

高炉の静特性におよぼす操業条件変更の効果について*

八木順一郎**・佐々木恵一***・鞭 巖****

Effect of the Change in Operating Conditions on the Static Characteristics of Blast Furnace

Jun-ichiro YAGI, Keiichi SASAKI and Iwao MUCHI

Synopsis:

On the basis of blast furnace (A), the changes of the production rate of pig iron and the carbon ratio caused by the change of the operating conditions, such as top gas pressure, average diameter of iron ores, blast volume, blast temperature, ratio of steam injection and ratio of oxygen enrichment, have been determined with the aid of the mathematical model of a blast furnace^{1)~6)} which was developed hitherto. Results obtained by use of digital computer (HITAC 5020E) are illustrated in Figs. 1~9.

The production rate of pig iron increases with the increase in pressure of top gas, blast temperature, ratio of steam injection and ratio of oxygen enrichment, but the rate of the increase in production rate of pig iron for decreases with the increase in these operating factors. It is found that there is a similar tendency of the effect of the decrease in diameter of iron ores.

The carbon ratio decreases with increase in top gas pressure, blast temperature and ratio of steam injection, but its variation is little in the lower region of the oxygen enrichment and increases with the oxygen enrichment in the upper region.

For blast volume, the production rate of pig iron and the carbon ratio increase in proportion to the increase in the blast volume.

(Received May 2, 1968)

1. 緒 言

高炉の実操業においては出銑量の増加とカーボン比の低下が望まれ、高圧操業、装入粒子の粒子径の減少および整粒、高温送風、調湿送風、酸素富化送風、重油の吹き込み操業などによつて生産性の向上がはかられているが、これらについての理論的な説明はほとんどなされていない。

本報では、高炉の操業改善のための基礎資料を求めるために、すでに報告した数学的モデル^{1)~6)}を用い、操作条件を広範囲に変化させた場合に出銑量やカーボン比と操作条件との関係について定量的な推算を行ない、定常状態下での反応装置としての高炉の特性を調べたが、本報で得た結果は高炉操業の改善に活用できるものと考えられる。

2. 計 算 方 法

著者らは、高炉全体にわたる総括物質収支と熱収支、羽口レベルでの理論火焰温度を求めるための断熱系としての取り扱い、および、CO ガスによる間接還元反応、カーボン・ソリューション反応、溶融 FeO の直接還元反

応、石灰石の熱分解反応、H₂還元反応、CとH₂Oの反応の各反応速度を考慮した微分収支モデルからなる数学的モデルを展開し、このモデルの計算方法についてすでに報告したが、ここではこのモデルを利用し、各操作条件を変化させた場合について大型電子計算機（東京大学大型計算機センター HITAC 5020E）を使用して計算した。

3. 計算結果および考察

3.1 高圧操業

高圧操業はすでに実際の高炉に应用されているが、現段階では炉頂圧約 2 atm までの昇圧が実用化され、良好な操業成績をあげている⁷⁾。

ここでは、どの程度まで昇圧すればよりすぐれた操業成績をおさめることができるかを、高炉の数学的モデルを使つて理論的に検討した。Fig. 1 に炉頂圧と出銑量お

* 昭和43年4月本会講演大会発表

昭和43年5月2日受付

** 名古屋大学大学院

*** 住友金属工業(株)

**** 名古屋大学工学部 工博

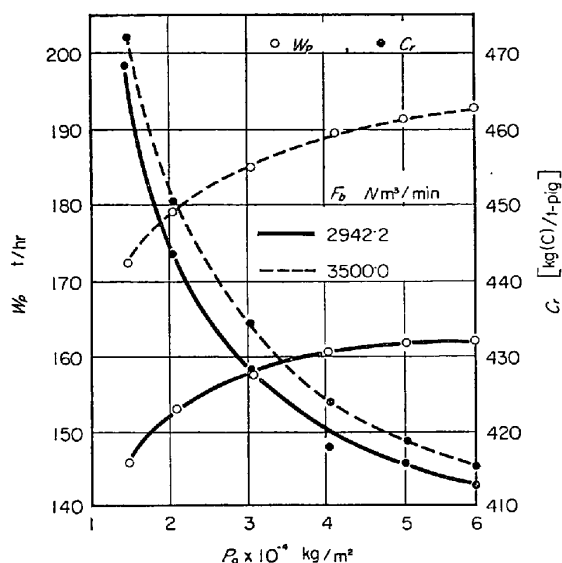


Fig. 1. Effect of the top-gas pressure P_0 on the production rate of pig iron W_p and carbon ratio C_r in B. F. (A) under the operating conditions of $d_{p1}=1.935 \text{ cm}$, $T_b=1366^\circ\text{K}$, $w_{st}=23.2 \text{ g/Nm}^3$, $x_{O_2}=0$.

