

＜特 集＞PFASの現状と課題

廃棄物・資源循環分野におけるPFAS対策の現状と課題

—PFAS含有廃棄物の熱処理及びそれに係る分析を中心に—

倉持秀敏・島田雄嗣・松神秀徳
(国立環境研究所資源循環領域)

1. はじめに

有機フッ素化合物（以下PFAS, Per- and polyfluoroalkyl substancesの略）は、その定義¹⁾上1万種以上となるが、後述するように現在環境汚染として関心の高い物質群はPerfluoroalkyl sulfonic acids (PFSA) もしくはPerfluoroalkyl carboxylic acids (PFCA) である。PFSAもしくはPFCAは、分子内に親油性と親水性の両方の官能基を有することから（図1の化学式例を参照），撥水・撥油性に優れ、また非常に高い結合エネルギーのC—F結合を有することにより熱化学的安定性にも優れ、1940年代以降今日に至るまで様々な製品に使用してきた²⁾。しかし、これらの特性は環境的側面でみると、水系へ移動しやすく、また残留性が高いことが予想される。これらの特性に加えて生物蓄積性や有害性を有する物質は我々人間を含む生態系に長期的かつ重大な悪影響を与える可能性があるため、そのような物質はストックホルム条約においてその利用の禁止や制限がなされる残留性有機汚染物質（POPs, Persistent organic pollutantsの略）として規制対象物質に登録してきた。2009年以降、4種のPFASとその塩及び関連物質（前駆物質と呼ばれ、環境中で上記4種のPFASへ変換される物質）が登録された。特にPFOS（Perfluorooctane sulfonic acid）やPFOA

(Perfluorooctanoic acid) はよく知られ、この二つの単語が連日ニュースにて聞く状況にある。これらの物質は幅広い用途に使用されてきたが、当然のことながら製品の寿命を終えて廃棄物となって廃棄物処理・処分もしくはリサイクル過程に同伴される。近年、廃棄物やその処分から生じるPFOS及びPFOA等の汚染も大きな話題である。本寄稿では、廃棄物・資源循環分野に焦点を当て、PFAS対策の現状や今後の課題を述べる。なお、筆者らの専門は、熱処理や環境分析であることから、これらに関する内容になることをご容赦願いたい。

2. PFASの分類と管理に向けた対象物質

廃棄物・資源循環分野におけるPFAS対策を紹介する前に、PFASの定義と分類及び管理に向けた対象物質を概説する。まず定義であるが、OECDの文書¹⁾によると、PFASは、完全にフッ素化されたメチル又はメチレン基(-CF₃又は-CF₂、ただしフッ素が結合している炭素原子にH, Cl, Br, Iの原子が結合していないもの)を少なくとも1つ含むフッ素化物質とされる。

次に、PFASの分類を図1にその例を示す。まず非ポリマーとポリマーに分類される。非ポリマーでは、炭素数と官能基を含む構造の違いで分類される。前者の分類では、炭素数の1-3, 4-7, 8以上は、それぞれ超短鎖、短

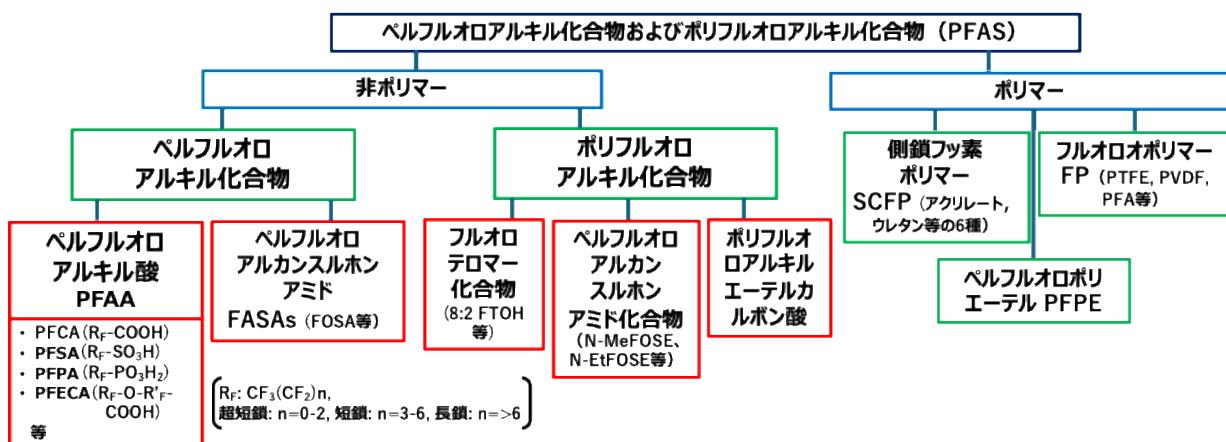


図1 ペルフルオロアルキル化合物およびポリフルオロアルキル化合物 (PFAS) の分類

鎖、長鎖PFASと分類される²⁾。後者ではまずペルフルオロアルキル物質（炭素がすべてフッ素化された物質、例えばPFOA）とポリフルオロアルキル物質（炭素のすべてがフッ素化されたわけではない物質、例えば、PFOAのカルボキシル基とフッ素化された炭素鎖の間にCH₂CH₂がある、8:2 fluorotelomer alcohol (FTOH) ）に分類される。さらに、それぞれの分類において官能基ごとに分類され、先述したPFCAやPFSA等のように分類される。

