

〈特集〉

温室効果ガス削減を考慮した発電型汚泥焼却技術

橋本 久尚¹⁾, 馬場 圭²⁾, 羽嶋 南州³⁾, 成島 正昭³⁾
山田 健太³⁾, 新川 祐二⁴⁾, 鈴木 博子⁴⁾

¹⁾JFE エンジニアリング(株) 環境本部アクア事業部
(〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1 E-mail: hashimoto-hisanao@jfe-eng.co.jp)

²⁾JFE エンジニアリング(株) 環境本部開発センター
(〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1 E-mail: baba-kei@jfe-eng.co.jp)

³⁾川崎市上下水道局下水道部下水道計画課(技術開発担当)
(〒210-8577 川崎市川崎区宮本町1)

⁴⁾日本下水道事業団技術開発室
(〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-27)

概要

我が国の地球温暖化対策は、2050年カーボンニュートラルを基本理念とすることが定められた。下水道事業では、温室効果ガス排出量の大きな汚泥焼却プロセスにおける燃焼の高度化等が脱炭素社会に向けての重要な取組みの一つとなっている。本稿では、温室効果ガス削減に寄与可能な技術として、高効率発電技術と一酸化二窒素排出量削減技術を組合わせた新型汚泥焼却技術を紹介する。本技術は150 wet-t/日炉で温室効果ガス排出量を70%削減でき、費用回収年は耐用年数を十分下回り、既設焼却炉への追加設置が可能な技術である。

キーワード：下水汚泥、焼却、発電、N₂O削減、復水式蒸気タービン

原稿受付 2022.5.9

EICA: 27(1) 30-34

1. はじめに

我が国の地球温暖化対策は、2016年5月に「地球温暖化対策計画」が策定され、中期目標の達成に向けて取り組むことが基本方針として示された。2021年3月には「地球温暖化対策の推進に関する法律」が改正され、2050年カーボンニュートラルを基本理念として法に位置づけることが定められた。

下水道事業においては、「地球温暖化対策計画改定(令和3年10月22日閣議決定)」にて、エネルギー消費の削減、汚泥焼却プロセスからの一酸化二窒素(以下、N₂O)排出の削減、及び下水汚泥のエネルギー化(創エネ)による温室効果ガス排出量の削減等について、2030年度の目標値が示された。

また、汚泥焼却の排ガスには大気汚染物質である窒素酸化物(以下、NO_x)が多く含まれるため、温室効果ガス排出量削減とともに、大気保全の観点からNO_xの削減も求められている。

これらの背景より、下水汚泥焼却設備における未利用廃熱のエネルギー化と温室効果ガス(N₂O, CO₂)、大気汚染物質(NO_x)の同時削減は大きな課題であり、その解決のために、JFE エンジニアリング(株)、川崎市、日本下水道事業団は、国土交通省が実施する下水道革新的技術実証事業(B-DASH プロジェク

ト)^{*1}として、2017、2018年度(平成29、30年度)に、焼却廃熱の回収による高効率発電技術、および温室効果ガスであるN₂Oと大気汚染物質であるNO_xを同時に削減する局所攪拌空気吹込み(二段燃焼)技術についての性能確認と技術確立を行った¹⁾。実証研究終了後、2019年度からは、より効率的かつ安定的な運転技術の確立を目指した自主研究を継続している。

※1 国土交通省が実施する下水道革新的技術実証事業(Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology Project)であり、国土技術政策総合研究所の委託研究として実施

2. 技術の概要

2.1 高効率発電技術

高効率発電技術はFig.1に示すとおり、既設の下水汚泥焼却設備に廃熱ボイラと復水式蒸気タービン発電機を設置して発電を行うもので、既設焼却設備の排ガスを廃熱ボイラに引き込み、廃熱を回収した後に既設の排ガス処理設備に戻すフローとなっている。また、本技術ではコスト削減を図るため、既設白煙防止予熱器は使用せず、新たに廃熱ボイラの蒸気を用いた白煙防止熱交換機を設置している。

