

焼鈍炉用環境調和型高効率ラジアントチューブバーナの 開発

Development of Environmentally Friendly High-efficiency Radiant Tube Burner for Annealing Furnace

岡田 邦明 OKADA Kuniaki JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) エネルギー部 エネルギー技術室 主任部員 (副部長)

要旨

ガス燃料を使用する工業炉における CO₂ 削減アイテムとして、蓄熱式バーナの採用が広く知られているが、製鉄所 2 次ミルの焼鈍炉は多数のバーナを有しているため、高額な蓄熱式バーナはなかなか導入しづらい側面がある。そこで JFE スチールでは、国内トップクラスの超低 NO_x ラジアントチューブ (RT) バーナを開発し、焼鈍炉に活用することで排熱回収効率を向上し、一層の CO₂ 削減 (省エネ) 操業を実現した。本稿では、特に新開発ラジアントチューブバーナの超低 NO_x 技術についてご紹介する。

Abstract:

It is widely known that the adoption of regenerative burners to reduce CO₂ emissions in industrial furnaces using gas fuel, but it is difficult to introduce expensive regenerative burners in many burners in annealing furnaces of cold-rolling line in a steel works. Therefore, JFE Steel developed a top-class ultra-low NO_x radiant tube (RT) burner in Japan and improved the waste heat recovery efficiency by utilizing it in the annealing furnace, and achieved a further CO₂ reduction (energy saving) operation. In this paper, we will introduce the ultra-low NO_x technology of the newly developed radiant tube burner.

1. はじめに

現在、鉄鋼製品に対する品質要求はますます高度化している。代表的なものは、自動車用鋼板、家電製品用鋼板等であり、近年の最重要の課題として、特に自動車の軽量化による燃費改善に大きく寄与する、自動車用鋼板の高強度化が挙げられる。お客様の要求の高度化、高級品種の生産比率増加に伴い、焼鈍工程における品質の作り込みは、薄板冷延鋼板、表面処理鋼板の競争力を左右する重要なプロセスとなっている。品質の作り込みにあたっては連続焼鈍における鋼板のヒートパターン (加熱・冷却温度履歴) が極めて重要であり、そこで使われる加熱用バーナにも適正な性能が求められる。本稿では連続焼鈍炉用ラジアントチューブ (RT) バーナの省エネに関する技術開発について詳細を説明する。

2. RT バーナの概要と省エネ・低 NO_x 化の 必要性

まず図 1 に連続焼鈍ラインを示す。冷延薄板を製造する製造工程では、薄板をコイル状に巻いてハンドリングする。

冷間圧延後のコイルは、加工 (塑性変形) により硬化しており、軟化させるために焼鈍を行う。焼鈍は製品の品質を作り込む上で非常に重要なプロセスである。冷延コイルの連続焼鈍プロセスは、コイル状の薄板を巻き戻し、次々に溶接しながら、加熱・均熱・冷却する工程からなる連続焼鈍炉を通過させ、ふたたび巻き取るものである。

焼鈍炉における薄板の加熱・冷却時には、鋼板表面の酸化を防止するため、無酸化還元雰囲気 (H₂, N₂ 雰囲気) で処理する必要がある。そこで一般的に、加熱に用いられる製鉄所副生ガスの燃焼排ガスと鋼板が直接接触しないように、輻射管 (ラジアントチューブ) 加熱方式のバーナが用いられる (図 2a)。

この連続焼鈍炉は、年間 200 GJ もの熱量を消費するエネルギー消費設備であることから、燃焼排ガスにおける環境

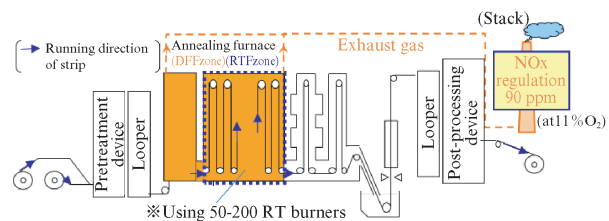


図 1 連続焼鈍ラインの概要

Fig. 1 Outline of continuous annealing line

2023 年 9 月 12 日受付

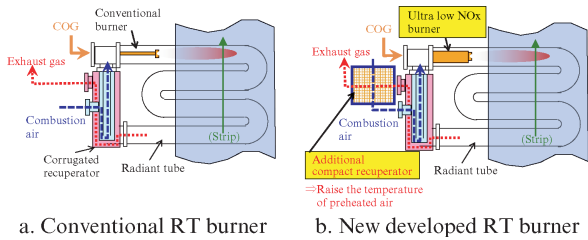


図2 従来および開発ラジアントチューブバーナ模式図
Fig. 2 Schema of conventional and new developed RT burner

