PFOS・PFOA含有水成膜泡消火剤を対象とした専焼炉の開発と焼却処理性能評価

山本達生＊1

要　　旨

PFAS含有水成膜泡消火剤（AFFF）の焼却処理は，副生成するフッ化水素による設備劣化の影響を低減するため混焼処理が主流であり，処理能力に制約がある．本報告では，排ガス温度管理によりフッ化水素の影響低減を図った処理能力180 L/h級のフルスケール専焼炉を開発し，その焼却処理性能を評価した．試験では，二次燃焼炉出口温度1,000°C以上および滞留時間2秒以上を確保してPFOSおよびPFOAを含有するAFFFを焼却処理した．その結果，PFOSは99.99979％以上，PFOAは99.99996％の分解効率を示した．また，フッ素収支は105～112％となり，PFASの完全分解が示唆された．さらに，排ガス温度管理および排ガス処理設備の適用により，ダイオキシン類生成の抑制，設備腐食の防止ならびにフッ化水素の高効率除去を確認した．これらの結果から，本専焼炉はPFAS含有AFFFの安全かつ効率的な焼却処理技術として高い適用性を有することを確認した．

キーワード　PFAS／水成膜泡消火薬剤／焼却処理／専焼炉／分解効率／副生成ガス

目　　次

１．はじめに
２．PFAS含有AFFF専焼炉の概要
３．実証試験概要
４．焼却処理性能評価
５．排ガス処理性能および副生成物評価
６．実用化に向けた考察
７．まとめ

DEVELOPMENT OF A DEDICATED INCINERATOR FOR PFOS- AND PFOA-CONTAINING AQUEOUS FILM-FORMING FOAM AND EVALUATION OF ITS INCINERATION PERFORMANCE

Tatsuo　YAMAMOTO

Synopsis:

Incineration of PFAS-containing aqueous film-forming foam (AFFF) is commonly conducted by co-incineration with other wastes to mitigate equipment deterioration caused by hydrogen fluoride, resulting in limited treatment capacity. In this study, a full-scale dedicated incinerator with a treatment capacity of 180 L/h was developed by incorporating flue gas temperature control, and its performance was evaluated. Incineration tests were conducted at a secondary combustion chamber outlet temperature exceeding 1,000°C and a gas residence time of more than 2 s. As a result, destruction and removal efficiencies (DREs) of greater than 99.99979% for PFOS and 99.99996% for PFOA were achieved. The fluorine mass balance ranged from 105% to 112%, indicating near-complete destruction of PFAS. Hydrogen fluoride removal, suppression of dioxin formation, and prevention of equipment corrosion were confirmed. These results demonstrate the applicability of the developed dedicated incinerator as a safe and efficient treatment technology for PFAS-containing AFFF.

＊1 本店　土木技術部

1．はじめに

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）は，難分解性，高蓄積性および有害性が懸念される化学物質群であり，環境中に放出されたPFAS を適切に処理することが求められている [1),2)].

PFAS の分解技術としては，電気化学酸化法，プラズマ法，光触媒法，超音波法，超臨界水酸化法などの研究開発が進められている [3),4)]．しかし，これらの技術は適用可能な PFAS の種類や濃度に制約があるほか，大規模処理時の処理能力や経済性に課題がある．このため，ダイオキシン類（DXNs）やポリ塩化ビフェニル（PCB）などの難分解性有機汚染物質の無害化処理技術として実績のある焼却処理が，有力な無機化処理技術の一つとして位置付けられている [3),5)].

PFAS 含有廃棄物の一つである水成膜泡消火剤（Aqueous Film-Forming Foam：AFFF）は，多量の PFOS や PFOA を含有している場合があり，各地で保管された廃消火剤の適正処理が課題となっている [6),7)]．一方，焼却処理では PFAS の分解に伴いフッ化水素（HF）が副生成するため設備腐食が懸念される．このため国内では他の廃棄物と混合して処理する混焼処理が主流であり，PFAS 含有廃棄物の処理能力向上が課題となっている [6),7)].

