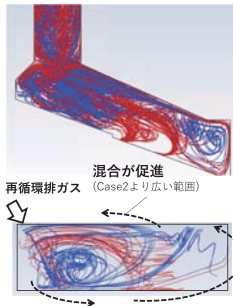


燃焼排ガス再循環法による窒素酸化物低減効果のシミュレーション

Simulation of Nitrogen Oxides (NO_x) Reduction Effect with Exhaust Gas Recirculation (EGR)



福井 淳平* 伊藤 竜生*
Junpei FUKUI Ryusei ITOH
増田 孝弘* 水野 孝昭**
Takahiro MASUDA Takaaki MIZUNO
芹澤 佳代**
Kayo SERIZAWA

【要旨】 ストーカー式下水汚泥焼却炉は一酸化二窒素の排出量が少ない一方、そのほかの窒素酸化物の排出量が高い傾向がある。既報¹⁾では燃焼排ガス再循環法による窒素酸化物の低減効果を実証試験により確認した。本稿では、既報¹⁾の実証試験を対象としたシミュレーションモデルを構築し、窒素酸化物の低減メカニズムの解明をおこなった。シミュレーション結果は実証試験における窒素酸化物濃度の変化傾向を良好に再現した。また、炉内の温度分布およびガス流動のシミュレーション結果から、再循環排ガスの供給位置の違いによって高温領域の縮小とガス混合促進の効果が異なることを示し、適切な供給位置の選択が窒素酸化物低減に寄与することを確認した。本モデルは新設炉設計における机上検討ツールとしての活用が期待される。

キーワード：下水汚泥焼却、窒素酸化物、燃焼排ガス再循環、数値流体力学、ストーカー式焼却炉

Abstract

Stoker-type sewage sludge incinerators emit low levels of nitrous oxide (N₂O) but tend to produce considerable concentration of other nitrogen oxides (NO_x). The effect of exhaust gas recirculation (EGR) on NO_x reduction was demonstrated in a previous study¹⁾. In this study, we developed a simulation model to elucidate the mechanisms of NO_x reduction and validated it against experimental data. The simulation results successfully reproduced the NO_x concentrations observed in the demonstration test. In addition, analysis of the simulated temperature distribution and gas flow in the incinerator showed that both the reduction of high-temperature regions and the enhancement of gas mixing depended on the EGR injection location. Selecting an appropriate EGR injection location reduces NO_x emissions. The model is expected to serve as a simulation tool for design of new incinerators.

Keywords: sewage sludge incineration, nitrogen oxides (NO_x), exhaust gas recirculation (EGR), computational fluid dynamics (CFD), stoker-type incinerator

* 研究部
Energy & Environmental Research Dept.
** 水処理技術部
Sewerage Engineering Dept.

1. はじめに

下水汚泥焼却における一酸化二窒素（以下、 N_2O と記す）由来の温室効果ガス排出量は、下水道施設からの温室効果ガス排出量の約20%を占めており、その低減が課題となっている。下水汚泥焼却で広く用いられている流動床式焼却炉と比較して、当社が採用しているストーカ式焼却炉は脱水汚泥を乾燥機で前処理した後に炉に投入することから燃焼温度が高く、 N_2O 排出量が少ないという特長がある（流動床式焼却炉は脱水汚泥を直接燃焼させる方式が主流であり、ストーカ式焼却炉と同等の高温燃焼を実現して N_2O を低減するためには汚泥の乾燥設備の追加や廃熱回収方式の変更など既存システムの大幅な改修が必要となる）。下水道機構の報告では、一般的なストーカ式焼却炉における N_2O 排出係数（焼却した汚泥量あたりの N_2O 排出量）は流動床式焼却炉の10分の1程度である²⁾。一方で、高温燃焼は窒素酸化物（以下、 NO_x と記す）を生成しやすいため、 NO_x 排出量が増加する傾向にある。ストーカ式焼却炉で汚泥を焼却すると排ガス中の NO_x 濃度は最大170 ppm程度となり²⁾、大気汚染防止法に基づく排出基準値である250 ppmを上回ることはないものの、環境負荷低減の観点からは NO_x 低減技術の導入が求められる。

