

製鋼用転炉の高精度制御

山 本 倫 久

(工学部 機械システム工学科)

1. はじめに

日本の鉄鋼製造技術は近年技術レベルが向上し、品質、歩留の向上、生産効率の向上は著しく、また設備の自動化、多品種少量生産体制の確立が進んできている。

代表的な製造工程であって、バッチ操業による鋼の精錬炉である転炉の制御システムは、以前から制御用のコンピュータを駆使して、炉内反応の数式モデルによる計算で炉内の状況を推定し、吹錬（転炉に酸素を吹込んで精錬すること）制御の精度向上に努めてきた。

従来は、吹錬開始時の各種データを入力して計算し、吹錬終了時に目標の品質の鋼が得られるように、必要な操作量（吹込酸素量、投入冷却剤量）を求めていた（スタティック制御）。

しかし要求品質が厳しくなり、また鋼中炭素含有量と溶鋼温度の同時適中が強く望まれるようになって、さらに精度の良い制御が必要となった。そこで考えられたのがダイナミック制御である。これは先ず終点直前の炉内溶鋼の炭素含有量と温度を実測し、この値と終点の目標値との差から、吹錬末期の炉内反応を計算し、所要の吹込酸素量と投入冷却剤量を求めるものである。これによって高精度の制御を実現することができた。

さらに操業結果から、炉内反応の数式モデルの係数を修正するフィードバック修正を併用することによって、種々の操業状況変化に強い制御方式を得ることができた。

操業中の炉内状況を測定する方法としては、本報文中に述べる炉内溶鋼の炭素含有量と温度の実測法のほかに、排ガスの流量と成分を測定して脱炭速度を計算で推定する方法もあるが¹⁾、これも含めてダイナミック制御は各製鉄所で広く実用化されている。

このダイナミック制御法は、バッチ操業プロセスの高精度な制御を実現するためには優れた方法であり、製鋼用転炉に限らず、他の業種のプロセスにも参考となると思われる。しかるに転炉のダイナミック制御について公表された十分な報文がないので、ここに報告する次第である。

2. 転炉の吹錬制御

2. 1 転炉の操業

2. 1. 1 転炉の位置づけ

転炉を中心とする製鋼工場は、高炉から一定品質の鉄鉄を受け、需要家からの注文に合わせた成分の鋼を作る。転炉はバッチプロセスであり、1回毎につけられるチャージ番号は材質を管理する指標として製品になるまでトレースされる。

鋼の成分の内、炭素含有量は転炉における吹錬で決まり、マンガンなどの添加元素は吹錬終了後転炉または取鍋への合金鉄の投入によって決まる。また不純物は転炉で媒溶剤との反応で除かれさらに別の工程で脱ガスが行われる。

2. 1. 2 操業の狙い

転炉操業における狙いは次の2項目である。

(1) 溶鋼中炭素含有量（以下炭素量と省略）

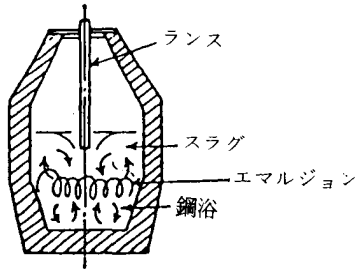
転炉反応の中心である脱炭の度合いを適切に行ない、鋼の炭素量を目標の値の範囲にすることが第1の狙いである。脱炭の度合いは吹込酸素量によって決まる。吹止め酸素量を如何にして決めるかが問題である。吹止め後溶鋼成分の確認分析を行なって、脱炭不足であれば追い吹きを、過剰であれば加炭を行なって調整することはできるが、追い吹きや加炭を行なうことは時間の無駄である。また吹止め後溶鋼成分の確認分析を待たずにすぐ出鋼できればさらに時間を節約できる。

(2) 出鋼温度

転炉から出鋼後、一定時間を経て連続鋳造を行うが、連続鋳造機に溶鋼を注ぐ時の温度は表面状態や冷却凝固の状態に大きく影響するため、温度の許容範囲が限られている。このため転炉の出鋼温度は目標の温度範囲にする必要がある。吹き止めた時に、出鋼温度が目標値から外れていれば、温度が低ければ追い吹きを、温度が高ければ冷却剤（鉄鉱石）を投入して調整するが、前項と同じように追い吹きや冷しは時間の無駄であって避けたい。

2. 1. 3 転炉の操業法²⁾

転炉の主原料は溶鉄と屑鉄である。屑鉄装入後、溶



第1図 吹錬中の炉内状況図

鉄を注入し、上部からランスを降下させ吹錬を開始する。ランスから噴射される酸素は98.5~99.5%純度のものである。反応によって溶銑中の炭素、磷、マンガ、硅素、硫黄が燃焼して発熱し、各元素は減少または除去させる。

ランスからの酸素の通入と同時に、造滓材としての副原料がシュートから投入される。FeO、MnO、SiO₂、P₂O₅などの酸化生成物は滓化されて、投入され

たCaOとともに酸化反応性の高いスラグを形成する。吹錬中の炉内の様子を第1図に示す。炭素は酸化してCO₂、COとなり鋼浴を沸騰させ、図のように循環運動によって反応が促進される。