なお、本分類はすべてを網羅しているわけではなく、規制値を有するPFAS、それと類縁構造を持つPFAS、またそれらの前駆物質を含めた管理対象となる、もしくはなりうるPFASを意識している点に注意されたい。管理対象となりうるPFASは、まず国内において令和8年度に水質基準に格上げされるPFOSやPFOA（合算で50 ng/L以下）³⁾、他国において規制対象となりつつ、かつ国内にて要調査項目にされている7種のPFAS⁴⁾、さらには海外動向も踏まえてISO 21675⁵⁾やアメリカ環境保護庁（US-EPA）Method 1633a⁶⁾にて水質、さらには土壤、汚泥等の濃度を評価するために分析されているPFASが対象物質として考えられ、略語ではあるが表1に44物質を示す。

表1 管理対象となりうるPFAS一覧（略語標記、目的によっては不十分であることに留意）

優先順位	PFAS
水質基準項目 (令和8年度4月～)	PFOS, PFOA
要調査項目	PFHxS, PFBS, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFNA, HFPO-DA (Gen X)
その他 US-EPA Method 1633aの対象	PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnA, PFDoA, PFTDA, PFTEDA, PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, FOS, PFNS, PFDS, PFDoS, 4:2FTS, 6:2FTS, 8:2FTS, PFOSA, NMeFOSA, NETFOSA, NMeFOSAA, NETFOSAA, NMeFOSE, NETFOSE, HFPO-DA, ADONA, PFMPA, PFMBA, NFDHA, 9C1-PF3ONS, 11C1-PF30UDS, PFEESA, 3:3 FTCA, 5:3 FTCA, 7:3 FTCA
	上記に入らず、ISO 21675で対象 PFHxDA, PFOcDA, 8:2 diPAP, 8:2 FTUCA

正式な物質名は引用文献5)と6)を参照

ただし、我々のフッ素系撥水剤中のPFAS濃度分析や廃棄物リサイクル施設におけるPFAS濃度実態に関する研究成果^{7,8)}を踏まえると、表1のリストでは前駆物質への対応については不十分であり、例えば6:2や8:2 FTOH類、N-MeFBSE (N-methylperfluorobutane sulfonamide ethanol)等を含めて、目的ごとに拡張が必要と考えられる。表2に、欧州化学品庁（ECHA）の文書⁹⁾からのPFOAとその関連物質（前駆物質）の用途と使用量の抜粋を示す。前駆物質の使用量が桁違いに多く、繊維や紙に利用され

ていることから、前駆物質の主要発生源の一つは撥水・撥油剤と推定される。またWeitzらの総説¹⁰⁾でも同様な製品等に先述の前駆物質の濃度が高いことが示唆されている。このような使用量や用途及び濃度を基に、対象物質を分野によって見直すことも必要である。さらに、製品によって社会にストックされる時間が異なることから、時間遅れで廃棄物が排出されるという点も留意する必要がある。例えば、紙ごみや廃繊維中のPFAS濃度を分析すると、紙ごみではPFOA前駆物質である8:2 FTOHは低く、その代替である6:2 FTOHの濃度が高く、現状の使用実態を反映していると言える。一方廃繊維では8:2 FTOHの濃度が高く、繊維類は我々の生活において長くストックされると言える¹¹⁾。なお、8:2 FTOHのPFOAへの変換については、微生物による変換や大気における変換等は先述のECHAの文書⁹⁾にも記載があり、参考にされたい。

一方で、ポリマーにおいては、側鎖フッ素化ポリマー（Side-chain fluorinated polymer (SCFP) ）と、Polytetrafluoroethylene (PTFE) に代表されるフルオロポリマーに分類される。OECDの文書¹²⁾によると、SCFPはさらにアクリレート型やウレタン型などの6種類ほどに分類されている。SCFPは、例えばPFOAの前駆物質である8:2 FTOHを側鎖として含有しており、光や熱等によって側鎖の結合が分解され¹³⁾、8:2 FTOHが放出される。したがって、SCFPの劣化に伴う前駆物質の環境排出にも留意すべきである。今は非ポリマー型のPFASに関心が高くモニタリングされているが、OECDの文書¹²⁾やEvichらの論文¹⁴⁾ではポリマー型PFASの生産量が多いことから、

表2 PFOA及びその関連物質の用途及び使用量¹²⁾

分類	分野、業種	EUにおける使用量 (t)
PFOA関連物質	繊維及び皮革	1,000
	紙	>150~200
	消火剤	>50~100
	塗料及びインク	>50~100
	その他の用途	>0.1~0.5
PFOAとその塩	フッ素ポリマーの製造	<20
	写真産業	1.0
	半導体産業	<0.05
	その他 の用途	0.5~1.5

今後はこれらのポリマー型PFASを管理する必要があるのか、また必要があればその管理方策とは何かを検討すべきであろう。筆者らも共同研究者と共に、一部の物質については、それらの物質フローを整備しており、廃棄物処理やリサイクルにおけるPFASの排出量がその環境濃度にどの程度のインパクトを与えるのかを研究しているところである。

