

UDC 662.951.2:621.783.224.2
621.771.22:658.2
54-31:546.17

千葉第3分塊工場均熱炉低NO_xバーナの開発

Development of Low-NO_x Burner for Soaking Pits of No.3 Slabbing Mill at Chiba Works

池 野 健*
Takeshi Ikeno

佐 藤 邦 昭**
Kuniaki Sato

柳 沢 高 義***
Takayoshi Yanagisawa

温 井 照 男****
Teruo Nukui

Synopsis:

The low-NO_x burner developed by Kawasaki Steel has the triple pipes (inner and outer pipes for air, middle for combustion gas) at its nozzle portion, and therefore it is possible to vary the flame length for a uniform heating of ingots, changing the ratio of inner and outer air flow rate.

Actual operation of burners at soaking pits shows the following features:

- (1) The variation of flame length ranges from 1.5 to 4.5 meters.
- (2) As fuel gas is enveloped in combustion air and mixed with it, a perfect combustion is made possible with a small amount of excess air supply.

Consequently, the amount of NO_x emission is about 30% lower than before.

1. まえがき

第3分塊工場均熱炉の建設にあたり、上部一方焚均熱炉の欠点である反バーナ側鋼塊の片焼けを防止し、均一加熱できる燃焼特性を有し、かつNO_x排出量の少ないバーナの開発が必要とされていた。特にNO_x排出量については、当所が千葉県および千葉市との間に昭和50年に締結した公害防止協定の値以内に抑制することが要求されていた。

当所ではこの建設に先がけ、小型燃焼炉におい

て低NO_xバーナの研究に取り組み開発に成功していたので、第3分塊工場均熱炉にはこの当社製バーナを採用した。以下にその構造と実炉における燃焼性およびNO_x排出状況について報告する。

2. 低NO_xバーナの構造

2-1 NO_x抑制条件

燃焼過程で生成するNO_xは、高温の火炎中でN₂とO₂の分子間反応により生成する thermal

* 千葉製鉄所エネルギー部エネルギー技術室主査(課長待遇)
*** 千葉製鉄所企画部能率室主査(課長待遇)
〔昭和53年8月8日原稿受付〕

** 千葉製鉄所エネルギー部エネルギー技術室
... 千葉製鉄所熱間圧延部分塊課掛長

NO_x、火災初期に発生する prompt NO_x および燃料中に含有される N 化合物（重油中のピリジン、キノリンなど）が O₂ と反応して生成する fuel NO_x に大別できる。¹⁻³⁾

これらの NO_x のなかで、火災初期で生成する prompt NO_x は thermal NO_x との区別がつきにくく、一般的にこの二者は総括して thermal NO_x として扱われている。thermal NO_x の生成は、火災温度、O₂ 濃度、滞留時間の 3 要因に関係しており、特に火災温度が大きく影響する。

一方、fuel NO_x は含有 N 分の 20～30% 程度が fuel NO_x として転換されていて、N 含有量の大きい燃料ほど高 NO_x の傾向にある。⁴⁾

第 3 分塊工場均熱炉の燃料は、高炉で副生する高炉ガス（B ガス）とコークス炉で副生するコークス炉ガス（C ガス）の混合ガス（M ガス）であり、燃料中に N 化合物はほとんど含有されていないので、thermal NO_x の抑制について考慮すればよいことになる。

thermal NO_x の抑制が可能な火災の燃焼形態は次の二つである。^{5,6)}

- (1) 火災の最高温度を極力低く抑えつつ燃焼を持続できる均一な温度分布を有する燃焼形態。
- (2) 低空気過剰率すなわち低酸素燃焼でも、完全燃焼が可能で残存酸素が少なくできる燃焼形態。

