

FRP 製圧力容器の構造設計に関する研究

日大生産工（院） ○鹿喰 裕二 日大生産工 染宮 聖人 平山 紀夫

1. 緒言

アルミニウム (AL) などの金属製ライナーに炭素繊維強化プラスチック (CFRP) をフィラメントワインディング成形 (FW成形) したCFRP製圧力容器 (Type3容器) は、金属単体の容器 (Type1容器) と比較し、軽量で高い充填圧力を実現できる。そのため、高压酸素容器等の可搬容器や、自動車用の燃料タンクなど軽量化が求められる分野で使用されている。特に近年では、エネルギー効率の改善や都市の大気環境保全という視点から燃料電池自動車の普及が図られており、小型の水素貯蔵容器にFRP複合容器を適用する研究が活発に行われている。

Type3容器は代表的なFRP複合容器として、様々な用途で使用実績があり、水素貯蔵容器としても普及していく可能性が高いと思われる。高压ガス保安協会 (KHK) が定めるType3容器の規格基準には、自緊処理によるALライナーの残留応力やCFRP層に発生する繊維軸方向応力の基準値が定められており、これらの設計基準を満足するための経済的なCFRPの層構成の決定や自緊処理圧力の設定には、有限要素法による精度の高い構造解析が要求される。

そこで本研究では、Type3容器のCFRP層の積層構成や自緊処理圧力の設定値を変化させた場合に、KHKが定める規格基準値にどのような影響を及ぼすか調査し、規格基準値を満足する設計条件を検討した。

2. Type3容器の設計条件

2.1 Type3容器の仕様

本研究で用いるType3容器の容量は5L程度の小型の容器を想定し、AL合金ライナーに強度分担層であるCFRPをフルラップし、その上に保護層のガラス繊維強化プラスチック (GFRP) をフルラップした構成となっている。

表1に本解析で用いたType3容器の積層構成を示す。

表1 Type3容器の積層構成

GFフープ1	GFヘリカル	GFフープ1	0.2mm
CFフープ2	CFヘリカル2	GFヘリカル	0.4mm
CFヘリカル1		CFフープ2	0.3mm
		CFヘリカル2	0.57mm
		CFフープ1	0.57mm
		CFフープ1	1.85mm
ライナー		ライナー	1.3mm

2.2 材料物性値

本研究で想定するType3容器のCFRP、GFRPおよびALライナーの材料物性値を表2に示す。

表2 CFRP、GFRP及びALの材料物性値

	CFRP	GFRP	AL
縦弾性係数Ex [GPa]	207.9	48.7	68.9
縦弾性係数Ey [GPa]	8.739	14.89	
縦弾性係数Ez [GPa]	8.739	14.89	
ポアソン比Vxy [-]	0.2808	0.29	0.33
ポアソン比Vyz [-]	0.4675	0.3	
ポアソン比Vxz [-]	0.2808	0.29	
横弾性係数Gxy [GPa]	4.109	5.79	25.9
横弾性係数Gyz [GPa]	2.979	5.72	
横弾性係数Gxz [GPa]	4.109	5.79	

2.3 荷重条件

本研究で想定するType3容器は、KHKの製造規格KHKS0121に準拠して設計を行うこととする。また、Type3容器の最高充填圧力 (使用圧力) は29.4MPaとし、耐圧試験圧力は49.0MPa、最小破裂圧力は102MPa (使用圧力29.4MPa×3.4倍以上) とした。

解析はKHKの規格KHKS0121に準拠して次の2種類の条件で行った。

<解析1>

- ①自緊処理圧力 (52.5～57.5MPa) を作用
- ②除圧 (0MPa)
- ③最小破裂圧力 (102MPa) を作用

<解析2>

- ①自緊処理圧力 (52.5～57.5MPa) を作用
- ②除圧 (0MPa)

