

## 〈論文〉

## 汚泥焼却における廃熱発電システムの開発

EFFECTIVE UTILIZATION OF WASTE HEAT FROM A SEWAGE  
SLUDGE INCINERATION PLANT大迫健一<sup>1</sup>, 鈴木宏<sup>2</sup>, 串山宏太郎<sup>3</sup>, 中里卓治<sup>4</sup>, 飯塚保<sup>5</sup><sup>1,2,3,5</sup> 東京都下水道局 / 〒163-0021 東京都新宿区西新宿 2-8-1<sup>4</sup> (財) 下水道新技術推進機構 / 〒171-0021 東京都豊島区西池袋 1-22-8KENICHI OOSAKO<sup>1</sup>, HIROSHI SUZUKI<sup>2</sup>, KOOTAROU KUSHIYAMA<sup>3</sup>,  
TAKUJI NAKAZATO<sup>4</sup>, TAMOTSU IIZUKA<sup>5</sup><sup>1,2,3,5</sup> Tokyo Sewerage Bureau, Tokyo Metropolitan Government  
/2-8-1, Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo, 163-0021, Japan<sup>4</sup> Japan Institute of Wastewater Engineering Technology  
/1-22-8, Nishi-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo, 171-0021, Japan

## Abstract

Recently, it is strongly needed to utilize energy and materials such as waste heat, processed water and sludge from sewage sludge processing facility, from viewpoint of construction of self-sustainable society. Waste heat power generation from sludge incineration might lead to the economical merit if such conditions as introduction of sophisticated control system, dehydrator with high efficiency and intensive treatment of sludge for wide region are satisfied. It is very important for power generation to keep the amount and quality of electric power and stable power supply is mostly required. Therefore, new waste heat recovery system from sewage sludge incineration is developed that incorporates power generation system and sophisticated control system. A sewage sludge incineration plant with power generation system of 2500kW was constructed at Tokyo Metropolitan East Head Sludge Plant and self-supporting rate of electricity of 75% within the facility was demonstrated.

**Key Words** : sewage sludge incineration, recovery of unutilized heat, power generation

## 1 はじめに

下水処理場にて脱水された汚泥には、流入下水中の有機成分が濃縮され固形分が高カロリー有機分を大量に含んでいる。この有機分は $2.4 \times 10^4$  kJ/kg-VTS (5800kcal/kg-VTS)<sup>1)</sup>と低質石炭レベルのエネルギーを有しており、発電用燃料として十分に利用可能なレベルにある。また、地域に分散している水処理施設から発生する汚泥を送泥して集約処理することは、発電燃料としての汚泥を大量に集められるこ

とを意味している。

このスケールメリットを生かすとともに、脱水機には高効率の脱水機を導入し汚泥の燃料特性を高めた。従来の焼却炉では廃熱回収設備として燃焼用空気の予熱、白煙防止等に廃熱を熱源として直接利用している。そこで本研究ではさらに廃熱回収設備に蒸気発電設備を導入し、廃熱エネルギーを電力として回収しようとした。また、本来の機能である汚泥焼却が安定的に運転できるよう、フェールセーフ機能を持たせるシステム及び制御機能についても検討

した。

上記検討結果を踏まえて、廃熱回収蒸気タービン発電付汚泥焼却設備を計画、建設し、適用効果の検証をすることができた。

## 2 汚泥焼却設備のエネルギー収支

下水処理場に流入した下水は、まず水処理施設で生物処理され、その過程で発生する汚泥は脱水・焼却される Fig.1。

汚泥固形分当り低位発熱量  $1.75 \times 10^4 \text{kJ/kg-DS}$  ( $4180 \text{kcal/kg-DS}$ )、含水率 75% の汚泥を 300 トン/日の能力をもつ大型焼却炉で処理した場合、焼却時に  $7.1 \times 10^7 \text{kJ/h}$  ( $1700 \times 10^4 \text{kcal/h}$ ) の熱量を持つ約  $830^\circ\text{C}$  の排ガスが発生する。この高温廃熱ガスが持つ熱エネルギーの約 20% を通常の方式で燃焼用空気の予熱や白煙防止のために回収している。残りの約 80% 廃熱は排ガス処理された後、煙突から約  $200^\circ\text{C}$  の温度で排気すると共に、約  $50^\circ\text{C}$  の排ガス処理水として排水されている。

## 3 廃熱発電システム検討

廃熱発電システムの検討に際しては、廃熱回収熱源の種類・温度がその回収効率・設備規模に大きく影響すること、ならびに、その用途に見合った条件で利用場所まで効率的に輸送できるエネルギー媒体への変換が肝要である。

