

© 1988 ISIJ

技術報告

高炉レースウェイ内におけるオイル コークス・重油スラリーの燃焼性

出口 幹郎*・笹原 茂樹*・葛西 丈次*²
田中 孝三*²・田村 節夫*³

Combustibility of Petroleum Coke-Oil Slurry in the Raceway of Blast Furnace

Mikio DEGUCHI, Shigeki SASAHARA, Taketsugu KASAI,
Kōzō TANAKA and Setsuo TAMURA

Synopsis :

For the purpose of utilization of the residual oil as a new energy resource for ironmaking, the development of an injection technique of petroleum coke-oil slurry into a blast furnace was undertaken. The slurry injection test through 4 tuyeres of No. 1 blast furnace at the Kobe Works was carried out for about 4 months. At the same time, the development of probe at the tuyere level was undertaken to study the combustibility of the slurry in the raceway. The petroleum cokes used in this study were the delayed coke (DC) and the fluid coke(FC).

As a result, it was confirmed that gas sampling, unburnt fuel sampling, and temperature measurement in the raceway were possible, and that the combustibility of the slurry could be evaluated on the basis of these results. It was made clear that the combustibility became worse in the following order, heavy oil, DC-slurry, and FC-slurry. However, the slurry injection had no harmful influence on blast furnace performance. The replacement ratio of coke/slurry was about 1.0. Consequently, it was concluded that the slurry could be used as a substitute fuel for heavy oil.

Key words : petroleum coke ; petroleum coke-oil slurry ; ironmaking ; raceway ; blast furnace operation ; injection ; combustibility ; probe.

1. 緒 言

高炉に補助燃料を吹き込む場合、羽口前のレースウェイ内における燃焼性を把握することは高炉の安定操業を維持する上で重要なことである。そのため従来より実炉において水冷ゾンデを羽口より挿入してレースウェイ内のガス組成分布や温度分布を測定している報告例が多い^{1)~15)}。

たとえば、重油吹込みに関しては I. M. GALEMIN ら¹⁾、清水ら²⁾、稲谷ら³⁾が、天然ガス吹込みに関しては Z. I. NEKRASOV ら⁴⁾、K. I. KOTOV ら⁵⁾、G. V. GORSHIKOV ら⁶⁾、G. A. PANEV ら⁷⁾が、石炭・重油スラリー (COM: Coal Oil Mixture) 吹込みに関しては成田ら⁸⁾⁹⁾が、微粉炭吹込みに関しては V. I. LOGINOV ら¹⁰⁾、V. N. ANDRONOV ら¹¹⁾、川辺ら¹²⁾、S. WAKURI ら¹³⁾、S. SAKURAI ら¹⁴⁾が、

石炭・水スラリー吹込みに関しては稲垣ら¹⁵⁾がそれぞれ報告している。

中でもレースウェイ内における温度分布の測定は G. V. GORSHIKOV ら⁶⁾、G. A. PANEV ら⁷⁾、稲谷ら³⁾が熱電対によつて行つた程度であるが、最近、和栗ら¹⁶⁾、武田ら¹⁷⁾、中島ら¹⁸⁾は羽口レベルでゾンデに内装した光ファイバーによつてレースウェイ内の温度を測定している。

一方、著者らは前報¹⁹⁾に記したように1981年8月から11月にかけて約4か月間にわたるオイルコークス・重油スラリー (以後スラリーと略称する) の高炉吹込み実験を行つた。その結果、スラリーの吹込み方式として環状管リターン方式を採用することによりスラリー中に沈降防止剤を添加しなくとも50%のスラリーを従来の重油吹込みとほとんど同じように長期間にわたつて吹込むことができることを確認した。しかしながら、スラリー

昭和57年4月本会講演大会にて発表 昭和62年9月22日受付 (Received Sep. 22, 1987)

* (株)神戸製鋼所材料研究所 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinocho Chuo-ku Kobe 651)

*² (株)神戸製鋼所神戸製鉄所 (Kobe Works, Kobe Steel, Ltd.)

*³ (株)神戸製鋼所鉄鋼生産本部生産技術部 (現:第一耐火煉瓦(株)) (Technology Administration Department, Iron & Steel Production Division, Kobe Steel, Ltd., Now Daiichi Taika Renga Co. Ltd.)

