

---

高炉の低 Si 操業

Low-Silicon Operation of Blast Furnace

上谷 年男(Toshio Uetani) 高橋 洋光(Hiromitsu Takahashi) 山崎 信(Makoto Yamasaki) 吉田 和彦(Kazuhiko Yoshida) 金子 憲一(Kenichi Kaneko) 武田 幹治(Kanji Takeda)

---

要旨：

水島第2高炉において Step I として羽口前温度の低下により SiO ガスの生成を抑え、かつステープ熱負荷を指標として融着帯レベルを低位に管理することにより、1983 年 12 月に [Si] を 0.40% から 0.25% まで低下させた。さらに Step II として、スラグの塩基度と MgO% を上昇させることで [S] を低下させ、同時に SiO ガスの生成を抑制して [Si] の一層の低下を図ることとした。この結果、[Si] は 0.20% 以下となり、1984 年 8 月には月間平均 [Si] 0.17%、[S] 0.030% を達成した。今回の低 [Si] 操業においては炉況の安定が基盤となっているが、この炉況の安定にはステープ熱負荷の管理強化と適度の炉壁流を確保したフラットなガス分布の効果が大きいと考えられる。

---

Synopsis：

As the first step, the decrease in the theoretical flame temperature at tuyeres and stove heat load reduced, silicon content at Mizushima No.2 BF, which had been around 0.40% to 0.25% in December 1983. As the second step, MgO and basicity in slag were increased in June 1984 to further reduce the silicon and sulfur contents. As a result, the average monthly value of silicon content was kept lower than 0.20% with a sulfur content of around 0.03% after May 1984. The lowest record was 0.17% in August 1984. The low silicon operation was based on the stable blast furnace condition, which was achieved by the control of stove heat load and a moderate peripheral gas flow in gas distribution.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

|                   |
|-------------------|
| 本文は次のページから閲覧できます。 |
|-------------------|

## Low-Silicon Operation of Blast Furnace



上谷 年男  
Toshio Uetani

水島製鉄所 製鉄部製  
鉄技術室



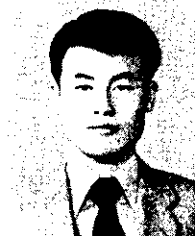
高橋 洋光  
Hiromitsu Takahashi

水島製鉄所 製鉄部製  
鉄技術室 主査(部長  
補)



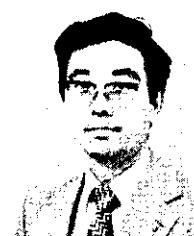
山崎 信  
Makoto Yamasaki

水島製鉄所 製鉄部製  
鉄技術室 主査(課長)



古田 和彦  
Kazuhiko Yoshida

水島製鉄所 製鉄部製  
鉄技術室 主査(掛長)



金子 憲一  
Kenichi Kaneko

水島製鉄所 製鉄部製  
鉄課 課長



武田 幹治  
Kanji Takeda

鉄鋼研究所 製鉄研究  
室

### 要旨

水島第2高炉において Step I として羽口前温度の低下により SiO ガスの生成を抑え、かつステープ熱負荷を指標として融着帯レベルを低位に管理することにより、1983年12月に [Si] を 0.40% から 0.25% まで低下させた。さらに Step II として、スラグの塩基度と MgO% を上昇させることで [S] を低下させ、同時に SiO ガスの生成を抑制して [Si] の一層の低下を図ることとした。この結果、[Si] は 0.20% 以下となり、1984年8月には月間平均 [Si] 0.17%, [S] 0.030% を達成した。今回の低 [Si] 操業においては炉況の安定が基盤となっているが、この炉況の安定にはステープ熱負荷の管理強化と適度の炉壁流を確保したフラットなガス分布の効果が大きいと考えられる。

### Synopsis:

As the first step, the decrease in the theoretical flame temperature at tuyeres and stove heat load reduced, silicon content at Mizushima No. 2 BF, which had been around 0.40% to 0.25% in December 1983. As the second step, MgO and basicity in slag were increased in June 1984 to further reduce the silicon and sulfur contents. As a result, the average monthly value of silicon content was kept lower than 0.20% with a sulfur content of around 0.03% after May 1984. The lowest record was 0.17% in August 1984. The low silicon operation was based on the stable blast furnace condition, which was achieved by the control of stove heat load and a moderate peripheral gas flow in gas distribution.

## 1 緒 言

近年、製鉄と製鋼間でのトータルコスト削減と高純度鋼溶製の観点から溶鉄中の含有量 Si の低下がますます重要となってきた。この [Si] の低下には、(1) SiO ガス生成の抑制、(2) 溶融帯領域の縮小、(3) 総入熱量の低下が最も有効であるといわれている。

水島製鉄所ではこの考えに基づいて、Step I として羽口前温度低下により SiO ガス生成を抑え、かつステープ熱負荷管理により溶融帯領域の縮小を図ることで、水島第2高炉 (BF) において 1983年末 [Si] を 0.40% から 0.25% まで低下させた。さらに、Step II として [Si] 一層の低下と同時に [S] の低下を図るべくスラグ成分の調整を行った結果、1984年8月には月間平均 [Si] 0.17%, [S] 0.030% を達成した。今回の一連の操業により当所では低 [Si] 操業技術を確立したので、以下この No. 2BF における低 [Si] 操業について報告する。

