

微粉炭吹き込み時の高炉内装入物挙動

岩永 祐治*

Behavior of Burden during the Pulverized Coal Injection into Blast Furnace through Tuyers

Yuji IWANAGA

Synopsis : It is known that the pulverized coal injection operation leads to increase in the ore/coke ratio in a blast furnace and some of the injected pulverized coals are accumulated in the blast furnace, being not burnt. Because these situations could make the blast furnace operation unstable, the control of gas flow in the blast furnace, which corresponds to the pulverized coal injection operation, becomes necessary.

In this paper, a systematic experiments were made to clarify the effect of ore/coke ratio on chemical reactions in a cohesive layer which dominates the gas flow in a blast furnace. The effects of ore/coke ratio and unburnt pulverized coal on the mechanical strength of coke slits in a blast furnace were also investigated by using CO₂ gas with volatile matter removed char prepared from a coal.

It was found that :

- (a) Reduction of ore in a cohesive layer is affected by the gas flow resistance through the cohesive layer due to the increase in thickness of ore layer.
- (b) Unburnt pulverized coal is gasified more rapidly than lump coke and, hence, the degradation of coke is decreased.

Key words : blast furnace ; pulverized coal injection ; ore/coke ratio ; coke strength ; coke reactivity ; cohesive zone ; coke slit ; sinter reducibility.

1. 緒言

近年コークス使用量削減によるコークス炉延命, 安価な石炭の使用および生産弾力性向上を目的に, 高炉での微粉炭吹き込み(以下PCIと略す)操業が一般化した¹⁾。高炉で微粉炭吹き込み量が増えると, 鉱石およびコークスの層厚比が高くなる。コークス層に比べて鉱石層の通気抵抗が相対的に大きいので, 上昇ガス流が鉱石層を貫流しにくくなり還元の進行が阻害されることが予想される。特に融着してくるとコークス層をクロスフローの状態で流れるようになり, ガスの偏流を助長するものと推定される。

高炉において羽口から吹き込まれた衝風は, 上昇とともに軟化融着帯で再配分され, この間に還元や伝熱がおこなわれる。高炉の安定操業のためには, 炉下部から塊状帯へのガス分配において, ガスと鉱石との十分な接触を保障し, ガス利用率を向上させる必要がある。融着帯の通気性は炉全体の通気性, ガス流分布に極めて重要な役割を演じる。したがって, 微粉炭吹き込み時に顕著となるO/C上昇あるいは未燃焼チャーの発生は装入物の通気性に影響してガス流れが変化するため, 融着帯の位置および形状の変化を介して, 高炉操業上極めて重要な役割を持つものと考えられる²⁾³⁾。

このように高PCI操業時には, 特に炉内状況を正確に把握

して炉内の諸現象を制御することが, 適正なガス流分布制御維持のために不可欠となる。しかしながら, O/Cが融着帯近傍の反応挙動におよぼす影響を系統的に研究した例は少なく, 十分に説明できるまでには至っていない。

そこで, スリット構造に着目して融着層とコークス層が交互に重なりあっている状況および高炉内に装入される鉱石が降下する過程をモデル化した装置を用いて, 鉱石の還元挙動およびコークススリットに着目した未燃焼チャー存在下におけるコークスの挙動を調査した。

2. 実験装置と実験方法

2・1 融着層近傍に着目した鉱石, コークスの反応実験

融着層とコークス層が交互に重なり合っている状況を想定したFig. 1に概略を示す装置を使用して, 高炉内に装入された鉱石が炉内を降下しながら加熱, 還元, 軟化する過程の性状変化およびコークススリットの性状変化を測定した。本装置では反応管が二重になっており, 内筒(40~90φ)に鉱石, 外筒(150φ)にコークス(層高100mm)を充填する。したがって, 鉱石の軟化とともに鉱石層の圧力損失が増大すると内筒にガスが入りにくくなり, 還元ガスは外筒のコークス層に迂回するように工夫されており, 実炉内の融着層近

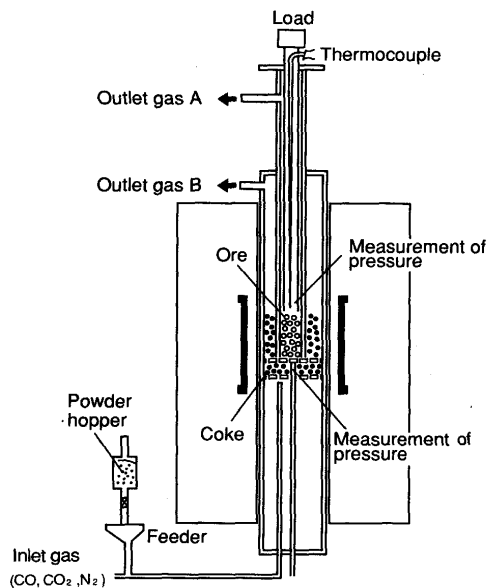


Fig. 1. Experimental apparatus for high-temperature properties of ore.

