解説

都市ごみ焼却用流動床炉の燃焼制御

Mild Combustion System of MSW Fluidized Bed Incinerator

井上 里志*

ABSTRACT

A fluidized bed incinerator for municipal solid wastes (MSW) has excellent characteristics with a high combustion rate. But they sometimes burn incompletely when the wastes supplied to the bed change greatly in feed rate and properties. As a countermeasure for this, a fluidization at the center of the bed, where wastes were supplied, was kept rather weak and that at the both side was made strong and weak alternately. Then the heat transfer coefficient to the wastes was decreased and pyrolysis was delayed. At the same time by blowing secondary air to the freeboard at the optimum position and flow rate, a stable combustion could be realized. At the test of the actual MSW fluidized bed incinerator, it was confirmed that the frequency of high CO emission spike was decreased and that visual smoke was suppressed than the conventional fluidized bed incinerator.

1. 緒言

都市ごみ焼却炉において、流動床炉はそのすぐれた燃焼特性により徐々に実績が増え、とくに准連続式ごみ焼却炉では約半数が流動床炉を採用している。流動床炉では投入されたごみは流動砂とのかくはんにより、短時間に乾燥し、熱分解によるガス化が行われフリーボード部でガス燃焼を完了する一方、炉内に残った可燃性固体成分（チャーなど）は層内で燃焼する。最近、都市ごみの性状が多様化し、高カロリー化する傾向があり、炉に供給されるごみは量、質ともに変動しやすい。さらに、流動床炉での燃焼が早いので、ごみ供給量や質の変動がそのまま燃焼の変動につながって、不完全燃焼を起こしやすくなっている。これらの負荷変動を吸収し安定させるため、つぎのような対応策に取り組み良好な結果を得た。

1. 給じん機の定量性の向上

1軸スクリュウ式給じん機からごみを安定供給するため、スクリュウ出口にパドルを設けて定量性を向上させた。

2. 流動層燃焼の安定化

流動層の流動化に強弱をもたせ、ごみを流動化の弱いところに投入して燃焼をおだやかに進行させ負荷変動を吸収し、安定燃焼をはかった。

3. フリーボード部ガス燃焼率の向上

フリーボード部への2次空気の供給を適切に行ない、ガス燃焼を促進させた。

本稿では、とくに流動層の安定燃焼システム（Mild Combustion System, 以下MCSとする）について紹介する。

2. 流動床炉の燃焼機構

2. 1 燃焼プロセス

炉内に投入されたごみは、流動層部において、流動化空気（1次空気）により流動砂とともに激しくかくはんされ、流動層部における熱伝達（流動砂からの伝熱、炭素の燃焼熱など）およびフリーボード部火炎からの放射熱などにより、きわめて短時間内に乾燥および熱分解が行われる。ごみは、熱分解により、おもに、炭素を主成分とするチャー及びタールと、熱分解ガスとにわかれ、炭素分は流動層部で、熱分解ガスはフリーボード部にて燃焼する。

以上のプロセスを図-1に示す。このプロセスの中で、流動層部での炭素などの燃焼熱、フリーボード部

* 石川県播磨重工業㈱機械鉄構事業本部工業炉・環境施設事業部環境設計部 Satoshi INOUE

図-1 ごみの燃焼プロセス

でのガス燃焼火炎からの放射熱が、流動層部におけるごみ、および流動砂の加熱源となる。

2. 2 ごみの熱分解

ごみの燃焼プロセスでの熱分解に着目すると、熱分解速度は温度により大きく影響を受ける。都市ごみの熱分解平衡関係の実験結果を図-2に示す。分解温度の上昇とともに、ガスへの転化率（ガス比率）が急激に上昇する。すなわち、温度が高いほど、熱分解ガス発生量が多いといえる。また、温度により熱分解速度（有機物の重量減少速度）がどのようになるかを以下に示す。本式は、温度をパラメータとし、各種のごみ（有機物）重量が時間とともにどのように減少していくかを示した実験式である¹⁾。

$$dX/dt = A \cdot \exp(-\Delta E/R \cdot T) (1-X)^n \cdots (1)$$

$$X = (W_0 - W_t) / (W_0 - W_\infty)$$

W_0 : 初期有機物重量 (g)

W_t : 有機物重量 (g)

W_∞ : 最終有機物重量 (g)

R : ガス定数 (kcal/mol・k)

図-3 熱分解による有機物重量の減少速度

図-2 都市ごみの熱分解

T : 絶対温度 (K)

