燃料電池自動車の安全性確保に関する研究

-技術基準策定のための調査-

成澤 和幸* 松島 和男** 伊藤 紳一郎** 松村 英樹** 谷口 哲夫**

Research on safety measures of fuel cell vehicles

-Survey for establishing technical standards in Japanese legislations-

by

Kazuyuki NARUSAWA^{*} Kazuo MATSUSHIMA^{**} Shinichiro ITOU^{**} Hideki MATSUMURA^{**} Tetsuo TANIGUCHI^{**}

Abstract

The practical and widespread use of fuel cell vehicles (FCVs) is eagerly awaited, because such vehicles impose less environmental load, increase energy security, and strengthen Japan's industrial competitiveness. The Ministry of Land, Infrastructure and Transport in Japan has subsequently undertaken studies on possible safety and environmental regulations for FCVs fueled by compressed hydrogen and established technical standards in order to introduce the type approval system for mass production of FCVs in March 2005. It is the first event in the world.

After that, National Traffic Safety and Environment Laboratory has been acting for gathering data, carrying out experiments and analyzing them with close cooperation between industry and government to improve the established technical standards, taking account into expansion of the standards to buses. The results of the investigation are summarized in this paper.

The major fields of research work are as follows.

- Hydrogen safety on the event of leakage such as safely discharge of hydrogen gas
- Safety against fuel (hydrogen gas) leak upon crashes
- High-voltage safety (Protection from electric shocks)

*環境研究領域 **自動車安全研究領域

1.はじめに

1.1 燃料電池自動車実用化促進プロジェクトの概要と本研究の実施内容

国土交通省では、平成 15 年度、16 年度に燃料 電池自動車に関する技術基準、試験法などを策定 するために、交通安全環境研究所を中核的研究機 関として「燃料電池自動車実用化促進プロジェク ト検討会」を設置した。この検討結果から、平成 17 年 3 月 31 日に道路運送車両の保安基準、技術 基準等を整備した。

これに続いて平成 17 年度より 2 カ年の計画で、 新たに「燃料電池バス実用化促進プロジェクト」 を開始し、燃料電池バスが満たすべき安全性及び 環境性能に関してとりまとめるとともに、バス特 有の保安基準及び技術基準が必要か否かの検討を 行った。燃料電池バスを検討の対象として取り上 げた理由は、以下である。

 ①既設の水素ステーションを中核とする地域での 路線バス運行によるインフラ整備の容易である。

②これによって不特定多数の乗客が乗車体験を得 て広報的意義が大きい。

③まだ高価な燃料電池車に対する自治体等からの 公共支援が期待できる。

④現状のディーゼルバスと比較して排出ガスや振 動等の性能向上を体感し易い。

⑤技術検討結果を乗用車へ展開可能である、

等々の技術的・社会的側面からによるものである。

さらに、燃料電池バスを取り上げることは以下 に述べる利点がある。すなわち、実証走行試験を 継続的に実施することや、その結果得られた燃料 電池バスの安全性能及び環境性能に関する検証の 結果を適切に一般市民に説明することにより、燃 料電池車について適切な認識を勧めることを容易 にする効果がある。

上記を背景に、本研究では、燃料電池バスの安 全性確保に関する事項について主として着目し、 以下の観点から技術調査を実施した。

すなわち、国の型式指定制度の下で、道路運送 車両法の保安基準において特有の技術基準策定し、 これを運用することにより、燃料電池バスの安全 を確保する必要があるか否かを判断の基準に取り 技術調査を行った。 1.2 本研究の実施項目

研究を実施するに当たり、基準整備に係わる課 題から項目を選定した。この選定においては、バ スに特有の課題、先に整備された保安基準・技術 基準に対する精査・充実を目途とした課題、を選 定した。

低床式路線バスを対象とする時、特有の課題として以下が想定される。

①必要な水素燃料が多くなるため、重量がかさむ 多くのガス容器が屋根部に搭載されることが想定 される。

②発電システムは乗用車と比較して大型化し、車 両後部に搭載されることが想定され、ガス容器と 燃料電池、双方間を結ぶ配管類が長尺化する。

③水素容器や配管類、発電システムが搭載される 区画が、乗用車と比較して大容量となる。

④区画の大容量化に伴う水素安全性、搭載水素量 の大容量化に伴うPRD放出の安全性が課題とな る。

⑤車両構造や振動条件の相違に伴う容器・配管類 の取付強度の耐久安全性を確認する必要がある。

⑥屋根部に水素容器が搭載されることに伴う直射 日光による高温化に対する安全性など、バスに特 有の課題が生じる。

先に整備された保安基準・技術基準に対する精 査・充実を目途とした課題としては以下が挙げら れる。

①衝突試験時の代替ガスの妥当性について議論を より深める必要がある。

②環境性能評価など、先の検討会の報告書におい て今後の検討事項として残された内容がある。

③水素センサなどの開発途上にある技術を調査し て現行基準を精査・充実させる必要がある。

④燃料電池車は電気自動車でもあり、電気安全に 係わる事項を電気自動車との関連において検討す る必要がある。

以上の考察から次章以降の項目について検討し た。

2. ガス容器及び配管類の取付強度に係る耐久安 全性の検討ならびにガス容器格納室気密試験に関 する検討

2.1 検討の必要性

(1)ガス容器及び配管類の取付強度等に関する別 添技術基準100の3.5.3項(添付技術基準抜粋参照、 以下「技術基準参照」と記す)の規定において、固 有振動数が20Hz以下のものにあっては、共振試 験を実施するか、耐久試験を実施し、試験終了後、 ガス容器と車体との取付金具等に緩みまたは破損 がないことを確認する。または悪路走行を含む実 走行による入力加速度を用いた計算方法等により、 耐振動強度を有することが証明されたものでなけ ればならないとされている。しかし、これらの規 定は乗用車を念頭に検討されたものであるため、 大型車(主にバス)においても適用可能か検討する 必要がある。

また、ガス容器取付部の進行方向の耐G規定は 別添技術基準100の3.5.4項(技術基準参照)で規定 されており、加速度に係る要件への適合性は、計 算による方法で証明されるものであってもよいと の規定であるが、これらは実験的に検証した上で 導入したものでないため、十分な取付強度が確保 されているかの検討が必要である。

(2)ガス容器及び容器附属品を客室等に設置した 場合、別添技術基準100の3.5.2項(技術基準参照) の規定により、格納室に納めなければならないが、 格納室を有した場合の気密・換気試験で使用する 代替ガスは水素とは物性値が異なるため、試験用 ガスとして、二酸化炭素またはヘリウムガスの使 用が適正化どうか検討する必要がある。

そのため、気密換気試験を実施し、気密換気試験 用の検査用ガス等の見直しが必要ならば提言する。

2.2 検討の背景と目的

(1)ガス容器の取付部の強度規定はLPG車、CN G車で用いていた規定を用いている。一方、耐加 速度規定は燃料電池自動車独自のものとして定め た。

(2)ガス容器取付部は、加振試験を実施し固有振動 数が 20Hz 以下の場合に、共振試験、耐久試験ま たは悪路走行試験を実施することが技術基準に規 定されている。この規定は、ガス容器取付部のメ インフレームの振動特性が乗用車の場合、固有振 動数は概ね 20Hz 以上であったために規定された ものであることから、大型バスについて検討する。 (3)格納室を有した場合の気密・換気試験で使用す る試験用ガスとして、二酸化炭素またはヘリウム ガスの使用が認められているが、二酸化炭素の場 合、物性値が異なるため、試験用ガスとして適正 かどうか検討する必要がある。

2.3 検討方法

下記の項目の実施結果を検討し、ガス容器及び ガス配管等の基準の見直しが必要ならば行うこと とした。

(1)衝突実験及び加振実験実施のための参考資料 とするため、燃料電池バスのガス容器及び容器取 付部について調査した。

(2)大型ガス容器を搭載した場合を想定して、ガス 容器取付部の強度及び容器取付バンドの厚み等 (バンドの厚さ:0.8、1.0、1.2mm、バンド取付ボ ルト:8、10、12mm、容器取付台の厚さ:2.3、 4.5mm)を変えた容器取付部模擬装置を3種類製作 した。これらを使用して、ハンマリング試験方法 による加振実験を実施し、固有振動数等を測定し た。

また、トラックの荷台に容器取付部模擬装置を 搭載した状態で、交通研内に設置した突起物を乗 り越える走行試験及び日本自動車研究所の悪路試 験場での走行試験の実施し、容器取付部フレーム 等の振動特性を把握した。これらの結果から、加 振試験方法及び加振試験の実施要件である固有振 動数の見直しが必要であるかどうかを検討した。 なお、トラック荷台上、メインフレーム、ガス容 器取付台、ガス容器上部中央部の上下加速度につ いて測定した。

(3)交通研自動車試験場の衝突試験場において、容器取付部模擬装置を衝突実験用台車に設置し、前面衝突実験を実施した。基準で規定した衝突加速度に合わせるために、台車の前部に衝突実験用ハニカムを装着した。実験は、この台車に大型ガス容器を2本搭載し、3種類の取付方法(ガス容器取付バンドの厚さ:0.8、1.0、1.2mm、容器取付ボルト:8、10、12mm)で固定した状態でそれぞれ1回、合計3回実施した。なお、衝突速度は17.5km/h、衝突加速度10Gとした。また、参考までに、乗用車用を想定した衝突実験条件(衝突速度は50km/h、

衝突加速度 30G)でも実施した。

なお、トラック荷台上、メインフレーム、ガス 容器取付台、ガス容器上部中央部の上下加速度、 前後容器の取付ボルト及び取付バンドにかかる力 について測定した。

(4)水素ガスの代替ガスとして、ヘリウムガスによる気密・換気試験を実施した。

以前の実験では換気口の穴径が小さく不十分で あったため、換気性能を満足しなかった。そのた め、今回は、コンテナ容器の換気口の面積を大き くした実験を実施した。なお、二酸化炭素の場合、 コンテナ容器の下部に滞留してしまい換気しない ことも確認した。

2. 4 結果及び考察

(1)ガス容器及び容器取付部模擬装置を用いて Fig.2-1 に示すようなハンマリング加振試験方法 により加振実験を実施し、固有振動数等を測定し た。

その結果、Fig.2-1 に示したように、3 軸方向(上 下方向、前後方向、左右方向)の固有振動数の測定 が比較的簡便にできることが分かった。上下方向、 前後方向は 20Hz 以上、左右方向の固有振動数は 概ね 100Hz 程度であった。

したがって、大型車を想定したガス容器模擬装置の固有振動数が 20Hz 以上であり、乗用車と同等の振動特性であったため、現行の規定を見直して、バス用に特別な規定を定める必要はないと思われる。

なお、今回用いたハンマリング法は簡便で有用 な方法であることが分かったが、新型審査時等に 使用可能かどうかについては、今後、加振機に載 せて求まる固有振動周波数の測定と比較、検証す る必要がある。

次に、ガス容器の取付部の固有振動数が 20Hz 以下の場合の取付強度確認試験について検討した。 トラックの荷台にガス容器取付部模擬装置を搭載 した状態で突起物を乗り越える走行試験やJAR Iの悪路試験場(Picture 2-1)での走行試験 (Fig.2-2)を実施した。この結果をみると、振動成 分としては概ね 20Hz 以下で、スペクトル密度の 最大値は 5Hz 程度であることが分かり、悪路走行 試験で取付強度確認試験が実施できる見通しが得 られた。



Fig.2-1 ハンマリングによる固有振動数の測定例



Picture 2-1 JARI 悪路試験コース



Fig.2-2 悪路走行試験結果(振動特性)

参考までに、日本自動車研究所での悪路試験用コ ースの路面凹凸の程度を推定するため、悪路走行試 験の振動データから路面凹凸のパワースペクトル密 度と空間周波数の関係についてプロットしたものを Fig.2-3 に示す。この結果をISOにより提案されて いる路面凹凸の分類により整理すると、今回使用し た悪路は標準的な非舗装悪路である E 領域のゾーン にあった。しかし今回の振動データはバネ上のデー タを使用しているため、パワースペクトル密度は数 倍高い値になると推定されることから、今回使用し た路面は F 領域に属する非舗装悪路になるようであ る。



Fig.2-3 日本自動車研究所悪路試験場路面 凹凸の程度

(2)Picture 2-2 に示すように、ガス容器及び容器
 取付部模擬装置をバリア衝突用台車に搭載して衝
 突実験を実施した。実験結果を Fig.2-4 及び
 Fig.2-5 に示す。

この結果を見ると、最大加速度が台車上で約8 Gであったが、タンク上では約10Gであった。ま た、バンド取付ボルトにかかる張力は最大で前方 側容器の場合で約0.7kNで、後方側容器の場合は 約1.2kNであった。また、現行の規定では約6.6 Gの加速度で容器取付部が破断しないことを計算 で証明することとなっていることから、現行の耐 G規定で十分であると考えられる。



Picture 2-2 ガス容器及び容器取付部模擬装置の台車への取付状況 衝突実験(衝突速度:17.5km/h, 衝突加速度:10G)







Fig.2-5 衝突実験結果(ボルト張力-衝突速度 17.5km/h)

(3)気密換気試験用容器(Picture 2-3)の換気口の径 を 100mm にして気密換気試験を実施した。その結 果、二酸化炭素、ヘリウムガスとも十分気密試験に 用いることができることが分かった。

上部から換気した場合の結果を Fig.2-6 に示す。 この結果から分かるように、二酸化炭素の場合はガ スが下方に滞留してしまうため非常に換気性能が劣 っていたが、ヘリウムガスでは換気性能を満足した 結果が得られた。今年度の結果も総合すると、換気 試験用として用いる試験用ガスはヘリウムガスを用 いる方が良いと思われる。 また、ヘリウム検知機の検知性能の制約から、以前 はヘリウム濃度が1%以下の場合、検知が難しかっ たが、気体熱伝導式センサータイプのもので、検知 能力0.1%の製品が発売されたのに続き、最新の情報 では超音波式のタイプで最小0.02%の検知能力のも のも製品化されている。したがって、ヘリウムを試 験用ガスとして使用することに問題はないと思われ る。



Picture 2-3 気密換気試験用容器

換気試験結果





Fig.2-6 換気試験結果

2.5 まとめ

大型ガス容器を搭載した場合を想定して各種容器 取付部模擬装置を試作し、固有振動数を測定した結 果、乗用車と同等の振動特性であったため、現行の 規定を見直してバス用に特別な規定を定める必要は ないと考える。なお、今回用いたハンマリング法は 簡便で有用な方法であることが分かったが、新型審 査時等に使用可能かどうかについては、今後、加振 機に載せて求まる固有振動周波数の測定と比較、検 証する必要がある。

現行基準では、ガス容器取付部等の固有振動数が 20Hz以下の場合、車両の加振試験または悪路走行試 験を実施することになっているが、バスを加振させ るための加振機は相当高額であること、試験時間が 長いことが欠点である。今回、悪路走行試験で取付 強度の確認試験が実施できる見通しが得られた。新 型審査の簡略化と審査時間の短縮を図るために、こ の手法を推奨したい。

今回の換気試験の結果から、水素ガスと類似した 換気性能を示すヘリウムガスを試験用ガスとして用 いる方がよいことが分かった。またヘリウムガスの 場合、水素ガスと物性値が近似していることも理由 である。なお、二酸化炭素は気密試験のみの実施の 場合は、試験用ガスとして使用しても差し支えない。

PRD排出時等の燃焼実験による安全性に関 する検討

3.1 検討の必要性

高圧水素ガスを使用した燃料電池自動車は、車両 火災時に容器内の水素ガスの温度が異常に上昇した 際の爆発を防ぐために、容器内の水素ガスを容器安 全弁(PRD: Pressure Relief Device)等を通して出 来るだけすみやかに、かつ安全に排出しなければな らない。そこで、別添技術基準100の3.1.4項(技術 基準参照)ではPRDからの水素ガス排出方法につ いて規定した。

しかし、燃料電池バス等の大型車を対象とした場 合、小型乗用車に比べて容器の設置位置や長さの違 いが想定されるためPRDの設置方法や水素ガスの 排出方法について検討する必要がある。例えば、燃 料電池バスの容器は、屋根上に設置される可能性が 高く、PRD作動時の水素ガスの放出方向が多様に なるものと考えられる。さらに、ガス容器が大型化 及び長尺化する可能性もある。このため、車両火災 時において燃料電池バス特有の条件を考慮し、PR D作動の有無および放出方向が車両周囲に及ぼす影 響を検討する必要がある。 3.2 検討の背景と目的

(1) CNG車にPRD排出方向の規定はない。

(2) P R D による水素放出に関する課題として水素 ガスの排出時間と排出方法を取り上げ、現行基準の 妥当性を検証する。

3.3 検討方法

下記の実験項目について燃焼実験をカナダにおい て実施した。また、試験条件の参考とするために、 燃料電池バスの大臣認定資料及び実車等の調査を実 施した。

① P R D 作動時における水素ガスの排出時間に関す る試験

大容量の水素容器が複数個設置された場合、PR D作動時の排出時間が長くなることが予想されるため、複数のPRDとそれらの作動状況が排出時間に 及ぼす影響を検討した。

容量 410 リットルのガス容器に、PRDを1ヶ所 に付けた場合と2ヶ所に付けた場合について、排出 時間の測定及び水素ガスの排出状況の観察を行った。 Fig.3-1 は試験方法の概念図である。

なお、タンクの出口には、主止弁と逆止弁を取り 付けた。Table.3-1 は試験条件をまとめたものである。



Fig.3-1 試験方法

#	Pressure	35MPa	\rightarrow	15MPa	\rightarrow	1MPa
	Valve 1	0pen	0pen	0pen	0pen	Close
Test 1-1	Valve 2	Close	Close	Close	Close	Close
Toot 1-9	Valve 1	0pen	0pen	0pen	0pen	Close
lest 1-2	Valve 2	Close	Close	0pen	0pen	Close
T+ 1 9	Valve 1	0pen	0pen	0pen	Open	Close
lest 1-3	Valve 2	0pen	0pen	0pen	0pen	Close

