

（S4-19）原位置化学処理（還元分解）に関する適用可能性試験の検討－第2報－

○水柿貴史¹・藤井雄太¹・羽瀧博臣¹・森岡錦也¹・三浦英俊¹・西田憲司¹・
土壤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（第2期）¹
¹ 土壤環境センター

1. 背景および目的

土壤汚染対策法では、土壤汚染の除去等の措置において汚染除去等計画の作成前に、汚染の除去等の処理方法（以下「措置技術」という）の適用性の確認を予め行うことが規定されている¹⁾。また、土壤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²⁾や区域内措置優良化ガイドブック³⁾には、予定している措置技術によって予想通りに処理ができるか「適用可能性試験」で効果を確認すること等が記されている。しかしながら、その具体的な方法や手順については示されていない。そのため、（一社）土壤環境センターに設置された、「土壤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」（以下、適用性試験部会という）では、2022年度から適用可能性試験の具体的な方法や手順に関する調査・検討を行い、これまでに5つの措置技術（オンサイト洗浄処理、原位置生物処理など）の適用可能性試験の具体例を提示した^{4),5)}。適用性試験部会は第2期として2024年度以降も活動を継続し、検討対象を他の措置技術にも拡大して試験方法や手順の作成を進めている。

本稿では、第30回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会報文⁶⁾の第2報として、第一種特定有害物質（ベンゼンを除く）による土壤汚染を対象とした原位置化学処理のうち還元分解について、より具体的かつ分かりやすい内容とするため、適用可能性試験の試験フローの見直し、および各ステップにおける留意点および補足説明の追加を行った。なお、本試験フローは標準的な手法ではなく、具体的な試験方法の一例を提示したものであること、また、本稿での報告内容は検討の最終結果ではなく、現段階における案であることに留意願いたい。加えて、今回、原位置化学処理のうち酸化分解に関する報告⁷⁾も行っているため、合わせて参考としていただきたい。

2. 適用可能性試験の検討対象

本稿では、前記のとおり第一種特定有害物質（ベンゼンを除く）の還元分解に焦点を当て、施工事例が多い工法の一つである鉄粉を用いた攪拌混合工法（以下「鉄粉混合」という）を検討対象とした。

3. 適用可能性試験の目的

鉄粉混合による還元分解では、処理対象土壤の土質区分や強度等の性状、およびpHや硫酸イオン等の阻害要因によって浄化対象物質の分解挙動は大きく影響を受ける。そのため、事前の適用可能性試験や現地試験、シミュレーション、実績等により、選定した措置技術で浄化対象物質を処理できることを確認しておく必要がある。特に、浄化対象物質を分解する薬剤の効果およびその反応条件の確認は重要である³⁾。よって、本稿の適用可能性試験の目的は、現地で採取した土壤を試料とし、鉄粉混合による還元分解を模擬した室内バッチ試験を行い、浄化対象物質の分解が十分に進行するかどうかを確認することとした。

4. 適用可能性試験の試験フローの見直し、各ステップにおける留意点および補足説明

試験フロー例を図-1に示す。第1報の後に見直した主な点は、①試料採取において浄化対象物質が揮発しているおそれがあるためコア表面での採取を避けることの追記、②浄化対象物質の用語の定義において分解生成物を含めたこと、③同じ試験体を継続して測定する場合の試験体作製数量について追記、④試験を実施する上での留意点を抽出し、試験フローの手順を補うための説明を参考として加えたこと、である。各ステップにおける留意点および補足説明について、以下4.1～4.8に詳述する。なお、試験フローにおいて、重要箇所には下線を、第1報からの更新箇所は太字で記載した。

Study on applicability test for in-situ chemical reduction -Part2-

Takashi Mizugaki¹, Yuta Fujii¹, Hiroomi Habuchi¹, Kinya Morioka¹, Hidetoshi Miura¹, Kenji Nishida¹
and Study group on applicability test of measures such as removal of soil contamination (The 2nd Term)¹ (¹GEPC)

連絡先：〒102-0083 東京都千代田区麹町4-5 KSビル3F （一社）土壤環境センター
TEL 03-5215-5955 FAX 03-5215-5954 E-mail info@gepc.or.jp

