

発表No.B1-3

超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業／  
水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／  
**複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に  
関する技術開発**

発表者：東條 千太 (JPEC)

一般財団法人石油エネルギー技術センター (JPEC)

高压ガス保安協会 (KHK)

国立大学法人東京大学

2023年7月13日

連絡先：一般財団法人石油エネルギー技術センター  
<https://www.pecj.or.jp/> TEL: 03-5402-8513

# 事業概要

## 1. 期間

開始：2018年6月

終了：2023年3月

## 2. 最終目標

- ・タイプ2複合圧力容器技術基準の整備に必要なデータを蓄積し、自主基準案の策定を図る
- ・応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法（タイプ3）を確立し、KHKS 0225改正に資する提案を行う。

## 3. 成果・進捗概要

- ・ **タイプ2複合圧力容器の技術文書JPEC-TD0008を制定した**（2020年度完）
- ・ 低コスト化を実現するタイプ3複合圧力容器の設計手法を確立し、**KHKS 0225改正に資する提案内容をまとめた**（設計フロー、最適疲労曲線、自緊解析モデル、試験項目削減）
- ・ **蓄圧器の圧力の変動比とサイクル寿命の増加比の相関を示す累積損傷関係式を構築し、FCV充填台数増を実現するタイプ3複合圧力容器の疲労評価手法を確立した**（特許出願済）

# 1. 事業の位置付け・必要性 ～水素ステーション用複合圧力容器蓄圧器～

- ①認可使用サイクル数が、10万サイクル以上を求められている。〔市場ニーズ〕  
認可取得のための試験費用が、1～2億円程度かかる。〔現状〕
- ↓
- ②前NEDO事業：水素ステーションの実態の圧力変動に見合った圧力サイクル試験による寿命延長効果を確認。  
→KHKTD 5202改正を要望し認められた。⇒KHKS 0225へ反映
- ↓
- ③水素ステーション用蓄圧器は特定則適用のため、  
容器則の流れである設計確認試験は必要最小限にしたい。
- ↓
- ④**本NEDO事業**：ライナー材を用いた試験、CFRP試験、複合圧力容器試験を実施し、**複合圧力容器試験を最小限にする認可取得の道筋を確立する。**〔目的〕
- ↓
- ⑤本NEDO事業で複合圧力容器の技術基準を整備することで、
- i) 省令改正（特定則）により大臣特認を不要とし、事前評価での認可を得られる様にしたい。  
⇒**2020年2月 特定則が改正され大臣特認が不要に**〔意義①〕
  - ii) **認可をとるためのイニシャルコスト**  
**および運営のランニングコストを低減したい。**〔意義②〕

## 2. 研究開発マネジメントについて

〔方向性〕 **応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法を確立**

### ① Design by Analysisの技術基準作成には、データが不足

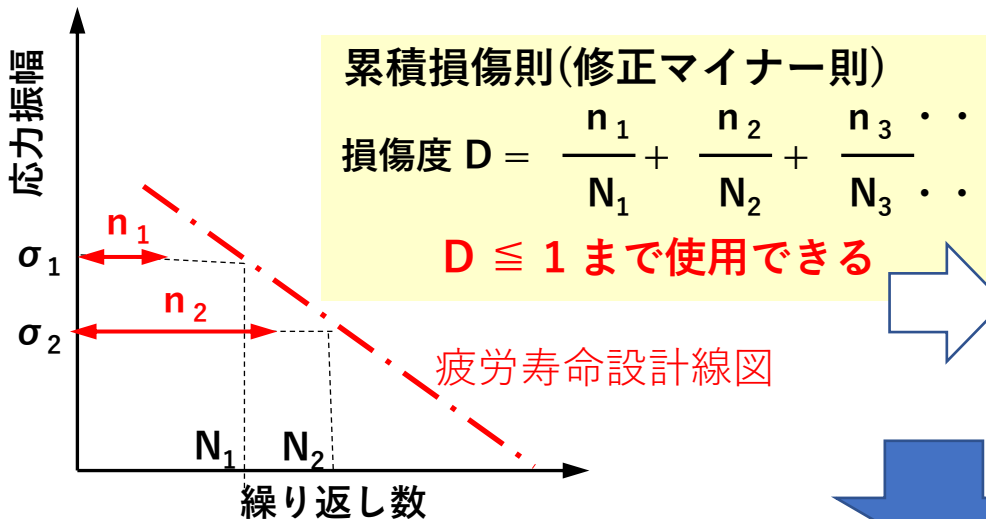
- ・ライナーの疲労特性（圧縮応力域）
- ・自緊処理の影響
- ・CFRP層の材料強度評価方法
- ・CFRP層の疲労特性 等

