

討 6 高炉内コークス挙動のモデル化

住友金属工業(株) 中央技術研究所 ○栗田興一, 下田輝久, 岩永祐治
山岡秀行

鹿島製鉄所 網永洋一, 小倉製鉄所 米谷章義

1. 緒 言

高炉内におけるコークス品質の重要性は、1974年の原料炭供給不足に起因するコークス性状の悪化と、それに対応する高炉炉況不調により、再認識された。その後、東大生研の試験高炉における劣質コークス使用操業¹⁾、および実炉炉口部のサンプリング結果²⁾等によりコークス劣化によって生じた粉コークスの挙動についても注目する必要があることが指摘された。

本報告では、高炉内コークス挙動に関連して、反応および機械的衝撃による塊コークスの劣化過程³⁾と、劣化によって生じた粉の運動特性⁴⁾の2点に着目した基礎実験を行い、その結果を前者については、高炉総合モデル⁵⁾の一部に組み込み、実炉でのコークス品質変更テスト操業結果と比較し、後者については、減産過程での実炉操業結果と比較した。

2. 高炉内コークスの劣化挙動

コークスの劣化過程を、ソリューションロス反応による劣化と、荷下りに伴う、機械的衝撃に基づく劣化に分割して、実験を行い、モデル化した後、実炉計測値と対比した。

2.1 ソリューションロスによる粒径低下の推定

(1) 実験装置および方法

ガス化反応量の計算に必要な反応速度式を導出するため、ステンレス製反応管(管径76^φ)コークスを約200g充填し、下方からN₂ガスを流しながら加熱する。所定温度に到達後、N₂ガスを反応ガス(N₂+CO₂または、CO+CO₂)に切り換え、ソリューションロス反応をおこさせた。なお、反応温度は900~1300℃、反応時間は2hrとした。

(2) 実験結果とモデル化

高炉を対象として、一般によく用いられる、Langmuir-Hinshelwood型の反応速度式に、コークス粒径(D_p)、コークス反応性(CRI)およびガス流速(u)の影響を補正項として付加した次式を、ソリューションロス反応速度式として導出した。

$$R = \frac{k_1 P_{CO_2}}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2}} \cdot f(D_p) \cdot h(CRI) \cdot g(u) \quad [g/g\text{-coke}/min] \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、k₁, k₂, k₃は、速度定数[1/min]である。

コークス熱間性状指標として現場的によく用いられているCSRは、強度指数であり、コークス反応指数(CRI)と区別する必要があるが、CSRはCRIと非常によい相関があることから、以下に示すシミュレーションでは、CSRを用いた。

炉内でのソリューションロス反応による重量減少を考慮した次式から、反応後の粒度を導出する。

$$W_A \text{ (反応前の重量)} - W_r \text{ (反応後の重量)} = R \cdot \Delta t$$

$$\text{ここで、} W_A = \pi/6 \cdot D_{PA}^3 \cdot \rho_A (1 - \xi_A), \quad W_r = \pi/6 \cdot D_{Pr}^3 \cdot \rho_r (1 - \xi_r) \quad \dots\dots\dots(2)$$

実炉コークスでは、ガス化反応による、気孔率変化が大きく、この効果を次式で表わす。

$$\xi_i = \xi_0 + 0.21 \Delta W / W_0, \quad \rho_i = \rho_0 \quad (i = A, r) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、ΔW : コークス粒1個あたりの装入後の反応による全ガス化消失量 [g]

W₀, ξ₀, ρ₀ : コークス粒1個あたりの装入前の重量[g], 気孔率[-], 密度[g/cm³]

従って、ソリューションロス反応による粒径低下は、反応後粒度を用いるとΔD_{Pr} = D_{PA} - D_{Pr}となる。

2.2 機械的作用によるコークス粒径低下の推定

炉内での機械的破碎、摩耗による粒径低下を、ドラム1回転あたりの粒径低下量(δ)、および炉内を単位長さ降下する間に受ける、機械的破碎、摩耗作用と等価なドラム回転数(r)を用いて次式で評価する。

$$\Delta D_{Pr}/\Delta L = r \cdot \delta \quad [mm/m] \quad \dots\dots\dots (4)$$

δ は、 DI_{15}^{30} の2次式で与え、 r は、本シミュレーションでは炉内で一定(0.13)と仮定した。

2.3 高炉半径方向モデルによるコークス劣化の推定と、高炉操業への影響

(1) 高炉半径方向モデルの概要と基礎実験結果の組み込み方法

高炉半径方向モデルは、操業条件(送風条件、装入物分布)を与えることにより、炉内状態を推定するモデルであり、ガス、固体、液体の3相について、各々の流線に沿って熱、反応の分布を同時解析し、さらに、流線と炉内状態変数(温度・粒度・空隙率)との間の相互作用をくり返し計算することにより、解を求めるものである。

