

LD転炉における操業条件の変更の効果*

浅井 滋生**・鞭

巖***

Effects of Various Operating Conditions in LD Converter

Shigeo ASAI and Iwao MUCHI

Synopsis:

In order to predict the differences in process variables which would be caused by altering operating conditions, a part of the mathematical model of oxygen top blowing converter proposed previously has been modified, and on the basis of this modified model, numerical calculations have been conducted with the aid of digital computer (HITAC 5020E) for various operating conditions. The operating conditions considered to alter in this work are as follows:

1) feeding conditions of ore, lime and limestone, 2) back pressures of oxygen, 3) temperatures and carbon concentrations of pig iron charged into converter.

(Received Feb. 21, 1969)

1. 緒 言

LD転炉の操業では、吹止め時の炭素濃度と鋼浴温度を的確に予知することが重要な課題となつている。副原料の投入方法(種類、投入量、投入時刻)、酸素の供給方法(送酸量、ランス高さの変更と変更の時刻)を種々変更しあるいは装入溶銑の条件(温度、炭素濃度)を種々変更することにより、吹錬時間の経過に伴うプロセス変数(溶鋼の温度、炭素濃度など)の推移を知ることは、転炉の作業標準を設定したり、操業改善や、あるいはプロセス制御に有用な基礎資料となると考えられる。

ここでは、LD転炉の仮想的な操業に基づいて、すでに発表したLD転炉の数学的モデル¹⁾に操業の変更条件を組み込み、上記のような操業条件変更の効果を実の3項目にわけて、デジタル電算機(HITAC 5020E)を使用して計算して検討し、さらに、これら結果の一部については他の研究者によつて発表されている実測値との比較も行なう。

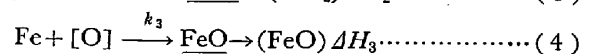
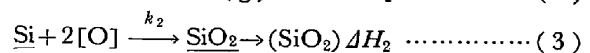
- (1) 副原料投入条件の変更の効果
- (2) 吹錬圧変更の効果
- (3) 装入溶銑条件の変更の効果

2. 解 析

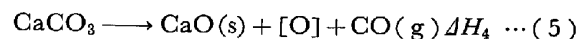
- (1) 鉄鉱石、石灰石、生石灰の投入効果

鉄鉱石はその全量がヘマタイトであるとし、まず(1)式により生じた酸素は、ジェットから凹み面に吸収された酸素と同様に(2)、(3)、(4)式の各反応に分配消費されるとし、その際の各分配率は σ_1 , σ_2 , σ_3 であるとし、

る。



石灰石は投入と同時に(5)式の反応により分解し、生じた酸素は鉄鉱石の場合と同様、(2)、(3)、(4)式の各反応に分配消費されるとする。生じた $\text{CaO}(\text{s})$ については、(6)式のように変化するとする。



生石灰は(6)式に基づいて滓化し、その滓化量は鋼浴温度、スラグ組成により決定される。また ΔH_5 の値もスラグ組成により変化するものと考えられるが、ここでは $\Delta H_5 = 214 \cdot 3 [\text{kcal/kg}(\text{CaO})]$ とした²⁾。

送酸量は吹錬圧力とノズル条件により決定され、酸素吸収速度は以前に発表した方法¹⁾により求められる。酸素ガス吸収速度に、(1)式、(5)式から生じる酸素のモル流量を加えると、全酸素供給モル流量 S は次のようになる。

$$S \equiv \bar{N}_A \cdot \int_0^{x_e} A(x) dx + 3(iW_{\text{ore}}/M_{\text{he}}) \cdot \delta(\theta - i\theta_{\text{ore}}) + (iW_{\text{ls}}/M_{\text{ls}}) \cdot \delta(\theta - i\theta_{\text{ls}}) \quad \dots\dots (7)$$

* 昭和43年9月本会講演大会にて発表
昭和44年2月21日受付

** 名古屋大学工学部大学院

*** 名古屋大学工学部 工博

ここで、 $\delta(\theta)$ はデルタ関数である。

副原料投入を加味した全発熱速度 q_t は(1)～(6)式の各反応熱 $Q_k = -\Delta H_k (k=0\sim5)$ と(7)式から(8)式のように表わされる。

$$\begin{aligned} q_t = & \{ \sigma_1 \cdot Q_1 + (\sigma_2/2) \cdot Q_2 + \sigma_3 \cdot Q_3 \} \\ & \cdot S + Q_0 \cdot (iW_{ore}/M_{he}) \cdot \delta(\theta - i\theta_{ore}) \\ & + Q_4 \cdot (iW_{ls}/M_{ls}) \cdot \delta(\theta - i\theta_{ls}) + Q_5 \cdot dW_{(l)}/d\theta \\ & \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

以上の解析から副原料投入により、 S と q_t が吹錬時間の経過に伴ってどのように変化するかがわかるので、これら S と q_t を使用することにより、溶鋼中の炭素濃度 C 、ケイ素濃度 Si およびスラグ中のシリカ量(SiO_2)、ウスタイト量(FeO)、 (T, Fe) 量、溶鋼の各質量変化および鋼浴温度 T_b の変化が次の(9)～(15)式から求められる。

$$d(W_m \cdot C_{Bb})/d\theta = -\sigma_1 \cdot S \dots\dots\dots(9)$$

$$d(W_m \cdot C_{Cb})/d\theta = -(1/2) \cdot \sigma_2 \cdot S \dots\dots\dots(10)$$

$$dW_{(sia)}/d\theta = (M_{sia}/2) \cdot \sigma_2 \cdot S \dots\dots\dots(11)$$

$$dW_{(w)}/d\theta = \sigma_3 \cdot M_w \cdot S \dots\dots\dots(12)$$

$$dW_{(T, Fe)} = (M_{Fe}/M_w) \cdot dW_{(w)} \dots\dots\dots(13)$$

$$\begin{aligned} dW_m/d\theta = & -(M_{Fe}/M_w) \cdot (dW_w/d\theta) - (M_{Si}/M_{sia}) \\ & \cdot (dW_{sia}/d\theta) + \{dF_{pig}(\theta)/d\theta\} \cdot W_{pig} \\ & + \{dF_{Sc}(\theta)/d\theta\} \cdot W_{Sc} + M_C \cdot (dW_m \cdot C_{Bb}/d\theta) \\ & + (2M_{Fe}/M_{he}) \cdot iW_{ore} \cdot \delta(\theta - i\theta_{ore}) \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

$$(W_m C_{pm} + W_S C_{ps} + Q_{So}) \cdot dT_b/d\theta = q_L \dots\dots\dots(15)$$

