

© 1992 ISIJ

論 文

未燃チャーの挙動に基づく高炉への微粉炭 吹込み限界量の検討

山口 一良*・上野 浩光*・田村 健二*²

Maximum Injection Rate of Pulverized Coal into Blast Furnace with Consideration of Unburnt Char

Kazuyoshi YAMAGUCHI, Hiromitsu UENO and Kenji TAMURA

Synopsis :

Experiments concerning the combustion and consumption of pulverized coal (PC) with high volatile matter content were conducted using an experimental apparatus capable of simulating the heat transfer and reaction in the lower part of the blast furnace.

First, the calculating method of PC combustion efficiency in the raceway was proposed and the effects of blast conditions on the efficiency were investigated.

Secondly, the calculating method of PC consumption efficiency at the apparatus top was proposed and the effects of blast conditions on the efficiency were investigated.

Thirdly, the unburnt char weight accumulating in the apparatus was measured and the limited char weight not to cause the permeability deterioration in the apparatus was found.

As a result of these analyses, the following conclusion was obtained concerning the maximum PC injection rate :

Under the conditions of blast temperature of 1300°C, blast humidity of 5×10^{-3} kg/Nm³ and oxygen enrichment of 2%, the limited PC injection rate is 245×10^{-3} kg/Nm³ in the apparatus that prevents the discharge of char from the apparatus top, and the limited PC injection rate is 190×10^{-3} kg/Nm³ that does not cause the permeability deterioration even when char accumulates in the apparatus.

Key words : ironmaking; blast furnace process; pulverized coal injection; raceway; deadman; char reaction.

1. 緒 言

高炉への微粉炭吹込みは、操業安定、コストダウン、生産性向上、石炭選択自由度拡大の手段として有効な技術である。とくに多量吹込みは、コークス炉老朽化、環境問題等にも対処できる有効な手段として近年その重要性の認識が高まっている。すでに実高炉で微粉炭比 180 kg/t-pig の実績があり¹⁾²⁾、今後 200 kg/t-pig 以上の吹込み技術の確立により、上述目的を達成することが求められている。

筆者らは、羽口燃焼帯(レースウェイ)において微粉炭を 100% 燃焼できる吹込み限界は 180 kg/t-pig であることを明らかにしたが³⁾、レースウェイ内で微粉炭が完全燃焼せずチャーが生成しても、高炉のシャフト部で

チャーが優先的に消費される⁴⁾ため、炉頂からチャーが放出されない吹込み限界は 180 kg/t-pig よりも高いことが予想される。

微粉炭吹込み限界を論じた報告は数例みられる。吹込み限界は炉下部の反応伝熱で規制され、限界値を向上させるには装入物分布と鉱石被還元性の改善が必要であるという報告⁵⁾では、限界値を明示していない。また炉内のチャー消費限界は 90 kg/t-pig であり、吹込み限界は 300 kg/t-pig であるという報告⁶⁾では、送風中酸素濃度が 65% と高い。さらに 300 kg/t-pig 吹込みでは燃焼性が低下し、未燃チャーのコークス充填層への蓄積が急増するという報告⁷⁾、200 kg/t-pig 吹込みのためには、160 kg/t-pig に対して燃焼性を 20% 向上させる必要があるという報告⁸⁾も、限界値を明示していない。

平成 3 年 10 月 9 日受付 平成 4 年 4 月 10 日受理 (Received on Oct. 9, 1991; Accepted on Apr. 10, 1992)

* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

*2 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 工博 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

高微粉炭比操業において発生する通気性悪化、装入物降下不良は、装入物分布およびコークス品質改善により解決できるという報告²⁾を考慮すると、吹込み限界は未燃チャーの炉内蓄積および炉頂からの排出で規制される可能性が高い。しかしシャフト部でのチャー消費に関する報告はみられるが⁴⁾、最大送風温度 1300°C の通常操業において、チャーの消費を考慮して吹込み限界を明らかにした報告はまだない。

本論文では、高炉炉下部を模擬できる実験装置を用いて微粉炭の燃焼実験を行い、炉頂からチャーが放出されず、かつ炉内にチャーが蓄積しても通気性悪化を招かない微粉炭の吹込み限界について検討した結果を述べる。

2. 実験方法および解析方法

2.1 実験方法

実験には Fig. 1 に示す既報の装置⁹⁾を用いた。本装置は高炉炉下部の反応伝熱を模擬でき、断面 90° 扇形で羽口 1 本を装備している。炉頂からムーバブルアーマーを用いて鉍石とコークスを層状に装入し、プラズマアークヒーターで加熱し羽口部より吹込んだ熱風により鉍石を加熱還元溶解し、溶銑滓を炉底出銑口より間欠的に排出する。羽口の反対側よりプローブを挿入し、温度測定、ガス組成分析、炉内観測、ダスト採取等を行う。

Table 1 に使用した微粉炭の化学組成を示すが、この微粉炭は実高炉で使用されている代表的な高揮発分炭で

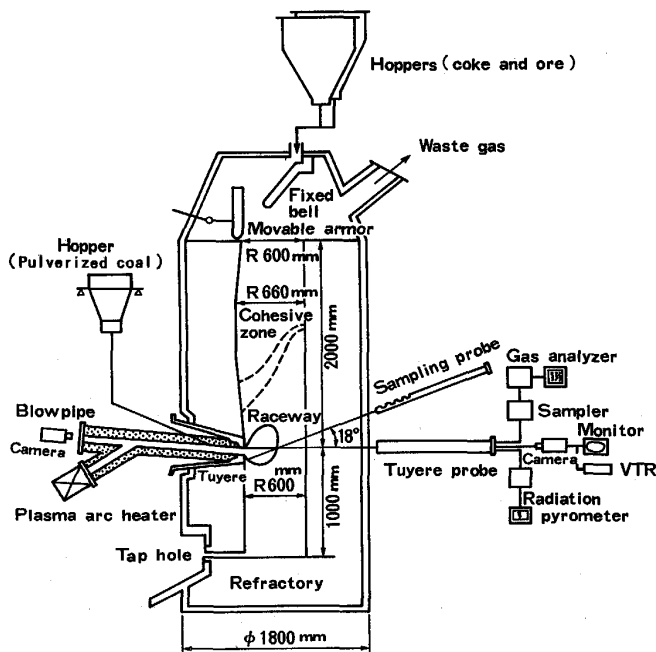


Fig. 1. Schematic illustration of an experimental apparatus.