当社はこれまでにストーカ式焼却炉排ガス中の NO_x 低減を目的として、低空気比燃焼法および燃焼排ガス再循環法（以下、EGRと記す）に着目し、その開発を進めてきた。EGRは、排ガス処理後の燃焼排ガスを焼却炉内へ吹込む方法であり、低温かつ酸素濃度の低い排ガスを炉内に供給することで、局所的な高温燃焼を抑制して高温領域を縮小させるとともに、低空気比燃焼により生じた還元性ガスとの混合攪拌を促進して還元ゾーンを拡大し、 NO_x の生成・分解の両面から排ガス中の NO_x 濃度を低減することができる。既報¹⁾では、実際の施設における実証試験でEGRによる NO_x 低減効果を確認し、低空気比燃焼法との組み合わせにより、空気比1.22にて NO_x 濃度42 ppm-dry ($O_2=12\%$ 換算)まで低減可能であることを報告した。

一方、実証試験では炉内各所の温度や流動状態を直接計測することが困難であり、 NO_x 低減メカニズムの詳細な把握には限界がある。しかしながら、近年は計算機の高性能化にともない、焼却炉内の複

雑な燃焼ガス流動・燃焼状態をシミュレーションにより把握できるようになってきた。このようなシミュレーションを活用することで、実炉では把握が困難な炉内の温度分布やガス流動を詳細に可視化でき、 NO_x 低減メカニズムの考察に役立てることができる。さらに、実測データとの比較によりシミュレーションモデルの妥当性が検証されれば、新設炉の設計開発段階においてEGRの再循環排ガス供給位置の最適化が机上検討で可能となり、設計開発の大幅なスピードアップが期待できる。

本稿では、既報¹⁾の実証試験における運転条件を対象としてシミュレーションモデルを構築し、実測された NO_x 低減効果の再現性を検証するとともに、炉内の温度分布および燃焼ガス流動の解析から NO_x 低減メカニズムの解明を図った。

2. 実証試験

シミュレーションの対象は既報¹⁾の実証試験とした。試験は札幌市西部スラッジセンター3号炉で実施されており、その施設の概要を表1に示す。本施設では、蒸気間接加熱型汚泥乾燥機より排出された含水率30~40%-wetの乾燥汚泥をストーカ式焼却炉にて燃焼させている。焼却炉の概略図を図1に示す。本炉は乾燥エリア、燃焼エリアの2ユニットのストーカから構成され、乾燥エリアの上流から汚泥を供給するとともに、各エリアのストーカ下部から一次燃焼空気を、燃焼室上部から二次燃焼空気を供給する。本稿では表2に示す既報の実証試験における三つの運転条件についてシミュレーションとの比較をおこなった。なお、既報¹⁾の実証試験は多数の運転条件で実施されており、本稿で取り上げる三条件には既報に掲載されていない条件も含まれる。Case 1はEGRを採用しないベース条件、Case 2およびCase 3はEGRにおける再循環排ガスを炉内の

表1 下水汚泥焼却設備の概要

| | |
|---------|----------------------------------|
| 脱水汚泥処理量 | 100 t/日 |
| 炉投入汚泥量 | 45 t/日 (含水率40%-wet) |
| 乾燥設備 | 蒸気間接加熱型汚泥乾燥機 |
| 燃焼設備 | ストーカ式焼却炉 |
| 熱回収方式 | 廃熱ボイラー |
| 排ガス処理設備 | マルチサイクロン式集塵機 排煙処理塔 湿式電気集塵機 |

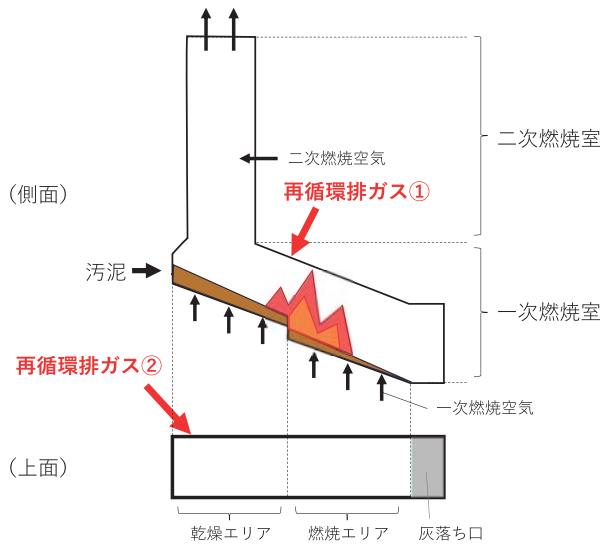


図1 汚泥焼却炉の概略図

表2 運転条件

| | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
|-------------|--------|--------|--------|
| 再循環排ガス 供給位置 | なし | ① | ② |
| 再循環排ガス 循環率 | 0% | 10% | 10% |
| 総空気比 | 1.4 | 1.3 | 1.3 |

