

特別講演

□浅田賞受賞記念

鉄鋼加熱設備における最近の燃焼技術

The Recent Progress of Combustion Technology in Steel Industry

秋山鉄夫

Tetsuo Akiyama

中外炉工業(株) 取締役技術統括

1 緒言

近年、燃焼技術は加熱機能に加えて NO_x ・煤塵など環境規制の枠組みに適合すべく進歩してきた。更に被加熱材の高級化や用途多様化などの新規要求に対応すべく高性能化が進んできた。金属工学などと異なり、燃焼工学は理論が体系化されて年月が浅いこともあり、設計実務の中ではそれらを十分に活用しきれない現実がある。燃焼機器の設計や制御系構築はむしろ個人経験とセンスに頼る部分が多いために折角開発された技術や製品が普及しにくいのが当分野の特質かも知れない。

本稿は、その特質をそのまま体現したようないくつかの応用例を紹介するものではあるが、共通する考え方は「単に加熱する以外の何らかの機能を付加し、設備要求に対して最適な技術を提供する」ことにある。これらが鉄鋼生産現場の熱設備に携わる諸兄の参考の一助となれば幸甚である。

2 燃焼の機能化

2.1 還元力を有する火炎¹⁾

1980年代当時、冷延ストリップの連続亜鉛メッキラインや連続焼鈍ラインでは、縦型直火加熱方式が益々多用される傾向にあった。その理由は次の3点であった。

- (1) 大幅な炉長短縮を図ってラインのコンパクト化が可能である。ラジアントチューブ加熱方式に比べて1/5～1/6の炉長ですませることができる。
- (2) 横形の直火加熱方式では難しかった両面均等の還元加熱が可能で、より優れた製品状態が得られる。
- (3) 急速加熱ができるので製品の金属学的性質の向上が期待できる。

この時直火加熱にて火炎を直接鋼板に衝突させると従来のバーナでは鋼板表面が酸化し、後処理が必要であったため、

後処理がない還元力の強い直火バーナが要請された。このような要請に応えるために、5年にわたり還元力の強い直火バーナの開発に取り組んだ。開発に当たり、省エネの観点から高温予熱空気を使用する拡散燃焼方式で実現することを目的とした。従来この技術はプレミックス型バーナでのみ可能であると考えられていたが、種々の実験結果を元に、プレミックス型ともタイルミックス型バーナとも異なるノズルミックスバーナの開発に着手し、急速混合型ノズルミックスバーナの開発に成功した。これにより排熱回収式バーナによる直火無酸化加熱炉が世界で初めて完成した。

バーナ概念図および実際の火炎状況写真をFig.1、2に示す。燃焼空気は図左上部から入り二重管外管から、燃料ガスは図左端より入り二重管内側から図右側の炉内へ導入される。両流体は先端のバーナチップの内部に加工したミキシン

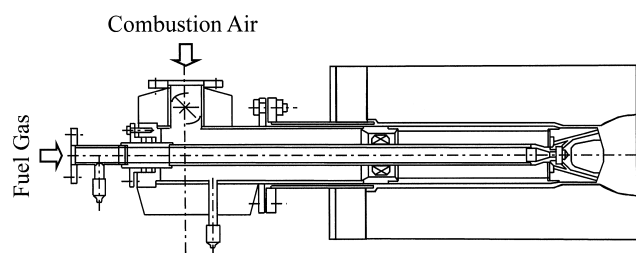
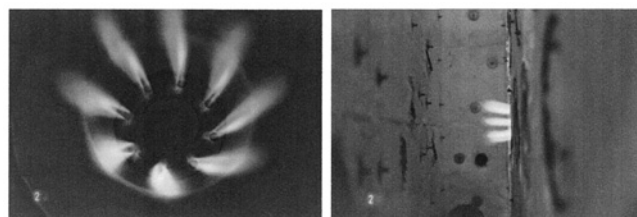


Fig.1 Schematic drawing of Y-jet burner



Front view

Side view

Fig.2 Y-jet burner flame

グポートで急速混合する。このミキシングポートがY字型をしているため、Y-ジェットバーナと名付けた。ミキシングポートは円周上に8ヶ所あり、各々独立にかつ角度を持ったタンジェンシャルに火炎を形成する。火炎は炉壁よりストリップまで伸びるが、衝突直前まで燃焼を完結させないことが重要なポイントである。予熱空気を使用することで燃焼完結位置はバーナチップに近くなるものの、鋼板手前で燃焼完結直前の排ガス同士が合流し鋼板に衝突することで、直火加熱することができた。