Table.3-1 試験条件

②PRD作動時における水素ガスの拡散放出に関す る試験

PRD作動時の水素ガスは直接大気に放出するだ けでなく、いったん拡散箱内に放出し、拡散箱に設 けた複数の穴から分散させる方式も考案されている。 この方式は放出時の水素の圧力や流速を低下させ、 着火した際の火炎長を短くするなどの利点が予想さ れるため、拡散箱に設けた放出口の数が拡散箱内の 圧力と火炎長に及ぼす影響を検討するための実験を 実施した。さらに、拡散箱がバスの屋根上に搭載さ れた状態での車両火災を想定した場合のPRD作動 時に、放出後の水素ガスに対して強制着火を行う場 合と火災の炎による自然着火の場合を比較し、どち らの方法がより安全性が高いかを検討するための燃 焼実験も実施した。なお、燃焼実験では、拡散箱を 設けた場合、拡散箱の上面に対する、ガス放出の開 ロ部面積の割合により、水素ガスの排出状況がどの ように変化をするかを観察した。その他、水素ガス 燃焼時の周囲温度、熱流速の測定も行った。また、 水素ガス放出時の拡散箱内の水素濃度についてもあ らかじめ計測した。

さらに、拡散箱を設けた場合、点火源が拡散箱の 内部にあった場合と拡散箱からの放出口外側にあっ た場合の燃焼状況に差があるかどうかについても検 討した。

Fig.3-2に拡散箱による試験方法を示す。試験は上部の穴の数を4穴、16穴、64穴の3種類について 実施した。なお、タンクの出口には、主止弁と逆止 弁を取り付けた。また、Fig.3-3は拡散箱が屋根上に 搭載された場合を模擬した試験方法を、Pictute.3-1 に拡散箱を屋根上に搭載された場合を模擬した試験 状況を示す。



Fig.3-2 拡散箱による試験方法



Fig.3-3 燃料電池バスの屋根への搭載を模擬した試験方法



Picture 3-1 燃料電池バスの屋根への搭載を模擬した実験装置概観

3.4 結果及び考察

① P R D 作動時における水素ガスの放出時間に関する試験

Picture 3-2 はPRD作動時における水素ガスの 燃焼状況を、Fig.3-4 はガス容器内圧力の低下状況と 放出口からの距離別温度の変化状況を示したもので ある。 PRDの排出数が2個の場合、1個に比べ排出時間は予想では1/2になると想定したが、実際は20~ 30%程度の短縮であった。なお、長尺容器の場合、 火炎暴露試験での火炎の当たり方が均一ではないた めに、容器両端部にPRDを設置することも含めて、 長尺容器の安全性に関する検討を継続することが望 ましい。



Picture 3-2 PRD放出時の燃焼状況

Test1-1(Tower-B)



Fig.3-4 PRD放出燃焼時の容器内圧力の低下状況と温度の変化状況

② P R D 作動時における水素ガスの拡散放出に関する試験

PRD作動時における水素ガスの拡散放出時の燃 焼状況を Picture 3-3 及び Picture 3-4 に示す。この 結果をみると、PRD作動時の水素ガスは直接大気 に放出させずに、いったん拡散箱内に放出し、拡散

箱に設けた複数の穴から分散させる方式の方が、安 全性が高いという結果が予想されたが、上面に 64 個の穴を設けた場合の燃焼実験では爆燃現象が発生 した。したがって、着火源が拡散箱の外側にある場 合、必ずしも拡散放出が良いわけではなく、場合に よっては水素放出後、直ちに着火させることも良い 方法であると思われる。何れにしても、今回の結果 において、明らかに安全性が向上する方法が見つか らなかったことから、基準見直しの提案は行わない。 また、溶栓式PRDの場合、温度低下と圧力低下 (約 0.7MPa 程度)によってPRDが閉じてしまい、 容器内に水素が残留することも考えられるため、火 災後のガス容器の安全性の確認試験も必要と考える。 また、PRDの確実な作動や火災時の完全放出につ いては今後も継続して検討する必要がある。





Picture 3-3 拡散箱に放出した場合の燃焼状況



Picture 3-4 燃料電池バスの屋根への搭載を模擬した実験装置での燃焼状況

3.5 まとめ

PRDを2ヶ所に付けて放出時間の短縮を図る 実験及び拡散箱を使用した間接放出の実験を、条 件を変えて実施した結果、明らかに安全性が向上 する方法が見つからなかった。また放出時間の短 縮が、条件により安全性向上と低下の両面の効果 をもつなど、PRD排出効果は複雑であることが 分かった。これらの結果から、安全性を確保する 上で現行の基準が機能していると考えられるので、 基準の見直しは必要ないと考える。

なお、高圧ガス保安法の範疇であるが、長尺容 器の場合、火炎暴露試験での火炎の当たり方が均 ーではないことや、PRDの構造が溶栓式の場合、 容器内残圧が約0.7MPa程度で閉じてしまうこと から、火災時および火災後の容器の安全性に関す る検討を継続することが望ましい。

火災時において想定される様々な状態でPRD を確実に作動させる条件を探すことは極めて困難 な作業である。容器に直接火炎が当たらないよう なメーカー側の工夫やPRDの設置位置の工夫な どを勘案しつつ、今後、国際基準調和の動向も視 野に入れ検討を続ける必要があると考える。

4. 水素漏洩試験に関するヘリウムガス代替の 適正に関する検討

4.1 検討の必要性

衝突試験において、ヘリウムを代替ガスとして 使用した場合の水素換算係数は理論値を用いて定 められた。実際の状態を再現した実験により求め た訳ではないのでこれを検証する必要がある。

4.2 検討の背景と目的

(1)ヘリウムを代替ガスとして用いる事に関して、 現行の関連基準はない。容器格納室の気密換気試 験はCNG車の場合と同じである。

(2)両者とも大型車独自の課題ではない。

(3)理論値は実際と異なる可能性があるので、なる べく実態に近い条件での実験を実施する。その結 果、水素換算係数の変更が必要な場合は提言する。

4.3 検討方法及び結果

細孔から水素漏洩した場合、接続部のナットに 緩みが生じた場合及び配管に亀裂を生じさせた場 合の微小漏れについて、水素とヘリウムを対象に 実験を実施する。

(1)細孔から水素漏洩した場合の試験方法及び結 果

Fig.4-1 に示した吹き出し径 φ 0.1mm、 φ 0.2mm、 φ 0.5mm の放出ノズル (オリフィス) から水素お よびヘリウム放出させた。そして温度、圧力の変 化からこの時の放出量を求めた。

実験手順は以下である。はじめに 14.7MPa のボ ンベのバルブを開にし、放出前の温度と圧力を測 定した。その後放出ノズルを設置し、ボールバル ブを開にすることにより水素またはヘリウムを放 出させた。一定時間放出させた後、ボールバルブ を閉にし、温度と圧力を測定した。

放出したガス量は、放出前後の温度、圧力の変 化から求めた。圧力計(精度±0.25%)および温度計 (精度±0.5℃)は高精度のものを使用した。

結果を Table.4-1 に示す。これによると、ヘリウ ムガスの漏れ量から水素ガスの漏れ量を換算する ための変換係数は、ノズル径が 0.2mm と 0.5mm の場合は 1.37 となり、ノズル径が 0.1mm の場合 は 1.35 で、技術基準で決められた 1.33 より 1.5~ 3%程度大きな値となったが、測定精度から考える と大きな差でないと言える。なお、この結果はそ れぞれの条件で 3 回ずつ実施した平均値で表した ものである。今後の国際基準調和活動への展開も 踏まえて、さらなる結果の検証を行う必要がある。 (2)接合ねじ部から水素漏洩した場合の試験方法 及び結果

配管接合部のねじに緩みが生じた場合の試験に ついては、締め付けナットを正規に締め付けた状 態から 1/4 回転ゆるめた場合の漏れ試験を実施し、 その後、正規の締め付けの状態からナットを 1/2 回転ゆるめた実験を実施した。なお、試験手順は (1)で記述した方法と同様である。漏れ時間は 15 分とし、漏れ量計測は 1 分毎に計測した。実験順 序は水素、ヘリウムガスの順で実施した。

その結果、1/4 回転ゆるめて水素を漏らした場合、 最初 2.2L/min であったが、15 分後には 3.8L/min と少しずつ大きくなった。次に、ヘリウムガスを 使用しての結果は、最初 2.8L/min であったが、15 分後には 5.7L/min とやはり時間とともに漏れ量 は大きくなった。



Fig.4-1 細孔から水素漏洩した場合の試験方法

Table.4-1 試験結果

穴の直径	ガス種	ボンベ 内容積	初期 圧力	初期 温度	初期温度 補正圧力*	放出後 圧力	放出後 温度	放出後温度 補正圧力*	放出 時間	平均 放出流量	水素/ヘリウム 変換係数
[mm]		[L]	[MPa]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[°C]	[MPa]	[min]	[L/min]	[-]
	水素	47.0	14.64	22.9	14.74	10.47	25.4	10.46	1.83	1099	1.97
φ0.5	ヘリウム	47.0	14.28	26.2	14.22	11.07	24.3	11.10	1.83	801	1.37
	水素	47.2	14.36	16.7	14.77	10.14	17.9	10. 39	15	137.8	1.97
φ 0. 2	ヘリウム	47.6	13. 79	18.0	14.12	10.71	18.3	10.96	15	100.3	1.37
1.0.1	水素	47.0	14.49	18.8	14.80	11.04	16.0	11. 38	60	26.8	1 25
φ 0. 1	ヘリウム	47.0	13.68	15.2	14.14	11.35	18.2	11.61	60	19.8	1. 35

※ 補正温度 25℃

水素漏れでの 15 分後の漏れ量とヘリウムガス の最初の漏れ量を比較すると、換算係数は 1.32 で あったが、時間とともに漏れ量が大きくなること を考えると換算係数としては、1.32 よりはやや大 きな値になると思われる。

これは漏れ続けた場合、時間とともに緩みの程 度が少し大きくなったためと思われる。また、正 規の締め付けの状態からナットを 1/2 回転ゆるめ た実験では、漏れ試験開始直後に締め付けナット か外れてしまい、結果として 1,000L/min を超える 漏れとなった。

(3)配管の亀裂から水素漏洩した場合の試験方法 及び結果

配管に亀裂を入れるために、配管を曲げ部分の 配管外側の厚みを元の厚みの約 1/3 になるように 約 60 度の角度まで曲げ、さらに、配管に水圧をか けて Picture 4-1 に示したような亀裂を発生させ た。その後、水素、ヘリウムガスを使用しての漏 れ試験を実施した。

その結果、漏れ量は水素の場合で5分間の平均 で53.2L/min、ヘリウムガスの場合5分間平均で 44.4L/min で換算係数が約1.2となり、細孔から の放出時よりも小さな値となったが、これは実験 順序がヘリウムガスを後にしたため、ねじ部のゆ るんだ場合の漏れ量の結果と同じく、時間ととも に亀裂が進行し、漏れ量が最初の0~1分と最後の 4~5 分とを比較した場合で 10%程度大きくなったため、単純に比較することが困難であることが 分かった。



Picture 4-1 圧力をかけて配管が割れた後、再度 圧力をかけた写真

4.4 まとめ

今回の調査結果から、ヘリウムから水素ガスへの換算係数を実験値(1.35~1.37)に基づき定めることを提案する。

人工的に微少な亀裂を発生させての水素とヘリ ウムガスの漏れの比較実験をしたところ、時間と ともに亀裂が拡大する傾向であることから、漏れ 量計測にあたっては時間ごとの変化も考慮する必 要があることが明らかになった。

5. 大型車における水素漏洩に関する検討

5.1 検討の必要性

燃料電池自動車では、技術基準 100 の 3.9.1 項 に水素漏れが発生した場合に速やかにその漏れを 検知するように1区画につき最低1個の水素セン サの設置が義務づけられている。(技術基準参照)

これは、乗用車等の水素システムが存在する区 画が小さい場合を想定したものであり、バス等の 大型車のように水素システムが存在する区画が乗 用車よりも大きくなる場合を想定していない。そ のため、大型バス特有の課題と考えられる、区画 が大きくなる場合に基準の変更等の検討が必要か どうか確認する。

5.2 背景と目的

水素を燃料とする燃料電池自動車において、水 素漏れの防止は安全上重要な問題である。現行法 規では、通常使用状態における水素漏れに関する 安全確保の手段として、水素システムが存在する 区画内に水素センサを「少なくとも一個装備」し、 「検知しやすい位置」に設置することとなってい る。これまでの議論において、乗用車では水素シ ステムが存在する区画の大きさが限られるため、 水素の拡散性を考慮すると水素センサが1つでも 漏れを検知できると判断された。しかし、大型バ スでは、客室空間の確保、ノンステップバスの要 望、航続距離を得る必要性などから、複数本のガ ス容器を屋根上に設置することが想定され、その 場合に水素が存在する区画が大きくなることが予 想される。

このように区画が大きくなった場合において、 「一個装備」の場合、水素センサの設置位置によ っては水素漏れを検知できず、区画内に高濃度の 水素濃度領域が発生する可能性が考えられる。ま た、現行法規にある「滞留することなく」、「大気 中に導く構造」とあるが、区画が大きくなった場 合に、滞留させずに大気中に導く構造を実現する 開口部の設置状況によっては、区画内に高濃度の 水素濃度領域が発生する可能性が考えられる。

水素は、その濃度によって着火の有無及び着火 したときの燃焼現象が異なる。水素濃度が4%未満 において水素は着火せず、4%以上が可燃領域とさ れている。また、18%以上の水素濃度において水 素は爆発的に燃焼(以下、爆燃領域という)し、水素 濃度75%以上となると着火しないとされている。 以上のことから、本調査では、水素システムが存在する区画が大きくなった場合において、現行 法規にある「検知しやすい位置」、「滞留すること なく」、「大気中に導く構造」、「少なくとも一個装 備」という記載の範囲内で想定される区画を模擬 的に実現し、模擬区画において配管の継ぎ手等か らの水素漏洩を想定した水素放出を行う。その上 で、模擬区画内において水素濃度分布を測定し、 測定位置において水素ガス漏れ検知器の動作濃度 である4%に至るかを確認すると共に、水素濃度が 爆燃領域に至るような高濃度領域の発生状況につ いて確認することを目的とする。なお、現行法規 における水素ガス漏れ検知器の動作濃度が4%で あることから、水素濃度4%未満の漏洩についての 検討は、今回の調査対象外とする。

5.3 検討方法

検討を行う上での前提の条件として、バスが走 行中のように区画内に気流の流れがある場合につ いては、水素が滞留しないと考えられるため検討 対象外とした。また、水素漏洩の形態に関して、 配管の破損や配管の脱落等の著しい水素漏洩とな る場合については検討対象外とした。したがって、 本調査では停車時及び駐車時を想定した、区画内 に気流の流れがない場合とし配管の継ぎ手等から の少量の漏洩を想定した場合について検討を行う。 検討のポイントは「水素の拡散性」であり、具体 的な検討項目として「区画の広さ(水平方向及び高 さ方向)」・「水素センサ動作の有無(水素濃度4%の 超過状況) |・「開口部の影響」とした。各実験条件 において「水素の高濃度領域」の発生状況を確認 する。また、水素センサが動作濃度の4%超過状況、 区画内における水素濃度差について調査を実施す る。実験を行う区画形状については、ノンステッ プバスやCNGバス等に関する調査から燃料電池 バスの区画形状としてありうる模擬区画を設定す る。

実験は、以下に示す3つのケース(I)~(Ⅲ)について行う。

- (I)水素漏洩基礎実験
- (Ⅱ)屋根上模擬区画実験
- (Ⅲ)バス後部模擬区画実験

(I)については、水素の基本的挙動を調査するため、基本的形状として選定した。

(Ⅱ)については、大型燃料電池バスでは乗用車と

比較して多くの水素燃料を要するため、屋根部に 水素容器が設置されると考えられ選定した。なお、 本区画は水平方向の拡がりを特徴とする大容量の 区画である。

(Ⅲ)については、乗用車と比較して大きな電力を 要することから大型の発電システムを搭載すると 考えられ、それが車両後部に配される場合を想定 し選定した。なお、本区画は、垂直方向の拡がり を特徴とする大容量の区画である。

- 5.4 実験結果
- 5.4.1 水素漏洩基礎実験
- 5.4.1.1 実験方法

基礎実験では、水素の濃度変化・空間濃度分布・ 水素の拡散特性などを調査して水素の基本的な挙 動を知る。また、これらの実験により、模擬区画 実験の実験条件を決定する。

本実験では水素の基本的な挙動についての知見 を得るため、密閉空間において実験を行い、模擬 区画実験の水素センサの設定位置等の実験条件を 決定する。

実験に用いる区画は、基本形状として 1mの密閉 した立方体を用いた。また、水素流入口を Fig.5--1 に示す。 水素流入口は、水素の流入初速度を低下させて 流入初速度の影響を極力排除するため、Fig.5-1の ようにガス配管から直接放出することを避け、2 段階で壁面に衝突させた後に立方体内に流入させ た。水素放出流量は、5L/min、10L/min、15L/min の3段階とし各10分間流入させて、均一になった 場合の水素濃度が5%、10%、15%となるように 想定した。但し、密閉空間において水素を流入す ると立法体内部と外部で気圧差が生じ通常の条件 とはならないため、立方体の下部に円形の開口を8 ヶ所設け、その円形開口部の面積の合計が水素流 入口の面積と同一になるようにした。

水素センサは、気体熱伝導方式によるセンサを 12 個用意し Fig.5-1 の①~⑫の位置に設置した。 本センサは空気と水素の熱伝導率の差により濃度 を検出するため、測定対象領域の雰囲気を乱さず 水素濃度の測定が可能である。また、本センサの 性能はフルスケールが 20%であり、指示精度は± 0.5%であった。各実験において、前センサの濃度 が 1%以下になるまで実験を行った。