ある。粒度は 100 μm 以下または 100~200 μm に粉碎整粒し、代表粒径 (重量の 80% が含まれる最大粒径) はそれぞれ約 50 μm , 150 μm である。送風支管側壁より挿入したランス先端を、羽口先端手前 100 mm の位置にセットして吹込んだ。

オールコークス時の操業条件: 送風温度 1100°C, 送風湿度 $5 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$, 酸素富化 0%, フレーム温度 2400°C, コークス比 600 kg/t-pig に対して、微粉炭吹込み時は、微粉炭濃度 $200 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ (微粉炭比 280 kg/t-pig), 空気比 0.75, 送風温度 1250°C, 送風湿度 $5 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$, 酸素富化 3%, フレーム 2100°C, コークス比 340 kg/t-pig を基準として、Table 2 に示すように操業条件を変更した。ここで空気比 (μ) とは、微粉炭中の C と H が CO_2 と H_2O に完全燃焼するのに必要な酸素量に対する、送風中および微粉炭中酸素量の比率を示す。炉頂での鉍石装入量を示す指標として、炉中心部 (炉口径 600 mm のうち中心部 100 mm) における鉍石とコークスの層厚比 (L_O/L_C) を用い、ムーバブルアーマーにより Table 2 に示すように調整した。

操業中に炉芯内 (羽口先端より 500 mm の位置) および炉頂上昇管中排ガスよりダストを採取し、顕微鏡観察によりチャーと粉コークスを識別し、レースウェイ内微粉炭燃焼効率および炉頂での微粉炭消費効率を算出した。また湿式収塵機の排水中ダストを採取し、炉頂ダスト排出速度を算出した。さらに実験終了後の炉内よりダストを採取し、顕微鏡観察によりチャーと粉コークスを識別し、炉内チャー蓄積量を求めた。

2.2 レースウェイ内微粉炭燃焼効率の算出方法

レースウェイ内微粉炭燃焼効率 η_{PC} (%) を、微粉炭中 C と H の合計に対するガス化 C と H の合計の比と定義すると、後述するように微粉炭中 H はレースウェイ内で完全燃焼するので、 η_{PC} は (1) 式で示される。

Table 1. Chemical compositions and particle size of pulverized coal (dry base, unit %).

Ash	Volatile matter	C	H	O	Mean size (μm)
10.4	32.4	74.1	4.7	8.5	50.150

Table 2. Operating conditions of an experimental apparatus.

Blast volume	130 Nm^3/h
Blast temperature	1210~1505°C
Blast humidity	$2\sim 41 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$
Oxygen enrichment	0.0~12.0%
Excess air ratio	0.42~1.40
Flame temperature	2000~2563°C
Pulverized coal concentration in the blast	$93\sim 326 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$
Layer thickness ratio in the central area	0.00~0.29

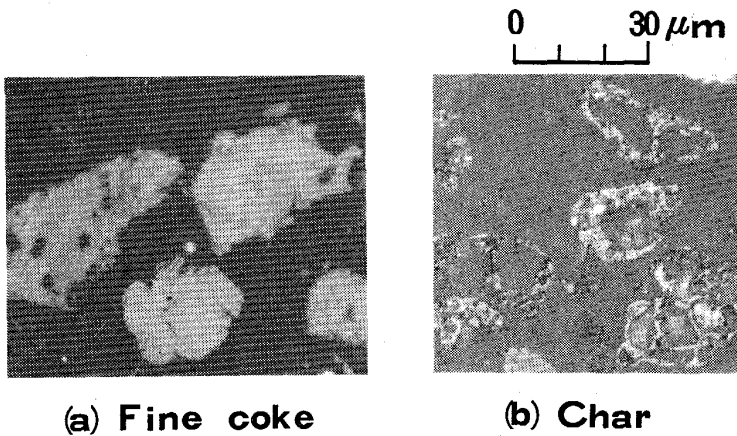


Photo. 1. Configuration of fine coke and char.

$$\eta_{PC} = 100 - \frac{W_{CH} \cdot \gamma_{CH}}{W_{PC} \cdot (H_{PC} + \gamma_{PC})} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

ここで W_{CH} : 炉芯内ダスト中のチャー排出量 (kg/h); γ_{CH} : チャー中 C 含有率 (-); W_{PC} : 微粉炭吹込み量 (kg/h); H_{PC}, γ_{PC} : 微粉炭中 H および C 含有率 (-)

(1)式中の W_{CH}, γ_{CH} の算出方法を以下に示す.

2.2.1 炉芯内および炉頂排ガスダスト中のチャー含有率の測定

採取したダストを樹脂に埋込み、研磨面を顕微鏡観察すると、緻密な粉コークスと揮発分放出により中空となったチャーが明りょうに識別できる (Photo. 1 参照). 鉬石由来の粉はほとんど観察されなかった. 研磨面 10 mm × 10 mm の領域に 2 mm 間隔で 36 点の測定視野を設定し、500 倍の倍率で全測定視野の粉コークスとチャーの個数を粒度別に集計した. 粒度は 10 μm より 10 μm ごとに区分し、> 100 μm までの 10 水準とした. 一般的に粉コークスに対してチャーは粒度が小さく個数が少ない (Fig. 2 参照).

