

■原著論文／ORIGINAL PAPER■

高温空気燃焼技術を適用したストーカ式廃棄物焼却炉の低空気比燃焼における燃焼安定性向上の研究

Improvement of the Instability of Low Air-Ratio Combustion in an Advanced Stoker-Type Solid Waste Incinerator with High-Temperature Air Combustion Technology

宮越 靖宏^{1,3*}・立福 輝生²・西野 雅明¹・横山 隆¹・傳田 知広²・門脇 敏³MIYAGOSHI, Yasuhiro^{1,3*}, TATEFUKU, Teruo², NISHINO, Masaaki¹, YOKOYAMA, Takashi¹, DENDA, Tomohiro², and KADOWAKI, Satoshi³¹ JFEエンジニアリング株式会社 環境エンジニアリング事業部 〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1
Environmental Industries Engineering Div., JFE Engineering Corporation, 2-1 Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa 230-8611, Japan² JFEエンジニアリング株式会社 エンジニアリング研究所 〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1
Engineering Research Center, JFE Engineering Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki, Kanagawa 210-0855, Japan³ 長岡技術科学大学 〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1
Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, 940-2188, Japan

2005年5月17日受付；2005年7月7日受理／Received 17 May, 2005; Accepted 7 July, 2005

Abstract : The effects of the low air-ratio combustion on a waste incineration process have a reputation for reducing environmental pollutants such as dioxins or nitric oxides and improving the waste heat recovery. However, it was difficult to incinerate appropriately under a low excess air condition due to the combustion instability caused by heterogeneity of waste materials. Although the High-temperature air combustion technology opened the way for the realization of stable low air-ratio combustion at a stoichiometry of 1.3, it required amount of fuel for heating the high-temperature mixed gas –that is controlled oxygen concentration and preheated– up to 400°C which is injected above the fuel bed of the furnace specifically. From the point of view of the energy-saving issue, it is desirable to minimize the fuel consumption. A practical low air-ratio combustion test is conducted on an actual MSW incineration plant 105 tons per day capacity with the temperature of the high-temperature mixed gas up to 250°C that can be increased by using waste energy recovery system yields the same result as the 400°C condition. Therefore, the low air-ratio combustion can be achieved in a stoker-typed incinerator system without using an external energy. Also it deemed to have a relation between the toxic product emission and primary combustion process.

Key Words : Environmental Engineering, Pollutant, Municipal Solid Waste Incineration, Low Air-Ratio Combustion, High-Temperature Air Combustion Technology, NOx, Dioxins, Waste Energy Recovery

1. 緒言

廃棄物焼却処理における低空気比燃焼は、排ガスの排出量削減とそこに含まれる窒素酸化物 (NOx) やダイオキシン類等の有害物質生成の抑制、さらに廃熱回収率の向上をもたらすことから、現代社会が志向する環境負荷の低減と循環型社会の構築に資する有効な手段といえる。わが国の廃棄物焼却炉には、ストーカ式焼却炉をはじめとして、ロータリーキルン炉、流動床炉、ガス化熔融炉など様々な形式

の焼却炉が存在するが、中でも一般廃棄物焼却処理施設の8割以上 (処理能力ベース)[1]をストーカ式焼却炉 (以下、ストーカ炉) が占めている。したがって、低空気比燃焼のストーカ炉への適用は、既存の技術と社会資本の有効活用において、スケールメリットの効果が見込まれ、経済的にも優れた手段であるといえる。

現在、国内で稼動している一般廃棄物焼却用ストーカ炉の適正空気比、すなわち良好な燃焼状態を保持するために必要な空気過剰率 (以下、空気比と記す) は凡そ 1.6 ~ 1.9 である。この数値は火力発電所の微粉炭焚きボイラや流動床炉の空気比 (1.1 ~ 1.5) に比べかなり高い値といえるが、これは主に以下の2つの事由によるものと考えられる。

* Corresponding author. E-mail: miyagoshi-yasuhiro@jfe-eng.co.jp

①燃料である廃棄物の不均質性

多様な物質が不秩序に混在する廃棄物を、化石燃料並の低い空気比で安定して燃焼させるためには、その組成から必要な燃焼空気量を割出し、常に正確に供給する必要がある。しかし、廃棄物の組成を即時分析し、同時に燃焼空気量を過不足なく供給することは事実上不可能である。実際には空気過剰率に十分な余裕を設け、不完全燃焼の抑止を重視した運転を行っている。さらに、廃棄物燃焼には、湿潤なごみを燃焼可能な状態にするための乾燥空気や燃焼室温度を適正に維持するために必要な冷却用空気等、その焼却過程において燃焼反応に直接関与しない機能空気の存在も不可欠である。

②ストーカ炉の燃焼装置としての特徴

一般に、ストーカ炉は図1に示すように燃料となる低質炭や廃棄物等の固形物を火格子で構成される移動床上に定量供給し、火格子の駆動により層状に展延させながら低速で移送し、順送りに緩慢燃焼させるという機能・構造的な特徴を有している。そのため、微粉炭ボイラや流動床炉に比べ燃料の流動・攪拌性に欠け、空気との接触効率が低く、これを補うために炉床下部から多量の過剰空気(一次空気)を供給する必要がある。

廃棄物燃焼プロセスにおいて重要な役割を担う過剰空気が不足すると、焼却残さ中の未燃物や排ガス中の一酸化炭素(CO)が多量に残留する等の不完全燃焼を惹起し、焼却炉としての基本性能を満たすことができなくなる。また、燃焼の健全性が著しく損なわれた状態での焼却炉の操業はダイオキシン類等の有害物質排出量の増加という重大な環境破壊にもつながるため、実施設での低空気比燃焼の実施は長らく敬遠されてきた。ところが、昨今のガス化溶融炉に代表される新型炉の登場により、廃棄物処理の高付加価値化(高効率発電や焼却灰の溶融処理等)が進み、ストーカ炉を擁する既存設備に求められる水準もより高度になった。このような背景から近年、低空気比燃焼をはじめとしたストーカ炉の性能向上に関する研究開発[2-5]が盛んに行われている。

