

佐藤 邦昭* 武藤 振一郎** 柳島 章也*** 下山 雄二****

Development of Low NOx Radiant Tube Burner

Kuniaki Sato, Shinichiro Muto, Fumiya Yanagishima, Yuji Shimoyama

要旨

千葉製鉄所では、多目的焼鈍炉 (KM-CAL) の建設に際して、新型のラジアントチューブ用低 NOx バーナを開発し、現在、自社・他社の CAL・CGL 等多くの炉で実用に供されている。

本バーナは、中空のリング状に配置したマルチガスノズルから噴出する燃料ガスとその外周から噴出する外流エアで 1 次燃焼を、ついで中心に配置した内流エアで 2 次燃焼させることによりスムーズな 2 段燃焼を実現でき、以下に示す優れた特徴を有している。

(1) チューブ内で円周方向・長手方向の燃焼均一化に優れ、局所的な高温域の発生が防止でき、NOx 発生量の低減、ラジアントチューブ温度の均一化が得られた。

特に、NOx 発生量については従来バーナより約 35% 低減している。

(2) 燃料ガスとエアのスムーズな混合により、燃焼音が小さく、かつ、燃焼効率が向上している。

(3) 外流エアとガスの燃焼着火について、構造的に安定した着火源が形成するよう工夫され、低ターンダウン時でも安定した燃焼ができる。

Synopsis:

Low NOx radiant tube burner has been developed for the multi-purpose continuous annealing line (KM-CAL) at Chiba Works, Kawasaki Steel Corporation, and is now used at many furnaces such as CAL, CGL, etc. This burner consists of a two-stage combustion radiant tube in which combustion nozzles are arranged in a ring form. Primary combustion is initiated by the gas flow from encircling multi-nozzles and the outer air flow from the outermost nozzle and secondary combustion is effected by the inner air flow from the center nozzle.

The above-mentioned smooth two-stage combustion ensures features described below.

(1) Uniform combustion is achieved in both the circumferential and longitudinal directions within the tube and this contributes to low NOx and uniform temperatures of the tube. NOx emission is about 35% lower than that of conventional burners.

(2) Smooth mixing between the gas and air is conducive to lower noise and higher combustion efficiency.

(3) A device for igniting between outer-flow air and the gas provides a stable ignition source which accomplishes stable combustion even at low turn-down.

1. まえがき

従来、ラジアントチューブ用バーナは、高 NOx、高騒音という公害上の欠点とラジアントチューブ内温度の不均一に起因したチューブの短寿命、被加熱物の不均一加熱等多くの問題点を有していた。特に、NOx に関しては、一般の工業炉と異なりラジアントチューブの場合、チューブ内の燃焼は狭い空間内で局所的な高温部が形成されやすく、一般の工業炉に適用される低 NOx 手段では、低 NOx 効果が小さく、バーナによる低 NOx 化は未開発の状況にあった。

当所では、連続焼鈍設備 (KM-CAL) の建設に際して、上記問題点を解決する目的で、ラジアントチューブ用低 NOx バーナの開発に着手し、新型の低 NOx バーナの開発に成功した。本バーナは、現在 KM-CAL, No. 6 鉄粉仕上還元炉, 川板 CGL 等多くの炉で実用に供している。以下に今回開発したラジアントチューブ用低 NOx バーナについて開発実験を主体に報告する。

2. 開発実験の概要

2.1 バーナに要求される燃焼特性

ラジアントチューブバーナに要求される燃焼特性は、低 NOx

の他に以下に示す諸特性がある。本開発実験ではこれらに関する改善も考慮した。

(1) 低 O₂ 燃焼性に優れ、低ターンダウン時でも良好な燃焼を維持できること。すなわち残存 O₂ ≒ 1.0% でチューブ内で完全燃焼し、低ターンダウン時でも失火しないこと。ちなみに、従来バーナの場合、20% 以下のターンダウン時では失火の危険が高く使用していない (この場合は、燃焼の投入を on-off して使用している)。

(2) 熱効率面で有利となるよう排ガス温度が低下できること。

(3) ラジアントチューブの温度分布が均一であること。これは局所的な高温部発生を防止し、チューブ寿命を長くでき、かつ、被加熱物の均一加熱に有利である。

(4) 燃焼騒音が小さいこと。これについては、メインバーナの他に、パイロットバーナについても考慮する必要がある。

2.2 実験設備と実験方法

本開発実験は、燃焼実験炉と実炉 (No. 1 CAL) で行った。実験炉では、バーナによる NOx 生成比較を主体とし、実炉では、実験炉で良好な結果が得られたバーナを 1 本のラジアントチューブに設置して従来バーナとの比較を実施した。

