

微粉炭多量吹き込み用高燃焼率ランスの開発

佐藤 道貴*・村井 亮太*・有山 達郎*・牧 章*²・下村 昭夫*²・森 候寿*²

Development of Injection Lance with High Combustibility for High Rate Coal Injection
 Michitaka SATO, Ryota MURAI, Tatsuro ARIYAMA, Akira MAKI, Akio SHIMOMURA and Kimitoshi MORI

Synopsis : To attain a high rate injection of pulverized coal into a blast furnace, it is required to increase a combustion efficiency of pulverized coal in the raceway. Therefore, it is important to design the injection lance with high combustibility based on the essential understanding of combustion behavior of pulverized coal.

Previous to the start up of the high rate injection operation at Fukuyama No.4 BF, a 2-dimensional mathematical model of pulverized coal combustion taking the lance arrangements and the dispersion of coal particles into account had been newly developed. As a result of the analysis using this model, it was found that the eccentric double lance, two lances arranged asymmetrically to avoid the interactions of the pulverized coal flows, had superior characteristics to increase the combustibility in the blowpipe and the raceway due to the intensified particle dispersion. Since the experiment using hot model also showed the same effectiveness, the eccentric double lance was adopted to all tuyeres of Fukuyama No.4 BF.

During the high rate injection operation in October 1994, pulverized coal rate was raised to 230 kg/t and little unburnt char was detected in the top waste dusts and the combustion efficiency of pulverized coal estimated by the sampled char from deadman during scheduled shut down just after the operation reached over 70%. These results suggests that the high combustion efficiency had been successfully achieved by using the eccentric double lance.

Key words : ironmaking ; blast furnace ; pulverized coal injection ; pulverized coal combustion ; two-dimensional mathematical model ; eccentric double lance.

1. 緒言

製鉄工程の合理化追求, コークス炉の老朽化への対応およびCO₂削減などの環境問題を背景に, 高炉への微粉炭多量吹き込みは, 近年, その重要性をさらに増しつつある。実際に97年8月現在, 我が国の稼働高炉30基中27基と大半の高炉が微粉炭吹き込みを実施している。吹き込み量に関しても必要性の先行している製鉄所では年間平均201kg/tの多量吹き込みが実現され¹⁾, 今後の製鉄所のコークス需給を考慮すると, 吹き込み量の増大は必須課題と思われる。

安定した多量吹き込みを達成するためには, レースウェイ内における微粉炭の燃焼効率を最大限に向上させることが必要である。従来から, 高炉を模擬した条件下において微粉炭燃焼の基礎に関する研究が数多く実施されているが²⁻⁵⁾, 炭種, 送風温度の影響, 酸素富化の効果など, 操業条件との関係を論じたものが中心であり, 高炉特有の条件, すなわち高速気流中における微粉炭の流れと燃焼挙動の実態に基づき, 積極的に吹き込みランスを改善して燃焼性の向上を図ろうとした研究は少ない。欧州を中心にoxy-coalランスが開発, 実用化されているが^{6,7)}, 燃焼性改善などの

効果について定量的な評価が十分になされているとは言い難い。

当社では福山4高炉において94年10月に微粉炭多量吹き込み試験を実施した⁸⁾。この多量吹き込みを計画するにあたり, 筆者らはまず最初に, ランス構造, 配置の影響を解析検討できる微粉炭燃焼2次元数学モデルの開発を行い, その知見に基づき, 多量吹き込みに適した新たなランスの開発を行った。そしてホットモデルによりその効果を検証し, 福山4高炉に適用した。この結果, 福山4高炉では月間218kg/tの記録を安定的に達成できた。本論文では, 数学モデルの開発, その知見に基づく新ランス開発, 実高炉における燃焼性に関する解析について報告する。

2. 微粉炭燃焼2次元数学モデルの開発

2・1 数学モデルの基本構造

ホットモデル実験によると, 微粉炭の燃焼性は吹き込み直後の分散性に大きく影響される。この分散性はシングルランス, ダブルランスなどのランス構造に大きく支配される⁹⁾。本モデルでは上述の効果を検討できるように, ブロー

平成9年7月8日受付 平成9年9月17日受理 (Received on July 8, 1997; Accepted on Sep. 17, 1997)

