
高炉操業シミュレータの開発と溶銑シリコン低減への適用

Development of a Blast Furnace Operation Simulator and its Application for Reduction of Si Content in Pig Iron

佐藤 健(Takeshi Sato) 野内 泰平(Taihei Nouchi) 木口 満(Mitsuru Kiguchi)

要旨：

劣質原燃料使用下での安定操業の継続と高品質溶銑の供給を達成するための操業設計ツールとして、高炉操業シミュレーターを開発した。本シミュレーターは（１）装入物の堆積形状を高精度で予測（２）融着層のガス流れ、伝熱を層構造を考慮してモデル化（３）装入物の炉内粉化挙動をモデル化という特徴を有しており、操業変更の結果を高精度で予測できる。水島製鉄所第３高炉では本シミュレーターを活用して操業設計を行い、大幅な装入物分布の変更により低 Si 化を達成した。

Synopsis：

A total blast furnace simulator has been developed for the planning of maintaining the best stable operation performance with inferior burden materials. The simulator has the following features: (1) Layer profile of burden materials is predicted with high accuracy. (2) Gas flow and heat transfer in the cohesive zone are modeled by focusing, with a special attention paid, on layer structure. (3) Size degradation of burden materials is modeled. The simulator has been used to precisely predict the results of operational changes for various purposes such as, [Si] reduction operation and stable operation with small size sinter. In this paper, the [Si] reduction at No.3 blast furnace at Mizushima Works is described as a typical application of the simulator to deal with the changes of charging sequence at the bell-less top.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

高炉操業シミュレータの開発と 溶銑シリコン低減への適用*

川崎製鉄技報
29 (1997) 1, 30-36

Development of a Blast Furnace Operation Simulator and its Application for Reduction of Si Content in Pig Iron



佐藤 健
Takeshi Sato
技術研究所 製銑研究
部門



野内 泰平
Taihei Nouchi
技術研究所 製銑研究
部門



木口 満
Mitsuru Kiguchi
水島製鉄所 製銑部製
銑技術室 主任(課長)

要旨

劣質原燃料使用下での安定操業の継続と高品質溶銑の供給を達成するための操業設計ツールとして、高炉操業シミュレータを開発した。本シミュレータは(1)装入物の堆積形状を高精度で予測(2)融着層のガス流れ、伝熱を層構造を考慮してモデル化(3)装入物の炉内粉化挙動をモデル化という特徴を有しており、操業変更の結果を高精度で予測できる。水島製鉄所第3高炉では本シミュレータを活用して操業設計を行い、大幅な装入物分布の変更により低Si化を達成した。

Synopsis:

A total blast furnace simulator has been developed for the planning of maintaining the best stable operation performance with inferior burden materials. The simulator has the following features: (1) Layer profile of burden materials is predicted with high accuracy. (2) Gas flow and heat transfer in the cohesive zone are modeled by focusing, with a special attention paid, on layer structure. (3) Size degradation of burden materials is modeled. The simulator has been used to precisely predict the results of operational changes for various purposes such as, [Si] reduction operation and stable operation with small size sinter. In this paper, the [Si] reduction at No.3 blast furnace at Mizushima Works is described as a typical application of the simulator to deal with the changes of charging sequence at the bell-less top.

1 緒 言

近年、製銑分野においては安価原燃料の使用量拡大による溶銑コストの低下が図られており、当社においても微精炭や高結晶水鉱石の使用が積極的に進められている。一方、高炉に対しては従来にも増して高品質溶銑の供給が要求され、さらに長寿命化のニーズも高まっており、低品位の焼結鉱およびコークス使用下の安定操業技術の確立が大きな課題である。このような相反する要求に答えていくには短期間での大きな操業変更にはトライする必要があるとされ、広範囲な条件での操業設計のできる、より高度な操業予測技術が必要とされる。当社ではこのような状況を踏まえ、2次元高炉数学モデルをベースに高炉操業シミュレータを開発した。本シミュレータは、装入物分布や原燃料の品質の変更が操業に及ぼす影響の評価が可能であり、操業予測の有効なツールとして各高炉で活用されている。本報告ではシミュレータの内容、その活用例として水島製鉄所第3高炉において装入物分布を大幅に変更して低Si化を図った事例について述べる。

2 高炉操業シミュレータの構成

高炉操業シミュレータは装入物分布予測モデル¹⁾と高炉2次元定常モデル^{2,3)}から構成される。両者は結合されており、装入物分布の変更が出銑成分やガス利用率などの操業結果に及ぼす影響をシミュレートできる。さらに炉内の温度や還元率、ガス成分、融着帯形状などが予測でき、炉内状況を定量的に把握することが可能である。以下に、おのおののモデルの特徴について説明する。

