

## 技術論文

## 高炉炉下部における溶銑，スラグの挙動と熱指標への応用

Behavior of Hot Metal and Slag in the Lower Part of Blast Furnace  
and Its Application to Heat Indices折本 隆\*  
Takashi ORIMOTO

## 抄 録

高 PCR においては燃焼焦点が炉壁側にシフトするためガスが周辺流化しやすく、熱損失が増大する傾向となる。さらに、O/C 増加に起因する鉱石層厚増加により鉱石層上層部の還元遅延が顕在化しやすくなるため、炉下部での熱的変動を増加させる一因となっている。また、低コークス比／高出銑比操業時は通気性や熱流比の観点から操業の自由度が従来よりも小さくなっており、このような状況では炉下部熱レベルを正確に把握し、過不足ない還元材比に調整する必要がある。このため、Si 移行メカニズムに基づく炉熱指標として SiO(g) 発生領域体積を定義しその妥当性について検討した。また、高 PCR 操業で熱的変動を誘発する PC 由来灰分の影響について報告した。

## Abstract

**In high PCR operation, raceway shift to the wall side tends to increase peripheral gas flow and heat loss. Furthermore due to the increase of ore layer thickness, reduction retard at the upper part of ore layer becomes more obvious. And this might be one of the causes of increasing heat fluctuation. Low coke rate and high productivity operation limits its flexibility, and in such situation RAR adjustment by grasping the heat level of the lower part of furnace precisely is critical. Therefore we focused on the volume of SiO(g) generation area, which was defined as a heat index based on a Si transfer mechanism. And its validity was mentioned. The influence of the PC origin ash content, which causes heat fluctuation in high PCR operation, was also referred.**

## 1. 緒 言

高 PCR 操業においては燃焼焦点が炉壁側にシフトするためガスが周辺流化しやすく、熱損失が増大する傾向となる。さらに、O/C 増加に起因する鉱石層厚増加により鉱石層上層部の還元遅延が顕在化しやすくなるため、炉下部での熱的変動を増加させる一因となっている。また、低コークス比／高出銑比操業の実現にあたり、通気性や熱流比の観点から操業の自由度が従来よりも小さくなっており、このような状況では炉下部熱レベルを正確に把握し、過不足ない還元材比に調整する必要がある。炉下部熱レベルの維持は、安定操業を継続する上で最も重要な項目の一つである。炉下部熱レベルの代表的指標は溶銑温度であるが、必ずしも炉下部高温領域の熱レベルを正確に反映しているとは限らない。溶銑はレースウェイ近傍の高温領域であるコークス充填層で最高温度に達した後、炉底から大樋、測

温位置であるスキンマー近傍に至るまでに抜熱されるため、抜熱量が異なるような状況では溶銑温度を一定に調整してもレースウェイ近傍の高温領域温度が異なるケースも発生する。

このため、通常は Si, Mn, S 等の溶銑中成分も熱レベルを判定する指標として併用することが多い。さらにこれら溶銑成分の実績値と平衡値の比を指標とすることも報告<sup>2,3)</sup>されている。ただし、これらの指標は原理的に出銑比の影響を考慮できないため、出銑比がほぼ一定の条件では炉熱を反映する指標として有用であるものの、リーマンショックに端を発した不況による超低出銑比操業のように出銑比が大幅に変化する条件下では必ずしも炉況を反映した指標ではない可能性がある。

また、PC 多量吹き込みに伴い、高炉スラグの生成過程も変化していると考えられる。高 PCR 操業ではコークス比を低下させるため、炭材中の灰分含有量が大きく変化しな

\* プロセス研究所 製銑研究部 上席主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

い前提ではコークス由来灰分は低下するものの PC 由来灰分は増加する。コークスと PC では燃焼場であるレースウェイへの供給形態が異なるため、それぞれから発生する灰分についても異なる挙動をすると推定される。Ichida ら<sup>4)</sup>は実炉の羽口サンプリングに基づく半径方向のスラグ組成分布が、高 PCR 操業ではレースウェイ近傍と炉芯側で異なることを報告している。すなわち、重油吹き込み操業時は半径方向のスラグ組成変化は少ないものの、高 PCR 操業においてはレースウェイ内の領域では最終スラグの平均 CaO/SiO<sub>2</sub> よりも低値であるが、レースウェイ以深では高 CaO/SiO<sub>2</sub> となっており、PC 由来灰分が炉芯側に行きにくいことを示唆している。

以上を鑑み、低コークス比(高 PCR)/高出銑比操業の実現に向け、炉下部の視点から PC 由来灰分の影響と Si 移行メカニズムに基づく炉熱指標について検討した結果を報告する。

## 2. PC由来灰分の挙動

### 2.1 PC 由来灰分の影響

高 PCR 操業に移行後、炉体熱負荷が増加するケースが多い。この原因としては PCR 増加による熱流比低下やコークス粉化助長による影響があるが、レースウェイシェル(いわゆる“鳥の巣”)形成により炉中心部へのガス流が妨げられる現象が報告されている。有山ら<sup>5)</sup>はオフライン実験により PC の揮発分、灰分と炉壁温度の関係を報告しており、揮発分の増加とともに燃焼焦点が炉壁側に近づき、PC 中灰分が7%超の条件ではレースウェイシェルを形成し、PCR や燃焼焦点が同程度でも羽口上部位置の炉壁温度がさらに上昇する結果となっている。