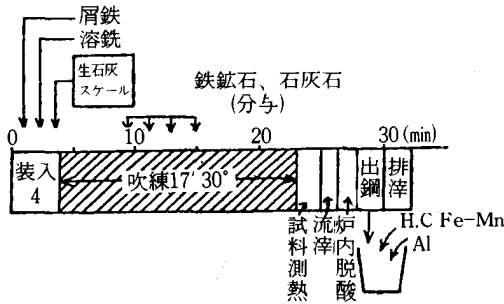
反応が進行し鋼浴の温度が上昇すると、冷却剤として適当な量の鉱石またはミル・スケールを投入する。吹止時期は、吹込酸素量、時間、前回あるいはそれ以前の吹錬実績を参考にして決定させる。

実際の操業では、吹錬鋼種、溶銑成分、装入原料の量により操業方法や時間が変わるが、第2図に軟鋼精錬の場合の時間的経過の例を示す。脱炭を始めたとした炉内反応過程の一例は第3図のように推移する。

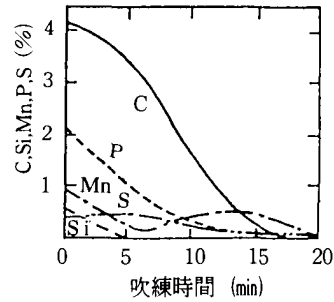
2. 2 スタティック制御

2. 2. 1 スタティック制御方式

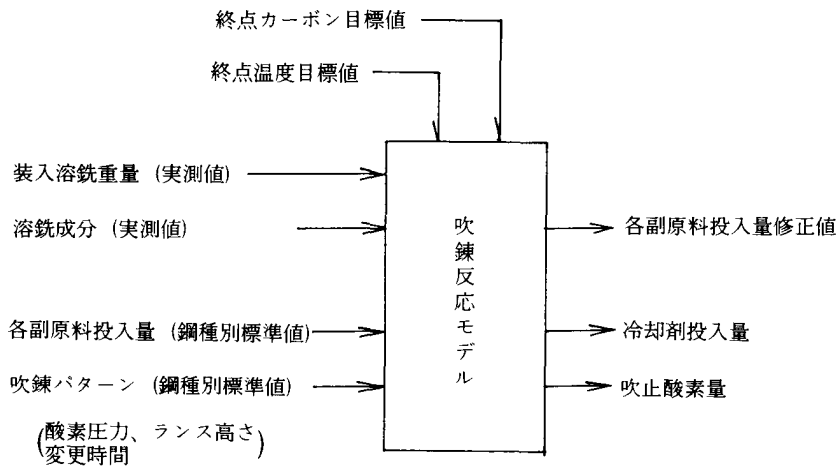
吹錬作業の標準化を行ない、吹錬開始前のデータによって、吹込酸素量および吹錬前・吹錬中に投入する副原料と冷却剤の量を、転炉の吹錬反応モデルを用いて予め計算を行なう方式をスタティック制御方式という。



第2図 転炉作業過程の例



第3図 転炉の炉内反応過程



第4図 スタティック制御方式における入力と出力

終点炭素量と終点温度の目標値を定め、予め求めた吹錬パターンと各副原料投入量の鋼種別標準値と、装入する溶銑重量と溶銑成分の実測値を入力し、吹錬反応モデルで計算することによって各副原料投入量修正値と冷却剤投入量および吹止酸素量を求めるものである。その関係を第4図に示す。

モデル式が或程度厳密に作られており、操業が標準通りに行なわれれば、かなり有効な制御の成果が得られる。

2. 2. 2 総合炉内反応モデル

代表的な例として炭素量の挙動についてみれば、総合炉内反応モデルからの、酸素量当たりの脱炭率についての関係式は概念的に(1)式のようなものである。

$$\left(\frac{dC}{dQ} \right)_i = f_1([C]_i, P_i, F_i, E_i, O_i, I, B, K) \quad \text{----- (1)}$$

- i : 吹錬時間 (min.)
- C : 鋼浴炭素重量 (kg)
- $[C]$: 鋼浴炭素含有率 (%)
- Q : 吹込酸素量 (Nm³)
- P : 吹錬パターン (酸素流量、ランス高さ)
- F : 媒溶剤 (副原料中の) 投入量
- E : 溶鋼他成分含有量 (Si, Mn, P等)
- O : 鉄鉱石投入量
- I : 初期条件
- B : 最高脱炭速度
- K : B 以外のモデル係数

すなわち、このモデルから鋼浴炭素重量は

$$C = \int_m^n dC = \int_m^n f_2([C], P, F, E, O, I, B, K) dQ \quad \text{----- (2)}$$

鋼浴温度 T (°C) についても同様に(3)式が得られる。

$$T = \int_m^n dT = \int_m^n f_3([C], P, F, E, O, I, B, K) dQ \quad \text{----- (3)}$$

これらの式で m ; O ; n ; i 分時の吹込酸素量、とすれば吹錬開始 i 分後での鋼浴炭素量、温度が得られ、同様にして他の成分、温度、重量なども求められる。このとき吹錬条件は実績の吹錬パターンおよび媒

2. 2. 3 セミダイナミック制御方式

(2)式および(3)式で m ; O ; n ; i 分時の吹込酸素量、とすれば吹錬開始 i 分後での鋼浴炭素量、温度が得られ、同様にして他の成分、温度、重量なども求められる。このとき吹錬条件は実績の吹錬パターンおよび媒

溶剤、冷却剤の投入経過を用いる。なお吹錬末期では予定の吹錬条件に切替えて計算し、前もって終点の予測をたてておく。このように実績の吹錬操作を反映して計算するため、「セミダイナミック」と呼んでいる。このモデルによって刻々の炉内反応状況を把握することができ、制御盤上の CRT に表示されるので、操炉員にとっても解り易いシステムである。

