



ものづくり ひとづくり 未来づくり

国立大学法人

名古屋工業大学

代替フロン^①の完全ケミカルリサイクル技術 —蛍石に依存しない次世代フッ素化合物製造法—

【発表のポイント】

- 代替フロン HFC-125 を 100%資源化
- HFC-125 を無機フッ素化試薬 KF-125 と有機フッ素化試薬 TFEDMA への完全転換に成功
- 蛍石に依存しないフッ素循環型社会の実現に大きく前進

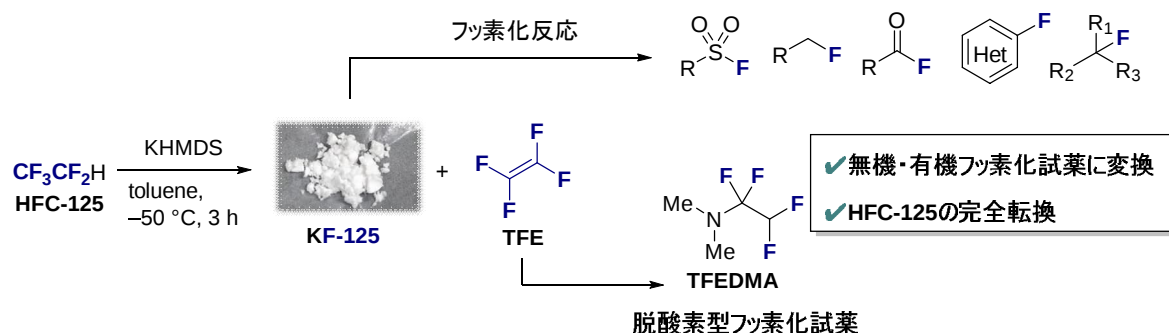
【概要】

有機フッ素化合物は、冷媒、医薬品、農薬、液晶材料、テフロン製品など幅広い分野で利用され、私たちの暮らしを豊かに支えています。しかし、その製造には蛍石（※1）を原料とするフッ化水素（HF）が不可欠であり、採掘に伴うエネルギー消費や二酸化炭素の排出、そして将来的な蛍石資源枯渇が国際的な課題となっています。このため、既存フッ素資源を循環利用する「ケミカルリサイクル技術」（※2）の開発が強く望まれています。

名古屋工業大学の岩崎皓斗氏（共同ナノメディシン科学専攻2年）、趙正宇助教（生命・応用化学類）、南谷俊介氏（生命・応用化学科4年）、柴田哲男教授（生命・応用化学類）らの研究グループは、代替フロン（※3）であるペンタフルオロエタン（HFC-125、 $\text{CF}_3\text{CF}_2\text{H}$ ）からフッ化カリウム（KF）および有機フッ素化試薬テトラフルオロエチル-N、N-ジメチルアミン（TFEDMA）へと完全転換する技術を開発しました。

HFC-125 はオゾン層を破壊しない冷媒として普及していますが、モントリオール議定書のキガリ改正（※4）によって段階的な削減が行われている冷媒の一つです。本研究により、HFC-125 を「冷媒」から「フッ素化試薬」へと分解変換する完全ケミカルリサイクルが実現し、蛍石に依存しないフッ素化合物の持続可能な製造に道を開きました。これは国連の持続可能な開発目標（SDGs）（※5）の「つくる責任 つかう責任（SDG12）」にも合致し、循環型社会（※6）の構築に大きく貢献する成果です。

本成果は、国際学術誌 *Organic Letters* オンライン速報版に 2025 年 9 月 29 日付で掲載されました。



【研究の背景】

HFC-125 はハイドロフルオロカーボン (HFCs) の一種で、かつてオゾン層破壊問題を引き起こした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) の代替物として導入され、冷媒や消火剤として広く利用されています。しかし、その地球温暖化効果は二酸化炭素の 3,000 倍以上に相当し、2016 年のモントリオール議定書キガリ改正により、生産・消費の段階的削減が国際的に義務付けられました。そのため保管されている HFC-125 や、エアコンや冷蔵庫から回収される HFC-125 の再資源化は 2050 年カーボンニュートラルの達成に向けた喫緊の課題です。

