

製鋼炉における計算機制御

— 転炉について —

Computing Control System of the Steel-making Furnaces
(On the Basic Oxygen Steel-making Furnaces)

北之園 英 博*
Hidehiro Kitano

内 容 梗 概

転炉の計算機制御において問題となるのは終点温度の制御と製品の品質を制御することである。これらを所定のものとするため、原料配合、酸素使用量が最適になるよう計算により求める。転炉の制御のとき入力信号がそれぞれ異なった時刻に入力されるという特殊性がある。ここではこうした問題と制御のやり方について述べる。

1. 緒 言

鉄鋼設備のオートメ化は最近著しく進歩し、制御装置もその要望に答えるものが実用化の段階に達した。ここではL-D転炉の計算機制御装置をとりあげ、システムの概要とオンライン制御用計算機としてどのような仕様が要求され、どのような問題点があるかについて述べる。現在東海製鉄株式会社納として工場で調整中の転炉計算機制御装置についても公表できる範囲で述べる。

2. 転炉計算機制御の考え方

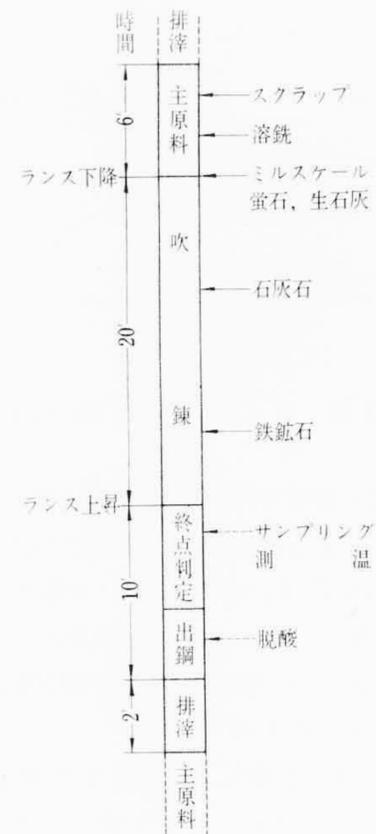
転炉は主原料として溶銑とスクラップ、副原料として生石灰、石灰石、ミルスケール、鉄鉱石、螢石などを用い酸素吹錬によって製鋼作業を行なう。この原料装入のタイムチャートの一例を第1図に示す。この吹錬作業の考え方は国により、また製鉄所により多少変わっている。石灰石は主として出鋼温度調整と復燐防止に、ミルスケールと鉄鉱石は媒溶剤、冷却材として用いられる。

つぎに転炉計算機制御上の問題点を述べる。

溶鋼温度の測定は連続測定が望ましいがいまだに実現していない。一つの試みとしてクロメットという特殊材料で保護管を作り炉内にそう入し稀ガスでシールし、マグネシア絶縁した例があり⁽¹⁾、着脱も5~6分程度と称しているが、やはり寿命が問題である。さらに炉壁近くは壁からの熱放散もあるし、混銑では温度分布が変わることもあり、また炉の使用が進むと測定値に差が出てくる。結局溶鋼温度の連続測定により冷却材の制御をすることは将来の課題であろう。

転炉で問題となる終点温度と終点成分をどのように制御するかは各製鉄所により差異があるようであるが、前者を冷却材により、後者のカーボンパーセントを酸素使用量で制御するやり方がある。この場合、酸素流量の測定精度が問題となるが、普通は流量検出値に温度と圧力の補正を行なっている。また温度については転炉内温度よりも、むしろ出鋼後の鍋内温度が問題で、その意味において出鋼孔の消耗に対し出鋼温度の補正を必要とする。

数式モデルについては、一つのやり方は熱精算により、基本関係式を求め修正計算により制御量を決める方法である。熱精算により理論的に基本関係式を求めることは非常に危険であり実際には操業実績に基づき設定される仮定を数式化する必要がある。たとえば熱損失がいずれのチャージでも定常状態にあるとはいえない。結局プロセス量の検出精度や成分の分析精度ともならみ合わせてある程度の仮定を許し、その結果に対し最適化の修正計算を行なうのが妥当である。熱精算では入熱として溶銑顕熱、C、Si、Feなどの酸化反応熱を考え、出熱として溶銑、排ガスなどの顕熱、スラグ中のMnO



