

# 高効率熱回収型流動床式都市ごみ焼却炉

白石幸弘\*・伊藤 正\*・河端博昭\*・須鎗 護\*\*・箕浦忠行(工博)\*\*・坂野雅章\*\*

\*都市環境本部・環境エンジニアリングセンター \*\*技術開発本部・機械研究所

## Municipal Solid Waste Fluidized-bed Incinerator with High-efficient Heat Recovery System

Yukihiro Shiraishi・Tadashi Ito・Hiroaki Kawabata・Mamoru Suyari・Dr. Tadayuki Minoura・Masaaki Sakano

A municipal solid waste fluidized bed incinerator with high-efficiency heat recovery system was developed. Steady and complete combustion was achieved in the incinerator even when a calory of waste is high or fluctuating, because the fluidized bed temperature is controlled with a heat recovery system and unburned gas is completely burned in the freeboard. This incinerator could serve as a compact and highly efficient electric power generator, because of high heat transfer coefficient and low corrosion area in fluidized bed. The fundamental characteristics of combustion and heat recovery were investigated with a model plant experiment. The plant (20t/d) demonstrated highly efficient heat recovery and complete combustion. The results satisfied the new control guidelines of the DXNs (1997).

まきがき = オゾン層の破壊, 地球温暖化, 酸性雨などの地球環境問題への認識が高まる中, 省エネ, 省資源・低環境負荷の持続的発展が可能な循環型社会(リサイクル社会)への転換が重要な課題となっている。廃棄物処理分野でも廃棄物減量化や未利用エネルギーの有効活用の観点から, 容器包装リサイクル法によるごみ再生利用促進, ごみ発電による余熱利用促進, 焼却灰の資源化などのリサイクルが進められている。また, 環境保全の立場からはダイオキシン類の新ガイドラインに代表されるように, 有害物質の排出抑制や最終処分場の管理強化などが要求されている。こうした状況の中, 廃棄物保有のエネルギーを最大限に利用できる高効率でコンパクトな熱回収システムと, ダイオキシン類を含む微量有害物質も完全燃焼させることができる高効率ごみ発電焼却炉が求められている。

当社はすでに20件以上の流動床式焼却炉の納入実績がある。その流動床炉の特長を生かし, 高い伝熱効率が見られるとともに低腐食環境域である砂層内から熱を回収することによる蒸気の高温・高圧化と, 高発熱量ごみやごみ質の変動に対応しての完全燃焼が可能な層内熱回収型流動床式焼却炉を開発した<sup>1)</sup>ので報告する。

### 1. 基本コンセプト

層内熱回収型流動床式焼却炉の基本コンセプトを下記に, 砂層部概念図を第1図に示す。

- 1) 砂層部の高い伝熱効率により, ボイラのコンパクト化が図れる。
- 2) 砂層内熱回収部は低腐食環境域であり, 回収蒸気の高温・高圧化が容易である。
- 3) 砂層内から熱回収することにより, 幅広いごみ質に対応して最適燃焼バランスがえられ, 上部フリーボード部との組合せにより完全燃焼が達成できる。
- 4) ごみ供給量, 発熱量の変動に対しても熱回収側流動空気を調整することにより, 砂層温度を制御し安定燃焼ができる。

### 1.1 モデル実験

本焼却炉の開発にあたっては, 砂層内での砂流動と伝熱特性ならびに炉内での燃焼特性を把握することが必要であり, このため, まずモデル装置においてこれらを把握した。

#### 1.1.1 モデル化手法

モデル実験は実炉砂層部の1/6のスケールダウン装置でおこなった。モデルは砂層内砂流動状態を把握するために可視化できるコールドモデル, 燃焼・熱回収特性を把握するホットモデルの二つの装置をもちいた。実装置のモデル化手法として, 次の掘尾らの式を使用した<sup>2)</sup>。

