

© 1982 ISIJ

鉄鉄中 Si 濃度に及ぼす高炉操業要因の影響 に関する反応工学的解析

論 文

田口 整司*・榎谷 暢男*²・久保 秀穂*³
一藤 和夫*³・岡部 俠児*²

Process Analysis of the Operational Factors Governing Silicon Content of Pig Iron in the Blast Furnace

Seiji TAGUCHI, Nobuo TSUCHIYA, Hideho KUBO,
Kazuo ICHIFUJI, and Kyoji OKABE

Synopsis :

By the use of a mathematical simulation of Si transfer via SiO in the blast furnace, main operational factors affecting Si concentration in pig iron were examined.

(1) The concentration ranging from 0.4% up to 2.5% was well simulated on the basis of the operational data of Chiba No. 2 and No. 3 furnaces.

(2) The observed relation between Si concentration and hot metal temperature was clarified by the concept of thermal flow ratio, which gave unified explanation to the relation.

(3) In iron production for steelmaking, the main source of SiO was from ash in coke, and the rate determining step of Si transfer into iron was Si absorption by pig iron from SiO.

(4) In the case of foundry iron containing more than 2% Si, the amount of SiO generated from flow-down slag accounted for over 80% of the generated SiO, and Si transfer rate was determined by SiO generation.

(5) Simulation of an operation with a low flame temperature in front of the tuyeres was tried, and it was proved that even in such a small furnace as Chiba No. 2 furnace (1 380 m³) an operation with 0.2% Si under a hot metal temperature of 1 490°C was possible by reducing SiO generation from coke ash.

1. 緒 言

最近、我が国においては転炉吹錬での溶融鉄鉄配合率が高いことや底吹きあるいは上、底吹きなどの複合吹錬法の発達に伴って、供給鉄鉄中の Si 濃度として 0.4% 以下が要求されるようになった。さらに転炉装入時の鉄鉄の Si 濃度を 0.1% 以下まで要求するスラグレス製鋼法が開発されつつあるが¹⁾²⁾、この新プロセスにおいても高炉から供給される鉄鉄の Si 濃度が低いほどメリットが大きい。また高炉での出鉄時の Si 濃度変動も小さいほどよい。このような状況下では、鉄鉄中の Si 濃度を高炉の炉熱を示す指標の一つとして調整する意味は薄れ、ばらつきの少ない低い Si 濃度の鉄鉄を製造することが重要となる。そのため高炉内での Si 移行量を定量的に議論する必要性が生じた。

高炉において、長期的に低 Si 濃度の鉄鉄を得るため

の操業法としては、高塩基度スラグによる操業³⁾や高炉頂圧、高出鉄比操業などの報告もあるが、現在では Si 濃度低下には溶融帯の高さを低くすることが最も有効であり⁴⁾⁵⁾、高熱流比、高羽口前ガス温度を指向することが一般的な低 Si 操業法となつている。しかし、最近水島第 2 高炉において低熱流比、低羽口前ガス温度操業下での低 Si 鉄鉄吹錬が行われ⁶⁾、新たな可能性を示唆するものとして注目される。

これまで高炉炉床湯溜りでのスラグ-メタル反応によるスラグ中シリカの還元反応について数多くの報告があるが、徳田ら⁷⁾は高炉内での Si 移行はこの反応のみでは説明し得ず、滴下帯での気相 SiO を介したメタルへの Si 移行を考える必要があることを熱力学計算により示唆した。榎谷ら⁸⁾はこの過程に着目した実験から SiO ガス経由のメタルへの Si 吸収反応速度式を提出し、現実の高炉での Si 移行が速度論的にも十分説明できるこ

昭和 57 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 3 月 16 日受付 (Received Mar. 16, 1982)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

*² 川崎製鉄(株)技術研究所 工博 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

*³ 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

とを示した。上述のように、銑鉄中の Si 濃度が溶融帯高さと強い関連を有する事実は、この気相を介した Si 移行を裏付けるものである。したがって、炉内での Si 移行を定量的に議論し、次の点を明らかにすることが重要となつた。すなわち、SiO ガスの供給源として、羽口前で燃焼するコークスの灰分に由来するものと滴下帯を流下するスラグ由来のものとの寄与割合を把握し、それらを制御する方法を見出すことである。この点に関して、最近石岡ら⁹⁾は鋳物銑操業時におけるけい石添加コークスを用いた試験操業から、添加 SiO₂ のおよそ 30% が溶銑中に移行したと報告している。

本報では前報¹⁰⁾の数学モデルを用いて Si の移行過程を定量化することを試み、その解析結果から、低 Si 濃度の銑鉄を得るための操業法を検討した。

2. 計算方法および結果

実炉の操業シミュレーションにあたり、オールコークス操業での千葉第3高炉(内容積 1845 m³)の製鋼用銑吹製時と、千葉第2高炉(内容積 1380 m³)の鋳物銑および製鋼用銑の操業時を基準として選んだ。

まず、前報¹⁰⁾でも用いた千葉3高炉の操業を基準として、Table 1 に示す A~F シリーズの条件変化を設定し、計算を行つた。表中、シリーズCでは異なつた鉱石粒子径 D_{po} を用いて炉内での鉱石間接還元量を変化させ、炉頂ガス利用率 η_{CO} を変えた。これは鉱石の被還元性に起因した、および(モデル自体は1次元であるが)炉頂の半径方向の装入物分布制御を想定した η_{CO} 変化と Si 濃度の関係を検討するためである。鉱石の溶け落ち温度 T_{drop} と Si 濃度との関係はシリーズFによつて検討した。前報での炉内分布計算はシリーズCの $D_{po}=15$ mm の場合に基づいている。なお千葉3高炉に関する計算では、すべて前報で述べた伝熱に関する諸パ

Table 1. Cases in calculation.

