

微粉炭多量吹き込み時のレースウェイでのコークスの劣化挙動に及ぼすコークスの反応性と強度の影響

笠井 昭人*・宮川 一也*・上條 綱雄*・木口 淳平*・清水 正賢*

The Effect of Reactivity and Strength of Coke on Coke Degradation
in the Raceway at High Rate of Pulverized Coal Injection

Akito KASAI, Kazuya MIYAGAWA, Tsunao KAMIJO, Junpei KIGUCHI and Masakata SHIMIZU

Synopsis : In order to clear the effect of coke quality on coke degradation in a blast furnace raceway at high rate of pulverized coal injection, experiments by a hot model simulating the raceway were carried out. The results were as follows.

- (1) Reactivity and strength of coke effect on combustion behavior of pulverized coal and coke in the raceway, coke degradation in the raceway and the raceway structure.
- (2) Using high reactivity coke, thickness of reacted layer near the lump coke surface is thin.
- (3) Using high reactivity and high strength coke, coke degradation in the raceway is suppressed.

Key words : blast furnace ; raceway ; coke ; degradation ; reactivity ; drum index ; pulverized coal injection.

1. 緒言

近年、溶銑コストの大幅な低減を目指して、高炉への微粉炭吹き込みが指向されている¹⁾。既に一部の高炉では微粉炭比200kg/tの多量吹き込みを達成²⁾しているが、微粉炭吹き込み量の増大とともに、炉芯の不活性化あるいは炉下部現象の変化に起因すると思われる炉下部圧損の上昇や送風圧変動が増大する傾向²⁻⁴⁾にある。微粉炭多量吹き込み操業を長期間・安定して継続するには、炉下部での通気・通液性を確保する必要があり、そのためには、(1)レースウェイでのコークスの劣化の抑制、(2)未燃焼微粉炭の発生及び蓄積の抑制、(3)炉上部でのコークスの劣化の抑制及び発生粉の炉下部への流入の抑制等が重要となる。

従来より、レースウェイでのコークスの劣化の抑制と微粉炭の燃焼性の向上を目的に、レースウェイ部を模擬した試験燃焼炉を用いた研究⁵⁻¹⁰⁾が多数行われている。微粉炭吹き込み時のレースウェイ内での反応は微粉炭とコークスの競合反応であり、この中で特に微粉炭の燃焼挙動については、微粉炭の性状⁶⁻⁸⁾や衝風条件^{7,9,10)}の影響について基礎的に多数検討されている。

一方、コークスの反応・劣化挙動については、オールコークス操業時のレースウェイでの燃焼挙動とコークスの劣化挙動に及ぼすコークスの冷間強度や反応後強度の影響という物理的挙動に関する検討例は多い¹¹⁻¹³⁾ものの、コークスの反応性の影響に関する研究例¹²⁾は少ない。さらに、微粉炭多量吹き込み時については、コークス粒子のレースウェイ

内での滞留時間増加による粉化量の増大が懸念されるが、レースウェイでのコークスの劣化とコークス品位の関係¹⁴⁾については、いまだ未解明な点が多い。

そこで本研究では、コークス充填型の試験燃焼炉^{6,7)}を用いて、微粉炭多量吹き込み時のレースウェイ内でのコークスの劣化挙動に及ぼすコークスの反応性と強度の影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置は、高炉レースウェイ部を模擬したコークス充填型の試験燃焼炉^{6,7)}である。装置概略図をFig. 1に示す。炉のサイズは、高さが2.5mで、奥行きは1.9mである。炉幅は、羽口側が1.0m、羽口対面側が0.6mであり、内容積が5m³の扇形炉である。羽口は、内径80mmの水冷羽口である。炉頂のコークスホッパーには超音波レベル計が設けてあり、コークスの降下速度を計測できる。コークス充填層の下には砂が充填してあり、砂をロータリーフィーダーで切り出すことにより炉芯の更新が模擬できる。また、羽口対面よりプローブを挿入して、ガスとダストのサンプリングが可能である。

