

# 化学プラントの計装

Instrumentation of Chemical Industries

今井 溥\* 松原 一郎\* 福島 清助\*  
Hiroshi Imai Ichirô Matsubara Seisuke Fukushima

## 要 旨

石油化学工業，食品化学工業をはじめ各種化学工業においてオートメーションは急速な進歩がみられているが，技術の高度化や製品に対する要求も厳格になるにつれて，プラントも複雑化してきている。連続プロセスの計装について，エチレンプラントの計装を例として，電子式計装と空気式計装との得失，停電時の計装電源などを考慮した方式について述べる。次にバッチプロセスの計装例として，発酵工業のシーケンス制御の考え方，経済性について述べる。

## 1. 緒 言

わが国において，ナフサからエチレンを製造する本格的なプラントがはじめて稼動したのは，昭和33年(1958年)三井石油化学(麻里布工場)の2万ton/yearのエチレンプラントであった。その後予想以上の速度で順調な伸びを続けている。

その製造法には種々の方式があるが，Stone & Webster 法が圧倒的に多い。この方式はナフサを原料とし，800℃付近にて管式炉で熱分解するもので，エチレン収率は原料ナフサに対し一般に20~25%程度であるが，最近開発された方式では28%以上にも達する。

ここではこのようなエチレンプラントを例として，(1)電子式計装と空気式計装の得失，(2)計装電源の考え方，(3)分解炉の計装につき述べる。

図1は一般的なフローダイアグラムを示したものである。

## 2. 電子式計装と空気式計装の得失

エチレンプラントでは可燃性物質を取り扱うため，現場計器には防爆を考慮しなければならない。したがって検出はなるべくメカニカルに行なう空気式が従来使用されてきた。しかしながらこの長大かつ複雑なプロセスの計装に対しては，その運転操作のための計装盤の配列，データの処理，計器保守の点から新しい計装思想が導入され，一方電子式計器の信頼性の向上，防爆対策の進歩により，計画に際していずれの方式を採用すべきかささまざまな意見が提出されるようになった。その論拠とするところは，建設費の問題，従来の設備との互換性，制御性の優劣，信頼性そして将来性のいかに関するものである。これらの結論とするものは，プラントの大形化ともなっており電子式に移行すべき傾向を示している。

### 2.1 電子式計装の経済性

計装方式を，電子式とするか，空気式とするかによって，建設費に影響を与えるものについて，その費用の差と，全体に占める割合を検討した結果は，次の通りである。

#### 2.1.1 計器類の費用

現在の段階では，従来の空気式と同じ制御ループを構成する電子式の計器の価格は，まだ高価である。調節ループであるか，多点記録のループであるかなどの種類によって差はあるが，空気式より電子式のほうが10~40%割高となる。しかし，温度の記録，

