

(S4-09) 国内の対応事例を踏まえた土壌・地下水環境中の PFAS に対する合理的な対応について

○佐藤徹朗¹・瀬野光太¹・生越恵¹・佐藤洋幸¹・今井由香里¹・中島誠¹

¹ 国際航業株式会社

1. はじめに

2026 年 4 月にペルフルオロオクタンスルホン酸(PFOS)及びペルフルオロオクタン酸(PFOA)が水道水質基準項目に格上げされ、基準値 0.00005 mg/L 以下 (50 ng/L 以下) となることが決定されており、水道事業者等における水質分析やその対応が義務化される。また、ペルフルオロヘキサンスルホン酸(PFHxS)の他、ペルフルオロヘキサ酸(PFHxA)やペルフルオロブタン酸(PFBA)など 8 項目が「要検討 PFAS」として設定され、情報収集されることとなった。公共用水域（地表水）と地下水については、2020 年 5 月に「PFOS 及び PFOA」が人の健康の保護に係る要監視項目に追加され、指針値（暫定）（50 ng/L 以下）が設定され、令和 7 年 6 月の施行通知により指針値となったが、環境基準への格上げは見送られ、値も継続されることとなった。

残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約（以下、POPs 条約）では、長鎖（C9-C21）のペルフルオロカルボン酸（LC-PFCA）の附属書 A（廃絶）への追加が決定された。このように、今後規制対象となる有機フッ素化合物（PFAS）が拡大し、地下水や土壌の環境基準の設定についても議論が進められると考えられる。

PFAS は、産業界だけではなく日用品に至るまで幅広く利用され、現在では使用や製造が制限されている PFOS 及び PFOA 等も含め環境中に大量に排出された。これら PFAS は難分解性のため、一度地下環境中に排出されると長期にわたり存在し、現時点でも多くの地下水から PFOS 及び PFOA 等が確認されている。

今後、法規制の強化や社会の関心の高まりから、PFOS 及び PFOA 等の土壌・地下水中における顕在化が進み、水道水源に対する対応だけではなく、その原因となる操業中の工場敷地や廃棄物処分地（廃棄物処分場だけでなく不法投棄跡地や廃棄物処理法による規制以前の埋立場所等も含む）等に対しても対応が求められることも予想される。そのため、土壌・地下水中に存在する PFAS に対する調査方法の確立や低コストかつ操業中の工場等においても適用可能な原位置浄化技術の開発・実用化に対する期待も高まっている。

本報では、国内で公となっている事例や国際航業（以下、「当社」）の開発技術や対応事例を踏まえ、以下の内容について整理・考察した。

- ・国内における発見契機や情報公開の状況
- ・土壌・地下水環境中における PFAS の挙動特性
- ・PFAS に対する法規制動向や挙動特性から考えられる調査契機と対応フロー
- ・PFAS を対象とした場合に必要となる調査・評価方法や対策技術
- ・情報公開

2. 公開資料及び対応事例による調査契機と情報公開内容の整理

表 1 に、公開資料と当社が対応した事例の一部について、対応の契機と情報公開の有無および対応を示す。

対応の契機としては、事業者による自主的な地下水調査や事業所（工場）周辺の水路等の水環境における自治体の調査による顕在化が多くを占めている。

多くの事例で自治体による情報公開が行われているが、事業者による公表は行われている場合と行われていない場合がある。事業者により対応が異なるのは、意図的に PFAS を利用（製造）している（いた）場合と非意図的に含有する材料を使用している（いた）場合（この場合、被害者的な立場と捉えている）の違い等、各事業者において立場が異なるためと考えられる。

対応の内容としては、自治体による周辺住民等に対する飲用指導および周辺地域の井戸の調査が主となっているが、拡散防止や汚染源の対策を実施している事例もある。

Rational Countermeasures for PFAS Contamination in Soil and Groundwater
: Insights from Japanese Case Responses

Tetsuro Sato¹, Kota Seno¹, Megumi Ose¹, Hiroyuki Sato¹, Yukari Imai¹, Makoto Nakashima¹
(¹KOKUSAI KOGYO CO., LTD.)

