

高炉送風エネルギーを利用した 高乱流微粉炭バーナーの開発*

川崎製鉄技報
29 (1997) 1, 37-42

Development of Pulverized Coal Burner with Intense Mixing Coal/Blast under Large Gas Velocity in Blast Furnace Tuyere



石渡 夏生

Natsuo Ishiwata

技術研究所 製鉄研究
部門



内山 武

Takeshi Uchiyama

技術研究所 製鉄研究
部門 主任研究員(掛
長)



武田 幹治

Kanji Takeda

技術研究所 製鉄研究
部門 主任研究員(課
長)・Ph. D.

要旨

微粉炭燃焼性改善による吹込み量増加と安定操業を目的として、数学モデルや燃焼実験によって、微粉炭と送風の混合を促進する高乱流微粉炭吹込みバーナーを開発し、その効果を確認した。(1) 数学モデルによる検討の結果、バーナー外径を拡大することにより送風とバーナーの相互作用で発生する乱流が強化され、微粉炭の分散、昇温が迅速化する。バーナー肉厚が外径の10~15%の時に最も効果が大きい。(2) コークス充填層型燃焼炉および実機炉門において微粉炭燃焼実験を行い、高乱流バーナーを使用すると燃焼率が10%向上し、昇温着火が迅速化することを確認した。

Synopsis:

Improvement in the combustion efficiency of pulverized coal (PC) is required to secure good permeability and stable operation in blast furnaces at high PC injection rates. Model simulations and combustion tests in a packed bed were carried out to develop a high-turbulence burner with intense mixing of pulverized coal flow and hot blast. Simulations of the PC flow in the tuyere indicated that expansion of the outer diameter of the injection burner would enhance the dispersion and heating of the pulverized coal at the downstream of the burner. Combustion tests in a furnace with a coke bed then showed that combustion efficiency was improved by approximately 10% with the high-turbulence burner. Temperature measurements and gas sampling were carried out to examine the effectiveness of the high-turbulence burner at a tuyere of Chiba Works No. 5 blast furnace. The temperature drop in the main coal stream decreased by 100 K with the high-turbulence burner due to effective mixing of the coal and hot blast. A carbon dioxide concentration of 0.06% was also detected, suggesting fast ignition. Measurements confirmed that better dispersion and faster ignition were obtained with the high-turbulence burner.

1 緒 言

高炉への微粉炭吹込み技術は、コークス炉の老朽化によるコークス不足を補う手段として重要であり、近年では微粉炭比 200 kg/t 以上の多量吹込み操業が行われている¹⁻⁶⁾。一方、コークス炉の生産能力に余力がある当千葉製鉄所では高燃料比操業により、高炉ガス発生量を増加させ、製鉄所のエネルギーコストを削減する目的で、燃焼性が悪化する低送風温度での微粉炭吹込み量の増加が試みられている^{7,8)}。

高炉へ吹込まれた微粉炭はレースウェイ内において大部分が燃焼するが、吹込み量を増加すると未燃焼の微粉炭が発生する。この未

燃焼微粉炭(未燃焼チャー)は炉内に堆積して通気性を悪化させるとともに、高炉ガス清浄系の設備に悪影響をおよぼす。したがって、微粉炭吹込み量を増加させるためにはレースウェイでの微粉炭の燃焼率を向上させる必要がある。

微粉炭の燃焼は(1)微粉炭の昇温、(2)揮発分の放出と着火、(3)揮発分の燃焼、(4)チャーの燃焼の各過程を経て進行する。低送風温度条件(900°C以下)では(1)、(2)が、高送風温度条件(1200°C程度)では(3)、(4)が燃焼の律速過程になることが多い。また、揮発分を放出したチャーがレースウェイ内で燃焼するための滞留時間は数ミリ秒と短く、同時にコークスとの競合燃焼が起こっている。微粉炭の燃焼性を改善するには早期昇温を達成するとともにチャーの燃焼に必要な酸素が優先的に供給されることが重要となる。

微粉炭の燃焼性の向上を目的とする代表的なバーナーとしては燃

*平成9年3月27日原稿受付

焼過程 (1), (2) を促進するダブルバーナー^{9,10)}、燃焼過程 (3), (4) を促進する Oxy-coal バーナーが知られている^{11,12)}。本研究の目的は燃焼性を改善し、微粉炭吹込量を増加させることであり、燃焼過程 (1)~(4) を総合的に促進する微粉炭吹込み法を明らかにすることにある。