さらにミキシングポートの形状、噴流速度及び炉内の熱環境条件を変更することで、無酸化加熱はもちろんのこと還元加熱も可能である。還元加熱の一例として、あらかじめトーチ火炎でブルーイングしておいた鋼板の表面を本バーナで加熱した結果をFig.3に示す。左図中央のY字型の黒色部は試験前のブルーイングがそのまま残った部分である（この部分は熱電対をセットしていたため燃焼完結直前の排ガスが触れなかったと考えられる）。他の部分は同排ガスが衝突した結果還元されたことがわかる。また右図は裏面で同排ガスが当たらず、昇温されたためにブルーイングしたことを示している。

本バーナは縦型直火式連続亜鉛メッキの4ラインに適用されており、そのバーナ性能が実証されている。またこの技術は連続亜鉛メッキラインへの応用だけでなく、普通鋼用連続焼鈍ライン、ステンレス鋼あるいは電磁鋼板の無酸化加熱への応用も考えられる。

2.2 すずを伝熱手段に^{2,3)}

ステンレス冷延鋼板の製造工程において、冷間圧延で加工硬化した鋼板は、これを軟化させるとともに、目的とする材料特性を得るために連続的に焼鈍が行われる。ステンレス冷延鋼板は放射率 ϵ （熱吸収率）が小さいため、輻射による熱伝達が小さく昇温に時間がかかることから、生産能率を向上させる方法が種々検討されてきた。その1つに炉内温度を高

くすることで鋼板との温度差を大きくするというものがある。この方法では鋼板を目標温度以上に過熱してしまうことが多く、材質上の問題が生じた。よって主に焼鈍炉の炉長延長による生産能率向上が図られたが、これも炉長延長には設置スペースの確保や改造に多くの時間と費用を要する。その他ステンレスの熱吸収率を上げる方法も提案されてきたが、ステンレス鋼板は耐食性や耐高温酸化性に優れているため、化学的処理が難しい等の理由で実際に実用化されたものはほとんどなかった。そこで著者らはすすの黒さに注目した。一般的にはすすは有害ですす発生を防止し、清浄な燃焼を実現させることを目指すが、逆にすすをできるだけ発生・付着させ、炉内で燃焼させてしまうことを考えた。すなわち予熱帯にて付着させたすすは、加熱帯では光輝焼鈍材の放射率を大きくする塗料として働き、昇温後は炉内残留酸素で燃やしてしまうことで解決を図った。

まずバーナタイプとして空気バーナで実験を試みたがうまく行かなかった。次に酸素バーナではうまくすすが発生し、酸素欠乏状態でも高温火炎を形成できる酸素バーナの開発に成功した。バーナ概念図をFig.4に示す。燃料ガスと酸素を燃焼開始前に効果的に混合させ、低速で混合気体を噴出させるシンプルな構造である。

ここで昇温に有効なすすの必要な性状について述べる。

- (1) 対流による飛散がないこと。焼鈍炉は予熱帯と加熱帯で構成され、予熱帯では対流加熱になる箇所があるため。
- (2) ロールとストリップに挟まれても簡単に剥離しないこと。ステンレス鋼板はいくつかのロールで支えられているため。
- (3) 予熱帯で付着させたすすが加熱に役立った後、きれいに燃え尽きてしまうこと。残留すすを取り除く後処理工程