2.1 装入物分布予測モデル

本数式モデルは以下のベルレス高炉特有の機能をシミュレートできに特徴がある。Fig. 1 に計算フローを示す。

- (1) 炉頂バンカー振替えによる装入物分布の円周方向偏差の定量化(円周方向の装入物分布の偏差を計算するために、垂直シュート内の原料の偏流挙動を模型実験に基づき定量化)
- (2) 細粒焼結鉱使用時の装入物分布の評価
- (3) 炉頂バンカー流量調整ゲートによる排出量制御のシミュレート
- (4) 分配シュート上での粒子の運動(コリオリ力、重力、摩擦力、

* 平成9年2月17日原稿受付

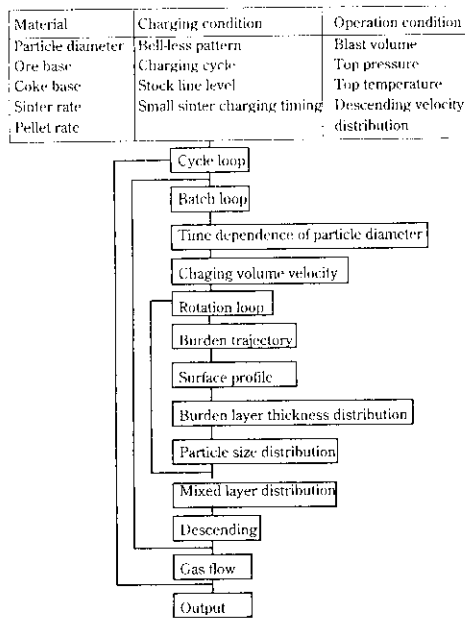


Fig. 1 Flow chart of a bell-less burden distribution model

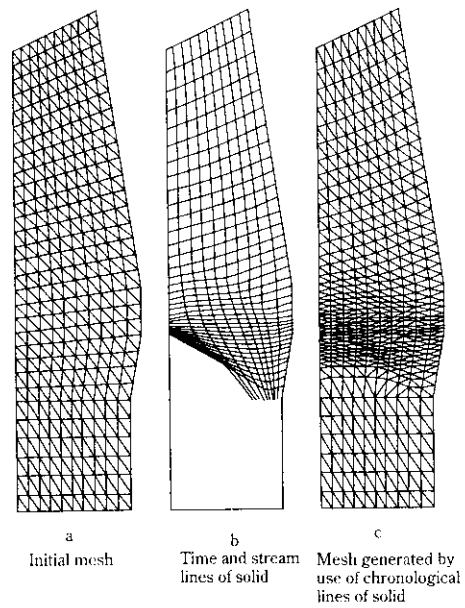


Fig. 3 Mesh generation by use of chronological lines of solid

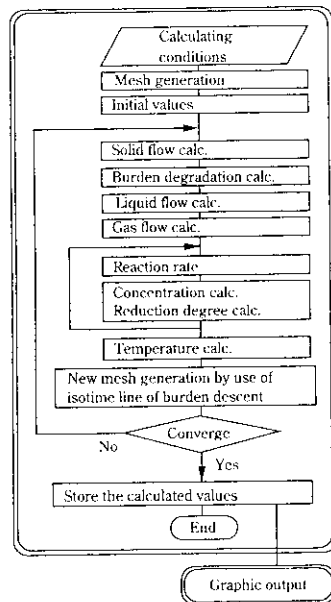


Fig. 2 Flow chart of a two-dimensional blast furnace mathematical model

遠心力などによる原料の振り上げを評価し、落下軌跡をシミュレート)

- (5) 鉱石落下エネルギーの計算に基づき混合層形成をシミュレート
- (6) 旋回ごとに粒度偏析を評価し、堆積時の半径方向粒度分布を計算
- (7) 2次元ガス流れモデルを組み込みガス流れの堆積形状への影響を評価
- (8) 炉頂バンカー出口から炉内へ堆積するまでの過程をシミュレートし、千葉製鉄所第3高炉、水島製鉄所第3高炉の炉頂装入装置に応じた計算が可能

