

PTFE を室温・1時間で“フッ素原料”に再生 —フルオロ・サーキュラー・エコノミーを切り拓く画期的技術を確立—

【発表のポイント】

- 難分解性のフッ素樹脂や様々なPFASを室温・1時間で完全分解する技術を開発。
- 得られたフッ化カリウム(KF)はそのまま化学反応に再利用でき、高機能化学品へ直接アップサイクル可能。
- 金属を選ぶだけで、KF・NaF・LiFなど用途に応じたフッ化物へ変換できる柔軟なプラットフォーム技術。

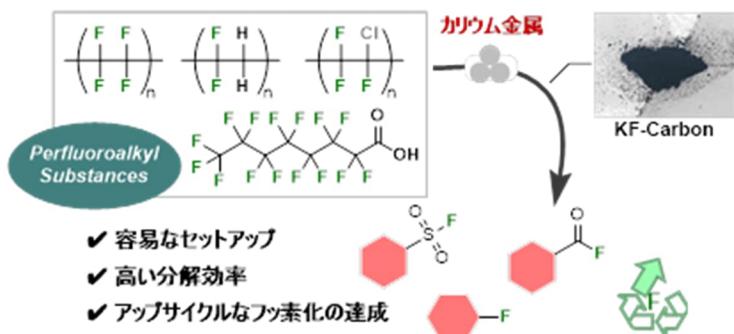
【概要】

名古屋工業大学の服部雅史氏（共同ナノメディシン科学専攻1年）、清野達希氏（工学専攻生命・物質化学プログラム2年）、趙正宇助教（生命・応用化学類）、柴田哲男教授（生命・応用化学類）らの研究グループは、バレンシア大学 Jorge Escorihuela 教授との共同研究により、再利用が極めて困難とされてきたフッ素系高分子（フルオロプラスチック）（*1）PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）を、室温・1時間の機械化学反応（メカノケミカル）（*2）で高純度KFと炭素材料の還元型酸化グラフェン（rGO）（*3）へと完全分解し、フッ素(F)を再資源化する技術を開発しました。得られたKFは精製を必要とせず、そのままフッ素化反応に使用でき、「フッ素樹脂や様々なPFAS（*4）→高機能フッ素化学品」への直接アップサイクル（有価化）（*5）を実現しました。また、使用する金属種を変えることで、PTFEをKFだけでなく、歯磨き粉などに用いられるフッ化ナトリウム(NaF)や、リチウムイオン電池材料に不可欠なフッ化リチウム(LiF)へと高純度変換できることも明らかになりました。

本手法はPVDF、PCTFE、ETFE、PFA、FEPなどのフッ素高分子に加え、環境への蓄積性・残留性が懸念されているPFOS、PFOA、PFHxS（*6）だけでなく、その他の低分子PFASにも適用可能であり、様々なPFASからフッ素を高効率に回収し、有価化できることを示しました。

本成果は、PFASの廃棄やフッ素資源枯渇問題という国際的課題を同時に解決しうる、持続可能なフッ素資源循環(Fluoro-Circular Economy)に向けた重要なブレークスルーと考えています。

本研究成果は、国際学術誌 *Nature Communications* オンライン速報版（2025年12月11日付）に掲載されました。



【研究の背景】

フッ素樹脂 PTFE は、1940 年代の発見以来、その高い化学的安定性、耐熱性、電気特性、非粘着性などの卓越した性質から、調理器具、電子デバイス、半導体製造装置、化学プラント部材、医療用途など、家庭から産業まで幅広い領域で不可欠な材料として用いられてきました。2024 年の世界市場規模は 146 億ドルに達し、今後も成長が続くと見込まれています。

しかし、PTFE の優れた特性の源である強固な炭素-フッ素結合 (C-F 結合) と高い結晶性 (融点 327 °C) により、同時に PTFE は「分解が難しいプラスチック」のひとつであり、最もリサイクルが困難な高分子材料として長らく位置づけられてきました。その結果、従来の PTFE 廃棄物処理は焼却や高温分解 (>500 °C) といった方法に限られ、フッ素の回収・再利用はほぼ不可能でしたが、資源循環の観点から有効活用を図るための再利用技術の開発が必要とされています。

さらに、自然環境への蓄積性・残留性が懸念されている特定 PFAS である PFOA、PFOS、PFHxS は環境中の削減が求められています。こうした背景から、「PFAS を完全分解し、かつ貴重なフッ素資源として再利用する」という fluoro-circular economy (フッ素資源循環社会) の構築は、化学・環境・資源工学分野における国際的な最重要課題となっています。