Suzuki, Tatefukuらは、廃棄物燃焼における不安定性が燃焼プロセス初期に発生する熱分解ガスの不規則・不均一性に起因することに着眼し、高温空気燃焼技術[6-9]の適用によりこれを改善することでストーカ炉の燃焼性の向上を図る研究を行ってきた[10-14]。その結果、ごみ層直上への高温混合気の吹込み(酸素濃度と温度を調整した空気と排ガスの混合気を図2のように炉の両側面から吹込む)と排ガス再循環(EGR)により初期燃焼場の保炎と熱分解ガスの均質化を図り、燃焼性を向上させるという独自の技術[13-14]を構築した。著者らはこれに続いて、当該技術を実際の一般廃棄物処理施設のストーカ炉(炉規模 105 ton/日)に導入して低空気比燃焼試験を行い、実炉における空気比1.3の安定燃焼を達成した[15-16]。同時に、排ガス量およびNO_x、ダイオキシン類等有害物質の排出量低減、廃熱回収率向上についても確認し、ストーカ炉における低空気比

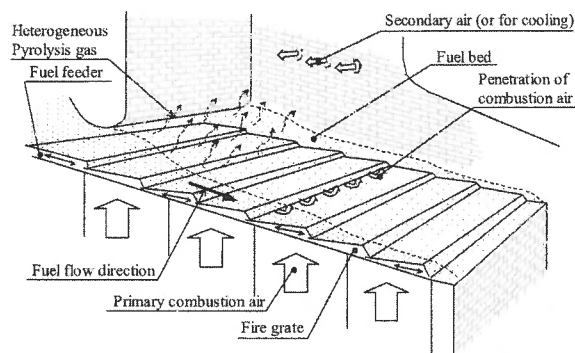


Fig. 1. Section diagram of a typical stoker-type incinerator.

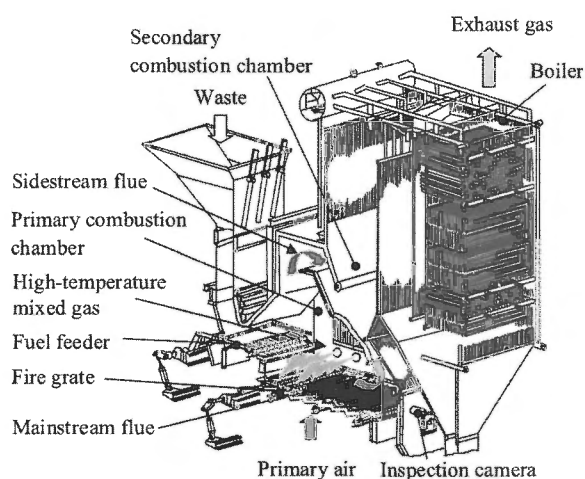


Fig. 2. Conceptual diagram of the advanced stoker-type incinerator.

燃焼の実効性を明らかにした。

しかし、このとき炉内に吹込んだ高温混合気の温度は400℃で、この昇温には燃料式(灯油)バーナの使用を要した。省エネルギーの観点から、実用化に際してはこのような外部エネルギー使用の削減は強く望まれるところである。そこで、本研究では外部エネルギーを使用せずに、低空気比燃焼を実現することを目的とした試験を行った。

高温空気燃焼技術を適用した本方式で、外部エネルギーを使用せずに低空気比燃焼を実現するためには、高温混合気の温度を廃棄物焼却炉で使用される廃熱回収用の熱交換器で昇温可能な250℃にまで低下させる必要がある。しかし、高温混合気温度の低温化は必然的に初期燃焼場における保炎効果の衰弱を伴い、燃焼安定性の虧損が予想される。本報では、高温混合気温度の低温化で損なわれる燃焼安定性を補償する手法とその効果について報告する。また、低空気比燃焼における高温混合気吹込みによる燃焼改善のメカニズム、および燃焼空気の供給方法と排ガス中のNO_x、ダイオキシン類の低減効果について考察を加える。

2. 試験設備および試験要領

2.1. 試験設備

本試験は著者らのこれまでの実証試験[15-16]に引続き、低空気比燃焼試験用に改造した苫小牧市沼ノ端クリーンセンター[17]の1号炉で行った。図3に本試験設備の主要部の概念図を示す。試験設備の詳細については既報[15-16]に報告されているので、ここでは燃焼安定性向上を目的とした制御機能の強化とその効果を確認するための追加設備について記述する。

2.1.1. 低空気比燃焼における従来燃焼制御の問題点

これまでの実証試験[15-16]によって得られた結果の一つである、従来燃焼 (Conventional) と低空気比燃焼 (Advanced) 試験時の燃焼排ガス中の O₂ と CO 濃度の関係を図4に示す。本図は高温燃焼技術の適用による燃焼改善の効果が適正燃焼領域が低空気比側に拡張したことを示したものであるが、同時にその境界を超えて不完全燃焼 (高濃度 CO の発生) が生じ得ることも表している。

このような不完全燃焼は、燃料である廃棄物の供給量に対する燃焼空気の不足、いわゆる空燃比の不均衡が原因で生じるものであるが、低空気比燃焼において、これを理論的に解決することが非現実的であることは緒言に記したとおりである。そこで、工学的観点からこの問題を捉え、その解決策は燃焼制御、特に空燃比の制御精度の向上にあると考えられる。

当焼却炉の燃焼制御は、火力発電所の石炭ストーカ炉の燃焼制御ロジックを基礎として、廃棄物焼却用に発展させた自動燃焼制御装置 (Automatic Combustion Control, 以下 ACC) により全自動化されている。ACC の基本的な動作信号伝達経路を図5に示す。燃焼状態の客観的指標となるボイラ蒸発量や燃焼温度、排ガス中の O₂、CO 濃度等の各プロセス値は、検出部から演算部に送られ、関連する制御因子 (操作端) に与える補正值 $f(\Delta p)$ が目標値 SP との偏差 Δp により算出される。算出された補正值は各操作端の基準値 PV に加減算 (制御因子は通常、複数のプロセス値から補正が加えられる) され、各操作端の制御値 OP となる。

