

大きく、例えば CaO/SiO_2 が 0.5 変動すると $[\text{Si}] = 0.6\%$ では約 0.08%, $[\text{Si}] = 1.8\%$ 程度では 0.25% 変化する。

3. 炭素濃度の影響

(1)式で SiO_2 の還元反応を考える際炭素の活量が増加すると SiO_2 の還元は進行することになる。一般に高炉における加炭は容易であり、飽和値に到達していると考えられているが、厳密には操業条件に多少左右される。高炉溶解帯での炭素の挙動は数多くの共存する酸化物との同時反応および加炭条件を考えないと解明できないが SiO_2 の還元を(1)式で考える場合、溶銑中炭素濃度の影響は Fig. 4 に示したごとく、かなり大きいことがわかるが、 FeO が共存する場合の SiO_2 の還元反応とともにさらに研究する必要がある。

6. 結 言

SiO_2 の還元におよぼす各種要因の影響を定量的に把握することを目的に、熱力学データを利用して平衡時における理論式を求め、高炉での適用性について検討した。この結果、

1. SiO_2 還元に関する基礎実験を行ない、従来からの熱力学データから求めた平衡反応式との対応を検討した結果、平行的にずれた傾向が認められ、高炉内での SiO_2 還元を考える際 FeO 濃度の影響を考える必要がある。

2. 高炉内での SiO_2 の還元反応温度を溶銑温度より $20\sim 30^\circ\text{C}$ 高いとみなし、(6)(7)式を適用すると溶銑中 Si は共存する炉床スラグと平衡に達しているとみなせるから、平衡反応式を使つても SiO_2 の還元におよぼす諸要因の影響を定量的に知ることができる。

3. 銑鉄中 Si と溶銑温度の関係は対数関係があり、実測の結果と傾向的に一致する。

4. 塩基度の影響は比較的大きく、 Si 含有量が高い程同一塩基度の変化に対する Si の変動は大きい。

文 献

- 1) J. TAYLOR: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), 202 (1964) 5, p. 420
- 2) 沢村: 理論鉄冶金学, p. 323
- 3) 盛, 他: 鉄と鋼, 45 (1960) 11, p. 1429
- 4) J. CHIPMAN, ROBERT et al.: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 227(1963) p. 473
- 5) J. SMITH and TAYLOR: J. Iron and Steel Inst. (U. K.), 202 (1964) 7, p. 577
- 6) D. A. R. KAY and J. TAYLOR: Trans. Farad. Soc., 56 (1960), p. 1372

(67) 高炉炉内の物理的諸現象について (高炉操業条件の解析—I)

八幡製鉄, 東京研究所

工博 瀬川 清・○石川 英毅

On the Physical Phenomena in the Blast Furnace.

(Analysis on the conditions of the blast furnace operation—I)

Dr. Kiyoshi SEKAWA and Hidetaka ISHIKAWA.

1. 緒 言

筆者らは高炉の操業条件と生産能力の関係を定量的に把握するために、炉内でおこる諸現象を、化学工学的な手法をとり入れて解析することを試みてきた。

本報ではこれらの結果のうち、高炉の能力を定める主な要因として、Flooding による棚吊り、ガスの吹抜け、ガスと装入物の熱交換、鉍石の還元などの諸現象をとり上げ、式中の諸係数を最近の操業データをもとに、再検討し整理しなおした。

このような考え方や得られた結果は、高炉能力の総合的な把握や、高炉の操作設計などに、役立つものと考えられるので、ここに報告する。

2. 溢汪現象による棚吊り

高炉の溶融帯付近で起こる棚吊りは、溢汪現象が原因と考えられ、筆者らはすでに、ロウを用いてモデル実験を行なつてきた¹⁾。溢汪現象については化学工学の分野で、充填塔について多くの研究がなされているが²⁾、高炉の棚吊りもこれと同じ機構で起こるものとして研究がすすめられてきた。ELLIOTT³⁾は次元解析的に Hanging factor と Fluid ratio なる 2 変数をパラメータとして棚吊りの条件を定めている。

$$\left. \begin{aligned} \text{Hanging factor} &= (V_0^2 \cdot S_0 / g \cdot \epsilon^3) (\rho_G / \rho_L) \mu^{0.2} \\ \text{Fluid ratio} &= (L/G) \cdot (\rho_G / \rho_L)^{0.5} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

