

NAL TR-981

ISSN 0389-4010

UDC 621.565

629.7.018

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-981

キセノンイオンエンジン試験用クライオパネルの開発

早川幸男・宮崎勝弘・北村正治

小浜寿夫・梶原堅一

1988年6月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. まえがき	1
2. 基本仕様と各種排気ポンプの比較	2
2.1 イオンエンジン作動時の真空圧	2
2.2 排気速度	2
2.3 市販真空ポンプ	2
2.4 キセノン専用真空槽内設置式クライオパネル	3
2.5 排気方式の選択	4
3. クライオパネルの設計	4
3.1 システム構成	4
3.2 排気能力	5
3.3 熱設計	7
3.4 クライオパネルの温度分布	11
3.5 配管による圧力損失と流量の決め方	13
3.6 詳細設計	13
4. クライオパネルの性能試験	17
4.1 冷凍機の性能	17
4.2 クライオパネルの温度特性	18
4.3 クライオパネルの排気特性	20
4.4 イオンエンジンの作動試験	22
5. まとめ	24
参考文献	24
補A. 排気速度計算における係数 a_{ij} の求め方	25
補B. 真空槽内における輻射熱伝達量の計算	26

キセノンイオンエンジン試験用クライオパネルの開発*

早川幸男** 宮崎勝弘** 北村正治**

小浜寿夫*** 梶原堅一†

Development of the Cryopanel for Tests of Xenon Ion Thrusters

Yukio HAYAKAWA, Katsuhiko MIYAZAKI, Shoji KITAMURA,
Toshio OBAMA and Kenichi KAJIWARA

Abstract

A cryopanel suitable for testing xenon ion thrusters was designed and tested. The target temperature of the cryopanel was below 50 K, since the vapor pressure of xenon was low enough at that temperature. This high-temperature-cryopanel has a cylindrical shape and was installed in the existing 1.5 m diameter vacuum chamber.

The cryopanel-alone-tests showed the attained temperature of the cryopanel was below 50 K and the cryopanel could evacuate xenon with a pumping speed of over 600,000 l/s. But while an ion thruster was operating, the speed fell to 40,000 l/s and the continuous-operation time was restricted to about 90 minutes.

It is very difficult to find other vacuum pumps that show the same performance in the same vacuum chamber the same cost.

1. まえがき

イオンエンジンは多量のガスを発生するにもかかわらず、その試験には 10^{-4} Pa 台程度の高真空環境を必要とする。即ち高い排気速度を有する真空ポンプが必要となる。従来の水銀を推進剤としたイオンエンジンの場合には、真空槽内に液体窒素冷却シュラウドを設けることにより、比較的容易にその環境を得ることができた。これは液体窒素の温度の面が水銀に対して低温凝縮効果を有している、即ちクライオパネルとして働いているからに他ならない。

最近、主に汚染の問題から水銀は敬遠され、キセ

ノンを始めとする不活性ガスを推進剤としたイオンエンジンの研究が盛んになってきている。当研究グループでも昭和59年度からキセノンを用いた実験を行なってきている。ところが液体窒素の温度(77.3 K)におけるキセノンの蒸気圧は約 4×10^{-1} Pa となり、イオンエンジンの試験に際しては液体窒素の温度の面はクライオパネルとして役に立たない。当初は止むを得ず2台の口径22インチの油拡散ポンプで排気を行っていたが、口径12 cmのイオンエンジン1台作動中の真空圧は 3.3×10^{-3} Pa までしか下らなかった。ちなみにこの時の推進剤供給量は7.5 SCCM (Standard Cubic Centimeter per Minute) で、真空ポンプのキセノンに対する排気速度は約 $3800 \text{ m}^3/\text{sec}$ であった。この様な高い背圧下において試験を行なうと、真空槽内からイオンエンジンの放電室へ逆流するキセノンの流量が供給流量と比べ

*昭和63年5月17日 受付

**宇宙研究グループ

***石川島播磨重工業(現:日産金属)

†宇宙開発事業団

て無視できず、試験結果に何らかの補正を施さねばならない。またたとえ補正したとしても、その方法が適正であるか否かは十分に低い背圧の下での試験で確認されなくてはならない。

以上の様な理由で高い排気速度を有する真空ポンプを入手することが必要になり、検討の結果クライオパネルを装着することが最善であるという結論に達した。実際にパネルを設計・製作し、性能試験を行なったところ、一応満足できる結果が得られ、高真空環境下においてイオンエンジンの試験を行なうことができた。しかしそれと同時にいくつかの不具合が見つかり、改良すべき課題となった。

2. 基本仕様と各種排気ポンプの比較

2.1 イオンエンジン作動時の真空圧

真空排気システムを設計するためには、先ずイオンエンジン作動時の真空圧を定めなくてはならない。これについては特に明確な基準はなく、低ければ低い程良いが、参考となる事例が2つあり、以下にそれらを示す。

- I. 従来の水銀を推進剤としたイオンエンジンの場合、作動時の真空圧はおよそ $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ Paであり、特に問題は起こらなかった。
- II. 逆流量と背圧はほぼ比例関係にあり、逆流量を供給流量に対して充分小さく、例えば1%以下とするには 9×10^{-4} Pa以下とすればよい。

結局目標の真空圧としては上記の1及び2を満たすべく、 1×10^{-4} Pa程度とすることにした。

2.2 排気速度

供給流量を Q 、真空圧を p とした時の排気速度 S は

$$S \equiv \frac{Q}{p} \quad (1)$$

で定義される。単位を適当に考慮すれば、供給流量が8.1 SCCMで真空圧が 1×10^{-4} Paの場合の排気速度は約77,000 ℓ/s となる。即ち約80,000 ℓ/s の排気速度を有する真空ポンプが必要ということになる。

ところで80,000 ℓ/s という排気速度はキセノンを対象とした場合のものであり、一般に市販の真空ポ

ンプのカタログでは窒素や水素に対しての排気速度しか表示されていないので、これ等を使用する場合には換算を必要とする。排気速度は一部の気体を除いておよそ分子の速度に比例する。即ちこの速度として最確速度¹⁾をとれば、

$$S \propto v_M = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad (2)$$

となる。ここで M は分子量を示す。即ち排気速度は $1/\sqrt{M}$ に比例し、窒素及びキセノンの分子量はそれぞれ28と131.3なので排気速度比は

$$\frac{S_{Xe}}{S_{N_2}} = \sqrt{\frac{M_{N_2}}{M_{Xe}}} \approx 0.46 \quad (3)$$

となる。従って市販の真空ポンプの窒素に対する排気速度に0.46を乗ずれば、そのポンプのキセノンに対する排気速度が大体分かる。

結局キセノン排気速度80,000 ℓ/s で排気する能力は、窒素を約170,000 ℓ/s の排気速度で排気する能力に匹敵する。即ち市販の真空ポンプを使用する場合には、この窒素で170,000 ℓ/s という値を目安にすればよい。

2.3 市販真空ポンプ^{1), 2), 3)}

現在市販されている真空ポンプの中で、充分な真空圧を得られ、尚且つある程度の大流量に耐えられるのは、クライオポンプ、ターボ分子ポンプ、油拡散ポンプの3種類しかない。これ等の原理及び特徴は次の通りである。

クライオポンプ⁴⁾：

20K前後に冷却された面に気体を凝縮させることによって排気する溜め込み式のポンプ。ヘリウム・水素・ネオンは20Kでは十分に蒸気圧が下がらないので、活性炭等による低温吸着排気を利用している。油を使用しないので清浄度は抜群であるが、溜め込み式なので大流量・長時間の運用には問題がある。単位面積当りの排気速度は3つのポンプの中で最大である。

ターボ分子ポンプ：

動翼を気体分子の速度と同等以上の速度で動かすことにより、分子の流れを一方に制限することによって排気する移送式のポンプ。起動・停止時に適当な操作をすれば清浄度はかなり良く保たれる。単

表1 吸気口径 450mmの市販各種ポンプの仕様
(価格は概算)

	クライオポンプ	ターボ分子ポンプ	油拡散ポンプ
排気速度 N ₂ (l/s)	7,100	4,900	9,300 (バップル無) 6,300 (バップル有)
H ₂ Ar	8,300 6,400	5,600	
到達圧力 Pa(Torr)	1.3×10^{-8} (1×10^{-6})	1×10^{-7} (7.5×10^{-10})	6.5×10^{-5} (5×10^{-7})
排気容量 H ₂ (std.1) Ar	10 2,000	∞ ∞	∞ ∞
電力 kW	5	3.2 (max)	6.5
価格 千円	7,500	8,000	800

位面積当たりの排気速度は最小で価格は最も高い。
油拡散ポンプ：

油蒸気の流れを作り、この中に飛び込んだ気体分子と一緒に流すことによって排気する移送式のポンプ。液体窒素冷却トラップ等の工夫をしない場合には、油の逆流により清浄度が悪くなる。単位面積当たりの排気速度はほぼクライオポンプのそれに匹敵する。価格は最も低く、可動部分がないので無保守で長寿命であるが、消費電力が大きい。

吸気口径が 450φ の上記 3 種ポンプについての仕様を表 1 に示す。価格については付属品の有無等によって変動があるので、およその目安である。

これらのポンプを使って先の 170,000 l/s という排気速度を得るために必要な台数と費用を表 2 に示す。この台数は単に 170,000 l/s を各ポンプの排気速度で割ったもので、実際には取り付け部において有限のコンダクタンスがあるのもっと多くの台数を必要とする。一般に真空ポンプを真空槽に取り付けた場合には、排気速度はカタログ値の 50% 程度に下がってしまう。また費用というのは台数×単価を示しており、真空槽のノズル加工費やゲート弁等の価格は含まれていない。

以上の事から、最も廉価な油拡散ポンプで排気システムを構成した場合でも主ポンプの費用だけで 3 千万円以上かかる事が分かる。

表2 170,000 l/s (N₂) の排気速度を得る
為に必要なポンプの台数と費用

	クライオポンプ	ターボ分子ポンプ	油拡散ポンプ
台数	24	35	19 (バップル無)
費用 千円	180,000	280,000	15,200

2.4 キセノン専用真空槽内設置式クライオパネル

キセノンの蒸気圧は 50.8K において 1.33×10^{-6} Pa (1×10^{-8} Torr)⁵⁾ になる。目標の真空圧は 1×10^{-4} Pa であるので、50K の面は十分にクライオパネルとしての機能を果たすことになる。キセノン分子の

$$\text{速度として平均速度 } \bar{v}^1) \left(= \int_0^{\infty} v f(v) dv = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_M : \right.$$

$f(v)$ は分布関数)をとれば、このクライオパネルの排気速度はおよそ

$$S = \frac{1}{4} k A \bar{v} = k A \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} \quad (4)$$

となる。ここで k は凝縮係数と呼ばれキセノン分子がクライオパネルに飛び込んだときに捕獲される確率で ≈ 1 である¹⁾。また A はクライオパネルの表面積である。温度 T を正確に見積もることは困難であるので、取りあえず常温と仮定すると、(4)式より

$$\frac{S}{A} \simeq 54,000 \text{ l/s m}^2$$

となる。従ってこの方式の場合、80,000 l/sの排気速度を得るために必要な面積は約 1.5 m²となる。この値はTの選び方によっても異なるし、クライオパネルの前面にシェブロン等を付けるか否かによっても異なるが、オーダー的には正しいと言える。

この方式の場合には、クライオパネルで排気できるのはキセノンと水くらいであり、その他の気体は前述の何れかのポンプに依らなくてはならない。しかしながらそのポンプの能力は、初期排気とリークや湧き出しに見合うだけあれば良いので、それ程大きなものは必要としない。この方式の場合、最も高価なのはクライオパネルを冷却するための冷凍機となる。50Kで約70Wの冷凍能力をもつ冷凍機の価格は、ヘリウム循環系を含めて約12,000,000円であった。これに今回製作したクライオパネルの価格を加えると、合計約20,000,000円弱であった。この価格には工事費等も含まれている。

2.5 排気方式の選択

実際に真空排気システムを設計する場合、既に述べた各種の排気方式の中から何れかを選択しなくてはならない。選択基準としては、真空槽内の清浄度や運転費等が挙げられるが、最も重大なのは建設費である。予算が建設費に達しないときには仕様を緩和して建設費を低減しなくてはならない。逆に予算の範囲内で最高性能のものを求めると考える事もできる。

現実的に獲得し得る予算として、単年度で約1千万円、2年にまたがる場合でも合計2千万円前後と見込んで再び表2を見ると、市販クライオポンプとターボ分子ポンプによる方式は既に軽く予算を上回り、問題外となっている事が分かる。(市販クライオポンプの場合、もっと口径の大きいものを使えば若干費用が下がるが大差はない。)油拡散ポンプの場合でも、口径の大きいものを使用すれば若干は費用が下がるが、ゲート弁の費用を含めれば裕に3千万円は超える。さらに2.3節に記した様に、排気速度としてカタログ値の50%をとればこの倍の費用がかかる。その上これだけ多くの油拡散ポンプを使用する

ためには、かなり大型の真空槽を製作しなくてはならず、これにもかなりの費用を必要とする。また費用の問題は別としても、バッフルを使用せずに油拡散ポンプを使用することは清浄度の点から望ましくなく、バッフルを付けると排気速度が下がるため更に多くの台数を必要とする。

以上の理由により、市販真空ポンプで目標排気速度を達成する事は不可能であることが分かる。目標を4分の1に下げても極めて困難であると言える。

これに対してキセノン専用クライオパネルの場合には、幸いにも現有の真空槽と真空ポンプがそのまま使用できる為に、新たに必要なものとしては冷凍機とクライオパネルだけなので費用としては2千万円以下となる。性能面からは未知の点が多く、目標性能が確実に得られるという保証はないが、主に費用の点からこの方式を採用した。

3. クライオパネルの設計

3.1 システム構成

図1に現有の真空排気システムの構成図を示す。主真空ポンプは2台の口径22インチの油拡散ポンプである。キセノン専用クライオパネルの場合、キセノンと水を除く大部分の気体の排気のために真空ポンプが必要となるので、この油拡散ポンプをそのまま使用する。但し電力とスペースの都合上、1台は取り外す。現有の装置の場合の到達真空圧は約 2.7×10^{-5} Pa (2×10^{-7} Torr)であったので、油拡散ポンプ1台を外した場合のそれはこの倍程度になると考え

