

次世代型下水汚泥焼却炉「過給式流動燃焼システム」の実用化

— 新規下水汚泥焼却炉の開発における産総研の役割 —

鈴木 善三*、村上 高広、北島 暁雄

国内の下水汚泥排出量は年々増加しており、その大部分は焼却処理されている。現状の下水汚泥焼却システムは、エネルギーを大量に消費し、また汚泥中の窒素含有量が高いため、燃焼により温暖化ガスである N_2O を大量に排出することが懸念されている。この研究では、研究機関と民間会社との共同で、省エネルギー運転に加え、低環境負荷運転をも達成できる加圧流動焼却炉と過給機を組み合わせた次世代型汚泥焼却システムである「過給式流動燃焼システム」を提案し、実用化に至った。この論文では、提案したシステムの実用化に至るまでの研究開発について主に紹介する。

キーワード：下水汚泥、焼却炉、加圧流動層、過給機、エネルギー回収

Practical use of an advanced sewage sludge incinerator, “turbocharged fluidized bed incinerator”

– The role of AIST in the development of a new system –

Yoshizo SUZUKI*, Takahiro MURAKAMI and Akio KITAJIMA

Annual production of sewage sludge in Japan has increased, and most of the sewage sludge is incinerated. With conventional sewage sludge incinerators, a large amount of energy is needed for operation. Additionally, the emissions of greenhouse gas N_2O are expected to be high, because sludge contains a high concentration of nitrogen. In this R&D, an advanced sewage sludge incinerator “turbocharged fluidized bed incinerator,” which can achieve not only energy savings but also a low environmental impact, was proposed in collaboration with a public research institute and a company. This new system consists of a pressurized fluidized bed combustor coupled with a turbocharger. The R&D to achieve practical use of the proposed system is primarily explained in this paper.

Keywords: Sewage sludge, incinerator, pressurized fluidized bed, turbocharger, energy recovery

1 はじめに

下水処理システムの普及に伴い、我が国の下水汚泥排出量は年々増加しており、その大部分は焼却処分されている。脱水処理後の下水汚泥は約 80 % の水分を含み、単体での焼却が困難であり、都市ガス、重油等の多量の補助燃料を使用して焼却処理されているのが現状で、下水汚泥焼却プロセスは、エネルギー多消費型プロセスとなっている。これに加え、下水汚泥は、石炭やバイオマスのような他の固体燃料と比較して窒素含有量が極めて高いため、燃焼させると窒素酸化物（以下、 NO_x ）や亜酸化窒素（以下、 N_2O ）を多量に排出する。一般的には、燃焼温度が高くなるに連れて、 NO_x 濃度は高くなる一方、 N_2O 濃度は低くなる。特に、温暖化ガスである N_2O の温暖化係数は、 CO_2 の 310 倍と高く、その排出が懸念されている。

現状では、下水道施設から排出される温暖化ガス量（ CO_2 換算）の内、汚泥焼却時に発生する N_2O の排出は、その約 1/4 を占めており、その N_2O 削減法として、現状では燃焼温度の高温化が試みられている。 N_2O の生成は、高温では抑制されることが知られており、燃焼温度をこれまでの標準的な 800 °C から 50 °C 高くした 850 °C での高温運転により、 N_2O 排出量を約 6 割削減できることが見込まれている。しかし、国内の下水汚泥焼却炉は 1980 - 90 年代にかけて建設されたものが多く、燃焼炉の老朽化が進んでおり、炉体を損傷する燃焼温度の高温化が困難なシステムも多数ある。このような現状から、下水道事業を所管する国土交通省では、下水汚泥焼却プロセスの省エネ対策・温暖化ガス削減対策を掲げており¹⁾、本質的な省エネルギーと低 N_2O 発生量を両立させた下水汚泥焼却システムが求められている。今後、

産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 〒305-8569 つくば市小野川 16-1 つくば西
Energy Technology Research Institute, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan * E-mail: suzuki.y@aist.go.jp

Original manuscript received February 20, 2013, Revisions received July 16, 2013, Accepted August 1, 2013

既存炉の大量更新が予想されており、新規技術による下水汚泥焼却プロセスの開発が喫緊の課題となっている。

従来型の下水汚泥焼却システムの一部を図1に示す。本図にも示すように、汚泥焼却炉には流動層がよく使用される。流動層では、空気分散板上に砂を充填し、分散板の下部から空気を供給することにより、水の沸騰時のように、気泡を生成しながら砂を激しく流動させる。この砂が熱媒体となり、流動層中では含水率の高い脱水汚泥を燃焼温度が安定した状態で燃焼させることが可能となる。下水汚泥は80%程度の水分を含有しており、焼却炉内温度維持のために、補助燃料（都市ガス、重油等）が使用される。流動焼却炉は大きく砂層（流動層）と、その上部の主に気体の空間であるフリーボードとに分けられ、砂層内で汚泥の乾燥・熱分解が主に起こる。次いで、フリーボードで熱分解により発生した可燃ガスが燃焼する。燃焼後の排ガスは、処理系統を経てクリーンなガスとして大気中へ放出される。ここで注目すべきは、運転に必要な二つのファンである。一つは、汚泥燃焼用の空気を供給するためのファン、もう一方は、

汚泥燃焼後の排ガスを誘引するためのファンである。これら二つのファンを駆動するための動力が、システム全体に必要なエネルギーの約40%を占めるといわれており、電力由来のCO₂排出の大きな根源となっているため、省エネルギー対策が求められる機器となっている^[2]。

産総研、国土交通省土木研究所（以下、土研）、民間会社の共同開発で、下水汚泥焼却炉の省エネルギー化、低N₂O排出量化のため、図2に示すような新しい焼却システムが考案された^{[2][3]}。これは、流動焼却炉を加圧条件で運転し、発生する高温高压の排ガスを利用して、炉後段に設置した過給機（ターボチャージャー）を駆動し、燃焼用空気を生成させることが大きな特徴である。本システムでは、従来型のシステム（図1）と比較して、以下に示す利点が挙げられる。

