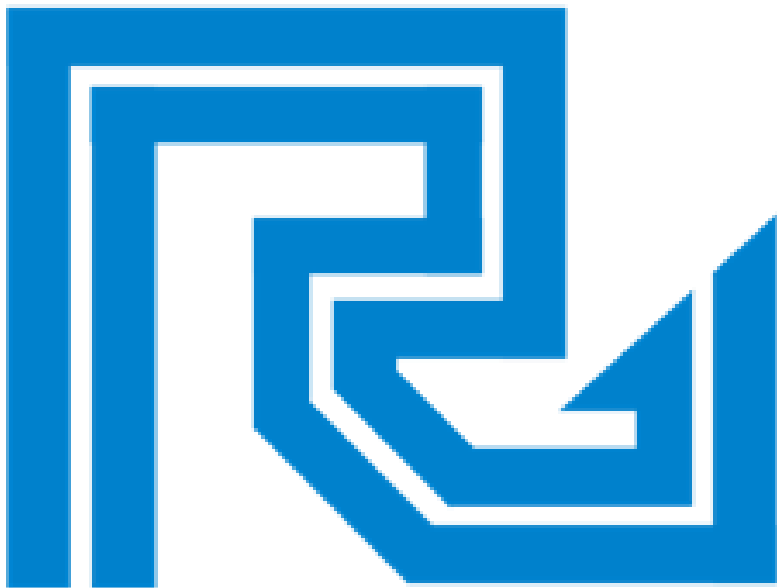


EUのPFAS Policyと浄化アプローチの動向

日本におけるMF膜・機能性粉体添着法による 長期安定運転の実証



2026年 1月 29日

(株)流機エンジニアリング

山内 仁

山内仁 (2026) : EUのPFAS Policyと浄化アプローチの動向, 日本におけるMF膜・機能性粉体添着法による長期安定運転の実証, Inter Aqua 2026 講演資料



① スウェーデン・オレブロ大学

(2) 技術・政策



② スウェーデン・スウェーデン農業科学大学

(3) 実証試験



③ ドイツ・シュタットガルト大学

(3) 実証試験

2026/1/29



④ スイス スイス連邦工科大学チューリッヒ校

(1) 科学者の哲学



アインシュタインのロッカー



沖縄県

(4) 実績

目次

1 EUのPFAS Policyと浄化アプローチ

(1) 科学者の哲学-惑星境界 (Planetary Boundary) 超過の指摘

(2) 政策-土壌モニタリングおよび回復力に関する指令 (Soil Monitoring Law)

(3) 実証試験

- LIFE SOuRCE
- SID-Water
- PFClean

2 日本におけるMF膜・機能性粉体添着法 (LFP法) による長期安定運転実証

(4) 実績-MF膜・機能性粉体添着法 (LFP) の実用機での実績

(5) 粒状活性炭 (GAC) と粉末活性炭 (PAC) のPFAS除去効率の比較

(6) Treatment train(トレイン方式処理) のすすめ

EUの話題は、PFAS対策技術コンソーシアム主催「PFAS対策技術 欧州現地視察 (2025年10月)」における各研究者からのご教示と、関連公開資料をもとに精査・整理した内容です。

1 EUのPFAS対策 Policyとアプローチ

科学的知見に基づく哲学的判断が、政策形成のみならず実証試験の設計にも影響を与えている

科学者の哲学

(科学的事実に基づく、PFASとの向き合い方に関する提言)

✓ 惑星境界を超えたPFAS汚染

社会実装

実証試験

- ✓ LIFE SOuRCE
- ✓ SID-Water
- ✓ PFClean

方針・政策

✓ Soil Monitoring Law

サイエンス

マッピング

PFAS動態と安全性評価
新技術開発・実証試験指導

PFASの科学的リスク評価

— PFAS汚染は惑星境界 (Planetary Boundary)を超えた—

論文 : Scheringer ら(2022) の指摘 1)

惑星境界 (Planetary Boundary) – 地球の自然浄化が機能する“限界ライン (安全運転領域)”を示す概念

1. 雨水のPFAS濃度が健康基準を恒常的に超過

- $\Sigma 4$ PFAS (PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS) 濃度がデンマークの飲料水基準(2 ng/L)を世界各地で超過

2. 雨水PFOS濃度が淡水域のPFOS環境基準(EQS)超過

- EUのPFOS EQS 0.65 ng/L と同等か超過する雨水レベル→降雨のみで河川・湖水は基準超過に近づく

3. PFASが環境で“不可逆的に循環”し続ける

- 海へ移動しても、エアロゾルとして大気へ⇨降雨⇨土壌・表流水の汚染
- 自然浄化では濃度が下がらず、環境中に残り続ける

さらに

- ① 健康勧告値 (リスクベース) は年々低下傾向するなか、人口希薄地域でも EU/米国の基準を超過
- ② 最新の基準値を達成するには巨額の投資が必要
- ③ 規制済みの PFOS / PFOA であっても濃度低減に数十年
- ④ 数千種以上の他PFASのリスクが未解明

以上により、

**PFAS汚染は惑星境界を超えており、
使用・排出の迅速な制限が重要と提言**

1) Ian T. Cousins, Jana H. Johansson, Matthew E. Salter, Bo Sha, and Martin Scheringer(2022). Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). Environmental Science & Technology, 56(15), 11172–11179.

土壌モニタリングおよび回復力に関する欧州議会および理事会指令²⁾

(Soil Monitoring and Resilience Directive : **SMRD** / 通称 *Soil Monitoring Law*)

- 欧州委員会 (2020) : **EU持続可能な化学物質戦略 (CSS)** (*Chemicals Strategy for Sustainability*)³⁾ 化学物質によるリスクを低減することを目的とした政策。PFASに対しては、グループ管理、修復技術開発、代替物開発支援、PFAS全体の使用禁止を示す
- 欧州委員会 (2021) : **空気・水・土壌のゼロ汚染に向けたEU行動計画** (*EU Zero Pollution Action Plan*)⁴⁾, 2050年までに大気・水・土壌の汚染を“健康に無害なレベル”にするEUの上位政策
- 欧州委員会 (2021) : **EU土壌戦略2030** (*EU Soil Strategy for 2030*)⁵⁾, 2050年までにEU域内のすべての土壌を健康な状態 (healthy soils) にすることを長期ビジョンとして掲げ、法制化手段としてSMRDを明示

SMRD : 土壌劣化や汚染 (PFAS含む) を共通指標でマッピング・監視して、土壌機能の回復を可能にする制度

SMRD が必要とされた背景

土壌はEUの食料生産の約95%を支え、陸域最大の炭素貯蔵庫であると同時に、地下水汚染の主要な起点

しかし、汚染、人工化、土地利用変化の進行によりEU域内の土壌の約60~70%が劣化状態になる。これまでEU全体で統一された土壌モニタリング・保全の法制度は存在しなかった

SMRDの主要要素

- EU共通の土壌モニタリングとマッピング
- 土壌健康状態の評価
- PFAS等汚染サイト登録・公開・監理

2) European Commission. (2025). Directive of the European Parliament and of the Council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law). Document 9474/1/25 REV 1, 29 September 2025.

3) European Commission. (2020). Chemicals Strategy for Sustainability: Towards a Toxic-Free Environment. COM(2020) 667 final, Brussels, 14 October 2020.

4) European Commission. (2021). *Pathway to a Healthy Planet for All: EU Action Plan — Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil*. COM(2021) 400 final, Brussels, 12 May 2021.

5) European Commission. (2021). *EU Soil Strategy for 2030: Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate*. COM(2021) 699 final, Brussels, 17 November 2021.

最終目標 EU土壌戦略

2050年までに、健康な土壌 (healthy soils) が広く確保された状態を実現すること。

ここでいう「健康な土壌」とは、以下の生態系サービスの提供が継続的にできる状態

- 農業や林業を含む食糧・バイオマス生産の提供
- 水を吸収・貯留・濾過し、栄養分や物質を変換することで地下水体を保護すること
- 生息地、種、遺伝子を含む生命と生物多様性の基盤を提供すること
- 炭素貯蔵庫としての機能を果たすこと
- 人間とその活動のための物理的基盤と文化的サービスを提供すること
- 原材料の供給源として機能する
- 地質学的、地形学的、考古学的遺産の記録を構成する



Brussels, 17.11.2021
COM(2021) 699 final

COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS

EU Soil Strategy for 2030
Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate

Soil contamination ⁸	Concentrations of PFAS-21 ⁹ or concentrations of PFAS-43 ¹⁰ or selected PFAS set by Member States in accordance with Article 7(4) Concentrations of selected active substances in pesticides and their metabolites set by Member States in accordance with Article 7(4) Optional: - concentrations or presence of a selection of other emerging soil contaminants set by Member States in accordance with Article 7(4)
---------------------------------	---

SMRDにおけるPFAS監視対象・分析要件

測定すべき PFAS 化合物のリスト

(PFAS-21/PFAS-43) を規定

参考

PPWR : Packaging and Packaging Waste Regulation (2024-)

包装 (食品包装?) の設計・市場投入・廃棄を一体で規制し、循環利用の義務化とともに、PFAS等有害化学物質の使用を上流側で抑制するEU規則。段階的に義務が発効 (主に2025-2030にかけて)、上位制度 CSS。REACH規制を前提とした、包装分野で上乘せ。

2026/1/29

⁸ May be measured on a limited number of sampling points.
⁹ 6:2 FTS, PFBA, PFBS, PFDA, PFDoDA, PFDoDS, PFHpA, PFHpS, PFHxA, PFHxS, PFNA, PFNS, PFOA, PFOS, PFPeA, PFPeS, PFUnDA, PFUnDS, PFUnDA, PFUnDS or other 21 PFAS, as available in the laboratories.
¹⁰ PFOS, PFOA, PFHxS, PFNA, PFBS, PFPeS, PFHpS, PFNS, PFDS, PFUnDS, PFDoDS, PFTeDS, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTeDA, PFOA, N-EtFOSA, N-MeFOSA, FOSAA, N-EtFOSAA, N-MeFOSAA, FHexSA, N-EtFHexSA, N-MeFHexSA, FHexSAA, N-EtFHexSAA, N-MeFHexSAA, FBSA, N-EtFBSA, N-MeFBSA, FBSAA, N-EtFBSAA, N-MeFBSAA, 6:2 FTS, 8:2 FTS, 5:3 FTCA, 7:3 FTCA or other 43 PFAS, as available in the laboratories.

