

(S2-03) 重金属汚染土壌のオンサイト処理に関する適用可能性試験の検討—第2報—

○山崎将義¹・森岡錦也¹・佐藤 毅¹・岡田雄臣¹・田村和広¹
 土壌汚染の除去等の措置の適用可能性試験に関する調査・検討部会¹
¹ 土壌環境センター

1. はじめに

土壌汚染対策法（平成29年改正）では、実施措置として土壌汚染の除去等の措置を適用しようとする場合、汚染除去等計画を作成するが、予め計画対象とした汚染の除去等の処理方法について適用性の確認を行うことが規定されている¹⁾。適用性を確認する方法として、土壌汚染対策法に基づく調査及び措置にするガイドライン²⁾（以下、ガイドライン）や区域内措置優良化ガイドブック³⁾（以下、ガイドブック）には、適用可能性試験⁴⁾を行い処理の効果を確かめること等が記載されている。しかし、その具体的な方法や手順については示されていない。そこで、（一社）土壌環境センター（以下、センター）に設置した土壌汚染の除去等の措置の適用可能性試験に関する調査・検討部会では、適用可能性評価のための室内試験（以下、室内試験）の具体的な方法・手順の案について、2つの処理方法（オンサイト洗浄処理、原位置生物処理）を対象とし検討を行っている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。昨年度第28回研究集会にてそれぞれ第1報⁷⁾⁸⁾を行い、その後得られた知見・ご意見をふまえて見直し、更新を行ってきた。

本報では、重金属等汚染土壌を対象としたオンサイト洗浄処理（湿式洗浄分級）について、室内試験の方法・手順の一例および留意点について検討した結果を報告する。第1報⁷⁾では室内試験フロー（以下、試験フロー）と留意点の検討結果を報告した。今般、新たに試験結果に対する適用可能性の判断基準を提示し、客観的評価ができるように改善すると共に、試験フローと留意点について見直し、更新したので第2報として報告する。