汚泥焼却廃熱における廃熱回収率を Fig.2 に示す。

焼却炉出口排ガスの高温域廃熱を排ガス温度で約  $830^\circ\text{C}$  から  $250^\circ\text{C}$  まで回収する。ここでは、空気予熱器で燃焼用空気を最高  $650^\circ\text{C}$  まで予熱し、焼却炉内で汚泥を自燃（補助燃料不要）させる。さらに残った高温域の余熱は、すべて蒸気ボイラーで一旦回収し蒸気に変換する。蒸気に変換された廃熱エネルギーによって抽気タービンで発電し施設消費電力の一部を自給する。これにより、高温域廃熱の安定した回収・有効利用が可能となる。

また、蒸気タービンからは一部蒸気を抽気 ( $980 \text{kPa}$ ) し、脱気器、煤吹装置等の発電設備補機への必要蒸気を供給しつつ、白煙防止の目的で煙突排ガスの再加熱熱源として利用する。なお、白煙の

防止に必要な熱量は大気温度・湿度によって変化するので、白煙防止に必要な熱量が減少した場合には施設内の冷暖房用熱源としても有効利用（将来計画）することで抽気蒸気の利用効率を高めることも考えている。また、比較的高温の排水である排煙処理塔排水から熱回収を図り暖房用及び給湯用に利用する。

以上の廃熱回収システムを構築すれば、従来約 20% 程度（空気予熱器 19.3%、白煙防止器 1.6% の合計）であった焼却廃熱回収率を約 30%（発電 4.7%、抽気蒸気有効利用 0.5%、排煙処理塔 5.3% を加算）まで向上できる。また、一部の回収熱を電気エネルギーに変換することで、施設消費電力の一部が自給可能となり、その自給率は焼却設備に対しては 80~95% が見込める。

## 4 廃熱回収蒸気タービン発電付汚泥焼却設備の検討

### 4.1 全体設備の構成

Fig.1 に設備全体のフローを示す。

脱水設備は、処理量  $80 \text{m}^3/\text{h}$  ・台の高効率遠心脱水機 5 台の構成となっており、濃度 2.0~4.0%（含水率 96~98%）の余剰及び混合汚泥を含水率 74~76% まで脱水する。

焼却設備は日量 300 トン/日・基の流動床式焼却炉で、補助燃料には都市ガスを使用する。焼却炉排ガスラインには燃焼空気をあらかじめ加熱するための空気予熱器があるが、これに並列させて廃熱ボイラーを設置した。

発電設備は、自然循環式ボイラー（過熱器付き）で圧力  $3.0 \text{MPa}$ 、温度  $355^\circ\text{C}$  の過熱蒸気を発生させ、その発生量は最高  $10.3 \text{トン/h}$  ・基とし焼却炉と対に 3 基設置する。過熱蒸気は高圧蒸気溜を介して蒸気タービン発電設備（抽気復水タービン）に送られる。蒸気タービンは一基とし最高発電出力  $2500 \text{kW}$  の能力を有する。

