

高炉における粗粒炭の燃焼・反応挙動

山口 一良*・鶴野 建夫*²・出野 正*・山根 健司*³・
東野 郁夫*³・平川 俊一*³

Combustion and Reaction of Coarse-sized Pulverized Coal in Blast Furnace

Kazuyoshi YAMAGUCHI, Takeo UNO, Tadashi DENO, Kenji YAMANE,
Ikuo TONO and Shun'ichi HIRAKAWA

Synopsis : In order to establish the coarse-sized pulverized coal injection technology in the blast furnace, the behavior of pulverized coal with the characteristic diameter of 350~450 μm has been investigated concerning the pyrolysis, combustion, gasification and accumulation, by use of two kinds of model experiment; one is the vertical tower type reactor called the combustion model and the other is the blast furnace type reactor called the hot model.

The coarse-sized coal is split and the small-sized coal is generated in the combustion model experiment. As a result, the combustion efficiency of coarse-sized coal is 10% lower than that of small-sized coal with the characteristic diameter of 50 μm .

As the coarse-sized unburnt char is gasified preferentially against coke in the lower part of the hot model, char is little accumulated in the model and little flown out of the top.

In the actual operation at Muroran No. 2 blast furnace with 150 kg/t-pig injection of coarse-sized coal, the stable operation has been performed in which the permeability deterioration and deadman temperature drop are not occurred, and the unburnt char is little flown out of the furnace top.

Key words: ironmaking; blast furnace process; pulverized coal injection; coarse-sized pulverized coal; raceway; deadman; unburnt char.

1. 緒言

微粉炭多量吹込み操業技術の確立は、安価石炭使用量増加による溶銑コスト低減に加え、コークス炉老朽化問題、CO₂排出抑制等の環境問題に対処する手段として、高炉操業技術上の不可欠かつ最重要課題である。このため、高炉において微粉炭吹込み設備能力増加の設備投資を行うとともに、既存吹込み設備の能力増加をも積極的に検討している。既存設備の能力増加の1つの手段として粉碎ミルの負荷軽減が挙げられ、これにより粉碎能力向上と粉碎コストの低減がはかれるが、微粉炭は粗粒化する。

微粉炭の粗粒化により、微粉炭輸送配管の磨耗促進および高炉レースウェイ内における燃焼性悪化の問題が顕在化し、前者に関しては、配管バンド部へのセラミックライナー装着等の対策により問題は解決しているが、今後設備コスト低減のために配管磨耗抑制策の研究が必要と考えられる。一方燃焼性に関しては、通常の微粉炭の代表粒径(累積重量分率が80%のときの粒径)80~100 μm に対して、500~1000 μm の粗粒炭がすでに実高炉で吹込まれている¹⁻³⁾ものの、粗粒炭の燃焼性・反応性に関する研究報告はほとんどみられない。

本報告では、北海製鉄(株)の室蘭2高炉で代表粒径350 μm 程度の粗粒炭製造設備が稼働(1994.3)したのを契機に、オフラインモデル実験により粗粒炭の燃焼・反応挙動を調査して操業設計時の基礎的知見を得るとともに、実炉において粗粒炭吹込み操業を実施した結果について述べる。

なお本報告において、通常の微粉炭の代表粒径が100 μm 以下であることから、100 μm を超える代表粒径の炭を粗粒炭と定義した。

2. 実験装置および実験方法

本実験では、後述する室蘭2高炉の設備で製造した粗粒炭をそのまま用いた。物理・化学性状をTable 1に示すが、室蘭2高炉で用られている代表粒径(350 μm 程度)に対して、やや大き目の粗粒炭が実験に供された。

高炉羽口部より吹込んだ粗粒炭の送風支管および羽口内

Table 1. Coal properties.

Ultimate analysis (mass%, dry base)			Calorific value (MJ/kg)	Characteristic diameter (μm)
C	H	O		
77.1	5.1	9.0	31.38	450

平成10年2月3日受付 平成10年4月8日受理 (Received on Feb. 3, 1998; Accepted on Apr. 8, 1998)

* 新日本製鐵(株) プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293-8511)

* 2 (株) 新日化環境エンジニアリング君津事業所 (Kimitsu Branch, Shin'nikka Environmental Engineering Co., Ltd.)

* 3 北海製鉄(株) 製造部 (Production Division, Hokkai Iron and Coke Corp.)

