
高炉における低 Si 溶銑の製造法

Manufacturing of Pig Iron with Low Si Content in Blast Furnace

槌谷 暢男(Nobuo Tsuchiya) 田口 整司(Seiji Taguchi) 河合 隆成(Takanari Kawai)
一藤 和夫(Kazuo Ichifuji) 佐藤 政明(Masaaki Sato)

要旨：

最近の銑鉄中 Si 濃度の推移を千葉および水島製作所の実績からとらえ、低 Si 銑吹錬法の原理を化学反応論および化学工学的な観点から考察した。つぎに高炉のデータ解析によって Si 濃度と操業上の主な要因や特性との関連を概括した。さらに将来の低 Si 濃度の達成目標は 0.1%以下となるものと推定し、これを安定達成するために解決しておかなければならない二、三の事項について言及した。

Synopsis：

On the basis of recent findings of changes in Si content in pig iron at the blast furnaces of Chiba and Mizushima Works, the blast furnace operation with a low Si content in pig iron are discussed from the viewpoints of chemical reaction kinetics and liquids flow in the packed bed. Operational variables and characteristics of the blast furnace are related to Si content in pig iron by the analysis of practical data. A possible target of Si content in pig iron in the near future is proposed to be around 0.1%, and some problems which must be solved for attaining the target with a stable furnace operation are also discussed.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

高炉における低 Si 溶鉄の製造法

Manufacturing of Pig Iron with Low Si Content in Blast Furnace

槌谷 暢 男*
Nobuo Tsuchiya

田口 整 司**
Seiji Taguchi

河合 隆 成***
Takanari Kawai

一 藤 和 夫****
Kazuo Ichifuji

佐 藤 政 明*****
Masaaki Sato

Synopsis:

On the basis of recent findings of changes in Si content in pig iron at the blast furnaces of Chiba and Mizushima Works, the blast furnace operation with a low Si content in pig iron are discussed from the viewpoints of chemical reaction kinetics and liquids flow in the packed bed. Operational variables and characteristics of the blast furnace are related to Si content in pig iron by the analysis of practical data. A possible target of Si content in pig iron in the near future is proposed to be around 0.1%, and some problems which must be solved for attaining the target with a stable furnace operation are also discussed.

1. 緒 言

鉄鉄中の Si 濃度は従来から高炉下部の高温領域、主として滴下帯の熱レベルを表わす指標のひとつとして利用されている^{1,2)}。さらに、最近では以下の理由により鉄鉄中 Si 濃度の制御、特に 0.1～0.3% のような低濃度での制御が操業技術課題のひとつとなっている。すなわち、転炉製鋼法においてはスラグレス、あるいはスラグミニマム吹錬に関する技術開発が進められており³⁻⁸⁾、この吹錬法は低 Si 濃度の鉄鉄供給が前提とされている。もちろん、低 Si 濃度の鉄鉄は必ずしも高炉での製造に限定されるわけではなく、高炉外で鉄鉄に酸化鉄などの酸化剤を吹き込んで脱硅することによっても得ることができる^{3,6,9)}。しかし、炉外脱硅法には新しい設備投資が必要であり、さら

にランニング・コスト、生成するスラグの処理費用を伴うなどコスト上の欠点がある。したがって、低 Si 濃度の鉄鉄は高炉内で製造することが望ましい。特別な設備は必要としないからである。

他方、高炉内で低 Si 濃度の鉄鉄を製造する場合の高炉操業上の要件のひとつに、炉下部の熱レベルを低下させる、換言すれば、滴下帯高さの低下がある。特に、0.1～0.2% の低 Si 濃度を指向する場合には、顕著な鉄鉄温度の低下を伴うことがあり、このような状態の時に、排鉄や排滓が不十分であったり、炉下部起因の大スリップが発生した場合には、冷え込みなどの大事故につながる可能性がある。したがって、低 Si 濃度の鉄鉄製造にとっては、順調で規則的な装入物降下を保障する安定操業は必要条件であり、また、低 Si 濃度の鉄鉄吹錬そのものが不安定操業をひき起すことも避けなければならない。十分な排鉄や排滓、

* 技術研究所第1研究部製鉄研究室室長・工博

*** 千葉製鉄所製鉄部製鉄課掛長

***** 水島製鉄所製鉄部製鉄技術室主査(掛長)

[昭和56年6月12日原稿受付]

** 技術研究所第1研究部製鉄研究室主任研究員

**** 千葉製鉄所製鉄部製鉄技術室

炉底温度管理による十分な炉床容積の確保なども重要な操業要件である。現時点では、0.1~0.2%のSi濃度の銑鉄を操業上の不安無しに製造する技術は確立されていない。本報告では高炉操業データを中心に、低Si濃度の銑鉄吹錬の原理と、今後解決されなければならない技術上の課題について述べる。

2. 銑鉄中Si濃度の歴史的推移

最近10年間の銑鉄中Si濃度および燃料比の推移をFig. 1に示す。この間、1973年と1977年の

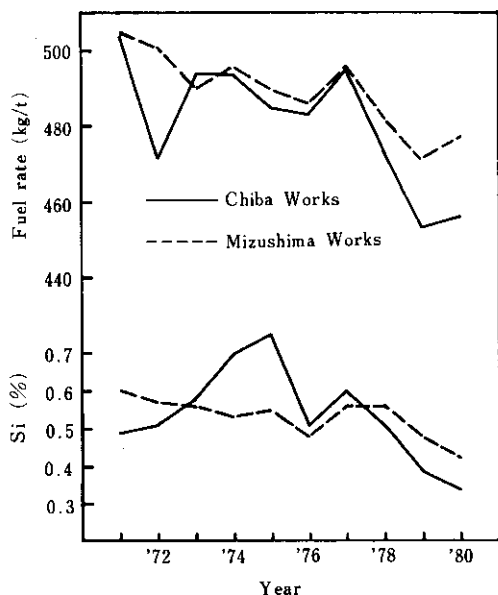


Fig. 1 Change of Si content in pig iron and fuel rate during the last ten years at Chiba and Mizushima Works

2回にわたる石油危機はコークス性状の劣化をひき起し、高炉操業に大きな影響を及ぼしたが、全体的にはSi濃度および燃料比は低下傾向にあることがわかる。こまかい点を度外視するならば、この傾向にはつぎのような技術的背景があると言える。すなわち、この10年間、出銑比に大きな向上が認められなかった点を考慮すると、燃料比低下に寄与した項目として、送風温度の上昇、炉体熱損失の低下、炉頂ガス利用率の向上がある。燃料比の低下と銑鉄中Si濃度の低下との関係は、概括的ではあるが、燃料比低下に伴う銑鉄トン

