

## (S3-26) 透過性地下水浄化壁（吸着）に関する適用可能性試験の検討

○山崎将義<sup>1</sup>・佐藤 毅<sup>1</sup>・三浦英俊<sup>1</sup>・森川航平<sup>1</sup>・西田憲司<sup>1</sup>・  
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）<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>には適用可能性試験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。また、環境省の区域内措置優良化ガイドブック<sup>3)</sup>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2つの措置技術（オンサイト土壌洗浄、原位置生物処理）に対し具体例を提示した<sup>4)</sup>。当部会は第2期として活動を継続し、他の措置技術を対象に室内試験の方法・手順について具体化を図るべく検討を行っている<sup>5,6)</sup>。

本報では、重金属等（第二種特定有害物質）による地下水汚染の拡大防止を目的に重金属等を吸着除去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、当該試験方法の例は、検討の最終結果ではなく現段階での案であり、今後改善を図る考えである。

### 2. 透過性地下水浄化壁の適用可能性試験（室内試験）の検討

#### 2.1 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<sup>3)</sup>（以下、浄化壁）は地下水汚染の拡大の防止を目的とした措置技術であり、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ものである（図-1）。浄化壁は米国において30件以上の適用実績（2012年時点）<sup>7)</sup>があり、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。今後、適用の増加が見込まれる技術であると考えられたことから、当部会において適用可能性試験の検討対象の一つに選定した。地下水汚染除去の原理として分解と吸着の2つがある<sup>3)</sup>が、重金属等（第二種特定有害物質）を吸着除去する浄化壁を検討対象とした。浄化壁の適用可能性試験の検討結果について以下に述べる。

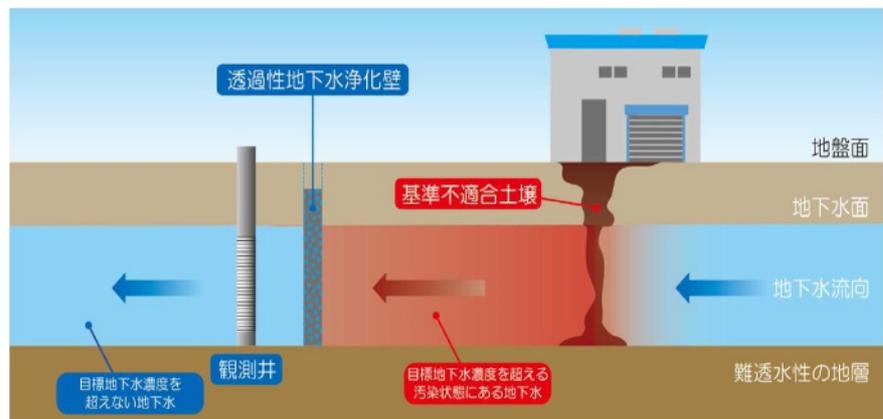


図-1 透過性地下水浄化壁の概要<sup>3)</sup>

Study on applicability test for Permeable Reactive Barriers

Masayoshi Yamazaki<sup>1</sup>, Takeshi Sato<sup>1</sup>, Hidetoshi Miura<sup>1</sup>, Kouhei Morikawa<sup>1</sup>, Kenji Nishida<sup>1</sup> and Study Group on Applicability test of measures such as removal of soil contamination (The 2nd Term)<sup>1</sup> (<sup>1</sup>GEPC)

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

## 2.2 適用可能性試験の目的

本試験は、浄化壁を法の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<sup>2),3)</sup>。

今回検討対象とした重金属等（第二種特定有害物質）を吸着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、有効な吸着材の選定、吸着材の配合条件（地盤材料への添加量）および壁厚・破過時間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。

## 2.3 室内試験フローの概要

室内試験のフローを図-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。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。

フローは7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（土壌、地下水）、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。

## 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（図-2）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）<sup>3),8)</sup>