④最高充填圧力 (29.4MPa) を作用
 →②～④間でGFRP層を除去
 以上の荷重ステップを図1にまとめて示す。

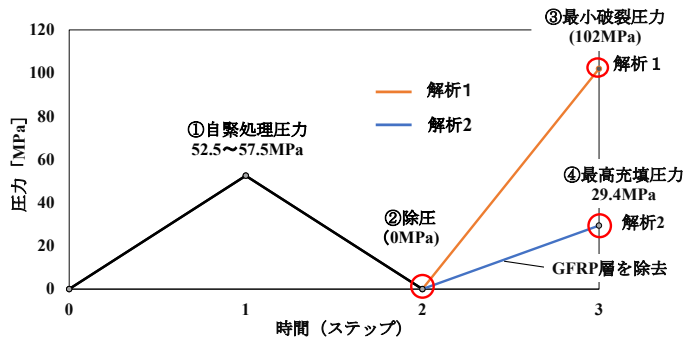


図1 解析1, 解析2における荷重ステップ

2.4 設計基準

KHKの製造規格KHK S0121における設計基準値は次の3つである。

<基準値1>

圧力荷重除圧後（0MPa）にALライナーに発生しているミーゼスの相当応力がALの耐力（290MPa）の95%以下であること。

$$290\text{MPa} \times 0.95 = 275.5\text{MPa}$$

<基準値2>

最高充填圧力（29.4MPa）作用時にALライナーに発生しているミーゼスの相当応力がALの耐力（290MPa）の60%以下であること。

$$290\text{MPa} \times 0.6 = 174\text{MPa}$$

<基準値3>

解析2の最高充填圧力作用時におけるCFRPの最大炭素繊維方向応力が解析1の最小破裂圧力時の最大炭素繊維方向応力の30%以下であること。

3. 解析結果

3.1 自緊処理圧力と設計基準値の関係

解析1と解析2の2ケースで自緊処理圧力を変化させた時のALライナーに発生しているミーゼスの相当応力を図2と図3に示す。これらの図より、自緊処理圧力とALライナーに発生しているミーゼスの相当応力の関係は、解析1と解析2で傾向が逆になっている。このため、基準値1と基準値2の両方を満足する自緊処理圧力を設定しなくてはならないことがわかる。今回のType3容器の仕様では、自緊処理圧力55.60MP以下るとき基準値1を満たし、55.55MPa以上るとき基準値2を満たすため、自緊処理圧力が55.55MPa～55.60MPaの範囲の時、基準値1と基準値2の両方を満たすことが確認できた。また、図4には解析1におけるALライ

ナー部の相当応力分布を示す。この図からALライナーの残留応力は、ドーム部とシリンダー部の接合部で高く発生していることが確認できる。

4. 結言

本報告では、Type3容器の構造設計として、自緊処理圧力を変化させ規格基準値を満足する設計条件を明らかにした。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 自緊処理圧力とALライナーに発生しているミーゼスの相当応力は、解析1と解析2で傾向が逆になり、自緊処理圧力が55.55MPa～55.60MPaの範囲の時、基準値1と基準値2の両方を満足する。
- 2) ドーム部とシリンダー部の接合部において、CFヘリカル層を厚くすることで、解析2におけるALライナーの残留応力を抑制できる。

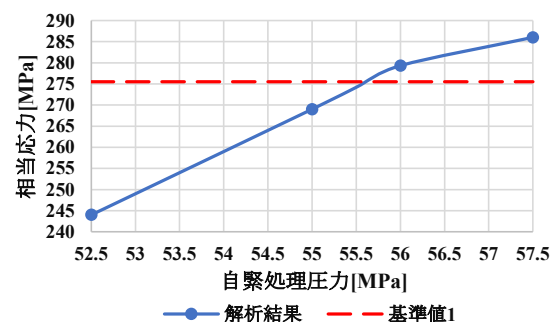


図2 解析1 自緊処理圧力と除圧時におけるALライナー部の相当応力との関係

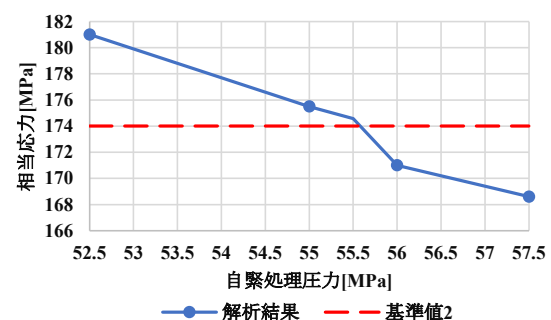


図3 解析2 自緊処理圧力と最高充填圧力時におけるALライナー部の相当応力との関係



図4 解析2におけるALライナーの相当応力分布