これまで、脱水汚泥約200 wet-t/日(約52 ds-t/

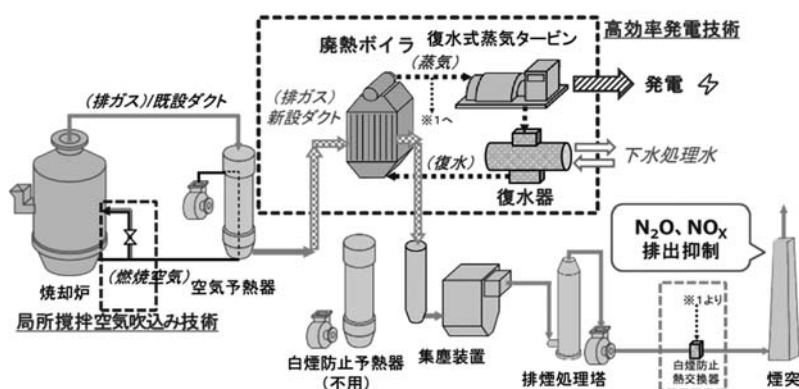


Fig. 1 本技術の概略フロー

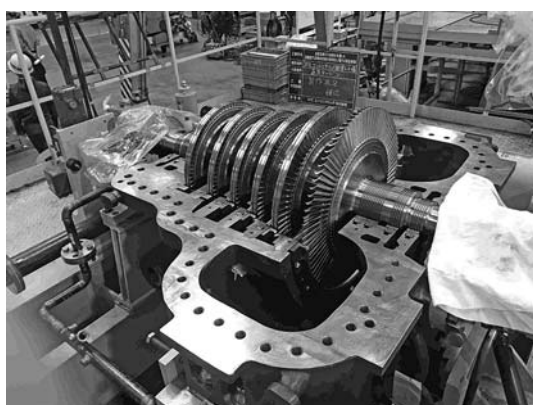


Fig. 2 新開発の小型復水式蒸気タービン

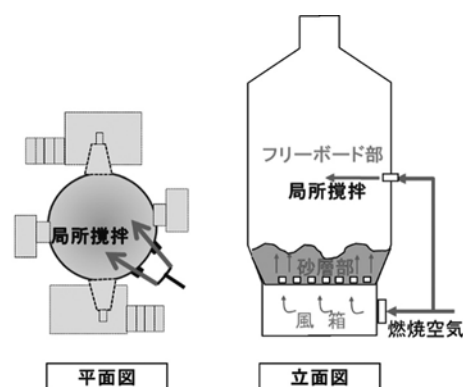


Fig. 3 局所攪拌空気吹込み技術概略図

日) 以下の焼却炉では、得られる余剰熱量が少なく、発電効率の高い復水式蒸気タービンの導入が困難であるという課題があった。当社は、この課題解決のため、これまで培ってきたタービン技術を基に、脱水汚泥約 60~300 wet-t/日 (約 16~78 ds-t/日) においても、高効率発電が可能な小型復水式蒸気タービンを新たに設計・開発した。更に、豊富な下水処理水を冷却水として活用し発電効率の最大化を図ることで、150~1,500 kW の高効率発電を可能とした。本技術で創出した発電電力を利用することで、焼却設備における CO₂ 排出量の削減を可能とした。新開発の小型復水式蒸気タービンを Fig. 2 に示す。なお、復水式蒸気タービン発電機と廃熱ボイラを有する発電設備はダクトを切り回すことで設置可能であるため、新設のみならず既設焼却設備への追加設置が可能である。

2.2 局所攪拌空気吹込み (二段燃焼) 技術

局所攪拌空気吹込み技術の概略図を Fig. 3 に示す。本技術は、焼却炉のフリーボード部に局所攪拌空気吹込み設備を新たに設置し、燃焼空気を風箱に送る一次空気とフリーボード部に送る二次空気に振り分けることで、フリーボード部での燃焼を促進し、炉内の広範囲で高温化を図るものである。炉内の広範囲で高温化を図ることで N₂O 排出量を抑制するとともに、砂層

へ供給する空気量を制限することで NO_x 排出量を抑制する。本設備は炉付近の限られたスペース (2.5×2.0 m 程度) に設置可能であり、低コストであるとともに、既設焼却炉付帯機器との干渉が少なく追加設置が可能である。