先に発表¹⁾したLD転炉の数学的モデルにおいて、(7)～(15)式を新たに組み込んだ。

(2) 吹錬圧力の効果

吹錬途中で吹錬圧力の変更に伴って、送酸流量や、凹み面積を以前に提出した方法²⁾により計算し、これらの変化に基づいて、プロセス変数の推移を求める。

(3) 装入溶銑条件の変更の効果

プロセス変数の初期条件として必要となる装入溶銑の温度、炭素濃度を变化させることにより求める。

以上のように修正した数学的モデルに基づいて、LD転炉における操業条件の変更の効果を調べた。

3. 計算結果と考察

Table 1 に示した条件のもとで計算した結果をFig. 1 Fig. 2 に示す。Fig. 1 には炭素濃度 C 、鋼浴温度 T_b と

Table 1. Data for numerical calculation.

Diameter of throat	35.4 mm $\phi \times 4$
Furnace capacity	150 t
Lance height	1.8m
Temperature of pig iron	1250°C
Mass of pig iron	150 t
Mass of scrap	5 t
Mass of ore	500 kg (at 1.5, 3.5, 5.5, 7.5, 9.5, 11.5min, respectively)
Mass of lime stone	300 kg (at 0.5, 3.5, 6.5, 9.5, 12.5 min, respectively)
Mass of lime	9000 kg (at 0 min)
Back pressure	10 atm (from 0 min to 15 min), 8 atm (from 15 min to the end)
$k_1 = 1 \times 10^{12}$ kg (Fe)/kg mol (C) · sec	
$k_2/k_1 = 20$ kg mol (C)/kg mol (Si)	
$k_3 C_{Db}/k_1 = 1 \times 10^{-4}$ kg mol (C)/kg (Fe)	
$t_e = 1 \times 10^{-5}$ sec	
$h_L = 12$ kcal/m ² · sec · °C	
$h_G = 0.6$ kcal/m ² · sec · °C	

Table 2. Data for numerical calculation.

Diameter of throat	26.7 mm $\phi \times 1$
Furnace capacity	12 t
Lance height	0.7m
Temperature of pig iron	1300°C
Mass of pig iron	13 t
Mass of scrap	1.3 t
Mass of ore	0 kg
Mass of lime stone	0 kg
Mass of lime	860 kg
Back pressure	5.5 atm

スラグ組成の百分率および(2)、(3)、(4)式の反応に消費される酸素の分配比 σ_1 , σ_2 , σ_3 が計算され、それらの推移が吹錬時間 θ に対して示されている。

炭素濃度曲線は4.3%から始まる。初期にはケイ素反応が優先するため脱炭速度は遅いが4min頃から約15minまで、炭素濃度で3.5%付近から約0.3%まではほぼ一定の脱炭速度で進み、以後急速に脱炭速度は遅くなっている。この脱炭速度の挙動は、(2)式で消費される酸素と全供給酸素との比 σ_1 の変化によく現われてい

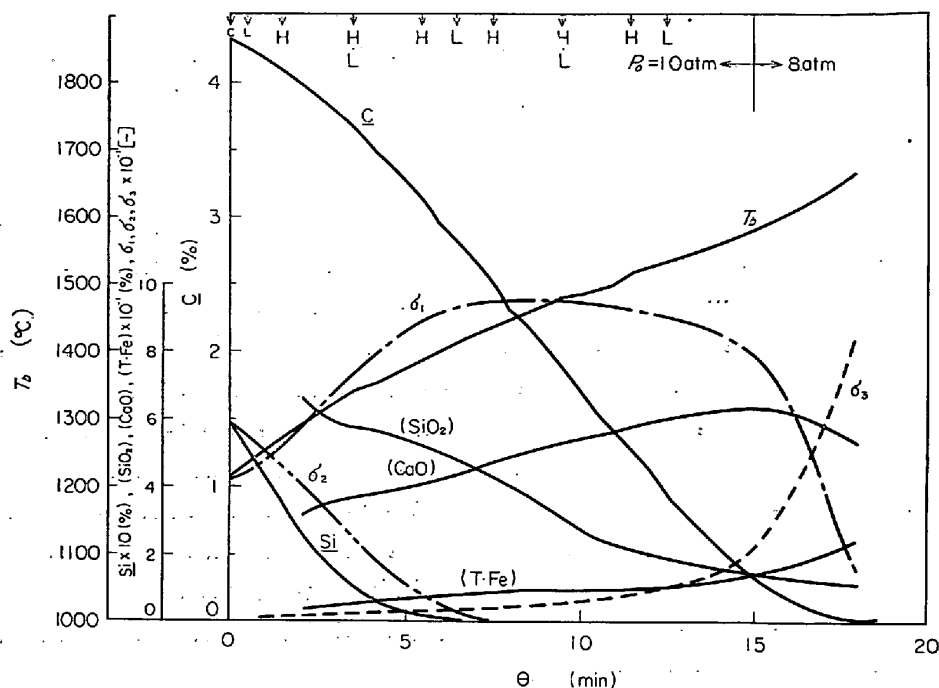


Fig. 1. Calculated results on the variations of process variables in 150t-LD converter (standard process) C : lime, charge 9t; L : limestone, each charge 300 kg; H : ore, each charge 500 kg.

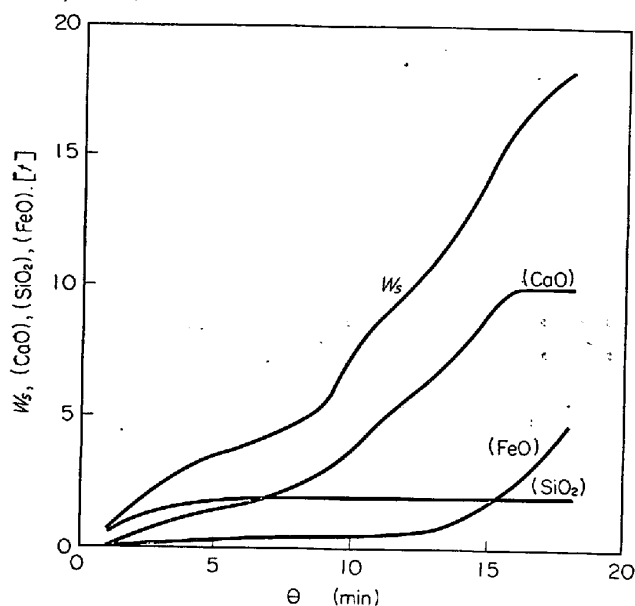


Fig. 2. Calculated results on the variations of mass of slag and that of each component.