あたりのSiO発生源の減少、および装入鉱石の被還元性の向上と炉頂での装入物分布の適正化に基づくガス利用率の向上による滴下帯高さの低下とから説明することができる。一般に、炉頂ガス利用率が向上すれば炉下部での熱量に余裕が生じ、銑鉄温度の上昇やSi濃度の上昇などの結果が現われるため、ore/cokeの増加などにより熱流比を高める操業に移行するのが普通である。熱流比の高い炉内の温度分布の特徴は、熱保存帯下端が炉下方に移動した状態、つまり滴下帯高さ (Fig. 8参照)が低いことにある。この点とSi濃度との関連は以下に述べる低Si濃度の銑鉄吹錬法の原理から説明することができる。とりわけ、ガス利用率向上による燃料比低下に対する努力が、Fig. 2に示すように結果としての銑鉄中Si濃度低下に対する寄与が大きく、これまでの操業技術上の背景として重要である。

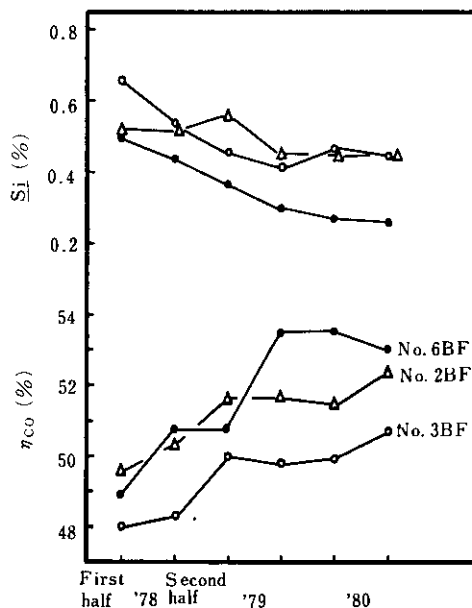
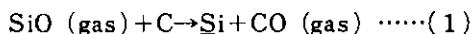


Fig. 2 Half-yearly change of CO gas utilization and its contribution to Si content in pig iron at Chiba Works

3. 低Si濃度の銑鉄を吹錬する原理

銑鉄中へのSiの溶解は、滴下帯に相当するコークス充填層の空隙を、炭素を含む銑鉄が滴下する過程で、同じ空隙を上昇するボッシュ・ガス中

の SiO が銑鉄中の炭素で還元されることによって主として進行する¹⁰⁾。この化学反応は(1)式で表わされる。



銑鉄が炭素で飽和している場合には、反応(1)の速度式は(2)式で与えられる¹¹⁾。ここで、銑鉄中 Si 濃度が 1% 以下の低い範囲では逆反応の寄与は無視できることが考慮されている。

$$\frac{\rho_M \cdot H_M}{m_{\text{Si}} \cdot A_{\text{GM}}} \frac{d(\% \text{Si})}{100 dt} = k_f \cdot P_{\text{SiO}} - k_b \cdot P_{\text{CO}} \cdot a_{\text{Si}} \\ \approx k_f \cdot P_{\text{SiO}} \quad \cdots \cdots (2)$$

k_f, k_b : それぞれ正、逆反応の見掛けの反応速度定数

ρ_M, H_M : 銑鉄の密度と全ホールドアップ

m_{Si} : Si 分子量

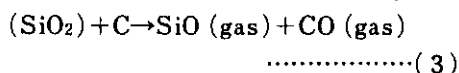
A_{GM} : ガス-メタル界面積

$P_{\text{SiO}}, P_{\text{CO}}$: それぞれ SiO と CO の分圧

a_{Si} : 銑鉄中の Si 活量

なお(2)式は炉内単位体積について考えている。

他方、ボッシュ・ガス中の SiO はコークスが燃焼する際にコークス中灰分に含まれる SiO₂ と滴下帯を流下するスラグ中の SiO₂ が(3)式によって還元されて発生すると考えられている^{10,12)}。



反応(3)の速度は(4)式で与えられる¹³⁾。

$$-\frac{\rho_S \cdot H_S}{m_{\text{Si}} \cdot A_{\text{SC}}} \frac{d(\% \text{SiO}_2)}{100 dt} = k'_f \cdot a_{\text{SiO}_2} \quad \cdots \cdots (4)$$

k'_f : 正反応の見掛けの反応速度定数

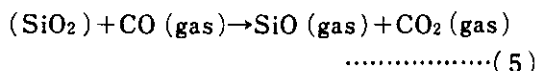
ρ_S と H_S : スラグの密度と全ホールドアップ

m_{SiO_2} : SiO₂ 分子量

A_{SC} : スラグ-コークス界面積

a_{SiO_2} : スラグ中シリカ活量

なお、1 気圧付近の変化に限れば、CO 分圧は SiO₂ 還元速度に影響しないことが実験的に確かめられており、この点を考慮すれば、(3)式の逆反応および反応(5)は無視できる。



二つの反応速度式(2)および(4)から明らかのように、銑鉄中 Si 濃度の制御の原理は、①反応

温度の制御 (k_f および k'_f の大小)、② 反応時間の制御 (t に関する積分の長短)、③ 反応比表面積の制御 (A_{GM}/H_M および A_{SC}/H_S) および④ スラグ組成の制御 (a_{SiO_2} の大小)にある。以上の 4 項目の制御は、その難易度をさしあたり度外視するとして、炉内においては以下の方法によって可能である。

3.1 反応温度の制御

SiO₂ の還元による SiO の発生、SiO の還元による Si の銑鉄中への溶解の二つの観点から考えると、レースウェイの温度、つまり羽口前コークス温度の制御によるコークス中灰分に含まれる、SiO₂ から発生する SiO 量の制御と鉍石から生成するスラグ中 SiO₂ が滴下帯内で還元されて発生する SiO 量の制御が重要であるが、後者は滴下帯内をスラグと銑鉄が接触しながらスラグ-メタル反応によりスラグ中 SiO₂ が銑鉄中 Si に還元される量の制御を考える場合にも重要な意味をもっている。現時点では、コークス中灰分に含まれる SiO₂ の SiO 経路による銑鉄中 Si への還元が、鉍石の脈石分として含まれる SiO₂ の還元に比べて、銑鉄中 Si 濃度を定める要因として大きいと考えられているが、その寄与率の具体的な数値は知られていない。この点の解明は、鑄物銑の Si 濃度を説明する上から考えても重要であるが、いずれの場合にも、羽口前コークス温度の制御と滴下帯温度の制御とは考慮すべき要因である。

