都市ごみ燃焼過程で生成するダイオキシン類の低減* (酸素富化空気及び排ガス再循環の効果)

折田 寛彦^{*1}, 吉良 雅治^{*1}, 田熊 昌夫^{*2}
高橋 清一^{*3}, 橘田 岳洋^{*3}, 工藤 一彦^{*4}

Dioxins and Related Compounds Decreasing Measures in Municipal Refuse Incineration Process (Oxygen Enriched Air and Flue Gas Recirculation Effects)

Norihiko ORITA^{*5}, Masaharu KIRA, Masao TAKUMA,
Seiichi TAKAHASHI, Takehiro KITTA and Kazuhiko KUDOU

^{*5} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Yokohama Dockyard & Machinery Works,
1-8-1 Sachiura, Kanazawa-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 236-8515 Japan

There are two kinds of main pollutants (NO_x and Dioxins) which can be controlled by municipal refuse combustion procedure improvements. The reduction phenomena of both of them are completely different, so that appropriate combustion condition must be considered separately. The basic theory to decrease NO_x is to make self de- NO_x combustion area and to maintain longer residence time in this area by decreasing primary combustion air supply. Also it is required for low dioxins combustion to maintain high furnace temperature and longer residence time in this area by decreasing combustion gas volume and well mixing of unburned combustion gas and air. We present in this paper the experimental results to determine the lower limit volume of primary combustion air, using over fire air and/or recirculated combustion gas injection into furnace and oxygen enriched primary combustion air supply. The best result would be presented by actual scale municipal refuse incineration test. The combination of oxygen enriched primary combustion air, recirculated combustion gas injection into lower furnace and overfire air injection into upper furnace can decrease NO_x and dioxins simultaneously.

Key Words: Pollutant, Solid Fuel, Combustion, Combustion Product, Municipal Refuse Incineration, NO_x , Dioxins

1. 緒言

都市ごみ燃焼過程において生成する代表的有害物質はダイオキシン類と窒素酸化物 NO_x である。それぞれの分解機構は異なり相反するが、それぞれに適した燃焼方式を採用することにより生成量の低減が可能である。

国内で大規模な都市ごみ焼却プラントが建設されだ

した1970年代から、1次燃焼空気によりごみの部分燃焼とガス化を促進させ、2次燃焼空気未燃ガスを完全燃焼させるオーバーファイアエア(OFA)燃焼方式が採用されてきた。その後、ダイオキシン類が問題化していない1980年代前期は、低 NO_x 燃焼が注目され、多くの都市ごみ焼却炉で実施されていた。低 NO_x 燃焼ではOFAの混合を緩慢にすると共に、1次燃焼空気を減少し炉内を還元雰囲気とする方策をとったため、火炎が長炎化し未燃ガスが残る状況となった。この結果、還元性の未燃ガスにより火炉壁を構成するボイラ水冷壁管が高温腐食する事故が多発した。

1980年代後期になって、ボイラ水冷壁管の高温腐食防止と、炉内でのダイオキシン類分解を目的として、未燃ガスの残らない完全燃焼法が求められた。ここからダイオキシン類と NO_x の両方を同時に低減する燃焼

* 原稿受付 2001年7月16日。

^{*1} 正員、三菱重工業(株)横浜製作所(☎236-8515 横浜市金沢区幸浦1-8-1)。

^{*2} 正員、三菱重工業(株)技術本部横浜研究所。

^{*3} 三菱重工業(株)技術本部横浜研究所。

^{*4} 正員、北海道大学大学院工学研究科(☎060-8628 札幌市北区北13西8)。

E-mail: Norihiko_Orita@d.ydmw.mhi.co.jp

方法の開発が加速される事になった。ダイオキシン類の低減指標としてはダイオキシン類生成量と正の相関を有するとされる一酸化炭素CO濃度が用いられ⁶⁾、COとNO_x双方の低減が具体的目標とされた。

本著では、ストーカ式ごみ焼却炉を対象として、低NO_x条件を維持しながらダイオキシン類及びCOの低減を充分に行える燃焼法に関する条件を明らかにした。

基本的条件として、1次燃焼空気に酸素富化空気を用い、2次燃焼空気に再循環排ガス(Exhaust Gas Recirculation : EGR)⁷⁾及びOFAを適用した焼却設備で、低ダイオキシン類と低NO_xの目的を実用炉にて達成できることを示した。

