

課題番号：3-2102

体系的番号：JPMEERF20213002

研究課題名：

# 新規・次期フッ素化合物POPsの 適正管理を目的とした廃棄物発生実態と 処理分解挙動の解明

研究代表者：松神 秀徳

研究代表機関：国立研究開発法人国立環境研究所

研究実施期間：令和3（2021）年度～令和5（2023）年度

研究体制：

サブテーマ1 松神 秀徳（国立環境研究所）、三宅 祐一（横浜国立大学）

サブテーマ2 遠藤 智司、倉持 秀敏（国立環境研究所）

サブテーマ3 藤森 崇（龍谷大学）

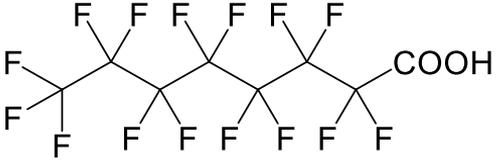
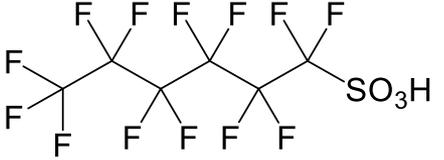
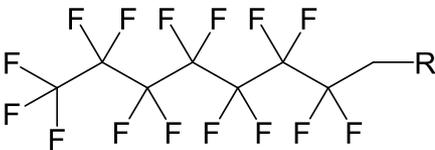
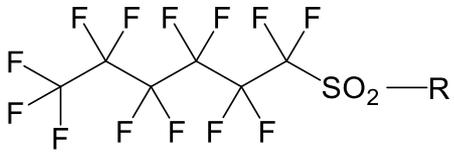
# 1. はじめに (1/4)

採択年月	条約採択 2001.5	COP4 2009.5	COP5 2011.5	COP6 2013.5	COP7 2015.5	COP8 2017.5	COP9 2019.5	条約対象 候補
POPs農薬	アルドリン クロルデン DDT ディルドリン エンドリン HCB ヘプタクロル マイレックス トキサフェン	クロルデコン HCH リンデン ペンタクロロ ベンゼン	エンドスルファン		PCPとその塩 及びエステル類		ジコホル	メトキシクロル
フッ素系 界面活性剤		PFOSと その塩及び PFOSE					PFOAと その塩及び 関連物質	PFHxSと その塩及び 関連物質
臭素系 難燃剤		ヘキサブロモ ビフェニル テトラBDE ペンタBDE ヘキサBDE オクタBDE		HBCD		デカBDE		
塩素系 製剤	PCB				HCBD PCN	SCCP		デクロラン プラス
非意図的 生成物	HCB、PCB PCDD/PCDF	ペンタクロロ ベンゼン			PCN	HCBD		

新規・次期  
フッ素化合物POPs

フッ素化合物POPsを含む廃棄物の適正管理を目的として、分析法の整備、  
廃棄物と関連物質の特定、処理排出挙動や焼却分解挙動に関する知見不足に課題

# 1. はじめに (2/4)

分類	PFOAとその塩及びPFOA関連物質	PFHxSとその塩及びPFHxS関連物質
基本物質	 <p>ペルフルオロオクタン酸 (PFOA)</p>	 <p>ペルフルオロヘキサンスルホン酸 (PFHxS)</p>
塩	NH <sub>4</sub> 塩、Na塩、K塩、Ag塩など	NH <sub>4</sub> 塩、Na塩、Li塩など
関連物質	<p>PFOAに分解するあらゆる物質 部分構造にペルフルオロヘプチル基 C<sub>8</sub>F<sub>15</sub>基をもつ全物質</p>  <p>→CAS番号付与物質：500種類以上</p>	<p>PFHxSに分解するあらゆる物質 部分構造にペルフルオロヘキサンスルホニル基 C<sub>6</sub>F<sub>13</sub>SO<sub>2</sub>基をもつ全物質</p>  <p>→CAS番号付与物質：100種類以上</p>

廃棄物由来の化学種と含有量の定量的なデータが乏しい

分析法を整備し、廃棄物由来関連物質の存在状況に関する知見の収集・評価が必要

# 1. はじめに (3/4)

	親化合物	分解生成物	最終生成物
撥水撥油剤	<p>エステル分解</p> <p>側鎖フッ素化ポリマー (撥水撥油成分)</p>	<p>酸化分解</p> <p>PFOA関連物質 (フルオロテロマーアルコール)</p>	<p>PFOA</p>
泡消火薬剤	<p>ペルフルオロヘキサン スルホンアミド誘導体</p> <p>分解</p>	<p>酸化</p> <p>PFHxS関連物質</p>	<p>PFHxS</p>

使用・廃棄・再資源化の段階における劣化、保管、加熱、洗浄・水処理等の光・水・熱で、環境移動性が高いイオン性・中性の関連物質を経て、PFOA・PFHxSを生成する可能性

廃棄の段階での物質挙動と排出状況について定量的なデータが乏しい

廃棄物由来関連物質の処理排出挙動に関する知見の収集・評価が必要

物質挙動・排出量の推計に欠かせない物性情報の整備も重要

# 1. はじめに (4/4)

種類	具体例	含有情報
薬剤そのもの	<ul style="list-style-type: none"><li>• 泡消火薬剤</li><li>• 撥水撥油剤</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 意図的に使用した薬剤の製造・販売実績がある</li><li>• 焼却分解処理の対象となる可能性がある</li></ul>
撥水撥油加工製品	<ul style="list-style-type: none"><li>• 作業着などの衣類</li><li>• アウトドア製品</li><li>• カーペット</li><li>• その他の繊維製品</li><li>• 皮革製品</li><li>• 食品接触材料</li><li>• 調理器具</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 意図的に使用した製品の製造・販売実績がある</li><li>• 表面加工のため、廃棄物中の濃度は高くない</li><li>• 利用用途が多岐にわたり、含有廃棄物の特定が困難</li><li>• 繊維ごみや紙ごみとして廃棄後、廃棄物固形燃料として再資源化され、エネルギー利用（焼却）されている可能性がある</li></ul>
その他の廃棄物	<ul style="list-style-type: none"><li>• 汚泥、廃水</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 製造過程のテロメリゼーション反応による非意図的生成物としてのフッ素化合物POPsが混入する恐れがある</li><li>• 廃棄物処理法等に従い焼却処分されている</li><li>• 焼却分解処理の対象となる可能性がある</li></ul>

焼却による分解率と分解挙動に関する定量的なデータが極めて乏しい  
廃棄物由来関連物質の焼却分解挙動に関する知見の収集・評価が必要

# 2. 研究開発目的

【研究開発目的】新規・次期フッ素化合物POPsを対象。網羅分析法を開発し、関連物質・含有製品・含有廃棄物・循環資源を特定。廃棄段階での各種処理による分解・副生成・溶出・放散挙動を把握し、環境排出量を推定。有害廃棄物焼却法による分解挙動を把握。

