

1. 装置の詳細説明

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、脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会にて、下水道が有するポテンシャルの最大活用、温室効果ガスの積極的な削減、地域内外・分野連携の拡大・徹底が方針として示されている。

下水汚泥焼却設備は消費エネルギーが大きく、排ガス中には温室効果ガスである一酸化二窒素 (N_2O と記載) 及び大気汚染物質である窒素酸化物 (NO_x と記載) が多く含まれるため、温室効果ガス削減とともに、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有効活用と温室効果ガス (N_2O 、二酸化炭素 (CO_2 と記載))、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式会社、日本下水道事業団、川崎市上下水道局は、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})の採択を受け、2017、2018年度に、焼却廃熱の回収による①高効率発電技術、及び N_2O と NO_x を同時削減する②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。

本設備の概略フローを図表1に示す。既設の下水汚泥焼却設備に廃熱ボイラと蒸気タービン発電機を設置して発電を行うもので、既設の従来型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。蒸気タービン発電機には復水式蒸気タービンを採用し、さらに、下水処理水の冷熱を活用した復水器を採用することで、高い発電効率を有する設備となっている。

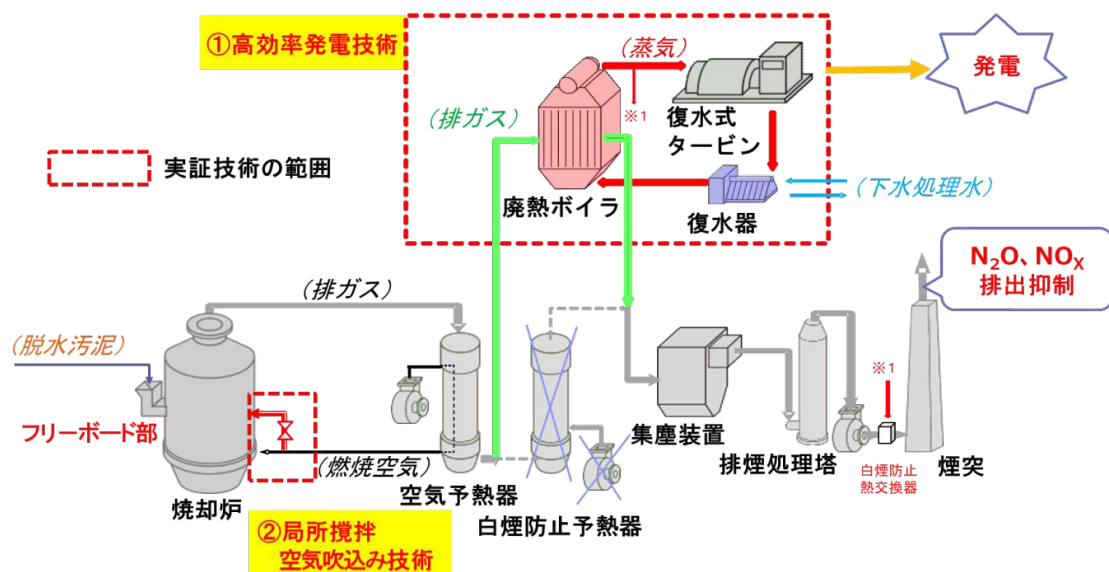
また、焼却炉本体には、燃焼空気の一部を分岐してフリーボード (FB と記載) 部に吹き込むことのできる、局所攪拌空気吹込み設備を設置して N_2O 、 NO_x を同時に削減する。

蒸気タービンの原理概要を図表2に示す。タービンは固定翼ノズルから噴射された蒸気をタービン翼で回転エネルギーに変換し発電機を回すエネルギーとしている。固定翼とタービン翼は多段に設置され、各段で蒸気エネルギーを効率的に回収できるように、翼の大きさやノズルの大きさ・間隔が設計されている。