粉コークスに比べて中空のチャーは真密度が小さく、同一粒度での断面観察結果および、採取ダストの密度測定結果より、チャーの真密度は粉コークスのほぼ 1/2 とみなしてよい. よって粒子を球と仮定すると、粒度別の個数割合と密度差からチャーと粉コークスの重量分率に換算でき、(2), (3)式で示される.

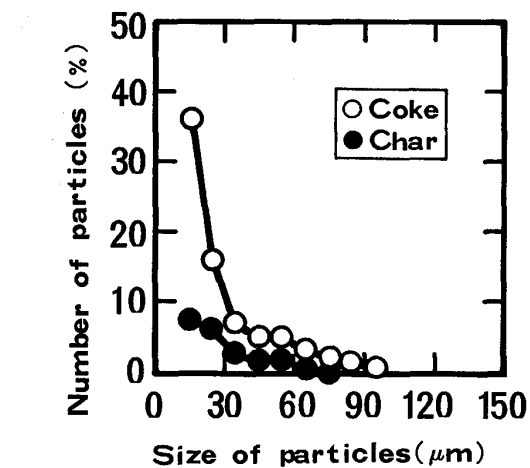
$$\alpha_{CH} = \frac{W_{CH}}{W_{CH} + W_{FC}} \dots\dots\dots(2)$$

$$\beta_{CH} = \frac{R_{CH}}{R_{CH} + R_{FC}} \dots\dots\dots(3)$$

ここで α_{CH}, β_{CH} : 炉芯内および炉頂排ガスダスト中チャー含有率 (-); W_{FC} : 炉芯ダスト中の粉コークス排出量 (kg/h); R_{CH}, R_{FC} : 炉頂ダスト中のチャーおよび粉コークス排出量 (kg/h)

2.2.2 炉芯内におけるチャー排出量の算出

炉頂排ガス中ダストバランス、ダスト中 C バランスより(4)~(5)式が成立する.



Blast temperature = 1 320°C
 Blast humidity = 5×10^{-3} kg/Nm³
 Oxygen enrichment = 1.2%
 PC concentration = 140×10^{-3} kg/Nm³

Fig. 2. Measuring result of char and coke contents in deadman dust.

$$R_{CH} + R_{FC} = R_d \dots\dots\dots(4)$$

$$R_{CH} \cdot \gamma_{CH} + R_{FC} \cdot \gamma_{FC} = R_d \cdot C_d \dots\dots\dots(5)$$

ここで R_d : 炉頂ダスト排出速度 (kg/h) (炉頂排ガス湿式収塵機排水量と排水中ダスト濃度より求める); C_d : 炉頂ダスト中 C 含有率 (-); γ_{FC} : 粉コークス中 C 含有率 (-)

なお(5)式における γ_{FC} は、オールコークス時に実測すると炉芯内および炉頂排ガスダスト中でもほぼ一定値 (36.0%) を示すので、以後この値を用いた. (3)~(5)式において R_d, C_d, β_{CH} に実測値を与えると、 $R_{CH}, R_{FC}, \gamma_{CH}$ が求まる.

筆者らが開発した、羽口燃焼帯における微粉炭の燃焼挙動を記述する数学モデル³⁾を用いて、レースウェイ燃焼炉の実験条件で推定を行うと、推定結果では $\mu = 0.84$ が $\eta_{PC} = 100\%$ を維持する限界であるのに対して、実験結果では $\mu = 1.0$ となり、両者に差異がみら

れた。この差異を解消するために、実験結果に合うようにチャーと酸素の反応速度に補正係数を乗じて次に述べる推定を行った。

本装置による実験の一例として、微粉炭濃度 $140 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ 、空気比 1.0、送風温度 1320°C 、送風湿度 $5 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ 、酸素富化 1.2% の実験条件で、上述数学モデルによる推定を行うと、本装置の実測レースウェイ深度 (250 mm) における η_{PC} は 70.5% となる。微粉炭中の H は完全燃焼し、未燃チャーとして C が残留する。よって (1) 式に η_{PC} を与えると本実験例の W_{CH} を計算できる。

チャーが粉コークスに対して優先的に消費されないときは、 R_{CH} は W_{CH} に比例し、 R_{FC} は W_C (装入コークス量, kg/h) に比例すると予想されるので、それぞれ両者の比 a , b を (6), (7) 式で定義すると、本実験例では次の値となる。

$$a = R_{CH}/W_{CH} = 0.016 \dots\dots\dots(6)$$

$$b = R_{FC}/W_C = 0.060 \dots\dots\dots(7)$$

後出する Fig. 7 の縦軸 ($\alpha_{CH} - \beta_{CH}$) は、炉中心部の鉍石とコークスの層厚比 (L_O/L_C) が 0.05~0.07 のときはゼロ ($\beta_{CH} = \alpha_{CH}$) である。このときチャーは粉コークスに対して優先的に消費されず、この条件を満足する実験条件 (本実験例を含む) で a , b を求めると、(6) (7) 式のようにほぼ一定値を示したので、以後の計算にはこの値を用いた。

2.2.3 レースウェイ内微粉炭燃焼効率の算出

η_{PC} の算出方法は次のとおりである。

1) $L_O/L_C = 0.05 \sim 0.07$ ($\alpha_{CH} = \beta_{CH}$) のときは、(3)~(5) 式および (1), (6) 式を変形した (8) 式により算出する。

$$\eta_{PC} = 100 - R_{CH} \cdot \gamma_{CH} / \{ W_{PC} \cdot (H_{PC} + \gamma_{PC}) \cdot a \} \times 100 \dots\dots\dots(8)$$