Design by Test

**課題①**  
複合圧力容器を用いた安全性を確認する試験が必要  
⇒費用と時間がかかる

**目標①**  
評価方法の簡素化  
〔イニシャルコスト低減〕

### ② 累積損傷関係式を構築するためのデータが不足



**課題②**  
複合圧力容器ライナーおよびCFRPに関する疲労寿命設計線図が存在しないため累積損傷則が適用できない  
⇒容器の使用回数が短い

**目標②**  
容器寿命最大限の活用  
〔ランニングコスト低減〕

〔手段〕 Design by Analysisと累積損傷関係式の構築により  
イニシャル&ランニングコストの低減を図る

〔体制と役割〕

全体統括  
**J P E C**

最適疲労曲線の作成

**K H K**

・ライナー試験片、CFRP試験片の評価

疲労寿命設計線図の作成

**東大**

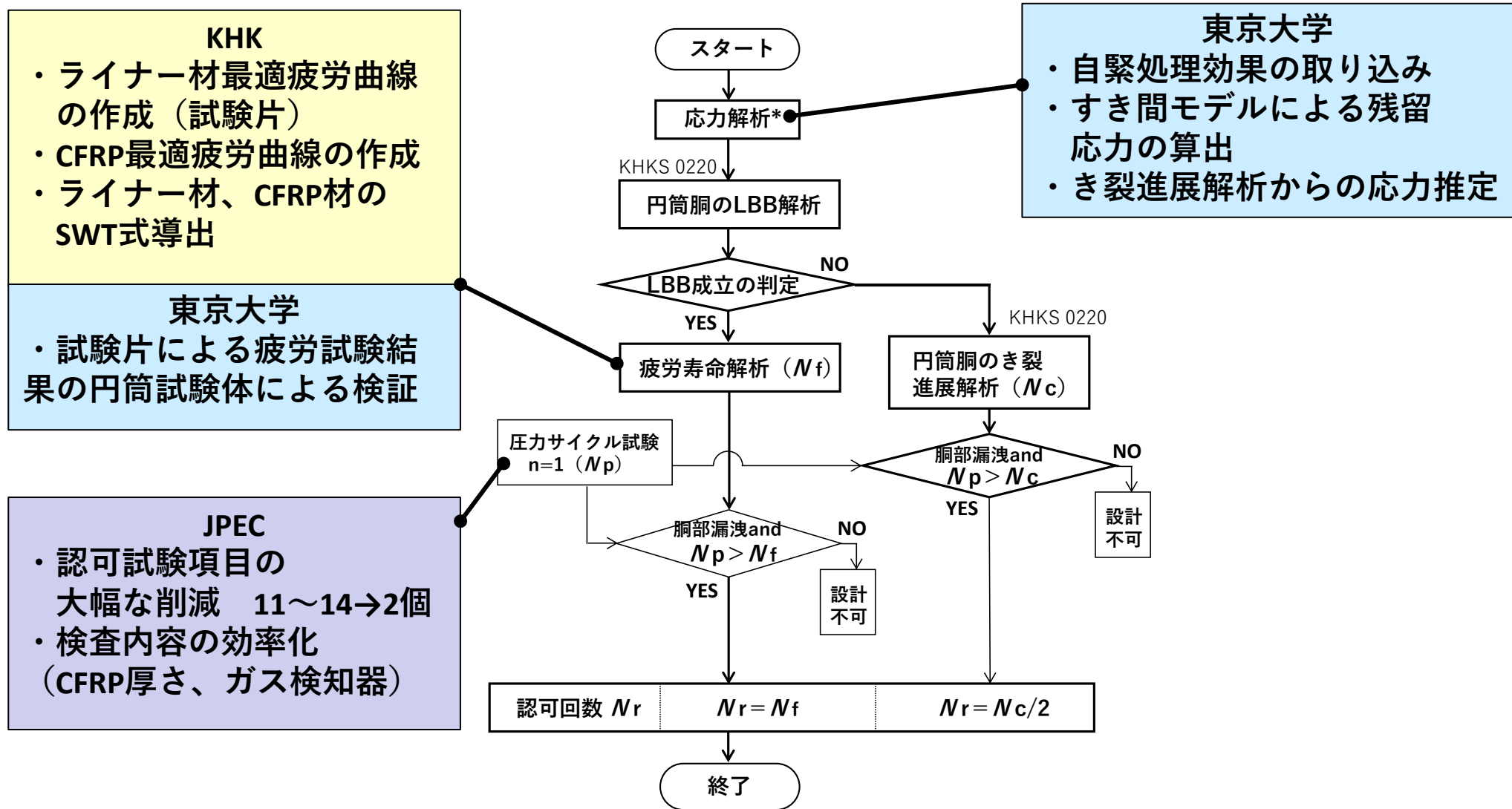
・自緊を考慮した疲労設計手法の確立

実容器検証・基準化

**J P E C**

・設計手法の実証  
→累積損傷関係式の提案  
・複合圧力容器蓄圧器の技術基準案の整備

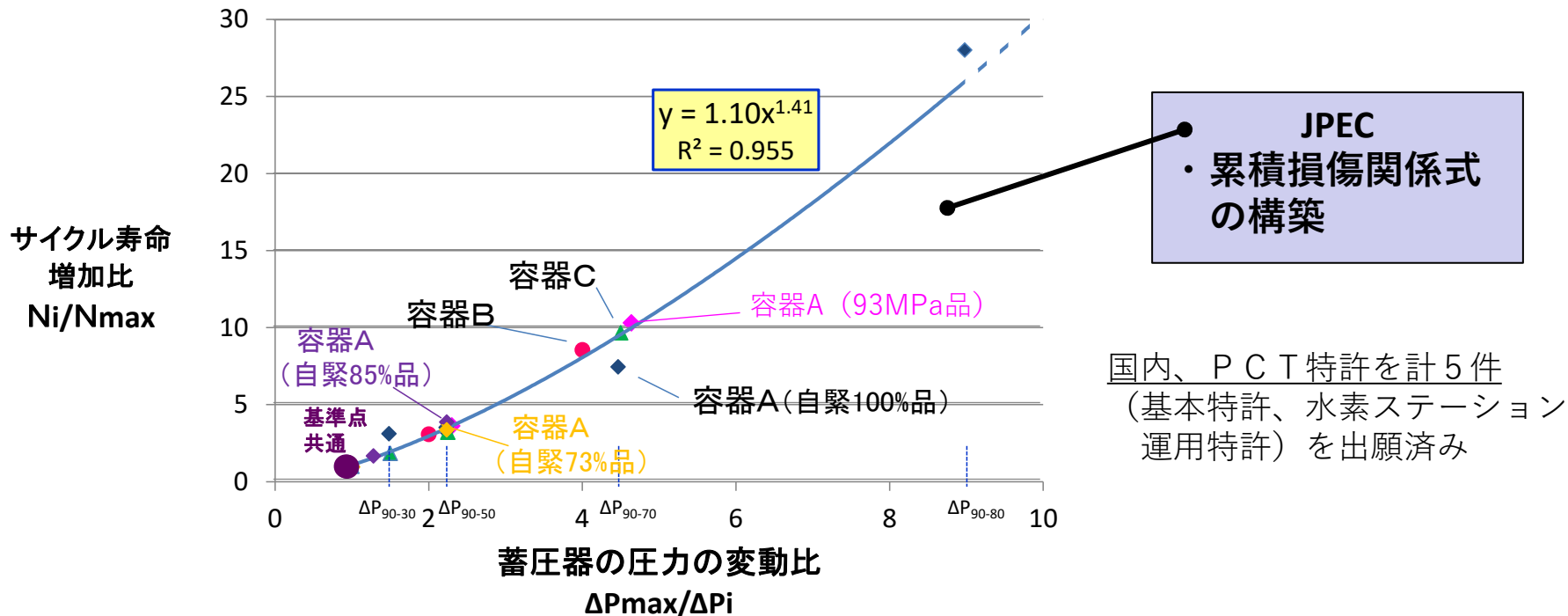
### 3. 研究開発成果① 5年間の全体成果 ～イニシャルコスト低減～



**成果①：低コスト化を目指したタイプ3複合圧力容器の設計手法を確立**

### 3. 研究開発成果② 5年間の全体成果 ～ランニングコスト低減～

蓄圧器の圧力の変動比とサイクル寿命増加比の関係



〔前提条件〕  
 ・認可回数  
 : 100,000回  
