PFAS含有水の浄化処理に用いるイオン交換樹脂の基礎的性能評価

林　夕　紀　子[*1]　　後藤　ゆかり[*1]
森　川　　純[*1]　　國　井　　聡[*1]
芳　賀　直　樹[*1]

要　　旨

有機フッ素化合物（PFAS）は，撥水性，撥油性，耐熱性，化学的安定性に優れることから，泡消火薬剤，表面処理剤，半導体関連材料など幅広い分野で利用されてきた．一方で，その多くは難分解性，生体蓄積性を有し，環境中に残留しやすいことから，近年では水環境中での存在実態や人の健康への影響に対する懸念が高まっている．PFAS 含有水の処理技術としては，粒状活性炭による吸着法や逆浸透膜等を用いた膜分離法が知られているが，処理コスト，対象水質への適用性などの観点から，それぞれに課題がある．そこで本研究では，PFAS の除去技術の一つとしてイオン交換樹脂に着目し，吸着性能に影響を及ぼすとされる温度や pH 等の因子について，代表的な PFAS である PFOS，PFOA，PFHxS を対象に基礎的な評価を行った．さらに，水中に存在するイオンなどの共存成分を含む実試料を用いた吸着性能評価も実施し，実環境への適用可能性や基礎試験結果との関係について検討した．

キーワード　PFAS／イオン交換樹脂／吸着処理／浄化処理／共存イオン／性能評価

目　　次

１．背景
２．振とう吸着試験
３．試験結果
４．実試料を用いたイオン交換樹脂性能の評価
５．まとめ

FUNDAMENTAL PERFORMANCE EVALUATION OF ION-EXCHANGE RESINS FOR THE TREATMENT OF PFAS-CONTAINING WATER

Yukiko　HAYASHI　　**Yukari　GOTO**
Jun　MORIKAWA　　**Satoshi　KUNII**
Naoki　HAGA

Synopsis:

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are widely used for their water and oil repellency, heat resistance, and chemical stability, but their persistence and bioaccumulation have raised environmental and health concerns. This study evaluated ion-exchange resins as a PFAS removal technology, focusing on the effects of temperature and pH on the adsorption of PFOS, PFOA, and PFHxS. Adsorption performance was also examined using real samples containing coexisting components to assess applicability under actual environmental conditions.

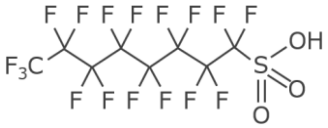
＊１本店　ICI テクノロジーセンター　環境技術グループ

1. 背景

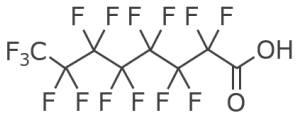
1.1 社会情勢

近年，有機フッ素化合物（PFAS）は，河川水，地下水，湖沼水などの環境水中で検出される事例が国内外で報告されており，水環境中の新たな汚染物質として社会的関心が高まっている．代表的な PFAS としては PFOS，PFOA，PFHxS などがあり，その構造式を**図−1** に示す．PFAS は撥水性，撥油性，耐熱性および化学的安定性に優れることから，泡消火薬剤，表面処理剤，撥水加工製品，半導体関連材料など多様な用途で使用されてきた．一方で，炭素－フッ素結合の安定性により環境中で分解されにくく，一度水系へ流出すると長期間残留し，河川流下や地下浸透を通じて広範囲に移動する可能性がある．そのため，汚染源周辺のみならず，下流域，地下水系，さらには取水源への影響も懸念されている [1)]．

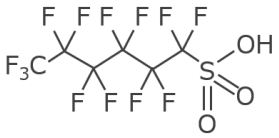
国内では，PFOS および PFOA について，令和 2 年に水道水の水質管理目標設定項目として暫定目標値（合算 50 ng/L 以下）が設定されるとともに，公共用水域および地下水では要監視項目として指針値（暫定）が設定された．その後，リスク管理の実効性を高める観点から制度的な見直しが進められ，令和 8 年には水道水の水質基準項目へ引き上げられたことからも水環境中での存在実態の把握，汚染源の推定，継続的なモニタリングの重要性が一層高まっていると考えられる [2)]．また，PFHxS をはじめとする他の PFAS 類や短鎖 PFAS への関心も高まっており，対象物質の拡大とこれらの物質に関する管理の在り方等が議論されてきている [3)]．



