



# 水素エネルギー海上輸送のための基盤技術の開発研究：光学観測用液体水素実験装置の構築(商船・理工学)

武田, 実  
赤澤, 輝彦  
岩本, 雄二  
前川, 政範  
風間, 力

---

## (Citation)

神戸大学海事科学部紀要, 2:171-177

## (Issue Date)

2005-07-31

## (Resource Type)

departmental bulletin paper

## (Version)

Version of Record

## (JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00422414>

## (URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00422414>



# 水素エネルギー海上輸送のための基盤技術の開発研究

## — 光学観測用液体水素実験装置の構築 —

Research and development of basic technologies for hydrogen energy maritime transportation  
- Construction of liquid hydrogen experiment facility with observation system -

武田 実, 赤澤 輝彦, 岩本 雄二, 前川 政範\*, 風間 力\*

Minoru Takeda, Teruhiko Akazawa, Yuji Iwamoto, Masanori Maekawa\*, Chikara Kazama\*

(平成 17 年 4 月 8 日 受理)

### Abstract

In order to establish the storage and transportation system for a large quantity of liquid hydrogen, it is important to elucidate sufficiently thermal and hydraulic properties of liquid hydrogen; especially, an optical observation at pressures is essential to clarify correlation between these properties and phase transitions. Thus we designed and constructed a liquid hydrogen experiment facility (LHEF) with an observation system. The LHEF consists of a liquid hydrogen optical cryostat, a gas handling system, and vacuum pumps. The liquid hydrogen optical cryostat, 1500 mm in height and 300 mm in diameter, have a vacuum jacket, a liquid nitrogen space (10.0 liters), a liquid hydrogen space (13.6 liters), a sample space (3.8 liters), optical windows, and a needle valve. Evaporation rate of the liquid nitrogen and liquid hydrogen in the cryostat, and a temperature distribution in the sample space were measured. In addition, an optical observation of free surface of liquid hydrogen was made using a digital video camera. As a result of the test, the LHEF showed a good performance.

(Received April 8, 2005)

### 1. はじめに

近年、先進国のみならず発展途上国のエネルギー消費および経済活動に伴い、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料の使用量が增大している。このため、CO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>などによる大気汚染や酸性雨の問題、さらに地球温暖化の問題などが深刻化している。これらの問題を回避するために、世界的規模で温室効果ガス排出量の削減を目指す京都議定書が本年 2 月より発効している。その一方で、化石燃料に替わるものとして再生可能エネルギーが脚光を浴びている。特に、太陽光発電、風力発電、バイオマス発電などによる新エネルギーの技術開発が本格化している。

再生可能エネルギーは地球全体に豊富に存在するが、エネルギー密度が小さいため、これを二次

エネルギーに変換して消費地まで輸送する必要がある。この二次エネルギーとして、水素が期待されている。水素を利用するエネルギーは反応後に残るのが水だけなので、究極のクリーンエネルギーとして注目されている。極く最近ではヨーロッパを中心にして、水素ガスを利用する燃料電池自動車や水素エンジン自動車が急速に普及している。また、家庭用の発電・給湯装置や電子機器用小型燃料電池などの研究開発も急ピッチで進んでいる。日本においても例外ではなく、近い将来に水素エネルギーを大量消費する時代が到来すると予測されている<sup>1)</sup>。

水素を大量に輸送・貯蔵する場合、輸送・貯蔵効率の観点から、液体水素(沸点 20.3 K の極低温液化ガス)が有利である<sup>2), 3)</sup>。水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(World Energy Net Work: WE-NET)計画では、世界各地で得られた再生可能