本モデルを用いることにより、傾動パターン変更時の装入条件の変更に伴う炉内の堆積挙動および炉内でのガス流れの挙動を計算で

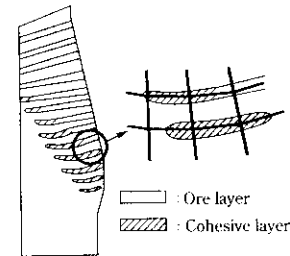


Fig. 4 Mesh formation corresponding to layer structure

きる。したがって、操業実験に先立って目的に応じた最適な装入パターンを見出すことが可能である。

2.2 高炉モデル

高炉モデルは、炉内の諸現象に対応した複数のサブモデルより構成され、Fig. 2 に示した計算フローにしたがって定常状態における炉内の2次元的分布が得られる。以下に、モデルの内容を説明する。

(1) メッシュの発行

計算に用いるメッシュは Fig. 3 に示すように後述の固体流れモデルから計算される層構造と一致するように発行される。さらに Fig. 4 に示すようにメッシュの上面および下面が鉱石層として取り扱われ、融着層でのガス流れおよび伝熱が計算される。計算は直接差分法で行い、ガスおよび固体流れは3角メッシュで、温度および濃度は4角メッシュを用いて計算される。速度は各辺に垂直な流速ベクトルとして示され、速度ポテンシャルおよびガス圧力は3角形の外芯上に定義される。温度および濃度はメッシュの代表値として取り扱われる。

(2) 固体流れ

固体の流れはポテンシャルフローとして取り扱い、運動方程式(1)および連続の式(2)を用いてモデル化されている。

$$-\text{grad}(\phi_s) = k u_s \dots \dots \dots (1)$$

ϕ_s : 速度ポテンシャル (m²/s)

k : 装入物降下抵抗

U_s : 装入物降下速度(m/s)

$$-\text{div}(u_s) + R_s = 0 \quad (2)$$

R_s : 湧き出し量(1/s)

また、高炉縮尺模型による実験結果⁹⁾を基に炉芯上に擬停滯域を設定し、炉芯、擬停滯域、その他の領域で(1)式における降下抵抗 k の値を変えている。

(3) 装入物粒径変化

焼結鉱については岩永の還元粉化式⁹⁾を、コークスについては羽田野の粉化式⁹⁾をベースに炉内の粒径低下をモデル化する。粉化は平均粒径の低下として取り扱われ、固体流れモデルと結合して粉化後の粒子個数のバランスをとっている。

(4) 液流れ

実炉の液流れには不明点が多く、その挙動は解明されていない。本モデルでは鉱石および脈石分は溶融後、炉体形状に添って滴下するという仮定を置いた。

(5) ガス流れ

ガス流れは2次元に拡張した Ergun の式⁹⁾(3)式および連続の式(4)式を用いて計算される。

$$-\text{grad}(P) = KG_g \quad (3)$$

$$K = f_1 + f_2 |G_g|$$

$$f_1 = 150 (1 - \epsilon)^2 \mu_g / (\phi d_p)^2 \epsilon^3 \rho_g$$

$$f_2 = 1.75 (1 - \epsilon) / (\phi d_p) \epsilon^2 \rho_g$$

P : ガス圧力 (Pa)

f_1, f_2 : エルガンの抵抗係数 (1/s, m²/kg)

ϵ : 空間率

ϕ : 形状係数

d_p : 粒子径 (m)

ρ_g : ガス密度 (kg/m³)

$$-\text{grad}(G_g) + R_g = 0 \quad (4)$$

G_g : ガス質量流速 (kg/m²·s)

R_g : 湧き出し量 (kg/m³·s)

前述のように本モデルでは層構造とメッシュを一致させてお

り、融着層における通気抵抗は Fig. 5 に示した手法で計算される。

(6) 伝熱

炉内温度分布は式(5)、Fig. 6 に示した4角メッシュにおける熱バランスにより計算される。

$$\begin{aligned} & \sum [A_i \text{Max}(G_{gi}, 0) C_{pgi} T_{gi}] - \sum [A_i \text{Max}(-G_{gi}, 0) C_{pgi} T_{gi}] \\ & + E_{gc} (T_{co} - T_{go}) + E_{go} (T_{go} - T_{co}) \\ & + V \sum [\eta_g (-\Delta H) + Q_{cg} + Q_{og}] R_n = 0 \quad (5) \end{aligned}$$

$$\text{Max}(a, b) = a \quad (a \geq b)$$

$$= b \quad (a < b)$$

A : メッシュ境界面積 (m²)

C_p : 平均比熱 (J/kg)

T : 温度 (K)

E : 熱交換係数 (W/K)

V : メッシュ体積 (m³)

$-\Delta H$: 反応熱 (W/m³)

Q : 不均一反応の顕熱移動量 (W/m³)