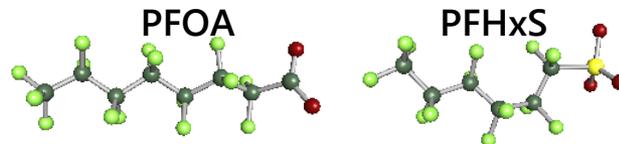
## サブ①：網羅分析法の開発と含有廃棄物発生実態の解明

○国環研 松神／横浜国立大 三宅

- ・フッ素化合物POPsに特化した網羅分析法の開発
- ・フッ素化合物POPs含有製品・廃棄物・循環資源の特定

- ・物質選定
- ・試料共有
- ・分析支援

- ・物質選定
- ・試料共有
- ・分析支援



## サブ②：溶出放散挙動解明と 廃棄物由来環境排出量の推定

○国環研 遠藤／倉持

- ・廃棄物処理施設調査による環境排出実態の把握
- ・フッ素化合物POPs等の溶出・放散挙動の把握
- ・フッ素化合物POPs等の劣化・分解挙動の把握

## サブ③：分解処理技術に関する研究

○龍谷大 藤森

- ・有害廃棄物焼却法による焼却処分における分解挙動の把握、分解生成物の検討

- ・挙動解析
- ・物性情報共有
- ・解析支援

# 3. 研究目標及び研究計画

	研究目標	研究計画
サブ テーマ 1	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 網羅分析法の確立</li> <li>2. 関連物質と含有製品の特定</li> <li>3. 含有廃棄物の特定</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 網羅分析法の開発と性能評価</li> <li>2. 撥水撥油加工製品（撥水撥油剤、合成繊維・繊維処理剤）、泡消火薬剤の調査</li> <li>3. 廃棄物、廃棄物固形燃料の調査</li> </ol>
サブ テーマ 2	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 処理・資源化施設の排出実態の把握</li> <li>2. 溶出・放散挙動の解明、劣化影響の解明</li> <li>3. 物性の実測・推算による物性値の整備、溶出・放散・劣化メカニズムの解析、処理・資源化過程の発生源の特定</li> <li>4. 排出削減対策を反映した際の施設における廃棄物由来環境排出量の推定</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 処理・資源化施設の排出実態の調査</li> <li>2. 溶出・放散試験と劣化試験</li> <li>3. 物性の実測・推算、発生源の特定</li> <li>4. 排出削減対策の検討、廃棄物由来環境排出量の推定</li> </ol>
サブ テーマ 3	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 純物質の焼却試験による影響因子の解明と分解条件の最適化</li> <li>2. 含有製品・廃棄物の焼却試験による分解率の解明</li> <li>3. 現行の処理条件における副生成物の把握</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 純物質の焼却試験による温度、滞留時間、酸素濃度等の影響因子の検討と分解率の確認</li> <li>2. 含有製品・廃棄物の焼却試験</li> <li>3. 純物質の焼却試験による副生成物の調査</li> </ol>

分析法を整備、廃棄物と関連物質を特定、

処理排出挙動や焼却分解挙動に関する知見を収集・評価、排出削減対策を提示する

# 新規・次期フッ素化合物POPsの 網羅分析法の開発と含有廃棄物発生実態の解明

## 研究目標

- 新規・次期フッ素化合物POPsの同定に特化した網羅分析法を確立する。
- 撥水撥油剤や合成繊維・繊維処理剤などの撥水撥油加工製品と泡消火薬剤について、網羅分析を行い、新規・次期フッ素化合物POPs含有製品と関連物質を特定する。
- 廃棄物処理・資源化施設の一般廃棄物及び産業廃棄物等の廃棄物、廃棄物固形燃料等の循環資源について網羅分析を行い、新規・次期フッ素化合物POPs含有廃棄物と関連物質を特定する。

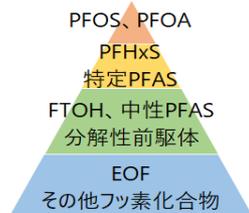
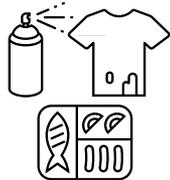
網羅分析法の  
開発と性能評価



製品・廃棄物の  
実測調査



存在状況の  
収集・評価



## 研究方法

### (A) 網羅分析法の整備と性能評価

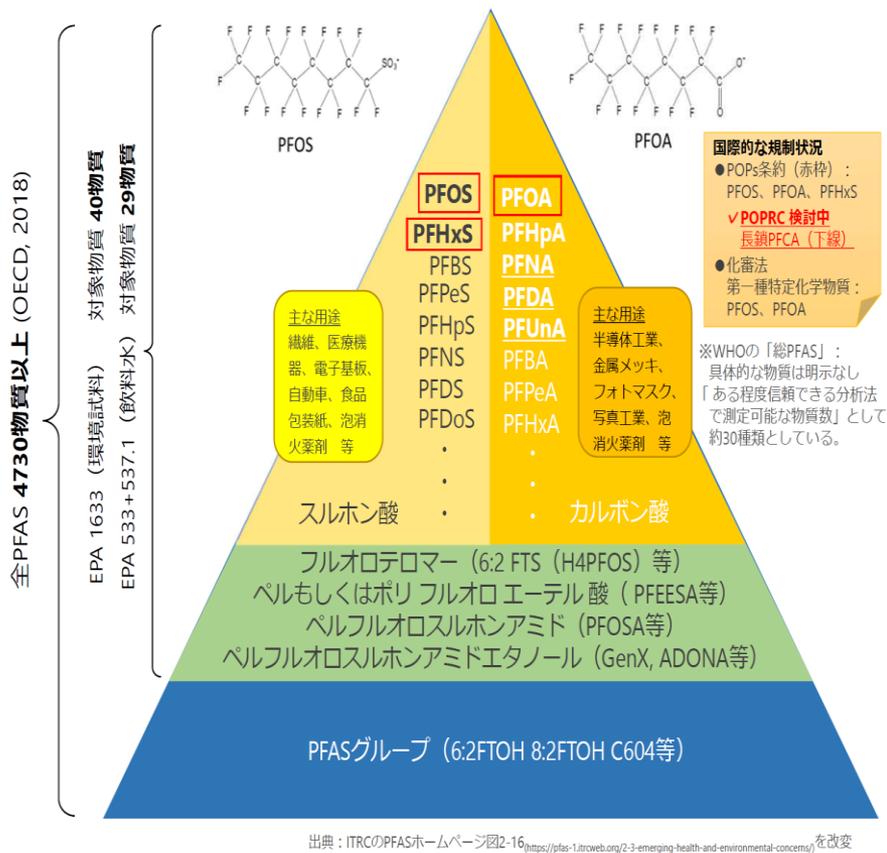
分子構造や物性を踏まえた前処理技術、及び総有機フッ素分析法や高分解能MS法等の機器分析技術の最適化を図る。

