

圧縮水素運送自動車用容器の固定方法に関わる  
技術基準

JPEC-S 0009 (2018)

添付資料 (調査・安全性検証試験結果)

平成30年7月17日

一般財団法人石油エネルギー技術センター

この技術基準は、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、一般財団法人石油エネルギー技術センター（JPEC）が、「水素利用技術研究開発事業／燃料電池自動車及び水素供給インフラの国内規制適正化、国際基準調和・国際標準化に関する研究開発／水素ステーションの設置・運用等における規制の適正化に関する研究開発」において、有識者等で構成された委員会での審議を経て作成した技術基準（案）をもとに、平成30年7月17日に当センターの技術基準として制定されたものである。

本添付資料は、技術基準本文の技術的根拠となった調査・安全性検証試験の結果を示すものである。

＜目 次＞

添付 1. 海外（米国）における圧縮水素運送自動車用容器固定方法に関わる調査	
1. 容器及び固定方法に関する法規、規格等	4
2. 事故事例の調査	5
添付 2. 圧縮水素運送自動車用容器固定方法の安全性検証試験結果	
1. 試験のコンセプト	6
2. 試験容器仕様	7
3. 用語定義	8
4. 安全性検証試験詳細	9
a) トレーラー走行振動と共振の可能性の把握	
a)-① 固有振動数試験	9
a)-② 疲労荷重評価	12
b) 定常使用における容器の健全性検証のための試験	
b)-① 振動耐久試験	
(ア) 負荷シミュレーション	13
(イ) 振動耐久（加振）試験	14
(ウ) 気密・サイクル試験	15
(エ) 耐圧・破裂試験	17
b)-② 海外における実績調査	17
c) 非定常状況における容器の健全性検証のための試験	
c)-① 衝撃耐久試験	
(ア) スレッド衝撃試験	18
(イ) 耐圧・破裂試験	19
5. 総括	20

## 添付 1. 海外（米国）における圧縮水素運送自動車用容器固定方法に関わる調査

### 1. 容器及び固定方法に関する法規、規格等

米国において、企業が Type 3 または Type 4 の複合容器を製造・販売するためには、DOT（米国運輸省）の危険物安全課（PHMSA: Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration）から製造・販売に関する特別許可（Special Permit）を取得しなければならない。取得に関する手続については、連邦規則集 49 巻（106、107）に従う必要がある。一方で、取得するための具体的な基準はなく、企業と PHMSA との個別交渉に委ねられる。

特別許可の申請にあたって企業が参照している規格を、以下に示す。

#### ➤ 容器

- ISO 11119-2 (Type 3) もしくは ISO 11119-3 (Type 4)
- DOT-CFFC
- CGA C-19 2002 (CGA : Compressed Gas Association (米国圧縮ガス協会))

#### ➤ 容器の固定化

- NFPA 52 (NFPA : National Fire Protection Association (米国防火協会))
- CGA-TB 25

などが用いられている。

このうち、容器の固定方法に関わる規格について述べる。

NFPA 52（2013年版）では、以下のように記載されている。

「ラック内の各燃料供給容器は、6方向（水平、垂直、前後）からのフル充填時の容器重量の8倍に相当する静的な力に対して、最大変位が0.5インチ（13mm）以下になるように固定されなければならない。」

なお、NFPA 52（2016年版）においては

「各燃料供給容器は、6方向（水平、垂直、前後）からのフル充填時の容器重量の8倍に相当する静的な力に対して耐えることができるように固定されなければならない。」

と改訂されている。

他方、CGA-TB 25（2013年版）では、以下のように記載されている。

「容器は、通常の使用条件下において摩擦摩耗が最小限となるような方法で搭載されなければならない。各容器を搭載するための器具は、下記に挙げる静的力に対して耐え得るものでなければならない。

- 移動方向（前後）において、各容器に内容物の最大の重さを加えた重量の2倍に相当する力
- 移動方向に対して直角である水平方向において、各容器に内容物の最大の重さを加えた重量の2倍に相当する力