従って、反応量と粒度・強度劣化との関係を用いることにより、装入物の炉内における、粒度・強度の変化を、層頂から順次、炉下部に向かって計算できる。

(2) シミュレーション結果と実炉計測値との対比

Fig. 1に、シミュレーション結果を示す。

コークス強度は、ソリューションロス反応帯での基質強度の低下により、融着帯上部で急激に低下する。この強度低下により、機械的破碎および摩耗による、コーク粒度の低下が顕著となる。

コークス粒度は、ソリューションロス帯以下で、顕著に劣化し、羽口前へ向かってさらに低下する。羽口レベルでのコークス強度、粒度の半径方向分布はFig. 2に示すように、CSRの上昇とともに向上する。

CSRの向上により、ソリューションロス反応の吸熱量が減少するため、炉内ガスおよび固体温度が上昇し、同時に融着帯も上昇する。この影響により、ガスのクロスフロー領域も、炉上部に移動する。

シャフト上段ゾンデにより測定された半径方向ガス温度分布は、Fig. 3に示すように、CSRの上昇とともに上昇しており、シミュレーション結果と同様の傾向を示すことから、シミュレーション結果が妥当であると判断される。

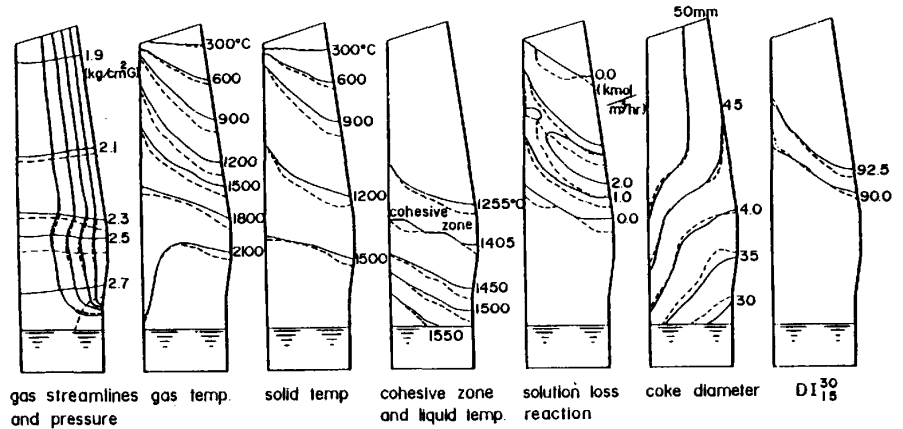


Fig. 1 Effect of CSR on the inner conditions of the B.F. (— CSR = 70, - - - CSR = 40)

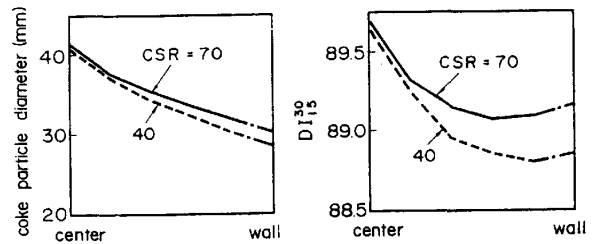


Fig. 2 Coke size and strength distribution on the level of tuyere.

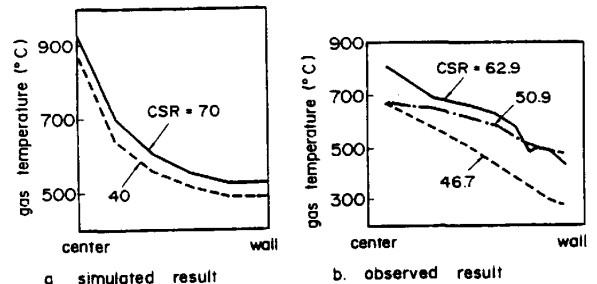


Fig. 3 Temperature distribution on the level of upper shaft.