2. 3 スタティック制御からダイナミック制御へ

スタティック制御では種々の要因変動や操業の再現性の不足から、終点適中には限度があることが認められた。

スタティック制御の適中成績に限界を作っている要因の大半は吹錬反応の再現性であると云える。これはスタティック制御が予測制御であるためであって、制御を成功させるためには再現性そのものを高めることが必要である。しかし、そのためには根本的に吹錬の方法を検討し直し、炉内反応の外乱になる要因をとり除かねばならないが、これはかなり難しい。

そこで吹錬前の情報から予測的に数式モデルで演算するスタティック制御ではなく、吹錬中の情報で修正するダイナミック制御が必要となってくる。

一方ダイナミック制御は吹錬中の情報で修正するので、従来測定できなかった吹錬中の情報を測定しなければならない。しかもこの測定値に全面的に依存して制御を行うので、十分な精度と十分な安定性が要求される。また見方を変えれば、計測技術が進歩することによって制御がレベルアップすると云うこともできる。

3. 炉内溶鋼センサー

3. 1 炉内溶鋼の炭素量・温度センサー³⁾

転炉の吹錬中あるいは吹錬終了後に、炉内の溶鋼温度と炭素量を同時に測定するセンサープローブを開発し、実用化した。この溶鋼用炭素量・温度一体化センサー (以下溶鋼センサーと呼ぶ) は対象炉の大小によって若干寸法の異なる数種を開発した。

1) 温度センサー

消耗型熱電対⁴⁾ (直径0.075~0.15mm, PR熱電対・タイプR、U字石英管使用) を原型とし、プローブが広い高温雰囲気と、厚いスラグ層を通過中に测温検出端が溶損されずに、かつ溶鋼中では鋭敏に鋼浴温度を測定できるように配慮した。

そのため保護キャップの厚み、U字石英管の厚み、紙スリーブの厚みなどは、用いる炉の大小に合わせて実験によって決めた。

2) 炭素量センサー

断熱性の良いシェルモールドに熱電対を組入れた型に、溶鋼を注ぎ入れ、徐冷する過程の温度を測定して熱分析を行ない凝固温度から鋼中の炭素量を知るカーボンデターミネータを原型とし、センサーを溶鋼中に押込んで溶鋼を流入させ、次に引上げて徐冷しながら温度を測るようにつくった。

そのため、熱的状态がかなり異なるのでシェルモールドの材質、寸法、また脱酸用アルミニウムの量などは、実験によって決めた。

一方炉前のオフライン測定と異なり、炉内での測定となるため、特徴のある改良点としてガスパージシステムを採用した。第5図に示す通り厚いスラグ層を通過中は、サンプル室の上部から吹き込まれる圧力ガスによりスラグの侵入を防ぎ、溶鋼内の所定の位置で圧力ガスを止め、残ガスを放出してその位置から滓混入の少ない良好な溶鋼サンプルが採取できる構造になっている。その結果、ガスパージの停止後0.5~1秒の間に確実にサンプルが流入することが確認されている。

3) 精度

以上述べた工夫と特徴により、溶鋼センサーは安定した溶鋼温度と凝固温度が得られ、そのため測定精度がよい。温度の精度は消耗型熱電対と同じであり、計

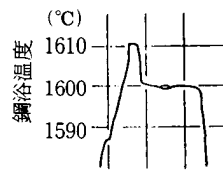
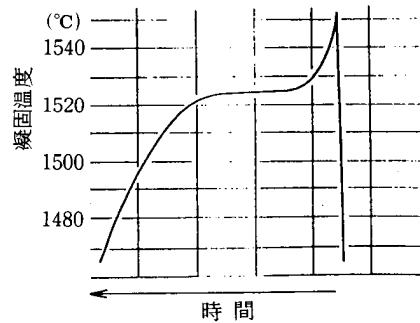
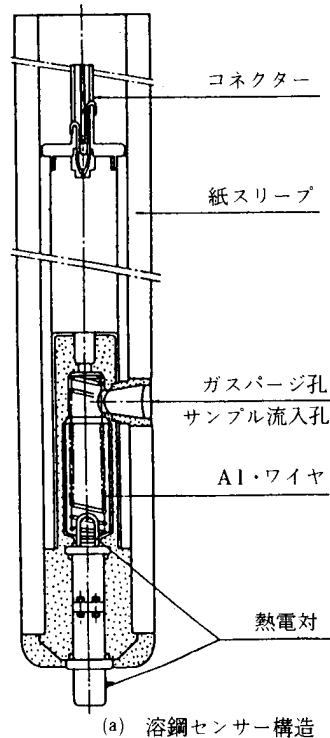
算機の読取精度も含めて2~5℃の許容誤差である。一方炭素量の分析精度は、低炭素域で $\sigma = 0.011\%$ 、高炭素域で $\sigma = 0.019\%$ である。

3. 2 サブランス設備³⁾

サブランス設備はサブランス本体、旋回式サブランスガイド、ランス昇降駆動装置、およびプローブの自動着脱装置によって構成され、それらを第6図に示す。サブランスは水冷のため3重管となっており、内筒が温度検出用補償導線およびパージ用ガスの導管となっており、外筒径は139.8mmと太く高速昇降に耐える剛性を保つよう設計されている。