2.2 当社製バーナの基本構造と特徴

以上の燃焼形態を火災に持たせ得るバーナとし

ては、以下に列記する性質を持つものが適していると考えられる。

- (1) 火災の最高温度を抑えるため、燃料を緩慢燃焼させることの可能なバーナ。
- (2) 火災の温度分布をできるだけ均一にするために、火災からの放熱が多い薄膜火災、あるいは薄膜拡大火災が維持できるバーナ。
- (3) 燃料と空気の混合が良好で低酸素燃焼が可能なバーナ。
- (4) prompt NO_x を減少させるため、バーナタイル内部で発生する NO_x 量を減少できるように、バーナタイル長さを短くできるバーナ。

上記条件のうち(1)に着目した低 NO_x バーナは、2 段燃焼型バーナにみられるように必然的に火災長さが長くなり短炎が得られにくくなるため、均熱炉内で鋼塊を均一に加熱するうえで必要なバリアブルフレームを得るのが困難になる。そのため、当社製バーナは、主に上記の(2)、(3)、(4)に着目して設計した。その基本構造を Fig. 1 に示す。一般のガス燃焼用バーナが燃焼用空気を燃料ガスの外側から供給する構造になっているのに比べて、このバーナは同軸噴流の 3 重管構造をなしており、中心から内流空気ノズル、M ガス（燃料ガス）ノズル、外流空気ノズルが配置されていて、スリット状に噴出される M ガスを内流空気と外流空気がサンドイッチ状に包み込む形で燃焼させる点の特徴である。⁷⁾ そこでこのバーナを川鉄型サンドイッチバーナ（KS バーナ）と命名した。

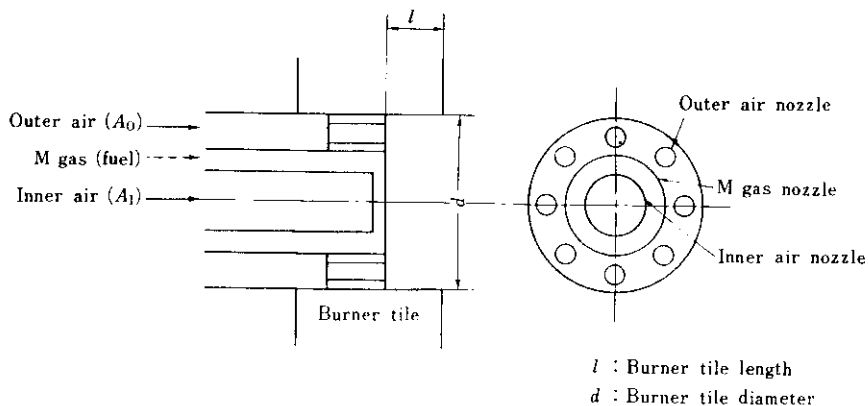


Fig. 1 Design of KS (Kawasaki Sandwich) burner

KSバーナは、燃焼用空気を内・外流に分割し供給することによりMガスとの混合が促進されるので、低酸素燃焼が可能である。内流ノズルには薄膜拡大火炎が得られやすいように旋回羽根を設け、空気流に回転を与えて外側に広がる構造とした。外流ノズルには、バップルプレートに多孔ノズルを設け着火性を安定させるようにしてあるので、バーナタイル長さをバーナ外径に比べて短くできる。さらにKSバーナは、内・外流空気ノズルの形状と内・外流空気の配分比率を適宜選定することにより、炉に必要な燃焼特性が容易に得られる。以上は小型燃焼炉の基礎実験により把握できたことである。⁸⁾

3. 均熱炉におけるKSバーナの使用実績

3.1 設備概要

第3分塊工場の均熱炉は上部一方焚均熱炉で、主バーナにKSバーナを2本配置している。均熱炉の設備仕様をTable 1に、概要をFig. 2に示す。実炉に設置したKSバーナの構造をFig. 3に示し、その仕様は以下のようである。

