

(S2-18) 透過性地下水浄化壁（分解）に関する適用可能性試験の検討

○森川航平¹・佐藤 毅¹・澁谷正宏¹・三浦英俊¹・西田憲司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（第2期）¹
¹ 土壌環境センター

1. はじめに

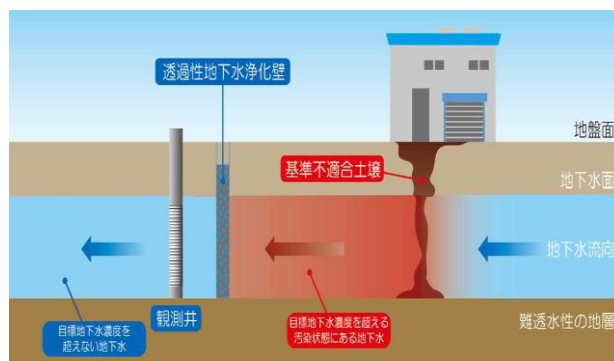
土壌汚染対策法（以下、法）において実施措置として土壌汚染の除去等の措置を適用する場合、汚染除去等計画を作成するが、計画した汚染の除去等の処理方法（以下、措置技術）に関し、予め適用性の確認を行うことが規定されている¹⁾。適用性を確認する方法として、法に基づく調査及び措置に関するガイドライン（以下、ガイドライン）²⁾には適用可能性試験を行い処理の効果を確認すること等が記載されている。しかし、その具体的な方法や手順については示されていない。また、環境省の区域内措置優良化ガイドブック³⁾においては適用可能性試験が「措置技術又は処理技術の適用性を検討する上で、事前に基準不適合土壌等を用いて処理技術の適用性および適用条件を決定するために、室内等で実施する試験」と定義され、適用性の確認方法の一つに挙げられているが具体的な手順等は示されていない。そこで、（一社）土壌環境センター（以下、センター）では、令和4年度（2022年度）より「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」（以下、当部会）を立ち上げ、適用可能性評価のための室内試験（以下、室内試験）の方法・手順について検討を行い、これまでに5つの措置技術に対してその具体例を提示した⁴⁾。当部会は、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。

本報では、第一種特定有害物質（ベンゼンを除く）（以下、第一種特定有害物質）による地下水汚染の拡大の防止を目的として、壁体に配合した鉄粉で第一種特定有害物質を分解する機能を有する透過性地下水浄化壁を検討対象とし、室内試験の目的、方法・手順および留意点について検討した結果を報告する。なお、今回提示する試験フローの例および留意点の例は、検討の最終結果ではなく現段階での案であることに留意されたい。

2. 検討対象とする透過性地下水浄化壁の概要

透過性地下水浄化壁（以下、浄化壁）は、前記のとおり地下水汚染の拡大の防止を目的とした措置技術である³⁾。対象地（要措置区域等）の地下水流向下流側に透水性が周辺の帯水層と同等以上に維持された浄化壁を地中に構築し、汚染された地下水から定常的に汚染物質を除去することにより、対象地からの目標地下水濃度を超える汚染状態の地下水の拡大を防止する³⁾（図-1）。

浄化壁は、米国において30件以上の適用実績があり^{5),6)}、国内でも実施事例をセンターの活動において確認している⁷⁾。地下水汚染除去の原理として分解と吸着の2つがあり³⁾、吸着に関しては2025年度に報告した⁴⁾。本報では、第一種特定有害物質を対象とする分解に着目し、施工事例が多い鉄粉を用いた還元分解機能の浄化壁を検討対象とした。当該機能は、鉄粉を壁体に配合した浄化壁に地下水が接触した際、鉄粉表面で生じる鉄の溶解に伴って脱塩素化反応が進行し、第一種特定有害物質を還元分解するものである⁸⁾。適用可能性試験の検討結果について以下に述べる。

図-1 透過性地下水浄化壁の概要³⁾

Study on applicability test for Permeable Reactive Barriers

Kouhei Morikawa¹, Takeshi Sato¹, Masahiro Shibuya¹, Hidetoshi Miura¹, Kenji Nishida¹ andStudy 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）土壌環境センター

