

(論文)

## 下水汚泥循環流動層焼却炉の開発

宮本博司\*・和泉一也\*\*・矢部幸彦\*\*・吉ヶ江武男\*\*・笠井利雄\*\*・須鎗 護\*\*\*

\*都市環境・エンジニアリングカンパニー・開発部 \*\*都市環境・エンジニアリングカンパニー・装置技術部 \*\*\*技術開発本部・機械研究所

### Circulating Fluidized Bed Sewage Sludge Incinerator Development

Hiroshi Miyamoto・Kazuya Izumi・Yukihiko Yabe・Takeo Yoshigae・Toshio Kasai・Mamoru Suyari

Kobe Steel has developed a circulating fluidized bed sewage sludge incinerator in cooperation with Foster Wheeler K. K. The combustion test using the pilot plant with a sludge treatment capacity of 10ton/day showed that sludge feed rate is 4-6 times that for the conventional fluidized bed incinerator and CO emission is below 10ppm (12% O<sub>2</sub>, dry). Numerical analysis showed that an even temperature distribution was achieved.

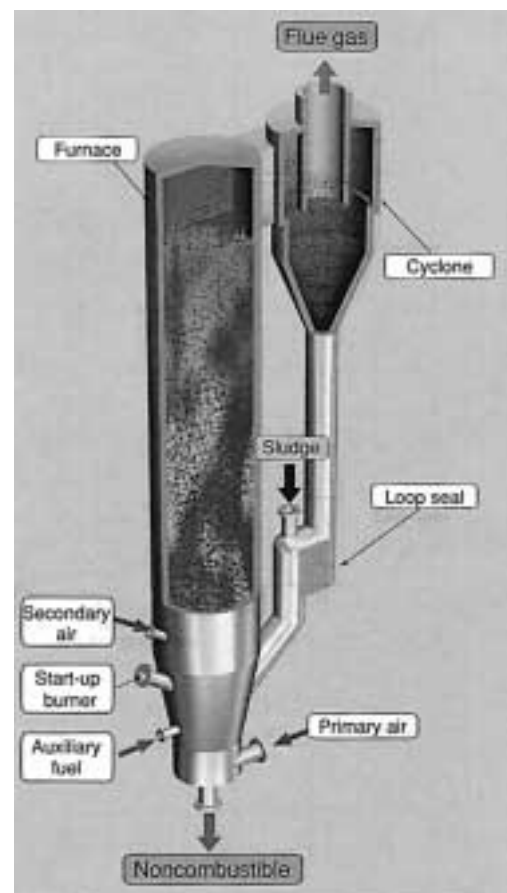
まえばき = 私たちの生活や産業活動にともなって発生する下水は、良好な水環境を保全するため、下水処理場において適正に浄化されている。その処理過程で発生する下水汚泥は、1998年度には全国で年間186万トン(乾物ベース)に達しており、それらは脱水された後に、約70%が焼却処理によって減容化・安定化されている。

汚泥の焼却処理においては、経済性、効率性の観点から、複数の処理場で発生した脱水汚泥を集約して処理する場合がある。こうした場合、幅広い性状の汚泥を安定焼却する必要があり、このようなニーズを満たす焼却炉として、近年、循環流動層焼却炉が注目を集めている。この炉は石炭を燃料とした循環流動層ボイラとして発展してきた技術<sup>1)</sup>を応用したもので、炉内のガス流速が速く高温の流動媒体が炉内を循環するため、炉内温度が均一化され、幅広い性状の物質を安定して燃焼できるという特長がある。現在下水汚泥焼却炉で主流を占めている気泡流動層焼却炉では、汚泥の性状によっては炉内温度差が大きくなり燃焼が不安定となる場合があるが、そうした条件においても、循環流動層焼却炉では炉内温度が均一となり安定して焼却することが可能である。

当社では、これまで培ってきた気泡流動層焼却炉の技術を発展させて、循環流動層ボイラで豊富な実績を有するフォスターウイラ<sup>2)</sup>と共同で、下水汚泥循環流動層焼却炉を開発・実用化している<sup>2)</sup>。本稿では、脱水汚泥処理能力10トン/日のパイロットプラントにおける燃焼試験の結果と、燃焼試験データを補完するために実施した炉内の流動・燃焼数値解析の結果を報告する。

