

# 試験燃焼炉による微粉炭多量吹き込み時の レースウェイ内燃焼挙動とガス流れ変化

有山 達郎\*・佐藤 道貴\*・村井 亮太\*・宮川 一也\*<sup>2</sup>・野沢 健太郎\*<sup>2</sup>・上條 綱雄\*<sup>2</sup>

Combustion Behavior and Gas Flow Change in Raceway at  
Massive Coal Injection in Experimental Furnace

Tatsuro ARIYAMA, Michitaka SATO, Ryota MURAI, Kazuya MIYAGAWA, Kentaro NOZAWA and Tsunao KAMIJO

**Synopsis :** Hot model experiments were carried out to clarify the combustion behavior in the raceway and the gas flow changes nearby the raceway at the massive coal injection into the blast furnace. From the experimental results, it was found that the location of maximum temperature in the raceway agrees with the peak position of the CO<sub>2</sub> gas composition and it tends to move toward the tuyere when the amount of volatile matter carried by the injected coal increases. The combustion efficiency was influenced by the volatile matter content of the injected coal and the oxygen enrichment had little effect on the combustion efficiency. The heat load to the wall of the hot model increased by the approach of the maximum temperature position toward the tuyere and it decreased by the reduction of ash content in the coal. It was observed that the shell layer was formed at the depth of the raceway. Then, it was estimated that the peripheral gas flow was intensified and the heat load to the wall increased due to the formation of the shell layer. These tendencies were confirmed by the mathematical simulation on the gas flow.

**Key words :** ironmaking ; blast furnace ; pulverized coal injection ; raceway ; pulverized coal combustion ; hot model.

## 1. 緒言

高炉への微粉炭吹き込みは製鉄工程での合理化のみならず、今後のコークス炉老朽化への有力な対策としても重要な技術として考えられ、200kg/tを超える多量吹き込みが、国内外を問わず志向されつつある。しかし、長期安定操業を目指すうえで依然として課題も残されている。従来より、微粉炭吹き込み量を増加させるに伴い、炉頂温度の上昇、炉内圧損の増加が報告され<sup>1)2)</sup>、これらの問題に関しては、装入物分布、酸素富加条件の適正化によって徐々に克服されつつあるが<sup>3)4)</sup>、150kg/t以上の微粉炭吹き込み量では、さらに炉下部に関わる問題も指摘されている。例えば、上條ら<sup>5)</sup>は微粉炭吹き込み量が200kg/tに接近すると、炉下部圧損の増大と同時に、炉下部熱負荷の上昇が認められ、多量吹き込み操業を継続する上で炉下部周辺流制御が重要であると報告している。このような観点より、微粉炭多量吹き込みの長期安定操業を達成する上で、レースウェイ近傍での通気性、熱負荷変化なども含めた炉下部固有の現象の解明と対策が必要と思われる。

従来より、燃焼ホットモデルなどにより、微粉炭燃焼に力点を置いた研究はなされているが<sup>6)7)</sup>、微粉炭吹き込み時のレースウェイ内燃焼挙動とガス流れ変化、炉下部におけ

る熱負荷などを総合的に検討した研究は少ない。そこで、本研究では小型のコークス充填層型試験燃焼炉を用いて微粉炭吹き込みに伴うレースウェイ内燃焼挙動の変化を調査し、さらにコークス層を降下できる大型試験燃焼炉によりレースウェイ周囲のガス流れ変化、熱負荷挙動など総合的な検討を行った。その結果、微粉炭多量吹き込みの長期安定操業を実現する上で、重要な知見が得られたので報告する。

## 2. 実験方法

### 2・1 実験装置

本研究では、前述のように二種類の試験燃焼炉を用いた。小型燃焼試験炉 I は既報の設備<sup>6)</sup>と同一で幅0.4m、奥行き0.6mのコークス充填層と内径0.09mのブローパイプ部から構成され、羽口径は0.065mである。今回の試験では羽口先端から0.27mの位置の上部から微粉炭吹き込み用のランスを1本設置した。また、コークス充填層の羽口対面側からガスサンプリング、温度測定用の水冷プローブを挿入できる。さらに、ブローパイプ部と排ガス上昇管に圧力測定孔を設けた。