参考 EUのPFAS飲料水基準 等

対象PFAS	
飲料水基準値	
日本	Σ2 PFAS PFOSとPFOAの合算値で、50ng/L
デンマーク	Σ4 PFAS (PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS): 2 ng/L ²⁹⁾
スウェーデン	Σ4 PFAS 4 ng/L 2026年1月1日～ Σ21 PFAS 100 ng/L 2026年1月1日～ ²⁸⁾
ドイツ	2023年改正 2026年から Σ20 PFAS 100 ng/L 2028年から Σ4 PFAS (PFOS、PFOA、PFNA 及び PFHxS) 20ng/L ²⁶⁾
欧州 European Commission	PFAS Total (総PFAS) : 500 ng/L (加盟国オプション) ²⁹⁾ Sum of PFAS (Σ20 PFAS) : 100 ng/L

PFOS の EQS (Environmental Quality Standards) 内陸表流水 (Inland surface waters) 0.65 ng/L

26) Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUK). (2024). Bewertungsmaßstäbe für PFAS-Konzentrationen für NRW.

27) Valentin, I. (2025). PFAS – Vermeidbar, Ersetzbar, Unverzichtbar?! Sanierung von PFAS Boden- und Grundwasserverunreinigungen: die kommunale Perspektive. Presentation at Freie Universität Berlin, 7–8 April 2025. Landeshauptstadt Düsseldorf, Umweltamt.

28) Livsmedelsverket. (2022). LIVSFS 2022:12 – Regulations on Drinking Water (Swedish Food Agency).

29) European Union. (2020). Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption. Official Journal of the European Union, L 435, 1–62.

実証試験

① LIFE SOuRCE プロジェクト (2021–2025)⁶⁾

目的：PFAS で汚染された**地下水**を、低コスト・省エネ・高効率で処理できる革新的な浄化技術（特に破壊技術）の開発・実証
（**€0.10/m³ 未満、短鎖PFASの効率的除去**）

資金源：EU LIFE Programme

② SID-Water プロジェクト (2023–2027)⁷⁾

目的：欧州の大規模**水道システム**で、PFAS を安全に除去する革新的技術の実装。処理後に環境へ再放出される従来型 **treat-and-release 型管理から脱却**し、汚染物質の環境循環を根本から遮断

資金源：EU（Horizon Europe系）

③ PFClean – National PFAS Contaminated Site Project (2023–2026)⁸⁾

目的：PFAS により汚染された 土壌・地下水の**制御・固定化**および**封じ込め**技術の開発・実証

資金：ドイツ連邦政府 BMBF（Federal Ministry of Education and Research）

水質に応じた技術の組合せを重視
Treatment train(トレイン方式処理) が
単一技術より高い除去効率をもたらす⁹⁾

実施機関・中心研究者

スウェーデン農業科学大学
Prof. Lutz Ahrens, PhD

シュトゥットガルト大学・VEGAS
（Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und
Altlastensanierung、土壌・地下水修復研究施設）
PD Dr.-Ing. Claus Haslauer

6) European Commission; LIFE SOuRCE Consortium. (2025). About the project – LIFE SOuRCE (LIFE20 ENV/ES/000880). LIFE Programme of the European Union.

7) Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) (2025). SIDWater – Sustainable Innovative Drinking Water Treatment Solutions.

8) University of Stuttgart, Research Facility for Subsurface Remediation (VEGAS). 2023–2026. PFClean: Innovative modular system for sustainable reduction of PFAS contaminants from soil and groundwater. Institute for Modelling Hydraulic and Environmental Systems (IWS), University of Stuttgart.

9) Lu, D., Sha, S., Luo, J., Huang, Z., & Zhang, X. (2020). Treatment train approaches for the remediation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A critical review. Journal of Hazardous Materials, 386, 121963.

ウプサラ埋立地 (Sweden) における LIFE SOuRCE実証結果¹⁰⁾

LIFE SOuRCE treatment train

① 運転状況と処理量

- 稼働期間 2024年5月-2025年4月
- 最終処理量：約 28,000 m³
- 平均電力消費：0.62 kWh/m³

② PFAS 除去性能 (モニタリング結果)

原水濃度 最大3,000 ng/L¹¹⁾

- 長鎖PFAS除去率：94% (SAFF®)
- 短鎖PFAS除去率：19% (SAFF®)

③ 特徴・技術的意義

- 短鎖 PFAS まで対象に含む“Treatment Train”方式 (SAFF® + EO + PHYTO) を Pilot スケールで実証
- SAFF® は長鎖PFAS に極めて高効率であるが、短鎖には効率低い。PHYTO による短鎖PFASの除去
- 分解技術 (EO) と植物浄化 (PHYTO) のハイブリッド型の欧州最新アプローチ

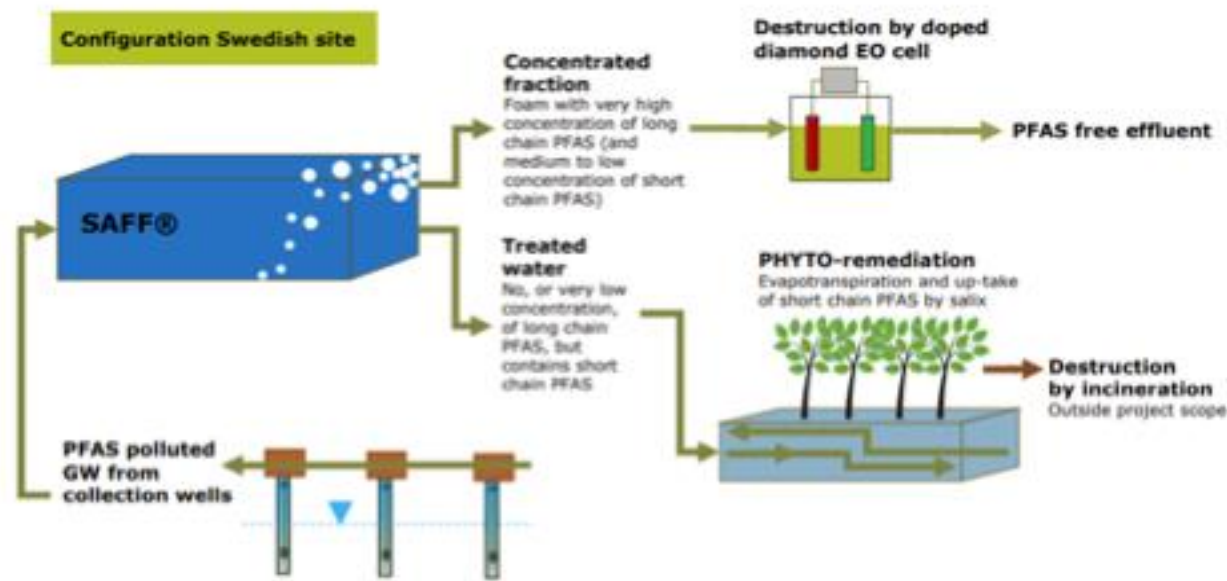


Figure 1: Contaminated groundwater is pumped into the SAFF unit where the water is purified mainly from long chain PFAS, but also some of the short chain compounds. PFAS in the concentrated foam are destroyed by electrochemical oxidation in the EO cell. The SAFF-treated water is fed into a PHYTO test bed with Salix that will take up the short-chain PFAS compounds in its biomass.

使用技術 (Treatment Train) – Fig.1

出典 10) Envytech Solutions AB (2025)

1. **SAFF®** (Surface Active Foam Fractionation)
長鎖 PFAS を主に高効率で除去。Foamに濃縮しEOへ送る
2. **EO** (Electrochemical Oxidation/電気化学酸化)
SAFFで濃縮されたPFAS Foamをダイヤモンドドーブ電極で分解
3. **PHYTO** (Phytoremediation/植物浄化)
SAFF処理水をヤナギ類植栽ベッドへ。短鎖PFASの吸収

10) LIFE SOuRCE Consortium; LIFE SOuRCE – Sustainable On-site Remediation technologies for PFAS-contaminated groundwater. LIFE Programme of the European Union (Grant Agreement No LIFE20 ENV/ES/000880). <https://life-source.se/en/start/>

11) LIFE SOuRCE Consortium; Envytech Solutions AB. (2023). Construction of extraction wells at Hovgården. LIFE SOuRCE Project.

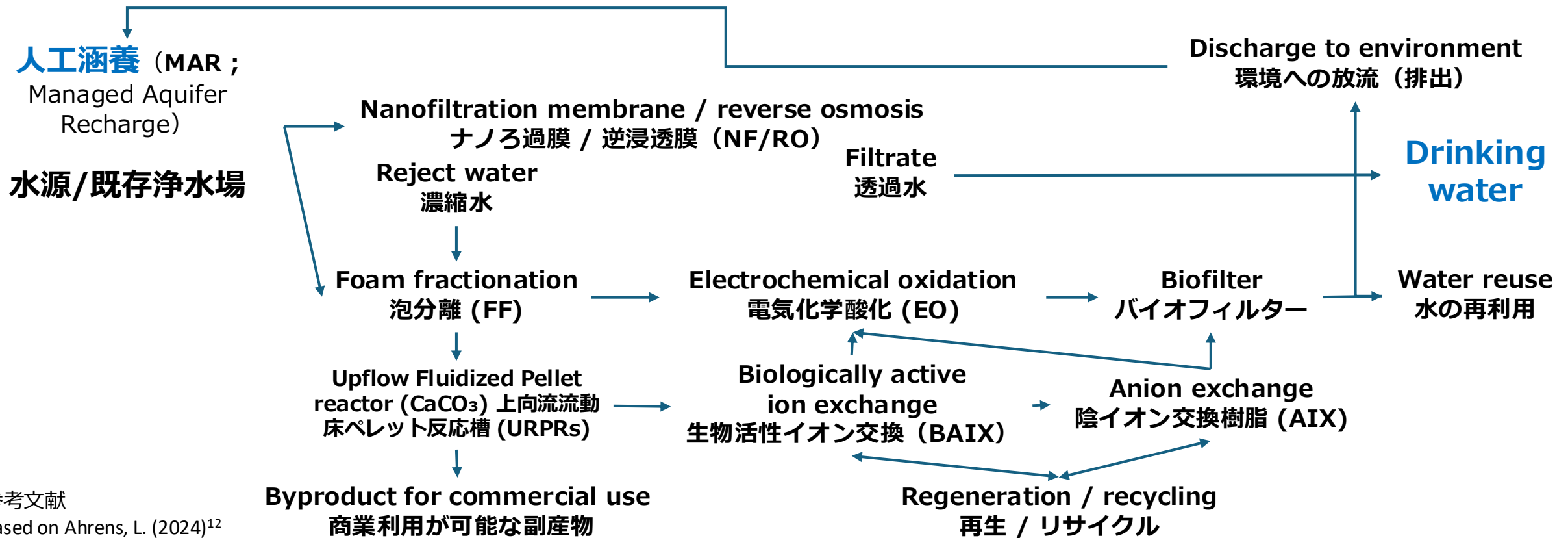
SID-Water : 人工涵養 (MAR) を組み込んだPFAS処理フロー¹²⁾