羽口前発生ガス温度はレースウェイ内に降下するコークス温度、送風温度、送風中湿分、送風中酸素濃度、補助燃料(重油、タール、微粉炭など)の吹込み量により、また滴下帯温度は羽口前発生ガス温度、滴下帯高さと銑鉄およびスラグの流量によって主として決定されることから二つの温度は相互に関連を有している。

ここで注意を要する事は通常操業指標として用いられる羽口前理論燃焼温度は複合送風の条件のみによって定まるものであり、現実の羽口前発生ガス温度とは必ずしも対応しないと考えられる点である。

3.2 反応時間の制御

レースウェイでの SiO 発生量は主として羽口前

コークス温度と溶融したコークス灰分とコークスとの濡れ面積に依存すると考えられるので、ここでいう反応時間は、銑鉄およびスラグの滴下帯内の滞在時間に限定して良いであろう。これら融体の滞在時間は滴下帯の高さ、融体自身の物理的性質（すなわち、粘性、密度）や滴下流量、さらに滴下帯内コークスの粒度分布などに左右される。

融着帯直下（1400～1450℃）で溶融したスラグ中のFeO濃度が高い場合には、そのFeOが還元されて大半が鉄になるまでの滴下距離は、その間の領域の酸素分圧を高めるという意味で、実質的に滴下帯高さを低下させることになる。したがって、滴下帯高さはつぎの複数の要因に依存すると考えられる。すなわち、羽口前発生ガス温度、ore/coke、鉬石の溶融滴下開始温度、鉬石の還元性（塊状帯から軟化帯までの温度範囲での間接還元反応速度）、補助燃料吹込み量あるいは送風中湿分量（ボッシュ・ガス中水素濃度）および炉体放散熱（特にボッシュから炉床部にかけての領域での炉体放散熱）である。

滴下帯内での融体の滞在時間は、滴下帯高さの他に融体の流下線速度にも依存する。この線速度 V_i は、融体の容量速度 U_i と全ホールドアップ H_i 、とによって(6)式で表わされる。

$$V_i = \frac{U_i}{H_i} \quad \dots\dots\dots (6)$$

U_i は単位時間に単位断面積を通過する融体容積であるから、単位時間あたりの送風量増加、あるいはore/coke増加などによって出銑比（炉内単位容積あたりの1日の出銑量）が増せば大きくなる量であり、結果的に V_i が増加し、仮に滴下帯高さが不変で操業されたとしても、滴下帯での融体の滞在時間は短縮される。

H_i はたとえば福武ら¹⁴⁾の式(7)～(9)によって表わされる。

$$H_i = H_{i,s} + H_{i,d} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$H_{i,s} = \frac{1}{20.5 + \frac{0.263 \rho_i \cdot g \cdot \phi^2 \cdot D_p^2}{\sigma_i (1 + \cos \theta_i) (1 - \epsilon)^2}} \quad \dots\dots (8)$$

$$H_{i,d} = 6.05 \left(\frac{\rho_i \cdot U_i \cdot D_p \cdot \phi}{(1 - \epsilon) \mu_i} \right)^{0.648} \times \left(\frac{\rho_i^2 \cdot g \cdot D_p^3 \cdot \phi^3}{(1 - \epsilon)^3 \mu_i^2} \right)^{-0.485}$$

$$\times \left(\frac{\rho_i \cdot g \cdot D_p^2 \cdot \phi^2}{\sigma_i (1 - \epsilon)^2} \right)^{0.097} \times (1 + \cos \theta_i)^{0.648} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$H_{i,s}$, $H_{i,d}$: それぞれ融体 i の静的、動的ホールドアップ（添字 i は銑鉄またはスラグの2つのケースを示す）

D_p , ϵ および ϕ : コークスの粒子径、層空隙率および表面形状係数

g : 重力の加速度

σ_i , μ_i : 融体の表面張力および粘度

θ_i : コークスと融体との接触角

(7)～(9)式を融体の物性値¹⁵⁾は大きく変化しないとして、出銑比2.0程度の高炉について適用すると銑鉄では静的ホールドアップ $H_{i,s}$ が動的ホールドアップ $H_{i,d}$ に比べて圧倒的に大きく、スラグでも全ホールドアップ H_i の75%を占める。したがって、 H_i に対してはコークス粒子径の影響が大きく、粒子径が大なるほど H_i は小さくなり、融体の滴下帯での滞留時間を短くすることができる。またスラグについては μ_s は組成によって大きく変えるので、 H_s への寄与を考える必要が生ずる場合がある。銑鉄、スラグともに H_M , H_S に及ぼす U_M , U_S の影響は小さいが、滞留時間についてみると(6)式の関係があるので U_M , U_S の増加に反比例して短くなり、その影響は大きい。

ここで滴下帯でのコークス粒子径を40mm程度とすれば、(7)～(9)式から粒子径の±10%の増減に対し、 H_M では±16%の影響を受け、炉内でのSi移行量に及ぼすコークス粒子径の影響は反応時間を介して一見大きく見えるが次節の検討が必要である。

3.3 反応比表面積の制御

反応比表面積は(2), (4)式に示したように、銑鉄およびスラグについてそれぞれ(10), (11)式で表わされる。

$$a_{GM} = \frac{A_{GM}}{H_M} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$a_{SC} = \frac{A_{SC}}{H_S} \quad \dots\dots\dots (11)$$

まず、SiOと銑鉄融体との滴下帯での反応を考えると、 A_{GM} はガス-融体間の有効表面積であり馬田¹⁶⁾らによる(12)式により計算できる。

$$A_{GM} = \frac{0.34}{D_P} \left(\frac{U_M^2}{g \cdot D_P} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{D_P \cdot \rho_M \cdot U_M^2}{\sigma_M} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \dots\dots\dots(12)$$

上式より、有効表面積に及ぼすコークス粒子径および銑鉄流量の影響は、 $D_P^{1/6}$ 、 $U_M^{1/3}$ に比例すると見積られ、とくに粒子径変化の寄与が小さい(10)式と(12)式とから、反応比表面積 a_{GM} に対する粒子径増加の寄与はほぼ H_M が減少する分だけ増加すると考えられる。一方、滴下帯高さおよび SiO ガス分圧を一定として(2)式を積分する場合には、生成銑鉄中 Si 濃度は反応時間と反応比表面積との積に比例するので、(13)式の関係が導かれる。

$$[\%Si] \propto \left(\frac{H_M}{U_M} \right) \cdot a_{GM} = \frac{A_{GM}}{U_M} \quad \dots\dots\dots(13)$$