#### 1. 循環流動層焼却炉の概要と特長

循環流動層焼却炉は、気泡流動層焼却炉と比較して炉内のガス流速が速く、炉内に充てんされている流動砂がガスに同伴して炉本体から飛び出し、炉出口で燃焼排ガスと分離され再び炉下部に循環される。当社が実用化した循環流動層焼却炉を第1図に示す。炉本体のほか、ホットサイクロンおよびループシールで構成されている。汚泥はスクリュフィードによって定量的に切出され、ループシール出口のリターンシュート部から炉内に投入



第1図 循環流動層焼却炉

Fig. 1 Circulating fluidized bed incinerator

される。炉内を循環している流動砂とともに炉下部に流入した汚泥は、炉底からの一次空気の吹込みで活発に流動する砂によって、短時間で解砕されるとともに、高温の流動砂からの熱伝達によって、乾燥、ガス化する。ガスは流動砂、一次空気、および炉下部側壁から吹込まれる二次空気によって、激しく攪拌、混合されながら炉内を上昇し、燃焼する。

ガスに同伴して炉本体から飛び出した流動砂は、ホットサイクロンにおいて遠心力によって捕集され、ループシールに落下する。ループシールは、流動砂を炉本体に戻す役割を果たしており、流動砂の飛散による炉本体の

圧力低下を補うように、ホットサイクロンで捕集された流動砂が炉下部に流入する。ループシールには流動砂が上向きに流れる部分を設けており、これによって、炉本体内部の圧力が上昇した場合でも、ガスがループシールを逆流してサイクロンの粒子捕集効率が低下するのを防止している。また、ループシールは、下部から流動化空気を吹込んで、内部を気泡流動層状態に維持している。これによって、流動砂が閉そくすることを防いでいる。

気泡流動層炉では、下水汚泥のような発熱量の低い物質を安定して焼却するためには、砂層（炉床）内での汚泥の燃焼割合を高く保ち、砂層温度を750～800程度の高温に維持する必要がある。そのため、蓄熱媒体として多量の流動砂を炉内に充てんとするとともに、全燃焼空気量に対する一次空気の割合を80%程度以上とする必要がある。しかし、循環流動層炉では、高温の流動砂を循環させることによって炉下部を高温に保つことができるため、流動砂の充てん量が少なく一次空気の圧損が小さくて済む。それに加えて、一次空気割合を50%程度にまで下げることができるので、燃焼空気プロワの動力が低減される。

当社炉の特長は、第一に、空気分散板に配置したノズルから一次空気を吹込んでいることである。ノズルの圧損を適切に設定することによって、ノズルごとの空気量を均等にしているほか、空気の吹出し方向を炉の中心方向とすることで、流動砂の流動を垂直方向だけでなく水平方向へも活発化させている。これにより、炉床全体で、常に良好な流動状態が保たれるので、安定した燃焼が可能となっている。また、第二の特長は、汚泥をループシール出口から炉内に投入していることである。これにより、汚泥と高温の流動砂との接触時間を長くとることができる。炉下部に流入するまでに汚泥は予備乾燥されるので、炉底部から炉頂部までを燃焼空間として確保でき、炉内で燃焼を完結させることができる。