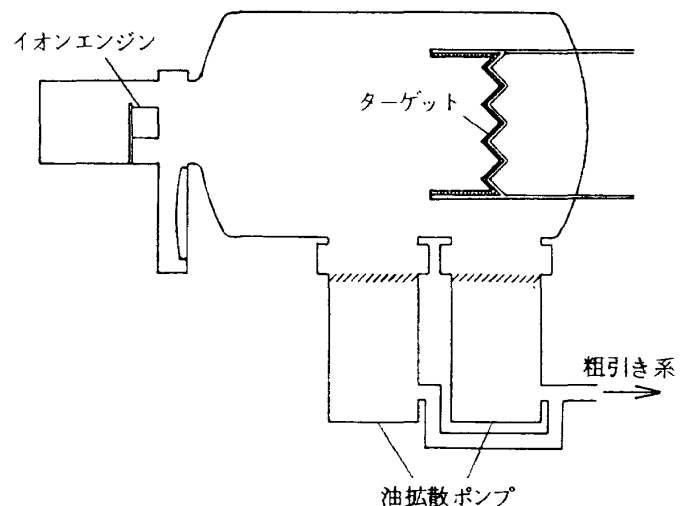


図1 現有真空排気システムの構成図

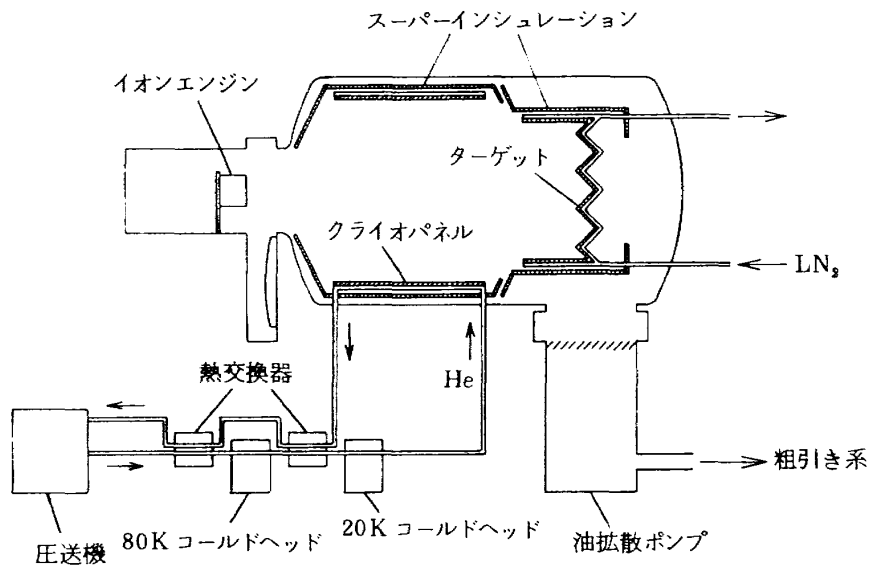


図2 クライオパネル設置後のシステムの構成図

られるが、イオンエンジン作動時の目標真空圧と比べて1桁小さいので、特に問題はない。

図2にクライオパネルを設置した場合のシステムの構成図を示す。クライオパネルは円筒型で、この中をイオンエンジンから出たキセノンイオンが通り抜ける。このキセノンイオンはターゲットに命中して電荷を失い、中性原子となって真空槽内に拡散してゆく。イオンエンジンに供給されるキセノンガスの内、約90%がイオンとなってターゲットに向かい、残りが中性原子のままグリッドから漏れて真空槽内に拡散してゆく。ここで問題としている真空圧はイオンエンジン近傍のものであり、クライオパネルをこの様に円筒型にしてイオンエンジンとターゲットの中間に設けた理由は、十分な面積を稼ぐと共に、ターゲットから拡散してくる大部分の中性原子をイオンエンジンに到達する前に捕獲しようとする為である。

クライオパネルの外側には、スーパーインシュレーションと呼ばれる断熱層があり、外部からの熱侵入を低減して冷凍機の熱負荷を少なくしようとしている。これは輻射率の低いフィルムを適当な間隔を空けて多層重ねたもので、輻射熱伝達を極めて少なく抑え込むことができる。またクライオパネルの内側には何もなく、パネル面が真空層中に露出している。一般的にはクライオパネルの表面には液体窒素温度程度の輻射シールドを設けるが、本件では排気

速度を稼ぐ為とイオンビームが通過するのに十分な内径を得る為に輻射シールドは設けていない。このためにターゲットを液体窒素で冷却して、クライオパネルへの熱侵入を減らす様に努めている。ターゲットはイオンビームにより加熱され、これだけで約500Wの入熱量となる。スーパーインシュレーションはターゲットの外側にも設けられている。但しターゲットの裏側は排気コンダクタンスを稼ぐために開放している。

3.2 排気能力

クライオパネルの設計で問題となるのは、排気能力と熱設計である。ここでは先ず排気能力について考える。

取り敢えずクライオパネルの表面温度はキセノン排気するに十分な温度まで下がっていると仮定すると、問題となるのはパネルの面積である。パネルの面積が増えれば排気速度も増えるが、同時に必要な冷凍能力も増えてしまう。実際には冷凍機の能力は決まっているので、その範囲内でどれだけの面積を獲得できるかということになる。これについての説明は次節に譲る。

ところで2.4節にこの種のクライオパネルの排気速度について若干示したが、今回製作したパネルは形状と使用法が特殊なので、排気速度についてもう少し詳しく検討する必要がある。そこで(4)式につい

て見直しを試みる。

まず(4)式では等方性の分子運動と、それを乱さない程度の充分小さいパネル面積を仮定している。ところが今回製作したクライオパネルでは、分子運動は等方性とは言い難く、形状が特殊で面積も大きくなるので排気速度が単純に面積に比例するとは言えない。即ち(4)式における $\frac{1}{4}A$ について見直すことが必要になる。 \bar{v} についてさらに複雑で、排気速度について正確に見積るためにはモンテカルロシミュレーション等を用いなくてはならない。しかしながらここではその様な手段は用いず、(4)式よりは若干精密な議論を試みることにする。

図3に真空槽内の気体分子の移動のモデルを示す。真空槽内の圧力は極めて小さいので、流れは全て分子流と考えられる。図中に示した $q_1 \sim q_3$ はそれぞれイオンエンジンから出たガス流量、ターゲットから出たガス流量、イオンエンジンの後の副真空槽に出入りするガス流量を示す。また p は副真空槽内の圧力である。本件の様な特殊な真空槽では、真空槽内各部の圧力が一定であるとは考え難いので、代表的圧力として副真空槽内の圧力を選んだ。これは問題としているのがイオンエンジン近傍の圧力であることから、妥当な選択であると言える。

この $q_1 \sim q_3$ によって示される真空槽内の流れは、定常状態において次の連立方程式を満たす。

$$q_1 = a_{11} q_1 + a_{12} q_2 + a_{13} q_3 + 0.1 Q \quad (5-1)$$

$$q_2 = a_{21} q_1 + a_{22} q_2 + a_{23} q_3 + 0.9 Q \quad (5-2)$$

$$q_3 = a_{31} q_1 + a_{32} q_2 + a_{33} q_3 \quad (5-3)$$

ここで例えば $a_{11} q_1$ は q_1 の内、壁にぶつかって再び

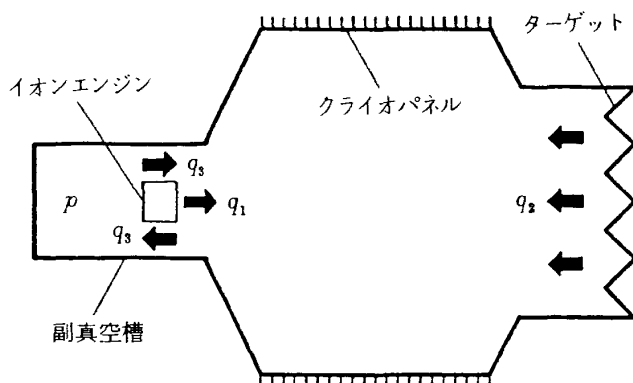


図3 真空槽内の気体分子移動のモデル

イオンエンジンの所へ戻ってくる流量を表わし、また $a_{12} q_2$ は q_2 の内、イオンエンジンの所へ行く流量を表わす。また Q はイオンエンジンに供給される流量で、 $0.1 Q$ 及び $0.9 Q$ は90%の推進剤利用効率に相当する。即ち供給流量の90%がイオンビームとなってターゲットに当たるので $0.9 Q$ が(5-2)式の右辺に現われ、残りの10%が中性ガスのままイオンエンジンから出て行くので $0.1 Q$ が(5-1)式の右辺に現われる。(5)式は簡単な連立一次方程式で、 a_{ij} を全て決めれば $q_1 \sim q_3$ が全て Q に対して求まる。

ところで q_3 は、副真空槽内の温度と圧力から次式で表わされる。

$$q_3 = \frac{1}{4} p A \bar{v} \quad (6)$$

但し A は副真空槽の断面積からイオンエンジンの断面積を引いたものである。これより直ちに

$$p = \frac{4 q_3}{A \bar{v}} \quad (7)$$

となる。(1)式に(7)式を代入すると

$$S = \frac{Q}{p} = \frac{Q A \bar{v}}{4 q_3} \quad (8)$$

となる。即ち、(5)式を解いて得た q_3 を(8)式に代入すると排気速度が求まる。

次に a_{ij} を求める。ところで図4に示す様に、微小面を通過してある特定の方向へ向かう分子流は次式に比例する。

$$dq = \cos \theta d\Omega \Delta S \quad (9)$$

ここで θ は微小面の法線ベクトルと分子流の方向の成す角、 $d\Omega$ は微小立体角、 ΔS は微小面の面積で

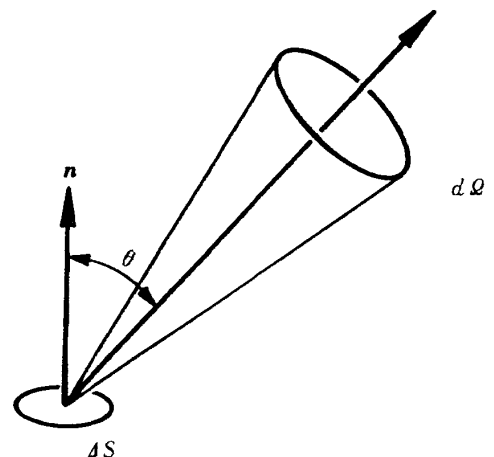


図4 分子流の方向依存性

ある。(9)式は分子運動の等方性が保証されている場合にのみ成り立つ式であり、本件の様な場合には分子間の衝突が稀で壁の温度も局所的に異なるので一般に(9)式は成り立たないと考えられる。しかしながらあるなめらかな仮想面を考え、この面の上流側に面する壁がほぼ等温と見做せるなら、この面より下流に向かう分子流を(9)式で表わすことはそう悪い近似ではないと考えられる。本件の場合、 q_2 と q_3 がこの考え方により(9)式で近似される。 q_1 については実際はかなり複雑であるが、単なる固体表面からのガス放出と見做すことにする。

具体的な a_{ij} の求め方は、例えば a_{21} であればイオンエンジンの位置からターゲットを見込む角を求め、その角内で dq を積分するという風にする。この「見込む角」というのは、同じイオンエンジンでも中心軸からの距離によって変わるが、簡単のために全て中心軸からのものを使用する。これにより全ての a_{ij} が一次積分のみで求まる。実際に用いた積分式は次の通りである。

$$\int dq = 2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta \sin \theta d\theta \Delta S \quad (10)$$

ここで θ_1 と θ_2 はそれぞれ見込み角の下限と上限、2は $\theta_1=0$ 、 $\theta_2=90^\circ$ としたときに ΔS の係数が1になるために必要な係数である。個々の a_{ij} の求め方は補章に譲ることにして、これらの値のみを示す。これらは後に実際に製作したものについて求めたものである。(図14参照)

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.035 & 0.002 & 0.035 \\ 0.057 & 0.022 & 0.057 \\ 0.325 & 0.024 & 0.325 \end{pmatrix}$$

これらの値を(5)式に代入してこれを解くと、

$$q_3 = 11.7 Q$$

となる。(8)式における \bar{v} の計算に際しては、副真空槽が常温であることから明らかに温度として常温ととることができ、

$$\bar{v} = 210 \text{ m/s}$$

となる。また $A = 0.212 \text{ m}^2$ であるので、これらを(8)式に代入して

$$S = 130,000 \text{ l/s}$$

を得る。これは80,000 l/s という目標を大きく上回り、充分満足のいく値である。

3.3 熱設計

ここでいう熱設計とは、クライオパネルを既定の温度にした場合の侵入熱量は幾らかという話で、熱関連のその他の問題、例えばパネル上の温度分布等の話は次節に譲る。

真空槽内の圧力が十分に低いため、クライオパネルへの熱侵入は、支持台からの熱伝導を除くと殆んど全てが輻射熱伝達に依るものである。ここでは先ず輻射熱伝達について議論し、後に熱伝導について述べる。

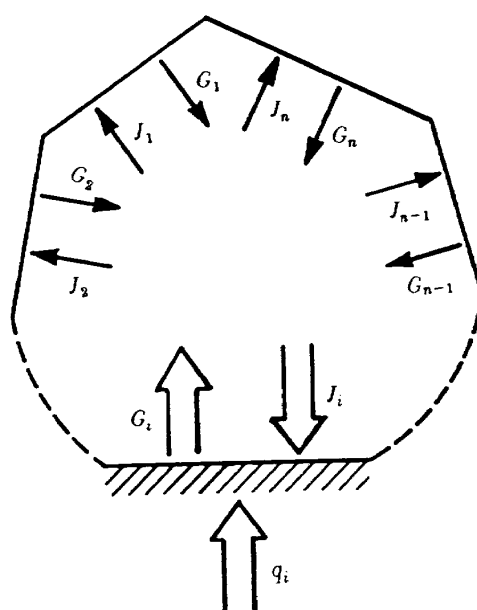


図5 多面閉空間系内の面*i*における熱平衡

図5に示した様に、 n 個の面から成る閉空間系で面*i*における熱平衡は次式で表わされる。

$$q_i = G_i - J_i \quad (11)$$

G_i : 面*i*からの輻射熱量(自己輻射と外来輻射の反射の和)

J_i : 面*i*への周囲面からの輻射の和

q_i : 面*i*を通しての供給熱量

この中の G_i 及び J_i はそれぞれ次式で表わされる。

$$G_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 A_i + (1 - \epsilon_i) J_i \quad (12)$$

$$J_i = \sum_{j=1}^n G_j F_{j+i} \quad (13)$$

ϵ_i : 面*i*の輻射率

σ : ステファン-ボルツマン定数

T_i : 面*i*の温度

A_i : 面*i*の面積

F_{j-i} : 面 j からの輻射に対し、面 j から面 i に到達する輻射の割合

但し、(12)式では各面の輻射率及び温度はそれぞれの面内で一定であることを仮定している。さらに各面が灰色体であり、輻射率が波長に依らず一定であると仮定している。また以降では簡単のため、面 i からの輻射強度の方向分布は、面 i の方向のみに依って決まるものと仮定する。これは反射が完全に乱反射であることを意味し、一般に現実とは若干異なっている。

(13)式を(11)式及び(12)式に代入するとそれぞれ、

$$q_i = G_i - \sum_{j=1}^n G_j F_{j-i} \quad (14)$$

$$G_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 A_i + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^n G_j F_{j-i} \quad (15)$$

となる。従って ε_i , T_i , F_{j-i} を決めれば(15)式より G_i が求まり、それらを(14)式に代入すれば q_i が求まる。この様にすればクライオパネルに侵入する輻射熱量を求めることができる。

その熱量を計算する為のモデルを図 6 に示す。具体的な計算の仕方は補章に譲るとして、計算結果を表 3～5 に示す。各面の輻射率は測定器がない為に実際に使用する材質に対する値を文献^{(6),(10)} から引用した。またスーパーインシュレーションの温度も

正確には分からないので適当に仮定した。さらにイオンエンジンの部分については、計算した結果の放出熱量が消費電力より若干大きめと思われる程度なので、安全側から見てこれで良しとした。表 3～5 より、クライオパネルに侵入する輻射熱量は最小で 30 W, 最大で 38 W ということになる。

この他にもクライオパネルにはスーパーインシュレーションを通して外側からも輻射熱が入ってくる。輻射率がそれぞれ ε_1 及び ε_2 で温度がそれぞれ T_1 及び T_2 の無限平行平板間の単位面積当たりの輻射熱伝達量は

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (16)$$

で与えられる⁶⁾。スーパーインシュレーションの層数を n , 輻射率を ε とすると、ここを通過する熱量は(16)式より

$$q = \frac{\varepsilon}{2 - \varepsilon} \sigma \frac{T_1^4 - T_n^4}{n - 1} \quad (17)$$

となる。ここで T_1 はスーパーインシュレーションの一番外側の層の温度, T_n は一番内側の層の温度である。 $T_1 = 298 \text{ K}$, $T_n = 50 \text{ K}$ とした場合の通過熱量を図 7 に示す。これによると $\varepsilon = 0.1$, $n = 40$ のときの熱量は約 0.6 W/m^2 となっている。

