

燃料電池システム水素換気構造の開発

Development of Hydrogen Ventilation Structure for Fuel Cell Systems

竹 越 聖 也¹

Sena TAKEKOSHI

要 旨

燃料電池パワートレインの多用途展開を見据えたシンプル化に向け、防水・防塵フィルタを用いた新たな燃料電池システム水素換気構造を開発した。従来モデルに搭載されているダクトを用いた燃料電池システム水素換気構造に対し、容積比で78%低減が可能となった。本稿では、通常運転時および水素漏れを想定し、採用した水素換気構造によって水素システムやフロントフード下の水素濃度が異常検知濃度以下であることを確認した。さらに本構造には、カソード極へのエア供給の一部を水素換気構造内に取り込む、いわゆる強制換気システムを新規で導入し、通常運転中の燃料電池システム水素換気構造内の水素濃度を従来モデル比から低下させることができた。

ABSTRACT

A new hydrogen ventilation structure for fuel cell systems has been developed that uses a waterproof and dustproof filter for simplification towards multipurpose development of fuel cell powertrains. A 78% reduction in terms of volume was achieved compared to conventional model hydrogen ventilation structures for fuel cell systems with ducts installed. In this paper, under the assumption of normal operation and the possible occurrence of a hydrogen leak, it was confirmed that the hydrogen concentration in the hydrogen system and under the front hood was equal to or less than the unusual detection for hydrogen concentration through the hydrogen ventilation structure that was adopted. Furthermore, this structure newly introduces what is known as a "forced ventilation system," where part of the air supplied to the cathode electrodes is taken into the hydrogen ventilation structure, which has enabled reducing the concentration of hydrogen inside the hydrogen ventilation structure of the fuel cell system during normal operation compared to its concentration in conventional models.

1. まえがき

燃料電池自動車 (Fuel Cell Vehicle: FCV) は水素と酸素の反応により電気を生み出し、運動エネルギーに変換し走行する車である。燃料となる水素は、酸素との反応時に水のみを排出し、二酸化炭素を排出しないため、究極のエコカー⁽¹⁾として知られている。Honda が2016年に発売したCLARITY FUEL CELLでは、マンマキシマム・メカミニマムの思想に基づき、セダンとして快適な居住空間を目指し、燃料電池パワートレインをフロントフード下への搭載を実現した⁽²⁾。実現するための一つの要素として、燃料電池スタックから透過した水素を効率よく車外へ放出する構造となっていた。

Fig. 1 に2016年モデルの燃料電池システムを車両に搭載した図、ならびに燃料電池システムの図を示す。橙色は、ダクトを示しており、燃料電池スタックより上方に設置することで、高低差を利用し、透過した水素をダクトを通じて車外へ排出する換気手法を採用していた。また、2016年モデルの燃料電池システム水素換気構造(以下、水素換気構造)では、水素系部品をシステムカバーで覆って、水素に対する安全性設計を実現しており、スタックケースとシステムカバーから成るバリア、水素センサ、ダクトの三要素で構成されていた。車両衝突などにより、水素系部品が破損すると構造内に水素が漏洩する場合がある。その場合、水素センサで検知し、水素の供給を遮断する。更に、ダクトを使用することで、水素を可燃濃度未満レベルまで

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

低下させてから車外へ排出していた⁽³⁾。加えて、水素は分子が小さいため、通常運転時でも数 cm^3/min 程度の極低流量の水素がスタックのシール材料を透過して水素換気構造内に排出されるため、透過によって排出された水素においてもダクトを通じて、常時車外へ排出した。

一方、乗用車だけでなく、商用車などの商材も見据えた燃料電池パワートレイン開発においては、適用商材に応じた形状の異なるダクトを都度設計する必要があったため、汎用性に課題があった。加えて、出力を得るために複数のパワートレインを連結するような燃料電池システムを想定する場合には、ダクトの設計がより煩雑化することが想定された。

