

高炉の炉芯, レースウェイ領域における 溶銑, スラグおよびコークスの挙動調査

© 1990 ISIJ
 技術報告
 //

丹羽 康夫*・炭竈 隆志*・牧 章*
 長野 誠規*・酒井 敦*・桜井 雅昭*

Investigation of the Behavior of Hot Metal, Slag and Coke in the Vicinity of Raceway and Deadman in a Blast Furnace

Yasuo NIWA, Takashi SUMIGAMA, Akira MAKI,
 Seiki NAGANO, Atsushi SAKAI and Masaaki SAKURAI

Synopsis :

In order to standardize the coke properties necessary in the blast furnace and to establish the control technologies of hot metal components by clarifying the changes in characteristics of coke and behaviors of hot metal and slag at the lower part of the blast furnace, a sampler, which is able to sample in-furnace molten materials at the tuyere level during the outage (for regular inspection and maintenance), was installed at No. 2BF (Inner volume of 2 828 m³, hearth diameter of 11.5 m) in Fukuyama Works.

The following results were obtained ;

(1) The coke temperature of the raceway is influenced by not only the theoretical flame temperature calculated by Ramm's equation but also the distribution of burden and gas flow.

(2) In the vicinity of the raceway, the higher the Coke Reaction Index (CRI) is, the more the coke size decreases, and the average disintegrated rate at the lower part of a blast furnace will be increased accordingly.

(3) Silicon content in the dropping zone depends upon the temperature and is affected by CRI.

(4) A presumed equation of a static hold-up (h_s) can be obtained as follows :

$$h_s = 0.20 \cdot Ga_m^{-0.102} \cdot Cp_m^{-0.387}$$

where Ga_m : Modified galilei No., Cp_m : Modified capillary No.

Key words : blast furnace process ; raceway ; deadman ; dropping zone ; measurement ; coke properties ; silicon content ; liquid holdup.

1. 緒 言

高炉におけるコークスの役割は、鉄鉱石類の還元、溶銑のための熱源、還元剤であると同時に炉下部におけるガスと液体の向流を円滑に行うための媒体としての機能である。特に、高炉の安定操業のためには向流機能を良好に保つことが必要不可欠の条件であり、このため高炉の大型化や操業度の上昇に合わせてコークス品質の向上が図られてきた¹⁾²⁾。しかし、高炉製銑法の競争力を確保するためには、より安価な原燃料を使用し、かつ、生産弾力性の大きな条件の下でコストの徹底的な追求が求められている。そのためには高炉の操業状態に適したコークス品質の明確化とその製造技術の開発が必要であ

る。

一方、溶銑品質においては、製鋼工程での品質向上、コスト削減のために高炉の出銑 Si の低下が強く要望され、最近では 0.2% 以下の操業が可能となってきた³⁾。

高炉での Si 移行反応は、コークス灰分からの SiO₂ ガスの発生量が大きく影響していると考えられているが⁴⁾、その発生を支配するコークスの温度と灰分の性状変化がどのように決定されるかは必ずしも明確になっていない。また、Si の溶銑への移行速度が滴下帯でのメタルの滞留時間にも影響されるが、滴下帯での液流れに関しては模型実験や数式モデルにより研究されているものの実炉の測定値に基づく解析例は少ない⁵⁾。

このような背景から、高炉炉下部のコークス性状変化

昭和 63 年 11 月本会講演大会にて発表 平成元年 5 月 17 日受付 (Received May 17, 1989)

* NKK 福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corporation, 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

と溶銑，スラグの挙動を明らかにし，高炉で必要とされるコークスの品質基準を標準化すること，さらには，溶銑成分の制御技術の確立のために，福山製鉄所第2高炉（内容積 2828 m³，炉床径 11.5 m）において，休風時に羽口レベルにおける半径方向の炉内容物を採取するためのサンプラーを設置した。

本報は，1987年4月から1988年8月までの6回にわたる測定により行ったコークスの物理的性状変化，液滴の静的ホールドアップ，および Si 移行反応についての検討結果についてまとめたものである。

2. 調査方法

高炉半径方向および円周方向の内容物はいずれも休風時に採取した。前者は Fig. 1 に示す羽口サンプラーにより行った。羽口サンプラーは半径方向6箇所から試料

を採取でき，また，採取位置を明確にし目標位置以外の試料の混入を防止するため，二重管構造で所定の位置で内外管の開口部を一致させることにより試料を採取する方式とした。後者については特定の治具で羽口先の試料を採取した。

得られた試料は目視によりコークス，メタル，スラグに選別し，さらにスラグは磁着物と非磁着物に分類した。コークスは，採取量，粒度，マイクロ強度，工業分析，灰の組成，気孔率，X線回折，メタルとスラグは採取量，粒度，組成について調査した。