びカーボン比の関係を示した。この計算結果から、送風量が $3000 \sim 3500 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 程度では、炉頂圧を約 4 atm まで昇圧することは出鉄量の増大とカーボン比の減少に大きな効果があること、 4 atm 以上に圧力を上昇させても出鉄量やカーボン比の改善はあまり期待できないことがわかる。

これは昇圧を行なうことは、炉内へ供給される熱および物質の量を増加させることではなく、炉内ガスの濃度と滞留時間の増加により、反応の推進力が変化し、鉱石の還元反応の反応速度が増加する効果があるものと解釈できる。また反応速度の変化に伴って、伝熱現象も間接的に影響される。すなわち昇圧を行なうことによつて、ガスの利用率が増大する効果がある。その結果は炉頂でのガス温度と CO/CO_2 の値の低下となつて現われる。 4 atm 付近から出鉄量やカーボン比の変化が少なくなるのは、 CO/CO_2 の値が酸化鉄の還元反応の平衡値に近づくためである。

3.2 鉱石の粒子径

鉱石の粒子径を減少させることは粒子側の反応推進力を増加させることになり、出鉄量の増加とカーボン比の減少が期待できる。しかし、粒子径を極端に小さくすることは圧降下に大きな影響をおよぼすが、ここでは圧降下については考慮しないで、定常操業下での鉱石の粒子径の変化に伴う出鉄量およびカーボン比の影響について計算した結果を Fig. 2 に示した。Fig. 2 から、炉頂圧が $2.033 \times 10^4 \text{ Kg/m}^2$ では、鉱石の粒子径が約 15 mm

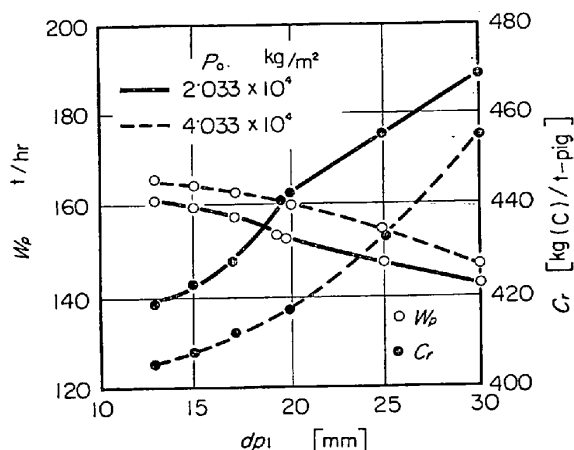


Fig. 2. Effect of the diameter of iron ores d_{p1} on the production rate of pig iron W_p and carbon ratio C_r in B. F. (A) under the operating conditions of $F_b=2942.2 \text{ Nm}^3/\text{min}$, $T_b=1366^\circ\text{K}$, $w_{st}=23.2 \text{ g/Nm}^3$, $x_{O_2}=0$.

まで、また、炉頂圧が $4.033 \times 10^4 \text{ Kg/m}^2$ では約 17 mm まで減少させると、出鉄量の増大とカーボン比の減少が著しいが、それら粒子径以下では出鉄量およびカーボン比の改善はそれほど大きくないことがわかる。