PFOS



PFOA



PFHxS

図−1 PFOS，PFOA，PFHxS 構造式

このように，PFAS に対する規制・管理の強化が進む中で，水環境中に存在する PFAS を効率的に低減する処理技術の確立がますます重要となっている．特に，イオン交換樹脂等を用いた PFAS 吸着技術では，実験室条件で得られた仕様が河川水や地下水などの実環境水にも適用可能であるかを検証することが不可欠である．さらに，環境水の性状は採水地点や季節によって変動するため，安定した吸着性能を得るには，水質条件の違いに起因する吸着挙動への影響を把握する必要がある．

このことから，実環境水を想定した条件下で PFAS の吸着特性を評価することは，実用的な水処理技術の確立に向けて重要である．

2. 振とう吸着試験

初期濃度が約 200,000ng/L となるように，PFOS，PFOA および PFHxS の単一溶液を調製した(以下上記 3 成分を PFOS 等とする)．これにイオン交換樹脂を添加し，100rpm で 72 時間振とうして PFOS 等を十分にイオン交換樹脂に吸着させた．

振とう後に固液分離した水相の PFOS 等濃度を測定し，初期濃度との差及びイオン交換樹脂の添加量から，イオン交換樹脂の単位重量当たりの PFOS 等吸着量を算出した．PFOS 等吸着量と各試験条件の関係から，イオン交換樹脂の吸着能力に与える影響を推察した．

2.1 振とう条件変化試験

(1) 水温変化試験

実環境での吸着除去作業では，地域，季節によりその作業中の水温が大きく異なる状況でイオン交換樹脂を使用することが考えられた．そのため，水温の変化がイオン交換樹脂の吸着能力に及ぼす影響を確認する試験を実施した．

一定濃度の PFOS 等含有水に 10～200mg-dry/L となるように段階的にイオン交換樹脂を添加した．振とう吸着試験には，庫内温度を+4～+70℃の範囲で制御可能な恒温振とう培養器（BR-40LF，タイテック社製）を用いた．試験溶液の温度は 4℃，室温（25℃）および 40℃に設定し，各条件で 72 時間振とう後，試料をシリンジフィルターでろ過し，固液分離を実施した．得られたろ液を分析に供した．

(2) pH 変化試験

浄化の対象となる水は，存在する環境や用途などによって pH が大きく異なることが想定された．そのため，pH の変化がイオン交換樹脂の吸着能力に及ぼす影響を確認する試験を実施した．

本試験で用いたイオン交換樹脂の推奨使用範囲は pH 5～9 であることから，推奨使用範囲の中間値である pH 7，ならびに推奨使用範囲外の酸性条件である pH 2 およびアルカリ性条件である pH 12 の計 3 条件を設定した．

一定濃度の PFOS 等含有水に 10～200mg-dry/L となるように段階的にイオン交換樹脂を添加した．振とう吸着試験を行う際，塩酸及び水酸化ナトリウムを用いて PFOS 等含有水を pH2，pH7，pH12 に調整し，72 時間振とう後に固液分離し，ろ液を分析に供した．

2.2 共存物質添加試験

(1) 陰イオン添加試験

陰イオンが吸着に及ぼす影響を確認するため，水中に一般的に存在する主要な陰イオンである塩化物イオン，硫酸イオン，硝酸イオンを選定し，これらの共存下でのイオン交換樹脂に対する PFOS 等の吸着量を確認した．水道水質基準において塩化物イオンは 200mg/L 以下と設定されていることから，各陰イオンの設定濃度はその 3 倍の 0～600mg/L の範囲とし，一定濃度の PFOS 等含有水に段階的に添加して試験溶液を調製した．その試験溶液にイオン交換樹脂を 60mg-dry/L となるように添加し，振とう吸着試験を行った．なお，各陰イオン源として，塩化ナトリウム，硫酸ナトリウム，硝酸ナトリウムを用いた．