2. 基本事項

ごみ中に塩素とベンゼン環を構成する芳香族炭化水素に代表されるダイオキシン類生成源物質が存在する条件では、燃焼場でのダイオキシン類生成は、避けられないものと考えられる¹¹⁾¹²⁾。

ダイオキシン類の生成速度と分解速度には温度依存性があり、両者とも温度の上昇と共に増大する傾向を有する。

筆者等の実験結果によると⁶⁾、分解速度が生成速度を上回る温度領域は、約700℃以上と考えられる。

また、ダイオキシン類熱分解基礎実験の例から、PCDD_sの異性体である2,3,7,8-TeCDDを99.999%分解するには900℃の温度条件下に1.5sec滞留させる事が必要とされている⁶⁾。

以上から、ごみの燃焼過程で生成したダイオキシン類を分解し、全体の生成量を制御する方法としては、ごみ燃焼ガスを約700℃以上の温度条件下に一定時間(数秒)以上滞留させる事が必要条件とされる。

また、局所的な低温領域の発生を避ける為に都市ごみ燃焼ガス温度を炉内で均一に上昇させる方策がとられる。具体的には、燃焼空気と未燃焼ガスの乱流混合を促進する炉の形状と燃焼空気(主として2次燃焼空気)の供給位置及び供給量の最適設定が実施されている。

ダイオキシン類の生成抑制には、上述の温度(Temperature)、滞留時間(Time)及び乱流混合(Turbulence)を総称した3Tを基本的指標として制御する事が必要となる。

ごみ焼却炉内のガス温度は800-1,000℃である為、発生するNO_xの形態としてThermal NO_xは微量であり、ごみ燃料中に含有される窒素分由来するFuel NO_xが主体である⁶⁾。燃焼の初期段階で生成したFuel NO_x

は還元雰囲気中でアンモニア等との反応で窒素N₂と水H₂Oに還元分解され無害化される⁶⁾。

ダイオキシン類を低減する3Tの条件、及びNO_xを低減する還元雰囲気燃焼領域の形成条件を共通して満足させる重要なパラメータは、1次燃焼空気量である。すなわち、1次燃焼空気量の低減により下記の効果が期待できる。

- 1) 過剰な1次燃焼空気による燃焼ガスの冷却を低減できるので、燃焼ガス温度を高く維持することが可能。
- 2) 1次燃焼領域中の未燃焼ガスを含む燃焼ガス量が減少し、炉内ガス流速(上昇流)が低下する。これにより、燃焼ガスの炉内滞留時間が増加する事と、1次燃焼領域の終端で供給されるEGR and/or OFAによる燃焼ガスの混合攪拌効果が増大する。
- 3) 1次燃焼領域を還元雰囲気に保持し、自己脱硝反応の進行が可能。

1次燃焼空気量の低減には燃焼反応成立に必要な限界値がある。この限界を越えるには、燃焼に必要な総酸素量を保持する目的で、酸素富化空気を用いることが可能である。

2次燃焼空気の供給は自己脱硝反応が目標のレベルまで進んだ領域に行うことが必要であるが、ダイオキシン類の低減には、より早い段階で燃焼ガスを十分に混合攪拌した場合に大きな効果がある。従って低酸素濃度のEGRを自己脱硝領域に近い位置に吹きこみ、その後流でOFAを吹込むことが有効である。

3. 燃焼試験

3.1 試験手順及び方法 小型モデル試験により、Fuel NO_xの分解に許容される燃焼領域への酸素供給量の限界を確認する。COの発生量抑制に有効とされるOFA及びEGR供給条件を低NO_xの制約下で求める。さらに、低NO_x、低COを目的としたOFA及びEGRを複合した供給条件の最適性確認・評価する。

さらに小型モデル試験で得られた最適条件を実機に適用しスケールアップ効果の確認を行う。最終的には、酸素富化空気を1次燃焼空気に用いることにより、筆者等が提案するダイオキシン類とNO_xの総排出量を低減可能な燃焼方法の性能を確認する。

