高真空系の自動制御

藤 永 敦* ・ 中 村 貢*

(昭和35年11月4日受理)

Automatic Control of High Vacuum Systems

Atsushi FUJINAGA and Mitsugu NAKAMURA

(Research Laboratory, Mitsubishi Elec. Mfg. Co.)

1. まえがき

高真空中動作する物理装置で、大形かつ連続自動運転を行い、少数の操作者で安全確実に運転できるように望まれることがしばしばである。本稿ではこれらに対する基本的な考え方を述べ、2, 3の実例について記述する。

たとえば、粒子加速装置の場合、動作圧力は低いほど良いのであるが、イオン加速の場合には、イオン源内圧力はできるだけ所望の一定圧力に保ち安定したイオンビームを得たいのであるが、一方イオン電流を多く得ようすると、ガス流量を多くする必要が生じてくる。このことは系の圧力の上昇を来し、絶縁破壊する危険を生ずる。そこでガス流量(イオン源内圧力)と加速管内圧力との間に、適当な自動制御(または interlock)を行うことが必要となる。また、熱核融合反応装置の場合には不純物の少いガスを充填して放電を行わせる場合が多いので、装置をまず超高真空中に排気し、その後高純度の気体を制御された圧力に充填しなければならない。

これらの装置は急激な圧力上昇などによって、何れも装置の破壊や、操作者に危険を与えることになるので、それらを考慮して、あらゆる点で安全確実な動作をするように制御され interlock されなければならない。

2. 基本的な考え方

真空系を自動的に制御しようとするときに考慮しなければならない基本的な問題は、(1)系で仕事が行われている間中一定の圧力に保つ必要があるかどうか、(2)設定圧力以下で動作すればよいのかどうか、(3)どの程度の事故対策が必要か、(4)これらの動作点における精度はどの程

度必要か—感圧計器(真空計)の精度と選択などの点である。さらに真空系設計上、一般的な問題として man-hour の経済性のこともあるが、この点についてはここでは触れないでおく。

(1) 一定圧力に保つこと

Linner, George および McQuistan¹⁾ の報告では、760 ないし 10^{-9} mmHg の範囲の任意の圧力でガラス製ヘルジャー内の圧力制御を行いうる真空系を発表している。この場合のように、半導体材料の蒸着膜の性質を研究するための蒸着装置や、真空蒸溜装置などは一定圧力で制御された系で仕事を行わないと、材料の解析や品質の管理ができない。

一般的に系を一定圧力に保とうとするとき第1図のように適当な感圧計器 G と可変漏洩器 L を組合わせた制御系が用いられる。この場合容器 V の圧力 P を一定に(圧力変動を ΔP とする)保つために排気速度 S のポンプと組合わされているとすると次式の如くなる。

$$P = \frac{Q}{S} = \frac{Q_L + Q_{op} + Q_i}{S}$$

但し Q_L は可変漏洩器からの漏洩量、 Q_{op} は動作時の放出ガス量、 Q_i は到達真空度 P_0 の時の系からの放出ガス量である。到達真空度の時の排気速度を S_e とすると、 $P_0 = Q_i/S_e$ であるから、

$$P = \frac{Q_L}{S} + \frac{Q_{op}}{S} + P_0 \frac{S_e}{S}$$

となる。この式において $P_0 = 1 \times 10^{-7}$ mmHg, $S_e/S = 1/10$, $S = 100$ l/sec とし、最少可変可能な Q_L を 1×10^{-4}

第1図 一定圧の自動制御

* 三菱電機(株)研究所

mmHg l/sec とすると、

$$P \times 10^2 - Q_{op} = 1 \times 10^{-4}$$

となるから、 Q_{op} が 10^{-4} 台で P は 10^{-4} mmHg に定め
 うことになる。高い圧力の領域では Q_L を適当に選
 ぶことは比較的容易であるから、任意の圧力に系を制御
 することは可能であるが、低い圧力の領域では Q_L の適
 当な値が得難いこと、 S の値が制御圧力で異なる（拡散ポ
 ンプを使用したとき）ことなどの理由で、大変困難な問
 題である。われわれが試みた例を後に示しておく。