- 1 加圧運転により燃焼が促進されるため、同一焼却量において装置のコンパクト化が可能となる。これにより、焼却炉からの放熱量を低減でき、補助燃料使用量を削減できる。
- 2 過給機により燃焼用空気を生成できるので、空気供

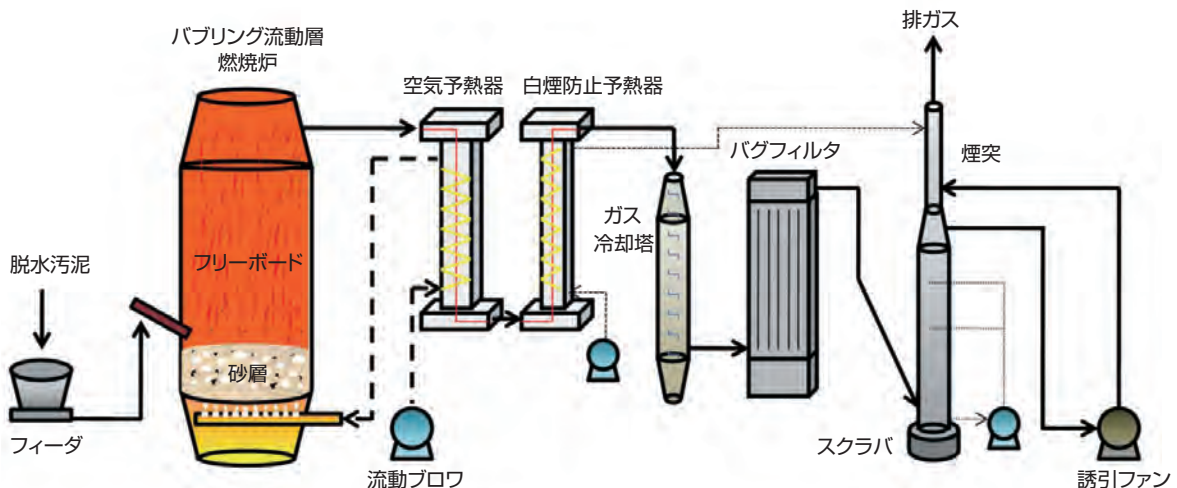


図1 従来型の下水汚泥焼却システムの概略図

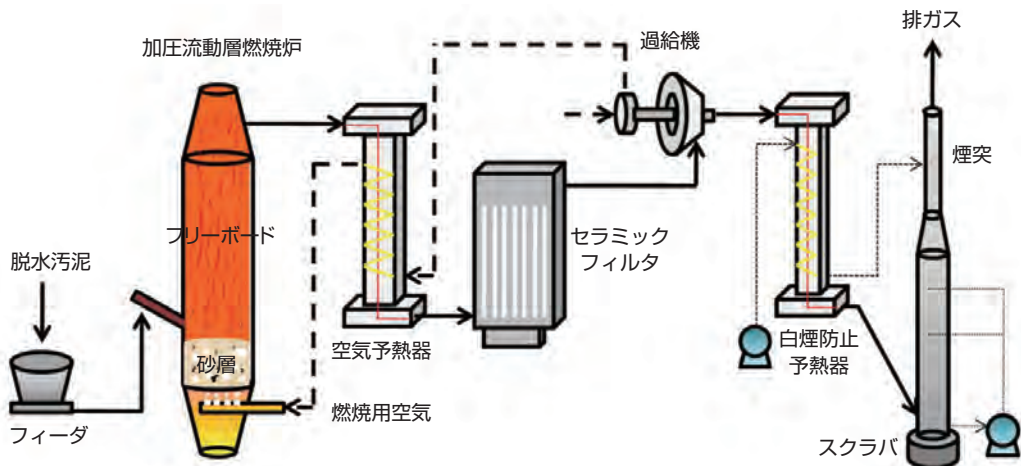


図2 過給式流動燃焼システムの概略図

給用のファンが不要である。さらに、加圧運転のため、燃焼排ガスは残圧で大気放出されるので、誘引するためのファンも不要となる。これより、大電力消費源である二つのファンを省くことができ、従来型と比較して、大幅に電力を削減できる。さらに、余剰空気は、曝気用空気として利用することも可能である。

- 3 エネルギー回収を過給機で行っているため、ガスタービンと比較して設備が簡便になる。過給機とのマッチングでは、最大でも2.5気圧程度の圧力しか要求されないため、ガスタービンとのマッチングに必要な高圧運転と高コストの加圧容器を必要としない。

我々は、この次世代型下水汚泥焼却システムを「過給式流動燃焼システム」と名付け、本システムを実用化することを目標として、研究開発を実施した。

2 目標を実現するためのシナリオ

この研究開発の目標は、前節で述べたとおり過給式流動燃焼システムの実用化である。国内の下水汚泥焼却炉の平均的な規模は、焼却炉へ供給する汚泥量として100 t/dとなるため、新規技術を導入したこのような大型プラントを商用化するためには、実験室規模の実験設備による基礎研究、つづいて、その基礎研究成果を活かしてスケールアップさせた実証プラントでの実証研究が必要となる。それぞれのステップの達成には複数年を要するため、一般のプロセス開発と同様に、実用化までには長期の研究開発期間が必要となる。本節では、商用化に至るまでの経緯を述べる。

2000年当時、土研では、汚泥焼却炉の抜本的な技術革新を計画して、民間会社と共同して研究会を立ち上げていた。その中で、当時石炭の新規高効率発電として注目され実用化が進められていた、加圧流動層複合発電技術が研究会で取り上げられた。下水汚泥は高圧ポンプで高圧の場に輸送することが可能であり、連続供給には問題がなく、加圧流動層燃焼とのマッチングが良いためである。システム検討を行った結果、高温高圧の排ガスからエネルギーを回収することにより、大幅に省エネを達成できる可能性が確認された。しかし、下水汚泥や廃棄物焼却の分野では、加圧流動層燃焼の経験は全くなく、土研や焼却炉メーカーによる加圧流動層燃焼を応用した新規システムの開発は困難な状況にあった。