3. 実証試験結果

3.1 実証フィールド

本実証設備は川崎市入江崎総合スラッジセンターに設置した。同センターは川崎市の4つの水処理センターで発生する下水汚泥全てを集中焼却処理している汚泥処理施設である。実証設備は3系焼却設備に設置している。また、2021年度に実証結果を基に構築した制御を組込んだ局所攪拌空気吹込み技術を2系焼却設備に水平展開した。2系、3系焼却設備は同型であり、仕様を Table 1 に示す。

3.2 高効率発電技術

(1) 新開発 小型復水式蒸気タービン性能確認結果

蒸気量を変化させ、運転可能範囲を確認した結果を Fig. 4 に示す。グラフ上の直線は実証設備で設置した小型復水式蒸気タービン発電機の設計値を示しており、実証運転結果がこの直線上にプロットされるこ

Table 1 2系および3系焼却設備仕様

項目	仕様	備考
汚泥種類	混合生汚泥	集約処理
炉形式	流動床式焼却炉	気泡流動
設計焼却量 (ds-t/日)	40	約 150 (wet-t/日)
含水率 (%)	74.75 (72.5~77.0)	
可燃分 (%)	83.5 (77.0~90.0)	固形分中
燃焼温度	850℃	
排ガス処理形式	セラミックフィルタ +排煙処理塔	

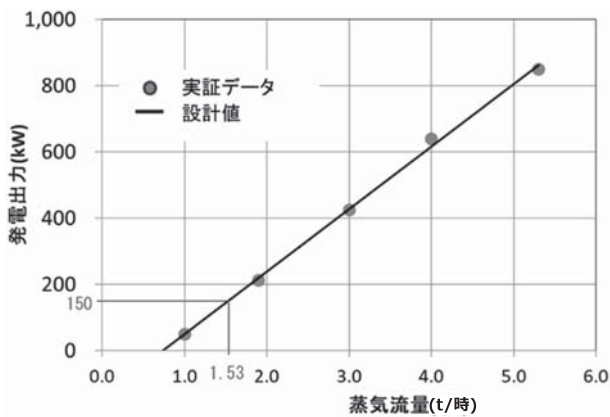


Fig. 4 復水式蒸気タービン性能

Table 2 季節ごとの高効率発電技術運転結果
(太字下線部は電力自立)

	春季		夏季		秋季		冬季
	定格	低含水	定格	低含水	定格	低含水	定格
焼却量 (wet-t/日)	150	138	150	136	151	140	154
含水率 (%)	74.7	71.6	72.9	72.2	75.6	73.1	75
投入熱量 (GJ/時)	14.9	17.8	16.6	18.8	14.8	15.8	15.4
発電出力 (kW)	420	690	605	730	448	683	385*
消費電力 (kW)	529	559	552	563	567	569	560

*焼却設備の安定運転ができず、炉内温度上昇にエネルギーを要したため、低い発電量となっている。

とから設計通りの能力を発揮していることが確認できる。また、適用範囲の下限である焼却設備 60 wet-t/日 (16 ds-t/日) 程度から得られる蒸気発生量 1.53 t/時において発電出力 150 kw の発電運転が可能であることを確認した。

(2) 高効率発電技術の安定性評価

各季節の定格負荷 (150 wet-t/日) における高効率発電技術の運転結果を Table 2 に示す。

冬季は焼却設備の安定運転ができず、炉内温度上昇にエネルギーを要したため、低い発電出力となっている。なお、焼却設備の安定運転ができなかった冬季を除き、春季、夏季、秋季は低含水汚泥での運転結果を併記した。焼却設備の安定運転ができなかった冬季を除き、季節ごとの含水率等の汚泥性状の変化に伴い、