背景

① Σ4 PFAS (4 ng/L、Swedish Food Agency (SLV)の新しい飲料水基準) への対応が急務

② 2021年時点で、200万人以上 (人口1057万人, 2024年) が基準超過飲料水の影響を受ける

実証サイト : Fyris river (人工涵養原水および AFFF (泡消火剤) による汚染地下水) 他4箇所



参考文献
Based on Ahrens, L. (2024)¹²⁾

12) Ahrens, L. (2024). *An overview of remediation techniques for removal of PFASs in soil and water*. Department of Aquatic Sciences and Assessment, SLU, Uppsala, Sweden. https://nordrocs.org/wp-content/uploads/nordrocs2024/L1_Ahrens.pdf

PFCleanで実証する主要技術¹³⁾

(モジュラー型アプローチ)

現地の地質条件・汚染特性に応じて、複数の技術を組み合わせることで適用する総合的な浄化手法

① PFASの“固定化” (Immobilization)

汚染土壌に活性炭 (AC) を混合、PFASを吸着し地下水への移行を抑制

② ファンネル&ゲート (Funnel & Gate)

不透水壁 (Funnel) で地下水流を誘導し、ゲート部に配置した吸着材でPFASを集中的に捕捉する技術

③ 強制移動 (forcierte Mobilisierung)

水理操作 (加圧・揚水・流向制御など) によりPFASを意図的に移動させ、回収しやすくする手法

④ 熱処理 (thermische Sanierung)

熱を加えてPFASを脱離させ、抽出または破壊する技術

⑤ モニタリングシステム

土壌間隙水・地下水の多層モニタリング 50種以上のPFAS + 前駆体分析



Universität Stuttgart
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)

PD Dr.-Ing. Claus P. Haslauer & Dr.-Ing. Simon Kleinknecht
vegainfo@iws.uni-stuttgart.de
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
Pflaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart, Deutschland
<https://www.iws.uni-stuttgart.de/vegas/>



<https://www.iws.uni-stuttgart.de/pfclean/>

Hintergrund

Die Stoffgruppe der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) umfasst mehrere tausend (OECD-Liste) bis mehrere Millionen Einzelsubstanzen (PubChem, NCBI). Aufgrund ihrer Persistenz, Bioakkumulation und Toxizität sowie ihrer weitverbreiteten Anwendung und ihres ubiquitären Vorkommens in der Umwelt, stellen PFAS derzeit eine der größten Herausforderungen, unter anderem für die nachhaltige Kreislaufwirtschaft, Gewässerbewirtschaftung und Trinkwasserversorgung dar. Ziel des Forschungsvorhabens PFClean ist die Weiterentwicklung und Erprobung verschiedener Ansätze zur Sanierung und Ausschleusung von PFAS aus Boden und Grundwasser wie „Funnel und Gate“, „Immobilisierung“, „forcierte Mobilisierung“ und „thermische Sanierung“ im Pilot- und Feldmaßstab.

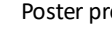
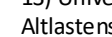
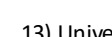
Pilotstandorte

An zwei Pilotstandorten werden in-situ Sanierungsverfahren für PFAS erforscht. Die Auswahl der Standorte richtete sich nach typischen Schadensquellen. In Reilingen existiert ein Schadenfall der durch Löschschalen (AFF) entstand (linkes Bild); im Rheintal bei Rastatt / Baden-Baden existiert ein ca. 1000 ha großer heterogener non-point Schadenfall (rechtes Bild).



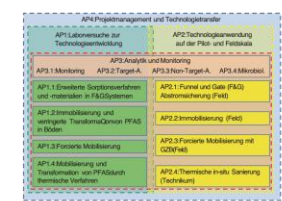
Partner

Universität Stuttgart, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)



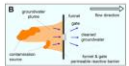
Grundwasser nachhaltig bewirtschaften

Plan



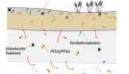
Erweiterte Sorptionsverfahren

Systeme zur Ausschleusung mobilisierter PFAS und zur Abstromsicherung von Punktquellen. Die Sorptionsmaterialien im Gate sind austauschbar. Herausforderung ist die Erhöhung der Sorptionskapazität mobiler kurzzeitiger Perfluorcarbonsäuren (PFCA). Dies soll durch elektrische Polarisation leitender Adsorber (Aktivkohle) erreicht werden.



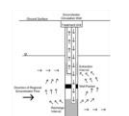
Immobilisierung

Ziel ist eine Verminderung der Transformation der sorbierten PFAS durch Adsorptionsmaterialien und damit eine reduzierte Nachlieferung mobiler, kurzzeitiger TP ins Grundwasser.



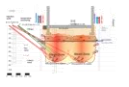
Forcierte Mobilisierung

Als Alternative zur Immobilisierung im Aquifer durch Unterstützung der mikrobiellen Transformation (Management von Temperatur, Zugabe von Elektronenakzeptoren). Ziel ist die zeitlich beschleunigte Umsetzung der sorbierten Schadstoffquelle im Grundwasserleiter über mobile Transferprodukte (TP).



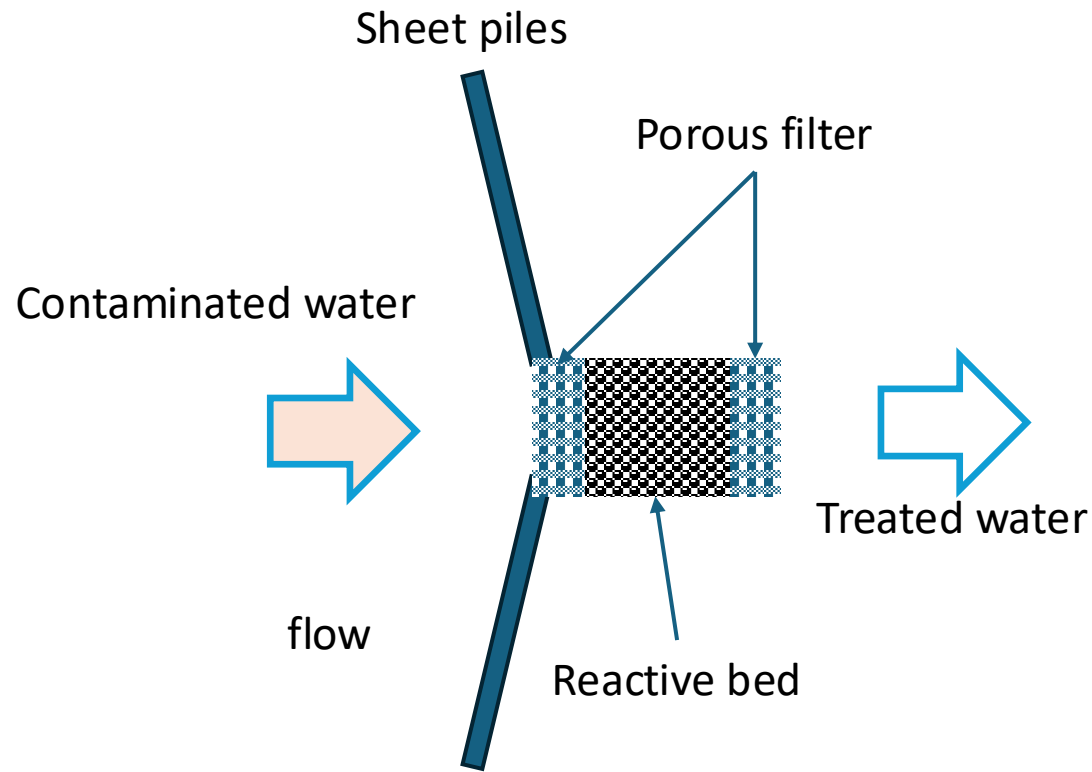
Mobilisierung und Transformation von PFAS durch thermische Verfahren

Umsetzung und Mobilisierung von immobilisierten Präkursoren bei erhöhten Temperaturen. Dabei sollen thermisch-katalytische Prozesse, die zur Bildung von TP führen, charakterisiert und bezüglich einer Mobilisierung und Ausschleusung beurteilt werden. Mit diesen grundlegenden Kenntnissen wird die Auslegung von thermischen in-situ Verfahren optimiert.



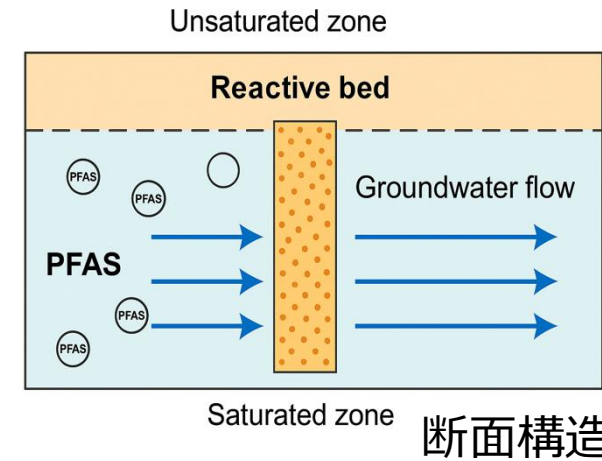
13) Universität Stuttgart, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS). (n. d.). PFClean – Innovatives modulares System zur nachhaltigen Reduzierung von PFAS-Kontaminanten aus Boden und Grundwasser. Poster presented at LURCH Kick-off Meeting. Stuttgart, Germany.

Funnel & Gate システムによるPFAS固定化



Overhead view of a funnel and gate system

平面構造



技術の特徴

- 地下水流を制御しつつ、PFAS を吸着材で捕捉するパッシブ型（低エネルギー）技術
- 従来のポンプ&トリート（揚水浄化）に代わる汚染プルーム制御手段として期待される
- 汚染源対策（ソースゾーン管理）にも有効性が示唆される
- 実証段階¹⁵⁾

参考文献

Based on: Hatzinger, P.B. (2024)¹⁴

14) Hatzinger, P.B. (2024). *PFAS Remediation Strategies and Research*. Aptim Federal Services, Lawrenceville, NJ. Technical presentation delivered on 27 September 2024.

15) Coyle, C., Ghosh, R., Leeson, A. & Thompson, T. (2021). *US Department of Defense-Funded Research on Treatment of Per- and Polyfluoroalkyl Substance-Laden Materials*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(1), 44–56.

