ストーカ式廃棄物焼却炉における低空気比燃焼* (高温空気燃焼技術適用による燃焼安定性の改善)

宮越 靖 宏^{*1}, 立 福 輝 生^{*2}, 西 野 雅 明^{*3}
横 山 隆^{*3}, 門 脇 敏^{*4}

Advantages of Low Air-Ratio Combustion in a Stoker-Type Incinerator (With High Temperature Air Combustion Technology)

Yasuhiro MIYAGOSHI^{*5}, Teruo TATEFUKU, Masaaki NISHINO,
Takashi YOKOYAMA and Satoshi KADOWAKI

^{*5} Department of Environmental Engineering, JFE Engineering Inc.,
2-1 Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 230-8611 Japan

Measures such as low air-ratio combustion have become the subject of a great deal of attention with a view to reducing the amount of environment impacting substances from the waste incineration process, and also to making the most effective use of energy. However, it has been understood there would be considerable difficulty utilizing low air-ratio combustion on the classic grate furnace due to fundamental problems in its process resulting from the wide range and heterogeneity of waste materials. The application of high-temperature air combustion technology for enhancing sound combustibility could provide solutions to these problems. In practice, a mixture of high-temperature air and flue gas is injected at high velocity from both sides of the furnace walls to form a stable high-temperature zone in the combustion air stoichiometry of 1.3 with EGR (Exhaust Gas Recirculation) and high temperature air combustion technology resulting in a 17% decrease in flue gas flow, an energy efficiency improvement of 10%, and more than 50% reduction in NO_x emissions when compared with an air stoichiometry of 1.6.

Key Words: Environmental Engineering, Combustion, Pollutant, Municipal Refuse Incineration, Low Air-Ratio Combustion, High Temperature Air Combustion, NO_x, Dioxins

1. 結 論

わが国では、1960年代の高度成長とともに増え続ける廃棄物を計画的に処理するために、安全かつ衛生的な減容化を主眼においた焼却処理政策が採られ、多くの廃棄物焼却処理施設が建設されてきた。これらの施設は我々の生活に必要な不可欠な社会基盤設備として定着しているが、環境やエネルギー問題に対する関心の

高まりと急変する社会情勢の中で求められる役割は年々高度多様化している。特に、排ガスを主排出源とするダイオキシン類や NO_x 等の有害物質の排出量削減、エネルギー利用の高効率化、ライフサイクルコストの低減は最重要課題として、様々な技術的取り組みがなされている。中でも廃棄物焼却炉における低空気比燃焼は、その効果の大きさから最も注目される技術のひとつである^{(1)・(2)}。

低空気比燃焼には、排ガス排出量の低減、NO_x生成の抑制、廃熱回収効率の向上等の利点があり、あらゆる炉型式への適用が考えられる。特に、操業の安全性や経済性を考慮すると国内一般廃棄物焼却処理施設の8割以上(処理能力ベース)を占める⁽³⁾ ストーカ式焼却炉(以下、ストーカ炉と記す)への導入が最も効果

* 原稿受付 2004年7月23日。

^{*1} 正員、JFEエンジニアリング(株)環境技術部(〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1)。

^{*2} 正員、JFEエンジニアリング(株)環境システム研究部(〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1)。

^{*3} JFEエンジニアリング(株)環境技術部。

^{*4} 正員、長岡技術科学大学機械系(〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1)。

E-mail: miyagoshi yasuihiro@jfe-eng.co.jp

的であると考えられる。日本と同様に廃棄物の焼却処理を志向してきた欧州においても、ガス化溶融炉等の新型炉導入の可能性を模索する一方で、低空気比燃焼やボイラ・タービンの高温高圧化による既存ストーカ炉の廃熱利用の高効率化が環境や省エネルギーだけでなく経済面においても有効な手段であるとして評価されている⁽⁴⁾。