- 上方の垂直方向において、各容器に内容物の最大の重さを加えた重量の 2 倍に相当する力
- 下方の垂直方向において、各容器に内容物の最大の重さを加えた重量の 2 倍に相当する力」

## 2. 事故事例の調査

DOE の支援の下、Pacific Northwest 国立研究所が開発した” HYDROGEN TOOLS” において報告されている水素容器または水素トレーラーに係る事故事例を容器の Type、固定方法を限定することなく 1948 年から 2016 年 7 月末までの期間を対象に調査した。

その結果、ネックマウント方式での固定方法に起因する事故事例は見いだせなかった。

## 添付 2. 圧縮水素運送自動車用容器固定方法の安全性検証試験結果

### 1. 試験のコンセプト

ネックマウント方式特有の懸念事項は、振動で容器に曲げ応力が発生し、疲労破壊に至るのではないか、という点である。

固定方法の安全性検証にあたり、疲労破壊に至る可能性について以下の2つの観点から検討することとした。

- a) 容器が、水素トレーラー走行に伴う振動に対して共振する可能性があるのか
- b) 使用に際して容器の健全性を維持できるのか

このうち、b)に対しては更に区分し、

- 定常使用（トレーラーに搭載し、水素の充填放出を繰り返す使用）において15年継続的に使用可能
- 事故等の非定常状況下で耐圧性を維持することが可能

の2点を満たすことを健全性の維持と定義し、各々の視点からの評価を実施した。

## 2. 試験容器仕様

表1に示す市販の圧縮水素運送自動車用容器を3種類評価した。

表1 試験に供した容器リスト

試験体容器	容器Ⅰ	容器Ⅱ	容器Ⅲ
製品規格・ 基準・ 認証評価	JPEC-S 0005	DOT-CFFC (SP13173)	CGA <sup>※1</sup> C-19 2002 PED <sup>※2</sup> 97/23/EC
種類	Type 3	Type 3	Type 4
生産国	米国	カナダ	米国
使用圧力 WP (最高充填圧力)	45MPa	45MPa	50MPa
内容積(公称)	300L	310L	531L
直径(公称)	436mm	433mm	560mm
全長(公称)	3,020mm	3,128mm	3,277mm
重量(公称)	200kg	206kg	260kg
最小破裂圧力	101.3 MPa	153 MPa	112.5 MPa
耐圧試験圧力	67.5MPa (WP×3/2)	75MPa (WP×5/3)	75MPa (WP×3/2)
組試験条件 (サイクル試験)	56.25MPa (WP×125%) ×11,250回以上	45MPa (WP) ×10,000 回+75MPa (WP× 5/3) ×30回以上	50MPa (WP) ×10,000 回+75MPa (WP×3/2) ×30回以上
ネック強度 (落下試験条件)	垂直落下 488J (JPEC-S 0005)	垂直落下 1220J (ISO-11119-2)	垂直落下 1220J (ISO-11119-3)

注※1: Compressed Gas Association/米国圧縮ガス協会

注※2: Pressure Equipment Directive/欧州圧力装置指令

### 3. 用語定義

- ・固有振動数：物体を自由振動させると、その物体に特有なある振動数で非常に大きな振幅で振動する共振現象が起こる。この振動数を固有振動数という。
- ・胴部：水素容器のうち、CFRP 内部にあるライナーの内径が一定であると見なせる円筒状の部分（図 1 参照）
- ・鏡部：胴部と口金部の中に位置する、ドーム状の部分（図 1 参照）