る。すなわち、藤井⁴⁾がすでに指摘しているようなLD転炉の脱炭反応に現われる第1期、第2期、第3期の推移と同様な変化が、本モデルの σ_1 の曲線に認められる。

1250°Cで装入された鉄鉄が吹錬開始前に投入されている副原料によつて冷却されるため鋼浴温度は初期に約1213°Cになり、以後吹錬経過とともに上昇し、18minの吹止め時点では約1660°Cに達する。

ここで炭素濃度曲線と鋼浴温度曲線に注目すると、副

原料投入時には両曲線とも折点が現われているが、これらは副原料投入による影響を表わすものである。

(3)式、(4)式に消費される酸素と全供給酸素との比 σ_2 、 σ_3 はそれぞれ、吹錬時間の初期と終期で大きくなっている。

スラグ組成の推移については、シリカ(SiO_2)が吹錬初期2minでの約65%から吹止めで約11%へと逐次減少している。初期における約65%はやや高い値のように思われる。これは、まだ生成スラグ量の少ない吹錬初期において、吹錬初期から始まる脱リン反応や脱マンガンを考慮していないため、スラグ中で占める(SiO_2)の比率が過大に評価されたものと推察される。

滓化石灰(CaO)は約30%から15min頃の62%へと増加し以後減少している。これは、Fig. 2からもわかるように吹錬時間16minになると投入された石灰がすべて滓化を完了して滓化石灰量が一定に留まるが、一方約15min以後は酸化鉄生成反応によるスラグ量が増加するため、スラグ中で占める(CaO)の比率が減少することによる。

スラグ中の全鉄成分($T-Fe$)は初期の約4%から吹止め時の約24%まで単調な増加が見られるが、初期における約4%の値は実測と比較して小さいようである。これは初期には投入される酸化鉄がそのままスラグ中に残ることが考えられる。しかしこれはスラグ量の少ない吹錬初期でのことであり、質量の少量の変動が大きくスラ

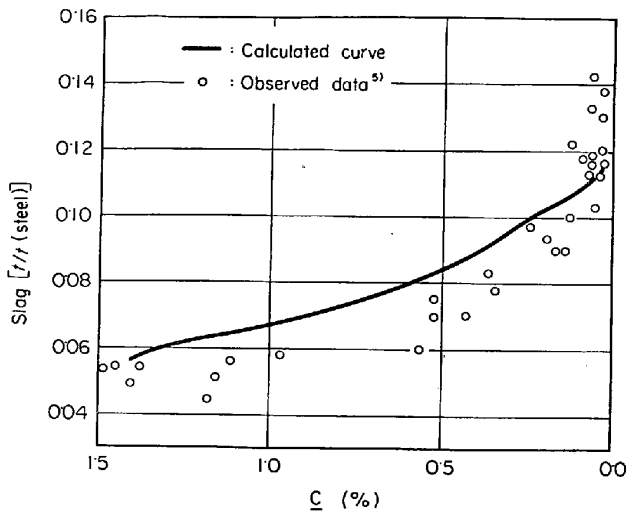


Fig. 3. Calculated and observed results on the relations between mass of slag and $\underline{C}$.

グ組成の値に影響するためと推察される。

Fig. 2 は全スラグ量と各スラグ成分の質量変化を吹錬時間に対して示したものである。石灰の滓化は約16 min で完了し、シリカ量は脱ケイ素反応終了の約6 min以後は一定となっている。酸化鉄成分は吹錬末期に急激に増加している。

次に、本モデル、および、計算に使用したパラメータの妥当性を検討するために、松野ら⁵⁾が Mn, Si の分配比から計算して求めたスラグ量 $t/(steel)$ および (T.Fe)% と、Table 1 に示した条件下で本モデルによつて計算した結果との比較を Fig. 3, Fig. 4 に示した。実測値の場合の吹錬条件とこの計算条件とはかならずしも一致していないので比較することに問題はあるが、両者とも変化の傾向がかなり一致しているものと推察される。また

川上ら⁶⁾は 13 t 転炉でのスラグ組成と鋼浴温度の変化を報告しているが、Table 2 に示した操作条件に基づいてパラメータは Table 1 に示したものと同一にとつて、本モデルによつて計算した結果と比較したのが Fig. 5, Fig. 6 である。ただしこの計算にあたり吹錬初めに 35 kg の酸化鉄が炉内にあつたものとして計算を進めた。Fig. 5 では、吹錬初期に少量の酸化鉄が存在すると思えたため、Fig. 1 で見られたような吹錬初期でスラグ組成が実測値からずれることがなくなっていることがわかる。(SiO₂) の推移は多少実測と離れるようであるが、脱リン、脱マンガン反応を考慮していないことを考

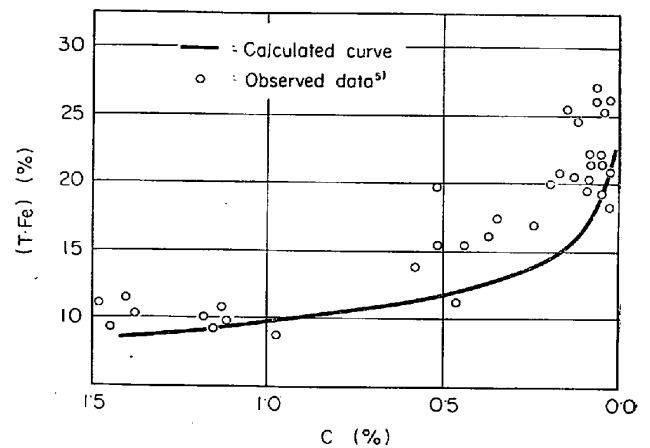


Fig. 4. Calculated and observed results on the relations between concentrations of (T.Fe) in slag and $\underline{C}$.

