

2020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)

2020年5月8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

— 禁無断転載・複製 ©JPEC 2020 —

**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）

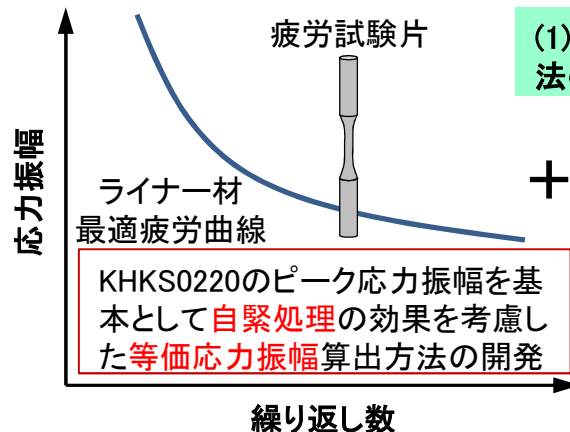
国立大学法人東京大学

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

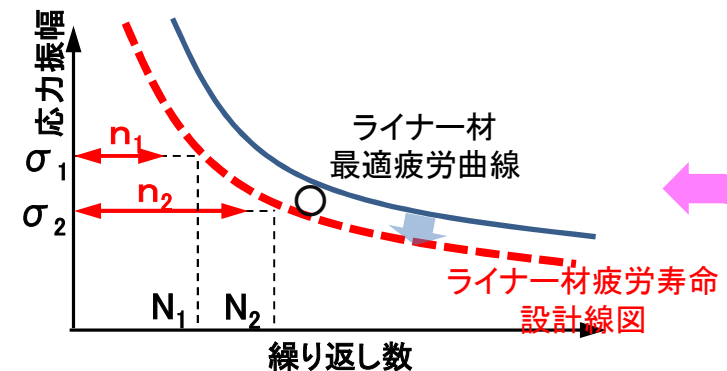
(1)a) ライナー材最適疲労曲線の作成(KHK)



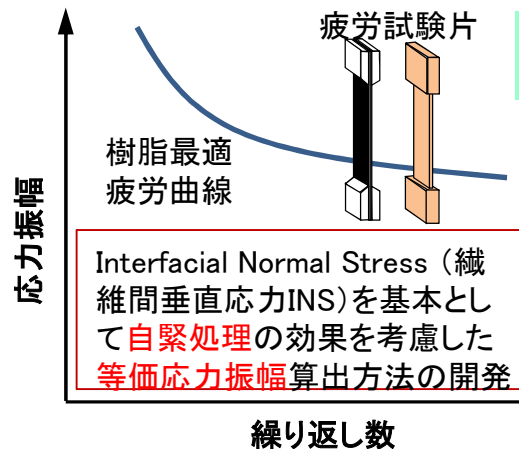
(1)b) 円筒試験体評価法の検討(JSW、東大)



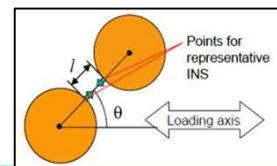
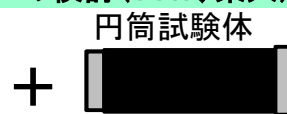
(1)c), (2)ライナー材・CFRP材樹脂疲労寿命設計線図作成(東大)



(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)



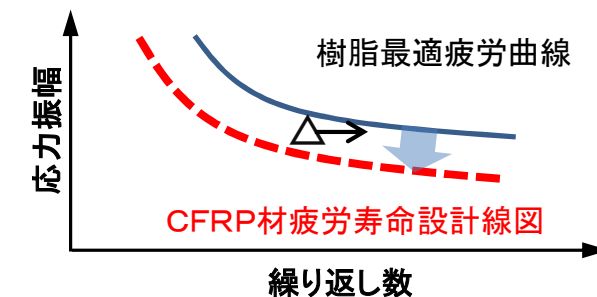
(3) 円筒試験体評価法の検討(JSW、東大)



(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) 累積損傷則の適用による寿命延長

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



本発表

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(案)制定

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. 複合圧力容器のサイクル試験と
累積損傷関係式
3. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
4. KHKS 0225の大改正
5. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
6. 2019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。

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。

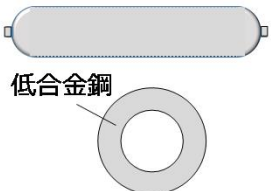
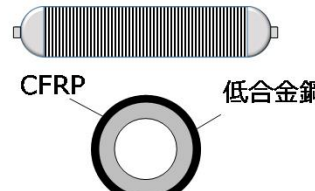
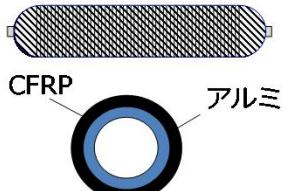
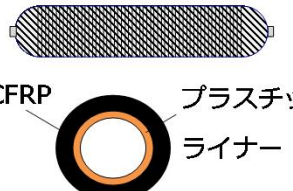


⑤本NEDO事業で複合圧力容器の技術基準を整備することで、
i) 省令改正（特定則）により大臣特認を不要とし、事前評価での認可を得られる様にしたい。

⇒2020年2月 特定則が改正され大臣特認が不要に

ii) 認可をとるためのコストおよび運営コストを低減したい。

現状と今後の展開

	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/CFRP(フープラップ) 	アルミライナー/CFRP(フルラップ) 	プラスチックライナー/CFRP(フルラップ) 
『水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業』 (2008~2012年度) 目的) 水素ステーション機器等の低コスト化・コンパクト化	・タイプ1蓄圧器 (高容量化)の開発		・特定設備検査規則に複合容器の技術基準がない ⇒ JPECガイドライン策定 ⇒ KHKT D 5202制定 (2014年9月) ・タイプ3蓄圧器の開発⇒上市 (2013年)	
法改正		2014年11月 一般高圧ガス保安規則改正 ⇒ タイプ2, 3, 4蓄圧器が水素ステーションに設置可能		
『水素利用技術研究開発事業』 (2013~2017年度) 目的) 水素供給インフラの コスト削減	・汎用材の水素環境下での利用に関する技術基準として、低合金鋼技術文書JPEC-TD 0003発行	・タイプ2蓄圧器 (*1) の研究開発 ⇒ 寿命10万回の試作器完成 ・国内に技術基準がない ⇒ JPEC自主基準構成案作成	・部分充填条件で容器疲労寿命は延びることを確認。 KHKS 5202の疲労試験条件を「蓄圧器が使用される状態を考慮した圧力範囲」とする要望提出 ⇒ KHKS 0225制定 (2019年2月) ・タイプ3蓄圧器 (コスト低減) の開発	
『超高圧水素インフラ 本格普及技術開発事業』 (2018~2021年度) 目的) 水素ステーションの整備費、運営費の低減	現状) Design by Analysisが確立している (実容器試験不要) ・JPEC-TD 0003のKHKS 0220 附属書を目指す	現状) 国内に技術基準がない ・Design by Analysisの確立 ・タイプ2技術文書を完成。 KHKS 0220附属書を目指す	現状) 設計確認試験 (実容器試験) が必要 [Design by Test] ・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確立へ 向けた検討	
法改正 (認可取得)	設計係数3未満: KHKS 0220に準拠し設計 ⇒ 事前評価 設計係数4および3.5: 事前評価 (従来通り)			KHKS 0225に準拠して設計 ⇒ 事前評価