2.2 試料

(1) コークス

使用したコークスの性状をTable 1に示す。コークスは、ドラム強度指数DI₁₅₀と反応性RIをそれぞれ変更させており、

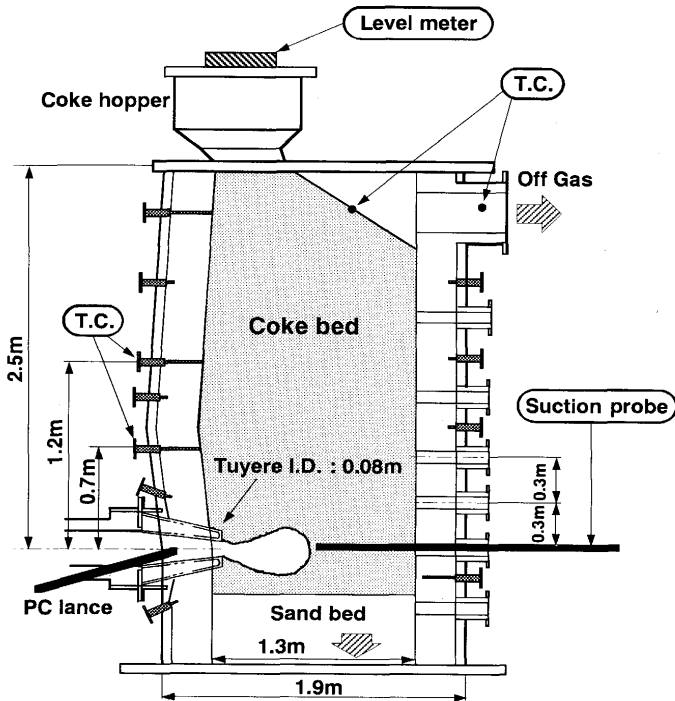


Fig. 1. Experimental furnace.

Table 1. Properties of coke.

Coke No.	DI ₁₅ ¹⁵⁰ (-)	I _{13.2} ⁶⁰⁰ (-)	RI (-)	RSI (-)	Ash (%)	Porosity (%)
A	85.2	88.8	23.0	70.5	11.2	45.0
B	84.5	85.4	35.6	53.5	11.5	45.5
C	81.9	83.6	40.2	43.2	11.2	44.4

Table 2. Properties of pulverized coal.

Proximate analysis (dry basis,%)		
Volatile matter	Ash	Fixed carbon
34.4	9.2	56.4

灰分と気孔率はほぼ一定である。コークスの粒度は8mm~20mmで、平均径は約14.5mmである。

ここで、ドラム強度指数DI₁₅¹⁵⁰は、25mm以上のコークス10kgをJISドラム試験機を用いて150回転した後の15mm以上の重量割合である。I型ドラム強度指数I_{13.2}⁶⁰⁰は、16mm~19mmのコークス200gをI型ドラム試験機(φ130mm×700mm)を用いて600回転した後の13.2mm以上の重量割合である。反応性RIは、20±1mmのコークス200gを1100°Cで5Nl/minのCO₂ガスと2時間反応させた後の重量減少割合である。反応後強度RSIは、RI測定後のコークスをI型ドラム試験機で600回転した後の9.52mm以上の重量割合である。

(2) 微粉炭

使用した微粉炭の分析値をTable 2に示す。微粉炭の平均

Table 3. Experimental conditions.

Blast flow rate	720Nm ³ /h
Blast temperature	1050°C
Oxygen enrichment	0%
Pulverized coal injection rate	144kg/h, 200kg/t

粒度は約47μmである。

2・3 実験条件

燃焼試験時の衝風条件をTable 3に示す。微粉炭吹き込み量144kg/hは微粉炭比200kg/tに相当する。

2・4 実験項目と方法

(1) 燃焼試験中のサンプリング

レースウェイ内の燃焼挙動が定常状態に達した後、吸引サンプリングにより羽口レベルでのガス組成分布と羽口上600mmレベルでのガス中のダスト濃度(単位吸引ガス量当たりのダストの重量)を測定した。

(2) 炉内容物の解体調査

レースウェイ近傍での通気性を検討するため、燃焼試験終了後に炉内を窒素雰囲気中で冷却し、解体調査によりコークスの粒度分布とレースウェイシェル(解体調査時にレースウェイの周囲に認識できるコークス粒子と微粉炭灰分由来の溶融物が一体となった殻状の層⁷⁾)のサイズを測定した。