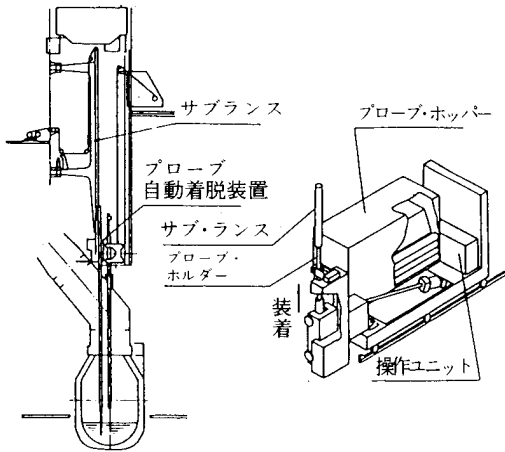
サブランスはその先端に炭素量と温度を測る溶鋼センサーを装着することによって鋼浴表面下の任意の位置で測定が可能であり、プリセットされた位置に±10mmの精度で停止し、その場所の鋼浴温度を測定し、さらにサンプルを採取することができる。

通常サブランス測定工程は次のとおりである。目標鋼種、装入量などの初期条件に応じて、計算機が吹錬中の測定時期とサブランスの停止位置を計算し指示する。測定時期になるとサブランスはエアパージしながら最高150m/minの速度で降下し、与えられた停止位置に自動的に停止する。停止後にエアパージが止



(b) 温度指示曲線

第5図 溶鋼センサーと温度指示曲線



(a) サブランス設備 (b) プローブ着脱装置

第6図 サブランス設備とプローブ着脱装置

まり、内圧ガスが放出され、溶鋼センサー内に溶鋼サンプルが流入する。同時に鋼浴温度を測定し、直ちにサブランスは高速度で上昇し、この間に凝固温度が測定され、計算機に読込まれ鋼浴炭素量に変換される。

サブランスの上限位置でプローブが自動着脱装置によって抜き取られ、新しいプローブがホッパーから供給されてサブランスに装着され一連のサイクルが終了する。抜き取られたプローブは作業床へ回収され必要に応じて分析に供される。

3. 3 測定データの信頼性³⁾

当然のこであるが、ダイナミック制御を成功させるためには吹錬中に正確な情報を得ることが必要である。サブランス法の場合、吹錬中に激しい反応が起こっている鋼浴の中から、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。

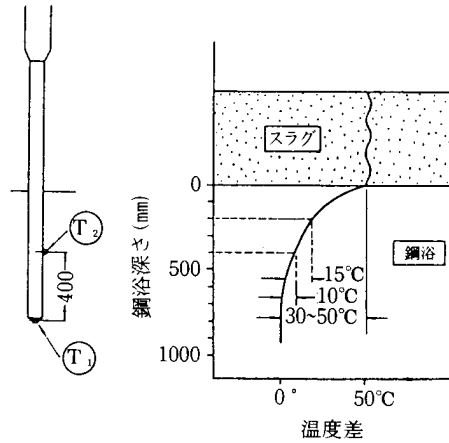
鋼浴は、酸素ジェットによるエネルギーと脱炭反応に基づくCOポイリングによる激しい攪拌によって、安定した吹錬条件下では総体的には均一になっていると考えられる。しかし反応が進行している火点の近傍、あるいはスラグ・メタル界面では温度と成分の偏析がありうる。これらの火点の影響を調査するために、吹錬を標準パターンで行ない、反応を安定させて、推定吹錬終了時の約2分前にサブランスでサンプリングし、鋼浴温度の分布を次のようにして調査した。

深さ方向2ヶ所の温度を測定するため2個の測温子

を取りつけた特殊プローブを用いて測定したところ、

- ・スラグの温度は鋼浴の温度よりも30~50℃高い。
- ・鋼浴温度は600mm以下ではほぼ一定値を示す。

ことがわかった。この結果から鋼浴中の温度分布をモ



第7図 鋼浴内温度分布

デル化すると第7図のようであると考えられる。

吹錬中の鋼浴成分の分布についても、上下方向に2つのサンプル容器を持った特殊プローブを用いて測定したところ、上部の炭素量が低く、反応が速く進行していることがわかり、鋼浴炭素量の分布も温度と同様の偏析状態を示した。これらの結果から測定位置(深さ)およびプローブ長さが決定され、それぞれ表層から600mm以下、および1.5mと決定した。

吹錬中にサブランスによって測定した鋼浴深さ700mm位置の温度と、その直後に吹錬を中断し炉を倒して通常の測定方法で測定した鋼浴温度との関係は、温度差の $\bar{x} = 0.05^\circ\text{C}$ 、バラツキは $\sigma = 2.77^\circ\text{C}$ であって、サブランス測定値が鋼浴を代表していることがわかる。

4. ダイナミック制御

4. 1 炭素量・温度の同時適中制御⁵⁾⁶⁾

吹錬の終点において溶鋼の炭素量と温度を同時に目標値に適中させようとするものである。これには吹止酸素量をどれだけにするかを定めることと、そのままの操業で酸素を吹止めた時に炭素量・温度のどちらかが目標範囲に入らないことが予測された場合に何等かのアクションをとることが必要となる。

ダイナミック同時適中制御に必要な操作量として、吹止酸素量の外に、冷却剤量、加炭剤量、ランスアクション(吹錬圧力、ランス高さ変化)が考えられる。そして再吹錬は極力避けることとする。

同時適中制御は第8図に示すように、溶鋼センサーによる測定後計算機で予測される下記の4つの型のいずれかによって行われる。まず脱炭モデルによって終点炭素量が目標値に一致するような吹込酸素量を決定

