
低 Si 高炉操業の長期安定化と Si 適中率の向上

Long-Period Stable Operation of Blast Furnace with Low Silicon Content in Hot Metal
and Improvement in Hitting Ratio of Silicon Content

西村 博文(Hirobumi Nishimura) 秋月 英美(Hidemi Akizuki) 山崎 信(Makoto Yamazaki) 金子 憲一(Kenichi Kaneko) 妹尾 義和(Yoshikazu Senoo) 木口 満(Mitsuru Kiguchi)

要旨：

溶銑 Si は製鋼工程におけるコスト・吹錬効率に対する寄与が大きいため、転炉での吹錬特性や鋼種に合致した適正な範囲で管理することが重要である。とくに、最近では Si の絶対値のみならず、そのバラツキを低減することが、吹錬コスト、高炉・製鋼・ミル間の同期化・連続化操業の両面から不可欠である。このような環境変化に対応するため、水島製鉄所では、低 Si 操業に必要な条件を定量的に整理・体系化し、要求 Si レベルに対して、最も的中率が高く、かつ安価な操業を高炉・転炉間のトータルシステムとして設計している。その結果、長期にわたり、低 Si かつ低 σ_{Si} 操業を達成し、吹錬コスト低減に大きく貢献している。

Synopsis：

Since cost and productivity of the steelmaking process largely depend on silicon content in hot metal, an optimum range of silicon content which corresponds to the type of steel should be set and controlled for blast furnaces. Not only the silicon value itself but also its variation must be controlled for refining cost saving and synchro-nised-continuous operation from blast furnaces through rolling mills. Corresponding to the situation change, the total silicon control system between blast furnaces and converters is established at Mizushima Works. In the system the conditions which are necessary to continue a stable low silicon operation are arranged and systemized quantitatively for targeting an optimum silicon value. Thus a long-period low-silicon and low-silicon-variation operation have continued at Mizushima Works and contributed greatly to the refining cost reduction.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Long-Period Stable Operation of Blast Furnace with Low Silicon Content in Hot Metal and Improvement in Hitting Ratio of Silicon Content



西村 博文
Hirobumi Nishimura
水島製鉄所 製鉄部製
鉄技術室 主査(掛長)



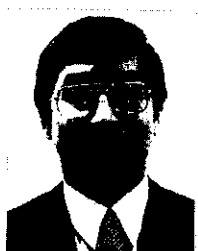
秋月 英美
Hidemi Akizuki
水島製鉄所 製鉄部 部
長



山崎 信
Makoto Yamazaki
水島製鉄所 製鉄部製
鉄技術室 主査(課長)



金子 憲一
Kenichi Kaneko
水島製鉄所 製鉄部製
鉄課 課長



妹尾 義和
Yoshikazu Senoo
水島製鉄所 製鉄部製
鉄課 主任部員(課長
補)



木口 満
Mitsuru Kiguchi
水島製鉄所 製鉄部製
鉄課 主任部員(掛長)

1 緒 言

ここ数年来、製鋼工程では、高級鋼比率が上昇するとともにコスト低減を目的とした省資源省エネルギー型の吹錬プロセスへの移行が必要となった。

このような製鋼工程の変ぼうにともない、溶鉄品質への要求はますます厳しくなっている。とくに、溶鉄 Si は製鋼工程でのコスト低減および吹錬時間短縮に対する寄与が大きいため、転炉の唯錬特性や鋼種に合致した適正な範囲で管理することが強く望まれている。

水島製鉄所では、転炉構造および吹製鋼種の違いから、高炉における出鉄 Si は、第 1 製鋼工場向けが 0.23~0.33%、第 2 製鋼工場向けが 0.15~0.23% が理想的な範囲とされている。

また、溶鉄 S に関しては、溶鉄脱硫工程の負荷を軽減し、トピード回転率を向上するために、低 Si の操業条件下で、できるだけ S を低減することが要求されている。

要旨

溶鉄 Si は製鋼工程におけるコスト・吹錬効率に対する寄与が大きいため、転炉での吹錬特性や鋼種に合致した適正な範囲で管理することが重要である。とくに、最近では Si の絶対値のみならず、そのバラツキを低減することが、吹錬コスト、高炉-製鋼-ミル間の同期化・連続化操業の両面から不可欠である。

このような環境変化に対応するため、水島製鉄所では、低 Si 操業に必要な条件を定量的に整理・体系化し、要求 Si レベルに対して、最も適中率が高く、かつ安価な操業を高炉-転炉間のトータルシステムとして設計している。その結果、長期にわたり、低 Si かつ低 σ_{Si} 操業を達成し、吹錬コスト低減に大きく貢献している。

Synopsis:

Since cost and productivity of the steelmaking process largely depend on silicon content in hot metal, an optimum range of silicon content which corresponds to the type of steel should be set and controlled for blast furnaces. Not only the silicon value itself but also its variation must be controlled for refining cost saving and synchronised-continuous operation from blast furnaces through rolling mills.

