

冷延鋼板焼鈍設備用高効率還元バーナの開発

Development of High Efficiency Reduction Burner for Annealing Furnace for Cold Rolled Strip

広島製作所 末 盛 秀 昭*¹ 辻 敦 義*¹
技術本部 新 屋 謙 治*² 堀 江 茂 斉*³

冷延鋼板の連続焼鈍炉において、鋼板に高速の火炎噴流を衝突させて対流加熱を行う直火加熱法は従来のふく射加熱法に比べて優れた加熱能力を持っている。当社はこの還元加熱用のバーナとして独自の予混合燃焼方式の衝突噴流バーナの開発を行ってきた。近年、省エネルギーあるいは二酸化炭素排出量低減のニーズから炉効率の更なる向上が要求されている。筆者らは、これに対応するために高温の予熱空気を使用できる予混合燃焼方式の衝突噴流バーナを開発し、エネルギー原単位及び二酸化炭素排出量の20%低減を可能にした。

The direct fire heating method for continuous annealing furnaces treating cold rolled strip makes use of jets which impinge flames directly onto a steel strip at high velocity in order to raise its temperature. The heating characteristics of this convective heating technology are far superior to those of the conventional radiation heating method. MHI has developed its own impinging type burner with a pre-mix combustion formula designed especially for the direct fire heating method. In recent years, calls for energy conservation and reduction of carbon dioxide emissions have prompted further improvements in furnace efficiency. In response, MHI has developed the impinging burner that is capable of using pre-heated air, and has been convinced that its thermal efficiency can be increased by 20%.

1. ま え が き

冷延鋼板あるいは同亜鉛めっき鋼板は、自動車用、家電用及び建材用材料として幅広く用いられている。これらの冷延鋼板は主に連続焼鈍炉において、冶金的に必要とされる所定のヒートサイクルで加熱、均熱、冷却を行うことにより、目的とする機械的特性を得ている。1990年代前半までは、連続焼鈍炉の大型化が成されてきたが、近年は、設備のコンパクト化のみならず、環境保全の観点から熱効率の向上による二酸化炭素の排出量低減が社会的に強く要求されている。

当社ではこれまでに連続焼鈍炉用還元加熱バーナとして、非常に高い加熱能力を持つ予混合燃焼方式の衝突噴流バーナを開発し、ステンレス冷延鋼板焼鈍炉等への実設備へ適用してきた⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、近年の二酸化炭素排出量低減への対応から、バーナの熱効率向上が早急な課題となってきた。そこで、筆者らは、従来の予混合燃焼方式では、逆火の問題から困難とされていた高温予熱空気の使用を可能とする独自の予混合燃焼ノズル構造を考案することで、高性能衝突噴流式還元バーナ（Mitsubishi Impinging Deoxidized Burner、以下 MID バーナと称す）を開発した。

この高性能 MID バーナでは、燃焼用空気を予熱する熱源として、焼鈍炉の排ガス顕熱を利用することにより、系内熱回収による大幅なエネルギー原単位の低減が可能となる。本報では筆者らが開発した MID バーナについて紹介する。

2. 直火加熱法の特徴

MID バーナを用いる直火加熱法とは、衝突噴流式バーナで形成される高温の火炎噴流を直接、鋼帯に衝突させて加熱を行う技術であり、従来のラジアントチューブを用いた間接ふく射加熱方式に比べて多くの設備上の利点が発生する。直火加熱法は対流伝熱を主とするため、特に冷間圧延鋼帯のように表面ふく射率の小さい加熱物に対しては非常に高い加熱熱流束を持ち、また熱慣性も

小さく高い加熱応答性を持つ。このことは炉長の大幅短縮と同時に鋼帯の厚さ変更による加熱熱負荷の急変に対しても高い応答性を実現する。さらに、火炎に安定した還元性能を持たせることにより、従来の間接ふく射加熱で炉に供給されていた還元性雰囲気ガスの使用量を大幅に低減することができる。当社ではこのような直火加熱法に適用するためのバーナとして、MID バーナの開発を行ってきた。