したがって、銑鉄中 Si 濃度に及ぼすコークス粒子径の影響は結果として小さいと推定される。また、銑鉄流量 U_M の Si 濃度に対する寄与は、(13)式から、 $U_M^{-2/3}$ のオーダーで現れると予想される。

つぎにスラグに含まれる SiO_2 とコークスとの接触による SiO の発生反応について考えると、 A_{SC} はスラガー コークス間の濡れ表面積となり、恩田ら¹⁷⁾の(14)式が適用できる。

$$\begin{aligned} \frac{A_{SC}}{a} = 1 - \exp \left\{ -1.45 \left(\frac{\rho_S \cdot U_S}{a \cdot \mu_S} \right)^{0.1} \right. \\ \cdot \left(\frac{a \cdot U_S^2}{g} \right)^{-0.05} \cdot \left(\frac{\rho_S \cdot U_S^2}{\sigma_S \cdot a} \right)^{0.2} \\ \cdot \left. \left(\frac{\sigma_C}{\sigma_S} \right)^{0.75} \right\} \quad \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

ここで、 a はコークス充填層の比表面積 ($= 6 \times (1 - \epsilon) / \phi \cdot D_P$)、 σ_C はコークスの濡れ性に関する定数値である。

前述の出銑比の操作で見積ると A_{SC} に及ぼすコークス粒子径およびスラグ流量の影響は、 $D_P^{-0.7}$ および $U_S^{0.4}$ に比例する程度である。また、滴下帯高さおよびボッシュ・ガス量を一定とすると、発生する SiO ガスの分圧はスラグ中 SiO_2 濃度の減少量とスラグ流量との積に比例するので、(13)式と同様に(4)式の積分を考慮して、次式を得る。

$$P_{SiO} \propto \left(\frac{H_S}{U_S} \right) \cdot a_{SC} \cdot U_S = A_{SC} \quad \dots\dots(15)$$

したがって、単位時間当り滴下帯で発生する SiO

量に対するコークス粒子径およびスラグ流量の影響は $D_P^{-0.7}$ および $U_S^{0.4}$ のオーダーで寄与すると推定されるが、高炉の操業データとの対応は未確認である。

3-4 スラグ組成の制御

SiO の発生源としてはこれまでに述べたように二つの可能性があるが、コークス中灰分については化学組成はほぼ一定で、これを変えることは輸入石炭の化学組成から考えても、ほぼ不可能と言っている。したがって、コークス中灰分からの、 SiO 発生を化学組成の観点から制御することは困難であり、むしろ灰分量を変化させる方が容易である。しかし、これも限られた範囲内と考えられる。他方、銑石の脈石分から生成するスラグについては、 SiO 発生量は例えば焼結銑、ペレットの脈石成分の塩基度の調整により制御は可能である。また、羽口周辺で発生した高分圧の SiO が滴下帯内を上昇する過程で滴下スラグに吸収される可能性を考えれば、焼結銑、ペレットの脈石塩基度の調整は滴下帯内の SiO 吸収速度の変化をもたらす、結果的に SiO 分圧の制御につながる。

以上、銑鉄中 Si 濃度の制御原理を要因別の系統図として表現すると Fig. 3 のようになる。

4. 高炉操業の特徴と銑鉄中 Si 濃度の関係

4-1 短時間内での関係

高炉操業の要件は円滑な出銑率と一定の銑鉄成分の保証にあり、最も注目すべき操業指標は溶銑温度である。短時間の変動という観点に立てば、溶銑温度と Si 濃度はともに炉下部での熱保有量（以下炉熱と呼ぶ）の増減にともなって上昇、低下する。例えば連続する各出銑タップについて溶銑温度と Si 濃度との関係をみると Fig. 4 に示すように溶銑温度 $\pm 10^\circ C$ の変化につき Si は $\pm 0.03 \sim 0.05\%$ の強い正相関を有する。したがって、 Si 濃度の変動を防止するためには溶銑温度レベルを安定させるのが第一であるが、溶銑温度を得てから炉熱調整のアクションをとるのでは Si 濃度制御は後追いになってしまう。そこで、短時間の Si 濃度制御は時々刻々の高炉の熱および物質収支に

