

# 流動床式焼却炉における低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術の検証

## Verification of Low NO<sub>x</sub> Combustion Technology in Fluidized Bed Incinerator



井上尚子\*  
Naoko Inoue



多田俊哉\*  
Toshiya Tada



砂田浩志\*\*  
Hiroshi Sunada



伊藤 正\*\*  
Tadashi Ito



木下民法\*\*  
Taminori Kinoshita

NO<sub>x</sub> に対し厳しい管理目標値を定めている廃棄物焼却処理施設の多くは触媒脱硝設備を有しているが、焼却炉での低 NO<sub>x</sub> 燃焼が実現すれば設備の簡素化と発電効率の向上が期待できる。今回、実稼働中の流動床式焼却炉にて燃焼試験を行い、低空気比燃焼（空気比1.32）と排ガス再循環（EGR）を組み合わせることで NO<sub>x</sub> 濃度を40 ppm 程度まで低減できることを確認した。また、熱流体シミュレーションにより NO<sub>x</sub> 発生状況を考察した結果、空気比低減が低 NO<sub>x</sub> 燃焼にもっとも効果があることが示唆された。

Most of the municipal solid waste incineration plants with strict regulations imposed on NO<sub>x</sub> emissions have a selective catalytic reduction (SCR) process. However, low NO<sub>x</sub> combustion can simplify this process and improve power generation efficiency. We conducted combustion tests at an operating plant with a fluidized bed incinerator. It was found that low excess air ratio operation (1.32) using the exhaust gas recirculation (EGR) system was able to reduce NO<sub>x</sub> to approximately 40 ppm. Furthermore, after observing the NO<sub>x</sub> generation status in simulations using computational fluid dynamics (CFD), it was suggested that low excess air ratio operation is the most effective approach to low NO<sub>x</sub> incineration.

### Key Words :

流動床式焼却炉  
窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>)  
排ガス再循環  
低空気比  
数値流体力学

Fluidized Bed Incinerator  
Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>)  
Exhaust Gas Recirculation  
Low Excess Air Ratio  
Computational Fluid Dynamics

### 【セールスポイント】

- ・総空気比1.32程度の低空気比燃焼と排ガス再循環を組み合わせることで、実稼働中の流動床式焼却炉において触媒脱硝設備がなくとも NO<sub>x</sub> 濃度を40 ppm 程度まで低減できた。

### まえがき

窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) について厳しい管理目標値を設定している焼却施設では、脱硝効率の高い触媒脱硝 (SCR) 設備を設置するケースが多い。しかし、SCR 設備設置に伴う建設費用増加に加え、排ガスを加熱する場合には蒸気が使用されるため、発電効率

が低下するというデメリットがある。そのため、SCR 設備を用いずに NO<sub>x</sub> の低減を行うことができれば、設備の簡素化や発電効率の向上が期待できる。

我々はこれまでに流動床式焼却炉において、燃焼の総空気比低減および押込/二次空気の供給割合の最適化により NO<sub>x</sub> の発生を抑制できることを確認

した<sup>1)</sup>。今回、さらなるNO<sub>x</sub>低減を目的に実稼働中の焼却炉にて燃焼試験を行った。また、得られた運転状況と排ガス性状から熱流体シミュレーションを実施し、NO<sub>x</sub>発生状況を考察した。

## 1. 実機試験

### 1.1 試験方法

試験は処理規模46 t/dayの流動床式焼却炉にて行った。試験を行った炉は、低NO<sub>x</sub>燃焼技術の一つとして知られている排ガス再循環(EGR)を行うため、バグフィルタ排ガスの一部を炉内へ供給できるよう改造を施している。EGRガスを炉内に供給することは、炉内温度を下げる効果もある。したがって、これまで炉内が高温になるため実施できなかった、より低い空気比での運転が可能となる。本試験では炉内で発生するNO<sub>x</sub>の低減を目的に、EGRを用いた低空気比運転を行った。試験中の総空気比は1.3とし、監視している炉内温度が通常運転時(総

空気比1.6)と同程度になるようEGRガス量を決定した。試験中は排ガス測定を行い、低NO<sub>x</sub>燃焼の状況を確認した。図1に試験を行った焼却炉の概略プロセスフローを示す。図1には、併せて排ガス測定を行った位置(SP1:二次燃焼部入口, SP2:二次燃焼部出口, SP3:バグフィルタ出口)も示している。表1に排ガスの測定項目および分析方法を示す。

NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>についてはプローブから連続的に排ガスを吸引して分析計に通し、連続測定を行った。なお、連続測定はそれぞれのポイントで約2時間ずつ行った。ただし、二次燃焼部入口, 出口(SP1, 2)では排ガス中にダストが多いため、ダストによるプローブの詰まりがしばしば生じる。その際はデータ取得を停止し、圧縮空気逆洗することで都度対応した。その他のガス種については、それぞれのポイントで2回のバッチ分析を行った。

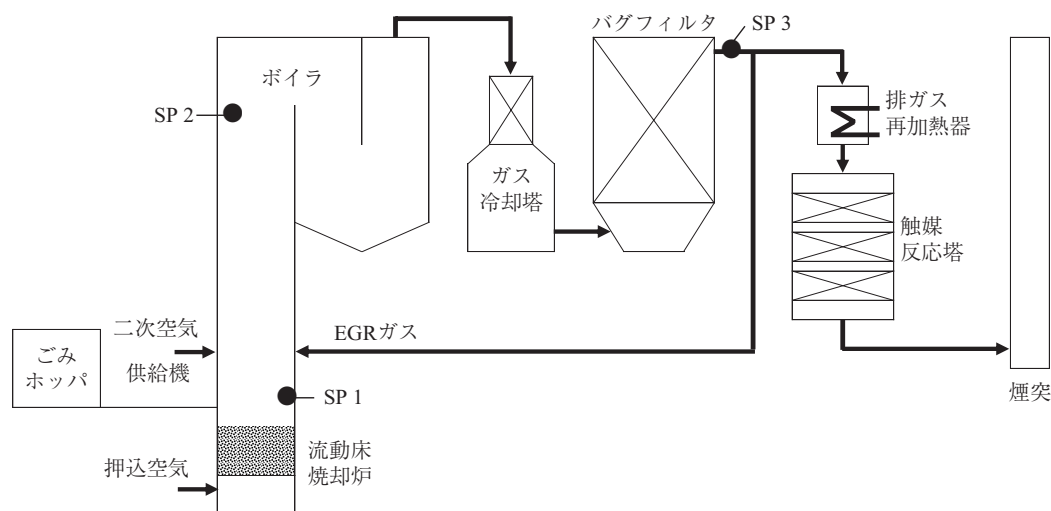


図1 概略プロセスフロー

表1 排ガス測定項目および分析方法

項目	SP 1	SP 2	SP 3	方 法
NO <sub>x</sub>	○	○	○	化学発光法
O <sub>2</sub>	○	○	○	磁気風式/ジルコニア式*
NH <sub>3</sub>	○	○	—	インドフェノール青吸光光度法
HCN	○	○	—	4-ピリジンカルボン酸—ピラゾロン吸光光度法
CO	○	○	—	赤外線式
CO <sub>2</sub>	○	○	—	赤外線式
H <sub>2</sub> O	○	○	—	吸収管
H <sub>2</sub>	○	○	—	TCD- ガスクロマトグラフ
CH <sub>4</sub>	○	○	—	TCD- ガスクロマトグラフ

\*SP3でのみジルコニア式を使用

表2 測定結果と運転条件

項目	単位	試験時（低空気比運転時）			通常運転時
		SP 1	SP 2	SP 3	SP 3
NO <sub>x</sub>	ppm-dry ppm@O <sub>2</sub> =12 %	17	77	62	83
		8	44	40	64
O <sub>2</sub>	%-dry	1.2	5.1	7.2	9.6
NH <sub>3</sub>	ppm-dry	1 100	4	—	—
HCN	ppm-dry	71	<0.5	—	—
CO	%-dry	2.9	—	—	—
	ppm-dry	—	50	—	—
	ppm@O <sub>2</sub> =12 %	—	28	—	—
H <sub>2</sub>	%-dry	1	<0.1	—	—
CH <sub>4</sub>	%-dry	0.5	<0.1	—	—
押込空気比	—	0.32			0.38
総空気比	—	1.32			1.59
EGR 率	%	19			0