現在、わが国の高炉では通常粒径約 20 mm の鉱石が使用されているが、これを 15 mm 前後まで下げるとさらにすぐれた操業成績が得られるものと考えられる。

3.3 送風量

実際の高炉の操業結果から、一般に、送風量を増大すると出鉄量も増加することが知られている。しかし、増風は圧降下や吹きぬけおよび溢流現象などのような炉況の不調の原因をまねくことにもなるので、むやみに増大させることはできないが、ここではこれらの現象については考えないで、送風量を増加した場合について検討したが、その結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、送風量を増加させると出鉄量もカーボン比も直線的に増加していることがわかる。これは、送風量の増加によつて、炉内に供給される熱および還元能力が増加するので出鉄量が増加する。しかし、炉内におけるガスの滞留時間が減少するので層頂でのガス温度は上昇し、 CO/CO_2 の値は増加する。その結果カーボン比が増大することになる。カーボン比を大きくしないためには、送風量をあまり大きくすることは不利であることがわかる。しかし、 $P_0=2.033 \times 10^4 \text{ Kg/m}^2$ の場合と $P_0=5.033 \times 10^4 \text{ Kg/m}^2$ の場合とを比較してみると、炉頂圧が高い場合のほうが低い場合に比べて出鉄量の増加率が少し大きくなり、カーボン比の増加率は多少小さくなっていることがわかる。すなわち、送風量を増加させる場合には、層頂圧を高くしておくほうが有利であることが推察される。

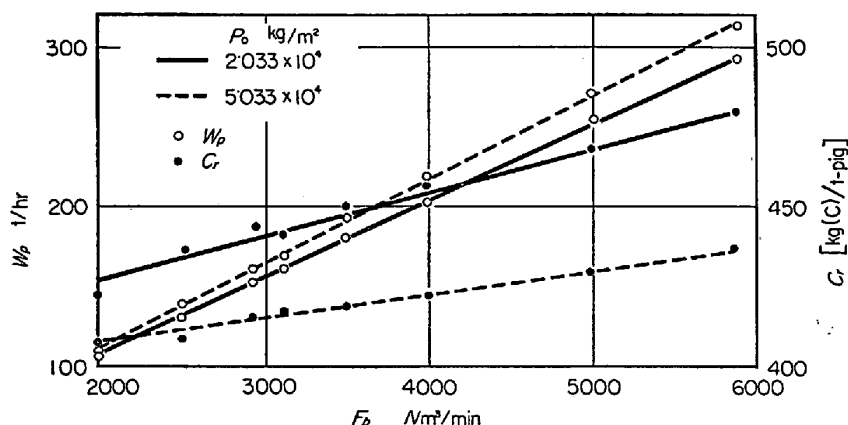


Fig. 3. Effect of the blast volume F_b on the production rate of pig iron W_p and carbon ratio C_r in B.F. (A) under the operating conditions of $d_{p1}=1.935$ cm, $T_b=1366^\circ\text{K}$, $w_{st}=23.2$ g/ Nm^3 , $x_{O_2}=0$.

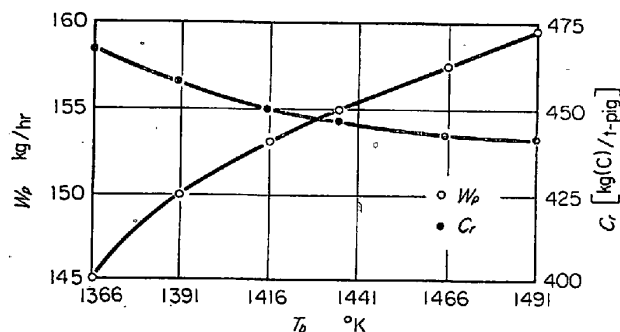


Fig. 4. Effect of the blast temperature T_b on the production rate of pig iron W_p and carbon ratio ratio C_r in B.F. (A) under the operating conditions of $d_{p1}=1.935$ cm, $P_0=1.433 \times 10^4$ Kg/ m^2 , $F_b=2942.2$ Nm^3/min , $w_{st}=23.2$ g/ Nm^3 , $x_{O_2}=0$.

3.4 高温送風

高圧操業や粒子径が小さい鉱石を装入する操業では、間接還元反応の反応速度の増加に伴って起こる出鉄増と低カーボン比を得ることを期待しているのに対し、高温送風では、炉内に送り込まれる熱量が増加するため溶解能力を大きくすること、および、高温のために還元反応速度が速くなることによつて生鉄量の増加とカーボン比の減少が期待される。

ここでは他の操業条件をすべて一定にして送風温度だけを上昇させた場合の計算結果を Fig. 4 に示した。Fig. 4 から、送風温度約 1430°K までは出鉄量の増加率は大きく、カーボン比も減少している。しかし、 1430°K 以上になると出鉄量の増加率は小さくなり、カーボン比はほとんど減少しなくなっている。これは送風温度を高くしても、ガスの還元能力 (CO および H_2 の量) には変化はなく、ガスの利用率がよくなり、約 1430°K で CO/CO_2 の値が酸化鉄の還元の平衡値に近くなつてい