\* 日立製作所那珂工場

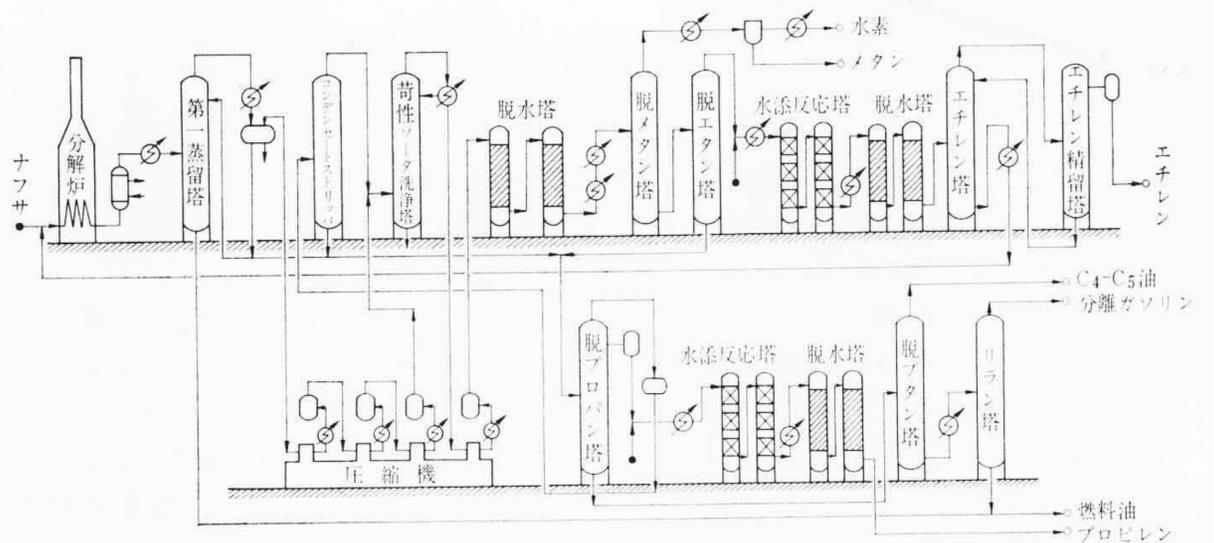


図1 エチレンプラントのフローダイアグラム

指示のみの計器や，現場調節，現場指示の計器類は，しいて電子式にする利点もなく，いずれの方式でもよい。

#### 2.1.2 計器用の電源および空気源の費用

電子式計器の電源は，商用電源から整流した直流安定電源とするために，特別な電源箱，あるいは蓄電池を使用し，定電圧とする電源装置を必要とする。操作端については，電子式となった現在でも，操作力，簡単な構造および価格の点で，大半は空気式の調節弁，パワーシリンダなどが使用されている。しかしこれらを除けば，所要空気量は，電子式では，空気式の場合の1/3~1/2程度となる。このため動力源設備として考えた場合，空気源設備は電子式計器のほうが容量が小さくて済むが，代わりに定電源装置を必要とするため，動力源全体としてみれば空気式計装と同じ程度の費用と考えられる。

#### 2.1.3 多点記録，指示のための費用

電子式の調節計は，集中監視を容易にするため，記録や指示計を切り離し，偏差指示調節計として，計器盤の中心部にまとめて配列するため，従来の「記録調節計」という形態では存在しなくなってきた。このため，スタート・アップ時の制御状態の記録や，定常状態における異常監視の記録として，トレンドレコーダや多点記録計類が必要となってくる。これらの記録装置は，数点~数10点について共通の，または多点の記録計でよいので，大幅な費用の追加とはならない。

#### 2.1.4 計装盤の費用

電子式の場合，調節計は小形縦形となり，横方向に密着して集中監視に人間工学的な効果が現われてくると，必然的に従来の空気式小形計器による計装盤よりも，少ない面数で，計器室内の計画がなされる。なお，最近市販されはじめた空気式の縦形偏差指示調節計は実績が少ないので，ここでは従来の小形計器と比較し

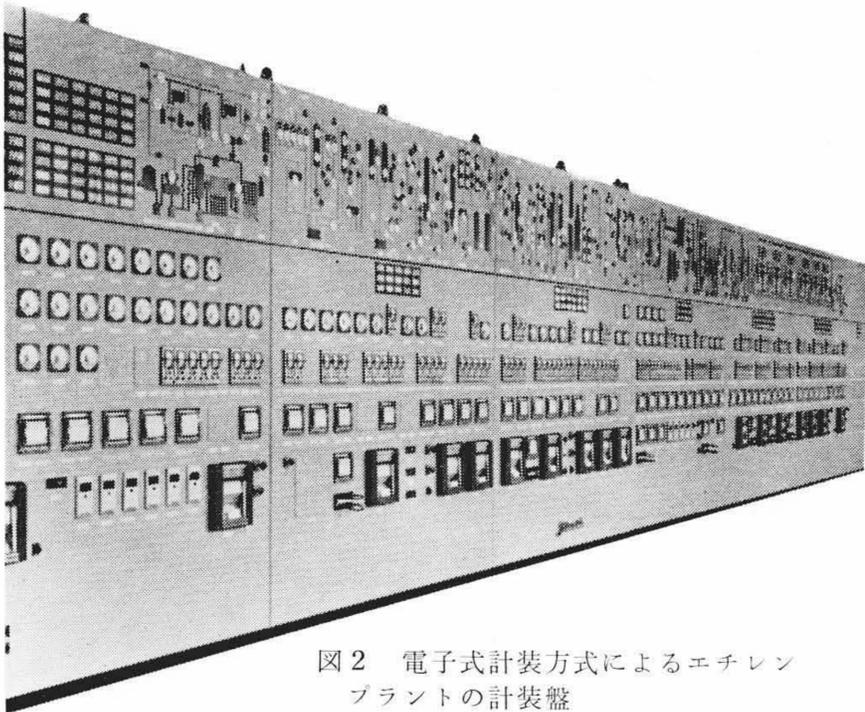


図2 電子式計装方式によるエチレンプラントの計装盤

た。一般的に、空気式計器の盤内配管は電子式計器の盤内配線に比べて割高となるが、電子式計装盤は配線本数が増大するため空気式と比較しほとんど同じ程度の費用である。

2.1.5 計装工事費

計装工事中、信号線に要する費用は、銅管とケーブルの比較となり、電子式のほうが安い。しかし、石油化学プロセスでの防爆工事を考慮すれば、材料費に関しては、ほぼ同程度となる。もちろん、防爆不要なプロセスでは、電子式のほうが安くなることは明らかである。

