

第 111 回定例研究会資料

燃料電池自動車の安全性について

渡辺 正五

財団法人日本自動車研究所

〒305-0822 茨城県つくば市荻間 2530

The Safety of Fuel Cell Vehicles

Shogo Watanabe

Japan Automobile Research Institute

2530 Karima, Tsukuba, Ibaraki, 305-0822

To establish codes and standards for fuel cell vehicle safety, Japan Automobile Research Institute (JARI) has been evaluating safety issue about hydrogen fuel cell vehicles such as hydrogen diffusion property in the air, ignition, flame propagation released from high pressure cylinders and so on. Although hydrogen is thought to be very dangerous gas, these results shows that, in some cases, hydrogen is rather safe compare with existing energy sources such as gasoline and compressed natural gas.

Key Word : hydrogen, fuel cell vehicle, Safety, codes and standards

1. まえがき

燃料電池自動車の実用化、普及に対しては十分な安全性確保のための技術基準の確立が必須である。燃料となる水素は、漏洩しやすく、可燃範囲が広く、わずかなエネルギーでも着火するという特性を有する。また車両貯蔵においては、一充填での走行距離を確保するため、高圧化等による高密度貯蔵が必要となる。これまで水素を自動車用燃料として使用する事例は少なく、技術基準作りに反映させるべく十分な知見が得られていないというのが現状である。

本報では、燃料電池自動車の国内外の安全基準・規格策定の動向と、当研究所における安全性評価試験結果について紹介する。

2. 標準（規格）と基準（規制）

はじめに、よく混同して用いられることがある標準（規格）と基準（規制）について述べる。標準は、製造者や消費者の利便性を考慮し、製品の互換性や共通

化を図るための規格と考えてよい。例えば紙のサイズで A 版、B 版の用紙であったり、ネジのサイズであったりである。規格に沿って製品が作られれば市場での流通性も増すが、必ずしも強制力を持つものではなく、規格外の製品を排除するものではない。一方、基準、規制は、認証制度などにより市場流通における安全性や環境性配慮のため、最低限満足すべき条件を定めるもので、これを満たさない製品は認められず、強制力を持つものである。一般に標準と基準は調和のとれたものであるのが望ましいが、それぞれが制定される時期における背景や制定する機関、規制官庁の見解によって異なることがある。また、国内、海外でも同様に地理的条件や社会的環境の違いによって異なる内容になる場合がある。いずれにしても、国内外の基準・標準が異なることは製造者や消費者にとっての利便性を損なう恐れがあるため、国際調和を図っていく必要がある。

