブルコンテナに封入されている状態の場合には、例えば線量計でフレキシブルコンテナの1cm表面線量を測定後、サンプルを採取するものとする。採取する土壌量はスクリーニング試験、本試験の内容を実施するのに必要な量とする。

汚染土壌の1cm表面線量が大きく異なる場合は、濃度レベルに応じて3検体程度採取することが考えられる。また、汚染土壌の発生場所が異なるなど土壌性状が異なるあるいは不均質で

あることが想定される場合には、目視等により土壌性状を確認し、それぞれ代表性があるサンプルを採取することが望ましい。なお、フレキシブルコンテナに入った状態で目視等による性状確認が難しい場合は、5点混合法等により試料を採取することも検討する。この場合、フレキシブルコンテナの数量に応じて、サンプル数を検討することとする。

2.2.2. スクリーニング試験

スクリーニング試験方法の概要を図-2に示す。

- ・ 対象土壌をよく混合した後に、試料を分取し湿潤状態で放射性 Cs 濃度をゲルマニウム半導体検出器もしくは NaI シンチレーションカウンターで測定する。また、当該土壌の含水比も測定する。
- (ア) 対象土壌について通常の JIS A 1204 土の粒度試験(沈降分析を除く)を実施する。
- (イ) 0.075mm 以上の粒径の土壌の質量および放射性 Cs 濃度を測定する。

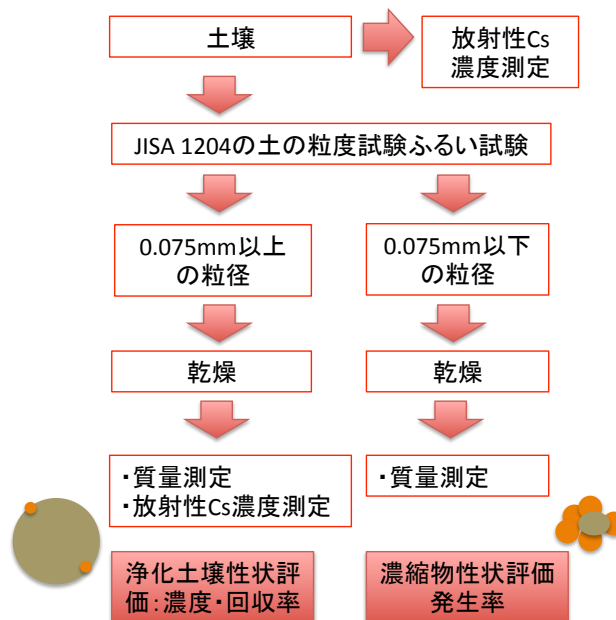


図-2 スクリーニング試験方法

(注) 図-2において、0.075mm 以下の粒径のものを乾燥させて質量を測定するフローは、計算で求められるため省略可。ただし、放射性 Cs 含有物回収の観点からは必要となる。

2.2.3. スクリーニング試験の評価

① 土壌洗浄後の浄化土壌濃度

土壌洗浄処理後の浄化土壌の放射性 Cs 濃度の目安として、0.075mm ふり残留試料(乾燥状態)の放射性 Cs の分析値を用いる。

※土壌洗浄法のスクリーニング調査として実施するものであり、実際の土壌洗浄法適用の際には、湿式分級以外にも研磨等の工夫により浄化効率が上昇する可能性があることに留意する必要がある。

② 分級後の浄化土壌の回収率

土壌洗浄処理後の浄化土壌の回収率（乾燥質量ベース）としては、以下の式で算定する。

$$\frac{\text{【0.075mm ふるい残留試料の乾燥質量】}}{\text{【全試料の乾燥質量（初期質量および含水比から算定）】}}$$

③ その他

スクリーニング試験により得られる以下の情報も適宜整理する。

- ・粒度分布（ふるい分析結果）
- ・原土壌の放射性 Cs 濃度（湿潤質量ベース、乾燥質量ベース）
- ・0.075mm ふるい通過分の放射性 Cs 濃度（乾燥質量ベース）