$$(U - Umf) = m \cdot (U - U_{mf})$$

$$U_{mf} = m \cdot U_{mf}$$

ここに, m: 倍率

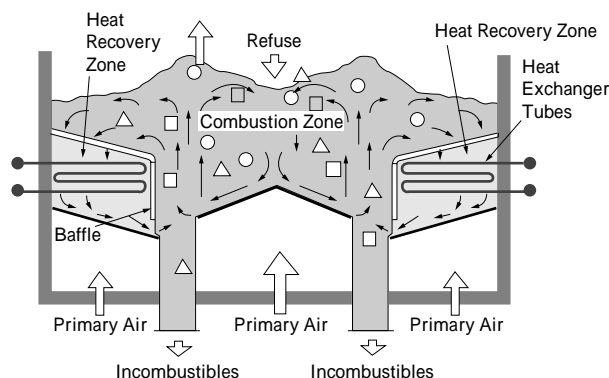
U, Umf: 実炉の空塔速度, 最小流動化速度

U, Umf: モデル装置の空塔速度, 最小流動化速度

### 1.2 モデル実験結果

#### 1) コールドモデル

コールドモデル実験装置は砂流動状態を可視化できる二次元(20×1000mm)および奥行き方向を考慮した三次元(600×1000mm)の2タイプを使用した。写真1に示す二次元モデル装置により, 流動空気量における砂循環速



第1図 層内熱回収型砂層部の概念図  
Fig. 1 Fundamental concept of fluidized-bed

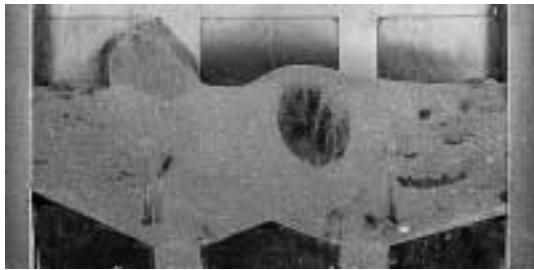
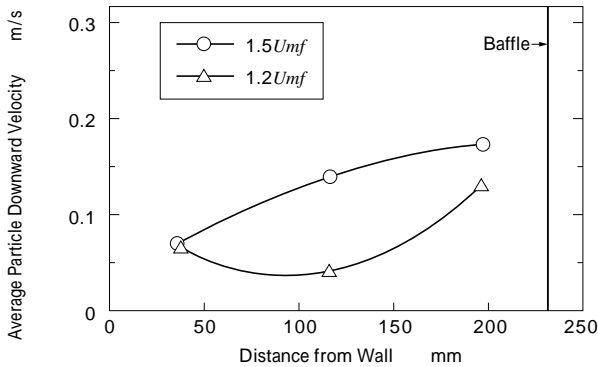


写真1 コールドモデル  
Photo. 1 Cold model equipment



第2図 熱回収部における空塔速度による粒子速度分布  
Fig. 2 Effect of superficial velocity on distribution of particle velocity in energy recovery zone

度を実測した結果の一例を第2図に示す<sup>3)</sup>。図示するように砂層各部の流動空気と砂移動速度の関係をとるとともに、模擬不燃物投入により、流動空気量が不燃物滞留状況に与える影響についても把握し、各風箱流動空気量分配や分散板形状を決定した。

## 2) ホットモデル

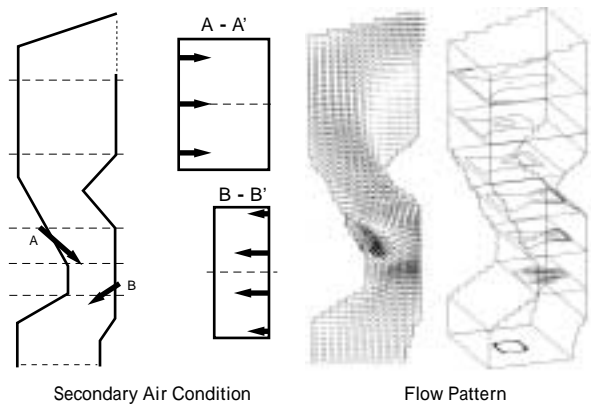
ホットモデル実験装置の砂層部(600×1000mm)はコールドモデル結果をふまえた形状とした。フリーボード部は完全燃焼を達成させるために、二次空気吹込み条件(二次空気位置、個数、ノズ位置、形状)をパラメータとして、二次空気と砂層部より上昇する未燃ガスとの混合後の炉出口における混合度合<sup>4)</sup>を、流動混合解析をもちいて最適化をおこなった結果より、第3図に示すようなノズ位置と対向交差(流速25~40m/s)による二次空気吹込み条件を決定した。

