

高炉レースウェイでのコークス粉化を抑制する コークス性状と操業条件

渡壁 史朗*・武田 幹治*・井川 勝利*²

Coke Properties and Operational Conditions of Blast Furnace to
Prevent Coke Degradation in the Raceway

Shiro WATAKABE, Kanji TAKEDA and Katsutoshi IGAWA

Synopsis : Fine coke, which mainly originated in the raceway, has a great influence on the blast furnace operation. Generation behavior of coke fine in the raceway was investigated by the coke combustion experiments and the examination of the coke collected from Chiba No. 5 blast furnace.

Fraction of fine coke in deadman increased as coke strength decreased, as coke CRI decreased, as flame temperature decreased or blast velocity increased. And influence of coke properties on coke fine generation in the raceway was confirmed from the coke combustion experiments. These results imply that coke was gasified and broke down to generate fine coke in the raceway.

Mathematical model of fine coke generation in the raceway, which consists of coke gasification and destruction in the transient region and combustion in the dense oxygen region, clarified that high strength coke, high reactivity coke, high flame temperature or low blast velocity decreases in coke fine generation in the raceway.

Key words: coke; coke fine; degradation; gasification; CRI; raceway; blast furnace; strength; reactivity; flame temperature; blast velocity.

1. 緒言

第1次石油ショック後の1981年に新日鉄の大分第1高炉で開始された高炉への微粉炭多量吹込み操業は¹⁾、NKK福山第3高炉の266 kg/ton-pig²⁾、神戸製鋼加古川第1高炉の254 kg/ton-pig³⁾などの記録とともに、1998年には国内の高炉での平均吹込み量は131 kg/ton-pigまで増加している。この高微粉炭比操業では炉内でのコークス粉の発生が増加し、炉芯表層や炉壁部に堆積して荷下がりや通気の悪化⁴⁾、炉内ガスの周辺流化⁵⁾などを引き起こすとされている。

レースウェイ内は高炉内の主なコークス粉発生領域の一つであると考えられる⁶⁻⁷⁾。レースウェイにおけるコークスの劣化、粉発生挙動に関する従来の研究は、主に高温のレースウェイへ移行する際の熱衝撃^{8,9)}、CO₂やH₂ガスとのソリューションロスガス化反応（以下、ガス化反応）¹⁰⁻¹²⁾、衝風などによる機械的な衝撃力^{13,14)}、の因子に分けて検討されてきた。

一方では、ガス化反応による塊コークスの劣化と、衝撃力による劣化層の破壊とを同時に検討するため、ガス化反応によって劣化したコークスに衝撃力を与えて、粉化量を測定、評価する試みも行われている。

重野らは円盤状のコークスをCO₂/H₂O/H₂/N₂雰囲気中で反応させながらせん断力を作用させる実験を行い、反応によるコークス基質強度の劣化は少なく、気孔率の増大が強度

低下をもたらしていることを見出している¹⁵⁾。また、原らは噴流層型の反応炉でコークスとCO₂ガスとを反応させながら流動層内で衝撃力を与えることによって、レースウェイ内のコークス粉化現象を再現する試験を行った¹⁶⁾。その結果、塊状のコークスのガス化反応が表面から進行し、粉化が起こる限界強度とガス化率を保持しながら粒径が減少するモデルを提案している。さらに、山口らはあらかじめ所定量ガス化させたコークスのI型ドラム試験を行っている¹⁷⁾。これらの検討によって、レースウェイ内のコークス劣化、粉発生機構が次第に明らかにされているが、コークスの反応劣化と機械的な衝撃力との関係の定量化はなされておらず、実操業におけるコークスの粉化を制御するには至っていない。

レースウェイでのコークス劣化、粉発生を抑制する高炉操業条件とコークス品質を見いだすためには、まずガス化反応による劣化層の生成を定量化し、次に衝撃力による劣化層の剥離を評価する必要がある。そこで、前報¹⁸⁾においてコークスの微細気孔構造と反応温度が塊コークス内のガス化率分布に与える影響を明らかにし、本報でそのガス化反応による劣化と衝撃力による粉発生を定量的に検討した。

本報では、レースウェイ条件を模擬したコークス燃焼実験から、レースウェイでのコークス粉化挙動に影響を与える因子を見出し、前報で示したコークス反応数式モデルに

平成13年4月13日受付 平成13年10月23日受理 (Received on Apr. 13, 2001; Accepted on Oct. 23, 2001)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Technical Research Labs., Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260-0835)

* 2 川崎製鉄(株)技術研究所(水島) (Technical Research Labs. (Mizushima), Kawasaki Steel Corp.)

衝撃力とO₂燃焼による粉の消費を追加したレースウェイ内コークス粉化モデルを用いて、レースウェイでのコークス粉発生挙動を明らかにした。その結果を実高炉内から採取したコークス性状と装入コークス性状、高炉操業条件との関係から検証した。

2. コークス燃焼粉化実験

2.1 実験方法

レースウェイでのコークスのガス化反応劣化と、旋回運動による粉の発生挙動に及ぼすコークス性状の影響を調査するため、コークスを充填したシャフト炉に熱風と微粉炭とを吹込み、炉内の充填層に蓄積した粉と炉外に排出された粉量の測定、およびレースウェイ近傍のコークス性状を測定した。

