

© 1990 ISIJ

技術報告

排ガス情報を利用した転炉吹錬の計算機制御技術の開発

福味純一*・滝 千尋*・畑中聡男*・小倉英彦*

Development of Refining Control System in Combined Blowing Converter Based on Exhaust Gas Information

Jun-ichi FUKUMI, Chihiro TAKI, Toshio HATANAKA and Hidehiko OGURA

Synopsis :

Mass spectrometer for analyzing the exhaust gas was mounted at No.2 BOF shop in NKK Fukuyama Works, and the level-up of refining under the computer control system using the exhaust gas information has been achieved. As the result, the continuous estimations of bath temperature, [O] and [C] etc. have been enabled, and the accuracy of end point control has been much improved. Moreover, rationalizing such as reductions of flux and steel making time has been achieved.

Especially the productivity has been remarkably improved and the production amount has reached to 330 000 t month under one vessel operation with two vessels.

Key words : exhaust gas information; mass spectrometer; computer control in BOF; prediction of slopping; quick tapping.

1. 緒 言

近年、鉄鋼業をとりまく環境の変化をうけて、転炉吹錬においても、高級鋼の製造、および製造コスト低減等の合理化推進、さらには高生産性等が要求されてきた。すなわち、複合吹錬法の導入、溶銑予備処理法によるスラグレス吹錬、取鍋精錬の発達に伴う転炉機能の分化、また、連続铸造と熱間圧延の直結化による転炉の高エネルギー操業の推進等である。これらの転炉吹錬の多様化に対応するため、より高度な転炉計算機制御技術の必要性が高まってきた。

NKKにおける転炉の計算機制御は、旧川崎第2製鋼工場にて、いち早くスタティック制御を実用化し¹⁾、先駆的な役割を果たした。その後もサブランスの実用化²⁾、サブランス用プローブの開発³⁾、及びダイナミック制御技術の開発²⁾を進め、福山第3製鋼工場において、NARCシステム(NKK's Automatic Refining Control System)として、自動吹錬システムをオンライン化するに至った³⁾。この結果、終点成分、温度の終点適中率は大幅に向上し、製品品質の安定、生産性の向上等に効果を発揮してきた。

しかし、これら従来の転炉計算機制御法は、バッチ的データを利用しているため、複雑な炉内反応を精度良く把握するには限界があり、特に吹錬が多様化した今日、炉内反応を正確、かつ迅速に把握する技術開発が求められていた。そこで、炉内反応の連続情報として排ガス情報に着目し、新しい吹錬制御モデルを構築した。

本報では、この排ガス情報を用いた転炉吹錬の計算機制御法について述べるとともに、福山第2製鋼工場における実施例を報告する。

2. 新吹錬制御モデルの全体構成と特徴

転炉吹錬制御システムの概要を Fig. 1 に示す。従来から実施してきた、スタティック、及びダイナミック制御に加え、排ガス情報を利用した吹錬制御(排ガスモデル)を今回新たに付加した。

従来の吹錬制御法では、スタティック制御として吹錬条件等に基づき計算された媒溶剤、冷却剤が添加され、吹錬終了までの使用酸素量が指示される。吹錬中は、サブランスを用い、溶鋼温度、溶鋼 C を測定し、予測式に基づいて目標溶鋼温度、溶鋼 C になるよう軌道修正するダイナミック制御が採用されていた。また、吹止め後

昭和62年10月本会講演大会にて発表 平成2年3月9日受付 (Received Mar. 9, 1990)

* NKK 福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corporation, 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

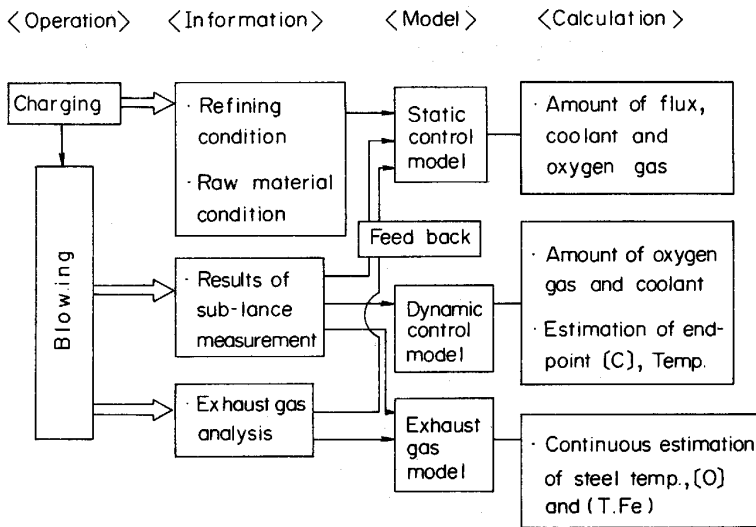


Fig. 1. Outline of blowing control system in BOF.

