

TIF型炉による次世代型流動床ごみ焼却技術

岡本有弘* 安倍真也*

Advanced Fluidized-bed Waste Incineration Technology using TIF Furnace

by Arihiro OKAMOTO & Shinya ABE

The twin interchanging fluidized-bed (TIF) incinerator is Ebara's unique technology that has been marketed since 1984. It is currently in operation at 71 plants in Japan and 31 overseas plants.

For the Hiratsuka City "Kankyujigyou Center" (environment management center), which was completed at the end of September 2013, Ebara delivered the TIF furnace as the advanced fluidized-bed incinerator. The advanced fluidized-bed waste incineration facility provides significantly improved performance through state-of-the-art technologies based on the past development and installation of fluidized-bed gasification and ash melting systems, such as lower air ratio operation and high-efficiency power generation.

This paper describes the features of the advanced fluidized-bed waste incineration technology with reference to operation data at the Center and discusses the future perspective of fluidized-bed waste incineration technology.

Keywords: Fluidized-bed, Waste, Incinerator, Energy from waste (EfW), Exhaust gas recirculation, Air ratio, Combustion control, Sulfur oxides

1. はじめに

旋回流型流動床焼却炉（TIF：Twin interchanging fluidized-bed）は、1984年に市場投入された当社のオリジナル技術であり、現時点で国内71施設、海外31施設が稼働中である。

2013年9月末に竣工した平塚市環境事業センターは、当社としては8年ぶりのTIF型炉の納入となったが、その間に流動床ガス化溶融炉の納入経験に裏打ちされた最新技術の適用によって、次世代型流動床ごみ焼却施設として大幅に性能が向上している。

本報では、次世代型流動床ごみ焼却技術の特長について、平塚市環境事業センターの運転実績を交えて解説するとともに、今後の流動床ごみ焼却技術の展望について述べる。

2. 次世代型流動床ごみ焼却技術の特長

従来、流動床ごみ焼却炉には以下の特長が備わっていた。

①起動・停止が容易で非常停止時も安全

炉内の廃棄物滞留量が少なく、起動・停止に必要な時間が短いため、運転時に不測の事態が生じて、瞬時に負荷遮断による非常停止が行え、排ガス処理等の機能が維持されている間に系内が空気置換される。軽微な機器故障等では、ごみ供給を一時的に停止して対応後、安全かつ速やかに再起動でき、設備稼働率を高く維持した施設運営が可能である。

②幅広いごみ質に対応可能

流動化する砂の中で燃焼が起るため、汚泥からプラスチックまで幅広いごみ質に対応できる。また、流動層内での砂とごみの混合状態が良いため、多種の廃棄物を同時に処理する場合にも、高い燃焼効率で燃え切り、焼却残渣の熱灼減量は極めて低くなる。

③硫黄酸化物（SO_x）の発生抑制

炉内脱硫効果によって、排ガス処理前のSO_x濃度が低いため、排ガス処理にかかるコストを低減できるとともに、酸露点腐食や触媒被毒等の問題が起りにくい。

次世代型流動床ごみ焼却技術は、従来からの流動床焼却技術をベースに、近年納入した流動床ガス化溶融炉（TIFG）で得られた知見や新技術を反映させたものである。従来からの流動床の特長を損なうことなく、以下の

* 荏原環境プラント(株)

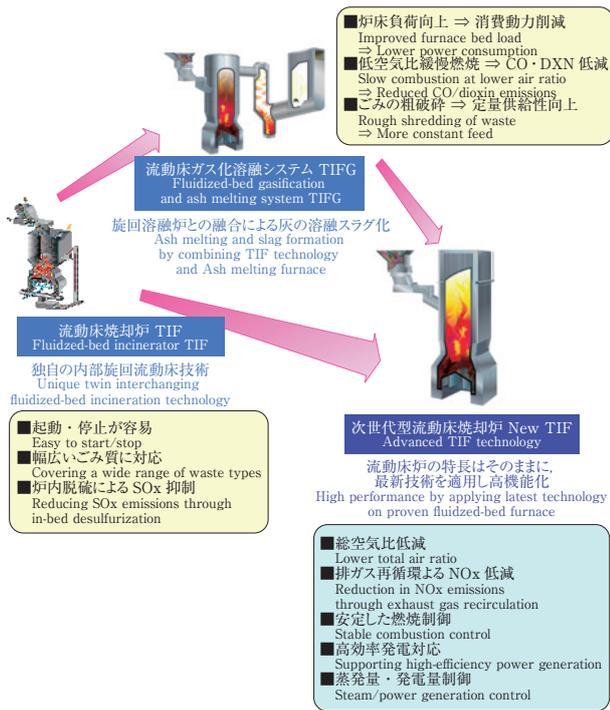


図1 次世代流動床技術と従来技術の関係

Fig. 1 Relationship between the advanced fluidized-bed incineration technology and conventional technologies

