過給式流動炉実証プラントにおける下水汚泥の燃焼特性評価

Evaluation of Combustion Characteristics of Sewage Sludge using a Demonstration Plant in Fluidized Bed Incinerator with Turbocharger

村上高広*・北島暁雄*・鈴木善三*・長沢英和**
山本隆文**・小関多賀美***・廣瀬 均***・岡本誠一郎****

Takahiro MURAKAMI, Akio KITAJIMA, Yoshizo SUZUKI, Hidekazu NAGASAWA
Takafumi YAMAMOTO, Takami KOSEKI, Hitoshi HIROSE and Seiichiro OKAMOTO

(Received December 12, 2008)

A new type of sewage sludge incinerator, which combines a pressurized fluidized bed combustor and a turbocharger driven by flue gas, was proposed. We constructed a demonstration plant (4.32 t/d scale) at a sewage works in Oshamanbe Cho in Hokkaido. The objectives of this study were combustion characteristics of de-watered sludge in this plant. Additionally, the characteristics between our new plant and a conventional one were compared using the experimental results. As the results, CO, NO_x, and N₂O emissions were substantially reduced by the pressurization. N₂O emission could be controlled by the freeboard temperature in spite of the high nitrogen content of the fuel and the pressurized conditions. In particular, N₂O emission of the new plant was less half of that of the conventional plant. It is thought that N₂O was decomposed at a local high temperature place in the freeboard. This phenomenon was verified qualitatively by investigating the chemical reaction rates. Therefore, our new fluidized bed incinerator with the turbocharger had a low environmental impact.

Key Words: Sewage Sludge, Fluidized Bed Combustor, Turbocharger, Pressurization, Nitrous Oxide

1. 緒言

前報¹⁾では、燃焼炉を加圧流動層とし、その後段に過給機を設置して、排ガスにより駆動させることで燃焼空気を生成させる過給式流動炉システムの概要を紹介した。さらに加圧流動層燃焼炉に着目して、研究室規模の加圧流動層による下水汚泥の基礎燃焼特性について報告した。本報では、北海道長万部町の終末処理場内に建設した汚泥焼却プラント実証設備（4.32 t/d）の運転結果について報告する。

2. 実験装置および方法

Fig. 1 に実証プラントの概略図を示す。本プラントは、燃料フィーダ、加圧バブリング流動層燃焼炉、空気予熱器、セラミックフィルタ、過給機および排気筒からなる。燃焼炉は内径 700 mm、高さ 9200 mm で、炉内温度は熱電対に

Fig. 1 Schematic diagram of a demonstration plant.

* 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（〒 305-8569 茨城県つくば市小野川 16-1）
Clean Gas Group, Energy Technology Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)
(16-1 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8569 Japan)

** 月島機械株式会社（〒 104-0051 東京都中央区佃 2 丁目 17-15）
Tsukishima Kikai Co., Ltd. (17-15 Tsukuda 2-chome, Chuo-ku, Tokyo 104-0051 Japan)

*** 三機工業株式会社（〒 242-0001 神奈川県大和市下鶴間 1742-7）
Sanki Engineering Co., Ltd. (1742-7 Shimotsuruma, Yamato, Kanagawa 242-0001 Japan)

**** 独立行政法人 土木研究所（〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6）
Public Works Research Institute(PWRI) (1-6 Minamihara, Tsukuba, Ibaraki 305-8516 Japan)

Table 1 De-watered sludge properties

Moisture [wt%]		87.0
Ignition loss [dry, wt%]		85.0
Ultimate analysis [dry, wt%]	C	43.7
	H	6.84
	N	7.50
	S	0.96
	O	26.1
Higher heating value [MJ/kg (d.b.)]		20.1

より測定した（砂層内：300 および 600 mm、フリーボード：1300, 3000, 4600 および 6800 mm の計 6 点、数値は分散板からの高さ）。流動媒体は、平均粒子径が 400 および 700 μ m の混合珪砂を使用した。運転中の層高は 950 mm である。過給機は貨物自動車のディーゼルエンジンに搭載されている汎用品で、仕様を以下に示す。重量：10.5 kg, 出口空気量：120-900 m³/h, 最大圧力比：3.0, 最大運転温度：1023 K。

燃料性状を Table 1 に示す。汚泥中の水分は 87 wt%、窒素含有量は 7.5 wt% であり、石炭や木材のような他の固体燃料よりもかなり高い。性状は実験毎に分析した。