実験にはFig. 1に概要を示した内径0.6 m、炉内有効高さ1.35 mのシャフト炉型燃焼炉を用いた。プラズマ式の加熱装置で1373Kに加熱し、酸素を富化した空気を羽口から吹き込んだ。羽口は1本で、微粉炭吹込みランスを備えている。羽口径を30 mmとして羽口先風速を実機と等しくすることにより、実機レースウェイ内のコークスに対する機械的な衝撃力を再現した。送風量は $2.5 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ (normal)/s、送風温度は1373K、富化酸素量は4%、送風中湿分は0とした。微粉炭の吹込み量は、実機での吹込み量200 kg/ton-pigに相当する5.0 g/sとし、実験中は送風量から計算した炭材消費量に相当するコークス量をバッチで装入した。実験条件をTable 1に示す。

実験にはTable 2に示した7種類のコークスを用いた。これは前報¹⁸⁾で用いたコークスに低強度、高反応性コークスを加えたものである。コークスの装入粒径は8~15 mmで

ある。

実験の手順は、1373KのN₂ガスを送風してコークス充填層を予熱した後、送風を空気に切替え、その $3.6 \times 10^3 \text{ s}$ 後に微粉炭の吹込みを開始した。いずれの実験でも微粉炭

Table 1. Experimental conditions of coke combustion.

Blast Volume	0.025 Nm ³ /sec
Combustion Time	1.44×10^4 sec
Blast Temperature	1373 K
Plasma Heater Power	140 kW
O ₂ Enrichment	4 %
Blast Moisture	0
Blast Velocity	200 m/sec
Coke Diameter	$8 \sim 15 \times 10^{-3}$ m
PCI	0.005 kg/sec (200 kg/ton-p)

Table 2. Coke properties used in the coke combustion experiments.

Coke	Tl ₆ ⁴⁰⁰ (%)	CSR (%)	CRI (%)
A	83.8	57.0	26.7
B	84.4	60.2	27.2
C	89.2	66.9	21.1
D	84.4	56.4	30.4
E	83.7	46.2	36.6
F	83.9	55.9	29.4
G	79.8	46.3	35.1

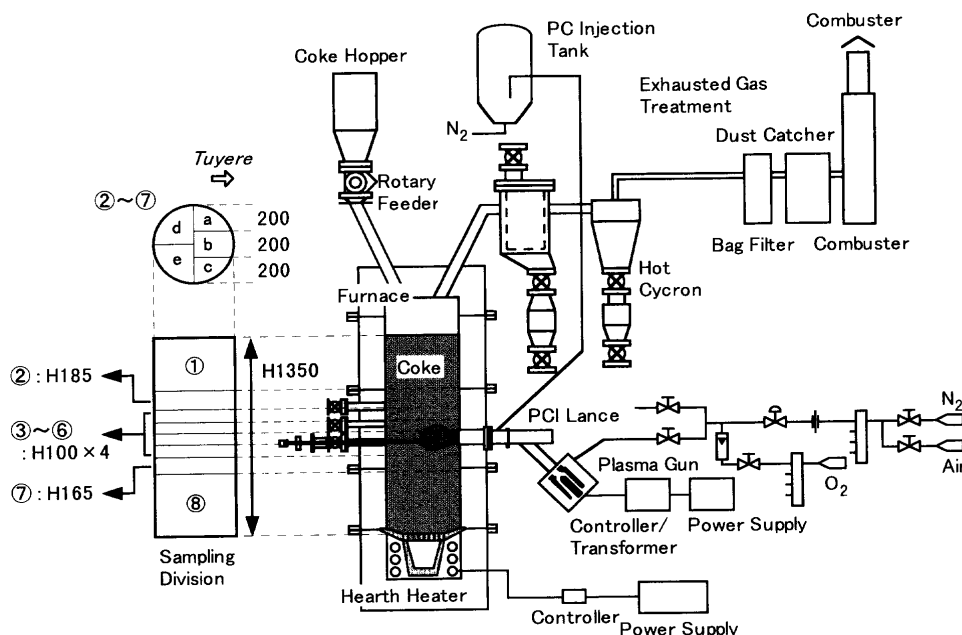


Fig. 1. Schematic view of experimental furnace (Coke combustion experiment).

の吹込み時間を 1.08×10^4 s, 空気送風時間を 1.44×10^4 s とした。実験中の炉頂からの排出ガスの組成をガスクロマトグラフにより 120 s ごとに測定した。

いずれの実験でも、微粉炭吹込み開始後 3.6×10^3 s 以内に排出ガスの集塵機フィルターの差圧と炉内シャフト圧力が一定となったため、発生粉の発生と移動が定常になったと判断した。

実験終了後、炉内を十分に冷却してから炉内充填物を高さ方向に 8 段に解体し、羽口上方 0.485 m から下方 0.265 m の第 2~7 段について断面を 5 分割、最上段については 2 分割して炉内の残留物をサンプリングし、充填層中のコークス粒度や粉率を測定した。以下、図中に示したように高さ方向の分割を ①~⑧ 段、② 段から⑦ 段の断面の分割領域を a~e とする。また、バグフィルタや粗粒分離器など、実験中に燃焼炉外に排出されたダスト量を測定した。

充填層中の残留粉や炉外への排出粉には、未燃焼の微粉炭とコークス粉が含まれる。これらの粉を粒径 0.21 mm 以下、粒径 0.21~0.5 mm, 粒径 0.5~2.83 mm の粒度別に分け、それぞれを光学顕微鏡で観察してバルーン状の未燃焼チャーとコークス粉とに分類してそれぞれの存在比率を決定した。