2.3. 本試験

2.3.1. 試験方法

本試験の概要を図-3に示す。

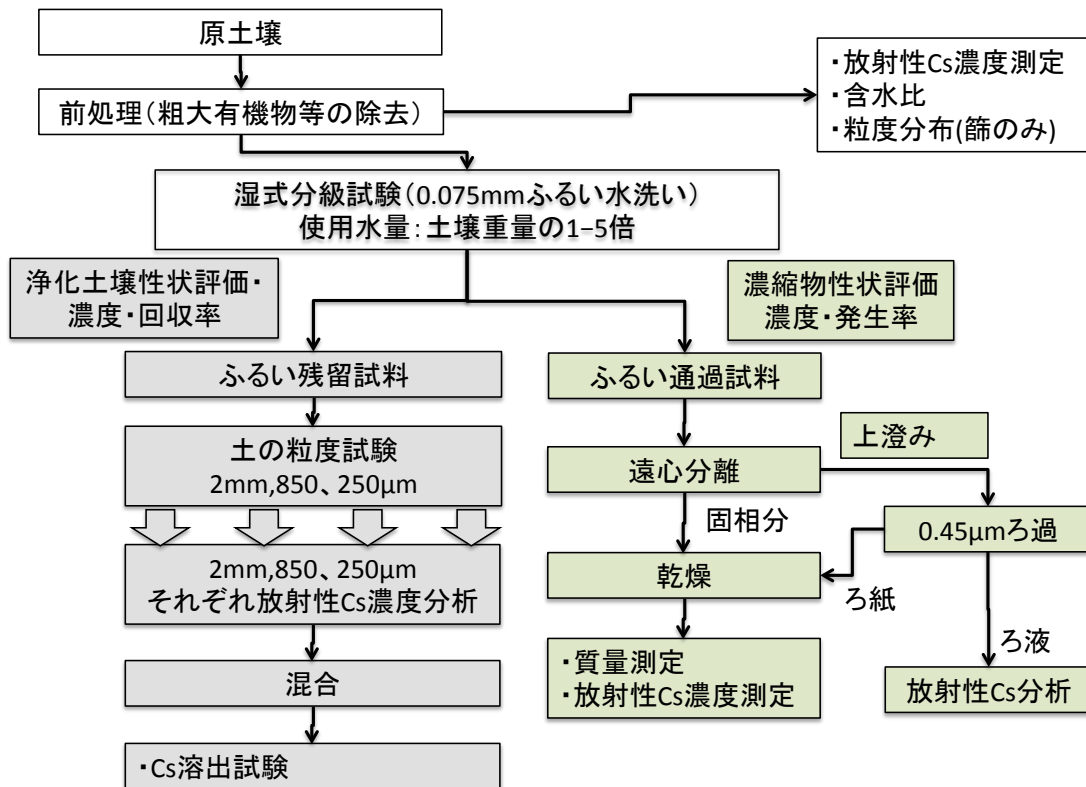


図-3 放射性セシウム含有土壌の土壌洗浄法の適用性評価に資する試験方法のフロー

2.3.2. 原土壌の基礎的物性

対象土壌の初期物性を把握するため、原土壌を対象に以下の試験を実施する。

- ・ 放射性 Cs 濃度：ゲルマニウム半導体検出器もしくは NaI シンチレーションカウンター
- ・ 含水比：JIS A 1203
- ・ 土の粒度試験：JIS A 1204
- ・ 湿潤密度測定

2.3.3. 室内湿式分級試験

土壌洗浄の効果を確認するため、室内湿式分級試験を行う。

①湿式分級処理

室内湿式分級試験は、湿式分級試験における分級点は **0.075mm** であることが多いため、原土壌を対象にして JIS A 1204 土の粒度試験のうち、**0.075mm** ふるい水洗いを行う。この時、実条件の結果により近づけるために、下記の条件を考慮して行う。

I. 1 サンプルに使用出来る洗浄水量を制限する。一般的には土壌質量の 1~5 倍の質量で行う。これは実際の土壌洗浄処理では水を無制限に使用出来ないため、無制限に水を使用して洗浄を行った結果とは異なるためである。

II. 具体的な方法としては、例えば以下の様な方法が考えられる。

[具体例 1]

試料土 300~500 g 程度 (湿潤) に対して、まず試料土質量の 30~60% 程度の水を加え、電動ミキサー等で 1 分間程度攪拌し、試料をスラリー状とする。その後、スラリー状の試料を **0.075mm** ふるいに移し、使用水量の合計が試料土質量の 1~5 倍量となるように、洗浄瓶等を用いてすすぎ洗いして細粒分を除去し、最終的に浄化土壌として **0.075mm** 残留物を回収する。

②ふるい残留試料

I. ①の湿式分級処理において、**0.075mm** ふるい水洗いで残留した試料の炉乾燥を行う。

II. この炉乾燥試料を、JIS A 1204 土の粒度試験 (沈降分析は省略) を行い、粒度分布を測定する。用いるふるいのサイズについては、最低限、**2mm**、**0.85mm**、**0.25mm** とするが、試験法通りのふるい分析を実施しても構わない。測定後、試料は例えば **2mm** 以上、**0.85mm-2mm** の試料、**0.25-0.85mm**、**0.25mm** 以下の試料に分類する。

