温度制御型サーミスター真空計

堀 越 源 一*

(昭和37年10月6日受理)

A Thermistor Gauge of Temperature Controlled Type

Genichi HORIKOSHI

(The Institute for Nuclear Study, Univ. of Tokyo, Tanashimachi, Tokyo)

A new type thermistor vacuum gauge is described. In a thermistor, the electric resistance changes largely with its temperature, so that it can be used as a pressure sensitive element in a thermal vacuum gauge. Owing to a nonlinear relation between the temperature and electric resistance in a thermistor, however, the problem of the ambient temperature compensation in a thermistor gauge is very difficult. So a gauge of new type was designed, employing two thermistors one of which is a monitor of gauge head temperature. The signal from the temperature monitoring thermistor drives a vacuum tube and control its plate current, the load of which is a nichrome wire winding around the gauge head. If the temperature of the gauge head is lower than the setting point, the plate current increases so that the temperature will be raised and vice versa, thus the gauge head is hold at a constant temperature irrespective of the ambient temperature. Some theoretical discussions concerning thermal vacuum gauge designs are presented. The measureable pressure range is 10 torr to 10^{-3} torr. Thermistor gauges of this type, together with Penning gauges and hot cathode ionization gauges, are now being used as pressure monitors in a vacuum system of a 1 Bev electron synchrotron at the Institute for Nuclear Study, University of Tokyo.

1. 序

真空計の一種に thermal gauge がある。これは気体の熱伝導率が、真空度がよくなるにしたがってだんだん小さくなることを利用したものである。thermal gauge にもいろいろの種類があり、ピラニゲージなどはその代表的なものであるが、サーミスターも、その電気抵抗が温度によって大きく変わることから、やはり thermal gauge としての可能性が考えられるわけである (1,2,3,4,5)。

2. 動作原理

気体の熱伝導率 κ は、単位体積当りの分子数 N と分子の平均自由行程 λ とに比例し、

$$\kappa = KN\lambda \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。但し K は分子の質量、気体の温度などによってきまる常数である。

気体の熱伝導率が真空度によって、どのように変化するかを考えて見る。 N は気体の圧力に比例し、 λ は気体圧力に逆比例する。したがって κ は気体の圧力には関係なく一定である。しかし圧力がだんだん下って、分子の平均自由行程が真空装置の寸法よりも長くなると、気体分子は、分子同志の衝突よりも真空槽の壁との衝突の方が多くなり、それ以上真空度がよくなっても λ は一定不変となってしまう。一方 N は、圧力に比例して少くなるから、(1)式で表わされる κ は、この程度の圧力範囲では、圧力と平行して変化するようになる。サーミスターが使用できるのは、この領域である。

この熱伝導率 κ の変化を如何にして検出して真空度を知るかが問題である。サーミスター・ゲージでは、サーミスターを測定しようとする圧力気体中に支えて、こ

* 東京大学原子核研究所 (東京都北多摩郡田無町)

Fig. 1 Thermal conductivity and temperature of the thermistor gauge under constant power supply as a function of pressure.

れに外から一定の電力を供給しておき、そのときの温度上昇 ΔT を検出するようになっている。この場合 ΔT は、

$$\Delta T = \frac{W}{\kappa' S + \kappa_0} \dots \dots \dots (2)$$

で表わされる。但し、

κ' : サーミスターの単位面積から毎秒失われる熱量 (Cal/cm²・sec)

S : サーミスターの全表面積

κ_0 : サーミスターを支えるリード線の熱伝導や輻射などによって毎秒失う熱量 (Cal/sec)