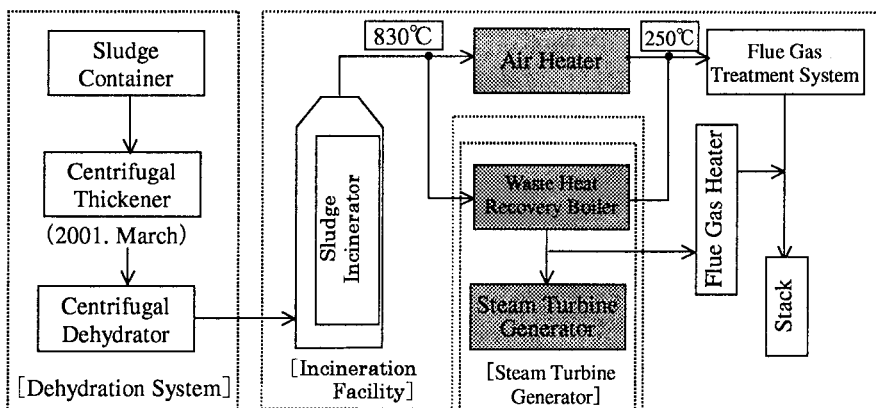


Fig.1 Schematic Flow of Facilities

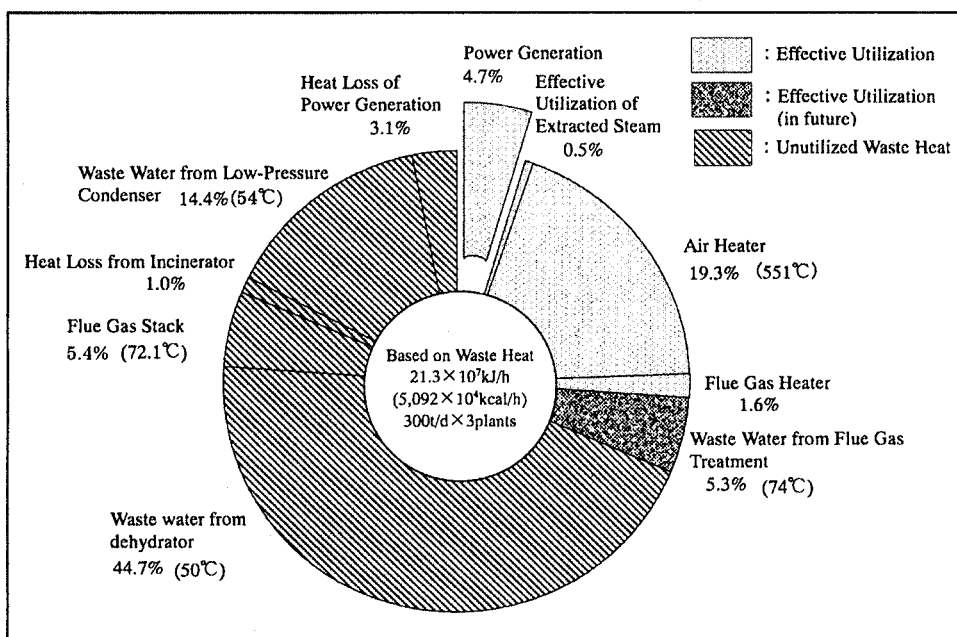


Fig.2 Heat Balance at Sewage Sludge Incinerator Plant

## 4.2 廃熱回収蒸気タービン発電設備の構成

Fig.3 に廃熱回収蒸気タービン発電設備フローを示す。各焼却炉に対応している1号から3号廃熱ボイラーにより発生した蒸気は高圧蒸気溜を介して蒸気タービン発電機に送気され発電する。なお、一部の蒸気はタービンより抽気し、白煙防止器、脱気器等に利用する。将来は施設内の冷暖房用熱源としての有効利用も図る。タービン排気蒸気は水冷式の低圧復水器で復水する、この冷却水には下水処理水を使用し処理水の有効利用を狙う。その後、復水はボイラー給水ポンプでボイラーに供給される。

この発電設備で、1号から3号までの焼却廃熱回収蒸気を高圧蒸気溜に集約することで、廃熱回収規模を確保した発電が可能になる。

一方、汚泥焼却処分の視点から検討すると、発電設備の自主検査・通産立会検査（ボイラー：1回/年、タービン：1回/2年）及び、増設時には焼却設備・発電設備の停止を余儀なくされる等、蒸気タービン発電設備を付帯させることによる設備稼働率向上の阻害要因が予想される。これを回避するため主要補機には予備機を設け二重化する。

## 4.3 廃熱回収システム

焼却廃熱の回収は並列配置された廃熱ボイラーと空気予熱器で排ガス温度を830°Cから250°Cまで降温して回収する。空気予熱器は焼却炉が必要とする補助燃料を低減させるため、燃焼用空気を予熱（常温から最高650°Cに昇温）する。焼却炉が自然を開始しかつ、炉内温度が上昇する傾向にある場合には、適正な炉内温度を維持継続するため、燃焼空気温度を下げることを目的に空気予熱器の回収熱量を低減して廃熱をボイラー側で連続的に回収することが、本システムの特徴である。また、複数の焼却炉それぞれに設置した廃熱ボイラーからの発生蒸気を集約し、一括して発電するシステムは日本の汚泥焼却設備としては初めての試みである。

従来の焼却炉では空気予熱器による回収熱量は一定（予熱温度約650°C）で、熱量が不足する場合には焼却炉で補助燃料を追加することで対応している。焼却炉が自然運転を開始した場合には、予熱した燃焼空気を再び冷却（廃熱）して対応している。

一方、本システムでは、空気予熱器の使用伝熱領域を空気の供給位置及び供給量により制御し必要な空気温度まで予熱する。この制御の結果、空気予熱器出口排ガス温度も変化することとなる。そこで、空気予熱器及び廃熱ボイラー出口に設置したダンパーの操作で両プロセスを通過する排ガス量の分配比率を調節し空気予熱器出口排ガス温度も一定（250°C）になるよう制御する。