小型モデル試験及び実機試験に共通した排ガス及び灰性状について項目と測定方法を表1にまとめて示す。

3.2 小型モデル試験⁵⁾

3.2.1 試験装置 試験装置の概略フローを図1に示す。巾 125mm, 長さ 240mm のストーク方式燃焼炉を用い, 燃焼室は内筒を不活性なムライト系セラミックスで構成し, 外部への熱放散による冷却を防止する為に SiC ヒーターで加熱保温している。炉への廃棄物の供給は定量切りだし装置と等速で回転するスクリーフィーダーを用いた。燃焼室(フリーボード部)の内径は 205mm, 有効高さは約 4,000mm である。OFA 及び EGR の供給は, 炉の高さ方向 3 段階の位置とし, 上段から順に H, M, L ノズルと呼称した。燃焼ガスのサンプリング位置は 2 次燃焼がほぼ完了している炉中央部とした。

Table 1 Measured species and their measuring methods of flue gas and ash

Species	Unit	Method
O ₂	%	magnetic continuous analyzer (JIS B7983-6)
CO	ppm	non-dispersion infrared spectroscopy (NDIR)
NO _x	ppm	chemiluminescence analysis
Dust	mg/Nm ³	Methods of measuring dust composition in flue gas (JIS Z8808)
PCDDs	ng/Nm ³	gas chromatography - mass spectroscopy (GC/MS)
PCDFs	ng/Nm ³

Fig.1 Flow diagram of incineration test equipment

3.2.2 試験条件 助燃なしの小型炉試験であったため, 低水分・高カロリー模擬ごみとして, 分別ごみから製造した RDF を本試験装置で処理できる大きさに破碎して用いた。ごみ組成を表2に示す。EGR 中の酸素濃度は送風機からの漏れ空気の影響により約 12%となった。他の試験条件については試験結果と共に表3に示す。

Table 2 Refuse Characteristics

Items			
proximate analysis data			
	water	%	3.33
	ash	%	6.33
	combustible	%	93.67
ultimate analysis data			
	C	db%	44.0
	H	db%	7.67
	N	db%	0.29
	Cl	db%	0.52
	S	db%	0.09
	O, etc.	db%	47.43
lower heating value		kJ/kg	18,381

*db: dry base

3.2.3 試験結果と考察 試験結果の一覧を表3にまとめて示す。

1次燃焼空気(Under Grate Air:UGA)量変化時の試験結果を図2に示す。NO_xを100ppm以下の低い値に保つには1次燃焼空気比 λ_{UGA} を約1.1以下とする事が必要であり, COを50ppm以下の低い値とするには λ_{UGA} を約

Fig.2 Effects of UGA

1.2以上とする事が必要であり、相反する条件であることがわかる。

本試験で用いた装置の燃焼室は小口径であったため、UGAとして供給した燃焼空気と未燃焼ガスとの混合が排ガス分析用のサンプリングを行なった炉の中段(図1参照)より下部で充分に行なわれ、燃焼が完結していることがRUN A1～A3(表3)に於けるCOの低減状況から想定できる。また、本条件ではUGA以外の空気を供給していないので、UGAが総空気量であり、 λ_{UGA} は総空気比 λ_{TOT} を意味する。

UGAの総量が充分にあり、燃焼空気と未燃焼ガスとの混合が行なわれる条件であれば、OFAの形での2次燃焼空気の供給は必ずしも必要とされないと考えら

れる。しかし、UGAとして炉の下部から供給された空気が2次燃焼領域で未燃焼ガスと混合する為に必要な時間は、より攪拌力の強いOFAを用いた場合と比較して長時間であると考えられる。従って、COの低減と高温炉内でのガス滞留時間増加によるダイオキシン類低減を考慮すると、OFA、EGR等の効果により、2次燃焼領域での混合攪拌性能を向上させ早期に燃焼を完結させる必要がある。

低NOx条件として、総空気比 λ_{TOT} を約1.1以下に保ち、OFAとEGRの供給量と供給位置を変化させたRUN B1～B4、C1～C3(表3)の試験結果より、OFAは上段(H)からOFA比=18%、EGRは下段(L)からEGR比=21%とした場合に、NOxをそれぞれ70ppmと50ppmに低減でき

