

## 実証結果報告書

- 1) 提案者の名称 清水建設株式会社
- 2) 実証の区分 PFOS 等の濃度低減のための対策技術の公募【水 2・現地以外】
- 3) 提案技術の名称 分離・分解技術による P F A S 含有水の処理実証（泡沫分離／プラズマ）
- 4) 技術の分類/適用段階 泡沫分離／実機・パイロットスケール プラズマ／ラボスケール
- 5) 実証の期間 令和 7 年 8 月 21 日～令和 8 年 2 月 13 日

## 2. 技術の概要

### 2.1 原理と特徴

泡沫分離法は、様々な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除去する安価で処理効率の高い方法として広く知られており、同様の特性を持つ PFAS においても泡沫分離法が有効であることが報告<sup>2)</sup>されている。

PFAS を含有する水を処理するための装置は、図 1.1.1 のとおり処理対象水にディフューザーを通じ一定量の空気を送り込むことで底部より微細な気泡を発生させる気液接触塔を有する。ここで、水中で発生した気泡の気液界面に PFAS が吸着・濃縮し、水面に形成された泡沫層を空気とともに系外に排出させることで、最終的に気液接触塔内の処理対象水から PFAS を分離する仕組みとなっている<sup>2)</sup>。

国内での実施事例として、沖縄県内で採取された PFOS、PFOA 及び PFHxS を含む地下水に対し、指針値の 12 倍程度の濃度であっても、PFOS 及び PFOA で濃度減少率 99.8%以上（処理前 634 ng/L → 処理後 1 ng/L 以下）、PFHxS で濃度減少率 90.6%（処理前 110 ng/L → 処理後 10.3 ng/L）まで浄化できることが確認されている<sup>2)</sup>。

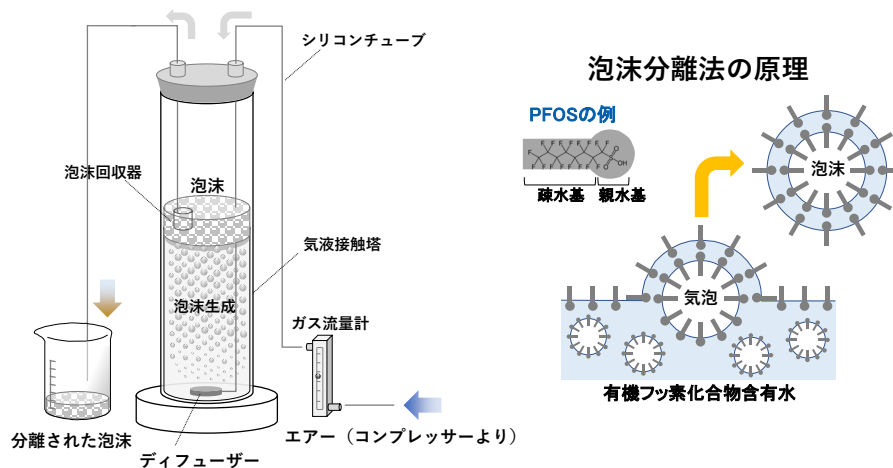


図 1.1.1 泡沫分離法の原理<sup>2)</sup>

これまでの知見では、泡沫による吸着・濃縮は PFOS、PFOA のような長鎖 PFAS に関しては高い処理能力を有する一方で、これらより短い炭素鎖 (C6 以下) を持つ短鎖 PFAS は処理が難しいという欠点が挙げられる<sup>3)</sup>。近年、欧州では短鎖 PFAS を規制対象に追加する動きが進んでおり、短鎖 PFAS は現在日本で規制されている PFOS や PFOA 等の長鎖 PFAS の代替物として使用されることも多く、潜在的な汚染が懸念される。また、長鎖 PFAS よりも水への溶解性が高く、環境中での移動性も大きいことから、将来的に規制対象となることを想定し処理技術の開発を急ぐ必要があると考える。

また、泡沫分離法で回収された泡沫は高濃度の PFAS を含有しており、焼却することにより分解処理が行われるが、焼却にはエネルギーとコストが多くかかり、燃焼に化石燃料も必要であることから、最適であってもエネルギー消費の観点からは持続可能な処理方法とは言えない。

焼却に依らない PFAS 分解処理方法の一つであるプラズマ技術は、高温の状態等で陽イオンと電子が分かれたプラズマ状態の物質を液体に照射することで水和電子をはじめとする様々なラジカルを発生<sup>4)</sup>させ、特に水和電子が PFAS の分解や脱フッ素を起こすことが知られている<sup>5)</sup> (図 1.1.2 参照)。

プラズマを用いた難分解性有機物の処理では、国内外において種々の方式が開発されているが、PFAS 分解に関しては諸外国でもラボレベルにおいて有効性が確認されているのみで、実用化には解決すべき課題が多い<sup>6)</sup>とされている。将来的には、例えば泡沫分離等の濃縮技術と組み合わせることで環境への負荷の少ない効率的な処理が実現すると考えられる。

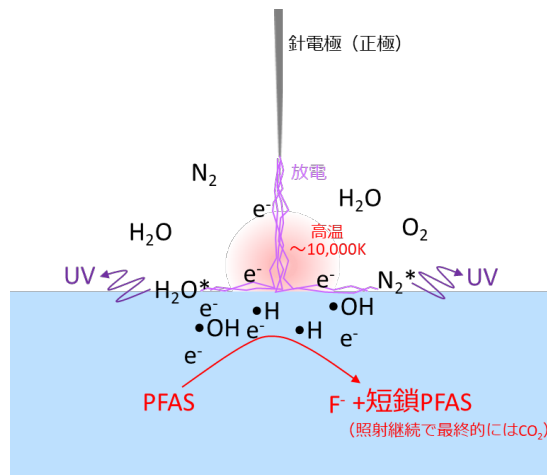


図 1.1.2 プラズマによる PFAS 分解の原理

本処理技術では、アルゴン雰囲気下においてパルス電源等の使用により水面から数 cm 放した電極からプラズマを効率良く発生させ、濃縮された PFAS 含有水（泡沫分離によって得られた回収泡沫）にプラズマを照射し、複数種のラジカルを単独もしくは複合的に作用させることにより水中の PFAS を分解する。

加えて、プラズマ処理による PFAS の分解効率を高める技術として凍結濃縮技術を併用することを提案している。同技術は、氷結晶は水分子のみから構成されることを原理とし、氷結した水分と液体中の物質を分離して物質側の濃度を高める効果  $\eta$  を利用（図 1.1.3 参照）しており、特に低濃度 PFAS 含有水をプラズマで処理する場合の前処理技術として有効<sup>\*</sup>となる。

※別途実施した PFAS 含有水（実汚染水）を用いた凍結濃縮試験（特許出願済み）において、氷結部では長鎖・短鎖 PFAS が共に「不検出」になることを確認している（図 1.1.4 参照）。

電極から発生するプラズマは、例えば紫外線等の照射による PFAS 分解技術とは異なりエネルギー照射が可能な領域が小さいため、同技術によって凍結時に濃縮物が容器の中心付近に集積される効果を利用すれば、局所的な照射による処理時間の短縮や分解効率の向上に繋がることから、プラズマ処理との組み合わせにおいて相性の良い技術になると考えられる。

ここでは、泡沫分離法で回収された泡沫を凍結濃縮技術で更に濃縮することで、より高濃度の PFAS 含有物を得ることを目的として試験を実施する。

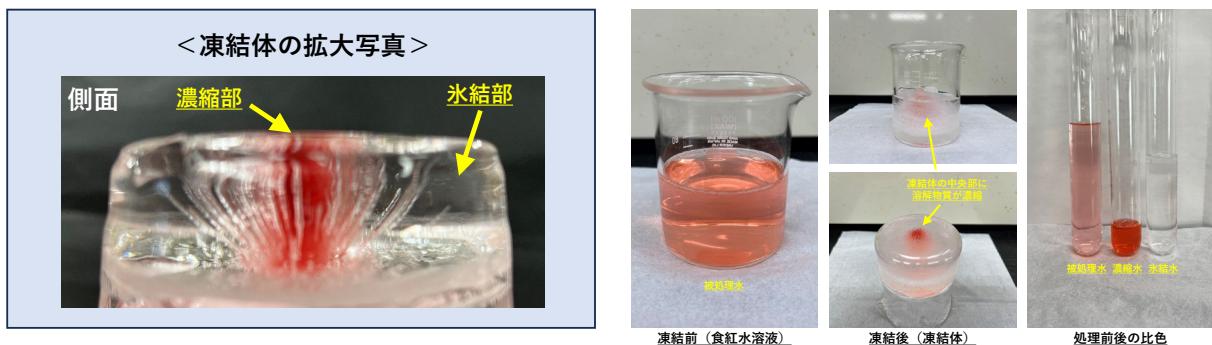


図 1.1.3 食紅水溶液を用いた凍結濃縮の例

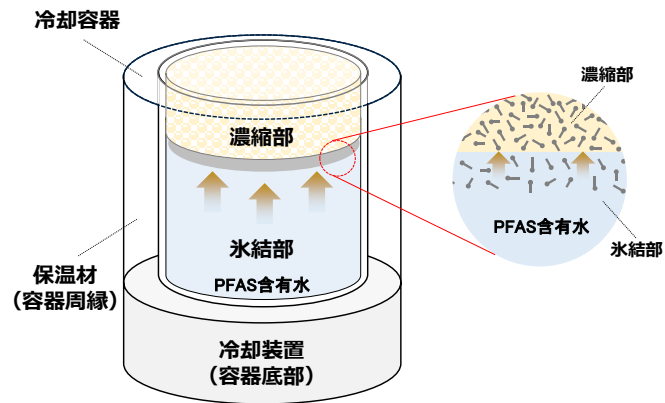


図 1.1.4 PFAS 含有水の凍結濃縮の例

- 文献 1: T. Buckley, X. Xu, V. Rudolph, M. Firouzi and P. Shukla (2022) : Review of foam fractionation as a water treatment technology, Separation Science and Technology, Volume 57, Issue 6.
- 文献 2 : 青木ら (2023) : 泡沫分離法による有機フッ素化合物 (PFOS/PFOA/PFHxS) の地下水浄化検討, 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, S4-18.
- 文献 3 : A. C. E. We, A. Zamyadi, A. D. Stickland, B. O. Clarke and S. Freguia (2024) : A review of foam fractionation for the removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from aqueous matrices, Journal of Hazardous Materials, Volume 465.
- 文献 4 : 伯田ら (2021) : 液中プラズマ反応場解析のための水和電子分光測定, 計測と制御, 第 60 巻.
- 文献 5 : 藤川 (2022) : 水中の PFOS と PFOA の分解技術の研究開発の経緯と最近の動向, 環境技術, Volume 51.
- 文献 6 : 竹内 (2024) : 水中放電プラズマ生成技術の発展と難分解性有機物処理, Journal of Plasma and Fusion Research, Vol.100, No.3 March 2024, pp. 123-127.
- 文献 7 : 脇坂ら (2001) : 凍結濃縮技術とその最近の動向, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.18, No.4, pp. 365-375.

## 2.2 技術の対策目標

本実証試験では、前節で挙げた泡沫分離及びプラズマ技術の課題を克服し、技術の有効性や経済効率性を確認するために、表 1.2.1 に示す技術目標及び評価方法を設定した。

○実証規模（総処理量）： 3 m<sup>3</sup>（1m<sup>3</sup>貯留タンク 3 基）

○実証設備処理能力：泡沫分離（バッチ式） 45.0（L/バッチ）

泡沫分離（連続式） 1.0（m<sup>3</sup>/回）

プラズマ（バッチ式） 0.7（L/バッチ）

○対象浸透水の性状：PFOS+PFOA 濃度 4,000（ng/L） ※計画時の想定

※細粒分土壌や有機物等を含む浮遊物質は泡沫分離法では除去できず阻害要因となるため、水試料に当たっては一定時間で静置された上澄み水を処理対象とする。

表 1.2.1 実証試験における技術目標と評価方法（泡沫分離/プラズマ）

項目	目的	目標値	評価
PFOS+ PFOA 濃度	浸透水中からの PFOS + PFOA 濃度の除去の評価	処理後の PFOS+PFOA 濃度 50 ng/L 以下、または処理前後の除去率等 99%以上	実証試験における公定法分析結果を基に評価  分析方法： 環水大水発第 2005281 号、 環水大土発第 2005282 号 別表 2 付表 1
短鎖 PFAS 濃度 ・ PFHxS ・ PFHxA ・ PFBS ・ PFBA	浸透水中からの短鎖 PFAS 濃度の除去の評価	処理前後の短鎖 PFAS の除去率 PFHxS：90% PFHxA：60% PFBS：70% PFBA：10%	実証試験における公定法分析結果を基に評価  分析方法： 環水大水発第 2005281 号、 環水大土発第 2005282 号 別表 2 付表 1
泡沫分離率 (泡沫分離)	低コスト性を評価	処理水量の 10%以下 PFAS 濃縮率からエネルギー効率を算出 (※)	実証試験データを基に評価
分解効率 (プラズマ)	低コスト性を評価	濃度低減率と消費電力から得られる効率を算出 電気化学酸化分解 (Electrochemical Oxidation) とエネルギー効率を比較 (※)	実証試験データを基に評価
マスバランス	対策効果を評価	各試験で得られたマスバランスにばらつきがないことを確認	実証試験データを基に評価