本実験装置にて模擬ごみ(発熱量8370~16700kJ/kg)を使用しておこなった燃焼テスト結果の一例を第4図に示す。第4図は発熱量12600kJ/kg、投入量90kg/h、空気比1.7、層内熱回収率12%としたときの炉内温度分布を示す。滞留時間2秒程度である炉出口において、CO濃度は安定して10ppm以下と、良好な結果がえられた。砂層内から熱回収をおこなった場合の層内燃焼率やフリーボード部各部の燃焼割合について、ごみ発熱量・空気比・熱回収量を変化させたデータの解析により、実験式を導出した。

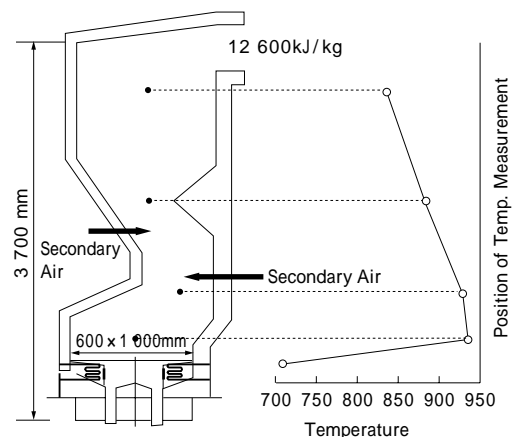
## 2. 実証実験

### 2.1 実証設備

モデル実験結果をふまえ、20t/日の実証設備(写真2)を社内に建設し、1996年5月より社内から発生する廃プラスチックを含む産業廃棄物を使用して1997年9



第3図 フリーボード部混合解析  
Fig. 3 Simulation of freeboard in fluidized-bed incinerator

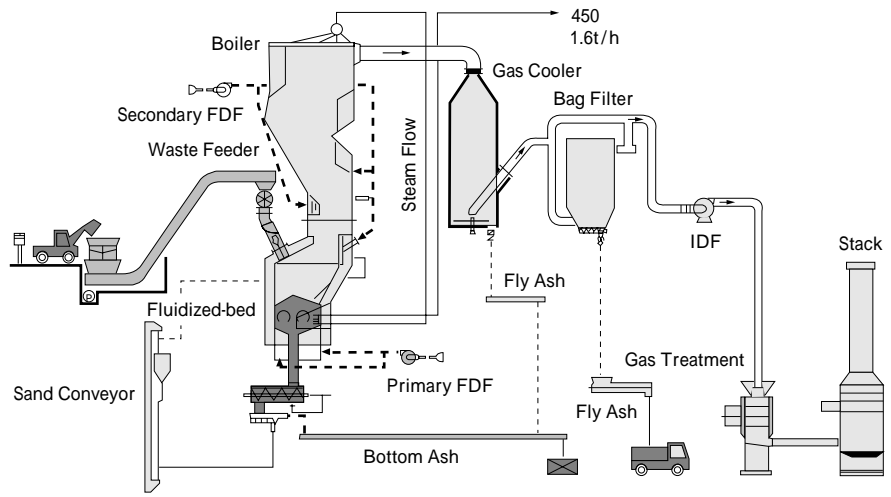


第4図 燃焼テスト結果  
Fig. 4 Combustion test result of a hot model experiment



写真2 実証設備の外観  
Photo. 2 Demonstration plant

月末までに約1600hにわたり実ごみによる燃焼テストをおこなった<sup>5)</sup>。実証設備のフローシートを第5図、設備概要を第1表に示す。焼却炉砂層部形状は1250×2500mmのハーフモデルタイプ、フリーボード部は、モデル実験での良好な結果をふまえ、最適形状を決定した。また、フリーボード部は水冷壁上側に耐火物を被覆し、燃焼ガスの高温化を確保しつつ熱回収をおこなえる構造とした。蒸気はフリーボード部にて飽和蒸気となったのち、砂層熱回収部にて450の過熱蒸気となる。ごみ性状は紙類、プラスチック類が多く平均発熱量にて13100kJ/kgと高い。その性状を第2表に示す。



