分類	装 置 名	会 社 名	材 質	試料最少 必要量	能力・容量	仕 様 そ の 他	借 出
粉 砕 装 置	奈良式自由粉碎機併用空気 分級装置	奈良機械	FC, SS	30~50 kg	3, 7.5 HP	分級粒径任意調整可能その他各種粉 砕機	3HP は可 否
	ヤリヤ式粉碎機並空気分離 装置	ヤリヤ製作所	SS	10 kg	10~50 kg/h	—	—
	ヤリヤハンマークラッシャ ー	同 上	SS	10 kg	50~300 kg/h	粗砕用カッター用	可
	EPD 型ロッドミル	神戸製鋼所岩屋工場	—	3 ton	—	910 ϕ ×1,520 L 開回路湿式または 乾式粉碎	—
	ハイドロコーククラッシャ ー	同 上	—	200 kg	30~38 ton/h	530 mm コース型	—
	ロールジョークラッシャー	増野製作所	鈎 鉄 鋼	5 kg	100~250 kg/h 0.2~0.75 kW	—	可
	ハンマーミル	同 上	同 上	30 kg	500~3,000 kg/h 7.5 kW	スクリーンバーは 3, 9, 16, 25 mm の各種	可
	チップクラッシャー	同 上	特殊鋼 鈎 鋼	100 kg	500~1,200 kg 7.5 kW	—	可

パイロットプラントの計装*

山 下 直**

1. パイロットプラントにおける計装の役割

ひと頃のパイロットプラントには、圧力計などほんの少しの計器がつけられていたにすぎなかったが、最近ではかなり進んだ計装が行なわれるようになってきた。パイロットプラントを計装する目的はつぎの諸点にあると思われる。

- 短期間に数多くのデータを採集する。
- 運転条件を厳密にする。
- プラントの動特性を求める。
- パイロットプラントの段階で将来必要となる計器を開発しておく。
- 運転に要する人員を削減する。

そしてパイロットプラントにおいて、静特性、動特性に関する有効な情報が得られていれば、シミュレーションの手法¹⁾などにより精度よいスケールアップを行なうことができる。

最近では特にパイロットプラント用として便利な計測器も開発されているので、それらのうち計測の三要素といわれる流量、温度、圧力について紹介する。いうまでもなく、パイロットプラントにおいては特殊な計器も要求されるが、その際は各位の創意工夫が大切である。

2. 一般的注意事項

パイロットプラントの計装を行なう際留意すべき一般的な注意事項はつぎのとおりである。

- 少ない量を取り扱うので、検出部、操作部もこれに合致したものでなければならない。
- ちょっとしたごみや気泡でも大きな誤差を生ずる原因となるので、これらの除去につとめねばならない。
- パイロットプラントの運転に際しては、静特性ばかりでなく、動特性の採集にも心掛ける必要がある。
- 動特性の測定に用いる検出部の応答は、プロセスのそれに比べ十分速くなければならない。
- パイロットプラントでは、実験条件の変更が頻繁に行なわれるので、測定範囲などが容易に変えられるものが望ましい。
- データ整理の都合上、得られる信号は空気または電気で統一されているのが便利である。
- 防爆、耐圧など安全に対する考慮が足りないことが多いので、これらの点を十分注意する。
- 差支えない限り簡易型計器（減圧弁、流量調整

* 昭和41年6月2日 受理

** Sunao Yamashita 味の素(株)中央研究所

表1 流量測定方式の比較

原 理 方 式	差 圧 式		容 積 式		浮 子 式	
	オリフィス	細 管	オーバル型	サーボ型	ガラス管	発信器付
流量と出力との関係	二 乗	直 線	ほぼ直線	直 線	ほぼ直線	ほぼ直線
最小測定流量(水) [l/hr]	0.5	0.01	2.6	0.25	0.01	2.0
Re 数による制限	約 $5 \sim 5 \times 10^4$	約 500 以下	粘度が 500 cp 以下		10^5 以下	—
応 答*	最 も 速 い		遅 い	最 も 遅 い	速 い	振 動 的
価 格	中		高 い	最 も 高 い	安 い	高 い
備 考	d/p セル使用 図1参照		ルーツ型もあり	図2参照	トリフラットメータ・測定のみ	

* 詳細については文献3参照

図1 インテグラルオリフィス d/p セル断面図 (Foxboro 社)

