

圧縮水素スタンドで使用する  
炭素繊維強化鋼製圧力容器に関する技術文書

JPEC-TD 0008 (2020)

2021年3月12日 制定

一般財団法人 石油エネルギー技術センター

## タイプ2 複合容器蓄圧器技術文書検討分科会委員(2018~2020 年度)

- 主 査 東京電機大学 工学部 教授 辻 裕一
- 委 員 東京大学 生産技術研究所 教授 吉川 暢宏
- 委 員 青山学院大学 理工学部 客員教授 小川 武史
- 委 員 慶應義塾大学 理工学部 教授 小茂鳥 潤
- 委 員 横浜国立大学 IAS リスク共生社会創造センター 教授 澁谷 忠弘
- 委 員 東京都立大学 システムデザイン学部 教授 小林 訓史
- 事務局 一般財団法人 石油エネルギー技術センター

## タイプ2 複合容器蓄圧器技術文書検討 TF メンバー(2018~2020 年度)

- 一般財団法人 石油エネルギー技術センター 佐藤 慎也・小林 拓・福本 紀
- 高圧ガス保安協会 佐野 尊・山田 敏弘・志賀 優多
- 株式会社日本製鋼所 細矢 隆史・荒島 裕信
- JFE スチール株式会社 岡野 拓史
- JFE コンテナ株式会社 高野 俊夫
- 高圧ガス工業株式会社 大西 辰郎・出口 実
- 高圧昭和ポンベ株式会社 真家 大樹

# 目次

1 適用範囲	1
2 引用規格	1
3 用語の意味	2
4 材料	3
4.1 金属層	3
4.2 樹脂含浸炭素繊維層	3
4.2.1 炭素繊維	3
4.2.2 樹脂	3
4.3 材料仕様書	4
4.4 金属層の縦弾性係数	4
4.5 樹脂含浸炭素繊維層の機械的性質の確認	4
5 設計	5
5.1 設計一般	5
5.1.1 設計仕様書	5
5.1.2 金属層の許容引張応力	5
5.1.3 樹脂含浸炭素繊維層に許容されるひずみ	5
5.2 設計の基本事項	6
5.2.1 炭素繊維強化鋼製圧力容器厚さの設定	6
5.2.2 炭素繊維強化鋼製圧力容器の最大許容圧力	8
5.2.3 炭素繊維強化鋼製圧力容器の樹脂含浸炭素繊維層に発生するひずみ	8
5.2.4 炭素繊維強化鋼製圧力容器に用いる金属層単体の破裂圧力	8
5.2.5 破裂前漏洩解析	8
5.2.6 疲労解析の前提	8
5.2.7 疲労解析	9
5.2.8 自緊処理による圧縮残留応力	9
5.3 ねじ構造	9
6 工作及び検査	10
6.1 材料の確認	10

6.2	設計の検査	10
6.3	表面仕上げ	10
6.4	耐圧部の検査	10
6.5	自緊処理	10
6.6	ねじ加工	10
6.7	電位差腐食防止の施工	10
6.8	フィラメントワインディング	11
6.9	樹脂の熱硬化処理	11
6.10	繊維体積含有率	11
6.11	外面ひずみ測定による炭素繊維強化鋼製圧力容器の製造状態の確認	11
7	耐圧試験	12
8	気密試験	12

## 解説

## 1 適用範囲

この技術文書は、特定設備検査規則の適用を受ける特定設備で、圧縮水素蓄圧器用の複合圧力容器（金属層に樹脂含浸連続炭素繊維を巻き付けた複合圧力容器であって、フープラップ構造に限る。以下、「炭素繊維強化鋼製圧力容器」という。）の材料、設計、工作及び検査に適用する。炭素繊維強化鋼製圧力容器の詳細基準事前評価申請を想定し、高圧水素環境での長期使用を鑑み、現行の特定設備検査規則及び特定設備の技術基準の解釈の規定以外に考慮すべき注意事項及び判定根拠を技術文書として例示する。

この基準を適用する炭素繊維強化鋼製圧力容器の適用範囲は、次の a)～e)による。

- a) 内容積は 500 L 以下とする。
- b) 最大設計圧力は、105 MPa 以下とする。
- c) 設計温度は、下限温度を-30 °C、上限温度を 85 °Cとする。
- d) 最大使用期間は、20 年以下とする。
- e) 溶接構造を有する炭素繊維強化鋼製圧力容器は除く。

## 2 引用規格

特定設備検査規則 昭和 51 年通商産業省令第四号

JIS B 8266 (2003) 圧力容器の構造 - 特定規格

JIS K 7095 (2012) 炭素繊維強化プラスチックの熱分析によるガラス転移温度測定法

JIS K 7121 (2012) プラスチックの転移温度測定方法

JIS K 7165 (2008) プラスチック-引張特性の求め方- 第 5 部：一方向繊維強化プラスチック複合材料の試験条件

JIS R 7608 (2007) 炭素繊維-樹脂含浸ヤーン試料を用いた引張特性試験方法

JPEC-TD 0003 (2017) 水素スタンドで使用される低合金鋼製蓄圧器の安全利用に関する技術文書

KHKS 0220 (2020) 超高压ガス設備に関する基準

KHKS 0225 (2019) 圧縮水素蓄圧器用複合圧力容器に関する基準

ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. VIII Div. 3: 2019

ASTM D 3039/3039M-17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

ASTM D4018-17 Standard Test Methods for Properties of Continuous Filament Carbon and Graphite Fiber Tows.

ISO472 (2013) Plastics -Vocabulary

### 3 用語の意味

#### a) 金属層

炭素繊維強化鋼製圧力容器を構成する低合金鋼製圧力容器をいう。

#### b) 樹脂含浸炭素繊維層

樹脂含浸連続炭素繊維に熱硬化処理を施した積層をいう。

#### c) フープラップ構造

金属層に樹脂含浸炭素繊維をフープ巻き（金属層円筒胴部に繊維を軸とほぼ直角に巻き付ける方法をいう。）する構造をいう。

#### d) 耐圧部分

炭素繊維強化鋼製圧力容器のうち、内面に圧力 0 MPa を超える圧力を保持する部分（樹脂含浸連続炭素繊維層を含む。）及び圧力によって生じる荷重を保持する部分をいう。ただし、次の 1)～3)を除く。

- 1) 圧力の保持の目的に直接供されない部分。
- 2) 耐圧部分に施すライニング、めっき等強度部材以外の部分。（金属層と樹脂含浸炭素繊維層との間の電位差腐食防止するための防食層を含む。）
- 3) 保護層（炭素繊維強化鋼製圧力容器を外部衝撃等から保護するために炭素繊維強化鋼製圧力容器の外面に設ける層及び保護パットをいう。）

#### e) 水素適合性

金属層が高圧水素環境で使用可能であることをいう。

#### f) Slow Strain Rate Tensile Test (SSRT)

**KHKS 0220 附属書 E の E.3.2** に基づき実施される低ひずみ速度引張試験のことをいう。

#### g) 材料仕様書

炭素繊維強化鋼製圧力容器の耐圧部分及び非耐圧部分に使用する材料の品名、型番、形状、材料特性に係る要求仕様、検査及び試験に係る要求仕様、品質管理に係る要求仕様、提出書類等の要求仕様を示す書類で、炭素繊維強化鋼製圧力容器製造者が作成し、材料製造者に提示する。

#### h) 設計圧力

最高運転圧力又はそれ以上の圧力で、対応する温度とともに設計荷重の条件に使用し、かつ、安全装置の設定圧力の基礎となる圧力をいう。

#### i) 設計温度

対象とする部分において、対応する圧力との関連から最も厳しい条件に対して定める運転温度又はそれ以上の温度で、設計に使用する温度をいう。

<備考>

- 1) 最も厳しい条件に対して定める運転温度とは、材料強度に最も厳しくなる温度をいう。
- 2) 設計温度は通常、高温側の最高設計温度であるが、低温側の使用限界の意味で最低設計温度の用語を用いる。

