

技術報告

排ガス情報による転炉吹錬推移の間接測定

高輪武志*・片山勝美*・加藤木健*²・栗林 隆*²

Indirect Measurement of Behaviors of Process Variables in Converter Process Based on the Exhaust Gas Information

Takeshi TAKAWA, Katsumi KATAYAMA, Ken KATOHI and Takashi KURIBAYASHI

Synopsis:

For the improvement of the endpoint control of BOF, a new mathematical model has been developed, which combines dynamic equations of material and heat balance with the exhaust gas information based on mass-spectrometer.

The outline of model calculation is as follows;

(1) By use of the amount of oxygen and submaterials which come into BOF and the composition and flow rate of the exhaust gas which goes out of BOF, the amount of oxygen consumed in the surface of cavity and oxygen consumed by decarburization can be determined.

(2) By including the above calculated value of the amount of oxygen in the model based on reaction theory, the transition of composition and temperature of steel bath can be estimated.

At No. 1 BOF shop in Wakayama Steel Works, the model is being used for the guidance of the operation and contributes to the reduction of reblow ratio.

Key words: indirect measurement; process variable; converter process; exhaust gas information; endpoint control; BOF; material and heat balance; mass-spectrometer; reaction theory; transition of composition and temperature.

1. 緒 言

転炉製鋼法の導入以来、転炉製鋼プロセスにおける最大の課題は吹錬終点における成分と温度的中である。この目的のために転炉の計算機制御が1960年当初より国内外において開発実施されてきており、国内では吹錬末期のサブランス計測と簡便な制御モデルとを組み合わせ吹錬終点時のCと温度を制御する方式がほぼ確立された¹⁾²⁾³⁾。

これに対して冶金反応理論にもとづきダイナミックな物質収支式と熱収支式から吹錬中の鋼浴成分と鋼浴温度の時系列推移を計算するモデルが鞭らにより提案されている⁴⁾。また田口からも同種のモデルによる制御結果が報告されている⁵⁾。

一方田中らは、排ガス情報を活用して炉内残留酸素量を時々刻々算出し、これをある適正範囲内に制御することにより終点P、Mnのばらつきを低減させたと報告している⁶⁾。さらに飯田らによりランス振動の測定結果に

もとづき、ランス高さと送酸速度を操作することによりスラグフォーメーションの制御技術を実用化したと報告されている⁷⁾。最近では吹錬終点時に酸素センサーにより鋼中酸素を測定し、この情報にもとづいて終点Pを推定する方法も報告されている⁸⁾。しかし、吹錬中の鋼浴P、Mnを推定しそれを終点制御に活用するという方式については、いまだ実施例はあまり見当たらない。

本研究は、鞭らの提唱した反応モデル⁴⁾を実操業に適用し得るよう発展させ、吹錬中の各種反応の結果として発生する排ガスの情報をモデルに反映させて精度向上を図った。当システムを和歌山1製鋼160t転炉でオンライン化した結果、P、Mnも含めた吹錬中の鋼浴成分と鋼浴温度の推移を把握することが可能となった⁹⁾。以下モデルの概要と計算結果について述べる。

2. 数式モデルの構成

2.1 間接測定のための数式モデルの基本構成

転炉の炉内では、酸素ジェットと溶鋼との接触面での

昭和58年4月本会講演大会にて発表 昭和61年7月29日受付 (Received July 29, 1986)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagasu Hondori Amagasaki 660)

*² 住友金属工業(株)和歌山製鉄所 (Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

ガス・メタル間反応やスラグと溶鋼との界面でのスラグ・メタル間反応などの複雑な反応が進行しており、このプロセスの厳密な定式化は不可能であるが、実用に供し得る程度に簡略化したモデルの作成は可能と考えられる。

そこで本研究では鞭らの開発した反応モデル⁴⁾を実作業データに合うように改良し、さらに実用可能な精度とするために質量分析計による排ガス情報を組み入れた間接測定のための数式モデルを開発した。

改良内容の要点は下記のとおりである。

(1) 鞭らは、火点での凹みの単位表面積あたりに吸収される酸素の時間平均モル流量と凹みの表面積とを求め、それらの積により有効酸素量（炉内へ供給される酸素量のうち火点での酸化反応に消費される酸素量）を求めている⁴⁾。本研究ではモデルの簡素化と精度向上のために、吹錬中の各種反応の結果として発生する排ガスの情報を用いて、有効酸素量および脱炭反応に消費される酸素量を推定した。

(2) 鞭らは、メタルとスラグの温度が等しいと仮定してメタルの熱エネルギーの変化を誘導しているが⁴⁾、実作業ではスラグの方がメタルより常に高目の傾向にある。本研究では上記の仮定をはずし、反応熱、融解熱などの各熱量がそれぞれ一定の比率でメタルおよびスラグへ分配されるとした。さらに鞭らのモデルでは考慮されていない CO ガスの炉内酸化による反応熱も考慮した。

(3) スクラップおよび冷鉄の融解に伴ってメタル中へ移動する成分として、Cのみならず Si, Mn, P も対象に加えた。

(4) オンライン適用時に作業の変動にも対処できるように、モデル・パラメーターの適応修正機能を付加した。

すなわち、まず Fig. 1 に示すごとく吹錬中の吹込み酸素流量、副原料投入量などの操作データ、および排ガス成分、排ガス流量のデータを時々刻々読み込み、これらのデータより有効酸素量および脱炭反応に消費される酸素量を計算する。次にこの計算データを反応理論にもとづく吹錬反応モデルに代入することにより吹錬中の鋼浴成分と鋼浴温度の時系列推移を計算するという方式である。

