転炉吹錬制御システムの開発*

岩村 健**・古澤 正夫***・宮本 正和**・布袋屋道則***・橘 秀文****

Development of BOF blowing control system*

Ken IWAMURA, Masao FURUSAWA, Masakazu MIYAMOTO, Michinori HOTEIYA
and Hidefumi TACHIBANA

In the No. 2 Steel making plant at Kashima Steel Works, CC-DC(Continuous Casting Direct Charge) process has been adopted to realize the synchronized operation between a caster (3CC) and a hot strip mill. In order to take advantage of this process, the BOF (Basic Oxygen Furnace) operation has been required to hit exact end-point carbon contents and metal bath temperatures, and to shorten the refining time. In addition, steel quality depends largely on the end-point hitting ratio. To meet the requirements, we have developed a new endpoint control system of BOF since the renewal of a process computer in 1992.

After the adoption of the new system, the direct tapping ratio is about 70%, which results in the reduction of operational cost and the improvement of productivity.

1. 緒言

転炉製鋼法の導入以来、転炉プロセスの最大の課題のひとつは吹錬終点における温度と成分的中であり、そのために転炉吹錬制御において、さまざまな技術が開発されてきた。とくに、溶鋼温度・成分を吹錬中に直接計測し、その計測値に基づいて終点制御を行うというサブランス情報（溶鋼温度・C濃度）を用いた終点制御システムは鉄鋼各社で導入され転炉プロセスの機能向上に寄与してきた¹⁾。

鹿島第2製鋼工場では、1982年に、サブランスを用いた終点制御システムを構築している²⁾。しかしながら、操業条件の変化などの理由で終点制御システムの中核であるダイナミックモデルの精度を長期に渡って維持できな

いという問題があった。近年では各社で、溶銑予備処理技術の発達（特に溶銑脱燐技術）により、転炉吹錬での脱燐機能を除去しスラグレス化を図り転炉吹錬の操業を安定化させ、終点制御の制御性を向上させかつ機能を拡張させる試みがなされているが³⁾⁻⁵⁾、本研究では、より高精度なモデル開発を通じて上記問題の解決をめざした。

そこで、ダイナミックモデルおよびフィードバックモデルのレベルアップを実施し、終点制御システムの積極的活用、すなわち終点制御の自動化を推進した結果、再吹錬率低下などの成果をあげることができた。以下終点制御モデルの概要と終点制御システムの実機適用結果について述べる。

2. 設備概要

鹿島第2製鋼工場の概要をFig. 1に示す。

連続 casting は熱延と直結しており(CC-DCprocess; Continuous Casting Direct Charge process), このプロセスの利点を活用するためには、転炉では、正確に目標溶鋼温度・成分になるように溶銑を吹錬し、かつ、より短時間で連続 casting へ溶鋼を供給する必要がある。

* 原稿受付 1995年12月26日

** 住友金属工業(株) システムエンジニアリング事業部
Sumitomo Metal Industries, Ltd.; 8 1-chome Fusocho, Amagasaki city, Hyogo 660, JAPAN

*** 住友金属工業(株) 鹿島製鉄所 Sumitomo Metal Industries, Ltd.; 3 Hikari Kashima-gun Ibaragi 314, JAPAN

**** 住金制御エンジニアリング(株) 九州事業所 Sumitomo Metal Industries Control & Engineering Corp.; 1 Konomi-machi, Kourakita ward, Kitakyushu city, Fukuoka 802, JAPAN

Key Words: endpoint control, BOF, automatic blowing, reblow ratio, direct tapping ratio.

