

## 〈特集〉

## シミュレーション技術を用いた焼却炉開発

## Development of Incinerator by Using Simulation Technology

山口明浩\*, 劉 大偉, 野上晴男

株式会社タクマ 技術本部 要素技術部

Akihiro Yamaguchi\*, Dawei Liu and Haruo Nogami  
Takuma Co., Ltd, Combustion and Core Technology Development Dept.

## Abstract

Recently, in order to optimize the design and operation conditions of various apparatus, simulation technology (computational fluid dynamics) has been used, because it is possible by application of simulation technology to simulate a wide variety of processes, to predict behavior under various conditions, to help in interpreting and understanding observed phenomena, to substitute for difficult or expensive experiments, and to establish the influence of individual parameters in processes by conducting parametric studies. In this paper, we introduce the examples of application of combustion simulation that were performed in development of new stoker-type incinerator and prove an availability of simulation technology. Thereby, We accomplished to retain a stable combustion operation at air ratio 1.3, to reduce the generation of toxic materials during combustion, and to improve the efficiency of thermal energy recovery in new stoker-type incinerator.

**Key Words** : Simulation, Computational Fluid Dynamics, Incinerator, Combustion

## 1. はじめに

近年, IT 産業の進展には目覚ましいものがあり, それに関連して様々な分野でコンピュータを用いて各種装置内の物理・化学現象を解析し, その結果に基づき装置形状や運転条件等の最適化が行われるようになってきたり.

一般に各種装置に要求される仕様は様々であり, そのすべてに対して実験を行って装置内の現象を把握し, 装置形状や運転条件を検討することは経済性, 時間的な面から困難である. また, 実験により現象を把握する場合, 装置内への計測プローブのアクセス方法や計測装置, 計測手法等, 実験に際して検討すべき課題が生じ, 知りたい情報を容易に得ることができない場合も多い. これらの問題を解決する手法としてシミュレーション技術の進歩には目覚ましいものがあり, エンジン, ガスタービン等, 様々な分野でシミュレーションによる解析が行われている. シミュレーションでは解析の対象となる現象を適切

にモデル化すれば様々な条件下での現象を予測し, その現象の過程を模擬することができる. また, 現象に影響を与えている因子を抽出し, その因子の影響度合いを把握することが可能であり, 実際に観察される現象の理解と解釈の手助けとなる. そのためシミュレーションは困難な実験や高価な実験に代わり, 各種装置を設計・開発する際の有効な手段の1つとなっている.

弊社においてもごみ焼却炉をはじめ, ボイラ, ガス冷却塔, 火格子等, 廃棄物処理プラントの各種機器の設計・開発にシミュレーション技術を応用し, 最適な装置形状や運転条件, 性能等について検討を行ってきた<sup>2)</sup>. ここではシミュレーション技術を新世代型ストーカー式ごみ焼却炉の開発へ応用した解析事例を紹介し, その有効性について報告する.

## 2. 新世代型ストーカー式ごみ焼却炉

近年, 循環型社会の構築を目指してマテリアルリサイクル, サーマルリサイクル等の様々な取り組みがなされ

\* 〒 660-0806 兵庫県尼崎市金楽寺町 2-2-33  
TEL: 06-6483-2634 FAX: 06-6483-2762  
E-mail: yamaguti@takuma.co.jp

