

(討-2) 高炉の高圧操業について

富士製鉄, 室蘭製鉄所

米沢泰三・永井忠弘・○野崎 充

High Top Pressure Operation of Blast Furnace.

Taizo YONEZAWA, Tadahiro NAGAI and Mitsuru NOZAKI.

1. 緒 言

高炉の高圧操業の各種の効果を確かめるため、室蘭第3高炉において、5回にわたって試験を繰り返してきた。これらの諸試験の結果はすでに報告済みであるが⁽¹⁾、高圧操業のワークス比などへの影響について、かなり定量的な関係が得られている。本報告では、これまでの諸試験を総括して、若干の考察を試みた。

2. これまでの試験の結果と若干の考察

2.1 送風量—送風圧—炉頂圧の関係

Fig. 1に、第5次試験での炉頂圧 (P_2 , atg) と送風圧 (P_1 , atg) の関係を、送風量 (V_B , Nm³/min) をパラメーターとして示した。データは出鉄減圧などがなく、炉況が安定している時から採取したものであり、大体各番の平均値である。ただし、送風量としては、たとえば、1900±50 を 1900 として示してある。

Fig. 1から、(1) 炉頂圧 1 kg/cm² の上昇につき、送風圧は 0.7~0.8 kg/cm² 位しか上昇しないようであること、(2) 送風量と送風圧とは比例的関係にはなく、送

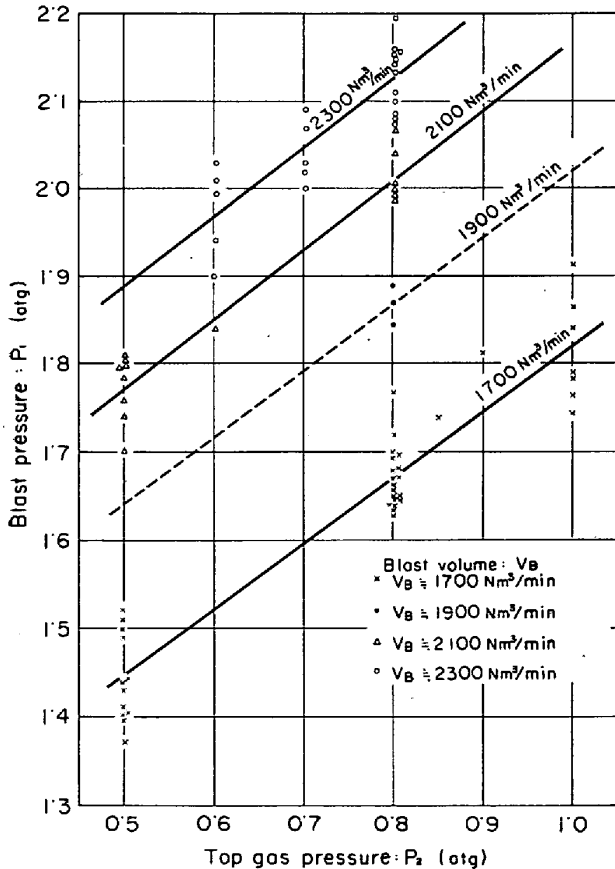


Fig. 1. Relations between top gas pressure, blast pressure and blast volume.