しかし、有山らの実験では組成が大きく異なる PC 炭種を用いていたこと、また、スラグ滴下がない条件であったことから、レースウェイシェルの形成に PC の発熱量やスラグの有無の差が影響を及ぼしていた可能性もある。このため、予め組成を調整したスラグ(3~15mm)をコークス(9~13mm)とともに装入することにより、スラグ滴下があり最終スラグ比、スラグ組成をほぼ揃え、PC の CO までの部分燃焼熱がほぼ一定となるように混炭した条件でレースウェイ試験を実施<sup>6)</sup>した。試験装置概要を図1に、試験条件を表1、2に示す。シングルランスによる吹き込みで、ベース条件と PC 中灰分が低い条件でそれぞれ約4時間の燃焼試験を実施した。実験終了1時間前の平均の炉芯温度を図2に示す。PC 中灰分を低くした条件で炉芯温度が高い結果となった。また、羽口上部位置の温度はベース条件で熱電対が試験中に溶損したが PC 中灰分を低くした条件は溶損しなかった。定量的な議論はできないものの、PC 中灰分を低くした条件の方が炉体熱負荷は低かったと推定される。

試験後の解体サンプリングにて各領域(図1中①~③)

のスラグホールドアップ量を測定した。図3に結果を示すが、各領域とも PC 中灰分を低くした条件でスラグホールドアップ量が少ない結果となった。また、分析結果から灰分のスラグへの同化はレースウェイ近傍に集中する傾向があった。

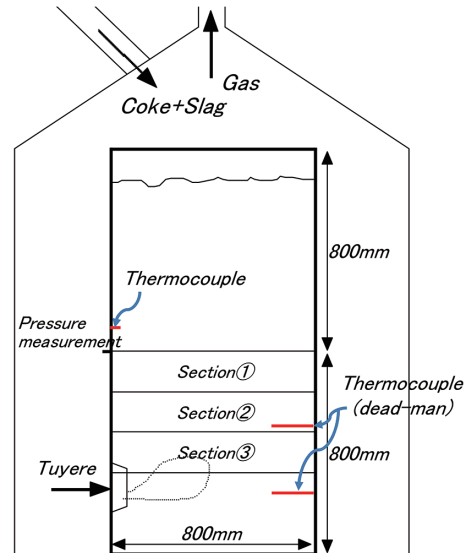


図1 レースウェイ試験装置  
Experimental apparatus of raceway test

表1 レースウェイ試験条件  
Experimental conditions of raceway test

	[%] PC ash	Dripping slag			Final slag		
		[kg/t] SV	[%] (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	[-] (C/S)	[kg/t] SV	[%] (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	[-] (C/S)
Base	8.6	270	11.8	1.42	297	15.1	1.28
Low ash	6.6	276	12.3	1.40	300	15.1	1.28

表2 レースウェイ試験の送風条件  
Blast condition of raceway test

Blast temperature	°C	1200
O <sub>2</sub> -enrichment	%	2.50
Blast humidity	g/Nm <sup>3</sup>	30.0
PCI	g/Nm <sup>3</sup>	152
Flame temperature	°C	2061

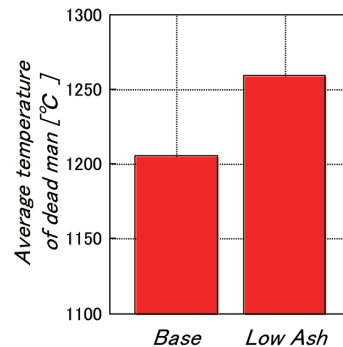


図2 異なる PC 中灰分での炉芯温度の比較  
Comparison of dead-man temperature between different ash content in PC

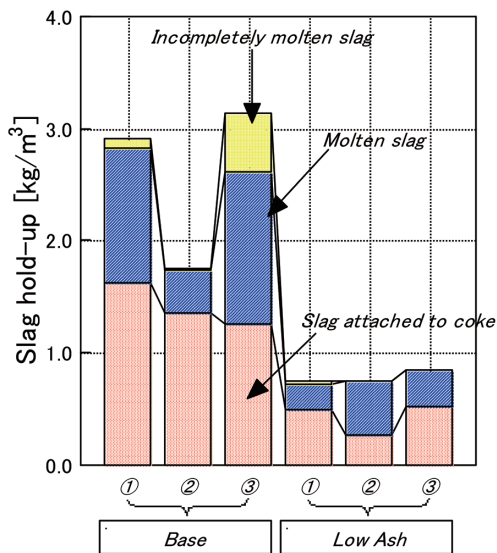


図3 異なるPC中灰分でのスラグホールアップ量の比較  
(①～③は図1中の位置に対応)