現在、国内の廃棄物焼却処理施設で実稼動しているストーカ炉の理論燃焼空気比（以下、空気比と記す）は凡そ1.6～2.0である。性状が不均質なごみを前処理せずに連続焼却するストーカ炉ではその燃焼プロセスにおいて、純粋な燃焼以外にごみの乾燥や炉内の温度制御に余剰の空気を要するため、発電プラント等の石油・石炭燃焼炉に比べ燃焼空気比が高くなる。したがって、安易な空気比の低減は異常高温による耐火物の損傷や不完全燃焼によるダイオキシン類発生等の弊害を伴うため、従来の燃焼制御技術では実現困難であるとされてきた。

低空気比燃焼を実現する既存技術の一つに排ガス再循環（EGR; Exhaust Gas Recirculation）がある。EGRは不活性な燃焼排ガスを再度燃焼室内に戻し火炎温度を下げることで、NO_xの生成を抑制する燃焼技術として広く知られている。欧州では1950年代から廃棄物焼却炉への適用が始められており、わが国でも1982年の「大気汚染防止法に基づく窒素酸化物に係る総量規制基準」の制定を期に、NO_xの削減を目的として実炉への導入が試行された。その結果、燃焼温度抑制、排ガス量・NO_x低減、廃熱回収率向上の効果が確認された⁽⁵⁾。しかし、EGRのみによる低空気比燃焼ではCO等の未燃ガス成分濃度が、現在の「ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン」による規制値⁽⁶⁾にまで達しておらず、完全燃焼性の課題を残すこととなった。さらに、燃焼温度低下による灰の熱収減量の増加が懸念されたことや、排ガス中の腐食成分の結露による設備の低温腐食の問題もあり、実用化の水準には至らなかった。

折田ら⁽⁷⁾は、実際のストーカ炉においてEGRと酸素富化燃焼の併用により、EGRによる不完全燃焼を補完し低空気比燃焼を実現している。酸素富化燃焼は、炉床より供給する一次燃焼空気の酸素濃度を高め、酸化反応に寄与しない窒素の割合を相対的に下げることによりごみ層燃焼を活性化させ、排ガスおよび灰中の未燃成分の低減を図る技術であるが、このプロセスには圧力変動吸着装置等の酸素製造設備と製造エネルギーが必要になる。さらに、一次燃焼場の酸素濃度を高め燃焼温度を意図的に高くするため、低空気比燃焼で

期待できるNO_x低減効果が十分に得られていない。

著者らは、ストーカ炉本来の特長である安定燃焼性を損なわずに空気比の低減を図る手段として、高温空気燃焼技術に着目した。高温空気燃焼とは、燃焼空気を自己着火燃焼が持続可能な温度以上に加熱し、低酸素濃度に希釈して供給することにより火炎の安定化をはかり、燃焼性を向上させる燃焼技術である⁽⁸⁾。燃焼場が低酸素雰囲気になることで局所的な高温燃焼が回避されNO_xの生成が大幅に抑制される⁽⁹⁾、燃焼用空気を廃熱回収により予熱するため、燃焼システム全体としての熱効率が改善されるという特徴がある。

図1に高温空気燃焼技術を応用したストーカ炉の燃焼開始領域での火炎安定化の模式図を示す。空気と排ガスを混合し酸素濃度を調整した混合気を高温に加熱（以下、高温混合気と記す）し、EGRに先んじて炉の両側面から高速で吹き込むことにより、ごみ層直上の空間に高温かつ低酸素状態の安定燃焼場を形成させ、ここに安定な火炎を定在させる。これにより低空気比条件下での燃焼開始領域における不安定性が解消され、火炎の吹き消えや局所燃焼のない安定した燃焼が期待できる。

Fig. 1 Flame stabilization image in the combustion beginning region

著者らは、これまでに廃棄物の基礎燃焼特性からパイロットプラントによる模擬ごみ燃焼試験に至るまでの系統的な研究を実施してきた^{(10)・(14)}。その結果、焼却量12 ton/日のパイロットプラントにおいて、高温混合気の吹き込みと排ガス再循により空気比1.3の安定燃焼を実証した⁽¹³⁾。これら基礎研究により得られた知見⁽¹⁴⁾を基に、現在稼動中のストーカ炉を低空気比燃焼用に改造し、高温空気燃焼技術を応用した実炉適用試験を行った。本研究では、105 ton/日規模の実炉において、空気比1.3の低空気比条件下で、従来の空気比と同等の低CO濃度の完全燃焼性が得られることを確認し、その燃焼状態