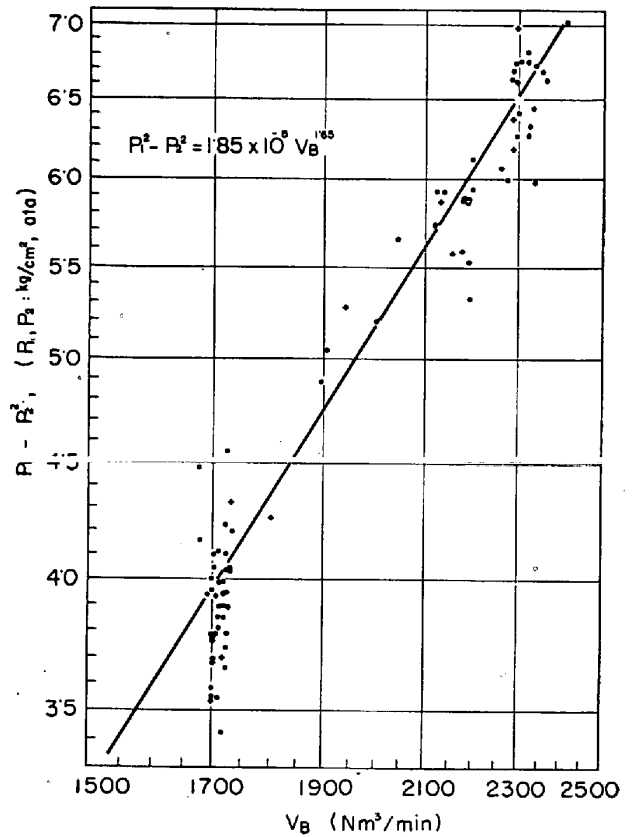


Fig. 2. Relation between V_B and $P_1^2 - P_2^2$.

風量を上げた割には送風圧が上昇しないことが示されている。

Fig. 1の関係をさらに詳細に検討するため、 V_B と $P_1^2 - P_2^2$ (P_1, P_2 : kg/cm², ata) について考えると、Fig. 2のようになりこの試験範囲内での各種の異なった条件の下で、 P_1, P_2, V_B の3者の関係が次式のように一義的に示されることが判明した。

$$P_1^2 - P_2^2 = 1.85 \times 10^5 V_B^{1.65} \dots\dots\dots (1)$$

ここで求められた(1)式は、室蘭第3高炉の、この試験期間での特性を示すものであろうが、一般にはつぎのような形で示されると考えられる。

$$P_1^2 - P_2^2 = K V_B^\alpha \dots\dots\dots (2)$$

(1)および(2)式において

P_1, P_2 : 送風圧および炉頂圧 (kg/cm², ata)

V_B : 送風量 (Nm³/min), K : 定数

α : 定数 (一般には 1.6~1.8 位になると思われる)

したがって、送風量一定で炉頂圧を変える時の送風圧の変化は次式で予想されよう。

$$2P_1 \cdot dP_1/dP_2 - 2P_2 = 0 \dots\dots\dots (3)$$

すなわち

$$dP_1/dP_2 = P_2/P_1 \dots\dots\dots (4)$$

たとえば、送風圧 1.5 kg/cm²(atg)、炉頂圧 0.6 kg/cm²(atg) で操業している場合、送風量一定で炉頂圧を 0.8 kg/cm²(atg) まで高めようとするなら、送風圧の上昇 ΔP_1 は近似的につぎのようになるだろう。

$$dP_1/dP_2 = (0.6 + 1.0)/(1.5 + 1.0) = 0.64 \dots\dots (5)$$

$$\therefore \Delta P_1 = 0.64 \times 0.2 = 0.13 \text{ (kg/cm}^2) \dots\dots (6)$$

すなわち、この場合、炉頂圧 0.2 kg/cm² の上昇によ

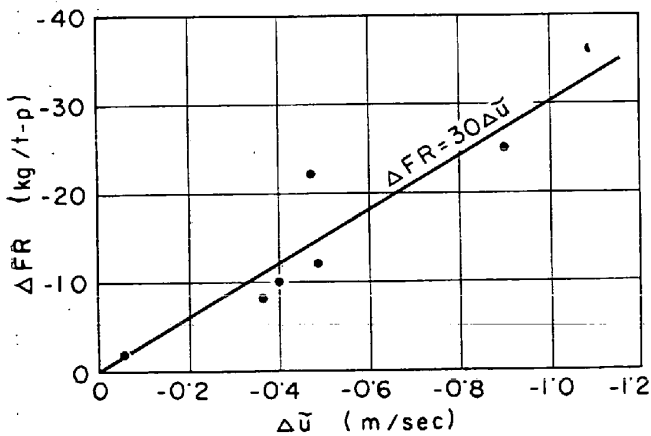


Fig. 3. Relation between ΔFR and $\Delta \tilde{u}$.