武田らは¹³⁻¹⁶⁾、圧倒的に大きな運動量を有している送風が微粉炭吹込みバーナー近傍の粉体、ガス流れを支配していると報告している。本研究ではこの知見に基づいて、微粉炭流の分散を強化する手段として送風のエネルギーにより生ずる乱流を利用する高乱流バーナーを提案し、数学モデルおよび実験によりその効果を確認した。

2 数学モデルによるバーナー形状の検討

2.1 微粉炭の分散、燃焼挙動におよぼす先端形状の影響

微粉炭燃焼モデル¹³⁻¹⁶⁾を使用し、バーナー先端部の構造が微粉炭の流動、燃焼挙動におよぼす影響を検討した。本モデルは軸対称 2 次元で、微粉炭の流動、反応に及ぼすバーナー構造の影響を評価できる。また、羽口からレースウェイおよび周辺のコークス充填層の領域を計算対象とし、レースウェイから流出時の微粉炭の燃焼率を計算できる。揮発分の放出と燃焼、コークスおよびチャーとガスとの不均一反応を考慮している。ガスの乱流が燃焼性に与える影響を評価するために、羽口内では $k-\epsilon$ モデルを、充填層内では $k-lm$ モデルを用い¹⁴⁾、気体と粒子、充填層と粒子の相互作用を確率モデル¹⁵⁾を用いて評価した。

バーナー構造が微粉炭燃焼へおよぼす影響を検討するため、Fig. 1 に示す 4 種類のバーナー形状について計算を行った。通常操業で使用している従来型バーナー (conventional burner)、これに旋回流を与え、その遠心力により分散を強化するスワールバーナー

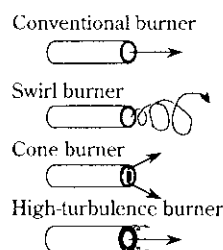


Fig. 1 Burner geometry for large dispersion of pulverized coal particles

Table 1 Simulation condition of pulverized coal combustion

Blast temperature (K)	1556
Blast volume (Nm ³ /s)	2.0/tuyere
Blast pressure (MPa)	0.35
PC rate (kg/t)	200

Table 2 Effect of burner geometry on the combustion efficiency

Burner	Combustion efficiency (%)
Conventional burner	86.8
Swirl burner	87.2
Cone burner	87.1
High-turbulence burner	90.5

(swirl burner)、先端にコーンを設置して半径方向の速度成分を与えることにより分散性を強化したコーンバーナー (cone burner)、バーナーの肉厚を大きくした際にバーナー下流に発生する乱流により微粉炭の分散を強化した高乱流バーナー (high-turbulence burner)、以上の各バーナーについての微粉炭燃焼性をシミュレートした。

計算に用いた送風条件および各バーナーレースウェイ外部での微粉炭燃焼率の計算結果を Table 1, 2 に示す。従来型と比べて、スワールバーナー、コーンバーナーの燃焼率はわずかに向上しているが、高乱流バーナーが最も燃焼率が高い。微粉炭流の分散挙動を表すために Fig. 2 に各バーナーの微粉炭濃度分布を示した。スワールやコーンバーナーでは分散性の改善が殆ど見られないのに対して、高乱流バーナーが最も分散性がよいことがわかる。

Fig. 3 に高乱流バーナーと従来型バーナーの乱流エネルギーの分布を示す。高乱流バーナーの乱流エネルギーは従来型バーナーの約 2 倍であり、粉体の分散が促進されることがわかる。