上の課題として、以下の2点が挙げられる。1つ目は光化学スモッグ等の環境汚染の原因物質となる窒素酸化物排出濃度 (NO_x 濃度) 規制の順守、2つ目は、近年世界的に問題視されている温室効果ガスの主要因である CO₂ の削減である。

一般的に燃焼設備の省エネ (CO₂ 削減) には、排ガス顕熱を再び回収し、空気予熱に利用する方法が取られる。その際、図3に示すように、空気の予熱温度を上げていくと、燃焼反応で生じる火炎温度も上昇し、結果としてサーマル NO_x も増加することから、排ガス NO_x 規制がある中で空気予熱温度には限界があった。そこで、環境規制を遵守しながら省エネ (CO₂ 削減) を実現するためには、低 NO_x 燃焼技術を開発し、さらなる省エネのために空気予熱温度を上昇させても現状の NO_x 値を維持できるバーナシステム (図2b) の実用化が必須であった。

3. ラジアントチューブバーナにおける低 NO_x 化技術の変遷

ラジアントチューブは通常、内部直径 φ150 mm ~ φ180 mm 程度の円筒状であり、長手方向に W 型を成す形状である。狭小空間で燃焼させるため火炎温度が上がりやすく、その構造から低 NO_x 化が困難であった。

以下、ラジアントチューブバーナの低 NO_x 性能の変遷をふまえて、今回開発した環境調和型高効率ラジアントチューブ

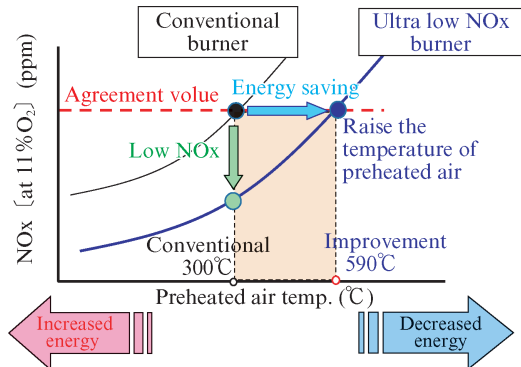


図3 低 NO_x 化による省エネの考え方
Fig. 3 Concept of energy saving by reducing NO_x

バーナの位置付けについて説明する。

従来、製鉄所副生ガスである C ガスを燃料として用いるラジアントチューブバーナでは、NO_x 値は、160 ppm (11% O₂ 換算値) 程度で推移していた。二段燃焼に排ガス再循環を付加するような種々の低 NO_x 燃焼技術を用いても、120 ppm 程度が限界値であった (図4)。

本開発では、自己排ガス再循環燃焼技術を用いて連続燃焼式のラジアントチューブバーナの超低 NO_x 燃焼を実現した。

バーナの省エネを実現するためには、排熱回収を強化し、燃焼用空気の予熱に利用することが必須である。一般に、空気予熱温度を上げると排ガス NO_x 値も上昇するが、今回開発したバーナを用いれば、予熱空気温度を現状から大幅に上げて (320°C → 590°C)、排ガス NO_x 値を上昇させずに燃焼させることができる。なお、本開発バーナは、590°C で燃焼させても EU・米国などと並び NO_x 等の排出物規制が厳しい日本の規制に適合する、国内でトップレベルの低 NO_x 性能である。

4. 開発目標および低 NO_x 化メカニズム

今回開発したラジアントチューブバーナの省エネの目標値は、排熱回収率を現状 24% の 2 倍に相当する 48% に定めた。その際、予熱空気温度および火炎温度上昇に伴うサーマル NO_x 上昇分を超低 NO_x バーナの新規開発により現状 NO_x 値相当まで大幅に低減させる必要があった。