3. 熱処理に関する現状と課題

2009年にPFOSがPFASとして初めてPOPsに登録され、国内では化審法にて第一種特定化学物質に指定された後に、PFOS含有廃棄物の適正な処理を確保するために必要な技術的留意事項が2011年に環境省から発出された。その後2019年にはPFOAがPOPsに登録されたことを受けて当該技術的留意事項も改訂され、現在の「PFOS及びPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」¹⁵⁾（以下、技術的留意事項）として発出されている。本留意事項には、廃棄物の保管、収集、運搬、分解処理が解説され、また参考資料として、分解効率の算出方法、管理目標値設定の考え方、分解実証試験の結果概要、廃棄物の採取・方法等も整備されている。

分解処理方法としては、環境に長期的かつ重大な影響を与えるPOPsであるが故に十分に分解、すなわち破壊もしくは不可逆的な変換が求められる。したがって、実機にて分解確認試験を行なって、PFOS等及びPFOA等の分解効率(=[1-PFOS等もしくはPFOA等の総排出量/PFOS等もしくはPFOA等の総投入量]×100)が99.999%(ファイブ(5)ナイン)以上であること、管理目標値(例として、記載されている処理シナリオにおける値: 排ガス中濃度は60ng/m³N、廃水中濃度は1.0 μg/L、残さ中濃度は5.0 μg/kg)を満たすことを確認する必要がある。また、この分解効率はBase1条約の共通テクニカルガイドラインにおいても同様で、POPs含有廃棄物の環境上適正な管理としてこの分解効率が処理の性能指標となっている¹⁶⁾。現時点では、焼却処理は実績があり、かつマッシュに処理できる

技術として有用であり、この分解効率を達成するためには、運転条件は、PFOS含有廃棄物の場合には850℃以上、PFOA含有廃棄物の場合には1,000℃以上（約1,100℃以上を推奨）とされる。なお、滞留時間は2秒以上とする。ただし、分解効率と管理目標値を満たす技術であれば、上記の以外の条件も排除するものではないことに注意されたい。また、技術的留意事項¹⁵⁾には、実証試験結果の概要、すなわち焼却炉方式、処理能力・条件、試験試料中のPFOSもしくはPFOAの濃度、それらの排出量、各媒体への分配率、分解効率及び分解除去効率が記載されていることから、これから分解性能を確認される企業・自治体の方は参考にされたい。

先述したように、POPsとして登録されているPFASは4種類あることから、PFOS及びPFOAに加えて、残りのPerfluorohexane sulfonic acid (PFHxS)と長鎖PFCA (LC-PFCA, 炭素数が9~21) の処理についても同様の分解効率が求められるであろう。LC-PFCAについては、筆者らのグループにおいて、炭素数が9のPerfluorononanoic acid (PFNA) を対象に、図2に示すような回転式表面溶融炉を用いて分解試験を実施しており、予備試験を含めて2回の分解試験を行った。溶融処理は、焼却処理よりも500°C程度高い熱処理で、焼却処理では燃え殻となるごみ中の灰分は溶融状態になり、急冷されてスラグ化（固化）される。スラグは、土木資材や、リンを豊富に含む下水汚泥由来であれば肥料代替として利用されうる。一方、金属分も同時に分離回収されることから、溶融処理は高温のリサイクル処理と位置付けられる。米国では、下水汚泥

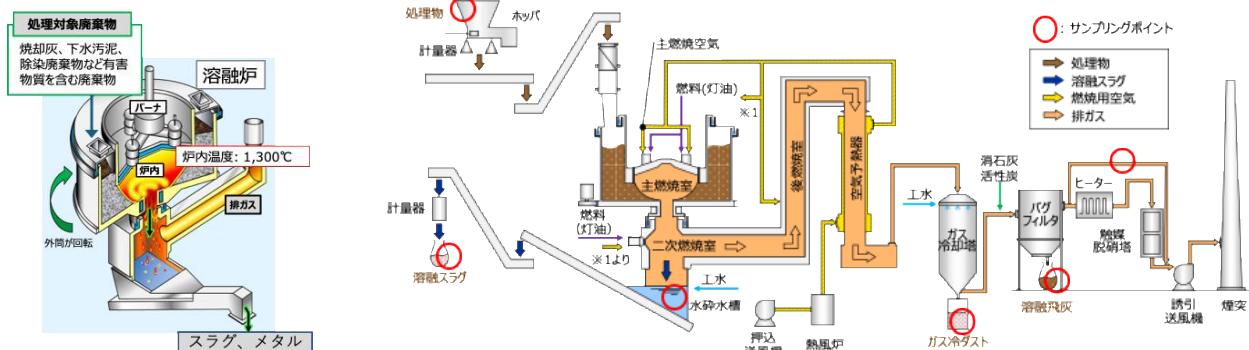


図2 回転式表面溶融炉の概略（左）及びその施設概要（右）¹⁸⁾

表3 PFNA及びPFHxSに対する溶融処理による分解試験結果^{18, 19)}

PFAS	試験条件			試験結果	
	炉方式	処理能力 燃焼温度	試料濃度 (試料)	排出濃度	分解効率 分解除去効率
PFNA	回転式表面 溶融炉	150kg-dry/h 1,380°C	64,000ng/g (廃焼却灰+PFNA試薬)	排ガス : <0.4ng/Nm ³ 溶融スラグ : <0.03ng/g 溶融飛灰 : 0.27ng/g	99.99993% 99.999992%
PFHxS	酸素バーナー- 式溶融炉	40L/h×5h +約2.2t/h (もえがら) 1,350°C	1300μg/kg-wet (消火剤) 0.03ng/kg-dry (もえがら)	排ガス : <0.4ng/Nm ³ -dry 溶融スラグ : <10ng/g-dry 溶融飛灰 : 0.70ng/kg-wet 冷却水 : <10ng/kg-dry	99.99998% -

