多層断熱式大型液体水素貯槽の製作

岡 崎 治

大同酸素(株)化工機部 大阪市南区鯉谷中之町 72-1

(1979年12月21日受理)

Manufacturing of Large Scale Multilayer LH₂ Tank

Osamu OKAZAKI

Chemical Machinery & Equipment Dept., Daido Oxygen Co., Ltd.
72-1, Unagidani-nakano-cho, Minami-ku, Osaka.

(Received December 21, 1979)

Synopsis :

Liquid hydrogen had been used only on a laboratory scale until 1976, but the demand for liquid hydrogen was considerably increased as a result of development of rocket engines.

consequently, it became necessary to have large facilities for reception of liquid hydrogen as well as for its production and transportation. To meet the requirements, we manufactured LH₂ storage tanks of 50,000 liters capacity in September 1978, and those of 11,000 liters capacity in March 1979.

This paper presents the details of design and construction of these huge-scale storage tanks.

1. はじめに

昭和49年、通産省が発表した「化石燃料に頼らないエネルギーの供給体制をたてるための研究、開発」の中で水素エネルギーの利用が提案されて以来、未来エネルギーとして、水素が脚光を浴び始めている。

しかし、エネルギーとして水素を利用するとすると工業的規模での生産、消費という事になり、液体水素による輸送及び貯蔵が必要となる。

世界各国での液体水素の現状は、宇宙開発関連への利用がほとんどで、日本においても例外ではない。

わが国では昭和50年から宇宙開発事業団 (NASDA) を中心に液体水素利用技術の検討が進められ、これらのデータを基に、昭和53年9月から、本格的な液体水素の製造、輸送及び貯蔵が開始されている。

本稿では、これらの設備のうち、受入側で使用されている、50,000 l 及び11,000 l 液体水素貯槽の製作について報告する。

2. 50,000 l 横型液体水素貯槽

まず、横型の多層断熱式大型液体水素貯槽として50,000 l 液体水素貯槽を紹介する。

本貯槽は、『液体酸素/液体水素エンジン』開発関係実験設備の一部として製作されたもので、本貯槽のほかに、液体水素高圧ポンプ (流量 600 l/H, 吐出圧力 250 kg/cm²G) 及び、空温式蒸発器 (蒸発能力 480 Nm³/H) を備えている。

貯槽の構造は二重殻円筒横型で、断熱方式は多層断熱を採用しているが、これは本貯槽がタンクローリーで輸送された液体水素を受入れる消費設備用の貯槽であるので、蒸発ロスを極力少なくすることが要求されたためである。内槽材料はオーステナイト系ステンレス鋼の SUS 304L, 外槽材料は一般構造用圧延鋼材の SS 41 を使用している。接液部にあたる内槽材料は、適用法規である高圧ガス取締法特定設備検査規則によると、SUS 304 でも良いが、溶接性の関係で SUS 304L を使用している。

Fig. 3 50,000/ LH₂ tank. Cabinet is attached to front side of the body, and valves, instruments and LH₂ pump are installed in the catinet.

内槽支持は外槽内壁より内槽を同心円位置に吊りおろした方式で、サポート材料は輸送時や地震等の荷重に耐え得る強度を有するものであると同時に、サポート材を介しての熱侵入量を少なくできるものでなければならない。サポート材の平均熱伝導率 $\bar{K}$ 、サポート材の降伏強さを σ とする時、サポート材の選定については、 $\sigma/\bar{K}$ 値の大きいものが用いられる。この貯槽のサポート材料には $\sigma/\bar{K}$ 値がオーステナイト系ステンレス鋼に比べて大きい Hastelloy B を使用し、さらに内外槽への締結部については、熱侵入量を低減する工夫をしている。本貯槽は一度液体水素を充てんすると少なくとも1年間は LH₂ を充てんした状態であるため、後述する貯槽と異なり、内槽クールダウン時の LN₂ 予冷は直接内槽内に LN₂ を充てんして行なう方法としている。このため、LN₂ 予冷ジャケットや LN₂ 予冷蛇管は取付けていない。