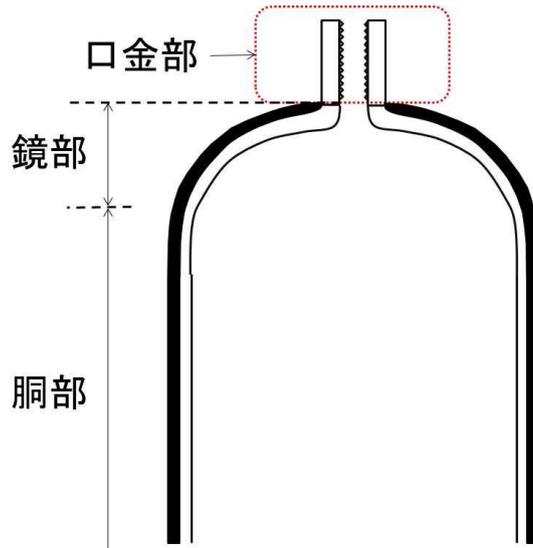


図 1 容器の部位名称

#### 4. 安全性検証試験詳細

上記 1. 項で述べたコンセプトに基づき、表 2 に示すような試験を実施した。

表 2 安全性検証試験項目

明らかにすべき事項	検討事項	実施試験・解析
a) 容器が、水素トレーラー走行に伴う振動に対して共振の影響を受けるか	① トレーラー走行振動と共振の可能性の把握 ② 振動による疲労破壊の可能性の解析	① 固有振動数試験 ② 疲労荷重評価
b) 容器の健全性は維持できるか (定常使用×15 年における耐圧性維持の可否)	① トレーラー走行振動×15 年分の振動を容器に与える →容器の健全性検証 ② 海外における実績調査	① 振動耐久試験 →気密・サイクル試験 →耐圧・破裂試験 ② 実績のある国における法規・基準及び事故事例調査
c) 容器の健全性は維持できるか (事故時等非定常時における耐圧性維持の可否)	① 自重の 8 倍の加速度 (8G) の衝撃を容器に与える →内圧に対する残存強度を測定	① スレッド衝撃試験 →耐圧、破裂試験

各容器を 2 本ずつ準備し、b)-①用と c)-①用に供した。c)-①用容器に対してスレッド衝撃試験前に a)-①固有振動数試験を実施した。

##### a) トレーラー走行振動と共振の可能性の把握

###### a)-① 固有振動数試験

トレーラーの走行振動と容器が共振する可能性を調べるために、固有振動数の測定試験を実施した。固有振動数試験は以下の 2 ステップで実施した。

###### Step 1: 容器自身の固有振動数測定のための打振試験

トレーラーの走行振動と水素容器との共振の可能性を調べるために、容器自身の固有振動数を測定する試験を実施した。図 2 に示すように、容器の両端部をスリングベルトで吊り下げ、インパルスハンマーで容器を打撃した。



図2 打振試験時の容器の吊り下げ（イメージ）

図3に示す72点（容器軸方向⑨点×円周方向8点）に加速度ピックアップを取り付け、容器表面の複数箇所を打撃して、上記72点の測定点でどの方向にどのような振動が発現するのかを測定した。