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) 基準不適合土壌の範囲・深さ、地下水汚染の範囲等

土壌汚染状況調査、詳細調査等報告書等を確認し、土壌溶出量基準に不適合な土壌の範囲・深さ、地下水汚染の範囲、地下水中の特定有害物質の濃度を確認する。

#### (2) 帯水層の構造（深さ、地下水の流向・流速、透水係数等）

土壌汚染状況調査、詳細調査等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。

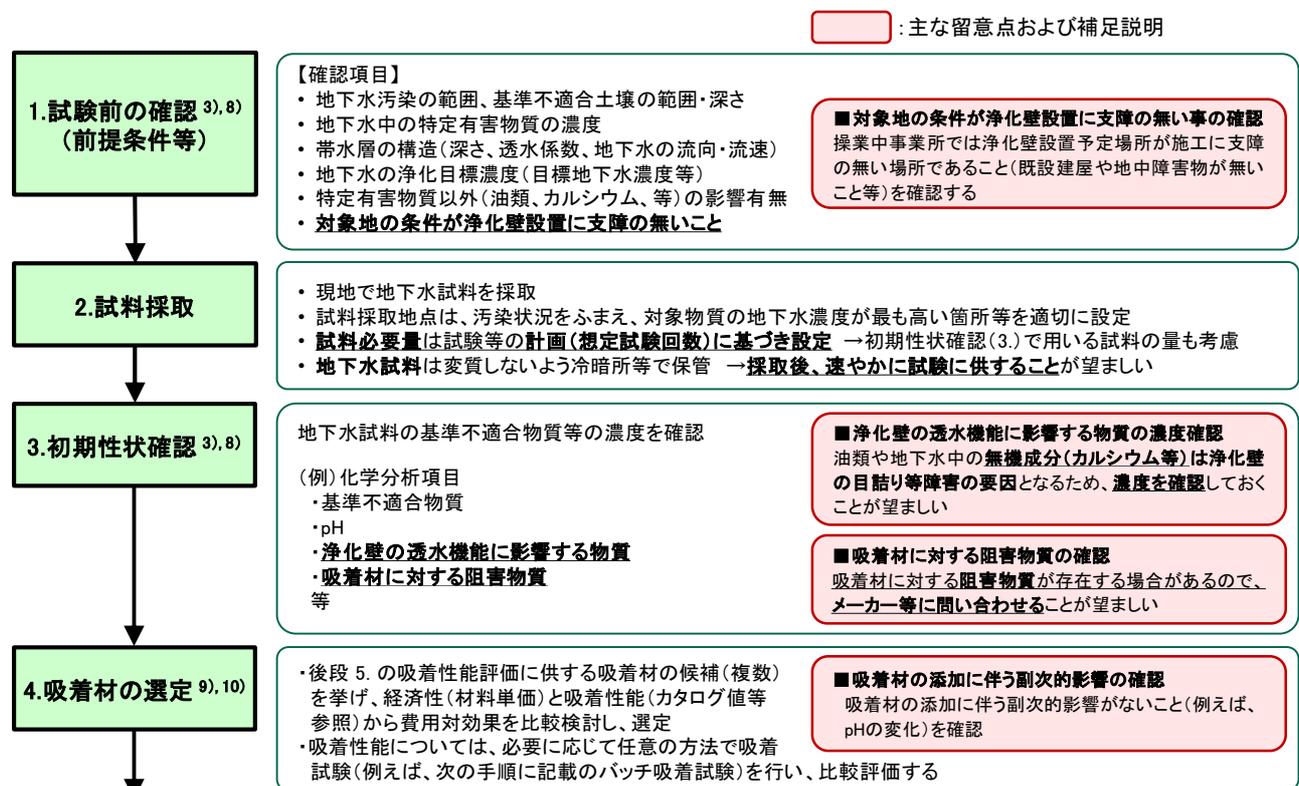


図-2 室内試験フロー（例）（1/3）<sup>3), 8)~10)</sup>

## 5. 吸着性能評価 (バッチ吸着試験)

：主な留意点および補足説明

### 【 5. 吸着性能評価（バッチ吸着試験） 】

#### ○試験の目的

対象物質毎に吸着等温線を作成し吸着材の吸着性能を確認する

#### ○準備<sup>11)</sup>

- ① 試料および材料  
地下水試料、試薬、吸着材
- ② 装置および器具  
試験容器、はかり、振とう機、遠心分離装置、遠沈管、  
メンブランフィルタ、pH計、ふるい、メスシリンダ、等

