

(S3-13) PFAS による土壤・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壤・地下水汚染の挙動評価に関する検討部会¹
¹土壤環境センター

1. はじめに

近年、ペルフルオロオクタンスルホン酸（PFOS）、ペルフルオロオクタン酸（PFOA）およびペルフルオロヘキサンスルホン酸（PFHxS）等の有機フッ素化合物（PFAS）は国内外で規制が強化されつつある。また、国内における土壤・地下水汚染に関する社会的関心も高まっている。

当部会ではこれまで、土壤・地下水中における PFAS 汚染の挙動を把握し、国内の PFAS 土壤・地下水汚染に適用可能な調査・対策手法を検討するべく、国内外の汚染挙動や土壤・地下水汚染の調査・対策実施等について文献等調査を進めてきた。本報では、国内外の PFAS による土壤・地下水汚染の対策工法に関する文献調査結果について、工法選定における適用性の評価項目を表として整理し、実用レベルにあるいくつかの工法について、評価・選定に際しての留意点等をまとめた。

2. 対策工法の絞込み

PFAS による土壤・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装されている、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。土壤対策として固化・不溶化、土壤洗浄および熱分解、地下水対策として遮水壁、透過性吸着壁および揚水バリアの各浄化・対策工法について国内への適用可能性が高い技術として選定した。

3. 対策工法の現場適用性

選定した対策工法の現場適用性を特徴、適用段階、留意点について文献調査結果をもとに整理した。ここで、特に言及がない場合、国内におけるフィールドスケールの実証事例は報告されていないのが現状である。



図- 1 固化・不溶化工法概要図

3.1 固化・不溶化

原位置で固化材や不溶化材を添加して土壤中 PFAS の移動性を低減させる工法について記載する。固化材により土壤の透水性を低下させる手法と、不溶化材により PFAS を物理的、化学的に安定化させる方法がある。対策後も現地盤に PFAS が残留するためリスク管理型の対策である。本工法は固定化、化学固定または固化・安定化と呼ばれることもある。

1) 特徴

PFAS 汚染土壤と固化・不溶化材を既存の地盤改良機を用いて混合する。図- 1 は浅層における粉体混合方式の概要を示しているが、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。施工機械の種類も多彩で、粘性土やシルトを主体とする軟弱地盤、礫を主体とする N 値 30 程度の硬質地盤など多様な地盤条件に対応できる。

2) 適用段階

海外ではフィールドスケールでの現場実証¹⁾が実施されている。一方で、実際の対策工事に適用された事例は国内外ともに報告されていないのが現状である。

3) 留意点

施工では大型機械を用いるため、施工ヤードが狭隘、継続して土地利用がなされている場合には採用が困難である。また、不溶化材混合による盛り上り土の処理方法を念頭にして施工計画を行う必要がある。加え

Evaluation of the Applicability of Remediation Methods for PFAS Contaminated Soil and Groundwater under Field Conditions

Hajime Hasegawa¹, Hajime Shiine¹, Daisuke Shiojiri¹, Naoto Shimamoto¹, Toshihiro Hirao¹, Natsuki Watanabe¹ and
Study group of investigation and remediation methods for soil and groundwater contaminated with Per- and
Polyfluoroalkyl substances (PFOS, etc.) and their precursors¹ (¹GEPC)

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

て、施工箇所周辺に重要構造物がある場合は、事前に地盤変位の有無等を確認することが望まれる。セメント系材料、活性炭を配合した不溶化材を適用する事例が紹介されているが、不溶化材は PFAS の種類によって溶出抑制効果に差異がある²⁾こと、固化材等のアルカリ資材は、周辺環境への影響有無、六価クロムや鉛等の両性元素の溶出による 2 次汚染に注意を要することから、現場施工に先駆けて、固化・不溶化材の選定および添加量を決定する配合試験を行う必要がある。また、前述のとおり対策を施しても現地盤に PFAS が残留することから、長期安定性の評価が求められる。加えて、将来の土地利用において対策箇所を再掘削した場合、発生する活性炭等は廃棄物として取り扱う必要がある点にも留意する。