Table 1. Properties of coke.

Ash (%)	R _{JIS} (CO%)	MSI ₈₅ ⁸⁰⁰ (%)	DI ₁₅ ³⁰ (—)	CRI (%)	CSR (%)	Porosity (%)
10.61	24.3	49.3	95.4	34.0	51.7	52.7

R_{JIS}: reactivity index by JIS method
 MSI: microstrength index
 CRI: coke reactivity index
 CSR: coke strength after reaction

Table 2. Properties of sinter samples.

Chemical composition (wt-%)						RI (%)	RDI (—3mm%)
Fe _{tot}	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO		
55.6	5.89	9.70	5.81	2.11	1.45	64.1	36.1

RI: reactivity index; RDI: reduction disintegration index.

傍におけるクロスフローを与える条件下で軟化性状試験をおこなうことができる。

実験では反応管を外部から加熱して、その中にガスを通じて実高炉の垂直ゾンデ測定結果を参考にして設定した条件⁴⁾(昇温パターン、ガス組成およびガス流量)のもとで還元をおこない、圧力損失、収縮量、排ガス量・組成の変化を測定した⁵⁾。荷重は一定(10000Pa)で推移させた。

実験にはTable 1, Table 2に示す性状を有するコークス、焼結鉱を用いた。粒子径はコークスでは19~21mm, 焼結鉱では8~10mmを基準とした。また、焼結鉱については実験終了後化学分析に供し、酸化度の変化から還元率を算出した。

2・2 未燃焼チャー随伴気流下におけるコークス移動層反応実験

実験装置の概略をFig. 2に示す。上部および下部が開放された電気炉、ステンレス製の反応容器および粉体供給装置

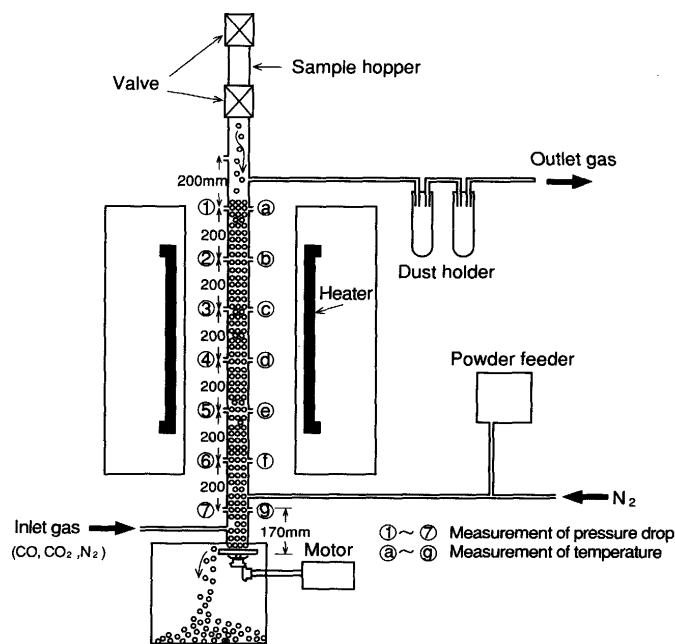


Fig. 2. Experimental apparatus for gasification of coke.

の3つの部分より構成されている。反応管は内径70mm, 高さ1.6mで上部に装入ホッパー, 下部にテーブルフィーダーを付帯している。反応管は高さ方向7位置に圧力および温度測定孔が設けられている。

実験は次の要領でおこなった。反応管内にコークス(約2.3 kg)を充填し、固定層状態でN₂ガスを(50Nl/min)を流しながら所定温度まで加熱する。次に、テーブルフィーダーを始動しコークスを一定速度で降下させ、充填層上部が一定レベルに降下毎に装入ホッパーよりコークスを補給する。炉温が安定したことを確認後、粉体供給装置から未燃焼チャーを定量切り出し、反応ガス(CO₂20Nl/min, N₂30Nl/min)とともに反応管内に吹き込む。層内温度、圧力、ガス組成、ガス流量の時間経過を追跡し、定常状態と判定されたところで速やかにN₂ガス(50Nl/min)に切り換える。粉体供給を停止させ電源を切る。

実験後のコークスは高さ方向各位置毎に粒度分布を測定しI型ドラム試験⁶⁾に供する。—1mmの重量率を強度指標とした。

実験にはTable 1に性状を示すコークスを管径の制約から5~8mmに整粒して使用した。また、未燃焼チャーは予め1500℃まで高速昇温(100℃/min)した後N₂ガス中で8h保持して熱処理し揮発分を除去したTable 3に性状を示すもの(粒子径50~70μm)を使用した。

Table 3. Properties of unburnt char.

