

JAERI - M
89-022

テフロン製トランスファーチューブの開発

1989年3月

山村 秀政*・吉田 純**・星野 雅弘
河野 勝己・加藤 崇・多田 栄介

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 燃高野高速印刷

テフロン製トランスファーチューブの開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

山村 秀政^{*}・吉田 純^{**}・星野 雅弘・河野 勝己・加藤 崇・多田 栄介

(1989年2月1日受理)

実験室内における液体ヘリウム移送は、従来金属製（ステンレス・スチール）のトランスファーチューブにて行われている。極低温で劣下の少ないテフロン等でトランスファーチューブを製作すると、軽量化でき、作業が簡素化され製作も容易になり経済性が向上する。しかし、テフロンは表面からのアウトガス量が非常に多く、ガス透過性も大きいゆえ、トランスファーチューブの真空断熱層を高真空に保つことがむづかしい。テフロンは熱伝導率が小さいため伝導による侵入熱が低減できるゆえ、液体ヘリウムの移送効率は主にこの真空度に依存する。すなわち、テフロン性トランスファーチューブの実用性は真空性能によって決定される。

そこで、テフロン製トランスファーチューブを試作し、真空排気試験を行い、真空性能を検証した。更に、液体ヘリウム移送試験においては、真空度と移送効率の関係を評価した。その結果、真空排気に関してはアウトガス量を評価した計算式と実測値はよく一致し、到達真空度が評価できることがわかった。しかし、その真空度は実用に対しては、充分でないことも判明した。また、液体ヘリウム移送試験については、真空度に見合う液体ヘリウムが移送されたが、真空度の値により液送効率は低く、実用に対する技術的問題はテフロンチューブ内の真空度向上であることが定量的にも明かとされた。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

* 外来研究員， 株 神戸製鋼所

** 外来研究員， 株 日立製作所

Development of Teflon Transfertube

Hidemasa YAMAMURA^{*}, Jun YOSHIDA^{**}, Masahiro HOSHINO
Katsumi KAWANO, Takasi KATO and Eisuke TADA

Department of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Insutitute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 1, 1989)

Teflon transfertube, which is used for transferring liquid helium from a dewar to a cryostat of superconducting magnets in a laboratory, has been manufactured as test sample. A teflon transfertube is light weight, easy to handle, easy to manufacture, and economy, compered with a stainless steel transfertube. Teflon, however, has disadvantageous characteristics for a transfertube; high outgassing and gas penetration, which cause difficulty to perform high vacuum insulation in a teflon transfertube. Accordingly, liquid helium transfer efficiency of the transfertube depends on vacuum insulation.

Vacuum test and liquid helium transfer test were conducted by using the test sample of the teflon transfertube. Through the tests, the following results are obtained.

- 1) It is possible to estimate the ultimate insulation vacuum in teflon transfertube by using the formula which takes account of an outgassing.
- 2) The relation between an amount of transferring liquid helium and vacuum is quantitatively demonstrated.
- 3) Improvement of the vacuum in the insulation should be quite necessary for practical use of the teflon transfertube.

Keywords: Teflon, Transfertube, Liquid Helium, Insulation Vacuum,
Outgassing

* on leave from Kobe Steel Co. Ltd.

** on leave from Hitachi Ltd.

目 次

1. 序論	1
2. テフロン製トランスファーチューブの概要	1
2.1 テフロン材の選択理由	1
2.2 テフロン製トランスファーチューブの構造	1
3. 真空排気試験および検討	2
3.1 概要	2
3.2 真空排気試験	2
3.3 試験結果	2
3.4 到達真空度に関する検討	3
3.4.1 排気容積およびアウトガス量	3
3.4.2 真空排気時間の計算	3
3.5 トランスファーチューブ内部の真空度の予測	4
4. 液体ヘリウム移送試験および検討	5
4.1 液体ヘリウム移送試験方法	5
4.2 液体ヘリウム移送試験結果	5
4.3 移送効率に関する検討	6
4.4 液体ヘリウム移送試験に関する考察	7
5. 結論	7
謝辞	7
参考文献	7

1. 序 論

実験室内において、超電導マグネット導体試験など様々な極低温下での実験を行う場合、液体ヘリウムをデュワからクライオスタット等の各種試験装置に供給するのに、従来は金属製の門型トランスファーチューブを使用している。金属製トランスファーチューブは、ステンレススチールで作られているため重量が重く、剛であるため受け側の位置や高さに対する自由度も少ない。門型のトランスファーチューブによる液体ヘリウムの移送は比較的頻繁に行われることから、軽量で取扱が容易かつ安価なトランスファーチューブを開発することは、非常に重要である。そこで、軽量であり極低温下でも使用可能なPFA（パーフロロアルコキシ側鎖4フッ化エチレン樹脂＝テフロン）を主素材として採用した門型のトランスファーチューブを試作し、性能評価及び実用化への問題点を明かすため、真空層の真空排気試験および液体ヘリウム移送試験を行うとともに、種々の検討を行った。

2. テフロン製トランスファーチューブの概要

2.1 テフロン材の選択理由

トランスファーチューブの内管は液体ヘリウム等の極低温流体に直接接触するため、極低温下においても劣化の少ない材料を選択する必要がある。そこで軽量で溶融成形が容易であり、また極低温においても比較的比強度の高いテフロンを主構成材料として採用した。図1にテフロンの極低温下における性質の変化を示す。更にテフロンは次の特徴を持っているため、トランスファーチューブの材料として有利であると考えられる。

- (1) 軽量で取扱いが簡単である。
- (2) 熱伝導率が小さいため伝導による侵入熱を低減できる。
- (3) 室温時における自由度が大きい。
- (4) 非金属であるため電気絶縁性に優れている。
- (5) 加工法が簡単であるため安価である。

一方、低温時の硬化や、表面からのアウトガスおよびガス透過による高真空度保持の困難さなどの技術的課題が残されている。

2.2 テフロン製トランスファーチューブの構造

テフロン製トランスファーチューブ試作品の概略構造図を図2に示す。基本構造は通常の真空断熱構造とし、スパン1.5 m高さ1.5 mの門型とした。低温の流体が直接接触する内管（ $\phi 6 / \phi 4$ ）、真空断熱層を形成する外管（ $\phi 43 / \phi 36$ ）および内管を中心部に保持するためのス

1. 序 論

実験室内において、超電導マグネット導体試験など様々な極低温下での実験を行う場合、液体ヘリウムをデュワからクライオスタット等の各種試験装置に供給するのに、従来は金属製の門型トランスファーチューブを使用している。金属製トランスファーチューブは、ステンレススチールで作られているため重量が重く、剛であるため受け側の位置や高さに対する自由度も少ない。門型のトランスファーチューブによる液体ヘリウムの移送は比較的頻繁に行われることから、軽量で取扱が容易かつ安価なトランスファーチューブを開発することは、非常に重要である。そこで、軽量であり極低温下でも使用可能なPFA（パーフロロアルコキシ側鎖4フッ化エチレン樹脂＝テフロン）を主素材として採用した門型のトランスファーチューブを試作し、性能評価及び実用化への問題点を明かすため、真空層の真空排気試験および液体ヘリウム移送試験を行うとともに、種々の検討を行った。

2. テフロン製トランスファーチューブの概要

2.1 テフロン材の選択理由

トランスファーチューブの内管は液体ヘリウム等の極低温流体に直接接触するため、極低温下においても劣化の少ない材料を選択する必要がある。そこで軽量で溶融成形が容易であり、また極低温においても比較的比強度の高いテフロンを主構成材料として採用した。図1にテフロンの極低温下における性質の変化を示す。更にテフロンは次の特徴を持っているため、トランスファーチューブの材料として有利であると考えられる。

- (1) 軽量で取扱いが簡単である。
- (2) 熱伝導率が小さいため伝導による侵入熱を低減できる。
- (3) 室温時における自由度が大きい。
- (4) 非金属であるため電気絶縁性に優れている。
- (5) 加工法が簡単であるため安価である。