Fig.5-1 模擬区画の概要

- 5.4.1.2 実験結果
- 5. 4. 1. 2. 1 高さ方向の濃度分布

各水素放出流量における高さ方向の濃度の比較検 討を行う。Fig.5-2~4 に水素放出流量 5、10、 15[L/min]での各列における高さ方向の水素濃度の 測定結果を示す。なお、Fig.5-1 において、センサ1 ~センサ4を(a)壁面列、センサ5~センサ7を(b) 中間列、センサ8~センサ11までを(c)中心列とす る。



Fig.5-4 各列における高さ方向の水素濃度(15L/min:想定濃度15%)

実験の結果から、以下の結果が得られた。 (ア)想定水素濃度が低いほど高さ方向の水素濃度 差が小さく均一となっている。

(イ)水素流入の影響がなくなると考えられる流入 停止 40 分後において、高さ 500mm 以上の位置に おいて、水素の濃度差は最大 1%程度であった。

(ウ)水素流入の影響がなくなると考えられる流入 停止 40 分後において、高さ 0mm と 1,000mm の 位置との差において、水素の濃度差は最大 2%程度 であった。

5.4.1.2.2 水平方向の濃度分布 各水素放出流量における水平方向の濃度の比較 検討を行う。Fig.5-5~7 に水素放出流量 5、10、 15[L/min]での各水平高さ方向の水素濃度の測定 結果を示す。なお、Fig.5-1 において、センサ4、 7、1 1を(a)高さ 1,000mm、センサ3、6、10 を(b)高さ 750mm、センサ2、9を(c)高さ 500mm とする。

実験の結果から、以下の結果が得られた。

水素流入の影響がなくなると考えられる流入停 止40分後において、想定濃度5%での水平方向の 濃度差は非常に小さく、想定濃度10%及び15%で の濃度差は、約1%程度であった。このため、水平 方向の濃度はほぼ均一であると考えられる。



5.4.1.3 まとめ

前述の結果から、水素流入後における 1m立方体 の区画内の濃度について、高さ方向の濃度差は最大 2%程度であり、水平方向の濃度差は最大 1%程度と なった。また、想定濃度 5%においては、高さ及び 水平方向について、その濃度差がほとんど見られな かった。

これらの結果から、水素の拡散性は非常に良く、1 m立方体の区画程度では、ほとんど濃度差が生じな いことが分かった。特に、バスの屋根上区画の高さ である 500mm の範囲では、高さ方向の濃度差が 1% 程度であった。このことから、バスの屋根上模擬区 画の実験では、高さ方向のセンサの設置位置は、上 部を中心に設置し、下部には確認のため一部のみに 設置することとする。

5.4.2 バスの屋根上模擬区画実験

5.4.2.1 実験方法

本実験では、バスの屋根上という区画の大きな空

間に対して、水素の拡散性及び水素濃度分布につい て確認する。屋根上模擬区画実験では、以下の項目 について計測する。

 ・し、模擬区画内の水素濃度の空間分布

②水素濃度の時間変化(水素濃度の持続)

③水素センサの作動状況(4%)

実験に用いる区画は、バスの屋根上を想定して直 方体とした。Fig.5-8 にその概要図を示す。

この模擬区画の寸法は次のようにして決定した。 CNGバスやノンステップバス等で使用されている バスを調査し、そのベースとなるバスのサイズを調 べた。その結果、横幅で約 2.5m、長手方向で約 12 mが最大寸法であった。そのため、その9割の寸法(横 幅で約 2.25m、長手方向で約 10.8m)をバスの屋根 上区画の寸法とした。また、区画の高さ方向につい ては、バスに使用されると想定される長尺のガス容 器の直径が 0.4mであることから、ガス容器支持部に よる高さを考慮して屋根上模擬区画の高さを 0.5m とした。



Fig.5-8 バス屋根上模擬区画

実験では、模擬ガス容器のある場合と無い場合 について実験を行う。また、バスの重心を考慮す ると、水素ガス容器はバスの中心付近に設置され ると予想されるため、ガス容器はバスの中心付近 とした。

開口の実験条件としては、密閉状態と開口状態 について実験を行った。開口状態については、 Fig.5-8 に示すように上部表面積の 10%(2.43m²) の開口を屋根上模擬区画の上面と側面のそれぞれ に設置し、開口条件として、側面 10%開口、上面 10%開口並びに上面と側面を開口した上側面 20%開口とした。また、側面については、上部表 面積の 5%の場合についても実験を行った。

水素放出位置は、幅方向の中心で長手方向の1/4 の位置とした。これは、ガス容器の設置位置から 考えると水素システムが存在する可能性のある領 域内で、空間的な濃度分布差が比較的得やすい条 件であると考えられる。また、水素放出方向は、 バス屋根上模擬区画の長手方向について、センサ 1の向きを短方向とし、センサ11の向きを長方 向とした。

また、センサ2、3、4、6、8、10、12 を天井長手方向の濃度分布とし、センサ1、2及 びセンサ7、8並びにセンサ11、12を上下方 向濃度分布、センサ4、5及びセンサ8、9を幅 方向の濃度分布とした。水素の放出流量は、配管 継ぎ手の漏れ実験の結果と衝突時の水素漏れ許容 量を考慮して、5、30、65、131L/minとした。な お、バス屋根上模擬区画中に水素が均一化した場 合の濃度が5%となる600Lに対応させて水素放出 時間を設定した。

上記の実験条件を Table.5・1 にまとめる。また、

放出口の断面積が 44.9mm²(口径: 7.56mm)である ため、各放出流量は Table.5-2 となる。

Table.5-1 バス屋根上模擬区画実験条件

	廿七	ガス容	器有り	ガス容	器無し
開口部	放出 流量 [L/min]	短方向	長方向	短方向	長方向
0	65	0		0	0
側面10%	5	0	0	0	0
	30	0	0	0	0
	65	0	0	0	0
	131	0	0	0	0
上部 10%	5	0	0		
	30	0	0		
	65	0	0	0	0
	131	0	0	0	0
上側面 20%	5	0		0	
	30	0		0	
	65	0	0	0	0
	131	0		0	
側面5%	5	0	0		
	30	0	0	0	
	65	0	0	0	
	131	0	0		

Table 5-2	放出谏度
abic.0	

1001010 =	
放出流量	放出速度
[L/min]	[m/s]
5	1.86
10	3.71
20	7.48
30	11.14
65	24. 13
131	48.64

5.4.2.2 密閉状態における実験結果

大きな区画における水素の拡散性を調査する目 的で、密閉区画における水素濃度分布の測定を行 った。密閉状態(開口率 0%)での区画内の水素濃度 分布の一例として、ガス容器が無い場合における 65L/min で水素放出を行った水素濃度分布を Fig. 5-9 及び 10 に示す。これより、密閉区画における 実験結果から以下の結果が得られた。

・天井部の長手方向の濃度分布は、水素放出停止 直後にほぼ一致した。これは、水平方向における 水素の拡散性が非常によいことを示す。

・上下位置の濃度分布を見ると時間が経過するに 従い一定濃度に漸近している。即ち、天井に設置 したセンサの設置位置で、水素放出停止後に濃度 低下が起こっているのは、上下方向に水素が拡散 しているためと考えられる。本実験では、上下方 向の水素拡散に 20~30 分程度の時間を要してい る。

・幅方向の濃度分布については、水素放出停止直 後にほぼ一致した。即ち、水平方向における水素 の拡散性が非常によいことを示す。

これらの結果は、密閉区画の場合の他の条件に おいてもほぼ同様の傾向となった。以上のことか ら、大きな区画(長さ10.8m、幅2.25m、高さ0.5 m)の密閉空間において、水平面の水素拡散性が非 常に良いことが確認された。

5.4.2.3 開口部がある場合における水素 濃度空間分布

開口部がある場合の測定結果の一例として Fig. 5-11 にガス容器が有る場合における側面開口(10%)での測定結果を示す。なお、放出方向は短方向とし放出流量は 30L/min とした。









Fig.5-11の結果より、各位置における水素濃度は、 時間の経過とともに一定値となる。これは、区画内 への水素の流入と放散とがバランスして平衡状態に なるためと考えられる。以後、平衡状態における濃 度を「平衡濃度」ということにする。他の開口条件 における結果についても水素放出量、開口率及びセ ンサ位置に対応した濃度で平衡状態となった。

以上のように開口部がある場合では、平衡状態とな





ることが分かった。

5.4.2.4 各開口部条件における水素濃度分布 についての検討

前節の結果から、水素の平衡濃度を用いて各条件に おける水素濃度分布について検討する。

Fig.5-12(a)~(d)にガス容器が有る場合における短 方向放出での測定結果を示す。





(c)容器有・上面10%開口・短方向
 (d)容器有・上側面20%開口・短方向
 Fig.5-12 短方向放出における長手方向の区画上部濃度分布





これらの結果において開口率に関わらずほぼ同様 の傾向となった。放出流量が少ない場合には放出口 上部のセンサ4が最も高い値を示すが、放出流量が 増加するに従い放出方向直線上にあるセンサ3にピ ークがシフトしている。これは、吹き出しの影響に よるものと考えられる。

Table.5-1の条件の短方向放出において約6%以上 の高濃度は見られなかった。また、65L/min 及び 131L/min におけるセンサ3以外は4%以下の値と なった。特に、最遠端のセンサ12については反応 しなかった。

Fig.5-13(a)~(d)にガス容器がある場合における

長方向放出での測定結果を示す。長手方向の水素濃度 分布特性について、ピーク値等の挙動については短方 向と同様、吹き出し方向で見られた。また測定の結果、 Table.5-1 の条件の長方向放出において、開口率が低 いほど水素濃度の上昇が見られたものの8%を超える ような高濃度領域は見られなかった。開口部近辺(セン サ4、6、8、9)で65及び131L/minのいくつかの 条件で4%を超えたものの、多くの場合で4%以下で あった。なお、最遠端のセンサ12では、開口率5% の場合で65L/min及び131L/minの放出流量の場合の み濃度の上昇が見られた。





Fig. 5-14(a)と Fig. 5-14(b)に中心部と端部におけ る水素濃度分布の一例を示す。今回の実験条件全体 として、Fig. 5-14(a)に示すように中心部と端部の濃 度差はそれほど見られなかった。また、最も濃度差 が見られた Fig. 5-14(b)の例では、上部開口の影響と 水素の吹き出しの影響のため濃度差が拡大したと考 えられる。特に吹き出しの影響が大であった。した がって、吹き出しの影響が無ければ、ほとんどの条 件において、中心部と端部の濃度差は 2%程度と考 えられる。

Fig. 5-15(a)と Fig. 5-15(b)に開口率 5%における 上下方向の水素濃度分布の一例を示す。これらの図 より、吹き出し速度及び吹き出し方向の影響で上部 と下部の濃度差が大きくなっており、一方で吹き出 し速度が大きい場合においても、下部には水素がほ とんど検知されていない。これは、他の条件につい ても同様であり、屋根上模擬区画においては水素が 下部で検知されない結果となった。 この原因として、水平方向に対する空間が大きな場 合、吹き出された水素は、対流することなしに外部へ 放出されるためと考えられる。

5.4.2.5 水素放出口付近の水素濃度分布

前節の結果より、Fig.5-8 の水素センサ位置におい て、水素の高濃度領域は見あたらなかった。そのため、 水素放出口付近の水素濃度分布について調査を行っ た。Fig.5-16に水素放出口付近に設置した水素センサ を示す。本実験において、センサ1~5を天井長手方 向の濃度分布とし、センサ3、12及びセンサ5、1 1を上下方向濃度分布、センサ2、6及びセンサ3、 7、8並びにセンサ5、9、10を幅方向の濃度分布 とした。

本実験では、側面 10%開口及び上側面 20%開口の 条件で測定を行った。また、放出流量を 5、10、20、 30、65、131L/min と変化させ、水素の放出は床面の 水平方向とした。





測定の結果を Fig.5-17、Fig.5-18 に示す。センサ 12を除き水素放出口付近においても爆燃領域に至 る濃度は測定されなかった。センサ12については、 水素放出口の直線上にあり、放出流量が大きくなる と高濃度の水素が放出口から直接当たるため、高い 濃度を示したと考えられる。一方、水素放出口近傍 にあっても、放出方向、放出流量によっては4%に 至らないケースが多数見られた。

これらの結果から、水素は放出口から放出された 直後に拡散し、濃度が低下していることが分かる。 放出流量が小さい場合には、放出口近辺の天井部で 4%程度の濃度が測定されるが、放出流量が増加する に従い、放出口から離れた位置で4%程度の濃度が測 定される。これは、放出流量が増加すると、吹き出さ れた高濃度の水素が遠方まで到達するためと考えら れる。そして、高濃度となった条件は、放出流量が高 い場合(65L/min 以上)において、センサ12の設置位 置で20%を測定したのみである。その場合においても、 センサ5の設置位置では、最大約7%以下となった。



 Fig.5-19
 開口率の濃度時間変化

 (容器有・側面 5%開口・長方向 センサ 6)



(容器有・側面5%開口・長方向)

以上のことから、水素は非常に拡散性が良く、放 出された直後から急激な濃度低下を起こすと考えら れる。また、本実験条件において水素の爆燃領域に 至る高濃度領域が存在するのは、放出流量が 65L/min以上の場合における放出方向に50cm 程度 までの距離であり、区画全体の領域に対して比較的 狭い領域にのみ存在することが分かった。

5.4.2.6 各開口部条件における水素濃度低 下時間についての検討

区画内における水素濃度低下時間(水素滞留時間) について検討する。

Fig.5-19 と Fig.5-20 にガス容器有り・長方向放 出・センサ6における開口率の濃度時間変化を示す。 これらの図において、水素濃度低下時間は、水素が



 Fig.5-20
 開口率の濃度時間変化

 (容器有・上面 10%開口・長方向 センサ 6)



(容器有・上面 10%開口・長方向)

平衡状態にある場合の濃度から1%に低下するまでの 時間を水素濃度低下時間とした。

Fig.5-21 と Fig.5-22 に水素濃度低下時間(水素滞留時間)の一例を示す。Fig.5-21 は、水素濃度低下時間が最大の場合であり、開口率が 5%のため約 340 s 程度水素が滞留している。Table.5-8 における開口率 10%以上の条件では、Fig.5-22 のように水素滞留時間は最大約 100s 程度であった。これらの結果は水素の高拡散性を示していると考えられる。

以上のことから、水素の拡散性が高いこと及び水素 滞留時間が開口状態の影響を受けることが分かった。 したがって、区画に十分な開口部分が存在すれば、水 素の滞留は起こりにくいと考えられる。 5.4.2.7 バスの屋根上模擬区画実験のまとめ

今回、バスの屋根上を模擬した模擬区画を作成し、 種々の条件で区画内に水素放出を行った。その結果、 以下のことが分かった。

①水素の拡散性が非常に良いため、密閉空間において十分時間が経過すると区画内の水素濃度はほぼ均一となった。

②区画に開口部がある場合には、水素の流入(漏洩) と流出(放散)が平衡状態となり、水素漏洩流量及び 開口部の面積に応じ、区画内の各位置で水素濃度が 一定レベルとなることが分かった。

③バスの屋根上模擬区画内において、水素濃度 8% を超える濃度は測定されず、爆燃領域に至るような 高濃度領域は見られなかった。

④水素放出口近辺の水素濃度分布を最小 25cm 間隔 で調査した結果、水素の爆燃領域に至る高濃度領域 が存在するのは水素放出直線上の放出口付近であり、 区画全体の領域に対して比較的狭い領域にのみ存在 することが分かった。

⑤本実験において、水素濃度が4%を超えるのは放 出流量が多い場合の水素放出口付近であり、その他 の条件では水素濃度が4%未満となった。

⑥区画に十分な開口部分が存在すれば、水素の滞留 は起こりにくいと考えられる。

したがって、水素センサの動作濃度が 4%である ことから、上記の⑤の結果を踏まえると、水素セン サの設置位置によっては水素の漏れ流量が数十 L/min の場合においても、水素センサが動作するこ となく水素が漏洩放出し続けることが考えられる。 また、ガス容器や配管類の甚大な損傷による著しい 損傷がなければ、適切な開口部を有する区画内にお いて爆燃に至る高水素濃度領域が生じる可能性は小 さいと考えられる。 5.4.3 バスの後部模擬区画実験

5.4.3.1 実験方法

本実験では、バス後部という段差が想定される区 画に対して、水素濃度分布及び水素の滞留状況確認 を行う。また、バスのエンジンルームと屋根上を接 続して高さ方向が最大となる区画の条件を想定する ことで、高さ方向に対する水素濃度分布についても 確認を行う。

バス後部模擬区画においても以下の項目について 計測する。

 ・し、「模擬区画内の水素濃度の空間分布

②水素濃度の時間変化

③水素センサの作動状況

実験に用いる区画は、CNGバスやノンステップ バス等で使用されているバスを調査した結果を元に バスの後部として想定できる範囲で形状を単純化し た。Fig.5-23 にその概要図を示す。本区画では、バ スの後部を想定していることから区画の底面は開放 状態とした。また、バスの床面の高さがおおよそ 500mm であることから、区画全体を地上面から 500mm の位置に水平に設置した。

実験条件として、区画の上部に開口部が有る場合 と無い場合について検討し、開口部のある場合では、 上部面積(4 m²)の 10%となるように開口面積を設定 した。放出流量は 5、15、30、65[L/min]とし、開 口部のある場合には 131[L/min]の条件を追加した。 また、放出時間は、区画中に水素が均一化した場合 の濃度が 5%となる 300L に対応する水素放出時間 を上限とし、各放出流量で水素濃度が平衡状態とな るまで放出した。水素の放出口の位置として、段差 部分への水素の滞留状況を確認する目的から、 Fig.5-23 に示す下段部の中心付近とし、放出方向を 上向きとした。

センサ2、7、8を(a)高さ2,000mm、センサ5、 9、11、12を(b)高さ1,000mm、センサ1、3 を(c)高さ0mmとする。また、センサ10、11を (a)垂直列A、センサ3からセンサ7を(b)垂直列B、 センサ1、2を(c)垂直列Cとする。