は再度サブランスを用いて、溶鋼温度、溶鋼炭素濃度、及び溶鋼中の酸素濃度を測定し、りん濃度⁴⁾、マンガン濃度⁵⁾、を推定する方法（無倒炉出鋼）を行っていた。

しかし、この方法では、吹止め後の成分、温度の確認作業のため、製鋼時間は延長され、吹止め温度も高くなる弊害があった。一方、終点りん濃度の制御では、吹錬条件に応じた媒溶剤がスタティック制御で添加されるのみであり、必ずしも適切な制御とは言い難く、また、終点りん濃度のばらつきも大きく、成品品質安定のためには媒溶剤を過剰に使用せざるを得なかった。

本制御システムは、以上のような問題点をふまえて開発されたものである。すなわち、無倒炉出鋼比率の拡大、さらには吹止め後のサブランス測定無し出鋼（以下迅速無倒炉出鋼と記す）比率の拡大により、転炉の高効率操業を達成するとともに、終点りん濃度のばらつきを低減させ、媒溶剤使用量の適正化を図ることを開発の主眼とした。

このため、排ガス情報によって得られた冶金的知見を従来の吹錬制御モデルに反映し、（例えば、スタティック制御において従来フィードバックパラメーターとしていた2次燃焼率を排ガス計測値より求めた。）その予測精度を向上させるとともに、吹錬中の溶鋼温度、(T.Fe)、および溶存酸素を連続推定することで吹止め時期の適正化を図った。さらにスラグの噴出予知技術（以下、噴出予知技術）の開発も行った。

3. 排ガス計測システムと情報処理技術

3.1 排ガス計測システム⁶⁾

従来の排ガス計測システムでは、炉内反応に対する排ガスの移送及び分析遅れ、さらには分析精度等の問題点があった。

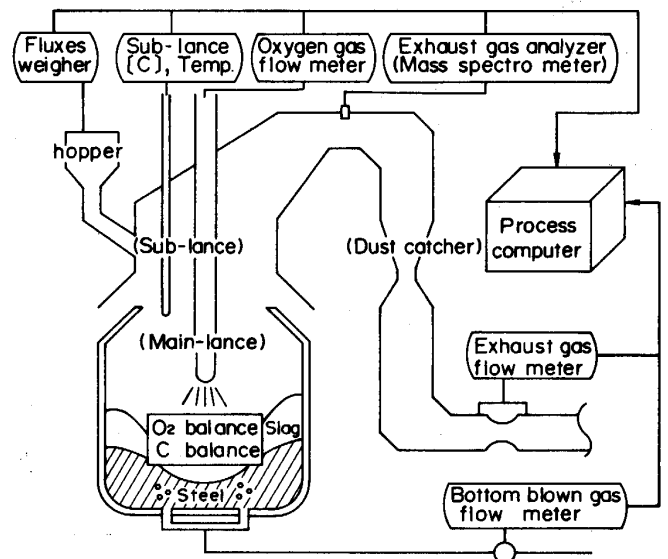


Fig. 2. Measuring method of blowing control system in BOF.

今回、排ガス情報を吹錬制御に利用するにあたっては、次の点に注意を払い、測定誤差が極力少なくなるように努めた。

(1) 分析精度向上および分析時間短縮のため、質量分析型排ガス分析計の導入⁷⁾

(2) 分析遅れ時間短縮のため、サンプラー～分析計系内の配管径の拡大、かつ吸引ポンプの能力増強

Fig. 2 に吹錬制御システムの構成図を示す。また、今回炉頂部に新設した質量分析型排ガス分析計の仕様を Table 1 に示す。

この結果、従来の分析計（OG ガス回収のために利用していたドライ分析計）と比較して、測定精度、応答時間ともに向上した。Table 2 には、本システムのデータサンプリング頻度、および遅れ時間を示す。特に遅れ時

Table 1. Main specification of mass spectrometer.

Item	Specification
Type	MGA-1200 of PERKIN-ELMER Corp., USA
Analysis	8 components (CO, CO ₂ , N ₂ , H ₂ , O ₂ , Ar, CH ₄ , He)
Measuring range	CO, CO ₂ , N ₂ : 0~100% O ₂ : 0~20% H ₂ , Ar : 0~10% He : 0~2% CH ₄ : 0~1%
Accuracy	±0.2% over full scale (Ar, CH ₄ , He : ±0.5%)
Response time	1 s (90% response)

間において、従来法では 30 s 程度であったが、本システムでは、約 18 s にまで短縮された。また、第 4 章で述べる炉口侵入空気量および吹出しガス量の計算のための N₂, Ar の定量化が可能となった。

3.2 排ガス情報処理技術

吹錬情報（上底吹きガス条件、副原料投入量等）と排ガス情報から、Fig. 3 に示した酸素、C のマスバランスがそれぞれ成立する。この関係を式化したのが(1), (2)式である。

$$W_{O_2} = \left\{ \int (f_i(Q, F) - f_o(V, A)) dt \right\} / W_M \dots\dots (1)$$

$$\Delta C = \left\{ \int (h_o(V, A) - h_i(F)) dt \right\} / W_M \dots\dots (2)$$