* NKK総合材料技術研究所 (Materials & Processing Research Center, NKK Corp., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

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

パイプおよびレースウェイを含む充填層に相当する部分を矩形領域を結合した2次元領域として扱い、両者とも中心軸に対して非対称の計算が可能ないように直行座標系を設定した (Fig. 1)。ブローパイプ内では任意のランス条件 (本数, ランス中心軸とx軸とのなす角度 α , 先端位置) の設定を可能とし、各ランス先端からの微粉炭射出条件 (微粉炭主流本数 m , 拡がり角度 $\Delta\theta$, 角度 θ_k で入射する粒子の質量分率 ω_k) を与えることにより種々の吹き込み方法を設定できるようにした。ここで、各主流角度 θ_k は α を中心として等角度になるように (1) 式で与えた。

$$\theta_k = \alpha - \Delta\theta \{1/2 - (k-1)/(m-1)\} \quad (k=1 \sim m) \dots (1)$$

また、充填層内では空隙率 ϵ 分布およびコークス粒径 d_c 分布を任意に与えることを可能とした。

化学反応の取り扱いに関しては、既報⁹⁾と同様、10種類の化学反応を考慮し、各反応式の総括反応速度式 R_i も既報と同一とした。

2.2 基礎式

ガスについての基礎式はTable 1に示す混合ガスの質量保存式、成分ガスの質量保存式、混合ガスの運動方程式、エネルギー収支式、状態方程式から成る。混合ガスの運動方程式は計算の簡略化を目的として層流場における運動方程式で近似した。ただし、式に含まれる粘度 μ_e は分子粘度 μ_m に乘数 k_1 を掛けた実効的な粘度を用いることによって乱流の効果を表現した。成分ガスの質量保存式における有効拡散係数 D_{eijm} についても乘数 k_2 を導入し、上記と同様に扱った。充填層内では運動方程式の外力項としてコークスによる通気抵抗の影響を考慮した。

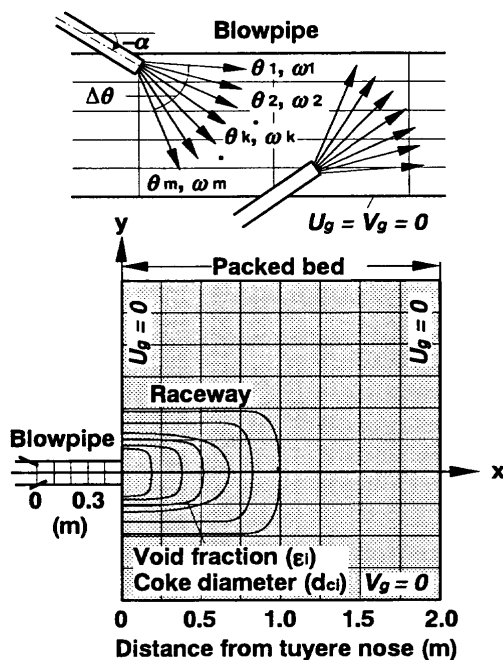


Fig. 1. Calculation zone in blowpipe and raceway.

微粉炭については、単一微粒子に関する運動方程式、質量変化式および熱収支式を基礎式とした (Table 2)。

ガスおよび微粉炭単一粒子のエネルギー収支式における ψ および ϕ はそれぞれ、エネルギー散逸項を表し、既報⁹⁾と同様、化学反応、対流伝熱および輻射伝熱の和として表した。

2.3 計算方法

混合ガスの質量保存式および運動方程式の解法としては、Patankerらの提唱したSIMPLER法¹⁰⁾を用いた。また、計算された粒子起因の質量および熱量をガスの質量およびエネルギー収支式の生成項として導入するPSI CELLモデル¹¹⁾を採用した。境界条件は、ガス流速 (U_g, V_g) について Fig. 1 のように与え、ブローパイプ出口の計算値を充填層計算の初期値として用いた。そして、差分近似解として混合気体の温度、圧力、組成、速度および粒子の温度、質量、速度を求めた。

Table 1. Basic equations of gas phase.

