

廃プラスチック助燃材の汚泥焼却炉への適用

Application of Waste Plastic Combustion Improver to Sludge Incinerator

平山 敦 HIRAYAMA Atsushi JFE エンジニアリング 技術本部 総合研究所 主任研究員【現 経営企画部】
戸村 啓二 TOMURA Keiji JFE エンジニアリング 技術本部 総合研究所 グループマネージャー
松井 威喜 MATSUI Takeyoshi JFE エンジニアリング 環境本部 アクア事業部 バイオマスプラント部

要旨

JFE エンジニアリングでは、汚泥焼却炉における化石燃料助燃材の使用量削減と廃プラスチックの国内循環利用の促進との両立を目的とし、廃プラスチック助燃材の汚泥焼却炉への適用技術の開発を進めてきた。燃焼実験および流動層式汚泥焼却炉における実機試験を通じ、廃プラスチック助燃材が汚泥焼却炉へ適用可能であることに加え、その有効性を実証した。実機試験結果を用いたコスト試算により、廃プラスチック助燃材の適用時、通常の灯油運転時と比較して助燃材コストを 60~80% 低減できることが示された。さらに、得られたデータを基に、実機の燃焼挙動を再現可能な流動層燃焼シミュレーションモデルを構築した。

Abstract:

JFE Engineering has developed technology for utilizing waste plastics as a combustion improver as a means of achieving both reduction of fossil fuel and promotion of domestic waste plastics recycling. The effectiveness of waste plastics as combustion improver was confirmed through bench-scale combustion experiments and actual plant testing carried out in bubble fluidized bed sludge incinerator. Actual plant testing revealed that, by utilizing waste plastic combustion improver, combustion improver cost could be reduced by 60-80%, compared with that of conventional operation utilizing kerosene. A simulation model for fluidized bed combustion was also developed based on the obtained data, which could simulate the combustion behavior in an actual plant.

1. はじめに

2017 年の中国における廃プラスチック輸入規制を契機とし、さらに 2021 年 1 月に改正バゼル条約が発効されたことを受け、国内廃プラスチックの輸出量は、低下傾向が続いている（図 1、参考文献 1 をもとに筆者が作成）。この間で、廃プラスチックの輸出量は年間 80 万 t 規模で低下しており、廃プラスチックの国内循環利用の促進が社会的な課題となっている。

廃プラスチックの循環利用には各種方式があり、方式別の環境負荷影響評価（LCA）が実施されているが¹、マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルに加え、固形化燃料（RPF）による熱利用についても、化石燃料代替に繋がることから高い環境負荷削減効果が示されている²。

一方で、国内汚泥焼却炉における温室効果ガスの排出量削減および運転コスト低減の観点から、助燃材として用いられている化石燃料の使用量削減が求められている。

このような状況下、当社では、汚泥焼却炉における化石燃料助燃材の使用量削減と廃プラスチックの国内循環利用の促進を両立し得る手段として、廃プラスチック助燃材

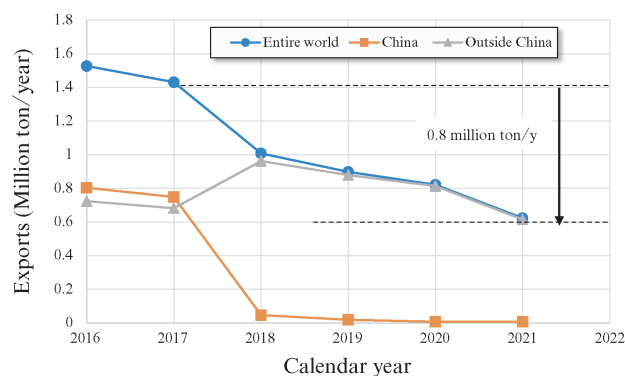


図 1 廃プラスチック輸出量の推移
Fig. 1 Changes of waste plastic exports

（以下、廃プラ助燃材）の汚泥焼却炉への適用に着目し、適用技術の開発を進めてきた³。国内汚泥焼却炉で使用されている化石燃料助燃材の全量を、熱量等価で廃プラ助燃材へ代替できた場合、その代替量は年間 12 万 t 規模と試算され、一定の役割を担えることが期待される。

まず、廃プラ助燃材適用に関する燃焼実験により、助燃材に求められる基礎物性を把握した。次に、石川県「河北郡市広域汚泥焼却センター」における実機試験を行い、廃プラ助燃材の化石燃料代替への有効性を実証し、さらに得