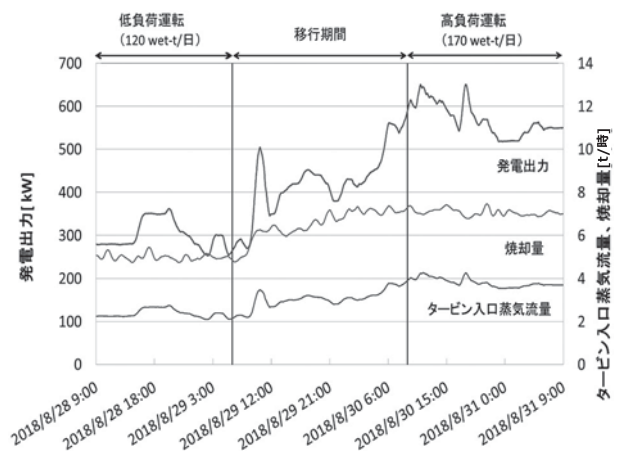


Fig. 5 負荷変動に対する高効率発電運転結果

焼却設備への投入熱量が変化し、投入熱量に応じた発電出力が得られ、安定した高効率の発電運転が可能であることを確認した。本技術によるエネルギー利活用は脱炭素社会への第一歩となると考えられる。なお、低含水試験を実施した期間において、焼却設備消費電力と発電設備消費電力の合計値を発電出力が上回る電力自立を確認した。

汚泥処理の負荷変動による高効率発電技術への影響を評価するため、汚泥処理量を増加させた運転を行った。Fig. 5 に汚泥焼却量を 5.0 wet-t/時 (120 wet-t/日) から 7.0 wet-t/時 (168 wet-t/日) に約 40% 増加させた場合の運転結果を示す。焼却設備への投入熱量の増加に伴い、タービン入口蒸気流量の増加とそれに伴う発電出力の増加が見られ、高効率発電技術は負荷変動においても安定した運転が可能であることが確認された。

3.3 局所攪拌空気吹込み技術

Table 3 に 3 系焼却設備定格運転条件下における局所攪拌空気吹込み技術の運転結果の一例を示す。なお、局所攪拌空気吹込み実施、停止ともに約 9 時間運転した結果である。

N₂O 削減効果については、実証運転において測定した平均 N₂O 排出濃度および焼却汚泥当たりの平均排出係数で評価を行った。比較対象は、同一実証期間で局所攪拌空気吹込み技術停止中の平均値を用いた。NO_x削減効果については、実証運転における平均排出濃度を用いて評価を行った。比較対象は、局所攪拌

Table 3 3系での局所攪拌空気吹込み技術運転結果

			局所攪拌空気		削減率 [%]
			なし	あり	
N ₂ O	濃度	ppm-12%O ₂	88	41	53
	排出係数	kg-N ₂ O/wet-t	0.494	0.232	
NO _x	濃度	ppm-12%O ₂	52	13	75

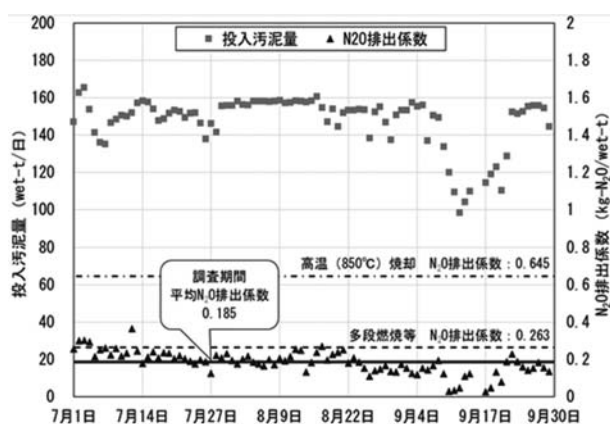


Fig. 6 2系での連続運転結果

空気吹込み技術設置以前の3系焼却設備の平均NO_x排出濃度を用いた。

局所攪拌空気吹込みを実施することにより、実証フィールドにおいてN₂O排出係数及びNO_x排出濃度を同時に50%以上低減させることが可能であること、N₂O排出係数は、多段吹込燃焼式流動床炉等のN₂O削減技術と同程度(0.263 kg-N₂O/wet-t)²⁾以下に低減できることを確認した。