のPFAS汚染に関心が高く、一部の州では下水汚泥の土地や農地への利用が禁止または制限されている¹⁷⁾。このような汚泥利用禁止に対する解決策として溶融処理は期待されている。PFNAについては予備的分解試験の分析を終え、平戸らが学会で報告しており¹⁸⁾、その結果を表3に示す。PFNA試薬を添加して投入濃度を64,000 ng/gとして溶融処理を行った結果、排ガス中のPFNA濃度は検出下限未満(<0.4 ng/m³)、飛灰(ばいじん)中のPFNA濃度は0.27 ng/gとなり、結果として分解効率は99.999%以上となつた。PFHxSについては、瀬尾らがPFOS及びPFOAを含めて溶融炉(上記とは別形式)を用いた分解試験を行っている¹⁹⁾。表3にはPFHxSの分解試験結果を示す。PFHxSの分解率はPFOSやPFOAと同様に高い分解効率(99.999%以上)が達成され、溶融処理は、PFOSとPFOAに加えて、PFHxS及びPFNAを高度に分解できると判断される。PFNAの分解試験では、飛灰中のPFNA濃度が高くなつた。Liuらの廃棄物焼却施設における調査²⁰⁾においても、主灰(炉底から排出される燃え殻)よりも飛灰におけるPFCA濃度が高い傾向にあつた。しかし、その調査では、PFSAについては逆に主灰における濃度が高くなることが報告されている。溶融においてもこのような差が生じるかどうかも今後調査する予定である。また、この差が生じる原因を明らかにするために、筆者らは、PFASのアルキル鎖長や官能基だけでなく、塩の形態も含めた構造変化がPFASの熱処理挙動に与える影響を体系的に理解するための研究に着手したところである²¹⁾。

分解確認試験では、高度な分解効率を算出するためにPFAS濃度が高い廃棄物が必要となる。この種の廃棄物の入手が困難であることから、分解確認試験の実施が滞っている状況もある。なお、技術的留意事項¹⁵⁾にもこの懸念に関する記載があり、必ずしも分解効率について5ナイン以上に拘らないという解説もある。しかしながら、5ナイン以上という定量的値は、処理業者や処理を委託する業者にとって一定の価値があり、その定量値を出すことのニーズは高い。そこで、排ガスの濃度から適正な処理を評価するような仕組みも必要ではないかと考えられる。例えば、Hofmanらは、ベルギーの焼却施設における排ガス中のPFOAとPFOSの濃度はそれぞれを2.2～482.2 ng/Nm³(11%O₂換算)と1.3～32.4 ng/Nm³(11%O₂換算)と報告し、これらの値はオランダの排出基準値(PFOA:1 mg/m³, PFOS:0.05 mg/m³)よりも低く、さらに拡散モデルの計算では、フランドル地域の慢性曝露の閾値(PFOA, PFOS, PFHxS, PFNAの合計で0.3 ng/m³)を超過しないと論じている²²⁾。なお、直接曝露につながる大気中の濃度と排ガス中の濃度では、リスクの考え方方が異なる点は注意されたい。排ガスは煙突出口で大気により5万倍程度に希釈されることもあるからである²²⁾。前述のオランダの排出

基準値と曝露の閾値には何桁もギャップが生じている点は、このような理由と予想される。ちなみに、日本の技術的留意事項¹⁵⁾にある分解試験結果の排ガス中のPFAS濃度(PFOA:0.70～1.7 ng/m³, PFOS:<0.5～<0.83 ng/m³)やスウェーデンの焼却施設のPFAS濃度(PFOA:0.3 ng/m³, PFOS:0.02 ng/m³)²³⁾は先述のベルギーの施設における濃度よりもかなり低い値であった。また、日本の大気中の濃度(PFOA:4.27～13.9 pg/m³, PFOS:29.3～37.8 pg/m³)²⁴⁾と比較すると、上記の排ガス中濃度は高い値ではあるが、先述の希釈率を踏まえると排ガス中濃度が大気中濃度へ与えるインパクトは極めて小さいと推察される。また一方、基準値は国や地域で異なり、米国では国内基準ではないが、8州でPFASについて大気中濃度に関するガイダンス値や規制値がある²⁵⁾。また、ミシガン州では、リスクアセスメントスクリーニングレベルとしてPFOA, PFOSに対して大気へ排出量が設定されており、それらの合算が70 ng/m³未満とされる²⁶⁾。本稿で引用した国内の分解確認試験^{15, 18, 19)}やスウェーデンの調査²³⁾では、いずれも米国3州の規制値(表4参照)よりも低い濃度であった。このような基準値との比較で安全性を示す例は他のリサイクル施設でも応用されている。例えば、米国の廃活性炭再生施設の調査では、最高温度954°Cの還元雰囲気による再生条件において、表5のような良好なPFAS分解除去性能が得られ、分解率は99.99%まで達成していないものの、同等な高いPFOA分解除去率と排ガス中のPFOAやPFOS等濃度が表4の米国の規制基準値やガイダンス値を下回ることを示し、当該施設がPFASを適正に分解処理できることを報告している²⁷⁾。実際に、米国においては同施設を所有する会社では、PFAS含有の廃活性炭を商業的に再生している。筆者らの国内の廃活性炭再生業者へのヒアリングによると、国内の再生施設においても米国と同等レベルの処理が可能と予想される。現在、実施設とともに同様な調査を計画したところで、実施設でのPFASの分解率等を明らかにして、廃活性炭再生の安全性を示すことができればと考えている。