3. 炉内容物採取時の高炉操業状況

羽口サンプラーによる試料採取を行った休風前の主要な高炉操業指標と装入物性状を Table 1 に示す。

ここで焼結鉱，コークスの性状に関する記号の定義を

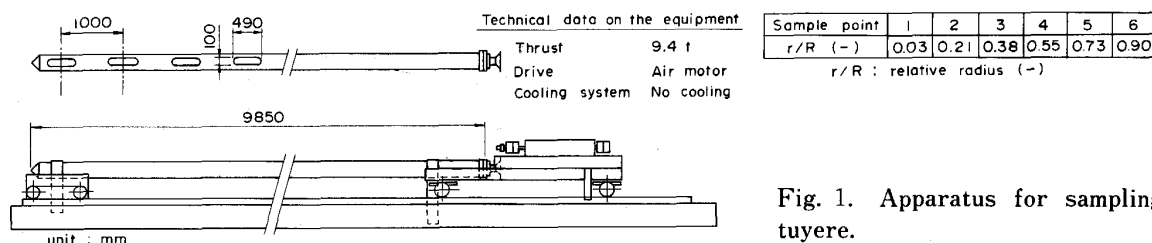


Fig. 1. Apparatus for sampling from tuyere.

Table 1. Operation results of Fukuyama 2BF.

Date of sampling		1986.4.16	1986.6.25	1986.10.29	1987.3.3	1987.6.17	1987.8.18
		I	II	III	IV	V	VI
Productivity	t/d·m ³	2.04	1.97	2.04	1.94	1.98	1.86
Coke rate	kg/t	504.6	510.5	497.7	506.9	521.2	526.5
Blast volume	Nm ³ /min	4 534	4 836	4 712	4 640	4 765	4 820
O ₂ volume	Nm ³ /h	3 000	0	0	0	0	0
Humidity	g/Nm ³	6.1	16.9	9.9	5.4	12.8	21.9
Water injection	g/Nm ³	23.0	19.6	31.1	25.6	22.0	20.5
Blast temperature	°C	1 040	949	1 046	948	950	949
Flame temperature	°C	2 284	2 101	2 136	2 124	2 146	2 052
Blast pressure	kg/cm ²	2.94	2.86	2.94	2.78	2.86	2.87
Top gas pressure	kg/cm ²	1.52	1.53	1.52	1.51	1.51	1.52
Slipping	time/d	0	0	0	0	0	0.4
CO ₂ /CO+CO ₂	%	50.8	50.8	52.2	50.8	49.4	49.4
Blast velocity	m/s	236	235	240	236	240	236
Kinetic energy of blast	kg·m/s	13 909	14 621	14 682	14 318	15 368	14 675
Heat loss	10 ⁴ kcal/t	18.8	17.5	15.7	17.9	14.1	14.5
Solution loss C	kg/t	83.9	74.8	76.0	73.7	89.6	79.6
Hot metal temperature	°C	1 501	1 499	1 500	1 487	1 491	1 487
[Si]	%	0.19	0.23	0.27	0.31	0.28	0.23
[S]	%	0.032	0.029	0.036	0.036	0.028	0.027
(CaO)/(SiO ₂)	—	1.28	1.27	1.26	1.28	1.25	1.28
(FeO)	—	0.45	0.41	0.39	0.41	0.40	0.39
Sintar ratio	%	90.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0
RI	%	63.7	68.4	64.0	64.5	65.9	67.8
RDI	%	39.4	41.5	42.2	42.3	45.7	47.7
Coke DI ₁₅ ³⁰	%	93.0	93.2	92.9	92.8	93.3	93.1
CRI	%	26.5	27.4	27.1	28.8	30.3	29.7

(5 day mean value before shut down)

以下に示す。

CRI: 20 ± 1 mm のコークス 200 ± 1 g を 51/min の CO_2 ガスにより 1100°C において 120 min 反応させた後試料減量より求めた反応率

RI: JIS M8713 における方法 I で求めた還元率

RDI: 15~20 mm の焼結鉱 500 g を $\text{CO}:\text{N}_2=3:7$ の混合ガスで 550°C において 30 min 反応させた後 $130 \phi \text{mm} \times 100 \text{Lmm}$ のドラムで回転速度 30 rpm にて 30 min 回転させた後の -3 mm の重量割合を示す (製鉄部会法)。

1986 年 4 月から 1987 年 8 月にかけての高炉の操業状態は，生産計画上の理由から出銑比を低下させている。減産操業への移行は低送風温度，高コークス比により達成している。このためガス利用率および羽口先温度が低下した。

4. 調査結果

4.1 コークス性状

(1) 粒度分布

Fig. 2 に高炉半径方向におけるコークスの調和平均粒径の分布を示す。西ら⁶⁾は，羽口より 2.2 m までの炉内コークス粒度は出銑比の低下にともない大きくなると報告しているが，今回の測定結果では，出銑比の高い期間 I~III に比べ出銑比の低い期間 IV~VI のほうが中間から周辺部において小さくなっている。また，羽口衝風エネルギーや羽口送風速度との間にも明瞭な関係は得られなかった。