また、実験後に羽口前に残留していたコークスのうち、粒径 8 mm 以上のもので実験前のコークスについて微細気孔率、真密度、見かけ密度を水銀圧入法により、また気孔比表面積を N_2 ガス吸着法 (BET 法) により測定した。これらのコークス性状の測定方法は前報¹⁸⁾と同様である。

2.2 実験結果

実験後のコークス粉率をコークス強度 (タンブラー 400 回転, 6 mm 以上, 以下 Tf_6^{400}) と CRI で整理して Fig. 2 に示す。ここでのコークス粉率は、実験中に消費した炭材量に対するコークス粉量の割合とした。コークス粉は、炉内に残留していたものと、炉外に排出されてダストキャッチャー等によって補集したものすべての総量であり、消費した炭材量は、実験前に炉内に充填したコークス量、実験中に装入したコークス量、吹込み微粉炭量の総和から、実験後に炉内に残留した塊コークスと粉、炉外に排出されたダスト量の総和を引いた量とした。実験によって送風量や微粉炭吹込み量などにばらつきが生じたため、コークス性状による粉率の差異を比較するために消費炭材量に対するコークス粉率で表した。

結果のばらつきは大きいものの、ほぼ同強度の A, B, D, E, F コークスでは、CRI の上昇とともに粉率が直線的に減少し、高強度の C コークスでは粉率が少なく、低強度の G コークスで高いことがわかる。これから、コークスの強度と反応性が高くなるほどレースウェイでの粉発生量が減少すると考えられる。

実験後、羽口前にはスラグが固着したシェルに囲まれた空洞が形成しており、実験中はこの領域がレースウェイと

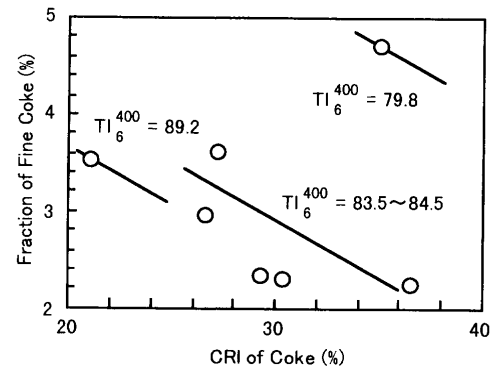


Fig. 2. Effects of coke CRI and strength on fraction of fine coke (Coke combustion experiments).

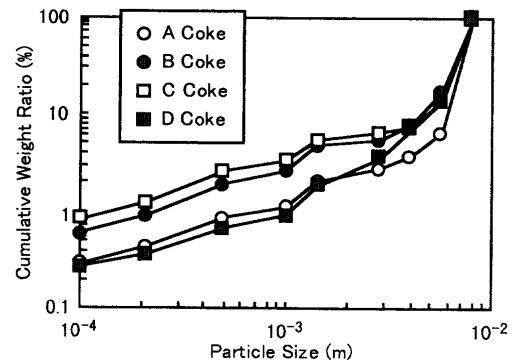


Fig. 3. Diameter distribution of the coke nearby raceway (Coke combustion experiment, coke A-D).

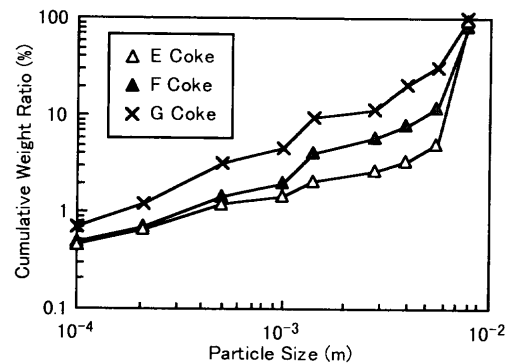


Fig. 4. Diameter distribution of the coke nearby raceway (Coke combustion experiment, coke E-G).

なっていたと考えられる。この領域は⑥ 段の b にほぼ一致し、ここから採取したコークスの粒径分布を Fig. 3, 4 に示す。各プロットは横軸の粒径における積算篩上重量比率である。

いずれのコークスを用いた実験でも装入粒径に等しい 8~15 mm の篩径の重量比率が最も大きく、篩径が小さくなるにしたがって減少していることがわかる。また、篩径 1.4 mm を境界として重量比率が変化している。これから、レースウェイでのコークスの破壊は塊コークスの体積破壊と、それによって生じた粉と残りの塊コークスの摩耗破壊が起こっていると考えられる。

その中で、Eコークスでは篩径8mm以上の塊コークスの割合が大きく、また篩径1.4mmでの重量比率の変化が小さい。これは、Eコークスではレースウェイでのコークスの劣化が摩耗破壊的な挙動をしており、生成したコークス粉の消費は他のコークスと同様であることを示していると考えられる。前報¹⁸⁾で、塊コークスのガス化反応では、コークスのCRIの増加とともに塊コークス中のガス拡散律速に移行して表面反応に近づくことを明らかにした。本実験においては、CRIの高いEコークスでは表面が優先的にガス化したために発生した粉の粒径が小さく、また塊コークスの粒径も維持されたと考えられる。一方、Eコークスと同程度のCRIで強度が低いGコークスでは粉化挙動が低CRIコークスと同様であり、コークス強度の影響も大きいことを示している。

