

討論会講演論文*

I. 高炉における高圧操業

(討-1) 高圧操業における炉頂圧, 送風量, コークス比の関係について

八幡製鉄, 八幡製造所

深川弥二郎・○斧勝也・池田稔・佐々木盛治
On Relationship among Top Pressure, Wind Rate and Coke Rate in Operation of High Top Pressure.

Yajiro FUKAGAWA, Katsuya ONO
Miroru IKEDA and Moriji SASAKI.

1. 緒言

近年, 高炉の生産性向上のため高圧化が急速に進められてきている。高圧操業は, いうまでもなく炉頂圧を上昇させることにより, 炉内のガス流速の増加による種々のトラブルを起こさせないで送風量を増加させ生産性の向上をはかろうとするものである。しかしながら送風量に見あつた炉頂圧はどのような基準で考えるべきなのかあるいはまた高圧操業を行なう場合のコークス比の変動はどのようになるのかについては, はつきりとした定説はまだ確立されていないようである。

本報告はこれらの点の解明の手がかりを得る目的で炉頂圧と送風量, コークス比との関係について若干の理論的考察を行なつたものである。

2. 送風量と炉頂圧との関係

高炉の高圧操業において送風量を上げてゆく場合, どのような基準で炉頂圧を上昇させるかは一般につきのよな方法が考えられる。

- 1) 通気抵抗が一定になるよう操業する。
- 2) 羽口風速が一定になるよう操業する。
- 3) シャフトでのガス流速が一定になるよう操業する。
- 4) 炉口でのガス流速が一定になるよう操業する。

上記の方法はいずれも決定的な方法であるとはいえないが, 送風量と炉頂圧との関係を究明する場合の有力な手段になり得ると考えられる。以下これらの点について検討を加える。

2.1 記号本報告に使用する記号を一括して示す。

- P_b : 送風圧 g/cm^2
 W : 送風量 Nm^3/min
 T_b : 送風温度 $^{\circ}C$
 P_t : 炉頂圧 g/cm^2
 ΔP_s : シャフトでの圧力損失 g/cm^2
 U_T : 羽口風速 m/sec
 N_T : 羽口数
 A_T : 羽口面積 m^2
 A_s : シャフトの平均断面積 m^2
 A_m : 炉口での断面積 m^2

- P_s : シャフト圧力 g/cm^2
 T_s : シャフト温度 $^{\circ}C$
 U_s : シャフトでのガス流速 m/sec
 U_m : 炉口ガス流速 m/sec
 (N_2) : シャフトおよび炉頂ガスの N_2 %
 $\theta = P_b - P_t$: 炉内圧力損失 g/cm^2
 Z : コークス消費量 kg/min
 Y : 出鉄量 kg/min
 (C) : コークス中の固定炭素割合
 $[C]$: 鉄鉄中の C
 C : 炉下部における入熱 $kcal/Nm^3$
 Q : 熱損失およびシャフト部へ逃げる熱量 $kcal/Nm^3$
 q_1 : ソリューション反応熱 $kcal/kg C$
 q_2 : 鉄鉄および鉄滓の熱容量 $kcal/kg pig$
 q_3 : Si, Mn, P の還元熱 $kcal/kg pig$
 H : ガス灰中の C 量 kg/Nm^3
 (oil) : 重油濃度 kg/Nm^3
 (H_2O) : 送風水分 kg/Nm^3
 F : Si, Mn, P の還元 C 量 $kg/kg pig$
 η_{CO+H_2} : ガス利用率
 $(CO+H_2)$: CO, H_2 発生量 Nm^3/Nm^3
 $[O]_p$: 鉄鉄 1 kg 当たりの Fe と結合した酸素量 $kg/kg pig$

- S : ソリューションロス C kg/min
 t : ガス還元の時間
 V' : $(1+圧縮率) \times$ シャフト間接還元帯体積 m^3
 α, β : コークス, 鉄石の嵩密度
 Fe : 鉄石の平均鉄分 %
 R_o, R_p : 普通圧および高圧での鉄石の被還元性 %