### (B) 撥水撥油加工製品の実測調査

撥水撥油剤、合成繊維・繊維処理剤等を選定して網羅分析を行い、分子構造のC7F15基及びC6F13基の有無を判定する。

### (C) 泡消火薬剤の実測調査

泡消火薬剤を選定して網羅分析を行い、分子構造のC7F15基及びC6F13基の有無を判定する。



## 環境省 水・大気環境局環境管理課 「PFASに対する総合戦略検討専門家会議」

### 1. PFOS、PFOA

POPs条約と国内法令に基づく対策の推進、含有品管理の強化、曝露防止の徹底など、更なる対応の強化

### 2. PFOS、PFOA以外のPFAS

PFHxS、長鎖PFCAの情報収集を優先  
存在状況に関する実測調査の強化、その結果を踏まえた当面对応すべき候補物質の整理、管理方策および評価手法の開発

今後の方向性は、POPsとともにPFAS全体の管理に不可欠な科学的知見の収集・評価、管理方策・評価手法の開発を進めることが重要

Source: 環境省 (2023) PFASに対する総合戦略検討専門家会議(第1回)議事次第・配付資料, 参考資料1

PFASに対する総合戦略検討専門家会議の今後の方向性を踏まえ、フッ素化合物POPsを含む広範囲なPFASについて、網羅分析法を整備し、製品調査を行った

項目	メソッド①	メソッド②	メソッド③④	メソッド⑤
評価対象	特定PFASと類縁物質	分析困難PFAS	加水分解性前駆体 酸化分解性前駆体	EOF 全フッ素
概要	ISO21675法及びEPA1633法における分析対象の特定PFASとその類縁物質の分析法 PFOS, PFOA, PFHxS, 長鎖PFCAs, REACH SVHCなど国際的に評価重要度が高い59のPFASを評価する	ISO法、EPA法で分析困難なPFASに特化した分析法 FTOH, FTO, FTI, FTAc, FTMAcなどの揮発性が高い23の中性PFASを評価する	加水分解を受けて副生成されるPFASの前駆体総濃度を評価する分析法 酸化分解を受けて副生成されるPFASの前駆体総濃度を評価する分析法 (TOPアッセイ)	有機溶剤により抽出される有機フッ素化合物 (EOF) の総濃度を評価する分析法 フッ素化合物の総濃度を評価する分析法 フッ化物(F-)濃度として評価する
測定機器	LC/HRMS	GC/HRMS GC/MSMS	GC/MSMS LC/MSMS	燃焼イオンクロマトグラフィー (CIC)
性能評価	ハウスダストの認証標準物質 (NIST SRM 2585) で分析法の妥当性を確認	NIST SRM 2585で分析法の妥当性を確認	撥水撥油スプレー剤、NIST SRM 2585、泡消火薬剤で分析法の妥当性を確認	標準液とNIST SRM 2585で分析法の妥当性を確認

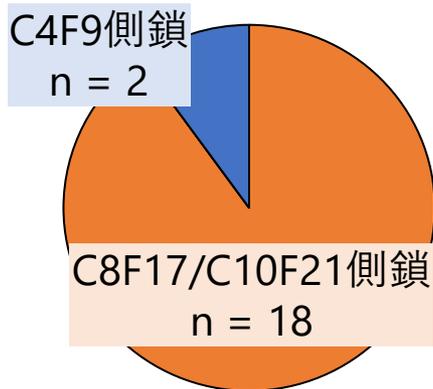
実測調査の目的に応じて分析化学的アプローチを組み合わせる網羅分析法を確立

- 撥水撥油スプレー剤、防水繊維、食品接触素材については、焼却分解処理の対象とする濃度基準の提案値（50 mg/kg）を上回る製品は少ない。
- フッ素化合物POPs等PFASの発生源になりうる撥水撥油加工製品が市中に存在していることが明らかになった（長年収納されている古い撥水撥油スプレー剤と防水繊維は、フッ素化合物POPsを含有したままの可能性が有る）。
- 撥水撥油加工製品の対象は広い。フッ素化合物POPsの発生源となりうる防水繊維等を廃棄物から分別して取り除くことは現行の技術では難しく現実的ではない。POPsの管理と調和する廃棄物の処理・再資源化を検討する場合の留意事項として、必要に応じて排ガスや廃水等に含まれるフッ素化合物POPsの排出管理対策を検討することが考えられる（排ガス・排水処理装置を設置して活性炭等によりフッ素化合物POPsを吸着・除去するなど）。  
→サブテーマ2との連携
- 長期的には国際的な規制によるPFASフリー化の促進の流れが資源循環に関わるリスク低減にも寄与すると示唆される。また、製品使用に関わる健康リスク低減の観点でもPFASフリー化を促進する意義があると考えられる。

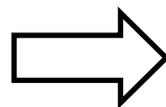
PFOA規制前の販売品28試料と規制後の販売品26試料を調査

項目	C8F17側鎖フッ素化ポリマー	C6F13側鎖フッ素化ポリマー	C4F9側鎖フッ素化ポリマー
側鎖	PFOA関連物質 (8:2 フルオロテロマー基)	6:2 フルオロテロマー基	N-メチルペルフルオロブタン スルホンアミドエタノール
不純物	PFOA関連物質 (8:2 フルオロテロマー化合物)	6:2 フルオロテロマー化合物	N-メチルペルフルオロブタン スルホンアミドエタノール等
特徴	規制後の頻度・濃度が低下 製造・販売制限の可能性	規制後の頻度・濃度が上昇 代替品の可能性	PFOA規制の前後で 頻度・濃度に大きな変化なし

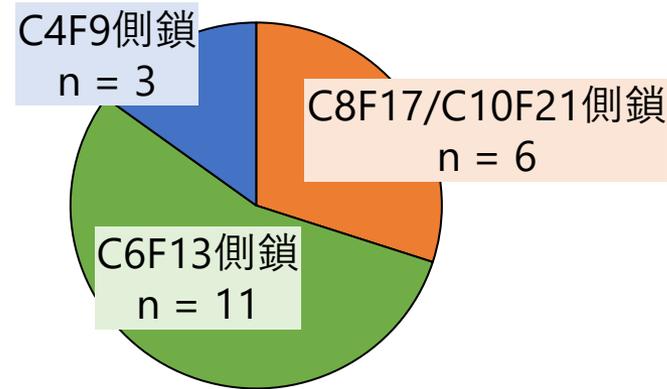
(A) 2011年販売品 (n = 20)



物質代替と  
PFOA管理



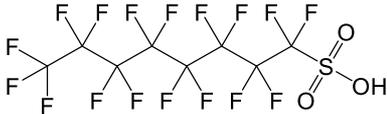
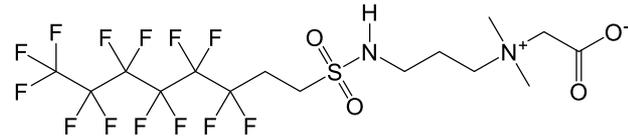
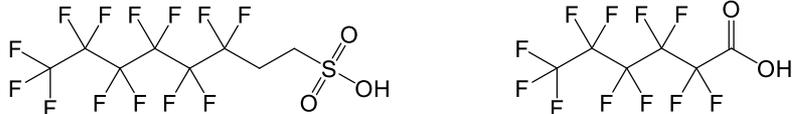
(B) 2021年販売品 (n = 20)



撥水撥油成分の側鎖フッ素化ポリマーがフッ素化合物POPs等PFASの混入の原因

- PFOS系泡消火薬剤の多くは、LPCの提案値を超過する。PFOS系以外のうちPFOA規制前（2011年～2020年）の泡消火薬剤については、焼却分解処理の対象とする濃度基準の提案値（50 mg/kg）を超過する疑いがある。
- PFOA規制前の泡消火薬剤については、廃棄の段階で実測調査を行い、PFOS、PFOA、PFHxSの存在状況に応じて国内技術的留意事項に準じた適正処理を検討することが考えられる。  
→サブテーマ3との連携
- PFOA規制後の泡消火薬剤は、LPCの提案値を超過する可能性が低い。PFOS及びPFOA規制前の販売品に代わって、PFOA規制後の販売品に更新されることで、泡消火薬剤に含まれるフッ素化合物POPsの市中全体の濃度は大幅に低減され、フッ素化合物POPsの排出量は時間の経過とともに減少することが期待される。