Comparison of slag hold-up between different ash content in PC (①～③ correspond to the location in the Fig. 1)

以上から、最終スラグ比、スラグ組成および発熱量がほぼ同じ場合でも、PC中灰分低減により、レースウェイが深い通気性が改善し、炉芯側にガスが流れやすくなり温度が上昇したと考えられる。その結果、レースウェイ近傍のスラグホールアップ量は大幅に減少したと考えられる。

## 2.2 レースウェイシェルへの対策

コークスはレースウェイ内を旋回しながら燃焼するため、発生した灰分は炉内に分散しやすいが、PCはランスから吹き込まれるため局所的に偏在しやすくシェルを形成しやすいものと考えられる。従って、高PCR操業を安定して継続するにはレースウェイシェルへの対策が必要となる。生成したシェルを解消する方法としては、シェルを形成する高SiO<sub>2</sub>・高Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>スラグの粘性、融点を塩基性物質吹き込みにより低下し滴下性を改善する蛇紋岩吹き込み<sup>7)</sup>、転炉スラグ吹き込み<sup>8,9)</sup>が報告されている。また、高流速酸素によりシェルの粉コークスを燃焼しスラグホールアップを減少させる酸素ジェット<sup>10)</sup>、PCと酸素のco-axialランスの有用性<sup>11)</sup>等も報告されている。シェル生成抑制の観点からは、一般的なダブルランスも有効な対策と考えられるが、偏芯ダブルランスによる分散性改善での灰分凝集防止<sup>12)</sup>の報告もある。

また、複合吹き込みについてはシェル解消の効果のみならず、例えば蛇紋岩吹き込みでは、MgOが還元、揮発し、Mgガスが脱硫反応に寄与し得る可能性も報告<sup>7)</sup>されており、溶銑品質向上の観点からも期待される。

## 3. 溶銑Si移行過程と熱指標への応用

### 3.1 溶銑へのSi移行の律速過程

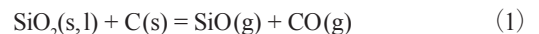
溶銑中Siが溶銑温度と正の相関があることは熱力学的

に明白であるが、炉内圧力や操業度等も溶銑Siに影響を及ぼす因子であり、同じ溶銑温度でも操業時期や高炉により溶銑Siの値は変化する。このため、これまで溶銑へのSi移行についての平衡論、速度論、統計的解析が多数報告されているが、必ずしも普遍的に適用できるとは限らないのが実情である。この原因としては、後述するSiO(g)発生と吸収の律速過程が操業条件により変わっていることが考えられる。溶銑Siの絶対値が時期により異なるのは、圧力や出銑比等の影響もあるが、温度依存性が異なるのは溶銑Siを規定する反応過程そのものが異なる可能性がある。

溶銑中のSiはコークス、PC、鉍石中のSiO<sub>2</sub>が起源であり、中でもSiO<sub>2</sub>の還元条件である、高温・低酸素分圧の条件になりやすいコークスの寄与が最も大きいと考えられる。SiO<sub>2</sub>の還元について、徳田ら<sup>13)</sup>は、羽口水準に達するまでに溶銑中への吸炭反応が十分進行せず、炉床スラグのFeO濃度が低くスラグ層中を微細な溶銑粒が滴下する場合にスラグ-メタル反応による還元の可能性を挙げているものの、SiO(g)の関与する反応の熱力学的考察によりSiO<sub>2</sub>活量の高いコークス中SiO<sub>2</sub>からのSiO(g)発生と、発生したSiO(g)と炭素含有鉄との反応が主要なSi移行メカニズムと結論付けている。

また、植谷ら<sup>2)</sup>は、出銑時の銑滓成分の時系列変化から、スラグ中SやMnOが時間とともに変化するのに対し、SiO<sub>2</sub>は濃度変化が極めて小さいことなどから、スラグ-メタル反応によるSi移行反応は主要な役割を果たさないと報告している。実際、C-CO平衡ないしは炉床スラグ中に含有されるFeOを考慮したFe-FeO平衡で規定される酸素分圧を用いてスラグ-メタル反応の平衡Si値を計算しても、必ずしも実高炉での溶銑Siとは一致しないことが知られている。

現在ではスラグ-メタル反応よりもSiOガスを經由しての反応機構が主流と考えられている<sup>2,13,19)</sup>。すなわち、(1)式によるSiO(g)の発生と、(2)式によるSiO(g)の吸収である。これらのSiO(g)を介した反応の速度定数はスラグ-メタル反応のものより大きく、実炉での溶銑Si含有量を説明できる。



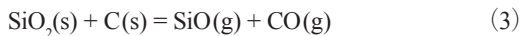
しかしながら、どちらの反応が溶銑Siを規定しているのかについては必ずしも明らかではない。植谷ら<sup>15)</sup>は、SiO(g)吸収律速で溶銑Siが規定されるとの立場であるが、これは、SiO(g)分圧を10<sup>-2</sup>atmと、平衡値に近い高値で評価しており、SiO(g)吸収領域で十分SiO(g)が存在していると考えていることが一因である可能性がある。また、杉山ら<sup>16)</sup>は、SiO(g)吸収速度がSiO(g)発生速度に比べて極めて速いためSiO(g)発生律速で溶銑Siが規定されると結論付けているが、レースウェイ周辺のスラグ温度を固体温度に等しいと仮定しているため溶銑温度を高めに見積もっており、



