

還元についても同様であるが、(4)式より考えれば、同じ粒度のものを用いれば、炉高に比例して出鉄能力が変化することになる。

以上のことから、炉高が低くなれば、ほぼ炉高に比例した粒度にすることが望ましく、出鉄能力も炉高が低くなるにつれて減少することが考えられる。

4. 結 言

高炉の能力を炉の寸法や操業条件、とくに装入物粒度から推定するために、出鉄能力を制限する諸要因をとりあげて、化学工学的、かつ定量的な方法で検討し、操業および炉の設計に利用できる関係式を導いた。

得られた諸関係式を酸素富化操業、高圧操業、低炉操業などに適用して考察をすすめたが、これら特殊操業の操作設計にも有用な知識が得られることが知れた。

文 献

- 1) 瀬川, 石川: 鉄と鋼, 52 (1966) 9, p. 1404
- 2) 長谷川, 根本, 他: 鉄と鋼, 51 (1965) 4, p. 628
- 3) 岩村, 菊地, 他: 鉄と鋼, 51 (1965) 10, p. 1728
- 4) 白石, 他: 鉄と鋼, 50 (1964) 3, p. 353

(69) 高炉における送風量とコークス比の関係についての理論的考察

八幡製鉄, 八幡製造所

光井 清・斧 勝也・池田 稔

Effect of Wind Rate on the Coke Consumption in Blast Furnace.

Kiyoshi MITSUI, Katsuya ONO and Minoru IKEDA.

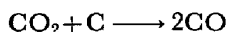
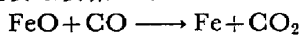
1. 結 言

従来より送風量とコークス比の関係は送風量を下げるとコークス比は低下するが、送風量があるレベル以下になると逆に上昇するということが経験的に知られている。しかしながら、送風量とコークス比の関係についての理論的考察および同一操業条件による実操業の裏付はまだなされていない。そこで東田6高炉の試験操業データに基づいて、その間の関係を熱力学面から数式により解析を行なった。

2. 操業アクションに関する考え方

高炉操業に必要な熱量バランスに関しては、一般に羽口上部の燃焼帯(1000°C以上)において熱バランスが崩れなければ鉄鉄成分変動も少なく順調に操業できると考えられる。高炉の操業アクションとしては ore/coke, 送風量, 送風温度, 送風湿度および重油添加量があげられる。

熱バランスからこの関係を解析すると、まず高炉において 1000°C 以上の反応帯では、羽口上部のソリューションロス反応は次式に示すように吸熱反応であり、熱バランス上重要な要素となる。



そこで操業アクションのうち、送風温度, 湿度, 重油濃度および原料品位を一定にして操業した場合のソリ

ーションロス量と送風量の関係を調べる。いま, ore/coke を一定にしたまま送風量をあげていくと装入物の降下速度が早くなり、鉱石のガス還元反応時間が短くなってガス利用率が低下する。そうすると羽口上部のソリューションロス反応が増加し熱量が不足気味の炉況となつてくる。そこで ore/coke を下げて鉱石当りの相対的ガス量を多くしソリューションロス量を減少させて熱バランスを保つ。この考えは鉱石を直接還元する割合を、ほぼ一定にして熱バランスを保つようにアクションをとつているのである。さらにいけば、単位送風量当りの熱バランスでは、入熱は一定に定められる。出熱で変動する大きな要素は単位送風量当りのソリューションロス量であり、この変動をなくするように ore/coke でアクションをとつていことになる。

以上からコークス比と送風量の関係は次のように考えられる。すなわち、送風量をあげてゆくと単位送風量当りの鉱石量(出鉄量)は低下する。一方コークス燃焼量はほとんど一定である。

3. 送風量とコークス比の関係についての熱力学的解析

熱バランスおよび還元反応速度などを考慮して送風量とコークス比の関係を数学的に解析する。

3.1 送風量とコークス消費量の関係

送風量 1 Nm³ についての熱バランスは次式で与えられる。

$$q_1 T + q_2 T \frac{dH_2O}{dx} + q_3 \frac{dz_1}{dx} - q_4 \frac{dH_2O}{dx} - q_5 \frac{dOil}{dx} = q_6 \frac{dz_2}{dx} + q_7 \frac{dy}{dx} + q_8 \frac{dy}{dx} + Q \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