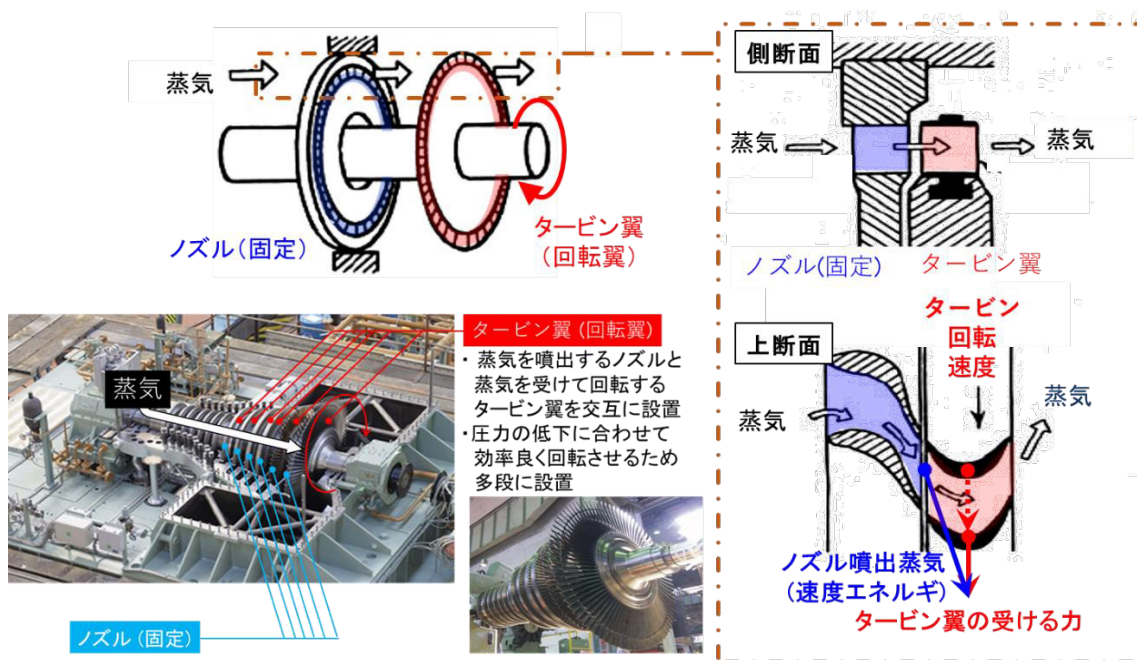
一般的に N_2O は燃焼温度を上昇させると分解が促進され、削減が可能であるが、燃焼温度を上げることにより NO_x が増加するトレードオフの関係にある。局所攪拌空気吹込みによる N_2O と NO_x の削減メカニズムを図表3に示す。砂層では流動空気 (1次空気) を減少させて燃焼を

抑制し還元物質であるシアン (HCN と記載) やアンモニア (NH₃ と記載) を多く発生させる (図中①)。FB 下部では HCN や NH₃ により NO_x を分解・抑制する (図中②)。FB 上部では局所攪拌空気での燃焼により高温場が発生することで N₂O を分解する (図中③)。これらの作用で N₂O と NO_x の同時削減を行う。

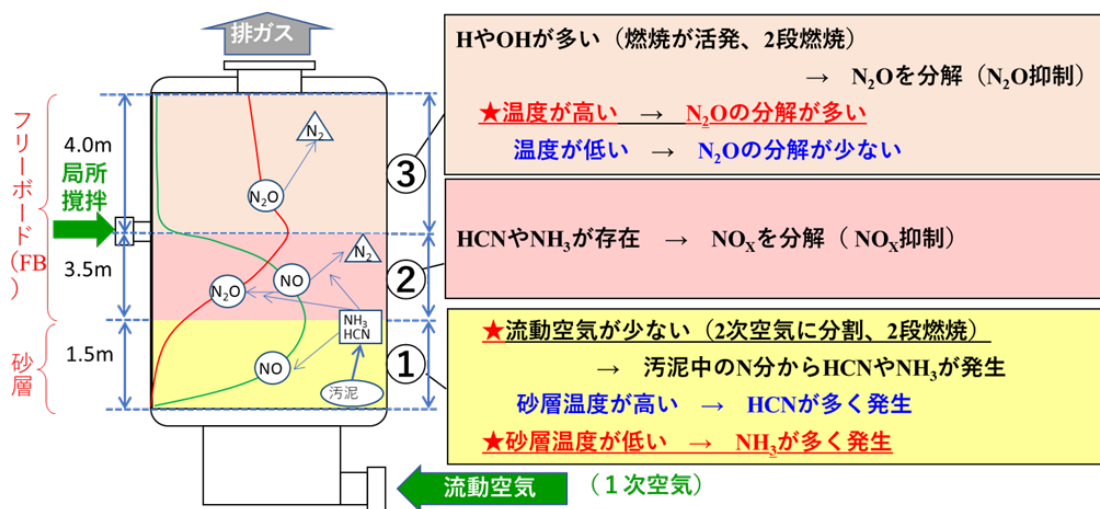
※1: 国土交通省が実施する下水道革新的技術実証事業 (Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology Project) であり、国土技術政策総合研究所の委託研究として実施



