研 究

クライオポンプの試作とその性能*

秋 山 好 胤**・橋 本 久 子**・石 井 博**

(昭和40年7月21日受理)

Design and Performance of Cryopump

Yoshitane AKIYAMA, Hisako HASHIMOTO, and Hiroshi ISHII

(Electrotechnical Laboratory, Tanashimachi, Tokyo, Japan)

A cryopump which has an expansion engine is designed and developed as the first machine in Japan for the nuclear fusion program in the Electrotechnical Laboratory. The flow diagram and the photograph are shown in Fig. 1 and 2 respectively. The cryogenerator consists of a single stage plunger type expansion engine which drives an oil pump or an induction motor as its load, several heat exchangers and a liquid nitrogen container which is set for pre-cooling helium gas. The whole system of the cryogenerator is set in a vacuum vessel which is evacuated by an oil diffusion pump to 10^{-5} Torr range. The pump head is connected with the cryogenerator by a vacuum cylinder which contains two cold helium pipes, going to and back from the cryo-panel. The pump head is designed for the experiment of pumping performance as shown in Fig. 3 and 4 and the surface area of the cryopanel is $2,500 \text{ cm}^2$. The temperature of cryo-panel can be reduced to 9°K within a few hours after starting the expansion engine. The refrigeration capacity at 9°K is 90 watts and the heat loss of cryopump head is very small. The ultimate pressure at the test dome is 1.5×10^{-8} Torr after outgassing of 150°C for 20 hours. From mass spectrometric analysis, it is supposed that the hydrogen partial pressure has the direct influence on the ultimate pressure. The measured pumping speed is nearly equal to the theoretical one and remains constant even after the condensation of large amount of air, 160 cm^3 (N.T.P.)/ cm^2 on the cold surface. The pumping speed increases slightly as the pressure becomes higher, and the increase is larger as the temperature of the cryo-panel is lower. The whole performance of this cryopump is satisfactory for our purpose. We have a future plan to apply a larger cryopump of analogous design to a space simulation chamber.

1. まえがき

1958年に Bailay と Chuan⁽¹⁾ が、カルフォルニア大学の低密度風洞の排気ポンプとして、はじめてクライオポンプを用いたが、その後、アメリカやソビエトなどでは、風洞やスペース・チェンバなどの大型真空装置の大容量の排気系として、ひろく実用されている。

われわれは、日本における試作第1号機として、ヘリウムの超低温発生機と真空ポンプ・ヘッドを直結したクライオポンプを、将来の核融合反応装置の排気系として、昭和35年から開発研究を行ってきた。36年には設

計製作をはじめ、その後多くの改良を加えてきた結果、39年6月に初期の性能をうることができた⁽²⁾。このポンプの構造及びいままでにえた性能について報告をする。

このポンプの超低温発生機には、ピストン型の膨脹エンジンを用い、 10°K 前後の低温排気面をうけることを目標とした。超低温発生部全体を、真空容器の中に入れる真空断熱方式を採用した。これは、当時としてははじめての試みで、このポンプの特徴である。

なお、この計画に用いたポンプ・ヘッドは、予備実験用の小型のもので、現在さらに大型のものを設計し、製作中である。

* 昭和39年7月3日真空協会研究例会及び昭和39年11月19日第5回真空に関する連合講演会において講演

** 電気試験所（東京都北多摩郡田無町）

Fig. 1 Flow diagram of the cryopump.

2. 装置の構造

装置の系統図を Fig. 1 に示す。このポンプは、ピストン型膨脹エンジンを内蔵した超低温発生機で冷却したヘリウムガスが、直接ポンプ・ヘッドの冷却管中を循環する冷凍機方式を用いている。Fig. 2 は、主構成部分の外観で、中央が超低温発生部、正面図の右側にある横向きの円筒がポンプ・ヘッド、左側のパネルは操作盤である。また背面図の右側は低温ガス精製器である。

2.1 冷却のしくみ

ヘリウム圧縮機で約 20~30 気圧に圧縮されたヘリウム・ガスは、油分離器、常温精製器、低温精製器で、油、空気などの不純物が除かれ、超低温発生部におくられる。まず、ガスは第一熱交換器から液体窒素だめを通して液体窒素温度まで予冷される。さらに第二熱交換器で、低温での熱交換がおこなわれ、低温の内部吸着器でさらに不純物が除かれ、膨脹エンジンに送られる。

