

化工プラントの自動制御

桑井源禎

化学工業装置を最も能率よく、自動的に操作するにはなにを、なにで、
いかにして行かうかが問題になる。ここでは物理的條件や化学的組成を制御
する手段を提供し、その検出、調節、操作法について説明してある。

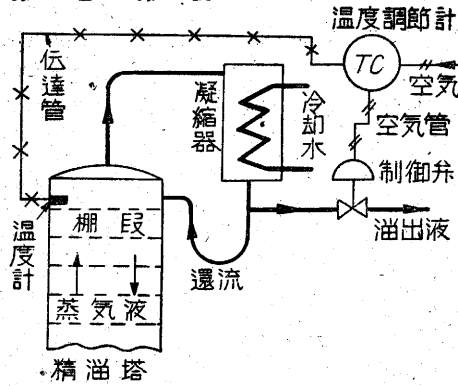
米國の刺激をうけてか昨今わが國でも自動制御には深い關心が寄せられているようである。石油關係を手はじめとして、一般化学工業に次第に普及して行く趨勢はまことに結構なことで、はやく化学工業技術者にも自動制御装置がめずらしくなくなつてもらいたいものである。かく自動制御禮讚におよぶとあるいは完全雇傭を標榜する向から非難が起るかも知れない。それにはこう反問しておこう。いくら忠實無比なオペレータでも勤務時間中片時もメータから目をはなさず、しかもメータの針の現在位置だけでなくその速度にも忠實に、更に負荷變化も勘案してバルブを操作できますかと。こんなことを機械ときそう愚はやめて、人間は研究室に設計室にあるいは工作工場に入りせいぜい頭腦を働かすべきではなからうか。これすなわち不完全雇傭ではなくて勞務者の格上である。更に國內の化学工場に制御装置を普及するとすれば、その製作面に仕事が増し、おのずから製作技術が向上する。向上した技術によつて、少材料から精密機械たる制御装置ができれば、それ自身輸出品としての價値もできようというものである。化学工業資源が節約でき、良質の化学工業製品が得られ、更に精密機械製作の高級技術が輸出できるといふ、この一石三鳥はあまりにも蟲のよい狸の皮であろうか。この最後のものまで慾ばらないとしても、勞力の節約、工場設備費の軽減(たとえばクッションングタンクの省略)、危険防止等は確かに自動制御の功德である。とにかくプラントに自動制御装置を裝備するのは伊達や趣味ではなく、生産の經濟性を高めるためであるから、各種制御装置の採擇は原價計算に立脚すべきである。それでもなお自動制御装置設備費の全プラント建設費に對する割合は、計装(instrumentation)の進歩に伴つて増大する傾向にあり、米國では10%が標準とされているようである。¹⁾

さて本論に入るのを急いで、化工技術者の立場から自動制御をのぞいてみよう。ここに課される問題は、何のために?何を?何によつて?いかに?自動制御するかである。何のために?の答はすでに述べたところにふくまれているから繰返すこともない。

何を制御すべきか? 單純なプロセスでは、この答は

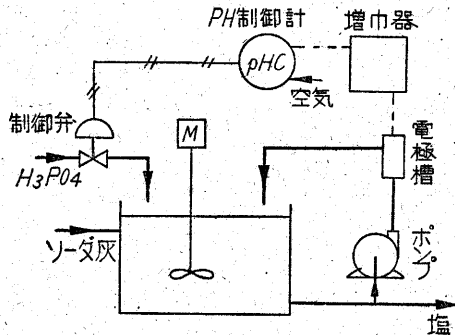
考慮の餘地のないほど簡單である。しかし化学工業プロセスでは、プロセス變數が多いのがむしろ普通であるから(1プロセスに30以上の重要變數のある場合がめずらしくない²⁾)、慎重な考慮を要する。ここにいうプロセス變數とは、變化を受ける材料あるいはその環境の状態もしくは條件をいう。連続精溜塔を例にとれば、溜出液ならびに罐液の濃度、原液供給速度、溜出液ならびに罐液の流出速度、冷却水量、加熱速度および塔内壓力等が主要なプロセス變數である。一般に化工プラントの自動制御を計畫するに當つては、まず全工程を最小單位のプロセスに分割し、そのプロセスに屬するすべての重要なプロセス變數を列挙することからはじめねばならない(上記精溜塔の例を参照)。その上で各變數間の從屬關係を検討する必要がある。これらの列挙ならびに、検討には、變數の多いプロセスでは慎重を要する。多成分系の連続吸收塔および精溜塔について Gilland および Reed³⁾の相律にもとづく解析は、複雑な系に對する合理的考察の好例であろう。