Table 3 Test conditions and results

Test Items			UGA change				OFA change				EGR change			Optim-um Run	
Run No.			A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	D1	
OFA	Nozzle Position		—	—	—	—	M	H	M	H	—	—	—	H	
	$\frac{\text{OFA}}{\text{OFA}+\text{UGA}} \times 100$	%	—	—	—	—	10	10	18	18	—	—	—	18	
EGR	Nozzle Position		—	—	—	—	—	—	—	—	L	M	H	L	
	$\frac{\text{EGR}}{\text{EGR}+\text{UGA}} \times 100$	%	—	—	—	—	—	—	—	—	21	21	21	18	
Air ratio	λ_{Total}		1.9	1.5	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.3	
		λ_{UGA}	1.9	1.5	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	
		λ_{OFA}	—	—	—	—	0.1	0.1	0.2	0.2	—	—	—	0.2	
		λ_{EGR}	—	—	—	—	—	—	—	—	0.1	0.1	0.1	0.1	
Refuse feed rate		kg/h	5.9	5.9	6.0	5.9	6.0	6.2	6.3	6.3	6.6	6.3	5.8	6.1	
Flame temperature		℃	1,200	1,210	1,320	1,130	1,300	1,300	1,170	1,100	1,180	1,210	1,160	1,160	
Flue gas Analysis	O ₂ *		%	10.8	9.5	6.8	5.0	3.8	5.0	4.0	5.0	2.5	2.5	2.5	6.2
	NOx *		ppm	161	147	119	100	83	95	75	70	50	60	70	80
	CO *		ppm	19	22	42	750	452	250	350	625	550	425	480	10
DXN	PCDDs *		ng/Nm ³	—	—	—	—	—	—	—	300	170	—	—	110
	PCDFs *		ng/Nm ³	—	—	—	—	—	—	—	2,400	750	—	—	1,000
	PCDDs* + PCDFs *		ng/Nm ³	—	—	—	—	—	—	—	2,700	920	—	—	1,110

*: at 12% O₂ converted valve

た。NO_xの低減効果が得られた理由は λ_{UGA} を0.9-1.0と更に低レベルに押さえる事が可能であったことによる。

COはそれぞれ625ppmと550ppmであったが λ_{TOT} を1.2以上としていない条件によるものである。

低NO_xの燃焼条件を維持しながら、低COに必要な条件 λ_{TOT} を1.2以上を満足させる為に、先に得られた低NO_x条件下でのOFA及びEGR供給条件を並列して用いた条件での最適試験を実施した。

ここで、OFA率18%をそのまま用いたが、EGR率は21%から18%に低下させた。これは総空気比 λ_{TOT} が必要とされる1.2を充分満足できる状況にあった為、自己脱硝反応領域への酸素の供給量を控えたことによる。

最適試験の条件では λ_{TOT} が1.3となり低CO条件を満足した。またOFAとEGRの供給については低NO_x条件を保ったため、NO_x = 80ppm, CO = 10ppmの結果が得られた。

ダイオキシン類についてはOFA単独供給の場合よりも低下する事ができたがEGR単独供給の場合をやや上回った。しかし、EGR単独時よりもCO値がOFAにより大巾に低減された事を考慮するとOFAとEGRを同時に供給する条件を最適条件として評価できる。

OFA及びEGRそれぞれの単独供給では、CO値が500ppmを超える高い値となった。この場合ガス中の未燃分が分解していない為、ダイオキシン類の生成が持続し、後流側に於いて増加する可能性がある。

Fig.3 Schematic Flow of Incineration Test

3.3 実機試験⁹⁾

3.3.1 試験設備 試験にはごみ焼却量 150 t/日規模の実機焼却炉を用いた。試験設備のフローを図3に示す。燃焼設備は逆送式火格子を備えたストーカ式焼却炉であり、UGAがストーカ下部から供給され、オリフィスダンパーを用いて風量調整ができる。また、主燃焼領域に供給するUGAの酸素濃度を増加できる仮設ラインを設けた。

ストーカの上部炉室の前後面壁にOFA及びEGRの供給ノズルが設備されており、後面ノズルは前面ノズルよりも低レベルの位置に設置されている。バグフィルターで除塵された燃焼ガスを送風機によりEGRとして焼却炉に戻す仮設ラインを設けている。

3.3.2 試験条件 試験に用いた焼却炉は通常運転に於いて、ストーカ下部から供給されるUGAと炉室前後面壁ノズルから供給されるOFAの配分を適正化する事によってNO_x及びCOの低減を図っている。

