

高炉への微粉炭吹込みにおける吹込部の構造と燃焼特性

古川 武*・松浦 正博*・大野 陽太郎*²・岸本 純幸*³

Effect of the Structures of Injection Facilities on Combustion Characteristics
in the Pulverized Coal Injection into a Blast Furnace

Takeshi FURUKAWA, Masahiro MATSU-URA, Yotaro OHNO and Sumiyuki KISHIMOTO

Synopsis : Concerning a large amount of pulverized coal injection into a blast furnace, the effect of the structures of injection facilities on the combustion of pulverized coal in a raceway cavity has been studied theoretically and experimentally.

The mixing of pulverized coal with oxygen is important to promote the combustion of pulverized coal in the raceway cavity. The effect of the mixing of pulverized coal with oxygen on the subsequent combustion in the raceway cavity was estimated theoretically. With respect to the structure of injection parts, the effects of the spouting velocity and angle of oxygen jet on the pulverized coal combustion was estimated experimentally using the empty combustion furnace. As the results, the larger spouting velocity of oxygen jet and larger cross angle of the pulverized coal and oxygen injections were concluded to be preferable for the promotion of the combustion of pulverized coal. Furthermore, the effect of increasing pulverized coal flow rate and the steam injection on the combustion of pulverized coal was estimated.

Based on above discussions, the injection burner and tuyere of the actual size was made and equipped on the commercial blast furnace for availability test. As the results, the performance of the developed pulverized coal-oxygen burner was confirmed for commercial use from the points of combustibility, durability, abilities of the operation, maintenance and security.

Key words : blast furnace ; pulverized coal ; injection ; oxygen ; combustion ; burner.

1. 緒言

高炉への微粉炭吹込みは広く普及しているが¹, 最近ではコークス炉の老朽化対応としても多量吹込みが指向されている²。微粉炭の高炉への多量吹込みには, レースウェイ空間での微粉炭の高負荷燃焼を達成する必要がある。著者らは先に, レースウェイ空間における微粉炭の燃焼挙動について理論的・実験的検討を行い, 高負荷燃焼の達成のためには, レースウェイ深度を十分に保ち, 微粉炭と酸素の混合が促進される吹込方法の採用が重要であることを示した^{2,3}。その報告では, レースウェイ空間での微粉炭の燃焼率の定式化を行い, 微粉炭と酸素の混合が重要因子であることを示し, その混合因子 F_k を新たに導入し, 評価した。その検討結果をもとにレースウェイ空間での微粉炭の燃焼限界に及ぼす吹込条件の効果および高炉への微粉炭の吹込限界を検討した。

本報告では, 微粉炭と酸素の混合状態すなわち混合因子 F_k に及ぼす吹込部の構造の影響について, 前報の燃焼率推算式を用いた検討と燃焼実験を行って評価した結果, さら

にその検討結果に基づいて設計・製作した実機規模の微粉炭-酸素バーナーを実高炉の羽口1本に設置して試験を行った結果について報告する。

2. 微粉炭と酸素の混合状態が燃焼に及ぼす影響の理論的検討

2・1 レースウェイ空間における微粉炭の燃焼率推算式

著者らは前報においてレースウェイ空間での微粉炭の燃焼率 η を推定する下式を導出した²。

$$\eta = \frac{24}{E_C \cdot R_g} \cdot \frac{6}{D_p \cdot \rho_p} \cdot \frac{1}{1 + B \cdot (Y_{O_2})_0 \cdot X} \cdot (Y_{O_2})_0 \cdot \frac{P}{T} \cdot K \cdot \tau \dots\dots\dots (1)$$

$$B = 22.4 \cdot (E_o/32 + E_c/24 + E_H/2 + E_N/28) \dots\dots\dots (2)$$

ここで, η : 微粉炭の燃焼率(-), E_C, E_H, E_N, E_o : 微粉炭(乾ベース)の炭素, 水素, 窒素, 酸素分率(-), R_g : 気体定数(=8.31441・10³m³・Pa/(K・kmol)), D_p : 微粉炭粒子径(m), ρ_p : 微粉炭粒子の見掛け密度(kg/m³),

平成8年6月7日受付 平成8年9月9日受理 (Received on June 7, 1996; Accepted on Sep. 9, 1996)

* NKK総合材料技術研究所 (Materials & Processing Research Center, NKK Corp., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

* 2 NKK技術企画部 (Planning and Coordination Department, NKK Corp.)

* 3 NKK福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corp.)