(1)式による計算結果の例を図-3に示す。同図から、温度が高いほど、熱分解反応が早く進行することがわかる。ただし、本結果は、窒素雰囲気下での熱分解実験の結果得られた実験式をベースとしているが、実際の流動層部においては、流動化空気により燃焼反応が促進され、ごみの温度も急速に上昇するため、図-3に示す曲線のうち、温度が高いもののほど、実際の曲線はさらに左側に寄り、熱分解時間は短くなるものと考えられる。以上の結果から、流動床炉の流動層部において、ごみの温度が高いほど、短時間で大量の熱分解ガスが発生すると言える。つぎに、炉内に投入されたごみの温度が流動層部においてどのように上昇していくかについて述べる。図-4は、流動粒子から流動層内に設置された伝熱管への熱伝達率を、流動化空気流

表1 ごみの熱分解速度を定める各係数

種 目	反 応 次 数 "	ひ ん 度 因 子 A (1/s)	活 性 化 エ ネ ル ギ ー ΔE	
			(kcal/mol)	{kJ/mol}
新 聞 紙	1	3.915	10.66	44.63
植 物 性 厨 芥	2	2.644	8.31	34.79
ポ リ エ チ レ ン 樹 脂	1	1.021×10^{10}	67.35	281.98

図-4 流動層から内管への熱伝達率

速に対してもとめた実験結果である²⁾。なお、流動粒子は粒径のそろっている球形の高純度アルミナを用いている。図-4の傾向から、熱伝達率は主に流動粒子の動きによって定まり、流動化が始まると伝熱面近傍の粒子が激しく入れ替って層内温度に近い粒子が伝熱面をおおうようになり熱伝達率が高くなる。流動化空気流速が一定以上大きくなると、層内の気泡の割合が大きくなって粒子と伝熱面の接触が悪くなり熱伝達が低下する。従来の流動化空気流速は約0.7~1.0 m/sの範囲であり、図-4で示される熱伝達率のもっとも高い領域で運転されているといえる。

2. 3 フリーボード部におけるガス燃焼（2次燃焼）

ごみの熱分解および炭素の燃焼により流動層部で発生した熱分解ガスなどの可燃性ガスは、流動床炉内を上昇し、フリーボード部にて2次空気によるガス燃焼（2次燃焼）が行われる。このフリーボード部でのガス燃焼の目的は、可燃性ガスを炉内で燃焼しつくすことであり、炉壁からフリーボード部に供給される2次空気によりいかに効率よく可燃性ガスを燃焼させるかが重要となる。具体的には以下に示す機能が重要となる。

1. 可燃性ガスの上昇流に対して2次空気が一様に分散される。（マクロ的混合）
2. 可燃性ガスと2次空気とのミクロ的な混合が迅速に行なわれる。

2. 3. 1 可燃性ガスの上昇流に対する2次空気の一様分散について

フリーボード部における可燃性ガスの上昇流に対して、2次空気を一様に分散（混合）するためには、炉

図-5 フリーボード部における2次空気の拡散

幅方向に対しては2次空気ノズル本数を多くする一方、炉の奥行きに対しては、対向壁まで2次空気を到達させる必要がある。すなわち、図-5に示すような2次空気供給方法が好ましい。しかしながら、2次空気ノズル本数を多くすると、炉幅方向の分散が良くなる反面、対向壁に向けての貫通力が弱まるため（図中破線部）、全体的に最適な分散（混合）が得られるように、2次空気のノズル本数、ノズル径、流速、ノズル段数などを決定しなければならない。

2. 3. 2 可燃性ガスと2次空気とのミクロ的な混合について

フリーボード部での燃焼は可燃性ガスと2次空気とのミクロ的な混合速度にも依存している。図-6³⁾に示すように、フリーボード部に噴出された2次空気は、可燃性ガスの上昇流により、2次空気噴流周辺におい

図-6 フリーボード部の2次空気の噴流

て可燃性ガスと2次空気との乱流混合が生じ、2次空気噴流の外層は運動量を失ない、向きを変える。この2次空気噴流の表面近くで生じる乱流混合がミクロ的な混合であり、この部分で拡散燃焼が起こっている。この乱流噴流における混合速度は、乱流拡散率と、周囲ガス（可燃性ガス）との接触面積に依存しており、乱流拡散率は、一般に、噴出速度（2次空気流速）と噴出口径（2次空気ノズル径）の積に比例する関係にある。接触面積は、2次空気ノズル本数を増やすことにより大きくできるが、たとえば2次空気流速一定の条件下でノズル本数を増やすとノズル径を小さくしなければならないため、乱流拡散率が小さくなり、ミクロ的な混合が悪くなる。

以上より、マクロ的な混合およびミクロ的な混合の両面から、最適な2次空気のノズル本数、ノズル径、流速、ノズル段数などを決定しなければならない。当社は、フリーボード部2次燃焼の改善のために、これまで、コールドモデルテストおよび実機流動床炉でのごみ焼却テストを積み重ね、フリーボード部における可燃性ガスと2次空気とのマクロ的な混合およびミクロ的な混合が良好となるような2次空気供給法を開発した。

