

## 燃焼試験炉における微粉炭燃焼実験

成田 貴一\*・前川 昌大\*<sup>2</sup>・金山 宏志\*<sup>2</sup>  
 関 義和\*<sup>2</sup>・斎藤 武文\*<sup>2</sup>

## Combustion of Pulverized Coal in Experimental Furnace

Kiichi NARITA, Masahiro MAEKAWA, Hiroshi KANAYAMA  
 Yoshikazu SEKI, and Takefumi SAITO

## Synopsis :

A fundamental investigation on combustion of pulverized coal has been carried out by using a vertical experimental furnace.

(1) In this furnace, low secondary air velocity and low air ratio give insufficient mixing degree of pulverized coal and air. Consequently, experiments are carried out under the condition that the combustion rate is not influenced by the mixing process.

(2) The combustion rate becomes higher with increase of volatile matter content of coal and with decrease of its particle size.

(3) From the analysis of experimental results by one dimensional combustion model, the reaction rate constant of Lithgow coal is expressed as follows :

$$k_s = 3.3 \times 10^4 \exp(-24500/RT)$$

(4) The combustion behavior of pulverized coal in the raceway of blast furnace is estimated by a simulation model.

## 1. 緒 言

重油価格の高騰に対処して、我が国ではすでに多くの高炉で重油の羽口への吹き込みを中止し、オールコークス操業が行われている。しかしながら、さらに溶鉄原価の低減を図るためにも、また炉熱制御を比較的容易にするためにも各種代替燃料の羽口への吹き込み技術が検討されている。これらの技術のうち微粉炭の吹き込み技術は米国、ソ連および中国で高炉における実績があり<sup>1)~5)</sup>、技術的にも経済的にも注目されるようになり、我が国でも最近実炉への吹き込み試験が開始された。

ところで微粉炭吹き込み技術を大型高炉に適用するには各羽口への均等吹き込みの方法および羽口先レースウェイにおける微粉炭の燃焼などの問題を解決する必要がある。とくに、重油に比較して微粉炭は燃焼性が悪いと予想されるためレースウェイ内における微粉炭の燃焼性を検討することは重要であるが、試験炉においてそれを検討した例も、また実高炉で微粉炭の燃焼性を調査した報告もほとんどない<sup>6)</sup>。

いつぼう、ペレット工場においても微粉炭による焼成が実施されており、石炭銘柄および粒度を選定するうえで微粉炭燃焼に関する基礎的な研究が望まれている。

本報ではこのような背景から、縦型実験炉にて微粉炭の燃焼性におよぼす種々の因子の影響を調査するとともに微粉炭燃焼に関する速度パラメータを求めた。さらに実験結果の適用例として高炉レースウェイ内における微粉炭の燃焼状況を燃焼モデルにより推定した。

## 2. 実験および実験結果

## 2.1 実験装置

本実験に用いた縦型燃焼炉の概略図を Fig. 1 に示す。炉内径は 700 mmφ、炉内高さは 2540 mm で、炉腹にはそれぞれ高さ方向に 5 レベルの観測孔と各種測定を行うための測定孔が設置されている。

微粉炭はテーブルフィーダーにより切り出され、輸送用空気（一次空気、18 Nm<sup>3</sup>/h）とともに内径 20 mmφ のバーナーから上向き方向で炉内に吹き込まれ、また燃焼用空気（二次空気、Max. 600 Nm<sup>3</sup>/h）もバーナースロートから炉内に吹き込まれる。

## 2.2 実験方法

あらかじめプロパンガスを燃焼して炉内を約 1000°C まで昇温したのち、微粉炭を炉内に吹き込んで燃焼実験を行った。炉内各レベルに設置した熱電対で測定した炉内温度が定常状態に達した時点で、微粉炭の燃焼率を測

昭和 55 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 3 月 9 日受付 (Received Mar. 9, 1982)

\* (株)神戸製鋼所中央研究所 工博 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

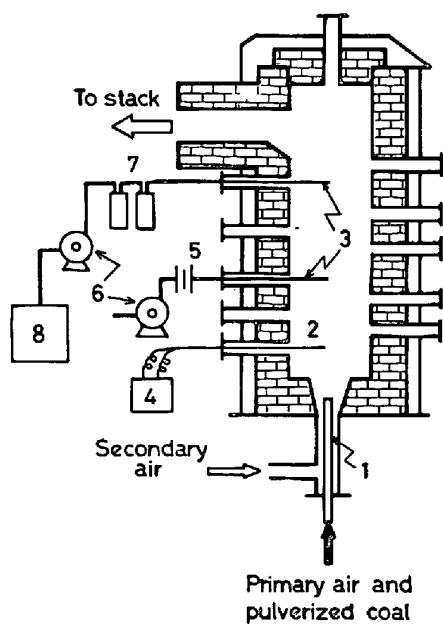
\*<sup>2</sup> (株)神戸製鋼所 中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

定するため炉内ガスおよび微粉炭の採取を行つた。炉内ガスは各測定孔に設置したガス採取用の磁製管を通して吸引し、ガスクロマトグラフにより分析した。また微粉炭はガラスフィルターによつて収集し、工業分析に供した。

2.3 供試試料

供試石炭として主にリスゴー炭を用いたが、その他に、燃焼性におよぼす揮発分の影響を調査するため、揮発分量の異なる数種の原料炭およびコークスを用いた。またリスゴー炭については燃焼性におよぼす微粉炭粒度の影響を調査するため、粒度を3水準変えて実験に供した。

供試石炭の分析値および平均粒径を Table 1 に示す。また同表には微粉炭の粒度分布を次の Rosin-Rammler 分布式で表した場合のパラメータ  $b$  および  $n$  の値も付記した。



1 Burner 2 Thermocouple 3 Probe 4 Recorder 5 Glass fiber filter 6 Suction pump 7 Cooler and washer 8 Gas chromatograph  
Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Composition and particle size of pulverized coals used.