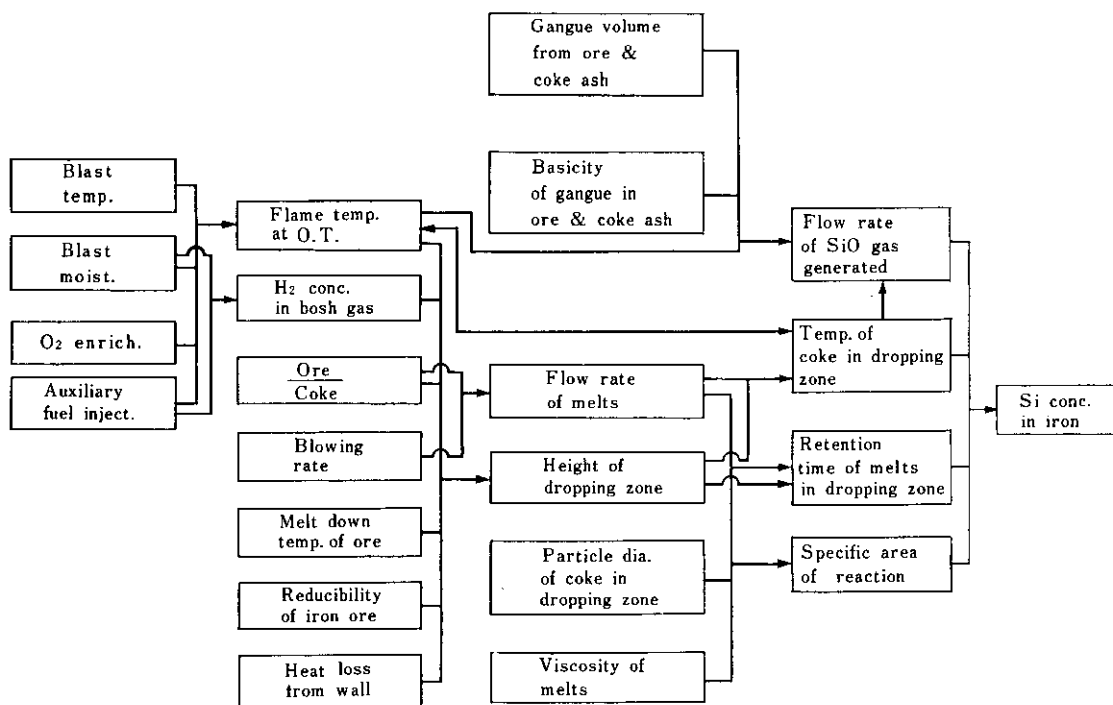


Fig. 3 Flow diagram of deciding factors on Si concentration in pig iron

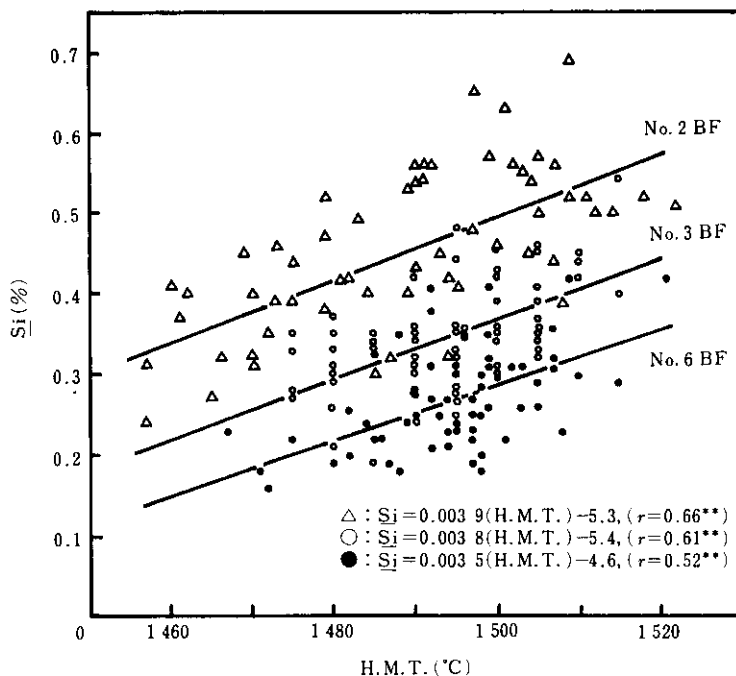
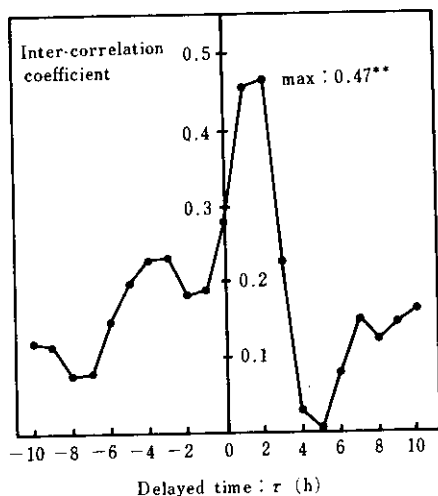


Fig. 4 Relation between Si content in pig iron and hot metal temperature (H.M.T.) in each blast furnace at Chiba Works

基づいて酸化鉄の鉄と酸素への解離熱以外にふり向けられた熱量 H_0 を求め、 H_0 の動向によって送風や装入の条件を変更するのが有効である。Fig. 5 に H_0 濃度の経時変化状況を、Fig. 6 に H_0 と Si との間のずれ時間に伴う相関係数の変化を示す。両図は出鉄時 Si 濃度が 2 時間前の H_0 と強い相関を有し、この動向を見ながら操業アクションをとることの有用性を示している。

短時間内での Si 濃度変化がより急激に生ずる例は減風減圧等によって装入物降下が遅くなったとき、あるいは生降り等によって装入物降下が速くなったときなどであり、これらは炉内で生成する鉄鉄の滴下流量 U_M の減少、増大と関連している。すなわち、鉄鉄への Si の吸収について考える



$$r = (H.M.T. \text{ measured time}) - (H_0 \text{ calculating time})$$

Fig. 6 Variation of inter-correlation coefficient between H_0 and Si content with delayed time

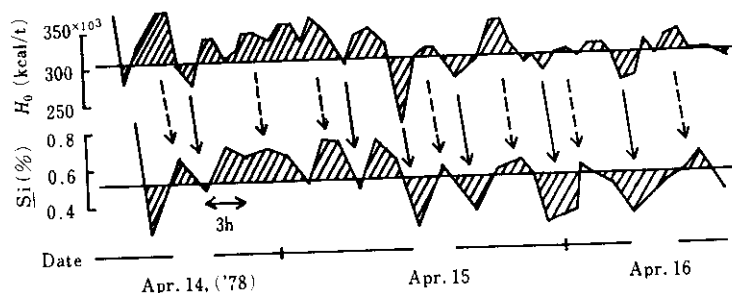


Fig. 5 An example of variation of H_0 and Si content with time (Chiba No.6 BF)

と(12)、(13)式で示したように、鉄鉄流量の反応表面積に及ぼす影響は小さく、滴下帯での滞留時間の変化に大きく依存するためである。このように装入物降下速度の変動が大なる時は鉄鉄中 Si 濃度の変動も大きくなり、炉熱確保のため高炉熱の操業を行なう結果として平均値としての Si 濃度の上昇をもたらす。Fig. 7 は装入物降下速度のかわりに送風圧力の変動と Si 濃度の変動との関連を示すが、強い正相関がある。

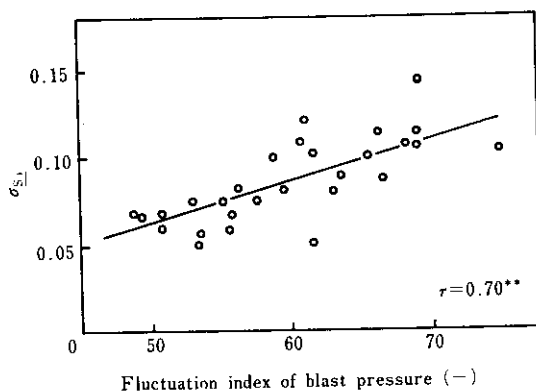


Fig. 7 Influence of fluctuations of blast pressure on σ_{Si} at Chiba No.6 BF (Fluctuation index; corresponding to a daily sum of fluctuation values)

