

論 文

小型燃焼炉におけるレースウェイ領域での
吹込み鉬石粉の伝熱と反応

小西行雄*・武田幹治*・田口整司*・浜田尚夫*

Heat Transfer and Metallurgical Reaction of Iron Ore Fines Injected into
Raceway of a Small-scale Rot Furnace

Yukio KONISHI, Kanji TAKEDA, Seiji TAGUCHI and Takao HAMADA

Synopsis :

Influence of injected ore fines on the chemical and physical phenomena in and around the raceway was examined and the mechanism of silicon decrease in iron melt was experimentally investigated by using a small-scale hot furnace.

(1) The temperature in the raceway decreases with increasing the amount of injected ore fines mainly due to the endothermic reaction

(2) A part of injected ore fines remains inside of the raceway and shows high fractions of melting and reduction. Both fractions of sample increase with the increase of the injection rate, as the proportion of remaining ore also increases.

(3) SiO content in the gas and Si content in the metal in the dripping region above the raceway decrease with increasing the injection rate, since SiO gas generated in the raceway can be absorbed by injected iron ore at the molten state.

(4) Decrease of Si content in the metal by the reaction with FeO in slag formed by injected ore is negligibly small in the dripping region below the raceway.

Key words : blast furnace ; model experiment ; tuyere ; raceway, injection ; ore fine ; silicon ; SiO.

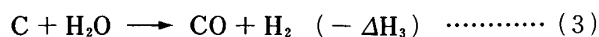
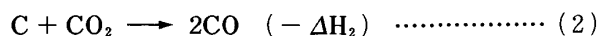
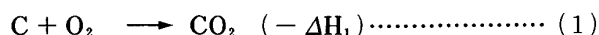
1. 緒 言

高炉羽口から微粉炭および石炭スラリー等の粉体燃料を吹き込む研究は数多く行われている^{1)~4)}。燃料以外の粉体吹込み技術は近年、溶銑中の Si 濃度低下が重要視されるようになり、高炉内での脱珪を目的に研究がなされるようになってきた⁵⁾⁶⁾。川崎製鉄(株)においても高炉における低 Si 銑吹錬の新技术を開発するために千葉第 2 高炉で羽口からの粉体 (CaCO₃, 酸化鉄等) 吹込みテストを実施した⁷⁾。しかし、羽口から吹き込んだ粉体のレースウェイ内およびその周辺における挙動に関して必ずしも明確でなく、また、吹き込んだ粉鉬石等による Si 濃度低下の機構も不明な点が多い。そこで実高炉と比較して実験条件の変更、レースウェイ近傍における測定およびサンプリングが容易な小型燃焼炉を用いて、これらの問題の解明を試みた。

2. 実験炉に必要な設定条件の検討

2.1 小型燃焼炉レースウェイ内での温度とガス分布の検討

稲谷ら⁸⁾は千葉第 1 高炉での羽口ゾンデによる測定結果から、(1)~(3)式の反応について、一次反応を仮定し、その速度定数を羽口先端からの距離とガス温度の関数として与えている。一方、著者らは、これら既報の反応速度定数式にガス流速、粒子反応表面積、レースウェイ大きさ等の補正を加えた(4)から(11)式を導き、これらを小型燃焼炉におけるレースウェイ内の各反応速度定数式と仮定した。



$$\frac{d[\%O_2]}{dX} = -k_1 [\%O_2] \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

昭和 62 年 3 月 13 日受付 (Received Mar. 13, 1987)

* 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

$$k_1 = 1.37 \left[\frac{V^0}{V} \right] \left[\frac{D_P^0}{D_P} \right] \exp \left[3.74X \frac{D_R^0}{D_R} \right] \times \exp(-8000/R(T_g + 273)) \dots (5)$$

$$\frac{d[\%CO_2]}{dX} = k_1[\%O_2] - k_2[\%CO_2] \dots (6)$$

ここで,

$$k_2 \text{ は } [\%O_2] > 10, \quad k_2 = 0.0 \dots (7)$$

$$[\%O_2] < 10,$$

$$k_2 = 10.0 \left[\frac{V^0}{V} \right] \left[\frac{D_R^0}{D_R} \right] \dots (8)$$

$$\frac{d[\%H_2]}{dX} = k_3[\%H_2O] \dots (9)$$

ここで,

$$k_3 \text{ は } [\%O_2] > 10, \quad k_3 = 0.0 \dots (10)$$

$$[\%O_2] < 10, \quad k_3 = 2.4 \left[\frac{V^0}{V} \right] \left[\frac{D_R^0}{D_R} \right] \dots (11)$$

ここで, レースウェイ奥行き長さ D_R の計算には中村ら⁹⁾の式を用いた.