## 1.2 試験結果

低空気比運転時の排ガスの測定結果を表2に示す。連続測定の結果はプローブの清掃時間などを除外した測定値の平均値である。また、表2には通常運転時のSP3（バグフィルタ出口）での排ガス測定結果および測定時の運転条件も併せて示している。ここで、EGR率はBF出口での総排ガス流量に対するEGRガス流量の割合で定義される。

ガス測定の結果、還元雰囲気であるSP1（二次燃焼部入口）ではFuel NO<sub>x</sub>の前駆体となるNH<sub>3</sub>とHCNが存在しており、NO<sub>x</sub>も17 ppmと微量ながら存在している。この結果から、砂層の内部でごみの熱分解によるNH<sub>3</sub>、HCNの発生と押込空気との反応によるNO<sub>x</sub>生成、およびNH<sub>3</sub>、HCNによるNO<sub>x</sub>の還元が複雑に起こっていることが窺える。また、NH<sub>3</sub>はHCNに比べ砂層での発生量が非常に多いことが分かった。

SP2（二次燃焼部出口）におけるO<sub>2</sub>濃度は5.1 %-dryであり、空気比1.3での低空気比運転が実現できていることがわかる。このとき、CO濃度は28 ppm@O<sub>2</sub>=12 %であった。しかしながら、同時刻の煙突での測定値は平均5.9 ppm@O<sub>2</sub>=12 %であり、COの酸化反応はボイラ下流でも継続しているものと思われる。一方で、NH<sub>3</sub>は4 ppm、HCN、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>は検出限界以下となり、二次燃焼部の燃焼状況は良好であったと言える。

SP3での測定の結果、EGRを用いた低空気比運転を行うことでNO<sub>x</sub>濃度を40 ppm@O<sub>2</sub>=12 %まで

表3 シミュレーション設定

次元	三次元
時間	定常
乱流モデル	k- $\omega$ SST
燃焼モデル	渦消散モデル
輻射モデル	DO モデル

抑えられることがわかった。通常運転時のNO<sub>x</sub>濃度である64 ppm@O<sub>2</sub>=12 %に対して明確な差があり、流動床式焼却炉においてEGRを用いた低空気比運転がNO<sub>x</sub>低減に効果があることが確認できた。

## 2. 熱流体シミュレーション

### 2.1 シミュレーション方法

炉内のNO<sub>x</sub>分布や発生要因が分かれば、炉の設計や燃焼方法の改善に役立てることができる。このような検討において、シミュレーションは非常に有効な手段である。そこで、実機から得たデータを参照してシミュレーションによるNO<sub>x</sub>生成挙動の把握を試みた。

シミュレーションには汎用熱流体解析ソフトANSYS Fluent（アンシス・インコーポレイテッドの商標）を使用し、解析領域は砂層表面からボイラ2パス出口までとした。熱流体シミュレーションで使用したモデル等の条件を表3に示す。砂層表面から解析領域に流入する熱分解ガスの流量と組成は、ごみの性状と発熱量および押込空気量から決定した。ガス種にはCO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、Cを考慮した。流入したガス化ガスはボイラ内の二次燃焼領域に吹込まれる二次空気によって燃焼する。焼却

炉部分とボイラ部分の壁面には伝熱条件を与えており、対流と輻射による伝熱を考慮した。NO<sub>x</sub>シミュレーションは解析ソフトに搭載されているNO<sub>x</sub>モデル (Fuel NO<sub>x</sub>, Thermal NO<sub>x</sub>, Prompt NO<sub>x</sub>) を使用した。今回使用したNO<sub>x</sub>モデルは燃焼シミュレーションの結果に対しポスト処理として用いられる。通常運転時の流動床式焼却炉において、シミュレーション上の発生NO<sub>x</sub>の大部分を占めるのはFuel NO<sub>x</sub>である。Fuel NO<sub>x</sub>の前駆体としてはNH<sub>3</sub>およびHCNが挙げられる。簡略化のため前駆体をNH<sub>3</sub>のみとした場合、Fuel NO<sub>x</sub>モデルの反応速度は以下の式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$R_1 = A_1 X_{NH_3} X_{O_2}^a e^{-E_1/RT} \quad (1)$$

$$R_2 = A_2 X_{NH_3} X_{NO} e^{-E_2/RT} \quad (2)$$

ここに、 $R_1$  [s<sup>-1</sup>] : NO<sub>x</sub>生成速度  
 $R_2$  [s<sup>-1</sup>] : NO<sub>x</sub>消失速度  
 $T$  [K] : 温度  
 $X$  [-] : モル分率  
 $a$  [-] : 酸素の反応次数  
 $R$  [J/K・mol] : 一般気体定数  
 $A$  [s<sup>-1</sup>] : 頻度因子  
 $E$  [J/mol] : 活性化エネルギー