\* 神戸大学大学院自然科学研究科博士課程前期課程  
マリンエンジニアリング専攻

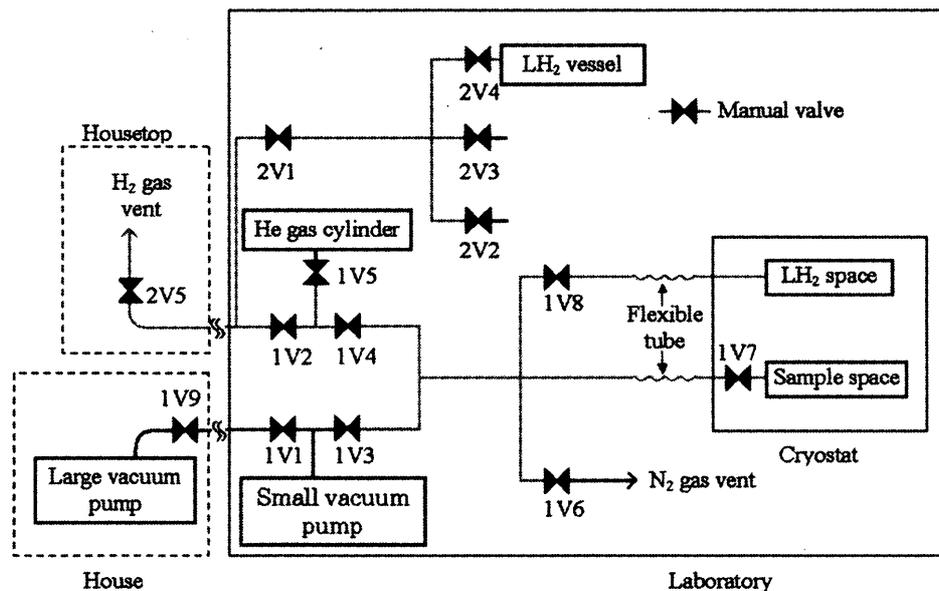


Fig.2-1 Layout of the liquid hydrogen experiment facility (LHEF).

エネルギーを用いて水を電気分解し、生成された水素を液化して液体水素タンカー(20 万  $m^3$ )<sup>4)</sup>で大量に海上輸送するシナリオが検討されている。

大量輸送・貯蔵のための基盤技術開発の一環として、これまでに貯蔵タンクの構造材料や断熱材料などの要素技術の研究<sup>5), 6)</sup>が行われているが、液面計や流量計などの研究は未だ不十分である。また、液体水素の大量輸送・貯蔵システムを確立するためには、液体水素の熱特性や流動特性を十分把握しておくことも重要である。特に、加圧下でこれらの特性と相変化との関連性を光学的に調べることは不可欠であるが、ほとんど明らかにされていない。そこで、本研究では水素エネルギーを液体状態で海上輸送するための基盤技術の開発を目指して、加圧下で光学観測可能な液体水素実験装置を構築することを目的とした。本論文では、構築した実験装置の詳細、液体水素および水素ガスを取り扱う上での安全対策、性能試験結果について述べる。

## 2. 実験装置

光学観測用液体水素実験装置のレイアウト図を Fig.2-1 に示す。実験装置は、主に光学クライオスタット、ガスハンドリングシステム、大型真空ポンプ、小型真空ポンプなどで構成されている。

Fig.2-2 は、実験室内での液体水素実験装置の写真である。写真のとおり、クライオスタットおよび液体水素容器(岩谷瓦斯、145 L)は、ガスハンドリングシステムに繋がれている。ガスハンドリングシステムは、真空排気ライン(外径 54.0 mm)と水素ガス放出ライン(外径 41.3 mm)に分かれている。前者は、実験室内にある小型真空ポンプ(大亜真空技研、DS-312W)と実験室外にある大型真空ポンプ(大亜真空技研、KRP-3000)に接続されている。一方後者は、屋上のベントスタックに接続されている。ヘリウムガスボンベは、クライオスタットおよび水素ガス放出ラインのガス置換のために、ま

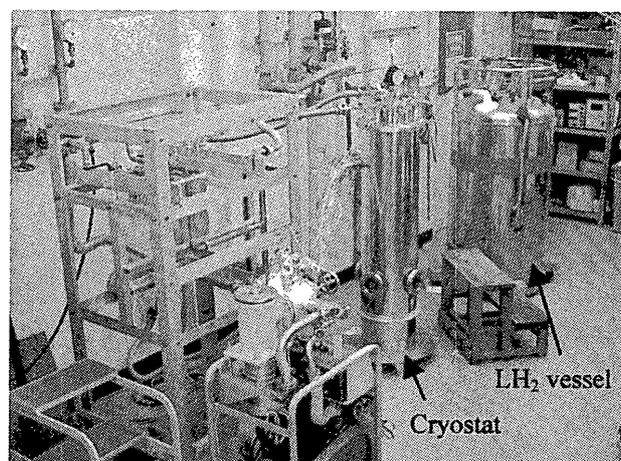


Fig.2-2 Picture of the liquid hydrogen experiment facility (LHEF) in the laboratory.