この制御により焼却炉出口の廃熱を、まず空気予熱器で必要熱量を回収、残りの廃熱量は全て廃熱ボイラー側で回収することが可能となる。

以上の連続制御の過程で、空気予熱器に腐食トラブル等の不具合が発生しないようフェールセーフ機能も持たせる。

本廃熱回収システムの中心となる制御は「空気予熱器出口排ガス温度制御」である。本制御には「焼却炉自然温度制御」及び「焼却炉入口流動空気温度制御」が関連する。さらに「空気予熱器中間空気温度制御」で空気予熱器の腐食に対するフェールセーフ機能をもたせた。Fig.4、Fig.5に廃熱回収システムの制御システムを、また、Fig.6にその運転トレンドグラフを示す。

なお、制御ループの詳細を以下に述べる。

### (1) 空気予熱器出口排ガス温度制御、ボイラー出口排ガス温度制御 (Fig.4 参照)

SV (設定値) : 空気予熱器出口排ガス温度 (TC-F44)

PV (プロセス値) : 空気予熱器出口排ガス温度 (TE-F44)

MV (操作値) : 空気予熱器出口排ガス流量調節弁開度 (CV-F44a)  
ボイラー出口排ガス流量調節弁開度 (CV-F44b)

ただし、調節弁はどちらか全開とする。

本調節弁は、空気予熱器出口温度を一定に制御するために空気予熱器側への排ガスを調整するものであり、残りの排ガスを廃熱ボイラー側へ流して余剰熱量は蒸気として全量熱回収するものである。本制御では、2つの弁を制御対象としているため、MV出力に対する弁開度を開度と流量の特性グラフを用いて制御を行う。



で空気予熱器にフェールセーフ機能をもたせる。

また、将来的には、炉内の各種燃焼制御と共に、以上述べた各種制御の一括したファジー制御構築と有効性を明らかにして行きたい。

#### 4.4 蒸気タービン発電<sup>2,3)</sup>

蒸気タービンの効率を高めるには、蒸気タービン入口の蒸気条件を高温・高圧にする方法があるが、本設備では発電規模・建設コスト等について総合的に勘案すると共に、汚泥の処理処分を優先して廃熱ボイラ出口蒸気は不具合の発生が少なく実績の多い圧力 3.0MPa、温度 355°C とする。蒸気タービンには抽気復水タービンを採用する。タービンの蒸気条件は入口圧力 2.75MPa、排気圧力 14.7kPa とする。

タービン入口の蒸気圧力は高くするほど、タービンでの有効熱落差が大きくなり発電量は増加する<sup>3)</sup>。この熱落差に着目するとタービン排気圧力も低いほど熱落差は大きくなる。しかし、排気圧力を低下させるためには、復水器の規模は大きくなり冷却水必要量も増加する。そこで、排気圧力は 14.7kPa とする。なお、復水器冷却水には下水処理水を使用する。

また低負荷運転（1 炉運転時：800kW）においてもタービン効率の極端な低下を招かぬよう、又、定格運転条件下（3 炉運転時：2500kW）では抽気蒸気の施設内有効利用等を配慮し、980kPa の抽気ができる抽気復水タービンを採用した。これにより、需要（季節変動による抽気蒸気利用設備所要熱量）に合わせた蒸気エネルギーの有効利用が可能となる。

## 5 実機適用結果と考察

### 5.1 自然による燃料の削減<sup>1)</sup>

焼却設備の汚泥性状範囲と自然限界曲線を Fig.7 に示す<sup>1)</sup>。図中の六角形の内側が設計汚泥性状範囲である。自然限界曲線の左側が自然範囲を、右側が補燃範囲を示している。汚泥は含水率が下がり、自然限界曲線の左側ゾーンに入ると燃料特性が上向し焼却炉は自然する。一方、含水率が上がり、自然限界曲線の右側ゾーンに入ると、補燃燃料を必要とする。そこで、脱水機には高効率の脱水機を導入し焼却設備の自然を狙った。Fig.7 の白丸と黒丸は平成

11 年度に調査（5 月、9 月、11 月）した汚泥性状と焼却炉の自然/補燃運転区分を示す。調査の結果、理論上の自然汚泥性状範囲とほぼ一致している。尚、高効率脱水機に関する詳細説明は省略する。

今後、脱水設備での高分子凝集剤の選定改善等で汚泥脱水性能を向上させることによりさらに、自然運転達成率を向上させることができる。発電効率を高めるためには汚泥の燃料特性を向上させて自然可能とすることにより、燃焼空気温度を低減できる運転とすることが発電量向上の面で効果的である。今後、設備全体の効率的運用を図るためには、①含水率制御の高度化、②汚泥発熱量制御の改善が必要である。すなわち、汚泥を従来の廃棄物としての扱いから燃料としての視点で対応していくことが重要である。