(Y_{O_2})₀: 送風ガスの酸素モル分率(-), X: 微粉炭酸素比 (kg/Nm³), P: ガス圧力(Pa), T: 理論火炎温度(K), K: 総括反応速度定数(m/s), τ : 微粉炭粒子のレースウェイ内滞留時間(s)²⁾。

微粉炭粒子の燃焼反応の速度過程は、微粉炭と酸素の乱流拡散、微粉炭粒子表面のガス境膜拡散、化学反応の3過程からなり、その速度定数は次式で与えられる⁴⁾。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_t} + \frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_c} \dots\dots\dots (3)$$

$$K_t = F_K \cdot (3.6 \cdot 10^{-2} \cdot V \cdot \rho_P \cdot D_P \cdot D_R / \tau / D_f) \dots\dots (4)$$

$$K_f = 3.65 \cdot 10^{-10} / (D_P \cdot P) \cdot (T/273)^{1.75} \dots\dots\dots (5)$$

$$K_c = 6.5 \cdot 10^6 \cdot T^{0.5} \cdot \exp(-22000/T) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 K_t : 乱流混合拡散速度定数(m/s), K_f : ガス境膜拡散速度定数(m/s), K_c : 化学反応速度定数(m/s), F_K : 乱流拡散速度定数補正係数(-), V: 微粉炭単位重量当りの燃焼ガス体積(m³/kg), D_R : レースウェイ深度(m)²⁾, D_f : 燃焼火炎の平均径(m)²⁾。

微粉炭と酸素の混合拡散速度は吹込方法に応じて変化するので、(4)式では新たに混合特性の差異を表す補正係数 F_K を導入し、速度定数に乗じている。(1)式の妥当性はコークス充填炉での燃焼実験により検証した²⁾。

2・2 微粉炭の燃焼限界に及ぼす微粉炭と酸素との混合状態の効果

(1)式で微粉炭酸素比(吹込微粉炭量/送風中酸素量)Xを増加させると燃焼率 η は減少するが、Xがある値までは $\eta > 1$ で、レースウェイ空間内で微粉炭の燃焼が完了することを意味する。 $\eta = 1$ となる時が吹込んだ微粉炭の全量が燃焼する限界であり、この時の微粉炭酸素比を最大燃焼可能微粉炭酸素比 X_m と定義した²⁾。ただし、 X_m はCO, H₂, H₂Sまでガス化する限界値以下である。

X_m に及ぼす微粉炭と酸素の混合の効果を評価するため、 F_K と X_m , K, K_t の関係を(1)~(6)式を用いて検討した結果をFig. 1に示す。計算条件は標準的な熱風高炉と酸素高炉⁷⁾の送風条件としてTable 1の条件を選定した。Fig. 1で(a)は熱風送風, (b)は酸素送風の計算例である。両例とも F_K の増加に伴い K_t が増加してKが増加するので X_m はほぼ直線的に増加する。 K_t は9.4m/s, K_c は $6.0 \cdot 10^3$ m/sとなる。 K_t は熱風送風で7~12m/s, 酸素送風で1~4m/sとなる。これから、レースウェイ空間での微粉炭の燃焼過程は乱流拡散とガス境膜拡散の混合律速であり、さらに酸素送風の場合は乱流拡散が支配的である。(a)の熱風送風は(b)の酸素送風に比較して送風ガス量が多いため K_t は4~6倍大きく、Kも2~4倍大きい X_m は小さい。これはKの増大よりも酸素濃度の低い影響が大きいためである。また、 F_K の増加に対する X_m の増加割合は酸素送風の方が熱風送風より大きい。これは K_t が小さく、相対的に乱流拡散過程の影響が大きいためである。これらから微粉炭と酸素の混合の促進は、

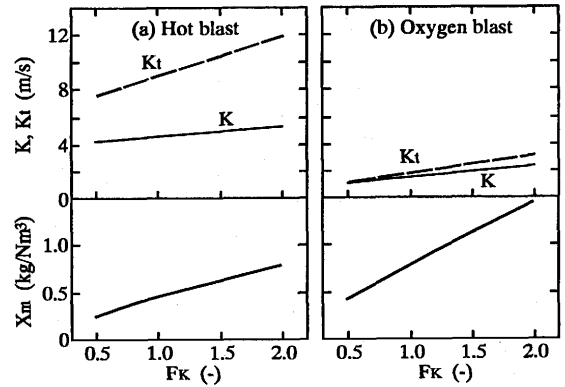


Fig. 1. Effect of correction factor of turbulent diffusion constant on maximum coal/oxygen ratio and rate constants.