 ・バンクローテー  
 ション実施

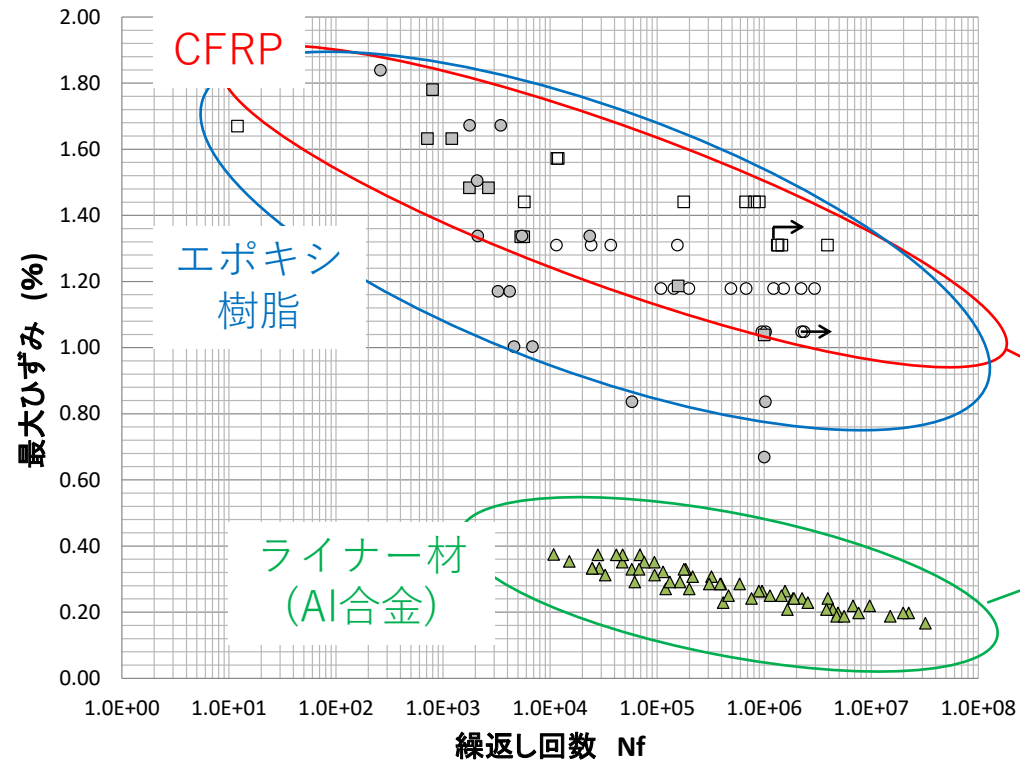
カウント方法	カウント数/1台	可能な充填台数
従来法	1.0	100,000台
累積損傷関係式	0.045	2,240,000台

**成果②：FCV充填台数増を目指したタイプ3複合圧力容器の疲労評価手法を確立**

### 3. 研究開発成果③ ～最適疲労曲線の比較～

#### ライナー材、CFRP及び同一のエポキシ樹脂材の試験片による疲労評価

CFRP:炭素繊維配位方向の試験片



定式化  

$$\sigma_a = 2.58\sigma_u N_f^{-0.12}$$

最適疲労曲線

図 最大公称ひずみで整理したS-N線図  
 (CFRP・樹脂：R=0.1、荷重制御、Al合金ライナー：R=-1、荷重制御)