一方、低温時の硬化や、表面からのアウトガスおよびガス透過による高真空度保持の困難さなどの技術的課題が残されている。

2.2 テフロン製トランスファーチューブの構造

テフロン製トランスファーチューブ試作品の概略構造図を図2に示す。基本構造は通常の真空断熱構造とし、スパン1.5 m高さ1.5 mの門型とした。低温の流体が直接接触する内管（ $\phi 6 / \phi 4$ ）、真空断熱層を形成する外管（ $\phi 43 / \phi 36$ ）および内管を中心部に保持するためのス

ペーサなどの主要構成部材は全てテフロンを用いて製作した。外管のコーナ部は液送時の自由度を持たせるためプライアブルエルボで接続した。内管の外側には、外管からの放射侵入熱を防ぐために10層のS I (スーパーインシュレーション) を、真空断熱層の真空度を上げるために、合成ゼオライト (モレキュラシーヴス) を巻き込んでいる。テフロン同士の接続は全て溶接で行った。また、外部から真空排気を行うためのシールオフバルブ (黄銅製) を外管に融着させた。

3. 真空排気試験および検討

3.1 概 要

二重管構造のトランスファーチューブにおいて、極低温液体の十分な移送を実現するためには、真空層の真空度をある程度高い状態に保つ必要がある。しかし、テフロン製トランスファーチューブはテフロン表面からのアウトガス量が多いこと、テフロンのガス透過性が非常に大きいことから、従来の金属製に対し、到達真空度が低い。極低温液体の移送効率、主にこの真空度に依存するため、試作品の真空排気試験を行うとともに到達真空度に関する検討を行った。

3.2 真空排気試験

真空排気試験のフロー図を図3に示す。テフロン製トランスファーチューブのシールオフバルブに内径50mm長さ2.5mのフレキシブルチューブ (ステンレス製) を接続し、油回転真空ポンプ (公称排気速度320 l/s) および油拡散真空ポンプ (公称排気速度1500 l/s) を用いて真空排気を行った。シールオフバルブの付近に真空計を取り付け、到達真空度およびシールオフバルブを封じ切った場合の真空劣化速度を調査した。

また、内管に液体窒素を流しながらの真空排気試験も行い、80Kレベルのクライオ効果を加味した到達真空度も調査した。

3.3 試験結果

真空排気開始後約42分で真空度は 4.0×10^{-2} Torrに達し、油拡散真空ポンプを起動することができた。今回の真空排気系では到達真空度 2×10^{-3} Torr程度 (シールオフバルブ引き口) となった。(3.4参照)

上記到達真空度からシールオフバルブを封じ切った結果、約3分で0.1 Torrまで真空劣化した。

また、内管に液体窒素を供給しながら真空排気を行った場合の到達真空度は、 1.1×10^{-3} Torrであった。

ペーサなどの主要構成部材は全てテフロンを用いて製作した。外管のコーナ部は液送時の自由度を持たせるためプライアブルエルボで接続した。内管の外側には、外管からの放射侵入熱を防ぐために10層のS I (スーパーインシュレーション) を、真空断熱層の真空度を上げるために、合成ゼオライト (モレキュラシーヴス) を巻き込んでいる。テフロン同士の接続は全て溶接で行った。また、外部から真空排気を行うためのシールオフバルブ (黄銅製) を外管に融着させた。

3. 真空排気試験および検討

3.1 概 要

二重管構造のトランスファーチューブにおいて、極低温液体の十分な移送を実現するためには、真空層の真空度をある程度高い状態に保つ必要がある。しかし、テフロン製トランスファーチューブはテフロン表面からのアウトガス量が多いこと、テフロンのガス透過性が非常に大きいことから、従来の金属製に対し、到達真空度が低い。極低温液体の移送効率は、主にこの真空度に依存するため、試作品の真空排気試験を行うとともに到達真空度に関する検討を行った。

3.2 真空排気試験

真空排気試験のフロー図を図3に示す。テフロン製トランスファーチューブのシールオフバルブに内径50mm長さ2.5mのフレキシブルチューブ (ステンレス製) を接続し、油回転真空ポンプ (公称排気速度320 l/s) および油拡散真空ポンプ (公称排気速度1500 l/s) を用いて真空排気を行った。シールオフバルブの付近に真空計を取り付け、到達真空度およびシールオフバルブを封じ切った場合の真空劣化速度を調査した。

また、内管に液体窒素を流しながらの真空排気試験も行い、80Kレベルのクライオ効果を加味した到達真空度も調査した。

3.3 試験結果

真空排気開始後約42分で真空度は 4.0×10^{-2} Torr に達し、油拡散真空ポンプを起動することができた。今回の真空排気系では到達真空度 2×10^{-3} Torr 程度 (シールオフバルブ引き口) となった。(3.4参照)

上記到達真空度からシールオフバルブを封じ切った結果、約3分で0.1 Torr まで真空劣化した。

また、内管に液体窒素を供給しながら真空排気を行った場合の到達真空度は、 1.1×10^{-3} Torr であった。

3.4 到達真空度に関する検討

試供品の到達真空度に関し、真空層を構成する主要材であるテフロンおよびS I（スーパーインシュレーション）からのアウトガス量、並びに真空排気ポンプの有効排気速度の関係から到達真空度と真空排気時間の検討を行った。

3.4.1 排気容積およびアウトガス量

図3の試験フローにおける排気容積はトランスファーチューブ内の排気容積 $V_T = 2.32 \text{ l}$ およびフレキシブルチューブ内の排気容積 $V_S = 4.91 \text{ l}$ の和とし、 7.2 l である。また、アウトガスは、主としてテフロン材表面とS I表面から発生するものとして、表1(1)、(2)のように評価した。

なお表1(1)、(2)において、テフロンの表面積は、外管内表面 0.29 m^2 、内管外表面 0.06 m^2 、およびスペーサ 0.008 m^2 、の合計から 0.358 m^2 とし、S Iの表面積は、 $\phi 6$ パイプに10層巻で互いに接触部分が無いとして、 1.24 m^2 としている。

以上より、真空排気時間 t に対する、真空ポンプ引き口におけるアウトガス量 G は、表1(3)のようになる。

3.4.2 真空排気時間の計算

図3の真空排気試験フロー図において、上記の真空排気時間とアウトガスの関係を使用し真空排気時間の計算を行った。真空排気の基本式を次に示す。

$$-V \frac{dP}{dt} = P \cdot S_e - G(t) \dots \dots \dots (1)$$

V : 被排気容積(l)

P : 圧力 (Torr)

t : 真空排気時間 (sec)

S_e : 計算点 (図2) での有効排気速度 (l/s)

$G(t)$: 計算点 (図2) でのアウトガス量 (Torr l/s)

上記(1)式において、真空排気時間を細分化しその時間ステップではアウトガス一定として積分する。

$$\frac{1}{S_e} \ln |P \cdot S_e - G| = -\frac{1}{V} t + C^* \quad C \text{ は積分定数}$$

$$\ln |P \cdot S_e - G| = -\frac{S_e}{V} t + C^* \quad (C^* = C \cdot S_e)$$

$t = 0$ での初期圧力を P_0 とすると、 $C^* = \ln |P_0 \cdot S_e - G|$ より

$$\ln \left| \frac{P S_e - G}{P_0 S_e - G} \right| = -\frac{S_e}{V} t$$

排気可能条件より $P \cdot Se > G$ かつ $P_0 \cdot Se > G$ であるので

$$P \cdot Se - G = (P_0 \cdot Se - G) \exp\left(-\frac{Se}{V} t\right)$$

$$P = \frac{G}{Se} + \frac{P_0 Se - G}{Se} \cdot \exp\left(-\frac{Se}{V} t\right) \dots\dots\dots (2)$$