当該 ACC は、経験則に基づき構築された多数の制御ロジックで上記動作を繰り返すことにより各プロセス値を目標値に収斂させる働きをする。ところが、豊富な過剰空気により不完全燃焼を比較的容易に抑止できる従来燃焼では、空燃比を厳密に制御する必要がないため、従来 ACC (これまでの実証試験で使用) は燃料である廃棄物の供給 (以下、給じん) や燃焼空気量を精密に操作するための制御ロジックを有していない。

2.1.2. 燃焼制御機能強化

一連の低空気比燃焼の研究で目標とした空気比 1.3 (O₂ 濃度 4.8 %) と図4から読み取れる適正燃焼領域の下限空気比 1.2 (O₂ 濃度 3.5 %) の間には O₂ 濃度で 1 point 以上のマージンがある。このことから、著者らは ACC の燃焼空気制御の即応性と給じん制御の精度を向上させ、O₂ 濃度

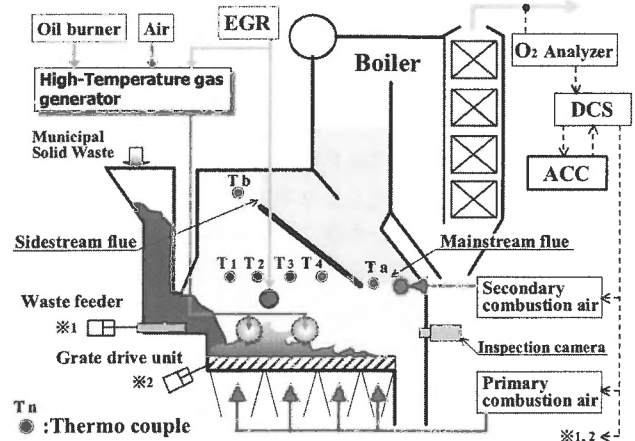


Fig. 3. Schematic diagram of an experimental incinerator.

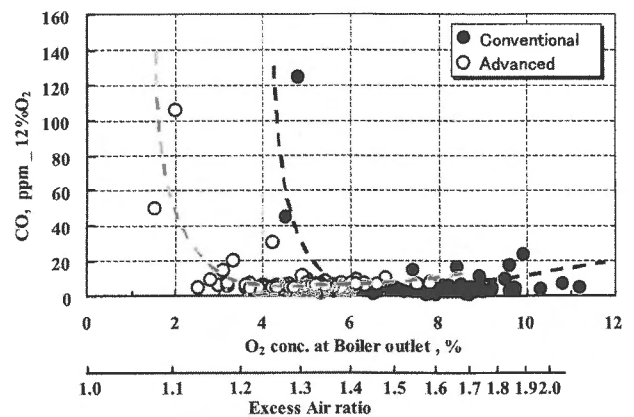


Fig. 4. Relationship between O₂ and CO concentrations in the flue gas.

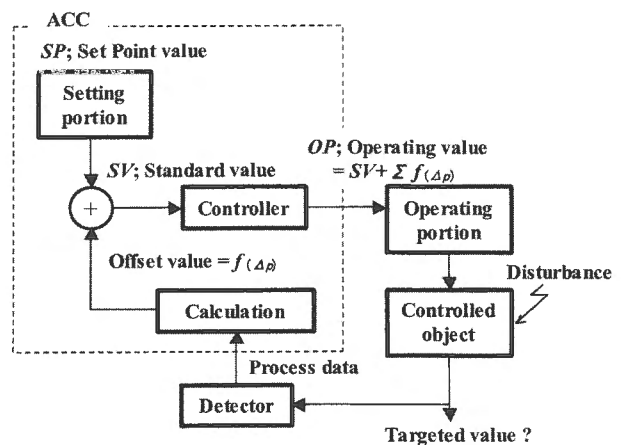


Fig. 5. Circuit diagram of Auto Combustion Control.

を 4.8 % ± 1 point 以内で制御することにより、短期的かつ極端な空気不足による不完全燃焼を抑止し、燃焼安定性を向上させることが可能であると考えた。

(a) 排ガス O₂ 濃度の検出遅れ時間短縮

一般に制御の即応性向上には、対象となるプロセス値の

早期検出が有効である。本焼却施設は、脱塩処理後の排ガス中の化学種 (O₂, CO, NO_x 等) 濃度をバグフィルタ出口の連続分析計で検出し、ACC のプロセス値として使用している。ところが、燃焼反応はダクト長で約 50 m 上流のボイラ内で完了しているため、この間で分オーダーの検出遅延が生じる。本試験では制御向上の対象となる O₂ 濃度の検出位置を従来のバグフィルタ出口から上流のボイラ出口に移し、検出遅れ時間の短縮を図った。これにより、ボイラ出口からバグフィルタ間の空気漏れ込み等による外乱が排除され、検出精度の向上も期待できる。ボイラ出口に追設した O₂ 濃度計の仕様を表 1 に示す。このジルコニア式 O₂ 濃度計は、センサーがプローブに直結しているため、この間に約 2 m のキャリヤチューブが介在する既設の O₂ 濃度計に比べ検出遅れ時間はさらに短縮される。ただし、本 O₂ 濃度計は湿ガスを直接計測するため、下式 (2.1) により乾基準に換算した値で示す。

$$O_{2_dry} = \frac{O_{2_wet}}{100 - H_2O} \times 100 \quad (2.1)$$

ここで、

O_{2_dry} : 排ガス O₂ 濃度 乾基準換算値 (%)

O_{2_wet} : 排ガス O₂ 濃度 湿基準 (計測値) (%)

H₂O : 排ガス水分濃度 (%)

排ガスの水分濃度は 3 回のスポット計測の平均値を全試験条件共通の定数として用いた。

(b) 燃焼空気量制御ロジックの改善

燃焼空気量の制御値演算における、排ガス O₂ 濃度乖離の補正項を従来の式 (2.2) から式 (2.3) のように指数関数に変更した。これにより、排ガス O₂ 濃度の著しい低下にも燃焼空気供給を一時的に大幅に増加させて空気不足を短時間で解消することができる。

$$OP_a = SV + m \cdot \Delta O_2 + b_1 + b_2 + \dots \quad (2.2)$$

$$OP_a' = SV + m(a \cdot \Delta O_2)^3 + b_1 + b_2 + \dots \quad (2.3)$$

ここで、

OP_a : 燃焼空気の制御値

SV : 燃焼空気の基準値

ΔO₂ : 排ガス O₂ 濃度の目標値との偏差

b_n : その他の補正值

(c) 廃棄物供給制御ロジックの改善

給じん制御は制御因子の中でも最も制御が難しく、その精度がボイラ蒸発量や空燃比等の燃焼安定性に直接影響を及ぼす。

炉内に供給され火格子下に堆積する廃棄物は、火格子下から供給する一次燃焼空気の圧損要因になるが、ACC はこの特性を利用して、一次空気の供給圧力と供給量から火格子下に堆積するごみ層の厚さを数値 (以下、ごみ層厚推測値) 化している。給じん制御はこの推測値を予め設定した

Table 1. Specification of the Oxygen Analyzer.