TEL 03-5215-5955 FAX 03-5215-5954 E-mail info@gepc.or.jp

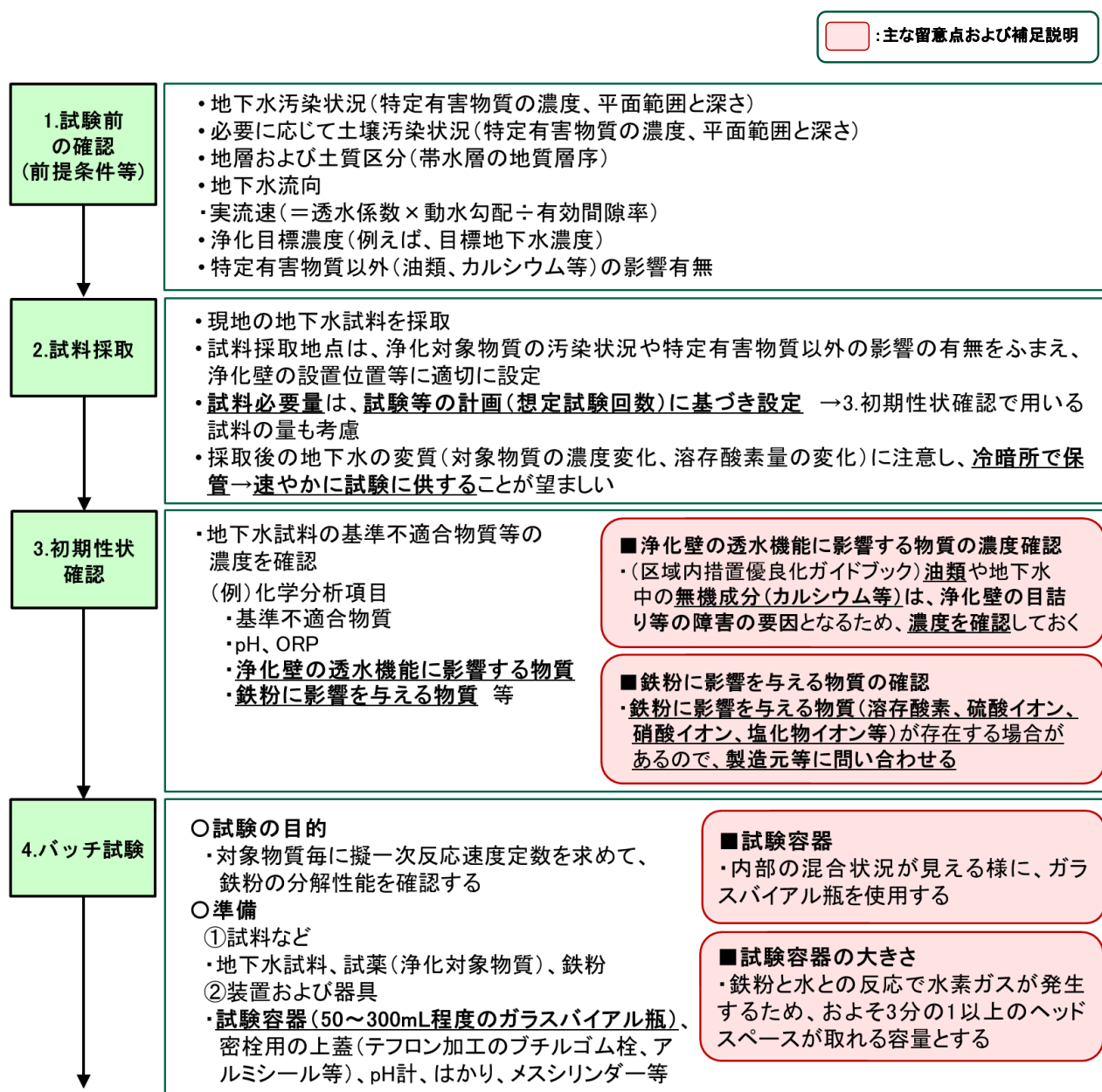
3. 適用可能性試験の目的

本試験は、浄化壁を実施措置等として適用する場合に、現地で採取した地下水試料を用いた室内試験により、処理後（浄化壁透過後）の地下水について確実に浄化目標濃度（例えば目標地下水濃度）を超えない状態にできる性能があることを確認する。また、その性能を維持する設計とするために必要なデータを取得することを目的とする。今回検討対象とした第一種特定有害物質を分解除去する浄化壁の室内試験においては、現地の条件をふまえ、有効な鉄粉の選定、鉄粉の配合条件（地盤材料への添加量）および壁厚の設計根拠データの取得を行い、上記の設計に資するものとする。

