

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

2022年5月11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

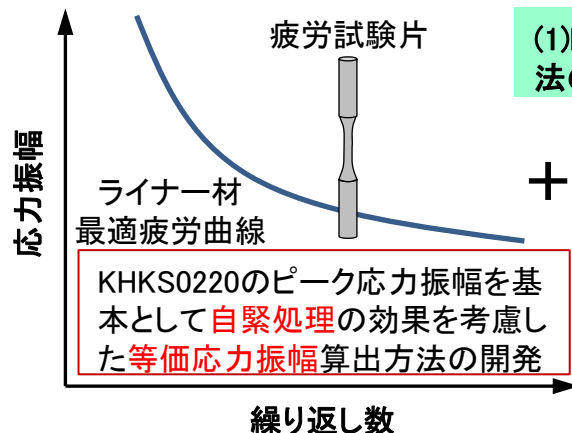
**超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業／
水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／
複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に
関する技術開発**

一般財団法人石油エネルギー技術センター（J P E C）
高圧ガス保安協会（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

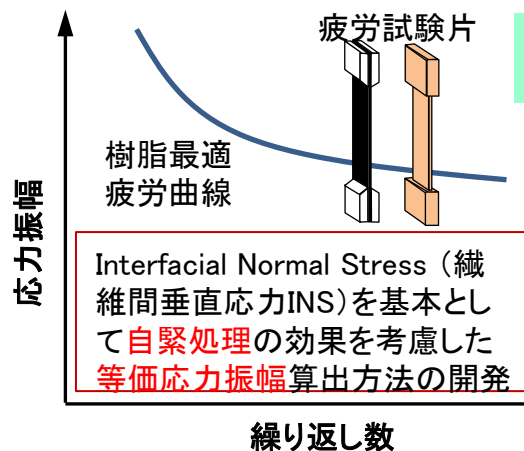
(1)a ライナー材最適疲労曲線の作成 (KHK)



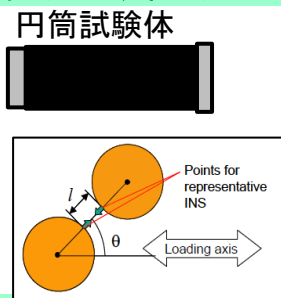
(1)b 円筒試験体評価法の検討 (JSW、東大)



(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)

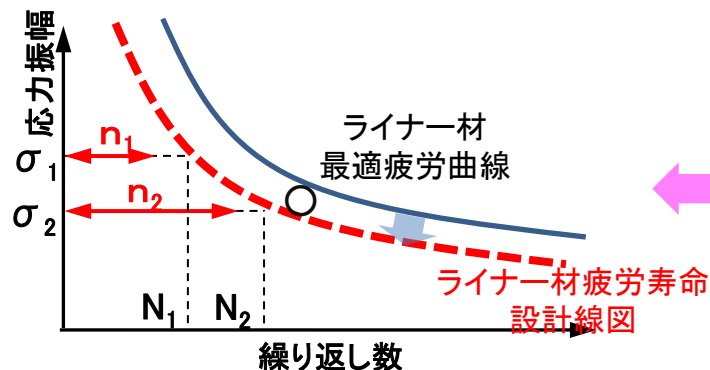


(3) 円筒試験体評価法の検討 (JSW、東大)



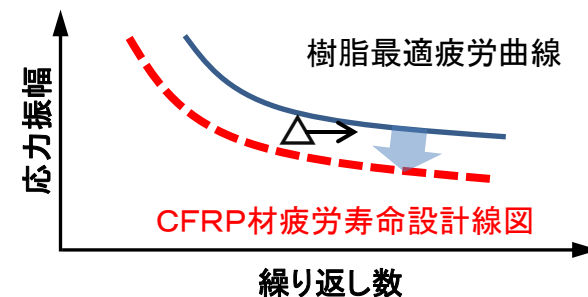
(2) ミクロスケール有限要素シミュレーション

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



(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



2. 技術基準の整備 (JPEC) KHKS 0225大改正を目指す

+ タイプ2技術文書制定

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. ライナー材最適疲労曲線の作成
3. CFRP材 S-N線図の平均応力補正
4. 最適疲労曲線の比較
5. 複合圧力容器の累積損傷関係式
6. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
7. KHKS 0225の大改正
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. 2021年度の成果

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。**

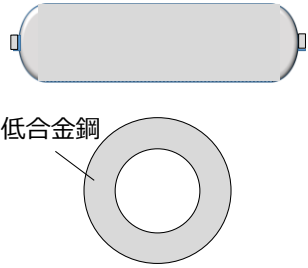
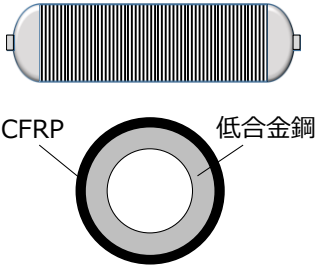
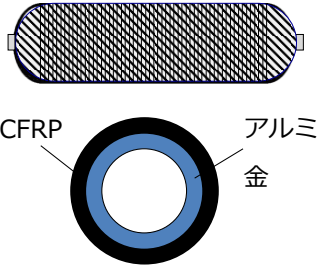
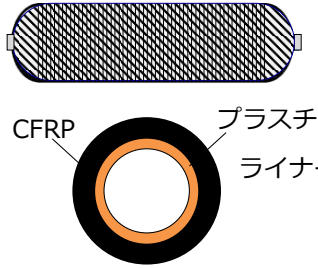


- ⑤本NEDO事業で複合圧力容器の技術基準を整備することで、
i) 省令改正（特定則）により大臣特認を不要とし、事前評価での認可を得られる様にしたい。

⇒**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	低合金鋼  低合金鋼	低合金鋼/CFRP(フープラップ)  CFRP 低合金鋼	アルミライナー/CFRP(フルラップ)  CFRP アルミ合 金	プラスチックライナー/CFRP(フルラップ)  CFRP プラスチック ライナー
現状	低合金鋼技術文書 JPEC-TD 0003が完成	- 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	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	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
	Design by Analysisが確立している（実容器試験が不要）	ASME規格では設計確認試験（実容器試験）が必要	設計確認試験（実容器試験）が必要	設計確認試験（実容器試験）が必要
今後の展開	- JPEC-TD 0003の KHKS 0220附属書を目指す - 圧縮機への適用拡大へ	本NEDO事業 - 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	本NEDO事業 - 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	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年度制定)