Manufacture	Yokogawa Electric co.
Proprietary name	Zirconia Oxygen Analyzer
Model number	ZR22G-40-S-L-C-R-J-A/GV
Measuring range	0 to 25 %
Operating Temperature	0 to 700 °C
90% response time	no later than 5sec.
Ambient temperature	-20 to +150 °C

基準値と比較して燃焼量の過不足を判断し、供給ペース (以下、給じん速度) の増減を行っている。

しかし、廃棄物の性状が想定域を著しく逸脱した場合、ごみ層厚の推測値と基準値の差には無意な偏りが生じ、給じん制御が意図どおりに動作しなくなる (例; 水分過多でかさ密度だけが高い、つまり発熱量が小さく通気性の悪いごみの場合、本来、給じん速度を増すべきところであるが、ごみ層厚推測上は供給過多と判別されるため、逆に減速制御される)。然して、その結果は燃焼負荷、つまり蒸発量の変動に表れる。本試験では判断基準となるごみ層厚の基準値を、ボイラ蒸発量の目標値との偏差により定期的に補正、更新するロジックを設けて本制御の精度を向上させた。

2.1.3. 計測設備

高温混合気吹込みと排ガス再循環による低空気比条件下での燃焼特性を調査するために、図 3 に示すように燃焼室内側面に K 熱電対を設置し、燃焼室内の温度分布を計測した。各温度計は、主燃焼室中央部ごみ流れ方向に設置した 4 箇所 (T1 ~ T4) と主燃焼室から二次燃焼室へ燃焼ガスが流入する主煙道入口 (Ta) および副煙道入口 (Tb) 各 1 箇所の合計 6 箇所である。

排ガス中のダイオキシン類濃度は O₂ 濃度と同じボイラ出口で、CO, NO_x 濃度はバグフィルタ出口で計測した。また、主燃焼室内の燃焼状況を観測するために、主燃焼室下流側壁面にビデオカメラを設置した。

2.2. 試験条件

試験条件を表 2 に示す。試験は、Exp. ①~⑤の 5 水準で行った。各水準全てに統一した条件は、空気比 1.3 と燃焼負荷 (ボイラ蒸発量 = 15 ton/h) で、これらは ACC により一定に制御される。ただし、Exp. ①は従来の ACC で、それ以外の条件は制御機能を強化した ACC である。

高温混合気の吹込み温度は Exp. ①, ②の 400 °C に対し、Exp. ③, ④は高温混合気の吹込み温度を廃熱回収用交換器で昇温可能な 250 °C (ただし、本試験の昇温には燃料式の加熱器を使用) とした。また、燃焼排ガス性状に及ぼす一次空気と二次空気の供給配分の影響を調べるために、Exp. ④は二次空気を他条件の約 2 ~ 3 倍に加増 (一次空気の削減により引き当て) して行った。さらに、Exp. ⑤では高温混合気吹込み無し (EGR のみ) の条件で低空気比燃焼を行った。バグフィルタ出口の排ガスを供給源とする EGR の温度は約 150 °C である。また、Exp. ②~⑤の各条件の一次、二次の供給比率を空気比当量で示す。ただし、これらの値

Table 2. Experimental conditions.

Experimental Conditions	Exp.①	Exp.②	Exp.③	Exp.④	Exp.⑤
ACC version	Conv.	Enhanced			
Operating duty	Equivalent of Steam generation = 15t/h				
Air ratio total	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Primary air	0.89-1.08	0.89-0.99	0.90-0.94	0.78-0.84	0.99-1.10
Secondary air	0.07-0.10	0.12-0.13	0.16-0.17	0.29-0.33	0.20-0.21
EGR	with	with	with	with	with
High-temperature gas injection	with	with	with	with	without
Temperature, °C	400	400	250	—	—

Table 3. Experimental results of flue gas and steam generation.

Experimental Conditions	Exp.①	Exp.②	Exp.③	Exp.④	Exp.⑤
Concentration of O ₂ , %	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
chemical species CO, ppm	4.7	3.1	4.5	2.9	6.0
in flue gas NOx, ppm	46	54	42	66	41
DXNs, ng-TEQ/m ³ N	0.49	0.47	0.33	0.19	0.27
Ratio of deviation of Steam generation, %	4.0	2.9	2.4	2.3	2.9

はごみ質等の外部要因により一定にすることができないため、試験結果の最小値と最大値で示した。

3. 試験結果および考察

3.1. 燃焼制御機能強化の効果

3.1.1. 燃焼空気量制御の即応性向上による効果

図6にボイラ出口およびバグフィルタ出口におけるO₂濃度の経時変化を示す。ボイラ出口O₂濃度計による検出遅れ時間はバグフィルタ出口に比べ約100sec.短縮されており、双方はほぼ同じ挙動を示している。表3に排ガス中のO₂, CO, NOx, DXNs濃度およびボイラ蒸発量の安定度を数値化した蒸発量乖離率の平均値を示す。ただし、DXNsは各試験条件で複数採取した検体を単純平均した値である。また、蒸発量乖離率は下式(3.1)により算出した。