次にこれらのプロセス變數の中から、プロセスの目的によつて、制御の目標となる變數すなわち制御變數および制御装置で直接操作する變數すなわち操作變數を選定する。前例の連続精溜塔でいえば、精溜の目的からして、溜出液および罐液の組成が基本的な制御變數である。今溜出液の組成制御を問題として取上げてみると、溜出液の組成を變更するには還流比(塔頂への還流量と溜出液量との比)を變えればよいことは精溜理論の示すところであるから、溜出液の濃度が所定値より低下すれば還流比を大にすればよい。溜出液の組成を検出して還流弁を操作する制御系を構成することはもちろん可能ではあるが、いま一步進めて考えると、溜出液の組成すなわち塔頂蒸氣の組成は、塔頂壓さえ一定ならば、塔頂温度と熱力學的な相關係がある。一方計器の側からみれば、濃度計よりも温度計および壓力計の方が普遍的で安價かつ維持も容易であるから、溜出液組成を直接制御するよりは、それと一定の關係にある塔頂温度および壓力を制御する方が便利であるとの結論に到達する。これを具體化したものとして最も簡單で廣く使用されている制御方式



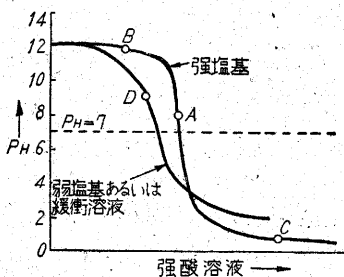
第1圖 精溜塔溜出液組成制御系

を第1圖に示す⁴⁾ (ただし壓力制御系は書いてない). 本例では, 表向の制御變數は溜出液組成であるが, 陰の直接的制御變數は塔頂温度であり, 操作變數は溜出液流量である (溜出液流量が變るとそれに伴つて還流比は變る).
いま一つ異つた例として溶液の濃度制御を考えてみよう.⁵⁾ この場合に連続測定に適した變數として種々の量あげられるが, そのどれを制御變數とし選ぶかは, 溶液の性質, 濃度, その他の條件によつて定めなければならない. 溶液の酸性あるいはアルカリ性の強さの直接的測定としては, pH が制御の目安として廣く採用されている. 第2圖は磷酸ソーダ製造において pH の制御の例



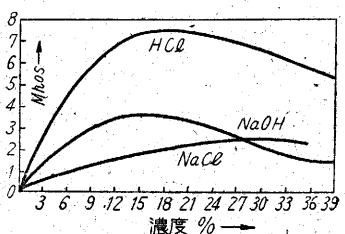
第2圖 磷酸ソーダ製造工程における pH 制御系

である. pH 制御でまず考えねばならないことは, 制御劑の添加に伴う pH の變化割合である. 典型的な滴定曲線は第3圖の通りで, 滴定曲線に沿つて pH の變化割合は廣範圍に變るから, 最適の自動制御を行うにはこの特性を考慮に入れなければならない. たとえば中性に近い強酸強鹽基混合物 (A 點) には少量の制御劑を添加しても, 制御點の周圍に大きいサイクリングが発生しやすく, 直線的な



第3圖 強鹽基および弱鹽基の強酸による中和曲線

制御結果を得るのはむずかしい. しかし制御劑あるいは被制御溶液が緩衝溶液であれば曲線の傾斜は緩かとなり制御は樂になる (D 點). 又大きい混合槽を用いて溶液の容積自身が pH の變化割合を緩慢ならしめるようにしてもよい. 反對に強酸あるいは強鹽基が過剰にある場合には, pH 曲線は水平に近く制御はほとんど不可能である (この場合には後述の自動滴定によれば制御は可能となる). 一般に pH による濃度制御は中性點附近の溶液にかざられる. 酸化還元電位による自動制御は, 溶液中の一定イオンが酸化あるいは還元をうける反應に用いられ, 米國で海水から Br を抽出するのに工業化されているようである. 前二者に反して, 電気傳導度は溶液中に存在する全イオンに關係するから, 特に高濃度溶液の制御に適している. しかし電気傳導度—濃度曲線 (第4圖) の傾斜に注目する要がある. たとえば HCl の濃度を 9% 附近で制御するのは可能であるが, 18% 附近では曲線は水平に近く不可能である. 比重による濃度制御もしばしば行われている.



