



# 水素エネルギー—海上輸送のための基盤技術の研究開発— —液体水素実験施設の構築—

武田, 実  
前川, 一真

---

(Citation)

低温工学, 55(1):14-21

(Issue Date)

2020-01-20

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2020 公益社団法人 低温工学・超電導学会 (旧 社団法人 低温工学協会)

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90007308>



## 水素エネルギー海上輸送のための基盤技術の研究開発

## —液体水素実験施設の構築—

武田 実<sup>\*1,†</sup>, 前川 一真<sup>\*1</sup>Research and Development of Basic Technologies for Hydrogen Energy  
Marine Transportation  
- Construction of a Liquid Hydrogen Experiment Facility -Minoru TAKEDA<sup>\*1,†</sup> and Kazuma MAEKAWA<sup>\*1</sup>

**Synopsis:** To develop basic technologies for the marine transportation of hydrogen energy, a liquid hydrogen experiment facility (LHEF) has been designed and constructed at the Fukae campus of Kobe University. This LHEF consists of an experiment room, a measurement room, a H<sub>2</sub> gas vent line, a vacuum pumping line, high-pressure gas security equipment, etc. A liquid hydrogen (LH<sub>2</sub>) optical cryostat equipped with a vacuum jacket, a liquid nitrogen space (15 L) and LH<sub>2</sub> space (20 L) has been installed in the experiment room. This paper explains the details of constructing the LHEF, including countermeasures for high-pressure gas security and experimental results using LH<sub>2</sub> obtained so far.

**Keywords:** basic technologies, experiment facility, high-pressure gas security, liquid hydrogen, marine transportation  
(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

## 1. はじめに

2014年4月に「エネルギー基本計画」が閣議決定され、水素社会の実現に向けた取組みが明記された。その後、2017年12月に開催された第2回再生可能エネルギー・水素等閣僚会議において「水素基本戦略」<sup>1)</sup>が決定された。その中でCO<sub>2</sub>フリー水素が注目され、日本では水素エネルギー社会の実現に向けて、世界を先導することの重要性が認められた。

エネルギーセキュリティの観点から、国際的な水素サプライチェーンの開発を目指して、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は、効率的な水素の輸送・貯蔵を可能とするエネルギーキャリア(液体水素、有機ハイドライド、アンモニア)の技術開発を開始した。これは海外の未利用エネルギーを活用して、水素を製造・貯蔵し、海上輸送を通じて日本国内で大規模に水素エ

ネルギーを利用するものである。特に、CO<sub>2</sub>フリー水素製造および高効率大規模輸送の観点から、オーストラリアの褐炭(石炭の一種、水分を多く含む)をガス化することにより水素を製造し、液体水素(LH<sub>2</sub>:沸点20 K)の状態、液化天然ガス(LNG:沸点111 K)と同様に海上輸送する技術開発プロジェクト<sup>2,3)</sup>が脚光を浴びている。

一方、我々の研究室では、神戸大学深江キャンパス内の極低温実験棟において液体ヘリウム(LHe:沸点4.2 K)を用いた超伝導応用(超伝導電磁推進船、海流MHD発電等)に関する研究を行うとともに、水素エネルギー海上輸送基盤技術の開発を目指し、2004年頃から、岩谷瓦斯(株)および国立研究開発法人物質・材料研究機構(NIMS)等との共同研究として、液体水素用超伝導液面計に関する基礎研究を始めていた<sup>4)</sup>。液体水素用の特殊実験施設は、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)および一般財団法人日本自動車研究所(JARI)等を除いて、国内には無かったため、我々は約4年の歳月を要して、深江キャンパス内に液体水素実験施設(以後、学内呼称である「水素実験棟」と略す。)を構築した。本解説では、高圧ガス保安対策、液体水素実験装置、設備配置、安全・防爆対策等を含めて、水素実験棟設置の経緯とその概要、およびこれまでの研究成果の概要について述べる。

Received August 9, 2019

<sup>\*1</sup> 神戸大学大学院海事科学研究科  
〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町5-1-1  
Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, 5-1-1  
Fukaeminami-machi, Higashinada-ku, Kobe, Hyogo 658-0022,  
Japan

<sup>†</sup> E-mail: takeda@maritime.kobe-u.ac.jp  
DOI: 10.2221/jcsj.55.14

## 2. 水素実験棟設置の経緯

2011年頃より、水素実験棟設置に向けて資料・情報収集および高圧ガス担当部署の兵庫県企画県民部災害対策局産業保安課（以後、兵庫県産業保安課と略す。現在は神戸市消防局が担当している。）との相談を開始した。それからの経緯の概要を以下に示す。

### (1) 2011年7月22日：兵庫県産業保安課へ（1回目）

別の研究で使用されていた古い実験棟（原子炉熱流動実験棟）を改修整備して、液体水素専用の実験施設「水素実験棟」を構築する旨相談するために、兵庫県産業保安課を訪問した。

設計・製作した液体水素実験装置（LH<sub>2</sub>槽内容積 20 L、設計圧力 0.5 MPaG）を用いて、水素実験棟にて実験を行うにあたり、高圧ガス保安対策・必要書類・手続き等について照会したところ、以下の事がわかった。

- ・本装置は、高圧ガス保安法第 56 条の 3 および特定設備検査規則第 3 条の適用を受ける特定設備である<sup>5)</sup>。
- ・ガスに換算した水素使用量が 100 Nm<sup>3</sup>/day 未満であれば、完成検査は不要である。