を重油の代替燃料として使用するには高炉操業におよぼすスラリー吹込みの影響を把握することが重要である。そこで、スラリー吹込み時の高炉操業データを検討することに加えて、ゾンデによるレースウェイ内のガス組成分布と温度分布の測定ならびにダストの採取を行い、その結果によつてスラリーの燃焼性の評価を試みた。なお、本報ではスラリーの濃度を重量百分率(%)で表す。

2. 測定方法

前報¹⁹⁾に記したように1981年に神戸第1高炉(炉内容積:904 m³, 羽口:16本)において羽口4本へのスラリー吹込み実験を約4か月間にわたつて実施した。その際、同時にレースウェイ内におけるスラリーの燃焼性を把握するために水冷式ゾンデによつてレースウェイ内のガスとダストの採取ならびに温度分布の測定を行った。その方法は以下のとおりである。

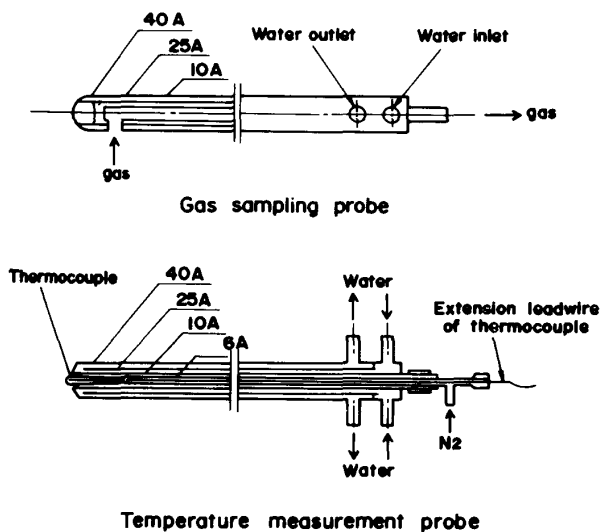


Fig. 1. Schematic figure of gas sampling probe and temperature measurement probe.

ガスとダストの採取には Fig. 1 に示すゾンデを用いた。ゾンデはステンレス製で三重管構造を成しており、外側から順に 40 A (外径:48.6 mm), 25 A (外径:34.0 mm), 10 A (外径:17.3 mm) のパイプを使用した。ゾンデ先端部の採取孔はレースウェイ内の滴下スラグをできる限り吸引しないようにするために下向きとした。このゾンデを Fig. 2 に示した芯出挿入装置上に乗せ、ガス採取用ホース、冷却水用ホース、冷却水の测温用熱電対等をそれぞれ接続する。ガス採取装置には、0.5 l のガラス製ガス採取容器、採取ガス用流量計、フィルターを内蔵したダスト採取容器などが収納されている。

ゾンデの芯出を行つた後、ゾンデ先端部を羽口シール装置のグラウンドパッキン部に挿入し、水冷式ボール弁を開ける。その後、所定の位置までゾンデを挿入し、ガスの採取を行うと同時にフィルターによるダストの捕集を行う。ガスは炉内の圧力によつてゾンデ内を通り、採取容器内に充填される。採取ガスの流量は約 50 l/min になるようにバルブで調整し、ダストの捕集時間は 1 min とした。採取後、ゾンデ先端部をグラウンドパッキン部まで引き抜いて水冷式ボール弁を閉める。

以上の操作を繰り返して羽口先端から炉外側と炉内側へ 25 cm ごとに採取を行い、またゾンデが挿入できなくなる位置(これをレースウェイの深さという)を測定すると同時にその位置からもガスとダストを採取する。採取したガスはガスクロマトグラフィーによつて分析し、ダストを捕集したフィルターは色の比較に供される。

一方、レースウェイ内の温度測定には Fig. 1 に示したゾンデを用いた。このゾンデはガス採取用ゾンデと若干異なり、10 A のパイプの中に移動可能な 6 A の最内管(外径:10.5 mm)を有している。この最内管の先端に消耗型熱電対を装着し、その接続端子からの補償導線を最内管の中を通して炉外の温度記録計に接続する。

ゾンデの芯出・挿入や測定位置はガスとダストの採取

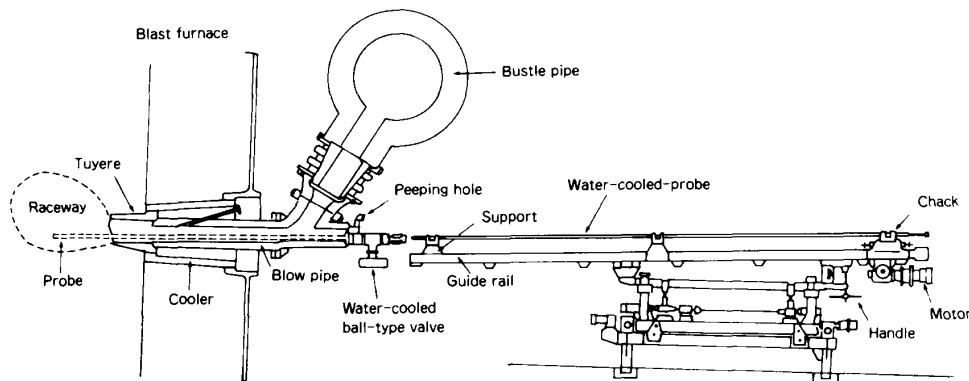


Fig. 2. Schematic figure of probe at the tuyere level.