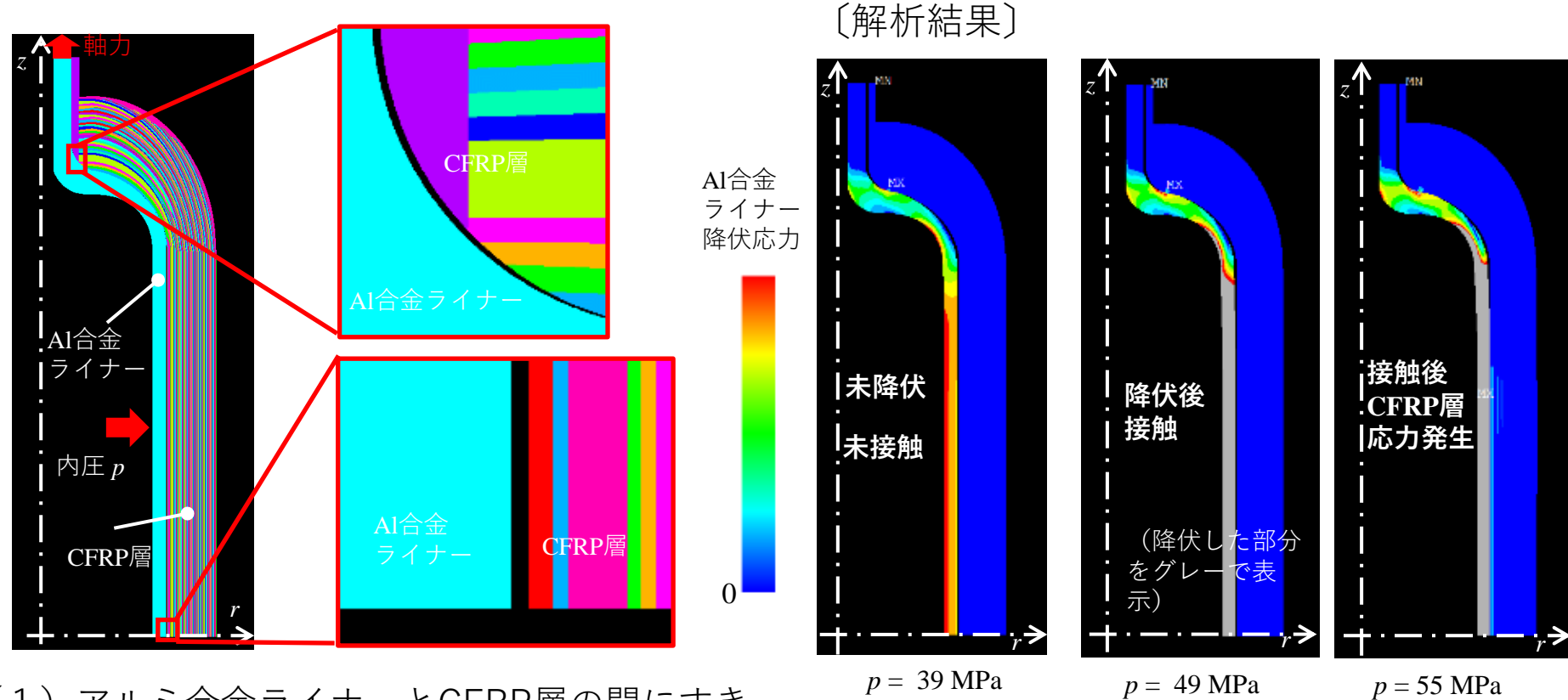
樹脂およびCFRPの疲労強度は  
 ライナー材のそれよりも十分長寿命側



疲労寿命：ライナー材の疲労強度  
 (最適疲労曲線) で決まる

### 3. 研究開発成果④ ～すき間をモデル化した有限要素解析～

アルミ合金ライナーの弾塑性変形とCFRP層との接触を考慮した有限要素解析



- (1) アルミ合金ライナーとCFRP層の間にすき間を設定して軸対称有限要素モデルを作成
- (2) アルミ合金は弾塑性体としCFRP層は直交異方性線形弾性体としてモデル化
- (3) CFRP各層の繊維配向と厚みの変化を見積もり正確な形状モデルを作成

図. 自緊圧力負荷中のMISES相当応力変化（隙間=5mmの場合）

- (1) 自緊処理圧力まで内圧を負荷し除荷まで解析
- (2) ライナー外面とCFRP層内面の接触問題を正確に解析
- (3) 除荷後の残留応力を初期応力として圧力サイクルにより発生するライナーの応力振幅と平均応力を評価



### 3. 研究開発成果⑤ ～ KHKS 0225の改正 (試験の削減案) ～

#### 容器を用いる試験、検査

##### 5.2 設計確認試験



##### 5.2.2.1 破裂試験

###### 【改正案】

- ・実容器3個 ⇒ **1個**
- ・解析 (DBA) を併用

##### 5.2.3.1 常温圧力サイクル試験 (疲労試験)

2~5個 ⇒ **1個**

##### 5.2.3.2 最小厚さ確認試験

(削除)

##### 5.2.3.3 環境試験

(削除)

##### 5.2.3.5 温度クリープ試験

(削除)

##### 7.3 製造確認試験 (200個毎または1年間に2個)

##### 7.3.1

- ・破裂試験、(削減)
- ・常温圧力サイクル試験 (疲労試験) (削除)