2.2 有効酸素量の推定

吹錬中のガス流れは Fig. 2 に示すごとくであり、排ガス情報を用いれば転炉炉口からの侵入空気量および火点での発生 CO ガスの炉内燃焼に消費される無効酸素量を推定できる。まず侵入空気量および炉内にて生じる CO₂ ガスの発生量は次式で求められる。

$$V_{AIR} = \frac{100}{79} \cdot V_{N_2}^{EX} \dots\dots\dots (1)$$

ただし V_{AIR} : 侵入空気量 (Nm³/h), $V_{N_2}^{EX}$: 排ガス中 N₂ 量 (Nm³/h)

$$V_{CO_2}^F = V_{CO_2}^{EX} - \left(V_{AIR} \times \frac{21}{100} - V_{O_2}^{EX} \right) \times 2 \dots\dots (2)$$

ただし $V_{CO_2}^F$: 炉内発生 CO₂ 量 (Nm³/h), $V_{CO_2}^{EX}$: 排ガス中 CO₂ 量 (Nm³/h), $V_{O_2}^{EX}$: 排ガス中 O₂ 量 (Nm³/h)

なお上式における排ガス中各成分量は排ガス流量と排ガス各成分濃度との積で求められるが各成分濃度につい

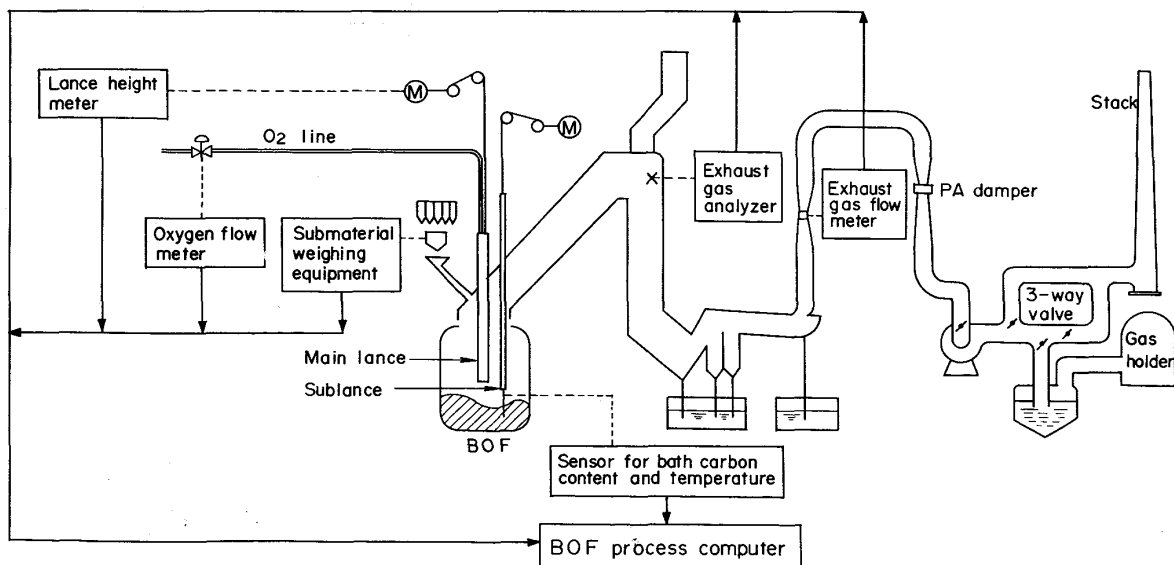


Fig. 1. Measurement system for model calculation using the exhaust gas information.

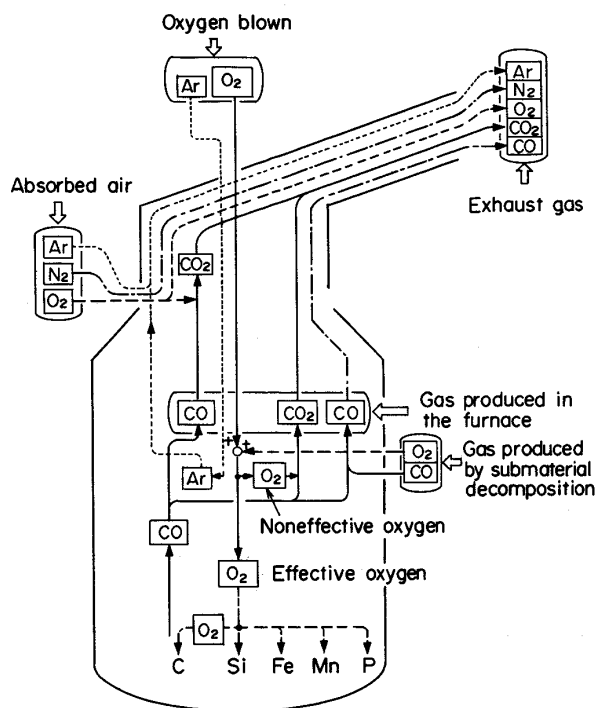


Fig. 2. Flow of gas in the furnace.

ではその分析遅れを考慮する必要がある。このため上吹ランスからの吹込み O_2 流量を吹錬途中で試験的に変更させ、その影響が排ガス中の CO 濃度におよぶ時間を調査した結果、一律に約 20 s の遅れであるとしてさしかえないことが確認された。

前記の無効酸素量および有効酸素量は下記(3)式、(4)式で表される。

$$V_{O_2}^{LOSS} = V_{CO_2}^F / 2 \dots\dots\dots (3)$$

ただし $V_{O_2}^{LOSS}$: 無効酸素量 (Nm^3/h)

$$V_{O_2}^{EFF} = V_{O_2} - V_{O_2}^{LOSS} \dots\dots\dots (4)$$

ただし $V_{O_2}^{EFF}$: 有効酸素量 (Nm^3/h), V_{O_2} : 供給酸素量 (Nm^3/h)