第5図 実証炉フロー  
Fig. 5 Process flow of demonstration plant

第1表 実証炉概要  
Table 1 Specification of demonstration plant

1.	Incineration Capacity	20 ton per day ( Heating Value 16 700KJ/kg )
2.	Incineration Type	Fluidized-bed Incinerator of Heat Recovery System
3.	Fluidized-bed Size	1 250 × 2 500mm
4.	Boiler	Water Tube Boiler and Super Heater in Fluidized-bed
5.	Steam Condition	450 × 1.8MPa
6.	Steam Rate	1.6t/h
7.	Gas Treatment	Baghouse + Wet Scrubber

## 2.2 実験結果

### 2.2.1 燃焼・熱回収

#### 1) モデル実験との比較

発熱量 12 600 と 16 700kJ/kg において空気比 2.0, 熱回収率 12% にて燃焼したときの砂層部, フリーボード部ゾーン 1, ゾーン 2 における燃焼割合を第 6 図に比較して示した。その結果ほぼ同等の数値がえられ, スケールアップ手法の妥当性を確認することができた。

#### 2) 層内燃焼率

ホットモデルよりえられた実験式に実証炉の運転条件を代入してえられた計算値と実測値とを比較した結果を第 7 図に示す。その結果, 実証炉実測値と計算値は良く一致しており, 砂層部内の燃焼はモデル実験によりスケールアップした場合でも予測が可能であることが確認できた。

#### 3) フリーボード部燃焼

ゾーン 1 における燃焼割合は層内燃焼率と 2 次空気の

### 第2表 ごみ成分

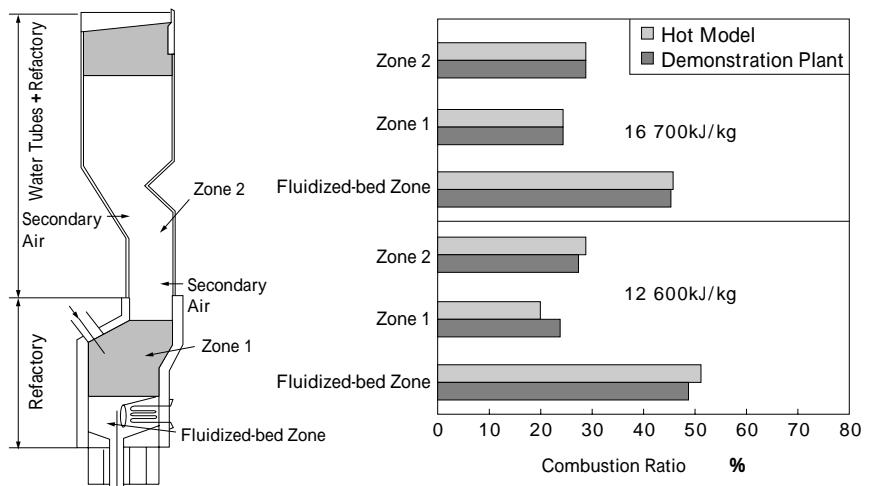
Table 2 Refuse composition

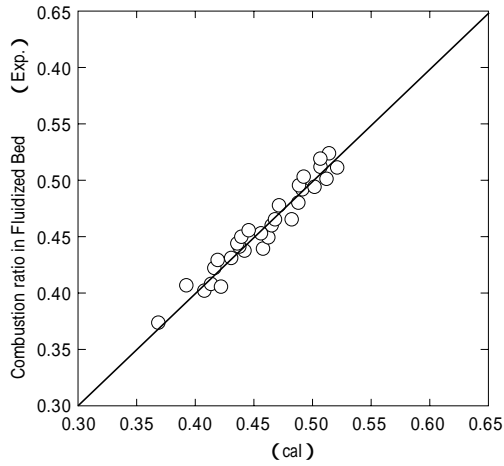
		kJ/kg		10 550 15 110	
Heating Value		kJ/kg		10 550 15 110	
Moisture		%		14.54 ~ 35.72	
Ash		%		7.35 ~ 19.31	
Combustibles		%		52.13 ~ 74.63	
Components (%Dry Base)	Paper	%	41.65 ~ 74.63		
	Wood	%	2.16 ~ 42.84		
	Plastic	%	3.65 ~ 29.59		
	Incombustibles	%	0.15 ~ 6.81		
	Others	%	1.44 ~ 19.22		