燃焼反応の進行に伴い, ガス温度および質量流量が(12), (13)式のように変化する. ガス速度も運動量保存則を適用して(14)式のように変化する.

$$\frac{dT_g}{dX} = \left\{ h_p \cdot a \cdot A (t - T_g) + \frac{N_g}{100} k_1 [\%O_2] (-\Delta H_1) + k_2 [\%CO_2] (-\Delta H_2) + k_3 [\%H_2O] (-\Delta H_3) + C_c T_c \frac{dN_c}{dX} - C_g T_g \frac{dN_g}{dX} \right\} / \left(C_g N_g + N_g T_g \left[\frac{\partial C_g}{\partial T_g} \right] \right) \dots (12)$$

$$\frac{dW_g}{dX} = \frac{12 \cdot N_g}{100} (k_1 [\%O_2] + k_2 [\%CO_2] + k_3 [\%H_2O]) \dots (13)$$

$$\frac{dV}{dX} = - \frac{V}{W_g} \cdot \frac{dW_g}{dX} \dots (14)$$

小型燃焼炉の実験条件を Table 1 に, レースウェイ

内におけるガス組成の計算結果と実測結果を, Fig. 1 に示した. 図から実測値と計算結果とは良く一致している. 実炉のガス組成および温度の測定結果は測定ごとのばらつきが大きい平均データを用いた測定値とシミュレーション結果とを比較すると Fig. 2 に示すように両者はよく一致する. Fig. 1 および Fig. 2 から小型燃焼炉でもコークス粒子径, 送風量, 羽口径, 送風温度

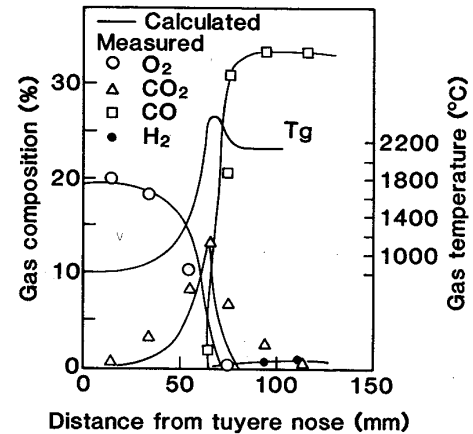


Fig. 1. Gas composition and adiabatic gas temperature in the raceway in the small experimental furnace.

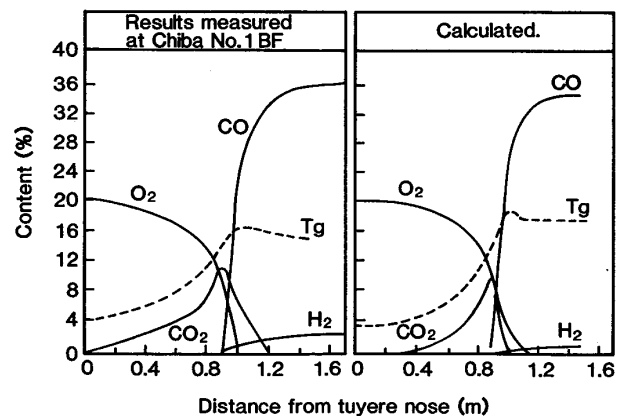


Fig. 2. Gas composition and adiabatic gas temperature in the raceway in Chiba No. 1 Blast furnace.

Table 1. Injection conditions.

		Blast furnace	Experimental furnace
Blast volume		145 (Nm ³ /min tuyere)	1 (Nm ³ /min tuyere)
Blast temperature		960 (°C)	800 (°C)
Gas velocity		230 (m/s)	78 (m/s)
Injected ore	Injection rate	0~106 (g/Nm ³)	0~200 (g/Nm ³)
	Species	MBR-PB	MBR-PB
	Particle size	50 (μm)	50 (μm)
Hearth diameter		11.1 (mφ)	0.40 (mφ)
Tuyere diameter		120 (mmφ)	32 (mmφ)
Raceway depth		1.4 (m)	0.11~0.15 (m)

を選択することにより実炉と相似なレースウェイ内状況を得る見通しがついた。

粉鉱石吹込み時のガス組成変化は Fig. 3 に示すように吹込み無しの場合と比較して、酸素の消失、 H_2O の分解および CO の発生位置は炉中心方向へ移る。これは後述するようにレースウェイ形状の拡大によると考えられる。

2.2 レースウェイ内の吹込み粒子温度と滞留時間

(1) レースウェイ内の粒子飛翔速度

羽口から吹き込んだ粒子の送風ジェット内容積分率 (ϵ') は例えば 100 g/Nm^3 の添加量では 5×10^{-6} 程度であり単一粒子の運動に関して次式が適用できる。

$$\frac{dU_p}{d\theta} = C \frac{3\rho_g}{4\rho_p \cdot D_p} (V - U_p)^2 \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、抵抗係数 C は $2 < Re < 500$ の範囲で、 $C = 10/\sqrt{Re}$ が適用できる¹⁰⁾。

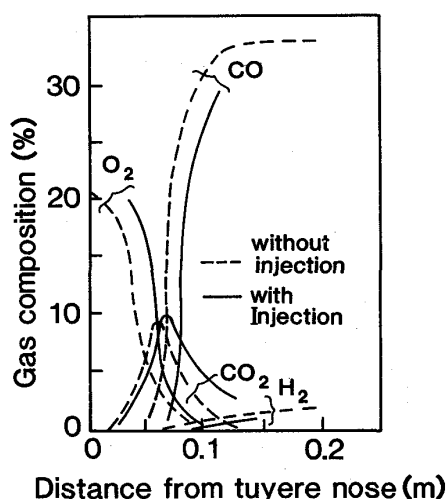


Fig. 3. Change of gas composition in the raceway with ore injection.