- T : 送風温度 °C
- q₁ : 空気比熱 kcal/°C Nm³
- H₂O : 送風湿分 kg/min
- q₂ : 蒸気比熱 kcal/°C kg H₂O
- z₁ : 羽口前 O₂ による燃焼 C kg/min
- q₃ : 2C+O₂ → 2CO 反応熱 kcal/kg C
- q₄ : C+H₂O → CO+H₂ 反応熱 kcal/kg H₂O
- q₅ : Oil 分解熱 kcal/kg oil
- Oil : 重油添加量 kg/min
- z₂ : ソリューションロス C kg/min
- q₆ : ソリューションロス反応熱 kcal/kg C
- q₇ : 鉄鉄+スラグ熱容量 kcal/kg 鉄鉄
- q₈ : Si, Mn, P 直接還元熱 kcal/kg 鉄鉄
- Q : 熱損失+1000°C の熱収支でシャフト部へ逃げる熱量 kcal/Nm³

x : 送風量 Nm³/min y : 出鉄量 kg/min

(1)式より鉄鉄成分[Si][Mn][P], 送風温度, 湿分および重油添加率を一定にすると(1)式の左辺は常数Kで与えられるため次式が求まる。

$$z_2 = \frac{K-Q}{q_6} \cdot x - \frac{q_7+q_8}{q_6} \cdot y \dots\dots\dots (2)$$

ゆえに、コークス消費量 z (kg/min) は次式のように送風量と出鉄量の関数で与えられる。

$$z = \frac{1}{(C)} \left\{ 0.225x + \frac{K-Q}{q_6} \cdot x - \frac{q_7+q_8}{q_6} \cdot y + [C]y + F \cdot y + H \cdot x + (H_2O) 12/18 x - 0.86(oil) x \right\} \dots\dots (3)$$

ただし、(C) : コークス中 C% (小数)

[C] : 銑鉄中 C% (小数)

F : [Si][Mn][P] 還元 C kg/kg pig

H : ダスト中 C 量 kg/Nm³ air

(H₂O) : 送風湿分 kg/Nm³

(Oil) : 重油濃度 kg/Nm³

0.86 は重油 C%

3.2 送風量と銑鉄生成量の関係

送風量 1 Nm³ 当りの銑鉄生成量について考えると、熱バランス上銑石の直接還元量は送風 1 Nm³ あたり、ほぼ一定にする必要がある。そこで銑鉄生成量の増加を図るには送風量 1 Nm³ 当りの CO および H₂ ガス発生量を多くするか、または CO、H₂ ガスの利用率を向上させることである。よつて単位送風量当りの銑鉄生成量は次の関係で求まる。

$$\frac{dy}{dx} = \frac{16}{22.4} \cdot \frac{1}{[O]_{pig}} \cdot \eta_{CO+H_2} \cdot \frac{d(CO+H_2)}{dx} + \frac{16}{12} \cdot \frac{1}{[O]_{pig}} \cdot \frac{dz_2}{dx} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、(CO+H₂) : CO+H₂ ガス発生量 Nm³/Nm³ air

[O]_{pig} : 銑鉄 1 kg 当りの Fe と結合した O₂ 量 kg/kg 銑鉄

η_{CO+H₂} : CO+H₂ ガスの平均ガス利用率 (小数)

ここで η_{CO+H₂} は銑石粒内へのガス拡散速度および界面反応速度によつて定まる。いま、銑石粒度、性状を一定とすると、これはガス温度およびシャフト間接還元帯を装入物が通過する時間の関数として求まる。そこで高炉内でのガス還元反応は一定温度、一定高さで終結すると仮定すると、間接還元帯での温度分布はほぼ一定に定まり、Fe₃O₄、Fe₂O₃、FeO と CO および H₂ ガスの反応平衡状態でのガス利用率は一定となるため、η_{CO+H₂} はつぎのように時間が無限大になつた場合に平衡状態のガス利用率に収斂する式で近似される。

$$\eta_{CO+H_2} = \frac{f(T') \cdot t}{t+k'} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、f(T') : 反応温度 T' の平衡ガス利用率 (最大ガス利用率)

t : 間接還元帯を装入物が通過する時間

k' : 定数、原料の性状により定まる。

また t はコークス燃焼速度および銑鉄生成速度から次の関係で求まる。

$$t = \frac{1000V'}{(Ax+By)/\alpha + 93.5y/Fe \cdot \beta} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、V' : (1+圧縮率) × シャフト間接還元帯体積 m³

α : コークスカさ密度 t/m³

β : 銑石かさ密度 t/m³

Fe : 銑石平均 Fe%

A, B : (3) 式のコークス消費量より求まる定数

以上 (3)(4)(5)(6) 式より次のような微分方程式が設定される。

$$\frac{dy}{dx} = \frac{A'x+B'y+C'}{A''x+B''y+C''} \dots\dots\dots (7)$$

これをとくと、出銑量 y が求まる。

ここで A', A'', B'... は前式から求まる定数である。

コークス消費量 (z kg/min) と銑鉄生成量 (y kg/min)

