

現地レポート

「温室効果ガス削減を考慮した発電型汚泥焼却技術」導入に向けた取組

菅原 充・羽嶋南州・成島正昭

1. はじめに

川崎市では、令和2年2月に昨今の気候変動問題の危機的状況を踏まえ、令和32年CO₂排出実質ゼロを表明するとともに、同年11月に脱炭素戦略「かわさきカーボンゼロチャレンジ2050」を策定し、令和32年に脱炭素社会の実現を目指す取組を開始した。

そのような中、上下水道局では脱炭素社会の構築に向けて、温室効果ガス排出量削減に資する取組として、設備の運転方法の見直しによる節電や、設備更新に伴う高効率機器の導入、小水力発電設備などの創エネルギー設備の導入などを実施することで、使用電力に由来するCO₂排出量の削減に努めてきた。しかし、下水資源として高いポテンシャルを持つ下水汚泥については、焼却処分した際に発生する焼却灰を全量セメント原料として利用するほかに、焼却廃熱を温水プールの熱源として利用しているが、さらに有効活用する余地があり、活用方策の立案が課題となっていた。さらに、汚泥焼却過程では、CO₂のおよそ298倍の温室効果を持つ、一酸化二窒素（以下「N₂O」という。）が排出されており、脱炭素社会実現に向けて排出量削減が課題となっていた。

これらの課題を早急かつ安価に解決するため川崎市は、JFEエンジニアリング（株）、日本下水道事業団と共同研究体を組み、国土交通省が実施する下水道革新的技術実証事業（以下「B-DASHプロジェクト」という。）の採択を受け、国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）からの委託研究として、平成29、30年の2箇年にわたり、N₂Oと大気汚染物質である窒素酸化物（以下「NO_x」という。）の排出量を同時に削減する「局所攪拌空気吹込み技術」と焼却廃熱を活用した創エネルギー技術である「高効率発電技術」を組み合わせた「温室効果ガス削減を考慮した発電型汚泥焼却技術（以下「実証技術」という。）」

（図-1）の実証研究を実施してきた。国総研の委託研究を終えた令和元年度からは、実証施設のより効率的かつ安定的な運転技術の確立を目指し、国総研より実証施設を借受け、研究共同体による自主研究を実施している。

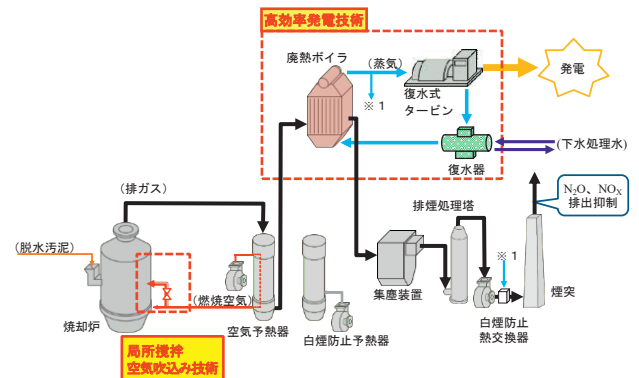


図-1 実証技術のシステムフロー

2. 実証技術の概要

2.1 実証フィールド

川崎市では、市内全4箇所の水処理センター（合流式2箇所、分流式2箇所）で発生する汚泥を沿岸部にある入江崎総合スラッジセンター（以下「スラッジセンター」という。）へ圧送、集約し、焼却処分を実施している。実証技術は、スラッジセンター全4系列の焼却施設のうち3系焼却施設にて実施している。3系焼却施設の仕様を表-1に示す。また、実証実験は、低負荷（120wet-t/日程度）、定格負荷（150wet-t/日程度）、高負荷（155wet-t/日程度）の3条件においてそれぞれ一定時間運転し、実験ガスデータを取得している。

表-1 スラッジセンター3系焼却施設仕様

項目	仕様	備考
汚泥種類	混合生汚泥	集約処理
焼却炉形式	流動床式焼却炉	気泡流動
焼却量	40(ds-t/日)	約150(wet-t/日)
含水率	74.75% (72.5~77.0%)	脱水汚泥
可燃分	83.5% (77~90%)	固形分中