Fig. 1 Material flow in No. 2 steel making plant at Kashima Steel Works

Fig. 2 Concept of endpoint control system

3. 終点制御システムの概要

3.1 システム概要

Fig. 2 には、終点制御システムの概要を示す。吹錬途中での溶鋼温度・C 濃度を計測させるサブランス測定装置、上吹き酸素流量・底吹きガス流量や冷却材投入量等の操作条件の計測装置および、ダイナミックモデル・フィードバックモデルにより構築されている。

ダイナミックモデルは温度バランス式・酸素バランス式からなり、溶鋼温度・C 濃度を推定する。フィードバックモデルはダイナミックモデルの補正のために導入されており、今回大幅な改善を実施した。

本システムの機能は、終点目標温度・C 濃度を満足するために必要な酸素量および冷却材量（鉄鉱石・スケール）を指示し、また、自動吹錬終了（オートストップ）実施時には、自動的に酸素の吹込みを終了し、吹錬を終えることにある。

4. 終点制御システムの詳細

4.1 ダイナミックモデル

ダイナミックモデルは溶鋼 C 濃度を推定する酸素バランス式と溶鋼温度を推定する温度バランス式から構成されている。両式を連立させて、操作量である酸素量と冷

却材量を算出する。酸素バランス式は式(1)で表され、低 C 領域から高 C 領域までの C 濃度と酸素消費量の関係を包括的に定式化している⁵⁾。

$$\frac{F_{O_2} + \eta \Sigma W_{sub} \cdot O_2}{W_{ST}} = a_0(C_{SL} - C_{EP}) + a_1 \ln \frac{C_{SL}}{C_{EP}} + a_2 + \Sigma l_i(X_i - \bar{X}_i) + FB_C \quad (1)$$

ただし

- a_0, a_1, a_2 : 酸素バランス式の係数
- C_{SL} : サブランス計測時の溶鋼 C 濃度 [wt%]
- C_{EP} : 終点 C 濃度 [wt%]
- F_{O_2} : サブランス計測時点から吹錬終点までの酸素消費量 [Nm^3]
- η : 副原料持込み酸素効率
- W_{sub} : 副原料投入量 [t]
- O_2 : 副原料中の酸素含有率 [Nm^3/t]
- W_{ST} : 溶鋼重量 [t]
- l_i : 操業要因の係数
- X_i : 操業条件要因
- FB_C : フィードバック補正項 [Nm^3/t]

Table 1 The rule of the feedback calculation model

 $FB(i)$: feedback value, $Mdlerro(i)$: error of the model $erro(i)$: error of feedback model G_{FB} : feedback gain, H : minimum detectable value

case	the trend of the error of the model	the amount of feedback
1	$Mdlerro(i-l) \cdot Mdlerro(i) \geq 0$	$FB(i) = FB(i-l) + G_{FB} \cdot \left(\frac{erro(i) + erro(i-l)}{2} \right)$
2	$Mdlerro(i-l) \cdot Mdlerro(i) < 0$ and $ erro(i) - erro(i-l) > H$	$FB(i) = FB(i-l) + G_{FB} \cdot erro(i)$
3	$Mdlerro(i-l) \cdot Mdlerro(i) < 0$ and $ erro(i) - erro(i-l) \leq H$	$FB(i) = FB(i-l)$

である。その吹錬に必要な酸素量（左辺）が、C 濃度の変化量をベースとする要因の多重回帰式で表されている。 X_i は各種操業条件を表しており、上吹き酸素流量、スラグ量等で構成している。また、右辺には、フィードバックモデルによる補正項を追加している。

温度バランス式も、従来の式では酸素バランス式と同様に C 濃度の変化量のベースとする要因の多重回帰式であったが、鹿島製鉄所第 2 製鋼工場のような低炭主体の操業では、終点 C 濃度の変動が小さく、その昇温量との関係が不明確なために、安定した精度を得ることができなかった。そこで、C 濃度ベースの形から、より昇温量との相関のある積算酸素量ベースの形に変更することにより、溶鋼温度の推定精度を向上させることができた⁶⁾。(2) 式に温度バランスを示すが、左辺の昇温量を積算酸素量と操業要因で表す多重回帰式になっている。操業条件 X_i は (1) 式で用いたものと同じである。また、酸素バランス式と同様に、フィードバックモデルの補正項を右辺に追加している。

$$T_{EP} - T_{SL} = b_0 \frac{FO_2 + \eta \Sigma W_{sub} \cdot O_2}{W_{ST}} + b_2 + \gamma \Sigma W_{sub} \cdot T_{sub} + \Sigma l_i (X_i - \bar{X}_i) + FB_T \quad (2)$$