図表 1 本設備の概略フロー



図表 2 蒸気タービン原理概要



図表3 N₂O と NO_x 削減メカニズム

2. 開発経緯

(1) 開発の趣旨及び目標

世界的な温室効果ガス削減とエネルギー削減ニーズの急激な高まりにより、下水道においてバイオマスの有効活用と CO₂ の約 300 倍の温室効果がある N₂O の削減が大きく求められるようになった。

下水汚泥焼却設備は消費エネルギーが大きく、排ガス中には温室効果ガスである N₂O 及び大気汚染物質である NO_x が多く含まれるため、温室効果ガス削減とともに、大気保全の観点から NO_x の削減も求められている。

下水汚泥焼却炉での発電については、得られる余剰熱量が少なく、発電効率の高いタービンの導入は焼却汚泥量 200wet-t/日以上の大規模焼却炉に限られるという課題があった。また、N₂O 削減を目的とした技術については、燃焼空気の一部を焼却炉 FB に吹込む二段燃焼技術があるが、焼却炉 FB 全周に吹込み配管を設置しているため、コストが高く、空きスペースが少ない炉周りへの追加設置が困難であるという課題があった。

これらの課題を解決し広く国内外への普及を図ることを目的に、以下を目標として本設備を開発した。

- ・脱水汚泥 60～300wet-t/日の中大規模焼却炉に適用できる高効率発電技術を開発すること
- ・局所攪拌空気吹込み技術は局所攪拌空気吹込みがない場合に比べ N₂O と NO_x を同時に 50%以上削減でき、N₂O は他の多段吹込燃焼式流動床炉等以下に削減できること
- ・高効率発電技術及び局所攪拌空気吹込み技術ともに既設焼却設備への追加設置が容易であること

(2) 開発経緯

2010 年度	局所攪拌空気吹込み技術の実験室規模の基礎研究開始
2013 年度	高効率発電技術の実験室規模の基礎研究開始
2013～2016 年度	JFE エンジニアリング株式会社と川崎市上下水道局による局所攪拌空気吹込みに関する共同研究を実施し技術を構築

2015～2016 年度	日本下水道事業団と JFE エンジニアリング株式会社の共同研究「焼却発電設備の導入促進に向けた技術開発」としてフィージビリティスタディーを実施し、技術を構築
2017～2018 年度	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)に採択。川崎市入江崎総合スラッジセンター(3系)に高効率発電技術及び局所攪拌空気吹込み技術を適用した実施設(150 wet-t/日)を設置し運転
2019 年度～	B-DASH プロジェクト実証研究完了後、自主研究を実施し、現在まで継続中(第1号機)

(3) 共同開発

JFE エンジニアリング株式会社、日本下水道事業団、川崎市上下水道局の役割を以下に記す。

- ・ JFE エンジニアリング株式会社 :
基礎原理の構築、N₂O 削減及び発電技術の構築と設計手法確立、実施建設
- ・ 日本下水道事業団 :
発電技術の構築、実証計画の立案と N₂O 削減及び発電技術の評価
- ・ 川崎市上下水道局 :
N₂O 削減技術の構築、実証設備の運転管理性、省エネ性の確認と改善

