

鉄道車両における燃料用高圧水素ガス利用に向けた 技術検証項目

牛腸 勇人* 米山 崇**
須藤 貴幸** 水口 芳樹*

Technical Verification Items from the Viewpoint of Relevant Laws for Use of High Pressure Hydrogen Gas for Fuel in Railway Vehicles

Hayato GOCHO Takashi YONEYAMA
Takayuki SUDO Yoshiki MIZUGUCHI

Fuel cells are expected as one of the new power sources in railway vehicles. One of the issues to realize commercial operation of a fuel cell railway vehicle, is the appropriate correspondence to the High Pressure Gas Safety Act related laws and regulations in Japan. Hence, among the items of the laws and regulations we have extracted the items to be considered. Subsequently to that, we conducted technical verification tests on items for which safety needs to be verified. Finally, in this paper, we introduced an example of the results of the technical verification test conducted.

キーワード：水素，高圧ガス，高圧ガス保安法，容器，配管

1. はじめに

鉄道車両において、燃料電池は新たな動力源の一つとして活用が期待されている。鉄道総研では、燃料電池鉄道車両の開発を2001年に開始し、2008年にはバッテリーとのハイブリッド化を行い2両編成で構成し、約10年間所内走行試験を行ってきた。この走行試験の中で、燃料電池が鉄道車両の動力源として適用できる見通しが得られた。一方で、実用化に向けては、燃料電池等の機器の小型化や、燃料用高圧水素ガスを搭載することによる高圧ガス保安法関係法令等への対応が必要となる。ここでは、燃料電池鉄道車両の実用化に必要な関係法令等への対応に向けた取り組みについて述べる。

2. 関係法令への対応

高圧水素ガスを燃料とする燃料電池鉄道車両は、従来の鉄道事業法における鉄道に関する技術上の基準等の他に、高圧ガスの取り扱いや容器の製造・取り扱いを規制している高圧ガス保安法関係法令（高圧ガス保安法，高圧ガス保安法施行令，一般高圧ガス保安規則，容器保安

規則，例示基準等）の適用を受ける。しかし、現行の法令に対して、現在想定される燃料電池鉄道車両は対応できておらず、営業線での走行は困難である。そこで、燃料電池鉄道車両の実用化に向けて、高圧ガス保安法等への対応や技術基準の策定が必要になる。

高圧ガス保安法等への対応や技術基準の検討にあたって、今回想定している燃料電池鉄道車両の燃料用としての水素供給システムの基本構成を図1に示す。車載された燃料電池に水素を供給する方式としては、高圧ガスを減圧し1MPa未満のガスを利用する方式を想定している。図1を基本構成とする場合、高圧ガス保安法における、高圧ガスの取り扱いとしての「貯蔵」、「移動」、「消費」、「廃棄」、および容器の「製造」、「取扱」が規制の対象となる。

関係法令や技術基準対応案への対応に必要な検討を進めるにあたって、燃料電池鉄道車両に搭載する高圧水

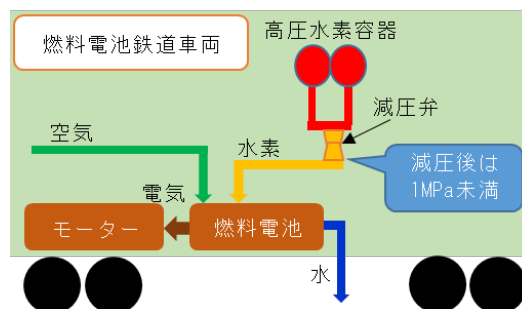


図1 水素供給システムの基本構成

* 車両制御技術研究部 水素・エネルギー研究室（現 東日本旅客鉄道株式会社）

** 車両制御技術研究部 水素・エネルギー研究室

素容器は、国際圧縮水素自動車燃料装置用容器（以下、GTR 容器）に準拠した容器を使用することとした。また、法令・基準等の整備が進んでいる燃料電池自動車（以下、FCV）での検証結果が反映された法令・基準等と鉄道の環境とを比較検討した。なお、ここでは、燃料電池鉄道車両向けの水素の貯蔵施設および車両への充電のための関連施設は検討対象外としている。