次に試験炉 II を Fig. 1 に示す。高さ2.5m、奥行き1.9mの

平成7年6月30日受付 平成7年9月25日受理 (Received on June 30, 1995; Accepted on Sep. 25, 1995)

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

\* 2 神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

扇形の炉であり、内径0.08mの羽口1本を有する。熱風炉は電気加熱による熱交換器方式を用いた。炉頂のコークスホッパーには超音波レベル計を設け、上部コークスホッパーのレベル変化からコークス消費速度を計測できる。また、この燃焼炉の大きな特徴として炉下部に予め川砂の充填層

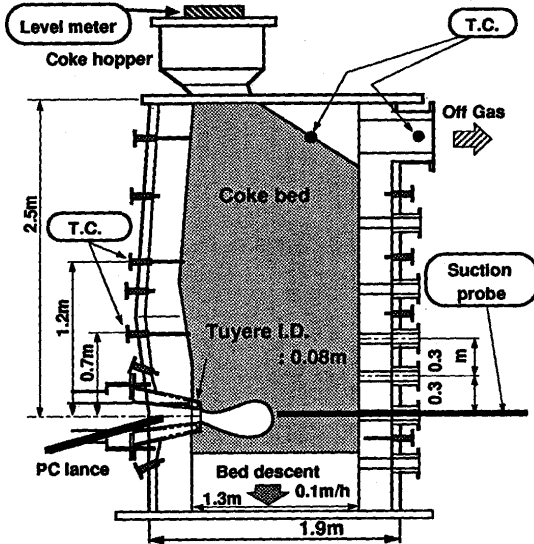


Fig. 1. Experimental furnace II.

Table 1. Condition of experimental furnace.

	Furnace I	Furnace II
Blast flow rate	350 Nm <sup>3</sup> /h	560~720 Nm <sup>3</sup> /h
Blast temperature	1200°C	1050°C
Oxygen content	21vol%	21~27vol%
Coal injection rate(PCR)	65kg/h(200kg/t)	72,144 kg/h(200kg/t)
Lance position from tuyere nose	0.27m	0.17~0.34m

Table 2. Composition of pulverized coal. d.b. : dry base

Coal	Proximate analysis (d.b.mass%)			Ultimate analysis (d.b.mass%)				
	V.M.	Ash	F.C.	C	H	N	S	O
A	34.9	8.5	56.6	73.9	4.8	1.6	0.4	10.8
B	30.9	1.5	67.6	84.6	5.0	1.0	1.0	6.9
C	24.3	7.9	67.8	78.9	4.3	1.6	0.6	6.7
D	11.2	0.5	88.3	89.3	3.8	2.4	1.6	2.4
E	33.2	9.8	57.0	73.3	4.7	1.8	0.6	9.8
F	42.3	3.4	54.3	76.8	5.7	1.6	0.4	12.2

を設け、この砂を底部のロータリーフィーダーで切り出し、充填層全体のコークスを降下させ、炉芯の更新を模擬できるような構造となっている。さらに、羽口対面側から3ヶ所のレベル(羽口中心, 羽口上0.3m, 0.6m)で水冷のサンプリングプローブを挿入でき、炉壁部には熱電対を設置してある。

### 2・3 実験条件および実験方法

試験炉 I, IIの実験条件をTable 1 に示す。試験炉 I ではLPGの燃焼ガスに酸素を混合して、所定酸素濃度の熱風とし、炉内には粒径約25mmのコークスを充填した。試験炉 II では送酸量一定の条件の下、酸素濃度を21~27vol%と変更した。使用コークス粒径は約17mmである。また用いた微粉炭の性状をTable 2 に示す。粒度はいずれも74μm以下80%である。

試験炉 I ではレースウェイ内温度分布を詳細に測定するために、光ファイバーをプローブ先端の孔から挿入し、その光信号を高速の放射温度計に導入して温度計測を行った。その構成図をFig. 2 に示す。従来では、レースウェイ内の温度測定は熱電対あるいは2色温度計などで行われてきたが、レースウェイ内は高温の酸化雰囲気であり、局所的な精度の高い直接測定は困難であった。この光ファイバーは消耗型であり、レースウェイ内の高温部で先端が溶融しても、水冷プローブ内を通じて逐次、光ファイバーを送り込み、瞬間的に光信号を受信することで目的部位の温度の測定が可能である。さらに、その際、Fig. 2 に示すように、プローブ先端の光ファイバー用の孔を羽口中心軸上に設定し、プローブを90°、180°と回転させることによって先端孔位置を高さ方向に変更し、レースウェイ内高さ方向温度分布を求めた。

