2019年度NEDO次世代電池・水素成果報告会

発表No.Ｈ1-17

超高圧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

林　郁孝

一般財団法人石油エネルギー技術センター（ＪＰＥＣ）

高圧ガス保安協会（ＫＨＫ）

国立大学法人東京大学

株式会社日本製鋼所（ＪＳＷ）

2019年7月18日

連絡先
一般財団法人
　石油エネルギー技術センター
E-mail：fu-hayashi2@pecj.or.jp
TEL：03-5402-8513

事業概要

１．期間

開始　　：２０１８年６月
終了(予定)：２０２１年２月

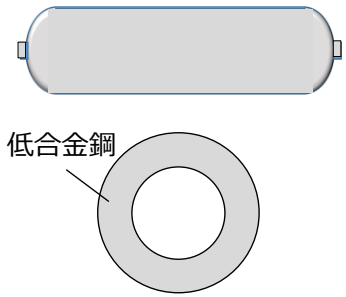
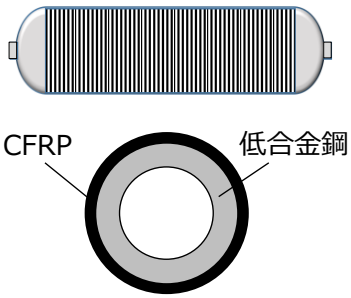
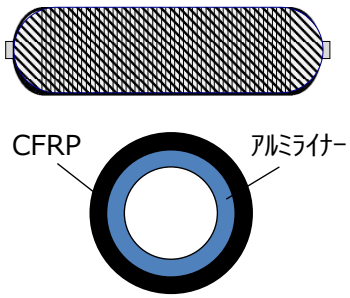
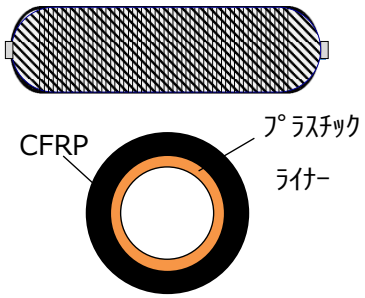
２．最終目標

実施項目	最終目標（２０２０度）
1 複合圧力容器設計手法確立に向けた技術開発	
1-(1) ライナー試験片評価法の検討	・アルミニウム合金の最適疲労曲線を作成する
1-(2) CFRP試験片評価法の検討	・樹脂単体の疲労寿命設計線図を作成する。ミクロスケール有限要素シミュレーションにより、炭素繊維と樹脂に生じる応力を詳細に評価する
1-(3) 円筒試験体評価法の検討	・フープラップ複合圧力容器対応円筒試験体を用いた圧力サイクル試験により、ライナーおよびCFRPの応力状態と疲労特性に及ぼす自緊処理の影響を把握する
1-(4) 自緊効果を考慮した疲労寿命設計線図の作成	・タイプ2複合圧力容器のライナーおよびCFRPに関する疲労寿命設計線図を作成する
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	・フープラップ複合圧力容器の応力解析及び疲労解析に基づく設計手法の実現に資する実容器圧力サイクル試験データ等を蓄積し疲労寿命設計線図を用いた設計手法を実証する
2　技術基準の整備に向けた技術開発	
技術基準の整備に向けた技術開発	・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、技術文書(案)を策定する

３．成果・進捗概要

実施項目	成果・進捗内容
1 複合圧力容器設計手法確立に向けた技術開発	
1-(1) ライナー試験片評価法の検討	・過去の実験結果を用いて2種類の最適疲労曲線とその実験式を提案した ・平均応力補正方法の検討を開始した
1-(2) CFRP試験片評価法の検討	・FWタイプ及びプリプレグタイプCFRP試験片、エポキシ樹脂単体試験片を製作し、疲労試験を開始した ・CFRP試験片の炭素繊維と樹脂の応力をInterfacial Normal Stress(INS)により整理する有限要素シミュレーション手法を検討した
1-(3) 円筒試験体評価法の検討	・フープラップ複合圧力容器対応円筒試験体を製作し、圧力サイクル試験を開始した
1-(4) 自緊効果を考慮した疲労寿命設計線図の作成	・エポキシ樹脂単体試験片を用いた疲労試験結果とミクロスケール有限要素シミュレーションの解析結果を用いてCFRPの疲労寿命設計線図を作成する手法について検討した
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	・胴部漏洩仕様のタイプ３実容器サブスケール品を用いた圧力サイクル試験を開始した
2 技術基準の整備に向けた技術開発	
技術基準の整備に向けた技術開発	・タイプ2技術文書(案)の策定に向け、材料と設計に関する課題を抽出し、議論を開始した ・KHKS 0225に対するメーカーの改正要望を抽出した