1 部をパラメータとした計算式を導出し, 計算値と実証炉実測値を第 8 図に比較した。同図より, 計算値と実測値は良好な相関性を示していることがわかる。

これにより, 実炉レベルでも発熱量, 空気比, 層内熱回収量, 砂層温度により, 実験式から燃焼割合と温度分布の予測が可能であることが判明した。

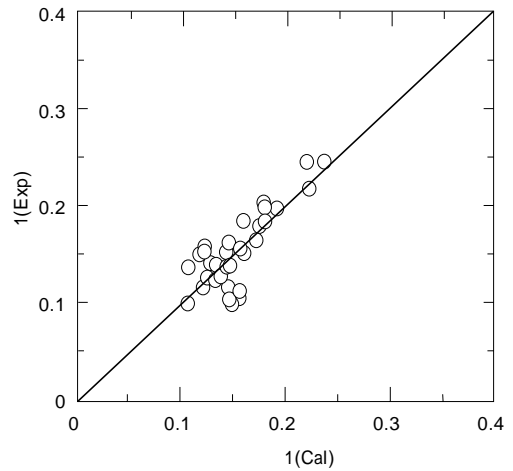
第6図 焼却炉各部における燃焼割合  
Fig. 6 Combustion ratio of incinerator zones





第7図 層内燃焼率のホットモデル予測値と実証炉実測値との比較

Fig.7 Comparison with calculation value in a hot model and experimental value in a demonstration plant



第8図 Zone 1 燃焼率の計算値と実測値の比較

Fig. 8 Comparison with calculation value and experimental value in zone 1

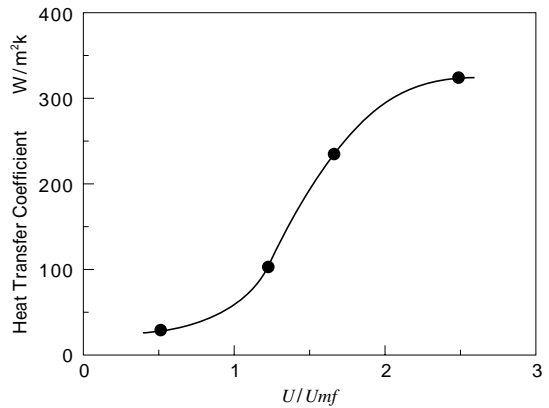
#### 4) 層内熱伝達率

層内熱伝達率と空塔速度との関係を第9図に示す。砂である流動媒体は伝熱効率が高く、最小流動化速度の2倍で約  $300 \text{ W/m}^2\text{K}$  に達している。空塔速度によって熱伝達率は大きく変化し、ごみ質の変動により砂層温度が変動した場合でも空塔速度を調整することにより熱回収量を制御できることが確認できた。

層内熱回収部出口における蒸気条件の経時変化を第10図に示す。蒸気条件  $450^\circ\text{C}$ 、 $1.6 \text{ t/h}$  以上という目標値を安定して達成している。

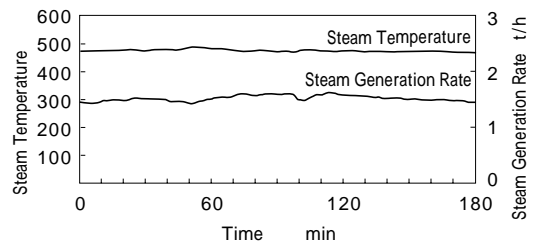
#### 5) 層内燃焼数値解析

本焼却炉において流動層内での燃焼や温度分布を把握することは重要となる。当社では流動層内での燃焼状態を把握するため三次元セルモデルを使用し、温度分布や  $\text{O}_2$  濃度分布の解析をおこなっている<sup>6)</sup>。実証炉にて本モデルをもちいた解析結果と実測値とを比較した結果を第11図に示す。計算における燃焼領域の精度を考慮すれば解析結果と実測値とは実用的な一致が認められた。今後、さらにモデルにおける各パラメータの精度を向上させ、砂層部形状の最適化や砂層部内での砂流動状態や伝熱特性の把握に活用していく予定である。