## 3. 実験結果

### 3・1 レースウェイ内温度およびガス組成分布

Fig. 3 は試験炉 I におけるレースウェイ内の2次元的な温度分布と羽口中心軸上のガス組成分布測定結果を示す。この温度は光ファイバーと放射温度計による計測によるため、

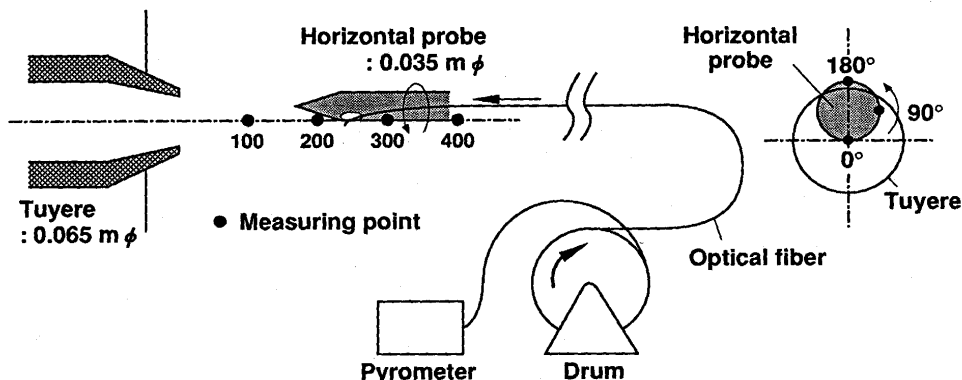


Fig. 2. Temperature measuring device by optical fiber.

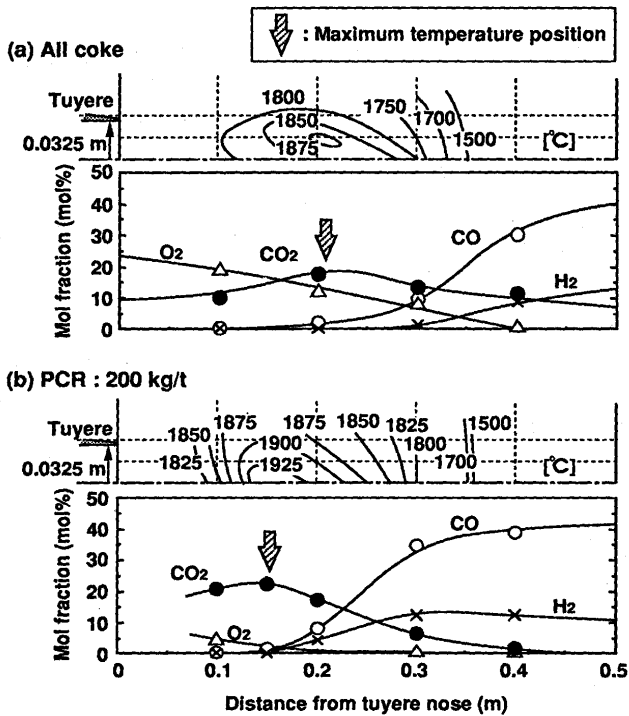


Fig. 3. Temperature and gas composition distribution in raceway.

輝炎の温度を示しているものと考えられるが、基本的にその温度場決定に支配的なガス温度に対応したものと考えられる。本結果によると、オールコークス時には最高温度出現位置が羽口中心よりやや上方に現れる。そして、200kg/tの微粉炭吹き込み時には、その位置は羽口中心軸上に移り、オールコークス時より羽口側に接近する。同時に示したガス組成分布では、微粉炭吹き込みの場合、酸素濃度が羽口先で急減し、CO<sub>2</sub>濃度のピークはオールコークス時より羽口に接近する。そしてこのピーク位置はオールコークス、微粉炭吹き込みを問わず、いずれの場合も上述の最高温度出現位置とほぼ一致する。

