要約版

川崎製鉄技報
KAWASAKI STEEL GIHO
Vol.4 (1970) No.1

焼鈍工場における計算機制御システム
Computer Control System of Annealing Plants

宝田　正昭(Masaaki Takarada)　高徳　芳忠(Yoshitada Takatoku)　井上　源之助(Gennosuke Inoue)　分田　実(Minoru Waketa)　萩原　光彦(Mitsuhiko Hagiwara)

要旨：
けい素鋼製造工程の安定化による品質向上と省力化を図るため，２つの連続ラインと３４ベースのバッチ式焼鈍炉からなる葺合焼鈍工場に新計算機制御システムを導入した。本計算機システムは，連続焼鈍ラインでは温度制御，ライン速度制御，バッチ式焼鈍炉では温度制御，シーケンス制御，異常処理，最適操業時間制御および作業予定表示から構成されている。本稿では主として連続焼鈍ラインの温度制御とバッチ式焼鈍炉の温度制御およびシーケンス制御の概要と特長について述べている。

Synopsis：
A new computer control system for the annealing plant of Fukiai Works was completed in January 1971, for controlling the two continuous annealing lines and 34 batch type annealing furnaces. The functions of this computer control system are temperature control, line speed control and line tension control at the continuous annealing lines, and temperature control, sequence control, emergency control, optimum time schedule control and display of work schedule at the batch type annealing furnaces. This new computer system is bringing about fine results, fully answering the increasing requests for higher and more stabilized quality of silicon steel.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

UDC 621.783.222/223
621.783.3 : 62·5 : 681.3

焼鈍工場における計算機制御システム

Computer Control System of Annealing Plants

宝田正昭* 高徳芳忠**
Masaaki Takarada Yoshitada Takatoku
井上源之助*** 分田実****
Gennosuke Inoue Minoru Waketa
萩原光彦*****
Mitsuhiko Hagiwara

Synopsis :

A new computer control system for the annealing plant of Fukiai Works was completed in January 1971, for controlling the two continuous annealing lines and 34 batch type annealing furnaces.

The functions of this computer control system are temperature control, line speed control and line tention control at the continuous annealing lines, and temperature control, sequence control, emergency control, optimum time schedule control and display of work schedule at the batch type annealing furnaces.

This new computer system is bringing about fine results, fully answering the increasing requests for higher and more stabilized quality of silicon steel.

1. 緒 言

鉄鋼業における制御用計算機は広範囲にわたり採用され，高炉，転炉などの大型プラントにおいては，技術的にも，省力化を図る上にも，必要不可欠のものとなっている。一方最終製品用プラントへの採用は前者とは異なる観点から導入される例が多くなっている。

今回，当社葺合工場けい素鋼帯焼鈍プラントの2つの連続焼鈍ラインと34ベースのバッチ式焼鈍炉について，計算機制御を計画，実施したが，この種のプラントへの導入によるメリットを考える場合，何を制御対象に選ぶかが大きな問題となっている。

すなわち，省力化だけを目的とする場合には，計測制御装置の代用としてではメリットが少ないので，シーケンス制御の大幅な活用も考えなければならないが，コアプログラムをもつシーケンス制御装置などでも十分代用できる部分も生じてくる。しかし品質，性能の向上のための計算機制御はプラントの特性によっては効果を十分発揮することができる。今回の対象プラントには両者の考え方を考慮しており，連続焼鈍ラインでは操業のいっそうの安定化による品質向上，能率向上を，またバッチ式焼鈍炉では省力化および品質向上を

* 葺合工場管理部熱管理課掛長
** 西宮工場管理部管理課掛長
*** 葺合工場管理部熱管理課
**** 葺合工場管理部熱管理課
***** 葺合工場管理部熱管理課

目的としている。そして焼鈍設備を含む焼鈍工場のプロセス制御を一つのシステムとして導入している。

導入経過は昭和44年10月頃より計画し，同時にソフト設計を始め45年8月に機器搬入，10月よりデバッグ，46年1月より稼動を開始し現在にいたっているが，将来，設備の増強が行なわれても本システムに包括できるよう余裕をもって設計されている。

システムの特色は計算機を有効に利用しているため，小型計算機の割には大きなシステムであること，またプラントの性格上ＤＤＣを加味した制御方式を採用していることであろう。

