

2023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

2023年5月10日

一般財団法人石油エネルギー技術センター
水素エネルギー部 水素利用推進室

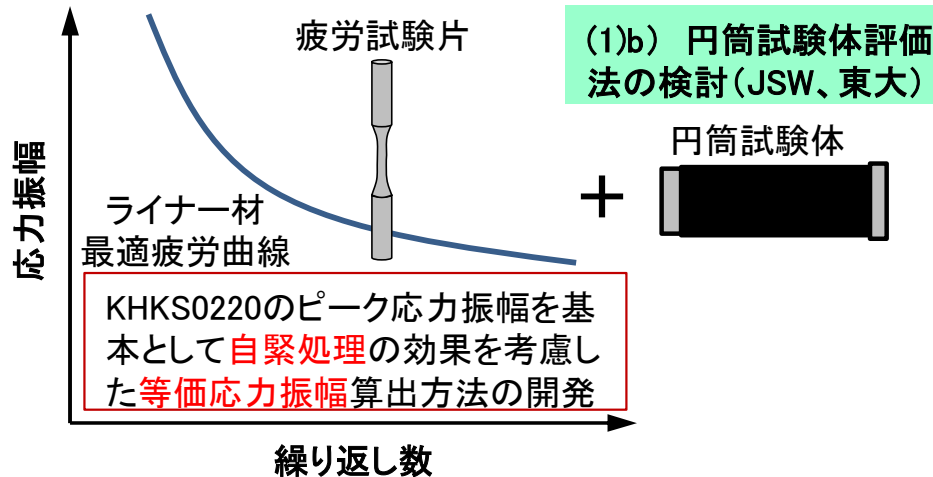
**超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業／
水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／
複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に
関する技術開発**

一般財団法人石油エネルギー技術センター（J P E C）
高压ガス保安協会（K H K）
国立大学法人東京大学
株式会社日本製鋼所（J S W）

「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」の概要

1. 応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法の確立に向けた技術開発

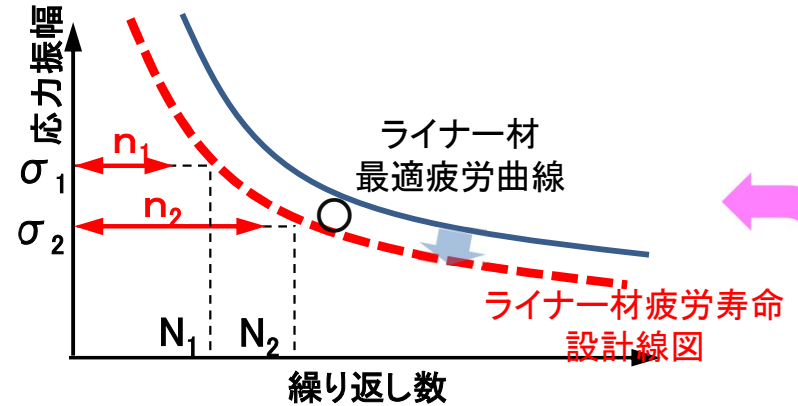
(1)a ライナー材最適疲労曲線の作成(KHK)



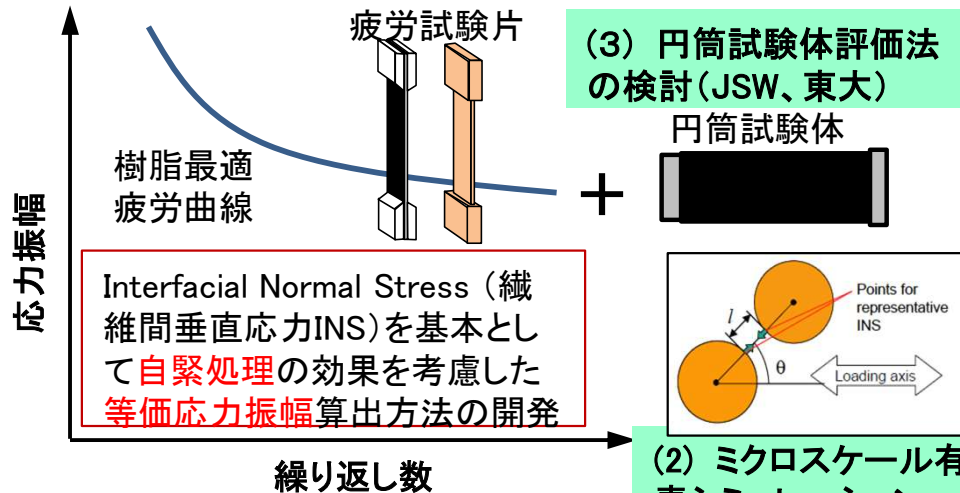
(1)b 円筒試験体評価法の検討(JSW、東大)



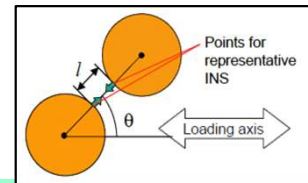
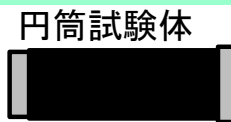
(1)c, (2)ライナー材・CFRP材樹脂疲労寿命設計線図作成(東大)



(2)a CFRP材の疲労強度評価のための樹脂最適疲労曲線の作成(KHK、東大)