つて、送風圧は 0.13 kg/cm^2 しか上昇しないのであり、同時に炉圧損失は $1.5 - 0.6 = 0.9 \text{ kg/cm}^2$ から、 $1.63 - 0.8 = 0.83 \text{ kg/cm}^2$ に減少することになる。

2.2 高圧操業と燃料比の関係

これまでの5次にわたる高圧操業試験の結果を、炉内計算ガス速度の低下 $\Delta \tilde{u}$ と補正燃料比の低下 ΔFR について総括するとつぎのようになる。

	$\Delta \tilde{u} (\text{m/sec})$	$\Delta FR (\text{kg/t-p})$
第1次試験	-0.75	-42
第2次試験	-0.40	-10
第3次試験	-0.05	-2
第4次試験	-0.47	-22
第5次試験		
I~II期	-0.36	-8
I~III期	-0.90	-25
I~IV期	-1.09	-36
I~V期	-0.49	-12

上記の関係を図示すると、Fig. 3 のようになり、燃料比とガス速度には極めて強い直線関係が見出される(ただし、第1次試験の結果は異常に感じられるので除いた)。

Fig. 3 の関係は次式で示される。

$$\Delta FR = 30 \Delta \tilde{u} \dots \dots \dots (6)$$

すなわち

$$FR = 30 \tilde{u} + a \dots \dots \dots (7)$$

(6)および(7)式の関係に基づいて若干の計算を行なうと、燃料比、送風量、炉頂圧、出鉄量の4者について一定の関係が定められる⁴⁾。計算結果の1例を出鉄量および炉頂圧をパラメータとしてFig. 4に示した。Fig. 4から高圧操業についてつぎのようなことがいえよう。

1) 炉頂圧 1 kg/cm^2 当たりの燃料比への効果は、常圧から 0.5 kg/cm^2 の範囲で -54 kg/t-p であるが、 0.5 から 1.0 kg/cm^2 の範囲では -40 kg/t-p となり、炉頂圧の高まるにつれて徐々に減少する傾向にある。

2.3 高圧操業と生産性について

高炉の圧損失が一般に次式で示されることはすでに述べた。

$$P_1^2 - P_2^2 = KV_m^\alpha \dots \dots \dots (8)$$

いま、常圧高炉 ($P_2 = 1.0$) が、ある限界圧損失(限

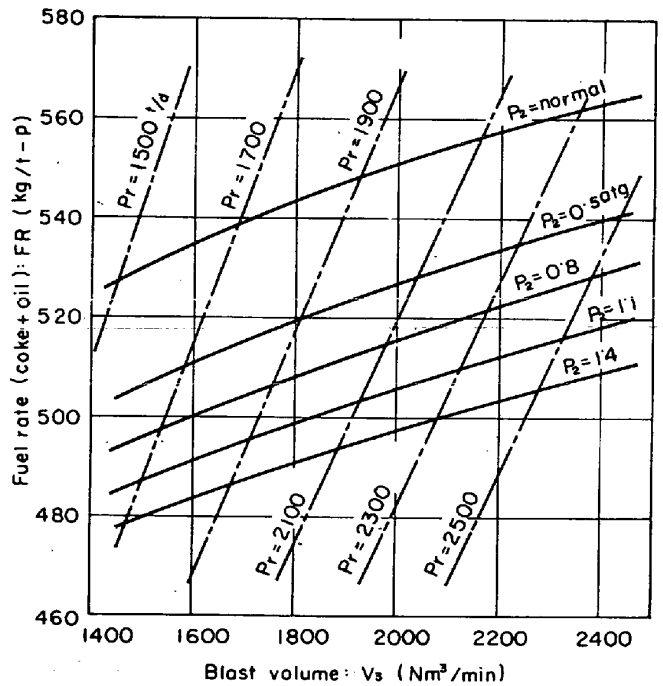


Fig. 4. Effect of high top pressure operation on fuel rate.