デフォルトの定数を用いた場合のNO<sub>x</sub>モデルでは実機の測定結果を再現できなかった。そのため、実機測定結果に合うように上式の定数を調整し、反応速度式を決定した。砂層内で発生するNO<sub>x</sub>およびNH<sub>3</sub>については、二次燃焼部入口での測定により得られたデータと砂層の運転状況を鑑みて決定し、砂層表面を入口とし流入条件として設定した。

## 2.2 シミュレーション結果

本試験 (低空気比運転) および通常運転の条件で燃焼シミュレーションを行った。シミュレーションの結果得られた炉内温度の分布図を図2に示す。分布図からEGRを用いることで低空気比にも関わらず局所的な高温化が抑制されていることが示された。図3に炉内温度の計算結果と実測値の比較を示す。グラフは横軸に炉内温度を、縦軸に砂層表面からの高さをとっている。白いプロットはシミュレーションにより得られた各高さ位置での断面平均温度であり、一方の黒いプロットは熱電対での温度測定結果である。図3より、温度の測定値と実測値は比較的良く一致していることが分かる。次に、O<sub>2</sub>濃

度分布の計算結果を図4に示す。シミュレーションにより得られたSP2における低空気比運転でのO<sub>2</sub>濃度は5.1% -dryであり、測定値と一致している。これより、シミュレーション結果は実機の炉内環境を良好に再現していると評価し、本計算結果にNO<sub>x</sub>モデルを適用した。

NO<sub>x</sub>モデルによるシミュレーションにより得られたNO<sub>x</sub>濃度の分布図を図5に示す。また、SP2におけるNO<sub>x</sub>濃度の計算結果と測定結果の比較を図6に示す。ここで、通常運転時の測定結果はSP3

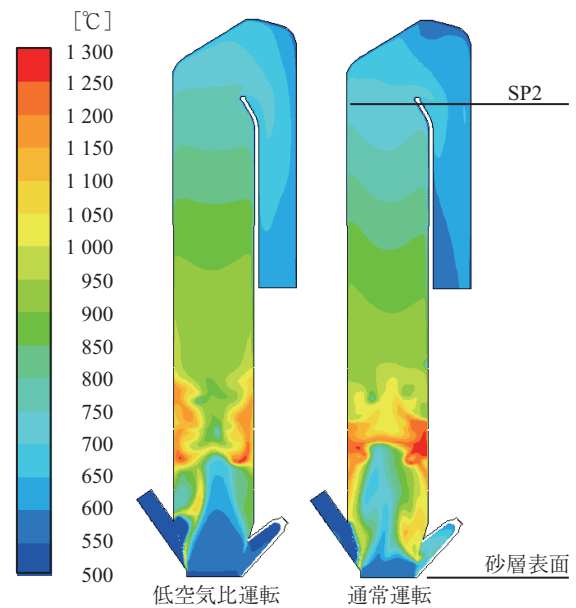
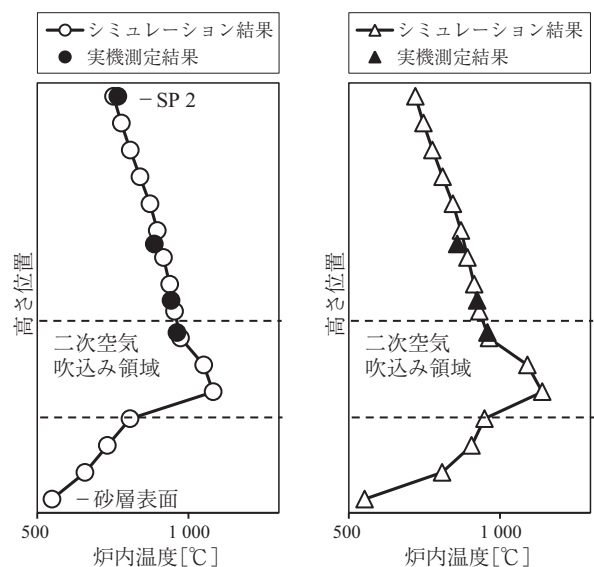