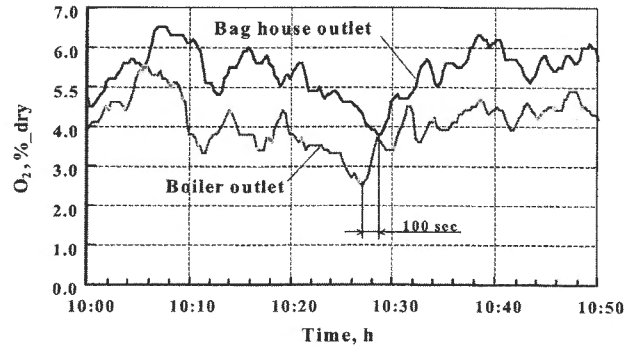


Fig. 6. Time histories of O₂ concentration at the Boiler outlet and the Bag house outlet shows shortening of detection time.

$$\sigma_s = \left| \frac{E_c - E_s}{E_s} \right| \times 100 \quad (3.1)$$

ここで、

- σ_s : 蒸発量乖離率 (%)
- E_c : 目標蒸発量 (kg/h)
- E_s : 実蒸発量 (kg/h)

図7にExp.①, ③, ⑤のボイラ蒸発量および排ガス中のO₂, CO, NOx濃度の経時変化を、図8に同時時間帯のExp.①, ③のO₂濃度のヒストグラム(母数180; 6hr/サンプリング周期2min)を示す。排ガスO₂濃度の平均値は全条件で目標値の4.8%を示しているが、その精度については、Exp.③のO₂濃度が90%以上の確率で目標とした4.8%±1pointの範囲に収斂しており、従来ACCを用いたExp.①に比べ有意に向上していることが瞭然としている。

これは、ボイラ出口のO₂濃度計による検出遅れ時間の短縮と燃焼空気制御ロジックの改善により空気量制御の即応性が向上したことによるものといえる。これにより、高温混合気吹込み温度を250°Cにしたことで保効効果が低下すると予想されたExp.③においても、Exp.①と同様の完全燃焼が可能であることを明らかにした。さらに、NOxに

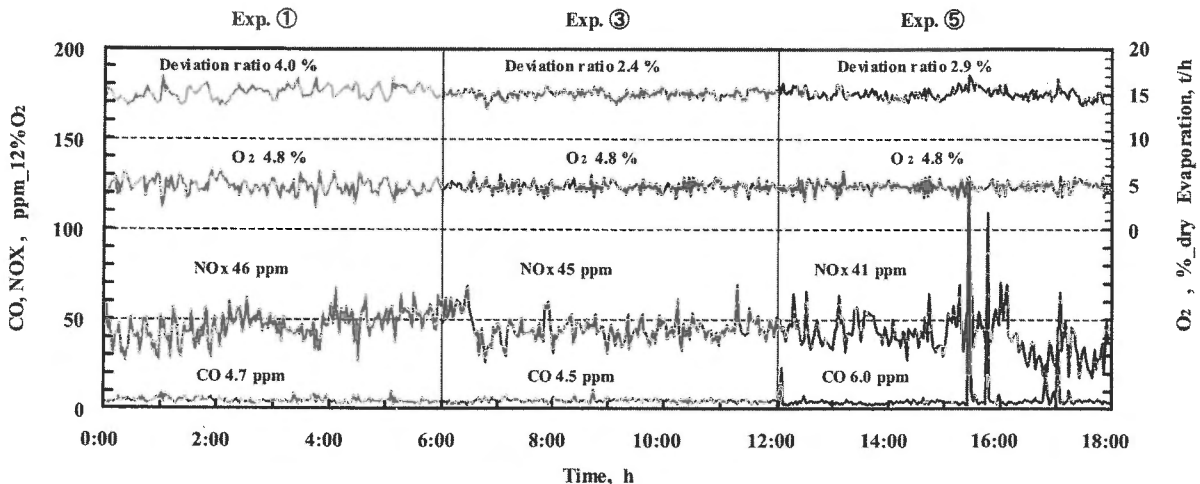


Fig. 7. Time histories of O₂, CO and NOx concentration in flue gas and Boiler evaporation.

についても平均で 50 ppm 未満 (従来の空気比 1.6 の燃焼では平均 86 ppm) で、低空気比燃焼による抑制効果が損なわれていないことも確認できる。

排ガス濃度の早期検出による燃焼制御の改善効果は、Deguchi[18]や Liu[19]の研究により報告されているが、いずれも応答性を極限まで向上させるために、検出位置を燃焼反応完了直後の二次燃焼室出口に置いている。これにより検出遅れは 120 ~ 180 sec. 改善され、燃焼状態の改善も確認されているが、850 °C を超える高温の排ガスを計測するために高価なレーザー分析分光法を用いている。本試験結果から、より簡便で廉価なボイラ出口の O₂ 検出でも同等の効果が得られることが示された。

3.1.2. 給じん制御精度向上の効果

図 9 は、ACC の給じん制御において、ごみ層厚の基準値を固定値とした従来の Exp. ①と蒸発量による補正ロジックを加えた Exp. ③のごみ層厚の推測値と基準値の偏差をヒストグラムに表したものである。Exp. ③は凡そ基準値付近である 0 ~ 0.5 区間を中心に分布しているのに対し、Exp. ①は基準値から外れた -1 ~ -0.5 区間を中心に分布し

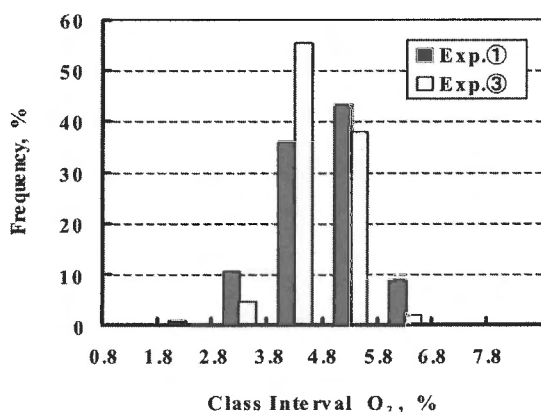


Fig. 8. Histogram of O₂ concentration at the Boiler outlet.