えればよい一致と考える。また Fig. 6 に示した鋼浴温度も非常によい一致を示しているが、文献 6) には装入溶銑温度が明記されていないので、1300°C として計算したものである。

以上 2 研究者による実測値と計算結果の比較から、本数学的モデルに採用したパラメータの値はかなり妥当なものと推察される。

そこで Table 1 に示した条件下の仮想操業に基づいて副原料投入条件、吹錬条件、装入溶銑条件を変更した場合の効果調べたが、それらの結果は Fig. 7~15 に示してある。すべて図中の実線は Table 1 の操業条件下での計算結果を比較のために基準として示したものである。一点鎖線は、それぞれ、操業条件を変更した場合の計算結果を表わしている。

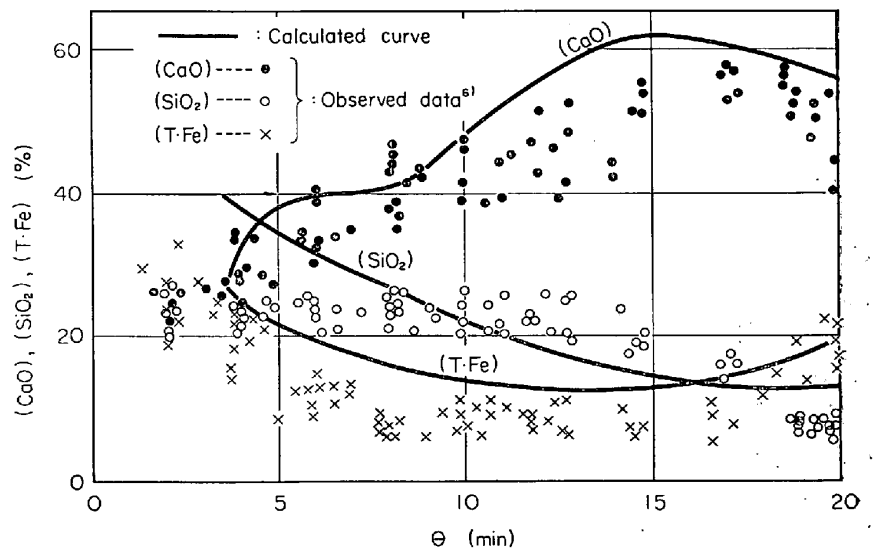


Fig. 5. Calculated and observed results on the variations of each slag component.

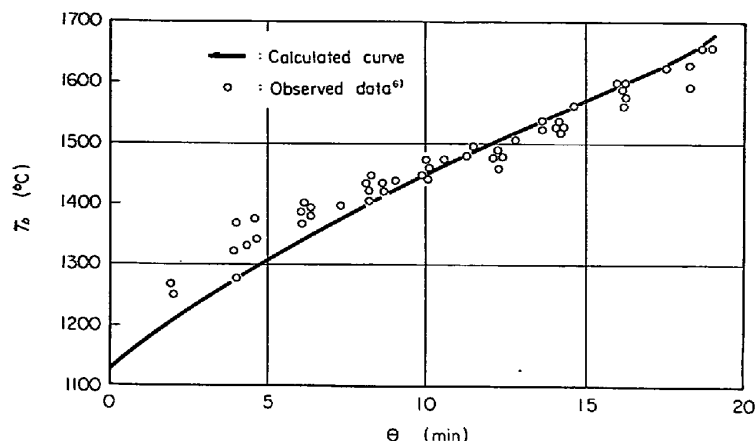


Fig. 6. Calculated and observed results on the variations of bath temperature.

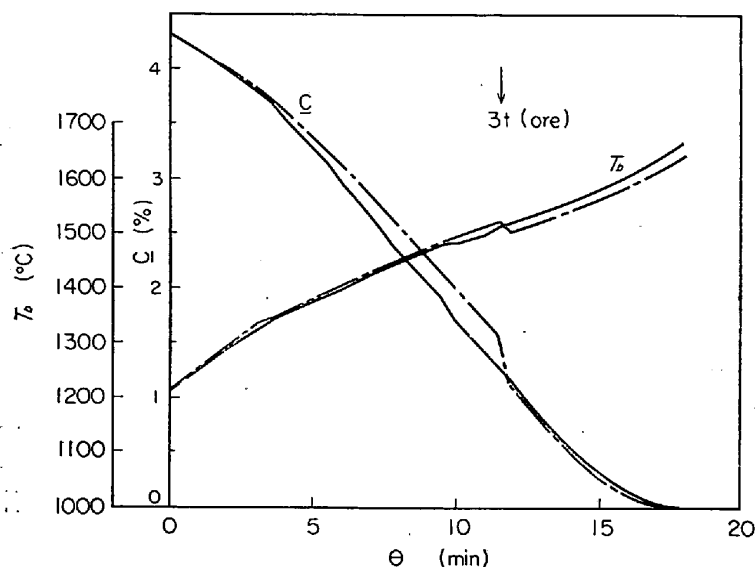


Fig. 7. Calculated results for the case where all iron ores were fed into converter at 11.5 min after start of blowing, but limestone and lime were fed as done in standard process.

—: standard process curve obtained from calculations based on Table 1.

(1) 副原料投入条件の変更の効果

(イ) 鉄鉱石投入条件を変化させた場合

計算結果を Fig. 7 に示す。一点鎖線のものは、図中の矢印で示した時刻に鉄鉱石の全量 3 t を一度に投入した場合の計算結果である。

吹錬開始時には、両者とも炭素濃度や鋼浴温度が同じであるが、実線では鉄鉱石の分割投入のため、鉄鉱石を分割投入しない場合の鎖線よりも脱炭反応がより早く進み鋼浴温度はやや低くなっている。鎖線では吹錬開始後 11 分 30 秒に全鉄鉱石が一括して投入されたので、鋼浴温度は一括投入以前の状況とくらべて逆転し、炭素濃度は急激に減少する。このように、鉄鉱石の投入は脱炭速度の促進と鋼浴温度の低下をもたらす。

最初に鉄鉱石を全部 (3 t) 投入した場合の計算結果を一点鎖線で Fig. 8 に示す。最初に一括投入した場合は、炭素濃度、ケイ素濃度ともに初期に大きく減少する。鋼浴温度は基準操作の場合 (実線) より多少低くなる程度で大きな変化がみられないが、実線では分割投入の効果のため吹錬開始後約 10 min で鋼浴温度が鎖線とは逆転し以後両者は漸次接近する。なお炭素濃度も吹錬末期では両者がほぼ一致する。

一点鎖線では、初期に脱ケイ素反応がより早く進行するため、スラグ量が実線の場合より多くなり、そのため生成可能な滓化石灰量も増加する。その結果、鋼浴温度は低いにもかかわらず石灰の滓化反応が、実線よりもより早く進み吹錬初期には、スラグ中に存在する石灰の比率が大きくなり、シリカの比率は小さくなる。しかし、吹錬開始後 6 min 頃からようやく鋼浴温度の影響を受けるようになり、スラグ組成でシリカと石灰の大小関係は逆転する。なお、吹錬末期では鋼浴温度が両者ほぼ一致するため、各スラグ組成も一致するようになる。