 5.4.3.2 区画内における濃度時間変化 Fig.5-24に開口部がない場合における 30L/min 及び 65L/min の測定データを示す。

30L/min の場合にはほぼ平衡状態に至ったが、 65L/min の場合には規定の水素放出時間内において 平衡状態に至らなかった。このため、65L/min にお いて高濃度領域の有無が確認できなかったが、実際 にセンサが設置される可能性のある位置(センサ2 及び4~12)において、すべての濃度が4%に達す ることから、65L/min 以上の放出条件においては、 センサが動作して水素放出が停止するため問題ない と考えられる。したがって、以下、開口部がない場 合については、30L/min までのデータについて議論 する。

Fig.5-25に開口部が有る場合における 30L/min 及

び131L/min の測定データを示す。図より、開口部が ある場合には、放出流量131L/min においても平衡状 態になることが分かる。したがって、開口部がある場 合については、131L/min まで検討を行う。

5.4.3.3 開口部が無い場合の区画内の水素濃 度分布についての検討

Fig.5-26 に区画上部の開口部が無い場合の水平方 向で整理した水素濃度分布を示す。図より、放出流量 が増加するに従い各位置での水素濃度が上昇してい ることが分かる。高さ 2,000mm における水平方向の 濃度分布は、各濃度においてどの位置に置いてもほぼ 一定の値となった。これは、水素の拡散性が良いため に水素濃度が一様になったと考えられる。



Fig.5-26 水平方向の水素濃度分布(開口部無し)

高さ 1,000mm では、センサ11をピークに若干 の濃度の偏りが見られる。これはセンサ11が水素 放出口の上部に位置するため、水素の吹き出しの影 響でセンサ11の周囲で濃度が高くなるものと考え られる。このように吹き出しの影響が濃度分布に濃 度差を生じさせているものの、水素放出流量が小さ いことから、センサ間の濃度差は小さく高さ 1,000mm においても比較的濃度分布は一定してい る。この結果より、段差部分が存在することが水素 の滞留に影響することはないと考えられる。

高さ 0mm は区画床面を示すため、区画外への水 素の放散により若干の濃度の上昇が見られるが、総 じて 2%以下であった。

Fig.5-27 に区画上部の開口部が無い場合の垂直方 向で整理した水素濃度分布を示す。垂直列Aは水素 放出口の上部であるため高い濃度を示している。水 素放出口の上部においても 30L/min でなければ 4% を超えることはない。垂直列Bでは、センサ3を除 き各放出流量によってほぼ一定濃度となった。これ は、水素が拡散性して垂直方向の濃度分布がほぼ一 定になったものと考えられる。なお、センサ3につ いては、床の開口面にセンサを設置しているため、 濃度が上昇しなかったと考えられる。

以上の結果から、区画上部の開口部が無い場合にお いて水素放出口近くの吹き出しの影響を除けは、区画 内の濃度分布はほぼ均一になると考えられる。また、 床面が開口されているため、爆燃に至るような高濃度 領域は見られなかった。更に、段差部分の水素濃度に ついては、他の位置に比べて著しく水素濃度が高くな ることはないと考えられる。

5.4.3.4 開口部が有る場合の区画内の水素濃 度分布についての検討

Fig.5-28 に区画上部の開口部が有る場合の水平方 向で整理した水素濃度分布を示す。開口部が無い場合 と比較すると濃度が低くなっている。高さ 2,000mm では、各放出流量においてほぼ一定濃度となった。高 さ 1,000mm では、水素の吹き出しの影響でセンサ1 1 での濃度をピークに濃度差がみられたものの、セン サ1 1 を除いたほとんどの条件で 4%を超えることは なかった。また、段差部分に設置したセンサ1 1 及び 1 2 については、他の位置に比べて著しく水素濃度が 高くなかった。高さ 0mm では、ほぼ濃度はゼロであ った。



Fig. 5-29 垂直方向の水素濃度分布(開口部有り)

Fig.5-29 に垂直方向で整理した水素濃度分布を示 す。垂直列Aは水素放出口の上部であるため高い濃 度を示しているものの、他の垂直列では、ほとんど 濃度が上がらなかった。また、垂直列Bから高さ方 向に対して最大 2%程度の濃度差が見られ、区画内 の濃度分布が均一でないことが分かる。

Fig.5-28 及び Fig.5-29 において、水素濃度が 4% を超過したケースは、放出口直上の放出流量が高い 場合であった。以上のことから、水素の高拡散性に よって区画上部の開口部から水素が放散されるため、 区画内の水素濃度が上昇しないと考えられる。その ため、爆燃に至るような高濃度領域は見られず、水 素放出口の直上を除き水素濃度 4%を超える結果は 見られなかった。更に、段差部分の影響については、 特に水素が滞留することはないと考えられる。

5.4.3.5 区画内における水素低下時間につい ての検討

Fig.5-30 に開口部が無い場合における区画内の水 素濃度低下時間の測定結果を示す。

Fig.5-30(a)より、開口部がない場合には、高さ 1,000mmの水平方向の濃度は、一様に低下している ことが分かる。また、Fig.5-30(b)より、高さ方向の濃 度低下は上部に行くほど濃度低下時間が長くなった。 これは、区画の床面が開放されているためである。他 の高さ及び垂直列においても同様の傾向となった。今 回の実験の結果、開口部が無い場合の条件において水 素濃度低下時間は最大約 1,400 秒となった。







Fig. 5-31 開口部が有る場合における区画内の水素濃度低下時間

Fig.5-31 に開口部が有る場合における区画内の水 素濃度低下時間の測定結果を示す。

Fig.5-31(a)及び(b)より、高さ 1,000mm の水平位 置では段差部分のセンサ1 1 及び1 2 で最大 40 秒 程度の水素の滞留が見られるものの、その他の測定 位置ではほとんど滞留しなかった。他の高さ及び垂 直列の結果についてもほぼ同様の傾向となり、開口 部がある条件での最大水素濃度低下時間は、約 40 秒であった。

以上をまとめると、開口部が無い場合については 最大約 21 分程度となり、開口部がある場合につい ては最大約 40 秒であった。このことから、バス後 部の区画において滞留時間を短くするためには、床 面が開口された場合でも上部に適切な開口部が必要 と考えられる。

5.4.3.6 バスの後部模擬区画実験のまとめ バスの後部の模擬区画実験において、以下の結果 が得られた。

①バス後部区画において開口部が有る場合には、区 画内の水素濃度は平衡状態となる。

②区画上部の開口部が無い場合において水素放出口

近くの吹き出しの影響を除けは、区画内の濃度分布は ほぼ均一になる。また、区画上部の開口部が無い場合 では、爆燃に至るような高濃度領域は見られなかった。 ③区画上部の開口部が有る場合では、水素の高拡散性 によって区画上部の開口部から水素が放散されるた め、区画内の水素濃度が上昇しないと考えられる。そ のため、爆燃に至るような高濃度領域は見られず、ま た、水素放出口の直上を除き、水素濃度 4%を超える 結果は見られなかった。

④段差部分の影響については、特に水素が滞留するこ とはないと考えられる。

⑤バス後部の区画において滞留時間を短くするため には、床面が開口された場合でも上部に適切な開口部 が必要と考えられる。

法規上、滞留しない構造であることが求められてい るため、バス後部においても何らかの開口部が設置さ れると考えられ、開口部のあるバス模擬区画の実験結 果が実際の条件に近いと考えられる。

以上のことから、バス後部における水素の濃度分布ついて、ガス容器や配管類の甚大な損傷による著しい損傷がなければ、適切な開口部を有する区画内において爆燃(18%)に至る高水素濃度領域が生じる可能性は小

さいと予想される。

また、開口部の有る場合について、今回の実験の 多くの条件で水素濃度が4%を超過しなかった。即 ち、空気に対する水素の拡散性が高く、開口部から 容易に水素が放逸することから、5.4.2.7で の結果と同様、水素センサでの検知下限値以下の水 素漏洩は検知できず、水素が漏洩し続けると考えら れる。

5.5 まとめ

本報告では、バス屋根上部での水素容器類の格納 及びバス後部でのスタック格納を想定した模擬区画 を作成し、水素漏洩挙動を調査した。その結果、開 口部がある区画では、水素の流入(漏洩)と流出(放散) が平衡状態となり、水素漏洩流量に応じ、区画内の 各位置で水素濃度が一定レベルとなることが判った。 また、空気に対する水素の拡散性が非常に高く、開 口部からの放散によって区画内に高濃度の水素が滞 留することがないことを確認した。したがって大型 バス特有の項目として、基準を変更する必要性はな いと判断する。

水素の高拡散性により、水素漏洩時に空間内の一 部の濃度が水素濃度検出下限値以下となり、水素セ ンサの設置位置によっては水素センサが作動するこ となく水素が漏洩し続けた。また、区画が法規で定 められた滞留防止構造である場合において、ガス容 器や配管類の甚大な損傷及び配管の脱落など著しい 水素の漏洩がなければ、水素の高拡散性のため、適 切な開口部を有する区画内で爆発的な燃焼に至る高 水素濃度領域が生じる可能性は小さいと予想される。

6. 新型水素センサの開発動向調査

6.1 必要性

大型バスを含む燃料電池自動車において、水素漏 れを危険にならない濃度で検知し水素漏れを速やか に停止させる必要がある。水素漏れを検知するセン サとして、水素センサは重要なデバイスである。こ れまで水素センサは、工場等において定置状態で使 用されることが主であった。そのため、自動車で使 用される水素センサについては開発途上にある。 現行法規では、以下に示すように法規が定められて いる。すなわち、主止弁から燃料電池スタックに至 る、構成部品(一体形成の配管を除く。)を設置して いる区画内の上部付近等検知しやすい位置には、水 素ガス漏れを検知する装置を少なくとも一個装備し ていなければならない。((技術基準参照)

このように、水素漏れを検知するため、少なくとも 一個の水素センサの装備が義務づけられている。そし て、現行の規定では、現状の水素センサの性能を考慮 しつつ安全性を確保して水素センサの必要要件が定 められている。

しかし、将来的に水素センサの性能が向上すれば、 水素センサの検知濃度レベルを下げるなどにより、水 素漏れを早期に発見でき水素漏れに対する安全性を より向上させることが可能になると考えられる。その ため、現時点において研究及び開発されている水素セ ンサの開発動向を調査して将来的に有望な水素セン サを把握することで、性能の向上した水素センサを考 慮した上での法規の適切な変更を適切な時期に行え るように準備する必要がある。

6.2 背景と目的

昨今、燃料電池自動車が注目を集めて以来、様々な 原理で水素センサが研究・開発されてきている。一方、 定置型を主として、これまでの原理を使用した水素セ ンサも使用されており、水素センサの種類は様々であ る。水素センサに関連した法規として別添100の3.9.1 項(技術基準参照)がある。この法規では、水素セン サの現状の性能を考慮して、安全性を確保して性能要 件を定めている。しかし、前述したように水素センサ は、日進月歩で開発が行われている。そのため、適切 な時期に実用化レベルにある水素センサの性能に合 わせて、車載用水素センサを選定すれば、水素漏れに 対する安全性を更に向上させることができると考え られる。

本調査の目的は、現時点において研究及び開発され ている水素センサの開発動向を調査し、将来的に有望 な水素センサを把握することである。また、燃料電池 自動車の審査の観点から、審査を効率的に行うために 有効な水素センサについても調査を行う。

6.3 検討方法

本調査では、文献及び聞き取りを主として調査を行 う。初めに現行使用されている水素センサの原理及び 性能について確認した。次に、車載用として特有の項 目を念頭において、新しい原理での水素センサについ て、現時点での性能と利点等を広く調査した。その上 で車載用及び審査用として、注目すべき水素センサに ついて議論した。

自動車用の水素センサとして、以下の項目について

調査を行った。

- ・耐久性(温度・湿度・年数)
- ・応答性
- ・検知精度
- 検知濃度範囲
- ・ガス選択性

6. 4 検討内容

6.4.1 現行の水素センサ原理

定置型も含め、現行使用されている水素センサの 原理としては、以下のものがある。

(a)接触燃焼式

(b)気体熱伝導式

(c)半導体式

(d)熱線型半導体式

(e)3 電極電気化学式

(f)光干涉式

以下、その原理について説明する。 (a)接触燃焼式¹⁾

本センサの検知素子は、水素に燃焼反応を起こす 触媒(白金とパラジウムを含有したアルミナ)で構成 した微粒子によって白金コイルを覆い、焼結させた 構造である。

検知原理は次の通りである。水素が触媒物質と反応して熱を発生させ、その熱が白金コイルを温める。 白金は、温度によって抵抗値が変化するため、水素 濃度が白金コイルの抵抗変化を引き起こす。ここで、 実験から水素濃度と白金コイルの抵抗変化が比例関 係にあることが知られている。一方、周囲の環境条件を考慮するための基準素子として、検知素子と同 構造の補償素子を用意し、補償素子は水素と反応させない構造とする。この補償素子と検知素子でホイ ーストンブリッジを構成し、水素濃度変化を電圧出 力として検出する。検知範囲としては、数十 ppm~ 4%程度である。

なお、本センサでは、温度がある一定温度以下で は応答特性が悪化するため、常時通電させてセンサ を暖機させる必要がある。一方、SO₂、H₂S、シ ロキサン化合物等により被毒してセンサ性能が低下 する。メタノールなどに反応するためガス選択性に 欠ける。

(b)気体熱伝導式¹⁾

本センサの検知素子は、アルミナ基板上に白金の 方形状薄膜パターンを形成し、ガラスコーティング による不活性化処理を施した測温抵抗体である。 検知原理は次の通りである。測温抵抗体に電流を流し て、温度及び抵抗値を一定値に保持する。水素は、高 熱伝導性を持つため、測温抵抗体に水素が接触すると 水素が測温抵抗体の熱を奪い抵抗値を変化させる。一 方、標準ガス(空気)を封入させて水素と接触させない 測温抵抗体からなる補償素子を用意する。その補償素 子と検知素子とでホイーストンブリッジ構成して、抵 抗値変化を電圧変化として検出する。

本センサは、低い濃度での検知が難しく、通常約1 ~100%の濃度範囲で使用される。また、物理センサ であるため劣化や被毒の問題がなく、再現性などに優 れている。

(c)半導体式 1) 2)

半導体式の検知素子は、加熱用のヒータと半導体部から構成される。

検知原理は次の通りである。空気中に含まれる酸素 は半導体に吸着する際、半導体内部の電子と結合して 酸素イオンとなる。この結合のため、半導体内部の電 子が減少し電流が制限を受けて抵抗値が増加する。セ ンサ周囲に水素が存在しない場合、この状態が保持さ れるが、水素が存在すると半導体表面の酸素イオンと 反応して酸素イオンが半導体表面から解離する。その 際、電子が半導体内に解放されるため電流の制限が緩 和され抵抗値が減少する。したがって、本センサでは、 水素濃度の変化が半導体の抵抗値の変化として検出 される。水素濃度と半導体の抵抗値は比例関係となる。

本センサは、応答性が高く、低い濃度ガスの検知能 力があるが、ある一定の濃度以上になると飽和してし まう欠点を持つ。また、温度がある一定温度(300~ 500℃)以下では応答特性が悪化するため、常時通電さ せて半導体内部を暖機させる必要がある。

(d)熱線型半導体式¹⁾

本センサは、従来の半導体式センサの表面に水素と 酸素を選択的に通すシリカ膜(SiO₂)で覆うことで ガス選択性を向上させて低濃度での検出を可能にし た。その結果、検出下限濃度は0.1ppm 程度からとな る。また、温度・湿度による影響が少なく、応答速度 は3~20 秒程度ある。

(e)電極電気化学式(電池)

燃料電池における反応を利用する。水素をイオン化 する膜を設置し、水素が水素イオンと電子に分解され た後、水素イオンが電解液内を通過する際の抵抗値を 測定することで水素濃度の検出を行う。 (f)光干渉式

対象ガスには、それぞれ固有の屈折率があるので、

可視光線の透過によって生ずる干渉縞の移動を計測 する。

6.4.2 新型水素センサの原理

新型水素センサの原理としては、以下のものがあ る。

(g)熱電式

(h)レーザー光方式

(i)光検知式

(j)音波利用式

(k)コンポジット透過膜式

(l)ボールSAW式

(m)固体電解質(EMF式)

(n)半導体(FET型)式

(o)固体電解質(プロトン伝導式)

(p)光ファイバ利用式

以下、その原理について説明する。

(g)熱電式³⁾⁴⁾:產業総合技術研究所

基本原理は、接触燃焼式と同様に水素の触媒燃焼 による温度差から濃度を測定する。つまり、接触燃 焼式では、プラチナ製のコイルが触媒燃焼熱を抵抗 値に変換して水素濃度の計測を行うのに対し、本方 式では、熱電変換膜が触媒燃焼熱を電圧に変換し、 濃度を計測する。

熱電式水素センサは、長方形状の熱電変換膜の片 端にプラチナ触媒を取り付けた構造である。センサ 周囲に水素が存在すると、プラチナ触媒が水素と反 応して触媒燃焼熱を発生させるため、熱電変換膜の 両端で温度差が発生する。熱電変換膜では、その温 度差を直接電圧に変換する。

接触燃焼式センサでは、触媒燃焼熱を抵抗の変化 として捉えるため、低濃度の水素ガスの検出が困難 である。しかし、熱電変換膜では、触媒燃焼熱を熱 電変換原理で信号電圧として発電するため、低濃度 の(100ppm~4%)ガスの検出が可能である。

なお、熱電素子はSiGeにより構成されており、 MEMS技術などを用いることで小型化・ヒータ等 の熱量の減少を行うことができる。

(h)レーザー光方式⁵⁾:四国総合研究所

水素を画像として捉えることが出来るセンサであ る。その検知手順は次の通りである。①レーザー光 を水素に照射する②物質特有のラマン散乱光が反射 してくる。③ラマン散乱光水素に対応した波長の散 乱光を検出できるCCDカメラ(紫外光対応の高感 度CCDカメラ等)で検出する。水素の燃焼や水素ガ スを画像化するものであるが、本センサでは、1%以 上の濃度検知が可能である。

