



「永遠の化学物質」PFAS を環境基準以下まで除去できる膜蒸留システム



東京科学大学 物質理工学院 准教授
磯部 敏宏

1. PFAS とは

PFAS（ピーファス）¹⁾とは、主に炭素とフッ素からできた化学物質のグループのことです。正式には「ペルフルオロアルキル化合物」と「ポリフルオロアルキル化合物」と呼ばれます。PFASは、1940年頃から開発が盛んになっており²⁾、分類の仕方にもよりますが、現在は、1万種類以上あるとされています。PFASと一言でいっても、炭素のつながり方や長さの違いによって、それぞれの性質は大きく異なります。中には、ほかの分子では実現できない特長を持つPFASも多数あります。たとえば、炭素とフッ素の強い結びつき（C-F結合）によって、熱や光、微生物の働きによる分解に強く、ほとんど壊れないという性質があります。また、水や油をはじく性質を持ち、表面張力が小さいことから、非常に強力な界面活性剤として働くことも特長です。このほかにも、熱に強い性質や電気的な性質を調整できる点など、多くの機能を持たせることができます。

表1 PFASの主な用途と具体的な製品例³⁾

分野	用途例
航空・宇宙	燃焼エンジン、シーリング、冷暖房
工業	電気分解、ワックス・研磨剤、潤滑剤、溶剤、洗浄剤、半導体フォトリソグラフィ
電子機器	配線、ケーブル、コーティング、リチウムイオン電池、溶剤、洗浄剤
医療	チューブ、カテーテル、埋込式医療機器
日用品	調理器具、食品用包装、衣類、洗浄剤、化粧品、トイレタリー、泡消火剤、スキーワックス

参考文献3)より抜粋

こうした特長から、表1のように、PFASは幅広い用途で使われています。溶剤や添加剤として利用されるほか、金属・繊維・革・紙・プラスチックなどの表

面加工にも使われています。また、飛行場や立体駐車場で使用される泡消火剤にも含まれています。さらに、スマートフォンでは配線や基板、画面のコーティングなど、ひとつの製品の中で複数の目的に使用されています。このようにPFASは、私たちの身の回りのさまざまな場所に浸透している物質です。

一方で、2000年頃から代表的なPFASであるペルフルオロオクタンスルホン酸（PFOS）やペルフルオロオktan酸（PFOA）の健康への影響が知られるようになりました。この結果、2026年現在、ペルフルオロヘキサスルホン酸（PFHxS）、PFOS、PFOAの3つのPFASが残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約（POPs条約）で使用を禁止されています。日本でも、「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（化審法）」によって、こうした物質の製造や輸入は原則として禁止されています。そのため、日本国内で新たに作られることはほとんどありませんが、過去に使用されて環境中に放出されたものが残っており、現在でも河川や地下水などから検出されています。PFASは分解されにくい性質をもつため、環境中に長く残り続けてしまいます。また、人の健康への影響も心配されています。そのため、環境中からPFASを取り除く技術の開発が活発に進められています。さらに、回収したPFASを分解し、安全な物質に変える技術の研究も行われています。

環境中に存在するPFASは濃度が低いため、そのままでは効率よく分解することができません。分解効率を高めるには、PFASをある程度高い濃度まで集める（濃縮する）必要があります。このような理由から、PFASを分解する技術と分離する技術を別々に考えるのではなく、分解しやすい濃度まで濃縮する工程も含めて、一体的に研究することが重要です。

カラー紙面をWebページで公開中。小社Web理科トップページよりダウンロードできます。

2. PFAS の分離技術

2. 1. 分離技術

一般に「分離」とは、物質の性質の違いを利用して、混ざっているものを分ける操作のことです^{4)a}。代表的な方法には、沸点の違いを利用する「蒸留」、溶けやすさ（溶解度）の違いを利用して成分を別の液体に移す「抽出」、物質が固体の表面に吸着する性質を利用する「吸着」、分子の大きさの違いをフィルターで分ける「膜分離」、拡散速度の違いを利用する「クロマトグラフィー」があります。これらの方法は、化学や環境分野で広く利用されています。

2. 2. PFAS の主な分離技術

PFAS の分離では、特に「吸着法」が活発に研究されています。代表的な吸着材料は活性炭です。活性炭はすでに浄水場などで使われているため、実用化しやすく、多くの研究が行われています。現在では、PFAS の除去に特化した活性炭も販売されており、今後も主要な分離技術の一つになると考えられています。

