

圧縮水素容器の安全弁作動確認手法に関する検討

Study of a Post-fire Verification Method for the Activation Status of Hydrogen Cylinder Thermally-activated Pressure Relief Devices

山崎 浩嗣*1
Koji YAMAZAKI

田村 陽介*1
Yohsuke TAMURA

Abstract

From a fire accident site, to safely move a hydrogen fuel cell vehicle equipped with a carbon fiber reinforced plastic composite cylinder for compressed hydrogen (CFRP cylinder) and also safely scrap the burnt vehicle, it is necessary to verify whether the thermally-activated pressure relief device (TPRD) of the CFRP cylinder has already been activated, releasing the hydrogen gas from the cylinder. To develop a simple post-fire verification method for TPRD activation, the present study was conducted on a simple technique of verifying TPRD activation by measuring hydrogen concentration at the TPRD gas release port, using hydrogen densitometers and Type III and Type IV CFRP cylinders having different linings. As a result, TPRD activation status can be determined by measuring gas concentration with a catalytic combustion hydrogen densitometer at the cylinder's TPRD gas release port within 24 hours of its activation.

1. まえがき

燃料電池自動車(FCV)に搭載されている圧縮水素容器には、火災時に容器の破裂を避けるため、火炎の熱を検知し、容器内のガスを放出させる熱作動式安全弁(Thermally-activated Pressure Relief Device: TPRD)が装着される。しかし、消火活動などでTPRDが作動する前に鎮火すると、焼損した容器には高圧の水素ガスが残された状態になる。過去に発生した圧縮天然ガス容器事故等の教訓から^{1)~3)}、火災車両を安全に移動し、かつ容器を廃棄処理するためには、TPRDの作動の有無を確認し、容器内に高圧のガスが残されているのかを確実に把握する必要がある。

通常、容器内の圧力は容器に接続された圧力センサによって把握できるが、鎮火後においては、センサや配線などの焼損によって把握できないことがある。火災現場でのTPRDの作動の有無は、TPRDの可溶栓が溶融した痕跡(Fig. 1)、TPRDのガス放出口が地面へ向けられた場合のアスファ

ルト路面上の焼損(Fig. 2)から判定する方法がある⁴⁾。しかしながら、焼損が著しいとTPRDの可溶栓の溶融金属が残らないことや、TPRDのガス放出方向が地面へ向けられていない場合、路面の焼損からTPRDの作動を判定できない。

そこで本研究では、容器内に残存するガスをTPRDのガス放出口から水素濃度計で検知する手法により、火災現場において簡易的にTPRDの作動の有無を判定する手法を検討した。

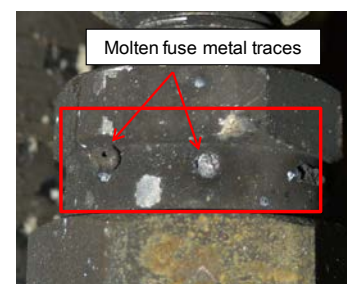


Fig. 1 Traces of molten fuse metal

*1 一般財団法人日本自動車研究所 FC・EV研究部

*本速報はJSAE著作権規則に基づくJSAE20174852の転載である。

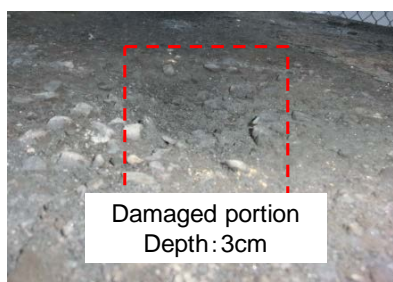


Fig. 2 Burnout traces on asphalt road

2. 試験方法

水素が充填された容器を火炎に晒した後、素濃度計を用い、TPRD のガス放出口から容器内に残存するガス濃度を計測した。供試した容器はライナーがアルミニウム合金製の TypeIII (容積:28 L) と樹脂製の TypeIV (容積:65 L) の二種類の圧縮水素自動車燃料装置用炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 複合容器を用いた。火炎に晒す前の容器とバーナの外観を Fig. 3 に示す。