2022 年 3 月 31 日受付

られたデータをもとに流動層燃焼シミュレーションモデルを構築した。本稿では、一連の開発により得られた成果を報告する。

2. 廃プラ助燃材の汚泥焼却炉への適用

国内における汚泥焼却炉の形式としては、流動層式汚泥焼却炉の採用実績が多く、汚泥性状によっては含水率が高く自然しないため、灯油や都市ガスなどの化石燃料助燃材が用いられている。化石燃料助燃材を用い、流動層内の砂層を助燃バーナーで直接加熱することで砂層温度を維持し、汚泥の安定燃焼を実現している（図2左図）。

廃プラ助燃材を化石燃料助燃材の代替として適用する場合、同様に砂層を適切な燃焼温度に維持する必要がある（図2右図）。そのため、炉内へ投入された廃プラ助燃材には、砂層内へ速やかに潜り込み、かつ均一に分散して燃焼することで、その燃焼熱を砂層へ効率良く伝える着熱性が求められる。

その際、廃プラ助燃材の砂層への着熱性に寄与する重要な物性の一つとして、見掛け比重が挙げられる。すなわち、例えばフラフ等の見掛け比重が低い廃プラ助燃材を用いた場合、投入された廃プラ助燃材は砂層表層に滞留し熱分解・燃焼が進むため、廃プラ助燃材の砂層への着熱性が低く、砂層温度の低下に繋がり、安定した燃焼状態を維持できなくなるのが想定される。

一方で、見掛け比重を高くした廃プラ助燃材を用いた場合、廃プラ助燃材は砂層内部へ速やかに潜り込み、流動媒体による混合・攪拌が促進され、酸素との接触も良好に保たれることで、砂層への着熱性に優れかつ安定した燃焼状態を得られることが期待される。そこで、廃プラ助燃材の見掛け比重が砂層への着熱性および燃焼状態へ与える影響を評価するため、流動層実験炉を用いた燃焼実験を実施した。

2.1 廃プラ助燃材の試作検討

燃焼実験に用いる廃プラ助燃材の試作については、見掛け比重を高めるため、廃プラスチック原料種、成形方式（リングダイ式/スクリー式）、成形条件等を詳細に検討し

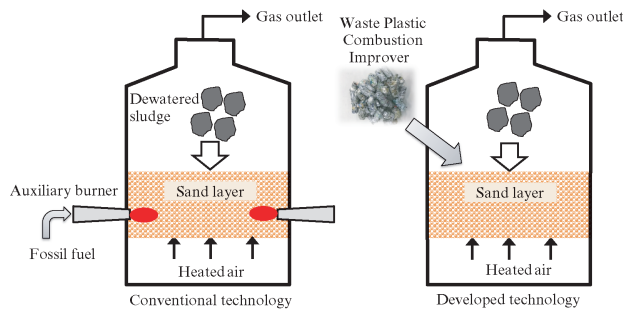


図2 流動層式汚泥焼却炉の概要

Fig. 2 Schematic diagram of fluidized bed sludge incinerator

た。その結果、原料の選定および製造方法の工夫により、一般的に入手可能な固形化燃料（RPF）を基準として、見掛け比重を1.5倍、2倍に高めた廃プラ助燃材の製造を実現した。

2.2 燃焼実験の概要

燃焼実験装置の概要を図3に、実験条件を表1にそれぞれ示す。まず、装置底部より流動化ガスとして700°Cに予熱した空気を吹込み、気泡流動層（φ150 mm、流動層高約300 mm、砂層温度750°C）を形成する。次に、炉頂部より模擬汚泥および廃プラ助燃材を一定速度で投入する。この時、本実験条件において砂層温度は模擬汚泥および廃プラ助燃材の燃焼熱により設定値750°Cより上昇するため、おおむね750°Cを保持するよう炉頂部より冷却水を連続的に供給する。助燃材の投入熱量が同じ場合、砂層への着熱性に優れる条件ほど、冷却水量が増加することから、助燃材に起因する冷却水供給量を砂層への着熱性の評価指標とした。