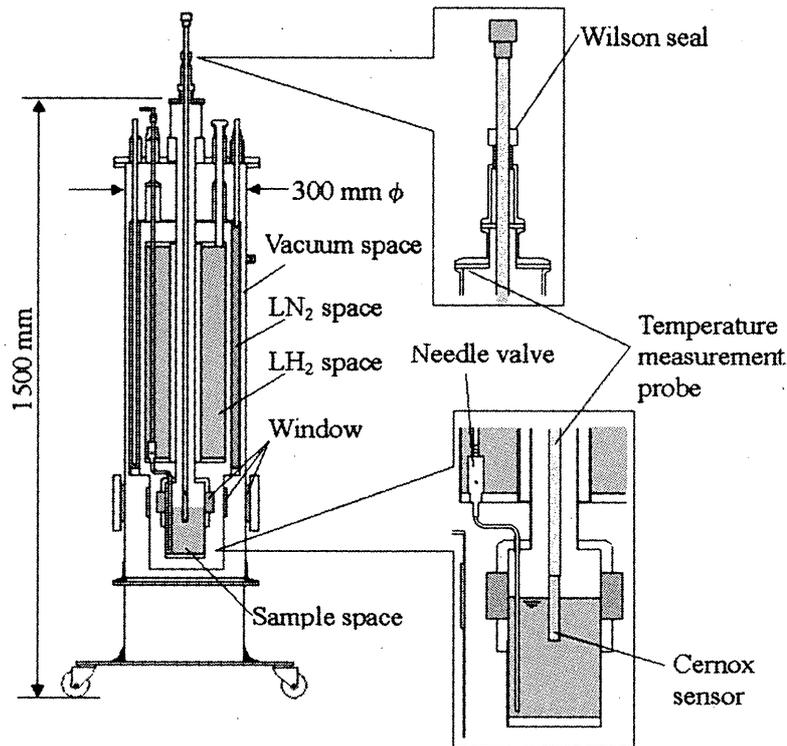


Fig.2-3 Schematic diagram of the liquid hydrogen optical cryostat.

たクライオスタットの予冷に用いる液体窒素を加圧して取り出すために使用する。なお予冷時に出る液体窒素の蒸発ガスは、別のラインから放出される。

Fig.2-3 に光学クライオスタット(理研社、RHE-100-OP 改造型)の概略図を示す。光学クライオスタットは、断熱真空槽、液体窒素槽(10.0 L)、液体水素槽(13.6 L)、サンプル槽(3.8 L)、光学観測窓、ニードル弁などで構成されている。このクライオスタットの主な材質は SUS 304 であり、高さは 1500 mm、外径は 300 mm である。光学観測窓は 4 か所(x 方向、y 方向)に設けられており、その有効直径は 50 mm である。また、光学観測窓の材質はパイレックスガラスであり、その厚みは 10 mm である。このガラスを真空および圧力タイトにするために、室温部分では O-リングを、また極低温部分ではインジウム線を用いてボルトで締め付けている。これによりサンプル槽は、5 kg/cm<sup>2</sup>G(0.6 MPa、設計値)の圧力まで耐えられる。

Fig.2-3 中の拡大図は、温度計測用プローブを示している。このプローブは主に薄肉の SUS パイプ(外径 12 mm)でできており、その先端の銅製ホル

ダー部分には Cernox センサー(Lake Shore 社、CX-1050-SD)とヒーター(ポリエステル被覆マンガン線)が取り付けられている。Cernox センサーは測定温度範囲(室温～極低温)が広く、応答性(約 15 ms)もよい温度センサーである。なお温度計測用プローブは、クライオスタット上部のウィルソンシールで保持されているので、上下に移動して任意の場所で固定することができる。

光学クライオスタットの写真を Fig.2-4 に示す。クライオスタットの下部には光学観測窓があり、上部にはブルドン管式圧力計(液体水素槽用、サンプル槽用)、バルブ、安全弁、ウィルソンシール、ニードル弁摘みなどがある。この摘みを回すことにより、液体水素槽の底部にあるニードル弁を通して液体水素槽からサンプル槽へ(その逆も可能)液体水素を容易に移送できる。

Fig.2-5 は、液体水素移送用のトランスファーチューブ(理研社)の写真である。このチューブの材質は SUS 304 であり、長さは 1500 mm、外径は 37.5 mm である。両端にはバイオネット式の継手があり、クライオスタットおよび液体水素容器に接続される。また、このチューブはフレキシブルタイ