## 2 [Si] の制御方法

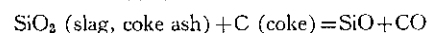
低 [Si] 操業は基本的には溶融帯領域の縮小が最も効果的である。

しかし、溶融帯領域の縮小は一般に出鉄温度の低下となるため、溶鉄温度を管理目標範囲に維持しながら [Si] の低下を図ることが高炉操業上非常に重要である<sup>1,2)</sup>。

[Si] の制御原理を要因別の系統図として表現したものを Fig. 1 に示す。[Si] の低下には以下の3点が最も重要である。

### (1) SiO ガス生成の抑制

SiO ガスの生成は、



の反応に基づいており、羽口前温度の低下による反応速度の低下、装入物の塩基度や MgO の増加によるスラグのコークスへの濡れ性 (反応界面積) の低下と SiO<sub>2</sub> の活量の低下、送風圧増による反応の制御等がその具体的手段である。

### (2) 溶融帯領域の縮小

これは SiO ガス生成の抑制にも効果があるが、その基本となる点は溶鉄とスラグの反応領域内での滞留時間を減少させることにある。しかし、溶融帯領域の縮小は溶鉄温度の低下に直接結びつくため、装入物の軟化溶融温度を上げてこの領域を縮小する必要がある。これには MgO や塩基度 (以下 B<sub>2</sub> と呼ぶ) の上昇による装入物の溶け落ち温度の上昇が有効である。さらに溶融帯領