2.2 通気抵抗を一定にする場合

高炉々内でのガスの通気抵抗を表わす関係式はいろいろ提出されているが, 当所での研究¹⁾によれば高炉シャフト部での圧力損失は次式で与えられる。

$$\Delta P_s = \sqrt{P_t^2 + KW^{1.7}} - P_t \dots \dots \dots (1)$$

ただし

K : 高炉の大きさ, 原料条件によつて定まる定数
 (1)式はシャフト部での圧力損失を表わす式であるがこれを便宜上拡大解釈して高炉全体の通気性を表わす式として利用できるかどうかを検討してみる。いま $\Delta P = P_b - P_t$ とおけば (1) 式はつぎのようになる。

$$P_b^2 - P_t^2 = KW^{1.7} \dots \dots \dots (2)$$

東田第 1 高炉の操業データから $P_b^2 - P_t^2$ と W との関係とを求めると Fig. 1 のようになる。Fig. 1 から明らかなように (2) 式の関係はかなり強い相関が認められ, つぎのような回帰式を得た。

$$P_b^2 - P_t^2 = 6.91W^{1.7} \dots \dots \dots (3)$$

つぎに通気抵抗を一定にした場合の送風量と炉頂圧と

* 討論会講演論文原稿受付日: 昭和41年 5月16日

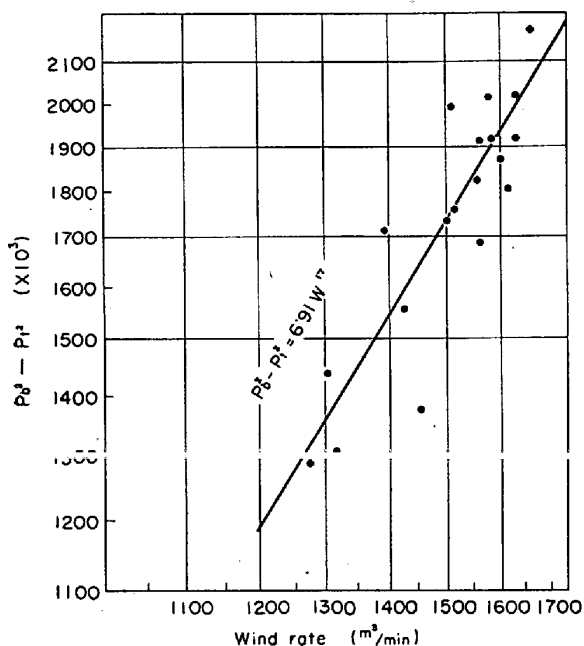


Fig. 1. The relationship between wind rate and blast pressure.

の関係を検討してみる。炉内での圧力損失を $P_b - P_t = \theta$ とすれば (2) 式はつぎのように変形できる。

$$P_t = (KW^{1.7}/\theta - \theta)/2 \dots\dots\dots (4)$$

したがって高圧操業時での通気抵抗をきめれば送風量に見合った炉頂圧は (4) 式より求められる。

2.3 羽口風速を一定にする場合

羽口風速 U_T は次式で与えられる。

$$U_T = W(273 + T_b)/(273 \times 60) N_T \cdot A_T (1033 + P_b) \dots\dots\dots (5)$$

同一高炉で送風温度が一定の場合、羽口風速が一定になるような送風量と炉頂圧との関係を求める。(5)式において U_T, T_b, N_T, A_T は一定であるから (5) 式はつぎのように表わされる。

$$W = K'(1033 + P_b) \dots\dots\dots (6)$$

(6)式に(2)式を代入して送風量と炉頂圧との関係を求めると(7)式のようなになる。

$$P_t = \sqrt{(W/K' - 1033)^2 + KW^{1.7}} \dots\dots\dots (7)$$

2.4 シャフトガス流速を一定にする場合

シャフトにおけるガスの空塔速度 U_s は次式で求められる。

$$U_s = (79 \times 1033)(273 + T_s)W / (273 \times 60)(N_2)(1033 + P_s)A_s \dots\dots\dots (8)$$

いまシャフトにおける平均ガス圧を $P_s = (P_b + P_t)/2$ と考え、この位置でのガス流の温度、ガス成分 (N_2) を一定とし、シャフトでの空塔速度を一定にして操業する場合(8)式はつぎのように変形できる。

$$W = K''\{1033 + (P_b + P_t)/2\} \dots\dots\dots (9)$$

(9)式と(2)式よりシャフトガス流速を一定にした場合の送風量と炉頂圧との関係は(10)式のようなになる。

$$P_t = (W/K'' - 1033) - KW^{1.7}/4(W/K'' - 1033) \dots\dots\dots (10)$$

2.5 炉口でのガス流速を一定にする場合

Table 1. Operating condition for normal top pressure.

