

討1 高炉のコンピュータ・コントロールとそのための計測の問題

川崎製鉄 千葉製鉄所 清水政治 香 富夫 ○伊藤 実

1. 緒言

わが国における高炉のコンピュータ・コントロールに関する研究と開発は、着手以来、10年近くになろうとしている。この間、いくつかの障害に出会い、その目的と接近方法の変更を行ないながら、現在、なお地道な努力を続けているというのが実情であろう。この過程において、実際に高炉にコンピュータを導入、運転し、炉に関する種々の情報を収集、整理、解析することによつて、新しい事実と問題点が明らかになりつつある。以下、われわれが行なつてきた開発の状況ならびに問題点について述べる。

2. 高炉のコンピュータ・コントロール

高炉のオペレータは、炉に関する数多くの情報から、炉内部の現在の熱レベルが増加する方向（以下、熱目方向という）にあるか、あるいは減少する方向（以下、若目方向という）にあるかを早期に判断して、適切な処置をとり、常に炉操業の安定化をはかり、順調な出銑を得ようと努力している。しかし、(1)高炉が不可視プロセスであること、(2)炉内部の直接測定が困難であること、(3)装入原料が出銑するまでに6～8時間の遅れ時間があり、その間に種々の状況変化があるため、処置に対する結果の技術的解析が他のプロセスと比較して困難であることなど、プロセス固有の操業上のむづかしさが存在する。

したがつて、高炉のコンピュータ・コントロールを意図した場合、その目的と接近方法の策定についても種々の考え方が今までに提起されている。現在のところ、大勢を占めている目的、方法としては、炉熱を代表する指数を計算し、これを適当な一定レベルに維持するように入力量を操作し、炉内の反応速度および状況を安定化しようとするものである。

2-1 炉熱指数の設定と代用特性値との相関について。

われわれが使用している炉熱指数は、高炉を上下2帯に分け、下部についての物質バランスおよび熱バランスを計算して求めるもので、これを Accumulated Heat (Kcal/t-pig; 以下AHという)と称している。

この炉熱指数AHがどの程度、炉熱を代表しているかを調べるため、従来から炉熱代用特性値として使用している溶銑中Si%および溶銑温度との時系列相関を計算した。これに関して、今までのところ次のような結果を得た。

(1) AHと溶銑中Si%との相関 (図2)

AHは溶銑中Si%より1～2時間の先行を示すが、相関は $r = 0.2 \sim 0.4$ であり、有意とはいえない。

(2) AHと溶銑温度との相関 (図1)

AHは溶銑温度より2～3時間の先行性を示し、 $r = 0.2 \sim 0.45$ で、相関の存在が認められる。

2-2 AHの精度解析

AHを計算するにあつて、各要因のAHにおよぼす影響の程度をある基準状態からの微小変動について解析した結果を表1に示す。この結果からAHの値に大きな影響を与える要因は、炉頂ガス分析計の精度であることがわかる。

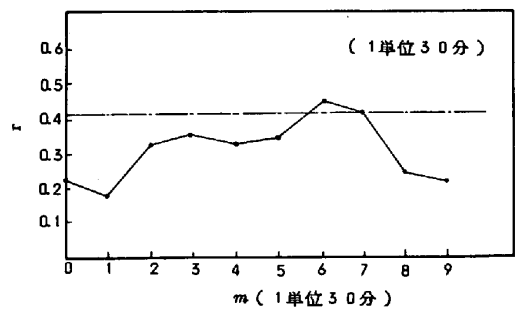


図1 AH-溶銑温度の相関

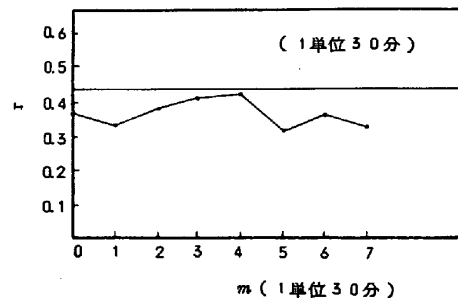


図2 AH-Si%の相関

一般に、分析計の精度は、現在の
 の実用レベルでは±0.1～0.5%
 である。この精度の変動を少なく
 するように機器の整備、保全に努
 力することが重要である。