**j) 最低設計金属温度**

低温側の使用限界の最低の温度で、炭素繊維強化鋼製压力容器を使用する場合の低温状態の温度（運転開始時又は停止時の温度、最低運転温度、運転時の異常状態での温度、他の冷却源による温度及び大気温度を含む）から求める。

**k) 最高運転圧力**

設備が正常に稼働している場合の最高の圧力をいう。

**l) 運転温度**

設備が正常に稼働している場合の温度をいう。

**m) 計算厚さ**

この技術文書により算定される厚さで、腐れしろを含まない厚さをいう。

**n) 設計仕様書**

炭素繊維強化鋼製压力容器の設計、加工、構造及び検査に係る仕様、検査、品質管理等を示す書類をいい、炭素繊維強化鋼製压力容器製造者が作成する。

**o) 構造図**

炭素繊維強化鋼製压力容器の耐圧部分及び非耐圧部分の材料、形状寸法、構造、数量等を示す図面をいい、炭素繊維強化鋼製压力容器製造者が作成する。

**p) 破裂前漏洩**

炭素繊維強化鋼製压力容器の金属層の表面き裂が厚さ方向を安定的に進展し、不安定破壊又は塑性崩壊を生じる前に貫通して内部流体が漏洩する事象をいう。

## **4 材料**

### **4.1 金属層**

金属層は、**KHKS 0220** の 4 及び **KHKS 0220 附属書 E** の **E.2** に示す水素適合性を有する低合金鋼とする。

### **4.2 樹脂含浸炭素繊維層**

#### **4.2.1 炭素繊維**

**ISO 472** に定める炭素繊維で、**JIS R 7608** 又は **ASTM D4018** に定める試験方法による引張強さ、破断ひずみ及び縦弾性係数が、材料仕様書に規定する要求値を満たす材料とする。ただし、引張強さは  $3.0 \times 10^3$  MPa 以上、破断ひずみは 0.4 % 以上とする。また、樹脂との接着性を向上するために行う炭素繊維の表面処理は、材料仕様書の規定に従い行う。

#### **4.2.2 樹脂**

樹脂はエポキシ樹脂又は変性エポキシ樹脂とし、材料仕様書に規定する特性等が明らかでない材料とする。樹脂のガラス転移温度は、**JIS K 7121** 又は **JIS K 7095** に定める試験方法に

より確認する。

### 4.3 材料仕様書

炭素繊維強化鋼製圧力容器製造者は材料仕様書を作成し、材料製造者に提示する。材料仕様書には、材料の種類に応じて次の **a)～d)** の要求仕様を含む。

**a) 一般**

材料の種類に係わらず、次の **1)～7)** を含む。

- 1) 材料製造者名
- 2) 材料名
- 3) 材料の品名、型番、区分等を示す記号
- 4) 材料特性の要求仕様に係る試験方法、検査方法等の基準。ただし、指示が無い場合は、材料製造者が適用した試験方法、検査方法等を示す書類を炭素繊維強化鋼製圧力容器製造者に提出する。
- 5) 購入数量
- 6) 材料の製造年月日及び使用可能期限
- 7) 提出書類及び書類への記載事項

**b) 炭素繊維の材料仕様書には、次の **1)** 及び **2)** を含む。**

- 1) 引張強さ、破断ひずみ及び縦弾性係数の要求値
- 2) 炭素繊維の表面処理の仕様

**c) 樹脂の材料仕様書には、次の **1)** 及び **2)** を含む。**

- 1) 樹脂の粘度、エポキシ当量、比重及びゲル化時間
- 2) 熱変形温度又はガラス転移温度

**d) 樹脂の硬化及び硬化の促進に用いる助剤の材料仕様書には、樹脂との混合に係る要求事項を含む。**

### 4.4 金属層の縦弾性係数

金属層の縦弾性係数は、**KHKS 0220** の附属書 **C** を参照し、設定する。

### 4.5 樹脂含浸炭素繊維層の機械的性質の確認

炭素繊維強化鋼製圧力容器の樹脂含浸炭素繊維層の機械的性質は、次の **a)～d)** による。

- a)** 炭素繊維強化鋼製圧力容器製造者は樹脂含浸炭素繊維層の破断ひずみ、縦弾性係数、ポアソン比等の設計に用いる機械的性質を適切な方法で設定し、設計仕様書に記載する。
- b)** **JIS K 7165** 又は **ASTM D 3039/3039M** により樹脂含浸炭素繊維層の引張試験を行い、全ての引張試験片が **a)** で設定した破断ひずみ以上のひずみで破断することを確認する。また、その他の設計に用いる機械的性質について、**a)** で設定した値が妥当である



ことを確認する。

- c) 引張試験片を採取する試験板は、使用する材料及び製造条件が製品と同等になるよう作製する。
- d) 4.2.2 で確認されたガラス転移温度に対して、炭素繊維強化鋼製圧力容器の設計温度が 20 °C以上低い場合、引張試験温度は常温としてもよい。

## 5 設計

### 5.1 設計一般

炭素繊維強化鋼製圧力容器の設計に際して設計仕様を定め、設計仕様書を作成する。

#### 5.1.1 設計仕様書

設計仕様書の記載事項及び添付する図書は、次の a)～l)による。

- a) 設備の系統図（フローシート）
- b) 全体組立図、耐圧部詳細図及び使用材料名
- c) 高圧ガスの種類及び腐食性の有無
- d) 設計圧力、設計温度、運転圧力及び運転温度
- e) 最低設計温度
- f) 圧力変動及び使用回数
- g) 昇温降温条件（温度変動）
- h) 金属層、樹脂含浸炭素繊維層の機械的性質
- i) 樹脂含浸炭素繊維層の繊維体積含有率
- j) 樹脂含浸炭素繊維層のフィラメントワインディング条件及び熱硬化条件
- k) 電位差腐食防止方法
- l) 自緊処理条件

#### 5.1.2 金属層の許容引張応力

炭素繊維強化鋼製圧力容器に使用する金属層の設計温度における許容引張応力は、炭素繊維強化鋼製圧力容器製造者が設定した設計温度における流動応力（（引張強さ+降伏点）/2）の 2.4 分の 1 とする。

#### 5.1.3 樹脂含浸炭素繊維層の許容ひずみ

樹脂含浸炭素繊維層の許容ひずみは、次の a)及び b)による。

- a) 設計圧力における樹脂含浸炭素繊維層の許容ひずみは、4.5 で設定した樹脂含浸炭素繊維層の破断ひずみの 40 %以下とする。
- b) 耐圧試験圧力における樹脂含浸炭素繊維層の許容ひずみは、4.5 で設定した樹脂含浸

炭素繊維層の破断ひずみの 67%以下とする。

## 5.2 設計の基本事項

炭素繊維強化鋼製圧力容器の設計に際しての基本事項は、次の a)～d)による。

- a) 炭素繊維強化鋼製圧力容器円筒胴の厚さの設定は 5.2.1 による。ただし、有限要素法等の適切な方法により詳細な応力解析が可能な場合には、5.2.2 及び 5.2.3 を満足する厚さを設定してもよい。
- b) 5.2.4 により、炭素繊維強化鋼製圧力容器に用いる金属層単体の破裂圧力を確認する。
- c) 5.2.5 により、破裂前漏洩解析を行う。
- d) 5.2.6～5.2.8 により、疲労解析を行う。