そこで本報告では，PFOS・PFOA 含有 AFFF の効率的な処理を目的として，排ガス温度管理により HF による設備影響の低減を図った処理能力 180 L/h 級のフルスケール専焼炉を開発した．さらに，PFOS および PFOA の分解性能，フッ素収支，排ガス処理性能ならびに設備健全性を評価し，本専焼炉の適用性を検証した．

2．PFAS 含有 AFFF 専焼炉の概要

2.1 専焼炉の構成

専焼炉システムの構成を**図-1** に示す．本設備は，1 次燃焼炉，2 次燃焼炉，熱交換器および排ガス処理設備で構成される．PFAS を高温環境下で分解した後，排ガス中に生成する HF や酸性ガスを排ガス処理設備により除去するシステムとした．1 次燃焼炉では AFFF および補助燃料である A 重油を燃焼させ，2 次燃焼炉では未燃ガスの燃焼促進と PFAS の分解反応を行う構成とした．また，熱交換器および排ガス処理設備を組み合わせることで，排ガス温度を制御しながら有害物質を除去できる構成とした．

2.2 専焼炉の設計方針

従来の PFAS 含有 AFFF の焼却処理では，副生成する HF による設備腐食を抑制するため混焼処理が主流であり，処理能力に制約があった [6),7)]．本設備では，排ガス温度管理により HF による設備影響の低減を図り，専焼処理を可能とすることを目標とした．

PFAS の焼却処理では，高い分解効率を確保するとともに，副生成する HF による設備腐食や DXNs の生成を抑制することが重要である [5),9)]．そこで本設備では，PFAS の分解性能と設備健全性の両立を目的として，排ガス温度管理を設計の基本方針とした．

PFAS の分解条件として，2 次燃焼炉出口温度を 1,000°C 以上，排ガス滞留時間を 2 秒以上確保することを設計目標とした [8)~10)]．さらに，熱交換器出口までは排ガス温度を 500°C 以上に維持し，その後，排ガス処理設備により 100°C 程度まで急冷する構成とした．

一般に金属材料は 500°C 以上で表面に保護性の高い酸化被膜を形成し耐食性が向上することが知られている [11)]．このため，本設備では HF を含む排ガスが通過する熱交換器出口までの温度を 500°C 以上に維持し，設備腐食の抑制を図った．また，排ガス処理設備で排ガスを 100°C 程度まで急冷することにより，200～500°C で生じやすい DXNs のデノボ合成反応の抑制を期待した [12)]．

2.3 排ガス処理設備

排ガス処理設備には湿式スクラバー方式を採用した（**図-2** 参照）．本設備は，高速回転する攪拌翼によって洗浄水を霧状にし，高温排ガスとの接触面積を増加させることで，HF，塩化水素（HCl）および硫黄酸化物（SOx）などの酸性ガスを効率的に除去する構造である．また，洗浄水にはアルカリ剤を添加して pH を管理し，酸性ガスの除去性能と設備維持管理性の向上を図った．さらに，本設備は排ガスを急冷する機能も有しており，有害物質の除去と排ガス温度管理を同時に実施できる特徴を有する．