での熱分解・燃焼挙動を調査するために、既報の実験装置⁴⁾(以後燃焼モデルと称する)を用いた。実験条件として粉体濃度 0.05 kg/Nm³ および送風温度 1250°C、雰囲気として N₂ および空気(酸素富化 0%)を採用した。実験中に、ランス先端から送風方向に 100~200 mm ピッチで吸引法により炉内からダストを採取し、粒径分布測定・樹脂埋込み研磨後の顕微鏡観察を行うとともに、微粉炭中灰分量(Ash, mass%)の値から、(1)式により微粉炭燃焼効率(η_{PC} , %)を算出した。

$$\eta_{PC} = (1 - Ash_0 / Ash) / (1 - Ash_0 / 100) \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

ただし, Ash₀: 燃焼前微粉炭中灰分量 = 6.4 (mass%)

次に、吹込んだ粗粒炭がレースウェイ内に侵入し炉内を上昇する際の燃焼・反応・蓄積挙動を調査するために、既報の実験装置⁵⁾(鉄鉱石装入の吹錬実験実施、以後ホットモデルと称する)を用いた。実験条件として、粉体濃度 0.15~0.20 kg/Nm³, 送風温度 1250°C, 酸素富化 2~3%, 空気比 0.90~0.75, フレーム温度 2200~2150°C を採用した。稼働中に炉芯内(羽口先端より 500 mm 奥の位置)および炉頂より吸引法によりダストを採取し、既報⁶⁾で述べた顕微鏡観察による未燃チャーと粉コークスの識別を基にした方法により、レースウェイ内微粉炭燃焼効率、炉頂での微粉炭消費効率を算出した。また実験終了・冷却後の炉内よりダストを全量採取し、未燃チャーと粉コークスの識別により炉内チャー蓄積量を求めた。

3. 実験結果

3.1 送風支管および羽口内での熱分解・燃焼挙動

燃焼モデル実験により得られた、ランス先端からの粗粒炭燃焼効率(η_{PC})の推移を Fig. 1 に示す。比較のために細粒(代表粒径 50 μm)の η_{PC} の推移⁴⁾を合せて示したが、細粒に対して粗粒の η_{PC} が低下していることがわかる。既報⁴⁾に

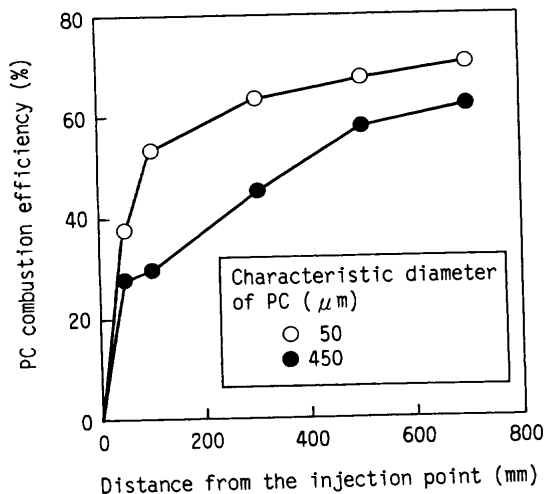


Fig. 1. Influence of coal particle size on the PC combustion efficiency.

において、100 μm の篩下である細粒(代表粒径 54 μm)と、100~200 μm で篩分けされた粗粒(代表粒径 148 μm)の熱分解・燃焼実験結果を比較すると、粗粒の η_{PC} およびガス温度が低下しており、これは粗粒の昇熱・熱分解遅れの結果と推定している。すなわち、粗粒炭の熱分解・燃焼性の悪化は粗粒部分が存在することによると考えられる。今回の実験結果でも、粗粒の場合のガス温度が細粒に比較して 100~150°C 低下している。

Fig. 2 に、N₂ 雰囲気中におけるランス先端から 50 mm の位置の粒子の顕微鏡観察結果を示すが、細粒の場合に唯一観察される膨脹中空チャー (Fig. 2(b)の右)のほかに、粗粒の場合は次の3とおりの粒子が観察された。

- ①未燃石炭：熱衝撃により粒子内に亀裂生成後、外周部で揮発分放出が起こった粒子 (Fig. 2(a))。ランス先端から 100 mm の位置以降では分裂・細粒化し、揮発分放出の進行した未燃石炭の粒子が観察される。
- ②コークス：粒子外周部が急激にコークス化して膨脹が阻害され、元粒子の形状を保ったまま全体がコークス化した粒子 (Fig. 2(b)の左)。比較的径の小さい粒子にみられるが存在率はそれほど高くない。
- ③スポンジ状コークス：急激な熱分解により揮発分放出が起こった粒子 (Fig. 2(c))。ランス先端から 100 mm の位置以降では分裂・細粒化したスポンジ状コークスの粒子が観察される。