を詳細に観察するとともに、ダイオキシン類、NO_x 等有害物質の排出削減、廃熱回収率向上等を従来燃焼と比較することにより低空気比燃焼の有効性について検証した。

2 試験設備および試験方法

2.1 試験設備 試験は実際の清掃工場である苫小牧市沼ノ端クリーンセンター⁽¹⁵⁾の1号設備を用いて実施した。当施設の概要を表1に、試験設備フローを図2に示す。本設備は摺動式の火格子を備えた二回流式ストーカ炉⁽¹⁶⁾（炉幅3.2m、炉高6.2m、炉奥行8.0m）と廃熱ボイラ、減温塔、バグフィルターおよび誘引送風機等で構成されている。燃焼用空気として①一次空気、②炉冷却用空気、③二次空気が供給される。さらに、炉内の過昇温による耐火壁の損傷防止とNO_x低減を目的として、主燃焼室上部には炉内水噴霧装置が設けられ

Table 1 Specifications of the commercial plant

Plant	Numanohata Clean Center Tomakomai City
Furnace type	JFE HYPER stoker-type incinerator
Capacity	105 t/d × 2 lines
Flue gas cooling	Heat recovery boiler (2.8MPa, 300℃) and cooling tower
Flue gas treatment	Bag house with lime and activated carbon supply
Heat utilization	Steam turbine (2.6MPa, 295℃) and generator (2000kW)

Fig. 2 Schematic flow of the experimental plant advanced stoker system

ている。アンモニア等の還元剤噴霧による排煙脱硝設備は装備していない。なお、燃焼最適化に必要なごみの供給、火格子の駆動速度および燃焼空気、炉内噴霧水の供給量等のプロセス制御は自動燃焼制御装置（ACC; Automatic Combustion Control system）に担持されている。

当既存設備で低空気比燃焼試験を実施するために、④再循環ガス供給用のEGRラインと⑤高温混合気吹き込み用の供給高温混合気発生装置を追加した。以下に①～⑤の各燃焼用空気及びガスの燃焼プロセスにおける機能および供給方法を記す。

① 一次空気（PA ; Primary combustion Air）

ごみの乾燥から熱分解、チャー燃焼に至る初期燃焼に必要な空気を火格子下より供給する。

② 炉冷却用空気（CA ; Cooling Air）

初期燃焼の促進と燃焼室温度の適正維持を図るために主燃焼室の両側壁に設けたノズルより供給する。

③ 二次空気（SA ; Secondary combustion Air）

熱分解ガス中の未燃成分を完全燃焼するために二次燃焼室下部より供給する。

④ 再循環ガス（RG ; Recirculating Gas）

低空気比燃焼時にダンパ DA1 と DA 2 の開閉操作により②炉冷却用空気に替えてバグフィルターでばいじんと塩素化合物を除去した燃焼排ガスを排ガス再循環送風機により主燃焼室に供給する。

⑤ 高温混合気（HG ; High temperature mixed Gas）

高温混合気は再循環ガスと空気を高温混合気発生

*1) Induced Draft Fan

*2) Exhaust gas Recirculated Draft Fan

装置の灯油バーナにより直接加熱混合することにより温度と酸素濃度を調整して製造し、図1に示すように炉温冷却用空気ノズルの下部に設けたノズルからごみ層直上にはほぼ水平に吹き込む。

排ガスの組成はバグフィルター出口に常設されている O_2 , CO , NO_x 連続分析計で計測した。排ガス中のダイオキシン類はボイラ出口および煙突で計測した。

2.2 試験条件 試験は通常運転による従来燃焼 (Conventional) と高温混合気の吹き込みと EGR を併用した低空気比燃焼 (Advanced) の2条件で実施し、 CO , NO_x および排ガス中のダイオキシン類濃度の排ガス性状、排ガス量、熱回収率 (ボイラ蒸気量) について比較した。各試験条件において供給した空気およびガスの組み合わせと空気比を表2に示す。低空気比燃焼時は空気比 1.3 で適正な燃焼が持続維持できるように、燃焼状態を監視しながら一次及び二次空気と再循環ガスの供給配分を調整した。調整後の再循環ガスの供給量は常時一定とした。このとき、再循環ガス中の酸素濃度は dry base で 6~7% であった。