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

テーマ発足時の課題と方向性

〔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

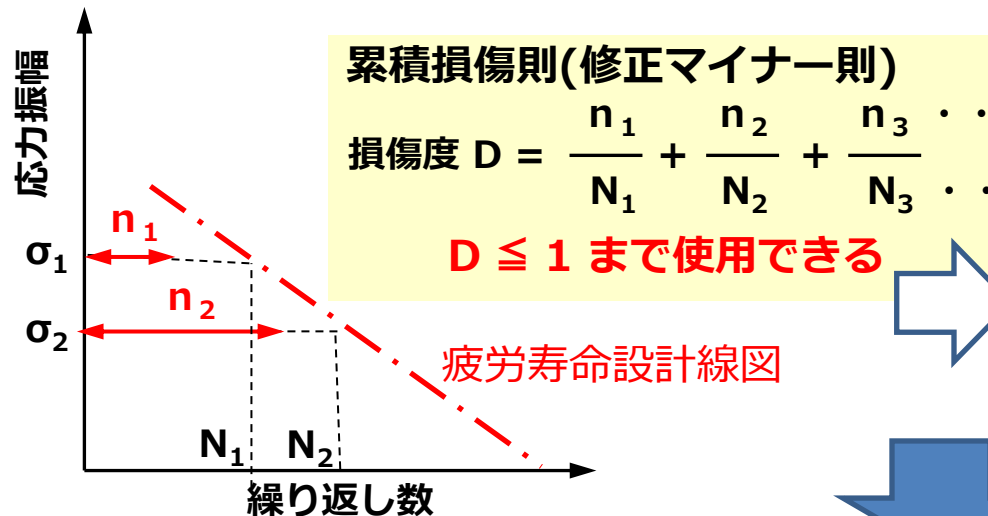
複合圧力容器を用いた安全性を
確認する試験が必要
⇒費用と時間がかかる

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

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

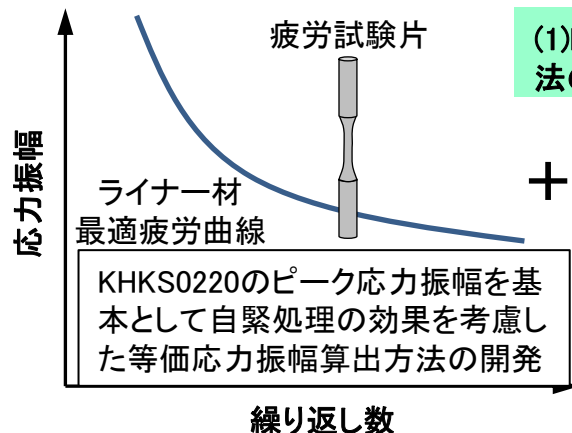
JPEC

- ・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

「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

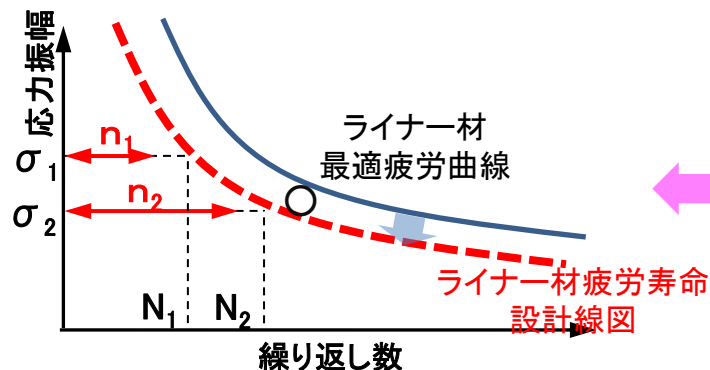
(1)a ライナー材最適疲労曲線の作成 (KHK)



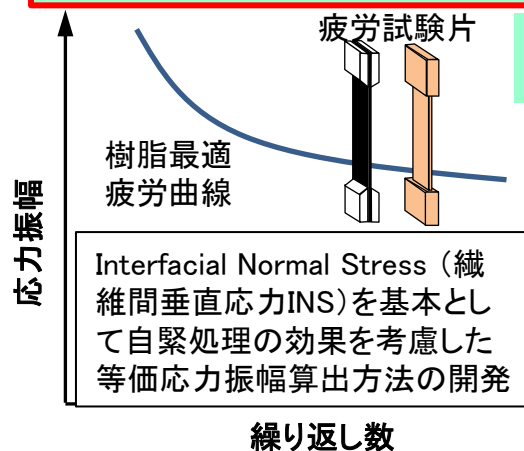
(1)b 円筒試験体評価法の検討 (JSW、東大)



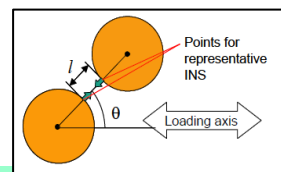
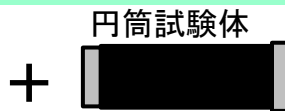
(1)c, (2) ライナー材・CFRP材樹脂疲労寿命設計線図作成 (東大)



(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)



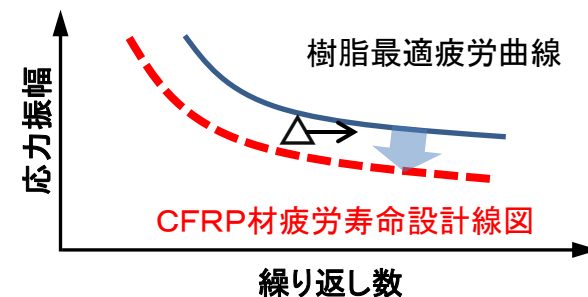
(2) ミクロスケール有限要素シミュレーション

(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



2. 技術基準の整備(JPEC) KHKS 0225大改正を目指す

＋ タイプ2技術文書制定

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. ライナー材最適疲労曲線の作成
3. CFRP材 S-N線図の平均応力補正
4. 最適疲労曲線の比較
5. 複合圧力容器の累積損傷関係式
6. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
7. KHKS 0225の大改正
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. 2021年度の成果