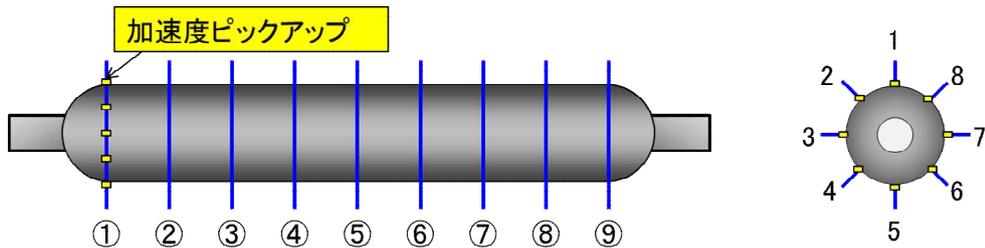


図3 加速度測定点の位置

観測された波形（容器Ⅲの例）を図4に、各容器の最小固有振動数を表3に示す。ただし、打振点の位置は、発現する振動の周波数に影響しなかった。

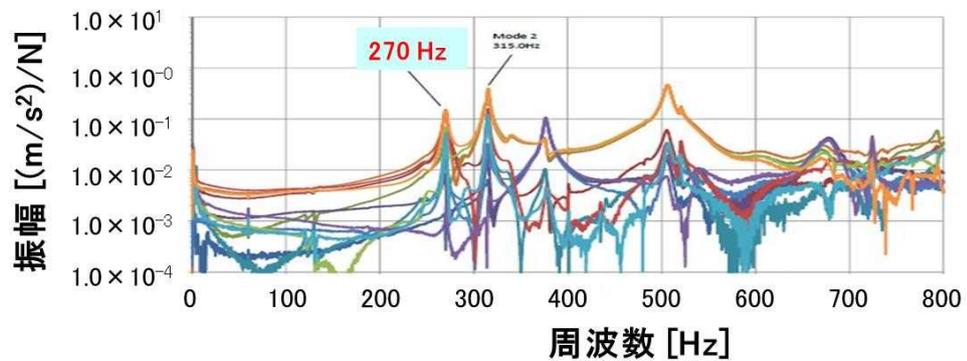


図4 Step 1の打振試験で観測された波形（容器Ⅲの例）

表3 各容器の最小固有振動数（Step 1）

容器	Type	最小固有振動数 Hz
I	3	290
Ⅱ	3	278
Ⅲ	4	270

一方、トレーラーの走行振動数は3～20 Hz であることが JPEC による自動車車

両・車体メーカーへのヒアリング調査より明らかになっている。

表 3 に示す試験の結果、容器の固有振動数はトレーラー走行振動よりも一桁高いことから、トレーラーの走行による共振の懸念はない。

#### Step 2：固定台にネックマウント方式で固定した容器の打振試験

容器をネックマウント方式で固定することで発現する振動を調べるために、容器を固定した状態での打振試験を実施した。図 5 に示すように、剛性の非常に高い定盤の上に、Step 1 の結果をもとにして設計・製作した鋼製固定台を設置した。この固定台にネックブラケットを取り付け、容器をネックマウント方式で固定し、打振試験を実施した。



図 5 打振試験時の容器のネックマウント方式固定（イメージ）

この結果、図 6（容器Ⅲの例）、表 4 に示すとおり、100 Hz 以下の領域に最小固有振動数が観察された。

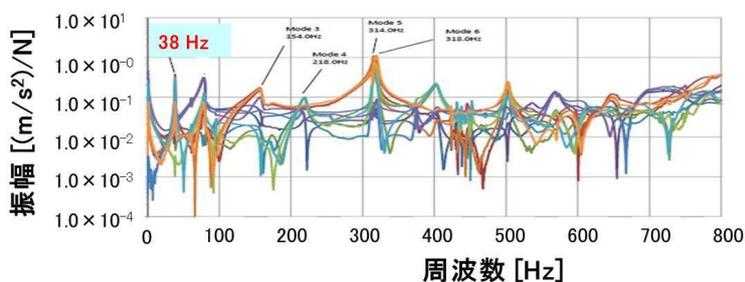


図 6 Step 2 の打振試験で観測された波形（容器Ⅲの例）

表 4 各容器の最小固有振動数（Step 2）

容器	Type	最小固有振動数 Hz
I	3	41
II	3	45
III	4	38

解析の結果、この振動は容器の変形による振動ではなく、ネックブラケットおよび鋼製固定台の支持部に現れる容器の円周方向の振動であることが分かった。これらの振動は、トレーラーの走行振動（3～20 Hz）に対して2倍程度の差がある。したがって、本試験において製作した固定台においては共振の懸念はなく、トレーラーの走行によって容器に生じる振動について、共振などの増幅効果は考慮する必要がないことが明らかとなった。一方、容器そのものに比べると支持部に現れる振動はトレーラーの走行振動に近い領域にあることから、ネックブラケットやフレームの設計には、留意する必要があることが示された。

a)-② トレーラー走行振動に対する疲労荷重評価（容器固定部）

振動負荷の高いネックブラケット及びその固定ボルトネジ部に、トレーラー走行振動が及ぼす影響を調べるために疲労荷重評価を実施した。ここでは、より負荷の高い固定ボルトネジ部について示す。トレーラー走行により発生する振動が固定ボルトネジ部に及ぼす応力を算出したところ、最大で 2.6 MPa であった。図7に示すように固定ボルトに用いた材質（SCM435）の S-N 線図から、疲労破壊を起こす下限応力（疲労限度）より二桁以上も低い。