の場合と同様であるので、ゾンデによる測温方法についてのみ以下に記す。消耗型熱電対の先端をゾンデの先端から 10 mm 突き出るようにセットした後、ゾンデをブローパイプ内に挿入し、所定の位置に設定する。熱電対の起電力がチャート上で一定値を示した後、さらに炉内側へ 25 cm 挿入する。以後、この操作を繰り返して熱電対が損耗するまで連続的に測定する。消耗型熱電対の熱電対とその保護管にはそれぞれ WRe 5-26 ($W_{95}Re_5-W_{74}Re_{26}$) と SiC を用いた。

3. 測定条件

高炉の操業条件とスラリーの性状は前報¹⁹⁾と同一である。すなわち、実験期間中における高炉の操業条件は平均値で、送風量が $1338 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 、送風温度が 844°C 、送風圧力が 0.0987 MPa 、送風湿分が 19 g/Nm^3 、出銑量が 1380 t/d であつた。オイルコークスにはディレードコークス (DC と略す) とフルードコークス (FC と略す) を用い、その組成と粒度は Table 1, 2 に示す。粒度は DC が 2 水準、FC が 1 水準であつた。0.15 mm 以下の DC スラリーを A スラリー、0.30 mm 以下の DC スラリーを B スラリー、0.30 mm 以下の FC スラリーを C スラリーとそれぞれ略記する。

ゾンデによる測定条件は吹込み燃料が重油、A, B, C スラリー、スラリーの濃度が 0.40, 50%, 羽口 1 本当たりのスラリーの吹込み量が 0.100, 200 kg/h (羽口 4 本に吹き込むとスラリー比は 0.7, 14 kg/t に相当) であつた。ガスとダストの採取ならびに温度測定はそれぞれ 2 回ずつ行つた。ゾンデの挿入位置は常に Photo. 1 に示すように右側から出ているバーナーと同一レベルにあつて火炎内を直進していく位置とした。バーナーの先端

Table 1. Composition of petroleum coke and heavy oil.

Species	Ultimate analysis (d.a.f. %)			Proximate analysis (%)			
	C	H	S	FC	VM	Ash	Mois.
Delayed coke	92.68	3.92	0.45	81.01	12.00	0.09	6.90
Fluid coke	86.10	2.31	2.80	86.40	4.80	0.20	8.60
Heavy oil	85.70	11.80	2.50				

Table 2. Particle size of petroleum cokes and denomination of slurry.

Species	Max. dia. (mm)	Mean. dia. (μm)	-74 μm (%)	Denomination of slurry
Delayed coke (DC)	0.15	44	63	Slurry A Slurry B
	0.30	82	45	
Fluid coke (FC)	0.30	68	51	Slurry C

は羽口先端から炉外側に 50 cm 寄つた位置にある。

4. 測定結果および考察

4.1 測定実績

ゾンデによるレースウェイ内からのガス採取は 24 回、ダスト採取は 14 回、レースウェイ内の温度測定は 20 回それぞれ行つた。このうちガスとダストの採取は同時に行つたのでゾンデによる測定回数は合計 44 回であつた。

中でも、レースウェイ内の温度は消耗型熱電対の先端をゾンデの先端から 10 mm 突き出した状態で連続的に測定することができた。その結果の一例を Fig. 3 に示す。チャート内の数値は羽口先端からの距離 (cm) である。この距離は羽口先端を原点として炉外側を負、炉内側を正で表している。以後、このような表示法を用いる。

Fig. 3 において、 $-100 \sim -25 \text{ cm}$ における温度が送

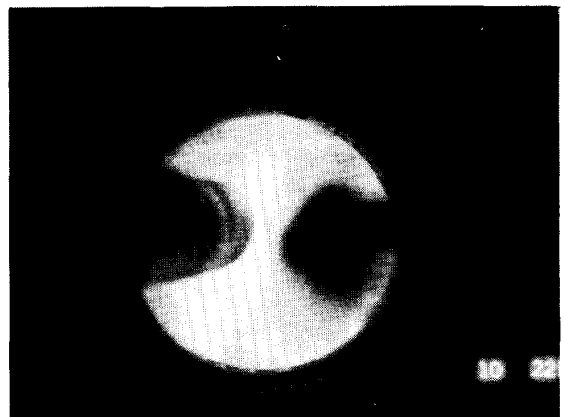
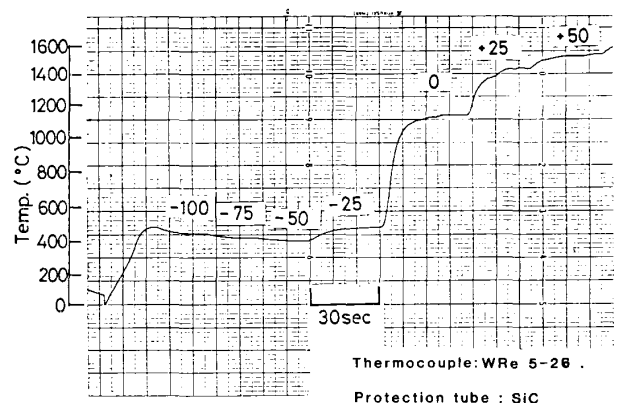


