

討 5

高炉での低Si溶銑の吹製と理論解析

川崎製鉄(株) 技術研究所 ○田口整司 榎谷暢男
 千葉製鉄所 才野光男 安野元造 奥村和男
 水島製鉄所 藤森寛敏

1. 緒 言

溶銑中のSi濃度は出銑温度と強い関連を有することはよく知られた事実である。しかし溶銑温度やスラグ組成を一定としても、高炉の操業条件によりSi濃度は大きく変わりうる。ここでは実際操業における操業方法によるSi濃度の低下および反応工学的モデルを用いた高炉内でのSi移行の解析について述べる。

2. 製鋼用銑吹製時のSi濃度変化

2.1 溶銑中Si低下の操業上の要因

1978年以降、千葉製鉄所の各高炉では燃料比の低減を目指して炉頂ガス利用率 η_{CO} の向上を計った。それに伴って、Fig.1に示すように各炉とも溶銑中Si濃度が低下した。炉内での熱および物質流れの半径方向分布推定モデルによる計算結果から、Si濃度および η_{CO} と滴下帯容積との関係を調べるとFig.2のようになる(千葉第6高炉)。図は η_{CO} の向上によって熱流比上昇が可能となり、その結果滴下帯領域が小さくなるとともに銑中Siが低下したことを示している。Si濃度が溶融帯レベル高さのような、“炉内分布”と強く関連をもつことは、Si移行量に及ぼす炉床でのスラゲーメタル反応の役割を減ずることにもなる。また、高炉の炉容差や炉頂圧とは無関係に熱保存帯以上の高温度領域での銑鉄単位量当りの熱損失が上昇するとSi濃度レベルが上昇するというよい対応関係がみられることやシャフトへの熱負荷が増すような分布コントロールを行なうと銑中Siが上昇するなど²⁾、熱損失の低減もSi濃度レベルを下げるために考慮すべき要因である。

2.2 反応工学的モデルによるSi濃度変化の解析例

製鋼用銑の基準操業としてオールコークス操業下の千葉第3高炉を選び、Table 1に示す条件変更のモデルシミュレーションを行なった。数学モデルの構成については別報³⁾に譲るが、炉床スラゲーメタル浴でのSi移行を無視し、SiOガスを介したSi移行モデルである。表中、シリーズAはO/Cを、シリーズBおよびDは送風温度 T_b を、シリーズCは鉱石粒子径 D_{p0} をそれぞれ変化させている。 D_{p0} の変化は炉内での鉱石間接還元量を変化させ、炉頂ガス利用率が変っている。計算結果の銑中Si濃度と溶銑温度との関係をFig.3に示す。上表のような操業条件の変更によっても同一溶銑温度でSi濃度に0.1%程度の差異が生じている。これらの関係から溶銑温度を一定とした場合のSi濃度と熱流比との関係をプロットするとFig.4のようになる。図より操業条件の変化は熱流比によってまとめら

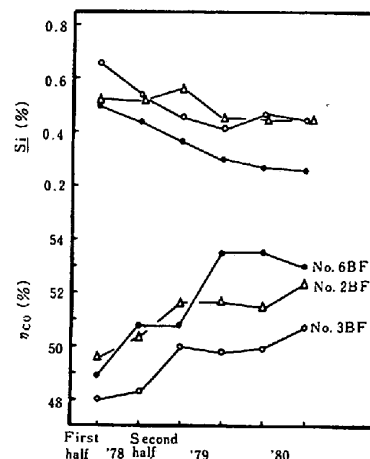


Fig.1 Half-yearly change of CO gas utilization and its contribution to Si content in pig iron at Chiba Works

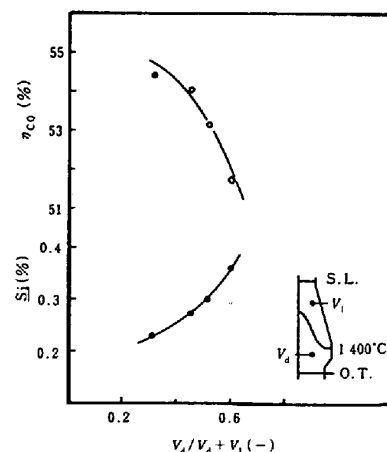


Fig.2 Changes of Si content in pig iron and of CO gas utilization with fractional volume of dropping zone (Chiba No.6 BF)

Table 1 Cases in Calculation for Chiba No.3 B.F.