販売終了品のPFOS含有薬剤3試料と、現在販売中の水成膜系薬剤20試料、  
たん白系薬剤33試料、界面活性剤系薬剤9試料を調査

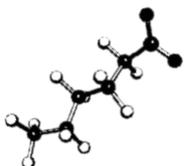
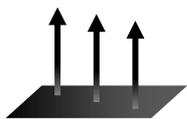
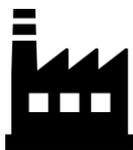
項目	PFOS規制前	PFOA規制前	PFOA規制後
主成分	 <p>PFOS: 9200 mg/kg</p>	 <p>6:2FTAB: 430~26000 mg/kg</p>	
不純物	<p>PFOA: 140 mg/kg</p> <p>PFHxS: 760mg/kg</p>	 <p>6:2FTS: 2.9~450 mg/kg) PFHxA: 0.030~6.8 mg/kg</p>	
		<p>酸化分解性前駆体総濃度分析で</p> <p>PFOA関連物質検出</p> <p>0.028~3300 mg/kg</p>	<p>PFOA関連物質</p> <p>PFHxS関連物質</p> <p>1 mg/kg以下</p>
特徴	<p>PFOSのみならず</p> <p>PFOA・PFHxSもまた</p> <p>LPC (50 mg/kg) 超過の疑いあり</p>	<p>PFOA規制前の</p> <p>低純度6:2FTAB製剤</p> <p>LPC超過の疑いあり</p>	<p>PFOA規制後の</p> <p>高純度6:2FTAB製剤</p> <p>LPC超過の疑いなし</p>

PFOA規制前の販売品は、LPC超過の疑いがあることが判明  
焼却分解挙動に関する知見の収集・評価が重要→サブ③

## 研究目標

- 廃棄物処理・資源化施設における物質動態と環境への排出実態を明らかにする。
- 含有製品・廃棄物とリサイクル物を対象に溶出・放散挙動を明らかにする（材料の経年劣化や処理による材料変質の影響も考慮）。
- 溶出・放散に係る物性データを整備し、溶出・放散メカニズムの解析を通して、処理・資源化過程の発生源を特定する。
- 排出削減対策を反映した際の施設における廃棄物由来環境排出量を推定する。

環境排出

製品・廃棄物からの  
溶出・放散フッ素化合物  
POPsの物性

## 研究方法

## (A) 環境排出実態調査

廃棄物処理・資源化施設内外の空気、処理排水・排ガス中の新規・次期フッ素化合物POPs濃度を現地調査により実測

## (B) 溶出・放散試験／促進劣化試験

含有製品・廃棄物・リサイクル物等からの新規・次期フッ素化合物POPsの溶出・放散量及び速度を実験室で測定、また各材の材料特性・劣化の影響を検証

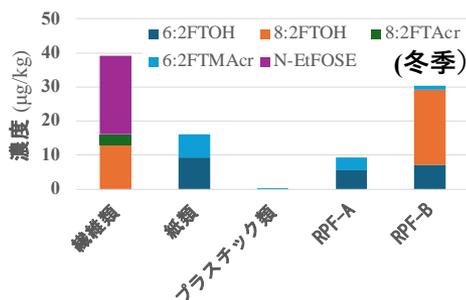
## (C) 物性測定・推算／メカニズム解析

溶出・放散に関わる物性を測定・推算、また溶出・放散挙動のメカニズムを検証、モデル化

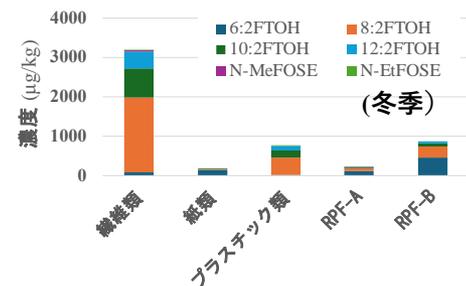
プラ、繊維、紙等の廃棄物をRPF化する施設で調査し、①廃棄物及びRPFにおけるPFAS濃度と汚染源の解明、②施設内外の大気中濃度を測定し、主要発生源の特定と発生源におけるPFAS濃度の把握

①廃棄物及びRPFにおけるPFAS濃度

a) 不純物として含有量(～約190μg/kg)

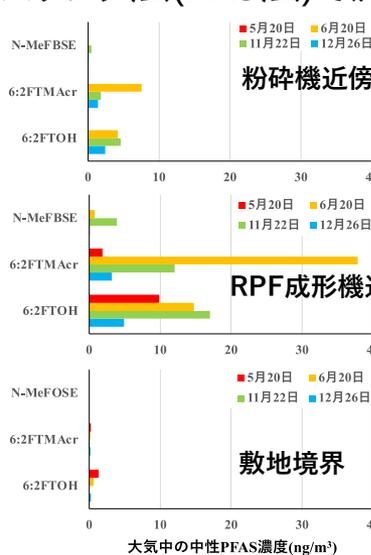


b) ポリマー側鎖由来も含めた量(～約23000μg/kg)



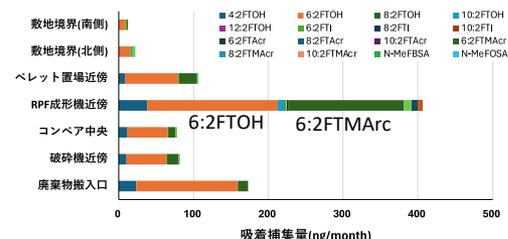
- 主要成分は、中性PFAS、特に6:2FTOHと6:2FTMAcr
- 汚染源は、紙類と繊維類、そのなかでもフッ素系撥水剤
- ポリマー側鎖PFASが桁違いに高い → このPFASの分解防止が重要

A施設内外の大気中のPFAS濃度 (アクティブ法(AAS法)とパッシブ法(PAS法)で測定)

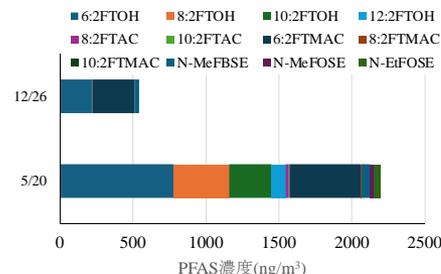


AAS法によるA施設における中性PFAS捕集量(屋内2、屋外1)

- RPF成形機(110°Cで加熱)近傍の濃度が高く、主要発生源
- 6:2FTOHと6:2FTMAcrが主要成分
- RPF成形機排ガス中のPFAS濃度は桁違いに高い → 排ガス処理は中性PFASの環境排出抑制として有用
- イオン性PFASは少なく、粒子態 → バグフィルタで除去可能



