

自動車用圧縮水素容器の極端温度圧力サイクル試験^{*1}

—試験温度による性能劣化—

Extreme Temperature Pressure Cycling Test of Compressed Hydrogen Tanks for Vehicles

—Performance Deterioration due to Examination Temperature—

山崎 義男^{*2}

Yoshio YAMAZAKI

富岡 純一^{*2}

Jun-ichi TOMIOKA

田村 陽介^{*3}

Yohsuke TAMURA

三石 洋之^{*2}

Hiroyuki MITSUSHI

渡辺 正五^{*2}

Shogo WATANABE

Abstract

The purpose of this study is to investigate the influence of examination temperature during extreme temperature pressure cycling test to determine the performance of two types of compressed hydrogen tanks for vehicles, VH3 and VH4. Decreased fatigue life was observed in the VH3 tank used for this examination, and decreased burst pressure was observed in the VH4 tank.

1. はじめに

燃料電池自動車に搭載される圧縮水素容器には『圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準 JARI S001 (2004)』(以下、「JARI S001」という)により -40°C と 85°C での性能確認を行う環境試験が規定されているが、急速充填や消費を行うと、条件によってはこの温度範囲を超える結果¹⁾が得られている。一方で、燃料電池自動車の普及拡大を目的に、JARI S001の改訂が検討されており、先の結果を受けて容器使用温度範囲の適正化も検討されている。しかし、使用限界温度(極端温度)での圧力サイクル試験が、容器寿命にどのような影響をおよぼすかといった事項に対する調査結果はほとんど公表されていない。

そこで本報告では、自動車用圧縮水素容器に極端温度圧力サイクル試験を実施して、試験温度が圧縮水素容器の容器寿命にどのような影響を与えるかを調査した結果を述べる。

2. 供試容器・試験方法

2.1 供試容器

試験には、最高充填圧力(Filling Pressure: 以下、「FP」という)35MPaの車載用水素容器であるVH3容器(金属ライナー+CFRP(炭素繊維強化プラスチック))およびVH4容器(プラスチックライナー+CFRP)を用いた。Table 1に供試容器の概略仕様を、Table 2に常温圧力サイクル試験結果を示す。常温圧力サイクル試験はFPの125%の圧力サイクルにてJARI S001第11条に準拠して実施した。

Table 1 Specification of test tank

Specification	VH3 Tank (Type3) KHK Approved	VH4 Tank (Type4) ANSI/IAS NGV2-1998
Filling Pressure [MPa]	35	35
Volume [L]	39	65
Diameter × Length [mm]	φ297 × 906	φ400 × 832
FRP Type	CFRP	CFRP (External Layer : GFRP)
Linner Material	Al (A6061-T6)	High Density Polyethylene (HDPE)

Table 2 Result of ambient temperature pressure cycling test (Maximum pressure : over 44MPa (≒FP×125%))

Tank type	Life [cycles]	Termination	LBB Position
VH3	23,336	LBB	Dome Part
	19,658	LBB	Dome Part
VH4	53,541	LBB	(No check)
	81,858	LBB	(No check)

* 1 原稿受理 2007年7月4日

* 2 (財)日本自動車研究所 FC・EVセンター

* 3 (財)日本自動車研究所 FC・EVセンター 博士(工学)

2.2 試験装置

極端温度圧力サイクル試験は、主にFig. 1に示す120MPa増圧機と大型恒温・恒湿槽（温度制御範囲：-40℃～150℃，以下、「恒温槽」という）からなる環境サイクル試験装置を用い，その恒温槽内に供試容器をセットして，目標とする温度・湿度に制御することで実施した。