	O/C (-)	T_b (°C)	D_{p0} (mm)
A series	3.4	1250	12
	3.5	"	"
	3.6	"	"
B series	3.4	1200	"
	"	1150	"
	"	1100	"
C series	"	1050	"
	"	1250	15
	"	"	18
D series	"	1150	15
	"	1050	"

れ、一義的な関係として表わせる。熱流比の上昇に伴う銑中Si濃度の低下について実績データの関係も、Fig.4と同様に示されることは後節に示すが、この関係はモデル的には熱流比上昇に伴う溶融帯レベルの低下に起因し、SiOガスからメタルへのSi吸収量の減少によることが示される。これらをまとめてこれまでの銑中Si低下のフローを次のように示すことができる。

- 送風熱レベルの上昇
 - η_{CO} の向上
 - 炉体熱損失の低減
- (熱流比の増加) SiOガスから
 \rightarrow ore/coke 増加 \rightarrow 銑鉄へのSi吸収量の減少

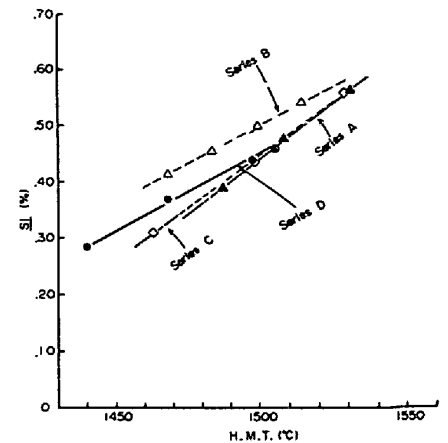


Fig.3 Relationship between Si content and temperature of hot metal under various calculating conditions

3. 鑄物銑吹製時のSi移行

千葉2高炉では製鋼用銑と鑄物銑を吹き分けており、操業結果の例をTable 2に示す。このときのそれぞれの操業条件をベースとして、製鋼用銑および鑄物銑の条件変更のシミュレーション計算を行なった。製鋼用銑についてはTable 3中のケースa~g, 鑄物銑ではケースh~lである。

同高炉の稼動中の炉内温度分布測定によれば、それぞれの操業時の炉内温度分布はFig.5のようになっている。図では溶融帯の高さは、製鋼用銑の場合には羽口上3~4 m, 鑄物銑では羽口上8 m程度である。基準操業条件において、シミュレーション結果の炉内温度分布および諸変数の分布をFig.6およびFig.7に示す。製鋼溶銑の場合に溶融帯位置が若干低いが、鑄物銑ではほぼ合致しており、両者ともに溶銑温度は合致している。

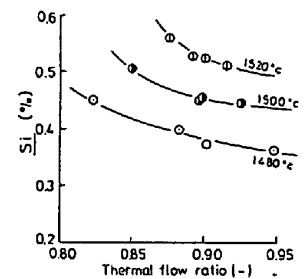


Fig.4 Relation between Thermal Flow Ratio and Si by Calculation

全計算結果の銑中Si濃度と溶銑温度との関係はFig.8のようになり、実績とはほぼ合致する。図より、鑄物銑操業におけるモデル解析上のSi濃度の温度依存性は $0.40\%(\Delta Si) / 10^\circ C$ であり実績のそれに等しい。鑄物銑操業時と製鋼用銑操業時の炉内変数分布の違いは、Fig.6および7から滴下帯におけるガス中SiO分率 X_{SiO} , ガス温度 T_g およびコークス温度 T_s に顕著に出ている。すなわち、鑄物銑操業では羽口先発生ガス温度を下げて、 T_s の局所的な上昇や溶銑、スラグ温度(T_m, T_{s1})の過度の上昇を避け、広い領域にわたって流下スラグからのSiO発生を促す温度分布となっている。しかし、SiOガスからメタルへのSi吸収も十分速いだ

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.