Corresponding to the situation change, the total silicon control system between blast furnaces and converters is established at Mizushima Works. In the system the conditions which are necessary to continue a stable low silicon operation are arranged and systemized quantitatively for targeting an optimum silicon value. Thus a long-period low-silicon and low-silicon-variation operation have continued at Mizushima Works and contributed greatly to the refining cost reduction.

こうした製鋼ニーズに対応するため、当所では、溶鉄 S の上昇を抑制しつつ、Si の低下およびバラツキ低減に積極的に取り組み、Si 最適範囲への適中率を高レベルで長期にわたり維持することができた。本論文では、Si 適中率を向上するための操業設計の考え方と操業実績について報告する。

2 溶鉄 Si のターゲット

製鋼工程においてコストミニマムとなる溶鉄 Si は第 1 製鋼工場向けが 0.23~0.33%、第 2 製鋼工場向けが 0.15~0.23% であり、その範囲を下回ると熱源不足、上回ると副原料使用量の増加といったコストアップ要因を招くばかりでなく、吹錬時間を増加させ、上下流工程の円滑な物流の妨げとなる。

Fig. 1 に溶鉄 Si の平均値、標準偏差による吹錬コスト指数の変化を示す。吹錬コスト指数は、その値が小さいほど吹錬コストが安

* 昭和62年6月1日原稿受付

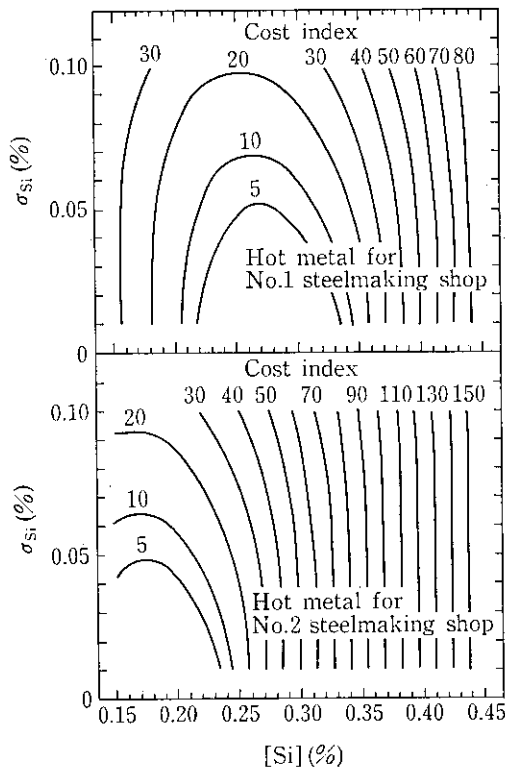


Fig. 1 Cost evaluation of hot metal with the change in silicon content

価であることを意味する。図から明らかなように、Si が 0.40% 前後の高い領域では、溶鉄 Si のバラツキが大きくとも、その平均値を下げれば吹錬コストが低下できる。一方、0.25% 前後の領域では、Si の平均値を低下するよりもそのバラツキを低減する方が、コスト低減に寄与する。水島製鉄所では、1984 年以降、おおむね全高炉とも Si を 0.40% 以下で管理しているため、Si の平均値のみならず、そのバラツキを低減するための操業設計および操業管理がコスト低減に不可欠である。

3 低 Si 操業に対する基本的な考え方

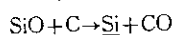
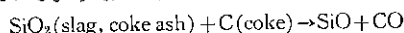
溶鉄温度を一定レベルで管理しながら、溶鉄 Si を低下させるためには、平衡論および速度論の立場から、以下の 2 項目が重要である。

(1) SiO ガス発生抑制

溶鉄中への Si 移行の反応経路として

- (a) SiO ガスを媒介とするガス-メタル反応¹⁾
- (b) スラグ-メタル反応²⁾

の 2 通りの考え方がある。当所においては前者の反応を重要と考えている。すなわち、主反応は以下の反応式で表現できる。



SiO ガスの発生を抑制するためには

- (a) 羽口前温度低下による SiO 分圧の低下
- (b) 装入物の塩基度や MgO の増加による SiO₂ 活量の低下
- (c) 炉頂圧力増加による CO 分圧の増加