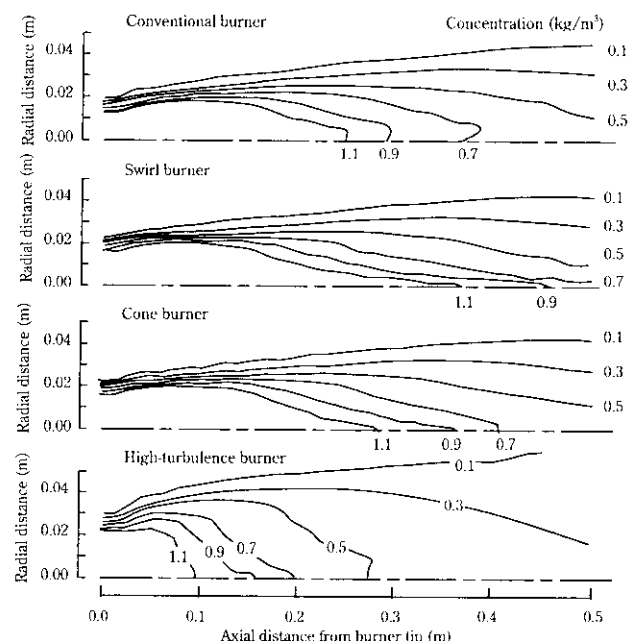


Fig. 2 Effect of burner geometry on pulverized coal dispersion

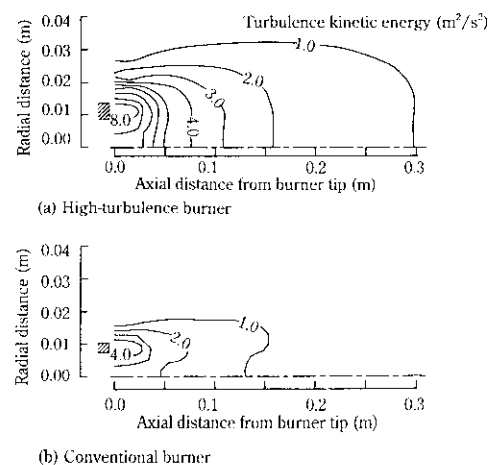


Fig. 3 Turbulence kinetic energy simulated by the pulverized coal combustion mathematical model

Table 3 Simulation condition of pulverized coal dispersion

Blast temperature (K)	1127
Blast volume (Nm ³ /s)	2.5/tuyere
Blast pressure (MPa)	0.35
Blast rate (Nm ³ /t)	1050
PC rate (kg/t)	100
Injection gas flow rate (Nm ³ /s)	0.67
Tuyere diameter (mm)	120

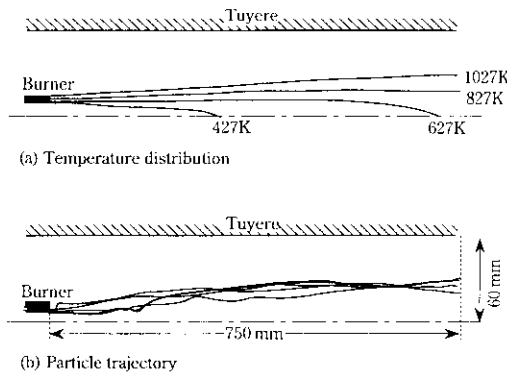


Fig. 4 Temperature and trajectories of pulverized coal particles in tuyere in the case of conventional burner

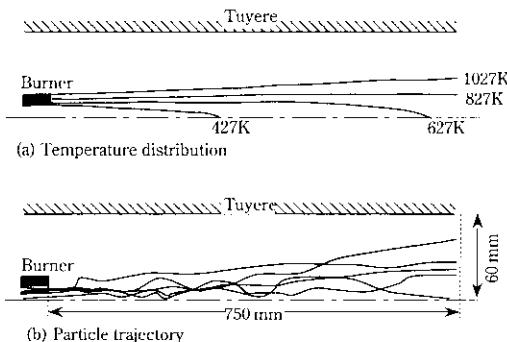


Fig. 5 Temperature and trajectories of pulverized coal particles in tuyere in the case of turbulent burner

高炉の羽口風速は200 m/s以上であり、送風の持つ運動量は微粉炭および圧送ガスのそれに比べて1000倍大きい。高乱流型バーナーの場合、大きな運動量を持つ送風を利用して乱流を強化するため、大きく分散性が向上した。また、高乱流バーナーは構造が簡単であるため通常型のバーナーからの変更が容易である。よって、本報告では燃焼性の改善に向けて、高乱流バーナーの形状の最適化に関する実験的検討を行った。