2. 4 従来の流動床炉の燃焼

従来の流動床炉では、流動化空気流速が一様であり、かつ、ごみを十分かくはんし、炉床全体で均一な燃焼を保つために空気流速が高い。このためにごみへの熱伝達率が大きく、ごみの温度上昇が速くなるため、熱分解速度が速くなり、ガス化率も高くなる。さらに、給じん機から供給されるごみは質、量ともに変動しやすいため、このごみの質と量の変動がそのまま熱分解ガス量の変動となる。この結果、大量のごみが炉内に供給された場合、流動層部からフリーボード部へ上昇する可燃性ガス量も短時間に増大し、フリーボード部での2次空気の供給量が追いつかず、燃焼しつくせない

なる場合が生じる。この現象を模倣的に示したのが図-7の破線部分である。

この図では、給じん量などの変動により、最大空気量でも燃焼しつくせないほどの可燃性ガス量が発生した場合に、一部が炉外に排出されることを示しており、下段の横線が平均的な可燃性ガス発生量、上段の横線が最大空気量にて燃焼しつくせる可燃性ガス発生量である。上段の横線を上まわった図中の斜線部分の面積が、炉外へ排出される可燃性ガス量である。

3. 流動床炉の安定燃焼システム（MCS）

3. 1 原 理

流動床炉の安定燃焼システム（MCS）とは、従来、激しい流動により、短時間でごみの加熱とそれともなう乾燥、熱分解を行っていた流動層部に着目し、この流動をおだやかにすることにより、ごみへの熱伝達を低下させる。そして、ごみの加熱を鈍化させることにより、熱分解ガスの瞬時の大量発生を抑制し、熱分解ガス発生量の平滑化を行なう。そして最終的には、フリーボード部内におけるガス燃焼を完結させる。MCSによる流動層部の挙動を図-8に示す。図のように流動層部を三分割し、中央部はやや流動化を弱くし、両サイドは散気管の空気量を増減することにより、流動の強い部分と弱い部分とを交互に繰り返させている。ごみは中央のやや流動の弱い所に投入され、さらに弱い流動化の領域へ押し流される。流動の弱い部分では、すでに述べたように熱伝達率が小さく、乾燥、熱分解、ガス化がおだやかに進行する。つぎに流動が強くなった時は、熱伝達率が大きく、熱分解、ガス化が速くなるが、すでに、ある程度熱分解、ガス化の進んだ残りのごみからは、熱分解ガスが瞬時に大量発生する可能性は少ない。

このように、従来のような流動層全域での一様な空気流速での流動の場合に比べて、熱分解ガス発生量は平滑化される。

3. 2 MCSによる効果

以上のように熱分解ガスの発生量が平滑化されるため、流動層部からフリーボード部へ上昇する可燃性ガス量も平滑化させる。このフリーボード部において、すでに述べた効率的なガス燃焼が行なわれれば、燃焼は完結する。この現象を模倣的に図-7に実線で示す。

このMCSによる安定燃焼により以下の効果が期待される。

1. 炉内圧力および炉内ガス温度の変動が小さくなる。

図-7 MCS 制御による可燃性ガス発生量の変動

図-8 MCS制御による流動層部の挙動

2. 蒸気発生量が安定する（ボイラ付の場合）.
 3. ガス冷却水の水量調節が容易になる（水噴射式ガス冷却の場合）.
 4. 排ガス CO 濃度を低減できる.
 5. 可視煙，悪臭煙の排出を抑制することができる.
- また，MCSにより総流動化空気量が絞られ，その分，2次空気量を増加させることにより，還元2段燃焼が促進され，結果的に，排ガス NO_x 濃度が低減される．

4. ごみ焼却運転試験

4. 1 設備概要

4. 1. 1 フローシート

ごみ焼却運転試験を行なったH市クリーンセンタのごみ焼却プラントのフローシートを図-9に示す．流動化空気はヘッダから各散気管に分岐され流動床炉下部の砂層内に供給される．各散気管の空気量はヘッダと散気管の間に設けられたダンパにより制御される．

図-9 H市クリーンセンタごみ焼却プラントのフローシート

各ダンパ開度は一定の位相差を保ちながら回転し、開閉を繰り返し流動化空気を連続的に増減する。なお、ダンパは、回転による連続開閉と任意開度での固定との多様な組合せが可能である。

4. 1. 2 設備仕様

ごみ焼却運転を行なった流動床式焼却炉、およびMCSの主要仕様を以下に示す。

流動床式焼却炉

都市ごみ焼却能力 45t/16h
 計画ごみ質 900~1,900kcal/kg
 {3.8~8.9MJ/kg}
 流動化方式 水平吹出散気管方式
 不燃物排出方式 強制連続排出
 炉床寸法 2,500×2,625mm
 炉床面積 6.56㎡
 燃焼室容積 60㎡
 散気管本数 6本