連絡先：〒169-0074 東京都新宿区北新宿 2 丁目 21 番 1 号 国際航業株式会社 環境リスク部 佐藤徹朗
TEL 03-6327-1988 FAX 03-5656-8694 E-mail tetsuro_sato@kk-grp.jp

表 1 国内事例における対応および情報公開実施状況の整理

事例	対応の契機	情報公開		対応
		自治体	事業者	
①	事業者から敷地内に設置した観測井戸から指針値を超過するPFOS・PFOAが確認されたという事業者の自主報告が契機	有り	有り	【自治体】 - 井戸利用者に対する飲用指導 - 報告井戸を中心に半径500m内に存在する井戸の調査（自治体による汚染井戸周辺周辺調査） - 指針値の超過が確認された場合、更に500m外側の井戸を調査 【事業者】 - 外部専門家を交えて調査を実施し、対応を検討するとともに適切な情報提供
②	地下水を処理し飲用利用していた事業者が飲用水の水質検査を実施した結果、暫定目標値を超過した報告が契機	有り	有り	【自治体】 - 井戸利用者に対する飲用指導 - 報告井戸を中心に半径500m内に存在する井戸の調査（自治体による汚染井戸周辺周辺調査） - 周辺地域の事業者等に対し汚染原因の調査および対策の指導 【事業者】 ※報告事業者の上流側に位置する事業者 - 自治体による調査への協力 - 自治体からの指導を踏まえ、敷地内の地下水について自主的な調査 - 社外専門家の協力を得て必要な対策の検討
③	自治体によるPFAS使用実績調査を踏まえ、フッ素樹脂メーカー工場周辺の河川・水路で調査を実施した結果、水路で暫定指針値の超過が確認されたことが契機	有り	有り	【自治体】 - 当該工場周辺の地下水調査 - 当該工場、自治会と三社連絡会議を設立 【事業者】 - 三社連絡会議の設立し、情報共有および適切な対応について相談 - 関係当局の指導と専門家の協力のもと迅速に対応
④	自治体による事業所周辺水路の調査でPFOAが確認されたことが契機	有り	無し	【自治体】 - 当該工場における地下水調査の指示 【事業者】 - 自治体指示に基づいた地下水調査の結果、暫定指針値を超過するPFOAを確認 - VOCを対象とした揚水設備による地下水汚の拡大防止の強化 - PFASに関する利用履歴調査及び土壌・地下水調査高負荷浸透源における対策（掘削除去）
⑤	生産工程でPFASを含む材料が使用されていたことから、自主的に工場排水の検査を実施したところ暫定指針値を超過する濃度で確認されたことが契機	無し	無し	【自治体】 - 認識していない 【事業者】 - PFASに関する利用履歴調査 - 水文・地質調査 - PFASを対象とした土壌・地下水調査 - 調査結果を踏まえ、必要な対策の検討

3. 事業所（工場）敷地内の地下水から PFAS が確認された場合の合理的な対応

表 1 の対応事例を踏まえて検討した、事業所（工場）敷地内の地下水から PFAS が確認された場合に取りべき対応のフロー（例）を図 1 に示す。この対応のフローにおいて考慮した点は次のとおりである。

○事業所内・外における地下水における顕在化が対応の契機となるため、土壌汚染対策法（土対法）の考え方とは異なった対応フローとなる。

○対象地とその周辺を含めた水文地質や地下水流動の状況を把握し、帯水層での PFAS の三次元分布を CSM（汚染概念モデル）¹⁾として構築した上で、メカニズム評価や合理的な対応内容を検討する必要がある。

- 周辺住民に対する影響や社会の関心の高まりから、適切な時期・内容での事業者及び自治体による情報公開が必要となる。
- 自治体により、水質汚濁防止法（水濁法）に準拠した汚染井戸周辺地区調査が実施される。
- 土壌・地下水や排水に対する規制基準が定められていないことから、事業者・地域住民・自治体によるリスクコミュニケーションを進めることで、合理的（＝効果的かつ実現可能）な対応内容について合意し、効率的かつ必要十分な対策を選択していくことが重要となる。
- 対策技術については、国・内外で開発も進められているが、現場適用が可能であり、対策対象となる PFAS 物性や地下環境中での挙動特性に適した対策技術を選択（状況により複数の対策を選択）する必要がある。

