

PFOS等含有洗浄水の浄化と再利用手法の確立

國 井 聡^{*1} 太 田 匡 哉^{*2}
 林 夕紀子^{*1} 森 川 純^{*1}
 芳 賀 直 樹^{*1}

要 旨

PFOS等含有廃棄物は、環境省が2022年に公表した「PFOSおよびPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」に規定された焼却能力を備える施設にて処分する必要がある。PFOS等が付着した金属くず、廃水なども、含有廃棄物として取り扱われるが、現状では施設によっては処分困難な品目も存在する。ある施設解体工事にて、PFOS等を含有する金属くずが発生した。その処分に際しては、金属くず表面を洗浄し、PFOS等を除去の上で処分する必要性が生じた。洗浄によって発生した水(PFOS等含有廃水)を浄化処理するため、PFOS等吸着処理装置を洗浄作業の現場に設置し、浄化可能であることを確認した。また、浄化して得た処理水を再度鉄くずの洗浄に供することとした。結果、発生するPFOS等含有廃水量を1/5に削減できることを確認した。一方で、廃水中に共存する夾雑成分が吸着処理を阻害することが示唆され、今後の課題として残った。

キーワード 有機フッ素化合物／PFOS／PFOA／PFHxS／廃棄物／吸着処理

目 次

- | | |
|---------|----------------|
| 1. 背景 | 3. PFOS等含有対策技術 |
| 2. 実験手法 | 4. まとめ |

ESTABLISHMENT OF PURIFICATION AND REUSE METHODS FOR PFOS-CONTAINING WASH WATER

Satoshi KUNII	Masaya OOTA
Yukiko HAYASHI	Jun MORIKAWA
Naoki HAGA	

Synopsis:

PFOS-containing waste must be disposed of at facilities equipped with incineration capabilities as stipulated in the “Technical Considerations for the Treatment of Waste Containing PFOS and PFOA” published by the Ministry of the Environment in 2022. Metal scrap and wastewater contaminated with PFOS are also treated as PFOS-containing waste; however, there are currently some items that are difficult to dispose of depending on the facility. During the demolition of a certain facility, metal scrap containing PFOS was generated. In order to dispose of this material, it was necessary to wash the surface of the metal scrap to remove PFOS prior to disposal. To purify the wash water (PFOS-containing wastewater) generated during this process, a PFOS adsorption treatment unit was installed at the washing site, and it was confirmed that purification was feasible. Furthermore, the treated water was reused for washing the metal scrap. As a result, it was confirmed that the volume of PFOS-containing wastewater generated could be reduced to one-fifth. On the other hand, it was suggested that coexisting impurities in the wastewater may inhibit the adsorption treatment, which remains an issue to be addressed in the future.

* 1 本店 ICI 総合センター ICI テクノロジーセンター 環境技術グループ

* 2 本店 土木事業本部 PFAS 対策推進室 施工グループ

1. 背景

1.1 社会情勢

有機フッ素化合物は、熱的・化学的安定性に優れた難分解性の有機化合物である。有機フッ素化合物の中で、ペルフルオロアルキル化合物、およびポリフルオロアルキル化合物の総称を PFAS と呼び、代表的な物質として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スルホン酸 (PFHxS)がある。近年では環境残留性、および人体蓄毒性が指摘され、PFOS は、残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約(POPs 条約)の付属書 A へ記載され¹⁾、PFOA は付属書 B²⁾に、PFHxS は付属書 A³⁾に記載されている。2025 年の 5 月には、炭素数 9~21 の長鎖ペルフルオロカルボン酸(LC-PFCA)とその塩、および LC-PFCA 関連物質の付属書 A への追加が決定した⁴⁾。国内での法規制も進み、PFOS・PFOA・PFHxS は化学物質審査規制法の第一種特定化学物質に指定され、これらを含む製品の製造・輸入・使用が規制されている⁵⁾。また、水質汚濁防止法の要監視項目に位置付けられ、暫定指針値として PFOS・PFOA の合計値 50 ng/L が設定されている⁶⁾。さらに、令和 5 年 2 月より同法施行令の一部が改訂し、PFOS・PFOA が指定物質とされ、漏出等の事故が発生した際の報告義務が課された⁷⁾。

水道法においては、PFOS・PFOA が水質管理目標設定項目⁸⁾に、PFHxS は要検討項目⁸⁾に設定されている。環境省は欧米の規制強化の動きに連動し、令和 8 年 4 月より PFOS・PFOA に関する水道水質基準として、PFOS・PFOA の合算値 50 ng/L を設定した⁹⁾。さらに、厚生労働省でも食品衛生法においても清涼飲料水の成分規格を改訂し、ミネラルウォーター類における基準値として PFOS と PFOA の合算値 50 ng/L が制定された¹⁰⁾。

水道水質基準が制定され、今後は環境水等への基準が設定される可能性がある。環境省や都道府県等が実施した水質調査では、河川等から暫定指針値の 50 ng/L を超過する PFOS・PFOA が全国各地で検出されている¹¹⁾。顕在化しつつある土壌・地下水中への汚染に対し、対策手法の確立が急務である。

1.2 PFOS 等含有廃棄物

PFOS・PFOA・PFHxS(以下、PFOS 等という)は、泡消火薬剤の主成分として使用されてきた¹²⁾。老朽化した施設の維持および更新が全国各地で実施されており、泡消火設備に対しても同様に推奨されている¹³⁾。泡消火設備とは、「泡消火薬剤原液タンク」、「配管」、「ポンプ設備」、泡消火薬剤原液を希釈するための水を溜めおく「貯水槽」等から構成されている¹⁴⁾。火災時に使用される泡消火薬剤については、2021 年度以降、PFOS・PFOA 非含有の製品へ置き換えが進められている¹⁵⁾。環境省が日本国内に存在する PFOS 等含有泡消火薬剤の全国調査