現状と今後の展開

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/CFRP(フープラップ)  	ｱﾙﾐﾗｲﾅｰ/CFRP(フルラップ)  	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸﾗｲﾅｰ/CFRP(フルラップ) 
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	本NEDO事業 ・Design by Analysisの確立 ・タイプ２技術文書(案)を策定する	本NEDO事業 ・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	本NEDO事業 ・Design by Analysisの確立へ向けた検討
	設計係数4および3.5　事前評価 設計係数3および2.4　大臣特認 →すべて事前評価	大臣特認 →事前評価	大臣特認 →事前評価	大臣特認 →事前評価
(目標寿命)	30万回以上	30万回以上	10万回以上	開発中

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させる

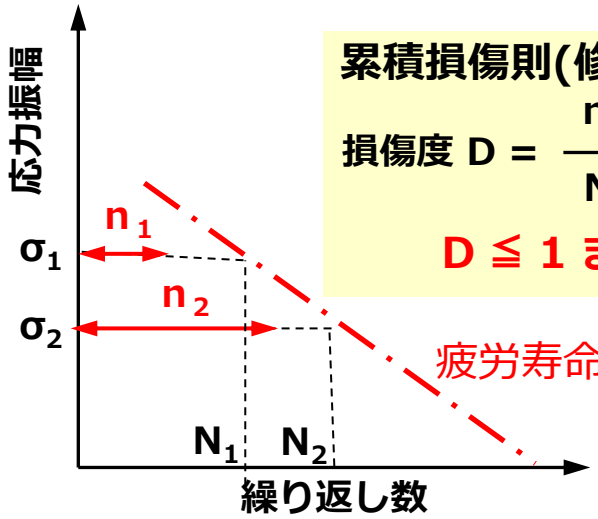
①複合圧力容器を設計するための技術基準、データが不足

- ライナーの疲労特性
- 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

課題①
実容器を用いた安全性を確認する試験が必要なため費用と時間がかかる

目的①
評価方法の簡素化

②累積損傷則適用により使用回数を増加させたい



累積損傷則(修正マイナー則)

$$損傷度\ D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} \cdots$$

D ≦ 1 まで使用できる

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の適用が困難

目的②
使用寿命延長

複合圧力容器の運営費低減につなげる

体制と役割

試験片による評価

KHK

ライナー試験片、CFRP試験片
評価法の検討

円筒試験体による評価

JSW

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

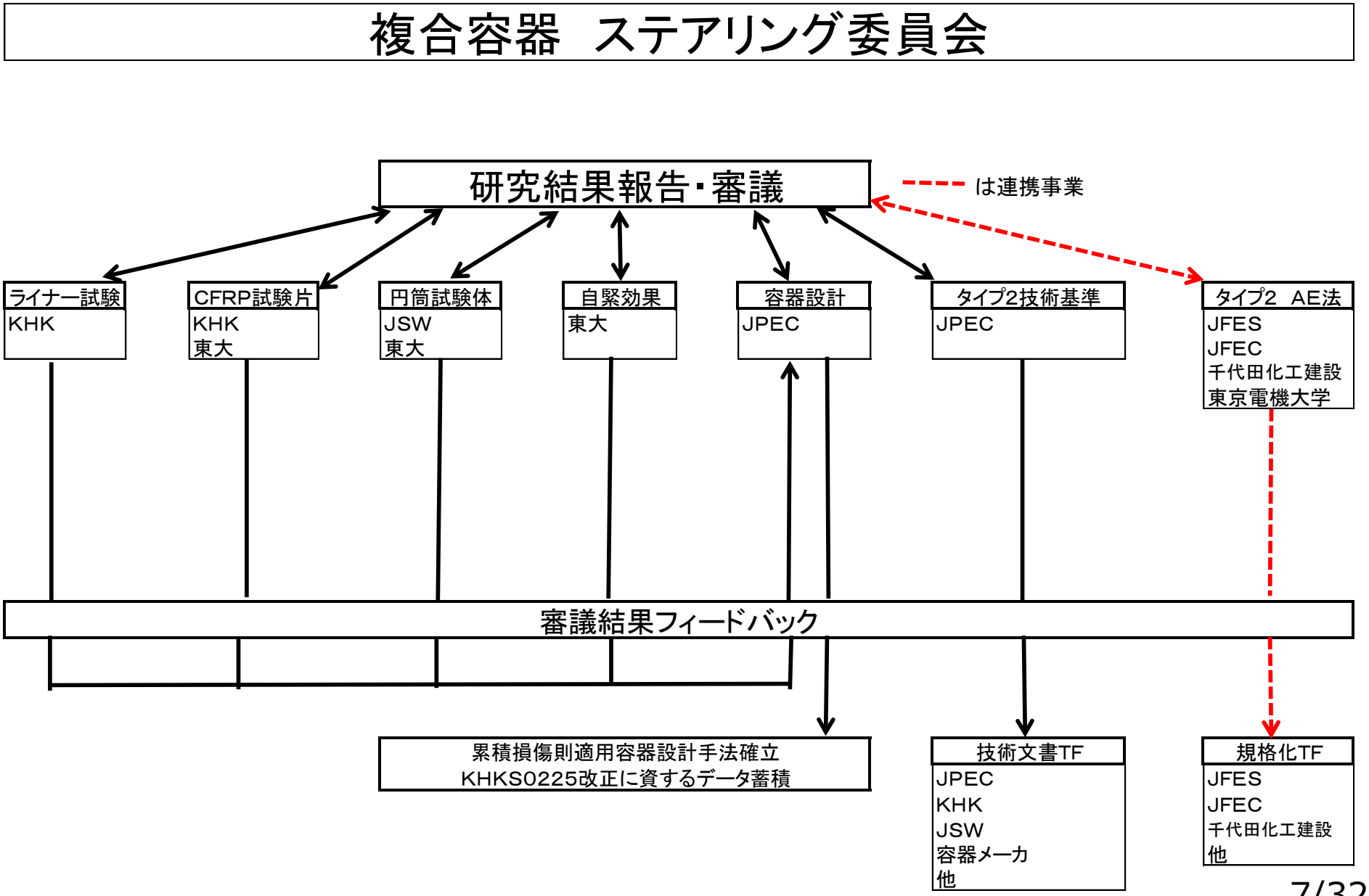
自緊効果および製造誤差までを
考慮したライナーおよびCFRP
に関する疲労設計手法の確立