3. 技術検証項目

前章で示した燃料電池鉄道車両の基本構成や搭載する高圧水素容器に対して、関係法令の中で対応が必要な項目の抽出や技術検証が必要な項目の検討を行った。技術検証が必要な項目について、鉄道車両として走行する際の課題や現行の鉄道車両における事故等の発生状況からリスクアセスメントを行い、法令に対応するために必要となる検証項目や検証方法の検討を行った。

3.1 対応が必要な項目の抽出

高圧ガス保安法、高圧ガス保安法施行令、一般高圧ガス保安規則、容器保安規則等の点検を行い、鉄道車両としての走行に不可欠な項目の抽出を行った。鉄道では対応が必要な項目、鉄道では該当しない項目に分類し、鉄道車両として走行する際の問題点や FCV の法令を参考に、鉄道での対応案を検討した。また、対応案の中で燃料装置用容器を搭載するにあたり、安全性を確認するための技術検証試験の要否について検討を行った。

高圧水素ガスを燃料とする鉄道車両の車両構造実施基準案において、道路運送車両の保安基準の細目を定める告示 別添 100（圧縮水素ガスを燃料とする自動車の燃

料装置の技術基準）との比較検討を行うことにより、基準案の検討や技術検証試験の要否について検討を行った。

3.2 技術検証項目の検討

前節において、鉄道車両として走行する際の問題点を検討した結果、主な課題は以下の内容となった。

- (1) 多量の水素貯蔵に対する安全性の検討
 - ・水素漏洩に対する安全性
 - ・車載水素貯蔵・供給システムの異常時の機能確認
- (2) 容器の高温化抑制の検討
- (3) 漏洩した水素が滞留しない構造の検討
- (4) 鉄道車両の振動等の使用環境に対する容器・配管等の安全性の検討

これらの課題に対して安全性を確認するための技術検証項目を検討した。

3.3 リスクアセスメント

現行の鉄道車両における事故等の発生状況からリスクアセスメントを行い、燃料電池鉄道車両への影響や安全対策・リスク低減策の検討を行った。また、その有効性の確認を行い、前節で検討した技術検証項目と安全対策・リスク低減策に齟齬がないか確認を行った。リスクアセスメントについては、以下の手順で実施した。

- ①鉄道事故等における全ての要因を抽出した総括表（表 1）を作成した。各要因について、発生箇所や事象を考慮し、対策の要否、燃料電池鉄道車両への影響、車両の損傷箇所等について検討した。
- ②実際に起こった鉄道事故等を抽出、分類した。実際に起こった鉄道事故等については、国土交通省運輸安全委員会が公表している 2001 年から 2016 年の報告書

表 1 リスクアセスメント総括表（一部抜粋）

発生意因	大分類	中分類	小分類	発生箇所							想定される事故のストーリー、影響	（過去の鉄道事故） 具体例	車両の損傷箇所、影響箇所				before ← → after		安全策、リスク低減策	危険度ランク	発生頻度	
				車庫、ピット	水素充填設備	留置線、引込線	明り、橋梁	トンネル	駅（屋根有）	駅（屋根無）			床下機器	車体（床下）	車体（側車内）	屋根上	水素貯蔵装置	危険度ランク				発生頻度
人為災害	部外	事故	踏切支障、線路支障、自動車軽車両衝突	×	×	●	●	×	●	●	自動車と衝突、車体からタンク逸脱、水素配管折損（高圧、低圧）	26 件	○	○	○	○	○	IV	③	機器は台車枠間に設置水素センサー、主止弁、過流防止弁設置	I	②
			脱線、転覆（乗上り、競合）	●	●	●	●	●	●	●	車体からタンク逸脱、水素配管折損（高圧、低圧）	○	○	○	○	○	IV	②	水素センサー、主止弁、過流防止弁設置	I	②	
	保守検修	締付、ゆるみ、隙間異常等作業ミス	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	車体からタンク逸脱、水素配管折損（高圧、低圧）	1 件	○	○	○	○	○	IV	③	水素センサー、主止弁、過流防止弁設置	I	③	
故障	設備故障	車両故障	水素漏えい（タンク透過）	●	□	□	□	□	□	□	水素漏洩し、着火火災		○	○	○	○	○	IV	③	水素拡散検討、通風構造	0	①
		設備故障	水素充填設備故障	×	●	×	×	×	×	×	過充填による高圧水素系故障							IV	③	高圧圧力センサー、主止弁、高圧安全弁設置	0	③
自然災害	部外		土砂崩れ・倒木・落石	●	●	●	●	●	●	●	脱線し車体からタンク逸脱、水素配管折損（高圧、低圧）	19 件	○	○	○	○	○	IV	③	水素センサー、主止弁、過流防止弁設置	I	②