実験炉は、Fig. 1 に示すように、W 型ラジアントチューブの外部をレンガ積みしたものである。ラジアントチューブの燃焼

* 千葉製鉄所エネルギー部エネルギー技術室主任(掛長)

** 千葉製鉄所エネルギー部エネルギー技術室

*** 千葉製鉄所冷間圧延部冷延技術室主任(課長)

**** 千葉製鉄所冷間圧延部第一冷間圧延課掛長

(昭和57年10月6日原稿受付)

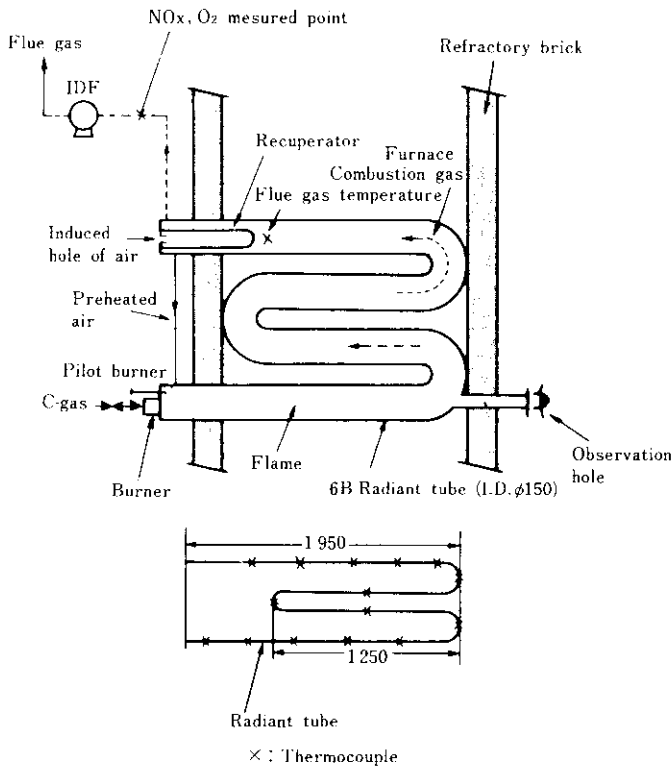


Fig. 1 Schematic diagram of experiment at furnace

は、排ガス吸引ブロワーでバーナ部に燃焼用エアを吸引してコークス炉ガス (C ガス) を燃焼させるサクシオンタイプである。

本実験では、バーナの燃焼特性を把握するために、 O_2 濃度、 NO_x 濃度、ラジアントチューブ温度 (T_{RT}) 分布、排ガス温度および予熱エア温度 (T_A) 等を連続測定している。騒音については、実験炉周辺の騒音の影響を受けるので、実炉にて測定を行った。実験条件は、以下に示すとおりである。

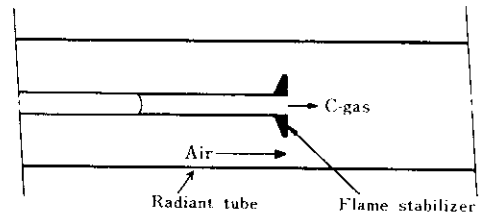
- 燃焼容量 : $100 \times 10^3 \text{kcal/h}$
- 燃料ガス : C ガス (発熱量 4300kcal/Nm^3)
- 過剰 O_2 : 2.0~2.5%
- 予熱エア温度 : $T_A \approx 300 \sim 350^\circ\text{C}$
- パイロットバーナ : 内部点火式 $10 \times 10^3 \text{kcal/h}$ (従来のバーナは、外部点火式で騒音と熱ロスが大きいので、パイロットバーナを内部点火方式に変更した)

3. 従来バーナの構造と NO_x 生成

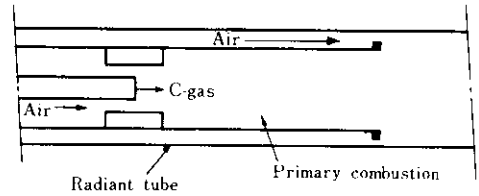
従来、一般に数多く使用されているバーナ (No.1 CAL 等使用) と低 NO_x を指向した 2 段燃焼バーナの概略および実験炉における NO_x 生成の結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2(a) は単孔ガスノズルを中心に配置したもので、その先端に着火安定用保炎フランジを有している。このバーナの燃焼は、緩慢燃焼型で従来バーナとしては低 NO_x 型式に属することを別の実験で確認した。

