

15' 2/3

昭和53年度サンシャイン計画
委託調査研究成果報告書

水素エネルギーサブシステムの研究 (水素自動車システムの研究)

昭和54年 3 月

財団法人 日 本 自 動 車 研 究 所

NEDO 図書・資料室



010018321-9

A

450

042

78

450-042-78

水素エネルギーサブシステムの研究

(水素自動車システムの研究)

財団法人 日本自動車研究所

昭和54年 3月

40 頁

研究目的

液体水素を燃料とする自動車における諸問題の検討を行うことにより、水素利用サブシステムに液体水素を導入する際の問題点を把握することを目的とした。

目 次

ま え が き	1
概 要	3
1. 液体水素タンクの開発	4
1.1 試作液体水素タンクの性能とその改善策	4
1.2 液体水素タンク蒸発損失の理論的考察	4
2. 液面計の試作	11
3. 液体水素供給ポンプの開発	16
3.1 構造の概要	16
3.2 ポンプ部材料の選択とその実験	21
3.3 吸込弁部の改善	23
3.4 駆動機構部の改善	23
4. 液体水素の流量制御に関する研究	32
4.1 流量制御方法の概要	32
4.2 トランスファーチューブの試作	32
5. 今後の研究課題	40
6. む す び	40

ま え が き

昭和49年度より3カ年間に亘り、サンシャイン計画の一環として、水素利用サブシステムとしての自動車用システムに関する研究を当研究所で受託し、当所の自動車用水素エンジン研究委員会（委員長 武蔵工業大学 古浜庄一教授）で実施した結果、液体水素の利用に関する研究は諸外国においてもほとんど行われていないことが明らかになった。自動車燃料としての液体水素の利用には、低温空気の吸入による容積効率の改善、従って、エンジンの排気量当たりの出力の大きいことと、液体燃料の運搬性の有利さという利点がある。しかし、その評価には実験的研究の裏付け資料が必要である。

液体水素を自動車燃料として利用する場合に、最も重要な問題は、車内貯蔵、すなわち、蒸発損失の少ない液体水素タンクの開発と、これから液体水素を取り出してエンジンに供給する方法、すなわち、液体水素供給ポンプの開発とであり、更に供給する水素の流量をエンジンの負荷条件に合わせて制御する方法の研究である。従って、これらの開発の可能性を追究した上で、はじめて液体水素利用についての評価が可能となる。

このような状況下にあつて、当研究所は、再度、液体水素供給法を主体とする研究を受託することになったので、この方面に最も造詣の深い、上記古浜教授の指導を仰ぎ、また、実際面に経験豊かな同大学講師 榎本良輝氏のご協力を得て、昭和52年度に試作した実験用タンクを用い、液体水素供給法の基礎研究を行い、液体水素供給ポンプの一次試作を実施し、開発のための基礎資料の収集並びに蓄積を図ったので、それらの成果について報告する。

研究責任者 海上次郎

研究実施者

研究第2部	海 上 次 郎
”	金 栄 吉
”	山 口 郁 夫
”	中 野 信 彦
”	山 崎 均
企 画 部	五十嵐 熙

水素エネルギーサブシステムの研究

(水素自動車システムの研究)

概 要

昭和49年度より51年度まで3年間に亘り、「自動車用水素エンジン研究委員会」の組織のもとで、下記の事項について、文献その他の資料により調査研究を行った。

- (1) 自動車に水素を利用するときの得失
- (2) 水素エンジンの問題点とその解決の可能性
- (3) 周辺問題、すなわち、製造方法から貯蔵及び運搬に至るまでの問題
- (4) 安全対策
- (5) 早急に着手すべき研究課題
- (6) 自動車燃料に水素を利用することの意義
- (7) 水素自動車が社会的・経済的に成り立つ条件
- (8) 実用化のための研究課題の提案。

これらの調査の結果、以下のような結論に達した。すなわち、

- (1) 1990～2000年には水素によるクリーンエネルギー時代になる可能性が強い。そのときは当然水素自動車化する。そのための水素運搬法の開発は最も難問で、当面、液水法をメタルハイドライド法と並行させて進めるべきである。
- (2) 高出力、高効率、無公害水素自動車のためには、水素供給法、噴射法、異常燃焼対策の基本問題の解決を要する。
- (3) これら個々の研究を総合し、安全取扱法も確立し、実用水素自動車を完成するための基礎的研究には、即刻、強力に着手すべきである。

しかしながら、液体水素の自動車への利用を評価するために必要な、車内貯蔵と供給法については、ほとんど資料がないという現状であるので、貯蔵と制御を含めた広義での供給法の基礎的資料を得るための実証的調査研究を行う必要がある。かくして、昭和52年度には実験用液体水素タンクの試作と、液体水素供給ポンプの形式、材料などについての予備的、実験的研究を開始した。

昭和53年度においては、上記試作タンクの性能改善、すなわち、タンクからの蒸発損失を低減させるための断熱法の研究、タンク内に残存する液体水素量を検知するための液面計の試作、並びに液体水素供給ポンプの試作研究、特にポンプ摺動部の材料の選択に重点をおき、これと並行して液体水素流量の制御法についての研究を進めてきた。その結果、液体水素タンクについては、第二次試作のために必要なタンク改造実験用の図面を作成し、液体水素供給ポンプについては、摺動部材料組合せの最有力候補を選定し、耐久試験を実施中である。また、流量制御法については、最終調整を噴射装置で行わせる方向で研究を重ねている。

1. 液体水素タンクの開発

〔要 旨〕

前年度試作した液体水素タンクは、真空とスーパーインシュレーションとの二重断熱構造にしてあるが、取り出し口の口径は、実験上の便宜を考え、比較的広くなっている。しかし、理論解析によると、この部分からの熱侵入が、全体の70%近くを占めているので、この開口部を小さくし、サポートその他の外部からの熱伝達の要因を少なくし、蒸発損失の少ないタンクの改造図面を作製した。

1.1 試作液体水素タンクの性能とその改善策

昨年度試作した液体水素タンクは、内容積70ℓ、真空とスーパーインシュレーションの二重断熱構造（昭和52年報告書参照）にしてあるが、取り出し口の径は、実験上の便宜を考えたこともあって、100mmと広く、車載時の安全性に万全を期することから、内部容量を、下部、両端、前後と5個所で支持しており、また、種々の液体水素取り出し法が試みられるように、タンク下部にも液体水素取り出しパイプを設けてあったが、内部容器と外部容器との結合個所が多いほど、熱侵入が大きくなるので、液体水素取り出しパイプ、及び前後、下部のサポートを取りはずし、両端2個所のサポートだけで支えることにし、第1-1図に示すように改良した。その結果、液体水素の蒸発量は、1日4ℓ、約5.7%/dayとなった。また、本年度試作した液体水素ポンプを挿入した状態では、蒸発損失は、タンク内液体水素の残量によって異なるが、10%前後と、かなり大きい値を示した。一方、タンク各部からの熱侵入を計算によって推定すると、液体水素取り出し口、すなわち、ポンプ挿入部からの熱侵入が、全体の70%近くを占めるものと予測された。従って、取り出し口からの熱侵入を極力防止するように、開口部をできるだけ小さくし、更に、取り出し口のフランジも小さくし、この部分の断熱法、ポンプ挿入法などについても、更に研究を重ねることになっている。なお、タンク内圧に対する安全弁も、上記同様の理由により、タンク本体には取り付けず、後述するような方法を採用することとした。

以上の結果からして、液体水素タンクは熱侵入によって液体水素が蒸発し、安全弁が作動する状態になると、大気中に放出される燃料損失という宿命的な問題を避けることができない。従って、その対策として、その蒸発分をブローオフさせずに、エンジンに供給できれば、損失がなくなるので、その方策を考究することが必要である。そのためには、たとえば、次のようなことが考えられる。

- (a) タンク内からブローオフした液体水素を、メタルハイドライドに吸蔵させ、エンジン運転時に吸気管に極く薄い状態で混入する。これは蒸発損失を皆無に等しくする上に、爆発範囲外の薄い予混合によって、燃焼が非常に安定するという効果もねらうことができる。
- (b) 液体水素供給ポンプを使用する場合、ポンプに付属した液体水素だめ内の圧力を一定に保つため、終始、調圧弁が作動し、高圧の液体水素または気化水素がタンク内に噴出するが、この液体水素噴出エネルギーを利用して冷凍サイクルを開発し、液体水素供給ポンプは液体水素の加圧とともに、液化機もかねるシステムにする。この際、必要なモータの電力は数十ワットと、かなり小さくてすむものと考えられる。

1.2 液体水素タンク蒸発損失の理論的考察

昨年度試作した液体水素タンクの熱侵入経路は、第1-2図に示すように、タンク上部開口部(Q_{c1})、タンク下部の液体水素取り出しパイプ(Q_{c2} 、本年度改造により取りはずした)、サポート(Q_{c3} 、旧タイ



取付板
SUS 304
100 x 200 x t5.

真空断熱スラブインシュレーション

取付板
SUS 304
100 x 200 x t5.

140

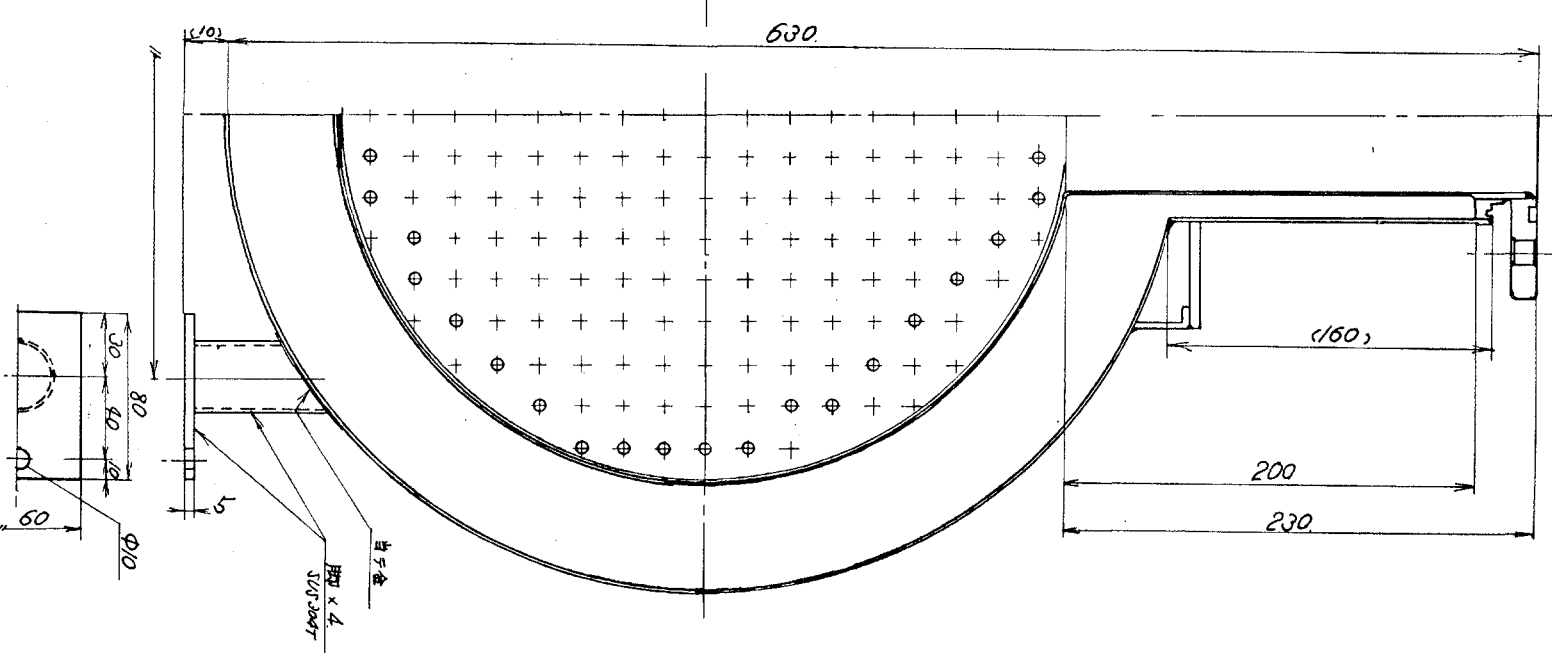
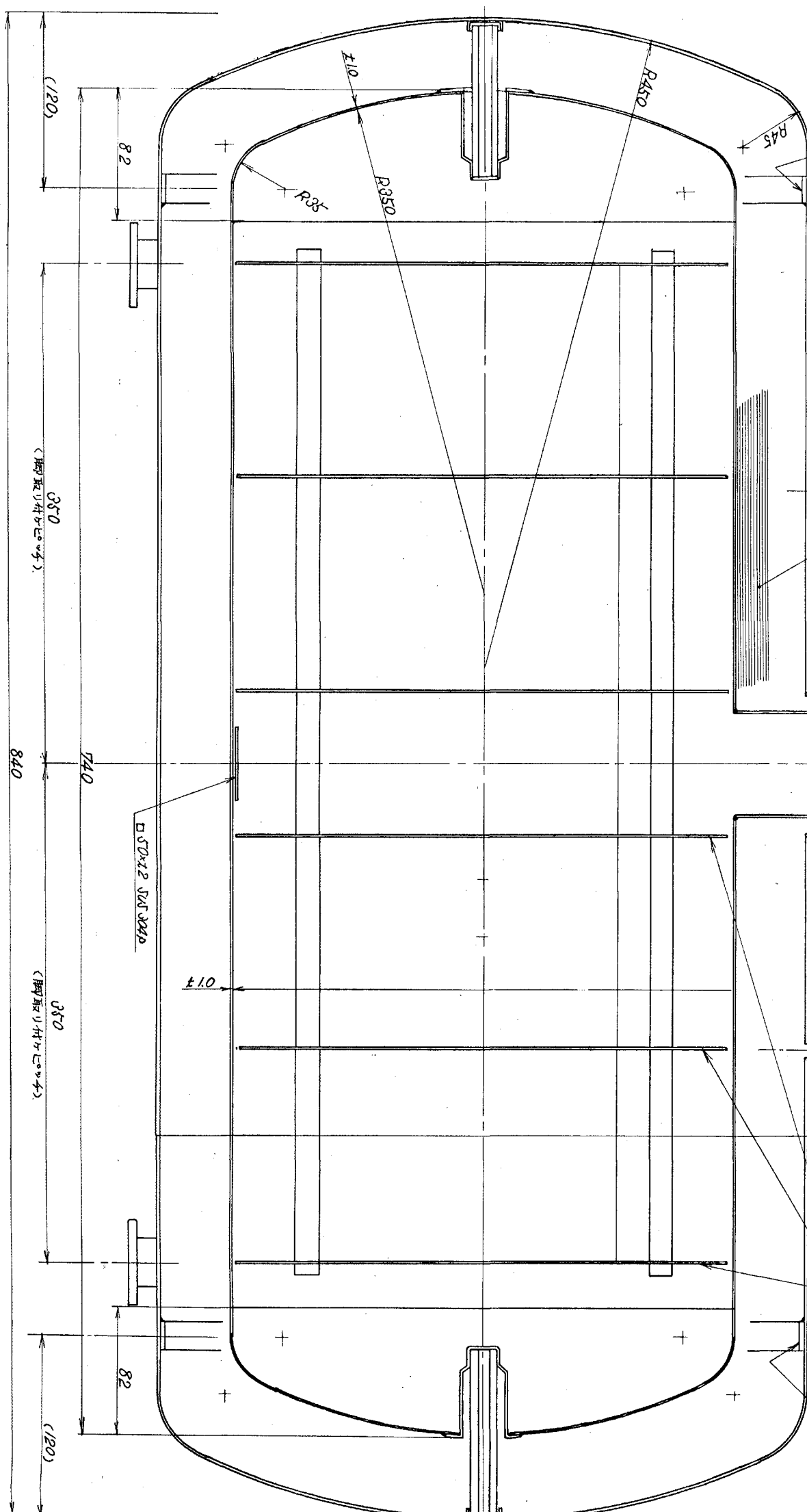
SUS 304 T $\Phi 76.3 \pm 2.1$
($L=200$ ± 1.0 mm)