#### ■試薬

価数が複数ある物質(例: As, Se)は現場の水質に合わせて価数を考慮する

#### ■メンブランフィルタ

孔径0.45 μmを使用(対象物質吸着後の吸着材がろ紙に残る孔径)

#### ○吸着性能試験(バッチ吸着試験)<sup>10), 11)</sup>

- ① 試験用地下水試料の調製
  - ・ 地下水試料または地下水試料に試薬を添加し調製した模擬地下水試料を試験用地下水試料(以下、試験試料)とし、試験試料中の対象物質濃度(以下、初期濃度)を測定
- ② 吸着試験
  - ・ 湿潤液固比(=試験試料液量(mL)/吸着材の湿潤質量(g))は浄化目標濃度(以下、目標濃度)を考慮し、吸着等温線の作成に必要な段階数(3段階以上)に設定
  - ・ 吸着材と試験試料を一定時間(概ね1時間以内 → 予備試験等で検討)、混合攪拌/振とうした後、固液分離する
  - ※固液分離の手順例：試験試料液量500mLでの例
    - 1) 吸着材を、湿潤液固比に応じて量り取り、試験容器に入れ試験に供する
    - 2) 試験試料(500mL)をメスシリンダで量り取り、吸着材が入った試験容器に入れる
    - 3) 試験容器を振とう機に取り付け、例えば、水平振とうの場合、振とう回数 約200回/分、振とう幅 4~5 cmに設定
    - 4) 振とうを開始して一定時間経過後(概ね1時間以内 → 予備試験等で事前検討)に停止
    - 5) 試験容器を振とう機から外し、検液の測定に必要な量の溶液を遠沈管に移し、2400G以上で10~20分遠心分離する  
その上澄み液をメンブランフィルタでろ過し検液とする  - ・ 検液中の対象物質の平衡濃度(以下、検液濃度)を測定
- ③ 吸着量の計算  
湿潤液固比の各段階における吸着量を次式にて算出  
吸着量(mg/kg) = (初期濃度(mg/L) - 検液濃度(mg/L)) × 試験試料量(L) / 吸着材の湿潤質量(kg)
- ④ 吸着率の計算  
吸着率(%) = ((初期濃度(mg/L) - 検液濃度(mg/L)) / 初期濃度(mg/L)) × 100
- ⑤ 吸着等温線の作成<sup>11)</sup>
  - ・ 検液濃度と吸着量の相関関係をもとに吸着等温線を作成(下記グラフ(1)(2)参照)
  - ・ 吸着等温線は目標濃度を含む3試験以上の結果から適した関係式を導き作成
- ⑥ 目標濃度における吸着量の計算  
上記⑤で求めた吸着等温線の関係式より目標濃度における吸着量を算出