し、次に昇温モデルによってその吹込酸素量に対応した終点温度 T_{EC} を計算する。この T_{EC} と目標終点温度 T_{EA} との関係によって次のように分類される。

ϵ は終点温度の許容差である。 ($\epsilon > 0$)

- 1) $|T_{EC} - T_{EA}| \leq \epsilon$ のとき
目標終点炭素量に必要な酸素量を吹止酸素量とする。
(適中型)
 - 2) $T_{EC} - T_{EA} > \epsilon$ のとき
目標終点炭素量に必要な酸素量を吹止酸素量とし、さらに冷却剤量を計算し、投入する。(冷却剤投入型)
 - 3) $T_{EA} - T_{EC} > \epsilon$ のとき
 - (3-1) 温度が目標下限以上になるような吹止酸素量を計算し、その酸素量の時の終点炭素量を求めて加炭剤量を計算する。(吹下げ加炭型)
 - (3-2) 脱炭モデルと昇温モデルから、吹止酸素量とソフトブローパターンを決定する。
(ソフトブロー型)
- ソフトブローとは、吹錬圧力を下げるかランス高さを上げるかして酸素流の衝突速度を低くすることによ

って、反応速度を下げることを云う。

ソフトブローによる脱炭効率の変化はあまり大きくなく、また計算結果で指示を出し実際にソフトブローになるまでの時間のずれなど外乱となる要素もあり、作業も複雑で、あまり確実な方法とは云えない。

そこで実操業では、吹錬前の投入副原料の計算において、予め適中型か冷却剤投入型になるようにしておき、稀に $T_{EA} - T_{EC} > \epsilon$ となった場合には吹下げ加炭型 (溶銑を追加装入) で操業することが多い。

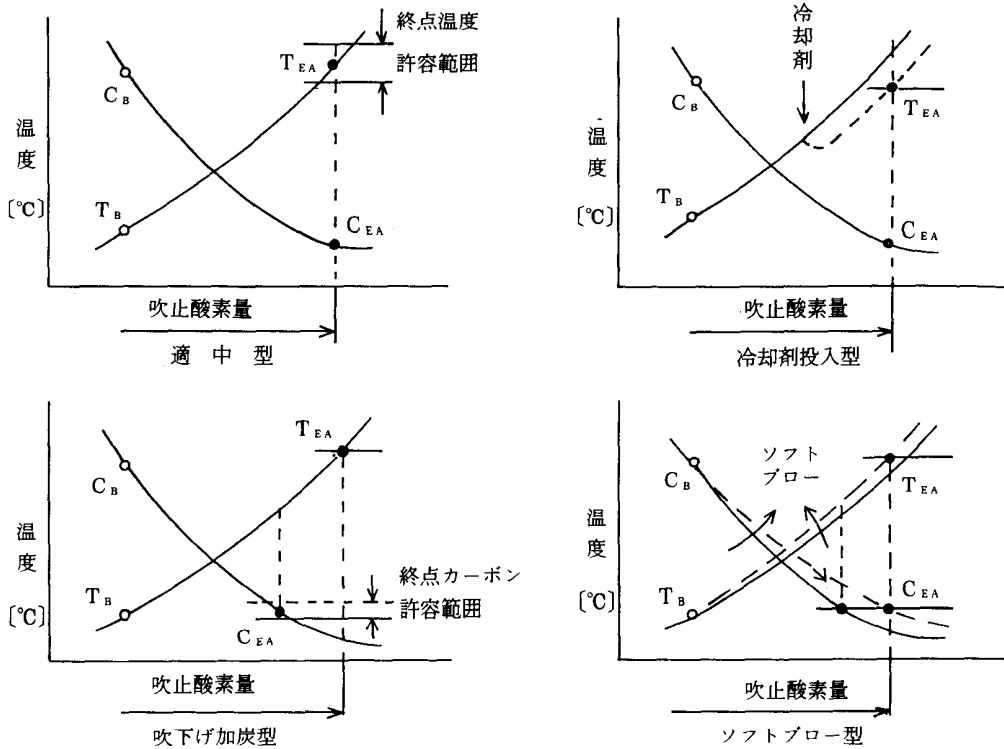
4. 2 ダイナミック制御方式

4. 2. 1 吹止酸素量と冷却剤量の求め方

吹錬終了2~3分前に、サブランスによって炉内溶鋼の炭素量と温度を測定し、吹止酸素量計算と追加冷却剤量の計算を行なう。その関係を第9図に示す。

ダイナミック制御の計算は、サブランス測定後できるだけ短時間で進行する必要があり、スタティック制御で用いた数式モデルを吹錬末期の条件で簡略化したモデルを用いる。

- C_B, T_B : 吹錬中測定
- C_{EA}, T_{EA} : 目標



第8図 同時適中制御の型

前項で述べた炭素量、温度の同時適中制御の冷却剤投入型の場合について、吹止酸素量と冷却剤投入量を求める手順を次に示す。

サブランス測定から終点までに必要な酸素量を Q_D とすれば

$$Q_D = f_D(\omega_{CS}, \omega_{CE}) \quad \text{..... (4)}$$

ただし、 ω_{CS} : サブランス測定炭素量

ω_{CE} : 終点目標炭素量

式の詳細は(8)式を参照のこと。

サブランスの測定から Q_D の酸素量で吹錬した時の昇温温度 θ_D は

$$\theta_D = g_D(Q_D) \quad \text{..... (5)}$$

式の詳細は(17)式を参照のこと。

サブランス測定温度 θ_S に昇温温度 θ_D を加えた温度が終点目標温度 θ_E より高ければ

$$\theta_S + \theta_D > \theta_E$$

冷却剤を追加投入する必要がある。

冷却剤追加投入量を W'_{ORE} とすれば

$$W'_{ORE} = \frac{C_{PM} W_{ST}}{\Delta H_{ORE}} (\theta_S + \theta_D - \theta_E) \quad \text{..... (6)}$$