(i)光検知式⁶⁾:長岡技術大学・ファインセラミック

パラジウム合金が水素を吸収することにより、屈折 率等が変化する現象を利用したものである。検知手順 は、次の通りである。①雰囲気の水素により膜厚 7nm 程度のパラジウム(Pd)は水素を吸蔵する。②水素吸 蔵することにより、パラジウム水素化合物が出来る。 ③パラジウム水素化合物に 680nm の赤色半導体レー ザーを入射し、その垂直反射光の強度変化をフォトダ イオードで検出する。④濃度と反射光の強度変化が比 例するため水素を検知できる。

(j)音波利用式:九州大学

本センサは、反射音の音響特性を測定し水素を検知 する。水素が存在することで空間の音響特性の変化が 表れFTDT法により解析を行う。少量の水素漏洩時 において、音響特性が変化することを確認している。 現状として、実現可能性を探っている段階である。数 値計算による研究と、小型模型を使用した実験を行っ ている。

(k)コンポジット透過膜式 ⁷: 岩手大学・株式会社 ミ クニ

水素を選択的に透過するコンポジット膜を開発、そ の膜を利用して水素の濃度を計測する。希土類金属は、 水素を吸収すると電気抵抗が増加する特性を有する が、酸化しやすいという欠点がある。本センサでは、 水素を選択的に透過するコンポジット膜を希土類に 対する酸化防止保護膜として使用することで、希土類 金属の水素センサ利用を可能にした。

特に、希土類金属は、水素に対する電気抵抗率の変化 が大きいため、高感度の水素センサに応用することが 期待される。

(I)ボールSAW式⁸⁾⁹:東北大学

圧電結晶の球の表面に音波による弾性表面波を発 生させると、ある条件下で振幅が減衰せずに周回し続 ける現象がある。本センサは、この現象において水素 を吸収するとパラジウム合金が弾性表面波の振幅を 変化させるという反応を利用するものである。

パラジウム合金の薄膜を圧電結晶球の表面の弾性 表面波周回上に設置して水素が存在する状況におく と、水素がパラジウム合金膜に吸収されてパラジウム の弾性率が変化し、圧電結晶球とパラジウム合金膜の 接触部分で弾性表面波の振幅が減衰する。その際、水 素濃度に相関して弾性表面波の伝搬速度の遅れるた め、その遅延時間を検出することで水素濃度を推定で きる。本センサにおいて、10ppm から 100%の水素 濃度に対して水素が検出できることが確認されてい る。

(m)固体電解質(EMF式)¹⁰⁾:新潟大

検出電極として触媒作用により水素と反応する自 金(Pt)を使用し、基準電極として水素と反応しに くいチタン(Ti)を使用する。両電極を水素が存在 する気体中に設置すると、検出電極において水素の 化学ポテンシャルが変化するのに対し、基準電極で は、化学ポテンシャルが変化しない。この反応を利 用して、検出電極と基準電極との水素の化学ポテン シャルの差を検出することで、水素濃度の計測を行 う。なお、応答速度が速いが、一酸化炭素等が入る ことでセンサの応答が下がる。

(n)半導体(FET型)式¹¹⁾:日立製作所

本センサの基本原理は、電界効果トランジスタ(F ET)において、パラジウムの解離作用によって分離 した水素原子が電気双極子となり、ゲート電圧を変 化させることで水素濃度の変化を電気信号に変換す る。詳細は次の通りである。FET型半導体のゲー ト部分に水素を触媒作用によって乖離させるパラジ ウム(Pd)を設置する。これを水素が存在する気体 中におくと、水素がPdに吸着し水素原子に解離す る。この水素原子は触媒金属層を通過し、金属一絶 縁層境界面に到達し、境界面で電気双極子層を形成 する。この電気双極子は、境界面のポテンシャルを 低下させる。このポテンシャルの低下は、ゲート電 圧の変化と同等の働きを行うため、ソースードレー ン間の電流を変化させる。このように水素の濃度に 応じて変化するソースードレーン間の電流を検出し て水素濃度を測定する。

(o)固体電解質(プロトン伝導式)¹²⁾:新コスモス電機 本方式は、固体電解質層の両端に水素の濃度差を つけ、固体電解質中の水素イオンの移動に伴い発生 する起電力を信号として水素濃度を測定する。

本センサでは、固体電解質にプロトン伝導体を用 いる。検知極にプラチナ(Pt)を使用し、対極(補償 極)に空気をガラスで封止したプラチナを使用する。 ペロブスカイト型希土類複合酸化物を使用すること により、中温域で高いイオン伝導率を有し、高い応 答能力を実現している。濃度範囲 100ppm~10%、 再現性±10%以内、応答速度 90%応答 1 秒以内、寿 命3年以上を目指している。また、微細加工により、 消費電力を削減することを目指している。 (p)光ファイバ利用式¹³⁾

パラジウムが水素を吸蔵すると膨張及び光学的特 性(屈折率・光学吸収係数)変化を起こす。その現象を 光ファイバにより、光の波長変化、光路長変化、光の 位相変化、光の強度変化として捉えて水素を検出する。 研究開発例としては、「干渉方式」、「オプトード方 式」、「FBG方式」、「LPG方式」、「エバネッセン ト波吸収方式」などがある。

6. 4. 3 既存原理によるセンサの性能向上

既存原理のセンサの改良による性能向上について は、接触燃焼方式について2つのセンサが開発されて いる。1つは、熱伝導層を挿入し、コイルを2重らせ ん構造にしたものである。これにより、バネ的な要素 を持ち振動等に強い構造となると共に、接触表面積が 大きいため熱を得やすく性能向上に寄与している。ま た、外装を多孔質プラスチックにしたため耐食性に優 れる。もう1つは、検知素子部を小型化することで耐 振動性及び衝撃性が高く、省電力化・起動時間の短 縮・応答性向上という性能を得たセンサである。

6.4.4 審査への適用

燃料電池自動車の審査に関連する水素センサの用 途は、

(a)気密・換気試験

(b)パージされたガスの排出時の水素濃度測定 (c)水素ガス漏れ検知器等の試験

のケースがある。

(a)気密・換気試験

本測定は、保安基準別添100の別紙1に記載されて いる。本試験の「3.配管等の気密試験」において、配 管等に圧力がかかった状態において、高圧部から燃料 電池スタックに至るまでの配管等の確認可能な箇所 について、ガス検知器または検知液を用いて水素ガス 漏れの有無を検知することとされている。

本試験では、水素システムが存在する区画全域に渡って微少な水素漏れを検知する性能が必要となる。その性能を満たす可能性のあるセンサとして、「レーザー光方式」が有効であると考えられる。このセンサでは、水素の漏れを広範囲に検知し水素漏れを可視化することができる。このセンサを使用することで、漏れ部分を迅速に特定することができる事が期待でき、審査の迅速化につながると考えられる。なお、現在の検知限界が1%程度であるため、本試験の目的である微

少漏れに対応するためには、更なる感度向上が必要 と考えられる。

(b)パージされたガスの排出時の水素濃度測定

本測定は、保安基準別添100の別紙2に記載されている。別紙2に記載される必要能力を以下に示す。

本測定において、上記性能を満足するセンサとし て接触燃焼式検知器がある。接触燃焼式は、水素を 燃焼させて濃度を検知する方式であるため、検知用 に採取した水素ガス中に水蒸気が混入していた場合、 その検知精度に誤差を生じることとなる。そのため、 現行法規では、計測部をパージされたガスの流れる 中心上であって、パージ・ガス排出部から 100mm 以内のなるべく近い位置に設置することとされてい る。これは、100mm 離れれば、水蒸気の影響を排 除できるという報告に基づいている。一方、本測定 での水素濃度計測において、水蒸気の影響を受けな いセンサを使用することが望ましいと考えられる。 他の原理で上記性能を満たすものがあれば、審査に おいて水素センサを使用する場合の選択肢が増えて 望ましいと考えられが、現状、そのようなセンサは 見あたらなかった。

(c)水素ガス漏れ検知器等の試験

本試験は、保安基準別添 100 の別紙 3 に記載され ている。本試験では、空気に水素を混入した水素濃 度 3.9%±0.1%のガスを用いる必要があり、その濃 度のガスを生成し、規定濃度であるかの確認のため の水素センサが必要である。現状、ガスクロマトグ ラフにより確認して規定濃度の水素を生成している が、より簡易に測定することが望ましい。本試験法 の性能を満たすセンサについては、今後、接触燃焼 方式のセンサを改良したセンサについて実現が期待 される。

6.5 まとめ

これまでの調査の結果、新型水素センサは原理も 含めて様々な新しい技術が提案されてきている。 今回の調査では、13の新型水素センサについて調査 を行った。その内訳は、従来の接触燃焼式を改良し たセンサが2種類、他はすべて新しい原理によるセ ンサである。新原理は9種類ほどあり、センシング の可能性を確認している段階から、センサの実用化 段階に入っている物まで様々であった。

一方、過酷な使用状況を想定しなければならない 自動車では、その仕様の厳しさから今回調査した新 型水素センサが近々に自動車で実用化されることは 難しいと考えられる。しかし、水素エネルギーが注目 されて、数年しか経過していないことを考えると、現 在は、新技術の萌芽時期であり、今後、これらの新型 水素センサが実用化に向けて開発が進むと予想され る。

審査用としては、水素の画像化技術が開発され審査 の効率化及び迅速化に貢献することが期待されると 共に、水素センサの検定用ガスの確認用水素センサに ついても期待されるセンサが見られた。

以上のことから、これらの技術について、引き続き その開発動向を注視していくことが必要であると考 えられる。

<参考文献>

1)福井;「水素ガスセンサの現状と将来」,表面技術,第 57巻,4号,p2-7

2)田中;「半導体水素センサー」,月刊 機能材料, Vol.26, No.12, p14-21, 2006-12

3)申;「熱電式水素センサー」,月刊 機能材料, Vol.26, No.12, p22-29, 2006-12

4)申ほか;「熱電式水素センサの研究開発」,NEDO 燃料電池・水素技術開発成果報告会 要旨集-水素技 術開発-(平成17年度成果),p138-141

5)三木;「水素火炎・水素ガス可視化技術の開発」,水 素エネルギーシステム, Vol.20,No.1, (2005)

6)奥原ほか;「Pd薄膜を用いた光検知式水素センサ」, 月刊 機能材料, Vol.26,No.12, p37-45, 2006年12月 7)http://www.ccrd.iwate-u.ac.jp/liaison/theme/122.p df

8)山中;「ボールSAW水素ガスセンサ」,月刊 機能 材料, Vol.26, No.12, p30-36,2006-12

9)山中;「ボールSAW水素ガスセンサの開発」,表面 技術,第56巻,4号,p35-38

10)原田ほか;「EMF型水素センサーの特徴と動作原 理」,表面技術,第57巻,4号,p15-18

11)横澤;「半導体水素センサと検知システムの研究開 発」,NEDO燃料電池・水素技術開発成果報告会要 旨集-水素技術開発-(平成17年度成果),p142-145 12)鈴木;「プロトン伝導体を用いた固体電解質型水素 センサ」,NEDO燃料電池・水素技術開発成果報告 会要旨集-水素技術開発-(平成17年度成果), p146-149

13)岡崎ほか;「光ファイバを用いた水素センサの開発 動向」,表面技術,第57巻,4号,p8-14

Table.6-1 水素濃度測定時の必要能力

項目	能力
検知範囲	水素濃度 0~4%
水素濃度の読取り	水素濃度 0.1%程度まで最小読取りが可能であること
指示誤差	水素濃度±0.2%以下
計測間隔	100ms 以下

Table.6-2 現行水素センサ

原理	接触燃烧式	熱線型半導体式	半導体式	3電極電気化学式
測定可能濃度	0.1~4%	0.01~1%程度	10ppm~2%	(a) ~(c) フルスケールの)切り替え (a) 0.01%~1% (b) 0.01%~2% (c) 0.01%~4%
精度(指示精度、 分解能)	±10%程度	±20%	±30%程度	各フルスケール5%
温湿特性	-30~85℃ 95%の相 対湿度以下 -40~105℃ 95%の 相対湿度以下	温度:−30~+80℃ 温度:98%の相対温度以下	ー30~85℃ 95%の相対湿度以下 ー40~105℃ 95%の相対湿度以下	温度:-20度~+80度 湿度:10%~95%の相対湿度以下
応答特性	2秒以内(80%起動) 5秒以内(80%応答)	90%応答5秒程度 起動時間(約3秒)	10秒以内(80%起動) 2秒以内(80%応答)	5秒以下
耐久期間	数年	定置式警報器用として5年以 上の実績	5年以上 メンテナンスフリー	約1年間
ガス選択性	・水素選択性として他ガス の感度は水素の1/100以 下である。 ・シリコンガスで被毒しな い		・水素選択性として他ガスの感度は水素 の1/100以下である。 ・シリコンガスで被毒しない	以下の各ガスで各濃度の場合に水素として表示 される濃度 C0 : 92ppm →0.001% C3H70H : 600ppm →0.003% N0 : 22ppm →0.001% ガソリン →0-0.005% 飽和水蒸気 →0-0.005%

Table.6-3 新型水素センサ

会社名/研究書名	シチズン	九州大学 知能機械システ ム部門	東北大学	新潟大学	產業技術総合研究所· 理研計器	日立	長岡技術大学・ファイン セラミックスセンタ	岩手大学工学部	四国総合研究所	新コス	モス電機
原理	接触燃烧式	音響型	SAWAC	EMFX	熱電式	FET룊	光検知式	透過限型	レーザ光	接触燃焼式 〈µ-CS〉	固体電解質型
測定可能濃度	①0.03%~4.0% (0.03%~1.2%;直線性) ② 0.1%~4.0% (0.1%~2%;直線性)		現在:10ppm~ 100%		目標:10ppm~~4% 現在:100ppm~~4%		1000ppm~100%	0.01~4%	15以上	0.1~4%	0.01~45
精度(指示精度、 分解能)	①分解能:±300ppm ②分解能:±500ppm			目標:分解能0.01 mol% 現在:分解能0.1 mol%	現在:±10%	現在: 再現性 10%		目標値:±10%		土10%以内	土10%以内
形状(寸法·重量)	12×12×10mm程度 (制御回路は別述)		10×10×10mm		2×2mm	3×7.5mm	10mm角×1mm(任窓 形状に設計可能)	¢11×15mm(6.4 g)		55×50×27mm	開発中につき未定
温湿特性	温度:-50度~+150度 温度:95%の相対温度以下 (WaterProof仕様有り)			温度:0~130℃ 湿度:30~85%	温度:-20~50℃	湿度の影響 は軽微	温度:100度以下で 10%以内の変動			-30~100℃ 指示精度±10%以内 湿度の影響は軽微	目標(使用環境範囲) -30~120℃ 5~95%の相対湿度以下
応答特性	90% 応答時間5秒以内		現在:常温で4秒以 内	約0秒	水素1%に対して5秒以 内	目標:5秒 現在:10秒	1sec以内(室温にて)	0.4sec		90%応答1秒以上 起動時間一秒以内	90%応答現状:1秒以内 起動時間現状:1秒以内
耐久期間	10年以上 (水素感度50%以上となる)			6年以上	目標:耐久性1年以上		1000時間以上			超年劣化率 :10%以内	目標 耐久性3年以上
ガス選択性	NOx:影響なし SOx:影響なし 水蒸気:影響なし			都市ガス及びCOに影響されない			メタンとイソブタンに感 度を示さない	CO:影響なし CO2:影響なし SO2:影響なし NO:影響なし NO2:影響なし		シリコーン耐性あり	H2選択性 シリコーン耐性あり
研究目的		間空間での水素 漏れを検出する	測定可能濃度が広く 高ガス選択性 高応等性 低価格	高速応答性 高精度 低価格	□ストの創業 高速応答 高感度化	水素の漏れ を確認するモ ニタリングシ ステムの開 発		燃料電池用	遮蔽に弱い		
偏考	定置型FC用として2007年販 売予定あり。	現在、水素セン サとしての適用 可能性について 研究中								率載用 評価サンブル提案可能	

7. 圧力法による水素漏れ測定に関する検討

7.1 必要性

現在制定されている技術基準では、圧力センサの精度、コストの問題から、衝突試験時の燃料漏れ試験時間を 60 分としてある。一方、ガソリン車は5分なので、これを短縮する可能性を検討する。

7.2 背景と目的

現行の圧力法による気体燃料の漏れを測定する 方法は燃料電池自動車のみのため定められた基準 である。したがって大型車特有の課題ではない。 ただし、ガソリン車の場合、燃料漏れは5分で測 定することが規定されている。同程度の短時間で 試験できた方が理にかなっているのではないか、 という考え方がある。この場合、コスト、信頼性 をどう扱うかが課題である。

型名項目	センサA
センサ構造	蒸着型フルブリッジ圧カセンサ
圧力測定モード	ゲージ圧、絶対圧
圧力測定レンジ (Pa)	0∼40M、0∼70M
過大圧力	圧力測定レンジの1.5倍
精度(% FS)	<u>+</u> 0.1(直線性+ヒステリシス+再現性)
長期間安定性	<u>+</u> 0.25%FS/12ヶ月
ライフサイクル	FSレンジの圧力印加にて100万回以上
使用温度範囲	-65 ~ 140°C
性能補償温度範囲	-65 ~ 140°C
ゼロ点温度係数	<u>+</u> 0.005%FS/°C
スパン温度係数	<u>+</u> 0.005%FS/°C

Table.7-1 検討に用いたセンサの諸元表

7.3 検討方法

衝突時の圧力測定に適した高精度圧力センサを 選定し、衝突時相当の耐衝撃性を検討した上で、 圧力センサの測定精度に与える要因を分析して、 計測時間の短縮の可能性を検討した。