この時期は温暖化ガスへの関心が高まっており、つくばの研究機関では環境省による省庁横断型の温暖化ガスインベントリー推定に関する研究が行われていた。この

中で、当所は化石燃料の燃焼プロセスの温暖化ガス排出を担当したが、土研の担当する下水汚泥焼却炉からの N_2O ガス排出量測定も支援した⁴⁾。その当時、当所では、石炭の加圧流動層燃焼を主要な研究テーマとしていたが、土研担当者との交流の中で、当所の研究が彼らのニーズにえられることが分かり、土研の主催する研究会からの正式な共同研究の要請に繋がった。これが、この研究のスタートであり、研究機関が集うつくばの特徴がうまく活かされた技術開発と言える。

開発に参加した研究機関は、当所と土研の2機関であるが、役割分担は最初から明確であり、当所が研究を実施する上での技術支援、土研が技術の評価、自治体や企業へのピーアールをそれぞれ担当した。最初に共同研究に参加した民間企業は、月島機械（株）、（株）クボタ、（株）IHIの3社であり、下水汚泥焼却プラントのメーカーに加え、ガスタービンのメーカーの内、この基本コンセプトを十分理解でき、かつ、過給機も製造しているメーカーと連携した。このように、5者共同で自主研究からスタートした。自主研究を進める中で、基礎研究や新規技術を導入したシステム設計の最適化等の成果を上げつつあったが、国内景気動向による企業内の諸事情もあり、2005年には月島機械（株）以外の企業は撤退した。しかし、新たにこの技術を高く評価した三機工業（株）が開発に加わり、土研と当所を加えた4者共同で再スタートとなった。その後、外部資金獲得による実証プラントの運転、実証プラント長時間運転による耐久性を確認でき、プロセスを完成した。

しかし、実績のない新規プロセスの導入は、ユーザーにとって大きな不安材料であり、プロセスの完成が直ちに実用化に結びつくわけではない。このため、主要ユーザーである自治体関係者への技術ピーアールについては、下水道行政と密接な関係を持つ土研が担当した。その結果、この技術は関係者から高い評価を受けることができたが、直ちに採用までには至らなかった。

開発グループ内で実用化に至る戦略を検討した結果、最も効果的なのは、公共事業である下水道事業で日本をリードする東京都で本プロセスを採用してもらうことであると結論に達した。当時、東京都下水道局では、下水処理での温暖化ガス削減計画（アースプラン）を策定中であったことから、省エネ性と低 N_2O 性に絞って、この技術のピーアールを行った。担当者の理解も徐々に得られたが、採用の最も大きな障壁と考えられた長時間の耐久性について、東京都を加えて改めて共同で確認試験を行うことになった。最終的にそれを達成したことから東京都のアースプランの主要技術に登録され、商用機

受注の獲得に至った。

3 目標実現のための構成的方法

3.1 実験室規模の加圧流動層燃焼実験

この研究は、前節で述べたとおり自主研究からスタートしたが、その研究期間中当所では、主に下水汚泥の加圧燃焼実験を担当し、民間企業と土研では、次世代型の汚泥焼却システムの最適設計を担当した。当時、下水汚泥の加圧条件下での燃焼データは皆無であった。そこで、図3に示す当所所有の加圧設備に、下水汚泥焼却用バブリング流動層燃焼装置および下水汚泥供給用のモノポンプを設置し、実験を開始した。

システム全体の概略図を図4に示す^{[5][6]}。加圧容器は石炭の加圧燃焼実験用に設計製作したもので、内径1,200 mm、高さ3,200 mm、設計圧力は0.99 MPaのステンレス製である。容器内にステンレス製のバブリング流動層燃焼炉（内径80 mm、高さ1,300 mm）を設置し、実験中の汚泥供給量、空気量、電気炉等を操作できるように、それらの制御機器は圧力容器外部に設置した。流動層最上部の垂直投入管より汚泥を連続供給した。圧力容器や流動層の汚泥供給管との接合部分には、実験前準備および実験後の後片付けを考慮し、ワンタッチコネクタを使用した。実験中の汚泥供給量を安定させるために、実験前の準備として、モノポンプ内の攪拌層内に汚泥10 - 20 kgを投入し、汚泥に流動性を持たせるために水を加えて攪拌し、汚泥の粘度を調整した（図5）。

実験試料の下水汚泥は、茨城県霞ヶ浦流域下水道事務所より、実験毎に実脱水汚泥を採取したものを供給して

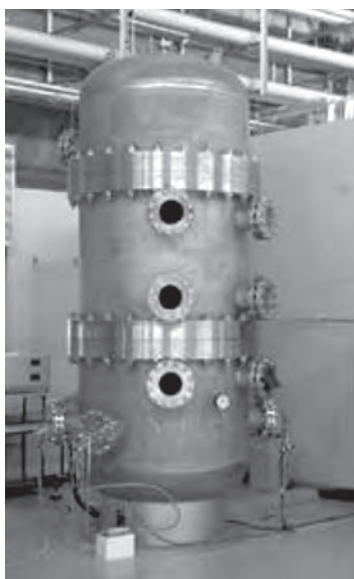


図3 加圧容器の外観写真

表1 下水汚泥の性状

| | | |
|----------------------|------|-------|
| 工業分析値 [wet, wt.%] | 水分 | 78.0 |
| | 揮発分 | 13.9 |
| | 固定炭素 | 1.8 |
| | 灰分 | 6.3 |
| 元素分析値 [dry, wt.%] | C | 29.8 |
| | H | 4.0 |
| | N | 5.0 |
| | S | 1.1 |
| | O | 21.4 |
| 高位発熱量 [MJ/kg (dry)] | | 17.10 |

