



(公財)水道技術研究センター
〒112-0004 東京都文京区後楽 2-3-28
K. I. S 飯田橋ビル 7F
TEL 03-5805-0264, FAX 03-5805-0265
E-mail jwrchot@jwrc-net.or.jp
URL <http://www.jwrc-net.or.jp>

水道における PFAS の処理技術等に関する 海外情報について（参考情報） （令和 4 年 12 月）

（はじめに）

最近、水道における新興汚染物質、特に有機フッ素化合物である PFAS（ペルフルオロアルキル物質及びポリフルオロアルキル化合物）を巡っては、海外において飲料水における目標値や基準値の設定の動きがある。また、これらに対応するため、欧米を中心として処理技術等について調査研究や技術開発が行われるとともに、浄水場における PFAS 処理設備の導入事例もみられるようになっている。

そこで、水道における PFAS の処理技術等に関する海外情報として、英国飲料水検査官事務所、米国環境保護庁及び米国会計検査院から公表されている情報を和訳することとしたものである。

なお、以下は仮訳であり、原文は出典を参照されたい。また、翻訳については、あらかじめ必要な許可を得ていることを申し添える。

（注）略語

PFAS：ペルフルオロアルキル物質及びポリフルオロアルキル化合物

PFOS：ペルフルオロオクタンスルホン酸

PFOA：ペルフルオロオクタン酸

目 次

資料 1：飲料水中の PFAS について（英国飲料水検査官事務所、2020 年 3 月）

資料 2：飲料水中の PFAS 低減技術（米国環境保護庁、2019 年 10 月）

資料 3：上下水道における PFAS の処理（米国環境保護庁、2020 年 9 月）

資料 4：PFAS の破壊及び処分に関する暫定ガイダンス（米国環境保護庁、2020 年 12 月）

資料 5：永遠の化学物質：PFAS の（健康影響）評価、検出及び処理に関する技術（米国会計検査院、2022 年 7 月）

資料 1

飲料水中の PFAS について（英国飲料水検査官事務所、2020 年 3 月）

（出典）

Poly and Perfluorinated Alkyl Substances in Drinking Water

Report Reference: DWI14078.02 March 2020

<https://cdn.dwi.gov.uk/wp-content/uploads/2021/01/07155639/DWI70-2-327.pdf>

（以下、抜粋）

2.6.1 従来の処理方法

化学凝集

フルスケールでは、化学凝集に続く沈殿は PFAA 化合物の除去に効果がないことがわかった（分析の不確実性の範囲内で 10%未満の除去）。一方、化学凝集に続く DAF（溶解空気浮上法）はある程度の効果があった（PFOS で 49 %減少、PFNA で 29 %減少）。短鎖の PFCA と PFSA は DAF ではあまり除去されなかった（Appleman et al., 2014）。

急速重力ろ過

急速重力ろ過の PFAS 濃度への影響に特化した文献は見つからなかったが、化学凝集と清澄化に先行する場合、下流の急速重力ろ過（単媒体砂または二媒体無煙炭/砂媒体）は PFAA 除去に明確な影響を与えなかった（Appleman et al., 2014）。

2.6.2 吸着

粉末活性炭

粉末活性炭は、PFAS の除去に関して GAC よりも優れている可能性があるが、この知見は普遍的なものではない（Ross et al., 2018）。PAC は一般的に再活性化されず、使用済みの PAC は下流の固形物分離プロセスで捕捉され、水処理汚泥の一部を形成する。排出された GAC は一般的に 800 ～ 1000 °C で熱的に再活性化され、このプロセスはペルフルオロアルキル物質を効果的に変性させることがわかっている（Ross et al., 2018）。

粒状活性炭

粒状活性炭は、水から PFOS と PFOA、および、より少ない範囲では他の PFAA を除去するために広く使用され、確立された水処理技術である。しかし、GAC は、鎖長が短くなるにつれて、PFHxA、PFPeA、PFBS、および PFBA などの短鎖 PFCA の除去に対して徐々に効果が低くなる（Ross et al., 2018）。

$\mu\text{g/l}$ 濃度の PFAA を除去するために特別に設計された GAC を用いた、自治体の浄水場における 5 年間の本格的な PFAA 除去が報告されている。Chemviron Filtrasorb 600 (F600) が直列の 2 つの容器で使用し、それぞれ接触時間（EBC T）を 13 分とした。PFAA のブレイクスルー前に処理されたベッドボリューム（BV：充填されている固相の空隙を満たすために必要な溶媒の量）の数は、PFOS については 60 000 BV、PFHxA および PFOA については 30 000 BV、PFBA については 5 000 BV であった（Ross et al., 2018）。

長鎖の PFAS や天然有機物からの GAC 上の収着部位の競合により、以前に吸着した PFHxA と PFBA が脱着し、放出される可能性があると推測された。同様の脱着挙動は、PFBS についても観察されている（Ross et al., 2018）。

Chemviron Filtrasorb 300 (F300) GAC を $1\ \mu\text{g/L}$ PFAAs で使用した小規模な連続フロー研究では、ブレイクスルー前に処理した BV は PFAS 鎖長とともに減少し（PFOS < 98 000 BV、PFHxS < 45 000 BV、および PFBS < 30 000 BV）、PFCA は同等のペルフルオロアルキル鎖長の PFAS よりも大幅に速くブレイ

クスルーを示した。同じ研究では、天然有機物の存在が、PFNA などの長鎖種を含むすべての PFAAs の除去効率に大きな阻害効果をもたらしたと述べている (Ross et al., 2018)。

フルスケールで、GAC 処理水の PFBA、PFHxA、PFOS、PFOS を 5 年間モニタリングした結果、PFBA の最初のブレイクスルーは 10 000 BV 未満、PFHxA の最初のブレイクスルーは約 35 000 BV 後に発生することが判明した。PFOS の容量はより大きく、約 65,000BVs 後に最初のブレイクスルーが起こった。再生せずに継続すると、汚染物質が GAC から脱着し始め、処理水中の PFASs 濃度が流入水と比較して高くなった (Appleman et al., 2014)。

イタリア北東部の地下水を処理した結果、PFAS は活性炭に吸着させることで高効率で除去されることがわかった。ポリフルオロブチル酸とポリフルオロブチルスルホン酸は、PFOA や PFOS などの大きな分子よりもはるかに早くブレイクスルーに達し、GAC を頻繁に再生する必要性につながった (Conte et al., 2015)。

表流水から汲み上げた水の飲料水処理性能に関する「スナップショット」サンプリング研究では、バンクサイド (砂丘) ろ過、急速砂ろ過、オゾン処理、GAC が行われ、PFOS (90%以上)、PFOA (～50%)、PFHxS (～80%) の濃度が著しく減少したのは GAC のみであることが判明した。しかし、短鎖型 PFBS の濃度は、GAC 後にブレイクスルーが発生し、流入濃度を超過して上昇した (Eschauzier et al., 2012a)。

EBCT6 分の GAC を用いた連続フローカラム試験では、試験中に短鎖 PFCA が脱離し始め、具体的には PFBA (C3) が～18 000 BV、PFHxA (C5) が～30 000 BV、PFPeA (C4) が～47 000 BV、PFHpA (C6) が～54 000 BV、PFOA (C7) が～60 000 BV であった (McClaf et al., 2017)。