η_g : 反応熱取得率

ここにはガス相の熱バランスを示したが、コークス、鉱石相についても同様に計算される。各相間の熱交換は、塊状帯、融着帯、滴下帯でそれぞれ挙動が異なる。おのおのの領域の熱交換係数 E を Fig. 7 に示す。粒子(液滴)－ガス間熱伝達係数 h_p は

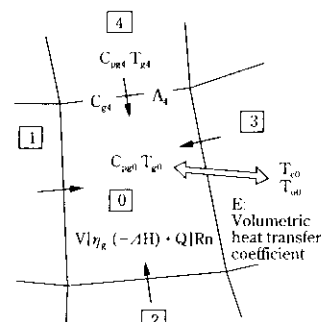


Fig. 6 Heat balance of gas phase in square mesh

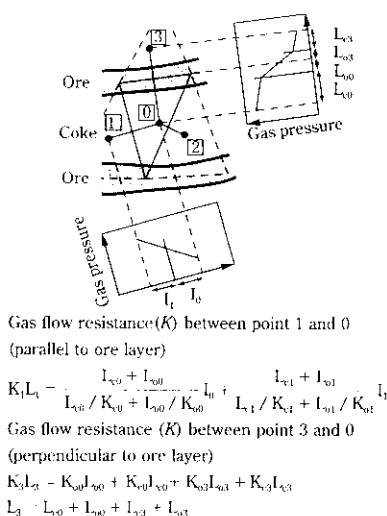


Fig. 5 Mathematical representation of gas flow resistance parallel to and perpendicular to ore layer

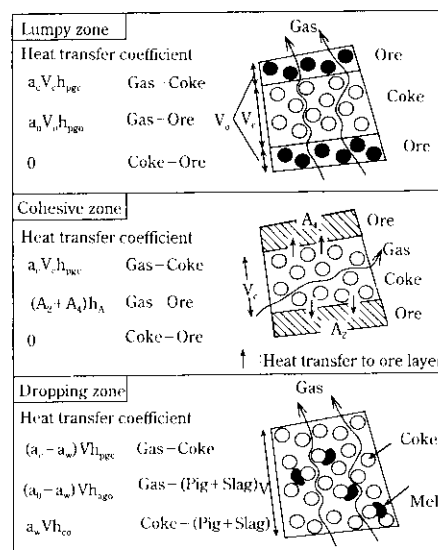


Fig. 7 Gas flow and heat exchange in each zone of blast furnace

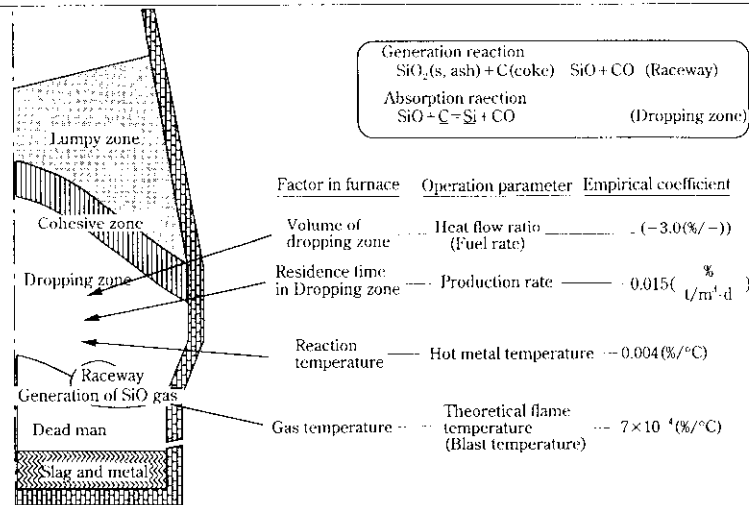


Fig. 9 Major factors influencing on [Si]

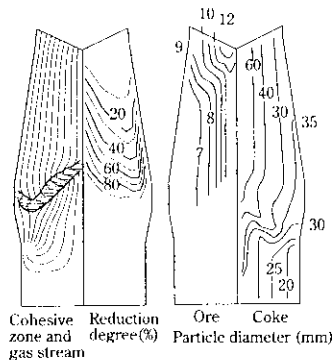


Fig. 8 Typical output of the simulator

Ranz⁹⁾の式を、融着層-ガス間の総括熱伝達係数 h_A は Beek¹⁰⁾が求めた充填塔における炉壁の境界熱伝達係数 h_s と融着層の有効熱伝導率 λ_{en} ¹⁰⁾から、次式のように表わされる。

$$h_A = 1 / (1/h_s + 0.5 \times L_0/\lambda_{en}) \quad (6)$$

液滴-充填層間の熱伝達係数 h_{cm} は強制対流熱伝達の式¹¹⁾を用いた。

(7) 反応

鉱石のガス還元、ソリュションロス反応、ガスシフト反応、直接還元については鞭らが求めた総括反応速度式¹²⁻¹⁴⁾を用いた。Si 移行反応として¹⁵⁾、滴下スラグ中の SiO_2 とコークスの反応による SiO ガスの発生¹⁶⁾、レースウェイにおけるコークスアッシュからの SiO ガスの発生、 SiO ガスから溶銑への Si の吸収¹⁷⁾が考慮されている。