表2 汚泥焼却灰組成の一例

| | | |
|--------------------|--------------------------------|-------|
| 灰組成 [dry, wt.%] | SiO ₂ | 39.97 |
| | Al ₂ O ₃ | 10.88 |
| | CaO | 6.33 |
| | MgO | 2.57 |
| | Fe ₂ O ₃ | 3.78 |
| | Na ₂ O | 0.63 |
| | K ₂ O | 1.63 |
| | P ₂ O ₅ | 20.51 |

もらった。脱水汚泥の性状を表1に示す。化石燃料と比較すると灰分と窒素分が多いのが特徴である。また、下水汚泥特有の問題として臭気があるが、臭気対策として、脱水汚泥の密閉型容器による保管と、実験後のモノポンプの洗浄を徹底した。

基礎研究で確認する必要があったのは、灰の溶融の有無と環境汚染物質であるNO_x、N₂Oの排出特性である。前者は、プロセス成立の根幹に関わる事象である。下水汚泥の灰分は、表2に示すように^[2]、多量の低融点アルカリ成分を含み、高負荷燃焼となる加圧燃焼条件では、局部高温域での灰の溶融とそれに起因する流動化停止が危惧された。しかし、最大10気圧の加圧条件での燃焼実験を行ったが、図6に流動層燃焼炉後段のセラミックフィルタで捕集したフライアッシュの外観写真として示すように、灰の大部分はフライアッシュで赤褐色を示し、灰の溶融は認められなかった^[9]。これは、汚泥処理における曝気槽での汚泥の沈降性を高めるために添加する鉄系の凝集剤が、結果的にアルカリ成分の溶融を抑制するためと推測された。

灰溶融を回避できることから、プロセスは基本的に成立することを確認した後、燃焼炉内温度分布やNO_x/N₂O排出特性の温度依存性等、加圧運転における燃焼

特性を明らかにした。N₂O 排出量は、燃焼温度の上昇と共に減少し、従来知られていた N₂O の温度依存性の一般的な知見と同様の結果が得られた。一方、NO_x 排出量は、同温度において、石炭や乾燥させた下水汚泥を燃焼させた場合よりも低くなった^[6]。これは、燃焼後の生成ガス中に約 40 % 含まれる水蒸気による NO_x 生成抑制効果と推測された^[7]。これらの結果から、脱水汚泥を加圧条件で燃焼させても特段の環境特性の悪化は見られず、むしろ環境負荷を低減できる可能性があることが明らかになった。

3.2 システム設計

一方、民間企業と土研が主体となって実施した、次世代型の汚泥焼却システムの最適設計に関しては、汚泥焼却システム更新時には、技術的に進歩した設備を導入することが期待されており、まず省エネルギーの観点から検討した。省エネルギー化には、大容量の動力消費源となっている燃焼用空気供給用のファンと燃焼後の排ガスを誘引するファンの二つのファンの省略が効果的であるが、これはシステムの加圧化により達成される。汚泥は

前述のとおり、多量の水分会を含むため、燃焼後の高温排ガス中の水蒸気量は 40 % 程度と大きい。このため、高圧の排ガスからエネルギーを回収する場合、多量に含まれる水蒸気を利用できる。水分を多量に含む汚泥特有の排ガスを、そのままエネルギー回収に有効利用できることは大きなメリットとなる。さらに、一般の化学プラントと同様に加圧システムでは、同一容量で比較した場合、常圧に比べ実容積は小さくなる。このため、炉の表面積が小さくなるため放熱量が減少し、燃焼温度維持のための補助燃料使用量を削減できる。

通常は、排ガスからのエネルギー回収には、ガスタービンを用いて燃焼用加圧空気を製造することが考えられるが、今回目標とする 100 t/d 規模の焼却炉の排ガス量にマッチするガスタービンは、汎用規格にはなく特注となること、このため導入コストとメンテナンスコストがとて高くなることが判明した。加えて、ガスタービンとの最適なマッチングには、10 気圧以上の高圧が必要であり、そのためには焼却炉を高コストの加圧容器に収容する必要があることが明らかになった。以上のシステ