一方、低 NO_x 指向の 2 段燃焼バーナは、一般の工業炉に適用されている緩慢燃焼による低 NO_x をラジアントチューブ内部で実現させようとするものである。

Fig. 2 には、 NO_x 濃度、予熱エア温度 T_A とラジアントチュ



(a) Design of conventional burner



(b) Design of conventional two-stage combustion burner

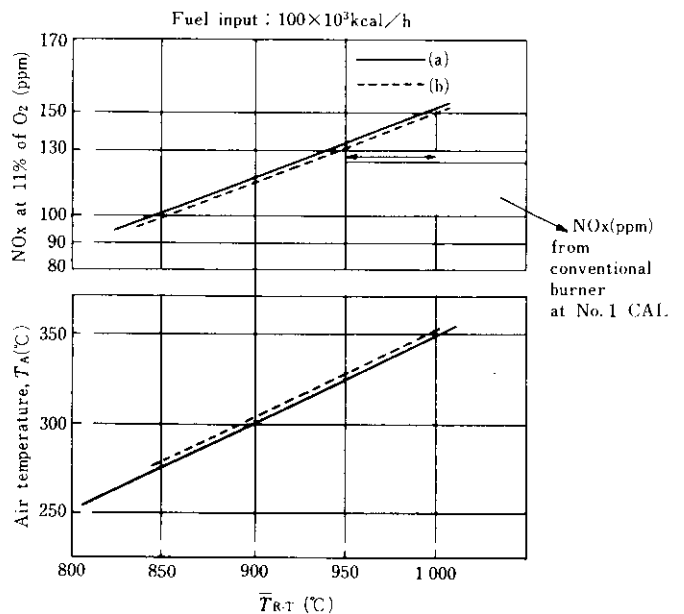


Fig. 2 Design and NO_x emission of conventional burner

ープの平均温度 T_{RT} の関係を示し、同時に、No. 1 CAL の実炉データも示してある。破線で示す NO_x 生成量は、2 段燃焼バーナの構成要素 (1 次エア量比・1 次燃焼筒長さ等) を変更したときの最良の結果である。

実験炉における実験は、点火後ラジアントチューブおよび予熱エアの温度が上昇し、同時に NO_x 生成も経時的に増加するので、ラジアントチューブ温度の平均値で整理した。本実験は、点火後約 3 h で定常に達し、 $T_{RT} \approx 1000^\circ\text{C}$ で安定となる。

従来バーナの実炉における NO_x 生成は、130~150ppm (ターンダウンが 80~90% で $T_A \approx 300 \sim 330^\circ\text{C}$ のときのレベル) であり、この値に対応する実験炉条件は、 $T_{RT} \approx 950 \sim 1000^\circ\text{C}$ 、 $T_A \approx 325 \sim 350^\circ\text{C}$ である。この条件を以降のバーナ実験の基準とした。

Fig. 2 の結果から、従来型の 2 段燃焼バーナでは、 NO_x 低減の効果がみられず、一般の工業炉つまりオープンスペースで形成される NO_x 発生量の低い状態での 2 段燃焼が、ラジアントチューブ内で起こりにくいことを示している。

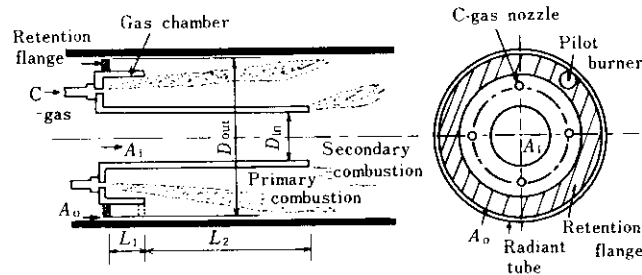
4. 開発したバーナの構造

ラジアントチューブ用として、今回開発した低NOxバーナの構造を Fig. 3 に示す。本バーナは、従来バーナの燃焼結果を踏まえ、ラジアントチューブ内部の燃焼均一化を図るよう考慮したものである。

本バーナは、燃焼用エアを2分割して、中心と最外流に供給し、チューブ内部で燃料ガスと外流エア（以後 A_0 と略記）で、1次燃焼を、ついで中心に配置した内流エア（以後 A_1 と略記）により2次燃焼を行わせることによって、チューブ内部でのスムーズな2段燃焼を図ったものである。同時に、バーナノズル部分の構造を工夫し、2章で述べた種々の燃焼特性の改善を図っている。

本バーナの構成要素は、Fig. 3 に示すとおりであり、実験はこれらの要素を種々変更し、NOx 生成と燃焼特性との関係を実験で把握したものである。

なお、本バーナは、当所が先に開発した加熱炉・均熱炉用 KSバーナ^{1,2)}の基本的な技術思想を発展させたものであり、KS-2バーナと命名した。



Burner factor

- Inner air flow : A_1
- Outer air flow : A_0
- Inner pipe dia. : D_{in}
- Retention flange dia. : D_{out}
- Number of gas nozzle holes : N
- Gas nozzle dia. : D_c
- Gas velocity at outlet of nozzle : V_c
- Length between retention flange and tip of gas chamber : L_1
- Gas chamber dia. : D_c
- Inner pipe length : L_2