	O/C (-)	T_b (°C)	D_{po} (mm)	T_{drop} (°C)
A series	3.4	1250	12	1400
	3.5	"	"	"
	3.6	"	"	"
B series	3.4	1200	"	"
	"	1150	"	"
	"	1100	"	"
	"	1050	"	"
C series	"	1250	15	"
	"	"	18	"
D series	"	1150	15	"
	"	1050	"	"
E series	3.3	1150	"	"
	"	1050	"	"
F series	3.4	1250	"	1450
	3.3	"	"	"

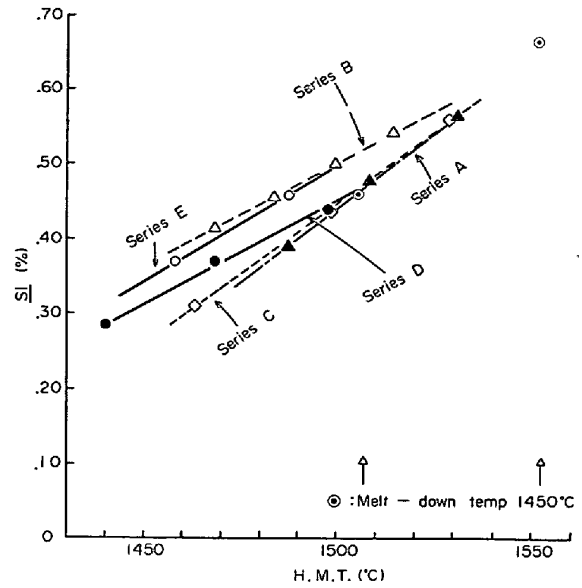
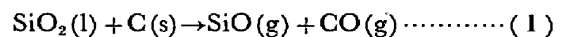


Fig. 1. Relationship between Si content and temperature of hot metal under various calculating conditions.

ラメータ値を用いた。計算による溶銑中 Si 濃度と溶銑温度との関係を Fig. 1 に示す。各シリーズとも、Si 濃度の温度依存性はおおむね同一であるが、送風温度 T_b を変えた場合よりも、装入鉱石とコークスの重量比 Ore/Coke あるいは D_{po} を変化させた場合の方が変化の勾配が大きい。後者は千葉各高炉での実績の温度依存性 $0.04(\%Si)/10(°C)$ ¹¹⁾ とほぼ等しい。ここで、上記のような通常の操業アクションにおいても、その種類によつたと例えば 1470°C の同一溶銑温度でも、Si 濃度に 0.1% 弱の差を生じている点に注目する必要がある。この違いは後に考察するように、熱流比によつて統一的に説明される。

次に、千葉2高炉についての計算では、これまでと同一の伝熱パラメータを用いると鋳物銑のシミュレーションにおいて、ガス相からコークス相を経由してスラグ相へ移る熱量が少なく、銑鉄中 Si 濃度が上昇しないことがわかつた。そこでこの高炉の鋳物銑および製鋼用銑吹製時の実績を同一の伝熱パラメータ値によつて再現できるように、以下に示すパラメータを種々変化させた。

(1) 流下スラグからの(1)式による SiO の発生反応速度定数 k_5 ¹⁰⁾ および反応熱のコークス取得率 α_s



(2) 上記反応における温度としてスラグ温度 T_{sl} 、コークス温度 T_s およびスラグとコークスの接触界面温度 T_w を用いた場合の比較

(3) 気-固相間および固-液相間の伝熱係数 $h_{g,s}$, $h_{s,sl}$, $h_{s,m}$

Table 2. Operational results of Chiba No. 2 B. F.

	Blast vol. (Nm ³ /min)	Temp. (°C)	Moist (g/Nm ³)	O/C (-)	H. M. T. (°C)	Si (%)	Slag rate (kg/t)
Steelmaking iron	1719	1087	13.6	3.37	1493	0.47	295
Foundry iron	1900	980	30.1	2.87	1557	2.43	309

Table 3. Cases of calculation for Chiba No. 2 B. F.

Variables	Case											
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
Ore/coke (-)	3.47	3.37	3.47	3.37	3.42	3.47	3.37	2.77	2.87	2.77	2.72	2.77
Blast temp. (°C)	1037	987	1087	1037	1087	1137	1087	930	980	980	980	1030

(4) 炉床部に回る羽口前発生ガス量の分率 α

ここで、 T_ω は温度 T_s のコークスと T_{sl} のスラグがそれぞれ 1 次元半無限体として接触した瞬間の界面温度であり、非定常熱伝導方程式を解くことにより、次式で与えられる。

$$T_\omega = (T_{sl} + \omega T_s) / (1 + \omega) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\omega = \sqrt{\lambda_{sl} C_{sl} \rho_{sl} / \lambda_s C_s \rho_s} \quad \dots\dots\dots (3)$$

