

自動車用圧縮水素容器の常温圧力サイクル試験 (VH4)^{*1}

—VH4容器の寿命におよぼす上限圧力の影響—

Ambient Temperature Pressure Cycling Test of Compressed Hydrogen Tanks
for Vehicles (VH4)
—Influence of Maximum Pressure on VH4 Tank Life—

富岡 純一^{*2}

Jun-Ichi TOMIOKA

山崎 義男^{*2}

Yoshio YAMAZAKI

渡辺 正五^{*2}

Shogo WATANABE

Abstract

The purpose of this study is to clarify the influence of the maximum pressure on the lifetimes of compressed hydrogen tanks (VH4) during ambient temperature pressure cycling tests. We varied the maximum pressure from 125% to 175% of the designed filling pressure (FP) in three stages. The lifetimes of tanks were very long. However, when the maximum pressure exceeded 150% of FP, the tanks' dome areas around the end boss ruptured without LBB. These areas had delaminations so that CFRP strength decreased.

1. はじめに

燃料電池自動車等に搭載される圧縮水素容器の長期疲労寿命評価のために『圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準 JARI S001 (2004)』¹⁾第11条では、容器に液体を充満させ、2 MPa以下の下限圧力と最高充填圧力の125%以上の上限圧力の間を往復させる常温圧力サイクル試験を課し、容器は加圧回数11,250回以下で漏洩してはならないと定めている。

現在、使用実態に見合ったより合理的な基準改定に向けて、常温圧力サイクル試験の加圧回数を11,250回から5,500回に、応力比（=最小破裂圧力／最高充填圧力）を2.25から1.8（end of life）に見直すための検討が行われている。しかし、応力比とサイクル数の関係についての知見があまりない。

そこで、これまでの報告では、最高充填圧力(Filling Pressure: 以下「FP」という)が35MPaのVH3容器(Type 3: 金属ライナー製複合容器)について、上限圧力をFPの100%, 125%, 150%, 175%, 200%として常温圧力サイクル試験を実施し、破裂前漏洩(Leak Before Burst: 以下、「LBB」

という)の発生状況などを調査した。その結果、VH3容器の常温圧力サイクル試験の上限圧力とLBB発生サイクル数の関係を示す疲労曲線を得た。また、VH3容器の寿命は金属ライナーの疲労寿命で決定されるといった知見を得た^{2), 3)}。

本報では、FPが35MPaのVH4容器(Type 4: プラスチックライナー製複合容器)について、上限圧力をFPの125%, 150%, 175%とする常温圧力サイクル試験を実施し、破損の発生状況などを調査した。

なお、応力比が2.25であるFP=35MPa容器(最小破裂圧力: $35 \times 2.25 = 78.75$ MPa)をFP×150% (=52.5MPa)で常温圧力サイクル試験を行う場合、目標とする、応力比: 1.8のFP=42MPa容器(最小破裂圧力: $42 \times 1.8 = 75.6$ MPa)をFP×125% (=52.5MPa)で常温圧力サイクルを行う場合と同等の圧力となり、現在検証が進められている応力比とサイクル数を見直した場合を想定することができる。

2. 供試容器・試験方法

2.1 供試容器

試験には、自動車用圧縮水素容器のひとつであるVH4容器(最高充填圧力35MPa)を使用した。

*1 原稿受理 2007年6月22日

*2 (財)日本自動車研究所 FC・EVセンター

Table 1に供試容器の概略仕様を示す。Fig. 1に供試容器の模式図と各部名称を示す。

Table 1 Test tank specifications

Specifications	VH4 tank
Filling Pressure (FP)	35 [MPa]
Volume	64 [L]
Diameter * Length	400 × 832 [mm]
Liner Material	HDPE*