表3に低空気比燃焼時に吹き込んだ高温混合気の性状を示す。高温混合気の吹きこみ量、温度および酸素濃度条件は、パイロットプラント試験の結果⁽¹⁴⁾を基に決定した。

表4にごみ、各燃焼用供給気、炉内水噴霧の供給

Table 2 Combination of supply combustion airs and gases

Supply source		Conventional	Advanced
Combustion air	PA	○	○
	CA	○	×
	SA	○	○
Dilution gas	RG	×	○
	HG	×	○
Stoichiometric air ratio		1.63	1.30

制御方法を示す。ここで、低空気比燃焼において一次および二次燃焼空気の制御方法を手動操作 (Manual) としたのは、使用した ACC のロジックが従来のままでは低空気比燃焼には適合しなかったためである。従来燃焼時に炉内過昇温防止のため主燃焼室に約 1 ton/h 供給していた炉内水噴霧は、低空気燃焼時は EGR の冷却効果により不要となった。

Table 3 Characteristic of the High-temperature gas

Item		Unit	
Temperature		°C	400
Gas Composition (wet base)	O_2	%	12
	CO_2	%	5-6
	H_2O	%	13-14

Table 4 Operating means of combustion control

Item		Conventional	Advanced
Refuse feeding		ACC	ACC
Combustion air	PA	ACC	Manual
	CA	ACC	—
	SA	ACC	Manual
Dilution gas	RG	—	const.
	HG	—	const.
Water spray		ACC	—

3 試験結果および考察

3.1 主燃焼室の火炎形態 主燃焼室における従来燃焼と低空気比燃焼には火炎形態に特徴的な差異が確認された。図3に従来燃焼時と低空気比燃焼時の燃焼状態を示す。

従来燃焼時は、燃焼室全体がオレンジ色の長火炎に覆われていて火炎の奥の状況が観察できない。これに対して低空気比燃焼時は、高温混合気吹き込み位置より下部に高輝度の短火炎が定在化し、それより上部で

Conventional

Advanced

Fig. 3 Combustion flame in primary combustion chamber

はごみ供給部の状況が透視できる程火炎輝度が低下している。この火炎形態から以下のことが推測される。

高温混合気の吹き込み位置より下部では、ごみ層直上に吹き込まれる高温混合気によりよどみ領域が形成され、ごみの熱分解が促進されると同時に熱分解直後の可燃性ガスが均質化される。一方、吹き込み口より上部では、EGRにより燃焼ガスの均質化が進み、二次燃焼に至るまで均一な温度で燃焼が緩慢に継続するため、少ない空気比で燃焼が完結するものと推測される。炉内噴霧水が不要になった理由も、燃焼ガスの均質化により緩慢燃焼が燃焼室全域に広がり、局所的な高温領域が無くなったことによるものと考えられる。

3.2 低空気比燃焼の安定性 従来燃焼時と低空気比燃焼時の排ガス濃度の経時変化を図4に示す。このとき、焼却負荷条件はともにボイラの蒸発量を15t/h一定とした。また、本グラフに示すO₂濃度は、ボイラ出口からバグフィルタ出口の間で供給される空気の酸素増加分を引いて算出したボイラ出口の酸素濃度(付録参照)である。

従来燃焼時のボイラ出口排ガスO₂濃度が平均8.1%(空気比1.63)であるのに対し、低空気比燃焼時のO₂濃度は平均4.8%(空気比1.3)である。完全燃焼の指標の一つであるCO濃度についても、低空気比燃焼時は従来燃焼時とほぼ同等であり、空気比1.3での安定燃焼の達成が確認できる。

図5に従来燃焼と低空気比燃焼の双方において、空気不足により瞬間的に不完全燃焼を生じた時のO₂とCO濃度の関係を示す。従来燃焼ではO₂濃度約5%以下になると高濃度のCOが発生している。一方、高温