次に、国際規則について述べる。燃料電池自動車の開発にあたっては、準拠すべき規則として国連の車両等の型式認定相互承認協定に基づく国際規則 (UN-R134)⁽⁴⁾がある。この協定は 1958 年に制定され、自動車の装置ごとの安全・環境に関する基準の統一および相互承認の実施を図ることを目的としている。記載内容は主に、燃料電池の自動車の車両ならびに水素の貯蔵容器及びその附属品に関するものとなる。この規則において、本稿に関連する項目は Table 1 に示す二項目である。一つ目は、タンク主止弁から下流側の燃料電池システムの構成部品の単一故障時における水素漏れが生じた場合、客室内の水素濃度を基準値未満にすることである。二つ目は、運転中に燃料電池システムの構成部品の単一故障時に水素漏れが発生し、車両の半密閉または密閉空間の濃度が 3% を超過した場合、警告を与えること、ならびに 4% を超過した場合には、タンク主止弁を遮断することにより、貯蔵システムと切り離せることとなっている。

Honda では、水素に対する安全性設計を実現するため

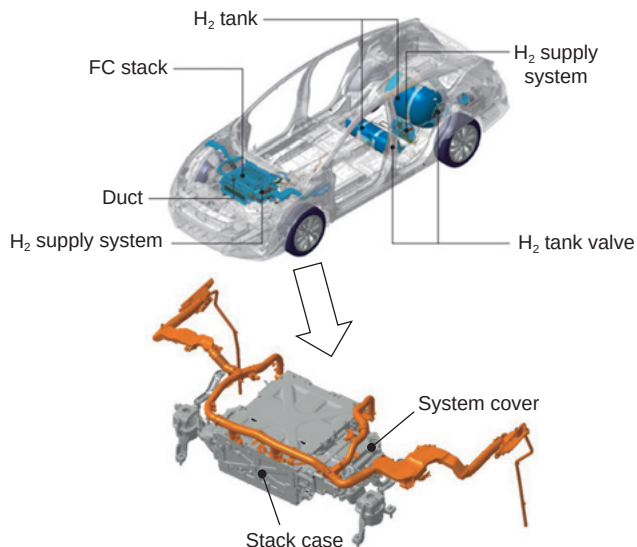


Fig. 1 Hydrogen ventilation structure of CLARITY FUEL CELL

Table 1 Excerpt from UN-R134

Item Number	Contents
7.1.4.2	Any single failure downstream of the main hydrogen shut-off valve shall not result in accumulations in levels of hydrogen concentration in the passenger compartment according to test procedure.
7.1.4.3	If, during operation, a single failure results in a hydrogen concentration exceeding 3.0 per cent by volume in air in the enclosed or semi-enclosed spaces of the vehicle, then a warning shall be provided. If the hydrogen concentration exceeds 4.0 per cent by volume in the air in the enclosed or semi-enclosed spaces of the vehicle, the main shut-off valve shall be closed to isolate the storage system.

Table 2 Comparison of regulations between Honda and UN-R134

Vehicle Condition	Honda	International Regulation (UN-R134)
Normal operation condition	• Hydrogen concentration in vehicle	No regulations
Single malfunction condition	• Hydrogen concentration in vehicle • Warning and hydrogen supply cutoff when concentration rises	• Hydrogen concentration in vehicle (passenger compartment only) • Warning and hydrogen supply cutoff when concentration rises

に、前述の規則に加え Honda 独自の目標値を設定し、開発をおこなった。まず、通常運転時においては、可燃濃度より十分に低い水素濃度を水素換気構造内の安全目標として設定している。着火源が点在するフロントフード下に水素を放出した場合には、水素の滞留を防止し、ボデーの隙間から車外に放出する設計としている。Table 1 の 7.1.4.2 に記載されている Passenger Compartment 内 (客室内) での水素濃度基準を満足することも前提とした安全目標を水素換気構造内に設定している。加えて、水素系部品が破損し構造内に水素が漏洩する場合には、水素センサで漏洩を検知し、水素の供給を遮断する。その際、Table 1 の 7.1.4.3 に記載されている項目も満足している。また、Honda では、水素換気構造内からフィルタを通じて着火源が点在するフロントフード下に水素を放出したとしても、水素の供給が遮断されているため、フィルタからの水素漏洩量が制限され、可燃濃度未満に抑制することで、着火を防止できる設計基準を設けている。

