

討 2 混合層形成を考慮した装入物分布シミュレーションモデルの開発と実炉への適用

住友金属工業(株)中央技術研究所 ○梶原 義雅 稲田 隆信
 小倉製鉄所 芳木 通泰 横井 毅
 和歌山製鉄所 神保 高生

1. 緒 言

高炉炉頂部における装入物分布は、炉内のガス流れを支配する主要因であるとともに、ガス流れを介して炉内における化学反応および気体-固・液体間の伝熱に大きな影響を与える。従って高炉操業目的（低コークス比操業、炉壁保護操業等）に応じて炉頂部の装入物分布を適正に制御することが必要である。近年、炉頂部の装入物分布と融着帯形状の関係が明らかになるにつれて、装入物分布制御の重要性が再認識され、実操業において積極的に種々の装入物分布制御が試みられている。

装入物分布の主構成因子である鉱石とコークスの重量比(O/C)の半径方向分布に及ぼす諸要因のうち1)送風の存在¹⁾³⁾2)半径方向荷下がり速度分布の存在⁴⁾⁵⁾については研究が進んでいるが、3)鉱石装入時のコークスの“流れ込み”による炉中心混合層の形成についての定量的研究は少ない。⁶⁾⁷⁾

本報告では炉中心混合層形成現象の実験的説明および混合層形成も考慮した装入物分布シミュレーションモデルの開発と実炉適用結果について述べる。

2. 混合層形成現象の説明

2.1 実炉填充試験⁸⁾

混合層形成現象を把握するため、実炉填充時に、磁気センサーを使用して混合層形成量を測定した。使用した磁気センサーはソレノイドコイルに交番電流を流し、周辺の物質の透磁率変化を電圧変化としてとりだす方式のものであり、Fig.1に示すように、±50mmの層境界検出能力をもっている。填充試験に使用した鉱石は、装入時の鉱石種別の偏析度の違いによる測定誤差を防止するため全量焼結鉱とした。

実炉填充試験結果をFig.2, 3に示す。図中の焼結鉱層、混合層、コークス層はコークス体積%が0~25, 25~75, 75~100%の層として示した。いずれの場合も、鉱石装入時の落下衝撃によってコークス層表面の一部が削りとられて炉中心方向に押し流され、炉中心近傍で広範囲にわたる混合層を形成している。コークス層のプロファイルは鉱石の装入によって大きく変化する。填充試験で得られた主な知見は次の通りである。

- 1) ムーバブルアーマ (M. A.) を使用すると、コークス表面に沿った方向の鉱石速度成分が増加し、混合層形成量が増加する。
- 2) 炉内への1回の鉱石装入量を増加すると（バッチ装入からチャージ装入に移行すると）混合層形成量は増加する。
- 3) 鉱石層上にコークスを装入する場合、コークス装入量を増加しても混合層はほとんど形成されない。
- 4) 鉱石の落下衝撃エネルギーが大きい場合、炉中心部では混合層の層厚増加とともにコークス単味層の増加もみられた。更に混

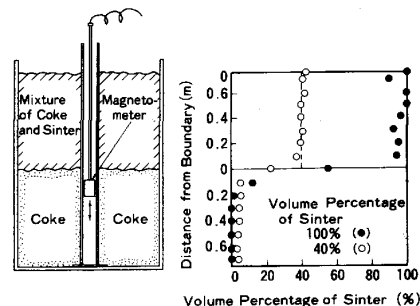


Fig.1. Characteristics of magnetometer.

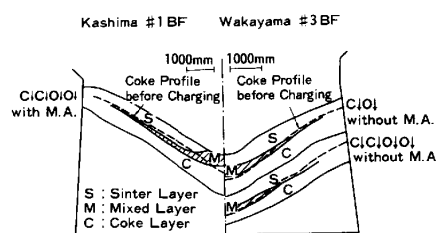


Fig.2. Measured results on mixed layer formation by magnetometer at furnace fillings.

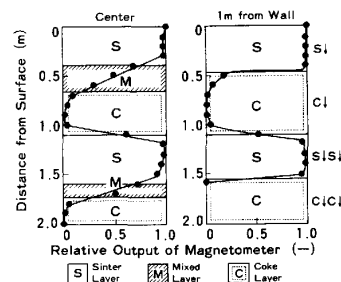


Fig.3. Measured results on mixed layer formation by magnetometer at Wakayama #3BF.