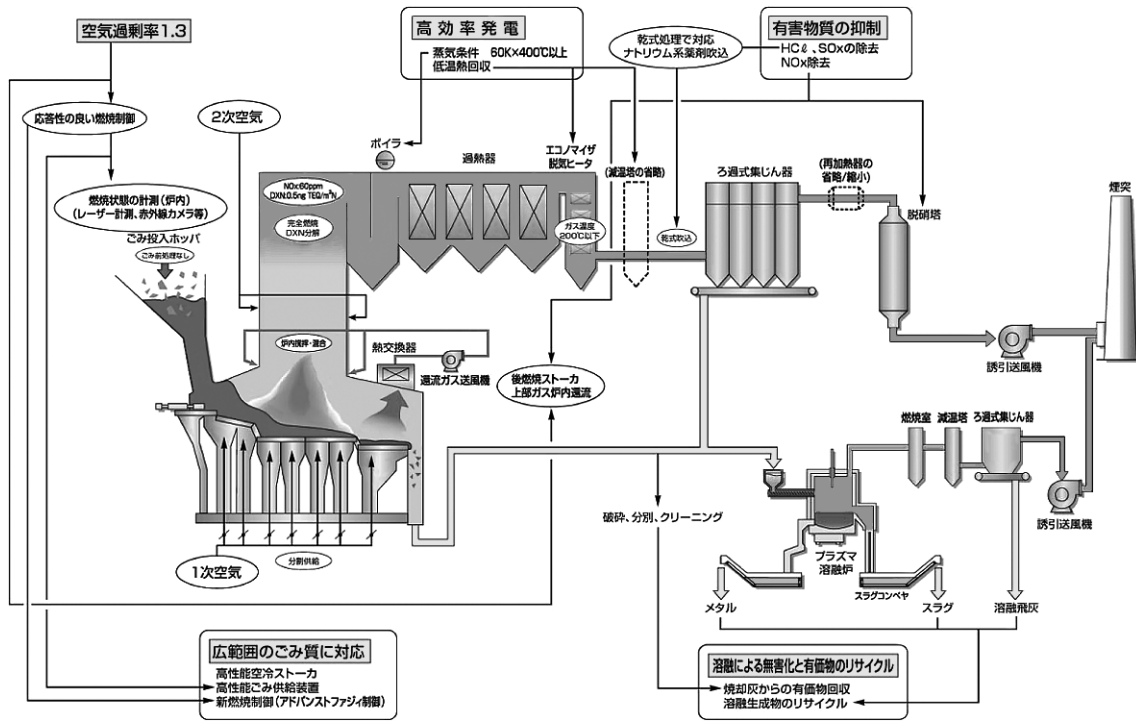


Fig. 1 Overall flow diagram of new stoker-type incinerator plant.

ているが、弊社では、衛生処理・完全燃焼、環境保全、高効率熱回収、コストダウンを開発コンセプトとして従来型のストーカ式ごみ焼却炉を発展させて新世代型ストーカ式ごみ焼却炉を開発した。これにより従来よりも排ガスを低減した空気比 1.3 (従来型の空気比は 1.7 ~ 2.0) での安定完全燃焼と NO<sub>x</sub>、CO 及びダイオキシン類の同時抑制を実現しており、環境負荷の低減とエネルギー回収効率の向上を達成している<sup>3)-6)</sup>。Fig. 1 に新世代型ごみ焼却プラントの全体フロー図を示す。ごみ投入ホッパから炉内に供給するごみはストーカ下部より供給する 1 次空気により焼却し、焼却灰を排出する。また、1 次燃焼領域から発生する未燃ガスを完全燃焼させるために炉内へ還流ガス及び 2 次空気を吹込み、未燃ガスを完全燃焼する。その後、ボイラで熱回収した後に排ガス処理設備によって排ガス中の煤塵や NO<sub>x</sub>、ダイオキシン類等の有害物質を取り除き、排ガスを大気へ排出するものである。

この新世代型ストーカ式ごみ焼却炉の大きな特徴の 1 つとして上記の開発コンセプトを達成するために採用した還流ガスシステムを挙げることができる。これは Fig. 2 に示すように O<sub>2</sub> 濃度が高く、HCl、SO<sub>x</sub> 等の腐食性ガス濃度が低い燃え切り点以降の後燃焼ガスを後燃焼段天井部より引き抜き (還流ガス)、熱交換器で冷却した