Table 1. Calculating conditions.

Theoretical flame temperature T (K)	2573	
Blast pressure P (MPa)	0.405	
Particle size of pulverized coal D_P (μ m)	50	
Number of tuyeres	40	
Raceway depth D_R (m)	1.2	
	Hot blast operation	Oxygen blast operation
Production rate (t/d)	10000	13000
Blast rate (Nm ³ /t)	Air 1200	Oxygen 300
Blast rate (Nm ³ /min)	Air 205	Oxygen 68
Tuyere diameter (mm ϕ)	100	80
Control of T	Blast temp.	Steam

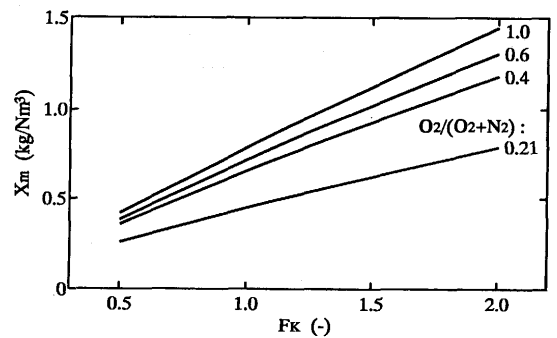


Fig. 2. Effect of correction factor of turbulent diffusion constant and oxygen concentration on maximum coal/oxygen ratio.

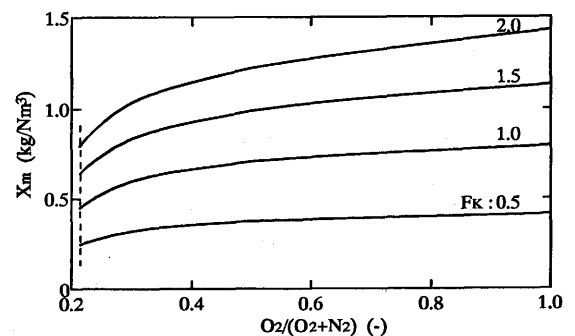


Fig. 3. Effect of oxygen concentration and correction factor of turbulent diffusion constant on maximum coal/oxygen ratio.

熱風送風および酸素送風ともに微粉炭の燃焼率の向上に大きな効果のあることがわかる。

Fig. 2 に F_K の X_m に及ぼす影響を酸素濃度をパラメータとして示した。微粉炭と酸素の混合の促進により X_m は増大し、その効果は酸素濃度が高いほど大きい。

Fig. 3 に酸素濃度の X_m に及ぼす影響を F_K をパラメータとしてまとめた。熱風送風での酸素濃度の X_m への効果は酸素濃度が低いほど、また F_K が大きいほど大きい。いかえれば微粉炭と酸素との混合が悪いと、酸素富化の効果は小さい。熱風高炉で酸素富化率を高めることは、熱流比の上昇など高炉プロセス全体に影響を及ぼすので、微粉炭の燃焼限界量を多くするには、まず、微粉炭と酸素の混合を強化して吹込むことが重要である。

3. 微粉炭と酸素の混合条件の燃焼に及ぼす影響の実験的検討

前報²⁾では、酸素を多数の小孔から噴出させる構造のバーナーで優れた燃焼性を得ることができた。そこで今回はこの多孔型構造で酸素噴出口の口径および角度を変化させて燃焼実験を行った。酸素送風を選定したのは前述のように吹込部の構造変化に対する感度が大きいことと、本研究が、著者らの一連の酸素高炉プロセスの開発⁵⁻⁷⁾の一環としても位置付けているためである。

3.1 実験装置および実験条件

実験炉を Fig. 4 に示す。横型の空洞炉で、炉側壁からプローブを挿入し、火炎温度の測定およびガス・ダストを吸引採

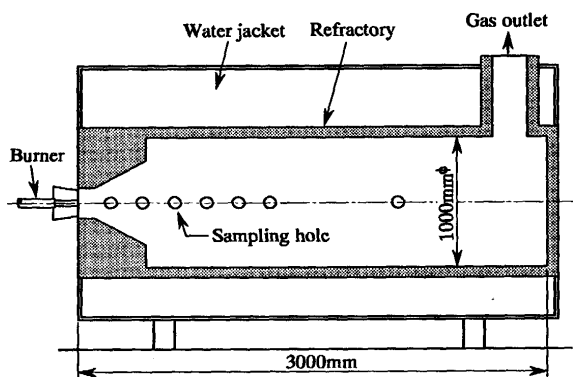


Fig. 4. Schematic drawing of combustion furnace.