以上の結果から、コークス強度と反応性がレースウェイ内のコークス粉化に影響を及ぼすことがわかった。これらの因子と、高炉操業条件の影響を定量的に評価し、レースウェイでの粉化抑制方法を見いだすために、数式モデルによるコークスの劣化、粉化挙動の検討を行った。

3. レースウェイでのコークス粉化挙動

3.1 レースウェイでのコークス粉化モデル

レースウェイ内のコークス粉化挙動を数学モデルにより検討した。レースウェイ内をFig. 5のように高O₂濃度のジェット領域と高CO₂濃度の遷移領域に分割し¹⁹⁾、ソルロス反応による劣化層生成、回転時の衝撃による劣化層の脱落、粉の燃焼挙動の3つの素反応からなるモデルとした。コークスはジェット領域と遷移領域とを一定時間ごとに交互に移動するとした。ガス化反応は前報¹⁸⁾のコークスガス化反応モデルを用い、前章の実験で測定した気孔体積および比表面積を用いて計算した。

レースウェイ内での回転運動時に受ける衝撃力と粉発生量の関係は、井川らのコークスのマクロ気孔率と冷間強度との関係²⁰⁾と、三浦らの摩耗による粉発生機構²¹⁾を用いて定式化した。すなわち、まずコークスのガス化量から気孔率εを計算し、(1)式を用いて算出した劣化層崩壊時の上限気孔率ε_cを越えた領域が塊コークス中の粉発生領域になるとした。

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-b\varepsilon) \dots \dots \dots (1)$$

この粉発生領域からの粉の発生速度は、三浦らによる(2)式を用いた。

$$Q = avV_f \Delta t \sigma_r^{0.6} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、Qは劣化層からの粉化速度、σ_rは粒子間応力、vは粒子間相対速度、V_fは反応によって生成した劣化層体積である。

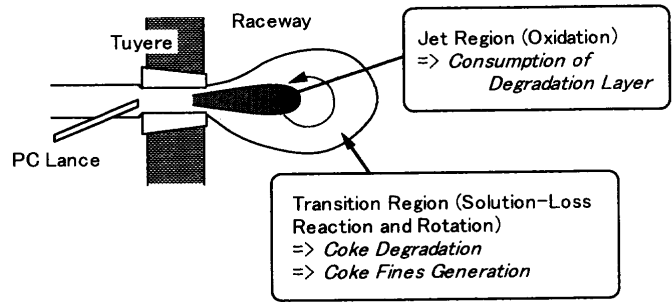


Fig. 5. Illustration of coke degradation and fine coke generation in the raceway.

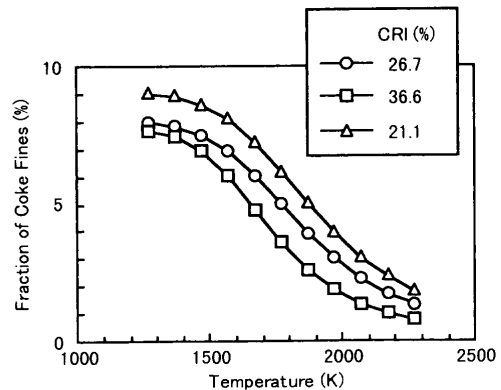


Fig. 6. Effects of temperature and coke CRI on fine coke generation (Calculation).

塊コークスから発生した粉のうち、一部は燃焼で消費され、残りが発生粉となる。燃焼反応については粒子表面でのガス境界内拡散律速として気体分子運動論によるChapman-Enskogの式²²⁾を用いた。

$$D_{f,i} = 5.80 \times 10^{12} T^{0.5} \frac{\sqrt{(M_i + M_j) / M_i M_j}}{P \sigma_j^2 \Omega_D} \dots \dots \dots (3)$$

ここでD_{f,i}はガスj中のガスiの拡散速度(m²/s)、Tはガス温度(K)、M_i、M_jはそれぞれi、jの分子量、Pは圧力(MPa)、σ_jは分子直径(m)、Ω_Dは拡散における衝突積分である。ガス温度Tは羽口前の理論燃焼温度とした。

3.2 コークス粉化モデルによるレースウェイでの粉化に与える高炉操業条件、コークス性状の影響

コークスのCRIと温度を変化させた場合のコークス粉発生量の計算結果をFig. 6に示す。ここでのコークス粉率は、コークス燃焼粉化実験結果と同様に、コークスの重量減少、すなわち燃焼量、ガス化量、粉化量の和に対する粉化量の比率で表わした。コークスTI₀⁴⁰⁰は84%、羽口先速度は200m/s一定とした。Fig. 6の結果から、いずれのコークスでも高温になるほど粉の発生が少なく、また高CRIコークスほどコークス粉の発生が少なく、高温になるほどその傾向が顕著となると予想される。

前報¹⁸⁾で明らかにしたように、気孔比表面積の増大、あ

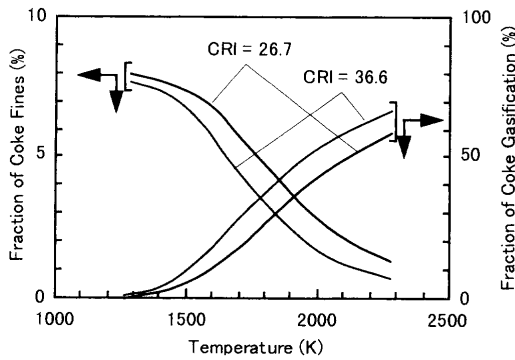


Fig. 7. Effects of temperature and coke CRI on fine coke gasification and fine coke generation (Calculation).