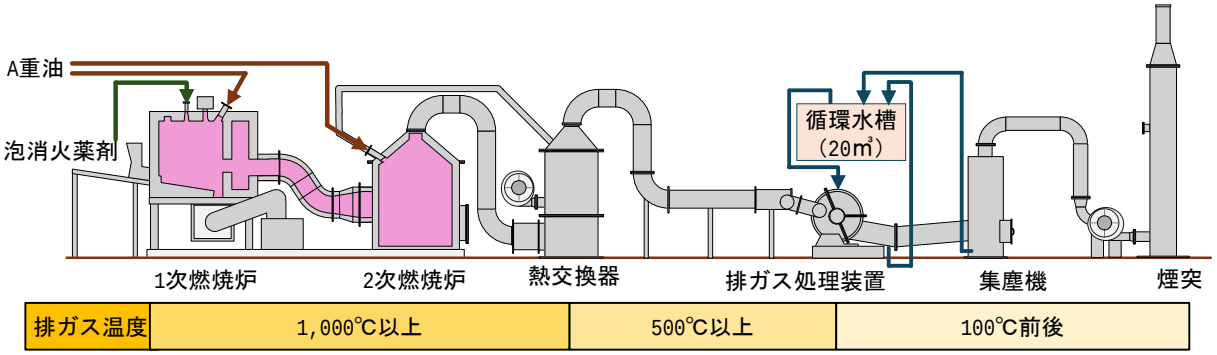


図-1 専焼炉システムの構成

3．実証試験概要

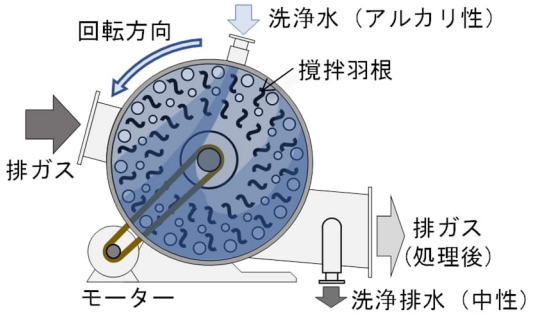
3.1 試験条件

開発した専焼炉の性能を確認するため，PFOS または PFOA を含有する AFFF を用いた焼却試験を実施した．試験では，PFOS 濃度 33 mg/kg に調整した AFFF を対象とした Run1 および PFOA 濃度 370 mg/kg に調整した AFFF を対象とした Run2 を実施した．なお，試験開始時点では排ガス処理設備における HF の処理能力が十分に把握できていなかったため，PFAS の分解に伴い発生する HF 負荷を考慮し，PFOS および PFOA の濃度は各試験で AFFF 中のフッ素濃度が概ね同程度となるよう設定した．AFFF の供給量は172～177 L/h とし，補助燃料に A 重油を併用した．また，2 次燃焼炉出口温度 1,000°C 以上および排ガス滞留時間 2 秒以上となる条件で運転を行った．試験条件を**表-1** に示す．なお，本試験では PFOS および PFOA の分解性能に加え，排ガス処理性能や設備への影響についても評価を行った．

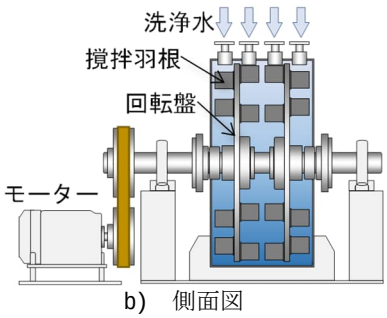
なお、SOx 発生量の指標となる硫黄分については、補助燃料として使用した A 重油の硫黄含有量が 0.07 wt%であった。また、AFFF 中の硫黄濃度は Run1 で 15,003 mg/L、Run2 で 16,000 mg/L であり、両試験条件の硫黄負荷は概ね同等であった。

表-1 Run1・Run2 の試験条件

	Run1(PFOS)	Run2(PFOA)
AFFF供給量（L/h）	172	177
運転時間（h）	4.5	3.8
A重油供給量（L/h）	29	23
PFOS濃度（mg/kg）	33	-
PFOA濃度（mg/kg）	-	370
全フッ素濃度（mg/kg）	570	340
1次燃焼炉設定温度（°C）	1,300	1,300
滞留時間（s）	2.5	2.3