また火点において脱炭反応により生じる CO 発生量は排ガス中の CO 量と CO_2 量のデータを用いて次式のごとく表される。

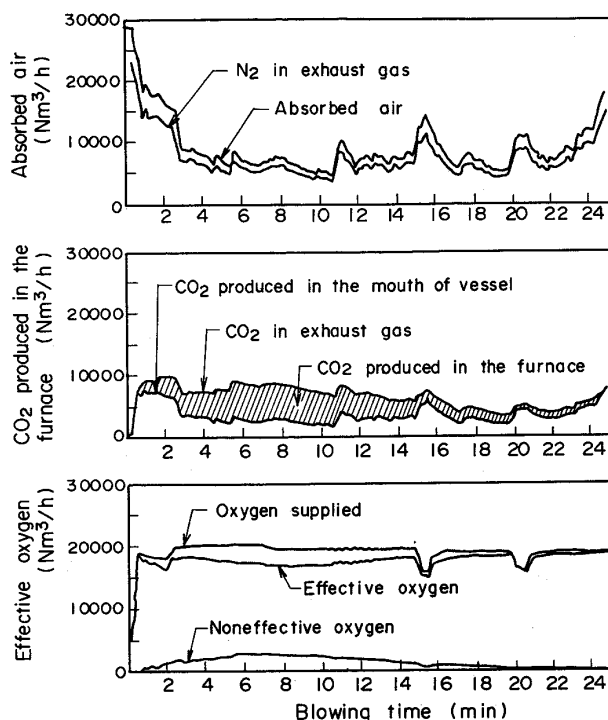
$$V_{CO}^{CAV} = V_{CO}^{EX} + V_{CO_2}^{EX} - V_{CO}^{SUB} \dots\dots\dots (5)$$

ただし V_{CO}^{CAV} : 火点で発生した CO 量 (Nm^3/h), V_{CO}^{EX} : 排ガス中 CO 量 (Nm^3/h), V_{CO}^{SUB} : 副原料供給 CO 量 (Nm^3/h)

有効酸素量のうち脱炭反応に消費される酸素量 $V_{O_2}^{DEC}$ は下記(6)式で表される。

$$V_{O_2}^{DEC} = V_{CO}^{CAV} / 2 \dots\dots\dots (6)$$

Fig. 3 にそれぞれ侵入空気量、炉内発生 CO_2 量および有効酸素量の推定計算例を示す。無効酸素量が吹錬開

Fig. 3. Estimation of amount of absorbed air, CO_2 produced in the furnace, and effective oxygen.

始後 6 min 以降に減少する現象については必ずしも明解な解釈はできていないが、炉内でのスラグ・フォーミングの高さが吹錬開始 6 min 以降にランス下端位置より高くなり火点で発生した CO ガスを燃焼させる O_2 の量が減るためではないかと考えられる。

2.3 吹錬反応モデルの概要

転炉吹錬の反応として Fig. 4 に示すように下記 6 種類の反応が考えられる。本モデルではこれらの反応についてそれぞれダイナミックな物質収支、熱収支を表現できるようにした。

①火点反応、② CO ガスの炉内酸化反応、③スラグ生成反応、④スラグ・メタル間反応、⑤スクラップ、冷鉄の融解、⑥副原料分解

本モデルでは炉内現象の簡潔化をはかるいくつかの仮定を設定した。それらは次のごとく要約される。

(1) 火点反応のうち C 以外の鋼浴各成分の酸化への O_2 分配比率は各成分の濃度と反応速度定数との積に比例する。

(2) 投入される石灰粒子はすべて同一の粒子径の球であり、融解は粒子の表面から内部へ進行するが、表面と接触するスラグは石灰で飽和されている。

(3) スラグ中の CaO 飽和濃度は $CaO \cdot FeO \cdot SiO_2$ の三元系状態図を簡略化して求める¹⁰⁾。

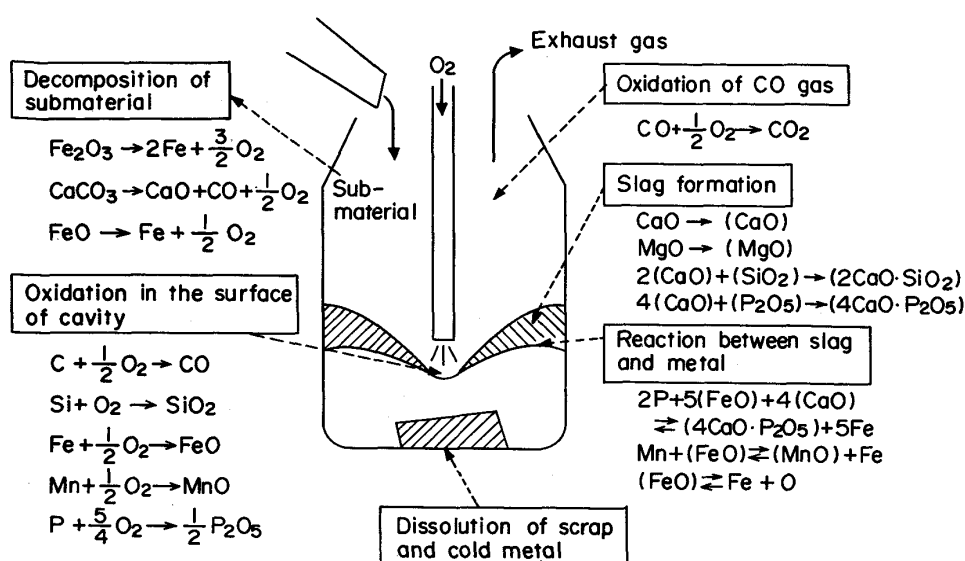


Fig. 4. Reaction process in the furnace.