などがその具体的手段である。

(2) 溶融帯領域の縮小と滞留時間の低減

ガス-メタル反応を経路とする溶鉄中への Si 移行はコークス充填層内での溶鉄とボッシュガスとの反応界面の大きさにより、その大小が決定される。

したがって、溶融帯領域を縮小すれば、溶鉄中への Si 移行を抑制できるが、これは溶鉄温度の低下に直接的に結びつくため、装入物の軟化溶融温度を上昇させ、この領域を縮小する必要がある。装入物の軟化溶融特性を改善するためには、焼結鉱やペレット中の MgO や塩基度の上昇が有効である。

また、高炉の操業アクションとは異なるが、出鉄比の増加は、溶鉄の滴下速度を大きくし、溶融帯領域内での滞留時間を減少させるため、Si を低下する重要な因子となる。

4 低 Si 操業の要因解析

4.1 出鉄比、熱流比および羽口前温度

高炉の操業度を計る重要な指標として、出鉄比、熱流比および羽口前温度が挙げられる。Fig. 2 に示すように、Si と出鉄比との間には強い相関関係が認められるが、これは、溶融帯領域を通過する溶鉄の滞留時間が変化するためである。なお、Fig. 2 では、溶鉄の滴下速度の尺度として意味を持たせるため、炉床単位面積当りの出鉄比を用いて両者の関係を示した。

熱流比と羽口前温度は熱レベルを表わす指標であり、前者は溶融帯の高さ、後者は羽口前の熱レベルの尺度と考えることができる。日常操業において、両者は正の相関関係をもって推移するが、溶鉄 Si に対する寄与は前者が負、後者が正の相関関係となるので、低 Si 操業を指向するためには熱流比を上げるのが有利か否かを判断する必要がある。Fig. 3 に、熱流比と羽口前温度の関係を溶鉄 Si レベ

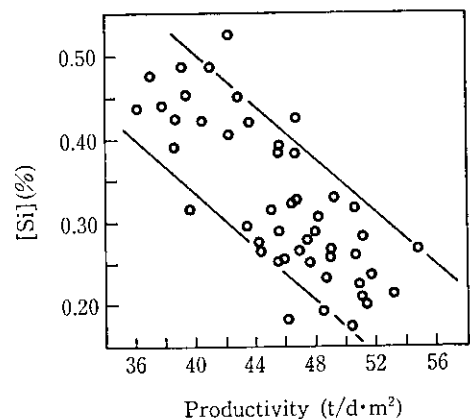


Fig. 2 Relationship between hot metal Si content and productivity

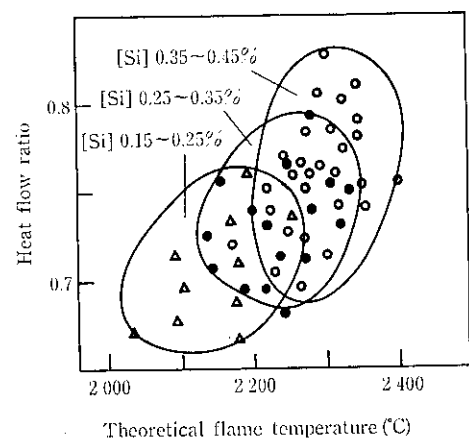


Fig. 3 Effect of theoretical flame temperature and heat flow ratio on Si content of hot metal

ルで層別して示す。低 Si 操業は低熱流比および低羽口前温度の操業条件で達成されていることがわかる。

4.2 ステープ熱負荷

溶銑 Si を装入物分布制御技術により管理する上でステープ熱負荷は重要な日常操業の管理指標である。ステープ熱負荷により Si が変化する要因として以下の 3 項目が考えられる。

- (1) ステープ熱負荷の大小が溶融帯レベルを表わす。
- (2) 炉壁熱損失の大小、すなわち、炉下部投入熱量の大小を表わす。
- (3) 炉壁近傍の Ore/Coke の大小を表わす。すなわち、炉壁近傍の Ore/Coke が大きいことは、炉壁近傍の溶銑滓の量が多いことであり、これは、SiO ガスの多い羽口周辺部での出銑比が高いことを意味する。