• Basic equation

ϕ	Γ	ρ	Ξ
1	0	ρ_g	$\sum_{j=1}^n (S_{gj} + S_{pj})$
ω_j	$\rho_g D_{eijm}$	ρ_g	$S_{gj} + S_{pj}$
U_g	μ_e	ρ_g	$-\frac{\partial P}{\partial x} - [f_1 + f_2(U_g^2 + V_g^2)^{0.5}]U_g$
V_g	μ_e	ρ_g	$-\frac{\partial P}{\partial y} - [f_1 + f_2(U_g^2 + V_g^2)^{0.5}]V_g - \rho_g g$
T_g	λ_g	$\rho_g C_{pg}$	Φ

$\mu_e = k_1 \mu_m$	$\epsilon \leq 0.8$
$D_{eijm} = k_2 D_{jpm}$	$f_1 = 150(1-\epsilon)^2 \mu_e / [\epsilon^3 (\phi_c d_c)^2]$
$P = 10^5 (\rho_g / M_m) RT_g$	$f_2 = 1.75(1-\epsilon) \rho_g / [\epsilon^3 (\phi_c d_c)]$
$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$	$\epsilon > 0.8$
	$f_1 = 0$
	$f_2 = (3/4) C_{Dc} \rho_g (1-\epsilon) / (\phi_c d_c)$

Table 2. Basic equations of single coal particle.

$\frac{du_p}{dt} = 3\mu_p C_{Dp} \frac{Re_p}{(4\rho_p d_p^2)} (U_g - u_p)$
$\frac{dv_p}{dt} = 3\mu_p C_{Dp} \frac{Re_p}{(4\rho_p d_p^2)} (V_g - v_p) - g$
$\frac{dw_p}{dt} = -\frac{[M_v R_1 + M_c (R_2 + R_3 + R_4)]}{n_p}$
$\frac{d(C_{pp} w_p T_p)}{dt} = \psi$
where,
$w_p = \frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6}$
$R_i = n_p \left(\frac{w_{p0}}{M_v} \right) k_{v0} \exp(-E/RT_g) (V^* - V)$

3. 数学モデルによる高燃焼率ランスの検討

3.1 ランス構造の基礎検討

著者らの燃焼実験によると、ダブルランスはシングルランスに比べ微粉炭をブローパイプ断面に均一に流すことができ、微粉炭燃焼性の改善を図ることができる²⁾。しかしながら、2本のランス主軸が断面中心を指向するダブルランスでは、Fig. 2 (b)に示すように微粉炭の燃焼場が断面中心に集中し、酸素の消費領域が限定される。そこで、断面全体での均一な燃焼場の確保を目的に、Fig. 2 (c)に示すように2本のランスを非対称に配置したランス(以下、偏芯ダブルランスと呼ぶ)を新たに考案し、検討の対象とした。

ランス配置が微粉炭燃焼性におよぼす影響を検討するため、上記2次元数学モデルを用い、Table 3に示す3条件で計算を行った。Case(a)はシングルランスの場合であり、表に示す重量分率を有する5本の主流線がランス先端から拡がり角度($\Delta\theta$) 30° で噴出するとした。また、Case(b)はCase(a)のランス2本がブローパイプ中心軸に対し対称に設置されたダブルランスである。Case(c)は、微粉炭主流同士が衝突しないように配置したもので、上述の偏芯ダブルランスに相当する。計算は福山4BFを対象とし、操業条件は送風量 $7000\text{Nm}^3/\text{min}$ 、送風温度 1200°C 、送風湿分 $24 \times 10^{-3}\text{kg}/\text{Nm}^3$ 、酸素富化率3%、出鉄量 $9000\text{t}/\text{d}$ 、微粉炭比(PCR) $200\text{kg}/\text{t}$ とした。ブローパイプ径は 140mm 一定とした。また、本計算では前述の k_1 、 k_2 は共に 10^3 と一定にした。

Fig. 3にTable 3の各条件で計算したブローパイプ内の微

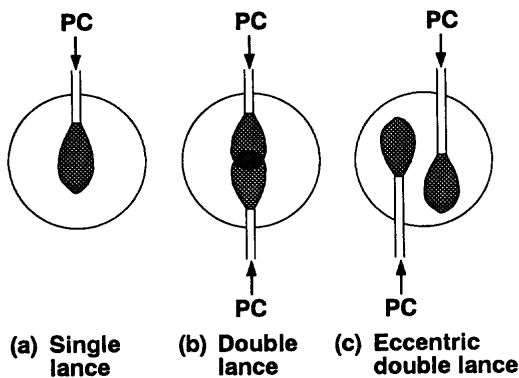


Fig. 2. Schematic illustration of lance arrangement and pulverized coal flow in blowpipe.