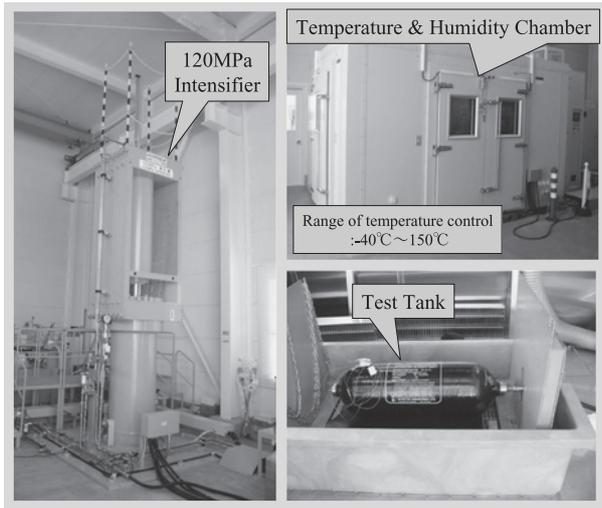


Fig. 1 Test apparatus and tank

2.3 試験条件

Table 3に試験方式・条件を，Fig. 2に目標とする試験条件の模式図を示す．Fig. 2に示すように，本試験にて実施目標とする極端温度圧力サイクル試験は，供試容器を高温条件（85℃,95%RH）および低温条件（-40℃）に保持して，FP×125%の圧力サイクルにて各々4,000回を実施する試験とした．これら一連の試験により供試容器に生じた性能変化は，極端温度圧力サイクル試験と同等負荷（FP×125%，8,000回）の常温圧力サイクル実施後の容器および無負荷容器を比較容器として，それぞれの負荷試験後に破裂試験を実施し，破裂圧力と破裂形態の比較検討により調査した．また各試験条件に用いた供試容器数は，それぞれ2個とした．

Table 3 Test conditions

Test Place		Temperature & Humidity Chamber
Fluid (Medium)		Perfluoropolyether (PFPE)
Test Conditions	Minimum Pressure	undre 1 MPa
	Maximum Pressure	over 44 MPa (Filling Pressure × 125%)
	Frequency	VH3 : 40 sec/cycle VH4 : 50 sec/cycle
Measurement		Pressure, Strain, Temperature (Sampling Rate : 10Hz)

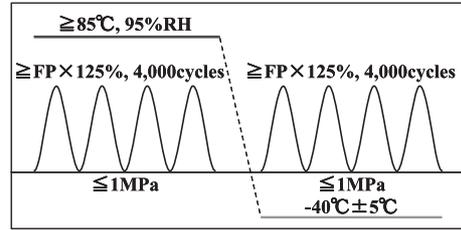


Fig. 2 Schematic diagram of target test conditions

試験中は加圧サイクル数の他に，Fig. 3の模式図で示すように，容器表面の周方向ひずみと温度を，ひずみゲージおよび熱電対を容器長手方向中央部に貼り付けて計測し，また容器内部の温度は，エンドプラグから熱電対を容器内に挿入して容器中央部で計測した。

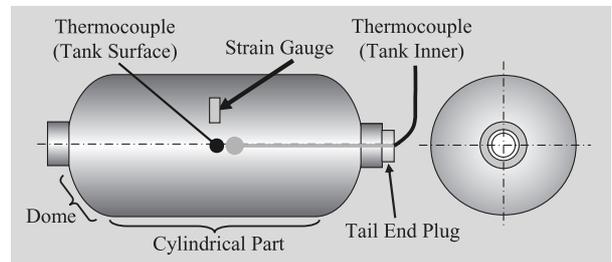


Fig. 3 Mounted position of strain gauge and thermocouple

3. 試験結果および考察

3.1 極端温度圧力サイクル試験

3.1.1 試験中の容器各部位の温度

Fig. 4にVH3容器高温試験（85℃,95%RH）中の容器表面温度，容器内部温度および圧力の経時変化を，Table 4に各容器タイプ，温度条件での容器表面温度および容器内部温度の実績値を示す。

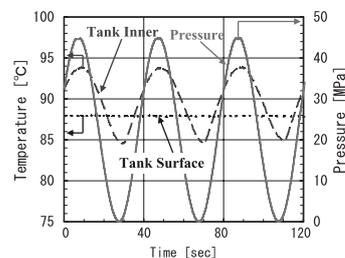


Fig. 4 Temperature, pressure vs. time during high temperature test of VH3 tank

Fig. 4より圧力変化にともない容器内温度も変化することが認められた．これは主に圧力媒体が断熱圧縮・膨張することによる温度変化と推察される。

Table 4 Results of temperature condition during extreme temperature pressure cycling Test

Tank Type	Target Temp.	Fluid Temp. in Tank	Tank Surface Temp.
VH3	$\geq 85^{\circ}\text{C}$	$85^{\circ}\text{C}\sim 96^{\circ}\text{C}$	$87^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$
	$-40^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$	$-36^{\circ}\text{C}\sim -43^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}\sim -43^{\circ}\text{C}$
VH4	$\geq 85^{\circ}\text{C}$	$85^{\circ}\text{C}\sim 97^{\circ}\text{C}$	$90^{\circ}\text{C}\sim 92^{\circ}\text{C}$
	$-40^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$	$-24^{\circ}\text{C}\sim -35^{\circ}\text{C}$	$-37^{\circ}\text{C}\sim -39^{\circ}\text{C}$

今回の試験結果より、極端温度圧力サイクル試験の導入では、容器内温度は圧力サイクルによる温度変化を含めると約 10°C の温度変化を生じる場合のあること、また容器内外温度差も 10°C 程度生じる場合のあることが確認され、試験温度の定義には配慮を要することがわかった。