### 5.2 廃熱ボイラーによる熱回収

廃熱ボイラーについて年間を通しての性能調査及び評価を行った<sup>1)</sup>。まず受熱側（排ガス側）の熱量を算出する上でボイラー入口排ガス量、温度、排ガス組成のデータを採取した。一方、受熱側（蒸気側）の熱量を算出する上で、入熱にはボイラー給水データを、出熱には過熱器出口蒸気データを採用した。調査は平成 11 年度（5 月、9 月、11 月）に行った。Table.1 に実機調査データ及び熱回収効率を示す。ボイラー熱回収効率は設計ボイラー効率 70% に対して、67~69% であった。また本設備の熱損失は約 4% である。尚、ボイラー効率（ $\phi$ ）の定義は次式に示す。

$$\phi = \frac{W_{out} - W_{in}}{G_{in}} \times 100$$

$W_{out}$  : 過熱器出口蒸気熱量 (J/h)

$W_{in}$  : ボイラー給水熱量 (J/h)

$G_{in}$  : ボイラー入口排ガス熱量 (J/h)

### 5.3 廃熱回収による発電効果及び経済メリット

#### 5.3.1 廃熱回収効率の予測

計画代表性汚泥（含水率 75% $H_2O$ 、低位発熱量  $1.75 \times 10^4$  kJ/kg・DS）の焼却では、 $7.1 \times 10^7$  kJ/h ( $1700 \times 10^4$  kcal/h) ・炉 × 3 炉 =  $21.3 \times 10^7$  kJ/h

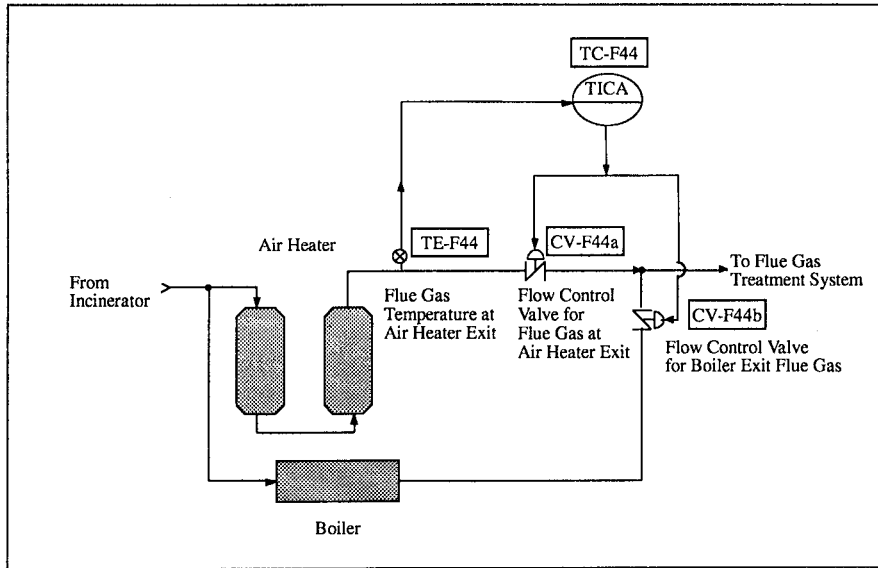


Fig.4 Flue Gas Temperature Control System at Air Heater Exit

( $5092 \times 10^4 \text{ kcal/h}$ ) の焼却廃熱が焼却炉より排ガス ( $830^\circ\text{C}$ ) として排気される。この排ガスは、空気予熱器と廃熱ボイラーとに分流配分され  $250^\circ\text{C}$  まで熱回収される。その分流比率は炉出口排ガス量  $32000 \text{ Nm}^3/\text{h}$  に対して空気予熱器への排ガス流入量は  $15000 \text{ Nm}^3/\text{h}$  で燃焼空気供給温度  $550^\circ\text{C}$  まで予熱され、残りの排ガス  $17000 \text{ Nm}^3/\text{h}$  が廃熱ボイラーへ流入し蒸気として廃熱回収される。回収熱量比で 47 対 53 (空気予熱器対廃熱ボイラー) である。空気予熱器で回収した熱は再び炉内に戻される。一方、廃熱ボイラーで回収した熱は蒸気エネルギーに変換され、 $2450 \text{ kW}$  の発電を行うと共に、蒸気タービンから、一部蒸気を抽気し白煙防止用熱源に利用される。また、前述の Fig.2 に廃熱回収効率を整理した。有効利用される熱量は焼却全廃熱量に対して、約 30% であり、その内 5% が発電電力として回収される。

