

液体水素の送液実験

秋葉 録二郎・棚次 亘弘・小林 清和

序 論

水素は化学ロケットのうちで最も高性能が期待できる燃料の一つであることから、液体水素はロケット推進用の燃料として、主に米国において大量に取扱われてきており、その取扱い技術は1960年代初期から現在までにほぼ確立されていると思われる。我国およびヨーロッパにおいても、最近液水/液酸ロケットエンジンの開発に伴って、液体水素の取扱い技術が進歩しつつある。

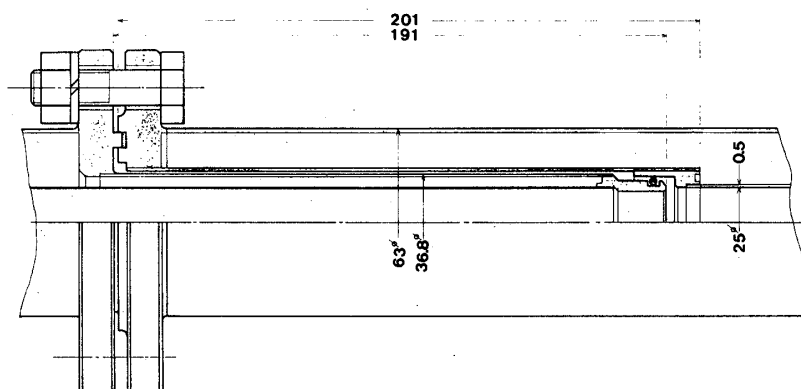
一方、水素の燃焼生成物は他の炭化水素系燃料のそれに比較して清浄であることから、ロケットの燃料としてだけでなく、石油に代る輸送可能な燃料として、将来は航空機および地上の交通機関にも使用することが期待されている。しかし、液体水素は沸点が 20.3°K で、気温との差が約 280°C あり、更なる気化ガスは可燃性、爆発性であるため、これを安全に取扱う技術を確立することが必要である。

ここでは、液体水素を配管によって移送する実験を行ったので報告する。

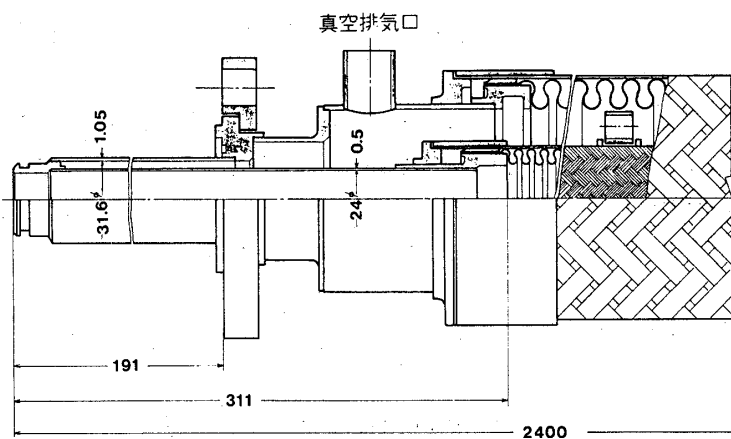
I 液体水素移送管および実験装置

実験に用いた液体水素移送管は真空ジャケット付の二重管であり、1本の長さが7.5 mのユニットになっている。各ユニットの内管には常温から液体水素温度までの熱収縮を避けるために3個のベローが配置されており、更に気温の変化および配管のミスアライメントを修正するために外管にもベローを取付けてある。従って、液体水素の移送時にも、移送管の全長は変化しない。各ユニットは第1図に示すカップラーによって容易に着脱でき、管を延長することができる。移送管の一端には長さ2 mの真空ジャケット付二重ベローを用いたフレキシブルチューブがあり、他の設備に容易に接続できる。第2図にフレキシブルチューブの断面形状を示した。