コークス粉と未燃焼微粉炭を分離して検討するため、採取粉のサイズを0.3mm前後で分離した。未燃焼微粉炭とコークス粉からなる0.3mm以下の採取粉を微粉、コークス粉のみからなる0.3mm~5.0mmの採取粉を微粒とした。また、塊コークスの平均径は、微粉と微粒の影響を除いた5mm以上のコークスについて求めた。

(3) コークス塊内部の反応率分布

I型ドラム試験機を用いてコークスを回転すると、コークスは表面から均一に粉化するとして、コークス塊内部の反応率は、所定回数回転した時に発生したコークス粉の灰分量の収支から求めた。

試料は、解体調査時に羽口レベルで塊コークスの平均径が最も低下していた位置(羽口先150~300mm)から採取したコークスのうち、11.2mm~13.2mmの塊コークス10個である。

3. 実験結果

微粉炭の炭種と衝風条件が一定のもとでコークスの品位を変更した燃焼試験を行い、微粉炭多量吹き込み時のレースウェイでの燃焼挙動とコークスの劣化挙動に及ぼすコークス品位の影響について検討した。

3・1 燃焼挙動

(1) 微粉炭の燃焼率

コークスの降下速度の変化から推定^{6,7)}した微粉炭の燃焼率をFig. 2に示す。微粉炭の燃焼率はコークス品位により若

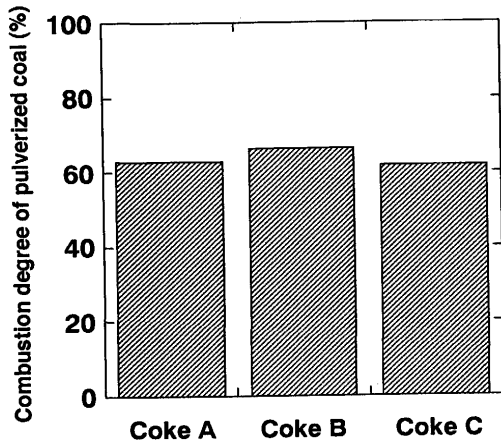


Fig. 2. Effect of coke quality on combustion degree of pulverized coal.

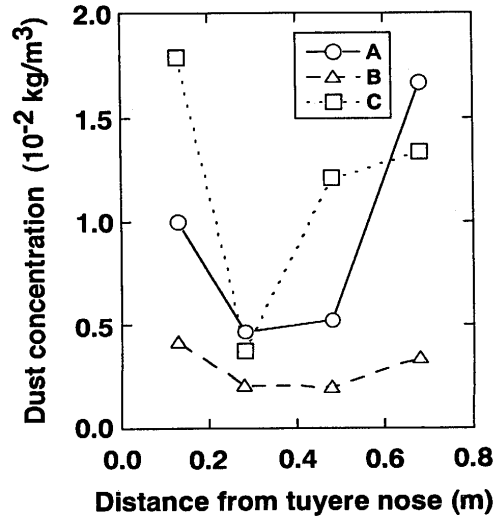


Fig. 4. Distributions of dust concentration at 0.6m above tuyere level.

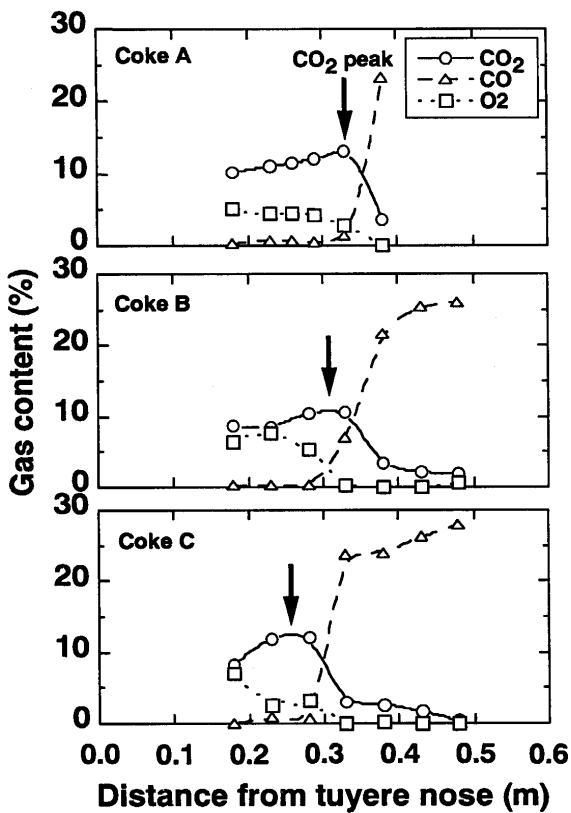


Fig. 3. Distributions of gas content at tuyere level.