界送風量)の下で操業していたとすれば

$$P_{m0}^2 - 1 = KV_{m0}^\alpha \dots \dots \dots (9)$$

ここで、

P_{m0} : 常圧高炉での限界送風圧 (kg/cm^2 , ata)

V_{m0} : P_{m0} における送風量 (Nm^3/min)

炉頂圧を高めると、送風圧の上昇は炉頂圧の上昇分より小さいから、同一送風量における圧損失が低下し、限界圧損失に達するのに、常圧高炉よりも多量の送風が可能となる。高圧にした場合の限界送風量 V_m は、つぎのようにして推定される。

$$P_1 - P_2 = \sqrt{KV_m^\alpha + P_2^2} - P_2 = \Delta P_{m0} \dots \dots \dots (10)$$

$$\text{ここで、} \Delta P_{m0} = P_{m0} - 1 \dots \dots \dots (11)$$

(10)式より

$$KV_m^\alpha = 2\Delta P_{m0} \cdot P_2 + \Delta P_{m0}^2 \dots \dots \dots (12)$$

(12)式に(9)および(11)式を代入すると、

$$KV_m^\alpha = KV_{m0}^\alpha + 2(P_{m0} - 1) \cdot (P_2 - 1) \dots \dots \dots (13)$$

すなわち、

$$\left(\frac{V_m}{V_{m0}}\right)^\alpha = 1 + \frac{2(P_{m0} - 1)(P_2 - 1)}{KV_{m0}^\alpha} \\ = 1 + \frac{2(P_{m0} - 1)(P_2 - 1)}{P_{m0}^2 - 1} = 1 + \frac{2(P_2 - 1)}{P_{m0} + 1} \dots \dots \dots (14)$$

$$\text{すなわち、} \frac{V_m}{V_{m0}} = \left\{ 1 + \frac{2(P_2 - 1)}{(P_{m0} + 1)} \right\}^{1/\alpha} \dots \dots \dots (15)$$

(15)式から、一般に α がわかっているならば、高圧操業を行なうと、どれだけ送風量を増やすことが可能であるかを推定できる。いま、1例として、 $\alpha = 1.65$ についての計算結果を Fig. 5 に示した。Fig. 5 から炉頂圧 1 kg/cm^2 当たり 30% 前後の増風が可能であり、したがって、高圧操業の燃料比への効果を考慮に入れなくても、30%程度の生産性の向上を期待し得ることがわかる。ここで室蘭第3高炉(内容積 1219 m^3) について考えれば、 $\Delta P_{m0} =$

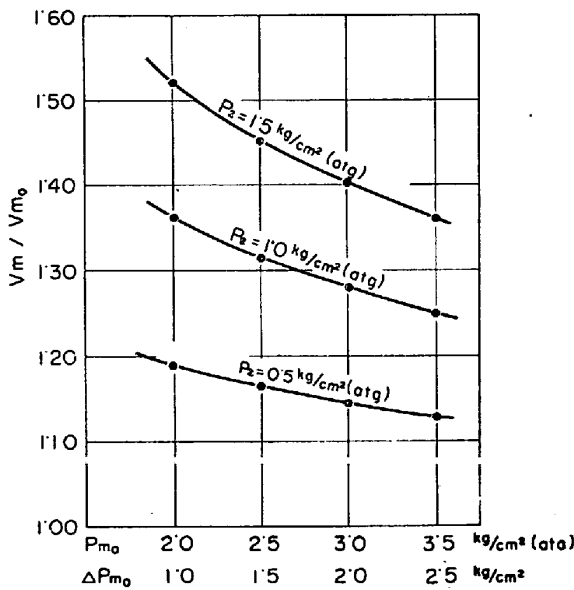


Fig. 5. Effect of top gas pressure on productivity.