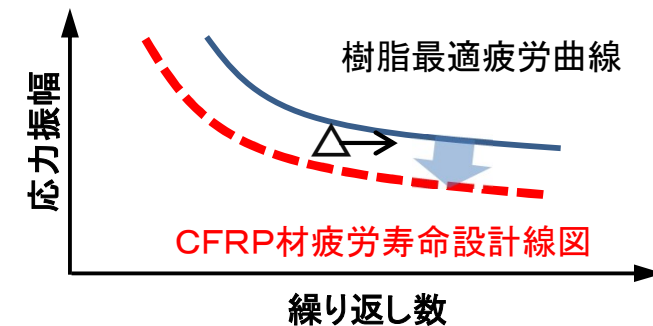
(3) 円筒試験体評価法の検討(JSW、東大)



(2) ミクロスケール有限要素シミュレーション

(1)d 実容器により疲労寿命設計線図の妥当性を検証(JPEC)
累積損傷関係式の構築による寿命延長

実容器試験結果から疲労寿命設計線図に基づき漏洩の予測が可能であることを実証
 → 累積損傷則: $n_1/N_1 + n_2/N_2 + \dots = 1$ を適用可能に



報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. 設計フロー図
3. 5年間の成果の全体イメージ
4. 有限要素解析
5. 最適疲労曲線
6. 試験の削減案
7. 検査内容の効率化
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. まとめと今後

水素ステーション用複合圧力容器蓄圧器を取り巻く環境

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。



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。

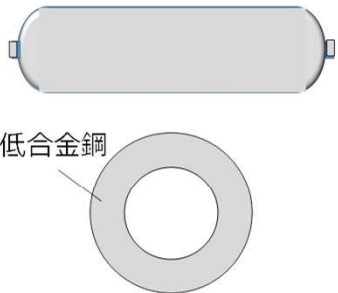
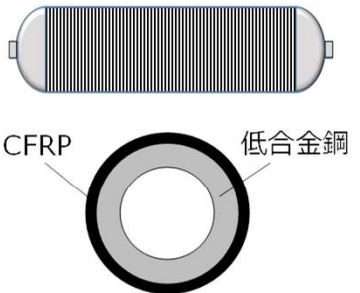
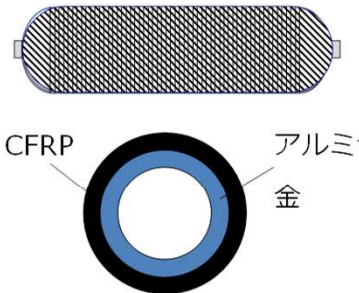
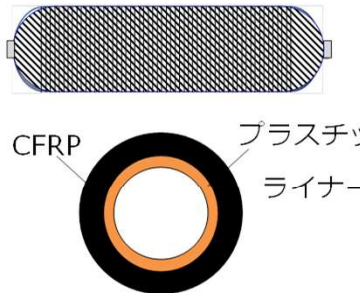


④**本NEDO事業**：ライナー材を用いた試験、CFRP試験、複合圧力容器試験を実施し、**複合圧力容器試験を最小限にする認可取得の道筋を確立する。**



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**
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。

受託時の状況と今後の展開

種類	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3	タイプ 4
構造	<p>低合金鋼</p>  <p>低合金鋼</p>	<p>低合金鋼/CFRP(フープラップ)</p>  <p>CFRP 低合金鋼</p>	<p>アルミライナー/CFRP(フルラップ)</p>  <p>CFRP アルミ合 金</p>	<p>プラスチックライナー/CFRP(フルラップ)</p>  <p>CFRP プラスチック ライナー</p>
現状	<ul style="list-style-type: none"> 低合金鋼技術文書 JPEC-TD 0003が完成 Design by Analysisが 確立している（実容器試験が 不要） 	<ul style="list-style-type: none"> 国内に技術基準が無い ASMEには技術基準がある 前NEDO事業にて、 タイプ 2 技術文書の構成案 を作成した ASME規格では設計確認 試験（実容器試験）が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 技術基準整備が進められ ている JPECガイドライン →KHKTD 5202 →KHKS 0225 設計確認試験（実容器試験） が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 技術基準整備が進められ ている JPECガイドライン →KHKTD 5202 →KHKS 0225 設計確認試験（実容器試験） が必要
今後の 展開	<ul style="list-style-type: none"> JPEC-TD 0003の KHKS 0220附属書を目指す 圧縮機への適用拡大へ 	<p>本NEDO事業</p> <ul style="list-style-type: none"> Design by Rule及びDesign by Analysisの確立 タイプ 2 技術文書を策定 KHKS 0220附属書を目指す 	<p>本NEDO事業</p> <ul style="list-style-type: none"> Design by Rule及びDesign by Analysisの確立 累積損傷則適用による 長寿命化 KHKS 0225改正を目指す 	<ul style="list-style-type: none"> Design by Analysisの確立へ 向けた検討

技術基準なし → Design by Rule & Analysis により技術文書を整備 (2021年度完)