検討の結果、Si 濃度が鋳物鉄吹製時に上昇するためには、(1) 式の反応熱のコークス取得率 α_s と気-固相間の伝熱係数 $h_{g,s}$ をともに大きくする必要があり、 $\alpha_s \geq 0.9$ 、 $h_{g,s}$ は前報(14)式において、滴下帯で $\chi = 0.05$ として求めた。このとき得られる溶銑温度が基準操業の実績に合うためには、 k_5 として次式を用い、(1) 式の反応温度として T_s を用いる必要があつた。

$$k_5 = 5.36 \times 10^{19} \exp(-177\,000/RT) \quad \dots\dots\dots (4)$$

この k_5 の値は前報の値の 15 倍である。角戸ら¹²⁾によれば k_5 はコークスの反応性に依存し、反応性の増大にはほぼ比例して大きくなり、また徳田によると¹³⁾、1600~1650°C を境に高温域ではコークスとスラグの濡れが急速に大きくなるとされている。高炉羽口前からサンプリングしたコークスは装入前コークスと比べてアルカリなどの吸収により反応性が增大していることや、高温域での濡れ面積の増加など、 k_5 として(4)式を適用する根拠もありうるが、実験室的にさらに検討を要する。また、 α については炉床部でのガス温度がコークス温度より低くならないよう 0.1 としたが、出銑時の温度や Si 濃度への影響はわずかである。したがって、千葉 2 高炉に関する計算での主要な変更点は、(1) 式の反応に関してスラグ相に関連する変数をコークスのそれに置き換えたことである。

以上述べたパラメータ値を用い、Table 2 に示す鋳物鉄、製鋼用鉄の操業実績を基準として、Ore/Coke と T_b を変えて計算した。計算条件を Table 3 に、基準操業時の計算炉内変数分布の例を Fig. 2 および 3 に示

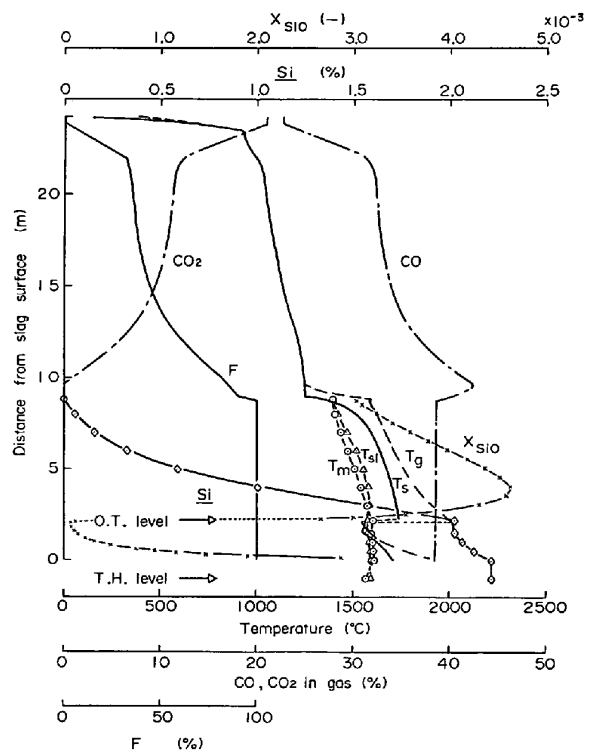


Fig. 2. Distribution of in-furnace variables by calculation (Chiba No. 2 B. F. : Foundry iron).

す。前報の Fig. 6¹⁰⁾と比較して、反応温度を T_s 、 $\alpha_s = 1$ などのパラメータ変更の結果、羽口より上部でのコークス温度が上昇しようとするとき SiO₂ 発生反応の増大に伴うため、その吸熱量が大きくなる影響をうけて結果的にコークス温度があまり高くない。したがって、燃焼帯に供給されるコークス温度は、送風温度の違いによる発生ガス温度の変化に大きく影響されない。全計算結果を用い、Si 濃度と溶銑温度との関係を調べると Fig. 4 のようになる。鋳物鉄では溶銑温度が実績よりやや高目であるが、全計算範囲で Si 濃度と温度との関係は実績とほぼ合致する。基準鋳物鉄操業期間での実績 Si 濃度と温度との関係を Fig. 5 に示すが、Si 濃度の温度依存性は約 0.38(4%Si)/10(°C) であり、Fig. 4 のそれ

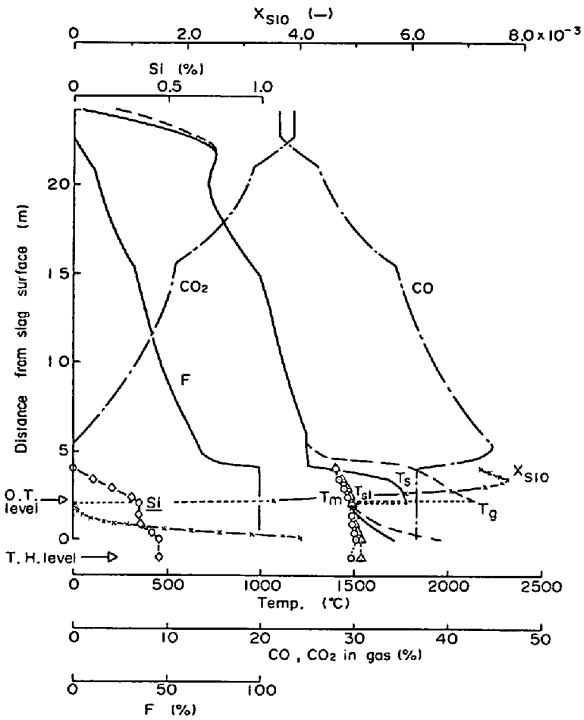


Fig. 3. Distribution of in-furnace variables by calculation (Chiba No. 2 B. F.; Steelmaking iron).