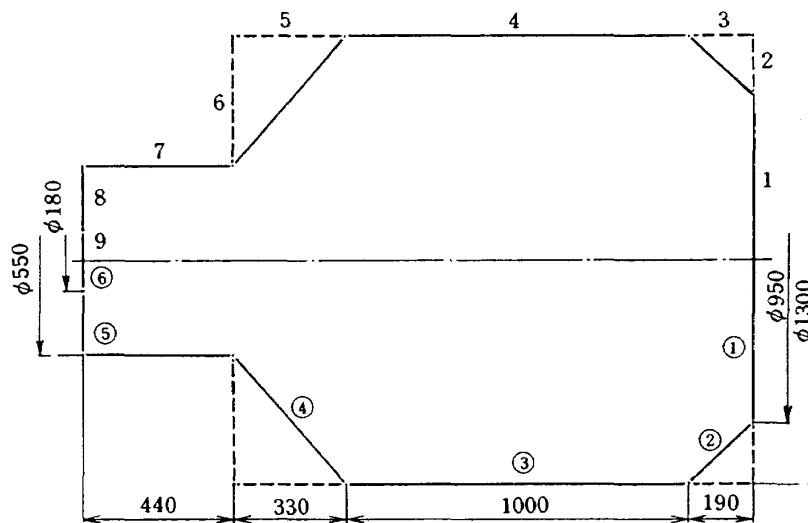


図 6 真空槽内の輻射熱伝達量計算のモデル (寸法単位は mm)

①: ターゲット, ②, ④: スーパーインシュレーション内面,
③: クライオパネル, ⑤: 真空槽内面, ⑥: イオンエンジン前面
丸なし数字が表 3～5 の面番号に対応しており, 計算の都合上②は 2 と 3 に, ④は 5 と 6 に置き換えている。

表3 真空槽内の輻射熱伝達
(スーパーインシュレーション内面の輻射率を変化させた場合)

面番号	輻射率	面番号2,3,5,6 の温度 (K)	熱伝達量 (W) (正は放熱, 負は吸熱)				
			温度 (K)	120	140	160	180
1	0.8	100	-42.1	-43.5	-45.7	-48.9	-53.3
2	0.1		-4.1	-3.6	-2.9	-1.9	-0.5
3	0.1		-4.4	-3.9	-3.0	-1.7	0.1
4	0.1	50	-30.5	-31.5	-33.0	-35.1	-38.2
5	0.1		-9.6	-8.6	-7.1	-5.0	-2.0
6	0.1		-6.1	-5.3	-4.1	-2.3	0.1
7	0.3	298	15.9	15.6	15.2	14.6	13.8
8	0.3	298	7.3	7.3	7.1	6.9	6.6
9	0.5	573	73.6	73.6	73.6	73.5	73.5

表4 真空槽内の輻射熱伝達
(ターゲットの輻射率を変化させた場合)

面番号	温度 (K)	面番号1 の輻射率	熱伝達量 (W) (正は放熱, 負は吸熱)				
			輻射率	0.5	0.6	0.7	0.8
1	100	0.1	-31.3	-35.8	-39.8	-43.5	-46.9
2	140		-4.3	-4.1	-3.8	-3.6	-3.4
3	140		-4.9	-4.5	-4.2	-3.9	-3.6
4	50	0.1	-36.9	-34.9	-33.1	-31.5	-30.0
5	140	0.1	-10.2	-9.6	-9.1	-8.6	-8.2
6	140	0.1	-6.7	-6.2	-5.7	-5.3	-4.9
7	298	0.3	14.3	14.8	15.2	15.6	16.0
8	298	0.3	6.7	6.9	7.1	7.3	7.4
9	573	0.5	73.5	73.5	73.6	73.6	73.7

表5 真空槽内の輻射熱伝達
(ターゲットの温度を変化させた場合)

面番号	輻射率	面番号1 の温度 (K)	熱伝達量 (W) (正は放熱, 負は吸熱)				
			温度 (K)	80	90	100	120
1	0.8	140	-44.7	-44.2	-43.5	-42.5	-41.2
2	0.1		-3.5	-3.6	-3.6	-3.7	-3.7
3	0.1		-3.7	-3.8	-3.9	-3.9	-4.0
4	0.1	50	-30.9	-31.2	-31.5	-31.9	-32.5
5	0.1	140	-8.5	-8.5	-8.6	-8.8	-8.9
6	0.1	140	-5.2	-5.2	-5.3	-5.4	-5.6
7	0.3	298	15.8	15.7	15.6	15.5	15.4
8	0.3	298	7.3	7.3	7.3	7.2	7.2
9	0.5	573	73.6	73.6	73.6	73.6	73.6

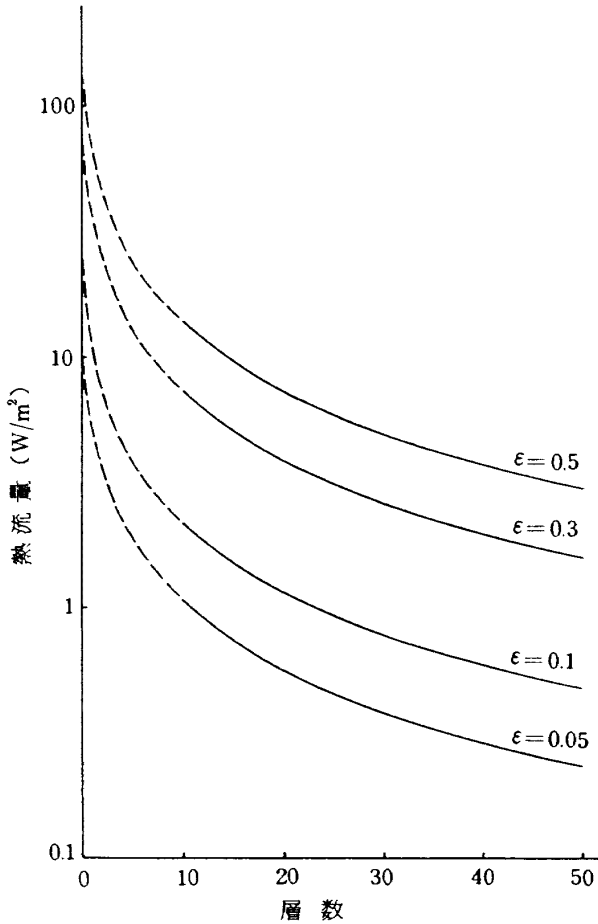


図7 スーパーインシュレーションの熱流量

実際には施工上の問題で層間での接触もあるし、層の表と裏で温度差ができるであろうから、上記の値にはある程度の誤差が含まれていると考えられる。しかしながら $T_1 = 285\text{K}$, $T_n = 77\text{K}$, $n = 40$ の場合に、熱量が約 0.6W/m^2 という実験結果も報告⁷⁾されており、施工上の不具合を見込んででも40層で 1W/m^2 以下にはなると思われる。この40という値は、層数をこれ以上増してもあまり効果はないということから選んだものである。尚、この場合の層の厚さは約15mmとなっている。

結局スーパーインシュレーションの外側表面積は図14より約 6.5m^2 であるので、外側からの侵入熱量は 6.5W 以下ということになる。(実測によるとスーパーインシュレーションの芯に相当するアルミの円筒の温度は約 140K であった。これを用いるとクライオパネルとこのアルミの円筒の間の輻射熱伝達は約 1.1W/m^2 であり、総量で 5W 以下となる。)

最後に支持台からの熱伝導について考える。図14、図15に示した様に、クライオパネル本体はスーパー

インシュレーションの芯であるアルミの円筒部から支持しており、この円筒部を真空槽壁から支持している。各支持台を流れる熱流量は、

$$q = k \frac{A}{l} \Delta T \tag{18}$$

で表わされる。ここで k は支持台材料の熱伝導率、 A は支持台の断面積、 l は長さ、 ΔT は支持台両端の温度差である。クライオパネルに流入する熱量を求めるためには、中間のアルミの円筒部の温度を知らなくてはならない。しかしながらこの温度は輻射熱伝達も含めた場合の熱平衡から決まるものであり、前に述べた通りスーパーインシュレーションを通過する熱流量は正確には求まらないので、結局この温度も正確には求まらない。そこでここではクライオパネルに流入する熱量をアルミの円筒の温度の関数として評価するに留まる。支持台の材質はテフロンとした。テフロンの熱伝導率は温度によって若干変化するが、概そ 0.28W/mK ⁸⁾ である。また実際に用いた支持台の形状は図15に示した様に複雑であるので、ここでは外径 40mm で長さ 40mm の丸棒とし、これを4本用いた場合について考える。図8にその結果を示す。アルミの円筒の温度は輻射熱の平衡だけから考えると 120K 以下まで下がると考えられ、伝導によって流入する熱量は余裕をみても 4W 以下になると考えられる。(実測によるとアルミの円筒

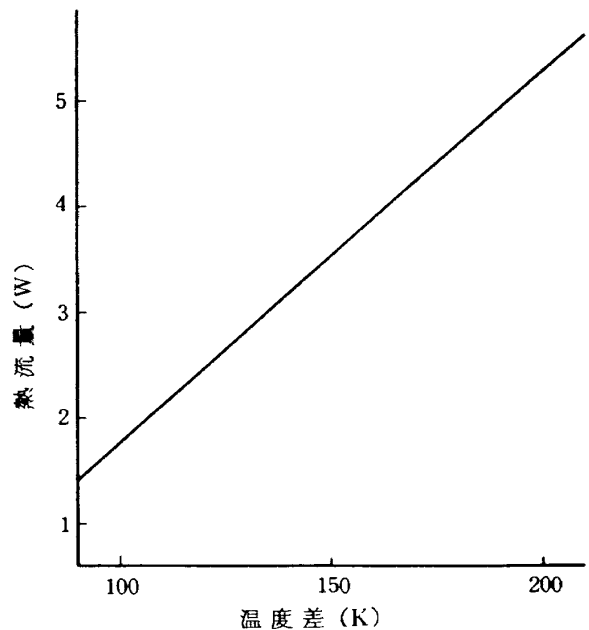


図8 伝導によりクライオパネルに流入する熱量

の温度は約 140 K なので、伝導熱量は約 3.2 W となる。但しこの温度は支柱の近傍の値ではなく、円筒にはかなりの温度分布があるのであまり正確ではない。しかしながら円筒の温度を 120 K としても熱量は 4 W を下回っている。)

非常に雑ではあるが、以上の結果の値を積み上げると、クライオパネルに流入する熱量は大体 40~48 W 程度ということになる。

ところで先に輻射による内側からの熱量を求めた際、スーパーインシュレーションに流入する熱については何も述べなかったが、これらは全てクライオパネルかターゲットに吸収される筈である。図 6 でいうと面番②の一部と④の全部に流入した熱がクライオパネルに回り込む。大雑把に②の半分がクライオパネルの負担とすると、クライオパネルの全熱負荷は表 3~5 より約 40~60 W となり、先に求めた結果と比べて誤差範囲が大きくなっている。これは各面の輻射率と温度の正確な値が不明のため、各値を適当に振った結果であり、先の結果と整合するものが真実に近いと考えることもできるし、安全側を採って最大 60 W と考えることもできる。ここでは必ずしも 100% の成功を期待しないという立場から、前者の最悪値である 48 W を代表値とすることが適当と思われる。

3.4 クライオパネルの温度分布

クライオパネルは円筒上の銅板の外側に銅管をロウ付けした構造とし、この銅管の中を低温のヘリウムが流れる様になっている。このために配管の近傍では温度が低く、配管から離れたところでは温度が高くなり、さらに配管内のヘリウムと配管の間でも温度差が生じる。ここではこれ等の事について考える。

クライオパネルの温度分布を求めるためのモデルを図 9 に示す。ここで l は配管の間隔、 t はパネルの板厚である。パネルの材質の熱伝導率を κ 、単位面積当たりの流入熱量を \dot{q} とすると、パネルの温度分布は次式で与えられる。

$$T = T_0 - \frac{1}{2} \frac{\dot{q}}{\kappa t} x^2 \quad (19)$$

ここで T_0 というのは $x=0$ の所の温度で、配管の位

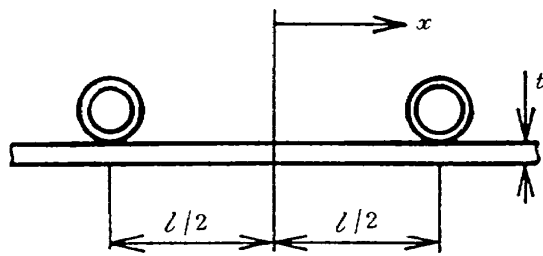


図9 クライオパネルの温度分布の計算モデル

置との温度差は

$$\Delta T = T_0 - T_{x=l/2} = \frac{1}{2} \frac{\dot{q}}{\kappa t} \left(\frac{l}{2}\right)^2 \quad (20)$$

となる。この温度差を具体的な数値を代入して求めたのが図 10 である。但し銅の熱伝導率として $\kappa=1100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (50 K)⁹⁾、 $\dot{q}=15 \text{ W/m}^2$ としている。これより板厚が 3 mm の場合、配管の間隔が 40 cm 以下ならばパネル上の温度差は 0.1 K 以下になることが分かる。

次に配管内のヘリウムとパネル間の温度差について考える。配管の材質は銅で銀ロウを用いてロウ付けするので、この温度差の大部分は配管内の境界層によって生じると考えられる。この境界層における

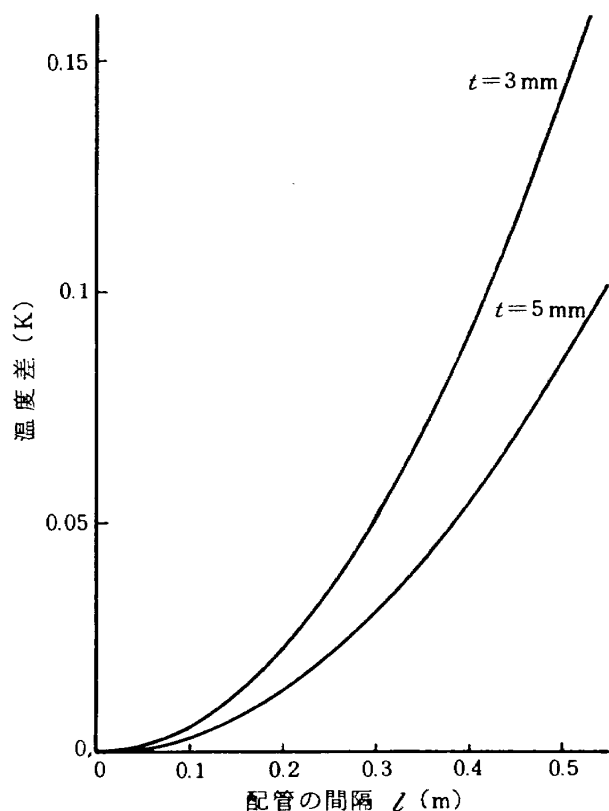


図10 クライオパネル上の温度差

平均熱伝達率は次式で表わされる¹⁰⁾。

$$\alpha = \frac{N_u \lambda}{d} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (21)$$