を実施したところ、令和 2 年度では 338.8 万 L であったのに対し、令和 4 年では 185.0 万 L へ約 45%減少したことが明らかとなった¹⁶⁾。また、PFOS 等含有泡消火薬剤を使用する施設から環境中への PFOS 漏出事故は全国各地で発生しており^{17,18)}、消防庁¹⁹⁾より処分を進める動きが求められている。過去に PFOS 等含有泡消火薬剤を使用した履歴のある消火設備や、それらの液体が一度でも通水された配管は全国に多数設置され、現在も運用されている。これらの泡消火設備は、泡消火薬剤に由来する PFOS 等が付着・残存している可能性が高い。PFOS 等含有廃棄物は、廃棄物の処理、および清掃に関する法律において特別管理産業廃棄物には規定されていないが、PFOS 等含有廃棄物として環境省の定めた「PFOS および PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」(以下、技術的留意事項という)²⁰⁾に則して取り扱うことが適切である。産業廃棄物処理施設の設置許可件数は国内全体で 21,160 件あり、うち焼却処理施設は 2,944 件にのぼる²¹⁾が、技術的留意事項に則った焼却処分能力が確認された処理場は国内に 18 件と少ない²²⁾。また、これらの焼却施設は、全国各地にあるのではなく、地理的にも都市圏等の局所にある。さらに、当該処理施設毎に、受け入れ可能な PFOS 等含有廃棄物の品目も限定され、液状の廃棄物しか取り扱わない箇所もある²²⁾。

本論では、PFOS 等含有廃棄物として PFOS 等が付着した金属くずを取り扱った。PFOS 等を含む泡消火薬剤が付着した消火設備配管が、解体金属くずとして発生したが、これを受け入れ可能な処理施設が当該箇所近傍に立地しておらず、その処分方法が課題となった。

そこで、消火設備配管の内壁を洗浄研磨し、付着した PFOS 等を取り除いた上で「通常の金属くず」として処分を行うこととなった。PFOS 等付着金属くずの洗浄により発生した廃水は、PFOS 等含有廃棄物として焼却処分することになるが、洗浄作業で発生する廃水全量を処分するよりも、その水を浄化し、繰返し利用するとともに、PFOS 等の浄化に供した吸着剤を焼却処分する方が、廃棄物発生量の削減に繋がり、強いては焼却処分時のエネルギー消費や運搬コストの低減に効率的であると考えられる。

1.3 PFOS 等含有対策技術

PFOS 等含有水の浄化対策として、技術的な成熟度と実用性を含めた実用性の面から、活性炭やイオン交換樹脂による吸着処理は有力な方法の一つとして知られている²³⁾。活性炭はイオン交換樹脂と比較して安価な利点があり、浄水場では流末での PFOS・PFOA 対策として装置が導入された事例もあるが、国内で使用済みの活性炭による PFOS 等の漏出と広範囲の水源地汚染に発展した事例も確認されている^{24,25)}。一方、イオン交換樹脂は近年まで研究段階とされてきたが、浄水施設にてパイロットス

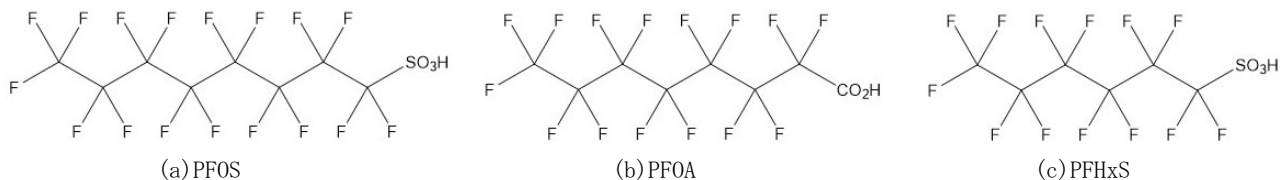


図-1.1 PFOS・PFOA・PFHxS の分子構造

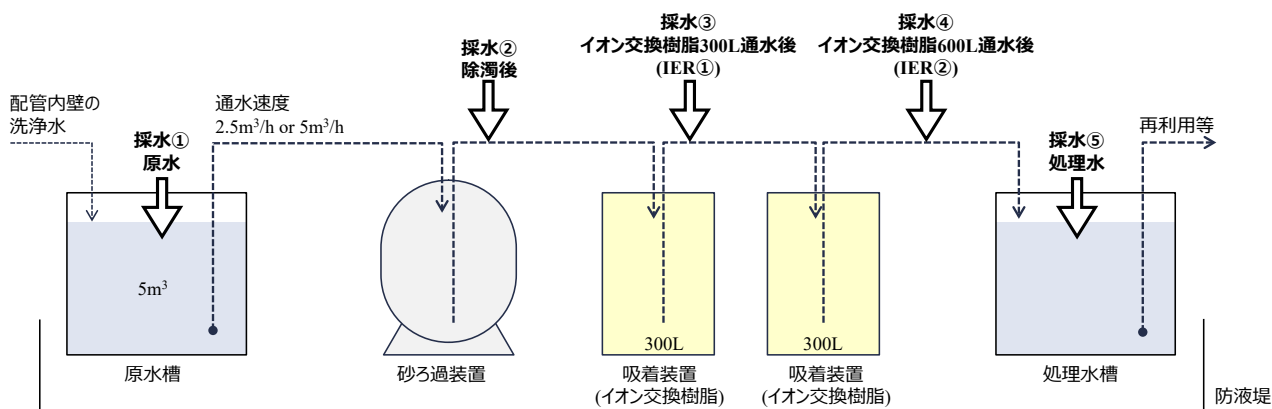


図-2.1 装置概略図

ケールでの実証試験も進んでいる。短鎖の PFAS に対しても有効であることや、破過に至るまでの時間が長いことから浄水処理に採用されるケースも現れつつある²⁶⁾。また、活性炭と比較して吸着容量が大きいことが知られており²⁷⁾、SV(Space Velocity)を大きくできるため、処理設備をコンパクトに設計できる利点がある。