Photo. 1. Inserted positions of probe and injection burner in blow pipe.



Value in this chart is a distance from tuyere nose (cm)
Fig. 3. Temperature distribution in the raceway measured by probe.

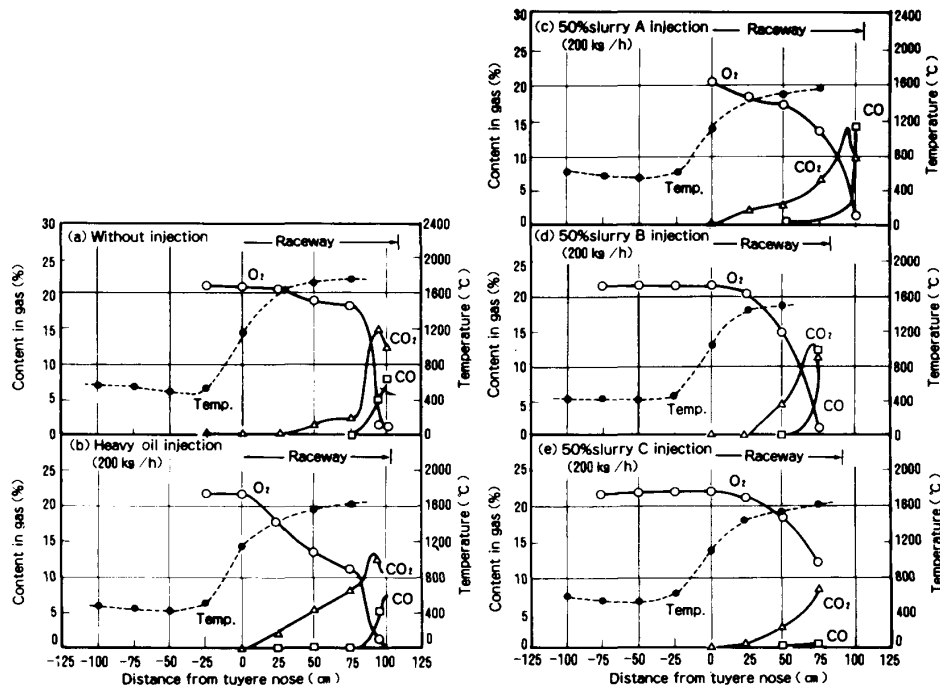


Fig. 4. Gas composition and temperature distributions along hearth radius.

風温度 (約 850°C) より約 400°C も低くなっているのはゾンデによって冷却された熱風の温度を測定しているためである。また、レースウェイ内の温度が理論燃焼温度 (約 2000°C) よりも約 400°C 低くなっているのは消耗型熱電対の突き出し長さが短く、しかもゾンデが水冷されているからである。

4.2 レースウェイ内のガス組成分布と温度分布

ゾンデによって測定したレースウェイ内のガス組成分布と温度分布の一例を Fig. 4 に示す。(a)は燃料を吹き込んでいないとき、(b)は重油を羽口1本当たり200 kg/h 吹き込んだとき、(c)~(e)はそれぞれ50%の、A, B, Cスラリーを羽口1本当たり200 kg/h 吹き込んだときの測定結果である。ここでレースウェイとはゾンデの挿入可能な領域を意味する。

ガス組成分布の測定結果よりつぎのようなことがわかる。すなわち、(1)重油もスラリーも羽口先端より50 cm 炉外側から吹き込んでいるにもかかわらず羽口先端までO₂が消費されていない。これは送風温度が低いために燃焼しなかつたからであろう。(2)燃料を吹き込んでいないときはO₂濃度が羽口先端から徐々に減少し、レースウェイの奥で急激に減少している。それに対して重油あるいはスラリーを吹き込むとレースウェイ中央部におけるO₂の消費速度が大きくなっており、このO₂の濃度変化に対応してCO₂とCOの濃度が変化している。なお、レースウェイの奥におけるO₂の急激な濃度

