

高炉レースウェイ周辺部の圧力、温度および炭材粉率におよぼす微粉炭吹込みの影響

論 文

出口 幹郎*・柴田耕一郎*・福岡 正能*²

Effect of Pulverized Coal Injection on the Distribution of Pressure, Temperature and Fine Particle Fraction around Blast Furnace Raceway

Mikio DEGUCHI, Kouichirou SHIBATA and Masayoshi FUKUOKA

Synopsis :

Pulverized Coal Injection (PCI) tests were carried out by using a coke-filled test furnace to clear the combustion behaviour of Pulverized Coal (PC) in a blast furnace and its effects on the furnace phenomena.

Effects of Pulverized Coal Injection Rate (PCR) and charged sinter on pressure drop, temperature and fine particle fraction distribution in the test furnace were studied. On the basis of these experimental results, carbon solution loss reaction rates of unburnt PC and fine coke was measured with "in-situ" analysis of high temperature gas. The results obtained are as follows.

(1) Increase in blast pressure with PCI is much dependent on the increase in blast velocity by PC combustion in the blow pipe.

(2) As unburnt PC accumulated in the furnace is gasified with CO₂ much faster than fine coke, it has no harmful influence on the pressure drop in the furnace.

(3) As descending velocity of solid at the peripheral part in blast furnace bosh decreases with increase in PCR, furnace heat loss increases.

Key words : ironmaking; pulverized coal; combustion; injection; blast furnace phenomena; carbon solution loss reaction.

1. 緒 言

近年、日本では高炉への微粉炭吹込み技術が急速に普及し、高炉の安定操業とコストダウンに大きく寄与している。

微粉炭の燃焼特性はコークスを充填していない燃焼炉(これを空炉という)での実験によってほぼ明らかにされ^{1)~3)}、しかも銘柄や粒度あるいは燃焼条件などが変化した場合でも燃焼特性が数式モデルによって推定できるようになった⁴⁾。しかしながら微粉炭が吹き込まれる羽口前レースウェイ部にはコークスが存在するため、ガス組成分布や温度分布などが空炉の場合と異なっている。そのため、最近ではコークスを充填した燃焼炉^{5)~8)}や実炉⁹⁾での微粉炭の燃焼挙動を検討した報告がある。

さらに、多量吹込み時には微粉炭がレースウェイ内で完全には燃焼せずに炉内に供給されると考えられるが、

この未燃焼の微粉炭の挙動を検討した例はなく、また微粉炭の吹込み量の増加に伴う炉内現象の変化、たとえば炉壁熱負荷の増大¹⁰⁾などについて検討した例もない。したがって、高炉内における微粉炭の燃焼挙動とその炉内現象におよぼす影響は十分には把握されていないと考えられる。

そこで、著者らはコークスを充填した燃焼炉を用いて高炉のレースウェイ部に近似した条件下で微粉炭の吹込み実験を行い、炉内の圧損や粉の蓄積あるいは温度分布などにおよぼす微粉炭の吹込み量や焼結鉱の装入などの影響を調査した。そして、その結果に基づいて炉内に蓄積した未燃焼の微粉炭のソリューションロス反応速度を高温ガスの“その場”分析¹¹⁾によって測定し、高炉内における未燃焼の微粉炭の挙動を検討した。

昭和 63 年 4 月本会講演大会にて発表 平成元年 6 月 30 日受付 (Received June 30, 1989)

* (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakino-hama-cho Chuo-ku Kobe 651)

*² (株)神戸製鋼所開発実験センター (Technical Development & Testing Center, Kobe Steel, Ltd.)

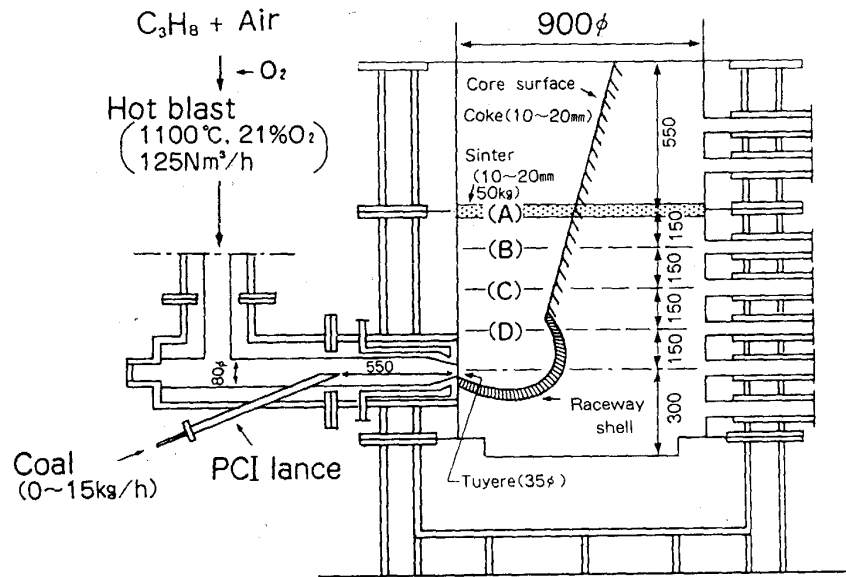


Fig. 1. Coke-filled test furnace for Pulverized Coal Injection (PCI) test.