*HDPE:High-Density Polyethylene

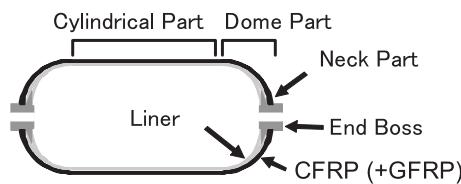


Fig. 1 Test tank schematic diagram

2.2 試験装置

試験は、水加圧試験装置を用いて、容器を試験ピットに設置して実施した。Fig. 2に水加圧試験装置の120MPa増圧機と供試容器の設置状況を示す。

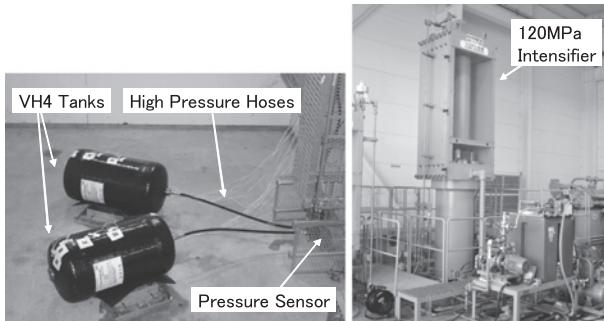


Fig. 2 Test apparatus and tanks

2.3 試験条件

常温圧力サイクル試験の試験条件をTable 2に示す。Table 3に試験容器に与えた上限圧力を示す。

Table 2 Test conditions

Test Place	Dry Pit	
Fluid (Medium)	Deionized Water	
Test Conditions	Minimum Pressure	under 1 MPa
	Maximum Pressure	(See Table 3)
	Frequency	4 cycles/min.

Table 3 Set up pressures

Tank No.	Maximum Pressure [MPa]
125%-A, B	44 ($\approx \text{FP} \times 125\%$)
150%-A, B	53 ($\approx \text{FP} \times 150\%$)
175%-A, B	62 ($\approx \text{FP} \times 175\%$)

2.4 計測条件

試験では、容器に加えた圧力と容器外表面に発生した周方向ひずみを計測した。ひずみは、容器外表面のGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）層にひずみゲージを貼付して計測した。Fig. 3にひずみゲージ貼付図を示す。圧力・ひずみは10Hzでサンプリングした。

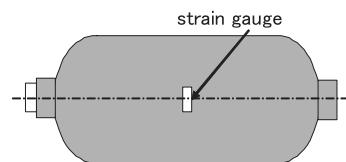


Fig. 3 Strain gauge position

3. 結果および考察

3.1 圧力とひずみの関係

試験では、容器に与えた圧力と容器表面に発生した周方向ひずみを計測した。Fig. 4に各容器で最高圧力時に発生した周方向ひずみを示す。

本試験で使用したVH4容器は、前報²⁾で試験したVH3容器よりひずみが大きかった。VH3容器はアルミニウムライナーの応力を小さくする必要があるが、VH4容器はその必要がないため、ひずみが大きいと考えられる。

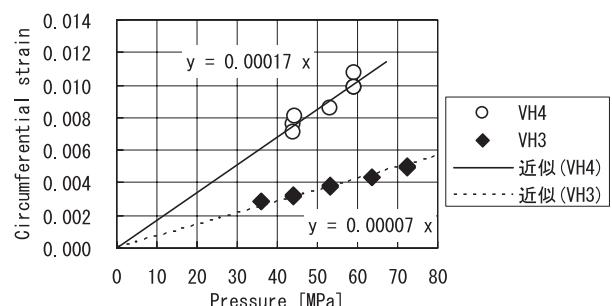


Fig. 4 Relationship between pressure and strain

3.2 破損発生サイクル数と発生状況

各容器の破損発生サイクル数と破損形態をTable 4に示す。

Table 4 Result of pressure cycling test

Tank No.	Maximum Pressure	Break [cycles] (State)
125%-A	44	53,541 (LBB)
150%-B		81,858 (LBB)
150%-A	53	37,757 (Burst)
150%-B		30,004 (Burst)
175%-A	62	4,058 (Burst)
175%-B		8,452 (Burst)

Fig. 5に破損状況を示す。125%では、ドーム部のエンドボス周辺からLBBが起きた。漏洩経路は、ライナーの疲労による亀裂、またはライナーと口金の接合部分などが考えられる。供試容器の設計圧力範囲を超える150%では、ネック付近のFRPが破損し、エンドボスが外れた。175%では、ドーム部のFRPが破損し、FRPが飛散した。ネック付近と直胴部付近のドーム部は、曲げ応力が発生しやすい部位であることから、曲げ応力によりCFRPが劣化し破裂したと考えられる。