ただし

- T_{SL} : サブランス計測時点の溶鋼温度 [°C]
- T_{EP} : 終点時の溶鋼温度 [°C]
- b_0, b_2 : 温度バランス式の係数
- γ : 冷却剤の冷却効率
- l_i : 操業要因の係数
- T_{sub} : 副原料の冷却量 [°C/t]
- FB_T : フィードバック補正項 [°C]

とする。

4.2 フィードバックモデル

フィードバックモデルはダイナミックモデルの推定誤差を補償するために導入している。フィードバック量は、(1), (2) 式に示したようにダイナミックモデルの補正項として用いる。終点にて温度・C 濃度を測定したチャージのダイナミックモデルの推定誤差の傾向を考慮してフィードバック量を計算する。Table 1 にその計算方法を示すが、大きく 3 パターンに分類してフィードバック量を算出している。

また、酸素バランス式では、Table 1 の方法に従って計算したフィードバック量を、ダイナミックモデルの始点となるサブランス測定時 C 濃度および終点目標 C 濃度を用いて補正している。Fig. 3 に示すように、吹き込んだ酸素量に対する終点 C 濃度はサブランス測定時 C 濃度レベルによって大きく異なるが、このサブランス測定時 C 濃度は各チャージごとに違うため、フィードバック量もこの情報をもとに補正する必要があるからである。以下、その補正方法を説明する。

まず、Fig. 3 の酸素吹き込み量と終点 C 濃度の関係を動浴 C 濃度レベルごとに定式化する ((3) 式)。今回は、三つの領域に分けている。

$$C_{EP} = s_1 \cdot \log \left(\frac{\Delta O_2}{W_{ST}} \right) + s_2 \quad (3)$$

ただし

s_1, s_2 : 係数

ΔO_2 : 酸素量 [Nm^3]

である。そして、終点 C 濃度に対する吹き込み酸素量の感度を、(3) 式を終点 C 濃度で微分した (4) 式で表す。

$$\varepsilon = \frac{d\Delta O_2}{dC_{EP}} = \frac{W_{ST}}{s_1} \cdot e \left(\frac{C_{EP} - s_2}{s_1} \right) \quad (4)$$

ただし

ε : 感度

とする。

Fig. 4 Adjustment of feedback value in blowing

Fig. 3 The relationship between the carbon content and the amount of oxygen

つぎに、動浴測定時のC濃度が属する領域のパラメータおよび終点目標C濃度 (C_{aim}) を用いて感度を計算し((7)式)、基準感度 (ε_{base}) との比である補正感度 (h) を用いて、(5)式のように、フィードバック値を補正する。Fig. 4 には、フィードバック計算のフローを示す。

$$FB'(i) = h \cdot FB(i) \quad (5)$$

ただし

$$h = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_{base}} \quad (6)$$

$$\varepsilon' = \frac{d\Delta O_2}{dCEP} = \frac{W_{ST}}{s_1} \cdot e^{\left(\frac{C_{aim} - s_2}{s_1}\right)} \quad (7)$$

である。

さらに、上記の一連のフィードバック計算を、吹錬特性の大きく異なる3種類の鋼種ごとに設定している。

近年では、終点C測定を省略して出鋼するダイレクトタップが各社で実施されているが、ダイレクトタップが実施される場合、ダイナミックモデルの推定誤差を計算するフィードバックの機能が働かなくなり、ダイナミックモデルの精度低下につながる。しかし(3)~(7)式の補正を動浴測定時に行うことにより、ダイレクトタップが実施されても適切なフィードバック量を毎チャージ設定可能となった。

4.3 エキスパートシステムの活用

終点制御システムは、先にも述べたように、吹錬途中でのサブランスによる動浴測定が起点となるが、この動浴測定タイミングを設定するのが、スタティックモデルである³⁾。スタティックモデルの機能としては、そのほかに、吹錬中に投入するフラックス量を決定する機能がある。