#### ■湿潤液固比の目安(例)

湿潤液固比の目安は、100、250、500、750、1000、2500、5000、7500、10000、等

#### ■吸着等温線が目標濃度付近で作成できなかった場合

湿潤液固比を見直して実施する

#### ■固液分離

・ 振とうから検液作成までの手順は、例えば、環告46号を参考にしてもよい  
・ 遠心分離の代わりにメンブランフィルタでろ過する方法も適用できる

#### ■吸着後の溶液(ろ過した検液)

pH等に副次的影響が生じていないことを確認する

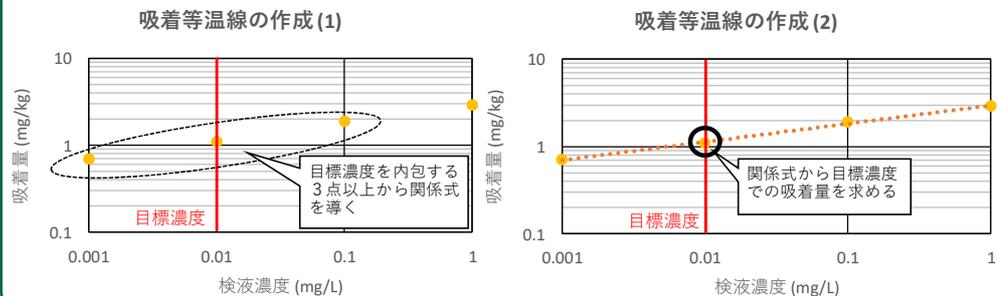


図-2 室内試験フロー(例) (2/3)<sup>10), 11)</sup>

## 6. カラム吸着試験

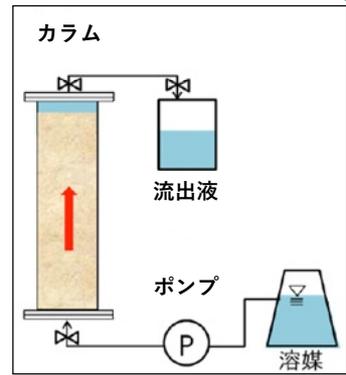
### 【6. カラム吸着試験】

#### ○試験の目的

浄化壁の長期性能を確認する

#### ○準備

- ① 試薬および材料  
地下水試料、試薬、吸着材、地盤材料
- ② 装置および器具  
・カラム (例)<sup>12)~14)</sup>：内径32~100mm (充填する材料の最大粒径の5~10倍以上) の円筒で厚さ60~300mmに充填できる物  
・メスシリンダ、遠心分離装置、遠沈管、メンブランフィルタ、pH計、電気伝導率計、はかり、ふるい、ランマー、等
- ③ 浄化壁材料の調製  
吸着材と地盤材料を混合し浄化壁材料 (以下、壁材) を調製  
その混合割合 (%) は前記5.の吸着性能試験結果をふまえ設定



カラム吸着試験の概念図<sup>12)</sup>に加筆

#### ○カラム吸着試験<sup>8)~12)</sup>

- ① 試験用地下水試料の調製
  - ・地下水試料または同試料に試薬を添加し調製した模擬地下水試料を試験用地下水試料 (以下、試験試料) とし、その対象物質濃度 (以下、初期濃度) を測定
- ② カラムの準備および壁材の充填
  - ・空のカラム質量 (kg) を秤量
  - ・壁材をカラムに偏りが生じないように充填  
→ 何層かに分けて充填したり、1層分を例えば、5回に分けて充填する等が望ましい
  - ・最後の層を締め固め後、壁材の充填高さを計測
  - ・カラムに充填した壁材の質量 (= 全体の質量 (kg) - 空のカラム質量 (kg)) を算出
- ③ 初期飽和  
充填した壁材を飽和させるため試験試料を通し、カラム内の水位が上端に到達したら24時間ほど静置
- ④ 通水
  - ・ポンプを始動し流量を調整 → 試験試料の流速を確認し、設定範囲から外れている場合は流量を調整
  - ・カラム装置に異常や障害がないことを確認
- ⑤ 流出液の回収及び測定
  - ・湿潤液固比に応じて採水頻度を設定
  - ・流出液が入った容器を交換したら、速やかに流出液が入った容器の質量を量り、流出液を固液分離 (5.の手順例参照) 後、ろ過し検液とする
  - ・検液の対象物質濃度 (以下、検液濃度) を測定
  - ・カラム吸着試験は吸着材が破過に達するまで行う
- ⑥ 湿潤液固比の計算<sup>11)</sup>  

$$\text{湿潤液固比 (L/kg)} = \frac{\text{流出液の質量 (kg)}}{\text{流出液の比重 (kg/L)} \times 1 / \text{壁材の質量 (kg)}}$$
 注※：測定を省略した場合は1.0 (kg/L) とする
- ⑦ 吸着量の計算<sup>11)</sup>  

$$\text{吸着量 (mg/kg)} = (\text{試験試料の初期濃度 (mg/L)} - \text{検液濃度 (mg/L)}) \times \text{湿潤液固比 (L/kg)}$$
- ⑧ 累積吸着量の計算<sup>11)</sup>  
吸着材が破過に達するまで繰り返し吸着量を計算し、合算して累積吸着量とする
- ⑨ 計画する浄化壁の耐久年数試算  
⑦で得た吸着量等の設計条件を基に計画壁厚での耐久年数を試算し確認 (右の計算表 (例) 参照)