2.2 局所攪拌空気吹込み技術

2.2.1 局所攪拌空気吹込み技術の概要

本技術は、流動床式焼却炉に適用される技術である。一般的な流動式焼却炉では、砂層を流動させるため、高温の流動空気を焼却炉下段の風箱に吹込み、砂を巻き上げ、高温化した砂と汚泥を接触させて焼却している。そのため、燃焼は主に砂層よりやや上部で活発となり、炉のフリーボード（以下「FB」という。）部の上段に向かうほど、炉からの放熱により炉内温度が低くなる傾向がある。本技術は、流動空気の一部をFB部に吹込み、炉内のガスを攪拌する装置を設置し、流動空気を風箱側（一次空気）とFB側（二次空気）に分けるように工夫することで、FB部での燃焼を促進し、通常の流動床式焼却炉より広範囲に850℃以上の高温域を拡張させることが可能となる（図-2）。

さらに、本技術は、他の多段燃焼技術と比較して、図-3に示すように限られたスペース（炉近傍で2.5m×2.0m程度）で設置可能な方式であり、炉周り機器と干渉せずに、かつ、空気配管等を複数回切り回す必要がなく、既設汚泥焼却設備への後付けなどの改造対応が容易なため、水平展開が期待できる技術である（図-3）。また写真-1には、実証施設である3系焼却炉と同型である2系焼却炉における改造箇所を比較した状況を示す。

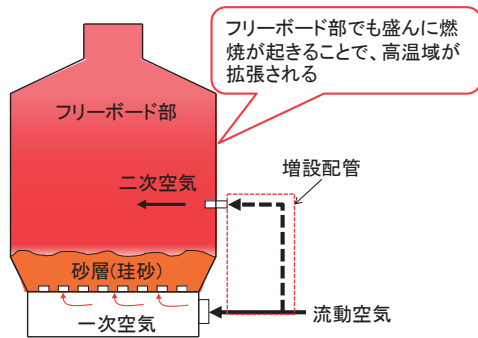


図-2 局所攪拌空気吹込み技術の特徴
（焼却炉縦断面図）

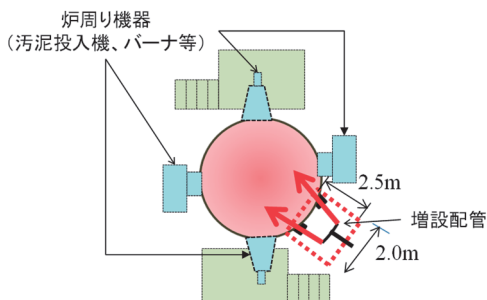


図-3 局所攪拌空気吹込み技術の増設模式図
（焼却炉横断面図）



写真-1 焼却炉改造前後比較
（左：2系焼却炉 右：3系焼却炉）

2.2.2 N₂OとNO_xの排出量同時削減

N₂Oは常温では比較的安定している物質だが、約500℃以上になると酸素と窒素に分解され、高温になるにつれ分解が促進される。そのため、焼却炉におけるN₂O排出抑制としては850℃以上の高温焼却が有効とされている。しかし、燃焼温度を上昇させた場合、NO_xの排出量が増加するという課題がある。

本技術は、図-4に示すメカニズムによってN₂OとNO_xの排出量同時削減を実現している。まず、炉底部にある砂層への空気供給量を減少させることで、汚泥の燃焼を抑制し、汚泥中の窒素分からシアン（HCN）やアンモニア（NH₃）の発生量を増加させる。次に、発生したHCNやNH₃がFB下部において、燃焼で発生したNO_xと反応して窒素ガスやN₂Oに変化する。最後に、二次空気によってFB部での燃焼が促進され、炉内の広範囲で850℃以上の高温域が展開されることで、N₂Oの分解が促進される。このようにFB下部とFB上部の反応が同時に起きることで、N₂OとNO_xの排出量が同時に削減される。

