水素容器

東條 千太*

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 67, No. 7 (2017), 301–306
© 2017 The Japan Institute of Light Metals

Hydrogen cylinders

Senta TOJO*

Keywords: hydrogen; composite cylinders; aluminum; type3; high pressure

1. はじめに ～社会的動向～

水素社会は、

- (1) 水素が燃焼時に二酸化炭素を排出せずクリーンなエネルギーであること
 - (2) 水素がいろいろな物から生成でき、エネルギーセキュリティに優れていること
 - (3) 日本の国際競争力を維持するうえで有益なこと
- など様々な観点から大きな期待が寄せられている。

2013年6月に閣議決定された日本再興戦略においても「2015年の燃料電池自動車の市場投入に向けて、燃料電池自動車や水素インフラに係る規制を見直すとともに、水素ステーションの整備を支援することにより、世界最速の普及を目指す」ことが明記された。燃料電池自動車普及のためには、既存のガソリン自動車およびガソリンスタンドと同等の安全性、利便性、経済性を有する燃料電池自動車および水素供給インフラ（水素ステーション）の実現が必要である。高压水素を貯蔵するFRP容器は、この3つの要求に重大に影響するものであり、極めて重要な製品である。本稿では、燃料電池自動車用複合容器および水素ステーション用複合蓄圧器として期待される、タイプ3容器（炭素繊維・アルミニウムライナー複合容器）について紹介する。

2. 製品の概要

2.1 高压ガス容器の種類

高压ガス容器は、その構造により図1のタイプ1～タイプ4に分類される。

水素ステーション等に利用される圧縮水素蓄圧器用複合圧力容器としては、タイプ1容器、タイプ3容器、タイプ4容器が使用され、燃料電池自動車等に利用される圧縮水素自動車燃料装置用容器としては、タイプ3容器、タイプ4容器が使用される。

タイプ1容器：金属製の継目なし容器である。長い安全の歴史があるが、4種類の容器の中では最も重い。強度・コストの面から、鉄鋼材料が用いられることが多い。

タイプ2容器：タイプ1容器を軽量化する目的で、薄肉化した金属製の継目なし容器（ライナー）の胴部に、高強度の繊維を周方向に巻いて強化（FRP）した容器である。タイプ1容器に対し、質量を2/3程度にまで軽量化できる。

図1 高压ガス容器の種類

*サムテック株式会社 高压ガス容器部（〒582-0027 大阪府柏原市円明町1000番18） SAMTECH Corp. (1000-18 Enmyo-cho, Kashiwara-shi, Osaka 582-0027) E-mail: senta_tojo@samtech.co.jp
受付日：平成28年12月26日 受理日：平成29年2月14日

タイプ3容器：タイプ2容器よりもさらに薄肉化された金属ライナーの胴部およびドーム部に、高強度繊維を周方向および軸方向に巻いて強化（FRP）した容器である。タイプ1容器に対し、質量を1/3～1/5程度にまで軽量化できる。軽量化を目的とする場合には、ライナー材料にアルミニウム合金が使用されることが多い。圧縮水素自動車燃料装置用容器では、金属ライナーの材質は6061-T6アルミニウムおよびSUS316Lステンレス、高強度繊維の材質は炭素繊維（CFRP）に限定される。

タイプ4容器：ライナー材料に熱可塑性樹脂、口金部に金属を使用し、タイプ3容器と同様にライナーの胴部およびドーム部に、高強度繊維を周方向および軸方向に巻いて強化（FRP）した容器である。タイプ1容器に対し、質量を1/3～1/5程度にまで軽量化できる。

表1 米国におけるFRP容器の研究開発

1947年	航空機用圧力容器の開発に着手
1966年	NASA からFRP 複合容器の計算プログラムCR-72124 発行
1970年	NASA により民生用FRP 複合容器の開発が始まる
1976年	米国DOT による最初の民生用FRP 複合容器が認可される
1981年	米国DOT FRP-1 基準発行
1982年	米国DOT FRP-2 基準発行
1980年代後半から	天然ガス自動車燃料装置容器として注目される
1992年	ANSI/AGA NGV2 基準発行

表2 日本におけるFRP容器の研究開発

1965年以降	航空宇宙用容器の開発
1982年	最初の民生用空気呼吸器用容器の特別認可
1985年	高圧ガス保安協会において軽量容器の研究開発が始まる
1987年	米国から特別認可による空気呼吸器用容器の輸入が始まる
1990年	最初のCNG自動車用FRP 複合容器の特別認可
1997年	特別認可から一般基準化

2.2 FRP容器の歴史

FRP容器は1947年に米国の航空宇宙用容器として開発され（表1）、現在ではさまざまな分野で利用されるようになった。その1つとして、1980年代後半に地球温暖化防止の観点から天然ガス自動車燃料装置容器として注目されるようになった。