### 5.3.2 発電効率と経済メリット

Fig.8 に平成 10 年度の廃熱蒸気発電電力量、汚泥処理施設全体の電力使用量、受電量、発電による電

力自給率の実績を示す。蒸気発電電力量の実績は、 $5,343 \text{ MWh/年}$  ( $445 \text{ MWh/月}$ ) である。また、汚泥処理施設全体の消費電力量に対する発電による電力自給率は約 30% であった。

東部スラッジプラントの設備別消費電力量の内、焼却設備の消費電力量は全体の 40% をしていることから、汚泥焼却設備の消費電力量に対する発電電力自給率は 75% に達している。

Table.2 に計画発電量及び実績発電量・経済効果に関する一覧を示す。廃熱回収蒸気タービン発電設備設置による経済効果は、電力料金を  $10 \text{ 円/kWh}$  として発電電力量を金額に換算すると平成 10 年度は、 $53,430 \text{ 千円/年}$ 、平成 11 年度は、 $56,268 \text{ 千円/年}$  である。現時点では経済メリットは発生していない。しかし、全体設備が完成する平成 12 年度の年間発電量は  $19,380 \text{ MWh/年}$  と予想している。

$$[ 2000 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 60 \text{ 日} + 2500 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times (365 \text{ 日} - 90 \text{ 日}) = 19,380 \text{ MWh/年} ]$$

