

S3-13 PFASによる土壌・地下水汚染の対策工法に関する 実汚染現場での適用性検討と評価

○長谷川甫¹・椎根大¹・塩尻大輔¹・嶋本直人¹・平尾壽啓¹・渡辺菜月¹・
PFOS等およびその前駆体を対象にした土壌・地下水汚染の挙動評価に関する検討部会¹
土壌環境センター



報告HP
調査情報掲載中

1. はじめに（本ポスターの内容には報文投稿後の検討結果等を含んでおります）

当部会で、**国内のPFAS土壌・地下水汚染に適用可能な調査・対策手法を検討**するべく、国内外の**汚染拡散の実態や土壌・地下水汚染の調査・対策実施状況**等について文献等調査を進めてきた。本報では文献調査の結果を基に、**実用レベルにある浄化・対策工法の概要と現場適用性について整理**した。また、**実汚染サイトでの汚染状況や現場条件等を浄化・対策工法の評価項目として整理**するとともに、**イタリアの汚染事例（S1-15）にて紹介）において適用性検討と評価**を行った。

2. 対策工法の絞込みと現場適用性

PFASによる土壌・地下水汚染の浄化・対策工法を選定するにあたり、文献調査において基礎研究段階の技術を除く**既に現場実績されている、または現場実証段階と判断される技術に着目**して幅広く国内および海外の情報収集を行った。**土壌対策として固・不溶化、土壌洗浄および熱分解**を国内への適用可能性が高い浄化・対策工法として選定した。ここで、掘削・搬出は汚染土壌を確実に除去可能であり海外での採用事例は多いものの、本検討ではオンサイト処理に対応可能な技術に限定するとして選定しなかった。**地下水対策としては、遮水壁、透過性吸着壁**および揚水工法のうち、地下水流動を制御して汚染拡散を防止する手法であり報告事例の多い**揚水バリア**を採用した。

2.1 固・不溶化（土壌）

1)特徴

PFAS汚染土壌と**固・不溶化材**を既存の**地盤改良機を用いて混合**する。施工機械や混合方式（粉体/スラリー）を適切に選定することで**大深度の汚染にも対応**可能である。

2)適用段階

国内ではラボ試験が中心。一方、海外ではフィールド/パイロットスケール実証が行われ、**安定化材やセメント、活性炭の併用**によりPFOS・PFOA・PFHxSなど**主要PFASの溶出が大幅に抑制**されている。



図2.1 固・不溶化工法概要図

2.4 遮水壁（地下水）

1)特徴

遮水壁は、**ソイルセメントや鋼矢板等**により連続壁体を構築し、**地下水流動を抑制・迂回**させることで、**汚染プルームの拡散を抑制**する工法である。主としてリスク管理型の対策に位置付けられる。

2)適用段階

海外では、埋立地において浸出水由来のPFASの周辺移行抑制を目的に遮水壁が用いられた事例が報告されるなど、実用化が進んでいる。適用にあたっては、壁体の止水性能に加え、**端部・下端部からの回り込みを含む三次元的な地下水流れを考慮した配置・延長が重要**である。



図2.4 遮水壁概要図

2.2 オンサイト土壌洗浄（土壌）

1)特徴

PFASが吸着している粒径区分を**分離**し、またPFASを**洗浄液中に溶解**させるとして、PFASを**土壌から抽出**するオンサイト浄化技術である。比表面積が小さく**粗い粒径の土壌**、また土壌への吸着力が弱い**短鎖**や**PFCA**sの方が**洗浄効率は高い**。

2)適用段階

海外ではラボスケールだけではなくパイロットスケール、フィールドスケールでの実証が進んでいる。特に米国の事例ではコスト評価もされており、**PFAS汚染土壌の細粒分が50%までなら掘削・搬出に比べてコスト優位**であるとされている。

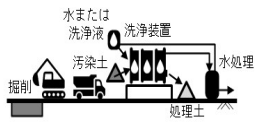


図2.2 土壌洗浄概要図

2.5 透過性吸着壁（地下水）

1)特徴

吸着壁（透過性地下水浄化壁：PRB）は地下水の流れを遮断せずに通過させつつ、**壁体中の活性炭系材料やイオン交換樹脂等により地下水中のPFASを吸着除去**する工法である。活性炭系材料やイオン交換樹脂等の吸着材が候補となり、地下水プルームが壁体を通過する際に濃度を低減させる。