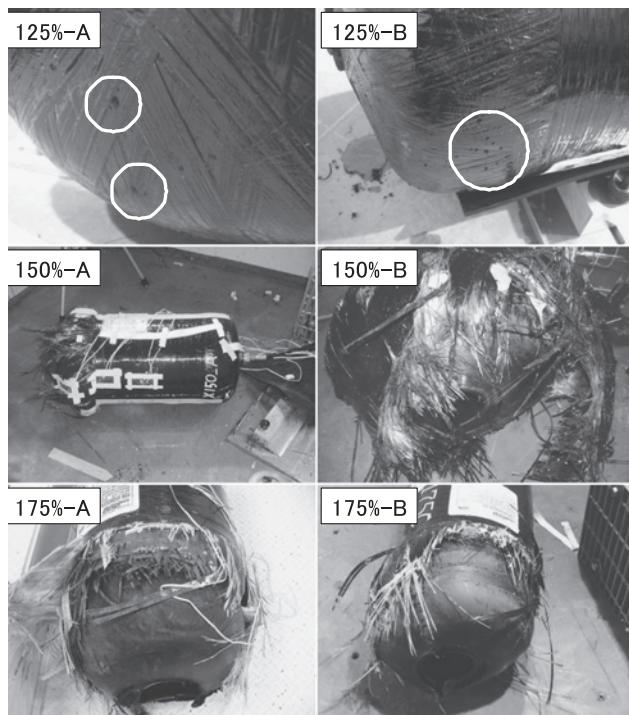


Fig. 5 State of break

上限圧力と容器破損発生サイクル数の関係をFig. 6に示す。比較のため、前報²⁾で使用したVH3容器の結果も示した。

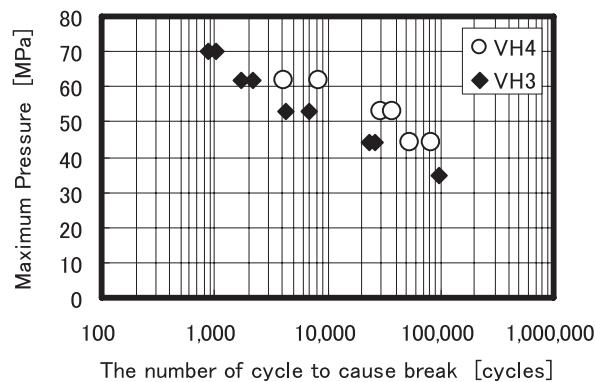


Fig. 6 Relationship between pressure and the number of cycle to cause break

VH4容器はVH3容器と比べて寿命が長い。VH3容器の損傷原因は金属製ライナーの疲労による寿命と考えられるが、VH4容器はプラスチック製ライナーであり、ライナーの疲労ではなく、ライナーとボスの接合部やCFRPの劣化などが寿命を決めていると考えられる。

150%試験 ($35\text{ MPa} \times 150\% = 52.5\text{ MPa}$) は、応力比1.8、規定サイクル数5,000回としたFP=42MPaの常温圧力サイクル試験 ($42\text{ MPa} \times 125\% = 52.5\text{ MPa}$) を想定した試験と考えることができる。VH4容器では、破損発生サイクル数が30,000回以上であり、十分な寿命を有している。しかし、破損形態が破裂であるため、破裂を起こさないような対応を検討する必要がある。

3.3 試験後容器の観察

LBBが発生した容器を切断し、ライナー内面を観察した結果、外観上亀裂などはなかったことから、口金とライナーの接続部分から漏洩した可能性が考えられる。

破裂した容器の破損原因を調べるため、破損した容器を切断し、CFRPの断面を観察した結果をFig. 7に示す。矢印部分は、層間剥離と見られる痕跡である。ネック部には層間剥離と見られる痕跡が多数観察された。一方、ドーム部にはほとんど観察されなかった。また、高角度ヘリカル近傍にも層間剥離と見られる痕跡が観察された。これらの層間剥離により、CFRPの強度が低下し、破裂に至ったと考えられる。