Design by Test → Design by Rule & Analysis及び累積損傷則適用によりコストを低減

〔方向性〕

テーマ発足時の課題と方向性

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

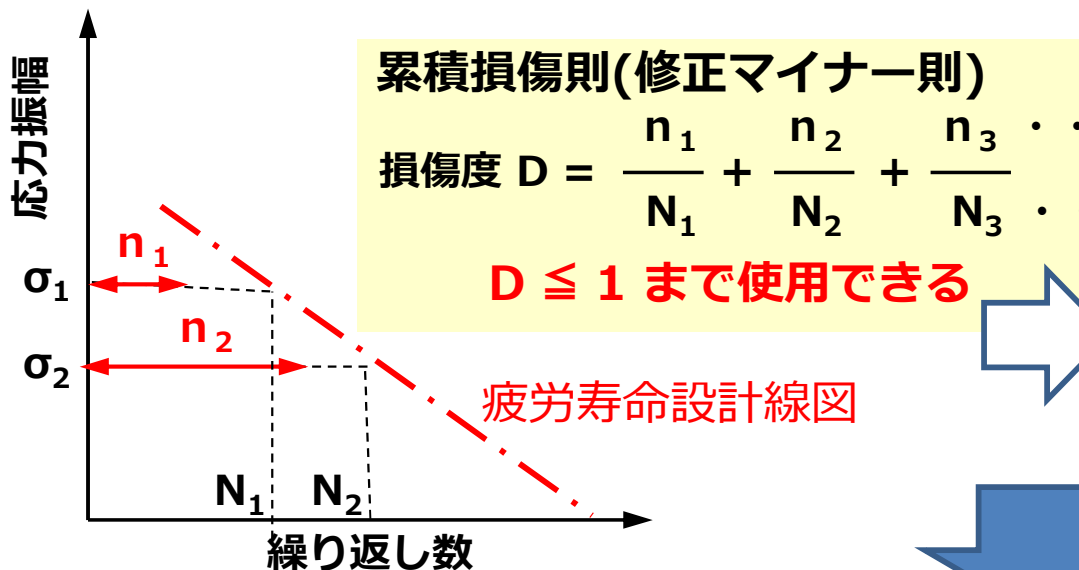
複合圧力容器を用いた安全性を確認する試験が必要
⇒費用と時間がかかる

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

容器寿命最大限の使用

〔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

最適疲労曲線の作成

KHK

- ・ライナー試験片（圧縮応力域）、CFRP試験片評価法の検討

円筒試験体の評価

JSW・東大

- ・金属円筒にCFRPを巻いた試験体評価法の検討

全体統括
JPEC

疲労寿命設計線図の作成

東京大学

- ・自緊効果および製造誤差までを考慮したライナーおよびCFRPに関する疲労設計手法の確立

容器試験による検証・基準化

JPEC

- ・応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法の実証
→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

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. 設計フロー図
3. 5年間の成果の全体イメージ
4. 有限要素解析
5. 最適疲労曲線
6. 試験の削減案
7. 検査内容の効率化
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. まとめと今後

KHKS 0225の設計フローについて

～胴部漏洩設計～

KHKS0220からの変更点

- ・最適疲労曲線

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

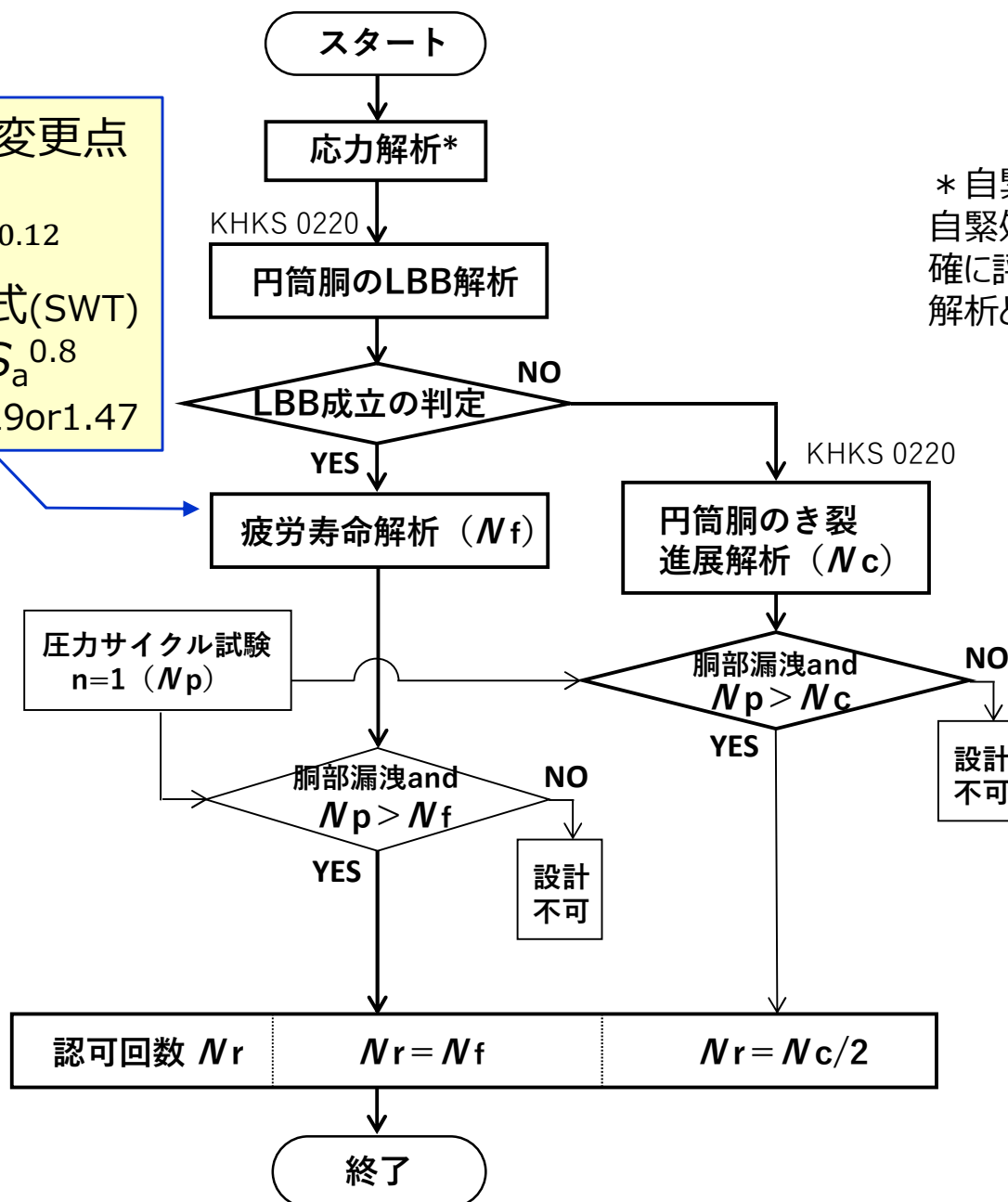
- ・平均応力補正の式(SWT)