(2) 陽イオン添加試験

陽イオンが吸着に及ぼす影響を確認するため，ナトリウム，カルシウム，マグネシウムを選定し，これらの共存下でのイオン交換樹脂に対する PFOS 等の吸着量を確認した．水道水質基準においてナトリウムは 200mg/L 以下，カルシウム，マグネシウム等（硬度）は 300mg/L 以下と設定されていることから，その 2～3 倍の濃度として 0～600mg/L の範囲に設定した．この範囲の濃度となるように一定濃度の PFOS 等含有水に段階的に添加し，試験溶液を調製した．その試験溶液にイオン交換樹脂を 60mg-dry/L となるように添加し，振とう吸着試験を行った．なお，各陽イオン源として，硝酸ナトリウム，硝酸カルシウム 4 水和物，硝酸マグネシウム 6 水和物を用いた．

(3) 有機物添加試験

水中に存在する有機物が吸着に及ぼす影響を確認するため，PFOS 等含有水中の有機炭素量（TOC）が 0～200 mg/L 程度となるように一定濃度の PFOS 等含有水に有機炭素を段階的に添加し，試験溶液を調製した．その試験溶液にイオン交換樹脂を 60mg-dry/L となるように添加し，振とう吸着試験を行った．なお，有機炭素源としてグルコースを用いた[4]．

2.3 模擬汚染水と実試料の比較

イオン交換樹脂の吸着に対する共存物質の複合的な影響を確認及び，2.1，2.2 の結果との整合性を確認するため，模擬汚染水と実試料を用いた振とう吸着試験の結果の比較を行った．試験に用いた実試料は PFOS を高濃度で含んでいたが，PFOA，PFHxS の濃度は比較的低かった．実試料の PFOS，PFOA，PFHxS の濃度を**表-1** に示す．この結果より，ここでの評価対象は PFOS のみとした．模擬汚染水は，超純水に PFOS 試薬を添加し 390,000ng/L 程度の濃度となるように調整した．

表-1 実試料の濃度

PFOS(ng/L)	PFOA(ng/L)	PFHxS(ng/L)
200,000	5,000	18,000

2.4 分析方法

本試験の分析対象は PFOS，PFOA および PFHxS とした．その測定分析は，「環水大水発第 2005281 号 環水大土発第 2005282 号 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（令和 2 年 5 月 28 日 環境省）」を準用し，液体クロマトグラフ-タンデム質量分析計（LC-MS/MS）を用いた．液体クロマトグラフは ExionLC（SCIEX 社製），分析カラムは Kinetex C18 2.6 μm 50×3.0 mm（Phenomenex 社製），質量分析計は QTRAP4500（SCIEX 社製）を使用した．

測定装置を**写真-1** に示す．また，機器分析の条件を**表-2** に示す．



写真-1 LC-MS/MS

表-2 分析条件

LC条件			
機器名称	：	SCIEX社製	ExionLC
カラム	：	Phenomenex社製 Kinetex® C18 2.6μm 50×3.0mm	
注入量	：	15μL	
カラム温度	：	40℃	
移動相	：	A液：0.02%ギ酸、2mM酢酸アンモニウム含有水	
		B液：メタノール	
		0 ～ 8.25min A液：80%→2.0%	B液：20%→98%
		8.25 ～ 11min A液：2.0%	B液：98%
		11 ～ 11.1min A液：2.0%→80%	B液：98%→20%
		11.1 ～ 15min A液：80%	B液：20%
流速：	0.6mL/min		

MS/MS条件			
機器名称	：	SCIEX社製	QTRAP4500
イオン化法	：	ESI Negative	
SRM条件	：	PFOS	499→80(定量用) 499→99(確認用)
		PFOA	413→369(定量用) 413→169(確認用)
		PFHxS	399→80(定量用) 399→99(確認用)
		$^{13}C_8$-PFOS	507→80
		$^{13}C_8$-PFOA	421→376
		$^{13}C_3$-PFHxS	402→80

3. 試験結果

3.1 振とう条件変化試験

(1) 水温変化試験結果

水温を 3 段階に変化させて吸着試験を行い，イオン交換樹脂の単位重量当たりの PFOS 等吸着量を確認した結果を図-2 に示す.