本稿ではそのシステムの概要および特色について報告するものである。

2. 設備概要

2·1 連続焼鈍ライン

このラインの目的は，けい素鋼帯を連続的に焼鈍することと，2，3の付加的処理を目的としている。

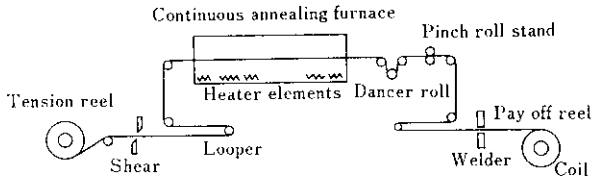

Fig. 1 Schematic diagram of continuous annealing line

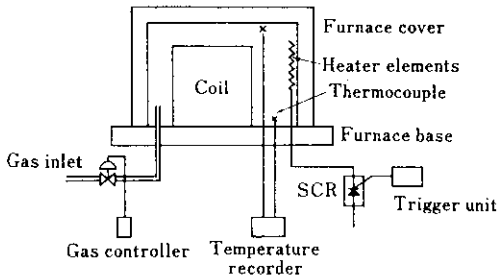

Fig. 2 Schematic diagram of batch type annealing furnace

ライン構成は（**Fig. 1** 参照）ペイオフリールから繰り出される鋼帯の先端が溶接機により先行コイルの最終端と溶接され，ルーパー，ピンチロール，張力調整ロール，焼鈍調質を行なう焼鈍炉，ルーパーを経て出側にいたるもので，出側では最終端すなわち溶接部を切断し，1コイルごとに搬出する。

鋼帯速度はピンチロールの回転数で決まり，他の出側テンションリール，入側ペイオフリールなどはこれに従属している。

連続焼鈍ラインの手動操作に必要とする情報は炉の温度，ガス成分，露点，ラインスピード，鋼帯張力，溶接点位置，コイル重量などであるが，これらの多くは自動運転にも不可欠のものであり，計算機の入出力の対象となるものである。

また，けい素鋼帯の生産工程では，この種の焼鈍炉が非常に有効であると同時に常に変動のない安定した処理能力が要求される。これを満足するには機械的，電気的配慮とともに，精度の高い制御系が必要である。

2·2 バッチ式焼鈍炉

バッチ式焼鈍炉の特徴は長時間の熱サイクルを要する焼鈍が可能あるでとともに，静置状態で加熱焼鈍できることである。当バッチ式焼鈍炉でもこの特徴を利用している（**Fig. 2** 参照）。

操業方法は炉床上に鋼帯コイルを積み込み，炉蓋をかぶせ，それに装備された電熱帯で加熱するとともに不活性ガスでパージする。以後，操業手順に従い加熱，冷却そしてガス切り替えを行ない，1サイクルのバッチ処理を終える。

制御情報は温度，ガス量，分析値，コイル重量などであり，操作量としては温度（ヒータ電圧），ガス切り替えである。

従来，バッチ式焼鈍炉では操業が長時間にわたるため，短時間で生じる温度偏差は小さかったので，簡単な温度調節器により手動を介して制御されてきた。しかし炉数が増加し，また操業の周密性が要求され，さらにトラブル発生時の処理を正確なものにして歩止まりを上げるためには，総合

的なシーケンスプロセス制御が必要であり，これらを解決するために計算機制御が採用された。特に炉内の鋼帯コイルに対して均一な焼鈍を行なうにはコイル重量，炉の初期条件，電熱帯の加熱能力による操業パラメータの修正が必要であり，計算機制御により，その精度が向上する効果は大きい。加えて計算機制御によりシーケンス制御も容易となる。

3. システム概要

3·1 システム構成

（1） 連続焼鈍ライン

連続焼鈍ラインでは温度制御，速度制御，張力制御およびデータロギングを行なっている。温度制御は時間比例によるオン・オフ制御であるが詳細は後述する。速度制御においては走行コイルと次のコイル処理温度が異なる場合に，炉温度変化の影響を緩和するために速度を漸次変化させて一定のコイル温度を維持するようにしている。張力制御は張力の自動設定とその保持調節を行なっている。速度および張力の制御機構については公知の事柄が多いので本稿での説明を省略する。

データロギングは1コイルの処理終了時点にライン出側タイプライタに必要データを出力し，作業報告を作成している。

以上の制御は1コイルごとに確実に実行される必要があり，そのためにパルスカウンターでコイル溶接点のトラッキングを行ない，コイルの通過状態を把握している。なお各コイルの制御パターンの選択はライン出側操作盤からのデータ設定で行なっており，また炉内各部の温度，その他必要な情報もこの操作盤および計算機室内の操作盤のニクシー管表示で得られる。