Table 2 には、Honda と国際規則の比較を示している。車両条件を通常運転時と単一故障時に分け、規定・基準を Table 2 に記載している。通常運転時においては、Honda は車両内に水素濃度規定を設定している一方、国際規則には規定はない。単一故障時においては前述の通り、国際規則

においては、客室内の水素濃度規定ならびに水素濃度上昇時における警告および水素供給遮断の規定が設定されている。Hondaにおいては、客室内のみならず車両の各部における水素濃度規定の設定、ならびに水素濃度上昇時における警告および水素供給遮断の規定を設定することで、国際規則を包括した上で、さらに高い安全性能要件を設定し、それを実現する安全設計をしている。

2. 開発の狙い

水素換気構造のシンプル化を図ったCR-V e:FCEVの外観を、Fig. 2 ならび Fig. 3 に示す。水素排出用ダクトの代わりに防水・防塵フィルタをスタックケースの側面に取り付けることで換気機能をもたせ、同時に安全性能を満足させる。その結果、Fig. 4 で示すように、水素換気構造を従来

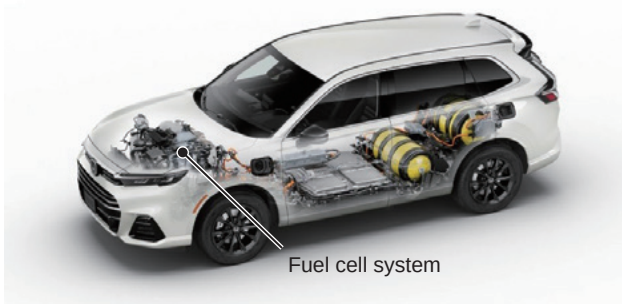


Fig. 2 FC system installation layout in CR-V e:FCEV

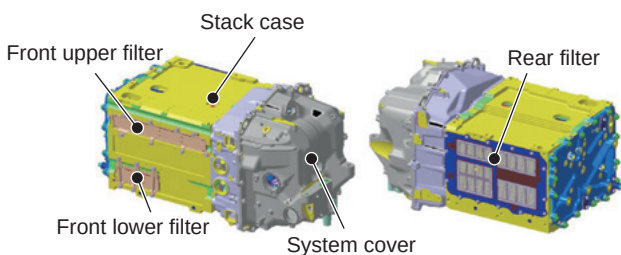


Fig. 3 FC system of CR-V e:FCEV

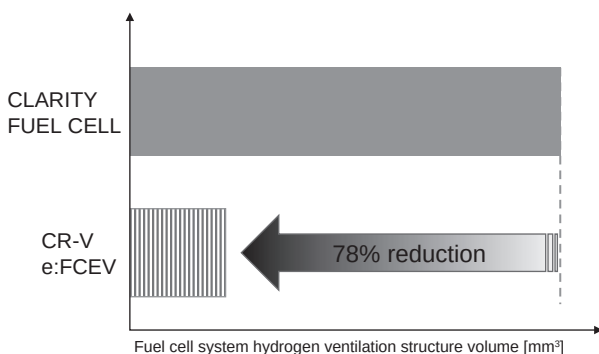


Fig. 4 Structure volume of hydrogen ventilation

モデルから容積比で78%低減することが可能となる。そこで、本構造の開発のねらいを以下に定めた。

- (1) 防水・防塵フィルタを用いた水素換気構造においても従来モデル同様にHonda内で定めた水素濃度基準を満足すること
- (2) 強制換気を利用した水素換気構造により、安全性を確立すること

3. 水素換気構造の概要

3.1. 強制換気システム

水素換気構造内の水素を希釈するため、本モデルでは、強制換気システムを新規で導入した。Fig. 5 に強制換気ラインを含めたシステム図を示している。カソード極のエア供給の一部を分岐する構造となっている。水素換気構造へ流入する途中には流量を絞るためのオリフィスを設置し、吸入エアに応じて強制換気ラインへ流入するエアの流量は変化し、吸入エアを増加させれば、強制換気ラインへのエア流量も増加する。通常運転時においては、燃料電池スタックから透過し水素換気構造内へ排出された水素はこの強制換気ラインから水素換気構造内へ排出されたエアによって希釈され、防水・防塵フィルタを通じて、フロントフード下へ排出される。ただし、この強制換気システムは、燃料電池システムが作動しているときにのみ有効となり、車両を停止し、燃料電池システムが作動していないときには、機能しない。したがって、防水・防塵フィルタのみを使用した、換気条件においても、水素換気構造内の水素濃度は基準値未満であることが必要となる。