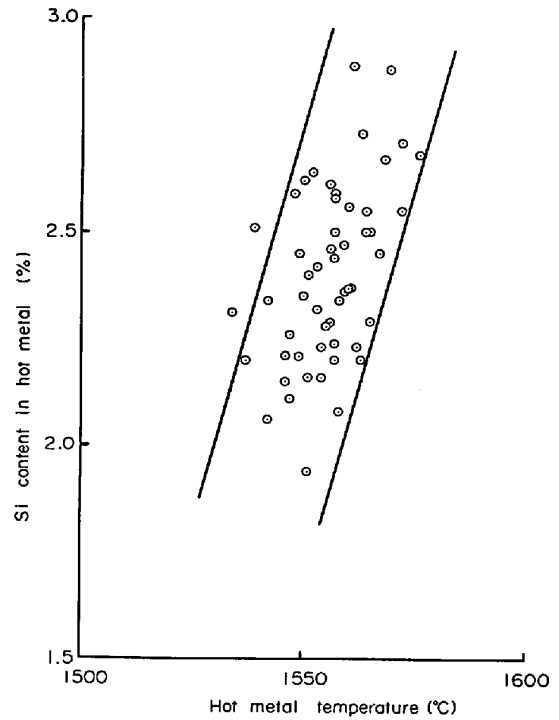


Fig. 5. Relationship between Si content in hot metal and temperature from actual operation (Every tap data of Chiba No. 2 B. F.; Foundry iron).

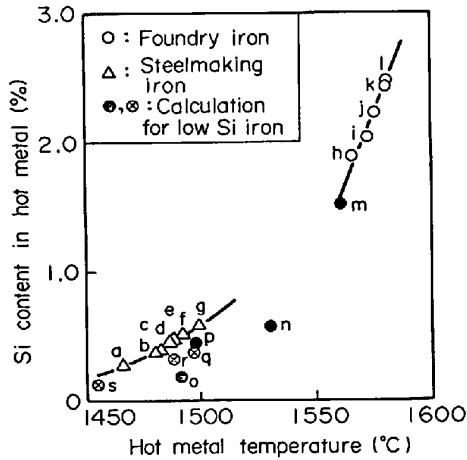


Fig. 4. Relationship between Si content in hot metal and temperature by calculation.

とはほぼ一致する。一方、製鋼用鉄の場合には Fig. 4 では $0.12(4\%Si)/10(^{\circ}C)$ であり、実績の温度依存性より大きくなり、前報のパラメータを用いた第3高炉の計算結果の方がよく合っている。

3. 考 察

3.1 滴下帯での融体の流れ

滴下帯におけるメタル、スラグの流れは前報第2節で用いた諸実験式から次のようになる。千葉3高炉において日産4000t(出鉄比2.17)の場合、メタル、スラグの全ホールドアップはそれぞれ $0.018, 0.025 \text{ m}^3/\text{m}^3$

(bed) で、コークスとの濡れ面積はそれぞれ $2.3, 2.1 \text{ m}^2/\text{m}^3(\text{bed})$ となる。したがって、濡れ面積に対する流れの平均接触厚さはそれぞれ $7.8, 12 \text{ mm}$ と推算される。とくにメタルでは全ホールドアップに占める動的ホールドアップの割合が著しく小さいので、メタルの流れはコークス粒子間に存在する静的ホールドアップの小プールをつぎつぎに混合しながら伝つて降りるものと推定され、流下の平均速度は 20 m/h と遅い。スラグについても 12 m/h と流下速度は小さい。またメタル、スラグともに、気-液間の有効表面積は濡れ面積の約4倍となる。

3.2 炉内温度分布および鉄鉄中 Si 濃度と伝熱パラメータとの関係

千葉2高炉の稼働中の炉内温度の測定¹⁴⁾によると、製鋼用鉄および鋳物鉄操業時では Fig. 6 のような温度分布が得られている。図中の×, ○, ●印はそれぞれ炉中心、中間、炉壁部の測定値である。温度はいずれも熱保存帯の下端から急激に上昇し、わずかの距離で $1300^{\circ}C$ まで到達する。これより高温の測定値はないが、高炉解体調査によつても、溶融帯近傍では温度勾配が急である。したがって同図において、鉍石類の溶け落ち温度を $1400^{\circ}C$ とすると、溶融帯下端の位置は $1300^{\circ}C$ 位置のわずか下方に存在すると考えられる。炉内断面平均と

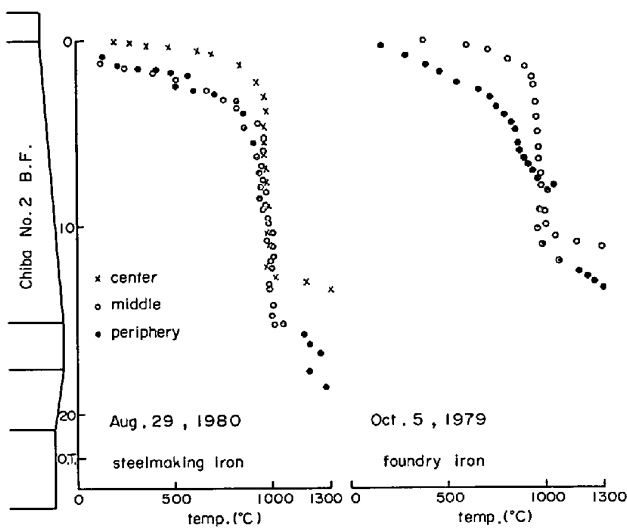


Fig. 6. Temperature distribution measured in Chiba No. 2 blast furnace.