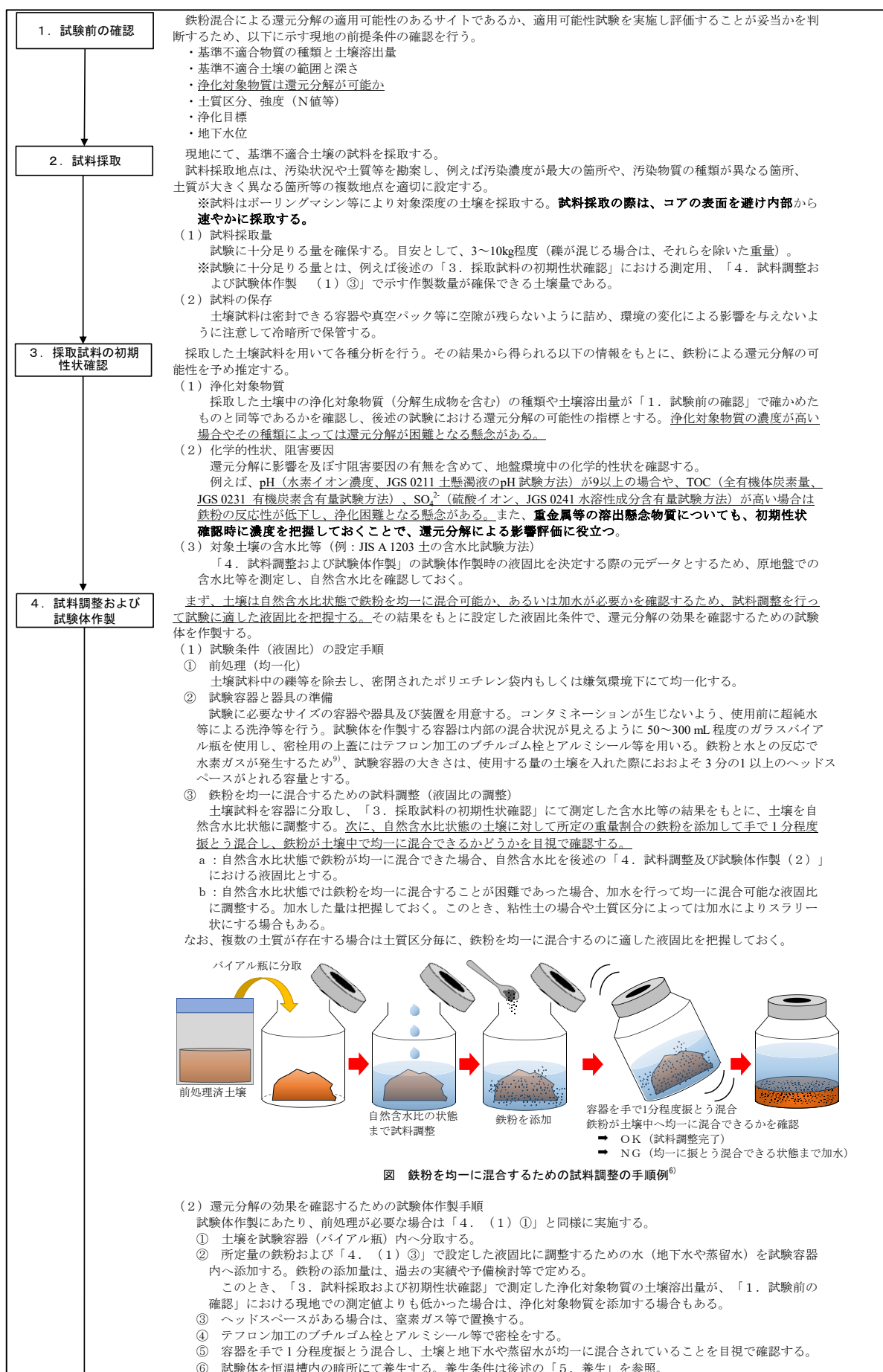


図-1 試験フロー（1/2）

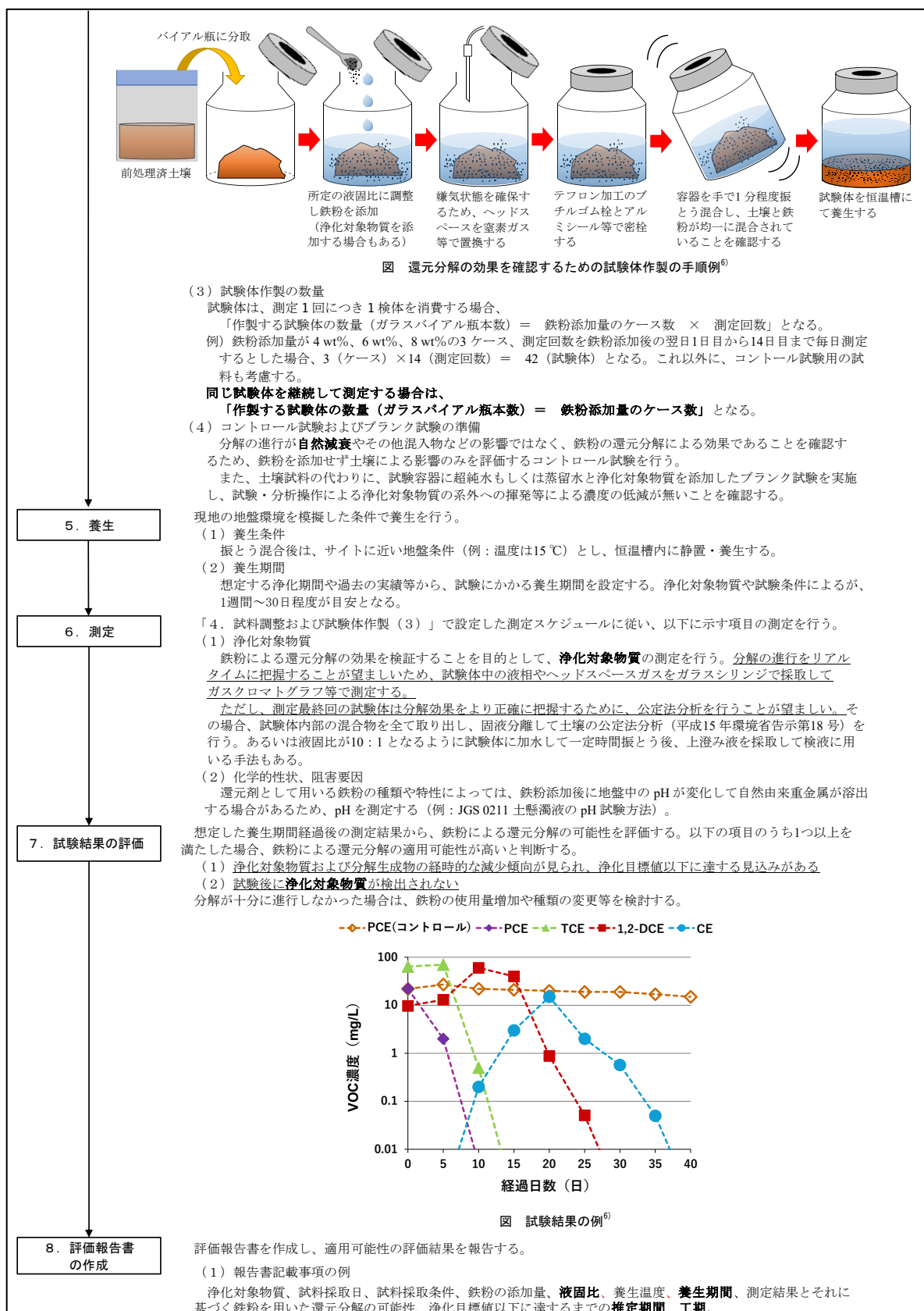


図-1 試験フロー（2/2）

4.1 試験前の確認（前提条件）

(1) 基準不適合物質の種類と土壌溶出量

原位置化学処理によって浄化可能な物質および濃度であるかを確認する。例えば、浄化対象物質の濃度が数十 mg/L 程度を超える場合は、薬剤（鉄粉）の適用が難しいことがある。

(2) 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、試験に供する汚染箇所の試料が採取可能かどうかを事前に調査する。また、薬剤を浄化対象範囲に効率的かつ効果的に混合するため、基準不適合地点の範囲と深さを確認する。

(3) 浄化対象物質は還元分解が可能か

実績および文献等の既存データから、浄化対象物質は薬剤を添加することで還元分解が可能か確認する。例えば、浄化対象物質が四塩化炭素やクロロホルムの場合は、ジクロロメタンまでの還元分解に留まることが多いため注意が必要である⁸⁾。また、1,2-ジクロロエタンに関しても分解が比較的困難となる場合がある⁸⁾。

(4) 土質区分、強度（N 値等）

ボーリング柱状図等の情報から鉄粉混合できる地盤環境であるか確認する。粘性土において、攪拌混合機械を用いた直接混合等を実施する場合は、均一な混合が難しくなる場合があるため、使用する機械や混合条件の選定に留意する³⁾。また、浄化対象の地盤が軟弱地盤の場合、攪拌混合機械の施工や安全性に影響を及ぼすため、N 値、地下水位を把握しておくことが望ましい。