3.2. 防水・防塵フィルタ

Fig. 6 には、燃料電池スタックの構成を示している。走行時に空気を効率良く水素換気構造の一部であるスタックケース内へ取り込むため、車両の前後方向にフィルタが装備されている。フロント上方のフィルタ (Front upper

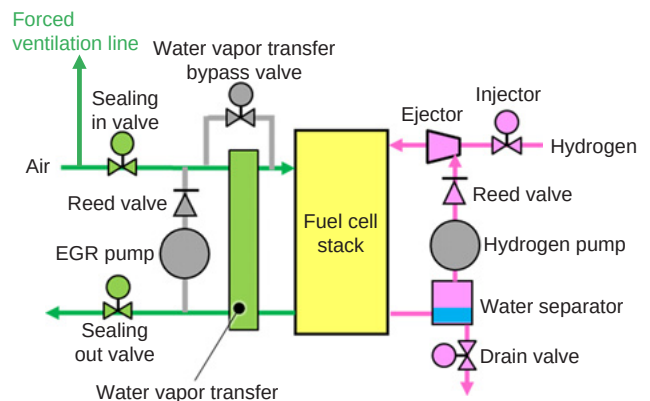


Fig. 5 Forced ventilation line in FC system

filter)をFig. 7に示す。フィルタは前方からの空気を水素換気構造内へ取り込むために面積を多く取ることが望ましいが、フィルタに直接接触することができると、塵が堆積し、所望の換気性能を得られない可能性がある。また、力(例えば、人間の指)によりフィルタを破損させ、スタックケース内部の活電部に接触し、感電したり、水、塵などが侵入し、短絡してしまう可能性がある。そこで、本モデルにおいては、フィルタカバーを用いて、水や塵は堆積しないように上下に隙間をあげつつ、力によりフィルタが破損してしまうことがないような隙間の構造とした。

3.3. 水素センサの役割と配置位置

水素センサは、車体衝突などにより水素系部品が破損し、水素漏れが発生した場合に、直ちに検知可能な場所へ配置する必要がある。一方で、通常運転時に異常検知濃度しきい値を超えると、部品破損などは起きていないにもかかわらず、水素漏れが発生していると誤って判定し、システムを停止させる。したがって、水素センサの設置位置