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

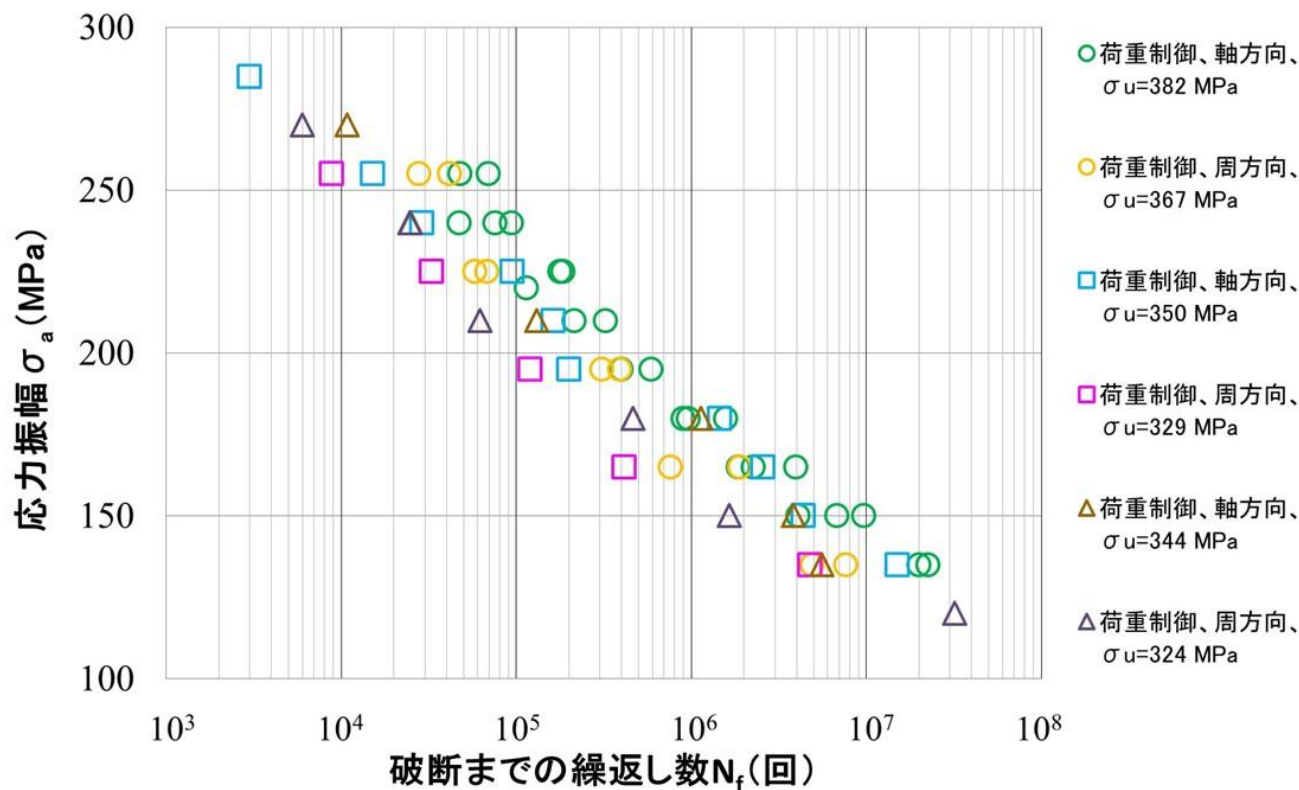


図 Al合金疲労試験片のS-N線図（JIS H 4080、 $R=-1$ 、荷重制御）

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

定式化

$$\sigma_a = 2.0 \sigma_u N_f^{-0.10}$$

報告内容

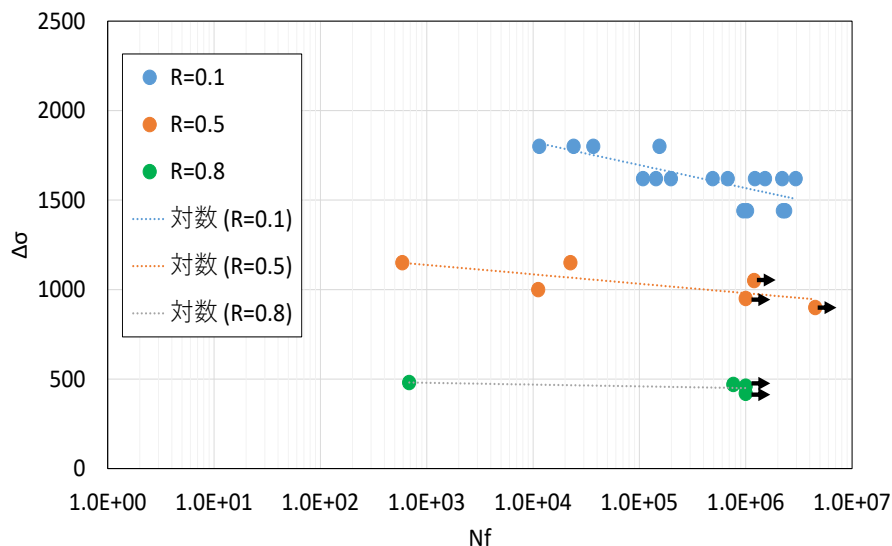
1. 研究体制、役割分担および課題
2. ライナー材最適疲労曲線の作成
3. CFRP材 S-N線図の平均応力補正
4. 最適疲労曲線の比較
5. 複合圧力容器の累積損傷関係式
6. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
7. KHKS 0225の大改正
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. 2021年度の成果