MCS

形 式 散気管ダンパ連続開閉式
 ダンパ形式 バタフライ式
 ダンパ回転数 0~4.75rpm (可変式)

4. 2 結 果

4. 2. 1 排ガス O₂, CO, NO_x 濃度

MCS非制御時(ダンパすべて全開にて停止:従来どおり流動層全域での激しい流動)とMCS制御時における排ガス O₂, CO, NO_x 濃度(平均値)を表2に、また各濃度チャートを図-10に示す。表2では、MCS制御により排ガス CO 濃度が大幅に低減されており、また、NO_xについても、低減効果が認められ

表2 排ガス中の O₂, CO, NO_x 濃度(平均値)

項目 種別	MCS 非制御時	MCS 制御時	分 析 方 法	備 考
O ₂ (%)	12.6	11.5	JIS B 7983:磁気式	乾きガス基準
CO(ppm)	132	27	JIS K 0098:非分散型赤外線	乾きガス基準
NO _x (ppm)	79	69	JIS K 0104:化学発光法	および O ₂ 12%換算

(注) 測定位置:電気集じん器出口

る。図-10では、MCS非制御時、2,000ppmを越えるCOのピークが1時間に4回程度あり、とくにピークの高い時に煙突からの可視煙排出が確認されていた。これに対し、MCS制御時、前述のようなCOのピークは皆無であり、COは20~30ppmで推移していた。なお、このMCS制御の期間、煙突からの可視煙排出はまったく認められなかった。また、MCS制御の期間、O₂濃度の振れ幅がMCS非制御時に比べて小さく、おだやかになっているが、これは、MCS制御により燃焼が安定化の方向に進んでいることを示している。

4. 2. 2 排ガスCOの発生確率

排ガス分析データをもとに統計処理し、CO濃度のピーク値別に任意の濃度以上となる確率(COスパイク発生確率)を図-11に示す。たとえば、図-11のCO発生確率のMCS非制御時において、CO濃度が500ppmの時、発生確率がおよそ5%となっている。これは、MCS非制御期間中、CO濃度のピーク値が500ppm以上となるひん度が、たとえば、100回のピークに対し、5回あったということである。図-11では、CO濃度100ppm以上となる確率は、MCS非制御時約60%に対し、MCS制御時0%と大幅に改善されて

図-10 排ガス O₂, CO, NO_x 濃度チャート

図-11 CO 発生確率

いる。なお、MCS制御時の曲線がCO濃度がおよそ60ppmで切れているのは、MCS制御期間中、CO濃度が60ppmを上まわらなかったことを示している。

以上の理由より、MCSによる燃焼制御は、排ガスCO低減および可視煙排出の抑制に対し、効果のあることがわかった。

4. 2. 3 MCSによる安定燃焼

流動層部で発生した可燃性ガスは、フリーボード部において2次空気により燃焼する。流動層部の激しい流動燃焼により瞬時に大量の可燃性ガスが発生すれば、この燃焼により、酸素は瞬時に大量消費され、結果として、排ガスO₂濃度は急激に低濃度まで低下する。

いま、燃焼の安定化の程度を示すパラメータとして、排ガスO₂濃度の減少量 ΔO_2 および排ガスO₂濃度減少速度 $\Delta O_2 / \Delta t$ が適当であると考え、排ガスO₂濃度が最低値に到達するまでの時間 Δt に対するO₂の減少量 ΔO_2 の関係を図-12に示す。MCS非制御時に比べ、制御時は、 ΔO_2 が小さく、かつ、 $\Delta O_2 / \Delta t$ (勾配) もゆるやかである。このことは、MCS制御時には、可燃性ガスの瞬時大量発生が制御されている

図-12 排ガスO₂濃度の減少量と減少時間の関係

ことを示しており、ごみの熱分解がおだやかに進行していることを示す実証データである。

5. 結 言

流動床炉において、ごみの負荷変動を吸収できる安定燃焼システムを紹介した。本方式は、流動層の流動化の強弱を制御することにより熱分解ガス発生量を平滑化するものである。この方式によりつぎのような結果が得られた。

1. 排ガスCO濃度の低減、ピーク発生ひん度の減少
2. 可視煙排出の抑制
3. NO_xの低減

さらに、給じん量の定量化、フリーボード部でのガス燃焼の向上により、燃焼の安定性が向上する。

参 考 文 献

- 1) 片柳健一, 平岡正勝, 水野健一郎: 都市固形廃棄物の熱分解反応特性に関する研究 京都大学環境衛生工学研究会第3回シンポジウム講演論文集, 1981年8月.
- 2) 渡辺健次, 二階勲: 流動層内管の高温での伝熱性能 第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 1986年5月.
- 3) Jordinson R.: Flow in a Jet Directed Normal to the Wind Aeronautical Research Council R & M 3074 1958.