2.2 バーナー先端形状の最適化

高乱流バーナーを設計する際に重要となるバーナー径と肉厚が微粉炭の着火性に及ぼす影響を検討した。本節ではバーナー形状の変更が簡単に行える汎用流体解析コードFLUENTを用いて微粉炭の分散挙動と温度分布を計算した。計算条件をTable 3に示す。

外径28 mmおよび34 mmのバーナーの微粉炭軌跡およびガスの温度分布をFig. 4, 5に示す。羽口内の温度は微粉炭および圧送ガスが常温で吹込まれるため中心部が低く、外側になるほど送風温度に近づく。また、微粉炭が外側に分散することにより、送風と混合し、微粉炭の昇温、揮発分放出、着火が起こる。

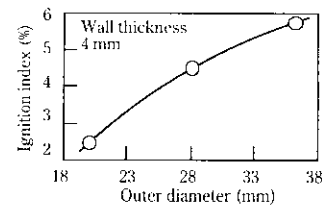


Fig. 6 Effect of burner diameter on pulverized coal ignition in tuyere

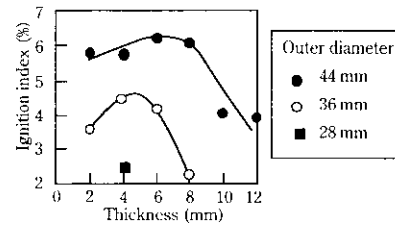


Fig. 7 Effect of burner wall thickness on pulverized coal ignition in tuyere

バーナーの外径および肉厚が与える影響を評価するために、羽口先端で着火温度以上に達した微粉炭の重量割合を求め着火指数とした。ここで、着火温度としては微粉炭の揮発分放出および燃焼が始まる温度は500~900°Cと報告されているため^{17,18)}、着火温度を600°Cと仮定した。

バーナーの肉厚を一定として外径を拡大することによりバーナー下流側に発生する乱流が強化され、Fig. 6に示すように着火指数が大きくなる。また、Fig. 7に示すようにバーナーの外径を一定にして肉厚を変えると、着火指数は肉厚が外径の15~20%のところで極大値を持つ。これは肉厚の増加により乱流は強化されるが、バーナー内管の面積が減少し、微粉炭流速が増加することにより、分散性が低下することが原因である。以上の検討から、バーナー外径が大きく、肉厚が外径の15~20%であるバーナーの着火性が最も良い。

3 高乱流バーナーの燃焼性改善効果の測定

3.1 コークス充填層型燃焼炉および実炉での微粉炭燃焼実験の方法

数学モデルにより予測された高乱流バーナーの燃焼性改善効果を小型燃焼炉を用いて実験的に検証した。同時に千葉製鉄所第5高炉実機羽口内の微粉炭サンプリングにより高乱流バーナーの効果を確認した。

使用した燃焼炉はFig. 8に示すように、内径50 mmの羽口11本を備えたコークス充填層型燃焼炉（内径0.6 m、羽口から装入面までの高さ2.0 m）である。水冷2重管の微粉炭サンプラーを羽口の反対側から挿入し、微粉炭とガスをレースウェイ外周部から採取した。実験には、外径17.3 mm、内径12.7 mmの高乱流バーナーと外径13.8 mm、内径9.4 mmの従来型バーナーの2種類を用いた。実験条件をTable 4に、使用した微粉炭とピッチコークスの組成をそれぞれTable 5に示す。本実験でピッチコークスを使用したのは灰分を含んでいないために微粉炭の灰分をベースとした微粉炭燃焼率の評価が容易なためである。

燃焼率 η (%)は、微粉炭中の炭素および水素量の燃焼前後の変化

Table 5 Chemical compositions of pulverized coal injected in tuyere

	Ultimate analysis			Proximate analysis			Ash analysis (mass %, dry base)			
	C	H	O	VM	FC	Ash	SiO ₂	CaO	t-Fe	Al ₂ O ₃
Coal	75.0	4.52	9.2	34.2	56.0	9.8	49.6	11.1	7.25	20.0
Coke	97.4	0.1	0.3	1.0	98.6	0.4				