3. 高炉内におけるコークス粉の流動特性

前述のとおり、高炉内コークスは劣化し、粉を発生しながら、炉下部に至るが、コークス粉発生量の定量的評価は、現状では困難である。しかしながら、高炉内ガス流れは、コークスの劣化によって生じた粉を含んだ固気 2 相流と見なす方が妥当であると考え、以下の実験を試みた。

3.1 実験装置および方法

Fig.4 に示すごとく、粉体供給装置より、充填層中へ、ガスとともに粉体を吹き込み、出側の粉体回収装置により、粉を回収した。実験例を Fig.5 に示す。すなわち、粉体供給開始とともに圧力損失が上昇し、粉体回収量も増加する。この供給量と、回収量の差を蓄積量として計測した。

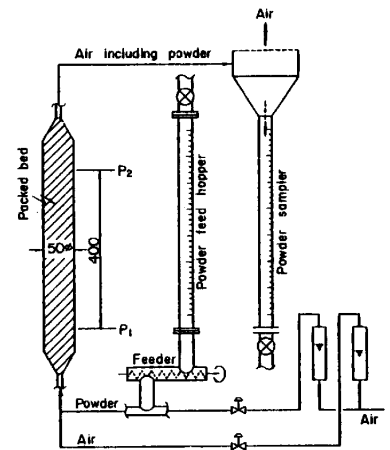


Fig.4 Experimental apparatus

3.2 実験結果

ガス流速と、圧力損失の関係を、Fig.6 に示す。低ガス流速域において、粉体蓄積の影響により、ガス圧力損失が急上昇し、粉蓄積効果の大きいことがわかる。

粉体供給量を増加させた場合、Fig.7 に示すように、粉体の蓄積量の増加とともに、圧力損失も増加するが、粉体供給量を停止しても、ガス流速が 0.43 m/sec より低い場合には、圧力損失は、粉のない場合の基準値には戻らない。すなわち、圧力損失変化分 (= 粉体存在下での充填層圧力損失 - 粉体のない場合の充填層圧力損失) と粉体供給量との関係は、Fig.7 に示すように低ガス流速の場合に、縦軸との切片を持つことになる。

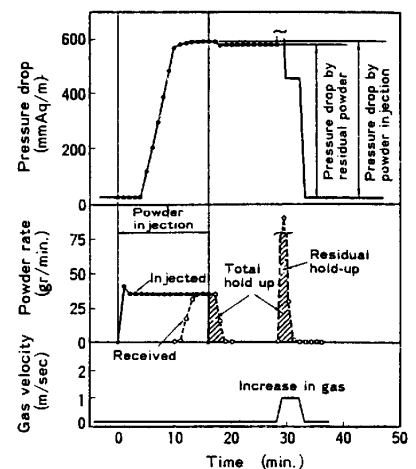


Fig.5 Procedure of experiment for low gas velocity.

充填物の粒径および粉体の粒径を変化させた場合、Fig.8 に見られるように、次の結果がえられた。(1) 充填物の粒径が大きいほど、高ガス流速域における圧力損失変化分は小さいが、逆に、低ガス流速域においては、大きくなる。

(2) 粉体の粒径が大きいほど、高ガス流速域における圧力損失変化分は小さいが逆に、低ガス流速域においては、大きくなる。

3.3 モデル化とシミュレーション結果

以上の実験結果をもとに、

粉体存在下での充填層圧力損失

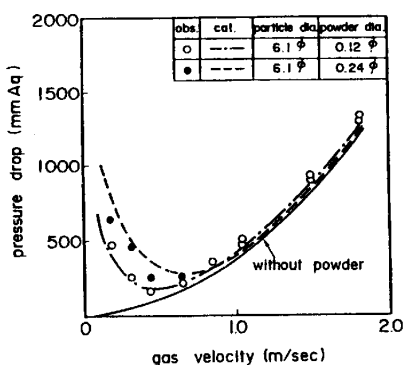


Fig.6 Relationship between gas velocity and pressure drop.

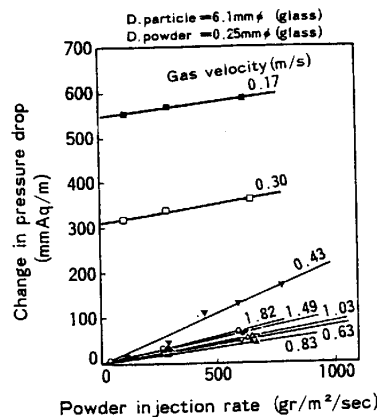


Fig.7 Change in pressure drop caused by powder injection.

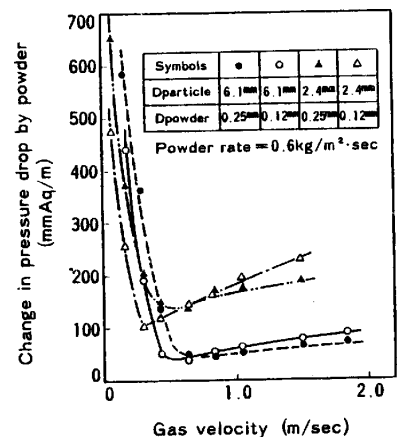


Fig.8 Effect of the particle and powder size on the change in pressure drop.