異なる位置から供給した条件である。再循環排ガスの供給による混合攪拌の効果で低空気比運転が可能となるため、Case 2 および Case 3 では Case 1 に比べて総空気比が低い条件となっている。

3. シミュレーションモデル

3.1 シミュレーションモデルの概要

実証試験を模擬したシミュレーションでは、汚泥の熱分解により発生するガス成分が炉内で燃焼すると仮定し、気相燃焼のみを考慮したモデルを作成した。熱分解ガスの組成は、汚泥の投入量および元素分析結果に基づいて決定した。実炉ではストーカの間隙から一次空気が流入することから、ストーカユニットごとに熱分解ガスと一次燃焼空気の流入境界を交互に配置した。計算格子にはポリヘドラルメッシュを採用し、総メッシュ数は約 57 万とした。

3.2 物理モデル

シミュレーションには Ansys® Fluent® を使用し、表 3 に示す物理モデルを適用した。乱流モデルには SST k- ω モデルを採用した。SST k- ω モデルは壁面近傍では k- ω モデル、主流域では k- ϵ モデルの

表3 シミュレーション設定

| 時間 | 定常 |
|-------|-----------------------------|
| 乱流モデル | RANS, SST k- ω |
| 燃焼モデル | 有限速度/渦消散モデル (総括反応) |
| 輻射モデル | DO (Discrete Ordinates) モデル |

特性を持ち、広い流速範囲で予測精度が高いことから、複雑な循環流をとまなう本シミュレーションに適している。燃焼モデルには有限速度/渦消散モデルを採用し、総括反応により燃焼反応を表現した。輻射モデルには DO (Discrete Ordinates) モデルを採用した。DO モデルは輻射伝達方程式を離散方向について解くモデルであり、高温の燃焼ガスや火炎からの輻射伝熱を考慮できる。

3.3 NO_x モデル

NO_x シミュレーションは、Ansys® Fluent® に搭載の NO_x モデルを用いたポスト処理によって計算した。NO_x の生成経路として、燃料中の窒素分由来するフューエル NO_x、高温場での窒素と酸素の反応によるサーマル NO_x、および炭化水素ラジカルを経由するプロンプト NO_x の 3 種類を考慮し、NO_x の主成分である NO の生成量を評価した。

4. シミュレーション結果および実証試験との比較結果

4.1 炉出口 NO_x 濃度の比較

図 2 に、実証試験およびシミュレーションにおける炉出口 NO_x 濃度を示す。実証試験では、EGR を適用していない Case 1 で NO_x 濃度が 117 ppm (O₂ = 12% 換算) であったのに対し、再循環排ガスを供給した Case 2 では 92 ppm、Case 3 では 49 ppm ま

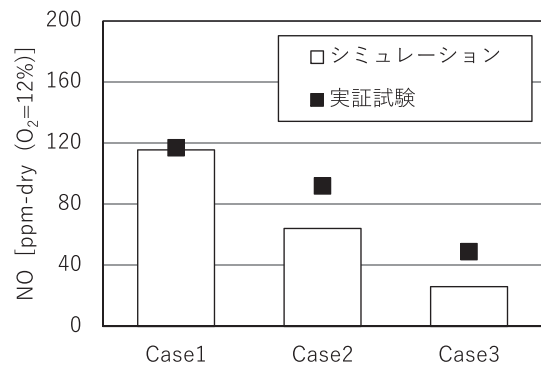


図2 炉出口における NO_x 濃度の比較

で低減し、最大 58% の NO_x 低減効果が得られた。シミュレーションにおいても、Case 1 に対して Case 2, Case 3 で段階的に NO_x 濃度が低下する結果が得られ、実証試験の傾向を良好に再現した。これにより、傾向算出における本モデルの妥当性が示された。以下、EGR による NO_x 低減メカニズムについて、炉内温度低下による NO_x 生成抑制、混合促進による NO_x の還元反応強化、の二つの観点から考察する。