表4 大気に係るPFAS濃度の規制値及びガイダンス値

州	濃度基準 (ng/m ³)	備考
ミシガン ^{26, 27)}	PFOA + PFOS < 70 (合算値), 6:2 FTS < 1,000	スクリーニングレベル
ウィスコンシン ²⁵⁾	APFO (PFOAアンモニウム塩) < 240	
ニューハンプシャー ^{25, 27)}	APFO < 50 (24時間日平均) もしくは < 24 (1年平均)	大気限度濃度
ミネソタ ^{25, 27)}	PFOA < 63, PFOS < 11, PFBA < 10,000, PFHxA < 1,000, PFHxS < 34	大気指導値

表5 米国の廃活性炭再生施設におけるPFAS分解除去性能の一例²²⁾

	PFOS	PFOA	PFHxS	PFNA
廃活性炭中の濃度 (ng/g)	6,700–16,000	5,800–11,000	5,900–33,000	53–88
再生炭中の濃度 (ng/g)	<0.58	<0.58	<0.58	<0.58
排ガス中濃度 (ng/m ³)	4.4	27.5	不検出	記載無し
再生炉の分解率 %	99.996%*	99.996%*	99.989%†	99.989%†

*: PFOS+PFOA+GenX+PFBSの合計, †:36種類PFASの合計

4. 分析に係る現状と課題

PFAS含有廃棄物の処理において、PFAS濃度実態の把握、PFASの分解率の算出等の安全性評価を行うには、信頼性の高い分析基盤が不可欠である。技術的留意事項¹³⁾には、排ガス採取法、固体試料からの抽出法、化学分析法の解説があるが、国内外において、留意事項とは違う方法が発出され、準公定法や公定法となっている。それらの状況と今後の課題を述べる。

まず、排ガス採取法であるが、図3に技術的留意事項¹⁵⁾とUS-EPAのOther Test Method (OTM) -45²⁸⁾の排ガス採取法の概略を示す。

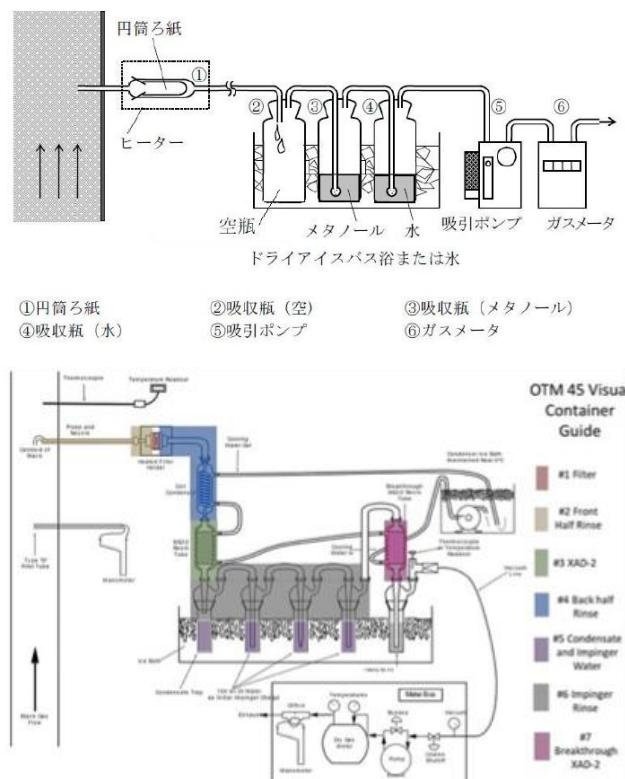


図3 技術的留意事項¹⁵⁾の排ガス採取法（上）とOTM-45²⁸⁾の排ガス採取法（下）の概略図

まず前提として、前者ではPFOS及びPFOAが対象となり、後者では表1のMethod 1633aのPFASを含む49種類を対象としている。それゆえ、OTM-45では明らかにサンプリングトレインが複雑化し、XAD-2のような吸着剤も配置されている。今後、他のPFASの分析も行うのであれば、技術的留意事項¹⁵⁾の排ガス採取法に吸着剤などの追加も必要であろう。Björklundらも、焼却施設の排ガス採取においては、技術的留意事項¹⁵⁾と類似のインピングジャートレインの後に吸着剤を配置して、18種類のPFASを分析している²³⁾。もしOTM-45を採用するのであれば、注意すべき点がある。HofmanらはOTM-45について、テフロンによるブランク汚染や湿度による長鎖PFSAの回収率低下等の損失を指摘している²⁾。また実務上、OTM-45の作業量及び作業時間は、技術的留意事項¹⁵⁾よりもかなり多くかつ長いことから、作業量についても注意されたい。米国では、別の30種類の揮発性PFASや前駆物質であるFTOH類等のPFASに対して、それぞれOTM-50や55の開発も進められている。OTM-50については、すでに公表されている²⁹⁾。このように排ガス採取方法の開発が進んでいる背景として、燃焼によってPFASを完全に無機フッ素と二酸化炭素にできれば良いが、実際は困難であり、副生成物 (PICs: Products of incomplete combustion の略) が生成する。PICsが規制されるPFASの前駆物質へ変換される可能性や温暖化係数の極めて高いフルオロカーボンとなる懸念がある¹⁰⁾。PICsへの対策の判断も視野に入れていると予想される。なお、OTM-50になると、排ガスをキャニスターで捕集する点や30種類のPFASの分析方法も異なることから、新たな装置や分析標準試薬の準備を含めて従来法との差異に留意する必要がある。