そこで本論では、PFOS 等含有水の処理技術として、イオン交換樹脂による吸着処理を採用した。イオン交換樹脂は、樹脂が有する官能基のアニオン交換反応と、樹脂表面で生じる疎水性吸着機能により PFOS 等を除去するとされる²⁸⁾。PFOS 等の分子構造式を図-1.1 に示す。PFOS・PFHxS はスルホン基、PFOA はカルボキシ基を有しており、これらは pKa 値が低く、環境中では陰イオンの形をとるために、樹脂の官能基とアニオン交換が生ずる。また、疎水性吸着においては、PFOS は完全にフッ素化された C-F 炭素を 8 個、PFOA は 7 個、PFHxS は 6 個有しており、これらが樹脂の表面へ吸着するとされる。

既往の報告にて、除濁(砂ろ過)装置とイオン交換樹脂を採用した吸着処理装置により、PFOS 初期濃度 1,000,000 ng/L、PFOA 初期濃度 100,000 ng/L、SS 濃度 30 mg/L の PFOS 等含有水 6 m³ の浄化を実施した。除濁後の水は、イオン交換樹脂 300 L に通水速度 5.0 m³/h で通水させることで、浄化後の PFOS 等濃度が 12 ng/L まで浄化したことを確認した²⁹⁾。一方で、現場ごとに水質条件が異なり、夾雑する成分によってはイオン交換樹脂の吸着性能の劣化が懸念されるため、浄化を実施する際には、現地の対象となる水を用いた確認試験が必用である³⁰⁾。この事前確認を経て、水処理によって PFOS 等を除去し、その水を再利用することができれば、最終的に発生する PFOS 等含有廃水を減容化することが可能である。

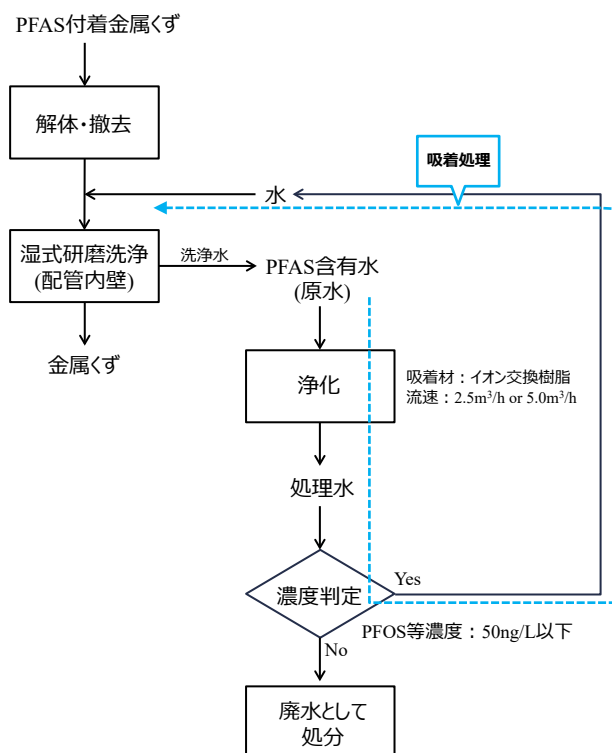


図-2.2 PFOS 等吸着処理のフロー図

本論では、PFOS 等含有金属くずの洗浄作業で発生した PFOS 等含有廃水に対し、吸着処理による浄化を試みた。さらに、浄化した処理水を繰返し利用することによって PFOS 等含有廃水の削減技術の検討を行った。

2. 実験手法

2.1 試験方法

PFOS 等が付着する配管内壁を湿式研磨洗浄することで発生した PFOS 等含有廃水(以下、原水という)5 m³を鋼製水槽に貯留し、図-2.1 に示す装置概略図に基づき、除濁

(砂ろ過)装置、2 ユニットを直列に接続した吸着処理装置の順にホースで連結した。水中ポンプにて原水を取水し、これを各装置へ連続的に通水させることで、PFOS 等を除去した水(以下、処理水という)を処理水槽に貯留した。使用したイオン交換樹脂量は、総容積 600 L とし、通水速度は 2.5 m³/h あるいは 5.0 m³/h となるように調整した。分析検体は、原水、除濁後、前段の吸着装置通水後(以下、IER①という)、後段の吸着装置通水後(以下、IER②という)、および処理水の計 5 カ所から採取した。

図-2.2 に浄化フローを示す。処理水の PFOS 等目標濃度は、3 成分の合算値 50 ng/L 以下を目標とした。目標処理濃度を満たした処理水は再度、配管内壁洗浄用の水として使用した。この洗浄作業にて発生した水を原水として吸着処理を実施し、複数回の再利用が可能であるかを検証した。50 ng/L を超過した処理水は、再利用せずに廃棄するものとした。

2.1 PFOS 等濃度の分析

PFOS 等の分析は、JIS K 0450-70-10 および環境省通知³¹⁾に従い測定した。検体中の濁質に付着する PFOS 等を液相に溶出させることで、PFOS 等濃度の測定の測定を行った。懸濁物質は、0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過し(写真-2.1)、ろ過残渣を容器に移し、0.3%アンモニアメタノール溶液を添加した後に超音波抽出(写真-2.2)を行った。得られた溶液を 3000 rpm で 10 分間遠心分離し、固液分離することで抽出液を得た。

抽出液中の PFOS 等濃度の測定は、液体クロマトグラフ質量分析計(LC-MS/MS)を用いて測定を行った。表-2.1 に装置測定条件を、写真-2.3 に分析装置全景を示す。LC は ExionLC、カラムは Kinetex C18 2.6 μm 50×3.0 mm、

MS は QTRAP4500 を用いた。

2.2 その他の水質分析

PFOS 等濃度以外の水質測定として、TOC(Total Organic Carbon, 全有機炭素)、pH、EC(Electrical Conductivity, 電気伝導率)、陰イオン(F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)、陽イオン(Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe³⁺, Al³⁺)の濃度測定を行った。陰イオンはイオンクロマトグラフを用い、陽イオンは ICP-MS を用いて測定した。TOC は全有機炭素計測定法にて測定し、pH および EC はガラス電極法にて測定を行った。SS 濃度は、JIS K 0102:2016 工場排水試験方法に準じて行い、0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過し、ろ過残渣を採取した。得られたろ過残渣に対し、マイクロスコブを用いて形態を観察し、フーリエ変換型赤外吸収スペクトル分析(FT-IR)およびエネルギー分散型 X 線分光分析(EDX)にて材料評価した。