実容器試験・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
複合圧力容器蓄圧器の技術基準
案の整備

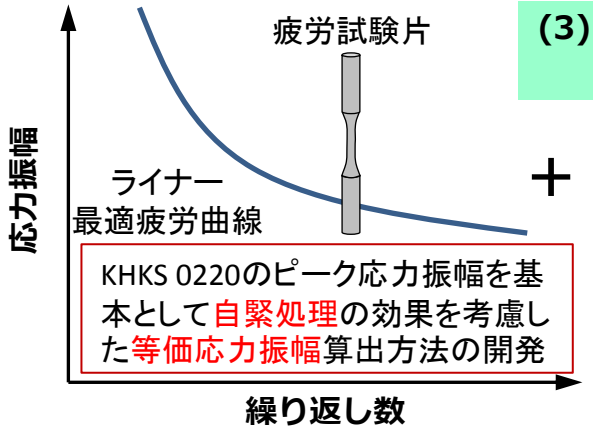
複合容器関連ＮＥＤＯ事業　推進体制



「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

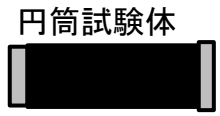
1．応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法の確立に向けた技術開発

(1) ライナー最適疲労曲線の作成(KHK)

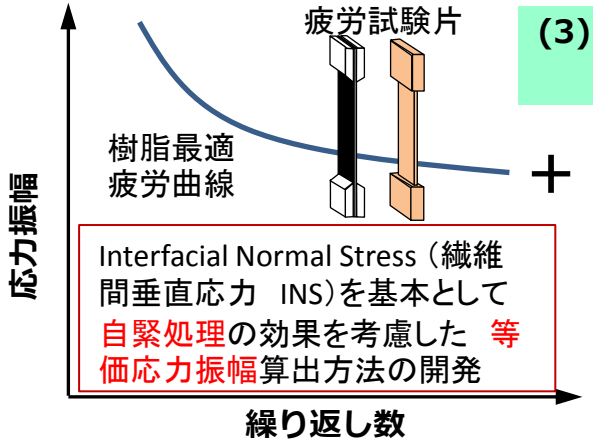


KHKS 0220のピーク応力振幅を基本として自緊処理の効果を考慮した等価応力振幅算出方法の開発

(3) 円筒試験体評価法の検討(JSW、東大)

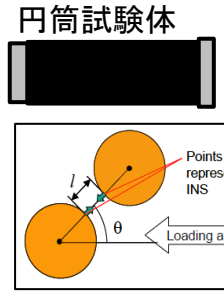


(2) CFRPの疲労強度評価のための樹脂最適疲労曲線の作成(KHK、東大)