(2)式を時間に対して前進差分的に解くことにより、各時刻の真空度を求める。

なお、計算条件は下記による。

- * 計算時間ステップ 0.1 sec
- * 被排気容積 $V = 2.4 \text{ l}$
- * 真空ポンプ有効排気速度 Se
 - 油回転真空ポンプ (ULVAC D330) 粗引時
 - ポンプ実効排気速度 $S_0 = 4.26 \text{ l/s}$
 - 配管系コンダクタンス $C = 2.79 \text{ l/s}$
 - 有効排気速度 $Se = \frac{S_0 C}{S_0 + C} = 1.69 \text{ l/s}$
 - 油拡散真空ポンプ (ULVAC ULK-06A) 運転時
 - ポンプ実効排気速度 $S_0 = 1100 \text{ l/s}$
 - 配管系コンダクタンス $C = 5.90 \text{ l/s}$
 - 有効排気速度 $Se = \frac{S_0 C}{S_0 + C} = 5.86 \text{ l/s}$
- * 油拡散ポンプ切り替え時間
 - 真空排気開始後 4 2分とする。(実測時の条件)
- * アウトガス量 G 図4による
- * 初期圧力 $P_0 = 760 \text{ Torr}$

以上の条件での計算結果を表2に、また、実測値との比較を図5に示す。これによると、実測値と計算値(2)式)は非常に良く一致し、テフロン製トランスファーチューブの到達真空度は予測可能であった。

3.5 トランスファーチューブ内部の真空度の予測

前項のようにシールオフバルブ引き口での真空度が $1 \times 10^{-3} \text{ Torr}$ の場合の、トランスファーチューブの内部における真空度を予測した。すなわち、図6においてA点の真空度から各点(A~D)の到達真空を、アウトガスおよび配管コンダクタンスからもとめた。

図6中の各点(A~D)におけるアウトガス量、並びに配管コンダクタンスは、以下のようになる。

- A点のアウトガス $G_A = 1.2 \times 10^{-2} \text{ Torr l/s}$
- B点のアウトガス $G_B = 1.2 \times 10^{-2} \text{ Torr l/s}$
- C点のアウトガス $G_C = 7.2 \times 10^{-3} \text{ Torr l/s}$

$$D \text{ 点のアウトガス } G_D = 4.8 \times 10^{-3} \text{ Torr } \ell / \text{s}$$

$$A \text{ B 間のコンダクタンス } C_{AB} = 5.0 \ell / \text{s}$$

$$B \text{ C 間の圧力差 } \Delta P_{BC} = Q_C / C_{BC} = 1.8 \times 10^{-3} \text{ Torr}$$

$$B \text{ D 間の圧力差 } \Delta P_{BD} = Q_D / C_{BD} = 7.6 \times 10^{-4} \text{ Torr}$$

となる。

従って、A点の真空度を 2.0×10^{-3} Torr とするとC点では 6.2×10^{-3} Torr、D点では 5.1×10^{-3} Torr と予想される。

4. 液体ヘリウム移送試験および検討

4.1 液体ヘリウム移送試験方法

液体ヘリウム移送試験に用いた試験装置のフロー図を図7に示す。最初に、トランスファーチューブを両デュワーに取り付け、真空ポンプで真空排気を行い、真空断熱層の真空度が所定の値（真空ポンプ引き口において 1×10^{-5} Torr 以下）に達した後、1000ℓデュワーを常温のヘリウムガスで加圧し、500ℓデュワーに液体ヘリウムを液送した。また、500ℓデュワーに液送した液体ヘリウムはここで気液分離し、ガス化したヘリウムは回収ラインを通してガスバッグに回収した。そして、1000ℓデュワーの液体ヘリウムの減少量から液送量を算出し、500ℓデュワーの液体ヘリウム増加量から、受取液量を算出して、液送効率を評価した。

4.2 液体ヘリウム移送試験結果

液体ヘリウム移送試験結果は、表3に示す通りである。この結果より、最大液送効率は9%であった。この値は、熱侵入とフラッシュロスの両方の影響を含んだものである。トランスファーチューブの入口圧力および出口圧力より計算したフラッシュロスによる蒸発分は約8%であるので、熱侵入のみを考慮した液送効率は17%となる。また、この時の平均真空度は 5.0×10^{-3} Torr であった。

4.3 液送効率に関する検討

液送効率に対する、実験結果と計算結果との比較を以下に行う。まず、熱侵入より計算した液送効率と実験値を比較する。図8は、図2に示すトランスファーチューブに対して、対流伝熱量 Q_C 、固体伝熱量 Q_S 、放射伝熱量 Q_R 、およびこれらの伝熱量を合計したものを Q_T を真空度に対してプロットしたものである。なお、各伝熱量は以下の式を用いて計算した。

$$Q_C = 0.243 \cdot \frac{r+1}{r-1} \cdot a_0 \frac{T_h - T_c}{\sqrt{MT}} \cdot P_A \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned}
 \text{D点のアウトガス } G_D &= 4.8 \times 10^{-3} \text{ Torr } \ell / \text{s} \\
 \text{A B間のコンダクタンス } C_{AB} &= 5.0 \ell / \text{s} \\
 \text{B C間の圧力差 } \Delta P_{BC} &= Q_C / C_{BC} = 1.8 \times 10^{-3} \text{ Torr} \\
 \text{B D間の圧力差 } \Delta P_{BD} &= Q_D / C_{BD} = 7.6 \times 10^{-4} \text{ Torr}
 \end{aligned}$$

となる。

従って、A点の真空度を 2.0×10^{-3} Torr とするとC点では 6.2×10^{-3} Torr、D点では 5.1×10^{-3} Torr と予想される。

4. 液体ヘリウム移送試験および検討

4.1 液体ヘリウム移送試験方法

液体ヘリウム移送試験に用いた試験装置のフロー図を図7に示す。最初に、トランスファーチューブを両デュワーに取り付け、真空ポンプで真空排気を行い、真空断熱層の真空度が所定の値（真空ポンプ引き口において 1×10^{-5} Torr 以下）に達した後、1000ℓデュワーを常温のヘリウムガスで加圧し、500ℓデュワーに液体ヘリウムを液送した。また、500ℓデュワーに液送した液体ヘリウムはここで気液分離し、ガス化したヘリウムは回収ラインを通してガスバッグに回収した。そして、1000ℓデュワーの液体ヘリウムの減少量から液送量を算出し、500ℓデュワーの液体ヘリウム増加量から、受取液量を算出して、液送効率を評価した。

4.2 液体ヘリウム移送試験結果

液体ヘリウム移送試験結果は、表3に示す通りである。この結果より、最大液送効率は9%であった。この値は、熱侵入とフラッシュロスの両方の影響を含んだものである。トランスファーチューブの入口圧力および出口圧力より計算したフラッシュロスによる蒸発分は約8%であるので、熱侵入のみを考慮した液送効率は17%となる。また、この時の平均真空度は 5.0×10^{-3} Torr であった。

4.3 液送効率に関する検討

液送効率に対する、実験結果と計算結果との比較を以下に行う。まず、熱侵入より計算した液送効率と実験値を比較する。図8は、図2に示すトランスファーチューブに対して、対流伝熱量 Q_C 、固体伝熱量 Q_S 、放射伝熱量 Q_R 、およびこれらの伝熱量を合計したものの Q_T を真空度に対してプロットしたものである。なお、各伝熱量は以下の式を用いて計算した。

$$Q_C = 0.243 \cdot \frac{r+1}{r-1} \cdot a_0 \frac{T_h - T_c}{\sqrt{MT}} \cdot P_A \dots\dots\dots (3)$$

$$T = \frac{T_h + T_c}{2}$$

γ : 内部流体の比熱比(-)

a_0 : 適応係数(-)

M : 内部流体の分子量 (g / mol)

T : 温度 (K)

P : 真空度 (Torr)