Fig. 3 Design and factor of KS-2 burner

5. バーナ構成要素とNOx生成

KS-2バーナの各構成要素変更実験では、Fig. 2 に示すNOxと温度の関係でデータを採取したが、バーナ構成要素の影響を整理するために、 $T_A = 300^\circ\text{C}$ におけるNOx値比較を行った。

5.1 内流エア比率の影響

A_1 比率 (A_1 流量/全流量) は、内・外流エアの面積比で決まるが、本実験では、内筒径 D_{in} とリテンションフランジ径 D_{out} を変化させ、 A_1 比率を変更した。このときのNOx生成と Fig. 1 に示すのぞき窓における火炎の目視観察結果を Fig. 4 に示す。

A_1 比率のNOx生成におよぼす影響は顕著で、 A_1 比率 = 35~80% で低NOxが得られ、 A_1 比率 \leq 30% では、 A_1 比率の減少

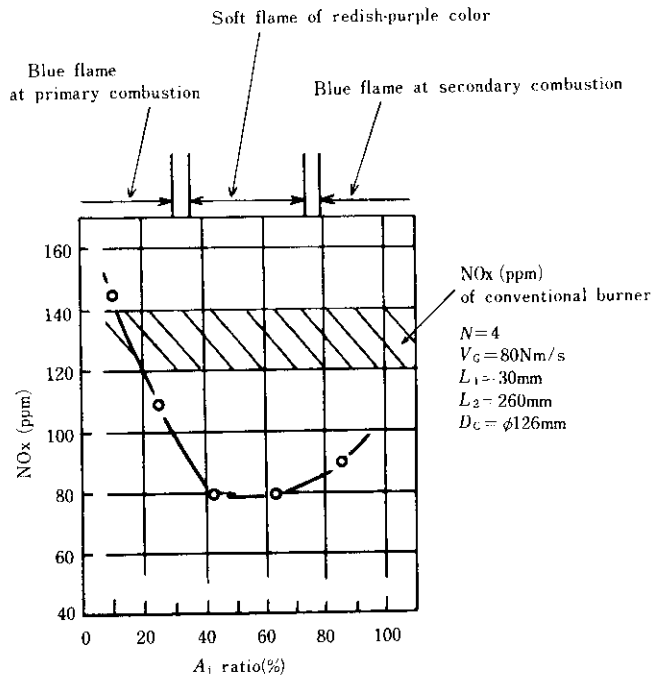


Fig. 4 Influence of A_1 ratio NOx emission

にともない著しくNOxが増加する。 A_1 比率の変化にNOx生成と燃焼性はよい対応を示し、低NOxの A_1 域では、全体がソフトな赤紫色火炎となりスムーズな2段燃焼の形態をなしている。それ以外の A_1 比率では、1次燃焼もしくは2次燃焼がシャープな紫色火炎（ブルー炎）を形成している。

5.2 ガスノズル孔数の影響

以上のデータは、ガスノズル4孔であり、円周方向で比較的均一な燃焼火炎が形成されていたが、円周方向での燃焼変化をみるために、ガスノズル孔数を変化させ実験を行った。その結果を Fig. 5 に示す。

ガスノズル孔数の変化に対するNOx変化も大きく、上述した4孔ノズルに対し、2孔ノズルでは1次燃焼域にエアリッチなブルー炎とガスリッチな赤色炎が混在しており、高NOxとなっている。一方、8孔ノズルでは、1次燃焼域がシャープなブルー炎となり、高NOxとなっている。

前者は、円周方向でのガスとエアの混合不均一によるエア

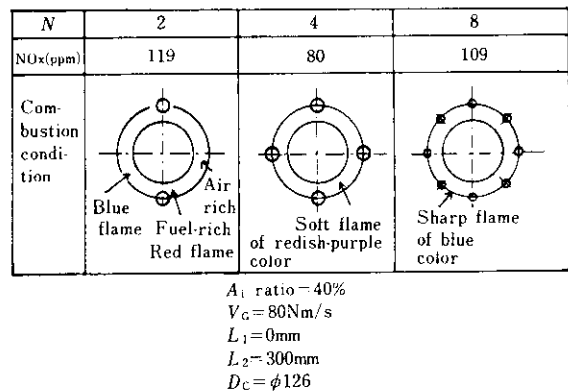


Fig. 5 Comparison of NOx emission by the change of number of gas nozzle holes

ーリッチ側での高NOx、後者は、ガスとエアの初期混合面積の増加による急速燃焼での高NOxと考えられる。特に、円周方向での混合不均一については、バーナを取り付け時に偏心させると、高NOxとなることが確認されている。