一方で、活性炭に吸着した PFAS をどのように処理するかが課題となっています。たとえば、PFAS を熱で分解しようとする、活性炭ごと燃やす必要があります、その結果、大量の二酸化炭素 (CO₂) が発生します。このように、環境への負担が大きい点が問題です。

もう一つの方法として、「逆浸透法」と呼ばれる膜分離法も盛んに研究されています^{4)b}。これは、水分子（約 0.3 ナノメートル）より大きく、PFAS 分子（約 0.6 ～ 3 ナノメートル）より小さい孔（あな）をもつフィルター（膜）を使う方法です。この膜は、小さな水分子は通しますが、大きな PFAS 分子は通さないため、水と PFAS を分けることができます。ただし、純水（PFAS を含まない水）と汚染水（PFAS を含む水）で分離膜を挟むことになることから、浸透圧が発生します。汚染水から純水側へ水を移動させるには、発生した浸透圧よりも大きな圧力をかける必要があります、エネルギーが必要になります。しかし、膜分離法では PFAS を水の中に濃縮できるという利点があります。濃度の高い水溶液中では、PFAS はさまざまな方法で分解できる可能性があります。たとえば、熱分解⁵⁾、プラズマ処理⁶⁾、光触媒処理⁷⁾、電気化学処理⁸⁾ などによって分解できることが報告されています。このため、今後はエネルギー効率が高く、PFAS を高濃度に

集められる膜分離法の開発が期待されています。

3. 膜蒸留法による PFAS の分離

3. 1. 膜蒸留法

もう一つ、新たな分離技術として注目されているのが「膜蒸留法」という方法です。膜蒸留法とは、温度差による蒸発と凝縮を利用して水を分離する技術です（図 1）。まず、高温側にある汚染水を温めると、水の一部が蒸気になります。このとき、水に含まれている PFAS は水より蒸発しにくいので、その場に残ります。一方、水蒸気だけが膜の細かい孔を通して反対側の低温側へ移動し、そこで冷やされて再び液体の水になります。この方法の特徴は、膜を通る水が液体ではなく気体である点です。逆浸透法のように圧力で水を押し出す必要がなく、また蒸留のように沸騰させる必要もないため、比較のおだやかな条件で運転できるという利点があります。そのため、エネルギー効率のよい方法とされています。また、不純物は蒸気として移動できないため、塩分や重金属、有機物などを効率よく取り除くことができ、質の高い水を得ることができます。このような理由から、海水の淡水化や工業排水の処理、半導体や医薬品の製造に必要な超純水の製造など、高い水質が求められる分野で注目されています。近年の研究では、膜の材料が性能に大きく影響することが分かっており、特に撥水性の強いフッ素系の樹脂膜が優れた特性を持つと報告されていますが、フッ素系の樹脂中に含まれている PFAS が、膜蒸留の過程で溶出する可能性が指摘されています。