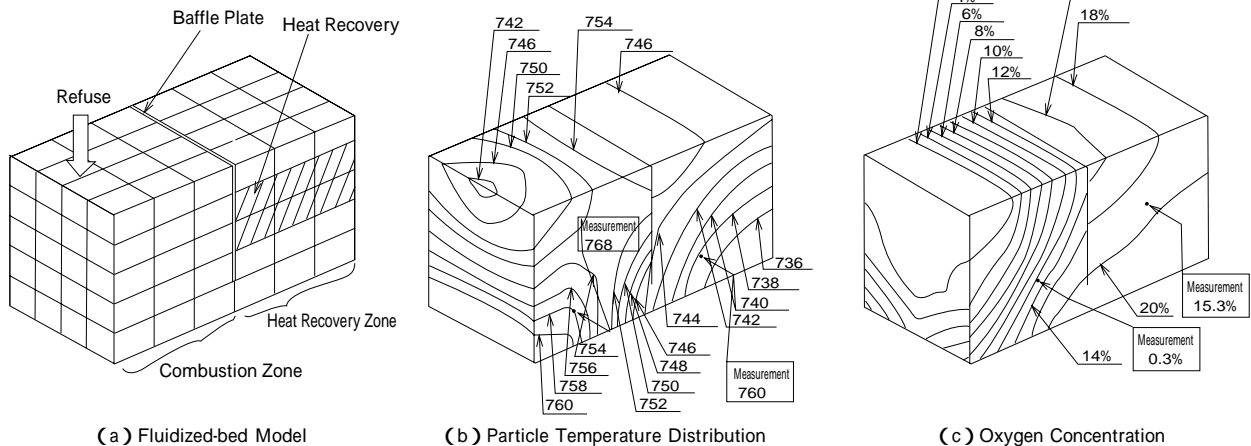
第9図 層内熱伝達率

Fig. 9 Heat transfer coefficient in fluidized-bed



第10図 経時変化

Fig. 10 Time chart of demonstration plant



第11図 計算結果と実測値の比較

Fig. 11 Comparison with calculation value and experimental value in fluidized-bed

## 6) 燃焼排ガス性状

本設備における炉内温度分布とバグフィルタ出口燃焼排ガス性状を第12図に示す。同図より、本設備は小規模炉において高発熱量ごみを処理しているにもかかわらず安定燃焼しており、燃焼温度はフリーボード出口にておおむね800以上となった。後述するCO抑制制御との組合せにより、バグフィルタ出口ではCO濃度は22ppm(4時間平均値)と安定しており、新ガイドラインの30ppm以下を充分下回っている。また、NO<sub>x</sub>も120ppm程度と安定している。ダイオキシン類は第3表に示すように活性炭の添加剤を供給し、バグフィルタ出口にて0.1ngTEQ/Nm<sup>3</sup>と小規模炉であるにもかかわらず低濃度となっている。

### 2.2.2 制御

本設備ではCO抑制制御として、炉内火炎状況とごみ供給状況を画像処理し、燃焼空気量を制御する手法を採用し、良好な結果をえている<sup>7)</sup>。また、蒸気量制御手法においても予測制御を取入れ、その有効性を確認している<sup>8)</sup>。