以下では、調査契機、汚染メカニズムの把握、調査技術、対策の考え方及び対策技術について詳説する。

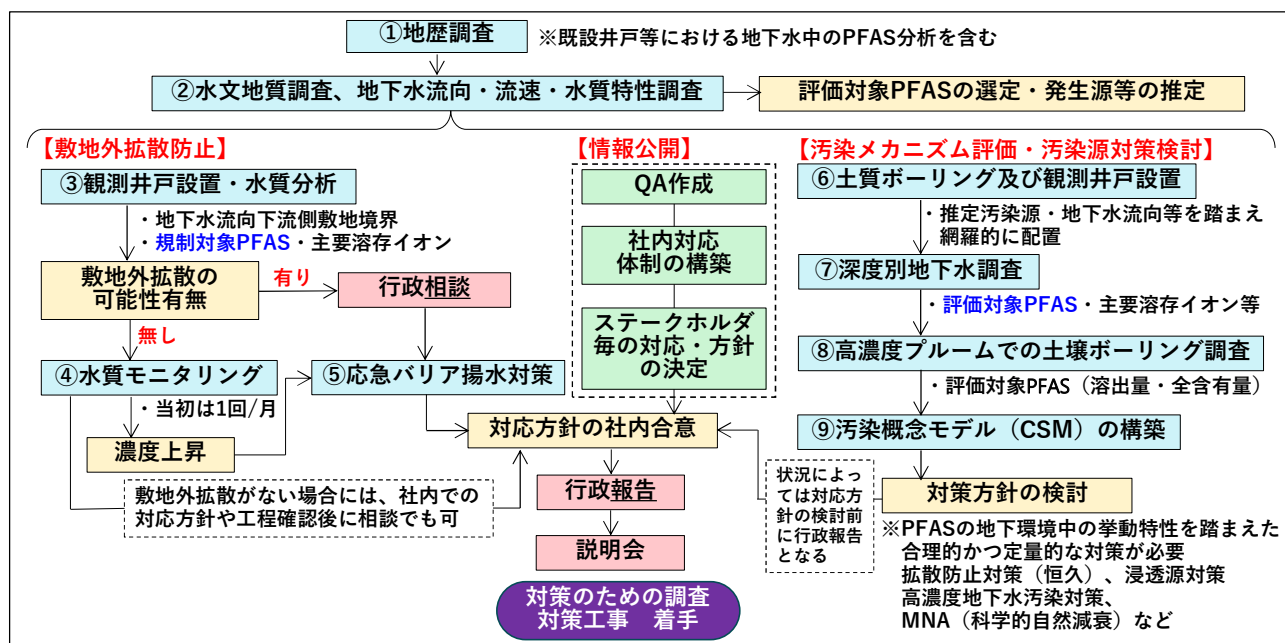


図 1 PFAS を対象とした場合の対応フロー（例）

3.1 調査契機

PFAS（特に、カルボキシ基を持つペルフルオロカルボン酸類：PFCA）の場合、指針値と比較すると溶解度が非常に大きく、地下水を介して広域に拡散しやすいと考えられることから、事業所内・外における地下水（水道水源における検査も含む）での顕在化を契機とした対応（地下水汚染発見契機型）となり、土対法の第3条や第4条を契機とする場合とは対応フローが異なってくる。

3.2 汚染メカニズムの把握

著者らは、これまで PFAS の土壌・地下水中的挙動特性を評価するため、模擬汚染土壌や実サイト土壌を用いたカラム試験を実施し、PFAS の種類及び土質によって遅延効果が大きく異なることを明らかにした²⁾。これらの結果を踏まえた土壌・地下水中的挙動特性のイメージを図2に示す。

仮に地表面から浸透した場合、PFOS（特に直鎖体）や PFNA は比較的浅い深度の土壌中の主に有機物に吸着し蓄積するが、PFOA や PFHxS は地下水面まで浸透・溶解し、溶解した PFAS が水平方向に広がると考えられ、PFHxA や PFBA はさらに広域に拡散することを示唆している。また、地下水汚染が水平方向に拡散する過程で土壌に再吸着し、広域の土壌汚染を発生する。