助燃材は、前節で述べた見掛け比重が異なる3種類（概ね1倍、1.5倍、2倍）の廃プラ助燃材を試作し用いた。また、比較対象として、実機で用いられる化石燃料助燃材（都市ガス）の代替となるメタンを砂層へ吹き込んだ系での実験データを取得した。排ガス性状については、分析計により炉出口排ガス中のO₂、CO濃度を連続測定した。

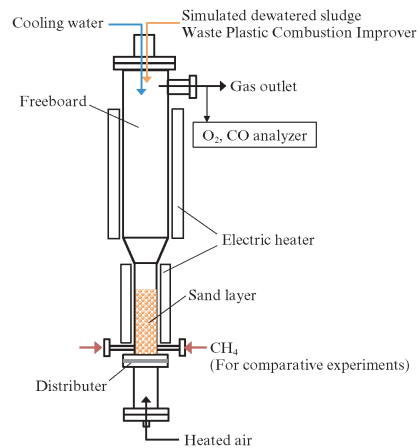


図3 燃焼実験装置

Fig. 3 Combustion experimental apparatus

表1 実験条件

Table 1 Experimental conditions

Sand layer temperature	(°C)	750
Freeboard temperature	(°C)	850~900
Superficial velocity	(m/s)	0.33
Air ratio	(-)	1.5~1.6

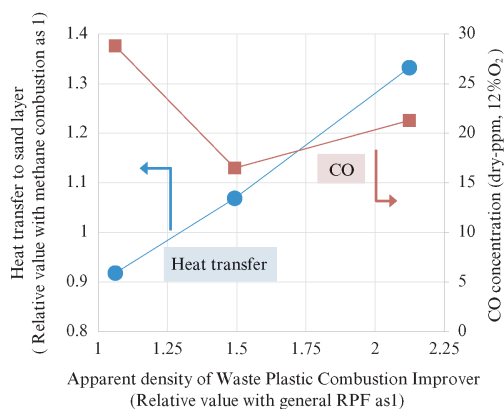


図4 燃焼実験結果

Fig. 4 Results of combustion experiment

2.3 燃焼実験結果

実験結果を図4に示す。廃プラ助燃材の見掛け比重の相対値（一般的に入手可能なRPFの見掛け比重を1とした場合）を横軸に、縦軸には各種助燃材の砂層への着熱性の相対値（メタン燃焼実験時を1とした場合）および安定燃焼の指標としてCO濃度の平均値を示す。

砂層への着熱性については、一般的に入手可能なRPF相当の見掛け比重の場合、メタン燃焼時より10%程度低い結果となったが、見掛け比重を上昇させることで着熱性が向上し、相対値1.5以上でメタン燃焼より優れた着熱性を得られることが確認された。

CO濃度についても見掛け比重の相対値を1.5以上とすることで、低減傾向を示した。着熱性向上およびCO濃度低減の要因としては、見掛け比重を高めた廃プラ助燃材の場合、投入直後に速やかに砂層内へ潜り込み、砂層内で混合・攪拌されながら熱分解・燃焼が進むことで、熱分解ガスと酸素とが十分に接触し燃焼が安定化した効果と考えられる。

本結果より、見掛け比重を高めた廃プラ助燃材を用いることで砂層への着熱性が高まり、かつ燃焼安定性を向上できる可能性が見出されたため、実機試験へと移行した。

3. 実機試験

3.1 試験目的

廃プラ助燃材の污泥焼却炉への適用性を実証することを目的とし、以下の項目について試験、評価した。

- ① 化石燃料（灯油）の全量を廃プラ助燃材に代替可能であること
- ② 廃プラ助燃材適用時のプラントの長期安定性
- ③ 廃プラ助燃材適用時の排ガス性状および飛灰性状の評価

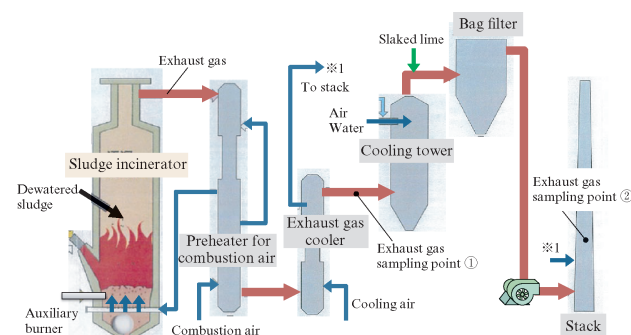


図5 実機施設フロー

Fig. 5 Schematic process flow of actual plant

3.2 試験概要

実機試験は、1997年竣工の河北郡市広域污泥焼却センター1号炉において行った。本施設のフローを図5に示す。炉形式は気泡流動層式焼却炉であり、脱水污泥の定格処理量は15t/日、助燃材として灯油が用いられている。