Fig. 3 Appearance of cylinder and burner before fire test

火源には、容器を火炎暴露試験法で定められた温度で容器を均一に加熱できるプロパンガスバーナを用いた⁵⁾。また、自動車火災を模擬するため、火炎暴露の条件は、日本自動車研究所と米国の自動車会社の双方から導かれた自動車火災試験のデータを基に、車両に搭載されている燃料容器の温度環境が模擬された燃料電池自動車世界統一基準 (HFCV-gtr) の局所火炎暴露試験法^{6), 7)}に準じた。火炎暴露試験法の火炎温度プロファイルを Fig. 4 に示す。

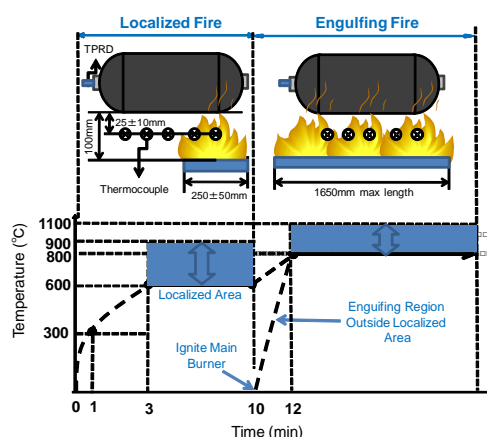


Fig. 4 Temperature profile of fire test

点火開始後 3~10 分間、TPRD から最も離れた容器の末端部から 250 mm ± 50 mm の範囲を 600°C~800°C の火炎に晒す (局所火炎)。10 分経過後、火炎は容器の全体を包み込む全面火炎へ移行させ、12 分後までに 800°C~1100°C になるように火力を調整する (全面火炎)。なお、本研究では、容器が激しく焼損した場合でも、TPRD の作動が判定できることを示すため、自動車全焼する場合の盛期火災継続時間となる 1 時間⁸⁾を目安に、容器を火炎に晒す時間は 1 時間 (局所火炎 10 分+全面火炎 50 分) とした。

また、TPRD 作動後に、容器内の水素ガスが容器外へ拡散しやすい条件でも TPRD の作動が判定できることを示すため、Fig. 5 に示すように、TPRD と容器は直線的に接続するとともに、ガス放出口の径は既存の燃料電池自動車用いられている径より大きい 1/4 インチ (内径:4.57 mm, 肉厚:0.89 mm) とした。



Fig. 5 Appearance of TPRD

鎮火後の容器内のガス計測は、検知される濃度および容器の温度によって3種類の水素濃度計を使い分けた。検知された濃度が2 Vol.%以上の場合には、高濃度の計測が可能である気体熱伝導式センサを用いた。気体熱伝導式センサは、鎮火後2時間までは、容器の温度が40°C以上であるため、センサの耐熱性の問題から、ガスを検知部へポンプ等で強制吸引する方式の吸引式(測定レンジ: 0 Vol.%~100 Vol.%, 精度: フルスケールの±5%)を用いて断続的に計測した。鎮火後2時間以降では、ガスが検知部へ自然に浸透する方式の拡散式センサ(測定レンジ: 0 Vol.%~100 Vol.%, 精度: フルスケールの±2%)を、TPRDの放出口に三又継ぎ手で装着し、連続的に容器内のガスを計測した。また、検知された濃度が2 Vol.%未満の場合には、低濃度の計測が可能である吸引式の接触燃焼式センサ(測定レンジ: 0~10000 ppm, 精度: フルスケールの±5%)を用いて断続的に計測した。吸引式を用いた際に断続的な計測にしたのは、計測時の吸引によって容器内のガスが置換され、計測結果に及ぼす影響を最小限に抑えるためである。吸引式でのガス吸引手法は、Fig. 6に示すように、濃度計のガス吸引口とTPRDのガス放出口を接触させて計測した。なお、容器の火炎暴露前にTPRDのガス放出口から水素ガスが検知されないことを確認した上で、試験を開始した。