なお、同じ PFAS でも直鎖体と分岐鎖体では吸着特性等が異なり地下水中での移動過程で構成比が変化するため、PFAS の構成比だけではなく直鎖体と分岐鎖体の構成比の三次元分布・時間変化が汚染源特定のための有効な手段となる^{2),3)}。

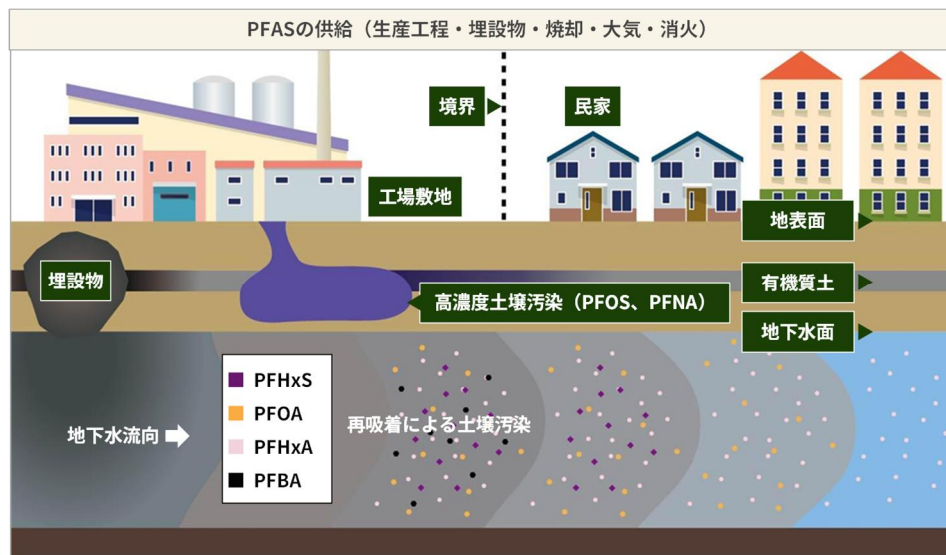


図2 PFASの土壌・地下水中での挙動特性のイメージ

3.3 調査技術

(1) 水文・地質調査

PFASの土壌・地下水中における挙動特性や深い帯水層からも検出されている現状から、宙水や第一帯水層といった浅層地下水だけではなく、下位の帯水層構造も把握した上で、土壌汚染と地下水汚染を一体として捉えた調査・評価が必要となる。

(2) 深度別地下水調査

PFASの多くは比重が水よりも大きく、親水性と疎水性の両面の特徴も持つことから、浸透源では帯水層の上部で濃度が高くなり、拡散域では均一になるといった現象も起こる。このように、同一の帯水層であってもPFASの深度分布の特徴は供給源との関係によって異なるため、深度別地下水調査⁴⁾により、同一帯水層における三次元分布を把握することで浸透源などそのメカニズム評価が可能となる。

地下水中でのPFASの存在状態と水文・地質状況、観測井戸位置・構造等に関するデータ等を用いて汚染概念モデル(CSM)を構築し、汚染メカニズムを把握した上で、必要かつ合理的な対応を検討し、結果について関係者間で合意のもと実施していくことが必要となる。図3に三次元可視化モデルによるCSM構築例を示すが、本方法で構築した場合⁵⁾、あらゆる角度から汚染状況を視認することが可能となり、関係者間の情報共有の促進にも繋がり、円滑なリスクコミュニケーションにも寄与するものである。