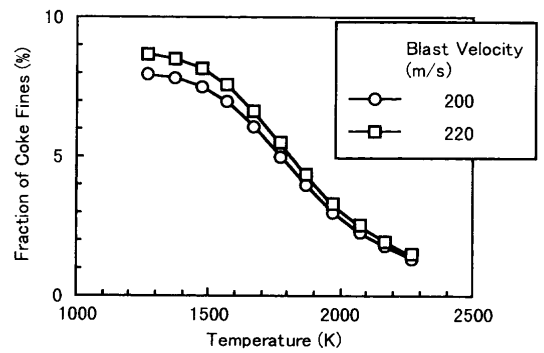


Fig. 9. Effects of temperature and blast velocity on fine coke generation (Calculation).

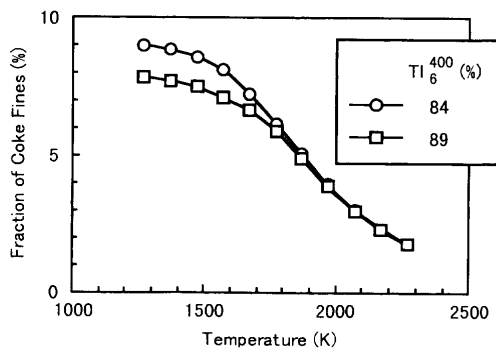


Fig. 8. Effects of temperature and coke strength on fine coke generation (Calculation).

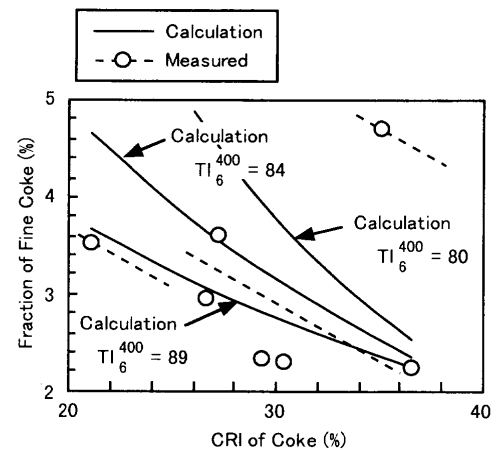


Fig. 10. Effects of coke CRI and strength on fraction of fine coke (Experiments and Calculation).

るいは反応温度の上昇にしたがって総括の反応速度が塊コークス内の拡散速度律速に移行し、塊表面が優先的に反応する形態になる。このため、コークス内のガス化率の半径方向勾配は高比表面積コークス、あるいは高温ほど大きくなり、反応劣化層が減少する。1373Kで測定されるコークス CRI は気孔表面での化学反応速度に支配され、CRI と気孔表面積との間には直線的な正の相関がある。そのため、Fig. 7 に CRI と温度によるコークス粉化量とガス化量の温度による変化の計算結果を示したように、レースウェイでのガス化反応量は CRI 増加、あるいは温度上昇によって増加するが、粉化が抑制されると考えられる。

また、コークス強度を変化させた場合の計算結果を Fig. 8 に、羽口先風速を変化させた場合の計算結果を Fig. 9 に示す。高強度コークスほど、あるいは羽口先速度が低いほどコークス粉の発生が抑制されることがわかるが、これはガス化反応によって生成した劣化層が崩壊して塊から脱離することを抑制するためである。

以上の計算結果と前章のコークス燃焼粉化実験結果との比較を Fig. 10 に示す。燃焼実験でのレースウェイ内の理論燃焼温度は約 2177K であり、コークス温度がその 75% (1906K) として Fig. 6, 8, 9 から内挿して求めた。コークスの TI₆⁴⁰⁰ が 84%, 89% の場合は実験結果と計算結果とはよい一致を示しており、上記のコークス粉化に対する知見を裏付けていると考えられる。一方で TI₆⁴⁰⁰ が 80% の場合は両者

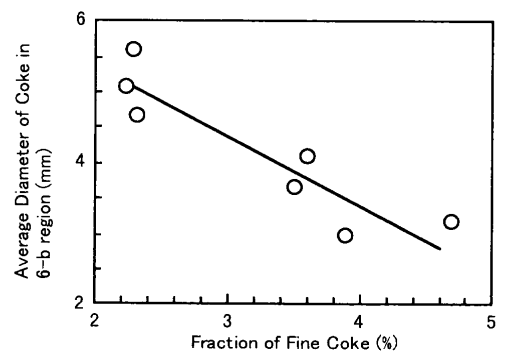


Fig. 11. Relationship between average coke diameter of coke in 6-b region and fraction of fine coke.

の差が大きく、コークス強度の低下にともなって反応劣化層の破壊が促進される可能性を示唆していると考えられる。なお Fig. 11 に示したように、コークス粉率と炉内 6-b 領域で採取したコークスの平均粒径とはほぼ直線関係を示しており、いずれの実験でもコークス強度にかかわらず表面からのガス化反応と粉化が進行していたと考えられる。

以上の結果から、コークスからの粉の発生はガス化反応による劣化層の生成と、旋回中の衝撃力による劣化層の破壊に支配されており、コークス CRI の増加または反応温度

の上昇によってコークス塊表面の反応劣化層を低減し、コークス強度の増加あるいは羽口前速度の低下によってレースウェイでの衝撃力で破壊する劣化層を低減することにより、コークス粉の発生を抑制することが可能であることがわかった。

