

燃料電池自動車用圧縮水素容器の開発

Hydrogen Storage Tanks for Fuel Cell Vehicles

稻田貴臣　技術開発本部生産技術センター生産技術開発部　博士（工学）
 張惟敦　技術開発本部基盤技術研究所構造研究部　課長　博士（工学）
 江口晴樹　技術開発本部基盤技術研究所応用理学研究部　課長　博士（工学）

燃料として水素を搭載した直接水素型燃料電池自動車の開発が進められている。水素貯蔵方法としては総合効率に優れる圧縮水素方式が有望視されており、2002年度から圧縮水素容器の開発に取り組んでいる。2003年度からはNEDO委託の「水素安全利用等基盤技術開発」プロジェクトにおいて「70 MPa級圧縮水素容器の研究開発」を担当しており、本容器実現のための技術開発を進めている。本稿では、圧縮水素容器にかかる技術開発の全体概要とアルミライナーおよび試作容器の開発状況について紹介する。

The compressed hydrogen gas cylinder is supposed to be an effective fuel storage method for fuel cell vehicles. IHI has continued development of such cylinders since 2003. Now, technical developments of the cylinders are being conducted in the national project named "Development for Safe Utilization and Infrastructure of Hydrogen." The goal of the project is to achieve a cylinder pressure of 70 MPa for hydrogen gas storage to enhance the range of fuel cell vehicles. The cylinder type is type 3 that consists of aluminum alloy liner and a fully wrapped FRP. The present paper describes the development of the hydrogen gas cylinder. A prototype cylinder for 35 MPa hydrogen gas storage is also introduced.

1. 緒言

燃料として水素を搭載した直接水素型燃料電池自動車の開発が進められている。水素を利用する燃料電池自動車は石油代替エネルギー自動車としてだけでなく、ゼロエミッションも達成可能な究極のクリーン自動車として期待されており、各種研究開発プロジェクトが平行して進められている⁽¹⁾。

水素を貯蔵する方式としては、①高圧ガスの状態で貯蔵する圧縮水素方式 ②液体の状態で貯蔵する液体水素方式 ③水素吸蔵合金を用いる方式、が検討されている⁽²⁾。液体水素方式では水素のボイルオフ量が多いこと、水素吸蔵合金方式は容器が重いことに加えて、いったん吸蔵した水素を取り出すためにエネルギーを必要とすることが問題となっている。一方、圧縮水素方式は貯蔵できる水素質量は少ないもののエネルギー効率の面でほかの二つの方法よりも優れており、容器質量も比較的軽いことから車載用の水素貯蔵方式として最も有望視されている。

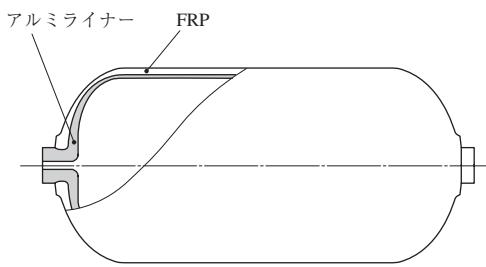
当社では、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から「70 MPa級圧縮水素容器の研究開発」を受託し、最高充てん圧力70 MPa級圧縮水素容器の

実現を目指して技術開発に取り組んでいる。2002年度に開発した35 MPa級圧縮水素容器の技術をベースに70 MPa級圧縮水素容器の開発を進めており、本稿では35 MPa級圧縮水素容器を中心に当社における圧縮水素容器（水素貯蔵容器）開発の概要を紹介する。

2. 圧縮水素容器の構造

圧縮水素自動車燃料装置用容器は、気密性の確保を目的としたライナー全体をFRP（Fiber Reinforced Plastics）で覆ったフルラップ容器であり、ライナーの種類に応じてVH3容器（金属ライナー）とVH4容器（樹脂ライナー）の2種類に分類される。

当社ではVH3容器の開発を進めており、その構造の模式図を第1図に示す。ライナーには一般的にアルミニウム合金製ライナー（以下、アルミライナーと呼ぶ）が用いられる。VH3容器用ライナーは、圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準に規定されるとおり、溶接またはろう付けによって製造したものは使用できないため、口金も含めて一体成形されている。このライナーの周りに軸方向を補強するためのラ旋转き層と容器円筒部の周方向を補強するための周巻き層から成るFRPを巻き付ける。構造は非常に単



