

講座 爆発しやすい水素を安全に扱い水素自動車を走らせる取り組み

自動車火災試験や着火試験結果からみた水素の安全性について

YOHISUKE Tamura

田村陽介

日本自動車研究所 FC・EV 研究部 主任研究員

水素自動車の一部の安全対策を取り混ぜながら、(財)日本自動車研究所で実施した水素自動車の火災時の振る舞いやガソリン車火災との比較および水素漏洩着火試験の結果を紹介し、危険なガスとイメージされる水素ガスを見直してみる。たとえば、水素火災は可視できないため、消火活動に支障を来すとされるが、実際の火災時には水素火災を可視することができる。また、水素は少量でも漏れたら危険だというイメージがあるが、実験の結果、自動車の構造上、容易に水素を溜めることができないことや、エンジンルームコンパートメント内では、濃度 20%程度で着火させても一瞬燃えるだけで、損傷がないことなどを紹介し、水素の安全性について見直してみる。

1 はじめに

地球温暖化の原因とされる温室効果ガスなどの総排出量を抑制するために、水素を利用する燃料電池自動車が着目されている。しかし、水素は爆発性の高いガスであると多くの人が認識されている中で、燃料として誰もが安全かつ安心して使用できるようになるには、安全に対する技術対策とともに、水素に対する正しい認識が必要である。このような背景により、水素自動車の使用環境下で起こり得る事象の把握や、水素を安全に利用するための技術開発に向けてデータを収集するために、(財)日本自動車研究所では、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて、2000 年、水素・燃料電池自動車安全性評価試験施設 (Hy-SEF) を開発した (図 1 参照)。



図 1 水素・燃料電池自動車安全性評価試験施設

この施設は、耐爆火災試験設備、圧縮水素試験設備、液化水素試験設備、水加圧試験設備で構成されており、水素・燃料電池自動車の総合的な安全性を評価することができる。特に、この中の耐爆火災試験設備は、水素容器が破裂しても安全な強度を持った屋内の火災試験設備であり、かつ火

災試験で発生した排煙も環境に配慮した処理ができる装置も設けている。これにより、天候や自然環境の影響を受けずに、より精度の高いデータを得ることができるようになった。本報では、これらの設備などを利用し、当研究所が実施した水素自動車の火災や爆発に関わる試験結果を、水素自動車の一部の安全対策を取り混ぜながら紹介し、危険な燃料としてイメージされる水素の安全性を見直してみる。

2 水素自動車の火災時の振る舞い²⁾

現状のほとんどの水素燃料電池自動車は、燃料タンクに圧縮した水素を貯蔵する方法が採用されている。圧縮水素燃料タンクは火災で炙られ続けると、タンク内のガスが膨張して圧力が増大し、かつタンク自体の強度が劣化するため、いずれ破裂してしまう。このような破裂を防ぐために、タンクには安全弁が装着される。安全弁は、タンクが過熱されていることを検知し、タンク内のガスを放出させる安全装置である。安全弁が火災時において確実に作動することを確認するため、安全弁が装着された容器を火炎で炙る試験がある¹⁾ (図 2 参照)。