SUS304T Φ76.3 ± 2.1
(L = 200 ± 1.0 = 測定) オート

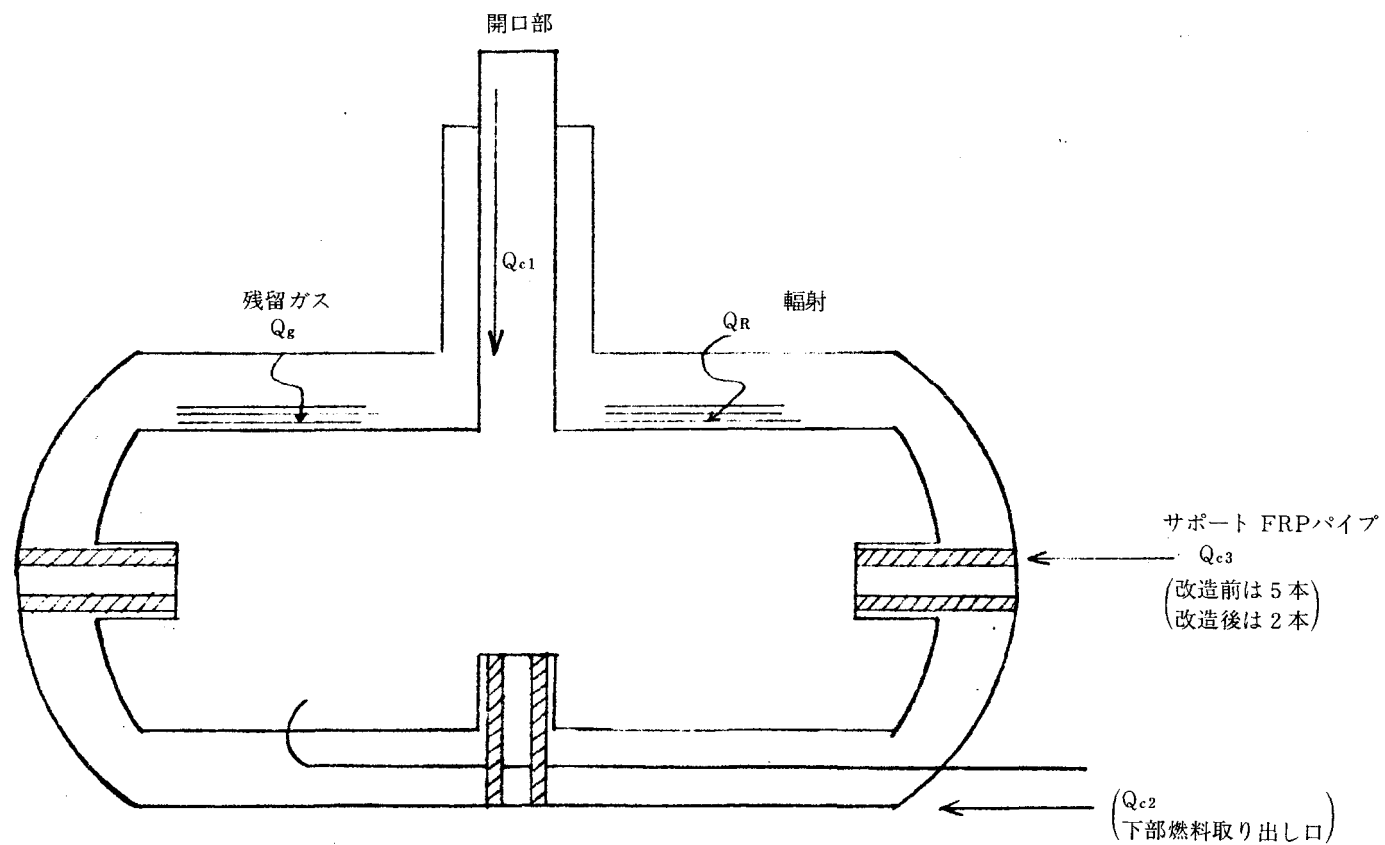
カクトオヲシルオヲバルヲ

波防止板×6
SCS多孔板±1.2

当于金
七三.



59



第1-2図 車載用液体水素タンク 熱侵入経路図

プは5本、改造後は2本)からの熱伝導による侵入、輻射による侵入(Q_r)、及び残留ガスによる侵入(Q_g)に分かれる。それらによって液体水素に伝達される熱量を理論的に求めることは非常に複雑、難解である。しかし、タンクの外表面から内部容器に侵入する熱量の極限值から、各侵入経路間相互の関係を推定することは、今後タンクの改造を行い、その性能を改善してゆく上での一つの指針を与えるものであり、重要なことと考える。

いま、極限条件として、タンク外表面の温度 T_1 が300K、内部容器の温度 T_2 が20Kで平衡状態にあると仮定して、各侵入経路からの熱侵入、及び全侵入熱量を単純に計算すると、以下ようになる。

(a) タンク上部開口部からの侵入 Q_{c1}

材料はSUS 304 T, 外径74.1 ϕ , 内径72.1 ϕ , 長さ200 mm

また、SUS 304 Tの20Kから300Kの間の平均熱伝導率 $\bar{\lambda} = 0.109 \text{ W/cmK}$

$$Q_{c1} = \frac{A}{L} \bar{\lambda} (T_1 - T_2)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (7.41^2 - 7.21^2) \approx 2.30 \text{ cm}^2$$

$$\therefore Q_{c1} = \frac{2.30}{20} \times 0.109 \times (300 - 20) = 3.51 \text{ W}$$

(b) 液取り出しパイプからの侵入(改造前) Q_{c2}

材料はSUS 304 T, 外径8 ϕ , 内径7 ϕ , 長さは700mmであるが、半分迄液体水素が入って来ているとして、 $l = 350 \text{ mm}$ とする。

$$A = \frac{\pi}{4} (0.8^2 - 0.7^2) \approx 0.12 \text{ cm}^2$$

$$\therefore Q_{c2} = \frac{0.12}{35} \times 0.109 \times (300 - 20) = 0.104 \text{ W}$$

(c) サポートからの侵入 Q_{c3}

材料はFRP樹脂, 外径28 ϕ , 内径18 ϕ , 長さ100mm

$$A = \frac{\pi}{4} (2.8^2 - 1.8^2) = 3.61 \text{ cm}^2$$

$$\bar{\lambda} = 2.57 \times 10^{-3} \text{ W/cmK}$$

改造前は

$$Q_{c3} = \frac{3.61}{10} \times 2.57 \times 10^{-3} \times (300 - 20) \times 5 = 1.30 \text{ W}$$

改造後は

$$Q_{c3} = 1.30 \times \frac{2}{5} = 0.52 \text{ W}$$

(d) 輻射による侵入 Q_r

スーパーインシュレーションの平均熱伝導率を

$\bar{\lambda} = 3.14 \times 10^{-7} \text{ W/cm deg}$ とする。また、厚さは20mmとする。同心円筒部では、

$$q = \frac{2\pi \bar{\lambda} (T_1 - T_2) L}{\ln r_o / r_i}$$

$$L = 74\text{cm}, \quad T_1 = 300\text{K}, \quad T_2 = 20\text{K}, \quad r_o = 17.5 + 2 = 19.5\text{cm}, \quad r_i = 17.5\text{cm}$$

$$\therefore Q_{R1} = \frac{2\pi \times 3.14 \times 10^{-7} \times (300 - 20) \times 74}{\ln 19.5/17.5}$$

$$\doteq 0.379\text{W}$$

両端部では（円形平行板とする），

$$A = \frac{\pi}{4} \times 35^2 \doteq 962\text{cm}^2$$

$$\therefore Q_{R2} = \frac{962}{2} \times 3.14 \times 10^{-7} \times (300 - 20) \times 2$$

$$= 0.0846\text{W}$$

$$\therefore Q_R \doteq 0.379 + 0.085 = 0.464\text{W}$$

（e） 残留ガスを通過しての熱侵入 Q_g

$$q_g = 0.014 \times A \times \frac{r+1}{r-1} \times a_o \times \frac{T_1 - T_2}{\sqrt{M}} \times P$$

A ：表面積（ cm^2 ）

r ： c_p / c_v （ $=1.4$ ）

a_o ：適応係数

P ：圧力（Torr）

T ：温度（K）

M ：分子量

簡単のため， $A = A_H = A_c = \pi DL$ ， $a = a_H = a_c = 1$ （空気とする）

$M = 28.8$ とすると，

$$A = \pi DL = \pi \times 35 \times 74 \doteq 8136.7\text{cm}^2$$

$$Q_g = 0.014 \times 8136.7 \times \frac{1.4+1}{1.4-1} \times 1 \times \frac{300-20}{\sqrt{28.8}} \times P$$

$$\doteq 35654.43 P (\text{W})$$

容器内の真空度を 1×10^{-6} Torr とすれば，

$$Q_g \doteq 0.036\text{W}$$

よって，

（1） 改造前の総侵入熱量 Q_T は，

$$Q_T = 3.51 + 0.104 + 1.30 + 0.464 + 0.036 = 5.414\text{W}$$

従って，開口部のしめる割合は，約65%となっている。

（2） 改造後は，

$$Q_T = 3.51 + 0.52 + 0.464 + 0.036 = 4.53\text{W}$$

開口部の占める割合は，77.5%となった。また，改造前より16.3%断熱がよくなったことがわかる。

以上の計算によって、開口部のパイプ断面積を小さくすれば、すなわち、肉厚及びパイプ径を小さくできれば、断熱効果が急増することがわかる。また、真空度が1けた下がると侵入熱は1けた増大することがわかり、真空を保つ重要性が大きいことがわかった。そこでFRPサポートを減らすより、開口部パイプの肉厚及び径を極力減らす構造、及びできるだけ高い真空度を長時間、できれば車載している車の寿命だけ、保つことができる構造を考える方向で今後の改造を進める必要がある。

2. 液面計の試作

〔要 旨〕

液体水素タンク中の LH_2 のレベルの測定は、その比重が小さく、ヘッド差も小さく、従って、微差圧によって検知することはできない。そこでゲルマニウムの温度変化による抵抗値の変化を測定して、液相レベルを検知することとした。

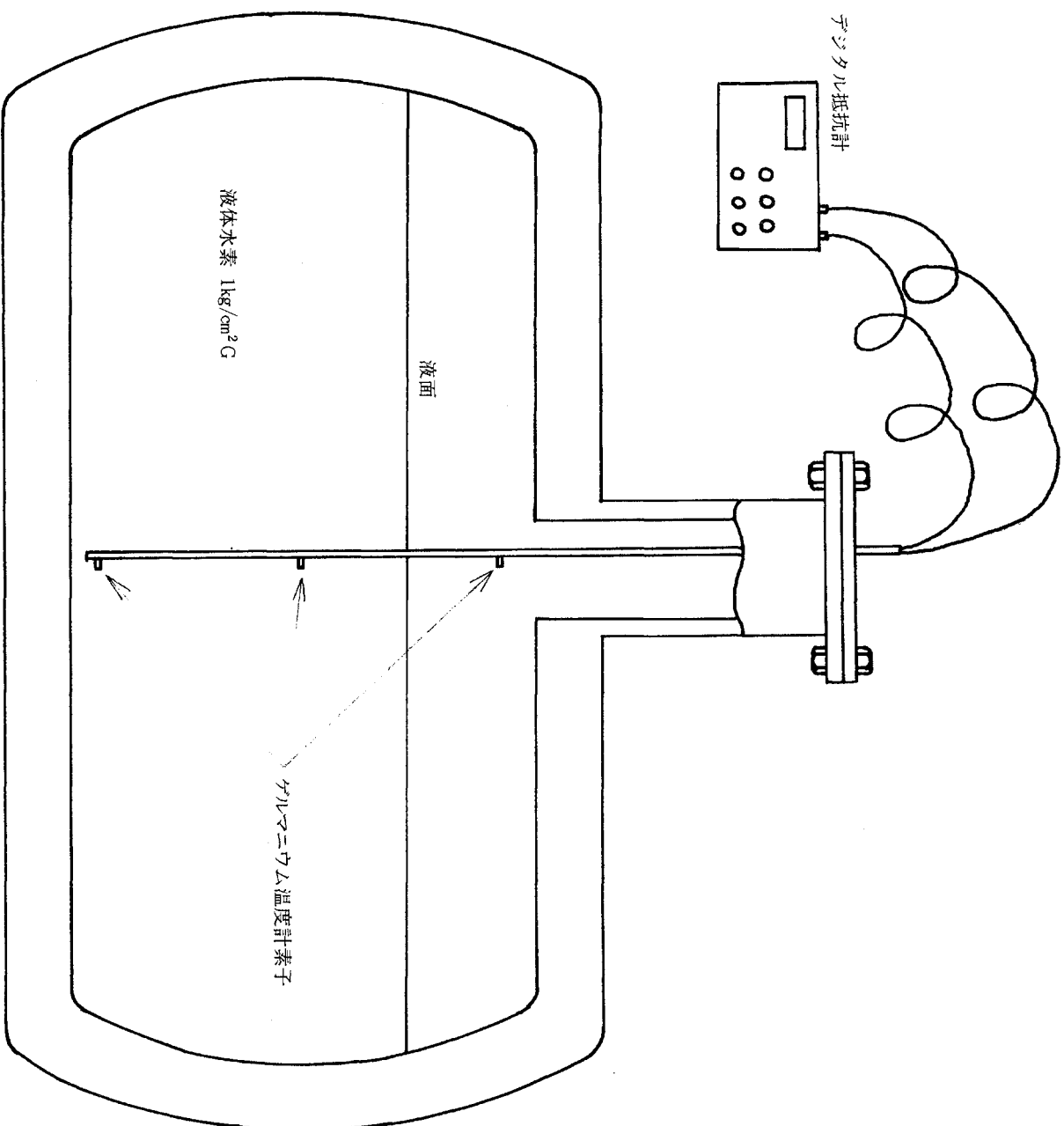
液体水素タンク中の液体水素のレベルを測定する計器として、比重の軽い（0.07）液体水素でも、そのヘッド分の微差圧を検知することによって液体水素のレベルを検出する計器が最近開発され、市販されている。しかし、この開発研究で使用している試作液体水素タンクの場合、液面高さは、350 mmと小さく、そのような極微小な差圧に対しては使用することができない（少なくとも500 mmは必要）。