2系焼却設備における2021年7月から9月までの運転結果をFig. 6に示す。調査期間において汚泥投入量は焼却設備の定格負荷量である150 (wet-t/日)で概ね運転しており、調査期間中の平均N₂O排出係数は0.185 (kg-N₂O/wet-t)であった。また、汚泥投入量が少ない(120 (wet-t/日)程度以下)条件を除外した場合は0.195 (kg-N₂O/wet-t)であり、多段吹込燃焼式流動床炉等のN₂O排出係数0.263 (kg-N₂O/wet-t)²⁾以下を安定して達成できることを確認した。また、2020年度までの3系焼却設備における平均N₂O排出係数0.21 (kg-N₂O/wet-t)³⁾をさらに下回る数値であり、2020年度までの自主研究の成果を基に構築した局所攪拌空気吸込み制御システムによる効果であると考えられる。

4. 導入効果

本技術を導入した場合の温室効果ガス排出量削減効果、エネルギー消費量削減効果、費用回収年について検討を行った。試算条件をTable 4に示す。ここで、含水率、有機分、高位発熱量は実証フィールドにおけ

Table 4 試算条件

項目		内容
含水率	%	74.0
有機分	%	86.4
高位発熱量	kJ/kg-DS	19,890
処理規模	wet-t/日	150
炉形式	—	流動床式焼却炉

る分析結果の平均値とした。なお、含水率などの汚泥性状や処理規模が変化した場合の試算結果は、技術導入ガイドライン(案)¹⁾を参照頂きたい。

4.1 温室効果ガスおよびエネルギー消費量削減効果

実証設備における電気由来の温室効果ガス排出量、N₂O由来の温室効果ガス排出量、発電によるCO₂由来の温室効果ガス削減量を試算し、従来の流動床式焼却設備を従来技術として比較した結果をFig. 7に示す。ここで、従来型の流動床式焼却設備のN₂O排出係数は0.645 kg-N₂O/wet-tとし、電力に伴うCO₂発生量は、電力量に温室効果ガス排出量原単位を乗じて算出した。また、実証した入江崎総合スラッジセンターの脱水汚泥は自然するため補助燃料は試算に含めていない。

また、実証設備のエネルギー消費量(電力)、発電によるエネルギー創出量を試算し、従来の流動床式動焼却設備を従来技術として比較した結果をFig. 8に示す。

試算条件において、本技術を導入することで、温室効果ガス排出量は局所攪拌により52%、高効率発電により18%、合計70%の削減が、エネルギー消費量は約98%の削減が期待できることが示され、本技術の適用が脱炭素社会に大きく貢献できることを確認し

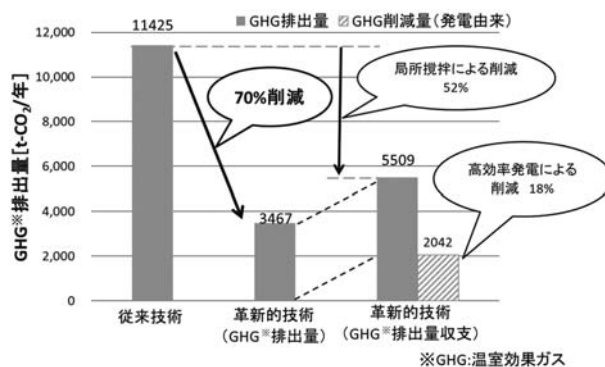


Fig. 7 温室効果ガス削減効果

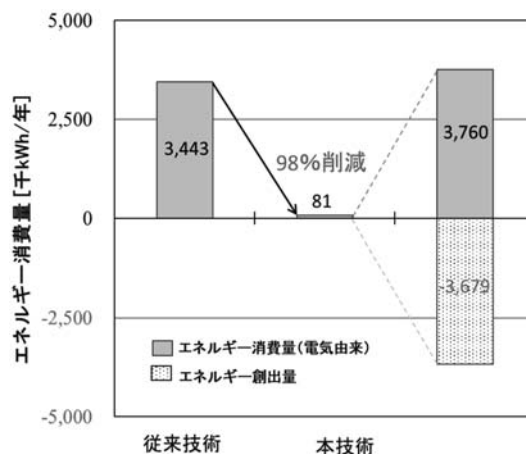


Fig. 8 エネルギー消費量削減効果

た。なお、試算条件のうち、含水率を72%とし投入熱量を増加させることで、発電量が消費電力を上回る電力自立が可能となる。

4.2 経済性

本技術を焼却設備に追加設置した場合の費用回収年試算結果を **Table 5** に示す。ここで、建設費は国庫補助制度等を考慮しない場合と、補助率55%と仮定した場合を記載した。また、表中の導入効果は、電力削減効果と、高効率発電技術導入により休止する白煙防止設備の動力、整備、交換等が不要となる効果である。