FC (%)	Ash composition(%)					
	T. Fe	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Alkali
92.3	0.2	1.1	2.8	3.0	0.1	0.02

なお、総括のガス化反応率をガス組成、ガス流量の変化から(1)式より算出した。

$$\begin{aligned} \text{総括ガス化反応率(\%)} = & \frac{\sum_{\Delta t} \{ (\Delta t \text{ 分間の排ガス流量 (Nl)} \\ & \times (\Delta t \text{ 分間の排ガス中平均CO濃度 (-)} \times 6/22.4) / \\ & \{ \text{初期コークス (g)} + \text{コークス装入量 (g)} \\ & + \text{未燃焼チャー吹き込み量 (g)} \} \times 100 \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

3. 実験結果と考察

3・1 L_o/L_c 上昇時の鉱石軟化性状変化

3・1・1 鉱石層幅の軟化性状におよぼす影響

鉱石の軟化が始まる1000℃以上になると、Fig. 3に示すように鉱石層を通過するガス量が急速に低下し、反対にコークス層を通過するガス量が増加する。 L_o/L_c (L_o : 鉱石層幅(cm), L_c : コークス層幅(cm))が大きくなるほど、コークス層を迂回するガス量の増大(鉱石層通過ガス量の低下)は

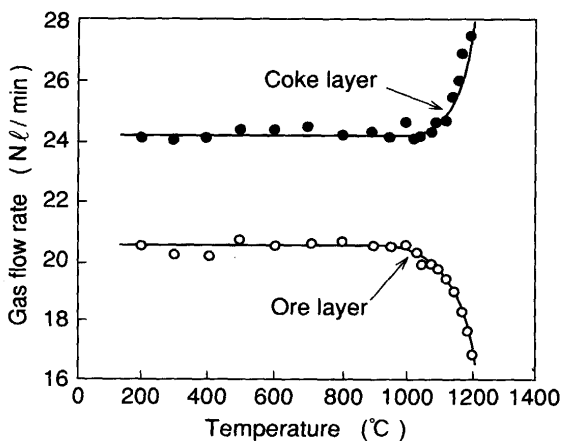


Fig. 3. Change in gas flow rate.

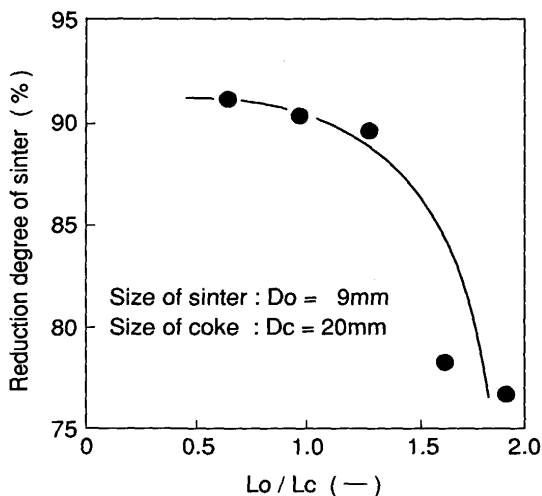


Fig. 4. Relation between reduction degree of sinter and L_o/L_c .

顕著となり、Fig. 4に示すように最終還元率は低下する。

このような鉱石層幅増大とともに顕著となる還元率の低下は、還元鉄殻が形成される前に軟化抵抗⁵⁾の低いFeOを多く含む低融点のスラグ生成を促進するために、圧縮されやすくなり軟化性状を悪化させる。したがって、収縮開始温度はFig. 5に示すように低温側に移行し最終的な収縮率も高くなるとともに、 $L_o/L_c 1.92$ の場合の鉱石層の圧力損失は $L_o/L_c 0.64$ の場合に比べて約1000Pa高くなる。

3・1・2 鉱石粒径の軟化性状におよぼす影響

鉱石層の軟化性状改善方策として還元性向上は有効であるが、焼結鉱の場合原料配合条件の変更が必要となるために、現場では実施しにくい方策である。ここでは比較的現場対応のとりやすい鉱石粒径の影響について検討する。

鉱石粒径が大きくなると、比表面積の減少にともなって還元が抑制され、未還元FeOが残存して軟化しやすくなるものと考えられる。

Fig. 6は1200℃における鉱石層の圧力損失と鉱石粒径との関係を示したものである。粒径増大による還元進行の遅れ

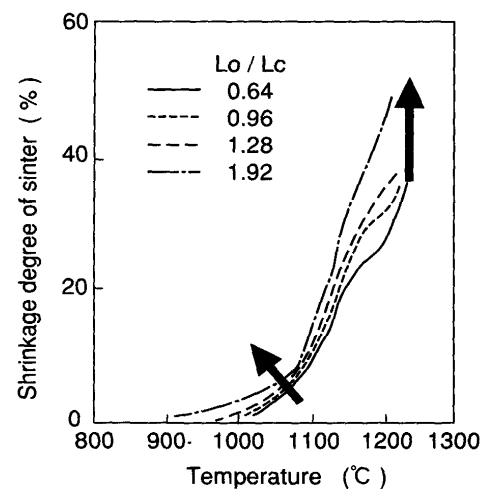


Fig. 5. Effect of L_o/L_c on temperature dependence of shrinkage degree of sinter.