一方、我が国においては、1965年から同じく航空宇宙用容器として利用され始めた。民生用の容器としては、1982年に空気呼吸器用容器が最初の特別認可を受け、1997年からFRP容器の一部が一般基準化された（表2）¹⁾。

2.3 適用例

タイプ3容器（炭素繊維・アルミニウムライナー複合容器）は、後述する安全面から長期大量貯蔵に優れた特性を有している。よって、図2に示すように、水素ステーション用複合蓄圧器や水素トレーラー用容器として使用されている。また、国内の燃料電池自動車用容器としても採用されている。

3. 材料要求特性

3.1 アルミニウム合金

アルミニウム合金の材料特性としては疲労強度と耐水素性・耐食性が重要になる。高圧ガス容器は、高圧ガスの充填と解放が繰り返されるため、アルミニウムライナーには大きな応力振幅が5,000回から100,000回も繰り返される。したがって、疲労強度が高い材料を使用するほど炭素繊維量（CFRP量）を低減することができ、コストを下げることができる。疲労強度は引張強度に比例するため、高い引張強度の材料を探してもよいことになる（図3、表3）。

現在、法令で認められているアルミニウム合金は6061材のみであるが、今後は耐水素性・耐食性に優れた高強度なアルミニウム合金の適用が求められている。

3.2 炭素繊維

炭素繊維の材料特性としては引張強度と縦弾性係数が重要になる。炭素繊維の引張強度は耐圧性能に、縦弾性係数は疲労性能に大きく影響する（図3、表4）。

炭素繊維の引張強度は耐圧性能に直接寄与する。よって、引張強度が高い炭素繊維ほど、その厚さを薄くすることができる。炭素繊維の縦弾性係数は疲労性能に間接的に寄与する。アルミニウムライナーのひずみ量は炭素繊維の縦弾性係数で決まり、炭素繊維の縦弾性係数が大きいほど（硬いほど）アルミニウムライナーはひずみにくくなる。したがって、炭

図2 タイプ3容器の適用例

図3 タイプ3容器に求められる材料特性

表3 アルミニウムライナーに求められる材料特性

	アルミニウムライナー
引張強度	疲労性能に強度とその厚さが直接寄与 ($\therefore$ 引張強度 $\propto$ 疲労強度) $\rightarrow$ 高いほどよい
縦断性係数	各種アルミニウム材で値がほぼ同じ $\rightarrow$ 影響は小さい

表4 炭素繊維に求められる材料特性

	炭素繊維
引張強度	耐圧性能に強度とその厚さが直接寄与 $\rightarrow$ 高いほどよい
縦断性係数	アルミニウムライナーのひずみ量は炭素繊維の縦断性係数で決まるため、間接的にアルミニウムライナーの応力振幅(疲労性能)を決定する $\rightarrow$ 大きいほどよい

素繊維の縦弾性係数が大きいほどアルミニウムライナーの応力振幅も小さくなり容器の寿命が長くなる。

4. 製造工程

タイプ3容器の製造工程について、水素ステーション用複合蓄圧器を例に説明する。工程は主に、

- (1) ライナー製造
 - ①スピニング加工
 - ②熱処理
 - ③ねじ切り加工
- (2) 容器製造
 - ①ワインディング
 - ②樹脂硬化
 - ③自緊処理

の6つの工程で製造される。

(1) ①スピニング加工

受入れ検査を合格したアルミニウム押出管の両端部を、スピニング加工によりドーム形状に成形する(図4)。

加工はアルミニウム管を加熱後、回転するアルミニウム管にローラーを少しずつ押し当てながら変形させていく。内型がなくローラーを一気に移動させるとアルミニウム管が座屈するため、このローラーの動きをいかに制御するかが大変重要になる。

図4 スピニング加工

図5 複合蓄圧器のワインディング風景

(1) ②熱処理

両端部をスピニング加工されたアルミニウム管(ライナー)のT6熱処理を行う。熱処理によってライナーの機械的性質が設計保証値以上になっていることを、同一バッチから準備されたテストピースの引張試験により確認する。

(1) ③ねじ切り加工

熱処理後のライナーの両端部(ポート部)のねじ切り加工を行う。

(2) ①ワインディング

ライナーに熱硬化性樹脂を含浸させた炭素繊維を巻きつける。ライナーの周方向に巻きつけるフープ巻きと、軸方向に巻きつけるヘリカル巻きを複数回繰り返すことにより、ライナー全体を炭素繊維で覆う(図5)。

これが、タイプ3容器(およびタイプ4容器)がフルラップ構造と言われる理由である。

(2) ②樹脂硬化

ワインディングされた容器を炉に入れて、樹脂硬化を行う。

(2) ③自緊処理

容器内側のアルミニウムライナーに、残留圧縮応力を付与する自緊処理を行う。自緊処理は、樹脂硬化後の容器にアルミニウムライナーが塑性変形をするまで内圧を加えることにより行う。