##### 8.4 構造の検査



##### 8.4.1.3 耐圧試験

製造容器すべて実施

- ・気密試験

特定則

##### 8.4.2 構造の検査

###### 【改正案】

の方法  
a)の3)

『寸法測定器等により、樹脂含浸炭素繊維層及び保護層のそれぞれの厚さを算出する』ことも可能とする

#### 試験片を用いる試験

##### 5.2.2.7 層間せん断試験

CFRP試験片5個  
で試験

(削除)



#### 公式及び解析による設計

胴部漏洩設計 ⇒  
解析により容器寿命を設定

##### 5.2.2.2 金属ライナーの破裂前漏洩の確認

##### 5.2.3.6 疲労解析

##### 5.2.3.6 き裂進展解析

・解析手法は、本事業の検討結果を反映

##### 5.1.1.1 タイプ3最小厚さの計算の方法 : 公式による静的強度の確保

##### 5.3.4

樹脂含浸炭素  
繊維層の炭素  
繊維  
(許容引張  
応力)

CFの強度発現率;  
破裂試験の容器1個の破  
裂圧力を用い、解析により  
求めた破裂圧力時のCFRP  
層のCFに生じる最大引張  
応力と、CFの引張強さの比  
で求める

**容器試験を大幅削減**  
胴部漏洩設計 : 11~14個 ⇒ 2個

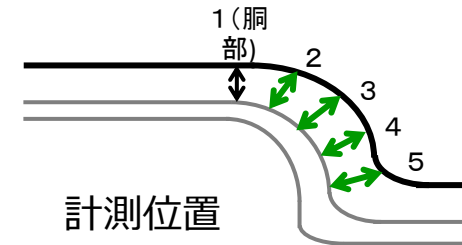
### 3. 研究開発成果⑥ ～検査内容の効率化～

〔樹脂含浸炭素繊維層厚さ計測手法の効率化〕

- ✓ プロファイル測定器により樹脂含浸炭素繊維層厚さを高い精度で測定できる（下表）
- ✓ フープ巻き、ヘリカル巻き各層ごと厚さも測定可能



断面計測以外の方法の一つとして適用可能  
⇒KHKS 0225改正案に記載



設計値に対する各層の厚み測定結果 n=3

	容器断面による計測				FW時の非接触計測				設計		
	CFRP厚さの設計値①に対する割合 (%)	GFRP厚さの設計値②に対する割合 (%)	全体厚さの設計値①に対する割合 (%)	CFRPの割合	CFRP厚さの設計値①に対する割合 (%)	GFRP厚さの設計値②に対する割合 (%)	全体厚さの設計値①に対する割合 (%)	CFRPの割合	CFRP厚さ (mm)	GFRP厚さ (mm)	全体厚さ (mm)
胴部 1	103.6	96.3	103.4	0.97	100.6	117.8	101.1	0.96	Base①	Base②	Base①

	容器断面による計測				FW時の非接触計測				設計
	CFRP厚さ (mm)	GFRP厚さ (mm)	全体厚さの設計値各②～⑤に対する割合 (%)	CFRPの割合	CFRP厚さ (mm)	GFRP厚さ (mm)	全体厚さの設計値各②～⑤に対する割合 (%)	CFRPの割合	全体厚さ (mm)
鏡部	2	データ非開示とさせていただきます	109.7	0.99	データ非開示とさせていただきます		109.7	0.99	Base②
	3		115.3	0.99			115.2	0.98	Base③
	4		133.3	0.99			135.0	0.99	Base④
	5		97.5	0.98			98.9	0.98	Base⑤

### 3. 研究開発成果⑦ ～累積損傷関係式およびKHKS 0225改正によるコスト低減イメージ～

〔現状〕 蓄圧器認可： 22,000回（フル充填）または30,000回（90-40MPa充填）

↓ **イニシャルコストUP**

〔普及期\*〕 蓄圧器認可： 100,000回（フル充填）

ステーションでの蓄圧器交換： 5回  
**ランニングコスト大**

\*100台/日×365日×15年=545,500台のFCVに充填

蓄圧器設計仕様		サイクル試験回数		トータル試験回数
疲労試験数	安全係数	Min.	Max.	(Max.回数×試験数)
n=2	4.0	400,000	800,000	<b>1,600,000</b>
～	～	～	～	～
n=5	2.6	260,000	520,000	<b>2,600,000</b>