4.2 炉内温度低下による NO_x 生成抑制

一般に、燃焼温度の上昇にともなう NO_x 生成量の増加は、1,200~1,300℃ 以上の温度域でサーマル NO_x の発生が急増することが原因として説明される。一方で、1,000℃ 未満の温度域で検証した既往研究³⁾において、燃焼温度が高くなるほどフューエル NO_x の生成量についても増加することが報告されている。そのため、燃焼温度が 800~1,100℃ 程度である汚泥焼却炉においても、燃焼温度の低下に

よって NO_x 生成が抑制されることが期待される。図 3 に炉内温度のシミュレーション結果を示す。EGR を適用していない Case 1 では燃焼エリアから二次燃焼室にかけて広く高温領域が存在している。これに対し、EGR による再循環排ガスを供給した Case 2, Case 3 では二次燃焼室の温度が低下している。また、Case 2 と Case 3 を比較した場合、Case 2 は乾燥エリアに再循環排ガス供給による高温領域が見られるが、Case 3 では乾燥エリアの温度も低く抑えられた。そこで、炉内温度が 1,000℃ 以上の領域を高温領域と定義し、Case 1~Case 3 の条件で高温領域の体積を比較した。図 4 に、Case 1 における高温領域の体積を 100% として高温領域の体積を比較した結果を示す。高温領域の体積は Case 1, Case 2, Case 3 の順に減少しており、NO_x 排出量の減少と同様の傾向を示した。このことから、再循環排ガス供給により炉内高温領域が縮小し、NO_x 生成量が低減されたものと考えられる。

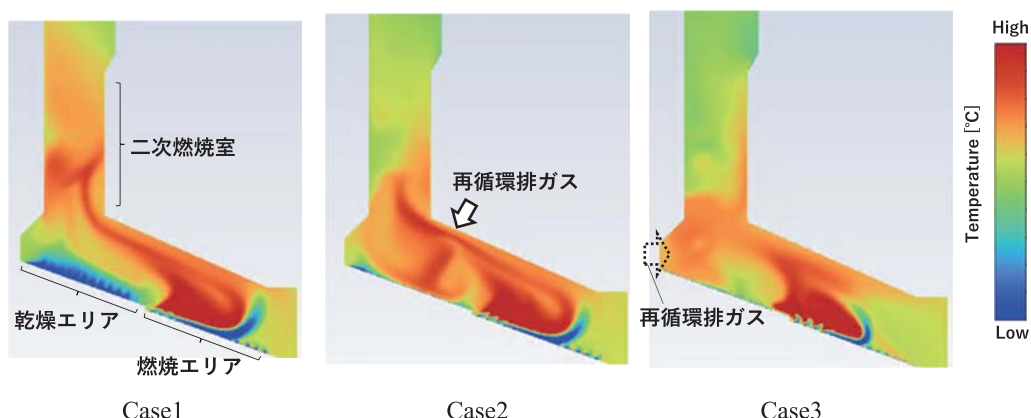


図 3 シミュレーション結果 (炉内温度)

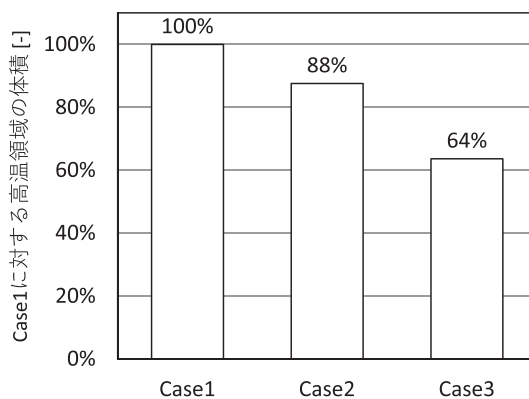


図 4 高温領域 (≥1,000℃) の体積の比較

4.3 混合促進によるNO_xの還元反応強化

次にNO_xの還元反応について考察する。焼却炉におけるNO_x還元反応として、生成されたNO_xが乾燥エリアから発生する一酸化炭素(CO)、シアニ(HCN)、アンモニア(NH₃)等の還元性ガスと混合されることで窒素ガスに還元され、排出NO_x濃度が低減することが知られている。ストーカ式汚泥焼却炉においては還元性ガスとNO_xの生成位置が異なるため、両者の混合促進がNO_x低減に重要な役割を果たす。