V_0 : 炉内ガスの見掛け流速 m/sec

ρ_G, ρ_L : ガスおよび下降流体の密度 kg/m^3

G, L : ガスおよび下降流体の見掛け質量速度

$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$

μ : 下降流体の粘度 センチポアズ

S_0 : 炉内装入物の比表面積 m^{-1}

ϵ : 装入物の空隙率

g : 重力加速度 $9.8 \text{ m}/\text{sec}^2$

通常の高炉の操業条件では、Fluid ratio は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 、Hanging factor は $10^{-1} \sim 1$ の範囲内にあり、溢汪限界はほぼ次式で表わされる。

$$(\text{Hanging factor})^2 \cdot (\text{Fluid ratio}) = 10^{-3}$$

上式の左辺 $> 10^{-3}$ が棚吊りの起こる範囲となる。

今、 $\rho_G, \rho_L, \mu, L, \epsilon$ が一定で、 $S_0 = 6(1-\epsilon)/d$ なる球としての条件を用い、 $V_0 \propto W/D^2$ とするとつぎのようになる。

$$(W/D^2)^2 = f \cdot d_c \dots (2)$$

ただし W : 送風量 Nm^3/min

D : 炉床直径 m

d_c : コークス粒径 mm

f : 比例定数

溶融帯ではコークス以外の装入物は溶融していると考えられるので、装入物粒径としてコークス径 d_c をとる。

(2) 式の f の値を当社洞岡の四基の高炉の操作データ (S 37 年 1 月~40 年 1 月の月平均値) より検討してみる. $W/D^2 \cdot \sqrt{d_c}$ と月間の棚回数を目盛ると Fig. 1 のようになり, $W/D^2 \cdot \sqrt{d_c}$ が大きいと棚も多い傾向がみられる. この期間の $W/D^2 \cdot \sqrt{d_c}$ の月平均値の約 95% までが安定に操業できる範囲とすれば, コークス粒径に

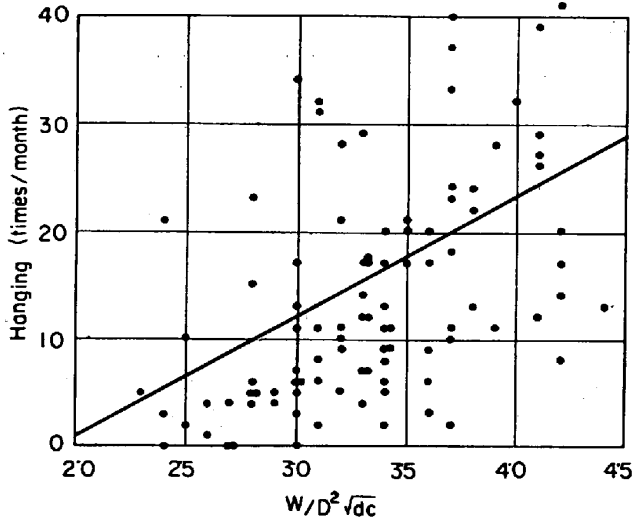


Fig. 1. Relation between $W/D^2 \cdot \sqrt{d_c}$ and hanging.