内流空気ノズル：旋回ノズル（旋回度60°）

Mガスノズル：スリット直流ノズル

外流空気ノズル：内向・旋回ノズル（内向15°、旋回15°）

Table 1 Specification of soaking pit in No.3 slabbing mill plant

Soaking pit	Type		Top one way	
	Nominal capacity (t/pit)		230	
	Number of pits		18	
	Furnace dimension (m)		5.4w×8.0l×5.0d	
	Wall thickness (mm)	Side	575	
Bottom		591		
Recuperator	Type		Radiation-Stack	
			Combustion air	M gas
	Flow		Parallel	Counter
	Temperature (°C)	Inlet	20	20
		Outlet	550	500
	Pressure drop (mmH ₂ O)		250	100
Burner			Main	Auxiliary
	Type		Air 2 flow KS	NFK bloom #200-1-6 HR
	Capacity (10 ³ kcal/h)		5 400	675
	Number of burners (number/pit)		2	2
	Fuel	Kind	M gas	
		Calorific value (kcal/Nm ³)	1 800	
		Pressure (mmH ₂ O)	100	500
		Temperature (°C)	500	20
	Air	Pressure (mmH ₂ O)	350	700
		Temperature (°C)	550	20

バーナタイル長比 $l/d: 0.15$

内流空気比率 $A_1/(A_1+A_0)$ の可変範囲:

0 ~ 35 %

ここに、 A_1 は内流空気量、 A_0 は外流空気量であり、内流空気比率は内流空気配管に取りつけた制御弁で調節する。KSバーナは、炉内に置かれた鋼塊を均一に加熱するために、内流空気比率を

変更させて燃焼形態を変えている。内流空気比率を増加させると短炎になり、バーナ側の温度が上昇しバーナ側に配置された鋼塊をより積極的に加熱できる。内流空気比率を減少させると長炎となり、反バーナ側温度が上昇する。短炎の場合は長炎時に比べて火炎温度の上昇が著しいが、できる限り薄膜拡大火炎を形成させるようにして極力温