CFRP材 S-N線図の平均応力補正

CFRP材の疲労評試験結果（平均応力補正前後）

応力比 $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$
 $= 0.1, 0.5, 0.8$

補正前



補正後(walker式 $\gamma=0.1$ にて整理)

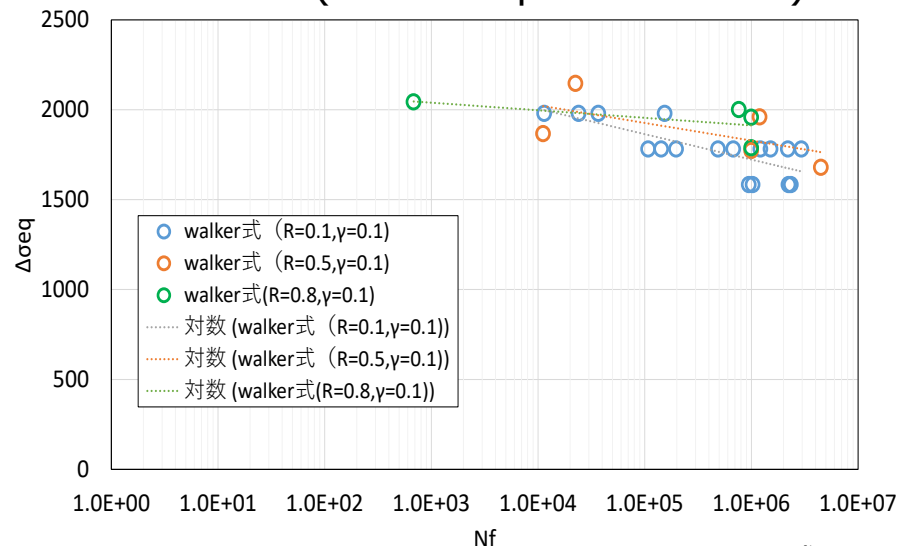


図 FW CFRP材のS-N線図

walker式

$$\sigma_{aeq} = \sigma_{\max}^{1-\gamma} \sigma_a^{\gamma}$$

walker式 $\gamma=0.1$ において試験時の応力比の影響が大幅に減少
⇒walker式により、CFRPの疲労予測が可能

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. ライナー材最適疲労曲線の作成
3. CFRP材 S-N線図の平均応力補正
4. 最適疲労曲線の比較
5. 複合圧力容器の累積損傷関係式
6. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
7. KHKS 0225の大改正
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. 2020年度の成果

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

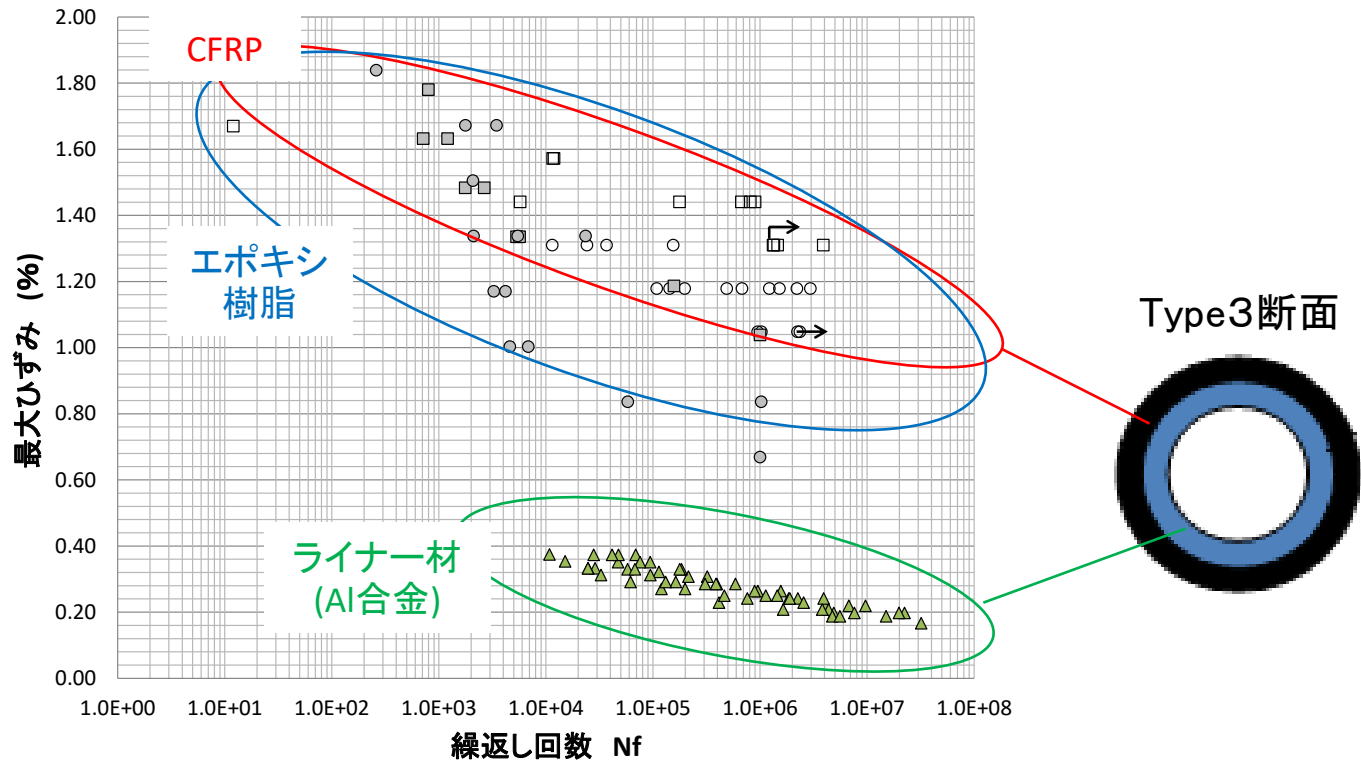


図 最大公称ひずみで整理したS-N線図
(CFRP・樹脂: $R=0.1$ 、荷重制御、Al合金ライナー: $R=-1$ 、荷重制御)

