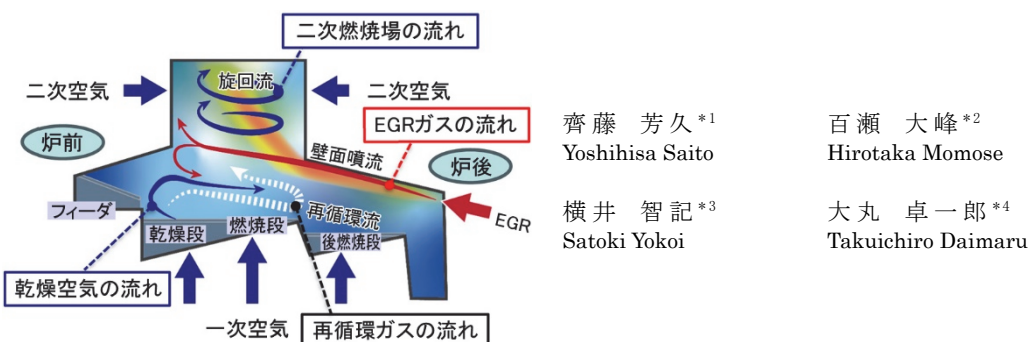


ごみ焼却ストーカ炉における超低 NO_x 燃焼技術の実証

Development of Ultra-Low NO_x Combustion Technology in Stoker Incinerator



齊藤 芳久*¹
Yoshihisa Saito

百瀬 大峰*²
Hirotaka Momose

横井 智記*³
Satoki Yokoi

大丸 卓一郎*⁴
Takuichiro Daimaru

ごみ焼却施設では環境負荷低減の観点から NO_x 排出の低減が求められており、ストーカ式焼却炉では低 NO_x 化のため排ガス再循環と無触媒脱硝を組み合わせている。脱硝薬剤費用低減に向け新規排ガス再循環ガス投入法による低 NO_x 燃焼システムを開発した。本システムでは、排ガス再循環ガスにより一次燃焼場に再循環流を形成し還元領域を拡大する。また、二次燃焼場に旋回流を形成し完全燃焼を促進することで全空気比を低減する。本システムを用いて発生 NO_x を従来と比べて半減したため、その概要について報告する。

1. はじめに

ごみ焼却施設では環境負荷低減の観点から NO_x 排出の低減が求められており、三菱重工環境・化学エンジニアリング株式会社(以下、当社)のストーカ式焼却炉においては、NO_x 発生抑制技術として排ガス再循環(Exhaust Gas Recirculation 以下、EGR)、除去技術として触媒脱硝(Selective Catalytic Reduction 以下、SCR)や無触媒脱硝(Selective Non-Catalytic Reduction 以下、SNCR)を組み合わせ、各自治体のニーズに応えてきた。この度、さらなる環境負荷、脱硝薬剤費低減に向け新 EGR ガス投入法による低 NO_x 燃焼システムを開発した。

本報では、開発した低 NO_x 燃焼システムの概要と実機ごみ焼却プラントにおける実証事例を示す。

2. 新低 NO_x 燃焼システムの特徴

一般にごみ中の N 成分由来で発生する Fuel NO_x を抑制するためには、二段燃焼法が用いられる。これは、ごみ層直上の一次燃焼領域を還元燃焼場とし NO_x の排出を抑制しつつ、二次燃焼領域を酸化燃焼場とし未燃分やダイオキシンを排出しないように完全燃焼する燃焼法である。

本低 NO_x 燃焼システムでは、EGR により一次燃焼領域と二次燃焼領域のガスの混合を強化し、二段燃焼法が高効率化されるように 3 つの流れを形成するところに特徴がある。図 1 に概略を示す。

(1) 壁面噴流形成

従来の EGR システムでは二次空気の下方向に幅方向に複数のノズルを設けて乾燥段-燃焼段の上方で合流するように EGR を投入していた。新低 NO_x 燃焼システムでは、EGR ノズルを集約し大径の EGR ノズルを炉後に設置、天井に沿って流れるような角度で投入することで、

*1 三菱重工環境・化学エンジニアリング株式会社 エンジニアリング統括部 プロジェクト部 次長 技術士(衛生工学部門)

