

## 論文の内容の要旨

氏名：黒澤彬元

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：プラスチック製ライナーを用いた CFRP 圧力容器の構造設計に関する研究

アルミニウム合金製のライナーに CFRP を積層した CFRP 圧力容器 (Type-3 容器) は、軽量で高い充てん圧力を実現できるため、空気呼吸器用容器や医療用酸素容器等の一般複合容器、圧縮天然ガス車 (CNG)、燃料電池自動車 (FCV) の燃料装置用容器など多様な分野で使用されている。

しかしながら、この Type-3 容器はライナーに金属材料を使用しているため、容器自体の軽量化には限界がある。そのため近年では、容器の更なる軽量化を目的に金属材料よりも比重の軽いプラスチック材料をライナー素材に使用した Type-4 容器が研究・開発されている。そして、現在国内では、圧縮水素自動車燃料装置用の技術基準が制定され、国内における実用化が始まっている。

その一方で、空気呼吸器用容器などに代表される一般複合容器では、Type-4 容器の技術基準が制定されておらず実用化には至っていない。空気呼吸器用容器は、圧縮水素自動車燃料装置用の CFRP 圧力容器と比較して、要求される安全率、最高充てん圧力、破裂の際の応力感応部等の要求仕様が異なるため、燃料装置用容器と同じ設計基準を空気呼吸器用の Type-4 容器に用いることは適切ではない。そこで、本研究では、空気呼吸器用 Type-4 容器の設計基準の作成と実用化を最終目的とし、多品種少量生産に適したブロー成形法にて成形した高密度ポリエチレン (HDPE) 製ライナーを使用した空気呼吸器用 Type-4 容器の構造設計と試作した Type-4 容器の性能評価を行った。最初に、Type-4 容器の基本仕様を決定し、次に有限要素法を用いた応力解析による Type-4 容器の構造設計を行った。そして、試作した空気呼吸器用 Type-4 容器の性能評価試験として、破裂試験 (強度)、落下後の破裂試験 (衝撃荷重作用後の残存破裂圧力)、圧力サイクル試験 (疲労寿命)、落下後のサイクル試験 (衝撃荷重作用後の残存疲労寿命)、ボストルク試験 (ボス部の強度) を実施し、設計した Type-4 容器の安全性と軽量化効果を明らかにした。

本論文は全 6 章で構成されており、各章の内容を以下に示す。

第 1 章では、一般複合容器の種類と、CFRP 圧力容器の特色と実用例について説明し、一般複合容器に関連する先行研究と現時点での問題点について述べ、その後、本研究の目的について述べた。

第 2 章では、欧州の設計規格 EN12245 を参考規格として、本研究対象の空気呼吸器用 Type-4 容器の基本仕様と設計規格の検討を行った。その結果、空気呼吸器用 Type-4 容器の寸法、形状や充てん圧力は、現在市販されている 4.7L の空気呼吸器用 Type-3 容器と同等とし、容器質量については Type-3 容器と比較し約 20% の軽量化を目標値として設定した。

第 3 章では、現行の 4.7L の空気呼吸器用 Type-3 容器と第 2 章で決定した基本設計仕様に基づいた 4 種類の積層構成の空気呼吸器用 Type-4 容器に対して、有限要素法を使用した応力解析による破裂圧力の評価結果について述べた。積層構成の異なる 4 種類の Type-4 容器モデルの応力解析結果から、容器肩部付近の CFRP ヘリカル層をマンドレル軸方向に対して高角度で巻き付けて増厚することで、設計基準を満足できる見通しを得た。

第 4 章では、一方向に引揃えた炭素繊維とガラス繊維にエポキシ樹脂を含浸させてライナーに巻き付けるフィラメントワインディング (FW) 成形法により、Type-4 容器の試作を行った結果について述べた。また、第 3 章で設計基準を満足した Type-4 容器を安定的に製造できる成形条件について探索し、圧力容器の固定条件、ライナーに作用させる空気圧、成形時の繊維張力、硬化温度について最適値を探索した。

第 5 章では、空気呼吸器用 Type-4 容器の性能評価試験を行った結果について述べた。試験方法や合格基準は第 2 章で述べた欧州の設計規格 EN12245 に準拠し、破裂試験 (強度)、落下後の破裂試験 (衝撃荷重作用後の残存破裂圧力)、圧力サイクル試験 (疲労寿命)、落下後のサイクル試験 (衝撃荷重作用後の残存疲労寿命)、ボストルク試験 (ボス部の強度) を実施した。これらの性能評価試験から、設計規格 EN12245 の基準値をすべて満足する空気呼吸器用 Type-4 容器は、第 3 章で述べた有限要素法を用いた応力解析による破

裂圧力の評価で最も安全性の高かった“容器肩部付近のCFRPヘリカル層をマンドレル軸方向に対して高角度で巻き付けて増厚した容器”であることが明らかとなった。この設計仕様で試作した空気呼吸器用Type-4容器は、最も厳しい評価基準値である、「落下後の破裂試験（衝撃荷重作用後の残存破裂圧力）」の合格基準値を大きく上回り、衝撃荷重の作用後も十分な残存強度を有していることが確認できた。これらの性能評価試験の結果から、本研究で設計・試作評価した空気呼吸器用Type-4容器は、常温におけるすべての設計基準値を満足していることを確認した。

第6章では、本研究の成果をまとめて述べ、プラスチックライナーを用いた空気呼吸器用Type-4容器を実用化するにあたり残っている課題について述べた。

以上、本研究では、空気呼吸器用Type-4容器の実用化を目標とし、空気呼吸器用Type-4容器の基本仕様の決定、有限要素法による構造設計、FW成形法による製造方法の検討、空気呼吸器用Type-4容器に要求される性能評価試験を実施した。その結果、ブロー成形で成形した高密度ポリエチレンの製のプラスチックライナーに対して、通常のCFRP、GFRPの積層構成に加え、容器肩部付近のCFRPヘリカル層をマンドレル軸方向に対して高角度で巻き付けて増厚することで、空気呼吸用容器に要求される破裂圧力、耐衝撃性、疲労寿命の基準値を満足し、さらに現状のType-3容器と比較して20%軽量化が実現できることを示した。

本研究の成果は、以下の2点である。

- ① 空気呼吸用容器に代表されるCFRP製一般複合容器の分野においても、CFRPのヘリカル層の角度と積層厚を調整することで、Type-4容器の性能基準を満足した容器の構造設計が行えることを明らかにした。
- ② 空気呼吸器用Type-4容器が多品種少量生産に適したブロー成形法とFW成形法により製造できることを実証し、従来のType-3容器と比較して約20%の軽量化が実現できることを明らかにした。

以上の成果は、今後の一般複合容器のさらなる高性能化と軽量化に大きく貢献すると期待される。