SiO(g) 吸収速度を過剰に速く評価している可能性がある。このため、以下では実炉の溶銑 Si がどちらの反応過程で規定されているのかについて解析した結果について報告する。

### 3.1.1 SiO(g) 発生速度の定量的表現

前述のように、SiO<sub>2</sub> 源としてはコークスや PC 中の灰分、鉱石中の脈石があるが、SiO<sub>2</sub> の還元条件である、高温・低酸素分圧の条件での滞留時間や、SiO<sub>2</sub> と炭素の接触界面積を考慮すると、コークスの寄与が最も大きいと考えられる。PC の寄与についての報告例<sup>20)</sup>もあるが、PC の場合は高温・低酸素分圧の条件であるレースウェイ周辺部での滞留時間が極めて短く、速度論的観点から溶銑 Si への影響は限定的であると考えられる。また、前述の灰分由来のレースウェイシェルや脈石中の SiO<sub>2</sub> はレースウェイ周辺部ではスラグ中に同化し活量が低下する上、炭材との接触界面積も炭材中に分散している灰分中の SiO<sub>2</sub> と比べて桁違いに小さいことから、主要な発生源とは考えにくい。樋谷ら<sup>2)</sup>はコークス中灰分の増加とともに銑滓への Si 分配比も増加することを報告していることから、コークス中 SiO<sub>2</sub> からの移行をここでは考慮した。このため、コークスからの SiO(g) 発生速度式に基づき解析を行った。コークスからの SiO(g) 発生速度式として、山縣らにより以下の式が報告されている<sup>1)</sup> (SI 単位系への換算により係数を修正)。



$$R_1 = k_1 \cdot (C_{\text{SiO}_2} - C_{\text{SiO}} \cdot C_{\text{CO}} / m_1) \quad (4)$$

$$k_1 = 2.0 \times 10^4 \cdot \exp(-289000/RT) \quad (5)$$

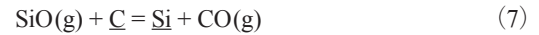
山縣らは SiO<sub>2</sub> の転化反応に及ぼす全圧の影響についても報告しており、全圧の増加とともに SiO(g) 発生反応は抑制されると報告しているが、3 気圧以上では圧力依存性が殆どない結果となっている。近代の大型高炉ではレースウェイ周辺部の圧力は 3 気圧以上あるため、(4) 式の圧力に

起因する第 2 項を無視し以下の解析では正反応のみを考慮した。

$$R_1 = k_1 \cdot C_{\text{SiO}_2} \quad (6)$$

### 3.1.2 SiO(g) 吸収速度の定量的表現

炭素飽和鉄への Si 移行速度式として、樋谷らにより以下の式が報告されている<sup>15)</sup> (SI 単位系への換算により係数を修正)。



$$d[\% \text{Si}]/dt = 10\kappa_f \cdot (A/M) \cdot P_{\text{SiO}} \quad (8)$$

ここで、 $\kappa_f$  は見かけの速度定数で、樋谷らの報告値を基数式化すると (9) 式で表される。

$$\log \kappa_f = 6.54 - 12685/T \quad (9)$$

また、SiO 分圧はコークス中 SiO<sub>2</sub> の活量  $a_{\text{SiO}_2}$  を 0.85 とし、ポッシュガス中の CO 濃度を 35 vol% とした平衡分圧として、以下の式から計算した。



$$\Delta G_{(10)}^\circ = 694126 + 26.99T \log T - 434.5T [\text{J/mol}]^{21)} \quad (11)$$

$$P_{\text{SiO}} = (a_{\text{SiO}_2} \cdot a_c) / P_{\text{CO}} \cdot \exp(-\Delta G_{(10)}^\circ / RT) \quad (12)$$

### 3.1.3 計算時の仮定についての検討

正確な炉内状況を推定するだけの情報が現時点では不十分であることから、SiO(g) 発生領域/吸収領域の温度、および A/M については、以下の仮定を置いている。

図 4 は SiO(g) 発生律速/吸収律速のケースで、SiO(g) 発生領域および吸収領域の温度について、溶銑温度  $T_{\text{pig}}$  との温度差が一定であると考え、 $T_{\text{pig}} + \alpha$  ( $\alpha = 25, 100$ ) °C の場合の溶銑 Si と溶銑温度の関係を示している。それぞれのケースで  $\alpha$  によりパラメータとなる発生領域体積、吸収領域での溶銑滞留時間は変わるものの、溶銑 Si と溶銑温度の関係はほぼ同じ曲線上にあることがわかる。すなわち、溶銑 Si の温度依存性は仮定となる  $\alpha$  の影響を殆ど受けな