この膨脹エンジンで、ヘリウムガスは断熱膨脹をし、温度が低下する。この時になされた仕事は、膨脹エンジンに連結された油ポンプによってとりさられる。

低温になったヘリウム・ガスは、銅パイプを通して、クライオポンプ・ヘッドの冷却フィンに直接導びかれていく。この冷却フィン面が、クライオポンプの排気面と

なるわけである。フィンを冷却したガスは、熱交換器部を通して圧縮機にもどされる。この循環によって全体の熱収支がバランスするまで温度が低下するわけである

この超低温部は、断熱のためにヘッドとは別の油拡散ポンプで排気している真空容器中に収められている。また、膨脹エンジンを中心とした超低温の部分には、断熱効果をよくするために、スーパー・インシュレーション（この場合は、アルミ箔とナイロン布を交互に数層巻いたもの）をおこなっている。更に、容器の内側には、液体窒素のシールド板を設けてある。

真空断熱用の外筒を取り除いた内部を Fig. 3 に示す。ここでは、膨脹エンジンのスーパー・インシュレーションは、はずしてある。熱交換器は、膨脹エンジンの上であり、その下端がみえている。はりめぐらされている導線は、温度測定用の配線である。

各部分の仕様について簡単にのべると、

- 圧縮機：空気用の横型 4 段圧縮機をヘリウム用に改造したもの。ガス洩れを防ぐカバーをつけてある。最高圧力は 40 atm。最大流量は 30m³/hr。モータ動力は 11 kw。
- 常温精製器：常温で主として油および水を吸着剤に吸着させて精製する。吸着剤としては、ネオビードを 0.76 kg を使用。また、運転中に随時切替えられ

(a) Front view.

(b) Rear view.

Fig. 2 Photograph of the cryopump.

Fig. 3 Main assembly of cryogenelater for obtaining very low temperature set in the vacuum shell.

るように、2本並列に設けてある。加熱真空排気して再生させるためのヒータがある。

(c) 低温精製器：液体窒素温度で主として窒素、酸素および水などを吸着剤に吸着させて精製する。吸着剤としては、活性炭 1.1kg を使用。再生のための真空排気系がある。

(d) 熱交換器：銅パイプを渦巻にして積重ねたシェンドラン型の熱交換器を3ヶ使用。第3熱交換器は、運

Fig. 4 Plunger and cylinder of expansion engine.

転初期にのみ使用。

(e) 内部低温吸着器（2ヶ所）：それぞれ液体窒素温度および極低温近傍温度のもので、低温精製器で取り切れなかったヘリウム・ガス以外のガスを吸着剤に吸着させる。吸着剤としては、良質の活性炭を使用。

(f) 膨脹エンジン：Fig. 4 に示すような、プランジャー型式膨脹エンジンを一機使用。プランジャーの外径は25mm、長さは100mm。シリンダの長さは140mm。プランジャーとシリンダの間隙は10~20 μ m。プランジャーの材質は、超低温用特殊合金で、表面には硬質クロム・メッキをしてある。膨脹エンジンの潤滑には、ヘリウムガス自身を用い、この膨脹によってなされた仕事を吸収する油ポンプは、超低温発生部の上部にある。吸入弁および排出弁は、油ポンプ・ボックス内のカムによってピストンの上下にあわせて開閉を調節されている。また、運動を安定にするためにモータも連結してある。

(g) ヘリウムだめ：ナイロンベースネオプレンの風船を利用している。容積は3m³。

Fig. 5(a) Cross section of the experimental cryopump head and the test dome. Cryo-panel consists of a spiral copper pipe ($12 \times 10 \phi$) and three copper plates.

2.2 ポンプ・ヘッド

ポンプ・ヘッドおよびテスト・ドームの構造を Fig. 5に示す。冷却面は、外径12mm, 内径 10mm の銅パイプをコイル状に巻き、これに銅板を3枚溶接してある。写真はヘッドの内部をのぞいたところである。冷却ヘリウムはこの銅パイプ中を貫流して、フィンを冷却している。パイプの表面積は 1600cm^2 、銅板の表面積は 900cm^2 で合計は 2500cm^2 。容積は約10l。外側は、超低温発生部の真空系につながり、真空断熱をしている。補助ポンプとしては3"の油拡散ポンプを用いている。

テスト・ドームの体積は、約12lで、このドーム全体は約 200°C までヒータで加熱できる。また、テスト・ドームとポンプ・ヘッドの中間に、リング状のバッフルまたはシェブロン型の液体窒素バッフルを挿入し、冷却面の条件を変えられるようにした。