図 1 は、燃料電池自動車に関わる標準と規制についての国内外の取り組み体制を示したものである。標準については経済産業省(METI)の管轄として(財)日

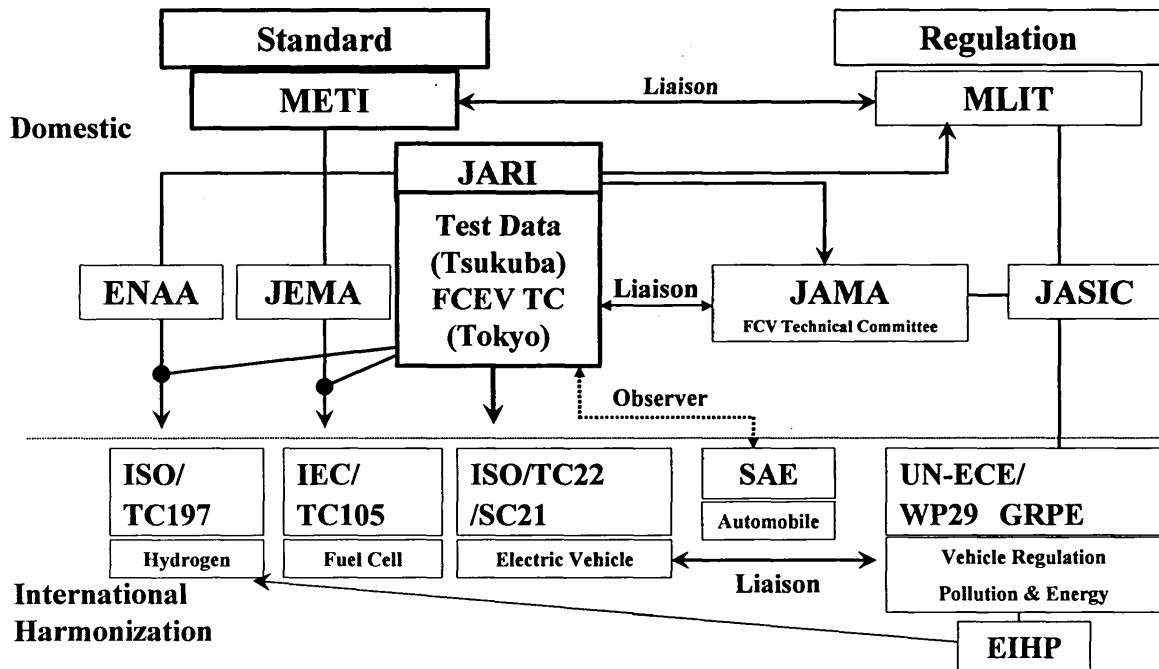


Fig. 1 Structure of Domestic and International Standard and Regulation

METI:経済産業省 MLIT:国土交通省 JARI:日本自動車研究所 ENAA:エンジニアリング振興協会 JEMA:日本電機工業会 JAMA:日本自動車工業会 JASIC:自動車基準認証国際化研究センター SAE: Society of Automotive Engineering(U.S.) UN-ECE: United Nations Economic Commission for Europe WP29:World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations GRPE:Group of Reporters on Pollution and Energy EIHP:European Integrated Hydrogen Project

本自動車研究所(JARI)が ISO/TC22/SC21(TC22 は自動車全般として自動車技術会が担当、そのうち SC21 は電気自動車、ハイブリッド車、燃料電池自動車領域として自動車研究所が担当)、

(財) エンジニアリング振興協会(ENAA)が ISO/TC197(水素技術)、(社) 日本電機工業会(JEMA)が IEC/TC105(燃料電池)、それぞれの国内審議団体を務めている。規制については国土交通省(MLIT)が規制官庁となるが、国際的な自動車基準については、自動車基準認証国際化研究センター(JASIC)が自動車基準の国際調和フォーラム(WP29)の環境・エネルギーグループ(GRPE)に対する日本窓口を担当している。

(社) 日本自動車工業会(JAMA)は標準、規制の直接的な団体ではないが、JASIC のメンバーとして GRPE に参加することがある。このほかの規制としては消防法(総務省消防庁)、高圧ガス保安法(経済産業省)、建築基準法(国土交通省)などがあるが、本図からは割愛している。海外では米国自動車技術会(SAE)が燃料電池自動車の米国規格を独自に策定しており、日本との規格整合を図るため SAE-JARI が

相互に規格策定情報を交換できるよう会議への参加を認める覚書を交わしている。また欧州では欧州統合水素プロジェクト(EIHP)が欧州統合基準を策定しており、欧州基準の国際基準化を提案しており、GRPE での議論が進められている。

3. 国内での規制見直し⁽¹⁾

国内では 2002 年 10 月に「燃料電池の実用化に向けた包括的な規制の再点検の実施」が内閣官房に設置された「燃料電池実用化に関する関係省庁連絡会議」の検討結果として発表され、燃料電池の初期段階の普及が円滑に進むよう 2005 年を目途に安全性の確保を前提とした規制の再点検を進めることとなった。対象は燃料電池自動車、水素供給インフラ、および家庭用燃料電池であり 6 法律 28 項目が含まれる。このうち燃料電池自動車に関わるものとしては、道路運送車両法、道路法、高圧ガス保安法、消防法があげられている。燃料電池自動車の水底トンネル等の通行、地下駐車場等への進入については道路法、消防法が関連する