(2) 黒鉛化度

コークスの黒鉛化度は，熱処理条件によって異なるが炉内の温度状況を推定する上で指標となる。そこで，採取位置ごとに塊コークス (+5 mm) と粉コークス (-5 mm) について X 線回折法により調査した。Fig. 3 は羽

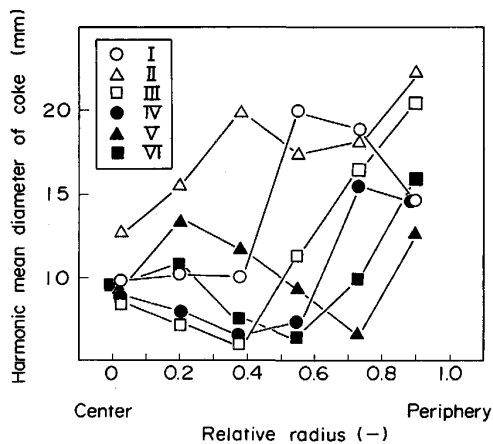


Fig. 2. Radial distribution of harmonic mean diameter of coke at the tuyere level.

口サンプラーでの各採取位置における塊コークスの黒鉛化度を示したものであるが，炉の中心と周辺で大きくばらついている。

(3) 灰分の組成

Fig. 4 に灰分組成の分布を示す。 Al_2O_3 は炉壁側で若干低下しているが変動は少ない。サンプルポイント 5 ($r/R=0.73$) では，高 CaO 低 SiO_2 となっており， SiO ガスの主要な発生領域と推測される。

4.2 溶融物の採取量

期間 III 以降溶融物の採取量を調査した。結果を Fig. 5 に示すが，中間部での採取量の変動が大きい。

4.3 スラグ，メタルの組成

採取したスラグとメタルの組成の平均値を Table 2 に示す。 $[\text{Si}]$ ， $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ ， (FeO) いずれも出銑値より高い。また，Fig. 6 には半径方向の $[\text{Si}]$ の分布を示すが，採取期間で大きく異なっている。

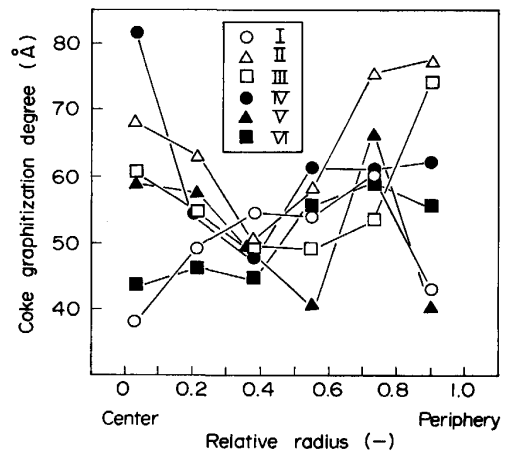


Fig. 3. Radial distribution of coke graphitization degree at the tuyere level.

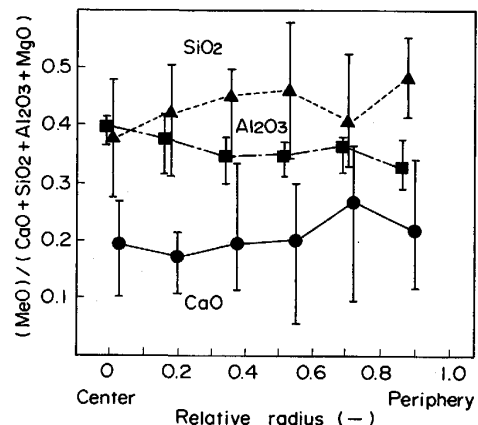


Fig. 4. Radial distribution of chemical composition of coke ash at the tuyere level.

Table 2. Chemical composition of slag and metal sampled at the tuyere level. (wt%)

Sample point	Slag							Metal			
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	S	FeO	CaO/SiO ₂	C	Si	Mn	S
1	41.0	31.6	10.7	7.14	1.80	0.33	1.30	3.94	2.23	0.40	0.06
2	40.6	31.5	10.4	7.12	1.28	0.20	1.29	4.00	1.84	0.38	0.07
3	40.9	31.9	10.1	6.74	1.31	0.37	1.28	3.86	1.83	0.38	0.07
4	38.9	30.6	10.4	6.50	1.20	0.74	1.27	3.87	1.95	0.37	0.11
5	38.5	29.5	11.2	6.63	1.25	1.27	1.31	4.09	2.92	0.37	0.08
6	28.6	27.1	10.3	4.17	1.26	9.99	1.06	3.92	3.59	0.33	0.20
Tapped value	42.5	33.5	12.9	6.82	1.00	0.41	1.27	4.62	0.25	0.19	0.031

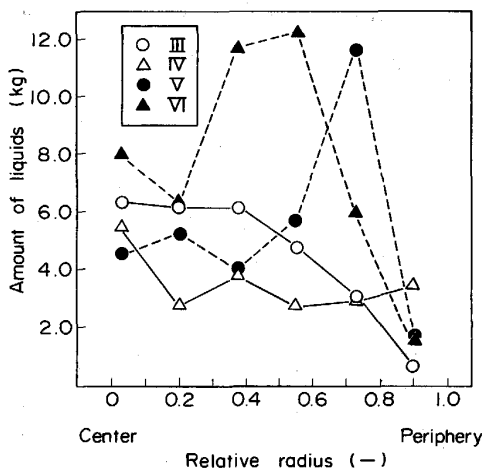


Fig. 5. Radial distribution of amount of liquids at the tuyere level.