また、工事費については、ケーブル延線に比べて、銅管の延線作業には工数がかかり、プラント運転開始までの調整期間を短縮するには電子式の方が有利である。これに加えて電子式の場合、空気配管用の12心に対し、150心ときわめて多くなり、1ループ当たりの材料費を節減するのはきわめて容易である。

2.1.6 計器室の建設費

計装盤の費用が安くつくことは、盤面数が少なくなるという形で表わされたが、このことは、計器室の面積の縮小という形で建設費に大きく影響する。別項の例では、空気式で幅1,200mmのパネル18面であったものが、電子式で計画すると幅1,200mmのパネル6面と、幅1,000mmのデスク2面となる。前者の計器室は、幅25m、奥行8mで200m<sup>2</sup>、後者の計器室は、幅10m、奥行6.5mで65m<sup>2</sup>となり、約1/3の面積とその建設費の差となるわけである。

2.1.7 そのほかの費用

さらに進んだ集中管理形態としての、データ・ロガー、コンピューティング・ロガーなどの設置により、これらのロガーの費用の増加とは逆に、品質の向上、効率の上昇、運転情報の収集、監視に要する運転員の削減という形で現われる費用の減少分は、ロガーの費用を償却して余りある場合もあるが、これらは評価が困難であるので論議は別の機会にゆずりたい。

以上述べた考え方は、表1に示すようなある実際のプロセスの計装計画に当たって算出した例によっても明らかのように費用の差はほとんどない。

2.2 電子式計器の保守

空気式計器で従来の工場を計装してきたユーザーは、既設の工場の「馴れ」によって、空気式のほうが保守しやすいと考える。しかしプラントの規模が大きくなってくると、もはや空気式計器の時代のように、1台1台の計器を手直してメカニズムを調整する余裕もなくなってくる。この点電子式では、デリケートな可動部分はなく、

表1 電子式、空気式計装設備費用の比較例

項目	電子式 (E)	空気式 (P)	E/P×100%
計器類の価格	60.60	52.50	115.43
流量計系統	15.91	13.08	(121.63)
圧力計系統	4.44	3.44	(129.07)
液面計系統	9.53	7.36	(129.70)
温度計系統	7.71	6.35	(121.41)
多点呼出記録指示計	0.74	—	—
現場計器	10.05	10.05	—
調節弁	8.10	8.10	—
プロセスガスクロ	4.12	4.12	—
計装盤関係	5.89	6.40	92.03
自立盤	5.12	5.23	—
デスク盤	0.77	0.77	—
エラーセット	—	0.30	—
計装工事費	24.20	27.10	89.50
動力源装置	5.39	5.90	91.35
コンプレッサ	1.33	2.95	—
脱湿器	0.75	1.80	—
据付工事	0.64	1.15	—
DC電源	2.67	—	—
計器室土建工事費	2.67	8.20	32.50
計	98.77	100.00	98.77

(空気式の建設費総計を100.00としての比率表示)

簡素化された機構と、ユニット化された電子回路のチェックや、さし替えて、不審な動作の計器は即座に、予備回路ユニットで運転を続けることができる。回路ユニットのチェッカーも、ベンチボードに用意されるなど、保守設備も近代化されてきている。

2.3 信号と制御性

普通のプロセスでは、制御性に関する問題で、空気式が電子式より応答が遅いということはほとんど考えなくてよい。しかし、最近では、広大なプラント間の総合計測制御に、2kmもの伝送距離を要したり、超臨界プラントや、特殊な連続反応ラインでは、等価的な Tankage Capacity が非常に小さくなるなど、空気式では伝送遅れの点で実現できない。たとえば、空気式で伝送距離30m、6×4φ銅管の伝送系の応答は

$$\frac{e^{-3s}}{14.5s+1} \dots\dots\dots (1)$$

(1)式のようになり、3秒のむだ時間と、14.5秒の1次遅れと、ほぼ等価である。空気式での伝送距離は150~200mが限度と考えられる。

また、電子式の変換器、演算器などの回路処理は、空気式のような、複雑な機構部がなくなり、精密な加工精度や調整もなくなり、原理的にも、構造的にも単純なものとなる。特に従来困難とされていた検出方式、終点制御や計算機制御などで必要なパラメータである分析計関係は、本来の検出量が、電氣的に変換されたものが多く(PH計、電導度計、放射線応用計器、プロセスガスクロなど)、空気式信号に変換する必要がなく、検出から制御信号までを、電子回路だけで処理することができる。したがって不感帯などによる、制御性の悪化は起こらない。

2.4 電子式計器の信頼度

空気式計器のように機構部のガタやヒステリシスなどによる故障が起こらないので、信頼度は平均無故障時間 (MTBF, Mean Time Between Failure) で表わされる。