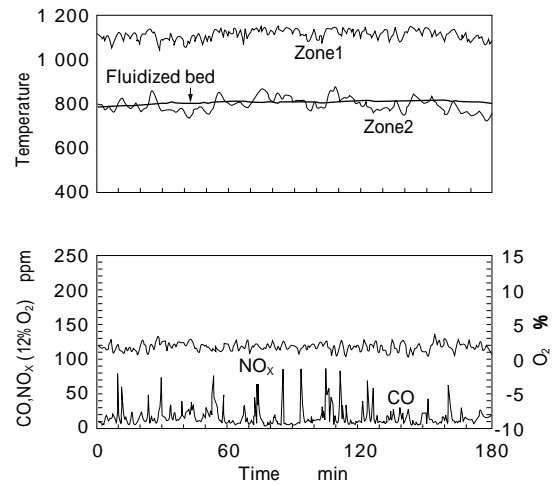
### 2.2.3 運転状況

本設備は約1600h運転において順調に稼働しており、不燃物の抜出も閉塞することなく運転している。伝熱管の腐食状況を把握するために、砂層熱回収部と炉出口排ガスの性状を第4表に比較して示す。前者は排ガス中とくらべてO<sub>2</sub>濃度は高く、HCl濃度は数十分の1程度となっており、低腐食環境域と考えられ、排ガス中の腐食ガス濃度よりマイルドであることを確認した。過熱管材質は現在までにSUS310相当にて問題なく運転しており、今後引続き長期的な腐食状況を把握していくとともに、さらに安価で高寿命な材質を選定していく予定である。

むすび=モデル実験における基礎データの取得・解析、さらに実証炉での実ごみによる燃焼結果より、以下を確認した。

- 1) モデル実験と実証設備の燃焼割合はよく一致しており、モデル化手法の妥当性を確認できた。
- 2) 実証設備やモデル実験装置からの実験式から、層内熱回収型流動床炉の燃焼バランスを操作条件から予測することが可能となった。
- 3) 本コンセプトの実証設備(20t/d)は小規模炉ながら燃焼は安定しており、目標値(排ガス性状と熱回収条件)を十分に達成した。排ガス性状は新ガイドラインのCO濃度を十分に満足し、ダイオキシン類についても排ガス処理との組合せにより達成が可能であることが確認できた。
- 4) 実証設備は約1600h運転にて問題なく稼働しており、実用化への目処をつけることができた。
- 5) 本熱回収システムを組み込んだ焼却炉により、安定した高蒸気条件がえられ、高効率ごみ発電への展開が可能となった。

最後に現在ごみ焼却施設において問題となっているダイオキシンを含む微量有害物質の排出抑制と未利用エネ



第12図 経時変化

Fig. 12 Time chart of demonstration plant

第3表 ダイオキシン濃度

		ng/Nm <sup>3</sup>
PCDDs	T4CDDs	0.25
	P5CDDs	0.017
	H6CDDs	0.37
	H7CDDs	0.99
	O8CDD	0.26
	Total PCDDs	2.4
PCDFs	T4CDFs	1.2
	P5CDFs	1.3
	H6CDFs	1.3
	H7CDFs	0.86
	O8CDF	0.26
	Total PCDFs	4.8
Total (PCDDs + PCDFs)		7.3
I-TEQ		0.1

第4表 燃焼排ガス

Table 4 Exhaust gas

Sampling Point	Heat Recovery Zone in Fluidized Bed	Boiler Outlet
O <sub>2</sub> %	14 ~ 19	8 ~ 11.5
HCl mg/Nm <sup>3</sup>	< 12	350 ~ 510
SO <sub>x</sub> ppm	< 10	40 ~ 80

ルギの有効利用において、本焼却炉はRDFを含むごみ焼却処理の広域化、大規模化への適用が期待され、今後求められる資源循環型ごみ処理施設の中核技術となるようさらなる高性能化をめざしていきたい。

## 参考文献

- 1) 河端博昭ほか：第8回廃棄物学会研究発表会(1997)。
- 2) 堀尾正昭ほか：化学工学論文集, Vol.14, No.6(1988) p.739。
- 3) 坂野雅章ほか：第74回機械学会全国大会講演論文集, Vol.13(1996), p.701。
- 4) 小山謙一ほか：Proceedings of The 1st SCEJ Symposium on Fluidization, (1995), p.56。
- 5) 伊藤正ほか：第18回全国都市清掃会議発表会(1997) p.152。
- 6) 箕浦忠行ほか：第11回流動層技術コース, (1997) p.26。
- 7) 友近信行ほか：第7回環境工学総合シンポジウム(1997), p.208。
- 8) 前田知幸ほか：第7回環境工学総合シンポジウム(1997), p.213。