第1図 タイムチャート

その他の顕熱、石灰石の分解反応熱、その他の熱損失を考える。酸素使用量の算出も同じ思想で考える。この結果得られる数式モデルは操業実績を重視したとしても、たとえば終点温度を $\pm 10^\circ\text{C}$ の精度で予測しうるにはほど遠い。結局このモデルを有効にするのは修正計算の妥当さによる。今ミルスケール W_{MS} を制御するとしたとき数式モデルを

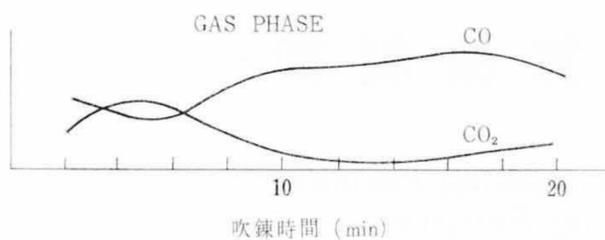
$$W_{MS} = F(W_{HM}, W_0, W_{S0}, \dots, T_{HM}, [C]_{HM}, [Si]_{HM}, \dots, [Mn]_{S\dots})$$

とおけば

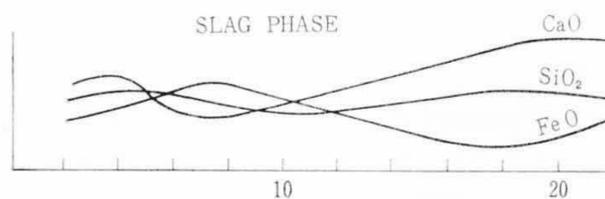
$$\Delta W_{MS} = \frac{\partial F}{\partial W_{HM}} \Delta W_{HM} + \frac{\partial F}{\partial W_0} \Delta W_0 + \dots + \frac{\partial F}{\partial T_{HM}} \Delta T_{HM} + \frac{\partial F}{\partial [C]_{HM}} \Delta [C]_{HM} + \dots + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial T_{HM}^2} \Delta T_{HM}^2 + \dots$$

は変分の和を表わすが、同一鋼種の平均操業実績に対し今回の実測データとの変分から修正値を求めようとするものである。ただし、 W_{HM} : 溶銑重量、 W_0 : 鉄鉱石、 W_{S0} : 焼結鉄、 T_{HM} : 溶銑温度、 $[C]_{HM}$: 溶銑中カーボンパーセントなどを表わす。

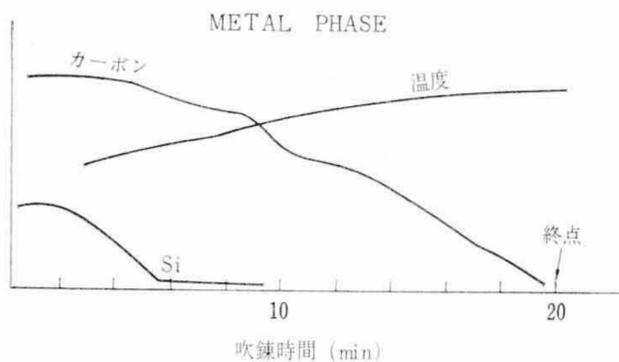
この場合、平均的操業実績はあらかじめ記憶しておく必要があるが、この値と今回の測定値との差が著しくなると一階の近似では非線形要素の修正が不十分になる。そして平均的操業実績は炉壁の温度、消耗の程度が今回と必ずしも近似できないから、炉回数に対す



第2図 成分の変動 (1)



第3図 成分の変動 (2)



第4図 成分の変動 (3)

る修正をし、また同一鋼種で操業条件のほぼ等しい前回のチャージがあればそのデータによる修正を行えばさらに好ましい。なお次に列挙するのは Jones & Laughlin S.C. の転炉における仮定⁽²⁾であるが一応の目安となる。これらの仮定は相当大胆なものも含まれる。一例として排ガス成分の時間的変動を第2図に示す⁽⁵⁾。第3図、第4図は参考までに示したものである。

- (1) 排ガス中の CO は 95%、CO₂ は 5% 程度とする。
- (2) 主として CO と CO₂ からなる排ガスは平均 2,700°F とする。
- (3) SiO₂ と P₂O₅ はすべてスラグ中で CaO と結合する。
 $SiO_2 + 2CaO = Ca_2SiO_4$
 $P_2O_5 + 4CaO = Ca_4P_2O_9$
- (4) ヒューム損失は 1 ヒート当たり 10,000 lb で一定とする。
- (5) スラグと溶鋼は倒炉のときは同一温度とする。
- (6) スラグ中の FeO と Fe₂O₃ は FeO で置きかえられるとする。
- (7) 熱損失は定常状態にあるとする。
- (8) 鉄鉱石とミルスケールは 47.5% の Fe₂O₃ と 47.5% の Fe₃O₄ を有するとする。
- (9) すべてのヒートで酸素流量約 6,500 f³/min で約 20.5min の吹錬をすると約 0.05% のカーボン成分となるものとする。
- (10) 比熱は 77°F から終点温度まで一定とする。