第1図 圧縮水素容器の構造模式図（VH3容器）
Fig. 1 Schematic of a compressed hydrogen gas cylinder (VH3)

純であり、ライナーとFRP部の構成によって質量や充てん特性が大きく異なる特徴がある。

3. アルミライナーの成形

アルミニウム合金のなかでもA6061合金は高圧水素雰囲気下での水素脆化の心配がほとんどなく⁽¹⁾、加工性に優れながらT6熱処理によって比較的高い強度をもたせることが可能であり、従来からアルミライナーに適用されてきた。そこで本研究においてもA6061合金の使用を前提として、アルミライナーの成形技術開発を行った。

3.1 成形方法

第2図にアルミニウム合金管からライナーを成形する工程(①～⑤)を示す。A6061-O押出管を利用することで大容量のライナーを比較的容易に製作することが可能である。ただし、押出管の製造プロセス上の問題から、押出したままの状態では偏肉(芯のずれによって管の肉厚が均一でないこと)が大きい場合もあることから、工程②において偏肉と肉厚修正のための薄肉・均一化を図る。薄肉・均一化の方法としては、回転しごき加工、切削などがある。回転しごき加工(フローフォーミング)とは、管の内側に中子を入れた状態で回転させながら外側からローラを押し

当て、偏肉と肉厚の修正を行う冷間加工のことである。

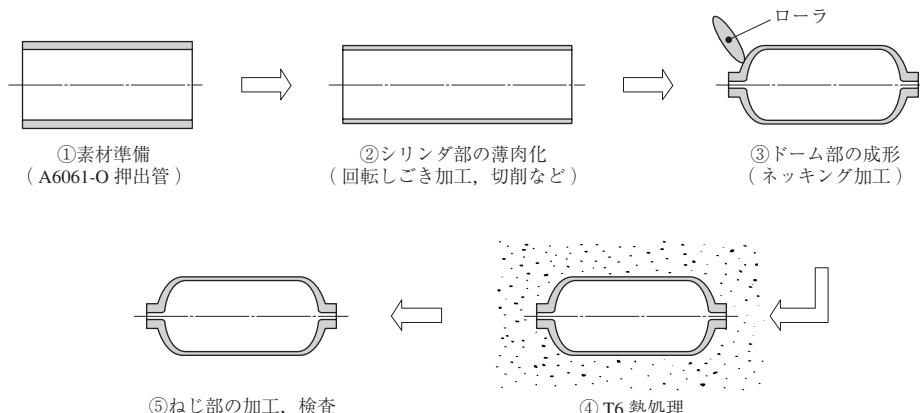
工程③のドーム部の成形に用いるネッキング加工は、従来からマンネスマニ式⁽³⁾として鋼製容器の製作にも適用されている方法であり、管に中子を入れない状態でローラを押し当てて絞りこむ熱間加工のことである。ドーム部を成形する際には、後でFRPを巻き付けることを考慮して外面は可能な限り滑らかにし、内面には有害な傷やしわが発生しないようにする。

3.2 成形結果

内径が約350mmのA6061-O押出管を用いて、第2図に示す成形工程に従い、内容積80l級のアルミライナーを試作した。ここで、アルミニウム合金管の薄肉・均一化は切削加工で行った。比較的偏肉の少ない素材であったこともあり、切削加工による薄肉・均一化でもほとんど問題は発生しなかった。ドーム部の成形(ネッキング加工)はNCでローラの動きを制御できるスピニング機で、スピンドルの回転速度とローラの送り速度を一定にして行った。

アルミライナー成形に使用しているA6061材は250°C以上になると、引張強さが室温の約1/6以下、耐力が同じく約1/8以下と大きく低下し、それに伴って伸びが室温の場合の約3.5倍以上と大きく増加することが確認されている⁽⁴⁾。そこで、ドーム部の成形はアルミニウム合金の温度を300～350°C程度に加熱した状態で実施した。

試作したアルミライナーの外観を第3図に示す。ドーム部を成形するためのローラの軌跡(パス)を調整し、ドーム部の外面を滑らかに仕上げた。アルミライナーはT6熱処理(第2図に示す工程④)を行った後、口金部の端部と外面の仕上げ加工を行い、次に内側ねじ部の切削加工(第2図に示す工程⑤)を行った。また、アルミライナーのドーム部から切り出した試料の引張試験を実施した。そ



