

水道における PFASの処理技術について

こさか こうじ
小坂 浩司

国立環境研究所 環境リスク・健康領域 水道水質研究和光分室

1. はじめに

PFASは、ペルフルオロ及びポリフルオロアルキル化合物の総称で、1万種以上の物質があるとされている¹⁾。PFASは、撥水・撥油性、熱・化学的安定性等の物性を示し、幅広い用途で使用されている²⁾。また、PFASには、同族体からなるいくつかのサブグループがあり、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) は、それぞれペルフルオロアルキルスルホン酸 (PFSA)、ペルフルオロアルキルカルボン酸 (PFCA) に属する。

日本の水道水質基準体系では、2020年に、PFOS、PFOAが要検討項目から水質管理目標設定項目に格上げされた(暫定目標値: 合算濃度で50ng/L)^{2, 3)}。2020年6月、PFOS、PFOAを水質基準項目へと格上げする省令が公布された(基準値: 合算濃度で50ng/L)⁴⁾。また、他のPFASについては、2021年、ペルフルオロヘキサンスルホン酸 (PFHxS) が要検討項目に指定されたが、7物質(ペルフルオロブタン酸 (PFBA)、ペルフルオロペンタン酸 (PFPeA)、ペルフルオロヘキサン酸 (PFHxA)、ペルフルオロヘプタン酸 (PFHpA)、ペルフルオロ

ノナン酸 (PFNA)、ペルフルオロブタンスルホン酸 (PFBS)、ヘキサフルオロプロピレンオキシドダイマー酸 (HFPO-DA)) が追加される方針である⁵⁾。

PFASの浄水処理については、以前より研究されてきたが、PFOS、PFOAの暫定目標値が設定されて以降、基礎的な研究に加えて、浄水場における暫定目標値の超過への対応等の実用的な研究も行われてきた⁵⁾。2026年4月に、PFOS、PFOAを水質基準項目とする省令が施行されるため、基準遵守に向けた取組み等に関する情報が一層求められると考えられる。本稿では、浄水処理によるPFASへの対応について紹介する。

2. 水道におけるPFASへの対応

国土交通省は、原水または浄水で暫定目標値を超過した水道事業者の対応事例を公表した(表1)⁶⁾。応急的対応、中期的対応に分けられ、それぞれ水質検査、水源、浄水処理、情報発信等について示している。浄水処理での対応は、施設整備をともなわないものを応急的対応、ともなうものを中期的対応としている。水源での対応として、水源の切替えや水道用水供給事業からの受水の増量・切替え等が挙げられた。また、

表1 PFASに対する水道事業者の対応⁶⁾

応急的対応事例	中期的対応事例
①水質検査の強化による検出状況の把握 ②既存の他の水道水源からの取水への切替え等 ③既存の浄水処理施設の浄水処理の強化 ④住民への周知、飲用制限措置等	①定期的な水質検査の継続によるPFOS及びPFOAの濃度レベルの確認 ②新たな水道水源への切替え等 ③施設整備を伴う浄水処理の強化 ④住民への周知、環境部局と連携した対応等

表2 PFASに対する各処理技術のまとめ⁸⁾

処理技術	短鎖PFAS除去率	長鎖PFAS除去率	主な残渣等	相対コスト	備考
粉末活性炭処理	低	中～高	廃活性炭	中程度	<ul style="list-style-type: none"> ・長鎖PFASを除去できる。 ・断続的な使用に有効である。 ・他の処理工程の前段に添加する。
粒状活性炭処理	中	高	廃活性炭	中程度～高い	<ul style="list-style-type: none"> ・長鎖PFASを除去できる。 ・断続的な使用に有効である。 ・他の処理工程の前段に添加する。
イオン交換処理	中～高	高	廃樹脂	中程度～高い	<ul style="list-style-type: none"> ・短鎖及び長鎖PFASを除去できる。 ・PFAS除去目的でイオン交換樹脂が設計されている場合、効果的に除去できる。 ・ろ過の後段が適している。
高圧膜 (ナノろ過／逆浸透) 処理	高	高	濃縮水	高い	<ul style="list-style-type: none"> ・短鎖及び長鎖PFASを除去できる。 ・膜の寿命まで一貫した除去率を維持できる。 ・高濃度のPFASを含む濃縮水を処理処分する必要がある。