数多くの部品から構成される機器のMTBFは、その機械を構成する各部品の故障率(λ; %/Hr)の和の逆数となるから

$$MTBF = \frac{1}{\sum_i \lambda_i} \dots\dots\dots (2)$$

いま30~100個の部品数をもつ電子式計器の信頼度を考えると、使用している部品の平均故障率は最悪条件で計算しても0.1%/1,000h

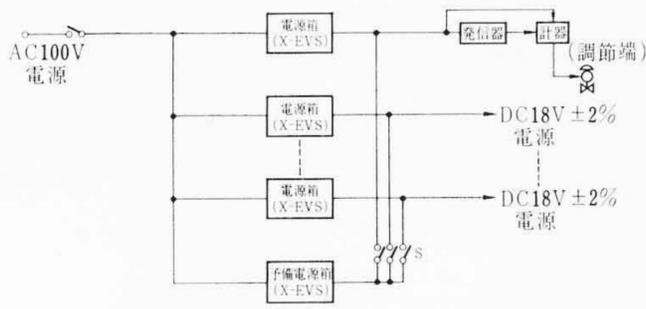


図3 電子式計器電源装置構成 (No. 1)

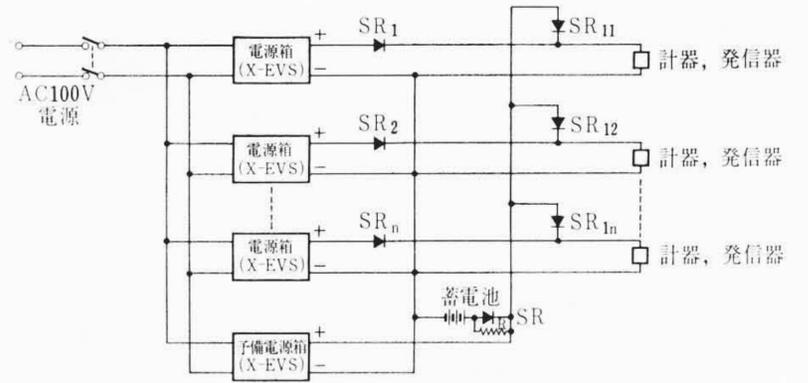


図5 電子式計器電源装置構成 (No. 2)

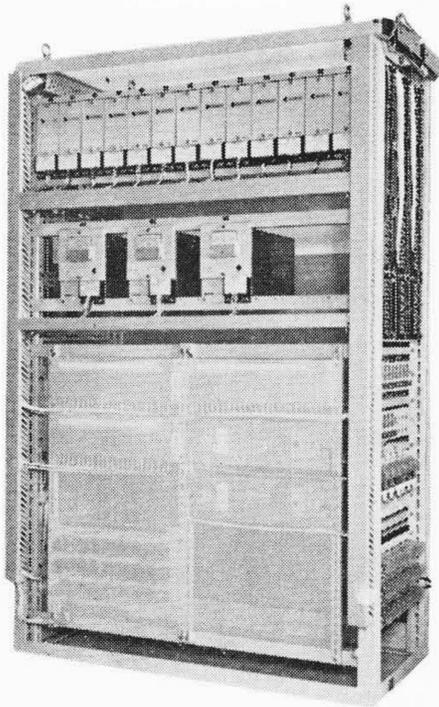


図4 電子式計器用電源箱および変換器類の取付ラック

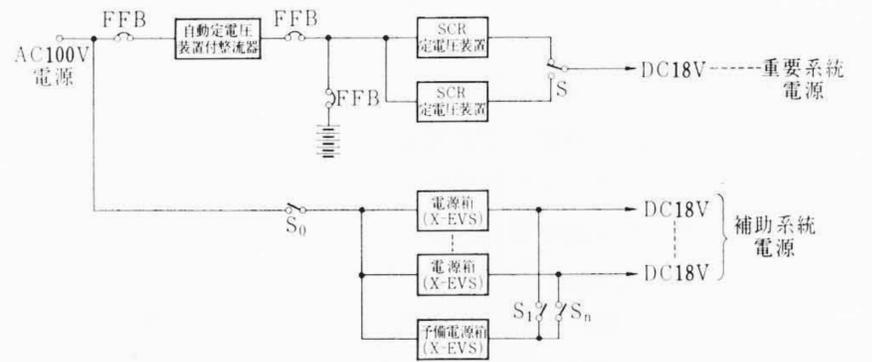


図6 電子式計器電源装置構成 (No. 3)

以下としているので、1.5~5年のMTBFをもつと考えられる。通常の使用状態では、条件がはるかに良いので1けた以上MTBFが上がり、搬送用機器の信頼度にまで達している。