a) 正面図



b) 側面図

図-2 排ガス処理設備の概要

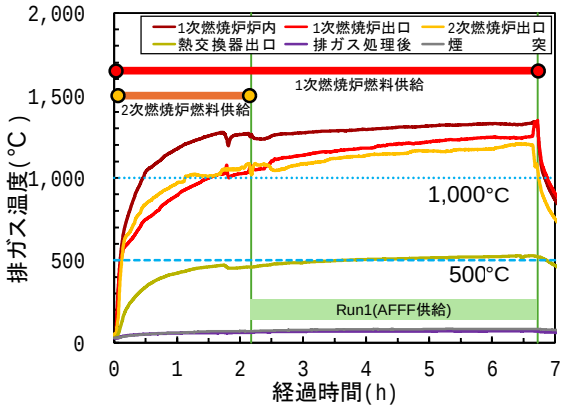
3.2 評価項目

専焼炉の性能評価は，PFOS・PFOA の分解効率，フッ素収支，排ガス処理性能および設備健全性を対象として実施した．分解効率は，環境省の技術的留意事項 [6]に準じ，処理前後の PFOS および PFOA 量から算定した．また，PFAS の無機化分解状況を確認するため，AFFF 中のフッ素量と排ガス処理設備で回収されたフッ素量との収支を評価した．

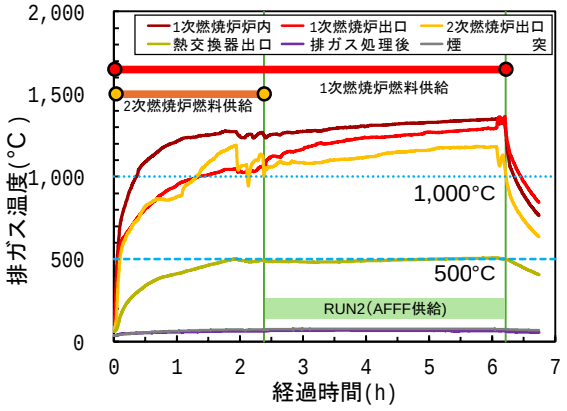
排ガス処理性能は，HF，HCl および SOx の除去性能を確認した．さらに，副生成物対策の有効性を確認するため，排ガスおよび循環水中の濃度を測定した．設備健全性については，試験終了後に煙道内部を目視観察し，HF による腐食の有無を確認した．

3.3 分析項目

AFFF，排ガスおよび排ガス処理設備の循環水を対象に PFOS，PFOA および全フッ素濃度を分析した．また，排ガス中の HF，HCl，SOx，窒素酸化物，ばいじんおよび DXNs を測定した．分析方法の詳細は既報 [13]に示す．



a) Run1(PFOS)



b) Run2(PFOA)

図-3 排ガス温度の経時変化

4．焼却処理性能評価

4.1 焼却条件

Run1（PFOS）および Run2（PFOA）の排ガス温度の経時変化を**図-3** に示す．両試験とも予熱運転により炉内温度および排ガス温度を上昇させた後に AFFF の供給を開始した．AFFF 供給開始時において，1 次燃焼炉出口および 2 次燃焼炉出口の排ガス温度はいずれも 1,000°C 以上を示した．また，AFFF 供給中も安定した燃焼状態が維持され，1 次燃焼炉出口温度は概ね 1,300°C 以上で推移した．

AFFF 供給開始後は 2 次燃焼炉への A 重油供給を停止したものの，1 次燃焼炉出口および 2 次燃焼炉出口の排ガス温度はいずれも 1,000°C 以上を維持した．これは，AFFF に含まれる有機成分が燃焼に寄与し，AFFF 自体が燃料として機能したためと考えられる．

一般に液状廃棄物の焼却処理では，焼却条件の維持のために補助燃料を継続的に供給する場合が多い．一方，本試験では AFFF 供給中においても炉内温度が安定して維持されており，専焼処理時の補助燃料使用量を低減できる可能性が示された．このことは，運転コストの低減に加え，二酸化炭素排出量の削減にも寄与することが期待される．また，本試験では Run1 および Run2 のいずれにおいても同様の傾向が確認されたことから，本試験で対象とした PFOS および PFOA 含有 AFFF に対して安定した燃焼特性が得られるものと考えられた．

また，熱交換器出口の排ガス温度は 500°C 以上を維持し，排ガス処理設備通過後の煙突温度は約 80°C で安定して推移した．さらに，滞留時間は Run1 で 2.5 s，Run2 で 2.3 s であり，設計目標である 2 s 以上を確保した．これらの結果から，本設備は PFAS の分解および副生成物対策に必要な設計条件を満足することが確認された．