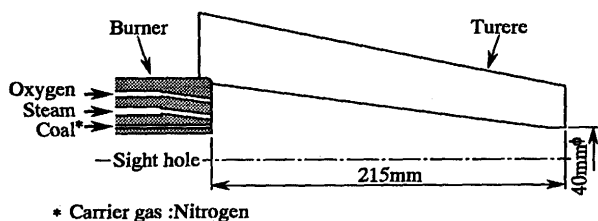


Fig. 5. Schematic drawing of tuyere and burner head.

取し、分析に供した。

送風ガスは、酸素高炉プロセス⁷⁾の送風条件から酸素と蒸気を用いた。吹込部の構造を Fig. 5 に示す。バーナー先端部は酸素を多数の小孔から噴出させる構造で、蒸気吹込孔は酸素吹込孔より内側に位置させて羽口内面での蒸気の凝縮を防止するとともに、酸素ジェットに同伴させて微粉炭との混合を図った。羽口内空間は混合室とした。羽口先端内径およびバーナー先端と羽口先端の距離は、後述する実高炉への適用規模の1/2である。

微粉炭—酸素—蒸気送風時のコークス充填下での理論火炎温度 T を Fig. 6 に示す。基準条件を「 $X=0.8\text{kg}/\text{Nm}^3$, $T=2300^\circ\text{C}$ 」とし、●の条件で実験を行った。流量は後述する実高炉と流速同一の相似条件から酸素流量 $254\text{Nm}^3/\text{h}$ を基準とした。吹込用の微粉炭として Table 2 に示す性状の一般炭

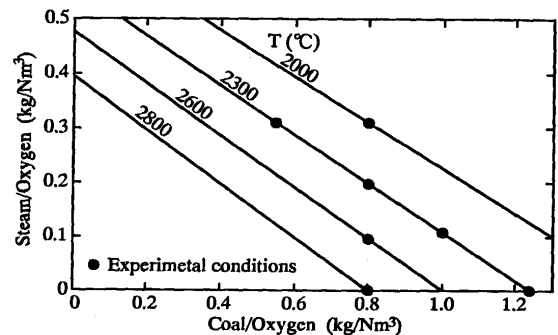


Fig. 6. Theoretical flame temperature under coal, oxygen and steam blast.

Table 2. Coal properties.

Ultimate analysis (d.a.f.%)					Proximate analysis (d.b.%)		
C	H	N	O	S	FC	VM	ash
76.7	4.9	2.0	8.0	0.6	58.8	33.4	7.8

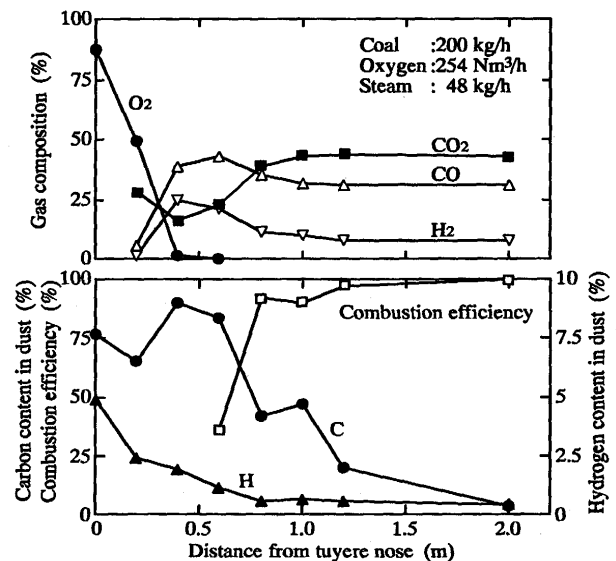


Fig. 7. Axial distribution of gas composition, dust composition and combustion efficiency.