第4圖 電気傳導度—濃度曲線 (12.4°C)

一般に上例におけるように, 制御變數と函數關係にある測定しやすい變數を直接的制御變數として選定することは, 特に化學工業プロセスの制御に重要である. 主要なものを分類列挙すると⁵⁾:
エネルギー變數—温度, 壓力ならびに真空度, 電壓, 流量および速度變數—流量, 液面位, 重量, 厚さ, 速さ, 物理的および化學的特性—比重, 濕度, 固體含水率, 粘度, 發熱量, 色, 電気傳導度, 熱傳導度, 化學吸收, 屈折率, X線回折, 紫外線および赤外線吸收, 發光スペクトル, 質量スペクトル, 偏光, 水素イオン濃度, 酸化還元電位等
これらの諸變數の中, 物理的および化學的特性は化學工業に特有のもので, それらの連続検出は最近のいちじるしい計測技術の進展によつて工業的に可能になってきた.⁷⁾ 實驗室にかざられていた質量スペクトロメータも米國ではすでに現場に進出し, 自動制御装置の一部として, 酸素, 水素, 炭酸ガス, 弗化水素, 窒素等のガス成分ばかりでなく 液體も蒸發させることによつてその成分を検出できるようになった. 戦時中に米國で信管の火藥量検出用として實用化された X線量計は, 化學工業でもガソリン中の四エチル鉛含量, 酸濃度, プラスチックの鹽素化度等の計測に應用されている. その他電子管を用いた自動露點記録計および自動スペクトル量記録計は湿度や發光スペクトルの自動制御に直結するもので

あり、又紫外線光量計によつてガス中のトリクロロールエチレン、ベンゼン、トルオール、アセトン、二硫化炭素を1~100 p.p.m. (百萬分の一容積)の微量まで工業的測定可能となつた。

さて制御變數すなわち直接に何を制御するかは決まると、次の問題は、**何で制御するか?**である。周知のように、一般に自動制御装置は検出部、調節部および操作部より成り、それぞれ各種標準製品があるから、化工技術者としては、その中から最適の種類や型式を選定するのが當面の問題である。

検出部について特に考慮を拂わねばならないのは、検出端の選定と相並んでその設置場所である。前に述べた精溜塔溜出液組成制御(第1圖)に例をとると、溜出液がかなり純粋な成分の場合には、一般に温度對組成の關係から、塔頂温度變化は自動制御の検出値としてはあまりにも小さすぎる。この場合には 温度計を10段ぐらゐ下の棚段に設置すれば制御に充分な温度變動を検出し得る。⁴⁾

調節部の制御動作は自動制御装置として最も重要であるが、他編にゆずり、ここではプロセスの代表的な特性からみた制御動作の選擇表を引用するに止める(第1表)⁸⁾ 同表上欄の制御動作は大體左方のものが機構簡單であるから、同程度にプロセス特性の要求を満たす場合には左方のものを採用するのがよかろう。化工プラントと制御動作の關係を二三の實例について見ることにしよう、⁹⁾ 装置や配管内の壓力制御は、多くの場合に容量が比較的大きいと、ほとんど傳達おくれやムダ時間がないから、

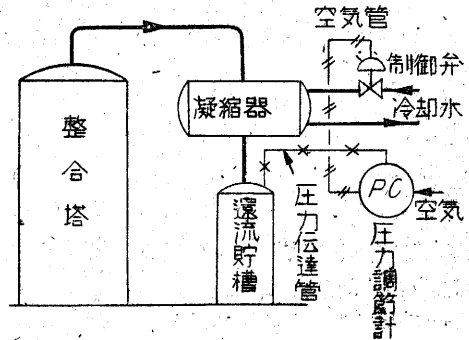
第1表 プロセス特性と制御動作

制御動作 プロセス特性		不連続		連続			
		二位式	單速浮動式	浮動式	比例式	比例・引戻式	比例・引戻・感率式
單容量	大	○	×	△	○	○	○
	小	△	○	○	○	○	○
傳達おくれ	小	×	×	△	○	○	○
	大	×	×	×	△	○	○
ムダ時間	小	×	×	△	○	○	○
	大	×	×	×	△	△	○
自己制御性	有	○	○	○	○	○	○
	無	○	×	×	○	○	○
定常負荷變化	小	○	○	○	○	○	○
	大	×	○	○	△	○	○
不定常負荷變化(擾亂)	速	×	×	×	△	○	○
	遅	○	○	○	○	○	○
	ノイズ*	○	○	○	○	○	×