ただし C_{PM} : 溶鋼比熱 kcal/t°C

W_{ST} : 溶鋼重量 t

ΔH_{ORE} : 鉄鉱石の反応熱 (吸熱) kcal/t

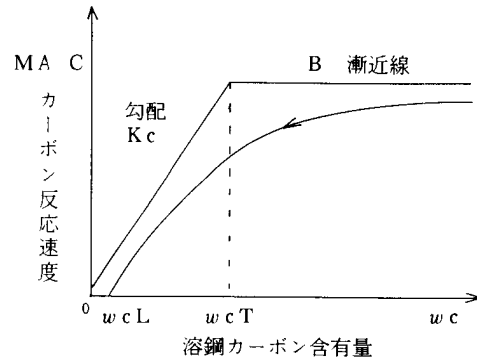
で求めることができる。

4. 2. 2 脱炭モデル

1) 脱炭速度式の解

脱炭速度と炭素量の関係は第10図のように考える。

(Bは最高脱炭速度、 ω_{CT} は脱炭遷移点炭素量)



第10図 吹錬末期脱炭速度

酸素量と脱炭量の関係式は

$$dQ_{O_2} = - \frac{F_{O_2} W_{ST}}{30 P_M K_C} \cdot \frac{d\omega_c}{\omega_c + \omega_{CT} - \sqrt{(\omega_c - \omega_{CT})^2 + 4\omega_{CT}\omega_{CL}}} \quad \text{..... (7)}$$

ただし F_{O_2} : 酸素流量、 Q_{O_2} : 酸素積算量

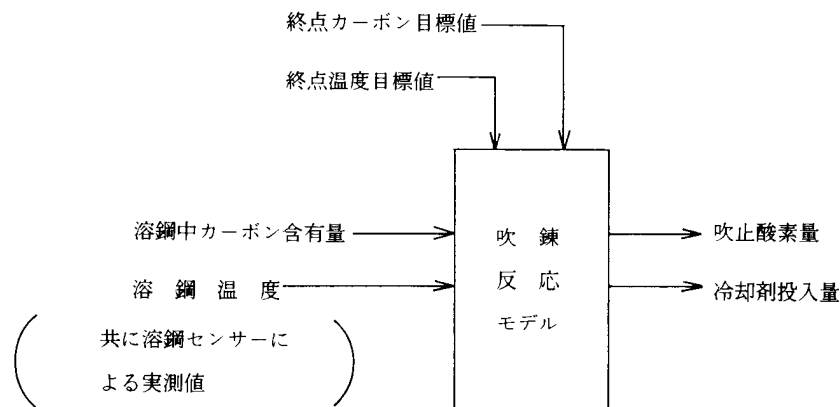
P_M : 溶鋼密度、 K_C : 炭素反応速度係数

ω_c : 溶鋼炭素量、 ω_{CT} : 脱炭遷移点炭素量

ω_{CL} : 脱炭限界点炭素量

を積分することによって、溶鋼炭素量と吹込酸素量の関係が求められる。

サブランス測定から終点までに必要な酸素量を Q_D 、サブランス測定炭素量を ω_{CS} 、終点目標炭素量を ω_{CE} とすれば



第9図 ダイナミック制御方式における入力と出力

$$Q_D = \frac{1}{4AK_c \omega_{CT}} \{J(\omega_{CS} - \omega_{CL}) - J\omega_{CE} - \omega_{CL}\} (\text{Nm}^3 \text{O}_2) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし $J(x) = x + \alpha \ell n x + f(x) - \beta \ell n \{x - \beta + f(x)\} + \alpha \ell n \{x + \alpha - f(x)\} - \alpha \ell n \{-x + \alpha + f(x)\} \quad \dots\dots\dots (9)$

で求められる。

2) モデルの係数

係数の値の決め方については省略するが、物理・化学的な定数として理論的に定まらないものについては、後述するように実績値からフィードバック修正によって決める。

4. 2. 3 昇温モデル

1) 昇温速度式の解

酸素量と溶鋼温度の関係式は

$$d\theta_M = \frac{\alpha_H}{C_{PM} W_{ST}} (\Delta H_{CO} \cdot dW_C + \Delta H_{FeO} \cdot \eta \cdot dW_{Fe}) + \frac{60}{C_{PM} W_{ST} F_{O_2}} (\alpha_H \beta_H - \alpha_{LOSS}) dQ_{O_2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし

- θ_M : 溶鋼温度、 C_{PM} : 溶鋼比熱
- W_{ST} : 全溶鋼量
- α_H : 溶鋼への熱配分率
- β_H : スラグ、ガスと溶鋼の相互熱作用量(一定)
- ΔH_{CO} : ΔH_{FeO} : 各成分酸化反応熱
- W_C, W_{FeO} : 溶鋼中全C、Fe量
- $W_C = W_{ST} \cdot \omega_C$
- F_{O_2} : 酸素流量 (Nm^3/h)、 Q_{O_2} : 酸素量 (Nm^3)
- η : 界面への寄与率 (一定) $\eta \approx 0.7$
- α_{LOSS} : 熱損失