Fig. 4 にステープ熱負荷上昇により、Si が上昇する代表的な例を示す。この影響を高炉多重同心円モデルと炉高方向炉壁レンガ温度の推移から、解析した結果、ステープ熱負荷の上昇は、とくに、炉壁部の溶融帯レベルの上昇によることが明らかになった。Fig. 5 には高炉多重同心円モデルによる炉内温度分布の解析結果例を示す。一方、ステープ熱負荷の過度の抑制は炉下部不活生帯形成を促

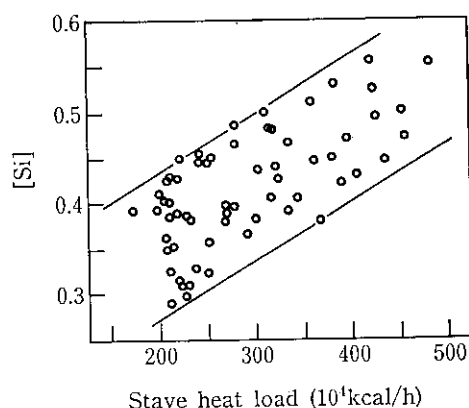


Fig. 4 Relationship between hot metal Si content and stove heat load

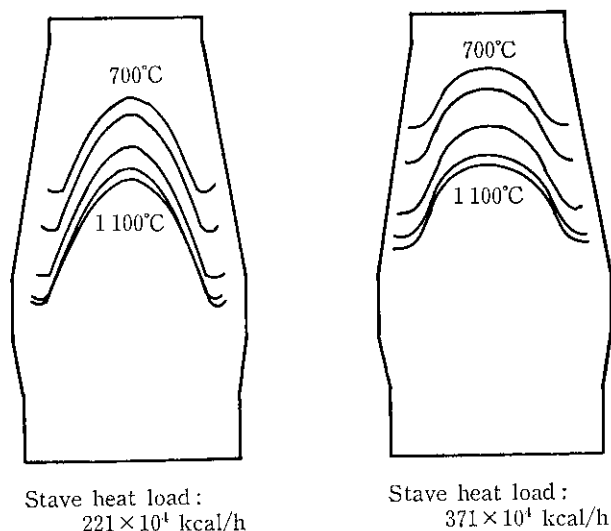


Fig. 5 Furnace temperature distribution calculated by multi-concentric circle simulation model

進し、荷下りおよび通気性変動の増大を招くため、高炉別に上下限を設け、管理している。

4.3 スラグ成分

滴下帯を通過するスラグとコークスの反応による SiO ガス発生を抑制する目的でスラグの CaO/SiO₂ 比および MgO のアップを実施している。これらのスラグ成分調整の効果として、Fig. 6 に (MgO) を層別因子として CaO/SiO₂ と Si の関係を示す。両者とも Si 低減に寄与することは明瞭であるが、Si 低下のためには CaO/SiO₂ 比の上昇の方がより有効な手段となることがわかる。SiO ガスの発生速度式は SiO₂ 活量 a_{SiO_2} の 1 次式で与えられ、また、SiO₂ 活量の計算方法は梶谷³⁾ らにより、次式が提案されている。

$$\log a_{\text{SiO}_2} = -(8 \times 10^{-6} \times T + 0.228) B - 9.31 \times 10^{-4} \times T + 0.797 \quad (1)$$

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

T : 反応温度

上式から、明らかに CaO の方が MgO より、SiO₂ 活量の低下効果が大きく、Fig. 5 の解析結果と一致する。したがって、コスト面から、考えれば、Si 低下のためのアクションとしては、CaO/SiO₂ の上昇が有効である。

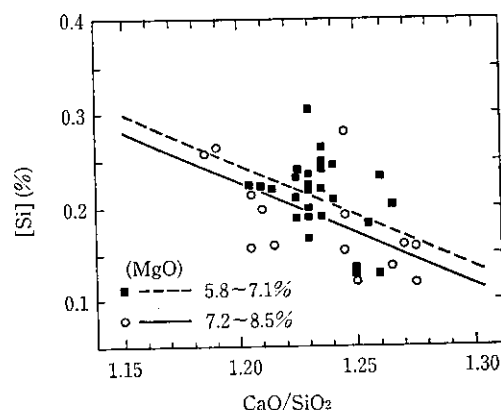


Fig. 6 Relationship between hot metal Si content [Si] and slag composition (B_2) = CaO/SiO₂