4. 透過性地下水浄化壁（分解）の適用可能性試験フロー（例）の概要

透過性地下水浄化壁（分解）の適用可能性試験フロー（例）を図－2に示す。本図には各手順における実施内容、確認項目および留意点を合わせて記す。

フローは、以下 5 つの手順から成る。まず、試験前の確認（前提条件等）として、汚染状況（地下水等）、地盤条件および現場条件等を確認・整理する。次に分析・試験に用いる地下水を現地で採取し、基準不適合物質等の初期性状を事前に分析して確認する。それらの確認結果を踏まえて室内試験を行い、試験結果を評価する。以上の検討結果をもとに適用性の評価を行い、実サイトの設計条件設定の基礎データとする。



図－2 透過性地下水浄化壁（分解）の適用可能性試験フロー（例）（1/3）

4. バッチ試験 (続き)

○バッチ試験(分解性能評価)

①地下水試料の調製

- 地下水試料または地下水試料に浄化対象物質(試薬等)を添加し調整した模擬地下水試料を試験試料とし、浄化対象物質および分解生成物の濃度(以下、初期濃度)を測定

②分解試験

- 試験試料を試験容器内へ分取
- 所定量の鉄粉を試験容器内へ添加。鉄粉の添加量は、過去の実績や予備検討等で定める
- ヘッドスペースがある場合は窒素ガス等で置換
- テフロン加工のブチルゴム栓とアルミシール等で密栓
- 試験体の数量は、測定1回につき1検体を消費する場合、
「作製する試験体の数量(ガラスバイアル瓶本数) = 鉄粉添加量のケース数 × 測定回数」
- 容器を手で1分程度振とう混合し、地下水と鉄粉が混合されていることを目視で確認
- 振とう混合後は、サイトに近い条件(例: 温度は15°C、暗所)とし、恒温槽内に静置・養生
- 鉄粉を添加せず、地下水による影響のみを評価するコントロール試験を行う
- 養生時間は、地下水が浄化壁を通過する時間を考慮して設定

③測定

- 鉄粉による還元分解の効果の検証を目的として、浄化対象物質および分解生成物を測定
- 分解状況をリアルタイムに把握することが望ましいため、試験体中の液相やヘッドスペースガスをガラスシリンジで採取し、ガスクロマトグラフ等で測定
- 測定最終回の試験体は、分解効果をより正確に把握するため、公定法分析が望ましい
- 還元剤として用いる鉄粉の種類や特性によっては、鉄粉添加後に地下水中のpHが変化して自然由来重金属等が溶出する場合があるため、pHを測定

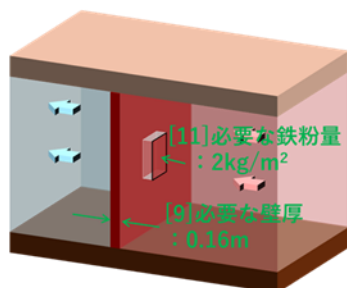
④擬一次反応速度定数の計算

- 鉄粉による第一種特定有害物質の脱塩素化は、擬一次反応式による評価が成立すると仮定し、浄化対象物質および分解生成物について、初期濃度、経過時間tにおける濃度、経過時間を以下の式に代入し、擬一次反応速度定数を求める。

$$\ln \left[\frac{\text{経過時間}t\text{における濃度}(\text{mg/L})}{\text{初期濃度}(\text{mg/L})} \right] = -[\text{擬一次反応速度定数}(1/\text{h})] \times [\text{経過時間}(\text{h})]$$