を用い、粒度は200メッシュ以下が80%以上とした。

3・2 燃焼火炎中のガス、ダストの組成成分

バーナー軸方向のガス組成、ダスト組成および燃焼率 η_E の分布をFig. 7に示す。酸素は羽口先端から0.6mで消失している。酸素量が完全燃焼の約80%なので、CO、H₂が残存している。組成変化は1.2mでほぼ一定となり、反応はこの距離で完了している。ダスト中、水素濃度Hの減少は揮発分の気化の過程と考えられ、約0.8mでほぼ完了している。炭素濃度Cは噴出直後に石炭中の分率より大きくなったあと減少しているが、これはガス化した揮発分の熱分解炭素も合わせて採取しているためと考えられる。ダスト組成から微粉炭中炭素の燃焼率 η_E を灰分は不変として(7)式から求めた。Co, (ash)_oは石炭中の炭素、灰分分率で、C_d, (ash)_dはダスト中のそれぞれである。

$$\eta_E = 1 - C_d / Co \cdot (ash)_o / (ash)_d \dots\dots\dots (7)$$

3・3 燃焼に及ぼす酸素噴出口構造の影響

3・3・1 酸素噴出速度の影響

酸素噴出口径すなわち噴出速度を変化させた場合のバーナー軸方向の η_E 分布をFig. 8に示す。噴出口角度は7°とした。微粉炭と酸素の混合状態の燃焼への影響を明確にするために微粉炭と酸素のみを吹込み、基準流量の60%の微粉炭流量125kg/h、酸素流量154Nm³/hで実験を行った。燃焼の進行は口径が小さいほど速い。流量と羽口径は同一なため羽口出口のガス流速は同じとなるので、Fig. 8は滞留時間

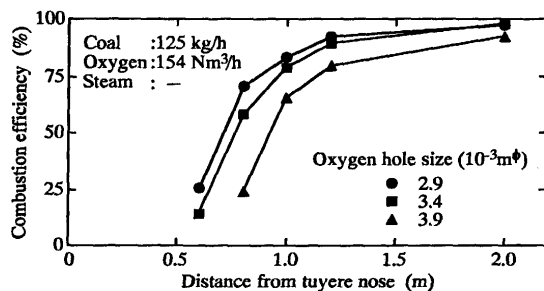


Fig. 8. Effect of oxygen hole size on combustion efficiency.

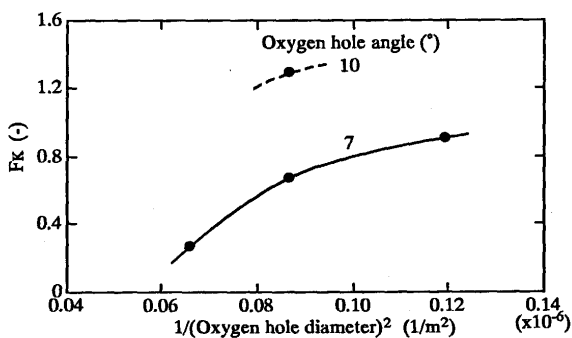


Fig. 9. Effect of oxygen jet velocity and angle on correction factor of turbulent diffusion constant.

と η_E の関係となる。同一滞留時間での η_E の差異は燃焼速度の差を示しており、酸素の噴出速度の変化が微粉炭と酸素との混合状態に影響し、燃焼速度に影響している。(1)~(6)式から η を求め、実験値と計算値が合致するF_kを求めてFig. 9に示した。横軸は酸素の噴出流速に対応する(1/(酸素噴出口径)²)を採った。酸素噴出速度が大きいほどF_kは大きく、微粉炭と酸素との混合が促進されて燃焼が促進される。しかし、酸素噴出速度が大きくなるにつれ、F_kの値は飽和する傾向にある。

3・3・2 噴出角度の影響

酸素噴出口の口径は3.4・10⁻³m^{phi}で、角度を7°から10°に変化させた場合のバーナー軸方向の η_E 分布をFig.10に示す。7°から10°に上げると燃焼の進行は早くなる。Fig. 9に10°にした場合のF_k値を併せて示したが、F_kは0.7から1.3と約2倍になり、微粉炭と酸素の混合が促進されて燃焼が早くなっていることがわかる。