A : 伝熱面積 (cm²)

(添字 h : 高温側, c : 低温側)

$$Q_S = \lambda / \delta (T_h - T_c) A \dots\dots\dots (4)$$

: 平均熱伝導率 (W / mK)

: 伝導距離 (m)

$$Q_R = \sigma \cdot E_i (T_h^4 - T_c^4) A \dots\dots\dots (5)$$

$$E = \frac{1}{1/\epsilon_i + A_i/A_{i+1} (1/\epsilon_{i+1} - 1)}$$

ϵ : 単色放射率(-)

σ : ステファン・ボルツマン定数 (W / m² K⁴)

(添字 ϵ_i : 高温面 ϵ_{i+1} : 低温面)

$$Q_T = Q_C + Q_S + Q_R \dots\dots\dots (6)$$

各伝熱形態のうち、対流伝熱量 Q_C だけが真空度の劣化に伴い増加するものである。今回の実験では、トランスファーチューブ内の平均真空度は約 5.0×10^{-3} Torrであった。従って、図8より熱侵入量は約63 Wと推定される。図9は図8に示す熱侵入量を用いて液送効率を、トランスファーチューブの断熱真空層内の真空度に対する液送効率の変化を求めたものである。この場合、フラッシュロスは無視した。同図より、計算結果と実験結果が良い一致を示すことがわかる。また、この図より、 1.0×10^{-3} Torr以上の真空度を得ることができれば、80%以上の液送効率が期待でき、充分実用可能であることがわかる。

本実験では、トランスファーチューブ内のヘリウムの流れは、二相流となっており、その圧力損失と液送効率より、ヘリウム二相流における圧力損失と気液率の関係が求められる。

図10に示すように二相流圧力損失モデルは、均質流モデルと気液率を想定したLockhart-Martinilliの相関式が代表的である。以前の、当研究室における実験では、ヘリウム二相流の圧力損失は、均質流モデルに従うことを明らかにした。そこで、今回のデータを、実際、均質流モデルとして圧力損失より気液率を求めてみると、 $\Delta P_{TP} / \Delta P_L = 5.1$ であるゆえ気液率は0.9となり、液送効率10%で実測値9%に非常に良い一致を示す。

4.4 液体ヘリウム移送試験に関する考察

今回の実験において最大液送効率が9%しか得られなかった原因は、トランスファーチューブの断熱真空層の真空度によるものであることが明かとされた。低い真空度のため対流伝熱によ

る液体ヘリウムへの熱侵入量が増加し、さらに管内での気液率が高くなり圧力損失が増大し、液送効率が低下したものであることがわかった。

5. 結 論

テフロン製トランスファーチューブの真空排気試験および液体ヘリウム移送試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 最大到達真空度はシールオフバルブ引き口で、 2.0×10^{-3} Torr、トランスファーチューブ内部で 5.0×10^{-3} Torr であった。
- (2) 到達真空度の測定値は(2)式とほぼ一致し、(2)式で充分予測可能であることが明かとなった。
- (3) 真空封じ切り性能については、実用に充分な結果は得られなかった。
- (4) 液体ヘリウム液送効率は9%であった。
- (5) 液送効率に関しては計算結果と実験結果は良く一致することが明かとなった。
- (6) トランスファーチューブの断熱真空層内の真空度を 1.0×10^{-3} Torr 以下にできれば、充分実用化可能であることが明かとなった。

謝 辞

本実験の遂行にあたり御指導頂いた島本 進 核融合研究部次長、試作品の製作を引き受けて頂いたニチアス株袋井工場の森田氏をはじめとする担当者の方々、並びに実験に御協力頂いた超電導磁石研究室の皆様に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 星野 雅弘ら：'87 春季低温工学予稿集
- 2) 日本真空技術株：真空ハンドブック
- 3) Proc. of ICEC 10 (1984) pp570

る液体ヘリウムへの熱侵入量が増加し、さらに管内での気液率が高くなり圧力損失が増大し、液送効率が低下したものであることがわかった。

5. 結 論

テフロン製トランスファーチューブの真空排気試験および液体ヘリウム移送試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 最大到達真空度はシールオフバルブ引き口で、 2.0×10^{-3} Torr、トランスファーチューブ内部で 5.0×10^{-3} Torr であった。
- (2) 到達真空度の測定値は(2)式とほぼ一致し、(2)式で充分予測可能であることが明かとなった。
- (3) 真空封じ切り性能については、実用に十分な結果は得られなかった。
- (4) 液体ヘリウム液送効率は9%であった。
- (5) 液送効率に関しては計算結果と実験結果は良く一致することが明かとなった。
- (6) トランスファーチューブの断熱真空層内の真空度を 1.0×10^{-3} Torr 以下にできれば、充分実用化可能であることが明かとなった。

謝 辞

本実験の遂行にあたり御指導頂いた島本 進 核融合研究部次長、試作品の製作を引き受けて頂いたニチアス(株)袋井工場の森田氏をはじめとする担当者の方々、並びに実験に御協力頂いた超電導磁石研究室の皆様に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 星野 雅弘ら：'87 春季低温工学予稿集
- 2) 日本真空技術(株)：真空ハンドブック
- 3) Proc. of ICEC 10 (1984) pp570

る液体ヘリウムへの熱侵入量が増加し、さらに管内での気液率が高くなり圧力損失が増大し、液送効率が低下したものであることがわかった。

5. 結 論

テフロン製トランスファーチューブの真空排気試験および液体ヘリウム移送試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 最大到達真空度はシールオフバルブ引き口で、 2.0×10^{-3} Torr、トランスファーチューブ内部で 5.0×10^{-3} Torr であった。
- (2) 到達真空度の測定値は(2)式とほぼ一致し、(2)式で充分予測可能であることが明かとなった。
- (3) 真空封じ切り性能については、実用に十分な結果は得られなかった。
- (4) 液体ヘリウム液送効率は9%であった。
- (5) 液送効率に関しては計算結果と実験結果は良く一致することが明かとなった。
- (6) トランスファーチューブの断熱真空層内の真空度を 1.0×10^{-3} Torr 以下にできれば、充分実用化可能であることが明かとなった。

謝 辞

本実験の遂行にあたり御指導頂いた島本 進 核融合研究部次長、試作品の製作を引き受けて頂いたニチアス(株)袋井工場の森田氏をはじめとする担当者の方々、並びに実験に御協力頂いた超電導磁石研究室の皆様に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 星野 雅弘ら：'87 春季低温工学予稿集
- 2) 日本真空技術(株)：真空ハンドブック
- 3) Proc. of ICEC 10 (1984) pp570

る液体ヘリウムへの熱侵入量が増加し、さらに管内での気液率が高くなり圧力損失が増大し、液送効率が低下したものであることがわかった。

5. 結 論

テフロン製トランスファーチューブの真空排気試験および液体ヘリウム移送試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 最大到達真空度はシールオフバルブ引き口で、 2.0×10^{-3} Torr、トランスファーチューブ内部で 5.0×10^{-3} Torr であった。
- (2) 到達真空度の測定値は(2)式とほぼ一致し、(2)式で充分予測可能であることが明かとなった。
- (3) 真空封じ切り性能については、実用に充分な結果は得られなかった。
- (4) 液体ヘリウム液送効率は9%であった。
- (5) 液送効率に関しては計算結果と実験結果は良く一致することが明かとなった。
- (6) トランスファーチューブの断熱真空層内の真空度を 1.0×10^{-3} Torr 以下にできれば、充分実用化可能であることが明かとなった。

謝 辞

本実験の遂行にあたり御指導頂いた島本 進 核融合研究部次長、試作品の製作を引き受けて頂いたニチアス(株)袋井工場の森田氏をはじめとする担当者の方々、並びに実験に御協力頂いた超電導磁石研究室の皆様に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 星野 雅弘ら：'87 春季低温工学予稿集
- 2) 日本真空技術(株)：真空ハンドブック
- 3) Proc. of ICEC 10 (1984) pp570