(5) 地下水位

選定する鉄粉の種類や攪拌混合方法によっては、不飽和層での浄化に適用できない場合があることに留意する。

4.2 試料採取

(1) 土壌試料の採取

土壌試料の採取・保管状態による試験への影響を考慮する必要がある。例えば、採取時には、土質ボーリングのように泥水は使わず無水掘りでの採取とし、回転を伴う掘削によって熱が発生しないように十分に注意する。

(2) 土壌の保管

土壌の保管時には、土壌の乾燥、好気的な環境に晒されることによる試料の酸化等が起こらないように、土壌採取後、速やかに密閉容器に入れ、冷暗所で保管する。

(3) 地下水の採取

現地で土壌試料を採取する際、地下水も採水することが望ましい。試験時に土壌試料に添加する水に現地の地下水を活用することにより、原位置の土質および地下水水質の特徴（浄化対象物質濃度や pH 等）を踏まえた試料で試験・評価を行うことができる。

4.3 採取試料の初期性状確認

(1) 現地の地盤環境

薬剤の特徴や還元分解の阻害要因が浄化効果に影響を及ぼす可能性があることに予め留意しておく。例えば地盤中の有機酸濃度が高い場合、鉄粉表面に酸化被膜が形成され反応性が低下することがある。また、溶存酸素濃度が高い場合は鉄粉が過剰に消費されることがある。

(2) 油類の共存

油類が共存する場合、油類の種類や濃度によっては薬剤が過剰に消費されることがや、薬剤と浄化対象物質との反応が阻害されることがあり、結果的に浄化が効率的に進まない場合がある³⁾。

4.4 試料調整および試験体作製

(1) 前処理（均一化）

土壌の均一化は可能な限り嫌気環境下で行う必要がある。方法としては、例えば、嫌気チャンバー内でのミキサー等による混合や、土壌を密閉できるポリエチレン袋等に入れて手作業で混合する方法があ

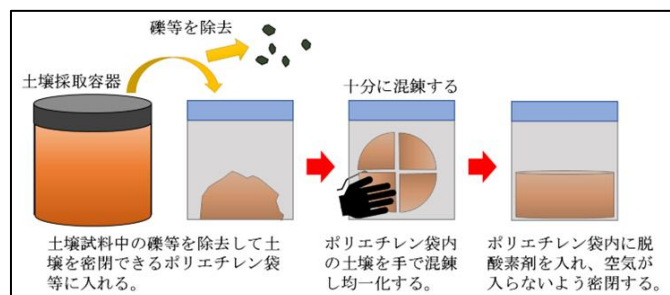


図-2 前処理（均一化）の手順例⁶⁾

る。図-2 に手作業による均一化の例を示す。

(2) 試料調整

振とう混合の方法は、容器を上下左右に手で振る。振とう混合する時間として、まずは1分程度行い、混合状態が不均一な場合は、振とう時間を延長するか加水による液固比の調整を行うかを判断し、均一に調整できた条件を記録する。薬さじを用いた混合は避ける。容器の蓋を開ける必要があり、浄化対象物質が容器外に揮発するおそれがあるためである。

(3) 薬剤の添加

試料に薬剤を添加する際は、作業者の安全を確保するためドラフト内で作業する。特に微細で比表面積が大きい鉄粉を使用する場合、添加後の初期段階においては水素ガス発生懸念がある⁹⁾。また、一部溶存イオン（硝酸イオンや硫酸イオン）が鉄粉により還元作用を受けて窒素あるいは硫化水素などが発生する可能性がある⁹⁾。

(4) 薬剤による影響の確認

薬剤を土壌中に添加することで予期せぬ物質が生成し、pH や酸化還元電位等の条件が変化することで重金属等が土壌から溶出する場合がある³⁾ことから、薬剤による影響について製造元に予め確認しておく。

(5) 薬剤の周辺環境への影響

環境への影響を配慮した薬剤（無害なもの等）を使用する。薬剤によっては添加物も含めて毒物や劇物、危険物等に指定されている成分を含む場合があるため、関連する法令を遵守し、保管や取扱いに十分に注意する必要がある³⁾。市販品の薬剤の場合は安全データシート（SDS）を確認し、各社独自の製品の場合は、成分表等のデータを示すことで安全性を担保する。

(6) 試験体の作製数量

試験体の作製数量は、測定1回につき1検体を消費するか、同じ検体を継続して測定するかによって異なる。試験条件を考慮して選ぶことになるが、例えば試験容器が小さく容器内が陰圧になりやすい場合や、測定頻度が高く採取液量の確保が難しい場合、および揮発性の高い物質を取り扱う場合は、測定1回ごとに1検体を用いるのが望ましい。なお、試験体作製数量を設定する際には、試験結果の信頼性を確保する観点から、同一条件の試験の繰返し回数（n 数）の設定に関する検討を行うことが望まれる。