3・4 微粉炭酸素比の燃焼への影響

微粉炭と酸素との混合状態はバーナーの構造が同一でも、その負荷によって変化すると考えられる。負荷の変更は、酸素流量一定で微粉炭流量を変化させる、すなわちXを変化させる場合と、X一定で流量を変化させる場合とがある。後者については送風量とレースウェイ深度および圧力との関係で前報²⁾で報告した。前者はバーナー自身の性能に関する。そこで混合状態の負荷依存性をXを変化させて評価した。バーナー構造は「酸素噴出口径3.4・10⁻³m^{phi}、角度10°」とした。T一定でXの変化に伴うバーナー軸方向の η_E 分布をFig. 11に示す。Xが増加すると燃焼の進行は遅くなる。本バーナーを流速一定の条件で後述の実機規模にスケールアップして実高炉で使用した時、レースウェイ深度は約1.2mと推定される²⁾ので、Fig.11の1.0~1.2mの距離での η_E とXの関係を図12に示した。Xが約1kg/Nm³を越えると燃焼率は急激に低下しているが、それ以下では80%以上の燃焼率が得られている。これから本バーナーを流速一定の条件でスケールアップした実機バーナーではXが約1 kg/Nm³までは80%以上の燃焼率を得ることができると考えられる。X=1.0~1.2 kg/Nm³の実験結果のF_kを求めると1.4~1.5となり、Fig. 9に示した値1.3より大きい。本条件はFig. 9の条件より燃焼

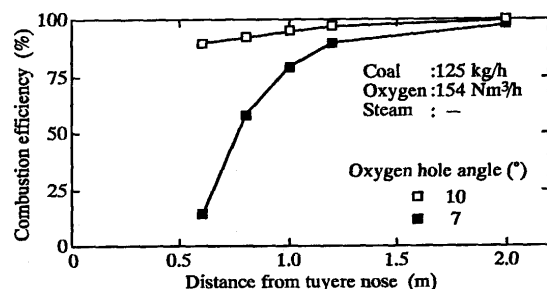


Fig. 10. Effect of oxygen hole angle on combustion efficiency.

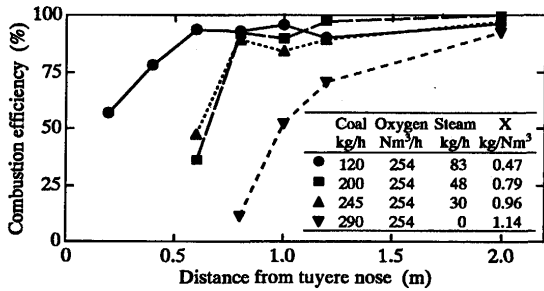


Fig. 11. Effect of coal/oxygen ratio on combustion efficiency.

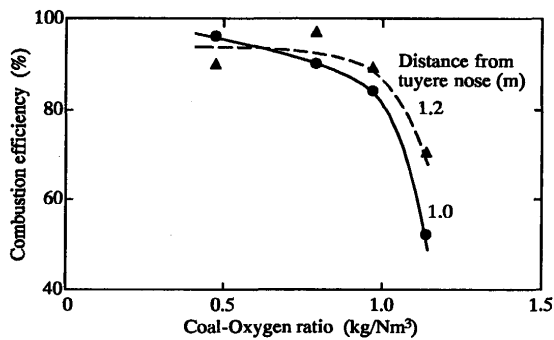


Fig. 12. Relation between combustion efficiency at same distance and coal/oxygen ratio.

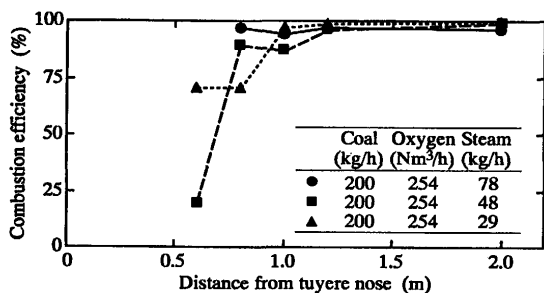


Fig. 13. Effect of steam rate on combustion efficiency.

負荷が大きく、すなわち流量が多く、前報²⁾での検討で示したように、この差が微粉炭と酸素の混合状態に影響していると考えられる。また、Fig.12の実験結果から1.0~1.2mの距離での η_E が100%となる F_K は約2.0であり、本開発の構造は混合の面からは優れた構造であるといえる。

3.5 水蒸気量の燃焼への影響

Xを変化させた前述の実験では、Tを一定とするために蒸気量も変化させている。ここではX一定で蒸気量のみ変化させて燃焼への影響を調べた。この場合Tは変化するが、前報²⁾での検討で2000~2800°CではTの η に及ぼす影響は小さい。蒸気量の変化に伴うバーナー軸方向の η_E 分布をFig.13に示す。 η_E 分布に顕著な差異はない。レースウェイのような高温場での微粉炭粒子表面での反応は $C + 1/2O_2 = CO$ の反応が支配的で、酸素濃度がかなり低くなるまで CO_2 や H_2O との反応速度は遅いとする報告⁹⁾があり、本実験結果とも一致す