Kind of coal	Proximate analysis (%)			Ultimate analysis (%)					Mean size (mm)	Rosin-Rammler parameter	
	Moisture	VM	Ash	C	H	N	S	O		b(m <sup>-n</sup> )	n(-)
Takashima	2.5	36.0	9.0	75.1	5.1	1.8	0.9	7.7	0.091	1.38 × 10 <sup>14</sup>	3.54
West Wallsend	3.6	35.4	7.5	73.8	4.9	2.2	0.6	8.9	0.102	3.03 × 10 <sup>10</sup>	2.65
Lithgow	3.1	28.7	16.7	69.9	4.3	1.6	0.6	6.4	0.083	2.01 × 10 <sup>9</sup>	2.31
" C	"	"	"	"	"	"	"	"	0.132	1.42 × 10 <sup>6</sup>	1.60
" F	"	"	"	"	"	"	"	"	0.066	2.59 × 10 <sup>21</sup>	5.17
Vicary	1.2	23.9	10.8	76.6	4.4	1.7	0.5	6.0	0.073	1.10 × 10 <sup>10</sup>	2.47
Keystone	1.7	20.0	6.9	81.4	4.3	1.9	0.7	4.8	0.085	6.50 × 10 <sup>14</sup>	3.68
Coke	1.4	1.4	13.7	87.5	1.4	1.4	0.8	1.8	0.120	3.06 × 10 <sup>5</sup>	1.41

$$R = \exp(-bd^n) \dots\dots\dots (1)$$

R: 篩上重量割合 (-)

d: 粒子径 (m)

2.4 微粉炭燃焼率の算出方法

微粉炭の燃焼率は炉内ガスおよび採取微粉炭の分析結果からそれぞれ算出した。ガス分析結果からは炉内半径方向に加重平均した各ガス濃度から次式で求めた。

$$f = \frac{12C_{N_2}^0(Q_1+Q_2)(C_{CO_2}+C_{CO})}{22.4C_{N_2}W_S C_C^0} \times 100 \dots (2)$$

f: 微粉炭中炭素の燃焼率 (%)

C<sub>N<sub>2</sub></sub><sup>0</sup>, C<sub>N<sub>2</sub></sub>: 空気および燃焼ガス中の N<sub>2</sub> 濃度 (%)

Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>: 一次および二次空気量 (Nm<sup>3</sup>/h)

C<sub>CO<sub>2</sub></sub>, C<sub>CO</sub>: 燃焼ガス中の CO<sub>2</sub> および CO 濃度 (%)

W<sub>S</sub>: 微粉炭吹き込み量 (kg/h)

C<sub>C</sub><sup>0</sup>: 燃焼前石炭中の C 含有量 (%)

ここで、微粉炭中の H 含有量は C 含有量に比較して少なく、微粉炭の燃焼率を算出する際に H 成分を無視した。

一方、採取微粉炭の分析値からは灰分をトレーサーとして次式で微粉炭燃焼率を求めた。

$$f' = \frac{100(ash - ash^0)}{ash(100 - ash^0)} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

f': 微粉炭中可燃物の燃焼率 (%)

ash<sup>0</sup>, ash: 燃焼前後の微粉炭中灰分含有量 (%)

しかしながら、微粉炭の採取量が不十分のため、分析精度が低下するなどの問題もあり、採取微粉炭の分析値から求めた燃焼率は参考値とみなした。

2.5 実験条件の検討

微粉炭の燃焼には微粉炭群と空気との混合過程、境界内物質移動過程および表面反応過程などが関与し、実験条件によつてこれらの過程の寄与率が異なってくる。そこで本燃焼炉における微粉炭燃焼特性を把握するため空気比 (理論燃焼空気量に対する比) および二次空気流速を変えて燃焼状況を調査した。

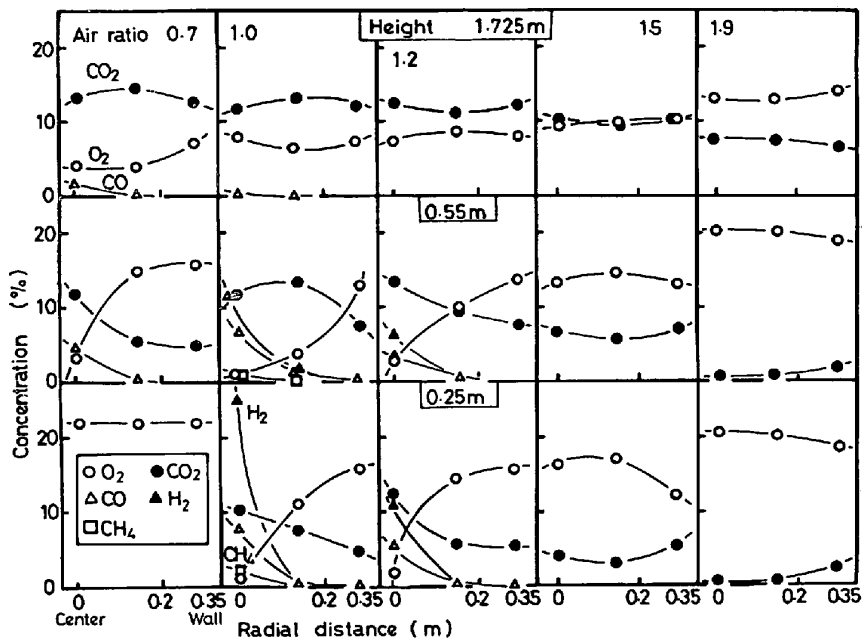


Fig. 2. Change of radial gas distribution with air ratio (Feeding rate 40 kg/h).