本試験の目的はUGAの低減により自己脱硝反応を促進させ低NO_xとすると共に、OFA、EGRの混合攪拌効果を向上することにより完全燃焼を促進させ低ダイオキシン類を実現する事にある。

さらに、UGAに酸素富化空気を用いることにより、供給する酸素の量を減らすことなくUGA量を表4に示すように大巾に減少させる方策の有効性を確認する。

試験条件の概要を以下に示す。

- (1) CASE1 : lowUGA+OFA (比較のベース)
通常運転条件で安定運転持続可能な限界までUGAを減少させた。
- (2) CASE2 : lowUGA+OFA+EGR
低位置にある後面壁ノズルからの OFA 量を減少させ代りに大量の EGR を供給。高位置にある前面壁ノズルからの OFA 供給量は通常運転と同等。
- (3) CASE3 : very lowUGA (with oxygen enriched air) +OFA+EGR
主燃焼領域のUGAに純酸素を混合し酸素濃度を約26%に富化し、燃焼に必要な酸素供給量を維持する条件でUGAを削減した。OFA、EGR配分はCASE2と同等。

表4に各試験条件をまとめて示す。EGR中の酸素濃度は約10%である。

各ケース共にOFAを燃焼室の最も上部に供給し、供給量は一定に保った。これは同じ2次燃焼条件でEGR効果とUGAへの酸素供給効果の比較を容易とする目的による。

Table 4 Test conditions

Item	Unit	CASE1	CASE2	CASE3
Refuse feed rate	t/h	6.02	6.10	6.17
Front	OFA	Nm ³ /h	1,240	1,280
	EGR	Nm ³ /h	—	480
Rear	OFA	Nm ³ /h	1,750	310
	EGR	Nm ³ /h	4,780	5,565
UGA	air	Nm ³ /h	22,550	21,570
	oxygen	Nm ³ /h	—	—

試験期間中に分析したごみ組成を表5に示す。

Table 5 Refuse Characteristics

Item		sample A	sample B
Proximate analysis data			
	Water	%	49.3
	Ash	%	4.5
	Combustible	%	46.2
Ultimate analysis data			
	C	db%	51.6
	H	db%	12.0
	N	db%	0.71
	Cl	db%	0.62
	S	db%	0.06
	O, etc.	db%	26.1
Lower heating value		kJ/kg	9,250

*db : dry base

3.3.3 試験結果と考察

表6に各試験結果をまとめて示す。

CASE1の基本条件での後壁からのOFA供給量に比べ、同じ位置からOFAに代えたEGR供給量を大幅に増量したCASE2、CASE3では未燃焼ガスの混合攪拌効果により、若干のNO_x増加があったが、COの低減効果が大きく出ている。

CASE3では酸素富化空気の導入によりUGA量を基本条件の約60%にまで絞り、還元雰囲気でのガス滞留時間を増加できたため、CASE2よりも低いNO_x値となった。また、UGAの低減による炉内温度の上昇を

Table 6 Incineration Test Result
(Flue Gas Component)

Item	Unit	CASE1	CASE2	CASE3
Temperature ^{*1}	°C	858	888	1,016
Volume	Nm ³ /h	42,100	40,200	29,000
Dust	mg/Nm ³	0.897	0.835	0.848
O ₂	%	6.8	6.6	5.8
CO ^{*2}	ppm	55	13	12
NO _x ^{*2}	ppm	91	123	117
PCDDs ^{*2}	ng/Nm ³	300	110	88
PCDFs ^{*2}	ng/Nm ³	1,200	280	280
PCDDs+PCDFs ^{*2}	ng/Nm ³	1,500	390	368

*¹: at furnace outlet *²: at 12% O₂ converted value

酸素富化により加速し、基本条件時と比較し約150°C上昇させることができた。以上、CASE3ではダイオキシン類低減条件である3Tの全てについて改善効果が得られたと評価できる。

燃焼ガス中の、ごみ単位重量あたりダイオキシン類総量は、CASE2では基本条件(CASE1)の約25%まで減少し、CASE3では酸素富化空気の導入により約16%まで低減できた。また、ごみ単位重量あたりNO_x総量についても86%まで低減できた。

