

# 燃料電池自動車のトンネル内における安全性に関する研究



田中 救人  
研究第二部  
次長

## 研究の背景と目的

規制改革推進3ヵ年計画において燃料電池自動車のキャリアカー積載時の通行制限の規制緩和については、H15年度中に実験を行いデータを得、H16年度中に検証等を行い必要な見直しを行うこととなっていた。

水素を燃料とする自動車は道路管理上未知のものであり、道路構造を保全し交通の危険を防止する観点から、トンネル内で事故が発生した場合、現行の道路構造、消火施設等をもって構造や人間の安全性が確保されるのか確認されていない。

このような背景から、本研究は燃料電池自動車の普及・促進にあたりトンネル内において火災事故等が発生した場合における道路管理上の安全性について検証することを目的に実施したものである。

尚、本稿においては一連の研究内容のうちから、模擬車両を用いた燃焼実験から得た発熱量に関する知見、燃焼シミュレーションによるトンネル内の火災に関する知見および拡散シミュレーションによるトンネル内への水素放散に関する知見に関して報告する。

## 研究の内容

### 1 検討項目

燃料電池自動車（以下FCVと表記）は主に圧縮（または液化）した水素を燃料とし空気中の酸素と反応させて電気を起こしそのエネルギーにより走行するものである。

本研究では、FCVが自走する場合ではなく、完成車両をキャリアカーで輸送する場合の安全性を検証したものである。この場合、水素は道路法上の制限物質に該当

し、積載数量に制限を受ける。FCV普及時には、水素ステーションが少なく輸送時には水素を制限数量近くまで積載する可能性がある。

水素の基本的性質として以下の点が上げられる<sup>1)</sup>。

- ・ 燃焼時の発熱量は1kg当たり121メガジュールで、ガソリン（44MJ）の2.75倍であり、単位質量当たりのエネルギー密度が大きい。
- ・ 単位体積当たりの発熱量は1m<sup>3</sup>当たり8.6Jとガソリン（29.8J）の約0.3倍である。
- ・ 可燃性のガスであり、空気中の濃度が4%（体積比）を越えると火災や爆発の危険性がある。また発火エネルギーが小さく、着火しやすい。
- ・ 密度は空気の1/14と軽く閉塞場所では上部に滞留するが、拡散速度が非常に速く、粘性は非常に小さいためオープンスペースでは散逸しやすい。

FCVはこれらの性質を持った水素をエネルギー源とするがトンネル内で火災事故に遭遇した場合の現象面に対する知見は今のところまったくないと言っても過言ではない。

そこでFCV車両運搬時の火災に関して実験およびシミュレーションによりデータ収集を行い、以下の項目に関して検討を行った。

- 1) キャリアカー積載FCVの車両火災の特性把握
- 2) キャリアカー積載FCVの車両火災時のトンネル内の熱気流、水素拡散に関する検討

### 2 FCV車両の火災発生時の水素の挙動

現行の多くのFCVは35MPの高圧水素ガス容器を使用している。ガス容器には溶栓（PRD：所定の温度で栓が溶けて水素を放出する機構）が備えられており容器が破裂するのを防止する。しかしながら、トンネルのような閉鎖空間において、火災時にPRDが作動し水素が放出された場合の実際の事象は不明である。

想定される事象を図-1に示す。火災発生後周辺温度の上昇により、水素容器にとりつけられたPRDが110℃以

上（FCV用の仕様が未定であったため100から110℃の範囲で作動するとしている）となり水素が放出される。放出初期の水素に着火した場合は、水素が燃焼し火災が広がって行く予想される。ただちに着火しなくとも空気と混合して行く過程で着火した場合は、濃度により爆燃もしくは爆轟をおこし、場合により周辺の器物を損傷する可能性がある。一方、着火しないで拡散した場合、爆発限界以下であれば問題ないが、濃度が下がらない場合はトンネル内で何らかの理由で爆燃もしくは爆轟に至る可能性があり危険である。同図のうち水素放出後に着火する場合（太字部分）を火災実験で、それ以外の場合をシミュレーションで確認することを試みた。