（2） バッチ式焼鈍炉

炉個々の温度制御，また雰囲気ガスの自動切り替え，その他シーケンス制御を行なっているが，

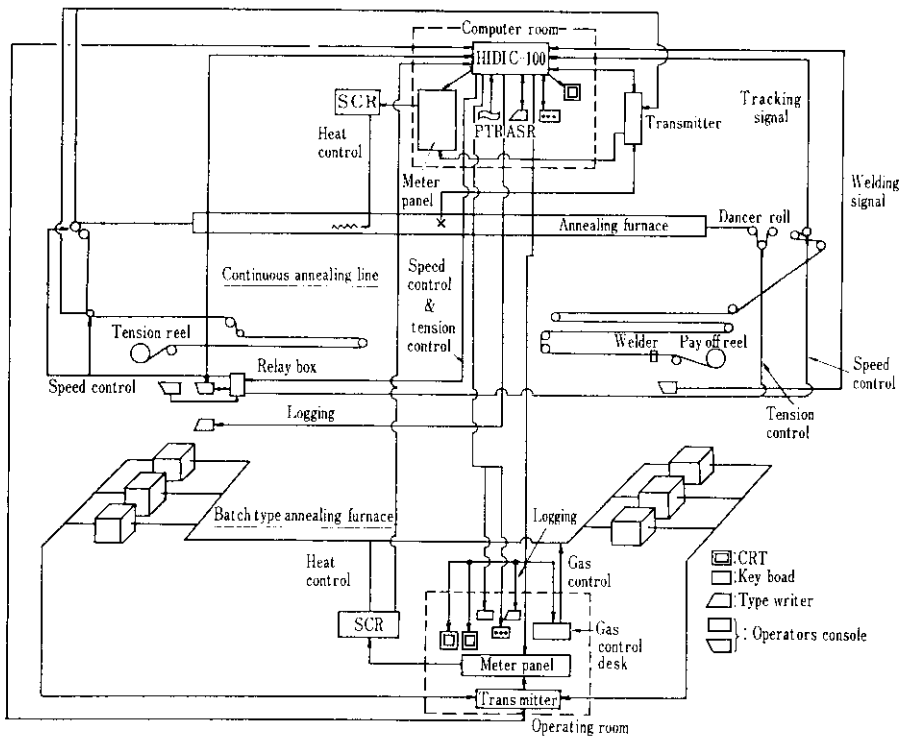

Fig. 3 System diagram

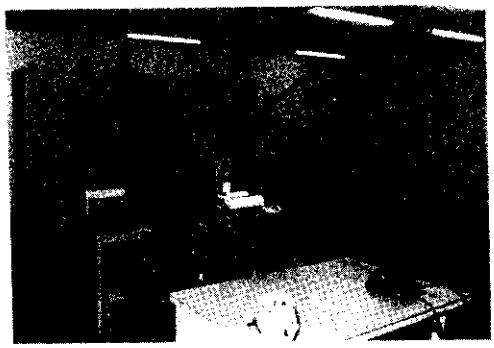

Photo. 1 View of computer room

Photo. 2 Control room of batch type annealing furnace

Table 1 Computer specifications

Central processing unit	Model	HIDIC-100
	Arithmatic operation	Binary parallel
	Execution time	Add., sub.: 16.5μsec, mult., div.: 25~35μsec
	Word length	15bits+ 1 bit sign+ 1 bit parity
	Core memory	16384words
	Memory cycle time	2 μsec
Drum memory	Capacity	8192 sectors, 16words/sector
Console	Data typewriter	Teletype ASR M-33
	Photo tape reader	
Process input output	Automatic program interrupt	6 levels, 8 points/level
	Analog input	204points
	Analog output	64points
	Digital input	7words, 16bits/word
	Digital output	15words, 16bits/word

詳細は後述する。

操作室内には操作盤，キーボードおよび2台のCRTを設置して，焼鈍パターン，コイルデータの設定および必要情報の呼び出しを行ない，またタイプライターにより作業報告の作成を行なっている。