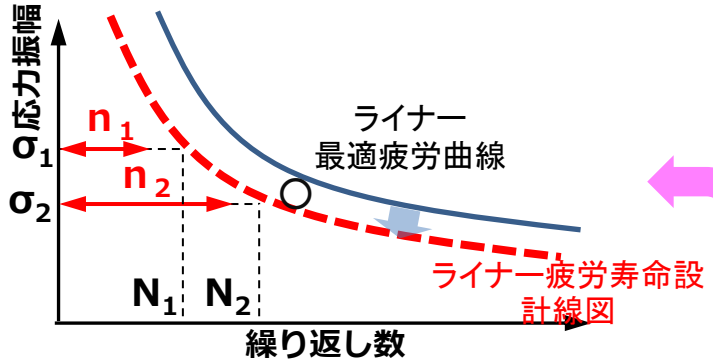
Interfacial Normal Stress（繊維間垂直応力　INS)を基本として自緊処理の効果を考慮した　等価応力振幅算出方法の開発

(3) 円筒試験体評価法の検討(JSW、東大)



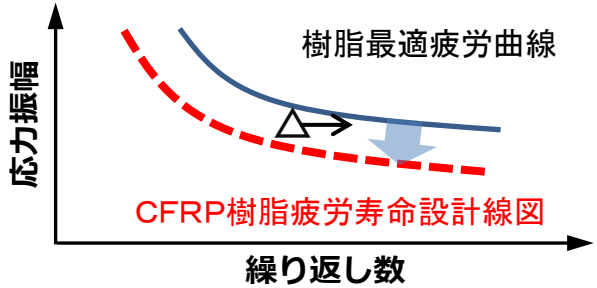
ミクロスケール有限要素シミュレーション

(4) ライナー・CFRP樹脂疲労寿命設計線図作成(東大)



(5) 実容器試験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：n1/N1+n2/N2+・・・=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(案)制定

1 複合圧力容器設計手法確立に向けた技術開発
1-(1) ライナー試験片評価法の検討

1-(1) ライナー試験片評価法の検討
A6061－T6の最適疲労曲線実験式の検討(1)

目的） ライナーの最適疲労曲線の作成に向け、過去の実験結果を用いて最適疲労曲線実験式を検討する

全て同じT6処理でありながら，引張強さ(又は降伏比)の大きさでグループ分けが可能

	グループ	試験片記号	引張強さ σ_u (MPa)	耐力 σ_Y (MPa)	降伏比 γ (-)	ヤング率 E (GPa)	伸び (%)	絞り Φ (-)	n数 (本)
取得データ *1)	高強度	A材	354	341	0.963	69.2	20	58	26
	低強度	B材	299	260	0.870	69.5	24	58	18
	高強度	C材	389	372	0.956	71.0	17	47	13
	高強度	D材	342	321	0.939	69.1	19	56	6
	高強度	E材	425	412	0.969	74.9	15	39	14
	低強度	F材	318	283	0.890	69.0	21	50	14
参照ﾃﾞｰﾀ *2),*3)	低強度	文献2)	317	279	0.880	—	—	—	5
	低強度	文献3)	317	279	0.880	—	16	—	8

【出典】
*1) 2003～2005年度METI委託　石油精製業保安対策事業（燃料電池システム技術基準調査）
2006～2009年度METI委託　石油精製業保安対策事業（FRP製水素用蓄圧器の設計基準に関する調査研究）
*2) 2013～2017年度NEDO事業　複合圧力容器蓄圧器の基準整備等に関する研究開発
*3) 松岡ら，115MPa水素ガス中におけるアルミニウム合金の強度特性，日本機械学会論文集，Vol.84，No.865，（2018）

1-(1)　A6061－T6の最適疲労曲線実験式の検討(２)