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

現状の課題と方向性

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

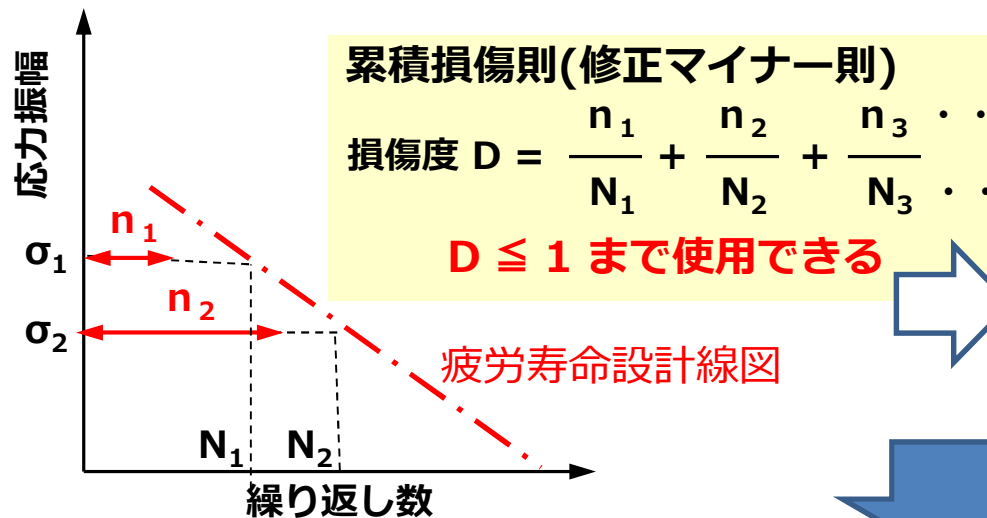
複合圧力容器を用いた安全性を
確認する試験が必要
⇒費用と時間がかかる

目的①

評価方法の簡素化

〔イニシャルコスト低減〕

② 累積損傷則を適用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

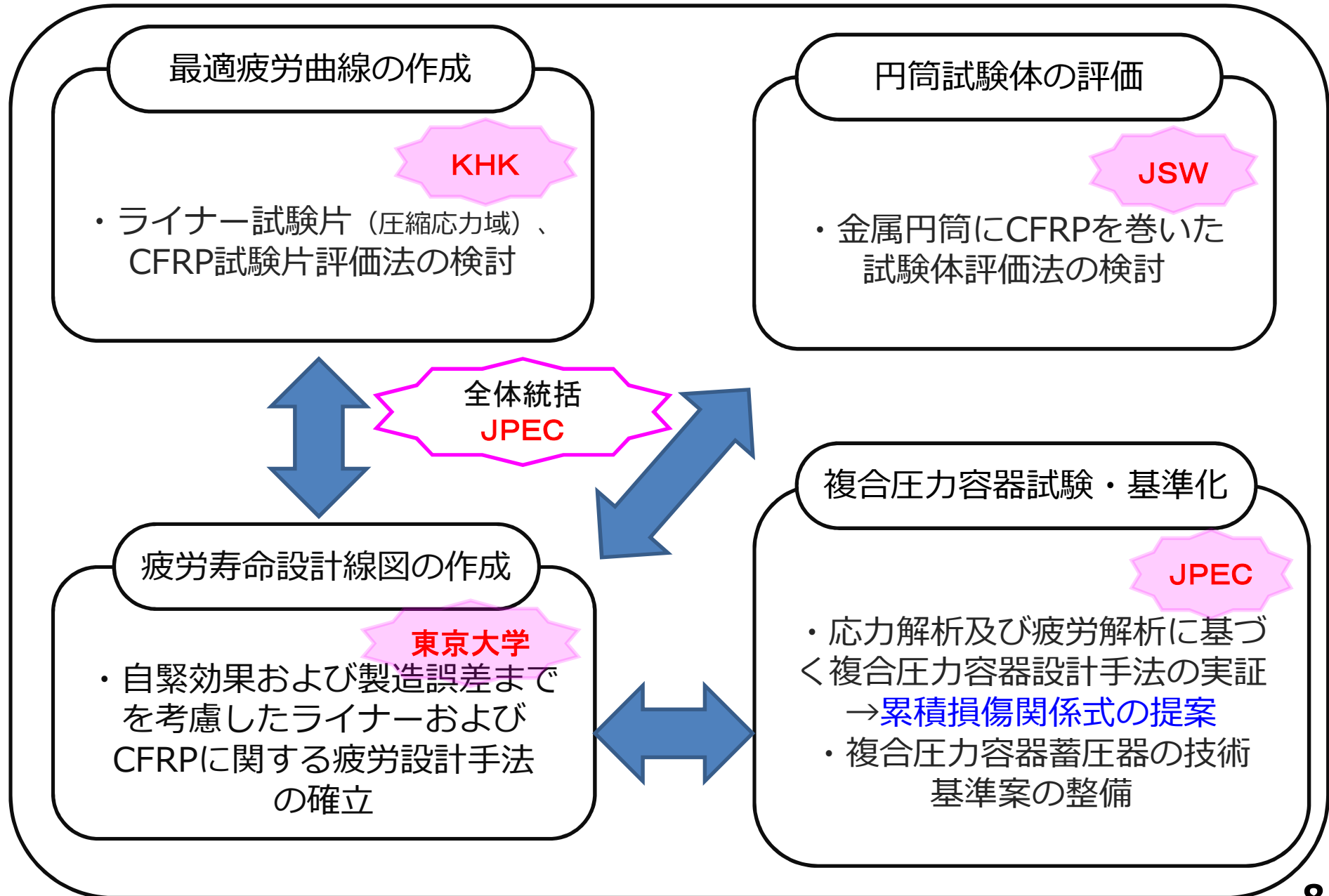
目的②

容器寿命最大限の使用

〔ランニングコスト低減〕

Design by Analysisと累積損傷則適用により
イニシャル&ランニングコストの低減を図る

体制と役割

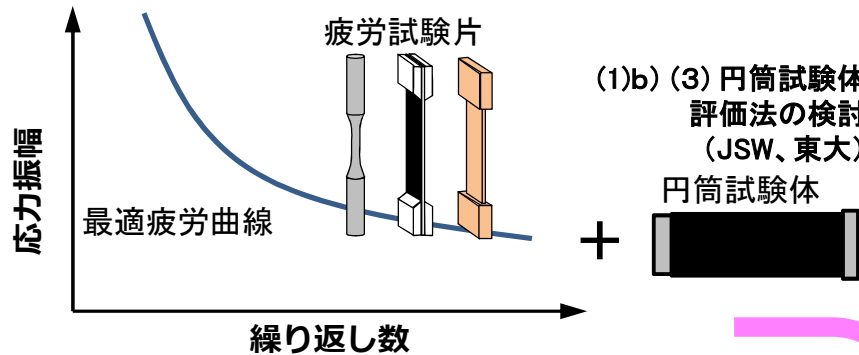


複合圧力容器の評価手法確立に関する相関図

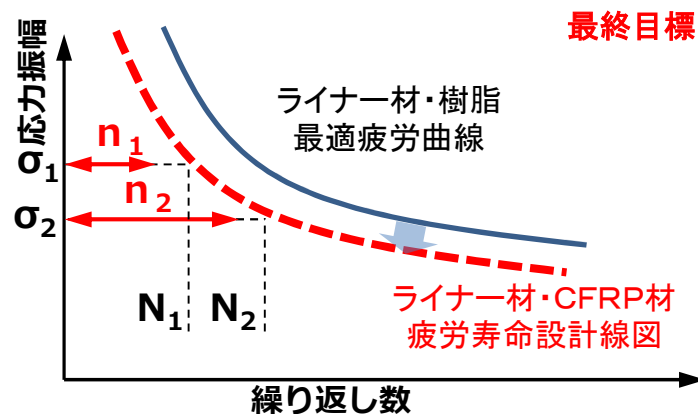
今回報告

【基礎データ&設計・シミュレーション】

(1)a)ライナー材(2)a)CFRP材の最適疲労曲線の作成(KHK、東大)

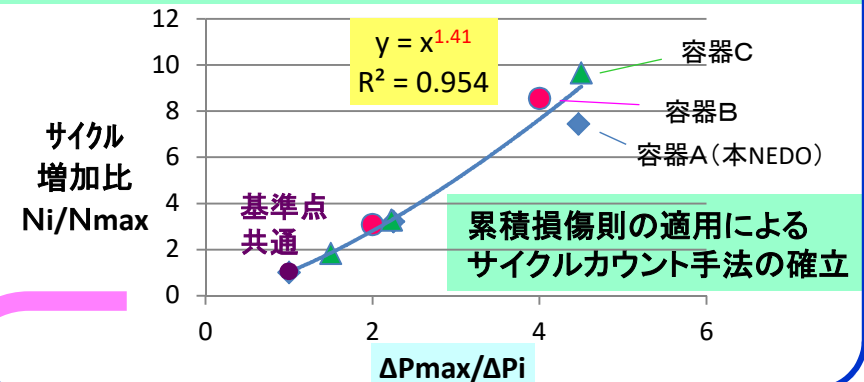


(1)(2)ライナー材・CFRP材樹脂疲労寿命設計線図作成(東大)

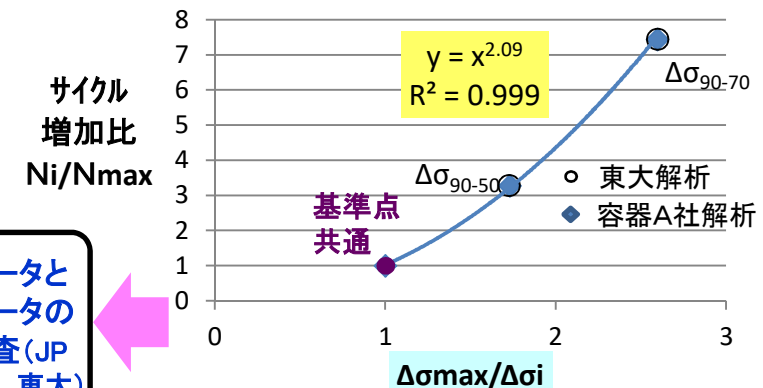


【実機データ】

(1)c) 複合圧力容器サイクル試験の圧力振幅とサイクル寿命の相関調査(JPEC)



(1)c) 複合圧力容器サイクル試験の応力振幅とサイクル寿命の相関調査(JPEC、東大)