2) $L_O/L_C \geq 0.09$ ($\alpha_{CH} > \beta_{CH}$) のときは、チャーが粉コークスに対して優先的に消費される (後出 Fig. 7 参照) ため、炉頂における β_{CH} および (6), (7) 式を適用できない。よって、チャーの炉内消費の生じる前の η_{PC} を α_{CH} を用いて、次の手順によって求める。

1) (7) 式を変形した (7)' 式に W_C の実測値を与え、チャーの優先的消費が起らないとしたときの R'_{FC} を求める。

$$R'_{FC} = b \cdot W_C \dots\dots\dots(7)'$$

2) (3) 式の β_{CH} に炉芯内実測値 α_{CH} を与え、この式を変形した (3)' 式でチャーの優先的消費が起らないとしたときの R'_{CH} を求める。

$$R'_{CH} = \alpha_{CH} \cdot R'_{FC} / (1.0 - \alpha_{CH}) \dots\dots\dots(3)'$$

3) (1), (2) 式の R_{CH} , R_{FC} に R'_{CH} , R'_{FC} を与え、 γ_{CH} を求める。このとき C_d には炉芯内実測値を与える。

4) (8) 式の R_{CH} に R'_{CH} を与え、 η_{PC} を算出する。

本装置による繰返し実験例：微粉炭濃度 $220 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ 、空気比 0.70、送風温度 1340°C 、送風湿度 $5 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ 、酸素富化 3.0% の実験条件で、 η_{PC} を算出すると 60.7%, 61.3% となり、再現性は良好であった。

従来の Al_2O_3 バランス¹⁰⁾により η_{PC} を求めると、64.0%, 65.5% となり若干高い。これは W_{CH} を $W_{PC} / (W_{PC} + W_{CC})$ に正比例すると仮定しているため (W_{CC} ; コークス燃焼量, kg/h), W_{CH} が低く見積もられることによるが、 η_{PC} の差はあまり大きくない。

2.3 炉頂での微粉炭消費効率の算出方法

炉頂での微粉炭消費効率 η_{PCT} (%) は、 η_{PC} と同じ定義より導かれる (9) 式で求める。

$$\begin{aligned} \eta_{PCT} &= [1.0 - R_{CH} \cdot \gamma_{CH} / \{ W_{PC} \cdot (H_{PC} + \gamma_{PC}) \}] \times 100 \\ &= [1.0 - \{ R_d \cdot C_d - (1.0 - \beta_{CH}) \cdot R_d \cdot \gamma_{FC} \} / \{ W_{PC} \cdot (H_{PC} + \gamma_{PC}) \}] \times 100 \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

2.4 炉内チャー蓄積量の算出方法

炉内チャー蓄積量 (微粉炭濃度換算) A_{PC} (kg/Nm^3) は、炉内総蓄積 C をチャーと粉コークスの合計であるとして導かれる、(10) 式で求める。

$$A_{PC} = \{ W_d / \theta \cdot C_{di} - (1.0 - \delta_{CH}) \cdot W_d / \theta \cdot \gamma_{FC} \} / (V_b \cdot \gamma_{PC}) \times 1000 \dots\dots\dots(10)$$

ここで W_d : 炉内蓄積総ダスト量 (kg); θ : 微粉炭吹込み時間 (h); C_{di} : 炉内ダスト中 C 含有率 (-); δ_{CH} : 炉内ダスト中チャー含有率 (-) (顕微鏡観察より求める); V_b : 送風量 (Nm^3/h)

3. 実験結果および考察

3.1 レースウェイ内微粉炭燃焼効率に及ぼす送風条件の影響

レースウェイ内微粉炭燃焼効率 (η_{PC}) に及ぼす送風条件の影響を調査するために、1 条件だけを変更する実験を行った。

Fig. 3 に示すように、送風温度上昇とともに η_{PC} は増加する。これは送風温度上昇により、微粉炭熱分解速度上昇、熱分解量増加、チャー燃焼速度上昇が起るためと思われる。

Fig. 4 によると、酸素富化率 (O_2) には η_{PC} の極大値が存在し (4% 付近)、 O_2 が上昇し過ぎると η_{PC} は逆に低下する。 O_2 が低いときは、 O_2 上昇によりチャー燃焼速度上昇が起るため η_{PC} は増加するが、 O_2 が上昇

し過ぎると空気比 (μ) 一定の条件下では送風中微粉炭濃度が増加し、チャーと酸素の接触率が低下し、チャー燃焼速度低下により η_{PC} は減少するものと思われる。

Fig. 5 に示すように、送風湿度増加は η_{PC} の増加をもたらす。山縣ら⁷⁾の微粉炭多量吹込み時のレースウェイ内ガス組成測定結果では、 $O_2 = 0\%$ の位置で H_2 が生成しており、 $H_2O + C$ (チャー) = $H_2 + CO$ の反応が起こっていると考えられ、送風湿度増加によりこの反応量が增大したことを示す。ただし η_{PC} 増加に与える影響はあまり大きくない。

η_{PC} に及ぼす各送風条件の影響に可成性が成り立つとして、本装置による実験の一例：微粉炭濃度 $140 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ 、空気比 1.0、送風温度 1320°C 、送風湿度 $5 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ 、酸素富化 1.2% を基準とし、Fig. 3~5 を用いて (ただし $O_2 \leq 4\%$) ほかの実験例における η_{PC} を計算して実績値と比較すると、 $\pm 5\%$ の精度で一致した。よって可成性が成り立つとして以後の計算を行った。

本装置による実験例を、送風条件一定 (送風温度

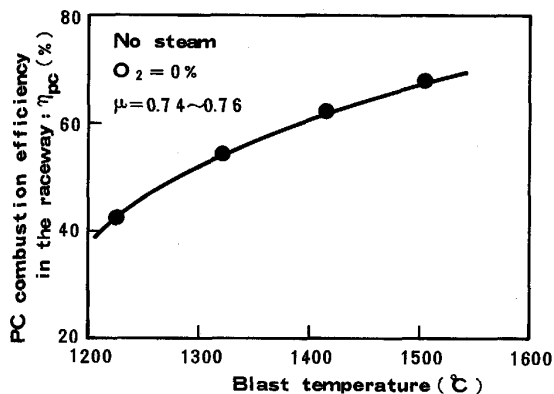


Fig. 3. Effect of blast temperature on PC combustion efficiency in the raceway.