(4) スラグ・メタル間反応では

① 反応に関与するスラグと溶鋼の各成分の拡散が律速となる。② スラグ・メタル界面では各成分の間に平衡関係が成立する。

(5) スクラップ、冷銑の伝熱抵抗はそれぞれその表面に集中している。

2.3.1 メタル成分、重量の計算

前述した6種類の反応についてそれぞれ物質収支または熱収支をとることによってメタル成分と重量とを計算する方法について以下に述べる。

(1) 火点反応では Fig. 4 に示すごとく供給酸素によるメタル中各成分の直接酸化を考える。鞭らは仮定(1)をC酸化にも適用してC酸化へのO₂分配比率を求めているが⁴⁾、ここでは前節で求めた有効酸素量 $V_{\text{O}_2}^{\text{EFF}}$ と脱炭反応に消費される酸素量 $V_{\text{O}_2}^{\text{DEC}}$ を用いて(7)式のごとく表した。

$$\sigma_c = V_{\text{O}_2}^{\text{DEC}} / V_{\text{O}_2}^{\text{EFF}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし σ_c : C酸化へのO₂分配比率

C以外の各成分の酸化へのO₂分配比率は仮定(1)より下式のごとく表される。

$$\sigma_i = \frac{k_i \cdot C_{im}}{\sum_j k_j \cdot C_{jm}} \cdot (1 - \sigma_c) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$i, j = \text{Si, Fe, Mn, P}$

ただし σ_i : i 成分酸化へのO₂分配比率, k_i : i 成分酸化の反応速度定数 (kg/kmol·s), C_{im} : メタル中の i 成分濃度 (kmol/kg)

吹錬経過に伴って起こるメタル中C, Si成分の変化量は、火点反応による変化量と、スクラップおよび冷銑の融解に伴ってスクラップおよび冷銑からメタル中へ移動する量との和で表せる。

(2) 石灰の滓化速度は仮定(2)によりスラグ中CaO飽和濃度を用いて求めることができる⁴⁾¹⁰⁾。

(3) スラグ・メタル間反応に関して仮定(4)①よりメタルおよびスラグ中各成分の物質移動速度はそれぞれ(9)式、(10)式で示される。

$$\frac{d(W_m \cdot C_{jm})}{dt} = A_m \cdot K_m \cdot \rho_m \cdot (C_{ji} - C_{jm}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$j = \text{Mn, P, O}$

$$\frac{d(W_s \cdot C_{ks})}{dt} = A_m \cdot K_s \cdot \rho_s \cdot (C_{ki} - C_{ks}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$k = (\text{FeO}), (\text{MnO}), (4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5), (\text{CaO}')$

ただし W_m, W_s : メタル, スラグの重量 (kg), C_{jm} : メタル中の j 成分濃度 (kmol/kg), C_{ks} : スラグ中の k 成分濃度 (kmol/kg), C_{ji} : スラグ・メタル界面での j 成分濃度 (kmol/kg), C_{ki} : スラグ・メタル界面での k 成分濃度 (kmol/kg), K_m, K_s : メタル側, スラグ側の各成分の物質移動係数 (m/s), ρ_m, ρ_s : メタル, スラグの密度 (kg/m³), A_m : スラグ・メタル間の接触界面面積 (m²)

なお上記の (CaO') は過剰塩基を意味し、次式で定義される。

$$C_{(\text{CaO}')s} = C_{(\text{CaO})s} - 2 \cdot C_{(\text{SiO}_2)s} - 4 \cdot C_{(\text{P}_2\text{O}_5)s} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし $C_{(\text{CaO})s}, C_{(\text{SiO}_2)s}, C_{(\text{P}_2\text{O}_5)s}$: スラグ中 (CaO), (SiO₂), (P₂O₅) の成分濃度 (kmol/kg)

一方、仮定(4)②よりスラグ・メタル界面では下記(12)~(14)式の関係が成り立つ。

$$\frac{C_{(4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5)l}}{C_{\text{P}_2\text{O}_5}^2 \cdot C_{(\text{FeO})l}^5 \cdot C_{(\text{CaO}')l}^4} = K_P \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{C_{(\text{MnO})l}}{C_{\text{Mn}l} \cdot C_{(\text{FeO})l}} = K_{\text{Mn}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{C_{O_i}}{C_{(FeO)_i}} = K_{FeO} \dots \dots \dots (14)$$

ただし C_{P_i} , C_{Mn_i} , C_{O_i} : スラグ・メタル界面でのメタル中 P, Mn, O の各濃度 (kmol/kg), $C_{(FeO)_i}$, $C_{(MnO)_i}$, $C_{(CaO)_i}$, $C_{(4CaO \cdot P_2O_5)_i}$: スラグ・メタル界面でのスラグ中 (FeO), (MnO), (CaO'), (4CaO·P₂O₅) の各濃度 (kmol/kg), K_P , K_{Mn} , K_{FeO} : スラグ・メタル間反応の平衡定数

ここで K_P , K_{Mn} , K_{FeO} はメタル温度にもとづいて計算した。

上記 (12) ~ (14) 式と, スラグ・メタル間各反応における化学量論的關係とから (9), (10) 式における界面濃度 C_{j_i} , C_{k_i} を算出することができる¹⁰⁾。

なおメタル中 Mn, P の吹錬時間の経過に伴う変化量は, 火点反応による変化量とスクラップ, 冷銑からメタル中へ移動する量と上記のスラグ・メタル間反応による変化量との総和になる。

(4) スクラップの融解に関して, スクラップ表面での熱収支と C 収支からそれぞれ (15) 式, (16) 式が得られる⁴⁾。

$$\alpha_{1sc} \cdot (T_m - T_{isc}) = \alpha_{2sc} \cdot (T_{isc} - T_{sc}) + \Delta H_{sc} \cdot \left(-\frac{dW_{sc}}{dt} \right) \dots \dots \dots (15)$$

$$\alpha_3 \cdot (C_{cm} - C_{isc}) = (C_{cm} - C_{csc}) \cdot \left(-\frac{dW_{sc}}{dt} \right) \dots \dots (16)$$