- ・本装置を用いた実験は、外部から 400 LLH<sub>2</sub> タンクにて購入した LH<sub>2</sub> を移送して行われるが、処理量ゼロの製造行為とみなされる。従って、高圧ガス製造施設等変更許可申請書<sup>2)</sup>の提出が必要である。

- ・申請書提出の前に、液体水素実験装置の設計図面、水素実験棟配置図および配管図、水素実験棟周辺図等の確認が必要である。

- ・南海トラフ地震に係る防災対策および避難訓練、水素の取扱いに関する安全教育等を含めて、高圧ガス危害予防規程の見直しが必要である。

- ・保安・防災対策はゾーン 2、排気口は最上部へ、火災報知器は不要でも消火器および放水設備が必要、実験室と測定室を分離する二重扉が必要、測定室の窓ガラスは網入りのハメ殺し、実験室照明器具は防爆型、水素ガス検知警報装置が必要等の保安技術指導を受けた。

- ・液体水素実験装置に対する特定設備検査合格証および使用するバルブ・配管等に対する気密試験成績書が必要である。

### (2) 2011年8月31日：兵庫県産業保安課へ（2回目）

再度確認したい事項等があり、2回目の訪問を行った。その際に明らかとなったことは、以下のとおりである。

- ・高圧ガス製造施設等変更許可申請書に記入する代表者は、神戸大学長である。

- ・水素実験棟配置図および配管図における一部変更として、水素ガス放出口の位置を最も高い屋根より 1 m 上へ上げる。

- ・製造施設等変更明細書（機器一覧表等）の作成において、専門知識を有し経験豊富な岩谷グループへ一度相談することを勧められた。

- ・高圧ガス製造施設等変更が許可された後に行うことは、危害予防規程変更許可申請書、特定設備検査合格証、気密試験成績書を提出することである。

### (3) 2011年9月21日：特定設備検査合格証交付

液体水素実験装置に対する特定設備検査合格証（23 大 0941）が交付された。特定設備の区分および種別は、たて置円筒形貯槽・第一種特定設備、製造をする高圧ガスの種類は可燃性ガス、内容積は 0.02265 m<sup>3</sup>、設計圧力は 0.5 + 0.1013 MPa、設計温度は -253 ~ +40°C である。なお、本合格証の有効期間は 3 年である。

### (4) 2013年4月9日：兵庫県産業保安課へ（3回目）

高圧ガス製造施設等変更許可申請書（案）の事前確認をお願いするために、3回目の訪問を行った。その際に明らかとなったことは、以下のとおりである。

- ・放水設備として用いる消火栓の放水能力、消火栓の位置、水源等に関する書面の提出が必要である。

- ・実験室照明器具として用いる水銀灯（数量 5）および水素ガス検知警報装置（数量 2）の防爆仕様証明書またはカタログを添付する必要がある。

- ・防爆対策として、アース（接地）を取ることを申請書へ記入する必要がある。

- ・水素実験棟の屋根は、軽微なスレートが望ましい。

### (5) 2014年1月31日：兵庫県産業保安課へ（4回目）

修正した高圧ガス製造施設等変更許可申請書（案）の直前確認をお願いするために、4回目の訪問を行った。その後、審査手数料として兵庫県収入印紙（16,000 円）を購入し、関係書類一式を兵庫県産業保安課宛に郵送した。なお特定設備検査合格証の有効期間 3 年（2014 年 9 月 21 日）までに気密試験成績書等の提出が求められた。

### (6) 2014年2月5日：高圧ガス製造施設等変更許可

高圧ガス（水素）の製造施設等変更（兵庫県指令産保第 20-G161 号）が許可された。増設する設備は液化水素製造施設、1日の処理量は 0.0 Nm<sup>3</sup>/day である。

### (7) 2014年6月30日：気密試験検査成績書等受付

気密試験を 5 月 22 日に実施した。試験圧力は設計圧力と同じとし、窒素ガス（気温 22°C）で 10 分以上の圧力保持を確認した。また、水素ガス検知警報装置（2 台）の試験を 6 月 19 日に実施した。警報設定値（200, 400 ppm）、校正ガス指示値（320 ppm）、応答速度（9 s）を確認した。これらの試験成績書各 2 部、特定設備検査合格証（写）2 部、返信用封筒（切手付）を兵庫県産業保安課宛に郵送し、6 月 30 日に受け付けられた。特定設備検査合格証の有効期間 3 年が満了する 3 か月前であった。

<sup>5)</sup> 本研究室<sup>4)</sup>では、阪神・淡路大震災後の 1996 年 3 月 25 日、極低温実験棟での液化ヘリウム製造設備並びに液化窒素貯蔵槽の設置に伴い、高圧ガス製造（兵庫県指令計第 20-G193 号）が許可された。今回は液化水素追加のため、変更許可申請となる。

(8) 2014年10月10日：変更概要の説明

兵庫県高圧ガス保安協会による、液化ヘリウム製造設備並びに液化窒素 (LN<sub>2</sub>: 沸点 77 K) 貯蔵槽に対する保安検査が10月10日に実施された。その際に、高圧ガス(水素)の製造施設等の変更が許可された旨概要説明した。

