

討 7 転炉の吹錬制御と自動化 (NARCシステム)

日本鋼管(株) 福山製鉄所 製鋼部 田口喜代美 尾関昭矢
長谷川輝之 白谷勇介
システム部 坪井勇 松井邦雄

1. 緒言

福山製鉄所、第3製鋼工場(300Ton転炉1/2稼動)は、プロセスコンピューター、サブランス、及び周辺設備により吹錬制御を行なっている、と同時にすべての精錬作業を自動化しており、終点適中率の向上、製品品質の安定向上、省力化に大きな効果を上げている^{1),2)}。サブランス法によるダイナミックコントロールの精度を決定する要素は、(1)鋼浴温度、(2)測定のための精度のよい検出端、(3)鋼浴を代表する情報を得るためのサンプリング技術、(4)吹錬反応を適確に反映する制御モデル、(5)個人誤差をなくし炉内反応を安定させるための吹錬操業技術であり、以上の各要素について述べる。

2. サブランス設備

第3製鋼工場のサブランス設備仕様¹⁾を表1に示す。サブランス及び、プローブの着脱装置は、すべて無人で計算機により操作される。サブランスによる鋼浴の温度、成分測定値が、火点により影響を受けるのを避けるため、酸素ランス、サブランス間の距離を大きくとる必要があり、当所では、1300mmである。

一方火点における激しい反応の影響により、サブランスが曲り、あるいは、地金が付着しトラブルの原因となる。サブランスの曲りは、回転矯正装置により、又、地金付着については、サブランス表面を円滑にすること、適切な吹錬パターンを採用することにより、数%に軽減され、サブランスの寿命は、一炉代使用可能となった。

3. サブランスプローブ(CONTEC)(鋼浴温度、[C]測定のための精度のよい検出端)

当社のサブランスプローブ³⁾(CONTEC:Controlling Measures for Temperature and Carbon)は、スラグの熱影響を受けない温度検出端、シェルモールド鑄型及び、ガスパージ方式を採用していることが特徴である。溶鋼のサンプルは、シェルモールド鑄型内で徐冷されているため、良好な凝固温度曲線が得られ、[C]の分析精度は、 $\sigma = 0.011\%$ で良好である^{1),3)}。この回収されたサンプルは、徐冷されているため、温度が高く保持されているので、水冷することにより、均一なマルテンサイト組織が得られ、そのまま発光分析用試料として使用される。その分析精度は、図1に示すごとく、通常のスプーンサンプルと差はない。それゆえ、無倒炉出鋼時の終点における発光分析用試料としても使用している。

表1 設備概要図

設 備	仕 様
サブランス	全長 23.200m 外径 125A 昇降 150, 20, 6m/min 冷却水量 150TON/Hr
計 算 機	IBM1800 コア 32KW ディスク 512KW×3
プローブ着脱装置	自動着脱、43本収容
プ ロ ー ブ (CONTEC)	シェルモールド鑄型 ガスパージ方式

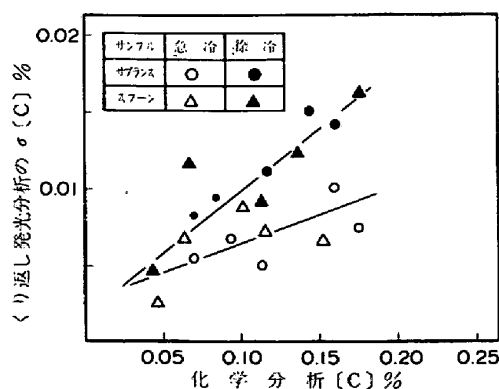


図1 サンプル分析精度比較

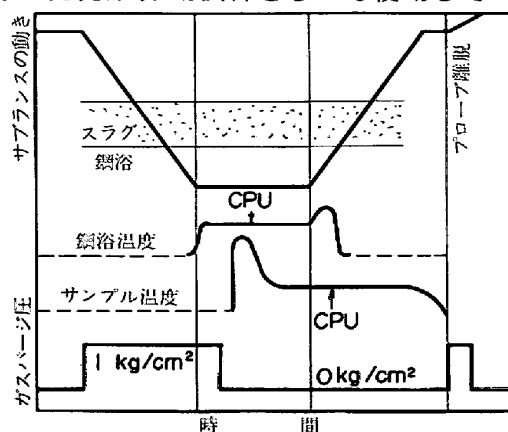


図2 サブランスによる測定

又、ガスパーシシステムを採用することにより、図2に示す様に、サブランス停止一定時間後にガスパーシが停止し、鋼浴を代表するサンプリングに必要な定位位置サンプリングが可能で、滓等の混入もないサンプルが得られる。それゆえ、CONTECによる[C]測定成功率は100%である。温度測定についても、検出端保護キャップにより、スラグの影響を受けず、その成功率は97%以上で、測定精度も高い。