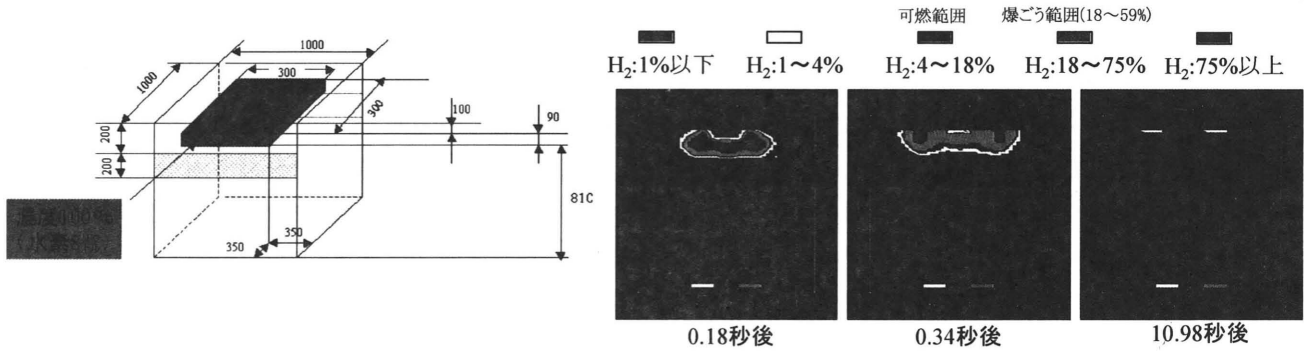


Fig.2 Computational Simulation of Hydrogen Diffusion in a Box with Ventilation Windows

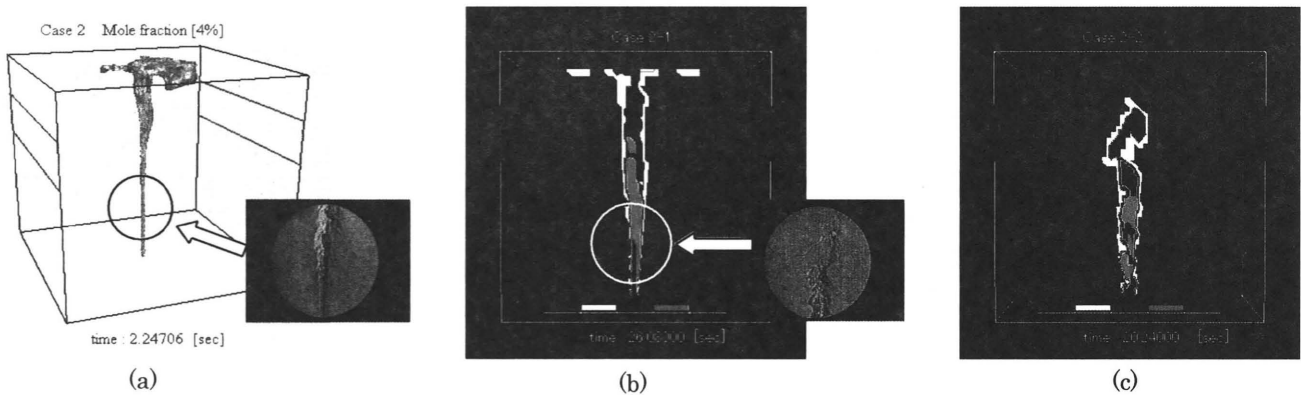


Fig.3 Computational Simulation and Schlieren Method Observation of Released Hydrogen at 10L/min. Flow Rate. (a)Nozzle Size 7x7mm(3.4m/s), (b) 29x29mm(0.2m/s), (c)41x41mm(0.1m/s)

が、いずれも燃料電池自動車の通行、進入については問題がないことが確認されている。一方、高圧ガス保安法における水素燃料用容器の例示基準作成や水素燃料容器用バルブの耐圧試験基準の見直し、道路運送車両法における車両適合基準策定による型式認定制度の整備、消防法における駐車場の消火設備の基準検討は2004年度までに規制官庁側等が技術基準の整備、適合性評価等の必要な措置をとることとなっている。