4.5 養生

(1) 試験容器の密栓

密閉性を維持したまま測定試料の採取を行うために、テフロン加工のブチルゴム栓とアルミシール等で必ず密栓¹⁰⁾をする。

(2) 養生場所

密栓後の試験容器は、温度を一定に保ったインキュベーターや室内に静置、あるいは恒温水槽内で水没させて養生する。

(3) 養生温度

養生時の温度は、現地条件に近い温度（例：15℃）とする。

4.6 測定

(1) 測定試料の採取と嫌気環境の維持

ガラスシリンジを試験容器のゴム栓に刺し、容器内の試料を必要量採取する。その際、針穴からの空気の混入に注意し、浄化対象物質が揮発しないよう留意する。

(2) 浄化対象物質の測定

規制外物質であるエチレン等については、公定法を準用するか、分析会社等と相談のうえ測定方法を選定することが望ましい。浄化対象物質の分解生成物を確認することは、経時的な減少傾向や分解速度の評価指標となるので有効である。

4.7 試験結果の評価

(1) 適用可能性の判断

コントロール試験との比較により、浄化対象物質および分解生成物に対する還元分解の効果が示されることは重要な判定要素となる。

4.8 その他

原位置化学処理が対象地（現地）に適用可能か評価する際は、室内試験の結果に加え、以下の項目も考慮して総合的に判断することが望ましい。

(1) コスト、工期

原位置化学処理の実施にかかる費用や工期が、事業計画の範囲内に収まる見込みかどうかを慎重に検討しておく。

(2) 攪拌混合工法の地盤環境への影響

攪拌混合機械を用いて薬剤を土壌に混合した場合、泥状化した土壌が地表面から噴出したり、地表面に盛り上がりが発生したりすることがある。また、工事後に地盤が軟弱化することや、逆に地盤が固化することもある。したがって、対象とする地盤の性状・特徴を十分に把握し、適切な工法や混合条件を設定することが重要である。必要に応じて、工事中の養生や工事後の地盤改良等を行う³⁾。

(3) 室内試験と現地施工の条件の相違点

室内試験と現地施工では、規模、土壌の均一性、薬剤の混合方法、地下水の流れの存在等、実施条件に多くの相違点があり、浄化の進捗に影響を及ぼす可能性があることに留意する。それらの点は、パイロット試験や現地試験等、次のステップへ移行し確認するかどうかを含め、対応について検討する。

(4) 乾式混合の場合

鉄粉を乾式混合する場合においても、湿式での混合と同様に、鉄粉による浄化対象物質の分解効果は本適用性試験によって評価可能と考える。

5. おわりに

本稿では、第一種特定有害物質（ベンゼンを除く）による土壌汚染に対する原位置化学処理のうち、還元分解の適用可能性試験について第1報で示した試験フローの見直し、各ステップにおける留意点および補足説明を追加した結果を報告した。汚染除去等計画の作成時や適用性を確認する際の判断の一助になればと考える。

参考文献

- 1) 環境省（2024）：土壌汚染対策法施行規則，別表第七， <https://laws.e-gov.go.jp/law/414M60001000029/>，2026年1月閲覧。
- 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。
- 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.88-92。
- 4) 山崎将義，森岡錦也，佐藤毅，岡田雄臣，田村和広，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）：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—，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，pp.119-124。
- 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，pp.346-351。
- 6) 藤井雄太，羽瀧博臣，森岡錦也，水柿貴史，三浦英俊，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（第2期）（2025）：原位置化学処理（還元分解）に関する適用可能性試験の検討，第30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.50-55。
- 7) 折山浩樹，藤井雄太，羽瀧博臣，森岡錦也，水柿貴史，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（第2期）（2026）：原位置化学処理（酸化分解）に関する適用可能性試験の検討，第31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。
- 8) 秦浩司（2014）：揮発性有機化合物（VOCs）および塩化ビニル・1,4-ジオキサンに対する化学的分解法の適用性に関する研究，安藤ハザマ研究年報 Vol.2，pp.1-6。
- 9) 根岸昌範（2012）：最新の土壌・地下水汚染原位置浄化技術，シーエムシー出版，pp.136-141。
- 10) 根岸昌範，樋口雄一，高岡昌輝，武田信生（2005）：金属還元剤の表面特性と塩素化炭化水素の脱塩素反応速度定数，水環境学会誌，Vol.28，No.11，pp.677-682。