### 5.2.1 炭素繊維強化鋼製圧力容器厚さの設定

炭素繊維強化鋼製圧力容器厚さの設定は、次の a)～f)による。

- a) 炭素繊維強化鋼製圧力容器胴部の金属層厚さと樹脂含浸炭素繊維層厚さを設定する。金属層と樹脂含浸炭素繊維層のすき間を考慮する必要がある場合は、最低設計温度において発生するすき間量を用いて計算する。
- b) 式(5.1)及び式(5.2) で炭素繊維強化鋼製圧力容器の設計圧力における金属層周方向応力 $\sigma_{\theta 1}$ を算出し、5.1.2 で設定した金属層の許容引張応力を超えないことを確認する。
- c) 式(5.1)、式(5.3)及び式(5.4)で炭素繊維強化鋼製圧力容器の設計圧力における樹脂含浸炭素繊維層周方向ひずみ $\varepsilon_{\theta 2}$ を算出し、5.1.3a)の許容ひずみを超えないことを確認する。
- d) 式(5.1)、式(5.3)及び式(5.4)で炭素繊維強化鋼製圧力容器の耐圧試験圧力における樹脂含浸炭素繊維層周方向ひずみ $\varepsilon_{\theta 2}$ を算出し 5.1.3b)の許容ひずみを超えないことを確認する。
- e) a)で設定した金属層厚さを用い、式(5.5) で金属層軸方向応力 $\sigma_{z 1}$ を算出し、5.1.2 で設定した金属層の許容引張応力を超えないことを確認する。
- f) 鏡部を有する金属層を用いる場合は、JIS B 8266 等適切な方法により鏡部の計算厚さを求める。

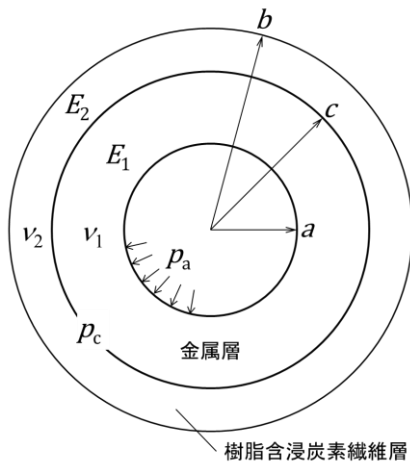
$$p_c = \frac{\frac{-\delta}{c} + 2 \left\{ \frac{p_a a^2}{E_1 (c^2 - a^2)} \right\}}{\left\{ \frac{1 - \nu_1}{E_1} + \frac{1 + \nu_2}{E_2} \right\} + 2 \left\{ \frac{1}{E_1} \frac{a^2}{(c^2 - a^2)} + \frac{1}{E_2} \frac{c^2}{(b^2 - c^2)} \right\}} \quad \text{----- (5.1)}$$

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{p_a a^2}{(c^2 - a^2)} \left( \frac{c^2}{r^2} + 1 \right) - \frac{p_c c^2}{(c^2 - a^2)} \left( \frac{a^2}{r^2} + 1 \right) \quad \text{----- (5.2)}$$

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{p_c c^2}{(b^2 - c^2)} \left( \frac{b^2}{r^2} + 1 \right) \quad \text{----- (5.3)}$$

$$\varepsilon_{\theta 2} = \sigma_{\theta 2} / E_2 \quad \text{----- (5.4)}$$

$$\sigma_{z 1} = a^2 p_a / (c^2 - a^2) \quad \text{----- (5.5)}$$



$P_c$  : 金属層と樹脂含浸炭素繊維層の接触面における圧力 (MPa)

$P_a$  : 内圧 (MPa)

$a$  : 金属層内半径 (mm)

$b$  : 樹脂含浸炭素繊維層外半径 (mm)

$c$  : 金属層外半径又は樹脂含浸炭素繊維層内半径 (mm)

$\delta$  : 金属層と樹脂含浸炭素繊維層の間のすき間量 (mm)

$r$  : 任意半径 (mm)

$E_1$  : 金属層の縦弾性係数 (MPa)

$E_2$  : 樹脂含浸炭素繊維層の縦弾性係数 (MPa)

$\nu_1$  : 金属層のポアソン比

$\nu_2$  : 樹脂含浸炭素繊維層のポアソン比

$\sigma_{\theta 1}$  : 金属層周方向応力 (MPa)

$\sigma_{z 1}$  : 金属層軸方向応力 (MPa)

$\sigma_{\theta 2}$  : 樹脂含浸炭素繊維層周方向応力 (MPa)

$\varepsilon_{\theta 2}$  : 樹脂含浸炭素繊維層周方向ひずみ

### 5.2.2 炭素繊維強化鋼製圧力容器の最大許容圧力

炭素繊維強化鋼製圧力容器の最大許容圧力は、次による。

- a) 有限要素法等の適切な方法により炭素繊維強化鋼製圧力容器の破壊圧  $P_B$  を求め、設計係数  $f=2.5$  で除した値を最大許容圧力  $P_{all}$  とする (式(5.6))。

$$P_{all} = P_B / f \quad \text{----- (5.6)}$$

- b) 破壊圧  $P_B$  は、樹脂含浸炭素繊維層に発生する最大周方向ひずみが **4.5** で設定した樹脂含浸炭素繊維層破断ひずみに達した時の圧力とする。
- c) 設計圧力が最大許容圧力  $P_{all}$  以下であることを確認する。

### 5.2.3 炭素繊維強化鋼製圧力容器の樹脂含浸炭素繊維層に発生するひずみ

有限要素法等の適切な方法により、設計圧力及び耐圧試験圧力において炭素繊維強化鋼製圧力容器の樹脂含浸炭素繊維層に発生するひずみを求め、**5.1.3** のひずみを超えないことを確認する。

### 5.2.4 炭素繊維強化鋼製圧力容器に用いる金属層単体の破裂圧力

式(5.7)より、炭素繊維強化鋼製圧力容器に用いる金属層単体の破裂圧力を求め、炭素繊維強化鋼製圧力容器に用いる金属層単体の破裂圧力が炭素繊維強化鋼製圧力容器の設計圧力以上であることを確認する。

$$P_{B1} = \frac{2}{\sqrt{3} f} \frac{(S_y + S_u)}{2} \ln K \quad \text{----- (5.7)}$$

$P_{B1}$  : 金属層単体の破裂圧力 (MPa)

$K$  : 金属層の内外半径比 (金属層外半径/金属層内半径)

$f$  : 設計係数で、1.0 とする

$S_y$  : 設計温度における材料の降伏点又は0.2%耐力の設定値 (MPa)

$S_u$  : 設計温度における材料の引張強さの設定値 (MPa)

### 5.2.5 破裂前漏洩解析

炭素繊維強化鋼製圧力容器に用いる金属層単体について、**KHKS 0220** の **7.2 a)**に基づいて破裂前漏洩が成立することを確認する。

### 5.2.6 疲労解析の前提

炭素繊維強化鋼製圧力容器の疲労解析の前提は、次の **a)~e)**による。

- a) 炭素繊維強化鋼製圧力容器の疲労解析は金属層について行う。
- b) 疲労解析で考慮する負荷には、設備の運転の起動及び停止に伴う運転圧力の繰返し、運転中の圧力変動、熱（温度）の変動、耐圧試験圧力及び気密試験圧力の繰返し等の必要な負荷を含める。
- c) 疲労解析は、樹脂含浸炭素繊維層の効果と **5.2.8** による圧縮残留応力を含めて行ってよい。
- d) 疲労解析の温度は運転温度とする。過小評価とならないことが検証できる場合には、運転温度の代わりに設計温度としてもよい。
- e) 金属層と樹脂含浸炭素繊維層のすき間を考慮する必要がある場合は、最低設計温度において発生するすき間量を用いる。

### 5.2.7 疲労解析

炭素繊維強化鋼製圧力容器の疲労解析は **KHKS 0220** の **6** 及び **KHKS 0220 附属書 E** の **E.4.2** による。金属層内面に発生する応力振幅が使用する金属層の疲労限度以下であることを確認する。

### 5.2.8 自緊処理による圧縮残留応力

自緊処理により導入される圧縮残留応力は、**a)**及び**b)**の条件を満足する場合に疲労解析等で用いてもよい。

- a) 自緊処理による圧縮残留応力は、金属層のバウシinger効果の影響を考慮し、有限要素法その他の適切な解析方法により求める。
- b) 金属層内面に発生する等価応力振幅  $S_{eq}$  が金属層の繰返し降伏強度（繰返し応力-ひずみ曲線における 0.2%耐力）よりも小さい。なお、金属層の繰返し降伏強度は式(5.8)より求めてもよい。

$$CYS = 0.615 TS \quad \text{----- (5.8)}$$

$CYS$ : 繰返し降伏強度 (MPa)