2. 実験方法

微粉炭の吹込み実験には、Fig. 1 に示すような内径が 900 mm で、高さが 1 450 mm の円筒縦型燃焼炉を用いた。この燃焼炉は内径 35 mm の羽口を 1 本有している。燃焼炉の中には Table 1 に示した 10~20 mm のコークスを約 500 kg 充填した。コークスの充填層高は羽口中心軸から 1 150 mm である。送風ガスはプロパンガスの燃焼排ガスに酸素を添加したものである。その温度は 1 100°C で、乾ガスの組成は 21.0% O₂, 7.2% CO₂, 71.8% N₂ である。送風量は 125 Nm³/h で、羽口内の風速に換算すると 200 m/s である。微粉炭は羽口先から炉外側に 550 mm 寄った位置から吹き込み、その吹き込み量は 0~15 kg/h である。微粉炭は Table 1 に示すように、固定炭素 (FC) が 55.8%、揮発分 (VM) が 34.2%、灰分 (Ash) が 10%、平均粒径が 66 μm, 74 μm 以下の割合が 80% のものである。

実験中は羽口中心軸に垂直な縦断面の温度分布を Pt₉₄Rh₆-Pt₇₀Rh₃₀ 熱電対で連続的に測定した。測定位置は炉径方向では羽口側の炉壁から 200 mm の位置とそこから 150 mm 間隔の位置であり、炉高方向では羽口から上下に 150 mm 間隔の位置である。

炉内の圧力は水冷プローブを水平に温度分布の測定断面まで挿入して測定した。測定位置は羽口レベルとそこから 650 mm 上の位置で、ともに羽口側の炉壁から 200 mm の位置である。

Table 1. Properties of Pulverized Coal (PC) and coke.

Species	Proximate analysis (%)			Size
	FC	VM	Ash	
PC	55.8	34.2	10.0	Mean size = 66 μm 10~20 mm
Coke	87.3	0.7	12.0	

実験終了時は送風ガスを窒素に切り替えて、炉内を冷却し、完全に冷却した。その後、羽口から 150 mm, 300 mm, 450 mm の各レベルで径方向に 100 mm 間隔でサンプルを約 400 g ずつ採取し、その粒度分布を測定した。

一方、コークスのみの充填では未燃焼の微粉炭が反応によって消失する可能性が少ないため、羽口から 600 mm 上のレベルに 10~20 mm の焼結鉱 (T. Fe: 56.5%, FeO: 6.4%) を約 50 kg 水平に均一に充填して、上述と同じ手順で実験を行った。なお、焼結鉱の装入量は燃焼率 50% の微粉炭を全量消費するのに必要な量として算出した。

3. 実験結果

3.1 送風圧力と炉内の圧損におよぼす微粉炭吹込みの影響

送風圧力におよぼす微粉炭吹込みの影響を Fig. 2 に示す。この実験では 35 min から 65 min まで微粉炭を 15 kg/h 吹き込み、その前後では微粉炭を吹き込んでい

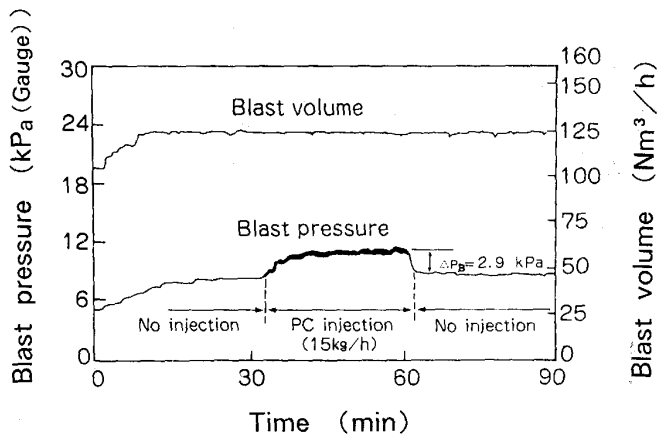


Fig. 2. Effect of Pulverized Coal (PC) injection on blast pressure.