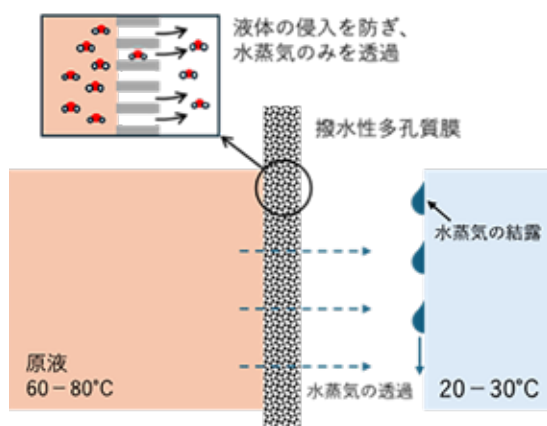


図1 膜蒸留の仕組み。気体のみ透過するため、蒸発しない物質（除去したい物質）は原液側に濃縮される。

3.2. セラミックスによる膜蒸留⁹⁾

膜蒸留に用いる膜には、主に高い水蒸気透過性と十分な撥水性（水は通さず、水蒸気だけを通す性質）の2つが求められます。水蒸気透過性を高めるには、膜の中にある孔（あな）を大きくすることが効果的です。しかし、孔が大きくなりすぎると、水蒸気だけでなく液体の水も膜の中に入り込み、そのまま通り抜けてしまうおそれがあります。そのため、液体の水が膜に染み込まないように、膜には高い撥水性を持たせる必要があります。私たちが研究しているセラミックス膜は、金属酸化物の粒子（今回はアルミナ）を焼き固めて作られています^{4)c}。この膜では、粒子と粒子のすき間が孔として働きます。また、原料となるアルミナ粒子の大きさを変えると、それに応じて孔の大きさも変化します。そのため、膜の孔径を比較的容易に制御でき、水蒸気の透過性を調整しやすいという利点があります。こうした特徴から、セラミックスは膜蒸留用の材料として非常に有望です。一方で、セラミックスはもともと水になじみやすい「親水性」の性質を持っています。そのままでは液体の水が膜に浸透してしまうため、膜蒸留に使用するためには、表面を撥水化する処理が必要になります。

3.3. 多孔質セラミックスの作製と撥水化

フィルターの作製方法の概要を図2に示します。まず、「鑄込み成形法」と呼ばれる方法を用いてアルミナ粒子から成形体を作製しました。この方法は、トイレや食器などのセラミックス製品の製造にも広く利用されています。鑄込み成形によってアルミナ粒子を隙間なく積み重ねた構造を作り、その後、熱処理を行いました。熱処理によって粒子同士の接触部分が部分的に結合（部分焼結）し、成形体の強度を向上させます。

次に、この成形体に撥水性を持たせるため、グルコースからカーボンを生成する方法を検討しました。グルコースは水に溶けるため、水溶液として用いることでアルミナ粒子の表面に均一に付着させることができます。まず、グルコース水溶液を成形体に浸透させ、その後乾燥してグルコースを析出させます。さらに、窒素雰囲気中で加熱すると、酸素が少ないためグルコースは燃焼せず、脱水縮合反応によってカーボンへと変化します。カーボンは水をはじきやすい性質を持つため、この処理によってフィルターに撥水性を付与

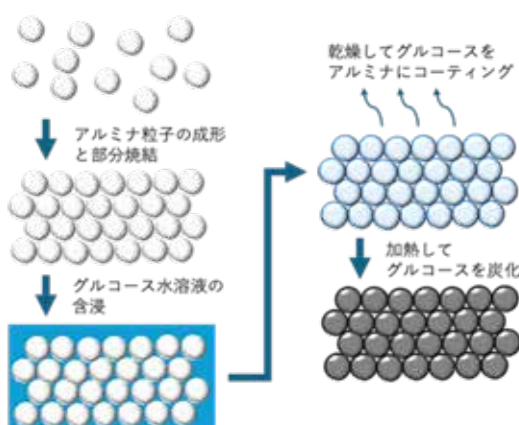


図2 カーボン膜の作製方法。膜蒸留に必要な多孔質構造をアルミナ粒子の間隙で、撥水性をカーボンコーティングで実現している。

することができます。実際に、フィルター表面に水を置いても、水が内部に浸透しないことを確認しました。

作製したフィルターの電子顕微鏡^{4)d}写真を図3に示します。図3(a)からは、球状に近いアルミナ粒子が積み重なっている様子が観察できます。一般に、同じ大きさの球状粒子を規則正しく並べると、粒子が占める体積は約74%、空隙の体積は約26%になります^{4)e}。一方、粒子をランダムに充填した場合、粒子が占める体積は理論上約64%になります。今回のフィルターでは、粒子の形状が完全な球ではなく、またランダムに充填されているため理論値とは多少異なりますが、粒子が占める体積は約60%でした。

さらに、図3(b)に示す窒素雰囲気中で焼成した後の電子顕微鏡写真からは、アルミナ粒子を積み重ねた構造が維持されていることが確認できました。この結果は、図2に示した模式図どおりの構造が形成されたことを示しています。また、細孔径分布の測定結果から、アルミナ粒子の表面を覆うカーボン層の厚さは数十ナノメートル程度であると推定されました。加えて、カーボンをコーティングしたフィルターが高い撥水性を示すことも実験によって確認されています。