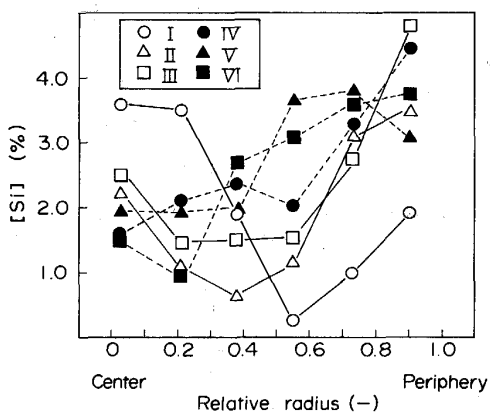


Fig. 6. Radial distribution of [Si] in metal at the tuyere level.

5. 考 察

以上の測定結果に基づいて高炉操業に影響を与える要因について検討した。

5.1 羽口レベルのコークス温度

炉内コークスの履歴温度 (T_c) は奥山ら⁷⁾の測定値に基づいてコークス黒鉛化度 (L_c) より推定した。

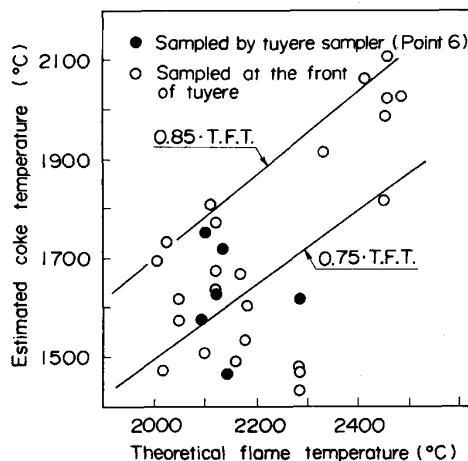


Fig. 7. Relationship between theoretical flame temperature and coke temperature estimated by Lc method.

Fig. 7 に羽口サンプラーより得られたレースウェイ近傍 (Point 6) のコークス履歴温度 (図中●) と羽口先理論燃焼温度 (TFT) との関係を示す。これより羽口先理論燃焼温度の上昇によりコークス温度は高くなる傾向にあるがばらつきが大きいことがわかる。

著者らは、半径方向の O/C 分布の変化により炉下部でのメタル、スラグの滴下量分布も変化すると仮定から、操業中に光ファイバーと二色光温度計を用いて調査を行い、レースウェイの近傍の温度は装入物分布の影響を受けることを示した⁸⁾。今回、福山第2高炉においてさらに検討を加えた。Fig. 8 は送り込み式垂直プローブ⁹⁾ (FVP) を用いて福山2BFにおける炉内炉壁近傍の温度分布を円周方向二箇所同時に測定した結果である。図中実線は南西 (SW) 方向、点線は北東 (NE) 方向の測定値であり、同時にストックライン 3m に設置されている固定ゾンの値も示す。図より、NE 側と SW 側で明らかに炉内の温度分布が異なり、熱流比が円周方向で異なることが分かる。また固定ゾンの値は FVP の結果と良い対応を示している。このことから、

固定ゾンデの温度が高ければ熱流比は低く溶融帯位置も高いと推察される。

Fig. 9 は全羽口先よりコークスを採取し黒鉛化度を調べた結果である。平均コークス温度は 1680°C であり $T_c/TFT \cong 0.80$ となり、従来の Ramm の式で採用されている値に近いものとなっている。また、固定ゾンデ温度の高い SW 側ではコークス温度は高く、NE 側では低くなっており、シャフト上部の温度分布と炉下部コークス温度が良く対応していることがわかる。

以上のことから、羽口先のコークス温度は理論燃焼温度のみならず装入物分布やガス流れの影響があることが明らかとなった。また、Fig. 7 におけるコークス温度のばらつきもこのためであると考えられる。