4. 水素・燃料電池自動車の安全性評価試験

当研究所では、水素燃料電池自動車の標準化、技術基準作りに反映させるため、各種の試験調査を行っている。光学観察やコンピュータシミュレーションによる漏洩水素の空気中での拡散挙動の可視化や、漏洩水素の着火、燃焼特性評価を行っている。また、高圧水素容器を搭載した車両の火災事故を想定し、安全弁から放出される水素火炎の範囲、放出時間、周辺への影響を評価し、異常時における安全性確保についての知見を蓄積している。

4.1. 水素の拡散挙動

水素は空気に比べ非常に軽い気体であり、また空気中での拡散係数も大きいことが知られているが、その挙動についてはあまり調べられてはいない。そこでコンピュータによる水素拡散シミュレーションとシュリーレン撮影による光学的実験観察により、水素の空気中での拡散挙動を調査した。図2は、各辺1mの立方体の箱の中で濃度100%の板状(300x300x90mm=8.1L)の水素ガスが解放された時の挙動をシミュレーション計算した結果である。立方体の箱には上面から200mm下方に幅200mmの換気窓が左右両面に設置されている。解放後、濃混合気の水素は上方に移動し、0.18秒後には水素雲の一部が天井に接し、0.34秒後に天井のほぼ全面に広がる。約3.5秒後には濃度4%以上の可燃混合範囲は無くなり、約11秒後に全て1%以下の希薄状態となる。この結果からは、十分な空間と換気がされた条件の中に解放された水素は短時間で希薄状態になり着火の危険性がなくなることが示される。図3は同じ箱の底部中央から、10L/minの水素が連続的に放出された場

合の拡散挙動のシミュレーション計算結果とシュリーレン撮影による観察を合わせて示したものである。ノズルサイズによって、放出速度が異なり、底面付近での水平方向への拡散状態と、4%以上の可燃混合気の上面への到達度合いが多少変化するものの、可燃混合気は直径 100mm 程度の棒状の空間内だけで、箱の内部に可燃性の水素混合気が広がることはない。シュリーレン撮影による実験観察は開放空間への放出であり周辺の空気流動が存在するためコンピュータ・シミュレーションに比べゆらぎ、拡散が大きくなっているが、計算結果の妥当性を検証するには十分な実験結果であるといえる。

図4は同様な計算シミュレーションによって、ガレージ内車両後方から水素が漏洩した場合の拡散挙動を調べたものであるが、解放空間への放出に比べ、車両側への拡散が妨げられるため、1%以上の混合気領域は図3の場合よりも広がるが、4%以上の可燃混合気範囲は放出口からの上方と天井部にわずかに存在するだけである。計算時間が放出後 30 までと限られているので、換気が不十分なガレージ内といった半閉鎖空間に漏洩水素が蓄積された場合を想定するには十分とはいえないが、天井部付近に換気口、換気扇などが設置されれば大規模な爆発現象は回避できると推察される。

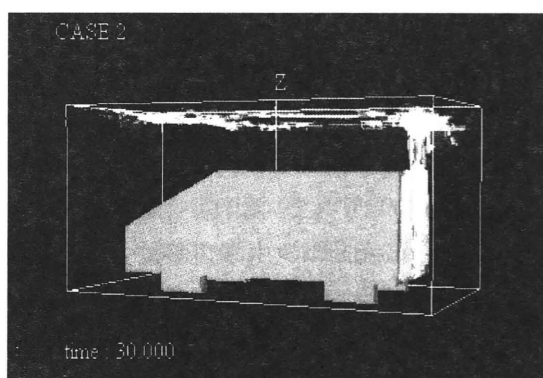


Fig.4 Hydrogen Diffusion in a Garage(6m x 3m x 2.78m) Hydrogen Flow Rate: 5.6L/min.