これらの観察結果から、粗粒子が熱分解時に分裂・細粒化することがわかる。

Fig. 3 に、ランス先端からの代表粒径の推移を N₂ 雰囲気中(熱分解のみが起こる)と空気中(熱分解と燃焼が同時に起こる)に分けて示す。N₂ 雰囲気中では 50 mm の位置で粒径上昇(膨脹)現象がみられるが、いずれの場合もいったん粒径が減少しその後増加する傾向がみられ、粗粒子が熱分解時に分裂・細粒化しその後膨脹する現象を示している。Table 2 に吹込み前および N₂ 雰囲気中でもっとも粒径が低下している 100 mm の位置の粗粒炭の粒径分布を示す。この表から、主として +500 μm の粒子が熱分解時に分裂・細粒化して、100~250 μm の粒子となることがわかる。

Fig. 3 において、粒径低下位置が空気中のほうがランス先端に近いのは、熱分解に燃焼を伴うためガス温度が上昇し(測定結果では 50 mm の位置で空気中のほうが 100°C 程度高い)、熱分解が促進されたためと考えられる。N₂ 雰囲気中で観察された 50 mm の位置の粒径上昇が、空気中ではみられなかったのもこの理由による。

また、Fig. 1 において粗粒と細粒の η_{PC} の差がランス先端から 700 mm の位置で 10% 以下である事実は、分裂・細粒化により燃焼性が改善されたためと考えられる。1次元数学モデル(分裂・細粒化を考慮していない)⁷⁾を用い、燃焼モデルの実験条件(粉体濃度 0.05 kg/Nm³, 送風温度

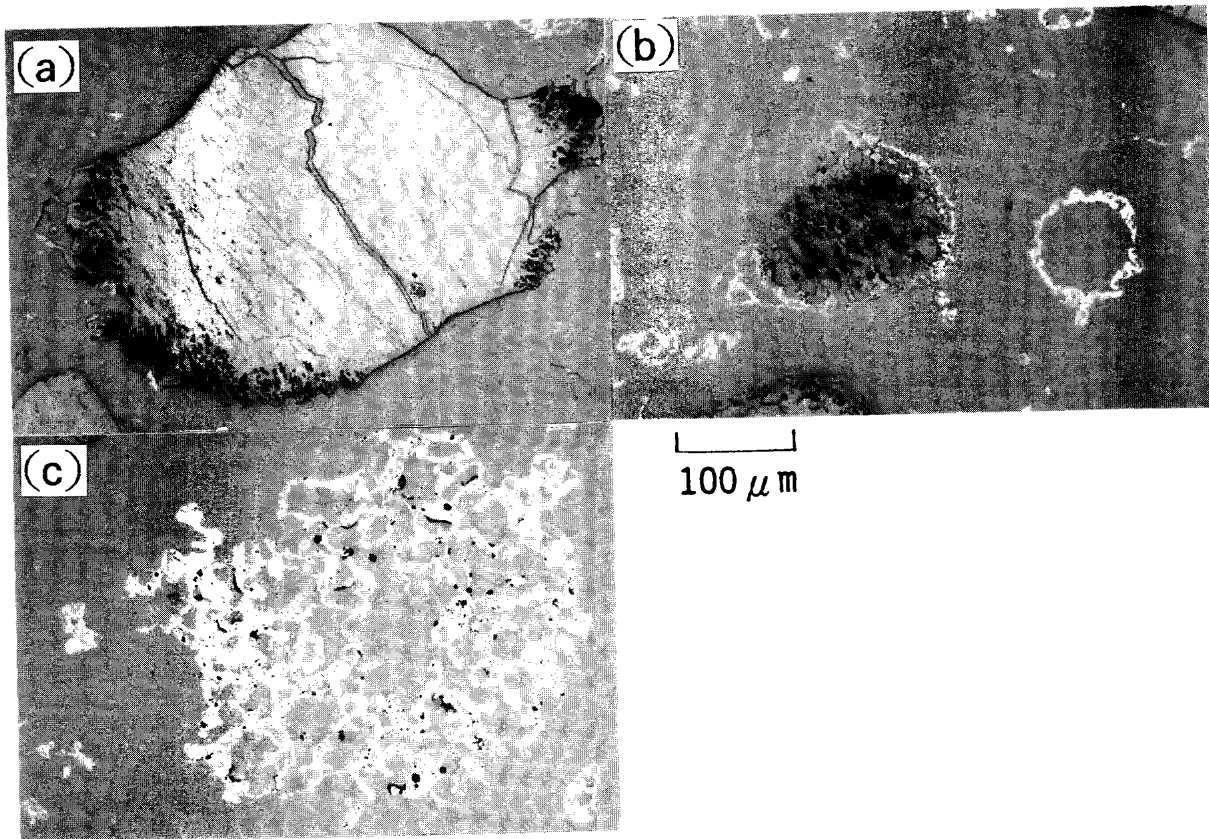


Fig. 2. Configuration of several kinds of char with the microscopic observation.