発生箇所：●想定され、装置に影響あり、対策が必要 □想定され、装置に影響なし、対策は不要の凡例 ▲想定され、装置に影響あり、リスク低減、現行車両との安全性比較 ×想定されない

の内容を参照した。この中から燃料電池鉄道車両に置き換えた場合、機器・配管等が損傷し、水素漏れ等につながる恐れのある事象を抽出し、総括表にあてはめ、①で検討した想定される鉄道事故等の要因や、事故による燃料電池鉄道車両への影響の検討を行った。

③総括表からリスクマトリックスを作成した。リスクマトリックスは、発生頻度と危険度ランクごとに、リスクアセスメント総括表の各要因が何件あるか示すものである。経済産業省の「リスクアセスメント・ハンドブック 実務編」¹⁾を参考に、発生頻度(表2)と危険度ランク(表3)を検討し、リスクマトリックスを作成した。まずは、対策案を考慮していない場合のリスクマトリックス(before)を作成し、現状のリスク

を把握した。

④安全対策案やリスク低減案を考慮したリスクマトリックス(after)を作成し(表4)、許容できない事象が残っていないか確認を行った。

表3 危険度ランクの定義

	定性的表現	人に対する被害	火災	装置の被害
危険度ランク	0	無傷	なし	なし(保護装置動作)
	I	軽微	発煙	機器内での損傷小
	II	中程度	通院加療	機器内での損傷大
	III	重大	重症入院加療	機器外への損傷小
	IV	致命的	死亡	建物火災 機器外への損傷大

表2 発生頻度の定義

	定性的表現	定量的表現(件/両・年)	定量的表現(件/年)
発生頻度	⑤ 頻発	10 ³ 超	年50件超
	④ しばしば	10 ³ 以下～10 ⁴ 超	年50件以下～年5件超
	③ 時々	10 ⁴ 以下～10 ⁵ 超	年5件以下～2年に1回超
	② 起こりそうにない	10 ⁵ 以下～10 ⁶ 超	2年に1回以下～20年に1回超
	① まず起こりえない	10 ⁶ 以下～10 ⁷ 超	20年に1回以下～200年に1回超
	① 考えられない	10 ⁷ 以下	200年に1回以下

表4 リスクマトリックス(after)

発生頻度	⑤	5	0	0	0	0
	④	3	0	0	0	0
	③	6	1	0	0	0
	②	4	26	1	6	0
	①	9	4	0	3	1
	①	18	4	0	0	4
		0	I	II	III	IV
危険度ランク						

赤・・・許容されない 黄・・・許容されるが改善が必要
白・・・許容される

表5 技術検証項目(太字は、今回報告する項目)

項目	目的
鉄道車両の使用環境を考慮した検証	容器および容器附属品の安全性の検討
容器安全弁動作に伴う水素放出を想定した検証	鉄道車両の屋根上空間を想定して、容器安全弁動作の際の安全性の検討
水素貯蔵装置の配管継手からの水素漏洩を想定した検証	鉄道車両の屋根上空間を想定して、水素貯蔵装置内の配管継手から水素が漏洩した際の安全性の検討
容器単体からの水素透過を想定した検証	鉄道車両の検修庫を想定して、容器単体からの水素透過を想定した際の安全性の検討
水素貯蔵装置カバーの日よけ効果実験	水素貯蔵装置カバーの日よけの有効性を検証し、GTR(国連 Global Technical Regulation) 容器の温度仕様を満たすことの確認
高圧ガスの通る部分の配管強度の検証	高圧ガス設備が、鉄道の環境に応じた強度設計となっていることの検討
水素貯蔵装置内で漏洩した水素が滞留しない構造の検討	水素貯蔵装置内で漏洩した水素を検知できること、漏洩した水素が滞留しない構造の検討
高圧水素ガス設備の強度の検証	鉄道車両の使用環境を想定して、容器、配管等の固定方法や強度の検討
鉄道車両における静電気除去措置の検証	車体に取り付けられた機器の静電気の除去についての検討
車体を模擬した水素拡散実験および解析	鉄道車両で水素が漏洩した場合の安全性の検討
車体艤装を模擬した装置機能確認実験	高圧ガス設備の異常時を想定したシステムの検討

