

水素・燃料電池自動車の安全性

三石 洋之

財団法人日本自動車研究所

〒311-4316 茨城県東茨城郡城里町大字小坂字高辺多1328-23

Safety Research on Hydrogen and Fuel Cell Vehicles

Hiroyuki MITSUISHI

Japan Automobile Research Institute

1328-23 Takaheta, Osaka, Shirosato, Ibaraki 311-4316

Fuel cell vehicle is expected as a next-generation car. However, hydrogen is recognized to be dangerous gas. Therefore it is necessary to investigate the hydrogen safety. As a result of the studied on the hydrogen safety, we got the following conclusions. 1) Hydrogen diffuses in the air very fast, and becomes safety mixture soon. 2) Diluted hydrogen mixture is not dangerous as it was said. 3) Hydrogen is not more dangerous than existing conventional gasoline or natural gas fuel.

Keywords: hydrogen diffusion, hydrogen safety, fuel cell, vehicle safety

1. はじめに

地球規模で年々深刻化する温暖化対策として、炭酸ガス（CO₂）排出低減に向けた取り組みが各方面で盛んに進められている。自動車についても例外ではなく、化石燃料を使用する現行の内燃機関自動車に対して、炭酸ガスを排出せず、クリーンなエネルギーの利用が可能な車両の開発が進められている。そのクリーンなエネルギー源として、再生可能な水素の利用を自動車分野でも実現すべく、技術開発が産学官で積極的に進められている。2015年からの普及開始を目指す水素・燃料電池自動車の型式取得に必要な規制は、2005年3月に道路運送車両法ならびに高圧ガス保安法といった関連法規の整備が完了し、更なる合理化検討が進む中で、水素・燃料電池自動車の実証走行が公道を使用して行なわれ [1]、より安全で利便性の高い水素・燃料電池自動車の開発に向けて、例えば航続距離の伸長やコストの面などからも普及に適した車両開発の取り組みが進められている。

このような各方面の取り組みに対して、(財)日本自動車研究所（以下、JARIという）では2000年度から新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDOとい

う）からの委託を受けて、水素・燃料電池自動車の普及に向けた各種基礎データの収集を行うことにより、基準策定やその合理化作業に取り組んできた。

以下では、NEDOからの委託事業として、これまでJARIが行ってきた水素・燃料電池自動車の安全性に関する研究中から、特に水素安全に着目して述べる。

2. 水素ガスの安全性

水素については、義務教育の過程で水の電気分解と発生した水素への着火実験により、爆発性の高い可燃性ガスでことが教育されており、幼い頃から誰もが水素は危険なガスであると認識している。さらに水素への着火が直接の事故原因でないことが近年になって報告されているものの、未だに飛行船ヒンデンブルグ号の爆発事故も水素によるものとして一般には認識されており、水素が非常に危険なガスであるという印象を決定的なものにしている。

そのような環境の中で、日常生活に身近な存在である自動車の水素を搭載するためには、技術開発の他に、水素に対する一般認識についても事実をきちんと確認し、

水素の社会受容性を高めていく必要がある。

2.1 水素・燃料電池自動車安全性評価試験施設

水素の安全性を調査するために、NEDO事業を通してJARIでは2003年度に水素・燃料電池自動車安全性評価試験施設を完成させることにより [2] (図1参照。以下、Hy-SEFという)、それまでは海外の試験機関に頼っていたデータ収集活動が、国内で安全、クリーン且つ再現性の高い試験として実施できるようになった。

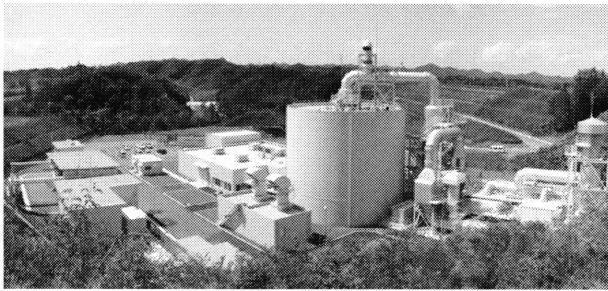


図1. Hy-SEF全景

Hy-SEFは、自動車用圧縮水素容器を搭載した水素・燃料電池自動車の車両火災試験が、水素容器が破裂するような事象が発生した場合でも安全に実施できる屋内型の耐爆火災試験設備を最大の特徴としている。その周囲には世界最高性能を有する設備群として、100MPa級の高圧水素が使用できる水素充填試験設備、液化水素充填設備、さらには高圧容器の安全性評価試験用として一般的に行われている液体の圧力を使用した破裂・疲労試験設備を配置している。