2. オンサイト洗浄処理の適用可能性試験室内試験フローの見直し、更新

試験フローの見直しにより変更した主な内容について以下に記す。

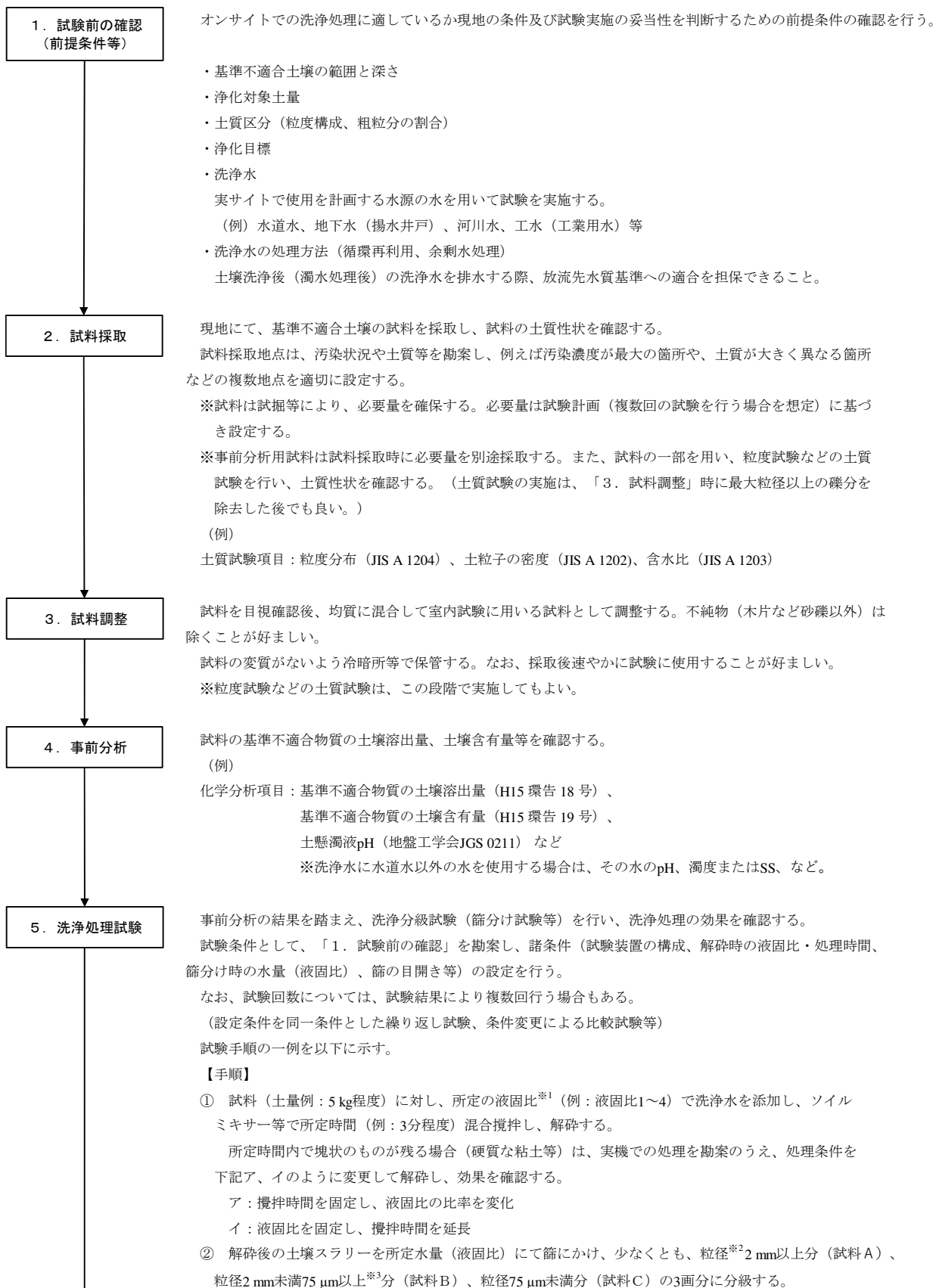
- ・従前の試験フローは設計段階まで考慮した内容としていたが、試験目的をあらためて検討し、見直した結果、洗浄処理の適用性を確認することに限定した内容に変更することとした。
- ・試験フローは全体を通してなるべく簡潔にし、手順等に係る補足説明の文言は必要最小限にとどめ、それ以外は別途、留意点および補足説明として記載することとした。
- ・洗浄水は一般的な洗浄処理として水を用いることとし、室内試験は実サイトで使用を計画する水源の水を用いて実施することとした。
- ・洗浄処理は処理方法として土壌の洗浄のみならず、洗浄水の排水処理工程も含めて成立することから、試験前の確認において、洗浄水の処理方法に関して土壌洗浄後の洗浄水を排水する際、放流先水質基準への適合を担保できることを追記した。
- ・試料採取において、必要試料量の目安の数値は、試験計画によって必要試料量が異なることから削除し、留意点および補足説明で考え方を記載することとした。
- ・洗浄処理試験において篩分けにより洗浄後土壌を3つの画分に分級すること、および洗浄排水（上澄み分）を凝集沈殿処理し洗浄処理水を得ることを理解しやすくするため、図を追加した。
- ・室内試験結果をもとに適用可能性を客観的に評価できるように、適用可能性判断基準を提示した。

上記の変更を反映し更新した試験フローを図-1に示す。以下に試験フローの解説を述べる。なお、本案は標準的なものではなく、具体的な試験方法の一例であることを留意されたい。

2.1 適用可能性試験の目的

本試験は、オンサイトでの洗浄処理について、現地で採取した土壌試料を用いた室内試験により、処理後の土壌が浄化目標に適合するか確認することを目的とする。

Study on applicability test for on-site purification of heavy metal-contaminated soil -Part 2-
 Masayoshi Yamazaki¹, Kinya Morioka¹, Takeshi Sato¹, Takaomi Okada¹, Kazuhiro Tamura¹ and Study Group on
 Applicability test of measures such as removal of soil contamination¹ (¹GEPC)
 連絡先：〒102-0083 東京都千代田区麹町4-5 KSビル3F （一社）土壌環境センター
 TEL03-5215-5955 FAX03-5215-5954 E-mail info@gepc.or.jp



図ー1 オンサイト洗浄処理 適用可能性試験 室内試験フロー（例）^{9),10)} (1/2)