3. 転炉計算機制御システム

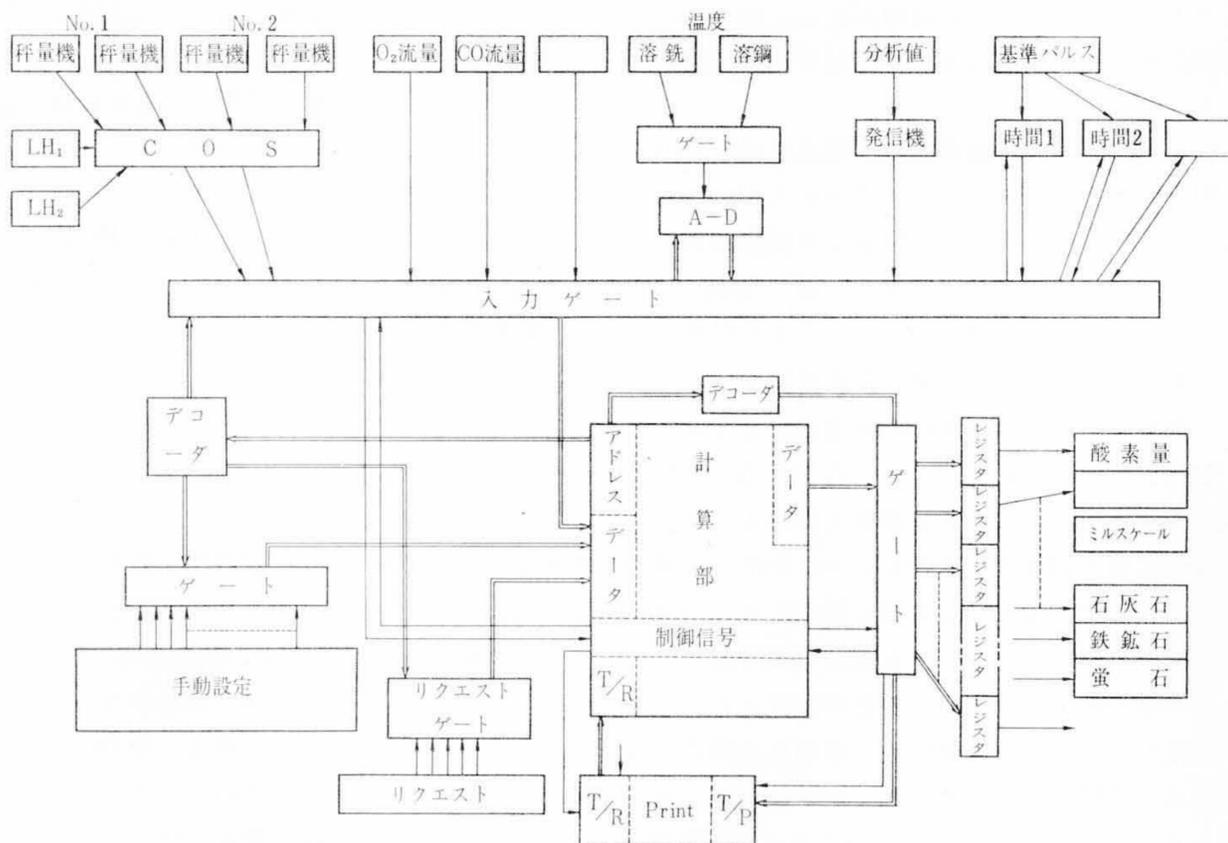
転炉計算機制御の概略構成ブロックを第5図に示す。秤量機(ひょうりょうき)は溶銑、副原料などの秤量を行ない、酸素流量は温度圧力補正を行なったものの積算値として、溶銑温度、溶鋼温度はアナログ量として与えられ、測定可能時の制御信号も出す。分析値は溶銑成分、溶鋼成分などの分析値基準パルスは、たとえば前回排滓から次回装入までの時間を測定するためのものである。なおこれら入力データの中で、温度は、検出端を長時間溶鋼中に浸漬できないため、取込可能なタイミングに制限されている。秤量機についてもある程度の制限がある。計算部は計算式、情報の入出力などに関するプログラムをテープリーダーより読み取って内部記憶しており、計算式に必要な定数を手動設定盤で設定し、必要に応じて記計部のメモリーに取り込む。入力データについては計算部よりの指令をデコードしてゲートを切り換え、指定番地の情報が計算部へ取り込まれる。情報の取込み指令は計算部がアクティブに出すこともあるが、主として情報側に主体性を持たせ、情報側の要求によって外部から計算部へ情報を送り込むようにしてある。計算された結果の出力情報は外部番地を指定して、その番地命令をデコードしてゲートを切り換え所定レジスタへ情報が送り出される。