るものと考えられる。

高温送風の効果については、従来の研究から、いずれも送風温度 100°C 上昇あたりのコークス比の減少は FLIERMAN⁹⁾ は送風温度 800°C で 26 kg (coke)/t (pig), AGARWAL¹⁰⁾ は送風温度 $540^\circ\text{C} \sim 760^\circ\text{C}$ では 26 kg/t, $760^\circ\text{C} \sim 980^\circ\text{C}$ では 20 kg/t を報告している。また山田¹¹⁾ が送風温度 $700^\circ\text{C} \sim 1040^\circ\text{C}$ に対してコークス比の補正に用いた値は 18 kg/t である。

本研究では、各送風温度におけるカーボン比の減少量を 100°C 当たり換算した結果を Table 1 に示した。

Table 1. Decrease in carbon ratio with increase by 100°C in blast temperature.

Blast temperature	Decrease in carbon ratio
1391°K	41.2 kg (C)/t (pig)
1416	39.8
1436	31.7
1466	26.1

高温送風での出鉄量の変化については、ほとんど発表されていない。

本研究の計算結果では、 $T_b=1366 \sim 1466^\circ\text{K}$ の変化に伴つて出鉄量は 8.48% 増加した。

3.5 調湿送風

送風温度だけを高くした場合の操業では、おもに高炉の熱的改善を目標にしているが、調湿送風の操業では送風温度を高くすることによつて炉内に供給された熱を、添加した水蒸気の分解に使用して羽口レベルでの理論火焰温度を一定に保ち、発生した CO と H_2 を鉱石の還元反応に利用して出鉄増とカーボン比の低下を期待している。

羽口レベルでの理論火焰温度を $2234 \pm 5^\circ\text{K}$ の一定値に保ち、送風温度を変化させた場合の水分の添加量を求めてみると Fig. 5 のようになり、ほとんど一直線になり、この直線は次式で表わされる。

$$w_{st} - w_{st}^0 = 0.124(T_b - T_b^0) \quad (1)$$

(1) 式は、 10 g/ Nm^3 の増湿に対して、送風温度を約 80.6°C 上昇させる熱補償が必要となることを意味している。

水分を添加して理論火焰温度を一定に保つた場合について、送風温度と出鉄量およびカーボン比の関係を Fig. 6 に示した。この場合にも、送風温度が約 1430°K まで

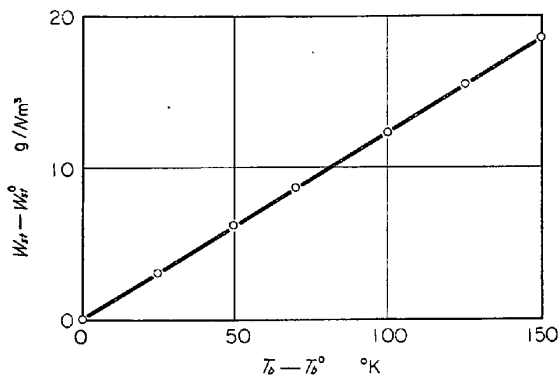


Fig. 5. Relationship between the increase in the blast temperature and that in the steam injection ratio under the constant theoretical flame temperature at the tuyere level in B.F. (A).

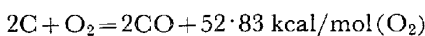
は、出鉄量の増加率が大きく、カーボン比の減少も顕著であるが、それ以上送風温度を高くしても、出鉄量の増加率は小さく、カーボン比はほとんど減少していない。

調湿送風の効果については、実測結果によれば、湿分 10 g/Nm³ あたり、共同研究会製鉄品会報告書¹¹⁾によれば 10 kg (coke)/t (pig) また山田ら⁷⁾がコークス比の補正に用いた値は 7 kg/t だけコークス比が減少するとしている。

本研究の計算結果では、たとえば 1416°K の場合には 8.25 kg (C)/t (pig) の減少となつていることが Fig. 6 からわかる。

3.6 酸素富化送風

酸素富化を行なうと、送風中の酸素濃度が高くなるので羽口レベルにおけるコークスの燃焼量が増加し、(2)式の反応によつて、大きな発熱と多量の CO ガスを発生する。



..... (2)

