

# 討 4 高炉数式モデルによる溶銑中Siの検討

住友金属工業(株) 鹿島製鉄所

田鍋一樹 狩谷順二 大原 悟

中央技術研究所

梶原義雅○山県千里

## I. 緒言

溶銑中Si含有率は、高炉下部の熱的状态の指標として従来利用されており、また、製鋼工程における精錬条件にも大きな影響を与えるため、高炉操業における重要な品質管理項目である。また、近年、低P鋼への対処、および、転炉滓投棄の問題から、新炉外溶銑処理プロセス(炉外脱Si+炉外脱P・S)も検討されており、高炉出側での溶銑成分の制御、特に溶銑中Siの低減が要望されている。<sup>1)</sup> 本報告では、反応工学的溶銑中Si移行モデルの概略、モデルによる実炉の溶銑中Siのフォロー、実炉におけるSi低減テストについて説明し、今後の溶銑成分管理の考え方についても述べる。

## II. 高炉内における溶銑中へのSi移行経路の概略

図1は、高炉下部軟化融着帯以下における溶銑中へのSi移行機構の概念図を示す。コークスアッシュ中のフリーSiO<sub>2</sub>は、レースウェイ近傍の高温低酸素分圧領域において、コークス中Cにより還元され、SiO(g)が発生する。(①) このSiO(g)は、ボッシュガス中に含まれて上昇し、浸炭を十分に受けて滴下する溶銑と接触して、溶銑中Cにより還元され、Siは溶銑中に移行する。(②) 生成したSiO(g)の一部は、低温高酸素分圧領域において、スラグ中への移行、および、装入物表面または炉壁部への再凝縮によりSiO<sub>2</sub>になる。(③) コークス充填層滴下中、炉床湯溜り部スラグ層滴下中、および炉床湯溜り部静止中におけるスラグ-メタル反応も考えられる。(④) しかし、従来の研究によれば、スラグ-メタル反応の溶銑中へのSi移行に対する寄与は小さく、むしろ、羽口レベル以下において、スラグ中のFeOによる溶銑中Siの再酸化が問題になるとされている。<sup>2)</sup> また、近年、スラグからのSiO(g)発生への寄与についても検討が行なわれている。<sup>3)</sup> (⑤)

## III. 溶銑中Si移行モデルの概略<sup>4)</sup>

本モデルは、断面平均の反応工学的数式モデルであり、図2に示すように、高炉の高さ方向で起こる反応に注目して、凝縮相温度により5段に分割している。軟化融着帯以下におけるSi移行反応を、SiO(g)発生反応、およびSiO(g)を媒介とする溶銑中へのSi移行反応の2段階より成ると考え、羽口レベル以下におけるFeOによるSiの再酸化反応は考慮していない。なお、モデルは、操業実績を入力とし、伝熱・反応パラメータおよびヒートパターンを計算する実操業解析機能と、伝熱・反応パラメータおよび操業条件を入力とし、操業実績およびヒートパターンを計算するシミュレーション機能とを有している。<sup>5)</sup> 鉍石類の高温性状の影響は、被還元性および装入物溶落温度を介してモデルに取込んでいる。<sup>6)</sup>