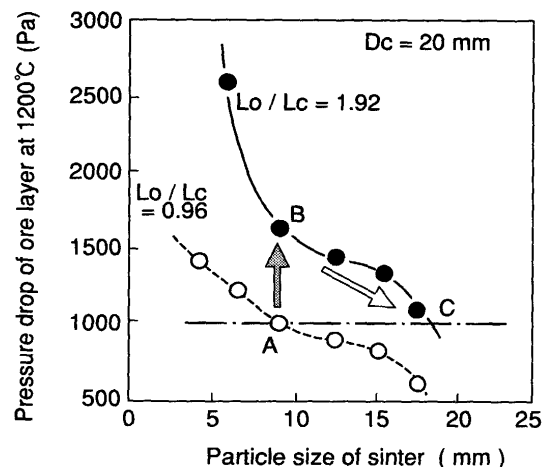


Fig. 6. Effect of particle size of sinter on pressure drop of ore layer.

は、収縮率の増大および空隙率の低下をもたらす通気性を悪化させるものと予想されたが、結果的に圧力損失が低下する傾向が認められる。

この理由は次のように考えられる。粒径を大きくすると、充填層としての空隙率が増大し圧力損失を低下させる方向に働くために⁵⁾、低温領域から通気性改善の効果が現われる。一方、還元率の低下にともなう軟化抵抗の減少は、空隙率の低下ひいては圧力損失の上昇に結びつく。しかしながら、前者の効果が後者の効果を上回るために、高温領域でも粒径を大きくした方が圧力損失が低くなるものと推定される。

Fig. 6によると、 L_o/L_c が0.96から1.92に上昇すると圧力損失はA点からB点へ約700Pa増大するが、鉍石粒径を9 mmから17.5mmに大きくすれば圧力損失はB点からC点に変化し元のレベルを維持することが可能である。実炉において平均粒径を上昇させることは困難であるが、ムーバブル・アーマー等の装入物分布制御により L_o/L_c の高い部位の粒径を上昇させることは、還元率向上の点で有効であることを示唆する。

3・2 L_o/L_c 上昇時のスリットコークス性状変化

3・2・1 鉍石層幅のスリットコークス性状におよぼす影響

コークス強度とコークス層迂回ガス量の関係をFig. 7に示す。コークス層迂回ガス量の増加により、塊コークスのソリューションロス反応率が最大で約10%増加し劣化が顕著になることを示している。

ところで、実炉においては劣化によって粒子径自身が小さくなり、また発生した粉が空隙を埋め通気抵抗を上昇させる。本実験では、ソリューションロス反応が進行すると、強度が低下するものの粒径低下までには至らない。そこで、コークス粒径を変更してガスの迂回量を変化させ、鉍石層の還元・軟化におよぼす影響を調査した。

Fig. 8 は1100℃における鉍石層を通過するガス量とコークス粒径の関係を示したものである。コークス粒径が小さく

なるとコークス層の通気抵抗が増すために、逆に鉍石層を通過するガス量が増加する。このために鉍石層の還元が向上し、軟化性状が改善される結果、Fig. 9に示すように鉍石層の圧力損失は低下する。

コークス層へのガスの迂回はコークスの劣化を介して鉍石層へのガス量を増加させようとする自己制御作用がある。しかしながら、Fig. 8 からわかるようにコークス粒径低下によるガス迂回抑制効果は比較的小さく、 L_o/L_c 増大にともなう鉍石層の軟化性状(通気性)悪化に起因する圧力損失の上昇をコークス粒径によって元のレベルに戻すことはむずかしい。高炉全体としては、コークス層および鉍石層双方の通気抵抗が上昇し、通気性を悪化させるものと推定される。