3. PFOS 等吸着処理試験結果

3.1 試験条件の策定

通水速度を 2 つの条件に設定し、所定の箇所での PFAS 濃度の比較を確認した。原水中の PFOS 濃度は 2,900 ng/L、PFOA 濃度は 3,000 ng/L、PFHxS 濃度は 140 ng/L であり、合計 6,040 ng/L であった。また、SS 濃度は、16.6 mg/L であった。図-3.1 に PFOS 等吸着処理の試験結果を示す。通水速度 2.5 m³/h にて、各採水箇所での PFOS 等濃度の変化を確認した。除濁後では 5,310 ng/L であり、原水から僅かに減少した。これは、夾雑成分に付着した PFOS 等が除濁(砂ろ過)装置にて捕集されたため減じたと考えられる。また、IER①、IER②、処理水槽ではそれぞれ定量下限値以下(2ng/L 未満。以下、ND という)を確認した。通

表-2.1 LC-MS/MS の測定条件

(a) LC 条件				(b) MS/MS 条件			
機器名称	: SCIEX社製 ExionLC			機器名称	: SCIEX社製 QTRAP4500		
カラム	: Phenomenex社製 Kinetex			カラム	: ESI Negative		
注入量	: 15 μL			SRM条件	PFOS	499→80 (定量用)	499→80 (確認用)
カラム温度	: 40 °C				PFOA	413→369 (定量用)	413→169 (確認用)
移動相	: A液 (0.02%ギ酸、2mM酢酸アンモニウム含有水)				PFHxS	399→80 (定量用)	399→99 (確認用)
	B液 (メタノール)				¹³ C ₈ -PFOS	507→80	
	0~8.25min	A液 : 80%→2.0%	B液 : 20%→98%		¹³ C ₈ -PFOA	421→376	
	8.25~11min	A液 : 2.0%	B液 : 98%		¹³ C ₃ -PFHxS	402→80	
	11~11.1min	A液 : 2.0→80%	B液 : 98→20%				
	11.1~15min	A液 : 80%	B液 : 20%				
流速	: 0.6 mL/min						



写真-2.1 固液分離



写真-2.2 超音波抽出



写真-2.3 LC-MS/MS

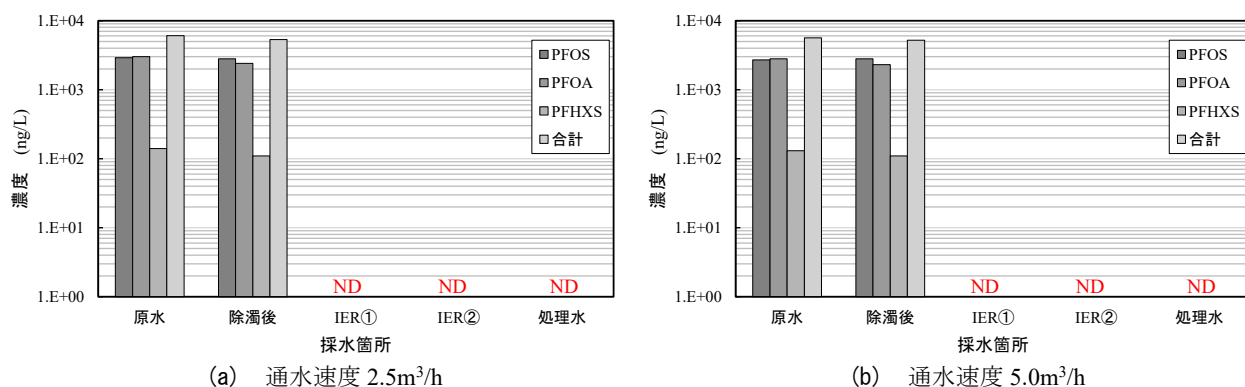


図-3.1 PFOS 等吸着処理における通水速度確認試験

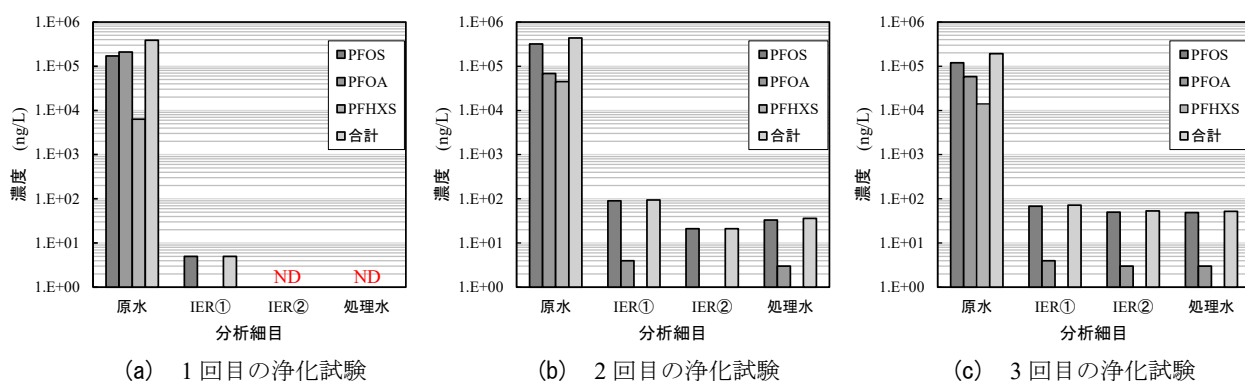


図-3.2 繰返し処理による PFOS 等浄化試験

水速度 5.0 m³/h でも同様の結果を示しており、除濁後の PFOS 等濃度は 5210 ng/L となり、IER①, IER②, 処理水槽ではそれぞれ ND であり、十分に吸着処理できている事を確認した。本論の現場においてはより確実な PFOS 等の浄化処理を優先するため、以降通水速度 2.5 m³/h にて PFOS 等吸着処理を行うものとした。