(ロ) 生石灰の投入条件を変化させた場合

吹錬開始後 14 分 30 秒のとき、一括して 9 t の石灰を投入し、途中では生石灰の投入を行わない場合の計算結果を Fig. 9 の一点鎖線で示す。基準操作の実線の場合とくらべて、炭素濃度の推移はほとんど変わらないが、石灰一括投入時期まで、石灰による冷却効果がないため鋼浴温度はより高くなっているが、一括投入されたときから鋼浴温度は石灰の滓化が終了するまでほとんど上昇しなくなり、滓化終了とともに鋼浴温度が上昇するようになる。

一点鎖線の場合には、初期に石灰が投入されないため、滓化石灰は石灰石から生じるものだけでありその量が少ないために、吹錬初期にはスラグ中でシリカの占める比率が大きくなっている。また、一点鎖線の場合には、石灰石が投入されるとただちに滓化して急速に滓化石灰が生成するためシリカ組成の曲線で投入時に折点が現われる。石灰が一括投入されてから以後は、スラグの各組成に大きな変化が現われて、基準操作の場合の実線の各組成へ急速に接近する。

(ハ) 全副原料を最初に投入した場合

この場合の計算結果は Fig. 10 に一点鎖線で示した。各プロセス変数の変化の傾向は鉄鉱石を最初に一括投入する(ロ)の場合の効果とほぼ同様である。しかし(ロ)の

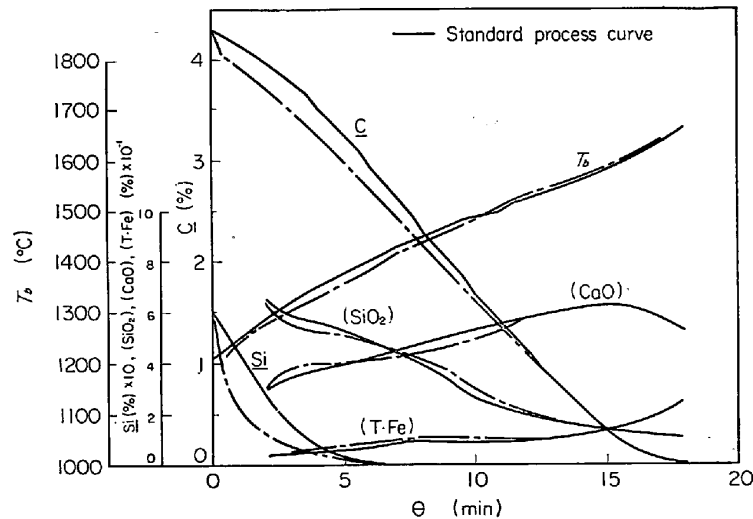


Fig. 8. Calculated results for the case where all iron ores were fed into converter at first, but limestone and lime were fed as done in standard process.

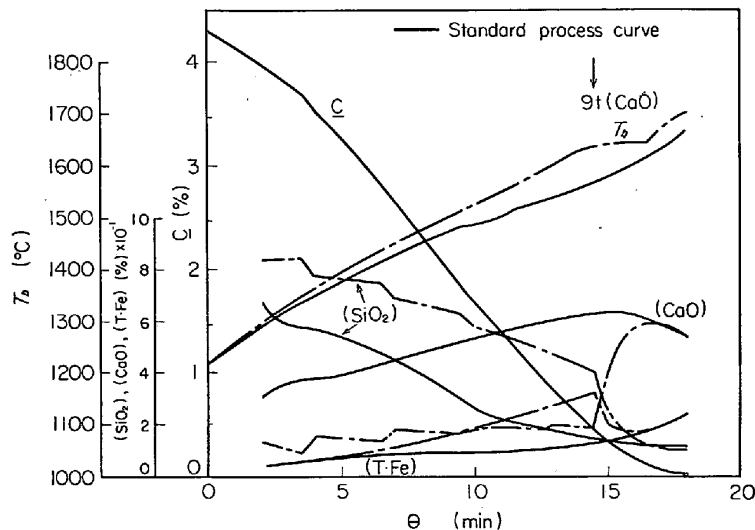


Fig. 9. Calculated results for the case where all limes were fed into converter at 14.5 min after start of blowing, but iron ore and limestone were fed as done in standard process.

場合とくらべて、吹錬初期の脱炭量や脱ケイ素量が大きく、浴内温度は大きく低下している。また、一点鎖線では吹錬中期での鋼浴温度が基準操業の場合の実線とくらべて、少し低めになっており、その影響が吹錬中期でのスラグ組成にも現われているが、その他の効果は(ロ)の場合とほぼ同様とみなしてよい。

(二) 副原料の投入量を減少させた場合

本計算以外の場合には、すべて、副原料の種類と投入量を基準計算の場合と同じにしたが、ここでは、送酸量は基準計算の場合と等しくし、副原料(鉄鉱石・石灰石)をまったく装入しない場合についてプロセス変数におよぼす効果を調べてみた。その計算結果を Fig. 11 に一点

鎖線で示した。すなわち、脱炭反応の促進と冷却効果を持つ鉄鉱石、石灰石が装入されていないために、同一吹錬時刻では、炭素濃度、ケイ素濃度、鋼浴温度ともに高くなっている。

スラグ組成については、鋼浴温度の影響が一部現われている。また吹錬末期における組成に差異が認められるのは、一点鎖線の場合には、炭素濃度が末期でもまだ高く、酸化鉄生成反応の進行が遅れているため、スラグ中の酸化鉄量が少なくなっていることと、石灰石を投入していないので石灰石からの滓化石灰がないため、このような結果になるものと考えられる。

次に、主要なプロセス変数である鋼浴温度と炭素濃度

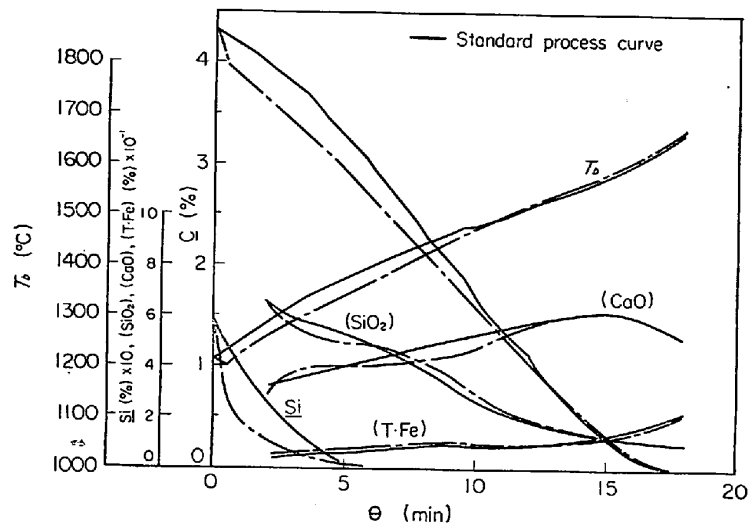


Fig. 10. Calculated results for the case where all fluxes and coolants were fed into converter at first.