通常、レースウェイ内に流入するコークスあるいは微粉炭などの燃料が酸素を消費し、CO<sub>2</sub>を生成するとともに熱を放散する。よって、CO<sub>2</sub>濃度のピーク位置が燃焼発熱反応の最も活発な最高温度位置に対応したと考えられる。以下、このピーク位置を燃焼焦点とする。また、オールコークス時には、レースウェイ上部から流入する高温のコークスと酸素の接触によってガス組成、温度分布が決定されるのに対し、微粉炭吹き込み時には、微粉炭の燃焼初期に生じる揮発分の燃焼速度が非常に速く、急速に周囲の酸素を消費するため、オールコークス時より羽口側にこの燃焼焦点を接近させることになったと考えられる。

### 3・2 燃焼焦点と炭種の関係

次に燃焼炉IIを用い、微粉炭吹き込み量と炭種を種々変更し、燃焼焦点の動きを検討した。Fig. 1に示したように、羽口対面からプローブを挿入して、羽口中心軸上のガス組成を測定し、CO<sub>2</sub>濃度のピークとなる燃焼焦点を求めた。従

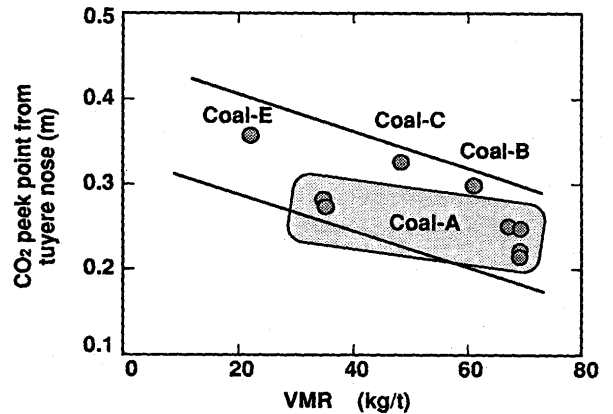


Fig. 4. Effect of volatile matter on CO<sub>2</sub> peak point in raceway.

来の微粉炭燃焼実験によると、吹き込み直後の燃焼反応としては基本的に、石炭の急速熱分解によって生じた揮発分の燃焼が主体になる<sup>9)</sup>。チャーの燃焼速度は遅く、レースウェイ内では揮発分の燃焼がガス組成、温度分布を大きく支配すると考えられる。よって、揮発分投入量と燃焼焦点との関係を調査した。

Fig. 4に燃焼焦点と揮発分投入量VMR (VMR(kg/t) = VM(%) × PCR(kg/t) × 100) との関係を示す。炭種Aについては微粉炭吹き込み量を100kg/t, 200kg/tと変更した結果である。本図で明らかなように、揮発分投入量が多いほど燃焼焦点は羽口側に接近する傾向が認められる。すなわち、揮発分の高い炭種ほど、また同一炭種では微粉炭吹き込み量が増えるほど酸素の消費速度が早まり、燃焼焦点、すなわちレースウェイ内の最高温度位置は羽口側に接近する。

### 3・3 微粉炭燃焼率

燃焼炉IIを用い、コークス消費速度から微粉炭の燃焼率を推定した<sup>9)</sup>。微粉炭吹き込みによってコークス消費量が減少するが、その低下量に相当する酸素消費が微粉炭中の炭素の燃焼、すなわちC + 1/2CO<sub>2</sub> = COの反応によって行われたとして計算した。ここで、微粉炭中のH<sub>2</sub>は燃焼の収支に関与せず、微粉炭中の酸素は微粉炭中の炭素と優先的に反応するものとした。結果的に、このようにして求めた燃焼率は石炭中の可燃分の消費率になる。

この方法で求めた燃焼率と炭種との関係をFig. 5に示す。揮発分の高い炭種では本結果で明らかなようにレースウェイ内で高い燃焼率を達成できる。またFig. 6には酸素富化、微粉炭吹き込みランス位置と燃焼率との関係を示す。ランス位置が羽口先端より0.24mの場合、酸素富化によって燃焼率は徐々に向上するが、酸素富化6%で燃焼率向上は5%程度であり、その効果は顕著でない。本実験の範囲では全体にランス位置の影響は明確でないが、燃焼開始点はランス位置からの距離によって規定されると考えられ<sup>9)</sup>、ランス位置変更により微粉炭の到達燃焼率は影響を受けると推測される。