(4) 技術導入

無し

3. 独創性

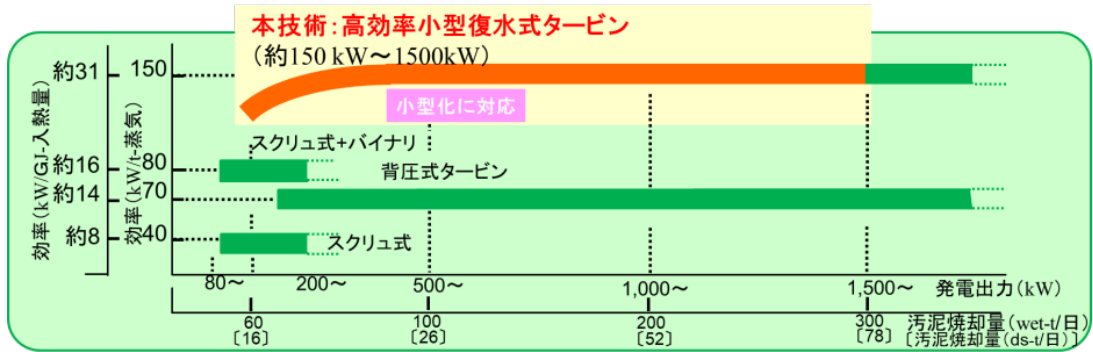
(1) 高効率発電技術

図表 4 に下水汚泥焼却における発電技術の比較を示す。これまで、国内下水汚泥焼却炉の大半を占める約 200wet-t/日(約 52DS-t/日)以下の焼却炉では、得られる余剰熱量が少なく、発電効率の高いタービンの導入が困難であるという課題があった。この課題解決のため、JFE エンジニアリング株式会社は、脱水汚泥約 60～300wet-t/日(約 12.6～78DS-t/日)においても、高効率発電を可能とする小型復水式蒸気タービンを新たに設計・開発した(図表 5)。

機械的な強度等の制約によりタービン本体は小さくできる限界がある。そのため、前述図表 2 に記載した固定翼側とタービン翼側のノズルをこれまでと同様の考えで設計すると蒸気の噴出速度が低下しタービン翼で受けるエネルギー効率が低下し高効率発電が不可能となる。JFE エンジニアリング株式会社は、これまで培ってきたタービン技術を基に、ノズルの間隔、大きさなどを最適化し高効率発電が可能な小型タービンを開発した。

さらに、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った。空冷式と水冷式の発電効率の比較を図表 6 に示す。タービン効率は蒸気の入口と出口のエネルギー差(温度差、圧力差)が大きいほど増加する。同図に見られるとおり、下水処理場の豊富に存在する処理水を冷熱として活用することで出口蒸気を冷却・凝集させ、タービン背圧を真空近くまで低下させた。その結果、空冷式に比べ蒸気の入口と出口のエネルギー差が拡大し発電効率を 1.2 倍に増加させることを可能とした。

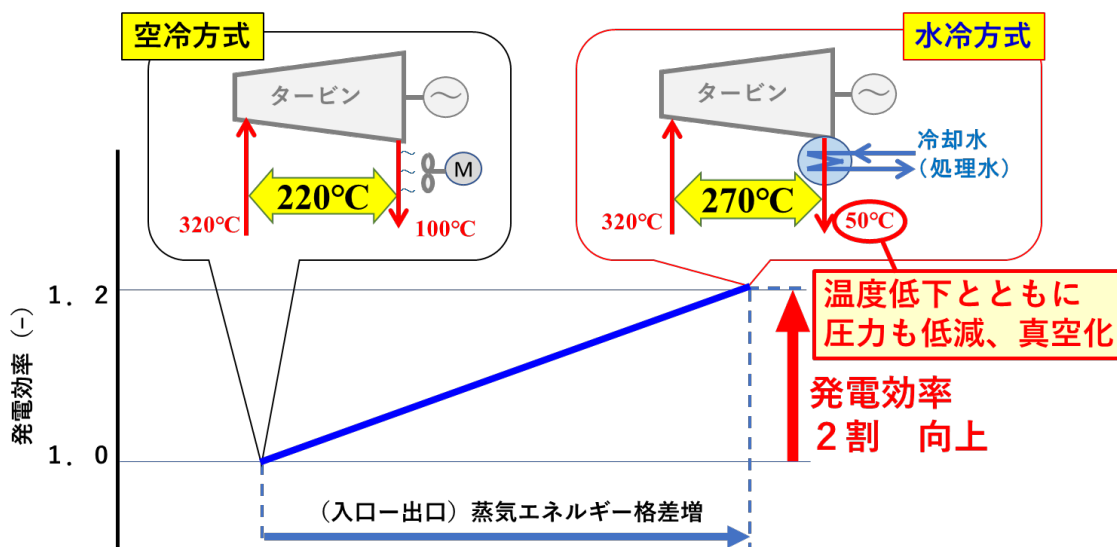
これらの独自性を組合せ 150~1,500kW の高効率発電を可能とした。なお、発電設備はダクトを切り回すことで設置可能であるため、新設のみならず既設焼却炉への追加設置が可能である。