出力情報は直接オンラインとして用いられるが、一応表示盤に表示してそれを見て手で操作するようにしてある。

以上のシステムを構成するものは次のとおりである。ただし2基整備1基稼動とする。

- | | |
|-------------|----|
| (1) 制御用計算機部 | 一式 |
| (2) 入出力制御部 | 一式 |
| (3) 制御用デスク | 一式 |
| (4) 現場表示盤 | 二面 |
| (5) 現場発信盤 | 一式 |
| (6) 電源装置 | 一式 |
| (7) 分析装置 | 一式 |
| (8) 秤量機 | 一式 |
| (9) プロセス計器 | 一式 |

このうち計算機部は数式計算と情報の処理を行ない、入出力制御部は検出器、設定盤などと計算部との間の情報の受け渡しの制御を



第5図 転炉計算機制御ブロック図

行なう。制御用デスクは系全体の起動停止の制御や、手動設定値の設定確認などを主として行なう。現場表示盤はミルスケール、石灰石など秤量値、所要酸素量などの表示を、現場発信盤は鍋ナンバーを含む制御情報の発信を行なう。分析装置は溶銑成分、溶鋼成分などの分析を行なって結果をコード化して発信する。秤量機は溶銑重量や副原料などの秤量を行ない秤量値の発信をする。プロセス計器は溶銑温度、酸素流量、ランス位置などを測定し情報を入出力制御部へ送る。

計算部、入出力制御部などは一応制御デスクと切り離して設置されるが、いずれも現場設置タイプで温度、湿度、じんあい、振動などに耐えられるような設計になっている。

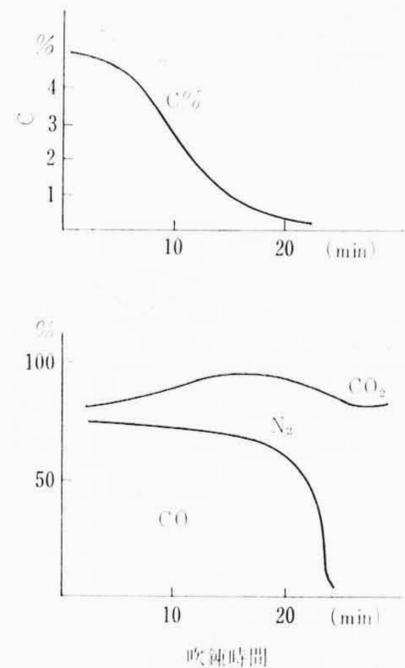
4. 計算機制御上の問題点

数式モデルに関する問題点はさきに述べたが、転炉の場合はバッチプロセスで情報の収集に制約があるため、連続制御におけるようにすみやかに偏差信号をうけて修正することは容易ではない。それだけにモデル修正は高い信頼性が要求される。演算方式は、アナログ形とデジタル形とに大別できるが、アナログ形の場合基準値をあらかじめ与え、変分の演算を行なうことにより実現できる。さきに述べたように修正計算は一次または二次の偏微分で行なうから、その意味でアナログ方式はすぐれている。一方転炉の計算機制御の場合、情報の処理が相当複雑なため制御用計算機によって処理する必要があり、あわせて計算もデジタルに行なうやり方もある。J&L⁽¹⁾や富士製鉄株式会社⁽³⁾で発表しているのはアナログ方式で、情報の処理には相当程度人間が介在しているが、日本鋼管株式会社⁽⁴⁾ではデジタル方式をとって計算機に処理させている。今回東海製鉄株式会社納に製作し、日立製作所で調整中のものもデジタル方式である。