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



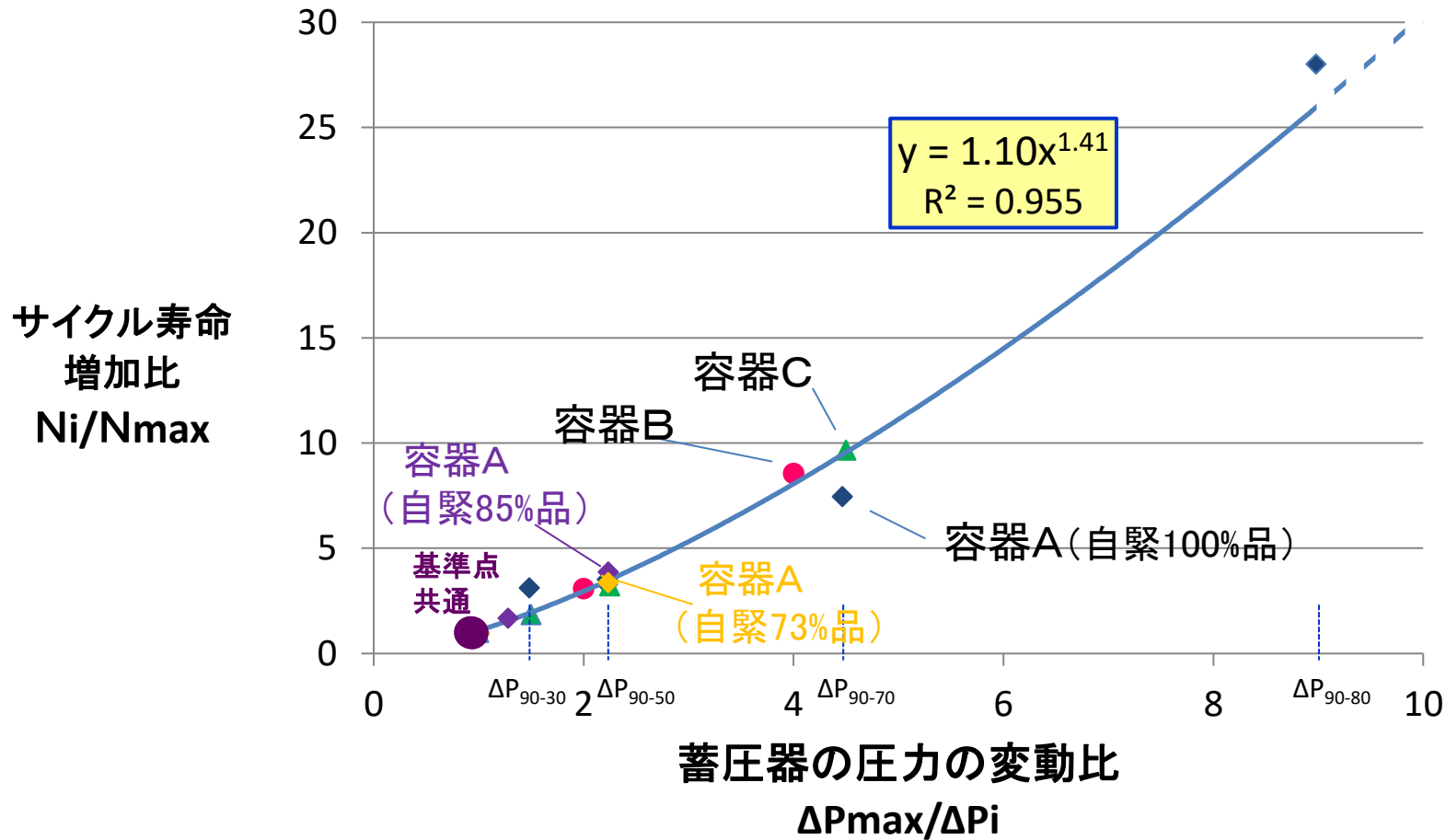
疲労寿命：
ライナー材の疲労強度で決まる

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. ライナー材最適疲労曲線の作成
3. CFRP材 S-N線図の平均応力補正
4. 最適疲労曲線の比較
5. 複合圧力容器の累積損傷関係式
6. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
7. KHKS 0225の大改正
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. 2021年度の成果

累積損傷関係式

蓄圧器の圧力の変動比とサイクル寿命増加比の関係



$\Delta P_{max}/\Delta P_i$ (無次元化) と N_i/N_{max} (無次元化) の相関は高い
⇒ 累積損傷則のサイクルカウント手法の確立に適用可能

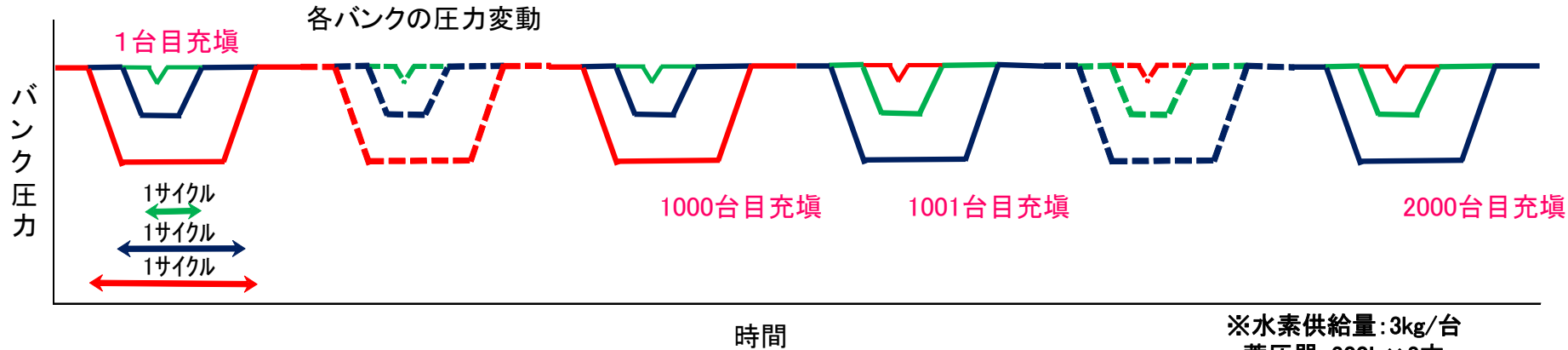
国内、PCT特許を各2件 (基本特許、水素ステーション運用特許) を出願済み

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. ライナー材最適疲労曲線の作成
3. CFRP材 S-N線図の平均応力補正
4. 最適疲労曲線の比較
5. 複合圧力容器の累積損傷関係式
6. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
7. KHKS 0225の大改正
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. 2021年度の成果