累積損傷関係式の導入

**イニシャルコスト大**

蓄圧器認可： 25,000回（フル充填） **イニシャルコスト同等**

ステーションでの蓄圧器交換： 0回  
**(100%減)**

**ランニングコスト低減**

蓄圧器設計仕様		サイクル試験回数		トータル試験回数
疲労試験数	安全係数	Min.	Max.	(Max.回数×試験数)
n=2	4.0	100,000	200,000	<b>400,000</b>
～	～	～	～	～
n=5	2.6	65,000	130,000	<b>650,000</b>

**KHKS 0225改正**

**イニシャルコスト低減**

Design by Analysis  
⇒試験項目の削減  
(胴部漏洩設計)

n=1	2.0～?	30,000?	<b>30,000?</b>
-----	-------	---------	----------------

**大幅なイニシャルコスト低減**

### 3. 研究開発成果⑧ ～特許～

No.	出願者	出願番号	国内・外国 ・PCT	出願日	状態	名称
1	石油エネルギー 技術センター 東京大学 高压ガス保安協会 日本製鋼所	2020-074196	国内	2020年 4月17日	出願 継続中	蓄圧器の寿命 判定方法
2	石油エネルギー 技術センター 東京大学 高压ガス保安協会 日本製鋼所	2020-074235	国内	2020年 4月17日	出願 継続中	蓄圧器の寿命 判定方法を用 いた水素ステ ーションの 運転方法
3	石油エネルギー 技術センター 東京大学 高压ガス保安協会 日本製鋼所	PCT/JP2020/ 041411	PCT (全指定)	2020年 11月5日	出願 継続中	蓄圧器の寿命 判定方法
4	石油エネルギー 技術センター 東京大学 高压ガス保安協会 日本製鋼所	PCT/JP2020/ 041416	PCT (全指定)	2020年 11月5日	出願 継続中	蓄圧器の寿命 判定方法を用 いた水素ステ ーションの 運転方法
5	石油エネルギー 技術センター	2022-167148	国内	2022年 10月18日	出願 継続中	蓄圧器の寿命 判定方法、お よび、この蓄 圧器の寿命判 定方法を用い た水素ステ ーションの運転 方法

2018～2022年3月  
合計5件

### 3. 研究開発成果⑨ ～論文～

発表者	所属	タイトル	発表誌名	発表年月
小林 拡	石油エネルギー 技術センター	水素ステーションでの 低合金鋼の利用に向け て制定された技術文書	JPECレポート	2021年 10月
林 郁孝	石油エネルギー 技術センター	水素ステーションの規 制適正化に関する研究 開発	一般社団法人燃 料電池開発情報 センター「日本 における燃料電 池の開発2021」	2022年 1月
志賀優多、小林 英男、山田敏弘 、佐野尊、（横 浜国立大学 澁谷忠弘）	高圧ガス保安協会	アルミニウム合金6061- T6の最適疲労曲線の構 築と平均応力の補正方 法	一般社団法人 日本高圧力技術 協会(圧力技術)	2021年 5月

2018～2022年3月  
合計3件

### 3. 研究開発成果⑨ ～研究発表・講演～

年月	発表先	題目	発表者	年月	発表先	題目	発表者
2020年 2月17日	FCCJ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	水素ステーション用鋼材・複合容器の技術開発動向	小林	2018年 7月18日	ASME PVP 2018	STUDY ON FATIGUE CHARACTERISTICS OF CFRP	KHK 竹花、山田、佐野、木村、宮下、志賀 東大 吉川 JPEC 小林
2020～2022年 5月	2020～2022年度 JPEC フォーラム	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発（タイプ3）	東條	2018年 11月29日	平成30年度 日本高圧力技術協会 秋季講演会	アルミニウム合金A6061-T6の最適疲労曲線	KHK 志賀、山田、佐野、小林
				2018年 7月17日	ASME PVP 2018	Numerical Fatigue Life Evaluation with Experimental Results for Type III Accumulators	東大 吉川、キム JPEC 小林、藤澤 KHK 佐野
2020年 7月20日	ASME PVP 2020	INTRODUCTION OF THE TECHNICAL DOCUMENT IN JAPAN FOR SAFETY USE OF TYPE2 PRESSURE VESSELS IN HYDROGEN REFUELING STATIONS	JPEC 佐藤、林、福本 KHK 前田 東大 吉川 JSW 荒島				
2021～2022年 3月	FCCJ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	林				