$TS$ : 引張強さ (MPa)

## 5.3 ねじ構造

ねじ構造の強度解析及び疲労解析は **KHKS 0220** の **5.3.5** による。

## 6 工作及び検査

### 6.1 材料の確認

炭素繊維強化鋼製圧力容器に使用する材料は、4の規定要求に適合していることが証明され、かつ満足する材料であることを示す記号等が確認できるようにする。材料を切断又は機械加工する場合は、記号を移し替えてもよい。

### 6.2 設計の検査

炭素繊維強化鋼製圧力容器の設計が、材料仕様書、設計仕様書、構造図、及び4～6の規定に適合していることを確認する。

### 6.3 表面仕上げ

金属層内面の表面仕上げは、KHKS 0220 の9.2.1による。

### 6.4 耐圧部の検査

炭素繊維強化鋼製圧力容器の金属層は機械加工後、磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を実施し、有害な欠陥が無いことを確認する。炭素繊維強化鋼製圧力容器の樹脂含浸炭素繊維層は、表面に使用上有害な傷、打こん、腐食等の欠陥が無いことを目視検査等で確認する。

### 6.5 自緊処理

炭素繊維強化鋼製圧力容器の自緊処理は、次のa)～e)による。

- a) 炭素繊維強化鋼製圧力容器の自緊処理は、KHKS 0220 の9.4による。
- b) 自緊処理を行うために用いる圧力は、除荷後に圧縮残留応力により金属層に圧縮降伏を生じる圧力を超えてはならない。
- c) 自緊処理圧力において樹脂含浸炭素繊維層に発生するひずみは、4.5で設定した樹脂含浸炭素繊維層の破断ひずみの67%を超えてはならない。
- d) 自緊処理圧力は有限要素解析等適切な方法により設定する。また、自緊処理圧力において樹脂含浸炭素繊維層外面に発生するひずみを求める。
- e) 自緊処理時は樹脂含浸炭素繊維層外面ひずみを測定し、d)の外面ひずみに到達したことを確認する。

### 6.6 ねじ加工

金属層のねじ加工は、KHKS 0220 の9.6による。

### 6.7 電位差腐食防止の施工

金属層と樹脂含浸炭素繊維層との間で電位差腐食の恐れがある場合には、防食層を設ける等の適切な電位差腐食防止措置を施す。電位差腐食防止措置の詳細は設計仕様書に記載

する。

## 6.8 フィラメントワインディング

炭素繊維強化鋼製圧力容器樹脂含浸炭素繊維層のフィラメントワインディングは、次の a) 及び b) による。

- a) ワインディング部に継目がある場合には、継目部での重なるの長さは繊維の巻き付け、剥離の防止等に対して十分な長さとし、外面に継目を設けてはならない。
- b) ワインディングは、樹脂含浸炭素繊維層等の設計に対応して炭素繊維強化鋼製圧力容器製造者が定めた施工条件に従い行う。ここで、施工条件は次の 1)～3) とし、施工条件は設計仕様書又は構造図に明示する。
  - 1) ワインディングパターン（巻き付け角度、巻き付け総数等）
  - 2) 巻き付け作業時に繊維に作用させる張力
  - 3) 巻き付け速度

## 6.9 樹脂の熱硬化処理

ワインディング後に樹脂を硬化させるための熱硬化処理は、次の a)～d) による。

- a) 樹脂の熱硬化処理温度は、繊維及び金属層の材料特性（組織、結晶粒、機械的性質等）に影響を与えない温度とする。
- b) 熱硬化処理は、樹脂の全表面が均一に加熱されるように内部、外部又は内外部から行い、部分的な熱硬化処理は行わない。
- c) 熱硬化処理は、樹脂含浸炭素繊維層の厚さ等の寸法形状に対応して炭素繊維強化鋼製圧力容器製造者が定めた加熱方法、加熱温度、保持時間等の熱硬化処理条件に従い行う。
- d) 炭素繊維強化鋼製圧力容器製造者は、樹脂含浸炭素繊維層が内面まで硬化していることを適切な方法で確認する。

## 6.10 繊維体積含有率

樹脂含浸炭素繊維層の繊維体積含有率は、樹脂含浸炭素繊維層の製造に使用した炭素繊維重量、樹脂含浸炭素繊維層寸法測定値等から算出し、設計仕様書に記載の繊維体積含有率に適合することを確認する。

## 6.11 外面ひずみ測定による炭素繊維強化鋼製圧力容器の製造状態の確認

炭素繊維強化鋼製圧力容器の製造状態の確認は、次の a) 及び b) による。

- a) 炭素繊維強化鋼製圧力容器に内圧を負荷し、適切な方法で樹脂含浸炭素繊維層の外面ひずみを測定する。
- b) 外面ひずみ測定結果をもとに、製造された炭素繊維強化鋼製圧力容器が設計通り製

造されていることを確認する。

## 7 耐圧試験

炭素繊維強化鋼製圧力容器は **KHKS 0220** の **10** により耐圧試験を行う。ただし、水圧試験圧力は設計圧力の 1.5 倍以上、気圧試験圧力は設計圧力の 1.38 倍以上とする。

## 8 気密試験

炭素繊維強化鋼製圧力容器は 7 に合格した後、**KHKS 0220** の **11** により気密試験を行う。



# 解 説

# 解説目次

- 1 技術文書作成方針
- 2 適用範囲について
- 3 金属層の水素適合性に及ぼす試験片採取方向の影響について
- 4 使用可能な炭素繊維材料について
- 5 樹脂含浸炭素繊維層の許容ひずみについて
- 6 式による厚さ計算の設定について
- 7 設計における温度の影響について
- 8 疲労解析について
- 9 自緊処理圧力の上限について
- 10 炭素繊維強化鋼製圧力容器のき裂進展解析について

## 圧縮水素スタンドで使用する炭素繊維強化鋼製圧力容器に関する技術文書の解説

この解説は、技術文書本文に規定・記載した事柄、並びにそれらに関連した事柄を説明するものであり、技術文書の一部ではない。

### 1 技術文書作成方針

炭素繊維強化鋼製圧力容器は金属層胴部に発生する周方向応力の一部を樹脂含浸炭素繊維層が分担している二層胴鋼製容器であると解釈することにより、特定設備検査規則に基づき製造されている鋼製圧力容器と同様に公式による設計及び解析による設計が可能であるという考え方に基づいてこの技術文書を作成した<sup>[1,2]</sup>。

技術文書の作成においては、既存の圧力容器規格である **KHKS 0220 超高压ガス設備に関する基準**の設計思想を基本とした。KHKS 0220 に規定の無い樹脂含浸炭素繊維層に関する部分については、欧米及び国内における定置用水素蓄圧器の製造に関する唯一の規格である **ASME Sec.VIII Div.3** やフルラップ容器の技術基準である **KHKS 0225 圧縮水素蓄圧器用複合圧力容器に関する基準**を参考に、炭素繊維強化鋼製圧力容器に適した規定を作成した。

### 2 適用範囲について

#### a) 内容積

**KHKS 0225** を引用し、500 L 以下とした。

#### b) 設計圧力範囲

**KHKS 0225** 及び **JPEC-TD 0003** を引用し、105 MPa 及び高压水素環境下で当該材料特性を評価した際の試験圧力を超えない圧力とした。

#### c) 設計温度範囲

設計温度の下限温度は **JPEC-TD 0003** を引用した。低合金鋼（SCM435 等）については、特定則別添 1 別表 1 の許容引張応力の記載が-30 °C までであるため-30 °C とした。設計温度の上限温度については、各種複合容器規格を調査し 85 °C が一般的であったことから 85 °C とした。