Table 3. Injection conditions for 2-dimensional mathematical model.

Case	Lance type	Lance No.	Position of lance tip (mm)	α ($^\circ$)
(a)	Single lance	1	(0, 50)	-30
(b)	Double lance	1	(0, 50)	-30
		2	(0, -50)	30
(c)	Eccentric double lance	1	(0, 15)	30
		2	(0, -15)	-30

$\Delta\theta = 30^\circ$, $\omega_1 = \omega_5 = 0.1$, $\omega_2 = \omega_4 = 0.2$, $\omega_3 = 0.4$

粉炭流れおよび燃焼率の推移を示す。また、Fig. 4には同時に計算された酸素濃度分布を示す。これらの図より、シングルランス、ダブルランスに比べ偏芯ダブルランスは吹き込み直後の微粉炭の存在域が拡大し、酸素の消費速度および燃焼率の上昇速度が速くなっていることが分かる。これは分散性向上に伴う微粉炭と酸素の接触効率の増大によるものと考えられる。

3.2 2次元数学モデルによる実炉燃焼率の推定

実炉のレースウェイを含む充填層領域における微粉炭の燃焼挙動を推定するため、前節と同様な解析を行った。ランス条件は先端のx座標を羽口先端から 200mm とした以外はTable 3と同一とした。充填層内の空隙率およびコークス粒径分布は文献^{12,13)}を参考にしてFig. 5のように与えた。

各ランス使用時の充填層内微粉炭流れおよび流れに沿った燃焼率の推移をFig. 6 (a)~(c)に示す。偏芯ダブルランスを模擬した(c)の場合ではレースウェイ内はもとより充填層内でも最も広く拡散しており、燃焼率の上昇も速い。羽口

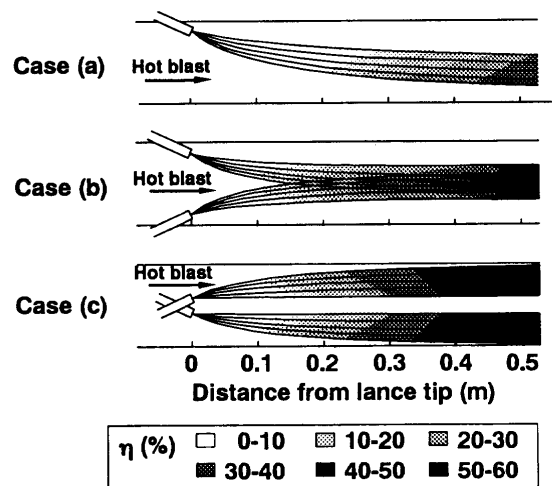


Fig. 3. Effect of lance arrangement on pulverized coal flow and combustion efficiency calculated by 2-dimensional model (η : combustion efficiency).

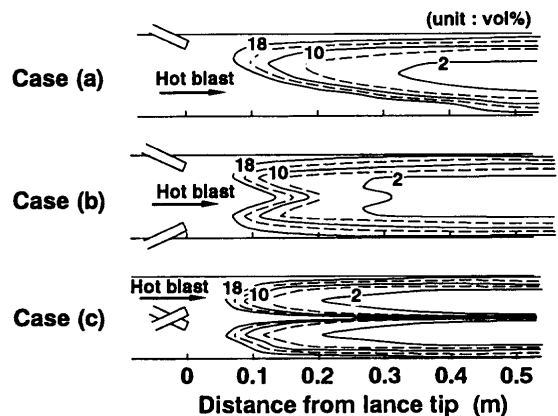


Fig. 4. Effect of lance arrangement on oxygen concentration calculated by 2-dimensional model.