### a. SiO(g)の発生反応

コークスアッシュ中のフリーSiO<sub>2</sub>をSiO(g)発生源とした。現状では、コークスアッシュ中のSiO<sub>2</sub>のガス化反応

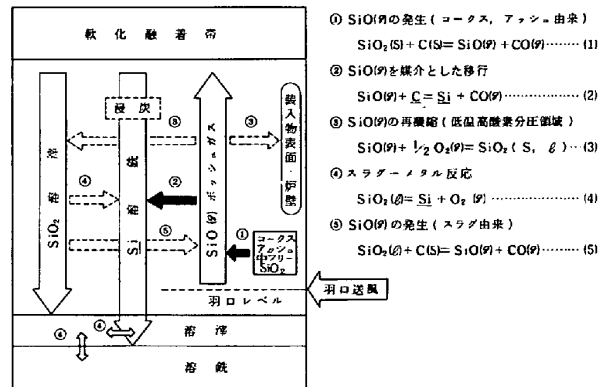


図1 高炉下部における溶銑中へのSi移行機構の概念図

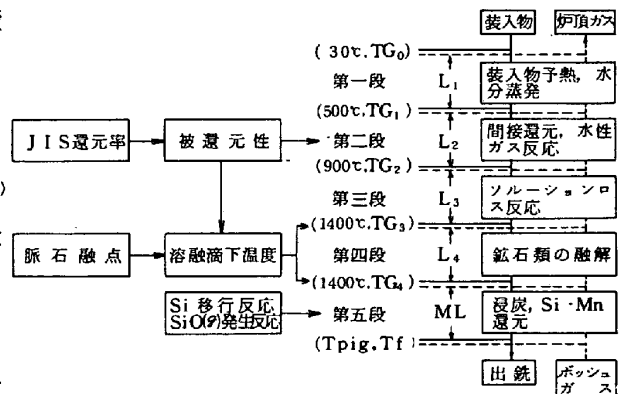


図2. 溶銑中Si移行モデル

速度のデータが少ないこと、および、羽口前コークス温度は沸点近傍であることの2つの理由から、コークスアッシュ中のSiO<sub>2</sub>全量がガス化すると仮定した。

b. SiO(g)を媒介とするSi移行反応

軟化融着帯以下のコークス充填層中において、滴下する溶銑とSiO(g)を含有するポッシュェガスとが向流で接触して、Siが溶銑中に移行すると考え、次の速度式を使用した。

$$\frac{d(\%Si)}{dt} = k_f \cdot \frac{A}{M} \cdot P_{SiO} \quad (6)$$

$$k_f = 1.34 \times 10^{12} \exp(-66500 / R \cdot T_1) \quad (7)$$

[%Si] : 溶銑中Si(%), t : 時間(h), k<sub>f</sub> : 反応速度定数(%・Kg/h・m<sup>2</sup>・atm)

A/M : 比表面積(m<sup>2</sup>/Kg), P<sub>SiO</sub> : SiO(g)分圧(atm), T<sub>1</sub> : 反応温度(K)

なお、(6)式は、等温条件で考えると、次の(8)式が得られる。

$$[\%Si] = k_f \cdot \frac{A}{M} \cdot P_{SiO} \cdot t \quad (8)$$

ここで、比表面積  $\frac{A}{M}$ , 反応時間 t は、それぞれ、(9), (10)式で表わされる。

$$\frac{A}{M} = \frac{a_{eff}}{\rho_p \cdot Hd} \quad (9)$$

$$t = \frac{ML}{U \cdot Hd} \quad (10)$$

a<sub>eff</sub> : 気液有効接触面積(m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>(bed)), ρ<sub>p</sub> : 溶銑の密度(Kg/m<sup>3</sup>)

Hd : ホールドアップ(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>(bed)), ML : 滴下距離(溶解帯レベル)(m)

U : 溶銑の滴下速度(m<sup>3</sup>/h・m<sup>2</sup>(bed))

以上より、溶銑中Siの低減のためには、SiO(g)発生反応の抑制としてコークス由来SiO<sub>2</sub>量の低減、および、Si移行反応の抑制として溶解帯レベル(ML)・溶銑温度(反応温度)の低下等が必要なことが明らかとなったが、以下に、モデルの適用例として、実炉の溶銑成分のフォロー、および、低Siテスト操業について述べる。

IV. モデルの適用例

(1) 溶銑温度(HMT), 溶解帯レベル(ML)と溶銑中Si

図3に示すように、短期的には、溶銑温度と溶銑中Siの間には相関があり、溶銑温度が上昇すると溶銑中Siは上昇する。(⊕0.07%Si/⊕10℃溶銑温度) これは、溶銑温度の上昇により、Si移行反応((2)式)の反応温度が上昇し、反応が促進されるためである。

しかし、同一の溶銑温度レベルでも、期間により、溶銑中Siレベルは異なる。これは、図4に示すように、中長期的には、熱流比が変動し、溶解帯レベルが変動するためである。すなわち、溶銑温度レベル

が同一でも、溶解帯レベルの上昇によって、溶銑滓の滴下距離が長くなるためにSi移行反応が促進され、溶銑中Siは上昇する。したがって、溶銑中Siの低位安定維持には、短期的には溶銑温度、中・長期的には溶解帯レベルの低位安定維持が必要である。