2-3 AHによる炉熱制御モデル
 とその適中率について

AHが炉熱レベルを表わしてい
 ることは理論的に明らかであるが

実際には、前述のように溶銑中Si%および溶銑温度との相関が高いとはいえない。またAHの精度の
 点からもAHのみを炉熱の目標設定値として炉熱制御を試みるには多少の危険がある。そこでわれわれ
 は、従来、オペレータが判断に使用している情報を組み合わせて、より総合的な判断のもとにコントロ
 ールできるシステムを作った。すなわち、オペレータが従来、使用している情報のうち、特に炉熱制御
 に関係の深い4つの状態変数とAHを組み合わせることにした。その変数は、溶銑中Si%、溶銑温度
 装入回数および送風圧力/送風流量(以下P/Vと記す)である。これらを考慮した制御モデル
 は、できるだけ経験則をとり入れ、かつ単純化
 した論理判断的なものとした。この1例を図3
 に示す。ここで問題となるのは、各量に対する
 判断基準の設定方法と出力パターンに対応する
 操作出力の与え方である。図5で～を冠した値
 が判断基準を表わしている。これについては、
 オペレータの過去の実績を調べ、各状態変数ご
 とに熱目および若目と判断した度数分布を作成
 し、この基準を設定した。しかし、度数分布の
 上で、熱目と若目の分布が分離されず重複する部分があるため、あくまで平均的な基準というべきもの
 である。またSi%および溶銑温度は出銑ごとにしか計測できないので不連続性が強い。これを判断す
 る場合、前数タップの平均値を使用するほうが経験的の判断に近いとしている。同様な考慮を装入回数に
 ついても行なっている。さて、次に出力パターンに対応する操作出力の与え方であるが、まづ出力パタ
 ーンとしては全部で25とおりとした。図3ではA
 およびBの2とおりのパターンを示した。Aはノー
 アクション、Bは熱目方向アクションである。25
 とおりの出力パターンは、熱目アクションが7とお
 り、若目アクションが6とおりの、ノーアクションが
 12とおりのパターンから成り立っている。操作出力の種類と
 単位操作量の大きさは、ステップ応答と経験則にも
 とづいて、送風湿分では、±2gT/Nm³、送風温度では
 ±10℃、装入鉱石重量では±200Kg/charge
 のように定めた。

表1. 各測定値のAHにおよぼす影響

項目	変化量	AH	項目	変化量	AH
送風量(VB)	+20 Nm ³ /min	-1.8	石灰石(WL)	+100 Kg/h	+0.9
風熱(TB)	+10 ℃	+5.0	ドロマイト(WO)	+100 Kg/h	+0.9
送風湿分(φB)	+1 gr/m ³	+1.2	炉頂ガスCO ₂ %	+0.5 %	-47.6
酸素量(EO)	+100 Nm ³ /h	+6.0	" CO %	+0.5 %	-4.22
重油量(Woil)	+100 l/h	-1.4	" H ₂ %	+0.2 %	-5.7

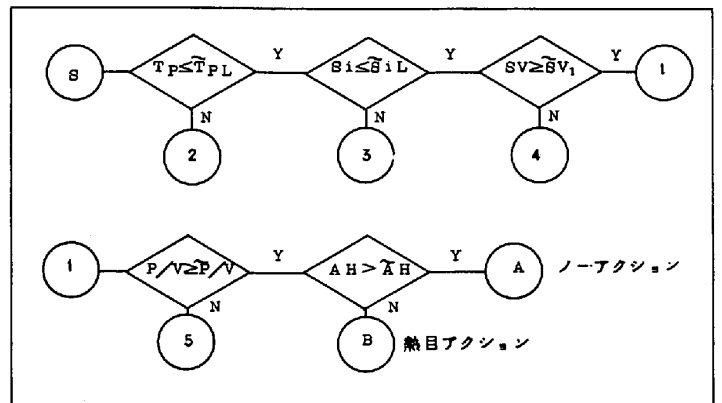


図3 制御モデル・フローの1例

この制御モデルを千葉2高炉のプロセス・コンピ

表2 制御モデルの適中率

判定	第1回	第2回	第3回	全期間
	初期基準	1次変更	2次変更	(計)
◎	8	4	16	28
○	17	16	78	111
□	14	16	16	46
x	18	5	29	52
アクション計	57	41	139	237
適中率	68%	87%	79%	78%

注. 適中率; (◎+○+□)/(アクション回数)×100
 ◎: オペレータとアクションをとることで一致。
 ○: " "をとらないことで一致。
 □: コンピュータの指示どおりでも良かった。
 x " "の指示は間違っていた。