(註) ○使用適當, △あまり適當ならず, ×使用不可,

* 小刻みの周期的負荷變化

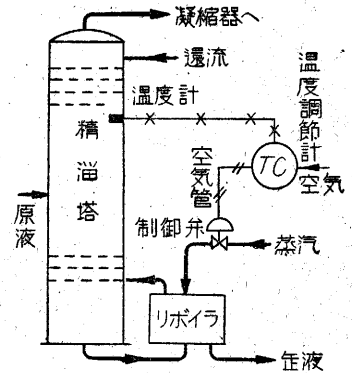
自動制御としては單純である。比例式で充分な場合が多いが、容量がかなりありかつ弁が小さくて壓力の變化速度の小さい場合には、二位式でも差支えない。しかし多容量系プロセスとなると、傳達おくれが導入されてやや複雑になつてくる。負荷變化のある場合にはオフセット(offset or droop)をのぞくために比例引戻し式が必要である。たとえば、第5圖のような凝縮器の冷却水量に



第5圖 整合塔壓力制御系

よつて壓力を制御する整合塔(stabilizer column)では、かなりのおくれがあるから、比例帯の大きい比例引戻し式調節計が必要であるが、それにしても負荷變化の大きい場合には制御は容易でない。もつと簡單なのは、還流貯槽から抽出す不凝縮ガス量を制御する方法である。こうすると傳達おくれがほとんどなくなり、比例式でも満足な結果が得られる。このようにプロセスや制御系をちよつと變更することによつて、簡単にしかもよい結果が得られることがしばしばある。

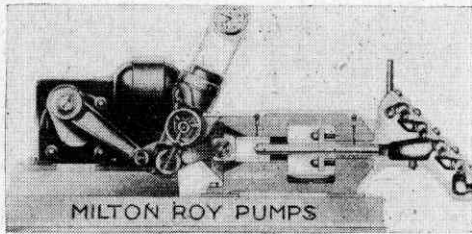
容量おくれ、傳達おくれ、ムダ時間および負荷變化が大きくなるほど制御は複雑になつてくる。第6圖の精溜塔では、各棚段は別々の熱容量を構成しその間に傳達おくれが介在する。このような制御系では比例帯



第6圖 精溜塔温度制御系

を大きくとらないとサイクリングが収まり難く、さりとて大きくすると感度が鈍るので制御は厄介である。容量は制御系に安定化作用を與えるものであるが、本例では同時に傳達おくれの原因ともなり、かえつて後者の方が大きくひびいて制御性が悪くなつてしまう。このような場合に満足な制御を得る唯一の方法は、できるだけその系に入る全變數を別々に制御して負荷變化の速度を減少せしめることである。

操作部に屬する操作端として、化工プラントに用いられるのは大抵の場合制御弁である。弁特性はプラント各部の流動特性と相連關して、制御性の重要な因子であるが、その詳細は割愛し、ここでプラントで特殊な用途に使われている**容量制御ポンプ (Controlled volume pump)**について少し觸れてみたい。¹⁰⁾これは液量をきわめて正確に制御して供給するのに用いられる、回転數の非常に低い一種のプランジヤポンプで、他の流量または計測値に比例して、運轉中にも回転數あるいはストロークの精密な調節により(全ストロークの1/750まで調節可能)吐出量を微細に制御しうるので**比例ポンプ (proportioning pump)**ともよばれる。第7圖¹¹⁾は米



第7圖 容量制御ポンプ (Milton Roy社)

國 Milton Roy 社製品の一型式である。液體の微小な壓縮性を無視すれば、吐出量は壓力によつてほとんど變らない。吐出量は數 cc/hr から 11m³/hr まで、壓力は最高 1300 氣壓に達するものまで同社で製作されている。このポンプを單なる送液のために利用するのは不經濟で、吐出量を制御する場合あるいはそうでなくても液量がきわめて小さいか壓力の高い場合に使用價值がある。ただし泥漿、高粘性液あるいは腐蝕性液のように取扱の困難な材料にも適用してよい。このポンプの構造上の一特徴は二重ボール弁を採用していることで、ボールに對する切線狀の液流によつて自己清掃を行わせ、泥漿でもボールと弁座との接觸をさまざまに漏洩を起さぬよう工夫されている。