図2 計算結果 (温度コンタ図)



(a) 低空気比運転 (b) 通常運転  
 図3 炉内温度の計算結果と実測値の比較

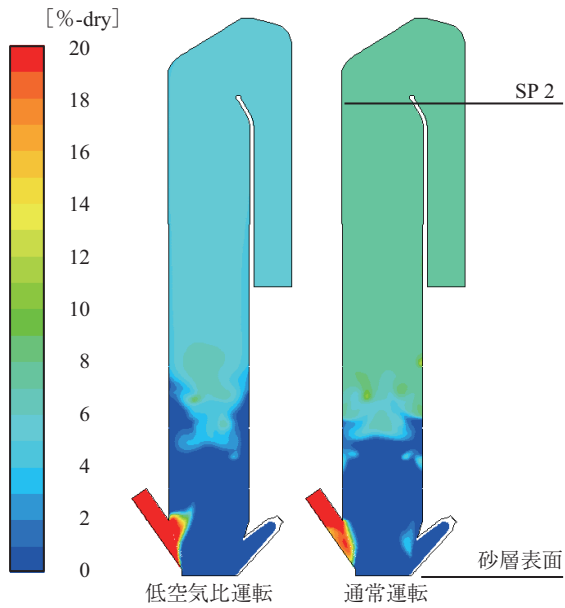


図4 計算結果 (O<sub>2</sub>濃度コンタ図)

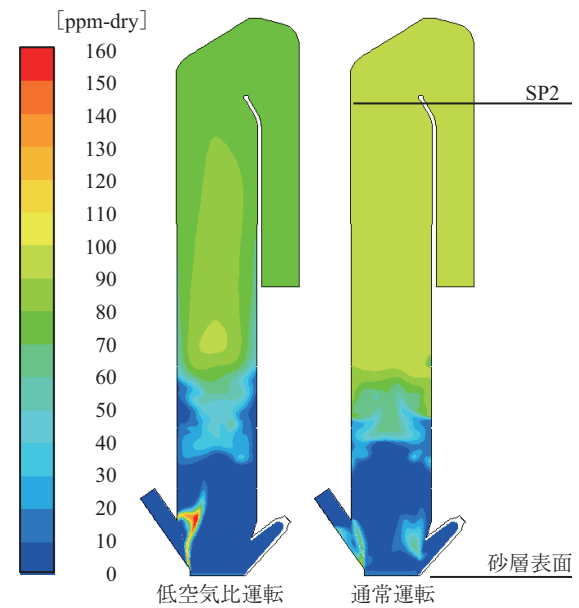


図5 計算結果 (NO<sub>x</sub>濃度コンタ図)

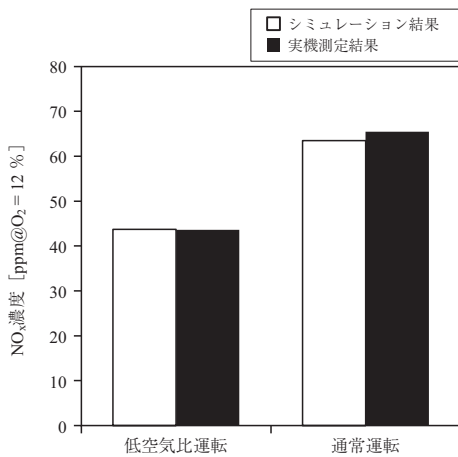


図6 SP2におけるNO<sub>x</sub>濃度の比較

(バグフィルタ出口)でのNO<sub>x</sub>濃度から算出した。図5より、NO<sub>x</sub>生成はSP2の位置でほぼ完結していることが分かる。図6より、本NO<sub>x</sub>モデルによる計算結果は低空気比運転時、通常運転時のどちらの測定値とも概ね一致することが確認できた。なお、SP2でのNH<sub>3</sub>濃度の計算結果は両条件とも0 ppmであり、実機に近い結果であった。図7にシミュレーションにより得られたNO<sub>x</sub>濃度のグラフを示す。図7から、NO<sub>x</sub>は主に二次空気吹込み領域の後半にて発生しており、とくに通常運転ではこの領域で急激にNO<sub>x</sub>濃度が上昇していることが分かる。NO<sub>x</sub>生成に影響を与える因子として、図8、9にシミュレーションにより得られた炉内温度、O<sub>2</sub>