■試薬、メンブランフィルタ → 5.の留意点参照

■カラム吸着試験 → 例えば、ISO/TS21268-3<sup>12)</sup>参照

#### ■壁材のカラムへの充填 (コツ)

- ・材料を混合する際は、非常電性の容器やさじを用いて静電気が発生しないようにゆっくりとよく混合する
- ・各層毎に毎回へらで平らにならす
- ・1回分を入れ終える毎に、試料面からランマーを落下させ、締め固めを行う
- ・締め固め後、次の層との密着を良くするため試料面にへらで縦横に線を刻む

#### ■吸着量の計算

流出液中の対象物質濃度が定量下限値未満の場合は定量下限値を用いて計算する

浄化壁耐久年数 計算表 (例)

| 項目                                       | 単位                    | 凡例：入力値 (斜体字)                  |           | 計算結果   |
|--|-----------------------|-------------------------------|-----------|--------|
|  |                       | 計算式                           | 壁厚0.5mでの例 |        |
| A 浄化壁 壁厚 (計画例)                           | m                     | -                             | -         | 0.5    |
| B 浄化目標濃度 (例: 0.01mg/L) での吸着量 (吸着等温線より)   | mg/g                  | -                             | -         | 1.2    |
| C 地下水の実流速 (計画例)                          | cm/min                | -                             | -         | 0.11   |
| D 同上 単位換算                                | m/day                 | $C \times 60 \times 24 / 100$ | -         | 1.6    |
| E 地盤中の間隙比 (計画例)                          | -                     | -                             | -         | 0.56   |
| F 浄化壁面積1m <sup>2</sup> に接触する1日当りの水量 (体積) | L/m <sup>2</sup> /day | $D \times E / (1+E)$          | -         | 0.57   |
| G 吸着材の配合量                                | kg/m <sup>3</sup>     | -                             | -         | 5.0    |
| H 浄化壁面積1m <sup>2</sup> 中の吸着材質量           | kg/m <sup>2</sup>     | $G \times A$                  | -         | 2.5    |
| I 浄化壁面積1m <sup>2</sup> に吸着できる対象物質質量      | mg/m <sup>2</sup>     | $B \times (H \times 1000)$    | -         | 3085   |
| J 地下水初期濃度 (計画例)                          | mg/L                  | -                             | -         | 0.022  |
| K 浄化壁面積1cm <sup>2</sup> が処理できる水量         | L/cm <sup>2</sup>     | I/J                           | -         | 140227 |
| L 耐久年数                                   | year                  | K/F/365                       | -         | 673    |

## 7. 結果の評価およびまとめ

検討結果をふまえ、以下の適用可能性判断基準2項目全てを満足した場合、浄化壁の適用可能性が高いと判断する。

1. 対象地の条件が浄化壁設置に支障の無いこと
2. 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設計上、担保されることを確認したこと