システム全体図を **Fig. 3** にシステム構成機器の仕様を **Table 1** に示す。

3·2 ソフトウエア概要

プログラムは管理プログラムとアプリケーションプログラムに大別されており，アプリケーションプログラムは1秒タイマー，1分タイマーおよび割り込みによって起動される。

システムの特徴として次の3点をあげることができる。

（1） サンプリング周期ごとに起動しないプログラムがあること，またバッチ式焼鈍炉についてはサンプリング周期が1 minと長く，時間的余裕があるのでコア常駐プログラムを大幅に減らしてある。これにより小型計算機でかなり大きなシステムを動かすことができると同時に投資効果を高めている。

（2） サンプリング周期が1 secのものと，1 minのものを使用している。相互干渉を防止するため1秒サンプリングを優先させ，処理も短時間になるようにプログラミングしてある。

（3） システムを柔軟なものにするため，操業条件となりうるすべてのパラメータは一括してテーブル化してある。これにより操業条件の変更（温度パターンの全面的変更も含めて）は限られたテーブル数値の変更で短時間に容易に実施でき，またプログラムシステムに精通していない者によっても可能である。

その他システムで留意された点はプラントの異常発生に対し，計算機によって実施する処理方法がプログラミングされていることである。また，計算機ダウンからの復帰の場合，あるいは，操業中に特定の炉の操業状態を変更する場合には，操作盤およびCRTから簡単に制御を再開，実行させることができる。

プログラム割り付けは6レベル16要因である。プログラムは高位レベルが優先し，高位プログラムが終了後，元の低位プログラムが再開，実行される。また，コア常駐プログラムはレベルおよび要因の優先するものとの同時処理が可能であるが，コア非常駐プログラムは同レベル内では同時起動要求に対し，要因の高いものが優先起動されるが同時処理はできない。

各レベルに対する主要プログラムを次に示す。

レベル0：計算機電源閉，電源開，タイマー割り込み

レベル1：磁気ドラムなど周辺機器からの割り込み

レベル2：タイプライタ出力プログラム
CRT表示出力プログラム
1 sec サンプリング

レベル3：連続焼鈍ラインストップ・プログラム
アラーム編集プログラム
張力制御プログラム

レベル4：連続焼鈍ラインサンプリング・プログラム
連続焼鈍ラインシーケンス・プログラム
バッチ式焼鈍炉サンプリング・プログラム
バッチ式焼鈍炉シーケンス・プログラム
バッチ式焼鈍炉操作盤プログラム
バッチ式焼鈍炉復帰処理プログラム

レベル5：計算機室操作盤プログラム
連続焼鈍炉操作盤プログラム
CRT表示編集プログラム

レベル6：コンソールトラップ，オンラインローダ，オンライン・タイプライタ・テスト・プログラム

レベル7：使用せず

4. 計算機制御

4·1 温度制御

計算機制御においては，通常のアナログ計器より自由度が高く制御対象に応じて最適アルゴリズムを採用できるが，プロセス制御（特に温度制御流量制御など）においては，アナログ計器に準じたPID動作を採用することが多い。式で表わせば次のようになる。

$$y_n = K_P e_n + K_I \sum e_n + K_D(e_n - e_{n-1}) \quad \cdots\cdots(1)$$

y_n：n回サンプリング時の出力
K_P：比例ゲイン
K_I：積分ゲイン
K_D：微分ゲイン
e_n：n回サンプリング時の偏差
e_{n-1}：$n-1$回サンプリング時の偏差

出力演算の形式には(1)式のような位置型と，操作端がモータバルブなどのように積分特性を有する場合によく使われる速度型がある。それを次式に示す。

$$\begin{aligned} y_n &= y_{n-1} + \Delta y_n \\ &= y_{n-1} + K_P(e_n - e_{n-1}) + K_I e_n \\ &\quad + K_D(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \end{aligned} \quad \cdots\cdots(2)$$

この両者では基本的に異なるところはないが非定常時に異なる特性を示す。すなわち(2)式で目標値に近づきつつある時点では，$K_P(e_n - e_{n-1})$

項と $K_I e_n$ 項が異符号になる。このための目標値を変更した場合に，オーバーシュートを小さくすることができる。また，このほかに(2)式を変形した微分先行型演算式が考えられる。ベル型焼鈍炉の温度制御のように目標温度到達時のオーバーシュートが問題になる場合には，その防止策としてこの制御アルゴリズムが使用されることがある。目標温度到達時に積分ゲインの低下によってオーバーシュートを防止する場合などがそれである。