本貯槽の仕様を Table 1 に、また概略寸法を Fig. 1 に示す。

次に製作方法であるが、製作の流れを Table 2 に示す。通常の液体酸素や液体窒素と大きく違う点は、まず、その使用目的から高い清浄度が要求されていることである。例えば「採取された液体水素 200 cc 中に 400 μ 以上の大きさの微粒子があってはならない」

というような厳しいものであるため、内槽の設計・製作にあたっては、内槽内面に切欠き、傷等ができるだけ生じないような構造にしなければならない。このため、本貯槽では、内槽の補強リングなど内槽内に取付ける部品については、小さな部品に至るまですべて完全溶込み溶接により取付ける構造とし、すみ肉溶接やボルト・ナットによる機械的結合は採用していない。また配管についてもソケット溶接構造はできるだけ採用せず、突合せ溶接構造を採用し、配管部での切欠き構造をなくして清浄度を確保できる構造としている。

次の相違点としては、液体水素が非常に高価なものであるため液体酸素・液体窒素貯槽と比べて、侵入熱を極端に小さくして蒸発ロスを極少にしなければならない事である。本貯槽の設計段階での予測では、液体水素充てん後、内槽への熱侵入量を 100 とすると、断熱層を介しての熱侵入量 73%、サポート材や配管を介しての熱侵入量 27% となっており、計算による断熱性能は SI 部の熱伝導率 $\lambda=4.0 \times 10^{-5} \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ とすると、0.23%/日となる。

今回使用した断熱材料は下記のようなアルミニウムハクとガラス繊維紙であり、これを施工時に層状に巻きつけるという極めて古典的な方法を用いている。近年、マイラ蒸着を施したマイラ材のスーパーインシュレー

ション材料も各種出まわっており、その優秀さも十分認識しているにもかかわらず、この方法を用いた理由は、

- ①比較的耐熱性に富んでいるため、真空排気時に高温でのベーキングが可能
- ②断熱施工表面積当りの原材料単価が低く抑えられる。
- ③十数年におよぶ小型断熱容器での施工経験がある。

等である。今回使用した断熱材料は

- アルミニウムハク

JIS H4160 IN30 0.007mm×750mm

- デキシターペーパー（ガラス繊維紙）

Dexiglass ®Grade 233 0.079mm×1,650mm

である。

施工風景を Fig. 2 に示す。多層断熱の施工は空調を施したクリーンブースの中で行っている。これは清浄度の問題と、スぺーサーとして使っているガラス織

Table 1 Specifications of LN₂ tanks

Item	unit	50,000l tank	11,000l tank
Code	—	High Pressure Gas Controlling Laws and Regulations	
Type	—	Double-wall cylindrical type, Multilayer insulation	
Maximum working pressure	kg/cm ²	5.3	3.0
Design pressure	kg/cm ²	6.4	4.1
Hydrostatic test pressure	kg/cm ²	9.6	6.2
Pneumatic test pressure	kg/cm ²	7.1	4.6
Gross capacity	l	50,000	11,230
Storage capacity	l	45,000	10,000
Acceleration : vertical direction	G	2.0 (1.14)*	2.0 (1.14)*
transverse direction	G	1.0 (0.3)	2.0 (0.3)
longitudinal direction	G	3.0 (0.3)	3.0 (0.3)
Material used : inner vessel	—	SUS 304L	SUS 304L
outer jacket	—	SS 41	SS 41
precool-down pipe	—	None	C1201T-H
Approx. empty weight	kg	16,500	8,000
Total weight	kg	19,700	8,700

* Value in parenthesis shows acceleration when the tank is in operation.

Fig. 1 50,000l LH₂ tank outline dimensions.

Stainless steel 304L for inner vessel and carbon steel SS41 for outer jacket are used.

維紙（デキシターペーパー）は吸湿性が高く、仮に水分を吸った場合、真空排気に悪影響を及ぼす恐れがあるからである。

真空排気は延30日間程度で、封じ切り真空度は 6.0

Table 2 Manufacturing block diagram of LH₂ tank

Fig. 2 Multilayer insulation work at shop. The insulation-layer density is 90 layers per 38mm, that is 60 layers per inch. Radiation shield and spacer are 7μ thick aluminum and dexter paper.