3.2 土壌洗浄

1) 特徴

PFAS は比表面積が大きく細かい粒径の土壌に多く吸着するという原則のもと、図-2 のとおり PFAS が吸着している粒径区分を分級し、また PFAS を洗浄液中に溶解等させることで、PFAS を土壌から抽出するオンサイト浄化技術である。したがって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 PFCAs の方が洗浄効率は高い。界面活性剤や酸、キレート剤等の助剤により、水洗浄よりも効果を高める検討もなされている^{2,3)}。

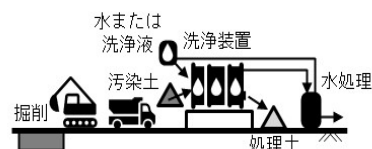


図-2 土壌洗浄概要図

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。スウェーデンでは粒径の異なる 2 種類の PFAS 汚染土壌（粒径 0.063 mm 未満と粒径 0.063～1 mm）を使って土壌洗浄試験を行った結果、粒径の大きい土壌の方が、また長鎖よりも短鎖、ペルフルオロアルキルスルホン酸（PFASs）よりもペルフルオロアルキルカルボン酸（PFCAs）の方が高い洗浄効果を示した⁴⁾。オーストラリアや米国ではフィールドスケールでも実証が行われており、それぞれ約 2,200 t と約 180 t の PFAS 汚染土壌を洗浄処理した事例がある^{5,6)}。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% までなら埋立てや熱脱着に比べてコスト優位であるとされている。

3) 留意点

基本的にシルトや粘土のような細かい粒径の土壌では洗浄効率が小さく、費用対効果が低く不向きである。また洗浄対象 PFAS の鎖長や官能基等の物性、pH 等の洗浄液の条件によっても洗浄効果が異なることに留意が必要である。国内の土質での適用性試験や、洗浄後の洗浄液の処理、濃縮物の処分費用の評価も必要である。

3.3 熱分解

1) 特徴

図-3 に熱分解概要を示す。PFAS の主な熱分解原理は、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。処理対象物は掘削された土壌等の固形物が想定されるが、例えば、膜分離処理等による PFAS の濃厚廃液等も考えられる。ただし、閉鎖系の試験においても 90% 以上のフッ素の物質収支を確認した報告がみられないことから、一部のフッ素化合物の環境中への放出が懸念されている⁷⁾。



図-3 熱分解概要図

2) 適用段階

2024 年に米国環境保護庁（USEPA）は、新たに PFAS の分解処理に関する暫定ガイダンスを公表した⁸⁾。暫定ガイダンスによれば、PFAS の熱分解によって副生成される不完全燃焼生成物（PIC：product of incomplete combustion）等の生成を含めた評価の重要性を指摘している。また、PIC 等を評価するために排ガスを対象とした新たな分析方法を開発したと記載されている。分析対象は、Other Test Method 45（OTM-45）は PFOS、PFOA 等を含む半揮発性 PFAS を含む 49 成分、Other Test Method 50（OTM-50）では、フロン類や PIC として生成する可能性のある短鎖 PFAS 等を含む揮発性フッ素化合物 30 成分である⁹⁾。

これら測定方法を用いた実スケールにおける水成膜泡消火薬剤（AFFF）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¹⁰⁾。実証試験では、800℃以上のロータリーキルン（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、AFFF 汚染土壌を処理した。その結果、PFOS の分解除去効率は 99.999% 以上、PFHxS の分解除去効率は 99.99% 以上、PFOA は 99.97% 以上であった。また、OTM-50 に記載の 30 成分の揮発性フッ素化合物はいずれも検出限界未満であり、懸念された PIC の生成は確認されず、PFAS の効率的な分解と拡散抑制を確認できたと報告している。