る。一方、蒸気の添加により燃焼率が向上するとの報告⁹⁾もある。同報告での実験は(蒸気量/酸素流量)は本報告の実験範囲にあるが、溶融鉱石存在下のコークス充填層での実験であり、水蒸気の効果はレースウェイ外部の充填層中での反応も含めたものである。以上のことから、水蒸気添加の効果はレースウェイ内では小さく、充填層中での未燃のチャーの反応消費に効果があるものと推察される。

4. 羽口吹込部の構造と混合性

微粉炭と酸素との混合が促進される構造の採用により、レースウェイ空間での微粉炭の燃焼負荷を高めることができる。しかし、その構造には高炉の羽口へ取り付けて使用するという制約条件がある。前報²⁾での検討で、高炉への微粉炭を300kg/t吹込むためには、炉内反応による未燃チャーの消費を含めると、 F_K が1.0で送風中酸素濃度が約60%で可能と推定された。

F_K を大きくするための吹込部の構造に関して、旋回流は安定したレースウェイ形成に不適であることは前報²⁾で述べた。バーナーからの酸素の噴出速度を大きくすることは微粉炭と酸素の混合を促進するが、過剰に大きくしても送風圧力を高くするだけで、その混合促進効果はFig.9に示すように飽和する。また、本実験の吹込部の構造は羽口内で多数の小孔からの酸素噴流が微粉炭流に貫通して混合を促進しており、酸素噴出角度の増大すなわち酸素噴流と微粉炭噴流との出合角度の増大による促進効果も大きい。しかし、噴出角度を大きくすると噴流が羽口内面に衝突し摩耗の問題が生じる。これらを併せて考慮した本開発の構造は前述のように F_K が約1.45で、レースウェイ深さが通常の高炉並の1.2mの時、 $X=1.0$ で η は80%以上、 $X=1.2$ で η は70%以上が得られると推定され、燃焼性の面からは実炉での微粉炭の多量吹込みに十分対応できると考えられる。

5. 実高炉への適用結果

5.1 試験設備および条件

前述の検討結果をもとに実機規模のバーナーを製作し、京浜第2高炉(内容積4052m³、送風羽口数34本)の羽口1本に設置して実機試験を行った。試験条件は福山第2高炉(内容積2828m³、羽口数32本)の酸素高炉への改造を想定して決定した。現状の装入設備能力から操業度3.0t/(m³・d)とし、微粉炭比300kg/t、微粉炭酸素比は3・4の結果から燃焼率90%以上を確保するために0.80とした。したがって、バーナーの基本仕様は微粉炭流量は3500kg/h、酸素流量は4400Nm³/hとし、羽口先温度は2000~2300°Cを調整範囲として、休・送風およびオールコークス操業に対応して蒸気流量は2500kg/h、空気流量は3180Nm³/hとした。羽口径はレースウェイ深度が通常高炉並に確保されるように0.08m^φとした。羽

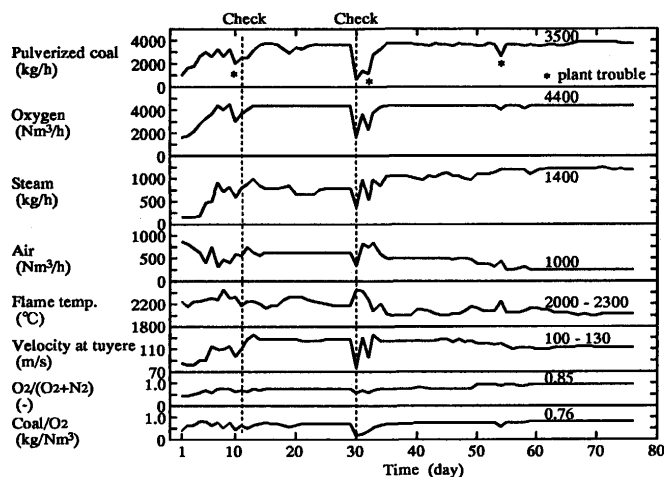


Fig. 14. Operational results of Oxy-coal burner at Keihin No. 2 blast furnace.