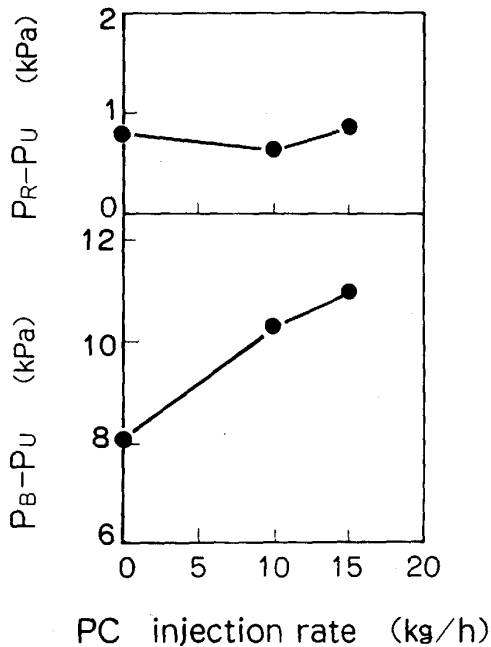


Fig. 3. Effect of Pulverized Coal (PC) injection rate on pressure drop in the furnace.

ない。この図から、つぎのことがわかる。

(1) 送風圧力は微粉炭の吹込みと同時に増大し、吹込みの停止とともに速やかに元の値に戻る。

(2) 定常域での送風圧力の増大量は約 2.9 kPa である。

Fig. 3 は炉内の圧損に及ぼす微粉炭吹込み量の影響を示した図である。炉内の圧損として送風圧力 (P_B : kPa (Gauge)) と羽口から 650 mm 上の圧力 (P_U : kPa (Gauge)) の差とレースウェイ内の圧力 (P_R : kPa (Gauge)) と P_U の差を選んだ。

この図から、微粉炭の吹込み量の増加に伴って P_B -

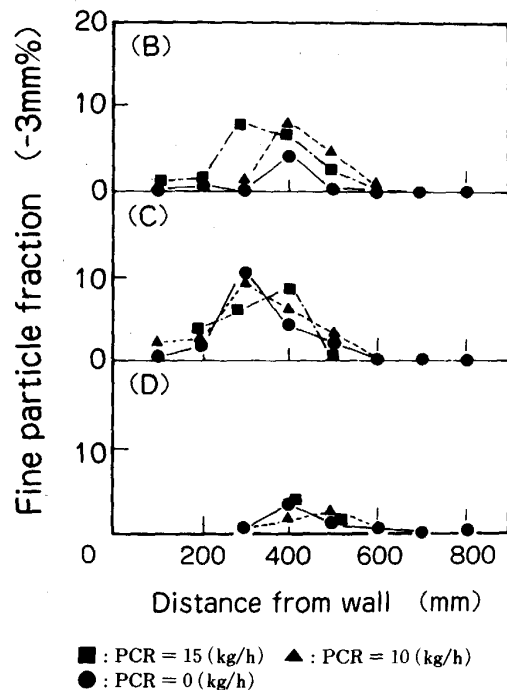


Fig. 4. Effect of Pulverized Coal Injection Rate (PCR) on radial distribution of fine particle fraction.

P_U は増大するが、 $P_R - P_U$ はほとんど変化しないことがわかる。したがって、微粉炭の吹込み量の増加に伴って送風圧力の P_B のみが増大し、炉内の圧損はほとんど変化しないと考えられる。

3.2 炉内の粉率分布におよぼす微粉炭吹込みの影響

Fig. 4 には、羽口から 150 mm 上の(D)レベル、300 mm 上の(C)レベル、450 mm 上の(B)レベルの径方向における 3 mm 以下の粉率の分布を示す。微粉炭の吹込み量は 0, 10, 15 kg/h である。

この図から、3 mm 以下の粉率が(B)レベルと(C)レベルで炉壁から 300~400 mm の領域で約 10% になっており、その中で(B)レベルの粉率が微粉炭の吹込み量の増加に伴ってわずかに増加していることがわかる。

炉内の粉率分布におよぼす微粉炭吹込み量の影響を報告した例は見られないが、関らは本研究と同一の設備を用いて検討した結果、粉の蓄積位置は本研究と同一であり、その量は微粉炭吹込みや酸素富化によって増大することを報告している⁶⁾。

一方、微粉炭吹込みを行わないときのコークス粉の蓄積については、田村ら¹²⁾が冷間実験と熱間実験によって、高谷ら¹³⁾が冷間実験と数式モデルによって検討している。その結果によれば、コークス粉は炉芯の中心部や表層部あるいは融着帯根部近傍に蓄積すると報告されている。また、実炉の休風時に羽口やボッシュ部で炉内