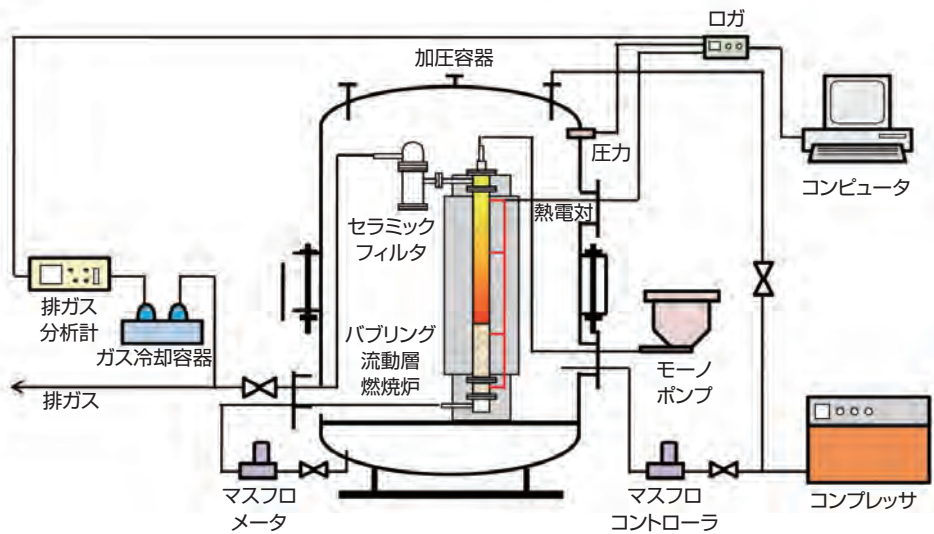


図4 実験室規模の加圧流動燃焼システムの概略図



図5 モノポンプによる脱水汚泥供給の様子



図6 汚泥燃焼実験後のフライアッシュの外観写真

ム解析から、ガスタービンの使用による加圧燃焼システムは断念することとなった。

この打開策として、ガスタービンより汎用な機器である過給機の採用に至った。過給機との組み合わせは、最大でも2.5気圧の微加圧運転で可能であり、高コストの圧力容器を必要とせず、装置の耐圧構造も簡易で済み、建設コスト、必要運転人員、定期点検等も従来型のシステムとほとんど差異はないと考えられる。開発目標である100 t/d規模の排ガス量にマッチする過給機としては、船用ディーゼル機関用のものが汎用品としてあり、導入コストもとても安価である^[2]。以上のシステム検討から、電力由来のCO₂と補助燃料燃焼により生成するCO₂を同時に削減できる省エネ型の「過給式流動燃焼システム」が誕生し、直ちに基本特許を共同出願した^[8]。

3.3 実証試験および実用化

基本的なシステム設計と基礎燃焼特性の把握につづき、提案した過給式流動燃焼システムを建設し、実証する必要がある。そこで、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の公募事業「都市バイオマス収集システムを活用するためのエネルギー転換要素技術開発」に応募した結果、幸いにも採択された。実証設備の建設場所は、この段階から新たに参加した三機工業（株）の循環炉実証機があった北海道長万部町の終末処理場内とし、5 t/d規模のプラントを建設した。設計には当所での基礎研究の成果が反映された。実証設備の概略図を図7に示す^{[2][3]}。加圧焼却炉は鋼板製の内部耐火物構造で、内径700 mm、高さ9200 mmである。流動焼却炉の後段に設置した過給機は、実証設備の規模に適合する、大

型ディーゼル貨物自動車に搭載されている汎用品を使用した。結果として、従来型のシステムで使用していた二つのファンを省いた運転に成功した^{[2][3]}。

この段階からは、当所は主に排ガス分析ラインの構築および運転結果の解析を担当した。実汚泥による連続燃焼試験を実施した結果、排ガス中N₂O濃度は、図8に示すように^[3]、フリーボード温度に依存し、温度が高くなるに連れて、その濃度は低くなった。また、その排出量は、従来型の高温運転時よりさらに半減できることが分かった（図9）^[3]。当所では基礎燃焼実験結果より、N₂O排出量の温度依存性を明らかにしており、この経験から、実証プラントの燃焼炉内温度分布に注目した。実験結果の解析結果（図10）より^[6]、フリーボード下部に局所的な高温域が生成されることが分かった。本図は、従来型の常圧運転時と出口温度をおよそ同じ条件として比較した結果である。加圧運転の場合でも、砂層に供給された脱水汚泥の乾燥と熱分解により発生した可燃ガスの燃焼が、フリーボードで生じることは従来型と同様であるが、その燃焼速度は大幅に大きくなる。このために、フリーボード下部に局所高温域が形成される。これに対し、従来型の常圧運転の場合は、ガスの燃焼速度が小さいために、熱分解後の可燃ガスがフリーボード全体で燃焼するために、緩慢な温度上昇となる。このように、過給式の加圧条件におけるN₂O排出量低減の要因は、フリーボード下部に形成される局所的な高温域でのN₂Oの分解であると推定された。

当所の基礎燃焼実験は、設備の制約から6気圧以上の運転であったが、実証試験に合わせて設備を改造し、実

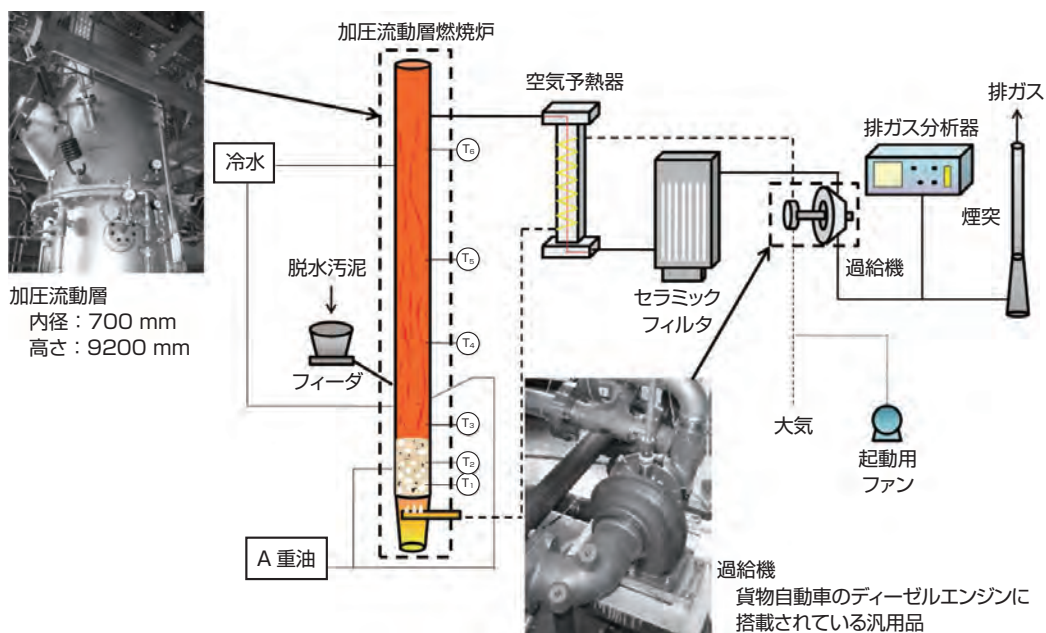


図7 実証プラントの概略図

証プラントとおおよそ同条件である 2-3 気圧で燃焼実験を行い、 N_2O 排出濃度は圧力よりも温度に依存することを明らかにした^[6]。また、 N_2O 低減効果を理論的に補完するため、素反応速度解析プログラムである CHEMKIN により、フリーボード温度分布を計算した。その結果、圧力が高くなるに連れて、フリーボードの下部で高温域が生成され、実証プラントと同様の傾向が得られた^{[9][10]}。 N_2O 低減の原因を迅速に究明できたのは、基礎研究と実証試験をうまくリンクさせた効果であるといえる。