2018～2022年3月  
合計18件

## 4. 今後の見通しについて

### 〔実用化のイメージ〕

- ・ 2023年3月にKHKS 0225改正に資する提案を行った。  
2023年度中に改正されたKHKS 0225が制定される予定である。

### 〔実用化・事業化に対する今後の課題と対応方針〕

- ・ 認可取得（試験項目の削減、検査の効率化）に関しては  
すぐに効果が得られると考えている。
- ・ 累積損傷関係式の水素ステーションへの導入に関しては  
2022年10月にHySUTにて実証試験を行い、疲労評価が可能であることを確認した。また、その内容をKHKS 0225附属書(案)に反映した。  
FCCJ（燃料電池実用化推進協議会）殿と連携しながら、導入を進める計画である。

## ライナー材から切り出した試験片による疲労評価

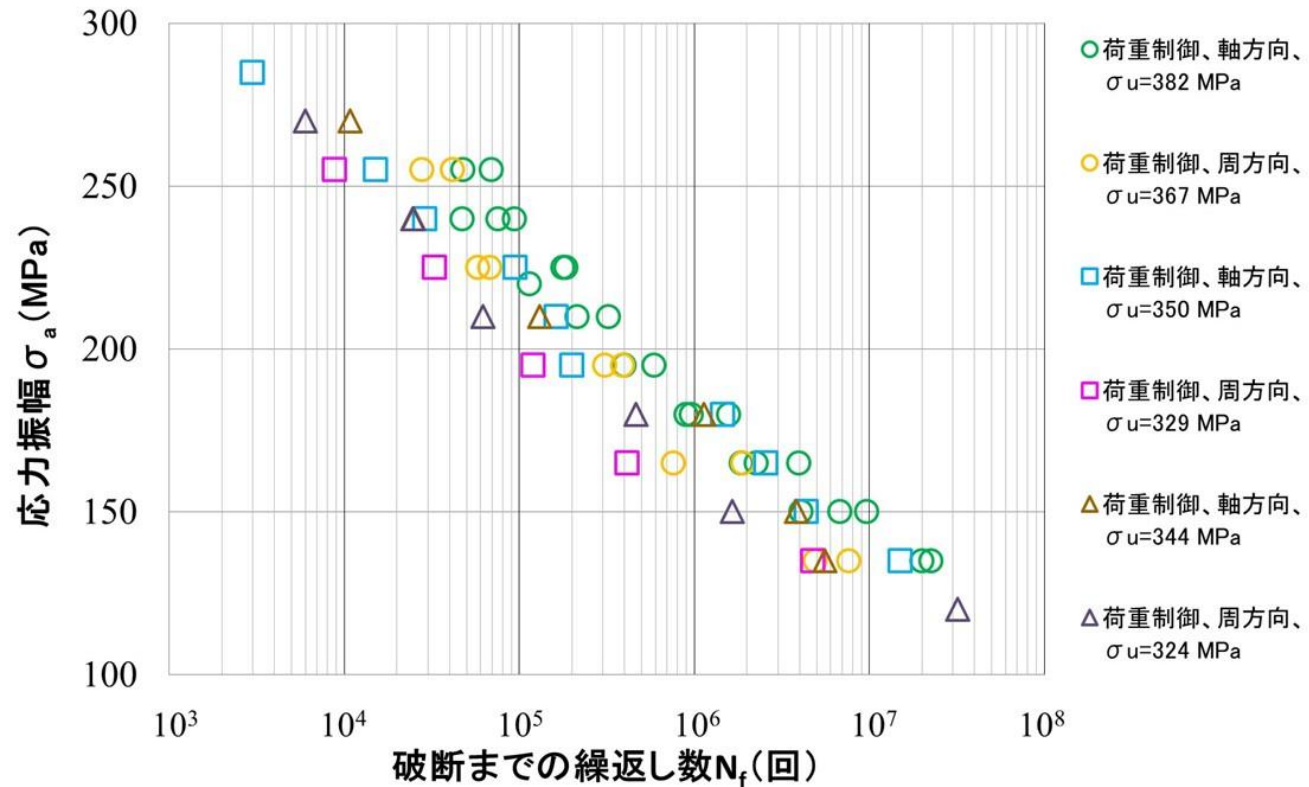


図 Al合金疲労試験片のS-N線図 (JIS H 4080、 $R = -1$ 、荷重制御)

■ S-N線図より、「疲労強度  $\propto$  引張強さ」の傾向を確認

定式化

$$\sigma_a = 2.58\sigma_u N_f^{-0.12}$$