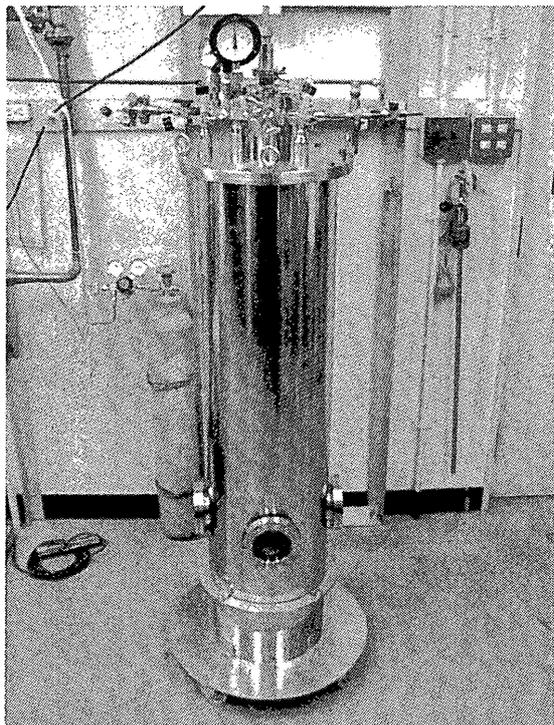


Fig.2-4 Picture of the liquid hydrogen optical cryostat.

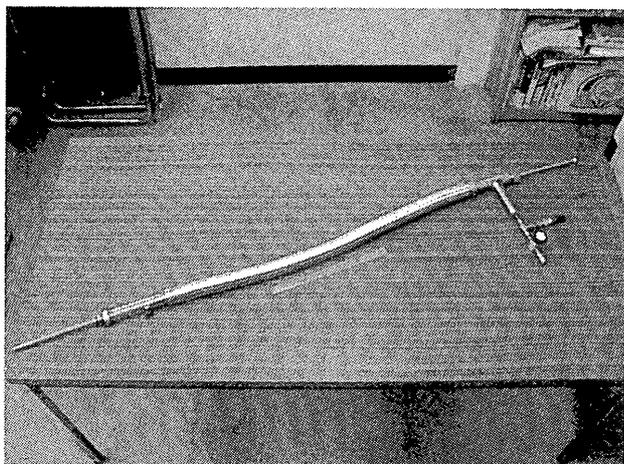


Fig.2-5 Picture of a liquid hydrogen transfer tube.

プであり、チューブ内の残存水素を放出するためのバルブと安全弁も取り付けられている。

なお、光学観測装置として高速度ビデオカメラ (Weinberger 社、Speedcam 512)、テレスコープ (溝尻光学)、デジタルカメラ (三洋電機、DSC-MZ3)、光源用ライト (Photron 社) などを所有している。

### 3. 安全対策

液体水素は、液体窒素や液体ヘリウムと同様に極低温液化ガスとして慎重に取り扱われなければ

ならない。特に、蒸発した水素ガスは可燃性ガスであり、燃焼・爆発・爆轟の危険性がある。従って、ガスの漏洩に対して細心の注意を払わなければならない。

Table 3-1 に液体水素および水素ガスの物理・化学的特性を示す<sup>7)</sup>。水素の主な特徴を以下に列記する。

- (1) 水素ガスは、無色・無臭である。
- (2) 室温で水素ガスは空気より軽く、上昇する。
- (3) 水素ガスには毒性はないが、酸素濃度を下げるので窒息の原因となる。
- (4) 水素ガスは空気と混合すると、広範囲の混合比にわたり可燃性混合物を形成する。
- (5) 空気中での点火エネルギーは非常に小さく、ガソリン-空気混合物の約 1/10 である。
- (6) 水素の焰は、無色である。
- (7) 液体水素は、無色・透明である。
- (8) 液体水素の密度は、水の約 1/14 である。

これらの特徴および安全に対する基本原則を考慮した上で、安全に実験を遂行するための注意事項を以下に示す。安全に対する基本原則とは、「適切な排気」、「漏洩の防止」、「着火源の排除」の 3 つである。

- (1) 実験装置から水素ガスが漏れないように、気密性を上げる。
- (2) 実験室内の水素濃度をモニターする。
- (3) 実験室内の換気を良くする。
- (4) 建物の屋上から水素ガスを安全に放出する。

Table 3-1 Physical and chemical properties of hydrogen.