4. 実機におけるコークス劣化

4.1 測定方法

休風時の高炉羽口からコークスを採取し、炉内コークスの性状と装入コークス品質、操業条件との関係を調査し、前章のモデル計算の結果について検証を行った。

炉内コークスの採取は、千葉第5高炉の休風時に行った。炉芯からレースウェイ近傍にかけてのコークスは、特定の羽口からサンプリングランスを挿入することにより採取した。サンプリングランスには羽口から炉中心に向かって半径方向に長径0.285 m、短径0.1 mの楕円形の穴が等間隔に8点開いている。またこれに先立って、羽口を外した後に長尺の金棒で羽口前のコークスをかき出した。かき出した後の羽口前の空間には上方からのコークスが降下するため、採取されるコークスの大部分はレースウェイ上方のコークスと考えられる。以下、サンプリングランスで得られたコークスを炉内コークス、羽口前からかき出したコークスをレースウェイ上方コークスと呼ぶ。

炉内から採取したコークスは N_2 ガスを封入したボックス内で冷却し、冷却後にコークスを銹滓と分離して粒度分析、成分分析、微細気孔率、比表面積、黒鉛化度等の測定を行った。

4.2 測定結果

高炉からのコークスの採取は1999年の1月から10月にかけて計10回行った。この期間における千葉第5高炉の操業は、6月まで出銹比約1.0の低出銹比操業であり、後半の出銹比は約1.4であった。それともなるとコークス比は前半の600~620 kg/ton-pigから後半では約500 kg/ton-pig、微粉炭比は前半は0で後半では約50 kg/ton-pig、羽口先の理論燃焼温度は前半で約1923K、後半で約2173Kであった。また、コークス TI_6^{400} は84.0~85.2%、CRIは27.0~31.8%、羽口先風速は183~269 m/sであった。

Fig.12, 13に炉内コークス中の塊コークスの平均粒径、および粉コークスの存在率の半径方向分布例を示す。ここで塊コークスは粒径5 mm以上、粉コークスは粒径5 mm以下とした。図中、a, b, cは低出銹比時の測定結果で、d, eは出銹比が上昇した後の測定結果である。これから、いずれの測定結果においても塊コークスの粒径は炉中心から2 m程度まで大きく、炉壁に近づくにしたがって低下しており、一方コークス粉率はいずれも炉中心から2 m程度まで高く、レースウェイ内の粉率は低いことがわかる。また、炉中心での粉率はその周囲より低い傾向となっている。

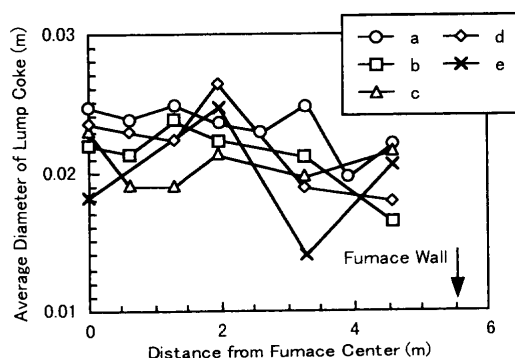


Fig. 12. Radial distribution of average diameter of lump coke in Chiba No. 5 blast furnace.

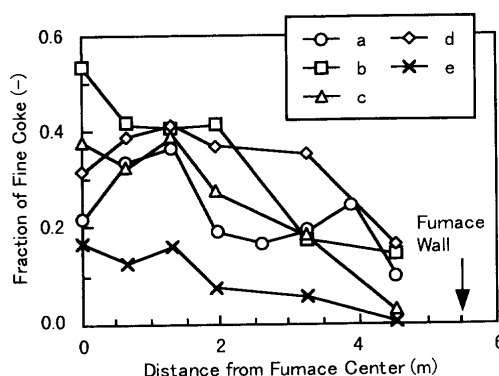


Fig. 13. Radial distribution of fine coke fraction in Chiba No. 5 blast furnace.

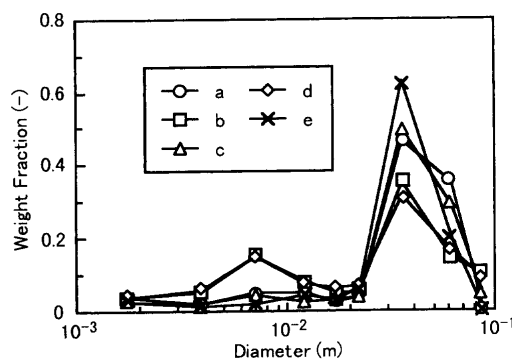


Fig. 14. Distribution of coke diameter above the raceway at Chiba No. 5 blast furnace.

Fig.14に前出のa~eの採取におけるレースウェイ上方コークスの粒径分布を示す。いずれも25 mm以上の割合が多く、表面の摩耗破壊によってレースウェイ上方まで降下してきたと考えられるが、b, dでは5~10 mmの小粒の割合が大きくなっており、体積破壊的な劣化を起こしていたと考えられる。

Fig.15, 16に炉芯コークスとレースウェイ上方コークスの黒鉛化度から推定した履歴温度の比較を示す。ここでの炉芯コークスはサンプリングランスの最先端の穴で採取したコークスで、ほぼ高炉の中心の位置に相当する。図は粒径20~25 mmのコークス塊について比較した結果がFig.15で、粒径3~5 mmの粉コークスについて比較した結果が