3) 留意点

熱分解の留意点としては、環境省が公表した「PFOS および PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」に記載¹¹⁾の焼却処理（PFOS 含有廃棄物：約 850℃以上、PFOA 含有廃棄物：約 1,000℃以上（約 1,100℃以上））の条件と燃焼ガスの十分な滞留時間の確保が必要とされ、土壌の性状等を勘案した運転管理が重要になると考えられる。例えば PFOA の分解には二次燃焼の温度が 1,100℃以上を推奨されていることから、焼却施設の設置に関するイニシャルコストに加えて、高温を維持するためのランニングコストも要する。また、熱分解にて生成される PFAS 分解生成物に関しても、引き続き知見の集積が必要とされている。

3.4 遮水壁

1) 特徴

遮水壁は、図-4 に示すとおりソイルセメントや鋼矢板などにより、高濃度汚染の下流側や敷地境界部に連続した壁体を造成し、地下水の流動を抑制・迂回させることで、地下水汚染の拡散を抑える対策¹²⁾である。

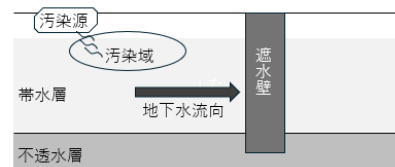


図-4 遮水壁概要図

PFAS を分解・除去する技術ではなく、主として拡散抑制を目的としたリ

スク管理型の位置付け¹³⁾となる。対策の目的は、(1)下流受水域や取水井等の保護、(2)浄化完了までの暫定対策、(3)掘削等の汚染源対策と組み合わせた管理である。PFAS は一般に溶存状態で移動しやすく、短鎖 PFAS ほど吸着遅延が小さいため、壁体のわずかな欠損でも下流側で基準超過につながり得る。このため、止水性能・連続性の確保と、上流側での水位管理（揚水処理を含む）を一体として設計することが重要である¹⁴⁾。また、海外ではシンガポールの Lorong Halus 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、壁体通過による PFAS の質量フラックスが限定的であった事例が報告されている¹⁵⁾。

2) 適用段階

適用にあたっては、壁体の止水性能そのものに加え、端部・下端部での回り込みを含む三次元的な地下水の流れを考慮した配置・延長が重要となる¹⁶⁾。また、砂礫レンズ、旧河道、割れ目等のある不均質地盤では、局所的な高透水経路により想定外のバイパス流が生じやすく、効果が過大評価される恐れがある。壁体の継手・止水材の連続性、欠損、地中障害物などによる施工品質も性能を大きく左右するため、事前調査や施工計画、施工管理と出来形確認が不可欠である。PFAS を対象とする場合、壁材料の吸着係数が性能に大きく影響すること、難透水層が主要な移行経路となり得ることが数値解析により示されている¹⁵⁾。したがって、(1)難透水層への確実な根入れ、(2)GCL（ジオシンセティック・クレイ・ライナー：ベントナイトをジオテキスタイル等で挟んだ遮水材）やジオメンブレンを組み合わせた複合遮水壁の適用、(3)改質粘土等による吸着機能の付与を検討し、施工後のピンホール等によるリークを想定した感度評価を行うことが望ましい¹⁵⁾。

3) 留意点

不適切条件として、(1)汚染プルームの幅・深度が不明確でバリア端部から流出する、(2) 不透水層などの基盤への根入れが困難で下端から回り込む、(3)基盤が割れ目岩盤・礫質などで止水が成立しにくい、(4)周辺の地下構造物・既設杭等により遮水壁の構築が制約される、(5)強い水頭差により壁体近傍で局所的な地下水流が発生しやすい等が挙げられる。運用面では、上流側の水位上昇や周辺井戸への影響、内水処理の必要性など維持管理を含む運用計画を事前に整理しておく必要がある。特に PFAS は目標値が極めて低いことから、下流側の監視井での濃度トレンドに加え、上流側水位上昇による端部回り込み・上方バイパスを早期に検知できるモニタリング網を構築する。加えて、変動する涵養（降雨等）により不飽和帯が長期的な供給源となることがあり、遮水壁単独では濃度が低下しにくい場合があるため、必要に応じて揚水処理等の併用を検討する¹⁴⁾。