$\times 10^{-4}$ Torr, LN_2 予冷時は 4.0×10^{-5} Torr であった。また液体水素充てん時は貯槽の設置付近が火気厳禁となり、しかも電気機器類は全て防爆型が必要となる等の理由で液体水素充てん時の真空測定は行っていない。

本貯槽の断熱性能は液体窒素における工場内断熱性能テストでは、蒸発量 0.091%/日 であった。また据付後、液体水素による蒸発量は 0.25%/日が確認されており計算値とほぼ一致している。

据付後、一年半を経過するが、真空再排気等の補修は行っていない。

3. 11,000 l 堅型液体水素貯槽

次に11,000 l 堅型液体水素貯槽を紹介する。この貯槽は、Table 1 に示す仕様に、また概略寸法は Fig. 4 に示すとおりであり、ロケットエンジン実験設備の燃

料供給設備として使用されている。

この貯槽の製作は基本的には50,000 l 横型液体水素貯槽と同様の手法を採用しているの、ここでは設計手法に主眼を置き設計計算の例として有限要素法を利用した非定常伝熱計算について報告する。

設計にあたり高圧ガス取締法に定める貯槽としての強度検討は無論のこと、詳細部に至るまで強度検討を行なった。特に本貯槽は堅型であるため、貯槽輸送時(横向きで輸送)と使用時の主荷重方向が異なり、内槽サポートには上下及び横方向のあらゆる荷重に耐え得る構造が必要となる。そこで内槽の上下端周方向に有効なサポートを配し、輸送時の上下左右方向の荷重(設計条件は 2 G) に対しては、内槽を十分保持できる構造としている。また据付時の下端には輸送時の長手方向荷重を考慮してサポートを取付け貯槽設置後の下方向荷重を受ける構造とした。さらに据付時の上端サポートには 4 リンク機構を採用し、貯槽運転時の内槽熱収縮によりサポートに発生する熱応力を完全に回避できる構造とした。特に内槽は高圧ガス取締法に規定されている必要板厚を大幅に上廻る材料を用い、そ

Fig. 4 11,000 l LH_2 tank outline dimensions.

Inner vessel material is stainless steel and outer jacket material is carbon steel. Inner vessel is fitted up with LN_2 precool-down pipes.

Fig. 5 11,000ℓ LH₂ tank. Necessary valves and instruments are installed in the bottom section of the tank.

の強度を十分に確保している。

また本貯槽ではその使用方法が通常の貯槽と異なり、実験期間中のみ液体水素を充てんし、実験が終了した後はヘリウムガスで貯槽内をパージし、次の実験時までヘリウムガスをホールドした状態で放置しておく運転方法がとられている。このため、実験開始時には貯槽の内槽が常温まで昇温しており、この状態で液体水素を充てんすると、内槽が液体水素温度まで冷却される間に、大量の液体水素が蒸発してしまう。この充てん時の液体水素蒸発ロスを極少にするため、充てん直前に液体窒素で内槽を冷却できる構造としている。

貯槽の液体窒素予冷は、本貯槽のように内槽をたびたびクールダウンする必要がある時は、大きな問題となってくる。通常の液体水素貯槽では、内槽のクールダウンはオーバーホール時以外には考える必要がなく内槽内に液体窒素を直接充てんし、内槽全体を液体窒素温度まで冷却する方式が用いられる。しかしながら