3.3 試験方法

廃プラ助燃材の供給方法としては、①施設構内に試験用の廃プラ助燃材貯槽と定量供給機（スクリーフィーダ）を設置し、焼却炉の砂戻しラインより廃プラ助燃材を単独で炉内へ供給、②脱水污泥と事前混合して污泥投入ラインより炉内へ供給、という2方式が考えられた。本開発では廃プラ助燃材による灯油の全量代替かつ燃焼安定化を狙うため、污泥性状（含水率、発熱量等）の変動に対し助燃材供給量（供給熱量）を迅速に追従させる必要があると考え、追従性に優れた①廃プラ助燃材の単独供給方式を採用した。

廃プラ助燃材については、前章における試作検討、燃焼実験で得られた結果をもとに、見掛け比重の相対値を1.5以上に高めた試料を実機試験用に数トン規模で製造した。

廃プラ助燃材適用時は、灯油の供給を停止し砂層温度が設定値（概ね750℃）となるよう廃プラ助燃材供給量を調整した。また、廃プラ助燃材適用時の排ガス性状を通常操業時（灯油運転）と比較するため、図5の排ガス冷却器出口と排気塔において排ガス分析を実施した。飛灰性状については、バグフィルタから排出された飛灰を採取し、分析した。

3.4 試験結果

3.4.1 脱水污泥および廃プラ助燃材の性状

実機試験中に採取した脱水污泥の分析結果を表2に示す。含水率は82~84%、低位発熱量は19MJ/dry-kg程度であった。

廃プラ助燃材に関しては、RPFのJIS規格（Z7311:2010、高位発熱量25MJ/kg以上、水分5%以下、灰分10%以下、塩素濃度0.3%以下）に準拠したものを製造し用いた。

3.4.2 連続試験結果

(1) 運転状況

試験期間中（定常運転時）に取得した灯油運転時および廃プラ助燃材適用時の運転データ（4h 平均値）を表3に示す。脱水汚泥投入量 0.65 t/h, 砂層平均温度 749~760°C, 空気比 1.5 と同等の運転状況となった。

まず、灯油供給量を絞りながら廃プラ助燃材供給量を増加させ、灯油の供給を停止した状態とし、廃プラ助燃材のみで運転することで、灯油の全量置換が可能であることを確認した。この時、両運転ともに空気比は 1.5 と同じ条件であることから、廃プラ助燃材適用時に砂層への良好な着熱性が発揮されたものと考えられる。また、廃プラ助燃材を連続投入（約 74 時間）することで、プラントの安定性を評価した。その結果、汚泥処理量に問題なく安定した運転が可能であった。

(2) 燃焼状態

表3に記載の灯油運転時および廃プラ助燃材適用時の炉内温度の推移を図6に示す。砂層温度は両条件ともに 740~770°C で推移しているが、砂層内 6 カ所（下段 3, 上段 3）の温度差の平均値を比較すると、灯油運転時が 16°C に対して廃プラ助燃材適用時は 9°C となり、廃プラ助燃材適用時は砂層内の温度差が小さく、均一な流動層が形成されることを確認した。また、廃プラ助燃材適用時の炉内燃焼温度（フリーボード最高温度）は 810~830°C 程度であり、図7に示す排ガス組成（排ガス冷却器出口）の推移より、CO, NOx 濃度はともに低位で安定していることが分かる。

以上の結果より、見掛け比重を高めた廃プラ助燃材を適用することで、廃プラ助燃材は砂層内で均一に分散して熱分解・燃焼が進み、砂層温度差が小さく安定した燃焼状態を得られることが確認された。

表2 脱水汚泥の性状

Table 2 Properties of dewatered sludge

Moisture content	(wet-%)	82~84
Ash	(dry-%)	11~15
Combustibles	(dry-%)	85~89
Low heat value	(MJ/dry-kg)	19~19.5