以上の結果をもとに、以降のバーナは4孔ガスノズルとした。

5.3 ガス流速の影響

中央にガスノズル、外周にエアノズルを配する一般のバーナでは、ガスとエアの運動量比、 M_G/M_A の増減と燃焼性はよい対応を示し、 M_G/M_A の減少につれて急速燃焼(シャープな燃焼)となる³⁾。

燃焼性を变化する目的で、ガスの噴出速度 V_G を変化させてNOx生成を調査した。その結果を Fig. 6 に示す。本実験でも、上述のように、 V_G の増大にともない、ソフトな燃焼火炎となり、低NOxとなる。一般に、 M_G/M_A の影響は、 $M_G/M_A \leq 0.2 \sim 0.3$ では、エア一流が支配のシャープな燃焼となるが、 M_G/M_A の増加により火炎長は飽和の傾向にあるので、 V_G をさらに増大しても、NOxは大幅に低減しないと考えられる。

また、Cガスの供給圧力の制限等を考慮して、 V_G を上げずに、エアノズルからの噴出速度を下げ、 M_G/M_A を増加することも、当然低NOxに有利であると考え、リテンションフランジをエア上流側に取りつけて、 A_0 ノズルからの実質的なエア一流速を減少させて、その影響を調査した。その結果を次に述べる。

5.4 リテンションフランジ位置の影響

リテンションフランジを $L_1=30\text{mm}$ の位置に取りつけて、 $V_G=60, 80\text{Nm/s}$ で実験し、他のバーナ条件は Fig. 6 と同一にした。このとき、 L_1 とフランジ部隙間 (A_0 ノズル部の隙間)の比は6で、ほぼ整流されていると考えられる。

実験の結果は、Table 1 に示すように、 $V_G=60\text{Nm/s}$ でも低NOxとなっており、Fig. 6における $V_G=80\text{Nm/s}$ との差が小さい。ここに、 A_0 ノズルで A_0 が整流されるとすると実 A_0 流速は、 3.7Nm/s となる。

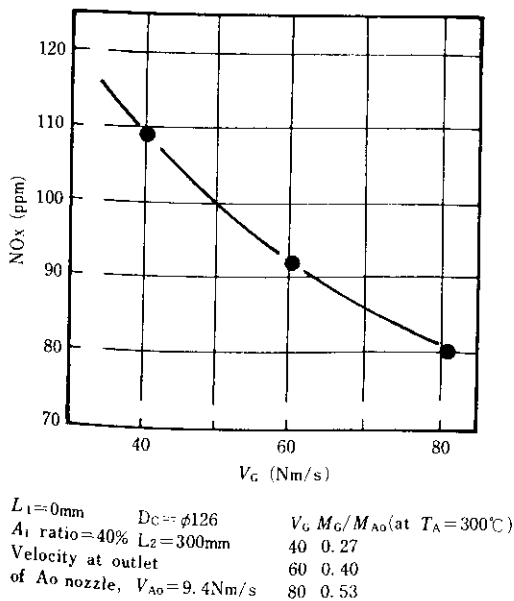


Fig. 6 Influence of gas velocity on NOx emission

Table 1 NOx emission

V_G (Nm/s)	NOx(ppm)	M_G/M_{A_0}
60	76~77	1.02
80	79~80	1.37

以上の V_G と L_1 変更の結果から、ラジアントチューブの長手方向での均一燃焼を図るには、1次燃焼の緩慢化が重要であると考え、燃焼要因を M_G/M_{A_0} で整理した。Fig. 7にNOxと M_G/M_{A_0} の関係を示す。

Fig. 7は、 A_0 ノズル先端部で完全に整流されているとした場合であるが、ガス流支配となる $M_G/M_{A_0} \geq 0.5$ では、NOxはほぼ飽和に達している。一方、 $M_G/M_{A_0} \leq 0.4$ では、1次燃焼がシャープなブルー炎となり、その減少にともない高NOxとなっている。

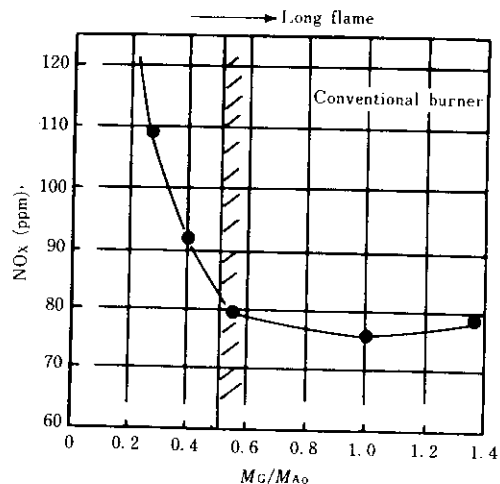


Fig. 7 Influence of momentum ratio between gas and air on NOx emission

5.5 ガスチャンバー径の影響

Fig. 3において、 L_1 部分における A_0 の整流は、 L_1 長さやガスチャンバー径 D_c の大きさにより異なると考え、 D_c の影響を調査した (L_1 については、実験バーナの制約で固定した)。