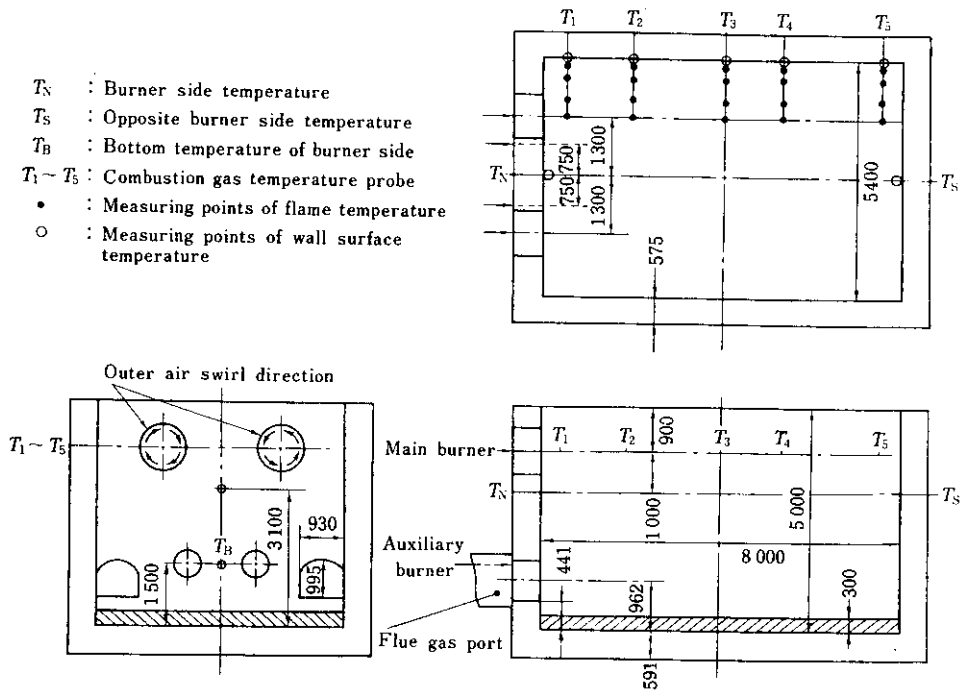


Fig. 2 Schematic diagram of soaking pit

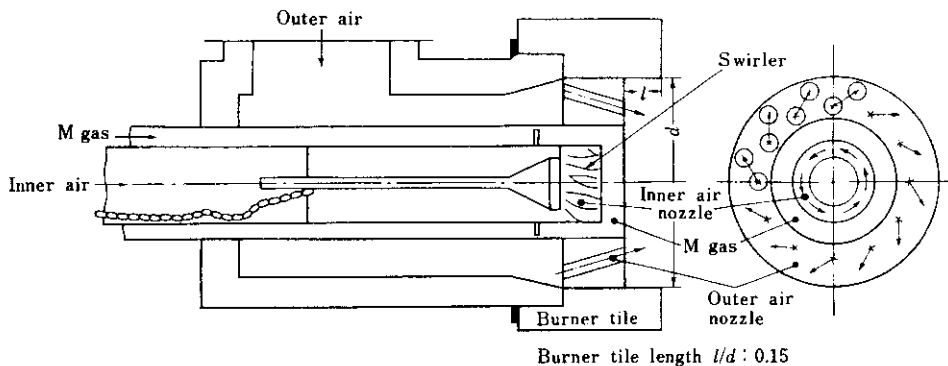


Fig. 3 Schema of KS burner adopted at soaking pit

度分布の均一化を図り、NO_xの発生を抑制できる燃焼形態をとらせている。

KS バーナの使用にあたっては、均熱炉の操業は直接デジタル制御⁹⁾のもとに行われるが、ヒートパターンに合わせてコンピュータにより内流空気比率を変えて長・短炎の切換えを行っている。同時に、煙道にO₂メータを設置し、空気過剰率設定器へフィードバック信号を送って制御し、低酸素燃焼を実施している。低酸素燃焼は、低NO_xのみならず均熱炉の燃料原単位の低減にも有効であり、省エネルギーに寄与している。

3・2 燃焼特性

内流空気比率と燃焼形態、すなわち火炎形状との関係は目視により観察した。

その結果、以下に列記するように内流空気比率を変化させると火炎形状が大幅に変化することを確認した。

- (1) 内流空気比率0%では、長さ4.5m、幅1.0mの直進火炎（長炎）となる。
- (2) 内流空気比率35%では、長さ1.5~2.0m、幅1.2~1.3mの中空の薄膜拡大火炎（短炎）となる。

さらに、Fig. 2に示した温度測定孔にP・R熱電対を設けて火炎温度分布および炉内の温度分布を測定したが、その結果をそれぞれFig. 4、Fig. 5に示す。両者とも火炎形状の変化と良く一致していることがわかる。長炎では、高温域が反バーナ側に存在しているのに対し、短炎ではバーナ側に著しく移行している。

実操業においては、炉内の温度分布を常時測定することは行わず、バーナ壁側温度 T_N と反バーナ壁側温度 T_S を測定し、炉内温度を制御している。 T_S と T_N の差と、Mガス投入量との関係をFig. 6に示す。長炎では、加熱期、均熱期ともに T_S が高く、Mガス流量の増加にともない著しく温度差が生じており、Mガス流量が1 000 Nm³/h以下になる均熱末期でも40℃程度の温度差がある。一方、短炎の場合は、加熱期でMガス流量が多いときに T_S が高くなる傾向にあるが、 T_S と T_N の差は加熱期で20℃以内であり、操業条件を多少変えると T_N が高くなった例も生じた。