表1(1) テフロン材からのアウトガス量

真空排気時間 (hour)	単位表面積からのアウトガス量 (Torr l/s m ²)	表面積 (m ²)	アウトガス量 (Torr l/s)
1	3.30×10^{-3} 2)	0.358	1.18×10^{-3}
2	2.02×10^{-3} 2)	0.358	7.23×10^{-4}
5	1.13×10^{-3} 2)	0.358	4.05×10^{-4}

表1(2) S I材からのアウトガス量

真空排気時間 (hour)	単位表面積からのアウトガス量 (Torr l/s m ²)	表面積 (m ²)	アウトガス量 (Torr l/s)
1	3.00×10^{-2} 2)	1.24	3.84×10^{-2}
2	1.43×10^{-2} 2)	1.24	1.84×10^{-2}
5	5.48×10^{-3} 2)	1.24	7.21×10^{-3}

表1(3) 真空ポンプ引き口におけるアウトガス量

真空排気時間 t (hour)	アウトガス量 G (Torr l/s)
1	3.84×10^{-2}
2	1.84×10^{-2}
5	7.21×10^{-3}

表2 真空排気計算結果

EVACUATION TIME ANALYSIS

CONDITIONS

VOLUME:2.4 litter

EFFECTIVE EVACUATING SPEED

ROTARY VACUUM PUMP : 1.69 litter/sec (ULVAC 0330)

OIL DIFFUSION PUMP : 5.86 litter/sec (ULVAC ULK-06A)

TIME (min)	OUTGAS (torr.l/sec)	はじめの	おわりの
		圧力 INT.PRESS. (torr)	圧力 ULT.PRESS (torr)
0.6	0.40E+01	0.76E+03	0.24E+01
1.2	0.20E+01	0.24E+01	0.12E+01
1.8	0.13E+01	0.12E+01	0.76E+00
2.4	0.10E+01	0.76E+00	0.59E+00
3.0	0.80E+00	0.59E+00	0.47E+00
3.6	0.65E+00	0.47E+00	0.38E+00
4.2	0.55E+00	0.38E+00	0.32E+00
4.8	0.50E+00	0.32E+00	0.24E+00
5.4	0.43E+00	0.24E+00	0.25E+00
6.0	0.38E+00	0.25E+00	0.22E+00
9.0	0.25E+00	0.22E+00	0.14E+00
12.0	0.19E+00	0.14E+00	0.11E+00
15.0	0.15E+00	0.11E+00	0.88E-01
18.0	0.12E+00	0.88E-01	0.74E-01
24.0	0.94E-01	0.74E-01	0.55E-01
30.0	0.75E-01	0.55E-01	0.44E-01
36.0	0.62E-01	0.44E-01	0.37E-01
42.0	0.54E-01	0.37E-01	0.32E-01
(OIL DIFFUSION PUMP START!)			
45.0	0.50E-01	0.32E-01	0.85E-02
48.0	0.46E-01	0.85E-02	0.79E-02
54.0	0.41E-01	0.79E-02	0.70E-02
60.0	0.38E-01	0.70E-02	0.65E-02
72.0	0.31E-01	0.65E-02	0.53E-02
84.0	0.26E-01	0.53E-02	0.44E-02
96.0	0.23E-01	0.44E-02	0.39E-02
108.0	0.20E-01	0.39E-02	0.34E-02
120.0	0.19E-01	0.34E-02	0.32E-02
150.0	0.15E-01	0.32E-02	0.25E-02
180.0	0.12E-01	0.25E-02	0.21E-02
240.0	0.90E-02	0.21E-02	0.15E-02

表3 液送試験結果

Experimental Results

Transferred liquid helium	(<i>l</i>)	4 2 2
Stored liquid helium	(<i>l</i>)	3 8
Flush loss	(<i>l</i>)	3 4
Transfer ratio	(%)	9
Apparent transfer ratio	(%)	1 7

* Transfer ratio without flush loss

Parameters (Transferred)

Pressure	(atm)	0.2 8 / 0.0 3
Temperature	(K)	4.5 / 4.2
Flow rate	(g/s)	3.3
Mean velocity	(m/s)	2.2