また、リスクアセスメントを精査することにより、関係法令上の課題に対して検討した技術検証項目の見直しを行った。見直し後の技術検証項目を表5に示す。

4. 技術検証試験

前章で検討した技術検証内容に基づき、実施した技術検証試験のうち、車載された水素配管からの漏洩に関するものについて以下に示す。

4.1 容器カバー内で漏洩した水素が滞留しない構造の検討

4.1.1 検証の目的

車両屋根上に搭載した水素貯蔵装置内で水素が漏洩した場合を想定し、水素が滞留しない構造であることの確認を行う。

4.1.2 検証方法

本検証では、実際の水素貯蔵装置を想定したモックアップを製作し検証を行った(図2)。モックアップ内に水素を放出し、放出終了後のモックアップ内の水素濃度の時間変化を水素センサーで測定した。漏洩した水素が滞留しない水素貯蔵装置カバーの開口条件の検討にあたり、一般高圧ガス保安規則関係例示基準²⁾の「滞留しない構造」において、2面以上の開口部を持った構造とすることと定められていることから、想定される全ての2面開口条件で検証を行った。

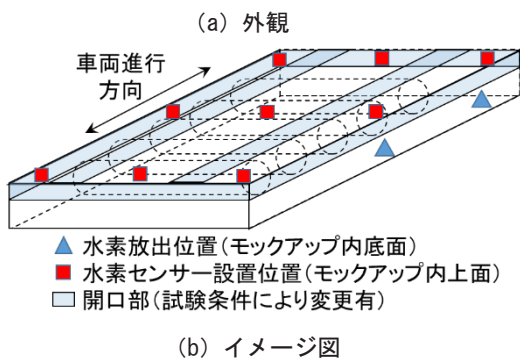
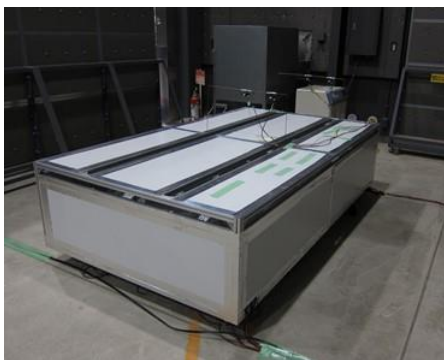


図2 水素貯蔵装置のモックアップ

4.1.3 検証結果

水素が最も滞留する(水素濃度が低下しない、または低下に時間がかかること)2面開口条件を図3に示す。このときのモックアップ内の水素放出終了前後の水素濃度の時間変化を図4に示す。最高濃度は、放出位置真上のセンサー①の箇所で測定され、水素濃度の低下時間が最長となったのはセンサー②であった。何れも水素放出を終了すると濃度が下がり続けることが確認でき、例示基準と同様に2面開口を有する条件であれば、水素貯蔵装置内に放出した水素は滞留しないことが確認できた。