(3) 排ガス分析結果

廃プラ助燃材適用時、排ガス冷却器出口の NOx, SOx 濃度は灯油運転時と同等であった。廃プラ助燃材適用により影響を受ける可能性がある HCl とダイオキシン類（以下 DXNs）について着目すると、表4に示すとおり、廃プラ助燃材適用時に廃プラ由来の塩素源により HCl 濃度は多少高めの傾向を示したが、濃度上昇は限定的であり、本施設の規制値（430 ppm）よりも大幅に低い値であった。

廃プラ助燃材適用時の排ガス DXNs 濃度は、バグフィルタ処理前の排ガス冷却器出口において灯油運転時と同等以下であり、極めて低い結果が得られた。この要因として、見掛け比重を高めた廃プラ助燃材を適用したことで、安定した燃焼状態が得られ炉内での DXNs 発生量が極めて少なく、かつ未燃炭素の排出も少ないため、炉出口以降における DXNs の再合成も効果的に抑制されたためと考えられる。

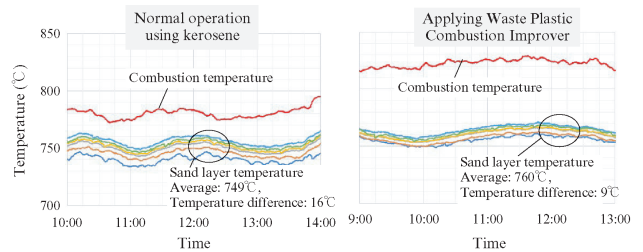


図6 炉内温度の推移

Fig. 6 Changes in furnace temperature

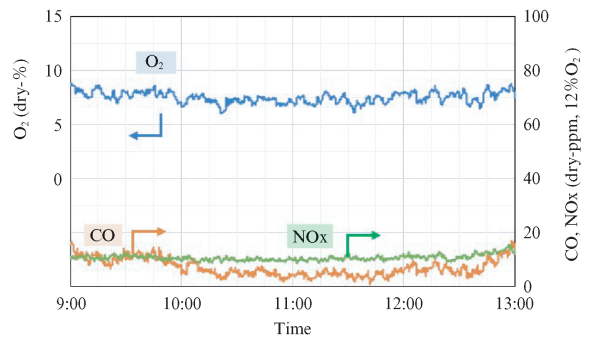


図7 排ガス組成の推移（廃プラ助燃材適用時）

Fig. 7 Changes in O₂, CO, and NO_x concentration

表3 運転結果（4h 平均値）

Table 3 Operation results (4-hour average)

		Normal operation using kerosene	Applying Waste Plastic Combustion Improver
Feed rate of dewatered sludge	(t/h)	0.65	0.65
Feed rate of kerosene	(L/h)	34	0
Feed rate of Waste Plastic Combustion Improver	(kg/h)	0	50
Average temperature of sand layer	(°C)	749	760
Air ratio	(-)	1.5	1.5

表 4 排ガス分析結果

Table 4 HCl and dioxins concentrations in exhaust gas

	Sampling point in Fig.5	Normal operation using kerosene	Applying Waste Plastic Combustion Improver	
			n1	n2
HCl (dry-ppm, 12%O ₂)	① After exhaust gas cooler	35	74	82
	② Stack	< 1.6	6.4	5.8
DXNs (ng-TEQ/m ³ N)	① After exhaust gas cooler	0.0000016	0.0000013	0.00000051
	② Stack	0	0	0

表 5 飛灰分析結果

Table 5 Leaching test results and dioxins concentration in fly ash

		Applying waste plastic combustion improver	
		n1	n2
Alkyl Hg (mg/L)	(mg/L)	ND	ND
T-Hg (mg/L)	(mg/L)	< 0.0005	< 0.0005
Cd (mg/L)	(mg/L)	< 0.001	< 0.001
Pb (mg/L)	(mg/L)	< 0.001	< 0.001
Cr6 + (mg/L)	(mg/L)	< 0.01	< 0.01
As (mg/L)	(mg/L)	< 0.001	< 0.001
Se (mg/L)	(mg/L)	0.002	0.002
DXNs (ng-TEQ/g)	(ng-TEQ/g)	0	0

表 6 コスト試算結果

Table 6 Cost calculation results

		Normal operation using kerosene	Applying Waste Plastic Combustion Improver
Type of combustion improver		<ul style="list-style-type: none"> Startup operation: kerosene Steady operation: kerosene 	<ul style="list-style-type: none"> Startup operation: kerosene Steady operation: Waste Plastic Combustion Improver
Fuel cost (Relative value)	Kerosene	100	3
	Waste Plastic Combustion Improver	0	15~36
	Total	100	18~39