軸上1m位置における平均燃焼率は、シングルランスに比べて10%程度高くなっている。これはFig. 3と同様、微粉炭の分散性の向上によって、羽口先および充填層内における単位個数当たりの微粉炭と接触する反応ガス(羽口先ではO₂, 充填層内で酸素消失後はCO₂およびH₂Oが主体)量を相対的に増大してきた結果と考えられる。Fig. 7 (a)~(c)にはレースウェイ近傍の温度分布を示す。本図より(c)の場合、レースウェイ内の最高温度が最も高くなると同時に、例えば2200°C

以上の高温域も拡大していることが分かる。このことは急速な酸化燃焼が進行していることを示唆している。この急速燃焼に伴う雰囲気および粒子温度の上昇も前述の燃焼速度増大に寄与していると考えられる。

よって、実炉においても偏芯ダブルランスによる燃焼率向上が期待できる。

4. ホットモデル実験による高燃焼率ランスの効果検証

前章のランスの効果を検証するため、ホットモデル実験²⁾を実施した。用いたランスはFig. 2と同様に、シングルランス、ダブルランスおよび偏芯ダブルランスの3種類とした。実験は、ランスの影響を高精度に調査するため、ブローパイプ部を用いた。実験条件としては、羽口先送風温度1200°C、酸素量21vol%、羽口先風速150m/sとした。微粉炭は、揮発分33.2mass%、灰分量9.8mass%の通常高炉で用いられている炭種を用い、PCRは200kg/t相当とした。燃焼実験中に羽口後方から写真撮影およびビデオ撮影を行った。またランス先端から300および600mm位置のサンプリング孔から燃焼中の粒子を吸引し、燃焼率測定に供した。

Fig. 8に各ランス使用時に羽口後方から撮影した微粉炭吹

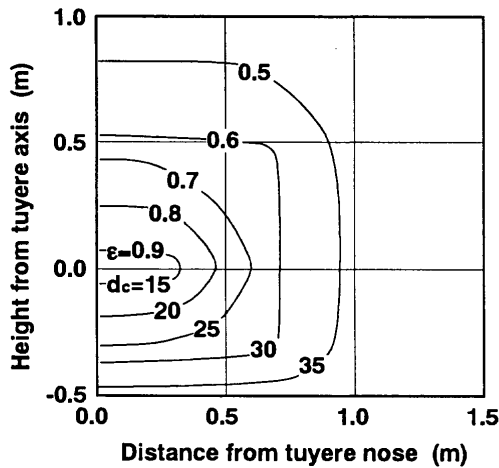


Fig. 5. Distributions of average coke diameter and void fraction in packed bed assumed.

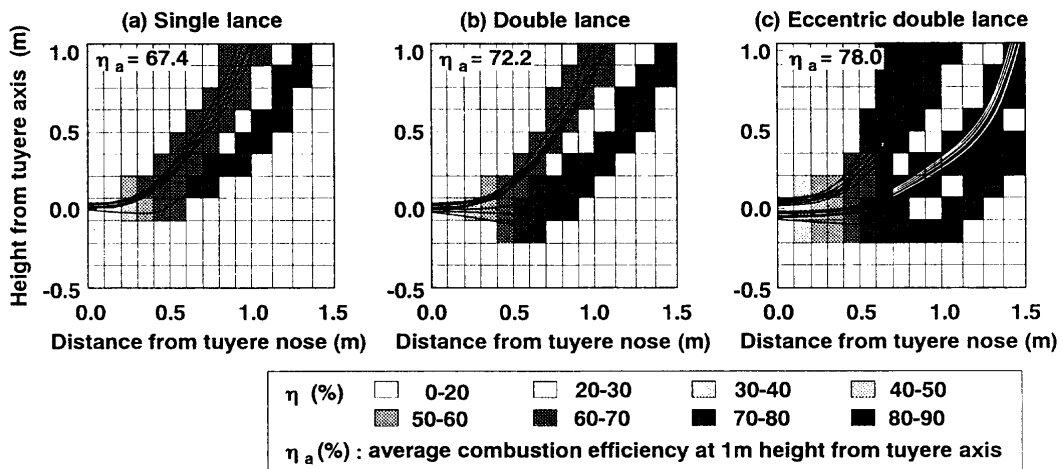


Fig. 6. Trajectories of coal particle and change in combustion efficiency near raceway.