(9) 2015年3月1日：高圧ガス危害予防規程等の施行

神戸大学大学院海事科学研究科高圧ガス危害予防規程、同高圧ガス保安教育計画、同南海トラフ地震に係る防災対策に関する内規を3月1日に施行した。

(10) 2015年6月：水素実験棟の完成

水素ガス放出配管の取付け、計測配線用の壁下穴の施工、流し台取付け、チェンブロック (1 ton, 手動) 2台の取付け等を終了し、水素実験棟が完成した。

### 3. 水素実験棟の概要

#### 3.1 液体水素実験上の注意

LH<sub>2</sub> を取扱う実験では、LN<sub>2</sub> や LHe と同様に極低温液化ガスとして、慎重に取り扱わなければならない。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。室温・大気圧下での空気中における水素の爆発範囲は広く、4.0~75 vol%であることが知られている。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。水素の物理・化学的特徴<sup>9)</sup>を含めて、主なものを以下にまとめる。

- (1) 水素ガスは、無色・透明である。
- (2) 室温で水素ガスは空気より軽く、上昇する。
- (3) 水素ガスに毒性はないが、充満すると酸素濃度が下がるので窒息の原因となる。

(4) 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。

(5) 水素の焰は、無色である。

(6) LH<sub>2</sub> は、無色・透明である。

(7) LH<sub>2</sub> 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(「適切な排気」、「漏洩の防止」、「着火源の排除」)を考慮した上で、安全に LH<sub>2</sub> 実験<sup>9)</sup>を遂行するための注意事項を以下に示す。ここでは、兵庫県産業保安課から指導された保安技術内容も含める。

(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) 実験室内の換気をよくする。

(4) 建物の屋上から安全に水素ガスを放出する。

(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) 実験室内で電気・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。

#### 3.2 設備配置および液体水素実験装置

深江キャンパスにおける水素実験棟および極低温実験棟の配置図を Fig. 1 に示す。Fig. 2 は、水素実験棟の外観写真である。水素実験棟の正面扉(横開き)には、「水素実験棟」と「液化水素実験用クライオスタット置場(火気厳禁)」(朱書き)のプレートが貼られている。また、写真右側に見えるのは、水素ガス放出ラインと真空ポンプ小屋である。

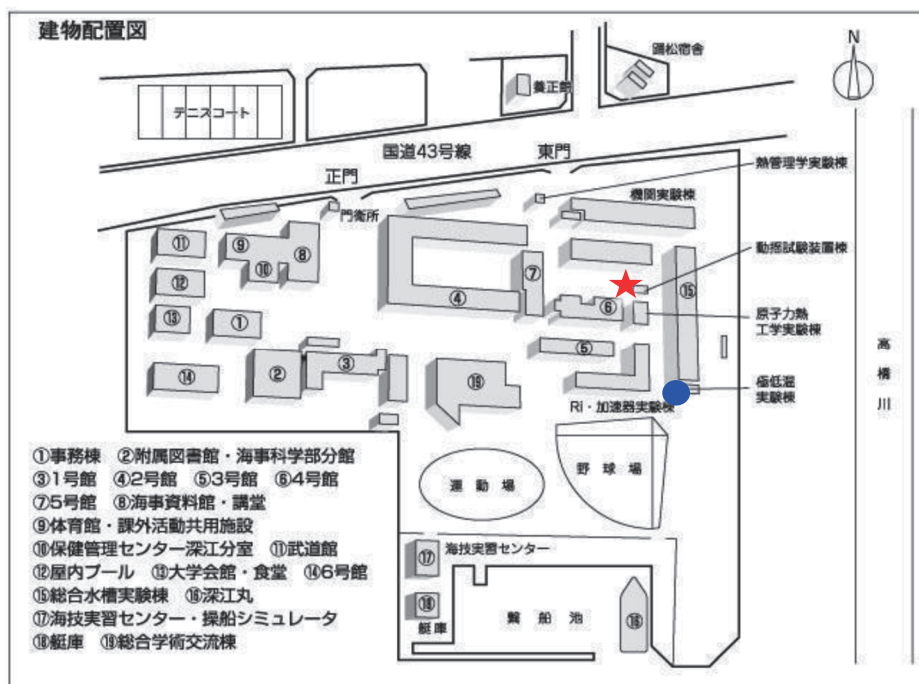


Fig. 1 Laboratory location at the Fukae campus of Kobe University: ★ Hydrogen Laboratory, ● Cryogenics Laboratory.





Fig. 2 Photograph of the Hydrogen Laboratory.



Fig. 4 Photograph of the experiment room.

Fig. 3 に水素実験棟における LH<sub>2</sub> 実験装置等のレイアウト図を示す。水素実験棟には、実験室、測定室、水素ガス放出ライン、真空排気ライン、保安・防爆機器、LH<sub>2</sub> 実験装置等が設置されている。実験室と測定室の間は、網入りの強化ガラスで隔てられ、二重扉から行き来できる。これらの部屋の写真を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。計測用配線は、実験室のピットおよび測定室の壁下穴を通してしている。

水素ガス放出ライン (SUS304, 40A : 外径 48.6 mm) は、屋根より 1 m 高い所に設置された水素逆火防止装置 (PROTEGO, LH/AD 型) に繋がっている。これは、落雷による着火事故を防ぐためである。また、真空排気ライン (SUS304, 50A : 外径 60.5 mm および 80 A : 外径 89.1 mm) は、水素実験棟横の真空ポンプ小屋内にある大型真空ポンプ (大亜真空, KRP-1500) に繋がっている。



Fig. 5 Photograph of the measurement room.