Ratio of production rate to inner volume	1.3 t/day/m ³
Wind rate	1210m ³
Top pressure	0.05 kg/cm ²
Blast temperature	950°C
Number of tuyere	16
Area of tuyere	0.0154m ²
Average temperature in shaft	850°C
Top temperature of gas	200°C
N ₂ % of gas	56%
Coke and oil rate	550 kg/t pig
Escape ratio of wind volume	3%

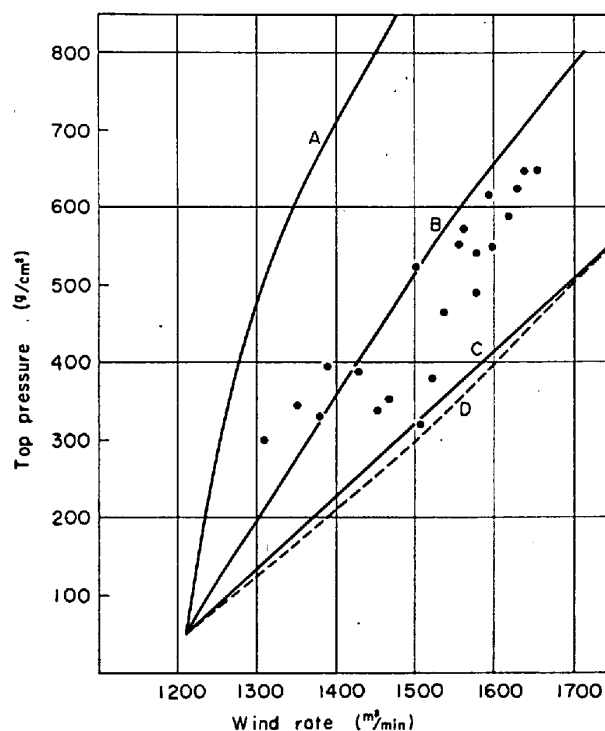


Fig. 2. The relationship between wind rate and top pressure.

炉口でのガス流速は炉頂ガスの量、温度、圧力、成分によって決まり次式で示される。

$$U_m = (79 \times 1033)(273 + T_t)W / (273 \times 60)(N_2)(1033 + P_t)A_m \dots\dots\dots (11)$$

炉口におけるガス速度を一定にして操業する場合、他の条件が一定であれば、送風量と炉頂圧との関係は次式で求まる。

$$P_t = K'''W - 1033 \dots\dots\dots (12)$$

2.6 高炉への適用

以上の検討結果を高炉に適用してみる。ここでは東田第1高炉(892m³)を対象として考える。普通圧時での操業が Table 1 に示すような操業条件であると仮定し、そ

それぞれの基準に従って送風量および炉頂圧を上昇させるものとする。この場合(1)式~(12)式での定数はそれぞれつぎのようになる。

$$K = 6.91, K' = 5.51 \times 10^{-1},$$

$$K'' = 7.24 \times 10^{-1}, K''' = 9.48 \times 10^{-1}$$

この定数を代入して各基準曲線を求めたのが Fig. 2 である。Fig. 2 の点は東田 1 高炉の実際の操業データを示したもので、B線とC、D線の間に位置している。すなわち高圧操業では普通圧操業時よりも炉内ガス流速が速く、圧力損失の若干少ない条件で操業していることになる。これらのことを考えれば高炉頂圧で円滑に操業できる範囲はB線とD線との間にあるものと思われる。しかしここで検討したのは東田第 1 高炉の実績のみに基づいており、さらに検討を要する問題である。圧力損失一定のD線は原料条件に大きく左右され、原料性状が改善されれば右方に移動する。その場合にはさらに増風が可能となろう。

3. 送風量とコークス比との関係

高圧操業時のコークス比の変動を考える場合には、高圧による鉱石の被還元性の向上と送風量の増加による装入物の降下時間の短縮のための間接還元率の低下とを考慮する必要がある。すなわちこの 2 つの組合せによつてコークス比は変動し、定性的には上に凹の曲線になることが予想される。