2 日本におけるMF膜・機能性粉体添着法 (LFP法) による 長期安定運転実証



沖縄県親水公園
2023年4月より
運転中

LFP法の実績
と
機能性粉体のPFAS
除去効率を高める
仕組み

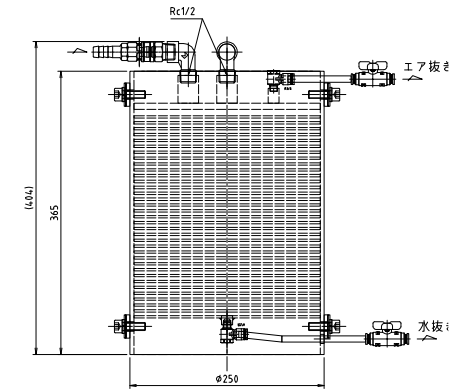
株式会社 流機エンジニアリング

PFASを 99.9%以上除去 LFP カートリッジ

現場での使いやすさと
高いコストパフォーマンスを追求して開発しました
次世代のカートリッジ式 PFAS浄化ユニット

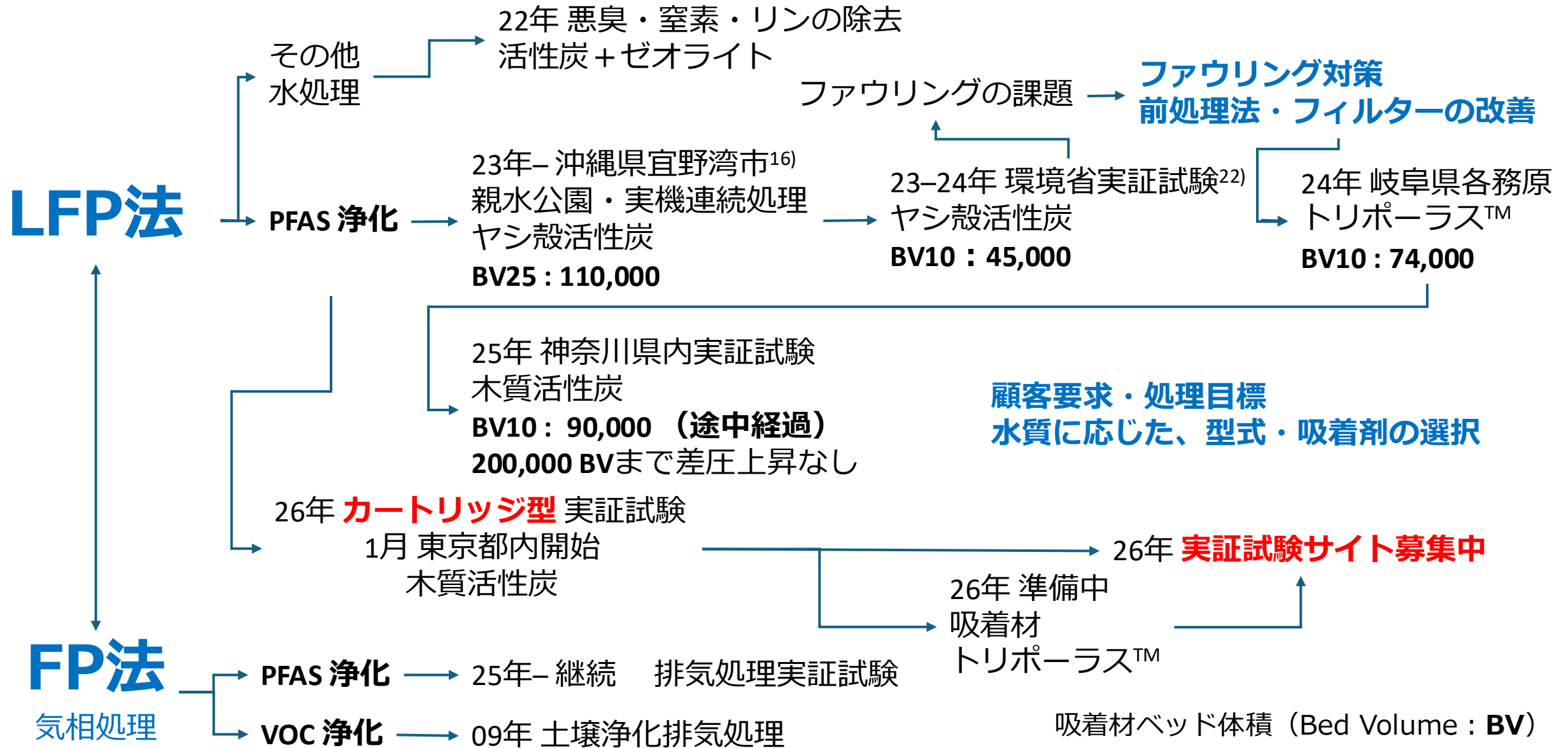
- ◆ 機能性粉体 × 特殊フィルター層による高効率 PFAS 除去
- ◆ ディスク構造で高性能かつ安定した処理を実現
- ◆ 専用水道（病院・工場・学校など）に最適な処理規模と運用性
- ◆ 現場でのメンテナンスはカートリッジの簡単交換だけ

さまざまな現場にフィットする
シンプルで持続可能な浄化システムです



LFPカートリッジ 実証試験

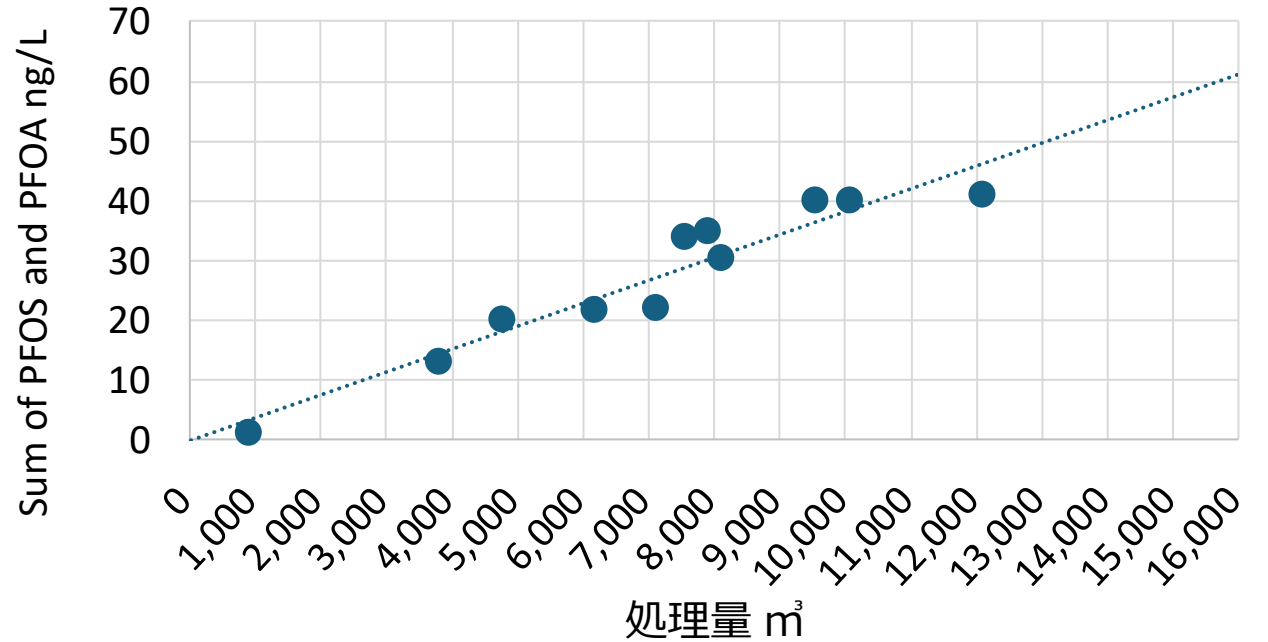
LFP法の取り組み 履歴



MF膜・機能性粉体添着法 (LFP) 実用機の実績

沖縄県宜野湾市 湧水公園

- 2023年4月、PFAS浄化専用装置として稼働開始 (2025年1月末までの累積処理量98,886 m³)¹⁶⁾
- 湧水から検出されたPFOS及びPFOAを濃度の合算値50 ng/L以下に低減し、放流
- 処理量：30 m³/h、ECOクリーンLFP 50M×4棟
- PAC使用量：60 kg/交換
- 平均電力消費：0.27 kWh/m³
- 前処理：降雨時の濁度対策
降雨による濁度上昇時には、原水の取り込みを一時停止することで膜ファウリングを防止し、連続運転を確保

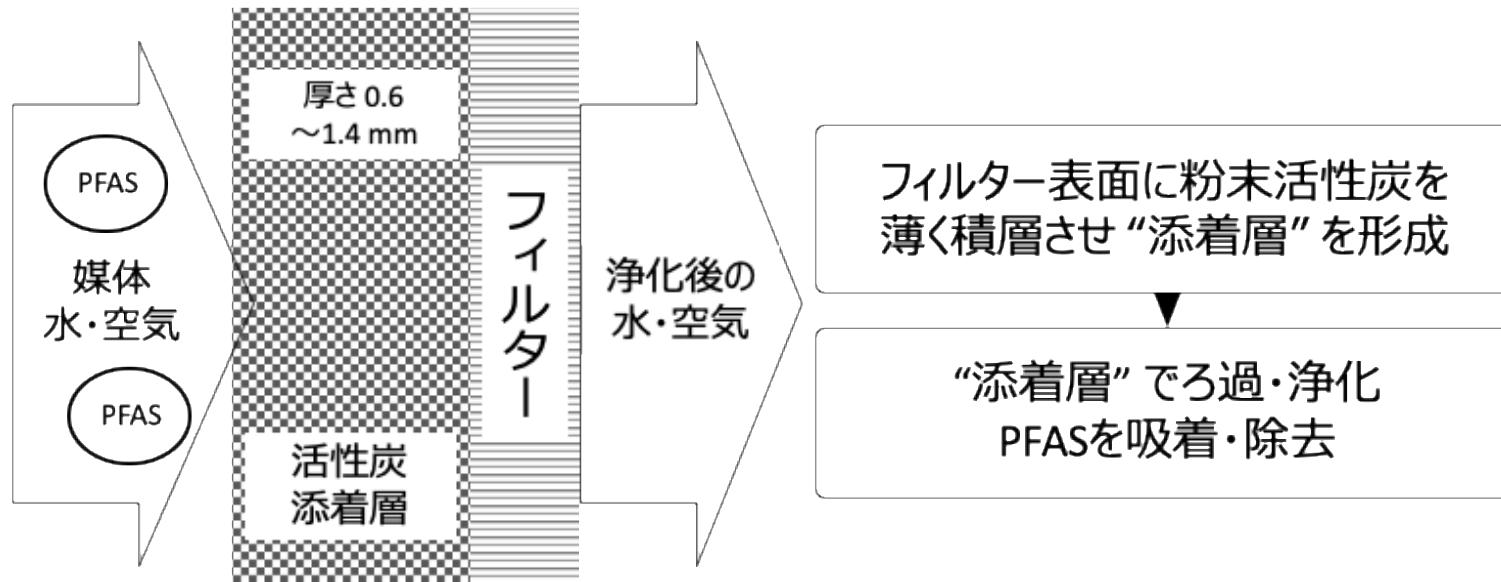


1回の活性炭 (60 kg) 交換で、13,000m³の処理¹⁶⁾
(BV₂₅：25%破過 (除去率75%) までの処理量ベッド容積 = 11万BV)