この自緊処理により、タイプ3容器の疲労性能を向上させることができる。

5. 安全性

5.1 水素ガス

まず、水素ガスの安全性について述べる。

水素ガスは空気拡散性が高いため、その性質を利用すれば安全に使用することができる。その例を図6に示す²⁾。

図6は水素エネルギー製品研究試験センターの高圧水素試験室の構造を示したものである。屋根には片側傾斜構造が取り入れられ、最上部には大気中への拡散窓が設けられている。水素ガスは空気より軽く、空気拡散性が高いため、万が一漏れが発生した場合にも直ちに拡散窓から大気中に解放される。

このように水素ガスは正しい使い方をすれば、ガソリンや都市ガス並みに安全なエネルギーである。

5.2 タイプ3容器

次に、タイプ3容器の安全性について述べる。

高圧水素ガス貯蔵において、安全上重要なことは

- (1) 容器の破裂を未然に防ぐこと
- (2) 水素ガスを外に漏らさないこと

の2つである。上記2つの項目に対し、タイプ3容器は特に優れた機能を有している。

5.2.1 容器の破裂を未然に防ぐ

タイプ3容器の構造を図7に示す。

タイプ3容器の多くは内側が高圧水素ガスをバリアするアルミニウムライナー、外側がアルミニウムライナーを補強し荷重の大部分を負担するCFRP層（炭素繊維強化プラスチック）からなる。

容器の破裂を未然に防ぐ機能（L.B.B. 機能：Leak Before

水素エネルギー製品研究試験センターの高圧水素試験室における安全対策

出典：水素エネルギー製品研究試験センター「水素エネルギー製品研究試験センターの紹介」

図6 水素エネルギー製品研究試験センターの試験室

図7 タイプ3容器の構造

Burst) は、アルミニウムライナーの疲労強度がCFRPの疲労強度より小さいことを利用し設計することができる。つまり、外部から何らかの衝撃を受けた場合や、設計以上の繰り返し荷重を受けた場合にも、CFRP層の安全率を高くとることにより、CFRP層がアルミニウムライナーより先に破断することなく破裂を防ぐことができる。言い換えれば、アルミニウムライナー内に先に疲労による小さな穴を進展させることにより、容器の破裂以前にガスを少しずつ逃がす設計が可能となる。また、CFRP層のさらに外側の最外層に、プロテクト層としてのGFRP層（ガラス繊維強化プラスチック）を形成することにより、CFRP層自体にもきずがつきにくい構造とすることができる。

5.2.2 水素ガスを外に漏らさない

貯蔵する水素ガスを外に漏らさないためには、ライナー材料がもつガスバリア性（ガス透過率）が重要となる。一般的に水素ガスにおいて、金属材料のガス透過率は樹脂材料のガス透過率の1/100以下である³⁾ため、タイプ1容器やタイプ3容器は長期貯蔵や大量貯蔵に有効である。

しかし、近年タイプ4容器の中には、樹脂ライナーに特別なガスバリア層を設けて水素ガスの透過を抑制しているものもある。

6. 課題と今後の期待

6.1 水素ステーションコストの低減に向けて

ここまで例にあげた水素ステーション用複合蓄圧器は、コスト的にも有利とされ、日本の水素ステーション（移動式を含む）の70か所以上に採用された。しかし、2015年現在水素ステーションの建設コストは4~5億円とも言われている。FCCJのシナリオ（図8）⁴⁾通りに水素ステーションを建設していくためには建設コスト目標を1~2億円に抑える必要があり、これが課題となる。

そこで水素ステーションコストの低減に向け、有効と思われるコスト低減策を以下に述べる。

(1) ステーション関連

- ① 複合蓄圧器による基礎工事および保持部材の簡素化
- ② 複合蓄圧器による設置スペースの低減
- ③ 複合蓄圧器を用いてのモジュール化による設計費および現地工事費の低減

(2) 蓄圧器関連

- ① 高強度アルミニウムライナーによるCFRP材料の削減

図8 FCVと水素ステーションの普及に向けたシナリオ⁴⁾

(1) ①複合蓄圧器による基礎工事および保持部材の簡素化
82MPa 以上対応の複合蓄圧器〔300L仕様：725kg〕は鋼製蓄圧器に比べると、重量が約1/5程になる。これはアルミニウム合金の比重が鋼の比重の約1/3であること、炭素繊維の引張強度が鋼の引張強度の約10倍であることによる。