そこでタンク内の液相温度は $-253^{\circ}C$ 一定であるが、液体水素が気化した気相の温度はそれより高くなっているということに着目して、ゲルマニウムを検出素子とする極低温による抵抗変化を利用した、レベル検知法を採用することとした。予備実験を行った結果、ゲルマニウム素子が $2.4\phi \times 9\text{ mm}$ と大きいために抵抗の変化遅れ（最大で約3分）は大きいですが、タンク内の一定残量の確認には使用できるという見通しが得られたので、この素子を第2-1図に示す如く、タンク中の鉛直方向に、上部、下部及び中間の3カ所に配置し、それらの素子からタンク外にリード線を導出し、デジタル抵抗計で抵抗測定を行い、タンク内の液体水素残量を検出した。

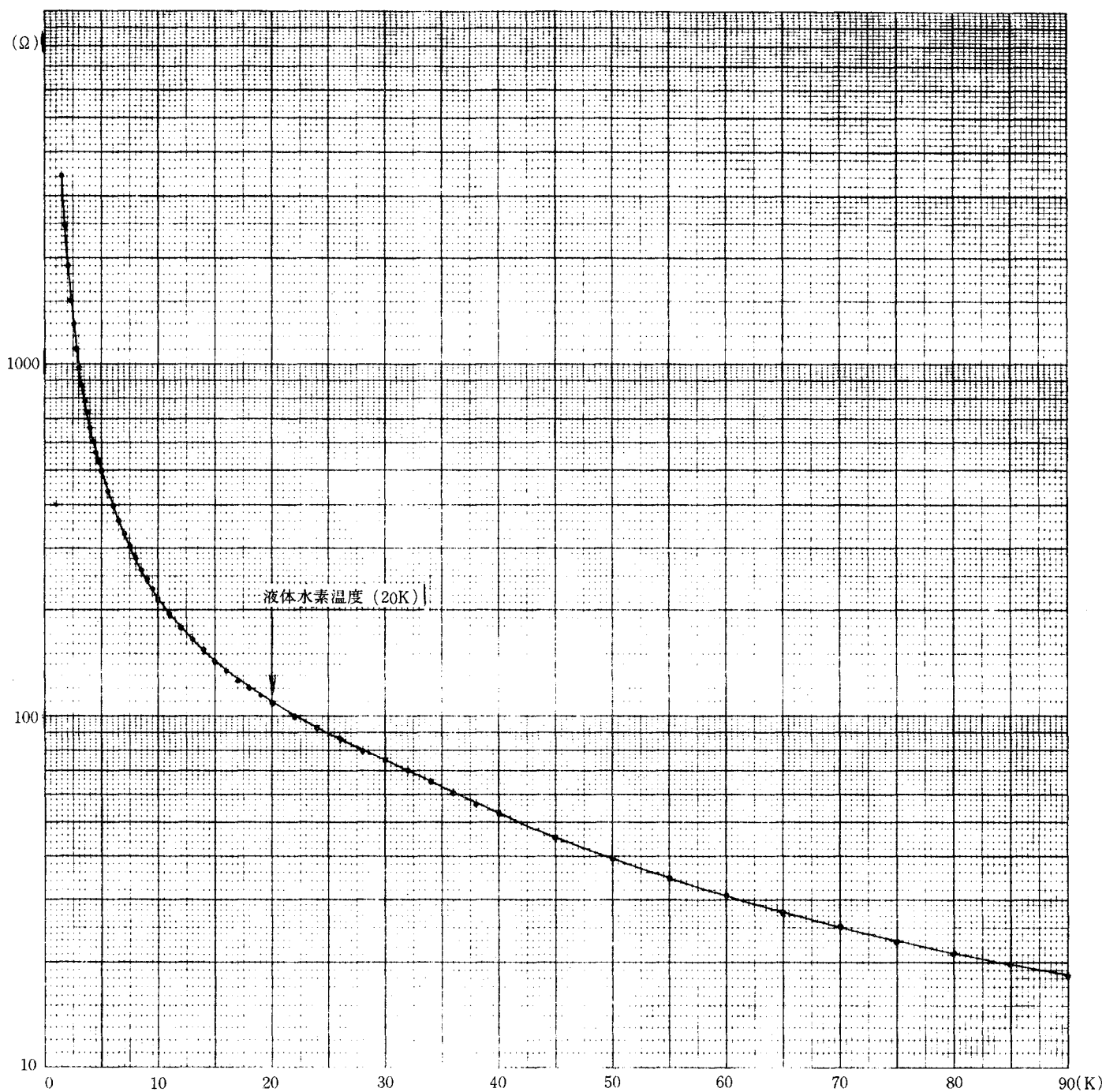
第2-2図はゲルマニウム抵抗素子の温度－抵抗検定グラフを示す。

第2-3図は白金抵抗素子の温度－抵抗検定グラフを示すが、感度の点でゲルマニウムより劣っている。また、銅－コンスタンタン熱電対も試みたが、第2-4図に示すように、液体水素温度付近での変化が少なく検知しにくいことがわかる。

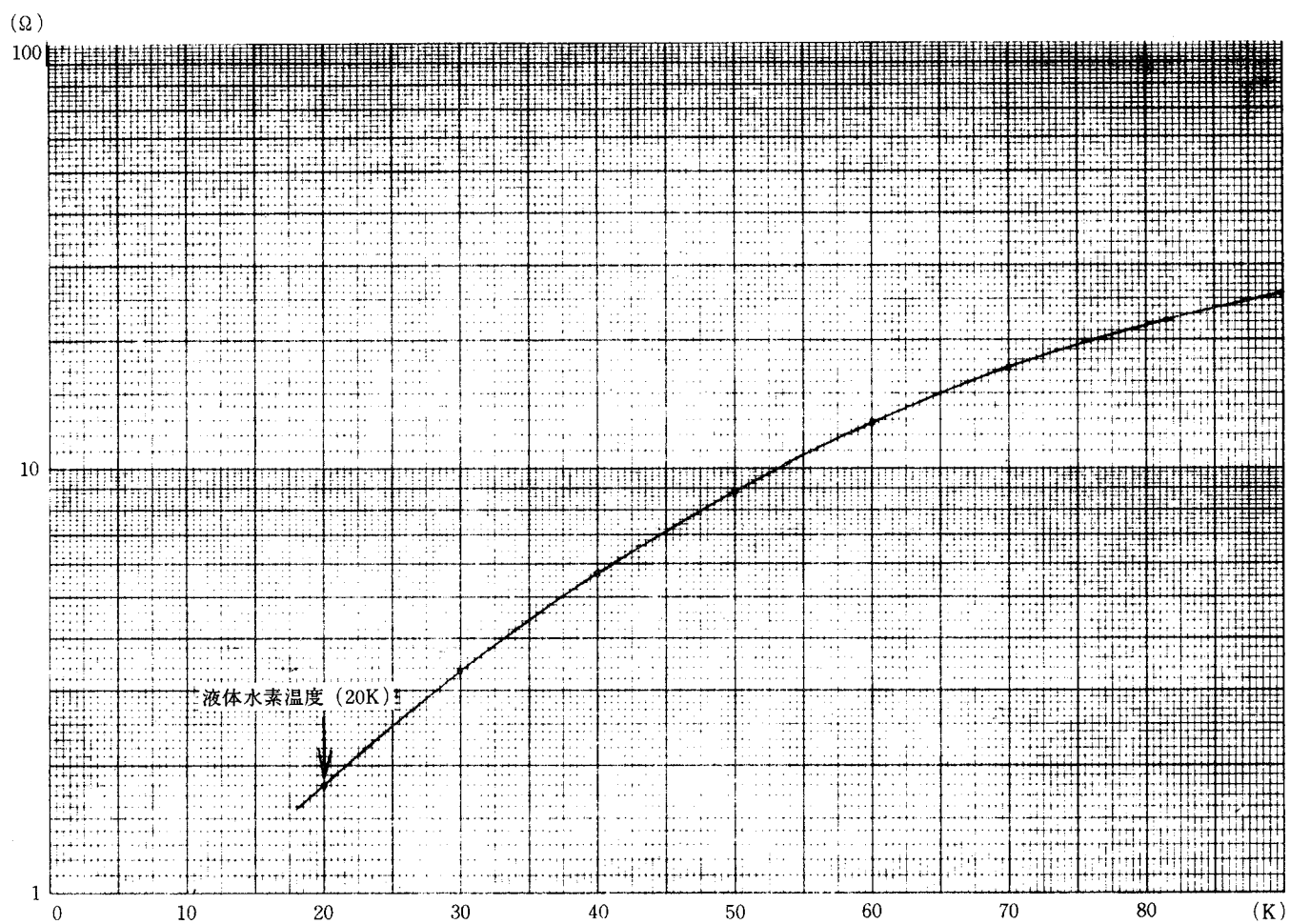
以上述べたように、極低温であり、比重の軽い液体水素の液面検知はかなり難しい課題であるので、今後も液面計の開発には液体水素の物性を十分に考慮して、さらに精度の高い検知素子を開発することが重要と思われる。また液体水素流量検出についても同様な問題がある（空燃比の直接測定などに早急に要求されている）。今後は是非開発されねばならない課題であり、次年度他の研究課題とともに平行して開発してゆきたい。



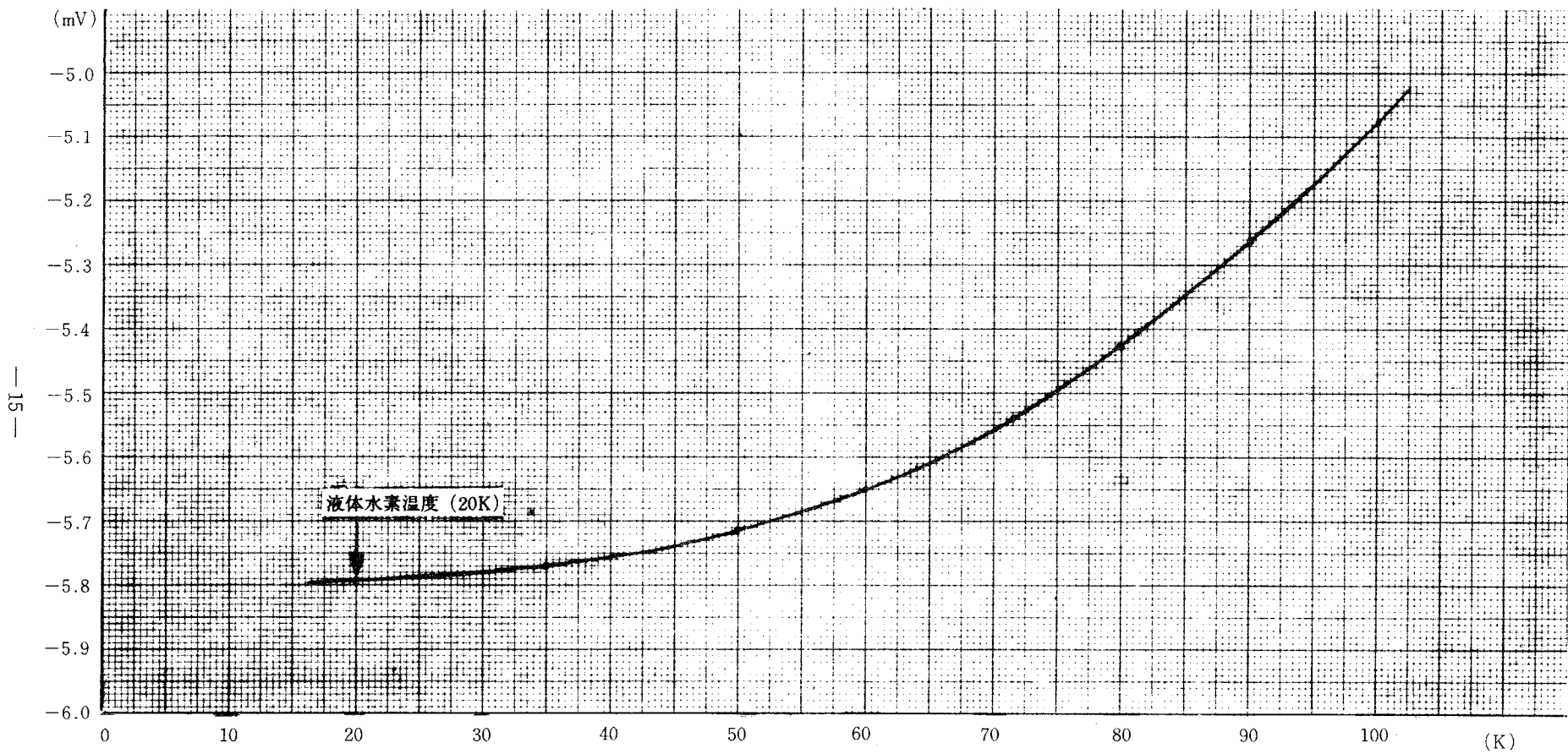
第2-1図 ゲルマニウム抵抗液面計取り付け図



第2-2図 ゲルマニウム抵抗温度計検定グラフ



第2-3図 白金抵抗温度計検定グラフ



第2-4図 銅-コンスタンタン熱電対起電力グラフ

3. 液体水素供給ポンプの開発

〔要 旨〕

前年度の設計図面に基づいて試作を行い、極低温で極めて粘性の低い潤滑条件で耐久性のあると思われる摺動部材料について実験を行った。その結果は、ユニフロンのライナと、SP-22のピストン及びピストンリングの組合せが最も好結果を示した。しかし、まだ短時間の試験結果であるので、更に耐久試験を重ねる必要がある。

昨年度報告した液体水素供給ポンプを本年度試作し、極低温で極く粘性の低い潤滑条件下でも摺動部材料に耐久性のあるものを選択し、ポンプ部よりエンジンへの液体水素の導出法の確立を目的とした研究を行った。