ータ (ICD 504) および水島 1, 2 高炉のコンピュータ (FACOM 270-20) にプログラミングして組み込み、その適中率を調査した。千葉 2 高炉における適中率の 1 例を表 2 に示す。表 2 において 1 次変更および 2 次変更とあるのは、当初は前述のようにして求めた基準値を使用したのが、その後試験期間中に、オペレーターの実操業と一致するように基準値を変更した意味である。このデータは試験の終了後、オペレーターと検討を行なつて得たものであり、適中率を表 2 の注記のように定義すれば 70 ~ 80 % 程度あるといえる。しかし、適中率をこのように定義して良いのかどうかという事は一つの問題であらう。

2-4 炉熱制御モデルによる結果について

制御モデルの適中率を確かめた上で、原則として、コンピュータの指示をできるかぎり採用して、アクションをとる実験操業を行なつた。千葉 2 高炉で 44 年 4 月 24 日 ~ 5 月 2 日の 9 日間実施した例についてみると、コンピュータの指示がオペレーターに採用された率は、88 回中、43 回であり、約 50 % であつた。採用されなかつた理由としては、(1) オペレータの判断と一致しない場合が 35 回、(2) 炉況の変動があつて採用できない場合が 7 回、(3) コンピュータの動作に異常があると判断した場合が 3 回という事であつた。この使用率 50 % という数字は、実際の局面にあつて、オペレータの判断とコンピュータの指示の間にまだ大きな差があることを示していると考えられる。この場合、オペレータの判断のほうが真に正しかつたのかどうかも問題である。今後、この点を分析、判定する作業が大きな課題とならう。この判定方法は、やはり、出銑量、炉況異常発生回数および Si % の変動を調査することであらう。上述の実験操業を行なつた期間と、それ以前の操業期間のデータを比較すると、出銑量では前者のほうが、平均約 100 t/日増加し、棚吊回数では皆無という結果であつた。この実験は、明らかに良好な結果が出た場合のものであつて、他の実験期間ではこれほど明らかな差が出ていないため、これをもつて、われわれの一般的結論といえない点は残念である。

3. コンピュータ・コントロールに必要な計測技術の向上と問題点

高炉の炉熱制御は、前述の炉熱算定モデルと制御モデルにより行なう方法と、目標となる炉内部の物理量または化学量を直接測定して、これが一定となるように制御する方法の 2 つが考えられる。また炉熱モデルによる場合でも、多くの計測値を使用するから、これらの測定精度が A H におよぼす影響はきわめて大きい。このように高炉の諸計測に関する技術的開発および改善の仕事は、コンピュータ・コントロールの本質的成否を握っている重要な仕事である。以下、われわれが行なつた作業とその問題点について述べる。

3-1 炉頂ガス分析計の改善

分析計の精度を左右する条件は、(1)電氣的ドリフト、(2)ガス中湿分変動、(3)大気圧力変動 (4)標準ガスの成分などがあげられる。赤外線分析計について(1)を改善するために設置運転後、3 年経過したものをオーバーホールし、劣化部品の交換と調整を徹底的に行なつた。この結果、表 3 に示すように仕様書以上の性能を示すようになった。すなわち再現性に関する誤差は 0 % となり、CO 値のドリフトは半減した。ガス中の湿分変動をおさえるために、冷水除湿器電気式冷凍機および塩化カルシウムで除湿し、最終的には 0.47 gr/Nm³ 程度の水分に保つようにしている。湿分が分析誤差となる程度は 9 gr/Nm³ で 0.3 ~ 0.5 % といわれている。標準ガスに関しては、メーカーの分析値が不正確であること、およびポンポの残圧に

表 3 赤外線分析計の仕様とオーバーホール前後の成績

メーカー	日立工場
型式	BI A-1 A
測定範囲	CO; 0 ~ 30 % CO ₂ ; 0 ~ 25 %
再現性	フルスケールの ± 1 % 以内
ドリフト	" " 以内/日
応答速度	15 秒 (90 % 応答)
出力特性	ノンリニア mV

	オーバーホール前		オーバーホール後	
	CO	CO ₂	CO	CO ₂
再現性 (%)			0	0
ドリフト/日 (%)	± 0.29	± 0.26	± 0.15/2日	± 0.25/2日
応答速度 秒	35	40	11	12