4.2 長期的な関係

特定の高炉について、長期的な Si 濃度レベルの違いが例えばガス利用率の向上からくる滴下帯高さの低下によっても生ずることは Fig. 8 のように示される。ここで V_d は高炉の同心円モデル¹⁸⁾によって計算される滴下帯体積であり、平均滴下

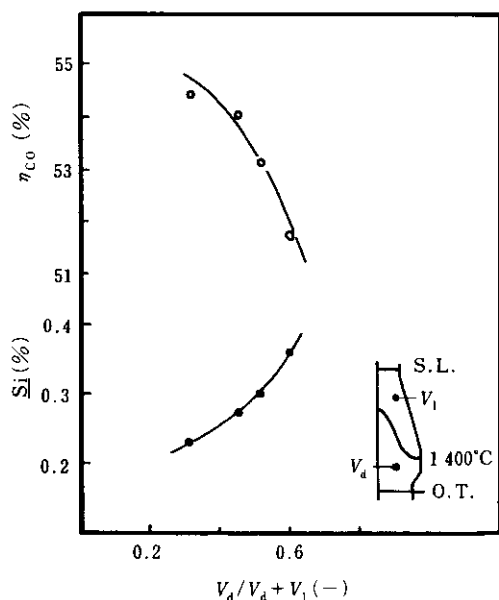


Fig. 8 Changes of Si content in pig iron and of CO gas utilization with the fractional volume of dropping zone (Chiba No.6 BF)

帯高さに対応づけられる。

このほかにも、溶銑温度レベルは同じでかつ、出銑比や送風条件はほとんど同じであるのに Si 濃度レベルが低いというケースがある。Fig.9 は千葉第6高炉のステープ熱負荷で層別した溶銑温度と Si 濃度との関係であるが、ステープ熱負荷が低い場合 Si レベルも低くなっている。同様な関

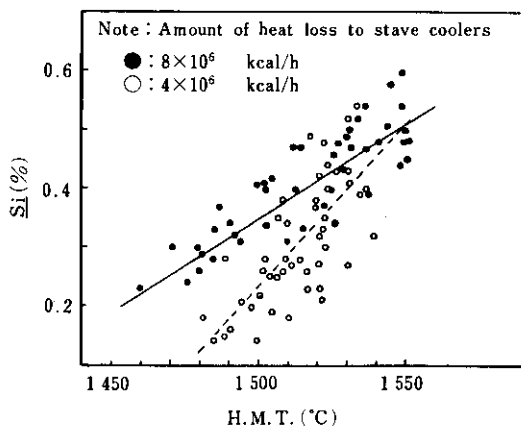


Fig. 9 Influence of the amount of heat loss to stave coolers on the relation between Si content and hot metal temperature at Chiba No.6 BF

係は水島第3高炉の例 (Fig. 10) でも見られる。この場合には熱負荷に関するデータはないが、A、C期ではステープ破損が生じており、シャフト下

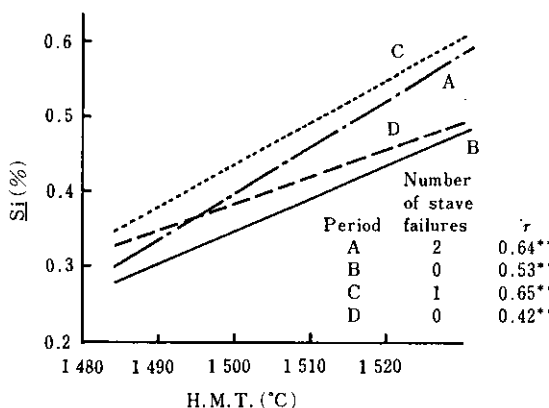


Fig. 10 Difference of the relation between Si content and hot metal temperature during 10 days periods at Mizushima No.3

部からベリ一部にかけての炉壁温度が高く、Fig.9の高ステープ熱負荷期と同じ状況にあった。Fig.9における熱負荷の差異と炉内状況との関連を前述の同心円モデルを用いて調べてみると炉内温度プロファイルはそれぞれFig.11のようになる。図より炉壁近傍の熔融帯レベルの高い場合、ステープ熱負荷も高い。すなわち、炉内温度は熔融帯を境として急激に変化し、これより下部では炉内温度は非常に高くなり、シャフト下部領域での炉壁への熱伝達は熔融帯高さ位置に大きく影響されることを示している。ステープ熱負荷の差異がなぜ Si 濃度に影響を及ぼすかについては次項で述べる。

その他にも、出銑比の上昇によって Si 濃度は低下し、また最近のオール・コークス操業では同一溶銑温度レベルと比較すると、羽口前で燃焼するコークス量の増加により羽口前での SiO 発生量が上昇すると、それに相当する分だけ Si 上昇傾向が現われている。後者に対してはオール・コークス操業へ移行後、若干の溶銑温度低下で対処している。

4.3 高炉炉容との関係

炉内容積の拡大にともない Si 濃度が下がる傾向

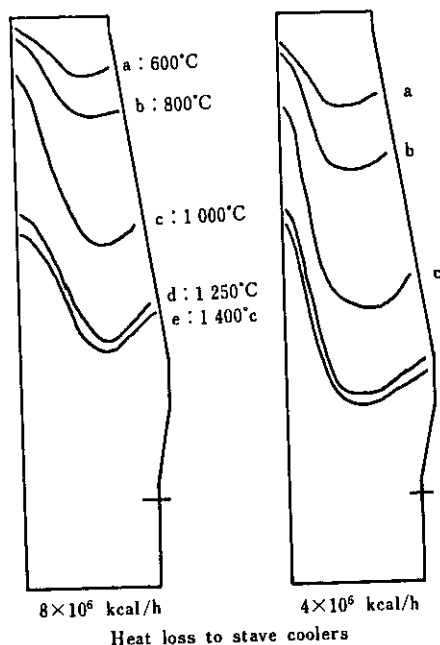


Fig. 11 Calculated temperature distributions in a blast furnace corresponding to heat loss to stave coolers

は一般に認められるところであるが、これまでその解釈については、①高炉頂圧による CO 分圧の上昇、②流下溶鉄の質量速度増大による滴下帯での溶鉄滞留時間の減少、③炉床断面積に対するレースウェイ近傍の高温領域の相対的縮小な