浄水処理での対応として、粉末活性炭(PAC)の投入、粒状活性炭(GAC)処理でのGACの交換時期の短縮、浄水フローの変更とGAC処理の導入、より高機能なGACの導入等が挙げられた。

PFASに対する実用的な浄水処理として、上述した活性炭処理の他、イオン交換処理、高圧膜(逆浸透膜、ナノろ過膜)処理が知られ、海外では適応事例がある^{7,8)}。国内で適応されている処理法は活性炭処理であるが、イオン交換処理を導入する方針を示した事業者もある⁹⁾。表2に、それぞれの処理のPFAS対策としての特徴を示す⁸⁾。処理によって、PFASの処理性や導入に対するコストが異なり、また、いずれの処理もPFASを含む廃棄物が発生するためその

対応が必要となる。以降、活性炭処理、イオン交換処理について紹介する。

3. 浄水処理によるPFASの除去

3.1 活性炭処理

図1に、浄水場の原水と浄水のPFOA濃度を示す。地表水が原水の23浄水場の2回調査で、原水か浄水でPFOAが検出された12浄水場の15試料の結果である。対象浄水場のほとんどで凝集沈殿砂ろ過処理が導入されていた。活性炭(PAC、GAC、生物活性炭(BAC))処理を導入している浄水場としていない浄水場で分類し、活性炭処理を導入していない浄水場では、一部、生物処理、膜(精密ろ過膜)処理を導入していた。

活性炭処理がない場合、すべての浄水場で、原水と浄水の濃度がほぼ1:1の直線上にあり、浄水プロセスでほぼ処理されていないことが示された。一方、活性炭処理がある場合、1:1の直線状の場合もあったが、直線の下部、すなわち浄水処理でPFOAが除去されているところが認められた。原水のPFOAが約40~45ng/Lの浄水場では、GAC処理が導入され、浄水は5~15ng/Lであった。浄水でのみ検出された浄水場があったが、BAC処理を導入した浄水場であった。BAC処理は、GAC処理と同様にGACを適用しているが、生物作用による処理機能も活用し、GACの交換期間は長い傾向にある。BAC処理では、PFASの処理効果は期待できないと考えられている。

図2に、浄水場のGAC処理における炭素数が4~9の6種のPFCA（それぞれPFBA、PFPeA、PFHxA、PFHpA、PFOA、PFNA）の破過曲線を示す（処理前のPFCA濃度：15~50ng/L程度¹⁰⁾。対象水はろ過水で全有機炭素（TOC）は2.2~3.6mg C/L程度、GAC種はヤシ殻炭、空床速度（SV）は3.1~3.7h⁻¹であった。運転期間は、ベッドボリューム（BV、処理水量/GAC層容量 = 通水時間/空床接触時間（EBCT））で表している。破過は、炭素数が最も小さいPFBAで最も速やかに進み、炭素数が大きくなるにつれて遅くなった。この理由として、炭素数が多いほうが、疎水性が大きいためと考えられた。また、PFBAの残存率は1.2に達し、GAC処理後のほうがPFBA濃度が高かったが、PFBAがGACから脱着されたためと考えられた。図2はPFCAのみの結果であるが、炭