PFOS，PFOA および PFHxS ともに，顕著とは言い難いものの，高温条件で吸着量が増加する傾向を示した． これは，高温条件により水分子やイオンの分子運動が活発になり，溶液中および樹脂粒子内での拡散が促進されることで，PFAS が樹脂表面および内部の吸着部位へ到達しやすくなったためと考えられる [5-7]．また，官能基との接触機会が増加したことも，吸着量増加の一因と推察される [7]．

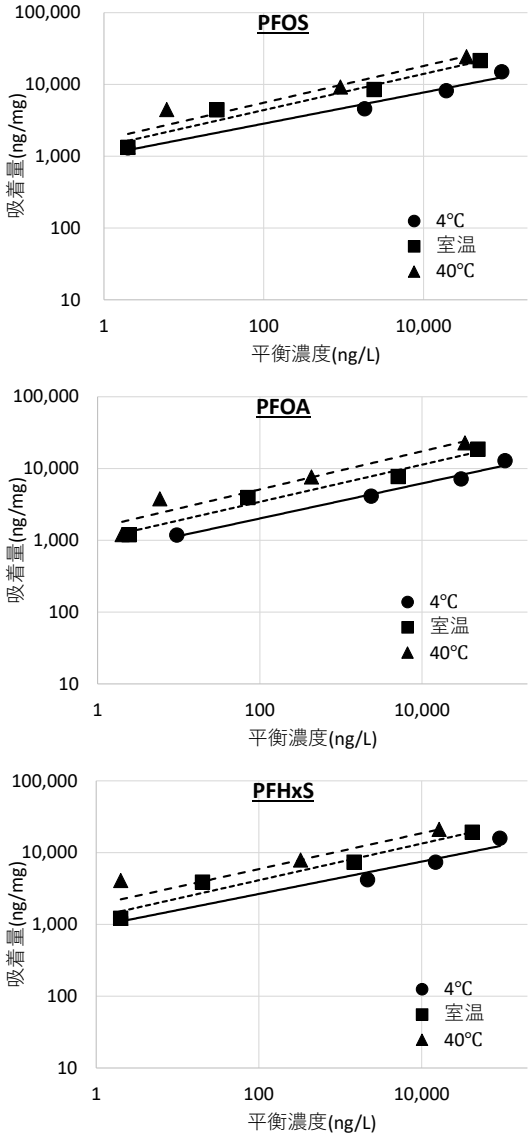


図-2　水温変化による吸着容量への影響

(2) pH 変化試験結果

試験水の pH を 3 段階に変化させて吸着試験を行い，イオン交換樹脂の単位重量当たりの PFOS 等吸着量を確認した結果を図-3 に示す.

その結果，PFOS，PFOA および PFHxS のいずれにおいても，pH の変化による吸着量の増減は僅かであり，本イオン交換樹脂に対する pH の影響は限定的であった.