こうした状況を背景に、柴田研究室では数年前から HFC-125 のケミカルリサイクルに着目し、「冷媒」ではなく「フッ素資源」として再利用する研究を推進してきました。これまでに、HFC-125 を強塩基とグリム溶媒処理でペンタフルオロエチルアニオン (CF_3CF_2^-) を安定化させ、医薬品や農薬中間体合成に利用可能なペンタフルオロエチル基導入反応を開発しました。さらに 2025 年 5 月には、HFC-125 を選択的に分解してテトラフルオロエチレン (TFE) を合成する新手法を報告し (*7)、生成した TFE からフルオロプラスチックの製造に応用可能であることを示しました (図 1)。

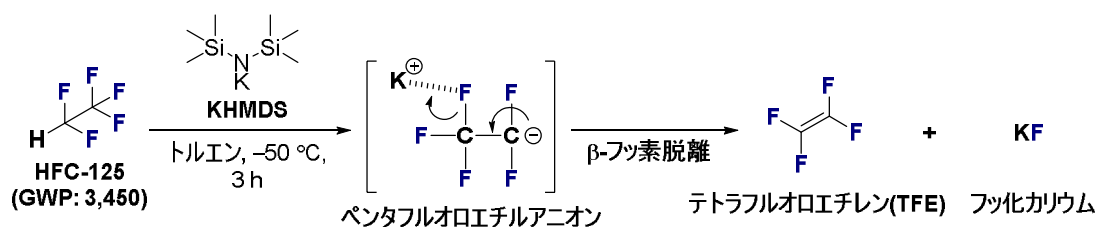


図 1 HFC-125 の TFE と KF への分解

一方、この分解過程で同時に生成するフッ化カリウム (KF) (未精製体) については、利用価値が検討されていませんでした。本研究では、この粗製 KF と TFE のいずれもフッ素化試薬として資源化する完全ケミカルリサイクルを考案しました。これは、蛍石採掘への依存を低減しつつ、国連の持続可能な開発目標 (SDGs) の「つくる責任 つかう責任 (SDG12)」にも直結する成果であり、循環型社会の構築と地球温暖化対策を同時に推進する画期的技術といえます。

【研究の内容】

研究グループは、HFC-125 を嵩高い構造を持つカリウム塩基 KHMDS (カリウムヘキサメチルジシラザイド) と低温下 (-50 °C) で処理することで、副生成物を伴わずに高収率でテトラフルオロエチレン (TFE) とフッ化カリウム (KF) へ変換できることを、2025 年 5 月に報告しました。今回の研究では、この反応で得られる粗製の KF を「KF-125」と名付け、精製を行わずそのまま利用することで、各種フッ素化反応に適用できるかを検証しました (図 2)。

その結果、KF-125 は、市販されている KF と遜色なく、スルホニルクロリドやアシルクロリド、アルキルブロマイドとの反応において、対応するフッ素化体を良好な収率で与えることが明らかになりました。さらに、生物活性物質に多く含まれる含窒素複素環化合物に対してもフッ素化 (Hallex 反応) が進行し、多様なフッ素化ヘテロ環骨格の合成に成功しました。また、濃硫酸の存在下で 3 級アルコールと反応させることで、脱酸素フッ素化を実現することもできました。

一方、HFC-125 の分解過程で同時に生成する TFE をそのままジメチルアミンで捕捉することで、既存の DAST や FLUOLEAD® に匹敵する脱酸素型有機フッ素化試薬 TFEDMA (テトラフルオロエチル-N, N-ジメチルアミン) へと変換することに成功しました。

つまり、本研究により冷媒として広く使用されている HFC-125 は、無機フッ素化試薬 KF-125 と有機フッ素化試薬 TFEDMA の 2 種類の高付加価値フッ素化試薬へと 100% 転換可能であることが示され、「完全ケミカルリサイクル」が実現しました。