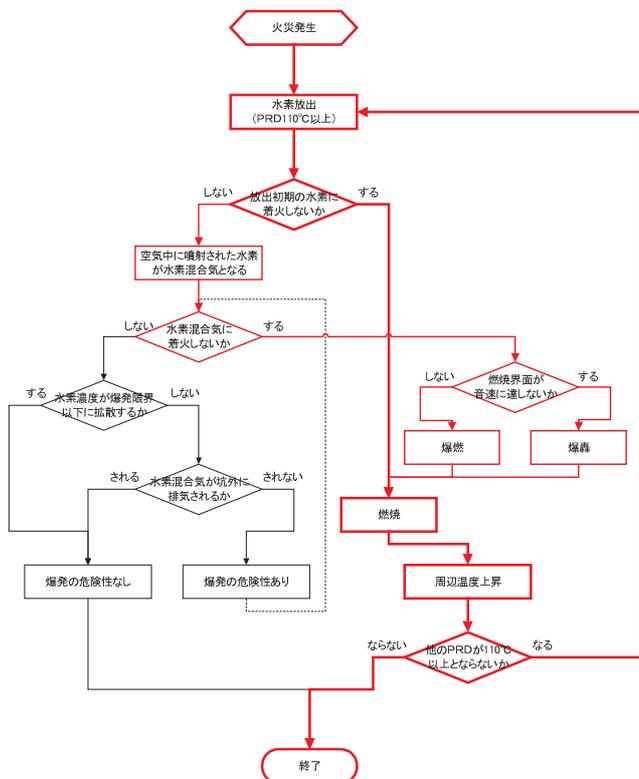


図-1 水素放出時の事象

表-1 実験ケース

ケース	使用車両（小型車）	台数	燃料種別・目標数量	現行制限数量
1	ガソリン車	4	ガソリン・50 L×4台	200 L未満
2	模擬車両（CNG）	4	CNG・15 m <sup>3</sup> ×4台	60 m <sup>3</sup> 以下
3	模擬車両（水素）	4	水素・15 m <sup>3</sup> ×4台	
4	模擬車両（水素）	4	水素・45 m <sup>3</sup> ×4台	

### 3 火災実験によるFCVの車両火災の特性把握

#### (1) 実験ケースの設定

比較のため燃料をガソリン、圧縮天然ガス（CNG）、水素の3種とした。ガソリンは研究データが豊富である。CNG、はいづれも高压容器を使用しており、類似の挙動を示すと想定される。制限数量等を考慮し実験ケースを表-1のとおりとした。また実験車両の配置を図-2に示す。

実験では車両4台をトラックの荷台に載せ、遠隔操作でガソリン火皿に着火し火災を起こした。

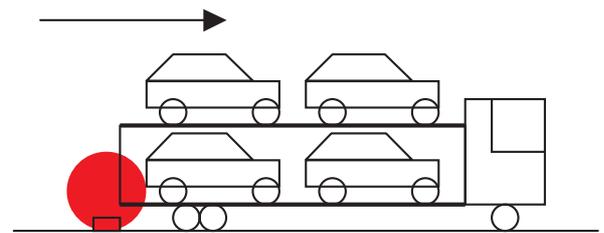


図-2 実験イメージ縦断面図

#### (2) 模擬トンネル

火災実験は、延長80m、内空断面積78m<sup>2</sup>（山岳トンネル2車線相当断面）の模擬トンネルを使用して行った。（実験は（社）施工技術総合研究所が実施した。）



写真-1 模擬トンネルの内空断面

#### (3) 測定項目

①熱気流温度 ②気流速度 ③輻射熱 ④コンクリート温度 ⑤酸素濃度 ⑥一酸化炭素濃度 ⑦煙濃度 ⑧水素タンク温度 ⑨水素タンク圧力 ⑩燃焼状況（ビデオ・写真）



### ③避難環境としての結果

- ・風速2m/sのトンネル内で路面から高さ1.5mの煙濃度、酸素濃度、CO濃度では、どのケースとも問題となる値は観られなかった。
- ・風速2m/sのトンネル内で路面からの高さ1.5mの熱気流温度は、燃焼箇所近傍では、一時的にCNG車 (CNG50.2m<sup>3</sup>) 199℃ > FCV (水素174.4m<sup>3</sup>) 188℃ > FCV (水素70.4m<sup>3</sup>) 74℃ > ガソリン車 (ガソリン200L) 48℃であり、FCV、CNG車はガス放出時に高い値となった。