機能を付加することができた (図1)。

- ① 所内動力の低減
- ② 安定した燃焼制御
- ③ 高効率発電

プロセスフローを図2に示す。

前述の機能を発揮するための設計的改善点は次のとおりである。

(1) 炉床負荷の向上

従来の流動床焼却炉の炉床負荷 (炉床面積 1 m² 当たり

の処理量であり、炉の大きさを決定するための設計基準値) は 400 ~ 450 kg/m²h であったが、流動床ガス化溶融炉の実績 (800 ~ 1200 kg/m²h) によって、従来の炉床負荷より増加させることができた。これによって次の効果を得た。

① 流動層の流動化空気量が従来に比べて 30% 程度削減できる。これによって、押し込送風機の動力も約 30% 削減できる。

② 砂中空気比が低下し砂中燃焼量が低減することによって、発熱量の高いごみの場合でも炉床注水なしで流動床温度を 560 ~ 600 °C 程度に維持できる。これによって、注水による熱ロスを抑制できる。さらに、流動層内でのごみの乾燥・ガス化が比較的低温でゆるやかに行えるため、可燃ガス発生量の変動が抑えられ、安定した燃焼制御が行える。

③ 砂中の酸素濃度が低くなることによって、ごみに含まれる有価金属類は、再利用し易い未酸化状態で回収できる。

(2) 総空気比の低減

流動床ガス化溶融炉では、ごみのもつ熱量を最大限有効に活用して高温場を形成し、安定的に灰を溶融する機能を有していた。そのため、総空気比を安定的に 1.3 ~ 1.4 程度に管理可能な技術を確認しており、次世代型流動床焼却炉にも適用できた。

① ごみの粗破砕及び定量供給システム

定量供給性能向上のため、ごみを粗破砕するシステムを採用した。異物によるトラブルを回避する破砕機の機種選定を行うと共に、ダブルピット方式によってごみ破砕とごみ焼却ラインを分離させている。

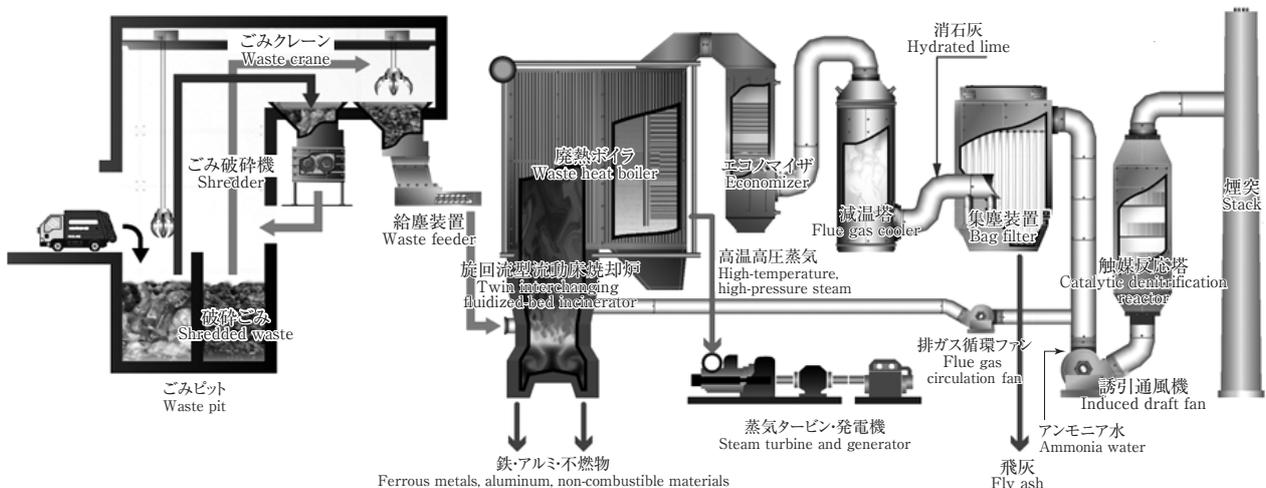


図2 次世代流動床ごみ焼却施設のプロセスフロー

Fig. 2 Schematic process flow of the advanced fluidized-bed waste incineration facility