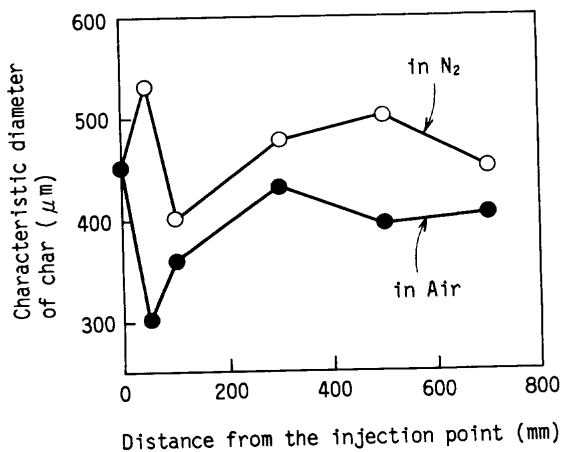


Fig. 3. Influence of atmosphere on the particle size change of PC during pyrolysis and combustion.

Table 2. Coal particle size distribution (Unit mass%).

	-100 μm	100~250 μm	250~500 μm	+500 μm
Original	27.8	30.9	22.7	18.6
After treatment in N ₂ *	29.8	37.3	23.5	9.4

*Sampling position=100mm

1250°C, 酸素富化0%の空気) を入力したシミュレーションによると, ランス先端から700mmの位置の η_{PC} は粗粒で61%, 細粒で75%となり, モデル実験結果よりも η_{PC} の差が大きい。実験結果とシミュレーションの違いは分裂・細粒化によるものと思われる。

なお Fig. 3 において, N₂ 雰囲気中における 700 mm の位置の粒径が熱分解前の初期粒径とほぼ同じであるが, これは 100 mm の位置で分裂・細粒化により低下した粒径がその後膨脹により回復したものであり, 燃焼を伴わない N₂ 雰囲気中ではいったん低下した粒径が回復する原因は膨脹だけである。

3.2 レースウェイ内での燃焼・反応挙動

ホットモデル実験により得られた, 粗粒炭吹込み時のレースウェイ内燃焼効率(η_{PC})と微粉炭濃度との関係を, 細粒(代表粒径 50 μm)吹込み時の η_{PC} と合せて Fig. 4(b) に示す。細粒吹込み時の実験条件は粗粒の場合と同じである。微粉炭濃度増加とともに η_{PC} が低下し, 細粒より粗粒の値が低い現象がみられるが, その差は粉体濃度 0.20 kg/Nm³ のとき 5% 以下である。

3.1 と同様に 1 次元数学モデル⁷⁾を用い, ホットモデルの実験条件(粉体濃度 0.20 kg/Nm³, 送風温度 1250°C, 酸素富化 3%) を入力したシミュレーションによると, ランス先端から 500 mm (ホットモデルの炉芯ダスト採取点) の位置の η_{PC} は粗粒で 58%, 細粒で 74% となり, モデル実験結果よりも η_{PC} の差が大きい。実験結果とシミュレーションの違いはやはり分裂・細粒化によるものと思われる。

なお, Fig. 4(b) において粉体濃度 0.15 kg/Nm³ のときに細粒と粗粒の η_{PC} の差は 10% 程度であり, 実験条件(粉体濃度 0.15 kg/Nm³, 送風温度 1250°C, 酸素富化 2%) を入力した数学モデルシミュレーション結果では, 500 mm の位置

の η_{PC} は粗粒で60%、細粒で86%となり、やはりモデル実験結果よりも η_{PC} の差が大きい。

3.3 炉下部での反応・蓄積挙動

ホットモデル実験における、0.20 kg/Nm³の粗粒炭吹込み終了・冷却後の炉内残留物中の粉の量(-1mm, mass%)と粉中のチャー含有率(mass%)の高さ方向の分布をFig. 5に示す。粉の量は炉上部ほど多くなる傾向がみられるが、チャー含有率は羽口近傍を除くとほぼ一定であり、コークス(塊および粉)に対するチャーの炉内における優先的消費を示している。粗粒炭総吹込み量(227.3 kg)、炉内チャー残留量(1.978 kg, Fig. 5より算出)およびチャー中灰分含有率(13 mass%程度)から、残留チャーは燃焼効率に換