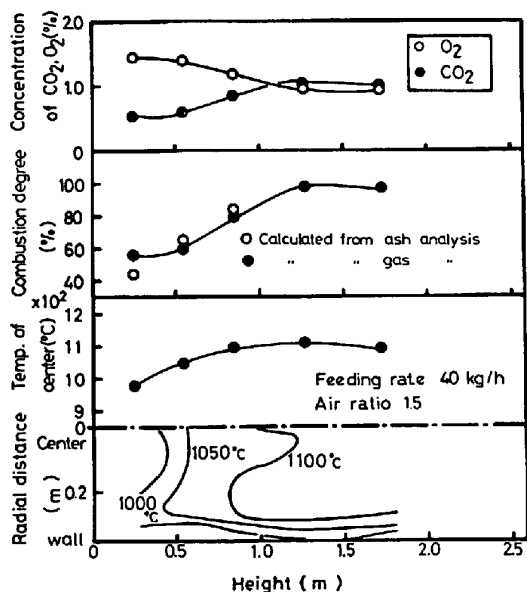


Fig. 3. Variation of gas composition, combustion degree of pulverized coal and temperature within the furnace.

Fig. 2 は半径方向のガス組成分布におよぼす空気比の影響を示す。空気比が低い場合 (0.7~1.2), 炉下部ほど炉軸側で O<sub>2</sub> 濃度が低く, かつ CO<sub>2</sub> 濃度が高くなっている。また炉壁側ではこの逆の傾向にあり, 燃焼が炉中心で進行するいわゆる拡散炎の燃焼特性を示している。しかしながら, 空気比の増加に伴って半径方向のガス組成分布は均一となり, 空気比 1.5 以上では炉最下端レベルにおいても均一に近いガス組成分布となる。

炉内温度 および 微粉炭燃焼率測定結果の 1 例を Fig.

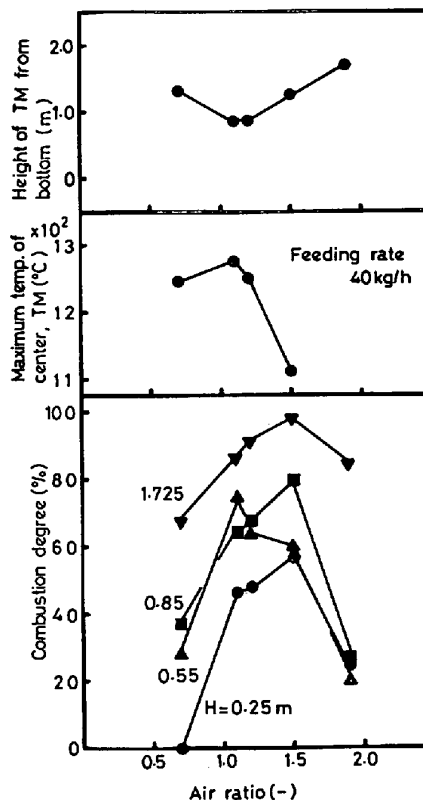


Fig. 4. Effect of air ratio on combustion degree.

3 に示す。また Fig. 3 から求めた炉内各レベルにおける微粉炭燃焼率, 炉軸最高温度および炉軸最高温度位置におよぼす空気比の影響を Fig. 4 に示す。Fig. 4 によると, 微粉炭燃焼率は空気比 1.5 で, また炉軸最高温度は空気比 1.0 で最も高い。空気比が低い場合, 前述したように燃焼が半径方向で均一に進行せず, 中心

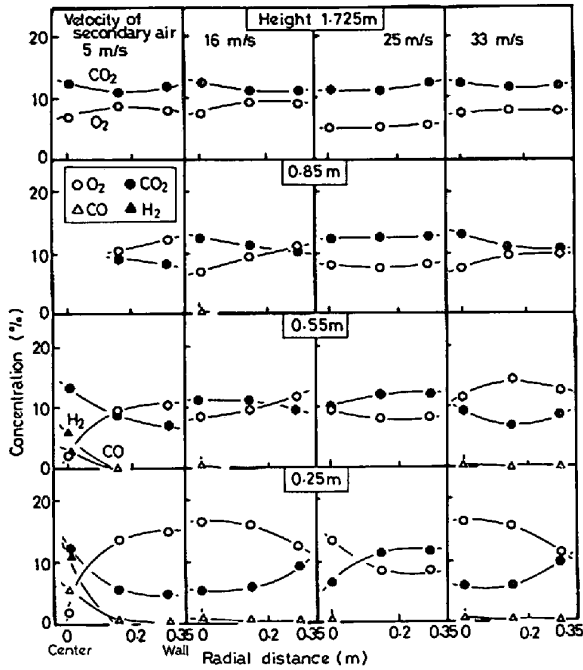


Fig. 5. Change of radial gas distribution with velocity of secondary air (Feeding rate 40kg/h, Air ratio 1.2).