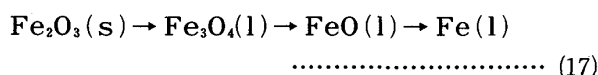
(2) 鉱石粒子への伝熱

吹込み鉱石中の酸化鉄酸素の解離熱や溶融熱を第一近似として無視し、粒子がレースウェイ空間内でコークス壁からの放射伝熱およびガスからの対流伝熱を受けることを考慮すると、粒子温度 t_s の変化は次式で与えられる。

$$\frac{dt_s}{d\theta} = \frac{6}{C_p \cdot \rho_p \cdot D_p} [\epsilon \cdot \sigma \cdot \Phi_{c,p} (T_c + 273)^4 - (t_s + 273)^4 + h_p (T_g - t_s)] \quad \dots\dots\dots (16)$$

実炉の操業および燃焼炉での条件をもとに、上記のモデルによつて吹込み粒子温度および速度変化の計算結果を Fig. 4 に示した。吹込み粒子がレースウェイ奥壁に到達する時間は小型燃焼炉で 0.004 s 、実炉で 0.006 s と極めて短い。また、吹込み粒子温度には粒子-流体間の伝熱が大きく寄与し、レースウェイ奥部でガス温度の上昇に伴つて急激に高くなっている。これらのことから粒子温度、飛翔時間とも実炉と概略相似にすることが可能である。

Fe-O 系状態図から推察すると、吹込み酸化鉄は 1450°C を超えると $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ の熱解離を生ずる。さらに、温度が上昇してコークスおよび還元性ガス共存下では次の還元反応が進む



可能性がある。これらは飛翔時間内の反応速度に依存すると考えられる。吹込み鉱石がレースウェイ奥部のコークス壁に到達した時点で溶融が完了し、還元率も高ければ高炉の安定操業にとって望ましい方向といえる。反面、Si 濃度低下に対して効果がなくなる。いずれにしろ、コークス壁へ到達するまでの粉鉱石中の酸素濃度変化が吹込みプロセスの解明の際の一つのポイントとなる。

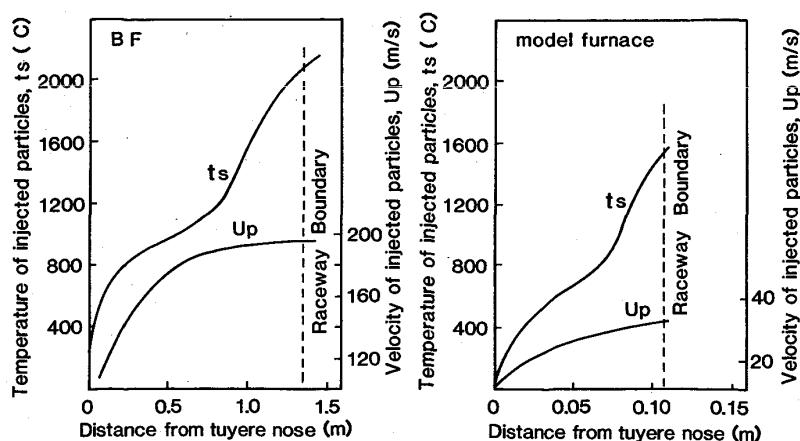


Fig. 4. Calculated velocity and temperature of injected ore particles in the raceway.

Table 2. Chemical composition and particle size of injection ore.

Chemical composition (%)							Particle size (μm)			Mean size
T.Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	<297	<63	<44	
68.6	0.10	1.16	0.93	0.03	0.05	0.002	100 (%)	80 (%)	60 (%)	50 (μm)

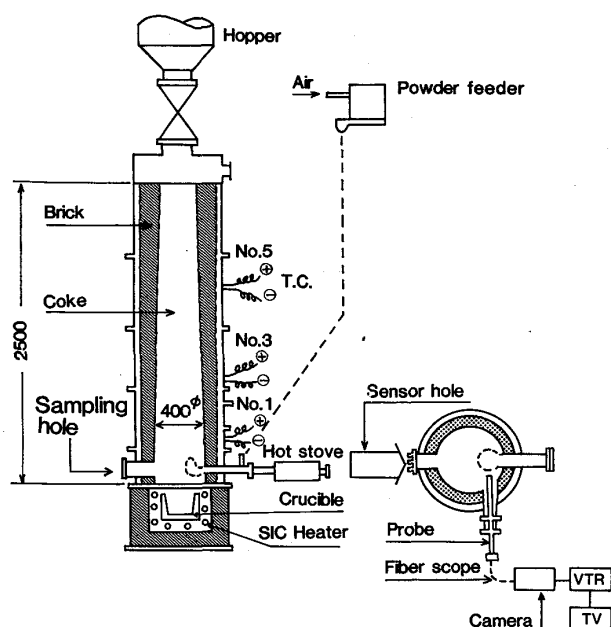


Fig. 5. Experimental furnace.