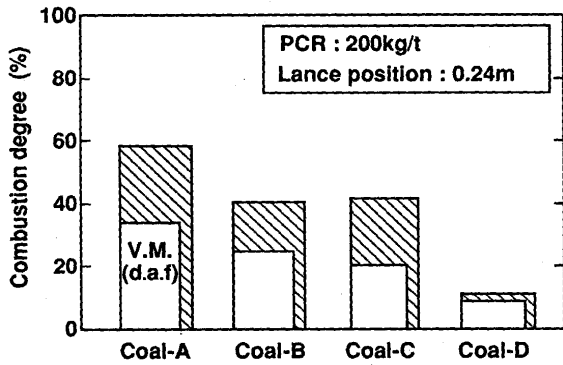


Fig. 5. Effect of coal species on combustion degree (Lance position: distance between lance tip and tuyere nose).

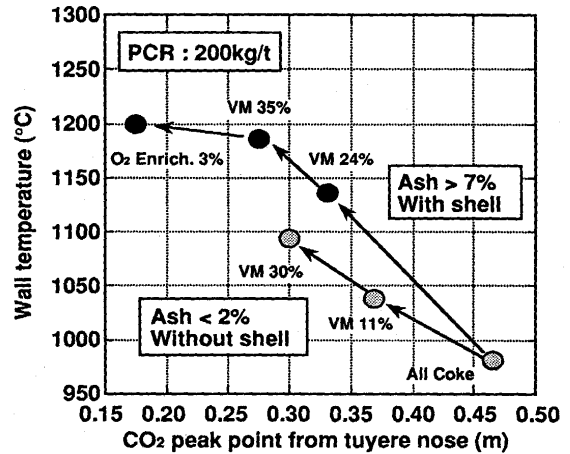


Fig. 7. Relationship between CO<sub>2</sub> peak point and wall temperature.

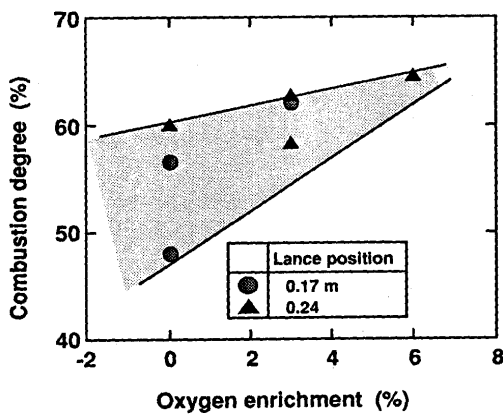


Fig. 6. Effect of oxygen enrichment and lance position on combustibility (Lance position: distance between lance tip and tuyere nose).

### 3・4 燃焼焦点と炉体熱負荷

揮発分投入量は燃焼焦点の位置を大きく左右する。高揮発分の炭種選択は高い燃焼率を期待できるが、同時に燃焼焦点を接近させ炉体熱負荷にも影響を与えることが懸念される。試験炉IIを用いて燃焼焦点と炉体熱負荷との関係を調査した。ここで羽口上方0.7m位置で測定した炉壁温度を炉体熱負荷の指標とした。

Fig. 7に燃焼焦点と炉壁温度との関係を示す。全体に燃焼焦点が羽口に接近すると炉壁温度が上昇することがわかる。例えば、オールコークスでは、燃焼焦点は0.46m、炉壁温度は980°Cであるが、灰分7%以上の炭種使用時には、揮発分35%の微粉炭を吹き込むことによって燃焼焦点は0.28mに接近すると同時に、炉壁温度は約200°C上昇する。また、注目すべきこととして炉壁温度は微粉炭中の灰分量によっても変化する。すなわち、灰分2%以下の微粉炭使用時には燃焼焦点接近に伴う炉壁温度上昇の傾向が緩和されている。

さらに、本図には酸素富化の影響も示したが、酸素富化により燃焼焦点が大きく接近しても炉壁温度の上昇は小さい。これは酸素富化により、羽口上部の熱流比が増大した結果と考えられる。よって、酸素富化も炉下部の熱負荷上昇傾向を緩和する効果を持つと考えられる。