W : サーミスターに入る電力

である。ここで述べる κ' は、(1) 式で表わされる κ に比例する量であり、 κ' の変化を ΔT の変化として読むものである。

ここで κ' は前に説明したように、分子の平均自由行程によって変化する量であり、圧力と κ' との関係は Fig. 1 に示されるようなものである。一方 κ_0 はゲージの幾何学的な寸法などによってきまるものであるが、これが小さい程低い圧力まで測ることができる。すなわち ΔT が κ' の変化で大きく変化するためには、

$$\kappa' S > \kappa_0$$

であることが必要であり、更に

$$\kappa' S \ll \kappa_0$$

の場合には κ' が変化しても、 ΔT は殆ど変化せず、この場合のサーミスターゲージは殆ど感度がないことになる。一般に thermal gauge の使用限界は、高真空側では、

$$\kappa' S = \kappa_0$$

できまると考えられる。

そこで高真空側で測定範囲をのほすには、 κ_0 を小さくすることおよび S を大きくすることが考えられる。

先ず κ_0 を小さくするには、サーミスターを支えているリード線から熱伝導によって失われる熱量を少なくする

Fig. 2 Voltage drop across a thermistor (V) as a function of current (I).

ために、材料を選び、細いリード線を用いると同時に、サーミスターの温度をあまり上げないようにする。これは温度が高いと、輻射による熱の発散が無視できなくなるからである。

表面積 S を増すには技術的な困難を伴うが、サーミスターはなるべく薄い板状のものが望ましい。我々が用いているものは、直径 1mm 厚さ 0.3mm の円板状のものである。板状のものを用いるもう一つの利点は、サーミスターの熱容量の割に表面積が大きいから、時定数が小さくなり、応答時間も早くなることである。

3. 真空計としてのサーミスター

サーミスターは、電気抵抗の温度係数が大きいから、熱敏感素子として用いることが出来るのであるが、その電流電圧特性は、Fig. 2 に示すように初めは直線的であるが次第に直線より外れ、ある電流値に対して電圧は最大となり、それ以上の電流に対しては電圧はだんだん減少する。この特性は当然真空度によっても異なり、真空がよくなると同じ電流値に対する電圧は前よりも下がる。

このようなサーミスターに一定の電力を供給するのは一般に簡単ではない。定電圧を加えた場合には、サーミスターの温度上昇によって電気抵抗が減少して、さらに電流が増し、遂にサーミスターが破壊してしまう。大きな抵抗を直列につないで電圧をかける場合には、その抵抗がサーミスターの抵抗にくらべて十分大きければ、流れる電流は殆んど一定とみてよく、サーミスターに供給される電力は、サーミスターの電気抵抗によって変ることになる。

供給電力が一定の場合の圧力 P と温度上昇 ΔT の関係を考えて、分子の平均自由行程が装置の寸法で押えられる領域では、(2) 式において

$$\kappa' \propto P$$

であるから、 $\kappa' S \gg \kappa_0$ とすれば、

Fig. 3 Output voltage of the thermistor gauge as a function of pressure.
solid line : constant wattage
broken line : constant current

Fig. 4 A conventional circuit of a thermal vacuum gauge.

$$\Delta T \propto P^{-1}$$

となる。しかし、圧力が小さくなって $\kappa'S \approx \kappa_0$ となるとそれ以上の圧力の変化には感じなくなってしまう。これをグラフで表わすと、Fig. 3 に示すようになる。供給電力を変えると、この曲線は上下に平行移動するだけで曲線の形は変わらないと考えられる。ところがサーミスターで電流一定の場合には、温度の変化によって抵抗値が変わり、供給電力が変わるから、この曲線とは形が変ってくる。このときの曲線は点線で表わされている如く、もとの曲線より ΔT の変化は少い。このために、サーミスターは温度係数は大きい、圧力に対する感度は若干減少するのである。

4. 室温による変動

さてこの温度上昇を如何にして検出するか。サーミスターの場合は、抵抗の変化によって ΔT を検出する。サーミスターの両端の電圧降下を測るのである。しかしこれだけでは、室温の変化に左右されて、真の ΔT は知ることができない。補償用のサーミスターを一個加えてブリッジを形成して、その電位差を読み取る方法をとっ

Fig. 5

Fig. 6 Diagram of the thermistor gauge head.
①. Cable connector ②. Kovar seal ③. Koyer.
④. Thermistor for pressure measurement.
⑤. Thermistor for temperature monitoring.
⑥. Nichrome wire. ⑦. Bakelite bobine.