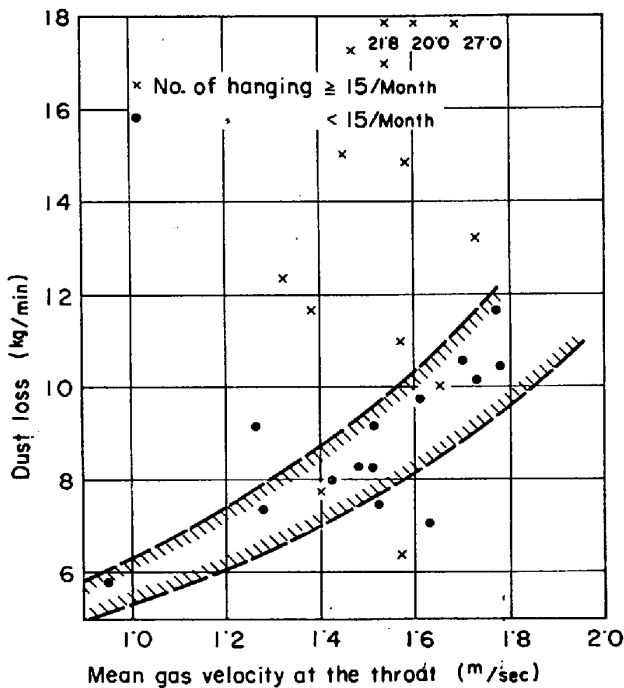


Fig. 6. Relation between mean gas velocity at the throat and dust loss (dust catcher dust).

1.60 (この時, Fig. 2 より, $V_{m0}=2100 \text{ Nm}^3/\text{min}$) 位であるから, 炉頂圧を 0.8 kg/cm^2 まで高めることによつて, 24%の増風が可能となり, 設備上および作業上の制約を考えなければ $2600 \text{ Nm}^3/\text{min}$ の送風(2600t/day, 出鉄比: 2.24) ができることを示している。また, Fig. 5 から, $\alpha=1.65$ という条件の下では, 一般に限界圧損失の大きい高炉 (例えば断面の大きな高炉や, 通気性のよい高炉) では, 高圧操業の生産性に対する効果を上げるためには, より高い炉頂圧を必要とすることが推定される。なお, α の値によつて, V_m/V_{m0} の値は変わるが通常の高炉では $\alpha=1.6\sim 1.8$ 程度にあると思われる

ので Fig. 5 で示される数値から大きくはずれることはない。また, 高圧操業によつて燃料比が低下すれば, 鉄鉄 1 t 当りの所要風量が減少し, Fig. 5 で示される増風の効果以上に生産性が高まることになる。

高圧操業の生産性に対する効果については, これまでも色々と論議されているが, 少なくとも炉頂圧 1 kg/cm^2 当り, 30%位の生産性の向上は期待できるようなのである。

2.4 ダスト発生量について

ダスト発生量は炉口部のガス速度と密接な関係があるはずである。Fig. 6 に第3高炉の38年7月から41年1月までのダストキッチャーでのダスト発生量 DR (月平均で kg/min に換算) と炉口平均ガス速度 \bar{U}_g (m/sec) の状況をプロットした。Fig. 6 からダスト発生量は装入原料の粉量や粒度構成によつて当然変わるであろうが, それらを見ても, 炉況順調時には炉口平均ガス速度とかなり密接な関係があること, および炉況の悪い時にはダスト発生量が著しく増大することが示されている。

一般に球形粒子の終末速度 U_∞ は次式で示される⁶⁾。

$$U_\infty^2 = 4gd_p(\rho_p - \rho) / 3\rho C_\infty \dots\dots\dots (16)$$

ここで, $\rho_p \gg \rho$ であれば,

$$U_\infty^2 = 4gd_p\rho_p / 3\rho C_\infty \dots\dots\dots (17)$$

(16) および (17) 式において,

U_∞ : 終末速度 (m/sec), g : 重力の加速度 (m/sec^2)

ρ_p : 粒子の比重 (kg/m^3), ρ : ガスの比重 (kg/m^3)