弁など)を用い計装設備費の低減に努力する。

ix) 一方商業プラントにおいて問題の生じそうな個所には思いきって計器を投入し、十分な情報を把握する。

3. 流量の検出法

3・1 各種流量測定方式の比較

パイロットプラントの計装において、担当者が最も苦痛するものの一つに流量の計測がある。たとえば、パイロットプラントの規模が制御可能な流量によって決定されることもしばしば経験している。

微小流量のフィードには、ミルトンロイなどの定容量ポンプがよく用いられるが、脈流であるのと流量の指示が得られないのが欠点である。表1に微小流量の各種測定方法を比較したものを示し、以下そのおのおのについて若干説明する。

3・2 差 圧 式

微小流量における差圧を空気圧または電気信号にかえる発信器としては、図1に示すような絞りを内蔵した Integral Orifice d/p Cell (Foxboro 社) が便利である。これは流量発信器内に被測定流体が通過しているうちに流量が測定されるもので、絞り前後の差圧取り出し管のないのが特徴であり、 100 kg/cm^2 程度の耐圧を有する。絞りの形状としては、四分円ノズル、半円ノズル、うす刃オリフィスなどいろいろのものがあがるが、ストレートオリフィスが最も手軽に得られる。すなわち、ストレ

ートオリフィスはうす板にドリルを用いて孔をあけ、周囲のバリを軽く落とすだけでよいから、研究施設などで簡単に作ることができる。筆者が調べたところでは²⁾、孔径とオリフィス板厚をほぼ同一にとった場合、孔径 $0.3 \sim 4 \text{ mm}$ 、Re 数 $5 \sim 5 \times 10^4$ にあたりほぼ一定の流量係数が得られた。しかしこの程度の微小流量では、流量係数を計算のみで求めることは難しく、やはり実測が必要となる。したがって測定範囲のうちの適当な所で一点だけ流量を実際にチェックして流量係数を求め

ておけば大体 $\pm 3\%$ 程度の精度が得られる。

さらに微小な流量の測定には細管式がよい。細管は被測定流体が清澄であれば直径 0.1 mm 程度のものまで可能であり、たとえば温度計用などのガラス管が利用できる。Re 数が 500 をこえると Hagen-Poiseuille の式よりずれて運動エネルギーの補正が必要となる³⁾ ので注意を要する。細管ではもちろん粘度の影響を受けやすいので、測定中は温度の急変がないようにせねばならない。Hagen-Poiseuille の式においては、流量は管径の四乗に比例するので、管径の測定には特に留意する必要がある。管径はたとえば端面より万能投影機などで読み取れば、 $1/1,000 \text{ mm}$ 程度の測定は可能であるが、面倒であれば実測によって管径を逆算する方法もある。

一般に差圧式は流体中に含まれるごみ、気泡などによって大きな誤差を生じやすいから、これらの除去に心掛けねばならない。

3・3 浮 子 式

ベンチパイロットプラントなどで被測定液自体をマノメータとした絞り流量計をよく見掛けるが、圧力が高い場合つぎめから液が噴出して大変危険である。このようなとき、ガラス製の浮子式流量計が用いられる。浮子式としては各サイズのトリフラットメータ (Fisher & Porter 社) がセットとして得られるので便利である。これは、管径 $1/16B \sim 1/2B$ の三角形の断面をもったテーパーガラス管の中に、サファイヤまたはステンレススティールのボールを入れたもので、管径および浮子の重さによって空気なら $0.3 \text{ cc/min} \sim 143.5 \text{ l/min}$ 、水なら

表2 温度測定要素の比較

方 法	測温抵抗体	熱電対	サーミスタ
温度と出力の関係	直 線	ほぼ直線	指数関数
使用温度範囲	-200~600°C	-200~1,200°C	-100~350°C
感度(0°Cにおいて)	0.4 ohm/°C (100 ohm につき)	40 μ V/°C	2 k ohm/°C (50 k-ohm につき)
実用最小寸法(保護管付)	3 m/m ϕ	0.64 m/m ϕ	2 m/m ϕ
応答(時定数) 流速 1 m/s の流水中	1.5 s	0.3 s	0.3 s
機 械 的 強 度	弱	強	中
材 質	白 金	(Ar-Cr)	金属化合物
損 耗	最も正確	Ar-Cr を例にとる。補償導線冷接点の必要がある	専用の受信計を用意せねばならない