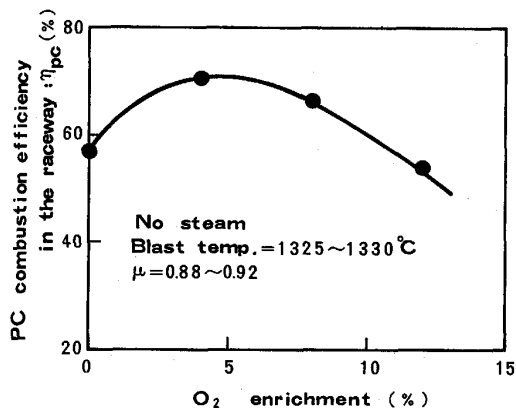


Fig. 4. Effect of oxygen enrichment on PC combustion efficiency in the raceway.

1300°C 、送風湿度 $5 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ 、酸素富化 0%) となるように η_{PC} を補正し、補正 η_{PC} と μ の関係をプロットしたのが Fig. 6 である。 μ が低下するほど η_{PC} は減少し、チャーに対する気相バルク中酸素濃度が減少したためと思われる。

3.2 炉内のチャー消費に及ぼす鉱石装入の影響

Fig. 7 に、炉内のチャー消費に及ぼす炉中心部の鉱石とコークスの層厚比 (L_O/L_C) の影響を示す。縦軸は炉芯内ダストと炉頂ガス中ダストのチャー含有率の差 ($\alpha_{CH} - \beta_{CH}$) を表し、後述するように炉内蓄積チャーの量が非常に少ないことから、この値が大きいほど炉内でチャーが優先的に消費していることを示す。この図によると、 L_O/L_C が 0.05~0.07 のときは差がほぼゼロであり、チャーは優先的に消費されないが、0.09 以上では優先的に消費され、 L_O/L_C が大きくなるほど優先的消費割合が大きくなる。これはチャーが軟化融着した鉱石層に付着し、FeO の直接還元により消費される⁴⁾こ

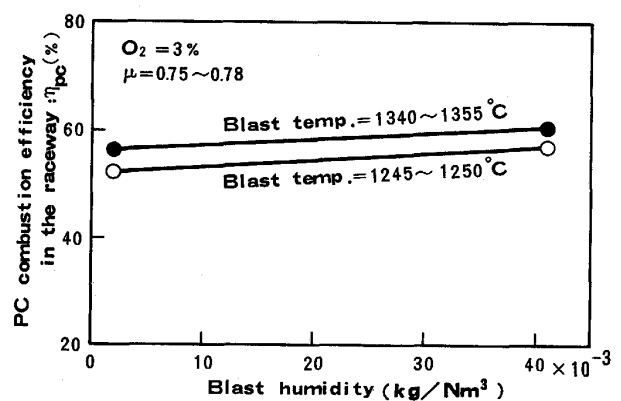


Fig. 5. Effect of blast humidity on PC combustion efficiency in the raceway.

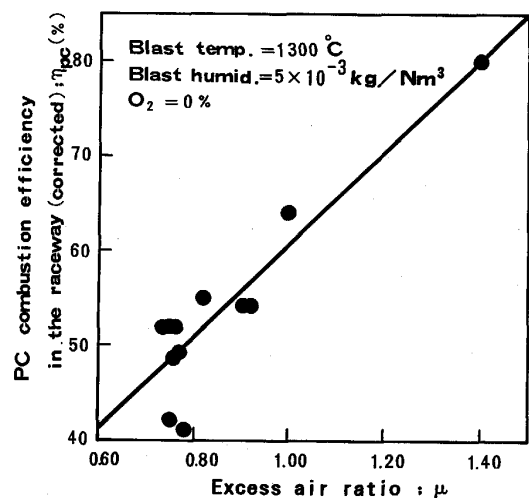


Fig. 6. Effect of excess air ratio on PC combustion efficiency in the raceway.

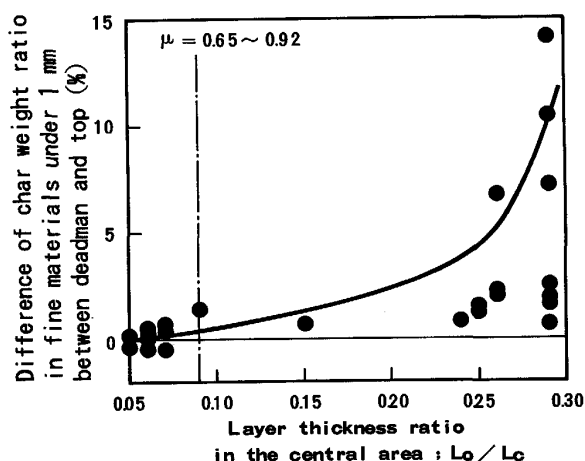


Fig. 7. Effect of layer thickness ratio in the central area on char consumption in the shaft.