図5は各運転条件でのストーカ面からの燃焼ガス流れのシミュレーション結果を示しており、上段が側面断面図、下段が俯瞰図である。Case 1は、乾燥エリアと燃焼エリアから発生した燃焼ガスが層状に流れ、十分な混合がおこなわれなまま二次燃焼室へ流入している。一方、Case 2では炉天井からの再循環排ガス供給により乾燥エリアでのガス混合が促進されている。最もNO_x濃度が低かったCase 3では、側壁からの再循環排ガス供給により一次燃焼室全体で強い循環流が形成され、より均一な混合状態が確認された。NO_xの還元反応は酸素が希薄な場において効率的に進行するとされており⁴⁾、酸素希薄な一次燃焼室内で再循環排ガスによってNO_xと還元性ガスが混合攪拌されたことでNO_xの還元が促進され、最終的なNO_x排出量の低減につながったものと推察される。以上より、再循環排ガスの供給位置の違いによるガス混合状態の変化がNO_x低減に寄与していることが、シミュレーション結果から示唆された。

5. ま と め

本稿では、既報¹⁾の実証試験で得られたストーカ式汚泥焼却炉におけるEGRによるNO_x低減効果について、シミュレーションによる再現および炉内現象の詳細解析をおこない、以下の知見を得た。

- (1) 構築したシミュレーションモデルは、実証試験における再循環排ガスの供給位置の違いによるNO_x濃度の低減傾向を良好に再現し、傾向把握における本モデルの妥当性が示された。
- (2) 炉内温度分布のシミュレーション結果から、再循環排ガス供給により高温領域が縮小し、NO_x生成量が低下することを確認した。
- (3) ガス流動のシミュレーション結果から、再循環排ガスの供給位置の違いにより炉内の循環流の形成状態が異なり、NO_xと還元性ガスの混合促進の程度がNO_x排出量に影響することが示唆された。

今後は、実機検証を通じてシミュレーション精度のさらなる向上を図るとともに、シミュレーションを活用した机上検討を充実させることで、実試験の削減による設計開発期間の短縮およびコスト削減を実現していく。さらに、本技術の実装を加速させることで、下水汚泥焼却にともなう温室効果ガスおよびNO_x排出量の低減を通じた社会課題への貢献を目指していく所存である。

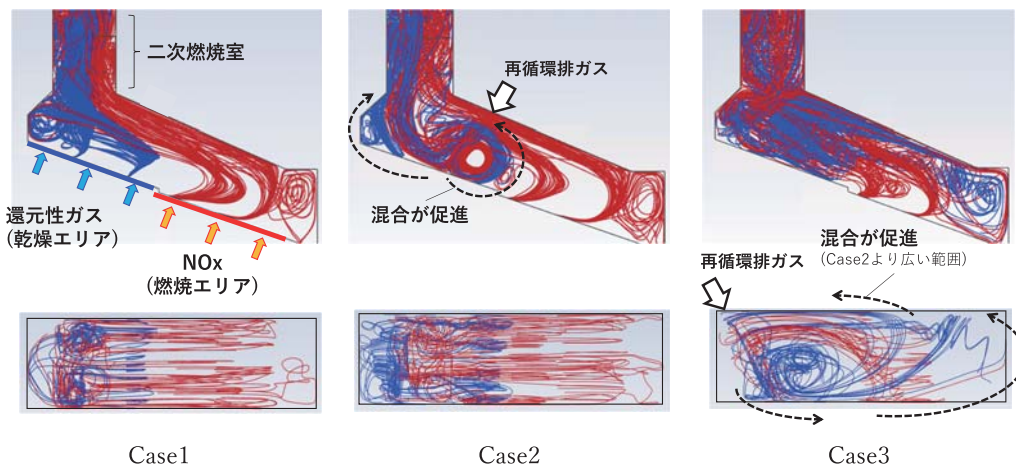


図5 シミュレーション結果(汚泥の燃焼ガス流れ)

参 考 文 献

- 1) 村岸弘基，中西 譲，水野孝昭，株丹直樹：階段式汚泥焼却炉における窒素酸化物の低減方法の検討（その2），タクマ技報，Vol. 27, No. 2, pp. 39-44（2019）
- 2) 日本下水道新技術機構：汚泥焼却炉からの N₂O 削減に関する技術資料，pp. 31-35（2012）
- 3) 安田憲二，大塚幸雄：都市ごみの焼却にともなう窒素酸化物の排出挙動 実験用焼却炉による基礎的研究，廃棄物学会論文誌，Vol. 8, No. 5, pp. 217-224（1997）
- 4) 環境省ほか：窒素酸化物排出削減対策技術の導入に係るガイドライン，p. 66（2024）