

液化水素漏洩挙動の調査^{*1}

Investigation of Liquid Hydrogen Leakage

高橋 昌志^{*2}
Masashi TAKAHASHI

広谷 龍一^{*3}
Ryuichi HIROTANI

寺田 利宏^{*2}
Toshihiro TERADA

大塚 宣明^{*2}
Noriaki OHTSUKA

Abstract

In order to study the effect of hydrogen concentration on the surroundings between liquid hydrogen and gaseous hydrogen when the leakage rate is 11.8g/min (131L/min(Normal)) by the allowable fuel leakage rate at the time of a collision of compressed hydrogen vehicles in Japan. The results demonstrated that at a flow rate of 14g/min liquid hydrogen spouted with liquid itself until height of 70 mm from nozzle tip. In addition, all spouted liquid hydrogen was dispersed upward without dropping to the ground. This test indicates no significant difference in hydrogen concentration on the surroundings between liquid hydrogen and gaseous hydrogen.

1. はじめに

道路運送車両の保安基準 別添100「圧縮水素ガスを燃料とする自動車の燃料装置の技術基準」では、圧縮水素容器を搭載した車両の衝突時の水素漏れ許容量が規定されているが、航続距離の伸長に有効な水素貯蔵技術の一つである液化水素容器を搭載した車両に関してはそのような規定は無いのが現状である。そこで、圧縮水素容器搭載車両の水素漏れ許容量と同等の液化水素が漏洩した場合、漏洩時の周囲水素濃度が気体水素と挙動が異なるか調査した。液化水素の漏洩試験は過去に幾つか実施されているが、ほとんどが風の影響を受ける屋外で行なわれているため、特に低流量漏洩時の周囲水素濃度の計測等で再現性のある試験が実施できていないのが現状である。そこで、風の影響を受けない屋内の耐爆火災試験設備で試験することにより、気体水素との漏洩挙動比較が可能な基礎データの取得を試みた。

また、液化水素容器特有の現象として、常にボイルオフガスによる水素漏洩の可能性があるが、屋内で試験を実施するためにはボイルオフガスを安全に屋外へ排出する必要がある。さらに、火炎暴

露試験などを実施した後に容器内に残留した液化水素も何らかの方法で安全に排出する必要がある。そこで、これらの液化水素特有の課題に対処した試験装置を導入し試験することにより、周囲水素濃度データを取得するとともに、屋内で液化水素を扱う試験を実施する上で必要な技術を収集した。

2. 試験方法

2.1 液化水素漏洩試験装置

試験は耐爆火災試験設備に液化水素漏洩試験装置を導入し実施した。試験装置は主に以下に示す四つの部分により構成される。試験装置概略図をFig. 1に示す。

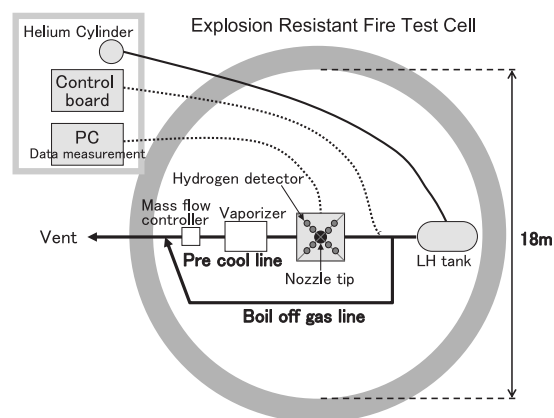


Fig. 1 Schematic of testing diagram

* 1 原稿受理 2007年 7月 4日

* 2 (財)日本自動車研究所 FC・EVセンター

* 3 (元) (財)日本自動車研究所 FC・EVセンター
(現) 岩谷産業(株) 水素エネルギー部

1) 液化水素漏洩部

液化水素容器を高純度ヘリウムガスで加圧することにより、真空断熱配管に設置したノズル孔（漏洩孔模擬）から液化水素を放出させる。

2) 水素濃度計測部

ノズル孔から放出された液化水素または低温気体水素の周囲水素濃度を計測する。

3) 放出管部

液化水素容器からのボイルオフガスおよび配管事前冷却時に利用される水素ガスを、耐爆火災試験設備外に設置した放出管より排出する。

4) データ収録部

水素濃度、温度、圧力等の計測データを収録する。

2.2 試験手順

試験手順を以下に示す。また、Fig. 2に液化水素漏洩部の配管系統図を示す。液化水素容器からのボイルオフガスはボイルオフガスラインを通過して、また、真空断熱配管の事前冷却時に利用される水素ガスはプレクールラインを通過して耐爆火災試験設備外に設置した放出管から排出する構造となっている。また、ノズルからの水素放出方向は上方向としている。