第2図 アルミライナーの成形工程
Fig. 2 Aluminum liner forming process



第3図 試作アルミライナーの外観
Fig. 3 Prototype aluminum liner

の結果、ほぼ目標どおりの機械的強度をもつことが確認できた。

4. 容器の試作と評価

4.1 材料の強度確認試験

圧縮水素容器の強度部材に使用する炭素繊維は、容器の変形抑制と安全性確保の面から、引張弾性率が 230 ~ 290 GPa 程度で伸度にも優れたものが望ましい。そこで、**第1表**に示す 3 種類の炭素繊維を使用して内容積 35 l 級、最高充てん圧力 35 MPa 級の小型容器を試作し、強度確認試験（破裂試験）を行った。ここで、今回の容器は材料強度の確認が目的であるため、切削加工と溶接で製作したアルミライナーを用いた。前述のとおり、圧縮水素自動車燃料装置用容器として実際に適用されるものについては、溶接を用いてアルミライナーを製造することはできない。試験は気泡が残らないように容器に水を充満させた後、ポンプを用いて毎分 1.4 MPa を超えない速度で容器が破裂するまで加圧した。

強度確認試験結果を**第2表**に示す。円筒部の CFRP

第1表 強度確認試験に使用した炭素繊維
Table 1 Specifications of carbon fiber applied to strength verification tests

材 料	A	B	C
繊維方向弾性係数 (GPa)	約 290	約 240	約 230
伸 度 (%)	2.0	2.1	2.1

(Carbon Fiber Reinforced Plastics) 肉厚は最高充てん圧力の 2.35 倍 (82.25 MPa) 以上で破裂するよう決定したが、材料 A および材料 B を用いた容器はこれを満足する結果となった。これに対し、材料 C は材料 B とほぼ同等の性能をもつにもかかわらず、破裂強度（圧力）はほかの二つの容器に比べて著しく低い。試験前の外観検査では特に異常は見受けられず、成形プロセスにおいて繊維の傷みや緩みが発生し、これが原因で破裂強度が低下したものと推測される。

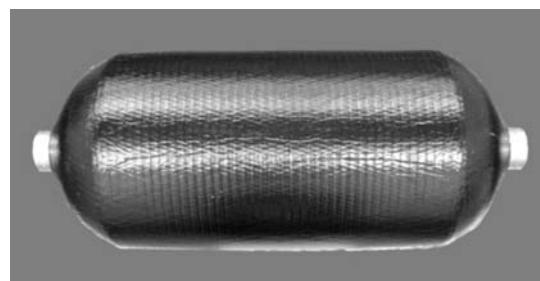
材料 A は引張弾性率の面でもほかの二つの材料よりも優れており、使用実績がある。コストは少々高いが材料 A を用いて次に述べる中型容器を試作した。

4.2 中型容器の試作

4.2.1 仕 様

シームレス成形した内容積 80 l 級の A6061-T6 アルミライナー（**第3図**）を用いて、最高充てん圧力 35 MPa 級の中型容器を試作した。試作中型容器の外観を**第4図**に、仕様を次に示す。

最高充てん圧力	約 35 MPa
最小破裂圧力	>82.25 MPa
内 容 積	約 80 l
全 長	980 mm
外 径	390 mm
質 量	<48 kg



第4図 試作中型容器の外観
Fig. 4 Prototype medium size cylinder

第2表 強度確認試験結果
Table 2 Strength verification test results

材 料	A	B	C
破裂後の容器			
破裂の起点	シリンド部	シリンド部	シリンド部
破裂圧力 (MPa)	約 100	約 84	約 62

CFRP は 2 種類のラミネート層と周巻き層で構成され、外側保護のためのガラス繊維を用いた GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) 層は成形されていない。