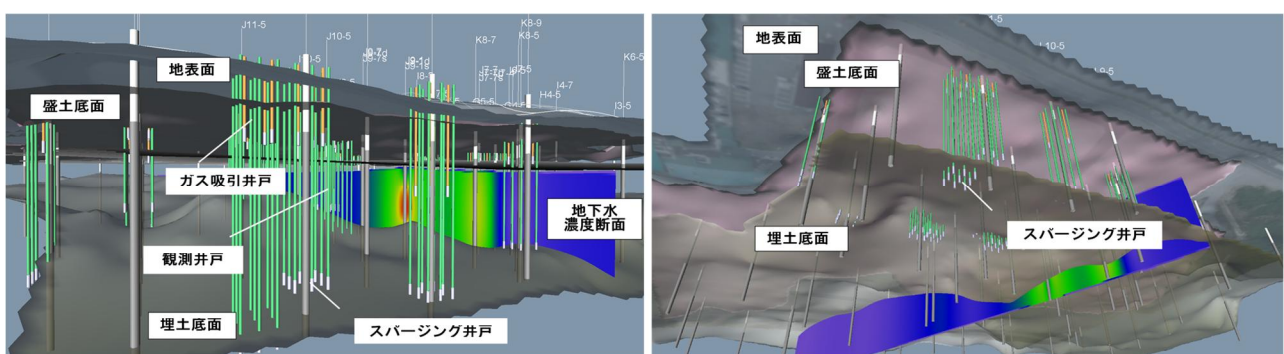


図3 三次元可視化モデルを用いたCSM構築例

(3) PFAS多項目調査

汚染メカニズムの評価には、PFOS及びPFOA以外のPFASに関する情報が有用である場合も多い。例えば、図4は、あるサイトにおけるPFASの多項目分析の結果と三次元尺度法(クラスター分析結果を視覚的に表したもの)による解析結果であり、これらの結果から以下のようなメカニズムが想定される。

- 井戸Aと井戸Eでは、ともにPFAS濃度も高くヘキサダイアグラムの形状も類似しており一見同じ供給源と考えられるが、クラスター分析の結果からは、PFASの濃度組成の違いが大きく、異なる浸透源である。
- 井戸Bと井戸Gでは、ヘキサダイアグラムの形状が異なるが、クラスター分析の結果からはPFASの濃度組成に類似性があることから、地下水経由ではなく例えば大気経由で供給されている。

○井戸 A と井戸 H では、PFBA と PFOA に着目した場合、同じような構成比となるが、クラスター分析では類似性が大きく異なることから、その要因を追及することでメカニズム把握に繋がる可能性もある。

このように、PFOS 及び PFOA だけではなく、多項目分析を行うことでメカニズム把握に有効な情報となるが、3.2 のとおり PFAS の種類によって土壌・地下環境中での挙動特性が異なることにも留意する必要がある。