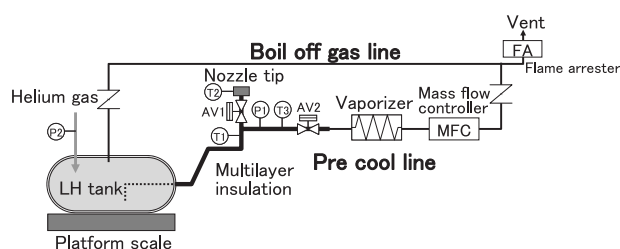


Fig. 2 Flow diagram of hydrogen line system

- 1) 液化水素容器を試験装置に接続し、ヘリウムガスにより装置配管内をパージする。
- 2) 液化水素容器内をヘリウムガスにより加圧する。
- 3) バルブAV2を開け、液化水素を事前冷却ラインに流して真空断熱配管を冷却する。
- 4) 真空断熱配管温度（T1およびT3）をモニタリングし、十分冷却されたことを確認した後、バルブAV2を閉じ、バルブAV1を開けてノズル孔から液化水素を放出させ漏洩試験を開始する。
- 5) 液化水素漏洩量は試験時の液化水素容器の質量変化から求める。

2.3 計測方法

Fig. 3に液化水素漏洩部およびノズル孔と水素濃度センサ設置状況を示す。ノズル孔高さは地面から約1,800mmとなっている。水素濃度センサは高濃度用（0～50vol%）および低濃度用（0～5vol%）の気体熱伝導式を使用し、計測位置によって適宜使い分けた。また、水素濃度センサは架台に固定した金属製パイプ（φ20mm）に設置した。真空断熱配管の内管外側表面とノズル孔の温度測定には白金・コバルト測温抵抗体を使用した。

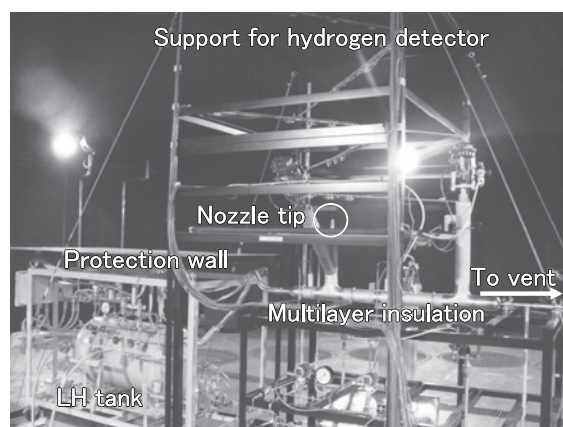


Fig. 3 Part of hydrogen spouting

2.4 試験流量およびノズル形状

液化水素の試験流量は、圧縮水素容器を搭載した車両の衝突時の水素漏れ許容量である11.8g/min（131L/min（Normal））を目標として、容器へのヘリウムガス加圧圧力やノズル径を調節することにより試験した。また、常温気体水素でも液化水素と同様の流量で試験した。

液化水素漏洩時に使用したノズル孔の構造をFig. 4に示す。ノズル孔はブラインドガスケットに穴開け加工して製作した。ノズル孔から大気への放出は内径φ10.2mm、高さ25mmの配管を通り放出される構造となっている。

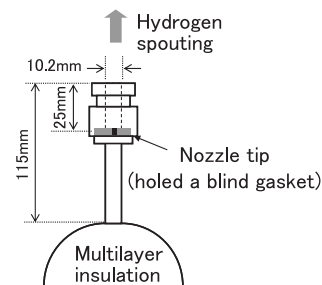


Fig. 4 Nozzle Structure

3. 試験結果

液化水素漏洩時の水素流量は、電子天びんを用いて液化水素容器の質量変化により求めた。また、ノズルは孔径 $\phi 0.5\text{mm}$ を使用した。試験では連続して液化水素を放出させているが、ヘリウムガス加圧圧力や配管温度の変化により放出流量が刻々と変化するため、連続した試験の中から目的とする放出流量に近い時点のデータを抽出し解析した。