なお、各粒径区分の土壌質量が少ない場合 (全質量の 10% 未満) には、細かい粒度側の試料と合わせて分析を実施することも考えられる。

III. 各検体を対象に、ゲルマニウム半導体検出器等を用いて放射性 Cs 濃度を測定する。

IV. 放射性 Cs 測定後、**2mm** 以下の全ての試料を混合して、以下の項目の分析を行う。

- (ア) 土壌からの放射性 Cs の溶出特性を確認する。：溶出特性は、固液比 1 : 10 の 6 時間振とう（通常の重金属類の土壌溶出量試験方法）と同様とし、振とう後、孔径 0.45 μm のメンブレンフィルターのろ液を試験に供する。

③ふるい通過試料

- I. ①の湿式分級処理において、0.075mm ふるい水洗いを通過した濁水を全量回収する。
- II. 濁水は遠心分離処理（3000rpm、20 分）を行い、その上澄み溶液を採取する。上澄み溶液については、0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過し、ろ液をゲルマニウム半導体検出器にて放射性 Cs 濃度を確認する（定量下限：10Bq/L 程度を確保すること）。
- III. 遠心分離後の残留物および 0.45 μm のメンブレンフィルター上の細粒分については炉乾燥後に質量を測定し、以下の分析を行う。
(ア) ゲルマニウム半導体検出器等を用いて放射性 Cs 濃度

2.3.4. 試験結果の整理（内容はほぼ、2.2.2 と同じである。）

①分級後の浄化土壌濃度の推定

土壌洗浄処理後の浄化土壌の放射性 Cs 濃度（乾燥質量ベース）の目安として、ふるい残留試料の粒度別の放射性 Cs の分析値から以下の式を用いて算定する。

$$C_{R-soil} = \frac{\sum(C_p \times W_p)}{W_{total}}$$

ここで、 C_{R-soil} ：浄化土壌の放射性 Cs 濃度（Bq/kg）、 C_p ：粒度区分 P の放射性 Cs 濃度（Bq/kg）、 W_p ：粒度区分 P の質量（kg）、 W_{total} 全土壌質量（kg）、P：粒度区分である。

また、各粒径区分（例えば 0.25mm-2mm 等）の存在割合、放射性 Cs 濃度等から、分級点を変えた場合の洗浄効果等についても評価を行う。

なお、本試験は土壌洗浄法のスクリーニング調査として実施するものであり、実際の土壌洗浄法適用の際には、湿式分級以外にも研磨等の工夫により浄化効率が上昇する可能性があることに留意する必要がある。

②分級後の濃縮物（汚泥）中の濃度

土壌洗浄処理後の濃縮物（汚泥）中の放射性 Cs 濃度（乾燥質量ベース）として、湿式分級試験のふるい通過試料の放射性 Cs 濃度を用いる。

なお、濃縮物の最終的な含水比（例えば脱水ケーキの含水比）が推定できる場合は、湿潤質量ベースの放射性 Cs 濃度を算定して評価の参考とする。

③分級後の浄化土壌の回収率

土壌洗浄処理後の浄化土壌の回収率（乾燥質量ベース）としては、以下の式で算定する。

$$\frac{\text{【湿式分級試験のふるい残留試料の乾燥質量】}}{\text{【全試料の乾燥質量（初期質量および含水比から算定）】}}$$

また、各粒径区分（例えば 0.25mm-2mm 等）の存在割合から、分級点を変えた場合の回収率の変化についても評価を行う。

ここで得られた回収率は、あくまで目安であり、実際の回収率は適用する洗浄技術の違いにより、この数値よりも上下する可能性がある。

④ 濃縮物発生率（分級後の汚泥の発生率）

濃縮物発生率（土壌洗浄処理後に発生する汚泥の発生率；湿潤質量ベース）については、以下の式で算定する。

$$\frac{\left(\frac{\text{【湿式分級試験のふるい通過試料の乾燥質量】} \times (1 + \text{【濃縮物含水比】})}{100} \right)}{\text{【全試料の湿潤質量】}}$$

また、濃縮物発生率（体積ベース）については、以下の式で算定する。

$$\frac{\left(\frac{\text{【湿式分級試験のふるい通過試料の乾燥質量】} \times (1 + \text{【濃縮物含水比】})}{100} \right)}{\text{濃縮物湿潤密度}} \div \left(\frac{\text{【全試料の湿潤質量】}}{\text{原土壌の湿潤密度}} \right)$$