- ③ 粒径75 μm未満分（試料C）とともに回収した洗浄水のうち、上澄み水を凝集沈殿処理（ジャーテスト）し、洗浄処理水（試料D）として分析する。
- ④ 分級後、粒径2 mm未満75 μm以上（試料B）の画分について測定、分析を行い、洗浄処理の効果を確認する。
- ⑤ 他の2画分すなわち粒径2 mm以上（試料A）の画分と粒径75 μm未満（試料C）の画分は、利用先・処分先の求めに応じて、指定された試験方法・項目の分析試験を行い、結果を確認する。

※1：液固比は重量比（土は自然状態における重量）とする。

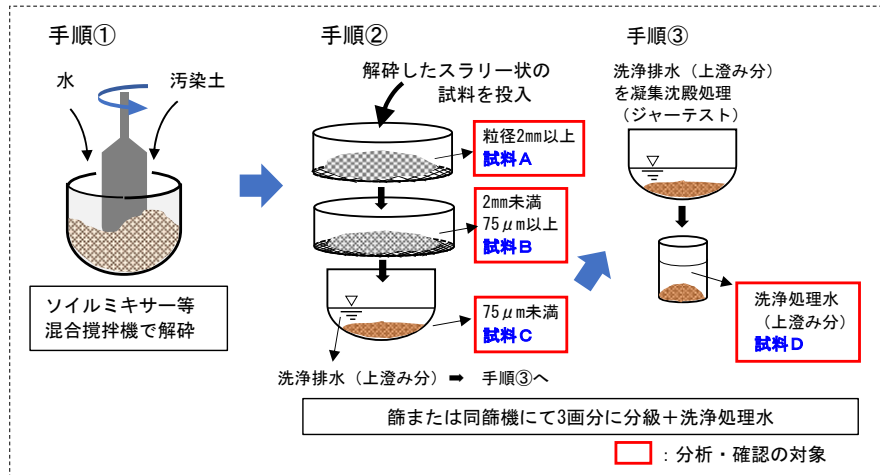
※2：土粒子の各粒径は次の値で表す。

粒径2 mm以上の粒径：目開き2 mmの篩に残留した土粒子。

粒径2 mm未満75 μm以上の粒径：目開き2 mmの篩を通過し、目開き75 μmの篩に残留した土粒子。

粒径75 μm未満の粒径：目開き75 μmの篩を通過した土粒子。

※3：粒径75 μmは粗粒分（75 μm以上）と細粒分（75 μm未満分）を分ける分級点の一般例。分級点は実機の仕様に応じて（より小さく）設定する。



分析項目：試料Bの基準不適合物質の土壤溶出量、土壤含有量、土懸濁液pH

試料Dを対象に上記（土壤の）基準不適合物質の排水中濃度、pH

確認項目：試料A、B、Cの3画分の乾燥重量（構成比を確認）

6. 結果まとめ

試験結果を基に、オンサイトで洗浄分級の適用可能性を評価する。

下記の適用可能性判断基準（3項目すべて）を満足した場合に適用性が高いと評価する。

【適用可能性判断基準】

- ① 浄化目標に適合（試料B）
- ② 洗浄分級後、粗粒分（粒径75 μm以上）の割合が乾燥重量比で50 %以上^{※4}であれば適用性が高いと判断

$$\frac{\text{試料A} + \text{試料B}}{\text{試料A} + \text{試料B} + \text{試料C}} \geq 50\%$$
- ③ 洗浄処理水が、放流先の水質基準（排水基準等）に適合（試料D）

※4：②は米国EPAの資料¹¹⁾等を参考にして設定した。

図-1 オンサイト洗浄処理 適用可能性試験 室内試験フロー（例）^{9),10)} (2/2)

2.2 対象物質

本試験では土壤汚染対策法（以下、土対法）の第二種特定有害物質（重金属等）を対象物質とする。

第二種特定有害物質のうち、シアン化合物、六価クロム化合物および水銀及びその化合物については、適用にあたり以下の点に留意⁹⁾が必要である。

- ・シアン化合物、六価クロム化合物：洗浄処理により排水側へ移行しやすい
- ・水銀及びその化合物：洗浄処理により揮散しやすい

2.3 室内試験フローの概要

室内試験フロー（図-1）は6つの手順から成り、各手順における確認項目や実施項目を図中に示している。

まず、試験前の確認（前提条件等）として、汚染状況および現場・環境条件等を確認・整理する。次に現地にて室内試験用の土壤試料を採取し、試験土壤の性状および汚染状態を土質試験・事前分析にて確認する。そ