地表水 (淀川、日本) の本格的な処理において、異なる段階で採取したサンプルを分析した結果、GAC が広範囲の PFASs の濃度低減に最も影響を与えることが示された。ある地点では、GAC による除去効率は、PFHxS, C6-S が 7 %, PFOS, C8-S が 61 %, PFNA, C9-A が 36 %, PFUnDA, C11-A が 48 % であった。1 ヶ月後にテストを繰り返したところ、除去効率は PFHxS が 3 %, PFOS が 65 %, PFNA が 45 %, PFUnDA が 78 % となった。PFHxS、PFHpA、PFOA の除去は効果的ではなかったが、他のペルフルオロ化合物 (PFCs) (PFNA、PFDA、PFOS、PFUnDA) はある程度除去されると結論づけられた (Shivakoti et al., 2010)。

2.6.3 消毒

塩素消毒

塩素消毒の PFAS 濃度への影響に特化した文献は見つからなかった。オゾンと比較して塩素の酸化力が低いこと、オゾンによる除去率が低いことから、塩素が PFAS 濃度に影響を与える可能性は非常に低いことを示唆している。

紫外線

消毒剤投与量での UV の影響に関する文献は見つからなかったが、AOP プロセスに伴うより大きな用量ではほとんど影響がないことが判明しているため、このプロセスは有効でないと考えられる。実験室でのバッチ試験において、(Bao et al., 2017) は、AOP としての UV による OBS の濃度の 15 % の減少を報告している。

2.6.4 膜ろ過

精密ろ過と限外ろ過

いくつかの研究では、精密ろ過 (MF) のような低圧膜は、PFASs の有効直径が、一般的に～100nm の範囲である MF 孔サイズに比べて小さい (～1nm) ので、PFASs の除去に有効ではないことがわかった (Appleman et al., 2014; Rahman et al., 2014)。

飲料水再利用プラントにおいて、MF 膜 (孔径 0.1 ミクロン) と UF 膜 (孔径 0.02 ミクロン) を並行して使用した場合、PFOS (24%)、PFDoA (44%) と FOSA (42%) の部分的除去が報告されている (Appleman et al., 2014)。

飲料水再利用のための追加プロセスの上流に MF を含むフルスケールの飲料水再利用プラントにおいて、PFAA（33%）の除去における MF 膜の低性能が報告されている (Glover et al., 2018)。

ナノろ過

水から PFAS を除去するために NF を使用することは、成功することが示されている。NF 膜の性能は、モデル原水と実際の原水の両方を処理するいくつかのベンチスケールとパイロットスケールの研究で実証されている。PFAS の典型的な除去効率は 95% 以上であると報告されている (Appleman et al., 2013; Loi-Brügger et al., 2008; Lutze et al., 2012; SteinleDarling and Reinhard, 2008; Wang et al., 2018)。

2.6.5 生物活性ろ過

緩速ろ過

緩速ろ過による PFAS の処理に特化した文献は見つからなかったが、実験室試験では、28 日間にわたり、PFAS OBS は、水処理に存在するような好気性条件下でのあらゆる生物学的変換に対して強い耐性を示した (Bao et al., 2017)。

GAC を挿んだ緩速ろ過

GAC を挿んだ緩速ろ過による処理に特化した文献は見つかっていない。GAC コンポーネントの効果は、プロセス条件の違いにより、必ずしも典型的な GAC 吸着器の効果を模倣するものではない。

2.6.6 揮発

エアストリッピング

PFAS は、特に陰イオン性 PFAA については、蒸気圧とヘンリーの法則定数が低いため、地下水から空气中に容易に移行せず、エアストリッピングによる揮発は、ほとんどの PFAS に対して有効な処理法とはならないと予想される。PFASs のヘンリーの法則定数は、ほとんど利用できない。PFAAs は、一般的に、他の多くの地下水汚染物質よりもはるかに揮発性が低い (Ross et al., 2018)。

2.6.7 イオン交換

陰イオン交換

イオン交換プロセスは、特に硝酸塩やヒ素、その他の微量汚染物質を除去するために、地表水や地下水源を処理するための多くの一般的な汚染物質に対する技術として確立されている。

PFAAs は、環境水の pH 値では陰イオン性であるため、陰イオン交換による除去が可能であると予想される。本格的な研究では、Purolite Fer1X A33（酸化鉄を含む強塩基性多孔質陰イオン交換樹脂）を用いた原水のイオン交換により、PFAS の除去が実証されている。このプロセスは、ヒ素の除去のために実施された。その結果、PFAS による低レベルの汚染 (ng/l) では、長鎖 PFCA がかなり除去され (PFHpA が 54%、PFOA が 76%)、PFSA が高い除去率 (PFBS、PFHxS、PFOS がそれぞれ 83%、97% 以上、90% 以上) であることが確認された。しかし、この樹脂は短鎖の PFCA (PFBA、PFPeA、PFHxA) を除去できなかった (Rahman et al., 2014)。

様々な種類の選択性を可能にする様々な官能基を持ついくつかのイオン交換樹脂が、水から少数の PFAS を除去するために評価されている。多くの樹脂が長鎖または短鎖 PFAS のいずれにも有効であることがわかったが、GAC が提供する幅広い容量スペクトルと比較して、より新しい樹脂のみが長鎖と一部の短鎖 PFAS の両方に対して高い収着容量を有していた。これまでの研究は、主に PFOS と PFOA である陰イオン性 PFAAs のみの除去に焦点を当ててきた (Ross et al., 2018)。

北イタリアで行われたパイロットプラント試験では、市販のイオン交換製品 (Purosorb PAD 500 と PAD 428、Purolite A600E、Macronet 102) の性能が比較された。テストカラムにはマイクロフィルタ

一でろ過された水が入り、滞留時間は 10 分だった。4 種類の樹脂は、いずれも PFOA と PFOS に対して非常に高い除去効率を示したが、PFBA と PFBS に対しては非常に異なる挙動を示した。例えば、樹脂 MN102 は、全試験期間 (4,800 BV) において PFOS をほぼ 100% 除去したが、PFBA の除去効率は、わずか 288 BV で急激に低下した。さらに、バッチ再生実験により、イオン交換媒体の再生が可能であり、塩化アンモニウムまたは水酸化アンモニウムの希薄溶液を必要とすることが示された (Conte et al., 2015)。

他の関連研究により、PFAS に対する A600E の除去能力は不可逆的な飽和現象の影響を受け、飽和と再生の 3 サイクルの後にほぼ半減することが示されている。他のより適した樹脂 (A520E) の除去能力は、不可逆的なプロセスの影響をわずかに受けるだけで、その除去能力は 3 サイクルの飽和/再生後に 15% 未満減少することが分かった (Zaggia et al., 2016)。

資料 2

飲料水中の PFAS 低減技術 (米国環境保護庁、2019 年 10 月)

(出典)

PERFLUOROALKYL AND POLYFLUOROALKYL SUBSTANCES (PFAS)