ここで W_{O₂}: 炉内酸化度 (kg/t) (溶鋼及びスラグ中に含まれる酸素量を示し、炉内で生じる各酸化反応を定量的に示す一因子) ΔC: 脱炭量 (kg/t) f_i: 供給酸素量 (Nm³/min) f_o: 排出酸素量 (Nm³/min) Q: 上吹き酸素量 (Nm³/min) F: 副原料投入量 (kg/min) V: 排ガス中 O₂, CO, CO₂ 量 (%) A: 炉口侵入空気、または吹出しガス量 (Nm³/min) (底吹きガスと OG 系パージガスの N₂, または Ar ガスバランスから定量化される。) W_M: 溶鋼量 (t) h_o: 排出 C 量 (kg/min) h_i: 供給 C 量 (kg/min)

この W_{O₂}, ΔC は炉内の酸化反応をあらわすパラメーターであり、今回、これらのパラメーターを既存モデル計算に適用するとともに、新モデルの構築に用いた。

また前述したごとく、排ガス分析値は、ガスの伝達および分析処理時間のため、炉内反応に対して遅れが生じる。モデル精度向上のためには、この間の W_{O₂}, ΔC それぞれの反応量を精度良く予測することが重要である。特に吹錬末期では、この時間を無視することができず、Fig. 4 および Fig. 5 に示した実績データに基づき、統計処理を行い、(3), (4)式を導入し遅れ時間内の反応量を予測した。(なお、W_{O₂} は、サブランスの測定時刻からの積算値である。)

Table 2. Data sampling for model calculation.

Item	Measuring apparatus	Frequency	Time lag*
Gas composition	Mass spectrometer	Every 2 s	18 s ^{*2}
Exhaust gas flow rate	Orifice meter	Every 2 s	16 s ^{*3}
Bottom blow gas flow rate	Orifice meter	Every 15 s	0 s
Oxygen gas flow rate	Orifice meter	Every 2 s	0 s
Addition rate of coolant and flux	Weigher	Every 2 s	0 s

* The standard point (0 s) of time lag is defined to the gas passing position of converter mouth.

*2 Time lag of gas analysis=Gas transportation period from converter mouth to gas analyser (9 s)+Gas analysis period (9 s)

*3 Gas transportation period from converter mouth to exhaust gas flow meter

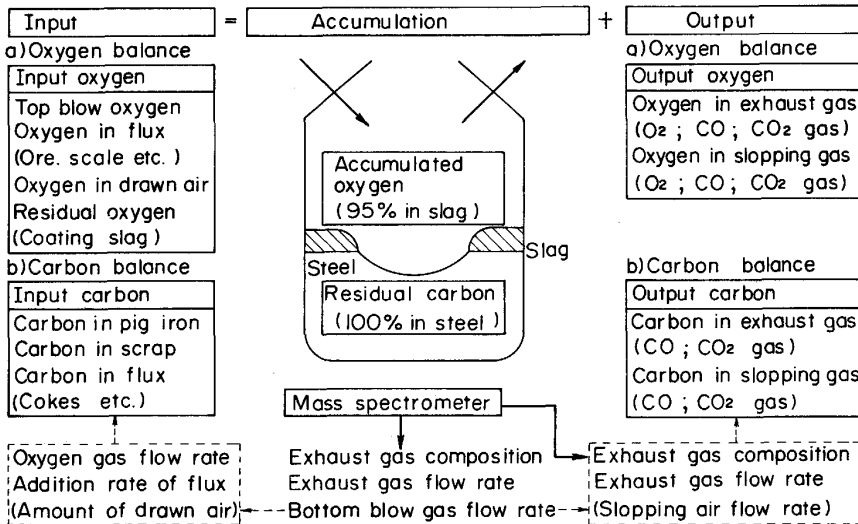


Fig. 3. Conception of model of various reactions in the BOF vessel.

$$dW_{O_2}/dO_2 = \alpha_1 \{1 - \exp(W_{O_2}/\beta_1)\} \dots\dots\dots(3)$$

$$dC/dO_2 = \alpha_2 \{1 - \exp((C_L - C)/\beta_2)\} \dots\dots\dots(4)$$

ここで α_1, α_2 : 定数 β_1, β_2 : 吹錬中に随時決定される定数 C_L : 脱炭限界炭素濃度 (%)

ただし, β_1, β_2 は吹錬中に決定される係数であり, それぞれの反応量は至近の経時変化から計算される。

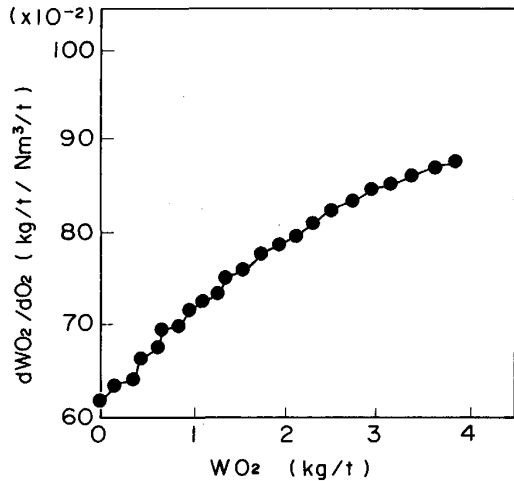


Fig. 4. Relation between W_{O_2} and dW_{O_2}/dO_2 .