さらに、 NO_x 排出量についても、当所の基礎研究結果と同様に排出量は低く、従来型と比較しても半減できた。これは、前述したとおり、燃焼排ガス中の水蒸気の NO_x 生成抑制効果や砂層内でチャーによる NO 還元効果が加圧化により増大されるためである。

最終的に完成したシステムでは、従来型システムと比較すると、電力使用量を約 40 %、補助燃料使用量を約 10 %、 NO_x 排出量を約 50 %、 N_2O 排出量を高温焼却時と比較して約 50 %それぞれ削減できる。これより、温暖化ガス削減効果 (CO_2 換算) として、国内平均規模

である 100 t/d 規模 1 基につき、年間約 4000 トンを見込める。国内の下水汚泥焼却炉は約 240 基あるが、その内半分導入されると推測すると、年間約 48 万トンの削減を見込むことができ、これは国内下水処理場の温暖化ガス総排出量の約 7 %に相当する。以上より、過給式流動燃焼システムは、省エネルギーに加え、低環境負荷をも達成できる画期的なシステムであることを実証できた^[2]。

このように、NEDO 事業完了後のピーアールの結果、東京都がこの技術に注目し、最終的な技術評価として、2008 年度より民間企業 2 社とで長期耐久性試験を目的とする共同研究が開始され、長時間運転を実施し、累積 2000 時間以上に及ぶ連続運転に成功した。これより、過給機の信頼性、耐久性に問題ないことが明らかとなり、温暖化ガス削減を掲げたアースプラン 2010 にこの技術が採用され、2010 年度末には、商用第 1 号機の受注を獲得することができた。1 号機の規模は、汚泥供給量で 300 t/d と国内最大級の規模である。実証プラントから約 60 倍のスケールアップとなるが、流動燃焼炉のスケールアップ手法はすでに確立されており、燃焼負荷、すなわち燃焼炉内断面積当たりの汚泥焼却量をあわせれば良く、スケールアップしても基本的には炉の横方向に大きくなるだけで、燃焼炉内のガス速度や滞留時間は同じである。したがって、炉の高さ方向の温度分布に変わりはなく、スケールアップさせても低環境負荷運転は可能であり、大きなトラブルなく運転できると考えられる。

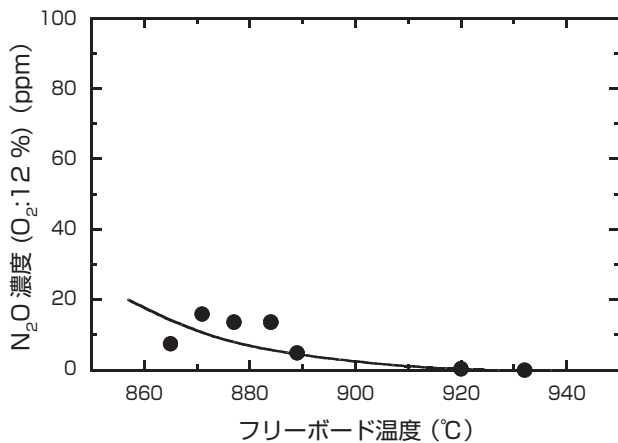


図 8 排ガス中 N_2O 濃度とフリーボード温度との関係^[9]

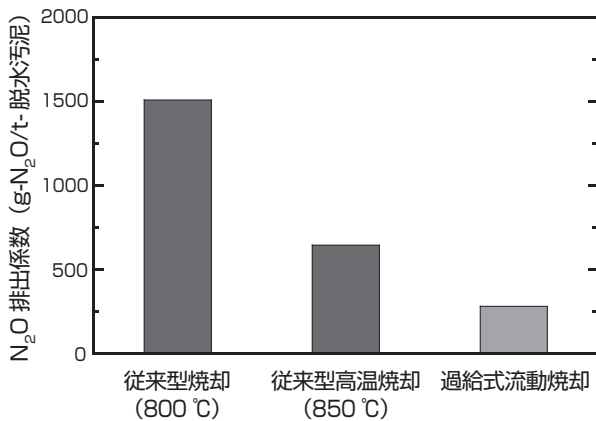


図 9 N_2O 排出量の比較^[9]

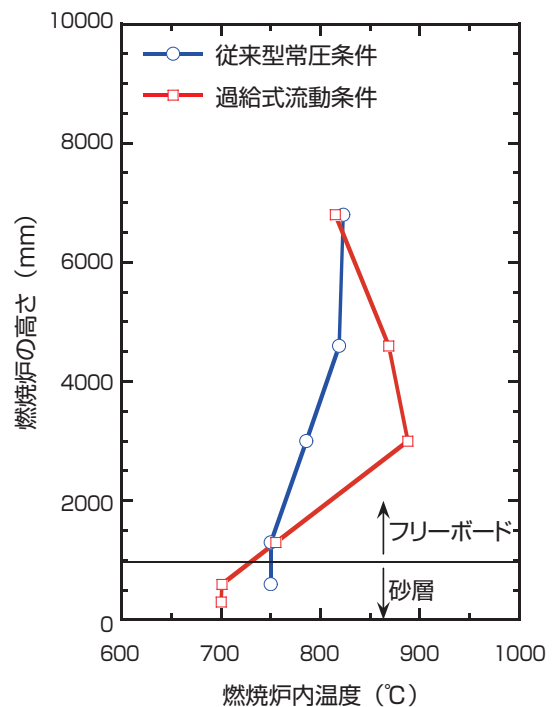


図 10 流動層燃焼炉内温度分布の比較^[10]