このようにして作製したフィルターに、PFOS濃度約500ng/Lの模擬汚染水を接触させ、約80℃で加熱する膜蒸留試験を行いました（図4）。その結果、蒸発した水蒸気がフィルターを透過することを確認できました。

さらに、透過液中のPFOS濃度を液体クロマトグラフィー質量分析法（LC-MS）^{4)d}で測定したところ、濃

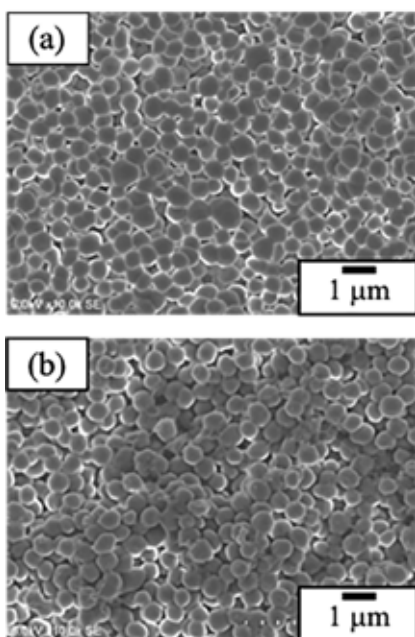


図3 作製したカーボン膜の走査型電子顕微鏡写真。
(a) カーボンコート前のアルミナ成形体と
(b) カーボンコート後の分離膜。⁹⁾

度は測定限界である約3ng/L未満まで低減していました。この値は、日本の水質管理目標値である50ng/Lや、米国の環境基準である4ng/Lを下回るものです。

また、カーボン膜の作製条件を調整することで細孔径を制御できることや、細孔径が大きいほど単位時間あたりの処理量が増加することも明らかになりました。これらの結果から、本研究で開発したフィルターは、PFASを含む汚染水の浄化に有効であり、さらに高効率化の可能性も持つことが示されました。

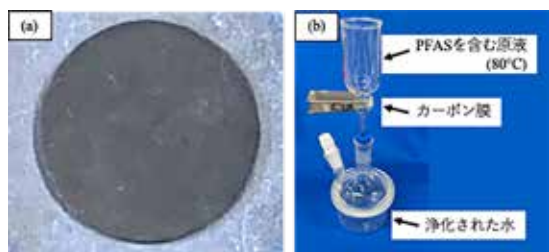


図4 膜蒸留の様子。
(a) 作製したカーボン膜の外観と(b) 最も簡単な膜蒸留装置。実際にはヒーター、クーラー、センサー、水循環装置等を取り付けて実験する。

4. まとめ

本稿では、PFASの用途や現在の社会的な課題について解説するとともに、新しい分離技術である膜蒸留法を用いたPFASの除去について紹介しました。PFASには1万種類以上の化学物質が存在すると言われており、それぞれ性質が異なります。そのため、活性炭などの吸着材を用いた浄化技術では、PFASの種類によって吸着のされやすさが異なり、すべてのPFASを効率よく除去できる材料を開発することは容易ではありません。

一方、膜蒸留法は物質の蒸気圧の違いを利用して分離を行う技術です。PFASは蒸発しにくく、水だけが水蒸気として膜を通過するため、PFASの種類にかかわらず高い除去性能が期待できます。このような特徴から、今後さらにPFASの規制対象が拡大した場合でも、膜蒸留法であれば大幅な設備更新を必要とせず、安定して安全な水を供給できる可能性があります。そのため、PFAS汚染への対策として有望な技術の一つと考えられています。

参考文献

- 1) PFASハンドブック，環境省（2025）
- 2) 井上知也ら，リスク学研究 34（2025）141-154
- 3) J. Glüge ら，Environ. Sci.: Processes Impacts, 22（2020）2345-2373
- 4) サイエンスビュー化学総合資料新訂版，実教出版（2026）（a）20-21,（b）118-119,（c）210-211,（d）324-325,（e）52-53
- 5) A.A. Dolatabad ら，Nature Reviews Clean Technol. 2（2026）38-53
- 6) R. Hayashi ら，Electr. Eng. Jpn, 190（2015）9-16
- 7) S. Kanao ら，Chem. Sci., 16（2025）23055-23063
- 8) N. Saeidi ら，Chem. Eng. J., 531（2026）172856
- 9) R. Tanaka ら，ACS EST Water, 6（2026）1786-1794