②レーザー式酸素濃度計

炉床温度の低下によって燃焼の変動が小さくなったことに加え、燃焼空気量制御の検出端として、従来のボイラ出口ジルコニア式酸素濃度計に替えて、時定数が小さくメンテナンス性に優れた炉出口レーザー式酸素濃度計を採用した。これによって、低空気比燃焼時においても燃焼空気の投入が燃焼変動に追従できるようになった。

③排ガス再循環の採用

低空気比時の燃焼温度の過度な高温化を防止し、窒素酸化物 (NOx) の発生量を抑制するため、排ガス再循環を採用した。

(3) 発電量の向上

プラントからの放熱量を最小化し、蒸気タービンへの送気量を最大化するために、以下の技術を採用した。

①排ガス再加熱器の不採用

従来、脱硝触媒の性能を確保するために、蒸気式熱交換器によって排ガスを再加熱していたが、これを不採用とした。懸念される脱硝触媒の被毒については、流動床炉特有の低SOx排ガスのために、ほとんど影響はない。蒸気使用量が削減されるため、発電効率を上げることができる。

②流動媒体からの熱回収

流動床焼却炉では炉内の不燃物を流動媒体とともに抜き出し、流動媒体と不燃物とを分級して流動媒体を循環使用しているが、循環系機器の不燃物シュート及び不燃物排出装置の機器冷却水による冷却が熱ロスとなっていた。本施設では当該機器の冷却をボイラ復水によって行うことで従来の熱ロス分を回収し、ボイラ効率を高めることができる。

(4) 蒸発量・発電量の制御

余剰電力を系統に連系する場合、発電所としての側面から「安定した電力の供給」を行う必要があり、送電量の制御が重要である。そこで、設定発電電力に対する実際の発電電力の変動を抑制するために、設定されたボイラ蒸発量において、蒸気圧力変動に対して給じん量を制御した。

3. 平塚市環境事業センターへの適用事例

(1) 流動床焼却炉の選定

要求水準書では、処理方式によらず焼却残渣 (飛灰・焼却灰又はスラグ) の全量資源化が求められた。

これに対し当社では多面的な検討の結果、主に以下の観点から流動床焼却炉を選定した。

①乾式による高度な排ガス処理 (LCC 優位)

流動床のもつ炉内脱硫機能によって、排ガス中SOx濃度を低く抑えられるため、脱硝触媒の被毒リスクが低くなる。そのため集じん装置下流に排ガス再加熱なしで脱硝触媒塔を設置できるので、施設内の蒸気消費を抑制して、タービンへの送気量を増やせる。また、比較的少量の乾式処理薬剤によって高度な排ガス処理を行える。

②動力低減と低空気比燃焼の実績

流動床ガス化溶解炉における流動化及び誘引動力の削減と低空気比燃焼による高効率熱回収の実証に基づき、本システムを採用した。

③起動・停止の容易さ

炉内に廃棄物の滞留量が少なく、起動・停止が容易なので、運転時に震災等で不測の事態が生じても速やかに、かつ安全に停止できる。また、ごみ供給を一時的に停止しただけであれば、砂温も保持されているので安全かつ速やかに再起動でき、設備稼働率を維持して安定したごみ処理ができる。

④未酸化状態での有価金属の回収

不燃物から金属類が再利用し易い未酸化状態で回収され、均一な飛灰と金属類を除去された不燃物の全量の資源化を外部の業者に委託できる。これによって、灰処理薬剤が不要 (加湿処理のみ) で、取り扱いも容易となる。

⑤将来のごみ質変化に対するフレキシビリティ

ごみ処理政策の変更等によって、将来ごみ質が変化しても、流動床炉であれば、汚泥 (低発熱量) からプラスチック (高発熱量) まで幅広いごみ質に対応できる。

(2) 施設特徴

本施設の主な仕様を以下に示す。

施設規模：315 t/d (105 t/24h × 3炉)

発電能力：5900 kW

煙突排ガス保証値 (酸素濃度12%換算値)：

ばいじん：0.01 g/m³ (NPT)