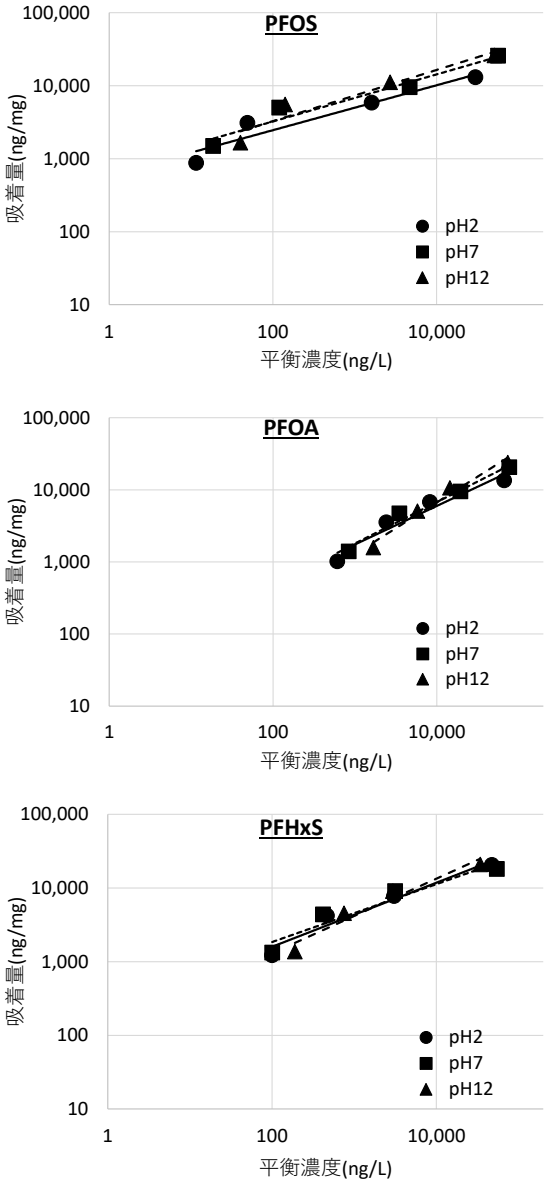


図-3　pH 変化による吸着容量への影響

本試験で用いたイオン交換樹脂の推奨使用範囲は pH5～9 であるが，その範囲を超える広い pH 条件下で PFAS 吸着性能を発揮できる可能性が示された．実環境水では，採水地点や共存成分の影響により pH が変動する場合があるため，広い pH 範囲で安定した吸着性能を有することは，実用的な水処理材として有用であると考えられた.

3.2 共存物質添加試験

(1) 陰イオン添加試験結果

硫酸イオン，塩化物イオン，硝酸イオンを共存させた条件において，イオン交換樹脂の PFOS 等の吸着能力の変化を確認した．横軸を各陰イオンの添加濃度，縦軸をイオン交換樹脂単位重量当たりの PFOS 等の吸着量としたグラフを**図-4** に示す．

PFOS 等は水中では陰イオンとして存在するため，これらの陰イオンはイオン交換樹脂での吸着において，競合する可能性が高いと推察された[8]．しかしながら，各陰イオン 600mg/L までの共存下においても PFOS 等の吸着容量の低下は見られず，これらの陰イオン単体では PFOS 等の吸着容量に影響を及ぼさないことが確認された．

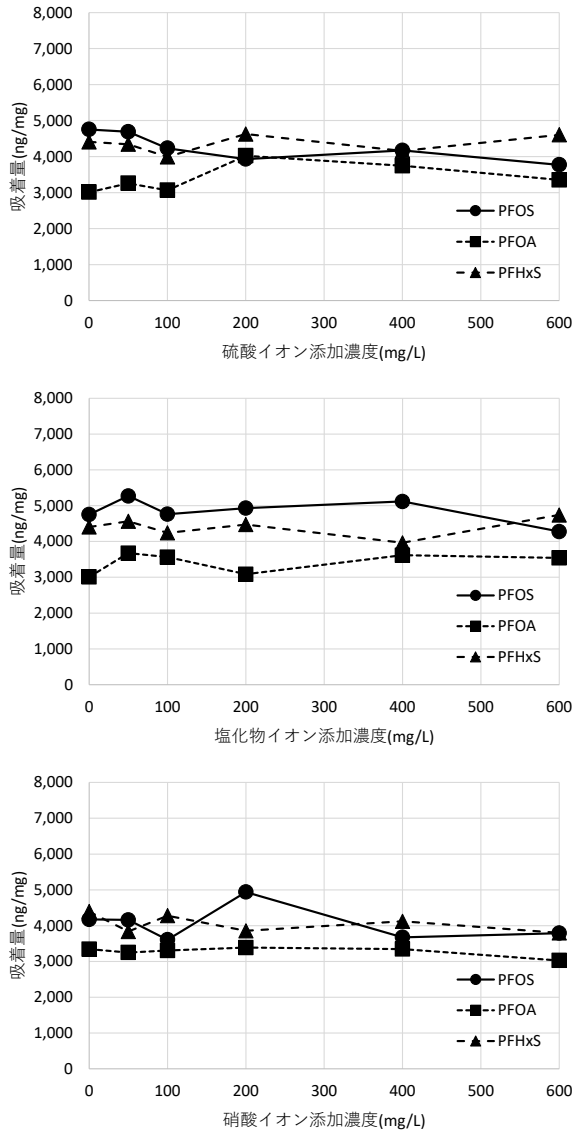


図-4 陰イオン共存下での吸着容量変化

(2) 陽イオン添加試験結果

ナトリウムイオン，カルシウムイオン，マグネシウムイオンを共存させた条件において，イオン交換樹脂の PFOS 等の吸着能力の変化を確認した．横軸を各陽イオンの添加濃度，縦軸をイオン交換樹脂単位重量当たりの PFOS 等吸着量としたグラフを**図-5** に示す．