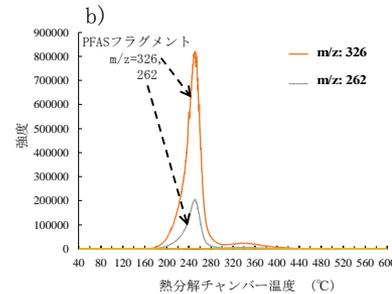
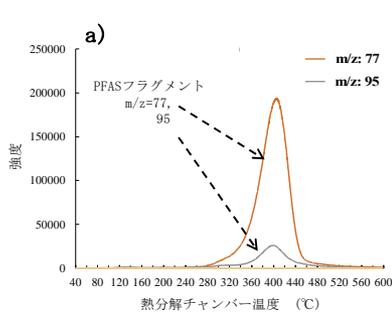
PAS法による中性PFAS捕集量(1ヶ月)



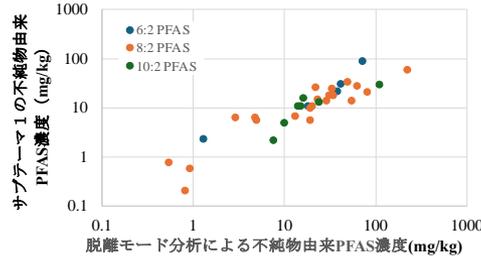
RPF成形機排ガス中の中性PFAS濃度

①フッ素系撥水剤を熱分解GC/MSで分析し、PFASの環境排出メカニズムを解明、②同撥水剤を耐候性試験と放散試験を組み合わせた装置に供し、劣化と放散速度の関係を解明

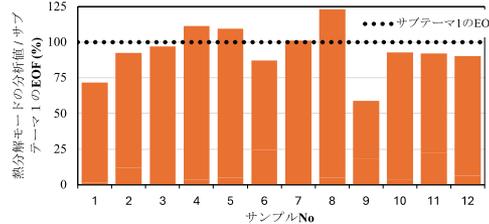
①撥水剤の熱分解GC/MSによる分析：1)発生モード分析、2)脱離モード分析、3)熱分解モード分析



発生モード分析 (温度vs発生ガス量)



脱離モード分析 (不純物由来PFAS濃度分析結果(横軸)と縦軸のサブテーマ1の別法と一致)



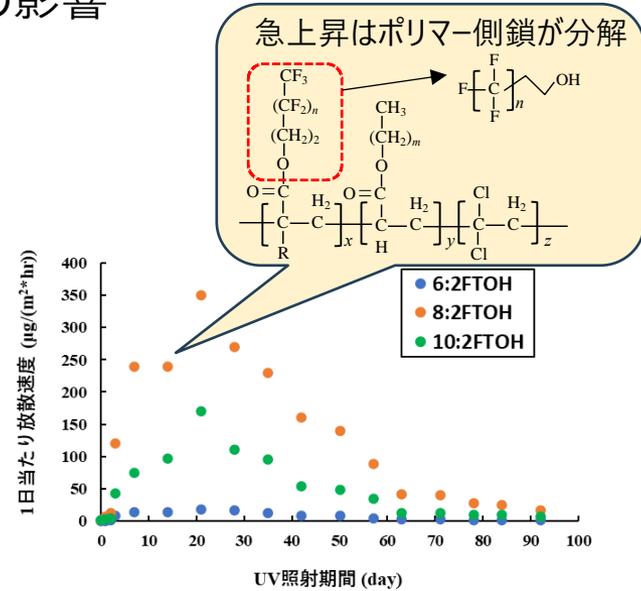
脱離モード分析 (側鎖由来PFAS濃度分析結果(縦軸)と破線のサブテーマ1のEOF値と概ね一致)

1) ポリマー側鎖由来PFASの放出は、FTO等は280°C以上、N-MeFBSEは170°C以上で発生 → RPF成形機では不純物由来PFASが揮発、側鎖由来PFASは揮発しない

2) 不純物由来PFASの分析に有用  
3) EOFの推定にも有用

サブテーマ1の分析の迅速・簡易法としても有用

①放散速度測定とUV照射劣化の影響



• 主に6:2, 8:2, 10:2のFTOHが主に大気へ放散

• UV照射 ⇒ 1)放散速度は最大で400倍に上昇、2) 3ヶ月でポリマー側鎖由来PFASの6~8割が放散

• しかし、UV照射後の撥水剤からの室温の放散速度には影響しない

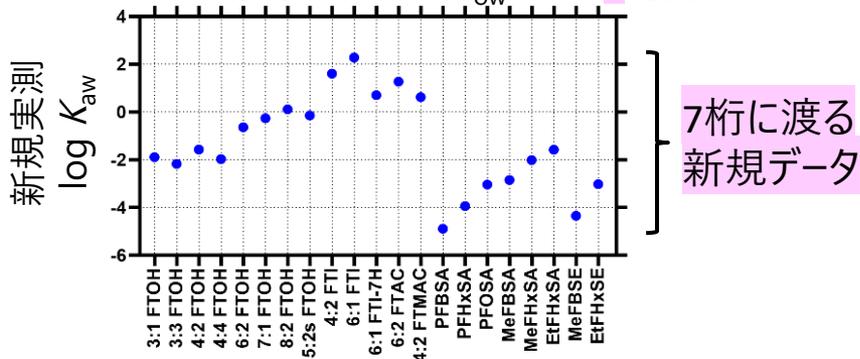
実測データセットを大幅に拡張

新規物性データを多数の中性PFASについて測定

空気/水分配係数 ( $K_{aw}$ 、ヘンリー定数) → 21物質

ヘキサデカン/空気分配係数 ( $K_{Hxd/air}$ ) → 64物質

オクタノール/水分配係数 ( $K_{ow}$ ) → 9物質



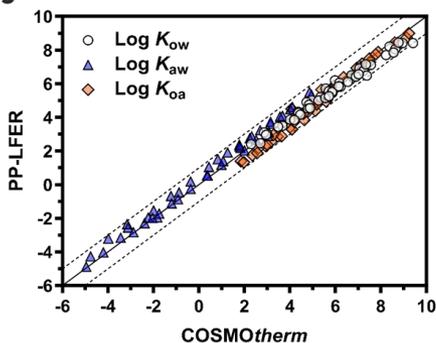
卓越した成果は英文国際誌に4報の原著論文として報告

整備した物性データはサブ1の分析法開発、サブ2の大気サンプリング、発生源解析、放散試験、サブ3の焼却実験などのデータ解釈に活用

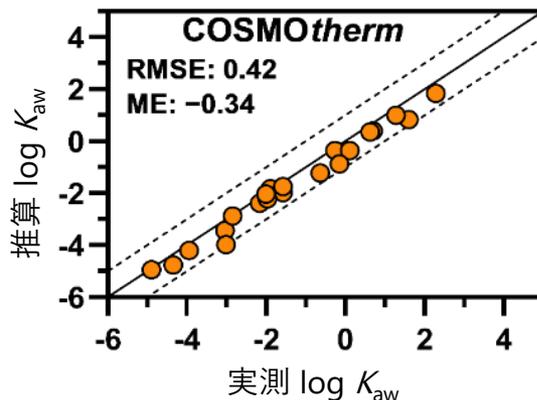
実測データがない物性値には推算モデルを活用

47種の中性PFASの溶質ディスクリプタを決定 → PP-LFERモデルによる物性推算を可能に

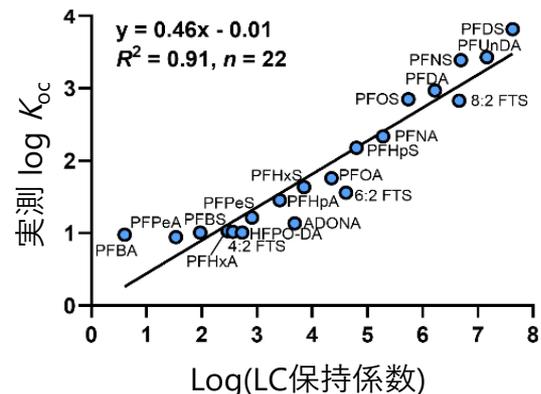
$$\text{Log } K = c + lL + vV + sS + aA + bB$$