3.5 透過性吸着壁

1) 特徴

吸着壁（透過性地下水浄化壁）は、図-5 に示すとおり地下水流を遮断せずに透過させつつ、壁体（充填材）により PFOS 等を吸着除去する工法である。一般に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。PFAS の分解ではなく、除去（捕捉）であるため、吸着材は飽和に向かい、運用上は破過の管理が重要となる¹⁷⁾。

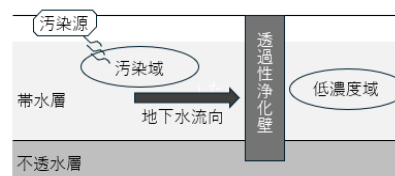


図-5 透過性吸着壁概要図

2) 適用段階

適用条件としては、(1)地下水流向・流速が概ね把握でき、プルーム幅に対して壁体の延長・深度を確保できる、(2)対象帯水層が連続的で、壁体の造成・連続性確保が可能、(3)施工後のモニタリング井配置が確保できるといった点が重要である²²⁾。一方で、PFAS の吸着は物質種によって挙動が異なり、一般に短鎖 PFAS は保持

されにくく破過しやすい。また、共存有機物（DOC/NOM）や陰イオン、懸濁物等により、競合吸着や目詰まりが生じ、設計時に想定した接触時間・透水性が得られない場合がある^{17,19)}。

3) 留意点

不適切条件として、(1)地盤の不均質が大きく、壁体を通過しないバイパス流が支配的、(2)濁質・鉄・有機物等が多く、目詰まりや吸着性能低下が顕著、(3)短鎖 PFAS が主体の場合は、期待する濃度低減を維持しにくい、(4)吸着材の交換・回収が施工上困難、(5)回収した吸着材・汚泥等の処分（残渣管理）の受け入れ体制が不十分である等が挙げられる^{17,18,19)}。また、維持管理としては、上流・壁内・下流の多点モニタリングにより破過兆候を把握し、交換周期・交換方法を含めた維持管理計画を明確化する必要がある^{17,20)}。

3.6 揚水バリア

1) 特徴

本工法は図-6 に示すとおり地下水流向下流側に揚水井戸を設置し、ポンプで地下水を汲み上げて水位を低下させ、流向を制御する水理的バリアを形成し、PFAS で汚染された地下水の拡散防止を目的としたもので、長期の維持管理を前提としている。汲み上げた水は活性炭、イオン交換樹脂、逆浸透膜などで PFAS を除去し、公共用水域等に排水する。濁りがある場合は凝集沈殿などの前処理が必要で、井戸配置は地質調査と揚水試験に基づき、汚染範囲下流側にライン状に設置する例が一般的である。本工法は、汚染地下水の拡散防止に対して即効性が高く、他の汚染地下水の拡散防止対策と比較して初期投資が比較的低い上、既設井戸の活用や他工法との併用が可能である。

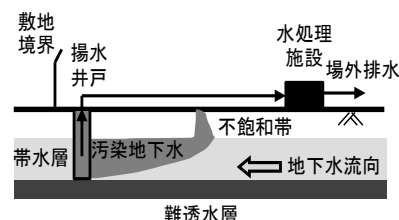


図-6 揚水バリア概要図

2) 適用段階

国内外で最も実用化され、すぐに汚染地下水の拡散防止を図らなければならない応急対応に有効な工法の一つである。国内では静岡市や大阪府で PFAS 汚染に対し揚水＋活性炭処理を実施しており、海外では米国ミネソタ州やドイツで揚水＋活性炭やイオン交換樹脂による処理事例がある。

3) 留意点

長期の維持管理が必要で、本工法単独では完全浄化には不適である。また揚水による地盤沈下の懸念や処理設備の設置スペース確保が課題であり、帯水層でもシルトや粘土などの細粒分を多く含んだ地層は、揚水バリアとしての効果が低い。また、長期にわたる維持管理による PFAS 処理の高コスト化の対応のために、効率的な処理技術や PFAS 吸着材料の開発等が必要であり、作業の省力化・省人化のために、AI による揚水制御等新たな管理手法の導入が期待される。