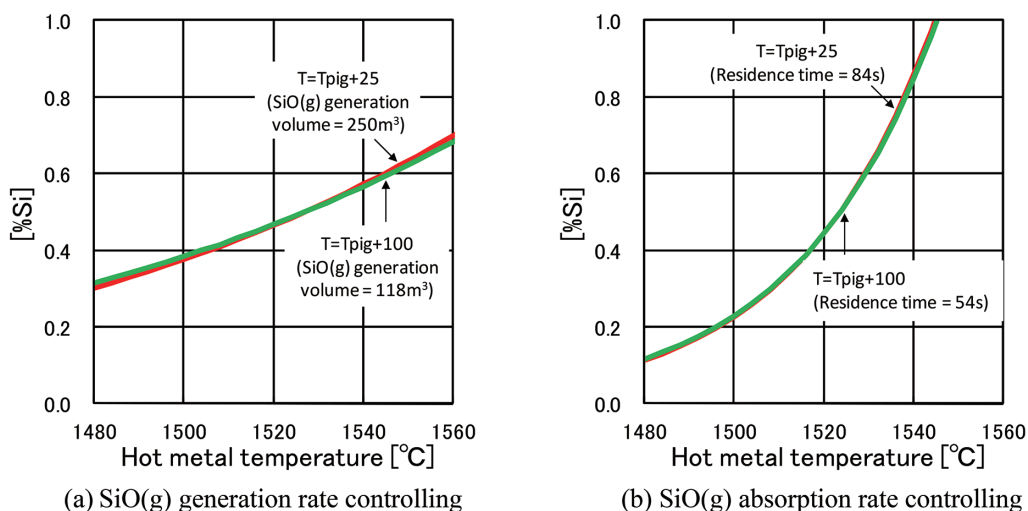


図 4 SiO(g) 発生/吸収律速時の溶銑温度と [%Si] の関係 (計算値)

Relation of hot metal temperature and Si content in case of SiO(g) generation/absorption rate controlling (calculated data)

いことがわかった。レースウェイ周辺部の高温域で発生した SiO(g) が炉上方で滴下してくる溶銑に移行すると考え、以下では SiO(g) 発生領域および吸収領域の温度をそれぞれ  $T_{pig} + 100^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{pig} + 25^{\circ}\text{C}$  と仮定した。前述のように、パラメータとなる発生領域体積, 吸収領域での滞留時間は前提により変わるため、炉内の実際のものとは異なることを付記しておく。

A/M については、コークス充填層の空隙を通過できる液滴径として、以下のように仮定している。

$$\begin{aligned} A/M &= 0.15 \quad (\text{直径 } 6.2\text{mm} \text{ の球に相当}) \\ d_l &= (2\sqrt{3}-3)/3 * d_s^{2/3} \quad (13) \\ d_s &= 0.04 [\text{m}] \end{aligned}$$

### 3.1.4 SiO(g) 発生律速/吸収律速の例

SiO(g) 発生律速と吸収律速の場合で温度依存性が異なってくることから、横軸に溶銑温度を、縦軸に溶銑 Si をプロットし、その傾きから律速過程を判断できると考えられる<sup>23)</sup>。図 5 に SiO(g) 発生律速/吸収律速時の例を示す。同図中には 3.1.1 および 3.1.2 で記述した方法に基づいた SiO(g) 発生律速/吸収律速時の理論線も表示しているが、図 5 (a) では実績値の溶銑温度に対する溶銑 Si の傾きは、ほぼ SiO(g) 発生律速の理論線に沿って分布している。一方で、SiO(g) 吸収律速時の理論線とは明らかに傾きが異なっていることがわかる。図 5 (b) は前述の例とは逆に、実績値の溶銑温度に対する溶銑 Si の傾きは、ほぼ SiO(g) 吸収律速の理論線に沿って分布している。本報告では、以下、図 5 (a) のようなケースを SiO(g) 発生律速、図 5 (b) のようなケースを SiO(g) 吸収律速とする。

休風時のデータを除いた日平均データで溶銑 Si と溶銑温度の関係をプロットすると、近年の高 PCR 操業においては殆どのケースで SiO(g) 発生律速を仮定した場合の傾きに近い結果となった。溶銑 Si を規定する過程は、SiO(g) 発

生速度と吸収速度の相対関係で決まるものと考えられる。例えば、融着帯高さの違いによる例を図 6 に示す。融着帯が高い位置にある場合は、レースウェイ周辺部で発生した SiO(g) が滴下する溶銑に吸収しきってしまうため、SiO(g) 発生速度が溶銑 Si を規定する過程、すなわち、SiO(g) 発生律速になると考えられる。逆に融着帯位置が低い場合は滴下する溶銑の滞留時間が短く、発生した SiO(g) を全て吸収することができない。このようなケースでは、溶銑への SiO(g) 吸収反応速度が溶銑 Si を規定する過程、すなわち、SiO(g) 吸収律速になると考えられる。ここでは例として融着帯高さで説明したが、これ以外に滴下帯の通液性等も溶銑滞留時間に影響することから、律速過程に影響する因子となり得る。