この結果から、固定ボルトネジ部は強度的に問題ない。

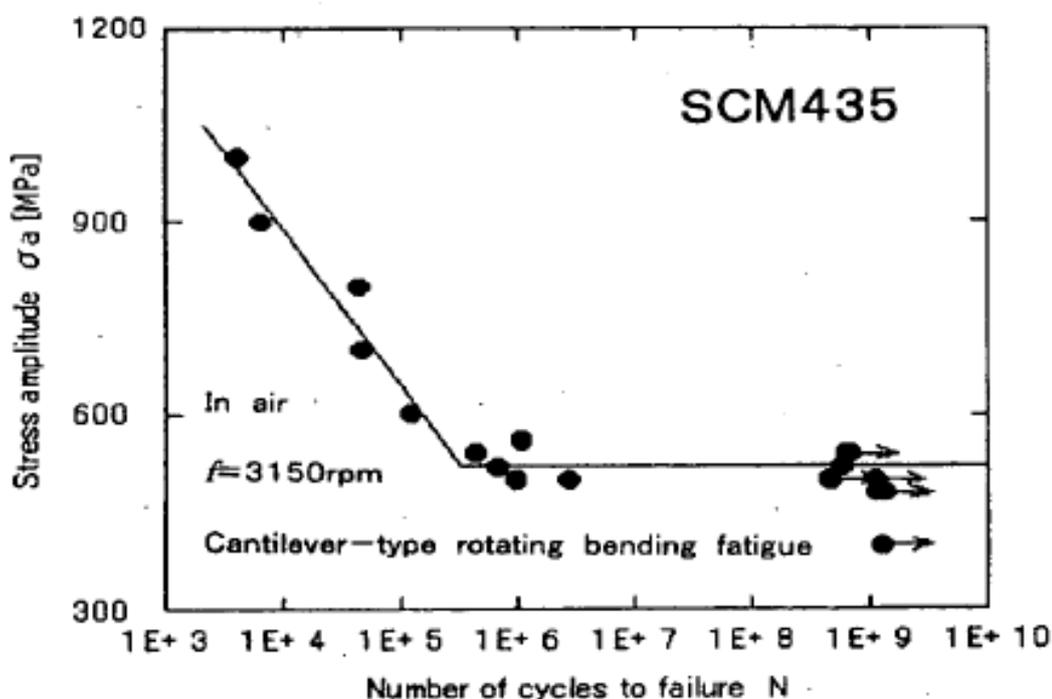


図7 固定ボルトに用いた材質（SCM435）の S-N 線図  
 (出典：日本材料学会 学術講演会講演論文集 52, 447-448, 2003)

b) 定常使用における容器の健全性検証のための試験

次に、固有振動数試験から得られた結果を受けて、ネックマウント方式で固定した容器に対してトレーラー走行×15年分の振動を与える振動耐久試験を実施した。更に振動耐久試験後の容器に対し、気密・サイクル試験、耐圧・破裂試験を実施した。

b)-① トレーラー走行振動に対する耐久試験（フレーム及びフレームに固定した容器）

(ア) 負荷シミュレーション

振動耐久試験に先立ち、

- ・ トレーラー用フレームの設計強度確認
- ・ トレーラー用フレームにおける最も振動加速度の影響の大きい容器（位置）の特定及びその加速度の推定

を目的として、トレーラーに設置する容器固定台（トレーラー用フレーム）の試設計、負荷シミュレーションを実施した。

ネックブラケット、フレーム構造は二次の四面体要素で、水素容器口金部（ネックブラケットとの接合部）、ネックブラケット固定ボルトは二次の六面体要素でモデル化した。また、固有振動数試験の結果を受けて水素容器は剛体として、剛体要素でモデル化した。

また、フレーム下端面は固定された状態と仮定して、水素容器を搭載したトレーラー用フレーム全体に対して、上下、前後（容器軸方向）、左右の各方向に 8G の負荷をかけて有限要素法解析を実施した。