| Property                                 | Value  |
|--|--------|
| Triple point (0.07 atm) [K]              | 13.80  |
| Boiling point (1 atm) [K]                | 20.27  |
| Critical point (12.8 atm) [K]            | 32.98  |
| Density of liquid* [kg/m <sup>3</sup> ]  | 70.9   |
| Density ratio (liq.*/ gas 300K)          | 865    |
| Limits of flammability (in air) [vol. %] | 4.0-75 |
| Limits of detonability (in air) [vol. %] | 18-59  |
| Ignition temperature (in air) [°C]       | 585    |
| Ignition energy (in air) [mJ]            | 0.02   |
| Heat of combustion [kcal/mol]            | 68     |
| Flame temperature [°C]                   | 2045   |

\* Normal boiling point



Fig.3-1 Picture of a hydrogen gas sensor.

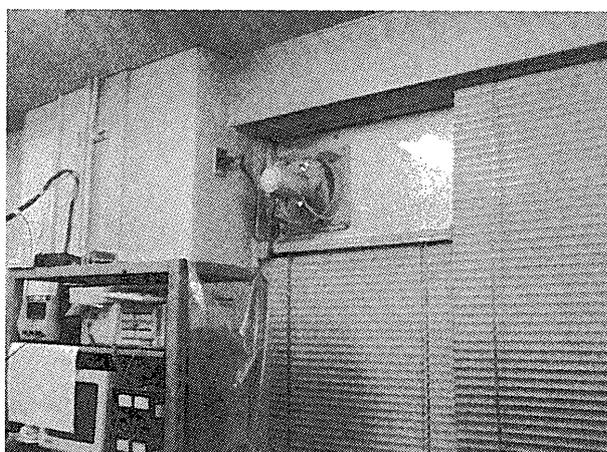


Fig.3-2 Picture of an explosionproof ventilating fan.

- (5) 水素を真空ポンプで排気する場合、そのアウトガスを安全に室外へ放出する。
- (6) 実験室内で火気を使用しない。
- (7) 静電気の帯電に伴う火花の発生を防ぐために、アースラインを設ける。

構築した光学観測用液体水素実験装置に対して施した安全対策の具体例について次に述べる。

Fig.3-1 は、水素ガス検知警報装置の拡散式ガス検知部(新コスモス電機、KD-5A-N)の写真である。実験装置の上部の天井に取り付けられた検知部から指示警報部(新コスモス電機、NV-100H)へ信号が送られ、水素濃度が 200 ppm を超えると警報が鳴る仕組みになっている。この検知警報装置は、実験室内の水素濃度を常時モニターしている。なお、ハンディタイプの水素ガス検知器(新コスモス電機、XP-316)も併用している。

実験室内に 2 台設置している防爆型換気扇(三菱

電機、EF-25ASD-V)の写真を Fig.3-2 に示す。この換気扇 1 台の換気能力は 1380 m<sup>3</sup>/h なので、2 台同時に使用すると約 3 分で完全に実験室を換気できる。

Fig.3-3 は、屋上に設置している水素ガス放出ラインの写真である。ベントスタックの部分は屋上から約 2 m の高さがあり、雨水が入らないように逆 U 字型をしている。また、このラインには火気厳禁の標示板を取り付けている。大型真空ポンプから排気される水素ガスの放出ラインの写真を Fig.3-4 に示す。ベントスタックの部分の形状は、屋上に設置したものと同一である。これらの水素ガス放出ラインは屋外にあり、落雷によって着火する危険性がある。これに付随する事故を防ぐために、逆火防止器の設置を予定している。

なお、実験室内にアースラインを確保するため



Fig.3-3 Picture of a hydrogen gas vent line at the housetop.

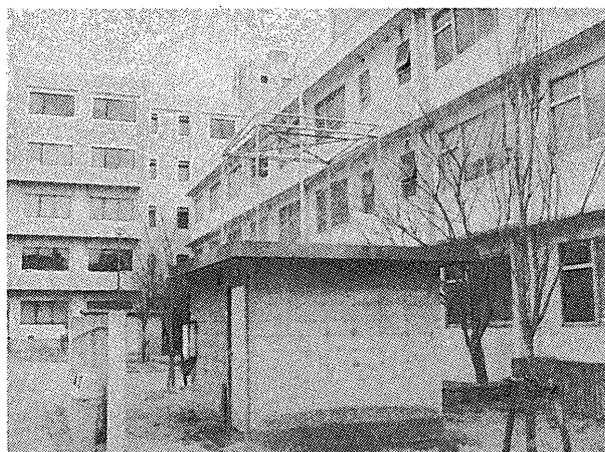


Fig.3-4 Picture of a hydrogen gas vent line from a large vacuum pump.