*2 三菱重工環境・化学エンジニアリング株式会社 エンジニアリング統括部 プロジェクト部

*3 三菱重工工業株式会社 総合研究所 エコシステム研究推進部 博士(工学)

*4 三菱重工工業株式会社 総合研究所 エコシステム研究推進部 主席研究員 技術士(機械部門)

噴流が壁面噴流化し扁平することで流れがシート状になる。これにより、ノズル間のガスのすり抜けを抑制して、 NO_x を還元する役割を持つごみ中の N 成分由来の揮発性ガスを伴った未燃ガスをより多く一次燃焼域に留めて NO_x 還元を促進できる。

(2) 再循環流形成

大径 EGR ノズルから投入された噴流の持つ貫通力により、乾燥段上方のガスの流れが遮られることで炉内に再循環流が形成される。ごみの熱分解反応により発生した揮発分を再循環流に同伴させ、EGR 流によって炉前まで押し出すことで、一次燃焼域に広く還元領域を形成することができる。特に、乾燥段に投入している空気由来の O_2 は炉前側で余りやすく、この O_2 と揮発分の混合を再循環流により促進することで、 NO_x の発生抑制・還元による分解が期待できる。

(3) 旋回流形成

二次燃焼域の中心軸に対して偏心して EGR を投入することで旋回流を形成する(後述の図 2(a)の流線も参照のこと)。旋回流により二次燃焼域におけるガスの混合を促進することで、少ない空気であっても完全燃焼することができ、全空気比を低減できる。全空気比を低減すると、二次燃焼域での NO_x 発生も抑制されるため、低 NO_x 効果も得られる。また、排ガス持出損失熱を低減できるため、発電効率の向上が期待できる。

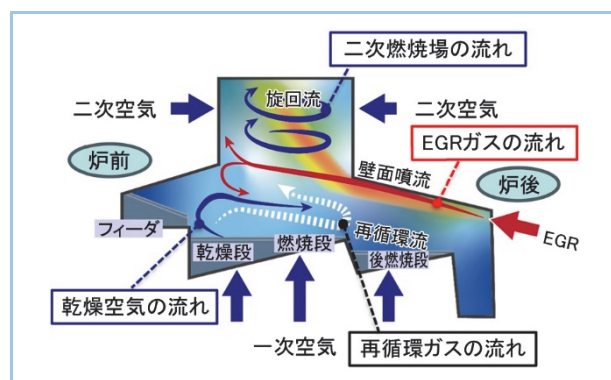


図1 EGR ガス流れの概略図

3. 燃焼 CFD による評価

実機検証に先立ち、数値シミュレーション解析(Computational Fluid Dynamics 以下、CFD)による評価を実施した^{(1), (2)}。

図 2 に本低 NO_x 燃焼システムを想定した低 NO_x 燃焼条件と EGR ノズル角度を水平に近づけたノズル角度減条件における流線の CFD 解析結果を示す。図 2(a)から低 NO_x 燃焼条件では前述した特徴的な流れ場を流線でも確認することができる一方、図 2(b)からノズル角度減条件では EGR 流と炉前ガスが干渉するため再循環流が形成されず一次燃焼域における滞留時間増加効果が見込めなかった。このことから、ノズル角度は上向きとして壁面噴流が形成されるように設定することが重要であると評価した。

図 3 に CFD 解析によって得られた低 NO_x 燃焼条件の NO_x 濃度及び NO_x 反応速度分布を示す。まず、 NO_x は、乾燥段上方においてごみが熱分解されて発生する揮発分量と比較して空気量が多いため、同領域で燃料中 N 分が酸化されて発生する。次に、この発生した NO_x と EGR 流に同伴して流れてきた還元性ガスが混合されることで二次空気投入位置以下の空間で還元される。最後に、旋回流の攪拌混合効果によって未燃ガスの完全燃焼を促進できるため、二次空気比を下げることができ、二次燃焼域において NO_x はほとんど発生しない。これらによって、出口 NO_x 濃度を低減できると予想した。