3. MID バーナの開発仕様及び構造

高効率 MID バーナに要求される仕様を表1に示す。燃焼方式は鋼板の還元能力に優れた予混合燃焼を採用した。燃焼空気の前熱温度はプロパンの発火温度より約 50°C 低い 470°C に設定した。焼鈍炉の最高使用温度は、予熱空気を使用することから従来より約 300°C 高い 1 500°C とした。また Turn Down Ratio（以下、TDR と称す）は炉の負荷変動にフレキシブルに対応するために 1/4 以下とした。

高温仕様 MID バーナの基本構造を図1に示す。高い熱流束を得るために火炎噴流形成用のセラミックス燃焼筒の先端をテーパ状に絞り、定格燃焼時において約 100 m/s の噴出速度が得られるように設計した。バーナの容量は設備の規模に応じて 40 kW から 140 kW の中から選択することにした。また、燃料については製鉄所の副生ガスである COG や、LNG 及び LPG に対応する。

表1 MID バーナの要求仕様
Requested specifications for MID burner

燃焼方式	予混合燃焼
燃焼能力	40~140 kW
燃焼空気温度	Max. 470°C
炉内温度	Max. 1 500°C
空気比	0.7~1.2
TDR	25%以下

*¹ 製鉄機械設計部製鉄セメント課

*² 広島研究所機械プラント研究推進室主務

*³ 広島研究所機械プラント研究推進室

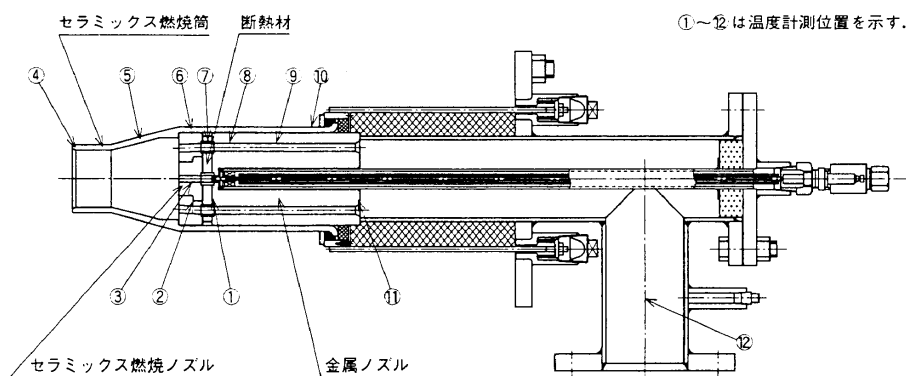


図1 MIDバーナの基本構造及び温度測定位置 高温仕様 MIDバーナの基本構造と温度測定位置を示す。①は金属ノズル先端を示す。
Basic structure of MID burner and temperature measuring point