(4) 飛灰分析結果

廃プラ助燃材適用時の飛灰分析結果を表 5 に示す。飛灰中 DXNs 含有濃度は、冷却器出口における排ガス DXNs 濃度と同様、極めて低い結果となった。また重金属類の溶出濃度についてはいずれも低く、基準値を満たす結果が得られ、廃プラ助燃材適用による影響は見られなかった。

3.5 廃プラ助燃材適用時のコスト試算結果

実証試験結果より得られた灯油および廃プラ助燃材の使用量をもとに、年間の助燃材コストを試算した。廃プラ助燃材の低位発熱量当りの単価を 0.2~0.4 円/MJ とした場合、灯油の低位発熱量当り単価の 14~28% に相当する。

結果を表 6 に示す。廃プラ助燃材適用時においても炉立上げ時は灯油を使用するため、灯油のコスト（使用量）は

97%低減との試算結果となった。さらに同条件における助燃材コスト（灯油+廃プラ）は、廃プラ助燃材適用により灯油使用時と比較して 60~80%程度の低減効果と試算された。

以上の実機試験結果より、廃プラ助燃材の化石燃料代替への有効性が実証されたとともに、助燃材のコスト低減にも大きく寄与することが示された。

4. 流動層燃焼シミュレーション

4.1 シミュレーションの目的

燃焼実験および実機試験により獲得したデータを活用し、流動層燃焼シミュレーションモデルの構築を図った。モデル活用により、廃プラ助燃材適用時の炉内温度分布や排ガ

ス濃度の推移等をシミュレートすることで、異なる炉形式や炉形状へ展開する際の最適な廃プラ助燃材仕様の確定や投入方法等に関するエンジニアリング的な評価が可能となる。

4.2 シミュレーションの概要

4.2.1 流動化状態の再現

まず、流動化状態を再現できることを確認するため、実機の1/20サイズでモデルを作成し、離散要素法（DEM: Discrete Element Method）によって流動媒体（珪砂）の流動化および廃プラ助燃材を砂層へ投入した時の潜り込み挙動を計算した。さらに流動層コールドモデル試験を実施し、計算で得られた挙動が実現象としても再現されることを確認した。

4.2.2 燃焼状態の再現

次に、実機試験を行った実炉と同じサイズのモデルを作成し、前項と同様の手法で流動化挙動および可燃分の燃焼について計算した。燃焼計算に用いる汚泥および廃プラ助燃材の物性値については、水分、揮発分、灰分、固定炭素などの工業分析データを与えた。

また、燃焼計算の精度を高めるため、廃プラ助燃材の熱分解速度、チャー燃焼速度などの主要な燃焼パラメータについては、2章における燃焼実験で得られた実験値を与えた。このような条件下で実機の炉内温度分布や排ガス成分濃度を計算し、得られた計算結果が実機試験結果の傾向と合致するように各種計算パラメータを調整した。

4.3 シミュレーション結果の一例

パラメータ調整後の流動層燃焼シミュレーションモデルを用い、2種類の廃プラ助燃材（助燃材仕様の最適化前および最適化後）を適用した場合の炉出口CO濃度の計算結果を図8に示す。仕様最適化前は、廃プラ助燃材の砂層内の熱分解・燃焼領域に偏りがあり、結果として炉出口CO濃度の変動が大きくかつピークの発生が見られている。

一方で、仕様最適化後の廃プラ助燃材においては、砂層内の熱分解・燃焼領域が均一化されCO濃度の変動が小さくかつ低い値で推移する結果となった。これらの計算結果は、実機試験における実際の傾向とも合致していることから、妥当なシミュレーションモデルが構築できたと考えられる。

また、構築したシミュレーションモデルを用いた計算結果例として粒子温度分布、ガス流速分布、酸素濃度分布を図9に示す。本手法により、今後新たな炉形式や炉形状へ廃プラ助燃材を適用する際の仕様最適化/設計検討のツールとしての活用が可能となる。