図 4 に CFD 解析と後述の実機検証における出口 NO_x 値の比較結果を示す。縦軸は従来条

件の実機結果との比として無次元化している。なお、従来条件の実機結果のみ、実機で消費していた薬剂量から SNCR による脱硝率を仮定して推算した発生 NO_x 値である。図 4 のように、解析結果は定量的にも実機結果を良好に予測することができており、有効性を示した⁽³⁾。

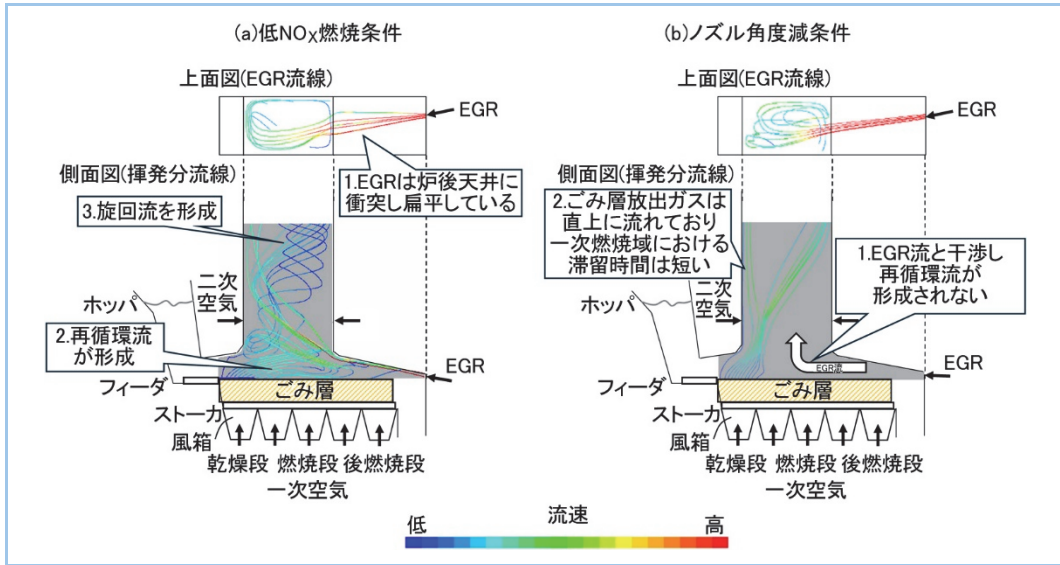


図2 流線の CFD 解析結果

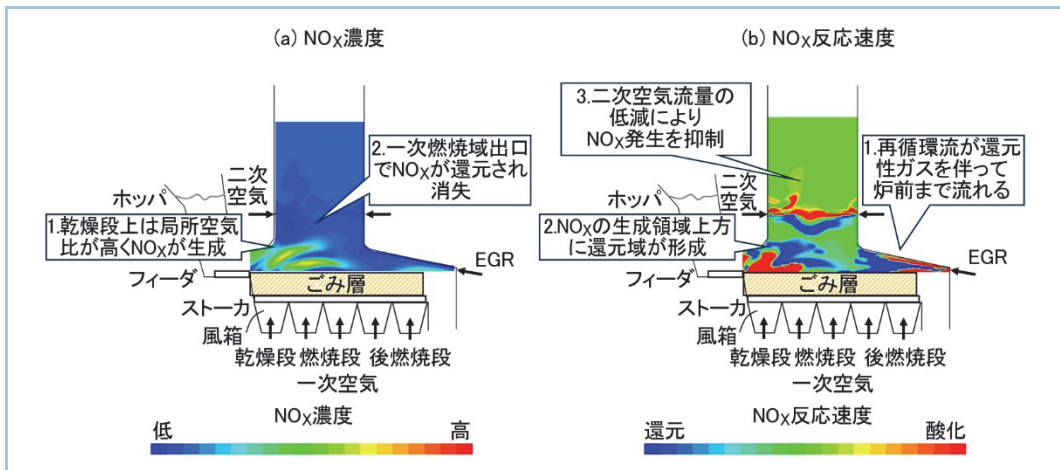


図3 NO_x 濃度及び NO_x 反応速度の CFD 解析結果

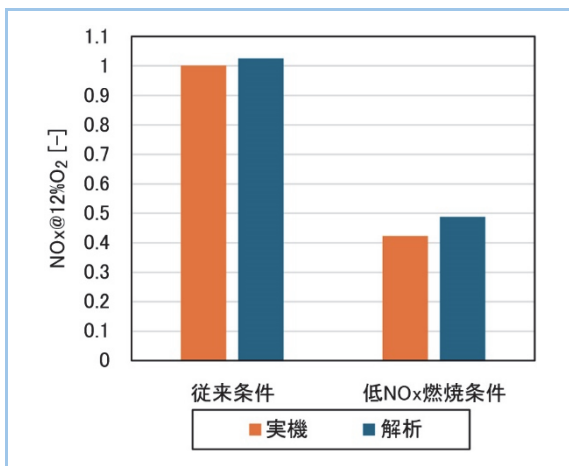


図4 実機データと解析結果の定量比較

4. 実機改造・検証

実機実証では既設炉の炉後部に EGR 配管及びノズルを追設した(図 5)。工事にあたっては、追設配管向けにダクトルート設計やダクト圧損評価等を実施した。CFD 解析により評価した低 NO_x 燃焼条件の達成に向けて十分な流量が得られることを推算した配管径とプラント空間を勘案して、最終的な配管を選定した。追設した EGR 配管には流量計とダンパを設置し、中央制御室の制御システムから流量変化の確認及び、遠隔自動でダンパを開閉できるようにした。