以下では、Hy-SEFの試験・解析技術を用いて行った研究活動の中から、まずは、水素ガスの拡散性、着火性について述べる。

2.2 水素ガスの拡散性および着火性

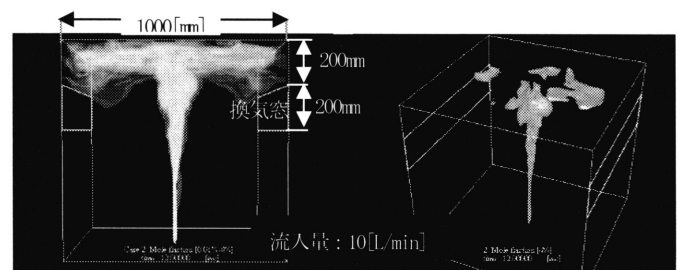
水素は可燃範囲が広く、着火エネルギーが小さいことから、漏れい時には着火・爆発といった事態が想定される。そこで、1000[mm]四方の空間の下部から10[L/min]の流量で水素ガスを上方に向けて流入させる水素拡散シミュレーションを行い、水素の拡散性や濃度分布を調査した。解析結果を図2に、検証試験の結果を図3にそれぞれ示す。

空間内に流入した水素ガスは、図2(a)に示すようにまっすぐ上方へ上り、天井部で水平方向に拡散する。水素濃度は空間内で不均一な状態となり、場所により濃度が異なる。さらに、可燃下限値である濃度4[%]の領域に着目すると、(b)に示すように水素流入部から上方に向けた

一部の領域に限定される。

検証試験は、水素拡散シミュレーションでモデル化した一辺1000[mm]の立方体の壁面をビニール板で覆った箱型の試験装置で行った。試験条件は、試験装置の底面中央部から10[L/min]の流量で試験装置内に流入させ、平均濃度が4[%]になる計40[L]の水素を流入させるケースと、平均濃度が8[%]になる計80[L]の水素を流入させるケースとした。

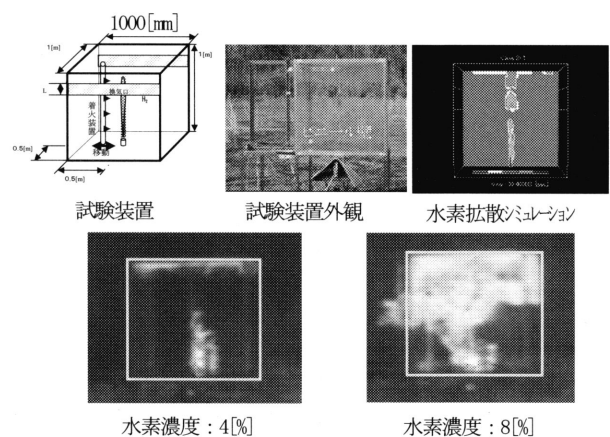
点火は、試験装置の上面中央部に取り付けた点火装置の電気火花により行った。その結果、水素拡散シミュレーションと同一条件となる40[L]の水素を流入させるケースでは、赤外線熱画像装置の映像から、水素拡散シミュレーションが示す可燃領域に着火が観察された。しかしながら、強度の低い壁面のビニール板には着火による損傷はみられなかった。一方、平均濃度が8[%]になる80[L]の水素を流入させるケースでは、壁面のビニール板が破損し、火炎が試験装置の外部に達した。



(a)濃度範囲：0.01-4[%]

(b)濃度範囲：4[%]

図2. 水素ガスの拡散性



水素濃度：4[%]

水素濃度：8[%]