その結果、出鉄量の増加が期待できる。しかし、カーボン比については、酸素富化によつて燃焼によるコークスの消費量が増加し、CO の発生量も増加するが、発生した CO の利用率によつて大きく影響される。

7%酸素富化を行なつた場合の炉内状況を Fig. 7 に示した。図中の点線は酸素富化を行なっていない場合の結果である。両者を比較してみると、7%酸素富化を行なつた場合には CO の濃度が極端に高くなり、層頂においてもその利用率はきわめて悪いが、CO の濃度が非常に高いため、温度は低くても還元反応が進行する

結果となり、酸素富化を行なわない場合よりも温度分布は低下している。

温度分布の変化により石灰石の分解率は下方に移動している。鉍石の還元率はやや低下しているが、これは、鉍石の装入量の増加、酸素富化による CO/CO₂ の値の変化、温度の低下などが総合された結果と考えられる。結局 7%酸素富化を行なつた場合には、酸素を富化しない場合に比べ、CO と熱の供給のバランスがくずれ、熱的には十分利用できたが、CO が十分利用されないまま炉頂から排出されることを示している。

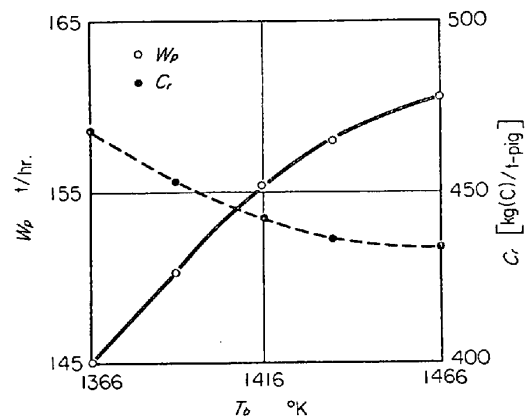


Fig. 6. Effect of the blast temperature T_b on the production rate of pig iron W_p and carbon ratio C_r under the constant theoretical flame temperature by the injection of steam and the operating conditions of $d_{b1}=1.935$ cm, $P_0=1.433 \times 10^4$ Kg/m², $F_b=2942.2$ Nm³/min, $x_{O_2}=0$.

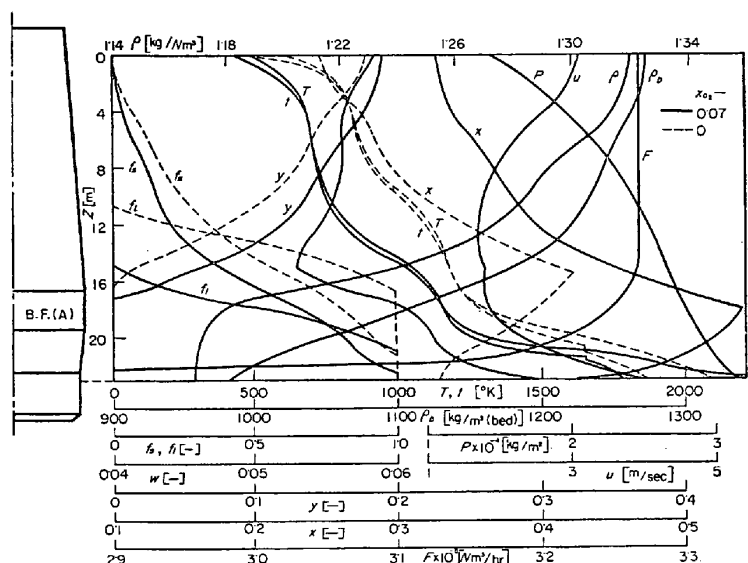


Fig. 7. Longitudinal distributions of the process variables in B.F. (A) under the operating conditions of $d_{b1}=1.935$ cm, $P_0=1.433 \times 10^4$ Kg/m², $F_b=2942.2$ Nm³/min, $T_b=1366^\circ$ K, $w_{st}=23.2$ g/Nm³, $x_{O_2}=0.07$.