### 2.5 将来性

エレクトロニクスの進歩はめざましく、低温高温に対してはシリコン・トランジスタやタンタルコンデンサの使用によって-40~120℃も可能になる。また消費電力も真空管式の20W時代からすでに2W時代になり、さらに低下可能の線もでてきている。これとともに停電対策、電源装置も簡単化される。また将来をみればマイクロモジュールによる極小形化、密封化による防食防湿対策、さらに防爆ではエネルギーを制限する本質的安全も可能であり、このようになれば一段と経済的にも有利となってくる。それとともにデジタル手法をとり入れることにより、さらに融通性のある系を組むことができる。

### 2.6 計算機制御の導入

将来の方向として計算機制御の採用が考えられる。しかしながらエチレンプラントではコストの低下が強く叫ばれており、単に将来性のためだけから高価な計算機を設置することはできない。計算機制御の完全な利用には基礎データの収集、入出力点の検討など相当の期間と労力を必要とするため、その得失については必ずしも結論が出ていない。ただし、将来、計算機制御の利点が明確化された時点において、変換器なしで計算機に簡単に結びつけられるよう電子式計器の採用が得策である。

## 3. 計装電源

電子式計器を使用して計装を行なった場合、空気式計器の計装に比べて、空気源装置のほかに電源装置に十分な配慮が必要である。

電子式計器は安定化直流電源にて作動するもので、計器、発信器の消費電力の減少、温度上昇の減少、小形化、信頼性の増加などの

理由により使用されている。

電源としては下記の点を満足することが必要である。

- (1) 電源装置は十分な容量をもつ機器により構成され、信頼度がいかなる機器よりも高いことが必要である。
  - (2) 電源装置が故障の際は予備装置と手動あるいは自動により切替可能であること。
  - (3) 計装上特に問題となる個所には無停電電源を準備する。
- 以上の諸点を考慮するとき、電子式計装の電源装置には下記のような数種類のものがある。

(1) 図3に示すような構成のもの。交流電源より整流し、トランジスタを使用した定電圧をうる電源箱(X-EVS)を必要個数使用し、発信器および計器に電源を供給するものである。万一ある電源箱が故障するときは、電源箱の異常時作動の接点により警報を発生し手動にて予備電源箱と切り換える。

(2) 図5に示すような構成のもの。電源箱を必要個数より1個多く準備し、逆流防止用のダイオードを使用してほかの全部の電源箱と並列運転を行なっている。常時使用中の電源箱が故障するときはダイオードを通して予備電源箱に無停電にて切り換わるものである。また予備電源箱より逆流防止用ダイオードを通して蓄電池に接続し、高抵抗を通して電池を常時充電させておく。短時間の停電が生じた場合、ダイオードを通しておのおの発信器および計器に無停電にて通電されることになる。この電池電圧は定電圧化されていないため電源変動は時間とともに大きくなるが、発信器および計器の誤差が多少大きくなる程度で短時間の停電に対しては問題が少ない方式である。

(3) 図6に示すような構成のもの。交流電流を定電圧装置付の充電器にてアルカリ電池を充電し、SCRを使用した定電圧装置を2台並列に使用し、故障時自動的に切り換わるもので、定電圧装置よりはDC-18V電源を得て発信器および計器に無停電の電源を供給している。蓄電池は保守その他の点からアルカリ電池を使用し、30分~1時間の規定負荷を補償している。この系統をプロセス上重要な個所に使用し停電による支障を防止するとともに、補助的系統の電源は(1)にて説明した方式を使用して経済的な安定したプロセス運転ができる電源系統が可能である。

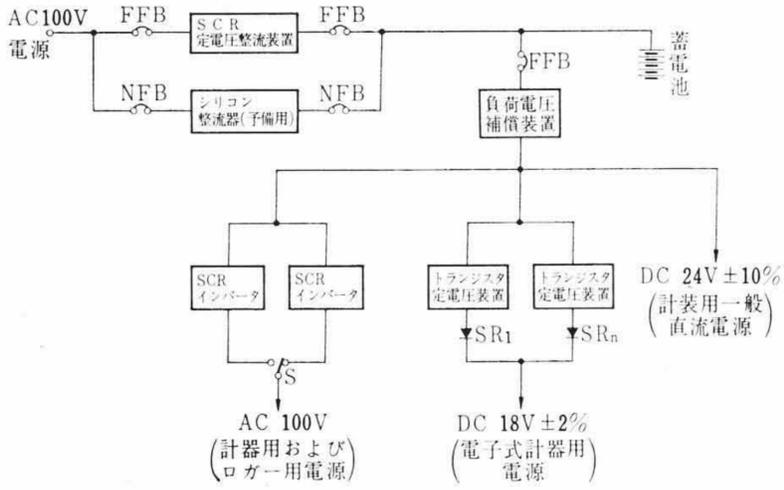


図7 電子式計器電源装置構成 (No.4)