これは、タービンの法令点検に伴う停止を 1ヶ月とし、焼却炉の年次点検を 1基当り 1ヶ月とすると、発電を全く運転しない期間が 1ヶ月、焼却炉 2基運転

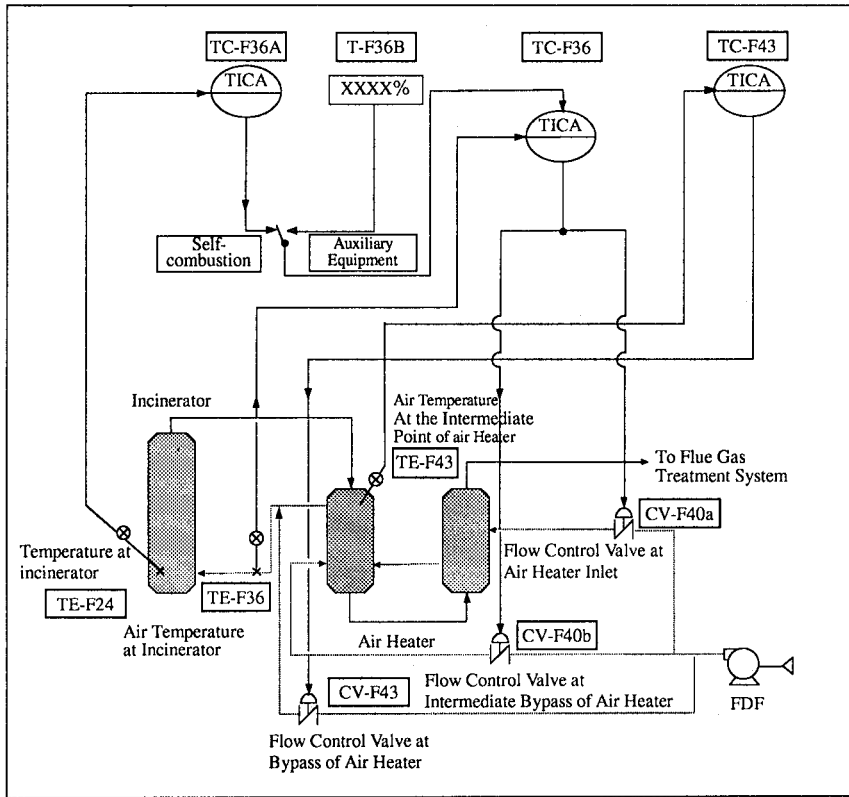


Fig.5 Temperature Control System for Incinerator and Air

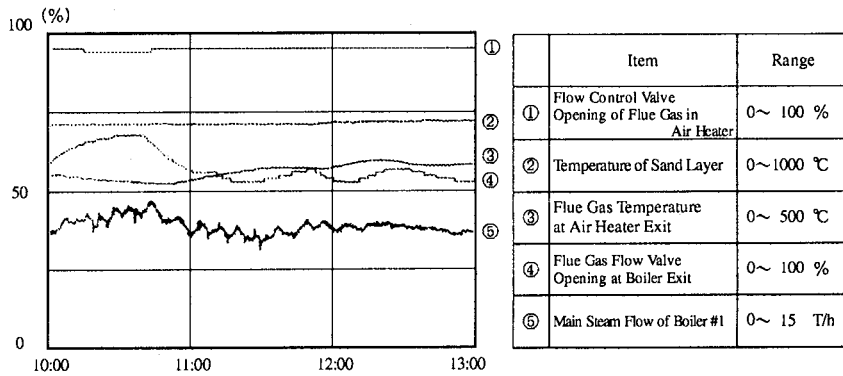


Fig.6 Trend Chart



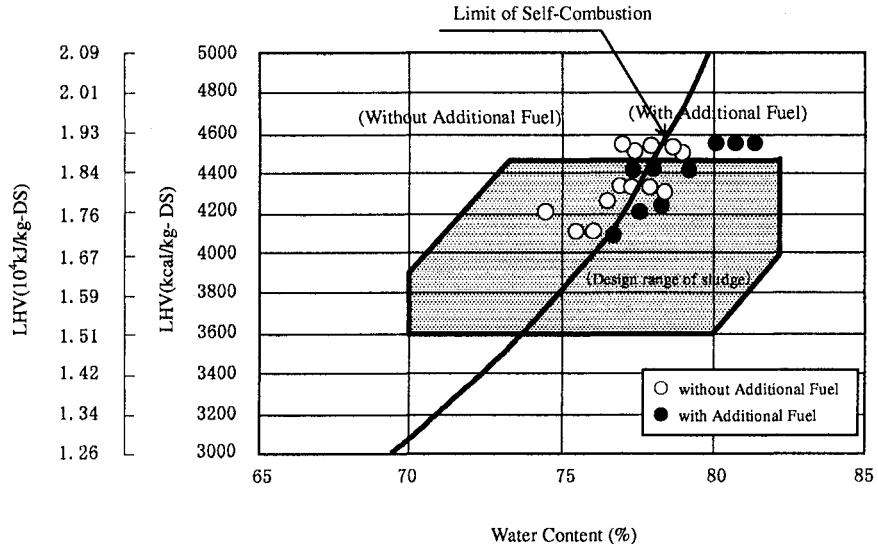


Fig.7 Self-Combustion Limit

Tab.1 Heat Recovery and Efficiency of Waste Heat Boiler

1999, Month	Flue Gas			Heat Loss [%]
	Inlet (Flue Gas)	Exit (Flue Gas)	Difference in heat [ $\times 10^7 \text{ kJ/h}$ ]	
	Heat [ $\times 10^7 \text{ kJ/h}$ ]	Heat [ $\times 10^7 \text{ kJ/h}$ ]		
2000, May	3.2	0.9	2.3	4.5
2000, September	2.3	0.7	1.6	2.0
2000, November	3.1	0.9	2.1	4.7

1999, Month	Boiler			Heat Recovery Efficiency in Boiler [%]
	Inlet (Feed Water)	Exit (Steam)	Difference in heat [ $\times 10^7 \text{ kJ/h}$ ]	
	Heat [ $\times 10^7 \text{ kJ/h}$ ]	Heat [ $\times 10^7 \text{ kJ/h}$ ]		
2000, May	0.6	2.8	2.2	68
2000, September	0.4	2.0	1.6	67
2000, November	0.5	2.5	2.0	69

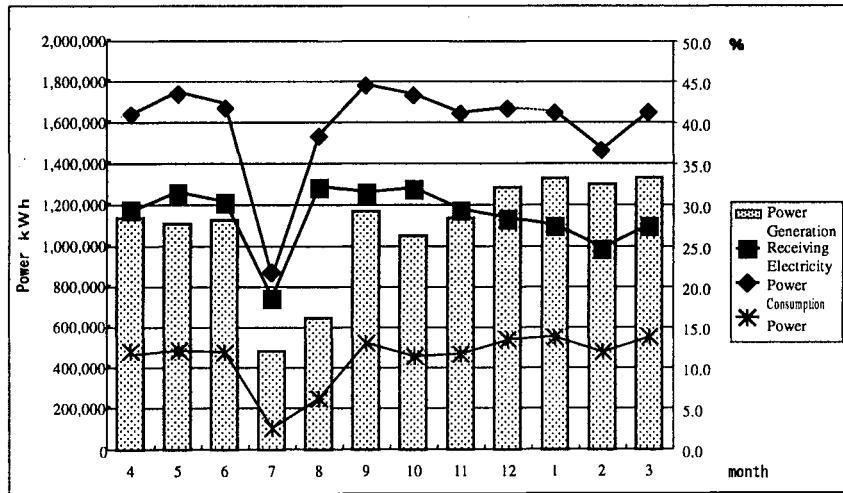


Fig.8 Power Generation and Power Consumption (1998)