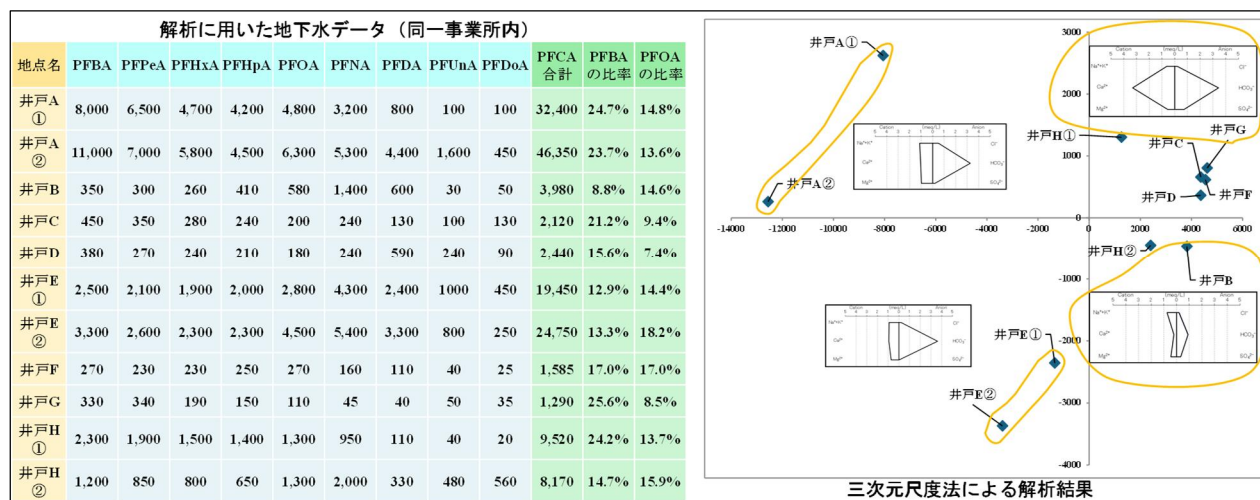


図4 PFAS 多項目分析結果と解析評価例

3.3 対策の考え方及び対策技術

（１）対策の考え方

国内では PFAS を対象とした土壌・地下水の浄化対策事例は少ないが、地下水については汚染地下水を汲み上げ地上部に設置した水処理施設で PFAS を取り除く「揚水対策」が選択されることが多い。一方、土壌については、現時点では基準値などは設定されていないが、対策を行う場合には、対象とする PFAS 含有土壌を掘削し場外の処理施設に運搬・焼却処分されることが多く、処理コストや環境負荷の低減が課題となっている。

PFAS の種類によっては帯水層下部まで浸透し土壌中に存在している場合や大気経由により低濃度ながらも広範囲に PFAS が存在することもあり、掘削除去による対策はコストや施工性の点で現実的でない場合も多い。したがって、先に示したように CSM を構築し、サイト毎に対応方針を検討し、必要に応じてリスクコミュニケーションにより周辺住民などのステークホルダーとの相互理解を経た上で、対策目標値を設定し、具体的な対策方法等を検討していく必要がある。したがって、状況によっては、遮水壁やバリア揚水による拡散防止ではなく、「水質監視により濃度が上昇しないことの確認」、「汚染源対策を実施した上で MNA（科学的自然減衰）に移行する」といった対応方針も選択肢となる。また、汚染源対策では、掘削・場外焼却処分だけではなく、原位置浄化やオンサイト浄化も選択肢となる。著者らは、原位置浄化技術として、「電気発熱法を用いた熱活性過硫酸法」および「アルカリ水を用いた注水・揚水（地下水循環法）」等を開発した。

（２）電気発熱法を用いた熱活性過硫酸法

電気発熱法⁹⁾は、地盤に挿入した電極井（φ 50 mm 程度の鋼管）に 40～200 V の三相交流電気を印加し、ジュール熱で抵抗体となる土壌自体を発熱（40～100℃）させる電気抵抗加熱法の 1 種である（図 5）。

電気発熱法では、対象物質や汚染状況によって、物理的回収、化学分解、微生物分解を組み合わせることで（電気発熱法ハイブリッド浄化）、対策を効率的に進めることができる。ガス吸引（水蒸気回収）の実績が最も多いが、微生物分解や化学分解（熱活性過硫酸）による浄化完了実績もある。過硫酸自体の酸化力は、オゾンと同程度であり、PCB や PFOS 及び PFOA 等の難分解性物質を酸化分解することはできない。一方で、過硫酸塩は酸化力だけではなく、ヒドロキシルラジカルや硫酸ラジカルを生成し、

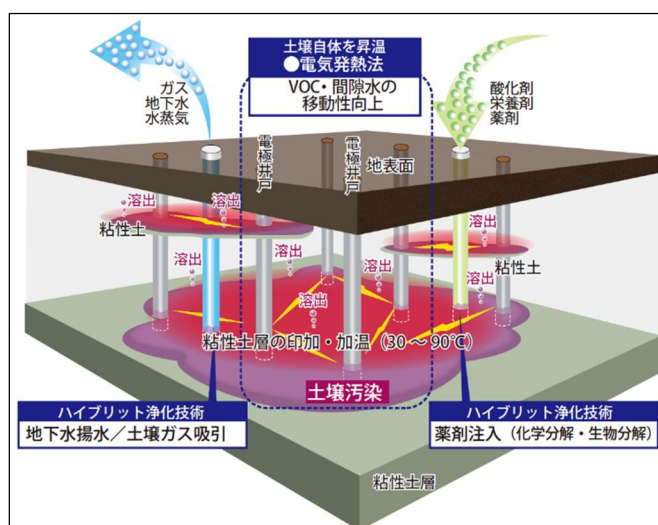


図5 電気発熱法ハイブリッド土壌・地下水浄化

様々な反応経路によって、PCB や PFOA^{2),3)}等の難分解性物質を分解できるようになる。

活性化法としては、紫外線照射、鉄塩添加、加温等があるが、土壌・地下水の原位置浄化の場合、加温による活性化が有効且つ現場適用性が高く、加温技術として電気発熱法の適用が有効と考えられる。