#### d) 最大使用期間

最大使用期間については、既存の複合容器規格（参考とした規格は、**天然ガス自動車に関する国連規則 R110、容器保安規則、ASME Sec.VIII Div.3**）を参考に 20 年としたが、技術的な観点から最大使用期間を 20 年とすることの妥当性を検証した。

多くの複合容器規格において、最大使用期間は樹脂含浸炭素繊維層のストレスラプチャー特性を基に決められている<sup>[1,3]</sup>。図 1 に PAN 系炭素繊維の一方方向樹脂含浸炭素繊維層材料のストレスラプチャー特性を示す<sup>[3]</sup>。この技術文書では、樹脂含浸炭素繊維層に発生するひずみを許容ひずみ以下（樹脂含浸炭素繊維層破断ひずみ×40 %）としており、図 1 の樹脂含浸炭素繊維層材料のストレスラプチャー特性から判断すると、20 年間で樹脂含浸炭

素繊維層が破断する確率は十分低いといえる。

次に、樹脂含浸炭素繊維層材料の疲労特性から最大使用期間 20 年の妥当性を検証した。図 2 は PAN 系一方向樹脂含浸炭素繊維層材料の疲労試験結果である<sup>[4]</sup>。炭素繊維強化鋼製圧力容器の樹脂含浸炭素繊維層に発生するひずみは許容ひずみ以下であるので、樹脂含浸炭素繊維層材料は  $10^7$  回以上の疲労寿命を有している。燃料電池自動車普及期に予想される蓄圧器の使用回数は  $7.3 \times 10^5$  回程度（100 台/日  $\times$  365 日  $\times$  20 年間）であることから<sup>[5]</sup>、炭素繊維強化鋼製圧力容器を 20 年間使用する場合の使用回数に対して、樹脂含浸炭素繊維層の疲労寿命は十分長いといえる。

以上の検証から、最大使用期間を 20 年間とするのは妥当であると判断した。なお、PITCH 系樹脂含浸炭素繊維層についても同様の検証を行い、最大使用期間 20 年は妥当であることを確認している（PITCH 系樹脂含浸炭素繊維層材料の試験結果については、炭素繊維メーカー社内データを含むため非公開とする）。

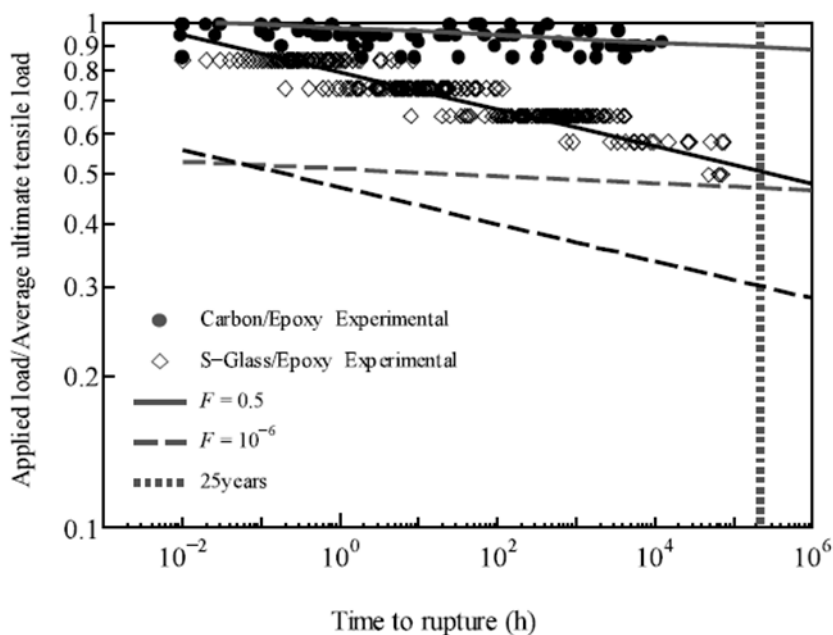


図 1 PAN 系一方向樹脂含浸炭素繊維層材料のストレスラプチャー特性

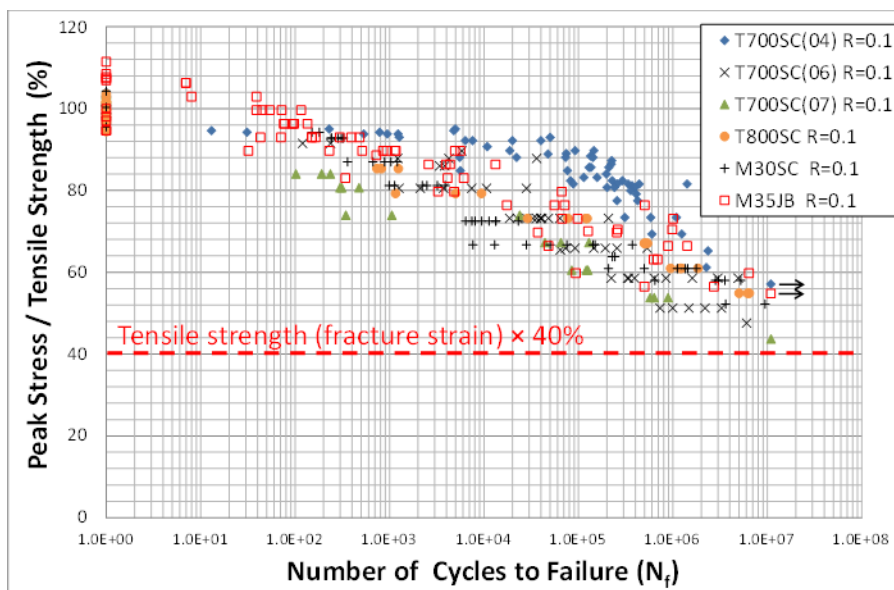


図2 PAN系一方向樹脂含浸炭素繊維層材料の疲労試験結果

### 3 金属層の水素適合性に及ぼす試験片採取方向の影響について

金属層の水素適合性の判定はSSRTの試験結果に基づき行われる。SSRTに用いる試験片は金属層の周方向と試験片の軸方向が一致するように採取するが、金属層厚さが小さい設計をする場合、試験片を周方向から採取できない事態が想定された。そこで、試験片採取方向が水素適合性に及ぼす影響を検証するため、金属層と同等の試験材を用いてSSRTを実施した。

#### a) 試験材

表1に試験材諸元を示す。試験材符号A及びBの2種類の試験材を用いた。なお、今回試験に用いた試験材は炭素繊維強化鋼製圧力容器製品に使用される金属層と同等の材料であるため、寸法、化学的組成、熱処理条件の詳細は非公開とする。

表1 試験材諸元

符号	鋼種	試験材形状	製造方法	熱処理
A	SCM435	鋼管	Hot-rolled	焼入れ焼戻し
B	SCM435	鋼管	Hot-rolled	焼入れ焼戻し

b) 試験片

水素適合性に及ぼす試験片採取方向の影響を検証するため、試験片は周方向採取及び軸方向採取とした。周方向採取、軸方向採取とも金属層の内表面近傍から試験片を採取した。

周方向採取：試験片の平行部が試験材の長手方向に垂直となるように採取

軸方向採取：試験片の平行部が試験材の長手方向に平行となるように採取

図 3 に試験片形状を示す。試験材 A から採取した試験片の平行部はバフ仕上げ、試験材 B から採取した試験片の平行部は #600 研磨紙縦磨き仕上げとした。

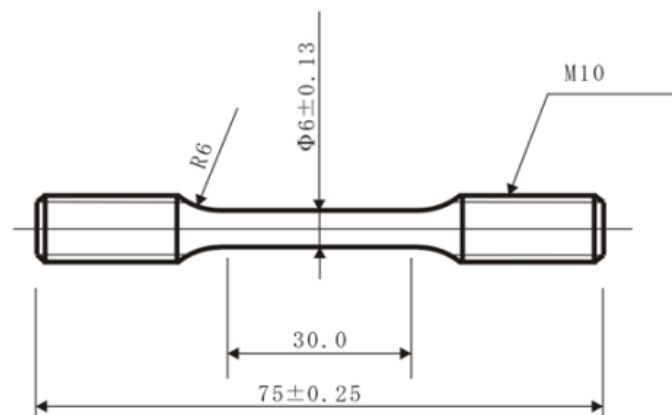


図 3 試験片形状

c) 試験条件

試験条件を以下に示す。

試験規格	ASTM G142-98
試験温度	-30 °C
試験環境	106 MPa 水素中、大気圧窒素中
クロスヘッド変位速度	0.018 mm/min (ひずみ速度 $1 \times 10^{-5}$ / s)
試験本数	水素中 2 本、窒素中 1 本