図3. 水素漏れい引火試験

以上の結果から、今回の試験条件の範囲内で、水素拡散シミュレーションの有効性が確認でき、閉鎖された空間内に水素が漏れ出した場合でも、水素は速やかに拡散

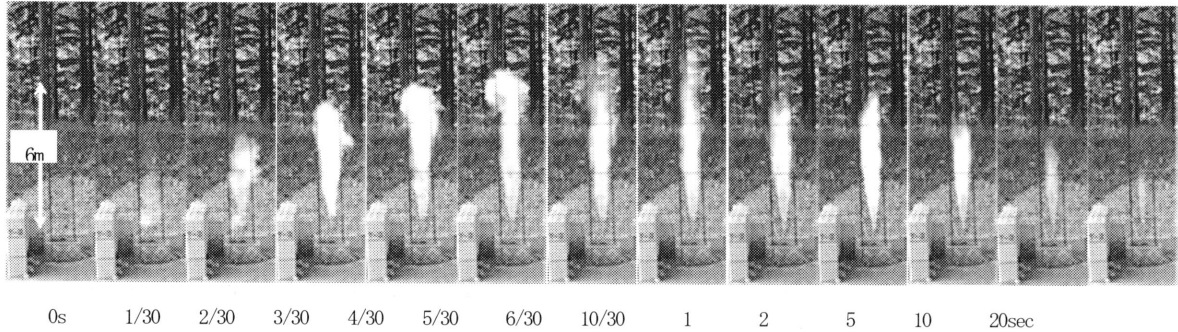


図4. 容器安全弁からの放出水素火炎（上方向への放出）

し濃度が低下すること、漏えいした水素の濃度分布は不均一で、水素漏えい部から上方に向けて着火可能性のある高濃度領域が存在すること、平均濃度4%相当分の水素に火がついても、拡散により生じる濃度分布などから「火が着けば大爆発になる」といった状況は生じないことがわかった。

次に、水素火炎について調査した結果を図4に示す[3]。水素は無臭で、さらに漏れ出した水素に火がついても火炎は透明で目視で確認できないため、水素漏洩と着火をどのように確認するかが水素の利用拡大に向けた安全上の課題の一つとなる。なお、水素漏洩の検知手段として付臭剤の研究が進められているが、燃料電池に悪影響を与えず乗員が危険を察知できるような不快な臭気をもった付臭剤は現在のところ見出せていないため、現在は、水素センサーによる検知を基準では要求している。

試験は、水素を充てんした35MPa自動車用圧縮水素容器の安全弁を作動させ、放出した水素に火を着け、火炎を観察する方法で行った。その結果、図4のように水素火炎は肉眼でも観察できることがわかった。なお、赤外線熱画像装置で火炎の領域を確認したところ、目視できる領域と同じであった。

以上の結果から、例えば水素を燃料とするロケットエンジンの炎は透明で見えないが、自動車用圧縮水素容器の安全弁が作動し、放出した水素が着火した場合に限っては、水素火炎は肉眼で確認でき、例えば火災現場で目視による避難領域の確保が可能であることがわかった。

前述の水素の大量漏洩に対して、微小漏洩時の着火状況に関する調査結果を次に述べる。水素・燃料電池自動車は、水素ステーションで現行車両と同様に燃料補給を受ける。水素は、水素ステーションのディスペンサーに取り付けられた充てんノズルと車両のレセクタブルを接続し、配管を経由して水素貯蔵タンクに充てんされ、走行時にはそのタンクから水素が供給される。そのため、

レセクタブル、減圧弁、継ぎ手類からの微小な水素漏えいに対する安全性についても調査する必要がある。以下では、レセクタブルの逆止弁などから1時間当たり250[cc]程度の水素漏えいが発生した場合を想定し、漏えいした水素が着火した場合の炎の持続状況などについて述べる[4]。

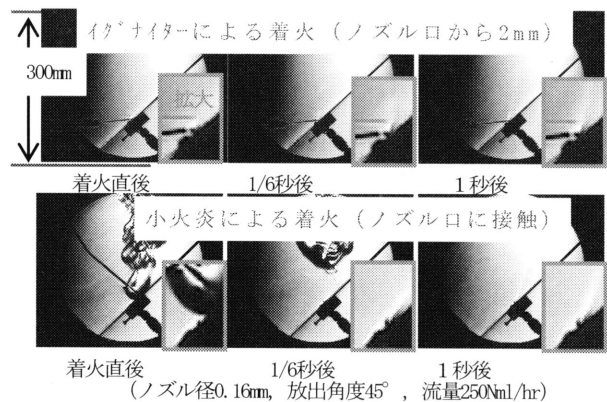


図5. 水素着火試験（シュリーレン画像）

試験は、口径0.16[mm]のノズルから250[cc/h]の流量で水素を放出し、電気火花や小規模の火炎で着火させる方法で行い、炎の持続状況について調査した。

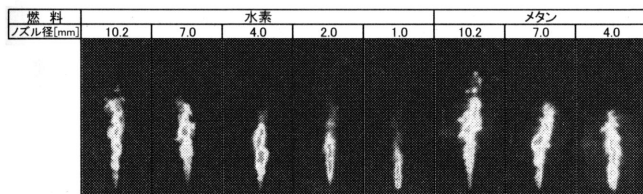
その結果、図5に示すように、漏えい水素に着火源を接触させても、着火しないか、着火してもすぐに消炎することがわかり、微小漏えいに対する危険性は高くないことがわかった。