しての溶融帯下端位置に対しては断面積割合から考えて外周部の寄与が大きいので、炉壁部での●印について考えると、溶融帯下端は製鋼用鉄の場合羽口上 3~4 m、鑄物鉄では羽口上 8m 程度である。製鋼用鉄操業時の溶融帯高さは 2 高炉と 3 高炉で大きく変わらないとして、前報 Fig. 6 と本報 Fig. 3 の計算結果を比較すると、溶融帯下端位置 (図中の急激な T_s の上昇開始位置) は第 3 高炉の場合の Fig. 6 では実測値とほぼ同じ位置にあるが、後者の Fig. 3 での溶融帯は低い。計算に基づく溶融帯高さは、前述したように滴下帯での気-固相間の伝熱係数の大きさに支配され、製鋼用鉄吹製時には χ として 0.02 を与えた方が良く合う。一方鑄物鉄吹製においては、 SiO の反応発生量を確保する意味から χ を 0.05 としたが、Fig. 2 によれば溶融帯下端位置は羽口上 6.6 m であり、 χ を大きくしたにもかかわらず実測された値に近い。この理由は以下のように考えられる。高炉の塊状帯での伝熱係数は前報で述べたように、 $\chi = 0.2$ に相当する値が適当であることがわかっている。これを基準とすれば $\chi = 0.02$ および 0.05 とすることは滴下帯での伝熱係数を塊状帯の 0.1 ないし 0.25 倍に下げることである。ガスから固体へ伝わる熱量は本報で扱っているように固体温度の上昇と SiO 発生反応熱に費やされるが、このほかにも羽口近傍の高温領域でアルカリ、Si, Al, Fe, Mn などの元素が亜酸化物、シアン化物、硫化物あるいはメタルなどのガスとして発生し、これらの反応の吸熱量をも補償するはずである。これらのガス物質は滴下帯上部で逆に凝縮相として析出する際に発熱し、この時点で羽口近傍でガス化に要した熱量がガス相から凝縮相に与えられることになる。したがって

ガス相から凝縮相への伝熱速度がみかけ上小さくなる。このとき羽口レベルのガス温度が高い製鋼用鉄と低い鑄物鉄では上記反応による吸熱量の全伝熱量に占める割合が異なる (すなわち伝熱係数の補正項が異なる) と考えられる。しかしその定量的な説明は今後の検討に待たなければならない。ちなみに、本モデル計算では燃焼帯でコークス灰分から発生する SiO の反応熱を計上しているが、この熱量は燃焼生成ガス温度低下にして、3 高炉の場合で約 90°C 、2 高炉製鋼用鉄のケースでは約 60°C 、鑄物鉄では約 50°C の大きさである。

また 2 高炉と 3 高炉の製鋼用鉄の計算においては、結果の Si 濃度は両者とも実績値とほぼ等しくなるが、伝熱パラメータを変更したことにより後述するように SiO の発生源の寄与割合が異なっている。広い Si 濃度範囲でのシミュレーション結果は本報でのパラメータ改良が妥当であることを示しているが、製鋼用鉄での Si 濃度の温度依存性が実績と合致するためにはさらにモデルの検討が必要である。

3.3 溶鉄中 Si 濃度に及ぼす熱流比の影響

2 節の Fig. 1 において、送風温度を変えた場合の方

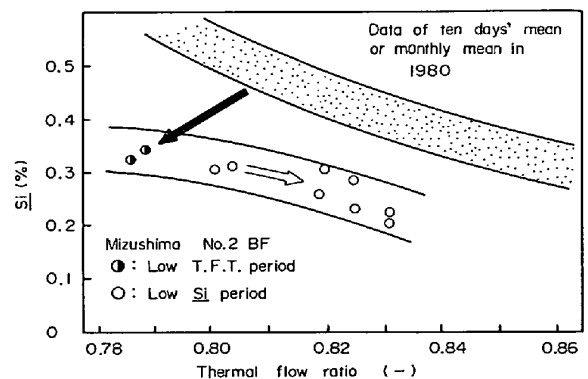


Fig. 7. Influence of thermal flow ratio on Si content in hot metal.

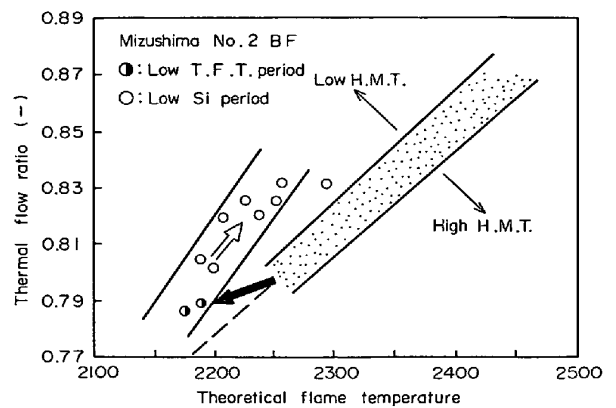


Fig. 8. Analysis of the factors influencing on the hot metal temperature at Mizushima No. 2 B.F.