3. 測定方法

3.1 温度

極低温の測定の手段としては、熱電対温度計、抵抗温度計、蒸気圧温度計などがある。いずれも一長一短があって、広範囲にわたって一つの温度計を用いることはできなかった。これは、真空度の測定において、全圧力をカバーする真空計がないのと似かよった点がある。そこで、われわれは、上記の温度計を併用した。測定場所は、膨脹エンジンの入口および出口、ポンプ・ヘッド、低温側の熱交換器の高圧側出口、低压側入口および出口の6カ所に設けた。

① 銅-コンスタンタン熱電対温度計

液体窒素温度までの高い温度の測定に用いたもので、フィリップス社製のシート状の熱電対をパイプ表

Fig. 5(b) Photograph of the cryopump head.

面にセロテープではりつけた。リード線は、 $0.5\text{mm}\phi$ の銅-コンスタンタン線を用い、熱伝導による測定誤差をできるだけ小さくするように、充分な長さをとった。この熱電対の 80°K での起電力は 0.018mV/deg で、せいぜい 80°K 程度までしか測定できなかった。しかし膨脹エンジンの始動時の温度の監視には、充分目的が達せられた。

② カーボン抵抗温度計

超低温部の測定には、Allen—Bladray 社製の $1/10\text{w}$, 56Ω (常温) のカーボン抵抗を採用した。直接にパイプ表面に巻きつけたのでは、熱接触が不充分であったので、銅パイプの中にヘリウム・ガスを入れ、カーボン抵抗を封じ込み、この銅パイプを冷却ヘリウムの循環パイプにはんだづけをして用いた⁽³⁾。レスポンスは、非常によかったが、カーボン抵抗の抵抗値が変動するためか、絶対値の再現性に若干の疑問があった。

Fig. 6 Apparatus for measuring the limit of condensing power.

しかし、温度変化はみることができた。

③ 蒸気圧温度計

主として水素の蒸気圧温度計を採用した。銅製の小さな容器をパイプにはんだづけをし、これとブルドン計とを $2\text{mm}\phi$ のキューブロニッケルのパイプで接続し、常温で 2 気圧以上の水素をつめて測定した。ブルドン計で測定できない圧力は、水銀マンオメータおよび油マンオメータを併用した。この温度計は、原理的には絶対温度が求まるはずであるが、測定範囲が、せいぜい $25\sim 9^\circ\text{K}$ であって、まだ問題が残っている。また一部窒素の蒸気圧温度計を用いた。

3.2 圧力

Fig. 5(a) のテストドームの VG に、副標準電離真空計および B-A 型電離真空計を、VA に、Veeco 製の GA-3 型真空分析計を取付けた。真空分析計は膨脹エンジンの振動の伝達を防ぐために、長いベローを介して接続したのでガス出しを徹底的に行なうことができず、その測定結果には、なお不十分な点が残った。高圧の圧力測定には、U 字型の高範囲マクラウド真空計⁽⁵⁾をもちいた。

3.3 排気速度

排気速度の測定は、ビュレット法によった。排気気体は、主として市販のボンベ窒素ガスをそのまま用いた。また、排気容量の測定は、Fig. 6 のように約 5L の容器をガラス・コックで接続し、コック A, B を交互にあげて、空気を数十回流入して調べた。

4. 運転結果について

運転の一例を Fig. 7 に示す。運転前には、ヘリウム

Fig. 7 Operating temperature and pressure during cooling.

・ガスを循環させて精製する。膨脹エンジンは、低温発生部を液体窒素で予冷してから始動する。動作後、約 2 ～ 3 時間でヘッド温度は $9\sim 10^\circ\text{K}$ になる。膨脹エンジンは、初めはオイル・ポンプで、定常状態になってからは、モータで制動する。

低温発生能力は、 9°K において約 90 watt であった。この値は、温度の測定に若干の不確かさがあるため、疑問を残している。ヘッドの温度は 9°K 以下にはならない。これは、膨脹エンジンの低温発生能力と各所からの熱侵入とが平衡状態になるためである。このクライオポンプでは、圧縮機の処理流量が最大 $30\text{ Nm}^3/\text{h}$ と少ないため、低温になるにしたがい、外部へなす機械仕事が少ない。実際には、モータによって無理に動かしている（毎分 330 回転）ために、過膨脹（入口圧力 17 ～ 18 気圧、出口圧力 1.1 気圧）を行なっていると考えられる。もし圧縮機の流量がもっと多ければ、更に低温発生能力が増加するであろう。

また、一時に多量のガスを排気しないかぎり、ポンプ・ヘッドの温度は変化しなかった。すなわち、このクラ

Fig. 8 Variation of temperature, pressure, and spectra of residual gases at pump head when the cryo-panel was heated.