d) 試験結果

表 2 に窒素中試験結果を示す。試験材 A 及び試験材 B とも、周方向採取と軸方向採取で引張特性は同等であり、試験片採取方向の影響はなかった。

図 4 に SSRT の試験結果 (応力-ストローク線図) を示す。全ての水素中試験が窒素中試験における最大荷重点を超えて破断していることを確認した。

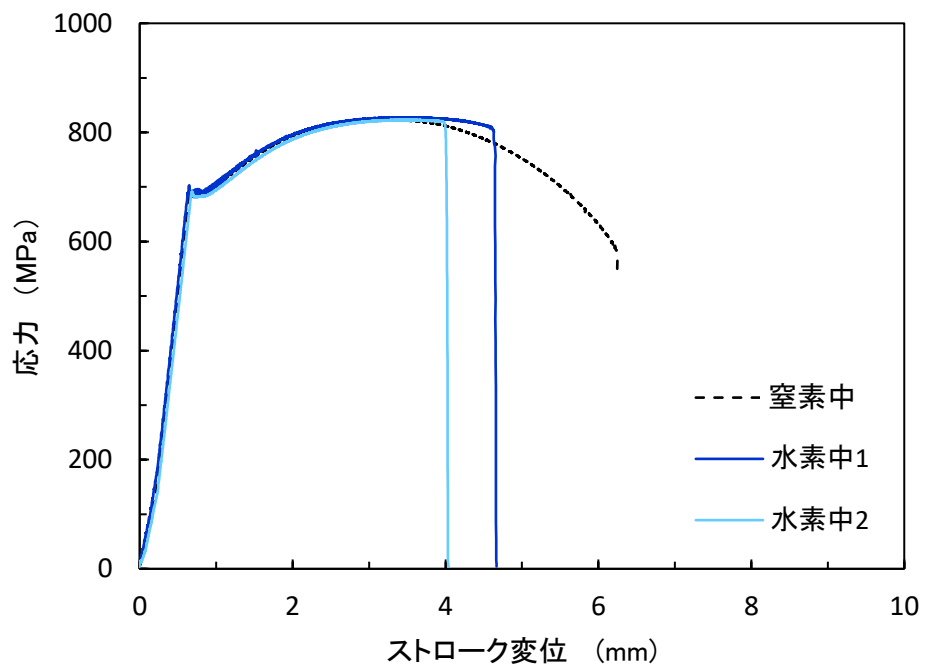
表 2 窒素中試験結果

試験材符号	採取方向	引張強さ(MPa)	降伏点(MPa)	伸び(%)	絞り(%)
A	周	824	694	22	63
	軸	825	696	25	68
B	周	880	763	23	68
	軸	880	770	24	71

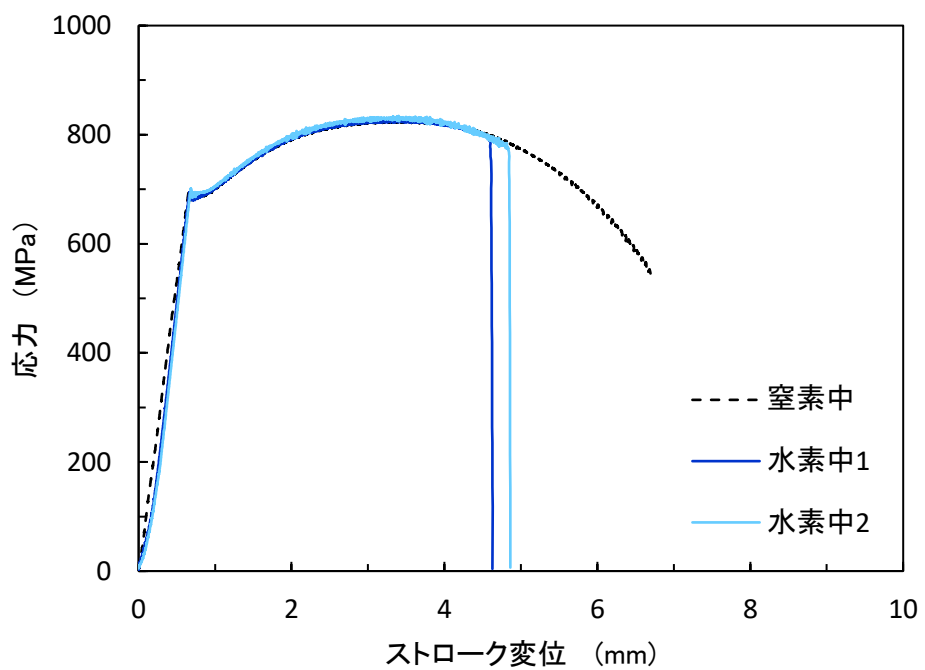
e) まとめ

窒素中の引張特性が軸方向採取試験片と周方向採取試験片で同等であれば、水素中の特性も採取方向の影響は受けないことを確認した。

従って、この技術文書においては、金属層厚さが小さく周方向から試験片が採取できない場合は、金属層円筒胴の周方向と軸方向の機械的性質が同等と判断し得る場合に限り、軸方向から試験片を採取してもよいと考えられる。