5.2 コークス粒度

高炉内でのコークスの劣化挙動については、解体調査¹⁰⁾ やホットモデルなどの実験¹¹⁾ により研究され、最近ではその機構を数式モデルに導入し操業予測がなされ

ている¹²⁾。しかし、高炉の高さ方向や半径方向における劣化原因について統一的理解はない。

レースウェイでのコークスの劣化については、操業度や羽口先衝風エネルギーなどで整理できることが報告されているが⁵⁾、今回の測定では明確な関係は得られなかった。また、コークスの CO₂ 反応による劣化については、西ら¹³⁾、および上條ら¹⁴⁾の研究がある。西らはコークスの CO₂ による反応劣化について、その反応形態の差を均一相モデル、中間モデル、未反応芯モデルで表し、同一ドラム強度であれば反応性の高いコークス、すなわち、未反応芯モデルで反応が進行するコークスの方が、粒径低下が大きいことを示した。一方、上條らは数式モデルにより反応性の高いコークスの方が破壊後粒径が大きくなるとしている。

Fig. 10 は、炉の周辺部 (Point 4, 5, 6) のコークス調和平均粒径 (d_p) および、炉の断面平均粉率 (≒5 mm%) と装入コークスの CRI との関係を示したものである。いずれも CRI が高いほどコークスの粉化が助長されることを示しており、炉下部での通気、通液性を確保し炉況の安定化を図るためには CRI の管理は重要で

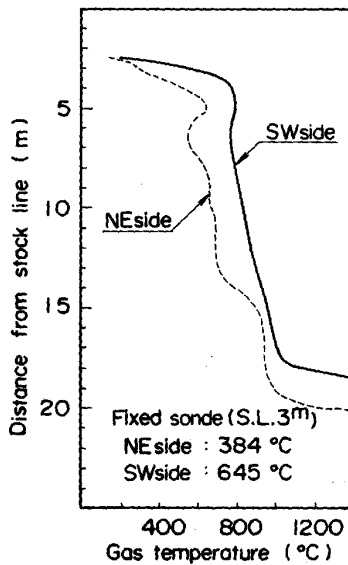


Fig. 8. Measurement results of feeding type vertical probe.

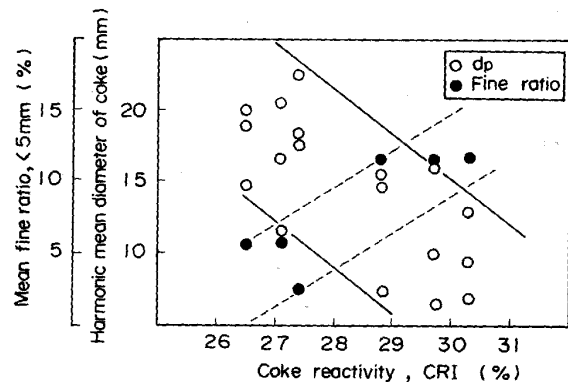


Fig. 10. Relationship between reactivity of coke and harmonic mean diameter of peripheral part and mean fine ratio.

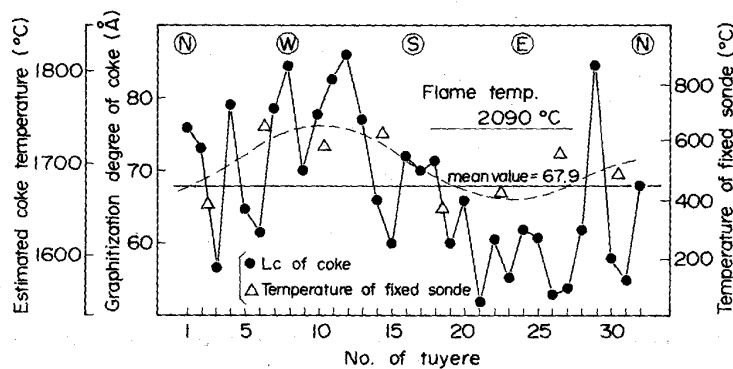


Fig. 9. Circumferential distribution of coke graphitization degree and temperature of fixed sonde.

あることが明らかとなった。

5.3 液滴のホールドアップ

滴下帯における液滴のホールドアップは、炉下部のガス流れ、炉芯部の伝熱挙動および精錬反応に影響を及ぼすため冷間模型による実験¹⁵⁾¹⁶⁾や高温条件下での調査¹⁷⁾¹⁸⁾が行われている。たとえば、福武ら¹⁵⁾は高炉の滴下帯に類似した条件下でホールドアップの推定式を導出している。また、杉山ら¹⁶⁾は、冷間模型実験結果とスラグの粘性の定量化により高炉二次元数式モデルを用いて高炉内の液流れの解析を行っている。しかし、高田ら¹⁸⁾はフォーミングを伴う高温条件下での現象は冷間模型の実験結果では必ずしも説明できないことを指摘している。そこで本報では、羽口サンプラーによる採取試料から実炉の滴下帯における静的ホールドアップについて定量化を試みた。

Fig. 11 にホールドアップ量を示す。ここで、ベッド体積はサンプラーの内容積と仮定し、スラグ、メタル、コークスの各体積は採取量と密度から求めた。スラグ、メタルの静的ホールドアップ量は、それぞれ 0.1~8%、0.3~4% 程度となっておりばらつきが大きい。Fig. 12 には、コークスの調和平均粒径とホールドアップ量の関係を示すが、スラグ、メタルともにコークスの粒径低下によりホールド量が増加している。