イオポンプの低温発生能力は、この程度の小型ヘッドでは充分であった。ヘッドの冷却パイプにヒータを巻き、この入力を変えた場合のヘッド温度との関係を Fig. 8 に示した。これから、定量的なデータはえられないが、ポンプ・ヘッド能力をみる一応の目安にはなる。

膨脹エンジンをモータによって制動することは、長時間の安定運転のために、非常に有効であった。クライオポンプでは、長時間の継続運転が要求される。この要請は、モータ制動によって満足することができた。40時間程度の継続運転では、全く問題はおこらなかった。

このモータ制動は、実験初期には、充分低温になるまで行なわなかった。これは、もし常温からモータ制動をした場合、低温になってから、ヘリウム中の窒素などが事前の精製器、吸着器で捕捉しきれず固体となり、ここで無理にピストンを動かすと、致命的なキズを作ることの心配したためである。実際に、試運転のときに、膨脹エンジンが、かじって停止してしまうトラブルがあっ

た。しかし、この原因は、溶接の残りカスやピストン・ロッドのけずれなど金属製の異物のためであった。窒素などが固化して附着しても、ごく微量なら、高速運動をしているピストンではぎとられてしまうのではなかろうか。経験によれば、高温からモータ制動してもトラブルは全く発生していない。現在まで、無事故で約 300 時間の運転を行なっている。

ヘリウムガスの精製は、先にも述べたとおり、常温、低温、内部精製器と三重に行なっている。さらに、膨脹エンジン入口には、エバラスト・フィルター（銅の微粉をかためて $2\sim 3\mu$ の穴を作ったもの）をつけている。この精製も、実験初期には、運転前日に一日中、当日も $2\sim 3$ 時間おこない、ガス分析をするなど、相当神経質にしたが、それ程の必要はなさそうである。運転中は、常に低温精製器で精製をしているが、低温になってから、これを除いて、10 時間程度の運転をしたが差しつかえなかった。

超低温発生部を真空断熱したことは、熱の侵入を防ぐために、大いに効果があった。断熱部の圧力は、 10^{-4} Torr 台にならないと温度はさがらなかった。もし、 10^{-4} Torr 以下になっていれば、液体窒素のシールド板に液体窒素を入れる必要はなかった。この熱の侵入をより少なくすることは、熱交換器の能率をよくすることとともに、今後に残された低温工学上の問題点である。

ヘリウム・ガスの予冷をする液体窒素のための容積は、約 3.6 l で、液体窒素の消費量は、初期冷却に $10\sim 15$ l、運転中には、毎時 $2\sim 3$ l であった。また、低温精製器は、初期に、 $30\sim 40$ l、運転中に毎時 $2\sim 3$ l の液体窒素を必要とした。

5. 測定結果

5.1 到達圧力

一般に真空装置の到達圧力は、装置を構成している材質、大きさ、形状により、またどのような予備処理をしたかにより異なってくるので、簡単に評価はできない。ここで、クライオポンプでの到達圧力を考えてみる。

クライオポンプの排気原理は、真空容器内に極低温の冷却面を挿入して、ほとんどのガスを凝固させてしまうということである。そこで、問題となるのは、極低温での気体の蒸気圧である。普通常温で気体と考えられる物質の蒸気圧を Table 1 に示す。これから、 16°K になれば、Ne, H_2 , He 以外の気体の蒸気圧は、 10^{-16} Torr 以下になっていることがわかる。これは、現在の超高真空においてえられている圧力よりもかなり低い。もし Ne, H_2 , He を他の方法で除くことができれば、極高真空が

えられるわけである。しかし、大気中に存在する Ne, H₂, He の分圧が 9.4×10^{-2} Torr 程度であることから考えて、これらの気体を完全に除くことはできない。たとえ、あらかじめ $10^{-4} \sim 10^{-6}$ Torr の真空中に排気してからクライオポンプを働かせても、この割り合いで、H₂ 等の気体が減少するとは考えられない。クライオポンプを使用さえすれば、すぐに極高真空が得られるという考えや、クライオポンプを用いる最大の目的が、極高真空をえるためであるという考えは間違っている。