Tab.2 Result of Operation and Cost Performance (Power Generation and Merits)

Item	unit	1998	1999	2000	2001	miscellaneous
Planned Power Generation	—	800kW×11M/year	800kW×10M/year 2000kW×1M/year	800kW×1M/year 2000kW×10M/year	2000kW×2M/year 2500kW×9M/year	M : Month
① Power Generation	kWh/year	5,342,990	5,626,760	—	—	
② Plan	kWh/year	6,432,000	7,296,000	15,216,000	19,380,000	
③ Converted Electricity Fee (Result)	10 <sup>3</sup> yen/year	53,430	56,268	—	—	10yen/kW
④ Converted Electricity Fee (Plan)	10 <sup>3</sup> yen/year	64,320	72,960	152,160	193,800	10 yen/kW
⑤ Running Cost (Assumption)	10 <sup>3</sup> yen/year	100,000	100,000	100,000	100,000	
⑥ Yearly Profit or Loss (Result)	10 <sup>3</sup> yen/year	-46,570	-43,732	—	—	=(③-⑤)
⑦ Yearly Profit or Loss (Plan)	10 <sup>3</sup> yen/year	-35,680	-27,040	52,160	93,800	=(④-⑤)
miscellaneous		6,432,000kWh/year=800kW×335day×24h/day 7,296,000kWh/year=(800kW×305day+2000kW×30day)×24h/day 15,216,000kWh/year=(800kW×30day+2000kW×305day)×24h/day 19,380,000kWh/year=(2000kW×60day+2500kW×275day)×24h/day				

の2000kW発電の期間が2ヶ月、その他を2500kW発電として試算した。この時には、年間発電換算電気量は、193,800千円/年で、全体計画時の年間維持管理費100,000千円/年とすると、年間損益としては、193,800千円/年-100,000千円/年=93,800千円/年の経済メリットが期待できる。

また、年間19,380MWh/年の廃熱回収発電を温室効果ガス(CO<sub>2</sub>)の排出量に換算すると7440t-CO<sub>2</sub>/年(CO<sub>2</sub>排出係数:0.384kg/kWh)となり、化石燃料で発電した場合のCO<sub>2</sub>排出を代替(削減)する効果も大きい。

## 6 おわりに

汚泥焼却設備における廃熱発電システムを研究した結果、廃熱回収蒸気タービン発電付焼却設備によって、汚泥自体の持つエネルギーで自燃できるシステムを構築することが判明し、実用機でその効果を実現することができた。

- (1) 汚泥の自燃焼却に伴う発電が可能で、設備消費電力の自給を図る設備としてほぼ目標性能(焼却廃熱の30%回収、その内5%が発電電力)が確認できた。
- (2) 汚泥処理施設全体の消費電力量に対する、廃熱回収蒸気タービン発電設備による電力自給率は平成10年度で約30%達成。汚泥焼却設備の消費電力量に対しては75%に達している。
- (3) 焼却廃熱回収蒸気タービン発電設備の設置に伴う経済効果は、現時点では十分とは言えないが、2500kW発電が可能となる平成13年度からは経済効果が得られる見通しである。

- (4) 廃熱回収発電により化石燃料で発電した場合のCO<sub>2</sub>排出を代替(削減)する効果が得られ地球温室効果ガスの削減に寄与できる。

今後は本設備の発電エネルギーの安定化が重要な課題となることから、エネルギー源となる汚泥の送泥ネットワーク構築による汚泥供給量の安定化、焼却炉の燃焼状況に合わせた脱水設備の含水率制御システム構築による汚泥燃料特性の向上・安定化が考えられる。また、焼却炉内各種制御と今回の廃熱回収システムの制御を総合的に関連付けたファジー制御等の導入を図ることで、安定的かつ効率的運転が可能になる。さらに、焼却排ガス処理工程(排煙処理塔)で発生する洗煙排水(50~74°C)に代表される低温域廃熱回収により、地域冷暖房用の熱供給等の計画があり、熱供給に向けて積極的に推進されているところである。

## 参考文献

- 1) 汚泥処理の機能向上に関する共同研究, 東京都下水道サービス(株), 平成11年度報告書(2000-3)
- 2) 須恵元彦: 蒸気噴射型ガスタービンを適用したごみ発電システムの性能特性, 日本機械学会論文集(B編) 62巻597号(1996-5)
- 3) 村松重兵衛, 石丸等, 石垣幸雄, 梶隆一: スーパーごみ発電におけるガスタービン容量最適化に関する一考察, 日本機械学会論文集(B編) 63巻612号(1997-8)

(受付 2000. 10. 31)

(受理 2000. 12. 13)