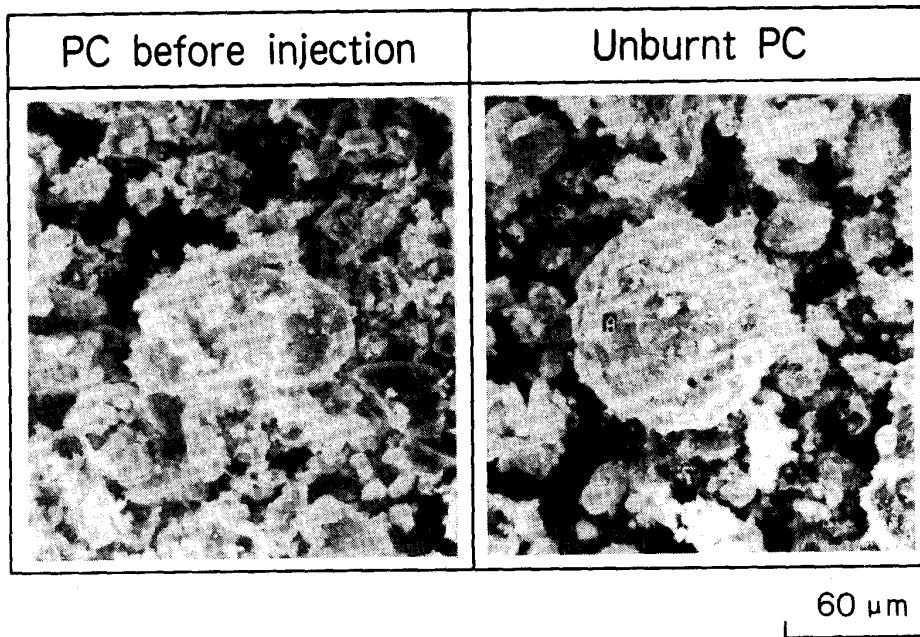
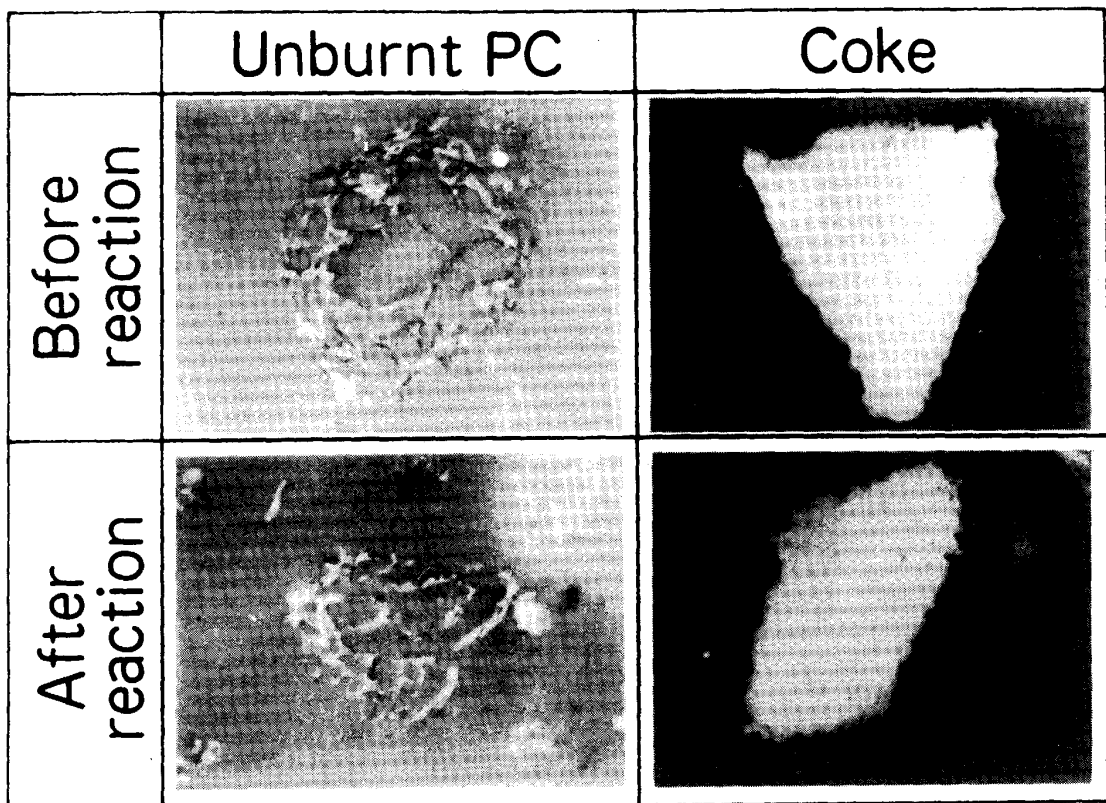


Photo. 1. Change of Pulverized Coal (PC) shapes with combustion.



50 μm

Photo. 2. Changes of unburnt Pulverized Coal (PC) and coke reacted with $N_2-50\%CO_2$ at $1200^\circ C$.