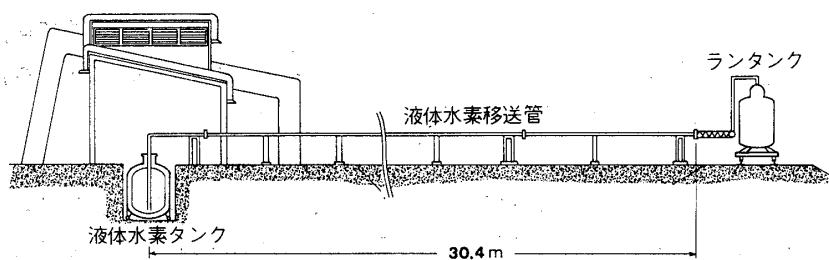
今回の実験では、第3図に示すように、水素液化機に付属する液体水素タンクから、移送管によって、ターボポンプ試験設備に付属するランタンクに液体水素を移送した。第4図および第5図に、液化機タンク周辺の配管系統およびランタンクの断面形状を示した。ランタンクの内筒の外壁には銅管がロー付されており、管内に液体水素を流すことによって内筒を予冷できる構造になっている。第1表および第2表にはタンクおよび移送系の諸元を示した。



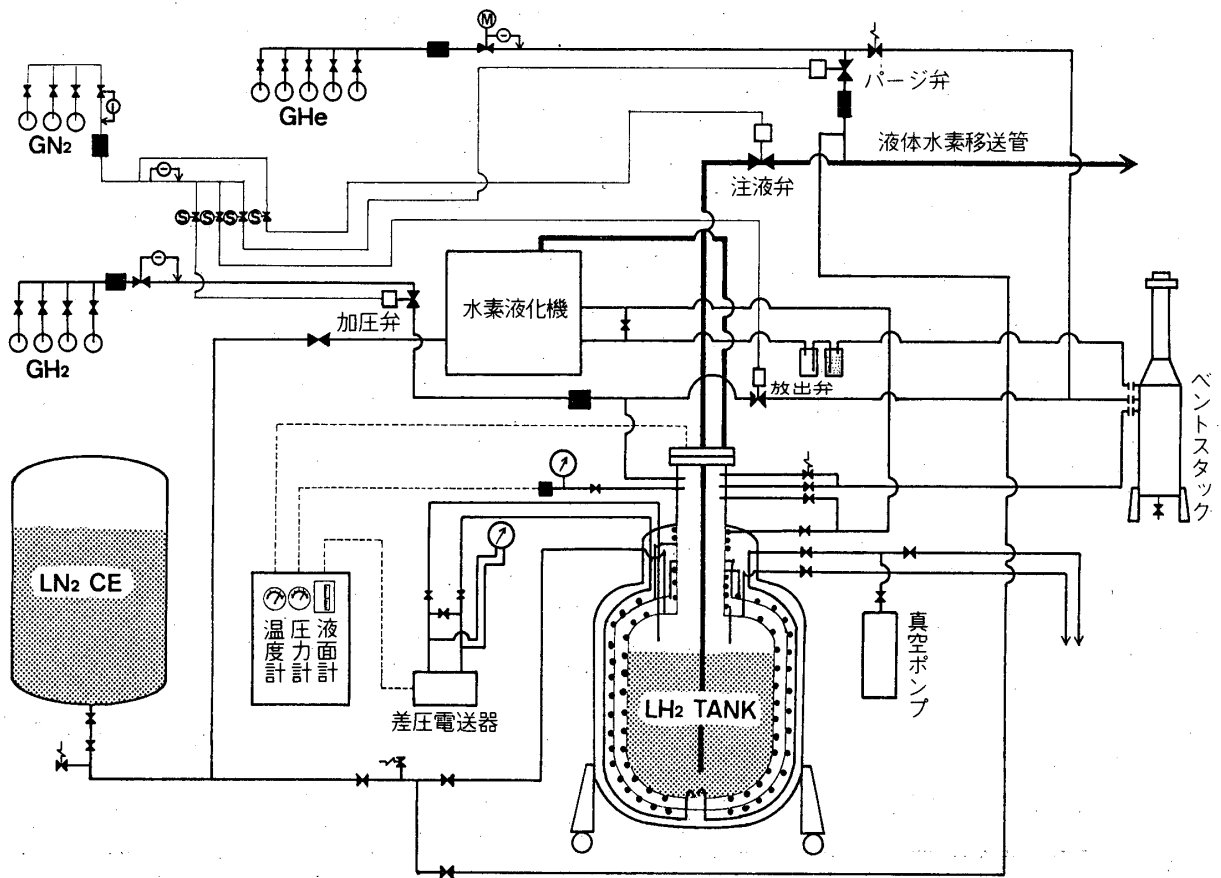
第1図 液体水素移送管カプラー



第2図 フレキシブルチューブ



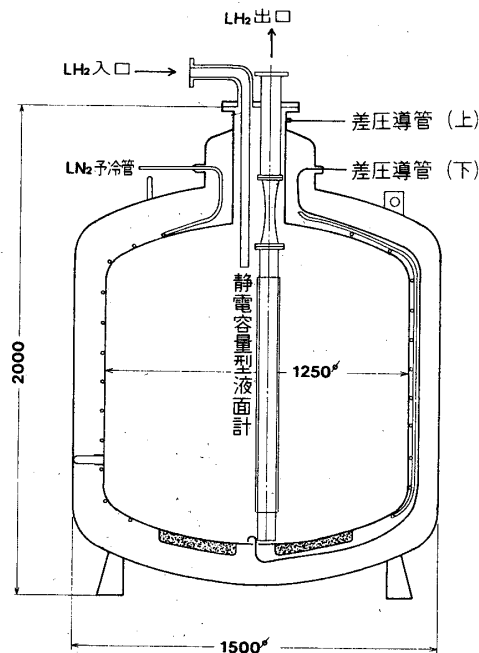
第3図 液体水素移送系の概観



第4図 液体水素タンク周辺配管系統図

第1表 タンクの諸元

	貯蔵用液体水素タンク	ラ ン タ ン ク
内容積 (300°K)	1440 l	1397 l
(20°K)	1425 l	1384 l
材 質	SUS 304 L	SUS 304 L
断熱形式	スーパーインシュレーション 水素シールド	スーパーインシュレーション (10層)
自然蒸発率	10 l / 日	190 l / 日
内筒予冷	液体窒素	液体窒素