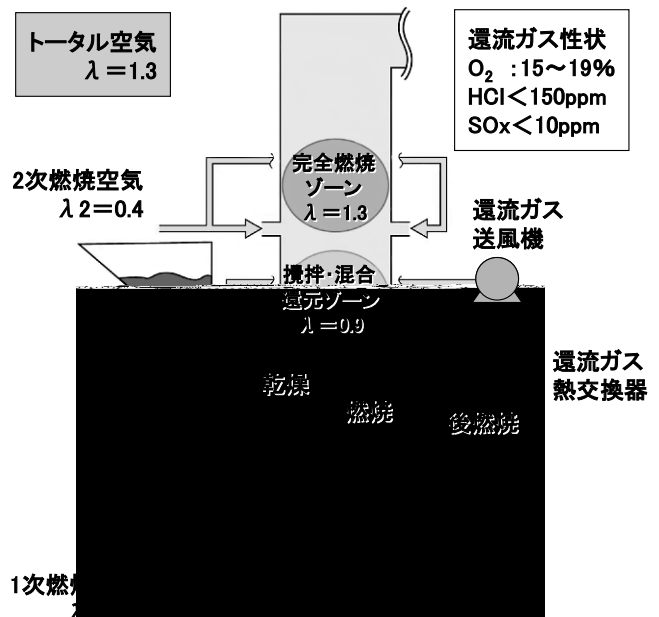


Fig. 2 Concept of burnout gas re-circulating system.

後に 2 次空気吹込み位置の上流に還流して 1 次燃焼ガスを攪拌混合し、その後、2 次空気を吹込み、未燃ガスを完全燃焼させる燃焼方式である。これにより 1 次燃焼空気を燃焼に有効に利用するとともに空気比 0.9 程度の均

一な高温還元雰囲気を形成し、NO<sub>x</sub>の発生を抑制しながら空気比 0.4 程度に相当する 2 次燃焼空気を吹込むことにより、空気比 1.3 で CO やダイオキシン類等の未燃ガスを完全燃焼するものである。

本システムを開発するに際しては、炉規模や発熱量の低いごみから発熱量の高いごみまで幅広いごみ質に対応するために **Table 1** に示すような各種条件でシミュレーションによる解析を行い、炉形状や還流ガス吹込み条件、2 次空気吹込み条件等の検討を行った。それにより炉形状及び燃焼条件の最適化、設計基準の標準化を行っている。以下にシミュレーションに用いた解析モデルと新世代型ストーカ式ごみ焼却炉の開発に際して行った解析事例を紹介し、シミュレーション技術の有効性を示す。

### 3. 基礎式及び燃焼解析モデル

#### 3.1 基礎式

装置内を流れる流体は一般に偏微分方程式で表される基礎式によって記述することができる。ここで取り扱っているような炉内の燃焼解析を行う場合には、質量保存式（連続の式）、運動量保存式（Navier-Stokes 方程式）、化学種保存式、エネルギー保存式の各基礎式と状態方程式、燃焼反応速度により流体の状態を記述することができる<sup>7,8)</sup>。また、流れが乱流である場合、実用的な解析を行うには現状では何らかの乱流モデル<sup>9)</sup>を導入する必要があるが、本解析では一般的によく用いられている標準型 k-ε 2 方程式モデルを採用し、上記の各保存式と合わせて解いた。これらの各保存式は有限体積法により解析格子上に作成されたコントロールボリューム内で保存則

を満たすように離散化され、これらの離散化された方程式は解が収束するまで繰り返し計算が行われる<sup>10)</sup>。尚、本解析は汎用流体解析ソフト CFX-4 を用いて行った。