常温気体水素漏洩では、基本的に液化水素漏洩時と同一の試験装置を用いたが、水素流量の制御手段としてマスフローコントローラを使用した。また、常温気体水素漏洩用のノズルは、プラグに穴開け加工を行なった孔径 $\phi 1.0$, 4.0 , 10.2mm の3種類を使用した。

水素放出位置を幅 0mm 、高さ 0mm として図示した水素濃度センサ設置位置をTable 1に示す。水素濃度は高濃度用を10個、低濃度用を20個使用し計測した。

Table 1 Hydrogen concentration measurement positions

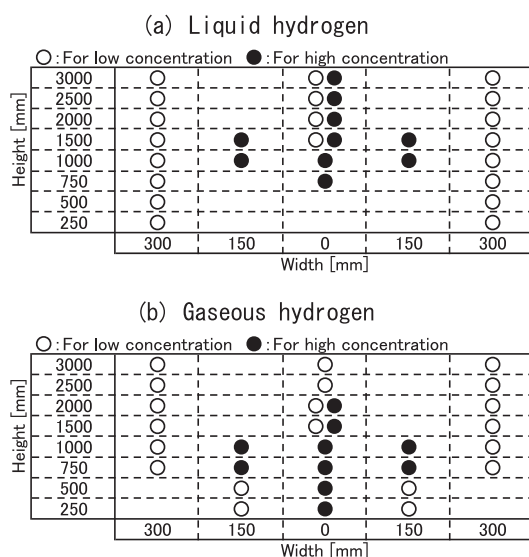


Table 2に試験時の水素流量、水素圧力およびノズル部温度を示す。液化水素漏洩は、放出流量 14.3g/min および 15.7g/min での試験結果を示す。なお、それぞれの放出流量時のノズル部温度は -212°C および -223°C であった。また、常温気体水素は放出流量 13.5g/min での試験結果を比較として示す。

Table 2 Test conditions

	Liquid hydrogen		Gaseous hydrogen		
Nozzle diameter [mm]	0.5		1.0	4.0	10.2
Hydrogen flow rate [g/min]	14.3	15.7	13.5		
Hydrogen pressure [MPaG]	0.44	0.46	0.43	<0.01	
Nozzle temperature [$^\circ\text{C}$]	-212	-223	11	10	10

液化水素漏洩時の放出状況をFig. 5に示す。放出状況は空気中の水分凝縮による水蒸気の発生により確認できる。発生した蒸気雲の最大幅は約 500mm であった。放出時の映像より、ノズル孔から約 70mm まで液化水素状態で放出し、それ以降はガス化している様子が確認された。また、ノズル孔から放出した液化水素は地面に落ちることなくすべて上昇し、蒸気雲の高さは 2m 以上となった。ノズル孔上部の放出孔（ノズル孔から 25mm 上方の内径 $\phi 10.2\text{mm}$ 配管）には固体空気が付着し、液化水素は固体空気の隙間の数箇所から放出している様子が確認された。

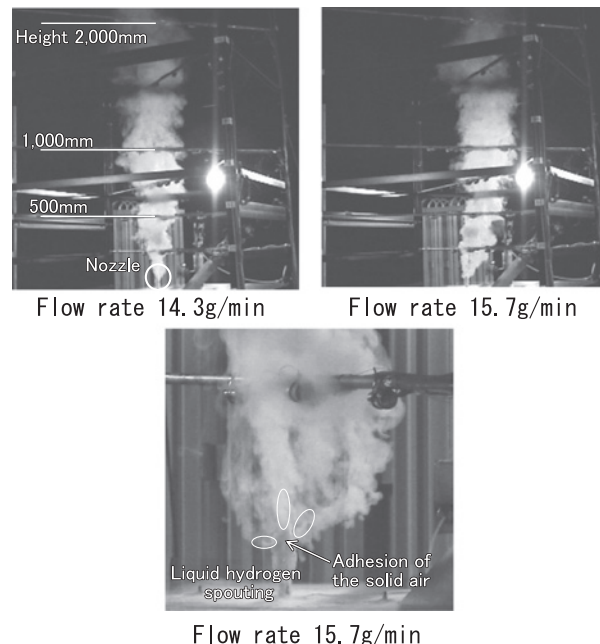


Fig. 5 Liquid hydrogen spouting situation

水素濃度計測結果から求めた高さ 750mm 以上の濃度コンター図をFig. 6に示す。液化水素漏洩時の濃度分布は、固体空気付着の影響により放出方向が数箇所に分散し、左右非対称となっている。なお、濃度コンター図には $2\text{vol}\%$ および $4\text{vol}\%$ の等