Technologies for Reducing PFAS in Drinking Water

[pfas_drinking_water_treatment_technology_options_fact_sheet_04182019.pdf \(epa.gov\)](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-04/pfas_drinking_water_treatment_technology_options_fact_sheet_04182019.pdf)

(以下、抜粋)

環境中の PFAS

ペルフルオロアルキル物質 (PFAS) は、PFOA、PFOS および GenX 化学物質を含む非常に大きな人工化学物質の一種である。1940 年代以降、PFAS は米国および世界のさまざまな産業で製造・使用されてきた。PFAS は、食品包装や、アウトドア愛好家が使用する衣類などの非粘着性、防汚性、防水性製品などの日用品に含まれている。PFAS は、工業用途や消火活動にも広く使用されている。PFAS は、生産や廃棄物の流れから環境に入り込み、環境や人体に非常に残留する可能性がある。一部の PFAS は、動物やヒトに健康への悪影響を及ぼす可能性があるという毒性学的な証拠が存在している。

EPA の研究者は、飲料水から PFAS を除去するためにどの方法が最も効果的かを判断するために、ベンチ (小規模)、パイロット (試作)、およびフルスケールのレベルで様々な技術を研究してきた。PFAS の中には水に溶けるものがあり、そのまま放置すると飲料水に混入する可能性がある。PFAS は化学的性質が異なるため、研究者は、ある種の技術は他の技術よりも飲料水から PFAS を除去するのに適していることを発見している。

特にペルフルオロオクタン酸 (PFOA) とペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS) は、これらの化学物質の中で最もよく研究されているものである。他の PFAS、例えば X 世代化学物質も除去することができるが、その程度はさまざまである。

有効な技術としては、活性炭吸着、イオン交換樹脂、ナノろ過や逆浸透膜などの高圧膜がある。これらの技術は、飲料水処理施設、病院や個々の建物の水システム、さらには家庭の水が入るポイントオブエントリー (POE: 水道管が家に入る場所に設置する浄水システム) や、キッチンのシンクやシャワーなどのポイントオブユース (POU: キッチン等のシンクや蛇口に設置する浄水システム) で使用することができる。

活性炭処理

活性炭処理は、PFAS 除去のために最も研究されている処理である。活性炭は、飲料水処理システムにおいて有機化合物を吸着させるために一般的に使用されている。吸着とは、PFAS のような物質を液相と固相の界面に蓄積させることである。

活性炭は、多孔質で表面積が大きく、汚染物質の吸着に有効な吸着剤である。

活性炭は、木材、褐炭、石炭など炭素含有量の多い有機物を原料としており、粒状活性炭（GAC）と呼ばれる粒状のものが多く使用されている。

GAC は、従来の砂ろ過または同様のプロセスで水から微粒子をすでに除去した後、フロースルー・フィルター・モードで使用すると、飲料水から PFAS を効果的に除去できることが示されている。この研究によると、GAC は、除去する必要がある特定の PFAS、使用する炭素の種類、炭素床の深さ、水の流量、温度、有機物の程度と種類、水中の他の汚染物質または構成要素の存在によって、一定期間 100% の効果を発揮することができる。

例えば、GAC は PFOA や PFOS のような長鎖の PFAS にはよく効くが、ペルフルオロブタンスルホン酸（PFBS）やペルフルオロブチレート（PFBA）などの短鎖の PFAS はあまり吸着しないため、破過が早く、GAC は高い効率を保つために頻繁に交換、または再活性化が必要なのでより高価な処理となってしまう。さらに、GAC の再活性化の際に除去された PFAS の廃棄も考慮しなければならない。

活性炭処理のもう一つのタイプは粉末活性炭（PAC）で、これは GAC と同じ材料だが、サイズが小さくなっている。粒子径が小さいため、PAC はフロースルー床では使用できないが、水に直接添加し、ろ過または清澄化段階で除去することができる。この方法で使用した場合、PAC は PFAS を除去する上で GAC ほど効率的でも経済的でもない。

調査によると、非常に優れた炭素を用いた非常に高い PAC 投与量であっても、高い割合で PFAS を除去することはほとんどない。PAC を使用する場合、浄水施設は、吸着された PFAS を含むスラッジに対してどのような処分方法が適切かを決定する必要がある。

イオン交換処理

もう一つの処理方法として、陰イオン交換処理、つまり樹脂がある。イオン交換樹脂は、多孔質で不溶性の高分子材料でできている。濾過モードで使用される樹脂ビーズは炭化水素から作られている。イオン交換樹脂は、カチオン系とアニオン系の 2 種類に大別される。プラスに帯電した汚染物質の除去にはマイナスに帯電したカチオン交換樹脂（CER）、PFAS のようなマイナスに帯電した汚染物質の除去にはプラスに帯電したアニオン交換樹脂（AER）が有効である。イオン交換樹脂は、小さな強力な磁石のようなもので、水系を通過する汚染物質を引き寄せて保持する。PFAS のマイナス電荷イオンは、プラス電荷の陰イオン交換樹脂に引き寄せられる。AER は、多くの PFAS に対して高い除去能力を持つことが示されているが、一般的に GAC よりも高価である。

さまざまな種類の AER 樹脂のうち、おそらく最も有望なのは、単回使用モードの特定 PFAS 向け AER であろう。この処理技術では樹脂の再生が不要なため、再生処理による液体汚染物質の廃棄物を考慮する必要はないが、使用済みの樹脂は廃棄または焼却のいずれかの方法で管理する必要がある。

GAC と同様、AER は、除去する必要がある PFAS の種類、樹脂の選択、充填層の深さ、流量、バックグラウンドの有機物やその他の汚染物質または成分の程度と種類によって決まる時間のなかで、PFAS を 100% 除去する。

高圧膜

PFAS の除去には、ナノろ過や逆浸透膜などの高圧膜が非常に有効である。中でも逆浸透膜は、ナノろ過膜よりも密度が高く、除去率も高い。

この種の膜は、短鎖型 PFAS を含むさまざまな PFAS を 90% 以上除去する効果があることが研究により示されている。どちらのタイプの高圧膜でも、供給水（膜に流入する水）の約 80% が膜を通過して排水（処理水）になる。

給水の約 20% は、高強度の濃縮廃棄物として保持される。高濃度の廃棄物は、特に PFAS のような汚染物質にとっては、処理や廃棄が困難な場合がある。この技術は、処理する水の量のはるかに少なく、廃棄物が排水溝に捨てられる可能性が低いいため、家庭での POU 技術として最も適していると思われる。一方、家庭やビルの入口で使用される高圧膜は、そのビルで使用されるすべての水を処理するため、廃棄物処理の問題が発生する可能性がある。また、高圧膜の処理水は腐食性があるので、建物の前提の配管や備品に金属（鉛や銅）の腐食が生じないように（水道事業で行われているように）注意する必要がある。

資料 3

上下水道における PFAS の処理（米国環境保護庁、2020 年 9 月）

（出典）

PFAS Treatment in Drinking Water and Wastewater

https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/r1-pfas_webinar_day_1_session_3_speth.pdf