4.4 CDQ コークス

CDQ コークスは wet コークスに比較し、顕熱および水分蒸発熱差の分だけ熱的に有利なため、シャフト上部において炉内装入物の昇温速度を大きくする。その結果、炉内還元反応を促進し、結果として羽口前温度を低下することができる⁴⁾。4.1 項で Si に対する熱

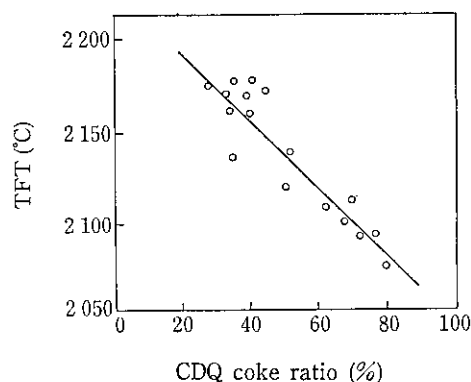


Fig. 7 Relationship between TFT and CDQ coke ratio

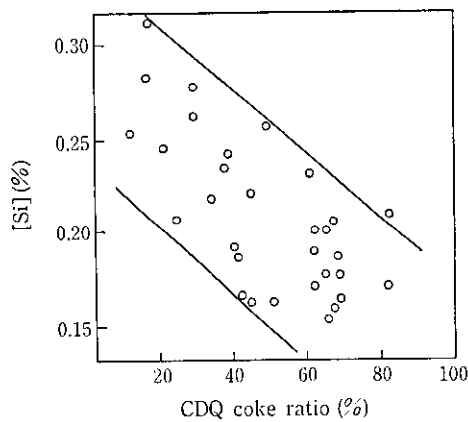


Fig. 8 Relationship between CDQ coke ratio and hot metal Si content

流比と羽口前温度の影響について述べたが、CDQ コークスは、コークス比のアップ、すなわち、熱流比をほとんど低下させることなく、羽口前温度のみ低下できるため、低 Si 化に対してきわめて有効な手段となる。

実操業において確認された CDQ コークスと 羽口前温度および Si との関係をそれぞれ Fig. 7 および 8 に示す。

5 溶銑 Si のバラツキ低減に対する考え方と取組み

溶銑 Si のバラツキすなわち σ_{Si} を低減するための操業方針と実施内容は Fig. 9 に示すように、炉況安定をベースとした、ボッシュスラグ・炉壁プロフィールの管理および CDQ コークスの適正な配合が主である。なお、ここで、 σ_{Si} はタップ 1 個のデータに基づく 1 日以内の Si の標準偏差を示す。

σ_{Si} を低減するためには、炉況を安定させる必要がある。Fig. 10 には炉頂ガス成分の CO と CO₂ の比 CO/CO₂ の標準偏差 σ_{CO/CO_2} と σ_{Si} の関係を示す。したがって、炉況安定を維持するために処理鉱比を従来の出銑比およびコークス比に加え、溶銑品質も考慮対象とすべく見直した。また、Fig. 11 に示すように CDQ コークスは熱間反応性および反応後強度に優れ、高炉操業を安定化する効果をも