### ④コンクリートへの影響

- ・コンクリート温度の最高温度の高さ及び200℃以上の継続時間では、CNG車 (CNG50.2m<sup>3</sup>) > FCV (水素174.4m<sup>3</sup>) > ガソリン車 (ガソリン200L) > FCV (水素70.4m<sup>3</sup>) であった。いずれも影響はなかった。

## 4 火災および水素拡散シミュレーション

火災に伴いFCV積載キャリアカーにおける水素放散に係わる現象は 1) FCV積載キャリアカーが火災を起こす場合 (実験でも確認している)、2) トンネル内に水素が放散する場合 の2ケースに集約される。これらのケース

についてシミュレーションをもとに検討した。

### (1) FCV積載キャリアカーの火災時の検討

キャリアカーが炎上し、FCV車すべてが延焼した場合、従来の防火設備の運用により避難安全性が確保できるかどうかシミュレーションを用いて検討した。

#### ①発熱速度の設定

実験から得た結果を用いて、シミュレーションに用いる発熱速度を設定した。

実験によれば、FCV車はガソリン車に比べ、燃焼の速度が速く熱量のピークが大きくなるが、熱量の持続時間が短いことがわかった。

また、FCV車8台 (現行の最大積載台数) の発熱速度は大型バスモデル火災の発熱速度を上回っている。

なお火災発生から10分間以内では、現在火災シミュレーションで用いられる大型バスモデル火災の発熱速度が、FCV8台のキャリアカーの発熱速度を上回った。これより、火災発生から10分で避難が概ね終了するとの前提に立てば、大型バスモデル火災を火災源とする方が危険側とすることができる。

#### ②FCVを積載したキャリアカーの火災解析結果

①で求めた発熱量を用い火災シミュレーションを行った。解析結果の一例を図-4に示す。以下の結果を得た。

- ・火災発生から10分後の熱の遡上は、要避難者にとっ

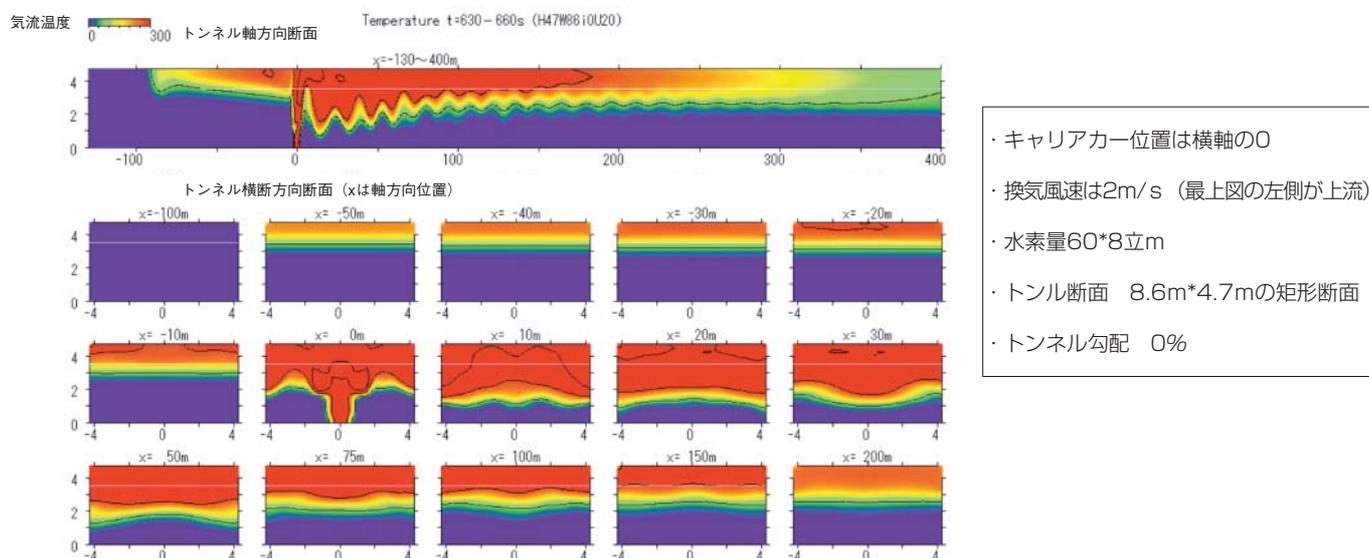


図-4 火災シミュレーション結果の例

て問題となるようなレベルではない。

- ・10分以降も、熱は大きく遡上することは無く、換気運用によって煙ともども一様方向に排出されていると考えられる。
- ・FCV8台を積載したキャリアカーは、現状で考えられる最大の積載状況であり、その火災の場合においても、通常の想定されている火災規模の範囲内であり、トンネル構造の保全及び交通の安全の確保は可能と考えられる。