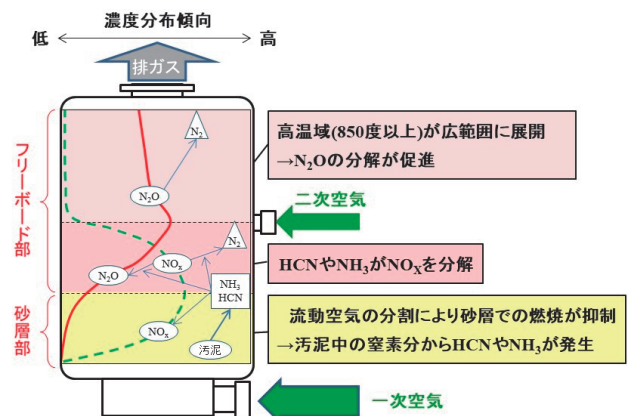


図-4 N₂OとNO_xの排出量同時削減メカニズム

2.3 高効率発電技術

本技術は、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する技術である。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排ガス処理設備に戻すフロー（図-1）となっている。

従来、脱水汚泥200（wet-t/日）以下の下水汚泥焼却設備では、焼却で発生した熱エネルギーの多くが燃焼を維持するために再利用されていることから、得られる余剰熱量が少なく高効率蒸気タービン発電設備の導入が困難であった（図-5）。

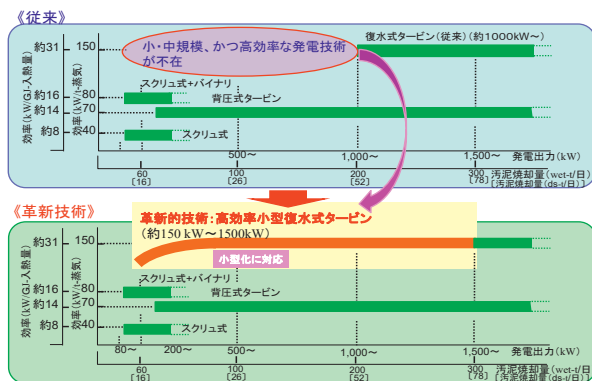


図-5 汚泥焼却炉に用いられる発電技術の比較

本技術では、200（wet-t/日）以下の下水汚泥焼却設備に適応可能な高効率小型蒸気タービンを新たに設計・開発している（写真-2）。また、入江崎総合スラッジセンターは入江崎水処理センターに隣接しているという立地を活用して、豊富な下水処理水を復水器での冷却水として利用することで、空冷方式よりも発電効率を20%向上させ、発電効率の最大化を図り、150～1,500kWの高効率発電を可能とした（図-6）。なお、蒸気冷却に利用した処理水は、排煙処理用水として、スラッジセンター内で再利用した後、入江崎水処理センターに返送し、汚水として再度、処理されている。



写真-2 新開発 高効率小型蒸気タービン

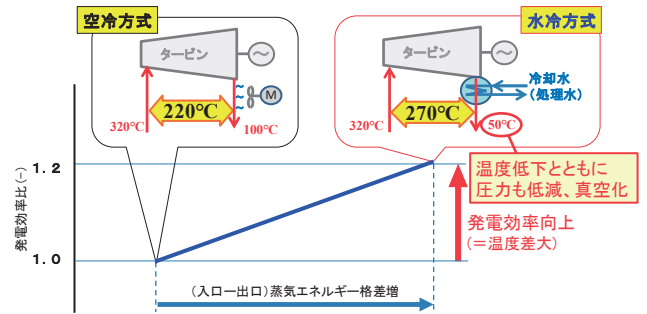


図-6 空冷方式と水冷方式の発電効率比較

さらに、新開発の小型復水式蒸気タービンによる発電設備は、ダクトを切り回すことで設置が可能であり、廃熱ボイラと発電設備を設置するスペースが確保できれば、焼却炉の新設時のみならず、既設焼却炉への後付け（追加設置）が可能な設備である。

3. 実証結果

3.1 局所攪拌空気吹込み技術

令和元年以降の共同研究体による自主研究では、地球温暖化対策が最重要課題であると考え、温室効果ガスである N_2O の排出量削減能力の向上に主眼を置いて研究を実施した。令和元～2年にかけて、局所攪拌空気吹込み装置の制御パラメーターの見直し等を実施した結果、令和2年夏季にはいずれの運転条件においても、 N_2O 排出量を通常時と比較して50%以上削減するとともに、「下水道における地球温暖化対策マニュアル」における「二段燃焼式循環流動床炉」等の排出係数である0.263（kg N_2O /wet-t）以下となった（表-2）。