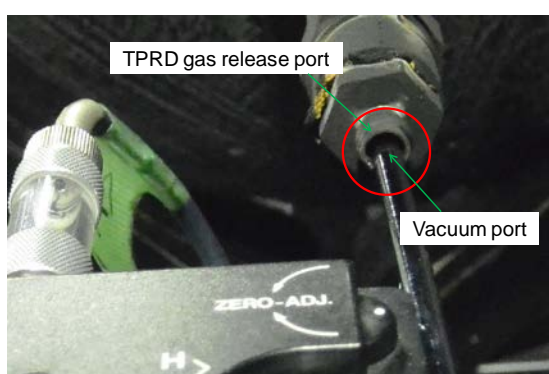


Fig. 6 Gas vacuum method

3. 試験結果

3.1 火炎暴露後の TypeIII 容器の濃度測定結果, TypeIII 容器の火炎暴露の様子を Fig. 7 に示す.

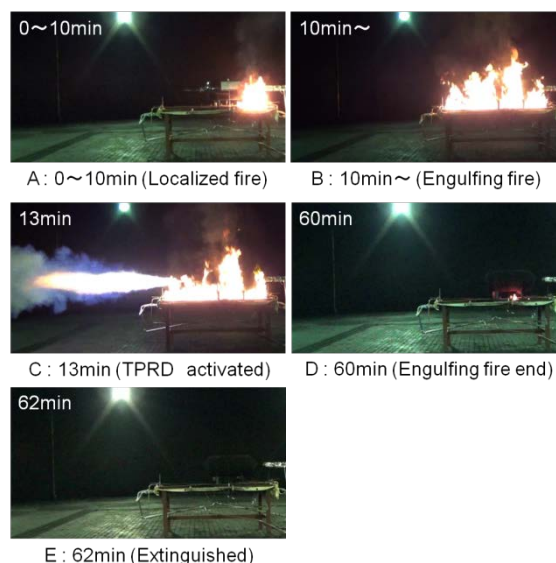


Fig. 7 Fire exposure test scenes (Type III)

本容器では、火炎暴露開始から約13分(局所火炎10分+全面火炎3分後)でTPRDが作動した。その際、容器に充填された高圧の水素ガスはTPRDのガス放出口から火炎となって放出され、容器内はほぼ大気圧になった(Fig. 7C)。60分後、プロパンガスバーナを停止し、火炎暴露を終了すると(Fig. 7D)、約2分後に容器自体の燃焼が消失し、完全に鎮火した(Fig. 7E)。鎮火後の容器およびTPRD温度は約5時間で外気温度と等しくなった。鎮火2時間後の拡散式の気体熱伝導式水素濃度計を用いて連続計測したType III容器におけるTPRDのガス放出口の水素濃度の時間推移をFig. 8に示す。

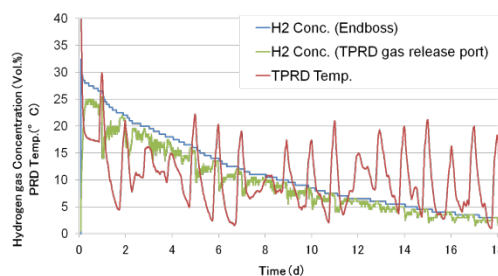


Fig. 8 Hydrogen gas concentration from 2 hours after fire test (Type III)

Fig. 8 から、1 日毎に TPRD の温度変動がみられるが、これは日夜温度の変動による影響である。その変動に伴い、TPRD ガス放出口の水素ガスの濃度も変動している。これは、日夜の外気温の変動により、容器内のガスが膨張、収縮を繰り返し、徐々に外気と置換され、その結果として、容器内の水素ガスが希釈されていったと考えられる。次に、水素濃度計測結果を Table 1 に示す。

Table 1 Hydrogen gas concentration (Type III)

Time	Hydrogen gas Conc.	Sensor type
0min	88 Vol.%	Thermal Conductivity Gas Sensor (Vacuum type)
1h	60Vol.%	Thermal Conductivity Gas Sensor (Vacuum type)
2h	32Vol.%	Thermal Conductivity Gas Sensor (Diffusion type)
1day	25Vol.%	Thermal Conductivity Gas Sensor (Diffusion type)
1week	11Vol.%	Thermal Conductivity Gas Sensor (Diffusion type)
1month	3500ppm	Catalytic Combustion Sensor (Vacuum type)