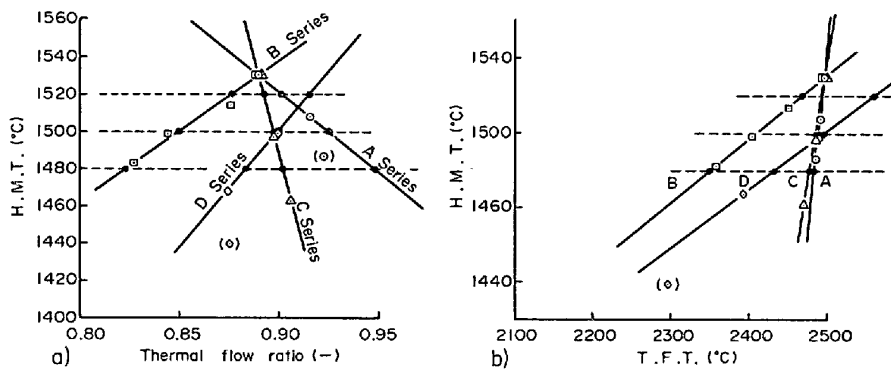


Fig. 9. Transformation of the results into the values under the constant hot metal temperature.

が Ore/Coke や D_{po} を変えた場合より、溶銑温度の同一変化量に対する Si の変化量が小さかった。そこで操業条件の変更による Si 濃度と溶銑温度の変化に関して、実績データと計算値とを比較してみる。水島第2高炉の1980年の1年間における旬間平均データを用いた Si 濃度と熱流比の関係は Fig. 7 のドットで示した領域のように、熱流比の上昇により Si 濃度の低下がみられる。この間の溶銑温度は $1500 \sim 1510^\circ\text{C}$ ではほぼ一定のレベルに維持されている。そのため熱流比と羽口前理論燃焼ガス温度(TFT)とは Fig. 8 に示すように一定の関係を維持しており、これは総括熱収支からも理論的に導かれる関係である⁹⁾。なお、実炉の TFT を求める際に、羽口前コークス温度は TFT の 0.75 倍と仮定している。

一方、千葉3高炉についての計算結果を溶銑温度レベル一定として表すと次のようになる。A~Dの各シリーズの結果を溶銑温度と熱流比、および溶銑温度とTFTとの関係として表すと Fig. 9のa), b)を得る。これから溶銑温度として $1480, 1500, 1520^\circ\text{C}$ の3水準をとり、それに対応する熱流比とTFTを読みとる。各シリーズごとの各温度に対応する Si 濃度は Fig. 1から与える。このようにしてモデル計算に基づく Si 濃度と熱流比との関係を Fig. 10に示す。一定溶銑温度で熱流比を増す操業を行えば Si 濃度は低下し、実操業の傾向とも一致する。炉内分布に関しては熱流比を増すと溶融帯高さが下がっており、熱流比のかわりに Si 濃度と溶融帯高さをとつても Fig. 10と同様よい関係を得る。Fig. 11に示すように、溶銑温度を一定に保つた熱流比とTFTとの関係は実操業の場合と同じである。すなわち、旬間あるいは月間などの長期間での Si 濃度や溶銑温度レベルの変化は本モデルで予測できると言える。なお、Fig. 11において Ore/Coke を増加するシリーズAの場合には、熱流比増加による溶銑

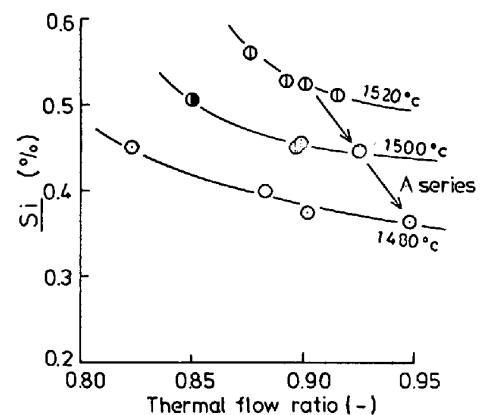


Fig. 10. Relation between thermal flow ratio and Si by calculation.

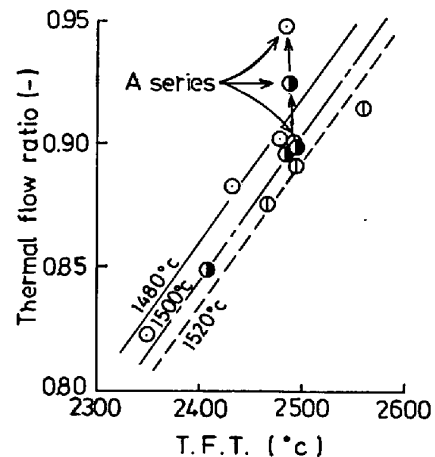


Fig. 11. Relation between thermal flow ratio and TFT under the constant HMT by calculation.

温度の低下幅は他のシリーズの場合より小さい。これは Ore/Coke 増加に伴い、 η_{co} の上昇や銑中 Si の減少、あるいは出銑量増加による銑鉄 t 当たりの熱損失の低下など、溶銑 t 当たりの所要熱量低下が大きいことに由来する。

以上のように、これまでの低 Si 操業は一定溶銑温度

Table 4. Estimation of operational indices by the model calculation.

Blast temp. (°C)	Hot metal temp. (°C)	Si (%)	Fractional SiO at tuyere (-)	Fractional SiO at melting zone (-)	Height of melting zone (m)
1250	1497	0.44	4.45×10^{-3}	1.54×10^{-3}	4.1
1150	1468	0.37	4.45×10^{-3}	2.06×10^{-3}	3.4
1050	1440	0.29	4.45×10^{-3}	2.57×10^{-3}	2.7

Table 5. Results by calculation.