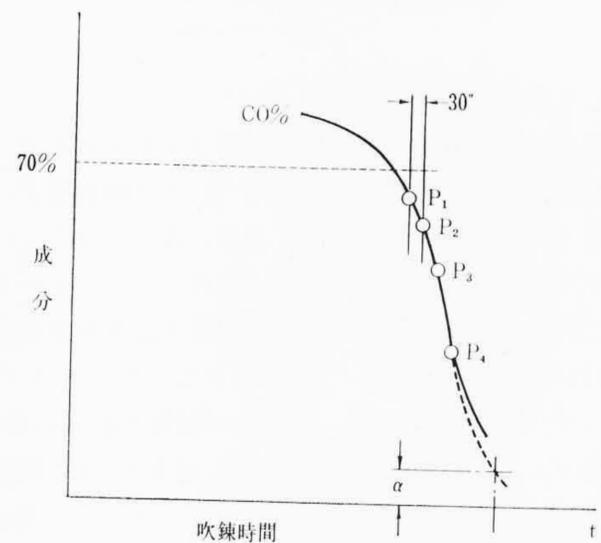
数式モデルの修正は偏微分方式により相当程度効果を得られるが連続制御閉ループと異なり、現時点では修正に限界があるため偏差が許容範囲をはずれるときは基本関係式に立戻って修正する必要がある。このため計算値と実際の情報をパンチテープで出力し、これを別置の計算機で解析して適時監視することが好ましい。第5図のテープパンチャはこの目的にも用いられる。

計算機制御において常に問題となるのは、入力情報、入出力制御部、計算部の誤動作に対してどのような処置をするかである。誤動作したことの検出にも種々の方法があるが、全体として見れば合理的な入力を模擬的に与え、合理的出力が得られたかどうかをチェックする。この方法は正常に動作していないことの判断はできるが、誤動作している部位の判断はできない。ここではじめて各部位のチェックを行なう。このように系が正しく動作しているかどうかは、系を一つのブラックボックスと考えて、その入出力関係を調べ、次に分割して調べる方法をとる。もちろん各機能ごとに常時監視できるものはそれぞれチェックしておく。一方この方法だけではチェックの直前に出力された情報は正しいかどうか不明である。これに対しては得られた出力が常識的な数値範囲にあるかどうかを調べる。(計算機のチェックについては別項で述べる。)

機器が正常でないときは原則として出力レジスタは前回の値をリセットしない。もし少なくとも計算部が正しく動作しているときは計算部でそのときの前回の出力に対する最適化の処理をする。計算部が正常でないときは前回の出力レジスタの値と、バックアップシステムとにらみ合わせて処理する方法をとる。たとえば終点判定のバックアップシステムとして考えられる一つの方法は排ガス中のCO%を監視する方法である⁽⁷⁾。第6図は排ガス中成分の時間変化の一例を示したものであるが、これよりCO%は吹錬終期に急激に変化している。そこでCO分析計によってCO%の変化をサンプリ



第6図 排ガス中CO%の変化



第7図 終点予測計算

第1表 赤外線ガス分析計

形式	EIA-1形(日立)
測定方式	赤外線法, ダブルビーム, 正フィルタ形, 偏位法
測定目盛	COガスでは最小スケール範囲 0~2,000 ppm COガスでは最大スケール範囲 0~100%
最小検出感度	フルスケールの2%
記録計用出力	-10~+100 mV, 出力インピーダンス約 1 kΩ
感度と再現性	フルスケールの±2%以内
応答速度	フルスケール1分以内
零ドリフト	フルスケールの±2%/24h
所要電力	約 250 VA, 100 V±10 V, 50/60 c/s ±1 c/s