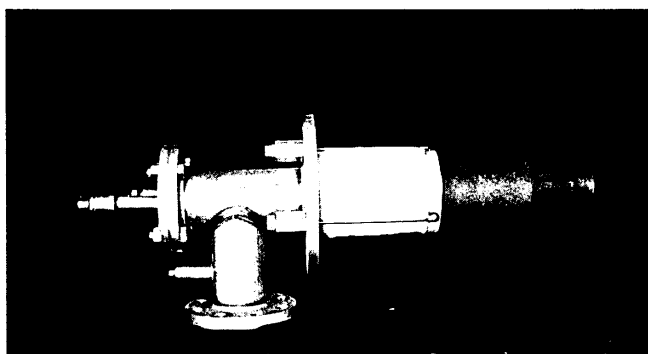


図2 MIDバーナ 高温仕様 MIDバーナの外観を示す。
MID burner overview drawing

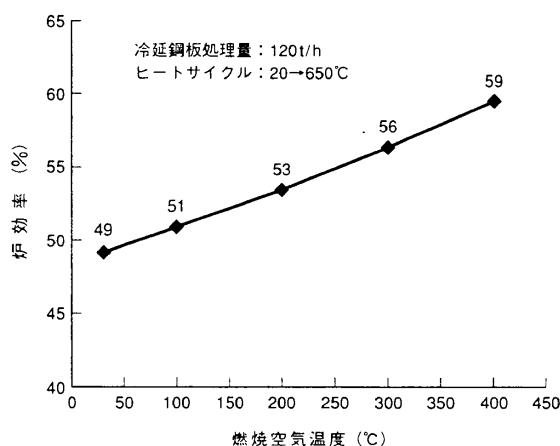


図3 炉効率 処理量 120 t/h 規模の焼鈍炉における空気予熱温度と炉効率の関係を示す。
Furnace efficiency

MIDバーナの外観を図2に示す。MIDバーナで採用したノズルの基本的な考え方は以下のとおりである。

- ① 低負荷時（最小 TDR 25 %）においてもノズル内で逆火が起らないように、予混合ガスの温度を考慮した燃焼速度からガス流速を決定した。また、高負荷時には火炎の吹飛びが起らないガス流速とした。
- ② 点火を確実にを行うため、予混合ガスの一部を分岐し、燃焼筒内で点火電極によるダイレクト点火を行う。形成された火炎は燃焼中にパイロット火炎として機能させる。
- ③ バーナノズル先端は炉内及び火炎からの熱ふく射を受け、1500℃近くの高温に加熱される。このノズル先端からの熱伝導によ

りバーナ本体及びノズル上流側の内壁面温度が上昇することによる熱面着火を起さないような断熱設計を行った。また、ノズルを多孔円筒形状として、その軸方向の長さを適切に決めることにより、ノズル上流側の予混合ガス入口部のよどみ領域で、ノズル壁面温度が予混合ガスの発火温度を下回るように設計した。

- ④ ノズル先端、燃焼筒及び点火電極の一部は高温での使用に耐える材質として耐熱性セラミックスを使用した。

開発した MIDバーナの高温予熱空気採用による炉効率の計算結果を図3に示す。図3は処理量 120 t/h 規模の連続焼鈍炉において、空気予熱を行った場合の空気予熱温度と炉効率の関係について示したものである。空気を常温から 400℃まで上昇させることにより炉効率が 59 %となり、絶対値で約 10 %の改善が図れる。これにより、エネルギー原単位及び二酸化炭素排出量の 20 %低減を達成することができる。

4. 耐熱性検証試験

4.1 実験装置

MIDバーナの、耐熱性検証試験に使用したテスト炉のフローを図4に示す。供試バーナは容量 140 kW のものを 2 本取付け、低燃焼負荷時にも炉雰囲気温度が実設備を想定した 1500℃に維持でき