4 技術的波及効果

2010年度に、東京都葛西水再生センター向けに300 t/d規模の商用第1号機を受注した。2013年度末には運転開始予定である。さらに、これまでに1号機を含め以下に示す5機の受注を獲得できた^{[11][12]}。

- | | |
|---------------------------|------------|
| 1 東京都葛西水再生センター向け | 規模：300 t/d |
| 2 東京都浅川水再生センター向け | 規模：60 t/d |
| 3 東京都新河岸水再生センター向け | 規模：250 t/d |
| 4 神奈川県相模川右岸処理場向け | 規模：100 t/d |
| 5 大阪府安威川流域下水道中央水みらいセンター向け | 規模：100 t/d |

5機の中で最も運転開始の早いのは東京都浅川水再生センター向けで、2013年1月末より運転を開始し、試運転期間を経て、4月26日に現地で完成式典が行われた。関連特許も多数共同出願（現在11件）しており、運転開始後には当所へ特許料収入も見込める。公的研究機関として、この技術を通じて社会貢献ができたと考える。また、前述のとおり、各研究機関が集結したつくばの利点から生まれた技術であり、研究学園都市の目指すべき今後の技術開発の一つの方向性を示す好例であると考えられる。

1号機受注の際には、土研においてプレス発表が行われ^[13]、新聞等で大きな反響を得た^[14]。また学会においても実用化したことを認められ、2012年度化学工学会の技術賞をはじめ、2011年度化学工学会流動層分科会技術賞、2008年度環境システム計測制御学会奨励論文賞、2008年度日本エネルギー学会奨励賞等、多数受賞している。

国内には約240機の下水汚泥焼却炉があり、今後の設備更新が活発化される予測の中で、受注数はさらに伸びるものと期待できる。これまでの単純な焼却に代わる下水汚泥処理プロセスでは、現在多数の新技术が提案されているが^{[15][16]}、それらの中でもこの技術は実用化が最も早い技術である。当所としても、商用機運転時のトラブル等、緊急事態に対する迅速なバックアップを準備している。

5 将来の展望

これまでの、下水汚泥に特化した研究を行ってきたが、前述のように、下水汚泥は高含水燃料であり、この技術は同様の高含水燃料である都市ごみや尿尿・家畜糞

尿、焼酎粕等への応用展開が期待できる。さらに、国内のみならず、現在は埋め立て処理を行っているが、今後は焼却処理が主流となると予想される中国や韓国のような海外への展開も大いに期待できる。

この研究により確立した過給式流動燃焼システムは、各々の構成技術に着目すると、決して新しいものではなく、既存設備の組み合わせである。今回のように、発想次第では、新しいものが生まれる可能性は今後も十分にあると思われ、一層研究に精進していく所存である。

参考文献

- [1] 国土交通省HP (WEB).
- [2] 平成17年度-19年度NEDO成果報告書: 都市バイオマス収集システムを活用するためのエネルギー転換要素技術開発 (2008).
- [3] T. Murakami, Y. Suzuki, H. Nagasawa, T. Yamamoto, T. Koseki, H. Hirose and S. Okamoto: Combustion characteristics of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery, *Fuel Process. Technol.*, 90 (6), 778-783 (2009).
- [4] Y. Suzuki, S. Ochi, Y. Kawashima and R. Hiraide: Determination of emission factors of nitrous oxide from fluidized bed sewage sludge incinerators by long-term continuous monitoring, *J. Chem. Eng., Japan*, 36 (4), 458-463 (2003).
- [5] Y. Suzuki, T. Nojima, A. Kakuta and H. Moritomi: Pressurized fluidized bed combustion of sewage sludge (energy recovering from sewage sludge by power generation system), *JSME Int. J. Ser B*, 47 (2), 186-192 (2004).
- [6] T. Murakami, A. Kitajima and Y. Suzuki: Study on freeboard properties to maintain low N₂O emissions from sewage sludge in a fluidized bed combustor, *Energy Fuels*, 24, 4879-4882 (2010).
- [7] M. Shoji, T. Yamamoto, S. Tanno, H. Aoki and T. Miura: Modeling study of homogeneous NO and N₂O formation from oxidation of HCN in a flow reactor, *Energy*, 30 (2-4), 337-345 (2005).
- [8] (独)土木研究所, (独)産業技術総合研究所, 株式会社クボタ, 月島機械株式会社: 汚泥処理システム及び方法, 特許第3783024号 (2006.3.24).
- [9] 村上高広, 北島暁雄, 鈴木善三, 長沢英和: 過給式流動炉を利用した下水汚泥燃焼場におけるNO_x-N₂O排出特性, *TSK技報*, 6-10 (2010).
- [10] T. Murakami, A. Kitajima, Y. Suzuki, H. Nagasawa, T. Yamamoto, T. Koseki, H. Hirose and S. Okamoto: Effect of operating pressure on freeboard temperature distribution in a pressurized fluidized bed incinerator of sewage sludge, *Journal of JSEM*, 10, 58-61 (2010).
- [11] 月島機械(株)HP (WEB).
- [12] 三機工業(株)HP (WEB).
- [13] NHKニュース (2011.3.10).
- [14] 例えば、朝日新聞 (2011.3.11).
- [15] メタウォーター(株)HP (WEB).
- [16] (株)神鋼環境ソリューションHP (WEB).