\* 昭和60年8月27日原稿受付

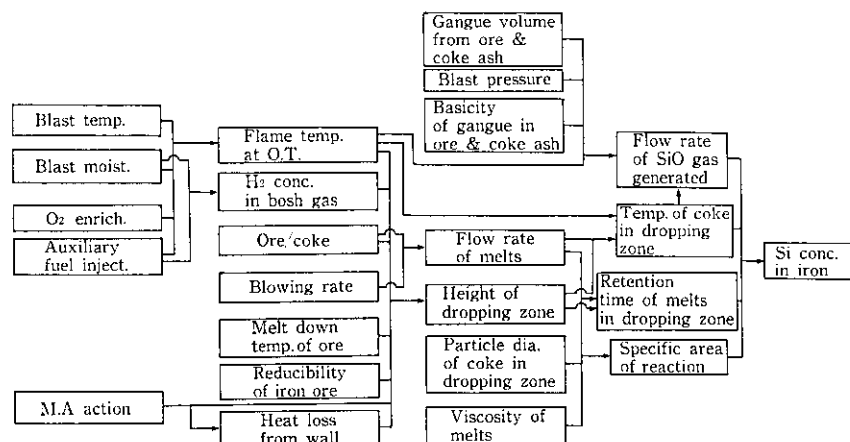


Fig. 1 Thinking flow diagram of deciding factors on silicon content in pig iron

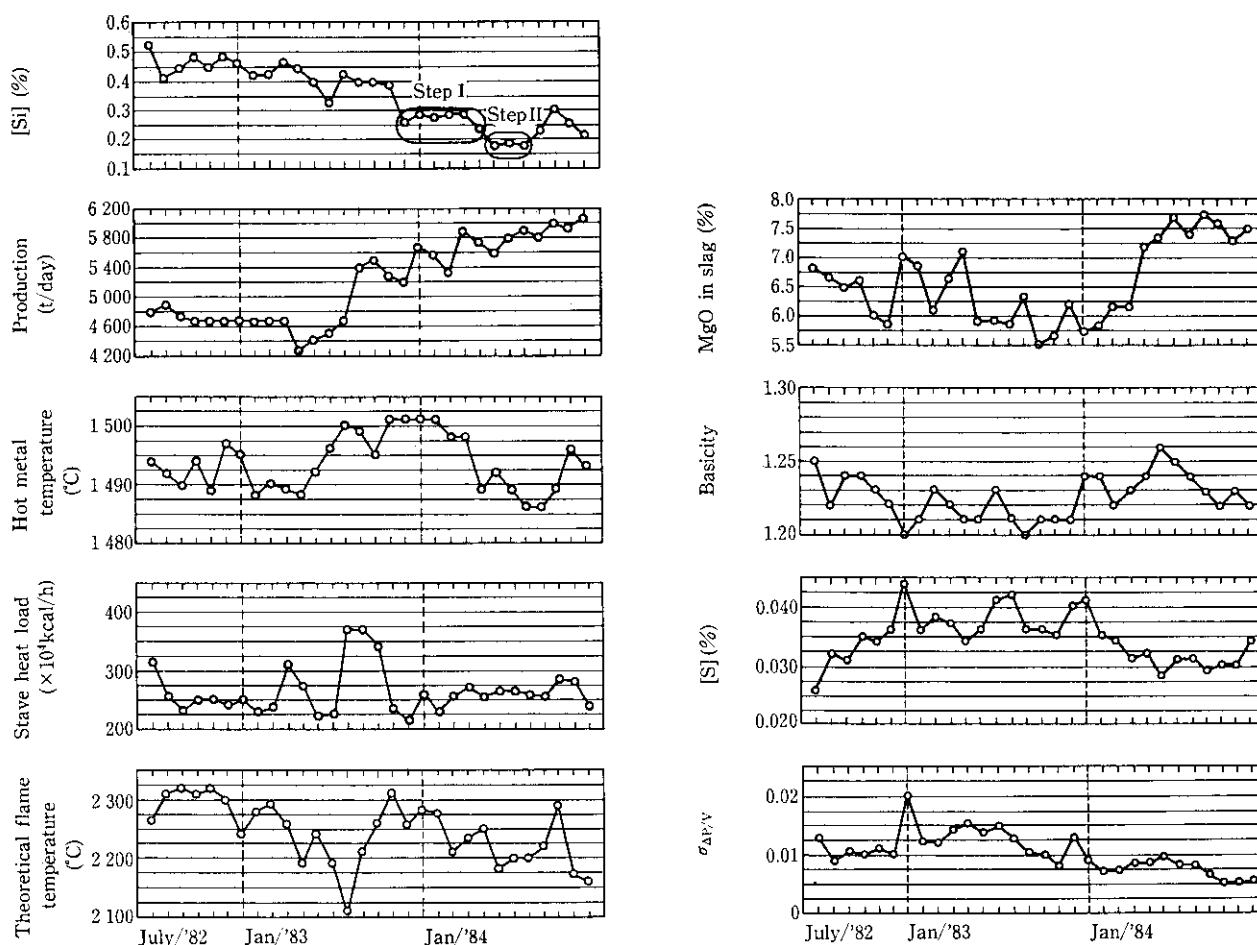


Fig. 2 Transition of operating results at Mizushima No. 2 BF

域を直接減少させる手段としては O/C や熱流比の増大がある。一方、高炉の操業アクションとは異なるが、出鉄比の増大は溶融物の滴下滞留時間を減少させるため [Si] を下げる重要な因子となる。

### (3) 総入熱量の抑制

炉壁からの熱損失が大きい場合には、熱補償の意味で O/C の低下や送風温度上昇が必要となり、[Si] の増加となる。さらに、ガス利用率の低下は同様の結果となる。従ってムーバブルアーマ (以下 M.A と呼ぶ) 操作により通気を確保するとともにガス利用

率の向上と炉壁熱損失の低下を図る必要がある。

## 3 水島第 2 高炉における低 [Si] 操業

### 3.1 操業推移

水島第 2 高炉では製鉄と製鋼間のコスト削減を目的として低 [Si] 操業を指向してきた<sup>9)</sup>。Fig. 2 に 1982 年から 1984 年までの [Si] の推移を示すが、[Si] は 1983 年末に 0.30% 以下に、さらに 1984 年

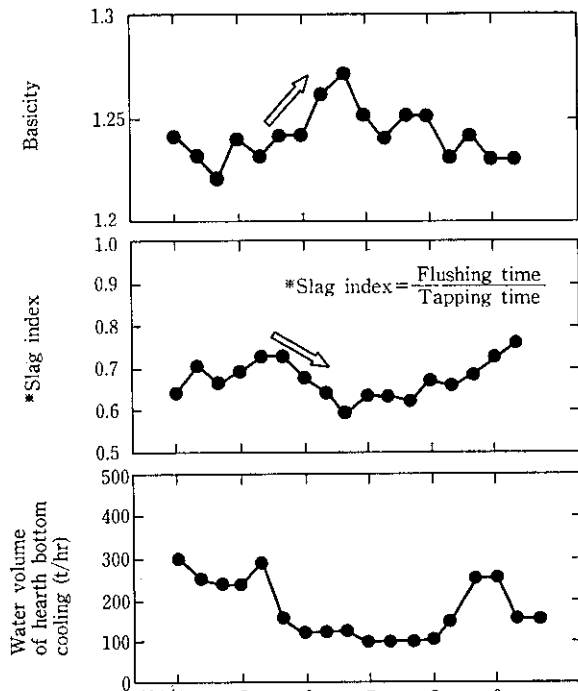


Fig. 3 Transition of slag basicity and slag index

6月から8月には0.20%以下となった。今回の低[Si]操業は1983年12月から1984年5月までのStep Iと1984年6月から8月のStep IIに分けられる。