次に、現行の自動車の燃料であるガソリンや天然ガス（メタン）と比較することにより、水素火炎の危険性を調査した結果の一部を述べる。

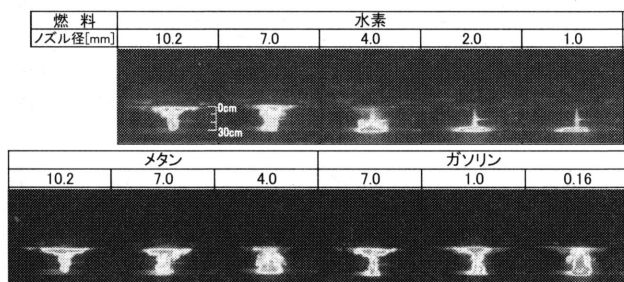
現行のガソリン車では、衝突試験の際の燃料漏れの許容量が30[g/min]以下であることが求められる。これに対し、天然ガス自動車でも燃料漏れ量が30[g/min]のガソリンと等価発熱量の40[NL/min]以下となることが求められており、水素についても同様の考え方から31[NL/min]

以下の漏れ量になることが衝突試験法で規定されている。

そこで、前述の漏えい量でガソリン、メタン、水素の火炎の大きさを調査し、比較した結果を図6に示す[5]。



(a) 上方への放出火炎比較 (水素、メタン)



(b) 下方への放出火炎

図6. 等価発熱量における火炎規模の比較

等価発熱量のメタンと水素の上向きの放出火炎を比較すると、図6(a)に示すように、同一ノズル径からメタンと水素を放出して着火させた際の火炎の長さはほぼ同一になった。また、図6(b)に示すように、液体燃料であるガソリンとも比較するため、メタン、水素、ガソリンを下方へ放出させた場合の火炎の大きさもほぼ同一であることがわかった。

3. 水素・燃料電池自動車の安全性

3.1 水素漏えいに対する安全性

漏えいした水素が車両の一部に滞留して着火した際の周辺被害などに関する調査結果[6]について述べる。

水素漏えい・着火試験は、図7に示すセダン型 (FR車：前部エンジン・後輪駆動) の現行ガソリン車を供試車両として、車体下部のホイールベース中央部から水素を一定流量 (5, 20, 50, 100, 131 NL/min) で10分間放出し、エンジンルーム内の水素の分布状況を調査するとともに、エンジンフード中央下100[mm]の位置に取り付けた点火装置により、水素に着火させる方法で行った。

主な計測項目は、エンジンルーム内の水素濃度および圧力 (図8参照)、車両周辺に音圧計、衝撃圧力計、熱

流束計とした (図9参照)。また、着火状況を調査するため、赤外線熱画像装置により火炎の状態についても観察した。

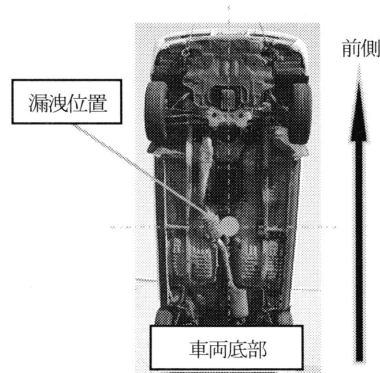


図7. 車両下部の水素漏えい位置



図8. 車両の計測状況

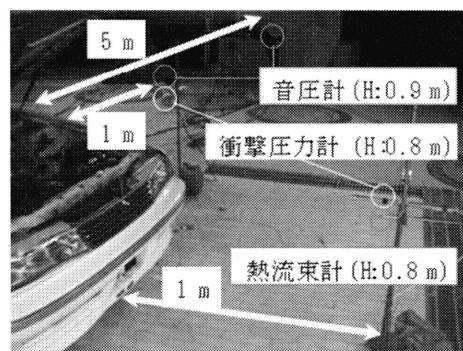


図9. 車両周辺の計測状況

水素漏えい流量131[NL/min]におけるエンジンルーム内の水素濃度の計測結果を図10に示す。

水素濃度については、試験開始約100秒後までは増加傾向にあるが、それ以降、水素放出を停止する600秒までは定常濃度になっている。水素濃度分布については、エンジンルーム上部に相当する点火装置近傍のエンジンフード中央下が高くなっている。一方、エンジンルーム下部に相当するラジエーター下部の水素濃度は非常に低くなっており、漏れ出した水素が上方に滞留しやすい