ただし T_m , T_{sc} : メタル, スクラップの温度 (°C), T_{isc} : スクラップ表面に接するメタル温度 (°C), C_{cm} , C_{csc} : メタル, スクラップの C 濃度 (kmol/kg), C_{isc} : スクラップ表面に接するメタルの C 濃度 (kmol/kg), W_{sc} : スクラップ重量 (kg), ΔH_{sc} : スクラップ融解潜熱 (kcal/kg), α_{1sc} , α_{2sc} : メタル側, スクラップ側での各伝熱係数とスクラップ有効表面積との積 (kcal/s·°C), α_3 : メタル側での C の物質移動係数とスクラップ有効表

面積との積 (kg/s)

スクラップ表面に接するメタル温度とメタル C 濃度とは鉄・炭素系状態図の液相線上の關係にあると仮定し下式で表す。

$$T_{isc} = \alpha_4 + \alpha_5 \cdot C_{isc} \dots \dots \dots (17)$$

ただし α_4 , α_5 : 定数

上記の (15) ~ (17) 式より C_{isc} , T_{isc} およびスクラップ融解速度 dW_{sc}/dt をメタル温度 T_m , スクラップ温度 T_{sc} , メタル C 濃度 C_{cm} およびスクラップ C 濃度 C_{csc} の関数として求めることができる。冷銑融解速度 dW_{CM}/dt についてもスクラップの場合と同様に求めることができる。

(5) 副原料として投入される鉄鉱石, 石灰石, スケールの各分解反応によつて生成する酸素はすべて前節で述べた供給酸素量 V_{O_2} に含める。また石灰石の分解で生じる CaO は投入される生石灰とともに滓化すると考える。

(6) CO ガスの炉内酸化に消費される酸素量すなわち無効酸素量の求め方については前節で説明した。

以上のような算出方法によつて求めたメタル成分および重量に関する計算式を Table 1 に示す。ただし Table 1 で使用している記号は以下のとおりである。

W_{CM} , $W_{(FeO)}$: 冷銑, スラグ中 (FeO) の各重量 (kg), $V_{O_2}^E$: 有効酸素量 (kmol/s), C_{CCM} , C_{SiCM} , C_{MnCM} , C_{PCM} : 冷銑中の C, Si, Mn, P 各濃度 (kmol/kg), C_{Csc} , C_{Sisc} , C_{Mnsc} , C_{Psc} : スクラップ中の C, Si, Mn, P 各濃度 (kmol/kg), M_j : 元素 j の原子量 (kg/kmol), M_{Fe} : Fe の原子量 (kg/kmol), M_{FeO} : FeO の分子量 (kg/kmol), W_{SUB} : 副原料投入量 (kg), k_{SUB} : 定数

2.3.2 メタル温度の計算

Fig. 4 に示すプロセスの反応熱, 融解熱, 分解熱のほかに, 鉄皮および炉口からの放散熱, 排ガスへの伝熱, スラグ・メタル間の伝熱の各熱量がそれぞれ一定の比率

Table 1. Equations for the calculation of composition and weight of metal.

Item		Equations
Composition	<u>C</u>	$\frac{d(W_m \cdot C_{cm})}{dt} = -\sigma_c \cdot V_{O_2}^E + C_{CCM} \cdot \left(-\frac{dW_{CM}}{dt} \right) + C_{csc} \cdot \left(-\frac{dW_{sc}}{dt} \right)$
	<u>Si</u>	$\frac{d(W_m \cdot C_{sim})}{dt} = -\frac{\sigma_{Si}}{2} \cdot V_{O_2}^E + C_{SiCM} \cdot \left(-\frac{dW_{CM}}{dt} \right) + C_{Sisc} \cdot \left(-\frac{dW_{sc}}{dt} \right)$
	<u>Mn</u>	$\frac{d(W_m \cdot C_{mnm})}{dt} = -\sigma_{Mn} \cdot V_{O_2}^E + C_{MnCM} \cdot \left(-\frac{dW_{CM}}{dt} \right) + C_{Mnsc} \cdot \left(-\frac{dW_{sc}}{dt} \right) + A_m \cdot K_m \cdot \rho_m (C_{mni} - C_{mnm})$
	<u>P</u>	$\frac{d(W_m \cdot C_{pm})}{dt} = -\frac{2}{5} \sigma_P \cdot V_{O_2}^E + C_{PCM} \cdot \left(-\frac{dW_{CM}}{dt} \right) + C_{Psc} \cdot \left(-\frac{dW_{sc}}{dt} \right) + A_m \cdot K_m \cdot \rho_m (C_{pli} - C_{pm})$
Weight		$\frac{dW_m}{dt} = -(1 - \Sigma M_j \cdot C_{jcm}) \cdot \frac{dW_{CM}}{dt} - (1 - \Sigma M_j \cdot C_{jsc}) \cdot \frac{dW_{sc}}{dt} + \Sigma M_j \cdot \frac{d(W_m \cdot C_{jm})}{dt}$ $-\frac{M_{Fe}}{M_{FeO}} \cdot \frac{dW_{(FeO)}}{dt} + \Sigma k_{SUB} \cdot \frac{dW_{SUB}}{dt}$ $j = C, Si, Mn, P$

でメタルおよびスラグへ分配されるとしてメタルおよびスラグの熱量変化を求めることにした。この比率 a_i , b_i の値については実操業データの解析により求めた。またスクラップおよび冷銑の熱量変化はそれぞれの熱収支から求めることができる⁴⁾。

以上のようにして求めたメタルとスラグの温度に関する計算式を下記に示す。

$$\frac{d(c_p \cdot W_m \cdot T_m)}{dt} = \sum_{i=1}^{10} a_i \cdot Q_i \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\frac{d(c_{ps} \cdot W_s \cdot T_s)}{dt} = \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot Q_i \quad \dots\dots\dots (19)$$