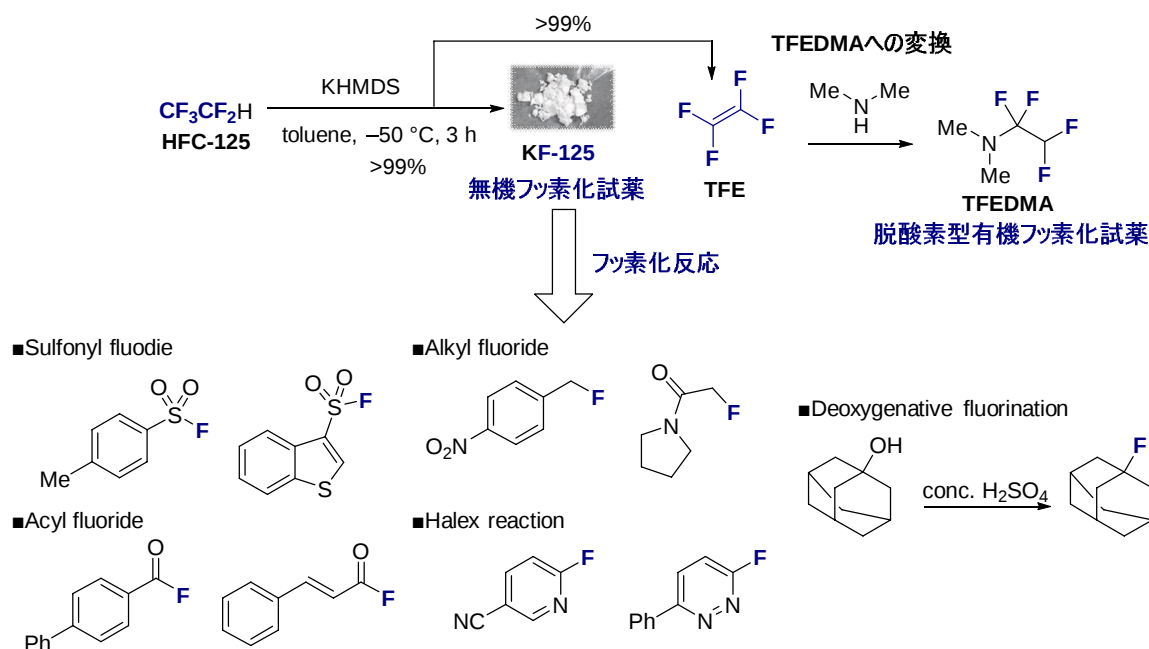


図2 HFC-125 塩基分解により生成する KF-125 と TFE のフッ素化合物製造への活用

【社会的な意義】

本研究は、冷媒 HFC-125 を 2 種類のフッ素化試薬として再利用する完全ケミカルリサイクル技術確立した点で大きな意義を持ちます。HFC-125 の地球温暖化係数 (*8) は 3,450 です。これにより、環境負荷を低減しつつ、新たなフッ素資源の循環利用が可能となります。さらに、冷媒として保管されている HFC-125 をフッ素化剤の資源とすることは、蛍石採掘への依存を大幅に低減し、将来的な資源枯渇リスクに対応する点でも極めて重要です。資源循環を基盤とする本技術は、国連の持続可能な開発目標 (SDGs) の「つくる責任 つかう責任 (SDG12)」と合致し、循環型社会の構築と地球温暖化対策を同時に推進する画期的な取り組みと言えると考えられます。

得られた KF-125 や TFEDMA は、医薬品や農薬合成に不可欠なフッ素化試薬として利用できるだけでなく、次世代の高機能材料や電子デバイス開発にも応用可能です。つまり本研究は、環境保全と資源循環にとどまらず、医療・農業・情報通信といった幅広い産業分野への波及効果を持つことが期待されます。

【今後の展望】

今後は、本技術をさらに発展させるため、産業規模への展開を目指すとともに、HFC-125 のみならず、他の HFC 類への適用も検討し、幅広いフッ素資源の循環利用が期待されます。