（以下、抜粋）

PFOS の浄水方法

効果のない処理

従来型処理、低圧膜、生物処理（緩速砂ろ過を含む）、消毒、酸化、促進酸化処理

効果的な処理

処理方法	除去率 (%)	
陰イオン交換樹脂 (IEX)	90 ～ 99	効果あり
高圧膜	93 ～ 99	効果あり
粉末活性炭	10 ～ 97 50%除去: 16mg/L 90%除去: >50mg/L	一部の使用法にのみ効果あり
粒状活性炭 ・ 長期間運転 ・ PFAS 除去用につくられたもの	0 ～ 26 >89 ～ >98	効果なし 効果あり

資料 4

PFAS の破壊及び処分に関する暫定ガイダンス（米国環境保護庁、2020 年 12 月）

（出典）

Interim Guidance on Destroying and Disposing of Certain PFAS and PFAS-Containing Materials That Are Not Consumer Products

<https://www.epa.gov/pfas/interim-guidance-destroying-and-disposing-certain-pfas-and-pfas-containing-materials-are-not>

2020 年 12 月 18 日、EPA はパブリック コメントのために、これらの新たな懸念のある化学物質への暴露から公衆を保護するのに役立つ新しい暫定ガイダンスをリリースした。具体的には、新しい暫定ガイダンスは、PFAS および PFAS 含有物質を非消費者製品（水性フィルム形成フォーム（消火用）を含む）から破壊または廃棄するために使用される可能性がある技術と処理に関する科学の現状を概説している。

この暫定ガイダンスは、2021 年 2 月 22 日までパブリック コメントを受け付けていた。コメント期間は終了した。

（以下、抜粋）

2. e 排水処理材料

飲料水源と地下水から PFAS を除去するための新規技術が開発されているが、現在有効であることが知られているプロセスは、活性炭、陰イオン交換樹脂、高圧膜（逆浸透 [RO] とナノろ過 [NF]）（USA EPA, 2016a, 2016b）である。

本セクションでは、これら 3 つのプロセスの残留物の流れについて議論する（処理と処分の検討とコストに関する議論はセクション 3、より新しい処理に関する研究の必要性についての議論はセクション 5 を参照されたい）。

2. e. i 活性炭

活性炭（セクション 3. a. i でより詳細に議論）は、木材などの炭素を多く含む資源から製造され、汚染物質をろ過することにより水または空気を処理するために用いられる（米国 EPA, 2012 年）。活性炭は、粉末活性炭（PAC）または GAC の形態で使用するができる。PAC 処理では、カーボンを粉末状にして処理水に加え、水中の化学物質を通過させる際にカーボンに付着させる。GAC 処理では、小さな炭素片が、水が通過する際に水中の化学物質を吸着する。

PAC 処理では、水から PFAS をある程度除去できるが、除去される PFAS の量は多くの要因に左右される。PAC 処理の場合、残留流体は、凝集剤、凝集助剤（使用されている場合）、自然微粒子、および混入した有機物とともに PFAS を吸着した粉末活性炭を含む沈殿汚泥または洗浄水中の固体である（Dudley ら、2015 年）。処理に影響を与える多くの条件を考えると、PAC 残留流体中の重量パーセント PFAS は、大きく変化するが、以下で議論するように、GAC 処理と同じ範囲になるであろう。

GAC については、使用済み媒体上の PFAS 濃度の範囲は、いくつかの方法で推定することができる（Crone et al., 2019; U.S. EPA, 2020d）。GAC への PFAS の吸着量は、高い場合（高性能の GAC を使用し、PFAS の吸着性が高く、競合汚染物質が少なく、有機レベルが低く、そして処理水中の濃度が高い場合）でも、2% のオーダーである（例えば、GAC1 グラムあたり 0.02 グラムの PFOS がある）。他のより一般的な処理や、吸着性の弱い PFAS（短鎖 PFAS など）の場合、吸着量は桁外れに低くなるであろう。

GAC は再活性化し、再利用できる（GAC 再活性化に関する議論はセクション 3. a. i. 2、GAC 再活性化のコストに関する議論はセクション 3. a. vii を参照のこと）。GAC が埋め立てられる場合、GAC が PFAS をあまり含まない水の流れと接触すると、PFAS が炭素から埋め立て浸出液に脱離する可能性がある。脱離は、液相と固相の間の非平衡により起こる。その結果、埋立地浸出水中の PFAS 濃度は、条件によって大きく変化する。

2. e. ii イオン交換樹脂

GAC と同様に、イオン交換樹脂は固定床吸着装置として使用する。同様に、この処理からの残留流は使用済みの媒体であるが、イオン交換樹脂は GAC のように熱的に再活性化することができない。いくつかの要因から、市場では陰イオン交換樹脂は使い捨て媒体へと移行しており、使用済み樹脂は最終処分として焼却が行われている。

また、GAC と同様に、樹脂への PFAS の最終的な吸着量は大きく異なる。保守的に高く見積もった負荷（特定 PFAS 向けの樹脂を使用し、競合成分が少なく、また PFAS の吸着性が高い場合）は、強く吸着する PFAS（例えば、樹脂 1 グラムあたり 0.1 グラム PFOS）に対して 10 重量パーセントのオーダーであると予想されます。GAC よりも高い重量パーセントは、特定 PFAS 向け樹脂の高い吸着量によるものである。GAC と同様に、より吸着力の弱い PFAS（短鎖 PFAS など）のより一般的なケースは、PFAS の平均重量パーセントをはるかに低くする。

使い捨ての樹脂が使用されると仮定すると、埋立は焼却よりも低コストとなりうる（セクション 3 のそれぞれの廃棄物管理オプションの処理コストに関する議論を参照）。樹脂が埋められた場合、PFAS と置換可能な対イオンを有する水流と樹脂が接触すれば、PFAS は樹脂から脱離する可能性がある。その結果、浸出液の濃度は条件によって大きく変化する。

2. e. iii 高圧膜 (RO 膜および NF 膜)

高圧膜は、水から多くの PFAS を高度に除去するのに非常に有効である (Crone et al., 2019; U. S. EPA, 2020d)。このプロセスは除去現象に基づいているため、高圧膜による水処理では、潜在的に高濃度の PFAS を含む廃棄物の流れが生じ、これを処理・処分する必要がある。これらの廃棄物の流れは、高濃度の塩類、他の汚染物質、および溶存有機物も含んでいる。

濃縮残留物の処理は困難であり、埋立地からの浸出物、イオン交換の使用済み再生液、高濃度汚染サイトからの水と同様、高コストとなる可能性が高い。

多くの変数がこれらの廃棄物の処理コストに影響を与える可能性がある。現時点では、特に、濃縮還流水が通常、流量の 20 パーセントであることを考えると、明白な処理技術の選択はない (Baruth, 2005)。これは、特に大規模自治体で使用されるような大規模膜処理システム (例えば、1 日あたり 2000 万ガロン (400 万ガロン/日) の濃縮流量を処理) にとっては、相当な流量となる。このような大容量の流れがあると、排出前に水を複数回処理できるため、効率が高いバッチ処理プロセスを使用することができなくなる。

(注) 2,000 万ガロン $\approx$ 75,700m³

400 万ガロン $\approx$ 15,100m³

資料 5

永遠の化学物質：PFAS の (健康影響) 評価、検出及び処理に関する技術

(米国会計検査院、2022 年 7 月)

Persistent Chemicals: Technologies for PFAS Assessment, Detection, and Treatment
GAO-22-105088 Published: Jul 28, 2022. Publicly Released: Jul 28, 2022.