150 wet-t/日の焼却設備に追加設置した場合の費用回収年は、補助率を55%と仮定した場合5.4年となり耐用年数15年⁴⁾に対して十分に短く、補助を考慮しない場合も12年となり耐用年数を下回った。

Table 5 費用回収年試算結果

処理規模 [wet-t/日] (固形物量) [DS-t/日]	150 (39)	
国庫補助制度等の考慮	なし	補助率 55%と仮定
工事費 [百万円/年]	65.1	29.4
維持管理費 [百万円/年]	18.8	18.8
導入効果 [百万円/年]	-88.1	-88.1
費用回収年 [年]	12.0	5.4

4.3 耐久性, 操作性

高効率発電技術である復水式蒸気タービンは、ごみ焼却設備やバイオマス発電設備で実績があり、耐久性、安全性は高いと考えられる。ボイラも、下水汚泥焼却設備では乾燥設備の熱回収用等に広く用いられており、耐久性、安全性に問題はない。また、下水汚泥焼却廃熱を活用した発電としては東京都において20年程度の実績がある⁵⁾。本技術の運転、操作については、長い運用の中で確立されており、運転の自動化が可能である。

局所攪拌空気吹込み技術は、下水汚泥焼却炉と同様の設計をしており、タービンやボイラ設備のように高速回転機器や稼働設備がないため、耐久性や安全性は高いと考えられる。また、自動化も確認済みであり、容易な運転・操作性を有している。

5. おわりに

本技術は、実証運転において、安定した高効率発電運転が可能であること、 N_2O 、 NO_x の同時削減が可能

であることを確認した。また、試算の結果、150 wet-t/日の焼却設備に本技術を導入することで、温室効果ガス排出量の約70%削減と、エネルギー消費量の約98%削減が期待でき本技術の適用が脱炭素社会に大きく貢献できることを確認した。

下水道事業において、国の補助を受けて汚泥焼却設備の新規設置や改築を行う場合、エネルギー効率に優れた技術の導入が必須とされているが、本技術は求められる性能を満たすことが可能である。また、新設焼却設備のみならず、導入が困難であった既存施設についても効果的に地球温暖化対策に取り組むことができる技術で、費用回収年は補助率を55%とした場合5.4年、補助を考慮しない場合12年と短い。今後は、さらなる技術的知見の蓄積に努めていきたい。

本技術は「OdySSEA (オデッセア)」^{*2} として商品化しており、国内外への普及展開を図り、脱炭素社会構築に向け貢献していきたい。

※2 新技術の名称。Ody (汚泥), Smart (賢く), Superior (優れ), Ecological (環境にやさしく), Advanced (先進的) に由来し、「新型汚泥焼却技術」の先進性を表現

謝辞

本実証研究は、2017、2018年度下水道革新的技術実証事業 (B-DASH プロジェクト) として、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究により実施されたものです。実証研究にご協力頂いた共同研究体の関係者各位、貴重なご意見を頂いた下水道革新的技術実証事業評価委員会の委員各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, B-DASH プロジェクト No. 27 温室効果ガス削減を考慮した発電型汚泥焼却技術, 国土技術政策総合研究所資料 No. 1093, (2019)
- 2) 環境省・国土交通省, 下水道における地球温暖化対策マニュアル～下水道部門における温室効果ガス排出抑制等の指針～ (2016)
- 3) 菅原充ら, 「川崎市における下水道革新的技術実証事業 (B-DASH プロジェクト) の自主研究」, 第58回下水道研究発表会講演集, pp. 458-460, (2021)
- 4) 国土交通省都市・地域整備局下水道部, 「バイオソリッド利活用基本計画 (下水汚泥処理総合計画) 策定マニュアル (案)」, (2011)
- 5) 中村功ら, 「汚泥処理プラントへの効率的廃熱回収制御システムと蒸気発電設備の導入についての報告」, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 1, No. 2, p. 222, (1996)