Case	O/C (-)	H. M. T. (°C)	Si (%)	Height of melting zone (m)	[SiO] at tuyeres (kg-Si/m ² ·h), (%)	[SiO] from slag (kg-Si/m ² ·h), (%)
A	2.77	1576	2.30	6.6	8.36 (20)	33.5 (80)
B	3.42	1488	0.50	1.9	9.08 (31)	20.6 (69)
C	2.97	1491	0.18	3.3	0.36 (5)	6.4 (95)

を保ちつつ、TFT の上昇、あるいは装入物分布制御による所要熱量の低下を通じて熱流比を増大させ、炉内容融帯高さを下げる方向に進んで来た。しかし、1981年水島2高炉での低Si操業実験において、Fig. 7および8中に●および○印のプロットで示すような低い銑鉄中Si値を得た⁶⁾。この操業実験では、まず●の期間において低Ore/Coke下でTFTを下げる操業を行い、つぎに○印のように低TFTを維持しながらOre/Cokeの上昇を計った。その結果、旬間平均値0.21%の低Si濃度を得た。このとき●印の期間では、Si濃度と熱流比の関係がFig. 7のドット部分に示した従来の関係から大きく下方にずれた。この現象は後に述べるように、銑鉄中へのSi移行反応がSiOガスからメタルへの吸収律速からSiOの発生律速になったことを示唆している。

3.4 Si移行量を規定する炉内過程

製鋼用銑を吹錬する千葉3高炉のシリーズDにおける炉内要因変化をTable 4に示す。この計算条件下では、流下スラグからのSiO発生量は全発生量の1%程度ときわめて少なく、そのほとんどが羽口前で燃焼するコークスの灰分に由来する。この条件下ではコークス温度が高くなるため、灰分中SiO₂の全量が還元ガス化し、ガス中SiO分率は一定となる。しかし、SiOガスと流下するメタルとの接触時間や温度は操業条件によつて異なるので、表中に示すように未反応のまま熔融帯に達するSiOガスの量は操業条件により異なっている。すなわち、SiOガスからメタルへのSi吸収反応の多少により、メタル中Si濃度が規定されている。溶銑温度1500°CではSiOガス全発生量の2/3がメタルに移行するが、1440°Cでは40%程度である。

千葉2高炉の銑物銑操業の場合にはTable 5のケースAに示すように、SiOガスの発生量は流下スラグ由来の方がコークス灰分由来に比べ4倍大きい。全発生SiO量の3/4以上がメタルへ吸収移行し、Si移行量はSiOの発生速度律速となつている。ここで、溶銑温度を規定

する羽口レベルより上部のコークス温度分布は、(1)式の反応熱が大きな吸熱であるためにSiO発生反応速度定数 k_s と気-固相間の伝熱係数 $h_{g,s}$ に大きく影響される。例えば、 k_s が大きい場合には、反応による吸熱量とガスからコークスへの熱移動が低いコークス温度でバランスする。その結果、SiO発生量とSi濃度はほとんど変わらず、溶銑温度のみが低下する。このときFig. 4中のプロットは低温側にずれる。すなわち、より低い温度での銑物銑操業の可能性を示唆する。

一方、2高炉の製鋼用銑のケースB (Table 5)においてSi濃度の溶銑温度依存性が大きいことは次のように説明される。表より全発生SiO量の約1/3がメタル中へSiとして吸収されるが、流下スラグからのSiO発生割合が大きいために、SiO発生反応の温度依存性が銑鉄中Si濃度にも影響している。したがつて、温度依存性に関する実績値と計算値の違いは流下スラグからのSiO発生寄与が計算では過大に見積られたためと考えられる。しかし、このような差異はあつても製鋼用銑の場合におけるメタルへのSi移行量は、3高炉の場合と同じくSiOガスからメタルへのSi吸収律速となつている。羽口前でのコークス灰分由来のSiOガスは全発生量の31%を占め、銑鉄中Si濃度に対する寄与率は36%である。しかし上述の理由から、銑鉄中Siの供給源としてのコークス灰分の寄与はこの値より大きいと推定され、製鋼用銑の操業においては主たる供給源と言える。いずれにせよ、流下スラグとコークス中灰分SiO₂の銑鉄中Siに対する寄与率は操業条件により異なり、連続的に変化する。

3.5 低Si操業法の検討

千葉2高炉の銑物銑操業のシミュレーションを基にして、Ore/Cokeと T_b を順次変えながら低Si操業に移る計算を行つた。この際、水島2高炉の実績にならひ、低Ore/Cokeのまま羽口先燃焼ガス温度を低下させ、次に徐々にOre/Cokeを増し、最終的にはOre/Coke

Table 6. Cases for the calculation of low Si content in hot metal.