5. おわりに

廃プラ助燃材の汚泥焼却炉への適用を図るため、燃焼実

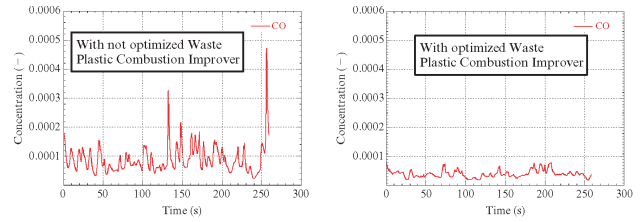


図8 シミュレーション結果（CO濃度の推移）

Fig. 8 Simulation results (changes in CO concentration)

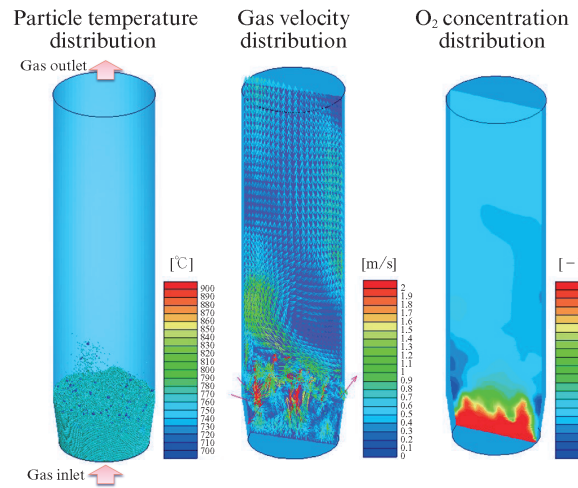


図9 流動層燃焼シミュレーションモデルの計算結果例

Fig. 9 Calculation result examples of fluidized bed combustion

験を実施した。さらに適用技術の実証を目的とし、河北郡市広域汚泥焼却センター1号炉において、見掛け比重を高めた廃プラ助燃材を適用した実機試験を行い、以下の結果を得た。

- ① 燃焼実験により、廃プラ助燃材の高比重化が砂層への着熱性向上・燃焼安定化へ寄与することが示された。
- ② 実機試験により、廃プラ助燃材による灯油の全量置換、砂層への良好な着熱性の発揮およびプラントの安定運転が可能であることを実証した。
- ③ 実機試験における廃プラ助燃材適用時、砂層内温度が均一化され、CO濃度は20 ppm以下と良好な燃焼状態が得られた。
- ④ 実機の排ガス・飛灰分析の結果、DXNs濃度は極めて低く、また全項目において施設の基準値未満となった。
- ⑤ 廃プラ助燃材適用により、灯油運転時と比較して助燃材コストの60～80%程度が低減可能と試算された。
- ⑥ 得られたデータを基に、廃プラ助燃材適用時の流動層燃焼シミュレーションモデルを構築した。

以上の結果より、廃プラ助燃材が適用可能であることに加え、その有効性が実証されたと考える。

廃プラスチックの国内循環利用に関しては、2050年の

カーボンニュートラル実現に向け、マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルが今後進められていく一方で、本格的な社会実装には時間を要すると予想される。これに対し、開発した廃プラ助燃材適用技術は、既設污泥焼却炉への適用も可能な即効性を有した手法であり、2050年へ向けた早期の社会実装が可能な技術として有効であると考えている。

当社グループでは、廃プラスチックの収集、燃料化・販売および污泥焼却炉のEPC、運営事業を手掛けており、本開発成果をもとにワンストップでの廃プラ助燃材の供給・適用が可能である。これらの特長を活かし、今後、本技術の社会実装を推進していくことで、廃プラスチックの国内循環利用促進と污泥焼却炉における化石燃料助燃材の使用量削減との両立へ貢献していく所存である。

謝辞

実機試験の実施に関して多大なるご協力を頂きました、かほく市様、津幡町様、内灘町様、河北郡市広域污泥焼却センター様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本容器包装リサイクル協会. プラスチックのくず（廃プラスチック）輸出統計. https://www.jcpa.or.jp/recycle/related_data/tabid/1019/index.php
- 2) 海洋プラスチック問題対応協議会. プラスチック製容器包装再商品化手法およびエネルギーリカバリーの環境負荷評価（LCA）. 2019, https://www.nikkakyo.org/system/files/Summary_JaIME%20LCA%20report.pdf
- 3) 平山 敦, 戸村啓二, 松井威喜ら. 廃プラスチック助燃材の污泥焼却炉への適用技術の開発. 第58回下水道研究発表会. 2021, p. 455-457.



平山 敦



戸村 啓二



松井 威喜