部のみで進行する。これは空気量の不足と二次空気流速が小さいことによる空気と微粉炭の混合状態が悪いためと考えられる。一方、空気比が高い場合、排ガス顕熱として燃焼熱が多量に系外に放出され、炉内温度が低下するため燃焼性が悪くなる。その結果、空気比 1.2~1.5 の範囲で燃焼性が最も良好になったものと推測される。

次に、二次空気量一定 (360 Nm<sup>3</sup>/h) の条件でバーナースロートの内径を 3 水準変えることによつて二次空気流速の影響を調査した。Fig. 5 は半径方向のガス組成分布におよぼす二次空気流速の影響を示す。二次空気流速が遅い場合、低空気比の場合と同様に炉軸側で O<sub>2</sub> 濃度が低く、炉壁側で高いという拡散炎に近い燃焼特性を示すが、二次空気流速の増加に伴つてガス組成分布が均一となる。

Fig. 6 は炉内温度分布および炉内各レベルにおける微粉炭燃焼率におよぼす二次空気流速の影響を示す。二次空気流速の増加に伴つて炉軸最高温度位置は炉上部側に移行し、炉軸最高温度は低下する傾向にある。一方、微粉炭燃焼率は二次空気流速の増加に伴つて上昇するが、二次空気流速が 25 m/s より大きくなると逆に低下する。これは、二次空気流速の増加に伴つて微粉炭と空気との混合状態は良好になるが、さらに二次空気流速が速くなると、微粉炭の炉内滞留時間が短くなるため逆に燃焼率が低くなつたものと考えられる。

CUDE<sup>7)</sup> は液体燃料バーナーの火炎長さを燃料噴霧流

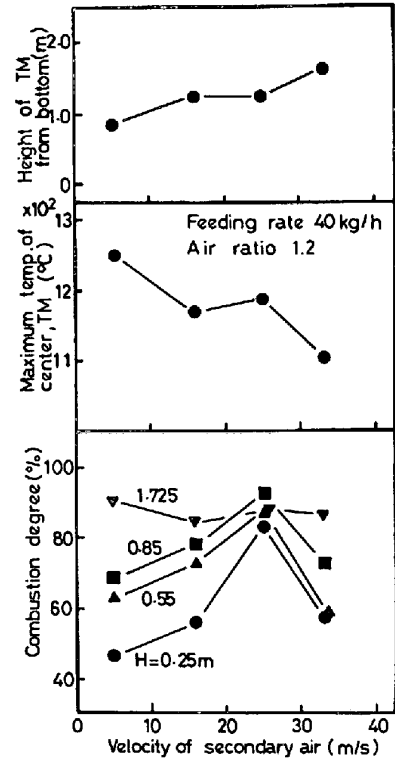


Fig. 6. Effect of secondary air velocity on combustion degree.

に対する周囲空気の混合速度に支配されるものとして次式で表した。

$$L_f = k \frac{W_f}{\sqrt{G}} \dots\dots\dots (4)$$

- L<sub>f</sub> : 火炎長さ (m)
- W<sub>f</sub> : 燃料供給量 (kg/h)
- G : 運動量 (kg・m/h<sup>2</sup>)
- k : 燃料およびバーナーなどで決まる定数 (√m<sup>3</sup>/kg)

ここで、W<sub>f</sub>/√G は燃料噴流に対する周囲空気の混合の程度を表している。この W<sub>f</sub>/√G を微粉炭燃焼にも適用し、微粉炭と空気の混合程度を表す指標として用いる。二次空気流速を変えた実験 (Fig. 5) で W<sub>f</sub>/√G の値を計算すると、流速の遅い方から順に 13.8×10<sup>-3</sup>、7.7×10<sup>-3</sup>、6.2×10<sup>-3</sup>、5.4×10<sup>-3</sup>√kg/m となる。また Fig. 2 において半径方向のガス分布が均一になる空気比 1.5 の場合には 10.3×10<sup>-3</sup>√kg/m となる。Fig. 2 および Fig. 5 の結果から混合速度比が約 10×10<sup>-3</sup>√kg/m 以下の場合には半径方向のガス分布はほぼ均一になり、微粉炭と空気の混合過程は微粉炭の燃焼速度に影響をおよぼさないと考えてよい。したがつて、以下の実験では空気比 1.5 の条件で行うこととした。

2.6 微粉炭の燃焼性におよぼす揮発分の影響

Fig. 7 は炉内温度分布 および燃焼率におよぼす微粉

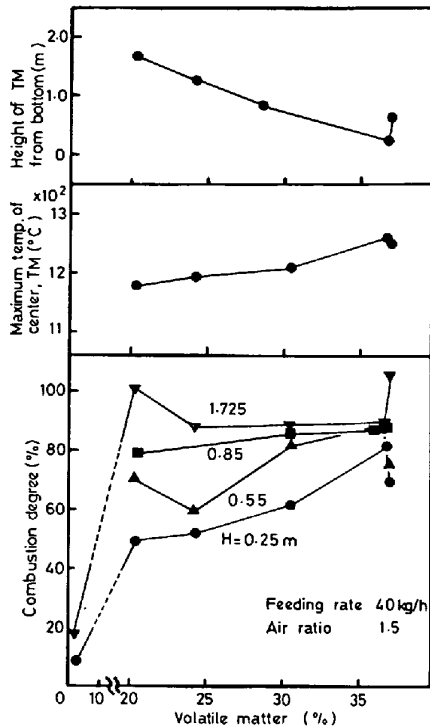


Fig. 7. Effect of volatile matter content on combustion degree.