#### 3.2 燃焼解析モデル

ごみ焼却炉から排出される有害物質の中で最も低減が求められているものはダイオキシン類である。このダイオキシン類の生成に関しては平衡計算によりダイオキシン類の生成量を予測する試みがなされているが、現状ではダイオキシン類の生成・分解機構、反応速度の詳細は十分に解明されておらず、実炉の燃焼状態におけるダイオキシン類の生成・分解を予測する手法は確立されていない。また、実際のごみの燃焼過程はたいへん複雑であり、反応経路、反応速度等の反応機構については未知な部分も多く、そのすべてをモデル化することは困難である。そこで、ダイオキシン類の生成と相関があり、完全燃焼の指標となる CO 濃度を予測できる 2 段燃焼反応モデルを構築し、それを活用している。

燃焼解析モデルで考慮している化学種は O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O の 6 成分で、1 次燃焼から発生する未燃ガスを CH<sub>4</sub> と CO の 2 成分で表している。その CH<sub>4</sub>, CO は反応 (1) CH<sub>4</sub>+1.5O<sub>2</sub> → CO+2H<sub>2</sub>O, 反応 (2) CO+0.5O<sub>2</sub> → CO<sub>2</sub> により最終的には CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O になる。ここで、反応 (1) に関しては化学反応速度が CH<sub>4</sub> と O<sub>2</sub> の混合速度に比べると極めて大きいので渦消散モデル<sup>11)</sup>の混合速度（渦消散速度）を反応 (1) の反応速度として用いる（混合律速）。また、反応 (2) に関しては、CO は化学反応速度が遅い化学種であり、化学反応速度と混合速度が同レベルと考えて、化学反応速度と渦消散モデルの混合速度（渦

**Table 1** Considered items of design and operation conditions by application of simulation technology

検討項目	内容
炉規模	ごみ処理量 100 ton/day ~ 300 ton/day
ごみ質	ごみ発熱量 6.7MJ/kg ~ 13.4MJ/kg
炉形状	炉中心位置、絞りの有無、ガス滞留時間、1 次燃焼室、2 次燃焼室
還流ガス吹込み条件	ノズル位置、ノズル本数、ノズル径、還流ガス吹込み速度、還流ガス分配
2 次空気吹込み条件	ノズル位置、ノズル本数、ノズル径、2 次空気吹込み速度、2 次空気分配



最適な炉形状及び燃焼条件の検討、設計基準の標準化

消散速度)を比較し、小さい方を反応(2)の反応速度として用いる。尚、渦消散速度の中に現れる経験定数には小型テスト炉<sup>12),13)</sup>やこれまでに納入した実炉のデータとシミュレーションの解析結果を比較して最適化した値を用いており、燃焼解析モデルの妥当性を検証して本モデルの有効性を確認している。

また、シミュレーションでは炉壁からの熱放出を考慮するため、炉内壁面での対流熱伝達と耐火物の熱伝導、それに焼却炉のように炉内が高温となる燃焼場においては輻射による伝熱が重要となるため離散輸送法により輻射を考慮して解析を行った。

#### 4. 解析事例

次に新世代型ストーカ式ごみ焼却炉の開発に際して、シミュレーションによる解析を行って炉内の燃焼状態について検討を行った解析事例を示す。

##### 4.1 従来型と新世代型の比較

新世代型ストーカ式ごみ焼却炉の開発に際して、実機稼働中の従来型ストーカ式ごみ焼却炉を新世代型に改造して実証試験<sup>4)-6)</sup>を行ったが、その際に様々な解析条件でシミュレーションを行って従来型と新世代型の燃焼状態を比較検討した。これにより従来型の問題点を把握し、