3. 小型燃焼炉実験

3.1 実験方法

小型燃焼炉 (Fig. 5) は内径 0.4 m ϕ , 有効高さ 2.35 m, 有効内容積 0.25 m³ である。炉内には 10~15 mm のコークスを充填し, 熱風炉で加熱した N₂ ガスで炉内を昇温する。炉床部は滴下溶融物を溜めるために黒鉛るつぼを置き, シリコニット発熱体により 1450°C に加熱する。熱風炉温度が 800°C に到達し, 30 min 保持した後, 1 Nm³/min の熱風を 32 mm ϕ の羽口より送る。また, 実験条件によっては酸素を富化した。送風後, 羽口レベルで炉中心温度が 1600°C に達したら, 粉鉬石を吹込み量 0~150 g/Nm³・air と変化させ, 空気によって内径 9 mm ϕ のランスからレースウェイ内へ吹き込む。使用した粉鉬石は MBR-PB であり, その化学, 物理性状を Table 2 に示す。粉鉬石吹込み時には Fig. 6 の位置で, 外径 18 mm ϕ の水冷式小型ゾンデを用いてガス, ダスト, および溶融物を採取した。温度測定時には先端に非水冷の保護管を取り付けた。また, ファイバースコープによってレースウェイ領域での吹込み粒子の溶融, 滴下性を観察した。Si 濃度低下機構の検討実験ではあらかじめ羽口レベルより 1 m 高さのコークス充填層中に 50 mm

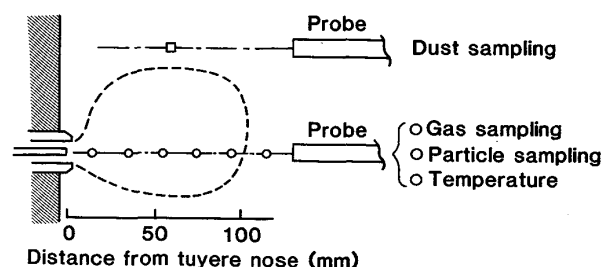


Fig. 6. Sampling and measuring positions.

Table 3. Chemical composition of metal sample.

C	Si	S
3.72 (%)	0.83 (%)	0.036 (%)

間隔 (3 層) で合計 15 kg の銑鉄を充填して滴下させた。装填した銑鉄の組成を Table 3 に示す。実験終了後ただちに, N₂ ガスに切り替えて炉内を冷却した。その後, 炉を解体して炉内および黒鉛るつぼ中のスラグ, メタルを回収し分析に供した。また, 解体時にはレースウェイ形状を測定した。

3.2 実験結果

3.2.1 粉体吹込みにおけるレースウェイ内温度

レースウェイ内へ吹き込まれた粉鉬石の粒子は還元および溶融する。この時, (a) 吹込み鉬石の加熱に要する熱量, (b) 反応熱, (c) 溶融熱量等によってレースウェイ内およびその近傍の温度は低下する。外径 18 mm ϕ の非水冷保護管内に熱電対を挿入してレースウェイ内温度を測定した結果を Fig. 7 に示すが, この温度は試算によればレースウェイ内壁面のコークスからの放射による温度と解釈される。Fig. 7 から粉鉬石の吹込み量が増加するにしたがつてレースウェイ内および近傍の温度は低下する。量大温度低下部では約 80°C/(50 g/Nm³) の低下であり, 計算上の全 Fe₂O₃(s) が Fe(l) となる (a)~(c) の熱量とほぼ等しい。

3.2.2 吹込み粒子の還元および溶融

Fig. 8 にレースウェイ内での粒子の還元率および溶融率分布を示す。ここで, 溶融率(%)は, 顕微鏡観察より (冷却後の採取試料の +0.21 mm 重量/全採取重量) であらわした。レースウェイ奥部ほど, 吹込み量が多いほど還元率および溶融率は増加している。吹込み量が多いほど還元率および溶融率が増加している理由として,

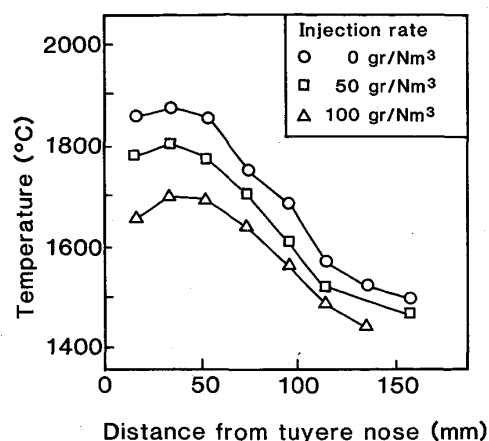


Fig. 7. Change of temperature distribution in the raceway with ore injection.