水素拡散シミュレーションの結果と一致している。

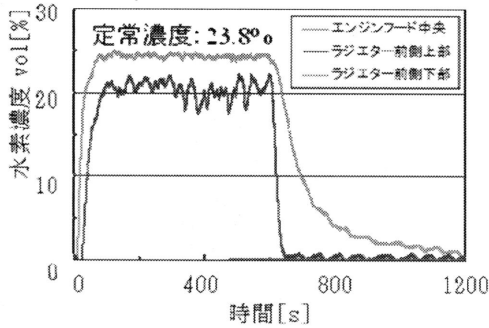
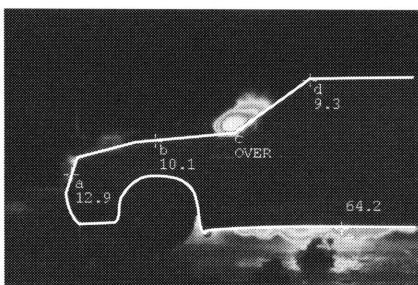


図10. エンジンルーム内の水素濃度

エンジンフード中央部の水素濃度23.8[%]は、空気中で
の爆ごう範囲に入っており、着火させた場合には車両を
破壊するような状態となることが予想される。そこで、
600秒後に水素放出を停止させ、同時に電気火花により
着火させた際の、赤外線熱画像装置による観察結果を図
11に示す。

赤外線熱画像装置による映像には、フロントガラス近
傍と車両下部に水素火炎による高温領域が撮影されて
いる。しかしながら、水素漏えい量131[NL/min]以下の
領域では、水素着火による影響として、例えば爆風圧に
よりエンジンフードが変形する、あるいは吹き飛ばされ
るといった現象は生じなかった。また、周辺への影響に
ついては、熱流束計の計測結果から、輻射熱については
太陽から受ける熱量の1割以下で、衝撃圧力は発生せず、
音圧についても鼓膜が損傷するようなレベルにはなかった。



(水素漏えい流量：131NL/min)

図11. 着火試験状況 (赤外線熱画像)

以上の結果から、衝突試験で規定する水素漏れ許容量
131[NL/min]が車両周辺に対しても安全であることが確
認できた。

3.2 車両火災試験

水素・燃料電池自動車着火試験の際には、燃料
タンクである自動車用圧縮水素容器の破裂を防止する

ために、容器の安全弁が約110℃で作動し、容器内に残
っている水素を車外に放出する。その際、水素は火炎中
に放出され、着火することになる。そこで、車両火災試
験を行い、現行のガソリン車や天然ガス自動車と水素自
動車 (35MPa容器をトランクに2本搭載) の火災試験の
最大火災規模 (図12参照) や熱流束 (図13参照) を比較
した[8]。



(a) ガソリン車



(b) 水素自動車 (水素放出方向：上向き)



(c) 水素自動車 (水素放出方向：下向き)



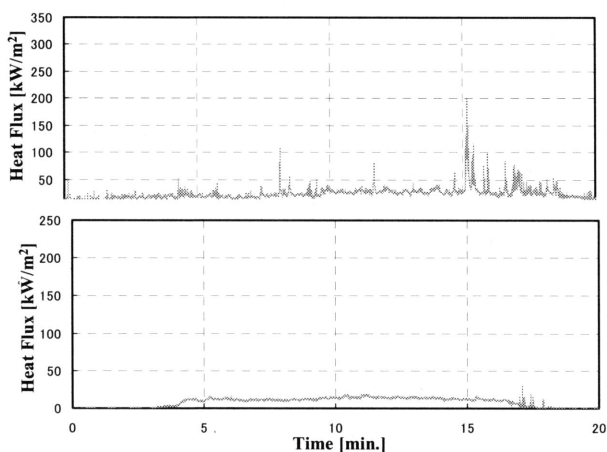
(d) 天然ガス自動車 (ガス放出方向：下向き)