7.4 検討内容

開発されつつある各種圧力センサの中から、耐 衝撃性の面で衝突試験に使用できると考えられる、 表 7-1 に示す 2 種類のセンサを選定し、燃料漏れ 試験時における計測精度を検討した。

-				
/ 項		センサB		
圧;	カ測定レンジ(Pa•FS)	0∼42M、0∼77M		
	過大圧力	測定レンジの120%		
精	ヒステリシス	<u>+</u> 0.01%FS		
度	再現性	<u>+</u> 0.01%FS		
	加速度誤差	<u>+</u> 0.0038%FS/G		
温	使用可能範囲	−54°C~107°C		
度	温度補償範囲	0∼50°C		
特	ゼロシフト係数	<u>+</u> 25PPM/°C		
1±	感度シフト係数	<u>+</u> 25PPM/°C		
圧	カ−出カ周波数とレベル	40KHz/0 圧力~36KHz/FS圧力 出力:TTLレベル4Vp-p		
圧力室材質		低圧ペローズ:ニッケル鋼 圧カ入力部:SS316とエポキシ系接着 剤 高圧ブルドン管:ステンレス鋼		
	圧力ポート容積	100以下		

Table.7-2 誤差解析結果

圧力計種類	センサA	センサB
精度(%FS)	0.1	0.02
ゼロ点温度シフト(%FS)		
[温度変動10℃時]	0.05	0.025
スパン温度シフト(%FS)		
[温度変動10℃時]	0.05	0.025
アナログ、デジタル変換誤	0.02	0
総合精度(%FS)	0.22	0.07



Fig.7-1 センサAの誤差検定結果

Table.7-2 に衝突試験時の燃料容器内圧力測定に おける総合精度をカタログ値から解析した結果を示 す。校正時と使用時の温度差を 10℃と仮定して基準 の精度に加え温度影響を考慮した。Fig.7-1 にセンサ Aの場合の精度および温度影響を実験により検定し た結果を示す。精度はカタログ値の 1/2 を示し、使 用圧力範囲で十分な精度を有していることを示す。 温度影響に関してはゼロ点誤差が 0.1%と大きめの 値を示したがスパン誤差は常用温度範囲で 0.05% 以下であった。そこで Table.7-2 の値を用いて漏れ 量測定の測定時間を推定した。

乗用車を想定し、150L、35MPaの容器をヘリウム で満たし衝突試験を実施した場合を仮定する。水素漏 れ量を許容値の131L/minとした場合、ヘリウムでは 100L/minの漏れを計測することになる。圧力センサ の測定レンジをそれぞれ40MPa、42MPaとして、燃 料漏れ測定時に必要な計測時間を試算した例を Table.7-3に示す。なお表中の「10%精度」とは、漏 れ量測定値が10%の精度を持つことを意味する。

Table.7-3 ヘリウム漏洩時の測定精度と測定時間

圧力計種類	センサーA	センサーB
10%精度	13分20秒	4分25秒
5%精度	26分40秒	8分50秒

表の計算結果から、センサ B の場合は、10%精度 でかつ5分以内で測定可能と言える。圧力計を用い た方法が水素センサを用いた燃料漏れ監視の代替法 として使用可能か、については、精度を高めるとコ スト高につながること、圧力計での検知は時間を要 することなどを考えると、現在の技術水準では水素 センサに代替する手法を直ちに提案できる状況では ない。

7.5 まとめ

圧力センサの開発にしたがって、将来的には、衝 突時の水素漏れ測定時間を 60 分から短縮すること が可能であると思われる。ただし、第4章で得られ た実験結果によれば、水素配管の亀裂により生じた 漏れは時間経過とともに増大することもあることが 分かった。これは燃料漏れ計測時間の短縮が、必ず しも安全性を確認する上で有効な方法とならないこ とを意味している。したがって、基準は変更せず、認 証試験時の燃料漏れデータの収集を行いつつ、国際基 準調和の活動の中で今後さらに検討を深めて行くべ きと考える。

8. ガス容器の屋根部設置による直射日光による高温 化の安全性に関する検討

8.1 必要性

自動車に関する法規のうち、燃料電池自動車に係わ る法規では、ガス容器が設置される場合において下記 のように「日よけ」を有することが求められている。 これは、ガス容器が温められてガス容器の内圧が上昇 するとガス容器の破裂等の危険性が増すことから、そ の危険性を防止するためである。

これまで検討されてきた乗用車タイプでは、ガス容 器を屋根上に設置するケースは少ないと考えられる。 しかし、大型バスでは、客室空間の確保、ノンステ ップバスの要望、航続距離を得る必要性などから、 複数本のガス容器を屋根上に設置することが想定さ れる。そのため、実際の環境において、屋根上に設 置されたガス容器の高温化対策が現行法規で求めら れる「日よけ」で十分であることについて確認を行 う必要がある。

8.2 背景と目的

一般に、高圧状態でガスを保存した容器ではその 容器の温度管理が重要である。これは、ガス容器が 温められて内圧が上昇するとガス容器の破裂等の危 険性が増すためである。そのため、ガス容器の保管 及び運搬に関して高圧ガス保安法では、ガス容器に 日よけを有すること等が求められている。

高圧のガス容器を搭載する自動車に関する法規に ついても同様に、ガス容器が危険な温度にならない ように日よけに関する規定が定められている。一方、 ガス容器の高温化に関する危険性について、容器内 圧力の上昇とガス容器の強度及び耐久性との関係が 重要である。容器内圧力と強度及び耐久性について、 日本自動車研究所が関連する研究を行っている¹⁾⁻⁴⁾。 また、一般に容器の設計確認試験温度として、85℃ が容器内ガス許容温度の上限の1つとされている⁵⁾。 これを念頭に「圧縮水素自動車燃料装置用容器の技 術基準 JARI S 001(2004)」が定められていると考え られる。

本調査の目的は、日よけの有効性を確認すること にある。そのため、ガス容器が高温状態となる可能 性がある夏季期間での日中屋外における駐車時を想 定して、実際の環境における温度状況を調査し、日 よけを有したガス容器の表面温度が容器の設計確認 試験温度の85℃を超えないことについて確認する。 日光の影響によるガス容器表面の温度上昇が、設計 確認試験温度の85℃以下であれば、駐車状態におけ る日光による温度上昇に関して問題ないと考えられ る。

なお、本調査では日光による温度上昇のみを検討 対象とし、水素充填時など特殊な温度上昇時の影響 については検討対象外とした。

8.3 検討方法

試験は、2006年8月中旬~9月下旬までの夏季期間において、10:00~17:00の間に模擬日よけ実験装置を当研究所(東京都調布市)の直射日光に曝される

場所に設置して測定を行った。測定結果は、測定期間 中において、外気温度が35℃以上の場合について検討 し、最も高温となる場合について検討を行った。

8.3.1 検討項目

検討は、下記の(Ⅰ)~(Ⅲ)の項目について行う。

(I)日よけを有した場合のガス容器表面及び周囲雰囲 気の最高温度の確認

実環境における温度上昇の程度を確認する。

(Ⅱ)日よけが有る場合と無い場合の温度上昇状況の確認

日よけの有効性を確認する。

(Ⅲ)日よけの塗装色による日光反射率の温度上昇への 影響の確認

日よけの塗装色により、日よけの直射日光に対する 反射率が変化し、それが日よけ内の温度上昇に影響を 与えることが考えられる。そのため、反射率の大きな 白色(反射率 77%)と反射率の小さな黒色(反射率 1%) の2つの日よけを用意し、塗装色による温度上昇の影 響を確認する。

8.3.2 実験装置

Fig.8-1 と Fig.8-2 に実験装置を示す。Fig.8-1 にお いて、日よけは、バスの屋根部分で通常使用されるF R P (Fiber Reinforced Plastics:繊維強化プラスチッ ク)により製作し、最も色による日光の影響を受けにく い白色とした。また、水素漏れ時の滞留防止の観点か ら、バスの屋根上部には通気口が設けられていると考 えられるため、Fig.8-1 のように通気口を 2 ヶ所設置 (反対側に同様の通気口設置)した。

ガス容器は、日よけの中に3本設置し、日よけを有 さないものを1本設置した。また、地上から50cmに 水平に設置し、地面からの輻射熱の影響を避けるため、 木板の2段構造とした。

温度の測定には、熱電対を用いた。測定点は Fig.8-3 に示すように、各ガス容器の底部、中心部、主止弁付 近(S1-1~S4-3)、日よけの外側表面中央部(S7)及び内 側表面中央部(S6)、外気温度、日よけ内の雰囲気温度 (ガス容器周辺温度:S5)とした。外気は、Fig.8-1 に示 すように、ガス容器設置部の下部にある空間とした。

また、日よけの塗装色による影響を検討するため、 Fig.8-4 に示すFRPで製作したBOXを用意し、日 中、直射日光に曝される場所に設置した。これにより、 同環境下における表面色の違いによる温度変化が確 認できる。なお、両BOXについてその反射率を測 定したところ、白色の場合の反射率は77%であり黒 色の場合の反射率は1%であった。

- 8.4 検討結果
- 8.4.1 測定データの検証

2006年夏期期間中において、天気の状態・気温の 上昇・試験場の日照状態を考慮すると実際に検討に 使用できるデータは8データ(8日間)であった。以後、 その8日間のデータについて議論する。8日間の天気の状態及び最高気温をTable.8-1に示す。

また、東京都(調布)及び沖縄県(那覇)における6月~ 9月までの観測史上の最高気温は38.9℃であった。 Table.8-1より、今回の測定条件について2006年度の 夏期中の最高気温は、観測史上の最高気温に比較して 著しく低くないと考えられる。



Fig.8-1 模擬日よけ実験装置

Fig.8-2 日よけ内部



Fig.8-3 温度測定点





Fig.8-4 白色及び黒色比較用BOX

日よけ内の各ボンベに取り付けた温度センサ (1-1)~(3-3)について、中心のセンサ(2-2)との温度差 について検討するとその温度差は±2℃以下となっ た。このため、日よけ内のガス容器表面の設置位置 による温度差は±2℃と考え、以後、センサ(2-2)を 日よけ内のガス容器表面の代表温度として扱う。 Fig.8-5 に一例として、外気温、日よけ外側表面、日 よけ内雰囲気、ボンベ胴体表面中央(日よけ無し)、 ボンベ胴体表面中央(日よけ有り)の測定データを示す。

8.4.2 日よけを有した場合のガス容器表面及び 周囲雰囲気の最高温度の確認

Fig.8-5 のデータから、日よけ内雰囲気温度とガス ボンベ胴体表面温度はほぼ一致した。

	8/18	8/21	8/29	8/31	9/2	9/3	9/4	9/5
天気の状態	快晴	晴れ時々 曇り	晴れ時々 曇り	快晴	晴れ時々 曇り	晴れ時々 曇り	晴れ時々 曇り	快晴
気象庁発表(府中) 最高気温 [℃]	32.8	33.0	32.9	31.9	29.7	31.5	30.9	34.6
測定場 最高気温 [℃]	38.9	39.1	42.5	37.2	35.3	36.8	36.8	40.1

Table.8-1 測定日の最高気温



Fig.8-5 2006/8/18 における測定データ



Fig.8-6 日よけを有した場合のガス 容器表面温度の測定結果

また、外気の最高温度が約38℃の時、ガス容器表面 及び周囲雰囲気の最高温度が約42℃となった。日よ け無しの場合の測定結果では、最高温度が約64℃程 度まで上昇している。

Fig.8-6にTable.8-1における測定日に日よけを有した場合のガス容器表面温度の測定結果を示す。
 Fig.8-6より、ガス容器表面の最高温度が約47℃となり、設計確認試験温度の85℃を大きく下回った。

今回の測定の範囲内において、駐車状態における 日光による温度上昇については、問題ないと考えら れる。

8.5 まとめ

2006年8月中旬~9月下旬までの夏季期間におい て、ガス容器温度の高温化について検討を行った。 その期間中における測定の結果、以下の結果が得ら れた。

日よけ有りと日よけ無しの場合について、その温 度差が最大 23℃程度あり、日よけの効果が得られて いると考えられる。

日よけを有した場合のガス容器表面及び周囲雰囲 気の最高温度を確認したところ、ガス容器表面の最 高温度が約47℃となり、設計確認試験温度の85℃ 以下を大きく下回った。

白色の場合と黒色の場合の温度差が 10℃程度で あり、それを考慮した場合最大 57℃になりうる可能 性がある。いずれの場合も設計確認試験温度の 85℃ 以下を下回っている。

以上のことから、駐車状態における日光による温 度上昇という観点からでは、現行基準が有効に機能 していることを確認できた。そのため、現行基準の 変更は必要ないと考えられる。

<参考文献>

広谷ほか;「自動車用圧縮水素容器の急速充填における容器内温度挙動:第一報」,自動車研究,第28
 巻,第7号,p25-28,2006年7月

2)伊藤ほか;「自動車用圧縮水素容器への急速充填の 数値解析」,自動車研究,28巻,第7号,p29-32,2006 年7月

3)飯島ほか;「自動車用圧縮水素容器の常温圧力サイ クル試験:第1報」,自動車研究,第28巻,第7号, p69-72,2006年7月

4)飯島ほか;「自動車用圧縮水素容器の常温圧力サイ クル試験:第2報」,自動車研究,第28巻,第7号,

交通安全環境研究所報告 第14号

p73-76, 2006年7月

5)Monterey R Gardiner et.al, "Compressed Hydrogen Storage for Fuel Cell Vehicles", SAE Technical Paper 2001-01-2531

9. 燃料電池スタックの公称電圧の規定方法に関す

る検討

9.1 検討の必要性並びに背景と目的

別添 101「燃料電池自動車の高電圧からの乗車人 員の保護に関する技術基準」では、用語の定義とし て、「公称電圧」は「その電気回路の特性を表示する 設計上の電圧であって、製作者が定めるもの」、「作 動電圧」は「通常の作動時または電気回路開放状態 において、あらゆる導電性の部分の間に発生する可 能性のある最大電位差であって、製作者が定めるも の」と規定されている。

また、絶縁抵抗に関しては、原則として「活電部 と電気的シャシとの間の絶縁抵抗値は、公称電圧 1 V当たり 100 Ω 以上でなければならない。」と規定さ れている。

しかしながら、燃料電池の公称電圧として「その 電気回路の特性を表示する設計上の電圧」を定める 方法が定められていないので、この規定に基づいて 実際に型式審査を実施する場合、各申請者により考 え方が異なる可能性があり、統一する必要があるこ とがわかった。

これは、技術基準の検討にあたっては、短期間に 多くの項目の検討を実施なければならなかった関係 上、燃料電池スタックの公称電圧の決定方法まで議 論するに至らなかったことによる。

このため、燃料電池スタックの公称電圧の規定方 法に関する検討を実施する必要がある。

なお、燃料電池スタックの公称電圧に関する基準、 規格について調査をしたところ、現在のところ、そ のような基準や規格は存在しないことがわかった。

また、これは大型車特有の課題ではないため、燃料電池バスは使用せず、燃料電池自動車全般的な課 題として検討を実施することとした。

9.2 検討方法

燃料電池に関する電圧-電流特性について調査を 実施し、その結果から、定格電流の範囲内で負荷電 流を変化させても端子電圧がほぼ安定している領域 を求め、それが妥当な根拠に基づいたものであれば、 「公称電圧」の決定方法とすることとする。このた め、主として、燃料電池スタックの電圧-電流特性

について文献調査を実施するとともに、その確認と

して、市販の業務用燃料電池スタックの負荷電流と出 力電圧の関係を測定し、ニッケル水素電池やリチウム イオン電池の電圧-電流特性と比較することにより 検証を実施した。

9.3 検討内容

現在実用化されている燃料電池自動車に使用され ている燃料電池スタックと同じ発電原理に基づく固 体高分子型燃料電池スタックの電圧-電流特性に関 する報告例を Fig.9-1¹⁾ 及び Fig.9-2²⁾ に示す。

このように、負荷の電流或いは電流密度が増加する につれて端子電圧が低下する傾向が見られ、負荷電流 が変化しても端子電圧がほぼ一定になる領域は存在 しないことがわかる。また、JIS規格等においても、 燃料電池の公称電圧についての規定は見られない。

一方、JIS規格では、一次電池の公称電圧は「電 池系の固有な電圧に基づいて規定する電池電圧」と規 定されており、電池の種類ごとに公称電圧が定められ ている。また、ニッケルカドミウム電池、ニッケル水 素電池、リチウムイオン電池等の二次電池については、 公称電圧が1セルあたり1.2V、3.6V(3.7V)等と規定 されている。そこで、これらの確認のため、燃料電池 スタック、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池に ついて電圧-電流特性を測定することとした。なお、 自動車に搭載されるレベルの二次電池や燃料電池ス タックの放電特性の測定には大がかりな装置が必要 になることから、今回は小型の二次電池や燃料電池ス タックを使用して測定することとした。

測定に使用した燃料電池負荷試験装置の主な仕様 を Table.9-1 に、燃料電池スタックの主な仕様を Table.9-2 に、ニッケル水素電池の主な仕様を Table.9-3 に、リチウムイオン電池の主な仕様を Table.9-4 に示す。また、燃料電池負荷試験装置の外 観を Fig.9-3 に示す。また、測定対象として、燃料電 池スタックの外観を Fig.9-4 に、ニッケル水素電池の 外観を Fig.9-5 に、リチウムイオン電池の外観を Fig.9-6 に示す。なお、測定に使用したニッケル水素 電池及びリチウムイオン電池は、電動アシスト自転車 専用電池であり、燃料電池負荷試験装置と直接接続す ることはできないため、電池出力を取り出すための改 造を実施済みである。