干変化しており、Bコークス使用時が66.6%で最も高く、AコークスとCコークスを使用した時はそれぞれ63.1%と62.0%で、ほぼ同等である。

(2) ガス組成分布

羽口レベルでのガス組成分布をFig. 3に示す。羽口レベルでのガス組成分布はコークス品位により変化している。ガス温度の最高位置(燃焼焦点)とほぼ一致するCO₂濃度のピークの位置は、RIが上昇すると羽口側に移行している。

3・2 コークスの劣化挙動

(1) ダスト濃度分布

羽口上600mmレベルでのガス中のダスト濃度分布をFig.

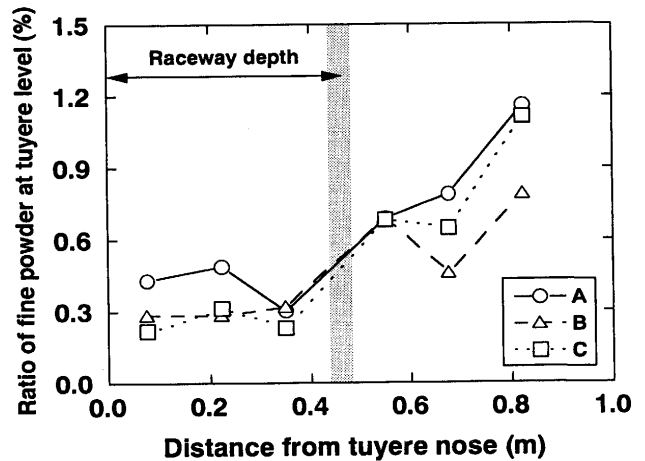


Fig. 5. Distributions of fine powder at tuyere level.

4に示す。ダスト濃度はコークス品位により変化している。ダスト濃度は、微粉炭の燃焼率が最も高いBコークス使用時に少なくなっている。また、羽口先からの距離の影響を見ると、いずれのコークスを使用した時も、羽口先130mmと680mmでダスト濃度は増加している。

(2) 微粉分布

羽口レベルでの0.3mm以下の微粉分布(採取試料全量に占める微粉の重量割合分布)をFig. 5に示す。ここで、レースウェイシェルを境界としたレースウェイサイズは、440mm~480mmである。羽口先からの距離の影響を見ると、いずれのコークスを用いた場合も、微粉はレースウェイの奥で増加している。微粉の発生量は1%程度とわずかであるが、コークス品位の影響を見ると、Aコークス使用時に最も多くなっている。

(3) 微粒分布

羽口レベルでの0.3mm~5.0mmの微粒分布(採取試料全量に占める微粒の重量割合分布)をFig. 6に示す。DI₁₅₀が同

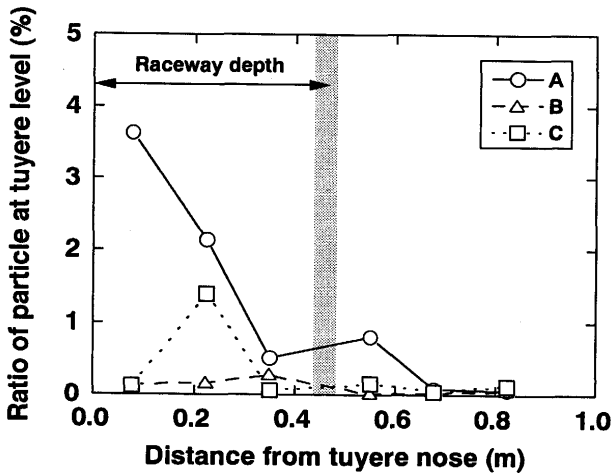


Fig. 6. Distributions of particle at tuyere level.