の内容物を採取した結果では、コークス粉が羽口レベルの炉芯部あるいは融着帯根部近傍に蓄積すると報告されている^{13)~15)}。しかし、コークス粉の蓄積に関してはコークス粉の発生位置がレースウェイ内だけではないため、微粉炭吹込み時と単純には比較することができないが、粉の蓄積位置はガスの流れる向きが急激に変化するところかあるいはガス流速が 0 m/s に近いところであるということではいずれの結果も一致している。

Fig. 3, 4 の結果から、3 mm 以下の粉率が微粉炭の吹込み量の増加に伴ってわずかに増加するが、炉内の圧損はあまり増加しないことがわかる。

3.3 未燃焼微粉炭の形状

吹込み前の微粉炭と燃焼炉内から採取した微粉炭の外観を電子顕微鏡で観察した結果を Photo. 1 に、その断面を顕微鏡で観察した結果を Photo. 2 に示す。Photo. 2 には 4.2 項で説明するようにソリューションロス反応前後における未燃焼の微粉炭とコークス粉の断面を示す。未燃焼の微粉炭は羽口レベルから 450 mm 上の(B)レベルから採取した比較的大きなもの(直径: 約 60 μm , 燃焼率: 約 70%) である。

これらの写真から、吹込み前の微粉炭は角ばっているが、未燃焼の微粉炭は丸く膨らんで空隙の多いバルーン状のものになっていることがわかる。バルーン状の微粉炭は 10⁴ °C/s 程度で急速加熱されたときに得られると HAMILTON が報告し¹⁶⁾、上條らも微粉炭を吹き込んでいる高炉の炉芯部から採取している¹⁴⁾。

3.4 炉内の粉率分布におよぼす焼結鉍装入の影響

Fig. 5 に(B), (C), (D)レベルの径方向における 3 mm 以下の粉率分布におよぼす焼結鉍装入の影響を示す。微粉炭の吹込み量は 15 kg/h である。

この図から、3 mm 以下の粉率が(B)レベルと(C)レベルで焼結鉍の装入によって減少していることがわかる。たとえば、炉壁から 300 mm の位置では、(B)レベルで 8% から 4% に減少しており、(C)レベルで 4% から 1% に減少している。

3 mm 以下の粉のうち焼結鉍の装入によって減少したものを特定するために、炉壁から 300 mm 内側の部分において焼結鉍の装入によって減少した 3 mm 以下の割合と 0.15 mm 以下の割合を測定した。その結果を Fig. 6 に示す。位置 B, C はそれぞれレベル(B), (C)に対応する。

この図から、B の位置では焼結鉍の装入によって 3 mm 以下の粉が 3.7% 減少し、0.15 mm 以下の粉が 3.0% 減少している。すなわち、焼結鉍の装入によって減少した 3 mm 以下の粉のうち約 80% が 0.15 mm 以下

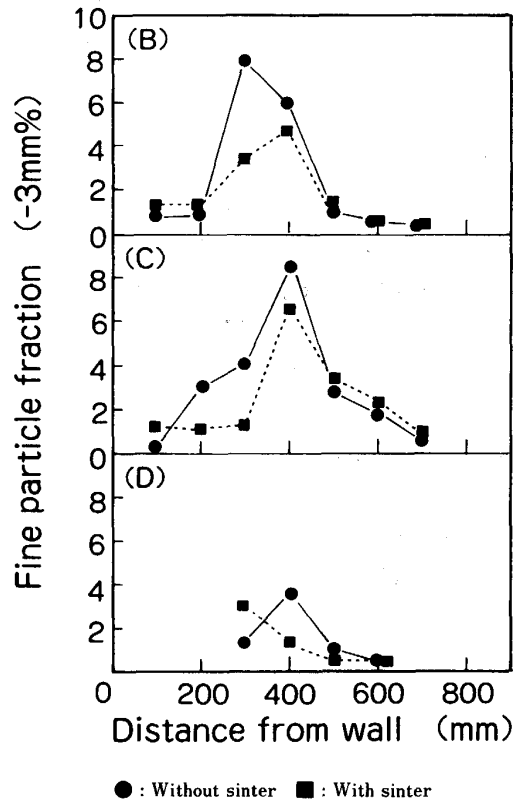


Fig. 5. Effect of charged sinter on radial distribution of fine particle fraction at the pulverized coal injection rate of 15 kg/h.

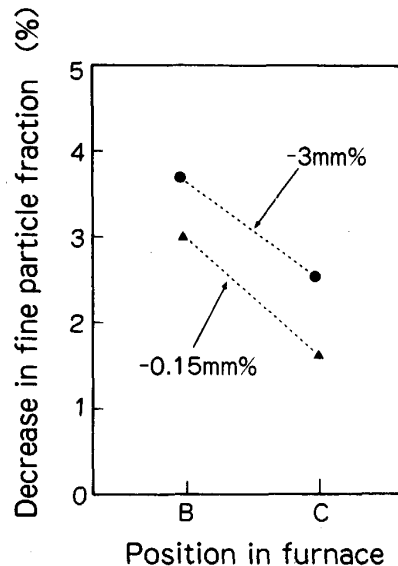


Fig. 6. Decrease in fine particle fraction with charged sinter at the pulverized coal injection rate of 15 kg/h.

