

泡沫分離法による地下水中の有機フッ素化合物（PFOS・PFOA・PFHxS）の処理

清水建設株式会社 正会員 ○倉部美彩子 正会員 青木 陽士 正会員 隅倉 光博
 正会員 加藤 雄大 正会員 小島 啓輔 非会員 稲田ゆかり

1. はじめに

有機フッ素化合物であるペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS) およびペルフルオロオクタン酸 (PFOA) は、難分解性で環境中への蓄積や健康被害が懸念されることから、令和 2 年に公共用水域および地下水において指針値 (暫定) が定められた。また、PFOS や PFOA の代替品であるペルフルオロヘキサンスルホン酸 (PFHxS) についても要調査項目に追加されている。令和 2 年度の環境省の調査では、複数の公共用水域および地下水で PFOS、PFOA、PFHxS が検出され、一部では指針値の超過が見受けられた¹⁾。PFOS や PFOA の処理には活性炭などの吸着材が適用されているが、濃度が高い場合や処理量が多い場合には効率的な処理が難しい。そこで、我々は地下水や汚染土壌などの洗浄処理技術の開発に向けて、泡沫分離法による PFOS および PFOA の処理について研究を進めてきた²⁾。泡沫分離法は、物質が泡沫の気液界面に吸着・濃縮される特性を利用して汚染物質を分離する安価で処理効率の高い方法である。本研究では、室内試験をもとにスケールアップした泡沫分離試験装置を沖縄県内の地下水に適用し、処理性能について検討した。また、回収した泡沫に含まれる PFOS や PFOA については分解等の後段処理が必要になる可能性が高い。その処理量を低減するため、回収した泡沫に対して再度、泡沫分離法を適用 (二段処理) し、処理効果が得られるか検討を行った。

2. 試験方法

沖縄県内で PFOS (600 ng/L)、PFOA (34 ng/L)、PFHxS (110 ng/L) を含む地下水を採取し試験に供した。試験装置を図 1 に示す。気液接触塔内の底部にディフューザーを、水面付近に泡沫回収器を設置した。泡沫は泡沫回収器に接続したチューブより気液接触塔外に排出され、泡沫貯留容器に貯留される。本試験では泡沫を安定して回収するため、起泡剤としてドデシル硫酸ナトリウム (SDS) を、助剤として無機塩を添加した。45 L/回の試験水に対しバッチ試験を実施し、処理時間は SDS が泡沫として概ね回収できる 40 min とした。試験条件を表 1 に示す。条件 A を基準に薬剤 (起泡剤および助剤) の添加量や泡沫回収器の設置高さ、泡沫の排出方法が処理性能に与える影響を検討した。条件 B、C、D の SDS については、開始時に 1 倍量を添加し、処理時間 20 min に 1 倍量または 0.5 倍量を追加した。処理水は試験中および終了時に気液接触塔下部より採取した。また、各試験で回収した泡沫を混合し 45 L に調整したものに泡沫分離法を適用 (二段処理) し処理効果を検討した。なお、二段処理では新たな薬剤の添加は行っていない。

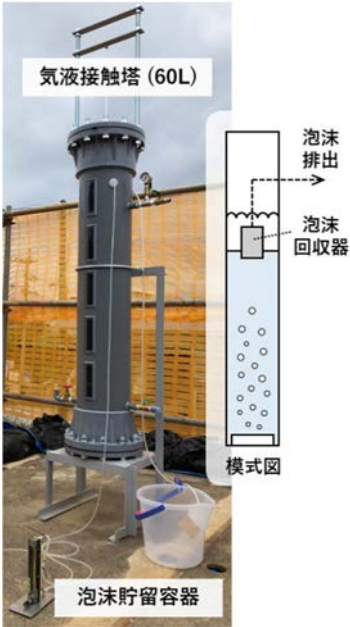


図 1. 泡沫分離試験装置

表 1. 試験条件

	A	B	C (C-1, C-2)	D	E	F
ドデシル硫酸ナトリウム(SDS)添加量	1 倍	2 倍	1.5 倍	1.5 倍	1 倍	1 倍
無機塩添加量	1 倍	1 倍	1 倍	0.5 倍	1 倍	1 倍
泡沫回収器の設置高さ (処理開始時の水面から回収器上部までの高さ)	12 cm	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm	12 cm
泡沫の排出方法	連続	連続	連続	連続	連続	処理開始10分まで連続 以降5分毎

キーワード 有機フッ素化合物, PFOS, PFOA, PFHxS, 泡沫分離法

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目 4-17 清水建設(株) 技術研究所 TEL : 03-3820-5504

3. 試験結果および考察

図2に処理水のPFOS濃度、図3に処理水のPFOA濃度の経時変化を示す。処理時間10minで、両物質の合算値が指針値50ng/Lを下回る濃度まで低下した。短時間で処理効果が得られたため、試験条件によって処理性能に大きな違いは見られなかった。条件Aでは、処理時間40minでPFOS 0.5ng/L、PFOA 0.5ng/Lであった。PFOSおよびPFOAの処理については、薬剤の添加量が少ない条件Aが望ましいと考えられる。