累積損傷関係式適用時のFCV充填台数

高圧、中圧、低圧バンクを、1,000台（一定台数）充填毎にローテーションするケース



※水素供給量: 3kg/台
蓄圧器: 300L × 3本
(実データ: HySUT殿提供)

- 〔前提条件〕・認可取得サイクル回数100,000回
・1,000台充填毎のバンク切り替えによる蓄圧器の負荷（累積損傷度）を平準化

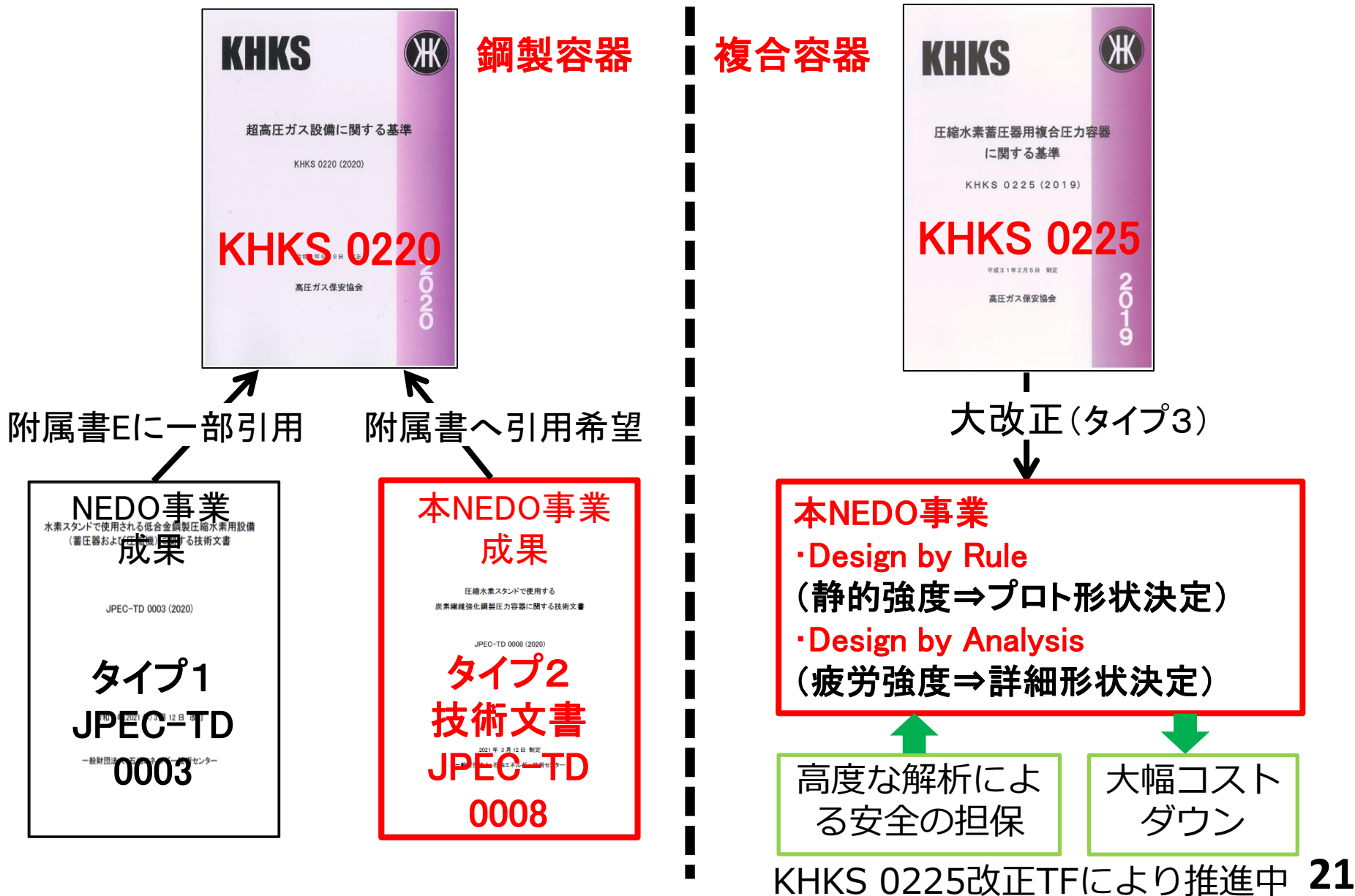
カウント方法	カウント数/1台	可能な充填台数
従来法	1.0	100,000台
累積損傷関係式	0.045	2,240,000台

- ①累積損傷関係式の適用により、蓄圧器のサイクル仕様を低減可能
⇒**イニシャルコストの低減**
- ②一定台数毎のバンクローテーションにより、
20年間蓄圧器の入れ替えは不要⇒**ランニングコストの低減**

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. ライナー材最適疲労曲線の作成
3. CFRP材 S-N線図の平均応力補正
4. 最適疲労曲線の比較
5. 複合圧力容器の累積損傷関係式
6. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
7. KHKS 0225の大改正
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. 2021年度の成果

NEDO事業成果による蓄圧器の技術体系イメージ



KHKS0225改正タスクフォーススケジュール

	2021年度						2022年度					
	4	6	8	10	12	2	4	6	8	10	12	2
TF日程		第1回 7/15 ★	第2回 9/21 ★	第3回 12/2 ★	第4回 3/23 ★		★	年5回予定 -----			★	改正案完成
ステアリング 委員会		☆		☆		☆		☆		☆		☆