4.2. 漏洩水素の着火・燃焼特性

3.1 節で、解放空間あるは適度な換気条件を備えた空間への水素漏洩は漏れ量が 10L/min.程度までであれば大きな爆発現象につながらないと推定されたが、本節では、実際に漏洩水素に着火、燃焼させた結果を紹介する。

図5は、3.1 節でおこなわれた計算シミュレーションの空間を実際に形成し火花放電により着火させた結果を示すものである。図 5-(a)は試験装置を模式的に示したもので、図 5-(b)は装置写真である。着火は垂直方向に 200mm 間隔で放電箇所を設けた移動式着火装置を底面から挿入しておこなった。図 5-(c)は、3.1 節と同じ条件の換気窓を設置し、水素放出、着火、燃焼をおこなった結果を赤外画像カメラで観察したものであるが、着火装置は水素放出口直上部に設置した場合のみ着火が可能であり、側方や天井付近では着火しなかった。また換気窓を設置した条件では水素放出時間によらず着火条件、火炎形成状態は同じであった。火炎は赤外画像カメラで捉えることができたが、可視画像 CCD カメラでは観察されなかった。燃焼範囲は 3.1 節で予想されたとおりの水素放出口の上部の限られた範囲にとどまっている。またビニールで形成された壁面への影響もなく燃焼は極めて弱々しいことがわかる。

図 5-(d)は換気窓を無くした擬密閉空間（ビニール壁の継ぎ目と着火装置挿入部に多少の隙間はある）で、10L/min.の水素放出を 4 分間おこなった後、着火させた結果である。放出水素量は 40L であり、空間内に均一に分布したとすると、燃焼下限界である 4%の濃度となる。実験結果では、燃焼範囲は図 5-(c)と同様水素放出口の上部と、天井の薄い層に限定され、火炎はビニール壁を損傷させることなく内部にとどまっている。水素放出時間を 8 分間に延長し着火させた結果を図 5-(e)に示す。水素火炎範囲は空間上半分程度を占めるようになり、ビニール壁を一部破って左側方に広がっているが、大半はビニール壁内にとどまっている。さらに水素放出時間を 30 分まで延長（均一水素濃度で 30%）した結果では、図 5-(f)に示すようにビニール壁が飛ばされ爆発現象が観察され、同条件で内部にアルミハニカムを置き意図的に乱流火炎を発生させた場合にはさらに激しい爆発を起こした。

これらの実験結果から、換気が極めて悪い条件で水素濃度が 30%程度まで蓄積されるような状態になると漏洩水素による爆発の危険性があるものの、適度な換気条件や、低濃度での水素漏洩検知などの対策がとられた場所では、水素漏洩（10L/min.程度）による爆発の危険性は回避できるものと判断される。

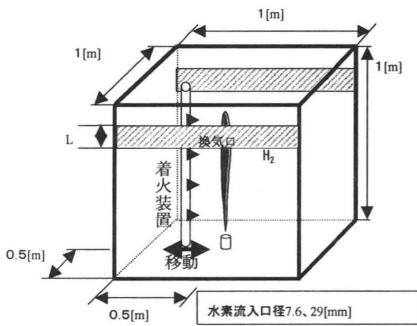


Fig.5-(a) Experimental Apparatus

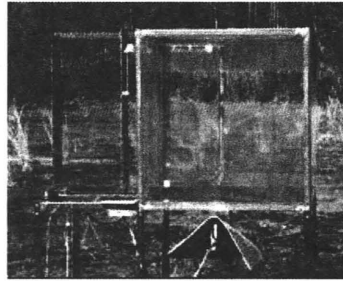


Fig.5-(b) Photograph of Apparatus

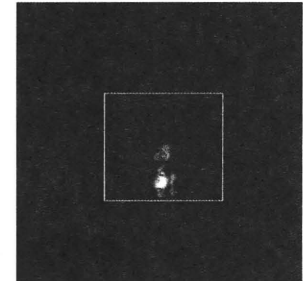


Fig.5-(c) With Windows

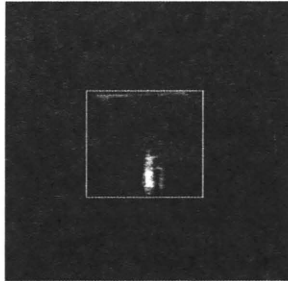


Fig.5-(d) Without Windows, after 4min.(40L)