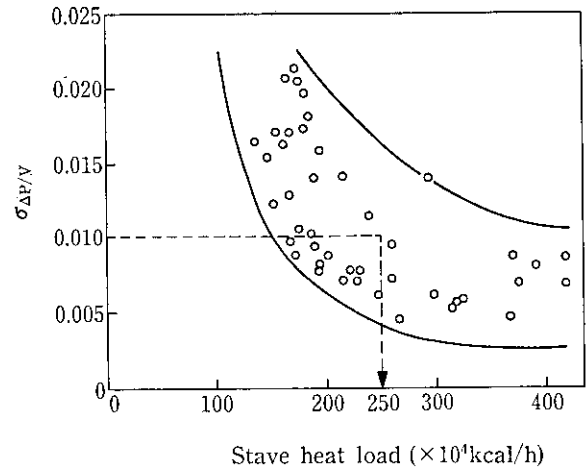
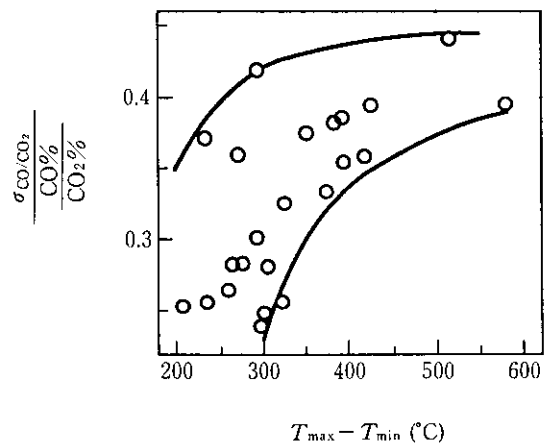
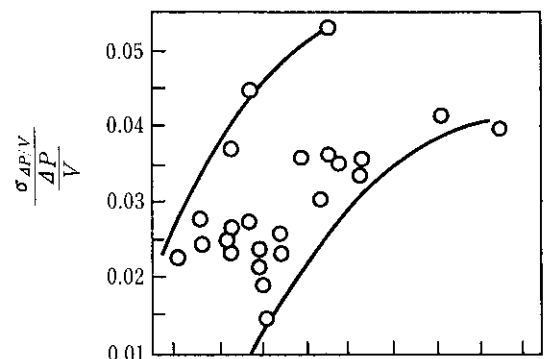
Step IではSiO<sub>2</sub>ガス生成の抑制と溶融帯領域の縮小により[Si]の低下を図った。SiO<sub>2</sub>ガス生成の抑制のため、ガス分布調整を行うことによりFig. 2に示されるように羽口前温度を2200℃前後まで低下させた。また、当所では融着帯のレベル管理を行ううえでの指標としてステープ熱負荷を用いているが、1984年に入りこれを低位安定に保つことにより溶融帯領域の縮小を図った。この結果、1983年12月には[Si]のレベルを0.40%から0.25%へと大きく低下させることができた。

このStep Iをベースとして、さらに一層の[Si]の低下を図り、かつ[S]も同時に低下させるため、Step IIではスラグ成分の調整を行った。スラグ成分調整として、B<sub>2</sub>、MgOを上昇させた。Fig. 3にスラグB<sub>2</sub>上昇時の操業推移を示すが、スラグB<sub>2</sub>を1.20から1.30付近まで上昇させた6月後半から滓指数（出鉄時間に対する出滓時間の割合）が減少し出鉄滓が悪化した。これに対して炉底冷却水量の調整とスラグB<sub>2</sub>の低下により炉床のクリーニングを行い滓指数を回復させて出鉄滓の安定化を図った。この結果、Step IIにおけるスラグ成分の調整としてはB<sub>2</sub> 0.03、MgO 2%の上昇となったがこのスラグ成分の調整によりStep IIでは計画通り[Si]を0.20%以下としとくに1984年8月には月間平均[Si] 0.17%の記録を達成した。同時に[S]も0.030%と低レベルに保つことができた。Fig. 2に通気変動値 $\sigma_{JP/V}$ （送風圧-炉頂圧/送風量の比の標準偏差）を示すがこれからもStep I, IIにおける炉況の安定がわかる。今回、低[Si]操業を長期にわたって継続しえたのは、この安定した炉況が基盤となっていると考えられる。

### 3.2 炉況の安定化

#### 3.2.1 ガス分布調整の考え方

今回、水島第2高炉では1983年末以来長期的に低[Si]操業を継続しているが、これには安定した炉況が基盤となっている。この炉

Fig. 4 Relation between  $\sigma_{DP/V}$  and stove heat loadFig. 5 Relation between  $(T_{max}-T_{min})$  by shaft probe and fluctuation value (No. 3 BF)

況の安定にはステープ熱負荷およびガス分布管理に基づく装入物分布調整が寄与している。

ステープ熱負荷は主に融着帯レベルを示す指標と考えられる。従って、これが低下しすぎることは荷下り不順につながり通気も不安定となる。逆に、これが上昇しすぎると炉体損失熱の上昇および[Si]の上昇となる。Fig. 4にステープ熱負荷と通気変動値 $\sigma_{JP/V}$ の関係を示す。これにより炉況を安定させるすなわち $\sigma_{JP/V}$ を0.010程度以下とするためにはステープ熱負荷を250万kcal/h以上確保する必要があると考えられる。

また、Fig. 5にシャフトガスサンプラーの最高温度 $T_{max}$ と最低温度 $T_{min}$ の差 $(T_{max}-T_{min})$ と通気変動値