ど、種々の説があった。前項までに述べたように Si の鉄鉄への移行量は炉下部の熱収支に影響されるところが大きい。炉容拡大の炉下部熱収支に対する有利性として炉体への放散熱量の低下が考えられる。千葉の各高炉について、旬間平均操業値の熱収支から炉体熱損失を計算によって求め、Si 濃度との関係をプロットすると Fig. 12 が得られる。図より、Si 濃度レベルは炉容や炉頂圧によっては層別されず、炉体熱損失と一義的な関係を有していることがわかる。また横軸を鉄鉄トン当りの入熱量としても同じ関係が得られる。すなわち、低い Si 濃度の鉄鉄を得るには、溶鉄温度を維持しながら可能な限り炉下部への入熱量を下げることが重要である。

5. 高炉での低 Si 鉄吹錬の限界

5.1 将来達成可能な Si 濃度の推定

3章で述べた低 Si 鉄吹錬の原理の諸式と気相-固相-鉄鉄相-スラグ相間の伝熱についての微分収支式とを用いて、出鉄溶鉄温度と出鉄 Si 濃度との関係を求めると Fig. 13 のような関係が得られる*。ここで、(2)、(4) 式中の正反応の見掛けの反応速度定数は、 k_f については植谷ら¹¹⁾ が炭素飽和鉄と SiO ガスとの反応実験により得たデ

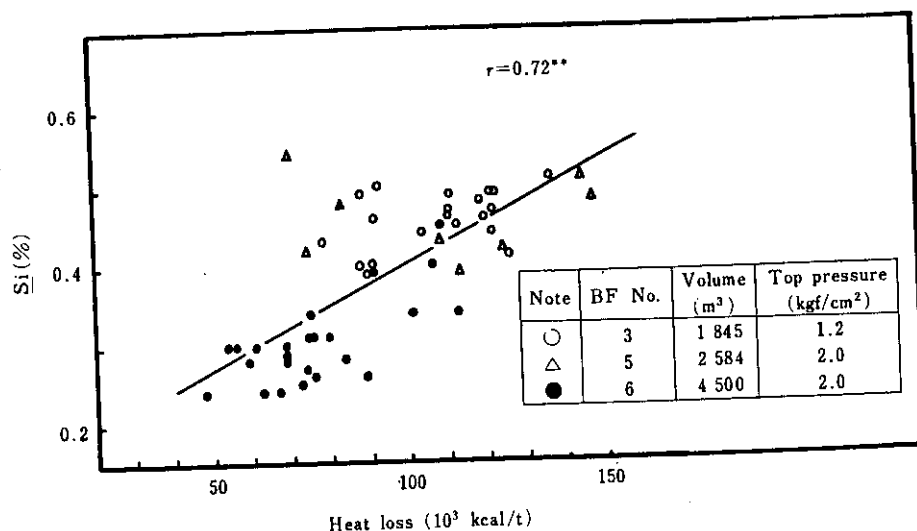


Fig. 12 Influence of heat loss from high temperature region above 950°C on Si content in pig iron (Chiba Works)

* 数式展開上の詳細は別に報告の予定である。

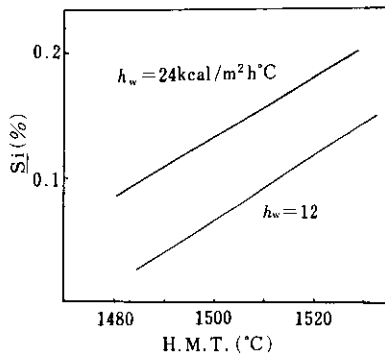


Fig. 13 Relation between Si content in pig iron and hot metal temperature by calculation

ータから(16)式を、 k_f' については角戸ら¹⁹⁾がグラフアイトと高炉タイプスラグとの反応実験により得たデータから(17)式をそれぞれ用いた(単位は $\text{kmol/m}^2 \cdot \text{h}$)。

$$k_f = 4.77 \times 10^8 \exp \left(\frac{-66\,500}{RT} \right) \dots\dots(16)$$

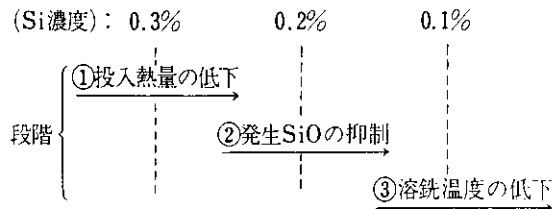
$$k_f' = 1.785 \times 10^{17} \exp \left(\frac{-177\,000}{RT} \right) \dots(17)$$

また、コークス灰分中に含まれる SiO_2 については、灰分組成の状態図²⁰⁾上の融点とレースウェイでのコークス温度とが等しくなるまで SiO として迅速にガス相に移行するとした。図中の $h_w = 12 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ は炉壁への熱伝達係数であり、炉床径10mの高炉では 10^5 kcal/t-pig の炉体放散熱に相当する。本計算結果では、滴下帯を流下するスラグ中 SiO_2 から発生する SiO は極めて小さく、 SiO としてはほぼコークス灰分中 SiO_2 に由来している。ここで用いた(17)式は黒鉛のつぼとスラグ中 SiO_2 との反応速度として現在研究中のものであり、直ちに高炉滴下帯に適用できるか否かは検討の余地が残っている。しかし、いずれにせよ逆説的に言えば、炉内での Si 移行が羽口前で発生するコークス灰分からの SiO のみによって起るような条件で操業できれば、 1500°C の銑鉄中の Si 濃度は 0.1% 以下になる可能性があると推定される。ただし、 0.1% 前後の低い Si 濃度について議論する場合には、本報では全く無視した炉底湯溜り部におけるスラグ-メタル反応による Si 移行も無視できなくなる可能性もある²¹⁾。しかしながら、 1500°C で 0.2% 程度の Si 濃度の銑鉄が得ら

れる今日でも、このスラグ-メタル反応が Si 濃度低下の限界を律するとする証拠は未だ認められていない。

溶銑温度と Si 濃度との関係を Fig.13 に戻って見ると、炉壁への伝熱係数を大きくした時、すなわち炉体損失熱を増した場合には同じ溶銑温度で Si 濃度は上昇する。いずれの場合にも 1450°C 以下では SiO ガスからの銑鉄中 Si 濃度は非常に小さい。