表中の※印は審査会における委員から意見があったもの

### 3. 実証試験結果

#### 3.1 実証試験方法

実証試験フローを図 2.1.1 に示す。

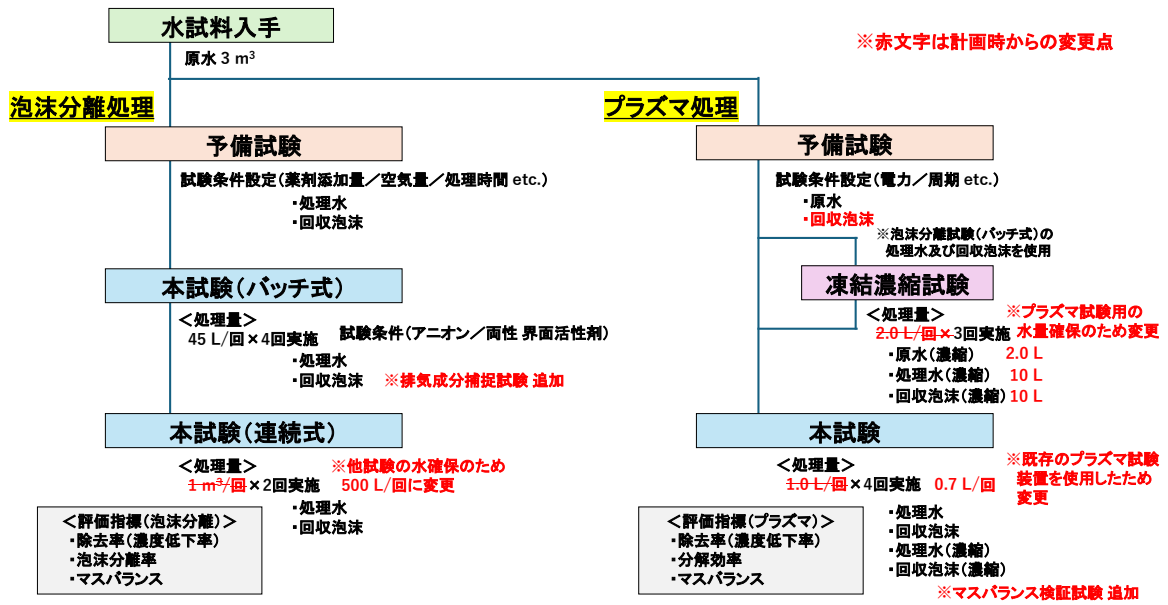


図 2.1.1 実証試験フロー

#### <泡沫分離試験>

試験結果をもとに泡沫分離による除去率（濃度低下率）、泡沫分離率、マスバランスを評価する。

##### ① 予備試験

薬剤（界面活性剤及び助剤）添加量／空気量／処理時間等を決定するための予備試験を実施する。試験に用いる装置（1 L メスシリンダーを使用）を図 2.1.2 に示す。

##### ② 本試験（バッチ式）

予備試験で得られた条件に基づき、本試験（バッチ式）を実施する。試験に用いる装置（容積 60 L：高さ 1.5 m×φ 25 cm）を図 2.1.3 に示す。この試験では、1 バッチあたり 45 L の水を処理し、泡沫分離の起泡剤として添加する界面活性剤の種類（アニオン、両性）を変更し、PFAS の除去率について評価する。

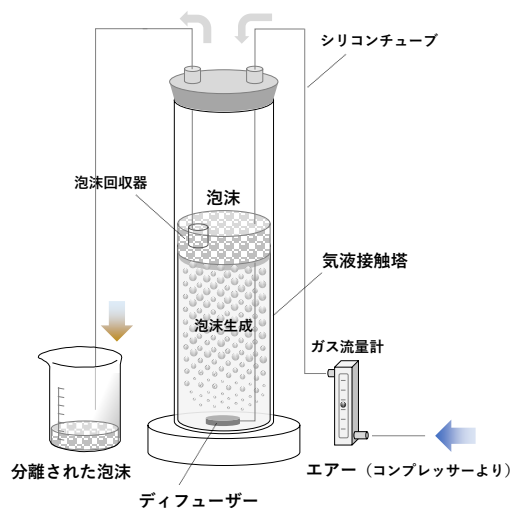


図 2.1.2 予備試験装置（泡沫分離）

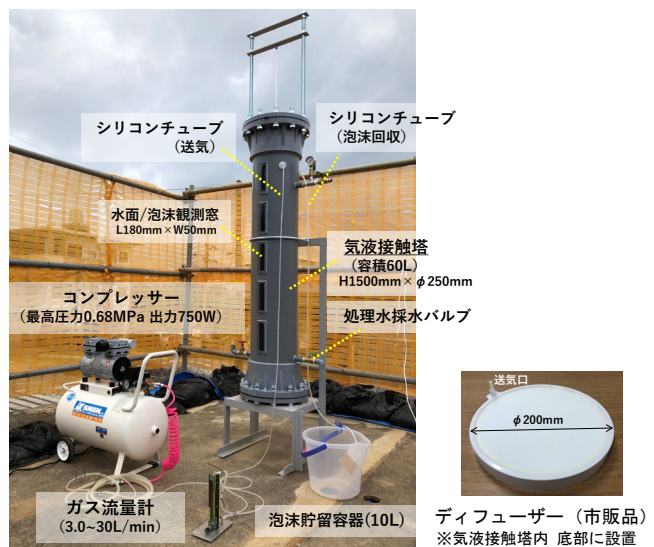


図 2.1.3 本試験（バッチ式）装置（泡沫分離）

### ③ 本試験（連続式）

本試験（バッチ式）によって計画した対策効果が得られることを確認したのち、本試験（連続式）を実施する。試験に用いる装置のフローを図 2.1.4 に示す（試験装置の詳細は 13 ページ参照）。この試験では、1 回につき 500 L の水を原水槽から連続して送水しながら処理する。泡沫分離の起泡剤として添加する界面活性剤の種類（アニオン、両性）を変更し、PFAS の除去率について評価する。

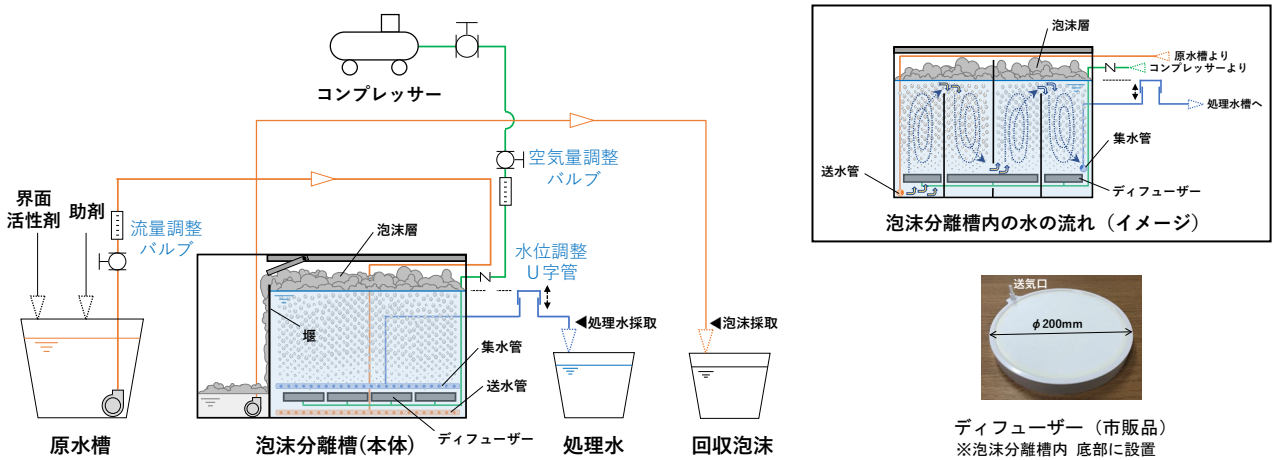


図 2.1.4 本試験（連続式）装置（泡沫分離）のフロー

## <凍結濃縮試験>

### ① 凍結濃縮試験

プラズマ処理の前段階で適用することを前提とし、プラズマによる PFAS 分解効率を高める目的で原水（各 2 L）と泡沫分離で得られた処理水及び回収泡沫（各 10 L）を用いた凍結濃縮試験を実施する。凍結によって生成された凍結体の氷結部と濃縮部の PFAS 濃度を測定し、濃縮効果を評価する。

## <プラズマ試験>

試験結果をもとにプラズマによる除去率（濃度低下率）、分解効率、マスバランスを評価する。

### ① 予備試験（プラズマ）

プラズマ発生に必要な電力や照射周期を決定するための予備試験を実施する。図 2.1.5 の装置（試験装置の詳細は 18 ページ参照）にて原水（0.7 L）を処理する。

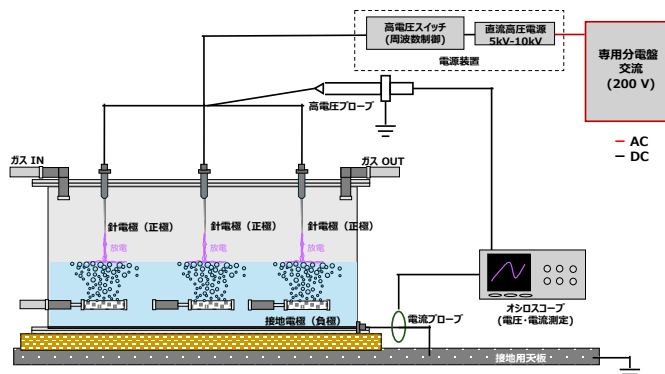


図 2.1.5 試験装置（プラズマ）のフロー※

### ② 本試験（プラズマ）

予備試験で決定した条件に基づき、泡沫分離で得られた処理水及び回収泡沫、それらを凍結濃縮した処理水（濃縮）及び回収泡沫（濃縮）について、プラズマ試験を実施する。試験装置は予備試験（プラ

ズマ) 時と同じものを用いる。この試験では1 バッチあたり 0.7 L の水を処理し、試験によって得られたプラズマ処理水について、PFAS 濃度を測定する。

## 3.2 実証試験結果

### <泡沫分離試験>

#### ① 予備試験結果

薬剤（界面活性剤及び助剤）添加量／空気量／処理時間等を決定するための予備試験を実施した。試験条件は以下のとおりである。

○処理対象：原水（1.0 L／バッチ）

○界面活性剤添加量：アニオン界面活性剤（ドデシル硫酸ナトリウム） 10 ppm、15 ppm、20 ppm

無機塩（塩化ナトリウム） ※アニオン界面活性剤の助剤として必要に応じ添加

両性界面活性剤（主成分：脂肪酸アミドプロピルベタイン） 5 ppm、10 ppm、15 ppm

※"ppm"は v/v による表記

○送気量：1.2 L/min

○処理時間：10 分（薬剤添加量に応じて適宜調整）

表 2.2.1 にアニオン界面活性剤を用いた予備試験結果を示す。

表 2.2.1 予備試験結果（アニオン界面活性剤 添加）

アニオン界面活性剤添加量	10 ppm					15 ppm				20 ppm			
	処理前	処理後	除去率(%)	回収泡沫	濃縮倍率	処理後	除去率(%)	回収泡沫	濃縮倍率	処理後	除去率(%)	回収泡沫	濃縮倍率
PFOS	280	33	88.2	5,700	20.4	12	95.7	1,800	6.4	11	96.1	1,700	6.1
PFOA	1,900	920	51.6	27,000	14.2	360	81.1	13,000	6.8	400	78.9	11,000	5.8
PFHxS	180	120	33.3	1,000	5.6	70	61.1	810	4.5	78	56.7	760	4.2
PFHxA	15,000	15,000	0.0	23,000	1.5	15,000	0.0	23,000	1.5	17,000	-13.3	21,000	1.4
PFBS	1,700	1,900	-11.8	1,700	1.0	1,600	5.9	1,600	0.9	1,600	5.9	1,700	1.0
PFBA	4,600	4,900	-6.5	5,200	1.1	5,100	-10.9	4,800	1.0	5,100	-10.9	5,800	1.3
アニオン界面活性剤 (mg/L)		0.04				<0.02				<0.02			

※除去率 = (1 - 処理後 / 処理前) × 100 (%) ※濃縮倍率 = 回収泡沫 / 処理前

PFOS においては、アニオン界面活性剤添加量 10 ppm の場合、原水濃度（処理前）280 ng/L に対し、泡沫分離後の処理水の濃度（処理後）は 33 ng/L であり除去率は 88.2%となった。添加量を 20 ppm まで増加した場合でも 96.1%であり、濃度は目標値の 50 ng/L 以下となったが除去率の目標値(99%以上)を下回る結果であった。回収泡沫では、界面活性剤添加量 10 ppm の場合、原水濃度（処理前）と比較した濃縮倍率は 20.4 倍、一方で添加量を 20 ppm に増加した場合は 6.1 倍に低下した。

PFOA においては、アニオン界面活性剤添加量 10 ppm の場合、原水濃度（処理前）1,900 ng/L に対し、処理水の濃度（処理後）は 920 ng/L であり除去率は 51.6%となった。添加量を 20 ppm まで増加した場合でも 78.9%と除去率の目標値を下回る結果であった。回収泡沫では、界面活性剤添加量 10 ppm の場合、濃縮倍率は 14.2 倍となったが、添加量を 20 ppm に増加した場合は 5.8 倍に低下した。

短鎖 PFAS に関しては、界面活性剤添加量 10 ppm の場合の除去率は、PFHxS (33.3%) 以外は濃度低下はほとんど見られず、添加量を 20 ppm に増加した場合でも、除去率、濃縮倍率ともに向上は認められなかった。

また、処理水中に残留しているアニオン界面活性剤は、添加量が 10 ppm の場合に 0.04 mg/L 検出された以外は 0.02 mg/L 未満であり、何れも水道法第 4 条に基づく水質基準値（陰イオン界面活性剤：0.2 mg/L 以下）を下回った。