$$S_{eq} = S_{max}^{0.2} S_a^{0.8}$$

- ・設計係数 $\alpha_1 = 1.29$ or 1.47

* 自緊処理効果:

自緊処理により発生する圧縮残留応力が正確に評価できている場合は、その効果を応力解析と疲労寿命解析に取り入れることができる。



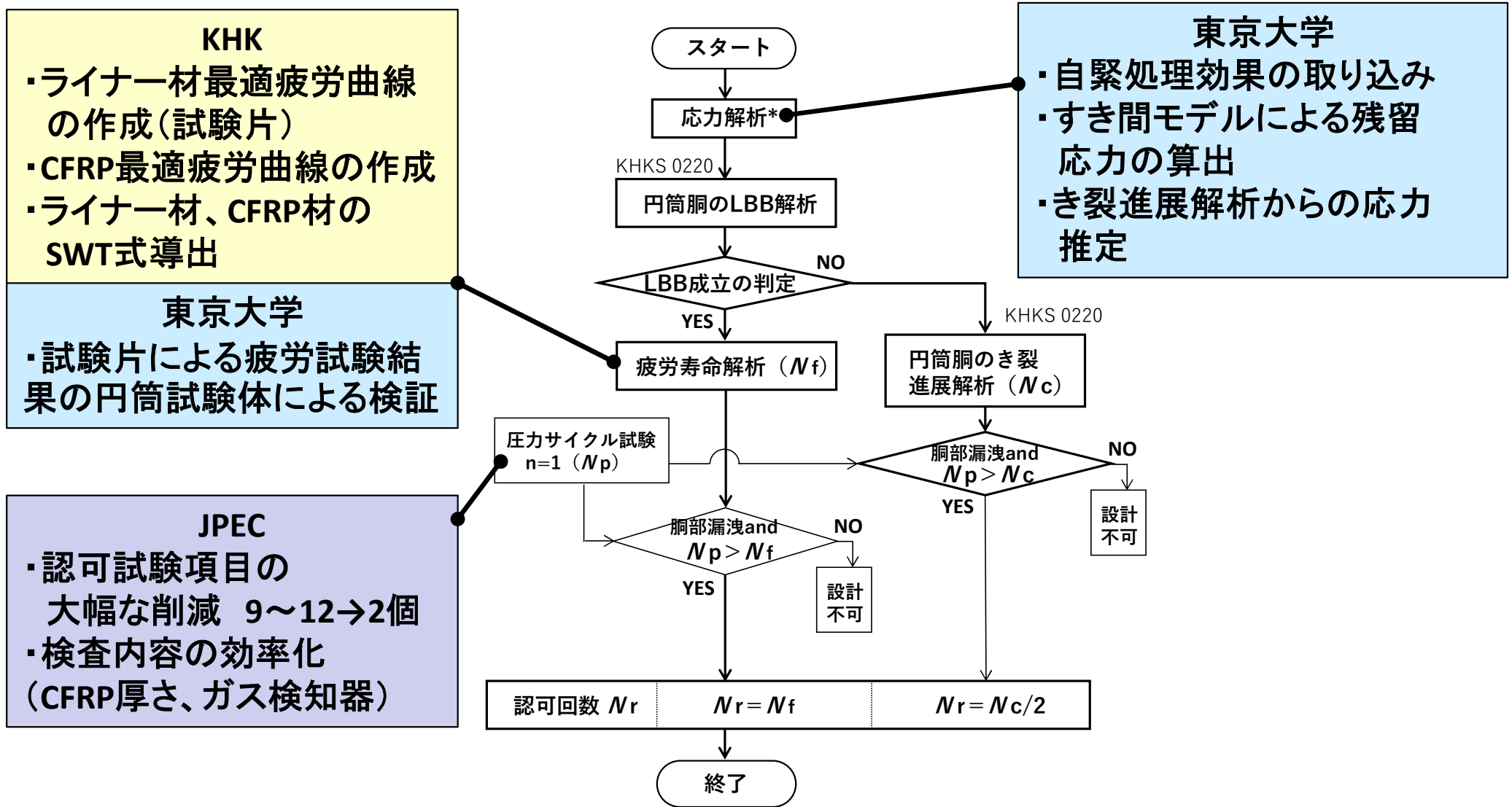
残留応力評価結果の検証方法例

- ①ライナーの破面観察 (ストライエーション)
- ②ライナー内面の残留応力計測 (ひずみ)
- ③CFRP表面のひずみ計測

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. 設計フロー図
3. 5年間の成果の全体イメージ
4. 有限要素解析
5. 最適疲労曲線
6. 試験の削減案
7. 検査内容の効率化
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. まとめと今後