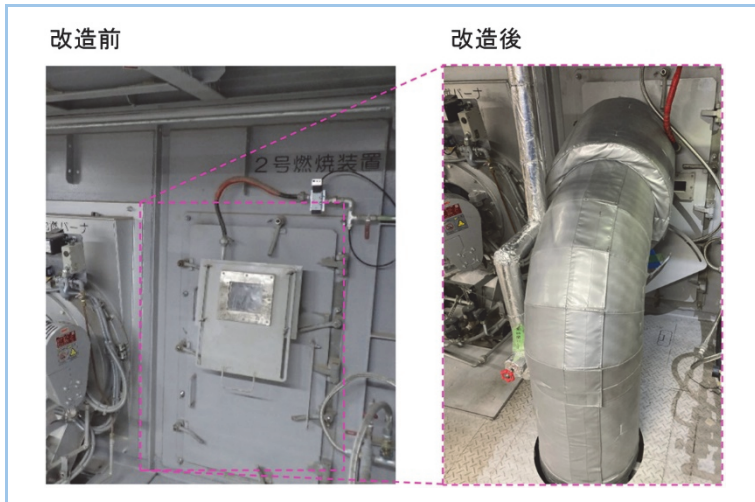


図5 追設工事により設置した EGR ノズル外観

CFD 解析で確認した流れ場が実機において形成されることを確認するため、ごみ層上の火炎を上方から耐熱ボアスコープカメラを用いて動画撮影し観察した。図 6 に従来運転時と低 NO_x 燃焼運転時の火炎画像をそれぞれ示す。白点線枠は目安として前後壁が一次燃焼域天井と接する位置(一次燃焼域出口付近)を表している。図 6(a)から、ごみ層を上部から見て、従来運転では輝炎(高輝度領域)がごみ流れ方向の一部に偏在している一方、図 6(b)から低 NO_x 燃焼運転では輝炎がごみ流れ方向に伸長し、かつ白点線枠内全体が薄く色づいている。これは、低 NO_x 燃焼運転時には EGR 流により再循環流が形成されている影響で、ごみ層に付着した火炎の上に再循環した燃焼ガスが層を成しているためである。また、画像では評価が難しいものの、動画では図 6(b)の左上隅の薄黄色の領域が回転するような動きをしており、旋回流が形成されることを確認できた。以上から、CFD 解析で予想した流れ場が形成されていると評価した。