 Fig.9-1
 燃料電池の電圧-電流特性の 文献調査結果の例¹⁾



Fig.9-2 燃料電池の電圧 - 電流特性の 文献調査結果の例²⁾





Fig.9-3 燃料電池負荷試験装置の外観



Fig.9-4 燃料電池スタックの外観



Fig.9-5 ニッケル水素電池の外観



Fig.9-6 リチウムイオン電池の外観

1001010 1 ////	
項目	仕 様
負荷入力電圧	$1.5 \sim 120$ V
負荷入力電流	$0 \sim 1 \ 2 \ 0 \ A$
負荷入力電力	$0 \sim 2.4 \text{ kW}$
電流設定分解能	4 0 m A
電圧測定範囲	$0 \sim 1 \ 0 \ 0 \ V$
電圧測定確度	読み値誤差 0.1%、測定レンジ誤差 0.2%
電流センサユニット	1500:1CT フローティング方式
電流測定範囲	$0 \sim 6 0 0 \text{A}$
電流測定確度	読み値誤差 0.15%、測定レンジ誤差 0.2%

Table.9-1 燃料電池負荷試験装置の主な仕様

Table.9-2 燃料電池スタックの主な仕様

項目	仕 様			
発電出力	1 2 0 0 W			
発電電圧	DC22V以上			
水素消費量	18.5%%/分以下			
水素純度	99.99%以上			
水素供給圧力	0.07~1.72MPa			

Table.9-3 ニッケル水素電池の主な仕様

項目	住 様
用途	電動アシスト自転車用
容量	8 A h
1セル公称電圧	1.2V
スタック数	20段スタック

Table.9-4 リチウムイオン電池の主な仕様

10010.0 1 / /	
項目	位 様
用途	電動アシスト自転車用
容量	8 A h
1セル公称電圧	3.6V
スタック数	7段スタック



測定は、燃料電池負荷試験装置を使用して実施し、 放電電流を 0Aから定格出力電流までの範囲で徐々 に増加させたときの端子電圧を測定した。ここで、 定格出力電流とは、燃料電池スタックでは、発電さ れる電力の実測値が定格出力電力である 1.2kW になる電流である約 44.7Aとした。また、ニッケル 水素電池及びリチウムイオン電池では、定格容量で ある 8Ah に等しい 8Aとした。 測定結果として、燃料電池スタックの電圧-電流特 性を Fig.9-7 に、ニッケル水素電池の電圧-電流特性 を Fig.9-8 に、リチウムイオン電池の電圧-電流特性 を Fig.9-9 に示す。

放電電圧も定格電流も異なる電池同士の電圧降下 の程度を比較しなくてはいけないので、「無負荷時か ら定格電流までに降下する電圧の無負荷電圧に対す る比率」と定義した電圧降下率を計算したところ、燃 料電池スタックでは35.9%、ニッケル水素電池では2.7%、リチウムイオン電池では1.5%であった。

このように、ニッケル水素電池、リチウムイオン 電池では、定格電流の範囲内で放電電流を変化させ ても端子電圧はほとんど変化しないのに対して、燃 料電池スタックでは放電電流が増加するにつれて端 子電圧が大きく低下することがわかる。このように、 現在の燃料電池では、他の電池の「公称電圧」に相 当する電圧を定義するのは非常に困難であることが わかる。このため、現行の技術基準を検討した結果、 公称電圧の定義が引用されているのが絶縁抵抗測定 時にベースとなる電圧のみであり、あえて公称電圧 を定義しなくてもかまわないと考えられる。

なお、絶縁抵抗測定時にベースとなる電圧は、高 く規定されるほど安全側に作用するものである。こ のため、絶縁抵抗測定時にベースとなる電圧として、

「通常の作動時または電気回路開放状態において、 あらゆる導電性の部分の間に発生する可能性のある 最大電位差」とすればよいと考えられる。

9.4 まとめ

基準に使用されている用語については、基準の国際調和活動等と整合性をとりつつ整理するのが望ましいと考える。絶縁抵抗測定時にベースとなる電圧については、「通常の作動時または電気回路開放状態において、あらゆる導電性の部分の間に発生する可能性のある最大電位差」を使用すべきである。

その理由として、現行の燃料電池の公称電圧を一 義的に定義することは、電圧-電流特性で電圧が安 定する領域がないこと等の理由から、適切ではない と考えたからである。また、現行の基準を精査した ところ、「公称電圧」が使用されているのは、絶縁抵 抗測定時のベースとなる電圧であり、この値が大き いほどより安全側に作用することから、このような 定義とすべきとした。

<参考文献>

中井ほか;「固体高分子型燃料電池の動特性に関する検討」,平成17年度電気学会全国大会,p4-216
 2)浅野ほか;「PEFCの高圧試験と余寿命評価手法の開発」,自動車研究,第28巻,第7号,p57-61,2006年7月

10. 燃料電池自動車の過電流保護に関する検討

10.1 検討の必要性並びに背景と目的

電気自動車の国際基準であるR100 では、「駆動用 バッテリ及び動力系は適切な定格のヒューズまたは サーキットブレーカーで保護されなければならない」 と規定されているものの、我が国は、この基準はまだ 採用していない。

また、燃料電池自動車の技術基準策定のための検討 においては、「電気自動車、ハイブリッド自動車にも 関係する課題なので、別途、電気自動車等も含めた検 討を実施する場で議論すべきである。」とされた。

しかしながら、過電流保護対策がなされていない高 電圧回路において、短絡等が発生して過電流が発生し た場合、機器の故障のみならず最悪の場合に火災等が 発生する可能性があることから、燃料電池自動車の過 電流保護に関しても検討を実施しておく必要がある。

なお、本課題は、燃料電池自動車全般に関わる課題 であって、大型車特有の課題ではないため、燃料電池 バスのみを対象とした検討は実施しない。

また、水害が発生して水没した自動車が、水が引いた 後に発火したという事例が何例か報告されているこ とから、水没後の水が引いたあとに漏電が発生した場 合等に発火等の可能性がないかについても検討を実 施することとした。

10.2 検討方法

燃料電池スタック、燃料電池スタックとともに使用 されてハイブリッドを構成すると考えられる二次電 池であるニッケル水素電池及びリチウムイオン電池、 補助バッテリとして使用されると考えられる鉛蓄電 池について、過電流放電特性の測定を実施し、そのと きの各電池の状態について調査を行い、過電流保護の 必要性について検討を実施した。

また、電子部品等を水没させたときの電気抵抗の変 化について測定を実施し、電池の過電流放電特性結果 から、水害が発生して水没した自動車が、水が引いた 後に発火する可能性があるかどうかについても検証 を実施した。

10.3 検討内容

10.3.1 電池の過電流放電特性

電池が短絡したとき、或いは、電源インピーダンス が低下したときに、電池自体の発熱・発火現象等が発 生することがないかどうか確認するとともに、電気配 線を含む負荷回路が発熱により発火することがない かどうか確認するために、保護回路等を取り外した 状態で取り出し可能な最大電流を把握するための最 大電流特性試験、連続してどれくらい過電流を流し 続けることが可能かを把握するための連続過電流特 性試験を実施した。

燃料電池スタック、ニッケル水素電池、リチウム イオン電池、鉛蓄電池を対象として、過電流放電特 性を測定することとした。

ただし、燃料電池スタックでは、過負荷保護回路 が制御回路に組み込まれており、保護回路を取り外 すことができなかったので、保護回路搭載状態で測 定を実施した。

なお、自動車に搭載されるレベルの二次電池や燃料電池スタックの放電特性の測定には大がかりな装置が必要になることから、今回は小型の二次電池や 燃料電池スタックを使用して測定することとした。

測定器としては、9章に記載の燃料電池負荷試験 装置を使用した。また、測定対象である燃料電池ス タック、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池も 9章に記載のものである。

まず、最大電流特性試験においては、使用したニ ッケル水素電池では、内蔵されている定格 30Aの短 絡保護ヒューズを取り外して測定を実施した。また、 リチウムイオン電池では、7段スタック 4Ah が 2 個 並列接続になっているので、満充電の後、4Ah 分だ け切断して保護回路を外し、測定器に直結して測定 を実施した。

次に、連続過電流特性試験においては、設定した 電流値は、ある程度の時間の連続運転が可能な 5A 単位での最大電流値とし、燃料電池スタックでは 55 A、ニッケル水素電池(8Ah)では 90A、リチウムイ オン電池(4Ah)では 45A、鉛蓄電池(2Ah)では 90A とした。ニッケル水素電池、リチウムイオン電池、 鉛蓄電池では満充電状態から出力電圧が出なくなる まで測定することとし、燃料電池スタックでは測定 値が安定した頃を見計らって、水素燃料を遮断して 測定を終了した。

Fig.10-1及びFig.10-2に燃料電池スタックの最大 電流特性及び連続過電流特性を、Fig.10-3 及び Fig.10-4にニッケル水素電池の最大電流特性及び連 続過電流特性を、Fig.10-5 及びFig.10-6 にリチウム イオン電池の最大電流特性及び連続過電流特性を、 Fig.10-7及びFig.10-8に鉛蓄電池の最大電流特性及 び連続過電流特性を示す。

Fig.10-1 の燃料電池スタックの最大電流特性試験

では、負荷電流を増加させていくとそれにつれて発電 電力も増加していくが、定格出力である 1.2kW を超 えても発電を続け、約 1.5kW で出力が遮断された。 この時点で過負荷に対する保護回路が作動したもの と考えられる。なお、本保護回路は、燃料電池スタッ クの制御回路に組み込まれたものであり、保護回路を 非作動状態にすることはできなかった。

Fig.10-2 の燃料電池スタックの連続過電流特性試験では、過負荷に対する保護回路が作動する直前である 1.4kW 相当の負荷電流 55Aで連続過負荷運転したものであるが、特に問題なく発電を続けた。このため、測定データが安定した頃を見計らって燃料供給を遮断して測定を終了した。

Fig.10-3 のニッケル水素電池(24V、8Ah、保護ヒュ ーズなし)の最大電流特性試験では、満充電の後、負荷 電流を増加させていくとそれにつれて放電電力も増 加していくが、負荷電流 120Aで出力が急激に低下し た。この時点でプラスチック容器の変形、電解液蒸気 の噴出が見られた。

Fig.10-4のニッケル水素電池(24V、8Ah、保護ヒュ ーズなし)の連続過電流特性試験では、満充電の後、90 Aで連続過負荷放電を実施したところ、放電開始後 100秒程度で出力が急激に低下した。この時点でプラ スチック容器の変形、電解液蒸気の噴出が見られた。

Fig.10-5のリチウムイオン電池(25.2V、4Ah、保護 回路なし)の最大電流特性試験では、満充電の後、負荷 電流を増加させていくとそれにつれて放電電力も増 加していくが、約45A、約780Wをピークにして電流 が増加しても電力は低下してきた。さらに負荷電流を 増加させると約53Aで出力が急激に低下した。この時 点で電解液蒸気の激しい噴出が見られた。

Fig.10-6 のリチウムイオン電池(25.2V、4Ah、保護 回路なし)の連続過電流特性試験では、満充電の後、45 Aで連続過負荷放電を実施したところ、放電開始後 20 秒程度で出力が急激に低下したものの、放電開始後 60 秒頃から再度電力放出が始まり、放電開始後 120 秒頃 に電力の放出が停止した。この時点で激しい電解液蒸 気の噴出が見られたあと、しばらく経過した後に発火 現象が見られた。なお、この現象がリチウムイオン電 池に一般的に生じるものであるか、については今後詳 細な検討が必要である。

Fig.10-7 の鉛蓄電池(6V、2Ah)の最大電流特性試験 では、満充電の後、負荷電流を増加させていくとそれ につれて放電電力も増加していくが、約90A、約320 Wをピークにして電流が増加しても電力は低下した。 さらに負荷電流を増加させて 100Aを超えると接続 に使用した電線の電圧降下により電子負荷の端子電 圧が 0V近くになるため、これ以上放電電流を増加 させることができなかった。

Fig.10-8の鉛蓄電池(6V、2Ah)の連続過電流特性 試験では、満充電の後、90Aで連続過負荷放電を実 施したところ、時間経過とともに放電が進み、端子 電圧が徐々に降下するため放電電力も徐々に降下す る。放電開始後約70秒後には接続に使用した電線 の電圧降下により電子負荷の端子電圧が0V近くに なったため、定電流放電ができなくなり定抵抗放電 となるものの端子電圧がほぼ0Vになるまで放電を



Fig.10-1 燃料電池スタックの最大電流特性

続けた。

このように、保護ヒューズを取り外したニッケル水 素電池では、過電流放電試験において電解液蒸気の噴 出等がみられ、また、保護回路を取り外したリチウム イオン電池では、過電流放電試験において電解液蒸気 の噴出、発火現象を確認できたことから、これらの電 池では万一短絡等の過電流が発生した場合に負荷を 遮断するための保護対策が必要と考えられる。



Fig.10-2 燃料電池スタックの連続過電流特性



Fig.10-3 ニッケル水素電池の最大電流特性

Fig.10-4 ニッケル水素電池の連続過電流特性



10.3.2 電子部品等の水没時の電源線のイン ピーダンス特性

水質(水道水、1%、2%、3%食塩水)を変えて電子 部品等を水没させたときの電源線のインピーダンス 特性の測定を実施することとした。浸漬時間は24 時間とし、浸漬中にも電源線インピーダンスを測定 する条件と浸漬中は単に浸漬するだけの条件の2つ の条件とした。なお、浸漬終了後も24時間にわたり 測定を実施した。

電源線インピーダンスの測定にあたっては、5分 間隔で10秒間通電し、その間に1秒おきに10回測 定を実施し、安定したのを見計らって、後の7回を 有効データとした。

浸漬時間の違いは、測定結果に大きな影響は与え なかったので、24時間の浸漬のみとした。

測定対象として、ABS用コンピュータと高電圧 用配線コネクタを使用した。

Fig. 10-9にABS用コンピュータの電源線のイン ピーダンス特性の測定結果を示す。

この図を見ると、浸漬時に通電して電源インピー ダンスを測定した場合、浸漬直後は食塩水の濃度に 殆ど関係なくほぼ同じインピーダンスを示し、時間 経過とともに電源インピーダンスは増加する傾向が 見られる。

次に、食塩水濃度が高いほど早い時点で電源イン ピーダンスが急激に増加し、その後は、また、食塩 水濃度に殆ど関係なくほぼ一定の電源インピーダン スを示すことがわかる。

試験サンプルを食塩水中から引き上げた後は、時 間経過とともに電源インピーダンスが増加する傾向 は見られるものの、食塩水濃度等により電源インピ ーダンスが変化するような一定の傾向は認められな かった。

浸漬時に通電して電源インピーダンスを測定した 場合のうち水道水の場合は、浸漬中は時間経過に伴 う電源インピーダンスの大きな変化は認められなか った。試験サンプルを引き上げたあとは、初めの方 は水道水に浸漬したときの電源インピーダンスに近 い値を示すことが多く、時間経過とともに通常の電 源インピーダンスに近い値を示すことが多くなって いる。

浸漬時に通電しない場合は、試験サンプルを食塩 水中から引き上げた後は、それぞれの浸漬中の初期 状態で測定した電源インピーダンスに近い値を示す ものの、その後については、顕著な傾向は見られな かった。

また、Fig.10-10 に高電圧用配線コネクタのインピ ーダンス特性の測定結果を示す。

浸漬時のインピーダンスは、水道水では800~1,000 Ω、食塩水では濃度が 1%の場合で約 18Ω、2%の場 合で約 10Ω、3%の場合で約 6Ωとほぼ一定である。 浸漬前及び試験サンプルを引き上げた後は、測定系の 限界となるような十分大きなインピーダンスを示し ている。

浸漬中に通電した場合、ABS用コンピュータのよ うに通電による時間経過に伴うインピーダンスの変 化が見られないことから、通電しないで浸漬した後に 測定する条件は省略することとした。

また、食塩水中に浸漬した条件では、試験終了後に は端子部の金属の溶出に伴うと考えられる食塩水の 色の変化は見られたものの、目視では端子部の形状の 変化は認められず、形状が変化するほどの溶出ではな かった。

なお、これら全ての電源インピーダンス測定を通じ て得られた最小の電気抵抗は約3Ωであり、浸漬状態 から引き上げた直後を除くとさらに大きな抵抗値と なる。これら今回の測定結果に限定すれば、水没後に 水が引いた状態で始動しても発火に至る可能性は小 さいといえる。

ただし、プリント基板のパターン間に導電性の物体 が付着したり、濃度が高い状態で食塩水が付着した場 合などには、さらに電源インピーダンスが低下するこ とが想定される。

以上の電池の過電流放電特性及び電子部品等の水没 時の電源線のインピーダンス特性の結果を考慮する と、次のことがいえる。

燃料電池自動車に搭載されると考えられる二次電池 と同種の二次電池については、短絡時等には電解液蒸 気の噴出や発火現象が見られる場合があること、災害 時等に水没した後に水が引いた状態ではかなり電源 インピーダンスが低下する可能性があることから、過 電流に対する保護回路を設置することが必要と考え られる。

しかしながら、この課題は、電気自動車、ハイブリ ッド電気自動車等、高電圧の二次電池を搭載した自動 車全般にかかわる課題であることから、燃料電池自動 車に関する基準のみ強化するのではなくて、電気自動 車等も含めて全ての高電圧の二次電池を有する自動 車に対して共通に適用するべきであると考えられる。 また、現在、公道を走行している燃料電池自動車は いずれも過電流保護回路が搭載されており、直ちに 燃料電池自動車の基準を改定する必要性もない。

以上のことから、現段階では燃料電池自動車の技 術基準の変更は行わないこととする。

なお、電気自動車、ハイブリッド電気自動車等の 高電圧からの乗車人員の保護に関する技術基準を平 成 19 年度中に制定することを目途に国土交通省に おいて検討が進められており、電気自動車等の過電 流保護に関する検討を実施するときに本調査結果を 活用することとする。 10.4 まとめ

現段階では燃料電池自動車の技術基準の変更を行う 必要は無いと考える。

これは、過電流保護対策については、燃料電池自動 車特有の課題ではなく、電気自動車、ハイブリッド電 気自動車等にも共通の課題として検討すべきである と考えたからである。