## 4. レースウェイ近傍の通気性変化

### 4・1 微粉炭吹き込みに伴うシェル層の形成

200kg/tを超える微粉炭多量吹き込み時には炉頂から未燃のチャーが排出されるなど、燃焼に関わると思われる問題も報告されている<sup>4)</sup>。よって、微粉炭の燃焼率を最大限、確保することが基本であるが、安定操業達成のためには緒言で述べたように、高炉下部における通気性の維持、熱負荷抑制も同時に必要と考えられる。しかし、既に明らかになったように燃焼の促進を図ること、例えば高揮発分炭の使用は燃焼点の羽口側への接近を生じ、熱負荷の上昇を招く。ただし、3・4で述べたように使用炭の灰分も熱負荷に影響を与えることから、レースウェイ近傍のガス流れを決定する通気性と石炭灰分の関係にも注目する必要がある。

以上の観点から、試験炉IIにおいて、燃焼試験終了後に解体調査を行った。本試験炉ではコークス充填層は連続的に降下しており、レースウェイ奥の層は逐次、更新され、実高炉に近い。炭種A, Bを使用し、200kg/tの吹き込み実験を行い、試験終了後の炉内解体によって得られたレースウェイ近傍の写真をFig. 8 (a), (b)に示す。灰分8.5%の炭種Aの微粉炭吹き込み時には冷却後、Fig. 8 (a)に示すようにレースウェイ周囲に白色の部分で識別される殻状の層(以下、シェル層とする)の形成が認められた。このシェル層はコークス粒子と微粉炭灰分由来の熔融層が一体となった通気性不良の層と観察された。またFig. 8 (b)のように灰分1.5%の低灰分炭B使用時にはシェル層の形成は軽微であった。さらに炭種Aでも100kg/tの吹き込み時、およびオールコークス時にもシェル層の形成は同様に軽微であった。

これらは冷却後に認められた現象であるが、燃焼試験中におけるシェル層の形成を検知するために、試験炉Iで燃焼試験中にブローパイプ部の圧力変動に注目した。微粉炭吹き込み時のブローパイプ内の圧力の経時変化をFig. 9に示す。炭種は灰分9.8%のE炭と、灰分3.4%のF炭である。E

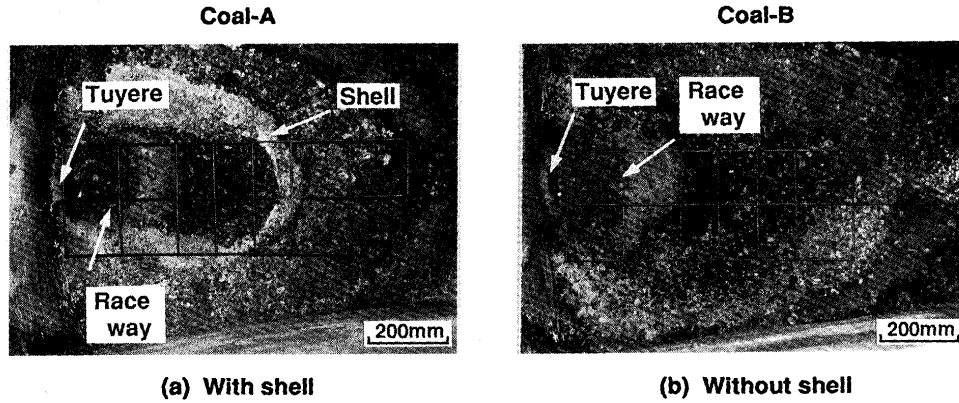


Fig. 8. Horizontal plane at tuyere level (Experimental furnace II, PCR=200kg/t).

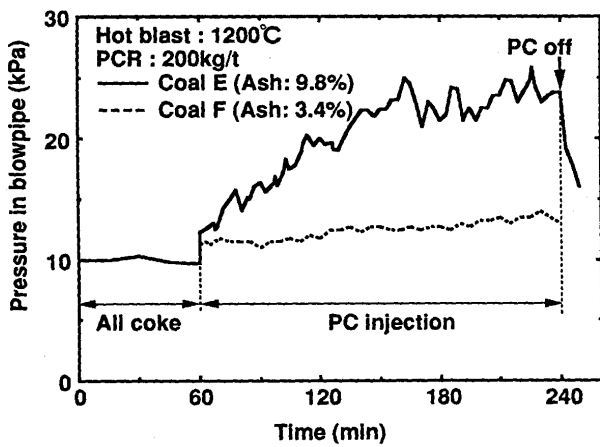


Fig. 9. Change in pressure with coal injection (Experimental furnace I).