3・2・2 コークス反応性CRIの鉍石層還元におよぼす影響

Fig.10はコークス反応性CRIと圧損ピーク値との関係を示したものである。コークス反応性CRIが高くなるほど鉍石層

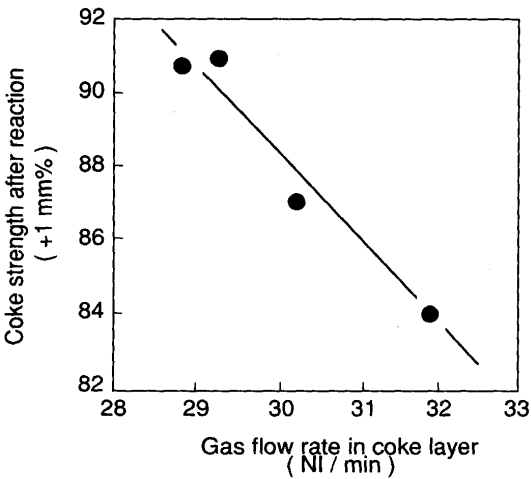


Fig. 7. Relation between coke strength and gas flow rate in coke layer.

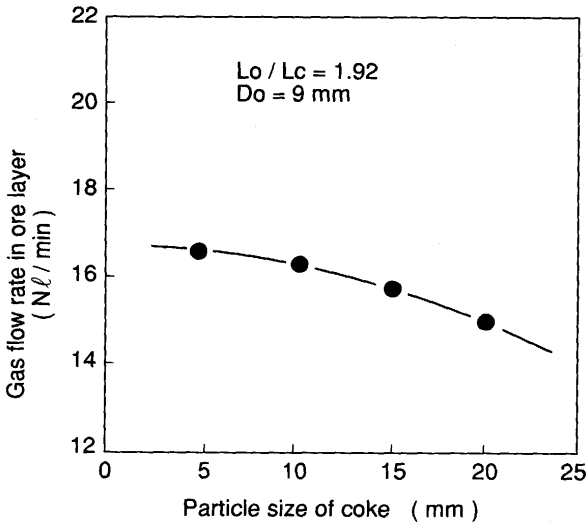


Fig. 8. Effect of particle size of coke on gas flow rate in ore layer.

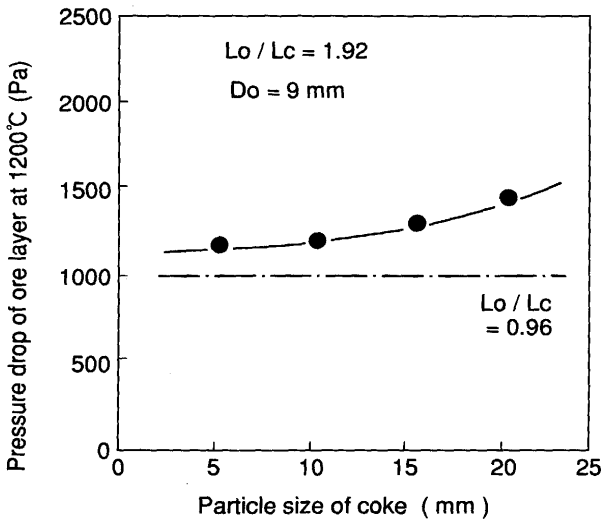


Fig. 9. Effect of particle size of coke on pressure drop of ore layer.

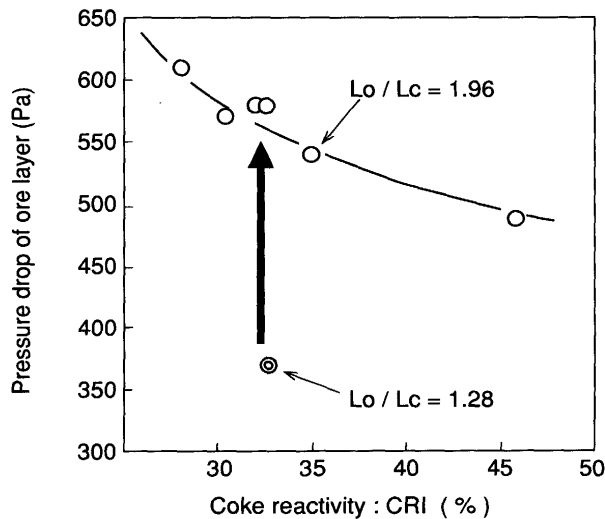


Fig. 10. Effect of coke reactivity on pressure drop of ore layer.