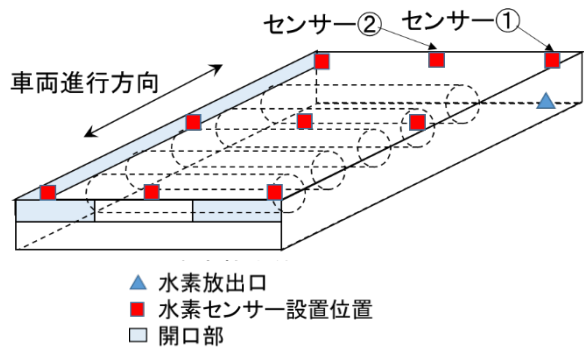


図3 水素が最も滞留する2面開口条件

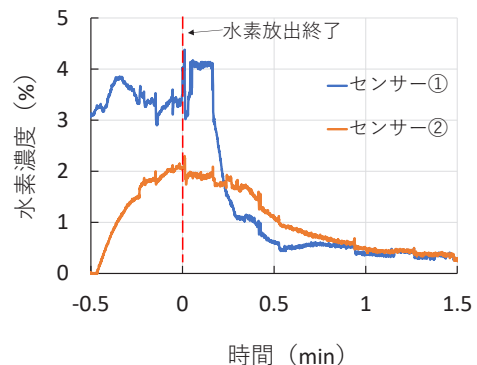


図4 水素放出終了前後の水素濃度の時間変化

4.2 架線位置での水素濃度の検討

4.2.1 検証の目的

車両屋根上に搭載した水素貯蔵装置内で水素が漏洩した場合を想定し、架線(高圧ガス保安法上、火気に該当する)位置での水素濃度の確認を行う。

4.2.2 検証方法

本検証は図2(a)のモックアップを使用し、モックアップ内に水素を放出し、屋根上の水素濃度の分布、時間変化を水素センサーにより測定した。水素貯蔵装置カバー開口部の試験条件は、架線の軌道中心からの最大左右変位が0.25mであることを考慮し、架線の直下が開口部とならないようにし、4.1節と同様にすべての2面開口条件で確認を行った。図5に示す水素センサーの位置は、高さ方向については、屋根上の車両限界がレール面から

4,100 mmになることと架線高さがレール面から4,400 mm～5,400 mmの位置にあることから、モックアップの上面から最短距離となる300 mmとした。左右方向については、架線の最大の振れ幅を考慮し、軌道中心から0.25mとした。

4.2.3 検証結果

最も濃度の高くなる開口条件および測定箇所における水素濃度は0.37%であり、水素容器ユニットカバーの2面以上の開口条件において、架線位置を想定した測定点での水素濃度は架線位置に達するまでに4%（水素の爆発下限界濃度）未達となることが確認できた。

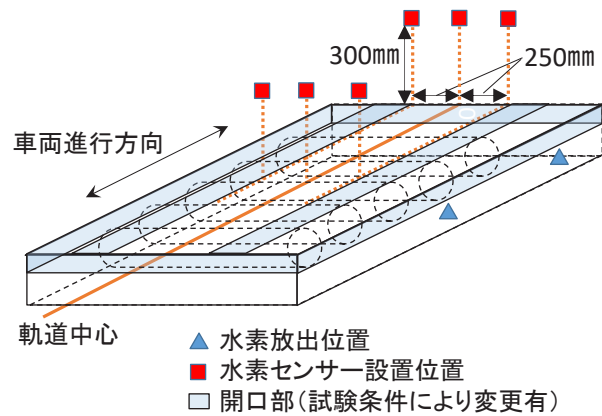


図5 水素センサー位置

4.3 車体を模擬した水素拡散実験及び解析①

(客室内の水素濃度の検証)

4.3.1 検証の目的

鉄道車両の床下水素配管からの水素漏洩を想定し、客室内の水素濃度の確認と床下水素配管の設置位置の検討を行う。

4.3.2 検証方法

側引戸を開いた状態で、床下から水素を放出した際、客室内の水素濃度を側引戸付近に設置した水素センサーで確認した(図6)。また、水素放出位置を車体幅方向に移動することにより、水素放出位置の違いによる客室内の水素濃度の変化を確認した。

4.3.3 検証結果

客室内の水素濃度の時間変化を図7に示す。車体床下端より水素を放出したときの最高濃度は、3.5%（爆発下限界濃度未達）であった。一方、水素放出位置を車体幅中心寄りに90 mm移動させたときは、最高濃度は2%程度に下がることが分かった。

現行の鉄道車両の保安ブレーキ等の床下配置の基準と同様に、台車の幅の内側に水素配管を配置することで、床下水素配管から水素が漏洩しても、客室内の水素濃度は、爆発下限界に対して余裕が生まれることが分かった。