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

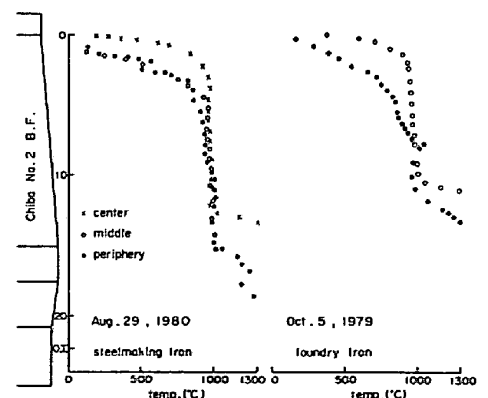


Fig.5 Temperature distribution measured in Chiba No.2 blast furnace

けの溶銑温度があり、ガス中のSiO分率は製鋼用銑操業の場合よりもむしろ低くなっている。このように鑄物銑吹製時のSi移行量はSiOの発生量に依存している。

4. 水島第2高炉での低Si操業

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て銑中Si濃度と熱流比との関係を見るとFig. 9中のドットで示す領域となり、前掲のFig. 4と類似の関係をうる。1981年に入っても●印のプロットで示すように低Ore/Cake下で羽口先理論燃焼温度T.F.T.を下げる操業を行ない、つぎに○印のように低T.F.T.を維持しながら徐々にOre/Cokeの上昇を計った⁴⁾。その結果Si濃度は低下し、旬間平均値0.21%のSi値を得た。このとき図中○印の期間ではSi濃度と熱流比の関係が従来より大きく下方にずれた。このことはこれまでのような熱流比上昇に伴うSiOガスからメタルへのSi吸収量の多少に基づくものではなく、SiOガス発生側での変化を示唆している。そこで前述の千葉2高炉の鑄物銑操業のシミュレーションを基にして、Ore/Cokeと送風温度Tbを徐々に変えながら低Si操業に移る計算を行なった。計算条件をTable 4に示す。表中の記号F,Sはそれぞれ装入物や送風条件が鑄物銑、製鋼用銑の基準操業と同じであることを示している。

Table 4 Cases for the calculation of low si content in hot metal

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: $a_{SiO_2} = 0.094$, $[Mn] = 0.45\%$, $[Ti] = 0.12\%$, $[P] = 0.10\%$

Si: " 0.06, " 0.32%, " 0.075%, " 0.087%

** $D_{po} = 11 \text{ mm}$

計算結果のSi濃度と溶銑温度との関係をFig. 8中に●印(F)および○印(S)で示した。同じ溶銑温度でも製鋼用銑のケース(△印)に比べSi濃度は低下している。最もSi濃度が低い条件Oの計算炉内変数分布をFig. 10に示す。製鋼用銑の炉内分布のFig. 6と比較して、溶融帯のレベルは高くなっている。しかし、ガス温度Tgが低いためコークス温度が相対的に低くなっており、滴下帯

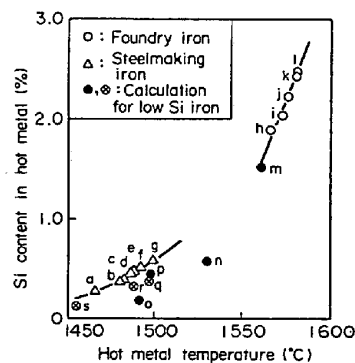


Fig. 8 Relationship between Si content in hot metal and temperature by calculation