なお、電気自動車、ハイブリッド電気自動車等の高 電圧からの乗車人員の保護に関する技術基準を平成 19年度中に制定することを目途に国土交通省におい て検討が進められた際、本調査結果が活用された。



Fig.10-9 電源線のインピーダンス特性の測定結果(ABS用コンピュータ)



Fig.10-10 電源線のインピーダンス特性の測定結果(高電圧配線用コネクタ)

11. 燃料電池スタックからの排出物に関する環境 安全性の検討

11.1 必要性

現行の燃料電池自動車に関する基準には、排出水 の質に関する規定はない。しかし燃料電池自動車の 排出水には、燃料電池膜を構成する物質が溶け出す ことにより、水質汚濁防止法で規制されている物質 が含まれる可能性がある。しばらくは普及台数が少 ないこと、今後の技術開発により排出水質の改善が 進むと期待されることから当面基準化の必要がない とされたが、引き続き検討を続けることが求められ ている。

11.2 背景と目的

前述の経緯から、水質汚濁防止法の排水基準で規 制されている物質が排出水に含まれているかどうか について、基礎的検討を実施すると共に実態を調査 することを目的とする。なお、この課題は大型車特 有の課題ではない。 11.3 検討方法

交通安全環境研究所において燃料電池の作動条件の 違いが排出水性状に与える影響について基礎的な実 験を行った。その結果を基に、実証試験に用いている 燃料電池バスからの排出水中の微量物質の排出傾向 を把握した。

11.4 検討内容

交通安全環境研究所において燃料電池稼働条件と排 出水中に含まれる微量物質との関係について基礎的 検討を実施する。また実証試験に供している燃料電池 バスデータの取得条件と排出水中の微量物質の排出 傾向を把握する。その結果と基礎的検討結果を比較す る。

Fig.11-1 に基礎的検討のための実験装置の概略を示 す。Table.11-1 に示す試験条件で、燃料電池を稼働さ せた場合のアノード、カソード両電極における排出水 の性状を分析した。稼働条件としては連続運転、起動 ー停止の繰り返し、負荷のオン、オフの繰り返しであ る。負荷のオン、オフの繰り返しについては二条件を 設定した。



Fig.11-1 実験装置の概要

	サンプル		負荷設定	収集時間	分析方法	
条件1	加湿用純水	水のみ	—	—	ノンサプレッサ型	
冬川の	負荷時	負荷時 Anode		c吐問	イオンクロマトク・ラフィ	
来件Z	(定常運転)	Cathode	(一定)	0吋 目]	(F⁻)	
条件3	起動~運転停止	Anode	0.600V	10吐明	╫つ゜┉╫┲ӈ	
	(暖機運転含む)	Cathode	(一定)	10時间	ッフレッッ イオンクロマトグラフィ	
冬卅 4	負荷ON∕OFF	Anode	無負荷⇔0.600∨	。哇問	(SO ₄ ²⁻)	
宋1十4	(5分毎)	Cathode	(変動)	0吋 目]		
条件5	負荷ON∕OFF	Anode	無負荷⇔0.600∨	60年8月	ICP-AES	
	(30分毎)	Cathode	(変動)	0吋间	(Fe、Cu)	

Table.11-1 実験条件

Fig.11-2 に実験結果の例を示す。連続運転時より も起動-停止の繰り返し、負荷のオン、オフの繰り 返し運転時の方がフッ素イオンの排出が多くなる傾 向を示した。これは定置式の燃料電池より自動車用 燃料電池が耐久性の面で厳しい使用条件にさらされ ていることを示している。フッ素イオンについては 連続運転時よりも起動-停止の繰り返し、負荷のオン、 オフの繰り返し運転時の方がおおよそ2倍排出される ことが分かった。なお硫酸イオンについては、明確な 傾向が得られなかったが、純水にも微量含まれており、 この量と比較すると、多くの量が溶出しているとは考 えられない。

PEMFC排出水分析 4回目 アノード(イオンクロマトによる F⁻、SO₄²⁻の定量結果)



PEMFC排出水分析 4回目 カソード(イオンクロマトによる F⁻、SO4²⁻の定量結果)



(b)カソード側 Fig.11-2 排出水に含まれるフッ素イオン及び硫酸イオンの傾向

したがって、燃料電池からの排出水の性状は燃料 電池のオン、オフを含む実稼働に近い状態のサンプ ルを用いて判断すれば良いと言える。このためには 実車の実用時における排出水中の微量物質の排出傾 向を把握することが望ましいとの結論を得た。

そこで、フッ素イオン、硫酸イオンともに排出水 を酸性化するので酸性度(pH値)で排出水性状を判 断できると考え、燃料電池バスを実用状態と同等の 走行サイクルで運転した場合の pH 値を調査するこ とにより基準化の必要性の有無を判断することにし た。その結果、燃料電池バスの排出水の酸性度は、 燃料電池自動車の基準を作成した際に収集した乗用 車の排出水酸性度以下であることが分かった。

11.5 まとめ

燃料電池自動車から排出される水の性状は、実車 の実用時において判断するのが望ましいことが分か った。そこで燃料電池バスを実用状態と同等の走行 条件で運転し、排出される水分のpH値を計測したと ころ、燃料電池自動車の基準を作成した際に収集し た乗用車の排出レベルであったので、排出水に関す る基準をあらためて作成する必要が無いと思われる。

ただし排出水性状は耐久性の向上と密接に関連す ることから、今後技術開発の動向を注視していきた い。

12.まとめ

以下に、本研究における検討結果をまとめる。

①ガス容器及び配管類の取付強度に係る耐久安全性 の検討ならびにガス容器格納室気密試験に関する検 討

大型ガス容器を搭載した場合を想定して容器取付 部模擬装置を試作し、固有振動数を測定した結果、乗 用車と同等の振動特性であった。なお、今回用いたハ ンマリング法は簡便で有用な方法であることが分か ったが、新型審査時等に使用可能かどうかについては、 今後、加振機に載せて固有振動周波数を求める測定法 と比較し、妥当性を検証する必要がある。

悪路走行試験により取付強度の確認試験が実施で きる見通しが得られた。新型審査の簡略化と審査時間 の短縮を図るために、この手法を推奨したい。

今回の換気試験の結果から、水素ガスと類似した換 気性能を示すヘリウムガスを試験用ガスとして用い る方がよいことが分かった。なお、二酸化炭素は気密 試験のみの実施の場合は、試験用ガスとして使用して も差し支えない。 ②PRD排出時等の燃焼実験による安全性に関する 検討

PRDからの水素排出方法に関し、条件を変えて 検討した結果、明らかに安全性が向上する方法が見 つからなかった。また放出時間の短縮が、条件によ り安全性向上と低下の両面の効果を持つなど、PR D排出効果は複雑であることが分かった。

なお、高圧ガス保安法の範疇であるが、長尺容器 の場合、火炎暴露試験での火炎の当たり方が均一で はないことや、PRDの構造が溶栓式の場合、容器 内残圧が約0.7MPa 程度で閉じてしまうことから、火 災時および火災後の容器の安全性に関する検討を継 続することが望ましい。

③水素漏洩試験に関するヘリウムガス代替の適正に 関する検討

ヘリウムを代替ガスとして用いた試験結果から水 素ガス漏洩を求める換算係数として、実験値(1.35 ~1.37)を用いることを提案したい。

人工的に微少な亀裂を発生させて水素とヘリウム ガスの漏れの比較実験をしたところ、時間とともに 亀裂が拡大する傾向であることから、漏れ量計測に あたっては時間ごとの変化も考慮する必要があるこ とが明らかになった。

④大型車における水素漏洩に関する検討

バス屋根上部での水素容器類の格納及びバス後部 でのスタック格納を想定した模擬区画を作成し、水 素漏洩挙動を調査した。その結果、開口部がある区 画では、水素の流入(漏洩)と流出(放散)が平衡状態 となり、水素漏洩流量に応じ、区画内の各位置で水 素濃度が一定レベルとなることが判った。また、空 気に対する水素の拡散性が非常に高く、開口部から の放散によって区画内に高濃度の水素が滞留するこ とがないことを確認した。したがって大型バス特有 の項目として、基準を変更する必要性はないと判断 する。

水素の高拡散性により、水素漏洩時に空間内の一 部の濃度が水素濃度検出下限値以下となり、水素セ ンサの設置位置によっては水素センサが作動するこ となく水素が漏洩し続けた。また、区画が法規で定 められた滞留防止構造である場合において、ガス容 器や配管類の甚大な損傷及び配管の脱落など著しい 水素の漏洩がなければ、水素の高拡散性のため、適 切な開口部を有する区画内で爆発的な燃焼に至る高 水素濃度領域が生じる可能性は小さいと予想される。 ⑤新型水素センサの開発動向調査

新型水素センサは原理も含めて様々な新しい技術 が提案されてきている。今回の調査では、13の新型水 素センサについて調査を行った。過酷な使用状況を想 定しなければならない自動車では、その仕様の厳しさ から今回調査した新型水素センサが近々に自動車で 実用化されることは難しいと考えられる。

⑥圧力法による水素漏れ測定に関する検討

圧力センサの開発にしたがって、将来的には、衝突 時の水素漏れ測定時間を 60 分間より短縮することが 可能であると思われる。ただし、水素配管の亀裂によ り生じた漏れは時間経過とともに増大することもあ り、燃料漏れ計測時間の短縮が、必ずしも安全性を確 認する上で有効な方法とならないので、慎重な検討が 必要である。

⑦ガス容器の屋根部設置による直射日光による高温 化の安全性に関する検討

日よけ有りと日よけ無しの場合について、その温度 差が最大23℃程度あり、日よけの効果が得られている と考えられる。したがって、駐車状態における日光に よる温度上昇という観点からでは、現行基準が有効に 機能していると考えられる。

⑧燃料電池スタックの公称電圧の規定方法に関する 検討

基準に使用されている用語については、基準の国際 調和活動等と整合性をとりつつ整理するのが望まし いと考える。絶縁抵抗測定時にベースとなる電圧につ いては、「通常の作動時または電気回路開放状態にお いて、あらゆる導電性の部分の間に発生する可能性の ある最大電位差」を使用すべきである。

⑨燃料電池自動車の過電流保護に関する検討

現行基準が有効に機能していることが確認された。 なお過電流保護対策については、燃料電池自動車特有 の課題ではなく、電気自動車、ハイブリッド電気自動 車等にも共通の課題として検討すべきであると考え る。

⑩燃料電池スタックからの排出物に関する環境安全 性の検討

燃料電池バスを実用状態と同等の走行条件で運転 し、排出される水分の酸性度を計測したところ、燃料 電池自動車の基準を作成した際に収集した大臣認定 車の排出水レベルであったので、排出水に関する基準 を新たに作成する必要は無いと思われる。 別添技術基準100の3.1.4項 3.1.4. ガス容器の温度の異常な上昇により容器安全弁が作動した場合に放出される水素ガスの排出の方法 は、次の3.1.4.1.から3.1.4.5.までに適合するものでなければならない。 3.1.4.1. 客室内及び荷室内に直接排出しないこと。 3.1.4.2. タイヤハウス内に向けて排出しないこと。 3.1.4.3. 露出した電気端子、電気開閉器その他の着火源に向けて排出しないこと。 3.1.4.4. 他のガス容器に向けて排出しないこと。 3.1.4.5. 車両前方に向けて排出しないこと。 別添技術基準100の3.5.2項 3.5.2. ガス容器及び配管等は、客室及び荷室その他の換気が十分にされない場所に備えてはならない。ただ し、ガス容器及び配管等が次の3.5.2.1.から3.5.2.3.までに適合する格納室(金属製のガス容器及び金属ライ ナを有するガス容器にあっては、容器附属品及びその接合部を格納するだけのものでもよい。)を有する場合 にあっては、この限りでない。 3.5.2.1. 別紙1「気密・換気試験」の1.による格納室の気密試験を行ったときに、ガス漏れがないこと。 3.5.2.2. 漏洩した水素ガスを排出するよう換気口を備えるものであること。また、その排出の方法は、次の 3.5.2.2.1.から3.5.2.2.3.までに適合するものであること。 3.5.2.2.1. 客室内及び荷室内に直接排出しないこと。 3.5.2.2.2. タイヤハウス内に向けて排出しないこと。 3. 5. 2. 2. 3. 露出した電気端子、電気開閉器その他の着火源に向けて排出しないこと。 3.5.2.3. 別紙1「気密・換気試験」の2.による格納室の換気試験を行ったときに、格納室内のガス濃度が 90%低下するのに要する時間が、180秒以内であること。 別紙1 気密・換気試験 1. 格納室の気密試験 1.1. 試験用ガス 試験用ガスは、ヘリウムまたは二酸化炭素とする(下記 2. においても同様とする)。 1.2. 試験方法 1.2.1. 格納室の換気口に試験用ガス導入ホース、検知器用ホース及び圧力計用ホースを挿入し、当該換気口 を完全密閉する。 1.2.2. 格納室に試験用ガスを吹き込み、容器格納室の内圧を 10kPa にした後、5 分間その状態を保つ。 1.2.3. その後、格納室の各シール部分について、ガス検知器によりガス漏れの有無を検知する。 2. 格納室の換気試験 2.1. 試験方法 1.2.の試験終了後、すべての換気口を解放し、その後の格納室内の試験用ガスの濃度変化を30秒毎に計測す る。この計測は、20分間またはガス濃度が0%になるまで行う。 配管等の気密試験 3.1. 停車状態であり、かつ、配管等に圧力がかかった状態を維持し、高圧部から燃料電池スタック(燃料電 池自動車以外の自動車にあっては、原動機)に至るまでの配管等の確認可能な個所についてガス検知器または 検知液(石けん水等)を用いて水素ガス漏れの有無を検知する。 別添技術基準100の3.5.3項 ガス容器及び配管等は、走行中に移動及び損傷を生じないように確実に取り付けられ、かつ、損傷を 3.5.3. 受けるおそれのある部分が適当なおおいで保護されていなければならない。また、ガス容器の取付部の上下、 左右または前後の固有振動数が 20Hz 以下のものにあっては、当該上下、左右または前後の方向に関し、次の 3.5.3.1. または 3.5.3.2. を満足するものでなければならない。 3.5.3.1. 別添 18「自動車燃料ガス容器取付部の技術基準」(適用範囲に係る部分を除く。)に適合すること。 悪路走行を含む実走行による入力加速度を用いた計算方法等により、3.5.3.1.と同等以上の耐振動 3.5.3.2. 強度を有することが証明されたものであること。 別添18「自動車燃料ガス容器取付部の技術基準」概要 下記の共振試験及び耐久試験を実施し、試験終了後亀裂または継ぎ手等に緩みを生じないことを確認すること。

- ①共振試験:下記の共振試験した場合に、緩みまたは破損しないこと。
- 上下方向共振試験 1Hz~40Hz まで 5G~7Gの範囲で振動させる
- 左右方向共振試験 5Hz~20Hz まで4G~5Gの範囲で振動させる
- 前後方向共振試験 10Hz~40Hz まで5Gで振動させる

②耐久試験:下記の加振条件で40万回振動させて緩みがないこと。

上下方向の共振周波数で加振加速度 5Gで 40 万回または 20 時間振動させて、緩みまたは破損しないこと。

別添技術基準100の3.5.4項

3.5.4. 保安基準第17条第3項の規定が適用される自動車以外の自動車のガス容器及び容器附属品は、その 最前端部から車両前端部までの車両中心線に平行な水平距離が420mm以上であり、かつ、その最後端部から車 両後端部までの車両中心線に平行な水平距離が300mm以上である位置に取り付けられていなければならず、ま た、ガス容器の取付部は、常用の圧力でガス容器に圧縮水素ガスを充填した状態において、自動車の種類に応 じ次の3.5.4.1.から3.5.4.3.までに掲げる走行方向の加速度により、破断しないものでなければならない。 この場合において、加速度に係る要件への適合性は、計算による方法で証明されるものであってもよい。

3.5.4.1. 貨物の運送の用に供する車両総重量 3.5t 未満の自動車 ±196m/s2

3.5.4.2. 専ら乗用の用に供する乗車定員11人以上の自動車であって車両総重量5t未満のものまたは貨物の 運送の用に供する車両総重量3.5t以上12t未満の自動車 ±98m/s2

3.5.4.3. 専ら乗用の用に供する乗車定員11人以上の自動車であって車両総重量5t以上のものまたは貨物の 運送の用に供する車両総重量12t以上の自動車 ±64.7m/s2

別添技術基準100の3.5.9項 排気管、消音器等によって著しく熱の影響を受けるおそれのあるガス容器及び配管等には、適当な防熱措置が 施されていなければならない。また、直射日光を受けるガス容器にあっては、おおいその他の適当な日よけを 有していなければならない。

別添技術基準100の3.9.1項

3.9.1. 主止弁から燃料電池スタック(燃料電池自動車以外の自動車にあっては原動機)に至る構成部品(一体 形成の配管を除く。)を設置している区画内の上部付近等検知しやすい位置には、水素ガス漏れを検知する装置(以下「水素ガス漏れ検知器」という。)を少なくとも一個装備していなければならない。ただし、次の3.9.1.1. 又は3.9.1.2.に該当する構造にあっては、この限りでない。

3.9.1.1. 主止弁から燃料電池スタック(燃料電池自動車以外の自動車にあっては、原動機)に至る構成部品 (一体形成の配管を除く。)が、上方に十分開放された空間に配置されている構造

3.9.1.2. 主止弁から燃料電池スタック(燃料電池自動車以外の自動車にあっては、原動機)に至る構成部品 (一体形成の配管を除く。)から漏れた水素ガスを滞留することなく、次の3.9.1.2.1 から3.9.1.2.3 までに掲 げる方法により大気中に導く構造となっており、かつ、その経路の適切な位置に水素ガス漏れ検知器が少なく とも一個装備されている構造

3.9.1.2.1 客室内及び荷室内に導くものでないこと

3.9.1.2.2 タイヤハウス内に向けて導くものでないこと

3.9.1.2.3 露出した電気端子、電気開閉器その他の着火源に向けて導くものでないこと