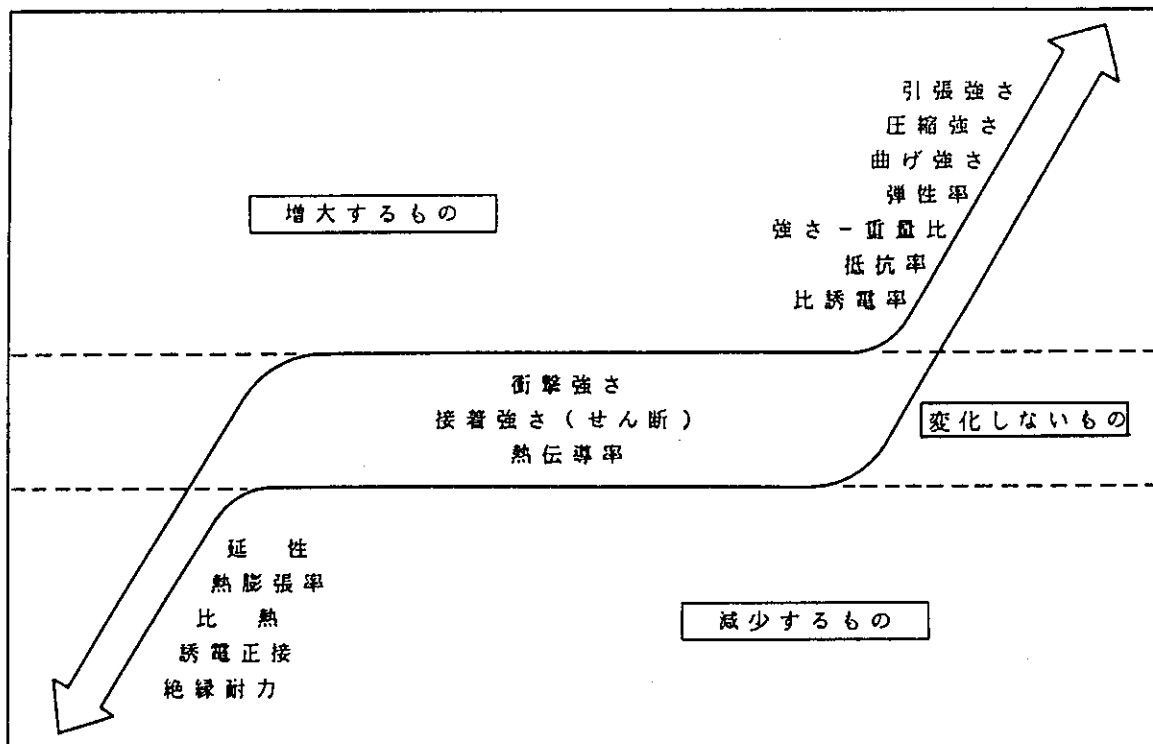


図1 テフロン of 極低温における性質の変化

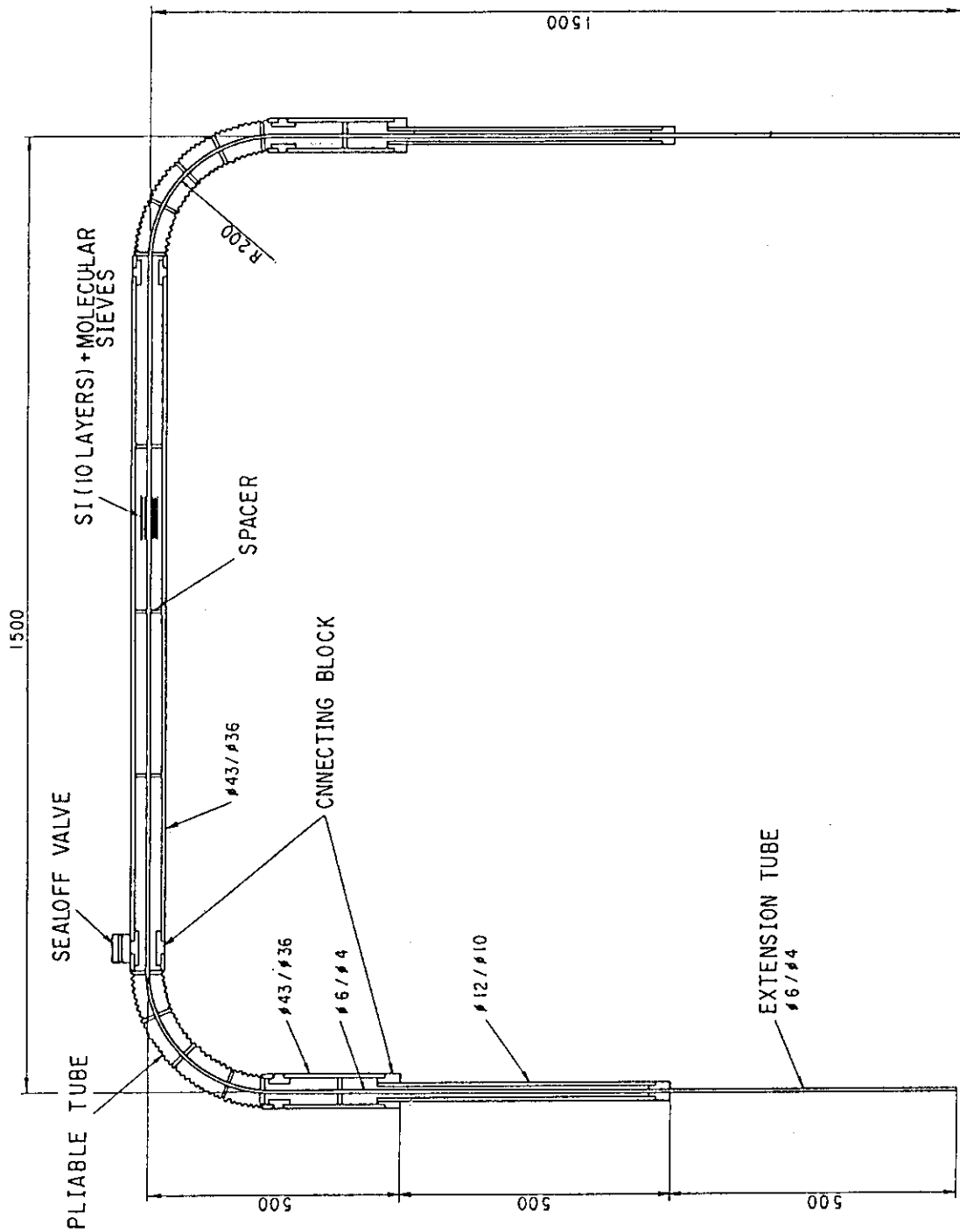


図2 テフロン製トランスファーチューブ構造図

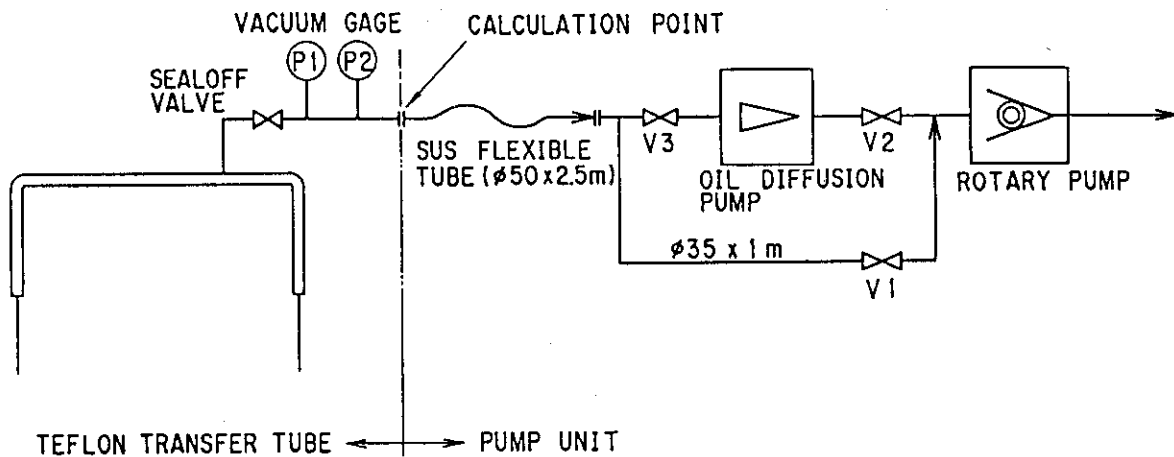


図3 真空引試験フロー図

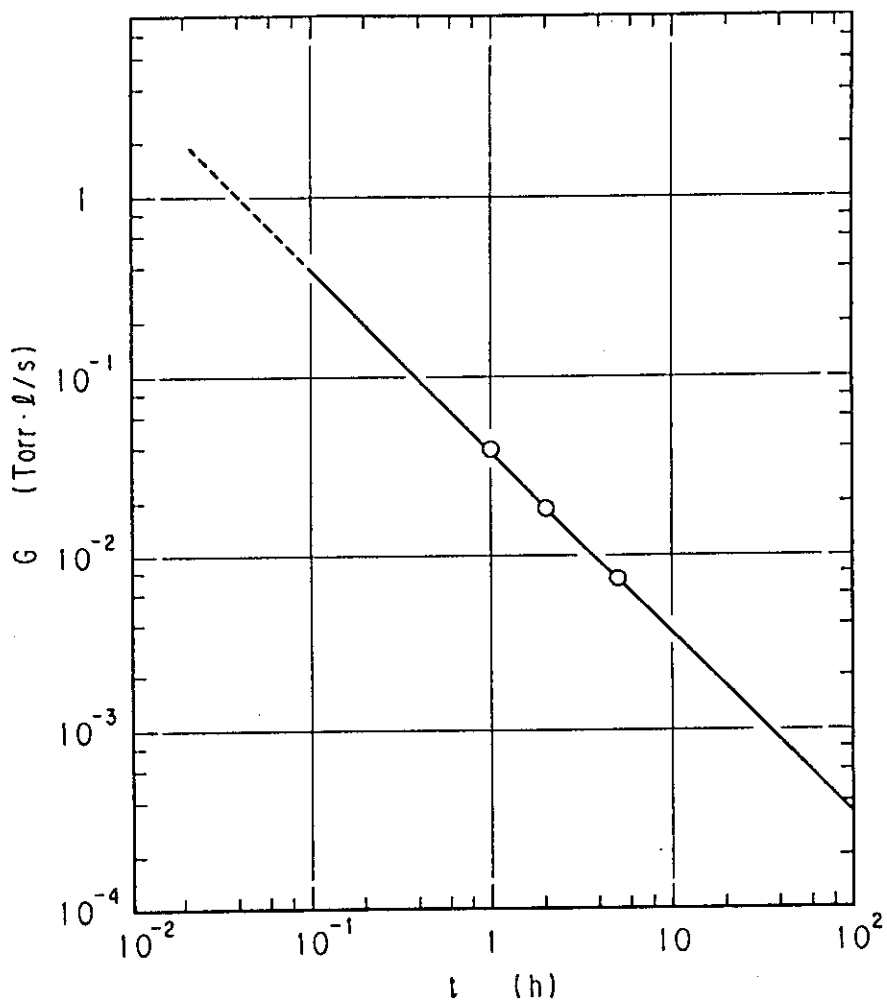


図4 テフロン製トランスファチューブ真空層アウトガス量

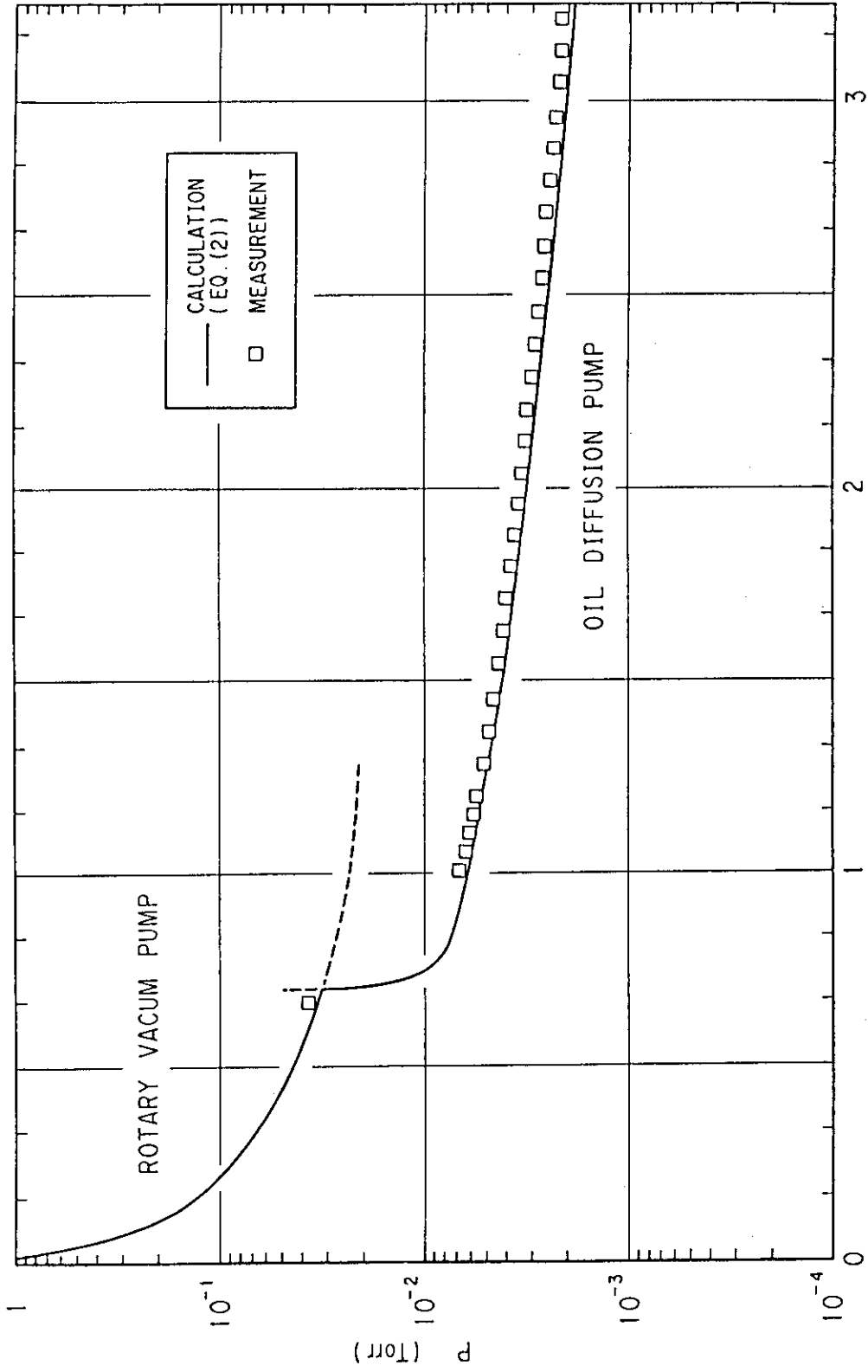


図5 真空排気時間計算結果

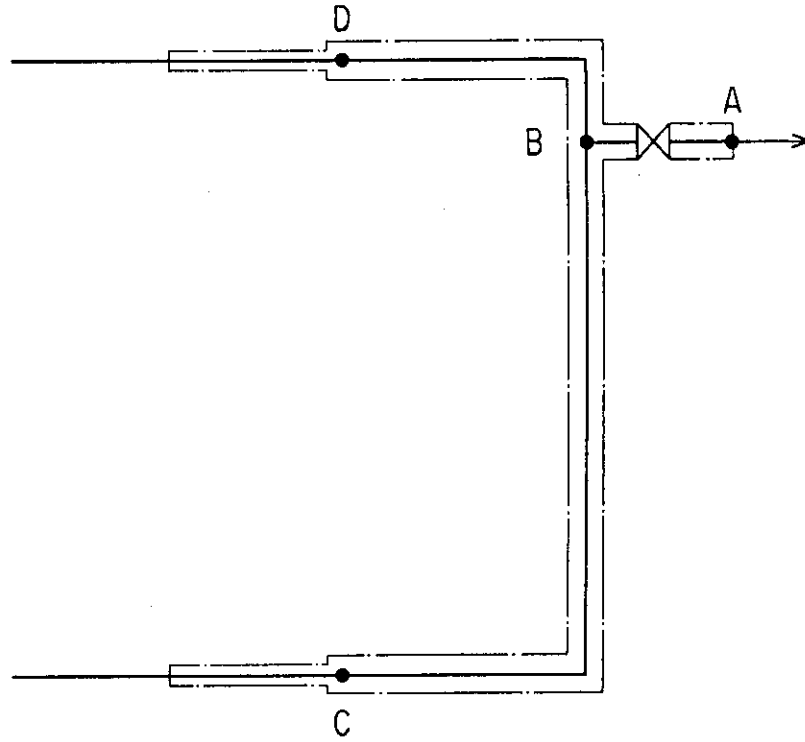


図6 トランスファーチューブ内部の真空度

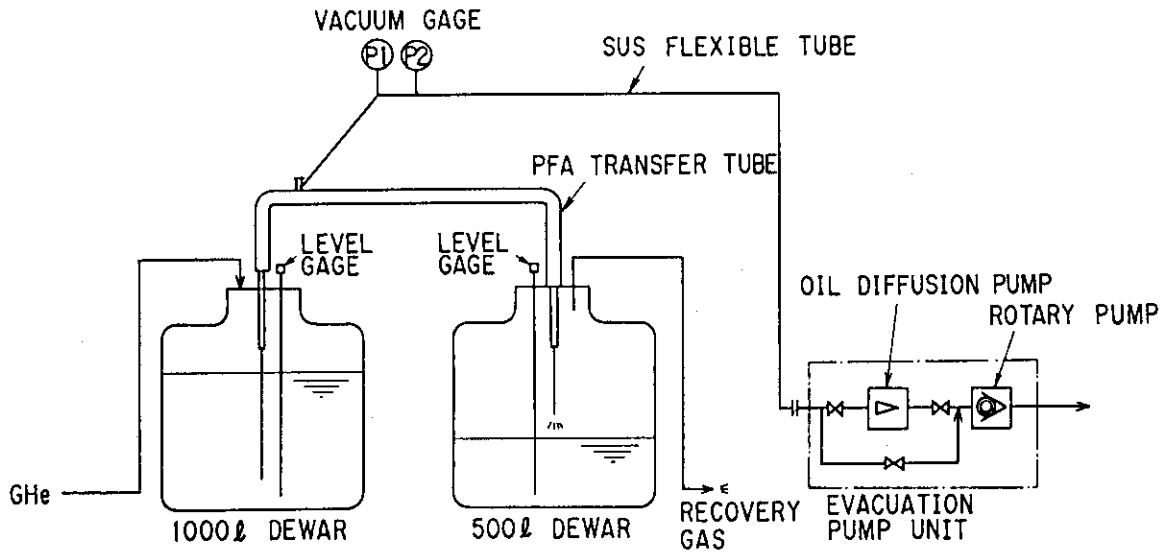


図7 液送試験装置の概略フロー図