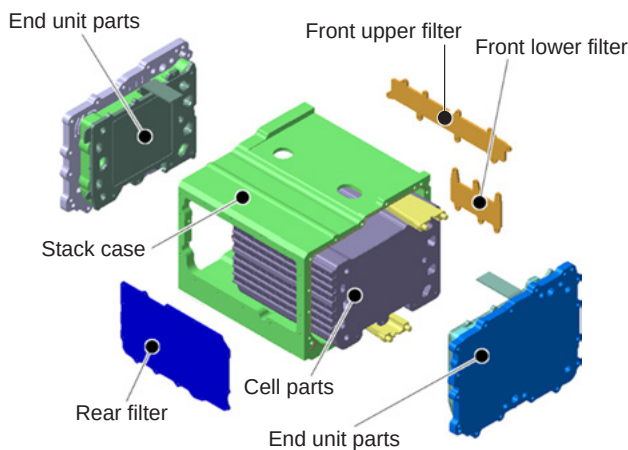


Fig. 6 FC stack of CR-V e:FCEV

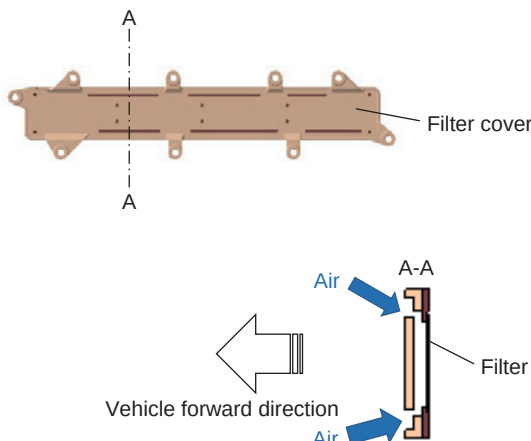


Fig. 7 Front upper filter assembly

を決めるにあたっては、異常検知濃度しきい値を下回るように水素換気構造内は適度に換気されている必要がある。通常運転中の部品破損などが発生していないときには、水素換気構造内は濃度上昇によるセンサの誤った検知がないことが求められる。加えて、故障時は、直ちに検知可能な位置であることを考慮する必要がある。Fig. 8には、通常運転時の構造内の水素濃度分布を示している。前述の考え方を加味すると、水素換気構造内のフィルタ近傍であれば、常時換気されており、スタックケース内の滞留部に設置することで、故障時においても直ちに検知できる前方フィルタ近傍部に設置した。

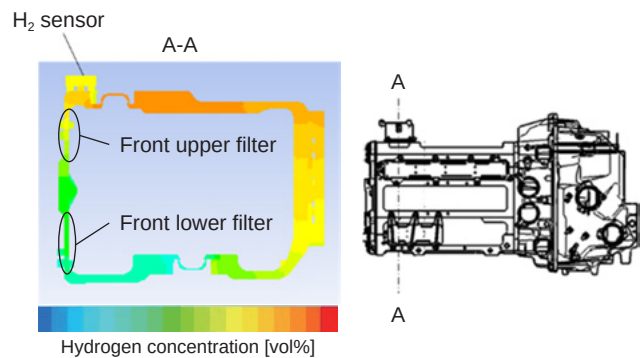


Fig. 8 H₂ sensor layout

4. テスト結果

4.1. 水素透過を想定したテスト検証

通常運転時における、水素換気構造内の水素濃度のテスト結果を本節で示す。通常運転時において、強制換気システムを使用することのできない非発電時をテスト条件とした。水素透過は、燃料電池スタックシールの設計ばらつきを加味した透過流量を、治具を用いて再現した。また、水素換気構造内で構造上水素が滞留しうるスタックケースの上部および下部の位置に、水素センサを設置した。Fig. 9とFig. 10は、水素センサの計測位置を示している。なお、車両に搭載されている水素センサは、Fig. 9の(2)と(5)となる。また、テストの検証条件は、車両の様々な運転状況を再現するため、車両の傾斜も考慮に入れた条件とした。水素濃度が傾斜によって、滞留しやすくなり、水素換気構造内の水素が効率よく換気ができず、異常検知濃度しきい値を超過しないことを確認するために実施する。

まず、水平での水素換気構造内水素濃度結果をFig. 11に示す。結果より、計測位置の大部分が異常検知濃度しきい値の半分未満の水素濃度となっており、水素換気構造内に水素はおおむね均一に拡散した。また、もっとも濃度が高くなる箇所は、Fig. 11の(8)の計測位置であり、スタッ

ケースの中心部の直上付近であったが、異常検知濃度しきい値に対しては6割程度であり、可燃濃度よりも十分に低い水素濃度であった。

次に車両が傾斜した場合を想定した水素換気構造の水素濃度結果を Fig. 12 に示す。最大濃度を示したのは、水平の条件と同様水素換気構造内の中央直上付近となった。傾斜方向に応じて、最も高くなる場所に水素が滞留しやすくなり、水素濃度が上昇するという傾向となった。以上の結

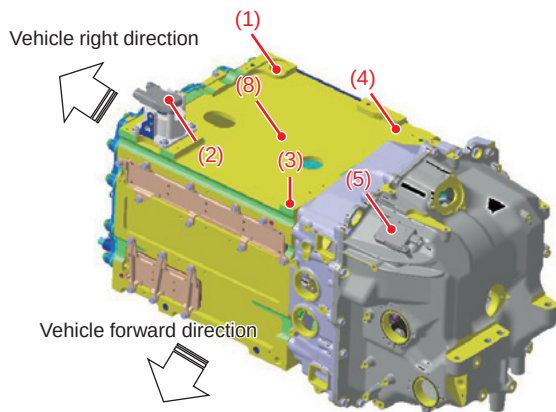


Fig. 9 Perspective view of FC system and hydrogen concentration measurement position