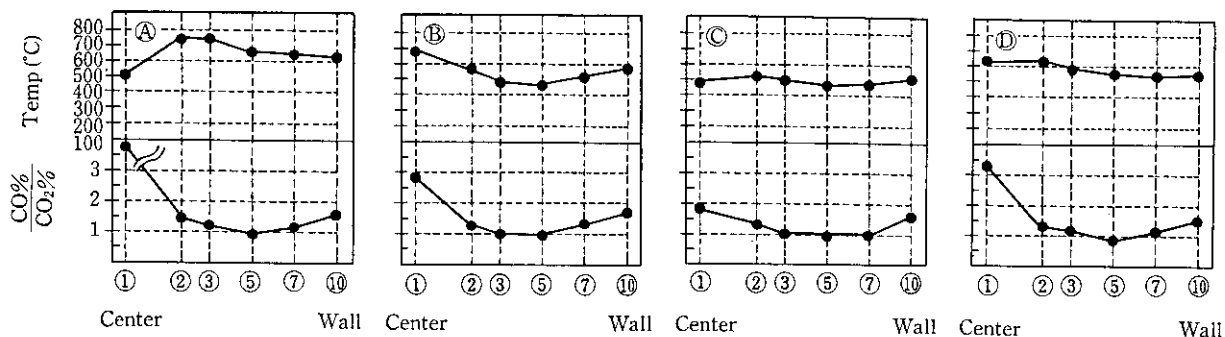


Fig. 6 Change of gas distribution by shaft probe

$$\frac{\sigma_{AP/V}}{AP/V}$$

およびガス変動値 (炉頂ガスの利用率 CO vol%/CO₂ vol% の変動値)

$$\frac{\sigma_{CO/CO_2}}{CO\% / CO_2\%}$$

との関係を示す。温度差が小さい、すなわちフラットな温度分布ほど炉況変動が小さいといえる。以上の検討から、2BF においてはステープ抜熱量を 250~300 万 kcal/h で管理し、かつフラットな温度分布を指向するという 2 点を中心にガス分布調整を行った。

### 3.2.2 ガス分布の推移

1983 年以降をガス分布により A 期 (1983/5~6), B 期 (1983/7~11), C 期 (1983/12~84/5), D 期 (1984/6~8) の 4 期に分ける。このうち Step I は C 期に、Step II は D 期に相当する。各期間のシャフトガスサンプラーの温度、ガス分布を Fig. 6 に、M.A の動きを Fig. 7 に、多重同心円モデル<sup>4)</sup>によるガス流分布を Fig. 8 に示す。

- (A→B 期) ステープ抜熱量が 200 万 kcal/h まで低下してきたため、周辺流化の M.A 変更を実施した。これにより、ガス流は中間流が減少しやや周辺流化した。
- (B→C 期) フラットな温度分布を指向し、中心流を抑制した。この結果、C 期にはほぼフラットなガス分布となりこれにより炉況は安定化した。
- (C→D 期) ステープ抜熱量は 250~300 万 kcal/h で安定してきたが、通気がやや悪化してきたため通気性の確保を考え、中心流を指向した。

このように、ステープ抜熱量管理とフラットな温度分布の指向により、C および D 期にはほぼ目標とするガス分布を達成し、炉況の安定を図り得たと考えられる。

### 3.3 [Si] の低下の要因

SiO<sub>2</sub> ガス発生抑制と溶融帯の縮小という観点から、[Si] と出鉄量、羽口前温度、ステープ抜熱量および溶鉄温度との対応を検討した結果を Fig. 9 に示す。これらにはよい対応が認められ、[Si] の低下には出鉄量の増加、羽口前温度の低下、ステープ抜熱量の低下、溶鉄温度の低下が有効である。

これらの関係を明確にするために、溶鉄温度 1490°C、ステープ抜熱量 250 万 kcal/h をベースとし、各々の単相関の傾きを用いて次式により補正した補正 Si と羽口前温度の関係を Fig. 10 に示す。

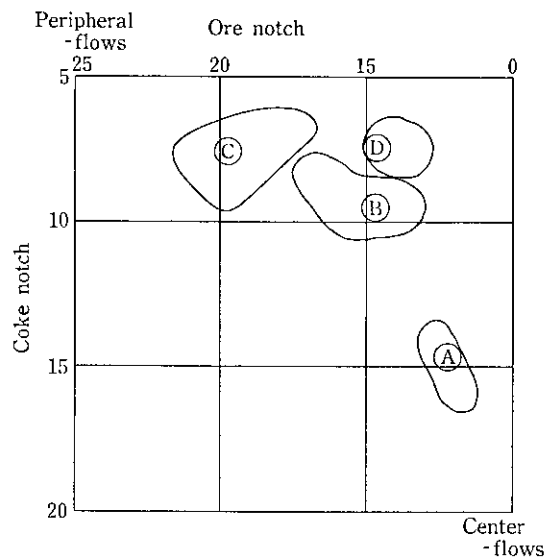


Fig. 7 Change of MA position

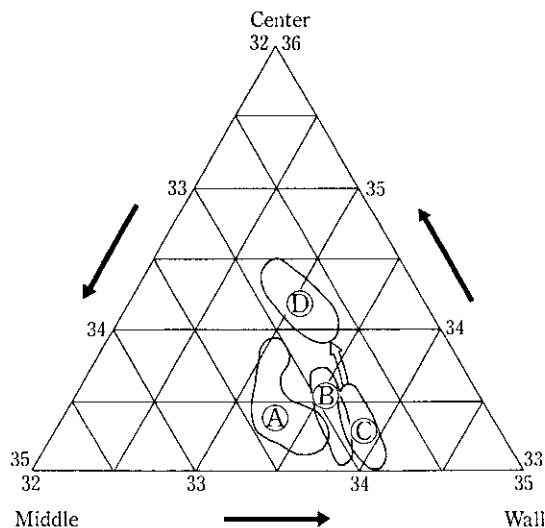


Fig. 8 Change of gas flow calculated by a multi-cylindrical model

$$\text{Corrected [Si]} = [\text{Si}] + 0.0014 \times (1490 - \text{HMT}) + 1.13 \times 10^{-7} \times (250 \times 10^4 - \text{STV}) \dots \dots (1)$$