図表 4 発電技術の比較



図表 5 小型復水式蒸気タービン



図表 6 下水冷熱活用による発電効率の増加

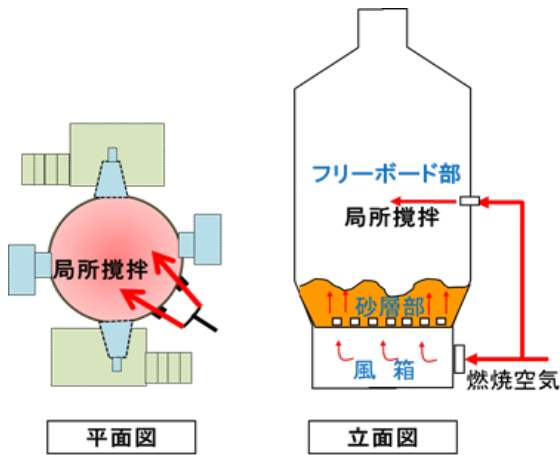
(2) 局所攪拌空気吹込み技術

N₂O 削減技術として、燃焼空気の一部を分岐して FB 部に効率的に吹き込む、局所攪拌空気吹込み技術を導入して N₂O、NO_x 排出量同時削減を実現した。局所攪拌空気吹込み技術の概略図を図表 7、図表 8 に示す。

局所攪拌空気吹込み技術では、数少ない空気吹込みノズルで FB 内に十分な高温場を発生させて N₂O を分解除去することが必要となる。そのため、JFE エンジニアリング株式会社が蓄積してきた燃焼シミュレーション技術を活用し、ノズルの位置、吹込み角度、吹込み流速などを検討し設計に繋げた。シミュレーションの一例を図表 9 に示す。

図表 10 に従来の多段吹込燃焼式流動床炉等の一例との比較を示す。従来技術では焼却炉 FB 全周に吹込み配管を設置しているため、空きスペースが少ない炉周りへの追加設置が困難である。本技術は炉付近の限られたスペース (2.5×2.0m 程度) に設置可能であるため、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容易である。

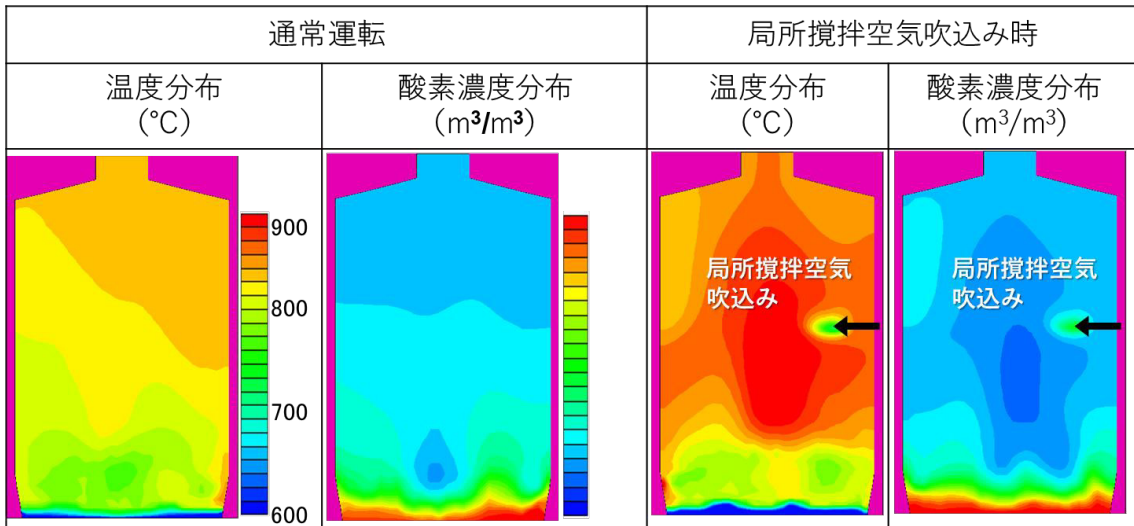
これらの独自性を有する本技術を適用することで、CO₂ の約 300 倍の影響力を持つ温室効果ガスである N₂O は開発目標とした従来技術と同等の削減が可能である。