よつて、成分％が変化することの2点が問題である。われわれは購入した標準ガスをガスクロマトグラフィによつて10回の分析を行ない、その平均値を標準ガスの分析値としている。表4にメーカーの表示分析値とわれわれが求めた分析値の比較を示す。ポンペの残圧によつて変化する分析値の程度は、当初の100 kg/cm²が25 kg/cm²になつた場合、CO₂で+0.3%、COで+0.4%の変動が認められた。したがつて、標準ガス使用中も定期的に精密分析を行なつて校正している。最後に大気圧力の変動による影響については、大気圧力発信器を別に設置し、この値をコンピュータに入れ、COに対してはボイルの式で、CO₂に対しては実験式で補正計算を行ない、誤差を少なくするようにしている。われわれが確かめた範囲では、COおよびCO₂とも、大気圧力±10 mbの変動に対して、±0.2~0.3%の変動がある。

表4 標準ガスの分析値比較

メーカー	CO (%)		CO ₂ (%)	
	川鉄	メーカー	川鉄	メーカー
21.1	21.36	18.6	18.50	
2.00	1.942	18.8	18.48	

3-2 垂直ゾンデによる直接測定¹⁾

高炉内部のガス成分、温度およびガス圧力を直接測定するために種々のゾンデが考案、使用されている。千葉1高炉では図4に示すような垂直ゾンデを使用して高炉シャフト内の軸方向における諸変化を調査した。このゾンデは鋼管製で全長およそ20mである。測定可能範囲は、シャフト上端から10~11mである。温度測定はCAシース熱電対をゾンデ内外部に固着して行なつた。ガス採取はゾンデ先端側面の孔をとおして行ない、水銀マンオメータにより圧力測定を、ヘンベル式およびガスクロマトグラフィにより成分測定を実施した。ゾンデの位置は可変抵抗による電圧変化方式で記録した。この測定結果を図4にあわせて示している。

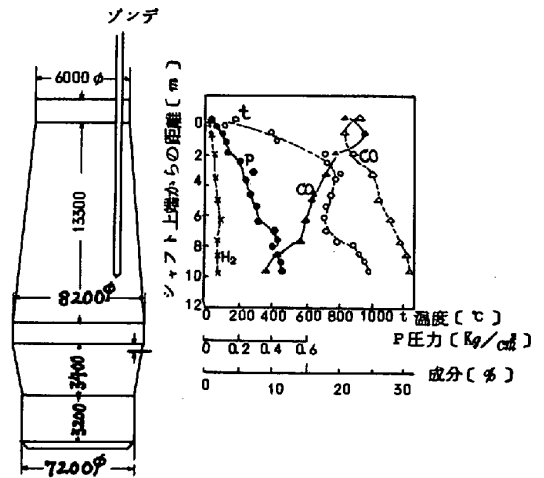


図4 高炉における垂直ゾンデならびに軸方向における温度、ガス成分および圧力の分布

これらの測定結果に種々の考察を加えて導き出した結論のなかには、コンピュータ・コントロールのための数式モデルを設定する上で有効なものがあつた。現在、すでにとり入れているものとしては、温度保存領域の温度変化範囲の設定があげられる。その他の結論についても種々の検討を行なつている。また、このような垂直ゾンデあるいは水平ゾンデを常時、実用できるようにするための設備、設計も重要な問題である。

4. 結言

高炉のように操業に関する情報の種類が多く、プロセスの諸特性を追求するに際してデータ相互間の時系列相関および精度を重視する必要のあるプロセスでは、時刻をつけた諸データを記憶、分類し、統計的処理を行なうことがプロセス解折上、必要不可欠の作業である。この作業を遂行する手段として、プロセスに密着したコンピュータが有力であるのは明らかである。高炉プロセスをコントロールするという観点からいえば、データ処理がそのような機械的手段で可能になつた現在では、炉内部の状態を直接測定できる計測方法、装置の開発、設計および実用化、ならびに精度の良い、信頼性の高いガス分析計の設置、運転に真剣に取り組む時期に来ているといえよう。さらに他のプロセスにみられるように、高炉においても、高炉設備の設計時に、各種の計測装置を、設備の一部として考慮するように、使用者、設計者ともに努力することが今後の進歩発展に対して必要であると考えられる。

参考文献

1) 岡部, 浜田, 渡辺; 鉄と鋼 55(1969)9, P764~776