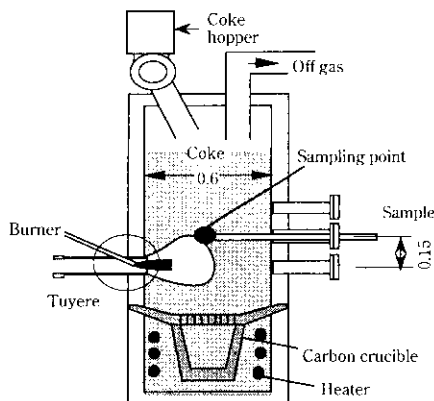


Fig. 8 Combustion test furnace for PC injection with coke packed bed

Table 4 Experimental conditions of the pulverized coal combustion in test furnace

Blast temperature (K)	1 100~1 200
Blast volume (Nm ³ /s)	1.4
O ₂ enrichment (%)	3.0
PC rate (kg/t)	100~200

率と定義される。炉内より採取された試料は未燃焼チャーとピッチコークス粉の混合物なので、ピッチコークス由来の炭素量を炉内試料中の炭素量から差し引いた。

式(1)に灰分量を基準とした燃焼率の計算式を示す。

$$\eta = \left(\frac{C_F^S - \frac{C_F^C}{100} \cdot R}{C_A^S} \right) \cdot \frac{C_A^R}{C_F^R} \times 100 \quad (1)$$

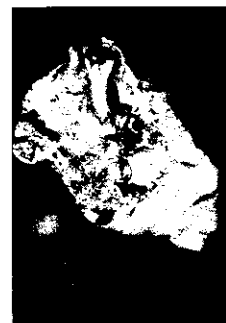
ここで、Cは濃度(%)を、Rはサンプル中のピッチコークスの割合(%)を表す。また、上付き添え字 S, C, P はそれぞれ試料中、ピッチコークス中、微粉炭中の濃度であることを表し、下付き添え字 F, A はそれぞれ燃焼成分(水素+炭素)、灰分を表す。

Photo 1 に試料中の未燃焼チャーおよびピッチコークスの顕微鏡写真を示す。未燃焼チャーには特徴的な気泡構造が見られ、コークス粉は特有な光学的な異方性を示さない構造のために容易に区別することができる。本報告では、顕微鏡視野中の 500 個の粒子を測定してピッチコークスの割合を求めた。

また、実験羽口の実験で使用したサンプラーの羽口、ブローパイプ内での位置および軌跡を **Fig. 9** に示す。本実験ではサンプラーによる微粉炭流の乱れを抑えるために、サンプラーを細径(外径 25 mm)とし、羽口中心軸に対して斜めに挿入した。また、採取後に試料が燃焼することを防止するために先端から消火水を噴射し、微粉炭をスラリーとして採取した。スラリー状の試料はろ過後、乾燥秤量し、成分分析、灰分分析、工業分析を行った。採取したガスについては流量を測定後、N₂、CO₂、CO、O₂、H₂、炭化水素について分析した。また、羽口内の温度をサンプラー先端に取付けた熱電対で測定した。実験には **Fig. 10** に示した先端切欠き型の高乱流バーナー



Char



Coke

Photo 1 Micrograph of char and coke particles sampled in combustion test furnace

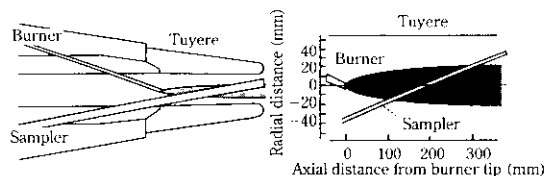


Fig. 9 Schematic diagram of sampling method of pulverized coal in tuyere

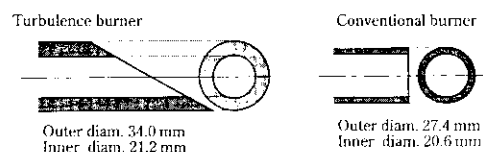


Fig. 10 Geometry of pulverized coal burner used in blast furnace

ナーと通常操業で使用している従来型バーナーを用いた。

3.2 実験結果

燃焼実験炉での高乱流バーナーと従来型バーナーの燃焼率測定結果を **Fig. 11** に示す。両バーナーともに微粉炭比の上昇に伴い燃焼率が徐々に低下し、空燃比が 1.0 以下になる微粉炭比 160 kg/t 以上で急激に低下した。両バーナーを比較すると、高乱流バーナーの燃焼率が約 10% 高く、高乱流バーナーによる燃焼性改善効果が確認された。