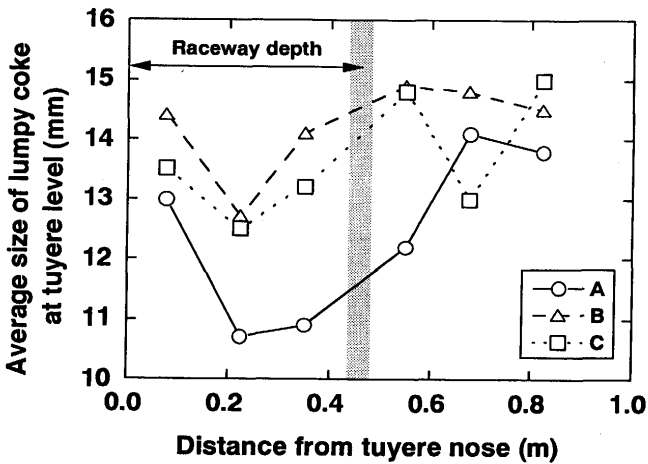


Fig. 7. Distributions of average size of lumpy coke at tuyere level.

等であるAコークスとBコークス使用時で比較すると、RIの低いAコークス使用時にレースウェイ前半部で微粒の発生量が大きく増加している。一方、RIの高いBコークス使用時には、微粒はほとんど発生していない。AコークスとBコークスに比して DI_{15}^{10} が大幅に小さく、RIが最も高いCコークスを使用すると、レースウェイ中間部で微粒が多少発生している。

(4) 塊コークスの平均径分布

羽口レベルでの5 mm以上の塊コークスの平均径分布をFig. 7に示す。AコークスとBコークス使用時で比較すると、Aコークス使用時に、レースウェイ後半部からレースウェイの奥で塊コークスの平均径が大きく低下している。Cコークスを使用すると、塊コークスの平均径は、Bコークス使用時に比してわずかに低下しているものの、Aコークス使用時ほどは低下していない。

以上より、 DI_{15}^{10} とRIがともに高いBコークスを使用すると、レースウェイでのコークスの劣化が少なく、微粉炭の燃焼率が高くなっている。一方、 DI_{15}^{10} は高いがRIが低いAコーク

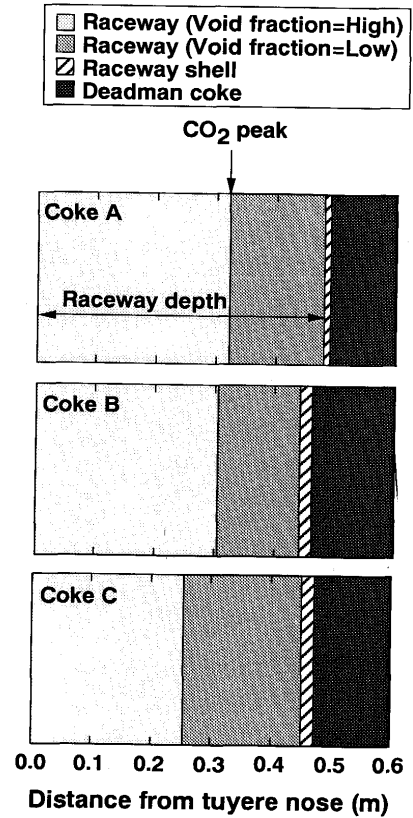


Fig. 8. Effect of coke quality on raceway structure.

クスを使用すると、コークスは激しく劣化している。また、 DI_{15}^{10} は低いRIが最も高いCコークスを使用すると、Aコークス使用時ほどは劣化していない。

4. 考察

4.1 レースウェイ構造

羽口レベルでのガス組成分布とレースウェイサイズをもとに検討したレースウェイ構造に及ぼすコークス品位の影響をFig. 8に示す。微粉炭の炭種と衝風条件が一定でも、コークス品位に依存して燃焼挙動とコークスの劣化挙動が変化し、レースウェイ構造が大きく変化している。すなわち、Aコークス使用時は、B、Cコークス使用時に比してレースウェイサイズが大きい(レースウェイサイズ：A=480mm, B=440mm, C=450mm)が、これはレースウェイ内のコークス粒径が小さい(羽口レベルでの5 mm以上の塊コークス平均径の羽口先0~400mmでの平均値：A=11.4mm, B=13.7mm, C=13.1mm)ことと関係づけられる。