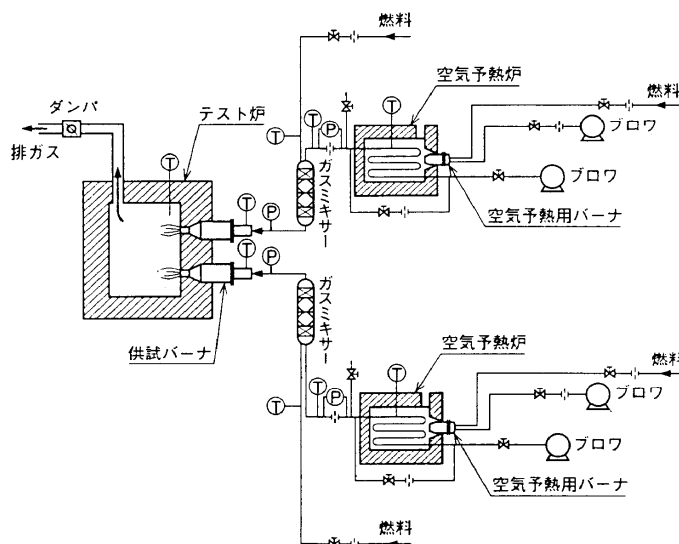


図4 テスト炉フロー MIDバーナの耐熱性検証試験に使用したテスト炉のフローを示す。
Diagram of test furnace flow

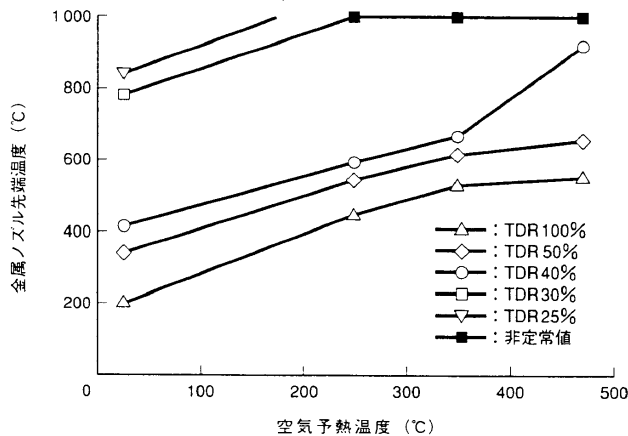


図5 空気予熱温度と金属ノズル先端温度の関係 バーナの耐熱性を金属ノズルの先端温度に着目し、実験計測結果を空気予熱温度と金属ノズル先端温度の関係に整理した。
Relationship between preheated air temperature and temperature of metal nozzle tips

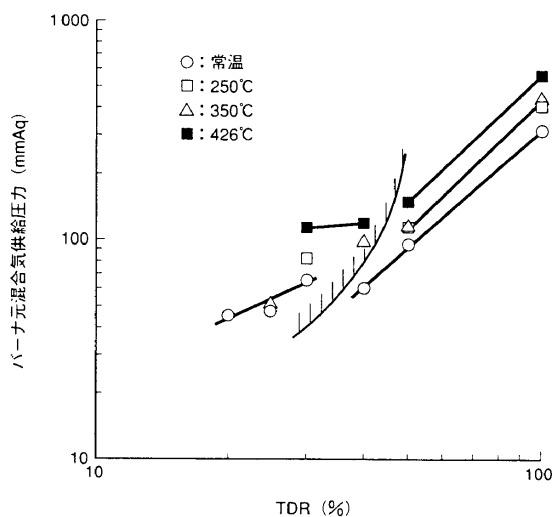


図6 TDR とバーナ元混合気供給圧力の関係 TDR とバーナ元混合気供給圧力の関係を示す。
Relationship between TDR and pre-mix gas supply pressure

るようにしている。燃焼用空気はそれぞれ独立した空気予熱器で最高 500°C まで予熱できるようにしている。バーナ各部の温度及び熱応力については、あらかじめはん用の熱伝導温度解析コードを用いて温度分布及び熱応力分布の解析を行い、バーナ各部の形状及び材質の選定を行った。実験では計算結果の検証と逆火発生の有無を調べるため、MID バーナ各部の温度を計測した。バーナの温度計測位置は、図 1 に示す ①～⑫ の部位である。

4.2 実験結果

バーナの耐熱性は図 1 に示す金属ノズル先端①の最高温度で決定されるため、ここではその温度に着目して実験計測結果の整理及びバーナの耐熱性の評価を行った。空気予熱温度と金属ノズル先端温度の関係を図 5 に示す。図中の黒抜き測定点は非定常値で、金属ノズル先端温度が 1000°C を超えても緩やかに上昇し定常値を見いだせられなかったことを示す。これは、セラミックスノズルが炉からの熱ふく射により高温に加熱されるため、ノズル内で自着火が起り、自着火点が徐々に上流側に移る現象である。一方、白抜き測定点は定常値で、炉雰囲気からバーナノズルへのふく射