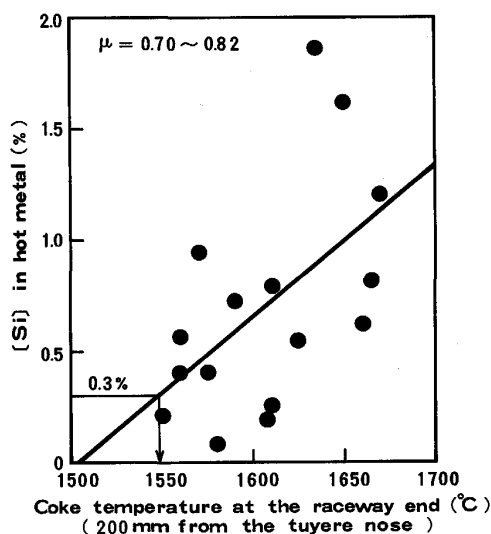


Fig. 9. Relation between coke temperature at the raceway end and Si content in hot metal.

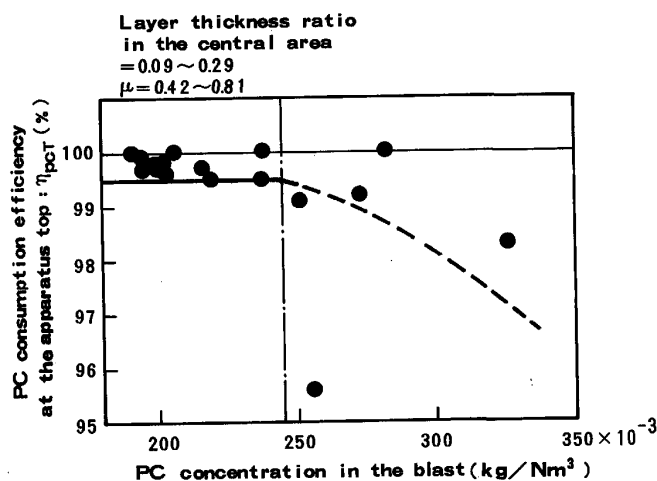


Fig. 8. Effect of PC concentration in the blast on PC consumption efficiency at the apparatus top.

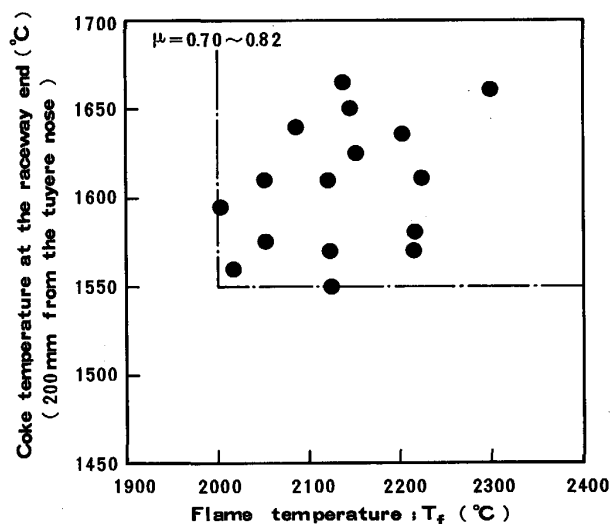


Fig. 10. Relation between flame temperature and coke temperature at the raceway end.

とによるものと思われる。

3.3 炉頂での微粉炭消費効率からみた吹込み限界

L_0/L_C が 0.09 以上のデータを用いて、炉頂での微粉炭消費効率 (η_{PCT}) に及ぼす送風中微粉炭濃度 (C_{PC}) の影響をプロットしたのが Fig. 8 である。この図によると、 C_{PC} が $245 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ より低い場合 η_{PCT} はすべて 99.5% 以上であるが、 $245 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ を超えると 99.5% を下回るケースが発生し、バラツキも増大する。 $\eta_{PCT} = 99.5\%$ では実炉炉頂排ガス清浄機に問題を生じておらず¹¹⁾、本装置の結果は実炉の結果と一致する。 η_{PCT} の下限を 99.5% とすると $C_{PC} = 245 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ が吹込み上限となる。

3.4 フレーム温度の下限

本装置において、羽口先端から 200 mm 位置のコークス温度 (T_C) (レースウェイ先端: 250 mm 近傍の温度でレースウェイ内代表温度⁹⁾である) と出銑口から流出す

るメタル中 Si 含有量 [Si] の関係をプロットしたのが Fig. 9 である。両者は良い相関関係を持ち、回帰直線により本装置の [Si] 下限を 0.30% と置いたときの T_C を求めると 1550°C となる。

Fig. 10 は本装置におけるフレーム温度 (T_f) と T_C の関係を示すが、 $T_f = 2000^\circ\text{C}$ でも T_C は 1550°C を越えており、 T_f の下限を 2000°C と設定できる。実炉でも 2050°C の T_f が達成されており¹²⁾、この値は妥当と考えられる。

3.5 送風中微粉炭濃度、フレーム温度からみた吹込み限界

Fig. 11 に、送風温度 1300°C 、送風湿度 $5 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ の場合の、送風中微粉炭濃度 (C_{PC}) と空気比

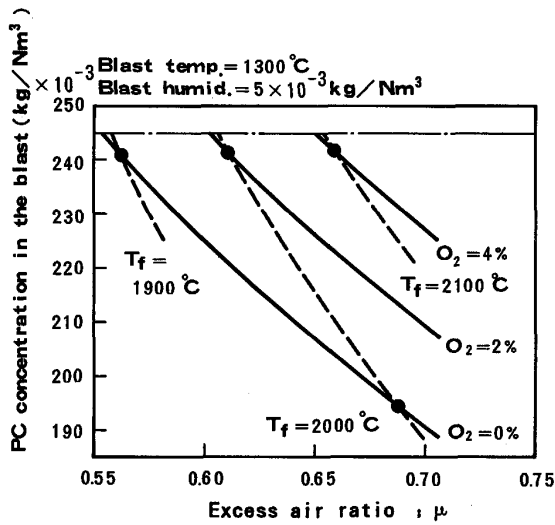


Fig. 11. Relation between excess air ratio and PC concentration in the blast.