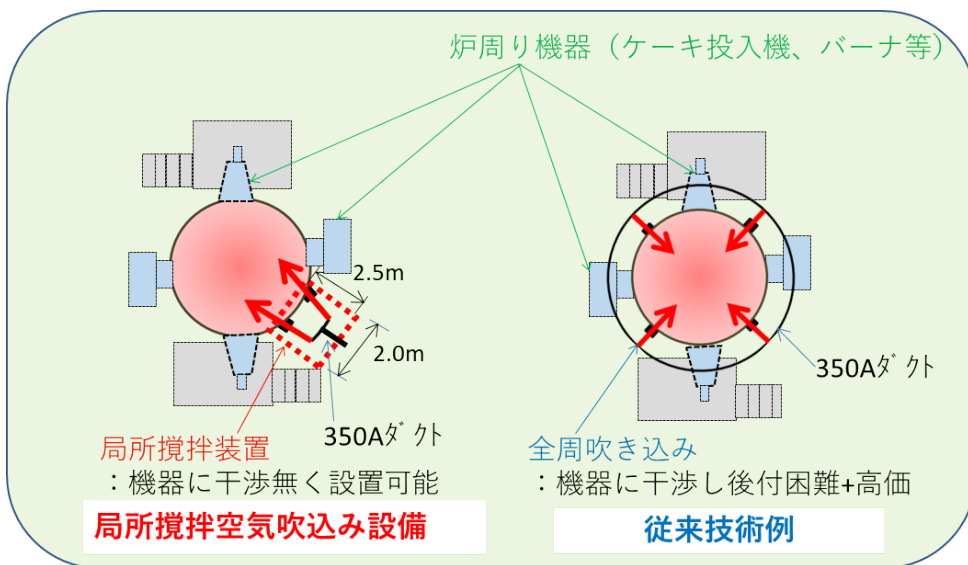
図表 7 局所攪拌空気吹込み技術概要



図表 8 局所攪拌空気吹込み技術設置状況



図表 9 シミュレーション解析結果



図表 10 従来技術との比較

4. 特許の有無

次のとおり、特許 3 件を取得済み、1 件を出願中。

特許番号：第 6466286 号

／ 名称：流動床式汚泥焼却炉における汚泥燃焼方法、流動床式汚泥焼却炉

特許番号：第 6701577 号 / 名称：廃棄物焼却システム

特許番号：第 6766772 号

／ 名称：下水汚泥焼却設備における廃熱を利用した発電システム及び発電システムの運転方法

公開番号：特開 2021-162192

／ 名称：流動床式汚泥焼却炉及び流動床式汚泥焼却炉の自動燃焼制御方法

5. 性能

(1) 新開発した小型復水式蒸気タービン性能確認結果

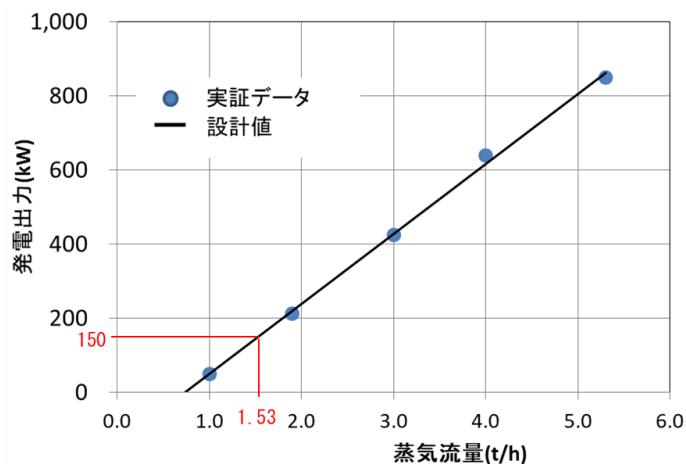
蒸気量を変化させ、タービンの運転可能範囲を確認した結果を図表 11 に示す。グラフ上の直線は実証設備で設置した蒸気タービン発電機の設計値を示しており、実証運転結果がこの直線上にプロットされることから設計どおりの能力を発揮していることが確認できる。また、適用範囲の下限である焼却設備 60wet-t/日 (16ds-t/日) 程度から得られる蒸気発生量 1.53t/h において発電出力 150kW の発電運転が可能であることを確認した。

(2) 高効率発電技術の季節変動に対する安定性評価

各季節の定格負荷 (150wet-t/日) における高効率発電技術運転結果を図表 12 に示す。

冬季は焼却炉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。なお、焼却炉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。

焼却炉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、焼却炉への投入熱量が変化し、投入熱量に応じた発電量が得られ、安定した発電運転が可能であることを確認した。なお、低含水汚泥での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。



図表 11 高効率復水式蒸気タービン性能

図表 12 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	75.0
投入熱量 (GJ/h)	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

※焼却炉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に、低い発電量となっている。

(3) 高効率発電技術の負荷変動運転結果

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、汚泥処理量を増加または減少させた運転を行った。図表 13 に汚泥焼却量を 5.0wet-t/h (120wet-t/日) から 7.0wet-t/h (168wet-t/日) に約 40%増加させた場合の運転結果を示す。焼却炉への投入熱量の増加に伴い、蒸発発生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。