3.2 繰返し処理による PFOS 等吸着処理試験

3.1 にて定めた通水速度 2.5 m³/h にて、図-2.2 および図-3.3 に示す浄化フローに基づき PFOS 等水処理を行った。PFOS 等吸着処理試験の測定結果を図-3.3 に示す。原水中の PFOS 等濃度は、洗浄対象となる配管内部の汚染状況に起因して濃度が一定とはならず、1 回目 386,300 ng/L、2 回目 433,000 ng/L、3 回目 192,000 ng/L となった。

1 回目の吸着処理では、386,300 ng/L であった原水が IER①では 5 ng/L、IER②以降では ND となった。この処

理水を配管洗浄作業にそのまま供し、2 回目の PFOS 等含有水を得た。これを洗浄後の原水として 2 回目の処理を実施し、433,000 ng/L であった原水が IER①では 94 ng/L、IER②では 21 ng/L、処理水は 47 ng/L となった。

同様に 3 回目の洗浄処理後の原水は、192,000 ng/L となり、IER①では 106 ng/L、IER②では 60 ng/L、処理水は 52 ng/L となり、この時点で最終的な処理水の PFOS 等濃度が 50 ng/L を超えた。一連の洗浄と処理を繰り返すことで、PFOS 等付着金属くずの湿式研磨洗浄に 2 回再利用することが可能であり、洗浄水量は 1/3 に低減した。

3.3 繰返し処理方法の改善検討

上述の 50 ng/L を超過した処理水に対して、PFOS 等濃度の低減を図るため、通水速度 2.5 m³/h とし、吸着処理装置にて処理を行った。図-3.4 に装置概略図を示す。水中ポンプにて処理水槽の水を取水し、吸着処理装置にホ

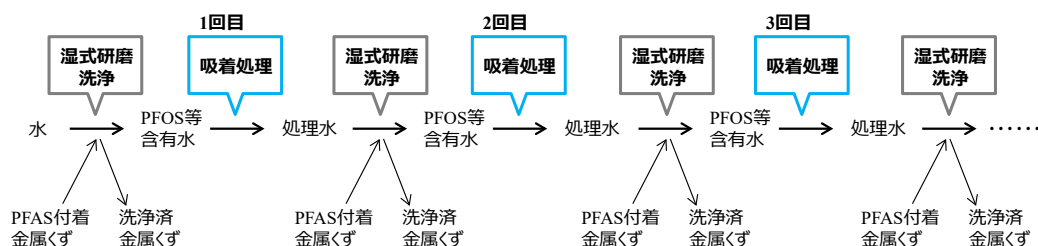


図-3.3 繰返し処理による PFOS 等吸着処理試験の概略

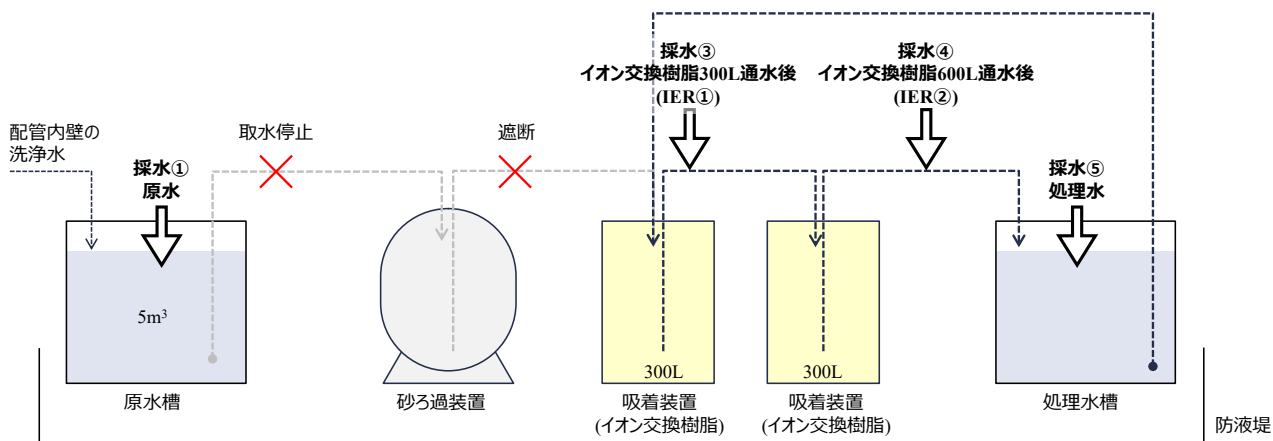


図-3.4 循環処理での装置概念図

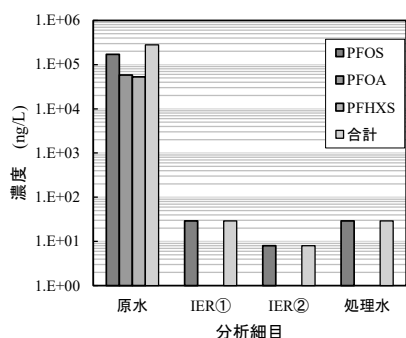


図-3.5 繰返し浄化試験結果(4回目)

表-3.1 繰返し処理における濃度と判定結果

	処理水濃度 (ng/L)	判定 (OK:50ng/L以下)
1回目	ND	OK
2回目	47	OK
3回目	52	NG
3回目（循環処理）	ND	OK
4回目	29	OK

ースで連結し、吸着処理した水は処理水槽に返送した。この処理方法を「循環処理」と称した。循環処理中、IER②ではNDにまで減少し、処理水槽中のPFOS等濃度が50 ng/L以下となったため、4回目の洗浄への利用が可能となった。4回目原水の吸着処理を行った結果を図-3.5に示す。IER①では29 ng/L、IER②では8 ng/L、処理水は29 ng/Lとなった。4回目の繰返し処理においても、処理水濃度が50 ng/L以下であるため、5回目の配管内壁の洗浄作業が可能となった。

表-3.1に処理水槽のPFOS等濃度と判定結果を整理した。PFOS等付着金属くずの湿式研磨洗浄に4回まで繰返し利用できることを確認できたため、発生する洗浄水量は1/5にまで低減した。