C_∞ : U_∞ に対応する抵抗係数

さらに, C_∞ はつぎのごとく示される⁶⁾。

$$C_\infty = 0.40 + 40 / N_{Re\infty} \dots\dots\dots (18)$$

$$N_{Re\infty} = d_p \cdot U_\infty \cdot \rho / \mu \dots\dots\dots (19)$$

ここで, $N_{Re\infty}$ は, U_∞ に対応するレイノルズ数, μ はガスの粘度 ($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{sec}$) である。

(17), (18), (19) 式より

$$(4g\rho_p/3\rho) d_p^3 - 0.40U_\infty^2 \cdot d_p - 40U_\infty \cdot \mu / \rho = 0 \dots\dots\dots (20)$$

さて, Fig. 7 に当所 2, 3, 4 高炉のダストの粒度分

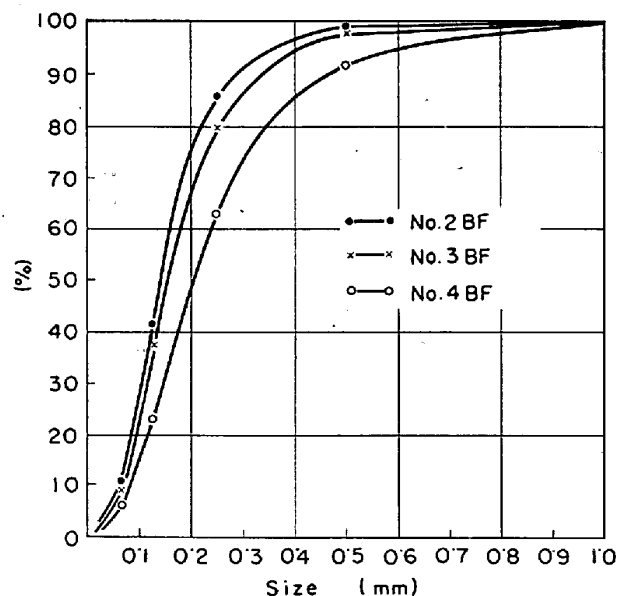


Fig. 7. Examples of flue dust particle size distribution (dust catcher samples).

Table 1. Operational data when dusts were sampled.

	No. 2 BF	No. 3 BF	No. 4 BF
Blast vol. (Nm ³ /min)	1600	1550	2250
Top gas vel. (Nm ³ /sec)	38.0	35.7	51.5
Top gas temp. (°C)	200	200	200
Top gas press. (kg/cm ²)	0.80	0.80	0.80
\bar{u}_g (m/sec)	0.95	0.98	1.74
Gas density (kg/m ³)	1.40	1.40	0.78
Coke density (kg/m ³)	1100	1100	1100
Ore density (kg/m ³)	3000	3000	3000
Gas viscosity (kg·m/sec)	0.22×10^{-4}	0.22×10^{-4}	0.22×10^{-4}

布の 1 例を、またこの時の高炉操業データおよび(20)式より d_p を求めるのに必要な諸数値を Table 1 に示した。

Table 1 より(20)式によつて各高炉のその時の炉口平均ガス速度で持ち出し得るダストの粒子径を概算するとつぎのようになる(ただし、ダスト粒子は球形と仮定)。

	鉄石径 (mm)	コークス径 (mm)
第 2 高炉	0.140	0.260
第 3 高炉	0.150	0.270
第 4 高炉	0.200	0.370

この計算は、炉口ガス速度として、単純な平均速度を用いたり、ダストの粒子を完全な球形と仮定するなど、非常に簡略化した結果であるが、ダスト粒度構成の 80% 以上が説明づけられるようである。

3. 結 言

室蘭第 3 高炉で、高圧操業について種々検討を加えた結果、つぎのようなことが判明した。

1) 送風量、送風圧、炉頂圧は、 $P_1^2 - P_2^2 = KV_B \alpha$ の形で定量的に結ばれている ($\alpha < 2$)。

2) 燃料比は、炉内ガス速度とほぼ直線の関係がある。炉頂圧 0.1 kg/cm² の上昇につき、燃料比は 4~5 kg/t-p 低下するが、その低下の度合は炉頂圧上昇につれて減少すると推察される。