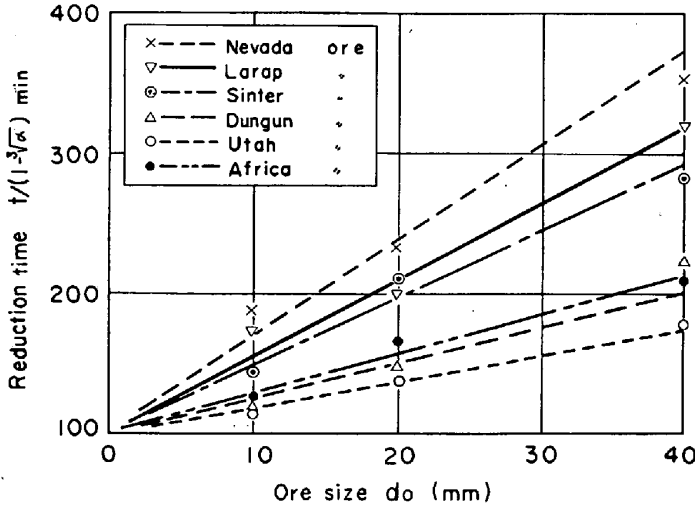


Fig. 2. Relation between ore size and reduction time (800°C·H₂).

関するつぎの条件式が得られる.

$$4.2 > W/D^2 \cdot \sqrt{d_c} \text{ または } d_c > 0.057(W/D^2)^2 \dots (3)$$

ここで送風量 W は実測風量に $\{1+2(\text{富化 } O_2 \% / 100)\}$ を乗じて, 酸素富化の補正を行なっている.

3. 炉内の圧損失および吹抜け

高炉内の圧損失については多くの研究があるが, 結果はいずれも類似しており, ここでは应用到に便利なものとして, PHILBROOK の結果⁶⁾を引用する.

$$\Delta P = f \cdot (G/\rho_G \cdot g) (H \cdot S_0/\epsilon^3) \dots (4)$$

ただし ΔP : 圧力損失 kg/m^2

H : 層の高さ m

f は流体の抵抗係数で, レイノルズ数 $N_{Re} = G/\mu_G \cdot S_0$ (ただし μ_G はガス粘度 $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{sec}$) の関数として与えられ, $N_{Re} = 20 \sim 150$ ではほぼ, $f = 1.25 N_{Re}^{-0.3}$ となる. この関係と (4) 式から, μ_G, ρ_G, ϵ を一定と想定すれば次式を得る.

$$\Delta P = \alpha H G^{1.7} / d^{1.3} \dots (5)$$

ただし, α は比例定数.

つぎに吹抜けについては PHILBROOK も報告しているが, 炉内断面にかかる装入物の重量

$$P_s = H(1-\epsilon) \cdot \rho_s$$

ρ_s : 装入物の密度 kg/m^3

以上の圧力損失があると, 局部的に流動化して吹抜け現象を起こすものと考えられる. 装入物重量が圧力損失 ΔP より大きいときは安定であると考えられるから, 吹抜けを起こさぬ条件として

$$\Delta P < \alpha H(1-\epsilon) \rho_s \dots (6)$$

ただし α は比例定数.

(5), (6) 式より, ϵ, ρ_s は一定と考えて次式を得る.

$$d > \alpha' (W/D^2)^{1.3}$$

ただし α' は比例定数.

前節と同様に, S 37 年 1 月~40 年 1 月の月平均の実操業データについて検討してみる.

$$X_c = (W/D^2)^{1.3} / d_c$$

$$X_o = (W/D^2)^{1.3} / d_o \text{ ただし } d_o \text{ は 鉾石粒径 mm}$$

として, 当社洞岡, 戸畑の各高炉について, X_c, X_o の値を求めてみると, その 90% の範囲は Table 1 に示すようになり, 平均値は, $X_c = 1.2 \pm 0.5, X_o = 3.4 \pm 1.6$ となる. これより吹抜けを起こさぬための条件として次式が得られる.

$$(W/D^2)^{1.3} / d_c < 1.7 \text{ または } d_c > 0.6(W/D^2)^{1.3} \text{ (7-1)}$$

$$(W/D^2)^{1.3} / d_o < 5.0 \text{ または } d_o > 0.2(W/D^2)^{1.3} \text{ (7-2)}$$

4. 炉内での熱交換

Table 1. Results of operation data analysis.