なお、実際には溶銑以外にも SiO(g) が吸収されたり再酸化し得ることが報告されているが、本報告ではこの影響はパラメータである発生領域体積, 吸収領域での滞留時間に含ませた形となっている。

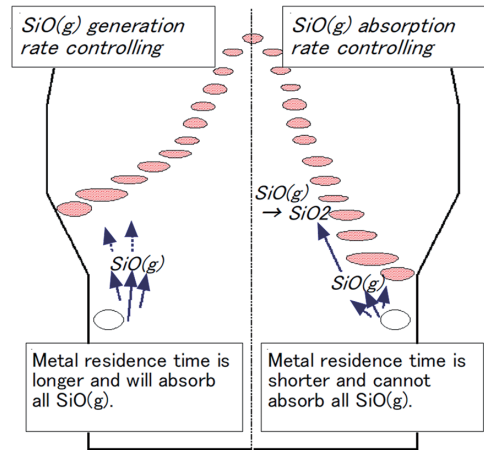


図 6 SiO(g) 発生/吸収律速時の炉内イメージ  
Example of inner furnace image in SiO(g) generation/absorption rate controlling

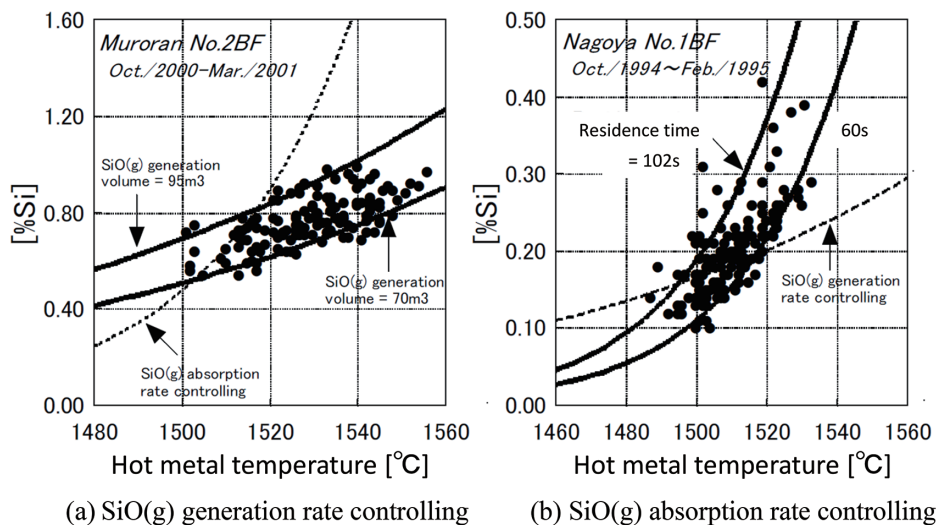


図 5 SiO(g) 発生/吸収律速時の溶銑温度と [%Si] の関係 (実績値)

Relation of hot metal temperature and Si content in case of SiO(g) generation/absorption rate controlling (operation data)

3.2 熱指標への応用<sup>24)</sup>

## 3.2.1 SiO(g) 発生領域体積

多くのケースで SiO(g) 発生律速となっていることから、パラメータである SiO(g) 発生領域体積はレースウェイ周辺の高温領域の広さを示す指標になり得ると考えられる。発生する SiO(g) が全て溶銑中に移行すると仮定し、溶銑温度、[%Si]、出銑量のデータから SiO(g) 発生領域体積を計算する。発生領域の絶対値は前提により変わるため、これらについては吟味する必要があるものの相対的關係についてはほぼ成立すると考えられる。

## 3.2.2 計算スラグ温度

炉床での Mn-C-O のスラグ-メタル反応に着目し、以下の反応が平衡であると仮定し、スラグ温度を銑滓成分から導出する。



上記反応の平衡関係は、

$$(a_{\text{MnO}} \cdot a_{\text{C}}) / (a_{\text{Mn}} \cdot P_{\text{CO}}) = \exp(-\Delta G_{(14)} / RT) \quad (15)$$

ここで、 $a_{\text{MnO}} = \gamma_{\text{MnO}} \cdot X_{\text{MnO}} = \gamma_{\text{MnO}} \cdot \beta \cdot (\% \text{MnO})$

$$a_{\text{C}} = 1$$

$$a_{\text{Mn}} = f_{\text{Mn}} \cdot [\% \text{Mn}]$$

の関係を代入して整理すると、

$$(\% \text{MnO}) / [\% \text{Mn}] / P_{\text{CO}} = f_{\text{Mn}} \cdot \exp(-\Delta G_{(14)} / RT) / (\gamma_{\text{MnO}} \cdot \beta) \quad (16)$$

$$\log f_{\text{Mn}} = e_{\text{Mn}}^{\text{C}} \cdot [\% \text{C}] + e_{\text{Mn}}^{\text{Si}} \cdot [\% \text{Si}] + e_{\text{Mn}}^{\text{Mn}} \cdot [\% \text{Mn}] + e_{\text{Mn}}^{\text{S}} \cdot [\% \text{S}] \quad (17)$$