変化に対応したCO₂とCOの濃度変化はすべての測定結果を示した Fig. 5 の関係に基づいて決定した。以上のような燃料の吹き込みによつてO₂の消費速度が大きくなるという結果はこれまで数多く報告されている。

温度分布の測定結果からはつぎのようなことがわかる。すなわち、(1)重油やスラリーを吹き込んでも羽口先端までの温度分布は何も吹き込んでいないときとほとんど同じである。これはガス組成分布の結果と同様に羽口先端まで重油やスラリーが燃焼していないことを意味する。(2)羽口先端からレースウェイ内にかけては温度が急激に上昇している。

Fig. 6 にはレースウェイの深さが同じで、50%のCスラリーを羽口1本当たり200 kg/h 吹き込んだときのガス組成分布と温度分布を示す。この結果は約2hの間隔をおいて測定したものであるが、両者とも非常に良い再現性を示している。

Fig. 7 にはレースウェイの深さが異なり、40%のCスラリーを羽口1本当たり200 kg/h 吹き込んだときのガス組成分布と温度分布を示す。この結果よりガス組成分布はレースウェイの深さによつて変化するが、温度分布はほとんど変化していないことがわかる。そこで羽口先端からの距離(x: cm)とレースウェイの深さ(D_R: cm)との比(相対距離という)で表すと、Fig. 7 のガス組成分布が Fig. 8 のようになり、1回目と2回目のガス組成分布が一致する。このような結果は他の場合にも得

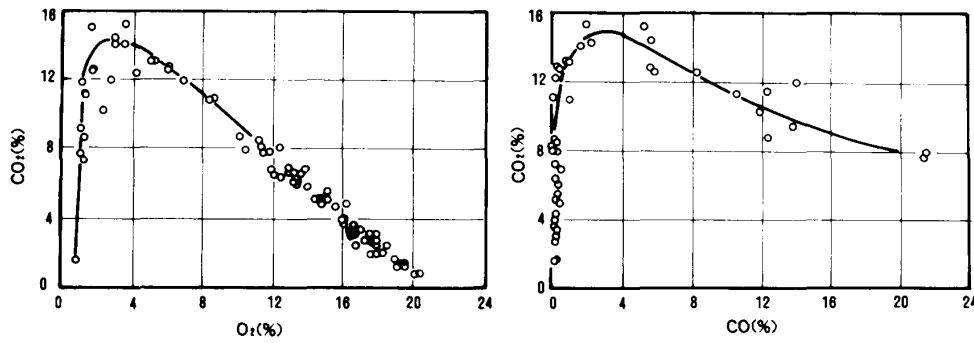
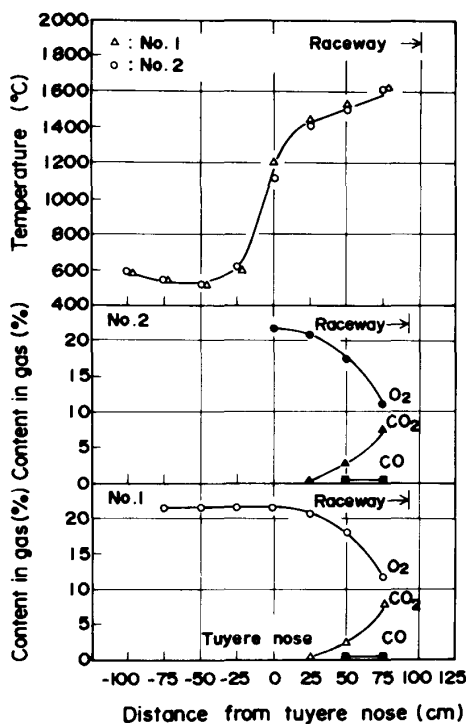
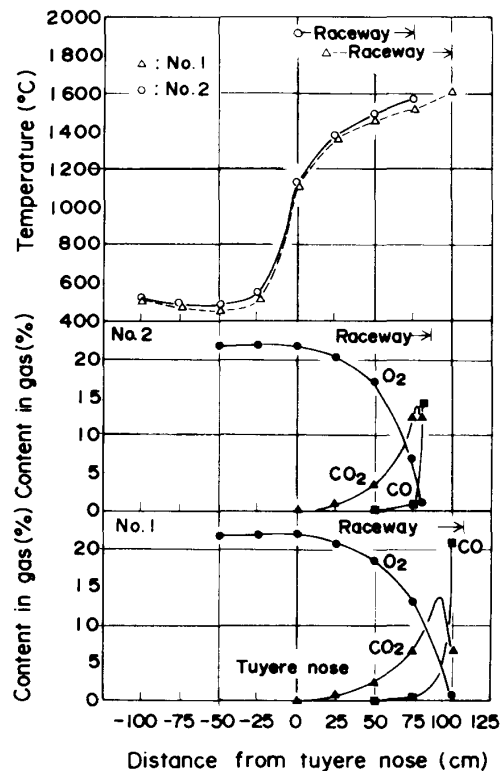


Fig. 5. Relation between CO₂, O₂ and CO concentration in the raceway.