この方法では液体窒素を抜き出した後に、ヘリウムガスや水素ガスでパージを行う必要があり、時間的ロスやパージガスのむだが生じるため、たびたびクールダウンを行う貯槽ではあまり採用されない。そこでこの時間的あるいはパージガスのロスを極少にする構造として、内槽の外面に液体窒素のジャケットを取付け、その中に液体窒素を流す方法と、内槽外面にパイプを巻き付け、そのパイプ内に液体窒素を流す方法が考案されている。これらの方法を比較すると、前者では予冷能力を十分確保できるが、予冷に用いる液体窒素の圧力を低く抑えなければならない。内槽に外圧を加えるため、万一誤操作の場合は、簡単に内槽が破壊されるという危険が伴っている。またクールダウン初期においては LN₂ 流入部と GN₂ 流出部で大きな温度差が生じ内槽に多大な熱応力を与える事になり、この温度差を小さくしようとすればジャケットの構造が複雑になる。一方後者については使用圧力を高くすることができ、構造的にも簡単かつ安全ではあるが、予冷能力がジャケット方式のものに比べ劣るという欠点がある。本貯槽では安全性が重視される関係で、内槽外面にパイプを巻き付けた『予冷蛇管方式』を採用した。予冷蛇管は液体水素充てん時に窒素ガスが固化することを防止するため、予冷完了後は He ガスにより蛇管内をパージすることとしている。この予冷蛇管方式は内槽外壁に『サーマルアンカー』と称するブロック状のパイプ取付け台を溶接し、そのブロックの上に予冷窒素を流すパイプを取付けた構造となっている。この方式の欠点である予定能力がジャケット式のものより劣るという点に関しては、有限要素法による非定常伝熱解析を利用した計算で、サーマルアンカーを最も冷却効率の高い配置に設定することにより、予冷能力の改善を図った。

内槽の冷却能力に関する設計計算は Table 3 に示す流れにしたがって実施している。以下に各項についての内容を概略説明する。

(i) サーマルアンカーの配置想定

サーマルアンカーの配置を Fig. 6 のように想定する。

(ii) 予冷用パイプの熱応力計算

予冷用パイプの熱応力計算は、パイプ要素による有限要素法を利用して各要素力を算出し、高圧ガス保安協会自主基準(KHK S 0302)に定める(1)式による合成応力及び(2)式による長手方向合成応力を算出し、許容応力を素材の 1×10^7 回疲労強さとして評価する。

Table 3 Flow diagram of inner vessel thermal analysis

Fig. 6 Arrangement of thermal anchors.

129 anchor blocks are used for tank precool-down with LN₂.

$$\sigma(E) = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\sigma_t^2} \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (1)$$

$$\sigma(L)_{\max} = \frac{M}{Z} + \frac{F}{A} + \frac{P \times A_i}{A} \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (2)$$

(1) 及び (2) 式において

$$\sigma_b : \text{合成曲げ応力} \quad \sigma_b = M/Z \quad (\text{kg/mm}^2)$$

$$\sigma_t : \text{ねじり応力} \quad \sigma_t = T/2Z \quad (\text{kg/mm}^2)$$

 M : パイプ要素に生じる曲げモーメント (kg/mm^2) Z : パイプ要素の断面係数 (mm^3) F : パイプ要素に生じる引張力 (kg) A : パイプ要素の断面積 (mm^2) P : パイプ内圧 (kg/mm^2)

Fig. 7 Temperature distribution of one thermal anchor.

Actuall line shows cutting line when computed by Finite Element Method and broken line shows the temperature at 30 minutes after cooling down with LN₂.

A_i : パイプ内流路面積 (mm²)

(iii) サーマルアンカー単体の伝熱計算

平板要素及び六面体要素を利用し、Fig. 7 に示すような計算モデルを設定した。最初にこのモデル全体が 20°C に保たれており、冷却開始時に Fig. 7 に示す α 面及び β 面に -196°C の冷熱を与えるものとした。伝熱計算を行ない 30 分後のこのモデルの温度分布として Fig. 7 に示した温度分布を得た。なお、本計算に使用したモデルの周囲は完全断熱条件とし、サーマルアンカー部と平板部（内槽）は完全に連続であるものとしている。

(iv) サーマルアンカー単体の伝熱抵抗の算出

Fig. 7 の平板部の任意の要素 I(i) (四角形要素) を定義する 4 つの節点を a, b, c, d とし、ある時間 t の時のそれぞれの節点 a, b, c, d の温度を、 T_a, T_b, T_c, T_d (°C) とすると、その要素の平均温度 $T_m(i)$ (°C) は

$$T_m(i)_{t=t} = \frac{T_a + T_b + T_c + T_d}{4} \quad (3)$$

また、この要素の面積は a, b, c, d の座標より算出できるので、この面積を $A(i)$ とする。この時、初期平板温度を 20°C としたので、この要素のポテンシャルエネルギー $Q(i)_{t=t}$ は