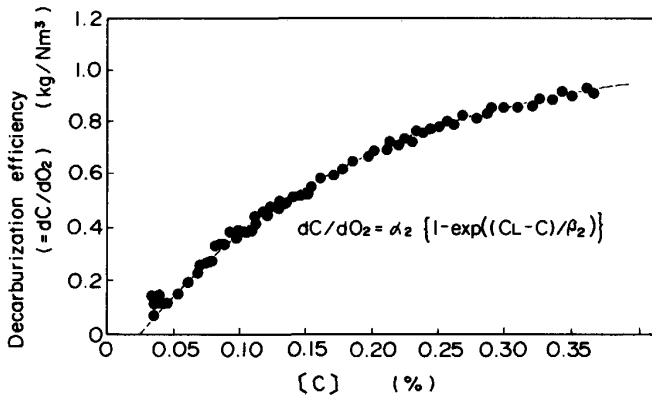


Fig. 5. Change of decarburization efficiency on last stage of blowing.

4. 新吹錬制御モデル設計

Fig. 6 に排ガス情報に基づく新吹錬制御モデル (以下排ガスモデルと記す) の構成を示す。途中サブランス測定以降, 第 3 章で述べた反応パラメーターを用い, 溶鋼温度, (T.Fe), および溶存酸素を連続推定する計算モデルを基本としている。

4.1 溶鋼温度連続推定モデルと推定実績

Fig. 7 に, 途中サブランス測定から吹止めまでの炉内酸化度の変化量 (ΔW_{O_2}) と昇温量の関係を示す。炉内酸化度の増加量と昇温量は良い相関を示している。すなわち, 吹錬末期における炉内酸化度は, 溶鋼の酸化反応量を現し, 昇温量と強い相関を示す。このことから, 吹錬末期の途中サブランス測定以降の昇温量 (ΔT) を C の反応も考慮に入れた熱バランス式(5)式から推定した。

$$\Delta T \cdot (W_M \cdot C_{pM} + W_s \cdot C_{ps}) = \Delta H_{cox} \cdot V_{cox} + \Delta H_{mo} \cdot W_{mo} - H_{loss} \dots\dots\dots(5)$$

ここで W_M : 溶鋼量 (t) W_s : スラグ量 (t) C_{pM} : 溶鋼比熱 (kcal/t·deg) C_{ps} : スラグ比熱 (kcal/t·deg) ΔH_{cox} : C の反応熱 (kcal/Nm³) ΔH_{mo} : 溶鋼酸化熱 (kcal/t) V_{cox} : C の反応量 (Nm³) W_{mo} : 溶鋼酸化量 (t) (炉内酸化度より算出した, それぞれの酸化生成物量) H_{loss} : 放熱ロス等 (kcal) (近似式より求めた定数項)

Fig. 8 に溶鋼温度の連続推定結果を示すが, スラグ量の大小によらず, 実績値と推定値はよい一致を示している。

従来のダイナミックモデルの脱炭反応予測量から昇温量を推定する方法と比較して, 温度適中率は大幅に向上し $\pm 10^\circ C$ での適中率は, 従来約 94 %であったが, 本法ではほぼ 100 %にまで達した。

4.2 (T.Fe) 連続推定モデルと推定実績

Fig. 9 に途中サブランス測定から吹止めまでの炉内酸

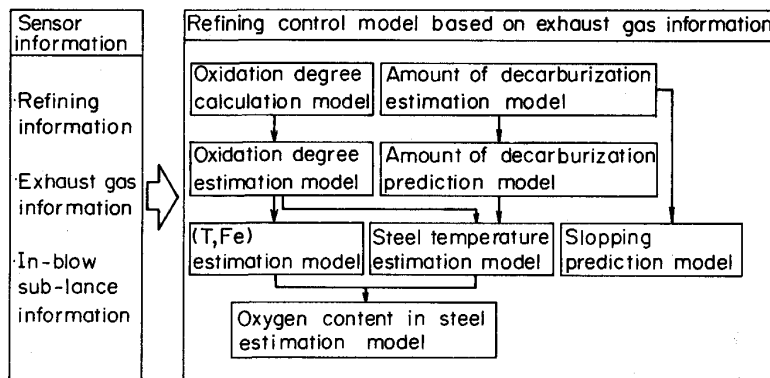


Fig. 6. Refining control model based on exhaust gas information.

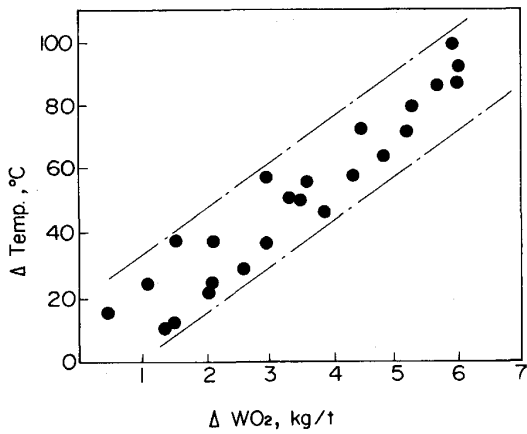


Fig. 7. Relation between change of W_{O_2} and change of bath temperature after intermediate sub-lance measuring.