炭中揮発分の影響を示す。揮発分量の増加に伴って炉内各レベルの燃焼率は上昇する傾向にあり、特にバーナー側で顕著である。また揮発分量の増加に伴って最高温度位置がバーナー側に移行するとともに炉軸最高温度が上昇し、火炎が短くなる。なお、揮発分量の少ないコークスでは燃焼がほとんど進行しない。

Fig. 8 は揮発分量の多いウェストウォールセンド炭と少ないキーストン炭燃焼時の炉内ガス組成分布を対比して示す。最下部レベルにおけるガス分布に注目すると、揮発分量の少ないキーストン炭では揮発分の放出に由来する H<sub>2</sub> ガス濃度は炉軸側で 15% 程度であるのに比較して、揮発分量の多いウェストウォールセンド炭では 30% 以上にも達している。

また採取微粉炭の分析値によると、最下部レベルにおける揮発分量は 4~8% 程度しかなく、炉内に吹き込まれた微粉炭中の揮発分は比較的短時間で放出されることが明らかである。さらに Fig. 8 の最下部レベルにおいて 5~30% もあつた H<sub>2</sub> は炉上部に行くに従って急激に減少・消滅しており、揮発分の燃焼も急速に進行することがわかる。

本実験結果からもわかるように、微粉炭の燃焼は、一般に 1) 火炎、炉壁からの輻射による粒子の加熱、2) 揮発分の放出・着火、3) 火炎の形成による温度上昇、4) 固定炭素の表面燃焼というプロセスにより進行するといわ

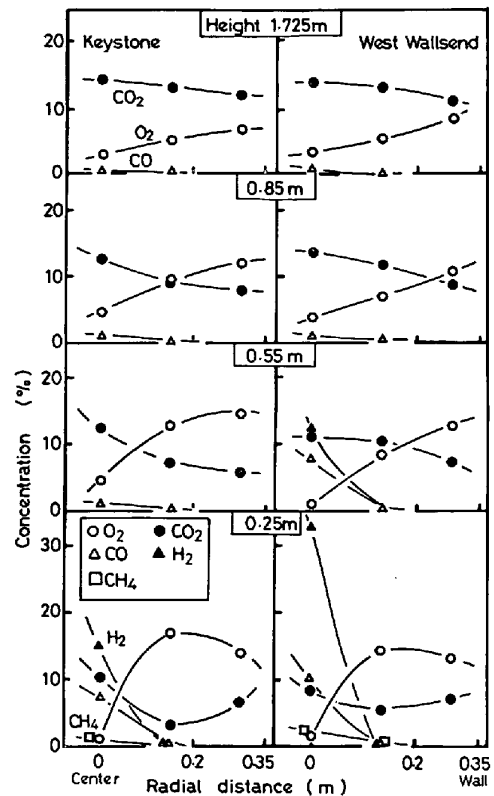


Fig. 8 Comparison of radial gas distribution of Keystone and West Wallsend coal (Feeding rate 40 kg/h, Air ratio 1.2).

れている。揮発分はその中で、微粉炭の着火過程に大きな役割を果たすため、揮発分量が多いほど燃焼速度が速いという結果になったものと考えられる。

### 2.7 微粉炭の燃焼性におよぼす微粉炭粒径の影響

Fig. 9 は炉内温度分布および燃焼率におよぼす微粉炭粒径の影響を、また Fig. 10 は供試石炭の粒度分布曲線を示す。Fig. 9 によれば、微粉炭粒径の減少に伴って炉内各レベルの燃焼率と炉軸最高温度は上昇するとともに、炉軸最高温度位置はバーナー側に移行し、燃焼性が向上している。また微粉炭の燃焼状況も粒径によって異なり、粒径が大きい場合(リスゴ- C)、炉下部で着火した微粉炭粒子が上部に飛行して行く状態が観察できるが、粒径が小さい場合(リスゴ- F)にはプロパンなど同様のガス状の火炎が形成される。

このように微粉炭粒径、すなわち粒子表面積が燃焼速度に大きな影響をおよぼすため、本実験条件下における微粉炭の燃焼反応速度は表面化学反応過程もしくは境界膜内物質移動過程によって支配されると推定できる。

### 3. 微粉炭燃焼速度の解析

微粉炭燃焼に関する速度パラメータを求めるため燃焼モデルによる解析を行った。すなわち本燃焼炉に関する

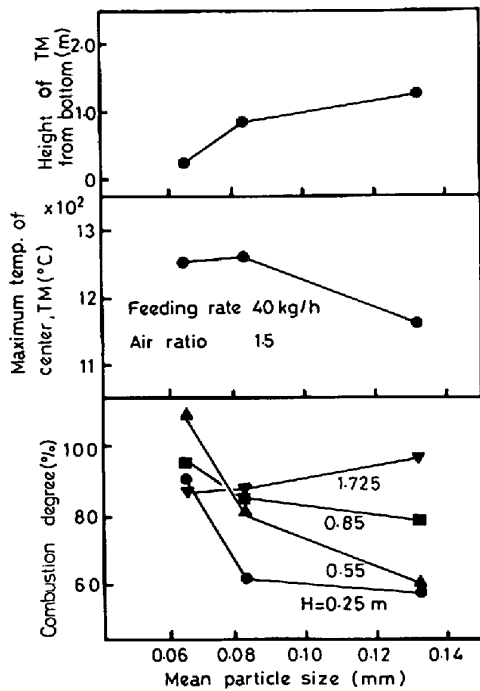


Fig. 9. Effect of mean particle size on combustion degree.