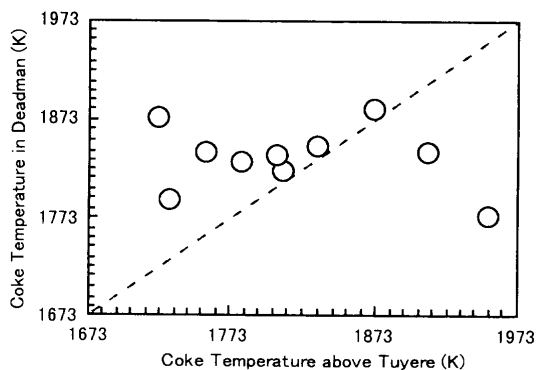


Fig. 15. Relationship between the estimated temperature of the lump coke in deadman and above raceway (dia. $2.0 \times 10^{-2} \sim 2.5 \times 10^{-2}$ m).

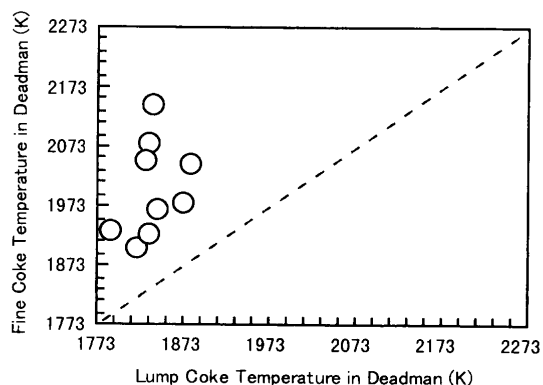


Fig. 17. Relationship between the estimated temperature of the lump coke (dia. $2.0 \times 10^{-2} \sim 2.5 \times 10^{-2}$ m) and the fine coke (dia. $3.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$ m) in deadman.

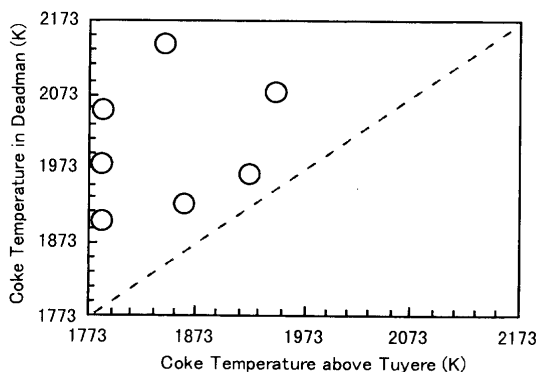


Fig. 16. Relationship between the estimated temperature of the fine coke in deadman and above raceway (dia. $3.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$ m).

Fig.16である。これから、塊コークスについてはばらつきは大きいものの、炉芯コークスとレースウェイ上方コークスの履歴温度はほぼ同程度であるのに対して、粉コークスでは炉芯コークスの方が高くなっていることがわかる。さらに、Fig.17に示したように炉芯コークスと比較すると粉の方が履歴温度が高い。すなわち、今回採取した炉芯の粉コークスは高炉内を降下する際に受ける熱履歴と異なっており、高温のレースウェイに由来していると推定される。

炉芯内の粉コークスの由来については様々な議論がなされており、レースウェイで発生して炉芯内に飛散したとする説⁹⁾、炉芯の塊コークスと同様の履歴を受けて降下したとする説^{23,24)}等がある。本研究では炉芯内のコークス粉はレースウェイから飛散したと推定されるが、これは採取した千葉第5高炉が比較的炉容積の小さな高炉であること、コークスを採取した期間のコークス比が高く、炉芯の通気性が良好であったためと考えられる。

本研究ではFig.15~17で示した炉芯内のコークス粉がレースウェイに由来しているとして、羽口前条件と炉芯内コークス粉率との関係を調べた。ここでのコークス強度と反応性は、コークスが炉頂から炉芯に達する時間を考慮して休風2週間前のデータを、羽口先風速、理論燃焼温度は休風2~4日前の日毎データの平均値を用いた。

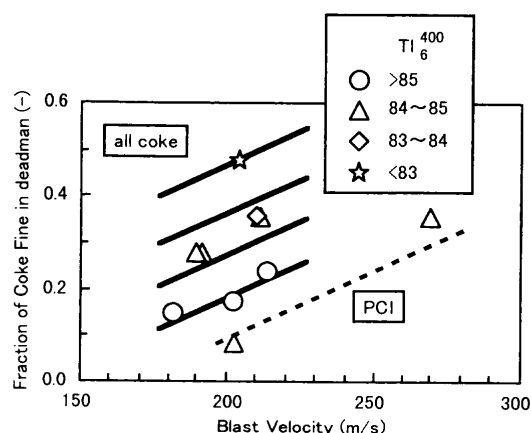


Fig. 18. Relationship between fraction of fine coke in deadman and coke strength and blast velocity.