16) 新垣千紘、高柳宏、草場周作、安原雅子、西村聡、山内仁：PFAS含有地下水における浄化装置の運転及び維持管理の手法、第30回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会、講演要旨集、p.78～82、2025

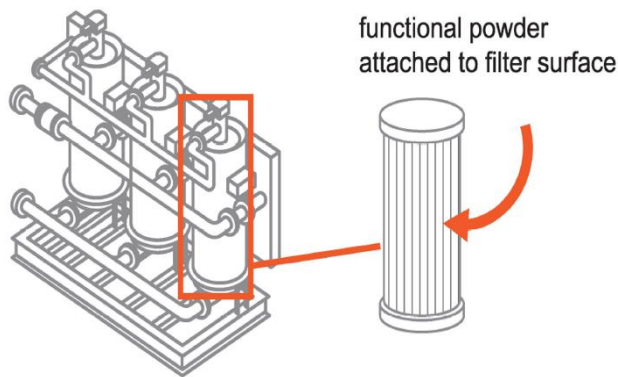
LFP技術の原理と仕組み



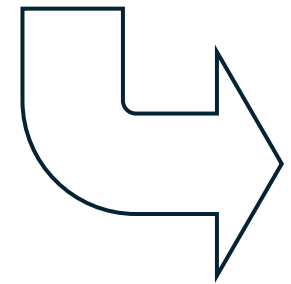
- 活性炭 粉体化の効果
- 粉末活性炭の使用方法による除効果の違い

従来法【混和法】
VS
本技術【LFP法】

技術の原理と仕組み



ブリーツフィルタータイプ 高さ2.0m カートリッジタイプ 高さ40cm



PACとGACのPFAS吸着性能比較

■ GACと比較したPACの優位性（文献レビュー）

- ① 活性炭粒子を小径化することで、単位質量当たりの比表面積が増加し、その結果、吸着速度および吸着容量が向上する¹⁷⁾
- ② 同一種活性炭を用いた場合、PAC($D_{50} = 45 \mu\text{m}$)とGAC($D_{50} = 836 \mu\text{m}$)とを比較すると、PACの吸着容量はGACの約6倍、初期吸着速度は約600倍に達することが示されている¹⁸⁾（右図）

しかし、

- ③ 50 mg/L以上のPACを連続投与する運転方式は、実規模浄水場（DWTP）では費用対効果が低く、実用的でない¹⁹⁾

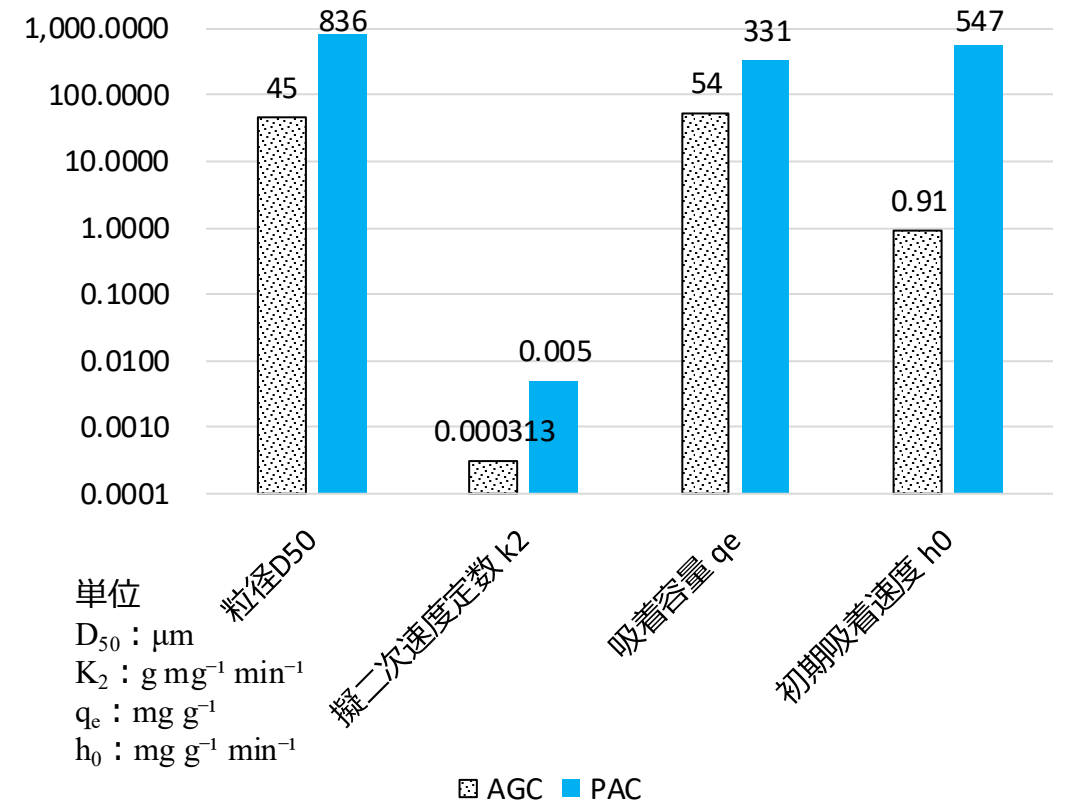


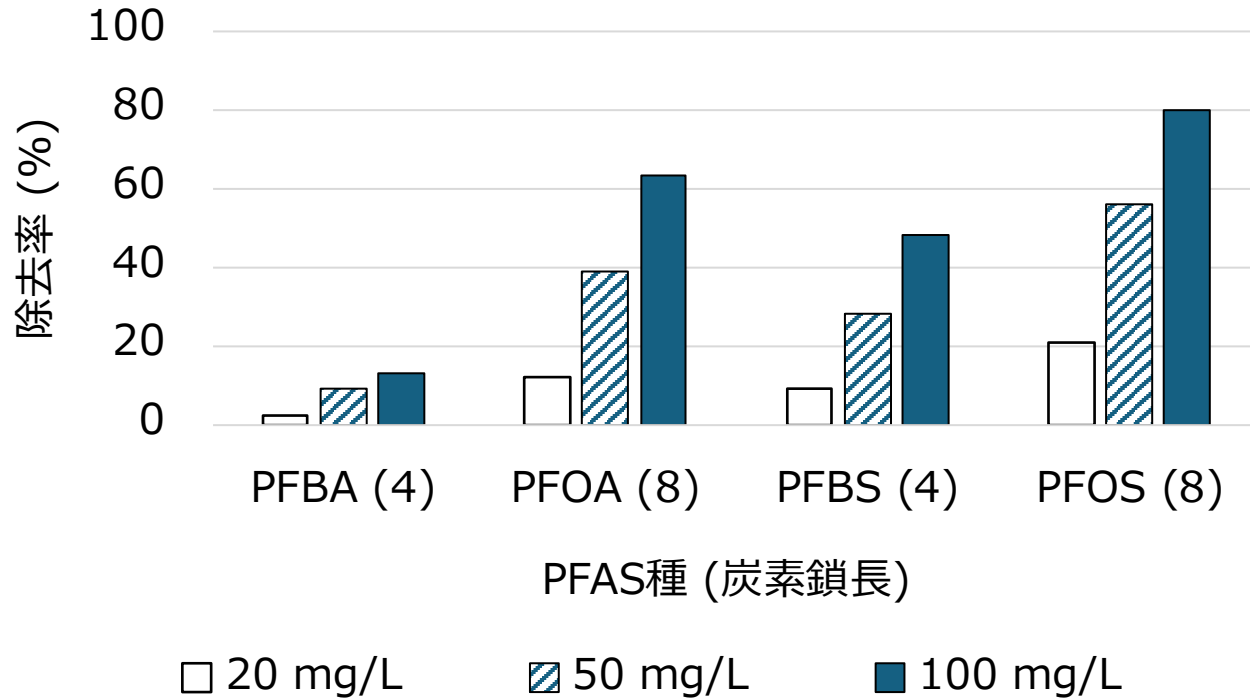
図 水中 PFOA に対する粉末活性炭および粒状活性炭の吸着速度定数および吸着容量の比較（同一原料活性炭）
文献18)を基に作成

同一原料（ヤシ殻炭）由来の活性炭を、粒状のまま(GAC)用いた場合と、これを粉砕してPACとした場合における吸着性能の比較を示す。同一のヤシ殻由来活性炭において、粒径の違い（PAC： $D_{50} = 45 \mu\text{m}$ 、GAC： $D_{50} = 836 \mu\text{m}$ ）により、PACの吸着容量はGACの約6倍、初期吸着速度は約600倍に達している

17) 藤直哉, 松井佳彦, 松下拓, 大野浩一「佐々木洋志, 中野優: 活性炭の超微粉化が活性炭吸着に与える効果, 環境工学研究論文集, 5.309-315 (2008)

18) Premrudee Kanchanapiya, Supachai Songngam, Thanapol Tantisattayakul : The adsorption of perfluorooctanoic acid on coconut shell activated carbons, AIMS Environmental Science, 9(2), 128~139 (2022)

50 mg/L 以上の PAC を投与する運転方式は、DWTPでは費用対効果が低く、実用的でない¹⁹⁾



PACのかさ密度を0.5と仮定した場合、PAC投与量50 mg/Lは、吸着材ベッド体積 (BV) 換算で約10,000 BV (処理水量 ÷ 活性炭層体積) に相当する

一般的なGACによる浄水処理では、PFOA除去率50%以上を維持できる処理量はおおよそ10,000 BVと示されている²⁰⁾

PACを50 mg/L以上投与することは、実質的にGACよりも多量の吸着材消費を意味する

図1 混和法における粉末活性炭投与量別PFAS除去率の比較例 文献19)を基に作成

原水：PFAS14種混合、各PFAS初期濃度 5,000 ng/L。本図は文献19)に示された結果を基に整理したものであり、原水条件を同一とした上で粉末活性炭投与量を変化させた場合のPFAS除去傾向の比較を目的とする。

19) Ahrens, L., Lundgren, S., McCleaf, P., & Köhler, S. (2025). Removal of perfluoroalkyl substances (PFAS) from different water types by techniques based on anion exchange (AIX), powdered activated carbon (PAC), iron(III) chloride and nanofiltration (NF) membrane – A systematic comparison. *Science of The Total Environment*, 970, 179004.