⑤鉄粉の評価、計画する浄化壁の耐久年数試算

- 擬一次反応速度定数や分解生成物の生成割合を比較し、設計に使用する鉄粉を選択
- ④で得る擬一次反応速度定数など設計条件を元に、計画壁厚での耐久年数を試算



バッチ試験で求められるのはあくまで最低限必要とされる壁厚と鉄粉混合量

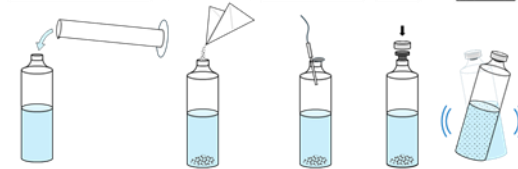
■浄化対象物質(試薬等)の添加

- 浄化対象物質の地下水濃度が現地での測定値よりも低かった場合は、浄化対象物質の試薬等を添加する場合もある

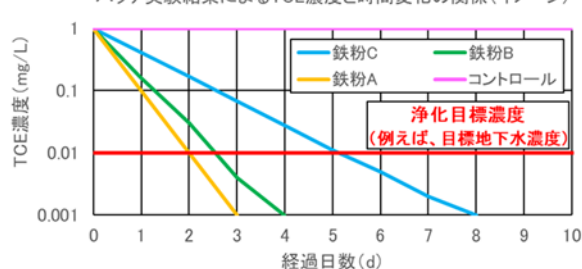
■鉄粉添加の副次的影響

- 鉄粉の添加に伴う副次的影響が無いこと(例えばpHの変化)を確認

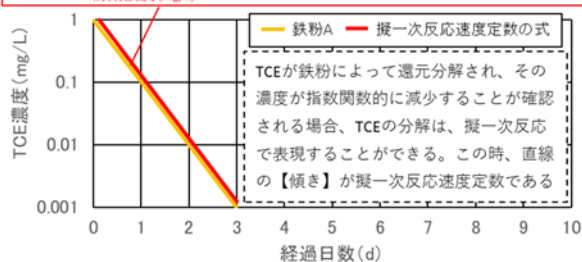
地下水試料投入 鉄粉添加 窒素パージ 密栓 振とう



バッチ実験結果によるTCE濃度と時間変化の関係(イメージ)



$$\ln \left[\frac{\text{経過時間}t\text{における濃度}(\text{mg/L})}{\text{初期濃度}(\text{mg/L})} \right] = -[\text{擬一次反応速度定数}(1/\text{h})] \times [\text{経過時間}(\text{h})]$$