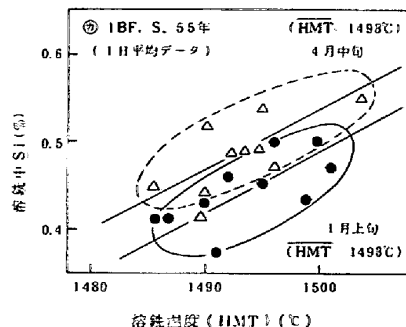


図3 溶銑温度と溶銑中Si

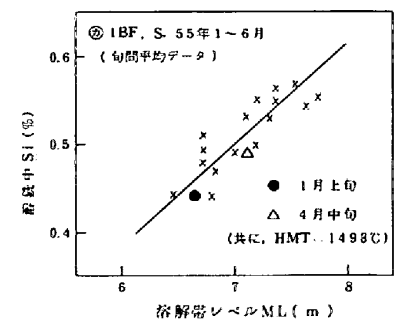


図4 溶解帯レベル(ML)と溶銑中Si

(2) コークス由来SiO<sub>2</sub>量, 有効接触面積 aeffと溶銑中 Si

図5に示すように, オールコークス操業から液燃吹込操業への移行に伴い, 溶銑中Siは低下している。この溶銑中Siの低下は, コークスアッシュ由来のSiO<sub>2</sub>量低下によるSiO(g)発生反応の抑制(①), および, 溶解帯レベル(ML)はほぼ一定に保たれたが, 有効接触面積 aeffの低下(ソリューションロス量の低下に基く炉下部コークス粒径の上昇に起因すると考えられる)(②), 出銑比上昇(③), 溶銑温度低下(④)によるSi移行反応の抑制により説明される。

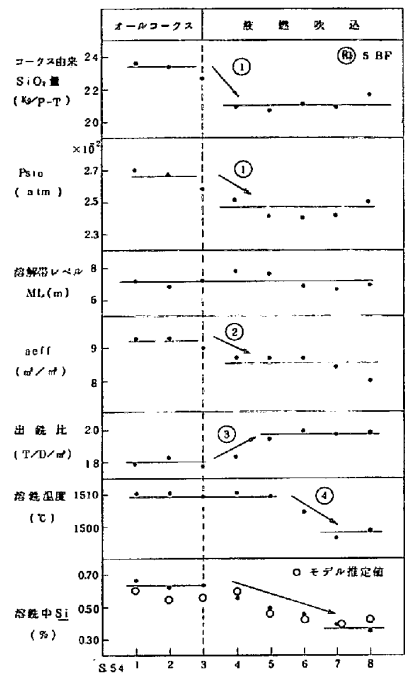


図5 オールコークスから液燃吹込移行期の溶銑中 Si の推移

(3) ①BF, 低Siテスト操業の実施

a. 事前検討

前述のモデルによる高炉操業実績解析の知見をもとにして, 低Siテスト操業を計画した。①SiO(g)発生反応の抑制として, コークスアッシュの低下(11.2%→10.5%), ②Si移行反応の抑制として, 焼結鉱比上昇(72%→80%), 焼結鉱RI上昇(63%→66%), 溶銑温度低下(1500℃→1490℃)のアクションを行なうことにし, 溶銑中Siの目標値を0.30%とした。図6に, 今回の低Siテスト操業の思考フローを示すが, 上記アクションにより,