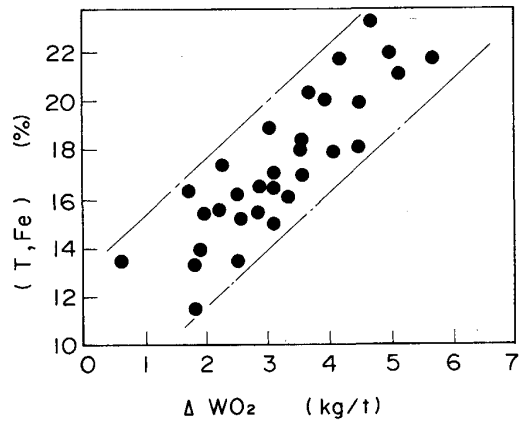


Fig. 9. Relation between (T.Fe) and change of W_{O_2} after intermediate sub-lance measuring.

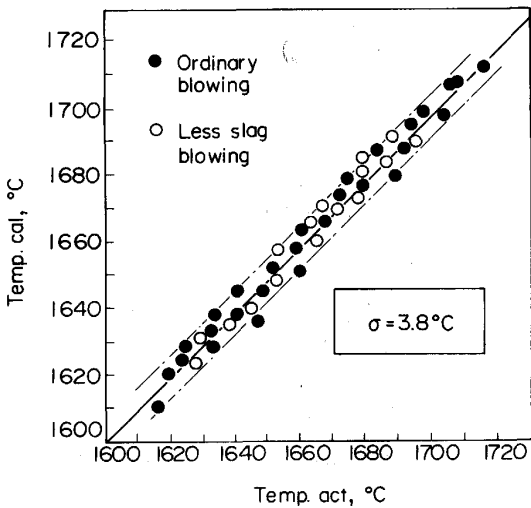


Fig. 8. Results of bath temperature calculation.

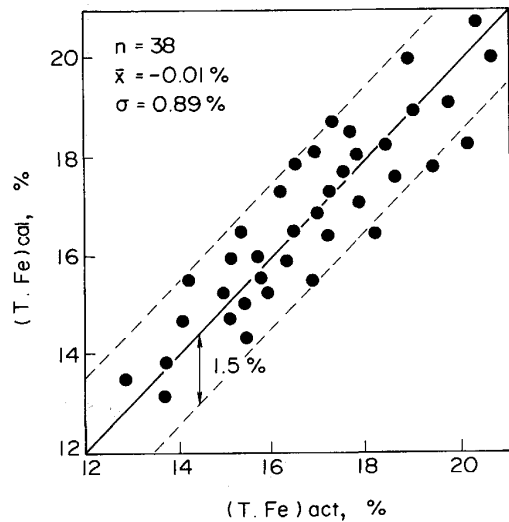


Fig. 10. Results of (T.Fe) calculation.

化度の変化量 (ΔW_{O_2}) と吹止め時のスラグ中 (T.Fe) の関係を示す。吹錬末期における炉内酸化量の増加は、Fe, Mn, P の酸化反応量と溶存酸素量の増加を表しており、(T.Fe) と相関が強い。そこで以下に示した式により吹錬末期の (T.Fe) 連続推定を実施した。

$$(T.Fe)_s = F(Q_B, F_{O_2}, C_s) \dots\dots\dots (6)$$

$$W_s(t) = \alpha \cdot W_{O_2}(t) + W_s(0) / \{1 - \beta(T.Fe)_s / 100\} \dots\dots\dots (7)$$

$$(T.Fe)(t) = \left\{ \frac{(T.Fe)_s}{100} \times W_s(t) + \gamma W_{O_2}(t) \right\} / W_s(t) \times 100 \dots\dots\dots (8)$$

ここで (T.Fe)_s: 途中サブランス測定時の (T.Fe) (%) Q_B : 底吹きガス流量 (Nm³/min) F_{O_2} : 上吹き酸素流量 (Nm³/min) C_s : 途中サブランス時の溶鋼炭素濃度 (%) W_s : スラグ量 (t) $W_s(0)$: 初期スラグ量

(t) t : サブランス測定時からの時間 (s) α, β, γ : 係数

すなわち、吹錬条件より求めた途中サブランス測定時の (T.Fe)_s を初期値として W_{O_2} の Fe 酸化への分配比 α と初期スラグ量 $W_s(0)$ を考慮して (T.Fe) を連続推定している。

推定結果を Fig. 10 に示す。± 1.5% の精度で吹錬末期の (T.Fe) が推定可能となっている。

4.3 溶存酸素連続推定モデルと推定実績

溶存酸素とスラグ中 (T.Fe) の間には、相関関係があることは、よく知られている。本モデルにおいても、前述した溶鋼温度、および (T.Fe) の推定値を用い、次の式に基づいて溶存酸素を連続推定した。

$$\log [O] = \log \{a \cdot (T.Fe)\} + b/T + c \dots\dots\dots (9)$$

ここで [O]: 溶存酸素 (ppm) T : 溶鋼温度 (K) $a,$

b, c: 係数

推定結果を Fig. 11 に示す. ± 100 ppm の精度で吹錬末期の溶存酸素が推定可能となっている.