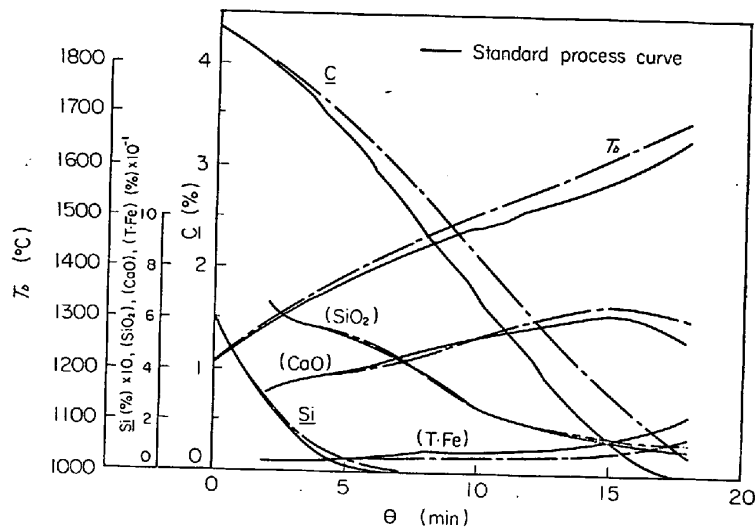


Fig. 11. Calculated results for the case where iron ore and limestone were not fed into converter, but lime was fed as done in standard process.

を縦軸と横軸にとって表わしたのが Fig. 12 である。これらの図から操業条件の違いが、鋼浴温度と炭素濃度におよぼす影響を知ることができる。

(A)は Table 1 に示した条件に基づいて計算した標準操業の場合である。溶銑は初め 1250 $^{\circ}\text{C}$ 、炭素濃度 4.3% で装入されるが、スクラップが溶銑を冷却する効果のため、吹錬開始時に 1213 $^{\circ}\text{C}$ に下がっている。吹錬初期と末期で実線の鋼浴炭素濃度変化に対する鋼浴温度変化が大きくなっているがこれは、まず、吹錬初期では脱炭反応の進行が遅いにもかかわらず、最初装入するスクラップの量が少ないために、脱ケイ素反応による発熱によつて急激な温度上昇が引き起こされるからであり、末期では脱炭反応の減少に伴つて、酸化鉄生成反応が盛

んになり、炭素濃度減少率と比較して鋼浴温度上昇率が増加しているためである。なお、吹錬途中に、ところどころ折点が現われ水平線状に近い変化が見られるが、これは吹錬途中に副原料を投入する効果によるものである。

次に(B)は、他の条件は(A)と同じにして、鉄鉱石、石灰石、石灰をすべて装入しなかつた場合である。吹錬開始時のスクラップによる冷却効果は同じであるが、吹錬途中での副原料による冷却効果がなく、脱炭反応はノズルから供給される酸素だけによつて行っているため、同一炭素濃度での鋼浴温度は吹錬時間の経過とともに非常に大きくなる。

(C)は副原料のうち、石灰 9 t は一括して吹錬開始時に装入するが鉄鉱石、石灰石を装入しなかつた場合で、

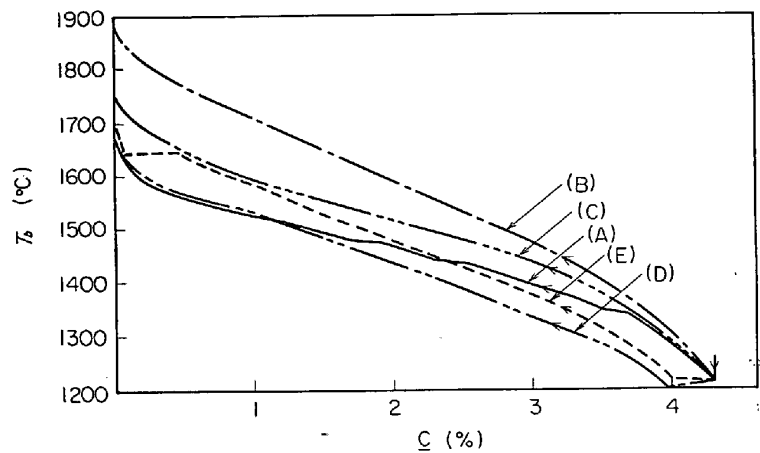


Fig. 12. Calculated results of temperature and carbon concentration of the steel bath under various operating conditions given as follows:

- (A) Standard operating condition shown in Table 1. (cf., Fig. 1)
- (B) The case where iron ore, limestone and lime were not fed into converter.
- (C) The case where iron ore and limestone were not fed into converter, but lime was fed as done in standard process. (cf., Fig. 11)
- (D) The case where iron ore, limestone and lime were fed into converter at first. (cf., Fig. 10)
- (E) The case where iron ore and limestone were fed into converter at first, but all limes were fed at 14.5 min after start of blowing.