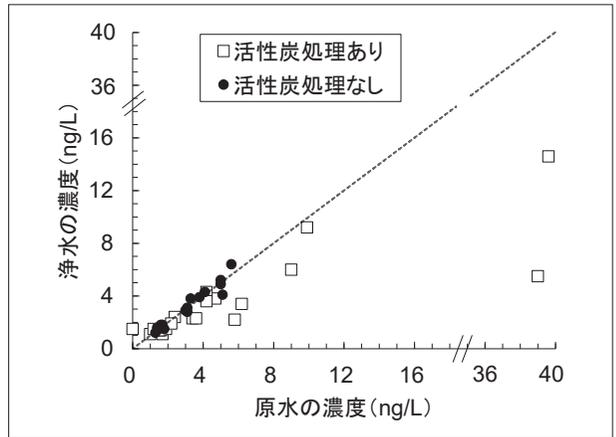


図1 浄水場の原水と浄水のPFOA濃度の関係（1浄水場の濃度は活性炭処理前後の値）（文献10を基に作成）

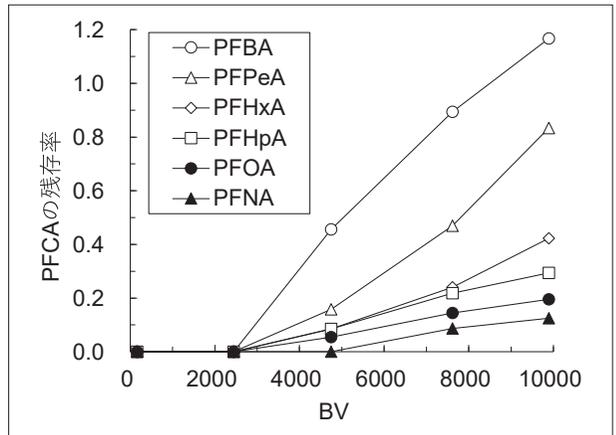


図2 GAC処理によるPFCAの破過曲線（BV：ベッドボリューム）（文献10を基に作成）

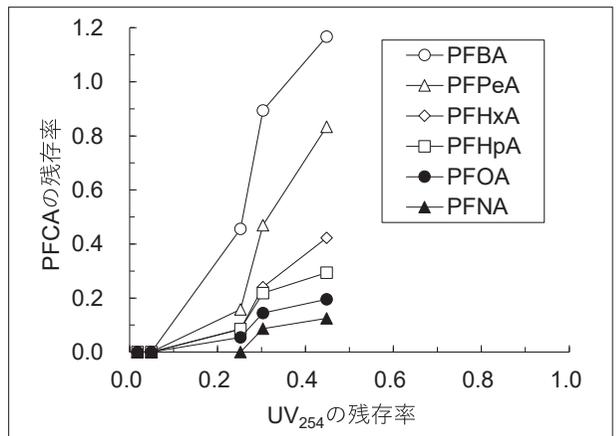


図3 GAC処理でのUV₂₅₄の残存率とPFCAの残存率の関係（文献10を基に作成）

素数が同じ場合、一般的にPFCAよりPFSAのほうが疎水性が高く、活性炭処理での除去性は高い。

GAC処理では、TOCや紫外外部吸光度(UV)等、有機物に関連した水質項目の残存率もBVとともに増加する。図3に、波長254nmのUV (UV₂₅₄) の残存率と各PFCAの残存率の関係を示す¹⁰⁾。いずれのPFCAもUV₂₅₄の残存率と関連性が認められ、TOCの残存率とも関連性が認められた。TOCやUV₂₅₄に比較して、PFASの分析には時間も費用もかかる。TOCやUV₂₅₄等の他の水質項目との関連性をあらかじめ把握しておくことで、これら水質項目を運転指標として活用し、PFCAの処理の程度を簡便に推定することができると思われる。

図2の浄水場では、八つのGAC池を並列運転しており、時期をずらしてGACを交換している。図4に、八つのGAC池それぞれの処理水の混合水(集合水)の残存率の変化を示す。各PFCAの残存率は変動しており、また、残存率はPFCAが小さいほうが大きい傾向にあった。PFCAの残存率は、

八つのGAC池の平均BVが大きいほうが小さい傾向にあった。また、冬季において残存率が低い傾向にあり、平均BV以外に、水温やそれ以外の水質の影響も考えられた。

PFAS対策として、GAC処理でなくPAC処理を適用している浄水場もある⁶⁾。PFASの除去率は、対象水、PAC種、接触時間等によって影響を受けるが、PAC注入率の増加にともなって大きくなる。また、炭素数が大きいほう(疎水性の高いほう)が、除去率が高くなる。

3.2 イオン交換処理

イオン交換処理では、静電相互作用と疎水性相互作用によりPFASは除去されると言われている^{11,12)}。PFASの吸収性能はイオン交換樹脂によって異なるが、いくつかのメーカーでは、PFAS専用のイオン交換樹脂も開発されている。イオン交換樹脂の吸収性能は、PFCA、PFSAのいずれに対してもGACより高いが、PFSAに対してより高いことが報告されている¹²⁾。短鎖PFASの除去に対しても、GAC処理より有