算して

$$1.978 \cdot (1 - 0.13) / \{227.3 \cdot (1 - 0.064)\} \cdot 100 = 0.81(\%)$$

となり、粗粒炭由来の未燃チャーは炉内で優先的に消費され、蓄積はほとんどない(<1%)ことがわかる。

Fig. 4(a)に、粗粒炭吹込み時の炉頂における消費効率(η_{PCT})と微粉炭濃度との関係を、細粒吹込み時の η_{PCT} と合わせて示す。微粉炭濃度増加とともに η_{PCT} が低下し、細粒より粗粒の値が低い現象がみられるが、その差は1%程度でありかつ絶対値は98.5% (粉体濃度0.20 kg/Nm³のとき)と非常に高く、細粒吹込み時にみられた炉下部においてチャーが優先的に消費され、炉内に蓄積する量が少ない現象⁶⁾は、粗粒吹込み時もほぼ同じである。

また、ホットモデル稼働中の炉芯内温度(羽口中心レベルで羽口先端から600 mm奥の反羽口側レンガ面位置に設置した熱電対の指示値)が低下する現象はみられなかった。すなわち、粗粒の未燃チャーが炉芯内に侵入しこの領域に蓄積して通気性悪化を招いていないことを示しており、粗粒チャーの優先的消費を検証している。

以上の結果から、粗粒炭吹込み時にレースウェイ内燃焼効率は低下するが、炉下部においてコークスに対する未燃チャーの優先的消費が起これり、かつ炉内蓄積がほとんどなく炉頂からの放出量も少ないことがわかる。

4. 実炉における粗粒炭吹込み操業

4.1 粗粒炭吹込み設備の概要

北海製鉄株の室蘭2高炉に設置された粗粒炭製造設備の概要をFig. 6に示す。本設備には専用の微粉炭破碎設備を新設せず、コークス炉用の既設予熱炭製造設備を流用した。予熱炉通過後ボールミルによる破碎を行い、ジェットパック車にて高炉付近に設置されたリザーバータンクに送る。フィードタンク下の切り出し系として機械式を、分配系として2段ディストリビューター方式を採用したことが特徴

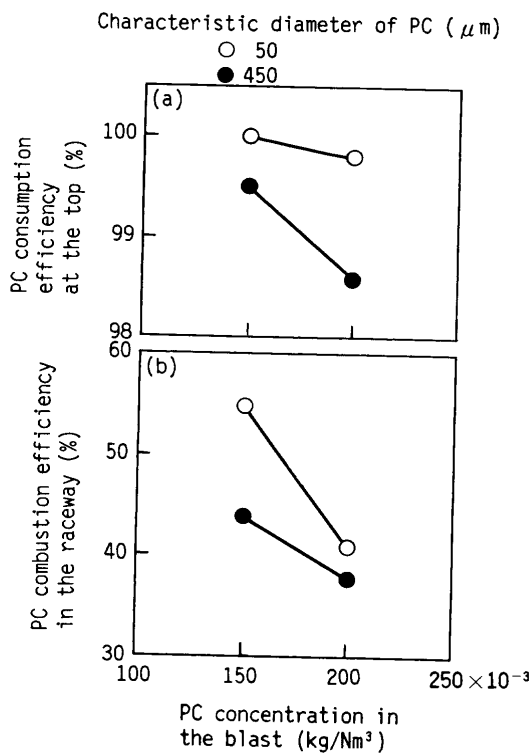


Fig. 4. Influence of PC concentration on the PC combustion and consumption efficiencies.

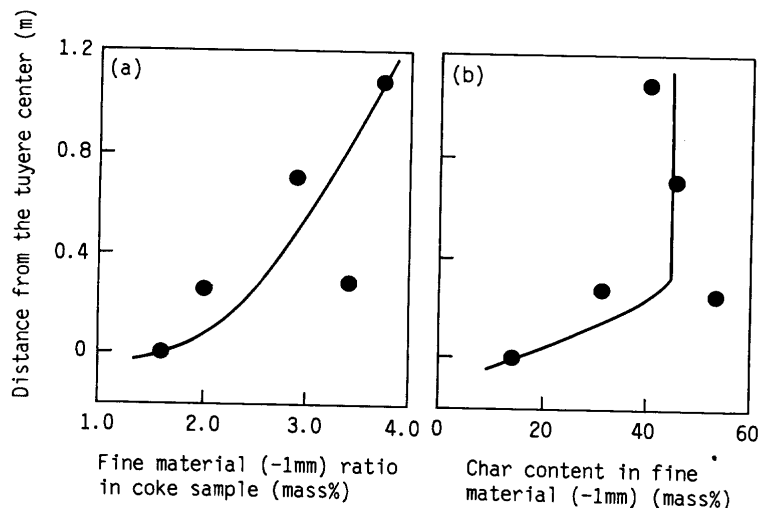


Fig. 5. Fine material and char content distributions after the dissection of apparatus.