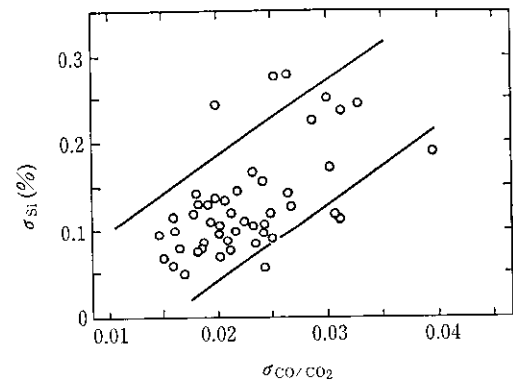


Fig. 10 Relationship between σ_{Si} and σ_{CO/CO_2}

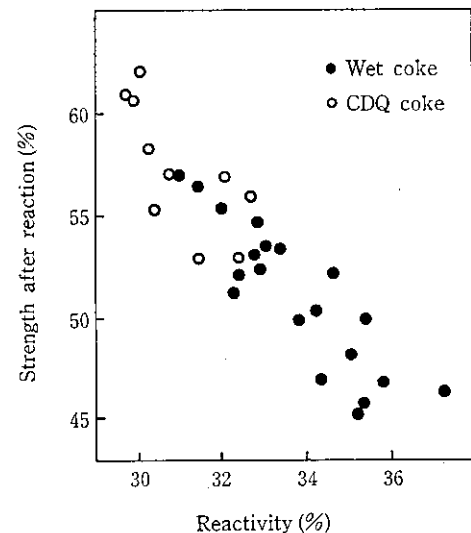


Fig. 11 Relationship of strength after reaction to reactivity

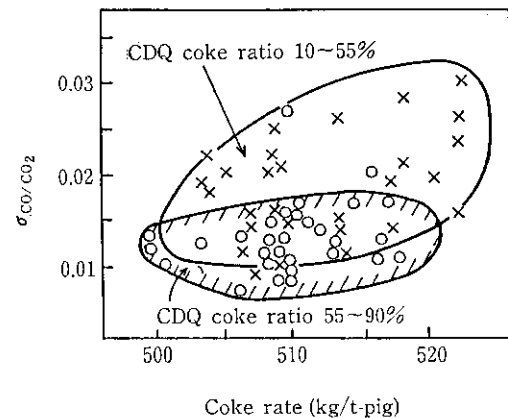


Fig. 12 Relationship between σ_{CO/CO_2} and coke rate

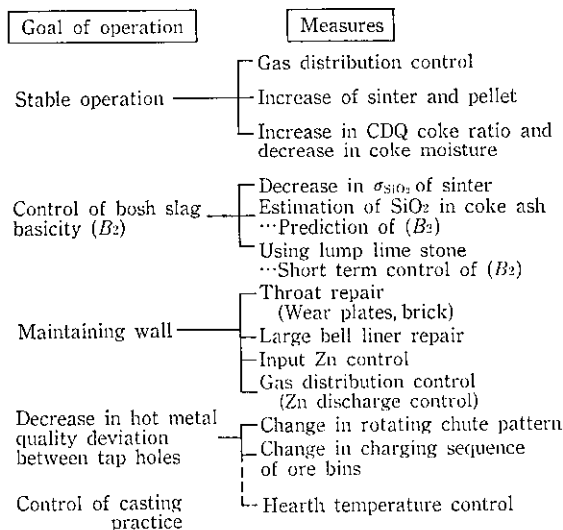


Fig. 9 Targets and measures for decreasing σ_{Si}

つ。Fig. 12 に CDQ コークスの炉況安定効果例を示す。

スラグ CaO/SiO₂ 比は Fig. 6 に示したように、CaO/SiO₂ 比 ±0.01 に対し、Si ±0.01% と Si を変動させる。したがって、均鉱工場でのオーブレンディングにおける成分安定化および焼結工場における焼結鉱成分管理の強化により、焼結鉱中の SiO₂ および CaO/SiO₂ 比のバラツキ低減を積極的に推進するとともに、高炉では、塊石灰石の使用により、スラグ CaO/SiO₂ 比の管理を強化した。また、コークスアッシュ中 SiO₂ の変動は、Fig. 13 に示すように、Si 変動の要因となる。このような外乱の影響を小さくするために、当所では、