このスタティックモデルは、特に転炉作業時での非定常作業(例えば炉底交換など)が実施された場合に、精

Table 2 Example of adjustments based on operator's know-how

Factor	Adjustments	
	Oxygen	Heat
First heat of the new furnace	+1.0Nm ³ /pt	-80°C
Bottom exchange	+4.0Nm ³ /pt	-40°C
Gunning repair of refractory	—	-10°C
Addition of steel adhesion on the mouth	—	-3.3°C/ton
Waiting time	—	-8.0°C/ton

度が低下し、その結果、動浴測定時の溶鋼温度・C濃度のバラツキが大きくなり終点制御に悪影響を及ぼしてしまうという問題があった。

そこで、非定常作業に対するオペレータのノウハウをもとにエキスパートシステムを構築し、スタティックモデルを補正し、動浴測定時の溶鋼温度・C濃度を安定化した (Fig. 5)。Table 2 には、その補正ロジック例を示す。

Fig. 5 Function of the expert system

5. 適用結果

Fig. 6 には、一炉代に渡るダイナミックモデル的中率の推移を示す。ダイナミックモデルおよびフィードバックモデルのレベルアップなどの一連の取り組みにより、ダイナミックモデルのパラメータ調整を実施しなくても、一炉代に渡って精度良く推定可能となった。

そこで、本終点制御システムを実機に適用し、吹錬自動終了（オートストップ）を推進した。Fig. 7 には、溶鋼温度・C濃度の終点目標値と終点実績値との関係を示すが、オートストップ実施時のほうがオペレータ判断による手動の吹錬終了時より、目標値に対して精度良好である。

そして、従来はオペレータの判断による吹錬終了が100%実施されていたが、オートストップの適用率は70%まで上昇した (Fig. 8)。

さらに、終点測定を省略して出鋼するダイレクトタップの比率も上昇し、Table 3 に示すように再吹錬率の低下・処理時間の短縮等の吹錬諸元を改善することができた。

Table 3 Effect of the new system

	Conventional	New
Direct tapping ratio	49.9%	65.2%
Reblowing ratio	4.0%	2.0%
Waiting time for tapping	1.21 min.	0.95 min.

6. 結言

主にモデルのレベルアップを実施した終点制御システムを実機に適用し、その終点制御の自動化を推進した。その結果、普通銚による転炉吹錬としては高いオートストップ適用率を達成し、吹錬諸元の改善に貢献した。

今後は、溶鋼温度・C濃度だけでなく、鋼の特性に大きな影響を持つP濃度やMn濃度の制御も含めた終点制御システムの構築を図ってゆく。

参考文献

- 1) 島：転炉技術の展開と今後の展望；鉄と鋼，Vol. 76, No. 11 pp. 1765-1769 (1990)
- 2) 高輪，片山，布袋屋，平山：転炉複合吹錬終点制御モデルの開発；鉄と鋼，Vol. 73, No. 7, pp. 836-843 (1987)
- 3) 佐藤：高純度銅溶製のための溶銑予備処理・転炉技術；最近の高純度銅溶製技術の進歩，日本鉄鋼協会，pp. 73-105 (1992)
- 4) 金本，岡島，山根，山内：転炉吹錬におけるりん・マンガン制御技術の現状と今後の方向；鉄と鋼，Vol. 76, No. 11, pp. 1964-1971 (1990)
- 5) 斉藤，坪根，東，山根，竹添：転炉自動吹錬技術の開発；鉄と鋼，Vol. 76, No. 11, pp. 1972-1977 (1990)
- 6) 谷，岩村，橋，古澤，宮本：転炉制御モデルの開発；材料とプロセス，Vol. 6, p. 1069 (1993)

Fig. 6 Estimation accuracy of dynamic control model

Fig. 7 Accuracy of Auto stop mode

Fig. 8 The change of the direct tapping ratio and automatic blow-end ratio