次に、固体試料からの抽出法については、いくつかの方法を表6に整理する。基本的には共通部分がありつつも、抽出溶媒に添加する試薬や抽出・前処理に係る操作が異なる。平尾らや佐多平は、表6のような抽出法の違いが活性炭からのPFASの回収率に大きな影響を及ぼすことを報告しており、また一部の長鎖PFASやペルフルオロオクタシスルホン酸アミド等については回収率に問題があることも指摘している^{32, 33)}。したがって、対象となる固体や焦点を当てるPFASによっては改良の必要があることにも注意されたい。また、複数の抽出法があると、分析現場における抽出法の選定に混乱を生じさせる可能性がある。今後の課題として、このような混乱が生じないように抽出法に関しては統合的な作業も必要ではないかと考えられる。

ここまで、PFASの分解を評価するために必要な分析基盤を論じてきたが、分解処理の究極の目標は、先述したように完全な無機フッ素化、すなわち鉱物化である。

表6 固体からのPFASの抽出法に関する準公定法及び公定法の比較

分析方法	PFOS及びPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項 ¹⁵⁾ (R4,2022.9)	土壤中のPFOS、PFOA及びPFHxSに係る暫定測定法(含有量試験) ³⁰⁾ (R5,2023.7)	土壤に含まれるPFASの一齊分析暫定マニュアル ³¹⁾ (R6,2024.3)	US-EPA Method1633a ⁶⁾ (R6,2024.12)
抽出溶媒	メタノール 酸性条件: ギ酸添加	0.3% アンモニア含有メタノール	0.5% アンモニア含有メタノール	0.3% アンモニア含有メタノール
抽出・濃縮方法	振とう、超音波抽出 固相抽出 窒素ガス濃縮	超音波抽出 窒素ガス濃縮→固相抽出 窒素ガス濃縮	振とう、(超音波抽出) 窒素ガス濃縮→固相抽出 窒素ガス濃縮	振とう 窒素ガス濃縮→固相抽出
固相導入前の処理 ※	純水希釈、ギ酸添加酸性確認	純水希釈、4M塩酸添加 (pH7以下)	純水希釈、酢酸添加 (pH2~3)	純水希釈 (必要に応じてギ酸・アンモニア添加でpH6~7)

※固相吸着材例：弱イオン性一疎水性ミックスモード型固相カラム (WAX)

Smithらも指摘しているが³⁴⁾、分解対象PFASのC—Fの結合が一つでも分解できれば、それは分解であり、分解率を100%に近づけることは比較的容易であるが、一方で完全な鉱物化はC—F結合をすべて破壊し、無機塩にすることを意味する。これを確認するには、フッ素も分析してフッ素の物質収支を取る必要がある。しかしながら、PFASの分解では、先述したように様々な副生成物の生成¹⁰⁾、またその物理化学的特性も多様と予想されるため、複数のターゲットもしくはノンターゲット分析を組み合わせて物質収支を完結する必要がある。図4にSmithらが提案する収支解析に必要な分析法の整理³⁴⁾を示す。無機フッ素、有機フッ素、PFASの階層で、それぞれに適用できる分析法とその性能が整理されている。なお、有機フッ素(OF)は、抽出態OFと吸着態OFに分けられていることに注意されたい。個々の分析法の説明は割愛するが、分析法の分析性能と課題を踏まえつつ、複数の方法を組み合わせることで、無機フッ素化に向けた分解技術の開発や評価が進展することに期待したい。また、これらの技術は運転管理のためのモニタリングにも役立つ可能性もある。PFASのターゲット分析のコストは極めて高額であることから、今後これらの分析技術が有用なモニタリングの開発に結実されることも期待したい。

5. まとめ

廃棄物・資源循環分野におけるPFAS対策として、熱処理とそれに係る分析の現状を紹介し、今後の課題を論じた。PFOS及びPFOA含有廃棄物の焼却処理に関する知見はあるものの、規制が予定される、もしくは環境汚染が懸念されるPFASに対する分解効率等の知見は少ない。PFAS含有廃棄物の種類及びリサイクル方法も広がりつつあり、様々なケースで実機規模の分解確認試験を実施する必要がある。すべてを網羅的に実施することは困難が予想され、効率的かつ合理的な分析法や評価法、さらに予測法が必要となろう。また、副生成物への対応も世界的に関心が高く、鉱物化までの評価を含めると、分析において多くの作業が必要となる。これまでの研究グループの規模で

は対応できない可能性がある。各専門家が一丸となって取り組むことが求められる。本誌を発刊されている全国環境研議会には多様な専門家が所属されていると思われ、大規模な研究グループを組織するには本協議会が有用なハブとなりうる。このハブ機能が活かされ、PFASに関する大きな課題が速やかに解決されることを願いたい。