レースウェイは、空隙率が85%以上のガスコア領域と空隙率が85%程度から50%程度まで直線的に低下していく領域から構成される¹⁵⁾。また、レースウェイ軸方向のガス組成分布を考えると、 CO_2 濃度のピークの位置は O_2 濃度の減少位置と CO 濃度の増加位置に一致する。レースウェイ内での CO ガスの発生は、レースウェイ内にコークスが存在し、ソリ

ューション・ロス反応が起きていることを示唆している。従って、 CO_2 濃度のピークの位置はレースウェイ内でコークスの空隙率が低下し始める位置とみなすことができる。 CO_2 濃度のピークの位置とレースウェイ内でのコークスの空隙率の関係から、コークス品位とコークスの反応劣化による粒径低下の結果がレースウェイ構造に大きな影響を及ぼしていると推定できる。

さらに、 CO_2 濃度のピークの位置(燃焼焦点)はRIに依存し、RIが高い方が燃焼焦点は羽口側に近づく。また、RIの上昇によりコークスの燃焼(酸化)速度が増加することから、RIの上昇は燃焼領域の昇温を早め、微粉炭の昇温と燃焼率の向上に寄与すると考えられる¹⁶⁾。しかし、微粉炭の燃焼率はコークスとの競合反応およびレースウェイ内の滞留時間に依存することから、レースウェイ構造にも影響されると推察できる。

4・2 コークスの劣化

コークス塊内部の反応率分布をFig.9に示す。相対半径 r/r_0 は、解体調査時に採取した塊コークスの半径 r_0 (m)と中心からの距離 r (m)の比である。

RIの高いBコークスとCコークスを使用した時の反応率分布はほぼ一致しており、この場合のレースウェイ内でのコークスの反応は塊コークスの表面に集中している。従って、BコークスとCコークス使用時に微粒分布と塊コークス平均径に差がでたのは、 $\text{DI}_{15\%}$ に代表される限界強度の差によると推察される。一方、Aコークスを使用した場合、レースウェイという高温な領域でも反応がコークス塊内部まで進行しており、その結果反応した領域である反応劣化層が厚くなっている。従って、Bコークス使用時に比してAコークス使用時に微粒が発生し塊コークス平均径が低下したのは、 $\text{DI}_{15\%}$ に代表される反応前の限界強度が高くて、反応速度の差異によりコークス塊内部まで反応が進行し、限界強度以下の領域が厚くなったことに起因していると推察される。

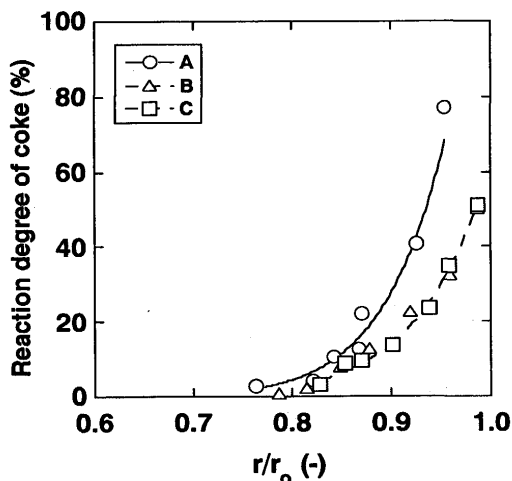


Fig. 9. Distributions of reaction degree in lumpy coke sampled in raceway.

また、Aコークスを使用した時にはレースウェイサイズが最も大きくなっていることから、コークスのレースウェイ内移動距離の増加による機械的な衝撃力の増加も微粒の多量発生と塊コークス平均径の低下に寄与したと推定できる。

以上より、 $\text{DI}_{15\%}$ が一定な場合、RIが高いコークスを使用すると、レースウェイでのコークスの反応は塊コークスの表面に集中し、しかもレースウェイサイズが小さく、コークスのレースウェイでの移動距離が短いため、塊コークスの劣化は少なくなる。またこの時、微粉炭の燃焼率が向上し、ダスト濃度も少なくなる。一方、RIが低いコークスを使用すると、レースウェイという高温な領域でもコークス塊内部まで反応が進行し、しかもレースウェイサイズが大きく、コークスのレースウェイ内移動距離が長いから、機械的な衝撃力の増加により微粒が多量に発生し、塊コークスの平均径が小さくなる。