の圧損は低下する。コークス反応性は還元ガスCOの生成に関係し、高CRIコークスほど導入ガス中に含まれるCO₂が床敷コークスと反応してCOに転化・再生し新たに還元剤として機能させる働きをする。高CRIコークス使用による荷重軟化性状の改善は、その還元促進に基づく金属鉄生成効果に起因するものと考えられる。

このように、高反応性コークスの使用により鉬石の還元率が上昇する結果、耐軟化性が改善され収縮開始温度は高温側に移る。実炉では実質的な融着帯幅の減少を意味し、融着帯の通気性を改善させる方向に作用するものと予想される。

3・2・3 コークス反応性CRIの適正值

L_o/L_c が高くなると、鉬石層はコークス層に比べて空隙率が小さいので、炉下部から上昇するガスは鉬石層を避けてコークス層を迂回しやすくなり、高炉操業上いろいろな面に影響をおよぼす。すなわち、鉬石層を流れるガス量が低下して、鉬石層が昇温されにくくなるとともに、還元も一層進行しにくくなる。半径方向で L_o/L_c の偏差が顕著になると、 L_o/L_c の高い部分ではますます鉬石層の圧損を上昇させる。このような問題に対して、Fig.10に示したように、コークス反応性CRI上昇が鉬石層の軟化性状向上対策として有効であることが明らかとなった。しかしながら、コークスの反応性は強度と密接に関係し、高炉通気性面からはコークス反応性は低い方が望ましいとされてきた⁷⁾。コークス反応性設定においては反応と通気性の両方を考慮する必要がある。そこで、コークス反応性の適正值有無について検討した。

Fig.11はコークス層の反応率とコークス反応性CRIとの関係を示したものである。CRIによって反応率が極小値があり、CRIが低すぎると反応率がかえって上昇する傾向が認められる。図中の領域①ではCRIが上昇する際、ソリューションロス反応が促進されるにもかかわらず、生成したCOにより還

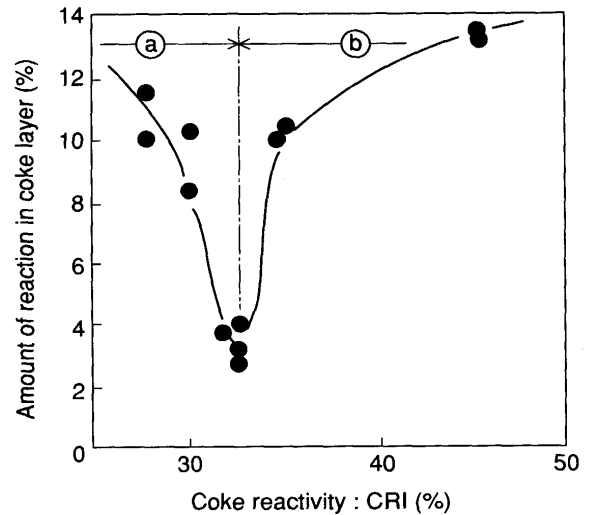


Fig. 11. Effect of coke reactivity on amount of reaction in coke layer.

元ポテンシャルが上昇し、鉬石層の通気性が改善され、コークス層を迂回するガス量が減少するためにガス化率が低下する関係を示す。領域①では逆に鉬石の還元促進によるコークス層迂回ガス量が低下する効果よりも反応性上昇によるガス化率促進が優勢になる関係を示している。

このように、コークス反応性CRIには適正值が存在し、30～35程度が最適と考えられる。

3・3 未燃焼チャー随伴気流下におけるコークスの劣化挙動

3・3・1 コークス降下速度、反応温度のコークス劣化におよぼす影響

Fig. 2に示す装置を用いた実験では、CO₂はコークスと反応してCOに変化し、コークスは表面から反応を受けながら降下するために、上部から下部に向かって粉率が上昇する。また同一位置における粉率は切り出し量が多くなるほど低下する。これはFig.12に示すように、総括ガス化反応率がコークス切り出し量と負の関係にあることから、コークス切り出し量が多くなるほど反応管内滞留時間が短くなり、より少ない反応を受けるためである。実炉において操業度が上昇すると反応劣化の面で有利になり、逆に高PCI操業時に顕著となる降下速度の低下はコークスのガス化反応の点で問題となることを示している。

一方、Fig.12からわかるように、コークス切り出し量が少なくなるほど反応温度上昇による総括ガス化反応率の増大は顕著となる。高PCI操業時には炉壁流が発達して炉壁温度が上昇しやすくなる¹⁾ことを経験するが、このような場合には、コークスの急速なガス化による劣化が進行しやすくなることを示唆する。

3・3・2 未燃焼チャー吹き込みによるコークス劣化の変化

Fig.13は反応管中央部の平均コークス粉率と未燃焼チャー吹き込み量の関係を示したものである。未燃焼チャー吹き込み量が増加すると、コークスの劣化が抑制されて粉率が