メタルとスラグのホールドアップ量を定量化するために福武ら¹²⁾、杉山ら¹⁶⁾と同様に修正キャピラリー数 (C_{pm}) および修正ガリレイ数 (G_{am}) を用いて統計解析を行った。

$$C_{pm} = \rho_l \cdot g (\phi D_p)^2 / \{ \delta_l (1 - \epsilon)^2 (1 + \cos \theta) \} \dots\dots\dots (1)$$

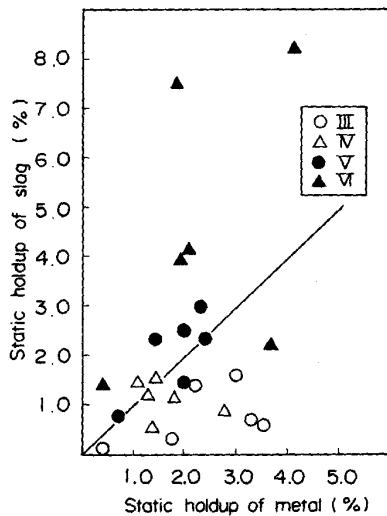


Fig. 11. Relationship between mental and slag on static holdup.

$$G_{am} = \rho_l^2 g (\phi D_p)^3 / \{ \mu_l^2 (1 - \epsilon)^3 \} \dots\dots\dots (2)$$

ここで液体の物性値、 ρ_l 等は次式のように体積基準で平均化した。

$$\rho_l = (V_m \rho_m + V_s \rho_s) / (V_m + V_s) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、物性値は文献¹⁹⁾を参考にした。また、温度については、スラグ、メタルともに Lc 法により推定したコークス履歴温度と同一と仮定した。最小二乗法による回帰分析結果から、静的ホールドアップ量 (h_s) と C_{pm} 、 G_{am} の関係を以下のように得た。

$$h_s = 0.20 \cdot G_{am}^{-0.102} \cdot C_{pm}^{-0.387} \dots\dots\dots (4)$$

$\gamma : 0.72$

(4)式による推定結果を Fig. 13 に示すが、本推定式は、サンプリング結果を良く表している。

5.4 珪素の反応

(1)コークス灰分中 SiO_2 の挙動

Fig. 14 には塊コークスの SiO_2 減少率とコークスの履歴温度との関係を示す。ここで、 SiO_2 減少率は Al_2O_3 収支より求め、そのうち Al_2O_3 収支の変化量が $\pm 10\%$ 以内のもののみ表示した。これより、 SiO_2 減少率は温度に依存していること、また、 $CaO-Al_2O_3-SiO_2$

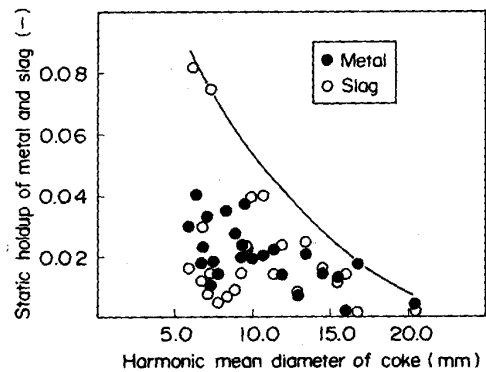


Fig. 12. Relationship between harmonic mean diameter of coke and static holdup of metal and slag.

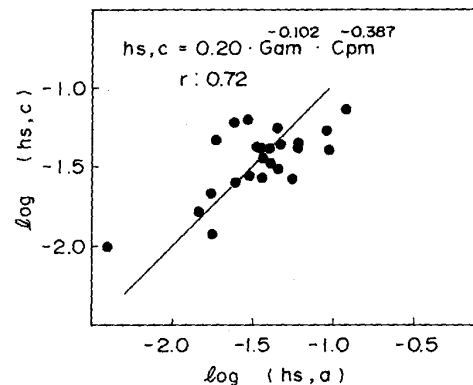


Fig. 13. Relationship between actual static holdup (h_s, a) and calculated static holdup (h_s, c).

三元系状態図から求めた装入コークス灰分の融点 (1710°C) 以下の領域においても SiO₂ はかなり減少していることが明らかとなった。これは、Fig. 15 に示すように炉下部のコークス灰分の融点が装入コークスの灰

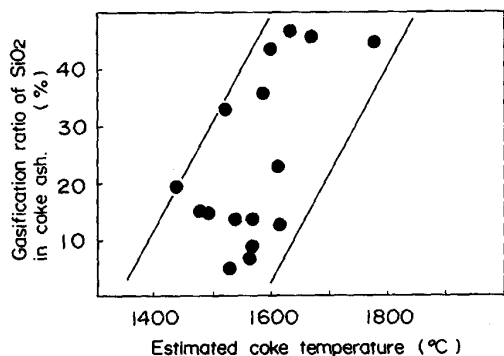


Fig. 14. Temperature dependence of the gasification degree of silica in coke ash.