4.4 噴出予知モデル

転炉における噴出は, 製鋼歩留りの低下, LDG 回収量の低下の原因となると同時に高速吹錬の障害の一つもあった. 噴出を防止するためには, スラッグのフォーミング抑制が可能な時期に噴出を予知し, 適切な噴出防止策を講じることが必要である.

本排ガス情報システムにて得られた吹錬中の脱炭酸素効率の推移の一例を Fig. 12 に示す. 噴出が発生した吹錬では, 噴出の発生前に脱炭酸素効率の低下が認められ, 噴出発生と同時に過剰の CO ガスを系外に排出している. これは, 供給された酸素と溶鋼中の C とが反応して生成される CO ガスが, スラッグ中にトラップされ, スラッグをフォーミングさせ, 噴出と同時に生成ガスを系

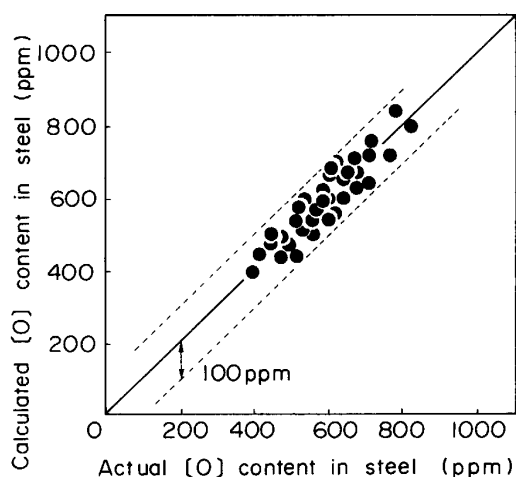


Fig. 11. Accuracy of estimation of [O] content in steel.

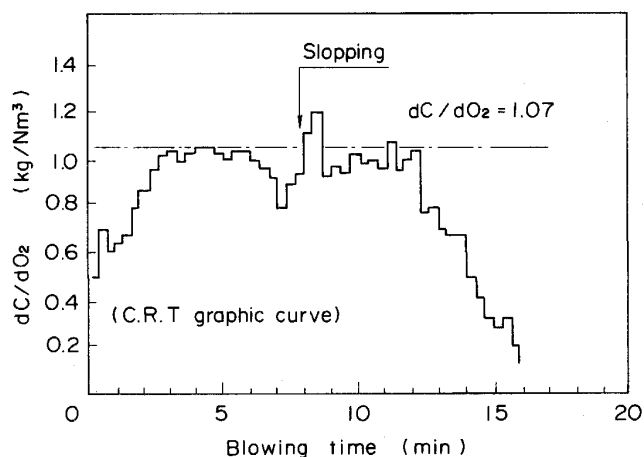


Fig. 12. Change of dC/dO_2 during blowing.

外に排出するためと考えられる.

この現象に着目し, 吹錬中の脱炭酸素効率と噴出発生頻度の関係を調査した. その結果 Fig. 13 に示したように, 脱炭酸素効率が 0.9 kg/Nm^3 以下に低下した時点より 40 s 以内に噴出の発生頻度がきわめて高くなっていることが判明した. 従って, 吹錬中の脱炭酸素効率を監視し, 所定の値 (例えば 0.9 kg/Nm^3) 以下に低下した時点で, 噴出警報を発生し, スラッグ噴出抑制剤を炉内に添加するシステムを構築した.

5. 新吹錬制御モデルの適用と効果

NKK 福山第 2 製鋼工場 (250 t, NK-CB 型転炉) における適用結果を以下に示す. 福山第 2 製鋼工場は, 連铸機及び取鋼精錬設備 (RH, NK-AP) をそれぞれ 3 基有しており, その鋼種構成は多岐にわたっている. また, 脱りん溶銑を利用したレススラッグ吹錬を約 4 割実施しており, 転炉吹錬はきわめて多様化している.

5.1 無倒炉出鋼比率の拡大

Fig. 14 に無倒炉出鋼比率と製鋼時間の推移を示す. 排ガス情報を利用した吹錬制御法の導入以降, 種々の改善により, 終点適中率が向上し, その結果として無倒炉出鋼比率は, ほぼ 100 % にまで達している. これにより, 製鋼能率が向上したばかりでなく, 倒炉サンプリング作業が皆無となり, 作業環境が改善された.

また, 無倒炉出鋼のうちでも約 5 割は, 終点サブランス測定を実施しない迅速無倒炉出鋼であり, 転炉~CC 直送チャージにおいても, 推定温度で吹止め, 推定溶存酸素を用いて合金鉄調整を行っている. その結果, Fig. 15 に示すように製鋼時間が約 36 s 短縮され, さらに測定用プローブも削減できた.