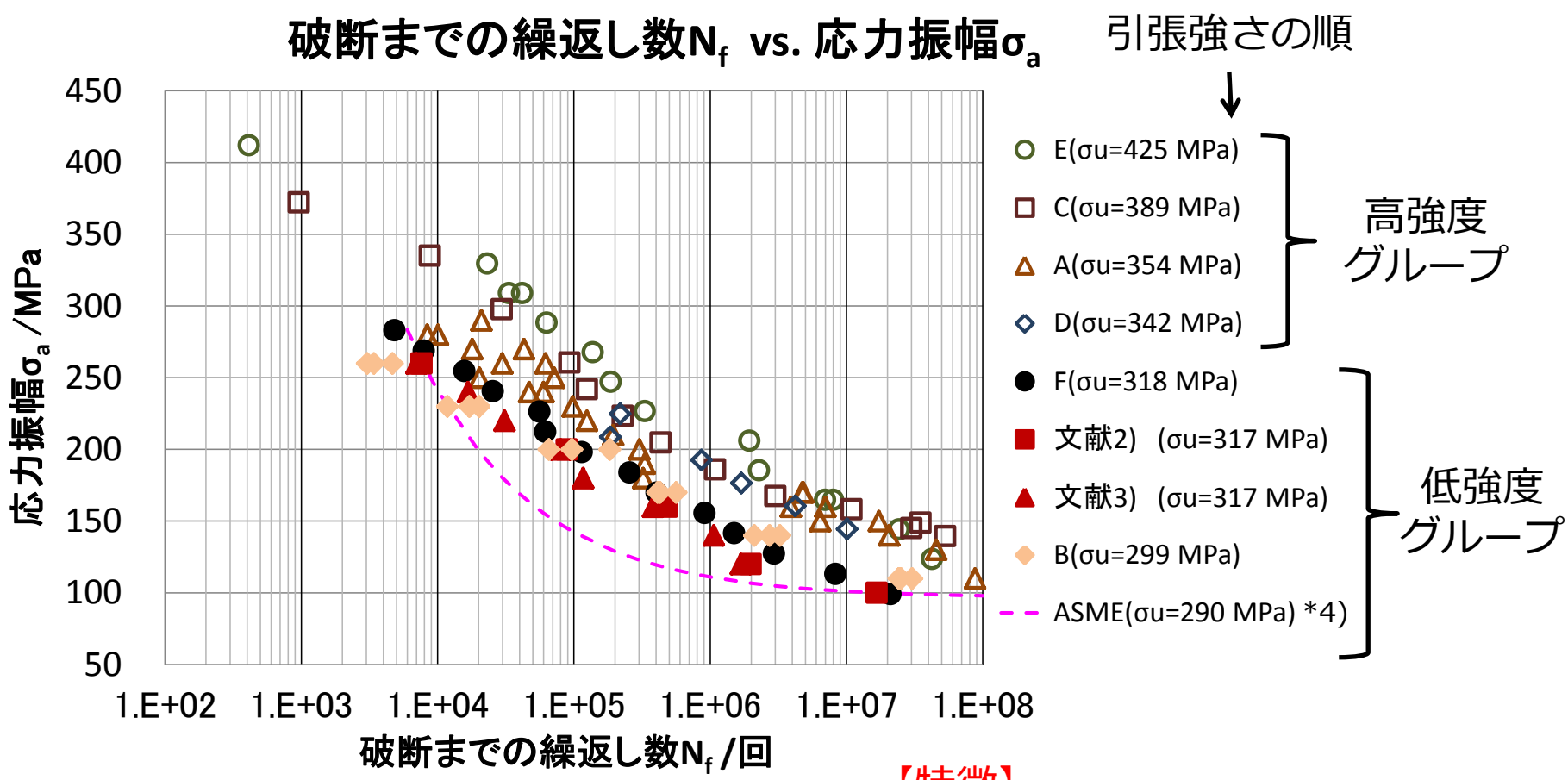


図　高強度材と低強度材の
A6061-T6のS-N線図

【特徴】

① 引張強さ依存性があり、低強度と高強度にグループ分けできる

② 高繰返し数領域で引張強さ依存性が減少する

③ 明確な疲労限度はない

【出典】

*4) G.T.Yahr, FATIGUE DESIGN CURVES FOR 6061-T6 ALUMINUM(1993)

1-(1)　A6061－T6の最適疲労曲線実験式の検討(３)

【検討する基本式】

$$\sigma_a = K \times N_f^{L} + M$$

	得られたS-N線図の特徴	実験式への反映点
①	引張強さ依存性があり、低強度と高強度にグループ分けできる	N_fの係数Kと指数Lにσ_uを含む
②	高繰返し数の領域で引張強さ依存性が減少する	σ_uに指数を設ける
③	明確な疲労限度はない	切片M=0