の粉で占められていることがわかる。C の位置でも同様な結果になっている。

また、B の位置で 74 μm 以下の粉の割合を測定した

結果、焼結鉱を装入しないときが 2.0%，焼結鉱を装入したときが 0.2% であった。これは顕微鏡で観察した結果、Photo. 1 のような未燃焼の微粉炭が焼結鉱の装入によって非常に減少していたことから裏付けられる。

3.5 炉内の温度分布におよぼす微粉炭吹込みの影響

オールコークス操業から微粉炭吹込み操業に移行したときに、炉壁熱負荷の増大が問題となった¹⁰⁾。そこで、微粉炭の吹込みに伴う炉内の温度分布の変化について検討した。

Fig. 7 には微粉炭吹込みに伴う 1200°C の等温ラインの変化を示す。微粉炭の吹込み量は 0, 15 kg/h である。図中には微粉炭吹込み時のレースウェイの概略形状と炉芯の推定表層面を示す。この図から、微粉炭の吹込みに伴って 1200°C の等温領域が広くなり、特に炉壁側でその領域が広がっていることがわかる。また、微粉炭を吹き込まないとき、レースウェイの概略形状と炉芯の推定表層面は、レースウェイの最深部付近のみが約 50 mm 羽口側に近づいていた。

そこで、炉内の温度分布におよぼす微粉炭吹込み量の影響を明らかにするため、羽口から 600 mm 上のレベルで炉壁から 200 mm 内側の温度 (T_W : °C) と 400 mm 内側の温度 (T_C : °C) との関係で検討した。その結果を T_W/T_C と微粉炭吹込み量との関係で示すと、Fig. 8 のようになる。この図から、微粉炭吹込み量の増加に伴っ

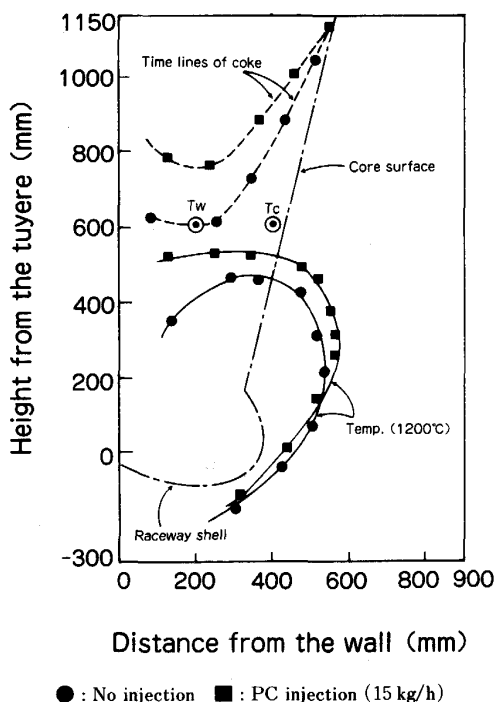


Fig. 7. Effect of Pulverized Coal (PC) injection on the isothermal lines and time lines of coke.

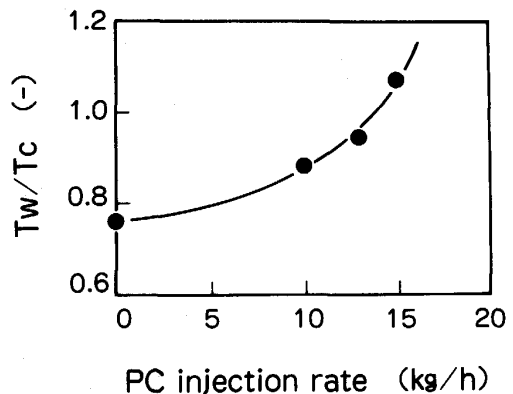


Fig. 8. Effect of Pulverized Coal (PC) injection rate on temperature distribution (T_W/T_C) in the furnace.

て、 T_W/T_C が増加する。すなわち、炉壁側の温度が炉内側の温度よりも高くなることがわかる。これは炉壁熱負荷が増大することに対応する。

4. 考 察

4.1 送風圧力の増大機構

微粉炭の吹込みに伴う送風圧力の増大機構を明らかにするために、微粉炭の吹込み位置から羽口先までの圧損と羽口先での流路の急激な拡大による圧損の和の増大量から、送風圧力の増大量 (ΔP_B : kPa) を推算する。その近似式が(1)式である。

$$\Delta P_B = 0.5 \rho_0 \frac{101.3}{273} \times \left\{ k_a v_a^2 \left(\frac{273 + T_{Ba}}{101.3 + P_B + \Delta P_B} - \frac{273 + T_B}{101.3 + P_B} \right) + k_b v_b^2 \left(\frac{273 + T_{Bb}}{101.3 + P_B + \Delta P_B} - \frac{273 + T_B}{101.3 + P_B} \right) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ_0 は標準状態におけるガスの密度 (kg/m^3)、 k_a は $4f(L_a/D_a)$ 、 f は摩擦係数 (-)、 L_a は吹込み位置から羽口先までの距離 (m)、 D_a はブローパイプの内径 (m)、 v_a は標準状態におけるブローパイプ内のガス流速 (m/s)、 T_B は送風温度 (°C)、 T_{Ba} は微粉炭吹込み時における吹込み位置から羽口先までのガスの温度 (°C)、 k_b は流路が羽口径 (35 mm) からレースウェイの最大径 (300 mm) に急激に拡大するときの損失係数 (-)、 v_b は標準状態における羽口先でのガス流速 (m/s)、 ΔT_{Bb} は微粉炭吹込み時における羽口先でのガスの温度 (°C) を意味する。