合層が鉍石層の表面に露出している場合も観察された。

半径方向のコークス層厚変化(=コークス単味層+混合層中のコークス層厚の変化)はFig. 4に示すように炉半径で無次元化した炉中心からの距離0.36程度を境にほぼ直線的に変化している。

2.2 扇形実機大模型実験

混合層形成現象を詳細に検討するため、小倉2高炉の実機大扇形(20°)模型を製作し、混合層形成に及ぼす諸要因(鉍石装入量、鉍石装入速度、鉍石装入時のM.A.ノッチ、コークス層のプロファイル、鉍石粒径など)の影響を調査した。装入後の鉍石をエポキシ系樹脂で固定してサンプリングし、混合層形成量の測定に供した。鉍石は全量焼結鉍を使用した。

(1) 焼結鉍装入量の影響

Fig. 5に装入速度を一定(0.32 t/sec)にした場合の装入量の混合層形成量(1回の焼結鉍装入で形成される混合層の全体積)に及ぼす影響を示す。実炉充填試験結果と同様、装入量を増加すると、混合層形成量は増加する。装入量が極端に少ない場合(本実験条件では装入量<0.5 t)、混合層はほとんど形成されない。装入量が増加するに従って混合層形成量の増加量は少なくなる。

(2) 焼結鉍装入時のコークスの移動状況

焼結鉍装入時のコークスの炉中心方向への移動現象を調査するため、半径方向位置別に色分けしたコークスを配置し、焼結鉍装入後の着色コークスの半径方向の堆積分布を測定した。(Fig. 6)炉内に落下してくる焼結鉍の衝撃を直接受ける炉壁部のコークス(図中○印)は形成された混合層のほぼ全域に存在しており、炉中心部への到達量が多いことが注目される。一方、中間部のコークス(図中△印、◇印)の半径方向の堆積分布は、焼結鉍装入前の位置付近で最大値を示し、それより炉芯側では急激に存在量が低下して炉中心部への到達量は少ない。

(3) 混合層形成過程

装入速度一定条件下で装入量を増加させた時の混合層形成状況の変化を混合層形成の経時変化とみなすと混合層形成過程は次のように分割できる。(Fig. 7)

i) 装入初期：炉壁部のコークスが焼結鉍の落下衝撃によって削りとられて混合層を形成し、中間部のコークスも一部まきこみながら炉中心に到達する。

ii) 装入中期：斜面を降下する焼結鉍によってコークス層接触面での混合層形成が進行し、形成された混合層は低速度で炉中心方向に押し流される。

iii) 装入末期：コークス層上の焼結鉍層厚が増加し、表層の焼結鉍の動きはあるものの新たな混合層の形成は生じない。

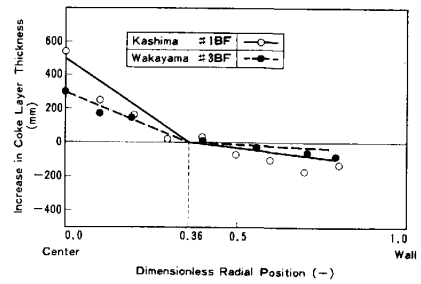


Fig. 4. Change of coke layer thickness in the radial direction.

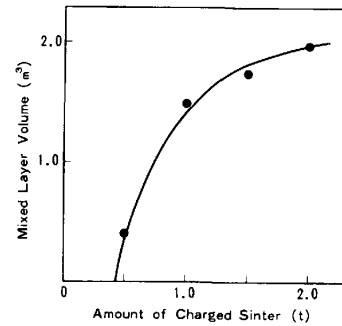


Fig. 5. Effect of amount of charged sinter on mixed layer volume.

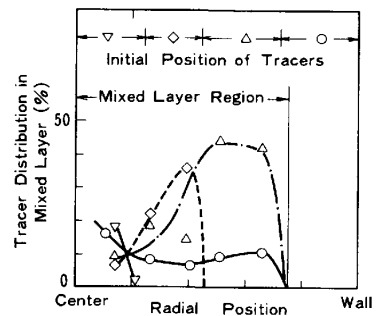


Fig. 6. Behavior of coke movement caused by charging of sinter.

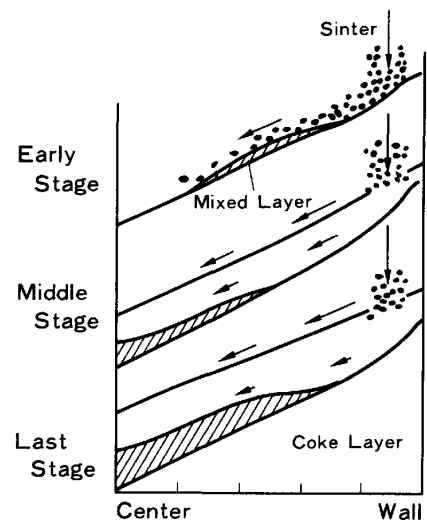


Fig. 7. Process of mixed layer formation.