【研究の内容】

本研究では、PTFE を金属カリウム (K) とともにボールミルで粉碎するメカノケミカル手法を用いることで、従来困難とされてきたフッ素樹脂の完全分解とフッ素資源の再利用に成功しました。まず、室温・1 時間という極めて温和な条件で PTFE をほぼ完全に (最大 99%) 分解できることを実証し、得られた生成物は主に KF と rGO から構成されることが分かりました (図 1)。この黒色粉末 (KF と rGO の混合物、KF-Carbon) は、精製を必要とせずそのままフッ素化反応に使用可能であり、スルホニルフロリド (RSO₂F) 合成、C(sp³)-F/C(sp²)-F 結合形成、アシルフロリド (RCOF)、脱酸素的フッ素化など 30 種以上のフッ素化反応を実現しました (図 2)。これは、「PTFE → フッ素化学薬品」という直接変換を達成した画期的成果です。

さらに本手法は、PVDF、PCTFE、ETFE、PFA、FEP といった多様なフッ素高分子に加え、規制物質である PFOA を含む低分子 PFAS にも適用でき、いずれの場合も高収率かつ高純度で KF を回収できることが明らかになりました。特に PVDF を分解して得られる KF-Carbon も PTFE と同様に、各種フッ素化反応へ利用可能であることを確認しています。

また、金属としてカリウム (K) だけでなく、ナトリウム (Na) やリチウム (Li) を用いた場合でも同様の分解が可能であり、この場合はそれぞれ NaF や LiF を高純度で得ることができました。LiF はリチウムイオン電池の重要な材料であることから、本技術はエネルギー材料分野への応用可能性も秘めています。

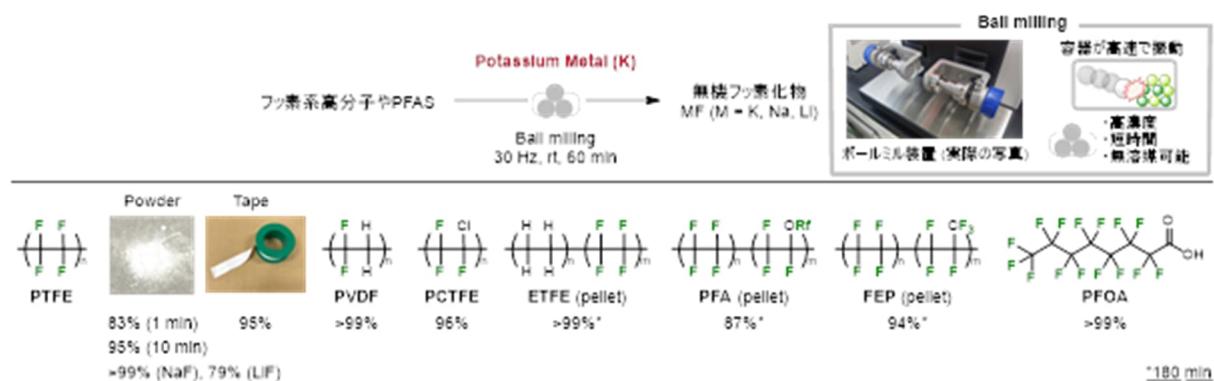


図 1 フッ素系高分子含む PFAS の分解結果

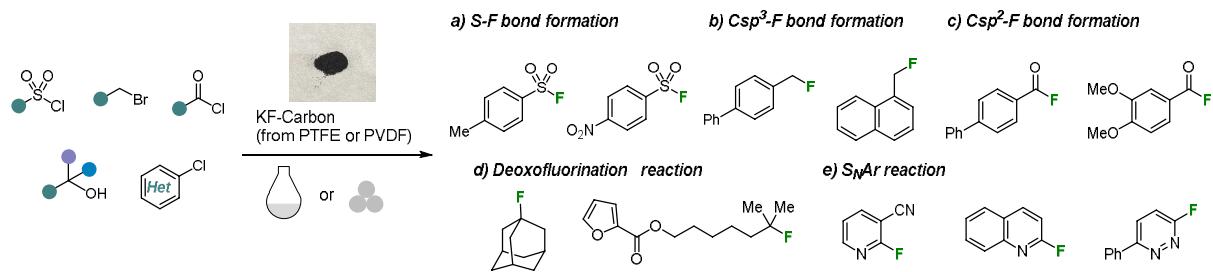


図2 本手法によって合成した KF-Carbon を用いた種々の反応で得られた化合物

なお、副生成物として得られる黒色残渣について、¹³C-SS-MAS NMR、ラマン分光法、粉末X線回折(XRD)などを用いて解析した結果、rGOが生成していることが示唆されました。さらに、反応機構についてはDFT計算(*7)により電子移動と炭素フッ素(C-F)結合開裂を伴う反応経路が推察されており、メカノケミストリーによるフッ素樹脂分解の化学的理義が深まりました。