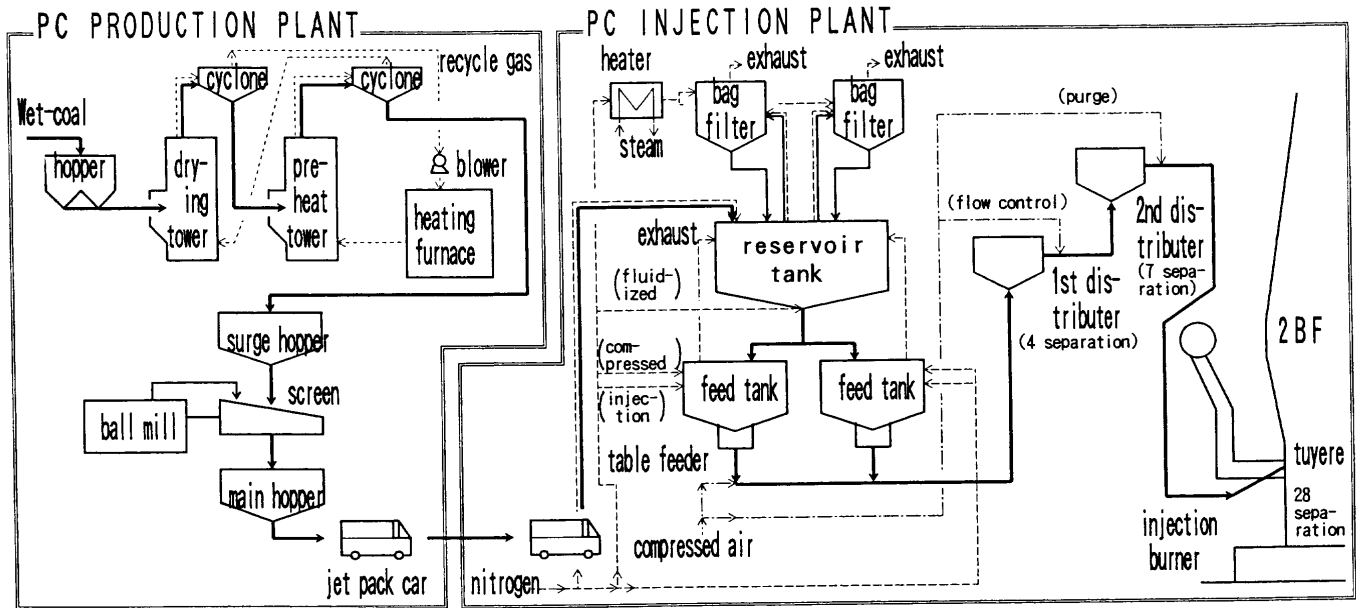


Fig. 6. Schematic diagram of pulverized coal injection equipment at Muroran No.2 blast furnace.

である。また配管バンド部にはセラミックライナーを装着した。本設備により代表粒径 $350\ \mu\text{m}$ 程度の粗粒炭が高炉に吹込まれる。

4.2 粗粒炭吹込み操業設計

前述したオフラインモデル実験結果を基に、微粉炭燃焼性向上のために次の対策を実施した。

(1) 送風温度上昇 ($900 \rightarrow 1200^\circ\text{C}$)、送風湿度低下 ($0.040 \rightarrow 0.030\ \text{kg}/\text{Nm}^3$)、酸素富化 ($0 \rightarrow 1.5\%$ 、微粉炭比 $> 110\ \text{kg}/\text{t-pig}$ より)：これらの送風条件によりフレーム温度 2100°C を確保した。酸素富化は熱流比上昇の抑制対策としても有効である。

(2) 羽口風速低下 ($240 \rightarrow 220\ \text{m/s}$)：羽口風速にはコークス粉化および炉芯内温度を制御する適正値が存在すると報告されている⁸⁾が、今回はコークス粉化抑制の観点から低下させた。粗粒炭のレースウェイ内滞留時間延長も期待した。