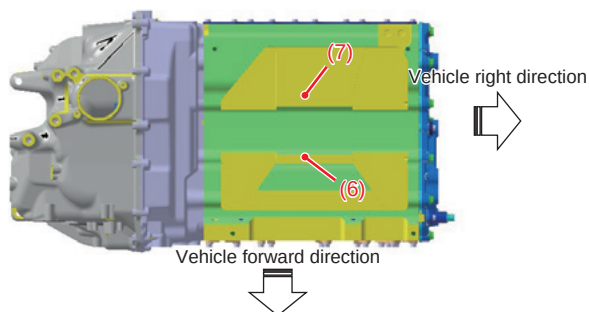


Fig. 10 Bottom view of FC system and hydrogen concentration measurement position

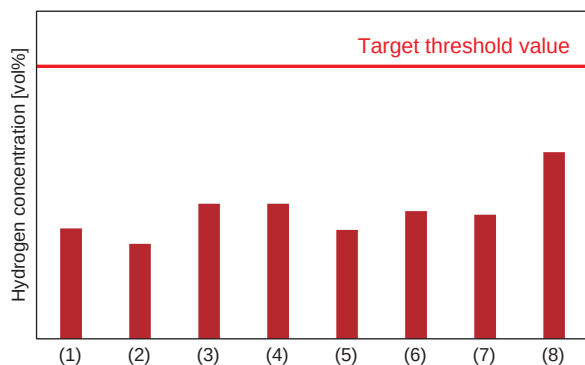


Fig. 11 Hydrogen concentration results for hydrogen ventilation structure in horizontal orientation

果より、システム換気構造内の上部に水素センサを設置したとしても、異常検知濃度しきい値を超えないことを確認した。

4.2. 水素漏れを想定したテスト検証

水素漏洩時においては、水素センサでの検知もおこなうことで、万一の漏洩が発生しても水素漏洩量を制限することで可能な限り安全に配慮した設計とした。本節においては、実車両を用いて水素系部品が破損し水素漏洩したことを疑似的に再現した時の、水素濃度計測結果を示す。漏洩箇所は、最も検知時間が遅くなる位置として、水素換気構造内に配置されている車載水素センサから直線距離で最も遠い位置とし、水素漏れ量は最大数千 cm^3/min を想定してテストを実施した。Fig. 13 は、水素濃度計測位置を示す。試験方法は、故障時における実際の車両の動作と同様とした。まず、想定される漏洩箇所から、水素漏洩を想定した流量を水素換気構造内へ排出した。次に、水素換気構造内に配置されている水素センサの濃度が供給遮断レベルに達

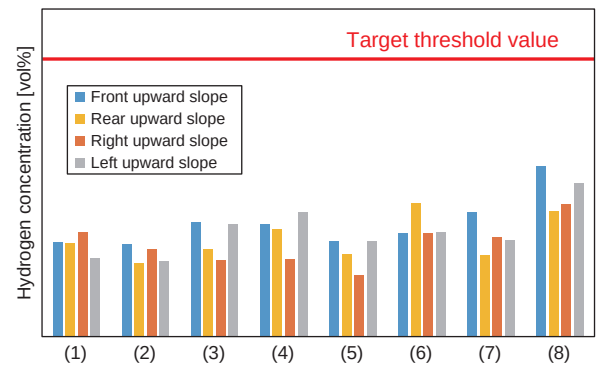


Fig. 12 Hydrogen concentration results for hydrogen ventilation structure in tilted orientation