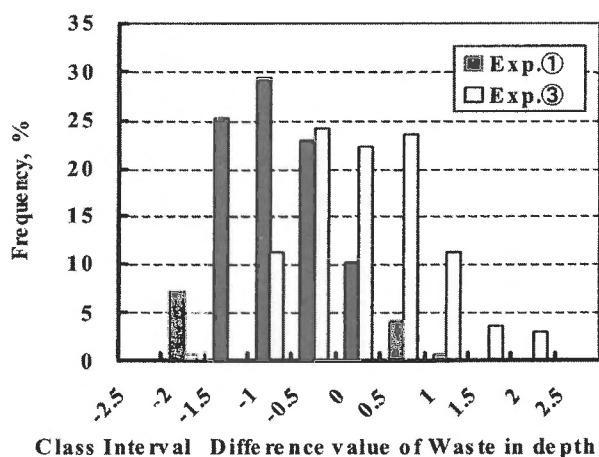


Fig. 9. Histogram of difference value of Waste in depth between Targeted and Stochastics.

ている。

ごみ層の偏差が恒常的に偏っているということは、給じん補正も常時増減のどちらかに偏っていたことになる。にも拘らず、Exp. ①の蒸発量が目標の 15 t/h を中心に推移しているのは、蒸発量乖離率が給じん速度による調整が可能な範囲を超えた時に作動する、給じん ON-OFF 制御と火格子速度や燃焼空気等、蒸発量を制御するその他の制御因子により補完されていたためである。したがって、ボイラ蒸発量の安定度を数値化した蒸発量乖離率の結果が、Exp. ③の 2.4 % に比べ Exp. ①が 4.0 % と大きいのは、給じん制御の巧拙の差であるといえる。これらのことから、ごみ層厚基準値をボイラ蒸発量の乖離率で補正した給じんの制御ロジックが狙いどおりに機能し、燃焼負荷変動の抑制に効果的に作用しているものと考えられる。

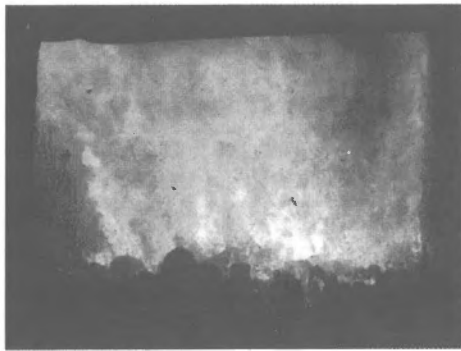
3.2. 高温混合気吹込みの効果と温度低下の影響

燃焼室下流側から観察した、従来燃焼 (空気比 1.6, 高温混合気および EGR なし) と低空気比燃焼 Exp. ②, ③および⑤の主燃焼室における燃焼状態を図 10 に示す。炉床から上方向に伸びる乱流状の拡散火炎が燃焼室全体を覆っている従来燃焼に対し、高温混合気の吹込み温度を 250 °C に低下させた Exp. ③は、既報[15-16]で確認された特徴的な火炎形態 (高温混合気吹込み位置を境にして下部には火炎高輝度が二分する) を再現した。また、火炎輝度や火炎長も高温混合気温度 400 °C の Exp. ②と遜色ないことが確認できる。

一方、高温混合気を吹込まない EGR のみの Exp. ⑤には、広範囲にわたる火炎の吹き消えを伴う不安定な燃焼状態が観察され、EGR の燃焼抑制効果をごみ層直上の火炎基部にまで及んでいることが確認された。また、完全燃焼性については、従来 ACC を用いた時に比べ格段の改善が見られる (従来 ACC での EGR のみの低空気比燃焼は、100 ppm を超える CO ピークが頻発して試験継続が不可能であった) もの、O₂ 濃度の極端な低下を伴わない CO ピークが発生しており、高温混合気を吹込んだ Exp. ②, ③との差を有意に示している。

図 11 に従来燃焼と Exp. ②における、主燃焼室温度 (T1 ~ T4) の経時変化を示す。Exp. ②の燃焼室温度は凡そ 800 ~ 1000 °C の範囲で推移しており、従来燃焼に比べ変動が小さくなっている。さらに、計測位置間の平均温度の標準偏差も従来燃焼の 77 から 42 に縮小していることから、105 ton/日規模の実炉においてもパイロットプラント (炉規模 500 kg/h) の試験[10,13]で確認された高温混合気と EGR による主燃焼場の温度均一化が図られているものと推測される。

以上のことから、廃熱回収用の熱交換器で昇温可能な高温混合気温度 250 °C の条件においても、その保炎効果は維持されることを確認した。また、EGR は未燃ガスの攪拌作用と燃焼抑制効果により、主燃焼室に広範で均質な一次燃焼場を醸成し、これが低空気比燃焼の実現に大きく寄与しているものと考えられる。



Conventional combustion (Air ratio = 1.6) without High temperature air nor EGR



Exp.② Low air-ratio combustion with High temperature air (400°C) and EGR



Exp.③ Low air-ratio combustion with High temperature air (250°C) and EGR



Exp.⑤ Low air-ratio combustion without High temperature air, with EGR

Fig. 10. Combustion flame in the primary combustion chamber.

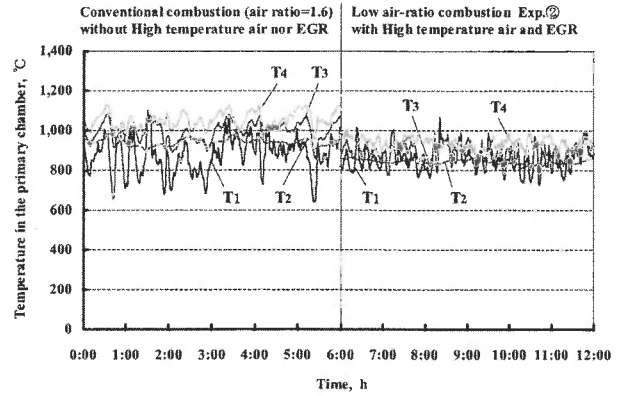


Fig. 11. Time histories of gas temperature in the primary combustion chamber.