低減効果を図4に示す。

Fig.4 Total Amount Reduction Ratio
(per Unit Refuse Weight)

排ガス以外のダイオキシン類排出源である、主灰中のダイオキシン類総量は、UGAへの酸素富化空気供給により減少する事が確認されているので⁽¹⁰⁾、主灰を含めた全体のダイオキシン類総量も図4と同様の傾向となると予想される。

ダイオキシン類のサンプリング位置は各ケースの比較評価を目的としたため、燃焼室の耐火ライニング部終端上部の雰囲気ガス温度800℃程度の領域とした。従って、本位置より後流の700℃以上の高温領域でさらにダイオキシン類の分解が継続し、炉出口の絶対値はさらに低下していたものと考えられる。

なお、酸素富化空気の効果により、ストーカ上の主灰の焼成が確認されており、灰中の未燃分が低減していたものと考えられる。

4. 結 言

都市ごみの燃焼過程で生成する、NO_xの低減には、1次燃焼空気量を減少させることにより1次燃焼領域を還元性に保ち、自己脱硝反応が進行する条件とする事が必要である。また、ダイオキシン類の低減には高温雰囲気での燃焼ガス滞留時間を十分に確保する事と、未燃分が残らない様に燃焼ガスと空気の混合攪拌効率を向上させる事にある。双方に共通した条件は1次燃焼空気量の減少となる。

従って、1次燃焼空気量を減少させた状態で、1次燃焼領域においてNO_xの低減をはかり、2次燃焼領域でダイオキシン類の低減をはかる燃焼方法がNO_xとダイオキシン類の両有害成分を分解するに適すると考えられ、小型モデル試験と実機試験で実現の可能性を実証した。

本稿で明らかとした、具体的な燃焼改善の要点を以下にまとめて示す。

- 1) 1次燃焼空気量を、1次燃焼が安定的に継続できる限界まで減少する。大幅な1次燃焼空気量の低減手法としては、燃焼に必要な酸素供給量を維持する条件で、主燃焼領域に酸素富化空気を供給する事が有効である。

この効果で、炉内温度が高温化すると共に、燃焼ガス量の大幅な低減があり、自己脱硝領域とダイオキシン類の熱分解領域での燃焼ガス滞留時間を長くできる。

- 2) 自己脱硝反応が進行している1次燃焼領域の終端に酸素濃度が低い再循環排ガスを吹き込む事で、NO_xの上昇を低く押さえながら、未燃焼ガスの混合攪拌を行うことができる。
- 3) 再循環排ガスにより混合攪拌された未燃焼ガスにオーバーファイア空気を吹き込むことで、未燃焼ガスを完全燃焼させ、炉内温度を高温化し、ダイオキシン類分解の条件を作ることができる。

参考文献

- (1) R.D.Griffin, A New Theory of Dioxin Formation in Municipal Solid Chemosphere 15 (1986)
- (2) Hasberg W, Romer R, Organische Spurenschadstoffe in Brennräumen von Anlagen zur thermischen Entsorgung, Chem.-Ing.-Tech. 60 (1988)
- (3) 折田寛彦, 他, 都市ごみ燃焼過程でのダイオキシン類生成機構, 日本機械学会論文集投稿中 (2000)
- (4) Hiroshi Ogawa, 他, Dioxin Reduction by Sulfur Component Addition, Chemosphere 32 (1996)
- (5) 橋田岳洋, 他, ごみ焼却炉の燃焼性能改善条件, 日本機械学会第7回環境工学総合シンポジウム'97 講演論文集 (1997)
- (6) 名島, 他, 燃焼制御による都市ごみ焼却炉のNO_x抑制に関する研究, 三菱重工技報 Vol.16, No.1 (1979)
- (7) 寺田, 他, 排ガス再循環法の稼動状況と課題, 東京都清掃技報 (1988)
- (8) 通商産業省環境立地局, 公害防止の技術と法規ダイオキシン類編, (社)産業環境管理協会 (2000)
- (9) 田熊昌夫, 他, 酸素富化による都市ごみ低公害燃焼法の開発, 第10回廃棄物学会研究発表会講演論文集 (1999)
- (10) 田熊昌夫, 他, 廃棄物酸素富化燃焼技術, 第11回廃棄物学会研究発表会講演論文集 (2000)