3.1 構造の概要

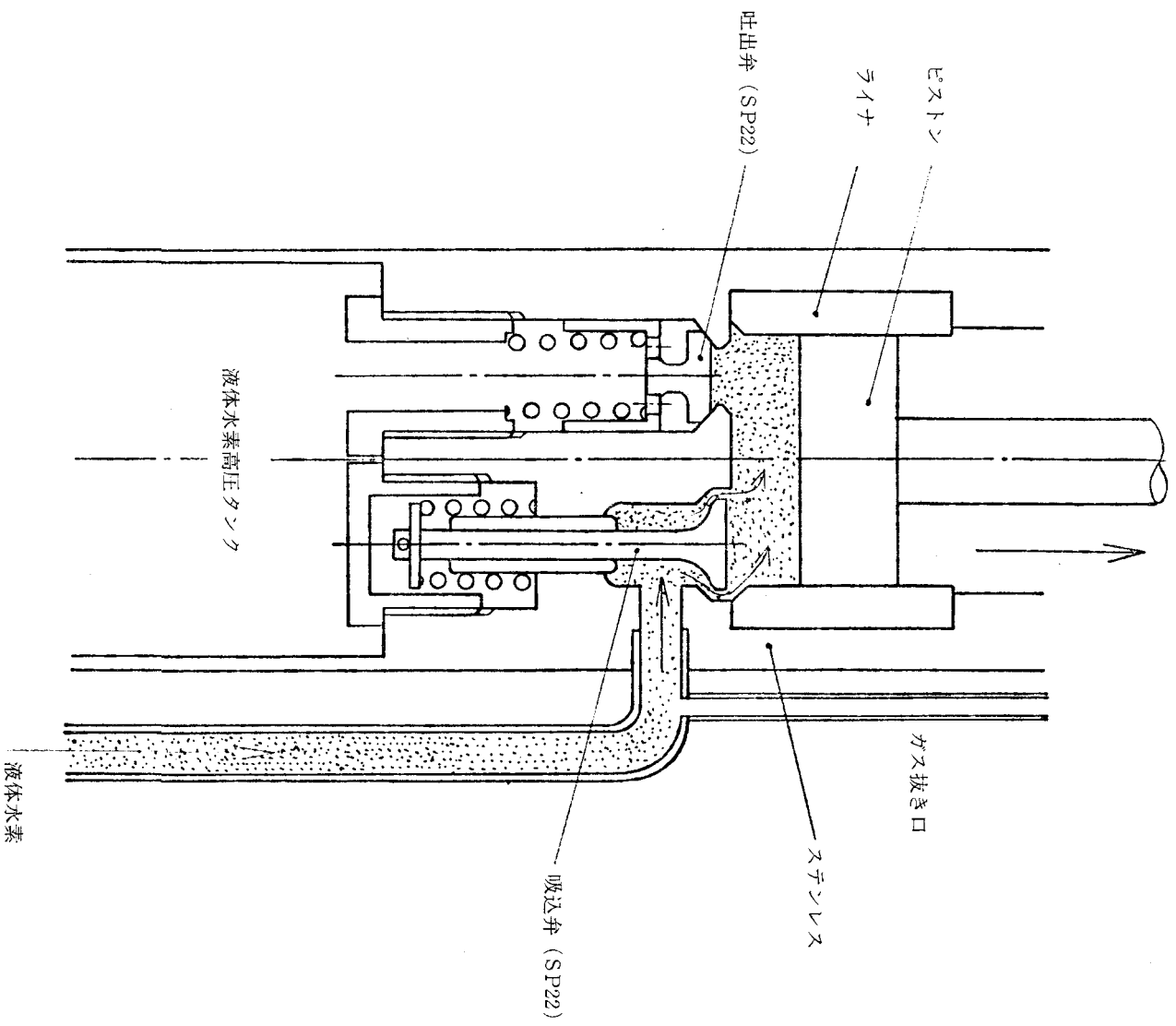
まず、液体水素を使って耐久試験を行う前に、液体水素より温度、粘度などの点で条件がゆるく、より安価な液体窒素を使用し、低温で潤滑性があると思われる金属材料、特殊材料をランダムに、本年度試作した液体水素ポンプ本体の摺動部であるピストン、シリンダライナに使用して、液体窒素中で試験を試み、液体水素中でも摩耗、漏れ、加圧などの点で使用可能であろうと思われる材料のみを抽出し、それらについて後述するように、組合せ試験を液体水素で行った。

第3-1図に示すように、液体水素ポンプは液体水素タンク内に挿入する方式を採用することによって、ポンプ部周辺の温度を液体水素温度に保った。また、高圧用に向いているピストン式とした。ピストン式の欠点は、クランク機構であるため、ピストンに側圧が作用し、ライナと焼付く恐れのあることにあるので、図に示すようにクロスヘッド式を採用し、側圧はこのクロスヘッドで受け、液体水素を圧縮するピストンには側圧が作用しないようにした。駆動モータには交流100 V、65 W、1,500 rpmのモータを使用した。モータのブラシ部及び接点部での火花が、万一漏れた水素の点火源になる恐れがあるので、窒素ガスを封入したカバーで絶縁し、安全を図った。

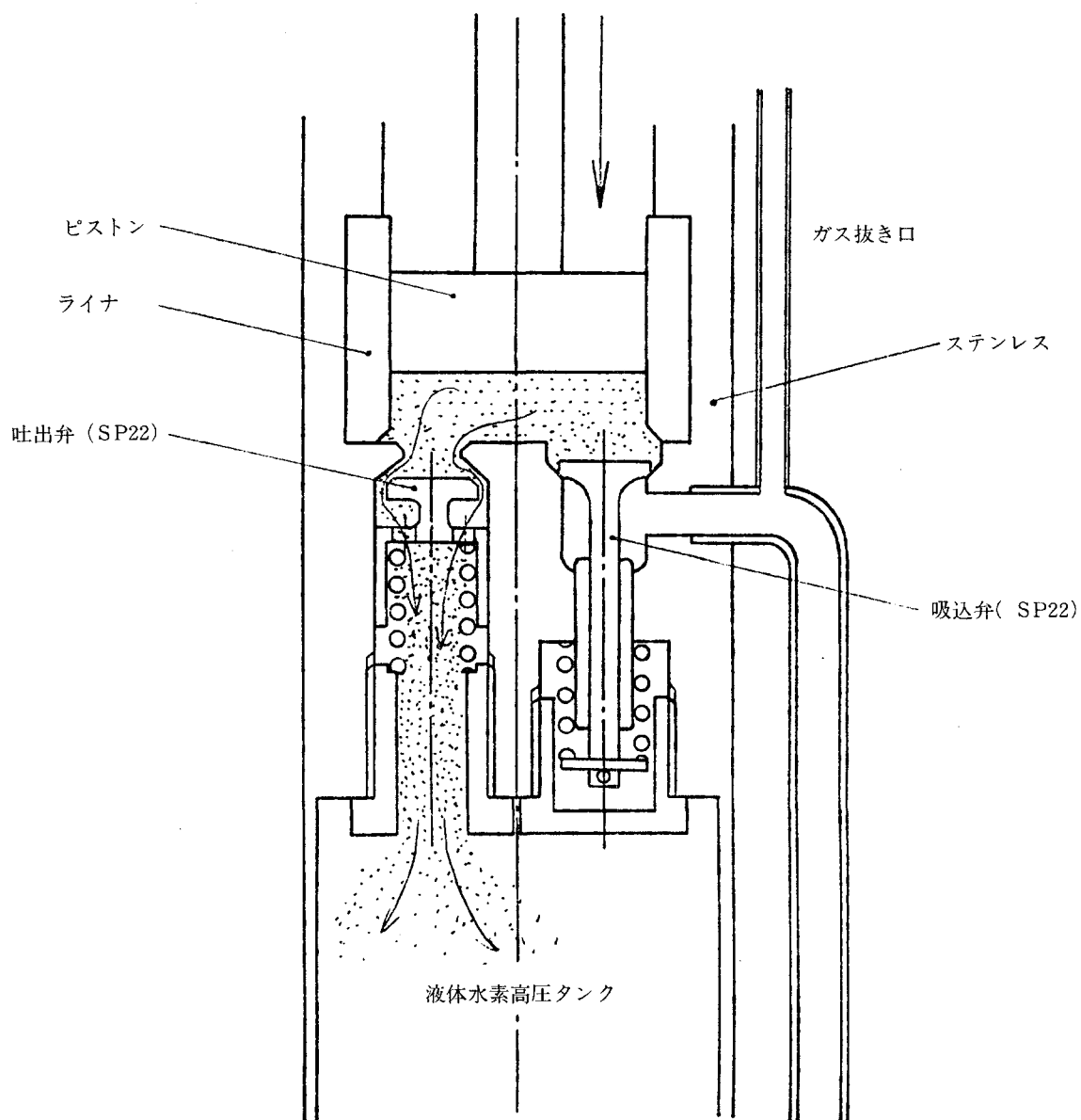
タンク底部より吸込パイプで吸込まれた液体水素は、吸込弁を通り、**第3-2図**に示すように、ポンプシリンダ内に吸込まれ、**第3-3図**に示すように、圧縮ピストンによって加圧され、液体水素高圧タンク（内容積200cc）内に押し込まれる。

エンジンへは、この液体水素高圧タンク底部から、**第3-1図**に示すように、断熱トランスファチューブ（液体水素通過パイプ内径5φ）で送られる。液体水素高圧タンクは、エンジンの回転数、負荷が変化して使用液体水素量が変動した場合にも、10～11 kg/cm²の圧力を維持できるように、同じく底部についている調圧弁で、余分な液体水素をタンクの中に液体のままどす機構となっている。**第3-4図**にその機構を示すが、開弁圧力調整はステンレス製ばねのばね定数を変化させることによって行った。この方法は大気中で高圧ガスによって行った試験でもかなりの微差圧でも開閉することが確認されている。また、調圧弁の材料は、最初砲金を使用したのが、相手側弁座にステンレスを用いたためか、砲金の摩耗がはげしく、当たりも悪いために、後述するSP-22を使用したところ、かなり良い結果を得た。この理由としては、弁座と弁が金属同士ということのほか、SP-22は砲金に比べ軽く、変形しやすいため、よい結果が得られたと思われる。

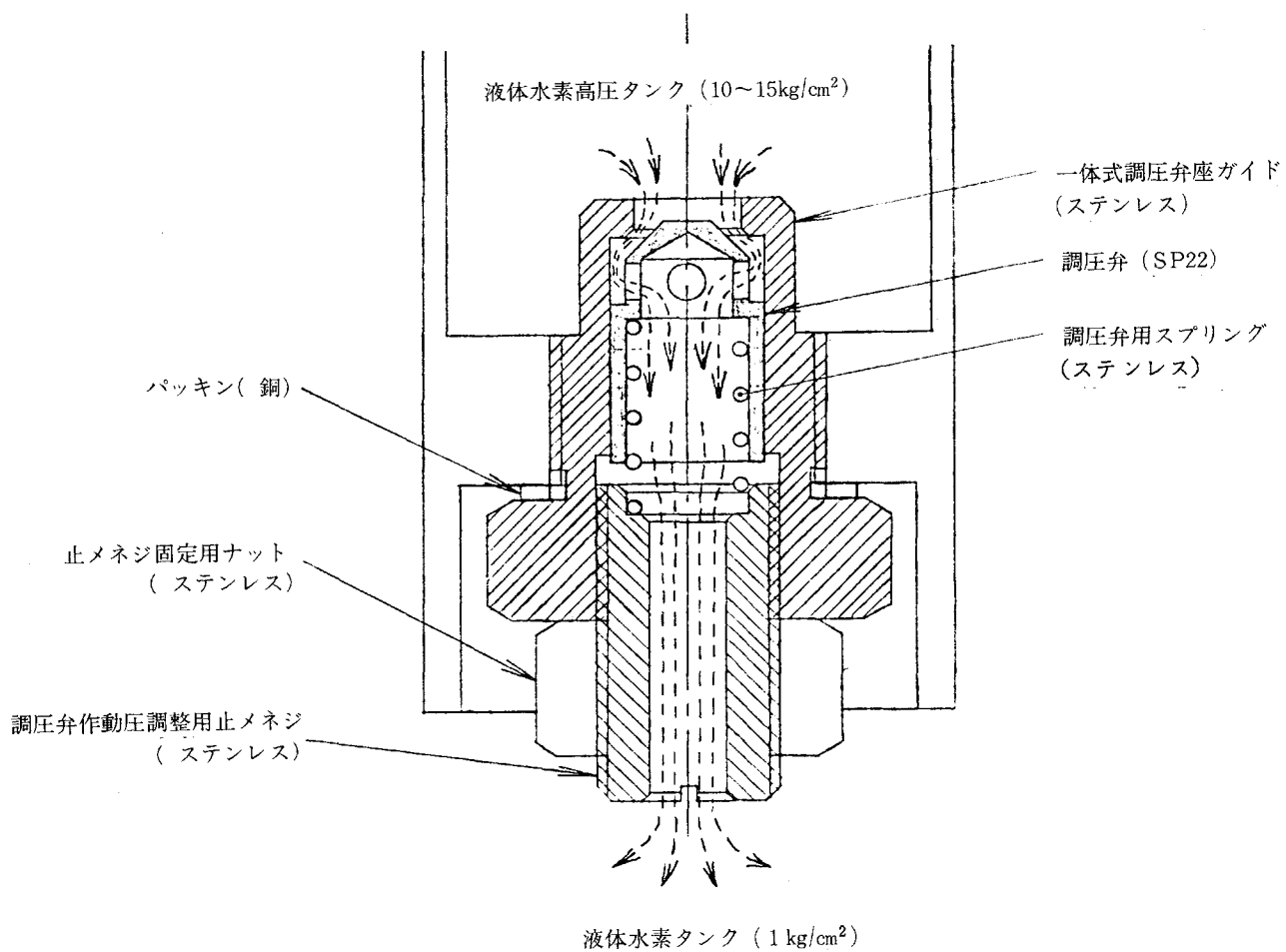
ポンプのピストンの外径×ストロークは、排気量1,000 ccのエンジンで、5,500 rpm全負荷での液体水



第3-2図 吸込み行程



第3-3図 吐出行程



第3-4図 調圧弁

素量が約500cc/minであるので、余裕をみて1,000cc/minとなるように、 $15\phi\times 4\text{mm}$ とした。

クロスロッドには、長さ：330mm、外径： 6ϕ 、内径： 5ϕ のステンレスパイプを使用した。

3.2 ポンプ部材料の選定とその実験

次にポンプ本体摺動部の材料決定のため、ピストン及びピストンリング、ライナの材質を変化させた種々のポンプを、タンク本体に組み込み、実際に、液体水素中において行った耐久試験の代表例を示す。そのうち、(3)のプランジャとバレルの組合せだけは、前述の液体窒素でしか実験を行わなかったが、他はすべて液体水素中で行った結果である。第3-5図の図面において、

- (1) ライナにSP-22（デュポン社製カーボン樹脂系）、ピストン及びピストンリングに砲金を使用した組合せ。

SP-22が砲金にかじられ、短時間で摩耗してしまった。

- (2) ライナにステンレス（SUS 304）、ピストンリングにユニフロン、ピストンに砲金を使用した組合せ。

液体酸素中で実績のあるユニフロン（日本ピストンリングで開発したテフロンベースに銅パウダ、二硫化モリブデン等を含み焼結したもの）をリングに使用したところ耐久性は充分であったが、ユニフロンの熱膨張係数（ $60\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）が、ステンレス（ $1.71\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）の3.5倍もあるため、液体水素中に入れると、圧力は $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度得られたが、リング合口すきまが大きくなり、漏れ量が増大するため、流量は目標値の $1/8$ しか得られなかった。なお、液体水素中に入った状態で、合口すきまが適切な寸法になるように、ライナのステンレスとリングのユニフロンの寸法形状を熱膨張係数から考慮して、常温で加工したが、常温ではライナの中にリングが入らず、試みることができなかった。

- (3) ディーゼルエンジンの燃料噴射装置のプランジャ、バレルを改良したもの。

流量は十分と思われたが、5分程度の運転で、プランジャとバレルが焼付いてしまった。

- (4) ライナとピストンリングとともにユニフロン採用。

リングを2段として実験を行った結果、リング部からの漏れは極く僅かとなり、焼付も全く起こらず、ライナ内径を 15ϕ から 18ϕ に拡張したこともあって、流量は目標値の $1/2$ 程度得られたが、ライナ、リングともに摩耗量が大きく、耐久時間は15時間程度で、しかも周期的に圧力降下の現象が発生した。また、リング溝を2個にしてリングを2本にしてみたが、流量の改善は認められなかった。従って、リングは1本として、その面圧を高める方が得策であることがわかった。