この結果、TypeIII 容器では、鎮火後 1 日経過後の TPRD のガス放出口の気体熱伝導式の水素濃度計の指示濃度は 25 Vol.%、1 週間経過後は 11 Vol.%であった。1 ヶ月経過後、気体熱伝導式の水素濃度計では検知できないが、接触燃焼式の水素濃度計では 3500 ppm が検知され、1 ヶ月経過しても TPRD のガス放出口のガスを接触燃焼式の水素濃度計によって検知可能であることがわかった。

3.2 火炎暴露後の TypeIV 容器の濃度測定結果

TypeIV 容器の火炎暴露の様子を Fig. 9 に示す。

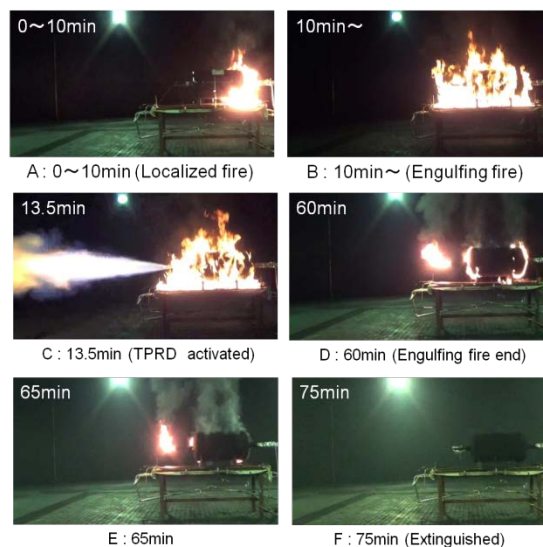


Fig. 9 Fire exposure test scenes (Type IV)

本容器では、火炎暴露開始から約 13 分 30 秒(局所火炎 10 分+全面火炎 3 分 30 秒後)に TPRD が作動した。容器に充填された高圧の水素ガスは TPRD のガス放出口から水素火炎となり放出され、容器内はほぼ大気圧になった (Fig. 9C)。プロパンガスバーナを停止し、火炎暴露を終了すると、TypeIV 容器は TPRD のガス放出口部位及び容器のボス口、ショルダ部で燃焼が継続し (Fig. 9D ~ E)、約 15 分で完全に鎮火した (Fig. 9F)。この際の TPRD のガス放出口の火炎の色は TypeIII 容器でみられたような青炎とは異なり、黄色輝炎になっている。この現象は、濃度計測終了後に容器を切断した際にみられた容器内下部に堆積した熔融したライナーの状態 (Fig. 10) から、容器内で樹脂製のライナーがガス化し、TPRD のガス放出口から排出されて燃焼したためと考えられる。そのため、鎮火後、TPRD のガス放出口で検知されるガスは、水素ガスだけではなく、樹脂製ライナーの熔融によって発生した可燃性ガスも含まれていると考えられる。



Fig. 10 Melted liner of the cylinder

鎮火後の TypeIV 容器における TPRD ガス放出口のガス濃度計測プロットを Fig. 11 に、結果一覧を Table 2 に示す。計測は、TypeIII 容器と同様に、鎮火直後から 1 時間は吸引式の気体熱伝導式水素濃度計を用いたが、TypeIV 容器では、鎮火後 2 時間以降はガス濃度が 2 Vol.%未満になったため、吸引式の接触燃焼式の水素濃度計を用いた。

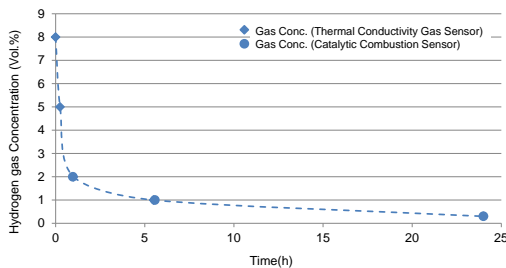


Fig.11 Gas concentration over time (Type IV)

Table 2 Gas concentration (Type IV)