図 2 圧縮水素燃料タンクの火炎暴露試験

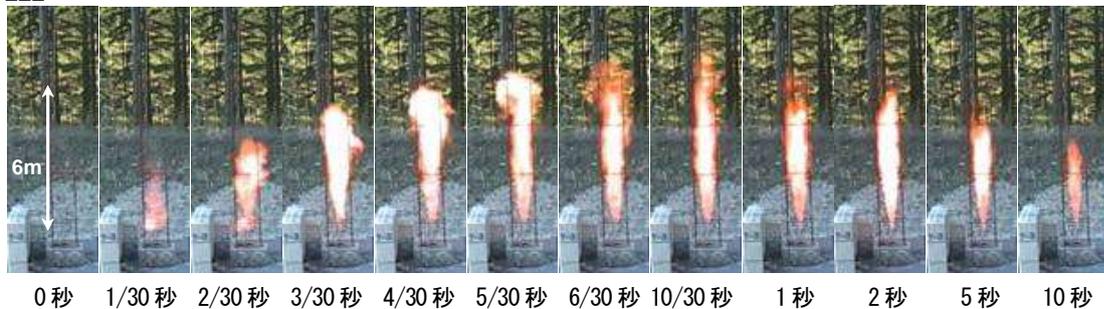


図3 35MPa 水素タンクから水素ガス放出させた場合の水素火炎

この試験にパスした容器だけを水素自動車に搭載することができる。しかし、火災時に安全弁が作動すると、安全弁の放出孔から水素ガスが放出される。図3は、圧力35MPaのタンクから水素ガスを放出した場合の水素火炎の状況である。水素火炎は最大10m程度の高さになるが、他のガスと比べて密度や粘性が小さいので、数十秒程度でガスの放出が終わり、火炎規模が小さくなる²⁾。一方、水素は、燃料自体に炭素を持っていないため、火炎は黄色輝炎が発生しない。そのため、プロパンやメタンガスなどの炭化水素系の拡散火炎に比べ、極めて可視化が困難である。しかし、先の写真をみると、水素火炎は可視化できる。これは、空気中に存在するNaなどの微量な化学成分や埃などが水素火炎の熱によって反応したためである³⁾。

図4には、車両火災によって、安全弁が作動した時の状況を示す。なお、水素の放出方向は、乗用車型の燃料電池自動車でも多く採用されている車底部から地面に向けている。



図4 車両に搭載した燃料タンクの安全弁作動時の状況

これを見ても、安全弁の作動時には、車両底部の全面に及ぶ範囲で水素火炎は広がるが、数十秒後には火炎が小さくなっている。また、車両の内装品や外装品によって生成された煤が水素火炎により燃焼し、水素火炎の存在が可視できる。

一般に、水素は炎が可視できないため、消火活動に支障をきたすとされるが、実規模レベルでの火災の状況では、

純粋な水素だけが燃えることはほとんどないため、このような問題はあまり心配しなくても良いといえる。

3 現行車火災との比較⁴⁾

水素自動車のみならず天然ガス(CNG)車も安全弁が装着されるため、火災時には噴出火炎が形成される。しかし、ガソリン車には、火災時に燃料を放出させるような構造はない。そこで、火災時の水素自動車は現行車に比べて危険であるかどうかを比較した。

図5,6には、それぞれ水素およびCNG車の火炎が最もピークとなる安全弁作動直後の火災状況を、図7にはガソリン燃料タンクに火炎が移行した時の状況を示す。



図5 水素容器搭載車の安全弁作動時の状況



図6 CNG車の安全弁作動時の状況



図7 ガソリンタンクに火炎が移行した時の状況

水素とCNGの火炎規模を比較すると、CNGの方が火炎の拡がり大きく、ガスの放出終了までの時間も長い。さらに、車両周囲の可燃物の損傷もCNGの方が広範囲に

及ぶ。一方、ガソリン車は火勢が増している時間帯が長く、火炎の拡がりも大きい。これを、周囲の可燃物や人への熱的危害を評価する際に用いられる火災車両周囲の熱流束（車両側面 1m、高さ 1.2m 位置）で評価すると、図 8～10 に示すようになる。

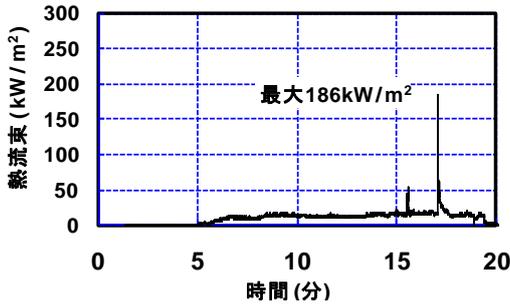


図 8 水素自動車周囲の熱流束

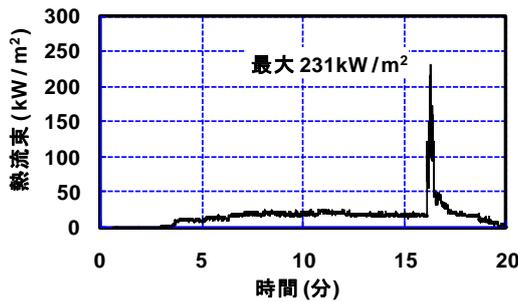


図 9 CNG 車周囲の熱流束

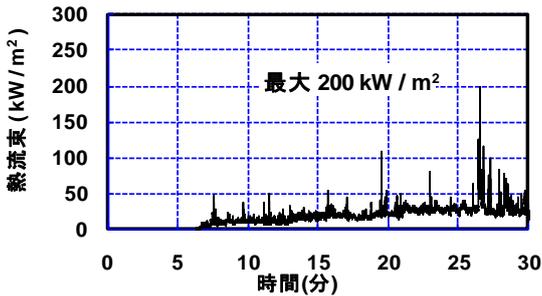


図 10 ガソリン車周囲の熱流束

水素自動車の場合の最大熱流束は、安全弁が作動した直後の 186kW/m²である。CNG 車の場合も安全弁が作動した直後の 231kW/m²であり、水素よりも CNG の方が熱流束が高い。ガソリン車の場合、燃料タンクに火が回った時に発生した 200kW/m²が最大であり、その値は水素よりも高く、かつ水素や CNG 車に比べて、高い熱流束が継続する時間帯が長い。その他、損傷程度なども比較しても、水素自動車は CNG 車やガソリン車に比べて極めて危険な状況には至っておらず、現行の自動車と同等レベルであることが言える。