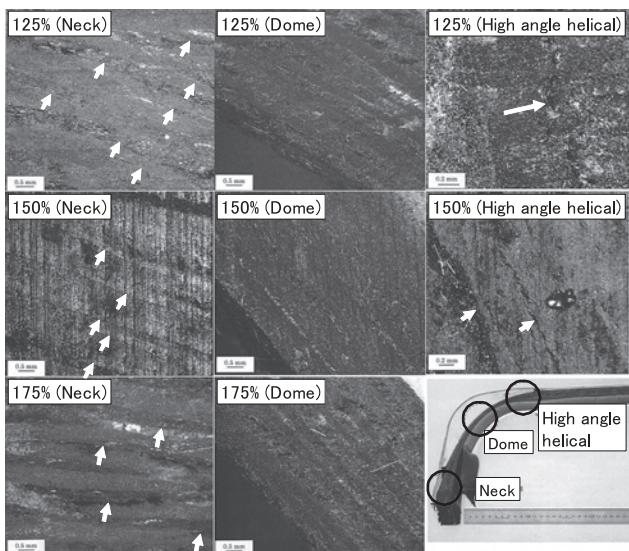


Fig. 7 Cross-section of CFRP

3.4 有限要素法による応力状態の解析

供試容器の破損原因を調べるために、試験中の応力状態について有限要素法による解析を行った。解析はCFRPはフープ4層、ヘリカル3層とした。Fig. 8に61.25MPa (FP×1.75)における主応力図を示す。最大応力はフープ第1層 (Fig. 8 ①) に出たが、高角度ヘリカルの下のヘリカル層 (Fig. 8 ②) にも高い値が出た。また、各ヘリカル層の繊維ひずみを調べた結果、ネックに近い部分に大きなひずみの差が生じていることが分かった。このひずみの差が層間剥離を引き起こした可能性があると考えられる。

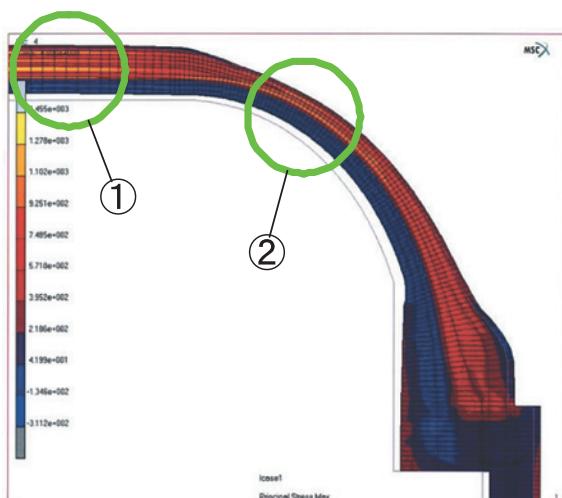


Fig. 8 Fiber strain of helical layer

供試容器は、 $FP \times 125\%$ のサイクル荷重を受けるものとして設計されている。このため、想定された応力状態 ($FP \times 125\%$) より高い応力状態 ($FP \times 150\%$, $FP \times 175\%$) で試験した場合、ネック部および高角度ヘリカル近傍において層間剥離が発生し、繊維と樹脂の界面が損傷を受け、CFRPの強度が低下し破裂に至ったと考えられる。

4.まとめ

VH4容器の常温圧力サイクル試験を実施した結果、以下のことが分かった。

- (1) 本試験で使用したVH4容器は疲労寿命が非常に長いが、上限圧力を設計圧力以上に設定すると破損形態が破裂になったため、破裂を起こさないような対応を検討する必要がある。
- (2) 上限圧力が $FP \times 150\%$ 以上では、ネック部と高角度ヘリカル部から破裂が起きた。これらの部分では、CFRPに層間剥離が発生し、強度が低下したために破裂に至ったと考えられる。

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 (安全性評価)」の成果の一部をまとめたものである。

参考文献

- 1) 圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準JARI S001 (2004)
- 2) 飯島孝文ほか：自動車用圧縮水素容器の常温圧力サイクル試験（第一報）－容器寿命によよばず上限圧力の影響－，自動車研究，Vol.28, No.7, p.313-316 (2006)
- 3) 大居利彦ほか：自動車用圧縮水素容器の常温圧力サイクル試験（第二報）－疲労過程によよばず上限圧力の影響－，自動車研究，Vol.28, No.7, p.317-320 (2006)