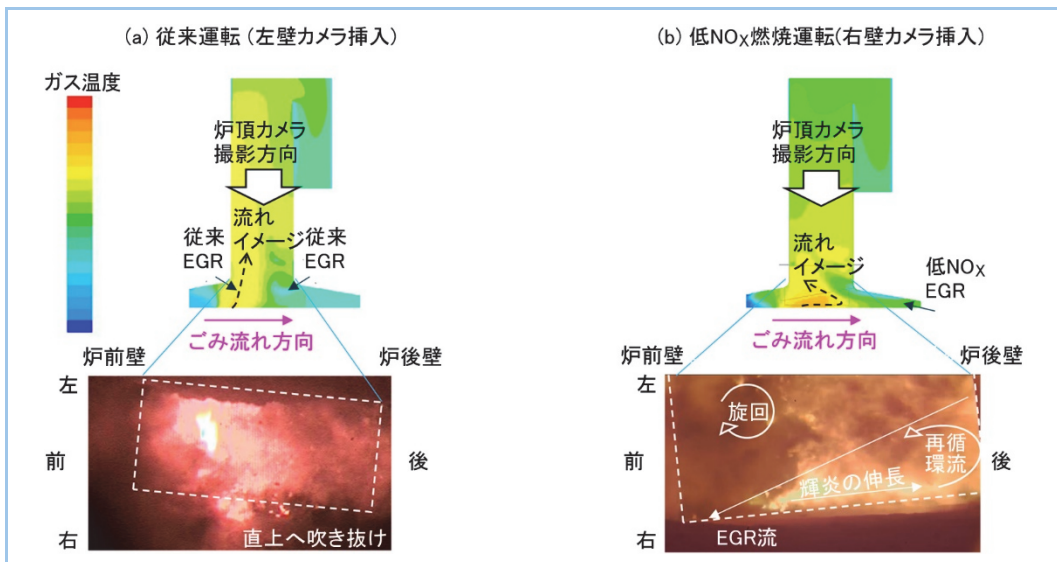


図6 炉内燃焼状況

表1, 図7に従来運転時と低 NO_x 燃焼運転時における約6か月の長期検証の結果を示す。ここで、従来運転時は脱硝薬剤を使用した SNCR 込みの NO_x である一方、低 NO_x 燃焼運転時は SNCR 不使用であり、煙突入口 NO_x を燃焼による発生 NO_x とみなすことができる。

表1から、CO 同等以下で発生 NO_x が 30ppm レベルの運転が継続できており、従来運転時における SNCR の脱硝率は約 20%と想定されることから、発生 NO_x は CFD 解析のとおり半減できたと評価した。本低 NO_x 燃焼システムでは、EGR 流により形成された再循環流及び旋回流によって炉内ガス攪拌性が向上しており、燃焼の安定につながっている。これによって、燃焼が不安定化した時に現地運転員により実施している手動介入操作の回数を従来運転と比較しておよそ半減することができた。また、全空気比低減によりファンの消費電力を従来運転と比較して約 5%抑制できた。

図7から長期検証期間中は季節的なごみ質の変化や、施設の操炉計画による負荷調整があっても低 NO_x 燃焼を継続可能であることを示した⁽⁴⁾。

表1 長期運転検証結果

		従来運転	低 NO _x 燃焼運転
運転日数	[日]	196	180
蒸発量 ^{※1}	[t/h]	8.0	8.4
焼却負荷率	[%]	80~100	78~100
低位発熱量	[MJ/kg]	8.7~11.0	9.0~11.0
ボイラ出口 O ₂ 濃度 ^{※1}	[wet%]	3.7	2.4
全空気比想定値 ^{※2}	[-]	1.33	1.20
煙突入口 NO _x ^{※3}	[ppm-dry]	56	33
煙突入口 CO ^{※3}	[ppm-dry]	6.1	3.9
脱硝薬剤流量 ^{※1}	[L/min]	17.6	0.0
手動操作回数比 (低 NO _x 燃焼運転/従来運転)	[-]	-	0.46
ファン消費電力量比 (低 NO _x 燃焼運転/従来運転)	[-]	-	0.94