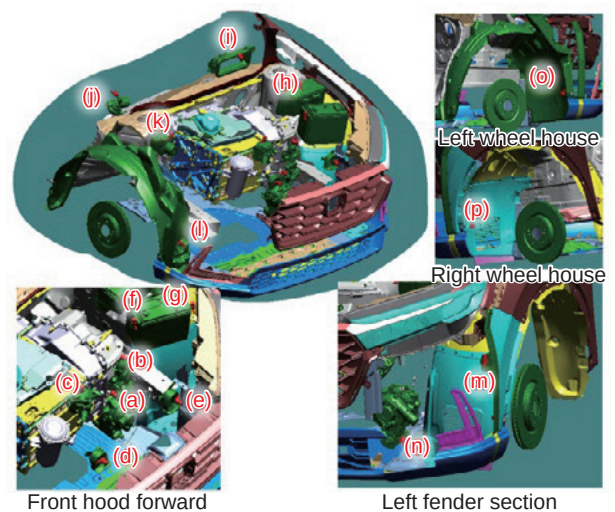


Fig. 13 Hydrogen concentration measurement positions

したら、水素放出を停止した。このとき強制換気ラインは、実車状態では通常作動しているが、水素濃度検知に有利となる。そのため、想定される運転条件のうち、エアとして強制換気ラインへ分配される最小流量を水素換気構造内へ流入させ、検知に有利に働かないような条件を模擬してテストを実施した。

水素換気構造内へ漏洩した水素は、防水・防塵フィルタを通じて、フロントフード下へ放出された。設置した各箇所の水素濃度を計測することで、火種として想定した位置で水素濃度が異常検知濃度しきい値未満であるかどうかを確認した。

まず、水平でのフロントフード下の水素濃度結果を Fig. 14 に示す。結果より、全ての計測位置において、異常検知濃度しきい値に対して、ほぼゼロに近い水素濃度であった。これは、防水・防塵フィルタからフロントフード下に水素が放出されたあと、直ちにボデーの隙間から車外に放出されたため、水素濃度は上昇しなかったと推察される。

次に、車両を傾斜した場合を想定したフロントフード下の水素濃度結果を Fig. 15 に示す。Fig. 16 は、車両を傾斜させたイメージ図を示す。結果より、水平の時と同様に異常検知濃度しきい値に対して、十分に低い水素濃度になっ

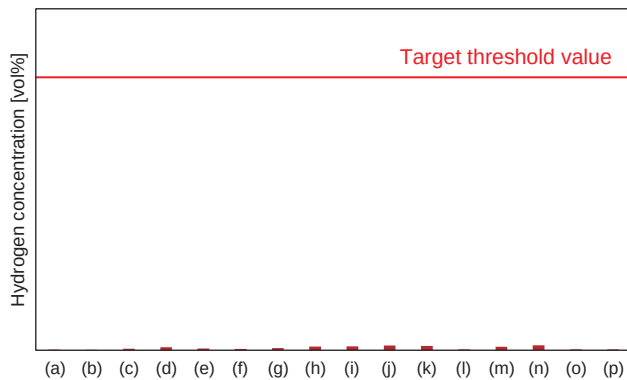


Fig. 14 Hydrogen concentration results in front hood in horizontal orientation

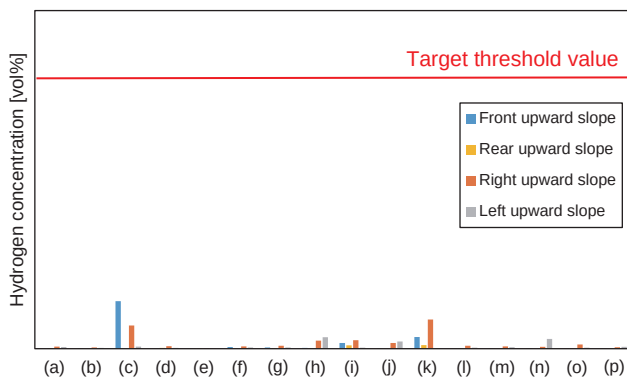


Fig. 15 Hydrogen concentration results in front hood in tilted orientation

ていることがわかる。ただし、傾斜への影響は観測されており、たとえば、燃料電池システムのフロント側付近に相当する Fig. 13 の (c) の計測位置については、前上がりときに水素濃度が高い値を示していることがわかった。すなわち本結果は、防水・防塵フィルタを通じて、フロントフード下に水素が拡散したと理解できる。