20) Nakazawa, Y., Kosaka, K., Yoshida, N., Asami, M., & Matsui, Y. (2023) : Long-term removal of perfluoroalkyl substances via activated carbon process for general advanced treatment purposes. *Water Research*, 245, 120559.

PAC使用方法による

PFAS吸着プロセスおよび除去特性の違い

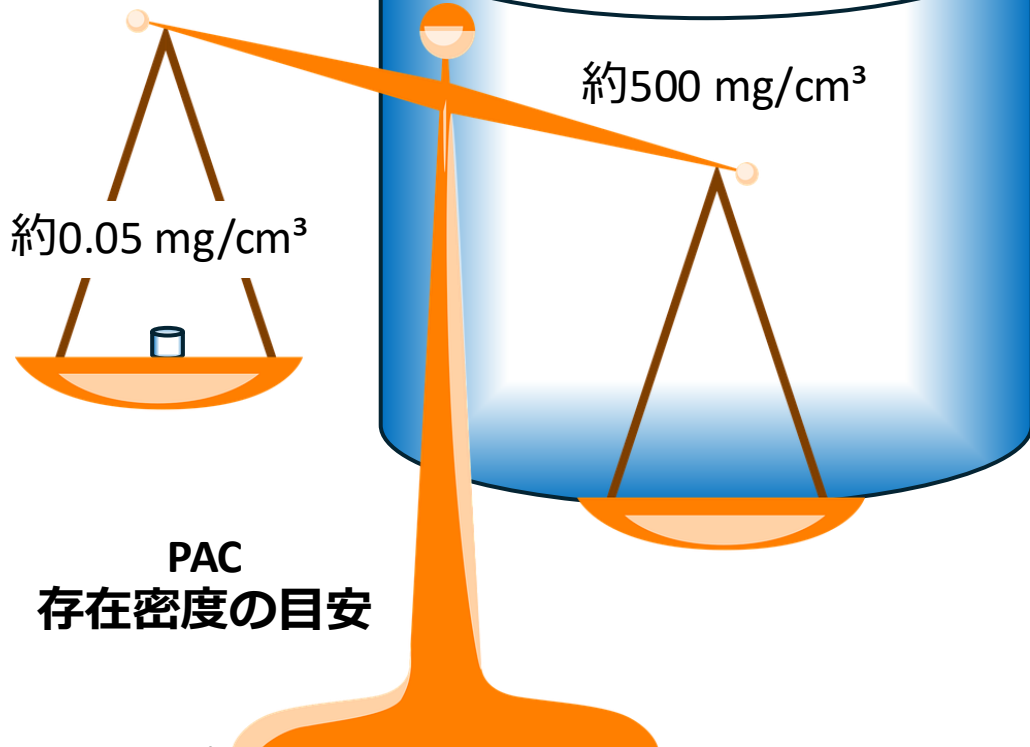
混和法

添加量 50 mg/L とした場合



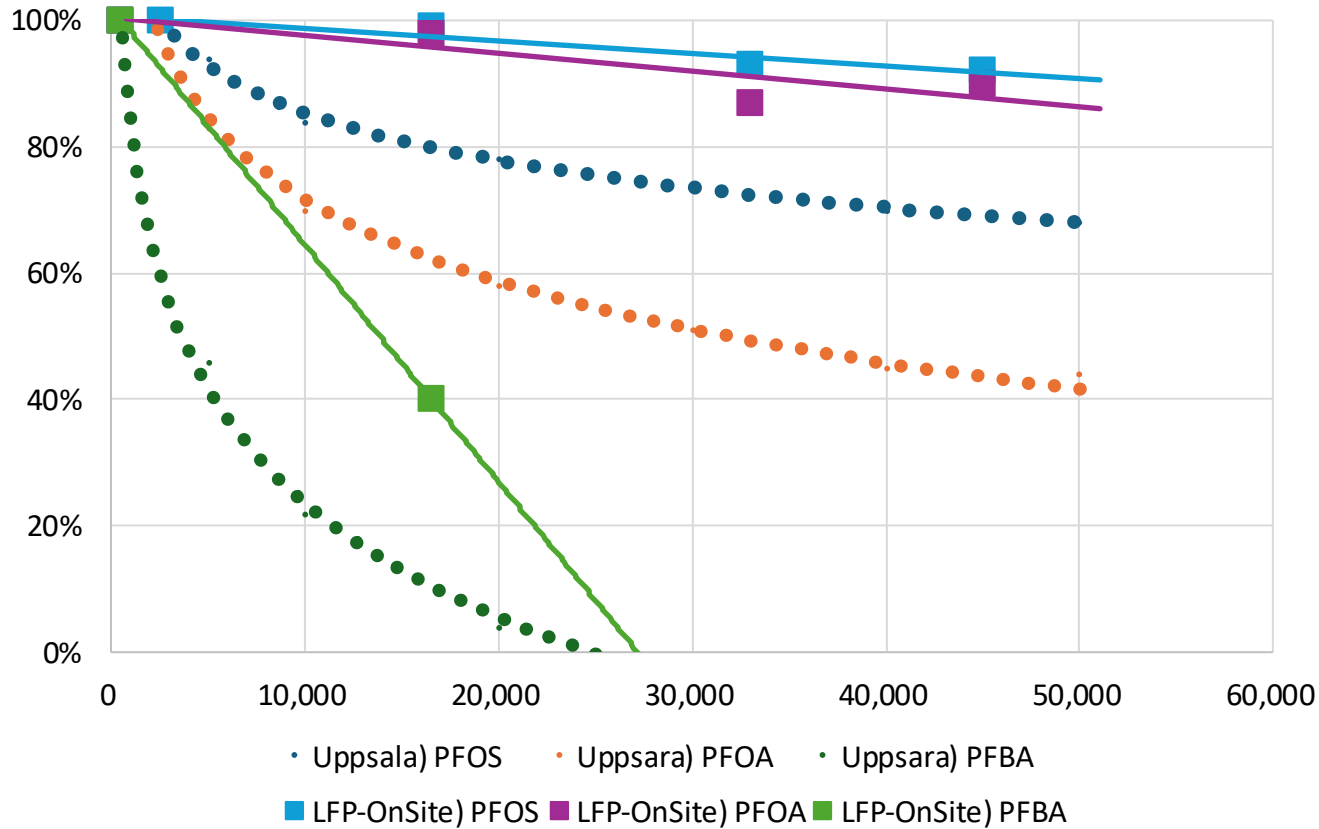
LFP法

添着量 500 g/m²、添着層厚さ 1 mm



使用方法	混和法	LFP法
処理形態	バッチ処理	連続処理
原水中での存在形態	PACが水中で希薄に分散	PACが膜表面で高密度に固定化
PAC存在密度	左図	
PFAS吸着プロセス	PFASは水中を拡散しながらPAC粒子と偶発的に接触、吸着が進行	PFASと吸着材との接触は偶発的ではなく強制的かつ連続的に確保
除去特性	吸着の進行に伴い水中PFAS濃度が低下すると、液相-固相間の濃度勾配および接触頻度が減少、物質移動の駆動力が失われる 結果、除去効率は時間とともに低下する	PAC層の原水入口側と出口側での濃度勾配が大きいく、液相-固相間の濃度勾配が保持され、物質移動の駆動力が持続しやすい 結果、高い除去効率が維持される

GACとLFP法の破過挙動 (BV) 比較



GAC と LFP法 の破過挙動の比較

■ 結論

LFP法は、GAC（吸着塔など）と比較して、高い除去率を長期間維持でき、その結果、大きな BV を達成できる

21) McCleaf, P., Englund, S., Östlund, A., Lindegren, K., Wiberg, K., & Ahrens, L. (2017). Removal efficiency of multiple poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water using granular activated carbon (GAC) and anion exchange (AE) column tests. *Water Research*, 120, 77–87.

22) 環境省(2024)：令和5年度 低コスト・低負荷型土壌汚染調査対策技術検討調査「揚水及びフィルター（精密ろ過膜）と機能性粉体（活性炭）を用いた処理法によるPFAS地下水汚染の拡大防止技術」による研究委託業務報告書（受託者 ㈱流機エンジニアリング），同 公表版