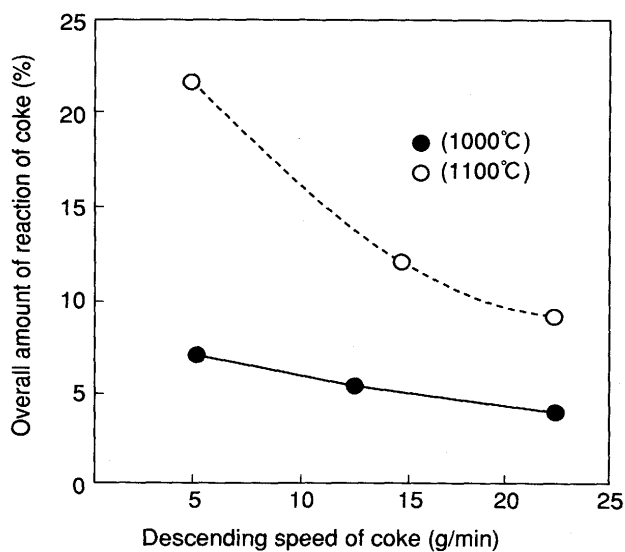


Fig. 12. Effect of descending speed on amount of reaction of coke.

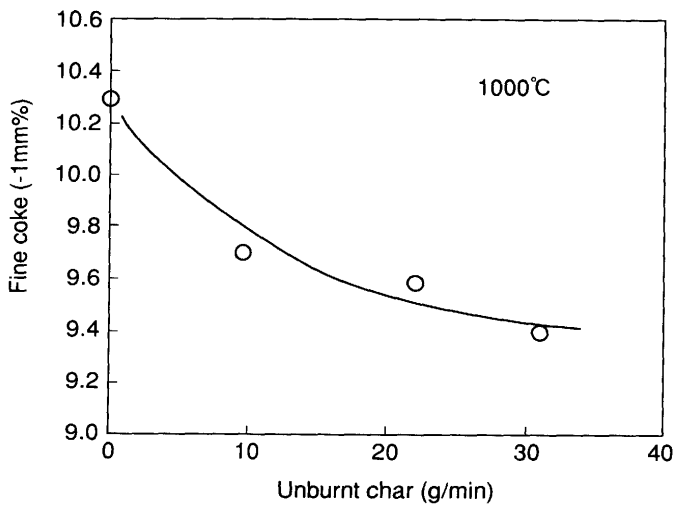


Fig. 13. Effect of injection of unburnt char on degradation of coke.

低下することがわかる。

実験によると、ガス組成、ガス流量の変化から求まる総括ガス化反応率は未燃焼チャーの吹き込み量に依存せずほぼ一定の値を示した。また、未燃焼チャーの反応管内残留および反応管外への排出が僅かであった。このことから、反応管内に吹き込まれたCO₂は未燃焼チャーの有無に関わらずすべてガス化反応により消費されたものと考えられる。そこで、反応管内に吹き込まれた未燃焼チャーのガス化がコークスのガス化を肩代わりしているものとみなすと、コークスのガス化反応率はFig.14に示すように未燃焼チャーの吹き込み量が多くなるほど低下する。未燃焼チャーの優先消費によりコークスのガス化が抑制されることがわかる。

なお、Fig.13に示したように、反応温度が1000°Cの場合には、コークスの粉率低下が未燃焼チャー30g/minの吹き込みで約1%程度である。これに対して、Fig.15に示すように反

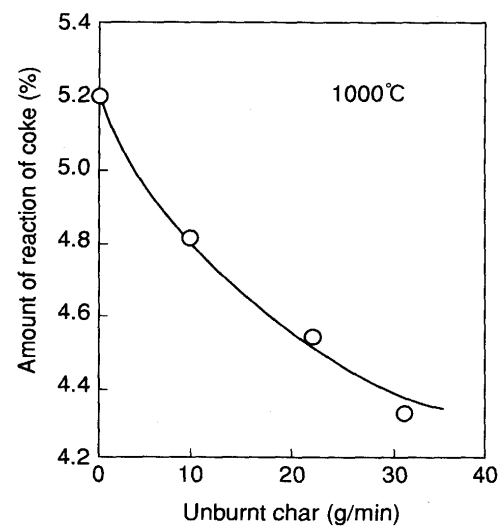


Fig. 14. Effect of injection of unburnt char on reaction of coke.

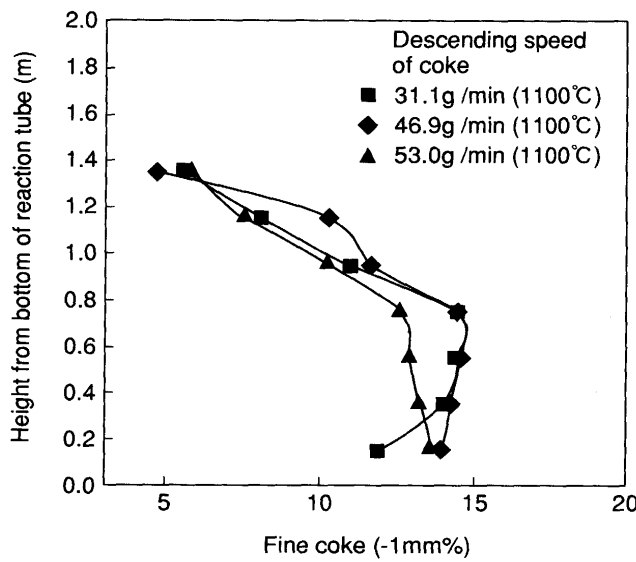


Fig. 15. Effect of injection of unburnt char on distribution of fine coke in reaction tube.