本シミュレーターは全社ネットワークに接続されたワークステーション上に構築され、開発主体となった技術研究所はもとより、千葉製鉄所、水島製鉄所から直接シミュレーションの計算を行うことができる。本シミュレーターを用いた融着帯形状、ガス流線、還元率、鉱石およびコークス粒径の予測例を Fig. 8 に示す。

3 実操業への適用

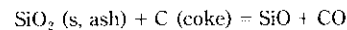
本シミュレーターは、高 PC 比、高 SS 比操業などを行う際の操業予測、あるいは操業解析に用いられ、多くの成果を上げている。

本論文では、シミュレータの実操業への新しい適用例として水島製鉄所第3高炉での溶銑中 Si 濃度 ([Si]) 低減について述べる。

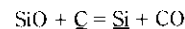
3.1 [Si] に影響する操業因子

コークスや鉱石中の SiO_2 は以下の2つの反応を介して溶銑中に移行すると考えられている。

・ガス化反応



・吸収反応



溶銑中への Si の移行は反応速度が律速しており、反応領域(滴下帯)の滞留時間(出銑比)や雰囲気温度に支配される。

[Si] に影響する様々な操業要因とその影響係数は良く知られている。中でも熱流比、出銑比、溶銑温度、理論燃焼温度は操業変動も大きく [Si] への影響が大きい。Fig. 9 にこれらの影響係数と関係する炉内要因を示す。

3.2 水島製鉄所3, 4高炉の操業因子の比較

水島製鉄所3, 4高炉における1995年1~5月の [Si] の推移を Fig. 10 に示す。水島製鉄所第3高炉の [Si] は4高炉に比較して高いレベルにある。水島製鉄所3, 4高炉の [Si] の差異を先の影響係数を用いて操業要因別に Fig. 11 に示す。溶銑温度と理論燃焼温度 (IFT) は3高炉の方が低く、[Si] が高い原因ではない。出銑比は3高炉の方が低いため、[Si] が高い要因にはなるが、それでもなお0.05%程度の差異が残る。この差異は残る影響因子である熱流比によると推定される。熱流比は主に燃料比に依存すると考えられるので、燃料比と [Si] の推移を Fig. 12 に示す。これらの図から高燃料比は熱流比を介して高 [Si] の原因になっていることが分かる。