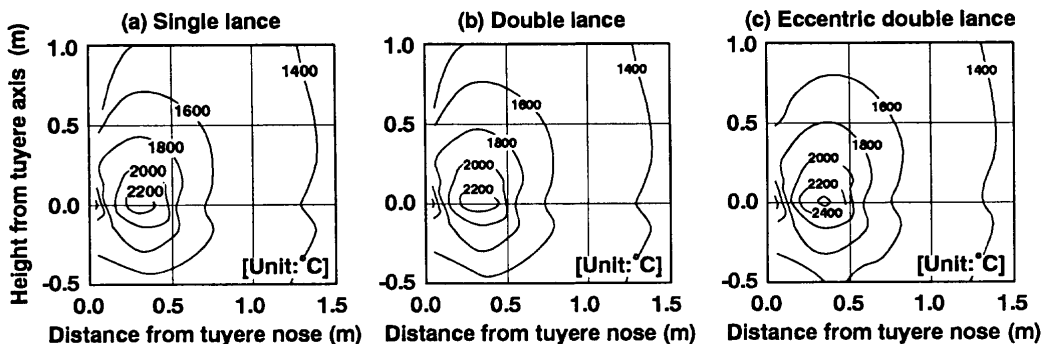


Fig. 7. Temperature distribution around raceway.

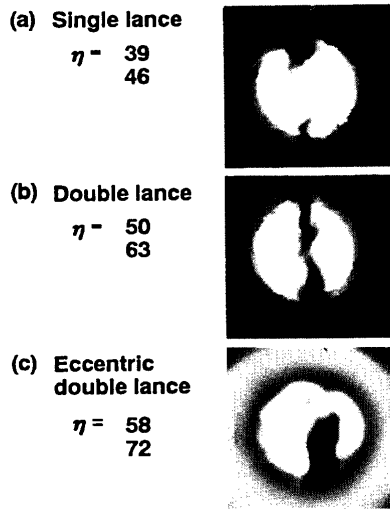


Fig. 8. Effect of lance arrangement on pulverized coal flow and combustion efficiency by hot model(η (%): combustion efficiency at 300 and 600mm from lance tip.

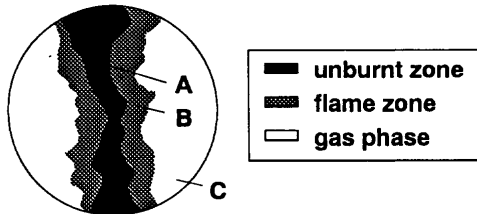


Fig. 9. Schematic illustration of image processed combustion zone of pulverized coal in a case using double lance.

き込み時の写真を示す。Fig. 2と同様な流れが実現されているのが分かる。また同図には、灰分バランスによる燃焼率の測定結果を示すが、偏芯ダブルランスでは、燃焼率の上昇は他のランスに比べて著しく速いことが分かる。

次に微粉炭の分散性および燃焼性におよぼすランスの効果を定量的に把握するため、羽口後方から撮影したビデオの画像解析を行った。解析はまず、得られた画像を256階調の輝度に分割し、次いで輝度の範囲を指定して輝度のグループ化を行い、Fig. 9に示すような3種類の輝度に分類した。これらはFig. 8との対応で見ると、輝度の最も低いA部は微粉炭の未燃部に、中間のB部は微粉炭の燃焼に伴う輝炎部に、またC部はガス相にそれぞれ相当する。本研究では微粉炭主流全体の面積(A+B)を分散性を示す指数、輝炎部(B)の微粉炭主流全体(A+B)に対する面積比を着火・燃焼性を表す指数とした。

Fig.10は、上記(A+B)およびB/(A+B)の時間変動(1/30sごと)をランスごとに示したものである。本図より、シングルランスに対してダブルランスでは微粉炭の分散領域は約3割、偏芯ダブルランスでは約4割向上していることが分かる。また、輝炎部面積比を見ると、シングルランスではこの時間的変動が極めて大きく、かつ平均値も低いのに

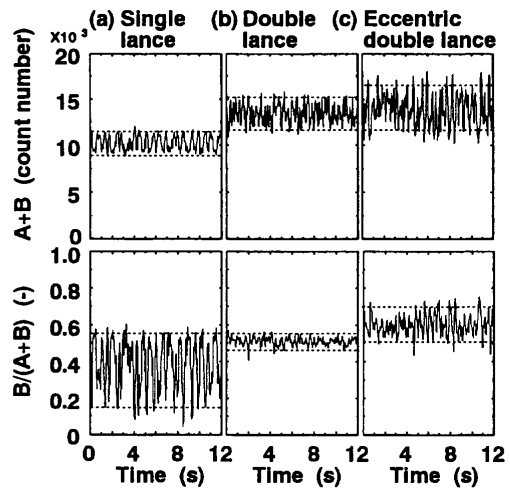


Fig. 10. Effect of lance arrangement on dispersion and combustibility of pulverized coal.