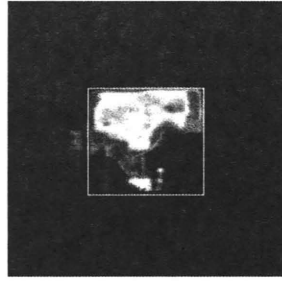


Fig.5-(e) Without Windows, after 8min.(80L)

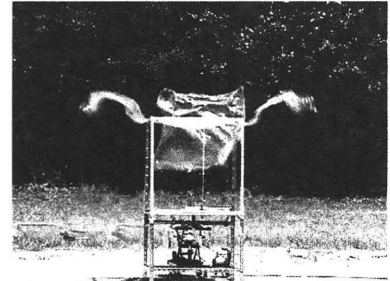


Fig.5-(f) Without Windows, after 30min. (300L)

Fig.5 Test Result of Hydrogen Ignition in a Box with or without Ventilation Windows

4.3. 高圧水素容器の安全弁から放出される水素火炎

燃料電池自動車の燃料となる水素の車載貯蔵においては一充填での走行距離を確保するため、高圧化による高密度貯蔵が必要になる。現在、試験的にリース販売されている燃料電池自動車では35MPaまでの高圧貯蔵容器が使用されているが、それでも水素一充填での走行距離は300~350kmと通常のガソリン車の1/2程度である。走行距離延長のため70MPaまで充填圧を高めた容器が開発されつつある。このような高圧の水素を自動車用燃料として使用する実績は全くなく、十分な安全性確保が必須である。

高圧ガス保安法では、容器材料の高圧環境下での水素脆性の影響評価や、耐圧試験、圧力サイクル試験、ガス透過試験、火炎暴露試験といった厳しい条件での

安全性評価試験を求める例示基準の策定を進めている。このうち火炎暴露試験は火災による容器破裂を防止するため、110℃程度で作動する可溶栓によって水素を放出させる安全弁の装着が求められている。高圧容器単体の安全性評価では、安全弁の作動が確認できればよいが、実車両の火災を想定した場合には、放出された水素が着火し周辺へ火炎が広がることまで配慮が必要である。

図6は35MPaの高圧水素貯蔵容器から放出される水素火炎の様子を観測したもので、(a)はベント管を上向きに放出した場合、(b)は下向き方向に放出した場合の結果を示している。上向き方向の水素放出火炎は5/30~10/30秒後に最長となり7~8mの高さになる。しかしながら放出は短時間で終了し20秒後には

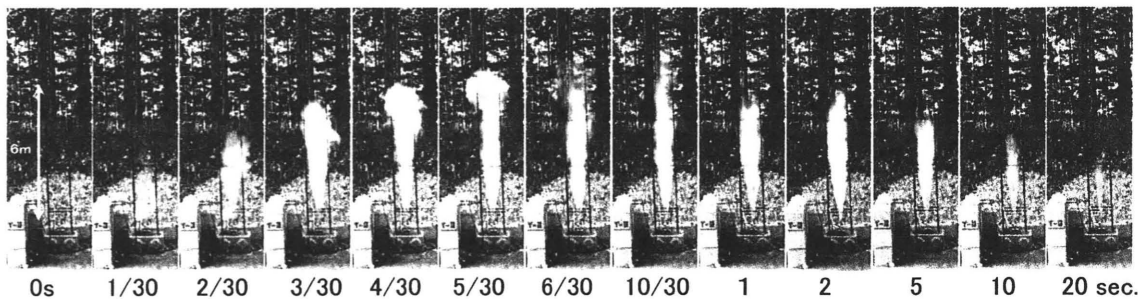


Fig6(a) Hydrogen Flema from Upward Vent Line of Pressure Relief Device on High Pressure Cylinder