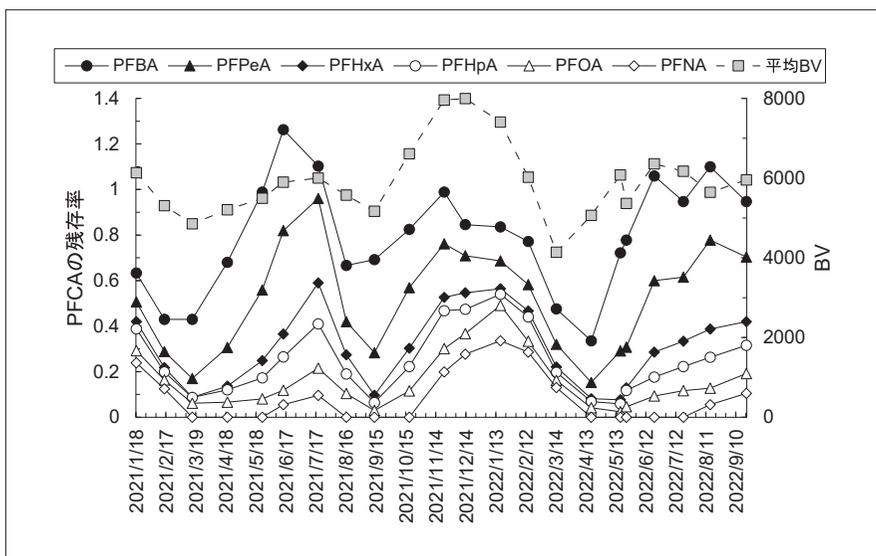


図4 GAC処理でのPFCAの残存率と平均BV (八つのGAC処理水の集合水) (平均BV: 八つのGAC池のBVの平均値) (文献10を基に作成)

効である⁸⁾。イオン交換処理とGAC処理を比較すると、一般的に、イオン交換処理のほうがEBCTは小さい(SVは大きい)¹¹⁾。

国内でも、イオン交換処理によるカラム試験でのPFAS除去についての研究がいくつも行われており、GACよりBVが高かったことが報告されている^{9, 13)}。地下水を原水とした浄水場では、除去性能や寿命、イニシャル・ランニングコスト等を考慮し、PFAS対策の処理方式として、イオン交換処理を採用する方針が示された⁹⁾。

3.3 残さ処理

活性炭処理やイオン交換処理によりPFASを除去した場合、処理に用いた活性炭やイオン交換樹脂はPFASを含有している。また、水道由来の固形廃棄物として浄水汚泥があるが、脱水ケーキ中のPFAS濃度は、PAC処理を行った場合のほうが高かったことが報告されている¹⁴⁾。環境省は、水道事業体に対し、暫定目標値を超過したPFOS等を含む水を処理した使用済活性炭について、適切な保管、適正処理及び再生に関する留意点等を示した¹⁵⁾。このなかで、廃棄物として処理する場合、廃棄物処理業者は「PFOS及びPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」を参考に確実に分解処理することが求められている(ただし、使用済活性炭中のPFOS等の濃度が管理目標参考値(5 µg/kg-dry)以下のものは技術的留意事項の対象外)¹⁶⁾。イオン交換樹脂についての記載はないが、上記に類する条件で導入された場合には、同様の対応が求められると考えられる。また、高圧膜処理においても、濃縮廃水の処分が課題となる。技術的留意事項は、廃棄物分野を対象としたものではあるが、浄水場由来の廃棄物の処理に関連する事項であり、また、GACの再生利用にも参考になる事項も含まれているため、水道としてもその内容を把握し、廃棄物部局との連携等が望まれる。

4. おわりに

PFOS、PFOAの水質基準項目への格上げにより、基準遵守のための対応として、浄水処理についての情報はより重要になる。PFASの処理性は、対象水、PFAS種等によって異なるため、浄水処理での対応を行う場合、コストも含めて処理方法を選択することになる。このとき、GAC処理、イオン交換処理のいずれも、どの程度の処理水量で破過に達するかの情報は、運転管理上必要となる。暫定目標値を超過した事例は、原水が地下水の浄水場等が多く、また、規模が小さい事業体や専用水道の場合もあるため、このような施設での対応も求められる。さらに、PFASを含む廃棄物の処理について、廃棄物分野との連携も含めた対応が望まれる。