微粉炭の吹込み量が 15 kg/h のときの羽口先におけるガスの温度は 1600°C であったので、吹込み位置から

羽口先までの送風温度を 1350°C と仮定して、 ΔP_B を計算すると、3.2 kPa となり、Fig. 2 に示した送風圧力の増大量 (2.9 kPa) にはほぼ等しい。したがって、微粉炭の吹込みに伴って送風圧力が増大する原因は、ブローパイプからレースウェイ内までの圧損増加、すなわちブローパイプ内での微粉炭の燃焼に伴う送風温度の上昇によって、ガスの容積が増加して羽口内のガス流速が増加するためであると考えられる。

4.2 未燃焼微粉炭の消失機構

炉内に蓄積した未燃焼の微粉炭の消失機構を明らかにするために、未燃焼の微粉炭とコークス粉のソリューションロス反応速度を測定した。

測定には Fig. 9 に示すような横型のシリコニット炉を用い、その反応管は内径が 50 mm で、長さが 1000 mm の再結晶アルミナである。測定では Table 2 に示した組成の試料 2 g をポート内に入れ、窒素ガス中で測定温度の 1000°C あるいは 1200°C まで昇温した後、N₂-50%CO₂ ガスに切り替える。試料は塊コークスを粉碎した 74 μm 以下のコークス粉と炉内から採取した 74 μm 以下の未燃焼の微粉炭 (推定約 10% のコークス粉を含む) である。未燃焼微粉炭の燃焼率は灰分中の Al₂O₃ を一定と仮定すると、約 70% となる。

ソリューションロス反応速度は、高温ガスの“その場”分析によって測定した。すなわち、反応後のガスを Fig. 9 の水冷プローブの先端にあるセル内に導き、その赤外光を Zn-Se レンズで構成されたりレーレンズの中に通して、CO と CO₂ の吸収スペクトルをフーリエ

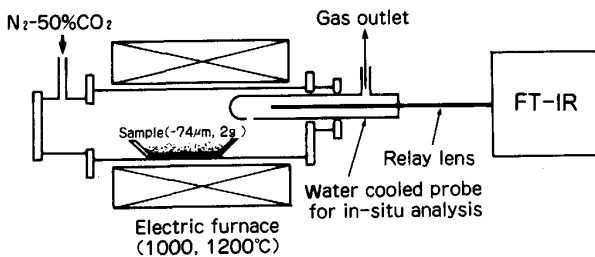


Fig. 9. Experimental apparatus for measuring a carbon solution loss reaction rate of unburnt pulverized coal and coke.

Table 2. Properties of unburnt Pulverized Coal (PC) and coke.

Species	Proximate analysis (%)			Ash composition (%)		
	FC	VM	Ash	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO
Unburnt PC	61.6	0.5	37.9	21.4	48.1	6.4
Coke	87.3	0.7	12.0	21.7	43.8	7.6

Combustion degree of PC=70%

変換赤外分光光度計 (FTIR) によって測定した。

この値から CO, CO₂ の濃度を求め、反応開始後 40 min までの CO, CO₂ の値からカーボンバランスによってソリューションロス反応速度 (C の減少速度) を算出した。その結果を Fig. 10 に示す。

この図から、未燃焼微粉炭のソリューションロス反応速度はコークス粉よりも大きく、その差は温度の上昇に伴って大きくなる傾向にあることがわかる。この原因は Photo. 2 に示した反応前における粒子内部の状態から推察できる。すなわち、未燃焼微粉炭の内部の空隙がコークス粉よりも非常に多いため、未燃焼微粉炭の内部がソリューションロス反応によって消失しやすいからである。また、この原因は未燃焼微粉炭の大部分が反応後に消失しているが、コークス粉の内部は消失していないことから立証される。同様の結果を CHARON¹⁷⁾ も報告している。

以上の結果から、未燃焼の微粉炭がコークス粉よりも優先的にソリューションロス反応を受けて消失することが明らかとなった。

4.3 炉壁熱負荷の増大機構

微粉炭吹込み量の増加に伴って炉壁側の温度が炉内側の温度よりも高くなる原因として、コークスの降下状況の変化を考え、実験終了時の 10 min 前に燃焼炉のコークス表面に黒鉛製のマーカーを置き、解体調査時にその存在位置を調査した。その結果を Fig. 7 の中に示す。破線が等時間線を表す。微粉炭の吹込み量は 0, 15 kg/h である。