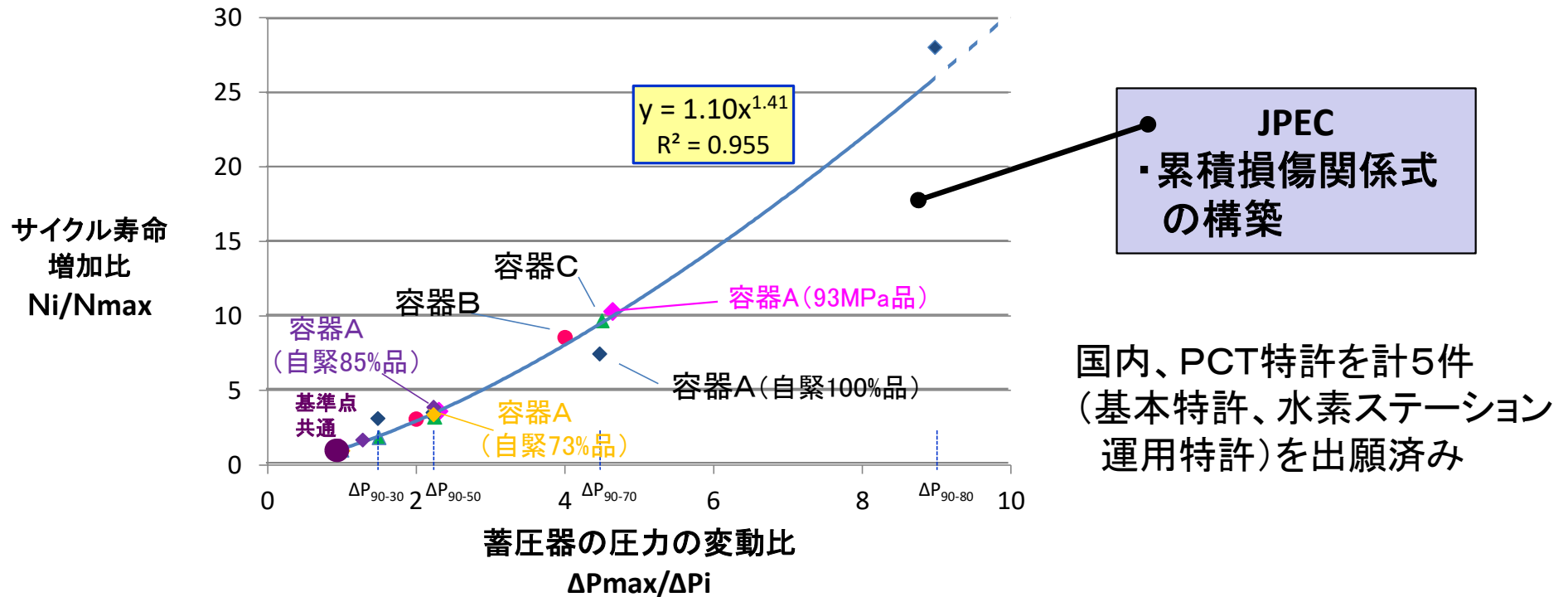
複合容器事業 5 年間の成果の全体イメージ① ～イニシャルコスト低減～



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の確立

複合容器事業 5年間の成果の全体イメージ② ～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

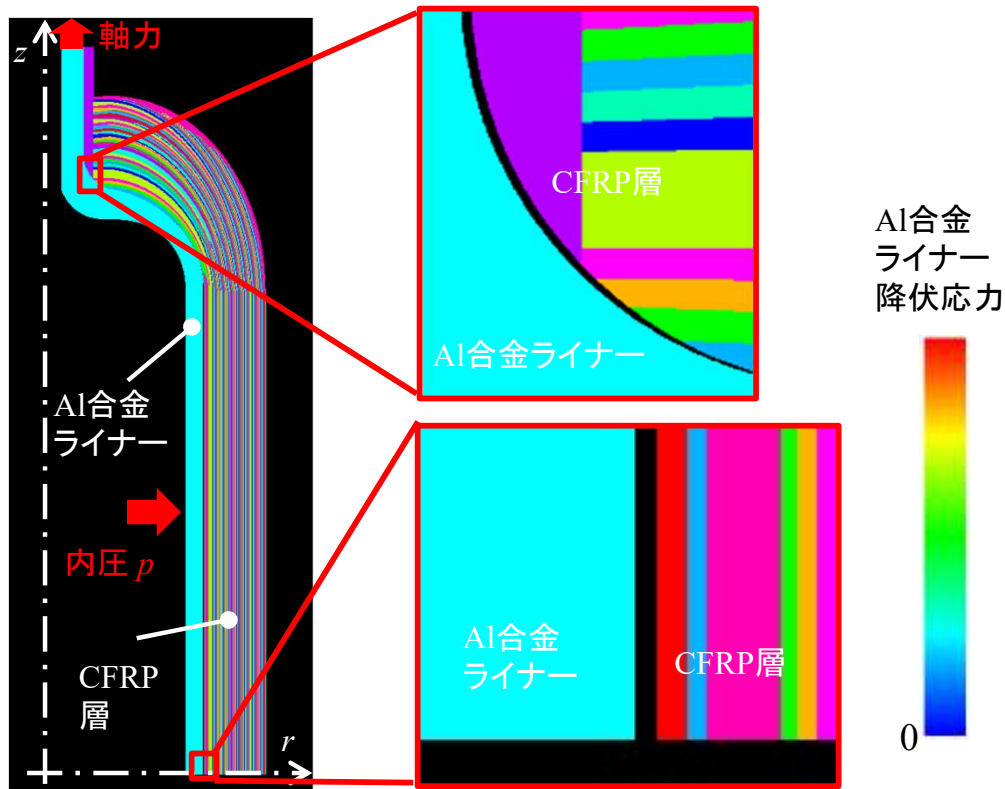
成果②:FCV充填台数増を目指したタイプ3複合圧力容器の疲労評価手法の確立

報告内容

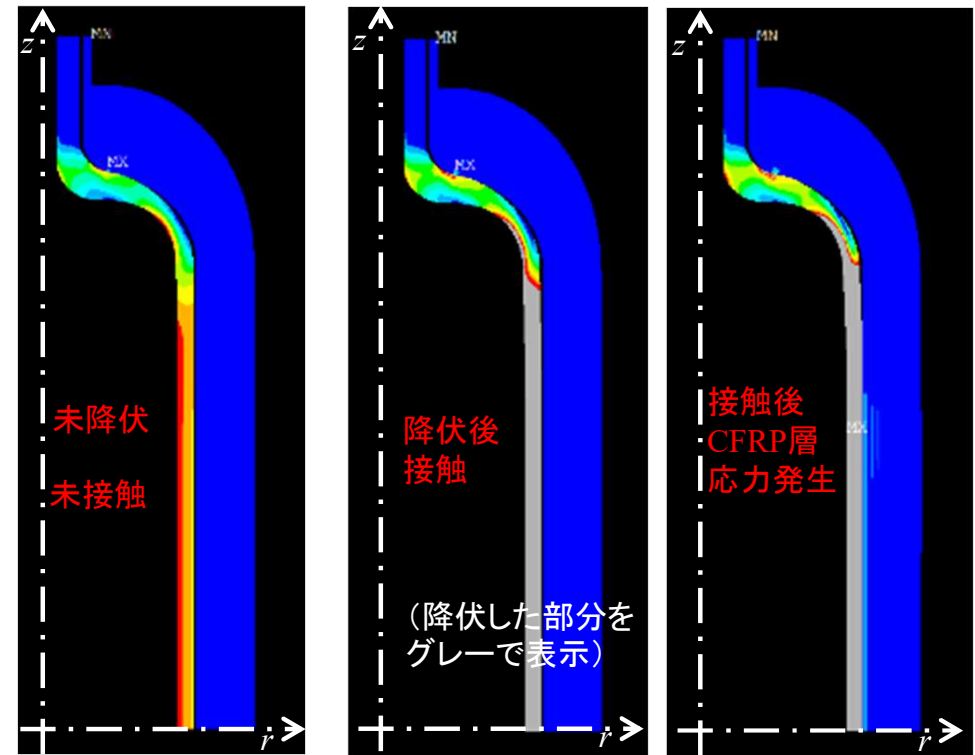
1. 研究体制、役割分担および課題
2. 設計フロー図
3. 5年間の成果の全体イメージ
4. 有限要素解析
5. 最適疲労曲線
6. 試験の削減案
7. 検査内容の効率化
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. まとめと今後

すき間をモデル化した有限要素解析による残留応力の算出

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



〔解析結果〕



$p = 39 \text{ MPa}$

$p = 49 \text{ MPa}$

$p = 55 \text{ MPa}$

図. 自緊圧力負荷中のMISES相当応力変化(隙間=5mmの場合)

- (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

- (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

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. 設計フロー図
3. 5年間の成果の全体イメージ
4. 有限要素解析
5. 最適疲労曲線
6. 試験の削減案
7. 検査内容の効率化
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. まとめと今後