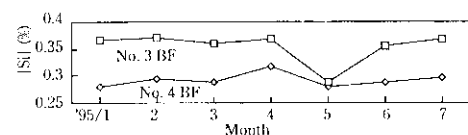


Fig. 10 Trends of [Si] at No. 3 and 4 blast furnace of Mizushima Works

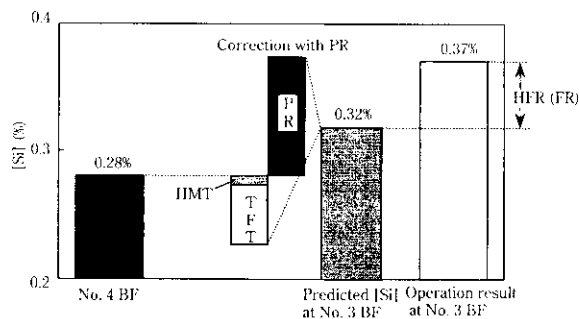


Fig. 11 Analysis of [Si] change with empirical [Si] coefficient

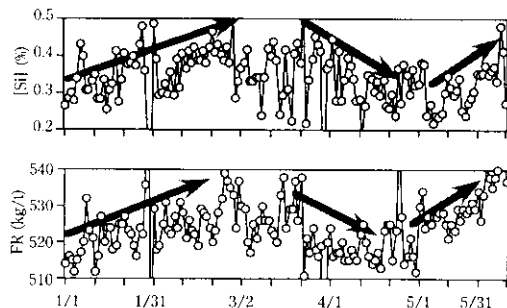


Fig. 12 Trend of [Si] and FR at No. 3 blast furnace of Mizushima Works

3.3 水島製鉄所 3 高炉の低ガス利用率要因と装入物分布設計

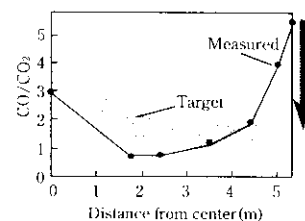
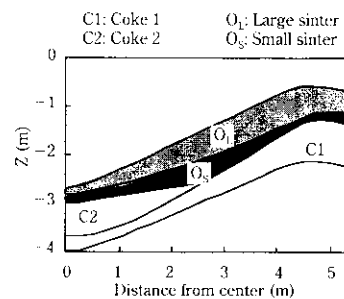
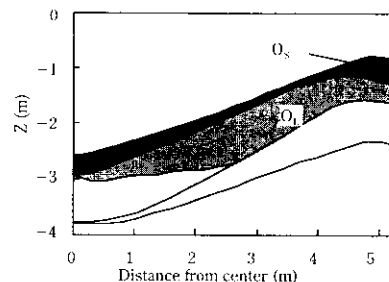
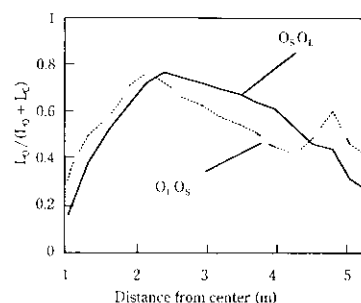
水島製鉄所第3高炉の燃料比を下げるには、ガス利用率 (η_{co}) の向上が不可欠である。水島製鉄所第3高炉でのシャフトガスサンプラーによる CO/CO_2 分布測定結果を Fig. 13 に示す。炉壁部の CO/CO_2 が特に高く、この部分のガス利用率向上が必要であることがわかる。水島製鉄所第3高炉ではコークスと鉬石をそれぞれ2分割して装入している。鉬石は粒度別に O_s と O_L に分割されており、装入は C1, C2, O_s , O_L の順序で行われている。Fig. 14 に1995年4月の装入パターンから分布予測モデルで推定した炉内堆積形状を示す。 O_s が L_0/L_k の高い中間部に集中しているためガスが炉壁部分に集中し、炉壁部のガス利用率を低下させていると推定された。以上から炉壁流抑制型の分布調整による炉壁ガス利用率向上が必要であると考えらる。

C1, C2 装入により炉中間部に窪みが形成され、炉中間部に L_0/L_k の高い領域が形成される。C1, C2 装入後に O_s を装入することその L_0/L_k の高い領域に O_s が集中してしまう。そこで鉬石装入順序を O_L, O_s に変更して長い O_L テラスを形成し、その上に O_s を乗せることで O_s が炉壁テラス上に安定に堆積するように分布パターンを設計した。分布の計算結果を Fig. 15, 16 に示す。

3.4 融着帯モデルによる [Si] 低減効果の検討 (Step1)

装入順序変更による [Si] 低減効果を融着帯予測モデルにより計算し、結果を Fig. 17 に示す。

変更前は O_s が L_0/L_k の高い中間部に集中していたため、その部分の融着帯のたれ込みが拡大している。逆に炉壁部で融着帯レベルが上昇し、炉壁部にガスが集中していることがわかる。一方の装入順序変更後では、 O_s 層厚のフラット化に伴い融着帯形状もフラ

Fig. 13 CO/CO_2 distribution measured with a shaft probe and target pattern for lower [Si]Fig. 14 Layer profile of $O_s O_L$ chargingFig. 15 Layer profile of $O_L O_s$ charging calculated with burden distribution modelFig. 16 Comparison of $L_0/(L_0 + L_k)$ distribution for $O_L O_s$ charging and $O_s O_L$ charging

ット化している。また Fig. 18 の計算結果に示すように、ガス利用率が特に炉壁部で改善し、全体では約1%上昇する。ガス利用率の向上による熱の余剰分は60°CのTFT低下と6kg/tの燃料比低下によって相殺されている。最終的にSiは0.06%低下する計算結果が得られた。ただし炉壁ガス流が抑制されるため、Fig. 17 に示すように炉内での圧力損失上昇が予想され、実機実験の際はこの点に十分留意する必要がある。