これを積分することによって酸素量と溶鋼温度の関係が求められる。

$$\theta_D = \frac{\alpha_H}{C_{PM}} \left[(\Delta H_{CO} - \Delta H_{FeO} \cdot \eta \cdot \frac{m_{Fe}}{m_C}) \cdot (\omega_{CS} - \omega_{CE}) + \Delta H_{FeO} \cdot \eta \cdot \frac{m_{Fe}}{2m_C} \right] \cdot \left\{ J(\omega_{CS} - \omega_{CL}) - J(\omega_{CE} - \omega_{CL}) \right\} + \frac{60(\alpha_H \beta_H - \alpha_{LOSS})}{C_{PM} F_{O_2} W_{ST}} Q_D \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし $J(x)$ は(9)式参照

m_{Fe}, m_C : 各成分の分子量

2) 脱炭と昇温の関係式

脱炭速度式の解 Q_D (8)式と昇温速度式の解 θ_D (11)式を比較し、 $J(x)$ の項を消去する。

サブランス測定から終点までの

脱炭 $\omega_D = \omega_{CS} - \omega_{CE}$

昇温 $\theta_D = \theta_{ME} - \theta_{MS}$

ただし θ_{ME} : Q_D に対応した終点温度計算値

に関して

平均脱炭率 $R_D = \frac{W_{ST} \omega_D}{Q_D} (\text{t}/\text{Nm}^3 \cdot \text{O}_2)$ (12)

平均昇温率 $R_\theta = \frac{W_{ST} \theta_D}{Q_D} (\text{t} \cdot \text{°C}/\text{Nm}^3 \cdot \text{O}_2)$ (13)

を用いると

$$R_\theta = K_{H1} - K_{H2} \cdot R_C \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで

$$K_{H1} = \frac{\alpha_H (\Delta H_{FeO} \cdot m_{Fe} \cdot \eta \cdot K_{O_2} + \beta_H) - \alpha_{LOSS}}{C_{PM}} \cdot \frac{60}{F_{O_2}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$K_{H2} = \frac{\alpha_H (\Delta H_{FeO} \cdot m_{Fe} \cdot \eta - \Delta H_{CO} \cdot m_C)}{C_{PM} \cdot m_D} \quad \dots\dots\dots (16)$$

R_θ と R_C は直線関係となる。

従って昇温温度 θ_D は次式で計算される。

$$\theta_D = \frac{Q_D R_\theta}{W_{ST}} = \frac{Q_D}{W_{ST}} \cdot (K_{H1} - K_{H2} \cdot R_C) \quad \dots\dots\dots (17)$$

5. 総合的な高精度制御

5. 1 終点制御の4つの方式³⁾

5. 1. 1 4つの方式の関係

実際に終点制御を行なうに当たって、前に述べたスタティック制御やダイナミック制御の項で説明した数式モデル(総合反応モデル)を基本として、目的、時期に応じて、いわゆるスタティック、セミダイナミックおよびダイナミックの各制御方式として、またパラメータのフィードバック修正方式として使っている。

スタティック制御方式は、現在サブランス測定時期の決定などに用いられている。

セミダイナミック制御方式は、反応過程のCRT表示や、サブランス測定異常時のダイナミック制御のバックアップなどに用いられている。

ダイナミック制御方式は、サブランスによる測定値に基づいて、終点炭素量・温度同時制御に用いられている。

なお、フィードバック修正方式は次項で述べる。

これら4つの方式の機能の概要を第1表に示す。制御の各段階で吹錬に関する情報量を増やしつつ精度を上げて行く機成になっている。

5. 1. 2 パラメータのフィードバック修正方式

吹錬終了時に終点炭素量および終点温度の実績値をサブランスで測定して計算機に入力しておき、吹止酸素量、吹錬条件および副原料・冷却剤の投入量にそのチャージの実績値を用い、終点の実測炭素量・温度を入れて総合反応モデルで計算すれば、そのチャージに最適なモデル係数が結果として逆算される。

第1表 終点制御の4方式の機能

モデル	目的	計 算	
		時 期	内 容
スタティク 制御方式	1. 吹止酸素量の1次決定 (バックアップ) 2. 鉄鉱石投入量の決定 3. サブランス測定時期の決定	1. 鋼番鋼種設定 (出鋼指示) 2. 媒溶剤再計算 3. 鉄鉱石投入完了 (酸素量再計算)	1. 吹止酸素量 2. 冷却剤量 (鉄鉱石)
セミダイナミック 制御方式	1. 吹練パターンの調節 2. 吹止酸素量の2次決定 (バックアップ) 3. 追加冷却剤量の1次決定 (バックアップ) 4. サブランス測定データの異常 チェック、リジェクトおよび バックアップ 5. 終点マンガ、出鋼量の予測	1. 吹練開始 (着火) 以後1分単位で計算	1. 炉内反応状況推定、予測 (鋼浴C, T他) 2. 吹止酸素量 3. 冷却剤量 (追加冷剤)
ダイナミック 制御方式	1. 終点同時適中制御 (カーボン、温度が同時適中す るよう吹止酸素量、追加冷 却量を最終決定)	1. サブランス測定	1. 吹止酸素量 2. 冷却剤量 (鉄鉱石) 3. 反応軌道予測 (鋼浴C, T)
パラメータの フィードバック 修正方式	1. スタティク、セミダイナミ ックの各制御モデルの係数を 実操業に適応調節	1. 出鋼開始 (終点サブランスデータ による計算) 2. 終点分析入力	1. 総括反応係数 (最高脱炭速度) 2. 末期脱炭係数 3. 総括熱損失係数 4. 末期昇温係数