これらの結果を踏まえて洗浄処理試験を行い、試験の結果をまとめる。得られた結果をもとに適用性の検討、評価を行い、実サイトの設計条件設定の基礎データとする。なお、評価は今回新たに提案した適用可能性判断基準（図-1（2/2））をもとに実施する。

2.4 室内試験フローにおける留意点および補足説明

室内試験フローにおける留意点および補足説明を以下に記す。

2.4.1 試験前の確認（前提条件等）

オンサイトでの洗浄処理に適しているか現地の条件及び試験実施の妥当性を判断するための前提条件の確認を行う。

①基準不適合土壌の範囲と深さ

土壌汚染状況調査、詳細調査等報告書を確認し、試験に供したい基準不適合物質の種類・濃度の試料が採取可能かどうかなど確認に必要な情報を収集する。試験に供したい試料であっても既存建屋下に存在し、建屋解体後でないと必要量を確保できない等の場合も考えられるため留意が必要である。

②土質区分（粒度構成、粗粒分の割合）

土質区分については、ボーリング柱状図から概略の情報を確認するとともに、試料採取後に行う土質試験において、試験試料の粒度構成のデータを得る。

一般的に、洗浄処理に適する土壌は粗粒分（粒径 75 μm 以上）の割合が試料の 50%以上であるとされている（EPA Guide for Conducting Treatability Studies Under CERCLA: Soil Washing Interim Guidance¹¹）の「2.2.3 事前スクリーニングの特徴」、「2.2.4 土壌洗浄の制限」を参照）。

③浄化目標

適用可能性試験における浄化目標の設定は、対象案件毎に異なる場合があることに留意されたい。

洗浄処理を実施措置の一つとして選定する場合、浄化目標を土対法の目標溶出量基準、含有量基準としないこともありうる。例えば、第二溶出量基準を超える汚染物質を同基準以下に低減する場合などがある。

④洗浄水

試験に使用する洗浄水は、実際に現場で使用を計画する水源の水を用いる。

洗浄水に水道水以外を使用する場合は、実施工時に十分な水量が確保できるかどうか確認しておく。

⑤洗浄水の処理方法（循環再利用、余剰水処理）

実際の措置および処理対策において、土壌洗浄プラント稼働中の洗浄水は、使用后、濁水処理し循環再利用することが一般的である。

稼働中の余剰水や措置および処理対策完了後の洗浄水は排水処理が必要であることから、排水する際の放流先の水質基準を事前に確認すると共に、同基準への適合を担保できることを当該試験において確認する。

放流先の水質基準は各自治体および放流先の公共用水域（河川流域など）によって規制が異なる場合があるため事前に確認しておく。

2.4.2 試料採取

試験に供する試料は採取後、速やかに試料調整し試験を行うように計画する。また、センターホームページで公開されている技術者向け「現場管理ハンドブック」¹²も参考となる。

①採取土量

採取土量は、1 回当たりの試験土量、試験回数（同一条件による繰返し試験、条件変更による比較試験および失敗による再試験などを勘案した回数）および最大粒径以上の礫分の除去（試験装置の篩目上限）を見込むことなどを検討した上で必要量を採取し確保する。

また、試料の最大粒径の上限は、洗浄処理装置の仕様が試験実施者毎に異なり一律に定めることができないため、「1. 試験前の確認」の確認項目でもある「土質区分（粒度構成、粗粒分の割合）」の情報も参考に粒径 10～50 mm の範囲を目安に設定されたい。

粒度試験などの土質試験は、最大粒径以上の礫分を除去後の試料を用いて行う。試験のタイミングは、「3. 試料調整」の段階でもよい。

「4. 事前分析」で行う事前分析用試料は試料採取時に必要量を別途採取する。

②試料採取地点

試料採取地点は、「1. 試験前の確認」の確認項目でもある「基準不適合土壌の範囲と深さ」の情報をもとに汚染状況や土質等を勘案し、例えば汚染濃度が最大の箇所や、土質が大きく異なる箇所などの複数地点を適切に設定する。