0.05cc/min~4.4l/min の測定範囲をカバーしている。またこれらには粘度および密度の補正表もついているので広く利用できる。

浮子式流量計を流量制御系の検出部として使うには、浮子の動きを外部にとり出す必要があるのであまり微小な流量は測定できない。方法としてはマグネットカップリングを用いたものが最も多い。浮子式は被測定流体内に多少固形物があっても、テーバー管および浮子に付着しない限りあまり誤差を生じない特徴をもっている。

3・4 容 積 式

容積式流量計としては、歯車を用いたオーバル型やルーツ型があるが工作精度に限度があるので、微小流量においてはすきまからのリークが問題となる。リーク量は、被測定流体の粘度に反比例するから、粘度の低い流体および気体は誤差が大きくなる。その欠点をおぎなうために開発されたのが図2に示すサーボ式流量計である。サーボ式では別に設けられたサーボモータによって、オーバル型流量計前後の差圧がゼロとなるように駆動するものである。差圧がゼロということは、リークがないということであるので微小な流量を非常に正確に計量することができる。

容積式の特徴は、被測定流体の粘度と測定範囲が適当であれば $\pm 1\%$ 以内の精度で測定が可能で、積算値も同時に得られる。しかし構造上固形物があると歯車にかみこんで停止してしまう欠点もあるが、他方誤差が生じてはわかりにくい差圧式より便利な場合もある。

4. 温度の検出法

4・1 各種温度測定方式の比較

従来のパイロットプラントにおいては、棒状温度計が多く用いられていたが最近では見やすいバイメタル型、液体膨張型、あるいはサーミスタなど遠隔で測定できる温度計が用いられるようになってきた。ここでは主として、熱電対、抵抗体、サーミスタの三つについて述べる。

パイロットプラントにおける温度の測定法も、流量の

図2 サervo型流量計(オーバル機器)

場合と同様に特別な注意が必要となる。まずパイロットプラントでは、微小部分の温度を測定することが多いので、温度の検出部も小さいものが要求される。また一般にホールドアップも小さいので応答の速い素子でないと正しい温度変化に追従できない。そのほか外気の影響による冷却誤差も生ずるおそれがある。以上を総合すると素子の選択、挿入個所の決定、保護管などの点に留意せねばならないことがわかる。

表2に温度の各種測定方式を比較したものを示し、以下そのおのおのについて若干説明する。

4・2 測温抵抗体

高温に使えない欠点があるが、最も安定した測定法である。コマーシャルプラント用には直径6m/m以上のものが用いられるが、パイロットプラント用として図3のように、直径3~4m/mのものが得られる。通常保護管に入れて使用されるが、抵抗体との接触をよくしておかないと応答が遅くなる。

4・3 熱電対

熱電対は古くから温度測定に用いられてきたが、1°C

(左: Minco Products 直径 3 m/m,
右: 富士電機 直径 5 m/m)

図3 小形測温抵抗体

当たりの熱起電力が小さいため、高温測定用として主に使われてきた。しかし戦後受信側である増幅器付電圧計の進歩によって低温用としてもその用途は拡大した。しかし増幅には雑音のレベルによって限度があり、現在熱電対で検出できる温度差は、起電力の大きい鉄-コンスタンタンでもせいぜい 0.1°C ($4\mu\text{V}$) 程度である。

熱電対としては素線を耐熱性の絶縁物の中に埋め込み、その上にシース（保護管のうすいもの）をかぶせ、適当な端子をつけた便利なものが各種市販されている。通常素線としては、鉄-コンスタンタン、銅-コンスタンタン、クロメルアルメル、白金-白金ロジウムなど、シース材質としては、ステンレス、銅、白金、ハステロイ、モリブデンなどの組み合わせが自由に選べる。サイズはたとえば AEROPAK (Aero Research 社) では、外径寸法が 6.64, 10, 1.6, 3.2, 4.8, 6.4, 8.0 m/m というようになっていて大変便利である。また気体用として junction 部が露出したものもあり、特に応答の面で改善がなされている。ただし junction 部が露出したものを直接液に挿入すると、異常な電圧を生ずるので注意されたい。圧力容器内には、グランド構造によって挿入されるが、素子自体は 500 kg/cm^2 程度の耐圧がある。