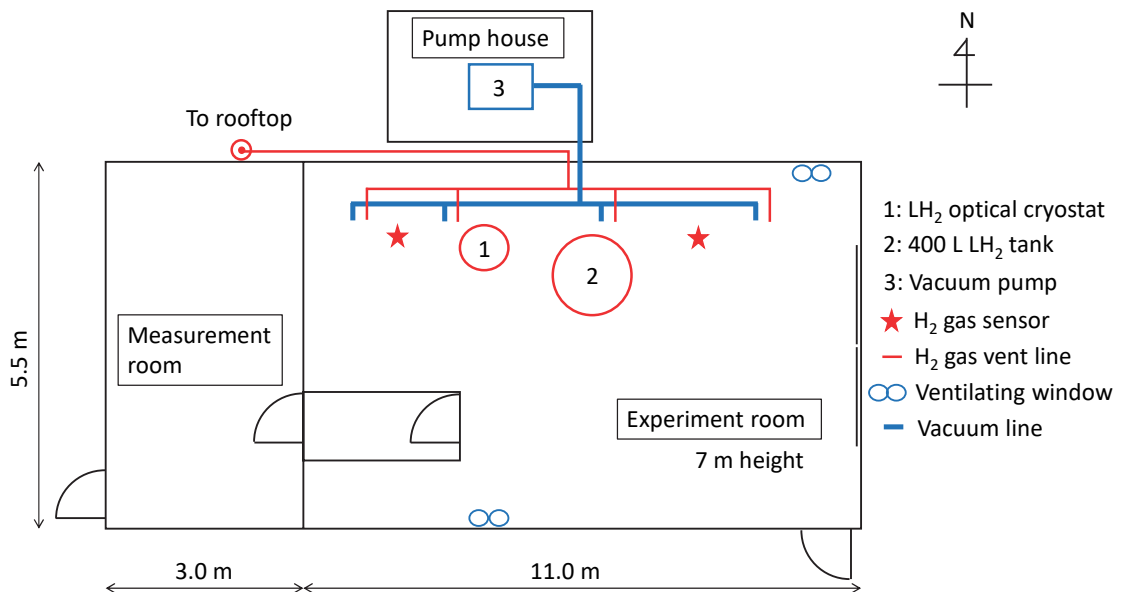
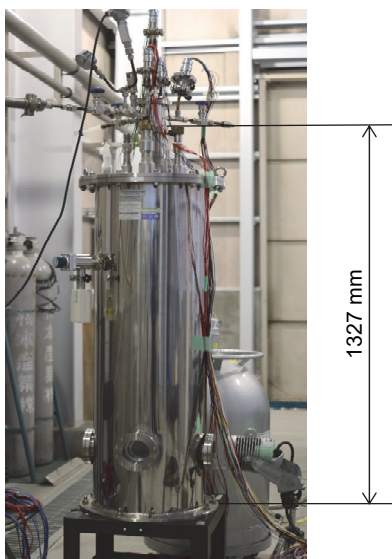


Fig. 3 Layout of the Hydrogen Laboratory.

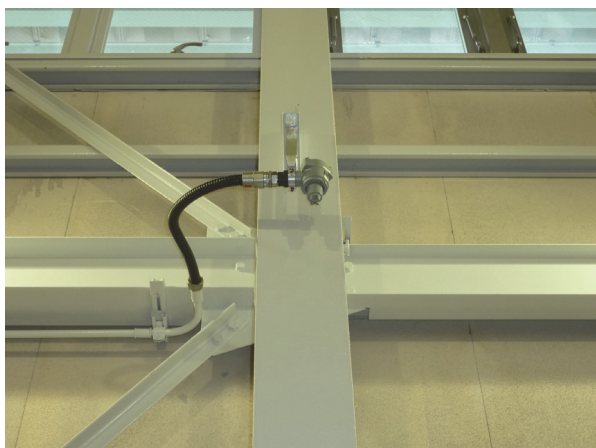


**Fig. 6** Photograph of the LH<sub>2</sub> optical cryostat.

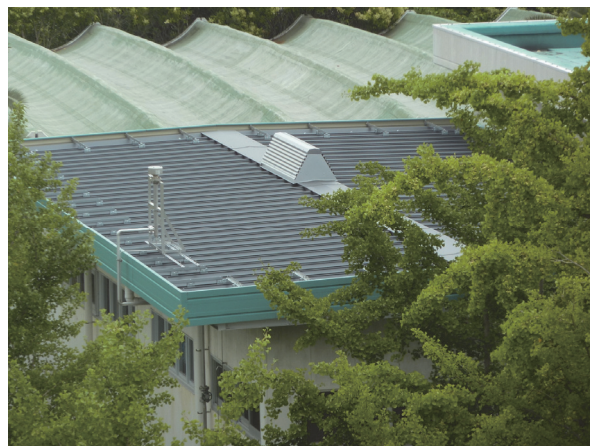
LH<sub>2</sub>実験装置（光学クライオスタット）の写真を **Fig. 6** に示す。本装置は、観測窓（低温部有効直径 60 mm, 室温部有効直径 80 mm）5 個を有した光学クライオスタット<sup>7)</sup>であり、断熱真空槽, LN<sub>2</sub> 槽 (15 L), LH<sub>2</sub> 槽 (20 L) で構成されている。LN<sub>2</sub> 槽より下には, 77 K アルミシールドが取り付けられており, LH<sub>2</sub> 槽を取囲む形状になっている。このクライオスタットの主な材質は SUS304 であり, 高さは 1327 mm, 外径は 350 mm である。観測窓の材質はテンパックス強化ガラスであり, その厚みは低温部が 8 mm, 室温部が 10 mm である。この観測窓を圧力および真空タイトにするために, 低温部はインジウム線を, また室温部は O-リングを用いてボルトで締め付けている。これにより LH<sub>2</sub> 槽は, 0.5 MPaG (設計圧力) まで耐えられる。