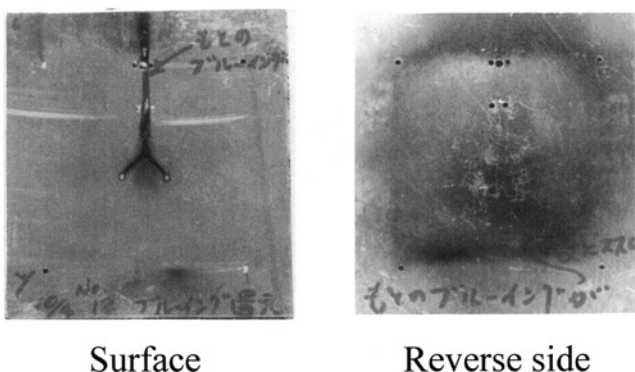


Fig.3 Test piece results of Y-jet burner

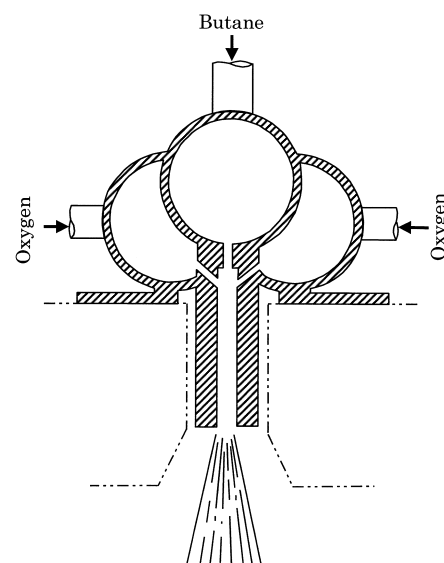


Fig.4 Schematic drawing of blacking burner

の追加をなくすため。

- (4) 1000℃以下で形成させること。1000℃以上の温度環境で形成させたすすでは、十分な熱吸収促進効果が得られないため。

バーナ燃料としてブタンやアセチレン、13Aを調査したところアセチレンが他の2つに比べすす付着量が約4倍であった。従って昇温速度の効率化も著しいと予想されたが、ブタンが昇温速度比換算で1.78と最も良い結果となり、アセチレンは1.38で13Aの1.45と同程度であった。これはすすの性状が加熱途中で消滅・飛散しやすいものと推測された。よってブタンを燃料にすることにした。

このバーナを用いて既設焼鈍炉入側のわずかなスペースにすすを被膜する「黒色化装置」を設置した。Fig.5に黒色化装置の概念図を示す。鋼板の上下面を黒色化できるように、バーナは装置の上下面に配置させた。火炎は鋼板進行方向に火炎誘導エアによって導く構造になっている。効果的な黒色化を狙って、バーナの下流に設置したノズルからエアを噴出させ、鋼板幅方向にも均一に黒色化することが可能となった。装置は水冷壁構造によって雰囲気温度を1000℃以下に保持している。

SUS420J1とSUS430に関して得られた能率向上効果をFig.6に示す。SUS420J1では処理無しに比べ36%、SUS430では21%の加熱能力向上を表面品位の劣化なしに達成できた。

この技術も実機ステンレスストリップ連続焼鈍酸洗ラインに適用されている。

環境公害の原因物質の1つとして嫌われているすすを伝熱促進手段として有効活用する技術の開発により、ステンレス鋼連続焼鈍ラインの新設計画では大幅な炉長短縮や生産性向上に貢献している。また既設炉においても炉改造や後処理の追加、レイアウトの変更等が不要であるという優位性を持っている。

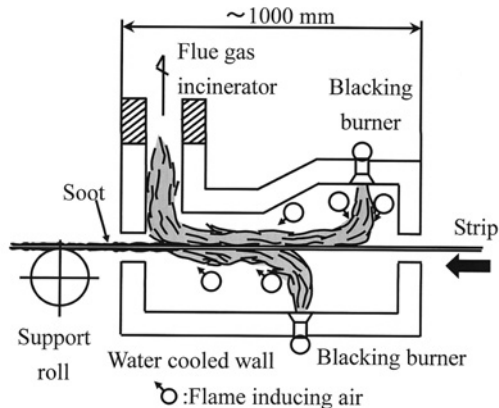


Fig.5 Schematic drawing of blacker

3 加熱の最適化

3.1 幅広加熱炉用バーナ

幅広加熱炉用バーナ (Super Diffusion Flame : SDF) は上述した2つのバーナタイプと異なり、燃焼空気と燃焼ガスを予め混合させず、それぞれ別配管で炉内へ導き混合させる形である。

このバーナの特徴の1つにNO_x発生量が極めて少ないということがある。炉内温度：1260～1280℃、燃料：13A、過剰空気率：1.1にてNO_x発生量は最大でも30数ppm程度である。またバーナ負荷を30～100%で変化させてもNO_x発生量の変動がほとんど無く、どの操業条件でも極低NO_x発生量で操業が可能である。そのNO_x特性データをFig.7に示す。

2つ目は長大な火炎により炉内温度差を小さくすることができる点である。炉内天井部の温度分布をFig.8に示す。幅15mでほぼ平坦な温度分布を実現できた。これは天井部分の温度分布であるので、被加熱物質のレベルではさらに温度