基礎データと
実機データの
相関調査(JP
EC、KHK、東大)

2. 技術基準の整備(JPEC) KHKS 0225大改正を目指す

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. 複合圧力容器のサイクル試験と
累積損傷関係式
3. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
4. KHKS 0225の大改正
5. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
6. 2019年度の成果

タイプ3 複合圧力容器サブスケール品の概要と試験内容

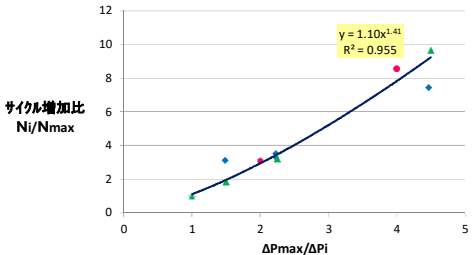
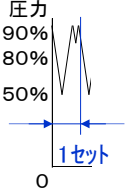
○ 容器仕様

材質	ライナー;A6061-T6, 繊維;PAN系炭素繊維
内容積	約76ℓ
設計圧力	99MPa
容器寸法	外径:458.7mm 長さ:1,520mm
損傷形態	胴部を起点とするLBB
最小破裂圧力	223MPa(設計圧力の2.25倍)以上

○ 試験内容

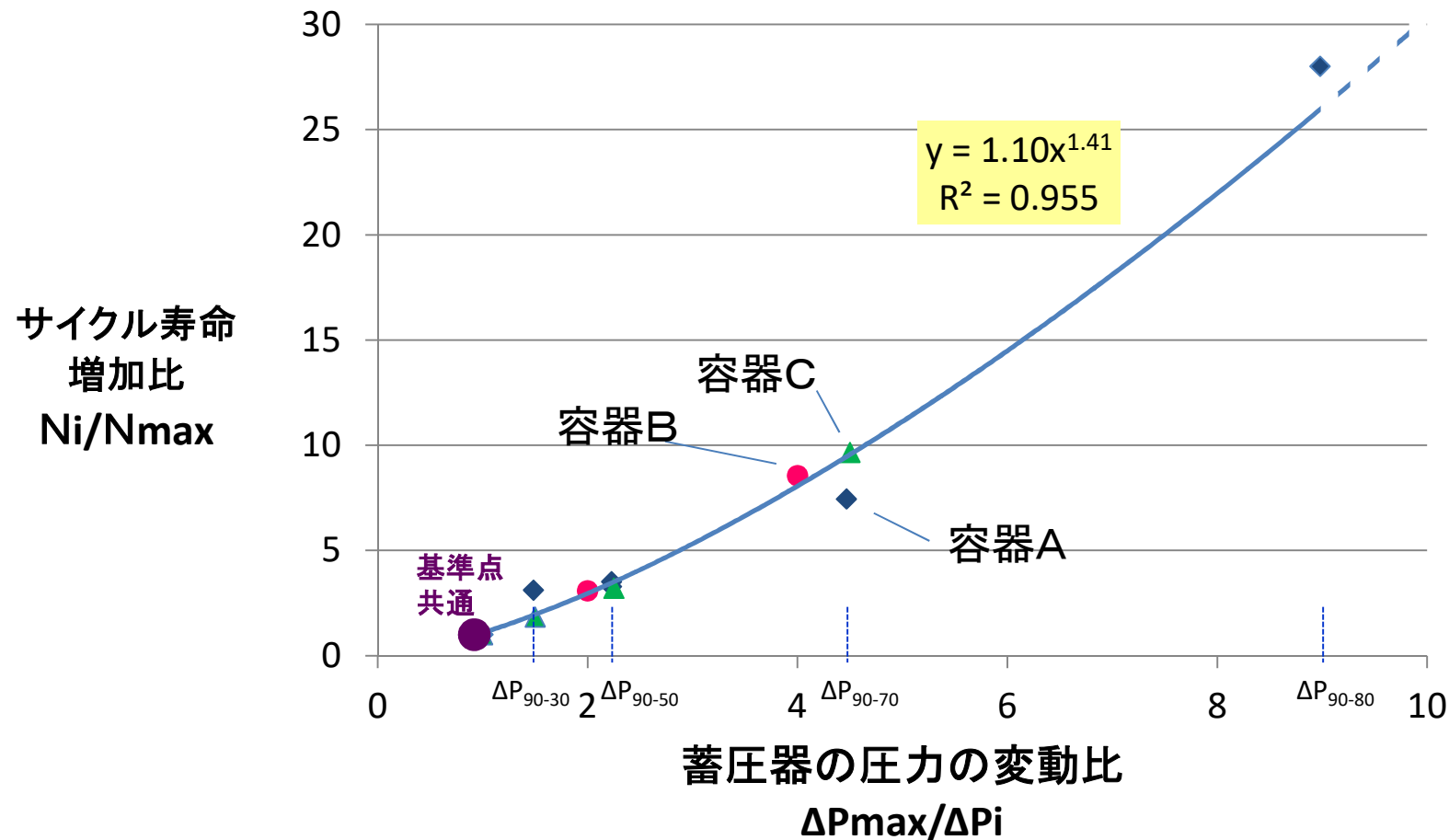
- 1]圧力サイクル試験 (試験温度:常温~約50℃)
 - (1)試験圧力条件:90⇔0MPa, 90⇔30MPa, 90⇔50MPa, 90⇔70MPa
(水素ステーション蓄圧器の使用条件を想定)
 - (2)圧力媒体:50MPaエチレングリコール水溶液
 - (3)試験後の確認ポイント
 - ①損傷箇所
 - ②疲労寿命に及ぼす圧力振幅の影響
- 2]破裂試験 (昇圧速度:毎秒0.35MPa以下) 252.9MPa:胴部破裂 $\geq$ 223MPa