### 3.3 安全対策

**Fig. 7** 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。実験室の上部 2 か所に設置された検知部から, 測定室にある指示警報器



**Fig. 7** Photograph of the H<sub>2</sub> gas sensor.



**Fig. 8** Photograph of the Hydrogen Laboratory roof.

（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, ハンディー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。

**Fig. 8** は, 水素実験棟屋根の写真である。写真の真中および左側に見えるのは, 排気口および水素逆火防止装置である。実験室には防爆型換気扇がないため, LH<sub>2</sub> 実験の際は, 実験室の換気用窓を開けて対応している。2 か所ある水素実験棟の入口には, **Fig. 9** の写真に示すように, アースハンドルが取り付けられている。また, 実験室内にもアース端子が取り付けられている。

## 4. 研究成果の概要

### 4.1 性能試験

400 L LH<sub>2</sub> タンクから光学クライオスタットヘトランスファーチューブを用いて, 直接 LH<sub>2</sub> を充填したときの CCS 温度計 (T1~T6) および超伝導液面計 (B1: 0~500 mm) の時間変化を **Fig. 10** に示す。温度計は, 液面センサー B1 の下端部に T1, 上端部に T6 が取り付けられている。



**Fig. 9** Photograph of the earth handle.



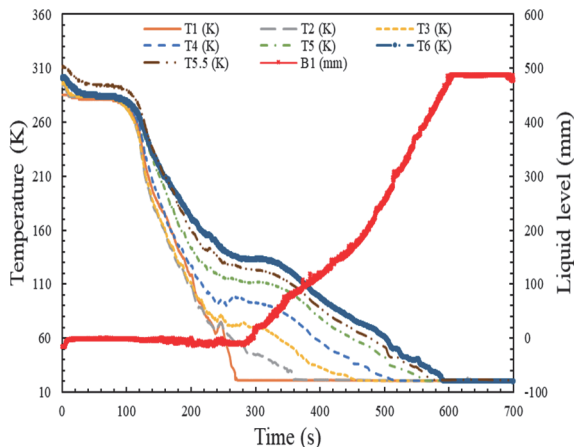


Fig. 10 Experimental results for the LH<sub>2</sub> filling test.

この図より 100 s を越えて温度計 T1~T6 が急激に下がり始め、270 s で温度計 T1 が 20 K を示している。その後、液面センサー B1 が反応を始め、液面が上昇した。充填完了までの時間は、約 600 s であった。LH<sub>2</sub> 充填中における蒸発損失 (1-LH<sub>2</sub> の溜まった量/LH<sub>2</sub> の移送量) は、約 0.5 である。なお、LH<sub>2</sub> 槽の液面位置の時間変化を調べたデータから平均入熱量を求めると 1.1 W であり、これは計算値より小さい値であった。

#### 4.2 液体水素用超伝導液面計に関する研究

貯蔵効率の高い LH<sub>2</sub> を海上輸送するための基盤技術のひとつとして、電気抵抗式の超伝導 MgB<sub>2</sub> (二ホウ化マグネシウム) 液面センサーの研究<sup>8)</sup>を行っている。この液面センサーは、LHe 用超伝導 NbTi (ニオブチタン) 液面センサー<sup>9)</sup>と同様に、液体中 (電気抵抗ゼロ) と気体中 (電気抵抗発生) における熱伝達の違いを応用している。ただし、従来の超伝導液面センサーは、測定電流 (励起電流) に伴うジュール発熱を利用した内部加熱型 (自己加熱型) であるのに対して、我々の液面センサーは、その周りにヒーター線を巻いた外部加熱型を採用している。これにより、蒸発ガスによる液面センサーの冷却を防ぎ、高精度・高応答性を有する LH<sub>2</sub> 用 MgB<sub>2</sub> 液面センサーを実現できるからである。なお、比較的簡便な LH<sub>2</sub> 用内部加熱型 MgB<sub>2</sub> 液面センサーの研究は、ドレスデン工科大学の Haberstroh<sup>10, 11)</sup>や九州大学の 梶川<sup>12-14)</sup>が行っている。以下に、我々の外部加熱型 MgB<sub>2</sub> 液面センサーの研究開発の経緯と研究成果の概要について述べる。

LH<sub>2</sub> 用 MgB<sub>2</sub> 液面センサーの研究を始めた当初、センサーに求められる主な条件として、以下に着目した<sup>15)</sup>。

- (1) 超伝導転移温度  $T_c$  が LH<sub>2</sub> の沸点に近いこと
- (2) 超伝導遷移温度幅  $\Delta T_c$  が小さいこと
- (3) 常伝導状態の電気抵抗値  $R$  が大きく、その温度依存性  $dR/dT$  が小さいこと

我々は、powder-in-tube (PIT) 法をベースとした in situ 法または ex situ 法を採用し、金属シースの材質、その外径を

Table 1 Line-up of MgB<sub>2</sub> wire samples fabricated by NIMS.