但し N_u はヌセルト数で、 λ は流体の熱伝導率、 d は管の内径である。ヌセルト数はレイノルズ数 R_e とプラントル数 P_r によって

$$N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^{0.4} \quad (22)$$

と表わされる。但し

$$R_e = \frac{4 \dot{m}}{\pi d \eta} \quad (23)$$

$$P_r = \frac{C_p \eta}{\lambda} \quad (24)$$

で、 \dot{m} は質量流量、 η は粘性係数、 C_p は定圧比熱である。ヘリウムの 50 K における物性値は、 $\eta = 6.45 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{11)}$ 、 $C_p = 5.23 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}^{11)}$ 、 $\lambda = 4.75 \times 10^{-2} \text{ J/m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{11)}$ であるので、(24)式より $P_r = 0.71$ となる。また管の内径を $\phi 8$ とした場合の R_e は(23)式より

$$R_e = 2.5 \times 10^7 \dot{m} \quad (23')$$

となるので、これらを(22)式に代入すると、

$$N_u = 1.7 \times 10^4 \dot{m}^{0.8} \quad (22')$$

となる。さらに(22')式を(21)式に代入すると

$$\alpha = 1.0 \times 10^5 \dot{m}^{0.8} \quad (21')$$

を得る。従って管の単位長さ当たりの内表面積を A とし、ここでの伝熱量を \dot{q} とすると、温度境界層で生じる温度差は

$$\Delta T = \frac{\dot{q}}{A \alpha} = 4.0 \times 10^{-4} \frac{\dot{q}}{\dot{m}^{0.8}} \quad (25)$$

となる。 $\dot{q} = 3 \text{ W}$ のときの ΔT を図 11 に示す。この 3 W というのは、クライオパネルの入熱量が 60 W で、配管の間隔が 0.2 m の場合の平均値である。

ところで冷媒のヘリウムは、配管内を流れる過程で熱を吸収し、次第に温度が上がってくる。このためにクライオパネルに温度分布を生じる。パネル配管の入口と出口における冷媒の温度差は次式で与えられる。

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{C_p \dot{m}} \quad (26)$$

但し \dot{Q} はクライオパネルの入熱量である。 $\dot{Q} = 60 \text{ W}$ のときの ΔT を図 12 に示す。

図 11 と図 12 で \dot{m} の範囲が異なるのは、パネル上で

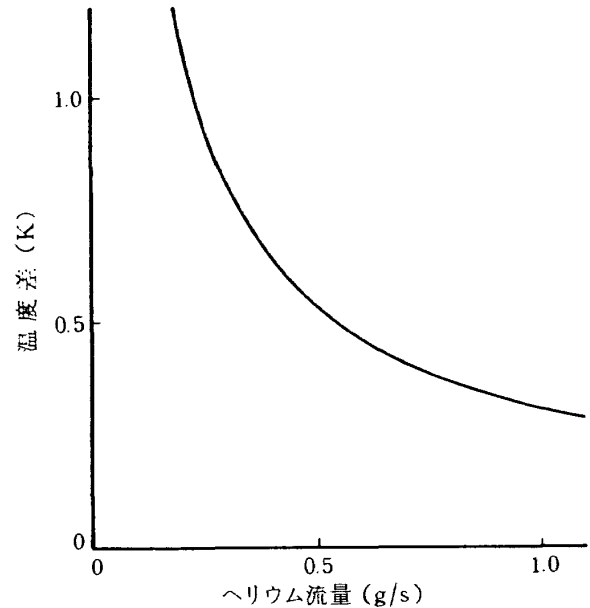


図 11 冷却配管内の温度境界層での温度差

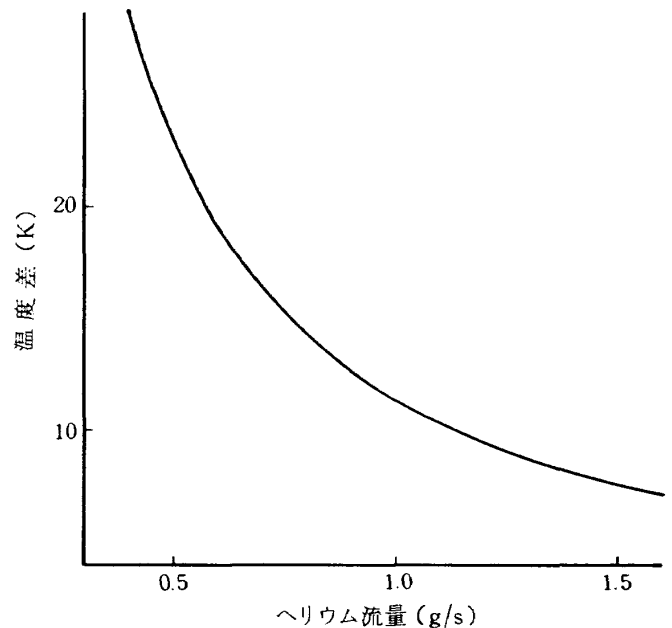


図 12 冷却配管の出入口における冷却ガスの温度差

流路を二分しているからである。図 11 と図 12 の ΔT は、何れも冷凍機から出てくる冷媒の温度がパネルの規定温度よりどれだけ低くなければならないかということを示している。冷凍機の能力は動作温度が高くなる程高くなるので、以上の結果は何れも流量を多くした方が有利である事を示している。一方流量を多くすると圧力損失が増え、圧縮機の能力や配管の耐圧からその量は制限される。次にこの事について考える。

3.5 配管による圧力損失と流量の決め方

流れが乱流のときの管内の圧力降下は次式で与えられる⁶⁾

$$\Delta p = f \frac{l}{d} \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (27)$$

ここで f は摩擦係数で図⁶⁾より求められる。また l は管の相当長、 d は管の内径、 ρ は密度、 u_m は平均流速である。使用した管は内径 $\phi 8$ の銅の引き抜き管で、50Kにおけるヘリウムの物性値を使って先の図より f を求めると、概そ

$$f = -20 \dot{m} + 0.039 \quad (28)$$

で表わされる。但し \dot{m} は二分割した流路の内の一方向の流量を表わす。また l は直線部の長さその他の部分の直線相当量の和で表わされ、実際に製作したクライオパネルにおいては二分割した流路の片方で概そ $l = 26 \text{ m}$ となる（但しパネルに密接した部分のみ）。(28)式を(27)式に代入し、 u_m の代わりに \dot{m} を用いて表わすことにすれば(27)式は

$$\Delta p = (-20 \dot{m} + 0.039) \cdot 6.4 \times 10^{11} \frac{\dot{m}^2}{\rho} \quad (29)$$

となる。 $\rho = 0.975 \text{ kg/m}^3$ (50K, 506625 Pa) のときの Δp を図13に示す。これよりパネル上の配管部分における圧力損失は、流量の増加と共に急激に増加するが、それでも尚絶対量としては小さく殆んど無視できる。この部分だけを考えた場合、ヘリウムの圧力を上げることにより ρ を大きくして流量を増

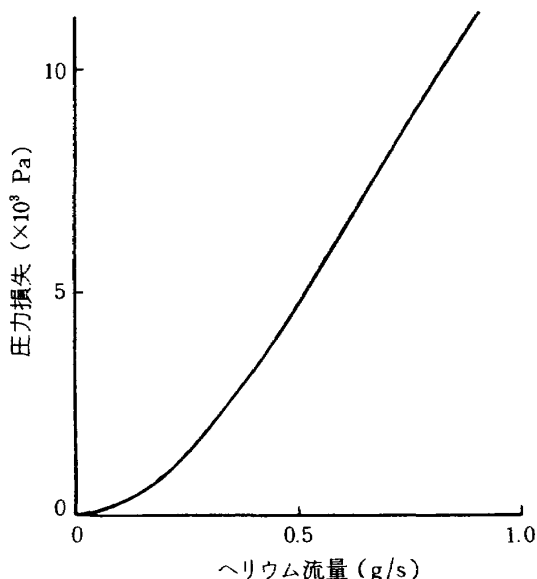


図13 冷却配管の圧力損失

やすことが得策と言える。しかしながら配管の耐圧やシステムとしての制限から自ずと限界がある。結局のところ流量は、システム内の最大圧力がいかなる場合でも制限値（例えば高圧ガス取締法による 10 kg/cm^2 ）を超えないように実験的に決めることが最良と言える。

3.6 詳細設計

クライオパネル及びその周辺の組立図を図14及び図15に示す。クライオパネルの材質としては、温度の均一化という点で低温下で熱伝導率が十分に高い物が望ましい。容量に入手可能な物としてはアルミ、銅及びそれらの合金に限られる。構造強度及び耐スパッタ性の点ではアルミの方が有利であるが、製作の点で銅の方が有利であるので、本件では銅を使用した。配管をパネル上に這わせる際に、銅であれば配管を自在に曲げる事ができるし、ロウ付けによって両者間の熱伝達を良好に行なう事ができる。パネルは板厚 3 mm 、長さ 1 m 、内径 1.3 m の円筒で、形状を維持する為に円框が2ヶ所に取り付けられている。このパネル上に外径 10 mm 、内径 8 mm の冷却配管を図の様に戻してロウ付けしている。配管内の圧力損失を減らし、入口と出口での温度差を小さくする為に流路を上側と下側に2分割しているが、特に流量の分配については考慮していない。圧力損失の点から言えば、この様にするよりも螺旋状にクライオパネルに巻き付ける方が望ましいが、製作が難しいので断念した。パネルの内側には輻射率を下げる為にニッケルメッキを施している。製作したパネルの写真を図16に示す。

スーパーインシュレーションは基本的にアルミ製の円筒状の芯にアルミ蒸着ポリエステルフィルムを40重に巻いたものである。芯の両端部は円錐状になっており、板厚は 3 mm であるがこのままで形状を維持するだけの剛性は有している。フィルムには約 10 cm 間隔で突起があり、スペーサは使用していない。この為にスーパーインシュレーションのフィルム40層の厚みは約 5 mm となっている。ターゲットの周囲にもスーパーインシュレーションを施してあるが、組み立ての都合上クライオパネル周りの部分と分離しており、両者の接合部では断熱が良好であ

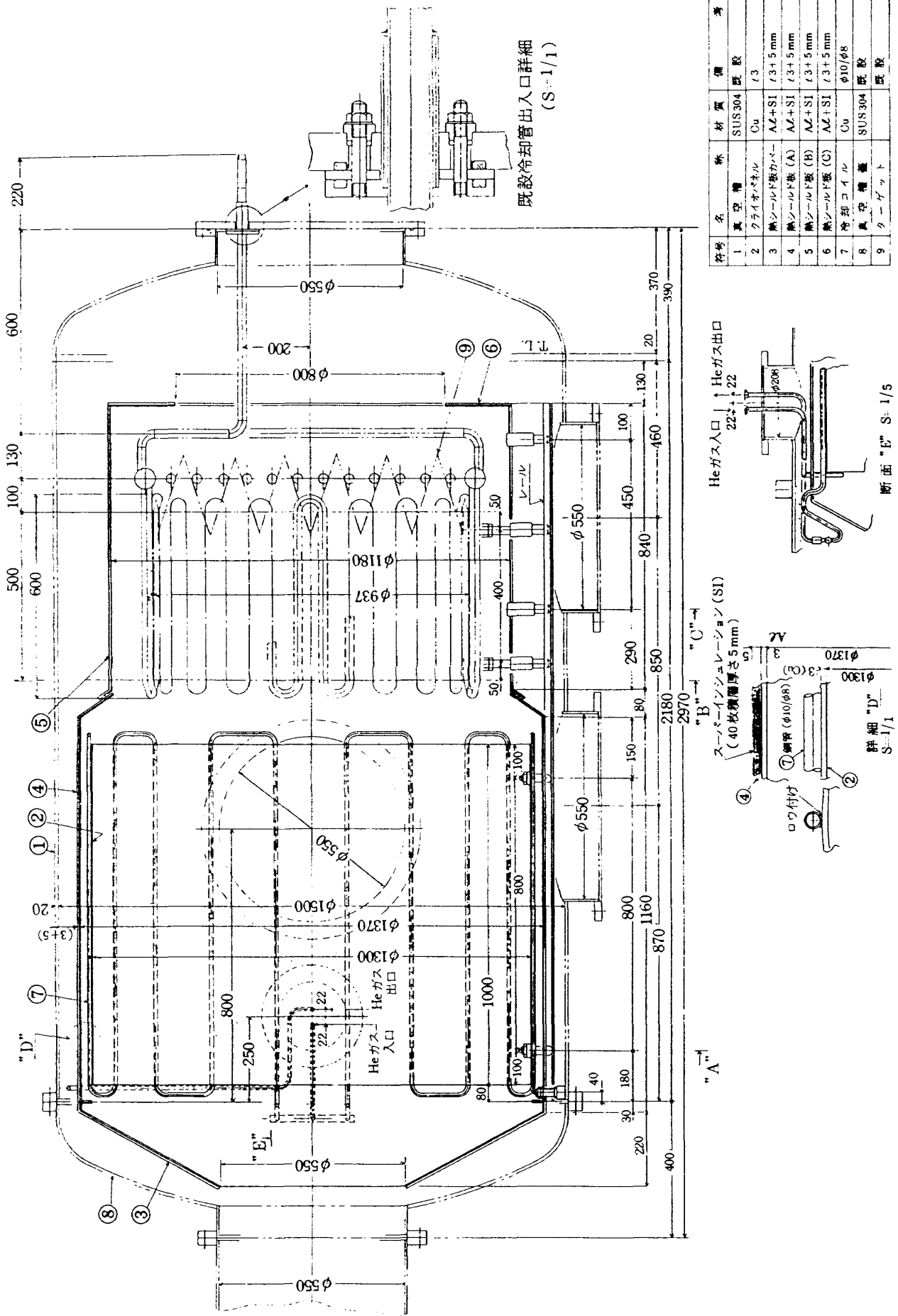


図 14 クライオパネル詳細図(その1)

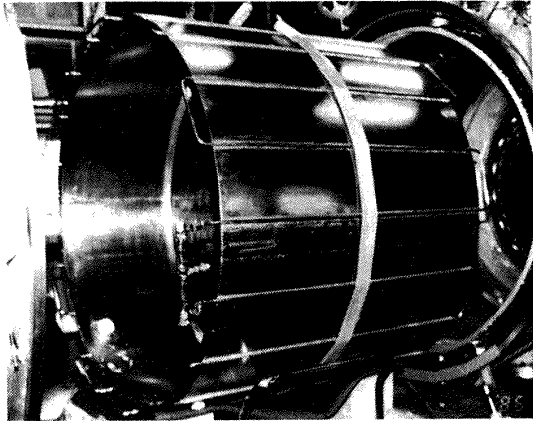


図16 クライオパネルの写真

るとは言い難い。パネル周りの部分で、円筒部と円錐部の継ぎ目も同様に断熱は良くない。クライオパネルの径をなるべく大きくする為に、その周りのスーパーインシュレーションの径は組み立て作業に支障を来たさない範囲でできる限り大きくとってあるが、油拡散ポンプの排気コンダクタンスを稼ぐ為にターゲット周りのスーパーインシュレーションの径はできる限り小さくしている。同様な理由でターゲットの後の部分には大きな穴を開けてある。これはターゲットの液体窒素の消費量の増加に繋がるが、クライオパネルへの熱侵入量は殆んど増えないと考えられるのでこの様にした。スーパーインシュレーションの一部の写真を図17に示す。

ターゲットは従来から使用していた物で、基本的にはSUS製の液体窒素配管にアルミ板をネジ止めした物である。特にイオンビームに直面する部分は、スパッタ物質がイオンエンジンの方へ飛ばない様に