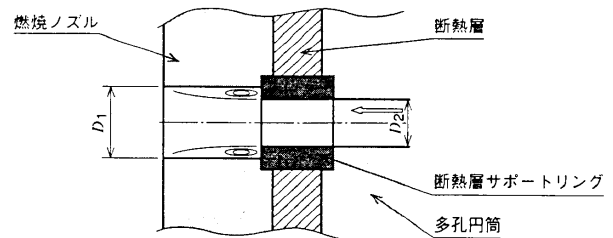


図7 リセス構造 火炎の上流側への伝ばを抑制するリセス構造を示す。
Recess structure

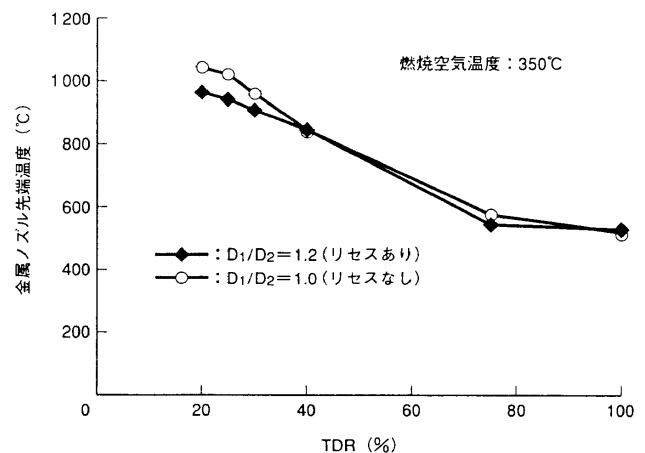


図8 リセス構造の有無による TDR と金属ノズル先端温度の関係
Relationship between TDR and metal nozzle tip temperature with and without recess structure

入熱と予熱空気によるノズルの対流冷却とがバランスした値である。空気予熱温度の上昇とともに金属ノズル先端の定常温度は上昇する。

図 6 はこのときの TDR とバーナ元混合気供給圧力の関係を示したものである。各空気予熱温度について、低 TDR 域で供給圧力が増大する方向にずれる現象を示している。これは、ノズル内面温度が上昇すると予混合ガスの一部がノズル内で自着火を起し、ガス温度が上昇することにより供給圧力が増大するものと考えられる。この境界領域を図 6 に示す。また、空気予熱温度が常温の場合でも供給圧力が増大する現象があり、これは同様にノズル流路内で自着火が発生しているものと考えられるが、金属ノズル先端温度の絶対値が低いことから、自着火の発生位置がセラミックスノズル内に安定的に定在していることが考えられる。この自着火定在火炎面の存在は、尾添ほか⁽³⁾の文献でも報告されており、炉からノズルへの熱ふく射と熱伝導損失及び反応発熱速度とが熱的にバランスにすることにより、ノズル流路内で自着火した火炎面が定在するものと考えられる。

ノズル先端のセラミックスは上流側が断熱されているため温度が上昇し、常温空気の場合でもこの部分で自着火が発生していると考えられるが、自着火点が上流側へ移動せず金属部の温度が上昇しなければバーナの耐熱上の問題はない。なお、金属ノズル温度が徐々に上昇するのは、自着火点が緩やかに上流側へ移動することにより起る現象であり、ノズル流速が燃焼速度以下となったときに発生する逆火とは違った現象である。

そこで、火炎のセラミックスノズルから上流側への伝ばを抑制する構造として、図 7 に示すようにノズル流路内をリセス構造に

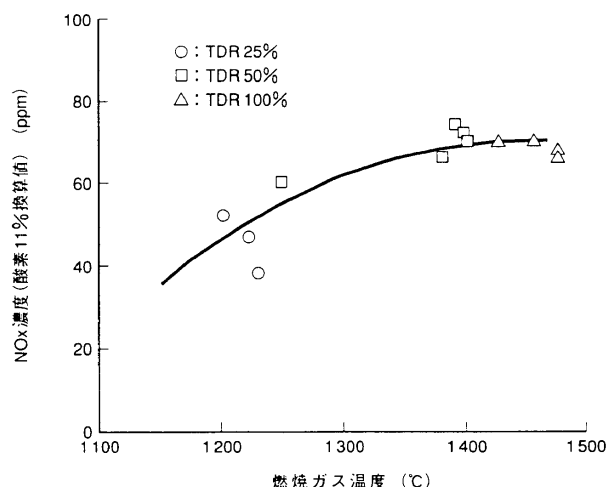


図9 燃焼ガス温度とNOx濃度の関係 燃料としてプロパン、空気予熱温度350℃、空気比0.9における燃焼ガス温度とNOx濃度の関係を示す。
Relationship between exhaust gas temperature and concentration of NOx