低 NO_x 化の具体的な指針は以下のとおりである。一般的に製鉄所副生ガスを燃焼させる際、発生する NO_x には、燃料中に微量存在するアンモニア等に含まれる N 分由来のフューエル NO_x と、燃焼中に火炎温度の上昇と共に 2 次曲線的に増加するサーマル NO_x の 2 種類がある。フューエル NO_x は、燃料由来であるためバーナの燃焼方法を変えることでは減らすことができない^{1,2)}。そこで、バーナレイアウト

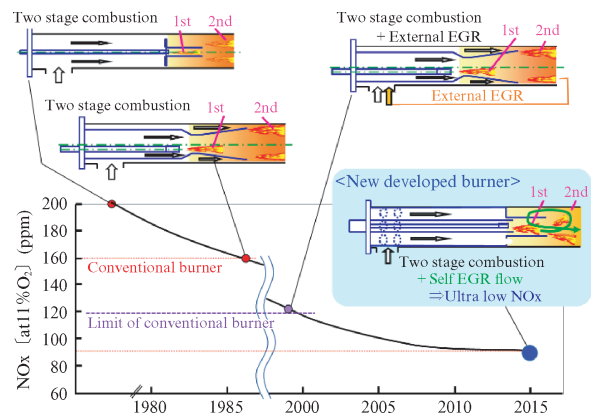


図4 焼鈍炉 RT バーナにおける NO_x 低減技術の進歩
Fig. 4 Advances in NO_x reduction technology for annealing furnace RT burners

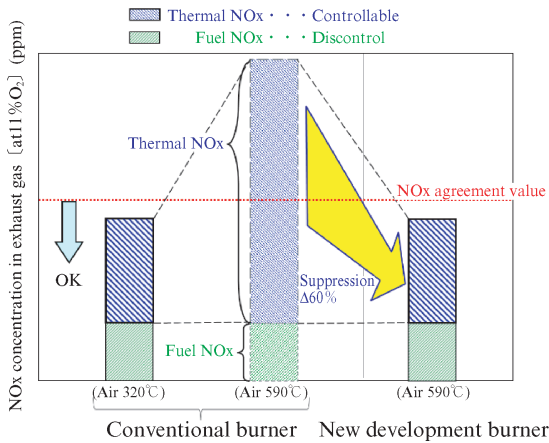


図5 RTバーナの開発目標（サーマルNOx抑制）

Fig. 5 Development target of RT burner (Thermal NOx suppression)

を最適化し、サーマルNO_xを低減することで、従来同様の排ガスNO_x値を維持できる手法を考える必要があった(図5)。

従来のラジアントチューブバーナは、低NO_x対策として、2段燃焼もしくは、2段燃焼に強制排ガス再循環を組み合わせた方式を採用していた。2段燃焼の低NO_x化のメカニズムは、空気比1.0前後のピーク火炎温度域を避けて、未燃領域、過剰エア領域で燃焼させることで火炎温度を低下させ、その結果NO_x発生量を低減させるものである^{1,2)}(図6)。また強制排ガス再循環は、燃焼で発生した排ガスの一部を燃焼エアに混合し、酸素濃度を低下させることで、燃焼時の火炎温度を低下させ、NO_xを低減する手法である^{1,2)}(図7)。

本開発にあたり、ラジアントチューブ内で2段燃焼させながら、その燃焼排ガスがチューブ内の空間で部分的に循環する流れを形成させれば、強制排ガス再循環と同様に火炎温度を低減できるのではないかと考えた。つまり、ラジアントチューブ内での流れを適切にコントロールし、一度燃焼した排ガスが、もう一度流れの上流側に戻る、“自己排ガス再循環流”を形成させればよいということである。そのために、従来の2段燃焼に加え、2次エアノズルを中心に対して偏心設置するとともに、2次エアノズル形状の設置角度 θ 、ノズル中心直径PCDの配置、2次燃焼エアノズル流速 V 、燃焼筒長さ L 、その他1次燃焼比率等を最適化し、“自己排ガス再循環流”を最も適切に形成させるバーナレイアウトを見出した。

開発した環境調和型高効率ラジアントチューブバーナ(図8)は、2次燃焼エアを偏心設置することで、従来バーナでは形成されていなかった特殊な燃焼排ガス流れを形成させている。燃焼筒周りに1段階目燃焼排ガスの縦方向回転の戻り循環流を形成させ、自己排ガス再循環作用による、従来を凌駕する低酸素濃度燃焼により火炎温度を低下させ、トップレベルの低NO_x性能を実現した。