それを改良することで従来型より高性能な新世代型ストーカ式ごみ焼却炉の開発を目指した。**Fig. 3**及び**Fig. 4**の解析はその1例であり、炉規模(ごみ処理量)85ton/day、ごみ発熱量7.95MJ/kg(1,900kcal/kg)の基準ごみに対して行ったもので、**Fig. 3**に従来型(空気比1.9)、**Fig. 4**に新世代型(空気比1.3)の解析結果を示す。従来型は1次燃焼室上部から斜め下向きへ2次空気を吹込み、1次燃焼ガスと2次空気を攪拌混合し、CO等の未燃ガスの燃焼を促進するシステムである。この従来型の解析結果を見れば、2次燃焼室のガス流れが前壁側に少し偏っており、ガスの攪拌混合が不十分であるため、CO濃度の高い領域が炉上部まで達している。また、従来型では燃え切り点以降の1次燃焼領域から2次燃焼室後壁に沿って、O<sub>2</sub>濃度の高い領域が存在することが分かる。これは燃え切り点以降ではごみ中の可燃分はほとんどなく、その大部分は灰分であるため、1次空気中のO<sub>2</sub>は余剰供給となっていることを示している。そこで、この余剰なO<sub>2</sub>を有効活用することに着目し、新世代型では上述した還流ガスシステムを採用した。**Fig. 4**に示すように新世代型では従来型の燃え切り点以降のO<sub>2</sub>濃度が高い1次燃焼ガスを還流ガスとして引き抜き、それを還元ゾーンに吹込むことで燃え切り点以降の1次燃焼ガスに含まれる余剰なO<sub>2</sub>を有効活用し、O<sub>2</sub>濃度が低い均一な還元雰囲気を形成することができている。また、新世代型では従来型に比べて低空気比燃焼であるため、全体として炉内のガス温度が上昇し、従来よりも高温な還元ゾーン、完

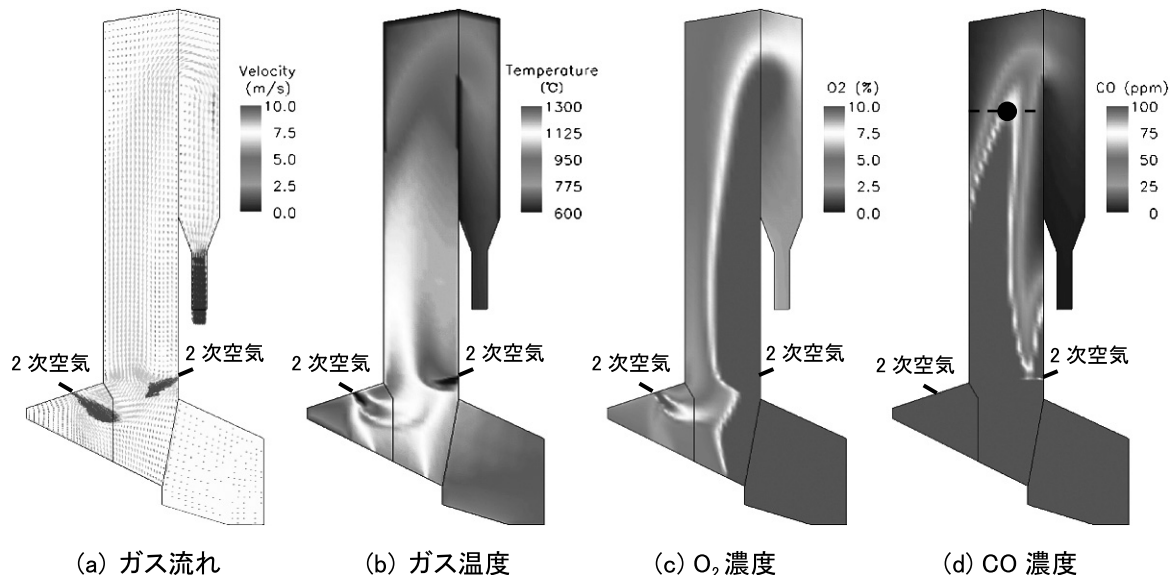


Fig. 3 Simulation results of conventional stoker-type incinerator (air ratio 1.9).