タイプ3 複合圧力容器サブスケール品のサイクル試験結果

	圧力振幅 *	リーク回数	アウトプット
単一サイクル試験	90-0MPa	111,177	X軸に圧力振幅比 ($\Delta P_{max}/\Delta P_i$)、 Y軸にサイクル増加比 ($N_i/N_{max}$)をとった 累積損傷関係式の構築 
	90-30MPa	346,195	
	90-50MPa (1回目)	364,624	
	(2回目)	390,749	
	90-70MPa	827,494	
組合せ試験	90-0MPa & 90-50MPa	391,051	ステーション圧力 開放時 (90-0MPa: 480回) の影響はない
	90-80MPa & 90-50MPa	347,180 セット 	90-80MPa: 311~726万回 累積損傷関係式は 90-80MPaまで使用可

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か?!

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. 複合圧力容器のサイクル試験と
累積損傷関係式
3. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
4. KHKS 0225の大改正
5. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
6. 2019年度の成果

関係式の指数を用いた3バンクシステムコスト低減の検討

〔目的〕3バンクシステムにおいて、各バンクのローテーション方式と関係式の指数が、FCV充填台数に与える影響を確認する。

（内容）

- 1) 充填毎に、高圧バンク、中圧バンク、低圧バンクを復圧するケース〔従来カウント法〕
- 2) 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
- 3) 3バンクローテーション（3台連続減圧）で、復圧するケース

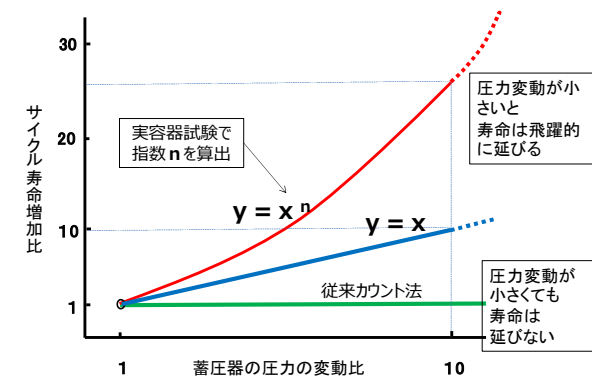
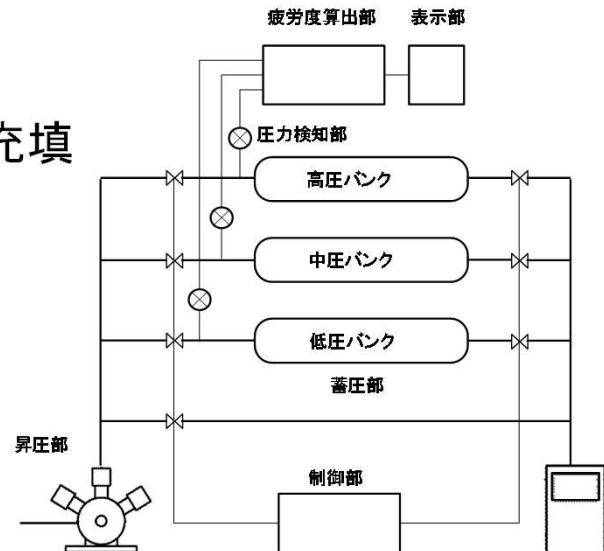
（パラメータ）