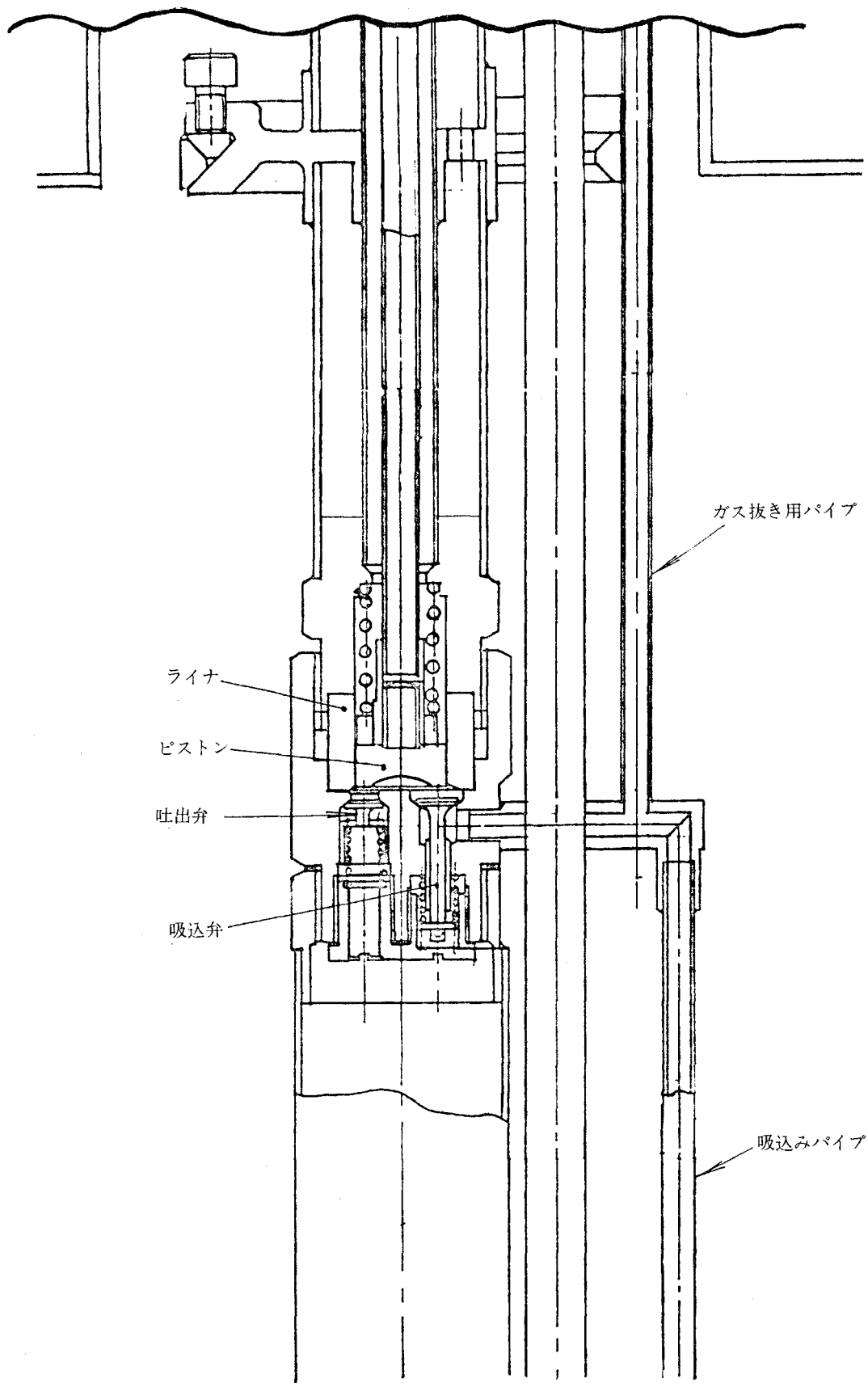
- (5) ピストンにSP-22を用い、ピストン自体にリングの機能を持たせる。

ユニフロン同士では摩耗が大きいのので、このことを考慮に入れ、SP-22でピストンを作り、ピストン自身にリングの役目をさせるよう、ピストン上部ライナ側に肉厚0.3mm、長さ3.5mmのリップを出し、テンションリングでライナ側に押すとともに、液体水素が加圧されると、更にその圧力でライナに押し付けられる構造とした。

SP-22の弾性が液体水素温度下でどの程度か疑問であったが、試験を行った結果、圧力は $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 、流量は目標値の $1/2$ 強を吐出した。しかし、2時間程度の運転でリップ部に割れが生じてしまった。

- (6) ライナにユニフロン、ピストン及びピストンリングにSP-22の組合せ。

SP-22（熱膨張係数 $37\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）を使用し、熱膨張係数を考慮に入れて加工し試験した結



第3-5図 ガス抜きパイプ取り付け図

果、漏れ、摩耗の点でかなり良い結果が得られた。

また、ストロークを4mmから7mmに変更したことから、流量も充分なものが得られた。まだ15時間程度の耐久試験しか行っていないが、分解調査した結果、摩耗した形跡はなく、少なくとも30時間以上の耐久性はあると思われる。また、洩れもわずかであった。

以上の結果から、これまでのところ、最も耐久性のある材質の組合せは、ライナにユニフロン、ピストン及びピストンリングにSP-22を使用したものであることがわかった。

3.3 吸込弁の改善

ポンプ部シリンダ内に液体水素が吸込まれず、圧力が上昇しないという現象がときどき生じた。この原因としては、液体水素吸入口に気化した水素のガス抜き口がなかったため、気体を圧縮し、その結果、シリンダ内に液体水素が吸い込まれなかったものと思われる。

また、吸い込みやすくするために、吸込弁のばねを弱くしたところ、シリンダ内に液体水素が入るようになったが、圧縮中に吸込弁から吸込管への漏れが生じ、吐出量がかかなり少なくなってしまうことが判明した。そこで、吸入管の最上部に、第3-5図に示すように、ガス抜き用パイプをつけ、タンク内を $1\text{kg}/\text{cm}^2$ に加圧して、ガス抜き用バルブを開けることにより、シリンダ内に液体水素が入りやすくなり、容易に圧力が上がることもわかった。これにより、始動時のポンプ性能がかかなり安定したものとなった。

さらに、吸入弁のばねは、圧縮行程時の吸入弁から漏れをなくす意味で、前述のものとは逆に、ある程度強いものを使用した方が良かった。

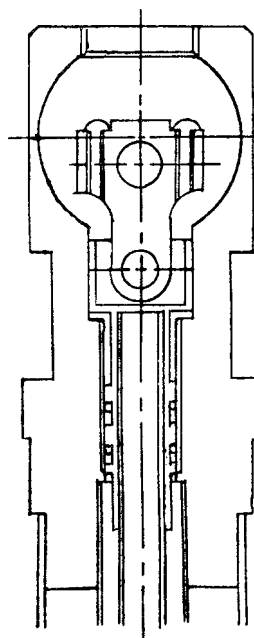
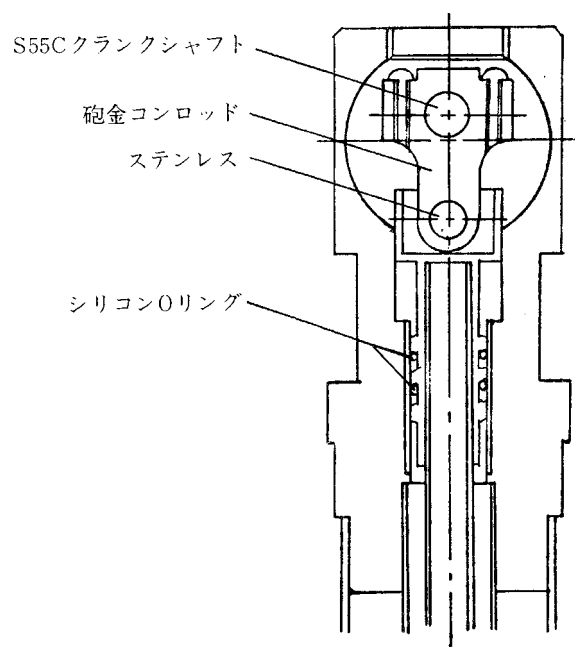
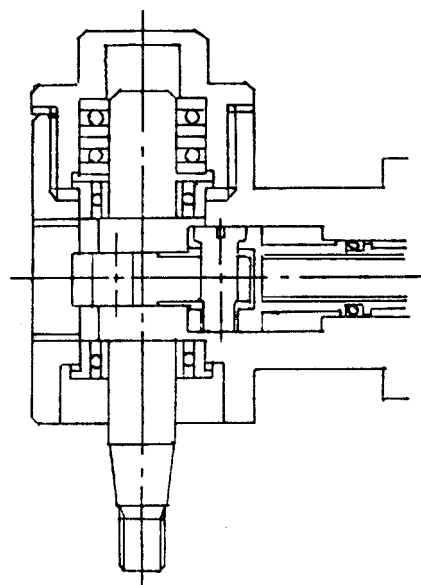
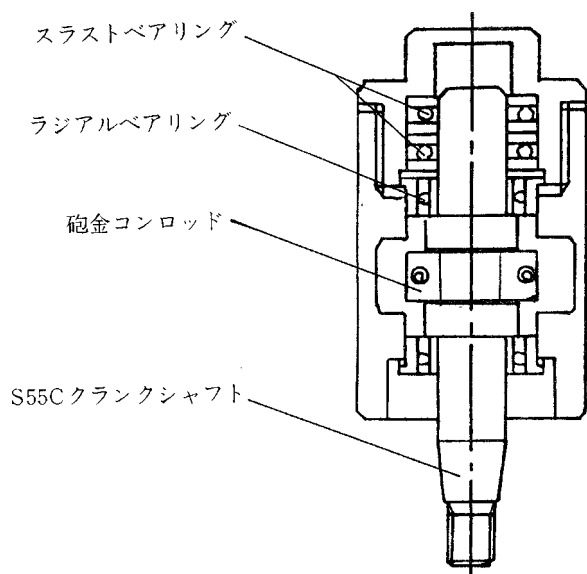
3.4 駆動機構部の改善

次に、駆動クランク機構部に関して、自動車用エンジンのクランク機構に似せて設計したため、最初には第3-6図(A)に示すように、S55Cクランクシャフト、ベアリングを兼ねた砲金コンロッドを使用した。ピストン下部のクロスロッド側にはO-リングを挿入し、ピストンの往復運動とともに、ガイド部を摺動させ、クランク機構部に潤滑のために封入した潤滑油が液体水素ポンプ部へ流出するのを防いだ。この場合、砲金コンロッドの大端部が、材料強度の点で弱く破損したため、(B)図のように、コンロッドをS-45Cにし、大端部、小端部とも、砲金製ブッシュ(肉厚0.5mm)を挿入した結果、かなり良い耐久性が得られた。

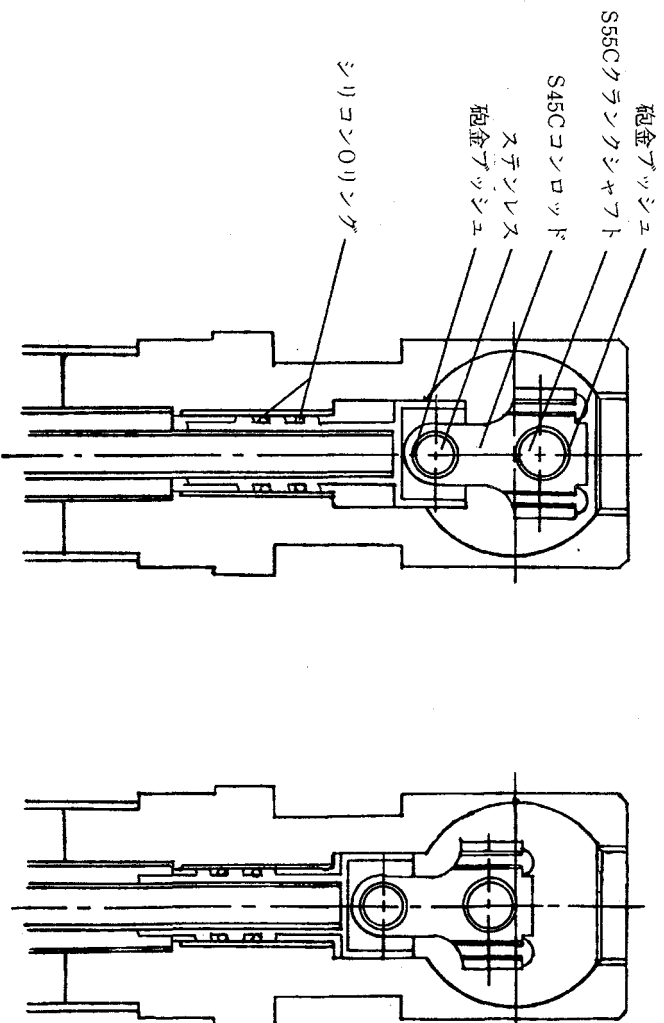
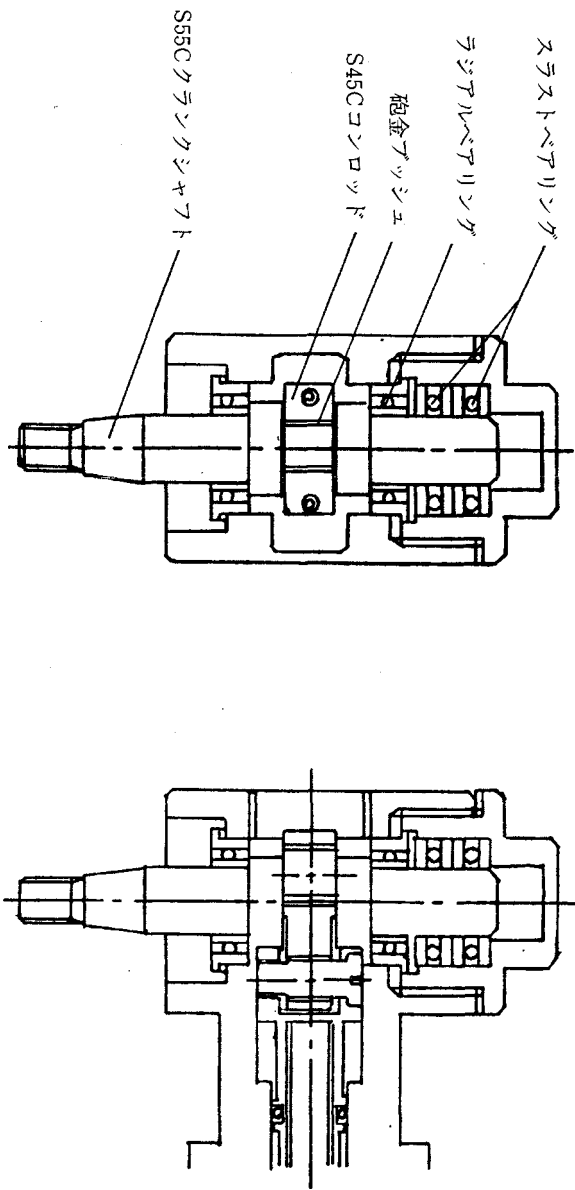
また、摺動するO-リング部より、シール状態が不完全なためか、潤滑油が徐々にO-リング部を通過し、クロスロッドに伝わり、その部分の低温によって固化するため、クロスロッドを締めつける結果となり、ポンプを作動させることができなくなった。そこで、クランク機構部の無潤滑化を考え、(C)図に示すように、先ほどの砲金をSP-22に変え、グリスをSP-22ブッシュ部、及びガイド部に塗布し運転したところ、小端部ブッシュ(SP-22)は十分耐久性があったが、大端部ブッシュは、かなり摩耗がはげしく、3時間位の耐久性しか得られなかった。