(2) 設定圧力以下で運転すること²⁾

粒子加速装置や真空脱ガス装置などの多くの場合には
 規定の圧力（危険の生ずる圧力）以下であればできるだ
 け低い圧力で系を作動させるのが良い結果を生ずるもの
 が多い。これらの場合には

- 1) 操作者はどこまでを手動で操作できるか
- 2) 制御系（主として感圧計器とリレー系）にヒステ
 レシスはないか
- 3) すべての部分を手動化しておき、各部からそれぞ
 れ点検できるようにしておくなどの注意が払われな
 ければならない。これらの点については後の章にお
 いて、われわれが製作して満足な運転を行っている
 実例で詳細に記述する。

(3) 事故対策について

真空系運転に際して系に損傷を与えるような事故が生
 じないように、起りうるあらゆる場合を考えて対策を講
 じておく必要がある。たとえば 1)断水、2)冷却トラッ
 プの温度上昇、3)拡散ポンプの加熱線の断線、4)真空弁

などの誤動作、5)急激な圧力上昇、6)放射線発生時に
 ける安全対策などが考えられる。

これも実例について後に述べる。

(4) 感圧計器について

自動制御に使用する感圧計器はつぎの条件を満たさな
 ければならない。

- 1) 精度が高く、読みは電氣的出力に変換できること
- 2) 経年変化がなく、互換性のあること
- 3) 堅牢であること
- 4) ヒステレシスのないこと

などであるが、現在われわれの知っている真空計で上の
 条件をみたすものは極めて少い。しかし、制御すべき真
 空系の性質によってはそれほど高い精度も必要でなく大
 体の値がわかればよい場合もあり、このときは、ピラニ
 真空計や、冷陰極電離真空計が使用される。

われわれの行った場合については後述する。本特集号
 でも他の著者³⁾によって詳述される筈であるからここ
 ではくわしくは述べない。

3. 加速装置における実例

(1) エクステンション・チューブの真空系

ここでいうエクステンション・チューブとは、20Me
 Vのリニアックアクセレータの出力電子電流を実験室まで
 導く直径 100mm の直線管で、全長約 30mにも及ぶも
 のである。これを4基の自動制御された排気系で 10^{-6}
 mmHg程度の圧力に排気するものであって、これらは強
 い放射線によって照射されるので、運転は遮へいされた

第2図 自動制御系のブロックダイアグラム

第2図にこの排気系の構成を示し、第3図に電気的制御系統図を示す。これらの図で明かなように、排気系は油回転ポンプ(150 l/min)——ニューマチックバルブV₂(50mm口径)——油拡散ポンプ(300 l/sec)——バツ

3) S_3 を閉じるとサーミスタ真空計が動作する。サーミスタ真空計にはリレー回路が用意されており、 $5 \times 10^{-2} \text{ mmHg}$ (任意の値に調整できる) の圧力以下で接点

が入る。この回路は油拡散ポンプのヒータに直列に入っている、この圧力以上では油拡散ポンプのヒータは入らない。かつ、この回路には直列に断水リレーおよびヒータの断線により応動するリレーが入っている。断水リレーは拡散ポンプに必要最少量以下の流量になると切れ、断線リレーは断線したとき V_3 を閉じるように動作する。

4) S_0 を閉じると冷陰極電離真空計が動作する。この真空計は $8 \times 10^{-5} \text{ mmHg}$ の圧力（任意の値に調整できる）以下で接点の入るリレーをもっている。

5) S_7 を閉じると電離真空計の電源回路が入り、直流増巾部分がウオームアップする。

6) S_2 を閉じてから30秒以上遅れると S_3 を閉じることができる。 S_3 を閉じると "manual operation" のときで、拡散ポンプのヒータが断線していなければ、 V_3 が開く。 S_3 を閉じてから約5秒後に遅延リレー R_1 が動作して、冷陰極電離真空計のリレー回路を切る。