4. 浄化・対策工法の適用性の評価

3章をもとに整理した浄化・対策工法の適用性検討における評価項目を表-1 に示す。以下に、各工法の特に配慮が必要な事項について記述する。

表-1 浄化・対策工法の適用性検討における評価項目

浄化目標	汚染源位置	PFASの種類	汚染状況										地盤条件										施工条件		その他							
			土壌汚染			地下水汚染				その他	帯水層の状態						不透水層の状態	施工場所	周辺環境													
			PFAS汚染の深度	PFAS汚染の濃度	PFAS汚染の深度	PFAS汚染の範囲	土質	地下水流向	地下水流速																							
完全浄化	リスク管理型	不明もしくは構造物直下	浅層	中層	深層	濃度の影響	浅層	中層	深層	敷地内（広範囲）	敷地外（広範囲）	特定有害物質や油等の複合汚染がある	粘性土	微細砂・シルト	砂および礫	不均質な地盤	有機物に富んでいる	地盤沈下を起こしやすい	不均一、あるいは不明	小さい（砂質地盤程度以外）	大きい	連続性がない	層厚が不十分	深度が深い	汚染源の直上に構造物がある	構造物（直接基礎）に近接している	施工ヤードが狭隘	長期的な土地利用が困難	電力供給や設備保守が困難	近くに利水点がある	PFAS汚染土壌や廃棄物を処理・受入可能な施設が無い	応急対策としての適用可能性

固化・不溶化工法は土壌からの PFAS 溶出量低減を目的としており、対策後も地盤中に PFAS が残留すること、汚染源が不明確な場合には不向きであることに留意する。同工法のうち特に不溶化は、短鎖 PFAS では不溶化効果が限定的との報告¹⁾があり、PFAS 種別により溶出抑制効果が変動することに留意する必要がある。地盤条件に目を向けると、不溶化材との均一な混合が困難と想定される粘性土、微細砂・シルトおよび礫層や不

溶化材の効果が阻害される恐れのある有機物に富んでいる地盤などの条件下では不溶化剤が有する溶出抑制効果が発揮されない懸念がある。加えて、不溶化材毎に溶出抑制効果には差異があることから、これらの条件下では溶出試験による確認を前提とする。なお、不溶化材適用が困難な場合でも、固化材による PFAS 溶出抑制（移動性低減）は可能と考えられる。

土壌洗浄は掘削した土壌をオンサイトで洗浄処理する前提であり、洗浄設備を設置するための施工ヤードが確保できない場合は施工が困難である。洗浄に伴い濃縮物（微粒分）と洗浄水が発生するため、濃縮物処理や水処理（再利用・処分）もサイト内またはサイト外で必要となる。土壌に吸着した PFAS を除去する技術であるため、比較的吸着力が強い長鎖や PFASs、また粒子が細かいシルトや粘土等は適用が難しいと考えられる。

熱分解は場外搬出による処理を基本とする。土質、土壌の粒径等の条件により前処理（含水調整、改質、粒径が大きい場合の破碎等）が必要となる場合がある。熱処理設備設置に関しては、構造物近接、狹隘ヤード、電力・設備保守制約下では適用が難しくなる。設備のトラブル時は、運転管理上最も必要とされる項目を想定し、適用、運用する。

遮水壁は PFAS を除去・分解する工法ではなく、地下水移動経路を遮断して拡散抑制するリスク管理型対策である。このため、完全浄化を目的とする場合は不向きである。一方、汚染源位置が不明でも、ブルームの概略把握を前提に施工位置・延長を設定することが可能である。設計・施工上は、不透水層への確実な根入れと壁体の連続性確保が重要で、不透水層の連続性不足や不均質地盤では回り込み（迂回流）に留意し、必要に応じて追加調査・水理解析を行う。施工条件として、汚染源直上に構造物がある／狹隘ヤードでは施工性が大きく制約されることから、構造物等を避けて設計する必要がある。周辺に利水点がある場合は、遮水による水位影響（上流側水位上昇等）の評価と対策（揚水等）検討を要する。なお、応急対策としては施工期間を要するため、不向きとする。