このような特徴をもつ容量制御ポンプは化學工業の各方面に利用しう。たとえば、罐水處理劑の供給、工場廢液の處理等である。更に獨得の應用として**自動滴定**がある。溶液の酸性あるいは鹽基性の強さの制御に際し

て、電氣傳導度も pH も大して變化しない濃度範圍では直接の檢出は困難であるから、このポンプを用いて試料を連續定量し、それに正確に比例した滴定劑を添加する。この混合物の pH が滴定曲線 (第3圖參照) の傾斜の急な點にくると、元の酸または鹽基の強さが容易に測定され、制御系に有効な檢出値を與えることができる。

最後にこの小文の筆をおくに當つて、化工技術者の立場から、次の三つのことを附言しておきたい。第1は、自動制御をふくむ計裝 (Instrumentation) は化工プラント計畫の初期、場合によつてはパイロットプラントの時代に考えねばならぬことである。すなわちプラントを作り上げてから計裝するのではなく、計裝をプラントデザイン (Plant design) の一部と考えるのが、技術的にも經濟的にも有利なことである。第2はプラントの運轉に計裝設備を活用し、その成果を充分發揮せしめるためには、化學工場組織の中に計裝部門を育成確立するのが必要なこと。第3には、前2項を實現するために、化工技術者と計裝技術者とが緊密に共同することである。しかしわが國の現状では、化工技術者 (Chemical engineers) は他種技術者に比しその數が少いし、それに増して計裝技術者は少い。本邦化學工業の健全な發展のためには兩者の育成が急務であることはもちろんであるが、過渡的な現在では、化學、機械、電氣、物理關係の技術者や研究者の緊密な連繫が一層重要であらう。

文 獻

- 1) E.D. Haigler, Chem. Met. Eng., May 1942, 129
- 2) D.P. Eckman, "Instrumentation" John Wiley & Sons, Inc., (1950)
- 3) E.R. Gilland & C.E. Reed, Ind. Eng. Chem, 34, 551 (May 1942)
- 4) "Instruments and Process Control", Delmar Pub. Inc., 1947
- 5) D.M. Considine & S.D. Ross, Chem. Eng. Progr., 46, 518 (Oct. 1950)
- 6) J.H. Perry, "Chemical Engineers' Handbook", 3rd, Ed., McGraw-Hill, 1950
- 7) E.S. Lee, Chem. Eng. Progr., 44, 263 (April 1948)
- 8) 市岡三郎, 化學工業, 2, 865 (Nov. 1950)
- 9) D.P. Eckman, "Principles of Industrial Process Control", John Wiley & Sons, Inc., (1945)
- 10) R.T. Sheen, Chem. Eng. Progr., 44, 327 (April 1948)
- 11) Brown, Instrumentation Data Sheet, No. 11, 5-1

自動制御研究会近況

先に本誌第2巻第2號に、本研究会成立の次第、目的および活動範圍を紹介した。その後1年有餘、同好の士は次第に多數となり、大學および關係諸會社の方を合せると、70名を突破するに至つた。

この間に研究会は、第21回より第34回まで、14回の會合により、次の活動を行つた。

○見學 4箇所行つた。

○文献紹介 米、獨、英、露各國の自動制御關係文献の内容約 80、題目約 90 が紹介された。

○研究發表 研究成果、または中間報告等として約 25 題目の發表があつた。

○現在進行中の行事 諸大學、官廳、研究所および諸會社に到着中の、自動制御關係の文献 (雜誌、書籍) を分擔して調査、整理し、リストをつくり、印刷、配布する計畫が進行中である。

○コントロール・エンジニア 研究會有志が、自動制御裝置の原理構造、應用等に關する、米國 Brown 計器會社の最近資料を、同社の許可を得てまとめ、第1回分が「コントロール・エンジニア」として出版された。

自動制御研究会は今後も毎月約1回の割合で、千葉 (東大生産技術研究所内) あるいは東京 (東大工學部電氣教室内) で會合を行う豫定になつており、自動制御に興味と關心をお持ちの方なら、どなたでも參加できる。會費は1回につき40圓で、參加を御希望の方は、幹事までお申込下さい。

自動制御研究会幹事 增淵正美 (東大生研第2部内)
鴨井 章 (東大生研第3部内)
(26.6.20 現在)