炉芯内の粒径5 mm以下のコークス粉率とコークス強度(TI_6^{400})、羽口先風速との関係をFig.18に示す。同程度の強度のコークスでは羽口先風速の増加とともに炉芯内粉率が増加し、コークス強度の増加にしたがって粉率が減少していることがわかる。

これと同様にコークス反応性(CRI)、理論燃焼温度と炉芯内粉率との関係を調べ、重回帰分析を行った。まずコークス TI_6^{400} 、羽口先風速、コークスCRI、理論燃焼温度のそれぞれの単相関係数を求めた。次に、最も相関が高いコークス TI_6^{400} と残り3因子それぞれを加えた重回帰を行って最も相関が高い因子を選択し、同様の操作を続けて最終的に4因子すべての回帰を行った。各回帰の段階においてF検定を行って有意であることを確認した。その結果、次式に示す重回帰式を得た。

$$P_w = -9.44 \times 10^{-2} TI + 1.85 \times 10^{-3} v_{uy} - 1.17 \times 10^{-4} TFT - 7.36 \times 10^{-3} CRI + 0.476 \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 P_w は粉率(-)、 TI はコークス強度(%), v_{uy} は羽口先風速(m/s), TFT は理論燃焼温度(K), CRI はコークス反応性(%)である。

前章までの燃焼実験や数学モデルで用いた炭材消費量に対する割合で実炉の粉率を算出することは困難であり、またこれらの影響係数は高炉によって異なると予想されるが、コークス強度の増加、コークス反応性の増加、理論燃焼温度の上昇、羽口先風速の低下とともに高炉炉芯中のコークス粉率が低下しており、前章までの燃焼実験およびモデル計算による結果と定性的に一致する。

すなわち、レースウェイでのコークス粉化は化学反応による劣化と物理的衝撃力によって支配されており、高温、あるいは高反応性のコークスとすることによって塊内部の劣化層の生成を抑制し、羽口先風速低下、あるいは高強度コークスとすることによって劣化層の崩落を防止し、粉の発生を抑制可能であると考えられる。

5. 結論

高炉レースウェイ条件を模擬した燃焼実験、レースウェイ中のコークスガス化反応と、回転時の衝撃を考慮したコークス粉化数式モデル計算、および実高炉内で採取したコークス性状の調査により、以下の点を明らかにした。

(1) コークス燃焼実験の結果、コークスの強度と反応性が高くなるほど燃焼中の粉発生量が減少した。

(2) 高反応性コークスを用いたコークス燃焼実験では、レースウェイ近傍での装入コークス粒径の塊の割合が高く、コークスが表面摩擦的に破壊していると推定される。

(3) レースウェイでのコークスのガス化反応と機械的な衝撃による破壊とを考慮した数式モデル計算により、高温、あるいは高反応性のコークスとすることによって塊内部の劣化層の生成を抑制し、羽口先風速低下、あるいは高強度コークスとすることによって劣化層の崩落を防止し、粉の発生を抑制可能であることを見出した。

(4) 千葉第5高炉の炉内から採取した炉芯内のコークス粉はレースウェイでのコークスの粉化によって生成したと考えられ、その粉率は、コークス強度の上昇、羽口前風

速の低下、理論燃焼温度の増加、コークス反応性の上昇によって低下したことから、数学モデルによる検討結果が裏付けられた。

文 献

- 1) Advanced Pulverized Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation, ed. by K.Ishii, Pergamon-Elsevier Science Ltd., Oxford, (2000).
- 2) T.Maruyama, A.Maki, A.Shimomura, I.Okochi, K.Mori, M.Sato and R.Murai: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 834.
- 3) K.Nozaawa, T.Maki, K.Shibata, T.Goto, R.Hori and Y.Matsui: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 833.
- 4) M.Ichida, T.Nakayama, K.Tamura, H.Shiota, K.Araki and Y.Sugisaki: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1132.
- 5) T.Nishi, H.Haraguchi, Y.Miura, S.Sakurai, K.Ono and H.Kanoshima: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1820.
- 6) K.Yamaguchi, T.Uno, T.Yamamoto, H.Ueno, N.Kon-no and S.Matsuzaki: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 641.
- 7) H.Haraguchi, T.Nishi, Y.Miura, M.Ushikubo and T.Noda: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 2216.
- 8) R.Nakajima, S.Kishimoto, H.Hotta, K.Ishii, M.Sakurai and S.Itagaki: *NKK Tech. Rep.*, No. 132, (1990), 1.
- 9) Y.Okuyama, T.Shiode, S.Sato and A.Kurumada: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 1877.
- 10) T.Nishi, H.Haraguchi and Y.Miura: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 43.
- 11) H.Haraguchi, T.Nishi and T.Okuhara: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), S749.
- 12) H.Iwakiri, T.Kamijo, C.Nakamura and H.Tanaka: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **40** (1990), 97.
- 13) H.Yamaoka and K.Nakano: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 733.
- 14) K.Tamura, M.Ichida, H.Ueno and K.Yamaguchi: McMaster Symposium, MacMaster University, Ontario, No. 19, (1991).
- 15) Y.Shigeno, S.Kobayashi, Y.Omori and M.-T. Hong: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), S43.
- 16) Y.Hara and M.Tsuchiya: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1810.
- 17) K.Yamaguchi and T.Uno: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 578.
- 18) S.Watakabe and K.Takeda: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 467.
- 19) K.Kodama, A.Shigemi, T.Ogata and T.Horio: *Tetsu-to-Hagané*, **48** (1962), 1551.
- 20) M.Ikawa: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 29.
- 21) K.Chikamori, Y.Kitamura, M.Ogawa, H.Aoki and T.Miura: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 73.
- 22) 大江修造：設計者のための物性定数推算法，日刊工業新聞社，東京，(1985)，225.
- 23) T.Kamijo, H.Iwakiri, J.Kiguchi, T.Yabata, H.Tanaka and M.Kitamura: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 2012.
- 24) K.Inagaki, H.Yoshimoto, Y.Ino, K.Inokuchi and N.Kusakabe: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), S792.