高線を同時に記載している。液化水素流量14.3～15.7g/minでは、濃度2vol%範囲の高さは約2,200～2,500mm、幅は約500mmとなった。また、図には無いがノズル孔から鉛直上の高さ250mmの濃度は50vol%前後であったが、水平方向に300mm離れた位置では0.5vol%以下となり、放出された水素は下に溜まることなくすべて上方に放出していることを確認した。

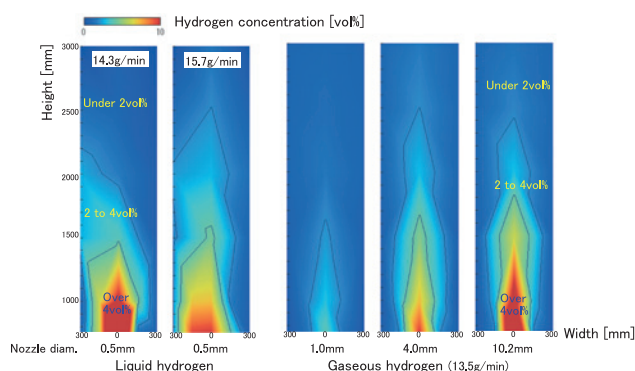


Fig. 6 Contour image of hydrogen concentration

気体水素漏洩では、ノズル径10.2mmでの濃度2vol%範囲の高さは約2,400mm、幅は約440mmとなったが、ノズル径1.0mmでは高さ約1,600mm、幅は約250mmとなり、ノズル径が小さくなるほど流速が増加する影響で水素の拡散が促進され、高濃度範囲は狭くなる傾向を示した。さらに径を小さくしたノズルを用いた液化水素漏洩試験では、ノズル孔から鉛直上の高さで水素濃度の関係を示したFig. 7からもわかるとおり、漏洩部周辺に高濃度範囲が形成されたことから、同一ノズル径で漏洩量一定の液化水素と気体水素の濃度範囲を比較した場合、液化水素の方が漏洩部周辺に可燃混合気形成されやすいことが示唆された。

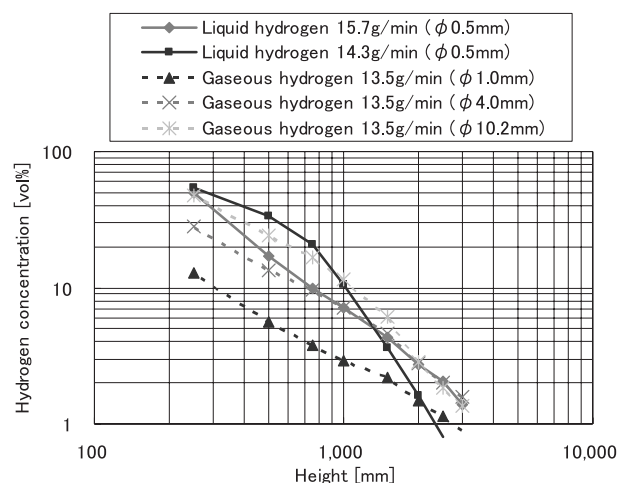


Fig. 7 Hydrogen concentration for vertical axis versus height from nozzle tip

4. まとめ

今回の試験の結果から、流量14.3g/minの液化水素漏洩でも、ノズル放出部近くでは液体として放出することを確認した。また、上方に放出した液化水素は地面に落ちることなくすべて拡散することを確認した。屋内で試験することにより風の影響を受けずに水素濃度を計測することが出来たが、ノズル孔周りに発生する固体空気の影響により、放出方向が定まらず、濃度分布が左右対称とはならないことを確認した。同一ノズル径で液化水素と気体水素漏洩時の濃度範囲を推測し比較した場合、液化水素のほうが漏洩部周辺に可燃混合気形成されやすいことが示唆された。

液化水素容器や液化水素容器搭載車両の研究開発は欧州を中心として継続的に行なわれており、また貯蔵密度などの面で利点があることから、将来の有望な水素貯蔵技術の一つとして挙げられる。そのため、将来的な商用化に備えて液化水素容器搭載車両等の基準化に資する基礎的な安全性データを今後も継続して蓄積することは重要であると考えられる。

なお、本研究は（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による委託研究の中で実施した一部である。