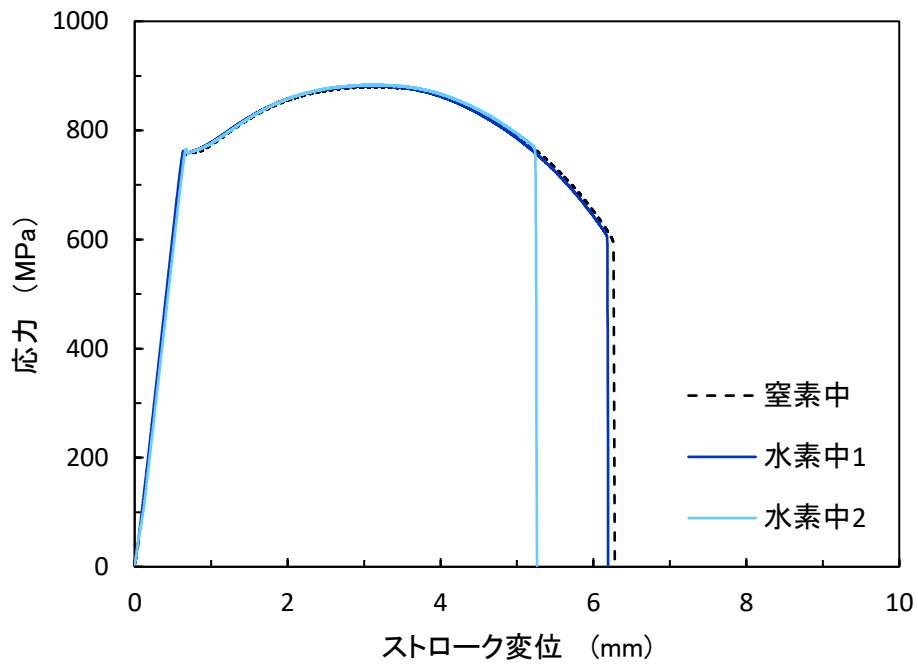
a) 試験材 A 周方向採取試験片



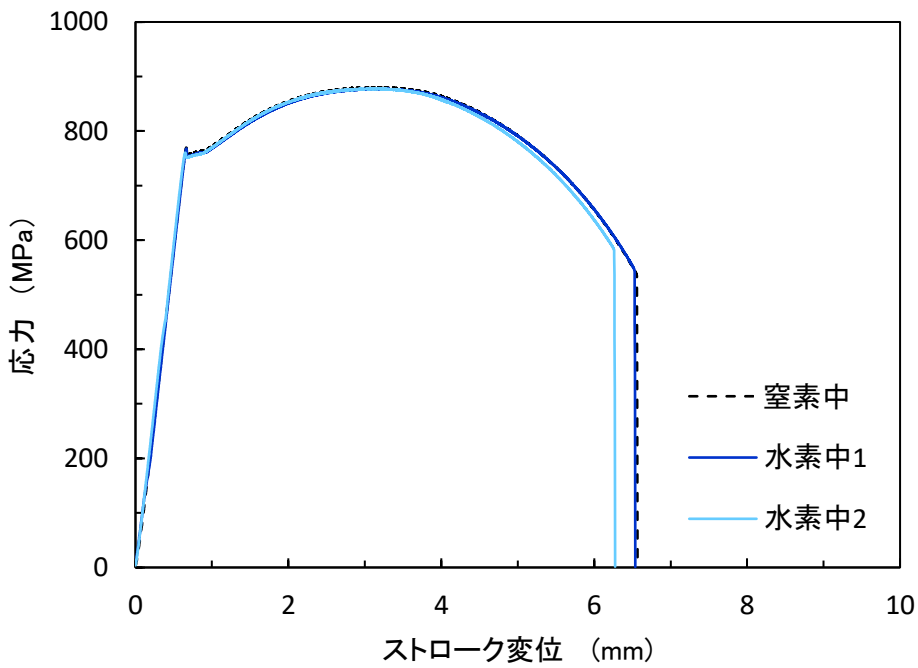
b) 試験材 A 軸方向採取試験片

図 4 SSRT の試験結果





c) 試験材 B 周方向採取試験片



d) 試験材 B 軸方向採取試験片

図4 SSRT の試験結果 (続き)

#### 4 使用可能な炭素繊維材料について

複合容器に関する基準では PAN 系炭素繊維を使用することを要求している基準が多いが、この技術文書では 4.2.1 を満足する炭素繊維であれば PAN 系及び PITCH 系のどちらの炭素繊維も使用できることとした。樹脂含浸炭素繊維層の破断ひずみを適切に設定し、許容ひずみ以下となるように設計することで、解説 2 に示した通り長期耐久性が確認されており、炭素繊維の種類を区別する必要は無いと考えられる。

#### 5 樹脂含浸炭素繊維層の許容ひずみについて

炭素繊維強化鋼製圧力容器の設計では樹脂含浸炭素繊維層の許容ひずみを適切に設定する必要がある。図 5 に樹脂含浸炭素繊維層の許容ひずみ設定の考え方を示す。一般的に樹脂含浸炭素繊維層の破断ひずみは使用する炭素繊維の破断ひずみよりも小さくなる傾向が知られており強度発現係数（樹脂含浸炭素繊維層の破断ひずみ/炭素繊維単体の破断ひずみ）等と呼ばれている。強度発現係数は炭素繊維強化鋼製圧力容器製造者の技術レベルや品質管理能力の影響を受けるため、技術文書で一律に規定できるものではない。

この技術文書では炭素繊維強化鋼製圧力容器製造者が適切な樹脂含浸炭素繊維層破断ひずみを設定し、樹脂含浸炭素繊維層材料の引張試験を実施して設定した樹脂含浸炭素繊維層破断ひずみが確保されていることを確認することとした。樹脂含浸炭素繊維層の許容ひずみは ASME Sec.VIII Div.3 を参考として、炭素繊維強化鋼製圧力容器製造者が設定した樹脂含浸炭素繊維層破断ひずみ×40%の値とした。なお、ASME Sec.VIII Div.3 では樹脂含浸炭素繊維層の引張応力を設計の基準としているが、この技術文書では引張応力ではなく破断ひずみを基準としている。引張応力は樹脂含浸炭素繊維層の繊維体積含有率  $V_f$  により変化するが、ひずみを基準とすれば  $V_f$  に関わらず設計クライテリアを設定することができるためである。

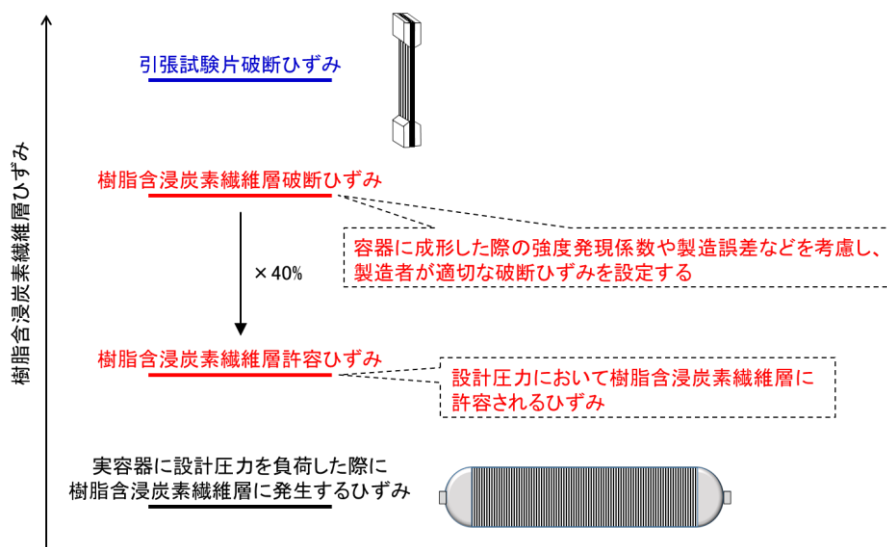


図 5 樹脂含浸炭素繊維層許容ひずみ設定の考え方

## 6 式による厚さ計算の設定について

この技術文書では一般的な応力計算の式<sup>[6]</sup>等を参考として、炭素繊維強化鋼製圧力容器の厚さ計算式を作成した。5.2.1の式は金属層が弾性変形する範囲で適用可能である。製造上の都合で金属層と樹脂含浸炭素繊維層の間にすき間が生じる場合は、すき間量を考慮して計算を行う。図6は炭素繊維強化鋼製圧力容器大型試験体の破裂試験における樹脂含浸炭素繊維層外面ひずみ実測値<sup>[7]</sup>と5.2.1の式より求めた樹脂含浸炭素繊維層外面ひずみを示したものである。樹脂含浸炭素繊維層外面ひずみの実測値と計算値はよく一致しており、計算式の妥当性が確認された。