ただし、 Q_1 : 火点反応熱 (kcal/s), Q_2 : スラグ生成熱 (kcal/s), Q_3 : スラグ・メタル間反応熱 (kcal/s), Q_4 : 炉内 CO 酸化反応熱 (kcal/s), Q_5 : 冷銑, スクラップ融解熱 (kcal/s), Q_6 : 副原料分解熱 (kcal/s), Q_7 : 鉄皮からの放散熱 (kcal/s), Q_8 : 炉口からの放散熱 (kcal/s), Q_9 : スラグ・メタル間伝熱 (kcal/s), Q_{10} : 排ガスへの伝熱 (kcal/s), c_p , c_{ps} : メタル, スラグの比熱 (kcal/kg $\cdot$ °C), T_s : スラグ温度 (°C)

2.4 数値計算法

前節で述べた吹錬反応モデルでの計算式をまとめると (20), (21) 式に示すように 19 個の微分方程式と 6 個の代数方程式とで表現される。

$$\dot{y}_i = f_i(y_1, y_2, \dots, y_{19}, y_{20}, \dots, y_{25}) \quad \dots\dots (20)$$

$$i = 1, 2, \dots, 19$$

$$g_j(y_1, y_2, \dots, y_{19}, y_{20}, \dots, y_{25}) = 0 \quad \dots\dots (21)$$

$$j = 20, 21, \dots, 25$$

ただし、 y_i はメタル中各成分濃度 $\underline{C}$, $\underline{Si}$, $\underline{Mn}$, $\underline{P}$, $\underline{O}$, スラグ中各成分濃度 ($\underline{SiO_2}$), ($\underline{FeO}$), ($\underline{MnO}$), ($\underline{P_2O_5}$), ($\underline{CaO}$), ($\underline{MgO}$), メタル, スラグ, スクラップ, 冷銑の各重量, およびメタル, スラグ, スクラップ, 冷銑の各温度をあらわす。また y_j は CaO 飽和濃度¹⁰⁾, スラグ・メタル間の界面濃度 ($\underline{P}$, $\underline{Mn}$, $\underline{O}$)¹⁰⁾, および冷銑, スクラップの表面に接するメタル温度を表す。(20) 式についてはルンゲ・クッタ法を, (21) 式についてはニュートン・ラフソン法を適用して 10 s きざみで数値計算を行った。ただし (20) 式の微分方程式を解くに際して右辺内の y_{20} , $\dots\dots y_{25}$ は 1 ステップ前の $y_1, \dots\dots y_{19}$ の各計算値を用いて (21) 式によりあらかじめ求めた値を使用することにした。なお, (20), (21) 式の計算に先立つ有効酸素量 $V_{O_2}^{EFF}$ および脱炭反応に消費される酸素量 $V_{O_2}^{DEC}$ の計算では, 2.2 節で述べたごとく 20 s の排ガス分析遅れを考慮して最新の排ガス分析データを 20 s 前のデータとして取り扱った。

上記のモデルには, 火点反応における速度定数やスラ

グ・メタル間反応での物質移動係数および発生熱量のメタル, スラグへの分配比率などのパラメーターを含んでおり, モデルによるメタル成分, メタル温度およびスラグ成分の各計算値がそれぞれの実測結果と合致するようにオフライン的にこれらパラメーターの数値を決定した。この場合, 基本的には鞭らの使用しているパラメーターの値¹⁰⁾をベースにして計算値が多量の実測データに合うように調整していく方法をとったが, 火点反応での速度定数を例にとると, $k_{Si} = 10 \times 10^{12}$ kg/kmol $\cdot$ s, $k_{Fe} = 0.0133 \times 10^{12}$ kg/kmol $\cdot$ s, $k_{Mn} = 1 \times 10^{12}$ kg/kmol $\cdot$ s, $k_P = 10 \times 10^{12}$ kg/kmol $\cdot$ s であつた。

2.5 排ガス流量値の補正

上記モデルにおいては排ガス流量値としてベンチュリ型流量計による計測値を用いているが, ダスト付着などにより流量計測値が真実の値よりずれてくるという問題がある。これに対処するため, 脱炭により発生した CO 量と投入副原料中の CO 量との和が排ガス中 CO 量と排ガス中 CO₂ 量との和に等しく, したがってその推定値が排ガス流量値の計測誤差の影響を受けるということから, 下記 (22) 式にもとづく流量補正係数を導入することにした。

$$K_G = \frac{(W_m^0 \cdot C_{cm}^0 + W_{cm}^0 \cdot C_{ccm} + W_{sc}^0 \cdot C_{csc} - W_m^E \cdot C_{cm}^E) \times 22.4 + \sum V_{CO}^{SUB}}{\sum (V_{CO}^{EX} + V_{CO_2}^{EX})} \quad \dots\dots\dots (22)$$

ただし、 K_G : 排ガス流量の計測誤差によるずれ量, W_m^0 , W_{cm}^0 , W_{sc}^0 : メタル, 冷銑, スクラップの各重量の初期値 (kg), C_{cm}^0 : メタル中 $\underline{C}$ 濃度の初期値 (kmol/kg), C_{cm}^E : メタル中 $\underline{C}$ 濃度の終点実績値 (kmol/kg), W_m^E : メタル重量の終点実績値 (kg)

上式の Σ は吹錬初期から吹錬終点までの総和をあらわす。実際の操業においては (22) 式による K_G の移動平均値 $\bar{K}_G$ を用いて排ガス流量値を (23) 式のごとく補正した。

$$V_{EX}^R = \bar{K}_G \cdot V_{EX} \quad \dots\dots\dots (23)$$

ただし、 V_{EX} : 排ガス流量計測値 (Nm³/h), $\bar{K}_G$: 流量補正係数, V_{EX}^R : 排ガス流量補正值 (Nm³/h)

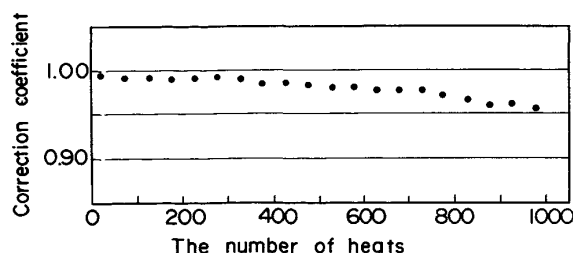


Fig. 5. The change of correction coefficient for exhaust gas flow rate.