炭使用時には微粉炭の吹き込み後から、徐々にブローパイプ圧力は上昇し、かつ変動も大きいことがわかる。また、F炭の場合には圧力の上昇は緩和されている。この試験炉Iでも実験終了後の炉解体時ではE炭使用の場合、試験炉IIと同様なシェル層が認められた。このE炭の場合、微粉炭吹き込み直後の圧力上昇は小さいため、これらの圧力変化は燃焼によるガス速度の増加によるものではなく、レースウェイ奥に灰分が徐々に蓄積して形成された通気性不良のシェル層の影響と考えられる。

また、実炉での炉芯ゾンデ挿入時においても微粉炭吹き込み時には、レースウェイ奥で挿入推力が上昇する傾向が認められており<sup>10)</sup>、実炉でも同様に灰分の凝縮など充填構造の変化が生じているものと推測される。

#### 4・2 シェル形成によるガス流れ変化

微粉炭灰分由来のシェル層がレースウェイ近傍のガス流れに大きく影響し、炉壁熱負荷を増大させているものと推察されるが、さらにモデル計算で通気抵抗の大きいシェル層の形成とガス流れの関係を検討した。

レースウェイ近傍における充填構造とガス流れ変化との関係を検討するために、2次元微粉炭燃焼モデル<sup>11)</sup>を用いた。Fig.10は200kg/tの微粉炭吹き込み時におけるシェル層が存

在するケースと存在しないケースのガス流れベクトルの計算結果を示す。レースウェイ近傍の空隙率 $\epsilon$ は本図中に示すように設定した。なお、Fig. 8の結果を参考に、シェル層内の空隙率 $\epsilon$ は内面を0.3、外面を0.1として与えた。Fig.10より、シェル層の存在により、レースウェイから炉中心方向へのガス流れが抑制され、レースウェイ上方へのガス流れが強くなっていることがわかる。すなわち、周辺流が強化されている。Fig.11には羽口軸、および1m上レベルにおけるガス温度分布を示す。微粉炭吹き込みにより、炉壁付近のガス温度は上昇するが、シェル層形成時には、炉壁近傍の最高温度がさらに増加する。このようにして、周辺流強化、ガス温度上昇が熱輻射を介して炉壁熱負荷を増大させているものと推測される。

よって、以上のようなレースウェイ近傍のシェル層、すなわち通気性不良の領域生成が微粉炭多量吹き込み時に実炉で観察される炉体熱負荷上昇の主因の一つと考えられ、微粉炭多量吹き込み長期安定操業の実現のためには微粉炭の燃焼率改善と同時に低灰分炭の使用、あるいは微粉炭灰分の融点低下を目的としたフラックスの同時吹き込みなどシェル層の解消につながる方策も必要と思われる。またランスの位置も燃焼焦点に大きく影響する要因であり、熱負荷と燃焼率の両者の観点からランス位置を決定すべきと考えられる。