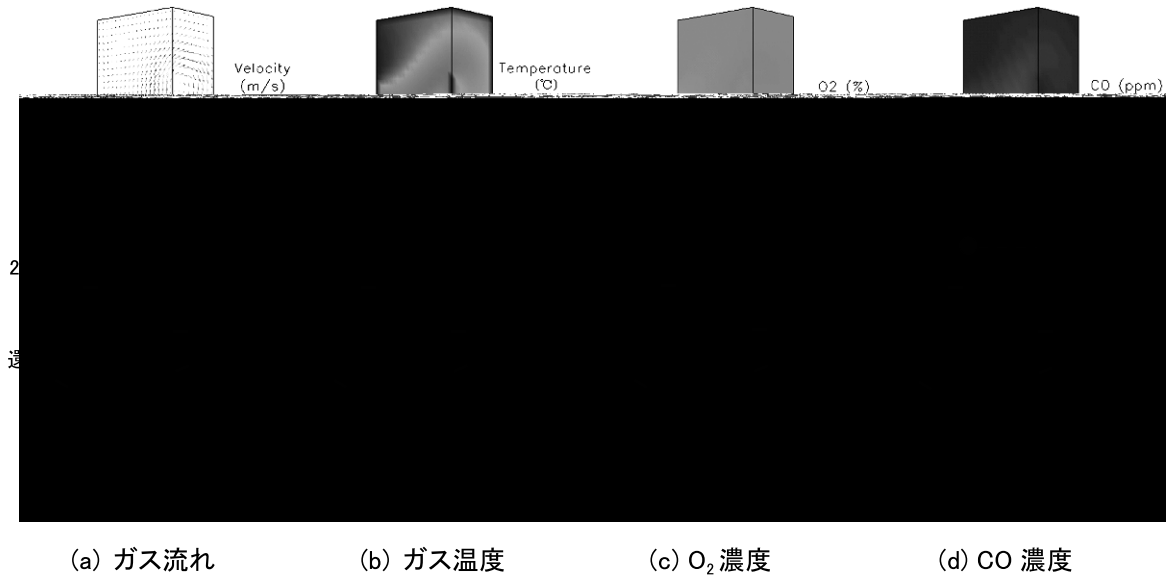


Fig.4 Simulation results of new stoker-type incinerator (air ratio 1.3).

Table 2 Operation data (steam flow rate, air ratio, and results of O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, and DXNs measurement)

項目		新世代型実証運転	従来運転
ごみトン当り蒸発量	t/t	3.46	3.42
空気量	空気比	1.28	1.63
	1次空気比	0.85	1.17
	2次空気比	0.42	0.46
バグフィルタ 出口ガス	O <sub>2</sub> 濃度	6.2	9.6
	CO 濃度 (O <sub>2</sub> =12%換算)	0.2	0.3
	NO <sub>x</sub> 濃度 (O <sub>2</sub> =12%換算)	90.9	134.5
	ダイオキシン類濃度	ng-TEQ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> 0.00023 ~ 0.00032	0.0024 ~ 0.0039