これまでに述べた事柄を総合して、高炉における Si 濃度低下の限界を模式的に示せば下記のごとくなるであろう。



すなわち現在の投入熱量低下の操業技術を維持しつつ、スラグ性状やコークス性状の改善および滴下帯のコークス温度をコントロールすることによって 0.2% 台から 0.1% 台の Si 濃度へと低下させ、さらに将来的には 1450°C 程度の溶銑温度を目標として、 0.1% 以下の Si 濃度に挑戦することになろう。各段階ごとに着目すべき要因を Fig.3 から示せば、段階①では融体の滴下帯内滞在時間が注目されてきた。段階②では鉍石、コークス性状と羽口前燃焼ガス温度、段階③では滴下帯内のコークス温度分布(炉熱の分布)が注目されるであろう。

5.2 低 Si 銑製造技術上の問題点

前項で述べた低 Si 銑吹錬を進めるうえで、大きく分けて3つの今後解決して行かなければならない問題がある。まずひとつは、投入熱量の低下は炉内熔融帯レベルの低下を招き、熔融帯レベルが下り過ぎると装入物降下の不順を生じる点である。この現象は熔融帯の径方向分布をバランスよく下げて、生鉍降り等がなく、かつ銑中成分の安定した段階でも既に生じてくる。この点は装入物降下の動力的な解明により、その対策を考える必要がある。第二点は SiO の発生反応速度に大きな影響を及ぼすと考えられる滴下帯内のコークス

温度と出銑溶銑温との独立なコントロール方法を考える必要がある。このためには炉下部における銑鉄およびスラグへの伝熱とSi移行反応の機構を定量的に明らかにしなければならない。第三点は炉床領域の全体的な熱量低下による炉底狭少もしくは炉床汚れの問題であり、とくに溶銑温度を長期間低レベルに維持するには、高炉装入物の性状や粒度の安定維持は一層重要となり、装入鉱石の溶け落ち性状や最終スラグ性状の管理はとりわけ注意が必要である。

6. まとめ

千葉および水島製鉄所の高炉における銑鉄中のSi濃度の最近の推移をふまえて、低Si銑吹

錬の方法を化学反応論、化学工学的な観点から検討した。その結果、低Si銑吹錬にとって特に考慮すべき点として、(i) 装入物降下速度の変動を抑制して炉況を安定させること、(ii) 溶銑温度を一定水準に維持しながら可能な限り入熱量を下げて、滴下帯高さの低下と羽口周辺でのSiO発生量抑制をはかること、の重要性を明らかにした。また、入熱量低下のためには炉体からの熱損失を低下させることも重要であることを、炉容積の影響の検討も含めて、明らかにした。

さらに、これまでの努力によって、Si濃度が0.20%台の銑鉄の吹錬は可能となったが、近い将来のSi濃度目標値は0.10%以下になるであろうことを推定し、この目標を安定に達成するために解決すべき問題点を論じた。

参考文献

- 1) C.Staib and J.Michard: ON-LINE COMPUTER CONTROL FOR THE BLAST FURNACE, Part I. Theoretical Study of Furnace Operation and its Thermal Control, J. Metals, 17 (1965) 1, 33
- 2) C.Staib and J.Michard: ibid., Part II. Control of Furnaces with Sinter and Complex Burdens, 17 (1965) 2, 165
- 3) 山本里見, 藤掛陽藏, 坂口庄一, 藤浦正己, 梶岡博幸, 吉井正孝, 福岡弘美: 半工業的規模での Na_2CO_3 精錬連続操業試験結果, 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S 212
- 4) 小久保一郎, 尾形昌彦, 小菅俊洋, 中島睦生, 桑原正年, 山本里見, 山口武和: Na_2CO_3 で脱リン脱硫した溶銑の転炉スラグなし脱炭試験結果, 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S 213
- 5) 栗栖敏, 田代清, 志藤文二, 伊藤幸良, 佐藤信吾, 河内雄二, 大久保静夫: 溶銑脱Siによるスラグミニム精錬プロセスの開発, 鉄と鋼, 65 (1979) 11, S 735
- 6) 伊藤幸良, 佐藤信吾, 河内雄二, 高橋紀夫, 奥山登: 固体酸化鉄による溶銑の脱Si処理について, ibid., S 736
- 7) 伊藤幸良, 佐藤信吾, 河内雄二, 手塚英男: 低Si溶銑の転炉精錬における脱P反応について, ibid., S 737
- 8) 伊藤幸良, 佐藤信吾, 河内雄二: 低Si溶銑の転炉精錬におけるその他の冶金特性, ibid., S 738
- 9) 平原弘章, 山崎勲, 城田良康, 林田啓造: 溶銑脱珪処理テストについて, ibid., 65 (1979) 4, S 221
- 10) 槌谷暢男, 田口整司, 高田至康, 岡部俠児: 高炉でのスラグ, 銑鉄間へのSi, MnおよびSの分配比による炉内下部領域の状態の判定, ibid., 63 (1977) 12, 1791
- 11) 槌谷暢男, 徳田昌則, 大谷正康: 気相から溶鉄へのSi移行に関する研究, ibid., 58 (1972) 14, 1927
- 12) 伊沢哲夫, 里見弘次, 福島勤, 古川武, 小松修: 高炉内における造滓過程について, ibid., 64 (1978) 4, S 111
- 13) 角戸三男, 槌谷暢男, 岡部俠児: 高炉タイプスラグからのSiO発生速度に対するスラグ塩基度の影響, ibid., 66 (1980) 4, S 66
- 14) 福武剛, V.Rajakumar: 高炉の滴下帯に相似させた気-液向流充てん層の液ホールドアップと流れの異常現象, ibid., 66 (1980) 13, 1937
- 15) 福武剛, 岡部俠児: 高炉滴下帯の気-液向流領域におけるガス圧力損失と液ホールドアップの実験式, ibid., 1947
- 16) 馬田次郎, 篠原久, 椿原元: 灌液充填塔における濡れ面積と有効面積の一整理法, 化学工学, 27 (1963) 12, 978
- 17) 恩田格三郎, 竹内寛, 小山恭章: 充填物材質の濡れ表面積におよぼす影響について, ibid., 31 (1967) 2, 126
- 18) 板谷宏, 荒谷復夫, 船越督己, 可児明, 清原庄三: 高炉内の温度, 装入物降下速度およびO/C分布の推定, 鉄と鋼, 65 (1979) 11, S 564

- 19) 角戸三男：私信
- 20) E.M.Levin, C.R.Robbins and H.F.McMurdie : Phase Diagrams for Ceramists, ed. by M.K.Reser, (1964), 219 (The American Ceramic Society)
- 21) 徳田昌則, 槌谷暢男, 大谷正康：高炉内のSi移行に関する熱力学的考察, 鉄と鋼, 58 (1972) 2, 219