## 5. 結論

コークス充填層型試験燃焼炉を用い、レースウェイ内および近傍での燃焼挙動、ガス流れ挙動と炉体熱負荷との関係に注目した実験、モデル計算を行い、以下の知見を得た。

(1) 微粉炭のレースウェイ内燃焼において、燃焼焦点、すなわち最高温度位置はガス組成中のCO<sub>2</sub>濃度のピークに対応する。

(2) 燃焼焦点の位置は揮発分投入量に支配され、微粉炭揮発分投入量の増大によって、燃焼焦点は羽口側に接近する。

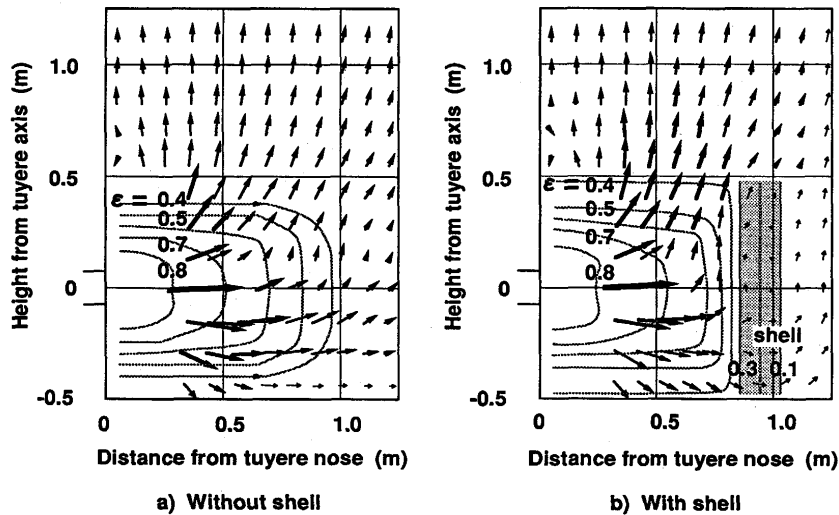


Fig. 10. Effect of shell formation on gas flow around the raceway by simulation model (PCR: 200kg/t).

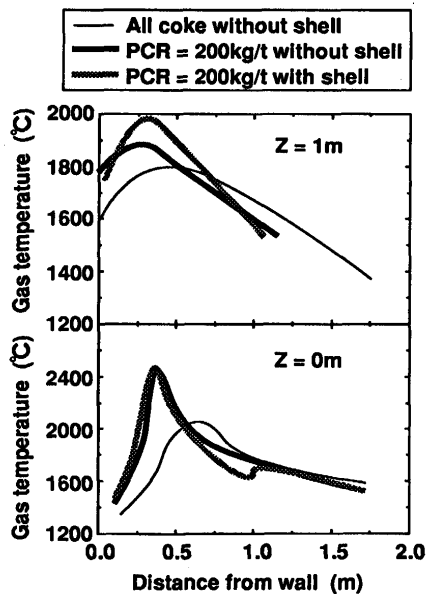


Fig. 11. Effect of shell formation on gas temperature around the raceway by simulation model (Z: Height from the tuyere axis).

(3) レースウェイ内燃焼率は微粉炭中の揮発分量の影響を大きく受ける。

(4) 炉体熱負荷は燃焼焦点の接近とともに増大するが、酸素富化、微粉炭中の灰分低下により軽減する。

(5) 微粉炭吹き込み時にはレースウェイ奥に微粉炭中の

灰分に由来するシェル層が形成され、このシェル層により周辺ガス流が強化され、炉壁熱負荷は増大する。しかし、微粉炭中灰分量の低減はシェル層の形成を軽減し、炉壁熱負荷の上昇を抑制する。

(6) 微粉炭多量吹き込みの達成のためには、燃焼性を確保しながら、熱負荷上昇、通気性悪化の要因を最大限、排除することが必要である。

文 献

- 1) 氷見晋太郎, 下田良雄, 大西守孝, 小松周作, 笹川 亮, 幸松 徹: 材料とプロセス, 5 (1992), p.115
- 2) 大鈴克二, 北山修二, 矢場田 武, 清水正賢, 野間文雄: 材料とプロセス, 4 (1991), p.100
- 3) 北野新治, 中矢 尚, 山形仁郎, 奥田哲央, 柴田耕一郎, 後藤哲也, 伊藤良二, 矢場田 武: 材料とプロセス, 7 (1994), p.124
- 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), p.126
- 5) 上條綱雄, 高橋 昇, 星野剛一, 吉田康夫, 伊藤良二, 柴田耕一郎, 宮川 裕: 材料とプロセス, 6 (1993), p.848
- 6) 有山達郎, 佐藤道貴, 山川裕一, 山田善郎, 鈴木 実: 鉄と鋼, 80 (1994), p.288
- 7) 上野浩光, 山口一良, 田村健二: 鉄と鋼, 78 (1992), p.1206
- 8) Y.de Lassat, G.Prado and O.Simonin: 49th Ironmaking Conf. Proceedings, AIME, (1990), p.473
- 9) 宮川一也, 野沢健太郎, 上條綱雄, 佐藤道貴, 山川裕一, 有山達郎: 材料とプロセス, 7 (1994), p.128
- 10) R.Murai, S.Kishimoto, H.Inoue, H.Mitsufuji, M.Sakurai and H.Wakai: The First Int.Cong. of Science and Technology of Ironmaking, Sendai, ISIJ, (1994), p.272
- 11) 佐藤道貴, 有山達郎, 山川裕一, 鈴木 実, 坪井孝夫: 材料とプロセス, 7 (1994), p.958