## 2. パイロットプラントにおける燃焼試験

### 2.1 試験装置

汚泥処理能力10トン/日のパイロットプラントにおいて燃焼試験をおこない、循環流動層を下水汚泥焼却炉



写真1 パイロットプラント外観  
Photo 1 Appearance of pilot plant

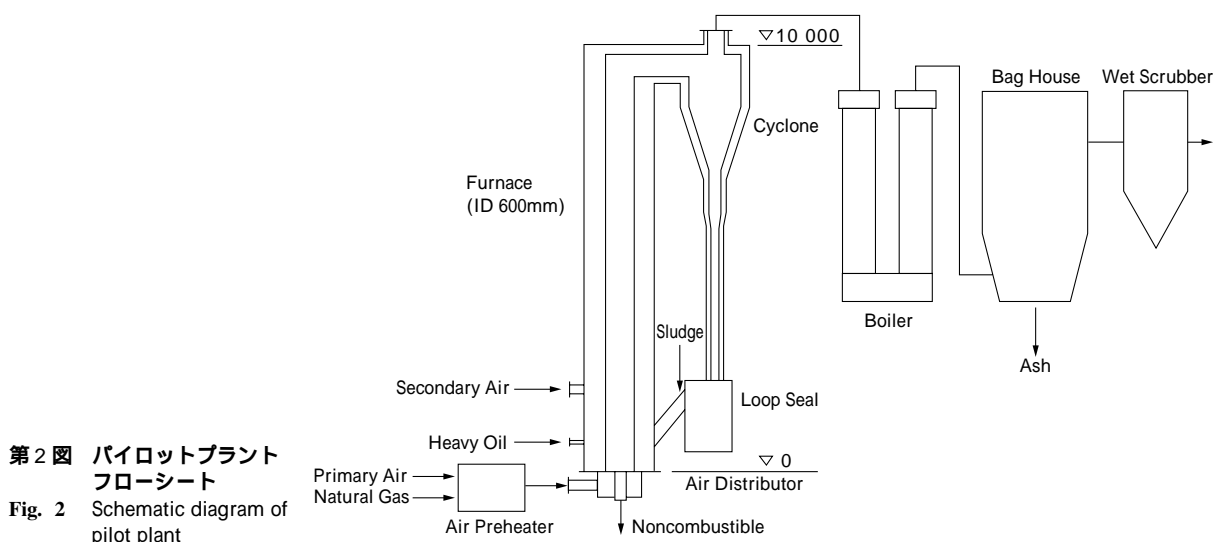
第1表 燃料分析結果  
Table 1 Fuel analysis

		Sludge	Heavy Oil	Natural Gas
Moisture	%	80.4	-	-
Volatile Matter	% in DS	71.6	-	-
Fixed Carbon	% in DS	9.1	-	-
Ash	% in DS	19.3	-	-
Lower Heating Value	MJ/kg in DS	17.56	40.45	48.3
Ultimate Analysis				
C	% in DS	43.4	82.0	74
H	% in DS	5.96	11.0	24
N	% in DS	4.25	0.3	1
S	% in DS	0.95	0.9	0
O	% in DS	26.1	5.8	0

として適用するために必要な設計データを取得した。パイロットプラントのフローシートを第2図に、循環流動層焼却炉の外観を写真1に示す。炉本体は内径600mmの内面耐火物構造で、空気分散板からの高さは10mである。補助燃料として重油を炉下部に噴霧供給し、一次空気を天然ガスバーナによって予熱している。

### 2.2 試験方法

燃焼試験に使用した下水汚泥は高分子凝集剤添加汚泥で、第1表に分析結果を示す。含水率は80.4%、揮発分は乾ベースで71.6%であり、高水分、高揮発分という下水汚泥として一般的な性状である。補助燃料の重油、および一次空気予熱用の天然ガスの分析値も第1表にあわせて示している。



第2図 パイロットプラントフローシート  
Fig. 2 Schematic diagram of pilot plant

運転条件を第2表に示す。汚泥供給量を237~413 kg/h, すなわち汚泥面積負荷(炉断面積あたりの汚泥供給量)を840~1460kg/(m<sup>2</sup>・h)の範囲で4条件設定し, 負荷の違いによる燃焼特性への影響を確認した。一次空気予熱温度を約500 とし, 全燃焼空気中の一次空気の割合を50~60%程度とした。また, 空気比が1.3程度になるように燃焼空気量を設定した。排ガス分析はホットサイクロン出口およびボイラ出口でおこない, O<sub>2</sub>・CO・NO<sub>x</sub>・N<sub>2</sub>Oを連続分析計によって測定した。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 炉内温度分布