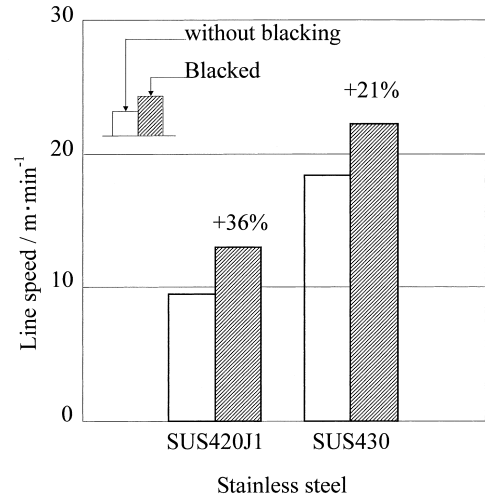
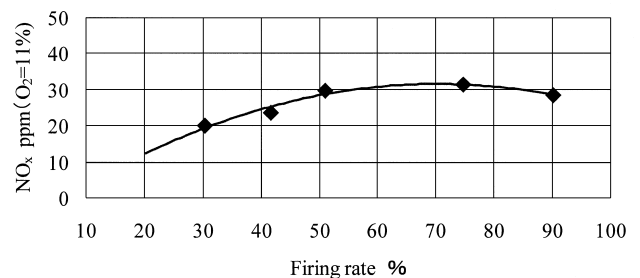


Fig.6 Increase of production rate



Burner capacity : 1977 kW	Fuel : LNG(13A)
Furnace temp : 1260~1280 °C	Excess air ratio : 1.1

Fig.7 NO_x emission of SDF burner

差は小さいものと推測される。

3つ目は簡単なノズル構造であるため、タイルの構造が単純かつ肉厚となり、割れ・ヘアクラックに対して耐性がある。

3.2 高温空気燃焼^{4,5)}

「高性能工業炉の開発」は1993年から7年間にわたって、(社)日本工業炉協会が通産省、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)から委託を受け研究開発を行った。この開発におけるコア技術として高温空気燃焼技術があり、これに注力して開発が進められた。

従来の燃焼特性の通説は、予熱空気温度を高くして燃焼を行うと熱効率は向上するものの NO_x 発生量が指数関数的に増大するというものであった。また予熱空気中の酸素濃度が低いと安定燃焼できないと考えられていた。

ところがテスト設備にて予熱空気温度を高くし(1000℃以上)、さらに空気中の酸素濃度を低くすると火炎が長大化し、緑色を帯び、 NO_x 発生量が30～40ppmと非常に小さくなることが分かった。また安定燃焼できる空気中の酸素濃度は5%以上であることも分かった。高温空気燃焼は、①火炎温度の平坦化、②低 NO_x 、③低騒音という、実用化において望まれる特性のほとんどすべてが含まれていることが実験により確かめられた。

実用化に当たり、燃焼空気中の酸素濃度を下げる手法として蓄熱再生(リジェネレイティブ)燃焼にて予熱空気温度を1000℃以上と高温にした上に高速噴流により炉内へ投入することで周囲の炉内燃焼ガスを巻き込ませるバーナ構造および配置とした。自然着火温度以上の高温空気と酸素濃度約

2%の炉内燃焼ガスが混ざるので、着火時の酸素濃度は5%以上と考えられる。さらに燃焼空気の高速噴流による炉内ガス循環によって形成される流れ場及び切り換えによる流れ場の非局在化が、炉内温度の均一化および低 NO_x 化を同時に実現していると考えられる。

高温空気燃焼技術を利用したバーナを銅片加熱炉に適用した例が日本鋼管(株)福山製鉄所(現JFEスチール(株)西日本製鉄所福山地区)内第一熱延ラインNo.2加熱炉である。本炉は全帯にリジェネレイティブバーナを採用したオールサイドバーナ型の炉であり、炉の各種仕様はTable1に示す通りである。

リジェネレイティブバーナはFig.9に示す通りである。2台で1ペアのバーナであり、蓄熱体を内蔵している。蓄熱体としてハニカムが用いられており、燃焼ガスの吸引ならびに燃焼空気の導入を切り換えることで熱交換を行う。この熱交換は媒体が蓄熱体に直接接触するので燃焼空気は1000℃以上に予熱され、排ガス温度は約200℃まで下げることができる。切り換え時間は30～60秒毎である。

本技術適用のリジェネレイティブバーナの導入によるNo.2加熱炉での省エネルギー等の効果をTable2に示す。

Table1 Specifications of reheating furnace

制御帯	4ゾーン 10帯
燃料	ミックスガス
炉サイズ	36 ^L x 10.1 ^W x 4.8 ^H (m)
スラブサイズ	8.8 ^L x 1.5 ^W x 0.22 ^H (m)
バーナ本数	76本-38組
バーナ燃焼容量	1100～3500kW
処理量	200t/h
加熱温度	20→1250℃