3. 装入物分布シミュレーションモデルの開発

3.1 シミュレーションモデルの概要

炉頂部の装入物分布を総合的に推定できる装入物分布シミュレーションモデルを開発した。O/C分布の計算においては、送風の存在・半径方向荷下がり速度分布の存在による装入物プロファイルの変化とともに、鉍石装入時の混合層形成も考慮した。混合層形成量の指標として炉中心におけるコークス層厚増加(ΔLc : mm)を採用すると、ΔLcは装入条件から次の実験式で定量的に評価できる⁸⁾。(Fig. 8)

$$\Delta Lc = 3.49 \times 10^{-4} E_M - 136$$

ここで E_M : 混合層形成エネルギー (kgm²/sec²)

半径方向粒径分布は実炉充填試験結果を使用し、空隙率分布は山田⁹⁾の式を用いて評価した。

装入物分布計算結果をガス流れモデル¹⁰⁾に入力し、半径方向のガス流分布、不均一性指数 (I.O.G.)¹⁰⁾を計算した。

3.2 O/C分布に及ぼす諸要因の影響の評価

シミュレーションモデルを使用してO/C分布に及ぼす前述の3要因の影響度を推定した結果をFig. 9に示す。M.A.の使用の有無によらず、混合層形成を考慮すると炉中心近傍のO/Cが顕著に低下している。混合層形成のみを考慮した場合(図中破線)と前述の3要因をすべて考慮した場合(図中実線)のO/C分布の差は少ない。従って3要因の中では混合層形成のO/C分布に及ぼす影響が最も大きい。高炉操業において混合層形成量の制御によるO/C分布制御も重要であるといえる。

3.3 シミュレーションモデルの適用例¹¹⁾

シミュレーションモデルの適用例として適正コークスペースの試算を行なった。Fig. 10に示すように装入O/C一定の条件下でコークスペースを増加すると、1回の装入鉍石量が増加して、鉍石装入時のコークスの“流れ込み”により炉中心部O/Cの低下、炉壁部O/Cの上昇が生じる。しかしコークスペースを過大にすると炉中心部の装入物粒径が増加して炉中心部ガス流速が増加する結果、I.O.G.は悪化する。即ち半径方向のガス量と鉍石量のバランスの観点から適正コークスペースが存在する。Fig. 10の場合、適正コークスペースの計算値は20 tであり、既報告値¹²⁾とほぼ対応している。

4. 実操業への適用

4.1 オールコークス操業

小倉2高炉はエネルギー事情から火入れ立上り後もオールコークス操業を継続することになり装入物分布制御による炉下部の不

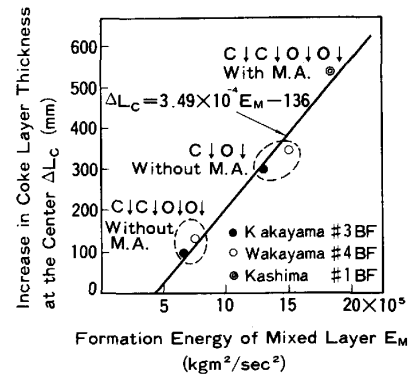


Fig. 8. Relation between formation energy of mixed layer and increase of coke layer thickness at the center of blast furnaces.

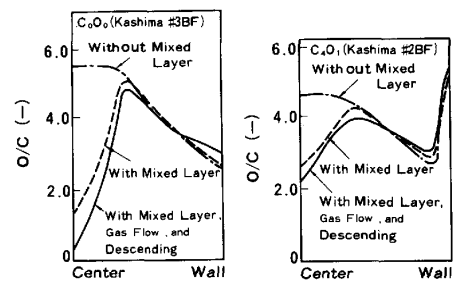


Fig. 9. Effects of various factors on O/C distribution.

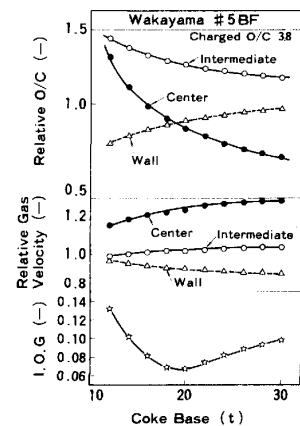


Fig. 10. Effect of coke base on burden and gas distribution at Wakayama #5BF.

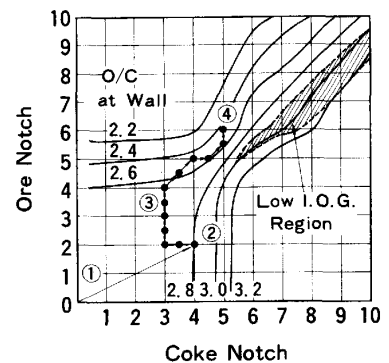


Fig. 11. Transition of movable armor notch in all-coke operation at Kokura #2BF(2nd).