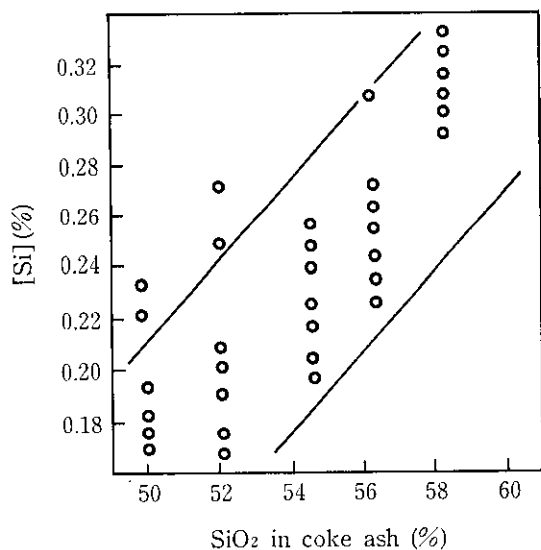


Fig. 13 Relationship between hot metal Si content and SiO₂ in coke ash

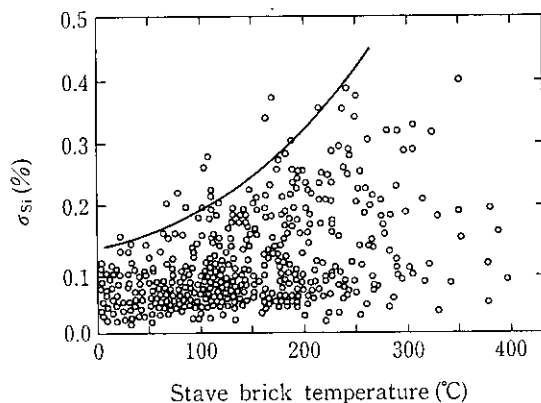


Fig. 14 Variation of σ_{Si} with stove brick temperature

原料炭の配合ベッドごとにコークスアッシュ中 SiO₂ を予測し、スラグ CaO/SiO₂ 比の予測管理を強化した。

Fig. 14 には、ステーブレンガ温度の日内変動と σ_{Si} の関係を示す。炉内からの Zn 排出が悪く、炉壁が付着物等で円滑なプロフィールを保てない場合には、周辺流が変動し、その結果、Si のバラツキを増大させる。これは、炉口ウエアリング金物およびレンガが損傷している場合でも同様である。したがって、当所では、炉壁プロフィールの凸凹をなくすため、炉口補修を定期的実施するとともに装入・排出 Zn の管理を強化している。

6 Si 適中率向上のための操業設計

当所では、製鋼工程からの要求 Si レベルに対し、最も適中率が高く、かつ安価な操業を全高炉-転炉のトータルシステムとして設計している。Fig. 15 に、そのシステムの考え方を示す。このシステムの特徴は、4 および 5 章で述べた低 Si、低 σ_{Si} を実施するための重要な操業因子をパラメータとして取込むとともに、各高炉の炉床径、炉体損傷状況、铸床脱珪設備の有無などの設備的な特徴および高炉-転炉間の溶銑需給を考慮対象に加え、生産量およびエネルギー需給の枠内で最も経済的な全高炉の操業条件を設計することである。したがって、生産量、エネルギー価格、原料コストなどの環境変化に対し、迅速に製鋼ニーズに適した全高炉トータルの操業選択が可能である。

7 操業実績

Fig. 16 に当所の 1986 年以降の主な高炉操業データの推移を示す。

1985 年以降、スラグの高塩基度を Si および S の両面で溶銑品質管理の重要項目として低 Si 化を図ってきたが、1986 年までは Si のバラツキ低減は第一義ではなかった。

溶銑 Si の適中率向上に対するコスト評価を確立し、適中率向上のための操業設計を体系的に実施した 1986 年 5 月以降は、全高炉で Si 0.20% 台を連続 11 カ月継続し、かつ、Si のバラツキを低レベ

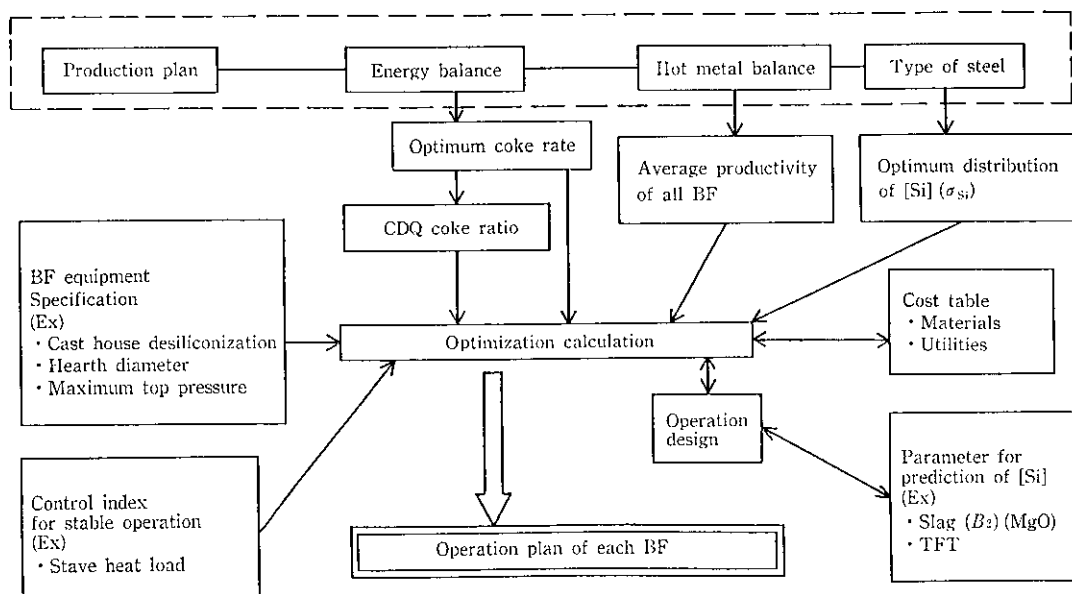


Fig. 15 Total BF operation design system for optimization of hot metal Si content