一酸化炭素：30 ppm

窒素酸化物：50 ppm

硫黄酸化物：30 ppm

塩化水素：50 ppm

ダイオキシン類：0.05 ng-TEQ/m³ (NPT)

(3) 運転状況

①炉床負荷

炉床負荷を675 kg/m²hとし、従来の焼却炉の約半分の炉床面積とした。その結果、流動空気量は従来に比べて30%低減することができた。

また、不燃物から回収される有価金属は写真に示すとおり未酸化状態であり、炉床空気比を低減した効果を裏



14-02 01/243

写真 未酸化有価金属
Photo Unoxidized valuable metals

付けている。

② 燃焼空気比

排ガス中のボイラ酸素 (O₂) 濃度と一酸化炭素 (CO) 濃度との関係を図3に示す。ボイラ酸素濃度として採用したレーザ式酸素濃度計は時定数が小さいため、従来広く使われているジルコニア式酸素濃度計のトレンドより変動が大きく見えるが、時定数の小ささゆえにO₂濃度が降下しても瞬時にその変化を捉え燃焼空気量を制御でき、低空気比でもCO濃度等の上昇が抑制できる。なお流動床ガス化溶融炉におけるボイラO₂濃度はおおむね4~5 wet%程度で運転されており、本施設においても流動床ガス化溶融炉と同様の低空気比運転を安定して行わせることができることが確認できた。

2013年9月6~7日にかけて実施した引渡性能試験における排ガス分析結果を表1に示す。

燃焼空気比が1.4を下回る条件で全ての排ガス保証値を満足することができた。

また、排ガス再循環によって、低空気比であっても炉頂温度を1000~1050℃程度に安定して抑えることができ(図4)、クリンカ(鉍物の焼塊)の付着も起こっていない。なお、再循環ガス量は排ガス量の10%程度である。

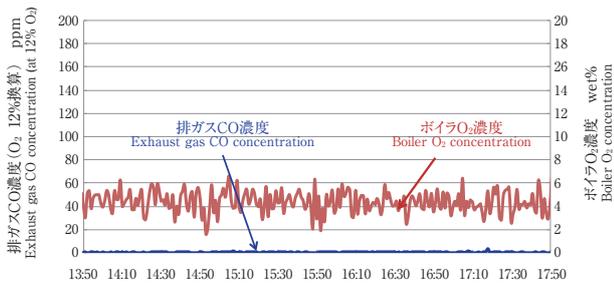


図3 ボイラ酸素濃度と一酸化炭素トレンド例

Fig. 3 Example of the boiler O₂ concentration vs. exhaust gas CO concentration trend

③ 発電量向上対策

集じん装置入口・出口の排ガスSO_xの濃度分析値は表2のとおりであった。特に、集じん装置入口では約1 ppm

表1 引渡性能試験 排ガス分析結果

Table 1 Results of exhaust gas analysis in acceptance performance test

項目 Item	単位 Unit	保証値 Guaranteed value	A系 Line A	B系 Line B	C系 Line C
ボイラO ₂ 濃度 Boiler O ₂ concentration	wet%	-	4.19	4.05	4.41
ボイラO ₂ 濃度 Boiler O ₂ concentration	dry%*	-	5.62	5.53	5.79
燃焼空気比 Excess air ratio	-	-	1.38	1.37	1.39
排ガスCO CO in flue gas	ppm	30	3	5	0
排ガスNO _x NO _x in flue gas	ppm	50	24	24	24
排ガスSO _x SO _x in flue gas	ppm	30	0.1	0.1	0.1
排ガスHCl HCl in flue gas	ppm	50	27	29	22
排ガスDXNs Dioxins in exhaust gas	ng-TEQ/m ³ (NTP)	0.05	0.0046	0.0025	0.0038

*排ガス水分計測定値による逆算

Calculated from measurements made with an exhaust gas moisture meter

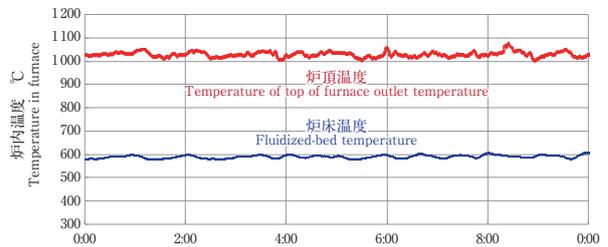


図4 炉内温度の経時変化

Fig. 4 Time chart of bed & freeboard temperature

表2 集じん装置前後の排ガスSO_x濃度

Table 2 Exhaust gas SO_x level before and after the bag filter

	系列 Line	1回目 1st measurement	2回目 2nd measurement	3回目 3rd measurement
入口 Inlet	A系 A	1.3	0.8	0.4
	B系 B	1.4	0.5	0.7
	C系 C	3.8	1.1	0.6
出口 Outlet	A系 A	0.5	0.1	0.1
	B系 B	0.3	0.1	0.2
	C系 C	0.2	<0.1	0.1