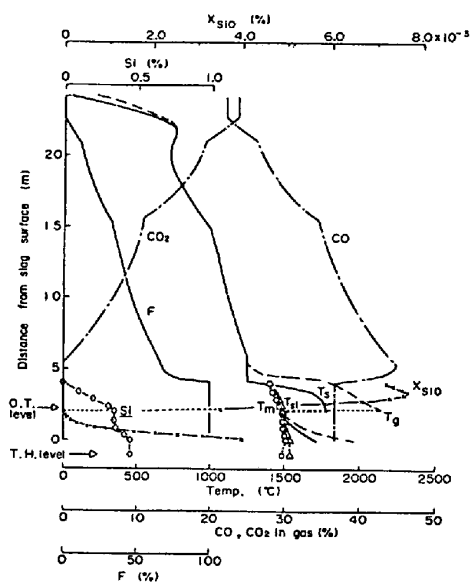


Fig. 6 Distribution of in-furnace variables by calculation (Chiba #2 B.F.: Steelmaking iron)

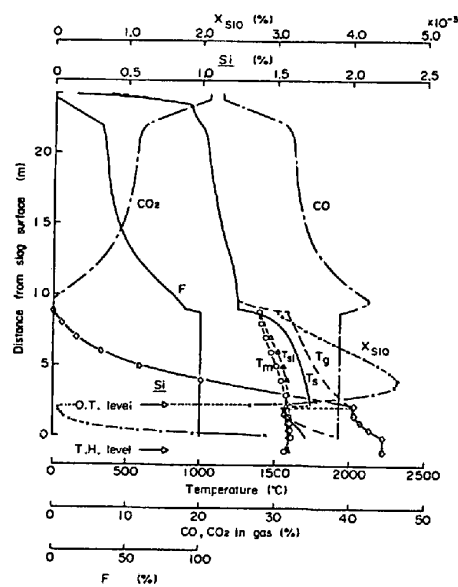


Fig. 7 Distribution of in-furnace variables by calculation (Chiba #2 B.F.: Foundry iron)

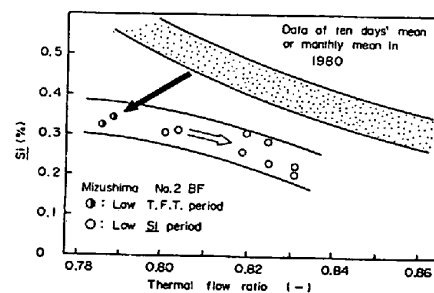


Fig. 9 Influence of Thermal Flow Ratio on Si Content in Hot Metal

での SiO の発生量が顕著に低下している。また分布のパターンは全体的に鑄物銑操業のケース Fig. 7 に類似している。鑄物銑操業と本操業法の根本的な相違点は、鑄物銑が溶銑 Si を上昇させるために、銑鉄単位量当りの入熱量をできるだけ大きくしようとしているのに対し、ここでは入熱量を可能な限り下げようとする点である。本操業方法における銑中 Si 低下の考え方は以下のようにまとめられる。

- Ore/Coke の減少
 - η_{CO} の向上
 - 炉体熱損失の低減
- (滴下帯温度の低下) SiO ガス
→ 送風熱レベル低下 → 発生量の減少

5. 操業方法による SiO ガス発生量の差違

千葉 2 高炉についての鑄物銑操業、製鋼用銑操業および低 T. F. T. による低 Si 操業のシミュレーション結果から、Si 移行に関する炉内要因の変化をそれぞれ Table 5 中の A, B および C に示した。鑄物銑 (A) では流下スラグから発生する SiO は全 SiO 発生量の 80% を占め、SiO の発生量はガス相から凝縮相への熱量供給律速である。一方製鋼用銑 (B) の場合にはスラグからの SiO 発生量は全体の $\frac{2}{3}$ となるが、Si 濃度の温度依存性が大きいことから、この発生量は多過ぎ、炉内で発生する SiO ガスの大半は羽口先で燃焼するコークス中灰分に由来すると考えられる。低 Si 銑操業の例 (C) では、炉内で発生する SiO 量が著るしく低下し、溶銑温度 1490℃ で銑中 Si が 0.18% の銑鉄を得る可能性を示唆している。