Variables	Case						
	m	n	o	p	q	r	s
Ore/coke	2.77	2.77	2.97	3.17	3.17	3.22	3.22**
Blast temp. (°C)	830	630	630	860	860	860	860
Burden & Product*	F	F	F	F	S	S	S

* F; $a_{SiO_2}=0.094$, $[Mn]=0.45\%$, $[Ti]=0.12\%$, $[P]=0.10\%$
S; 0.06, " 0.32%, " 0.075%, " 0.087%

** $D_{p0}=11$ mm

と T_b の上昇によつて通常の製鋼用鉄に戻る道すじをたどつた。計算条件を Table 6 に示す。表中の記号 F, S は Ore/Coke と T_b 以外の装入物条件や送風条件が、それぞれ前述の鋳物鉄、製鋼用鉄の基準操業と同じであることを示す。千葉 2 高炉の鋳物鉄操業時は低 Ore/Coke にもかかわらず η_{CO} が高いので、 $D_{p0}=7$ mm としているが、ケース s では $D_{p0}=11$ mm として η_{CO} 変化の影響を調べた。計算結果の溶鉄温度と Si 濃度の関係を Fig. 4 中の●印(F)および⊗印(S)で示した。同一溶鉄温度でも操業条件により Si 濃度が大きく変わっている。Si 濃度が最も低くなる条件 o について、Si 移行量を規制する主たる要因を Table 5 の C に示す。炉内で発生する SiO 量が A, B と比べて少なく、とくに羽口前で発生する SiO はきわめて少ない。また Ore/Coke を低くしているため、製鋼用鉄の場合の B に比べて溶融帯レベルは高くなっている。すなわち、これまでの高熱流比による Si 濃度低下は溶融帯高さを低下させ、SiO ガスからメタルへの Si 吸収量を少なくすることに依存していたが、低熱流比でかつ低 TFF での低 Si 操業は熱流帯および滴下帯で発生する SiO ガス量を低下させることによるものである。なお、 D_{p0} を増加させて η_{CO} を低下させると、Fig. 4 中の r から s への移動のように Si 濃度と溶鉄温度は同一の Ore/Coke と T_b のもとでともに低下するが、Si 濃度の低下は製鋼用鉄のケース (△印) に比べて小さい。この溶鉄温度低下を例えば T_b の上昇によつて補おうとすると、熱流帯や滴下帯内の温度が上昇し、条件 r の場合よりも Si 濃度が増加する。低 Si 操業においては、ガス利用率の増加や熱損失の低減などにより鉄鉄 t 当たりの所要入熱量をできるだけ下げることが重要であることがわかる。

4. 結 言

炉内での SiO ガスを介した Si 移行の数学的モデル¹⁰⁾を用いて、鉄鉄中 Si 濃度に及ぼす操業条件の影響

を検討し、以下の結論を得た。

(1) 鉄鉄中 Si 濃度 0.4% の製鋼用鉄から、2.5% の鋳物鉄まで、広い濃度範囲にわたり操業実績値とよく一致する計算結果を得た。

(2) Si 濃度と溶鉄温度との関係を熱流比を用いて統一的に説明できた。この関係は従来の操業データの説明に適用でき、定量的な論拠を与えた。

(3) Si 濃度 0.4% 前後の製鋼用鉄を吹製する場合、炉内で発生する SiO ガスの大半は羽口前で燃焼するコークス灰分中シリカに由来する。このとき鉄鉄への Si 移行は SiO からメタルへの Si 吸収速度で律速される。

(4) Si 濃度 2% 以上の鋳物鉄操業の場合には、流下スラグから発生する SiO は全 SiO 発生量の 80% 以上を占める。この場合鉄鉄への Si 移行は SiO の発生速度で律速される。

(5) 羽口前の燃焼ガス温度を低下させて、低 Si 濃度の鉄鉄を吹錬する操業条件を検討し、一例として千葉第 2 高炉 (1380 m³) において、溶鉄温度 1490°C, Si 濃度 0.2% の鉄鉄を吹錬する可能性を得た。この操業条件下では、炉内で発生する全 SiO 量が低下し、とくに羽口前でコークス灰分から発生する SiO 量が著しく少なくなることが予測できた。

文 献

- 1) 山本里見, 小久保一郎, 吉井正孝, 中村 泰, 梶岡博幸: 製鉄研究 (1979) 299, p. 13108
- 2) 丸川雄浄, 城田良康, 姉崎正治, 平原弘章: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 323
- 3) 嶋田駿作, 阿部幸弘, 井上展夫: 同上, 58 (1972) 11, S 284
- 4) 羽田野道春, 山岡秀行, 山縣千里: 同上, 62 (1976) 11, S 391
- 5) 田口整司, 榎谷暢男, 高田至康, 岡部俠児: 同上, 64 (1978), p. 691
- 6) 才野光男, 藤森寛敏, 末森 昱, 佐藤政明, 野村真, 妹尾義和: 同上, 67 (1981) 12, S 727
- 7) 徳田昌則, 榎谷暢男, 大谷正康: 同上, 58 (1972), p. 219
- 8) 榎谷暢男, 徳田昌則, 大谷正康: 同上, p. 1927
- 9) 石岡信雄, 菊池淑矩, 高谷孝一, 泉 碩純, 三浦清也, 佐藤裕二: 同上, 67 (1981) 12, S 729
- 10) 田口整司, 久保秀穂, 榎谷暢男, 一藤和夫, 岡部俠児: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2303
- 11) 榎谷暢男, 田口整司, 河合隆成, 一藤和夫, 佐藤政明: 川崎製鉄技報, 13 (1981), p. 557
- 12) 角戸三男, 榎谷暢男, 岡部俠児: 学振 54 委-No. 1564, (昭和 56 年 7 月)
- 13) 徳田昌則: 私信
- 14) S. TAGUCHI, H. KATAYAMA, N. TSUCHIYA, K. OKABE, K. TANAKA, and K. OKUMURA: Stahl u. Eisen, 101 (1981), p. 1173