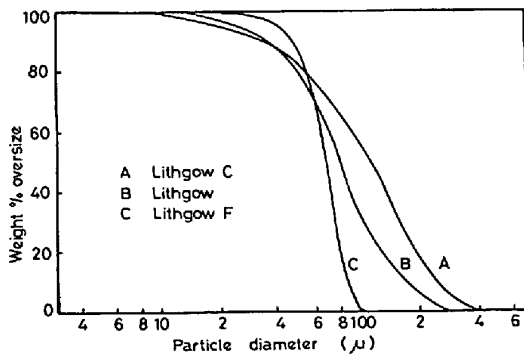


Fig. 10. Size distribution of three kinds of Lithgow coals.

一次元燃焼モデルを導出し、そのモデルに適当な速度パラメータ (表面反応速度定数) を与えることにより得られた計算結果と実験結果を比較する方法を採用した。

一次元燃焼モデルに用いた仮定は以下の諸点である。

- 1) 微粉炭粒子は球状で、その粒度分布は Rosin-Rammler 則に従う。
- 2) 燃焼は  $C+O_2=CO_2$  の反応で進行する。
- 3) 反応の進行により微粉炭粒径は密度一定で減少する。
- 4) 炉内のガス流速が遅いため、微粉炭とガスとの相対速度はなく、かつ予混合が十分になされている。
- 5) 炉内は等温である。

微粉炭燃焼反応の素過程としてガス境界膜内物質移動過程と粒子表面での化学反応過程を考慮して、単一微粉炭

粒子の燃焼速度式を導出した。

境界膜内物質移動速度  $r_f^*$  (kmol/s) および表面反応速度  $r_s^*$  (kmol/s) はそれぞれ (5) および (6) 式で表される。

$$r_f^* = k_f \pi d^2 (C_{O_2}^b - C_{O_2}^s) \dots\dots\dots (5)$$

$$r_s^* = k_s \pi d^2 C_{O_2}^s \dots\dots\dots (6)$$

$k_f$  : 物質移動係数 (m/s)

$C_{O_2}^b, C_{O_2}^s$  : バルクおよび粒子表面におけるガス中酸素濃度 (kmol/m<sup>3</sup>)

$k_s$  : 表面反応速度定数 (m/s)

ここで物質移動係数  $k_f$  は Ranz-Marshall の式<sup>8)</sup>で微粉炭とガスの相対速度がないとして求めた。

$$k_f = 2.0D/d \dots\dots\dots (7)$$

$D$  : 拡散係数 (m<sup>2</sup>/s)

(5), (6) 式から擬定常状態を仮定して単一微粉炭の燃焼速度  $r^*$  (kmol/s) が求まる。

$$r^* = r_f^* = r_s^* = \pi d^2 C_{O_2}^b / (1/k_s + 1/k_f) \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{また, } C_{O_2}^b = P y_{O_2} / R_G T \dots\dots\dots (9)$$

$P$  : 圧力 (atm)

$y_{O_2}$  : O<sub>2</sub> 分率 (-)

$R_G$  : ガス定数 (m<sup>3</sup>·atm/kmol·K)

$T$  : 炉内温度 (K)

ここで、単位ガス量当たり粒径  $d_i$  の微粉炭が  $N_i^0$  (m<sup>-3</sup>) 個存在するとすると、単位ガス量当たりの粒径  $d_i$  に関する総括反応速度  $R_i^*$  (kmol/m<sup>3</sup>·s) は次式となる。

$$R_i^* = r_i^* \cdot N_i^0 \dots\dots\dots (10)$$

$r_i^*$  : 粒径  $d_i$  に関する燃焼速度 (kmol/s)

次に、燃焼炉微小高さ  $dx$  (m) で全粒径を考慮して粒子に関して物質収支をとると、(11)式が得られる。

$$\frac{dW_C}{dx} = -12A \sum_i R_i^* \dots\dots\dots (11)$$

$W_C$  : 供給カーボン量 (kg/s)

$A$  : 燃焼炉断面積 (m<sup>2</sup>)

同様に、CO<sub>2</sub> に関して物質収支をとると(12)式が得られる。

$$\frac{dy_{CO_2}}{dx} = \frac{A}{Q_M} \sum_i R_i^* \dots\dots\dots (12)$$

$Q_M$  : ガス流量 (kmol/s)

したがって、(10)式を用いて(11), (12)式を適当な初期条件のもとで解けばよいが、粒径の異なる全粒子の燃焼速度を求めるためには粒径分布式による取り扱いが必要となる。そこで、微粉炭の初期粒径分布を Rosin-Rammler 分布式にあてはめ、0~0.5 mm の粒径幅を10等分し、各分割内で粒子径が等しいという仮定のもとで計算を行った<sup>9)~11)</sup>。

Rosin-Rammler 式における篩上重量割合は(1)式で

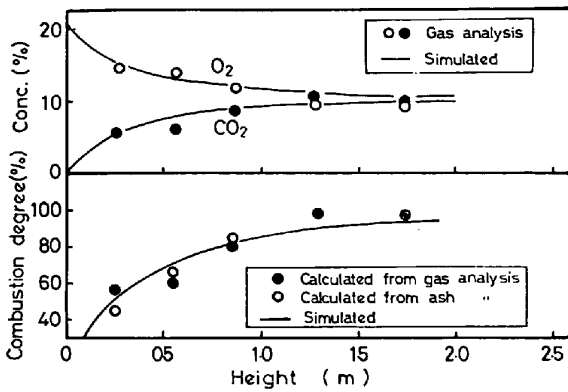


Fig. 11. Typical simulation results on axial gas distribution and combustion degree by means of parameter fitting method.