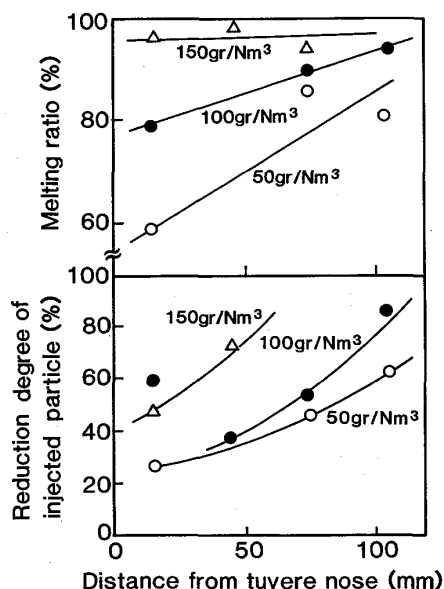


Fig. 8. Melting ratio and reduction degree of the raceway samples under different injection rates.

採取試料は吹き込まれた直後の粒子だけでなくレースウェイ奥部まで飛翔し還元および溶融して再び施回してきた粒子との混合物と考えられる。すなわち、吹き込み量が増すとレースウェイ内での粒子の滞留割合が増すことを示唆している。このことはファイバースコープによるレースウェイ内観察でも認められた。

採取した溶融物のX線回折では鉄および鉄酸化物以外に $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ (Fayalite) が同定された。これは、使用した粉鉱石からは $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ が同定されなかつたので、コークス燃焼時に発生する SiO ないし SiO_2 がレースウェイ内へ吹き込まれた粉鉱石粒子と反応し捕捉され

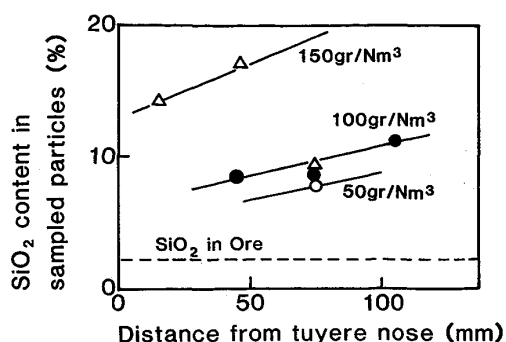


Fig. 9. SiO_2 content in sampled particles.

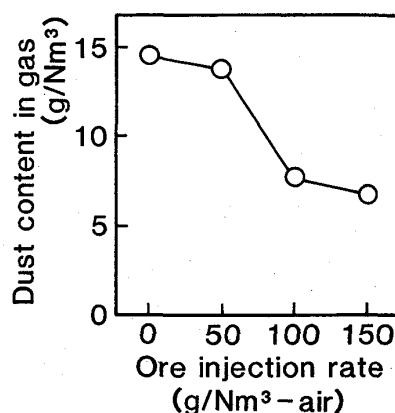


Fig. 10. Relation between ore injection rate and dust content in gas.

たことを意味している。Fig. 9 に粉鉱石の吹き込み量に対する採取試料中の SiO_2 との関係を示す。レースウェイ奥部ほど、また、吹き込み量が増すほど SiO の吸収量は増大している。

3・2・3 ダスト

高炉内におけるメタル中への Si の移行はレースウェイ近傍でコークスおよびスラグから発生する SiO ガスを介した反応が主と考えられている¹¹⁾。粉鉱石吹き込みによる SiO ガス発生抑制効果を調べるためにレースウェイ内で発生するダストの採取を行った。

Fig. 10 に粉鉱石吹き込み量とレースウェイ内で発生したダスト量の関係を、Table 4 には EPMA による採取ダストの分析結果を示す。粉鉱石吹き込みによつてレースウェイ領域で発生するダスト量は低下し、ダスト中の大半は Si 化合物である。この Si 化合物は Fig. 11 の ESCA (Electron Spectroscopy of Chemical Analysis) による形態分析結果から SiO が大部分を占めている。これらのことからレースウェイ領域ではコークス灰分およびスラグ由来の SiO が発生し、この SiO 発生は粉鉱石吹き込みによつて抑制されるといえる。

3・2・4 通気および通液性

粉鉱石吹込に伴うレースウェイ周辺の融体の滞留量はレースウェイの上部では少なく、下部ほど多くなっている。また、吹込み量が増すほどレースウェイ周辺に融体量は多くなる。とくに、融体はレースウェイ底部に多い。これらのことから、吹込み鉱石はレースウェイ外への拡散は少なく、レースウェイの周辺に融体としてト

ラップされるものと推察される。

粉鉱石吹込み時にはいずれの吹込み量でも送風圧の変化は小さい。送風圧が不変の理由としては融体のホールドアップは上昇するがホールドアップの増加に伴って Fig. 12 に示すようにレースウェイも拡大し、ガス圧力の上昇を相殺することによると考えられる。