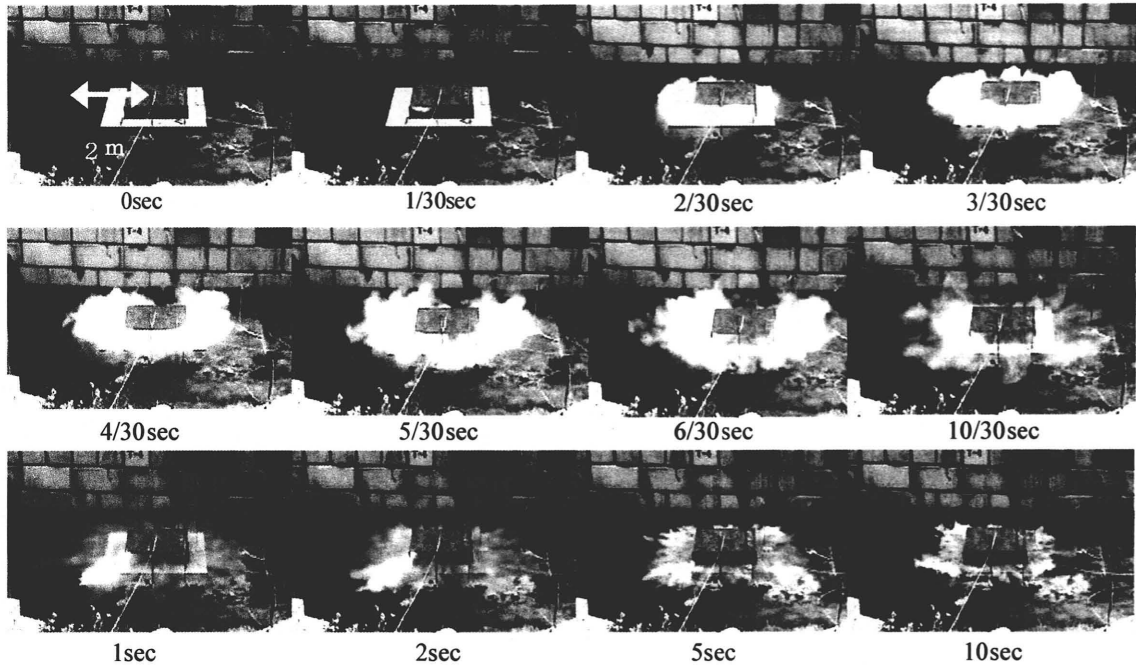


Fig6(b) Hydrogen Flame from Downward Vent Line of Pressure Relief Device on High Pressure Cylinder

1 ~ 2 m 程度に減少する。下方方向の放出火炎では、上方方向と同様に 5/30 ~ 10/30 秒後で最大となり直径 5 ~ 6 m の範囲に広がる。放出時間も上方方向と同じで数十秒後には放出が終了する。

図 7 は一般車両のトランクルームに 35MPa の高圧水素容器(34L x 2 本) (放出方向として上方方向、下方方向の 2 ケース)、20MPa の高圧天然ガス容器(34L x 2 本) (下方方向に放出)、通常のガソリンタンクに 40L のガソリンを搭載した場合それぞれの火災時における車両近傍での熱輻射を計測した結果である。車両火災源はインパネ灰皿上の固形燃料着火による自己火

災を模擬している。輻射計測位置は車両側方 1 m の距離で地上からの高さは 1.2m である。図 7-(a) は上方方向へ水素を放出した場合であるが、火災発生から 14 分 36 秒後と 16 分 16 秒後に安全弁が作動し水素火炎が放出されたが熱輻射のピークは観測されなかった。図 7-(b) は下方方向へ水素を放出した場合である。火災発生後 17 分 4 秒で 2 本めの容器の安全弁が作動したが、熱輻射のピーク値は約 190kW/m² であった。図 7-(c) は天然ガスを下方方向に放出した場合で、1 本めが 16 分 27 秒後、2 本めが 16 分 53 秒後に安全弁が作動し、1 本めの熱輻射のピーク値で約 235kW/m² が計測さ