6. Si 濃度低下のための操業上の課題 (まとめ)

これまで述べたように今後の低 Si 銑操業として、一層の高熱流比化を指向する、メタルへの Si 吸収量の抑制型と低 T. F. T. 化を計る SiO 発生量の抑制型とがある。いずれのケースにおいても炉頂ガス利用率の向上と炉体損失熱の低減が重要である。とくに前者では溶融帯の低下を伴うので荷下りの安定確保が問題である。炉壁への熱負荷の低減は Si 濃度の低下をもたらすが、同時に Fig.

11 に示すようにスリップ頻度の増加を招く⁵⁾ので、長期的な安定操業が難しい。後者の場合には荷下りは安定するが、Si の低下巾に見合う燃料比の増加が必要となる。

文献 1)板谷, 荒谷, 船越, 可児, 清原; 鉄と鋼, ('79), S564, 2)槌谷,

田口, 河合, 一藤, 佐藤; 川崎製鉄技報, ('81), P557, 3)田口, 槌谷, 久保, 一藤; 鉄と鋼 ('81), S728 4)才野, 藤森, 末森, 佐藤, 野村, 妹尾; ibid. S727, 5)安野, 田中, 河合, 渡辺, 栗原; ibid., S771

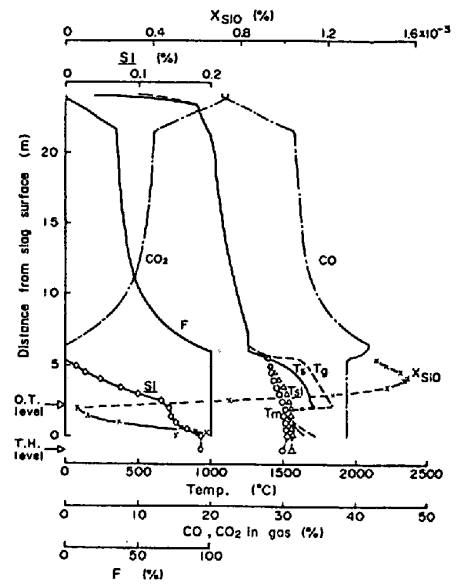


Fig. 10 Calculated distribution of in-furnace variables at low silicon operation

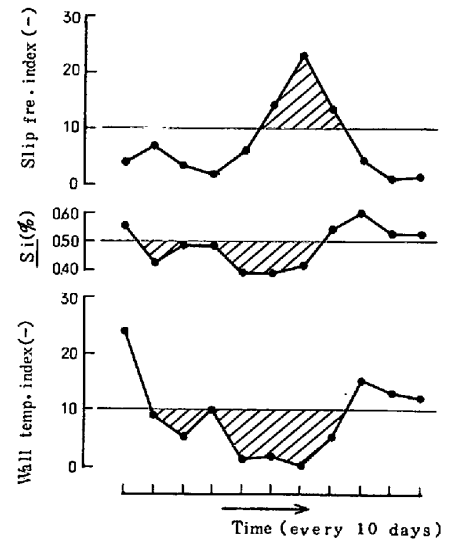


Fig. 11 Relationship between Silicon content in metal and operational indices (Chiba No. 2 B.F.)

Table 5 Results by calculation for Chiba No. 2 B. F.

Case	O/C (-)	H.M.T. (°C)	Si (%)	Height of melting zone (m)	[SiO]at tuyeres (kg-Si/m ² ·h)ℓ ²	[SiO]from slag (kg-Si/m ² ·h)ℓ ²
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)