*単位はppm (O₂ 12%換算)
Unit: ppm (at 12% O₂)

程度と極めて低濃度であった。これによって、排ガス再加熱器なしでも触媒の被毒のリスクは低いことを確認した。

また、不燃物系流動砂からの熱回収量は1炉当たり約140 kWであり、熱効率の向上に寄与している。

竣工後における10～12月の平均の電力収支を表3に、発電端効率と送電端効率の（日平均）トレンドを図5に示す。本施設は2炉操業が基本であり、ごみ搬入量やピット残量を考慮して、1炉当たりの負荷の増減、操炉数の変更を行っており、10月以降は2炉運転を継続している。発電端効率は10月で19.6%、11月で19.9%、送電端効率は同様に13.4%、14.2%と高い効率を保持できることを確認した。

またプラント所内動力については10月で113 kWh/t、11月で105 kWh/tとなっている。10月と11月の違いは

表3 電力収支（10～12月）
Table 3 Energy balance (from October to December)

	10月平均 Monthly average in October		11月平均 Monthly average in November		12月平均 Monthly average in December	
	kWh/d	kWh/t	kWh/d	kWh/t	kWh/d	kWh/t
受電電力量 Received power	0	0	0	0	0	0
太陽光・非発 Photovoltaic/ emergency power	8	0	13	0	14	0
発電電力量 Generated power	90318	507	101752	514	101159	524
所内電力量 Consumed power	26600	149	26898	137	25282	131
プラント Plant	20095	113	20706	105	19448	101
建築 Building	6506	37	6192	31	5834	30
送電電力量 Transmitted power	61851	347	72566	368	73518	381
発電端効率 Gross thermal efficiency	19.6%		19.9%		19.7%	
送電端効率 Net thermal efficiency	13.4%		14.2%		14.3%	
処理量 Throughput	178 t/d		197 t/d		193 t/d	
(1炉平均) (Average per furnace)	89.0 t/(d・炉) t/(d・furnace)		98.8 t/(d・炉) t/(d・furnace)		96.4 t/(d・炉) t/(d・furnace)	
ごみ発熱量 Waste calorific value	9301 kJ/kg		9301 kJ/kg		9571 kJ/kg	
外気温 Outdoor air temperature	21.9 °C		13.6 °C		8.7 °C	

※ごみ発熱量は運転データによる演算結果（到着ベース）
The waste calorific values have been calculated from operating data (on an as-received basis).

ごみ処理量の増大と気温降下による低圧蒸気復水器や冷却塔の動力低下によるもので、12月に入ってからは更なる影響が強まり、100 kWh/tを切る日も多く、結果として平均で101 kWh/tを記録している。

④蒸発量制御・発電量制御

図6に設定発電電力が4300 kWの場合のタービン給気量、発電電力、送電電力のトレンドを示す。図6に示した発電電力のトレンドデータの確率分布を図7に示した。4300 kWという設定発電電力量に対し、非常に安定した



図5 発電端・送電端効率トレンド（日平均）

Fig. 5 Gross/net thermal efficiency trend (daily average)

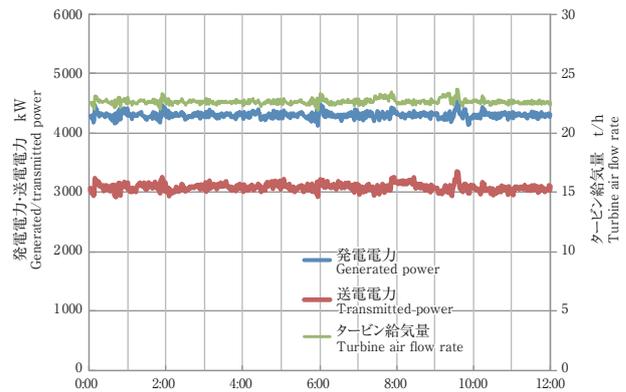


図6 発電量制御時の発電電力・送電電力トレンド例

Fig. 6 Example of the generated/transmitted power trend under power generation control