各条件における炉内の温度分布を第3図に示す。ループシール内部の流動砂の温度は850 程度であるが, ループシール出口に投入された汚泥が, 流動砂の保有熱を吸収しながら炉下部に流入するため, 炉最下部の温度は800 程度となっている。しかし, ガス化した汚泥と補助燃料の重油の燃焼によって, 高さ4m までには850 に達し, それより上部では炉出口までほぼ一定の温度になっている。このことから, 炉の下半分で大部分の燃焼が終了していることがわかる。本燃焼試験では, 設備上の制約から, 炉底部から吹込む一次空気の温度を500 程度とし, 炉下部側壁から吹込む二次空気を常温としている。しかし, 実炉においてはいずれも最高650 の予熱空気を使用できるため, 本結果よりも炉下部の温度は高くなり, 炉上部との温度差は小さくなると考えられる。

また, 本図からわかるように, 今回の運転条件の範囲では, 汚泥供給量の違いによって炉内温度分布に大きな差異はみられなかった。このことから, 気泡流動層焼却炉の4~6倍程度の高負荷燃焼が可能であり, 炉がコンパクト化できることが明らかとなった。また, 汚泥面積負荷が840~1460 kg/(m<sup>2</sup>・h)と広い範囲にわたって安定して焼却できることを確認した。

炉頂温度および炉頂圧力の24時間の経時変化を第4図に示す。いずれも変動は少なく, 安定した燃焼状態が保たれていることがわかる。

#### 3.2 排ガス性状

各条件における排ガス濃度を第5図に示す。値はすべてO<sub>2</sub>12%換算値で表示している。いずれの条件においてもCO濃度は10ppm以下であり, 安定した燃焼が達成できた。また, バグフィルタで捕集された灰の強熱減量は0.14~0.18%であり, 低いCO濃度とあわせて燃焼効率の高さが確認された。NO<sub>x</sub>は40~60ppm程度, N<sub>2</sub>Oは100ppm程度であった。

#### 3.3 炉内流動・燃焼数値解析

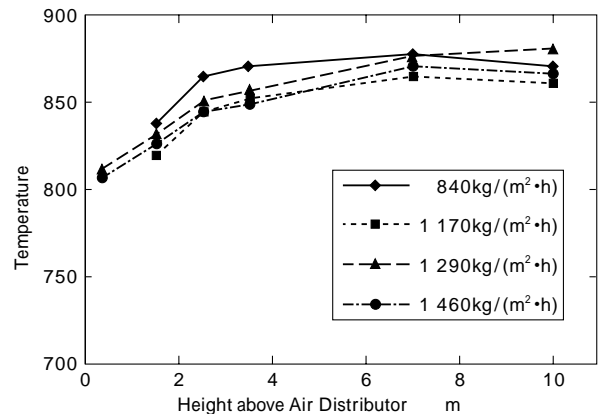
パイロットプラントで取得したデータの補完を目的として, 循環流動層焼却炉内部の流動・燃焼数値解析をおこなった。本解析では, 流動砂を連続体として取扱い, 軸対称二次元非定常計算を実施した。炉形状は, パイロットプラントと同じ内径600mm, 高さ10mとし, 二次空気の吹込み位置より上部の領域を解析の対象とした。すべてのガス, 空気, および流動砂が円筒下端より流入するとし, 入口境界条件は, 第2表に示すパイロットプ

第2表 運転条件

Table 2 Operating condition

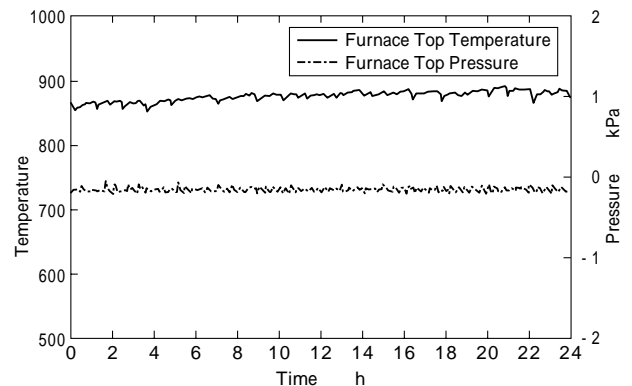
		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
Sludge Feed Rate	kg/h	237	330	364	413
	kg/(m <sup>2</sup> ・h)	840	1170	1290	1460
Heavy Oil Feed Rate	kg/h	33	36	41	42
Natural Gas Feed Rate	kg/h	7.2	8.3	8.3	7.9
Air Flow Rate	m <sup>3</sup> /h*	834	976	1067	1113
Fluidization Velocity	m/s	4.5	5.4	6.0	6.3
Furnace Average Temperature		854	836	846	839
Air Coefficient	-	1.38	1.34	1.32	1.28
Primary Air Ratio	%	58	57	53	50
Primary Air Temperature		508	502	535	501
Secondary Air Temperature		55	55	54	54