4 水素の漏洩・着火試験⁵⁾⁶⁾

水素は漏れやすく、最小点火エネルギーが小さく、燃焼限界が広いことから、容易に爆発する危険なガスであると認識されている。そこで、実際に車両を用いて水素を漏洩・着火させた場合、どのような事象が起こるのかを調べた。

水素自動車は、我が国の基準により、燃料タンクやガス配管などの燃料系統は客室やトランクルームなどの換気が十分にされない場所には設置してはいけない⁷⁾。そのため、ほとんどの車両では、水素燃料系統は客室やトランクルームと隔離された車底部に設置される。図 11 は、車底部から水素を漏洩させた時のエンジンコンパートメント内 3 点を計測した場合の水素濃度を示す。なお、この時の水素漏洩量は、我が国の道路運送車両の保安基準に係る技術基準の別添 10「衝突時等における燃料漏れ防止の技術基準」により規定される最大漏れ量の 131NL/min とした。

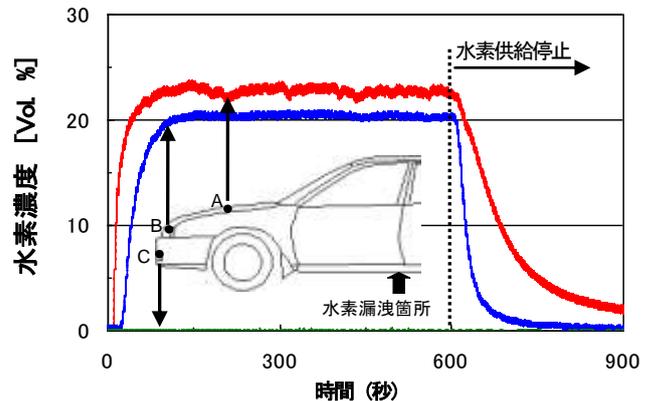


図 11 水素漏洩時のエンジンコンパートメント内の水素濃度

水素は軽いため、車底部から漏らした水素は車底部に沿ってエンジンコンパートメント内へ侵入する。エンジンフードの中心位置に相当する A 点の水素濃度は最大 24% であるが、これ以上、水素を漏らし続けても、水素は溜まらない。600 秒後、水素の供給を停止すると、水素は拡散し、その 200 秒後には、最小可燃範囲である 4% 以下になる。このように、エンジンコンパートメント程度の密閉性であれば、水素は容易に拡散してしまう。次に、この同条件で、エンジンフード中心部が 24% と一定になった時点で、水素の漏洩を停止した直後にエンジンフード中心部で電気火花によって着火させた。図 12 は、赤外線熱画像による火炎が最大となる瞬間を示す。

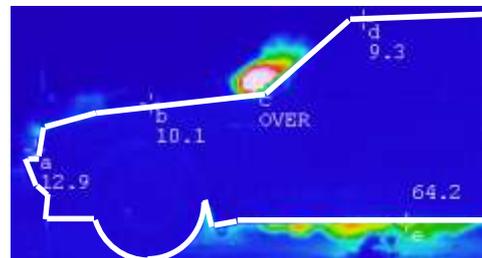


図 12 赤外線熱画像による火炎が最大となる瞬間

着火した瞬間、エンジンフードとフロントガラスの隙間から火炎が噴出するが、ただちに消炎するため、フロントガラスなどの車両の部品はほとんど温度上昇しない。また、エンジンコンパートメント内にあるプラスチック部品やビニールテープなどは着火や熔融もしない⁸⁾。そこで、さら

に水素漏洩量を 1000NL/min に増して着火させた。すると、漏洩量を変えても、エンジンフード内の最大の水素濃度は約 20%程度とほとんど変わらないが、その濃度を持った領域が広がるため、爆発時の威力が増し、エンジンフードの一部が変形した。しかし、この状況でも、車両周囲の音圧レベル、爆風および熱流束を計測しても、車両周囲の人に対しては重大な危害を加えるレベルではない⁶⁾。