定められた温度勾配で上昇する炉温をデッドビートにて目標値に突入させるには，目標値と炉温がある温度差になった時点から出力をしだいに減少させ，その後 j 回サンプリング時出力の変化分を零になるようにすればよいのであるから(2)式において $n+j$ サンプリング時の出力は次のようになる。

$$y_{n+j}=-K_P e_{n-1}+K_I \sum_{j=0}^{j} e_{n+j}+y_{n-1} \quad \cdots\cdots(3)$$

$-K_P e_{n-1}+K_I \sum_{j=0}^{j} e_{n+j}$ の項が j 回サンプリングにおける出力変化分を示しており，K_I/K_P の比は出力の減少度を示している。K_P の安定限界内で K_I/K_P 比を考えるとき K_P, K_I のどちらを変化させてもよいと考えられるが，外乱に対する応答を考えるならば K_P を増加させるのが得策であろう。

ここで対象プロセスをむだ時間，および一次遅れで近似すれば次式で表わせる（**Fig. 4** 参照）。

$$G_P(S)=Ke^{-\tau_D S}/(\tau S+1) \quad \cdots\cdots(4)$$

ここで，

S：ラプラス変換演算子

τ：時定数

τ_D：むだ時間

K：定数

デッドビート動作の条件として次式を考える。

$$W(z)=z^{-(1+P)} \quad \cdots\cdots(5)$$

また，$W(z)$ は次式で表わすことができる。

$$W(z)=\frac{C(z)}{R(z)}=\frac{D(z)\cdot G(z)}{\{1+D(z)\cdot G(z)\}} \quad \cdots\cdots(6)$$

ただし，$G(z)=z\{G(S)\}=z\{G_h(S)\cdot G_P(S)\}$ $\cdots\cdots(7)$

ここで $P=\tau_D/T$（T：サンプリング時間）で整数であるとし $G(z)$ を求めると次式のようになる。

$$G(z)=z\cdot\left\{\frac{1-e^{-TS}}{S}\cdot\frac{Ke^{-\tau_D S}}{\tau S+1}\right\}=K\left\{(1-e^{-T/\tau})\cdot\frac{1}{z^{P+1}-e^{-T/\tau}\cdot z^{P}}\right\} \quad \cdots\cdots(8)$$

(5)，(6)式に(8)式を代入し $D(z)$ を求める。

$$D(z)=\frac{1}{K(1-e^{-T/\tau})}\cdot\frac{1-e^{-T/\tau}\cdot z^{-1}}{1-z^{-(P+1)}} \quad \cdots\cdots(9)$$

最終的制御アルゴリズムは次式で表わせる。

$$y_n=y_{n-(P+1)}+K_1(e_n-K_2e_{n-1}) \quad \cdots\cdots(10)$$

$$K_1=1/K(1-e^{-T/\tau}) \quad \cdots\cdots(11)$$

$$K_2=e^{-T/\tau} \quad \cdots\cdots(12)$$

(10)式はPI動作の制御式と同一であり，したがって特にデッドビート動作制御アルゴリズムは必要ではないことがわかる。ここでむだ時間に対し K_1, K_2は無関係であり，補償項は $y_{n-(P+1)}$で表わされている。

また，デッドビート動作のいまひとつの特徴は

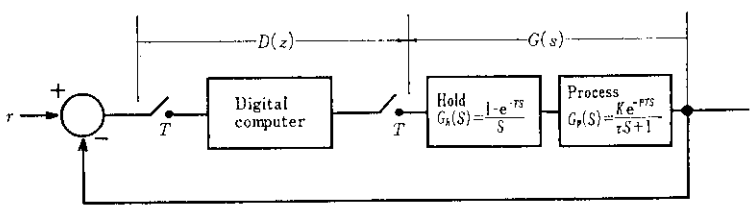

Fig. 4 Block diagram

外乱に対する応答が遅いことである。外乱が問題となる場合は速度型PI動作の方が効果的である。

以上の制御アルゴリズムのうちいずれを採用するかは，対象プロセスの特性によって選択されなければならない。

当プラントに対する制御アルゴリズムは次のようである。すなわちバッチ式焼鈍炉においては外乱に対する応答を良くするため速度型PI動作を，またデッドビート動作のためには，コイル重量によって決まる K_P 値に対する K_I 値を変更することにより K_I/K_P 値を変化させて，対処することにした。制御式を次に示す。