審議項目；

- (1) 技術文書構成
- (2) 安全係数 (2.25) の見直し検討 *) 初回に提起。以降も審議継続いただく案件
- (3) 最大使用期限の延長
- (4) ガラス繊維の機械的特性の規定削除
- (5) 温度クリープ試験の削除
- (6) 樹脂の規定修正
- (7) 『4.4 材料仕様書の作成』の修正案
- (8) Design by Ruleによる設計初期の厚さ設定法の導入
- (9) 破裂試験の試験内容修正
- (10) 環境試験の削除
- (11) 製造確認試験 (破裂試験及び疲労試験) の削除
- (12) 累積損傷関係式の導入
- (13) 構造の検査の方法 樹脂含浸炭素繊維層及び保護層の厚さ確認 容器切断しない計測も可
- (14) 層間せん断試験
- (15) 疲労試験 (常温圧力サイクル試験) 及び最小厚さ確認試験の試験数修正 (または削除)
- (16) 疲労解析、き裂進展解析

* 耐圧試験圧力、保持時間減、高強度アルミ

2021年度4回の改正TFにて容器試験を4削減に目途、2検討中

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)(今年度)

5.2.3.2 最小厚さ確認試験 (今年度)

5.2.3.3 環境試験 (検討済→削減)

5.2.3.5 温度クリープ試験 (検討済→削減)

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、 (検討済→削減)

・常温圧力サイクル試験(疲労試験)

(検討済→削減)

8.4 構造の検査



8.4.1.3 耐圧試験

・気密試験

製造容器すべて実施

特定則

8.4.2 構造の検査

の方法
a)の3)

【改正案】

『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



全体の試験項目が決まるときに改めて検討

公式及び解析による設計

解析で、LBB及び容器寿命を確認

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

・疲労寿命設計線図により寿命設定

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

改正TFにて容器試験を 4 削減に目途、 2 検討中
(試験片の試験は削減検討中)

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. ライナー材最適疲労曲線の作成
3. CFRP材 S-N線図の平均応力補正
4. 最適疲労曲線の比較
5. 複合圧力容器の累積損傷関係式
6. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
7. KHKS 0225の大改正
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. 2021年度の成果

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)

* 100台/日 × 365日 × 15年 = 545,500台のFCVに充填

ステーションでの
蓄圧器交換: 5回
ランニングコスト大

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	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	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

イニシャルコスト低減

n=1以下	2.0?	50,000?	50,000?
-------	------	---------	---------

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. ライナー材最適疲労曲線の作成
3. CFRP材 S-N線図の平均応力補正
4. 最適疲労曲線の比較
5. 複合圧力容器の累積損傷関係式
6. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
7. KHKS 0225の大改正
8. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
9. 2021年度の成果

事業スケジュール

研究開発項目	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
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	【中間目標】 容器設計の基礎となる疲労曲線作成			【最終目標】 疲労寿命設計線図による容器設計 累積損傷則による使用寿命延長	
1-1. ライナー試験片評価法の検討	AL疲労試験(軸荷重試験片)、最適疲労曲線作成			平均応力補正方法の提案	
1-2. CFRP試験片評価法の検討	CFRP及びエポキシ樹脂の軸荷重疲労試験			CFRPとエポキシ樹脂の疲労特性 相関の導出	
1-3. 円筒試験体評価法の検討	フープ巻円筒試験体の疲労試験 ライナー材料、CFRP材料の疲労特性把握			ヘリカル巻円筒試験体の疲労試験 ライナー材料、CFRP材料の疲労特性把握	
1-4. 自緊効果を考慮した疲労寿命設計線図の作成	疲労寿命設計線図 導出方法の検討	タイプ2に関する疲労寿命設計線図 の検討		タイプ3に関する疲労寿命設計線図 の検討	
1-5. 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	タイプ2実容器のサイクル試験データ採取 疲労寿命設計線図の妥当性を実証			タイプ3実容器のサイクル試験データ採取 疲労寿命設計線図の妥当性を実証	
2. 複合圧力容器蓄圧器の技術基準案の整備	タイプ2自主基準案完成			タイプ3: KHKS0225改正に向けた提案	
				ISO TC197 WG15への提案	

2021年度成果（その1）

項目	成果
ライナー試験	タイプ3複合圧力容器のライナー材から試験片採取を行い、疲労試験を実施した。引張強さをパラメータに含む次式の最適疲労曲線を構築した。 $\sigma_a = 2.0\sigma_u N_f^{-0.10}$ また、実機に適用する平均応力の補正方法の比較検討を行った。
C F R P 試験	CFRP及び同一のエポキシ樹脂の疲労試験において、最大公称ひずみで整理すれば、樹脂およびCFRP試験片の疲労強度は、アルミ合金や低合金鋼のそれよりも十分長寿命側にあり、CFRP層ではなく金属ライナーの疲労破壊が支配的であることが分かった。また、walkerの式を用いた平均応力補正により、異なる応力比の疲労試験結果が整理できる可能性を見出した。