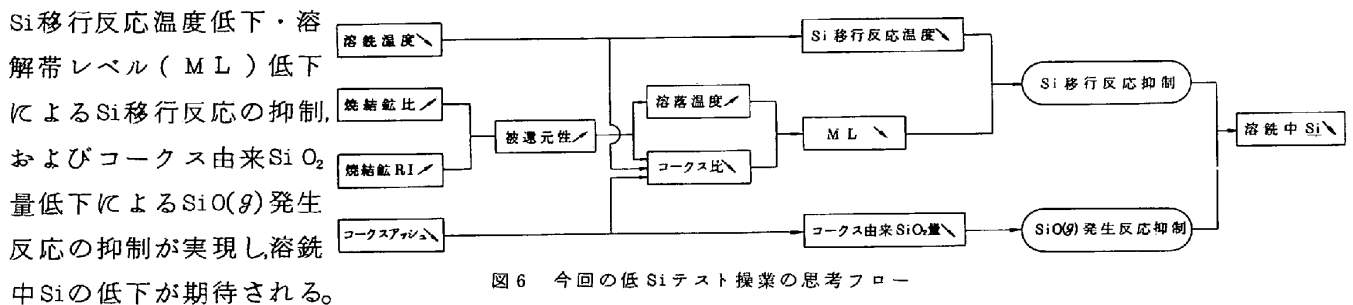


図6 今回の低 Si テスト操業の思考フロー

Si移行反応温度低下・溶解帯レベル(ML)低下によるSi移行反応の抑制, およびコークス由来SiO<sub>2</sub>量低下によるSiO(g)発生反応の抑制が実現し, 溶銑中Siの低下が期待される。

なお, 羽口前温度の低下については, SiO(g)発生反応の抑制が期待される一方, 熱流比の低下により溶解帯レベル(ML)の上昇をきたしSi移行反応が促進されるという両面の影響が考えられるため, 今回のテストでは, 羽口前温度は一定に保つことにした。

b. 実炉テスト結果

表1に, ベース期間, および, テスト操業期間における操業成績を示す。原料条件(焼結鉱, コークス), 操業条件(溶銑温度)ともに, ほぼ計画値に達し, 予測通り, Si低減が実現された。

図7に, この期間における溶銑中Siのモデル推定値と実績値の関係を示すが, 両者には良い対応が見られる。

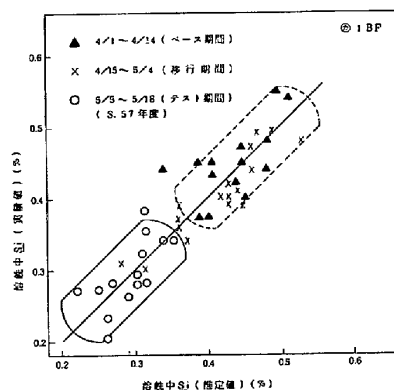


図7 低 Si テスト 操業期の溶銑中 Si

表1 低 Si テスト操業実績

項目	期間	
	ベース期間 S.57.4/1~4/14	テスト期間 S.57.5/5~5/18
焼結鉱 比 例	72	80
焼結鉱 RI 例	63	66
コークス中アッシュ 例	11.2	10.6
溶銑 温 度 (℃)	1499	1492
溶銑 中 Si 例	0.45	0.29
出 銑 比 (T/D-m)	2.00	2.09
コークス比 (Kg/P-T)	444.7	436.1
タ ー ル 比 (Kg/P-T)	20.5	17.8
ML (m)	7.50	6.87
Psio (atm)	2.76 × 10 <sup>-2</sup>	2.60 × 10 <sup>-2</sup>
σ Si	0.105	0.087
σ 溶銑 温 度	16.6	15.6
風 圧 変 動 指 数	1.49	1.38
羽 口 前 温 度 (℃)	2434	2418
ス ラ グ 比 (Kg/P-T)	286	294
ス ラ グ CaO/SiO <sub>2</sub> (-)	1.26	1.30

なお、このテスト期間において、溶解帯レベル（ML）、溶銑温度ともに低下したが、原料条件（コークスアッシュ、焼結鉍RI）の向上により、溶銑温度、溶銑中Siの標準偏差σは低下し、風圧変動も低下して、荷下り異常等の炉況変化は見られなかった。

図8に、シャフト上部ゾンデ計測値を入力とするML形状推定モデル<sup>8)</sup>の計算結果を示すが、ベース期間に比べて、テスト期間中では、炉中間部から炉壁部にかけてのガス利用率(ηco)が向上し、該当部の融着帯が低下したことが確認された。

今回のテストにおいて行なったアクションの溶銑中Siにおよぼす効果を表2に示す。

表2 低Siテスト操業時の操業アクションのSiへの影響

項目	期間	テスト期間 (5/5~5/18)		影響係数 (モデル)
		ベース (4/1~4/14)	ΔSi	
操業条件	コークスアッシュ	11.2	10.6	⊖ 0.04 ⊕ 0.07% Si / 1%
	焼結鉍比(RI-63一定)	7.2	8.0	⊖ 0.04 ⊖ 0.05% Si / 10%
	焼結鉍 RI	6.3	6.6	⊖ 0.02 ⊖ 0.08% Si / 10%
	溶銑温度	1499	1492	⊖ 0.05 ⊕ 0.07% Si / 10%
溶銑中Si(推定値)(%)		—	0.30	⊖ 0.15
" (実績値)(%)		0.45	0.29	⊖ 0.16