2)適用段階

PFASを対象とした透過性吸着壁は、従来型PRBとしての実汚染現場での**長期実績は限定的**。一方で、米国において**コロイド状活性炭（CAC）による原位置固定の実証が進められるなど**、実証・適用例が蓄積しつつある。また、有機塩素系化合物や重金属等を対象として多数の実績があり、長期運用に伴う**目詰まり、ガス滞留、媒体更新等の知見が蓄積**されている。

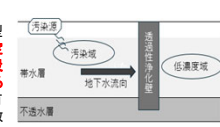


図2.5 透過性吸着壁概要図

2.3 オンサイト熱分解（土壌）

1)特徴

PFASは、熱エネルギーによる**C-F結合切断、ラジカル反応、加水分解および酸化反応等、複合的な反応**によって分解される。

2)適用段階

実スケールにおける水成膜泡消火薬剤汚染土壌の熱分解処理実証試験の結果を米国の民間企業が報告している。800℃以上の**ローターキルン**（土壌の滞留時間：1時間）、**二次燃焼室**が1,100℃以上、ガスの滞留時間2秒以上の焼却処理施設において、PFOSの**分解除去効率は99.99%以上**であった。



図2.3 熱分解概要図

2.6 揚水バリア（地下水）

1)特徴

本工法は、地下水流向下流側に揚水井戸を設置して水理的バリアを形成し、PFAS**汚染プルームの拡散を防止**するものである。揚水した地下水は適切な処理を行って排水する。**即効性が高く初期投資が比較的低い**ことから、他工法と併用可能である。

2)適用段階

揚水処理は、**国内外で最も実用化が進んでおり**、汚染地下水の拡散を速やかに防止する応急対応として有効な工法である。PFAS汚染に対し、国内では**揚水+活性炭処理**が多く、海外では**活性炭の他にイオン交換樹脂**によるPFAS処理も多く実施されている。

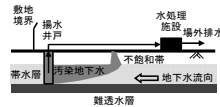


図2.6 揚水バリア概要図

3. 実汚染サイトでの浄化・対策工法の適用性検討例（イタリアの事例 出典:S1-15）



図3.1 汚染源の位置（ヴェネト州）

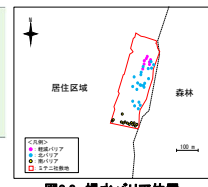


図3.2 揚水バリア位置

【対象地の概要】

- ・PFAS製造工場（A社）由来の汚染事例である。
- ・**地下水への環境影響が深刻**と評価されている。
- ・工場はヴェネト州トリッパに位置し、東側は森林で、西側には川が流れる。
- ・工場敷地内には複数の帯水層が形成されている。

【地歴・汚染源】

- ・A社は1965年設立である。
- ・2018年に廃業するまでの間に**PFOS、PFOA、PFBS、C₆O₄、BTF**を製造していた。

【調査結果】

- ・汚染が確認された地下水の敷地外への流出防止のため、工場敷地内に**揚水バリアを設置**した。
- ・ヴェネト州環境局はモニタリングにより**揚水バリアの有効性を確認**した。
- ・敷地外に設置された**モニタリング井戸**からは、**最大でPFOAで11,000 ng/L、PFOSは3,000 ng/L**等が検出された。
- ・**表層土壌では水銀、PFOA、PFOS**の汚染が、**深層土壌ではさらにBTF、ヘキサクロロベンゼン、1,1,2,2-テトラクロロエタンの汚染も確認**された。
- ・地下水流向は北から南方向と一定である。**地下水流速は季節変動**が大きい。

表3.1 イタリアの汚染サイトの特徴

項目	内容
汚染発生の背景・スケール	2013年におけるヴェネト州のPFAS汚染調査として発見
立地条件	北：住宅地、東：森林、南：住宅地 西：住宅地
環境条件	水文 地下水位：深度不明 ただし、季節変動が4～6 m 最大10～15 m 地下水流向：南方向 地質 不明 気象条件 不明
汚染原因	工場施設由来の排水
発生源	工場製造現場由来
土壌	PFOA最大450 mg/kg
汚染状況	地下水 主にPFOA 3,000～20,000 ng/L ただし、揚水バリア井戸から定量的にPFAS（最大値）PFOA 11,000 ng/L
拡散メカニズム	地下水流動が寄与しているものと推定