本設備の操作手順として、フリーボードに相当する分散板から 1750 mm の位置より、A 重油を流動層炉内へ供給することで昇温させた。炉内温度が 873 K を超えると、供給点は砂層に該当する 500 mm へと変更させた。流動空気は過給機によって供給した。起動から自立運転開始までは、流動ブロワから圧縮空気も供給することにより過給機を駆動させ、過給機の入口温度が 623 K を超えると、流動ブロワを停止させて自立運転に切り替えた。すなわち、燃焼炉からの排ガスのみを駆動源とした。炉内温度が 1073 K を超えると、分散板から 2100 mm の位置より脱水汚泥を燃料フィーダによって供給した。実験中、空気予熱器の温度が 1123 K を超えると、空気予熱器の耐熱温度の影響から燃焼炉内へ冷却水を供給した。燃焼後の排ガスは、空気予熱器、セラミックフィルタおよび過給機を経て、大気中へ放出した。空気予熱器により、燃焼後の高温排ガスと過給機から生成した燃焼用空気との間で熱交換を行い、その後段のセラミックフィルタでは、主に脱塵を行った²⁾。

実験条件は、脱水汚泥供給量は 180 ~ 190 kg/h とし、炉内平均温度は、砂層で 1019 ~ 1075 K、フリーボードで 1138 ~ 1205 K、圧力は絶対圧で約 0.2 MPa とした。空気比は排ガス中の O₂ 濃度ベースで約 1.6 とし、炉内のガス速度は、 U/U_{mf} で約 6.0 とした。排ガス分析は、O₂, CO, CO₂ および NO_x は連続分析計（IR400 横河電機株、VA-3000 榊場製作所）により分析し、N₂O はガスクロマトグラフ（CP-4000, Varian Inc.）により分析した。

Fig. 2 Relationship between CO, NO_x, and N₂O emissions and O₂ concentration in the flue gas. Fig. 3 Dependency of N₂O emission on freeboard temperature.

3. 実験結果および考察

3.1 排ガス特性

Fig. 2 に、排ガス中の O₂ 濃度と CO, NO_x および N₂O 濃度の関係を示す。まず CO において、O₂ 濃度が低下するに連れて、CO 濃度は若干高くなっているが、全ての条件で低濃度を維持できた。これは加圧により炉内の O₂ 分圧が増加したことで、燃焼速度が促進されたためと考える。つぎに NO_x に関しては、本来 O₂ 濃度が増加するに連れて増加する傾向にあるが^{3),4)}、本結果は逆の結果が得られた。さらに、石炭燃焼場での NO_x 放出濃度よりも低濃度となった。汚泥中の水分はとて高いため、O ラジカルや OH ラジカル濃度に影響を与え、NO 生成反応を抑制する効果がある⁵⁾。さらに、加圧条件により水蒸気分圧が高くなるので、NO_x 抑制効果も大きくなると推測できる。N₂O に関しては、O₂ 濃度が変化してもほとんど変化しなかった。これまでの研究では、常圧流動層燃焼炉における排ガス中の N₂O 濃度はフリーボード温度で整理できると報告されている^{6),7)}。本研究のような高 N 含有量燃料および加圧条件においても、Fig. 3 に示すように、N₂O 濃度はフリーボード温度で整理

Fig. 4 Comparison of CO and NO_x emissions.

Fig. 5 Comparison of N₂O emission factors.

できることが分かった¹⁾。

3.2 過給式流動炉と従来型燃焼炉との燃焼特性の比較

Fig. 4 に、過給式流動炉と従来型（常圧）燃焼炉における排ガス中の CO および NO_x 濃度の比較を示す^{2), 8)}。両濃度とも前述したような加圧の効果により、従来設備よりも半分以下の濃度となった。つづいて、N₂O 排出係数を比較した結果を Fig. 5 に示す⁹⁾。N₂O 排出係数とは、1 トンの脱水汚泥から排出される N₂O 量で定義される。フリーボード温度 1123 K で比較した。結果として、従来型よりも半分以下に低減できることが分かった。

N₂O 排出量を低減できる要因として、燃焼炉内温度分布 (Fig. 6) より考察した。本図中の従来型のデータは、本実証プラントと同規模の運転データを使用した。過給式流動炉においては、分散板より 3000 mm 付近のところで局所的な高温域を形成している。これは、加圧により燃焼速度が促進されたことで、砂層内で熱分解したガスが、この付近で燃焼していると考ええる。一方、従来型においては、過給式流動炉よりもフリーボード内の温度上昇が緩慢であることから、熱分解ガスはフリーボード全体で燃焼していると考ええる。したがって、過給式流動炉では、局所的な高温域

Fig. 6 Comparison of temperature distribution in the combustor.