一炉代の流量補正係数値の推移の一例を Fig. 5 に示すが炉回数の進行につれてダスト付着量が増加し、そのために $\bar{K}_G$ の値が低下していくのが確認される。

2.6 モデルパラメーターの適応修正

2.4 節で述べたモデルによりメタルの成分、温度を推定することができるが、操業の変動にも対処できるようにするため吹錬終点での実績データを用いて以下の適応修正を行う。推定の対象としてはメタル C, P, 温度が特に重要であるが、メタル P についてはスラグ・メタル間反応でのメタル側各成分の物質移動係数 K_m を、メタル温度については鉄皮からの放散熱のメタルへの分配比率 α_7 を適応修正対象のパラメーターとして選び、終点 P と終点温度の計算値がそれぞれ実績値に合致するように適応修正を行う。メタル C については前節で述べた排ガス流量値の補正により推定精度低下を防止することができる。

3. 数式モデル妥当性の検証

3.1 モデルによるシミュレーション例

数値計算による結果の一例を Fig. 6～Fig. 10 に示

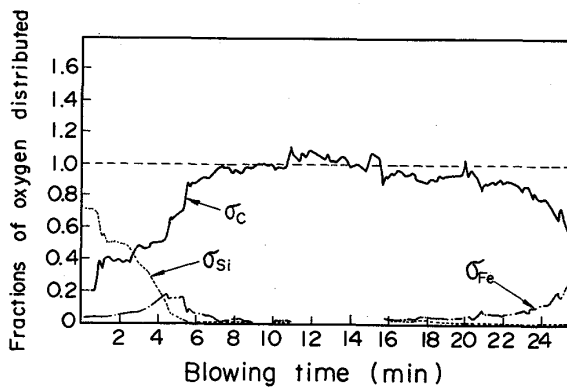


Fig. 6. Estimation of fractions of oxygen distributed in the surface of cavity.

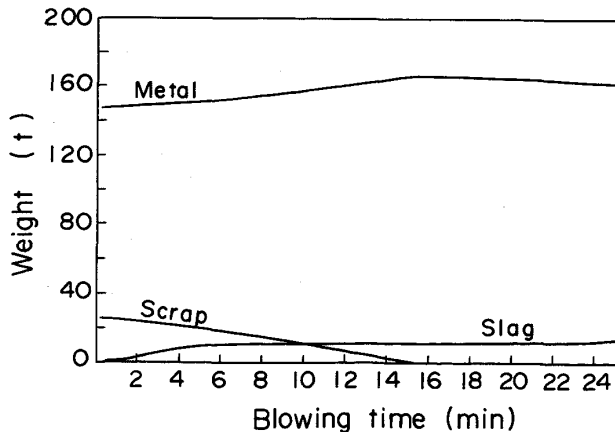


Fig. 7. Estimation of amount of metal, slag and scrap.

す。Fig. 6 は火点反応における O_2 分配比率の時系列推移を示す。吹錬初期は有効酸素量の大部分がメタル Si の酸化に消費され、Si のほとんどがメタルから除去された後の吹錬中期には有効酸素量のほぼ 100% が脱炭に消費されていることが確認できる。Fig. 7 はメタル、スラグおよびスクラップの各重量の時系列推移を、Fig. 8 はメタル成分およびメタル温度の時系列推移とサブラ

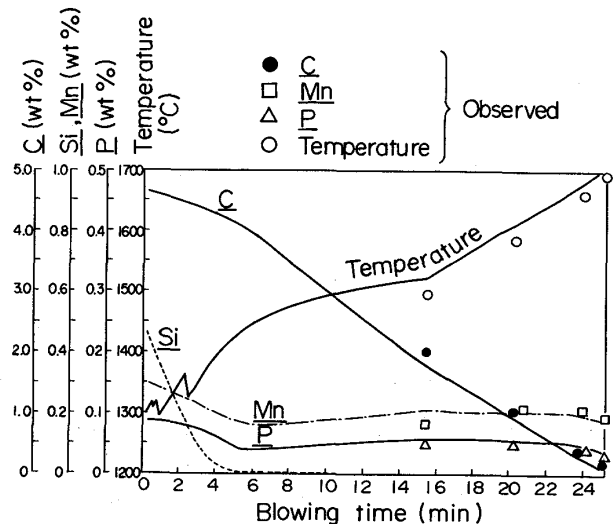


Fig. 8. Estimation of composition and temperature of steel bath.

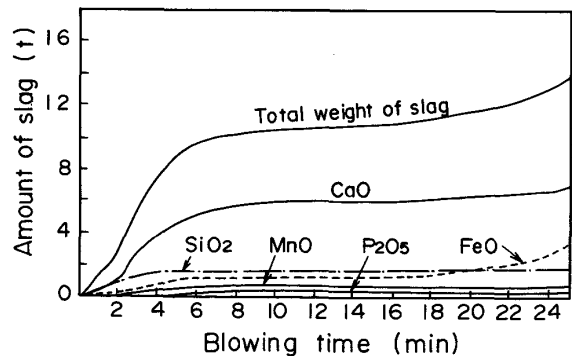


Fig. 9. Estimation of amount of slag.

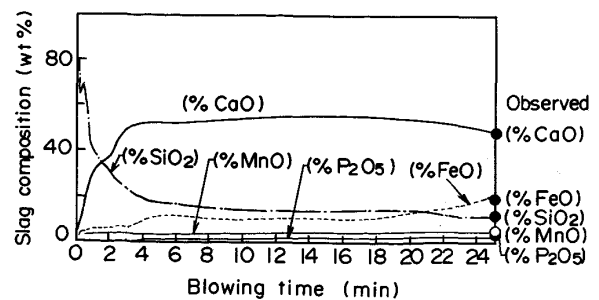


Fig. 10. Estimation of slag composition.