【社会的な意義】

本研究で確立された技術は、フッ素化学と環境科学の双方において極めて大きな社会的意義を持ちます。まず、本手法は、これまで実質的にリサイクルが不可能とされてきたフッ素樹脂PTFEを、高温処理や多大なエネルギーを必要とする従来法とは異なり、室温・1時間という極めて簡便な条件で完全分解し、その構成元素であるフッ素を高価値なフッ素化学試薬へと再生する“真のリサイクル”を初めて実現しました。これにより、使用後に廃止しなければならないPTFEなどのフッ素樹脂を有用資源へと変換する全く新しいアップサイクル型処理が可能となります。

さらに、本技術は固体樹脂だけでなく、環境への蓄積性・残留性が懸念されているPFOS・PFOAやその他の多様なPFASを、金属フッ化物の一つであるKFと炭素材料rGOへと完全転換することを可能にしました。分解困難なPFASの有機フッ素骨格を根本から断ち切り、フッ素を回収して再利用へとつなげる点は、環境からの削減と資源循環を同時に満たす画期的な成果です。同時に本手法は室温・無溶媒で進行し、有害副生成物を出さない環境調和性も備えています。

本成果は、世界的に懸念される萤石資源の枯渇や供給不安を背景とするフッ素化学産業の持続性に対し、廃棄物からフッ素を回収して再利用する「フッ素資源循環(Fluoro-Circular Economy)」の実現に向けた明確な道筋を提示しました。医薬品・農薬・電子材料・半導体などフッ素化学を基盤とする多数の産業への安定供給につながる可能性を持ち、今後の工業スケール展開を見据えた企業連携も現実味を帯びつつあります。

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(OMC総合研究所)およびダイキン工業株式会社の支援を受けて実施しました。

【論文情報】

論文名: Upcycling of PTFE and PVDF to fluorocompounds through mechanochemical process

著者名: Masashi Hattori, Tatsuki Kiyono, Zhengyu Zhao, Masahiro Higashi, Moe Fujishiro, Yosuke

Kishi kawa, Jorge Escorial, Norio Shiba*

*責任著者

掲載誌： *Nature Communications*

公表日： 2025年12月11日

DOI： 10.1038/s41467-025-67299-y

URL： <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67299-y>

【用語解説】

（*1）フッ素系高分子（フルオロプラスチック）

分子構造中にフッ素を含む高分子樹脂で、非粘着性・低摩擦性・耐薬品性・耐熱性・電気絶縁性・耐候性など、優れた特性を併せ持つ。化学構造の違いにより独自の高機能が付与される。具体的にはPTFE、PVDF、PCTFE、ETFE、PFA、FEPなどが知られている（構造の詳細は図1）。

（*2）機械化学反応（メカノケミカル）

ボールミルなどの強い機械的攪拌を利用して、有機合成反応を実施する新しい技術。この技術を使うことにより、有機溶媒の使用を最小限にし、従来の有機合成では扱いにくい溶解性の悪い化合物（未利用材料）を反応させることができるなど、有機合成を大幅に進化させるポテンシャルを持っている。

（*3）還元型酸化グラフェン（rGO）

グラフェン酸化物を還元して得られる材料であり、 sp^2 炭素骨格を主体としつつ、少量の酸素官能基と欠陥を含む層状構造を有する。

（*4）PFAS

有機フッ素化合物のうち、ペルフルオロアルキル化合物及びポリフルオロアルキル化合物の総称。化合物中の炭素原子が形成できる結合すべてがフッ素と結合している部分構造を持つ化合物がその対象となる。撥水・撥油剤、界面活性剤など様々な用途で利用されている。しかし、一部のPFASは高い安定性のために環境中でほとんど分解されないことから、環境への蓄積や残留性が問題となっている。

（*5）アップサイクル（有価化）

副産物や廃棄物などを使用して、新たな機能性、品質を備えた材料へと高付加価値化するプロセスである。

（*6）PFOS、PFOA、PFHxS

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）の略称で、特定PFASとして規制対象となっている。

（*7）DFT計算

密度汎関数理論に基づく計算手法。電子密度を用いて、原子や分子のエネルギー、電子状態の解析、

物性などを予測するのに利用される。

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

JST 事業に関すること

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔

TEL: 03-3512-3531 E-mail: crest@j st. go. 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

科学技術振興機構 広報課

TEL: 03-5214-8404 E-mail: j stkoho@j st. go. jp