3・2・5 粉鉱石吹込に伴う炉高方向の溶銑成分変化

粉鉱石吹込に伴う炉高方向の溶銑成分の変化を Fig. 13 に示す。羽口レベルより上部では吹込み量の増

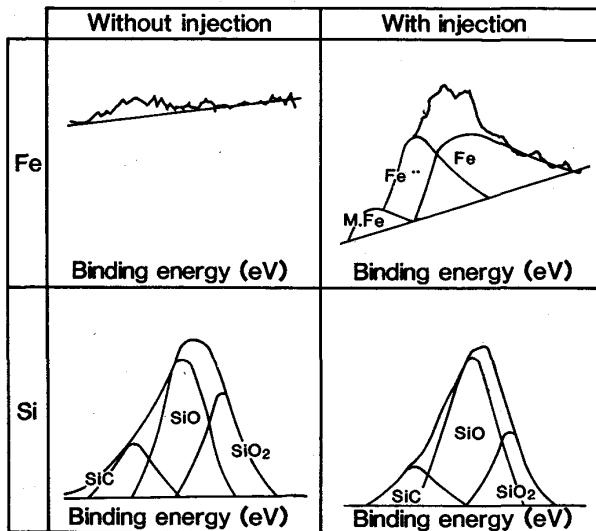


Fig. 11. Dust analysis by ESCA method.

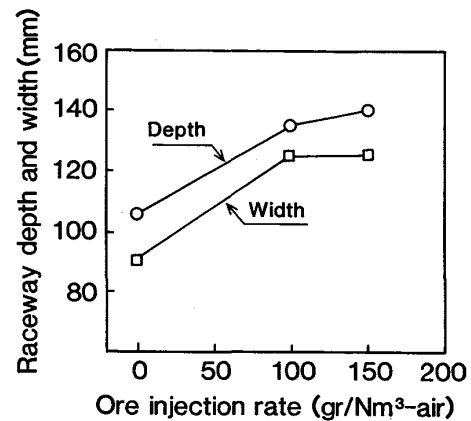


Fig. 12. Relation between raceway dimension and ore injection rate.

Table 4. Chemical analysis of dust from raceway.

Ore injection rate	T.Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	S
0 (g/Nm ³)	1.77	53.70	21.67	2.98	1.86	2.11	0.66	0.53
50	16.81	65.60	1.18	0.19	0.76	3.25	1.29	1.00
100	13.75	45.35	9.25	0.79	1.11	2.06	0.69	1.30
150	26.26	38.62	0.76	1.15	0.45	5.49	2.15	3.12
Coke ash	6.3	51.8	27.5	4.1	1.2	1.4	0.6	0.5

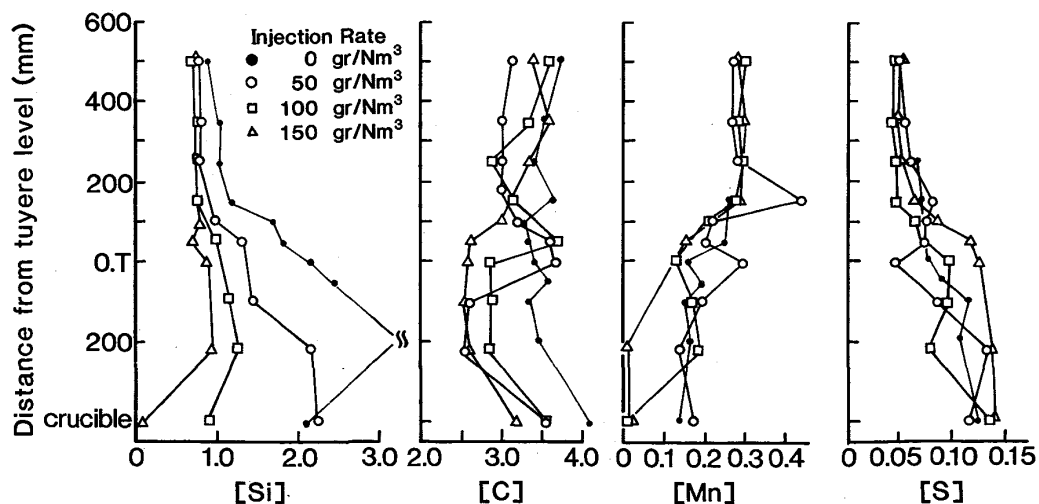


Fig. 13. Change in composition of drop materials.

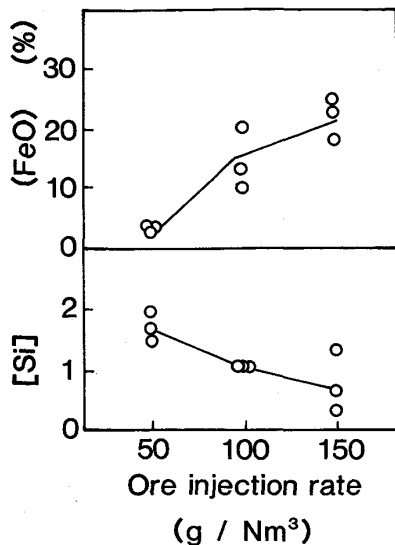


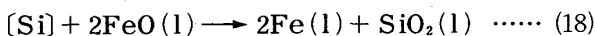
Fig. 14. (FeO) and [Si] content at the bottom of raceway.

加に伴ってレースウェイ内で発生する SiO 量の減少により, メタルへの Si 移行量は減少している. Mn 濃度の変化は炉下部へ移るにしたがつて減少し, 逆に S 濃度は増加傾向を示している.