表 2.2.2 に両性界面活性剤を用いた予備試験結果を示す。

表 2.2.2 予備試験結果（両性界面活性剤 添加）

両性界面活性剤添加量	単位 (ng/L)												
	処理前	5 ppm				10 ppm				15 ppm			
	処理後	除去率(%)	回収泡沫	濃縮倍率	処理後	除去率(%)	回収泡沫	濃縮倍率	処理後	除去率(%)	回収泡沫	濃縮倍率	
PFOS	280	3	98.9	2,600	9.3	3	98.9	5,900	21.1	2	99.3	4,000	14.3
PFOA	1,900	9	99.5	28,000	14.7	5	99.7	82,000	43.2	5	99.7	23,000	12.1
PFHxS	180	<1	99.9	2,600	14.4	<1	99.9	6,000	33.3	<1	99.9	1,900	10.6
PFHxA	15,000	4,200	72.0	270,000	18.0	6,000	60.0	420,000	28.0	2,800	81.3	160,000	10.7
PFBS	1,700	470	72.4	17,000	10.0	690	59.4	30,000	17.6	250	85.3	17,000	10.0
PFBA	4,600	4,300	6.5	6,300	1.4	4,300	6.5	5,700	1.2	4,500	2.2	5,800	1.3

※除去率 = (1 - 処理後 / 処理前) × 100 (%)      ※濃縮倍率 = 回収泡沫 / 処理前

PFOS においては、両性界面活性剤添加量 5 ppm の場合、原水濃度（処理前）280 ng/L に対し、泡沫分離後の処理水の濃度（処理後）は 3 ng/L であり除去率は 98.9% となった。添加量を 15 ppm まで増加した場合は 99.3% と除去率の目標値（99% 以上）を上回った。回収泡沫では、界面活性剤添加量 5 ppm の場合、原水濃度（処理前）と比較した濃縮倍率は 9.3 倍、添加量を 15 ppm に増加した場合は 14.3 倍に上昇した。

PFOA においては、両性界面活性剤添加量 5 ppm の場合、原水濃度（処理前）1,900 ng/L に対し、処理水の濃度（処理後）は 9 ng/L であり、アニオン界面活性剤添加時と比較して大幅に除去率が向上し、99.5% であった。添加量を 15 ppm に増加した場合は 99.7% にまで上昇し、濃度及び除去率において目標値を上回った。回収泡沫では、添加量 5 ppm の場合の濃縮倍率は 14.7 倍、添加量を 15 ppm まで増加した場合は 12.1 倍に低下した。

短鎖 PFAS に関しては、界面活性剤添加量 5 ppm の場合の除去率は、PFHxS（99.9%）、PFHxA（72.0%）、PFBS（72.4%）、PFBA（6.5%）、界面活性剤添加量 15 ppm の場合は、PFHxS（99.9%）、PFHxA（81.3%）、PFBS（85.3%）、PFBA（2.2%）と除去率の向上が認められた。

このため、本試験では、アニオン界面活性剤添加量を処理対象水に対して 10 ppm、両性界面活性剤は 5 ppm となるように予め添加することとした。

## ② 本試験（バッチ式）結果

予備試験で得られた条件に基づき、泡沫分離の起泡剤として添加する界面活性剤の種類（アニオン、両性）を変更し、PFAS の除去率、泡沫分離率及びマスバランス（物質収支）について評価した。

試験条件は以下のとおりである。

○処理対象：原水（45 L / バッチ）

○界面活性剤添加量：アニオン界面活性剤（ドデシル硫酸ナトリウム） 10 ppm

無機塩（塩化ナトリウム） ※アニオン界面活性剤の助剤として添加

両性界面活性剤（主成分：脂肪酸アミドプロピルベタイン） 5 ppm

※"ppm"は v/v による表記

○送気量：15 L/min（泡沫発生量に応じて適宜調整）

○処理時間：18 min

表 2.2.3 に本試験（バッチ式）結果を示す。

表 2.2.3 本試験（バッチ式）結果

単位 (ng/L)

	アニオン界面活性剤添加					両性界面活性剤添加				
	処理前	処理後	除去率(%)	回収泡沫	濃縮倍率	処理前	処理後	除去率(%)	回収泡沫	濃縮倍率
PFOS	270	<1	99.9	1,900	7.0	190	<1	99.9	3,200	16.8
PFOA	2,700	2	99.9	19,000	7.0	2,400	<1	99.9	40,000	16.7
PFHxS	150	3	98.0	1,100	7.3	110	<1	99.9	1,800	16.4
PFHxA	18,000	13,000	27.8	30,000	1.7	15,000	3,900	74.0	200,000	13.3
PFBS	1,800	1,700	5.6	2,200	1.2	1,300	610	53.1	14,000	10.8
PFBA	5,200	5,200	0.0	5,000	1.0	4,300	4,200	2.3	4,900	1.1
アニオン界面活性剤 (mg/L)		0.06								

※除去率 = (1 - 処理後 / 処理前) × 100 (%)      ※濃縮倍率 = 回収泡沫 / 処理前

PFOS においては、アニオン界面活性剤添加の場合、原水濃度（処理前）270 ng/L に対し、処理水の濃度（処理後）は 1 ng/L 未満であり除去率は 99.9%であった。両性界面活性剤添加の場合も同様に 1 ng/L 未満と除去率の目標値（99%以上）を上回った。回収泡沫では、アニオン界面活性剤の濃縮倍率は 7.0 倍、両性界面活性剤では 16.8 倍となった。

PFOA においては、アニオン界面活性剤添加の場合、原水濃度（処理前）2,700 ng/L に対し、処理水の濃度（処理後）は 2 ng/L であり除去率は 99.9%であった。両性界面活性剤添加の場合は 1 ng/L 未満と、何れも目標値を上回った。回収泡沫では、アニオン界面活性剤の濃縮倍率は PFOS と同じく 7.0 倍、両性界面活性剤では 16.7 倍となった。

短鎖 PFAS に関しては、アニオン界面活性剤の場合の除去率は、PFHxS (98.0%)、PFHxA (27.8%)、PFBS (5.6%)、PFBA (0.0%) と短鎖 PFAS の除去率の目標値を下回った。両性界面活性剤の場合は、PFHxS (99.9%)、PFHxA (74.0%)、PFBS (53.1%)、PFBA (2.3%) と目標値を下回ったが、アニオン界面活性剤添加と比較して除去率の向上が認められた。

また、処理水中に残留しているアニオン界面活性剤は、予備試験と同程度（0.06 mg/L）で検出されており、水質基準値（陰イオン界面活性剤：0.2 mg/L 以下）を下回っているものの処理時間（泡沫回収に要する時間）を長く確保する必要があると判断した。

泡沫分離処理では、処理水における除去率（濃度低下率）及び濃縮倍率に加え、泡沫回収量がエネルギー効率や産業廃棄物発生量及びコストに大きく影響する。

バッチ式試験における泡沫回収量は、アニオン界面活性剤添加の場合は、原水の量（45 L）に対し 4.0 L（泡沫分離率：9.0%）、両性界面活性剤添加の場合は 2.2 L（泡沫分離率：4.9%）であり、何れの条件においても目標値を上回ったことに加え、泡沫分離に両性界面活性剤を用いることで、泡沫回収量が約 50%に下げられることが判明した。

図 2.2.1 にマスバランス（物質収支）検証結果を示す。

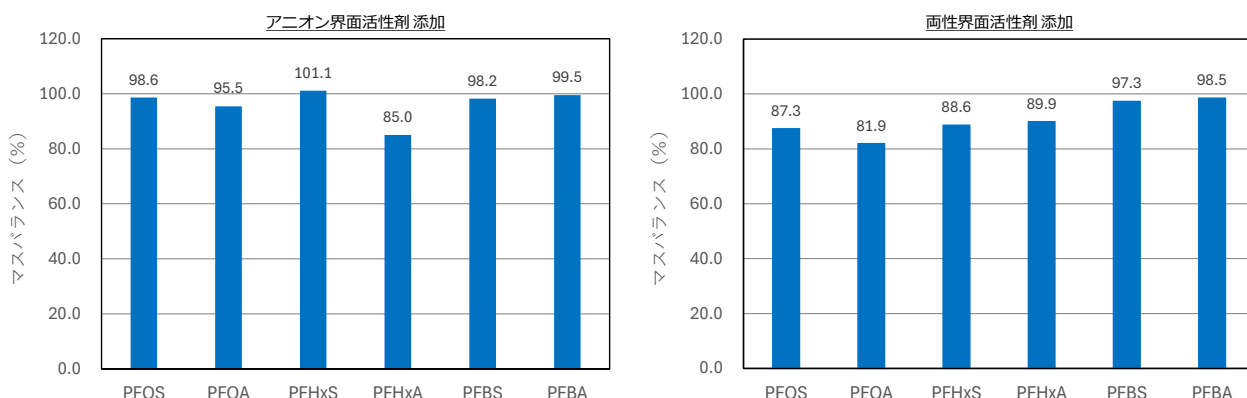


図 2.2.1 マスバランス検証結果

マスバランスは、PFAS の物質毎の濃度に水量（原水、処理水、泡沫回収量）を乗じ、処理前後の物質量を比較したものである。検証の結果、概ね 80%~100%の収支が得られており、各試験でのバラつきはないことが分かる。一方で、PFOS、PFOA、PFHxS についてはアニオン界面活性剤添加よりも両性界面活性剤添加の方が回収量が小さい傾向にある。更なる検証が必要であるが、物質収支に差が生じる原因として、界面活性剤に捕捉された PFAS が装置や配管、容器等の壁面に付着することで一部が回収されずに残存していることや気泡の破裂によって生成されるエアロゾルが空気とともに装置から排出される可能性<sup>1)</sup>が考えられる。

そこで、泡沫分離処理の排気中に PFAS が存在しているかどうかを確認するため、図 2.2.2 に示す装置を用いて排気成分捕捉試験を実施した。

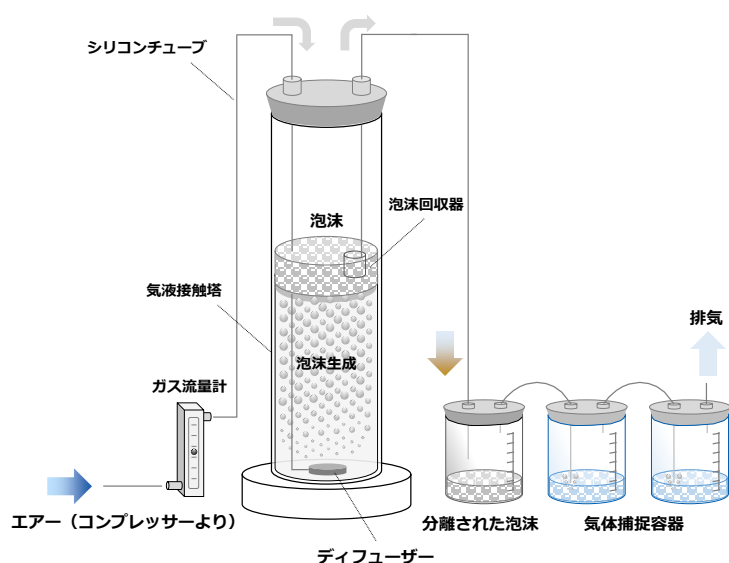


図 2.2.2 排気成分捕捉試験概要

前述のバッチ式試験条件のもとで排出された気体を二連に設置した気体捕捉容器（超純水：各 2.0 L）を通したのち、各超純水（トラップ水①②）中の PFAS 濃度を測定した。

表 2.2.4 に排気成分捕捉試験結果を示す。

試験は、アニオン界面活性剤を添加した場合と両性界面活性剤を添加した場合のそれぞれで実施した。また、両性界面活性剤を添加した試験においてトラップ水①で比較的高い値（PFOA：4 ng/L、PFHxA：7 ng/L）を検出したため、検証のために同条件で再試験（2 回目）を行った。

表 2.2.4 排気成分捕捉試験結果

	アニオン界面活性剤添加		両性界面活性剤添加(1回目)		両性界面活性剤添加(2回目)	
	トラップ水①	トラップ水②	トラップ水①	トラップ水②	トラップ水①	トラップ水②
PFOS	<1	<1	<1	<1	<1	<1
PFOA	1	<1	4	<1	1	<1
PFHxS	<1	<1	<1	<1	<1	<1
PFHxA	1	<1	7	2	<1	1
PFBS	<1	<1	<1	<1	<1	<1
PFBA	<1	<1	<1	<1	<1	<1

単位 (ng/L)

試験の結果、アニオン界面活性剤及び両性界面活性剤添加ともに排気中に僅かながら PFAS が存在することが確認されたことから、本技術の本格運用時には『排気成分捕捉装置』の設置を標準とするものとした。

文献 1 : S. J. Smith , J. Lewis, K. Wiberg, E. Wall and L. Ahrens (2023) : Foam fractionation for removal of per- and polyfluoroalkyl substances Towards closing the mass balance, Science of the Total Environment, Volume 871.