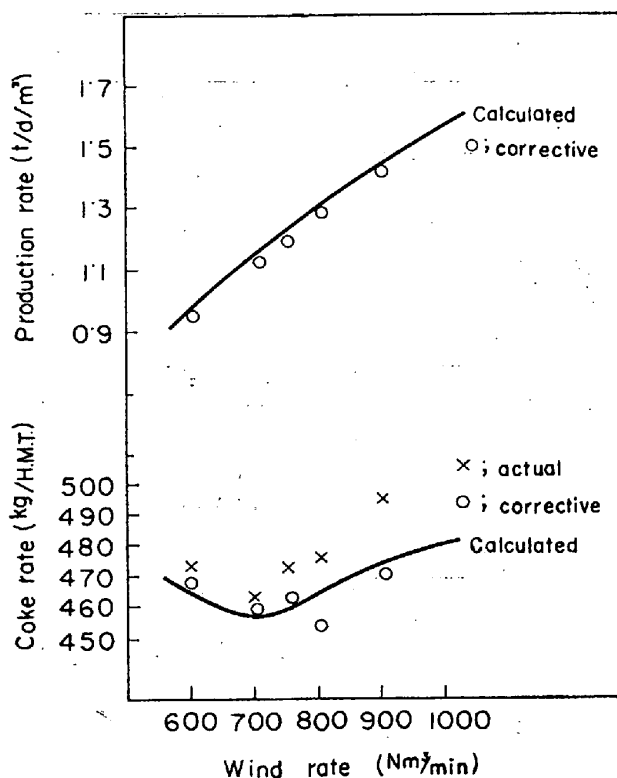


Fig. 1. Relation between wind rate and coke rate, production rate at Higashida No. 6 B. F. (vol. 648m³).

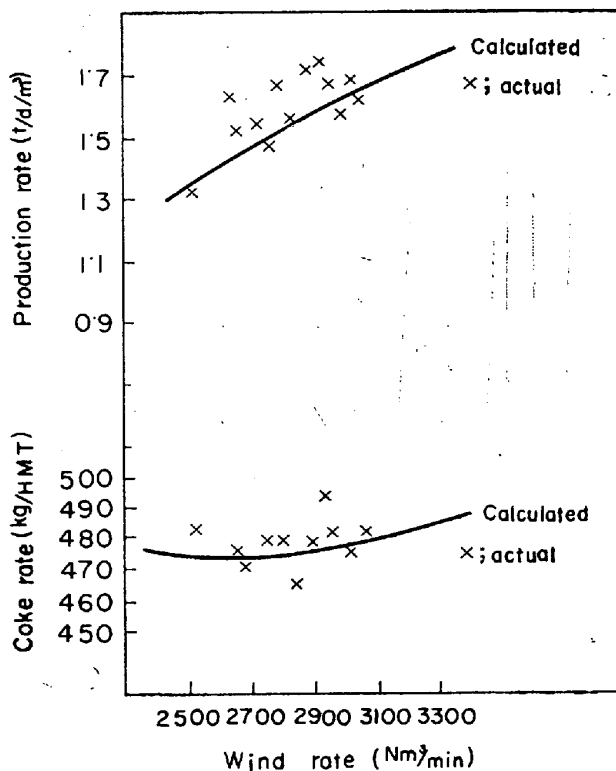


Fig. 2. Relation between wind rate and coke rate, production rate at Tobata No. 3 B. F. (vol. 1947 m³).

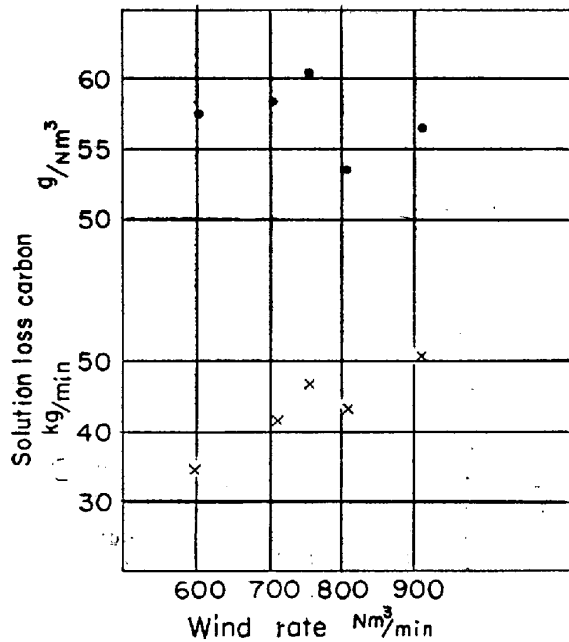


Fig. 3. Relation between wind rate and solution loss carbon (at Higashida No. 6 B. F.)