ても、サーミスターの温度と抵抗との関係が直線的でないため、室温変化の影響をなくすることができない。すなわち Fig. 5 に示すように二つのサーミスターの温度差 ΔT が同じでも、室温がそれぞれ T_1 , T_2 であれば、それにしたがって二つのサーミスターの電気抵抗の差 ΔR は大きく変化してしまう。 ΔR は出力電圧に比例する量と考えてよいから、出力は室温に大きく左右されることになるのである。

5. 室温の変化を逃げる方法

この室温の変動による出力の変動を避けるにはどうすればよいか。最も簡単な考え方は、ゲージヘッドを一定温度に制御することである⁽³⁾⁽⁵⁾。その考えにしたがって、温度制御型のサーミスター・ゲージが作られ、温度検出素子として、もう一つのサーミスターを用いることにした。サーミスターの温度係数が大きいから、このような目的には都合がよい。ゲージヘッドには Fig. 6 に示すように、周囲に直径 0.08mm のニクロム線のヒー

ターが巻かれている。ヒーターの電気抵抗は約 500 Ω 位である。これはあとで述べるようにもっと大きい方が望ましいが、取扱上この程度が限度のようである。サーミスターは真空部に一個、外側に一個ついており、外側のサーミスターで温度を検出して、その出力をフィードバックしてヒーター電流を変えるようにしてある。また温度の急激な変化を避けるためと保護のため、全体にカバーをかぶせてある。真空度検出用のサーミスターは、2 節でも述べた如く表面積の大きい方が望ましいので、ここで用いたものは直径 1mm、厚さ 0.3mm の円板状のもので、20°C における電気抵抗が約 5kΩ である。温度検出用のものは直径 1mm のビー玉状のもので、20°C における電気抵抗が約 100kΩ である。ヒーターの巻棒はベークライト製のものをを用いた。動作温度は 40°C 以下であるから、これで充分である。

この温度検出用サーミスターによって、ヒーターを流れる電流を制御してゲージヘッドの温度を一定に保つのであるが、この温度の設定点を決めるには次の考慮が必要である。すなわち、温度はなるべく低い方がよい。温度が高くと、熱輻射による損失が大きくなる他に、サーミスターの抵抗も低くなって、出力電圧が小さくなるからである。しかし、温度を制御するためには、常に室温よりも高くなければならない。この結果、設定温度は 35°C~40°C の程度とした。

温度制御回路は Fig. 7 に示すようなもので、ヒーターを流れる電流は、温度検出用サーミスターの両端電圧によって制御され、サーミスターの温度が上り入力電圧が下がるとヒーターを流れる電流は減少し、逆に温度が下って入力電圧が上がると、ヒーター電流が増すようになっている。温度の設定点を変えるには、図の可変抵抗器 VR₁ を変える。

こうして温度制御を行ったときのゲージヘッドの温度は、室温の約 10°C の変化に対しても 1°C 以内に押えることができる。Fig. 9 に示したものは、24 時間運転におけるゲージヘッドの温度変化で、ここには温度制御を行った場合と行わない場合とが示してある。温度の測定はサーミスターで行った。

6. 温度制御に関する考察

このようなサーミスターを用いた恒温装置について、室温の変動に対する温度の変動率、およびスイッチを入れてから定常状態に達するまでの時定数などについて考えてみる。まず、ゲージヘッドについての温度変化に対する方程式は次のようになる。

$$C \frac{dT}{dt} + L(T - T_0) = W \quad \text{.....(3)}$$

Fig. 7 Circuit diagram for temperature controle.

Fig. 8 Temperature change of the thermistor vacuum gauge head.

- a) fully controlled.
- b) partially.
- c) without controlling.

但し、 C はゲージヘッドの熱容量、 L はゲージヘッドからの熱発散の係数、 W はゲージヘッドに毎秒加えられる熱量、 T_0 は室温、 T はゲージヘッドの温度である。

温度制御を行うときは、 W は T によって変化するようになっており、 T が上がれば W は減少し、下がれば増加するようになっている。これを簡単に、

$$W = W_0 - AT \quad \text{.....(4)}$$

の形で表わせるものとする。 A は常数であり、増巾器の利得や、温度検出用サーミスターの感度などによってきまる。 W_0 は Fig. 7 に示した VR₁ を変えることによって変わる常数で、これで温度の設定点がきまる。

(4)式を(3)式に代入すると次のごとくなる。

$$C \frac{dT}{dt} + L(T - T_0) = W_0 - AT \quad \text{.....(3')}$$

定常状態における温度は、 $dT/dt = 0$ として T について解いて求めることができ

$$T = \frac{LT_0 + W_0}{L + A} \quad \text{.....(5)}$$

となる。室温 T_0 が ΔT_0 だけ変化したときの T の変化を ΔT とすれば、

$$\Delta T = \frac{L}{L + A} \Delta T_0 \quad \text{.....(6)}$$

Fig. 9 Temperature change of the gauge head when the switch is on and off.