3.1.2 極端温度圧力サイクル試験結果

Fig. 5に各容器の試験温度ごとの試験圧力と容器直胴中央部における周方向ひずみとの関係の一例を示す。ただし、VH4容器表面のひずみは容器最表層のGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）が、高温試験では容器膨張にともない大変形し、ひずみゲージが破損してしまうため、ひずみ変化は測定できなかった。Fig. 5より試験圧力と周方向ひずみはほぼ比例関係にあり、温度による容器周方向ひずみへの影響は非常に小さく、よって温度がFRPやライナーに作用する応力サイクルにおよぼす影響は小さいものと推察される。またVH3容器の単位圧力あたりのひずみは約 $70\mu\epsilon/\text{MPa}$ 、VH4容器は約 $160\mu\epsilon/\text{MPa}$ であり、VH3容器に比べてVH4容器の方がCFRPには2倍以上のひずみ、すなわち応力が作用すること確認された。

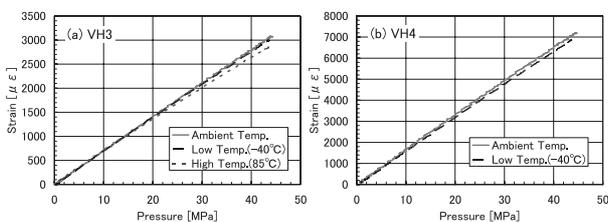


Fig. 5 Cylindrical strain vs. pressure during tests

Table 2に示す常温圧力サイクル試験結果より、高温および低温圧力サイクル試験が各4,000回では破裂前漏洩（Leak Before Burst：以下、「LBB」という）は発生しないものと想定していたが、今回の試験ではVH3容器の一つが、高温条件で圧力サイクル4,000回完了後、続けて低温条件で2,863回（全

サイクル数：6,863回）後に、LBBが発生した。

一般にVH3容器の疲労寿命が低下する原因として、Alライナーの応力振幅増加もしくは疲労特性劣化が考えられる。しかし前述したように容器直胴部のAlライナーの応力振幅への試験温度の影響は小さいことが確認されている。一方、ライナーの材料であるアルミニウム合金A6061-T6の引張特性²⁾や疲労特性³⁾の温度依存性からは、本試験の温度範囲内では疲労寿命が半分以下になるような違いを説明できるような特性変化は確認できない。

このVH3容器を、LBB発生箇所特定のために、CFRP層を分離して、Alライナーの浸透探傷検査を行なった結果、Fig. 6に示すようにドーム部に周方向の貫通亀裂が確認された。Table 2より常温圧力サイクル試験でのLBB発生箇所も同様にドーム部周方向の亀裂であり、発生場所および形態は同じであった。ドーム部の加圧による応力変化は直胴部のように単純に考えることが難しいため、今回の試験だけでは直接的な疲労寿命低下要因を特定することは困難と考えられる。直胴部でLBBを起こすVH3容器を用いて疲労寿命への温度の影響を調査する必要があると推察された。

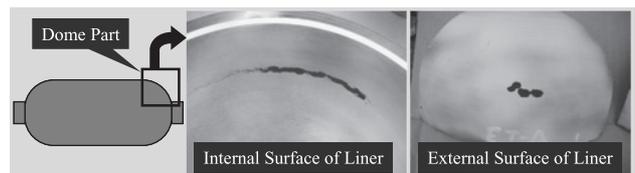


Fig. 6 Result of penetrant testing of LBB tank liner

3.3 破裂試験結果

Fig. 7に供試VH3容器、Fig. 8に供試VH4容器の初期破裂圧力、常温圧力サイクル試験および極端温度圧力サイクル試験後の破裂圧力を示す。ただし、今回用いたVH3容器は容器破裂前にトップ部ボスのネジ部破損が2例生じたため、ネジ部破損時の圧力をもって破裂圧力とした。

供試VH3容器では破裂圧力にバラツキはあるものの、極端温度圧力サイクル試験を実施後でも破裂圧力の低下は確認できなかった。また破裂形態もすべて直胴部より破裂が進行し、大きな違いは観察されなかった。

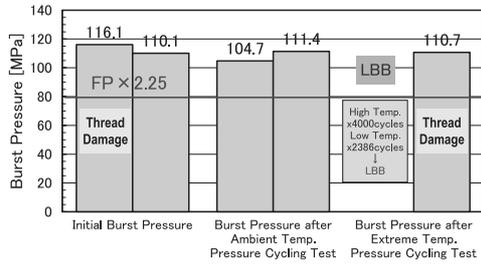


Fig. 7 Result of burst test (VH3 tanks)