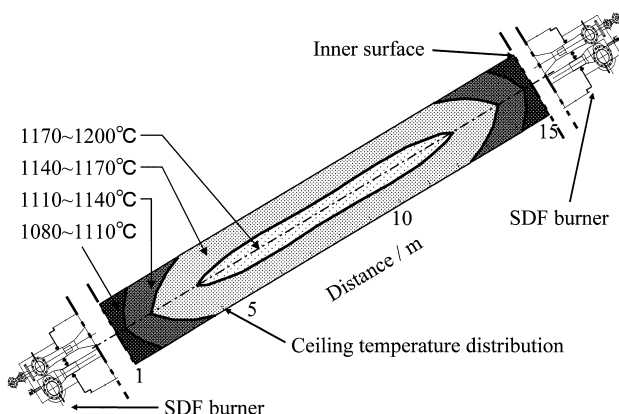


Fig.8 Contour of ceiling temperature

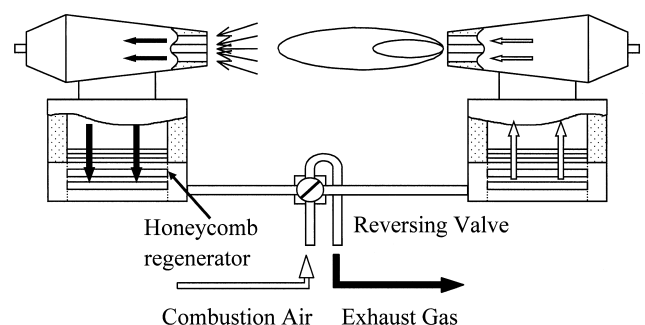


Fig.9 Schematic drawing of regenerative burner

Table2 Energy-saving result

省エネ率 (%)	省エネ量 (GJ/d)	熱効率 (%)	廃熱回収率 (%)	NO_x 値 (ppm, 11% O_2)
25.0	805.5	79.0	76.0	30.0

この炉を設計するに当たり、配管3D-CADを導入した。
Fig.10はNo.2加熱炉の鳥瞰図である。

従来設計では重量物から設置位置を決めるため、配管設計は最後のステップとなり、大変な数の障害物を考えて設計し

なければならず、設計期間の短縮は困難であると考えられていた。しかし3D-CADの導入により配管設計者と炉設計者が同時に議論ならびに設計することも可能となった。また建設業者との議論にも使うことができる点も納期短縮に大きく寄与した。現在も配管3D-CADを用いて設計を行っている。

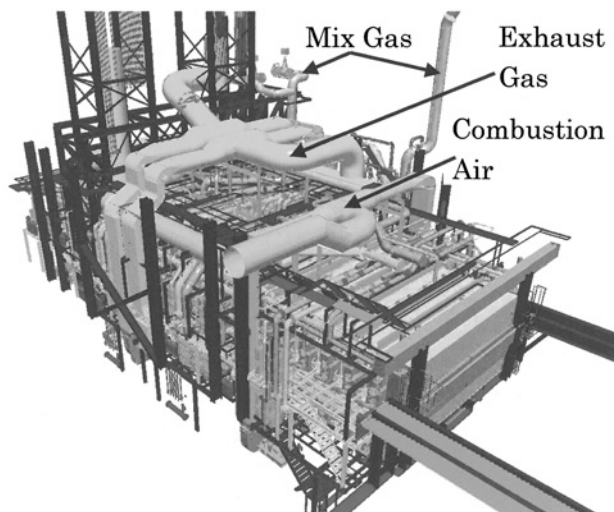


Fig.10 3D-CAD

参考文献

- 1) 秋山鉄夫, 一前憲悟: 工業加熱, 26 (1989) 5, 33.
- 2) 秋山鉄夫, 阪本佳史, 安達隆勝, 松村整: 工業加熱, 31 (1994) 2, 12.
- 3) 安達隆勝, 松村整, 森下久生, 田中尚一, 西本忠博, 秋山鉄夫: 工業加熱, 30 (1993) 2, 26.
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 平成12年度高性能工業炉導入フィールドテスト事業収集データ解析評価, (2001)
- 5) 上出雅男, 中野正昭, 今田守彦, 徳留典之: 工業加熱, 40 (2003) 1, 27.

(2003年4月11日受付)