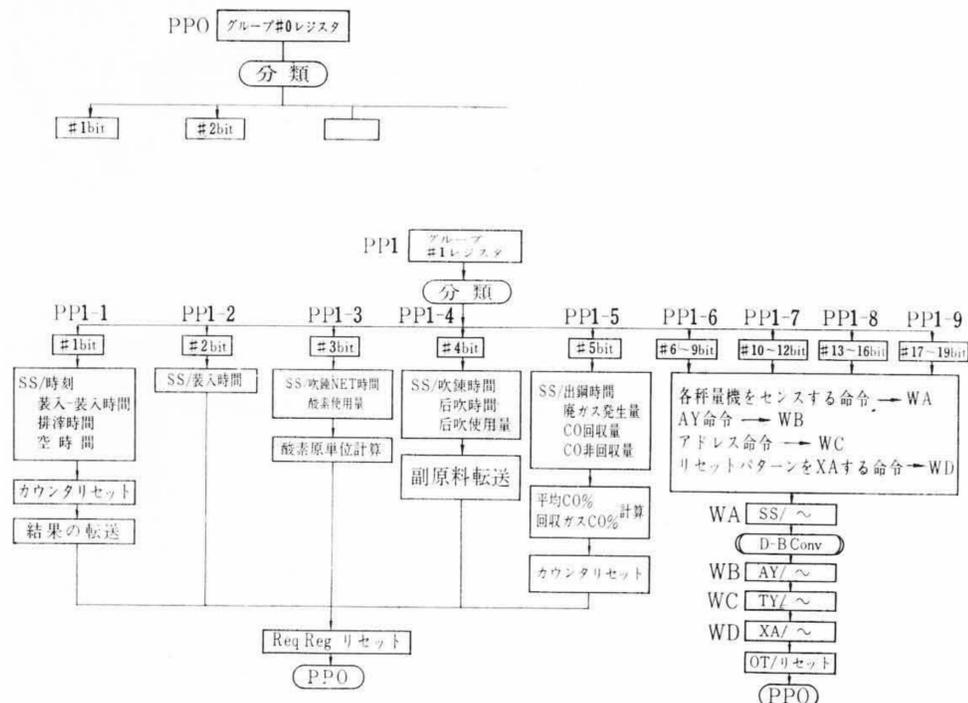
ングし終点の予測を行なう。予測を行なう方法はいろいろあるが分析計の応答も考え約30秒ごとにデータをサンプルし第7図P₁~P₄の4点のデータが得られたらアナログ演算を行なう。第7図に示すように、CO%が約70%になったときサンプリングを始めCO%が予定値まで減少するまでの時間を求める。関数の近似は

$$CO\% = \sum_c F(A_i e^{-a_i t})$$

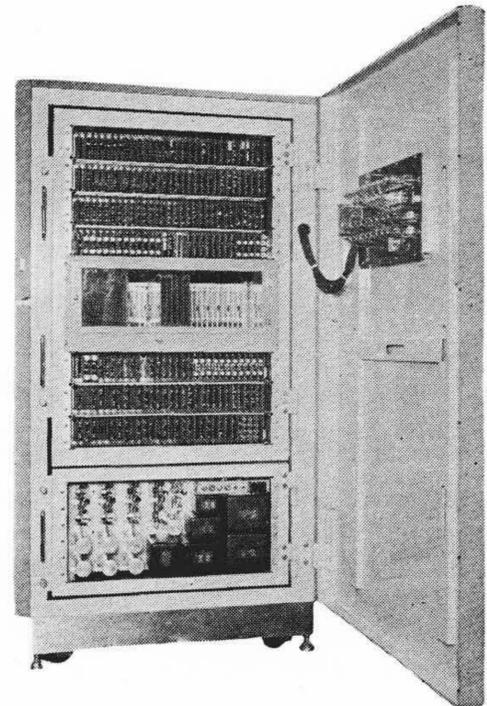
の形で比較的長期の予測ができる。この場合の検出器が問題となるが第1表はその一例である⁽⁶⁾。なおこの方法に対し、溶鋼量、鋼浴の形状、鋼滓層の状況、吹錬酸素圧力、ランス湯面間距離などが影響する。

5. 情報の取込み

情報の取込みは緊急を要するものと、ある程度時間的に余裕のあるものによって異なる。前者は計算機へプライオリティ割込みにより、後者はプログラム割込みによって取り込まれる。プライオリティ割込みはあとで触れるように緊急対策時にも用いられ、制御用



第 8 図 データ取込みフローチャートの一部 (プログラム割込み)