液 位 計	差 圧 式 炭素抵抗式	静電容量式 差 圧 式



第5図 ランタンク

第2表 液体水素移送部分の諸元

	移送管	フレキシブル チューブ	ランタンク入口部 配管	ランタンク
液体水素の流れ方向	→			
断熱構造	真空ジャケット付 二重管	真空ジャケット付 二重ペロー	真空ジャケット付 二重管	スーパーインシュ レーション 10層
材質	SUS 304	SUS 304	SUS 304	SUS 304
内径×長さ×肉厚 (mm) (内管)	24×31400×0.5	26.5×1780×0.4	30×7370×1.0	1250×1100×3
(外管)	60.7×31400×1.15	72×1780×0.7	72.1×7370×2.1	1500×1320×6
内管の重量 (kg)	15.8	3.5	8.3	159.9
ジャケットの真空度 (mmHg)	10^{-5}	10^{-5}	8.1×10^{-6}	8.1×10^{-6}

II 移送実験の方法

今回の実験では液化機付属の液体水素タンクに506 lの液体水素を用意し、常温のヘリウムガスでタンクを加圧することによって、ほぼ全量に近い493 lを送り出した。ランタンク内筒は液体窒素で130°Kまで予冷したが、他の配管系は常温の状態から移送を開始した。蒸発気化した水素ガスはランタンクに接続したベントスタックから大気中に放出した。