(要約)

<https://www.gao.gov/products/gao-22-105088>

(全文)

<https://www.gao.gov/assets/gao-22-105088.pdf>

(以下、抜粋)

会計検査院 (GAO : Government Accountability Office) がこの調査を行った理由 :

PFAS は、1940 年代に初めて開発された、耐熱性と耐汚染性を備えた化学物質の大きなグループである。PFAS は、空港や軍事基地で使われるカーペット、テフロン加工の調理器具、防水衣類、消火用泡など、幅広い製品に使用されている。PFAS は、水、土壌、空気などの環境に数十年以上存在する可能性がある。疾病管理予防センターは、米国のほとんどの人が、最も広く研究されている 2 つの PFAS、ペルフルオロオクタン酸 (PFOA) とペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS) にさらされていることを発見した。どちらも人間の健康問題に関連している。

GAO は、PFAS の評価、検出、および処理に関する技術評価を実施するよう依頼された。このレポートでは、(1) PFAS およびその代替物質がもたらす健康への悪影響をより効率的に評価するための技術、(2) PFAS の検出と処理のための現行および新興技術の利点と課題、(3) これらの技術に関連する利点を強化し、課題を軽減するのに役立つ政策オプションについて調査している。

GAO は関連技術の評価し、PFAS の対象分野の専門家を調査し、政府、非政府組織、産業界、学界などの利害関係者グループにインタビューし、そして、重要なレポートをレビューした。GAO は、このレポートで政策オプションを明らかにしている。

会計検査院 (GAO) が見出したもの

現在の有望な技術と方法は、ペルフルオロアルキル物質およびポリフルオロアルキル物質 (PFAS) によって引き起こされる人間の健康への影響評価を促進し、環境中の PFAS の検出と処理を改善する

可能性がある。ただし、これらの技術と方法は、PFAS の効果的な管理を妨げる重要な課題に直面している。

評価：

PFAS の健康への影響の評価を促進する可能性のある技術には、ハイスループット・アッセイ（多数の化学物質を迅速に評価する自動化された試験方法）や、機械学習（類似分子の影響に基づき健康への影響を予測する技術の改善に役立つ可能性がある）が含まれる。

検出：

PFAS を検出するための現在の技術は、約 50 の特定の PFAS を確実に定量化できるが、これらの技術では、存在することが知られている他の何千もの PFAS を検出または定量化することはできない。EPA は、PFAS 検出方法を開発するために、分析標準物質として知られる信頼できるサンプルを必要としている。しかし、研究者や機関は、分析標準物質を必要とせず、未知の PFAS をスクリーニングまたは定量化できる新しい検出方法を開発している。これらの方法には、高分解能質量分析と全フッ素分析が含まれる。

処理：

PFAS 処理には、汚染された媒体からの PFAS の除去と、それに続く埋立地への廃棄または焼却による破壊が含まれる場合がある。飲料水から PFAS を除去可能な、実績を持ったフルスケールの処理技術がある。しかし、これらの技術を用いても、廃棄または破壊しなければならない PFAS で汚染された残留物は残る。新興技術はより効果的かもしれないが、フルスケールで実証されたものはなく、ほとんどがまだ研究中である。

GAO は、PFAS の評価、検出、および処理技術に関連する 3 つの課題を特定した。

PFAS の化学構造は多様であり、健康リスクの分析が困難である。また、機械学習させるには広範な訓練データが必要だが、そのようなデータは入手できない可能性がある。

研究者は、多くの PFAS の分析標準物質を欠いており、そのため効果的な検出方法の開発が制限されている。

PFAS の廃棄および破壊方法は複数存在するが、その有効性と利用可能性は、データ、監視、およびガイダンスが不足しているため、はっきりとしない。

GAO は、これらの課題を軽減するのに役立つ次の 3 つの政策オプションを明らかにした。これらの政策オプションには、議会、連邦機関、州および地方政府、学界、および産業界を含む政策立案者が取りうる行動が含まれる。いくつかの政策オプションと関連する機会と考慮事項の詳細については、以下を参照されたい。

PFAS の評価、検出及び処理技術の利点を強化したり、課題を軽減したりするのに役立つ政策オプション

政策オプション (Policy Option)	機会 (Opportunities)	考慮事項 (Considerations)
研究の推進（報告書 p. 35） 政策立案者は、PFAS の健康リスクをより効率的に研究するための技術と方法の開発を支援できる。 この政策オプションは、機械学習のための標準化されたデータセットの欠如だけでなく、多数の PFAS とその多様性に関する情報が限	・予測方法に関する研究を促進することで、研究者は個別にではなく、より効率的にさまざまな PFAS のクラスを評価できるようになる。 ・複数の研究からの既存の PFAS の健康情報を統合することで、広範囲の PFAS のより効率的な健康評価を行うことができる。 ・より効率的な研究のためのサポート技術は、PFAS の代替品の評価を改善	・人体における PFAS の挙動に関する科学的知識が不足しているため、PFAS をより効率的に研究するためのコンピューターモデルだけでは、健康への影響を正確に評価するには不十分な場合がある。 ・研究者は、機械学習モデルを訓練して検証するための

られているという課題に対処するうえで役立つ。	できる。	完全なデータセットを欠いている。データセットは、機械学習モデルを PFAS の評価に使用する前に必要である。
手法の開発の拡大（報告書 p. 36） 政策立案者は、分析標準物質として知られる PFAS の標準参照サンプルへのアクセスを改善し、PFAS 検出のための方法と参照サンプルの開発のペースを速めるために協力することができる。 この政策オプションは、水以外の媒体に対する検証された方法の欠如、分析基準の欠如、およびコストの課題に対処するのに役立ち、このことは研究者が新しい検出技術を開発する能力に影響を与える。	・既知の PFAS の参照サンプルを開発するための連邦および独立した研究所による取り組みを支援することで、研究者が利用可能で手頃な価格の分析標準物質へのアクセスを増やすことができる。 ・研究者が水以外の媒体の新しい検出方法の開発を加速できるようにすることで、研究者はより多くの PFAS を発見し、確実に特徴付けることができるようになる。 ・高分解能質量分析の標準的な方法を開発・確定させることで、環境中の PFAS のより良いスクリーニングと識別ができるようになる。	・民間産業は分析標準物質（その多くは独自仕様と見なされている）の提供に消極的であり、そのことが検出方法の開発を妨げている。 ・PFAS の試験は費用が高いため、私設井戸の所有者や小規模な水道事業者は試験を思いとどまる可能性がある。
フルスケールでの処理の支援（報告書 p. 37） 政策立案者は、PFAS を廃棄または破壊するためのフルスケールの技術と方法の開発と評価を奨励することができる。 この政策オプションは、廃棄および破壊技術のコストと効率、および規制当局からのガイダンスの欠如という課題に対処するのに役立つ。	・EPA 手法の最終決定を奨励することで、PFAS のフルスケールでの廃棄および破壊技術の最適化を支援することができる。それにより焼却中の PFAS の監視を改善できる。 ・埋立地での監視を改善するためのガイダンスの開発を奨励することにより、将来の汚染を防ぐのに役立つことができる。 ・PFAS の廃棄と破壊の性能モデルとコストモデルの開発と共有を加速し、処理を促進することにより、関係者が将来のコストを計画するのに役立つ。	・規制当局からのガイダンスが不足しているため、PFAS を破壊するための技術を実装することは困難な場合がある。 ・効果的な管理が行われていない場合、埋立地は時間とともに PFAS を環境に放出する可能性がある。 ・ガイドラインは現在、米国全体でかなり異なっており、PFAS の廃棄と破壊のコストを押し上げる可能性がある。