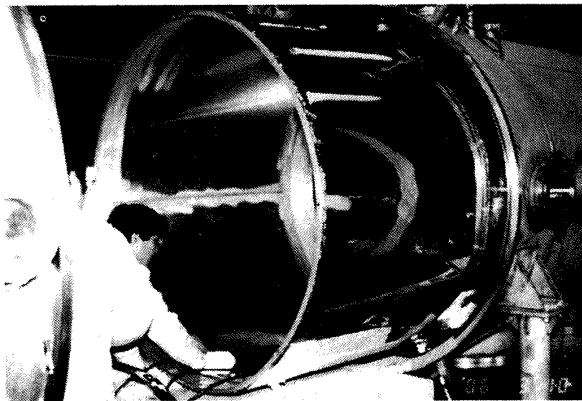


図17 スーパーインシュレーションの写真

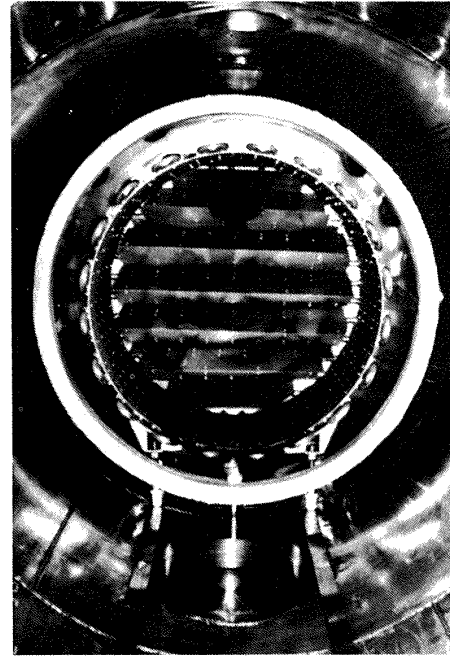


図18 ターゲットの写真

する為に楔状になっている。このような構造の為に熱伝導性が悪く、イオンビームが当たっている時にはかなりの高温になる部分も生じると考えられる。さらに配管部に溜めがない事から、液体窒素の消費も必要以上に多い。本来であれば本システムに適当な物を使用したいところであるが、経済的理由から止むを得ず従来の物を使用する事にした。ターゲットの写真を図18に示す。

クライオパネルはスーパーインシュレーションの芯の内側から5本のテフロン製の脚(内1本は位置決め用)によって支持されており、またスーパーインシュレーションの芯は真空槽の内側から5本×2組の同様の脚(内1本ずつは位置決め用)によって支持されている。図15に示した様に、位置決め用を除く各脚の底部は、接触面積を減らして熱伝導を悪くする為に球面形状をしている。また各脚の太さは強度上問題がない範囲でなるべく細くして熱伝導を悪くしている。ターゲットについてはスーパーインシュレーションの内側から支持するのが適当であると考えられるが、重量が大き過ぎる為に直接真空槽の内側から支持している。各脚の内、イオンビームに直接当たる可能性のあるものにはアルミホイルを被せてある。

4. クライオパネルの性能試験

4.1 冷凍機の性能

本来はクライオパネルの設計の段階に於いて、冷凍機の性能を把握してはならないのであるが、今回は性能の一部を冷凍機とパネルとを組み合わせた状態で測定した。これは作動領域が40~50Kの冷凍機が規格品には無い上に、冷媒のヘリウムを循環させる装置を付加した為に全く新しい機種にな

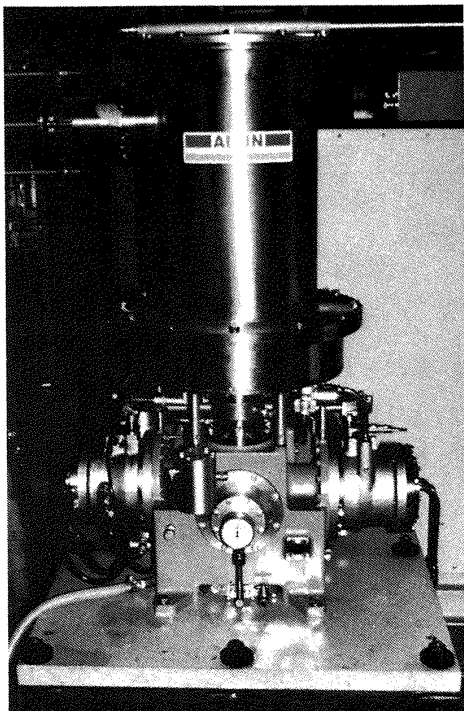


図19 冷凍機の写真

ってしまった為である。

冷凍機は本体と圧送機の部分に分かれており、それぞれを図19及び図20に示す。冷凍機と圧送機の関係は図1に示した通りで、圧送機は常温下で作動する。先に述べた「冷凍機の性能」については、正確には冷凍機と圧送機を組み合わせた場合の性能で、重要なのは圧送能力と冷媒を通しての冷却能力である。ここでは冷却能力を次式で定義する。

$$\dot{Q} \equiv c_p \dot{m} (T_{out} - T_{in}) \quad (29)$$

ここで c_p は冷媒の定圧比熱、 \dot{m} は冷媒の流量、 T_{out} 、 T_{in} はそれぞれクライオパネルに出入りする時の冷媒の温度である。図21¹¹⁾に示した通り、 c_p は温度と圧力に依存するので、ここでは便宜的に出入口の平均値における c_p を使用した。また \dot{m} は圧送機の吸入圧より間接的に求めた。これは圧送機が容積型のもの

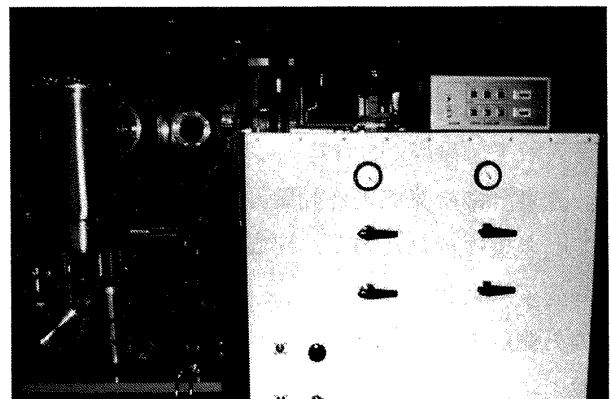


図20 冷却ガス圧送機の写真

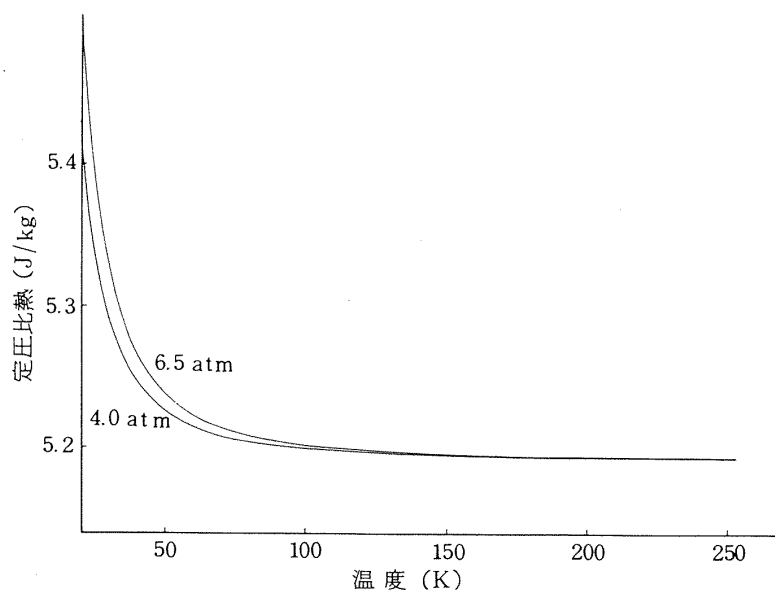


図21 ヘリウムの定圧比熱

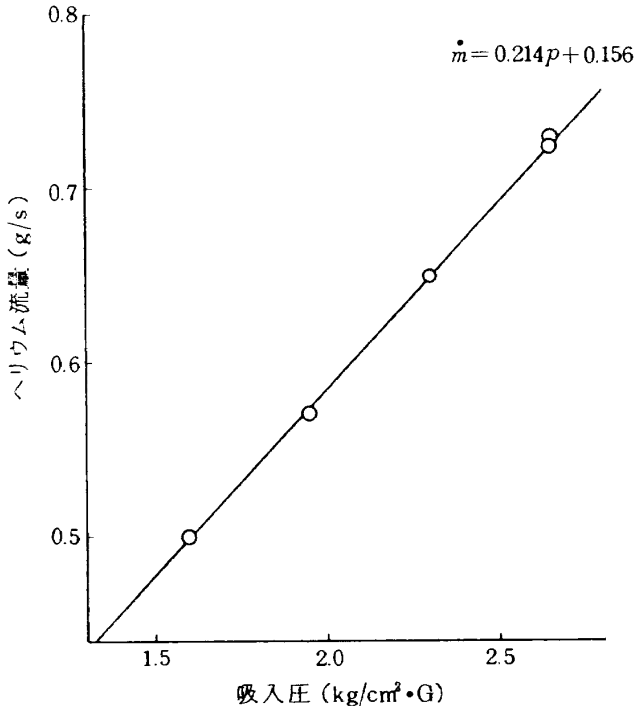


図 22 圧送機の吸入圧と流量の関係

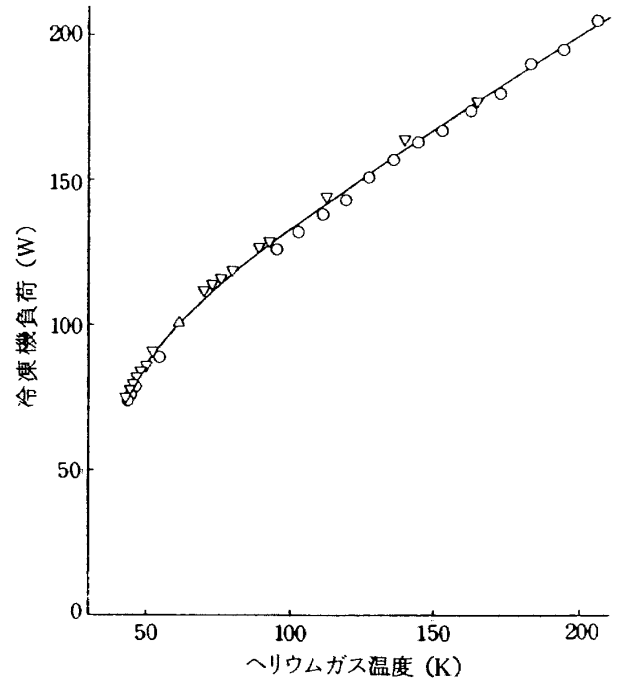


図 23 冷凍機の冷却能力

であるので、ある程度は妥当といえる。吸入圧と流量の関係を図 22 に示す。(これは冷媒の流路に流量計を入れて、冷媒がほぼ常温の時に測定したものである。流量計は冷凍機の作動確認後、直ちに業者によって引き揚げられたので、冷媒が十分に冷えた状態での流量は実測していない。) T_{out} 、 T_{in} は冷却配管の外側に取り付けた金(鉄 0.07%)ークロメルの熱電対により測定した。

冷凍機の冷却能力を図 23 に示す。 $T_{out} = 50K$ における冷却能力は約 85W となっている。但しこの時の T_{in} は 30K 未満であり、その差は 20K 以上となっていた。これは例えば \dot{m} を 2 倍にし、 c_p に大きな変化はないとすれば(29)式より $T_{in} = 40K$ で同じ冷却能力

となる。実際には冷凍機の作動温度が 10K 上がるので、図 23 より 10W 程度余計に能力を引き出す事ができると考えられる。即ち、本冷凍機はもっと大流量で使用した方が良いという結論に達する。

4.2 クライオパネルの温度特性

クライオパネルが予定の温度に到達するか否かを確認するため、クライオパネル上の数ヶ所に金(鉄 0.07%)ークロメルの熱電対¹²⁾を配置した。またこれと同時にスーパーインシュレーションの芯、ターゲットの温度を測定するためにクロメルーコンスタンタン(CRC)の熱電対を数ヶ所に配置した。これらの配置を図 24 及び表 6 に示す。これらの熱電対の

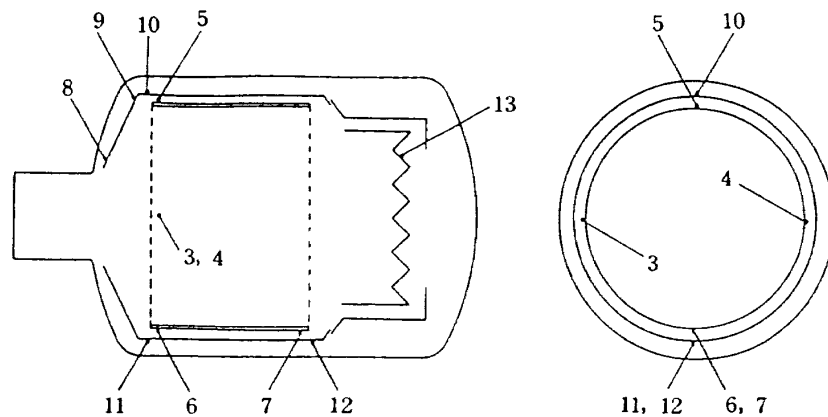


図 24 熱電対の配置図

表6 熱電対の配置表

熱電対番号	取り付け位置
1	冷却用ヘリウムガス（配管入口側）
2	冷却用ヘリウムガス（配管出口側）
3	クライオパネル（イオンエンジン側：配管入口側）
4	クライオパネル（イオンエンジン側：配管出口側）
5	クライオパネル（イオンエンジン側：上側）
6	クライオパネル（イオンエンジン側：下側）
7	クライオパネル（ターゲット側：下側）
8	スーパーインシュレーション（コーン部先端）
9	スーパーインシュレーション（コーン部裾）
10	スーパーインシュレーション （円筒部：イオンエンジン側：上側）
11	スーパーインシュレーション （円筒部：イオンエンジン側：下側）
12	スーパーインシュレーション （円筒部：イオンエンジン側：下側）
13	ターゲット（裏側）

起電力は全てアドバンテスト製 TR 2114 H によって温度に変換し、 GPIB によりマイコンに転送した。全てのチャンネルをスキャンするのに約 20 秒を要するが、同時性という点では全く問題ない。

以上の熱電対によって取得したデータの一例を図 25 に示す。横軸は冷凍機を始動させてからの時間であり、それと略同時にターゲットへの液体窒素の注入を開始した。データのサンプリング間隔は 10 分である。この図によると、冷凍機を始動させてからクライオパネル上の全ての測定点の温度が所定の 50 K

に到達するのに、約 40 時間を要している。約 15 時間経過のところでもわずかに各曲線が屈折しているのは、この時点でターゲットに注入する液体窒素の量を減らした為、ターゲットの温度降下の速度が鈍ったからである。41 時間と 43 時間の 2ヶ所で温度が急激に上昇しているのは、この時イオンエンジンを作動させたのが原因である。（この部分の詳細については後に述べる） 44 時間以降 63 時間迄の間、液体窒素の供給を停止した。この間、温度は一度極小点に達した後、徐々に上昇した。これは液体窒素の供給が停止した後、暫くは配管内に残った液体窒素によってターゲットが低温に保たれるので冷凍機の余剰能力によって温度が下がるが、配管内の液体窒素が全て蒸発した後はターゲットの温度が上昇し、その結果クライオパネルの入熱量が増加したことによる。液体窒素の供給を再開した直後に温度は下がり出し