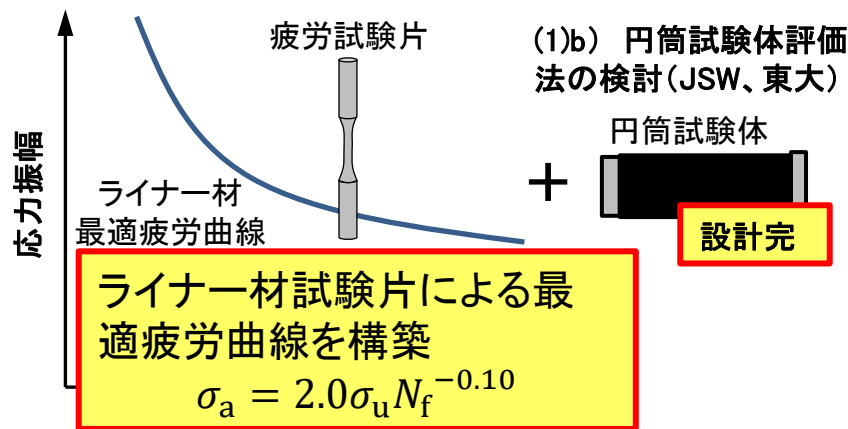
2021年度成果（その2）

項目	成果
円筒試験	試験片によるCFRP材料のS-N線図がフープ巻きされたCFRPについても有効かを検証するため、プラスチックパイプ製円筒試験体の設計を行い試験体を作製した。
疲労寿命設計線図作成	圧力サイクル試験の破面観察により求めたき裂進展特性と、解析により求めたき裂進展特性が一致しない状況に対して、弾塑性変形を考慮したJ積分による解析により改善されることを見出した。
容器実証	自緊の強さと圧力振幅範囲をふったタイプ3複合圧力容器蓄圧器のサイクル試験データから、累積損傷則に基づいた容器寿命延長式（累積損傷関係式）が、幅広い仕様の蓄圧器に対して有効であることを確認した。
タイプ3技術基準の整備	KHKS0225改正タスクフォースを4度開催し、4つの容器試験（環境試験、温度クリープ試験、製造確認試験の破裂試験及び疲労試験）の削減に目途をつけた。

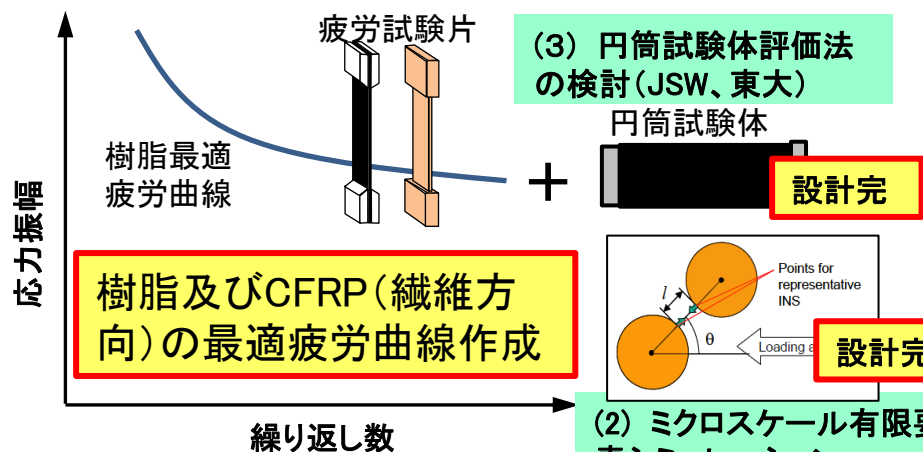
2021年度成果（その3）

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

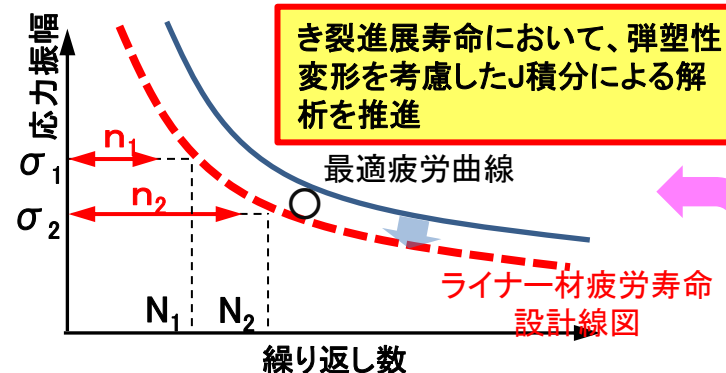
(1)a ライナー材最適疲労曲線の作成 (KHK)



(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)

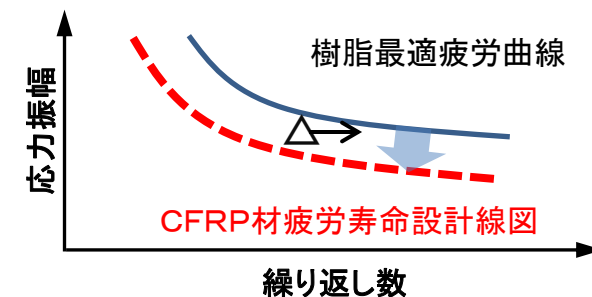


(1)c, (2) ライナー材・CFRP材樹脂疲労寿命設計線図作成 (東大)



(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

累積損傷関係式を構築⇒圧力変動から蓄圧器の寿命推定が可能



今後の予定（その1）

項目	成果
ライナー試験	Al合金製疲労試験片を用いて、平均応力を変えた疲労試験を実施し、未破断試験片に対するレプリカ法観察と破断した試験片に対するSEM観察を行うことにより、実機のき裂発生寿命の予測方法を検討する。
CFRP試験	荷重方向と炭素繊維配向方向が一致するCFRP試験片を用いて応力比を変えた疲労試験を行い、平均応力補正式を用いて疲労試験結果の整理をする。また、CFRPと樹脂の疲労試験結果の関係性を検討する。
円筒試験	フルラップ複合圧力容器対応円筒試験体を用いて100万サイクルレベルの圧力サイクル試験を実施し、導出した疲労寿命設計線図に基づく圧力サイクル寿命予測法が実用上問題ないことを検証する。 プラスチックパイプ製円筒試験体を用いて、圧力サイクル寿命100万回レベルの圧力サイクル試験を実施し、試験片CFRP材料のS-N線図との相関を検証する。

今後の予定（その2）

項目	成果
疲労寿命設計線図作成	き裂進展寿命について、き裂貫通直前のき裂進展量の予測精度を向上させる手法を開発する。き裂発生寿命と平均応力および応力振幅の関係を定式化する。
容器実証	蓄圧器の上限圧力がUPした場合にも、累積損傷関係式が有効であることを確認する。
タイプ3 技術基準の整備	KHKS0225改正タスクフォースを実施継続し、技術基準KHKS 0225の大改正に資する改正案を構築する。

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