また鉬石とコークスの装入比率(O/C)増加に伴う装入物分布調整のために次の対策を実施した。1) 炉腹部コークス平均層厚低下 ($300 \rightarrow 200\ \text{mm}$)：鉬石還元促進を狙った。2) 炉下部溶解能力 (フレーム温度 \times ボッシュガス量) に応じた周辺部鉬石層厚調整：融着帯根部の安定溶解を狙った。

(3) 中心部ガス流維持・周辺部ガス流抑制型の装入物分布調整：通気性安定を狙った。

4.3 粗粒炭吹込み操業結果

Fig. 7 に操業結果を示す。1994.3 より粗粒炭吹込みを開始し、4.2 で述べた諸対策を実施することにより 1994.6 に微粉炭比 $150\ \text{kg}/\text{t-pig}$ に到達し、以後安定操業を継続している。この間の粗粒炭のコークスとの置換率は 0.85 と、ほぼ高炉の熱・物質収支による計算値を達成した。

Fig. 8 に、休風時に羽口部からコークスを採取し、レー

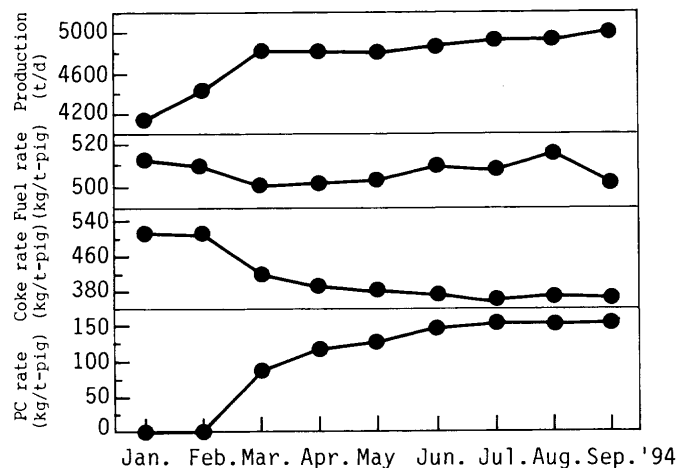


Fig. 7. Operation results of Muroran No. 2 blast furnace from all coke to pulverized coal injection.

スウェイ・炉芯内のコークス粉率 ($-3\ \text{mm}$, mass%) を測定した結果を示す。オールコークス時に対して、微粉炭比 $150\ \text{kg}/\text{t-pig}$ 時の炉芯内 (炉壁から $3.2 \sim 4.8\ \text{m}$ の位置) での粉率増加はみられない。また、Fig. 9 に、休風時にレースウェイ・炉芯内を2色温度計で測温した結果を示すが、オールコークス時に対して、微粉炭比 $150\ \text{kg}/\text{t-pig}$ 時は最高温度位置 (燃焼焦点に対応) が羽口先端に近付く傾向はみられるものの、炉体熱負荷増大には至らず、また炉芯内の温度低下はみられない。

Fig. 10 に炉腹部コークス平均層厚と炉下部通気抵抗指数 {送風圧力: P_b , 羽口上 $7.3\ \text{m}$ の位置の炉内圧力: P_i , ボッシュガス量: V_B を用い、 $(P_b^2 - P_i^2)/V_B^{1.7}$ で算出} との関係を示す。O/C 増加に伴いコークス層厚を減少させたが、通気抵抗悪化の傾向はみられない。

また炉頂からの排出ダスト中に、粗粒炭由来の未燃チャ

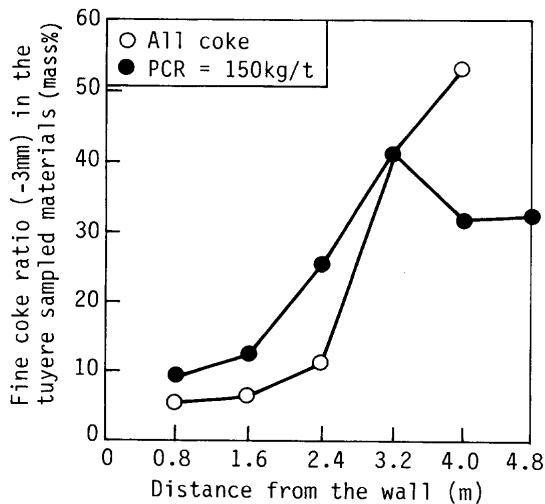


Fig. 8. Fine coke ratio in the tuyere sampled materials during all coke and pulverized coal injection.