で N₂O が分解され易くなるので、排出量を低減できるといえる。この圧力により温度分布に顕著な差異が生じる現象をシミュレーション (CHEMKIN Ver. 3.7) により定性的に評価した。本シミュレーションでは燃焼反応式を組み込み、それらの反応式は GRI-Mech (HP: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/) より引用した。計算条件として、計算開始点を砂層最上部とし、砂層内で脱水汚泥は熱分解、A 重油は燃焼がそれぞれ完結する、またガスの流れはプラグフローと仮定した。燃焼炉の規模は実証プラントを模擬し、熱損失は 0 とした。本条件において、燃焼炉内圧力が 0.1, 0.2 および 0.3 MPa における温度分布、さらにガス濃度をそれぞれ比較した。Fig. 7 に、燃焼炉内温度分布の圧力依存性について示すが、圧力が高くなるほど温度上昇開始点が速くなることが分かる。これは、Fig. 8 に示す各ガス濃度分布 (ガス中の N₂ および H₂O 濃度が他の組成よりも顕著に高いため、横軸はモル比 0-0.1 の範囲に拡大した) から明らかなように、圧力が高いほど燃焼速度が速くなることから、温度上昇開始も速くなる。今後、熱損失などを考慮して、より定量的に評価していく。

以上より、過給式流動炉では、加圧の効果により従来型流動炉よりも低環境負荷を達成できる。

4. 結論

過給式流動炉実証プラントにより、下水汚泥の燃焼特性を明らかにした。得られた結果を以下に示す。

- 1) 排ガス中の CO および NO_x 濃度は、従来型燃焼炉よりも半分以下に低減できた。これは、炉内の酸素分圧が高くなることで CO の燃焼速度が促進されること、水蒸気分圧も高くなることで O および OH ラジカルにより NO

Fig. 7 Effect of pressure of temperature distribution in the freeboard by using simulation package.

生成反応を抑制することによる。

- 2) N_2O 排出係数は、従来型燃焼炉よりも半分に以下に低減できた。これはフリーボード内に形成する局所的な高温域で N_2O が分解され易くなることによる。
- 3) 燃焼炉内の温度分布より、過給式流動炉では燃焼速度が促進されることにより、フリーボードの下部で局所的な高温域を形成するが、従来型燃焼炉では熱分解ガスがフリーボード全体で燃焼するため、過給式流動炉よりも緩慢な温度上昇となった。本現象は、燃焼反応式を組み込んだシミュレーションにより、定性的に明らかにできた。
- 4) 過給式流動炉は低環境負荷の運転を達成できることが分かった。

謝 辞

本研究は、「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」の一環として、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から委託を受けて実施したものである。ここに記して、謝意を表する。

引用文献

- 1) 村上高広、鈴木善三、長沢英和、山本隆文、小関多賀美、廣瀬均、落修一：高温学会誌、34 (2008) 166-170.
- 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).

(a) 0.1 MPa

(b) 0.3 MPa

Fig. 8 Effect of pressure of flue gas concentration in the freeboard by using simulation package.

- 3) J. R. Pels, M. A. Wojtowicz, F. Kapteijn and J. A. Moulijn : Energy & Fuels 9 (1995) 743-752.
- 4) B. Leckner : Prog. Energy Combust. Sci. 24 (1998) 31-61.
- 5) T. Ogada and J. Werther : Fuel 75 (1996) 617-626.
- 6) M. Shoji, T. Yamamoto, S. Tanno, H. Aoki and T. Miura : Energy 30 (2005) 337-345.
- 7) M. Sanger, J. Werther and T. Ogada : Fuel 80 (2002) 167-177.
- 8) 本多裕姫：地球環境、2 (2001) 98-102.
- 9) 清水俊昭：地球温暖化とインベントリ、下水道新技術推進機構 - 下水道機構だより (2007).