D_c の影響については、内筒長さ L_2 の短いバーナを用いて調査したのでNOxレベルは高い状態にある。バーナ条件とNOx生成の関係について Fig. 8に示す (L_2 の影響は後述する)。

$L_1=30\text{mm}$ の条件で、 $D_c < \phi 120$ では L_1 部分での整流効果がなく、NOxは増加する。Fig. 9に A_0 とCガスの噴流線模式図を示したが、両者の噴出角は片側 11° としている。 $D_c = \phi 126$ では、 A_0 ノズル先端が流線にぎりぎり触れる程度であるが、外周がラジアントチューブで括がりがなく、チャンバー出口で燃焼による膨張があるので、上記数値より噴出角は大きくなっていると考えられる。

$D_c = \phi 114$ では、外流エアが噴流に影響を与えず、逆に外流エアとガスの混合位置が手前に移行し、1次燃焼が促進されているといえる。

5.6 内筒長さの影響

KS-2バーナの性能を決定する要因として、1次燃焼ゾーン

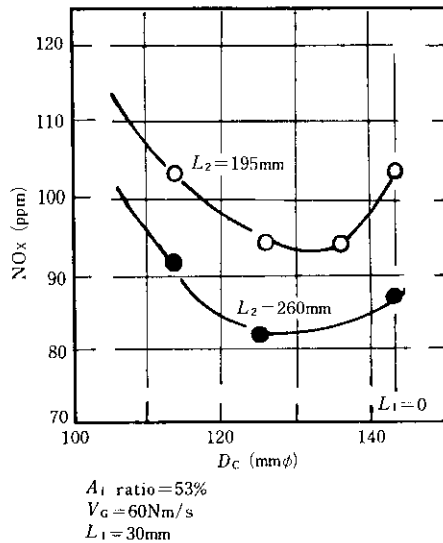


Fig. 8 Influence of gas chamber diameter on NO_x emission

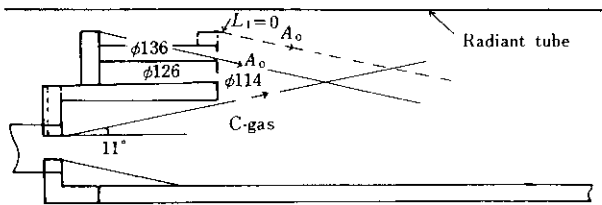


Fig. 9 Flow model of gas and outer air by the change of gas chamber diameter of KS-2 burner

長さつまり L_2 が重要である。この影響を調査した結果を Fig. 10 に示す。

$L_2 \leq 200$ mm では、 L_2 の減少にともない NO_x が増加し、 $L_2 > 250$ mm で飽和の傾向にある。

特に、内筒については、寿命の関係でできるだけ短いほうが好ましい。 $L_2 = 300$ mm にて内筒先端温度を測定したところ約 1000~1050°C 程度であり、内筒およびノズル部材質は SUS310S

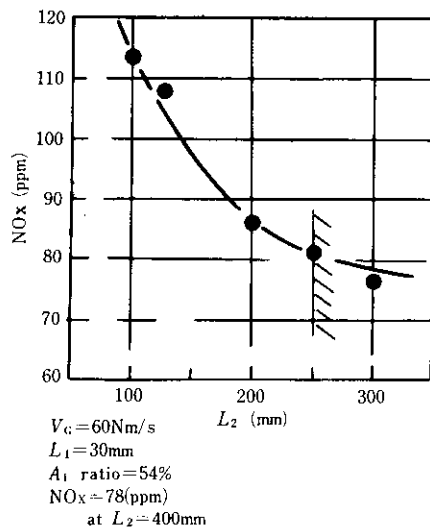


Fig. 10 Influence of inner pipe length on NO_x emission

とした。なお、高温部は先端50mm程度であった。

5.7 KS-2 バーナの低 NO_x 条件と実炉への適用

KS-2 バーナの主要なバーナ各部要素の NO_x 生成に対する影響を述べてきたが、Table 2 に本バーナの低 NO_x 条件と実炉への適用例(KM-CAL)を示し、Fig. 11 にバーナ構造の概要を示す。

実炉へ適用したバーナについて実験炉と実炉での、NO_x 生成状況を従来バーナと比較して、Fig. 12, Fig. 13 に示す。実験炉・実炉ともほぼ類似の傾向にあり従来バーナに比べて約35%の大幅な低減率を得ている。