\* at 0, 101.3kPa



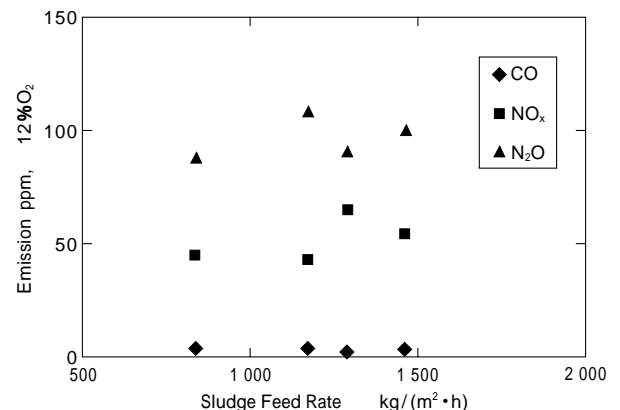
第3図 炉内温度分布

Fig. 3 Vertical profiles of temperature



第4図 炉頂温度と炉頂圧力の経時変化

Fig. 4 Trend of temperature and pressure at furnace top



第5図 排ガス

Fig. 5 Emission gas

ラントでのデータ取得時の運転条件のうち Run4 に合わせた。

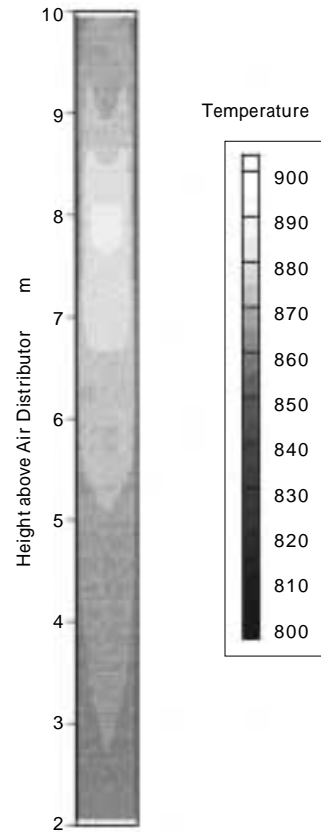
炉内温度分布の解析結果を第 6 図に示す。この図からわかるように、解析対象の全域にわたって平坦な温度分布となっており、最大温度差は約 40 であった。この結果は、第 3 図に示したパイロットプラントでの取得データとほぼ同等であり、循環流動層炉内部の流動・燃焼数値解析が可能であることが確認された。今後、炉の負荷や汚泥性状を変化させた場合の解析をおこない、炉内の温度分布の予測に活用していく予定である。

むすび = 循環流動層炉を下水汚泥焼却炉として適用するために、パイロットプラントにおける燃焼試験、および炉内流動・燃焼数値解析をおこなった。その結果、高い汚泥面積負荷において、広い負荷範囲にわたって安定して燃焼できること、および良好な排ガス性状を達成できることを確認するとともに、実機を設計するために必要なデータを取得することができた。今後は、さらなるブラッシュアップによって、よりいっそう環境負荷の低い汚泥処理システムとなるよう取組んでいきたい。

最後に、パイロットプラントにおける燃焼試験を共同で実施したフォスターウイラ㈱に対し、深く感謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) 鈴木 喜雄: 日本機械学会関西支部第 65 期定時総会講演概要集, No.904-2 (1990) p.8.
- 2) 宮本 博司ほか: 第 35 回下水道研究発表会講演集 (1998), p.942.



第 6 図 炉内温度分布 (数値解析結果)  
Fig. 6 Temperature distribution in the furnace  
(Result of numerical analysis)