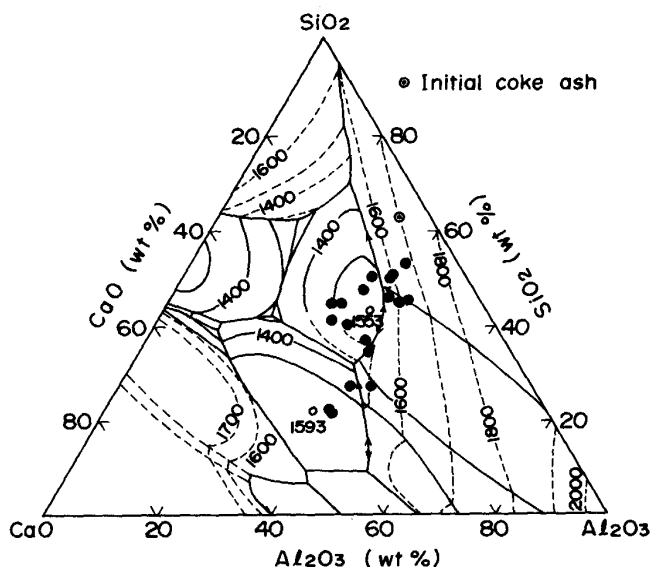


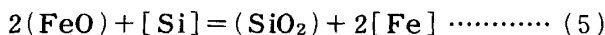
Fig. 15. Chemical composition of coke ash in the SiO₂-CaO-Al₂O₃ system.

分の融点より低くなっていることによると推察される。ここで、化学分析より得られた SiO₂ の割合は光藤ら²⁰の実験結果に基づいて SiO₂ と SiC に按分して示した。

(2) [Si] の挙動

Fig. 16 にコークス履歴温度と [Si] の関係について装入コークスの反応性で層別して示す。図より、同一温度において反応性の高いコークスの近傍で採取されたメタルの Si は高く、[Si] の移行に反応性が影響を与えることが示唆される。これは、反応性が大きいほど CO₂+C=2CO の反応で生成する CO ガス量が多く、コークスの還元力を表す指標であると考えられることから、SiO₂ の還元速度も反応性の増加と共に大きくなったためと思われる。

Fig. 17 に (FeO) と [Si] の関係を示す。また、図には以下の反応の平衡値を示す。



$$\Delta G_0 = -345\,300 + 122.2 T \quad (\text{J/mol})$$



$$\Delta G_0 = 597\,500 - 397.9 T \quad (\text{J/mol})$$

図より [Si] の最高値は P_{CO}=0.35 atm すなわち、休風後の CO 分圧との平衡値に、また、最低値は (FeO)

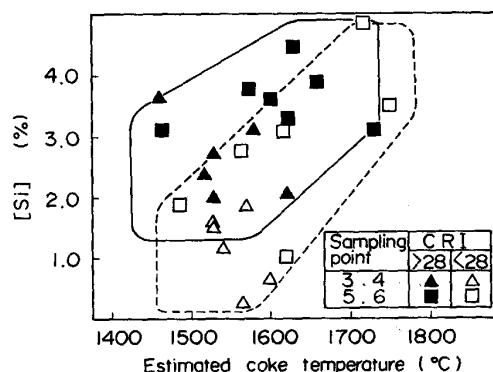


Fig. 16. Effect of coke temperature and coke reactivity (CRI) for [Si].

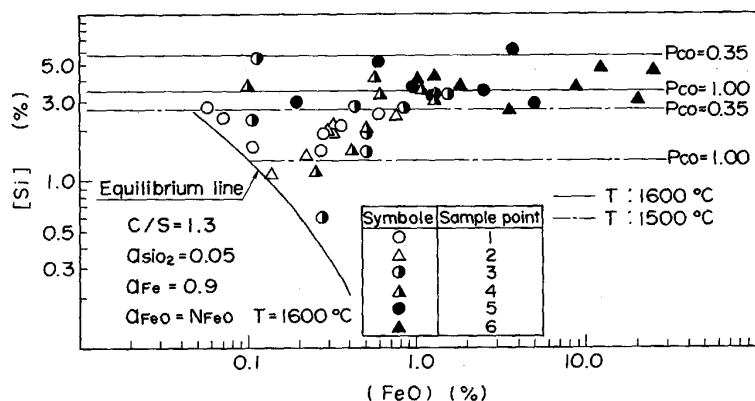


Fig. 17. Relationship between (FeO) and [Si].