ライナー材最適疲労曲線の作成

ライナー材から切り出した試験片による疲労評価

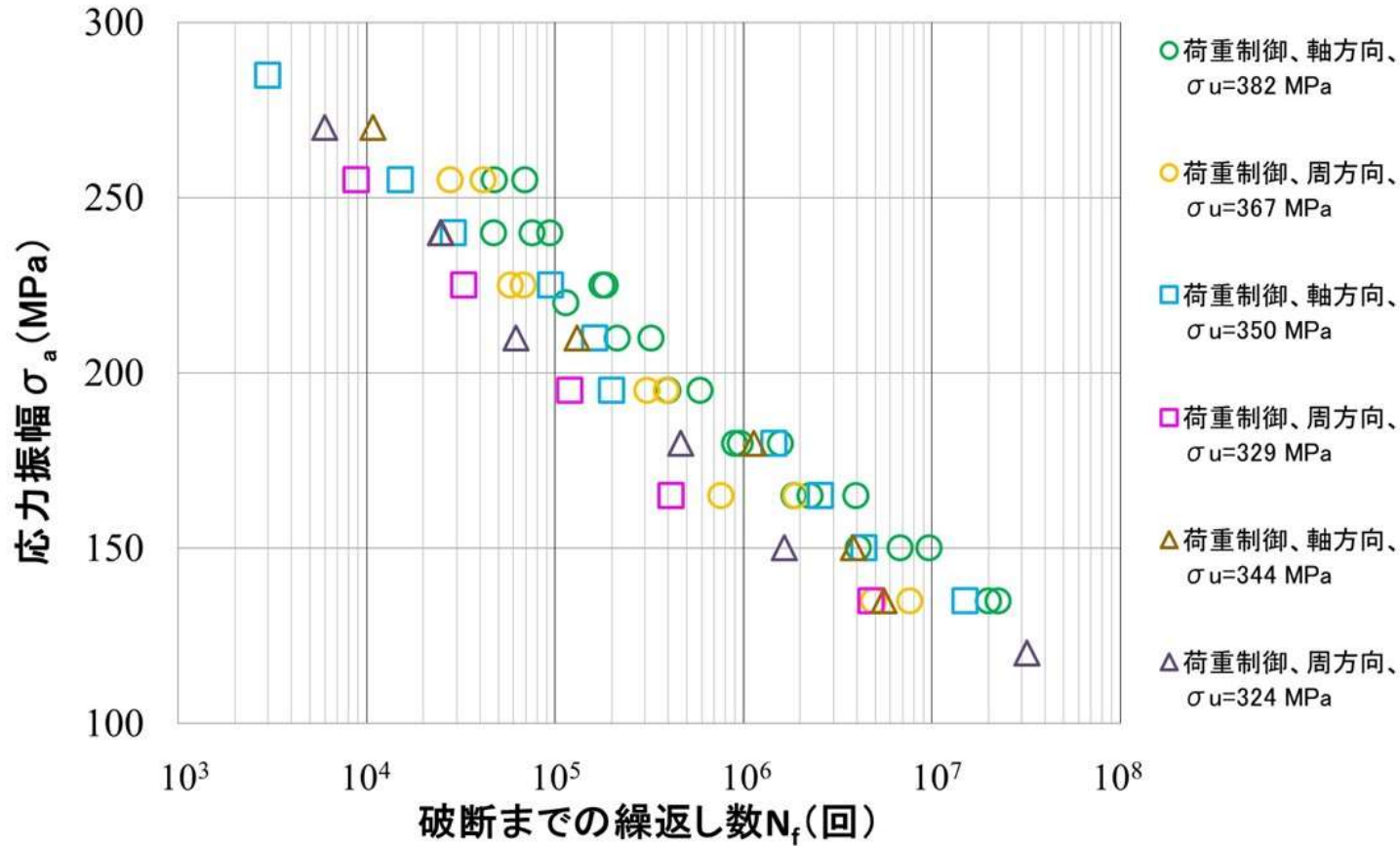


図 Al合金疲労試験片のS-N線図 (JIS H 4080、 $R=-1$ 、荷重制御)

■ S-N線図より、「疲労強度 \propto 引張強さ」の傾向を確認

定式化

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

最適疲労曲線の比較

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

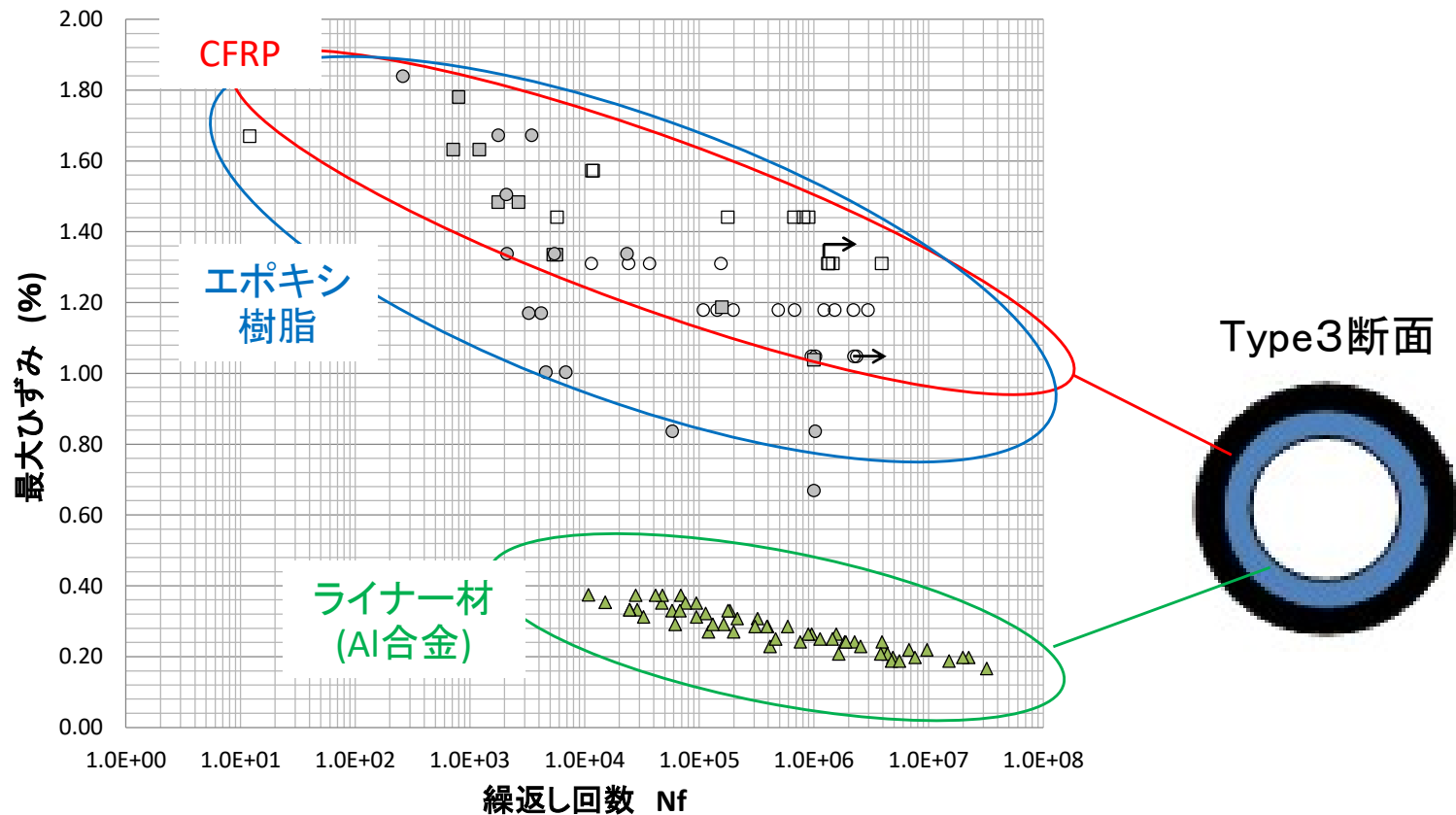


図 最大公称ひずみで整理したS-N線図
(CFRP・樹脂: $R=0.1$ 、荷重制御、Al合金ライナー: $R=-1$ 、荷重制御)