(4) 局所攪拌空気吹込み技術運転結果

図表 14 に焼却炉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。ここで、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 N₂O 排出濃度及び脱水汚泥当たりの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、実証運転における排出濃度を用いて評価を行った。比較対象は、局所攪拌空気吹込み技術設置以前の 3 系焼却炉の NO_x 平均排出濃度を用いた。

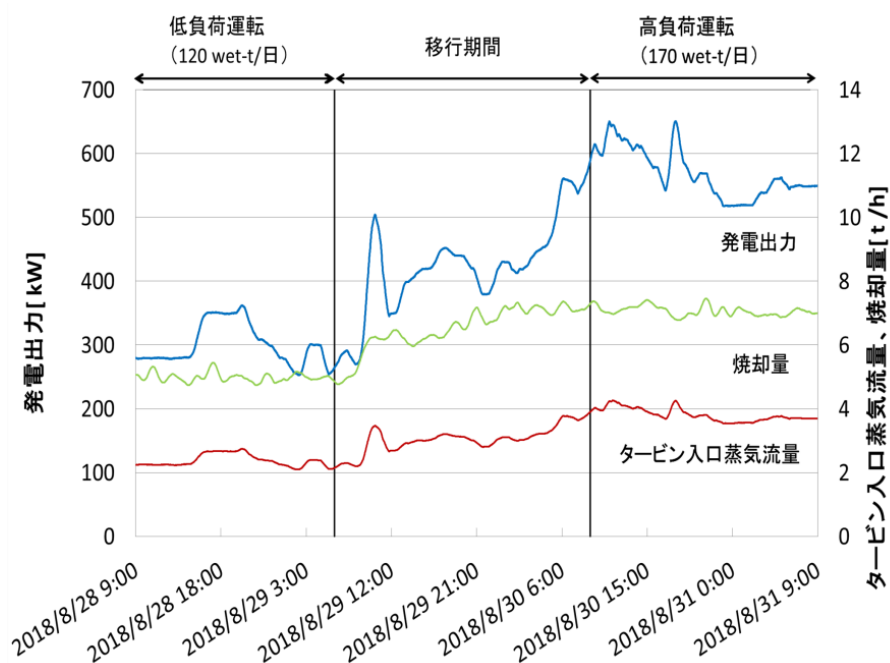
局所攪拌空気吹込みを実施することにより、実証フィールドにおいて N₂O 排出係数及び NO_x 排出濃度を同時に 50%以上低減させることが可能であること、N₂O 排出係数は、多段吹込燃焼式流動床炉等の N₂O 削減技術と同程度 (0.263 kg-N₂O/wet-t) ^{※2}以下に低減できることを確認した。

※2：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 年 3 月 環境省・国土交通省

(5) 耐久性、安全性、運転・操作性

高効率発電技術である復水式蒸気タービンは、従来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きており、耐久性、安全性に問題はない。また、運転、操作も発電技術の長い運用の中で確立されており、本設備でも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。



図表 13 負荷変動に対する高効率発電技術運転結果

図表 14 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

6. 経済性

本設備を焼却炉に追加設置した場合の費用回収年試算結果を図表 15 に示す。ここで、建設費は補助金を考慮していない。また、表中の導入効果は、発電による電力創出効果と、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。150wet-t/日の焼却炉に追加設置した場合の費用回収年は 12 年となり、耐用年数 15 年^{※3}を下回った。

本設備を導入した場合の温室効果ガス排出量削減効果の試算条件を図表 16 に、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図表 17 に示す。ここで、従来技術は高温焼却（850℃）対応焼却炉の N₂O 排出係数 0.645 kg-N₂O/wet-t^{※2}を用いた。

本設備を導入することで、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%の削減が期待できることが示された。

※2：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 年 3 月 環境省・国土交通省（再掲）

※3：「バイオソリッド利活用基本計画(下水污泥処理総合計画)策定マニュアル(案)