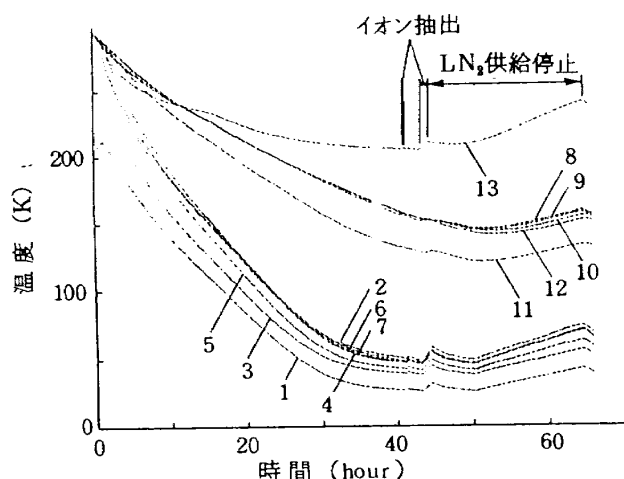


図 25 クライオパネルの温度特性（その 1）

図 25 と同様の例をもう一つ図 26 に示す。ここでは冷凍機の起動から 48 時間の間、液体窒素は供給していない。また LN₂ の供給を開始した後も、その供給量は図 25 の場合より少ない。（実際に液体窒素の供給量を測定した訳ではないが、ターゲットの配管の出口側の温度が液体窒素の流量の目安になる。配管

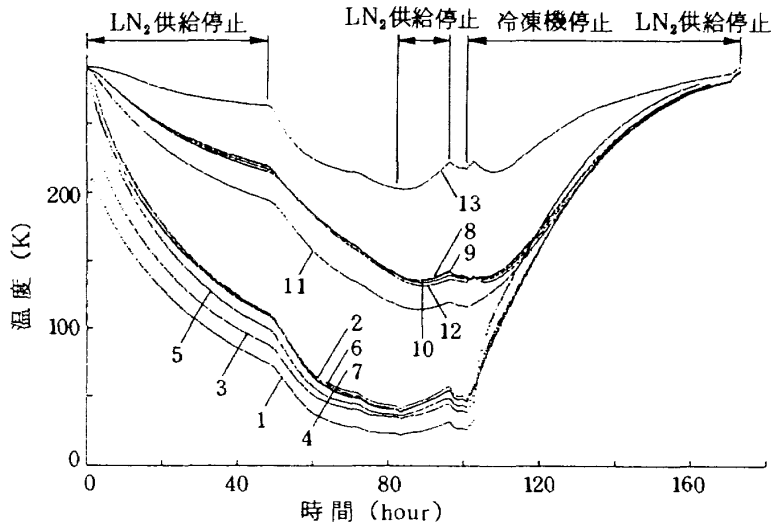


図26 クライオパネルの温度特性(その2)

は液体窒素を貯蔵するには設計されていないので、流量が多いと液体窒素がそのまま出て来てしまい、この時の温度がターゲットの到達最低温度となる。図25の15時間から44時間の間は略この状態であり、それ以外では液体窒素は全て気化して排出された。) 72時間に曲線が屈折しているのは、図25と同様にLN₂の供給量を変えたからである。

図26ではクライオパネルの温度が全点で50 Kに達するのに約72時間を要している。この様に液体窒素の供給量によってクライオパネルの起動時間(冷凍機を始動させてからクライオパネルの全面が50 Kに達する迄の時間)が大きく左右される事が解る。起動時間、液体窒素の消費量、電力量、冷凍機の損耗から総合的に判断すると、最初から充分な量の液体窒素を供給する方が良いと考えられる。

図26では83時間のところでクライオパネルの温度が全面に渡って40 K以下に下がった。これは今回の一連の試験に於いて得られた最低温度である。図22に示されている通り、冷凍機的能力がこの辺りで急激に低下するので、上記の温度が本システムで得られる最低温度とほぼ同じと言える。この時のクライオパネルへの入熱量は、系が定常状態にあると見做すと冷凍機の負荷に等しく、その値は約74 Wである。クライオパネルの設計点、即ち50 Kにおける入熱量はこれより若干少ないと考えられるので、3.3節で行なった推定値の48 Wは54%以下の誤差で正しかったと言える。

図26に於いて102時間の時点で冷凍機と液体窒素の供給を停止した。この状態で放置してクライオパネルの温度が0°C以上に迄上昇するのに70時間以上かかった。クライオパネルの温度が露点以上にならないと真空槽内を大気に開放する事が出来ないのも、これは即ち大気開放する為には70時間以上必要という事になる。実用上は真空槽内に適量の乾燥ガスを注入するとか、冷凍機を停止させたまま圧送機を作動させてヘリウムを循環させるとかの方法により、この時間を大幅に短縮させることが可能と思われる。

図25と図26に共通して言えるのは、スーパーインシュレーションの芯が熱的に良く絶縁されているので、その温度がクライオパネルの温度と連動していないという事である。これは即ち芯から熱を奪うという作業が、クライオパネルと芯の間の輻射熱伝達によって行なわれるが、その熱流量が小さい為に両者間に大きな温度差が生じ、結果として冷凍機能力の低いところを用いて行なわれる事を意味している。これは単なる冷凍機の効率上の問題ではなく、クライオパネルの起動時間の点で望ましくない。従ってもし可能なら、最初に芯とクライオパネルを熱的に結合するとか、液体窒素で冷却するとかの対策を講ずる必要がある。

4.3 クライオパネルの排気特性

クライオパネルの排気速度を測定する為に、既知量のキセノンを真空槽内に放出し、真空槽内の圧力

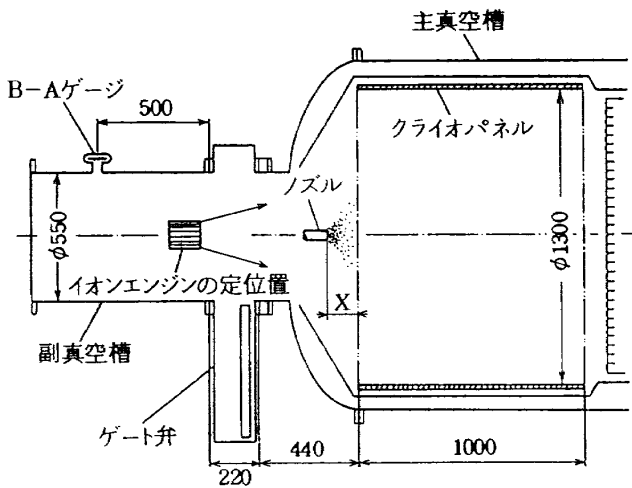


図 27 排気速度測定時の装置配置図

がどの程度変化するかを調べる実験を行なった。その際の各装置の配置を図27に示す。ここで重要なのは、問題としている 10^{-4} Pa 台程の高真空では流れは分子流であると見做せるので、真空計やガスの放出口の位置や向きによって測定値が大きく変動するという事である。

放出口については実際にイオンエンジンを用いるのが最良であるし、当初はそうしてデータを取得したのであるが、図体が大きく重量もあるので簡単に位置を変える事ができないので、単純なノズルを用いた。このノズルは外径約6mm、内径4.3mmのパイプで、端面は単に旋盤で仕上げて角をわずかに落としただけのものである。図27に示した通りこのノズルは常に図の右側を向いており、真空槽の中心軸上を平行移動する事ができる。ノズルの位置はクライオパネルの端面からの距離で表わす。尚、キセノンの流量は大倉電気製のマスフローコントローラによって制御した。

真空計は富士精密電機製のB-Aゲージを用いた。真空計の取り付け位置は、図27に示した様に通常イオンエンジンが設置される位置の後方で、その開口部は副真空槽の半径方向を向いているので、真空槽内の局所的な流れの影響は受け難いと考えられる。尚、通常のイオンエンジンの試験の際も真空計は同じ位置にある。3.2節でも触れたが、この部分の圧力はイオンエンジン正面のそれと平衡していると考えられる。

キセノンの流量及びノズルの位置を変化させて測

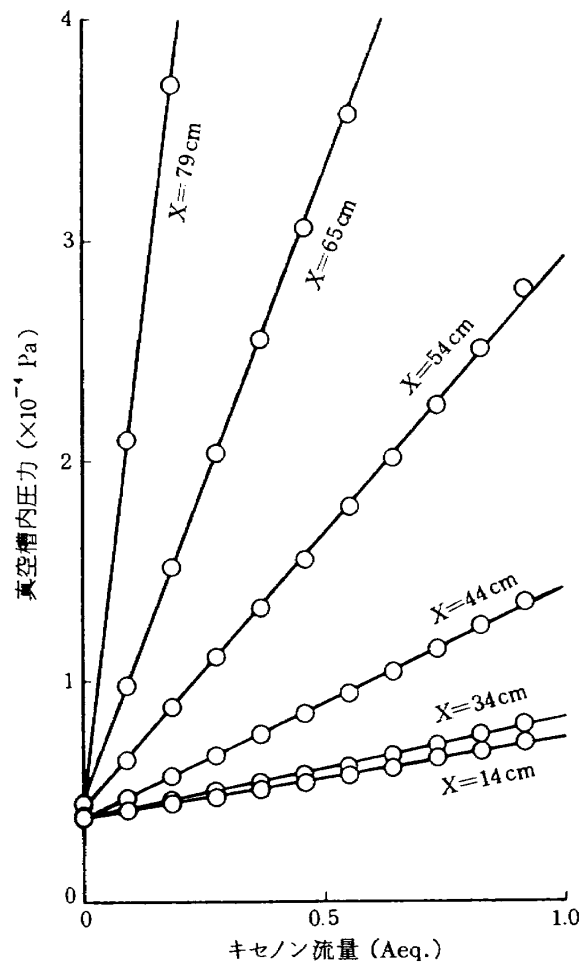


図 28 キセノンの流量と真空槽内圧力の関係

定した結果を図28に示す。ノズルの位置を一定とした場合、圧力は流量の一次関数で表わされ、この場合の傾きが排気速度に対応する。即ち排気速度は次式で表わされる。

$$S = \frac{Q}{P - P_0} \tag{30}$$

ここで Q は流量、 P は圧力、 P_0 は $Q=0$ に於ける圧力。(注：真空槽内にキセノンを供給する系は3つあり、その内の1つをここでの測定に使用している。測定に関係のない他の2系統にも同様なマスフローコントローラが使用されており、流量は0に設定してあるが若干の漏れがあり、真空槽内の圧力に影響を及ぼす。図28に於ける P_0 はこの漏れを含めた場合のもので、完全に漏れの無い場合の圧力は 1.5×10^{-5} Pa に迄下がる。) (30)式により計算された排気速度を図29に示す。これによるとノズルが最もクライオパネルに近い時に排気速度は最大となり、その値は $600,000 \text{ l/s}$ 以上となる。しかしながらノズル

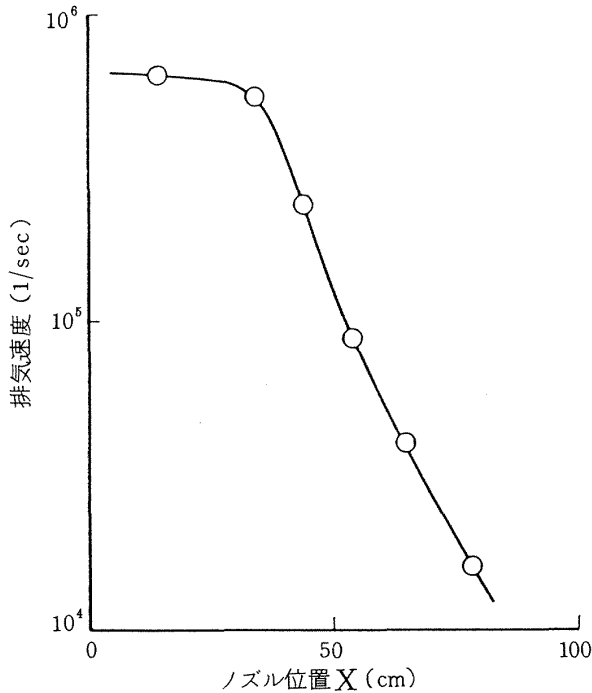


図 29 排気速度とガス供給ノズル位置の関係

がイオンエンジンが通常設置される位置(X=60cm)にある場合の排気速度は約 40,000 l/s となってしまふ。この排気速度は 3.2 節で推定した値の 3 分の 1 以下であり、その原因はノズルとクライオパネルの間のコンダクタンスが小さい事にあると考えられる。これを改善する為には、もっと薄いゲート弁を用いるとか、イオンエンジンをもっと前方へ押し出すとかの対策が必要となる。

4.4 イオンエンジンの作動試験

クライオパネルの温度が充分に下がったところで、実際にイオンエンジンを作動させて性能を測定すると共にクライオパネルの特性も調べた。図 30 に使用した 12 cm カस्प型イオンエンジンを示す。初めにこのエンジンに規定流量 (8.1 SCCM) のキセノンのみ (電力は供給せず) を供給し、真空槽内の圧力を測定したところ約 3×10^{-4} Pa であり、この時の排気速度は約 40,000 l/s であった。この値は先にノズルを用いて測定した時のものと略同じである。次にこの状態で放電のみ (イオンの加速はせず) を開始したが、圧力は殆んど変化しなかった。またクライオパネルの温度については、わずかな上昇が観測された。このことはイオンエンジンからクライオパネルへの輻射熱伝達がそれ程多くないということを示している。

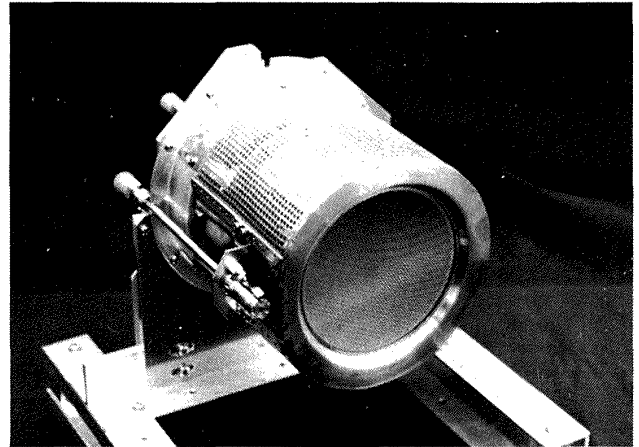


図 30 12 cm カस्प型キセノンイオンエンジンの写真

示している。

イオンを加速した場合、即ち通常の作動を行なった場合の様子は先の場合と大きく異なる。図 31 にイオンを加速した場合の真空槽内の圧力の推移を示す。横軸はイオンの加速を開始してから時間である。圧力は加速を開始した瞬間にその直前の値の 2 倍以上に跳ね上がり、その後ゆっくりと低下を続け、暫くすると加速開始直前の値を下回る。この現象は次

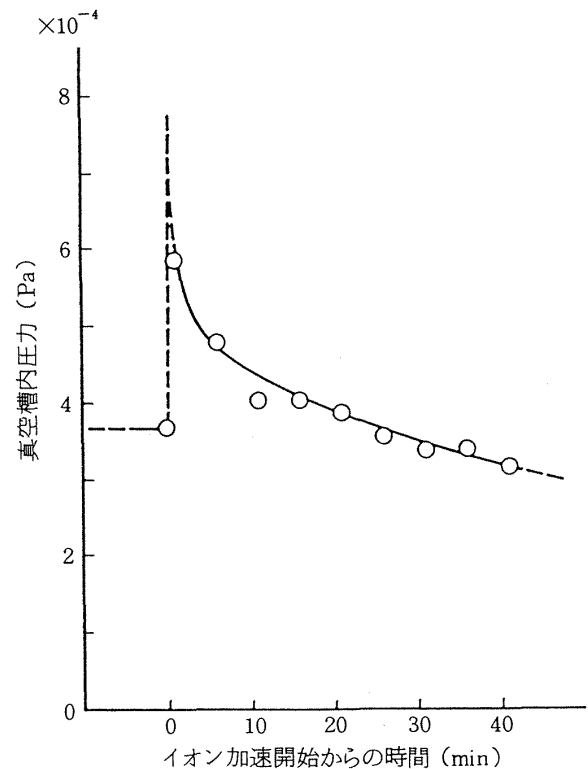


図 31 イオンを加速した場合の真空槽内圧力の推移

の様に説明する事ができる。加速されたイオンの内、集束性の悪いイオンがクライオパネルの一部に当たり、そこに凝縮していたキセノンを主とする気体分子を跳ねとばす。当然ターゲット上に凝縮していた気体分子も跳ねとばす。この為に真空槽内の圧力が急増する。やがて時間と共に凝縮層が減退し、跳ねとばされる気体分子の数が減少する為に圧力が低下する。最後にはクライオパネルに凝縮捕獲される気体分子の数と跳ねとばされる気体分子の数が平衡して圧力は一定となる。他方イオンを加速する事によって、キセノンの発生源の大部分がイオンエンジンからターゲットへと推移する。即ち加速しない場合にはイオンエンジンから拡散していたのが、加速することによってキセノンに強い指向性が付与され大部分のキセノンがターゲットに衝突してから拡散するので、見かけ上ターゲットがキセノンの発生源となる。この為に副真空槽内の圧力がイオンを加速する前の値を下回る程に低下する。