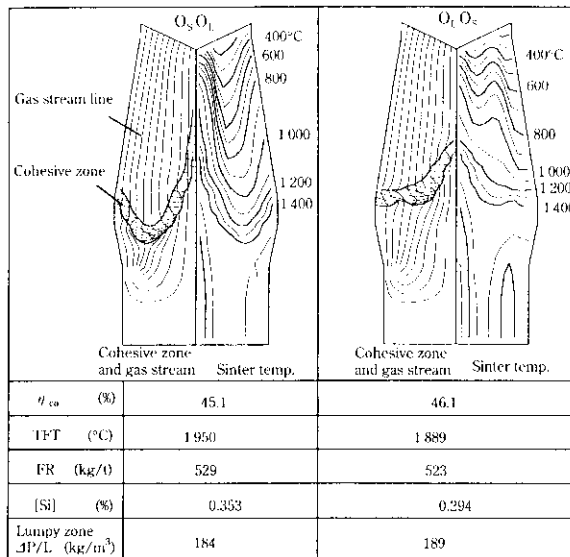


Fig. 17 Calculated result of blast furnace simulator

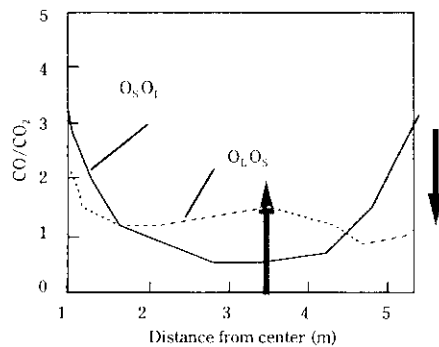


Fig. 18 Calculated result of gas distribution

3.5 融着帯モデルによる [Si] 低減効果の検討 (Step 2)

さらなる [Si] の低下には融着帯形状の調整が必要であると考えられる。Si 移行機構によると SiO ガス濃度の高い炉壁付近の融着帯根部を低下させることにより [Si] の低減が期待できる。

Fig. 19 に炉壁部の $L_w/(L_w + L_c)$ と粒径を変化させた場合の融着帯下端レベルの変化のモデル計算結果を示す。融着帯下端レベルは粒径よりも炉壁部 $L_w/(L_w + L_c)$ に依存することがわかる。これより、炉壁部 $L_w/(L_w + L_c)$ を上昇させ、その分が炉壁部粒径を上昇して通気を一定に保てば、ガス流分布一定のまま融着帯下端レベルを低下させることができると推定される。装入物分布モデルによる計算を行い、Fig. 20 に結果を示す。 O_t テラスを大幅に延長して窪みをつくることにより、 O_s の中心部流入を抑制しつつ炉壁部 L_{ws}/L_{wt} を小さくすることが可能である。同時にコークスパターンを炉壁 L_w/L_c を上昇するように変更することで、炉壁ガス流の維持が可能である。

3.6 実機実験結果

前節の装入物分布モデルと融着帯モデルによる予測計算結果に基づき、水島製鉄所第3高炉での操業実験を行った。Fig. 21 に操業推移を示す。

装入順序変更により、モデルでの計算通り、 η_{co} は約1%上昇し、[Si] は0.08%低下した (Step 1)。Fig. 22 に示す装入順序変更 (Step