そこで、危険な状態とはどの程度なのかを調べるために、あえて、より密閉された空間である客室内にて水素が漏洩して着火した場合にどうなるのかを調べた。水素は客室中央部の床から天井に向けて漏洩させた。点火は、客室中央の天井に電気火花によって行った。また、車両の窓は全閉にし、空調は入れていない。

天井部の水素濃度が 12%になるまで水素を供給(水素供給量 10L/min×15 分=150L)して点火させた場合、点火したかどうか判定ができないほど、ほとんど損傷がなく、かつ燃えた目安として天井部に設置した1枚のティシュペーパーでさえも燃えなかった。同様に、水素濃度が 22%になるまで供給(10L/min×30 分=300L)して点火させると、前面ガラスの一部が吹き飛び、かつ天井部に設置した1枚のティシュペーパーは燃えた。しかし、シート生地などの自動車内装材は燃えなかった(図 13 参照)。



図 13 水素濃度 22%で着火させた場合の状況

次に、天井部の水素濃度が 60%になるまで水素を供給した。その結果、この濃度に到達するまでに必要な水素は 3.350L (=50L/min×18 分+75L/min×10 分+100L/min×17 分)であった。ここで、なぜ、一定の流量で水素を供給していないかという点、水素濃度を高めようとしても、容易に水素を溜めることができなかったためである。また、水素の供給量をみても、車室内の容積が 3m³程度であるため、その容積に対して約 100%以上が必要であった。このように、水素は拡散性が良いため、車室内程度の密閉性でも、高濃度の水素を溜めることは容易ではない。

図 14 に、天井部の水素濃度が 60%で点火させた時の状況を示す。天井部の水素濃度が 12%や 22%で点火させた場合と状況が異なり、車両は原型留めないほど変形し、ルーフ、トランクパネルおよび全てのドアパネルが吹き飛んだ。

このように、水素濃度をある程度まで高めていくと、爆発力は増すが、水素を溜めることは容易ではないこと。かつ、水素燃料自動車はこのような事態にならないように、

積室と燃料系統は隔離され、かつ水素が溜まりやすい部位に水素漏れ検知器が取り付けられており、水素ガスの供給を遮断するなどの安全対策が施されている⁷⁾。



図 14 天井部の水素濃度 60%で着火させた時の状況

5 あとがき

水素自動車の火災試験や着火試験から、火災下では水素火災は可視でき、火災時の周囲影響は現行車と変わらないこと。また、エンジンフード内で水素 20%程度の濃度で着火しても重大な被害をもたらすことはなく、かつ車両構造上、高濃度の水素にすることは困難であることを紹介した。これらの試験結果から、今まで持っていた水素のイメージとは、多少なりとも、ギャップがあることを感じられたのではないかと思う。

しかし、事故は予測できない状態で起こりうる事があるため、水素燃料電池自動車の事故に対応する消防や警察、および一般ドライバーや事故に遭遇する人達に対しても、さまざまな想定の下で起こり得る可能性がある事象と適切な対応を促す知識を提供していくことが、水素を自動車の燃料として社会に受容するために必要であると考え。今後、我々は産業界や消防や警察などの関連機関と連携を取りながら、水素を燃料として使用するための安全情報を発信していく予定である。

参考文献

- 1) 圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準 ,JARIS 001 (2004)
- 2) Yohsuke Tamura, et. al, The Fire Tests With High-Pressure Hydrogen Gas Cylinders for Evaluating the Safety of Fuel-Cell Vehicles, SAE Technical paper 2004-01-1013 (2004)
- 3) Michael R. Swain, Fuel Leak Simulation, Proceedings of 2000 DOE H2 Program (2000)
- 4) 鈴木仁治ら、圧縮水素搭載自動車の火災安全性—ガソリンおよび CNG 車との比較—、平成 22 年度日本火災学会研究発表会概要集 (2010)
- 5) Yasumasa Maeda, et, al., Test of Vehicle Ignition Due to Hydrogen Gas Leakage, SAE Technical paper 2006-01-0126 (2006)
- 6) Yasumasa Maeda, et, al., Diffusion and Ignition Behavior on the Assumption of Hydrogen Leakage from a Hydrogen-Fueled Vehicle, SAE Technical paper 2007-01-0428 (2007)
- 7) 圧縮水素ガスを燃料とする自動車の燃焼装置の技術基準 (2005)

[連絡先] 311-4316 東茨城郡城里町小坂高辺多 1328-23
(勤務先)