この図から、微粉炭の吹込みによってコークスの降下速度が遅くなり、特に炉壁側でその速度が遅くなる傾向にあることがわかる。類似の結果は波多野¹⁸⁾ が実施した高炉下部実験炉での重油吹込み実験においても得ら

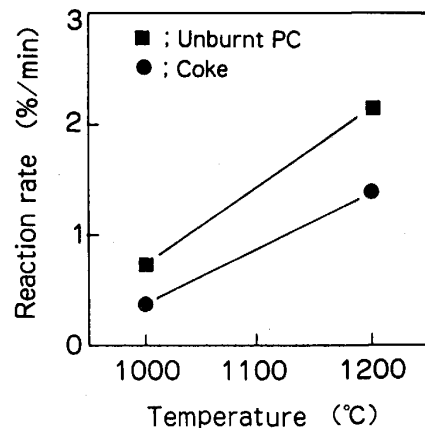


Fig. 10. Carbon solution loss reaction rate of unburnt Pulverized Coal (PC) and coke under 74 μm.

れている。

したがって、微粉炭や重油の吹込みによってブローパイプ内とレースウェイ内で送風中の酸素が消費されるため、レースウェイ内のコークスの消費量が減少し、炉壁側のコークスの降下速度が低下する。その結果として、熱流比が低下して、炉壁側の温度が上昇するものと考えられる。さらに、微粉炭や重油の吹込み量を増加させると、これらの現象が著しく生じるため、炉壁側の温度が上昇するものと考えられる。これが実炉における微粉炭の吹込みに伴う炉壁熱負荷の増大機構の一つであると考えられる。

5. 結 言

高炉内における微粉炭の燃焼挙動とその炉内現象におよぼす影響を明らかにするために、コークスを充填した燃焼炉によって微粉炭の吹込み実験を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

(1) 微粉炭の吹込みに伴う送風圧力の増大は、ブローパイプ内での微粉炭の燃焼に伴う羽口内風速の増加に大きく依存する。

(2) 炉内に蓄積した未燃焼の微粉炭は、CO₂によってコークス粉よりも早くガス化し、炉内の圧損におよぼす影響は小さい。

(3) 微粉炭の吹込みによってレースウェイ内のコークスの消費量が減少するため、炉壁側のコークスの降下速度が低下する。その結果、熱流比が低下するため炉壁側の温度が上昇する。これが微粉炭の吹込みに伴う炉壁熱負荷の増大機構の一つである。

文 献

- 1) 成田貴一, 前川昌大, 金山宏志, 関 義和, 斎藤武文: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 2385
- 2) 鈴木富雄, 広瀬量一, 森本浩太郎, 阿部 亨: 日本機械学会論文集 B 編, **50** (1984), p. 1067
- 3) 脇元博文, 佐藤健朗, 藤浦正己, 原 久典: 鉄と鋼, **69** (1983), S105
- 4) 鈴木富雄, 多田彰吾: 神戸製鋼技報 R & D, **35** (1985) 4, p. 67
- 5) 金山宏志, 関 義和, 斎藤武文, 前川昌大, 成田貴一, 田村節夫: 鉄と鋼, **68** (1982), S763
- 6) 関 義和, 斎藤武文, 金山宏志, 前川昌大: 鉄と鋼, **70** (1984), S36
- 7) 有山達郎, 光藤浩之, 西尾浩明, 大野陽太郎, 山田 裕, 福島 勤: 鉄と鋼, **71** (1985), S83
- 8) 田村健二, 上野浩光, 林 洋一, 佐藤健朗: 鉄と鋼, **73** (1987), S757
- 9) 武田幹治, 田口整司, 福武 剛, 加藤治男, 高島暢宏, 中井歳一: 鉄と鋼, **72** (1986), S871
- 10) 上仲俊行, 袖久保安正, 堀 隆一, 松井良行, 野間文雄, 宮川 裕: 鉄と鋼, **73** (1987), S83
- 11) 前田正史, 高橋 昇, 桑野芳一, 雀部 実, 柴田耕一朗, 出口幹郎, 稲葉晉一: 鉄と鋼, **75** (1989), p. 251
- 12) 田村健二, 一田守政, 脇元博文, 斧 勝也, 林 洋一: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 1980
- 13) 高谷幸司, 山岡秀行, 岩永祐治: 鉄と鋼, **73** (1987), A1
- 14) 上條綱雄, 岩切治久, 木口淳平, 矢場田武, 田中英年, 北村雅司: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2012
- 15) 中島龍一, 炭竈隆志, 脇元一政, 桜井雅昭, 鴨志田友男, 脇田 茂: 鉄と鋼, **73** (1987), A17
- 16) L. H. HAMILTON: Fuel, **60** (1981), p. 909
- 17) O. CHARON, G. PRADO, C. OFFROY, M. PICARD and J. L. ROTH: Proc. European Ironmaking Congress (1986), p. IV-2
- 18) 羽田野道春, 平岡文章, 福田充一郎, 増池 保: 鉄と鋼, **62** (1976), p. 505