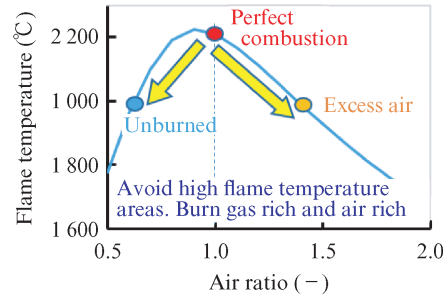


図6 濃淡燃焼による低NOx化の説明

Fig. 6 Explanation of NOx reduction by rich-lean flame combustion

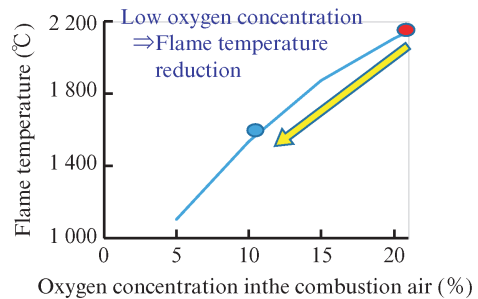


図7 低酸素濃度燃焼による低NOx化の説明

Fig. 7 Explanation of NOx reduction by low oxygen concentration combustion

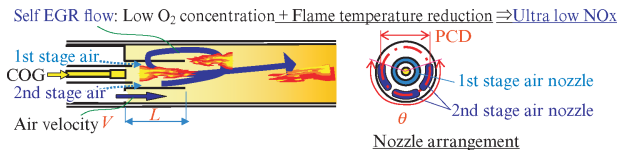


図8 自己排ガス再循環バーナのパラメータ

Fig. 8 Parameters in self EGR burner geometry

5. バーナ燃焼時の挙動（数値解析結果）

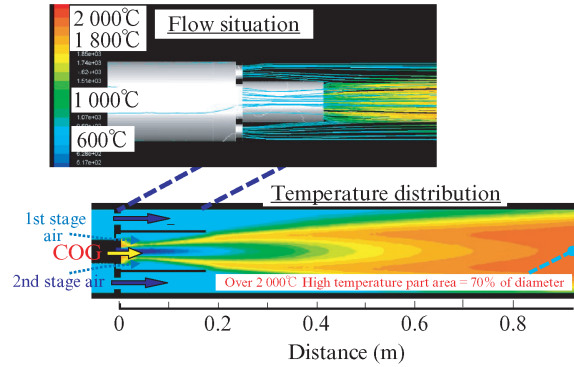
開発したラジアントチューブバーナの燃焼時の挙動を数値解析により明確にした。

図9に示すように、従来の2段燃焼バーナでは、ラジアントチューブの中心軸方向(図の右方向)に、おおむね真っすぐな流れが確認できる。またそれに伴う火炎温度分布を見ると、2次エアの噴射孔から約0.9mの断面で、2000°C以上を示す赤色の部分が直径に対して約70%を占めており、火炎が高温になっていることが見てとれる。

これに対して、今回開発したバーナでは、解析上約30 vol%の流れが逆方向(図の左方向)に旋回する自己排ガス再循環流となることで、2次エアの噴射孔から約0.9mの断面で、2000°C以上を示す赤色の部分が直径に対して約10%程度に減少している。

以上の解析結果から、従来バーナは高温火炎により、温

○Conventional two-stage combustion burner



○Self EGR combustion burner

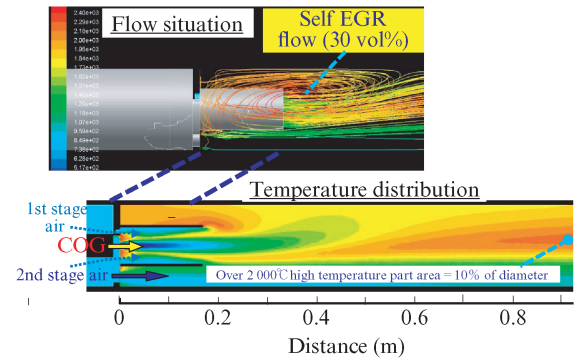


図9 ラジアントチューブバーナの燃焼数値解析結果

Fig. 9 Numerical analysis result of combustion in radiant tube burner

度に起因して二次曲線的に増加するサーマルNO_xがより多く発生するのに対し、開発バーナは自己排ガス再循環流に起因した火炎温度上昇の抑止効果によりサーマルNO_xの発生が抑えられていることがわかった。