A6061-T6の最適疲労曲線実験式を以下とし，
定数A，B，C，Dを求める

$$\sigma_a = A\sigma_u^{B} \times N_f^{C\sigma u + D}$$

1-(1)　低強度グループの実験式

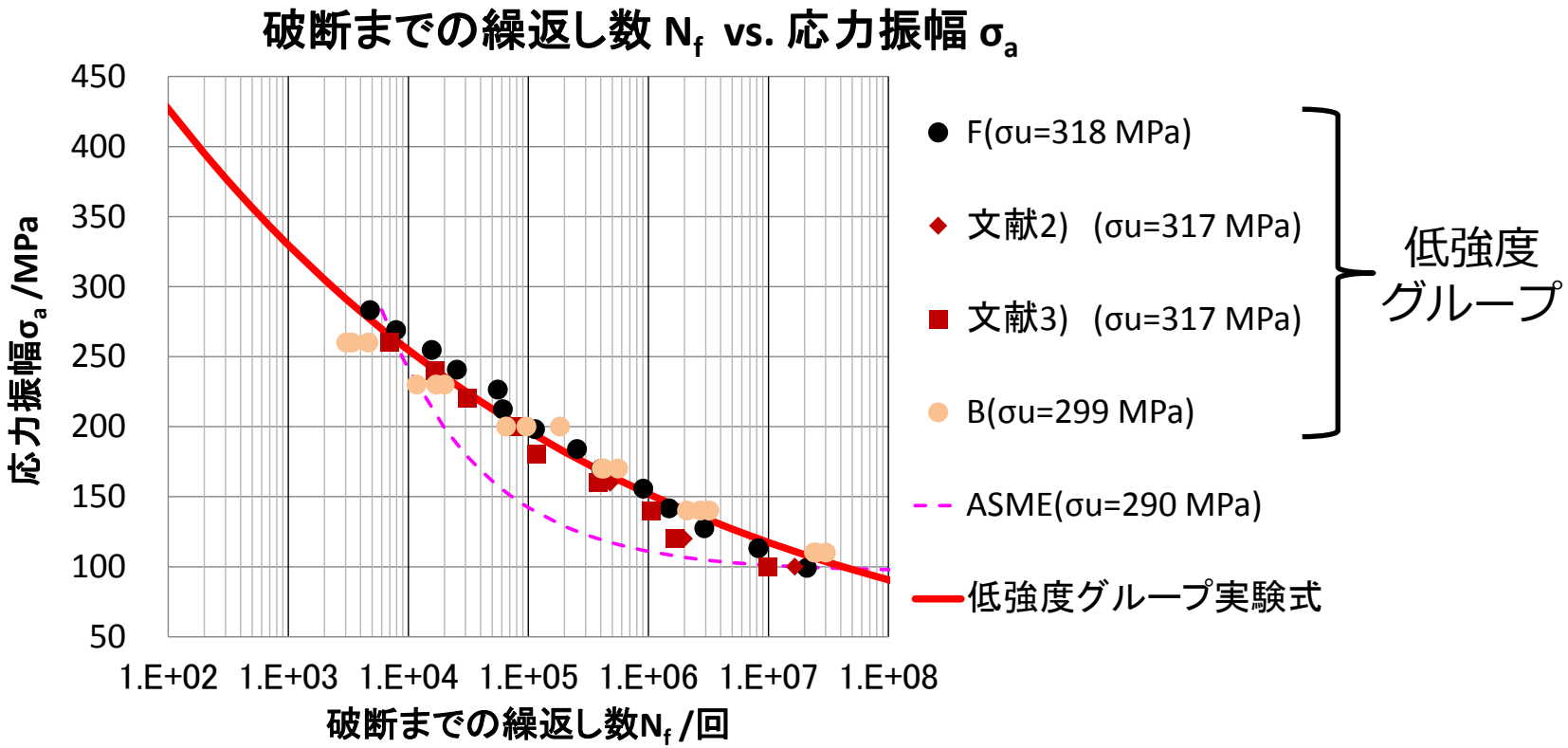


図　低強度グループのプロット例

【低強度グループ実験式】

$$\sigma_a = 715 \times N_f^{-0.112}$$

【特徴】

① Nfの係数に引張強さの項を含まない

② ASMEのグラフと形状が異なる

1-(1)　高強度グループの実験式

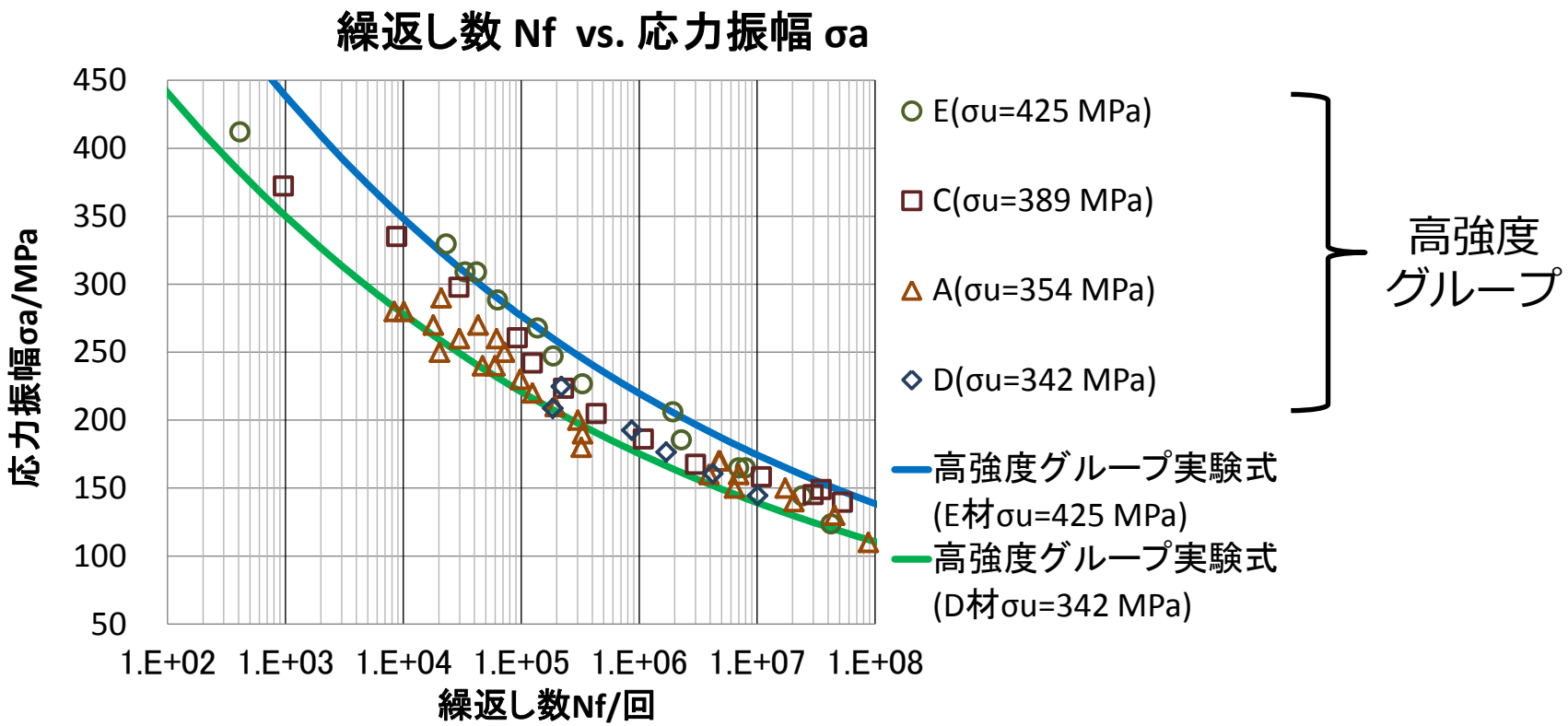


図　高強度グループの強度別プロット例

【高強度グループ実験式】