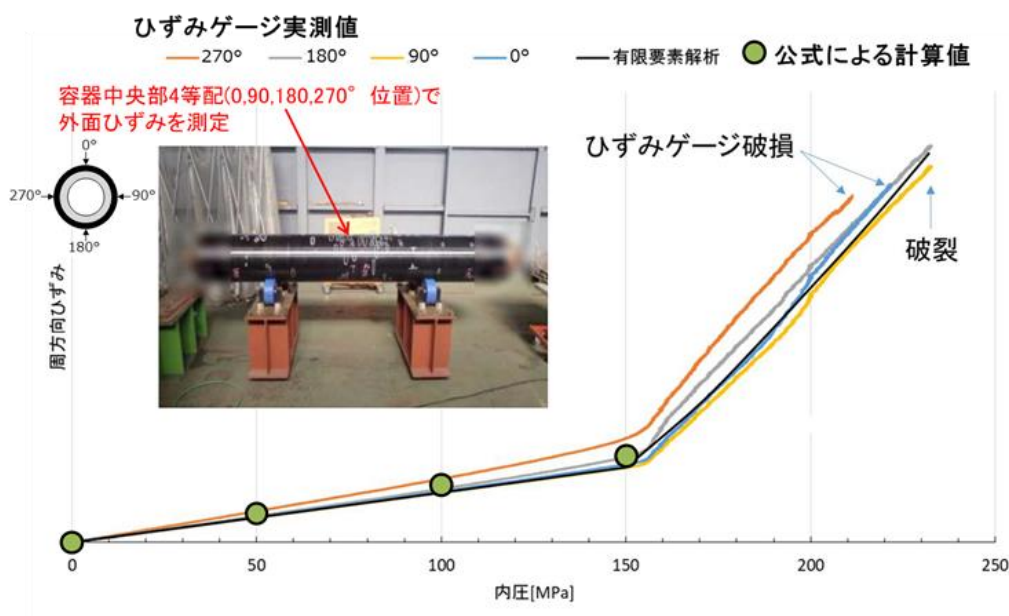


図6 炭素繊維強化鋼製圧力容器大型試験体の破裂試験における樹脂含浸炭素繊維層外面ひずみ実測値と5.2.1の式より求めた樹脂含浸炭素繊維層外面ひずみ

## 7 設計における温度の影響について

金属層（低合金鋼）と樹脂含浸炭素繊維層（炭素繊維）は熱膨張係数の差が大きいため、温度変化に伴い金属層と樹脂含浸炭素繊維層の間のすき間量が変化する。そのため、設計においては適切なすき間量を設定することが重要である。この技術文書では安全性を重視し、設計において設定するすき間量は最もすき間量が大きくなる最低設計温度におけるすき間量とした。

## 8 疲労解析について

一般的に複合容器の使用回数は金属材料の疲労特性、樹脂含浸炭素繊維層材料の疲労特性及びストレスラプチャー特性を考慮し決定される。しかし、**解説 2** に示した通り、許容ひずみ以下で設計することにより、樹脂含浸炭素繊維層の疲労特性やストレスラプチャー特性は炭素繊維強化鋼製圧力容器の使用回数に影響する因子にはならない。従ってこの技術文書では金属層について疲労解析を行い炭素繊維強化鋼製圧力容器の使用回数を決定する。

**KHKS 0220** では、実体又は実体に準じた試験体により残留応力が減衰しないことが検証されている場合にのみ、自緊による圧縮残留応力を疲労解析に用いることができる。しかし、試験体による検証は炭素繊維強化鋼製圧力容器製造者の負担が大きいため、この技術文書では **HPIS C106** <sup>[8]</sup> を参考として、試験体による検証が不要となる条件を **5.3.8** に示した。

## 9 自緊処理圧力の上限について

炭素繊維強化鋼製圧力容器の自緊圧力上限については、金属層と樹脂含浸炭素繊維層のそれぞれの観点から検討した。

金属層については、**KHKS 0220** 等の既存の鋼製圧力容器規格の規定と同様に、除荷後の圧縮残留応力により金属層に圧縮降伏を生じる圧力を超えないこととした。

樹脂含浸炭素繊維層については、自緊処理により樹脂含浸炭素繊維層の長期耐久性に影響を与えないことを重視し自緊圧力上限の規定を検討した。**ASME Sec.VIII Div.3** では、耐圧試験圧力において樹脂含浸炭素繊維層に発生するひずみは樹脂含浸炭素繊維層破断ひずみの 67 %以下、と規定されていることを参考に、自緊処理圧力において樹脂含浸炭素繊維層に発生するひずみが破断ひずみの 67 %を超えない圧力とした。

次に、自緊処理の上限圧力を樹脂含浸炭素繊維層破断ひずみの 67 %としても樹脂含浸炭素繊維層の長期耐久性に影響を与えないことの検証を行った。なお、PAN 系樹脂含浸炭素繊維層については、自緊処理において破断ひずみの 67 %のひずみが生じる可能性は無いことから、PITCH 系樹脂含浸炭素繊維層について検証した（自緊処理で金属層が全断面降伏しても樹脂含浸炭素繊維層に発生するひずみは低合金鋼の降伏ひずみである約 0.2 %であり、PAN 系樹脂含浸炭素繊維層の破断ひずみを 1.5 %と想定すると、破断ひずみの 13 %程度のひずみしか発生しない）。

**図 7** に PITCH 系樹脂含浸炭素繊維層材料の疲労試験結果を示す <sup>[9]</sup>。応力レベル 65 %で  $10^7$  回未破断と報告されており、仮に自緊処理圧力が繰返し負荷されたとしても十分な疲労寿命を有していることいえる。以上の事から、自緊処理で 1 回破断ひずみの 67 %のひずみが発生しても長期耐久性に影響を与えないと判断した。

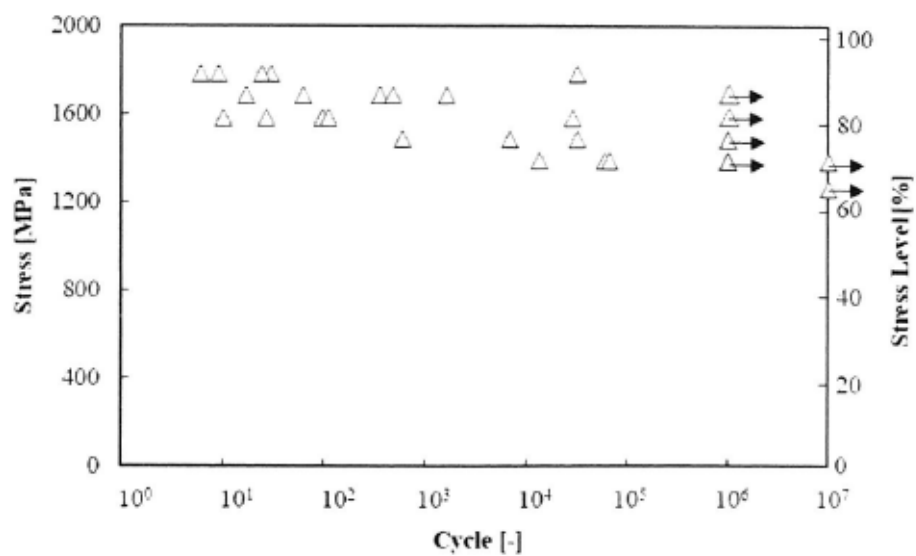


図7 PITCH系樹脂含浸炭素繊維層材料の疲労試験結果

### 10 炭素繊維強化鋼製圧力容器のき裂進展解析について

炭素繊維強化鋼製圧力容器のき裂進展解析を実施する必要がある場合は、KHKS 0220 の8及びKHKS 0220の附属書Eを参考に実施することが望ましい。

## 参考文献

- [1] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構.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/複合圧力容器蓄圧器の基準整備等に関する研究開発.平成 25 年度～平成 29 年度成果報告書.13400606-0,13400607-0,13400608-0
- [2] 小林英男,水素ステーション用複合圧力容器の設計と検査の在り方.非破壊検査.2020.69 巻.6 号.p.268-272.
- [3] 山田敏弘ほか.FRP 複合容器用一方向炭素繊維強化複合材の静的引張特性.圧力技術.2009.vol.47.No.6.p369-377
- [4] T. Takehana et al., ASME Pressure Vessels & Piping Conference 2018 Proceeding, PVP2018-85081
- [5] 一般財団法人石油エネルギー技術センター.平成 27 年度 技術開発・調査事業成果発表資料.
- [6] 日本機械学会編.機械工学便覧基礎編.2007.
- [7] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構.水素利用技術研究開発事業/燃料電池自動車及び水素ステーション用低コスト機器・システム等に関する研究開発/タイプ 2 複合容器蓄圧器の研究開発.平成 27 年度～平成 29 年度成果報告書.15101732-0
- [8] 一般社団法人日本高圧力技術協会.高圧容器規格.HPIS C 106:2013
- [9] 小林訓史ほか.一方向高弾性率炭素繊維強化プラスチックの疲労挙動.圧力技術.2020.vol.58,No.3,p.161-170.