

フッ素循環型社会に向けた PFAS 分解技術の最前線と課題

【発表のポイント】

- PFAS（※1）分解研究の急速な進展と「壊せる時代」の到来
- 「分解」から「資源循環」への発想転換
- フッ素を回収・再利用する新概念の提示
- 分解技術の到達点と今後の課題を体系的に整理

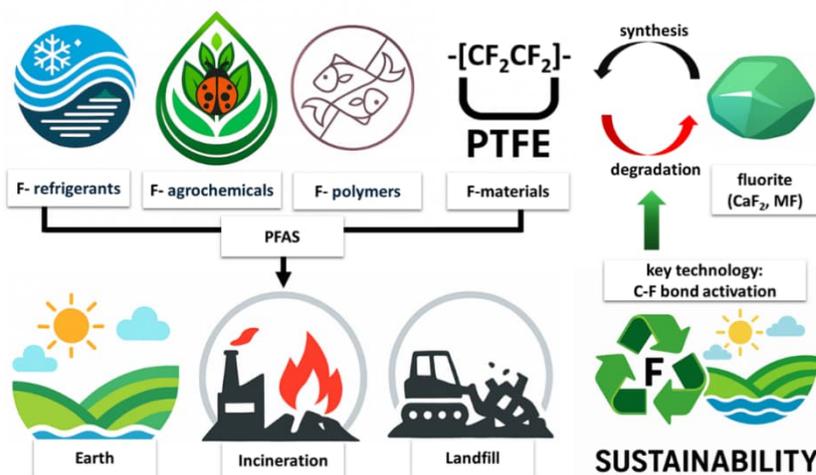
【概要】

近年、環境中に蓄積する PFAS 問題の解決に向けて、分解技術の研究が世界的に急速に進展しています。特にこの1年で、光化学的手法やメカノケミカル手法などにより、従来は極めて困難とされてきた炭素-フッ素 (C-F) 結合の切断とフッ素の回収が現実的なものとなってきました。

名古屋工業大学生命・応用化学類の趙正宇助教と柴田哲男教授（4月1日以降、本学客員教授）は、PFAS 分解に関する最新の研究動向を体系的に整理し、「分解」から一歩進んだ「フッ素資源の再利用」という新しい概念——すなわち「フッ素循環型社会 (fluoro-circular economy)」の可能性を提案しています。従来、PFAS は環境負荷物質として「除去・廃棄」の対象とされてきましたが、本研究はそれらを「二次的なフッ素資源」と捉え直し、無機フッ化物として回収・再利用することで持続可能な化学プロセスへと転換できることを示しています。さらに、代表的な分解手法（光化学、電気化学、メカノケミカル法、ナトリウム分散法など）を比較し、それぞれの利点と限界を明確にするとともに、現時点では「分解効率」だけでなく「回収したフッ素の再利用」までを一体化した技術が重要であることを指摘しています。また、環境中の極微量 PFAS の回収、水存在下での反応制御、安全性やスケールアップといった未解決課題も整理しました。

本研究は、PFAS 問題を単なる「分解・無害化」の枠を超えて、「資源循環」という視点から再定義するものであり、今後の環境化学・フッ素化学における研究指針を提示するものです。フッ素資源の持続可能な利用と環境負荷低減を両立する新しいパラダイムの確立に向けた重要な一歩といえます。

本論文は、アメリカのセル出版 (Cell Press) が発行する学術雑誌「Chem Circularity」のオンライン速報版に、2026年3月31日付（日本時間4月1日）で掲載されます。



フッ素循環型社会 (fluoro-circulareconomy) のイメージ図

【PFAS問題に新たな視点：「分解」から「資源循環」】

PFAS は、少なくとも 1 つの完全にフッ素化された炭素単位を持つ人工化学物質群であり、低分子のトリフルオロ酢酸 (TFA) から、フッ素樹脂に代表される高分子 PFAS (例：PTFE) まで、非常に幅広い種類が存在します。これらは優れた耐熱性・耐薬品性・撥水撥油性を持つため、調理器具、繊維、電子材料、航空宇宙機器、医療機器などに広く利用されるとともに、熱的安定性や適切な揮発性により冷媒 (HFC など) (*2) としても用いられ、現代に不可欠な材料となっています。一方で、その強固な C-F 結合ゆえに自然界ではほとんど分解されず、環境中に長期間残留・蓄積することが大きな問題となっています。さらに、分解しても最終的に安定なフッ素化合物 (例えば TFA やフルオロホルム CF_3H) として残存し、環境中に広がり続けるという課題があります。

【世界的に加速する PFAS 分解研究：この 1 年で何が変わったのか】

近年、PFAS の分解に関する研究が急速に進展しています。特にこの 1 年で、光化学的手法や電気化学的手法により、従来は極めて困難とされてきた C-F 結合の切断が現実的に達成されてきました。これらの研究により、PTFE を含む多様な PFAS からフッ素を無機フッ化物として取り出すことが可能となっています。しかしながら、多くの手法では「分解」に焦点が当てられており、得られたフッ素の回収や再利用までは十分に検討されていません。