$$\sigma_a = 1.65\,\sigma_u^{1.0365} \times N_f^{-0.100}$$

【特徴】

① Nfの係数に引張強さの項を含む

② σ_uの指数が約1.0となっており、よく行われる正規化処理と同じである

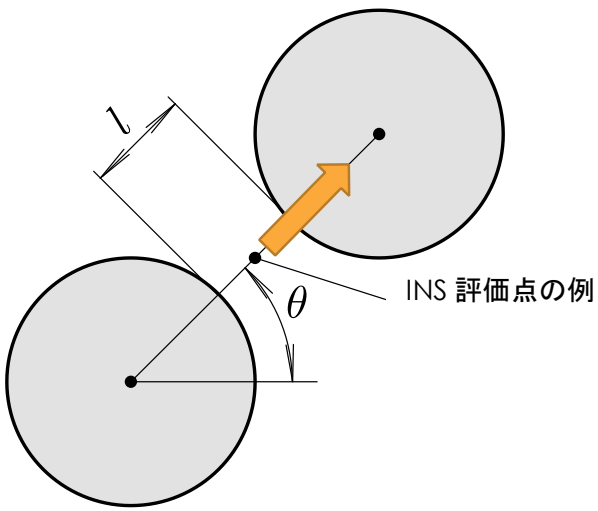
1-(2) CFRP試験片評価法の検討

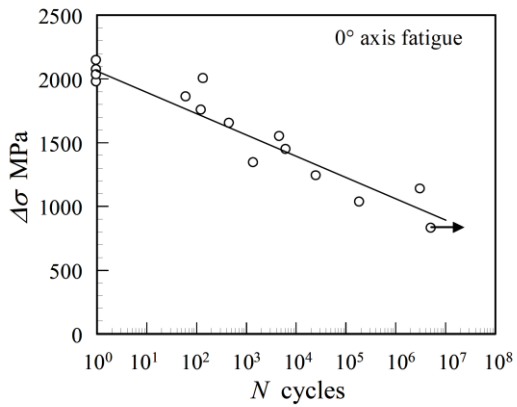
1-(２) CFRP試験片評価法の検討
ミクロスケール有限要素シミュレーション(１)

目的） CFRPの樹脂に生じる応力を詳細に評価するための、炭素繊維と樹脂を区分したミクロモデルによる有限要素シミュレーション法を構築する

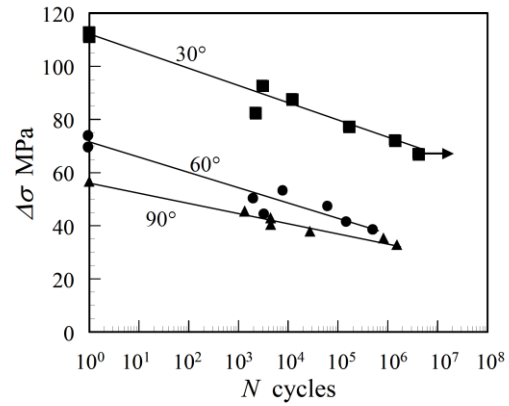
○ **Interfacial Normal Stress (INS) の利用**