以下に実験手順を示す。

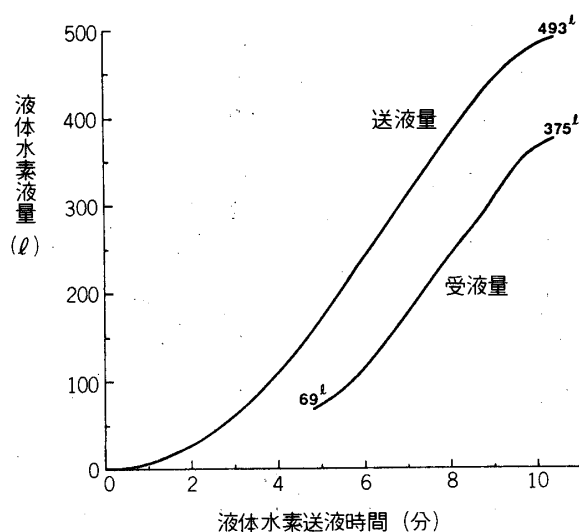
- ① ランタンクおよび移送管内をヘリウムガス置換する。
- ② ランタンク内筒を液体窒素で予冷する。
- ③ 液体水素タンクをヘリウムガスで $0.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ に加圧する。
- ④ ランタンクの蒸発ガス放出弁および移送管パージ弁を開き、ヘリウムガスを移送管、フレキシブルチューブおよびランタンクに流す。
- ⑤ 移送管パージ弁を閉じ、液体水素注液弁を開き、液体水素の移送を開始する。
- ⑥ ランタンクに液体水素が溜り始めると、液体水素タンクを $1.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ に昇圧する。
- ⑦ 液体水素タンク内の液の送り出しが完了した時、注液弁を閉じ、移送管パージ弁を開いて、移送管内をヘリウムガスでパージする。

液体水素移送時の弁の開閉は全て遠隔操作によって行い、タンク内圧、温度および液位も遠隔でモニターし、記録した。

Ⅲ 実験結果および考察

第6図に液化機付属タンクおよびランタンク内の液位計によって計測した送液量とランタンクの受液量を送液開始時からの時間に対して示した。全送液量は 493 l で、ランタンクの受液量は 375 l であり、送液に要した時間は10分24秒であった。送液開始後約2分30秒でランタンクに液体水素が溜り始め、送液開始後約6分でランタンクを含めた全ての移送系が定常状態になっている。定常状態での送液率は 69.5 l/分 で、ランタンクの受液率は 66.5 l/分 であり、従って、定常状態での移送損失は毎分 3.0 l であった。また、ランタンクを含めた全ての移送系の液体水素の損失は 118 l であった。

液体水素に接触する移送系の全てが 20.3° K になっている場合に生じる液体水素の移送損失は、次の三つの熱侵入による。



第6図 液体水素の送液量と受液量

第3表 移送系の冷却および熱侵入による液体水素の移送損失

	移送管	フレキシブル チューブ	ランタンク 入口部配置	ランタンク	
送液開始前の温度 [°K]	常温	常温	常温	130	(合計)
20.3°K に冷却するに (最大) 要する液体水素量[l] (最少)	43.6 8.3	9.6 1.8	23.0 4.4	86.2 34.7	162.4 49.2
真空ジャケット内の残留ガスの 熱伝導による損失量 [l/min]	3.18×10^{-4}	1.73×10^{-5}	9.06×10^{-5}	6.73×10^{-4}	1.10×10^{-3}
副射熱伝達による損失量 [l/min]	7.01×10^{-2}	7.80×10^{-3}	2.04×10^{-2}	1.30×10^{-1}	2.28×10^{-1}
支持材の熱伝達による損失量 [l/min]	3.30×10^{-6}	7.36×10^{-7}	5.58×10^{-7}	4.86×10^{-6}	1.71×10^{-5}