到達圧力に関するデータの一例を Fig. 9 に示す。これは Fig. 7 の運転の続きであって、圧力は Fig. 5 の VG の位置につけた真空計でえられた測定結果である。このように、約10時間ドームを加熱脱ガスしても、 10^{-9} Torr 台の圧力はえられなかった。この原因をたしかめる目的で、冷却面の冷却開始後の分圧を測定した結果、主なスペクトルの変化を Fig. 10 に示した。この時の実験では、脱ガスがまだ充分でなく、到達圧力はあまりよくなかった。圧力の低下とともに、質量数18および28は急激に減少しているが、質量数2（すなわち水素）の減少の割合が小さいことがわかる。

また、ポンプ・ヘッドの冷却フィンにヒータを巻いて、一度フィンを極低温に下げた後に温度を上昇させた場合の分圧の変化を Fig. 8 に示したが、質量数2のピークが急激に増加していることがわかる。

これらのことから、クライオポンプによる到達圧力が超高真空にならないのは、水素が冷却面に捕えられないということだけではなくて、窒素といっしょに一部分が捕えられ、この捕捉と離脱の平衡関係に起因しているものと思われる。この点については今後さらに追求する予定である。

5.2 排気速度

窒素ガスの排気速度を Fig. 11 に示す。A はポンプ・ヘッドとテスト・ドームの間になにもおかない場合、B は Fig. 5 (a) に図示したように、傘形バッフルを挿入した場合、C は液体窒素で冷却したシェブロン型バッフルを入れた場合、D はバックの 3" 油拡散ポンプのみで排気した場合である。

クライオポンプの排気速度の理論的な取扱いはいろいろ^(5,6)となされているが、定説はない。また、最近 Dayton⁽⁷⁾ が排気速度の評価についての提案を行なっ

Table 1 Vapour pressure at low temperature (Torr)

	CO	A	O ₂	N ₂	Ne	H ₂
10°K	7×10^{-85}	1×10^{-33}	3×10^{-31}	2×10^{-28}	9×10^{-5}	1.93
12	9×10^{-28}	8×10^{-27}	2×10^{-26}	2×10^{-23}	5×10^{-3}	13.9
14	1×10^{-22}	5×10^{-22}	4×10^{-21}	4×10^{-19}	1×10^{-1}	58.8
16	6×10^{-19}	2×10^{-19}	1×10^{-17}	4×10^{-16}	1	161.1
18	6×10^{-16}	1×10^{-15}	5×10^{-15}	2×10^{-13}	6	360.3
20	1×10^{-13}	2×10^{-13}	7×10^{-13}	2×10^{-11}	3×10	699.3
22	1×10^{-11}	2×10^{-11}	4×10^{-11}	7×10^{-10}	8×10	
24	4×10^{-10}	5×10^{-10}	1×10^{-9}	2×10^{-8}	2×10^2	
26	1×10^{-8}	1×10^{-8}	2×10^{-8}	2×10^{-7}		
28	2×10^{-7}	1×10^{-7}	2×10^{-7}	2×10^{-6}		
30	2×10^{-6}	1×10^{-6}	2×10^{-6}	2×10^{-5}

Fig. 9 Variation of pressure and fin temperature with time.

いる。これらの詳しい検討にはデータが不充分であるので、今回は、一般に用いられている排気速度をあらわす次式について比べてみた。

$$S = \alpha A \frac{\bar{v}}{4}, \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{8KT}{\pi M}}$$

ただし、 S は凝結面における排気速度、 α は凝縮係数、

Fig. 10 Change of main mass spectra of residual gases during operation.

A は排気面の面積、 M は分子量、 T は侵入分子の温度である。

冷却面に飛び込んでくる分子は、常温であると仮定すれば、室素に対する排気速度 $11.9 \alpha A$ (l/sec) となる。

$\alpha = 1$ とし、Fig. 11 の場合の面積を計算して求めた値が、Table 2 の理論排気速度である。ただし、バッフルを入れた場合の透過確率を考慮した。この透過確率は、電子計算機で計算した結果⁽⁸⁾を用いた。

測定値と理論値を比較すると、ほとんど同じ値であることがわかる。すなわち、とび込んでくる分子は、ほぼ完全に捕えられるという排気機構 ($\alpha = 1$ になる) をもっている。