一般に，陰イオン交換樹脂の選択性に陽イオンである金属イオンが影響を及ぼすことはない[8]と考えられる．PFOS，PFHxS は本試験における各陽イオンの共存濃度において吸着量の変化は確認されなかった．一方，PFOA はいずれの陽イオン共存化においても，その濃度が高くなるに従って，イオン交換樹脂の吸着量が低下する傾向が確認された．この要因として，PFOA はカルボン酸系 PFAS であり，スルホン酸系である PFOS および PFHxS に比べてイオン交換樹脂への親和性が相対的に低いことが考えられる[4),9)]．

さらに，カルシウムイオンやマグネシウムイオンなどの二価陽イオンの存在により，溶液中のイオン強度や静電的相互作用が変化した可能性があり，これらの水質条件の違いも PFOA の吸着挙動に関与した可能性が示唆された．

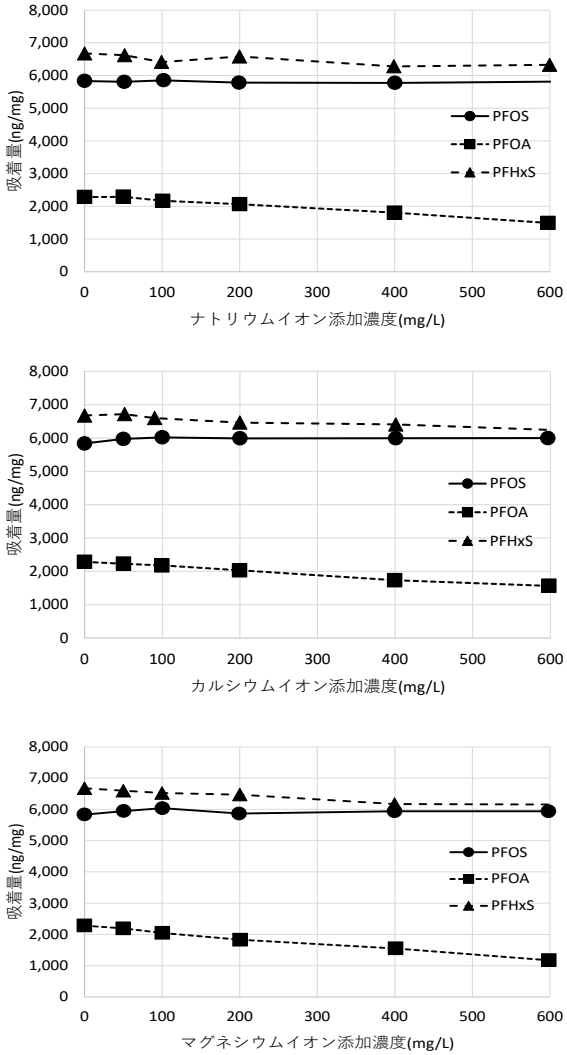


図-5 陽イオン共存下での吸着容量変化

(3) 有機物添加試験

PFOS 等含有水にグルコースを段階的に添加し，TOC 濃度として 0〜200mg/L 程度の範囲で変化させ，イオン交換樹脂による PFOS，PFOA，および PFHxS の吸着量への影響を評価した．結果を**図-6** に示す．

本試験で用いたイオン交換樹脂の推奨使用範囲は TOC 2ppm 以下となっており，2ppm 以上においては吸着に悪影響を及ぼすと記載があるが，全ての TOC 濃度条件において，PFOS，PFOA，PFHxS の除去率は 99.99%以上を維持した．