Sample	Method	Metal Sheath	Diameter (mm)
A-1	ex situ	SUS316	1.3
A-2	ex situ	SUS316	1.6
B-1	in situ	Fe	0.7
B-2	in situ	Fe	0.6
B-3	in situ	Fe	0.45
C-1	in situ	Nb	0.25
D-1	in situ	CuNi/9:1	0.65
D-2	in situ	CuNi/7:3	0.65
D-3	in situ	CuNi/7:3	0.5
D-4	in situ	CuNi/7:3	0.2
D-5	in situ	CuNi/7:3	0.05

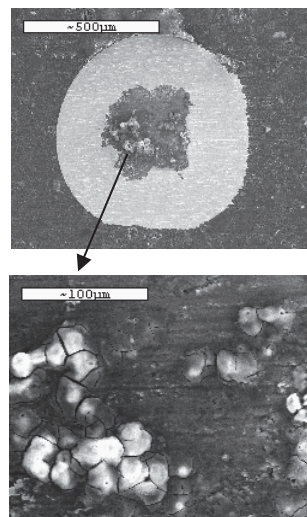
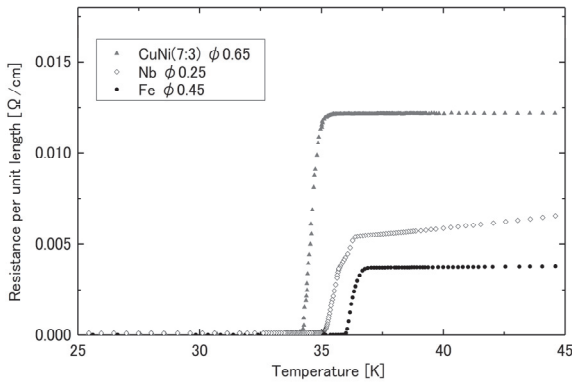


Fig. 11 Photograph of the cross-section of the D-2 sample.

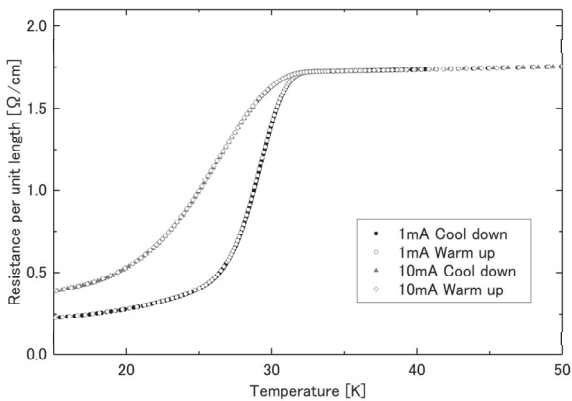
変えてサンプルを作製した。Table 1 にサンプル一覧を示す。Fig. 11 は、サンプル D-2 の断面写真である。

長さ約 20 mm のサンプルを対象として、直流四端子法を用いて電気抵抗の温度依存性を調べた。ex situ 法で作製した A-1 と A-2 では、 $\Delta T_c$  が約 8-6 K と大きく、測定電流値 (1 mA, 10 mA) によって  $T_c$  オフセットに差が生じていた。これらサンプルの超伝導特性が良好でなかった原因のひとつとして、ex situ 法では内部の MgB<sub>2</sub> 粒子間の結合状態が良くないことが挙げられる。そこで、結合状態を良くするために、熱処理を加える in situ 法に切替えることにした。

in situ 法で作製した B-3, C-1, D-2 における単位長さ当たりの電気抵抗値と温度の関係を Fig. 12 に示す。これらのサンプルでは、測定電流値による  $T_c$  オフセットの差は見られなかった。CuNi/7:3 の D-2 は、 $T_c$  オンセット 35.4 K,  $T_c$  オフセット 33.8 K ( $\Delta T_c = 1.6$  K), オンセット抵抗 0.0127  $\Omega/cm$ ,  $dR/dT = 5.80 \times 10^{-6}$   $\Omega/cm/K$  であり、上述の条件を最も満足していることがわかった。これにより、シース材とし



**Fig. 12** Experimental results of the relationship between resistance per unit length and temperature of samples B-3, C-1 and D-2.



**Fig. 13** Relationship between resistance per unit length and temperature of sample D-5 as a parameter of excitation current.

て CuNi/7:3 が有望視された。ただし、オンセット抵抗を更に上げるために、外径を 0.05 mm へ減じたところ、**Fig.13** に示すように、超伝導特性が悪化するとともに、その特性が測定電流値にも依存していた。この原因を調べるために、D-5 を長さ方向に切断し、断面を確認したところ、サンプル内の MgB<sub>2</sub> 部分に長さ方向に対して直角向きのクラックが多く入っていることがわかった。

LH<sub>2</sub> を貯蔵・輸送する場合、発生する boil-off gas (BOG) を容器内に留めるのが一般的であり、例えば 0.9 MPaG まで蓄圧すれば、沸点（飽和温度）が 31 K まで上昇する。MgB<sub>2</sub> 液面センサーの  $T_c$  を 35 K から 31 K 辺りまで下げられれば、液面センサーとして有利である。そこで我々は、不純物（SiC, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）添加により  $T_c$  を下げるとともに、外径、MgB<sub>2</sub> とシース材との断面積比等を変えてサンプルを作製した<sup>16,17)</sup>。