- ・累積損傷関係式の指数：1.0（参考値：右下図青）、1.41（近似式の値：右下図赤）

（充填方法）

- ・差圧充填と直充填の併用充填
（実データ：HySUT殿提供）

〔3バンクシステム〕

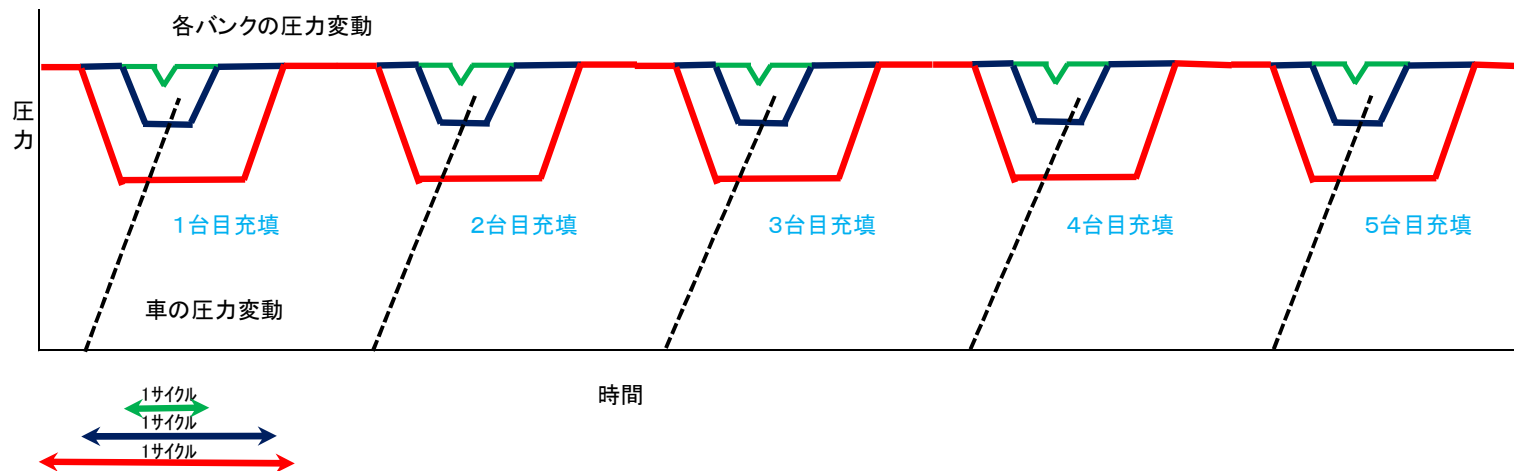


累積損傷関係式の指数と F C V 充填台数①

- 1.前提 〔目標〕100台/日 × 365日 × 15年 = 545, 500台のFCVに充填
〔システム〕82⇔0MPaの圧力サイクル試験で、100, 000サイクルの認可を受けたタイプ3蓄圧器(300L)の3バンクシステム

2.検討結果

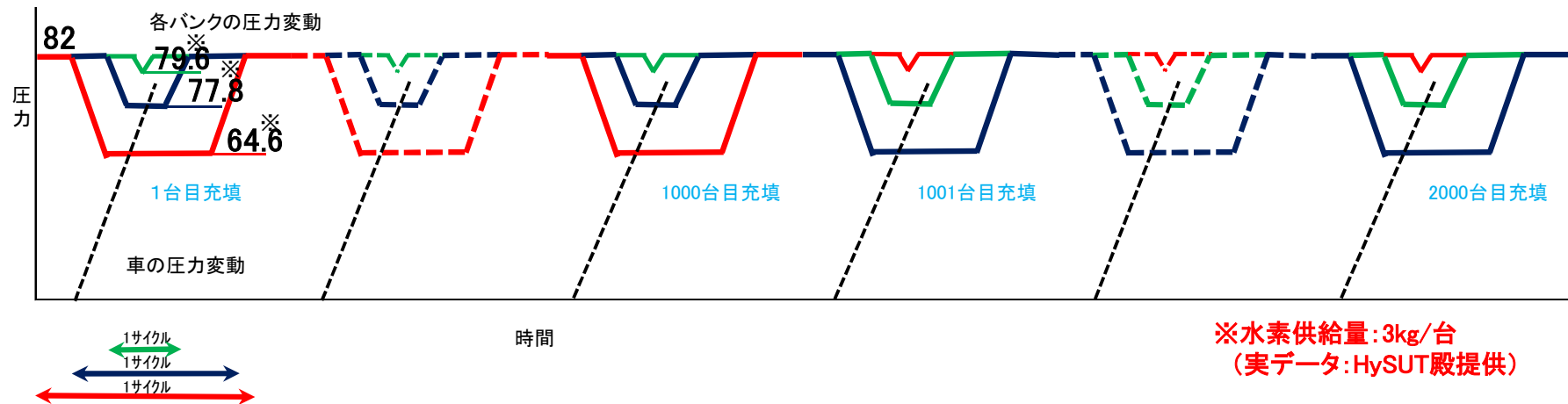
- 1) 充填毎に、高圧バンク、中圧バンク、低圧バンクを復圧するケース〔従来カウント法〕



圧力範囲に寄らず、1回復圧につき1サイクルとカウントされる
⇒FCV充填台数: 100, 000台
⇒5回蓄圧器の入れ換えが必要

累積損傷関係式の指数とFCV充填台数②～H₂：3kg～

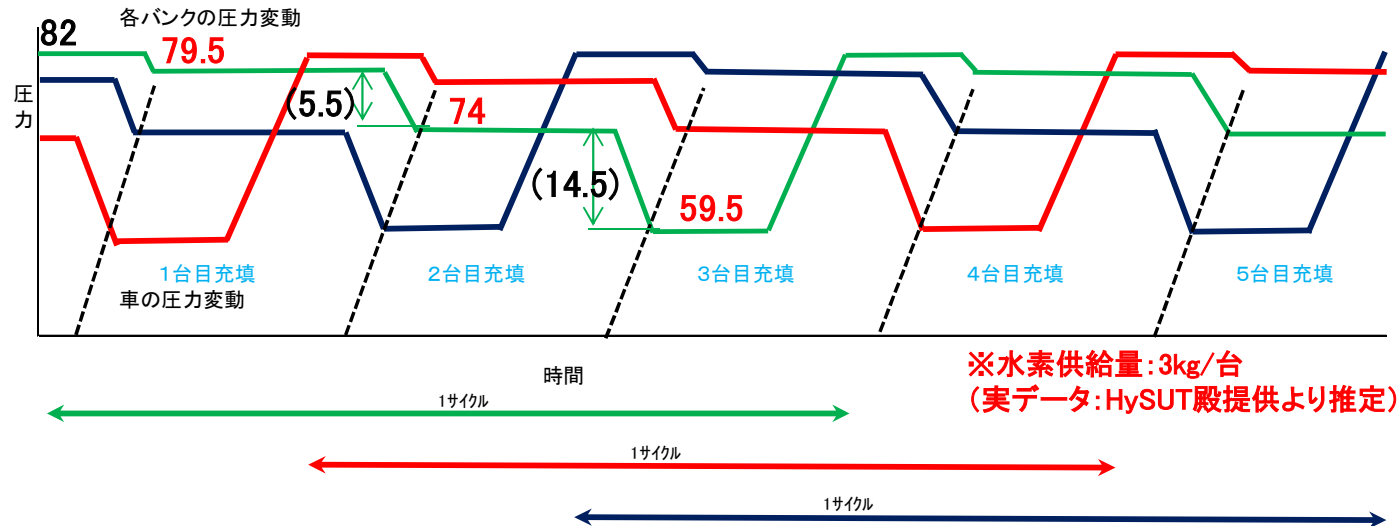
2) 高圧、中圧、低圧バンクを、1,000台(一定台数)充填毎にローテーションするケース