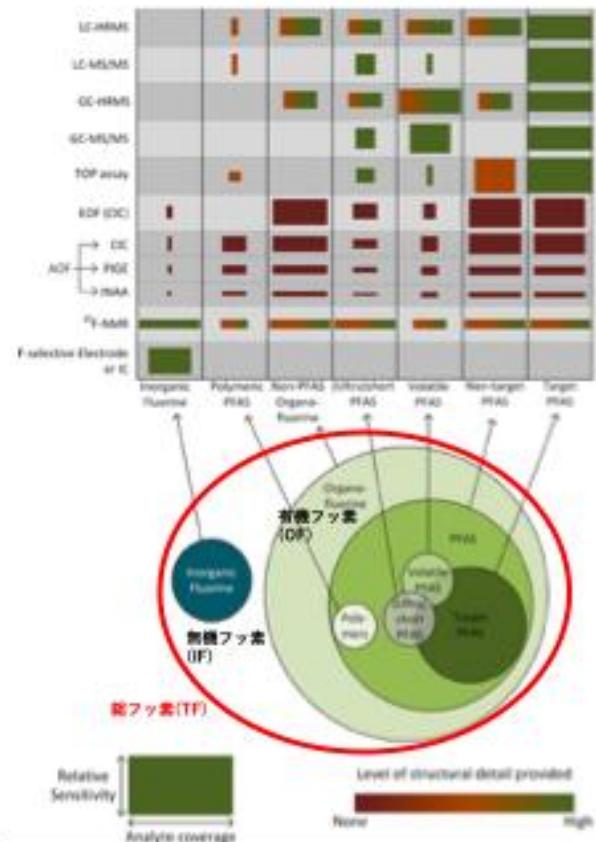


図4 PFASの破壊・無機化に係るフッ素収支解析に必要な分析法の体系（引用文献34に一部追記）

バーの縦幅と横幅はそれぞれ感度と分析対象物の範囲を示す。色は得られる構造情報を探る、緑色になるほど詳細がわかる。以下、略語の説明。EDF: 抽出態有機フッ素、ADF: 吸着態有機フッ素、CIC: 燃焼イオンクロマトグラフィー、PIGE: 粒子誘起ガンマ線放出法、INAA: 中性子放射化分析、Top assay: 全酸化前駆体分析

6. 謝辞

本研究は（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（3-2403、及び3MF-2501）及び廃棄物資源循環学会POPs関連研究助成金により実施した。

7. 引用文献

- 1) OECD: Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance, https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/07/reconciling-terminology-of-the-universe-of-per-and-polyfluoroalkyl-substances_a7fbcb8/e458e796-en.pdf (2025.11.15 アクセス)
- 2) Hofman J., Baeyens B., Aerts W., Jacobs G., de Carvalho A.R., Van den Bergh G., Voorspoels S., Otten G.: Quantification of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in air emissions: An interlaboratory comparison. *Chemosphere*, **380**, 144449, 2025
- 3) 環境省：「水質基準に関する省令の一部を改正する省令」及び「水道法施行規則の一部を改正する省令」の公布等について, https://www.env.go.jp/press/press_00075.html (2025.11.15 アクセス)
- 4) 環境省：要調査項目リストの改訂について, <https://www.env.go.jp/content/000342928.pdf> (2025.11.15 アクセス)
- 5) ISO: ISO 21675:2019, Water quality-Determination of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in water-Method using solid phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) 21675:2019, <https://www.iso.org/standard/71338.html> (2025.11.15 アクセス)
- 6) US-EPA: Method 1633a, <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-12/method-1633a-december-5-2024-508-compliant.pdf> (2025.11.15 アクセス)
- 7) Matsukami H., Saito J., Wang Q., Miyake Y.: Impact of tightening environmental regulations against long-chain perfluoroalkyl acids on composition of durable water repellents containing side-chain fluorinated polymers. *Science of The Total Environment*, **940**, 173708, 2024
- 8) Kuribara I., Motoki T., Matsukami H., Takahashi Y., Kuramochi H.: Atmospheric concentrations of per- and polyfluoroalkyl substances and their emissions at a waste recycling facility producing refuse-derived paper and plastics densified fuel. *Science of The Total Environment*, **954**, 176456, 2024
- 9) ECHA: Committee for Risk Assessment (RAC) : Committee for Socio-economic Analysis (SEAC) : Background document to the Opinion on the Annex XV dossier proposing restrictions on Perfluorooctanoic acid (PFOA), PFOA salts and PFOA-related substances EC Number, 206-397-9, 11 September 2015
- 10) Weitz K., Kantner D., Kessler A., Key H., Larson J., Bodnar W., Parvathikar S., Davis L., Robey N., Taylor P., De la Cruz, F., Tolaymat T., Weber N., Linak W., Krug J., Phelps L.: Review of per- and poly-fluoroalkyl treatment in combustion-based thermal waste systems in the United States. *Science of The Total Environment*, **932**, 172658, 2024
- 11) 松神秀徳, 斎藤隼輝, 小澤真人, 元木俊幸, 栗原勇, 三宅祐一, 倉持秀敏: 廃棄物固形燃料の製造工程で排出されるPFASの発生源廃棄物の推定. 第35回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2024
- 12) OECD: Synthesis Report on Understanding Side-Chain Fluorinated Polymers and Their Life Cycle. Series on Risk Management No. 73. 2022
- 13) van der Veen, I., Hanning A.-C., Stare A., Leonards P.E.G., de Boer J., Weiss J.M.: The effect of weathering on per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) from durable water repellent (DWR) clothing. *Chemosphere*, **249**, 126100, 2020
- 14) Evich M.G., Davis M.J.B., McCord J.P., Acrey B., Awkerman J.A., Knappe D.R.U., Lindstrom A.B., Speth T.F., Tebes-Stevens C., Strynar M.J., Wang Z., Weber E.J., Henderson W.M., Washington J.W.: Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment. *Science*, **375**, eabg9065, 2022
- 15) 環境省: PFOS及びPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項, <https://www.env.go.jp/content/000077696.pdf> (2025.11.15 アクセス)
- 16) Basel Convention: General technical