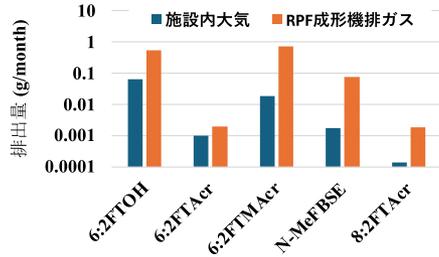
量子化学計算にもとづくCOSMOthermモデルの高い推算精度を実測値をもとに実証



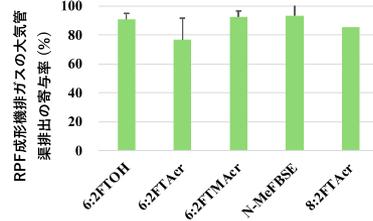
$K_{ow}$ のような有用な物性指標がないイオン性物質にはLC保持係数を新たな疎水性指標として提案



## ①環境排出量の推計（RPF成形機由来と施設内大気由来に区別）



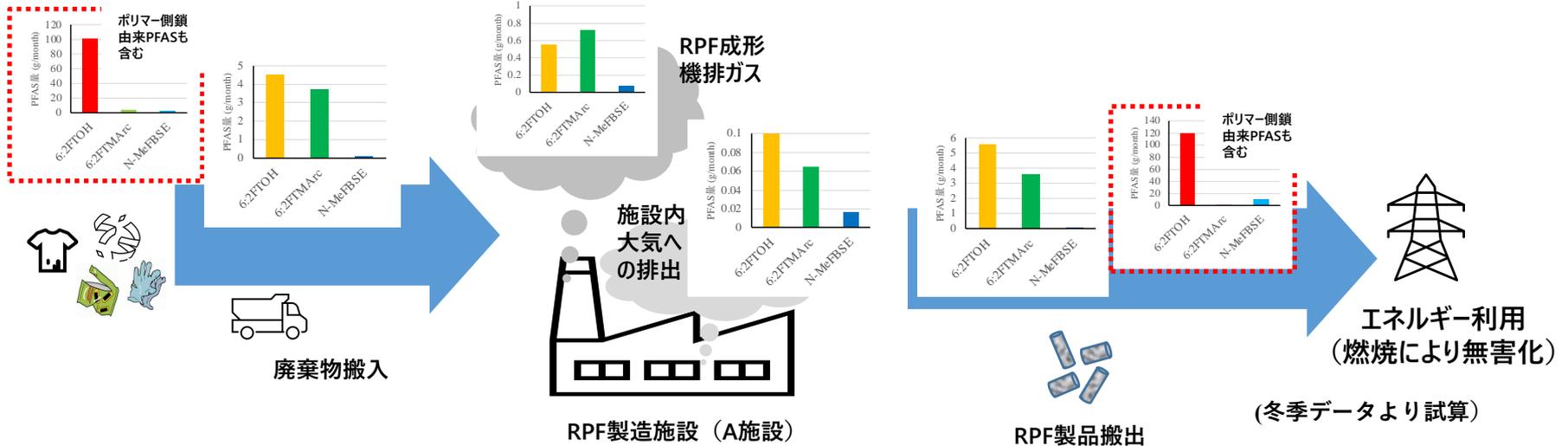
①-1 環境排出量(冬季)



①-2 RPF成形機排ガスの環境排出への寄与率 (冬季と春季の平均)

- 主要成分の排出量は約0.1-2 g/month
- RPF成形機の排出寄与は概ね90%以上
- RPF成形機の排ガス処理が最優先（提言1、作業者曝露低減からもBest）

## ②施設のPFASフロー(主要3成分)を整備し、環境排出量のインパクトと排出削減対策の提言



- 廃棄物搬入に対する環境排出量は約10-20%(不純物由来基準)、約0.1-1.5%(ポリマー側鎖由来基準)
- 多量に存在するポリマー側鎖PFASの側鎖分解防止が重要（提言2、RPF成形の温度は170°C以下）
- マイナー成分のイオン性PFASは粒子態、室内大気出口にバグフィルタの設置が効果的削減（提言3）
- 環境排出量が計算できない施設も多く、得られた物性と室内動態モデルによる推計が将来必要

# 新規・次期フッ素化合物POPs 分解処理技術に関する研究

- 新規・次期フッ素化合物POPsの分解処理として「焼却処理」を検討
- PFOSの分解に効果あり、実際に処理が進む→フッ素化合物POPsの分解を検討
- 焼却試験の運転条件は「850°C以上、1000°C以上、2秒以上滞留」
- 分解率、副生成物、排出状況を把握

## バーゼル条約：PFOS廃棄物処理の技術ガイドライン（2018）

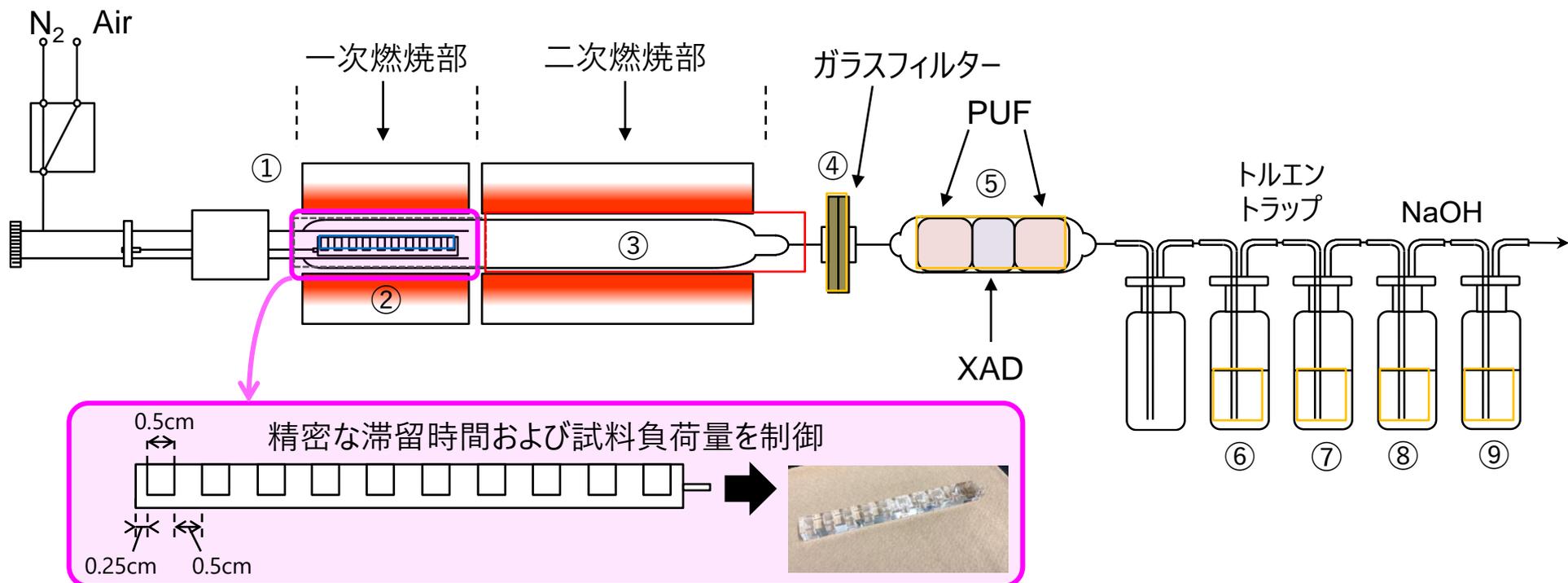
- 焼却処理（Hazardous waste incineration）が主として記載
- 他にもセメントキルン焼却，超臨界水酸化などもあるが実証例はあまりない