境界条件を以下に示す。

拘束条件

水素容器の口金部（片方）は自由度のない完全拘束

接触条件

ネックブラケット（固定側）/ 水素容器；接触、摩擦係数 0.3

ネックブラケット（支持側）/ 水素容器；接触、摩擦なし

その他の接触、摩擦係数 0.3

解析の結果、容器同士及び容器とフレームの接触等につながるような大きな変位量は認められなかった。

また、トレーラー用フレームに搭載した容器の中で最上段、中央近傍の容器（図 8 の赤点線で示した容器）に対して最も大きな振動加速度が生じることが明らかとなった。

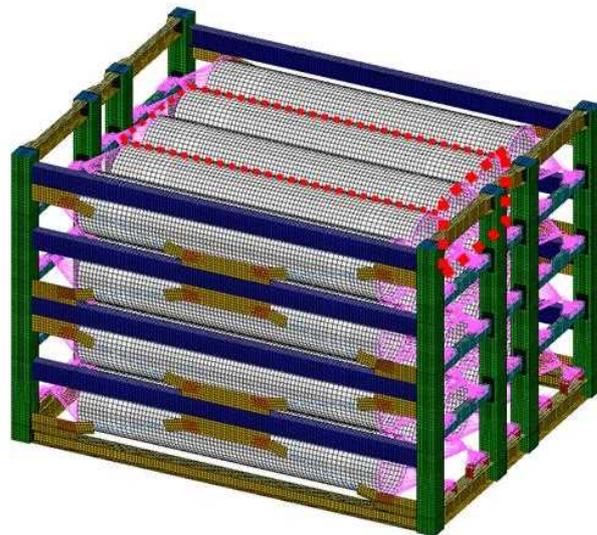


図8 仮設計したトレーラー用フレーム例及び加速度の影響が最大となる容器位置

(イ) 振動耐久（加振）試験

上記①の負荷シミュレーション結果を基に、最も加速度の影響を受けるトレーラー用フレームの最上部を模した一本用フレームを製作した。一本用フレームのイメージ図を図9に示す。

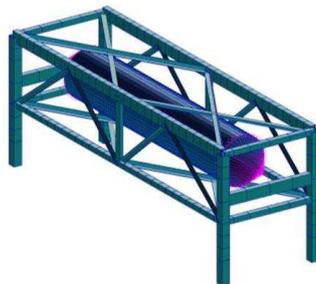


図9 一本用フレームのイメージ

これに容器を設置し、トレーラー実走行データをもとに15年間の走行と同等の加速度の影響を短時間で与える加速振動モードのモデル波形（図10）を構築し、この振動を各容器に付加した。

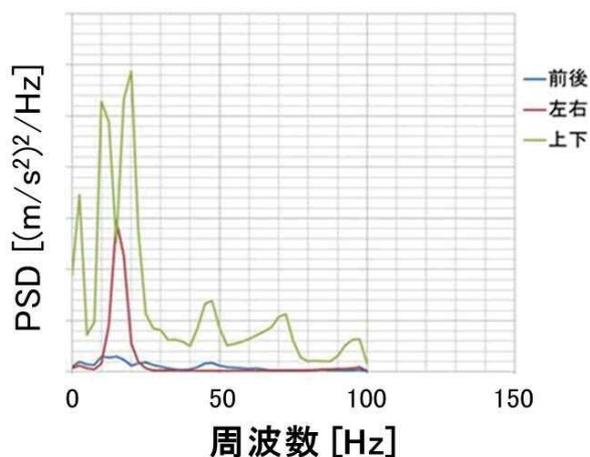


図 10 トレーラーの走行振動モードのモデル波形

(ウ) 気密・サイクル試験

振動耐久試験を実施した後の各容器に対して、容器の健全性を確認するための試験として気密・サイクル試験を実施した。

気密試験条件を表 5 に示す。

表 5 気密試験条件

容器	Type	規定圧力 MPa	実施圧力 MPa	試験ガス	保持時間 min
I	3	45.0以上	45.0	N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> (5%)	10
II	3	45.0以上	45.0	N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> (5%)	10
III	4	50.0以上	50.0	N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> (5%)	10