③採取方法

試料は現地の状況に応じて小型重機を用いるなどして、対象となる深度から必要量を確保する。

採取した試料に不純物（木片など砂礫以外）が混じっている場合、採取場所にて取り除くことが可能であれば、できるだけ取り除くことが望ましい。

帯水層で試料採取をする場合は、ガイドライン 5.9.2 (2) 2) pp.680-681 についても留意されたい。

④小型重機を用いた試料採取が困難な場合

小型重機を用いた試料採取が困難な場合は、既往のボーリングで採取済みのコア土壌が試験に利用可能か、また、追加ボーリングにより複数箇所のコア土壌を採取、混合し必要量の確保が可能かを検討する。ただし、試験用土壌の必要量を確保することが困難な場合は、試験の実施において次のようなリスクがあることに留意する。

- ・試験を複数回行うことが難しい。
- ・土質試験（粒度分布試験など土質性状の把握、確認）に供する必要量の確保が難しくなる。
- ・既存のボーリングのコア土壌は、適用可能性試験に利用することを前提として採取されていない可能性があるため、試料の保管方法・期間によっては、現地盤の状態と乖離しているおそれがある。

⑤洗浄水

洗浄水として水道水以外の水を使用して室内試験をする場合は、試験条件（試験土量、液固比、試験回数など）を検討した上で必要量を現地で採水し確保する。

2.4.3 試料調整

試験に供する試料は採取後、速やかに試料調整し試験を行うように計画する。

試料は目視確認後、均質に混合して室内試験に用いる試料として調整する。不純物（木片など砂礫以外）が混じっている場合、取り除くことが望ましい。

最大粒径上限値の設定および最大粒径以上の礫分の除去が、「2. 試料採取」の段階でできない場合は、この段階で行うことでもよい。

試料を保管する際は、乾燥により含水状態が変化しないように密閉容器に収納し、試料の変質がないよう冷暗所にて保管する。

2.4.4 事前分析

土壌の化学分析に用いる試料は、環境省告示 18 号および同 19 号、ガイドライン Appendix 9（土壌溶出量調査に係る測定方法）および Appendix 10（土壌含有量調査に係る測定方法）に準じて保管および分析を行う。

なお、洗浄水に水道水以外の水を使用する場合は、事前に水質（pH、濁度または SS、など）を確認しておく。

2.4.5 洗浄処理試験

試験にあたっては、洗浄処理の設定条件を固定させるための事前試験（予備実験）を行い、条件確定後に本試験を行うことが望ましい。設定条件は以下に示す表 1 を参考にして検討されたい。

表 1 洗浄処理試験の設定条件（例）

設定条件の項目	・土壌と洗浄水の液固比（自然状態の重量比） ➡ 【設定例】液固比 1~4 ・解砕（解泥）する混合攪拌時間 ➡ 【設定例】3 分程度 ・分級の篩目（目開き） ➡ 【設定例】1 段目 2 mm、2 段目 75 μm
試験回数	【複数回実施の場合】 ・設定条件を同一条件とした繰り返し試験 ・条件変更による比較試験

対象土質が土丹（固結性シルト、粘土）の場合は、混合攪拌時に完全に解砕しきれない可能性がある。そのような場合は、分級の際、篩上に残った未解砕の土壌を指で潰せる範囲で解砕（篩上で）しながら分級する。

分級によって得られた各画分のうち、粒径 2 mm 以上の画分（試料 A）と粒径 75 μm 未満の画分（試料 C）は、利用先・処分先の求めに応じて、指定された試験方法・項目の分析試験を行い、結果を確認する。

また、分級後の洗浄排水（上澄み分）をさらに、凝集沈殿処理（ジャーテスト）等による濁水処理を実施し、洗浄処理水として分析する。

なお、洗浄処理試験の手順②の後にすすぎ工程を追加することで、粗粒分（特に砂分：粒径 2 mm 未満 75 μm 以上（試料 B））の分級精度が向上し、土壌溶出量の低減を図れる場合がある。ただし、実処理において使用