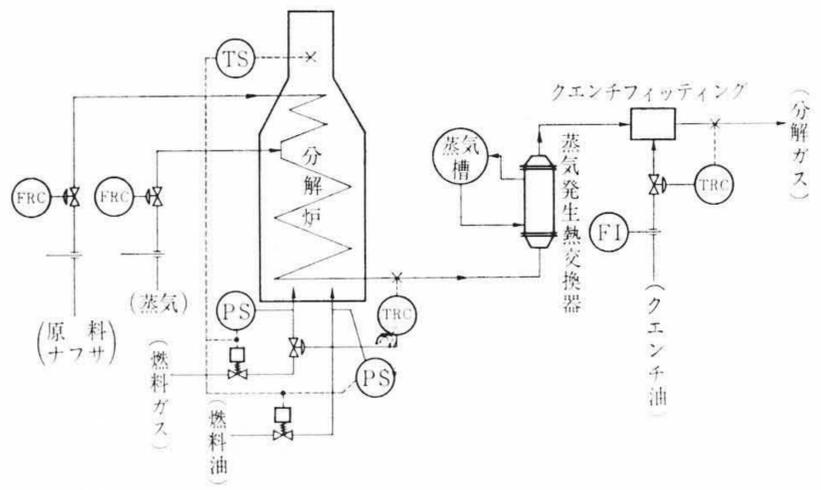


図8 分解炉まわりの計装系統図

このほかに交流電源を必要とする計器もあるが記録計、分析計などの監視計器で停電による制御上の問題は生じない。

(4) 図7に示すような構成のもの。交流電源より充電器を通して常時蓄電池を浮動充電し、その出力をシリコン・ドロップを通して24V ± 10%の出力を得て計装用一般の電源としている。さらに充電器の故障に対し手動切換の予備充電器を設置してある。24V ± 10%の電源を必要個数の定電圧装置とダイオードを使用して、予備の定電圧装置と並列運転を行ない故障に対処しDC18Vの計器用電源を得ている。また24V電源よりSCRインバータを使用しこれを並列に運転し、故障時自動的に切り換わる方式を使用して計器用電源およびロガー用電源としている。

以上4種類の電源装置について記したがこれらのいずれを使用するかはプラントの種類および規模により決定される。

#### 4. 分解炉の計装

熱分解炉は、ナフサなどの石油留分を水蒸気の存在下で分解し、オレフィンを生産する重要な部門である。エチレンの収率を上げるため、生成エタンの分解炉も併設されている。分解炉には多数のバーナが取り付けられ、炉内はチューブコイルが均一に加熱されるようになっている。この熱分解において、反応に大きな影響を与えるものはチューブ内の圧力、温度、滞留時間である。工業的には、反応に適当な分圧をたもつためと、カーボンの生成抑制のために、常圧下スチーム稀釈を行なっている。また温度と滞留時間には一定の関係をもたせるべきであり、本プラントでは800°C前後の高温で、滞留時間が短く秒以下のオーダーである。

分解炉の計装例を図8に示す。原料ナフサはFRCで流量制御され、これに同様なFRCで流量制御された、ほぼ同量の水蒸気が分圧を下げるために吹込まれる。この加熱には、燃料ガスと燃料油が併用されており、稼働率の調整に便利な燃料ガスを炉出口温度のTRCにより制御している。分解炉を流出した分解ガスは直接蒸気発生熱交換器に送られ、温水にて急冷され、次いでクエンチフィッティングにはいり循環クエンチ油でさらに冷却されるが、これはTRCで制御される。炉の安全保護のため、燃料ガスおよび燃料油の圧力低下(PS)スタック温度の上昇(TS)により遮断弁を緊急閉鎖させるようにインターロックがくまれている。

次に、分解炉の運転制御に大きな影響を与えるプロセス変数について検討する。

(1) 分解ガス出口温度……出口温度は出口ガス組成に大きな影響を与える。要求される製品組成、コーキングの状態によってこの温度は変更されなければならない。一般に出口温度が高くなればエチレン収率は増加する。この出口温度の検出には正確さが要求され、普通クロメル-アルメル熱電対が使われるが、素線を良導体の細い保護管の中に、絶縁して組み入れたシース熱電対が有

用されている。絶縁材としては酸化マグネシウムまたは酸化アルミニウムなどが使われている。なおこの出口温度計の目盛はできるだけ小さくして、制御することが好ましい。

(2) ガス温度分布……製品組成を最大の収率とするためには、炉のチューブを最適温度分布に保つことが必要である。このため炉内各点の温度記録をとり、異常時には警報を発するよう常に監視している。