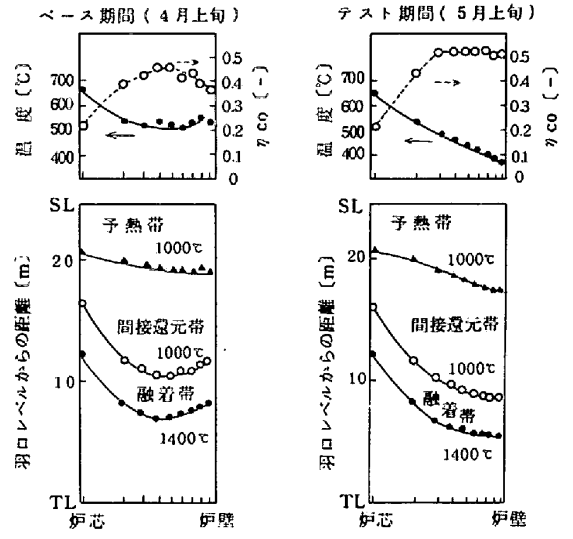


図8 シャフト上部ゾンデに基づくML形状推定結果

V. 今後の溶銑成分管理の考え方

以上、高炉におけるSi低減方法について述べてきたが、製銑工程における溶銑成分管理項目としてはSiと共に、S、P、Mn等も、製鋼工程の精錬条件に影響を与えるので重要である。

今後、製銑工程での溶銑成分調整技術を確立すると共に、原燃料状況に応じた、コークス-焼結-高炉-炉外溶銑処理-製鋼を含めた最適な溶銑成分調整の評価法を確立する必要がある。(図9)

VI. 参考文献

- 1) 例えば、丸川、城田、姉崎、平原：鉄と鋼 Vol.6 6 (1980), A.145
- 2) 徳田、榎谷、大谷：鉄と鋼 Vol.5 8 (1972), P.219
- 3) 田口、榎谷、久保、一藤：鉄と鋼 Vol.6 7 (1981), S.528
- 4) 羽田野、山岡、山県：鉄と鋼 Vol.6 2 (1976), S.391
- 5) 羽田野、山岡、山県、佐藤：鉄と鋼 Vol.6 2 (1976) S.67
- 6) 宮崎、下田、岩永、山本、清水、片岡：鉄と鋼 Vol.6 7 (1981), A.13
- 7) 榎谷、徳田、大谷：鉄と鋼 Vol.5 8 (1972), P.1927
- 8) 羽田野、沖、山岡、山県、村上：鉄と鋼 Vol.6 5 (1979), S.52

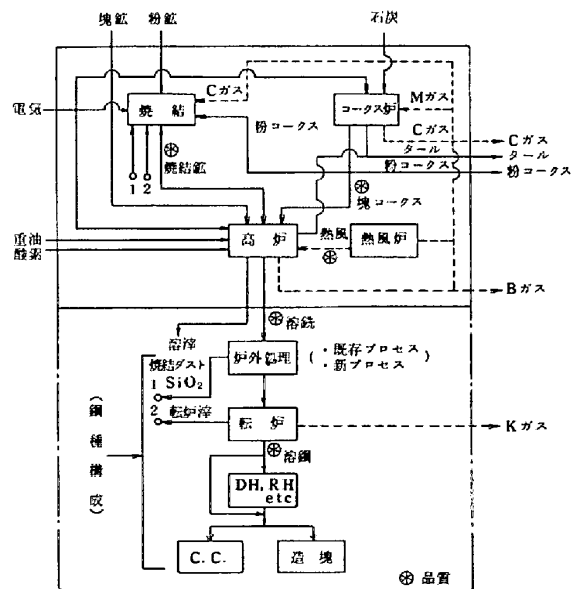


図9 製銑-製鋼工程の物質フロー