図4に処理水のPFHxS濃度の経時変化を示す。PFHxSは、PFOSやPFOAと比較して濃度低下が緩やかであった。また、試験条件によって処理性能に違いが見られ、処理時間40minのPFHxS濃度は、条件A>F>E>D>C-2>C-1>Bであった。条件BのPFHxS濃度は10.3ng/Lである。泡沫回収器の設置高さを低くし、SDS添加量および無機塩添加量を増やすことで処理性能が向上したといえる。これはPFOSやPFOAよりも炭素鎖長の短いPFHxSは疎水性が小さくなるためであると考えられる³⁾。また、泡沫の排出方法については明確な影響は見られなかった。PFHxSについては指針値が定められていないため、目標とする処理濃度に応じて処理条件を設定するのが望ましい。

表2に二段処理における処理水の濃度を示す。PFOSおよびPFOAは処理時間20minで指針値を下回る濃度に低下した。PFHxSについても、前述のバッチ試験と同様に緩やかではあるが濃度低下が見られた。回収泡沫についても泡沫分離法による処理効果が得られることが確認できた。

4. まとめ

沖縄県内の地下水に泡沫分離法を適用した結果、PFOSおよびPFOAについては、10minで指針値を下回る濃度まで処理することができた。炭素鎖長の短いPFHxSについては、泡沫回収器の設置高さを低くし、薬剤の添加量を増やすことで処理性能が向上することが確認できた。また、二段処理を行うことで、回収泡沫の処理が可能であることが示唆された。今後は、二段処理や対象物質に応じた処理条件の最適化について検討していく予定である。

参考文献

1) 環境省, 令和2年度有機フッ素化合物全国存在状況把握調査の結果について, 環境省報道発表資料, 2021.
2) 青木ら, 土壌洗浄・分級による有機フッ素化合物(PFOS/PFOA)の浄化検討, 第27回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 2022.
3) T. Buckley et al., Effect of different co-foaming agents on PFAS removal from the environment by foam fractionation, Water Research, vol. 230, 2023.

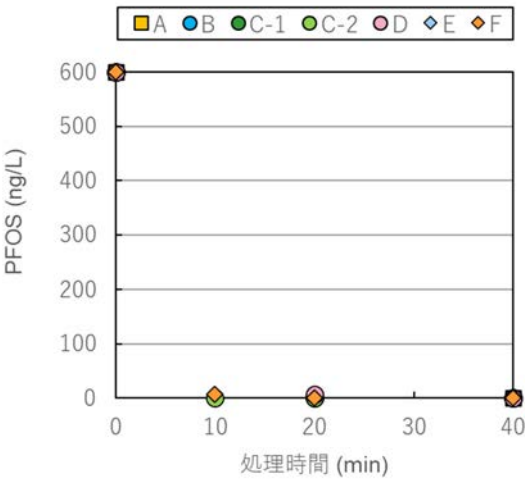


図2. PFOS濃度の経時変化

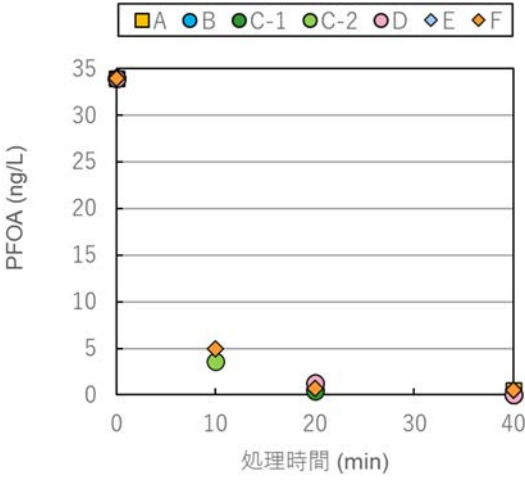


図3. PFOA濃度の経時変化

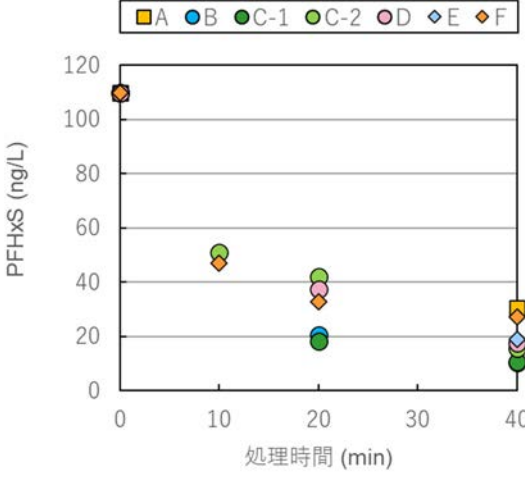


図4. PFHxS濃度の経時変化

表2. 二段処理における処理水の濃度

処理時間	(min)	0	20	40
PFOS	(ng/L)	2,400	28.2	9.0
PFOA	(ng/L)	180	8.1	1.4
合算値	(ng/L)	2,580	36.3	10.4
PFHxS	(ng/L)	410	114	22.5