4.3. 強制換気ラインの効果

前述の通り、水素換気構造内からフロントフード下へ放出される水素の濃度をより低くするため、燃料電池スタックのカソード極のエア供給の一部を水素換気構造内へ流入させる強制換気システムを導入している。Fig. 17 に強制換気システムの有無による水素換気構造内の最大水素濃度の差を示している。エアによる水素換気構造内の希釈の効果は大きく、水素濃度を低下させていることがわかる。また、Fig. 18 には強制換気の風量の程度による車載水素センサの検知時間の違いを示している。結果より、強制換気システムを導入したことで、検知タイミングを早めることができていたのがわかる。この強制換気システムにより、検知時間を 55% 短縮することができた。水素漏れ時に強制換気システムが検知に有利に働いている理由はこの結果から明らかになる。これは、漏洩した水素を強制換気システムのエアが水素センサへ誘導したことで検知タイミングが早くなったと推定される。なお、水素濃度の値が検知しきい値を超過したのち、濃度値が一定となっているのは、水素センサの検知濃度域をオーバーレンジしてしまっているためである。

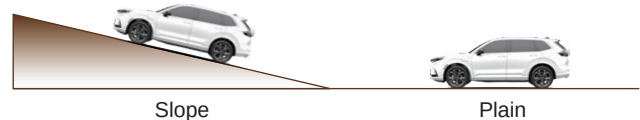


Fig. 16 Image of parking slope

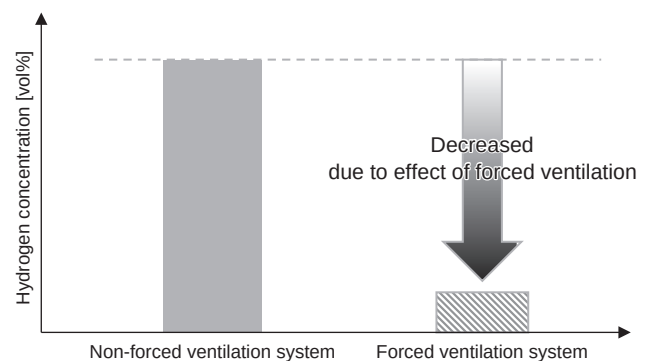


Fig. 17 Comparison of hydrogen concentration between non-forced ventilation system and forced ventilation system

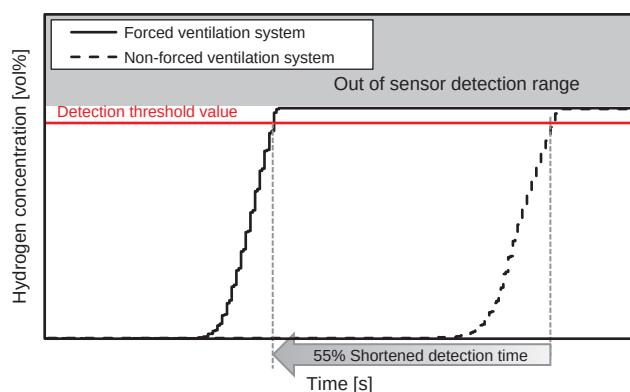


Fig. 18 Comparison of detection time between non-forced ventilation system and forced ventilation system

5. まとめ

燃料電池パワートレインのシンプル化により、水素換気構造の容積比で78%低下させた本モデルにおいて、以下の二項目を確認し、防水・防塵フィルタを配置した新たな水素換気構造を採用することができた。

- (1) 従来モデル同様、通常運転時ならびに故障時において、車両傾斜も含めて想定したテストを実施し、国際規則よりも厳しいHonda独自の目標値においても、基準を満足していることを確認した。
- (2) 防水・防塵フィルタの配置とともに、強制換気構造システムを導入したことで、通常運転時において水素換気構造内の水素濃度を低減し、可燃濃度より更に低い濃度とすることができた。また、水素漏れ時の水素センサでの検知タイミングを55%早めることができた。

参考文献

- (1) https://www.gov-online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/201609/201609_02_jp.html, (参照 2024/6/5)
- (2) 木村顕一郎, 河崎輝明, 大村孝之, 渥美淑弘, 清水潔: 新型燃料電池自動車CLARITY FUEL CELLの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 1-7
- (3) 佐々本和也, 須田恵介: 防水・防塵フィルタ付水素隔離構造のCFDを用いた設計手法の確立, Honda R&D Technical Review, Vol. 34, No. 1, p. 80-87
- (4) <https://unece.org/sites/default/files/2022-07/R134am4e.pdf>, (参照 2024/6/5)

■ 著 者 ■



竹越聖也