6. コンパクトレキュペレータについて

実機導入に当たり、排熱回収率を48%に倍増させるために設置するレキュペレータは、隣接するラジアントチューブ間に配置可能な寸法にすべく、フランジ面間を375mmと短めに設計した。併せて、排熱回収率を倍増できるように、エレメントの伝熱面積を考慮し、表1および図10に示すような形状・仕様で決定した。従来に比べて単位体積に占める伝熱面積を207m²/m³まで向上させ、コンパクト化しながらも性能向上を図っている。またレキュペレータ内のエレメントにまんべんなくエアが通過することを考慮し、特に径の小さいエア配管側は、管をテーパ化することで効率を上げる工夫をしている。なお、コンパクトレキュペレータ内の伝熱エレメントは、COG中の微量硫黄分による腐食を考慮し、耐高温耐酸性の金属を採用することで耐久性を確保している。

表1 レキュペレータ仕様

Table 1 Recuperator spec

	[Newly adopted]	[Conventional]
Recuperator type	Compact	Corrugated
Heat transfer area S	2.46 m ²	1.29 m ²
Volume V	0.0118 m ³	0.036 m ³
S/V	207	35.5
Exhaust heat recovery rate (Single use)	40%	25%

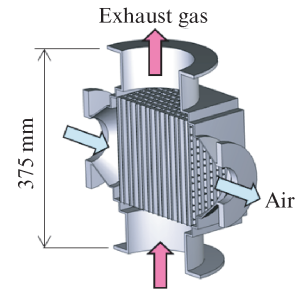


図10 コンパクトレキュペレータ (3Dカット)

Fig. 10 Compact recuperator (3D cut view)

7. 導入状況

開発した環境調和型高効率バーナを、2016年11月に、JFEスチール西日本製鉄所(福山地区)の2つの連続焼鈍ラインに計162基導入した。いずれのラインも、基本仕様として燃料ガスに製鉄所副生ガスであるCガスを用い、燃焼容量11~12万kcal/h、予熱エア温度590°C、目標とする排熱回収率48%を達成している(図11)。その結果、燃料ガス削減率▲12%、CO₂削減18.6kt-CO₂/年に寄与した。また煙突出口における排ガスNO_x値も現状値90ppm以下で推移し、環境性能を維持している。

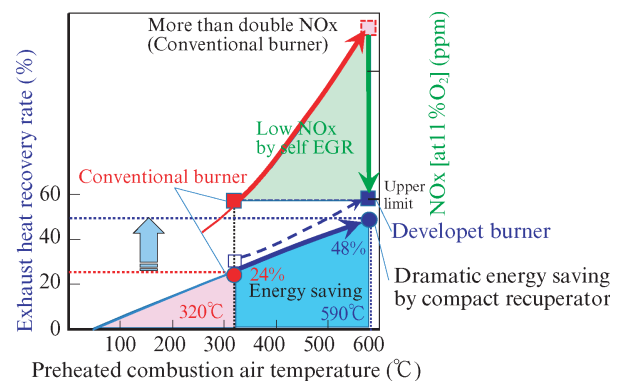


図11 開発RTバーナ適用による省エネおよびNO_x値の成果

Fig. 11 Achievement of energy-saving and NO_x by applying the developed RT burner

8. おわりに

以上のとおり、本稿で紹介した環境調和型高効率ラジアントチューブバーナは現在も順調に稼働しており、狙い通りの環境性能を維持している。今後、必要に応じて他の焼鈍炉への展開を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 新井紀男, 三浦隆利, 宮前茂広. 燃焼生成物の発生と抑制技術. テクノシステム. 1997, 571p. (p. 63-84.)
- 2) 燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構と抑制法. 日本機械学会. 1980, 260p. (p. 74-103.)

謝辞

本研究開発において、共同研究としてバーナの設計・製作で多大なご協力を頂きました日本ファーンレス（株）北原様をはじめ、関係者の方々に深く感謝申し上げます。