第 9 図 FACTROL-5000 システム計算部

計算機として重要な機能である。

転炉の場合は大部分のデータがプログラム割込みによって処理できる。東海製鉄株式会社納のセットについては解析用データのロギングも行なうため相当大幅なデータの取込みを行なっている。そのうちプログラム割込みについてその一部のフローチャートを第 8 図に示す。これは主として時間カウンタ関係と副原料秤量機に関するもので、これらを一つのグループにまとめている。こうしたグループが数個あって、それらに属する一つ一つの情報が取込み要求を出す。そしてそのグループの構成要素の取込み要求を OR 回路で取り出し、そのグループ内に要求のあることを知りグループ No. 0 の親レジスタの対応ビットをセットする。したがって計算機は親レジスタを監視しておけば取込み要求の有無を知ることができる。たとえば装入時間の計数が終わるとグループ No. 1 レジスタの第 2 ビットをセットし、No. 1 レジスタでは直ちに第 0 ビットがセットされて、これによりグループ No. 0 の親レジスタ第 1 ビットがセットされる。計算部ではリクエストレジスタのセットされたことを知って、それがどのグループのどの情報の要求であるかを判断し、その情報に与えられた外部番地を指定して取込み命令を出す。その命令が出されると入出力制御部では、番地を解読してゲートを制御し、その情報を計算部へ送り込む。情報の取込みによって、対応する要求はリセットされるが、もしそのグループで、同時に他の情報の取込み要求のあるときは、その属するグループとしての要求は生きていて上述の操作がくり返される。

一方緊急を要する取込み要求は、プライオリティ割込みによって処理される。この方式は、実行中のプログラムを中断させて割込みを実行するため高速の情報取込みが実行できる。

6. 制御用計算機の問題点

制御用計算機は高い信頼性と融通性が要求される。第 2 表は工業用に開発された FACTROL-5000 システム計算部の仕様である。第 3 表はその基本命令一覧である。第 9 図は計算部中枢を示す。

この計算部は第 2 表に示すとおり記憶装置として線形選択方式のコアメモリーを基本とする。しかも出力レベルは 500 mV に達し温度範囲も 0~40°C である。制御用計算機の信頼性の一つの目安として MTBF があるが、本装置では 1,000 時間を越えて、なお無事故運転中である。このほか、湿度、じんあい、振動などに対しても考慮されており現場設置が可能である。

このほか金物として、高信頼性を持たせるため各部に配慮がなさ

第 2 表 FACTROL-5000 システム計算部

	基本仕様	オプション機能
方式	プログラム内蔵方式	
数値語	内部 2 進, 固定小数点方式 20+符号 1+チェック 1 ビット	浮動小数点 (ソフト)
命令語	命令部 6 + アドレス 15 ビット	インデックス付はアドレス 13 ビット
演算方式	直列, 同期式	
演算速度	加減算 730 μS (乗除算 100~150 mS)	乗除算 5.33 mS
命令の種類	17	基本 4 最大 47
アドレス方式	1 アドレス方式 (アドレス演算付)	
基本周波数	100 kc	
基本回路	トランジスタ, スタティック同期式	
記憶容量	1024 または 2048 語 (WA 方式 固定 640 語)	ドラム, コア最大 8k 語
入力	8 単位テープ, 並列 21 ビット情報	
出力	並列 21 ビット情報 並列 15 ビットアドレス	
周囲温度	0~40°C (-5~50°C で再現性失わず)	
電源	100 または 200 VAC 3φ2kVA	
標準寸法	1,200 W×1,900 H×900 D	

れているが、さらに固定記憶が可能である。事務用の場合でもメモリープロテクション (Memory Protection) を金物またはプログラムで行なっているが、事務用と違って制御用の場合は可及的広範囲に固定化を行なうことが望ましい。

プライオリティ割込みに関連して停電対策がある。デジタル形はアナログ形と異なり停電の影響が大きい。制御用としてはなんらかの停電対策が必要で、長時間停電の場合は記憶部の内容の保護をすればよいが、短時間停電のときは各レジスタ内容と記憶部内容とともに保護し停電復旧によって再スタートが容易にできるようにする必要がある。停電期間中に情報が発生し、かつ消えてしまうようなときは情報側でその対策をたてる。一般的には瞬時停電が問題になり、停電検出により各レジスタの内容を退避させ記憶電源を規定どおりに遮断する。この動作が完了するまで計算機は正しく動作しなければならぬから、停電に対する処理速度と電源電圧低下に対するマージンがこれにたえるものでなければならない。そして停電

第3表 FACTROL-5000 システム基本命令

		シンボル	オクタル	
四 則	Add	AY	10	
	Sub	BY	20	
	Clear Add	XA	71	
アドレス	Add Address	AA	11	命令部不変
論 理	Collate	CO	36	
	Exclusive OR	EO	56	
ジャンプ	Halt Jump	HJ	01	
	Jump Unconditional	JU	14	
	Jump if Acc < 0	JN	15	
	Jump if Acc = 0	JO	16	
シフト	Shift right n	SR	21	Arithmetic $n \leq 21$
	Shift left n	SL	23	Arithmetic $n \leq 21$
転送	Transfer Acc to n	TY	30	n: メモリ アドレス
入出力	Tape Read	RP	17	n: けた数 ≤ 3
	Sense input n	SS	22	n: 外部レジスタアドレス
	Out put n	OT	63	n: 外部レジスタアドレス
複合	Jump & Store PC	JS	12	
オプション	Multi	ML	43	
	Divide	DV	45	
	Load Awx. Reg	LD	34	
	Right cycle long	RL	13	