【浄化・対策工法の適用性検討例】

- ・表3.2に示すとおり、**評価項目に対する浄化・対策工法の現場適用性について整理**した。また、**イタリアの事例における適用性の評価を試みた**。
- ・当サイトにおけるPFAS汚染は工場敷地内の排水が原因であり、土壌中を経て地下水へと移行し、**工場敷地外へも汚染が拡散**している。
- ⇒「完全浄化」よりも**「リスク管理型」**を候補として選定した。（●が該当）
- ・対象となるPFASの種類は、PFOS、PFOA、PFBS等を製造していた履歴から、**長鎖および短鎖PFAS、PFSA、PFCA**が該当する。（●、▲が該当）
- ・当サイトの土壌汚染について、地盤の**土質情報がないこと、汚染の深度は表層でPFOS、PFOA**が検出されていることを勘案すると、浄化・対策工法は「**固・不溶化**」と「**熱分解**」が候補となる。ここで、固・不溶化はPFCAにに対して条件付き適用可と整理しているが、PFOA（長鎖）が対象となることから適用可とした。（●、▲が該当）
- ・地下水汚染では、工場敷地外に設置されたモニタリング井戸で**PFOS、PFOA**の拡散がみられること、**季節によっては地下水流速の変動が大きくなる**ことから、「**遮水壁**」が候補となる。（●が該当）
- ・各項目における適用性を検討した結果、**土壌対策としては「固・不溶化」、地下水対策としては「遮水壁」**の適用性が高いと考えられる。
- ・固・不溶化により土壌からの溶出量を低減させ、遮水壁を設置したうえで揚水を行うことで、より効果的な対策が可能になると考えられる。

表3.2 浄化・対策工法の適用性検討例（イタリアの事例）

評価項目	浄化・対策工法									
	固・不溶化	土壌洗浄	熱分解	遮水壁	透過性吸着壁	揚水井戸	バリア	バリア	バリア	バリア
浄化目標	完全浄化	リスク管理型	完全浄化	完全浄化	完全浄化	完全浄化	完全浄化	完全浄化	完全浄化	完全浄化
汚染源位置	工場敷地内	工場敷地内	工場敷地内	工場敷地内	工場敷地内	工場敷地内	工場敷地内	工場敷地内	工場敷地内	工場敷地内
PFASの種類	長鎖のみ	長鎖のみ	長鎖のみ	長鎖のみ	長鎖のみ	長鎖のみ	長鎖のみ	長鎖のみ	長鎖のみ	長鎖のみ
汚染状況	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度
地下水汚染	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度	汚染土壌の深度
地盤の状況	土質	土質	土質	土質	土質	土質	土質	土質	土質	土質
不透水層の状態	不透水層の状態	不透水層の状態	不透水層の状態	不透水層の状態	不透水層の状態	不透水層の状態	不透水層の状態	不透水層の状態	不透水層の状態	不透水層の状態
施工条件	施工条件	施工条件	施工条件	施工条件	施工条件	施工条件	施工条件	施工条件	施工条件	施工条件
周辺環境	周辺環境	周辺環境	周辺環境	周辺環境	周辺環境	周辺環境	周辺環境	周辺環境	周辺環境	周辺環境

凡例：○ 適用可 △ 条件付き適用可 × 適用不可 - 対象外
● ▲ ナイトの特徴

4. まとめ

PFASによる土壌・地下水汚染対策については、海外においても、具体的な対策の達成水準や工法別の適用可否を一律に判断できる**判断基準が必ずしも整備されている状況にはない**。管理値等は存在するものの、それらはあくまで**対策目標設定の目安**であり、**個別サイトにおける工法選定**は、汚染状況や地盤・水文条件を踏まえた**ケースバイケースの判断が中心**となっている。

一方、国内においては、実汚染サイトでの対策事例や長期的な効果検証に関する**知見が依然として限られており**、工法の適用性評価や選定判断に活用できる**情報の蓄積が十分とは言えない**。このため、表3.2の浄化・対策工法の適用性検討例についても、現時点での知見を基にした整理として位置付け、**今後の国内外の調査結果や実証事例の蓄積に応じて、適宜更新していくことが前提**となる。また、PFAS汚染対策においては、単一の工法のみで対策を完結させることは難しく、**複数の工法を組み合わせた多岐的な対策が現実的**である。その際、実務上は技術的有効性に加え、施工性、維持管理、長期運用を含めたコストの概念が不可欠であり、**対策目標と費用対効果のバランスを踏まえた総合的な工法選定**が求められる。