4.4 車体を模擬した水素拡散実験及び解析②

(滞留しない床下構造の検討)

4.4.1 検証の目的

鉄道車両の床下水素配管からの水素漏洩を想定し、滞留しない床下構造の検討を行う。

4.4.2 検証方法

床下から水素を放出した際、床下の滞留の可能性を水素センサーを設置し確認した。水素センサーは、側ハリや大型機器に囲まれ、滞留する可能性のある箇所配置した(図8)。

4.4.3 検証結果

最も滞留しやすい箇所は、水素放出位置近くであり、かつ側ハリや横ハリに囲まれた箇所となった。この箇所

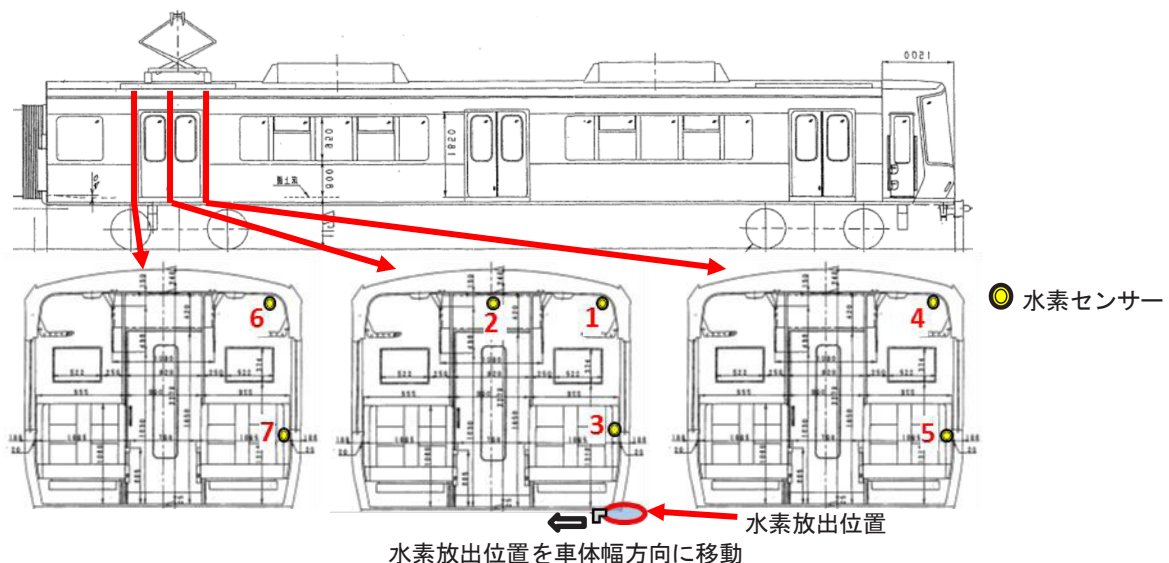


図6 水素センサーと水素放出位置

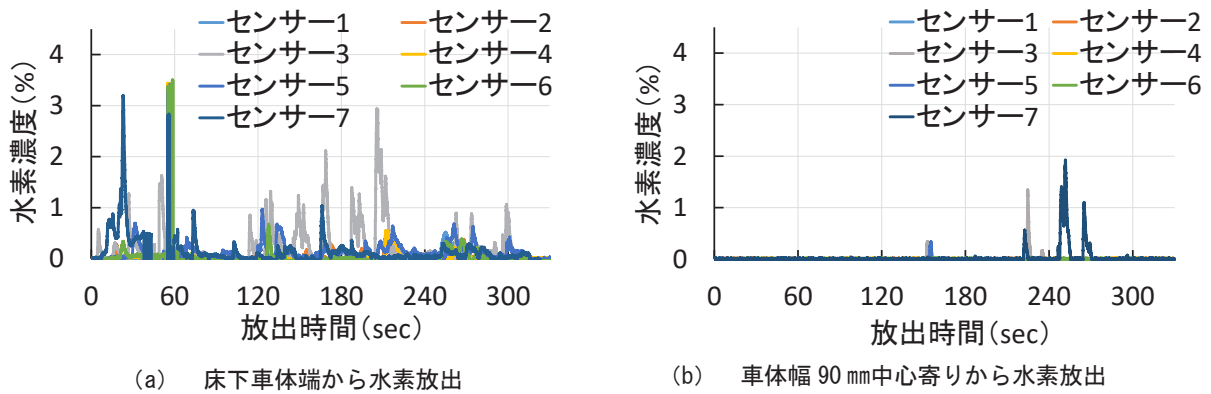


図7 客室内の水素濃度

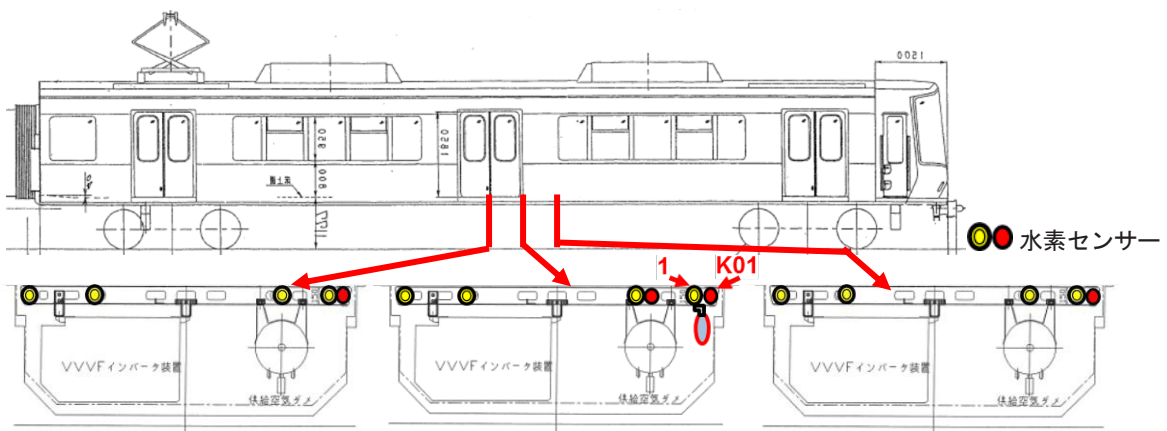


図8 水素センサーと水素放出位置

において、水素放出終了後、35 秒程度で 1% 未満に低下することが分かった (図 9)。現状の鉄道車両の床下構造において、漏洩した水素は速やかに拡散し濃度が低下することが分かった。

5. まとめ