次に高乱流バーナーおよび従来型バーナーで微粉炭を吹込んだ場合の実験の羽口内の **Fig. 9** に示したサンプラーの軌跡位置における微粉炭濃度を **Fig. 12 (a)** に、ガス温度分布を **(b)** に示す。従来型バーナーでは、微粉炭が羽口中心軸周囲の 30 mm の範囲に集中している。また、微粉炭主流位置の温度は送風温度よりも 300°C 以上低く、**Fig. 4** に示した計算結果で示唆された羽口中心軸上での温度低下が確認された。微粉炭の吹込み点から 0.2 m 下流位置よりサンプリングされたガスの組成を **Table 6** に示した。ガス中には揮

Table 6 Gas composition in tuyere

O ₂ (%)	N ₂ (%)	CO ₂ (ppm)	CO (ppm)	H ₂ (ppm)	C ₂ H ₆ (ppm)	CH ₄ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)
21.3	77.4	29	<1	<1	<1	<1	<1

Table 7 Chemical compositions of pulverized coal in tuyere

	Ultimate analysis			Proximate analysis			Ash analysis			
	C	H	O	VM	FC	Ash	SiO ₂	CaO	t. Fe	Al ₂ O ₃
Coal	74.0	4.5	9.2	34.2	56.0	9.6	49.6	11.1	7.25	20.0
Coke	63.7	3.26	9.6	28.1	52.8	19.1	44.7	9.23	6.08	26.4

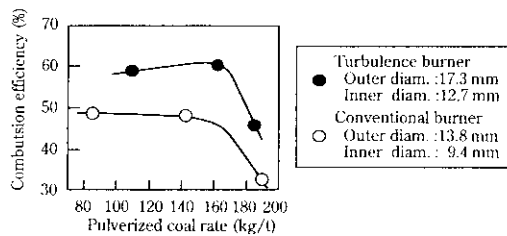


Fig. 11 Combustion efficiency of pulverized coal with conventional and turbulent burner

発分に相当する炭化水素分や二酸化炭素がほとんど検出されなかった。吹込んだ微粉炭および同位置で採取された微粉炭の化学分析結果を Table 7 に示す。微粉炭から揮発分が放出されると炭素分よりも水素が優先的に放出されるため、炭素と水素の比率 (H/C) が低下する。吹込み前後の H/C はそれぞれ 0.063 と 0.052 で変化が見られず、揮発分の放出は起こらない。また、採取された微粉炭の顕微鏡観察では加熱を受けていない石炭の組織が観察された。これらの測定結果は、従来型バーナーを使用した場合、微粉炭と送風との混合、微粉炭の昇温が不十分であるために、揮発分の放出および燃焼が起こっていないことを示している。

高乱流バーナーを使用した場合、Fig. 12 に示したように微粉炭濃度が全体的に低く、微粉炭が分散していることがわかる。羽口後方の観察からも微粉炭流が広がっていることが確認され、送風と主流位置での温度差は 300°C から 100°C に縮小した。また、高乱流バーナーを使用した場合、0.06% の二酸化炭素が全測定点から検出された。これらの結果は、高乱流バーナーを使用した場合、昇温促進により揮発分の放出と一部の着火が同時に起こっていることを示唆している。

以上のように高乱流バーナーによる微粉炭の分散性の向上および燃焼性改善効果が小型燃焼炉および実機で確認できた。

これまで千葉製鉄所第 6 高炉では低送風温度で微粉炭吹込み量の増加すると微粉炭燃焼率が低下し、未燃焼チャーの発生量が増える結果、高炉ガス乾式集塵機の差圧が上昇し、吹込み量の上限を律速していた。Fig. 13 の実線は通常型バーナー使用時の送風温度と乾式集塵機の差圧が設備能力範囲内である微粉炭吹込み量上限値の関係を示したものである。点線は高乱流バーナーの燃焼性向上効果から予想した高乱流バーナー適用後の送風温度と微粉炭吹込み量上限値の関係である。高乱流バーナーでは微粉炭燃焼性の向上により未燃焼チャーの発生量が減少する結果、同一の送風温度では微粉炭吹込み量 15 kg/t の増加が可能になる。