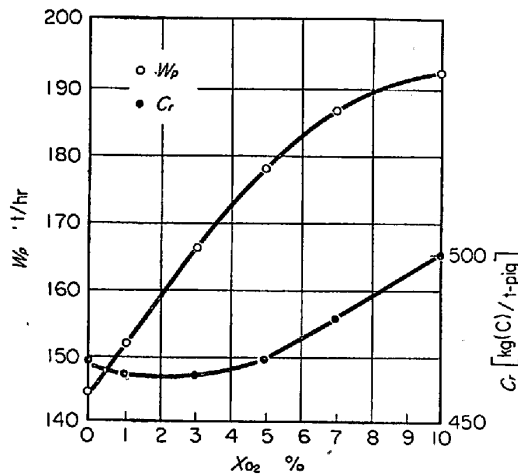


Fig. 8. Changes in the production rate of pig iron W_p and in the carbon ratio C_r caused by the change in the ratio of oxygen enrichment x_{O_2} in B.F. (A) under the operating conditions of $d_{p1}=1.935$ cm, $P_0=1.433 \times 10^4$ Kg/m², $F_b=2942.2$ Nm³/min, $T_b=1366^\circ$ K, $w_{st}=23.2$ g/Nm³.

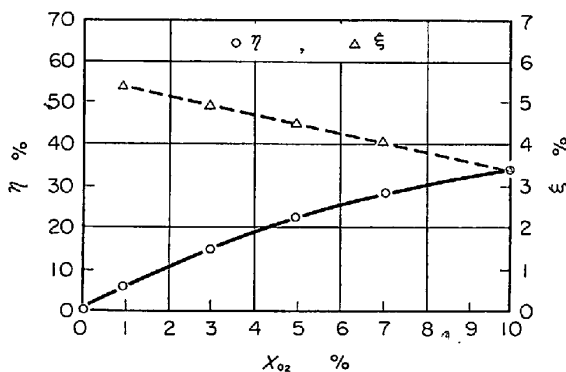


Fig. 9. Rate of increase in production of pig iron η and that per 1% oxygen enrichment ξ vs. ratio of oxygen enrichment x_{O_2} in B.F. (A) under the operating conditions of $d_{p1}=1.935$ cm, $P_0=1.433 \times 10^4$ Kg/m², $F_b=2942.2$ Nm³/min, $T_b=1366^\circ$ K, $w_{st}=23.2$ g/Nm³.

Fig. 8 に、酸素富化率と出鉄量およびカーボン比の関係を示した。Fig. 8 から、酸素富化を行なうと出鉄量は急激に増加するが、カーボン比は富化率約 5% まではほとんど変化なく、その後増加することがわかる。これは炉内で発生する熱と還元能力 (CO) のバランスがくずれることを意味している。

Fig. 9 に、出鉄量の増加率 η と酸素富化率 1% 当たりの出鉄量の増加率 ξ を示した。富化率が増加すると出鉄量の増加率が直線的に減少している。

従来報告された実操業データでは、1% 酸素富化を行なうと、出鉄量の増加は、瀬川ら¹²⁾によれば 5%，長谷川ら¹³⁾によれば 5.4%，喜多川ら¹⁴⁾によれば 5.6% とな

っているが、本研究の計算結果では 5.45% となり、かなりよい一致を示している。

4. 結 言

著者らがすでに報告した高炉の数学的モデルを使って、実際に稼動中の A 高炉に基づいて炉頂圧、鉍石の粒子径、送風量、送風温度、調湿量、酸素富化率などの操業条件の変化に伴う出鉄量およびカーボン比の変化について検討した。その結果、圧降下、溢沓現象、吹きぬけなどを考えない場合、炉頂圧、送風温度、調湿量の増加に伴って出鉄量は増加し、カーボン比は減少する。しかし炉頂圧、送風温度、調湿が増大すると出鉄の増加率とカーボン比の減少率は小さくなる傾向がある。鉍石の粒子径の減少についても同様のことがいえる。送風量の変化については、出鉄量とカーボン比はともに送風量に比例して変化する。酸素富化率を増加すると出鉄量は増加するが、カーボン比は低富化率ではほとんど変化せず、高富化率になると増加する。また出鉄量の増加率は富化率が増加すると減少する傾向がある。

記 号

C_r : カーボン比 kg (C)/t (pig)