謝辞

本研究の一部は、厚生労働科学研究費補助金(JPMH22LA1007)、環境省受託調査研究「令和6年度水道水及び原水における化学物質等の実態を踏まえた水質管理の向上に資する調査検討業務」及び環境省支出委任研究「水道水質基準策定に関する調査」により行った。執筆にあたりノースカロライナ州立大学の中沢禎文博士研究員、水道事業体の方々にご協力いただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 環境省, 有機フッ素化合物(PFAS)について, <https://www.env.go.jp/water/pfas.html>
- 2) 環境省, PFASハンドブック, 2025.
- 3) 環境省, 水質基準項目と基準値(51項目), https://www.env.go.jp/water/water_supply/kijun/kijunchi.html#01
- 4) 環境省, 水質基準に関する省令の一部を改正する省令(環境省令第19号), 2025.
- 5) 環境省, 水道水質・衛生管理小委員会(第2回), 2025.
- 6) 国土交通省, 水道事業者等によるこれまでのPFOS及びPFOA対応事例について, 2024.
- 7) US PEA, Reducing PFAS in Drinking Water with Treatment Technologies, 2018.

<https://www.epa.gov/sciencematters/reducing-pfas-drinking-water-treatment-technologies>

- 8) 水道におけるPFASの処理技術等に関する研究会, 水道におけるPFASの処理技術等に関する資料集, 公益財団法人水道技術研究センター, 2023.
- 9) 各務原市, 各務原市水質改善対策委員会, <https://www.city.kakamigahara.lg.jp/life/suidou/1001633/1001635/1022924/index.html>
- 10) Nakazawa, Y., Kosaka, K., Yoshida, N., Asami, M., Matsui, Y., Long-term removal of perfluoroalkyl substances via activated carbon process for general advanced treatment purposes, *Water Res.*, 245, 120559, 2023.
- 11) American Water Works Association, *Drinking Water Treatment for PFAS selection Guide, Technical Support on Per- and Polyfluoroalkyl Substances Policy*, 2020.
- 12) Dixit, F., Dutta, R., Barbeau, B., Berube, P., Mohseni, M., PFAS removal by ion exchange resins: A review, *Chemosphere*, 272, 129777, 2021.
- 13) 古田絢姿, 前原加奈子, 島村宗孝, 出水丈志, 種々のイオン交換樹脂を用いたPFAS吸着と再生の検討, 第59回日本水環境学会年会講演集, 563, 2025.
- 14) 小坂浩司, 吉田伸江, 宮本雅史, 浅見真理, 増田貴則, 浄水場の脱水ケーキ中のPFAS濃度におよぼす粉末活性炭処理の影響, 令和7年度全国会議(水道研究発表会), 2025.
- 15) 環境省, PFOS等を含む水の処理に用いた使用済活性炭の適切な保管等について(環水大管発 第25032611号, 環循規発 第2503261号), 2025.
- 16) 環境省, PFOS及びPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項, 2022.

投稿原稿募集

『生活と環境』では、環境全般（生活衛生、廃棄物処理・リサイクル、環境保全等）に関する原稿を募集しています

【テーマ】

調査研究、新技術紹介等の有用な情報を含む、環境全般（生活衛生、廃棄物処理・リサイクル、環境保全等）が対象です。ただし、他の出版物等に発表されていないものに限ります。

【分量】

3,000～4,000字程度。その他、必要に応じて図・表・写真5点程度。

【掲載】

『生活と環境』編集部による審査に基づき採否を決定し、掲載が決定した場合には投稿者へご連絡いたします。なお、その際に原稿の補足・加筆等をお願いすることがございます。

【原稿料】

掲載原稿については、規定の原稿料を追ってお支払いいたします。

【お問い合わせ・原稿送付先】

〒210-0828

神奈川県川崎市川崎区四谷上町10-6
(一財)日本環境衛生センター

『生活と環境』編集部

Tel : 044-288-4967 Fax : 044-288-4952

E-mail : shuppan@jesc.or.jp