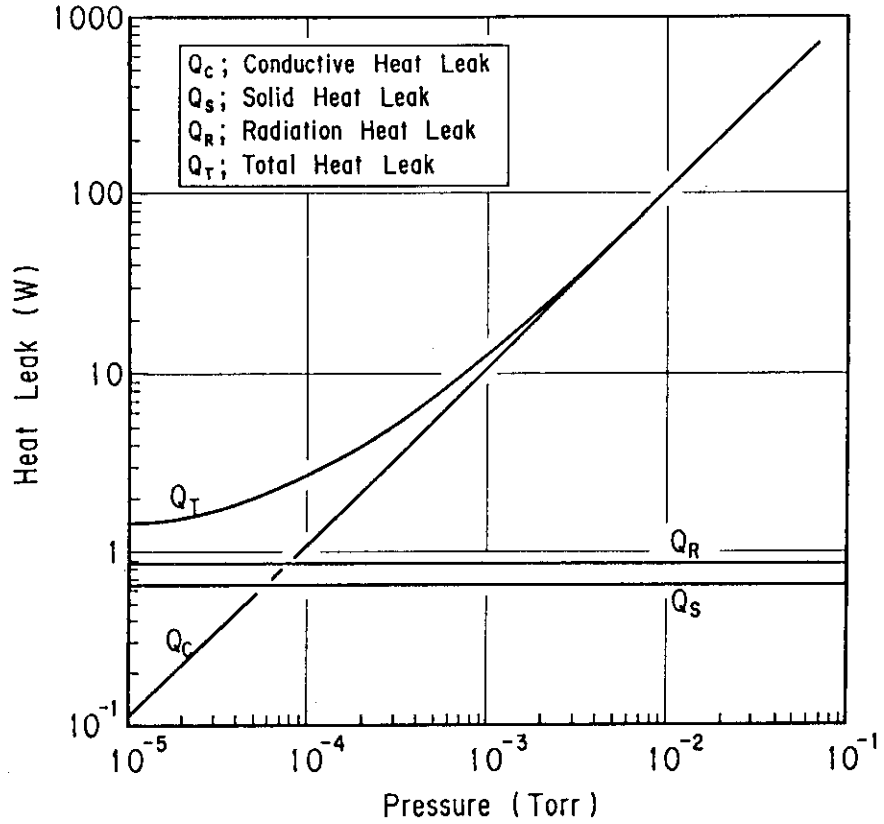


図8 真空度と侵入熱量の関係

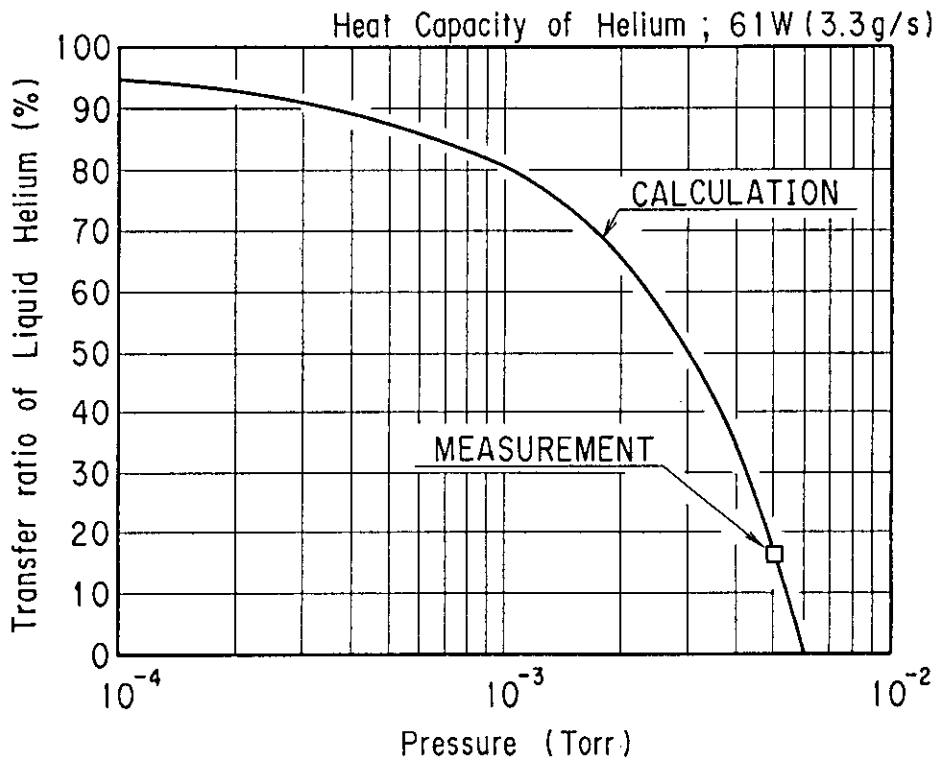


図9 真空度と液送効率の関係

$$I : \frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_L} = \left\{ (1-x) + \left(\frac{\rho_\ell}{\rho_g} \right) x \right\} \left\{ (1-x) + \left(\frac{\eta_\ell}{\eta_g} \right) x \right\}^{-0.25}$$

$$\rho_\ell / \rho_g = 7.10, \quad \eta_\ell / \eta_g = 2.48$$

$$\frac{\Delta P_L}{\Delta L} = f_L \frac{G_L^2}{2\rho_\ell D}$$