透過性吸着壁は PFAS の分解ではないため、吸着材の破過管理と必要に応じた媒体交換・処分まで含めた運用計画が前提となる。この観点から、浄化目標はリスク管理型で適用可、完全浄化は条件付きとする。PFAS 種別では、一般に短鎖 PFAS は破過しやすいため、短鎖比率が高い条件では、媒体量・層厚・交換頻度等の設計条件を満たすことを前提に条件付きとする。地下水流速が大きい場合も接触時間不足となり得るため、流速条件を踏まえた設計（層厚、透水性、捕捉容量）が必要である。さらに、共存有機物や油等の複合汚染がある場合は、競合吸着や目詰まりにより性能低下を招くおそれがあるため、前処理（SS 除去等）や維持管理を組み込むことを前提に条件付きとした。施工条件として、施工位置・延長の設定にはブルーム把握が前提であり、構造物直下／狹隘ヤードでは施工・モニタリング井配置が困難で適用不可となり得る。一方、運転上は受動的であるため、電力供給制約下でも適用性は相対的に高いが、使用済媒体の搬出・処分（受入先確保）まで含めて適用性を確認する。応急対策としては施工期間を要するため、不向きとする。

揚水バリアは、地下水汚染拡散防止の応急対策として有効な工法の一つだが、地下水中の PFAS 汚染範囲（平面・鉛直）および地下水流向を事前に把握することが重要である。地下水流向が不安定な場合は、揚水範囲が広がり費用増加の要因となる。また、短鎖 PFAS が主体の場合、活性炭による吸着効率が低下するため、活性炭以外の吸着材と併せて検討する必要がある。さらに、汚染深度が深い場合や硬質地盤では大型ボーリング機械が必要で、揚水による地盤沈下や周辺構造物への影響、ならびに井戸や河川など利水への影響を検討した事前調査やシミュレーションによる評価などが必要であり、関係者との協議・許可が求められることがある。

5. まとめ

本報では、国内外の PFAS 汚染土壌・地下水の対策に関する文献調査を行い、実汚染現場への適用性の評価項目を整理した。実際の浄化・対策工事では対策工法の併用も念頭に、費用や工期等も踏まえて選定する必要がある。また、選定項目は技術開発の進展等に応じて、適宜更新のうえ活用されることが望ましい。

参考文献

- 1) Söregård, M., Gago-Ferrero, P., Kleja, D.B., Ahrens, L. (2021): Laboratory-scale and pilot-scale stabilization and solidification (S/S) remediation of soil contaminated with per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123453.
- 2) Muhammad Usman, Aaifa Chaudhary, Khalil Hanna (2024): Efficient PFAS removal from contaminated soils through combined washing and adsorption in soil effluents, *Journal of Hazardous Materials* 476, 135118.