**(2) トンネル内の水素放散についての評価**

「トンネル内で大型バス1台相当の火災が発生し、停車していたFCV積載キャリアカーが加熱され、FCVのタンクからトンネル内に水素が拡散した場合」について検討した。

**①水素放散時間（火災発生からのタイミング）の検討**

火災に伴う熱によりPRDが作動しFCVの水素が放散されるのはどのような条件の場合か検討した。

PRDの位置は、2段積みにした場合上層の車両では地上から3.0m~3.5mである。またPRD周辺が100℃になってから水素を放出するまでの時間を実験結果から6分と見込むことができる。水素が放散するのは、火災による熱でPRD周辺が100℃まで上がり、そこからPRDが作動するまでの時間を見込んだ時間が経過した後である。これらは換気条件、トンネル形状、トンネル勾配により

異なる。条件を変え検討したところ表-3を得た。

この結果から、一般的な要避難時間10分以内にPRDが作動し水素が放散する可能性は低いと言える。

よって、水素放散が問題となるのは、要避難者が避難した以降となる。

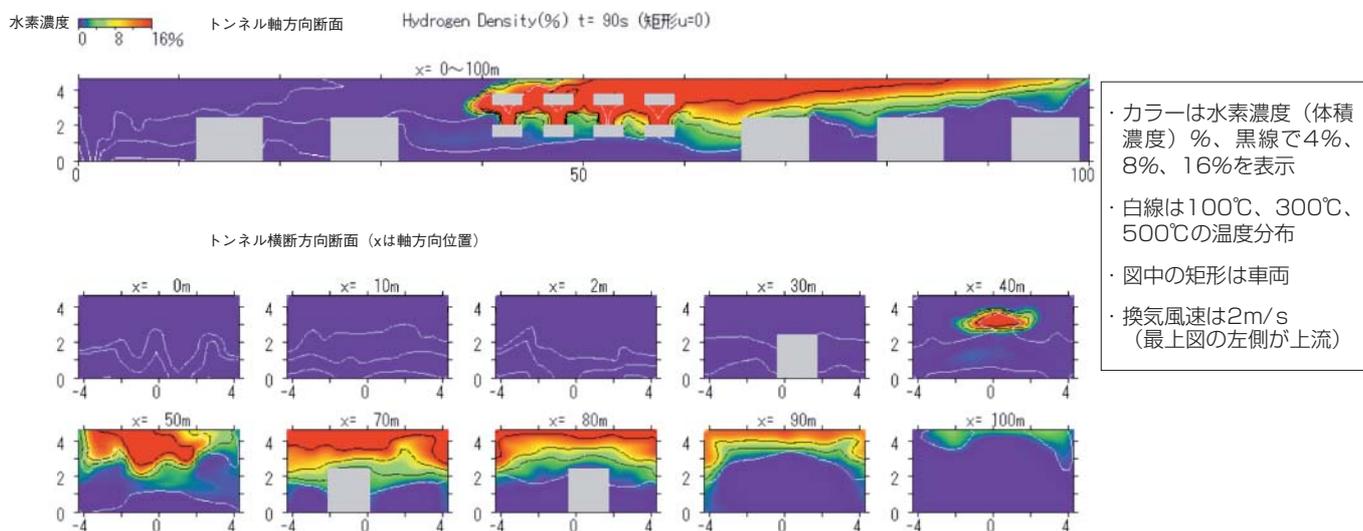
**表-3 火災発生から水素放散の時間**

トンネル形態	換気条件	解析結果	
		PRD (GL+3.0m) が100℃に達する時刻	水素放散時刻
矩形 0%勾配	0m/s	5.5分	11.5分
	2m/s	6.5分 (GL+3.5m)	12.5分
馬蹄形 0%勾配	0m/s	7.0分	13.0分
	2m/s	8.0分 (GL+3.5m)	14.0分
馬蹄形 3%昇り勾配	0m/s	8.0分	14.0分
	2m/s	—	—

**②放散した水素の挙動について**

放散した水素の挙動を検討した結果以下のことが分かった。(図-5参照)