図-2 室内試験フロー (例) (3/3)<sup>8)~15)</sup>

### (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) 特定有害物質以外の物質 (油類、カルシウム、等) の影響有無

油類や地下水中のカルシウム等の無機成分は、浄化壁の目詰り等障害の要因となるため留意する<sup>10)</sup>。

また、吸着材に対する阻害物質が存在する場合があるので、メーカー等に問い合わせることが望ましい。

### (5) 対象地の条件が浄化壁設置に支障の無いことの確認

操業中事業所では浄化壁設置予定場所が施工に支障の無い場所であること (既設建屋や地中障害物が無いこと等) を確認する。

## 2.4.2 試料採取

試験に供する地下水試料は、現地で採取後、速やかに試験を行うように計画する。

低濃度の地下水試料しか採れない場合は、地下水試料に対象物質の試薬（市販品）を添加して濃度をより高く調整し、模擬地下水試料として試験に供する。

試料必要量は後述する試験等の計画（想定試験回数等）に基づき設定する。初期性状確認（2.4.3）において分析に要する試料量も考慮する。

## 2.4.3 初期性状確認<sup>3), 8)</sup>

地下水試料について基準不適合物質、pH および吸着材の阻害物質の濃度等、初期性状を確認する。また、油類や地下水中のカルシウム等の無機成分は、前記のとおり浄化壁の目詰り等障害の要因となるため、濃度を確認しておくことが望ましい。

## 2.4.4 吸着材の選定（吸着材選定試験）<sup>9), 10)</sup>

後述する2.4.5の吸着性能評価に供する吸着材の候補（複数）を挙げ、経済性（材料単価）と吸着性能（カタログ値等参照）から費用対効果を比較検討し、吸着材を選定する。吸着性能については、必要に応じて任意の方法で吸着試験（例えば、2.4.5に記載のバッチ吸着試験）を行い、比較評価する。

また、吸着材の添加に伴う副次的影響がないこと（例えば、pHの変化）を確認する。

## 2.4.5 吸着性能評価（バッチ吸着試験）<sup>10), 11)</sup>

前節にて選定した吸着材を用いて、対象物質毎に吸着等温線を作成し吸着材の吸着性能を確認することを目的としたバッチ吸着試験（図-2（2/3））を行う。

価数が複数ある対象物質（砒素、セレン）の模擬地下水試料を作製する場合は、現場の水質に合わせて試薬を選択する。

吸着試験後に検液のろ過に用いるメンブランフィルタは孔径0.45 μmを使用する。対象物質を吸着した吸着材は当該孔径のメンブランフィルタ上に残るため適切にろ過することができる。

バッチ吸着試験において、湿潤液固比の目安は、例えば、100、250、500、750、1000、2500、5000、7500、10000といった設定が考えられる。試験の結果、吸着等温線が浄化目標濃度付近で作成できなかった場合は、湿潤液固比を見直して実施する。

同試験における振とう時間は、吸着材によって1~6時間で実施する。吸着材は対象物質（重金属等）が触れただけで（極めて短時間で）吸着するのが理想的である。

固液分離に関し、振とうから検液作成までの手順は、例えば、環告46号を参考にしても良い。また、遠心分離の代わりにメンブランフィルタでろ過する方法も適用できる。

吸着後の溶液（ろ過した検液）に関し、pH等に副次的影響が生じていないことを確認する。

## 2.4.6 カラム吸着試験<sup>8)~15)</sup>

浄化壁の長期性能を確認するための試験の一例として、カラム吸着試験を提示した（図-2（3/3））。

本試験で確認すべき試験ケースは、前節の吸着性能評価（バッチ吸着試験）の結果、現地条件（地下水の濃度、地下水の流速、設置できる浄化壁の厚さ）、地下水の浄化目標濃度および浄化壁の耐久年数から試験条件を整理し計画することが望ましい。

カラム装置は、例えば、ISO/TS21268-3<sup>12)</sup>、佐藤ら<sup>13)</sup>、および三浦ら<sup>14)</sup>の論文等を参考にされたい。条件設定の例を表-1に示す。

試薬とメンブランフィルタに関する留意点および補足事項は、前節2.4.5を参照されたい。

浄化壁材料の調製に関し、浄化壁は吸着材と地盤材料を混合したものを材料（以下、壁材）とし、その混合割合は吸着性能試験（バッチ吸着試験）の結果を考慮して設定する。当該壁材で構築する浄化壁は、現地盤よりも透水性を高め地下水が集まりやすくすることが基本である。