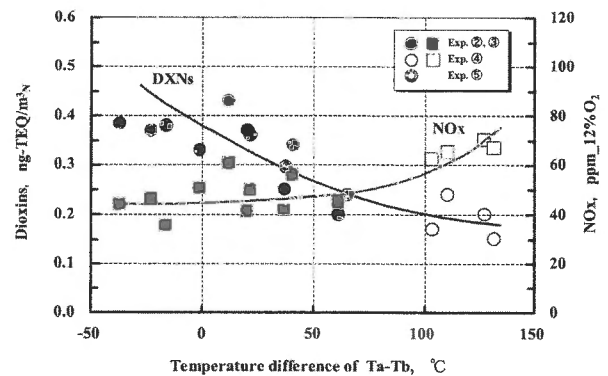


Fig. 12. Concentration of Dioxins and NOx depending on the temperature difference.

3.3. 燃焼プロセスと有害物質生成の関係

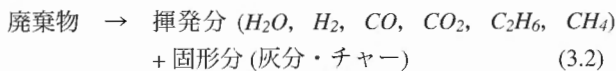
図 12 に Exp. ②～⑤)における主煙道入口温度 (T_a) と副煙道入口温度 (T_b) の差 ($T_a - T_b$) とボイラ出口排ガス中のダイオキシン類濃度, および NO_x 濃度の関係を示す. ダイオキシン類は高温混合気や EGR の条件に関わらず, 主煙道と副煙道の温度差に対して強い相関を示している. 同時に, 燃焼空気の供給配分は燃焼室の温度差 ($T_a - T_b$) に少なからず影響を及ぼし, 一次空気の供給比率が低いほど, 「副煙道側温度 < 主煙道側温度」の傾向が顕著に表れる. つまり, ダイオキシン類の生成は, 主燃焼室において生成される未燃ガスが多く流れ込む副煙道側の温度が低く, 比較的酸素濃度が高い主煙道側の温度, すなわち二次燃焼開始点の温度が高い状況で低減する傾向にある.

この結果は, Hatanaka らのダイオキシン類生成におよぼす主燃焼室と二次燃焼室温度の影響調査[20]において, 主燃焼室温度 (本試験では副煙道温度に相当) が低い場合にダイオキシン類が低減したという報告とも一致する. また, 排ガス中の CO 濃度の結果から Exp. ⑤ (平均 6.0 ppm, ピーク有) は Exp. ② (平均 3.1 ppm, ピーク無), ③ (平均 4.5 ppm, ピーク無) と比べ完全燃焼性に劣ると観られるが, ダイオキシン類濃度は図 12 の燃焼室温度差 ($T_a - T_b$) との

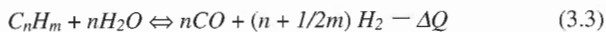
相関曲線のプロットを見ると、比較的低い値を示している。このことは、これまでダイオキシン類生成の最大要因とされてきた不完全燃焼とその指標となる CO 濃度が、 1 ng-TEQ/m^3 未満の低濃度域では充分な説明因子とはなり得ないことを示唆している。以上のことからダイオキシン類の生成には主燃焼領域における燃焼プロセスの関与が考えられる。

ダイオキシン類の原因物質としては PCP, PCBz 等の塩素化芳香族[21]の他に、すす (soot) や多環芳香族炭化水素 (PAH) の存在[22-23]が挙げられるが、燃焼プロセスがこれら炭化水素化合物の生成に関係していることは周知の通りである。廃棄物の燃焼プロセス[24]は以下に示す 3 過程に大別され、中でもガス化反応は反応経路が無数に存在しその後の燃焼反応に伴う副生成物の性状に多大な影響を及ぼしていると考えられる。

1) 熱分解反応 (Pyrolysis)



2) ガス化反応 (Gasification)



3) 燃焼反応 (Combustion)



特に吸熱反応である改質反応 (3.3) (3.5) や水性ガス反応 (3.4) が右辺に移動して還元側に進む場合には、一酸化炭素を主体とした軽質の可燃ガスが生成される。逆に左辺に進むと、燃焼反応に遷移する間に炭化水素の結合が進み、芳香族炭化水素類やすす等の中間副生成物質への成長が助長されると考えられる。このように吸熱を伴う反応が逆方向に進む仮想要因としては、燃焼場の変動による急激な温度低下等、周囲の環境が反応熱を奪うような状況が考えられる。本試験では、初期燃焼場への高温混合気の吹込みと EGR により局所的燃焼が回避され、図 11 のように主燃焼室内の温度分布や変動が抑えられたことによりガス化反応が還元側に進んだ可能性が高い。さらに、主燃焼室で改質された CO 主体の可燃ガスは、二次燃焼室で主煙道部から入る酸素の豊富な高温ガスとの速やかな燃焼反応により、ダイオキシン類の分解が促進されることも考えられる。

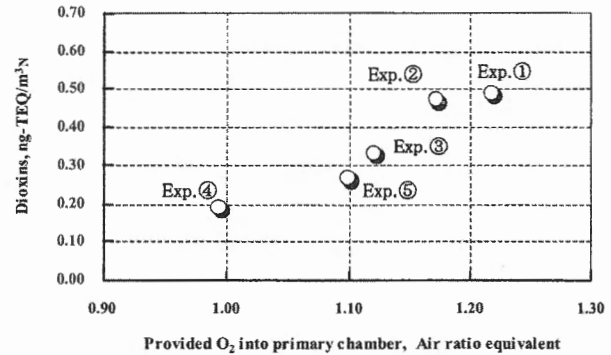


Fig. 13. Relationship between provided O₂ into primary chamber and Concentration of Dioxins.