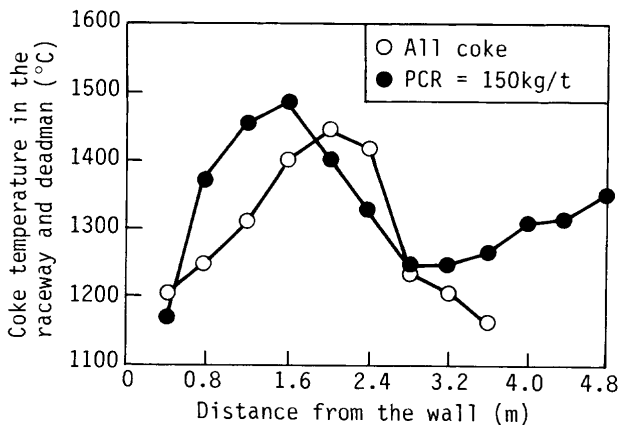


Fig. 9. Coke temperature measuring results during all coke and pulverized coal injection.

一はほとんど観察されず、湿式収塵設備の沈殿槽の上澄み液がわずかに黒色化した程度で、収塵効率低下には至らなかった。

以上の操業結果より、 $350\mu\text{m}$ 程度の粗粒炭 150kg/t-pig の吹込み操業において、チャーの炉内蓄積による通気性悪化・炉芯内温度低下、および炉頂からのチャー排出量増大による収塵効率低下がなく、安定操業ができることが実炉で検証された。

5. 結言

代表粒径 $350\sim 450\mu\text{m}$ の粗粒炭を高炉の羽口部より吹込む技術を確認するために、オフラインモデル実験による熱

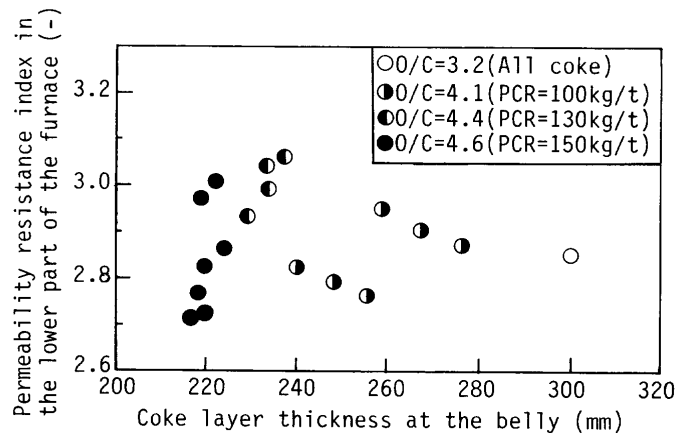


Fig. 10. Relation between coke layer thickness at the belly and permeability in the lower part of the furnace.

分解・燃焼・反応・蓄積挙動を調査するとともに、実炉における吹込み操業を実施することにより、次の結論を得た。

(1) 粗粒炭は、熱分解およびそれに続く燃焼時に分裂による細粒化を起す。その結果、細粒炭と比較した燃焼効率の低下率は10%程度となる。

(2) 吹込み濃度 $150\sim 200\text{g/Nm}^3$ では、レースウェイより炉下部に放出された粗粒未燃チャーが、炉内でコークスに対して優先的に消費されるため、炉内蓄積・炉頂からの放出量は少ない。

(3) 実炉における 150kg/t-pig の吹込み操業では、チャーの炉内蓄積による通気性悪化、炉芯内温度低下、炉頂からのチャー排出量増大による収塵効率低下がなく、安定操業を継続できた。

文 献

- 1) J.O'Hanlon: Steel Times, (1993. 12), 508.
- 2) R.Maldonado, R.C.Mills, B.K.Hartley and N.J.Busby: Proc. 1st Int. Cong. of Science and Technology of Ironmaking, ISIJ, Tokyo, (1994), 535.
- 3) D.Flamion: La Revue de Metallurgie-CIT, (Mai 1990), 433.
- 4) 上野浩光, 山口一良, 田村健二: 鉄と鋼, **78** (1992), 1206.
- 5) 山口一良, 上野浩光, 内藤誠章, 田村健二: 鉄と鋼, **77** (1991), 1609.
- 6) 山口一良, 上野浩光, 田村健二: 鉄と鋼, **78** (1992), 1214.
- 7) 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), 775.
- 8) 清水英男, 佐藤憲一, 小島正光, 網永洋一, 中村文夫, 岩永祐治: 鉄と鋼, **72** (1986), 195.