熱電対によって正確に温度を測定する場合には補償導線および冷接点補償を行なわねばならないが、最近の計器では室温補償装置付のものも多い。

4.4 サーマスタ

図4 サーマスタの先端構造例

サーミスタは実験室、ベンチパイロットプラントなどにおいて常温付近の温度を測定するのに好適である。すなわち、微分部分の温度が測定でき、応答も著しく速い。また抵抗変化が著しいので微小温度差の測定も可能で、たとえば 0.001°deg の温度差を検出し水車効率の実測を行なった例⁷⁾も報告されている。

サーミスタの特性には、焼成のときの条件のばらつきによってなかなか同一のものが得にくい、最近では補償回路を組み込んだものができ、この問題はほぼ解決した。しかし目盛は非直線なので、特別な受信計器を用意する必要がある。サーミスタ先端の構造は、挿入用、表面温度測定用などの用途によって図4のような形状を選択することができる。

ガラスサーミスタの出現によって、より高温まで測定可能なものも得られようとしている。今後サーミスタは自己加熱の冷却作用を利用した流量計、液面計などの用途もあるので広く普及するものと考えられる。

5. 圧力の検出法

パイロットプラントにおける圧力の測定法は、コマーシャルプラントに比べそう変わったところはない。指示のみの場合は主としてブルドン管、制御または遠隔指示記録にはこれに空気圧または電子式の発信器を組み込んだものが用いられる。

ここでは最近特に欧米で多く使用されている金属の受

圧板にはりつけられたストレインゲージ（歪によって素線が伸び抵抗が変化することを利用した歪計）による圧力測定素子を紹介する。通常圧の測定範囲は、最小レンジ $0 \sim 0.05 \text{ kg/cm}^2$ ，最大 $0 \sim 2,000 \text{ kg/cm}^2$ ，使用最高温度は水冷式ならば 240°C までのものが得られる。図5に示すのは常温用の一例であるが国産ではこれより若干大型となる。ストレインゲージの抵抗変化はごくわずかであるから、かなり増幅を必要とし、専用の受信器を用いねばならない。近頃はアメリカにおいて軍事用として半導体による感度の高いストレインメータが開発されたという。

ストレインメータによる圧力測定の特徴は応答の速いことで、 500 cps の応答に追従できる。このような場合はむしろ測定器の周波数特性が問題となる。筆者らはあるパイロットプラントの異常反応による圧力上昇をこの方法で測定し、好結果を得た経験がある。

6. 操 作 部

6・1 微小流量調節弁

かつてのパイロットプラントでは、簡単なオンオフコントローラ以外あまり調節器が用いられなかったが、近頃ではかなり多くの制御装置がとり入れられるようになり、パイロットプラント用の調節弁も登場してきた。弁は小形になってくると、工作精度上からもリーク量が問題となり、しかも正しい弁特性（たとえばイコール％特性とか平方根特性など）をうることも難しくなってくる。しかし近頃では工作技術の向上によって C_v 値 $0.05 \sim 0.001$ のものもできるようになった。またこれらの弁ではレンジアビリティ** は $15 \sim 30$ くらいはとれるので弁全開時の $1/15$ 程度の流量まで制御可能である。図6に示すものは、特に高圧用として開発された調節弁で約 300 kg/cm^2 の耐圧を有し、弁ポジションも必要に応じて頂部に取り付けることができるようになっている。

また場合によっては、調節弁なしで微小な量を制御できる方式⁹⁾もある。たとえば流量制御に、この原理を応用した例を図7に示す。すなわち、フィードすべき流体を密閉した槽の中に入れ、空気圧式調節器の出力空気圧を槽の上部に加える。流量が目標値より少なければ調節器より空気が送り出されて槽内の圧力は上昇して押し出す量がふえ、多ければその逆となる。筆者はこの方式と細管による差圧式流量発信器を用いて、清水を 0.14 cc/min の流量で、およそ10日間安定に制御した経験があ

図5 ストレインゲージを利用した圧力発信器
(Micro System 社、 $30 \text{ m/m} \phi \times 40 \text{ m/m}$)

図6 高圧用微小流量調節弁（島津製作所、高さ 425 m/m ）

図7 調節弁なし制御方式（流量制御の場合）

る。

6・2 ヒ ー タ

パイロットプラントにおける温度制御の加熱源としては、防爆を要する場合を除き電気ヒータが便利である。槽には投げ込み式ヒータ、管または塔にはテープヒータやケーブルヒータが用いられる。パイロットプラントに