### ③ 本試験（連続式）結果

本試験（バッチ式）にて計画した対策目標を上回る効果が得られることを確認したことから、本試験（連続式）を実施した。連続式試験においても、泡沫分離の起泡剤として添加する界面活性剤の種類（アニオン、両性）を変更し、PFAS の除去率及び泡沫分離率について評価した。

試験条件は以下のとおりである。

- 処理対象：原水（約 500 L/回）
- 界面活性剤添加量：アニオン界面活性剤（ドデシル硫酸ナトリウム） 10 ppm  
無機塩（塩化ナトリウム） ※アニオン界面活性剤の助剤として添加  
両性界面活性剤（主成分：脂肪酸アミドプロピルベタイン） 5 ppm  
※"ppm"は v/v による表記
- 処理水量：2.6 L/min
- 送気量：12~15 L/min × 4 基（ディフューザー）
- 滞留時間（HRT）：約 1.5 hr（処理装置内の水位調整に伴い若干の変動あり）

試験に用いた試験装置（本体：L 1,000 mm×W 250 mm×H 1,250 mm）を図 2.2.3 に示す。

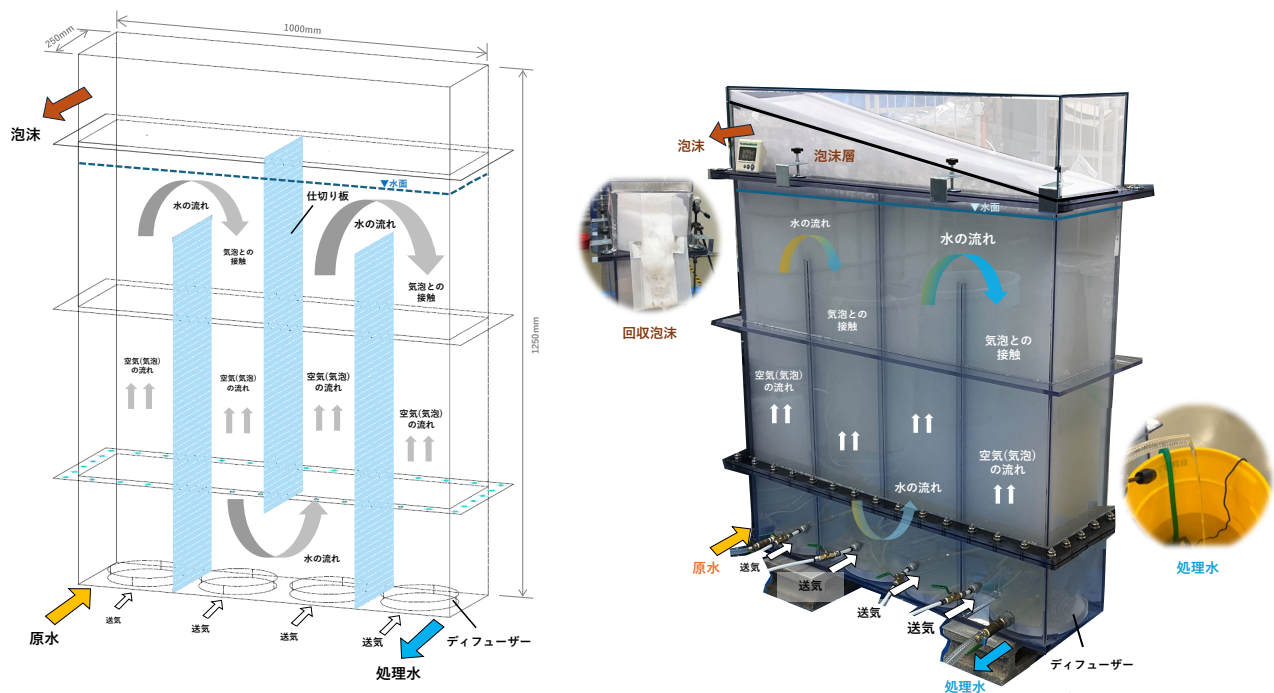


図 2.2.3 本試験（連続式）装置（泡沫分離） ※新規製作

表 2.2.5 に本試験（連続式）結果を示す。

表 2.2.5 本試験（連続式）結果

	アニオン界面活性剤添加					両性界面活性剤添加				
	処理前	処理後	除去率(%)	回収泡沫	濃縮倍率	処理前	処理後	除去率(%)	回収泡沫	濃縮倍率
PFOS	180	2	98.9	8,300	46.1	310	<1	99.9	6,600	21.3
PFOA	3,100	12	99.6	130,000	41.9	2,700	<1	99.9	83,000	30.7
PFHxS	120	3	97.5	5,700	47.5	160	<1	99.9	3,500	21.9
PFHxA	15,000	12,000	20.0	200,000	13.3	14,000	2,000	85.7	1,000,000	71.4
PFBS	1,200	1,300	-8.3	5,300	4.4	1,200	300	75.0	77,000	64.2
PFBA	4,500	3,400	24.4	4,000	0.9	4,700	3,500	25.5	5,100	1.1
アニオン界面活性剤 (mg/L)		<0.02								

※除去率 = (1 - 処理後 / 処理前) × 100 (%)      ※濃縮倍率 = 回収泡沫 / 処理前

PFOS においては、アニオン界面活性剤添加の場合、原水濃度（処理前）180 ng/L に対し、処理水の濃度（処理後）は 2 ng/L であり除去率は 98.9%であった。両性界面活性剤添加の場合は 1 ng/L 未満と除去率の目標値（99%以上）を上回った。回収泡沫では、アニオン界面活性剤の濃縮倍率は 46.1 倍、両性界面活性剤では 21.3 倍となった。

PFOA においては、アニオン界面活性剤添加の場合、原水濃度（処理前）3,100 ng/L に対し、処理水の濃度（処理後）は 12 ng/L であり除去率は 99.6%であった。両性界面活性剤添加の場合は 1 ng/L 未満と、何れも目標値を上回った。回収泡沫では、アニオン界面活性剤の PFOA 濃縮倍率は 41.9 倍、両性界面活性剤では 30.7 倍となった。

短鎖 PFAS に関しては、アニオン界面活性剤の場合の除去率は、PFHxS (97.5%)、PFHxA (20.0%)、PFBS (-)、PFBA (24.4%) と目標値を下回った。一方で、両性界面活性剤の場合は、PFHxS (99.9%)、PFHxA (85.7%)、PFBS (75.0%)、PFBA (25.5%) とアニオン界面活性剤と比較して除去率が向上し、目標値を上回った。

また、処理水中のアニオン界面活性剤は 0.02 mg/L 未満であった。なお、水道法第 4 条に基づく水質基準値（陰イオン界面活性剤：0.2 mg/L 以下）は、泡立ち発生の目安として定められていることから、本実証においても処理水の泡立ち状況について処理前との比較を試みた（写真 2.2.1 参照）。



写真 2.2.1 処理前後の泡立ち状況（5 秒間振とう後、5 秒間静置）

連続式試験における泡沫回収量は、アニオン界面活性剤添加の場合は、原水の量（2.6 L/min）に対し 0.18 L/min（泡沫分離率：6.9%）、両性界面活性剤添加の場合は 0.084 L/min（泡沫分離率：3.2%）であり、連続式処理においても目標値を上回ったことに加え、両性界面活性剤を用いることで泡沫回収量が 50%以下になることが判明した。

また、バッチ式での処理と比較し、連続式の場合は気液接触塔内の滞留時間を大幅に長く（バッチ式：18分→連続式：1.5時間）し、かつ水の流れを空気と対向させることで、短鎖 PFAS の除去率や回収泡沫の濃縮倍率が向上することが確認された。

泡沫分離処理において、界面活性剤の添加量と送気量及び泡沫回収量は密接な関係にある。送気量は泡沫発生量に応じて適宜調整しながら処理を継続したが、送気量が多くなると短時間で泡沫が回収できるが、気泡サイズが大きくなることで PFAS の濃縮にはマイナスの要素となる。逆に送気量が少ないと泡沫の発生自体が抑えられることに加え、泡沫の回収に時間を要する。本実証では、送気量は気泡サイズが水面付近でφ1mm程度（写真 2.2.2 参照）となることを目安として調整した。

なお、これまでの試験で用いたディフューザーをマイクロバブル（微細気泡）発生装置に変えることで PFAS の濃縮率を更に高める手法が考えられるが、マイクロバブル発生装置では空気の絶対量が少なく、本実証で用いる泡沫分離試験装置では泡沫の排出（回収）が困難になると考えられたため、適用は検討しなかった。



写真 2.2.2 本試験（連続式）における水面付近の泡沫（気泡サイズ）の状況

表 2.2.6 に自社（清水建設株式会社）にて実施した、PFAS 以外の物質を対象とした処理前（原水）と泡沫分離処理後の水質（処理後／回収泡沫）の比較結果を示す。

表 2.2.6 泡沫処理前後の水質比較

	単位	処理前	アニオン界面活性剤添加 処理後	両性界面活性剤添加	
				処理後	回収泡沫
pH	-	8.19	8.44	8.50	8.53
EC	mS/m	195	364	193	194
Na	mg/L	140	400	140	140
Cl	mg/L	92	940	100	100
F	mg/L	0.46	0.41	0.38	0.38
K	mg/L	53	48	49	49
Ca	mg/L	24	18	18	18
Mn	mg/L	0.034	0.00046	ND	0.00067
Fe	mg/L	ND	ND	ND	ND
TC	mg/L	120	120	170	110
IC	mg/L	97	90	94	91
TOC	mg/L	26	25	81	18

分析：清水建設株式会社

泡沫分離に際して界面活性剤及び助剤以外の薬剤の添加がないことや、PFAS の除去に生物・化学的な反応を伴わないことから、泡沫分離は処理前後の水質に影響を与えないことが分かる。このため、既存の他の水処理（生物処理／活性炭等）フローへ組み込むことが容易となる。

## <凍結濃縮試験>

### ① 試験結果

原水、泡沫分離（バッチ式：アニオン界面活性剤添加）で得られた処理水及び回収泡沫を用いて、凍結濃縮試験を実施した。

試験条件は以下のとおりである。

○処理対象：原水（2.0 L/回）

泡沫分離（バッチ式）処理水、回収泡沫（各 10 L/回）

○冷凍装置：市販 直冷式電気冷凍庫（容量：100 L 規模）

○冷凍温度：マイナス 18℃

○冷凍時間：各 5 日間

凍結濃縮試験状況を図 2.2.4 に示す。

処理対象となる水を所定の容器に入れ、容器上面以外の周囲を保温材で覆ったのち、市販の直冷式電気冷凍庫にて凍結（緩速冷凍）させた。5 日間経過後に冷凍庫より容器を取り出したのち、凍結体の濃縮状況を確認しながら濃縮部（容器底の中央部）と氷結部（容器上面の周縁部）の一部分を切り出し、解凍したものを分析試料（濃縮水、氷結水）とした。

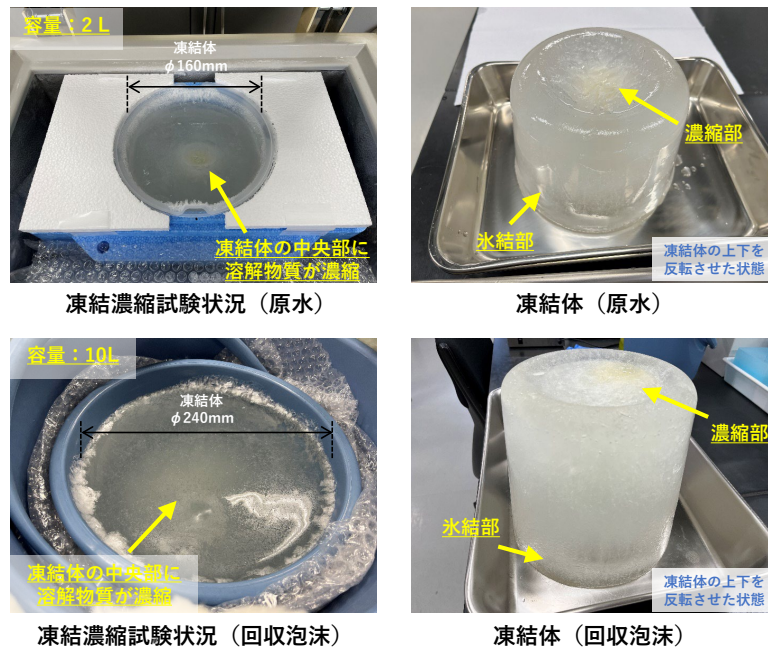


図 2.2.4 凍結濃縮試験状況

表 2.2.7～表 2.2.9 に試験結果を示す。

表 2.2.7 凍結濃縮（原水）試験結果

単位 (ng/L)

	原水				
	処理前	濃縮水	濃縮倍率	氷結水	除去率(%)
PFOS	190	770	4.1	28	85.3
PFOA	2,400	7,100	3.0	290	87.9
PFHxS	110	310	2.8	20	81.8
PFHxA	15,000	45,000	3.0	2,000	86.7
PFBS	1,300	3,800	2.9	190	85.4
PFBA	4,300	12,000	2.8	560	87.0

※濃縮倍率=濃縮水/処理前 ※除去率=(1-氷結水/処理前)×100 (%)

表 2.2.8 凍結濃縮（処理水）試験結果

	単位 (ng/L)				
	泡沫分離（バッチ式（アニオン界面活性剤添加））処理水				
	処理前	濃縮水	濃縮倍率	氷結水	除去率(%)
PFOS	2	77	38.5	<1	99.9
PFOA	26	580	22.3	26	0.0
PFHxS	28	120	4.3	<1	99.9
PFHxA	15,000	63,000	4.2	2,100	86.0
PFBS	1,500	6,900	4.6	190	87.3
PFBA	4,900	21,000	4.3	670	86.3

表 2.2.9 凍結濃縮（回収泡沫）試験結果

	単位 (ng/L)				
	泡沫分離（バッチ式（アニオン界面活性剤添加））回収泡沫				
	処理前	濃縮水	濃縮倍率	氷結水	除去率(%)
PFOS	3,000	16,000	5.3	200	93.3
PFOA	23,000	190,000	8.3	3,300	85.7
PFHxS	1,800	8,700	4.8	160	91.1
PFHxA	23,000	170,000	7.4	3,000	87.0
PFBS	1,900	15,000	7.9	200	89.5
PFBA	4,600	38,000	8.3	550	88.0

※濃縮倍率＝濃縮水／処理前 ※除去率＝（1－氷結水／処理前）×100（%）

原水を凍結させた結果、PFOS、PFOAに加え、長鎖 PFAS よりも溶解性が高い短鎖 PFAS についても物質に関わらず概ね均等な割合で濃縮（平均濃縮倍率 3.1 倍）されていることが分かる。また、原水の濃度（処理前）に対する氷結水の濃度の割合を示す除去率（濃度低下率）についても、すべての PFAS において平均で 85.7%という高い効果が確認された。

泡沫分離（バッチ式）で得られた処理水及び回収泡沫についても同様に凍結濃縮を行った結果、原水と同程度の分離が行われていることが確認された。

特に、原水の濃度（PFOS：190 ng/L、PFOA：2,400 ng/L）と凍結濃縮された回収泡沫の濃度（PFOS：16,000、PFOA：190,000 ng/L）を比較した場合は、平均で 81.7 倍に濃縮されていることになり、「泡沫分離」と「凍結濃縮」を組み合わせることによる高い PFAS 濃縮効果が期待できる。