処理は最優先の割込みによって処理される。

制御用計算機に対して要求される機能として計算部運転中の記憶内容変更または記憶内容の読出しがある。一般には数式中の定数はひんばんに変更する可能性のあるものは手動設定を行なうが、ときにより当初固定した数値を変更したいことがあり、その都度計算機を止めるのは連続運転のためまえから好ましくない。計算機運転中に記憶番地を外部で指定して内容の変更を行なう機能があれば都合がよい。また制御用では原則としてデータのロギングをやらなため計算結果の数値を読出したいことがあり、このときも同様に記憶番地を指定して内容の読出しを運転中に行なう。

デジタル制御において常に問題となるのはチェックシステムで

ある。システム全体のチェックについては前にも触れたが、計算部自身のチェックをどの程度考えるかは計算機の信頼性とも関連する。計算部の自己チェックとして JUMP 類命令チェック、加減算類命令チェック、番地演算類命令チェック、そのほかシフト、乗除算命令などのチェックがある。現段階では A-D チェックなども含め、所要メモリーの約 10% 程度のチェックが必要であろう。

7. 結 言

以上転炉の計算機制御についてシステムの考え方や問題点について述べたが、数式モデルの確かさに限度があるためソフト、ハードともに検討すべき問題が多く残されている。わが国の熟練者が操作することにより適中率は 90~95% に達するといわれているが、自動化によりここまで持ってくるのは容易ではない。検出器の検出精度分析計のサンプルの処理法などにも検討の余地がある。

日立製作所日立工場で現在調整中の東海製鉄株式会社納転炉計算機制御装置については稿を改めて述べる予定である。

終わりにご指導いただいた東海製鉄株式会社製鋼設備課小川課長、日立製作所中央研究所三浦主任研究員をはじめ関係各位に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) Stahl und Eisen. Nr. 13 82, S 797/808 (1962)
- (2) Journal of Metals. Mar. 226 (1960)
- (3) 計測と制御 Vol. 2, No. 1 (1963)
- (4) 日本鋼管技報 No. 26, 136 (1963)
- (5) BORREBACH: Electrical Systems and Computer Control for the Basic Oxygen Steelmaking Process W. H. (1962)
- (6) 日立工業計器カタログ, EI-257 A
- (7) 鉄と鋼, No. 3, 68 (1961)
- (8) Iron and Steel Eng. Dec. 93 (1962)
- (9) Journal of Metals. Jul. 531, (1960)
- (10) Jourual of the Institute of Fuel Jan. 3, (1961)
- (11) Journal of Metals. Apr. 256 (1959)



特 許 の 紹 介



特許第422219号

高野憲三

変性フルフリルアルコール樹脂の製造方法

フルフリルアルコール系縮合樹脂が非常に耐薬品性に富むことは周知であるが、硬化性、特に内部硬化性が劣り接着性が悪いことも知られている。

この欠点を改良しようとして従来アミン類、アルデヒド類、フェノール類などを添加して変性したものがあるが、これもまた十分に目的を果していない。

この発明は、フルフリルアルコール中間縮合物 1 重量部に対して、レブリン酸 0.01~0.5 重量部添加混合し、これを酸性触媒存在下で反応させることを特徴とする変性フルフリルアルコール樹脂の製造方法に関するものであって、これにより樹脂セメント、接着剤、耐

食材料、電気絶縁材料などに適した樹脂が提供される。

この発明で用いられる酸性触媒は、塩酸、硫酸、リン酸などの無機酸あるいはベンゼンスルホン酸、トルエンスルホン酸、キシレンスルホン酸、ナフタレンスルホン酸などのスルホン酸がある。

レブリン酸を添加して変性しないフルフリルアルコール樹脂のジオキサンに対する不溶解量がわずか 3% (重量) であるのに対し、本発明によるものはたとえばレブリン酸添加量が 20% (重量) のとき不溶解量 36%、添加量 25% のとき不溶解量 38% である。

このことから本発明の変性樹脂は非常に良好な硬化性をもつことが明らかである。(佐藤)