50% slurry C injection, 200 kg/h

Fig. 6. Gas composition and temperature distributions along hearth radius in case of the same raceway depth.



40% slurry C injection, 200 kg/h

Fig. 7. Gas composition and temperature distributions along hearth radius in case of the different raceway depth.

られている。したがって羽口先端からの距離を相対距離にすることによりガス組成分布におよぼすレースウェイの深さの影響を無くすることができる。

4.3 レースウェイ内のガス組成分布によるスラリーの燃焼性の評価

スラリーの燃焼性は O₂ の濃度分布を示す曲線下の面積の大小によつて相対的に評価する。すなわち、吹込み燃料の燃焼性が良いほどレースウェイ内における O₂ の消費速度が大きいので O₂ の濃度分布を示す曲線下の面積が小さくなるという考え方に基づいて燃焼性を相対的

に評価する。

Fig. 9 にはスラリーの吹込み量が羽口 1 本当たり 200 kg/h のときの O₂ の濃度分布を示す。スラリーの濃度は 50% である。ここでは羽口先端からの距離を相対距離で表し、O₂ 濃度についても相対的な値、すなわち羽口先端からの距離 : x における O₂ 濃度 : (% O₂) と羽口先端の O₂ 濃度 : (% O₂)₀ との比 (相対酸素濃度という) で表している。(% O₂)₀ は酸素富化を行っていないので常に 21% である。

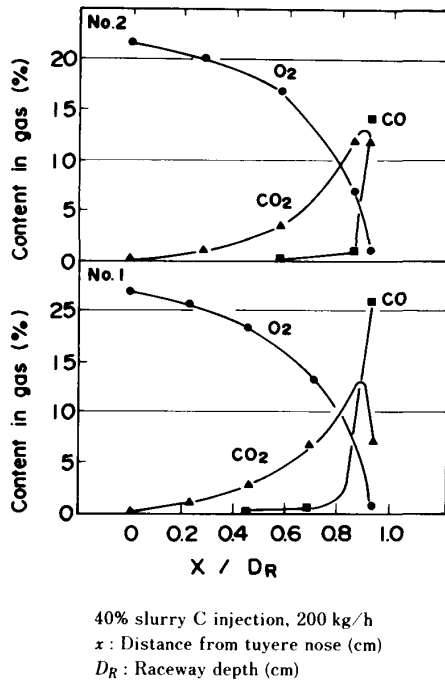


Fig. 8. Relation between gas composition distributions and relative distance.

Injectant	Distance from tuyere nose (cm)			
	0	25	50	75
Without injection				
Heavy oil				
50% Slurry A				
50% Slurry B				
50% Slurry C				

Photo. 2. Unburnt fuel collected in the raceway by a gas sampling probe at a injection rate of 200 kg/h.

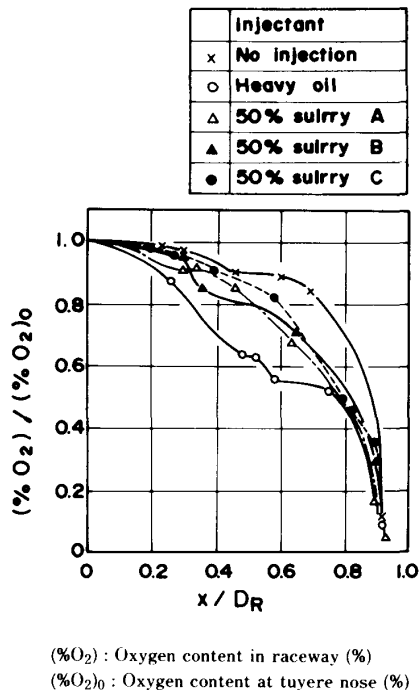


Fig. 9. Relative content distribution of oxygen in raceway at a injection rate of 200 kg/h.

これらの結果より燃料を吹き込んでいないときの O₂ の消費速度が最も小さく、重油あるいはスラリーを吹き込むことによつて O₂ の消費速度が大きくなつてゐる。中でも重油のそれが最も大きいことから重油が最も燃焼しやすいことがわかる。これを定量的に表すために

Fig. 9 において相対距離が 0.93 までのそれぞれの曲線下の面積を求めた。その結果、燃料を吹き込んでいないときの面積を 1 とすると、重油のときが 0.80、A スラリーのときが 0.87、B スラリーのときが 0.89、C スラリーのときが 0.96 となつた。したがつて、吹込み燃料の燃焼性は重油、A スラリー、B スラリー、C スラリーの順で低下するものと考えられる。