これらの結果をもとに高乱流バーナーを千葉製鉄所第 5、6 高炉

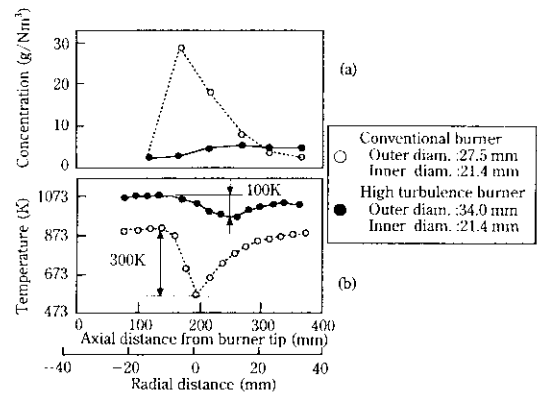


Fig. 12 Temperature and pulverized coal concentration distribution in tuyere

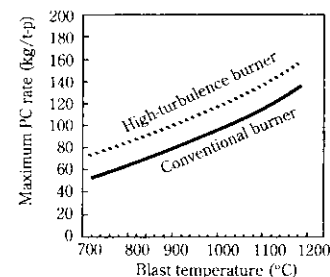


Fig. 13 Comparison of PC rate between conventional and high-turbulence burner

に適用し、低送風温度での吹込み量の増加を行っている。

4 結 言

羽口前の送風エネルギーを利用した高乱流バーナーの燃焼性改善原理を数学モデルを用いて示し、高炉微粉炭吹込み時の微粉炭の昇温、着火性を改善できることを実験的に確認した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) バーナー外径の拡大により送風とバーナーの相互作用で発生する乱流が強化され、微粉炭の分散、昇温が迅速化する。また、バーナー肉厚が外径の 10~15% の時に最も効果が大きい。
- (2) コークス充填層型燃焼炉及び実機羽口において微粉炭燃焼実験を行い、高乱流バーナーにより燃焼率の 10% 向上および昇温着火の迅速化を確認した。

参 考 文 献

- 1) G. Hanniker and J.C. Davidson: Ironmaking Conf. Proc., (1991), 503
- 2) Y. de Lassat, M. Picard, G. Prado, H. Aleboyera, and O. Simonin: 9th PTD Conf., AIME (1990)
- 3) K. H. Peters, M. Peters, B. Korthas, K. Mulheim, and K. Kreibich: Proc. of the 6th IISI Conf., Nagoya, 2 (1990), 492
- 4) 柿内 一元, 松永伸一, 坂本愛一郎, 松岡裕直, 上野浩光, 山口一良: 材料とプロセス, **7**(1994), 126
- 5) 森 候寿, 高垣法義, 井上英明, 光藤浩之, 岸本純幸, 酒井 敦: 材料とプロセス, **8**(1995), 319
- 6) 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
- 7) 日本鉄鋼協会・製鉄部会, (鉄84-8共), (1994)
- 8) 後藤滋明, 西村博文, 柳沢克彦, 鎌野秀行, 野口宏基, 津田泰志: 材料とプロセス, **7**(1994), 151
- 9) 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
- 10) 佐藤道貴, 山川裕一, 有山達郎, 光藤浩之, 山口 富, 村井亮太: 材料とプロセス, **8**(1995), 318
- 11) H. W. Gudenau, M. Peters, and M. Joksche: *Stahl und Eisen*, **114**(1994), 69
- 12) T. Furukawa, H. Mitsufuji, M. Matuura, and Y. Ohno: *Rev. Metall. Cah. Inf. Tech.*, **87**(1990), 549
- 13) 武田幹治: Ph. D. 論文, (1994), London Univ.
- 14) 武田幹治, F. C. Lockwood: 鉄と鋼, **82**(1996), 487
- 15) 武田幹治, F. C. Lockwood: 鉄と鋼, **82**(1996), 493
- 16) 武田幹治, 板谷 宏, F. C. Lockwood: 材料とプロセス, **6**(1993), 920-921
- 17) R. P. Gupta, V. S. Gururajan, J. A. Lucas, and T. F. Wall: *Combustion and Flame*, **79**(1990), 333
- 18) R. H. Essenhigh, K. Misra, and D. W. Shaw: *Combustion and Flame*, **78**(1989), 3