（本文）

はじめに（略）

1 背景（略）

2 PFAS の人の健康リスクの評価（略）

3 PFAS の検出（略）

4 PFAS 処理

現在の PFAS 処理技術は、次の 3 つのカテゴリに分類できる。

(1) 水、土壌、または空気からの PFAS の除去、(2) PFAS 汚染物質の廃棄、または (3) PFAS 汚染物質の破壊

今日まで、PFAS の処理技術は、水から PFAS を除去するためにフルスケールで使用されてきたが、これらの効果はさまざまである。

廃棄技術も効果が異なり、適切な管理が行われていない廃棄場自体が汚染源になる可能性がある。破壊は永続的な解決策であるが、専門家、発表された研究、および各種機関の資料によると、既知のすべての PFAS に対して完全に効果的であることが証明された破壊方法はまだない。

さらに、コスト、ガイダンスの欠如、実証済みの方法の欠如など、いくつかの課題が PFAS の処理を妨げている。

4.1 一部の PFAS には現在の除去技術が有効である

現在の除去技術は、水から 30 種類の PFAS の 90%以上を除去することができ、副産物として PFAS に汚染された残留物を生成する（これらの残留物に関連する廃棄および破壊技術については、以下の 4.2 および 4.3 を参照のこと）。

水から PFAS を除去するために現在利用できる技術はその除去効果が異なるが、いずれも特定の PFAS を最大 90%以上除去できる（表 4 を参照）。

これらの技術は利用可能であり、現在、産業廃水に対して、また、連邦機関、一部の地方自治体の浄水施設や個々の家庭で使用されている。

粒状活性炭（GAC）ろ過は、購入するのに最も費用のかからない技術であり、長鎖 PFAS に効果的である一方、短鎖 PFAS の除去においては最も効果の低い技術である（図 7 を参照のこと）。これは、GAC フィルターが広範囲の汚染物質をその大きな表面積に引き付けて結合するのに対し、短鎖 PFAS は長鎖 PFAS ほど容易に GAC フィルターに付着せず、GAC 処理後も飲料水中に残留する可能性があるためである。短鎖 PFAS は、原水において PFAS が存在するとされる約 100 の浄水場に存在する可能性があるため、このことは重大な課題となる可能性がある。

一般に、イオン交換樹脂技術は、GAC よりも PFAS の除去に効果的である。イオン交換では、原水はフィルターとして機能する樹脂を通過し、負に帯電した PFAS 分子などの望ましくないイオン（荷電粒子）を、塩化物イオン（図 8 を参照のこと）などの害の少ないイオンと「交換」することによって除去する。GAC と同様に、樹脂は汚染物質を結合する大きな表面積を持っている。また、電荷を使用して PFAS 分子を引き付ける。これらのメカニズムが組み合わさることにより、イオン交換樹脂技術は GAC の最大 4 倍の PFAS を除去できる。GAC よりもリサイクルが難しく、購入するのに費用がかかるが、イオン交換は（設計方法と設置場所の水質にもよるが）使用するエネルギーとスペースが少なく、メンテナンスが少なく済み、PFAS 濃度が高いほど費用対効果が高くなる。

逆浸透（RO）技術は PFAS の除去に非常に効果的であるが、より高価である。各種機関の文書によると、これらの膜分離技術の PFAS 除去効率は、鎖の長さに関係なく、80%から 99%以上である。RO は、最小の PFAS 分子でさえも除去する、非常に小さな孔径の膜を通して水をろ過することによって、この効果を達成する（図 9 を参照）。ただし、RO は細孔に水を通すための大きな力を必要とするため、エネルギー消費量が多く、また汚染物質が多く含まれた逆洗が膜によって拒否されるため、原水の大幅な損失につながる可能性がある。そのため、原水量の乏しいところでは問題になる可能性がある。これらの理由から、目標が PFAS を非常に低い濃度に下げることでない限り、あるいは PFAS 濃度が高すぎて GAC またはイオン交換フィルターの使用が継続できない場合を除き、浄水場での PFAS 除去において RO 技術の費用対効果は高くない可能性がある。これらの技術を家庭で使用することも効果的である。水道の PFAS 濃度が上昇したノースカロライナ州の 73 世帯を対象とした調査では、家庭用 RO フィルターが調査対象のほぼすべての PFAS を除去した一方、GAC フィルターは平均して長鎖 PFAS の 60~70%、短鎖 PFAS の約 40%を除去した。

除去技術の有効性は、他の要因に依存する可能性がある。例えば、他の汚染物質の存在は除去を複

雑にする可能性がある。地下水にはイオン交換フィルターや GAC フィルターを詰まらせる可能性のある有機物が少ないため、地下水のほうが地表水よりも処理しやすい。さらに、特定の破壊技術と組み合わせることができるように、除去技術を組み合わせることで効果を高めることができる。処理技術を組み合わせることで（これは一般に「処理トレイン」という呼び方で知られる）、PFAS の全体的な処理の効率を向上させることができる。

各種機関の文書によると、破壊と除去の技術を組み合わせた処理トレインを用いることで、除去技術によって発生した PFAS 含有残留物を長期にわたって保存する必要がなくなるが、破壊技術の効果がどの程度であるかについては現在研究が活発に行われている段階であり、はっきりとしない。

4.2 現在の PFAS 処理技術は有効性が異なり、フルスケールでは不確かである

飲料水から PFAS を除去すると、PFAS で汚染された液体または固体の残留物が濃縮される。土壌や汚泥などの PFAS で汚染された他の物質も、汚染された場所から収集できる。これらの PFAS 含有物を埋立地または地下注入井に廃棄するための技術が利用可能である。ただし、以下の表 5 に示すように、各種機関の文書、専門家へのインタビュー、および科学文献によると、これらの技術の有効性はさまざまに不確かである。