し、かつ断熱層の強化を図った実験を行った。図8にリセス構造の有無による金属ノズル先端温度とTDRの関係を示す。この結果、リセス構造を設けることにより、金属ノズルの温度はTDR 20%においても約950℃に抑えることができた。このリセス構造により、金属ノズル部の材質にNi-Cr系の耐熱鋼が使用できる。

また、リセス構造を採用することで金属ノズル側への自着火点の移動がないことから空気予熱温度350℃においても、TDR 20%で逆火の問題は発生していない。また、図5からは、TDR 100～40%の場合には空気予熱温度を470℃まで上昇させても逆火の問題は発生しないことが分かる。

以上の検証テストから低燃焼負荷時の逆火の問題及び金属ノズルの耐熱性の問題は回避できることを実験的に検証した。一方、高温予熱空気をを用いることにより火炎温度が上昇し、その結果としてNOx発生量が増大することが予想される。燃料としてプロパン、空気予熱温度350℃、空気比0.9における燃焼ガス温度とNOx濃度の関係を図9に示す。炉内燃焼ガス温度約1450℃においてNOx濃度は75 ppm以下（酸素濃度11%換算値）となっており、従来焼鈍炉に用いられた直火バーナの100～120 ppmに比べて低い値が達成できた。

5. 還元加熱特性

衝突噴流式バーナは高速加熱能力と合せて鋼帯表面を還元状態で加熱する機能を持つ必要がある。本バーナの還元加熱特性を検証するためにテスト炉を用いて鋼帯の還元加熱特性検証試験を実

表2 酸化、還元特性

Oxidation and reduction characteristics

温度	空気比							
	1		0.9		0.8		0.75	
	表	裏	表	裏	表	裏	表	裏
700℃	▼	▼	▼	▼	○	○	○	○
650℃	▼	▼	▼	▼	○	○	○	○
530℃	▼	▼	▼	△	▼	△	▼	△

注) ○：還元，△：無酸化，▼：酸化

施した。使用したバーナの容量は140 kW、燃料はプロパンガスであり、鋼帯とバーナ間の距離は450 mmとした。表面に熱電対を張付けた鋼帯を炉内に装入して所定の温度まで加熱した後、炉下側に設けた冷却チャンバに移動し、イナータガスとして窒素で常温まで冷却する。冷却後、鋼帯を取出し表面の酸化皮膜の状態から酸化、還元特性を評価した。

空気比0.75～1.0、鋼帯温度530～700℃の範囲での酸化、還元特性を表2に示す。空気比0.8以下でかつ鋼帯温度650℃以上で還元領域となる。鋼帯温度が530℃以下の低温領域になると空気比によらず鋼帯の表面は酸化される傾向にある。

低空気比燃焼では、平衡論的には空気比が0.5以下にならないと還元作用は現れない。これに対して、MIDバーナの火炎では空気比0.8程度で還元作用を持っており、これは火炎中に生成される中間生成物質である活性基に鋼板の還元作用があるためであると考えられる。

6. あとがき

直火加熱法は従来のふく射加熱法に比べて高い加熱能力及び負荷応答性を持ち、今後その用途はますます増大するものと考えられる。さらに、近年の省エネルギー、二酸化炭素排出量低減のニーズから炉効率の更なる向上が要求され、これに対応するために高温予熱空気が使用できる予混合燃焼方式の衝突噴流バーナを開発した。今後は本技術の新設の連続焼鈍設備のみならず、既存設備の性能向上にも積極的に適用していく予定である。

参考文献

- (1) 福島丈雄ほか、連続焼鈍設備の新技術、三菱重工技報 Vol.29 No.1 (1992)
- (2) 新屋謙治ほか、連続焼鈍設備の新技術直火加熱法の連続焼鈍炉への適用、工業加熱 Vol.30 No.5 (1993) p.28
- (3) Ozoe, H. et al., Development of a Computational Scheme for Transient Combustion Inside a Refractory Tube, Combustion and Flame 108 (1997) p.158