(3) 滞留時間およびスチームと原料の比……滞留時間はおもにスチームと原料の比、運転温度のほか圧力で決まるが、スチームと原料の比は製品組成に影響を与える。

(4) 原料組成……一般的に原料組成には大きな変動はみられないが、エタン分解炉では変わることがあるため、原料組成をガスクロなどの分析計によって監視している。

コンピュータ採用の場合には、これらプロセス変数につき、検討することにより、熱分解炉の運転制御においては多くの利益がもたらされると考えられる。

そのほか、エチレンプラントにおいて計装上注意すべき事項について述べる。

(1) 流量測定において、分解、圧縮工程ではコークスの生成や分解したオレフィンの再重合によるポリマーの生成があり、また脱プロパン塔、脱ブタン塔では不飽和化合物が重合してガム状ポリマーが生成し、これらがベローズ形差圧発信器のベローズのひだに付着し、収縮をさまたげ測定を不能にしてしまう。このため流量計用差圧発信器としては、ダンパー調整可能なダイアフラム形が最適である。

また、低温液体の流量測定では、オリフィスのタップ取出し向きを上側にとり導圧管をスチームトレースし、導圧管内の液体を完全に気化させて測定することも必要である。

(2) 液面測定において、低温液体の場合に、差圧式にて導圧管を長くとり、完全に気化させて測定する方法がとられている。外筒式のディスプレイサを使うと外気の影響をうけるため、相当厚い保冷工事を施工してもフロートチャンバ内で液体が沸騰し、使用に耐えないので注意する必要がある。

(3) 温度測定において、低温ではガス膨張式温度計も使用されているが、検出端として熱電対を使用する場合、保護管内に水分が存在すると凝縮し、絶縁不良を起こし、正確な温度を示さなくなるので、最近ではシース熱電対の使用が盛んである。

#### 5. バッチプロセスのシーケンス制御

食品あるいは薬品製造工業における、発酵化学の計装および自動化は、生物体を含む流体を取り扱うため、ほかの一般化学プロセスとは性格を異にする点が多い。特に雑菌による汚染を防止するために複雑な操作を必要とするほか、検出器はすべて殺菌用蒸気にさら

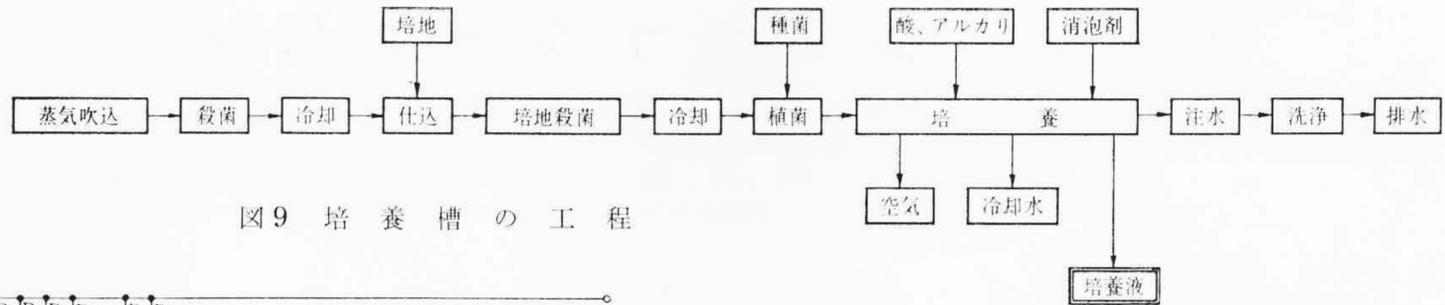


図9 培養槽の工程

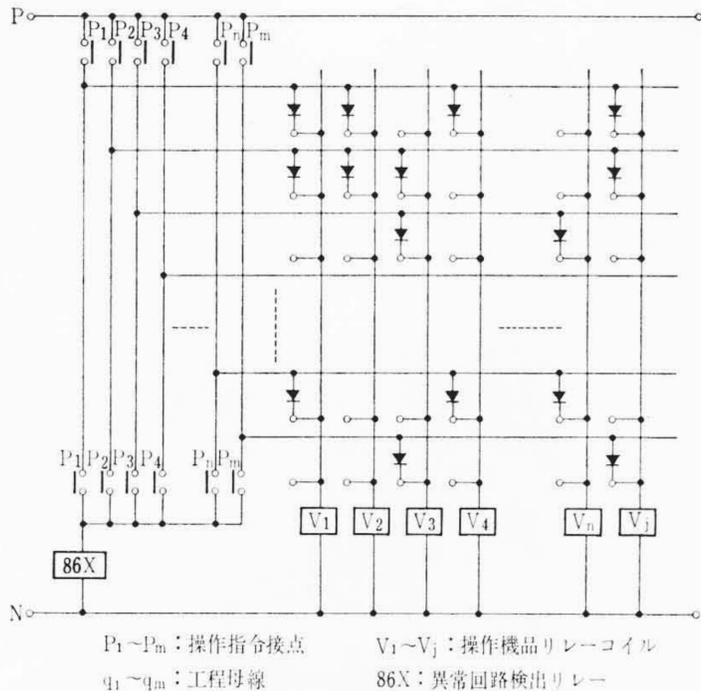


図10 ダイオードマトリックスによる操作端選択回路

されるためこの温度、圧力に耐えることが要求される。ここではバッチプロセスとしての発酵槽の運転上の問題点およびそのシーケンス制御について述べる。図9は培養槽を単体としてみた場合の工程である。