以上の説明の正当性は、他の実験結果からも確かめられる。図32に推進剤利用効率と圧力の関係を示す。推進剤利用効率とは、供給されたキセノンに対してのイオンとして抽出されるキセノンの割合で、ここではターゲットからのガス発生量の全体の発生量に対する割合と考えて良い。推進剤利用効率が100%を超えるのは、キセノンの二価イオンが存在する為で、イオンを電流として測る場合、 X_e^{++} を X_e^+ 2個として勘定しているからである。図32では

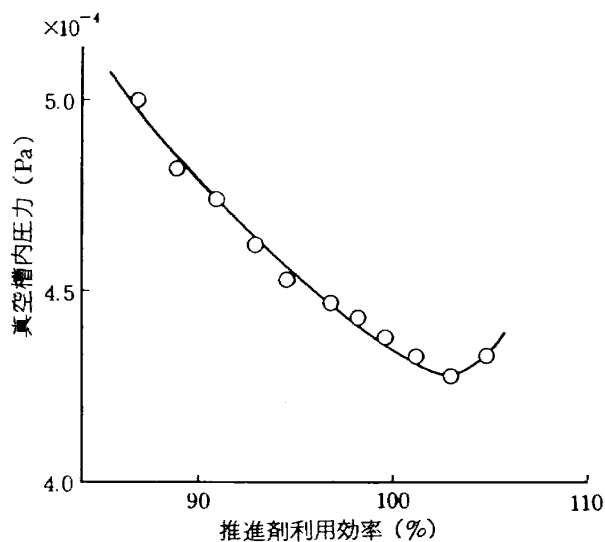


図32 推進剤利用効率と真空槽内圧力の関係

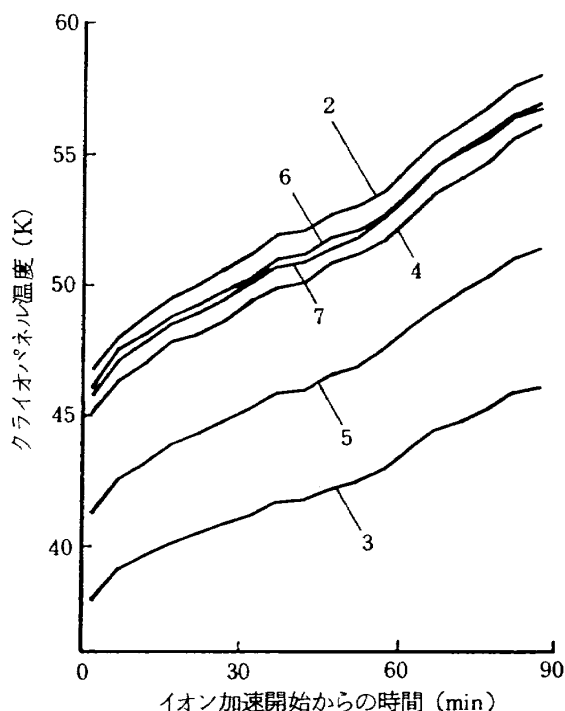


図33 イオンを加速した場合のクライオパネルの温度変化

推進剤利用効率が上がるに従って圧力が下がっており、これは先の説明と合致する。推進剤利用効率が極度に高くなった時に圧力が再び上昇しているのは、イオンエンジン側の特性で、イオン電流が過大になるとイオンの集束性が悪くなる事による。

図33はイオンを加速している際中のクライオパネルの温度変化を示している。加速を開始する迄は充分に下がっていたクライオパネルの温度が、加速開始と共に上昇を始め、約90分で実験を中断しなくてはならないところまで上昇した。これは明らかにイオンがクライオパネルに当たる事によるものと考えられる。図33のch.2は冷凍機へ戻るヘリウムの温度であり、90分経過のところで約58 Kとなっている。図23によるとこの時の冷凍機の冷却能力は約107 Wであり、イオンビーム以外によるクライオパネルへの熱侵入は4.2節にもある様にたかだか74 Wであるので、少なくとも33 Wがイオンビームによる熱侵入と考えられる。実際にはここで平衡状態に達した訳ではないので、これをかなり上回る値であると考えられる。また図33では、全ての温度が略同じ傾きで上昇しており、イオンビームが局所的に当たっているという事は断定できない。これはクライオパネル

の熱伝導性が高い為か、当たっているのが指向性のあるイオンビームでなく、指向性のない電荷交換イオンである事によるものと考えられる。後者の場合にはクライオパネルの電位を上げれば解消できる筈であるが、現在迄のところ準備の関係で実施に移してはいない。イオンビームが直接当たっている場合にはむしろイオンエンジン側に問題があり、ビームの集束性が悪いとも言えるが、試験装置としてはある程度のビームの散乱は許容できる事が望ましい。

5. ま と め

イオンエンジン試験用のクライオパネルを設計、製作し、クライオパネルの単体試験及びイオンエンジンの作動試験を行なった。その結果設計通りにクライオパネルの温度を50K以下に下げる事ができ、またこの温度で十分にキセノンを排気できる事を確認した。しかしながら次の様な問題のある事が発見若しくは再確認された。

- クライオパネルを設定点の50Kまで冷却するのに40時間以上を必要とする。原因は冷凍機の能力に余裕がない事他に、スーパーインシュレーションの芯が熱的に良好に絶縁されていて冷え難い事による。
- イオンエンジンとクライオパネルの間の排気コンダクタンスが十分に大きくない為、クライオパネルの排気能力は充分あるにもかかわらず副真空槽の圧力が充分下がらない。
- イオンエンジンを正常に作動させた場合、クライオパネルの温度が急激に上昇してしまい、連続作動可能な時間が約90分に制限されてしまう。原因はイオンビームのエネルギーが直接又は電荷交換を通じてクライオパネルに移送される事による。本装置は既存の真空槽を活用し、尚かつ限られた予算の下で設計された為、イオンエンジンの試験装置として充分であるとは言いがたい。しかしクライオパネルの温度、形状、位置についての考え方の正しさは証明されたものと考えられる。仮に一切の制約がないとしたら、次の様にする事が望ましいと考えられる。
- 真空槽はイオンビームの広がり、クライオパネルやスーパーインシュレーション等の厚みを考慮して充分大きくとる事。最低でも2.5mは必要と考えられる。長さは直径に応じて決める。
- 冷凍機の能力は充分余裕を持つ様にする。但し能力が高い程価格も高くなるので、諸条件を考慮に入れた場合の最大負荷時に50Kの温度を余裕を持って維持できる程度のもとする。但し起動時間は例えば24時間を超えない程の能力とする。
- クライオパネルとスーパーインシュレーションの芯は、起動時には液体窒素で冷却する。後者については継続的に液体窒素又は他の冷凍機で冷却する。
- クライオパネルの内側には液体窒素温度程度のシールドを設け、クライオパネルに直接イオンビームが当たるのを防ぐ。
- ゲート弁は薄いものを用いる。できればイオンエンジンをゲート弁を通じてクライオパネルの方へ押し出す機構を設け、イオンエンジンとクライオパネルの間の排気コンダクタンスを大きくする。

参 考 文 献

- 1) 堀越源一, 真空技術 [第2版], 東大出版, 1983
- 2) John F.O'Hanlon, A User's Guide to Vacuum Technology, John Wiley & Sons, 1980
日本語版, 野田・斉藤・奥谷訳, 真空技術マニュアル, 産業図書, 1983
- 3) 林主税編, 真空技術, 共立出版, 1985
- 4) P.D.BENTLEY, "The modern cryopump", Vacuum Vol.30 p145, 1980
- 5) CTI クライオポンプカタログ
- 6) W.H.Giedt, Principles of Engineering Heat Transfer, D.VAN NOSTRAND CO., 1957
日本語版, 横森・久我訳, 基礎伝熱工学, 丸善, 1974
- 7) 大森・平・伊集院, 「真空多層断熱材の断熱性能」, 第27回低温工学研究発表会予稿集, 1981
- 8) 理科年表, 丸善
- 9) 荒川一郎, 「超高真空中における低温実験の技術的問題」, 真空-24-3, 1981

- 10) 日本機械学会編, 伝熱工学資料
- 11) R.D.McCarty, "Thermophysical Properties of Helium-4 from 2 to 1500 K with Pressures to 1000 Atmospheres", National Bureau of Standards Technical Note 631, 1972
- 12) Sparks · Powell, "Low Temperature Thermocouples", JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards-A Physics of Chemistry, Vol. 76 A, No. 3, May-June 1972
- 13) Hayakawa · Kitamura · Nakamura · Miyazaki, "A Cryopumping System for Tests of Xenon Ion Thrusters", AIAA87-1009, 19th International Electric Propulsion Conference, 1987

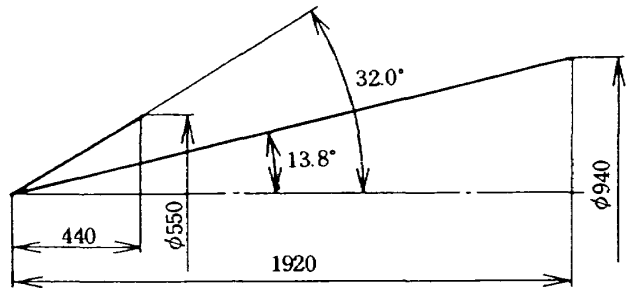


図 A 1 イオンエンジンから見込む各部の角度

$$a_{11} + a_{31} = \frac{1}{2} \int_{32.0^\circ}^{90^\circ} \sin 2\theta \, d\theta$$

$$= 0.360 \tag{A-5}$$

となる。残りの半分は右側へ行き、クライオパネルとターゲットに当たると考えられるが、殆んどがパネルへ行くものとしてターゲットへ行くものは無視した。 a_{11} と a_{31} の比はイオンエンジンとそれ以外の面積比に等しいので、

$$a_{11} : a_{31} = 9.7 : 90.3 \tag{A-6}$$

となり、従って (A-5) 式と (A-6) 式より

$$a_{11} = 0.035 \tag{A-7}$$

$$a_{31} = 0.325 \tag{A-8}$$

を得る。

次に a_{i2} について考える。図 A 2 及び図 A 3 はこれ等を求める為のモデルである。図 A 2 において中心軸から 28.8° までの方向へ飛ぶ気体分子はクライオパネル当たり吸収されると考える。 28.8° から 10.5° までののはスーパーインシュレーションの内側に当たり、そこから再び放出されると考えられる。そこでこの部分の中心軸上の位置から右側へ放出されると考えた時のモデルが図 A 3 で、ここからターゲットを見込む角度は 19.5° である。従って

補 A. 排気速度計算における係数 a_{ij} の求め方

q_1 と q_3 は同一平面上から発し、それ等の重心は一致していると考えられるので、次の 3 式を仮定する。

$$a_{11} = a_{13} \tag{A-1}$$

$$a_{21} = a_{23} \tag{A-2}$$

$$a_{31} = a_{33} \tag{A-3}$$

先づ a_{i1} について考える。図 A 1 は図 14 を基にしたモデルであるが、同図において中心軸から 13.8° までの方向へ飛ぶ気体分子はターゲットに当たる。従って (A-5) 式より

$$a_{21} = 2 \int_0^{13.8^\circ} \cos \theta \sin \theta \, d\theta$$

$$= \int_0^{13.8^\circ} \sin 2\theta \, d\theta$$

$$= 0.057 \tag{A-4}$$

を得る。同様に 13.8° から 32.0° までの方向へ飛ぶのはクライオパネルに当たり、これは完全に吸収されると考える。 32.0° から 90° までののはゲート弁の内壁等に当たって再び真空槽内の空間に放出される。この内の半分が左側へ行くと考えられるので (A-4) 式と同様に

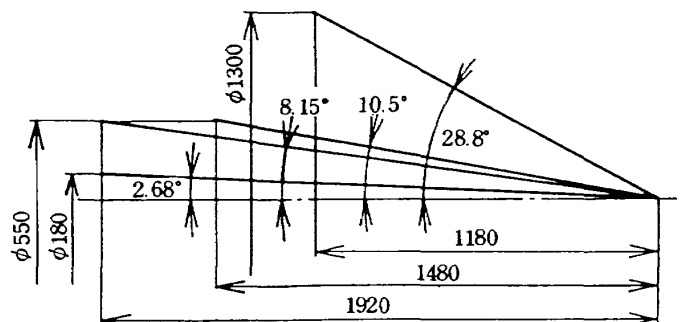


図 A 2 ターゲットから見込む各部の角度

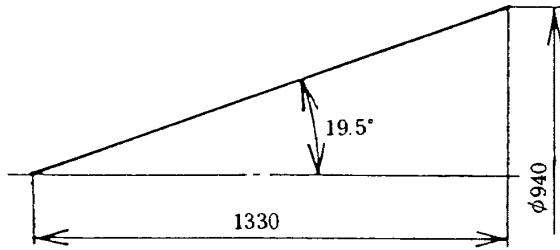


図 A 3 クライオパネルとゲート弁の中間からターゲットを見込む角度

$$\begin{aligned}
 a_{22} &= \int_{10.5^\circ}^{28.8^\circ} \sin 2\theta \, d\theta \int_0^{19.5^\circ} \sin 2\theta \, d\theta \\
 &= 0.199 \times 0.111 \\
 &= 0.022 \qquad \qquad \qquad (A-9)
 \end{aligned}$$

を得る。図 A 2 において 10.5° から 8.15° までののは、先にも述べた通りゲート弁の内壁等に当たり、その半分が左側へ行く。それを q とすると

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{1}{2} \int_{8.15^\circ}^{10.5^\circ} \sin 2\theta \, d\theta \\
 &= 0.007 \qquad \qquad \qquad (A-10)
 \end{aligned}$$

となり、これと同量が右側へ行くが、それ等は全てクライオパネルに吸収されると仮定した。 q はイオンエンジンとそれ以外の面積比に分割されると考えられるので、図 A 2 及び (A-6) 式、(A-10) 式より、

$$\begin{aligned}
 a_{12} &= \int_0^{2.68^\circ} \sin 2\theta \, d\theta + 0.097 q \\
 &= 0.002 + 0.000 \\
 &= 0.002 \qquad \qquad \qquad (A-11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_{32} &= \int_{2.68^\circ}^{8.15^\circ} \sin 2\theta \, d\theta + 0.903 q \\
 &= 0.018 + 0.006 \\
 &= 0.024 \qquad \qquad \qquad (A-12)
 \end{aligned}$$

を得る。

以上の結果をまとめると

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.035 & 0.002 & 0.035 \\ 0.057 & 0.022 & 0.057 \\ 0.325 & 0.024 & 0.325 \end{pmatrix} \quad (A-13)$$