## 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（2022）

- PFOS含有廃棄物は850°C以上、2秒以上滞留、燃焼ガスの十分な滞留時間を確保
- PFOA含有廃棄物は1000°C以上(1100°C以上を推奨)、2秒以上燃焼ガスの十分な滞留時間を確保
- 分解率99.999%以上を満たすことを要件とする

廃棄物焼却法によるフッ素化合物POPsの分解率、副生成物、排出状況を確認  
焼却分解挙動に関する知見を収集・評価する

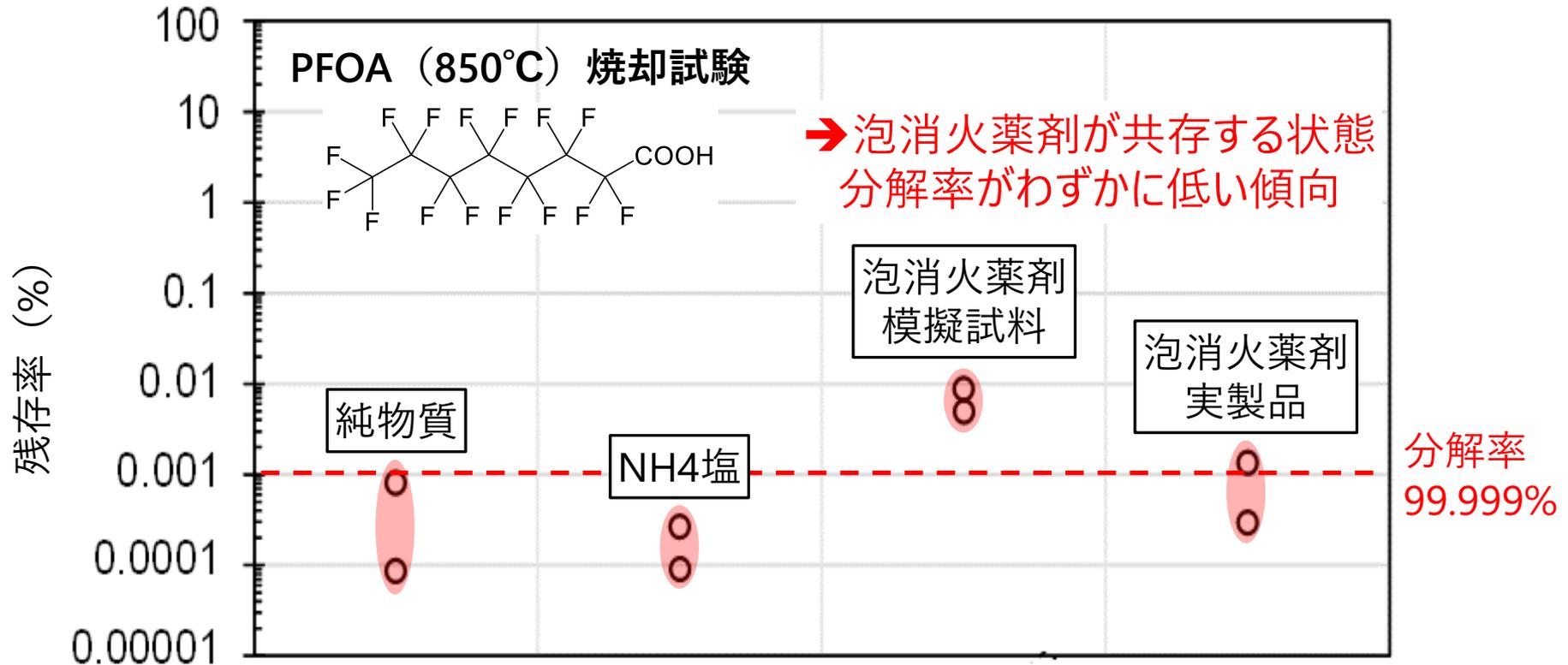
- 現実の炉の運転条件を模したラボスケールの制御炉を主として運転
- 精密な滞留時間及び試料負荷量を制御
- 焼却後残渣、管内付着物、排ガス成分を細かく分けて採取



→フッ素化合物POPsの分解率、副生成物、排出状況を詳細に解析した

項目	内容
分解率	<p>純物質、塩類、泡消火薬剤について、850°C以上の温度で焼却試験を実施</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•PFOS、PFOA、PFHxSの純物質と塩類の分解率：99.999%以上</li> <li>•長鎖PFCAs、GenXの純物質の分解率：99.999%以上</li> <li>•泡消火薬剤が共存する状態の分解率は、純物質よりもわずかに低い傾向</li> </ul> <p>→ 廃泡消火薬剤に含まれるPFOAを分解処理する場合は、PFOS及びPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項に従い、1000°C以上の分解処理を行うことが有効であると確認</p>
副生成物	<p>PFOAとPFOcDA (C18) の純物質について、700°C以下の温度で副生成物を特定</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•炭素鎖長が短いフッ素化合物の副生成物を確認 (PFOcDA→PFOA)</li> <li>•エーテル結合や炭素数の増加も確認</li> </ul> <p>→ 副生成物の観点から徹底した炉内温度管理が重要であると確認</p>
微量残渣の排出挙動	<p>焼却後の微量な残渣（残留率0.001%程度）の挙動について解析</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•排ガス中のPFCAs（カルボン酸）は気相へ分配される傾向</li> <li>•排ガス中のPFSA（スルホン酸）は固相へ分配される傾向</li> </ul> <p>→ 排ガス中のPFOAは、PFOS、PFHxSよりも気相へ分配されると確認</p>