サイクル試験条件を表 6～8 に示す。

サイクル試験条件は、各容器に対応する製品規格・基準に則って実施した。共通条件を以下に示す。

試験温度：常温

加圧媒体：イオン交換水＋防錆剤

表6 サイクル試験条件（容器Ⅰ）

試験圧力	2.0 MPa以下 ⇔ 56.25 MPa以上
サイクル速度	22秒/サイクル
サイクル回数	11,250回

表7 サイクル試験条件（容器Ⅱ）

試験 1

試験圧力	2.0 MPa以下 ⇔ 45.0 MPa以上
サイクル速度	20秒/サイクル
サイクル回数	10,000回

試験 2

試験圧力	2.0 MPa以下 ⇔ 75.0 MPa以上
サイクル速度	35秒/サイクル
サイクル回数	30回

表8 サイクル試験条件（容器Ⅲ）

試験 1

試験圧力	2.0 MPa以下 ⇔ 50.0 MPa以上
サイクル速度	42秒/サイクル
サイクル回数	10,000回

試験 2

試験圧力	2.0 MPa以下 ⇔ 75.0 MPa以上
サイクル速度	60秒/サイクル
サイクル回数	30回

試験の結果、今回実施した全ての試験で容器の漏洩、異常膨張、破裂等の異常は認められなかった。

(エ) 耐圧・破裂試験

前記の気密・サイクル試験を実施した各容器に対して耐圧・破裂試験を実施した。

耐圧試験条件を表9に示す。

表9 耐圧試験条件

容器	Type	試験圧力 MPa	保持時間 sec
I	3	$45 \times 3/2 = 67.5$	30
II	3	$45 \times 5/3 = 75.0$	30
III	4	$50 \times 3/2 = 75.0$	30

試験の結果、いずれの容器においても漏洩、異常膨張、破裂等の異常は認められなかった。

気密・サイクル試験後、更に容器の破裂試験を実施した。いずれの容器も、容器メーカー提示の最小破裂圧力では破裂せず、十分高い圧力で破裂した。

b)-② 海外における実績調査

添付1に記載のとおり。

c) 非定常状況における容器の健全性検証のための試験

c)-① 衝撃耐久試験

トレーラーの事故時等、非定常状況における容器の健全性を検証するために、スレッド衝撃試験を実施した。更にスレッド衝撃試験後の容器に対し、耐圧・破裂試験を実施した。

(ア) スレッド衝撃試験

試験原理は図1-1に示すとおりである。

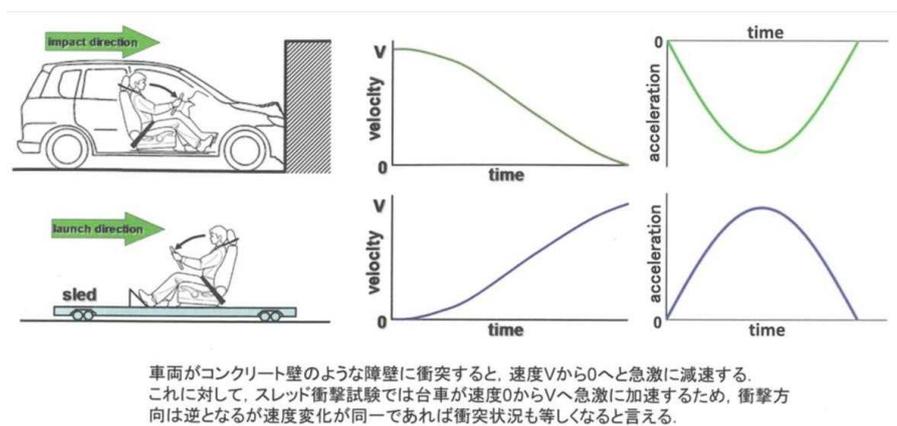


図1-1 スレッド衝撃試験の原理

出典：一般財団法人 日本自動車研究所「委託試験・研究、設備のご案内」

図1-2に示すように、スレッド（台車）の上に、容器をネックマウント方式で固定し、スレッド衝撃試験を実施した。試験はスレッド（台車）をピストンが押し出すもので、容器そのものに衝撃を与える試験ではないことに留意が必要である。