4. 鋼浴を代表する情報を得るための、サンプリング技術

サブランス法の場合、吹錬中に激しい反応が起っている鋼浴から、再現性のある信頼できるデータを得る技術の確立が、最も重要である。そのため、例えば火点の範囲と、測定すべき位置とを考慮して、酸素ランスとサブランスの間隔、サブランスの長さ、プローブの長さを設計する必要がある。ここでは、鋼浴の測定深さと、時間に関する調査結果について述べる。

安定した吹錬条件下で鋼浴は、酸素ジェットによるエネルギーと、脱炭反応に基づくCOボイリングによる激しい攪拌によって、総体的には均一になっていると考えられるが、火点の近傍、あるいは、スラグメタル界面では反応が急速に進んでおり、温度と成分の偏析がある。深さ方向に2個所で同時に測定が可能なプローブを使用して、吹錬終了の約2000N_m前の吹錬中の温度、及び成分の偏析調査を行ったところ、図3の様な結果となった。すなわち、鋼浴表面ほど反応が進んでおり、

- (1) 表面近くの鋼浴温度は内部に比べて、30~50℃高い
- (2) 600mm以下で、鋼浴温度はほぼ一定値を示す
- (3) 鋼浴[C]は、鋼浴表面近くで低い値を示し、内部の約80~85%の値を示す

ことが解った。鋼浴[C]の分布については、図4に示す様に、スラグ中の粒鉄の[C]値が、鋼浴[C]値より10~20%低い値を示すこととよく合っている。

さらに吹錬後の温度、成分の経時変化についても調査を行い、次の様な結果を得た。⁴⁾すなわち、吹錬後も脱炭反応は進行し、6分後に鋼浴[C]値の約5%が脱炭して安定する。温度については、徐々に低下し、低[C]域においてその降下量は大きい。これは、低[C]域では、COボイリングが少く、上下の温度差が生じており、時間の経過とともに均一化して、上記の様な結果になると考えられる。

以上の結果から、サブランスによる測定は、一定位置、一定時期の測定が重要であり、当所では、その位置及びその時期についても計算機により制御されており、測定深さは700mmである。

5. 制御モデル

吹錬開始から終了までの広い成分範囲、温度範囲の反応を代表し、吹錬中の制御にも使用できる共通のモデルを作るために、炉内の吹錬反応を解析し、これに基づいて理論制御モデルを作成した。⁵⁾前述したごとく、吹錬中の鋼浴は、ミクロ的には大きな偏析があるため、鋼浴を代表しない異常値をサブランスが測定することがある。この異常値を判別するためにも、吹錬全域をカバーする理論式が必要である。

吹錬中にサブランスにより、溶鋼とスラグをサンプリングし、各成分の反応を表わす式を作成した。代表的な例として、鋼浴[C]の反応式について次の様な関係式を得た。

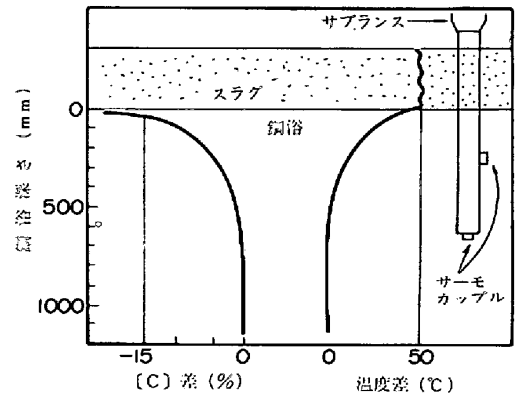


図3 鋼浴深さ方向の[C]、温度差

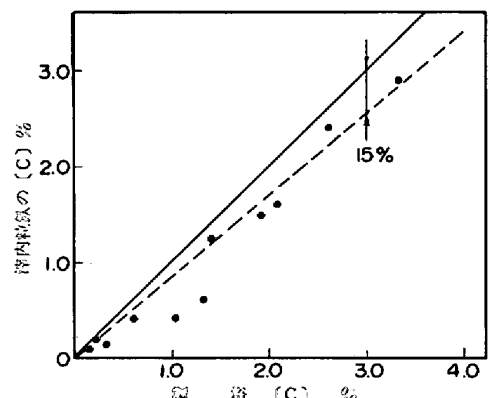


図4 吹錬中の滓内粒鉄の[C]と鋼浴[C]比較

$$-\left(\frac{dc}{dQ}\right)_i = f_i([C]_i, B_i, F_i, E_i, O_i, I) \dots\dots\dots(1)$$