4.2 PFOS・PFOA 分解性能

PFOS および PFOA の分解効率を**表-2** に示す．PFOS の分解効率は 99.99979%以上，PFOA の分解効率は 99.99996%であった．いずれの試験も環境省の技術的留意事項に示される 99.999%以上の分解効率を満足する結果であった [8]．また，排ガス中の PFOS 濃度は定量下限値（8 ng/m³N）未満であり，PFOA 濃度は 16 ng/m³N であった．さらに，排ガス処理設備循環水中の PFOS および PFOA 濃度には，焼却処理に起因すると考えられる増加は認められなかった．これらの結果から，本専焼炉は PFOS および PFOA に対して高い分解性能を有することが確認された．

4.3 フッ素収支

Run1 および Run2 におけるフッ素収支を**表-3** に示す．フッ素収支は Run1 で 112%，Run2 で 105%となり，いずれも概ね一致する結果を示した．これより，AFFF 中に含まれるフッ素は焼却処理後に排ガスおよび排ガス処理設備の循環水中で回収されていることが確認された．

表-2 PFOS・PFOA の分解効率

	Run1 (PFOS)	Run2 (PFOA)
AFFF処理量（L）	784	379
PFOSまたはPFOA濃度（mg/L）	34	379
PFOSまたはPFOA処理前質量（mg）	27,000	250,000
PFOSまたはPFOA未分解質量（mg）	0.058	0.099
PFOSまたはPFOA分解効率（%）	>99.99979	99.99996

注）未分解質量は排ガスおよび循環水中に存在する最大未処理量として算出した

表-3 フッ素収支

	Run1 (PFOS)	Run2 (PFOA)
AFFF処理量 (L)	784	660
AFFF全フッ素濃度 (mg/L)	586	349
フッ素処理前質量 (mg)	459,000	230,000
排ガス･循環水中のフッ素質量 (mg)	514,000	241,000
フッ素収支 (%)	112	105

注）排ガス･循環水中のフッ素質量は，排ガスおよび排ガス処理設備循環水中のフッ素量の合計値

PFAS の焼却処理では，分解効率に加えてフッ素収支の整合性を確認することが重要である．本試験では，フッ素収支が概ね 100%となったことから，PFAS が無機化され，炭素－フッ素結合（C-F 結合）が切断されたものと考えられた．以上より，本専焼炉は PFOS および PFOA に対して高い無機化分解性能を有することが確認された．

5．排ガス処理性能および副生成物評価

5.1 排ガス処理性能

排ガス処理性能を**表-4** に示す．HF の除去率は Run1 で 98%，Run2 で 96%を示した．また，SOx の除去率は Run1 で 79%，Run2 で 90%であった．

SOx については，大気汚染防止法に基づく規制値が設置地域および煙突条件によって異なるため，一般的な基準適合性評価は困難である．しかしながら，使用した A 重油および AFFF 中の硫黄含有量から算出した SO_2理論濃度を基準とした場合，79～90%の除去率を示しており，アルカリ循環水による酸性ガス除去効果が確認された．なお，参考として煙突高さ 6 m および K 値 9 を適用して評価した場合には，Run1 および Run2 とも規制値を満足する結果であった．

煙突での排ガス中の HF 濃度はいずれの試験でも 2.0 mg/m³N であり，環境省技術的留意事項に示される管理値

5 mg/m³N 以下を満足した[6]．また，本設備規模では HCl，NOx およびばいじんに対する規制値は設定されていないが，HCl，NOx およびばいじんの測定値はいずれも廃棄物焼却炉に適用される最も厳しい規制値を下回った．

これらの結果から，本排ガス処理設備は PFAS 含有 AFFF の焼却に伴い発生する酸性ガスの除去に有効であり，排ガスの環境安全性の観点からも良好な性能を有することが確認された．