水量増加や処理能力低下（処理時間が全体として長くなる）を伴うため、費用対効果の見極めも含めて計画検討されたい。

2.4.6 結果まとめ

試験結果を基に、オンサイト洗浄処理の適用可能性を判断基準により評価する。判断基準の3項目（①から③）すべてを満足した場合に、適用可能性が高いと評価する。

判断基準②は、米国 EPA の資料¹¹⁾等を参考にし、砂礫質の土壌は適用性が高く、細粒分（シルト・粘土）が50%以上ある土壌は一般的に処理に時間と費用を要するため不利であることから、設定した。

判断基準③に関して、洗浄処理水が放流先の水質基準に適合しない、あるいは適合させるために必要な水処理の実施が費用対効果の観点から困難な場合は、適用可能性が低いと判断する。

「5. 洗浄処理試験」において複数回の繰返し試験を実施した結果にばらつきがある場合は、追加試験の実施を検討する、過去の類似試験の結果も参考に評価する、など試験実施者の判断に委ねたい。例えば、同一条件による試験回数が3回以上であれば、変動係数を用いた評価（データの変動係数が20%を超える場合は追加試験を検討するなど）も可能となる。

3. おわりに

本報では、重金属等汚染土壌を対象としたオンサイト洗浄処理を対象とし、室内試験の具体的な手順の一例および留意点について、前回の第1報から更に検討を重ねて見直し、更新した結果を報告した。また、適用可能性の判断基準も提示した。今後これらの活用を図る上で改善の余地がないか、意見交換・討議を重ねたい。

参考文献

- 1) 環境省（2007）：土壌汚染対策法施行規則，別表第7の5の項中欄1のト、別表第7の5の項中欄2のホ。
- 2) 環境省（2022）：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン（改訂第3.1版），5.4 措置の実施，Appendix 22_4,同5。
- 3) 環境省（2020）：区域内措置優良化ガイドブック（改訂版）—土壌汚染対策法に基づくオンサイト措置及び原位置措置を適切に実施するために—，pp.55。
- 4) 岡田雄臣・山崎将義・森岡錦也・佐藤毅・西田憲司・土壌汚染の除去等の措置の適用可能性試験に関する調査・検討部会（2024）：米国（EPA）における汚染土壌の処理方法の適用性の確認方法・手順，第29回地下水土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，投稿中。
- 5) 羽瀧博臣・藤井雄太・山野辺純一・伊藤雅子・西田憲司・土壌汚染の除去等の措置の適用可能性試験に関する調査・検討部会（2024）：塩素化エチレン類による土壌・地下水汚染の原位置生物処理に関する適用可能性試験の検討—地下水を用いる場合 第2報—，第29回地下水土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，投稿中。
- 6) 山野辺純一・羽瀧博臣・藤井雄太・伊藤雅子・西田憲司・土壌汚染の除去等の措置の適用可能性試験に関する調査・検討部会（2024）：塩素化エチレン類による土壌・地下水汚染の原位置生物処理に関する適用可能性試験の検討—土壌を用いる場合—，第29回地下水土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，投稿中。
- 7) 森岡錦也・佐藤毅・山崎将義・田村和広・西田憲司・土壌汚染の除去等の措置の適用可能性試験に関する調査・検討部会（2023）：重金属汚染土壌のオンサイト処理に関する適用可能性試験の検討，第28回地下水土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.242-246。
- 8) 羽瀧博臣・伊藤雅子・金井良太・西田憲司・土壌汚染の除去等の措置の適用可能性試験に関する調査・検討部会（2023）：塩素化エチレン類による土壌・地下水汚染の原位置生物処理に関する適用可能性試験の検討，第28回地下水土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.476-480。
- 9) 環境省（2020）：汚染土壌処理業の許可審査に関する技術的留意事項（令和2年12月改訂），pp.25-26。
- 10) 秦浩司・大山将・鈴木義彦・片岡昌裕・技術標準化部会（2014）：重金属等不溶化処理の適用性確認試験手順（案）の作成および不溶化処理土壌の安定性に関する既往研究事例の調査，第20回地下水土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.255-260。
- 11) U.S. Environmental Protection Agency (1991) : Guide for Conducting Treatability Studies Under CERCLA, Soil Washing, Interim Guidance, EPA/540/2-91/020A.
- 12) (一社) 土壌環境センター：技術者向け「現場管理ハンドブック」C-01-001, C-01-015, T-04-001, <https://www.gepc.or.jp/handbook/top-hb.html>