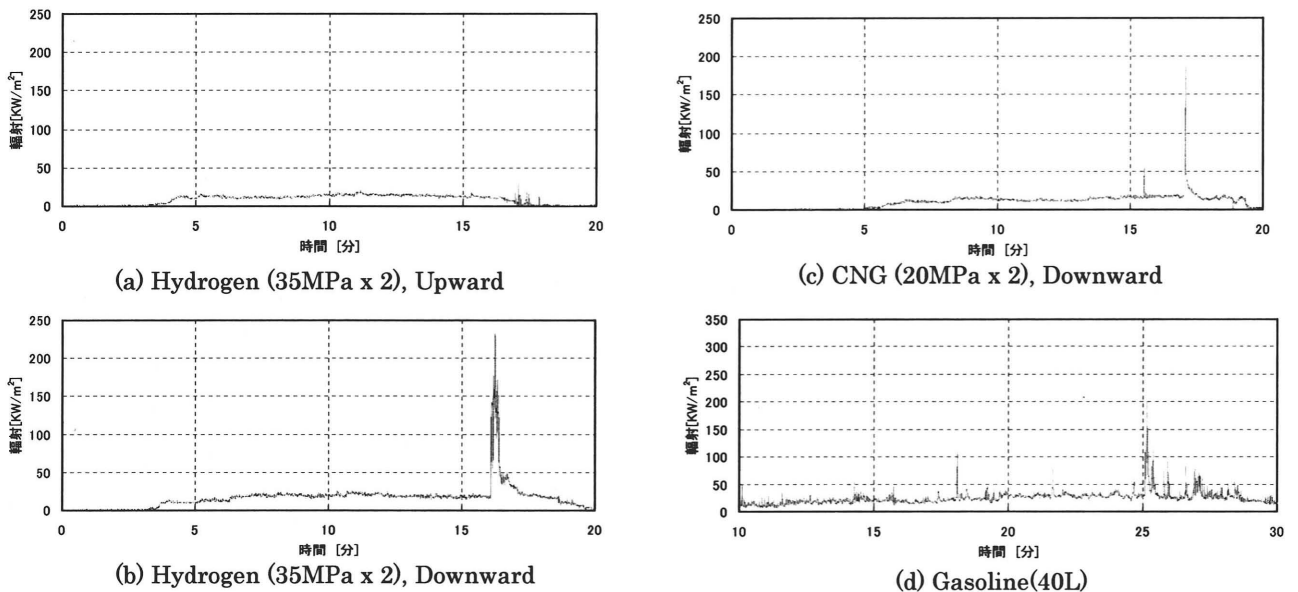


Fig.7 Heat Flux from Vehicle Fire Fueled by Hydrogen, CNG or Gasoline

れた。図 7-(d)はスチール製ガソリタンクに 40L のガソリンを充填して車両火災試験をおこなった結果であるが、火災発生後 14 分ぐらいからタンクシール部から漏れ出したガソリン蒸気が燃焼し、小規模な火炎が繰り返し放出されている。熱輻射の最大値は約 200kW/m^2 であった。

これらの試験結果から、35MPa の高圧水素貯蔵容器から火災時の安全弁作動により放出される水素火炎は、必ずしも安全な状態とはいえないが、既存の天然ガス車、ガソリン車と比較してその周辺への影響はむしろ小さいと判断される。

火災時の高圧容器安全弁からのガス燃料の放出方向について、どの方向がより危険度が小さいかという議論は道路運送車両法の技術基準策定の場で行われる予定であるが、本試験による知見は消防・救助活動時の対応マニュアルや、トンネル火災、地下駐車場等での火災時の建造物への影響予測など色々な想定場面での活用が期待されている。

5. あとがき

燃料電池自動車の標準・基準の策定状況と当研究所での安全性評価の事例を紹介したが、技術開発が急速に進展するなか、それを受け入れるための制度の整備も迅速に対応していく必要がある。関連機関や規制官庁が複雑に絡みあうなか、利害関係を越えて、有望な技術の育成、普及促進に貢献できればと願っている。

引用文献

(1)経済産業省プレスリリース「燃料電池の実用化に向けた包括的な規制の再点検の実施」および「政府による燃料電池自動車の率先導入」について (2002.10.28)