ここで、濃縮物が脱水ケーキの性状で排出される場合、脱水ケーキの含水比は 40%～60%、湿潤密度 1.4～1.6t/m³ 程度が一般的であるが、これらは使用する機械や処理する土壌の性状で異なることに注意が必要である。また、上記の脱水ケーキの湿潤密度は、脱水ケーキそのものの湿潤密度であり、ドラム缶やフレコンバックにそのまま充填すると、空隙が大きく「嵩密度」がかなり低くなる場合があり、結果として減容化率が悪化することがある。そのため、減容化率を算出する場合、原土壌および濃縮物の湿潤密度をどの様に設定するか(濃縮物であれば排出時の密度なのか、保管時の密度なのか)は留意が必要であり、実際に使用する工法等を勘案して設定することが望ましい。

2.4. 試験結果の評価

当該土壌が土壌洗浄法を適用可能かどうかは、得られた結果を総合的に評価して判断材料とする。減容化という観点から土壌洗浄法の適用性を評価するための目安を以下に示す。

- ① 浄化土壌中の放射性 Cs 濃度については、その後の浄化土壌の再利用・保管における基準等（クリアランスレベルや管理された使用等を想定）を勘案しつつ、総合的に土壌洗浄法の適用の可否について検討する。その際、放射性 Cs の溶出試験の結果も含め、評価を実施することとする。
- ② 分級後の濃縮物について保管・管理が可能であること。その際、放射性 Cs の溶出試験の結果も含め、評価を実施することとする。
- ③ 汚泥発生率が体積ベースで 1 もしくは、事業者の求める割合（コストも含む）を超えていない。例えば、追加汚泥発生率が体積ベースで 70% の場合、土壌洗浄処理をしたとしても、管理が必要な土壌量はもとの土壌量の 7 割にしかない（体積減容化率 30%）。なお、減容化率の計算、体積もしくは質量で行うため、目的に応じて使い分ける必要がある。

※参考：一般的な重金属類汚染土壌に対する分級処理においては、分級後の粗粒分の回収率が 7 から 8 割以上にならないと、通常の搬出処理のコストと比較して、優位にはならない。

保管・管理単価および洗浄処理単価が異なるため、放射性 Cs 汚染土壌に対しては一概には言えないものの、土壌洗浄法がコスト面からも有効となるポイントを探る必要がある。

- ④ 浄化土壌が、有効利用の目的に適する性状を有すること。その際、浄化土壌の土の粒度試験結果から評価を実施することとする。

また、上記の技術的な要件以外に、コスト、プラントの設置に関する地域住民の理解等、社会・経済的な要因も含めて検討をする必要がある。

3. 浄化土壌の有効利用に関する整理

中間貯蔵施設への移送量縮減のため除染除去土壌は減容化処理することが必要と考えられているが、処理土壌の有効利用に関する基準は整備されていない。

災害廃棄物については、例えば道路の路盤材等に利用する場合、利用者・周辺居住者の被ばく線量が 0.01mSv/年以下となるよう管理された状態で利用することが可能である。

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 3000Bq/kg 以下の再生資材、厚さを 10cm 増やした場合（道路表面から 40cm 下）、およそ 10000Bq/kg 以下の再生資材であれば、追加被ばくを 10 μ Sv/年以下に抑えることができるとの結果が得られている^{1),2)}。

一方、放射性廃棄物が、自然に存在するものと同じ程度で十分低い値である基準としてクリアランスレベル（100Bq/kg 以下）が原子炉等規制法で規定されている。また、環境省 除染等

工事共通仕様書では品質管理基準の表に客土材料の規格値として 400Bq/kg 以下が示されている。

各種基準類の汚染レベルについて表-1 に示す。

土壌洗浄法による処理土壌については、シルト・粘土分が除去されるため盛り土材等の地盤材料に使用する場合は、液状化しやすくなる可能性があることに留意が必要である。

表-1 各種基準類と浄化技術の適用性

汚染レベル (Bq/kg)	各種基準類
～ 100	クリアランスレベル(利用に対する制限なし)
～ 400	環境省 除染等工事共通仕様書 客土の基準
～3,000	<ul style="list-style-type: none"> ● 管理された状態での災害廃棄物(コンクリートくず等)の再生利用について¹⁾ ● 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(通知)²⁾ (遮蔽効果を有する資材で地表面から 30cm の厚さを確保すること)
～8,000	(放射線物質汚染対処特措法に基づく指定基準)：廃棄物

1) 管理された状態での 災害廃棄物 (コンクリートくず 等) の再生利用について

2) 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(通知)