この結果は、KS-2 バーナが Table 2 に示す基本仕様を設定することにより、ラジアントチューブ内で、ソフトかつスムーズな2段燃焼を可能としたことを示している。

これまで、NO_x 生成を主体とした実験について述べたが、次に NO_x 以外の諸燃焼特性を調査した結果について述べる。

6. KS-2 バーナの諸特性

6.1 ラジアントチューブの温度分布

バーナを実炉に適用したときのラジアントチューブの温度分布を Fig. 14 に示す。従来バーナが、ラジアントチューブの1mの距離で高温ピークを示し、その部分から急激な燃焼が開始しているのに対して、KS-2 バーナでは全体的に均一な分布を示し、スムーズな2段燃焼がなされていることがわかる。その結果、ラジアントチューブ各部における燃焼温度の平坦化となって表われている。

6.2 燃焼効率

ラジアントチューブ用バーナの燃焼効率、排ガス温度により決まるものである。本実験では一定の燃焼を投入し $\bar{T}_{R-T} \approx$

Table 2 Low NO_x conditions of KS-2 burner at experimental furnace and KM-CAL (6B R·Tube)

Burner factor	Experimental furnace	KM-CAL
Ai ratio(%)	40~80	60
N	4	4
L_1 - D_c	30mm- ϕ 120 \leq	30mm- ϕ 120
M_C/M_{A_0}	0.5 \leq	1.2
		$V_C = 60\text{Nm/s}$
L_2	250 \leq	260mm

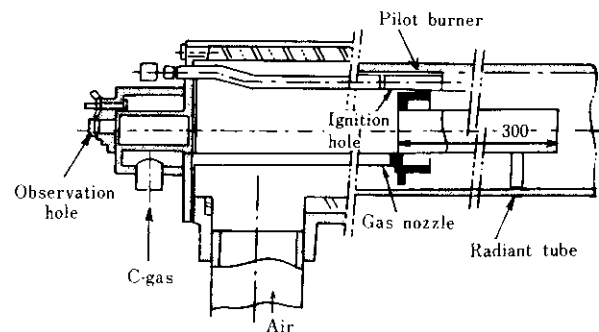


Fig. 11 Design of KS-2 burner applied at KM-CAL

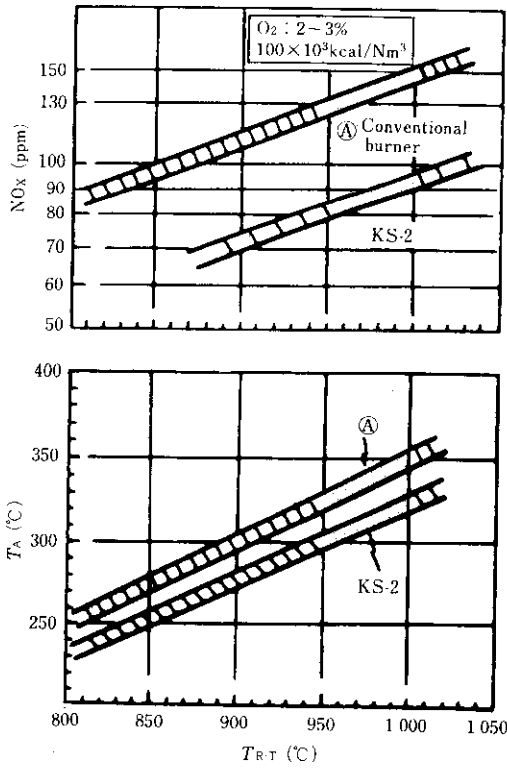


Fig. 12 Comparison of NOx emission between conventional burner and KS-2 burner at experimental furnace

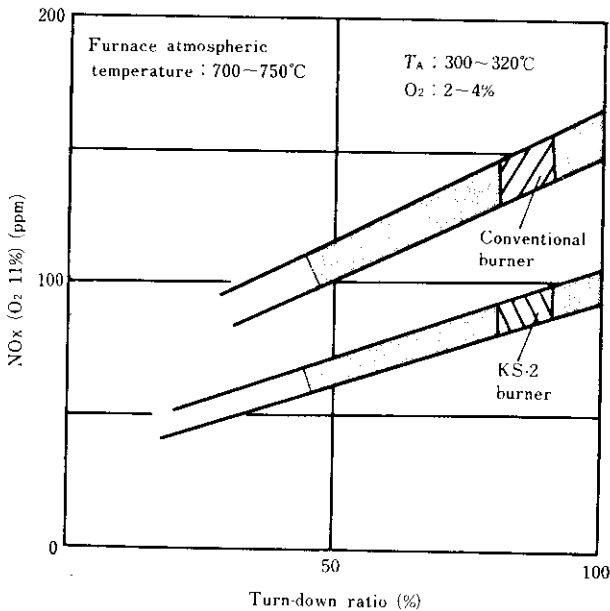


Fig. 13 Comparison of NOx emission between conventional burner and KS-2 burner at actual furnace