$$y_n = y_{n-1} + \Delta y_n = y_{n-1} + K_P(e_n - e_{n-1}) + K_I e_n \quad \cdots\cdots (13)$$

y_n：n回サンプリング時の出力

Δy_n：n回サンプリング時の増加分

e_n：n回サンプリング時の偏差

K_P：比例ゲイン

K_I：積分ゲイン

連続焼鈍ラインにおいてはさらに速度変化による外乱を無視できない。制御式を次に示す。

$$y_n = y_{n-1} + \Delta y_n = y_{n-1} + K_P(e_n - e_{n-1}) + K_I e_n + K_v(v_n - v_{n-1}) \quad \cdots\cdots (14)$$

v_n：n回サンプリング時の速度偏差

K_v：速度比例ゲイン

K_v は板幅，板厚の関数であり，また焼鈍炉の各ゾーンのゲインを選択することにより温度制御性を良くしている。

また，サイリスタを電力制御素子として使用するため発生ノイズが問題となるので，連続焼鈍ラインにおいては時間比例（パルス幅制御）方式を採用している。この時間比例の同期はプロセスの応答速度を考慮して決定している。

温度制御について上記のような考慮を払った結果，次のような効果をあげることができた。バッチ式焼鈍炉では広い温度域で，長時間一定速度で昇熱することができる。速度が一定化することは各温度域での滞留時間が一定化し，コイルの調質時間あるいは表面反応時間をいっそう安定したものにすることができた。従来の方法では積み込みコイルの重量あるいは各温度域での炉体放散熱の相異などによる炉の応答性が異なることから，一定のPID調節では低温，高温で同様の制御性を維持するのはかなり困難である。

また，炉内の温度勾配を小さくすることができた。K_I 値を各温度域あるいは昇熱速度によって変化させることにより，昇熱時，均熱入時のコイル上下間の温度差を小さくすることができ，製品の均一化，歩止まり向上に寄与している。

連続焼鈍ラインでは，アナログ計器以上の制御性を得ている。

温度制御のもう一つの特徴は，計算機からSCRへの出力信号を保持する機能を持つオートマニュアルステーションを使用していることである。これは正常時は計算機からの出力値を保持しているが，計算機ダウン時には直前の出力値を保持するとともに電流出力値の手動操作を可能にしている。その機構の概略図を **Fig. 5** に示す。

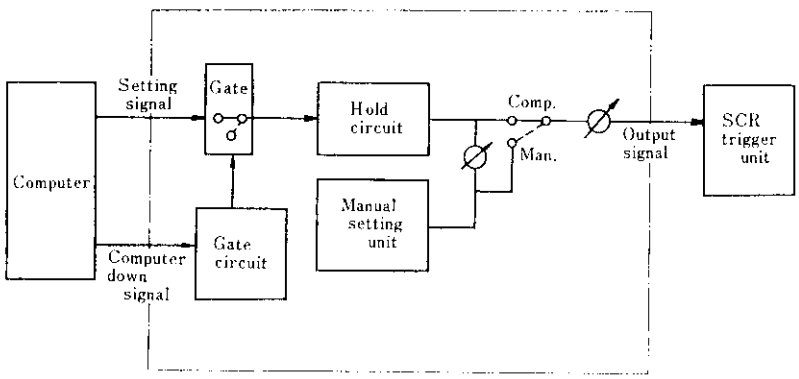

Fig. 5 Block diagram of auto-manual station

4·2 バッチ式焼鈍炉のシーケンス制御

計算機システムにおけるシーケンス制御はリレー回路の単なる代行だけではなく，ほかの情報あるいは他炉の同種シーケンス情報を持ち，一般計測制御器や，オペレータに比べ綿密な判断を下すことができる。一方オペレーターの立場からすれば，計算機およびプラントが正常であれば作業量が著しく軽減されるが，プラント異常時の作業量の急増は計算機による省力化と反するものであり防止されなければならない。異常（頻度は少ないが）判断の正確性，迅速性には個人差があり，常に最善の処理をするのには熟練を必要としていた。それらを考慮してシーケンス制御では，異常の発見とその処理および炉の有効利用を実施させている。制御内容を分類すると次のようになる。