3.4 原水の水質分析

配管洗浄作業に着目すると、PFOS等含有金属くずは内壁部がモルタルで防食塗装された鋼管であり、この内壁塗装面にPFOS等を含む消火液が付着し残存している。この配管内壁の塗装面を湿式研磨洗浄することで、PFOS等を除去した。

図-3.6に洗浄水中の陽イオンの測定結果を示す。原水中に Ca^{2+} が比較的多く検出されており、繰返し使用回数を重ねるごとに Ca^{2+} 濃度は増加し、3回目の原水では142.7 mg/Lとなった。これは、配管内壁防食剤のモルタルに含まれる Ca^{2+} によるものと考えられる。また、鋼管材料由来の金属成分である Fe^{3+} 、 Al^{3+} はほぼ検出されなかった。また、図-3.7に示した処理水中の陰イオンの測

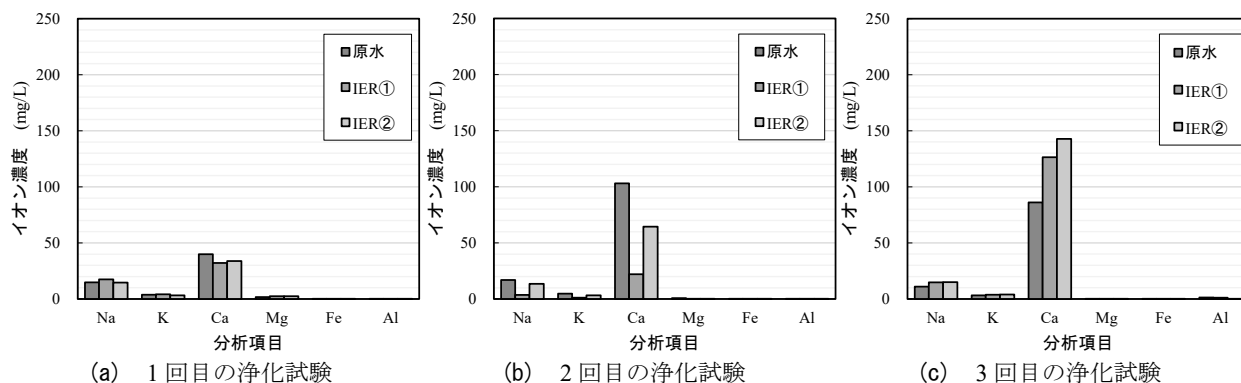


図-3.6 繰返し処理による陽イオンの測定結果

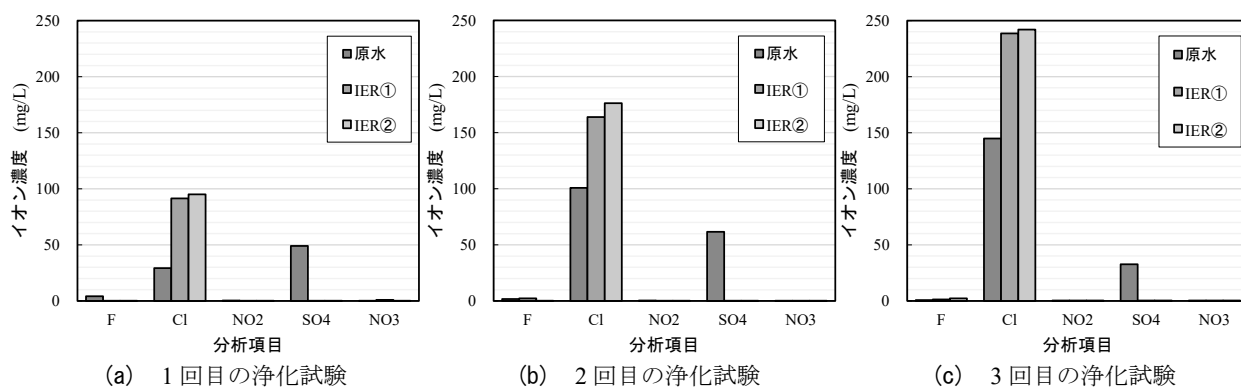


図-3.7 繰返し処理による陰イオンの測定結果

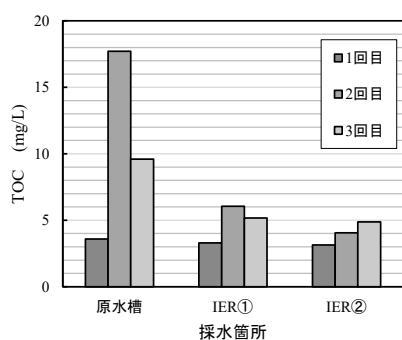


図-3.8 TOC の測定結果

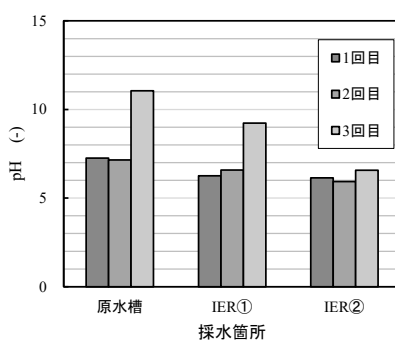


図-3.9 pH の測定結果

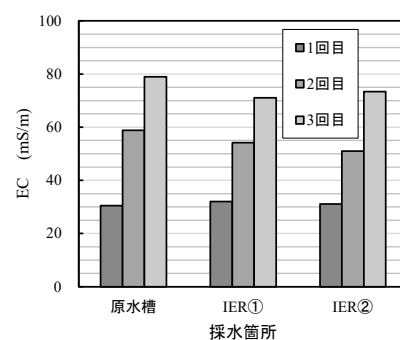


図-3.10 EC の測定結果

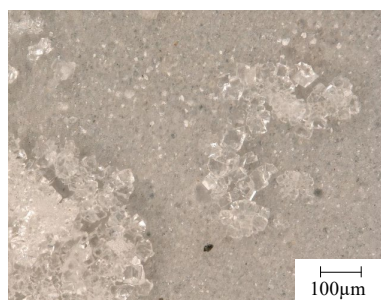


写真-3.1 懸濁物質の顕微鏡写真

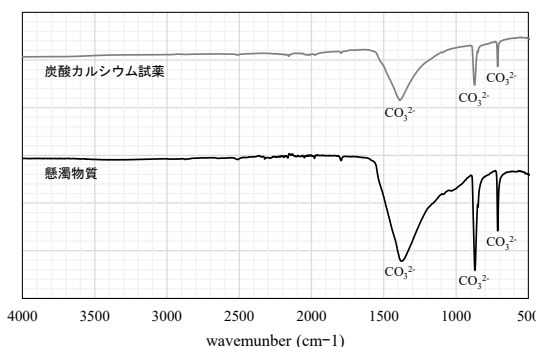


図-3.11 懸濁物質の赤外線吸収スペクトル

表-3.2 懸濁物質の EDX 測定結果

元素	wt%
Ca	99.3
Fe	0.3
Zn	0.2
Sr	0.1
Cu	0.1

定結果では、SO₄²⁻と Cl⁻が確認された。1～3 回目までの経過を観察すると、3 回目の IER②にて Cl⁻濃度が 242 mg/L と最も高くなっており、BV(Bed Volume)が増大するごとに Cl⁻濃度が徐々に上昇する傾向がある。一般に、PFOS 等のアニオンをイオン交換樹脂に吸着するには、対立イオン(counter ion)として SO₄²⁻や Cl⁻が用いられる。本論における Cl⁻濃度の上昇は、このアニオン置換によってイオン交換樹脂から溶脱したイオンだと考えられる。このように、同一の水を繰返し利用することで、供給源は異なるものの、陽イオン、陰イオンともに水中に蓄積される傾向を確認した。

また、図-3.8 に TOC の水質分析結果を示す、1 回目の原水槽では 18 mg/L と比較的高いものの、それ以降は概ね低濃度で安定した。

図-3.9 に pH、図-3.10 に EC の結果を示す、pH は 3 回

目の原水が 11.1 と高い値を示した。これは前述の陽イオン濃度の測定結果からも、繰返し処理による Ca²⁺の濃縮が寄与していると考えられる。EC は吸着処理をすることで各測点にて上昇した。