* C_v 値: C_v factor とよばれ調節弁の大きさを示す値で、弁前後の差圧が 1 p.s.i. のときに流れる水の流量を $\text{G.P.M. (gallon per minute)}$ で表わしたものである。

** レンジアビリティ: 定められた弁特性に適合する範囲の最大流量と最小流量の比。市販の調節弁では 50 が普通である。

おける各装置は、ホールドアップに比べ表面積が大きいので保温だけでは外気による冷却作用を防ぎきれない。したがって蒸留塔の実験などでは、外気の影響を除去するため外壁にヒータを巻きつけ、表面温度と内部温度が同一になるよう制御する場合もある。

ヒータの制御方式としては、小電力の場合リレーによるオンオフ動作が普通用いられるが、接点の損傷を防ぐため、シリコン制御整流器 (SCR) も使用される。

6・3 自力式制御弁

パイロットプラントにおける計装に要する経費を安価におさえる効果的な手段として、自力式の制御弁を上手に使う方法がある。自力式制御弁は、たとえば空調用などに多数発売されているが、精度もあまり良好でなく、信頼性も低いものが多い。これらをプロセスにもちこむには十分品質を吟味して採用せねばならない。

筆者の経験では流量制御弁、減圧弁、温度調整弁などの一部には、十分実用に供しうるものがあつた。

7. む す び

パイロットプラントにおける計装の要点は、常にスケールアップを心掛けるということになる。粉体の取り扱いを例にとれば、パイロットプラントではバケツに入れて秤にのせて計量し問題はなかったが、コマーシャルプラントでホッパースケールを採用したところ粉体が飛散して大改造のやむなきに至ったこともある。開発担当者はたえず将来のプラントの形態を予測し、それから問題点を洞察する能力を養成することが重要である。

文 献

- 1) Yamashita, S.: Preprint Symposium, Industrialization of Research Works (1966)
- 2) Yamashita, S.: *J. of the Society of Instrument and Control Eng.*, 3, 970 (1963)
- 3) Yamashita, S.: *Automation (Japan)*, 8, 14 (1964)
- 4) Iwanaga, M.: *J. of the Society of Instrument and Control Eng.*, 4, 11 (1964)
- 5) Japan Patent, No. 224607

[特集終わり]

必 要 に し て 稍 々 不 十 分

パイロットプラント実験を経て設計した新しい連続プロセスの工場が完成して、その試運転を行なってみた結果、はじめからトラブルがなくドンピシャリとデザイン通りの品質・収率および能力が出るというのはわれわれケミカルエンジニアの理想であり夢であります。

「必要にして十分な」条件を満足する工場の設計を行なうためにこそ PILOT PLANT 実験の意義があるわけです。

しかし、この「十分な条件」を満足するためには、いかに多くの習熟したエンジニアと、期間と、金と、設備と、設計上の安全率をかけなければならないかを考えてみる必要があります。

工場をつくって製品の品質ははじめから売れるものが出なければなりません。工場を一年間運転しますと収率はデザイン以上に上り、能力もまた設計以上に上昇してきます。一方完璧と思っていた個所に数多くのトラブルが生じてきます。

はじめからドンピシャリの工場は、一年後には多くの無

駄がなされていたこともわかってきます。

そこで一度、「必要にして稍々不十分な設計」をすることに頭を切り替えてみることをおすすめします。

この頭の切り替えによって、BASIC DESIGN, DETAIL DESIGN および機器製作時の安全率の重複が多くされられます。

そして PILOT PLANT 実験と設計を行なったエンジニアを試運転後も引きつづき 1 年間位、その新しい工場の実際の運転に従事させてみて「十分な DESIGN」にいかは無駄が多いか、「必要な DESIGN」がいかに多く不足しているか体験させてみる必要があります。

暖房のきいた居心地の良い部屋で、きびしい冬山の「必要にして十分な」装備の設計をすることはほとんど不可能です。「必要にして稍々不十分な」装備で冬山に送り出しても、素質のあるケミカルエンジニアであれば暖房のきいた部屋では考え出せない対策を打ち出してトラブルを解決して行くことができます。

[O. A.]