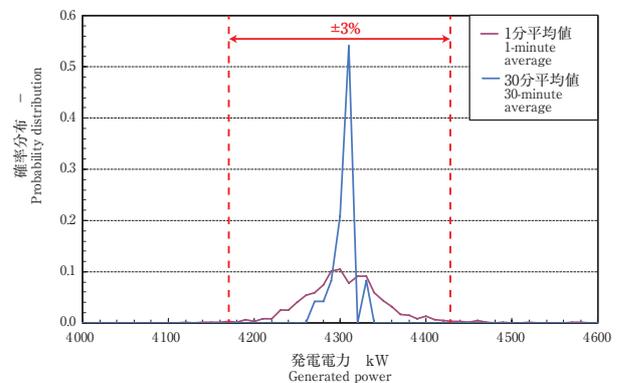


図7 発電量制御時の発電電力の確率分布

Fig. 7 Probability distribution of power generated under power generation control

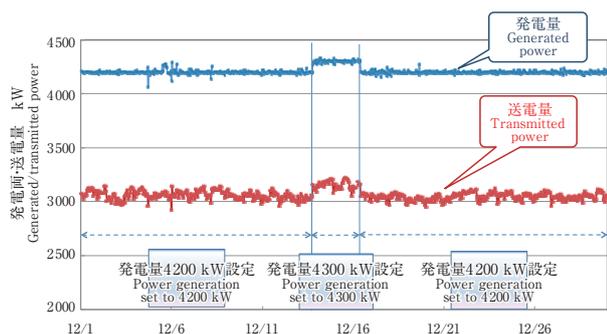


図8 発電量制御時の発電電力・送電電力トレンド（'13年12月）
Fig. 8 Generated/transmitted power trend under power generation control (December 2013)

発電電力を維持できていることがわかる。

また、図8に12月の発電量及び送電量の1時間平均値の推移を示す。12月は常時発電量制御を実施し、設定発電量は4200 kWとしている。一部4300 kWとした日もあるが、設定変更にも十分追従し安定した制御が行えていることがわかる。

定量性の高いごみ供給システムを採用し、流動層温度を比較的低温に維持することによって、燃焼量の制御性が従来から更に向上したため、非常に高いレベルで狙いどおりの蒸発量と発電量を安定して維持することができるようになった。

4. 今後の展望

かつてダイオキシン問題を引き起こした施設が流動床焼却施設であったことから、問題の主原因が別のところにあったにもかかわらず、流動床焼却炉は燃焼が不安定でダイオキシンが発生しやすい施設との印象をもたれることとなった。その後、流動床焼却炉は高温燃焼による

高度環境対応や灰の資源化等のニーズに応えるために、流動床ガス化溶融炉へと変貌を遂げたが、流動床焼却炉が新規に建設されることは近年ほとんどなかったために、流動床炉は「最近の建設実績がない」とされ、新炉計画時の機種選定対象から外されるケースが多い状況となっている。

本報で紹介した蒸発量の安定性は、「流動床炉は瞬時燃焼であり蒸発量が大きく変動する」という多くの都市ごみ処理関係者が抱いている事実と異なるイメージを払拭し、流動床炉の置かれた状況を改善することに繋がるものと考えている。今後次世代型TIFの実績データを更に積み上げ、その安定した性能を実証していく使命を痛感している。

今後日本では人口が減少し、ごみの発生状況が大きく変化するだけでなく、自治体の財政はますます厳しさを増し、都市ごみ処理の方法も見直しを迫られることは避けられないと思われる。また、温暖化対策等の強化によって、下水汚泥や他の産業廃棄物の処理についてもより合理的・効率的な方法が模索されるようになるものと考えられる。予測困難な将来にわたって、いかに持続可能な廃棄物処理計画を立案するかは、多くの地域にとって喫緊の課題となろう。

流動床焼却炉は、液体・固体の区別なく廃棄物を焼却することができ、対応可能な発熱量の幅も広いため、多種多様な廃棄物を同時に混合処理できるという特長をもつ。流動床ごみ焼却技術は、将来の廃棄物処理ニーズの変化に確実に応えられる強靱な技術であり、長期にわたって地域の廃棄物処理を支える技術として、その役割は必ず見直されるものと確信している。