これを裏付けるデータとして、一次燃焼室に供給した全酸素量 (一次空気 + 高温混合気 + EGR) を空気比当量で表した値とダイオキシン類の関係を図 13 に示す。相関図に使用した数値は、各検体のデータを試験条件毎に単純平均した値であるため、傾向を示すものにすぎないが、主燃焼室の酸素供給比率配分が低下、つまり初期燃焼場がガス改質反応に有利な還元雰囲気になるほど、ダイオキシン類濃度が低下していることが分かる。したがって、廃棄物燃焼におけるダイオキシン類の抑制には、ガス化反応過程において芳香族炭化水素や重質炭化水素の生成を抑制し、二次燃焼室で副生成物質が生成されにくいクリーンな燃焼に導くことが有効であると考えられる。また、そのためには主燃焼室で燃焼反応を抑制しガス改質を促進させると同時に、燃焼温度の均一化を図ることが効果的であるといえる。

一方、NO_x は二次空気の供給量を増やした Exp. ④で、燃焼室温度差 (Ta - Tb) が大きくなり、Exp. ②, ③の条件に比べ約 20 ppm 増加している。また、Exp. ②, ③が燃焼室の温度パターンに関係無く 40 ~ 60 ppm の低い値に抑えられていることから、Exp. ④の NO_x 増加は二次燃焼空気の増加に伴う二次燃焼反応の活性化による Prompt NO_x 若しくは Thermal NO_x の生成によるものと考えられる。

以上のことから、ダイオキシン類と NO_x を同時に低減するためには、二次空気供給比率を極力上げずに、副煙道よりも主煙道を高温に維持することが望ましいと考えられる。

4. 結言

高温燃焼技術の適用により低空気比燃焼を実現したストーカ炉において、燃焼制御機能の強化により燃焼安定性の向上を図り、高温混合気温度を既報の 400 °C から廃棄物焼却プラントで用いられる廃熱用の熱交換器で昇温可能な 250 °C に低下させて行った試験により以下の結果を得た。

- 1) ACC による燃焼空気制御の即応性と給じん制御の精度向上により、排ガス O₂ 濃度とボイラ蒸発量の変動が抑制され、燃焼制御の安定性が大幅に改善された。
- 2) ACC 強化により燃焼安定性が改善された結果、高温混

合気吹込み温度を汎用熱交換器で昇温可能な 250 °C に低下することが可能となり、外部エネルギーを使用しない低空気比燃焼が可能になった。

3) 燃焼空気の供給配分や主燃焼室の温度分布と NO_x、ダイオキシン類等、有害物質の生成には有意な相関があり、主燃焼室における燃焼空気量や温度管理が有害物質の抑制に極めて有効であることを明らかにした。

本研究により、ストーカ式廃棄物焼却において燃料等の外部エネルギーを必要としない低空気比燃焼を実現した。

謝辞

本試験の一部は、NEDO「平成 15 年度産業技術実用化開発費助成事業」の助成により行われた。また、本試験の実施にあたり、苫小牧市殿と同市沼ノ端クリーンセンターの皆様のご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

References

1. *Waste management in Japan -2002 edition, Ministry of Environment.* (in Japanese): 11 (2005).
2. Kira, M., Doi, T., Tsuneizumi, S., Takuma, M., and Kitta, T., *MHI Technical Review* 38-2: 78-81 (2001).
3. Orita, N., Kira, M., Takuma, M., Takahashi, S., Kitta, T., and Kudou, K., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 68: 1253-1259 (2002).
4. Asou, T., Akiyama, J., Ohmori, K., Sameshima, R., Ikawa, K., Fujikawa, H., Tamura, T., Hayata, Y., Nakatsuka, D., and Matsumoto, A., *TAKUMA Technical Review* (in Japanese) 10-1: 21-39 (2002).
5. Miyake, T., Wakamatsu, H., Mimura, M., Sakurai, T., Matsuzawa, Y., Ueno, S., Nishino, J., and Kubota, N., *JSME Proc. 14th Symp. on Environmental Engineering* (in Japanese): 168-171 (2004).
6. Katsuki, M., Hasegawa, T., *Proc. Combust. Inst.* 27: 3135-3146 (1998).
7. Wang, J., Niioka, T., *Proc. 40th Japanese Symp. on Combust.* (in Japanese): 287-288 (2002).
8. Ito, Y., Yoshikawa, K., and Shimo, N., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 69: 107-113 (2003).
9. Fujita, O., Matsunaga, F., Noro, T., and Ito, K., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 69: 490-496 (2003).
10. Suzuki, M., Tatefuku, T., Noto, T., Matsui, S., Nishino, M., and Fujisawa, Y., *Proc. Forum on High-temperature Air Combustion Technology* (in Japanese): 53-68 (2001).
11. Tatefuku, T., Noto, T., and Suzuki, M., *Proc. 38th Japanese Symp. on Combust.* (in Japanese): 273-274 (2000).
12. Tatefuku, T., Noto, T., and Suzuki, M., *Proc. 39th Japanese Symp. on Combust.* (in Japanese): 105-106 (2001).
13. Tatefuku, Matsui, S., Noto, T., and Suzuki, M., *Proc. 40th Japanese Symp. on Combust.* (in Japanese): 63-64 (2002).
14. Denda, T., Tatefuku, T., and Suzuki, M., *Proc. 41st Japanese Symp. on Combust.* (in Japanese): 403-404 (2003).
15. Miyagoshi, Y., Tatefuku, T., Nishino, M., Yokoyama, T., and Kadowaki, S., *Proc. 2nd Int. Conference on WASTE MANAGEMENT 2004 WIT, Waste Management in Japan:* 155-164 (2004).
16. Miyagoshi, Y., Tatefuku, T., Nishino, M., Yokoyama, T., and Kadowaki, S., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 71: 1205-1211 (2005).
17. Obara, I., *NKK Technical Review* (in Japanese) 166: 51-53 (1999).
18. Deguchi, Y., Noda, M., Abe, M., and Abe, M., *Proc. Combust. Inst.* 29: 147-153 (2002).
19. Liu, D., Yoshimoto, S., and Kataoka S., *TAKUMA Technical Review* (in Japanese) 9-2: 59-67 (2001).
20. Hatanaka, T., Kitajima, A., Takeuchi, and M., *JSME Proc. 12th Symp. on Environmental Engineering* (in Japanese): 352-354 (2002).
21. L.C.Dickson, F.W.Karasek, *Trans. Chromatography* 389: 127-137 (1987).
22. Kitta, T., Hoshi, Y., Honda, H., and Sugai, A., *Proc. 42nd Japanese Symp. on Combust.* (in Japanese): 423-424 (2004).
23. Niioka, T., Kouno, M., Sato, J., *Nensyuu Gensyuu no Kiso, Ohmsha,* (in Japanese): 281-289 (2001).
24. *Saishin Haikibutsu Syori Gijyutsu, Kougyougijyutsukai.* (in Japanese): 277-280 (1997).