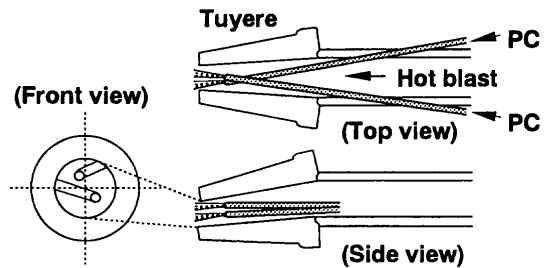


Fig. 11. Arrangement of eccentric double lance in Fukuyama No.4 BF.

対し、ダブルランス、偏芯ダブルランスではこの順に平均値が上昇し、かつ時間変動も少ない。このことは、偏芯ダブルランスの場合に最も酸素との接触効率に優れ、安定した火炎を形成していることを示唆している。

以上より、分散性の改善は直接、燃焼性向上に結び付くことが明らかになった。

5. 偏芯ダブルランスの実炉適用

2次元数学モデルおよびホットモデルによる検討結果から、偏芯ダブルランスが燃焼性向上に有効であることが確認されたため、福山4高炉の全羽口に本ランスを適用した。Fig.11には羽口内におけるランス設置状況を示す。微粉炭吹き込み時には、微粉炭主流同士は相互に干渉することなく、空間内への高分散が達成されていることが実炉羽口部からの観察により確認された。94年10月の微粉炭多量吹き込み操業時にはPCRを230kg/t程度まで増大させているが、炉頂排出ダスト中に未燃チャーの存在はほとんど認められなかった⁸⁾。また、操業直後の休風時に羽口軸上の炉芯部からダストを採取し、既報¹⁴⁾の方法により20個の粒子について燃焼率の測定を行った結果をFig.12に示す。なお、炉芯奥に存在するチャーの形態におよぼす休風前後の操業変化の影響は小さいと考え、羽口先3m以降より採取したチャーを供試試

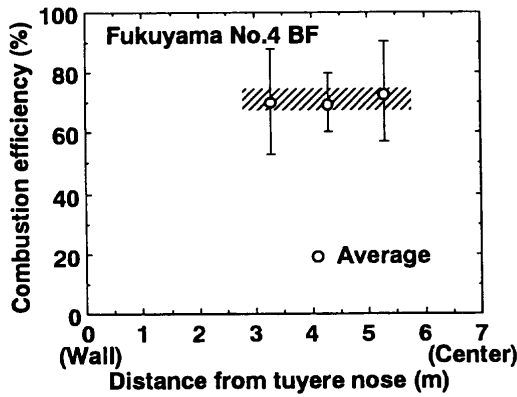


Fig. 12. Combustion efficiency of pulverized coal based on image analysis of char particles from deadman sampled with tuyere probe.

料とした。本図によれば、燃焼率は70%以上に達している。この数値は炉芯中心に向かう微粉炭燃焼率の計算値(Fig. 6(c))に近いことから、Fig. 6の燃焼率推定結果は妥当であったと思われる。

以上より、偏芯ダブルランスの採用により、高分散が達成され、期待通りの高燃焼率が得られたと推測される。

6. 結言

微粉炭の拡散およびランス配置の影響を考慮した新たな微粉炭燃焼2次元数学モデルの開発を行った。本モデルの知見に基づき、2本のランスを非対称に配置した偏芯ダブルランスを考案した。ホットモデル実験の結果、本ランスでは微粉炭の分散性が強化され、酸素との接触効率に優れる結果、燃焼率向上に有効なことが確認された。