3. 考 察

3.1 吹込み鉱石による Si 濃度の低減

レースウェイ以下の滴下帯では Fig. 14 に示すように, 例えば FeO 濃度が 10% 以上のスラグが存在するレースウェイ下部においても Si 濃度は 1% 前後と高い. 溶鉄中 Si 濃度の FeO 融体による脱珪反応を平衡論的にみると, (18), (19)式から(20), (21)式を得る.



$$\Delta G^\circ = -82470 + 29.18T$$

$$\ln K = \ln \frac{a_{\text{Fe}}^2 a_{\text{SiO}_2}}{a_{\text{Si}} \cdot a_{\text{FeO}}^2} = \ln \frac{a_{\text{Fe}}^2 a_{\text{SiO}_2}}{f_{\text{Si}} [\% \text{Si}] a_{\text{FeO}}^2} \quad \cdots (19)$$

ここで, $a_{\text{Fe}}=0.65$, $a_{\text{SiO}_2}=0.07$, $f_{\text{Si}}=6.87$, a_{FeO} はスラグ中のモル分率に等しいと仮定した. 本実験条件では $a_{\text{FeO}}=8.7 \times 10^{-3} (\% \text{FeO})$ と表せる.

$$K = \frac{56.9}{[\% \text{Si}] (\% \text{FeO})^2} \quad \cdots (20)$$

$$\ln K = -\frac{\Delta G^\circ}{R \cdot T} = 41504/T - 14.69 \quad \cdots (21)$$

これから, 例えば 1500°C で $(\text{FeO})=1\%$ のとき, $[\text{Si}]=0.01\%$ 程度の平衡値となる. 実験データははるかに高い [Si] 値を示している. Fig. 16 には羽口上, 羽口～

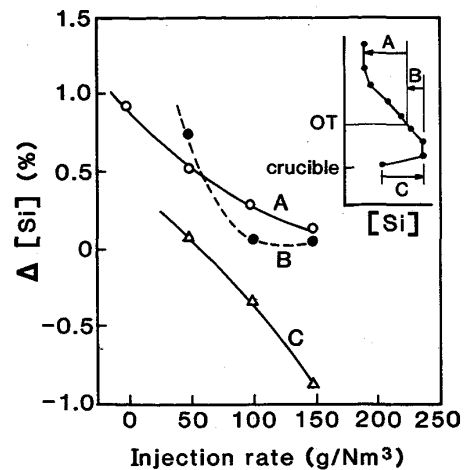


Fig. 15. [Si] changes in experimental furnace with iron ore injection.

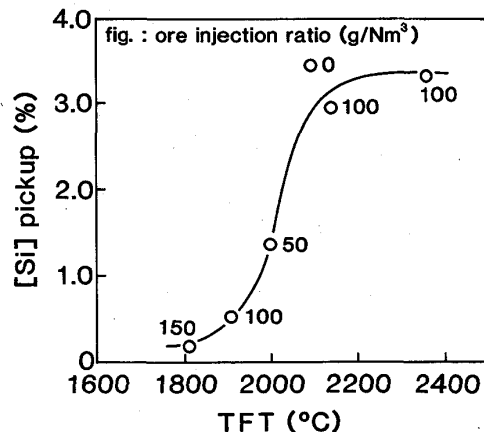


Fig. 16. Relation between TFT and silicon pickup transfer in dripping zone.

るつば間, るつば内での Si 濃度の変化を示す. Fig. 14 および Fig. 15 から吹込み量 150 g/Nm^3 のように黒鉛るつば内に FeO 含有スラグが多量に滴下した場合には, 炉底るつば内で脱珪が生じている. これを除く通常の状態ではレースウェイ以下の滴下帯(B)では FeO 含有スラグと溶鉄との直接接触による脱珪反応が進んでいない.

3.2 羽口前理論燃焼温度の影響

Fig. 16 に羽口前理論燃焼温度 TFT と $\Delta[\text{Si}]$ との関係を示す. ここで, 粉鉱石吹込み時の TFT の算出には酸化鉄酸素を送風酸素量に加算し, 吹込み鉱石の加熱や反応熱等の吸熱量を考慮した. また, 図中には吹込み量が 100 g/Nm^3 で酸素富化 5% および 10% の実験結果も示す. TFT におよぼす吹込み鉱石の影響は計算によると $190^\circ\text{C}/(100 \text{ g/Nm}^3)$ の低下である. 図から Si 濃度

に対する寄与は粉鉬石吹込み量より、 TFT の影響が著しく大きい。とくに、 TFT が 1900°C から 2100°C の間の Si 濃度の変化量は大きい。二色温度計による測定ではレースウェイ内のコークス表面温度は TFT の0.85程度であり、 TFT が 1900°C の場合にはコークス表面温度は 1615°C である。 Si 濃度の変化量が急激に増加し始める温度は佐藤ら¹²⁾の SiO および SiC の発生速度が急激に増大し始める温度と一致している。すなわち、 Si 濃度低下はレースウェイ内およびその周辺の温度低下による SiO の発生量の低下が主要因であることを示している。