## <プラズマ試験>

### ① 予備試験結果

プラズマ処理における電源条件の検討及びアニオン界面活性剤の添加有無による PFAS の分解確認を行うことを目的として予備試験を実施した。

試験条件は以下のとおりである。

○処理対象：原水（0.3 L/バッチ）、泡沫分離回収泡沫（0.7 L/バッチ）

○界面活性剤添加量：アニオン界面活性剤（ドデシル硫酸ナトリウム：SDS） 10 ppm

※"ppm"は v/v による表記

○送気量（アルゴン）： 100 mL/min（針電極 1 本リアクター）、  
150 mL/min（針電極 3 本リアクター）

○処理時間：60 min

○針電極の材質：TIG 溶接用電極棒（タングステン電極棒 トリウム入り）

○針電極 1 本リアクター電源：電圧平均 2 kV、電流平均 15 A、周波数 100 Hz、パルス幅 4 μs、  
平均 12 W、パルス DC 電圧

針電極 3 本リアクター電源：電圧平均 5 kV、電流平均 10 A、周波数 100 Hz、パルス幅 4 μs、  
平均 20 W、パルス DC 電圧

原水を対象とする予備試験で使用したリアクターを図 2.2.5 に示す。予備試験では針電極 1 本及び針電極 3 本のリアクターを用い、処理中の放電状況をもとに電源条件、アルゴンガスの供給量等の調整を行った。

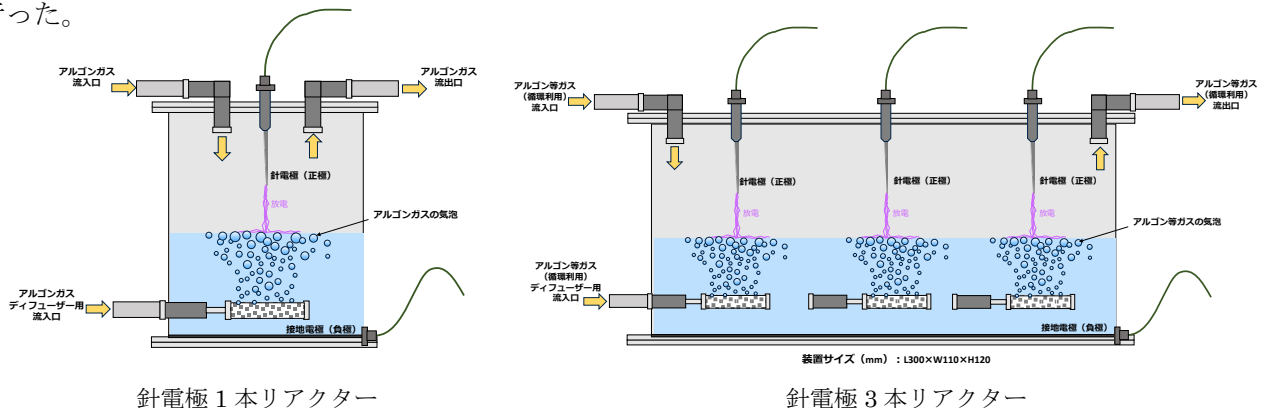


図 2.2.5 プラズマ処理で用いたリアクター

予備試験結果を表 2.2.10 に示す。

表 2.2.10 原水を用いた予備試験結果（自社分析）

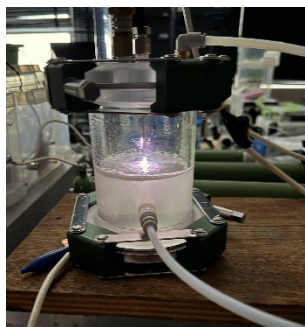
	単位(ng/L)				
	原水	SDS添加無し（針1本）		SDS添加有り（針3本）	
	処理前	処理後	分解率(%)	処理後	分解率(%)
PFOS	120	130	-8.3	<20	99.2
PFOA	1,900	1,700	10.5	160	91.6

※分解率 = (1 - 処理後 / 処理前) × 100 (%)

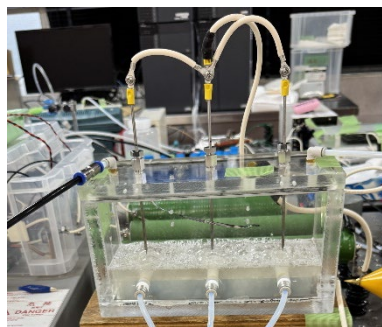
分析：清水建設株式会社

プラズマ処理の際に SDS を添加しない場合は、PFOS、PFOA ともに分解が僅かであることが確認された。プラズマ処理においては、プラズマが水面に照射されることで水面の照射範囲及びその周辺に存在する PFAS が分解されると考えられる。

写真 2.2.3 に SDS を添加しない場合と添加した場合の水面の泡沫の発生状況を示す。



針電極 1 本リアクター (SDS 添加無し)



針電極 3 本リアクター (SDS 添加有り)

写真 2.2.3 SDS の添加有無による水面付近の泡沫発生状況の比較

PFAS は気液界面に濃縮される特性があることから、水面付近において気泡による気液界面を増やすことで、プラズマ照射範囲の PFAS 濃度を局所的に高くすることが重要であると考えられる。比較のために実施した針電極 3 本のリアクターを用いた SDS を添加した系での試験では PFOS 及び PFOA の分解率はそれぞれ 99.2%、91.6%に向上することが確認された。このため、本試験では処理対象水に予め SDS を添加する条件にてプラズマ処理を行うこととした。

次に、SDS を用いた泡沫分離試験 (バッチ式) で得られた回収泡沫を対象としてプラズマ処理を行った。試験結果を表 2.2.11 に示す。処理対象とした回収泡沫は予め SDS を含有していることから、新たに SDS を添加しない条件においても PFOS、PFOA の分解は確認された。なお、回収泡沫に SDS を追加で添加した条件の方が PFOS は分解率が高い傾向であったことから、本試験では SDS が既に含まれる処理対象水でもプラズマ処理の際に改めて SDS を添加することとした。

なお、60min のプラズマ照射後、アクリル内側に曇りや結露が少し見られた。若干の水温上昇もあると考えられる。この現象は他のプラズマ照射試験でも同様であった。

表 2.2.11 回収泡沫を用いた予備試験結果

	回収泡沫	単位 (ng/L)			
		SDS 添加無し		SDS 添加有り	
	処理前	処理後	分解率 (%)	処理後	分解率 (%)
PFOS	7500	810	89.2	140	98.1
PFOA	47,000	550	98.8	1,200	97.4

※分解率 = (1 - 処理後 / 処理前) × 100 (%)

## ② 本試験結果

SDS を用いた泡沫分離試験 (バッチ式) で得られた試料を「SDS 泡沫分離処理水」、「SDS 泡沫分離回収泡沫」、泡沫分離試験 (バッチ式) で得られた試料を凍結濃縮したものを「SDS 泡沫分離処理水濃縮水」、「SDS 泡沫分離回収泡沫濃縮水」とし、それぞれを対象としてプラズマ処理 (本試験) を実施した。

試験条件は以下のとおりである。

○処理対象：「SDS 泡沫分離処理水」、「SDS 泡沫分離回収泡沫」、「SDS 泡沫分離処理水濃縮水」、「SDS 泡沫分離回収泡沫濃縮水」 (0.7 L / バッチ)

○界面活性剤添加量：アニオン界面活性剤 (ドデシル硫酸ナトリウム : SDS) 10 ppm

※"ppm"は v/v による表記

○送気量 (アルゴン) : 150 mL/min (針電極 3 本リアクター)

○処理時間 : 60 min

○針電極の材質：TIG 溶接用電極棒（タングステン電極棒 トリウム入り）

○針電極 3 本リアクター電源：電圧平均 5 kV、電流平均 10 A、周波数 100 Hz、パルス幅 4 μs、平均 20 W、パルス DC 電圧

### （１）泡沫分離試験（バッチ式）で得られた試料

「SDS 泡沫分離処理水」、「SDS 泡沫分離回収泡沫」を対象とした試験結果を表 2.2.12 に示す。

「SDS 泡沫分離回収泡沫」は、プラズマ処理により全物質で一定の分解が認められたものの、予備試験時と比較して PFOS、PFOA の分解率は高くなかった。また、短鎖 PFAS においては炭素数が小さくなるほど分解率は低くなる傾向が見られ、炭素鎖長が同じ PFAS ではスルホン酸基を持つ PFAS の方が分解率が高い傾向であった。

一方で「SDS 泡沫分離処理水」は、PFOS 濃度が大幅に増えた（処理前 2 ng/L→処理後 350 ng/L）。PFOS よりも炭素鎖が長い物質が分解されて生成した可能性が考えられるが原因は不明である。なお、PFOS 以外の PFAS の分解率の傾向は「SDS 泡沫分離回収泡沫」と同程度であった。

表 2.2.12 SDS 泡沫分離処理水、SDS 泡沫分離回収泡沫を用いた本試験結果

	SDS泡沫分離処理水			SDS泡沫分離回収泡沫		
	処理前	処理後	分解率(%)	処理前	処理後	分解率(%)
PFOS	2	350	-17400.0	7,500	250	96.7
PFOA	51	16	68.6	47,000	1,200	97.4
PFHxS	47	20	57.4	2,000	140	93.0
PFHxA	17,000	14,000	17.6	24,000	21,000	12.5
PFBS	1,800	1,500	16.7	2,100	2,000	4.8
PFBA	4,600	4,400	4.3	4,800	5,100	-6.3

※分解率 = (1 - 処理後 / 処理前) × 100 (%)

### （２）泡沫分離試験（バッチ式）で得られた試料を凍結濃縮した試料

「SDS 泡沫分離処理水濃縮水」、「SDS 泡沫分離回収泡沫濃縮水」を対象とした試験結果を表 2.2.13 に示す。

「SDS 泡沫分離処理水濃縮水」は「SDS 泡沫分離処理水」と同様に PFOS 濃度が大幅に増えた（処理前 17 ng/L→処理後 420 ng/L）。PFOS よりも炭素鎖が長い物質が分解されて生成した可能性が考えられるが原因は不明である。

「SDS 泡沫分離回収泡沫濃縮水」では PFOS、PFOA の分解率は高い傾向を示した一方で、短鎖 PFAS の分解率は PFOS、PFOA と比較し低い傾向となった。短鎖 PFAS は気液界面に集まる特性が PFOS、PFOA と比較して小さいことが泡沫分離試験でも確認されており、気泡によって水面付近に輸送されて留まる量が少ないことが、プラズマによる分解を受け難い要因であると考えられる。

なお、本試験で用いた凍結濃縮後の試料の PFAS 濃度は、表 2.2.8 及び表 2.2.9 に示す凍結濃縮試験結果（処理水、回収泡沫）と比較して全体的に低い傾向にあった。これは、プラズマ試験用に凍結濃縮による濃縮水を生成する工程において PFAS 濃度分析のために濃縮水の一部を分取したことが原因と考えられる。このため、当初想定していた泡沫分離による「回収泡沫」と回収泡沫を凍結濃縮した「回収泡沫濃縮水」をプラズマ処理した際の分解効率を比較することができなかった。

表 2.2.13 SDS 泡沫分離処理水濃縮水、SDS 泡沫分離回収泡沫濃縮水を用いた本試験結果

単位(ng/L)

	SDS泡沫分離処理水濃縮水			SDS泡沫分離回収泡沫濃縮水		
	処理前	処理後	分解率(%)	処理前	処理後	分解率(%)
PFOS	17	420	-2370.6	3,000	580	80.7
PFOA	130	130	0.0	28,000	2,800	90.0
PFHxS	28	13	53.6	1,400	590	57.9
PFHxA	11,000	9,600	12.7	29,000	25,000	13.8
PFBS	1,200	960	20.0	2,300	2,000	13.0
PFBA	3,200	3,100	3.1	6,100	4,900	19.7

※分解率 = (1 - 処理後 / 処理前) × 100 (%)

③ 追加試験結果 (その1)

プラズマ処理の過程において SDS 添加による気泡発生量が時間とともに少なくなる現象が観察された。これは、プラズマによって PFAS とともに SDS も分解されていることが原因と考えられる。また、泡沫分離及び凍結濃縮による一連の処理において SDS を多く含むと想定される処理対象水の方がプラズマ処理において高い分解率を示したことから、更なる分解率の向上を目的とし、SDS の添加量を増やし、処理時間を長くする試験を実施した。なお、試験には初期濃度が最も高かった「SDS 泡沫分離回収泡沫」を用いた。

試験条件は以下のとおりである。

○処理対象：「SDS 泡沫分離回収泡沫」(0.7 L / バッチ)

○界面活性剤添加量：アニオン界面活性剤 (ドデシル硫酸ナトリウム : SDS)  
計 60 ppm (30 min 経過毎に 1 回 10 ppm 分を添加)

※"ppm"は v/v による表記

○送気量 (アルゴン) : 150 mL/min (針電極 3 本リアクター)

○処理時間 : 180 min

○針電極の材質 : TIG 溶接用電極棒 (タングステン電極棒 トリウム入り)

○針電極 3 本リアクター電源 : 電圧平均 5 kV、電流平均 10 A、周波数 100 Hz、パルス幅 4 μs、  
平均 20 W、パルス DC 電圧

追加試験結果 (その1) を表 2.2.14 に示す。

表 2.2.14 追加試験結果 (その1)

単位(ng/L)

	SDS泡沫分離回収泡沫		
	処理前	処理後	分解率(%)
PFOS	7,500	<20	99.7
PFOA	47,000	200	99.6
PFHxS	2,000	65	96.8
PFHxA	24,000	15,000	37.5
PFBS	2,100	1,000	52.4
PFBA	4,800	3,500	27.1

処理後分析 : 清水建設株式会社

※分解率 = (1 - 処理後 / 処理前) × 100 (%)