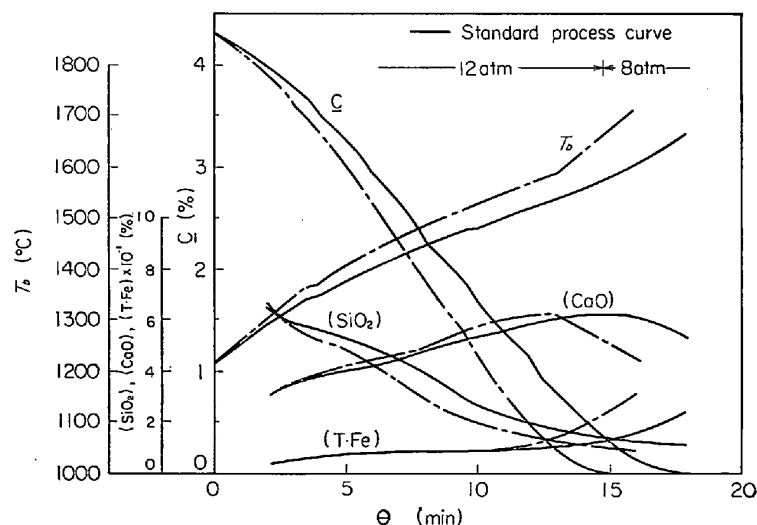


Fig. 13. Effects of the alternations of back pressure on the process variables.

(A)とくらべてその曲線は高めになっている。

(D)は最初一括して全副原料を投入する操業の計算結果であり、他の条件は(A)と同一の場合である。吹錬初期の冷却効果が大きいために、いつたん左下がりの曲線となり、次に左上りになって、(A)の曲線と交さず。(B)、(D)ともに吹錬途中での副原料投入がないため、(D)の吹錬初期での折点を除くと、(B)、(D)の両曲線では折点は現われない。

(E)は装入量については(A)と同じであるが、最初に

一括して鉄鉱石、石灰石を装入し、石灰 9 t の装入を吹錬末期に行なつた場合である。そのため吹錬初期と末期にその影響がみられる。すなわち(E)の吹錬末期で石灰の投入からその滓化完了までの間、温度上昇が起こらず水平線となつている。初期の水平線に近い変化は鉄鉱石石灰石の一括投入による。

Fig. 12 に示したこれらの結果は初期の溶銑温度、炭素濃度が同じであるため、同一の出発点から始まる曲線群となつているが、転炉操業で問題となる終点の炭素濃

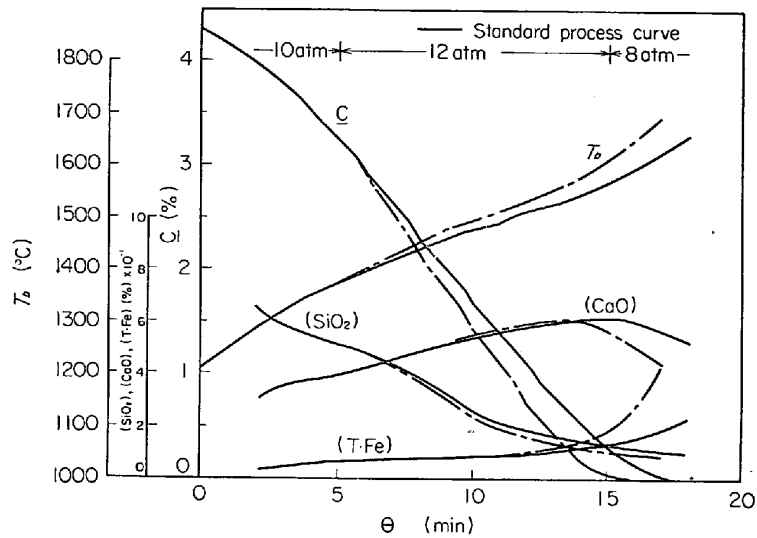


Fig. 14. Effects of the alternations of back pressure on the process variables.

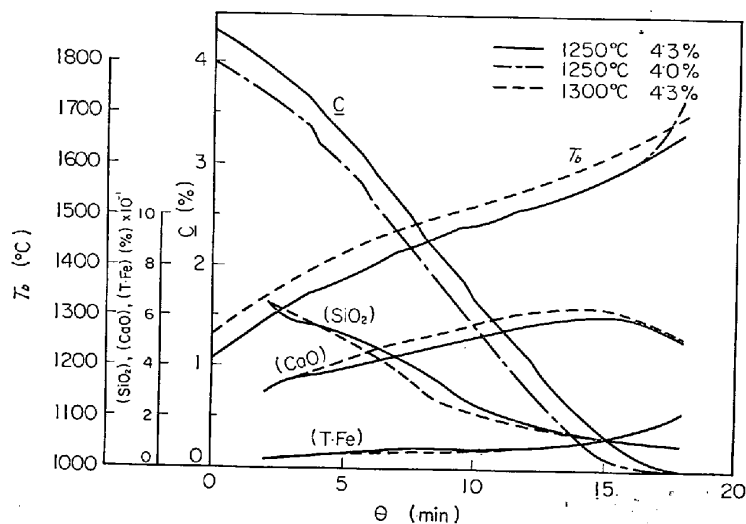


Fig. 15. Effects of the different temperatures and carbon concentrations of pig iron charged into converter on the process variables.

度と鋼浴温度の制御では、種々の異なった出発点から始まる曲線をいかにして目標とする設定値へもたらすかという問題となる。そのためには操業条件をどのように変更したらよいかを定量的に推察するのに、本研究で示したような計算結果が有用な指針として活用できるものと考えられる。

(2) 吹錬圧変更の効果

計算結果を Fig. 13 に示す。図中実線はタンク圧を吹錬開始から 15 min まで 10 atm とし、以後吹錬終了まで 8 atm としたものであるが、一点鎖線では吹錬開始から 15 min まで 12 atm とし、以後は実線の場合と同じく吹錬終了まで 8 atm として計算したものである。

(1), (3) の計算では、ノズルから供給される酸素量を基準計算の場合と等しくしたが、ノズル径が一定の場合には、吹錬圧の高低は供給酸素量の大小となる。

供給酸素量がプロセス変数の推移に大きな影響をおよぼすことはよく知られているが、ここでの計算例でも、酸素の供給速度に脱炭速度が支配されている領域では、吹錬圧増加によつて脱炭速度が早くなり、それに伴つて鋼浴温度が上昇し、そのためスラグ組成の変化が顕著に現われている。

すなわち、Fig. 13 から明らかなように、吹錬圧の増加は吹錬時間短縮をもたらすが、吹錬圧増加によつて起こる凹み界面の攪拌効果を見逃し、本モデルで採用し

ている溶鋼素片の平均接触時間 t_e の変化を無視して、 t_e を一定として計算したため、実操業で認められているような吹錬圧変更によるスラグ中酸化鉄生成の影響はよく現われていないが、これは今後解決すべき課題と考えられる。

次に、吹錬圧を途中で変化した場合の計算結果を Fig. 14 に示す。すなわち、吹錬時間 5~15 min に吹錬圧を 12 atm に変更した場合が一点鎖線である。吹錬圧変更時刻からプロセス変数に差異が現われ、それらが吹錬経過とともにますます増大していく。