最後に小端部ブッシュは前述の材料をそのまま使用し、大端部の構造を変え、クランクケースを大きくして、(D)図に示すように、ニードルベアリングを使用した。また、コンロッド及びクランクシャフトの摺動面は高周波焼入れ(RHC50以上)をし、ベアリング部及び摺動部にグリスを塗布して運転した結果、かなりよい耐久性が得られた。

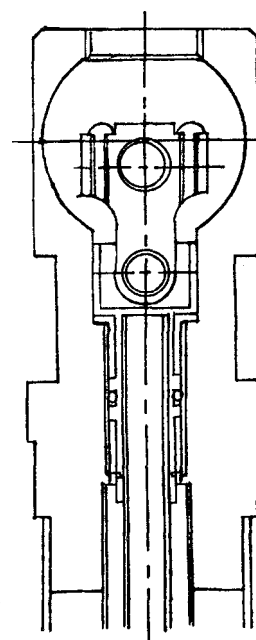
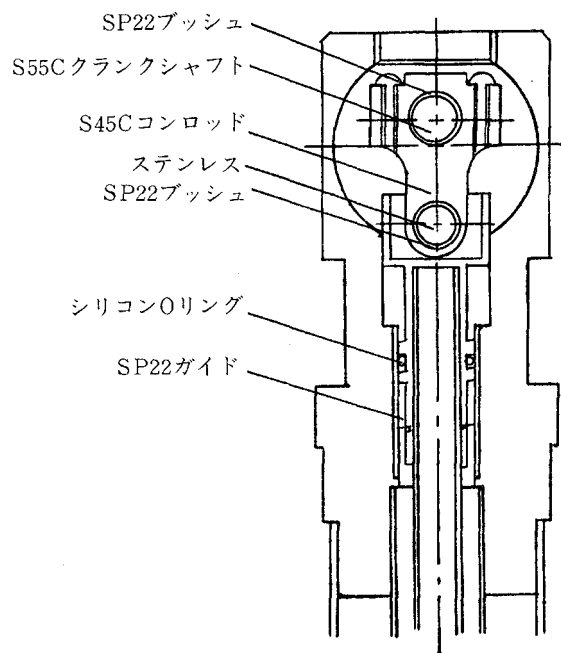
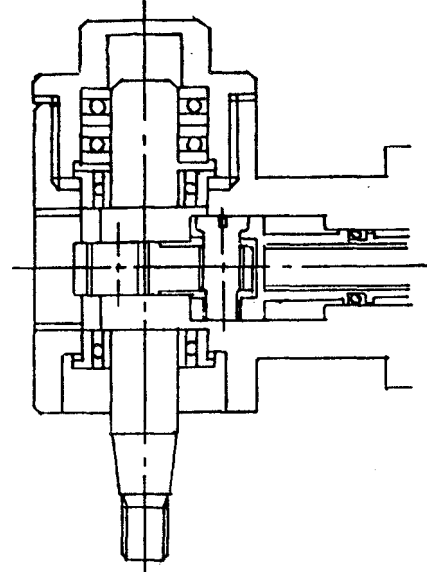
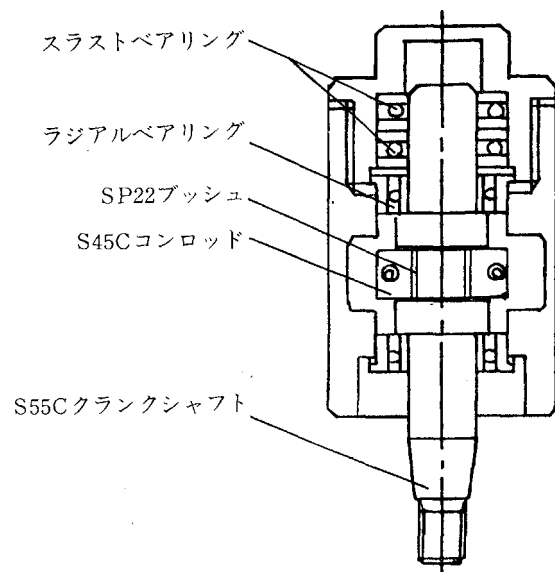
タンク及びポンプの圧力上昇に対する安全策としては、タンク内圧力が $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上になった場合、



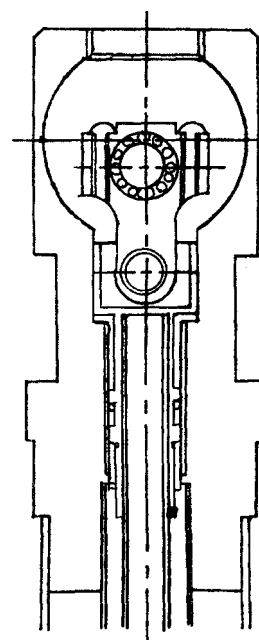
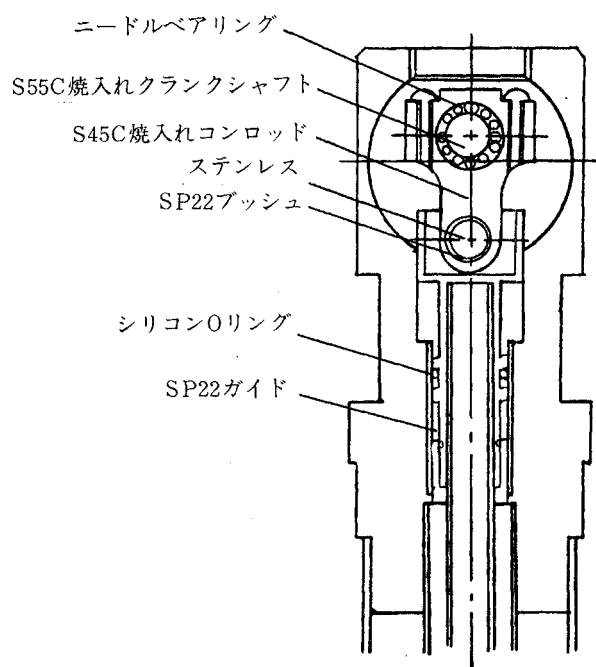
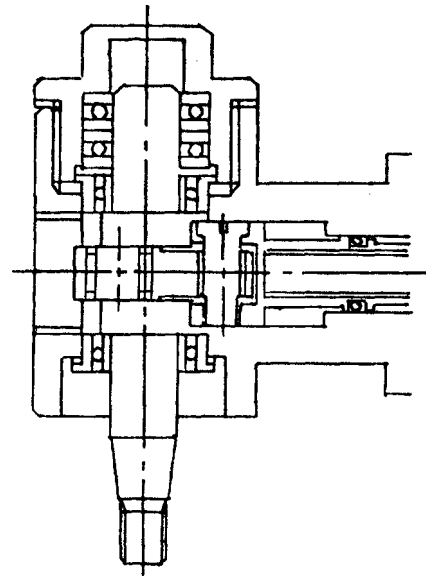
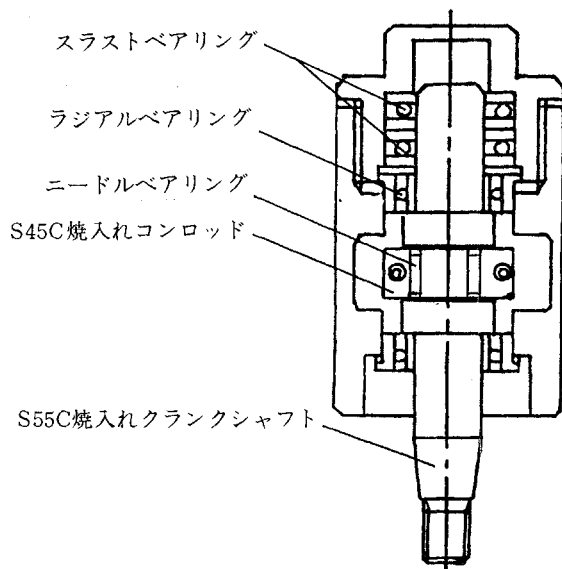
第3-6図(A) 駆動クランク機構部



第3-6図(B) 駆動クランク機構



第3-6図(C) 駆動クランク機構



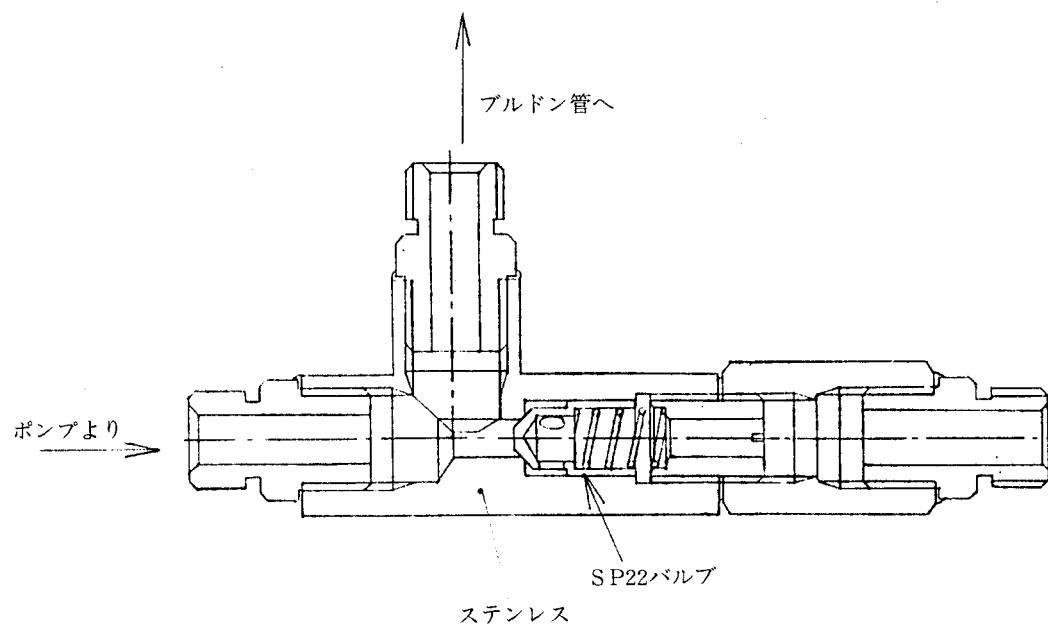
第3-6図(D) 駆動クランク機構

タンク内上部の気体水素が大気中に放出されるよう安全弁を設け、さらに、 $2.2\text{kg}/\text{cm}^2$ で破裂するよう、ラプチャーディスクも設定し二重の安全対策を施した。ポンプについては、ポンプ付属の液体水素高压タンクに、 $11\text{kg}/\text{cm}^2$ で作動する調圧弁とともに、 $15\text{kg}/\text{cm}^2$ で作動する安全弁をタンク外に設け、安全性を同じく二重にして確保した。

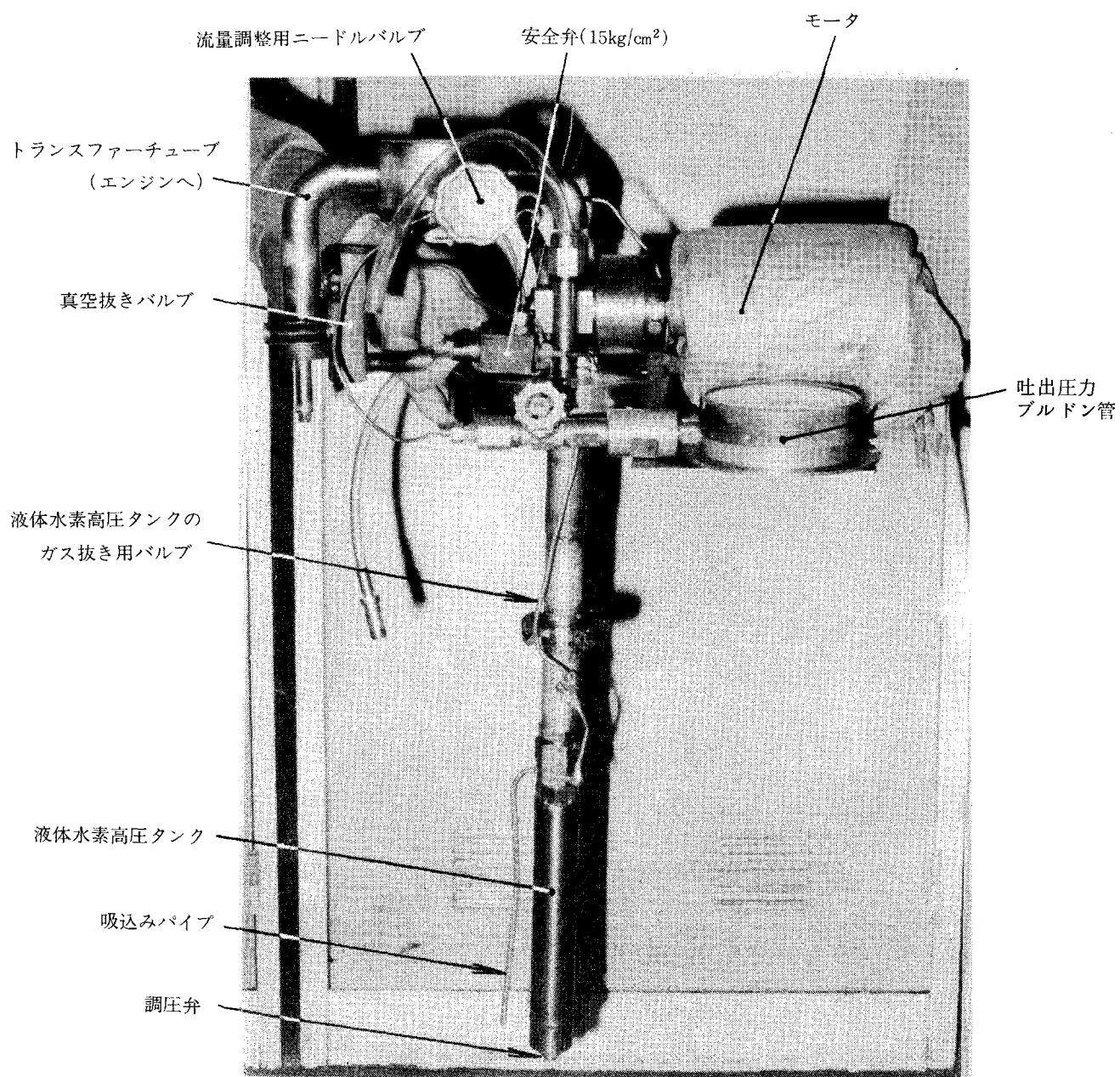
第3-7図に本研究において開発した安全弁を示す。これは、ばねの強さを変えることによって、使用目的に合った開弁圧力を設定する。