第2表 フィードバック修正のパラメータ

	スタティクモデル	セミダイナミックモデル	ダイナミックモデル
物質バランス係数 (カーボン)	最高脱炭速度 B	総括反応速度係数 $\alpha K O^2$	C反応速度係数 K C
熱バランス係数 (温度)	熱 損 失 率 B H	熱 損 失 係 数 α_{LOSS}	昇温率係数 K H ₁

実績の終点炭素量・終点温度に対して、スタティック、セミダイナミック、ダイナミックの各制御モデル共、物質バランス係数1個、熱バランス係数1個を選び、チャージ間でフィードバック修正をしている。修正する対象の係数は、物理的考察と数学的な感度の大きさに、操業経験を加えて第2表のように選んだ。

このようにして求められた係数は、各種の計測誤差、モデル誤差を含んでいるので、時系列的にフィルターをかけ、次チャージにフィードバックしている。

これらの吹錬結果のフィードバックによって各制御モデルの状態を常にアダプティブに保っている。特にフィードバック修正方式は、理論モデルと現実をつなぐ絆として重要である。

5. 2 操業結果

サブランスシステムと総合終点制御システム、それに装置の自動運転システムの組み合わせによって吹錬作業が安定化したため、終点適中率が向上し、歩留の向上と製品品質の安定向上に大きく寄与した。

自動化システム実用化後約1年で、計算機による自動吹錬システムの適用率は約70%に向上した。適用できなかったものの内訳は、副原料などの各種テストのため(20%)、スロッピング(炉内反応が過剰となり炉口からの噴出物が増す現象)抑制のための手動介入(10%)などである。

制御精度の面からは、ダイナミック制御の適用率が95%に達し、終点温度・炭素量の同時適中率は80%に達した。これは従来のオペレータによる方式に比べて40%高く、したがって再吹錬率も従来(オペレータ)に比して半分以下の4%に減少した。

現在では同時適中率は90%以上になっている。

なお終点の目標値は鋼種によって炭素量で0.04~0.20%、温度で1620~1660°Cであり、適中範囲は目標に対して炭素量で±0.020%、温度で±10°Cとしている。

ダイナミック制御は確かに有効であり、モデルの精度も軌道修正によって向上し、自動化システム実用化後約1年で従来に比べ、バラツキが炭素量で $\sigma=0.025\%$ から0.015%、温度で $\sigma=15.0^\circ\text{C}$ から9.4°Cに改善された。また終点における無倒炉サンプリングも自動化することにより製鋼時間が約2分短縮され、生産性が向上すると共に作業環境の改善にも役立っている。

6. まとめ

6. 1 転炉高精度制御開発の意義

1) 溶鋼炭素量と溶鋼温度を直接測定するセンサーの

実用化は、適切なセンサーの開発がプロセスの制御方法に大きな改革と進歩をもたらすことを実証した。

2) ダイナミック制御方式は有効である。操業状況の変化に対しても強く、高精度の制御を実現することができた。

3) パラメータのフィードバック修正方式は一種の学習機能であり、長期間にわたって安定な操業の見通しを得た。

6. 2 高精度制御の成果

1) ダイナミック制御によって終点のバラツキが減少した。従来操業に比べてバラツキが炭素量で $\sigma=0.025\%$ から $\sigma=0.015\%$ へ、温度で $\sigma=15.0^\circ\text{C}$ から $\sigma=9.4^\circ\text{C}$ に改善された。

2) ダイナミック制御の適用率が95%に達し、終点炭素量と温度の同時適中率は80%となった。現在ではさらに好成績を得ている。

謝 辞

本報文で述べた転炉の高精度制御についての研究開発は、日本鋼管株式会社の福山製鉄所、京浜製鉄所および技術研究所によって長年にわたって進められたものであり、坪井勇部長(現エレクトロニクス本部開発センター長)を始めご協力頂いた多くの関係者の方々に深く感謝申し上げる次第である。

引用文献

- 1) 野坂(1970) 鉄鋼業のコンピュータ・コントロール、産業図書：P.110
- 2) 板岡、斉藤、伊藤、田口(1963)「純酸素転炉計算機制御の対象及び装置について」、鉄と鋼、49-10：P.1371-
- 3) 田中、山本(1977)「福山製鉄所第三製鋼工場の転炉自動吹錬」、日本鋼管技報、73：P.11-24
- 4) 日本鉄鋼協会(1983) 鉄鋼便覧I基礎、第3版、丸善：P.738
- 5) 阪本、久保、矢野、安居、鈴木、橋(1972)「京浜製鉄所第三製鋼工場の転炉の計算制御」、日本鋼管技報、58：P.58-
- 6) 藤井、田口、坪井、松井、長谷川(1975)「転炉の自動化と計測」、日本鋼管技報、68：P.35-48

The High Accurate Control for the Steel Smelting Converter

Tomohisa YAMAMOTO

We had calculated and predicted a reaction in the furnace by mathematical models using a control computer for the steel smelting converter (LD converter).

We had calculated a reaction from the initial data before oxygen blowing.

But we developed the dynamic control system to get higher accurate results.

Therefore we measured a carbon content and a temperature of the molten steel in the furnace. And we calculated the reactin at last blowing period from the difference of the measured values and the aimed values, and get the optimum operating values.