活性化”防止が課題であった。そこで装入物分布シミュレーションモデル計算結果をガイドとしてM.A.ノッチの適正選択を図った。Fig. 11,12にM.A.操作線図と操業推移を示す。期間①はM.A.を使用しておらず炉壁部O/Cが低く、炉頂ガスゾンデデータ・炉壁温度からも明らかなように炉壁ガス流が過多になっており、燃料比は高目に推移した。期間②でM.A.をC₄O₂に設定し炉壁部O/Cを増加させた結果、ガス利用率が改善され燃料比は483kg/ptまで低下した。しかし昭和56年11月から通気性・荷下がりが悪化し、炉体ボーリングで“不活性帯”が確認されたので、期間③では炉壁部O/C低下を意図したM.A.操業変更を行なったが、アーマ使用域が部分反撥域にあるため効果は小さかった。期間④では炉壁部O/Cを更に低下させて炉壁ガス流を促進させた結果、荷下がり是好転し、“不活性帯”は消滅した。

4.2 4バッチ不等量装入

現状のMAノッチ変更巾では炉壁部O/Cの変化量が大きい、O/C分布微調整技術の一つとして、4バッチ不等量装入の実炉試験を実施した。Fig. 13に小倉2高炉の試験操業結果を示す。4バッチ装入(C_I↓C_{II}↓O_I↓O_{II})においてO_Iの装入量を増加すると鉍石装入時の混合層形成量が増加し、ガス流の中心流化が予測された。炉壁温度の推移はガス流の中心流化を裏付けているが、炉頂ガスゾンデデータは必しも同一傾向を示しておらず、今後の詳細検討が必要である。

5. 結 言

鉍石装入時のコークスの“流れ込み”による炉中心部混合層の形成は炉頂部の半径方向O/C分布に大きな影響を及ぼすことを実験およびシミュレーションモデルで確認した。今後は混合層形成も考慮した装入物分布シミュレーションモデルの実炉適用の促進を図るとともに混合層形成メカニズムの解明を行なう予定である。更にO/C分布だけでなく、粒径分布・空隙率分布に関する基礎研究・実炉試験の進展によって、総合的な装入物分布制御技術の確立を図る必要がある。

参 考 文 献

1) 杉山 喬ら：鉄と鋼, 62(1976), S39	2) 西尾浩明ら：鉄と鋼, 66(1980), p. 133
3) 成田貴一ら：鉄と鋼, 66(1980), p. 459	4) 飯塚元彦ら：日本鋼管技報 85(1980), p.133
5) 成田貴一ら：鉄と鋼, 65(1979), p. 44	6) 彼島秀雄ら：鉄と鋼, 69(1983), S57
7) 神坂栄治ら：鉄と鋼, 70(1984), S47	8) Y.Kajiwaraら：Trans I S I J, 23(1983), p. 1045
9) 山田孝雄ら：川崎製鉄技報, 6(1974), p. 16	11) Y.Kajiwaraら：Trans I S I J, 24(1984), p. 379
10) 羽田野道春ら：鉄と鋼, 63(1977), p. 217	
12) 日本鉄鋼協会編：鉄鋼便覧(第3版), 1979, p. 297	

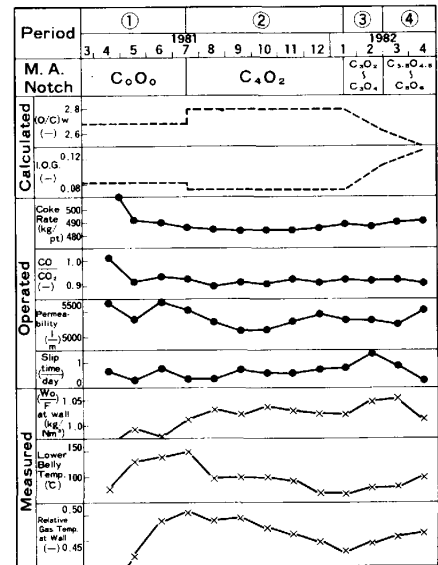


Fig.12. Performance of all-coke operation at Kokura #2BF(2nd).

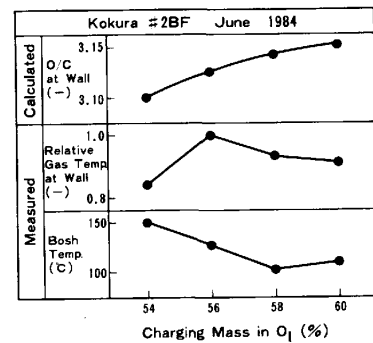


Fig.13. Performance of 4 batch charging with change of charging mass in O₁.