従って、微粉炭多量吹き込み時のレースウェイでのコークスの劣化を抑制し、炉下部での通気性を確保するには、 $\text{DI}_{15\%}$ が高く、RIも高いコークスの使用が有効である。さらに、高炉内でのソリューション・ロス反応量は一定で、限界強度以下になったコークスの反応層が高炉内を降下中に表面より剥離すると仮定したシミュレーション計算からもRIが高いコークスの方が破壊後の粒径が大きくなっている¹⁷⁾ことから、レースウェイ部だけでなく、高炉全体でのコークスの劣化抑制にもRIの高いコークスの使用は有効と考えられる。今後は、高強度で高反応性のコークス製造方法についても検討していく必要がある。

5. 結言

微粉炭多量吹き込み時のレースウェイでのコークスの劣化を抑制し、炉下部での通気性を確保することを目的に、コークス充填型の試験燃焼炉を用いて、微粉炭多量吹き込み時のレースウェイ内でのコークスの劣化挙動に及ぼすコークスの反応性と強度の影響について検討し、以下の知見を得た。

- (1) コークスの反応性と強度は、レースウェイでの微粉炭とコークスの燃焼挙動、コークスの劣化挙動に影響するとともに、レースウェイ構造にも大きく寄与する。
- (2) 高強度で高反応性のコークスを使用すると、微粉炭の燃焼率が若干向上する。
- (3) コークスの反応性が高くなると、レースウェイ内の燃焼焦点の位置(CO_2 濃度のピークの位置)が羽口側に移行する。
- (4) 高反応性コークスを使用すると、レースウェイ内でのコークスの反応は塊コークスの表面に集中し、反応劣化層が薄くなる。
- (5) 微粉炭多量吹き込み時のレースウェイでのコークスの劣化を抑制するには、高強度で高反応性のコークスの使

用が有効である。

文 献

- 1) 稲葉晋一, 八木順一郎: 鉄と鋼, **78** (1992), 1187.
- 2) 門口維人, 後藤哲也, 伊藤良二, 矢場田武, 清水正賢: R&D 神戸製鋼技報, **46** (1996) 1, 2.
- 3) 上條綱雄, 高橋 昇, 星野剛一, 吉田康夫, 伊藤良二, 柴田耕一郎, 宮川 裕: 材料とプロセス, **6** (1993), 848.
- 4) 大鈴克二, 北山修二, 矢場田武, 清水正賢, 野間文雄: 材料とプロセス, **4** (1991), 100.
- 5) 野沢健太郎, 宮川一也, 小野玲児, 上條綱雄, 清水正賢: 材料とプロセス, **7** (1994), 961.
- 6) 宮川一也, 野沢健太郎, 上條綱雄, 佐藤道貴, 山川裕一, 有山達郎: 材料とプロセス, **7** (1994), 128.
- 7) 有山達郎, 佐藤道貴, 村井亮太, 宮川一也, 野沢健太郎, 上條綱雄: 鉄と鋼, **81** (1995), 1114.
- 8) 山縣千里, 須山真一, 堀坂 修, 梶原義雅: 住友金属, **44** (1992) 1, 36.
- 9) 有山達郎, 佐藤道貴, 山川裕一, 山田善郎, 鈴木 実: 鉄と鋼, **80** (1994), 288.
- 10) 山口一良, 上野浩光, 田村健二: 鉄と鋼, **78** (1992), 1214.
- 11) 一田守政, 田村健二, 林 洋一, 西 徹, 原口 博, 杉山 喬: 製鉄研究, (1989)335, 7.
- 12) 原 行明, 中村正和, 小島鴻次郎: 製鉄研究, (1978)295, 12610.
- 13) 齊藤武文, 岡本晋也, 北村雅司: 鉄と鋼, **71** (1985), S92.
- 14) 笠井昭人, 宮川一也, 上條綱雄, 木口順平, 清水正賢: 材料とプロセス, **8** (1995), 957.
- 15) 野沢健太郎, 上條綱雄, 清水正賢: 鉄と鋼, **81** (1995), 882.
- 16) 武田幹治, 石渡夏生, 内山 武, 板谷 宏, F.C.Lockwood: 材料とプロセス, **9** (1996), 2.
- 17) 上條綱雄, 岩切治久, 木口順平, 矢場田武, 田中英年, 北村雅司: 鉄と鋼, **73** (1987), 2012.