（３）アルカリ水等を用いた注水・揚水法（原位置土壌洗浄）

PFOA 等の土壌・地下水汚染の特徴から、帯水層にも広く土壌汚染が拡大することから、掘削除去での対応は現実的ではない。一方、実サイトにおける溶出量と含有量（全量）の関係や今回報告したカラム試験結果から、土質や物質によっては、溶出操作で、ほぼ全量が水相に移行している場合も多いことから、注水・揚水による地下水循環法による原位置浄化が効果的であると考えており、実サイト土壌を用いたカラム試験により、注水液をアルカリとすることで浄化促進効果があることを示した^{2),3)}。

（４）吸着材及びサイクロンを用いた土壌洗浄法（オンサイト土壌洗浄）】

PFAS は溶解度も高いことから土壌洗浄も有効と考えられている。一方で、指針値を参考として土壌溶出量の目標値を設定した場合、一般的な土壌洗浄では達成が難しいことも多い。そこで、吸着材とサイクロンを用いたオンサイト土壌洗浄システムの開発を進めている。

（５）粉末活性炭などの吸着特性評価

地下水揚水や土壌洗浄などで発生する水の処理は、一般的には活性炭等による吸着除去で行われることが多い。一方で、指針値まで濃度を低下することが困難なことも多いため、適用対象となるサイトの状況に応じた適切な水処理設計を行うため、粉末活性炭などの吸着剤の吸着特性評価を実施している⁷⁾。

3.4 情報公開

PFAS については、サイトの特性や PFAS の存在状態を踏まえ、合理的な調査・対策を進めていく必要があり、そのためには、自治体による情報公開だけではなく、事業者自ら公表していくことも必要となる。一方で、情報公開の内容や時期を誤ると周辺住民等のステークホルダーの余計な不安を招くことや、感情論となり合意形成が困難となることもある。

おわりに

近年、PFAS に対する社会の関心が高まっている中、本年 4 月には PFOS 及び PFOA が水道水基準項目に格上げされ、今後、日本各地の水道水源等の水環境において指針値を超過する濃度で PFOA や PFOA が確認されることが予想される。一方で、国内では、現状において土対法や水濁法等といった個別法による規制がなく（水濁法の事故時の措置を除く）、事業者等の自主的な対応に委ねられることになるが、規制値やその対応方法が示されていないため、既往の規制対象物質による土壌・地下水汚染と同じように現象をとらえ、「過度な、もしくは不十分」な対応がとられることも想定される。PFAS による土壌・地下水汚染への対応を検討する際には、土壌汚染と地下水汚染を一体のものとして捉えて調査を行い、サイト毎に CSM を構築した上で、サイトの特性を踏まえた適切な対応方針を決定し、関係者間で合意を図り、対応していくことが求められる。そのためには、自治体および事業者による情報公開とリスクコミュニケーションによる相互理解に基づいた合意形成が重要となる。本報ではその考え方とそのための調査・対策技術等について論じた。

参考文献

- 1) ASTM (2020): ASTM E1689-20-- Standard Guide or Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites.
- 2) 佐藤徹朗・今井由香里・中島誠 (2025): 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, 352-357.
- 3) 佐藤徹朗・今井由香里・中島誠 (2025): 第 59 回日本水環境学会年会講演要旨集, 434.
- 4) 和知剛・高木一成・佐藤徹朗・高畑陽・リスク評価を活用した地下水汚染の拡散防止措置検討部会 (2023): 第 28 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リスク評価を活用した地下水汚染の拡散防止措置検討部会
- 5) 佐藤徹朗・坂本拓二・伊藤哲緒・中島誠 (2019): 第 25 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, 460-463.
- 6) 佐藤徹朗・長曾哲夫 (2017): 環境浄化技術, 日本工業出版, 第 16 巻第 5 号, 44
- 7) 中島誠・今井由香里・佐藤徹朗・西村聡・木滝悠介・角田真之 (2025): 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, 208-213.