実際の水処理においては粘土層に含まれるフミン酸やフルボ酸等の有機物が TOC の主成分となる場合があり，これらは PFAS との競合吸着を引き起こす可能性がある[10]．本実験結果は中性有機物（グルコース）の影響を評価したものであり，実環境水への適用には追加検討が必要である．

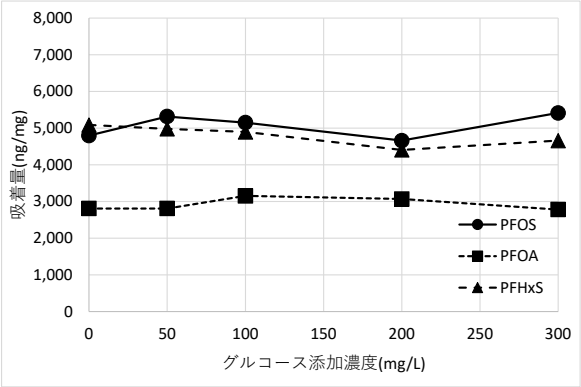


図-6 グルコース(TOC)共存下での吸着容量変化

4. 実試料を用いたイオン交換樹脂性能の評価

これらの結果を踏まえ，実試料を用いてイオン交換樹脂の吸着性能試験を実施した．なお，実試料は主に PFOS を含有しており，PFOA と PFHxS の含有量は少なかったことから，検討は PFOS のみを対象とした．また模擬汚染水は，純水に PFOS 試薬を添加して調製した．

試験に用いた実試料と模擬汚染水の PFOS 濃度を**表-3** に，実試料の水質分析結果を**表-4** に示す．また，実試料と模擬汚染水の吸着量比較を**図-7** に，破過濃度 50ng/L における吸着量を**表-5** に示す．

調製した模擬汚染水と比較して，実試料中の共存陰イオンおよび陽イオン濃度は同程度または低い水準であった一方，TOC 濃度は 110mg/L と高く，本試験で用いたイオン交換樹脂の推奨使用範囲である 2ppm 以下を大きく上回っていた．

このような高 TOC 条件下で試験を行った結果，**表-5** に示すように，イオン交換樹脂の破過濃度を 50 ng/L とした場合の実試料における PFOS 吸着量は，模擬汚染水を用いた場合の約 11%にとどまった．

表-3 実試料と模擬汚染水の PFOS 濃度

試験試料	PFOS(ng/L)
実試料	200,000
模擬汚染水	390,000

表-4 実試料の水質分析結果

項目	単位	測定値
硫酸イオン	mg/L	2
硝酸イオン	mg/L	<0.3
塩化物イオン	mg/L	11
ナトリウムイオン	mg/L	30
カルシウムイオン	mg/L	80
マグネシウムイオン	mg/L	4
pH	-	7.5
全有機炭素（TOC）	mg/L	110

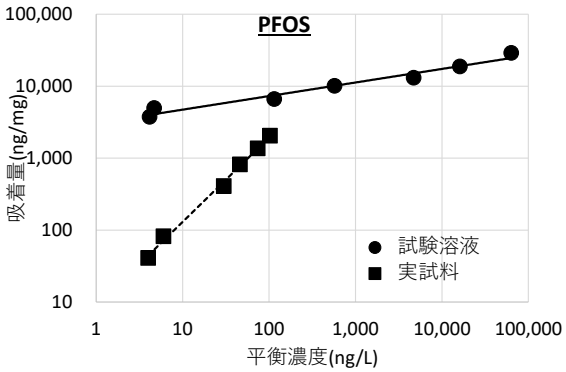


図-7 実試料と試験溶液の PFOS 吸着容量比較

表-5 破過濃度 50ng/L における PFOS 吸着量比較

試験試料	PFOS(ng/mg)
実試料	723
模擬汚染水	6,580

以上より，実試料における PFOS 吸着量の低下は，推奨使用範囲を大きく超える高濃度の TOC の影響を強く受けた結果であると推察される．実試料中の TOC は，フミン酸やフルボ酸等の天然有機物に由来する成分を多く含む可能性があり，これらがイオン交換樹脂の PFOS との競合吸着を引き起こした可能性であると推察される．したがって，実環境水へ適用する際には，TOC 濃度および有機物組成を考慮した吸着性能評価が重要である．