- ・0m/sで換気運用を行った場合には、放散した水素は熱気流にのり、天井や壁面に沿って火災から離れる方向へと拡散する。
- ・2m/sで換気運用を行った場合には、0m/s、1m/sでの換気運用時よりも水素濃度が高い範囲を小さくすることができるが、各種機器類のスパーク等による爆発の可能性が否定できない。



**図-5 水素の拡散シミュレーションの例**

- ・矩形断面よりも馬蹄形断面の方が（断面積が大きいほど）水素濃度が低くなる傾向にあるが、爆発可能性のある濃度が広範囲に分布する傾向には変化は無い。
- ・水素放散温度が変化しても（断熱膨張を考慮）、水素放散現象に大きな影響は無い。
- ・トンネル勾配が変化しても爆発可能性のある濃度が広範囲に分布する傾向には変化は無い。

よって、キャリアカーに積載した燃料電池自動車から水素放散が生じた場合には爆発の可能性がある、トンネル構造に影響を及ぼす事が考えられる。また消防隊員等の安全の面から、水素放散が発生しないような対策が必要と考えられる。

以上から水素放散の可能性をまとめると表-4の通りとなった。

同表より、2m/sでの換気運用が可能であれば、トンネルの形状、勾配に依らず水素放散が発生する可能性は低いと考えられる。

表-4 トンネル形状、換気運用と水素放散の関係

トンネル形状	換気運用	水素放散の可能性	条件など
矩形 0%勾配	0m/s	可能性がある	トンネル内で大型車火災発生 近傍にFCVを積載したキャリアカー
	2m/s	可能性は低い	火災車両より下流の車は、トンネル外へ走行する (火災の上流にのみ車が滞留)
馬蹄形 0%勾配	0m/s	可能性がある	トンネル内で大型車火災発生 近傍にFCVを積載したキャリアカー
	2m/s	可能性は低い	火災車両より下流の車は、トンネル外へ走行する (火災の上流にのみ車が滞留)
馬蹄形 3%勾配 (上り勾配)	0m/s	可能性がある	トンネル内で大型車火災発生 近傍にFCVを積載したキャリアカー
	2m/s	可能性は低い	火災車両より下流の車は、トンネル外へ走行する (火災の上流にのみ車が滞留)

## まとめ

FCV車のトンネル内の安全性に関する研究は、筆者の知る限り今研究が初めてであった。またFCV車それ自体が研究途上でありしかも急速に進歩しているため、試験に供する車両その他はあくまでも暫定的なものとならざるを得ず、様々な仮定の元に実験やシミュレーションを行わなくてはならなかった。しかしながら、高圧水素ガ

スを燃料とする車両の火災に関してはおおよその特性を把握できたのではないかと考えている。この研究が今後の当分野の研究の基礎になれば幸いである。

以下に今後の課題を簡単にまとめる。

- 1) 圧縮水素を燃料とする燃料電池自動車の技術開発や研究状況を勘案しつつ、これらの技術水準に応じて検討の見直しを行う必要がある。特に、今回はPRDの作動条件については、明確な規定に基づいた検討とはなっていない。また圧縮水素の圧力が現在の想定2倍の70MP程度になると予想され、一方では安全対策の面での技術開発が急速に進歩しており、本研究が陳腐化することが予想される。このため今後これらの技術開発進展に応じて研究のフォローアップが必要である。
- 2) 圧縮水素を燃料とする燃料電池自動車のキャリアカーへの積載配置方法については、更なる安全性の向上を図る観点から、火災時における水素の放散方向や放散方向の表示に関する検討が必要と考えられる。これらは延焼防止の観点、消火・救急等活動時の安全上からも必要である。
- 3) 将来、水素を燃料とする自動車が既存のガソリン車のように普及する時代が到来する際には、今現在の技術水準からも格段の進歩がなされ、より安全性の高い自動車であることが期待されるが、一方ではトンネル内を走行するFCV車が急増し結果としてトンネル内の安全性という面ではリスクが増加することが懸念される。これに対応するため道路管理者側としては水素を燃料とする自動車の普及に向けてトンネルの非常用施設全般を再点検することも必要になる可能性がある。

最後に、この研究のご指導をいただいた方々、大変に難しい実験を実行していただいた方々にお礼を申し上げます。

### 参考文献

- 1) 文部科学省 科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター、2003年 2月号、「科学技術動向」