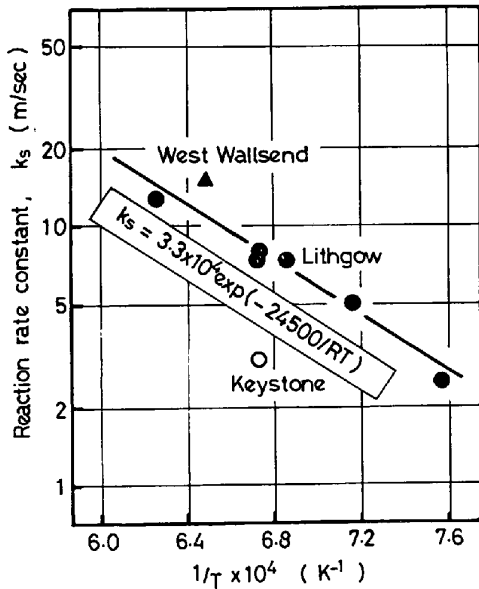


Fig. 12. Temperature dependence of reaction rate constant  $k_s$ .

与えられるため、 $d_1^0 \sim d_j^0$  の粒径範囲内にある微粉炭の重量割合  $R_i^0 (-)$  は次式となる。

$$R_i^0 = \exp\{-b(d_1^0)^n\} - \exp\{-b(d_j^0)^n\} \dots\dots (13)$$

$$d_j^0 = d_1^0 + 5 \times 10^{-5}$$

また  $d_1^0 \sim d_j^0$  にある粒子の代表径を  $\bar{d}_i^0$  とすると、この代表径で表される粒子の個数  $N_i^0 (m^{-3})$  は次式となる。

$$N_i^0 = R_i^0 W_s / \left\{ \frac{\pi}{6} (\bar{d}_i^0)^3 \cdot \rho_s (Q_1 + Q_2) T / 273 \right\} \dots\dots (14)$$

$$\bar{d}_i^0 = (d_1^0 + d_j^0) / 2$$

$\rho_s$  : 粒子密度 (kg/m<sup>3</sup>)

したがって、(14)式を(10)式に代入して、それを用いて(11)、(12)式を解けばよい。この場合、炉内温度の代表値として炉軸最高温度を用いた。また、微粉炭粒子は  $10^{-6} m$  以下になると消滅するとして計算を行った。

適当な  $k_s$  の値を与え、微粉炭燃焼率の推移をシミュレーションした結果と実測値の比較を Fig. 11 に示す。

ここで、 $k_s$  の温度依存性を求めるため、微粉炭供給量を 30~60 kg/h と変えて炉内温度の異なる実験を行った。この場合にも微粉炭と空気の混合過程が微粉炭の燃焼速度に影響をおよぼさない条件で、すなわち前述した  $W_f/\sqrt{G}$  が  $10 \times 10^{-3} \sqrt{kg/m}$  以下の条件で実験を行った。

パラメータフィットにより得られた  $k_s$  の温度依存性を Fig. 12 に示す。 $k_s$  の活性化エネルギーとして 24 500 kcal/kmol が得られた。また同図にはウェストウォールセンド炭およびキーストン炭の  $k_s$  の値もプロットしたが、揮発分量が多い程  $k_s$  の値も大きいという結果が得られた。

#### 4. 高炉レースウェイ内における微粉炭燃焼状況の推定

高炉レースウェイ内における微粉炭の燃焼状況を推定するにはコークスの燃焼についても同時に考慮する必要がある。そこで、本報では前章で述べた微粉炭の燃焼モデルにコークス燃焼モデルを組み合わせる方法を用いた。

レースウェイ内のコークス燃焼モデルは田村ら<sup>12)</sup>のものとはほぼ同じであるが、レースウェイ内のガス分布測定結果<sup>13)</sup>によると、 $O_2$  濃度が約 10% 程度に減少した後  $CO$  濃度が急激に増加し始めるため、 $C + CO_2 = 2 CO$  の反応は  $O_2$  濃度が 10% 以下の領域でのみ考慮した点が異なっている。

さらに、レースウェイ内のコークス粒径と空間率を仮定する必要があるが、本報では神戸 No. 3 高炉におけるレースウェイ内のガス分布測定結果<sup>14)</sup>をもとにそれらを決める方法を採用した。すなわち、レースウェイ内のコークス粒径は、解体調査<sup>15)</sup>の結果から 20~30 mm 程度であるので 25 mm 一定にし、神戸 No. 3 高炉のガス組成分布の実測値に計算結果が一致するようにレースウェイ内の空間率分布を仮定した。得られた空間率分布は次式であつた。

$$\epsilon = 0.8 - 2.28 \exp(-1/x) \dots\dots (15)$$

$\epsilon$  : 空間率 (-)

$x$  : 羽口先端からの距離 (m)

ガス組成の実測値と計算結果の比較を Fig. 13 に示す。また同図には計算により得られた温度も示す。

一方、微粉炭の燃焼に関しては前述の仮定をそのまま適用したが、温度については計算により得られたレースウェイ内の温度分布を用いた。さらに、燃焼炉内燃焼モデルではガス流速が遅いため、微粉炭粒子とガスとの相

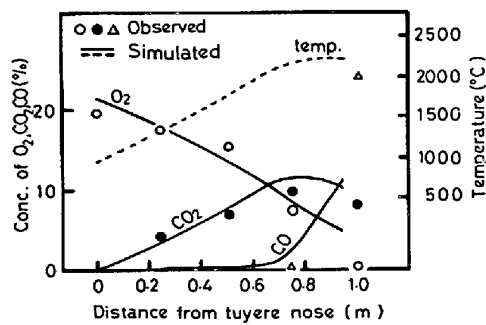


Fig. 13. Change of gas composition and temperature in front of tuyere (Kobe No. 3 BF).