執筆者略歴

鈴木 善三（すずき よしぞう）

1980年3月早稲田大学大学院理工学研究科応用化学専攻博士前期課程修了、4月通産省工業技術院公害資源研究所入所、公害第4部。1988年工業技術院サンシャイン本部、石炭液化を担当。2001年（独）産業技術総合研究所エネルギー利用研究部門主任研究員、2005年10月エネルギー技術研究部門クリーンガスグループ長、現在に至る。入所以来、石炭、バイオマス、廃棄物の流動層燃焼、流動層ガス化を中心に研究。2005年加圧流動層燃焼の研究により博士（工学）取得。この論文では、開発初期段階での実験室規模の加圧流動層による下水汚泥燃焼実験を担当し、開発を支援した。



村上 高広（むらかみ たかひろ）

2001年3月豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程環境・生命工学専攻単位取得退学、4月同大学工学部エコロジー工学系教務職員。2001年10月石川島播磨重工業株式会社基盤技術研究所基礎技術研究部入社、2002年4月基盤技術研究所熱・流体研究部所属。2007年4月独立行政法人産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門クリーンガスグループ研究員として入所し、2012年10月主任研究員として現在に至る。2001年12月に博士（工学）取得。エネルギー・環境分野が専門。この論文では、主に実験室規模の加圧流動層による下水汚泥燃焼実験、実証プラントの排ガス分析および運転結果の解析を担当した。



北島 暁雄（きたじま あきお）

2000年慶應義塾大学大学院理工学研究科機械工学専攻後期博士課程修了。博士（工学）。2000年通産省産業技術院資源環境技術総合研究所入所。2001年（独）産業技術総合研究所エネルギー利用研究部門研究員。2013年（独）産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃焼評価グループ主任研究員として現在に至る。1998年～2000年新エネルギー・産業技術総合開発機構提案公募研究員。2011～2012年産業技術企画調査員（経済産業省中小企業庁創業・技術課）。実用燃焼器における燃焼現象の解明と制御に関する研究に実験および数値解析の両面から取り組む。この論文では燃焼炉内気相燃焼領域の詳細化学反応数値計算による N_2O 抑制機構の解析を担当した。



査読者との議論

議論1 全般（長谷川 裕夫：産業技術総合研究所、景山 晃：産業技術総合研究所イノベーション推進本部）

順次、更新時期を迎える下水汚泥焼却システムについて、省エネルギー化と低 N_2O 排出量を図る新規システムを関係機関、企業と共同で設計、開発、評価し実証プラント試験まで行った統合的な論文で、シンセシオロジーにふさわしい内容と判断します。

技術が社会で価値を生み、実用化されるための研究開発の進め方を示す点で、読者の参考になると思います。

質問・コメント1（長谷川 裕夫）

産総研と土研という、つくばにある異なる分野、異なる省庁の研究機関、および参加企業が、互いに協力し、それぞれの持つポテンシャル

を補完し合って、技術を実用化に結びつけた好例と思います。

地方自治体の代表である東京都をターゲットにすることが導入拡大に効果的と思われるが、自治体に導入するまでのむずかしさ、その過程における土研の役割を明らかにしてください。また、実用化に向けて実証研究が、重要な役割を果たしたと思われるが、いかがでしょうか。

回答1（鈴木 善三・村上 高広）

下水道事業を所管する国土交通省に所属する土研が中心となっており、プロジェクトをスタートさせるために、まず、国内の各自治体へこの技術の優位性について説明を行いました。しかし、とても興味をもってはいただけず、第1号機の安定運転を確認してからという声が多かったです。そのような中、東京都がこの技術に高い関心を持ち、民間企業2社と共同研究を開始し、温暖化ガス削減を掲げたアースプラン2010にこの技術を取り上げたことが大きなステップアップとなりました。下水処理業界の中で東京都は中心的な役割を果たしており、各自治体が東京都の動向に注目していました。実機導入へは、実証システムの長時間連続運転による性能評価が重要であり、実証研究の中で、性能、運用に問題ないことを示すことができ、最終的な受注の獲得につながりました。

質問・コメント2（景山 晃）

この論文は1980～1990年代に設置された下水汚泥焼却装置の更新時期が近づいていること、既存の焼却装置ではエネルギー消費が大きく、かつ、亜酸化窒素 N_2O の生成濃度が比較的高いことを課題としてとらえ、低エネルギー消費、 N_2O が低濃度となる新規下水汚泥焼却システムの開発を進めようとしたことが核であろうと思います。

その際、加圧燃焼の要素技術の蓄積がある産総研と、汚泥焼却装置の評価・設計技術に知見がある土研および関係企業とが相互補完する形で新規な汚泥焼却システムの開発に取り組み、画期的な成果を得たことがポイントだと思います。

回答2（村上 高広）

本システムの開発当初は、省エネルギー化を達成できるシステムを重要視したコンセプトを描いていました。そこで、加圧条件下で汚泥を燃焼させ、その高温燃焼排ガスを利用して過給機により燃焼用空気を製造すれば、動力消費の高い二つのファンを省けるというシステムの考案に至りました。 N_2O の削減に関しては、実際に燃焼試験した結果をみてからという位置付けでしたが、これまでの高温焼却時よりも半減できるというとても良い結果を得ることができました。

質問・コメント3（景山 晃）

過給機を利用したシステムの開発において、過給機自体には大きな技術課題はなかったのでしょうか。一方、この研究においては、ガスタービンメーカーであり、かつ過給機のメーカーでもある企業の参加を得たことは情報力の勝負であり、真に構造的な研究を進める際には狭義の技術開発だけでなく、情報力や複数企業・機関の融合効果を発揮させるという取り組み方が重要と思われます。

回答3（村上 高広）

過給式システムの導入に当たって技術的隘路となったのは、過給機の耐久性でした。2008年度より民間企業2社とで長期耐久性試験を目的とする共同研究が開始され、長時間運転を実施し、累積2000時間以上に及ぶ連続運転に成功しました。これより、過給機の信頼性、耐久性に問題ないことを明らかにでき、実用化につながりました。

この研究開発においては、下水汚泥焼却プラントのメーカーに加え、これまでさまざまな研究開発を通して産総研とつながりの深かったガスタービンのメーカーの内、この研究開発の基本コンセプトを十分理解し、かつ、過給機も製造実績のある企業との連携体制を速やかに築くことができたことも開発のポイントでした。