このように、KS バーナは、内流空気比率を変えて火炎長さを1.5から4.5mまで任意の長さを選

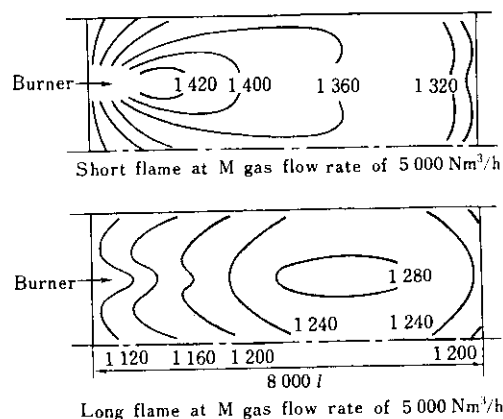


Fig. 4 Flame temperature distribution of KS burner

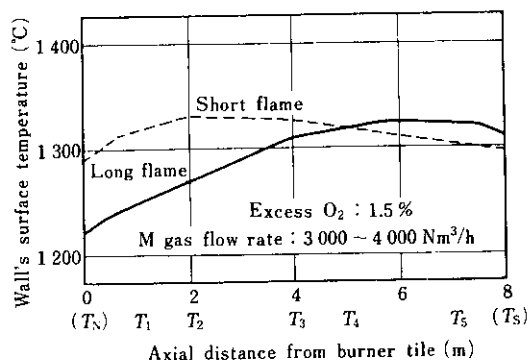


Fig. 5 Wall's surface temperature distribution

べる良好なバリアブルフレーム特性を有し、それに応じて温度分布も大幅に変化させられる。現在実炉においては、鋼塊を均一に加熱するように、コンピュータにより所定時間ごとに長炎・短炎に切換えている。

3・3 NO_x発生について

KS バーナを用いて長炎のみまたは短炎のみでの場合のNO_x発生と炉内温度 T_S の関係をFig. 7に、熱塊チャージにおける均熱炉の操業例をFig. 8に示す。第3分塊工場の均熱炉では均熱温度を1 300℃としているが、Fig. 8に示すように、NO_x発生は均熱温度到達後の均熱初期で最も高くなり、同一火炎長さの場合、加熱期では温度の上昇にともないNO_x発生量が増加し、均熱期では末期に近づくほど、すなわちMガス流量が減少するにつれ

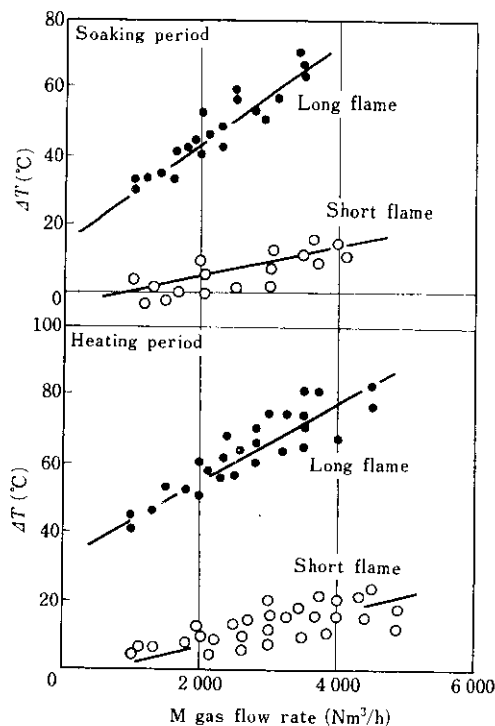


Fig. 6 Relation between M gas flow rate and wall temperature difference $\Delta T (= T_s - T_N)$