これらサンプルの超伝導特性を調べた結果、最適なサンプル作製条件は、in situ 法（600°C, 1 時間, Ar 大気圧下で熱処理）、シース材 CuNi/7:3、添加物 10%SiC、外径 0.32 mm であると判断した。この条件で作製した MgB<sub>2</sub> 線材を基に

して、ヒーター線（ポリエステル被覆マンガン線 0.23 mm φ）を約 2 mm ピッチで螺旋状に巻いて液面センサー（有効長：200, 500, 800, 1200 mm 等）を完成させた。液面センサーに対する静的液面検知特性（大気圧・加圧下）、最適ヒーター入力値、個体差性能等<sup>18-21)</sup>を明らかにして外部加熱型の高性能を実証する一方で、特許（特許番号：第 5158633 号, 2011 年 12 月 21 日）を取得した。現在、LH<sub>2</sub> 運搬船への搭載を目指して、液面センサーの長尺化・大型化の研究を進めている。

#### 4.3 液体水素のスロッシングに関する研究

高速度カメラを用いて、上述の液面センサーの優れた動的液面検知特性等<sup>8)</sup>を明らかにするとともに、2000 L LH<sub>2</sub> タンク内部のスロッシング（液面揺動）に関するシミュレーションおよびトラック走行試験を行った。また、液面センサーを複数用いた 3D スロッシング計測にも成功した<sup>22)</sup>。

LH<sub>2</sub> の海上輸送に関する実測データを得るために、海事科学研究科附属練習船「深江丸」による LH<sub>2</sub> 海上輸送実験を行っている<sup>7,23)</sup>。上述のクライオスタットに 500 mm 長の液面センサー 5 本を挿入し、大阪湾航海中においてクライオスタット内部の温度・圧力・液面、および船体動揺・加速度等の同時計測に成功した。現在、外洋における実測データを取得中である。

#### 5. おわりに

本解説では、水素エネルギー海上輸送基盤技術の開発を目指して、神戸大学深江キャンパス内に構築した水素実験棟設置の経緯とその概要、およびこれまでの研究成果の概要について述べた。水素エネルギーの大規模利用が将来的に本格化しようとする中、本解説が今後 LH<sub>2</sub> 実験を計画する関係者のお役に立てば幸いである。

LH<sub>2</sub> 実験装置等の設計・製作に関して(株)クライオバックに、また高圧ガス許可申請等に関して岩谷瓦斯(株)・イワタニガスエンジニアリング(株)・岩谷産業(株)にご協力いただきました。厚く御礼申し上げます。水素実験棟の改修整備および高圧ガス危害予防規程の施行等に関してご支援いただきました、神戸大学施設部および海事科学研究科に感謝の意を表します。LH<sub>2</sub> 用超伝導液面計および LH<sub>2</sub> のスロッシングの研究に関してご支援・ご協力いただきました、岩谷瓦斯(株)・岩谷産業(株)および物質・材料研究機構に、また関係各社に厚く御礼申し上げます。LH<sub>2</sub> 海上輸送実験に関してご協力いただきました、練習船深江丸乗組員の皆様に感謝の意を表します。

これらの研究の一部は、兵庫県 COE プログラム推進事業補助金、日本郵船・ヘイエルダール記念事業助成金、造船学術研究推進機構助成金、関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団研究助成金、科学研究費補助金の助成を受けて行われました。