ンス多点サンプル採取データとの比較結果を示す。Fig. 8 より Mn の中期挙動を除けばメタルの各成分および温度ともほぼ妥当な精度と判断される。なお Fig. 8 では吹錬末期の昇温勾配が吹錬中期に比べて急に大きくなっているが、これは Fig. 7 に見られるごとくスクラップの融解がこの頃までに完了し、さらに Fig. 6 に示すごとく吹錬末期にメタル Fe の酸化が増大するためと考えられる。Fig. 9, Fig. 10 はそれぞれスラグ重量とスラグ成分の時系列推移を示す。Fig. 10 には吹錬終点時のスラグサンプル分析結果を比較のために記載したが各成分とも計算値とよく一致している。さらに多くの操業データにもとづいて計算した結果、吹錬終点時の C, P, 温度の計算値はそれぞれ $\pm 0.05\%$, $\pm 0.01\%$, $\pm 20^\circ\text{C}$ 内に入る精度であった。

3.2 サブランス計測による軌道修正

実操業では吹錬末期にサブランスによりメタル中 C と温度を計測するので、前述の方法で求めた推定値を (24) 式、(25) 式のようにサブランス計測による実績値に置きかえる。

$$C_{cm} = C_{CSL} \dots \dots \dots (24)$$

$$T_m = T_{msl} \dots \dots \dots (25)$$

ここで C_{CSL} : サブランス計測によるメタル C 濃度 (kmol/kg), T_{msl} : サブランス計測によるメタル温度 ($^\circ\text{C}$)

ただし、サブランス計測による実績値と計算値との差が異常に大きい場合は、計測異常として上記の置きかえ

を実施しない。

上式にもとづく軌道修正を行って計算した結果の一例を Fig. 11 に示す。

4. 結 言

従来転炉の吹錬終点制御の研究は溶鋼中 C と温度のみを対象とするものがほとんどであったが、最近では P, Mn の制御についても検討されつつある。本研究では吹錬中の P, Mn も含めた鋼浴成分と鋼浴温度の時系列推移の把握を目的として、オンラインで適用可能な数式モデルを開発する研究を行い、次の結果を得た。

(1) 吹込み酸素流量、副原料投入量などの操作データおよび炉内反応の結果としての排ガスデータにより火点反応に消費される有効酸素量および脱炭反応に消費される酸素量を求めた。

(2) 上記酸素量の計算データを反応理論にもとづく吹錬反応モデルに代入することにより吹錬中 P, Mn も含めた鋼浴成分と鋼浴温度の時系列推移を計算できるようにした。

本研究により開発されたモデルを和歌山 1 製鋼 160 t 転炉に導入し操業ガイドシステムとしてオンライン化した結果、再吹錬比率低減などに効果をあげている。

最後に、本研究に対して御支援、御指導をいただいた住友金属工業(株)前中央技術研究所所長西岡邦夫博士および制御技術センタ制御 OR 部長美坂佳助博士に深謝の意を表するとともに、有益な助言と御指導をいただいた名古屋大学工学部鞭巖教授および浅井滋生助教授に厚く感謝いたします。

文 献

- 1) 竹村洋三, 加藤 郁, 福田重美: 製鉄研究 (1977) 291, p. 12147
- 2) 太田豊彦, 三枝 誠, 永井 潤, 数土文夫, 中西恭二, 野崎 努, 内村良治: 川崎製鉄技報, 12 (1981), p. 209
- 3) 高輪武志, 美坂佳助, 片山勝美, 辻川 宏, 桜場和雅: 鉄と鋼, 66 (1980), S766
- 4) 鞭 巖, 森山 昭: 冶金反応工学 (1972), p. 270 [養賢堂]
- 5) 田口喜代美, 尾関昭矢, 長谷川輝之, 白谷勇介, 坪井 勇, 松井邦雄: 鉄と鋼, 63 (1977), A95
- 6) 田中 功, 城野 裕, 金本通隆, 吉田 透, 上田裕二郎, 磯上勝行: 鉄と鋼, 66 (1980), S768
- 7) 飯田義治, 江本寛治, 小川正勝, 大西正之, 山田博右: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2480
- 8) 丹村洋一, 長谷川輝之, 半明正之, 宮脇芳治, 碓井 務: 鉄と鋼, 69 (1983), S1003
- 9) 高輪武志, 片山勝美, 加藤木健, 榎本良敏, 村沢泰雄: 鉄と鋼, 69 (1983), S205
- 10) 三輪 守, 浅井滋生, 鞭 巖: 鉄と鋼, 56 (1970), p. 1677

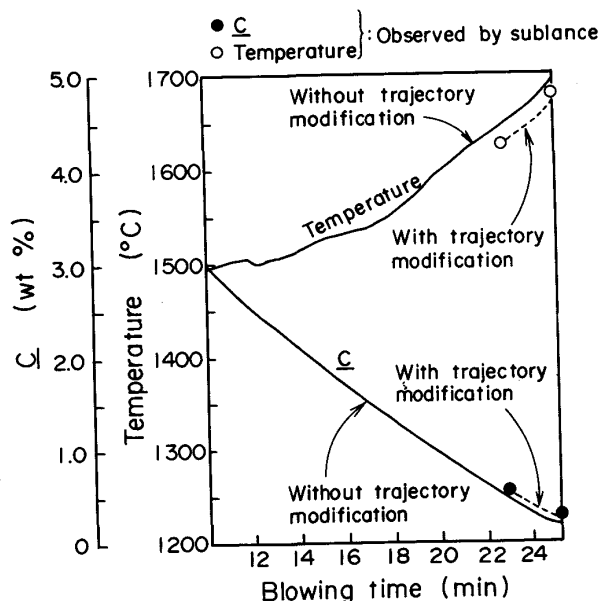


Fig. 11. Trajectory modification based on sub-lance measurement.