4. 結 言

小型燃焼炉を用いて吹込み粉鉬石粒子がレースウェイ領域の化学的、物理的現象におよぼす影響を調査し、 Si 濃度の低下機構を検討した。

(1) レースウェイ内温度は吹込み粒子の加熱、反応熱および溶融熱などに要する熱量によつて低下する。

(2) 吹込み粒子の一部はレースウェイ内で残留旋回しており、吹込み量が増すほど溶融率、還元率は増す。レースウェイ領域で発生する SiO ガスはこの吹込み粒子によつて捕捉される。

(3) 上記(1)、(2)の結果として粉鉬石吹込み量の増加に伴つてレースウェイ外部に出ていく発生 SiO 量は減少する。また、それに伴いレースウェイより上部の滴下帯ではメタルへの Si 移行量は減少する。

(4) レースウェイ以下の滴下部ではスラグ中 FeO と溶鉄の反応による Si 濃度の減少量は小さい。

(5) 吹込み量の増加に伴い、レースウェイ近傍の融体量は増すがレースウェイが拡大して送風圧には影響をおよぼさない。

記 号

A : 熱風ジェットの断面積 $[\text{m}^2]$
 a : 熱風ジェット中の単位容積当たりの粒子表面積 $[\text{m}^2/\text{m}^3]$
 a_{FeO} : FeO の活量 $[-]$
 C_c : コークス比熱 $[\text{kcal}/\text{kmol}\cdot\text{deg}]$
 C_g : ガス比熱 $[\text{kcal}/\text{kmol}\cdot\text{deg}]$

C_p : 比熱 $[\text{kcal}/\text{kg}\cdot\text{deg}]$
 D_p : 粒子径 $[\text{m}]$
 D_p^0 : 模型実験での粒子径 $[\text{m}]$
 D_R : レースウェイ奥行き長さ $[\text{m}]$
 D_R^0 : 模型実験におけるレースウェイ奥行き長さ $[\text{m}]$
 H_i : 燃焼熱 $[\text{kcal}/\text{kmol}]$
 h_p : 粒子-流体間の伝熱係数 $[\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{deg}]$
 K : 平衡定数 $[-]$
 k_i : 反応速度定数 $[1/\text{m}]$
 N_c : コークス粒子のモル流量 $[\text{kmol}/\text{s}]$
 N_g : ガスのモル流量 $[\text{kmol}/\text{s}]$
 R : 気体定数 $[\text{kcal}/\text{kmol}\cdot\text{deg}]$
 T_c, T_g : コークスおよびガス温度 $[^{\circ}\text{C}]$
 t_s : 吹込み粒子温度 $[^{\circ}\text{C}]$
 U_p : 吹込み粒子速度 $[\text{m}/\text{s}]$
 V : ガス流速 $[\text{m}/\text{s}]$
 V^0 : 模型実験におけるガス流速 $[\text{m}/\text{s}]$
 W_g : ガス質量流量 $[\text{kg}/\text{s}]$
 X : 羽口先端からの距離 $[\text{m}]$
 ε : 鉬石粒子放射率 $[-]$
 ε' : 送風ジェット中の粉鉬石の容積分率 $[-]$
 θ : 時間 $[\text{s}]$
 ρ_g, ρ_p : ガス密度および粉鉬石の見掛密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$
 δ : 熱放射定数 $[\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{K}^4]$
 $\Phi_{c,p}$: 粒子へのコークス壁の角関係定数 $[-]$

文 献

- 1) 田島喜久雄, 城本義光, 金山有治, 奥野嘉雄, 岡本 晃: 鉄と鋼, **61** (1975), p. 2531
- 2) 西田 功, 田中孝三, 矢場田武, 玉田慎一: 鉄と鋼, **70** (1984), S34
- 3) 清水三郎, 宮島正和, 尾内武男, 漁 充夫, 舟越考久, 大石 忠: 鉄と鋼, **70** (1984), S803
- 4) 有山達郎, 光藤浩之, 西尾浩明, 大野陽太郎, 斉藤 汎, 山田 裕, 福島 勤: 鉄と鋼, **71** (1985), S83
- 5) 水野 豊, 細井信彦, 元重正洋, 三宅貴久, 中村文夫, 山縣千里: 鉄と鋼, **70** (1984), S35
- 6) 福田隆博, 内藤文雄, 浜田雅彦, 九島行正, 高本 泰, 柴田 清: 鉄と鋼, **71** (1985), S88
- 7) 春 富夫, 才野光男, 奥村和男, 阪口泰彦, 稲谷稔宏: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 951
- 8) T. INATANI, T. FUKUTAKE and K. OKABE: Der Hochofenprozess, Hrsg. von Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Dusseldorf (1973), p. 114
- 9) 中村正和, 杉山 喬, 鶴野建夫, 原 行明, 近藤真一: 鉄と鋼, **63** (1977) p. 28
- 10) 化学工学便覧 (第4版) (1978), p. 1054 [丸善]
- 11) 槌谷暢男, 徳田昌則, 大谷正康: 鉄と鋼, **58** (1972), p. 1927
- 12) 佐藤裕二, 杉山 喬, 中村正和, 原 行明: 鉄と鋼, **67** (1981), S76