F : 炉内ガスの流量 Nm³/hr

F_b : 乾送風量 Nm³/min

f_l : 石灰石の分解率 —

f_s : 鉍石の還元率 —

P, P_0 : 層内と炉頂の圧力 Kg/m²

T : ガス温度 °K

T_b, T_b^0 : 送風温度, 実操業時の送風温度 (=1366°K) °K

t : 粒子温度 °K

u : ガスの流速 m/sec

W_p : 出鉄量 t/hr

w : 水素のモル分率 —

w_{st}, w_{st}^0 : 水蒸気添加量, 実操業時の水蒸気添加量 (=23.2 g/Nm³) g/Nm³

x : CO のモル分率 —

x_{O_2} : 酸素富化率 —

y : CO₂ のモル分率 —

ρ : ガスの密度 kg/Nm³

ρ_b : 粒子かさ密度 kg/m³ (bed)

文 献

- 1) 靱, 八木, 田村, 森山: 金属学会誌, 29(1965), p. 826
- 2) 靱, 田村, 八木, 森山: 同, 30 (1966), p. 1109
- 3) 靱, 田村, 八木, 森山: 同, 30 (1966), p. 1105

- 4) 八木, 田村, 鞭: 同, 31 (1967), p. 102
- 5) 八木, 西尾, 佐々木, 鞭: 同, 31 (1967), p. 711
- 6) 八木, 鞭: 同, 31 (1967), p. 1284
- 7) 山田, 米沢, 永井, 野崎: 富士鉄技報, 15 (1966), p. 99
- 8) N. B. MELCHER, W. E. MARSHALL and P. L. WOOLF: J. Metals, 19 (1967), p. 41
- 9) G. A. FLIERMAN and J. M. VAN LANGEN: Automation Amsterdam Session (日本鉄鋼連盟訳, 昭和41年), p. 105
- 10) J. C. AGARWAL and H. R. PRATT: Blast Furn. Steel Pl., 55 (1967), p. 405
- 11) 共同研究会製鉄品会報告書: 鉄と鋼, 49 (1963), p. 1151
- 12) 瀬川, 石川: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 1407
- 13) 長谷川, 根本, 阪本, 黒田: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 628
- 14) 喜多川, 太田, 木村: 鉄と鋼, 53 (1967), p. S205

鋼中に含まれる数種の酸化物系介在物の 熱間圧延過程における挙動

岩井彦哉**・辻野文三**・伊佐重輝***・青 武雄***

On the Behavior of Several Kinds of Oxide Inclusion in Steels during Hot-rolling

Hikoya IWAI, Bunzo TSUJINO, Shigeteru ISA and Takeo AO

Synopsis:

The present investigation was carried out in order to obtain some fundamental information concerning the influence of non-metallic inclusions on the mechanical properties of steels.

In most of the investigations performed by many research workers on the subject, the steel specimens were prepared by usual melting procedures. In consequence, such specimens contained many uncertain factors, affecting the mechanical properties of steels, and making it considerably difficult to investigate the influence of inclusions independently.

In the present investigations, in order to exclude such difficulties as mentioned above as possible, steel specimens containing uniformly a certain amount of particular oxide inclusions were prepared by powder metallurgy technique.

These steel specimens were hot-rolled under the following conditions: the rolling temperature ranges were 1250~1000°C and 1000~800°C, the rolling ratio was 1/5.

Then, the change of inclusion in shape, composition and crystallographic structure during hot-rolling were observed.

In the present experiment the behaviors of Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ and $2\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ were examined.

The main results were as follows:

(1) Al_2O_3 and SiO_2 inclusions having the particle size of 105~74 μ , showed fragile fracture, and the degree of fracture was increased in the case of lower rolling temperature.

(2) Those complex oxide inclusions whose melting points were nearly the same as the rolling temperature were deformed plastically, while some others, whose melting points were higher, showed fragile fracture. They were possibly more fragile than simple oxide inclusions.

(3) The crystallization of amorphous SiO_2 was accelerated by surrounding solid iron, and most of SiO_2 inclusions were transformed to α -cristobalite.

(Received May 8, 1968)

1. 緒 言

鋼中に含まれる非金属介在物が、鋼材の機械的諸性質に悪影響を与えることは古くから問題にされ、これに関

* 昭和41年10月本会講演大会にて発表
昭和43年5月8日受付

** 鉄鋼短期大学

*** 鉄鋼短期大学 工博