本研究は、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) 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 : From Refrigerant to Reagent: Repurposing HFC-125 into Inorganic and Organic Fluorinating Agents

著者名 : Hiroto Iwasaki、Zhengyu Zhao、Syunsuke Nanya、Naoyuki Hoshiya、Yosuke Kishikawa、and Norio Shibata*

*責任著者

掲載誌 : *Organic Letters*

公表日 : 2025 年 9 月 29 日

DOI : 10.1021/acs.orglett.5c03605

URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.orglett.5c03605>

【用語解説】

(※1) 蛍石

天然からフッ素を得る際の主原料となる鉱物。主成分はフッ化カルシウム (CaF_2)。硫酸と反応させるとフッ化水素が生じ、このフッ化水素がフッ素化合物の製造に使われる。

(※2) ケミカルリサイクル

廃棄物を化学的に分解し、元の原料もしくは他の化学成分に変換し、新たに原料として再利用する技術。元の製品が原料となるため、限りある資源の使用量を削減でき、資源の循環利用が可能となる。

(※3) 代替フロン (HFC)

フルオロカーボンの一種。フルオロカーボンは、クロロフルオロカーボン (CFC)、ハイドロクロロフルオロカーボン (HCFC)、ハイドロフルオロカーボン (HFC、代替フロン) に分類される。化学的に極めて安定で、人体に無害なことから、エアコンや冷蔵庫などの冷媒や消火剤、断熱材の発泡剤など広く利用されていた。CFC、HCFC は塩素を含むが、HFC は塩素を含まないためオゾン層を破壊しない。その一方で、温暖化効果が高いため国際的に段階的な削減が義務付けられている。

(※4) モントリオール議定書のキガリ改正

従来のオゾン層破壊物質に加えて、HFC (ハイドロフルオロカーボン) を段階的に削減することを定めた国際合意である。これにより、HFC-125 などの高 GWP 冷媒も規制対象となり、気候変動対策として削減が進められている。

(※5) 持続可能な開発目標 (SDGs)

2030 年までに世界が達成すべき目標として 17 の達成目標と 169 の達成基準からなる国際目標。17 の達成目標は、貧困や教育、気候変動、環境問題など地球規模で解決すべき課題が目標となっている。先進国・途上国を問わず、あらゆる人が目標から取り残されることなく、豊かに暮らせる社会に実現を目指し、国や政府だけでなく、企業や個人などすべての人が目標達成に向けて行動することが重要とされている。

「つくる責任、つかう責任」とは、地球の限りある資源を持続的に利用し、環境汚染を防ぐために、製品をつくる側とつかう側がそれぞれ協力して、生産と消費のサイクルを構築する目標である。生

産者側は省資源で高品質、製品のライフサイクルを意識した設計が求められ、消費者はリサイクルや廃棄物削減を意識した消費行動を行うことが求められる。

(※6) 循環型社会

廃棄物はできるだけリサイクルなどで適正に再利用し、これ以上利用できない場合には適正に処理することで、廃棄物の発生と限りある資源の消費を可能な限り抑制される。環境への負荷ができる限り低減された社会。大量生産・大量消費・大量廃棄型の経済から脱却し、ごみの発生抑制（リデュース）、再使用（リユース）、再資源化（リサイクル）の「3R」を基本原則としている。

(※7) 「ペンタフルオロエタンからテトラフルオロエチレンの室温合成に成功 ―フルオロプラスチック製造の革命的進展に期待―」（2025 年 5 月 14 日）

<https://www.nitech.ac.jp/news/press/2025/12877.html>

(※8) 地球温暖化係数

地球温暖化係数(GWP:Global Warming Potential) とは、二酸化炭素の持つ温室効果を基準 (GWP = 1) にして、ほかの温室効果ガスがどれだけ温暖化する能力があるかを示す指標。通常は 100 年間の温暖化効果を評価した数値が一般的に用いられる。

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: nozshiba@nitech.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.nitech.ac.jp