(3) 装入溶銑条件の変更の効果

装入溶銑の炭素濃度を変更した場合の計算結果を Fig. 15 に一点鎖線で示した。

供給された酸素はほとんど脱炭反応に消費され、酸素供給量が脱炭速度を決定する状態になっているため、炭素濃度曲線で、実線と一点鎖線とはほぼ同程度の濃度差を保つまま推移している。

このように、脱炭反応速度がほぼ一致しているため、鋼浴温度は吹錬末期になるまで差異は認められない。しかし、炭素濃度が低い一点鎖線の場合には、実線より早期に酸化鉄生成反応が顕著になるため、吹錬末期で鋼浴温度の急激な上昇が認められる。なお、装入溶銑の炭素濃度は溶銑温度に対応した飽和濃度になっていると考えるのが妥当であるが、装入溶銑の炭素濃度、あるいは温度だけの影響をはつきりさせるために、ここでは、溶銑温度は基準操業の場合と同じであるとして、炭素濃度だけを変化させて計算した。

次に、装入溶銑の温度を変更した場合の計算結果を Fig. 15 に破線で示したが、溶銑炭素濃度と溶銑温度との関係は無視して、炭素濃度は実線の場合と同じとし、溶銑の温度だけを変えた。脱炭速度に差異はほとんど認められないため、吹錬初期の溶銑温度差がほぼそのまま吹錬末期まで保持されている。

一方スラグ組成を見ると溶銑温度の高い場合には、それだけ石灰の滓化が進み、吹錬中期でスラグの塩基度は高くなっているが、末期で両者とも石灰の滓化が完了すると副原料投入量が両者とも等しいため各スラグ組成は末期になると一致するようになる。

以上 Fig. 7~15 に示した操業条件変更の効果は、Table 1 に示したように、溶銑 150 t に対しスクラップ 5 t で溶銑比 97% という高い値の場合である。本モデルではスクラップが装入と同時に溶銑と混合して、均一温度になるものとしたため、スクラップの装入量が多い場合には、吹錬初期に鋼浴温度がかなり低下することになる。Fig. 6 に示した操業は溶銑比 90% の場合であつ

たが、吹錬初期には実測と比較して、鋼浴温度が低くなっている。しかし、中期から末期にはほぼ妥当な値を示すものと推察される。したがって、ここに示した操業条件変更の効果は、比較的溶銑比の高い場合のプロセス変数の挙動であつて、溶銑比の低い場合には、溶銑比の減少に伴って、吹錬初期から中期にかけて、ここに示したプロセス変数の挙動からのずれが大きくなっていくものと考えられる。

4. 結 言

副原料投入条件、装入溶銑の条件、吹錬圧などの操作条件を変更した場合、それらがどのようにプロセス変数に影響をおよぼすかを定量的に知ることが操業の指針として重要なことである。ここでは、先に発表した数学的モデルの一部を改良し、次の3項目：

- 1) 副原料投入条件の変更の効果
- 2) 吹錬圧変更の効果
- 3) 装入溶銑条件の変更の効果

にわたってその結果を調べたが、本モデルをプログラミング (FORTRAN-IV) した際のステートメント数約 700, 1 吹錬の計算に要した時間は東京大学大型計算機 (HITAC 5020E) を用いて約 20 sec であつた。

記 号

- $A(x)$: 文献 1) の(31)式により定義される関数 [m]
 C_{Bb}, C_{Cb}, C_{Db} : 鋼中の炭素, ケイ素, 鉄の濃度 [kg mol(C)/kg(Fe)], [kg mol(Si)/kg(Fe)], [kg mol(Fe)/kg(Fe)]
 C_{pm}, C_{ps} : 溶鋼, スラグの平均比熱 [kcal/kg(Fe)·°C], [kcal/kg(slag)·°C]
 $F_{pig}(\theta), F_{sc}(\theta)$: 冷銑, スクラップの融解率関数[-]
 ΔH : エンタルピー変化 [kcal/kg]
 h_G, h_L : ガス側, 鋼浴側の熱伝達係数 [kcal/m²·sec·°C]
 k_1, k_2, k_3 : 脱炭, 脱ケイ素, 酸化鉄生成の反応速度定数 [kg(Fe)/kg mol(C)·sec], [kg(Fe)/kg mol(Si)·sec], [kg(Fe)/kg mol(Fe)·sec]
 M_j : j 成分の分子量 [kg/kg mol]
 $\bar{N}_A$: 時間平均吸収酸素モル流束 [kg mol(O)/m²·sec]
 p_0 : 酸素貯槽圧 [atm]
 Q_{so} : 未溶解固体の熱容量 [kcal/kg·°C]
 q_L : 鋼浴側への伝熱速度 [kcal/sec]
 q_t : 副原料投入を加味した全発熱速度 [kcal/sec]
 S : 全酸素供給モル流量 [kg mol(O)/sec]
 T_b : 溶鋼本体の温度 [°C]

t_e : 凹み表面での溶鋼素片の平均接触時間 [sec]

W_j : j 成分の質量 [kg]

${}_iW_j$: i 番目の j 物質投入質量 [kg]

x_e : 有効凹み半径 [m]

θ : 吹錬時間 [sec]

${}_i\theta_j$: i 番目の j 物質投入時刻 [sec]

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 脱炭, 脱ケイ素, 酸化鉄生成反応への酸素分配比[-]

添 字

he: ヘマタイト, l : 生石灰, ls : 石灰石, (l) : 滓
化石灰, m : 溶鋼, ore: 鉄鉱石, pig: 冷鉄, S: スラ
グ, Sc: スクラップ, sia: シリカ, w: ウスタイト,
(): スラグ中を表わす.

文 献

- 1) 浅井, 鞭: 鉄と鋼, 55(1969), 2, p. 122
- 2) 鞭, 大槻, 浅井: 鉄と鋼, 53(1967), 7,
p. 794
- 3) D. C. HILTY, R. W. FARLEY and D. J.
GIRARDI: Electric Furnace Steelmaking,
Volume I, Theory and Fundamentals, (1963),
p. 298
- 4) 藤井: 鉄と鋼, 52 (1966), 3, p. 362
- 5) 松野, 越川: 鉄と鋼, 53(1967), 3, p. 312
- 6) 川上, 藤井, 内堀: 鉄と鋼, 52(1966), 3, p. 513