$f_{\text{Mn}}$  は溶銑中 Mn の活量係数であり温度および組成の関数であるが、実操業の変動範囲内では定数としても差し支えない。また、 $\beta$  はモル分率を mass% に変換するときの係数であるが、これも簡易的に定数とする。また、 $\gamma_{\text{MnO}}$  も温度および組成の関数である。

スラグ-メタル界面の  $P_{\text{CO}}$  は溶融還元により界面で発生する CO を想定しており、厳密には送風圧+スラグ浴の静圧で与えるべきであるが、正確な貯滓量の把握は困難であることから簡易的に送風圧として与えた。スラグ温度は銑滓組成から計算することができ、絶対値は前提により変わるものの炉床の熱レベルを表す指標であると考えられる。

## 3.2.3 実炉への適用例

一例として、火入れ立ち上げ操業における各指標の推移を図 7 に示す。火入れ直後の溶銑温度は低位であるが、SiO(g) 発生領域体積および計算スラグ温度は非常に高い値となっている。これは、火入れ直後は高 RAR でレースウェイ周辺の高温領域は広く滴下物温度は高いものの、炉底や樋が十分昇温されていないため、溶銑からの抜熱量が多い結果を表している。また、マクロに見ると SiO(g) 発生領域体積と計算スラグ温度は同じように推移している。前述のように、SiO(g) 発生領域体積と計算スラグ温度は異なるデータを用いており、計算方法も前者が速度論に基づくのに対し後者は平衡論に基づいており、計算原理は全く異なる。それにも拘らず同じように推移していることから、両

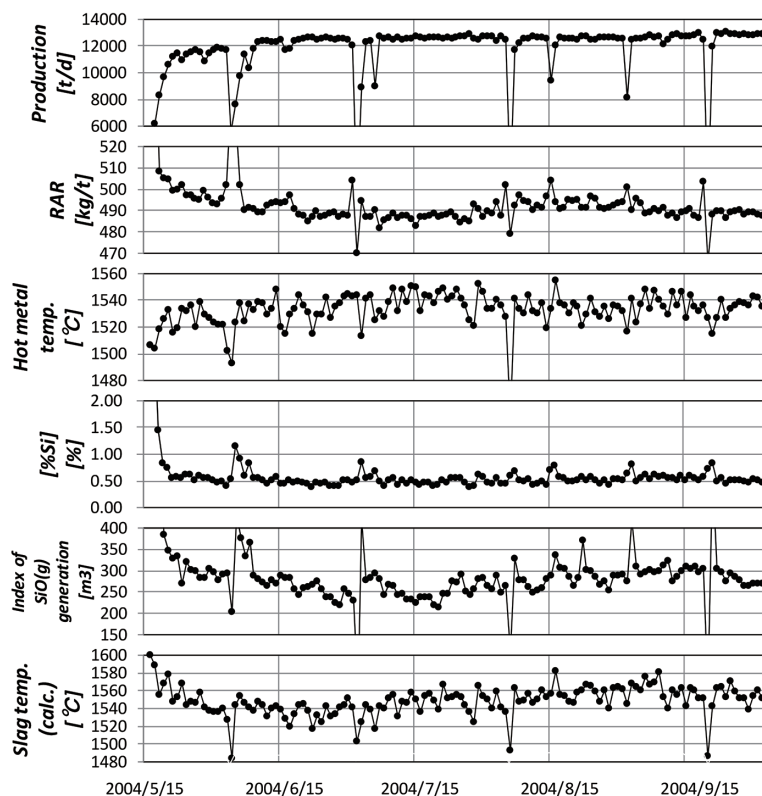


図 7 火入れ後の操業推移 (大分第 2 高炉)  
Operational results after blow-in (Oita No.2 blast furnace)



指標とも炉下部熱レベルを表す指標として妥当であると考えられる。

SiO(g) 発生領域体積，計算スラグ温度とも炉底底盤の熱流束との関連も報告されている<sup>25)</sup>。

#### 4. 結 言

低コークス比(高 PCR)／高出銹比操業の実現に向け、炉下部の視点から PC 由来灰分の影響と Si 移行メカニズムに基づく炉熱指標について検討し、以下の知見を得た。

- 1) スラグ滴下かつ PC 発熱量をほぼ同じレベルにした条件において、シングルランス吹き込み条件では PC 由来灰分増加がガスの周辺流化を助長する結果となった。高 PCR 操業を安定して継続するにはレースウェイシエルの生成抑制および解消の対策が必要である。
- 2) SiO(g) 発生反応と SiO(g) 吸収反応の温度依存性の違いに着目し、溶銹温度に対する溶銹 Si の変化幅から律速過程を推定した結果、近年の高 PCR 操業においては殆どのケースで SiO(g) 発生律速であった。このため、SiO(g) 発生領域体積はレースウェイ周辺の高温領域を表す指標になり得る。
- 3) SiO(g) 発生領域体積と計算スラグ温度は異なるデータを用い計算原理も全く異なるにも拘らず同じように推移していることから、炉下部熱レベルを表す指標として妥当であると考えられる。