(μ) の関係を、酸素富化率 (O_2) で層別して計算した結果を示す。図中にフレーム温度 (T_f) を破線で示した。この図によると、同一 μ においては O_2 が高いほど C_{PC} が高かつ T_f が高くなる。

前述したように、微粉炭吹込み上限を決める境界条件として、 $C_{PC} = 245 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ と $T_f = 2000^\circ\text{C}$ が求められたので、この条件を Fig. 11 に適用すると $O_2 = 2\%$ 、 $\mu = 0.61$ のときに両方の条件がほぼ満足される。

このときのレースウェイ内微粉炭燃焼効率 (η_{PC}) は、3.1 節で述べた方法で 52% と算出される。よって炉内で消費されるべきチャーは微粉炭濃度に換算して $245 \times 10^{-3} \times (1.0 - 0.52) = 118 \times 10^{-3} \text{ (kg/Nm}^3)$ となる。

前述の数学モデルで微粉炭吹込み位置からの η_{PC} を計算し、実炉レースウェイ深度 (1150 mm) における η_{PC} を求めると 75% となる。したがって実炉の C_{PC} 上限を $245 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ と仮定すれば、炉内で消費されるべきチャーは $245 \times 10^{-3} \times (1.0 - 0.75) = 61 \times 10^{-3} \text{ (kg/Nm}^3)$ となる。

3.6 炉内におけるチャーの消費、蓄積限界

Fig. 12 に炉下部通気抵抗指数 (K 値) に対する η_{PC} 、 η_{PCT} のプロットを示す。 K 値は送風圧力から送風支管内の圧損を差し引いた羽口中心レベルの炉内圧力 (計算値) P_1 、羽口中心より 500 mm 上の炉壁部炉内圧力 (実測値) P_2 、ボッシュガス量 V_B を用い、 $(P_1^2 - P_2^2) / V_B^{1.7}$ の式で計算した値を、オールコークス時の値に対する相対値として表示した。

K 値が 1.5 以内のときは、本装置による実験時に装入物降下が安定し送風圧力変動も少なかったため、粉体

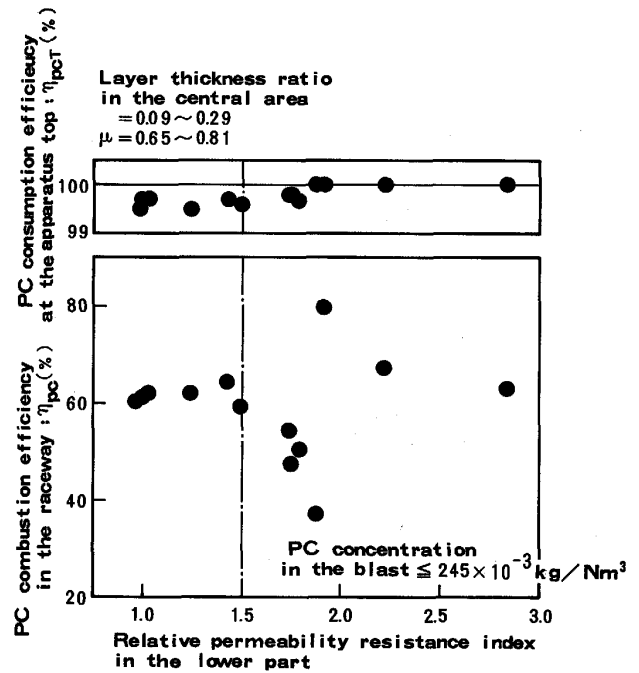


Fig. 12. Relation among permeability in the lower part, PC combustion efficiency in the raceway and PC consumption efficiency at the apparatus top.

蓄積による通気性悪化が発生していないと判断できる。このときの η_{PC} は Fig. 12 から 60~65% であり、 η_{PCT} はほぼ 100% に達していることから、40~35% のチャーが炉内で消費、蓄積され、通気性悪化を招いていないことになる。実験条件から、40~35% のチャーを微粉炭濃度に換算すると $90 \sim 70 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ となり (Table 3 参照)、 $90 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ が本装置における炉内でのチャー消費、蓄積の上限となる。

3.7 微粉炭吹込み限界量

本装置の C_{PC} 上限 $245 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ から求められる、炉内で消費されるべき微粉炭濃度 $118 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ は、通気が悪化しない消費、蓄積上限 ($90 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$) を超えており、送風温度 1300°C 、送風湿度 $5 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ 、酸素富化 2% の条件で、 $90 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ を満足する微粉炭吹込み限界量は、 $90 \times 10^{-3} / (1.0 - 0.52) = 190 \times 10^{-3} \text{ (kg/Nm}^3)$ となる。

また実炉で C_{PC} 上限 $245 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ を仮定した、炉内で消費されるべき微粉炭濃度 $61 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ は、本装置の消費、蓄積限界内にある。本装置のシャフト高さ 2 m に対して実炉は非常に高い (20 m) ので、さらにチャーの消費、蓄積が可能であるが、一方蓄積増加による通気悪化を招き、消費、蓄積上限が低下する懸念がある。したがって実炉の微粉炭吹込み限界量は $245 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ より高い可能性があるが、実炉試験に

Table 3. PC concentration to be consumed when K value is within 1.5.