応温度が1100°Cと高くなると粉率低下が約2%に上昇する。これは未燃焼チャーの消費速度が上昇し⁸⁾コークスのガス化抑制効果が大きくなるためと考えられる。

3・3・3 高炉内における未燃焼チャーの効果

高炉羽口からPCを吹き込むと送風圧が上昇するといわれている。この原因として、羽口先消費コークス量の低下およびコークス比の低下により、コークス一個粒子が被るガス化反応率が高くなり劣化が進行することが考えられる。本実験結果からも予想されるように、レースウェイ内でPCを完全に燃焼させなくても、炉の上方へ上がっていく過程でガス化反応を優先的に受ければ、コークスの劣化を防いで温存したままレースウェイまで降下させることが可能となる。

高炉でPCが吹き込まれると、送風ガス中の酸素量は一定

であるから、PC中の炭素が燃焼する分だけ羽口先燃焼コークス量は減少し、降下速度が低下する²⁾³⁾。レースウェイ内でのコークスの滞留時間は増加し、PCの燃焼率が高い場合にはむしろレースウェイ内でのコークスの粉化が進行する⁹⁾。一方、PCの燃焼率が低下すると、レースウェイ外に運ばれて炉内を浮遊する未燃焼チャーの量は増加する。このような未燃焼チャーはコークスに比べてガス化反応速度が大きく、炉内で優先的に反応消費されるために塊コークスのガス化反応率は低下するであろう。

このように、PCの燃焼率低下とともに粉化は緩和され、条件によってはむしろ抑制されることが期待される。吹き込み量に応じた最適燃焼率あるいは、燃焼率に応じた最適吹き込み量が存在することを示唆する。

4. 結言

高炉微粉炭吹き込み操業時に顕著となる L_o/L_c 上昇あるいは未燃焼チャーの発生が、融着帯近傍の反応挙動におよぼす影響を実炉内の状況に即した条件下で系統的に調査し、その結果次のことが判明した。

(1) 鉬石層幅が増えると軟化性状が悪化しやすくなる。軟化性状向上対策として粒径制御は有効である。

(2) L_o/L_c 上昇に起因する鉬石層の通気性悪化(コークス層を流れるガス迂回量の増大)は、ソリューションロス反応を介して高炉内におけるコークスの劣化挙動にも複雑に影響を与える。また、ソリューションロス反応抑制のために

は、コークス反応性CRIに適正值(30~35)が存在する。

(3) ガス化反応速度の速い未燃焼チャーとコークスが共存すると、未燃焼チャーが優先的にガス化反応消滅することにより、コークスの劣化が抑制され、吹き込み量に応じた最適燃焼率あるいは燃焼率に応じた最適吹き込み量が存在することを示唆する実験的裏付けを得た。

高炉への微粉炭吹き込みは、鉬石層通過ガス量低下の点からは鉬石の還元進行に対して不利となる。コークスのソリューションロス反応に対しては、反応を促進させる要因と未燃焼チャーを介した抑制する要因の二面性がある。今後、高PCI操業時における装入物の品質設定指針を明確にしていく上で、熱流比の変化および未燃焼チャーの影響を含めて鉬石の還元とコークスのガス化の複合反応に着目した実炉操業解析を進めていく必要があるものと考えられる。

文 献

- 1) 稲葉晋一, 八木順一郎: 鉄と鋼, 78(1992), p.1187
- 2) K. H. Peters, M. Peters, B. Korthas, K. Mülheims and K. Kreibich: Proceedings of the 6th Inter. Iron Steel Congress Vol.2, Nagoya, (1990), p.492
- 3) 出口幹郎, 柴田耕一郎, 福岡正能: 鉄と鋼, 76(1990), p.691
- 4) 下田輝久, 栗田興一, 岩永祐治: 鉄と鋼, 70(1984), p.665
- 5) 岩永祐治: 鉄と鋼, 68(1982), p.2223
- 6) 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), p.195
- 7) 例えば, 材料とプロセス, 3 (1990), p.2, p.6, p.10, p.14, p.18
- 8) 岩永祐治: 鉄と鋼, 77(1991), p.71
- 9) K. H. Peters, E. Beppler, B. Korthas and M. Peters: 2nd European Ironmaking Congress Proceedings, (1991), p.247