プラズマによる処理時間を 180 min に延長し、かつ SDS を 30 min 毎に追加して添加することで、PFAS の分解率はすべての物質で向上し、特に PFOS、PFOA の分解率はそれぞれ 99.7%、99.6%、短鎖 PFAS である PFBS、PFBA はそれぞれ 52.4%、27.1% となった。これまでの試験結果と同様に、長鎖 (PFOS、PFOA) の分解率が高く、短鎖になるほど分解率は低くなる傾向が見られ、炭素鎖長が同じ PFAS ではスルホン酸基を持つ PFAS の方が分解率が高い傾向であった。

#### ④ 追加試験結果 (その 2)

これまでの知見から、開放系のリアクターでプラズマ処理を行うと、分解された PFAS がガスとして揮発し、分解生成物の収支が取れないことが確認されている。そこで、プラズマによる PFAS の分解における収支を把握することを目的として図 2.2.6 に示す試験装置 (気相循環式リアクター) を用いた試験を実施した。本試験では処理後の気相をすべて回収し、気相中の PFAS ガス、ふっ素ガスの測定も行った。

試験条件は以下のとおりである。

○処理対象：「SDS 泡沫分離回収泡沫」(0.3 L/バッチ)

○界面活性剤添加量：アニオン界面活性剤 (ドデシル硫酸ナトリウム：SDS) 10 ppm

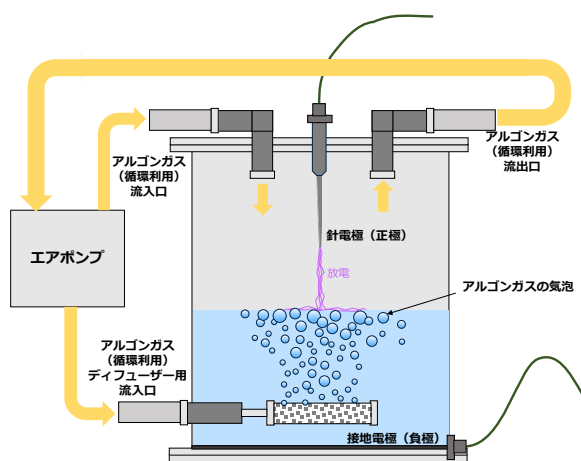
※"ppm"は v/v による表記

○送気量 (アルゴン)：100 mL/min (針電極 1 本リアクター)

○処理時間：60 min

○針電極の材質：TIG 溶接用電極棒 (タングステン電極棒 トリウム入り)

○針電極 1 本リアクター電源：電圧平均 2 kV、電流平均 15 A、周波数 100 Hz、パルス幅 4  $\mu$ s、平均 12 W、パルス DC 電圧



処理後の気相を下記のとおり処理



カラムにて吸着 (PFAS ガス)



インピンジャーにて吸収液に吸収 (ふっ素ガス)

図 2.2.6 追加試験装置 (気相循環式 針電極 1 本リアクター)

気相循環式のプラズマリアクターによる処理前後での直鎖 PFAS の網羅的な分析を行い、ふっ素の収支について検討を行った。液相の PFAS は直接 LC-MS/MS にて分析した。気相の PFAS は図 2.2.6 に示すカラムに全量を通し、PFAS をカラムからメタノールで抽出したのち LC-MS/MS にて分析した。また、無機ふっ素ガスは図 2.2.6 に示すインピンジャーに捕捉した後、IC にて分析を行った。

表 2.2.15 にプラズマ処理前後における液相と気相の PFAS、無機ふっ素分析結果から算出したリアクター内のふっ素総量、液相については PFAS、無機ふっ素の分解率も示す。また、一部の短鎖 PFAS (PFBS、

PFBA、PFPrA、TFA、FMS) は増加が見られたことから、表中にマイナス表記とし、増加分を合計した値 (1,054 ng) を表下部※に付記した。

液相においては、PFOS、PFOA 等の長鎖の分解率が高く、短鎖 PFAS の分解率が低い傾向に変わりはなかった。また、短鎖 PFAS のうち PFBA は処理前と比較して 30.8%濃度が増加した。それ以外の炭素数 C4 以下の短鎖 PFAS においても濃度が 6.7~15.8%程度 (ふっ素量で 1,054 ng) 上昇していた。

また、図 2.2.7 に分解過程において推定されるマスバランスをふっ素量に換算した結果を示す。

試験結果から、プラズマ処理前において PFAS 由来のふっ素は 34,289 ng 存在し、プラズマ処理後には 18,979 ng にまで減少した。また、前記の一部の短鎖 PFAS は処理前の PFAS 由来のふっ素量と比較しわずか (1,054 ng / 34,289 ng × 100 = 3.1%) に増加したことから、長鎖 PFAS の分解生成物の可能性がある。ただし、60 min のプラズマ処理後においては、分解された PFAS のほとんど (15,310 ng / (15,310 ng + 1,054 ng) × 100 = 93.6%) が無機ふっ素に変換されている可能性が高いと考えられた。なお、プラズマ処理による副生成物は直鎖 PFAS のみである可能性が高い<sup>2)</sup>ことがこれまでの知見でわかっていることから、今回は分岐鎖 PFAS については分析していない。

なお、本試験では PFAS の分析対象を処理前及び処理後のみとしたため、処理前後の濃度比較では PFAS の分解や副生成物の発生の可能性を評価することができなかった。また、処理前の濃度が定量下限値未満の物質は分解率 0%となり、プラズマによる分解の有無は評価できなかった。

一方で、今回の実証では、プラズマ処理前の泡沫分離による回収泡沫には無機ふっ素が 187,900 ng と PFAS 濃度と比較して 5.5 倍程度多く含まれていたことから、測定したガス中のふっ素が PFAS 分解物由来のものか回収泡沫に含まれていた無機ふっ素由来かを判断することはできないと考えられる。

表 2.2.15 循環式リアクターによる処理前後の PFAS 類総量ふっ素換算値

	液相 ふっ素換算値			気相 ふっ素換算値		液相+気相 ふっ素換算値		推定分解量 ふっ素換算値
	処理前	処理後	分解率(%)	処理前	処理後	処理前	処理後	
	PFNA	2,297	42	98.2	-	3	2,297	
PFOS	659	<19	97.1	-	<1	659	<20	659
PFOA	9,913	330	96.7	-	1	9,913	331	9,582
PFHpS	<19	<19	0.0	-	<1	<19	<20	0
PFHpA	4,886	2,239	54.2	-	3	4,886	2,242	2,644
PFHxS	278	37	86.7	-	<1	278	37	241
PFHxA	4,792	3,994	16.7	-	6	4,792	4,000	793
PFPeS	<19	<19	0.0	-	<1	<19	<20	0
PFPeA	3,498	3,303	5.6	-	2	3,498	3,305	192
PFBS	257	274	-6.7	-	<1	257	274	-18
PFBA	727	951	-30.8	-	1	727	952	-225
PFPrS	<19	<19	0.0	-	<1	<19	<20	0
PFPrA	799	834	-4.3	-	2	799	836	-37
PFEtS	<19	<19	0.0	-	<1	<19	<20	0
TFA	5,100	5,700	-11.8	-	1	5,100	5,701	-601
FMS	1,083	1,254	-15.8	-	2	1,083	1,256	-173
PFAS計						34,289	18,979	15,310
無機ふっ素	187,900	213,800	-11.76	-	19,000	187,900	232,800	-44,900

※液相内の PFAS 総量 (ng) = PFAS 濃度分析結果 (ng/L) × リアクター内液量 (0.3 L)

気相内の PFAS 総量 (ng) = PFAS 分析結果 (ng)

ふっ素換算値 (ng) = PFAS 総量 (ng) × ふっ素原子量 19 × 分子内ふっ素原子数 / PFAS 分子量

分解率 = (1 - 処理後 / 処理前) × 100 (%)

液相+気相 ふっ素換算値のうち処理前より総量が増えたものを赤字で表記、増加分の合計は 1,054 ng

<処理前>

<処理後>

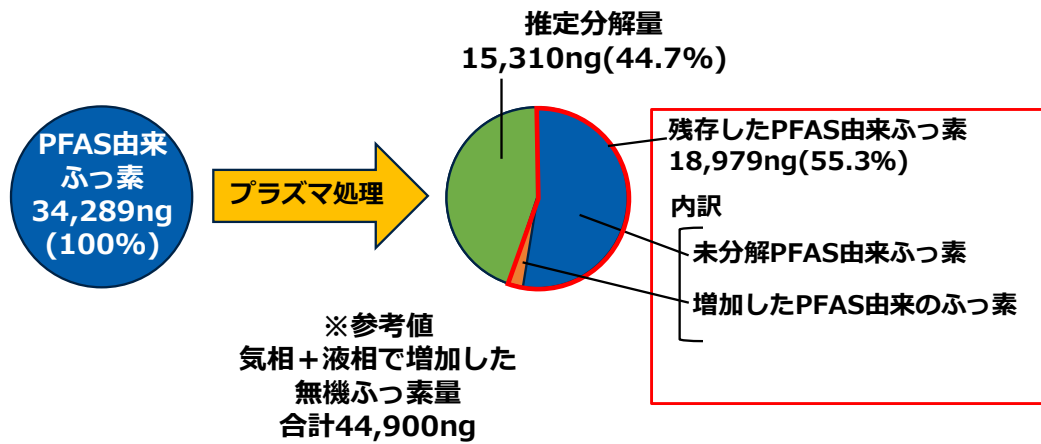


図 2.2.7 分解過程におけるマスバランス（ふっ素換算量で算出）

※本図は 16 項目の PFAS と無機ふっ素のみを見ている。

文献 1：竹内（2024）：水中放電プラズマ生成技術の発展と難分解性有機物処理，*Journal of Plasma and Fusion Research*, Vol.100, No.3 March 2024, pp. 123-127.

文献 2：松谷ら（2012）：「有機フッ素化合物の気液界面吸着量とプラズマによる分解速度の関係」，*電学論文誌 A*, Vol.132, pp.1027-1032.

## 4. 実証試験の評価項目

### 4.1 対策技術の有効性

#### <泡沫分離>

泡沫分離法による PFAS 含有水処理の原理は複数の研究論文<sup>1-4)</sup>で公開されており、海外では多くの国で商用化<sup>5-8)</sup>されている。これらは高濃度から低濃度までの処理が可能で、国内においてもパイロットスケールで PFOS 及び PFOA において 99%以上の除去率で指針値 (50 ng/L) を下回ることが実証<sup>9)</sup>されている。

泡沫分離法の処理フローの特徴として、気液接触塔への送気直後より水面に浮上した気泡から泡沫層が形成され、空気とともに系外に排出される。ここで分離・回収された泡沫には濃縮された PFAS が存在しており、焼却等によって最終的に分解処理 (二次処理) されるが、PFAS を高濃度に含有する泡沫は最終的に液体として回収されるため、活性炭による吸着処理とは異なりプラズマ等の焼却以外の二次処理方法も容易に選択可能となる。

泡沫分離においては、いかに PFAS を高濃度に濃縮するかが、エネルギー効率やコストに大きく影響するため、PFAS の除去率は技術を評価するうえで最も重要なファクターとなる。

今回の実証では、効果的な泡沫生成と分離を実現するために起泡剤としてアニオン界面活性剤 (ドデシル硫酸ナトリウム) を用いることで、PFOS 及び PFOA の除去率の目標である 99%以上を達成した。また、短鎖 PFAS においては、両性界面活性剤 (主成分: 脂肪酸アミドプロピルベタイン) を用いることで除去率の向上が図られることを確認している。

近年、PFOS、PFOA、PFHxS 以外の短鎖 PFAS も環境への影響が懸念され始めており、PFOS、PFOA の代替物質として使用されてきた PFBS や PFBA なども要検討項目 (水道) 及び要調査項目 (環境) に新たに追加された。前駆体や長鎖 PFAS が分解されて短鎖 PFAS となる現象を含め、最終処分場の浸出水や工場排水からも検出される事例も見られることから、短鎖 PFAS を含めたすべての PFAS を含む処理技術の開発を推進することが将来的な課題となる。

文献 1 : P. Meng, S. Deng, A. Maimaiti, B. Wang, J. Huang, Y. Wang, I. T. Cousins and G. Yu (2018) : Efficient removal of perfluorooctane sulfonate from aqueous film-forming foam solution by aeration-foam collection, *Chemosphere*, Pages 263-270.

文献 2 : S. J. Smith, K. Wiberg, P. McCleaf and L. Ahrens (2022) : Pilot-scale continuous foam fractionation for the removal of per and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from landfill leachate, *ACS ES&T Water*, 2022, 2, Pages 841-851.

文献 3 : T. Buckley, K. Karanam, X. Xu, P. Shukla, M. Firouzi and V. Rudolph (2022) : Effect of mono- and di-valent cations on PFAS removal from water using foam fractionation - A modelling and experimental study, *Separation and Purification Technology*, Vol. 286-120508.

文献 4 : H. Pang, B. Dorian, L. Gao, Z. Xie, M. Cran, S. Muthukumaran, F. Sidiroglou, S. Gray and J. Zhang (2022) : Remediation of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) contaminated soil using gas fractionation enhanced technology, *Science of the Total Environment*, Vol. 827-154310.

文献 5 : ECT2 社, <https://www.ect2.com/solutions-pfas/foam-fractionation/>, (2026 年 1 月確認)

文献 6 : E2METRIX USA, LLC, <https://e2metrix.com/products-solutions/onsite-pfas-removal-with-ozone-foam-fractionation-ff/>, (2026 年 1 月確認)

文献 7 : Allonnia 社, <https://allonnia.com/saff/#foam-fractionation-booster>, (2026 年 1 月確認)

文献 8 : The Water and Carbon Group, <https://waterandcarbon.com/taking-the-fear-out-of-pfas-with-direct-removal-from-leachate-using-foam-fractionation/>, (2026 年 1 月確認)

文献9：青木ら（2024）：泡沫分離法による有機フッ素化合物（PFOS/PFOA/PFHxS）含有水の連続式処理システムの開発, 第29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, S1-20.