写真-3.1 に原水を 0.45 μm のメンブレンフィルターで濾した際に、フィルター上に捕集された懸濁物質のマイクロスコップ写真を示す。無色の立方体の結晶が確認されたため、この結晶の同定を試みた。図-3.11 に FT-IR の吸収スペクトルを示す。比較物質として、カルサイトを主成分とする炭酸カルシウムの一級試薬を用いた。結晶と比較物質は、同一波長にて CO₃²⁻に起因する吸収スペクトルを示していることから、懸濁物質もカルサイトを主成分とすることが示唆された。また、表-3.2 に結晶の EDX 測定結果を示す。表 3-2 では、Ca²⁺が 99.3 wt%を占めていることが確認され、共存する他イオン種の晶析

は確認できなかった。水中の塩濃度の上昇は、PFOS 等と電解質の塩析効果をもたらし、吸着を促進する効果があるとされるも³²⁾、本論においては、除去能力低下の原因は水中の溶解成分ではなく、晶析した夾雑成分によるものと考えた。

3.5 結果と考察

イオン交換樹脂を用いた吸着処理により、PFOS 等含有水の浄化と繰返し処理を行った、洗浄水は 4 回までは 50ng/L 以下に浄化できることを確認した。それにより、繰返し処理をしない場合と比較して、PFOS 等含有廃水を 1/5 まで削減できた。PFOS 等処理能力が低下した場合の対応策として、図-3.4 に示す循環処理を用いた。循環処理によりイオン交換樹脂と PFOS 等含有水の接触頻度を増やし、効率的に濃度低減を図ることが可能である。同様に、イオン交換樹脂との接触時間を長く保つ方法として、処理量は低下するものの、水処理装置の SV をさらに小さくすることも有効であると考えられる。

繰返し処理することで、PFOS 等濃度が 50ng/L 以下に浄化しなくなった原因が、水中に含まれる夾雑物等によるイオン交換樹脂の吸着能力の低下と推測し、水質分析を行った。その結果、原水中に含まれるカルシウムイオン由来のカルサイトによるものと推察した。砂ろ過では除去しきれない微細な懸濁物質や有機質等の物質を除去することで、イオン交換樹脂の吸着処理能力をより発現することができると考えられる。そのため、除濁(砂ろ過)装置とイオン交換樹脂を充填した吸着装置の間に、活性炭吸着を導入することも有効であると考えられる。処理水の繰返し使用の回数をさらに向上する事ができれば、一層の PFOS 等含有廃棄物量の減容化が可能である。

4. まとめ

PFOS 等を取り巻く社会情勢や機運によって、各業界・各所にて PFOS 等含有廃棄物の発生量は増加すると考えられるが、PFOS 等廃棄物を受入れ可能な処分場は限られている。本論では、PFOS 等含有配管内壁の洗浄作業によって発生した PFOS 等含有水の発生量削減手法を検討した。イオン交換樹脂を用いた洗浄廃水の浄化処理と処理水の繰返し利用は、産廃量の削減に寄与することが明らかとなった。

環境省では、PFOS 等を含有する土壌や地下水に対する実態調査を進めており、PFOS 等に対する環境規制の動きは年々強化されつつある。本論では、PFOS 等含有水を作業現場内で確実に浄化するためのアプローチを整理したが、これは PFOS 等を固相から液相へ移行させ、その液相中の PFOS 等を効率的に除去する手法を検討したものとも言い換えることができる。そのため、PFOS 等含有土壌やその他の廃棄物といった浄化対象に対しても、本浄化プロセスを応用することが可能と考えられる。近い将