Time	Gas Conc.	Sensor type (Vacuum type)
0min	8Vol.%	Thermal Conductivity Gas Sensor
15min	5Vol.%	Thermal Conductivity Gas Sensor
1h	2Vol.%	Thermal Conductivity Gas Sensor
2h	> 10000ppm	Catalytic Combustion Sensor
5h	> 10000ppm	Catalytic Combustion Sensor
24h	3000ppm	Catalytic Combustion Sensor
72h	non-quantifiable	Catalytic Combustion Sensor

TypeIV 容器においては、接触燃焼式の水素濃度計で、5 時間経過も 10000 ppm 以上検出できた。また、24 時間経過後には 3000 ppm となり、24 時間以後にはガス濃度を検知できなくなった。

接触燃焼式の水素濃度計は、検知原理として触媒表面でのガスの接触燃焼による白金線コイルの温度上昇を用いる⁹⁾ことから、水素ガス以外の可燃性ガスであっても検知することができる。よって、たとえ TPRD のガス放出口で検知されたガスが、容器内に充填された水素ガスではなくても、接触燃焼式の水素濃度計を用いることで、樹脂製ライナーの加熱・溶融によって発生した容器内の可燃性ガスを検知できるため、この手法によって、TPRD の作動の有無を判定することができると考えられる。

4. まとめ

圧縮水素容器を搭載した車両の火災後処理において、火災現場で容易に TPRD の作動の有無を判定する手法を開発するため、容器内に残存するガスを TPRD のガス放出口から水素濃度計で検知する手法により、TPRD の作動の有無を判定できるかを調べた。その結果、鎮火後 24 時間以内に、接触燃焼式の水素濃度計を用いて、TPRD のガス放出口からガスの検知ができれば TPRD は作動し、ガスの検知ができなければ TPRD は作動していないと判定できることがわかった。また、本手法は、容器の種類を問わず、容器内のガスが大気中へ拡散しやすくなる構造や、車両が激しく焼損するような条件であっても有効であることがわかった。なお、FCV の車両火災試験や実際の水素トレーラーでの火災事故¹⁰⁾の際に、本手法を用いて TPRD の作動の判定を試みた結果、本手法が有効であることを確認できた。

今後は、鎮火後、TPRD が作動していないことがわかった場合の焼損容器の安全な取り扱いについて検討する予定である。

本報は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施した「燃料電池自動車の水素安全基準等の国際調和に関する研究開発」の一部の成果をまとめたものである。

参考文献

- 1) 経済産業省：CNG自動車燃料装置用容器のくず化作業における事故の防止について（要請）：
http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2012/10/241012-2.html
(2014.04.17)
- 2) Indianapolis CNG Refuse Truck Fire Update :
<http://www.cleanvehicle.org/technology/IndianapolisCNGRefuseTruckFireUpdate.pdf> (2015.06.24)
- 3) 経済産業省：燃料電池自動車及び水素ステーションに関する規制面での取り組みについて：
<http://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kaigi/meeting/2013/wg3/toushi/150220/item2-2.pdf> (2016.08.10)
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」次世代技術開発・フィージビリティスタディ等革新的な次世代技術の探索、有効性検証に関する研究開発燃料電池自動車等に係る国際標準化および規制見直しのための研究開発， p.240-242 (2013)
- 5) Tamura, Y. et al. : Validation of the Localized Fire Test Method for On-Board Hydrogen Storage Systems, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. Volume 7, Issue 3, p.1027-1035 (2014)
- 6) Scheffler, G..et al. : Establishing Localized Fire Test Methods and Progressing Safety Standards for FCVs and Hydrogen Vehicles, SAE Technical Paper (2011), 2011-01-0251, DOI:10.4271/2011-01-0251
- 7) UNITED NATIONS : ECE/TRANS/180/Add.13 , Global technical regulation No. 13 (2013)
- 8) 増田秀昭：自動車火災を受ける構造部材の耐火設計手法：
<http://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h16/txt/05-3.pdf> (2016.08.08)
- 9) 小林哲彦：水素および可燃性ガスセンサ技術，水素エネルギーシステム Vo1.19, No.1, p.46-51 (1994)
- 10) 中田雅之，遠藤正和：水素トレーラーの火災事例から考察する消防隊活動の留意事項について，日本火災学会誌 66(5), p.8-13 (2016)