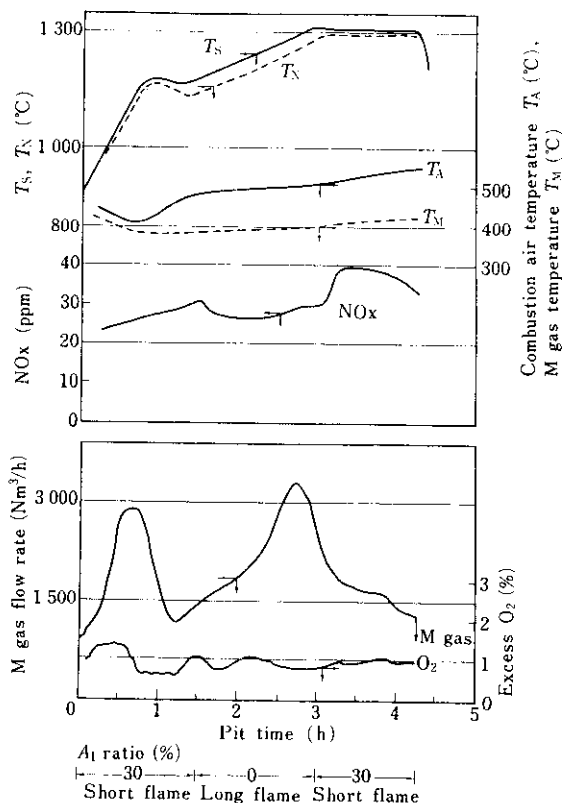


Fig. 8 Soaking pit operation pattern

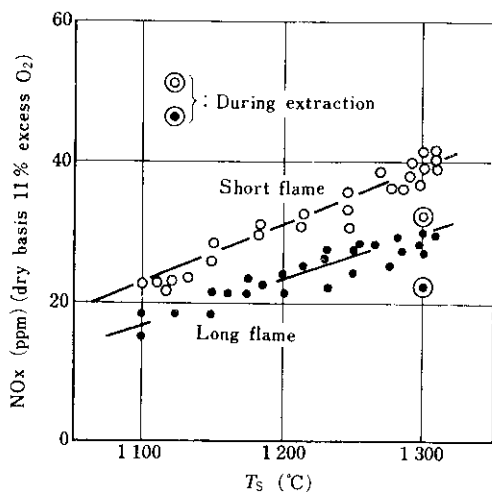


Fig. 7 Relation between wall temperature T_s and NOx emission

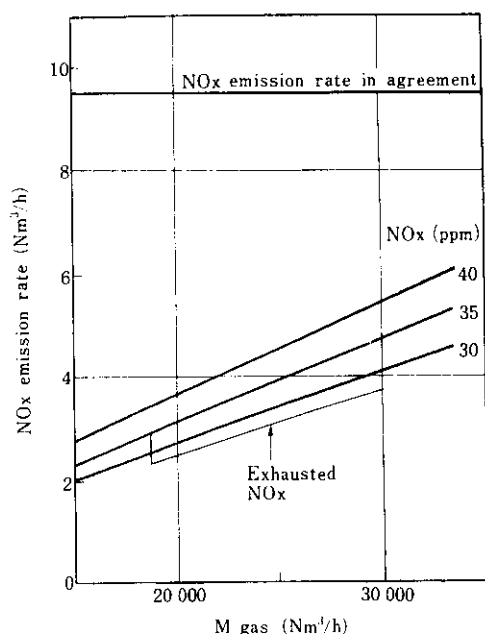
NOxの発生量は少なくなる。

Fig. 7よりNOxの発生は、長炎時に15~30ppm、短炎時に20~40ppmであり、長・短炎ともにNOx

レベルは一般のバーナに比べて10ppm以上低い。これは、バーナタイル長さを短くし prompt NOxを抑制した効果が大きく影響しているためと考えられる。また、短炎時には極端に短炎にしたために火炎温度が上昇し、長炎時より高NOxであるが、拡大火炎形状であるので火炎からの放熱が大きく、温度上昇のわりには一般のバーナの火炎形状と比べてNOxレベルは低い。

以上はKSバーナの均熱炉1ホールあたりでの鋼塊加熱の1チャージに対してのNOx発生について述べたものであるが、均熱炉全体(18ホール)でのNOxの排出量は、集合煙突に設置されている監視用のNOx計により把握している。NOx排出量とMガス使用量の関係をFig. 9に示す。