（1） サイクル時間に関するもの

（a） 積み込みから積み卸しまでのチャージ時間

（b） 不活性ガスによる炉内パージ時間

ガス切り替えの確認はガス流量および電磁弁の作動を確認したオペレーターからの信号によっている。電磁弁は電磁弁電源断時に状態保持の可能なものを使用している。

（c） 雰囲気ガスサイクル時間

（d） 冷却時間

（e） 昇熱時間

目標温度の±5°C以内になった時点で昇熱完了とし，それまでの加熱時間

（f） 均熱時間

設定値との温度偏差，および均熱到達までの時間により指定均熱時間の変更も行なっている。

（2） 異常発見に関するもの

（a） 異常温度偏差のチェック

常に1分サンプリングで偏差をチェックし，その偏差の大小により温度注意，または温度警報メッセージを出している。温度は炉内の上部，下部の2点を測定しているが，それらの一方のメッセージの時は熱電対による測温上の異常で，点検によって発見できる。両者ともに異常の場合は，送電設備あるいは電熱帯の異常であり，異常処理ルーチンへ移行する。

（b） 炉電熱帯の抵抗チェック

送電開始時，停止時および送電中に数回決められた時点で電圧および電流値から抵抗を求め，十分な加熱能力の有無を判断している。抵抗は電熱帯の断帯によって高くなり，1サイクルの処理を実施するに不十分な炉に対して，早期に対策をとることを目的としている。

（c） ガス切り替え確認のチェック

自動切り替え後オペレーターからの確認が得られない場合再度要求メッセージを出すが，それでも得られない場合は異常処理ルーチンへ移行する。

（3） 異常処理に関するもの

（a） 処理の判断

炉の異常が発見された場合炉の変更を行なうが，それ以前にコイルへの影響が著しく少ない時点まで続行できるかどうかの判断を電熱帯能力から実施し，可能なものは続行後，できないものは影響の極力少ない時点で送電を停止する。

（b） 処理の指示

炉の変更は，最も近い時点で積み卸しの終ったまたは終るほかの炉を使用し，異常の表示とともに指定指示する。

（c） 処理

再スタートされた炉はコイルの異常前歴データをもとに数種の温度およびガス切り替えパターンによって処理される。

（4） 作業性に関するもの

（a） 送電時間の決定

積み込み作業が完了した時点で，全チャージの所要時間を予測し，送電時間の決定を行なう。決定にあたっては作業者の作業が指定時間帯に入り，さらに作業待時間が最も少なくなるようにしている。これにより指定時間帯での作業密度が高められ，この時間帯での作業だけでプラントを稼動させることができる。これに

よる処理能力の低下は数%である。

（b） 作業予定表示

1日の予定される作業と推定時刻を表示し，作業段取りの効率化をはかっている。

（c） 炉ぐり指示

炉の余熱を有効利用するために熱い炉ぶたを優先的に最も早く送電する予定の炉床へ指定指示している。

4·3 データ処理

プラントの性格上最終製品を扱うため，前後の工程やオーダーとの関係上，詳細なデータをできるだけ正確にリアルタイムで収集処理する必要がある。一般的に操業管理上，データ解析上そして計算機の精度向上のためにも重要なことである。本システムのデータ処理内容を次に述べる。

（1） バッチ式焼鈍炉のデータ処理

1チャージごとの操業結果の整理および異常処理，データのチェックアウトを行なうとともに，オペレーターの誤操作をデータの合理性チェックから論理的に検出する。

（2） 連続焼鈍ラインのデータ処理

オペレーターの誤操作の論理的チェックを行ないこれを表示する。タイプアウトされた処理完了コイルの確実なデータを，工場内の上級計算機や本社の計算機システムへの入力とすることにより，オーダー処理機械化の一環として活用する。現在はタイプアウトされたもので本社計算機システムとリンケージをとっているが，将来はダイレクトオンライン転送することを計画の中に入れている。このほかにプロセス用計算機が一般に採用するデータ処理（処理要求信号の発信，異常発信，計算機トラブルのロギングなど）も行なっている。これらの結果，情報の信頼性を高め省力化にも寄与している。

5. 結 言

以上焼鈍工場における計算機制御システムの概要について述べた。計算機の導入には経験が浅く，初期の段階では多少曲折もあったが比較的短期間で実施でき，操炉作業の省力化，製品品質のいっそうの向上など初期の期待された効果を十分発揮している。

計算機のシステムへの適合という観点からすれば今回の試みで，小型計算機を最大限に活用し相当大きな規模のシステムを完成していることは，投資効果の点からも技術的な面から見ても特記できるものと考えられる。

最後にシステム建設にご協力いただいた日立製作所担当者各位に厚く感謝いたします。