4.2.2 自緊処理

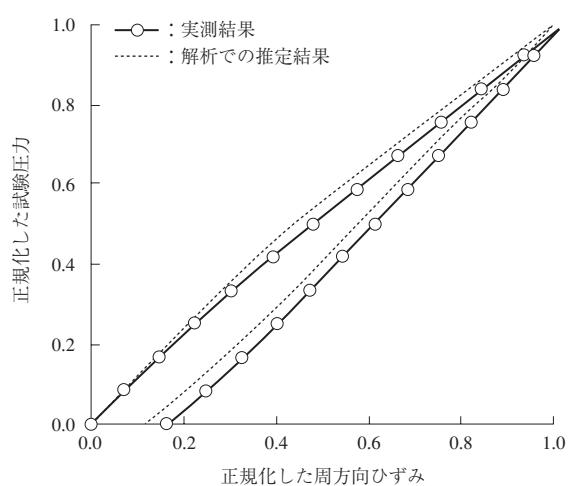
金属ライナーを用いる VH3 容器では、疲労特性の向上を目的として自緊処理を行う。自緊処理とは、水圧を利用して耐圧試験圧力以上の圧力を容器を加圧したあと除圧し、ライナーに圧縮残留応力を付与する処理のことである。

容器円筒部にひずみゲージを貼り付け、自緊処理時のひずみ挙動の確認と設計解析結果を検証した。例として、円筒部中央の表面において測定した周方向ひずみ変化を第 5 図に示す。縦軸は容器の設計解析時に設定した自緊処理圧力で正規化した試験圧力を、横軸は同圧力における解析値を用いて正規化した周方向ひずみを示す。実測結果は○印と実線で、解析での推定結果は破線で示す。

解析においてアルミライナーの材料非線形を考慮しているが、第 5 図から、アルミライナーの塑性開始点の推定結果と実測結果には若干の誤差があることが確認できる。しかし、この塑性開始点の誤差を除けば、解析による推定結果は実際のひずみ挙動とほぼ一致しており、設計解析結果の妥当性が確認できた。

4.2.3 破壊試験

自緊処理後の容器について、水加圧による破裂試験を実施した。破裂試験の方法は材料の強度確認のために行った小型容器の破裂試験に準ずる。破裂試験後の容器を第 6 図に示す。容器の破裂圧力は約 105 MPa であり、解析による破裂予測値とほぼ一致していた。容器は円筒部から破裂し



第 5 図 自緊処理時の円筒部中央における周方向ひずみ変化
Fig. 5 Hoop strain changes measured at center of cylinder during autofrettage



第 6 図 破壊試験後の中型容器
Fig. 6 Medium size cylinder after burst tests

たが、円筒部から発生したき裂は円筒部と鏡部の接線付近を周方向に伝播していた。圧力が高いほど破裂に至るまでに蓄積されるひずみエネルギーが大きく、このようなき裂の伝播が生じたものと考えられる。

以上、自緊処理と破裂試験という二つの静的な処理・試験の結果から、35 MPa 級圧縮水素容器は実現可能であることが確認できた。破裂試験は容器の設計確認試験のなかでも最も基礎的な試験であることから、今後は常温圧力サイクル試験などのほかの設計確認試験において検証を進めしていく。

5. 結 言

直接水素型燃料電池自動車の燃料装置用容器として期待される圧縮水素容器実現のための技術開発を行った。アルミライナーと FRP 部の成形技術を中心に検討を行い、自緊処理と破裂試験において、試作した最高充てん圧力 35 MPa 級圧縮水素容器は目標どおりの性能をもち、設計解析結果も妥当であることを確認した。今後も常温圧力サイクル試験をはじめとするほかの設計確認試験を行い、最高充てん圧力 70 MPa 級圧縮水素容器の実現を目指す所存である。

— 謝 辞 —

本研究開発の成果の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受け実施した「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 - 70 MPa 級圧縮水素容器の研究開発」において成されたものである。NEDO および関係各位のご厚誼に対し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 岩崎和市：水素用材料開発の現状と今後の展開
配管技術 2004 年 10 月 pp.7-11
- (2) T. Kawai : Fuel Cell Hybrid Vehicles –
Challenge for the Future – Proceeding of The
Fourth International Symposium on Fuel Cell
Vehicles (2004. 1) pp.45-59
- (3) 竹花立美, 川原正言: 壓力容器の製造法と性能評
価 日本塑性加工学会誌 第 42 卷第 490 号 2001
年 11 月 pp.1 100-1 105
- (4) 社団法人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) 2001 年 p.41