7) S_3 を閉じると電離真空計のフィラメントが入る。この電離真空計は側定球のイオン電流のコレクタが2分割されており⁴⁾、一方のコレクタで真空度の側定を行い他の一方は、制御回路への信号出力を取出せるような特殊なものである。いまこの回路では $1 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$ でフィラメント回路が切れ、 $5 \times 10^{-6} \text{ mmHg}$ の圧力に達すると "vacuum good" の信号を出すようになっている。この部分の回路を第4図に示しておく。第4図に示したように、イオン電流による制御回路に用いたリレーは、on-off にヒステリシスがあるのでそれを防ぐために適当な値の抵抗を R_1 , R_2 を並列に入れているが、これによって非常に満足的な動作を行わせることができた。また、動作真空度は抵抗 R_3 を変えることによって任意の値に設定することができ、これをチェックするために標準電圧発生電源が別に用意されている。

以上述べた所はすべて "manual operation" の場合であったが、あらかじめ S_2 ないし S_3 のスイッチを閉じておき、 S_1 を "auto" にしておけば、 S_1 を入れるだけで真空度に従って（単に時間だけで動作を定めた部分もある）排気系が動作する。

速動バルブ³⁾ はリニヤクセレータの出力電子流を取出すアルミ箔の窓の近くに設けられた一種の電磁弁でこの部分の真空度の急激な劣化の際に 50/1000秒程の早さで閉じ、排気系への悪影響を最少限にするためのもので、口径 100mm の大形のものが使用されている。

つぎに、この真空系の運転中に生ずる可能性のある事故の場合について述べる。

1) 断水のときは、断水リレーのスイッチが開き拡散ポンプのヒータ回路が切れ、リレー R_3 が開くから、主

第5図 液体室素自動補給機構

バルブ V_3 および 電離真空計フィラメント 回路が切れる。このまま放置すると冷陰極電離真空計のリレー ($8 \times 10^{-5} \text{ mmHg}$ に設定) により アラーム信号を発する。

2) 油拡散ポンプヒータ断線のときは、第3図より明らかにように断水のときと同じ動作をする。

3) 高真空側の真空が悪化したとき S_0 を "auto" にしていたとすると、 R_1 は開いたままの状態にあるから冷陰極電離真空計からの信号 ($8 \times 10^{-5} \text{ mmHg}$) により主バルブ V_3 が閉じるが、そのために再び真空が良くなっても、今度は R_1 が閉じ、冷陰極電離真空計からの信号回路を開路しているので V_3 は再び開くことはない。このときもアラーム信号が送られる。（冷陰極電離真空計のリレーは reset しない限り回復しない）。これは高真空側の真空悪化は必ず何らかの原因によるのであるから先ずそれを調べよ、という警告である。このときは、当然電離真空計フィラメント回路は切れる。

4) 低真空側の真空が悪化したときは、サーミスタ真空計のリレー ($5 \times 10^{-2} \text{ mmHg}$ に設定) によって拡散ポンプヒータ回路が切れ、同時に主バルブ V_3 が閉じ、電離真空計フィラメント回路が切れる。この時は、サーミスタ真空計または冷陰極電離真空計によりアラーム信号が送られる。

5) 停電したときはすべて停止する。圧搾空気は、約 50l のリザーバタンクに貯蔵され、つぎの送電時に備える。

6) 停電後ふたたび送電されたときは、油回転ポンプが入り、サーマルリレーにより30秒遅れて V_2 が開き、サーミスタ真空計が $5 \times 10^{-2} \text{ mmHg}$ 以下の圧力を示すと油拡散ポンプが入る。その後サーマルリレーにより30秒経たのち主バルブが開く（ただし S_0 が "auto" になっているときは冷陰極電離真空計が $8 \times 10^{-5} \text{ mmHg}$ より悪