Fig. 5 Relationship between O₂ and CO concentrations in the flue gas

混合気吹き込みとEGRを行った低空気比燃焼の場合は、O₂濃度3%程度までは高濃度のCO発生は無く、不完全燃焼領域は低酸素濃度側、すなわち低空気比側に移行していることがわかる。これは、12 ton/日のパイロットプラントで行った試験結果⁽¹⁰⁾と同じ傾向であり、実炉においても高温混合気吹き込みによる燃焼改善効果が確認できたといえる。

廃棄物を焼却したときに発生する排ガス量は、焼却炉に投入した可燃物が保有する総熱量と強い正の相関にある。そこで、焼却炉に投入したごみ(低空気比燃焼の場合はこれに高温混合気製造に用いた燃料を加える)の総発熱量を43,400MJ/hに統一して従来燃焼と低空気比燃焼時の排ガス量を比較した。その結果、低空気比燃焼時の排ガス量は、従来燃焼の26 km³/hから約17%低減し21.7 km³/hとなった。

図6に主燃焼室の温度とNO_x濃度の関係を示す。従来燃焼時のNO_x濃度は平均86 ppmであるのに対し

Fig. 4 Time histories of O₂, CO and NO_x in flue gas

て、低空気比燃焼時は炉内水噴霧無しで平均 46 ppm とほぼ半減している。これは、高温混合気吹き込みと EGR で燃焼室の温度が均一化され局所的な高温燃焼が回避されたことにより Thermal NOx の生成が抑制されたことと、主燃焼過程における O₂ 濃度の低下によりごみ中の窒素分が Fuel NOx に転換する反応が抑制されたこと等によるものと推測される。

Fig. 6 Relationship between gas temperature in the primary combustion chamber and NOx concentration in the flue gas

3.3 ダイオキシン類の排出抑制 ボイラ出口排ガス中におけるダイオキシン類濃度の結果を表 5 に示す。EGR と高温混合気の吹き込みにより燃焼改善が成された結果、低空気比燃焼時のダイオキシン類濃度は従来燃焼時と比較して約 40%低減した。ダイオキシン類の生成要因については諸説あるが、原因物質にすすや多環芳香族炭化水素 (PAH) の存在が挙げられている⁽¹⁴⁾。この場合の低減要因も、高温混合気吹き込みによる初期燃焼領域におけるすす生成の抑制効果が関係しているものと推測される。なお、煙突での排ガス中のダイオキシン類濃度は従来燃焼時および低空気比燃焼時ともに 0.001ngTEQ/m³N₂の低い値であった。

Table 5 DXNs concentrations in flue gas at boiler outlet

	Conventional	Advanced
DXNs conc. (ng-TEQ/m ³ N ₂ 12%O ₂)	0.71	0.43

3.4 廃熱回収率の向上 (ボイラ蒸発量の増加) 低空気比燃焼における廃熱回収の向上効果を図 7 に示す。焼却炉に投入したごみと高温混合気製造に用いた燃料の総発熱量を 43,400MJ/h とした時、廃熱ボイラの蒸発量は従来燃焼時と比較して約 10%の増加となる。これは、炉内水噴霧による蒸発潜熱分の削減と炉冷却用空気の代わりに再循環ガスを供給したことによりボ

イラ伝熱部への入熱量が増加したことによるものである。

Fig. 7 Waste heat recovery gain by low air-ratio combustion

4. 結 論

実設備のストーカ炉で高温空気燃焼技術を応用した低空気比燃焼試験を行い以下の結果を得、ストーカ炉への高温空気燃焼技術の適用が廃棄物焼却処理における環境負荷の大幅低減とエネルギー効率の向上に極めて有効な手段であることを検証した。

- 1) 105 ton/日規模のストーカ炉において、高温混合気吹き込みを行うことにより一次燃焼領域における燃焼を改善し、排ガス再循環のみでは困難であった空気比 1.3 の低空気比安定燃焼を実現し、従来比約 17%の排ガス量削減を確認した。
- 2) 燃焼排ガス中に含まれる有害成分の NOx とダイオキシン類が大幅に低減していることを確認した。
- 3) 低空気比燃焼によるボイラ蒸発発生量の大幅増加を確認した。