ルエネルギー $Q(i)_{t=t}$ は

$$Q(i)_{t=t} = Th \times A(i) \times \rho \times C \{20 - T_m(i)\} \quad (4)$$

(4) 式において

Th : 平板の板厚 (m)

ρ : SUS 304L の密度 (kg/m³)

C : SUS 304L の比熱 (kcal/kg°C)

要素の数を n とすると平板に伝わった総冷熱量 Q_T は、

$$Q_{T,t=t} = \sum_{i=1}^n Q(i)_{t=t} \quad (5)$$

ある時間 t からある時間 t' までのサーマルアンカーの熱伝導度 φ (kcal/min°C) はサーマルアンカーの底面温度 T_b 、と冷熱温度 T_c との差を代表温度差とすると、

$$\varphi = \frac{Q_{T,t=t} - Q_{T,t=t'}}{T_b - T_c} \quad (6)$$

ただし (6) 式で T_b は、 t, t' 時の底面温度の最も高い温度の平均値、具体的にサーマルアンカー底面四すみの平均値とし、熱伝導度 φ を極少とする。

以上の計算により得られた温度伝導度を Fig. 8 に示す。

(v) 内槽本体の伝熱計算

Fig. 6 に示したタンクのサーマルアンカーの配置は 1/3 回転対称体となっているので、120°分割平板モデ

Fig. 8 Thermal transfer rate curve from thermal anchor block to inner vessel plate.

ルを設定し、最初にモデル全体が 20°C に保たれており、冷却開始時にサーマルアンカー位置に下記手法により -196°C の冷熱を与えたものとして伝熱計算を行った。なお、このモデルの周囲は完全に断熱されているものとする。

- サーマルアンカー位置にサーマルアンカーの底面の相当径を有する円形平面を想定し、その面積を A_T とし、(6) 式で求めた温度伝導度 φ ($\text{kcal}/\text{min}^{\circ}\text{C}$) より、この平面に対する熱伝達率 α ($\text{kcal}/\text{H}\cdot\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$) を算出する。

$$\alpha = \frac{\varphi}{A} \times 60 \quad (\text{kcal}/\text{Hm}^2\cdot^{\circ}\text{C}) \quad (7)$$

- (7) 式で求めた熱伝達率 α ($\text{kcal}/\text{Hm}^2\cdot^{\circ}\text{C}$) を介して想定した円形平面に -196°C の冷熱を与える。この結果、サーマルアンカーの伝熱抵抗を本体の伝熱計算に組み入れたことになる。

この冷却速度の計算結果として Fig. 6 の X-X' 断面の温度変化を Fig. 9 に示す。またサーマルアンカーの配置の妥当性及び予冷特性を確認するために、内槽の最も冷却しにくい位置 (Fig. 6 中の⊗部) に温度計を取付け、液体窒素を予冷蛇管に流し、内槽の温度降下状態の実測を行ない、計算値との比較を試みた。この結果を Fig. 10 に示す。本図より、設計時の計算手法及び計算の流れは妥当性があるものと判断される。

以上のような設計手法により製作された貯槽は設計時の想定能力を十分に発揮し、実用に供している。

4. おわりに

以上液体水素用大型貯槽の製作について紹介してき

Fig. 9 Temperature variations of inner vessel X-X'' section (see Fig. 6) at 1, 3, 6 and 15 hours after anchoring cooling down with LN_2 .

Fig. 10 Fitting of the experimental curves to the theoretical curves.

たが、使用に際しては貯槽本体以外に、これに付属する外部配管が必要であり使用上の安全対策といった点が重要なことであるが、これらの点については次回に譲ることとする。

このような大型貯槽の場合は設計、製作ののち即実用に供されるため種々のデータが取りにくい。また、真空式貯槽の場合は、真空を長期間にわたり保持しておく必要があるため、断熱層間に多数の測定素子を挿入して行う応力測定や温度分布の測定は行いにくい。今後これらの点を検討する必要があるものと思われる。

参考文献

- 1) 花田, 岡崎, 岡本: 低温工学, 14-1 (1979) 11
- 2) 花田: 高压ガス, 15-6 (1978) 18
- 3) 川手他: 低温工学, 14-4 (1979) 12
- 4) Barron: Cryogenic Systems (1966)