## <凍結濃縮>

泡沫分離法とは異なる液体濃縮手段としてPFAS含有水の処理に適用される可能性が考えられる。泡沫分離では、地下水等の本来起泡成分を含まない液体に対して、効果的な泡沫生成と分離を実現するために界面活性剤等の起泡剤を添加する必要があるが、凍結濃縮では外部からの温度制御のみで濃縮が完結するため、濃縮物の二次処理として分解処理等を行う際にも阻害とならないことから、泡沫分離よりも二次処理方法の選択肢の幅が広がることが特徴となる。

## <プラズマ>

### ① PFAS（長鎖／短鎖）除去率の検証

「SDS 泡沫分離回収泡沫」をプラズマ処理した結果、PFOS、PFOA、PFHxSについては60 minで93.0%～97.4%、SDSを追加添加した条件では180 minで96.8%～99.7%の分解が確認され、概ね除去率の目標を達成した。一方、「SDS 泡沫分離回収泡沫濃縮水」の処理では、PFHxA、PFBS、PFBAについて、60 minで13.8%～19.7%、SDSを追加添加した「SDS 泡沫分離回収泡沫」では180 minで27.1%～52.4%の分解率であった。

### ② 分解効率の検証

最も分解率が高かった処理時間180 minにおけるPFOAの分解効率を試算した場合、処理前濃度47,000 ng/Lが処理後に200ng/Lにまで低減するのにかかった電力量は $20\text{ W} \times 3\text{ h (180min)} = 60\text{ Wh}$ 、リアクター内の試料量0.7 Lを加味すると、 $0.0018\text{ Wh/ng-PFOA}$ となる。ただし、より高濃度の試料を用いた場合は、分解効率は更に向上する可能性がある。

### ③ マスバランスの検証

今回の実証において、気相循環式のリアクターを構築し、プラズマ分解されたPFASのマスバランスの検証を試みた。試験の結果、分解されたPFASの93%程度は無機フッ素にまで分解されている可能性が高いことがわかった。なお、本対象水には無機フッ素が原水中においてPFAS由来のフッ素よりも濃度比較で4倍程度多く含有されていたことから完全なマスバランスの検証には至らなかった。

### ④ 適用条件（濃度範囲）

プラズマにより最大濃度47,000 ng/LのPFOAを分解率99.6%で分解することができた。これまでの試験結果で示されるように、処理対象水が高濃度になるほど高い分解効率でプラズマ分解が可能になるものと考えられる。

## 4.2 対策技術の新規性・将来性

### < 泡沫分離 >

#### ① 泡沫分離と他の技術の組み合わせの可能性

今回の実証においては、泡沫分離と他の技術（プラズマ）を組み合わせることによる「濃縮＋分解」による浄化を試みた。これらは、PFAS 含有水全量を焼却するのではなく濃縮することで体積を減らし、二次処理においても高濃度の方が分解効率が高まることに着眼している。

泡沫分離に最低限必要な装置は、原水槽、泡沫分離槽、処理水槽、回収泡沫槽、コンプレッサーで済むことから、イニシャルコストが小さいことに加え、容易に現地で組み立てられる可搬型とすることができる。泡沫分離の連続処理化にも成功しており、ノッチタンクのような箱型の装置とすることで大容量化（スケールアップ）への道筋も付いたと考えられる。

今後は、有機フッ素化合物を取り扱う工場や最終処分場の水処理施設の近傍に本装置を設置し、そこから排出される廃水や浸出水を現地で処理することを視野に入れている。

更には、試験結果で示したとおり、泡沫分離は処理前後の水質に影響を与えないことから、既存他の水処理（生物処理／活性炭等）フローへ組み込むことも容易である。特に、土壌洗浄処理工程に組み込むことで高濃度洗浄水の処理が可能となり、今後も適用される場面が拡大することが予想される。

#### ② 装置の構造

本実証で製作した連続処理装置は、構造が単純で水質に対する柔軟性／許容性があることが特徴である。水質に応じて処理水量、送気量、薬剤添加量を調整するのに加え、泡沫分離槽内の水位を制御することで泡沫層の厚さを適宜変動させ、処理対象となる PFAS 物質を選択的に回収（例えば、PFOS 主体の水質の場合は、水位を下げた泡沫層を厚くし、層上部の含水の少ない泡沫のみ回収する等）することも可能<sup>1)</sup>である。

また、活性炭やイオン交換樹脂、逆浸透膜などとは異なり、フィルター構造がないため目詰まりを起さないこと、ポンプやコンプレッサー以外の駆動装置がないためメンテナンスが容易なことが挙げられる。

処理に際して添加する薬剤は起泡剤のみであり、起泡状態に影響をもたらさない水質条件であれば pH 調整等の前処理の必要がない。予期せぬ水質や温度の変化や共存物質などによるばらつきに対しても、一定の性能を保持する能力を有していることから、『ロバスト性』が高い技術であると言える。

#### ③ 消泡手段

本実証で使用した装置は泡沫の分離方法に特徴がある。これまでの泡沫分離法は、発生した泡沫を別の吸引装置によって上部から排出する方法が多く採用されているが、本装置は、気泡の元となる空気の移動を利用して泡を横方向に押し出す構造により、泡沫を上部から吸引することなく、横方向から水面付近に存在する短鎖 PFAS を多く含む高含水の泡沫も併せて回収することが可能となっている。

回収した泡沫は体積が増すことから、直ちに消泡することで回収泡沫槽の容量を小さくすることが望ましいが、消泡剤等の液体の噴霧は液体そのものが体積増の要因となるほか、消泡剤が後段の二次処理に影響する可能性もある。超音波や加熱による方法は消泡範囲が限定的となるなど課題も多い。

種々の検討を行った結果、泡沫分離の連続処理及び大型化に際しては、物理的な機械式消泡手段<sup>2)</sup>が最も効果が高いと考えている。

#### ④ 添加する界面活性剤の種類

泡沫分離処理において効果的な泡沫生成と分離を実現するために、起泡剤としての界面活性剤や気泡の表面張力に影響を与え増粘効果を有する無機塩<sup>3)</sup>を助剤として予め添加するが、水処理全体の負荷や処理水を放流する際の環境影響を考慮した場合は、外部から添加する起泡剤や助剤の量はできる限り少なくするのが好ましい。

本実証では、アニオン界面活性剤（ドデシル硫酸ナトリウム）に加え、両性界面活性剤（主成分：主成分：脂肪酸アミドプロピルベタイン）を用いて短鎖 PFAS の除去率を検証し、その有効性を確認した。諸外国の事例では、起泡剤として両性界面活性剤（ココミドプロピルベタイン）<sup>4)</sup>やカチオン界面活性剤（臭化セチルトリメチルアンモニウム(CTAB)）を用いることで短鎖の PFBS や PFBA が 95%以上の効率で除去できたとの報告<sup>5)</sup>があるが、一般に界面活性剤の生物毒性はカチオン系が最も高く<sup>6)</sup>、起泡剤としてカチオン界面活性剤を添加する場合は、泡沫分離後の処理水を環境中に直接放流せず、例えば泡沫分離の後段に生物処理を組み合わせる等の対処が必要となる。

文献 1 : 青木ら (2024) : 泡沫分離法による有機フッ素化合物 (PFOS/PFOA/PFHxS) 含有水の連続式処理システムの開発, 第 29 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, S1-20.

文献 2 : (例) 株式会社ジェイテクトフルードパワーシステム, 消泡装置, <https://www.jtekt-fluid.co.jp/product/2017062814131981.html>, (2026 年 1 月確認)

文献 3 : P. McCleaf, Y. Kjellgren and L. Ahrens (2021) : Foam fractionation removal of multiple per- and poly fluoroalkyl substances from landfill leachate, AWWA Water Science, Volume 3, Issue 5.

文献 4 : A. Malovanyy, E. Forsen and R. Lihammar (2025) : Removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from municipal wastewater by foam fractionation, Water Research, Vol. 268-122660.

文献 5 : T. Buckley, K. Karanam, H. Han, H. Vo, P. Shukla, M. Firouzi and V. Rudolph (2023) : Effect of different co-foaming agents on PFAS removal from the environment by foam fractionation, Water Research, Vol. 230-119532.

文献 6 : P. H. N. Vo, T. Buckley, X. Xu, T. M. H. Nguyen, V. Rudolph and P. Shukla (2023) : Foam fractionation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfill leachate using different cosurfactants, Chemosphere, Vol. 310-136869.

## <凍結濃縮>

### ① 凍結濃縮技術の環境分野での利用

一般に、液体を濃縮する方法として加温蒸発濃縮、膜濃縮、凍結濃縮が挙げられるが、それらは濃縮する対象によって適用可能な手法が異なっている。例えば、液状の食品のように加温によって品質が変化したり、化学反応で成分劣化したりするようなものには加温蒸発濃縮は適用できない。一方で、凍結濃縮は加温を伴わず、低温環境下の物理反応であるためガス等の発生もないことから、適用範囲が広く、品質、安全性ともに優れていると考えられる。

これらの特性を利用して、生物処理が困難な産業廃水処理等の環境分野に適用される事例<sup>1~3)</sup>が公表されている。本実証のように、凍結濃縮技術の PFAS 含有水への適用は国内外において初めて取り組みと思われるが、原理的には一般的な水溶性物質と同様な挙動を示すことにより炭素鎖長による PFAS の物質特性にかかわらず溶液からの濃縮分離が可能であると考えられる。

### ② 凍結濃縮技術の実機への展開

凍結濃縮技術は食品や医薬品製造の分野では既に確立された技術<sup>4)</sup>であり、PFAS 含有水から PFAS 濃縮物を得るに留まらず、焼却等による処理量を大幅に減らす効果が期待される。将来的に本技術を実用化するためには、熱交換によるエネルギー効率の改善と高濃度溶液に対する品質の向上が課題として挙げられることから、引き続き技術開発に尽力する。

文献 1: O. Lorain, P. Thiebaud, E. Badorc and Y. Aurelle (2001) : Potential of freezing in wastewater treatment: soluble pollutant applications, Water Research, Volume 35, Issue 2 pp. 541-547.

文献 2: 脇坂 (2002) : 凍結排水処理のための層状晶析における清澄な氷結晶生成条件の検討とその実用化装置の開発, 九州工業大学 学位論文, (2026 年 1 月確認)

文献 3: (例) 新日本空調株式会社, 凍結濃縮システム, <https://www.snk.co.jp/service/technology/search/?pdid=122>, (2026 年 1 月確認)

文献 4: (例) 明和工業株式会社, 凍結濃縮事業, <https://www.meiwa-ind.co.jp/our-business/freezing-concentration/>, (2026 年 1 月確認)

## ＜プラズマ＞

### ① プラズマ技術のエネルギー効率性

国内では PFAS を分解・処理する技術は焼却以外に商業規模で適用されたものはないが、焼却にはエネルギーとコストが多くかかり、燃焼に化石燃料も必要なことが課題として挙げられる。一方で、プラズマによる PFAS 処理は 100%電気エネルギーを使用することや、泡沫分離や凍結濃縮と組み合わせることで PFAS を効率良く分解することができるため、焼却処理に代わるような環境にやさしい技術として広く適用されることを期待している。

プラズマによる PFAS の処理技術は国内ではまだ商用化されているものは存在しないが、原理的には短鎖 PFAS の分解も可能であることから、将来的に PFOS、PFOA 以外の物質が規制対象になる場合にも対応ができるものとする。

### ② プラズマ技術の実機への展開

将来的な実用化に向けて、連続式リアクターの構築が考えられる。具体的には、複数本の針電極を用い、それらを整列配置した水路に処理対象水を流下させる方式を想定している。針本数を増やすことで処理対象水に一定時間連続してプラズマを照射することが可能となり、単位時間あたりの処理量を増やすことができると考えている。なお、装置の大型化に際し、高額な電源コストが懸念されることから、電源あたりの針電極を増やすことで初期コストを下げることが検討されている。

### 4.3 対策技術の経済効率性

#### <泡沫分離>

##### ① コスト検討結果

泡沫分離の経済効率性について、過去の適用実績及び本実証試験結果をもとに概算費用を算出した。算出条件は以下のとおりである。

○処理水量：100～1000 m<sup>3</sup>、300 L/時（8時間運転/日）

○泡沫分離処理装置：屋外設置（連続処理）

原水槽、泡沫分離槽（本体）、ブロワー、処理水槽、回収泡沫槽、薬剤タンク含む

○界面活性剤添加量：アニオン界面活性剤（ドデシル硫酸ナトリウム） 10 ppm

無機塩（塩化ナトリウム） ※アニオン界面活性剤の助剤として添加

両性界面活性剤（主成分：脂肪酸アミドプロピルベタイン） 5 ppm

○泡沫回収量：アニオン界面活性剤添加時 処理量に対し 6.9%

両性界面活性剤添加時 処理量に対し 3.2%

表 3.3.1 及び表 3.3.2 にコスト試算結果を示す。

表 3.3.1 アニオン界面活性剤添加時の処理コストの比較（概算）

処理量	100 m <sup>3</sup>	200 m <sup>3</sup>	300 m <sup>3</sup>	500 m <sup>3</sup>	1000 m <sup>3</sup>
処理コスト （初期+運転費用） [千円]	14,564	18,306	22,048	29,531	48,240
初期費用 [千円]	10,823	10,823	10,823	10,823	10,823
運転費用 [千円]	3,742	7,483	11,225	18,709	37,417
材料（薬剤）費	16	31	47	79	157
廃棄物（回収泡沫）処分費	1,039	2,077	3,116	5,193	10,385
その他	2,688	5,375	8,063	13,438	26,875
運転期間 [月]	2.5	5.0	7.5	12.5	25.0
二酸化炭素排出量 [kg/ m <sup>3</sup> ]	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92
1 m <sup>3</sup> 当たり処理コスト （初期+運転費用） [千円/ m <sup>3</sup> ]	146	92	73	59	48
1 m <sup>3</sup> 当たり処理コスト （運転費用） [千円/ m <sup>3</sup> ]	37	37	37	37	37