1000°Cの定常状態に達した後、従来バーナとKS-2バーナを比較したものでTable 3に示すようにKSバーナは排ガス温度および予熱エア温度でそれぞれ約50°C、25°C低温で、安定した。この結果は、KS-2バーナの燃焼効率がよいことを示しており、この燃焼効率向上は、約2.5%の燃料原単位低減に寄与している。以上のラジアントチューブ温度分布と燃焼効率の改善は、低NOx性を重視したバーナでの結果であるが、低NOx性を必

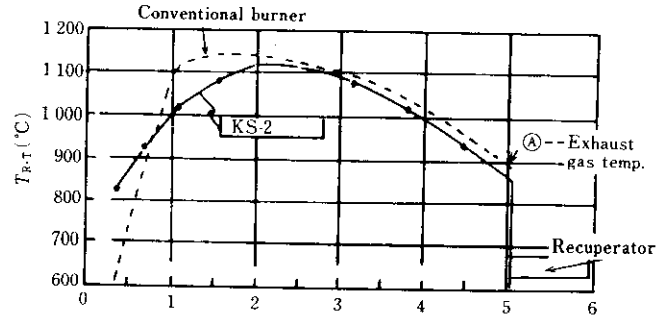


Fig. 14 Temperature distribution of radiant tube

Table 3 Comparison of furnace efficiency between conventional and KS-2 burner (at excess O₂ of 2%)

	Conventional burner	KS burner	
Exhaust gas temp. T_g	°C	870	820
Q_g	kcal/C Nm ³	1730	1620
Preheated air temp. T_A	°C	350	325
Preheated air sensible heat Q_A	kcal/C · Nm ³	482	458
Recovery efficiency of recuperator $\mu = Q_A/Q_g$		0.279	0.283 : about 0.28
Furnace efficiency α		0.712	0.729
Decrease rate of fuel consumption	1 →		0.974

$$Q_c = \frac{4300}{4300 - (1 - \mu)Q_g} (Q_s + Q_L)$$

Q_c : Fuel consumption (kcal/t)

4300: Heating value of C-gas (kcal/C · Nm³)

Q_g : Exhaust gas sensible heat from T_g and O₂ (%) (kcal/C · Nm³)

$$\alpha = \frac{4300 - (1 - 0.28)Q_g}{4300}$$

Q_s : Strip sensible heat (kcal/t)

Q_L : Heat loss (kcal/t)

要としない場合は、バーナの各部要素を適切に設定することにより、排ガス温度をかなり低くすることができることがわかっている。

6.3 着火性および騒音

KS-2バーナの着火域は、Fig. 3に示すガスチャンバ内部に生じる、CガスとA₀の安定した循環部分に形成されている。また、エアを2分割にすることによって、エア過剰による吹き消えが容易に防止でき、低ターンダウン時にも安定した着火性を維持することができている。実炉においては、低ターンダウン時のガスのカットは従来バーナでは20%であったが、KS-2バーナでは10%まで下げて使用でき、バーナは連続燃焼で操業できるようになった。

一方、騒音に関しては、上記の着火安定性向上、チューブ内でのスムーズな2段燃焼とFig. 11に示す内部パイロットバーナの採用により、以下に示すように大幅な騒音の減少となっている。

従来バーナ：90db以上

KS-2バーナ：75db以下（暗騒音レベル）

以上のKS-2バーナは、KM-CAL用の6Bラジアントチューブに適用したものであるが、その後、5B~7Bラジアントチューブに適用する技術も確立している。KS-2バーナは、現在、当社や他社のCAL、CGL、鉄粉仕上炉等広範囲に適用されている。

7. あとがき

KM-CALの建設時に開発したラジアントチューブ用KS-2バーナは、ラジアントチューブの狭い空間で、スムーズな2段燃焼を実現できる特徴を有し、低NO_xと省エネルギーを同時

に達成できるバーナである。

実がでのNO_x低減効果は、ほぼ35%であるが、それ以外に低ターンダウン時の燃焼安定性に優れているとともに、ラジアントチューブ用バーナに特有の騒音問題も解消される利点があり、現在数多くの炉で使用されている。

参 考 文 献

- 1) 佐藤ら：川崎製鉄技報，10（1978）2・3，83
- 2) 下向ら：川崎製鉄技報，13（1981）3，154
- 3) 辻正一：燃焼機器工学，日刊工業版（1971），61～97