これらの結果, 1986 年後半には転炉 1/2 基操業化に

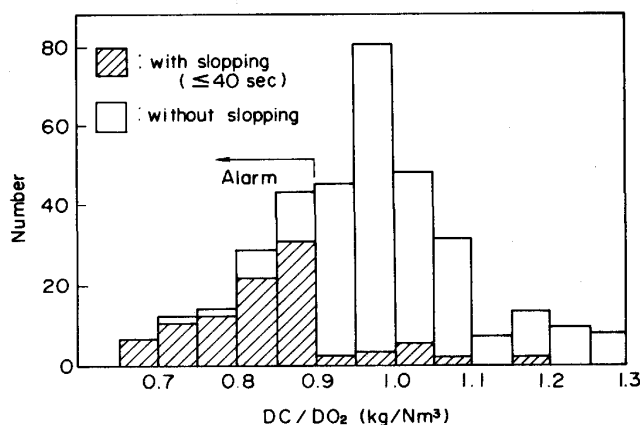


Fig. 13. Distribution of dC/dO_2 during middle stage.

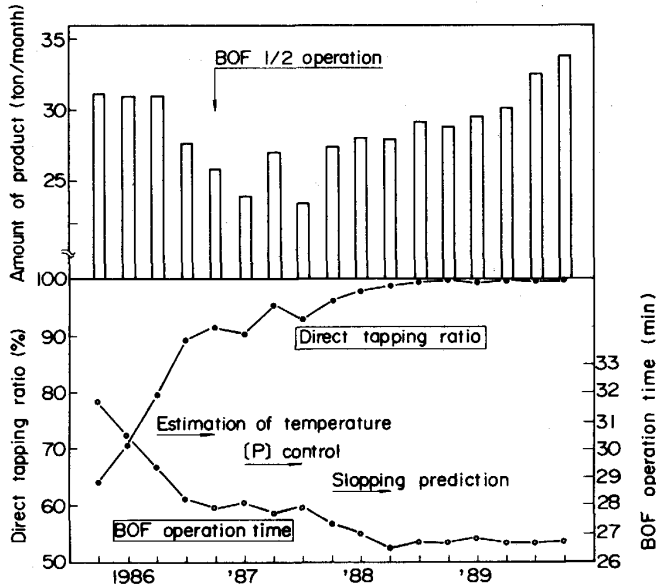


Fig. 14. Change of direct tapping ratio, BOF operation time and amount of product.

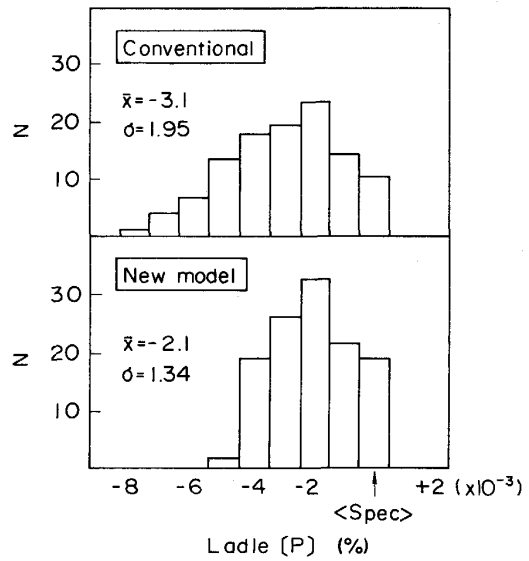


Fig. 16. Distribution of ladle [P].

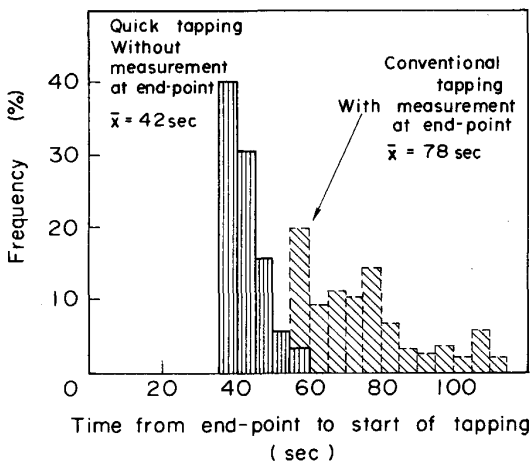


Fig. 15. Reduction of waiting time for tapping.

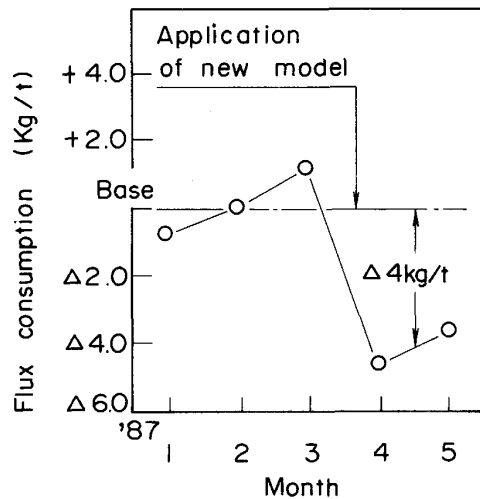


Fig. 17. Change of flux consumption (Except less slag blowing).