1) Uppsala) : (McCleaf et al., 2017)²¹ に基づき作図

GACおよび現地水を用いたカラム試験

原水濃度：PFHxS 83 ng L⁻¹, PFOS 47 ng L⁻¹, PFBS 13 ng L⁻¹, PFHxA 10 ng L⁻¹

高い除去率の維持が難しい

2) LFP-OnSite) : (環境省, 2024)²² に基づき作図

LFPによる現地試験

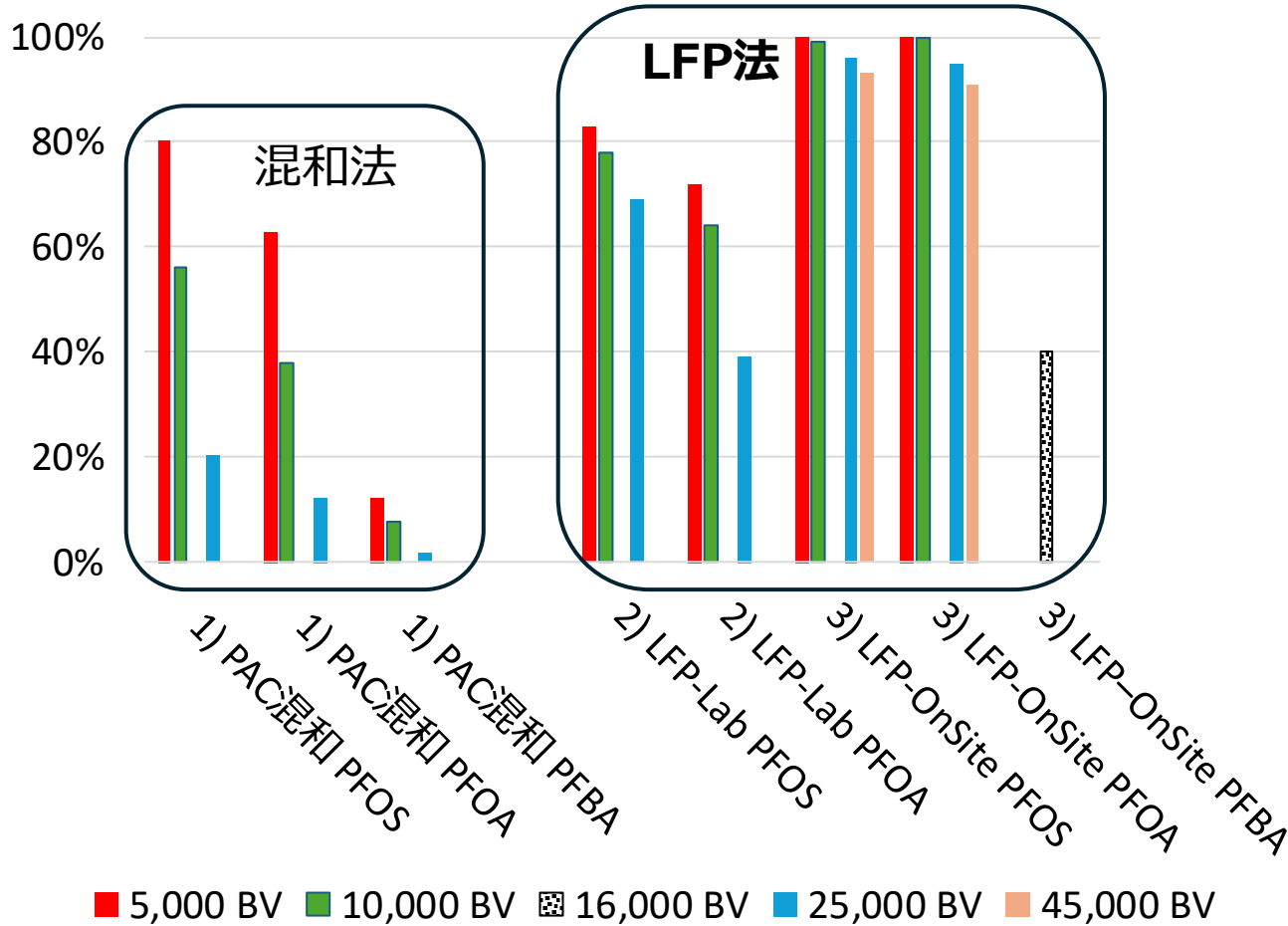
原水濃度：Σ40 PFAS = 1,500 ng L⁻¹

PFHxS 370 ngL⁻¹, PFOS 600 ngL⁻¹, PFOA 120 ng L⁻¹, PFBS 27 ng L⁻¹, PFBA 23 ng L⁻¹, PFHxA 97 ng L⁻¹

高い除去率を維持したまま、大きなBVを達成

PAC混和法とLFP法における PFAS除去性能の比較

本図は、**BV**に対する
PAC 混和法 vs LFP 法 のPFAS 除去率の比較を示している。



■ **1) PAC 混和法** : Based on Ahrens et al. (2025)¹⁹
 原水濃度 (Σ14 PFAS = 75,000 ng/L)
 PFOS : 5,000 ng/L
 PFOA : 5,000 ng/L
 PFBA : 5,000 ng/L
 DOC : 6.1-9.6 mg/L

■ **2) LFP-Lab (高濃度 PFAS 模擬水)** : Based on 環境省(2024)²²
 使用活性炭量 1.15g
 原水濃度 (Σ4 PFAS = 450,000 ng/L)
 PFOS : 100,000 ng/L
 PFOA : 110,000 ng/L
 TOC : 3.0 mg/L

■ **3) LFP-OnSite** : Based on 環境省(2024)²²
 使用活性炭量 500g
 原水濃度 (Σ40 PFAS = 1,500 ng/L)
 PFOS : 600 ng/L
 PFOA : 120 ng/L
 PFBA : 23 ng/L
 TOC : 0.2 mg/L

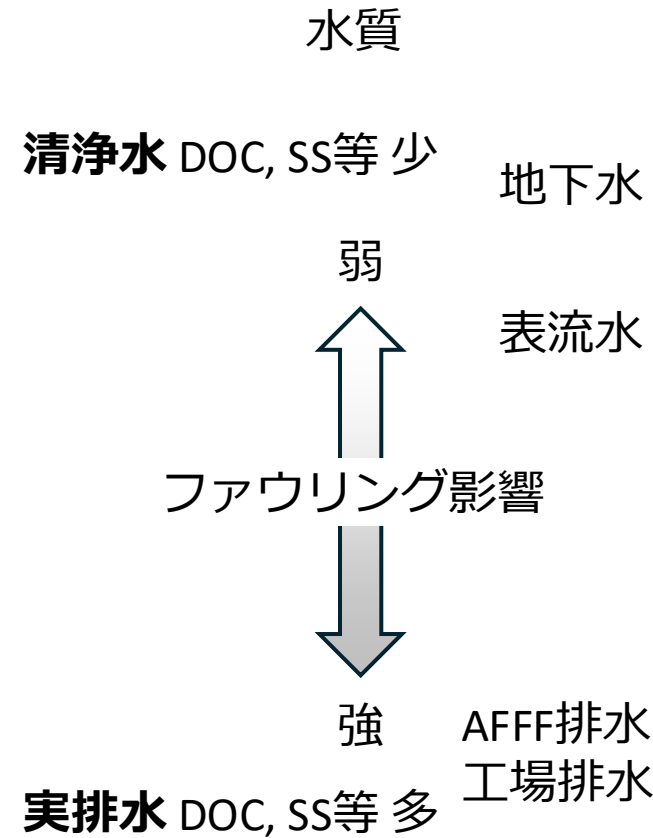
PACのかさ密度を0.5と仮定

BV	混和法 活性炭濃度	LFP法使用活性炭量に対する処理量	
		1.15 g	500 g
5,000	100 mg/L	12 L	5 m ³
10,000	50 mg/L	23 L	10 m ³
16,000	30 mg/L	—	16 m ³
25,000	20 mg/L	58 L	25 m ³
45,000	11 mg/L	—	45 m ³

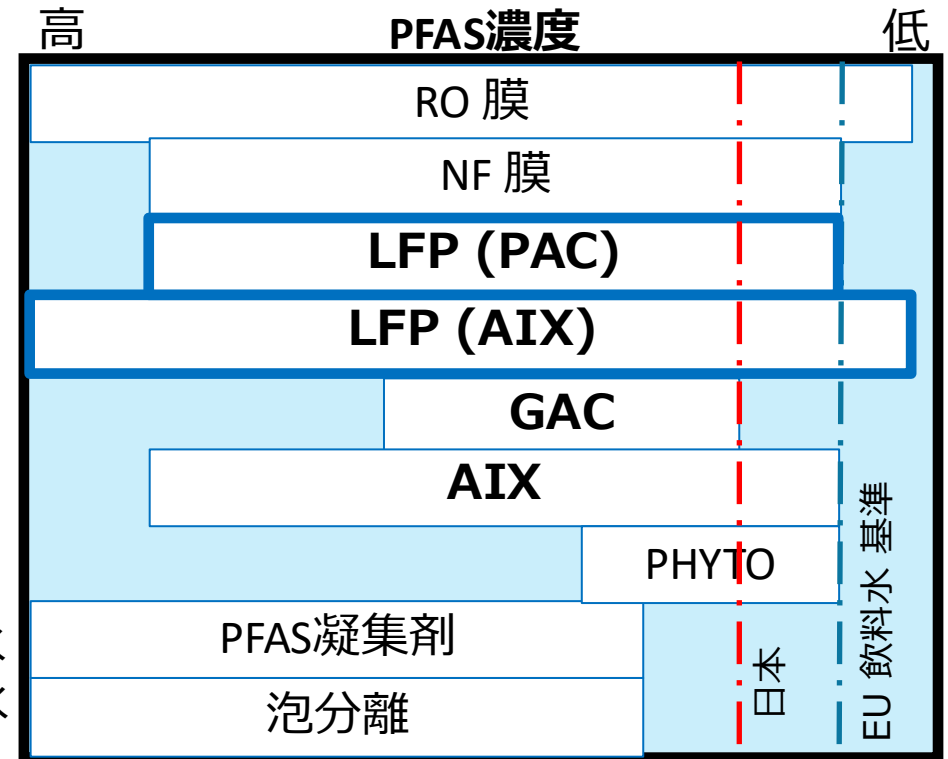
● **使用活性炭量当たりの処理量が増えると、混和法では除去率低下が著しい。LFP法 は高い除去率を維持する**

** PFAS浄化における Treatment Train (多段処理) の重要性**

- LFP(は吸着材 (活性炭)が本来有する性能 (吸着速度および吸着容量) を処理プロセス上で効果的に発現させる技術
 - 日本基準のみならず、EU基準の達成も可能
- しかし、ファウリングの影響を受ける
- 実排水の浄化ができるよう、前処理方法や他技術との組み合わせを研究開発中



前処理無しでの単独技術での適用として



Base on CONCAWE (2020) ²³ など

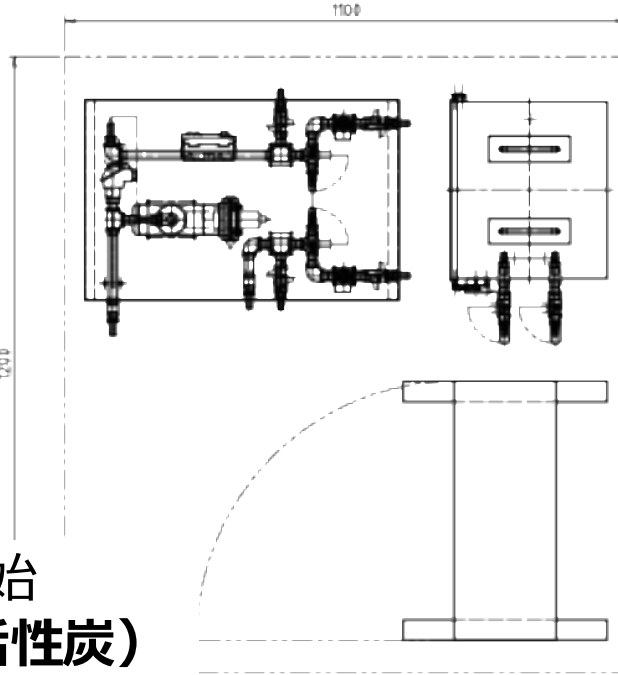
陰イオン交換樹脂 (AIX : Anion Exchange resin)
 Nanofiltration (NF)
 Reverse Osmosis (RO)

単一処理方式範囲の概念図

- 様々な水質に対して、単独技術では効率的浄化が不十分
- 水質と処理目標に応じた技術の組み合わせ (Treatment Train) で効率化が重要

23) CONCAWE. (2020). Review of water treatment systems for PFAS removal. Environmental Science for European Refining, Report No. 8/20. CONCAWE, Brussels.