培養工程を連続化すれば、むだ時間、製造工程の一部省略および菌体の再利用などにより生産率を向上させることができるなどの利点があるが、(1) 運転時間の延長に伴う雑菌汚染の恐れ、(2) 菌種の変異による生産率の低下などの理由から工業化は困難といわれている。このため現状では、シーケンス制御を利用した自動化によりバッチプロセスを連続プロセス化し、プラントの運転効率を向上させることが必要であらう。

バッチプロセスの自動化に際して、シーケンス制御を行なうことにより一般的に下記のような多くの利益が期待できる。

- (1) 製品の品質の安定
- (2) 収率の向上
- (3) 作業人員の大幅な削減
- (4) 作業時間、原料、電力などのむだの減少
- (5) 操業の安全性、環境衛生の向上

バッチプロセスには不確定要素が多くまた運転条件の整理もむずかしいため、広い意味の全般的な詳細なプラントデータが必要である。プロセスの複雑な操作条件を誤りなくシーケンス回路上に翻訳できなければ満足なシーケンス制御装置を作ることができない。

発酵工業ではそのシーケンス制御の技術上、いろいろな特殊条件が要求される場合が多い。たとえば、各工程における時間や、種々の設定値、操作機器のひん繁な変更、あるいは工程の飛び越し、逆進、一時停止などが簡単に行なえることなどである。このため、各工程の機器は自動優先、任意手動操作方式をとり、融通性をもたせ

るよう考慮されている。

シーケンス回路それ自体は、信頼性の高い電話リレー、ワイヤスプリングリレーなどにより、非常に複雑なリレー回路も、コンパクトに製作できるようになった。しかし、複雑なシーケンスにおいて運転スケジュールを少しでも変更することは並みだっていることではない。そこで、操作指令の種類と、操作機器の組合せタイムチャートができると、これをそのまま図10に示すようなダイオードマトリックスに構成し、これを一つのシーケンス部品としてプリント基板化すると非常に便利である。もちろん、ダイオード部分に条件接点を入れることも可能なため、操作の変更はダイオードの取り付け、取りはずしできわめて容易にできるので、保安も簡便である。

現今のシーケンス制御ではその一段としてフィードバック制御やプログラム制御を含むプロセス制御が行なわれ、自動制御装置の主役である調節計などは、ここでは単なる一部分品として扱われることが多い。たとえば、温度制御において、プログラム設定器と組み合わせているため、所定の煮沸時間を維持するよう特殊回路が設けられているように、計器類はその用途に適応した機能が要求されている。検出機器については、蒸気圧力、温度の繰返しの印加に耐えること、構造上雑菌汚染を生じないことや細部まで殺菌洗浄が可能なこと、さらに繰返し操作に対して長寿命で信頼性が高いことなどを備えなければならない。

## 6. 結 言

以上、エチレンプラントの計装を中心に電子式計装の得失および停電対策につき、またバッチプロセスのシーケンス制御について概要を述べた。エチレンプラントの大形化に伴いコンピュータ導入の経済性が真剣に検討されているとき、コンピュータと簡単に結合できる電子式計器は、各種演算にすぐれ、信頼性が高いため、さらに一段と多く採用される傾向にある。今後は、電子式計器電源の計装上の取り扱いにつき、深く検討して行きたいと考えている。バッチプロセスのシーケンス制御においては、従来のリレー方式に加え、ダイオードマトリックス方式を採用すれば、操作変更や保守が容易になり、経済的にも役だつがさらに簡便で安価な方式につき検討したいと考えている。

終わりにのぞみ、本稿を完成するにあたり終始ご指導、ご助力をいただいた関係者各位に厚く感謝する次第である。

## 参 考 文 献

- (1) H.C. Schutt: Chem. Eng. Progress 43 103 (昭22-3)
- (2) J.R. Parsons: Control Engineering 7, 150 (昭35-9)
- (3) 木村: 日立評論 44, 1633 (昭37-10)
- (4) 十川: 化学と工業 19, 383 (昭41-4)
- (5) 森: 自動制御 3, 9 (昭39-1)
- (6) 根本, 坂詰, 松井田, 森田: 日立評論 46, 2002 (昭39-12)