Furnace	Kukioka No. 1 B.F.	Kukioka No. 2 B.F.	Kukioka No. 3 B.F.	Kukioka No. 4 B.F.	Tobata No. 1 B.F.	Tobata No. 2 B.F.
Number of data	33	33	11	33	33	33
90% range of X_c	1.0 ± 0.3	1.0 ± 0.3	1.2 ± 0.3	1.4 ± 0.3	1.4 ± 0.3	1.4 ± 0.3
" of X_o	3.1 ± 0.6	3.0 ± 0.6	3.5 ± 0.6	3.5 ± 0.8	3.5 ± 1.2	3.5 ± 1.2
90% range of θ_c	59 ± 7	60 ± 8	56 ± 8	58 ± 7	52.4 ± 7	51 ± 8
" of θ_o	23 ± 3	20 ± 4	18 ± 3	20 ± 3	19 ± 2	20 ± 2
90% range of Y	74 ± 9	74 ± 8	74 ± 6	77 ± 8	74 ± 8	70 ± 8

つぎに炉内のガスから装入物への伝熱の問題を考えてみる。炉内の反応熱および炉壁からの熱損失を無視して、ある水平断面で微小高さ dx を考えると、粒子、流体間の伝熱量が粒子の吸熱量に等しいとして次式が得られる。

$$-h_s \cdot v_s \cdot dT_s = k(T_g - T_s) dx \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、シャフト底部より上方に高さ x をとつて、 $x = 0 \sim x$ の間の熱収支から

$$h_g \cdot v_g (t_g - T_g) = h_s \cdot v_s (t_s - T_s) \quad \dots\dots\dots (9)$$

h : 比熱 kcal/m³·°C v : 見掛け速度 m/sec
 k : 単位体積中でのガスから固体への熱伝導度
 T, t : $x = x$ および $x = 0$ における温度 °C

添字 g, s はガスおよび粒子を示す。

(9)式より T_g を求めて (8) 式に代入し、 $x = H$ で $T_s = 0$ として微分方程式をとくと、

$$(A + BT_s)A = \exp\{B \cdot k(H - x)/h_s \cdot v_s\}$$

$$\text{ただし, } A = t_g - (h_s \cdot v_s / h_g \cdot v_g) t_s \\ B = (h_s \cdot v_s / h_g \cdot v_g) - 1$$

上式の指数項を展開して近似し、整理しなおすと

$$(T_s/t_g)[1 + (t_s/t_g)(h_s \cdot v_s / h_g \cdot v_g)] = k(H - x)/h_s \cdot v_s$$

ここで、 h_s, h_g, t_g, t_s は一定とし、 v_g/v_s がコークス比 η に比例すると考えると、つぎの関係式が得られる。

$$T_s(0.8 + 1/\eta) \propto k(H - x)/h_s \cdot v_s \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $(t_g/t_s)(h_g \cdot v_g / h_s \cdot v_s) = 0.8\eta$ と仮定した。

さらに k は粒子比表面積 S_0 に比例し、 S_0 は d^{-1} に比例する。また、 k は v_g に依存するが、高炉の条件では k は N_{Re} の 0.7 乗位に比例すると考えられるので(10)式を書き直して

$$(H - x)/T_s \cdot H = C(W/D^2)^{0.7}(d/H)(0.8 + 1/\eta) \dots\dots\dots (11)$$

ただし C は比例定数である。

上式において右辺の値が大きいと熔融層が下がりすぎ、小さいと上がりすぎることが知れる。高炉においては一定のところ熔融層があることが望ましいので、(11)式の右辺がある範囲内の値をとることが必要である。い

$$(W/D^2)^{0.7} d_c (0.8 + 1/\eta) / H = \theta_c$$

$$(W/D^2)^{0.7} d_o (0.8 + 1/\eta) / H = \theta_o$$

まと書けば、洞岡、戸畑の各炉の月平均の操業データについて θ_c, θ_o の 90% の範囲の値を求めてみると、Table 1 のようになり、平均値をとつて、 $\theta_c = 57 \pm 17, \theta_o = 20 \pm 10$ これより安定な操業の範囲として、次の関係を得る。