5.2 DXNs 分析結果

DXNs 分析結果を**表-5** に示す．排ガス中の毒性等量（TEQ）は Run1 および Run2 ともに 0 pg-TEQ/m³N であった．また，循環水中の TEQ はそれぞれ 0.099 pg-TEQ/L および 0.19 pg-TEQ/L であり，水質環境基準である 1 pg-TEQ/L を下回った．これらの結果から，本設備で採用した排ガス温度管理により，DXNs のデノボ合成反応が抑制されたものと考えられた．

5.3 設備劣化状況

PFOA を対象とした Run2 終了後に煙道内部を観察した結果を**写真-1** に示す．観察の結果，煙道内面に著しい腐食や損傷は認められなかった．本設備では，熱交換器出口までの排ガス温度を 500°C 以上に維持する運転を行った結果，HF による設備腐食を抑制できたものと考えられた．以上より，本研究で採用した排ガス温度管理は HF による設備劣化対策として有効であることが示唆された．

6．実用化に向けた考察

PFAS 含有 AFFF の焼却処理では，副生成する HF による設備腐食の懸念から混焼処理が主流であり，処理能力に制約があった[6),7)]．本研究では，排ガス温度管理と湿式排ガス処理設備を組み合わせた専焼処理システムを構築し，約 180 L/h の処理条件において PFOS および PFOA に対する高い分解性能を確認した．また，フッ素収支は概ね一致し，PFAS の無機化分解が示唆された．さらに，HF，SOx および HCl などの酸性ガスの除去，DXNs 生成の抑制ならびに設備腐食の防止を確認したことから，本設備は PFAS 含有 AFFF 処理技術として高い適用性を有すると考えられる．

本試験では，AFFF 供給中も 2 次燃焼炉出口温度 1,000 °C 以上を維持できた．また，AFFF 供給開始後には 2 次燃焼炉への A 重油供給を停止しても燃焼状態を維持できたことから，AFFF に含まれる有機成分が自己燃料として機能したものと考えられる．このことは，補助燃料使用量の低減や処理コストの縮減の観点からも有効であると考えられる．

一方，PFAS 対策では，汚染水処理等に使用された PFAS 吸着済み活性炭やイオン交換樹脂の再生・無害化処理も重要な課題となっている．これらの吸着材の再生処理においても PFAS の分解に伴う HF の発生や設備腐食対策が課題となることから，本研究で得られた排ガス温度管理および排ガス処理に関する知見は，PFAS 吸着済み吸着材の再生処理技術にも適用できる可能性がある．今後は，本専焼炉で得られた知見を活用し，PFAS 吸着済み活性炭およびイオン交換樹脂の再生・無害化処理への応用の可能性について検討を進めたい．

また，本研究では PFOS および PFOA を対象として評価を実施したが，PFAS は多様な化学構造を有する物質群である．今後は，PFAS 組成や濃度の異なる実廃棄物を用いた試験を実施し，本技術の適用範囲および再現性を確認することが望まれる．さらに，長期運転時の設備劣化挙動や維持管理性についても継続的な検証が必要である．

7．まとめ

PFOS・PFOA 含有水成膜泡消火剤（AFFF）を対象とした処理能力 180 L/h 級のフルスケール専焼炉を開発し，焼却処理性能を評価した．本研究で得られた知見を以下に示す．

表-4 排ガス処理性能

		Run1 (PFOS)	Run2 (PFOA)	参考基準値
フッ化水素	排ガス濃度 (mg/m³N)	2.0	2.0	5
	除去率 (%)	98	96	-
硫黄酸化物	排ガス濃度 (mg/m³N)	428	230	-
	除去率 (%)	79	90	-
塩化水素濃度 (mg/m3N)		0.3	0.1	700
窒素酸化物濃度（ppm）		56	60	250
ばいじん濃度（g/m³N）		0.07	0.06	0.15