第3-8図はポンプ外観図、第3-9図は車載用タンクに取りつけて実験中のポンプを示す。

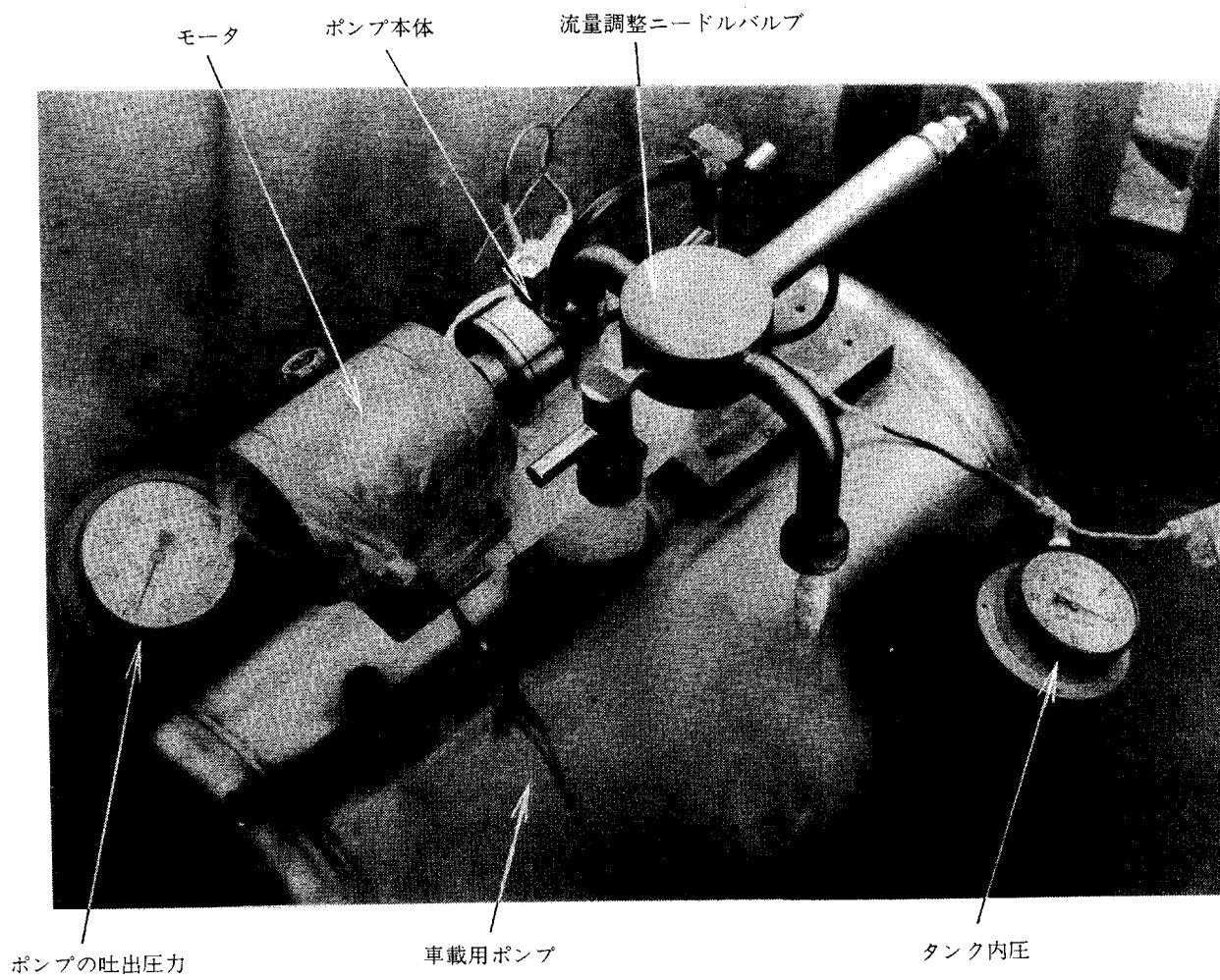
以上により、液体水素を加圧するポンプとしては、実用にはまだ十分とはいえないとしても、かなり耐久性のあるポンプを開発することができた。これを原型として、さらにポンプの運動と吸入、圧縮、吐出の機構の解明等を行い、液体水素ポンプ自体の作動状態を把握すれば、理想的な機構を開発できる。またさらに、高压（ $50\sim 60\text{kg}/\text{cm}^2$ ）のポンプ開発などに向って、新年度は研究を進めてゆくつもりである。



第3-7図 安全弁



第3-8図 液体水素ポンプ外観写真



第3-9図 実験中の液体水素ポンプ

4. 液体水素の流量制御に関する研究

〔要 旨〕

トランスファーチューブの中間にニードル弁を設けて液体水素の流量を制御することは、途中で気化するという問題が介在して不可能であるので、吐出した液体水素を中間タンクでガス化し、気体水素を噴射装置に供給し、そこで流量調節を行わせる方式で研究を進めている。

4.1 流量制御方法の概要

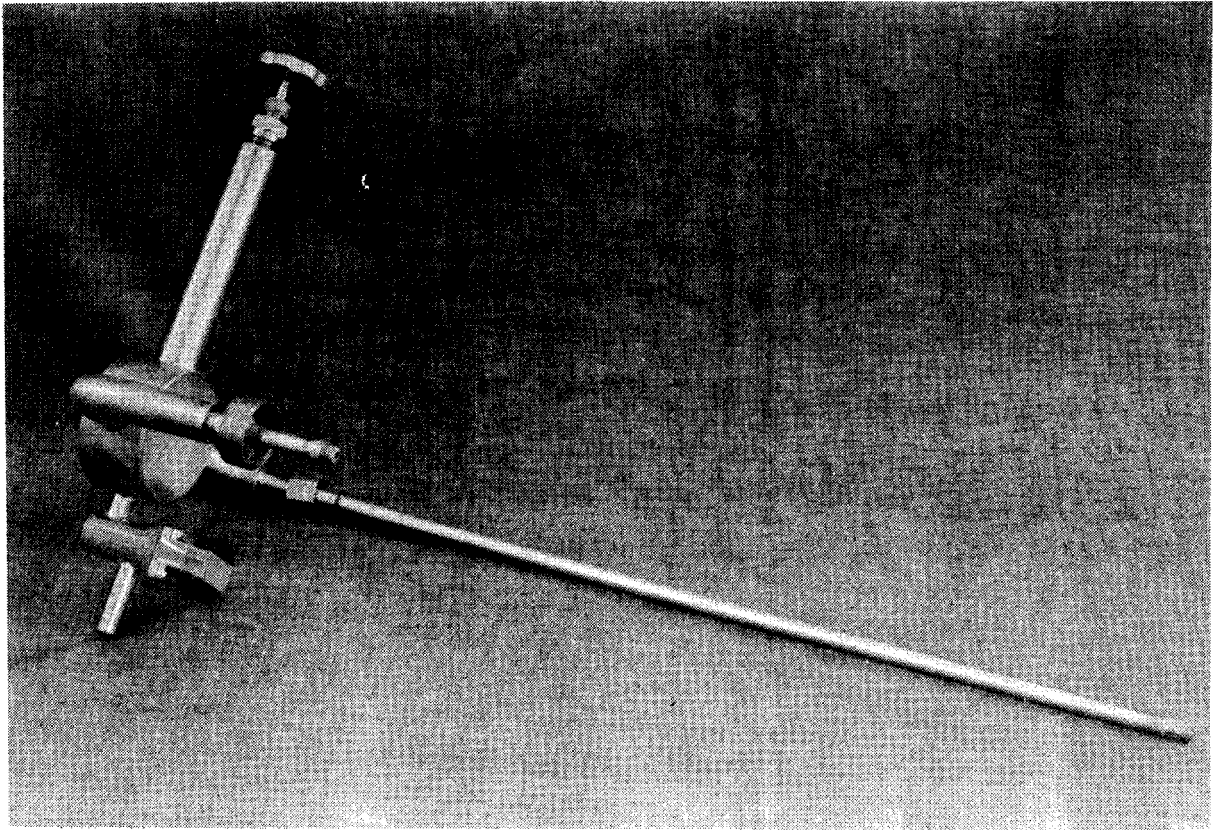
前年度の実験で、トランスファーチューブの中間にニードル弁を設けて液体水素の流量を調節しようとすると、ニードル弁に至るまでの過程で多少の受熱は避けられず、ために、弁に到達する以前に一部ガス化するという現象が起り、その量及び位置は、そのときの周囲の状況及び供給量によって異なり、複雑に変動する二相流となり、弁によってこれを制御することは不可能であった。よって、液体水素タンク内の調圧弁によって圧力を調整した一定圧力の液体水素を吐出させ、真空とスーパーインシュレーションを併用した構造のトランスファーチューブで中間タンクに導き、ここでガス化した高圧気体水素を、上記同様の構造のトランスファーチューブで噴射装置に供給し、そこで流量を制御する方式を採用することとした。

4.2 トランスファーチューブの試作

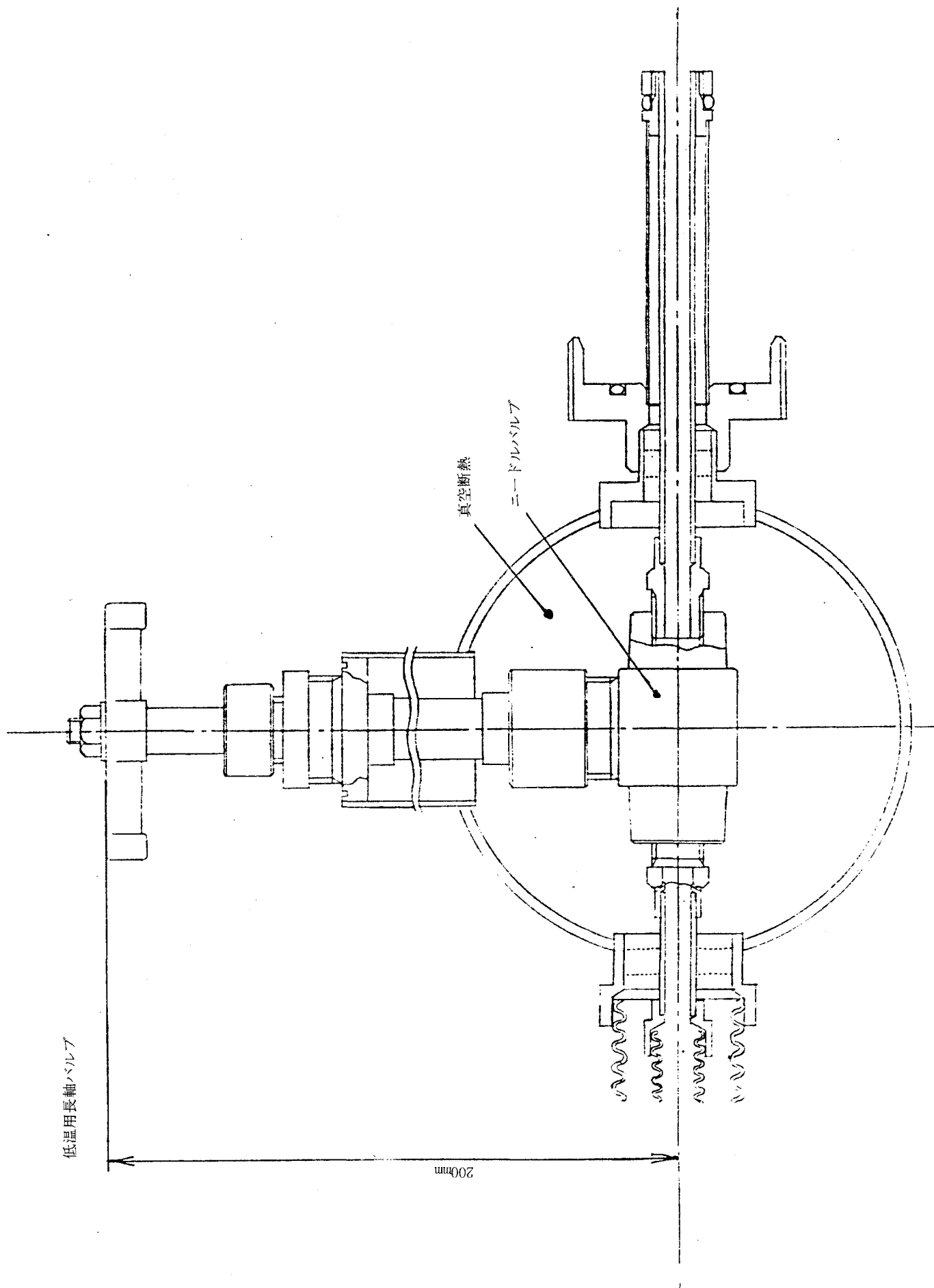
本年度試作したトランスファーチューブは液体水素ポンプより多気筒（3気筒）エンジンへの液体水素供給システムとして試作したもので、供給圧力は液体水素タンク内の液体水素ポンプ下部に取りつけた高圧タンクの調圧弁で10～11 kg/cm²に調圧される。液体水素はこの高圧タンクから、液体水素ポンプと一緒に組み立てられてタンク内に挿入されるトランスファーチューブによって（第4-1図）、液体水素タンク外に導びきだされる。このトランスファーチューブには図に示すように、手動式ニードル弁が取り付けられている。このニードル弁は第4-2図に示すように、真空断熱構造となっていて、ストップバルブの役目を果す。

タンクから導出された液体水素は第4-3図に示す液体水素気化膨張タンクに接続され、これも真空断熱構造となっており、5,500rpm、全負荷のエンジン運転条件でも、液体水素を安定供給できるように、内容積は600ccになっている。第4-4図は液体水素気化膨張タンクから多岐管への接続トランスファーチューブを示し、第2段目の長軸ニードル弁が取り付けられている。第4-5図はエンジン各気筒に個々に供給できるように分岐されたトランスファーチューブの断面図を示す。第4-6図はこれらのトランスファーチューブを組み立てた状態を示す。エンジンの振動によるトランスファーチューブの切断などを防止するため、できうるかぎりフレキシビリティのあるトランスファーチューブを使用し、安全対策上、このシステム途中の液体水素膨張タンク部には、安全弁をとりつけてある。また、液体水素ポンプの性能実験の際にこのシステムを接続して、試験してみたところ、以下のようなことが判明した。

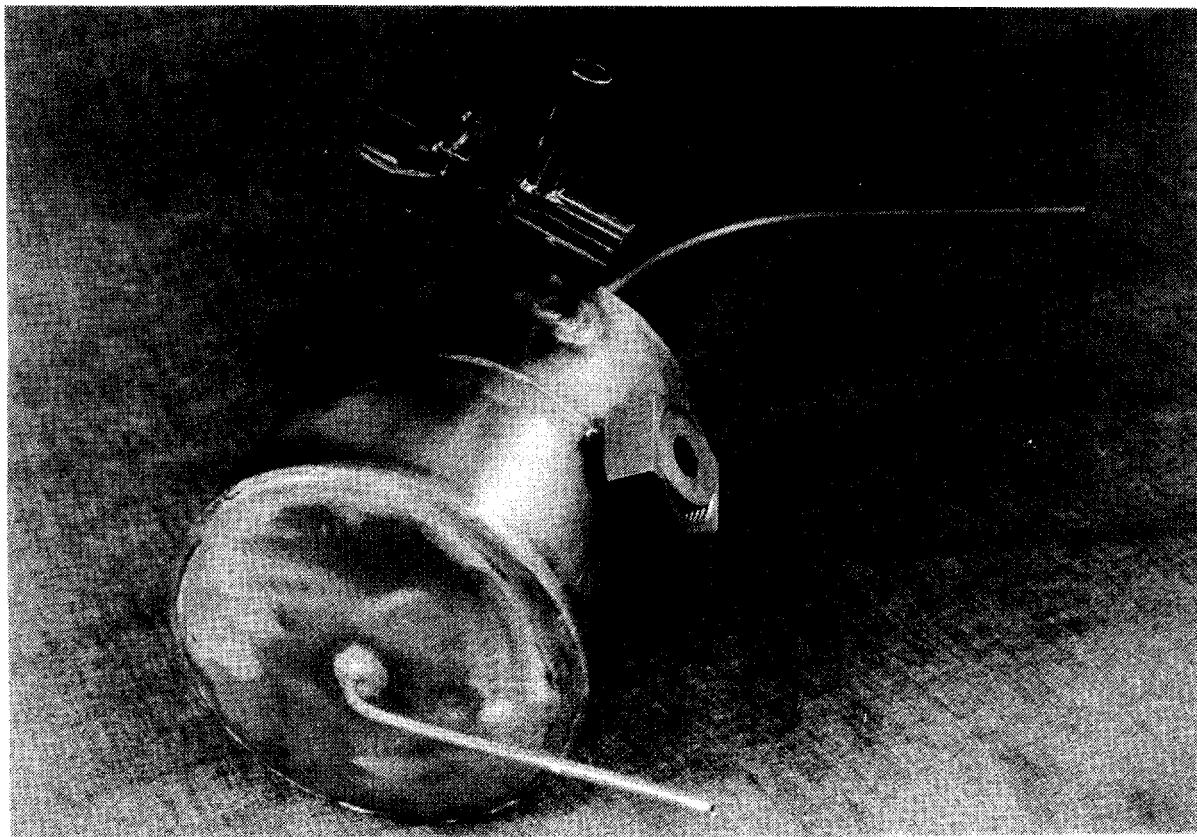
- (a) 断熱状態はかなりよく、2個の長軸ニードルバルブを全開にすると、多岐管より液体水素が、ときたま放出されることがあった。
- (b) これによって液体水素を多量に使う条件下では、液体水素気化膨張タンクでの気化が追いつかないことがわかった。
- (c) すなわち、このタンクも断熱構造であるため、少量液体水素を供給する場合は、このままでよ