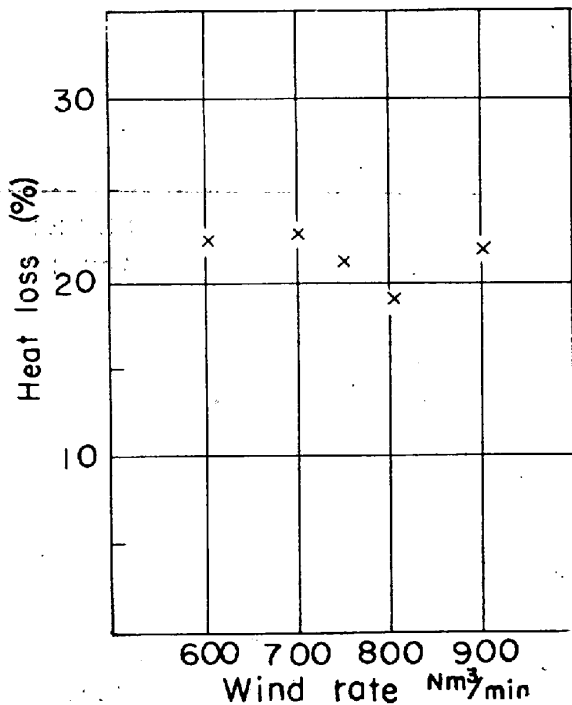


Fig. 4. Relation between wind rate and heat loss (at Higashida No. 6 B. F.)

Table 1. Corrective coefficient of coke rate.

Variable		Coke rate (kg/t pig)
Si% in pig	±0.1%	±7.5 kg/t
Coke ash	±1.0%	±10 kg/t
Slag volume	±100 kg/t pig	±25 kg/t
Blast humidity	±1 g/Nm³	±1 kg/t
Oil rate	±1 kg/t	±1 kg/t

を求めることにより、送風量とコークス比の関係が得られる。

4. 理論計算と操業実績の比較

次の前提条件により、前項の方式に基いて理論計算を行ない操業実績と比較すると Fig. 1, 2 のようになり、よく一致した。コークス比の補正係数は Table 1 に示す。

4.1 前提条件

送風温度：1000°C 送風湿度：25 g/Nm³
 重油濃度：0.033 kg/Nm³ [C]：4.50%
 [Si]：0.65% [Mn]：0.70% [P]：0.15%
 鉱石 Fe%：61% [O]_{pig}：0.39 kg/kg pig
 かさ密度：2.20 t/m³ コークス(C)：90%
 かさ密度：0.41 t/m³ 造滓量：300 kg/t pig
 熱損失：20%(H-6), 15%(T-3)
 間接還元帯体積：内容積の 34%：圧縮率 6.8%
 $\eta_{CO+H_2} : 0.58 t / (t + 77)$

4.2 計算結果

- (1) 東田 6 高炉
 $z = 0.420x - 0.108y$
 $y = 0.365x + 2930 \log_{10}(142x + 68.8y + 5.88 \times 10^5) / 5.88 \times 10^5$
- (2) 戸畑 3 高炉
 $z = 0.433x - 0.108y$
 $y = 0.380x + 8500 \log_{10}(154x + 71.1y + 1.84 \times 10^6) / 1.84 \times 10^6$

4.3 送風量とソリューションロス量、および熱損失の関係

この計算方式では熱損失の割合は送風量に関係なく、ほとんど一定という仮定を入れて、送風量とソリューションロス量の間係を求めている。Fig. 3, 4 に示すように東田 6 高炉の実績ではこの仮定を裏付けるような結果が得られた。すなわち単位時間当りのソリューションロス量、熱損失は送風量にほぼ比例して増加する。

5. 考 察

(1) 送風量とコークス比の関係について熱力学面より数式により解析を行ない、関係式を求めて操業実績と比較したところ、かなりよく一致した。これにより高炉にはそれぞれ適正な送風量があると予想される。

(2) 単位風量当りのソリューションロス量、熱損失の割合は送風量レベルにあまり関係しない。単位風量当りのソリューションロス量は送風温度、湿度、重油添加率、熱損失、原料品位により一率に決定される。また熱損失の割合は高炉の大きさにより一率に決定されると考えられる。

(3) 一般に高炉において出銑比増、コークス比減を図るには、まず燃料吹込などによる還元ガス(CO, H₂)の増加を行なうこと、ならびに還元性のよい鉱石の使用、鉱石粒度を小さくするなどによりガス利用率を向上させることが考えられる。次に送風温度の上昇、生石灰石使用減、造滓量減および高炉の大型化による熱損失の減少などにより単位送風量当りのソリューションロス量を増大させることが有効となる。

文 献

- 1) 児玉, 重見: 鉄と鋼, 48 (1962) 11, p. 1217
- 2) A. N. RAMM: Stal, (1964) 10, p. 760