$$74 > \theta_c > 40 \quad \dots\dots\dots (12-1)$$

$$30 > \theta_o > 10 \quad \dots\dots\dots (12-2)$$

5. 鉱石の還元速度

塊鉱石の還元速度を表示する式としてはいろいろなものがあるが、ここでは次式のようなものを用いることにする。

$$t/(1 - \sqrt[3]{\alpha}) = Rd_o + t_o \quad \dots\dots\dots (13)$$

t : 時間 α : t での未還元率
 d_o : 鉱石の平均粒径 mm R, t_o : 定数

いろいろな鉱石について 800°C, H₂ 気流中での実験結果を (13) 式に準じて、還元速度を調べると Fig. 2 のようになる。図のように $t/(1 - \sqrt[3]{\alpha})$ と d_o はほぼ直線関係をみだし、

$$R = \begin{cases} 5 \text{ min/mm} & \text{(磁鉄鉱系)} \\ 3 \text{ " } & \text{(赤鉄鉱系)} \end{cases}$$

$$t_o = 100 \text{ min}$$

のように定数の値が求められる。

実際の高炉では還元ガスの組成や温度が異なつているので推論はむづかしいが、炉内での還元に必要な時間は、 $(t_o + Rd_o)(1 - \sqrt[3]{\alpha})$ に比例すると仮定し、その比例係数を a とする。シャフト下部では未還元率 $\alpha = 0$ と考えて、

$$t = a(t_o + Rd_o) \quad \dots\dots\dots (14)$$

しかるに $t \propto$ (炉高 H) / (鉱石消費速度) と考えられ、さらに鉱石消費速度はほぼ、[炉内ガス流速 V_o] × [(Ore) / (Coke)] に比例するものと考えられる。また、 $V_o \propto W/D^2$ であるからこれらの諸関係を (14) 式に代入して、炉内で還元が十分に行なわれるための条件として次式が得られる。

$$W/D^2 < a' \cdot H / (t_o + Rd_o) \cdot [(Ore) / (Coke)] \dots\dots\dots (15)$$

ただし a' は比例定数である。そこで

$$Y = 200(W/D^2) / H \cdot [(Ore) / (Coke)]$$

として、洞岡、戸畑の各高炉の月平均データ (S37年1月~40年1月) について Y を計算してみると Table 1 に示すような値が得られ、その平均は 75 ± 9 になる。

ゆえに、(15)式の条件は、つぎのごとく書き改められる。

$$(W/D^2)(100 + Rd_o) / H [(Ore) / (Coke)] < 84 \dots\dots\dots (16)$$

6. 結 言

高炉の棚吊り、炉内の通風、熱交換および鉱石の還元などの諸現象について解析し、鉱石およびコークス粒度 d_o, d_c と炉内断面積当りの送風量 W/D^2 との関係式を導いた。さらにこれらの諸式の恒数を最近の実操業データにもとづいて検討した結果、安定な操業条件の範囲を与える次の諸式が得られた。すなわち、棚吊りを起こさぬ条件として (3) 式、吹抜けを起こさぬ条件として (7-1), (7-2) 式、炉内の伝熱に必要な条件として (12-1), (12-2) 式、鉱石の還元に必要な条件として (16) 式が得られた。

文 献

- 1) 瀬川: 製鉄研究, 235 (1961), p. 3320; 236 (1961), p. 3408
- 2) 瀬川, 斧, 他: 鉄と鋼, 43 (1957), p. 352
- 3) 内田, 藤田: 工化誌, 39 (1936), p. 876; 40 (1937), p. 538; 41 (1938), p. 513
- 4) T. K. SHERWOOD, et al.: Ind. Eng. Chem., 30 (1938), p. 765
- 5) J. F. ELLIOTT, et al.: Proc. Brast Furn., (1952), p. 246
- 6) W. O. PHILBROOK: J. Metals, (1954), p. 1396