<内訳>

初期費用（イニシャルコスト）：泡沫分離処理装置の本体価格（9,000 千円）  
本体設置工事費及び人件費（1,823 千円）

運転費用（ランニングコスト）：

処理量 100m<sup>3</sup> の場合

材料（薬剤）費（16 千円）

回収泡沫（PFAS 含有水）処分費※（1,039 千円）

その他

・労務費（1,750 千円）＝3.5 千円/日×20 日×2.5 箇月

・共通仮設費（100 千円）

・現場管理費（500 千円）

・一般管理費（338 千円）

※回収泡沫は産業廃棄物として焼却処分（処理単価 150 千円/ m<sup>3</sup> と想定）

表 3.3.2 両性界面活性剤添加時の処理コストの比較（概算）

処理量	100 m <sup>3</sup>	200 m <sup>3</sup>	300 m <sup>3</sup>	500 m <sup>3</sup>	1000 m <sup>3</sup>
処理コスト （初期＋運転費用） [千円]	13,998	17,174	20,349	26,701	42,579
初期費用 [千円]	10,823	10,823	10,823	10,823	10,823
運転費用 [千円]	3,176	6,351	9,528	15,877	31,756
材料（薬剤）費	5	9	14	23	46
廃棄物（回収泡沫）処分費	485	967	1,451	2,418	4,835
その他	2,686	5,375	8,063	13,436	26,875
運転期間 [月]	2.5	5.0	7.5	12.5	25.0
二酸化炭素排出量 [kg/ m <sup>3</sup> ]	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92
1 m <sup>3</sup> 当たり処理コスト （初期＋運転費用） [千円/ m <sup>3</sup> ]	140	86	68	53	43
1 m <sup>3</sup> 当たり処理コスト （運転費用） [千円/ m <sup>3</sup> ]	32	32	32	32	32

<内訳>

初期費用（インシヤルコスト）：泡沫分離処理装置の本体価格（9,000 千円）  
本体設置工事費及び人件費（1,823 千円）

運転費用（ランニングコスト）：

処理量 100m<sup>3</sup> の場合

材料（薬剤）費（5 千円）

回収泡沫（PFAS 含有水）処分費※（485 千円）

その他

- ・労務費（1,750 千円）＝3.5 千円/日×20 日×2.5 箇所
- ・共通仮設費（100 千円）
- ・現場管理費（500 千円）
- ・一般管理費（336 千円）

※回収泡沫は産業廃棄物として焼却処分（処理単価 150 千円/m<sup>3</sup> と想定）

泡沫分離による運転コスト（実処理における経済的最適規模）は焼却費用と比較して遥かに低いため、当該能力による処理の場合は処理量が 100m<sup>3</sup> 程度を分岐点として運用することでコストメリットがでてくると考えられる。

運転費用（ランニングコスト）の主要な変動要素は処理水量であり、300 L/時（8 時間運転/日）の処理装置の機能を増強し、例えば 600 L/時かつ運転時間を 24 時間連続とすることでコストダウン（工期短縮による労務費減）が見込まれる。ただし、処理水量は工場排水や最終処分場の浸出水等の PFAS 含有水発生施設の規模によるため、一元的に決められるものではない。

参考までに、埋立地浸出水に含まれる PFAS を除去する方法のうち、泡沫分離、粉末活性炭（PAC）、粒状活性炭（GAC）及び陰イオン交換樹脂（AIX）についてコストを検討した例では、PFOS 及び PFOA を 90%削減するという目標に対して泡沫分離と陰イオン交換樹脂による方法が他の方法と比較して最も費用対効果が高く、その費用は設計流量 15m<sup>3</sup>/時のシステムにおいて 1 ユーロ（約 180 円）/m<sup>3</sup> 未満ということが示されている。なお、この場合は泡沫分離において回収された濃縮物は「超臨界水酸化（SCWO）」で破壊する条件となっており、処理単価は 150 ユーロ（約 27,000 円）/トンと想定して見積もられている。

文献 1 : A. Malovanyy, F. Hedman, L. Bergh, E. Liljeros, T. Lund, J. Suokko and H. Hinrichsen (2023) : Comparative study of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) removal from landfill leachate, Journal of Hazardous Materials, Volume 460.

## <凍結濃縮>

### ① コスト／エネルギー消費量検討結果

凍結濃縮の経済効率性について、本実証試験結果をもとに概算費用を算出した。  
算出条件は以下のとおりである。

○処理水量：2.0 L（凍結体の形状：φ160 mm、高さ 100 mm）

10 L（凍結体の形状：φ240 mm、高さ 230 mm）

○冷凍装置：市販 直冷式電気冷凍庫（容量：100 L 規模）

○冷凍温度：マイナス 18℃

○年間消費電力量：177 kWh／年<sup>\*1</sup> ※1 資源エネルギー庁 「省エネ性能カタログ 2025 年版」より  
月当たりの電気料金＝年間消費電力量 177 (kWh) × 電気代単価 31 (円/kWh) <sup>\*2</sup> ÷ 12 (ヶ月)  
＝458 円／月

※2 主要電力会社 10 社の平均単価(公益社団法人全国家庭電気  
製品 公正取引協議会「よくある質問 Q&A」)

凍結濃縮は、氷結晶は水分子のみから構成されることを原理とし、氷結した水分と液体中の物質を分離して物質側の濃度を高める効果を有しているが、液体を凍結させる速度が遅いほど液体中の物質を巻き込まずに氷界面が成長し、濃縮度の高い凍結体が得られることが知られており、その速度は 2 mm/h 以下（緩速冷凍）とされている<sup>1)</sup>。

凍結時間は凍結体の形状（凍結開始点から完了までの距離）と凍結速度によって算出され、上記の凍結体の高さを適用すると、2.0 L の凍結体の場合は 50 時間（＝100 mm／2 mm/h）、10 L の凍結体の場合は 115 時間（＝230 mm／2 mm/h）となる。

これらに算出条件に当てはめると、処理水量の凍結濃縮に必要な電気料金は、それぞれ 32 円（＝50 時間 × (458 円/月 ÷ 30 日 ÷ 24 時間)）、74 円（＝115 時間 × (458 円/月 ÷ 30 日 ÷ 24 時間)）と算出される（凍結体の解凍は室温による自然解凍とする）。

最終的に 1 リットル当たりの電気料金に換算した場合は 16 円／L、7.4 円／L となる（凍結体の形状により変動あり）。

文献1:株式会社前川製作所,凍結濃縮の基礎とその利用技術,<https://rdc.mayekawa.co.jp/column/02-7.shtml>, (2026 年 1 月確認)

## <プラズマ>

### ① コスト／エネルギー消費量検討結果

プラズマ処理の経済効率性について、現状はラボレベルで実証された技術であるが、本実証試験結果をもとに最もランニングコストに占める割合が大きいと考えられる直接プラズマ照射にかかる概算費用を算出した。

算出条件は以下のとおりである。

○分解効率：0.0018 Wh/ng-PFOA（3.1 対策技術の有効性②項で試算）

○処理濃度：50,000 ng/L（泡沫分離による回収泡沫と同程度と設定）

○処理水量：1 m<sup>3</sup>

○消費電力量：0.0018 Wh/ng×50,000 ng/L×1 m<sup>3</sup>=90 kWh

90 kWh×31 円/kWh<sup>\*</sup>=2,790 円

以上より、プラズマ照射のみにかかるコストは2,790 円/m<sup>3</sup>と試算される。

なお、実際に装置化した場合には、装置本体の費用や装置本体の電気代がかかることとなる。また、本試験で用いた SDS 等の薬剤の費用もかかるが、割合的にはかなり低いと考えられる。

※ 主要電力会社 10 社の平均単価（公益社団法人全国家庭電気製品 公正取引協議会「よくある質問 Q&A」）

諸外国の PFAS 分解時のエネルギー効率に関する文献<sup>1-3)</sup>では、電気酸化分解（Electrochemical Oxidation）で50～250 kWh/m<sup>3</sup>、他のプラズマ手法では1.7～332 kWh/m<sup>3</sup>等の報告がある。それらと比較した場合でも、本実証において得られた必要エネルギー量（90 kWh/m<sup>3</sup>）は同等かやや低い値であると考えられる。

文献 1: K. Londhe, C. S. Lee, Y. Zhang, S. Grdanovska, T. Kroc, C. A. Cooper and A. K. Venkatesan (2021) : Energy Evaluation of Electron Beam Treatment of Perfluoroalkyl

Substances in Water: A Critical Review, ACS EST Engg., 1 (5), 827-841.

文献 2 : L. Jiang, S. Wang, W. Chen, J. Lin, X. Yu, M. Feng and K. Wan (2022) : Removal of Per- and Polyfluoroalkyl Substances by Electron Beam and Plasma Irradiation: A Mini-Review, Water, 14, 1684.

文献 3: M. Riegel, S. Egner, F. Sacher (2020) : Review of water treatment systems for PFAS removal, Concawe Special Task Force on Soil and Groundwater, Report No. 14/20.

#### 4.4 対策技術の環境保全

泡沫分離は、処理対象水と微細気泡を接触させるシンプルな操作で水溶液中に溶解した物質の除去が可能な環境に配慮した水質浄化手法であり、魚介類から排出されるタンパク質（プロテイン）の除去を目的として、古くから水族館でも使用されている。

プラズマによる水処理技術は、短時間で効率的に難分解性の有機化合物を分解することができ、薬品添加の必要がないことや有害な副生成物の発生がないことが特徴である。

以下に、本技術適用時の環境面でのメリットを挙げる。

##### <両技術共通>

- ・可搬型とすることで装置を発生場所の近傍に設置可能であり、濃縮＋分解により処理が現地で完結するため、処理対象物の輸送によるCO<sub>2</sub>の排出がない
- ・活性炭のような廃棄物処理を伴う残渣（固形廃棄物）の発生がない

##### <泡沫分離>

- ・処理後の濃縮物（泡沫）が液体として得られるため、二次処理において環境負荷の大きい焼却以外の分解方法も選択可能
- ・起泡剤として添加した界面活性剤は、多段処理による回収や生物処理が可能（系外への排出がない）
- ・泡沫分離後の処理水に残留する界面活性剤は水道法に基づく水質基準値未満となる
- ・送気装置以外の騒音・振動の発生源がない
- ・従来の活性炭処理フローの前段階で適用することで負荷が低減され、活性炭消費量を削減可能
- ・泡沫回収時の排気中のPFASを捕捉する装置（トラップ）を設置することで、意図せぬ大気中へのPFASの放出を防止することが可能

##### <プラズマ>

- ・騒音・振動を伴う装置がない
- ・他方式よりプラズマのエネルギー効率が高く電気使用量が少ない
- ・凍結濃縮の併用により処理対象物の濃縮率を高めることで、プラズマ処理の時間短縮と分解効率をプラズマ単独の処理よりも向上させることが可能

## 5. 当該技術の今後の展望

PFAS を含む地下水や廃水の処理を実現現場で適用するためには、処理装置の大型化や連続処理が必須となる。本実証で用いた泡沫分離処理装置（連続式）は、水処理量を更に大容量化することも視野に入れ、エネルギー消費を伴い、故障の原因にもつながる駆動装置を排除（ポンプとコンプレッサーのみ）した簡便な機構により泡沫の排出を自動化する最低限の機能を持たせた装置を実現した。

装置は原水と処理水を貯留するための水槽、泡沫分離を行う処理水槽、コンプレッサー及び薬品槽とポンプ類からなり、処理対象となる水量に合わせて装置の容量を柔軟に変更できることやフィルター構造がないためメンテナンスの頻度が少ない（メンテナンス性が高い）ことが特徴であり、装置本体を現地に持ち込み処理する可搬型とすることも可能である。

国内では、公共用水域及び地下水を対象とした PFOS 及び PFOA 汚染の調査が実施されており、令和 5 年度には 39 都道府県 2,078 地点の測定地点のうち 22 都府県 242 地点で指針値（50 ng/L）の超過が確認<sup>1</sup>されており、その多くは地下水より検出（50～5,000 ng/L）されている。

今回の実証試験の結果を踏まえると、これらの地下水の濃度は泡沫分離で処理可能な範囲であり、今後も適用の機会が増えると想定される。また、泡沫分離による PFAS 地下水の原位置浄化技術<sup>2</sup>も開発されつつあることから、将来性の高い技術であると考えられる。

凍結濃縮は、これまでの技術開発期間が短くエネルギー効率等の課題もあるが、炭素鎖長による PFAS の物質特性にかかわらず溶液からの濃縮分離が可能なが主たるメリットであり、泡沫分離や活性炭等の吸着技術では困難な短鎖 PFAS の浄化に適用される場面が期待される。

プラズマは、界面活性剤の使用という観点から泡沫分離との相性が良いことに加え、今回の実証において泡沫分離及び凍結濃縮処理で得られた高濃度の PFOS、PFOA、PFHxS について高い除去効率を確認できた。現在も開発段階の技術ではあるが、例えば処理の際に添加する薬剤ひとつをとっても、長鎖 PFAS だけでなく短鎖 PFAS にも効果がある素材がいくつか確認<sup>3</sup>されており分解効率の向上が望める。また、今回の処理で使用したリアクターにおいても針電極 1 本から針電極 3 本に変更することによる効果も確認できたことから、今後も実用レベルに向けて最小限の電源でスケールアップ可能なフローを検討していく。

文献 1：環境省，令和 5 年度公共用水域及び地下水の PFOS 及び PFOA 調査結果一覧，

<https://www.env.go.jp/content/000310066.pdf>, (2026 年 1 月確認)

文献 2：特許 7744196 号，泡沫分離処理装置、泡沫分離処理方法，

[https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL\\_ID=202503019788977177](https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=202503019788977177), (2026 年 1 月確認)

文献 3：O. Isowamwen, R. Li, T. Holsen and S. M. Thagard (2023) : Plasma-assisted degradation of a short-chain perfluoroalkyl substance (PFAS):perfluorobutane sulfonate (PFBS), Journal of Hazardous Materials, Volume 456.