この複合蓄圧器の軽量特性は、ステーション建設における蓄圧器設置場所の基礎工事の簡素化および蓄圧器搭載ラック（図9）の簡素化に寄与する。

(1) ②複合蓄圧器による設置スペースの低減

複合蓄圧器の軽量特性は、設置場所にも様々な自由度を与える。具体的には、複合蓄圧器の水素ステーションのキャノピー（屋根）上への設置である。

アメリカでは Los Angeles で ICC 水素規制に準拠したものが実用化（図10）されているが、日本でも実用化されれば都市部等の敷地が狭いステーションのスペース削減に大いに有効と考えられる。

(1) ③複合蓄圧器を用いてのモジュール化による設計費および現地工事費の低減

水素ステーションの建設コスト低減のためには、各機器のコスト低減とともに、総コストの47%を占める現地工事費、設計費の低減が重要である。複合蓄圧器は軽量であるために、図9のように工場より大きな単位（ユニット）にまで組上げた状態で現地に運ぶことができ、現地工事の簡素化

図9 複合蓄圧器の搭載ラック

図10 キャノピー上に蓄圧器が設置された例⁵⁾

に貢献する。また、軽量であるために、現地での基礎工事も簡素化できる。さらに、このようなユニットを標準化することによって、設計費⁶⁾の低減にも貢献できると考えられる。こうした考えは、欧米の自動車会社がコストダウンの決め手として推進しているモジュール化と同様であるが、軽量な複合蓄圧器を用いることにより実現が可能である。

(2) ①高強度アルミニウムライナーによるCFRP材料の削減

アルミニウムライナー材料に高強度なアルミニウム合金を使用すると、CFRP層の厚さを低減できる。

CFRP層を構成する炭素繊維は、材料コストの半分以上を占めるためコスト低減に大変有効である。アルミニウムライナーには耐水素性も求められるため、設計的検証と材料的検証を並行して行う必要がある。しかし、蓄圧器本体のコスト低減とさらなる軽量化が同時に達成できるため、大変魅力的なコスト低減策である。有望な材料として、7000系アルミニウム合金が挙げられる。

7. おわりに

～水素社会における複合容器の可能性～

2章で述べたように、燃料電池自動車のほかにも水素社会は様々な可能性を秘めている。その1つが再生可能エネルギーの有効利用である。

最近、太陽光や風力といった自然エネルギー発電は増加の傾向をみせているが本格的な普及までにはまだ時間がかかると感じられる。その理由として、①投資コストを回収するまでに歳月を要すること、②安定的に電力が得られないこと、などが挙げられる。

その弱点をカバーするアイテムとして水素ガスの高圧貯蔵が注目されている。それは、太陽光や風力といった自然エネルギー発電の余剰時の電力を、水の電気分解等により水素の形で蓄圧器等に貯蔵し、必要な時に発電して使うものである（図11）。

電力を貯蔵する方法としては、バッテリーによる蓄電も考えられるが、バッテリーには漏電といった問題があるため、長期貯蔵には向いていない。しかも、貯蔵する電力量に比例してコストや体積が増大するため、大量のエネルギーを貯めるのに向いていない⁷⁾。

それに対し、高圧水素ガスという形で水素をタイプ3複合

再生可能エネルギーの有効利用

図11 複合蓄圧器による再生可能エネルギーの有効利用

蓄圧器に貯蔵すれば、水素の透過がほとんどないため大量のエネルギーを長期間貯めることができ、太陽光や風力といった自然エネルギー発電の弱点を補うことが可能となる。燃料電池自動車の航続距離が長い理由は、この高圧水素ガス貯蔵の利点を最大限に活用しているためと言える。

また、高圧水素ガス貯蔵は燃料電池自動車や家庭用燃料電池を介して災害時の非常用エネルギーとしても利用でき、水素社会における複合容器の果たす役割は大きい。

以上のように、アルミニウム合金をライナー材料として用いるタイプ3容器は、水素容器として様々な可能性を秘めている。

参 考 文 献

1) 竹花立美：FRP複合容器の設計と安全性評価に関する研究，博

- 士論文，東京都立大学，(2000)，4-6.
- 2) 菊川重紀：水素エネルギー製品研究試験センターの紹介，燃料電池，**10**(1) (2010)，160-165.
- 3) 財団法人日本自動車研究所：「水素安全利用等基盤技術開発」—車両関連機器に関する研究開発—燃料電池自動車に係る安全技術研究 平成15年度～16年度成果報告書，60.
- 4) 燃料電池実用化推進協議会 (FCCJ)：FCVと水素ステーションの普及に向けたシナリオ，(2016.3).
- 5) Fuel Cell & Hydrogen Energy Association ホームページ，<http://www.hydrogenandfuelcellsafety.info/2008/aug/shellStation.asp>
- 6) 一般財団法人石油エネルギー技術センターほか：70 MPa級水素ガス充填対応ステーション機器システム技術に関する研究開発 (平成20年度～24年度成果報告書)，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，(2013)，376.
- 7) 本田國昭：ハイドリズム4，株式会社ガスレビュー，(2013.9)，8-9.