指数	カウント/台	FCV充填台数
1.00	0.098	1,025,000
1.41	0.045	2,241,000

累積損傷関係式の指数とFCV充填台数③～H₂: 3kg～

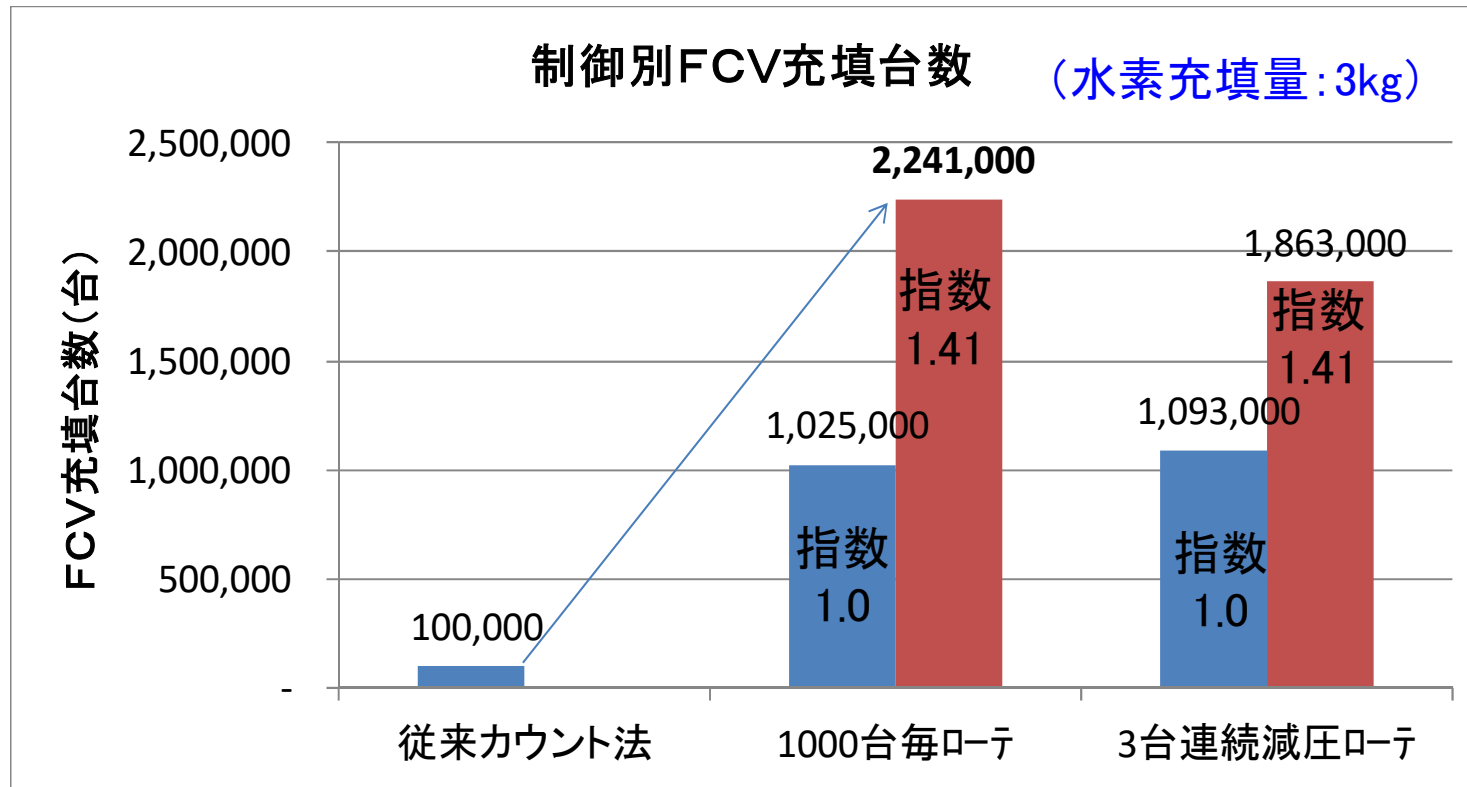
3) 3バンクローテーション(3台連続減圧)で、復圧するケース



指数	カウント/台	FCV充填台数
1	0.091	1,093,000
1.41	0.054	1,863,000

累積損傷関係式の指数とFCV充填台数④～H₂: 3kg～

4) まとめ



FCVの水素充填において

- 1) 累積損傷関係式を導入することにより、FCV充填台数を従来より大幅なUPが可能。
- 2) 一定台数毎にバンクをローテーションする方が、連続減圧のローテーションよりも多くのFCVに充填することができる。[ただし、指数1.1超]

ローテーションと指数別にみた蓄圧器サイクル仕様①

〔前提〕100台/日 × 365日 × 15年* = 545, 500台のFCVに水素3kg充填

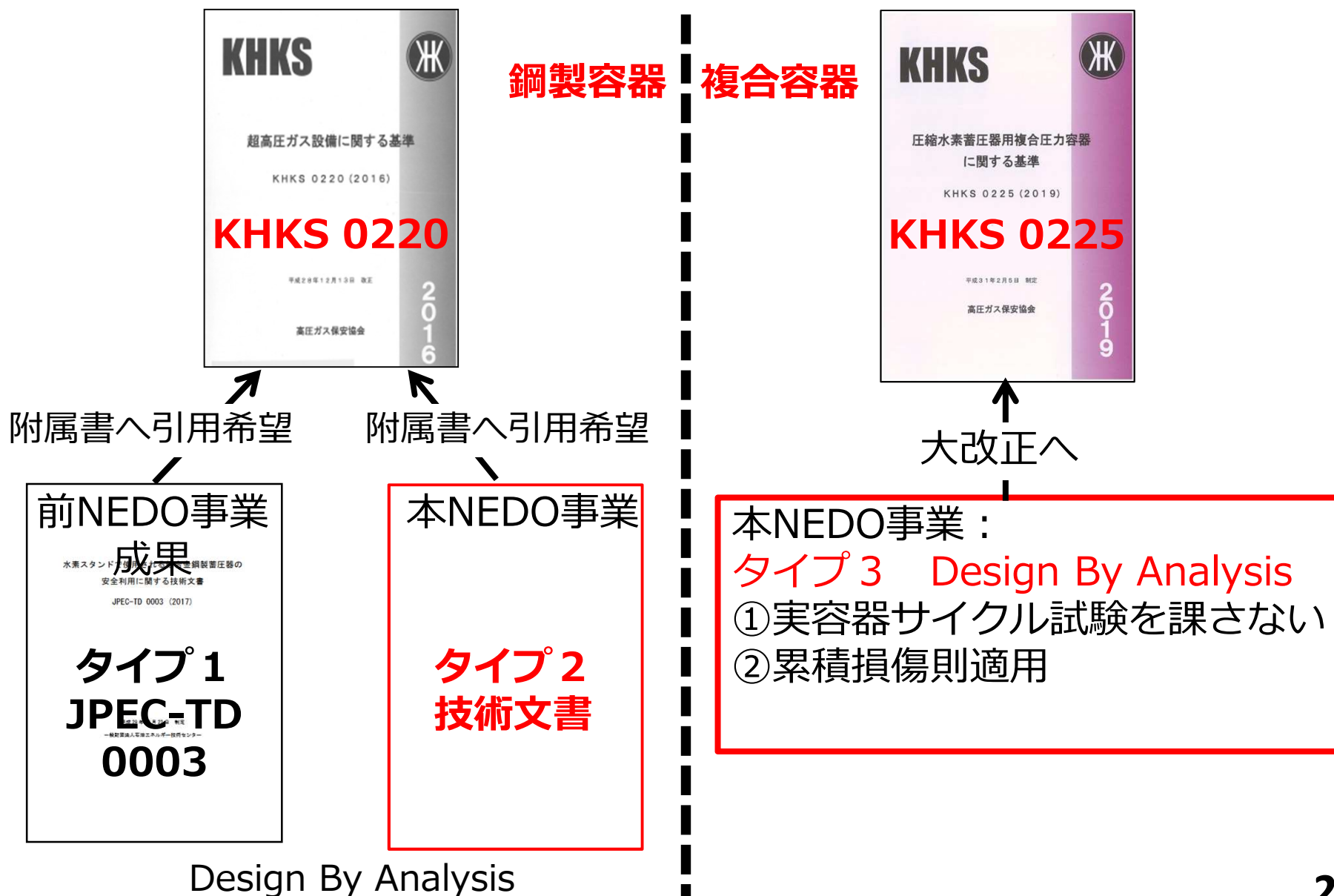
蓄圧器サイクル仕様〔回〕82-0MPa認可			
指数	従来カウント法	1000台毎ローテ	3台連続減圧ローテ
1	100,000 5回蓄圧器の入れ換えが必要	54,000	50,000
1.41		25,000	30,000