3) 高圧操業により生産性は増大するが、圧損失から考えると、炉頂圧 1 kg/cm² 当たり 30% 位の生産性の向上が期待されよう。

4) ダスト発生量およびその粒度構成は、炉口部のガス速度と密接な関係がある。

文 献

- 1) 横山, 他: 富士技報, 13 (1964) 1, p. 42
- 2) T. YAMADA: Iron & Steel Eng., 42 (1965) 6, p. 85
- 3) 山田, 他: 鉄と鋼, 50 (1964) 11, p. 1599
- 4) 米沢, 他: 鉄と鋼, 52 (1966) 3, p. 319
- 5) 大山: 化学工学 II, 1963, p. 29
- 6) DALLAVALLE: Micromeritics, 2nd Edition, p.23

(討-3) 水江第 1 高炉の高圧操業設備について

日本鋼管, 水江製鉄所

○堀江 重栄・宮本 健彦

Installations of Mizue No. 1 Blast Furnace for High Top Pressure Operation.

Shigeyoshi HORIE and Takehiko MIYAMOTO.

1. 緒 言

日本鋼管(株)水江製鉄所第 1 高炉はわが国最初の炉頂高圧高炉(内容積 1709 m³, 炉床径 9m)として計画され昭和 37 年 11 月火入されたものである。稼動以来順調な操業を続け、昭和 39 年 10 月以来出鉄比 2.0 t/m³ 以上を長期にわたつて維持している。この間炉頂圧は 0.4 kg/cm² を続けており、この高生産性に貢献している。昨年の成績を Table 1 に示す。0.4 kg/cm² 以上の炉頂圧による操業を行なつていないのは送風機能力によるものである。

わが国において炉頂高圧操業の採用が比較的遅かつた 1 つの原因は炉頂の圧力を増加することによる炉頂装置の保守に対する危惧にあつた。本高炉においてはすでに稼動以来 3 年半を経過し 400 万 t 近い出鉄を行なつているが、この間小ベルを 2 回交換しているが大ベルはとくに問題なく、炉頂装置の保守上取立つた点もない。この間の状況について報告する。

2. 高圧設備の概要

2.1 炉頂設備

本高炉の炉頂設備は Fig. 1 に示されるごとくである。装入装置は、デストリビューターとしてはマッキー式を用い、2 ベル型を使用している。炉頂圧上昇に伴ない、

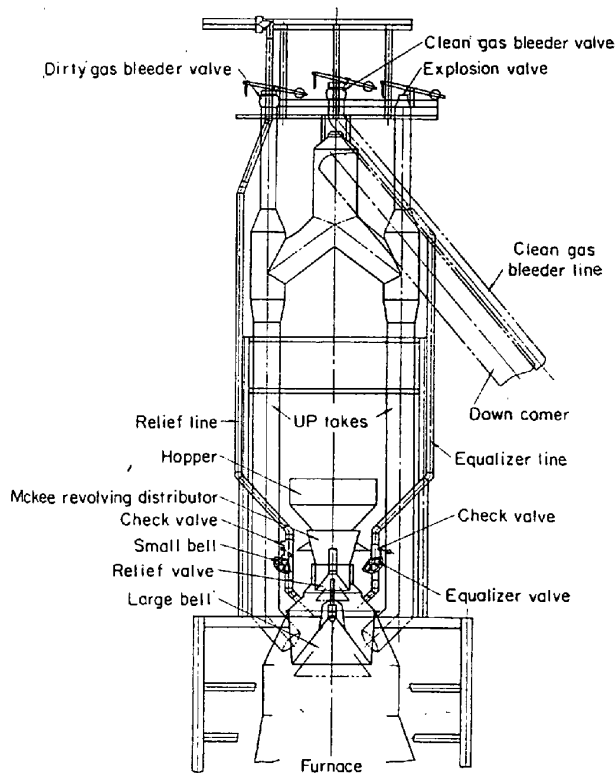


Fig. 1. Furnace top equipment.