- guidelines on the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants (General POPs) ,
[\(2025. 11. 15アクセス\)](https://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW.16-6-Add.1-Rev.1.English.pdf)
- 17) Oza S., Li H., Huang Q., Norton J.W., Winchell L.J., Wells M.J.M., Nangle T., Perez N., DeLaughter D., Hauser J.M., Taylor M., English Z.E., Melnyk M., Truong P., Bell K.Y.: Per- and polyfluoroalkyl substances in untreated and treated sludge/biosolids from 27 water resource recovery facilities across the United States and Canada. *Water Environment Research*, **97**, e70039, 2025
- 18) 平戸康雅, 賀正史樹, 井上繁則, 松神秀徳, 倉持秀敏: 溶融分離プロセスにおけるPFAS分解挙動の評価. 第36回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2025
- 19) 瀬尾卓, 西省子, 鎌田三千久, 藤井悠也: 溶融炉を用いたPFAS含有廃棄物の熱分解処理の実証その1. 第3回環境化学物質合同大会, 2024
- 20) Liu S., Zhao S., Liang Z., Wang F., Sun F., Chen D.: Perfluoroalkyl substances (PFASs) in leachate, fly ash, and bottom ash from waste incineration plants: Implications for the environmental release of PFAS. *Science of The Total Environment*, **795**, 148468, 2021
- 21) 倉持秀敏, 大村成二, 元木俊幸, 小林拓朗, 松神秀徳: PFAS及びそれらの塩の加熱挙動に関する基礎的検討. 第36回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2025
- 22) 環境省: 第9回災害廃棄物安全評価検討会資料, [\(2025. 11. 18アクセス\)](http://www.env.go.jp/jishin/attach/haikihyouka_kentokai/09-mat_4.pdf)
- 23) Björklund S., Weidemann E., Jansson S.: Emission of Per- and Polyfluoroalkyl Substances from a Waste-to-Energy Plant Occurrence in Ashes, Treated Process Water, and First Observation in Flue Gas. *Environmental Science and Technology*, **57**, 10089–10096, 2023
- 24) Lin H., Taniyasu S., Yamazaki E., Wu R., Lam P.K.S., Eun H., Yamashita N.: Fluorine mass balance analysis and per- and polyfluoroalkyl substances in the atmosphere. *Journal of Hazardous Materials*, **435**, 129025, 2022
- 25) ECOS (The Environmental Council of the States) :ECOS Compendium of State PFAS Actions, [\(2025. 11. 16アクセス\)](https://www.ecos.org/wp-content/uploads/2025/04/ECOS-PFAS-Compendium-FINAL.pdf)
- 26) Michigan PFAS Action Response Team: FAQ:PFAS-related air quality issues, [\(2025. 11. 16アクセス\)](https://www.michigan.gov/pfasresponse/faq/categories/pfas-related-air-quality-issues)
- 27) DiStefano R., Feliciano T., Mimna R.A., Redding A.M., Matthis J.: Thermal destruction of PFAS during full-scale reactivation of PFAS-laden granular activated carbon. *Remediation*, **32**, 231–238, 2022
- 28) US-EPA: Other Test Method 45 (OTM-45) Measurement of Selected Per- and Polyfluorinated Alkyl Substances from Stationary Sources, [\(2025. 11. 16アクセス\)](https://www.epa.gov/system/files/documents/2025-01/other-test-method-45-rev1-final-1-14-25.pdf)
- 29) US-EPA: Other Test Method 50 (OTM-50) Sampling and Analysis of Volatile Fluorinated Compounds from Stationary Sources Using Passivated Stainless-Steel Canisters, [\(2025. 11. 16アクセス\)](https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-01/otm-50-release-1.pdf)
- 30) 環境省: 土壤中のPFOS, PFOA及びPFHxSに係る暫定測定方法(溶出量試験), [\(2025. 11. 18アクセス\)](https://www.env.go.jp/content/000150448.pdf)
- 31) 農研機構: 土壤に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアル～土壤採取から測定まで～, [\(2025. 11. 18アクセス\)](https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/163753.html)
- 32) 平尾壽啓, 大山将, 中井智子, 米澤武志: PFASを吸着した廃活性炭からのPFAS抽出条件の検討. 第34回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2023
- 33) 佐多平恒成: 活性炭中のPFASの分析方法に関する検討. 第4回環境化学物質合同大会, 2025
- 34) Smith S.J., Lauria M., Higgins C.P., Pennell K.D., Blotevogel J., Arp H.P.H.: The Need to Include a Fluorine Mass Balance in the Development of Effective Technologies for PFAS Destruction. *Environmental Science and Technology*, **58**, 2587–2590, 2024