C = 鋼浴中のC重量 (kg), F = 副原料使用量
 Q = 吹錬酸素量 (Nm³), O = 鉄鉱石投入量
 [C] = 鋼浴 [C] 含有量 (%), I = 初期条件 (主原料等)
 E = [C] 以外の鋼浴成分, i = 吹錬開始後の時間 份
 B = 吹錬条件

表2 制御方式

モデル	m	n	酸素	鉱石	冷剤	[C]	温度
スタティック	0	終点	解	解			
セミダイナミック	0	任意				解	解
ダイナミック	サブランス	終点	解		解		

(1)式は、脱炭効率と吹錬条件の関係を表わしたものであり、例えば、ハードブロー吹錬では単位酸素量当りの脱炭効率が増加する。(1)式を積分することにより、吹錬中の m 分から n 分の間における反応量が次の様に求められる。

$$-\int_m^n dc = \int_m^n f_i([C]_i, B_i, F_i, E_i, O_i, I) dQ \dots\dots\dots(2)$$

(1)式の脱炭反応及び、他の諸反応から発生する熱バランス式を作り、温度に関して同様に(3)式が得られる。

$$\int_m^n dT = \int_m^n f_T([C]_i, B_i, F_i, E_i, O_i, I) dQ \dots\dots\dots(3)$$

(2)(3)式を基本反応式として、主原料条件(溶銑の配合率、成分、温度等)が決定されると、表2に示すごとく、m及びnを選ぶことによって、スタティックコントロール、或はダイナミックコントロールの式として用いて、おのおのの解を得ることができる。ここで m = 0 として、吹錬条件 B_i で吹錬を続けたとき、n = i とすると、i 分 (Q_i Nm³) 時における鋼浴 [C]、温度が求められ、炉内の反応をある程度知ることができるので、このモデルを、セミダイナミックモデルと称している。表3に、3つの制御モデルと、自動吹錬のための制御モデルの各機能を示す。

表3 制御モデル機能表

モデル	機能
スタティック	1. 酸素、副原料の計算 2. 初期吹錬パターン制御
セミダイナミック	1. 吹錬中の鋼浴温度、成分の推定 2. 中期吹錬パターン制御 3. サブランスデーターのリジェクト、バックアップ 4. 酸素、鉄鉱石量計算 5. 終点成分、全出鋼量等の推定
ダイナミック	1. 末期吹錬パターン制御(自動ストップ) 2. 全酸素量、冷却剤量計算
フィードバック	1. モデル係数の計算、フィードバック
合金鉄	1. 合金鉄必要量計算 2. 合金鉄切り出し制御

セミダイナミック制御は、ダイナミック制御より精度は劣るが、初期条件を正確に把握することにより、大きな異常値は示さないで、図5に示す様に、サブランス測定値の適否の判断に用いられ、異常値をリジェクトするシステムを構成している。一方これら3つのモデル式において、ある時期に決定された反応係数は、炉体プロフィールの変化、主原料の緩慢な変化等諸条件の変動に応じて、徐々に変化する。そこで、終点温度成分と初期条件、吹錬条件から3つのモデル反応係数を計算して真の反応係数に修正する。この様に結果を3つのモデル式にフィードバックすることによって、制御精度を高めている。例として、フィードバックシステムにより求めた脱炭効率(係数)の推移を図6に示す。

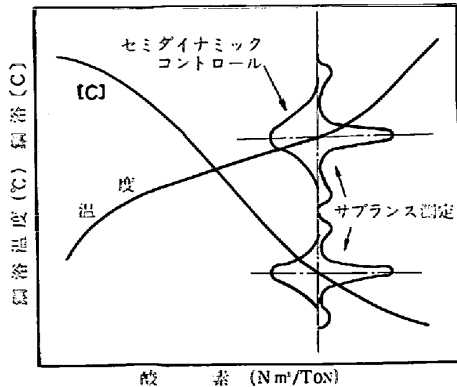


図5 セミダイナミックコントロールによるデーターリジェクト

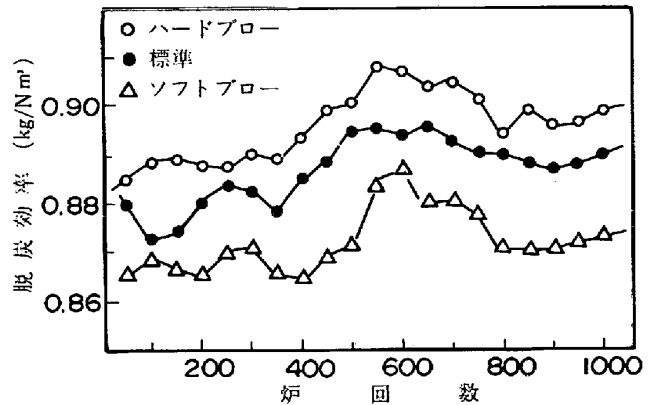


図6 フィードバック係数の推移例

6. 自動吹錬システム

吹錬反応の再現性を高め、制御精度を向上させるためには、スクラップ、副原料等の性状管理を行ない、炉内反応を安定させることも重要である。更に、吹錬中の操作を自動化し、個人誤差をなくすことによって、その効果を高めた。