Corrected [Si]: 補正 Si

[Si]: 実績 Si

HMT: 溶鉄温度 (°C)

STV: ステープ抜熱量 (kcal/h)

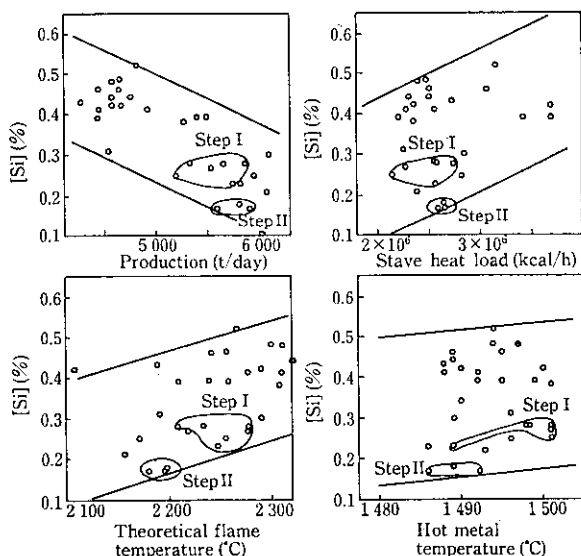


Fig. 9 Relation between silicon and operating parameters

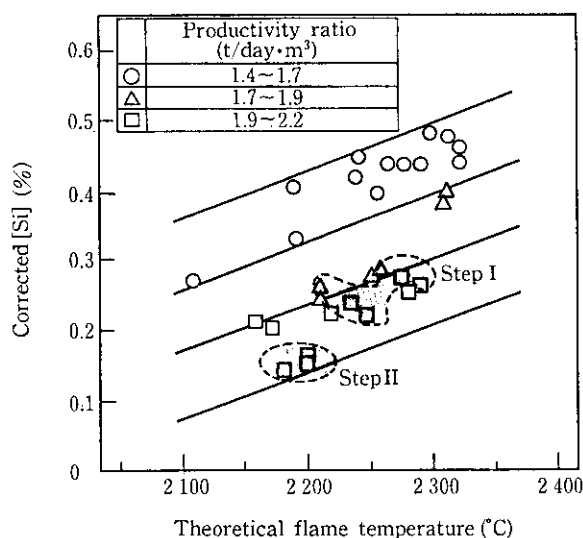


Fig. 10 Relation between corrected silicon and theoretical flame temperature

これらは出鉄比により明確に層別が可能であるが Step II では従来のレベルから 0.05% 前後低下している。すなわち、Step II ではスラグ成分の調整により [Si] を従来レベルから一層低下させている。

Fig. 11 に多重同心円モデルから計算した融着帯の形状を示す。Step I では融着帯を低下させ [Si] の低下を図っている。しかし、Step II では融着帯のレベルはほとんど変化しておらず、これから Step II でのスラグ成分調整による [Si] の低下が推定される。

#### 4 今回の低 [Si] 操業の特徴

##### 4.1 スラグ成分調整による [Si] の低下

Step II でのスラグ成分調整による [Si] の低下に関して用口ら<sup>9)</sup>の Si 移行の数学モデルを用いて検討を加える。

滴下帯の中を流下するスラグ中  $\text{SiO}_2$  とコークスの反応による  $\text{SiO}$  ガスの発生は、 $a_{\text{SiO}_2}$  の一次式として表わすことができる。角戸<sup>10)</sup>らによると次の (2)~(4) 式のように表わされる。

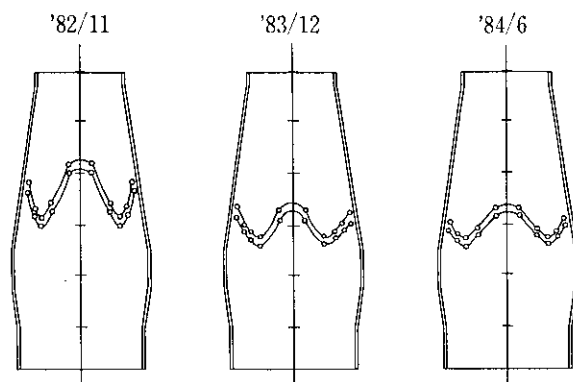
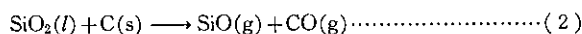


