

# 液体水素実験施設の構築と最近の研究成果

神戸大学大学院海事科学研究科 教授 武田 実

カーボンニュートラルへの意識の高まりに伴い、水素エネルギーへの関心が高まっています。当社においても関連する技術として、水素関連技術の研究開発を開始しています。今回、神戸大学武田教授に専門分野での研究成果についてご執筆いただきました。

なお、本稿は公益社団法人 低温工学・超電導学会より発行された低温工学（2020年55巻1号）にて掲載の“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－”をもとに執筆されたものです。

## 1. はじめに

カーボンニュートラル社会構築およびエネルギーセキュリティ確保の観点から、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、有機ヒドライド、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20K）の状態、液化天然ガス（LNG：沸点111K）と同様に海上輸送する技術開発プロジェクトが脚光を浴びている。

一方、筆者らの研究室では、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4.2K）を用いた超伝導応用（超伝導電磁推進船、海流MHD発電など）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）など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。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）などを除いて、国内には無かったため、筆者らは約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。本稿では、高圧ガス保安対策、液体水素実験装置、設備配置、安全・防爆対策などを含めて、水素実験棟設置の経緯とその概要、および最近の研究成果の概要について述べる。

## 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。

1回目の相談は、2011年7月に行った。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」を構築する旨相談した。設計・製作した液体水素実験装置（LH<sub>2</sub>槽内容積20L，設計圧力0.5MPaG）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・手続きなどについて照会したところ，本装置を用いた実験は，中型LH<sub>2</sub>タンクにて業者から購入した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ことがわかった。その後3回の相談を繰り返し，2014年2月に高圧ガス（水素）の製造が許可（兵庫県指令産保第20-G161号）された。この設備は液化水素製造施設であり，1日の処理量は0.0Nm<sup>3</sup>/dayである。

そして，2015年3月に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施行した。最終的に，2015年6月に水素ガス放出配管の取付け，チェーンブロック（1ton，手動）2台の取付けなどを終了し，水素実験棟が完成した。水素実験棟設置の経緯の詳細は，こちらの文献<sup>1)</sup>に記載されている。

### 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，4～75vol%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の外観写真を図1に示す。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。

図2に水素実験棟におけるLH<sub>2</sub>実験装置など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>実験装置などが設置されている。実験室と測定室の間は，網入りの強化ガラ



図1 水素実験棟の写真

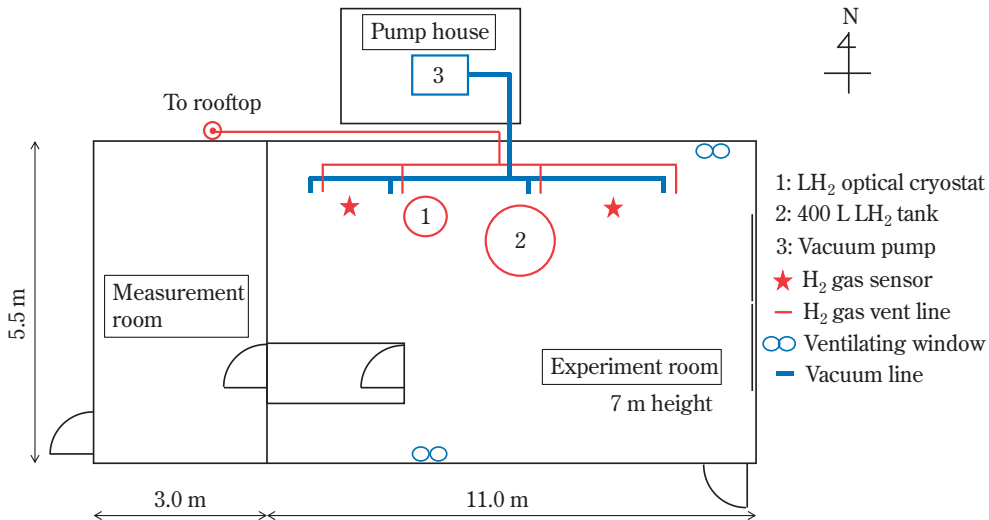


図2 水素実験棟のレイアウト図

スで隔てられ、二重扉から行き来できる。なお、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 48.6mm) は、屋根より1m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 60.5mm および 80A: 外径 89.1mm) 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。