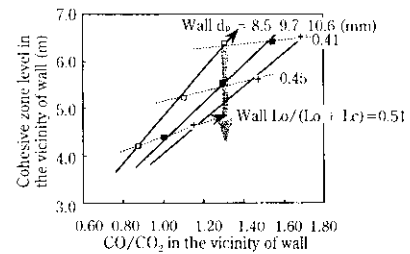


Fig. 19 Lower cohesive zone level in the vicinity of wall

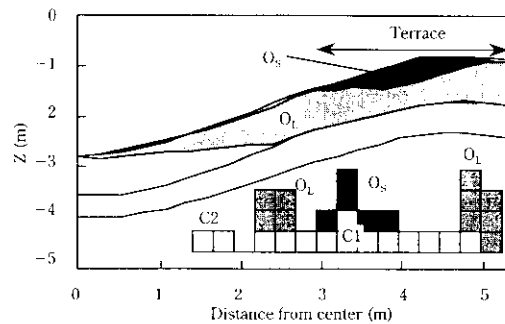


Fig. 20 Calculated result of burden distribution model for long terrace pattern

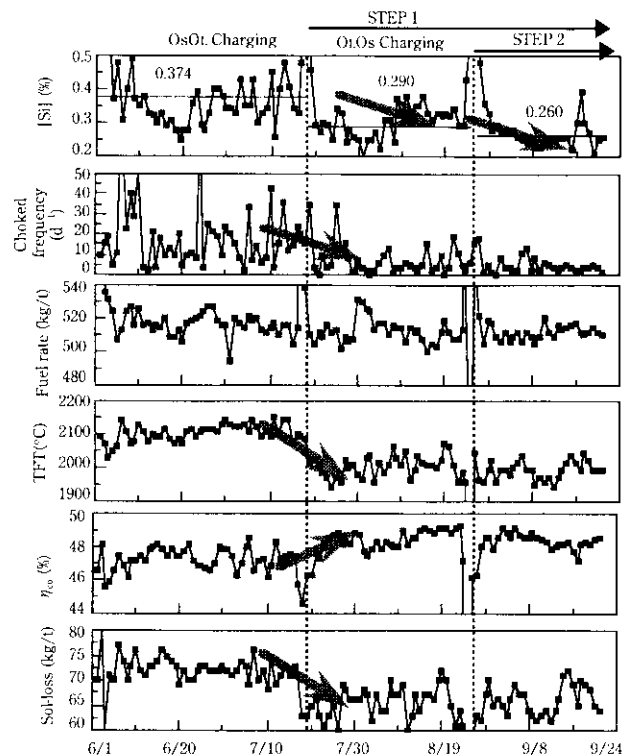


Fig. 21 Operation results of Mizushima No. 3 blast furnace

1)前後でのシャフトガスサンプラーの測定結果もモデルの推定と同じく炉壁のガス利用率向上とガス分布のフラット化を示している。Fig. 23 に装入順序変更 (Step 1) での TFT と [Si] の関係とその相関係数の傾きをもつ直線と共に示す。この図より装入物分布制御によるガス利用率向上により TFT を約 100°C 低下させることが可能となり、SiO ガス発生抑制と [Si] 低減が可能となったことがわか

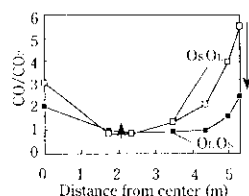


Fig. 22 Comparison of gas utilization distribution

る。また、 O_s を炉中心側、 O_L を炉壁側に堆積させる分布制御により、TFT、 η_{co} 一定のままさらに 0.03% の [Si] 低減が観測された (Step 2)。

4 結 言

高精度の操業予測ツールとして高炉操業シミュレータを開発し

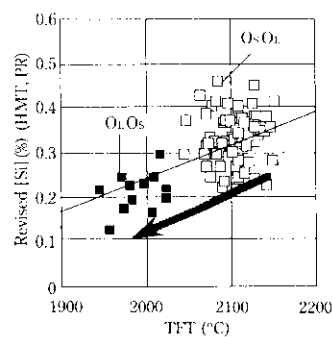


Fig. 23 Relationship between TFT and corrected [Si]

た。本シミュレータは水島製鉄所第3高炉における装入物分布変更による低 [Si] 操業時の操業設計を始めとし、川崎製鉄の各高炉で操業設計、解析に活用されている。

参 考 文 献

- 1) 野内泰平、佐藤 健、宮川昌治、武田幹治、板谷 宏：CAMP-ISIJ, **7** (1994), 1004
- 2) Y. Sawa, K. Takeda, and S. Taguchi: Proc. 50th Iron making Conf. of AIME, **50**(1991), 417
- 3) 佐藤 健、松原弘直、武田幹治、板谷 宏、西村博文：CAMP-ISIJ, **8** (1995), 140
- 4) 佐藤 健、宮川昌治、板谷 宏：CAMP-ISIJ, **6**(1993), 887
- 5) 岩永祐治：鉄と鋼, **68**(1982), 740
- 6) 羽田野通春、宮崎富夫、岩永祐治：鉄と鋼, **65**(1979), 1365
- 7) S. Ergun: Chem. Eng. Progr., **48**(1952), 59
- 8) W. E. Ranz: Chem. Eng. Progr., **48**(1952), 247
- 9) J. Beek: Advances in Chem. Eng., **13**(1962), 203
- 10) 杉山 喬、佐藤裕二、中村正和、原 行明：鉄と鋼, **65**(1979), s532
- 11) W. H. Giedt: 基礎伝熱工学 (1957), 146
- 12) 鞭 巖、八木順一郎、田村健二、森山 昭：日本金属学会誌, **30** (1966), 826
- 13) 八木順一郎、西尾浩明、佐々木恵一、鞭 巖：日本金属学会誌, **31** (1967), 711
- 14) 八木順一郎、鞭 巖：日本金属学会誌, **32**(1968), 1316
- 15) 角戸三男：鉄と鋼, **66**(1980), s66
- 16) 槌谷暢男、徳田昌則、大谷正康：鉄と鋼, **58**(1972), 1927
- 17) 田口整司、槌谷暢男、久保秀穂、一藤和夫、岡部侠児：鉄と鋼, **68** (1982), 2311