埋め立て。 各種機関の文書によると、PFAS を廃棄するための最良の選択肢の 1 つは、粘土、プラスチック、または合成ゴムのポリマー、またはその両方で内張りされた埋立地である。しかし、多くの古い埋立地にはそのような仕組みが欠けており、米国全体で長期的な PFAS 廃棄を行ううえで、フルスケールの埋立地の全体的な有効性は不確かである。この廃棄方法は、土壌、消火用泡、使用済み GAC フィルター、イオン交換樹脂などの PFAS を含む固体に推奨される。しかし、各種機関の職員は、埋立地での PFAS の廃棄にはいくつかの課題があると述べている。たとえば、州の埋立地の管理方法は、PFAS を封じ込めるのに十分ではない可能性がある。そのため、PFAS を含む液体（すなわち浸出液）が埋立地から漏出し、地域の水源の PFAS 汚染につながる可能性がある。さらに、埋立地での PFAS の管理について定めた連邦規制がないため、一部の州や地方自治体は、PFAS を長期にわたって安全に管理できるか確信が持てないと、各種機関の関係者は述べている。その結果、PFAS が埋め立てによってどの程度抑え込めているか不明なことが多く、またすべての埋立地が PFAS の汚染源であるかを判断するために監視されているわけでもない。たとえば、ミネソタ州にある 101 の閉鎖埋立地の調査で、州は、98 の埋立地の地下水に PFAS が含まれていることを発見した。これらの埋立地のうち 59 ヶ所で、地下水中の PFAS が州のガイドライン値を上回っており、15 ヶ所では濃度が州のガイドライン値の 10 倍であった。埋立地は、埋立地の種類、土地の条件、および PFAS の種類に応じて、PFAS を効果的に封じ込められる期間が異なる。ただし、すべての埋立地は、維持、監視、浸出液とガスの処理を行わない限り、最終的に PFAS を放出する。埋立地での PFAS 監視に関する連邦規制はなく、浸出液中の PFAS を検出するための最終決定された公開済みの EPA による手法もない。

地下注入井。 埋立地に加えて、液体の形で濃縮された PFAS 廃棄物も地下注入井に廃棄される場合がある。有害廃棄物を注入井が効果的に隔離できるかどうかは、廃棄物が液体であるかどうか、また井戸の位置および地質に依存する。さらに、廃棄物の輸送コストが、PFAS 廃棄に対するこの方法の魅力に影響を及ぼす。EPA によると、現在 PFAS の廃棄に使用されているのは、非有害産業廃棄物および有害廃棄物用に許可されたクラス 1 の井戸のみである。これらの井戸は、公共水道への PFAS 放出のリスクが比較的低い、深く孤立した岩層にのみ見られる。

焼却。 PFAS と接触した後のフィルターや樹脂などの水処理残留物に一般的に適用されてきた一種の熱破壊であるが、PFAS で汚染された土壌・化学・製造廃棄物や未使用の泡消火剤にも適用されてきた。焼却中に、PFAS 分子は断片に分解される可能性があり、その一部は短鎖 PFAS かもしれない。フルスケールでの PFAS 焼却の有効性は、温度、時間、および燃焼される材料の混合の最適化に依存する。たとえば、限られた実験室規模の研究では、PFOA（PFAS の一種）が 1,000° C で 2 秒後には検出できない濃度まで減少した。アフターバーナーを使用する有害廃棄物キルンおよび商業用有害廃棄物焼却炉

はこの温度を超える可能性があるが、より一般的なタイプの焼却炉では超えないことがある。具体的には、1000℃は自治体のごみ焼却炉の運転条件の上限であり、下水用汚泥焼却炉の限界を超えている。EPA の 2020 年 12 月の PFAS の破壊と廃棄に関する暫定ガイダンスによると、米国には 193 の自治体向けごみ焼却炉と 170 の下水用汚泥焼却炉があり、10 の商業用有害廃棄物焼却施設と 12 の有害廃棄物キルンがある。焼却やその他の破壊方法の有効性ははっきりとしないもう 1 つの理由は、現在、空気中のすべての PFAS を特定して定量化できる最終的な EPA の手法がないことである。そのため、PFAS が焼却炉から排出される煙道ガスを介して空気中にどの程度放出される可能性があるのかを判断できない。さらに、PFAS の焼却が完全に最適化されていない場合、不完全燃焼の生成物（EPA の手法では現在検出できない潜在的に有害な化合物）が生成される可能性がある。EPA には、空気サンプル中の 50 の PFAS を測定する試験方法の草案として、「その他の試験方法 45」（OTM-45）がある。しかし専門家は、OTM-45 は空気中のすべての PFAS を測定することはできず、焼却後の PFAS 濃度を監視するための「良い出発点」に過ぎないと述べている。専門家や各種機関の文書によると、PFAS 焼却の全プロセスを最適化するには、さらなるガイダンス、調査、およびデータ収集が必要である。

専門家は、焼却炉に入る PFAS（フィード）、出てくる PFAS（煙道ガス）、および焼却が完了した後、焼却炉内に残される PFAS（残留物）を測定する方法は定かでない述べている。彼らはまた、施設の空気中にすでに存在している可能性がある PFAS を監視するためのガイダンスが不足しているため、破壊効果の測定精度が低下する可能性があることにも言及した。

超臨界水の酸化は、激しい化学反応、高温（705° C 以上）および圧力（大気圧の 200 倍以上）を使用して、PFAS の炭素-フッ素結合を切断する。この技術は、パイロット規模のデモンストレーションで、対象 PFAS の 99%の破壊を達成した。

別の新興技術である熱分解は、焼却に使用される温度よりも低い温度（および必要なエネルギーが少ない）で、試作品のテスト中に、汚泥内の PFAS を完全に破壊したようである。また、熱分解の結果、燃料として利用できる水素を多く含むガスや、農業に利用できる炭素を多く含む固体（バイオ炭）などの有用な副産物が得られた。このプロセスは商業的に利用可能である。ただし、バイオ炭が後に PFAS を放出するかどうかはまだ確認されておらず、プロセス中に発生するガス状化合物は他の汚染物質のために処理する必要がある。

4.4 PFAS 処理技術に影響を与える課題

我々は、PFAS の処理技術と方法をさらに開発および適用するために、次の 4 つの課題を特定した。

費用。我々が話を聞いた専門家や調査した政府機関の文書によると、フルスケールの PFAS 処理にかかる費用は、非常に不透明とのことである。この不透明性は、計画と予算編成に課題をもたらす。専門家は、より良いコストデータは、水道事業者が人の健康を最も効率的に守るためにどの除去技術を適用できるかを決定するうえで役立つと指摘した。ただし、飲料水からの PFAS 除去の経済性に関する研究は限られているため、必要な規模のコスト情報は存在しない可能性がある。

今ある見積もりでは、いくつかの技術でコストが高くなることが予想される。たとえば、米国水道協会（AWWA）によると、PFOA および PFOS に関する以前の EPA 生涯飲料水健康勧告値（70ppt 未満）を満たすために GAC 処理が米国全土に設置された場合、そのコストは 21 億ドルから 44 億ドルになる可能性がある。AWWA はまた、一部の州が処理ガイドライン値として設定している 20ppt というより低い濃度を満たそうとすると、230 億ドルから 500 億ドルが必要になると試算した。これらの数字がどの程度かを理解するために例を挙げると、各種機関の文書によれば、2017 年のすべての水道事業に対する公共支出は 1,130 億ドルであった。市町村にとって、これらのコストは予算に影響を与え、住民の水道料金を増加させる可能性がある。たとえば、メイン州の水道システムの PFAS 処理目標を達成できる逆浸透施設の建設には、5,700 万ドルから 8,500 万ドルの費用がかかると見積もられた。返済により、自治体の予算は 2 倍、顧客の水道料金は 2 倍、3 倍になるとの試算も出ている。