LH<sub>2</sub>実験装置 (光学クライオスタット) の詳細図を図3に示す。本装置は、観測窓 (低温部有効

直径 60mm, 室温部有効直径 80mm) 5個を有した光学クライオスタット<sup>2)</sup>であり、断熱真空槽、LN<sub>2</sub>槽 (15L)、LH<sub>2</sub>槽 (20L) で構成されている。LN<sub>2</sub>槽より下には、77Kアルミシールドが取付けられており、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1327mm、外径は350mm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8mm、室温部が10mm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、0.5MPaG (設計圧力) まで耐えられる。

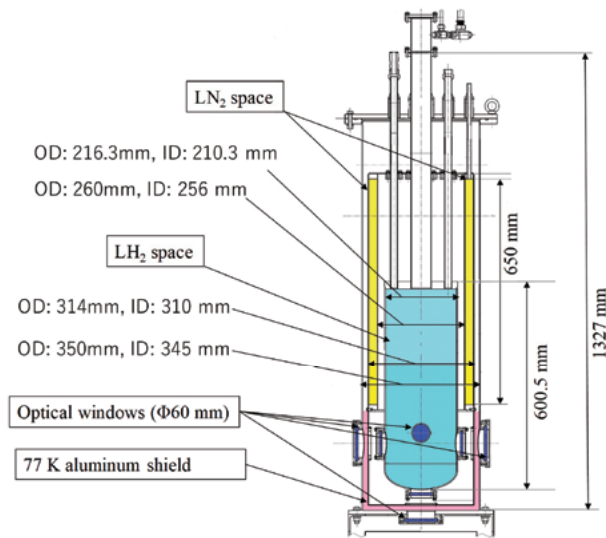


図3 光学クライオスタットの詳細図

### 3.3 安全対策

実験室の上部2か所には、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) が設置されている。検知部から、測定室にある指示警報器 (新コスモス電機, NV-100H) へ信号が送られ、水素濃度が200ppm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。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、アースハンドルが取付け



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 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、筆者らの液面センサーは、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。図4は、LH<sub>2</sub>用MgB<sub>2</sub>液面センサーの液面検知特性の一例である。図中の青線と赤線は、それぞれ外部加熱に使用するヒーターの入力値が6Wと9Wのときの結果を示しており、どちらも直線性は良好であった。現在、LH<sub>2</sub>用MgB<sub>2</sub>液面センサーの長尺化に関する研究開発<sup>3)</sup>を推進している。

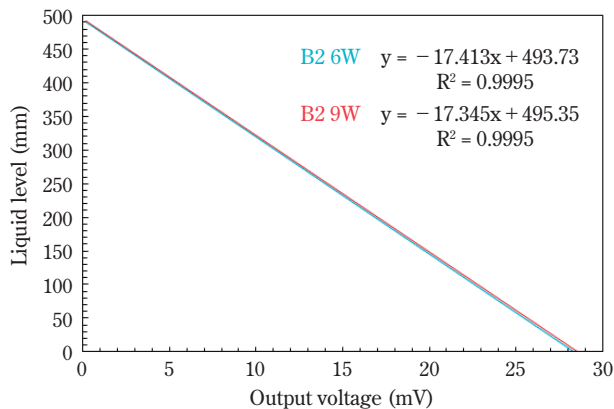


図4 LH<sub>2</sub>用MgB<sub>2</sub>液面センサーの液面検知特性

### 4.2 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などを明らかにすると

もに、2000L 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。

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た<sup>2,4)</sup>。上述のクライオスタットに500mm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。また、外洋における実測データの取得にも成功した。