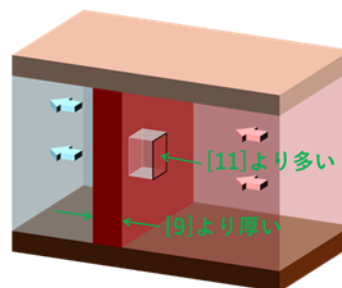


■擬一次反応速度定数の計算

- 汚染源対策を行う等で初期濃度に変化する場合もあるが、バッチ試験では、初期濃度一定として擬一次反応速度定数を求める

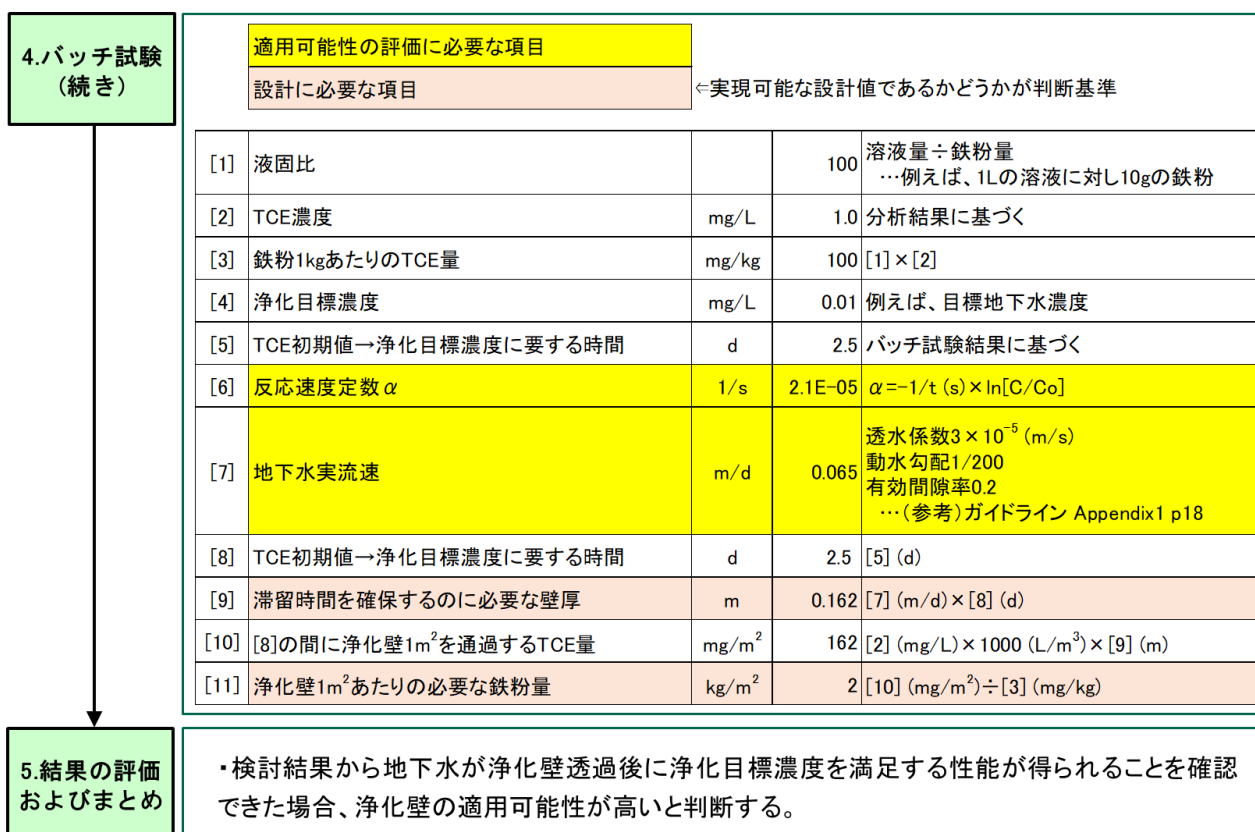
■鉄粉の評価、計画する浄化壁の耐久年数試算

- 液相中の濃度が浄化目標濃度を下回ること、および、その経過時間を確認する
- 使用した鉄粉に第一種特定有害物質の脱塩素化の能力があることを確認する
- 液相中の浄化対象物質および分解生成物が浄化目標濃度を下回るまでの経過時間を浄化壁の滞留時間とする



実際の設計では、施工性や鉄粉の均質混合性等も考慮し、壁厚や鉄粉混合量に余裕を持たせて設計すると想定される

図-2 透過性地下水浄化壁(分解)の適用可能性試験フロー(例) (2/3)



図ー 2 透過性地下水浄化壁（分解）の適用可能性試験フロー（例）（3/3）

5. 透過性地下水浄化壁（分解）の適用可能性試験のフロー（例）における留意点および補足説明

透過性地下水浄化壁（分解）の適用可能性試験フロー（例）（図ー 2）における留意点および補足説明を以下に記す。

5.1 試験前の確認（前提条件等）

対象地が浄化壁の設置に適する地盤条件や施工条件であること等、適用可能性試験の実施の妥当性を判断するための前提条件に関し、以下の事項について確認を行う。

(1) 地下水汚染状況等

土壌汚染状況調査や詳細調査等の報告書を確認し、地下水汚染状況（特定有害物質（対象物質の分解生成物を含む。以下同じ）の濃度、平面範囲と深さ）等を確認する。

(2) 帯水層の構造（深さ、地下水の流向・流速、透水係数等）

上記の報告書等から該当情報を確認し、無ければ追加調査等を行い把握する。

(3) 地下水の浄化目標濃度

浄化目標とする地下水濃度（例えば、目標地下水濃度）を適切に設定する。

(4) 浄化壁の機能に影響を与える物質

油類や地下水中の無機成分（カルシウム等）は、浄化壁の目詰り等障害の要因となるため留意する³⁾。また、鉄粉に影響を与える物質（溶存酸素、硫酸イオン、硝酸イオン、塩化物イオン等）とその濃度について、製造元等に問い合わせる⁸⁾。

5.2 試料採取

試験に供する地下水試料の採取地点は、浄化対象物質の汚染状況や特定有害物質以外の影響の有無をふまえ、浄化壁の設置位置等に適切に設定する。試料容器は、ガイドライン等に則り、JIS K 0094 に準拠した容器を使用する²⁾。採取後の地下水試料は、変質に注意し、冷暗所に保管し、速やかに試験を行うように計画する⁹⁾。試料必要量は、後述する試験等の計画（想定試験回数等）に基づき設定し、初期性状確認（5.3）において分析に要する試料量を考慮する⁸⁾。

5.3 初期性状確認

地下水試料について基準不適合物質等の初期濃度を測定する。環境省告示 17 号、ガイドライン Appendix-6（地下水に含まれる試料採取対象物質の量の測定方法）に準じて保管および分析を行う^{2),9)}。また、前述の通り、浄化壁の目詰り等障害の要因となる物質および鉄粉に影響を与える物質についても濃度を確認する^{3),8)}。