Fig. 11 Change of cohesive zone calculated by a multi-cylindrical model



$$R_s = k_s \cdot A_{s, s1} \cdot a_{\text{SiO}_2} \dots\dots\dots (3)$$

$$k_s = 3.57 \times 10^{18} \exp(-177000/RT) \dots\dots\dots (4)$$

$R_s$ : 滴下スラグと C との反応による  $\text{SiO}$  発生速度 (kmol/m<sup>2</sup>·h)

$k_s$ : 反応速度定数 (kmol/m<sup>2</sup>·h)

$A_{s, s1}$ : スラグ濡れ表面積 (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

$R$ : 気体定数 (kcal/kmol·deg)

$T$ : 反応温度 (K)

$a_{\text{SiO}_2}$  は徳谷<sup>11)</sup>らの提案する次の (5) 式により算出することができる。

$$\log a_{\text{SiO}_2} = -\{8 \times 10^{-6} \times t + 0.0228\} B - 9.31 \times 10^{-4} \times t + 0.797 \dots\dots\dots (5)$$

$$B = \text{CaO}(\%) + \text{Al}_2\text{O}_3(\%)/2 + \text{MgO}(\%)/3 - \text{SiO}_2(\%) \dots\dots\dots (6)$$

$t$ : 反応温度 (°C)

Step II ではスラグ  $B_2$  と  $\text{MgO}$  をそれぞれ上昇させたが、これは (5) 式において  $a_{\text{SiO}_2}$  を低下させることとなり、さらにこの  $a_{\text{SiO}_2}$  の低下が (3) 式において滴下スラグと C との反応による  $\text{SiO}$  発生速度を抑えることになる。

また、スラグ  $\text{MgO}$  の上昇は  $a_{\text{SiO}_2}$  の低下以外にスラグとコークス間の反応界面積に影響を与える。徳田ら<sup>12)</sup>は  $\text{MgO}$  の添加によりスラグとコークス間の濡れ面積が減少することを実験により示している。これによれば 1700°C で  $\text{MgO}$  を 0 から 5% まで増大させると濡れ面積は 2.3 cm<sup>2</sup> から 0.9 cm<sup>2</sup> に減少する。ここでは、徳田らのこの結果をベースにスラグ  $\text{MgO}$  を 6 から 8% に増大させた場合、(3) 式中のスラグ濡れ表面積  $A_{s, s1}$  が 25% 減少すると仮定する。

以上の仮定のもとに、スラグ  $B_2$  を 1.20 から 1.30,  $\text{MgO}$  を 6 から 8% まで上昇させた場合の Si 移行の数学モデルによる計算結果を Fig. 12 に示す。スラグ  $B_2$ ,  $\text{MgO}$  の上昇により同一溶鉄温度でも [Si] を 0.03~0.04% 程度低下させることが可能である。従って、Step II でのスラグ成分調整による [Si] 低下の効果は 0.03% 程度と推定され、実績よりやや小さいがほぼ説明が可能である。

また、海老沢<sup>13)</sup>らの  $\text{SiO}$  発生反応に関する基礎実験では  $\text{SiO}$  と  $\text{Mg}$  の還元揮発が同時に進行し、かつ両者とも大きな吸熱反応であるため相互に抑制効果を及ぼすとしている。この点を考えればスラグ  $\text{MgO}$  の [Si] 低下への効果はさらに大きいと推定されるが、これは今後の検討を要する。