図12. 最大火炎の比較

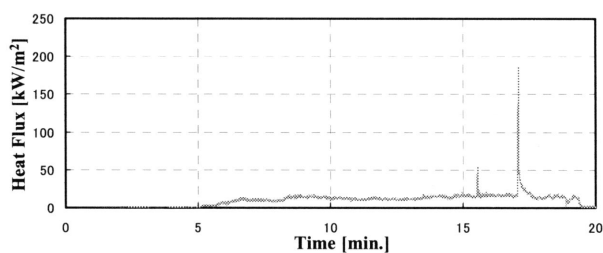
ガソリン車の場合、ガソリンタンクから漏れて気化し
たガソリンが着火・燃焼を長時間にわたって繰り返し、
同規模の火災が継続する。一方、ガス燃料の水素および
天然ガス自動車の場合、容器 (燃料タンク) に取り付け
られた安全弁が作動温度 (約110℃) に達した段階で容
器内のガスが外部に放出されるため、安全弁作動時の火
災規模が最大となる。水素自動車の火災規模 (c) と天
然ガス自動車の火災規模 (d) を比較すると、水素の燃

焼速度が速いため、水素自動車の火災規模は天然ガス自動車より小さくなっている。次に周辺への影響を熱流束により比較する。

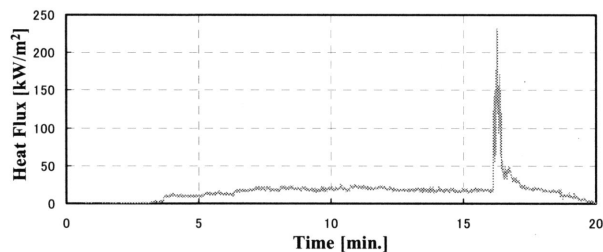
ガソリン車の熱流束は、燃料タンクから漏れ出したガソリンへの着火が長時間にわたって繰り返され、断続的に高い状態が生じる。一方、水素自動車は (b) に示す上方放出の場合、約17分経過後の安全弁作動時に熱流束の上昇がみられる。(c) の下方放出では、安全弁作動時に熱流束計が火炎の中に入ってしまう一瞬高い熱流束を示すが、天然ガス自動車より低い値となっている。このことから、車両火災時の周辺被害を熱流速で比較すると、水素自動車はガソリン車や天然ガス自動車と大差は無いと考えられる。



(b) 水素自動車 (水素放出方向：上向き)



(c) 水素自動車 (水素放出方向：下向き)



(d) 天然ガス自動車 (ガス放出方向：下向き)

図13. 熱流束の比較

4. おわりに

JARIが実施してきた水素そのものの性質や水素・燃料電池自動車の安全性評価試験から、自動車用燃料としての水素の安全性・危険性については、以下のように考えている。

1. 水素は空気中で速やかに拡散し可燃下限以下に希釈される。
2. 車載容器の安全弁からの放出水素火炎は見える。
3. 希薄な水素（濃度10%程度以下）はこれまで言われてきたほど危険ではなく、天然ガスなど他の可燃性ガスと同程度の危険性といえる。

水素・燃料電池自動車が普及するためには、適正な安全性を確保しつつコスト削減と利便性の向上をはかる必要がある。現在、水素・燃料電池自動車として、より適正な安全性を見極めるために、さらに過酷な状況下での試験データ取得を進めている。

参考文献

1. [岩瀬孝邦, 燃料電池自動車実証研究の意義と活動, 自動車研究第30巻 第7号, 2008.7]
2. Shogo Watanabe et al., The New Facility for Hydrogen and Fuel Cell Vehicle Safety Evaluation, 2005 ICHS Proceeding
3. Yosuke Tamura et al., The Fire Tests with High-Pressure Hydrogen Gas Cylinders for Evaluating the Safety of Fuel-cell Vehicles, 2004 SAE Word Congress Proceeding (2004-01-1013)
4. Masashi Takahashi et al., Investigation of the Allowable Flow Rate of Hydrogen Leakage on Receptacle, 2008 SAE Word Congress Proceeding
5. Masashi Takahashi et al., Investigation of the Allowable Amount of Hydrogen Leakage upon Collision, 2005 SAE World Congress Proceeding (2005-01-1885)
6. Yasumasa Maeda et al., Test of Vehicle Ignition Due to Hydrogen Gas Leakage, Jinji Suzuki, Yohsuke Tamura, Shogo Watanabe, and Masaru Takabayashi, Kenji Sato, Fire Safety Evaluation of a Vehicle Equipped with Hydrogen Fuel Cylinders: Comparison with Gasoline and CNG Vehicles, 2006 SAE World Congress Proceeding (2006-01-0129)