方法とガイダンスの欠如。

我々がインタビューした有害廃棄物処理業界の代表者は、PFAS を処理するためのベストプラクティス、検証済みの方法、連邦規制、ガイダンスが不足していると指摘した。例えば、焼却業界の代表者は、焼却前にどのように PFAS を測定すべきか、破壊が起こっている間にどのような化合物を測定すべきか、どの程度の破壊が必要なのか、よくわからないと述べている。こうした情報がなければ、PFAS を完全かつ効果的に破壊するために焼却プロセスを最適化することは困難である。各種機関の専門家によると、PFAS の廃棄に関する連邦政府のガイダンスがないため、州および地方自治体の埋め立て業者は PFAS 廃棄物の受け入れをためらう可能性がある。また、我々が話を聞いた国防総省の専門家は、有効かつ EPA が承認した廃棄方法の少なさが引き続き課題であると述べた。さらに、ほとんどの環境媒体、特に埋立地の浸出液と埋立地のガスに対して、複数の実験室で検証された PFAS の検出方法がないことが、PFAS の埋立地貯蔵の有効性に関する不確実性の一因となっている。

化学構造。 PFAS 化合物の中には分解が困難なものもあり、その場合、処理効果が限定され、浄化のコストが高くなる可能性がある。その他の PFAS 化合物は分解しやすいが、焼却時に新たな化合物を生成する可能性があり、破壊の効率性を判断することが難しい。また、環境中の PFAS は、異なる PFAS 化合物に分解される可能性があり、特定や処理が困難になる場合がある。また、こうした変化により、処理技術が有効かどうか分かりにくくなることもある。

フルスケールで完全に効果的な破壊技術はない。

フルスケールで PFAS を完全に破壊する効果が実証された PFAS の破壊技術は存在しない。各種機関の文書によると、現行のフルスケールの破壊技術は PFAS の破壊に最適化されておらず、ほとんどの新しい PFAS 破壊技術はまだ研究段階である。また、新しい PFAS 破壊技術は、非効率、高いエネルギー消費、コストなどの制約がある。例えば、超臨界水の酸化はすべての PFAS を破壊できるかもしれないが、大量のエネルギーを使用し、排出制御も必要である。また、処理中に発生する高熱、高圧、腐食性の副産物のために、メンテナンスが困難でコストがかかる可能性もある。これらの要因は、超臨界水酸化による処理コストを増加させ、展開できる規模を制限する可能性がある。

5 政策オプション

GAO は、PFAS の評価、検出、および処理技術に関連する課題を軽減するのに役立つ 3 つの政策オプションを特定した。政策立案者には、現状を維持する、つまり、介入せずに現在の取り組みを進めるという選択肢もある。関連する政策立案者には、議会、連邦政府機関、州および地方政府、学術研究機関、産業界が含まれる可能性がある。本報告書に記載された課題の中には、現在の取り組みによって解決できるものもあるが、介入しなければ解決できないか、悪化する、あるいは解決により多くの時間がかかるものもある。

研究の推進（略）

メソッド開発の拡大（略）

本格的な処理の支援

政策立案者は、PFAS を処分または破壊するためのフルスケールの技術と方法の開発と評価を奨励することができる。

この政策オプションは、処分および破壊技術のコストと効率、および規制各種機関からのガイダンスの欠如という課題に対処するのに役立つことができる。

機会

・EPA 手法の最終確定を促すことにより、PFAS のフルスケールでの廃棄および破壊技術の最適化を支援することができる。例えば、政策立案者は、空気中の 50 種類の PFAS を測定するために設計され、

専門家が焼却後の PFAS 濃度監視の「良い出発点」とであると述べた EPA 手法 OTM -45 の最終確定を奨励することができる。

- ・米国内のさまざまな環境と状況において PFAS のより効率的な廃棄と破壊に向けて、異なる技術のより良い統合（処理トレインとして知られるものを作成）を促進するために協力することができる。また、米国の州と地方の各種機関者の間で、廃棄と廃棄のオプションの採用と実施に関連する有効性とコストの進行中および過去の評価に関する情報を互いに共有することもできる。

- ・埋立地での PFAS 放出を監視するためのガイダンスの開発を奨励することができる。埋立地は、その種類や立地条件によって、PFAS に汚染された物質が浸出液やガスを通じて環境中に放出されないよう効果的に封じ込められる期間が異なる。PFAS を廃棄した埋立地では、PFAS が地下の飲料水源を汚染していないことを確認するための監視と試験が必要である。

- ・飲料水中の PFAS の廃棄と破壊のための性能モデルとコストモデルの開発と共有を加速することができる。利害関係者、特に小規模水道システムの運営者は、一般的にそのような情報を欠いている可能性がある。この情報は、PFAS 処理を促進し、水道事業者や機関が将来のコストをより適切に計画するのに役立つ。

考慮事項

- ・規制各種機関からのガイダンスが不足しているため、PFAS 破壊技術の大規模な実施は難しい可能性がある。たとえば、複数の機関の関係者は、現在大規模かつ長期的に PFAS を破壊するための唯一の選択肢である焼却の全過程について、規制各種機関からより多くのガイダンスが必要であると指摘した。このガイダンスは、特に、焼却室に流入、流出、および残留する PFAS の量を測定する方法について説明すべきである。焼却施設に通常存在する可能性がある PFAS の量を監視するための追加ガイダンスも必要である。こうした元から存在する PFAS の量は、焼却により空気中に放出される PFAS を正確に測定するうえで妨げになる可能性がある。

- ・効果的に管理しなければ、埋立地は時間とともに PFAS を環境中に放出する可能性がある。現在、埋立地での PFAS 監視に関する連邦要件はなく、この処分方法のフルスケールでの有効性は不確かなままである。

- ・ガイドラインは PFAS の廃棄と破壊のコストを押し上げる可能性があり、現在、米国内でかなりの差がある。いくつかの対応方法は高コストであることから、一部の自治体の予算に大きな影響を与え、住民の水道料金を大幅に引き上げる可能性がある。

（担当）理事長 安藤 茂

配信先変更のご連絡等について

「JWRC水道ホットニュース」配信先の変更・追加・停止、その他ご意見、ご要望等がございましたら、会員様名、担当者様名、所属名、連絡先電話番号をご記入の上、下記までEメールにてご連絡をお願いいたします。
〒112-0004 東京都文京区後楽2-3-28 K.I.S飯田橋ビル7F (公財) 水道技術研究センター ホットニュース担当

E-MAIL : jwrchot@jwrc-net.or.jp

TEL 03-5805-0264 FAX 03-5805-0265

また、ご連絡いただいた個人情報は、当センターからのお知らせの配信業務以外には一切使用いたしません。

水道ホットニュースのバックナンバーについて

水道ホットニュースのバックナンバー（第58号以降）は、下記アドレスでご覧になれます。

バックナンバー一覧 <http://www.jwrc-net.or.jp/hotnews/hotnews-r4.html>

水道ホットニュースの引用・転載について

水道ホットニュースの引用・転載等を希望される方は、上記ホットニュース担当までご連絡をお願いいたします。
なお、個別の企業・商品・技術等の広告にはご利用いただけません。