表-5 DXNs 分析結果

	Run1 (PFOS)	Run2 (PFOA)
排ガスTEQ（pg-TEQ/m³N）	0	0
循環水TEQ（pg-TEQ/L）	0.099	0.19



写真-1　煙道内部の状況

・ 排ガス温度管理により，2 次燃焼炉出口温度 1,000°C 以上，滞留時間 2 s 以上，熱交換器出口温度 500°C 以上および煙突温度 100°C 以下の条件で安定した焼却運転が可能であった．
・ PFOS および PFOA の分解効率はそれぞれ 99.99979%以上および 99.99996%を示し，環境省の技術的留意事項に示される 99.999%以上の分解効率を満足した．
・ フッ素収支は Run1 で 112%，Run2 で 105%となり，概ね収支が一致したことから，PFAS の無機化分解が示唆された．
・ HF および SOx に対して高い除去性能を示し，煙突排ガス中の HF 濃度は管理値 5 mg/m³N 以下を満足した．また，HCl，NOx およびばいじん濃度は廃棄物焼却炉に適用される最も厳しい規制値を下回った．さらに，DXNs の生成および設備腐食は認められなかった．
・ 本研究で得られた排ガス温度管理および排ガス処理に関する知見は，PFAS 含有 AFFF の焼却処理に加え，PFAS 吸着済み活性炭やイオン交換樹脂の再生・無害化処理技術への応用が期待される．

参考文献

1) Buck, R. C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J. M., Cousins, I. T., De Voogt, P., .and van Leeuwen, S. P. : Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins, *Integr Environ Assess Manag*, Vol. 7, No. 4, pp.513-541, 2011.
2) Obsekov, V., Kahn, L. G., and Trasande, L.: Leveraging System-atic Reviews to Explore Disease Burden and Costs of Per- and Polyfluoroalkyl Substance Exposures in the United States, *Expo Health*, Vol. 15, No. 2, pp.373-394, 2023.
3) Meegoda, J. N., Bezerra de Souza, B., Casarini, M. M., and Kewalramani, J. A.: Review of PFAS Destruction Technologies, *Int J Environ Res Public Health*, Vol. 19, No. 24, 16397, 2022.
4) Veciana, M., Bräunig, J., Farhat, A., Pype, M. L., Freguia, S., Carvalho, G., .and Ledezma, P.: Electrochemical oxidation pro-cesses for PFAS removal from contaminated water and wastewater: fundamentals, gaps and opportunities to-wards practical implementation, *J. Hazard. Mater*, Vol. 434, 128886, 2022.
5) Environmental, U. S.: Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): Incineration to Manage PFAS Waste Streams, Technical BRIEF, 2019, https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-09/documents/technical_brief_pfas_incineration_ioaa_approved_final_july_2019.pdf.
6) 草野洋平：PFOS 含有廃棄物の処理と POPs 含有の難処理物に関する取り組み，MATERIAL STAGE/技術情報協会 編，22 巻 8 号，pp. 63-69，2022.
7) 長沼誠：DIRECTION PFOS 含有消火薬剤の安全・確実な分解処理，化学物質と環境との調和をめざす情報誌，112 巻，pp. 13-15，2012.
8) 環境省環境再生・資源循環局廃棄物規制課：PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項, 2022.
9) Longendyke, G. K., Katel, S., and Wang, Y., PFAS fate and destruction mechanisms during thermal treatment: a comprehensive review, *Environ. Sci.: Process. Impacts*, Vol. 24, No. 2, 2022.
10) Winchell, L. J., Ross, J. J., Wells, M. J., Fonoll, X., Norton Jr, J. W., and Bell, K. Y.: Per- and polyfluoroal-kyl substances thermal destruction at water resource re-covery facilities: A state of the science review, *Water Environ. Res*, Vol. 93, No. 6, 2021.
11) 多根井寛志，近藤泰光：酸化スケールの相変態挙動とその制御，新日鉄住金技法，Vol. 401， pp. 91-95, 2015.
12) 葛西栄輝：高温プロセスにおけるダイオキシン類発生に関する研究動向，高温学会誌，34 巻 3 号，pp. 104-110，2008.
13) 山本達生，芳賀直樹，加藤智大，高井敦史，勝見武：フルスケール専焼炉を用いた短時間試験による PFOS・PFOA 含有水成膜泡消火剤の焼却処理性能評価，土木学会論文集，Vol.81，No.6，24-00257，2025.