この順位は鈴木ら²⁰⁾が報告しているように揮発分の少ない燃料ほど、いいかえれば燃料比(固定炭素/揮発分)の高い燃料ほど燃焼性が悪化するという結果に一致している。つまり Table 1 に示すように FC の燃料比が 18.0 で、DC の 6.8 よりも大きな値であるため、50% の C スラリーの燃焼性が最も悪いということになる。また B スラリーの燃焼性が A スラリーのそれよりも悪いのは、Table 2 に示すように B スラリー中の DC の粒度が A スラリーのそれよりも粗いためであると考えられる。

4.4 レースウェイ内のダストによるスラリーの燃焼性の評価

ゾンデによつてガスを採取するときに同時にフィルターでダストを捕集した。その代表例を Photo. 2 に示す。この写真には、燃料を吹き込んでいないとき、重油を羽口 1 本当たり 200 kg/h 吹き込んだとき、濃度が 50% の A、B、C スラリーをそれぞれ羽口 1 本当たり

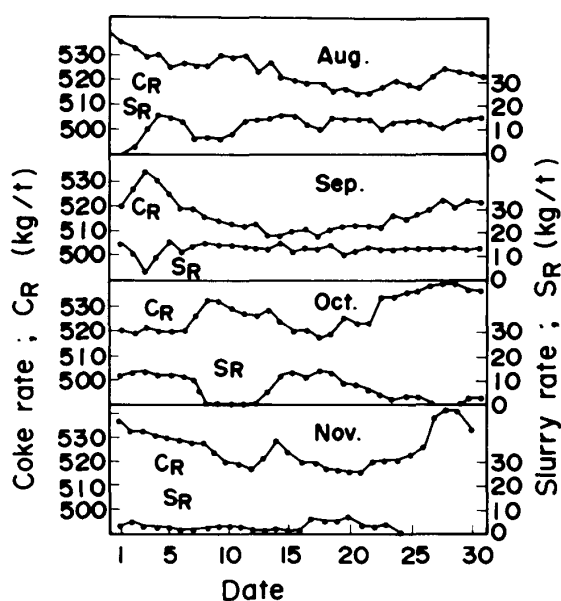


Fig. 10. Transitions of coke rate and slurry rate for slurry injection test period.

200 kg/h ずつ吹き込んだときにレースウェイ内から捕集したものを示した。燃料を吹き込んでいないときには全領域において未燃物が付着していないが、重油とAスラリーでは羽口先端と25 cmの位置において、またBスラリーとCスラリーでは羽口先端から50 cmの位置まで、それぞれ未燃物が付着しており完全には燃焼していないことがわかる。したがって、燃焼性は(1)重油とAスラリー、(2)BスラリーとCスラリーの順に低下するものと考えられる。このような評価はガス組成分布による燃焼性の評価をある程度裏付けるものである。

4.5 スラリーの燃焼性の総合的な評価

ゾンデによる測定結果より、重油、Aスラリー、Bスラリー、Cスラリーの順に燃焼性が低下することが明らかとなったが、スラリーの未燃物が炉内の通気性を阻害することによって炉況を悪化させるという懸念が残されている。

そこでコークスとスラリーの置換率について検討する。まず、実験期間中のコークス比とスラリー比の推移をFig. 10に示す。この図よりコークスとスラリーの置換がその吹込み量に応じて順調に行われたことがわかる。この結果に基づいて求めたスラリー比(S_R : kg/t)と補正コークス比(C_R : kg/t)の関係をFig. 11に示す。この図で使用したデータはスラリー吹込み実験の開始前と終了後ならびにスラリーとコークスとの置換が完了した期間に対応するものである。ここで、補正コークス比の補正量は送風温度に対しては 0.15 (kg/t)/ $^{\circ}\text{C}$ 、湿分

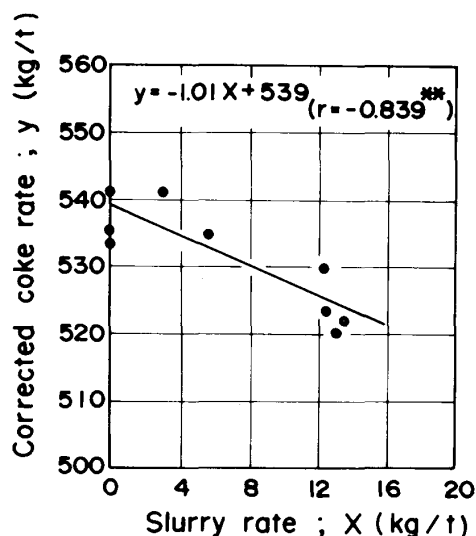


Fig. 11. Relation between corrected coke rate and slurry rate in steady state of blast furnace operation.