浄化壁の設置後、鉄粉が酸化することで地下水の pH が上昇する場合があります、地下水に共存する無機成分（カルシウム等）が析出して、浄化壁の透水性が低下する場合があります³⁾。pH は、4 以下では鉄の溶出促進による耐久性阻害、10 以上では腐食反応の鈍化による反応性阻害が生じる場合があります¹⁰⁾。溶存酸素は、速やかに鉄を消費するため耐久性阻害が生じる場合があります¹⁰⁾。油分は、油膜による水分子を介した電子授受反応の反応性阻害が生じる可能性がある¹⁰⁾。

5.4 バッチ試験

バッチ試験は、浄化対象物質毎に擬一次反応速度定数を求めて、鉄粉の分解性能を確認することを目的とする。第一種特定有害物質が鉄粉によって還元分解され、その濃度が指数関数的に減少することが確認される場合、第一種特定有害物質の分解は擬一次反応で表現することができる¹¹⁾。また、鉄粉の種類ごとに求められた反応速度定数 k (h^{-1}) を比較することで、簡易な反応性比較の指標となることが確認されている¹²⁾。

(1) 準備

試験容器は、内部の混合状況が見える様に、ガラスバイアル瓶を使用する。鉄粉と水との反応で、水素ガスが発生するため、試験容器の大きさは、およそ 3 分の 1 以上のヘッドスペースが取れる容量とする⁸⁾。

(2) 地下水試料の調製

汚染状況等を考慮し、地下水試料に浄化対象物質（試薬等）を添加した模擬地下水試料を試験試料としてもよい。試験に使用する地下水試料もしくは模擬地下水試料について、浄化対象物質および分解生成物の濃度（以下、初期濃度）を測定する⁸⁾。

(3) 分解試験

試験試料を試験容器（ガラスバイアル瓶）内へ分取し、所定量の鉄粉を試験容器内へ添加する。鉄粉の添加量は、過去の実績や予備検討等で定める。ヘッドスペースがある場合は、窒素ガス等で置換する。テフロン加工のブチルゴム栓とアルミシール等で密栓をする^{8),11),12)}。

試験体の数量は、測定 1 回につき 1 検体を消費する場合、「作製する試験体の数量（ガラスバイアル瓶本数）＝鉄粉添加量のケース数×測定回数」となる。分析毎のガラスバイアル瓶を予め準備して測定する場合、1 本のガラスバイアル瓶を用いて経時変化を測定する場合、どちらの方法でも測定可能である。それぞれの測定方法に応じた必要本数を作成する^{8),12)}。

容器を手で 1 分程度振とう混合し、地下水と鉄粉が混合されていることを目視で確認する。振とう混合後は、サイトに近い条件（例：温度は 15℃、暗所）とし、恒温槽内に静置・養生する。養生時間は、地下水が浄化壁を通過する時間を考慮して設定する⁸⁾。

分解の進行が自然的要因やその他混入物などの影響ではなく、鉄粉の還元分解による効果であることを確認するため、鉄粉を添加せず、地下水による影響のみを評価するコントロール試験を行う。また、地下水試料の代わりに、試験容器に超純水あるいは蒸留水と浄化対象物質を添加したブランク試験を実施し、試験・分析操作による浄化対象物質の系外への揮発等による濃度の低減が無いことを確認する^{8),12)}。

(4) 測定

分解の進行をリアルタイムに把握することが望ましいため、試験体中の液相やヘッドスペースガスをガラスシリンジで採取してガスクロマトグラフ等で測定する。ただし、測定最終回の試験体は、分解効果を正確に把握するために、公定法分析を行うことが望ましい。還元剤として用いる鉄粉の種類や特性によっては、鉄粉添加後に地下水中の pH が変化して自然由来重金属等が溶出する場合がありますため、pH を測定する⁸⁾。

(5) 擬一次反応速度定数の計算

鉄粉による第一種特定有害物質の脱塩素化は、擬一次反応式による評価が成立すると仮定する。汚染源対策を行う等で初期濃度が変化する場合もあるが、バッチ試験では初期濃度一定として擬一次反応速度定数を求める。浄化対象物質および分解生成物について、初期濃度、経過時間 t における濃度、経過時間を以下の式に代入し、擬一次反応速度定数を求める^{11),13)}。

$$\ln [\text{経過時間 } t \text{ における濃度}(\text{mg/L}) / \text{初期濃度}(\text{mg/L})] = -[\text{擬一次反応速度定数}(\text{1/h})] \times [\text{経過時間}(\text{h})]$$