第3分塊工場の生産量は現在月間20万t程度であり、均熱炉全体のMガス使用量は通常2万~3万Nm³/hを推移しているが、NOx排出量は2.5~5.0Nm³/hである。現状の排出量は、県および市とのNOx協定値9.5Nm³/hを大幅に下回っていて、こ

Fig. 9 NO_x emission rate at collected stack

のNO_x排出レベルであれば、月間30万t強の増産時でも協定値内に維持でき、当初目標にした低NO_x操業が達成されよう。

3.4 低酸素燃焼について

KSバーナが低NO_x性を有するのは、低酸素燃焼が大きく寄与している。燃焼排ガス中のO₂濃度が、 $1 \pm 0.5\%$ 以下になるよう空気過剰率を設定して操業しているが、Fig. 8にみられるようにこの設定値はほぼ守られており、低酸素燃焼が実現している。

KSバーナは排ガス中のガス成分を分析した結果、排ガス中のO₂が0.2%以下の場合に未燃分の発生がみられる程度である。

低酸素燃焼は燃料原単位の低減にも寄与しており、排ガス中のO₂が2～3%燃焼の通常の操業に比較して約5 000kcal/t程度原単位を低くできる。また、第3分塊工場均熱炉ではMガスレギュレ

ータを設置¹⁰⁾して、Fig. 8に示したようにMガス温度が400°Cに予熱されているので、この回収熱は7 000kcal/tに相当し、レギュレータを設置しない場合に比べ、排ガス量の減少分を見込むと約13 000kcal/tの原単位低下に寄与しており、上記5 000kcal/tと合わせて約18 000kcal/tの低下となる。

以上述べてきたKSバーナは、Fig. 3に示すように、内流空気ノズルと外流空気ノズルの旋回方向を同旋回に組み合わせたものである。実炉では、この他に内流空気ノズルの旋回方向を変えた場合についても実験したが、内・外流空気ノズルを逆旋回に組み合わせると、短炎時にいっそう短い火炎が得られ、小型で急速加熱を必要とする炉に採用するに適したKSバーナが得られることがわかった。

4. あとがき

KSバーナは、内流空気比率を0～35%の範囲内で変化させ、1.5～4.5mと広範囲に火炎長さを変えることが可能であり、好ましい炉内温度分布にできる燃焼特性を有している。また、バーナタイル長さを短縮でき、局部的に高温箇所のない温度の均一な火炎形状が得られ、しかも低酸素燃焼の可能なバーナであるため長・短炎ともにNO_x発生を抑えて操業でき、30ppm前後と操業中低NO_xレベルを維持している。

以上、KSバーナに関して、その特性と第3分塊工場均熱炉における使用状況を述べてきたが、KSバーナは省エネルギー面でも有効であり、熱間圧延工場の加熱炉にも一部設置されて好成績をおさめている。また、昭和53年7月に稼動した第1熱間圧延工場の4号加熱炉に設置されているKSバーナは、内流空気比率の可変範囲を70%まで増加できるため、KSバーナの特徴をさらに生かせると期待している。

参考文献

- 1) 大屋：燃料協会誌，52 (1973) 558, 766
- 2) 大柳：燃料協会誌，55 (1976) 588, 206

- 3) 永田, 望月: 燃料協会誌, 52 (1973) 558, 77
- 4) 辻: 熱管理と公害, 25 (1973) 2, 53
- 5) 畠中: 熱管理と公害, 26 (1974) 10, 29
- 6) 益田: 燃料及燃焼, 43 (1976), 542
- 7) 川崎製鉄㈱: 特開昭53-7843, 工業炉における気体燃料の燃焼方法および燃焼用バーナ
- 8) 川崎製鉄㈱: 特開昭53-18825, 工業炉における気体燃料の燃焼制御方法
- 9) 片岡, 峰松, 片山, 柳沢, 温井, 佐藤: 川崎製鉄技報, 10 (1978) 2・3, 73
- 10) 川崎製鉄㈱千葉製鉄所: 第61回熱経済技術部会資料 熱経61-5-5. (1977)