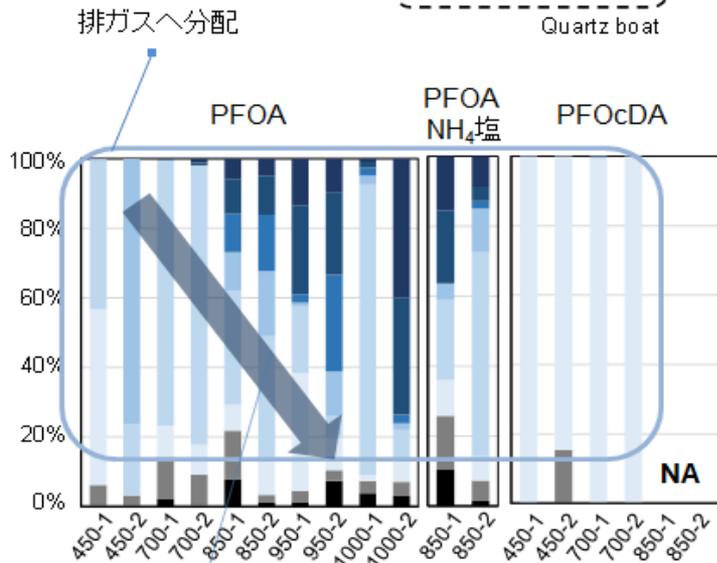
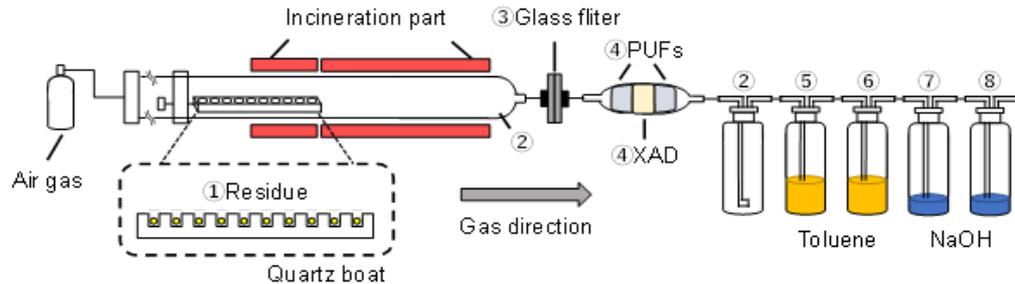
純物質、塩類、泡消火薬剤について、850°C以上の温度で焼却試験を実施



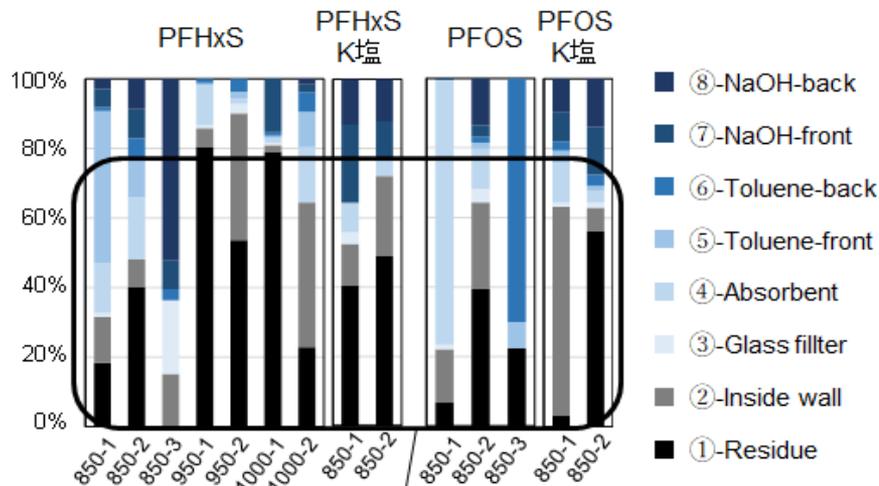
PFOS及びPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項に従い、  
1000°C以上の分解処理を行うことが有効であることを確認した



焼却後の微量な残渣（残留率0.001%程度）の挙動について解析



焼却温度上昇に伴い、  
NaOHの割合も増加



- ⑧-NaOH-back
- ⑦-NaOH-front
- ⑥-Toluene-back
- ⑤-Toluene-front
- ④-Absorbent
- ③-Glass filter
- ②-Inside wall
- ①-Residue

排ガス中のPFOAは、PFOS、PFHxSよりも気相へ分配されると確認した

# 6 (1) 達成状況

	達成状況	エビデンス
サブ 1	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. フッ素化合物POPsを含む広範囲なPFASについて、実測調査の目的に応じて分析化学的アプローチを組み合わせる網羅分析法を開発し性能を評価（当初の目標以上）</li> <li>2. 撥水撥油加工製品中の側鎖フッ素化ポリマーとPFASの存在状況を解明、撥水撥油成分のC8F15基側鎖フッ素化ポリマーがフッ素化合物POPs混入の原因と特定</li> <li>3. 泡消火薬剤中PFASの存在状況を解明、低純度フッ素系界面活性剤がフッ素化合物POPs混入の原因と特定</li> <li>4. RPF原料の廃棄物から分別した紙ごみと繊維ごみ中のPFASを特定、使用済みとなり廃棄された紙類や繊維類などの撥水撥油加工製品がPFAS混入の原因と特定</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. P10</li> <li>2. P11-14</li> <li>3. P16</li> </ol>
サブ 2	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 資源化施設における主要な発生源が、加熱成形による不純物PFASの放散と特定</li> <li>2. 放散試験により側鎖フッ素化ポリマーからPFASが分解・脱離し、放散されることを解明</li> <li>3. PFASの物性について新規実測値を提供、推算モデルの校正・検証を行い、PFAS全般の物性データを整備（突出した成果）</li> <li>4. 資源化施設においては成形機の排ガス対策が最重要と提示、対策の導入により排出量を90%以上、削減可能であると推定（当初の目標以上）</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. P16</li> <li>2. P17</li> <li>3. P18</li> <li>4. P19</li> </ol>
サブ 3	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. PFOA、PFHxSに加えて、PFOS、長鎖PFCAs、GenXについて、850°C以上で99.999%以上の分解率を確認（当初の目標以上）</li> <li>2. 泡消火薬剤が共存する場合は焼却温度を十分に確保する重要性を解明、国内技術的留意事項に従い、1000°C以上の分解処理を行うことが有効であることを確認</li> <li>3. 700°C以下の焼却試験で炭素鎖長が短いPFASなどの副生成物を特定、副生成物の観点から徹底した炉内温度管理が重要であると確認</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. P22</li> <li>2. P23</li> <li>3. P24</li> </ol>

目標を大きく上回る成果をあげた

## 6 (2) 環境政策等への貢献

### PFAS網羅分析法の応用展開

- PFASに対する総合戦略検討専門家会議で示された今後の対応の方向性を踏まえた調査検討への活用
- PFASの存在状況に関する科学的知見の更なる充実に貢献
- 環境分析化学関連や地下水・土壌汚染対策関連の民間企業への活用

### PFASの存在状況・処理排出挙動・焼却分解挙動に関する知見

- 化審法による製造・輸入の禁止等の措置の検討
- 国内技術的留意事項・バーゼル条約技術ガイドライン策定への貢献

### PFASの排出低減対策

- PFAS管理の強化と曝露防止の徹底に貢献

## 7. 研究成果の発表状況

成果の種別	件数
査読付き論文	ES&T：4件 STOTEN：1件
査読付き論文に準ずる成果発表 (人文・社会科学分野)	0
その他誌上発表 (査読なし)	4
口頭発表 (国際学会等・査読付き)	13
口頭発表 (学会等・査読なし)	37
知的財産権	0
「国民との科学・技術対話」の実施	6
マスコミ等への公表・報道等	0
研究成果による受賞	2
その他の成果発表	1