LFP カートリッジ 実証試験



配置参考図
(配置は変更可)

2026年1月 実証試験を東京都内で開始
使用吸着剤・木質活性炭（汎用型活性炭）

4月以降
使用吸着剤・トリポーラス™（高性能活性炭）（次ページ）
短鎖PFASを含む要検討項目 (PFBS、PFHxS、PFBA、PFPeA、PFHxA、PFHpA、PFNA および HFPO-DAの8項目) 他も、高効率除去、ロングライフ運転を期待

誰でも簡単に運用可、使用済み活性炭は当社で廃棄

カートリッジは既存設備にポンプで接続するだけ。特別な工事は不要です。

既存の処理設備の後段処理として設置できます。

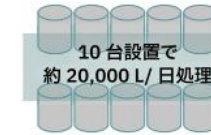
使用済みカートリッジは当社に返送するだけ、新しいカートリッジをお届けします。

現場での廃棄作業が不要なため管理しやすく、運用コストを抑えながら安定した浄化性能を維持できます。



処理能力は1台あたり 100~200 L/h

必要な処理量に合わせて拡張



10台設置で
約 20,000 L/日処理

用途や水質に応じてユニットを追加、専用水道や中規模施設にも最適です。

例) 生徒数 300 人の中学校
一人あたり水道使用量 1日 65 L の場合
▶ LFP カートリッジ 10 台設置

65 L × 300 人 = 19,500 L/日
1台あたり 200 L/h × 10 時間稼働で処理想定



機能性粉体で効率良く PFAS を処理

粉末状の活性炭を採用、能力は粒状活性炭の 4 倍。PFAS 除去の常識が変わります。

微細な粉末活性炭 (PAC) をフィルターに緻密に添着することで、吸着面積を大幅に拡大。

PFOS・PFOA・PFHxS の 90%以上除去状態を維持したまま、

従来の粒状活性炭 (GAC) 吸着塔の約 4 倍の処理能力を発揮します。

粉体だからこそ、少ない活性炭量で最大の効果を生み出します。



安心して当社製品をお使いいただくために、
実機導入前のサンプルテストも実施しています



お気軽に
お問い合わせください

株式会社流機エンジニアリング

本社 〒108-0073 東京都港区三田 3-4-2
TEL: 03-3452-7400
E-mail: hp_info@ryuki.com



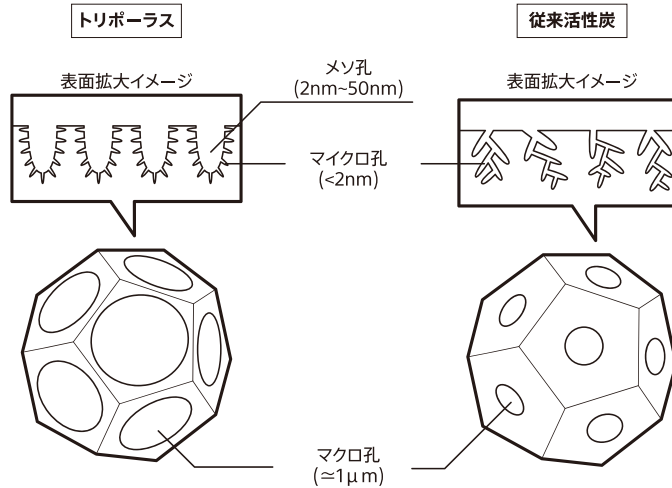
<https://www.ryuki.com>

実証試験サイト募集中

籾殻由来の多孔質カーボン素材 トリポーラス™ ソニーグループ株式会社

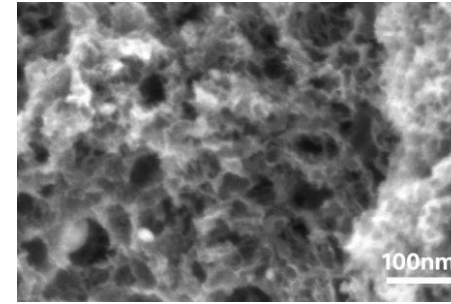


トリポーラスの外観とロゴマーク

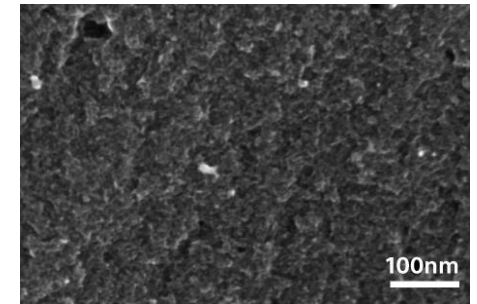


大・中・小3種類の細孔構造のイメージ

トリポーラスの拡大画像

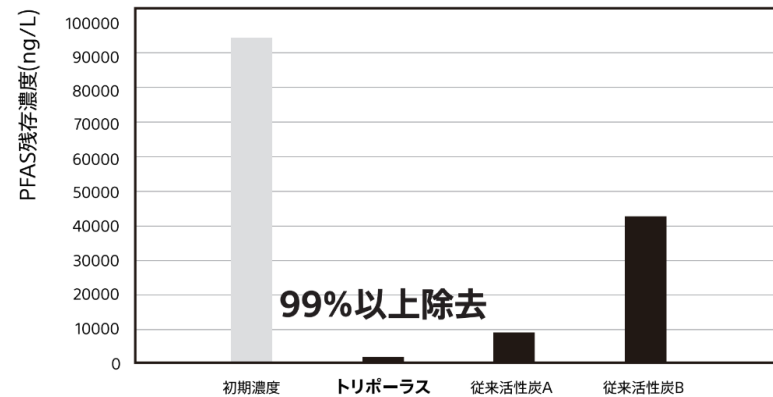


やし殻活性炭の拡大画像



トリポーラスおよび従来活性炭の顕微鏡写真

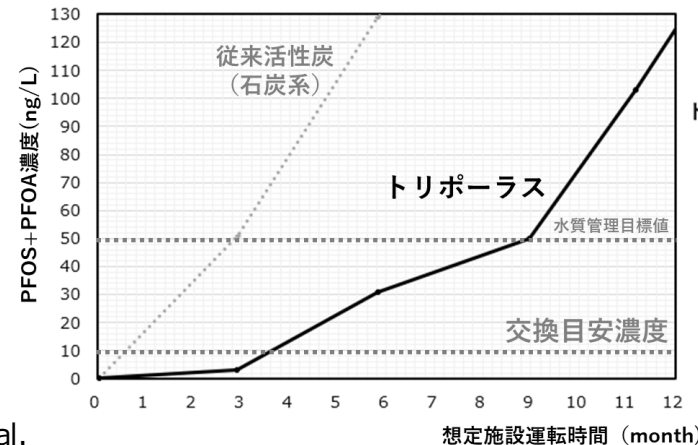
トリポーラスはマイクロ孔・メソ孔・マクロ孔と3種類の領域に細孔をもち溶存有機物の存在下でも高いPFAS吸着性を示す。



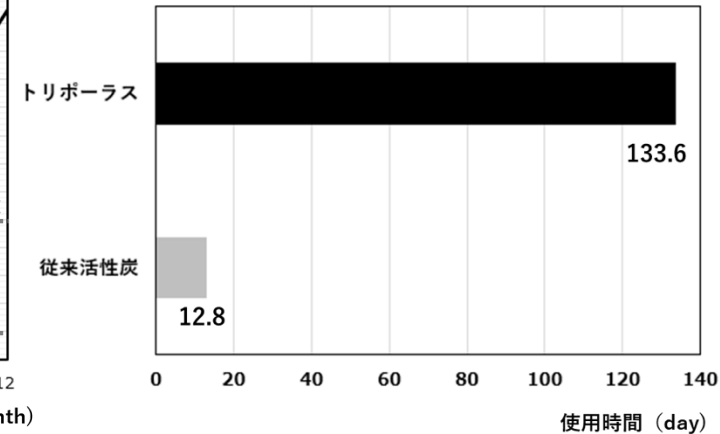
25種類のPFASに対する各種吸着剤のPFAS除去率の比較



Nobuyoshi Yamashita et al. Chemosphere (2024)



岐阜県各務原市の環境水を用いたトリポーラスおよび従来活性炭の寿命評価 (RSSCT)



吸着材の交換目安濃度 (PFOS+PFOA: 10ng/L) までの到達時間の比較

国立研究開発法人産業技術研究所およびエドブルック大学の研究においてトリポーラスは15種類の吸着剤の中で最も高いPFAS吸着特性を確認。トリポーラスは短鎖から長鎖まで様々なPFASに対し高い吸着性を示す。

トリポーラスは従来活性炭と比較して体積比で10倍、重量比で15倍の寿命を示した。



まとめ

PFAS浄化技術に求められる次のステップ-実フィールドで鍛えられるアプローチ-

- EUでは、科学者のPFASに対する考え方が政策形成に反映され、代替可能なPFASについては計画的なフェーズアウトが進められている。これと並行して、2050年までにすべての土壌を「健全な状態」へ回復させるという長期目標の下、PFAS対策が体系的に推進されている。
- 浄化に関する実証試験では、科学者がプロジェクト責任者を務め、科学的妥当性と実装性の両立を図りながら進められている。原水水質の多様性を踏まえ、単一技術ではなく、複数技術を段階的に組み合わせるトレイン方式が重視されている。
- LFP 技術においても、高濁度や高DOCといった厳しい原水条件に適応するためには、他の処理技術と連携させたシステム構築が不可欠である。
- 一方、日本ではPFOSおよびPFOAのみに評価対象を限定した技術開発が依然として主流であり、短鎖PFASや前駆体を含む条件下で実証と改良を重ねてきたEUと比べると、処理技術の向上が進みにくく、結果としてコスト低減の進展が遅れる懸念がある。
- 今後は、実フィールドにおいて「除去」から「破壊」までを包含したトレイン方式による実証試験を通じて、技術レベルの高度化と運転コストの低減を同時に達成できる体制の構築が期待される。

ご清聴ありがとうございました



HP 環境コラム

山内仁
株式会社流機エンジニアリング
E-mail h.yamauchi@ryuki.com

山内仁 (2026) : EUのPFAS Policyと浄化アプローチの動向—日本におけるMF膜・機能性粉体添着法による長期安定運転の実証, Inter Aqua 2026 講演資料



〒108-0073
東京都 港区 三田3-4-2 いちご聖坂ビル

<https://www.ryuki.com/>

03-5452-7400

hp_info@ryuki.com