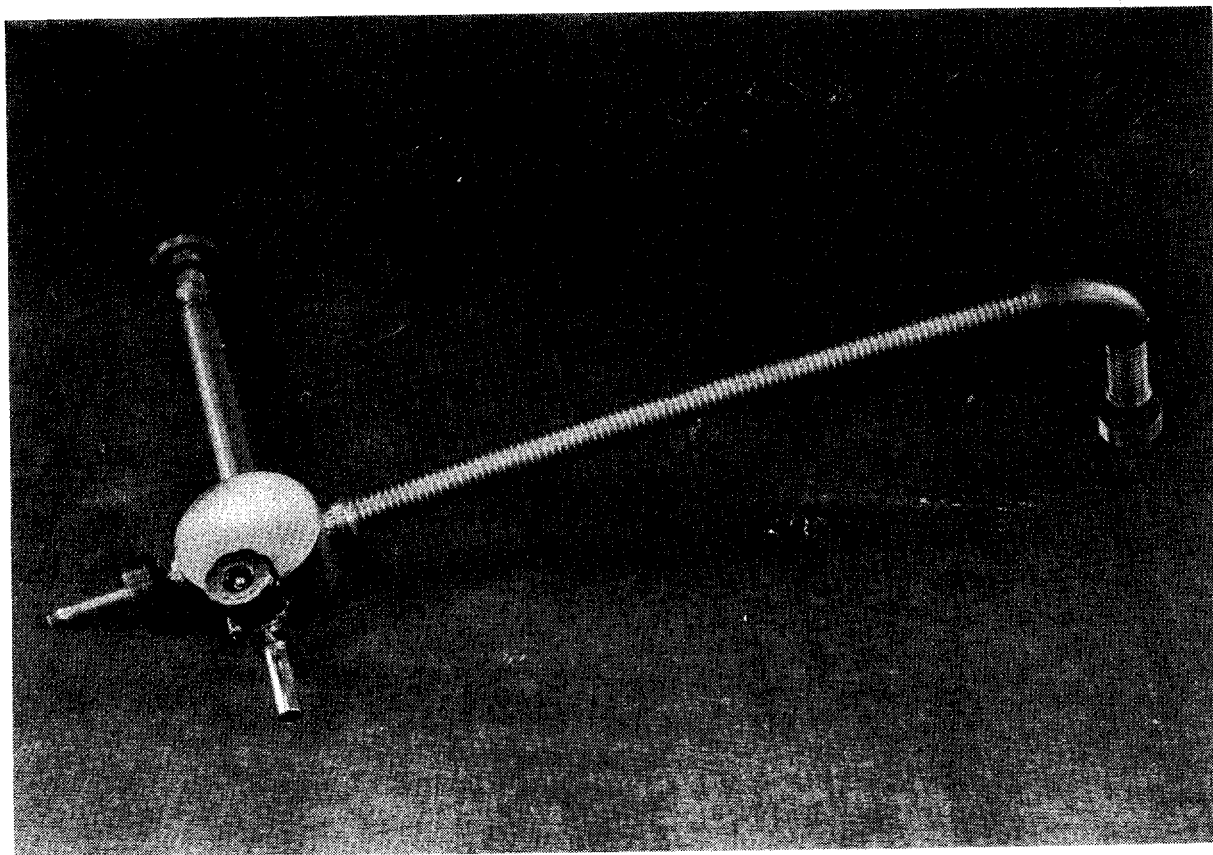
第4-1図 タンク内挿入トランスファーチューブ



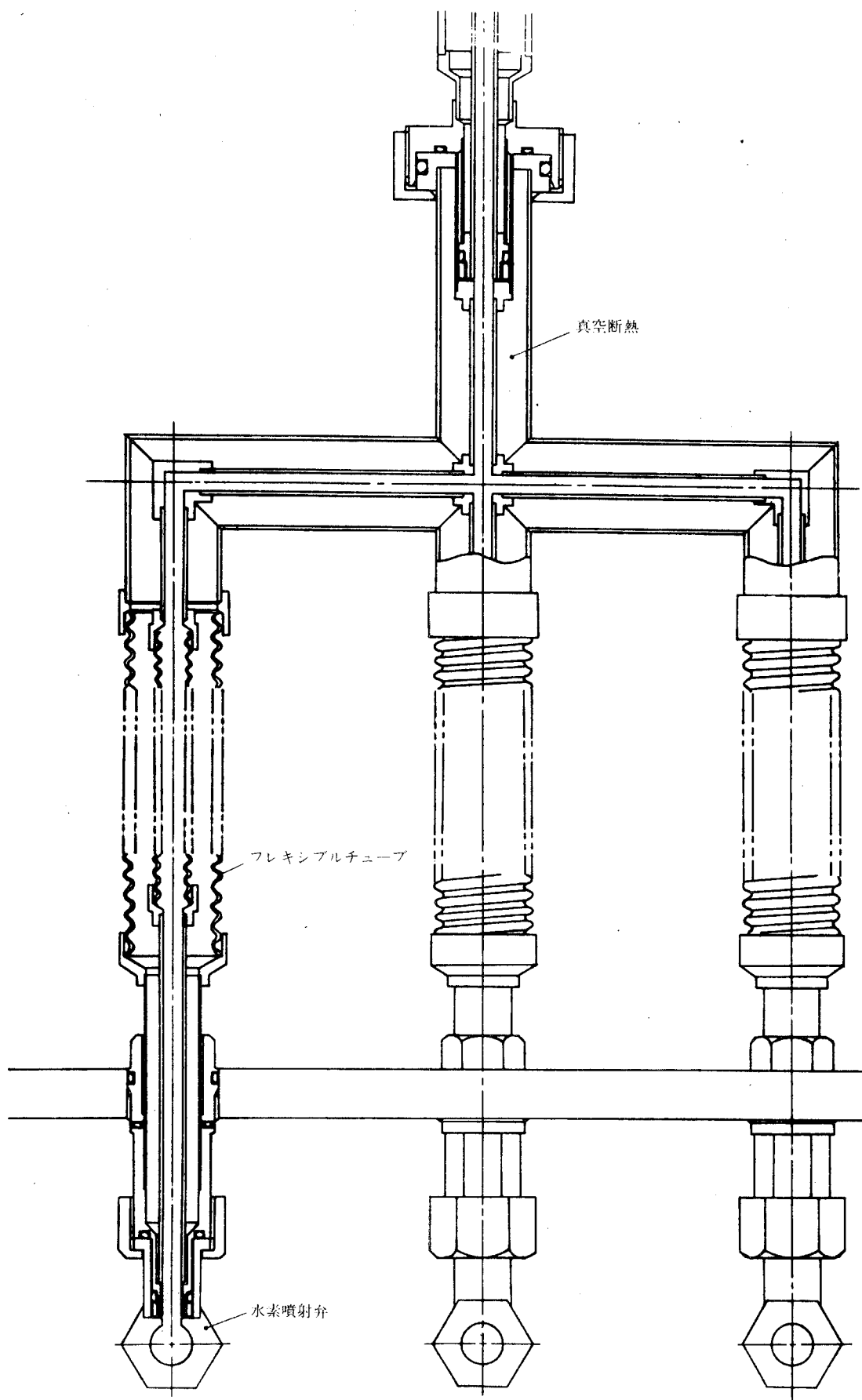
第4-2図 低温用長軸バルブ



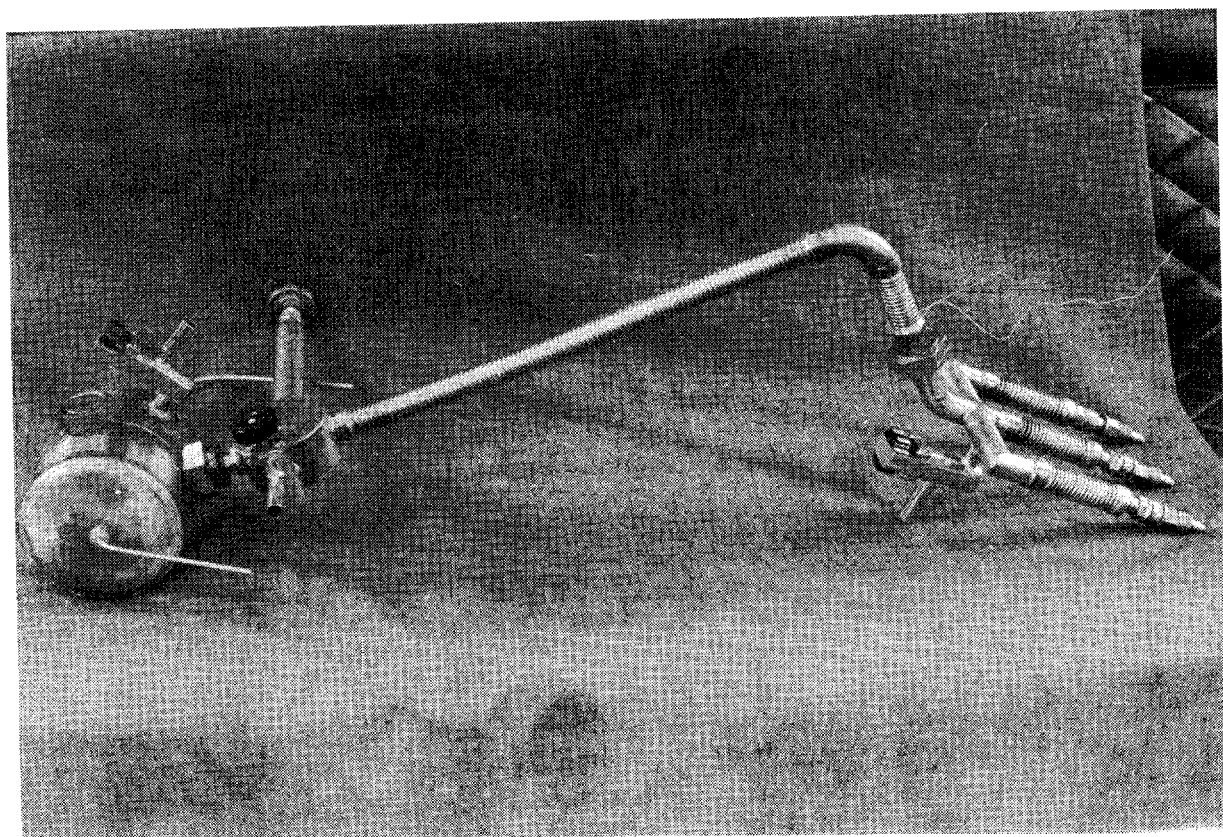
第4-3図 液体水素気化タンク(断熱)



第4-4図 気化タンクから多岐管への接続トランスファーチューブ



第4-5図 多岐管断面図



第4-6図 組立てた状態

いが、多量使用の際は、タンク内に特殊な装置を設けて、できるだけ液体水素温度に近い気化水素をエンジンに供給できるようにするシステムを開発する必要がある。

- (d) ポンプ、トランスファーチューブの一連のシステムについて判断してみると、エンジンとのマッチングということを度外視して供給システムだけに絞ってみる限り、かなり安定して供給されていることがわかった。また、目で見た限りでは、多岐管の各々から、均一に放出していることが確認された。

5. 今後の研究課題

- (1) 液体水素タンクの断熱法の向上を図る。すなわち、液体水素取り出し口の構造及び材料の改善、高真空度の維持など。
- (2) 液体水素供給ポンプの摺動部材料の探索をつづけ、耐久性及び高圧化を図る。また、ポンプの動力伝達機構を経て侵入する熱量をできるだけ遮断するような構造、材料を開発する。
- (3) 負荷変動に応じ、供給水素流量を制御するための噴射装置を開発する。
- (4) 液体水素タンクの蒸発損失を大幅に減少させることは不可能と考えるので、蒸発した気体水素の回收利用を考える。たとえば、蒸発した気体水素を大気中に放出させずに、金属ハイドライドに吸蔵させ、エンジン運転時に吸気に混入させる。あるいは、ポンプに付属した液体水素だめ内を定圧に保つために調圧弁から噴出する液体水素を利用して冷凍サイクルを開発し、液体水素加圧とともに液化機もかねたシステムを開発する。

6. む す び

以上述べてきたように、昭和53年度の研究において、試作液体水素タンクの性能改善のための具体的な目どが明らかにされてきた。しかし、タンク単体だけで蒸発損失を無視できるほど僅少にすることは不可能に近い。従って、むしろ、ある限度以上は、これを回収・利用するシステムを考究する方が当を得ていると考えられる。液体水素供給ポンプについては、ポンプ摺動部の耐久性を保証できるような材料は、まだ実証されていないが、高分子化学の発達に伴い、極低温で無潤滑で使用できる材料の選択が可能と思われる。流量制御については、噴射システムの開発によって解決することが望ましいと考えられ、その方向で研究を進めるべきであろう。

本報告書の内容を公表する際はあらかじめ通商産業省工業技術院サ
ンシャイン計画推進本部の許可を受けて下さい。

電話 03—434—5644～7（直通）

財団 日 本 自 動 車 研 究 所
法人

研 究 所：茨 城 県 筑 波 郡 谷 田 部 町（筑波研究学園都市）

郵便番号300-21 電話 筑波谷田部 02975-4-1111

東京事務所：東京都千代田区大手町1丁目6-1（大手町ビル2階）

郵便番号100 電話 東京 03-214-2484～5

JAPAN AUTOMOBILE RESEARCH INSTITUTE, INC. (JARI)

RESEARCH INSTITUTE : YATABE-CHO, TSUKUBA-GUN, IBARAKI 300-21 JAPAN

TEL. TSUKUBA-YATABE (02975)4-1111

TOKYO OFFICE : OTEMACHI BLDG. (2F), 6-1, OTEMACHI 1-CHOME

CHIYODA-KU TOKYO 100 JAPAN

TEL. TOKYO (03)214-2484

JN0040276