II : Lockhart - Martinelli

$$\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta L} = \phi_\ell^2 \frac{\Delta P}{\Delta L}, \quad \phi_\ell^2 = 1 + \frac{20}{X_{ff}} + \frac{1}{X_{ff}^2}$$

Parameter ;

ΔP : Pressure Drop ρ : Density η : Viscosity ΔL : Pipe length

G : Mass flow rate f : Friction factor D : Inner diameter of pipe

X : Quality

Subscript ;

L, ℓ : Liquid TP, tt : Two phase g : Gas

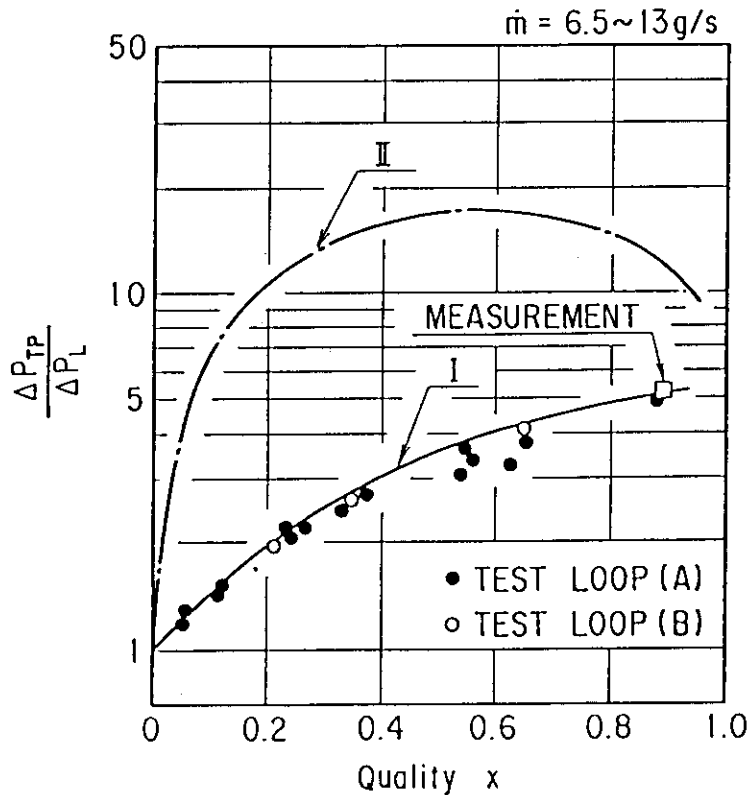


図 1 0 2相流の無次元圧損