表-1 カラム装置の条件設定の例<sup>13), 14)</sup>

| 報告例                | カラム寸法<br>内径×厚さ  | ポンプ流量   | 通水速度   | 地盤材料・粒径             |
|--------------------|-----------------|---------|--------|---------------------|
| 佐藤ら <sup>13)</sup> | φ32mm<br>×100mm | 0.5mL/分 | 90cm/日 | 沖積砂質土<br>(2mm未満)    |
| 三浦ら <sup>14)</sup> | φ100mm<br>×60mm | 2mL/分   | 36cm/日 | 礫分0% (砂質土)<br>2mm未満 |

試験用地下水試料の調製において、調製後の地下水試料のpHが現地の地下水と変わらないことを確認する。  
カラムの準備および壁材の充填において、充填の品質を上げる要領を図-2(3/3)に記したので参考にされたい。

流出液の回収および測定において、湿潤液固比は破過するまでを評価できるように調整する。

流出液の固液分離・ろ過に関し、前節のバッチ吸着試験と同様に、例えば、環告46号を参考にしてもよい。  
また、遠心分離の代わりにメンブランフィルタでろ過する方法も適用できる。

吸着量の計算において、流出液中の対象物質濃度が定量下限値未満の場合は、定量下限値を用いて計算する。

本試験の結果から得られた吸着量等の設計条件を基に、計画する壁厚での浄化壁の吸着性能の耐久年数を試算(図-2(3/3)の浄化壁耐久年数計算表参照)し、長期的に耐久性を有することを確認する。

#### 2.4.7 結果の評価およびまとめ

検討結果から以下の適用可能性判断基準2項目全てを満足した場合、浄化壁の適用可能性が高いと判断する。

- (1) 対象地の条件が浄化壁の設置に支障の無いこと
- (2) 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計算上、担保されることを確認したこと

### 3. おわりに

今回提示した試験方法の例について、改善の余地がないか討議を重ねて意見を集約し、更新する所存である。

#### 参考文献

- 1) 環境省(2007): 土壤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 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), pp.32-35。
- 4) 岡田雄臣, 山崎将義, 森岡錦也, 佐藤毅, 西田憲司, 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(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・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.23-28。
- 5) 藤井雄太, 羽瀧博臣, 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(投稿中)
- 6) 山野辺純一, ブラーツ初枝, 島田雄太郎, 大久保敬祐, 西田憲司, 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): 原位置加熱脱着処理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(投稿中)
- 7) U.S. Environmental Protection Agency(2012): A Citizen's Guide to Permeable Reactive Barriers, EPA 542F12-017
- 8) Gavaskar,A., Gupta,N., Sass,B., Janosy,R., Hicks,J.(2000): Design Guidance for Application of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation, Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP), pp.11-17, 45-49。
- 9) 日野良太, 大西健司, 緒方浩基, 西川直仁(2019): シアンを対象とした透過性地下水浄化壁の材料選定及び効果確認, 土木学会全国大会第74回年次学術講演会, pp.III-215。
- 10) Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group(1999): Regulatory Guidance for Permeable Reactive Barriers Designed to Remediate Inorganic and Radionuclide Contamination, pp.6-8。
- 11) 国立研究開発法人産業技術総合研究所(2022): 吸着層工法に使用する材料等の試験方法の標準化検討委員会報告書, pp.11-40。
- 12) 保高徹生, 肴倉宏史, 田本修一, ISO/TC190 部会(2015): ISO/TC190におけるカラム試験の国際標準化への日本取り組み, 第21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.453-454。
- 13) 佐藤毅, 伊藤圭二郎, 河合達司(2017): 還元地盤による地下水中のヒ素吸着特性評価, 鹿島技術研究所年報, 第65号, pp.47-52。
- 14) 三浦俊彦, 西田憲司, 佐藤祐輔, 日笠山徹巳(2014): 酸化鉄粒子の注入による砒素汚染拡散防止技術の開発, 大林組技術研究所報 No.78, pp.1-6。
- 15) U.S. Environmental Protection Agency(1998): Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation, EPA600R98-125, pp.18-19。