偏芯ダブルランスを福山4高炉の全羽口へ適用し、微粉炭多量吹き込み操業において極めて優れた燃焼特性を有していることが実証された。

記号

C_p	: 定圧比熱[J/kg·K]
C_D	: 抵抗係数[-]
d	: 粒子径[m]
D_{jm}	: ガス成分jの拡散係数[m ² /s]
E	: 活性化エネルギー[kJ/kmol]
g	: 重力加速度[m/s ²]
k_{v0}	: 揮発反応の頻度因子[s ⁻¹]
M	: 分子量[kg/kmol]
m	: 一本のランスから射出される微粉炭主流本数[-]
n	: 気体成分の数[-]
n_p	: 微粉炭数密度[1/m ³]
P	: 圧力[Pa]

R	: 気体定数[kJ/kmol·K]
R_i	: 総括反応速度[kmol/m ³ ·s]
Re	: Re数[-]
S_j	: ガス成分jの生成・消滅速度[kg/m ³ ·s]
t	: 時間[s]
T	: 温度[K]
U_g, V_g	: ガス流速[m/s]
u_p, v_p	: 粒子流速[m/s]
V	: $t=t$ における揮発分発生量[-]
V^*	: $t=\infty$ における揮発分発生量[-]
w	: 質量[kg]
x, y	: xおよびy座標[m]
α	: ランス挿入角度[°]
ϵ	: 空隙率[-]
η	: 微粉炭燃焼率[-]
θ	: 微粉炭入射角度[°]
λ	: 熱伝導度[W/m·K]
μ	: 粘性係数[Pa·s]
ρ	: 密度[kg/m ³]
ϕ	: 形状係数[-]
ϕ, ψ	: エネルギーの散逸項[W/m ³]
ω_k	: 質量分率[-]
添字	
c	: コークス
e	: 有効(実効)
g	: ガス
i	: 反応式
j	: ガス成分(1: O ₂ , 2: CO ₂ , 3: CO, 4: H ₂ , 5: H ₂ O, 6: N ₂ , 7: C _m H _n)
k	: 微粉炭主流線
m	: 平均
0	: 初期
p	: 微粉炭粒子
v	: 揮発分

文献

- 1) 厚 雅憲, 中矢 尚, 北野新治, 山形仁朗, 柴田耕一郎, 後藤哲也, 小野玲児, 矢場田 武: 材料とプロセス, 8 (1995), 321.
- 2) 有山達郎, 佐藤道貴, 山川裕一, 山田善郎, 鈴木 実: 鉄と鋼, 80 (1994), 288.
- 3) 有山達郎, 佐藤道貴, 村井亮太, 宮川一也, 野沢健太郎, 上條綱雄: 鉄と鋼, 81 (1995), 1114.
- 4) 山口一良, 上野浩光, 田村健二: 鉄と鋼, 78 (1992), 1214.
- 5) 山縣千里, 須山真一, 堀坂 修, 梶原義雅: 住友金属, 44 (1992), 36.
- 6) K.H.Peters, E.Beppler, B.Korthas and M.Peters: Proc. 2nd European Ironmaking Cong., Glasgow (1991), 247.
- 7) D.A.Campbell, G.Flierman, G.Margarini and R.B.Smith: Ironmaking Steelmaking, 19 (1992), 120.
- 8) A.Maki, A.Sakai, N.Takagaki, K.Mori, T.Ariyama, M.Sato and R.Murai: ISIJ Int., 36 (1996), 650.
- 9) 佐藤道貴, 村井亮太, 有山達郎: 鉄と鋼, 82 (1996), 731.
- 10) S.V.Patanker: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill Book Co., New York, (1980).
- 11) C.T.Crowe, M.P.Sharma and D.E.Stock: J.Fluids Eng., (1977), 325.
- 12) 野沢健太郎, 上條綱雄, 清水正賢: 鉄と鋼, 81 (1995), 882.
- 13) 松浦正博, 佐藤道貴, 有山達郎, 光藤浩之, 若井 造, 石井邦彦, 築地秀明: 材料とプロセス, 6 (1993), 852.
- 14) 清水正賢, 宮川一也, 野沢健太郎, 小野玲児, 上條綱雄, 山岡洋次郎, 佐藤道貴, 山川裕一, 有山達郎: 日本学術振興会製鉄第54委員会資料(No2024), (1994).