- (1) 真空ジャケット内に残留したガスによる熱伝導
- (2) 二重壁間の副射熱伝達
- (3) 内管あるいは内筒を支持する構造材による熱伝導

以上の詳細な計算式は付録に与えたので参照されたい。

第3表には移送系各部の熱侵入による液体水素の移送損失と、20.3°Kまでの冷却損失の計算値を示した。冷却損失の項で、最大損失は液体水素の蒸発潜熱だけを利用して冷却した場合であり、最少損失は液体水素の蒸発潜熱および蒸発気化した水素ガスの熱容量を全て有効に利用して冷却した場合の値である。冷却時間を十分長くとれる場合には最少損失に近づき、急激に冷却すると損失は大きくなる。第3表に示した外部からの熱侵入による液体水素の移送損失は、大きく見積っても2~3 l程度であるので、全ての送液損失118 lのほとんど全量に近い液体水素は、ランタンクを含む移送系を20.3°Kに冷却するために費されている。この値は、第3表に示した最大冷却量162.4 lと最少冷却量49.2 lの中間にあり、蒸発気化した水素ガスの熱容量の17.9%が有効に冷却に利用されたことになる。更に、第3表に示した外部からの熱侵入による移送損失は0.23 l/分と予想されるが、今回の実験では3.0 l/分の定常移送損失が測定されており、約13倍程度予想値より大きい。これは、ランタンクの内筒に液体水素が移送されるにつれて、底部から徐々に20.3°Kに冷却されたためであろう。従って、今回の実験では外部からの熱侵入による移送損失とランタンクの冷却損失の区別が明確ではない。しかし、比較的速い時間で液体水素を移送する場合には、今回の実験条件は妥当であり、また実用に即したものであろう。

結 論

能代ロケット実験に設置された水素液化機に付属する液体水素タンクから長さ約40 mの真空ジャケット付二重管によって、ターボポンプテストスタンドのランタンクに液体水素を移送し次のような実験結果を得た。

- (1) 送液量は493 lでランタンクの受液量は375 lであり液体水素の移送損失は118 lであった。
- (2) 移送損失のうち115 l程度がランタンクを含む移送系の冷却に費やされた。冷却には蒸発気化した水素ガスの熱容量の約18%が利用された。
- (3) 全送液時間は10分24秒で、送液開始後約6分で定常状態になり、この時の送液量は69.5 l/分、ランタンクの受液量は66.5 l/分で、移送損失は3.0 l/分であった。この値は外部からの熱侵入による移送損失の予想値より約13倍大きい。これは、ランタンク全体が完全に20.3°Kに冷却されていなかったためであろう。

謝 辞

実験装置の設計にあたり、技術的な御指導をいただきました研究担当、永野弘助教授に感謝致します。液体水素移送管の設計、製作にあたり、大阪酸素工業 K. K. の協力を得、ターボポンプ試験設備のランタンクに関して住友重機械工業 K. K. から資料の提供を受けましたことに謝意を表します。

今回の実験を行うにあたり、実験主任倉谷健治教授はじめ、液水実験班の皆様に御協力いただきましたことに深く感謝します。

1978年1月9日 新設部(工学)

付 録

- (1) 配管等の材料を20.3°Kに冷却するのに必要な液体水素の量

$$Q = \frac{(H_{MT} - H_{M20.3}) \times W}{H_H \times 0.0707} \quad (1)$$

Q : 冷却に必要な液体水素の量 [l]

$H_{MT} - H_{M20.3}$: 材料を T°K から 20.3°K に冷却するのに必要な全熱容量 [kcal/kg]

H_H : 冷却に利用できる水素の熱容量 [kcal]

W : 冷却される材料の重量 [kg]