Permeability resistance index K value (—)	PC combustion efficiency η_{PC} (%)	PC consumption efficiency η_{PCT} (%)	PC concentration in the blast C_{PC} (kg/Nm ³)	PC concentration to be consumed $C_{PC}(\eta_{PCT} - \eta_{PC})(\text{kg/Nm}^3)$
0.970	60.7	99.5	219×10^{-3}	85×10^{-3}
0.994	61.3	99.7	216×10^{-3}	83×10^{-3}
1.018	61.8	99.7	201×10^{-3}	76×10^{-3}
1.238	61.8	99.5	237×10^{-3}	89×10^{-3}
1.417	64.7	99.7	195×10^{-3}	68×10^{-3}
1.488	59.7	99.6	203×10^{-3}	81×10^{-3}

Table 4. Accumulated char weight in the apparatus.

Total dust weight sampled W_d (kg)	PC injection time θ (h)	C content in dust in the apparatus C_{di} (%)	Char content in dust in the apparatus δ_{CH} (%)	Accumulated char weight A_{PC} (kg/Nm ³)
14.0	5.1	39.7	0.6	1.1×10^{-3}
16.0	6.2	38.0	2.3	0.8×10^{-3}
19.0	5.7	36.8	3.0	0.7×10^{-3}

よる確認が必要である。

3.8 炉内におけるチャー蓄積量の測定

Fig. 12 において K 値が 1.5 以内になるときに、微粉炭吹込みを中止した後に休風し、冷却後に炉内より全ダストを採取して、顕微鏡観察によりチャー含有率を求めた。ダストは主として炉芯表層部、レースウェイ側壁部に蓄積していた。Table 4 に(10)式で算出した炉内チャー蓄積量(微粉炭濃度換算) A_{PC} (kg/Nm³) を示すが、 1×10^{-3} kg/Nm³ 程度でありその量は非常に少なく、コークスに対してチャーが優先的に消費されている。

すなわち 3.6 節で求めた本装置における消費、蓄積上限 90×10^{-3} kg/Nm³ は、本装置の炉内におけるチャーのソリューションロス反応で消費される上限でもあり、C 量に換算すると $90 \times 10^{-3} \times 0.741 = 65 \times 10^{-3}$ (kg/Nm³) となる ($\gamma_{PC} = 0.741$)。

4. 結 言

高炉下部を模擬できる実験装置を用いて高揮発分炭の燃焼、消費実験を行い、炉頂からチャーが放出されず、かつ炉内にチャーが蓄積しても通気性悪化を招かない微粉炭吹込み限界量に関して、次の結論を得た。

- 1) レースウェイ内微粉炭燃焼効率を向上させるには、送風温度上昇、送風湿度増加、酸素富化率上昇が効果的であるが、酸素富化率は 4% 付近に極大値をもつ。
- 2) 炉中心部における鉱石とコークスの層厚比が 0.09 を越えると、炉内でコークスに対するチャーの優先的消費が起こる。
- 3) 本装置において炉頂からチャーが放出されない微粉炭吹込み限界濃度は 245×10^{-3} kg/Nm³ である。
- 4) 本装置におけるメタル中 Si 含有量 = 0.30% としたときのフレーム温度下限は 2000°C である。

5) チャーが炉内に蓄積しても通気性悪化を招かない消費、蓄積量の上限は、本装置において 90×10^{-3} kg/Nm³ (微粉炭濃度換算) であり、このチャーはほとんどソリューションロス反応で消費される。したがって本装置におけるチャーのソリューションロス反応で消費される C 量の上限は 65×10^{-3} kg/Nm³ となる。

6) 送風温度 1300°C、送風湿度 5×10^{-3} kg/Nm³、酸素富化 2% の条件下で、炉頂からチャーが放出されず、炉内での消費、蓄積限界 (90×10^{-3} kg/Nm³) を満足する微粉炭吹込み限界量は、本装置で 190×10^{-3} kg/Nm³ となる。

文 献

- 1) F. Graffeulle, N. Jusseau, F. Mosser and R. Nicolle: 材料とプロセス, 4 (1991), p. 96
- 2) 石脇史郎, 吉田康夫, 多田彰吾, 北山修二, 星野剛一: 材料とプロセス, 4 (1991), p. 1062
- 3) 田村健二, 上野浩光, 山口一良, 須賀田正泰, 天野 繁, 山口一成: 鉄と鋼, 77 (1991), p. 775
- 4) 岩永祐治: 鉄と鋼, 77 (1991), p. 71
- 5) K. H. Peters, M. Peters, B. Korthis, K. Mülheims and K. Kreibich: Proc. of the 6th Int. Iron and Steel Cong. (1990) [ISIJ, Tokyo]
- 6) 大野陽太郎, 古川 武, 松浦正博: 材料とプロセス, 4 (1991), p. 80
- 7) 山縣千里, 須山真一, 堀坂 修, 梶原義雅, 小松周作, 紫富田浩, 網永洋一: 材料とプロセス, 4 (1991), p. 84
- 8) 妹尾義和, 丸島弘也, 国分春生, 武田幹治, 田口整司: 材料とプロセス, 4 (1991), p. 92
- 9) 山口一良, 上野浩光, 内藤誠章, 田村健二: 鉄と鋼, 77 (1991), p. 1609
- 10) 田村健二, 上野浩光, 林 洋一, 佐藤健朗: 鉄と鋼, 73 (1987), S757
- 11) 山口一良, 上野浩光, 田村健二, 中山正章, 松井 章: 材料とプロセス, 4 (1991), p. 88
- 12) 山口一成, 天野 繁, 中山正章, 織田博史, 柿内一元, 河井信明: 材料とプロセス, 3 (1990), p. 84, 85