Table 4-1 Measurement results of evaporation rate and heat leaks.

| Subject                                       | Evaporation rate [L/h] | Heat leak [W] | Heat leak (Cal.) [W] |
|---|------------------------|---------------|----------------------|
| LN <sub>2</sub> space                         | 0.30                   | 13.6          | 13.9                 |
| LH <sub>2</sub> space<br>(Sample space: 77 K) | 0.09                   | 0.74          | 0.36                 |
| LH <sub>2</sub> space<br>(Sample space: 20 K) | 0.05                   | 0.40          | 0.33                 |

に、クライオスタット、液体水素容器、ガスハンドリングシステム等とグラウンドとを電氣的に接続している。

#### 4. 性能試験

##### 4.1 液体窒素および液体水素の蒸発量測定

光学観測用液体水素実験装置の性能試験のひとつとして、液体窒素槽および液体水素槽から蒸発する寒剤の量を測定した。測定量に基いて浸入熱を求め、計算値と比較した。

蒸発量の測定方法は、次のとおりである。液体窒素槽から蒸発する液体窒素の量は、1時間当りの液面高さの変化から求めた。一方液体水素槽から蒸発する液体水素の量は、サンプル槽が77 Kと20 Kの場合において蒸発する水素ガス(室温)の流量を測定し、これを液体量に換算して求めた。

Table 4-1 に測定結果および浸入熱(実験値と計算値)を示す。計算値は、クライオスタットの材質や構造を考慮して求めたものである。液体水素槽(サンプル槽:77 K)の場合を除いて、浸入熱の実験値と計算値はほぼ一致している。液体水素槽(サンプル槽:77 K)の場合に計算値よりも実験値が大きかったのは、時間経過によりサンプル槽が設定温度を超えていたことが原因のひとつであると考えられる。液体水素槽への浸入熱は十分小さく、1回の液体水素移送で2日間実験を行うことが可能であった。

##### 4.2 液体水素の自由表面の光学観測

光学観測窓を通してサンプル槽内部における液体水素の自由表面の観測を行った。初めに液体水素槽を少し加圧しながらニードル弁を開けて、サンプル槽へ液体水素を移送した。移送後、液体水素の蒸発が収まり液面が安定するのを待ってから

デジタルカメラで撮影した。Fig.4-1 に液体水素の自由表面(1気圧)の写真を示す。液体水素の自由表面が揺動する様子もビデオカメラで撮影しており、光学観測上の問題はなかった。

##### 4.3 サンプル槽内部の温度分布測定

サンプル槽内部の液体水素の液面が安定した状態で、温度計測用プローブを用いて温度測定を行った。初めに液面が光学観測窓のほぼ中心にあるときに、プローブの先端部を液面から30 cmの高さの所にセットし、1 cmごとにプローブを動かしてサンプル槽内部の温度分布を調べた。なお実験中、蒸発による液面の低下をメジャーで測定して高さの補正を加えた。

得られたサンプル槽内部の温度分布をFig.4-2に示す。横軸は液面からCernoxセンサーまでの距離であり、縦軸はCernoxセンサーが示した温度(測定誤差±0.02 K)である。液面から10 cmまでの温度勾配は約0.4 K/cm、また液面上部10 cmから20 cmまでのそれは約1.2 K/cmであり、液面に近づくほど温度勾配が緩やかになっていることがわかった。液体水素タンク輸送時の揺動を模擬して、サンプ

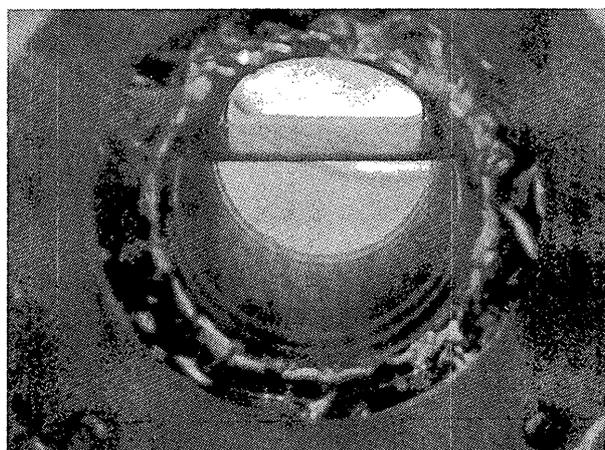


Fig.4-1 Picture of a free surface of liquid hydrogen at 1 atm.