- ①累積損傷式の指数1.41にて、蓄圧器のサイクル仕様を大幅に低減できる。
⇒イニシャルコストの低減
- ②連続減圧のローテーション、一定台数毎のローテーションともに
20年間蓄圧器の入れ替えは不要である。⇒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. 複合圧力容器のサイクル試験と
累積損傷関係式
3. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
4. KHKS 0225の大改正
5. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
6. 2019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



技術基準の整備 KHKS 0225大改正に向けて

[NEDO]

水素製造・輸送・貯蔵システム等
技術開発

[NEDO]

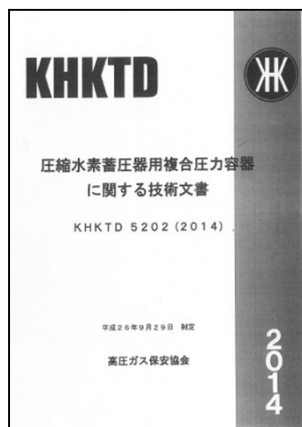
水素利用技術研究開発

[NEDO]

超高圧水素インフラ本格普及
技術研究開発

タイプ3 & 4用
複合容器技術文書制定

タイプ3 & 4用
複合容器技術基準制定



2014/09

NEDO事業成果：
ステーション用複合容器
技術基準ガイドライン



2019/02

NEDO事業成果：
複合容器の使用圧力変動
実態に合った試験データ蓄積

大改正を目指す

改正構成

- Design by Rule
- Design by Analysis

高度な解析
による安全
の担保

大幅コス
トダウン

現行構成

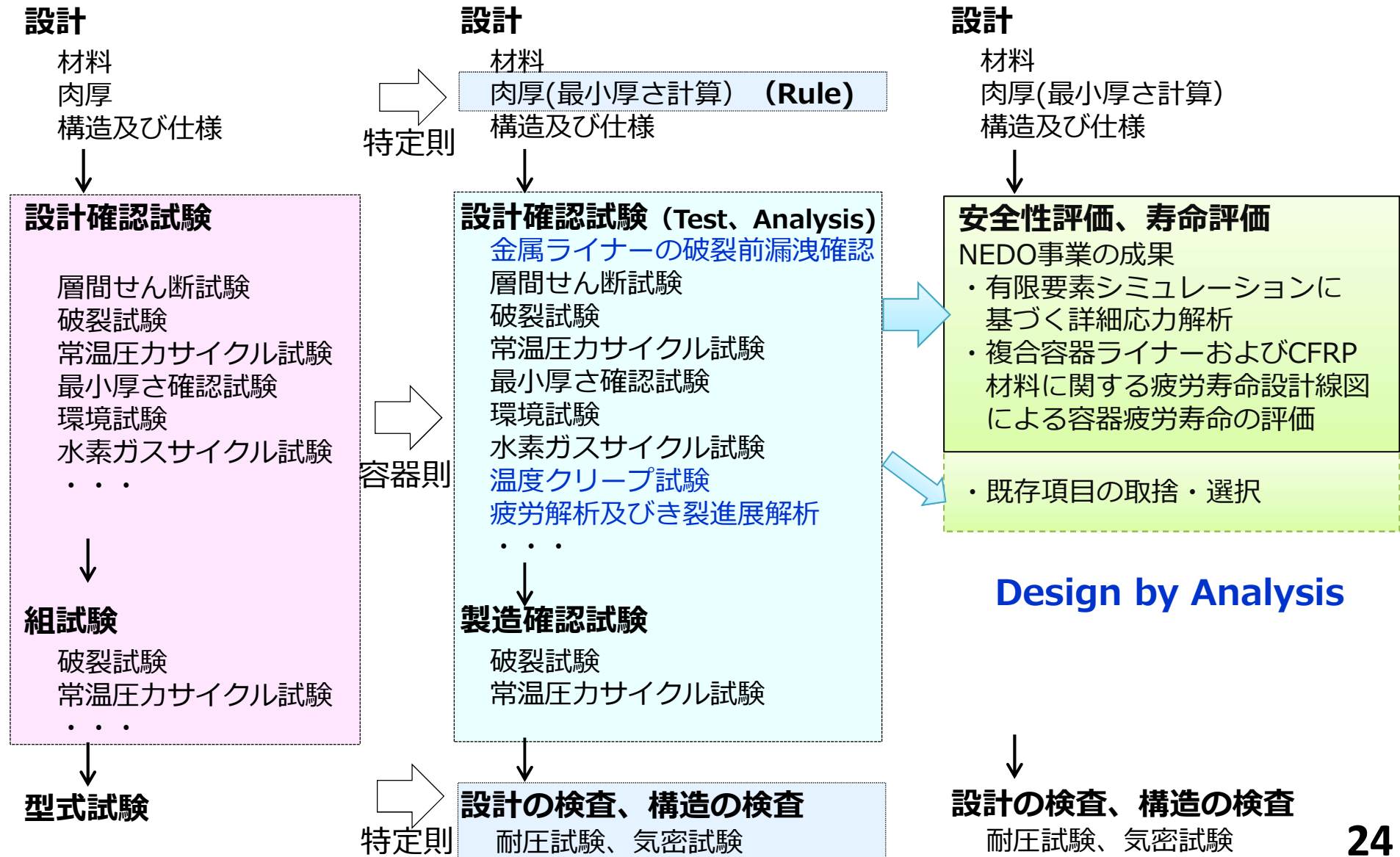
- Design by Rule
- Design by Analysis
- Design by Test**

KHKS 0225大改正に向けて

車載容器 (容器則、KHKS 0128)

現行KHKS 0225

改正後



項目間の関係

Confidential

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)

5.2.3.2 最小厚さ確認試験

5.2.3.3 環境試験

5.2.3.5 温度クリープ試験

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、
・常温圧力サイクル試験(疲労試験)

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】

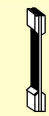
『CFRP層及び保護層の厚さが構造図に適しているか、計測することにより検査する』
ことも可能とする

特定則

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

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

5.3.4 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

報告内容

1. 研究体制、役割分担および課題
2. 複合圧力容器のサイクル試験と
累積損傷関係式
3. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
4. KHKS 0225の大改正
5. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
6. 2019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)



〔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

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

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. 複合圧力容器のサイクル試験と
累積損傷関係式
3. 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数
4. KHKS 0225の大改正
5. 本NEDO事業のコスト低減イメージ
6. 2019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最適疲労曲線作成			【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合金疲労試験(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 ミクロスケール有限要素シミュレーション			CFRPとエポキシ樹脂の疲労特性 関連の導出	
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技術文書完成			タイプ3: KHKS0225改正に向けた 提案 ISO TC197 WG15への提案	