5. まとめ

本試験により，イオン交換樹脂による PFAS 吸着では，単に対象水中の PFAS 濃度や代表的な無機イオン濃度を確認するだけでは，実環境水中での処理性能を十分に予

測できないことが示された．特に，室内で調製した模擬汚染水では安定した吸着挙動が得られる場合であっても，実試料では水質を構成する複数の因子が重なり合い，吸着量が大きく変化する可能性がある．このことから，イオン交換樹脂の適用性評価では，標準溶液を用いた基礎性能の確認に加え，対象とする実環境水を用いた事前評価が不可欠であると考えられる．

また，本試験結果は，PFAS の種類によって実環境水中での吸着挙動が異なる可能性を示している．そのため，処理対象を PFOS や PFHxS のようなスルホン酸系 PFAS に限定して評価するのではなく，PFOA など比較的吸着されにくい成分を含めて処理性能を確認することが重要である．特に，複数の PFAS が共存する実環境水では，各成分の樹脂への親和性や共存成分との相互作用の違いにより，単一成分試験とは異なる吸着特性を示す可能性がある．

以上より，イオン交換樹脂は PFAS 含有水の処理材として有効な選択肢となり得るが，実環境水への適用にあたっては，水質分析結果に基づいて樹脂添加量，接触時間，交換頻度などの処理条件を設定する必要がある．特に，TOC や総溶解固形物などの一括指標だけでなく，有機物の性状や懸濁成分の有無など，吸着を阻害し得る要因を把握することが，安定した処理性能を得るうえで重要である．

なお，本試験で用いた実試料は主として PFOS を含有する水質であったため，本試験結果は PFOS を対象とした実環境水中での吸着挙動を評価したものである．今後は，PFOA や PFHxS をはじめとする他の PFAS を主成分として含有する実試料や，複数の PFAS が共存する実試料についても同様の吸着容量試験を実施し，PFAS の種類によるイオン交換樹脂の吸着性能に及ぼす影響を体系的に整理する必要がある．

また，採水地点や季節の異なる実試料を用いた検証を行い，水質変動がイオン交換樹脂の吸着性能に及ぼす影響を整理することが望ましい．また，実処理への適用を想定する場合には，破過に至るまでの挙動や処理水質の安定性，樹脂交換時期の判断方法についても検討する必要がある．これらの知見を蓄積することで，イオン交換樹脂を用いた PFAS 処理技術の実用性をより具体的に評価できるものと考えられる．

参考文献

1) 環境省：PFAS ハンドブック，令和 7 年
2) 環境省：水質基準に関する省令改正の概要について，令和 7 年
3) 環境省：PFAS に関する今後の対応の方向性　令和 5 年 7 月・PFAS に対する総合戦略検討専門家会議，令和 5 年
4) 原宏江，シャハナズ・パルビン，金井佑磨，ソワンラスミー・ソン，本多了，山村寛：地下水 PFAS の陰イオン交換処理において重量な樹脂特性の検討，令和 5 年度全国会議（水道研究発表会），2023
5) 阿部郁夫：吸着の化学，折尾サイエンス　第 2 巻第 5 号　pp.275-281，2002
6) 山本寛：単位操作としてのイオン交換，生産研究，12(2)，pp.31–36，1960.
7) 河添邦太朗，竹内雍，橋本忠昭：イオン交換における物質移動の単粒子による研究，化学工学，32(2)，pp.175–181，1968.
8) 室町ケミカル株式会社：イオン交換樹脂の選択性，イオン交換樹脂総合センター，2021.
9) 金井佑磨，Shahanaz Parvin，原宏江，本多了，山村寛，山﨑亜希，安藤信吾：ラボスケールカラム通水試験における陰イオン交換樹脂と粒状活性炭による PFAS 除去性能の評価，発行年不明
10) 古幡真祐子，小林琢也，髙橋洋平，林益啓：活性炭による PFAS 除去シミュレーションの構築と検証，令和 7 年度全国会議（水道研究発表会），pp.264–265，2025.