※1 運転日数における日平均, ※2 排ガス中水分 30%想定, ※3 酸素 12%換算

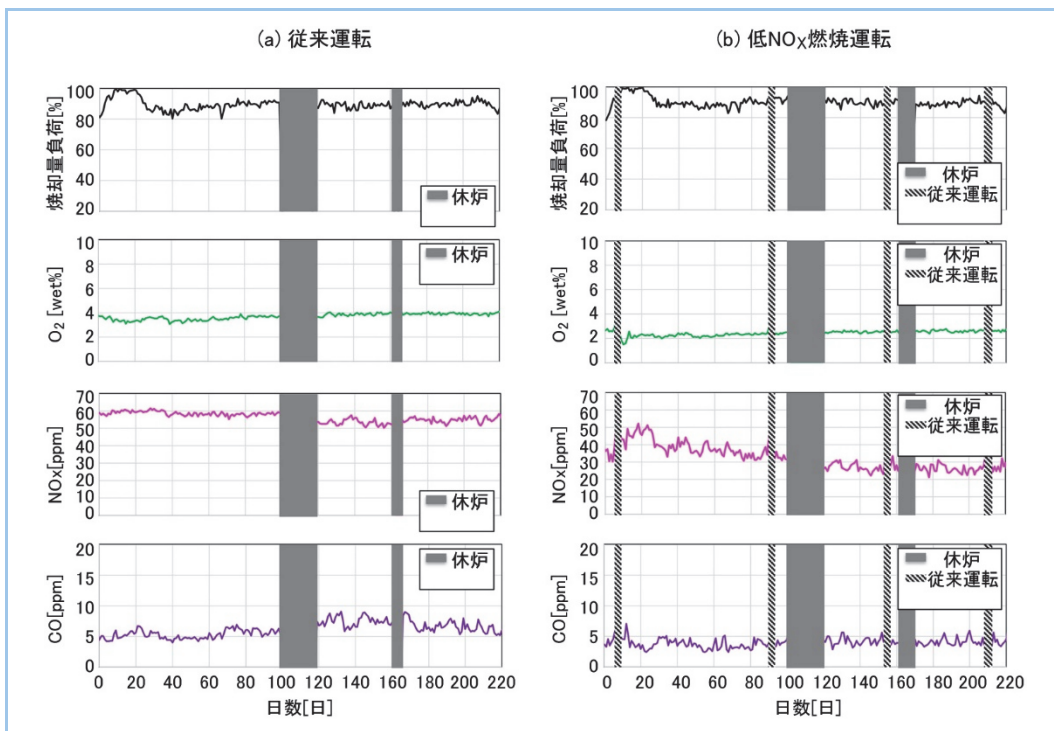


図7 長期トレンドデータ(日平均値)

5. まとめ

ストーカ式焼却炉の後部から EGR ガスを投入し、炉内に再循環流と旋回流を形成することで、安定して NO_x・CO を同時低減する低 NO_x 燃焼システムを開発し、以下の成果を得た。

- ・ 発生 NO_x を 30ppm レベルと従来運転から半減できた。
- ・ 180 日にわたる長期運転データより、季節的なごみ質の変化や焼却炉負荷の変更に対しても低 NO_x 燃焼を継続可能であることを示した。
- ・ 炉内ガス攪拌性の向上により安定燃焼に寄与することができ、従来運転と比較して手動介入回数をおよそ半減できた。

今後、自動運転システムとの組み合わせにより、さらなる省力化・省電力化・低環境負荷化を達成するべく開発を鋭意推進する所存である。

参考文献

- (1) 横井智記ほか, 排ガス再循環を用いた中小型ストーカ炉における低 NO_x 燃焼技術の開発, 第 36 回廃棄物資源循環学会 研究発表会講演集 (2025) D2-5-O
- (2) 横井智記ほか, 再循環流と旋回流を活用したストーカ式焼却炉の低 NO_x 燃焼システムの開発, 第 63 回 燃焼シンポジウム講演論文集 (2025) D112
- (3) 横井智記ほか, プラントの低 NO_x 化改造への CAE 活用事例の紹介, 第 47 回全国都市清掃研究・事例発表会論文集 (2026) II-4-94
- (4) 百瀬大峰ほか, 排ガス再循環を用いたストーカ炉における低 NO_x 燃焼技術の開発, 第 47 回全国都市清掃研究・事例発表会論文集 (2026) II-4-92