条件は、スレッド（台車）の最大加速度が容器質量の8倍に相当する力（8G）となるように設定した。1本の容器に対して、容器軸方向と、容器軸と直交しかつ水平な方向（容器水平方向）との2方向の試験を実施した。

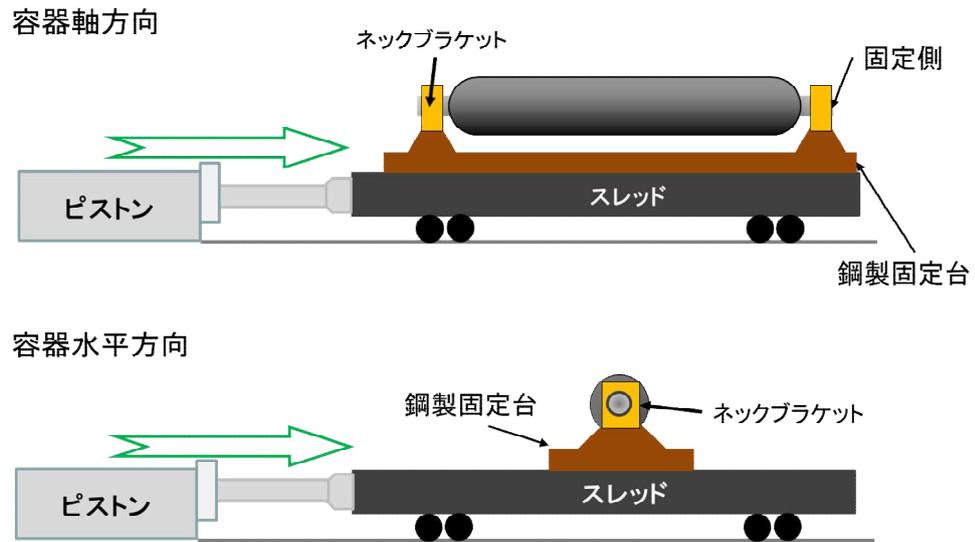


図 1 2 容器に対するスレッド衝撃試験 (イメージ)

採取したデータから、全ての容器に対して 8G 以上の加速度が生じていることを確認した。

(イ) 耐圧・破裂試験

スレッド衝撃試験を実施した各容器に対して耐圧・破裂試験を実施した。耐圧試験条件を表 1 0 に示す。

表 1 0 耐圧試験条件

容器	Type	試験圧力 MPa	保持時間 sec
I	3	$45 \times 3/2 = 67.5$	30
II	3	$45 \times 5/3 = 75.0$	30
III	4	$50 \times 3/2 = 75.0$	30

耐圧試験の結果、いずれの容器においても漏洩、異常膨張、破裂は認められなかった。

耐圧試験後、更に破裂試験を実施した。いずれの容器も、容器メーカー提示の最小破裂圧力では破裂せず、十分高い圧力で破裂した。

## 5. 総括

水素トレーラーの走行振動によりネックマウント方式で固定された容器に発生する曲げ応力による容器の疲労損傷について一連の検証試験及び有限要素解析を実施した。その結果、次に示す主な結論を得た。

- ・固有振動数試験の結果より、水素トレーラー走行に伴う振動と容器とは共振しないことが分かった。ただし、ネックブラケットおよびトレーラー用フレームの設計・製作についてはその固有振動数に留意する必要がある。
- ・振動耐久性試験後の容器に対する気密・サイクル試験、耐圧・破裂試験の結果より、トレーラー走行を含む15年間の定常使用において容器は健全性が維持されることが示された。
- ・スレッド衝撃試験後の容器に対する耐圧・破裂試験の結果より、事故等の非定常状況下においても容器は破壊せず、耐圧性を維持することが確認された。

以上の結果から、ネックマウント方式により、容器の健全性を保つ安全な容器固定が達成されると判断される。

以上