#### 記 号

- A : ガス - 溶鉄界面積 [m<sup>2</sup>]  
 $a_i$  : 成分 i の活量 [-]  
 $C_{SiO_2}$  : SiO<sub>2</sub> 濃度 [mol/m<sup>3</sup>]  
 $d_l$  : 液滴径 [m]  
 $d_s$  : 滴下帯でのコークス径 [m]  
 $e_i^j$  : 相互作用助係数 [-]  
 $f_{Mn}$  : 溶銹中 Mn の活量係数 [-]  
 $k_1$  : 反応速度定数 [s<sup>-1</sup>]  
M : 溶鉄重量 [kg]  
P : 出銹量 [t/(d·m<sup>3</sup>)]  
 $P_i$  : 成分 i の分圧 [atm]  
R : 気体定数 [J/(mol·K)]  
 $R_1$  : 正反応速度 [mol/(m<sup>3</sup>s)]  
T : 絶対温度 [K]  
 $T_{pig}$  : 溶銹温度 [°C]  
 $X_i$  : 成分 i のモル分率 [-]  
 $\beta$  : モル分率を mass% に変換するときの係数 [-]  
 $\gamma_i$  : 成分 i の活量係数 [-]  
(%i) : スラグ中成分 i 濃度 [mass%]  
[%i] : 溶銹中成分 i 濃度 [mass%]

#### 参考文献

- 1) 折本隆, 内藤誠章: CAMP-ISIJ. 13, 894 (2000)
- 2) 槌谷暢男, 田口整司, 高田至康, 岡部侠児: 鉄と鋼. 63, 1791 (1977)
- 3) 折本隆, 内藤誠章, 高尾正義, 阿南邦義, 井上義弘: CAMP-ISIJ. 11, 213 (1998)
- 4) Ichida, M., Orimoto, T., Tanaka, T., Koizumi, F.: ISIJ International. 41, 325 (2001)
- 5) 有山達郎, 佐藤道貴, 村井亮太, 宮川一也, 野沢健太郎, 上條綱雄: 鉄と鋼. 81, 1114 (1995)
- 6) 折本隆, 国友和也: CAMP-ISIJ. 20, 78 (2007)
- 7) Ichida, M., Orimoto, T., Sakatani, M., Nakamura, K., Kumaoka, H., Ueno, H.: ISIJ International. 44, 2134 (2004)
- 8) 加藤嗣憲, 笠井昭人, 伊藤健児, 野澤健太郎, 内田尚志, 光岡那由多: CAMP-ISIJ. 28, 99 (2015)
- 9) 光岡那由多, 大山隆史, 松尾匡, 加藤嗣憲, 内田尚志: CAMP-ISIJ. 28, 100 (2015)
- 10) 村井亮太, 村尾明紀, 佐藤道貴, 有山達郎: CAMP-ISIJ. 16, 142 (2003)
- 11) Chung, J.K., Hur, N.S.: ISIJ International. 37, 119 (1997)
- 12) 村井亮太, 佐藤道貴, 有山達郎, 牧章, 酒井敦, 森候寿: CAMP-ISIJ. 8, 959 (1995)
- 13) 徳田昌則, 槌谷暢男, 大谷正康: 鉄と鋼. 58, 219 (1972)
- 14) 田村健二, 斧勝也, 西田信直: 鉄と鋼. 67, 2635 (1981)
- 15) 槌谷暢男, 徳田昌則, 大谷正康: 鉄と鋼. 58, 1927 (1972)
- 16) 杉山喬, 松崎真六, 佐藤裕二: 鉄と鋼. 78, 1140 (1992)
- 17) 山縣千里, 梶原義雅, 須山真一: 鉄と鋼. 73, 637 (1987)
- 18) 縫部綴, 佐野信雄, 松下幸雄: 鉄と鋼. 55, 965 (1969)
- 19) 九島行正, 内藤誠章, 柴田清, 佐藤裕二, 吉田均: 鉄と鋼. 75, 1286 (1989)
- 20) Matsui, Y., Mori, S., Noma, F.: ISIJ International. 43, 997 (2003)
- 21) Kubaschewski, O., Alcock, C.B.: Metallurgical Thermochemistry. 5th Ed., Revised and Enlarged, Pergamon, Oxford, p.378
- 22) 沈宗斌, 西岡浩樹, 西村恒久, 内藤誠章, 清水正賢: 鉄と鋼. 87, 380 (2001)
- 23) 折本隆: CAMP-ISIJ. 26, 198 (2013)
- 24) 折本隆, 国友和也, 磯部誠, 塩田哲也: CAMP-ISIJ. 18, 96 (2005)
- 25) 折本隆, 国友和也, 磯部誠: CAMP-ISIJ. 19, 705 (2006)



折本 隆 Takashi ORIMOTO  
 プロセス研究所 製銹研究部  
 首席主幹研究員  
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511