第6図 イオン源の圧力制御系

いと開かない)。

つぎに、液体窒素自動補給機構について述べよう。

液体窒素トラップは内容積約 8 l で、液体窒素の消費量は約 12 l/day であるが、連続で電子線ビームを発生している時のことなどを考慮して、自動補給機構を用意した。この原理に関しては、すでに種々の報告があるが、われわれの行ったのは第5図に示したように感熱部に白金線条を用い、ブリッジに結線して用いた。この場合ブリッジ電流 1 A で、出力 0.27 V で、0.02 V 程度の電圧変動で動作するトランジスタ増幅回路を用いてリレーを動作させている。実際に使用した場合、液面が 1 ~ 2 mm 低下すると補給するが、この時間は 30 l 入魔法瓶の空気部分の容積 V によって幾分変わる。魔法瓶内の液体窒素が少なくなったときはリモートスイッチによって、制御盤に“empty”の信号を送るようになっている。

(2) イオン源の圧力制御

イオン加速装置で安定なイオン流を得るためにはイオン源内の圧力を所望の値に制御する必要がある。イオン源は普通、数 100 kV ないし数 MeV の高い電圧の電極内におかれる。従って、このイオン源内の圧力は遠隔操作によって制御されなければならない。

われわれが試みた方法は第6図に示すように、サーミスタ真空計の出力をパラジウムリクの加熱入力にフィードバックする方式で、圧力の設定はサーミスタ真空計のリレー回路の可変抵抗 R を制御盤からセルシンモータによって変えて抵抗調整、設定する。勿論これらはあらかじめセルシンモータの回転角度とイオン源内圧力の関係は校正しておく必要がある。

第6図で、イオン源内圧力を P_i サーミスタ真空計の

圧力を P_t 、両者の間のコンタクタンスを C とし、流量を Q とすると

$$Q = C (P_t - P_i) = a e^{-\frac{q}{T}}$$

ただし、 T はパラジウムの温度、 q は定数、 a は圧力などに関係するが一応定数とすると

$$P_i = P_t - \frac{a}{C} e^{-\frac{q}{T}}$$

となり T を変えることにより P_i を変えることができる。

われわれはこの方法によってイオン源内の圧力の自動制御を行うことに成功した。制御可能な圧力範囲は 3 MeV の Van de Graaff 形加速器の場合、 1×10^{-3} ないし 5×10^{-2} mmHg の範囲で 5% 以下の変動に制御することは容易であった。

これには 2 つの付属的装置を必要とした。すなわち、パラジウムリク入口の水素圧の読みとり、サーミスタ真空計のメータの目盛りの読みとりであるが。これらは鏡を用いて加速器の外部から安全にできるようにした。しかし、このことは自動制御方式には、本質的に必要なことではない。

5. あとがき

自動制御を真空装置に実際に適用するには、現在の段階では、部品の精度、信頼性などの点で困難がすこぶる多い。しかし、われわれは一応満足できる装置を作ることができた。いずれ詳しい稼動記録を発表するつもりであるが、今回は概念的な記述に止めた。

なお、エクステンション・チューブの制御系に関しては日本原子研究所の河原崎雄紀、井上堅司の両氏の指示に負う所が多く、イオン源の圧力制御に関しては三菱原子力工業(株)の今村元氏ほかの協力を得た。記して謝詞とする。

〔文 献〕

- 1) L. R. Linner, R. I. George and R. B. McQuistan. *Rev. Sci. Instr.*, **31**, 650 (1960)
- 2) N. C. Balchin and B. L. Mordike: *Vacuum*, **9**, 264 (1960)
- 3) 中山勝矢: 真空、本号
- 4) 藤永敦、中村貢、藤田彪太、井上功一: 真空に関する連合講演会、於阪大、1958年5月
- 5) 藤永敦、高部俊夫: 真空、**2**, 202 (1959)