口内での混合性の評価のため流速一定の条件を採用してバーナーのスケーリング¹⁰⁾をしている。バーナーへの微粉炭供給は既設の羽口4本への微粉炭供給ラインを1本にまとめて行い、微粉炭流量は差圧式流量計¹¹⁾で計測した。実機では燃焼性能に加えて、耐久性、操業対応性、保守・安全性が求められるため、小羽口とブローパイプ部を改造して必要機能の確保を図った。試験は2.5ヶ月連続して行い、各性能を調査した。

5・2 試験結果

バーナーの試験経過をFig.14に示す。試験後期の約22日間は、微粉炭酸素比0.80となり、パージ空气中酸素を含めて送風酸素濃度は85%となり、微粉炭流量3500kg/hとなった。この期間の平均操業条件は生産量8700t/d、バーナー羽口を除く送風量6900Nm³/min、羽口先送風圧力0.363MPaであった。微粉炭吹込量は通常羽口経由で58.6kg/t、バーナー羽口経由で9.6kg/tであった。微粉炭の кокс との置換率は、本バーナー使用試験の直前1ヶ月間の微粉炭比約67kg/tの操業結果を基準として、前述の試験後期の生産量、送風条件、出鉄滓条件、原料条件の操業諸元変化分を燃料比補正して求めると、基準期間の0.75とほぼ等しい0.77であった。ダスト中炭素濃度に変化は無く、これらのことからバーナーから吹込まれた微粉炭のレースウェイ内での燃焼は確保されていたと推定される。

上述の結果から、バーナー羽口単独での微粉炭量/生成鉄鉄量すなわち微粉炭比は、熱風羽口とバーナー羽口で鉄鉄生成量が同一とした場合は微粉炭比は328kg/tとなり、降下кокс量に比例するとした場合は246kg/tとなる。

試験期間中の休風時にバーナーと羽口の点検を行い、耐久性を確認した。周辺の炉壁温度の変化は試験前後で小さく、高炉本体にも損傷は無かったとみられる。操業も安定して推移し、休・送風およびオールコークス操業も安定して行えた。以上の実機試験の結果から、本研究における微粉炭-酸素バーナーの実機規模での必要機能である燃焼性能、耐久性能、操業対応性能、保守・安全性能が確認できた。

6. 結論

高炉への微粉炭の多量吹込みに対して、吹込部の構造の燃焼への効果について、理論的、実験的検討を行った。また、その検討結果に基づいて実機規模の吹込部を製作し、実高炉に設置して試験を行った。

得られた結論は以下の通りである

- (1) 微粉炭と酸素の混合を促進することにより、レースウェイ空間における微粉炭の燃焼限界量を高めることができる。混合促進の効果は酸素濃度が高いほど大きい。
- (2) 微粉炭と酸素の混合を促進する吹込部の構造は、酸素の噴出流速が高く、また、微粉炭と酸素との出合角度が大きい構造である。
- (3) 酸素流量一定での微粉炭流量の増加は混合を促進するが、微粉炭酸素比の増加により燃焼の進行は遅くなる。
- (4) 蒸気吹込みの微粉炭の燃焼に及ぼす効果は小さい。
- (5) 実機規模の吹込部を製作し、実高炉に設置して行った試験の結果、微粉炭酸素比0.80で微粉炭比は250~330 kg/tであった。性能は実機使用に十分対応できた。

文 献

- 1) 例えば、稲葉晋一、八木順一郎：鉄と鋼，78 (1992)，1187。
- 2) 大野陽太郎，古川 武，松浦正博：鉄と鋼，78 (1992)，50。
- 3) Y. Ohno, T. Furukawa and M. Matsu-ura: ISIJ Int., 34 (1994), 641.
- 4) S. Yagi and D. Kunii: Proc. 5th Symposium on Combustion, (1955), 231.
- 5) 大野陽太郎，堀田裕久，松浦正博，光藤浩之，斎藤 汎：鉄と鋼，75 (1989)，1278。
- 6) 大野陽太郎，松浦正博：鉄と鋼，76 (1990)，1262。
- 7) Y. Ohno, M. Matsu-ura, H. Mitsufuji and T. Furukawa: ISIJ Int., 34 (1994), 641.
- 8) M. A. Field, D. W. Gill, B. B. Morgan and P. G. W. Hawksley: Combustion of Pulverized Coal, The British Coal Research Association, (1967), 205.
- 9) 山口一良，上野浩光，田村健二，中山正章，松井 章：材料とプロセス，4 (1991)，88。
- 10) 例えば，ベア，シガー：燃焼の空気力学，日本熱エネルギー技術協会，(1976)，194。
- 11) 佐藤辰夫，川島章浩，岸本純幸，鴨志田友男，石井邦彦：材料とプロセス，1 (1988)，1041。