を得る。

補 B. 真空槽内における輻射熱伝達量の計算

図 6 では真空槽内面を 6 つの面群に分けており、それ等の間での輻射熱伝達を考える。各面群は①が

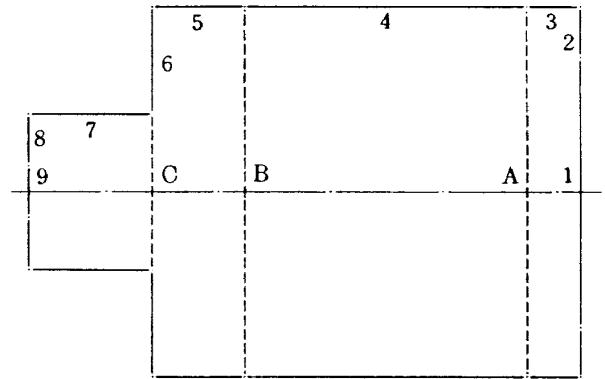


図 B 1 真空槽内の輻射熱伝達量計算のモデル [面番号 A, B, C は計算の便宜の為の仮想面]

ターゲット、②と④がスーパーインシュレーションの芯、③がクライオパネル、⑤が副真空槽、⑥がイオンエンジンである。最初に各面群間の形態係数、即ち(13)式における F_{j-i} を求めなくてはならないが、計算を簡単にする為に②と④を図の点線で示した様に 2 つずつに分けて番号をつけ直す。つけ直した後のモデルを図 B 1 に示す。同図には便宜上の仮想面が 3 つ追加されている。以下図 B 1 の番号によって表わされる形態係数を求めるが、その前に基本となる 2 つの式を導入する。

図 B 2 の様な 2 つの平行且つ同軸の円板間の形態係数は次式で示される¹⁰⁾

$$\begin{aligned}
 F_{1-2} &= \frac{1}{2R_1^2} \left\{ R_1^2 + R_2^2 + L^2 \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{(R_1^2 + R_2^2 + L^2)^2 - 4R_1^2 R_2^2} \right\} \qquad \qquad \qquad (B-1)
 \end{aligned}$$

また面 i の面積を A_i とした時に、任意の 2 面の間に

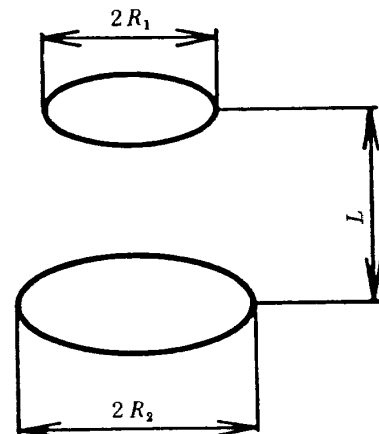


図 B 2 平行同軸な 2 つの円板

次の式が成り立つ。¹⁰⁾

$$F_{i-j} A_i = F_{j-i} A_j$$

図 B 1 において、面 1 と面 9 の間には何も障害物がなく、各方の面上の任意の点から他方の全面を見る事ができる。従って (B-1) 式を適用する事ができ、 $R_1 = 0.475$, $R_9 = 0.09$, $L = 1.96$ の数値を代入すると、

$$F_{1-9} = 0.002$$

を得る。面 1 と仮想面 C も同様な関係にあり、

$$F_{1-C} = 0.029$$

を得る。これより

$$F_{1-7} + F_{1-8} = F_{1-C} - F_{1-9} = 0.027 \quad (B-2)$$

となる。 F_{1-8} は途中で障害物がある為に求まらず、従って F_{1-7} も求まらない。そこで面 1 の径を F_{1-8} が求められるまで小さくし、そうして求めた F_{1-7} と F_{1-8} の近似値を得る事で妥協する事にする。面 1 の半径を面 C と同じ 0.275 としたものを面 1' とすると直ちに

$$F_{1'-9} = 0.002$$

$$F_{1'-8} + F_{1'-9} = 0.019$$

$$F_{1'-C} = 0.031$$

を得、これ等より

$$F_{1'-8} = 0.019 - F_{1'-9} = 0.017$$

$$F_{1'-7} = F_{1'-C} - (F_{1'-8} + F_{1'-9})$$

$$= 0.012$$

を得る。従って

$$F_{1'-7} : F_{1'-8} = 12 : 17$$

であるので、(B-2) 式を満たす様にする

$$F_{1-7} = 0.011$$

$$F_{1-8} = 0.016$$

を得る。

以下同様にして数式のみを重ねる事にする。但し先の F_{1-7} , F_{1-8} の様に厳密に求められないものについては仮定を導入し、仮定式には右側に△印をつける事にする。また仮想面にはダッシュをつけておく。

$$F_{1-1} = F_{1-2} = F_{2-1} = F_{2-2} = F_{5-8} = F_{5-9}$$

$$= F_{6-6} = F_{6-7} = F_{6-8} = F_{6-9} = F_{7-6}$$

$$= F_{8-5} = F_{8-6} = F_{8-8} = F_{8-9}$$

$$= F_{9-5} = F_{9-6} = F_{9-8} = F_{9-9} = 0$$

$$F_{1-A} = 0.863, \quad F_{1-B} = 0.209, \quad F_{1-C} = 0.029$$

$$F_{1-3} = 1 - F_{1-A} = 0.137$$

$$F_{1-4} = F_{1-A} - F_{1-B} = 0.654$$

$$F_{1-6} + F_{1-C} = 0.144$$

$$F_{1-5} = F_{1-B} - (F_{1-6} + F_{1-C}) = 0.065$$

$$F_{1-6} = 0.144 - F_{1-C} = 0.115$$

$$F_{(1+2)-A} = 0.747, \quad F_{(1+2)-B} = 0.194$$

$$F_{(1+2)-3} = 1 - F_{(1+2)-A} = 0.253$$

$$F_{3-1} + F_{3-2} = F_{(1+2)-3} \frac{A_1 + A_2}{A_3} = 0.433$$

$$F_{3-1} = F_{1-3} \frac{A_1}{A_3} = 0.125$$

$$F_{3-2} = 0.433 - F_{3-1} = 0.308$$

$$F_{2-3} = F_{3-2} \frac{A_3}{A_2} = 0.386$$

$$F_{(1+2)-4} = F_{(1+2)-A} - F_{(1+2)-B} = 0.553$$

$$F_{4-1} + F_{4-2} = F_{(1+2)-4} \frac{A_1 + A_2}{A_4} = 0.180$$

$$F_{4-1} = F_{1-4} \frac{A_1}{A_4} = 0.114$$

$$F_{4-2} = 0.180 - F_{4-1} = 0.066$$

$$F_{2-4} = F_{4-2} \frac{A_4}{A_2} = 0.436$$

$$F_{(1+2)-6} + F_{(1+2)-C} = 0.136$$

$$F_{(1+2)-5} = F_{(1+2)-B} - (F_{(1+2)-6} + F_{(1+2)-C}) = 0.058$$

$$F_{5-1} + F_{5-2} = F_{(1+2)-5} \frac{A_1 + A_2}{A_5} = 0.057$$

$$F_{5-1} = F_{1-5} \frac{A_1}{A_5} = 0.034$$

$$F_{5-2} = 0.057 - F_{5-1} = 0.023$$

$$F_{(1+2)-C} = 0.027$$

$$F_{(1+2)-6} = 0.136 - F_{(1+2)-C} = 0.109$$

$$F_{6-1} + F_{6-2} = F_{(1+2)-6} \frac{A_1 + A_2}{A_6} = 0.133$$

$$F_{6-1} = F_{1-6} \frac{A_1}{A_6} = 0.075$$

$$F_{6-2} = 0.133 - F_{6-1} = 0.058$$

$$F_{2-6} = F_{6-2} \frac{A_6}{A_2} = 0.102$$

$$F_{9-1} + F_{9-2} = 0.099$$

$$F_{9-1} = 0.055$$

$$F_{9-2} = 0.099 - F_{9-1} = 0.044$$

$$F_{2-9} = F_{9-2} \frac{A_9}{A_2} = 0.002$$

$$F_{C-1} + F_{C-2} = 0.151$$

$$F_{C-1} = 0.087$$

$$F_{C-2} = 0.151 - F_{C-1} = 0.064$$

$$F_{2-C} = F_{C-2} \frac{A_C}{A_2} = 0.025$$

$$F_{2-7} + F_{2-8} = F_{2-C} - F_{2-9} = 0.023$$

$$F_{2-7} : F_{2-8} = F_{1-7} : F_{1-8} = 12 : 17 \quad \triangle$$

$$F_{2-7} = 0.010, \quad F_{2-8} = 0.013$$

$$F_{3-3} = 1 - 2(F_{3-1} + F_{3-2}) = 0.134$$

$$F_{B-A} = 0.242$$

$$F_{B-3} = F_{B-A} - F_{(1+2)-B} = 0.048$$

$$F_{3-B} = F_{B-3} \frac{A_B}{A_3} = 0.082$$

$$F_{3-4} = (F_{3-1} + F_{3-2}) - F_{3-B} = 0.351$$

$$F_{(6+C)-A} = 0.166$$

$$F_{(6+C)-3} = F_{(6+C)-A} - (F_{(1+2)-6} + F_{(1+2)-C}) \\ = 0.030$$

$$F_{3-6} + F_{3-C} = F_{(6+C)-3} \frac{A_6 + A_C}{A_3} = 0.051$$

$$F_{3-5} = F_{3-B} - (F_{3-6} + F_{3-C})$$

$$F_{C-A} = 0.188$$

$$F_{C-3} = F_{C-A} - (F_{C-1} + F_{C-2}) = 0.037$$

$$F_{3-C} = F_{C-3} \frac{A_C}{A_3} = 0.011$$

$$F_{3-6} = 0.051 - F_{3-C} = 0.040$$

$$F_{A-9} = 0.002$$

$$F_{A-C} = 0.035$$

$$F_{A-7} + F_{A-8} = F_{A-C} - F_{A-9} = 0.033$$

$$F_{A-7} : F_{A-8} = F_{A-7} : F_{A-8} = 4 : 5 \quad \triangle$$

$$F_{A-7} = 0.015, \quad F_{A-8} = 0.018$$

$$F_{9-3} = 0.119 - (F_{9-1} + F_{9-2}) = 0.020$$

$$F_{3-9} = F_{9-3} \frac{A_9}{A_3} = 0.001$$

$$F_{3-7} + F_{3-8} = F_{3-C} - F_{3-9} = 0.010$$

$$F_{3-7} : F_{3-8} = F_{A-7} : F_{A-8} = 5 : 6 \quad \triangle$$

$$F_{3-7} = F_{3-8} = 0.005$$

$$F_{A-4} = 1 - F_{B-A} = 0.758$$

$$F_{4-A} = F_{A-4} \frac{A_A}{A_4} = 0.246$$

$$F_{4-3} = F_{4-A} - (F_{4-1} + F_{4-2}) = 0.066$$

$$F_{4-4} = 1 - 2F_{4-A} = 0.508$$

$$F_{(6+C)-B} = 0.605$$

$$F_{(6+C)-4} = F_{(6+C)-B} - F_{(6+C)-A} = 0.439$$

$$F_{4-6} + F_{4-C} = F_{(6+C)-4} \frac{A_6 + A_C}{A_4} = 0.143$$

$$F_{4-5} = F_{4-A} - (F_{4-6} + F_{4-C}) = 0.103$$

$$F_{C-B} = 0.770$$

$$F_{C-4} = F_{C-B} - F_{C-A} = 0.582$$

$$F_{4-C} = F_{C-4} \frac{A_C}{A_4} = 0.034$$

$$F_{4-6} = F_{4-A} - (F_{4-5} + F_{4-C}) = 0.109$$

$$F_{4-7} : F_{4-8} : F_{4-9} = F_{4'-7} : F_{4'-8} : F_{4'-9} \\ = 48 : 38 : 5 \quad \triangle$$

$$F_{4-7} = 0.018, \quad F_{4-8} = 0.014, \quad F_{4-9} = 0.002$$

$$F_{5-3} = F_{3-5} \frac{A_3}{A_5} = 0.018$$

$$F_{B-5} = 1 - F_{(6+C)-B} = 0.395$$

$$F_{5-B} = F_{B-5} \frac{A_B}{A_5} = 0.389$$

$$F_{5-4} = F_{B-5} - (F_{5-1} + F_{5-2} + F_{5-3}) = 0.314$$

$$F_{5-5} = 1 - 2F_{5-B} = 0.222$$

$$F_{C-5} = 1 - F_{C-B} = 0.230$$

$$F_{5-7} = F_{5-C} = F_{C-5} \frac{A_C}{A_5} = 0.041$$

$$F_{5-6} = F_{5-B} - F_{5-C} = 0.348$$

$$F_{6-3} = F_{3-6} \frac{A_3}{A_6} = 0.028$$

$$F_{6-4} = F_{4-6} \frac{A_4}{A_6} = 0.408$$

$$F_{6-5} = F_{5-6} \frac{A_5}{A_6} = 0.430$$

$$F_{C-8} + F_{C-9} = 0.231$$

$$F_{C-7} = 1 - (F_{C-8} + F_{C-9}) = 0.769$$

$$F_{7-C} = F_{C-7} \frac{A_C}{A_7} = 0.240$$

$$F_{7-1'} = F_{1-7} \frac{A_1}{A_7} = 0.010$$

$$F_{7-4'} = F_{4-7} \frac{A_4}{A_7} = 0.097$$

$$F_{7-5'} = F_{5-7} \frac{A_5}{A_7} = 0.073$$

$$F_{7-1} : F_{7-2} : F_{7-3} : F_{7-4} : F_{7-5}$$

$$= F_{7-1'} : F_{7-2'} : F_{7-3'} : F_{7-4'} : F_{7-5'}$$

$$= 10 : 8 : 8 : 97 : 73 \quad \triangle$$

$$F_{7-1} = 0.012, \quad F_{7-2} = F_{7-3} = 0.010$$

$$F_{7-4} = 0.119, \quad F_{7-5} = 0.089$$

$$F_{7-7} = 1 - 2 F_{7-C} = 0.520$$

$$F_{9-C} = 0.280$$

$$F_{9-7} = 1 - F_{9-C} = 0.720$$

$$F_{7-9} = F_{9-7} \frac{A_9}{A_7} = 0.024$$

$$F_{7-8} = F_{7-C} - F_{7-9} = 0.216$$

$$F_{C-9} = 0.029$$

$$F_{C-8} = 0.231 - F_{C-9} = 0.202$$

$$F_{8-C} = F_{C-8} \frac{A_C}{A_8} = 0.224$$

$$F_{8-1'} = F_{1-8} \frac{A_1}{A_8} = 0.053$$

$$F_{8-4'} = F_{4-8} \frac{A_4}{A_8} = 0.270$$

$$F_{8-1} : F_{8-2} : F_{8-3} : F_{8-4}$$

$$= F_{8-1'} : F_{8-2'} : F_{8-3'} : F_{8-4'}$$

$$= 53 : 38 : 29 : 270 \quad \triangle$$

$$F_{8-1} = 0.030, \quad F_{8-2} = 0.022, \quad F_{8-3} = 0.017$$

$$F_{8-4} = 0.155$$

$$F_{8-7} = 1 - F_{8-C} = 0.776$$

$$F_{9-4} = F_{9-C} - (F_{9-1} + F_{9-2} + F_{9-3}) = 0.156$$

以上の形態係数を(15)式に代入し、各面の温度 T_i と輻射率 ϵ_i を適当に仮定して(15)式に代入して連立一次方程式を解く事により各 G_i が求まる。この G_i と F_{j-i} を(14)式に代入する事により最終的に各 q_i が求まる。

航空宇宙技術研究所報告981号

昭和63年6月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) ㊦182

印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山5-6-17

Printed in Japan