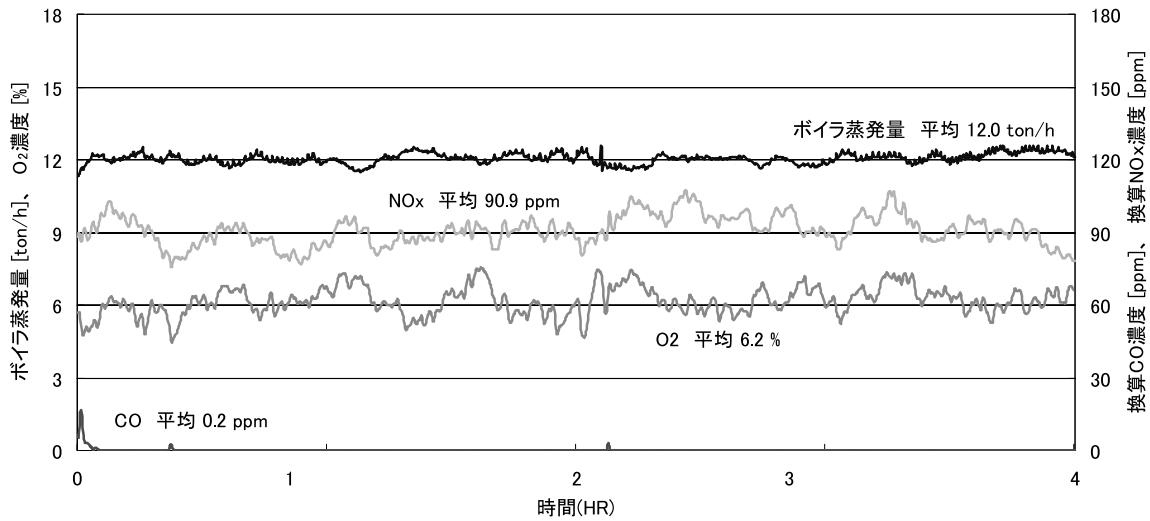
全燃焼ゾーンが形成されている。そして、この2つの領域において十分なガスの攪拌混合が行われており、燃焼反応が促進されることが期待できる。実際にCO濃度に関しては、図中にCO濃度が100ppm以上である領域の頂点を黒点で示しているが、従来型ではその頂点が炉中心位置付近でピーク状に2次燃焼室下流まで達しているのに対して、新世代型ではCO濃度100ppm以上の領域の頂点は2次燃焼室前壁側の2次空気吹込み直後の地点であり、従来型に比べて新世代型ではCOの燃焼が促進されることが示された。

以上の解析結果から新世代型では、空気比0.9程度の均一な高温還元雰囲気を形成し、NO<sub>x</sub>の発生を抑制しながら空気比0.4程度に相当する2次燃焼空気を吹込むことにより、空気比1.3でCOやダイオキシン類等の未燃ガスの完全燃焼を達成できることが期待でき、実際に実証試験においてそのことが証明された。従来運転と新世

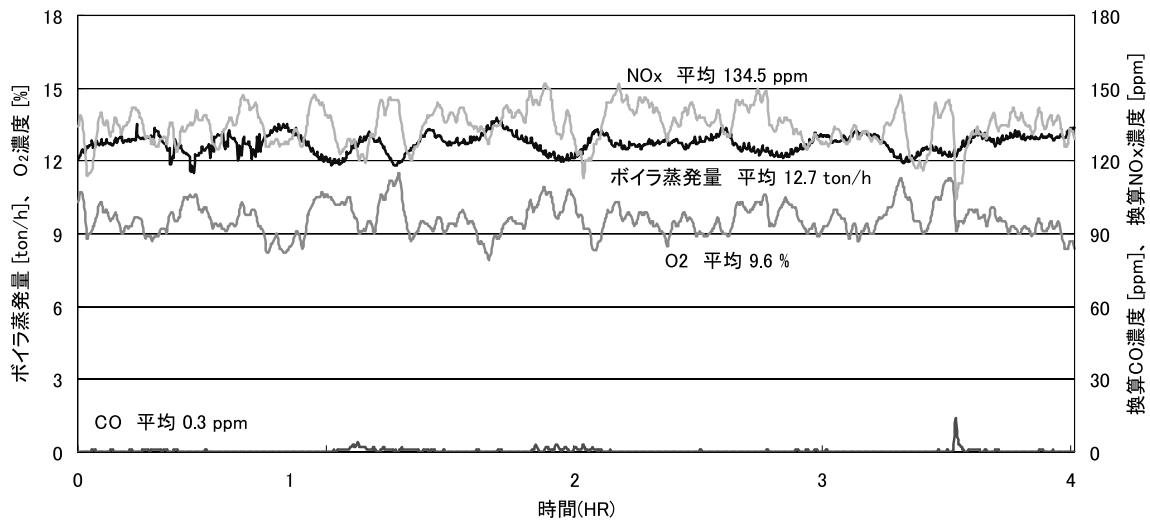
代型実証試験の運転データをTable 2及びFig. 5に示すが、従来運転に比べて新世代型実証運転ではバグフィルタ出口ガスのNO<sub>x</sub>濃度を30%以上低減し、ダイオキシン類濃度については従来運転の0.0024~0.0039ng-TEQ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>に対して新世代型実証試験では0.00023~0.00032ng-TEQ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>と1桁低い値に低減することができた。