との平衡値に近い値を示している。さらに、サンプルポイント 1, 2 (炉芯) のデータは、低 (FeO) 側でかつ、[Si] が (FeO) の平衡値に近い値に散布しているが、サンプルポイント 5, 6 (レースウェイ近傍) のデータは高 (FeO) 側で [C] との平衡値に近い領域に散布している。これは、スラグとメタルの接触の程度が炉芯とレースウェイで異なるためと思われる。

以上から、メタルへの Si の移行は、コークス温度のみならずコークスの反応性と炉内の CO 分圧にも大きく左右されることが示された。また、出銑 [Si] を考える上で、滴下帯から出銑口までの間におけるメタルと高 FeO 濃度のスラグとの接触による再酸化も考慮すべきであることが示唆された。

6. 結 言

高炉下部のコークス性状変化と、溶銑、スラグの挙動を解明するため、羽口サンプラーを設置し調査した。

この結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 全羽口先からのコークスサンプリングと、溶融帯測定などからレースウェイ領域のコークス温度は、理論燃焼温度のみならず、装入物分布やガス流分布の影響を受ける。

(2) レースウェイ近傍において、コークスは反応性 (CRI) が高いほど劣化が促進され、炉内の平均粉率も上昇する。

(3) 溶銑とスラグを混合体として取り扱い、高炉での液滴の静的ホールドアップの推定式として次式を以た。

$$h_s = 0.20 Ga_m^{-0.102} Cp_m^{-0.387}$$

(4) コークス灰分中の SiO₂ の還元は CaO-Al₂O₃-SiO₂ 三元系状態図から推定される装入コークスの灰分の融点以下においても生じている可能性がある。

(5) 滴下帯での [Si] は、温度に依存するとともにコークス反応性にも影響される。

(6) 休風時の炉芯およびレースウェイでの [Si]、(FeO)、塩基度 (CaO/SiO₂) は通常操業での出銑値よりいずれも高い値を示した。さらに、[Si] と (FeO) の関係では、炉芯部では低 (FeO) 低 [Si]、レースウェイ近傍では高 (FeO) 高 [Si] となっている。

記 号

C_{pm} : 修正キャピラリー数 [—]

D_p, d_p : コークスの調和平均径 [m], [mm]

Ga_m : 修正ガリレイ数 [—]

g : 重力の加速度 [m/s²]

ρ : 密度 [kg/m³]

V : 体積 [m³]

ϕ : コークス粒子の形状係数 [—]

h_s : 静的ホールドアップ [—]

σ : 表面張力 [N/m]

ε : コークス充填槽の空気率 [—]

θ : 液体と固体の接触角 [—]

μ : 粘度 [Pa·s]

γ : 相関係数 [—]

r : サンプラー半径方向採取位置 [m]

R : 高炉半径 [m]

添え字 m (メタル), s (スラグ), l (液体)

文 献

- 1) 館 充: 鉄と鋼, **69** (1983), A153
- 2) 加瀬正司: 鉄と鋼, **69** (1982), p. 2124
- 3) 山本亮二, 中島龍一, 炭竈隆志, 脇元一政, 桜井雅昭: 学振 54委-No. 1759 (昭和 60 年 11 月)
- 4) 樋谷暢男, 徳田昌則, 大谷正康: 鉄と鋼, **58** (1972), p. 1972
- 5) 福武 剛, 近藤幹夫, 小西行雄, 岡部俠児, 橋爪繁幸: 鉄と鋼, **65** (1979), A13
- 6) 西 徹, 原口 博, 美浦義明, 桜井 哲, 斧 克也, 彼島秀雄: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1820
- 7) 奥山泰男, 宮津 隆, 岸本純幸: 鉄と鋼, **69** (1983), A161
- 8) 中島龍一, 炭竈隆志, 脇元一政, 桜井雅昭, 鴨志田友男, 脇田 茂: 鉄と鋼, **73** (1987), A17
- 9) 梶川脩二, 脇元一政, 新谷一憲, 石井孝治: 鉄と鋼, **66** (1980), S38
- 10) 神原健二郎, 萩原友郎, 重見彰利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬一, 平本信義: 鉄と鋼, **62** (1976), p. 535
- 11) 原 行明, 土屋 勝: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1810
- 12) 栗田興一, 岩永祐治, 元重正洋, 網永洋一: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2060
- 13) 西 徹, 原口 博, 美浦義明: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 43
- 14) 上條網雄, 岩切治久, 木口淳平, 矢場田 武, 田中英年, 北村雅司: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2012
- 15) 福武 剛, V. RAJAKUMAR: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1937
- 16) 杉山 喬, 中川朝之, 芝池秀治, 小田 豊: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2044
- 17) 佐々 豊, 田中勝博, 河野正人, 福田富也: 鉄と鋼, **73** (1987), S842
- 18) 高田至康, 片山英司, 角戸三男, 稲谷稔宏, 浜田尚夫, 樋谷暢男: 鉄と鋼, **70** (1987), A25
- 19) 第 3 版鉄鋼便覧第 I 巻基礎 (日本鉄鋼協会編) (1981) [丸善]
- 20) 斎藤 汎, 大野陽太郎, 光藤浩之, 福島 勤: 学振 54 委-No. 1749 (昭和 60 年 11 月)