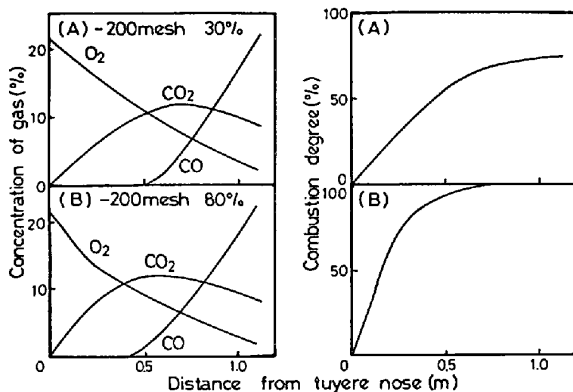


Fig. 14. Estimation of combustion behavior of pulverized coal in the raceway.

対速度はないと仮定したが、レースウェイ内では流速が非常に速いため、その相対速度を無視することはできない。そこで、レースウェイ内に吹き込まれた微粉炭粒子1個に着目し、BOGDANDYら<sup>16)</sup>と同様に微粉炭粒子の運動方程式を用いて相対速度を粒子径の関数として求めた。

レースウェイ内の燃焼モデルを用いて微粉炭燃焼率の推移を計算した結果の1例をFig. 14に示す。同図は対象高炉を神戸No. 3高炉とし微粉炭粒度が-200 mesh 80%と-200 mesh 30%のリスゴー炭を80 kg/t-p吹き込んだ場合の比較であるが、粒度が-200 mesh 80%の場合では羽口先約0.8 mで完全に燃焼を完了しているのに対し、-200 mesh 30%の場合には燃焼が完結していない。したがって、これらの結果から微粉炭は-200 mesh 80%程度の粒度であればレースウェイ内で完全に燃焼するものと考えられる。

以上のように本モデルによつて高炉レースウェイ内の微粉炭の燃焼状況を推定できると考えられる。

## 5. 結 言

豎型燃焼炉を用いて微粉炭燃焼に関する基礎的実験を行い、以下のような結果を得た。

(1) 本燃焼炉においては二次空気流速および空気比の低い場合、微粉炭と空気の混合が不十分となる。したがって、混合の程度を表す指標として $W_f/\sqrt{G}$ の値を用い、これに基づき混合過程が燃焼速度に影響をおよぼさない条件で実験を行った。

(2) 微粉炭の燃焼性におよぼす微粉炭の揮発分と粒度の影響は大きく、揮発分量の増加および粒度の減少に伴つて燃焼性は良好になる。

(3) 実験結果を一次元燃焼モデルにより解析し、パラメータフィット法により微粉炭の表面反応速度定数 $k_s$ (m/s)を求めた結果、リスゴー炭では $k_s=3.3 \times 10^4 \exp(-24500/RT)$ が得られた。

(4) 実験結果の適用例として、高炉レースウェイ内における微粉炭燃焼モデルを導出し、これを用いて微粉炭の燃焼状況を推定した。

## 文 献

- 1) E. M. SUMMERS, L. MACNAUGHTON, and J. R. MONSON: JISI, 201 (1963), p. 666
- 2) S. A. BELL, J. L. PUGH, and J. R. SEXTON: AIME Ironmaking Proc., 34 (1975), p. 307
- 3) E. J. OSTROWSKI and J. R. DIETZ: Iron Steel Eng., 17 (1965), p. 116
- 4) A. A. YARMAL, S. L. YAROSHVSKII, L. R. RUZHINSKII, and L. Z. SUPLIN: Steel in USSR, 6 (1976), p. 470
- 5) G. YUN-ZHI, and L. YUN-CAI: Rev. Mét., 77 (1980), p. 841
- 6) M. HATANO, T. MIYAZAKI, T. SHIMODA, Y. KAJIWARA, and Y. KAMEI: Int. Conf. on "Operation of blast furnace", Arles, France, June (1980)
- 7) A. L. CUDE: JISI, 175 (1953), p. 304
- 8) W. E. RANZ and W. R. MARSHALL: Chem. Eng. Progr., 48 (1952), p. 141
- 9) M. E. LEESLEY: AICHEJ., 23 (1977), p. 520
- 10) A. LOWE, T. F. WALL, and I. M. STEWART: 同上, 23 (1977), p. 440
- 11) T. W. DAVIES, J. M. BEÉR, and R. G. SIDDALL: Chem. Eng. Sci., 24 (1969), p. 1553
- 12) 田村健二: 製錬化学工学演習 (鞭 巖 編著) (1974), p. 81 [養賢堂]
- 13) たとえば T. INATANI, T. FUKUTAKE, and K. OKABE: Der Hochofenprozess Hersg. Vom Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf, (1973), p. 114
- 14) K. NARITA, M. MAEKAWA, M. DEGUCHI, C. NAGAI, and S. TAMURA: Int. Blast Furnace Hearth and Raceway Symp., Newcastle, Australia, Mar. (1981), p. 8-1
- 15) 橋爪繁幸, 高橋洋光, 奥村和男, 富田貞雄, 小坂橋寿光, 小西行雄, 近藤幹夫, 森岡恭昭: 川崎製鉄技報, 11 (1979), p. 388
- 16) L. V. BOGDANDY and R. GÖRGEN: Arch. Eisenhüttenw., 35 (1964), p. 963