【フッ素は廃棄物ではない：フッ素循環型社会という新しい概念】

柴田教授らは、PFAS を単なる環境負荷物質としてではなく、「二次的なフッ素資源」として捉える新しい視点を提示しています。すなわち、PFAS を分解して得られるフッ化物を再び化学反応に利用することで、フッ素を循環させる「フッ素循環型社会 (fluoro-circular economy)」の実現を目指すものです。この考え方は、従来の「分解して終わり」という発想から、「分解して再利用する」という大きなパラダイム転換を意味します。

【メカノケミカル法が切り拓くブレークスルー：分解と再利用を同時に実現】

特に注目されるのが、ボールミルを用いたメカノケミカル法です。この手法では、溶媒を使わずに PFAS を分解し、高効率でフッ化カリウム (KF) などの無機フッ化物を得ることができます。さらに重要なのは、得られたフッ化物がそのままフッ素化試薬として利用できる点です。つまり、「分解」と「再利用」が一体化されたプロセスが実現されつつあります。また、フッ素ポリマーから生成する炭素材料との複合体 (いわゆる“KF-black”) も、実用的なフッ素化反応に利用できることが示されています。

【多様なアプローチの比較：どの手法が優れているのか】

現在開発されている PFAS 分解技術には、大きく以下の特徴があります：

- 光・電気化学法：温和な条件で高効率だが、再利用までつながりにくい
- メカノケミカル法：高効率かつ再利用に直結
- ナトリウム分散法：高反応性でスケールアップに有利
- 気相フロー法 (HFC に適応)：連続処理に適し産業応用に近い

本論文は、これらを体系的に比較し、「分解効率」だけでなく「フッ素の回収と再利用」が今後の鍵であることを明確に示しています。

【まだ終わりではない：残された重要課題】

一方で、実用化に向けては依然として重要な課題が残されています。

- 環境中の極低濃度 PFAS の回収・濃縮
- 水存在下での反応制御
- ナトリウム・カリウム使用時の安全性
- 副生成物（炭素材料）の有効利用

これらの課題を解決しなければ、真の意味での循環型プロセスの確立には至りません。

【経済性よりも「環境責任」：フッ素循環の本質的意義】

近年、フッ素循環のエネルギーコストや経済性に対する議論もあります。しかし柴田教授らは、その本質的な意義は経済合理性ではなく「環境責任」にあると強調しています。すでに環境中に広く拡散した PFAS を回収・無害化し、さらに資源として再利用することは、持続可能社会に向けた不可避の取り組みです。

【「永遠の化学物質」から「循環資源」へ未来に向けた提言】

PFAS はこれまで「フォーエバーケミカル」と呼ばれてきました。しかし本研究は、それらを「回収可能なフッ素資源」へと転換できる可能性を示しています。今後は、廃棄物の回収技術、連続プロセス化、産業への統合を進めることで、フッ素化学の持続可能な未来が切り拓かれると期待されます。

【謝辞】

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST 研究領域「分解・劣化・安定化の精密材料科学」（研究総括：高原淳（九州大学 ネガティブエミッションテクノロジー研究センター 特任教授））における研究課題「フッ素循環社会を実現するフッ素材料の精密分解」（研究代表者：柴田哲男）（課題番号 JPMJCR21L1）、元島栖二博士（CMC 総合研究所）の支援を受けて実施しました。

【論文情報】

論文名：Toward a circular fluoropolymer economy coupling PFAS degradation and fluorine reutilization

著者名：Zhengyu Zhao、Norio Shibata*

*責任著者

掲載誌：Chem Circularity

DOI：org/10.1016/j.checir.2026.100016

公開日：2026年3月31日24時

Journal link：https://doi.org/10.1016/j.checir.2026.100016

【用語解説】

（*1）PFAS

Per- and Polyfluoroalkyl Substances（ペルフルオロアルキル化合物およびポリフルオロアルキル化合物）の略称。熱、水、油に強いという特徴を活かし、焦げ付きにくい調理器具、食品包装、汚れにくい布地など様々な製品に使用されている。また、ペルフルオロオクタンスルホン酸（PFOS）、ペルフルオロオクタン酸（PFOA）、ペルフルオロヘキサンスルホン酸（PFHxS）は発がん性などの健康被害の可能性が報告され、特定 PFAS として規制対象となっている。

(*2) HFC

HFC (ハイドロフルオロカーボン) とは、炭素、水素、フッ素から構成される有機フッ素化合物の一種であり、塩素を含まないフッ素系ガスの総称である。主に冷媒、発泡剤、エアゾール噴射剤、消火剤などとして利用されており、オゾン層破壊係数 (ODP) がほぼゼロであることから、従来のクロロフルオロカーボン (CFC) やハイドロクロロフルオロカーボン (HCFC) の代替物質として広く使用されてきた。一方で、多くの HFC は高い地球温暖化係数 (GWP) を有するため、近年では温暖化対策の観点から使用削減や規制が進められている。

本件への問い合わせ先

研究に関すること

名古屋工業大学 生命・応用化学類

教授 柴田 哲男

TEL: 052-735-7543 E-mail: nozshi ba@ni tech. ac. jp

広報に関すること

名古屋工業大学 企画広報課

TEL: 052-735-5647 E-mail: pr@adm. ni tech. ac. jp