##### 4.2 スラグ成分調整による [S] の低下

一般に低 [Si] 操業を指向する場合、炉熱の低下を伴う場合が多

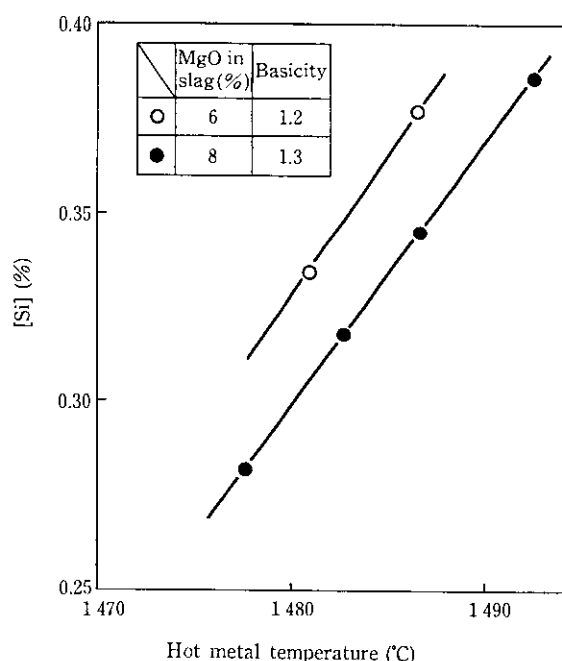


Fig. 12 Effect of MgO and basicity in slag on silicon content

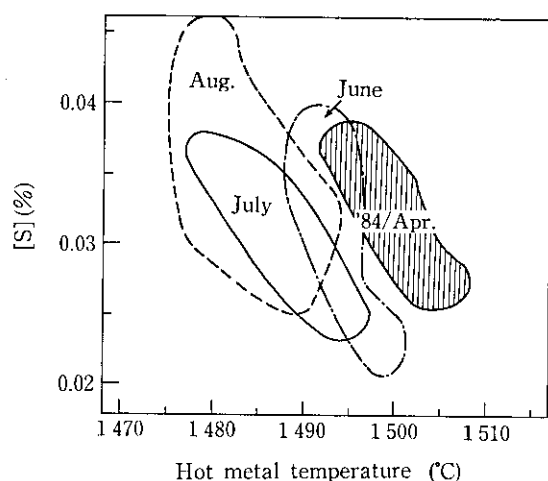


Fig. 13 Relation between sulphur and hot metal temperature

く [S] の上昇が問題となる。これに対し、Step II では [Si] の一層の低下と共に脱 S 能の向上を目的とし、スラグ  $B_2$ , MgO を上昇させた。この結果、[Si] を 0.20% 以下とすると同時に [S] も 0.030% のレベルを達成した。

Fig. 13 に 1984 年 4 月 (Step I) と 6~8 月 (Step II) の溶銑温度と [S] の関係を示すが、同一溶銑温度でも Step II では Step I に比べ [S] が低下している。

S の分配比は次式により示される<sup>9)</sup>。

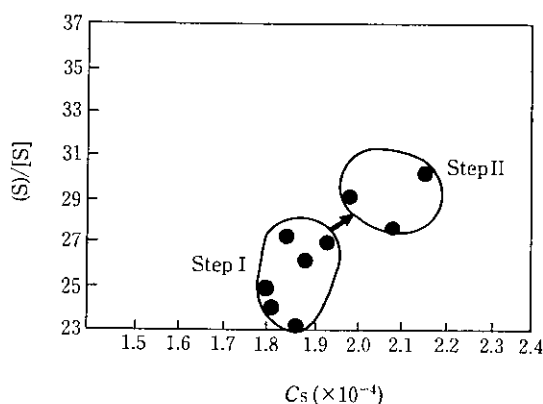


Fig. 14 Relation between (S)/[S] and sulphide capacity

$$\frac{(S)}{[S]} = K_1 \cdot C_s \cdot f_s / P_{O_2}^{1/2} \quad (7)$$

$$\log C_s = 1.35 \times \frac{1.79 \times (CaO) + 1.24 \times (MgO)}{1.66 \times (SiO_2) + 0.33 \times (Al_2O_3)} - \frac{6911}{T} - 1.649 \quad (8)$$

(S)/[S]: S の分配比

$K_1$ : 平衡定数

$C_s$ : Sulphide capacity (%)

$f_s$ : フガシチー

$P_{O_2}$ : 酸素分圧

スラグ  $B_2$ , MgO の上昇による脱硫能の向上は Sulphide capacity の上昇に基づく。Fig. 14 に (8) 式を用いて計算した Sulphide capacity  $C_s$  と S の分配比 (S)/[S] の関係を示す。これより、Step II では  $C_s$  の上昇により (S)/[S] を上昇させ [S] を低下し得たと推定される。

## 5 結 論

水島第 2 高炉においては 1983 年 11 月以来低 [Si] 操業を継続しており、とくに 1984 年 6 月~8 月には [Si] 0.20% 以下を達成した。この低 [Si] 操業に検討を加えた結果、以下の結論を得た。

- (1) [Si] の低下にはステープ熱負荷の低位管理による溶融帯領域の縮小、羽口前温度低下による羽口前 SiO ガスの抑制が有効である。これにより [Si] 0.20% のレベルで長期的な低 [Si] 操業が可能である。
- (2) スラグの MgO% および  $B_2$  の上昇により [Si], [S] の低下が可能である。1984 年 6~8 月に [Si] を 0.20% 以下に出来たのはこのスラグ成分調整の効果が大きいと考えられる。
- (3) 今回の低 [Si] 操業には炉況の安定が基盤となっているが、この炉況の安定にはステープ熱負荷とガス分布管理に基づく装入物分布調整の寄与が大きい。

## 参 考 文 献

- 1) 榎谷暢男, 田口整司: 鉄と鋼, **69** (1983) 16, 1945
- 2) 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), 557
- 3) 才野光男, 藤森寛敏, 末森 昱, 佐藤政明, 野村 真, 妹尾義和: 鉄と鋼, **67** (1981) 12, S 727
- 4) 板谷 宏, 荒谷復夫, 船越督己, 可児 明, 清原庄三: 鉄と鋼, **65** (1979) 11, S 564
- 5) 田口整司, 榎谷暢男, 久保秀穂, 一藤和夫, 岡部俠児: 高炉内現象とその解析 (高炉内反応部会報告書), (1982), 124, [日本鉄鋼協会]
- 6) 角戸三男, 榎谷暢男, 岡部俠児: 鉄と鋼, **66** (1980) 4, S 66
- 7) 榎谷暢男, 田口整司, 高田至康, 岡部俠児: 鉄と鋼, **66** (1977) 12, 1791
- 8) 海老沢幸弘, 徳田昌則, 大谷正康: 高炉内現象とその解析 (高炉内反応部会報告書), (1982), 227, [日本鉄鋼協会]
- 9) 田村健二, 斧 勝也, 西田信直: 鉄と鋼, **67** (1981) 16, 2635