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で決まる

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. 設計フロー図
3. 5年間の成果の全体イメージ
4. 有限要素解析
5. 最適疲労曲線
6. 試験の削減案
7. 検査内容の効率化
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. まとめと今後

試験の削減案

【改正案】

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

実容器3個⇒ 1個(済)

5.2.3.1 圧力サイクル試験(胴部漏洩設計)

容器2~5個⇒ 1個(済)

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

(削除)

・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 構造の検査の方法 a)の3)

現行規定『CFRP層及び保護層の厚さを実容器を切断して確認する』のほか、FW中の測定で確認することも可とする。

(済)

試験片を用いる試験

5.2.2.7 層間せん断試験

(削除)

公式及び解析による設計

漏洩部位を胴部として設計する場合、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

・本事業の検討結果を反映

5.2.3.6 亀裂進展解析

・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

・漏洩部位を胴部として設計する場合: 9~12個 ⇒ 2個

※項目番号は、現KHS0225の番号

報告内容

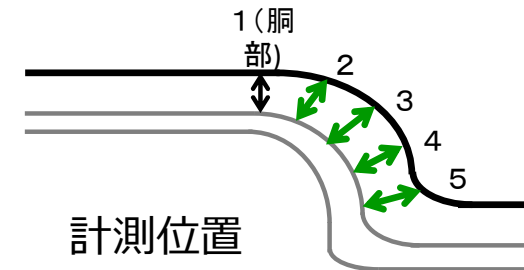
1. 研究体制、役割分担および課題
2. 設計フロー図
3. 5年間の成果の全体イメージ
4. 有限要素解析
5. 最適疲労曲線
6. 試験の削減案
7. 検査内容の効率化
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. まとめと今後

検査内容の効率化① ～樹脂含浸炭素繊維層厚さ計測手法の検討結果～

- ✓ 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改正案に採用



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

検査内容の効率化② ～ガス検知器について～

※改正TFにおいて、気密試験のガス検知器使用が承認された。



- ・携帯ガス検知器による漏洩検知濃度に関して、法的な規定は無い。
- ・限界検知量・検知濃度に関しては定量的な規定をせず、“発泡検査と同等以上”の検知ができることを考える。
- ・発泡検査及び目視検査は、検知器の精度の比較対象とするため記載を残す。



【文章案】

複合圧力容器（試験体を含む。）の気密試験は、次のa)～c)による。

- a)窒素又はヘリウム等の安全な常温の気体を使用して設計圧力以上の圧力で行う。
- b)気密試験は、気密試験装置を用いて試験圧力まで昇圧して複合圧力容器等の内部が試験圧力になったことを確認した後、検査条件を考慮して、**目視、発泡検査及び発泡検査と同等以上の検知ができるガス検知器等**のうち適切な方法により検査を行う。
- c)気密試験は、漏れ等の異状が生じない場合に合格とする。

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. 設計フロー図
3. 5年間の成果の全体イメージ
4. 有限要素解析
5. 最適疲労曲線
6. 試験の削減案
7. 検査内容の効率化
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. まとめと今後

累積損傷関係式およびKHKS 0225大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		サイクル回数		総サイクル回数
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	1,600,000
~	~	~	~	~
n=5	2.6	260,000	520,000	2,600,000

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		サイクル回数		総サイクル回数
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	400,000
~	~	~	~	~
n=5	2.6	65,000	130,000	650,000

KHKS 0225大改正

Design by Analysis
⇒試験項目の削減
(胴部漏洩設計)

イニシャルコスト低減

n=1	2.0~?	30,000?	30,000?
-----	-------	---------	----------------

大幅なイニシャルコスト低減

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. 設計フロー図
3. 5年間の成果の全体イメージ
4. 有限要素解析
5. 最適疲労曲線
6. 試験の削減案
7. 検査内容の効率化
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. まとめと今後

まとめと今後

1. **イニシャルコスト低減を図るため、タイプ^o3 複合圧力容器の設計手法を確立し、KHKS 0225の改正案を完成した**
 2. **ランニングコスト低減を図るため、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^o3 複合圧力容器の疲労評価手法を確立した**
 3. **タイプ^o2複合圧力容器は炭素繊維層が金属層の周方向応力を分担している鋼製圧力容器であり、実容器試験を課さない設計が可能であるとの結論を得、タイプ^o2 技術文書を作成した（JPECのHPにて公開）**
- （今後） KHKS 0225の改正を2023年度中に実現すべく
必要な情報を提供する**

ご清聴ありがとうございました

謝辞

以上の発表に関する技術開発成果は、
国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO*）からの委託事業
「超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業」（プロジェクトコード：P18011）
の結果得られたものです。

* New Energy and Industrial Technology Development Organization