## 参 考 文 献

- 1) 「水素基本戦略」が決定されました (2017年12月26日)  
<https://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002.html>
- 2) S. Kamiya, M. Nishimura and E. Harada: "Study on introduction of CO<sub>2</sub> free energy to japan with liquid hydrogen," *Physics Procedia* **67** (2015) 11-19
- 3) 「2019年度NEDO次世代電池・水素成果報告会」の開催 (更新2019年7月11日)  
[https://www.nedo.go.jp/events/HY\\_00013.html?from=nedomail](https://www.nedo.go.jp/events/HY_00013.html?from=nedomail)  
 (参照2019-7-28)
- 4) 武田 実: 「神戸大学大学院海事科学研究科 超伝導科学 (武田) 研究室」, *低温工学* **50** (2015) 483-484
- 5) 高压ガス保安協会 編: 「高压ガス保安法規集」第18次改訂版, 高压ガス保安協会, 東京 (2019)
- 6) R. B. Scott, W. H. Denton and C. M. Nicholls: "Technology and Uses of Liquid Hydrogen," Pergamon Press, Oxford (1964) Chap. 10
- 7) K. Maekawa, M. Takeda, Y. Miyake and H. Kumakura: "Sloshing Measurements inside a Liquid Hydrogen Tank with External-Heating-Type MgB<sub>2</sub> Level Sensors during Marine Transportation by the Training Ship Fukae-Marui," *Sensors* **18**, 3694 (2018)
- 8) K. Maekawa, et al.: "Dynamic Level-Detecting Characteristics of External-Heating-Type MgB<sub>2</sub> Liquid Hydrogen Level Sensors Under Liquid Level Oscillation and Its Application to Sloshing Measurement," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27**, 9000304 (2017)
- 9) M. Ishizuka and K. Yasukochi: "A simple, continuous level indicator for liquid helium," *TEION KOGAKU* **3** (1968) 131-135 (in Japanese)  
 石塚素義, 安河内昂: 「簡単な連続ヘリウム液面計」, *低温工学* **3** (1968) 131-135
- 10) Ch. Haberstroh and G. Zick: "A superconductive MgB<sub>2</sub> level sensors based on MgB<sub>2</sub>," *Adv. Cryo. Eng.* **51A** (2006) 679-684
- 11) Ch. Haberstroh, G. Dehn and D. Kirsten: "Liquid hydrogen level sensors based on MgB<sub>2</sub>," *Proceedings of 21st ICEC/ICMC 2006, Prague* (2007) 357-360
- 12) K. Kajikawa, et al.: "Fundamental investigation of a superconducting level sensor for liquid hydrogen with MgB<sub>2</sub> wire," *Journal of Physics: Conference Series* **97**, 012140 (2008)
- 13) K. Kajikawa, et al.: "Numerical simulation of a superconducting level sensor for liquid hydrogen with MgB<sub>2</sub> wire," *Proceedings of 22nd ICEC/ICMC 2008, Seoul* (2009) 425-430
- 14) K. Tomachi, et al.: "MgB<sub>2</sub> wire optimization guidelines for a liquid hydrogen level sensor," *TEION KOGAKU* **44** (2009) 366-372 (in Japanese)  
 戸町恭平ら: 「液体水素液位センサー用MgB<sub>2</sub>線材の最適化の指針」, *低温工学* **44** (2009) 366-372
- 15) C. Kazama, et al.: "Fundamental studies of superconducting level gauge for liquid hydrogen," *Abstracts of CSJ Conference* **73** (2005) 69  
 風間 力ら: 「液体水素用超伝導液面計の基礎研究」, 第73回2005年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2005) 69
- 16) Y. Matsuno, et al.: "Fundamental studies of superconducting level gauge for liquid hydrogen (3) -Level-detected characteristics at pressurized conditions-," *Abstracts of CSJ Conference* **77** (2007) 49
- 松野 優ら: 「液体水素用超伝導液面計の基礎研究(3) -加圧条件下における液面検知特性-」, 第77回2007年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2007) 49
- 17) M. Takeda, et al.: "Characteristics of MgB<sub>2</sub> sensor for detecting level of liquid hydrogen," *Adv. Cryo. Eng.* **53** (2008) 933-939
- 18) M. Takeda, et al.: "Application of MgB<sub>2</sub> wire to liquid hydrogen level sensor -External-heating-type MgB<sub>2</sub> level sensor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009) 764-767
- 19) K. Maekawa, et al.: "Optimization of external-heating-type MgB<sub>2</sub> level sensor for liquid hydrogen," *TEION KOGAKU* **49** (2014) 69-75 (in Japanese)  
 前川一真ら: 「外部加熱型液体水素用MgB<sub>2</sub>液面センサーの最適化」, *低温工学* **49** (2014) 69-75
- 20) K. Maekawa, et al.: "Effect of sensor length on thermal response of external-heating-type MgB<sub>2</sub> level sensor for liquid hydrogen," *Journal of the JIME* **49** (2014) 547-553 (in Japanese)  
 前川一真ら: 「外部加熱型液体水素用MgB<sub>2</sub>液面センサーの熱応答性に対するセンサー長の影響」, *日本マリンエンジニアリング学会誌* **49** (2014) 547-553
- 21) K. Maekawa, et al.: "Individual difference performance evaluation of external-heating-type MgB<sub>2</sub> level sensor for liquid hydrogen," *TEION KOGAKU* **50** (2015) 368-373 (in Japanese)  
 前川一真ら: 「外部加熱型液体水素用MgB<sub>2</sub>液面センサーの個体差性能評価」, *低温工学* **50** (2015) 368-373
- 22) K. Maekawa, et al.: "Fundamental study of sloshing inside liquid hydrogen tank with external-heating-type MgB<sub>2</sub> level sensors for marine transportation," *Journal of the JIME* **51** (2016) 383-389 (in Japanese)  
 前川一真ら: 「海上輸送のための外部加熱型 MgB<sub>2</sub> 液面センサーによる液体水素タンク内部のスロッシングの基礎研究」, *日本マリンエンジニアリング学会誌* **51** (2016) 383-389
- 23) K. Maekawa, et al.: "First experiment on liquid hydrogen transportation by ship inside Osaka bay," *Materials Sci. Eng.* **278**, 012066 (2017)

---

**武田 実** 1961年12月25日生。1984年神戸商船大学商船学部原子動力学科卒業。1986年大阪市立大学大学院理学研究科前期博士課程(物理学専攻)修了。1988年同研究科後期博士課程(物理学専攻)中退。同年4月神戸商船大学商船学部(現:神戸大学大学院海事科学研究科)勤務。現在,超伝導応用および極低温流体に関する研究に従事。低温工学・超電導学会,応用物理学会,日本物理学会,日本マリンエンジニアリング学会,日本船舶海洋工学会会員。博士(理学)。

**前川 一真** 1986年4月16日生。2010年神戸大学海事科学部マリンエンジニアリング課程卒業。2012年同大学院海事科学研究科博士前期課程(海事科学専攻)修了。2015年同大学院海事科学研究科博士後期課程(海事科学専攻)修了。同年4月より日本原子力研究開発機構J-PARCセンター博士研究員。2016年3月神戸大学大学院海事科学研究科特命助教。2018年10月より神戸大学大学院海事科学研究科マリンエンジニアリング講座助教。現在,液体水素の貯蔵・輸送に関する研究に従事。低温工学・超電導学会,日本マリンエンジニアリング学会会員。博士(工学)。