Fig. 10 Calibration curve of the thermistor vacuum gauge.

となる。温度制御回路の場合は $L \ll A$ であるから（これは後述のように実際に確かめられた）

$$\Delta T \approx \frac{L}{A} \Delta T_0$$

となり、 A が大きい程 T の変化は少い。したがって増巾器の利得は大きい程よく、ゲージヘッドのヒーターの抵抗は真空管の内部抵抗と同程度ですることが望ましい。

つぎにスイッチを入れて動作を始めてから、常数状態に達するまでの時定数については (3') 式を T について積分し、初期条件として $T(t=0)=T_0$ とすれば、

$$T = T_\infty - (T_\infty - T_0) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{C}{L+A} \approx \frac{C}{A} \quad (L \ll A) \\ T_\infty &= \frac{LT_0 + W}{L+A} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(8)$$

である。時定数は、 C が小さく A が大きい程短い。したがってゲージヘッドの熱容量は小さい程よく、増巾器の利得は大きい程よい。

L と A の比は実測によって推定することができる。

ゲージの電源のスイッチを入れたとき、(7)式で示されるように温度が変化をする。その時定数は(8)式で表わされる。一方電源のスイッチを切ると、ゲージは自然冷却によって徐々に冷えて室温に達するが、このときの温度変化は(8)式で $W=0$ において求めることができる。その結果時定数 τ' は

$$\tau' = \frac{C}{L} \quad \dots\dots\dots(9)$$

であることは容易に分る。この τ と τ' から A と L の比を求めることができ、つぎのような結果を得る。

$$\frac{A}{L} = \frac{\tau'}{\tau} - 1 \quad \dots\dots\dots(10)$$

実測によれば τ , τ' はそれぞれ $\tau=3.1$ 分, $\tau'=22.4$ 分であるから $A/L \approx 6.2$ であることが推論される。

7. 性能

サーミスターを用いた温度制御によって、実際にどの程度の温度変化があるかを Fig. 8 に示す。(a) は温度の設定点が適当な場合で、その温度変動は 1°C 以内に入っている。(b) は設定点が低過ぎた場合で、室温が上って来ると、温度制御が行われなくなる。(c) は全く温度制御を行わない場合である。

真空度に対する校正曲線は Fig. 10 に示す。圧力が 10 Torr 以下から 10^{-3} Torr までが大体の測定範囲である。サーミスターを薄い板状にすると、もつと低い圧力迄測定できる筈であるが⁽²⁾⁽³⁾、技術的な困難が伴う。

核研電子シンクロトロン系の真空系では、サーミスターゲージで拡散ポンプ系の背圧を測つてその信号をコントロール系に送っている。またペニングゲージと組合わせて、ペニングゲージの指度の二重性を識別できるようにして高真空側の圧力を監視するようになっている。

最後にいろいろ御指導を賜った熊谷教授、また多くの有益な御助言をして頂いた馬場齊氏に厚く感謝する。

〔文 献〕

- (1) P. E. Seiden : *Rev. Sci. Instr.* 28 657 (1957)
- (2) A. W. Smith : *Rev. Sci. Instr.* 30 458 (1959)
- (3) M. Varičák et. al. : *Rev. Sci. Instr.* 30 891 (1959)
- (4) A. P. Flaniček et. al. : *Rev. Sci. Instr.* 32 356 (1961)
- (5) A. R. Hamilton : *Rev. Sci. Instr.* 28 693 (1957)
- (6) J. H. Leck et. al. : *Rev. Sci. Instr.* 28 119 (1957)