燃料電池鉄道車両の実用化に向けて、高圧ガス保安法関係法令等において、対応が必要な項目の抽出を行った。また、安全性を確認するための技術検証項目を検討し、技術検証試験結果の一部を紹介した。今回紹介した技術検証試験では、水素貯蔵装置のカバーが 2 面開口を有する構造であれば漏洩した水素が滞留せず、架線位置に達するまでに爆発下限界 (4%) 未満の水素濃度になること、床下配管からの水素漏洩に対して、安全性を確保するためには、台車の幅の内側に水素配管を配置すると良いことや、現状の床下構造において、漏洩した床下に水素は滞留しないことがわかった。これらの結果は、高圧ガス保安法関係法令等の対応に必要な実証や技術基準作成の基礎データとして活用されることが期待される。

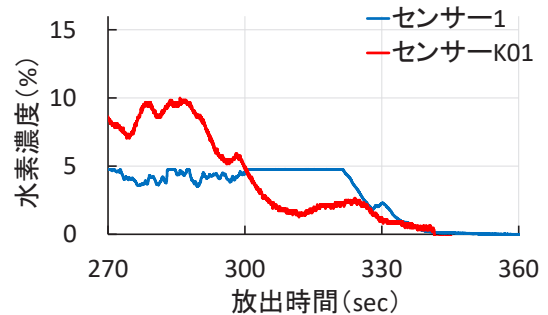


図9 水素放出終了前後の水素濃度の時間変化

文献

- 1) 経済産業省: リスクアセスメント・ハンドブック (実務編), 2011
- 2) 高圧ガス保安協会: 高圧ガス保安法関係例示基準資料集, 第 8 次改訂版, 一般高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について 6. 滞留しない構造, pp.12, 2017