に対しては 0.7 (kg/t)/(g/Nm³)、灰分に対しては 10 (kg/t)/%とした。Fig. 11の結果よりスラリー比と補正コークス比の関係は(1)式で表せる。したがってスラリーとコークスとの置換率は 1.01 (kg コークス/kg スラリー)となり、スラリーは高炉内で有効に使用されていることがわかる。

$$C_R = -1.01 S_R + 539 \dots\dots\dots (1)$$

また、高炉の炉況、たとえば送風圧力とその変動、ダスト比、スリップの回数、ガス利用率などにおよぼすスラリー吹込みの悪影響も認められなかった。

ゾンデによる測定結果と高炉操作に関するデータを検討した結果からスラリーの燃焼性を総合的に評価すると、スラリーは高炉における重油の代替燃料として十分利用できる燃料であると考えられる。

5. 結 言

オイルコークス・重油スラリーの高炉吹込み技術を開発するために神戸第1高炉において約4か月間にわたる羽口4本への吹込み実験を実施した。それと同時にレースウェイ内におけるスラリーの燃焼性を把握するために羽口ゾンデの開発を行つた結果、ゾンデの芯出・挿入、レースウェイ内からのガスとダストの採取および熱電対によるレースウェイ内の温度測定などの技術をほぼ確立することができ、その測定結果からスラリーの燃焼性を評価することができた。

レースウェイ内における燃焼性は重油、DCスラリー、FCスラリーの順に低下することが明らかとなったが、

高炉操業におよぼすスラリー吹込みの悪影響がなかつたことおよびコークスとの置換率が約 1.0 であつたことから、スラリーが重油の代替燃料として使用できるものと考えられる。

文 献

- 1) I. M. GALEMIN and S. M. NARTOV: *Stal in English* (1966), p. 865
- 2) 清水政治, 長井 保, 岡部侠児, 近藤幹夫, 稲谷稔宏: *鉄と鋼*, **58** (1972), p. 589
- 3) 稲谷稔宏, 岡部侠児, 西山哲司, 芹沢保文, 高橋洋光, 才野光男: *鉄と鋼*, **62** (1976), p. 514
- 4) Z. I. NEKRASOV, V. L. POKRYSHKIN, A. V. ZAGREBA and R. D. KAMENEV: *Stal in English* (1962), p. 169
- 5) K. I. KOTOV, M. D. ZHEMBUS and V. Yu. TSYMBALYUK: *Stal in English* (1965), p. 85
- 6) G. V. GORSHIKOV, Yu. G. VORONOV, M. A. TSEITLIN, Yu. M. KIYASHKO, A. S. GOROKNOV and M. A. SEKACHEV: *Stal in English* (1965), p. 687
- 7) G. A. PANEV, A. G. KUZUB, P. P. CHUVPYLO, S. L. YAROSHEVSKII and N. N. POPOV: *Stal in English* (1966), p. 171
- 8) 成田貴一, 前川昌夫, 出口幹郎, 八谷 晋, 吉岡邦宏, 田村節夫, 松原 格, 布施 憲: *鉄と鋼*, **65** (1979), S 46
- 9) K. NARITA, M. MAEKAWA, M. DEGUCHI, C. NAGAI and S. TAMURA: *International Blast Furnace Hearth and Raceway Symposium, Newcastle* (1981), p. 8-1
- 10) V. I. LOGINOV and E. I. BEKHTER: *Steel in the USSR* (1972), p. 261
- 11) V. N. ANDRONOV and Z. Sh. PLOTKIN: *Steel in the USSR* (1974), p. 525
- 12) 川辺正行, 和栗真次郎, 馬場昌喜, 石川 泰, 長谷川晟: *鉄と鋼*, **68** (1982), p. 2393
- 13) S. WAKURI, M. BABA and K. KANAMORI: *Ironmaking Steelmaking*, **10** (1983), p. 98
- 14) S. SAKURAI, H. TAKAHASHI and A. SUEMORI: *Ironmaking Steelmaking*, **10** (1983), p. 137
- 15) 稲垣憲利, 小田部紀夫, 川岡浩二, 浅井謙一, 石松宏之, 脇元博文: *鉄と鋼*, **71** (1985), S 880
- 16) 和栗真次郎, 森下紀夫, 芦村敏克, 井上義弘, 平田達朗, 杉山 喬: *鉄と鋼*, **72** (1986), A 9
- 17) 武田幹治, 田口整司, 福武 剛, 加藤治男, 池田義俊: *鉄と鋼*, **72** (1986), A 17
- 18) 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), A 17
- 19) 出口幹郎, 笹原茂樹, 森 利治, 田中孝三, 田村節夫: *鉄と鋼*, **74** (1988), p. 1742
- 20) 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. 1182