を、次の手順でモデル化した。

(1) 粉体運動の駆動力は、「粉体群を、充填粒子空隙内に形成されるもう一つの充填層」と見なした充填層内のガス圧力損失に等しい。(2) 粉体の定常運動状態では、粉体にかかる重力と、粉体および充填粒子の衝突による運動量変化の和が、粉体運動の駆動力とバランスする。(3) 固気2相流圧損は、ガスの粉体充填層による圧力損失と、粒子充填層による圧力損失の和に等しい。

実験に対応させた条件下での計算結果は Fig.6 に示すごとく、よい一致を示した。さらに、実炉に対応させて30mmのコークス充填層中を、コークス粉および、鉬石粉を含有するガスが流れた場合の、ガスの運動エネルギーと、通気抵抗の関係を Fig.9 に示す。このような低流速域における著しい通気悪化現象は、Fig. 10 に示すように、実高炉においても、減産過程で認められており、コークス粉径として0.3~1mm、鉬石粉径として0.3mmを想定すれば、定性的には、十分説明可能なことが判明した。

高炉内での半径方向粒度偏差を想定し、粒子径の異なる充填層が、並列している場合に、本モデルを適用した。その結果は、Fig. 11 に示すように、ガス流速低下とともに、小粒子充填層に、粉体が滞留しはじめるので、清浄ガス流れの場合と比較して、大粒子充填層中へのガスの偏流が助長される。この現象は、減産下における炉内ガス流れの偏流助長を示唆するものと考えられる。

4. 結 言

高炉内コークスの挙動を、反応および機械的衝撃による劣化過程と、劣化によって生じた粉の運動特性とに分け、それぞれ基礎実験および、モデルシミュレーションを実施し、次の結果を得た。

- (1) コークス粒度および強度は、ソリューションロス帯以下で急激に低下し羽口前に向かって更に低下する。また、CSRの上昇により、羽口レベルでのコークス粒度および強度は上昇する。
- (2) 粉体の存在を考慮すると、ガス流速を低下させた場合、粉の蓄積により圧損が上昇する。また粉蓄積は、炉内の通気性偏差を助長する働きを有する。

今後は、高炉内での粉の発生および消滅を定量化するとともに、それらを組み込んだ、粉蓄積挙動の検討を進め、高炉総合モデルに反映させることにより、高炉内における、コークスの総合評価へと発展させたい。

参考文献

- 1) 試験溶鉬炉第26次操業報告(1975)
- 2) 林、須賀田、斧、西、山口、中込 : 鉄と鋼、69(1983)A.157
- 3) 羽田野、宮崎、岩永 : 鉄と鋼、65(1979)10, p.1365
- 4) 宮崎、梶原、山岡 : 鉄と鋼、70(1984)4, s.90 5) 羽田野、栗田 : 鉄と鋼、66(1980)13, p.1898

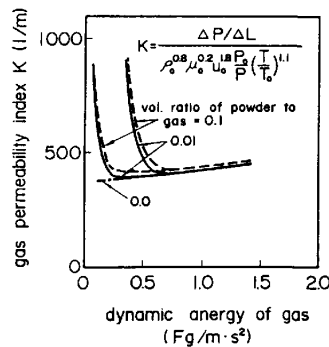


Fig.9 Gas permeability based on the theory of two phase flows.

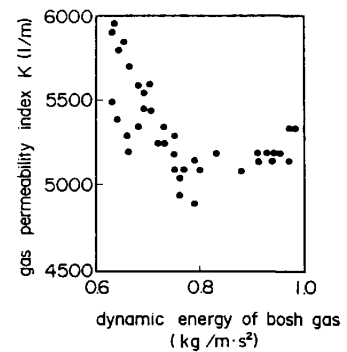


Fig.10 Relationship between gas permeability and dynamic energy of bosh gas. (Kokura 2 BF)

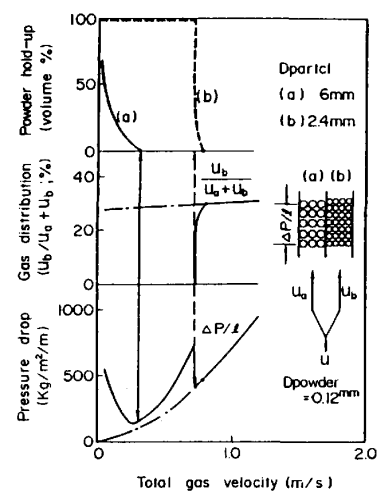


Fig.11 Gas flow including powder in parallel packed beds.