移行し、その後も多少の生産量の変動はあったが、1989年には32万t/月の粗鋼量を生産し、安定した高生産性を維持している (Fig. 14 参照).

5・2 媒溶剤の削減

吹錬制御において、媒溶剤使用量は以下の三つの基本式により決定される。

- (1) 脱りん平衡式⁸⁾
- (2) スラグバランス式
- (3) りんバランス式

以上3式を吹錬条件に応じて終点目標 (FeO)、温度、りん濃度を与えることにより、最適スラグ量を計算し、さらにその値に基づき、生石灰、ドロマイトなどの媒溶剤量を決定している。

吹錬末期に排ガス情報からスラグ中の (T.Fe)、溶鋼温度の連続推定を行い、それらが目標値になるように吹止めを制御した結果、Fig. 16 に示したごとく、成品りん濃度のばらつきが低減した。この結果、異常の発生率が低減したと同時に、成品りん濃度の平均レベルの適正化が図れ、Fig. 17 に示すように、媒溶剤を従来操業に比較して約4kg/t削減することができた。

5・3 噴出滓発生量の低減

本排ガス情報システムにて計測される脱炭酸素効率を吹錬中監視することにより、噴出予知が可能となり、かつ噴出防止策が実施された結果、噴出滓の発生が低減された。

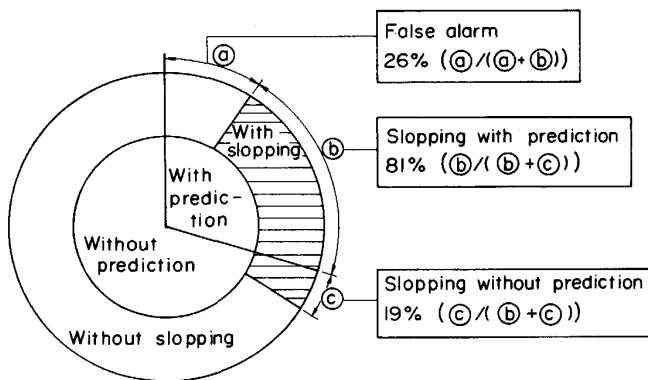


Fig. 18. Prediction ratio of slopping with exhaust gas information.

Fig. 18 に噴出予知精度を示す。予知精度は必ずしも満足のいくものではないが、発生する噴出の約 80 % は予知可能となった。

この結果、送酸速度の増加も可能となり、さらに自動吹錬の実施率が向上し、転炉 1/2 基操業下において安定した高能率操業を実施している⁹⁾。

6. 結 言

質量分析計を用いた排ガス情報を吹錬制御に取り入れた結果、炉内の酸化反応、脱炭反応等を連続的に把握することができた。その結果、吹錬中の溶湯温度、(T.Fe)、溶存酸素を精度よく連続推定することが可能となった。実操業に適用した結果、無倒炉出鋼比率の拡大、媒溶剤の削減、さらには噴出予知も可能となり、大幅な操業改善がなされた。特に転炉操業の高能率化に果たした役割

は大きい。

近年、新しい情報処理技術として知識工学 (AI) が注目をあびており、鉄鋼業においても高炉操業分野などを中心に導入が進んでいる。高炉操業と比較して操業条件がダイナミックに変化する転炉操業においては、AI の適用には困難な面も多々あるが、反面、省力化、及び作業者技能の向上・平準化等のために AI に期待するところは大きい。転炉における AI の導入はまだ開発の緒にすぎたばかりであり、新しいセンサーの開発が急務と考える。このような観点から、今回開発した排ガス情報処理技術をさらに発展させ、AI も組み入れた転炉操業のトータル制御システムを構築することによりいっそうの転炉計算機制御技術の改善に取り組んでいく所存である。

文 献

- 1) 板岡 隆, 五十部賢次郎, 中村昌平, 伊藤雅治, 坪井邦夫, 田口喜代美: 日本鋼管技報 (1963) 26, p. 136
- 2) 阪本英一, 久保雅信, 矢野幸三, 安居孝司, 鈴木勝也, 橘 克彦: 日本鋼管技報 (1972) 58, p. 541
- 3) 田中駿一, 山本倫久: 日本鋼管技報 (1977) 73, p. 11
- 4) 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
- 5) 山瀬 治, 福味純一, 中村博己, 滝 千尋, 池田正文, 山田建三: 日本鋼管技報 (1987) 118, p. 1
- 6) 竹腰篤尚, 橋本紘吉, 畑中聡男, 川嶋一斗士, 粕谷昌紀: 鉄と鋼, **73** (1987), S1005
- 7) H. ISO, Y. JYONO, M. KANEMOTO, Y. UEDA, T. YOSHIDA and K. ISOGAMI: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **27**(1987), p. 351
- 8) 碓井 務, 山田建三, 宮下芳雄, 丹村洋一, 長谷川輝之, 宮脇芳治: 鉄と鋼, **68** (1982), S 292
- 9) 滝 千尋, 池田正文, 福味純一, 田辺治良, 海老沢勉: 鉄と鋼, **68** (1986), S1045