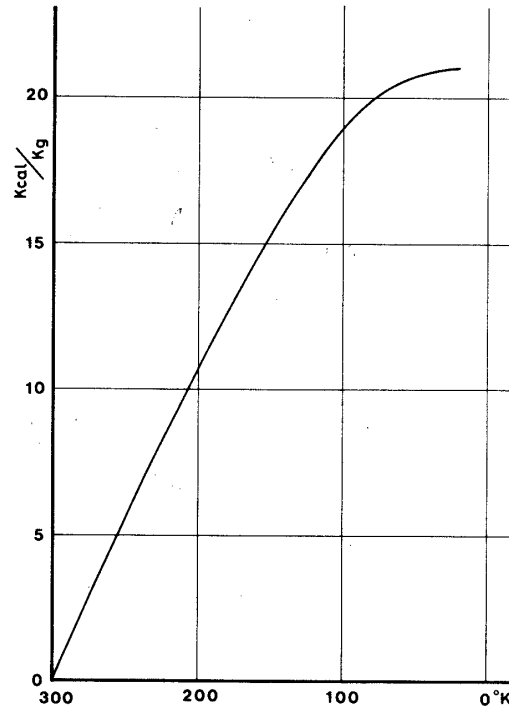
ここで、液体水素の蒸発潜熱だけを利用して冷却する場合には、

$$H_H = 107 \text{ kcal/kg} \quad (2)$$

となり、蒸発気化した水素ガスの熱容量も有効に利用できる場合には、

$$H_H = 107 + (T^\circ\text{K} \text{ から } 20.3^\circ\text{K} \text{ までの水素の全熱容量})/2. \quad (3)$$

従って、蒸発潜熱だけで冷却した場合には、冷却に必要な液体水素の量は最大になり、蒸発気化した水素ガスの熱容量の全てを合せて有効に利用した場合には最大になる。第7図に SUS 304 の熱容量を 300°K を基準にして示した。以下に 1 kg の SUS 304 を冷却するに要する液体水素の量を示す。



第7図 SUS 304の熱容量

冷却温度	300 → 20.3° K	77 → 20.3° K
(最大)	2.76 l	0.12 l
(最少)	0.52 l	0.064 l

(2) 高真空ジャケット内の残留ガスの熱伝導による熱損失
ここでは, Corruccini の式⁽¹⁾を用いたので以下に示す.

$$q_{gc} = 2.36 \alpha \left(\frac{r+1}{r-1} \right) P (T - 20.3) A_1 \quad (4)$$

q_{gc} : 熱損失 [cal/sec]

P : 300°Kにおける残留ガスの圧力 [mmHg]

r : 比熱比

T : 内壁の表面温度 [°K]

$A_1 A_2$: 内壁, および外壁の表面積 [m²]

α : 修正係数

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_2 + \alpha_1 (1 - \alpha_2) (A_1 / A_2)} \quad (5)$$

$\alpha_1 \alpha_2$: 内壁, および外壁の修正係数⁽²⁾

表面温度 (°K) 300 80 20

修正係数 0.3 0.5 1.0

(3) 副射による熱損失

ここでは、次のような仮定に基づいて、(6)、(7)式を導いた。

- (1) 同心円筒壁間の副射を考える。
- (2) 同心円筒間は真空である。
- (3) 壁の表面は灰色体とする。

$$q_r = \sigma A E (T^4 - 20.3^4) \quad (6)$$

q_r : 副射熱損失 [cal/sec]

σ : Stefan - Boltzman 定数 = 1.36×10^{-8} cal/s m^2 $^{\circ}K^4$

A : 内壁の表面積 [m^2]

$$E = \frac{e_1 e_2}{e_2 + \frac{A_1}{A_2} (1 - e_2) e_1} \quad (7)$$

e_1, e_2 : 内壁, および外壁の吸収率

以下に SUS 304 の吸収率を示す.⁽²⁾

温度 ($^{\circ}K$)	300	77	20
吸収率	0.08	0.048	0.04

(4) 低温部の支持材の熱伝導による熱損失

$$q_{sc} = k_{eff} A_c \frac{T - 20.3}{L} \quad (8)$$

q_{sc} : 熱損失 [cal/sec]

A_c : 熱の流れ方向に垂直な支持材の断面積 [m^2]

L : 支持材の実効長 [m]

k_{eff} : 実効熱伝導率 [cal/s m $^{\circ}K$]

$300^{\circ}K$ から $20.3^{\circ}K$ までの温度落差のある場合の SUS 304 の k_{eff} は,

$$k_{eff} = 2.69 \times 10^{-4} \text{ cal/s } m \text{ } ^{\circ}K \text{ } ^{(2)}$$

参 考 文 献

- [1] CORRUCCINI, R, J, Gaseous Heat Conduction at Low Pressures and Temperatures, Vacuum, 7, 8, 19-29 (1957-8).
- [2] R. B. SCOTT: TECHNOLOGY AND USES OF LIQUID HYDROGEN, pp. 106-148, PERGAMON PRESS, 1964.