来、本格化することが予想される多様な PFOS 等による汚染事案に対応するため、PFOS 等の処理技術に係る知見の収集と実績構築を今後とも進めていく所存である。

参考文献

- 1) 環境省：POPs 条約第 4 回締約国会議(COP4)の結果について，2009
<https://www.env.go.jp/press/11117.html>
- 2) 環境省：ストックホルム条約，バーゼル条約およびロッテルダム条約締約国会議の結果について，2019
<https://www.env.go.jp/press/106784.html>
- 3) 環境省：ストックホルム条約，バーゼル条約およびロッテルダム条約締約国会議の結果について，2022
<https://www.env.go.jp/press/111174.html>
- 4) 環境省：ストックホルム条約，バーゼル条約およびロッテルダム条約締約国会議の結果について，2025
https://www.env.go.jp/press/press_04897.html
- 5) 経済産業省：第一種特定化学物質一覧
https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/kasinhou/about/class1specified_chemicals_list_20250218r.pdf
- 6) 環境省：環水大水発第 2005281 号，環水大土発第 2005282 号，令和 2 年 5 月 28 日
- 7) 環境省：「水質汚濁防止法施行令および建築基準法施行令の一部を改正する政令」の閣議決定について，令和 5 年 12 月 20 日
https://www.env.go.jp/press/press_02611.html
- 8) 環境省：環水大水発第 2103262 号，令和 3 年 3 月 26 日，<https://www.env.go.jp/content/900539428.pdf>
- 9) 環境省：環境省令第十九号，環境省令第二十号，令和 7 年 6 月 30 日，
https://www.env.go.jp/press/press_00075.html
- 10) 厚生労働省：健生発 0630 第 5 号，令和 7 年 6 月 30 日
https://www.caa.go.jp/policies/policy/standards_evaluation/food_pollution/pfas/assets/standards_cms105_250630_002.pdf
- 11) 環境省：令和 5 年度公共用水域水質測定結果，令和 7 年 4 月，
<https://www.env.go.jp/content/000310475.pdf>
- 12) 環境省：残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約に基づく国内実施計画，令和 2 年 11 月
<https://www.env.go.jp/content/900516491.pdf>
- 13) 一般社団法人日本消防装置工業会：消火設備の維持管理に関するご提案，2017 年 3 月
- 14) 一般社団法人泡消火装置工業会：泡消火設備
<http://shosoko.or.jp/equipment/awa.html>
- 15) 松神秀徳，齋藤隼輝，三宅祐一：環境化学物質 3 学会合同大会，泡消火薬剤に含まれるフッ素界面活性剤に関する実態調査 pp.134-135，2023

- 16) 環境省：PFOS 等含有阿波消火薬剤全国在庫量調査の結果について，2024 年 11 月 1 日
https://www.env.go.jp/press/press_03919.html
- 17) 東京都：西東京市内の駐車場における泡消火剤流出事故について，令和 7 年 4 月 21 日
<https://www.metro.tokyo.lg.jp/information/press/2025/04/2025042206>
- 18) 那覇市：PFOS 等含有泡消火薬剤週出事故の状況について，令和 7 年 3 月 26 日
<https://www.city.naha.okinawa.jp/kurasitetuduki/kankyou/kougai/KKHOZEN00220231024201212494.html>
- 19) 消防庁：PFOS 又はその塩を含有する泡消火薬剤の更新について（通知），2020 年 6 月 1 日
https://www.fdma.go.jp/laws/tutatsu/items/20200601_pfos_koushinkeikaku.pdf
- 20) 環境省：PFOS および PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項，2022 年 9 月
<https://www.env.go.jp/content/000077696.pdf>
- 21) 環境省：産業廃棄物処理施設の設置，産業廃棄物処理業の許可等に関する状況(令和 4 年度実績等)について，2025 年 3 月 27 日
https://www.env.go.jp/press/111095_00005.html
- 22) 泡消火設備工業会：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ついて相談できる処理施設の紹介，2025 年 7 月 4 日
- 23) Ian Ross, Jeffrey McDonough, Jonathan Miles, Peter Storch, ParvathyThelakkat Kochunarayanan, Erica Kalve, Jake Hurst, Soumitri S. Dasgupta, Jeff Burdick : A review of emerging technologies for remediation of PFASs, Remediation28, 2018
- 24) 小坂浩司, 吉田伸江, 中沢禎文, 浅見真理, 松井佳彦, 秋葉道宏：第 56 回日本水環境学会年会講演プログラム・講演集，浄水場における活性炭処理による有機フッ素化合物の除去，p.252, 2022
- 25) 千鶴馨平, 水野信輝, 渡辺太郎, 関口恵美, 原田未来, 下田穰史, 島田大地, 齋藤智幸：令和 3 年度水道研究発表会，小雀浄水場における有機フッ素化合物による汚染事例および対応報告，pp.668-669, 2021
- 26) 各務原市：上水道における水質改善対策について(答申)，令和 6 年 12 月 4 日
https://www.city.kakamigahara.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_001/023/399/toushinnsho.pdf
- 27) Pattarawan Chularueangaksorn, Tanaka Shuhei, Fujii Shigeo, Kunacheva Chinagarn : journal of Applied Polymer Science, Batch and column adsorption of perfluorooctane sulfonate on anion Exchange Resins and Granular Activated Carbon, 2013
- 28) Qiang Yu, Ruiqi Zhang, Shubo Deng, Jun Huang, Gang Yu : water research, Sorption of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate on activated carbons and resin: Kinetic and isotherm study, 43, pp.1150-1158, 2009
- 29) 芳賀直樹, 國井聡, 太田匡哉, 赤松佑介, 河野浩之, 竹澤正太郎：土木建設技術発表会 2023，PFOS/PFOA を含有する水に対する浄化技術の開発，2023
- 30) Karnwadee Wilaingam, 田中周平, Pattarawan Chularueangaksorn, 鈴木裕識, 小野亮輔, 藤井滋穂：土木学会論文集 G(環境)，ペルフルオロヘキサン酸(PFHxA)のイオン交換樹脂，非イオン交換樹脂および粒状活性炭への吸着に及ぼすアニオンの影響，Vol.70, No.7, III_65-III_72, 2014,
- 31) 環境省：水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準等の施行等について(通知)，環水大発第 2005281 号・環水大土発第 2005282 号，令和 2 年 5 月 28 日
- 32) 公益社団法人水道技術研究センター：水道における PFAS の処理技術等に関する資料集，2023 年 11 月
https://www.jwrc-net.or.jp/docs/p-ken_report_rev.pdf