普通圧操業の場合の送風量とコークス比との関係については当所で次のような関係式を求めている²⁾。この式を利用して高圧操業の場合のコークス比を推定してみる。

$$Z = AW + BY \dots\dots\dots (13)$$

$$A = 1/(C) [0.225 + (C - Q) / q_1 + 12(H_2O)/18 + H - 0.86(\text{oil})]$$

$$B = 1/(C) [C - (q_2 + q_3) / q_1 + F]$$

$$dY/dW = 16/22.4 \cdot 1/[O]_p \cdot \eta_{CO+H_2}$$

$$d(CO+H_2)/dW + 16/12 \cdot 1/[O]_p \cdot dS/dW \dots\dots\dots (14)$$

$$\eta_{CO+H_2} = 0.58 t / (t + 77) \dots\dots\dots (15)$$

$$t = 1000V' / [(AW + BY) / \alpha + 93.5Y / (Fe) \beta] \dots\dots\dots (16)$$

いま高炉の操業条件が Table 2 に示すような基準で操業されているとすれば(13)式および(14)式はそれぞれつぎのように表わされる。

$$Z = 0.425W - 0.108Y \dots\dots\dots (17)$$

$$Y = 0.394W + 5.70V'$$

$$\ln(143W + 68Y + 2532V') / 2532V' \dots\dots\dots (18)$$

高圧操業の場合については炉内圧の上昇による鉱石の被還元性の向上を考慮しなければならない。そこで(15)式のガス利用率の関係式に高圧の影響を入れて考える。

$$\eta_{CO+H_2} = 0.58 t / (t + 77) \cdot R_p / R_0 \dots\dots\dots (19)$$

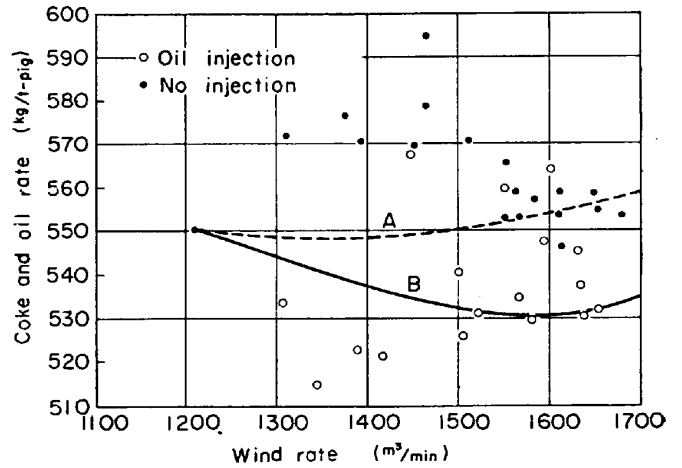
ガス圧力と学振還元率(R)との関係については当所の実験結果から次のような回帰式が得られた。

$$R = 54 + 16 \ln P_G \dots\dots\dots (20)$$

(20)式を(19)式に代入して高圧時でのガス利用率を求めれば、高圧操業でのコークス比の変動を求めることができる。Fig. 3 は圧力損失一定に操業した場合の送風量とコークス比との関係を求めたものである。Fig. 3 より明

Table 2. Operating condition for calculation of coke rate.

Blast temperature	950°C
Blast moisture	25 g/Nm ³
Density of oil	0.033 kg/Nm ³
Chemical composition of pig iron	
Carbon	4.50%
Silicon	0.65%
Manganese	0.70%
Phosphor	0.15%
Ferrous content in iron ore	61%
Oxygen connecting with Fe	0.39 kg/kg·pig
Bulk density of ore	2.20
Ash content in coke	10%
Bulk density of coke	0.41
Slag volume	300 kg/t
Heat loss	18%
Volume of indirect reduction zone	264 m ³
Rate of compression	6.8%



A : Normal top pressure B : High top pressure
Fig. 3. The relationship between wind rate and coke rate.

らかのように高圧操業ではある送風量まではコークス比の低下があり、それ以上になると逆にコークス比は上昇するのが認められる。東田第 1 高炉の場合には 1600~1650 m³/min の送風のとき最低値がある。もちろんこの計算にはかなりの仮定が入っているため正確とはいえないが、高圧操業でのコークス比変動に対する 1 つの指針になると考えられる。

4. 結 言

高圧操業における送風と炉頂圧、コークス比の関係について理論的に解析しつぎの結論を得た。

- 1) 送風量に見合った炉頂圧のかけ方は炉内ガス流速および通気性を考慮して考えるべきである。
- 2) コークス比は高圧操業の場合ある送風量までは低下し、さらに送風量が増加すると上昇する。

文 献

- 1) 児玉, 他: 鉄と鋼, 52 (1966) 3, p. 295
- 2) 光井, 他: 鉄と鋼, 52 (1966) 9, p. 1410