冷却面の温度の高い場合の排気速度の変化をFig. 12に示した。これは、シェブロン型バッフルを入れた時の値である。高圧側で、排気速度が増加しているが、この割合は温度が低い場合がいちじるしい。粘性流領域になると、飛び込んでくる分子の数が多くなり、9°K ではそれに見合う充分な排気能力があるが、20°K では充分でないためであろう。

このシェブロン型バッフルの液体窒素冷却をやめると温度は2〜3度上昇するが、この程度では排気速度の変化はみられなかった。

次に排気容量の限界をしらべるために、3.3で説明したような方法で、多量の空気を導入してみた。その結果をFig. 13に示したが、400lの空気を凝固させても、排

Fig. 11 Pumping speed of different construction, A: without baffle, B: with a ring baffle, C: with a chevron baffle cooled by liquid nitrogen, D: pumping speed of a diffusion pump without operating of cryopump.

Table 2 Pumping speed of cryopump.

	Diameter (mm)	Surface (cm ²)	Transmission probability	Pumping speed (l/sec)	
				Theoretical	Experimental
A	175	240	—	2800	2500~3000
B	175	240	0.6	1730	1500~1800
C	145	165	0.25	480	400~500

気速度の変化は全くみられなかった。冷却フィンの表面積は2500cm²であるから、空気が平均に凝固したとし、固体の体積をほぼ1/1000と考えれば、1cm²あたり0.16ccの固体空気が凝固したことになり、厚みは約1.6mmとなる。このことから、銅板上の排気速度も、固体窒素上の排気速度も変わらないことがわかった。固体窒素表面の温度は、固体窒素の熱伝導率がわからないので明らかにすることができないが、銅の表面とあまり変わらないように思われる。

テスト・ドームとポンプ・ヘッドの容積は22lであるから、常温で18気圧の空気を排気したことになる。これはポンプ・ヘッドを常温にもどす時に注意しないと、危険である。このようなことから、これ以上の排気容量の限界をしらべることはしなかった。

6. 結論

以上、電気試験所に設置した、クライオポンプの構造および性能の概要について説明した。ポンプ・ヘッドと直結されているピストン型の膨脹エンジンは、300時間無事故で運転をしている。そして目標とした9°Kの冷

Fig. 12 Effect of fin temperature on the pumping speed.

封面を、膨脹エンジン始動後 2~3 時間でうることができた。また、極低温発生部全体を真空容器中に収めたことは、真空断熱のために非常に有効であった。さらに膨脹エンジンの負荷に誘導モータをもちいたことは、ほとんど無人での長時間の運転を可能にした。

真空ポンプとしての排気速度や排気能力は、現在の小型ポンプ・ヘッドで測定できる以上の充分な性能をもっていることがわかった。到達圧力としては、いわゆる超高真空をえることはできなかったが、水素ガスの凝固面への出入状態が、強い影響をあたえているのではないかと推察された。

現在大型のポンプ・ヘッドを設計中であるが、これによって、更に詳しい排気能力、排気機構、冷却面の性質などを追求する予定である。同時に、将来予想されているスペース・チャンパーや大形核融合装置の排気系として、実用化のための技術的な問題について検討を加える予定である。

7. あとがき

このポンプは、電気試験所における核融合研究の一環として、将来予想される大形核融合装置の排気系のため

Fig. 13 Relation between the pumping speed and the total volume of condensed gas.

に計画し、設計されたものである。なお、製作にあたって、日本酸素株式会社（製作時は日本理化工業株式会社で、その後日本酸素と合併した）の佐藤 禎 司 技術部次長、中川洋技術課長、石井寿一氏に非常なお骨折をいただいたことを深く感謝いたします。また、実験の遂行や、データの整理に協力して下さった当研究室の佐藤至正君に感謝いたします。

〔文献〕

- (1) B.M. Bailay and R.L. Chuan : 1958 5th Natl. Symp. Vac. Tech. Trans. 262 (1959)
- (2) 電試ニュース1964年 8 月号
- (3) 「真空」寄書投稿中
- (4) 電試ニュース 1956年 5 月号
- (5) F.S.J. Wang, J. A. Collins, Jr. and J. D. Haxgood : *Advances in Cryo. Eng.* 7 44 (1962)
- (6) B. A. Buffham, P. B. Henanlt and R. A. Flinn : 1962 Trans. 9th Natl. Vac. Symp. 205 (1962)
- (7) W. W. Stickney and B. B. Dayton : 1963 10th Natl. Vac. Symp. 105 (1963)
- (8) L. L. Levenson and N. Milleron : *Le Vide* 18, 12 (1963)