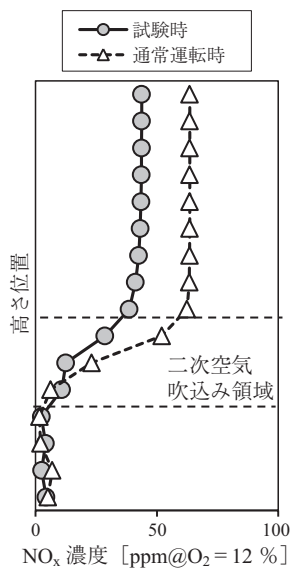


図7 NO<sub>x</sub>濃度の計算結果

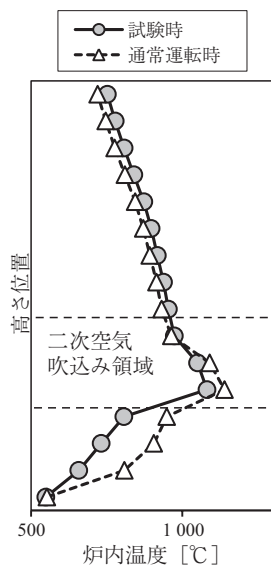


図8 炉内温度の計算結果

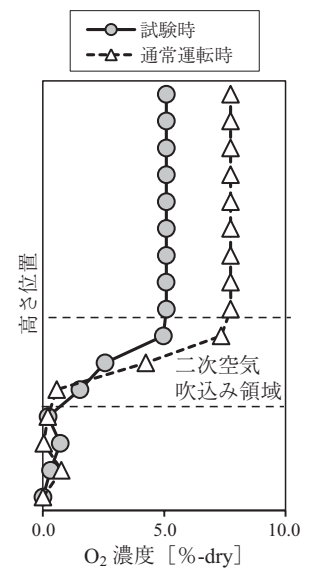


図9 O<sub>2</sub>濃度の計算結果

濃度を示す。一般的に炉内温度が高いと  $\text{NO}_x$  発生量も増加するが、図8に示されるように  $\text{NO}_x$  が生成する二次空気吹込み領域の後半では炉内温度に大きな差は見られなかった。一方、図9において、通常運転では二次空気吹込み領域の後半で  $\text{O}_2$  濃度が急激に増加しており、 $\text{NO}_x$  の発生挙動と一致していることが分かった。以上のことから、 $\text{O}_2$  濃度の抑制、すなわち総空気比の低減が  $\text{NO}_x$  抑制にもっとも効果があることがシミュレーションによる検討で示唆された。

## む す び

流動床式焼却炉での発生  $\text{NO}_x$  低減を目的とし、実稼働中の焼却炉にて EGR を用いた低空気比運転試験を実施した。また、得られた運転状況と排ガス性状から熱流体シミュレーションを実施し、 $\text{NO}_x$  発生状況を考察した。それにより、以下の結果が得られた。

1) EGR を用いた低空気比運転を行うことで、バグフィルタ出口での  $\text{NO}_x$  濃度を  $40 \text{ ppm}@\text{O}_2 = 12 \%$  まで抑えることができた。

2) シミュレーションにより  $\text{NO}_x$  発生状況について検討した結果、 $\text{NO}_x$  は主に二次空気吹込み領域の後半で発生しており、空気比低減が低  $\text{NO}_x$  燃焼にもっとも効果があることが示唆された。

本試験により、低空気比燃焼と EGR を組み合わせることで、流動床式焼却炉において触媒反応塔がなくとも  $\text{NO}_x$  濃度を  $40 \text{ ppm}$  程度まで低減できることが確認された。

また、今回対象とした流動床式焼却炉において、低空気比運転を含む通常の運転範囲であればシミュレーションにより発生  $\text{NO}_x$  を予測できる見込みを得た。本シミュレーション手法は  $\text{NO}_x$  生成挙動の把握に有効な手段であると考えており、今後更なるブラッシュアップを進めていく。

## [参考文献]

- 1) 砂田浩志ほか：流動床焼却炉における低  $\text{NO}_x$  燃焼の取組み，第36回全国都市清掃研究・事例発表会，(2015)，216-218
- 2) De Soete G.G. : 15th Symposium (International) on Combustion, (1974), 1093-1102