- 3) Wenjiao Li, Shuhei Tanaka, Yuta Kitaji, Shutaro Hashikomi, Yiming Xu, Takuma Ikeo (2024): Remediation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) contaminated soil via soil washing with various water-organic solvents, *Journal of Hazardous Materials* 480, 135943.
- 4) Jean Noel Uwayezu, Zhongfei Ren, Sarah Sonnenschein, Tiina Leiviska, Tore Lejon, Patrick van Hees, Patrik Karlsson, Jurate Kumpiene, Ivan Carabante (2024): Combination of separation and degradation methods after PFAS soil washing, *Science of the Total Environment* 907, 168137.
- 5) Charles Grimison, Emma R. Knight, Thi Minh Hong Nguyen, Nathan Nagle, Shervin Kabiri, Jennifer Bräunig, Divina A. Navarro, Rai S. Kookana, Christopher P. Higgins, Michael J. McLaughlin, Jochen F. Mueller (2023): The efficacy of soil washing for the remediation of per- and poly-fluoroalkyl substances (PFASs) in the field, *Journal of Hazardous Materials* 445, 130441.
- 6) Joseph Quinnan, Jeffrey McDonough, Corey Theriault, Danielle Toase, Colin Morrell (2022): Ex Situ Soil Washing to Remove PFAS Adsorbed to Soils from Source Zones, ER20-5228.
- 7) Wang J, Lin Z, He X, Song M, Westerhoff P, Doudrick K and Hanigan D., (2022) : Critical Review of Thermal Decomposition of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Mechanisms and Implications for Thermal Treatment Processes, *Environ. Sci. Technol.*, 56. 5355-5370.
- 8) UE EPA(2024) : Interim Guidance on the Destruction and Disposal of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances and Materials Containing Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances—Version 2 (2024), <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-04/2024-interim-guidance-on-pfas-destruction-and-disposal.pdf> (参照 2026-01-05) .
- 9) ITRC web site (: PFAS — Per- and Polyfluoroalkyl Substances. <https://pfas-1.itrcweb.org/11-sampling-and-analytical-methods/> (参照 2026-02-05) .
- 10) Veolia(2025) : PFAS Destruction Testing at Veolia’s Port Arthur Incinerator, (参照 2026-01-05) .
- 11) 環境省(2022) : P F O S および P F O A 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項, <https://www.env.go.jp/content/000077696.pdf>, (参照 2026-01-05) .
- 12) Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC) (2023) : PFAS–Technical and Regulatory Guidance Document and Fact Sheets (PFAS-1) , <https://pfas-1.itrcweb.org/> (参照 2026-01-22) .
- 13) United States Army Corps of Engineers (1993) : Engineering Manual EM 1110-2-1901 Seepage Analysis and Control for Dams, https://damtoolbox.org/wiki/Seepage_Analysis_and_Control_for_Dams_%28EM_1110-2-1901%29 (参照 2026-01-22) .
- 14) Brusseau, M.L., Yan, N., Van Glubt, S., Wang, Y., Chen, W., Lyu, Y., Dungan, B., Carroll, K.C., Holguin, F.O. (2019) : Comprehensive retention model for PFAS transport in subsurface systems, *Water Research*, 148, pp.41-50. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.035>
- 15) Shi, Y., Yan, X., Wang, Q., Wu, J., Yan, H. (2025) : Insights into the migration behaviours of PFOS and PFOA in a cut-off wall-aquifer-aquitard triple-domain system, *Journal of Hazardous Materials*, 494, 138740. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138740>
- 16) National Institute of Building Sciences / Whole Building Design Guide (WBDG) (2021) : UFGS 31 56 13.13 Soil-Bentonite Slurry Walls, <https://dev.wbdg.org/dod/ufgs/ufgs-31-56-13-13> (参照 2026-01-22) .
- 17) Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC) (2023) : Treatment Technologies for PFAS (Fact Sheet) , https://pfas-1.itrcweb.org/wp-content/uploads/2023/10/TreatmentTech_PFAS__FactSheet_Sept2023_final.pdf (参照 2026-01-23) .
- 18) Gavaskar, A., Gupta, N., Sass, B., Janosy, R., Hicks, J. (2000) : Design Guidance for Application of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation, Battelle (Prepared for Air Force Research Laboratory) , <https://itrcweb.org/wp-content/uploads/2024/09/PRB-2a.pdf> (参照 2026-01-23) .
- 19) Murray, C.C., Marshall, R.E., Liu, C.J., Vatanikhah, H., Bellona, C.L. (2021) : PFAS treatment with granular activated carbon and ion exchange resin: Comparing chain length, empty bed contact time, and cost, *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102342. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102342> (参照 2026-01-23) .
- 20) Strategic Environmental Research and Development Program / Environmental Security Technology Certification Program (SERDP/ESTCP) (2023) : In Situ Vessel Permeable Reactive Barrier With New High Efficiency, Replaceable Sorbents For PFAS Plume Control (ER23-7936) , <https://serdp-estcp.mil/projects/details/d23df0db-c572-4f0e-b4a4-bdbf4f4cb508> (参照 2026-01-23) .