### 4.3 GFRP管のヤング率測定に関する研究

LH<sub>2</sub>の海上輸送に関連して、陸上タンクから海上輸送タンクへ、または海上輸送タンクから陸上タンクへLH<sub>2</sub>を荷役する技術の研究開発が求められている。中でも荷役時に必要な安全かつ高精度なLH<sub>2</sub>用流量計は、まだ開発されていない。そこで筆者らは、新たな流量計として、ヘリカル型LH<sub>2</sub>用流量計を考案した。この流量計は、配管（GFRP管）とヘリカル型仕切り板とひずみゲージで構成されている。ヘリカル流を通す配管の表面にひずみゲージを取付け、流れに伴う管内の圧力変化により生じる配管のひずみを検知すれば、その大きさから流量を算出することができる。この流量計を開発するためには、配管材料の低温下における力学的特性（ヤング率）を調べることが重要である。現在、図5に示す低温加圧実験装置を用いて、GFRP管のヤング率のデータを取得中である。

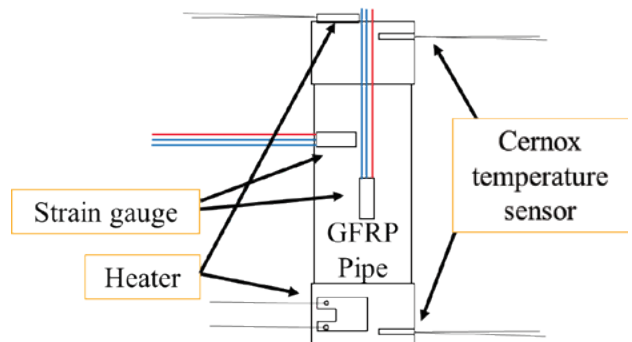


図5 低温加圧実験装置の概略図

## 5. おわりに

本稿は、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、および最近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、本稿が今後LH<sub>2</sub>実験を計画するニチアス(株)をはじめ水素エネルギー分野の関係者のお役に立てば幸いである。

### 謝 辞

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・ハ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) 武田 実, 前川一真: 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 -, 低温工学 55, 1, pp.14-21 (2020).
- 2) 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-Marun, Sensors, 18, 3694 (2018).
- 3) 福本祥一, 高田芳宏, 武田 実, 前川一真, 熊倉浩明: 液体水素液面センサー用長尺MgB<sub>2</sub>線材の作製とその評価, 低温工学 57, 1, pp.39-45 (2022).
- 4) K. Maekawa, M. Takeda, T. Hamaura, K. Suzuki, Y. Miyake, Y. Matsuno, S. Fujikawa and H. Kumakura: First experiment on liquid hydrogen transportation by ship inside Osaka bay, Materials Science and Engineering, 278, 012066 (2017).

## 筆者紹介



### 武田 実

神戸大学大学院海事科学研究科  
超伝導応用および極低温流体に関する研究に従事  
博士 (理学)  
低温工学・超電導学会会員, 応用物理学会会員など



極低温から超高温にいたる領域で、  
独自技術を駆使したエンジニアリング  
サービスを提供しています。

### プラント向け各種工事

- 断熱 (保温・保冷) 工事
- 耐火工事
- 電気ヒータトレース工事
- 防音工事

### 省エネ対策提案 Thermofit™

### 保温メンテナンス工事 増し保温® 工法

### シール材販売

#### 各種ガスケット

- NAジョイントシート など

#### 各種グランドパッキン

- ナフロン® ファイバーパッキン-T など

### ガスケットソリューションサービス

- ガスケットLab™
- GASKET工房™
- ガスケットNAVI™
- BT Master™

※®が付されている名称はニチアス(株)の登録商標です。  
※TMが付されている名称はニチアス(株)の商標です。