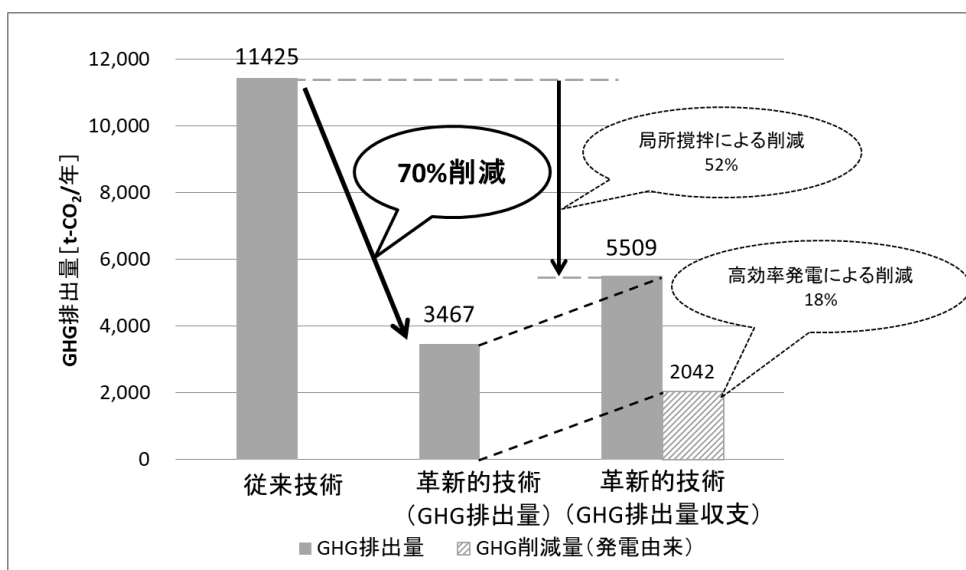
図表 15 費用回収年試算結果

処理規模 [wet-t/日]	150
(固形物量) [ds-t/日]	(39)
投入熱量 [GJ/h]	17.0
工事費 [百万円/年]	65.1
維持管理費 [百万円/年]	18.8
導入効果 [百万円/年]	-88.1
費用回収年 [年]	12.0

図表 16 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

※数値は実証フィールドにおける分析結果の平均値



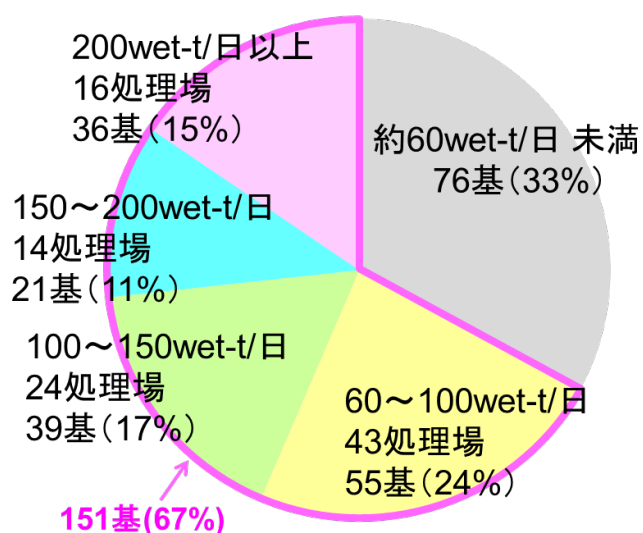
図表 17 温室効果ガス削減効果

7. 将来性

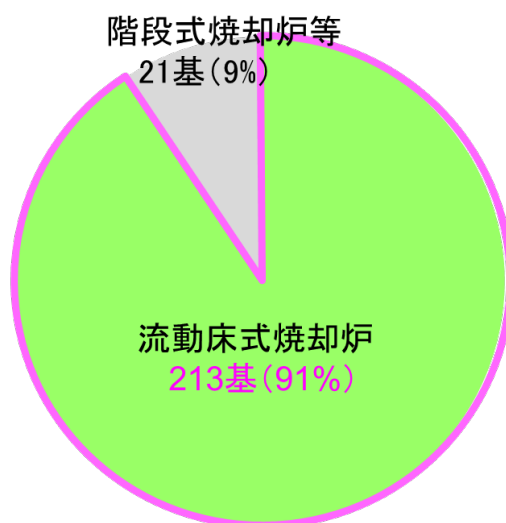
カーボンニュートラルに向け温室効果ガス削減の必要性は高く、汚泥焼却炉での廃熱利用技術の適用は重点施策（「下水道事業におけるエネルギー効率に優れた技術の導入について」国水事第38号通知（通知年度：2017年））となっている。国内既設焼却炉の内、高効率発電技術は67%（151基）に、局所攪拌空気吹込み技術は91%（213基）に適用可能である（図表18及び図表19）。

よって、適用範囲が広く、かつ環境課題、施策に合致した本設備導入の可能性は高く普及が期待される。

また、カーボンニュートラルは国内のみならず世界において重要な課題であり、海外への展開も期待される。



図表18 高効率発電技術 適用可能焼却炉



図表19 局所攪拌空気吹込み技術適用可能焼却炉