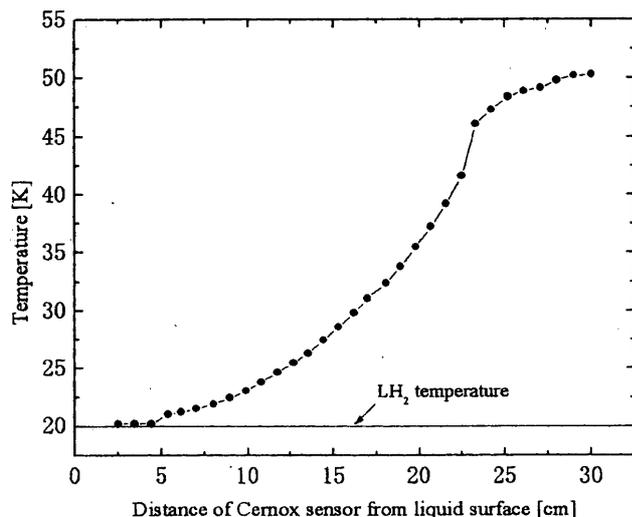


Fig.4-2 Relationship between temperature and distance of Cernox sensor from liquid surface.

ル槽内部の液面が揺動する状態で温度の時間変動などを調べる予定にしている。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、水素エネルギー海上輸送のための基盤技術の開発を目指して、光学観測用液体水素実験装置を構築した。この装置の特徴は、加圧下で液体水素およびその自由表面を光学的に観測できることである。

液体水素の実験を行う場合、可燃性ガスである水素ガスの取り扱いに細心の注意を払わなければならない。本実験装置では、安全対策として水素ガス検知警報装置、防爆型換気扇、水素ガス放出ライン、アースラインなどを設置した。

本実験装置の性能試験として、液体窒素および液体水素の蒸発量測定、液体水素の自由表面の光学観測、サンプル槽内部の温度分布測定を行った。その結果、所期の目的通り良好な性能を示すことがわかった。

今後予定している開発研究および基礎研究の課題を以下に列記する。

- (1) 液体水素用液面計および流量計
- (2) 液体水素の自由表面の揺動

- (3) 液体水素のキャビテーション
- (4) 液体水素のサーマルオシレーション
- (5) 液体水素のロールオーバー
- (6) 液体水素の沸騰熱伝達
- (7) 液体水素の流体損失
- (8) 液体水素用輸送ポンプ

## 謝辞

本研究の遂行に際して、大久保由幸君（特別研究学生）の協力を感謝します。本研究の一部に対して、平成 16 年度兵庫県 COE プログラム推進事業補助金、平成 16 年度神戸大学海事科学部学内プロジェクト研究経費、岩谷瓦斯株式会社および川重テクノサービス株式会社からの援助を受けました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) NEDO：水素エネルギー利用技術(WE-NET) 第Ⅱ期研究開発成果概要(2003).
- 2) 福田健三：WE-NET 第Ⅰ期研究開発成果の総括，WE-NET 水素エネルギーシンポジウム予稿集，pp.1-34 (1999).
- 3) 神谷祥二：液体水素輸送・貯蔵技術の開発，平成 12 年度水素エネルギー等関連技術開発委員会予稿集，pp.19-24 (2001).
- 4) 関 紀明：液体水素タンカーの開発，WE-NET 水素エネルギーシンポジウム予稿集，pp.131-139 (1999).
- 5) 神谷祥二，大西 勝，川越英司，西垣 和：液体水素貯槽用断熱性能試験装置の開発，低温工学，Vol. 35，No. 9，pp.448-457 (2000).
- 6) 桜井 剛，神谷祥二，堀口誠志，藤井秀樹：大型液体水素貯蔵タンク用断熱材の低温強度特性，第 67 回 2002 年秋季低温工学・超電導学会講演概要集，p.300 (2002).
- 7) Ed. R. B. Scott, W. H. Denton and C. M. Nicholls: *Technology and Use of Liquid Hydrogen*, Pergamon Press, Chap. 10 (1964).