表-2 局所攪拌空気吹込み技術実証結果
（令和2年度夏季）

項目	低負荷	定格	高負荷
焼却量 (wet-t/日)	136	144	163
含水率(%)	73	74	74
局所攪拌あり N_2O 排出濃度 (ppm-12% O_2)	27	35	23
局所攪拌なし N_2O 排出濃度 (ppm-12% O_2)	103	150	150
削減率(%)	74	77	85
N_2O 排出係数 (kg- N_2O /wet-t)	0.21	0.226	0.263

3.2 高効率発電技術

平成30年度に実施した、高効率発電技術の実証結果を表-3に示す。

実証実験は、低負荷（120wet-t/日程度）、定格負荷（150wet-t/日程度）、高負荷（155wet-t/日程度）の3つの運転条件について、四季を通じて実施しており、結果として、いずれの運転条件においても発電設備の計画発電量を上回る発電量を得ることができることを確認した。また、電力の自給率としては、焼却炉の定格負荷（150wet-t/日程度）条件において、含水率が73%となった夏季の発電量は3系焼却設備の消費電力（552kW）を上回っており、余剰電力をスラッジセンター内で自己消費している。また、それ以外の条件においても、3系焼却設備の消費電力（509～600kW）に対して、45%～99%程度の発電を確認した。

表-3 発電設備運転結果（平成30年度）

運転条件		焼却量 (実績値) (wet-t/日)	平均 含水率 (%)	発電量 (kW)	計画 発電量 (kW)	電力 自給率 (%)
春季	低負荷	117	75	230	108	45
	定格	150	75	420	307	79
	高負荷	154	75	545	441	99
夏季	低負荷	120	74	290	166	53
	定格	150	73	605	403	110
	高負荷	165	75	514	371	91
秋季	低負荷	130	75	360	200	64
	定格	151	76	448	300	79
	高負荷	158	75	482	370	84
冬季	定格	154	75	385	335	69
	高負荷	174	75	506	459	84

4. 今後の展開

共同研究体による自主研究は令和5年度末までを計画している。令和2年度までの研究では、「局所攪拌空気吹込み技術」のN₂O排出量削減能力の向上を主に研究を進めてきていたが、今後は

N₂OとNO_xの排出量同時削減効果を最適化するために、制御パラメーターの整理と制御システムの構築を進めると共に、「高効率発電技術」の発電効率の向上や安定運転に関する研究を進めていく。

5. まとめ

本実証技術については、平成30年度までの研究の成果を基に、技術導入の検討資料として「温室効果ガス削減を考慮した発電型污泥焼却導入ガイドライン（案）」が令和元年11月に国総研より発刊されている。本実証技術は、焼却炉の新設だけでなく、既存炉への段階的な後付け導入ができるため、迅速な地球温暖化対策が図られることが期待される。川崎市においても、本技術のような温室効果ガス排出量の大幅な削減を可能とする革新的技術を積極的に開発・導入していきたいと考えている。

最後に、世界規模で地球温暖化に起因すると考えられる異常気象による激甚災害が多発しており、CO₂排出実質ゼロ達成となる脱炭素社会の実現が急務であることから、本技術のような温室効果ガスの大幅削減を可能とするような技術の更なる開発が進むことを期待する。

謝 辞

本実証研究は、国土交通省国土技術政策総合研究所より「JFEエンジニアリング（株）・日本下水道事業団・川崎市共同研究体」が受託した「温室効果ガス削減を考慮した発電型污泥焼却技術実証研究」として行ったものである。本実証研究実施にあたり協力を頂いた関係各位に謝意を表する。

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污泥焼却技術導入ガイドライン（案）、2020.11

菅原 充



川崎市上下水道局下水道部下水道計画課(技術開発担当)主任
SUGAHARA Mitsuru

羽嶋南州



川崎市上下水道局下水道部下水道計画課(技術開発担当)担当課長
HAJIMA Nanshu

成島正昭



川崎市上下水道局下水道部下水道計画課(技術開発担当)担当係長
NARUSHIMA Masaaki