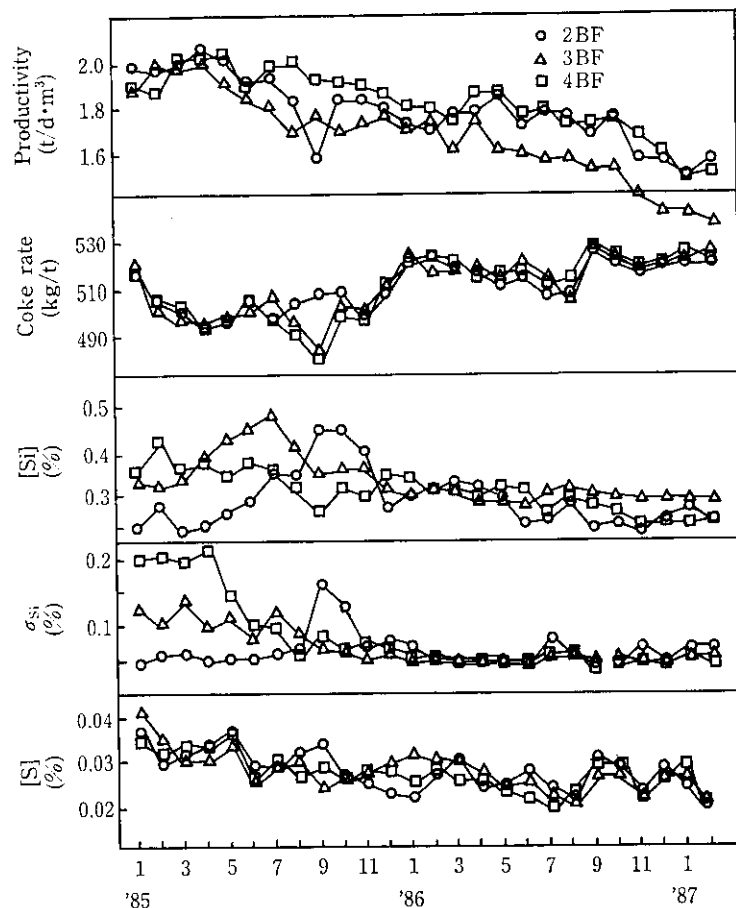


Fig. 16 Operation result

ルに安定して管理できた。

とくに、水島製鉄所第2高炉では、 $[Si]=0.20\sim0.25\%$ の低Si操業を長期間達成できた。これは、铸床脱珪設備のない第2高炉に対し、生産量配分、燃料比、処理鉄比設定およびCDQコークス配合を適切に設計して達成されたものである。

また、最も稼働年数の長い第3高炉においては、炉体保護のため、低出鉄比操業を実施しているが、Si低下ニーズの小さな第1鋼工場向け対応とし、 σ_{Si} 低減に傾注することで適中率の向上を達成している。

このように、製鋼の要求ニーズと高炉設備の特徴を考慮して、全高炉-転炉間をトータルシステムとして捉え、高炉操業設計を実施

することにより、コストアップを招くことなく、製鋼ニーズを十分に満足する低Si鉄を長期間、連続して吹製している。

8 結 言

水島製鉄所では、溶銑Siに対する製鋼ニーズを満足させるために、 $[Si]$ のレベルおよびそのバラツキに関連のある操業要因を定量的に整理し、それらをベースとしたSi適中率向上のためのシステム作りを行った。

このシステムを有効に運用することで、コストアップを招かずに製鋼ニーズを十分満足する低Si操業を長期間、継続している。

参 考 文 献

- 1) 徳田昌徳, 樋谷暢男, 大谷正康: 鉄と鋼, **58** (1972) 2, 219
- 2) 郷農雅之, 岩月鋼治, 野田多美男, 三輪 隆, 高城俊介, 田村健二, 杉山 喬, 佐藤裕二: 鉄と鋼, **68** (1982) 10, A125
- 3) 樋谷暢男, 田口整司, 高田至康, 岡部俠児: 鉄と鋼, **66** (1977) 12,

1791

- 4) 秋月英美, 山崎 信, 西村博文, 金子憲一, 妹尾義和: 鉄と鋼, **73** (1987) 4, S19