(6) 鉄粉の評価、浄化壁の壁厚の算出

試算された壁厚や鉄粉量をふまえ、対象地に浄化壁が設置可能であることを確認する。擬一次反応速度定数や分解生成物の生成割合を比較し、設計に使用する鉄粉を選択する¹²⁾。また、擬一次反応速度定数など設計条件を元に、計画壁厚での耐久年数を試算して確認する。

バッチ試験の擬一次反応速度定数は、鉄粉の腐食による長期的な影響が考慮されていない。これらの影響を考慮する場合は、カラム試験等による長期性能の評価が求められる¹⁴⁾⁻¹⁷⁾。

5.5 結果の評価およびまとめ

検討結果から地下水が浄化壁透過後に浄化目標濃度を満足する性能が得られることを確認できた場合、浄化壁の適用可能性が高いと判断する。

6. おわりに

本報では、第一種特定有害物質による地下水汚染の拡大防止を目的に、鉄粉を用いた第一種特定有害物質を分解する透過性地下水浄化壁を検討対象とし、室内試験の目的、方法・手順および留意点について検討した結果を報告した。今回提示した試験フローの例および留意点のさらなる改善のために、引き続き議論を重ねたい。

参考文献

- 1) 環境省（2024）：土壤汚染対策法施行規則，別表第7，<https://laws.e-gov.go.jp/law/414m60001000029/>，2026年1月閲覧。
- 2) 環境省（2022）：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（改訂第3.1版），5.4 措置の実施，Appendix 1，Appendix 6，Appendix 7，Appendix 22。
- 3) 環境省（2020）：区域内措置優良化ガイドブック（改訂版），pp.32-35。
- 4) 土壤環境センター（2025）：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），https://www.gepc.or.jp/engineer/applicability_test/index.html，2025年12月閲覧。
- 5) U.S. Environmental Protection Agency（2012）：A Citizen's Guide to Permeable Reactive Barriers，EPA 542F12-017。
- 6) Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group（1999）：Regulatory Guidance for Permeable Reactive Barriers Designed to Remediate Inorganic and Radionuclide Contamination，pp.6-8。
- 7) 土壤環境センター（2025）：技術実態集計分科会（実態集計分科会），<https://www.gepc.or.jp/engineer/sub-actual/index.html>，2026年2月閲覧。
- 8) 藤井雄太，羽渕博臣，森岡錦也，水柿貴史，三浦英俊，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）（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・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.50-55。
- 9) 土壤環境センター（2013）：平成24年度 技術委員会 技術標準検討事業，別冊 既存井戸等からの地下水採水に関する基礎知識（平成24年度版），pp.31。
- 10) 根岸昌範，深澤道子，樋口雄一（2005）：マルチバリア技術による汚染地下水浄化対策，大成建設技術センター報，第38号，pp.03-1-03-6。
- 11) 伊藤裕行，須藤孝一，井上千弘，千田侑（2003）：鉄粉による塩素化エタンおよびメタンの分解，水環境学会誌，Vol.26，No.10，pp.637-642。
- 12) 根岸昌範，下村雅則，樋口雄一，高岡昌輝，武田信生（2006）：金属還元剤による有機塩素化合物の脱塩素反応とその持続性，土木学会論文集 G，Vol.62，No.2，pp.268-277。
- 13) 環境省（2023）：令和5年度 土壤汚染調査技術管理者試験 試験問題（午後），問題11。
- 14) 平田健正，中島誠（2012）：最新の土壤・地下水汚染原位置浄化技術，シーエムシー出版，pp.253-264。
- 15) 下村雅則，今村聡，根岸昌範，李昌洙（1998）：鉄粉を用いた透過性地下水浄化壁のモデル化に関する研究，地下水学会誌，第40巻，第4号，pp.445-454。
- 16) 中島誠，坂本大，根岸昌範，下村雅則（2000）：透過性地下水浄化壁による汚染地下水の浄化効果について，地下水学会誌，第42巻，第1号，pp.27-45。
- 17) 中島誠，根岸昌範（2009）：零価鉄を用いた透過性地下水浄化壁の長期性能の評価，地下水学会誌，第51巻，第4号，pp.331-347。