#### 4.2 絞りの有無の比較

Fig. 6に新世代型ストーカ式ごみ焼却炉の開発に際して、還元ゾーン入口の絞りの有無が炉内の燃焼状態に与える影響を検討するために行った解析結果を示す。解析は炉規模(ごみ処理量)300ton/dayに対して行ったものである。この還元ゾーン入口の絞りの役割は燃え切り点上流の領域から発生する未燃ガスを多く含む1次燃焼ガスを整流し、そこへ還元ガスを吹込み、1次燃焼ガスと



(a) 新世代型実証運転



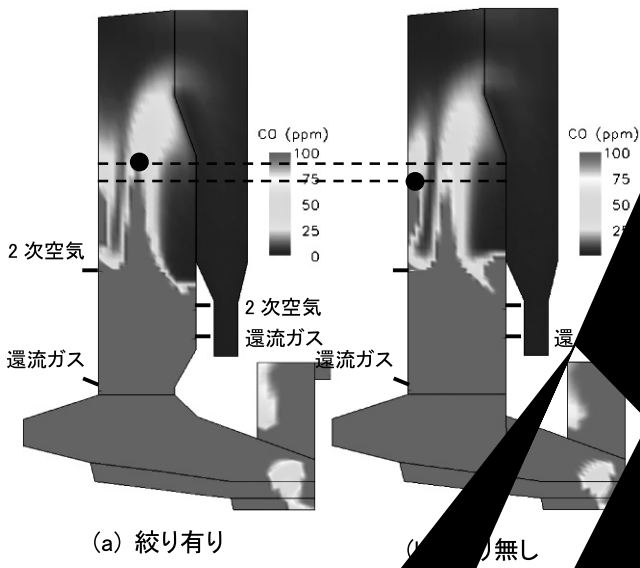
(b) 従来運転

Fig.5 Comparison of trend data ( steam flow rate and exhaust gas composition at bag filter outlet) between (a) new type and (b) conventional type.

還流ガスを効果的に攪拌混合することをねらったものである。しかし、解析結果を比較すれば、CO濃度100ppm以上の領域の頂点位置は絞り無しの方が少し低くなり、両者に大差は見られなかった。また、他の解析条件(炉規模、ごみ質等)に対して同様の解析を行ったが、結果として炉幅がある一定の距離以内であれば、炉内の燃焼状態に対する絞りの有無の影響は両者で大差ないことが分かった。これはこのようなシミュレーションによる解析を行うことにより炉形状の最適化を検討できる事例の1つであり、シミュレーション技術の有効性を示すものである。

## 5. まとめ

新世代型ストーカ式ごみ焼却炉の開発に際して、シミュレーション技術を用いて炉内の燃焼状態を解析し、炉形状や燃焼条件等の最適化を図った。ここではその解析事例を取り上げ、シミュレーション技術の有効性を示した。これにより弊社では従来よりも排ガスを低減した空気比1.3(従来型の空気比は1.7~2.0)での安定完全燃焼とNO<sub>x</sub>、CO及びダイオキシン類の同時抑制を実現しており、環境負荷の低減とエネルギー回収効率の向上を達成している。



2)

[参考文献]

- 1) 日本機械学会編『燃焼工学』(2003). 燃焼工学の基礎と応用, 第26巻(2003).
- 2) 日本機械学会編『燃焼工学』(2009). 燃焼工学の基礎と応用, 第27巻(2009).