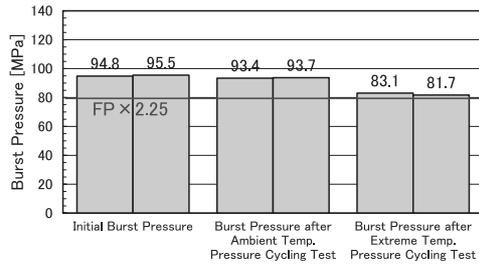


Fig. 8 Result of burst test (VH4 tanks)

一方、供試VH4容器では、極端温度圧力サイクル試験実施後の容器の破裂圧力は初期破裂圧力より10MPa以上も低下し、容器の設計最小破裂圧力である78.75MPa (=FP×2.25倍)に近い値まで低下した。さらに極端温度圧力サイクル試験後の容器だけ破裂試験中、圧力約50MPaから、CFRPの部分破損と思われる破壊音が破裂時まで連続して確認された。なお、他の容器では同様の破壊音は破裂する数MPa前から確認されている。破裂形態をFig. 9に示すが、初期破裂圧力を測定した容器や常温圧力サイクル後の容器はすべて直胴部より破裂が進行して、両ドーム部が分離する形態を示すのに対して、極端温度圧力サイクル試験後の容器では、片方のドーム部のみ破壊分離する破損形態が観察された。すなわち試験温度によっては破裂圧力の低下が促進され、とくにドーム部の強度低下が著しく起きることがあることが認められた。

供試VH4容器は常温圧力サイクル試験によりネック部や高角度ヘリカル近傍のCFRPに層間剥離を生じることが確認されている⁴⁾。極端温度圧力サイクル試験後のVH4容器は、破裂試験時にCFRP破壊音が低圧から認められることから、試験温度の変化によりCFRPの劣化が促進され、破裂試験時に層間剥離等が低圧から進行し強度低下が生じたものと推察される。したがってVH4容器使用温度範囲の適正化には、CFRPの疲労特性(引張, 曲げ)の温度依存性を確認する必要がある。

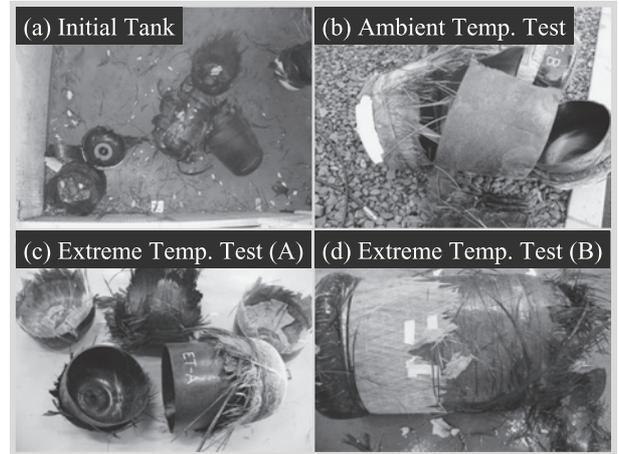


Fig. 9 Appearances after burst test (VH4 tanks)

4. まとめ

燃料電池自動車用圧縮水素容器 (VH3容器およびVH4容器) に極端温度圧力サイクル試験を実施した結果、以下のことがわかった。

- 1) 本試験の供試VH3容器は、極端温度圧力サイクルにより疲労寿命の低下が認められた。
- 2) 本試験の供試VH4容器は、極端温度圧力サイクルにより破裂強度の低下が認められた。

今後は、高温と低温とで、どちらが容器の性能劣化により大きく影響するか調査を進め、技術基準のさらなる適正化に向けたデータ蓄積を進める予定である。

なお、本研究は、(独)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「水素社会構築共通基盤整備事業—水素・燃料電池自動車の基準・標準化に係る研究開発」の成果の一部をまとめたものである。

参考文献

- 1) 広谷龍一ほか：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1報), 自動車技術会論文集, Vol.38, No.2, 307-312 (2007)
- 2) 日本アルミニウム協会：アルミニウムハンドブック(第6版), p.64 (2001)
- 3) 日本アルミニウム協会ほか：平成15年度～平成16年度成果報告書 水素安全利用等基盤技術開発 水素に関する共通基盤技術開発 水素用アルミ材料の基礎研究, p.109 (2005)
- 4) 富岡純一ほか：自動車用圧縮水素容器の常温圧力サイクル試験(VH4), 自動車研究, Vol.29, No.7, p.283-286 (2007)