今後の課題は、以下のとおりである。

- 1) ACC による低空気比燃焼制御の完全自動化ロジックを構築する。
- 2) 高温混合気の吹きこみ条件 (温度、酸素濃度、吹き込み量) と燃焼特性 (炉内温度、排ガス性状) の関係を調査し、さらなる燃焼の最適化を図る。
- 3) 高温空気製造における外部エネルギー (燃料) の使用を削減する。

実炉試験の実施に際し、設備の使用および試験の実施にご理解とご協力をいただきました。苫小牧市殿と同市沼ノ端クリーンセンターの職員、運転員の方々に謝意を表します。

文 献

- (1) 杉島他, 環境技術会誌第110号, 4-41 (2002).
- (2) 藤吉他, 資源環境対策 2002年4月号, 29-78 (2002).
- (3) (財)廃棄物研究財団 編, ごみ焼却施設台帳 (平成13年度版).
- (4) G.Brem, 4th Sympo. (Int.) on Waste Treatment Technologies, Wed. Session 2 (2003).
- (5) 吉野他, 第6回全国都市研究発表会, 172-175 (1985).
- (6) ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン, ごみ処理に係るダイオキシン削減対策検討会, (旧)厚生省生活衛生局 報道発表資料 (1997).
- (7) 折田他, 日本機械学会論文集(B編) 68, 1253-1259 (2002).
- (8) Katsuki, M., Hasegawa, T., Proc. Combust. Inst., 27, 3135-3146 (1998).
- (9) Wang, J., 新岡 崇, 第40回燃焼シンポジウム講演論文集, 287-288 (2002).
- (10) NEDO, 高温空気燃焼制御技術開発研究開発成果報告書, 235-295 (平成14年3月).
- (11) 立福他, 第38回燃焼シンポジウム講演論文集, 273-274 (2000).
- (12) 立福他, 第39回燃焼シンポジウム講演論文集, 105-106 (2001).
- (13) 立福他, 第40回燃焼シンポジウム講演論文集, 63-64 (2002).
- (14) 傳田他, 第41回燃焼シンポジウム講演論文集, 403-404 (2003).
- (15) 小原, NKK 技報 No.166, 51-53 (1999).
- (16) 永関他, NKK 技報 No.147, 25-26 (1994).
- (17) 新岡 崇, 河野 道方, 佐藤 順一 編著, 燃焼現象の基礎, オーム社, 281-289 (2001).

付 録

以下にボイラ出口 O_2 濃度の算出式を示す.

$$O_{2b} = \frac{F_{O_2} + F_{O_{2e}} - 0.21 \cdot F_p}{F_b \cdot (1 - W_b / 100)} \times 100$$

$$F_b = F_o + F_e - F_w \cdot \frac{22.4}{18} - F_p$$

$$F_{O_2} = F_o \cdot (1 - W_o / 100) \cdot O_2 / 100$$

$$F_{O_{2e}} = F_e \cdot (1 - W_o / 100) \cdot O_{2e} / 100$$

上式に用いた記号の意味は以下の通りである.

- O_2 : バグフィルター出口排ガスの O_2 濃度 (%dry base) (連続分析計値)
- O_{2b} : ボイラ出口 O_2 濃度 (%dry base)
- O_{2e} : 再循環排ガス O_2 濃度 (%dry base)
- F_o : バグフィルター出口排ガス量 (m^3/h)
- F_b : ボイラ出口排ガス量 (m^3/h)
- F_e : 排ガス再循環量 (m^3/h)
- F_p : 消石灰, 活性炭吹き込み用空気流量 (m^3/h)
- F_w : 減温塔噴霧水量 (m^3/h)
- F_{O_2} : バグフィルター出口排ガス中の O_2 量 (m^3/h)
- $F_{O_{2e}}$: 再循環排ガス中の O_2 量 (m^3/h)
- W_o : バグフィルター出口排ガスの水分濃度 (%)
- W_b : ボイラ出口排ガスの水分濃度 (%)