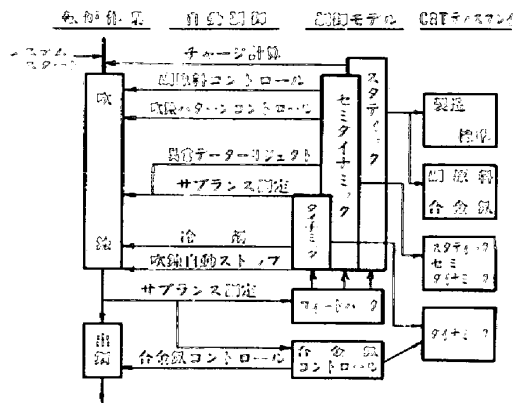


図7 自動制御フロー

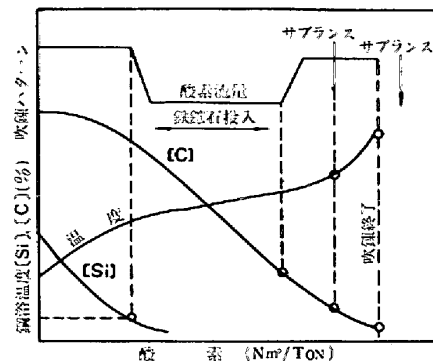


図8 セミダイナミックコントロールによる吹錬パターンコントロール

図7に自動化フローの概略を示す²⁾。スタティックシステムにより初期の吹錬パターン制御、副原料の自動投入が行われ、同時にセミダイナミックシステムにより、吹錬中の鋼浴とスラグの温度、成分が推定計算、表示され、スラグの生成状態に応じて、図8に示す様に、送酸速度、ランス高さ、副原料投入等の吹錬パターンコントロールが行なわれる。温度、成分の推定値が所定の値になった時点で、サブランスが測定を行ない、その結果をセミダイナミックシステムでチェックし、ダイナミックシステムへと制御モデルは移行する。ダイナミックシステムにより、吹錬は自動的に停止され、サブランス測定後無倒炉出鋼される。さらに合金鉄については、終点の実績をもとに、銘柄を選択し、添加量の計算及び、自動切り出しを行っている。

この様な自動化は、一見オペレーターに無味乾燥さを与えかねないが、計算機からの各種情報を、CRTを介してオペレーターに与え、オペレーターと計算機が対話できるシステムとして使い易くした。

7. 実績

吹錬の自動化オンライン後1年半の現在、図9に示す様に、ダイナミックコントロールの適用率は95%以上であり、吹錬終点での[C]、及び温度の同時適中率は80%以上に向上した。これは、従来の吹錬者による方法に比べ、40%高い、又、再吹錬率も、従来の10%から4%に減少した。さらに歩留の向上、品質特に介在物の減少、転炉耐火物原単位、合金鉄原単位の減少の効果が得られている。これら一連のシステムは、吹錬から脱酸までの全精錬工程をコントロールするので、NARCシステム(NKK'S Automatic Refining Control System)と名づけ実用化した。

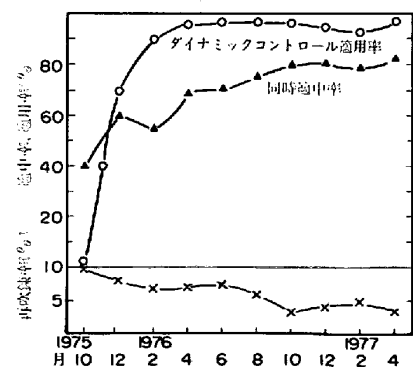


図9 ダイナミックコントロール実績

参考文献

- (1) S.Miyoshi, K.Taguchi, I.Tsuboi and T.Hasegawa; The BOP Symposium in Toronto, Sept. 1975.
- (2) S.Tanaka, H.Maeda, K.Taguchi, I.Tsuboi and A.Ozeki; AIME Meeting Mar. 1977.
- (3) N.Nagata, G.Usui, A.Ozeki and M.Ishiguro; International Conference on the Science and Technology of Iron and Steel, Tokyo, Sept. 1970.
- (4) 前田, 田口, 尾関, 長谷川, 坪井, 松井; 鉄と鋼, 63(1977) No. 4, S134.
- (5) 田中, 山本; 日本鋼管技報 No.73, 1977.