2019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。 $N < 10^7$ 回の領域において明瞭な疲労限度が無いことを確認した。引き続き、圧縮平均応力条件下での疲労試験を行う。
CFRP試験	CFRPの疲労特性に及ぼすマトリックス材の影響を評価するため、CFRP疲労試験片と同一のエポキシ樹脂について軸荷重疲労試験を実施し、応力比0.1の疲労試験データを取得した。 また、一方向強化CFRP試験片の炭素繊維方向引張疲労試験結果を Interfacial Normal Stress (INS) により解析するモデルを作成した。
円筒試験	フープラップ複合圧力容器対応円筒試験体の設計および試験条件を見直し、圧力サイクル試験に資する試験体の寸法を決定した。 フルラップ複合圧力容器対応円筒試験体を改良設計し試作を行った。

2019年度成果（その2）

項目	成果
疲労寿命設計線 図作成	タイプ3複合容器蓄圧器の疲労寿命を、ライナーでのき裂発生寿命とき裂進展寿命に区分して設計することとした。本年度は、き裂進展寿命の予測方法を検討し、基本モデルを作成した。 荷重方向と繊維方向が一致する一方向強化CFRP試験片については、荷重方向の最大ひずみで疲労試験結果を適切に推定できることを示した。
容器実証	タイプ3複合圧力容器の圧力サイクル試験を行った。その結果から、圧力振幅比とサイクル寿命比の間に指数関数的な相関があることを見出し、累積損傷関係式を構築した。この関係式を用いることにより、水素ステーションにおける15年間の蓄圧器交換回数を5回から0回に（ランニングコスト低減）、および認可取得時の試験回数を数百万回から50万回程度に（イニシャルコスト低減）低減できる目途を得た。

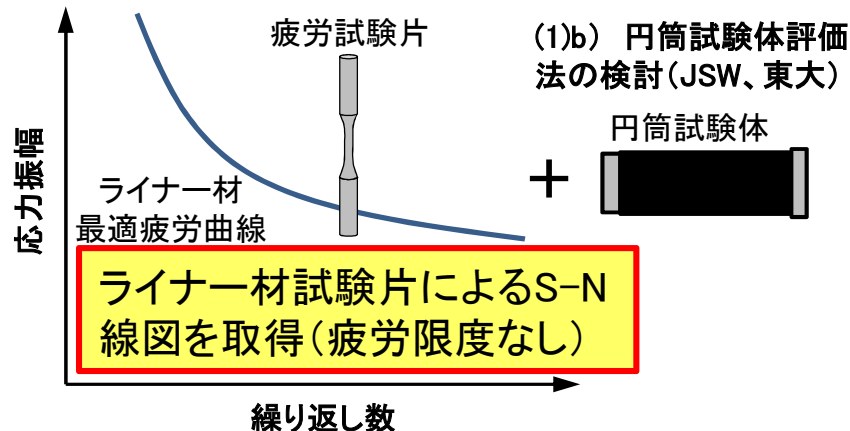
2019年度成果（その3）

項目	成果
タイプ2 技術 文書の作成	分科会およびタスクフォース（TF）を実施し、材料および設計についてのコンセプトをほぼ確定した。タイプ2蓄圧器の金属層とCFRP層の肉厚計算は公式による設計（Design by Rule）を基本とし、必要に応じて応力解析および疲労解析（Design by Analysis）を行うこととした。
タイプ3 技術 基準の整備	複合圧力容器メーカーから挙げたKHKS 0225に関する改正要望12項目について、設定の背景、根拠を調査するとともに項目間の関係性を考慮して、改正方針・シナリオを策定した。

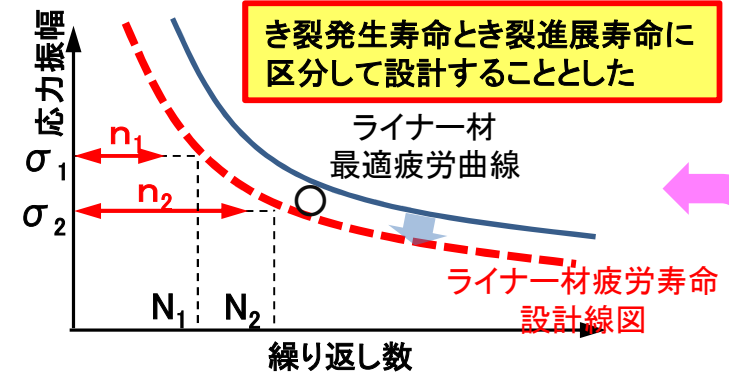
2019年度成果（その4）

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

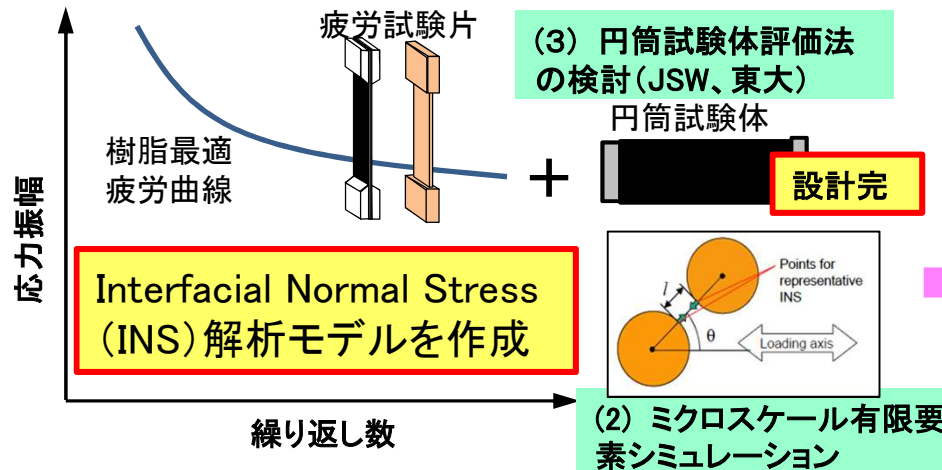
(1)a) ライナー材最適疲労曲線の作成(KHK)



(1)c), (2)ライナー材・CFRP材樹脂疲労寿命設計線図作成(東大)

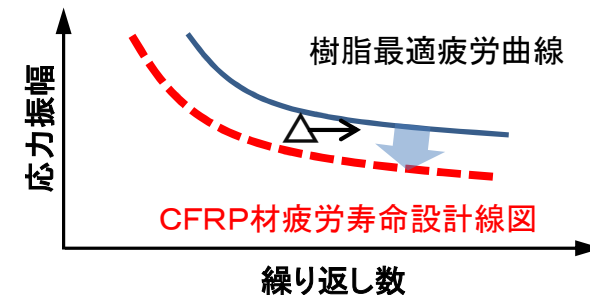


(2)a) CFRP材の疲労強度評価のための樹脂最適疲労曲線の作成(KHK、東大)



(1)d) 実容器により疲労寿命設計線図の妥当性を検証(JPEC) 累積損傷則の適用による寿命延長

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



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(案)制定

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<JPNP18011>の結果得られたものです。

*New Energy and Industrial Technology Development Organization