INS：炭素繊維の中心を結ぶ線分を法線とする垂直応力



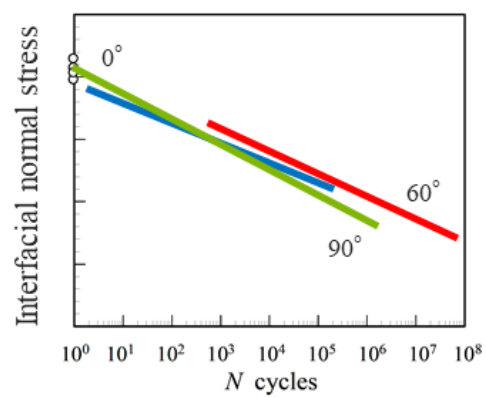


(a) On-axis fatigue



(b) Off-axis fatigue

一方向強化 CFRP試験片 ごとの S-N 曲線 [*]からINS規準で単一のS-N曲線に

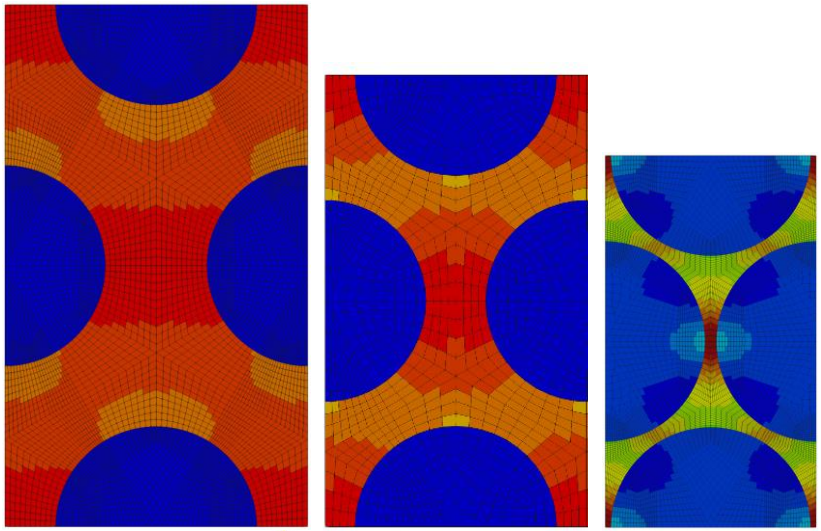


*) K. Tohgo et al., Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, JSME, Vol. 2, No. 3, pp.342--353 (2008).

1-(2)　ミクロスケール有限要素シミュレーション(２)

○ 有限要素シミュレーション手法の検討

・過去の一方向強化CFRP 試験片（０°）の炭素繊維方向引張疲労試験結果で検証した結果、Interfacial Normal Stress (INS) で整理することにより、炭素繊維の偏りも考慮すれば適切にCFRPの疲労試験結果を予測できることがわかった



V_f=0.4　　V_f =0.54　　V_f =0.8

有限要素モデル

- 正三角形頂点に繊維中心軸配置 (細密充填)
- 繊維直径 7 μm
- 繊維体積含有率(V_f)= 0.4, 0.54, 0.8
- 炭素繊維は直交異方性体としてモデル化
  （繊維直交方向のヤング率, ポアソン比を繊維方向の1/10と仮定）

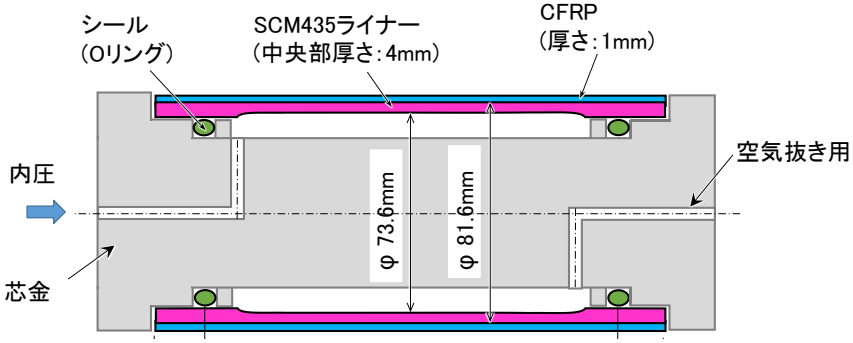
CFRP の材料定数

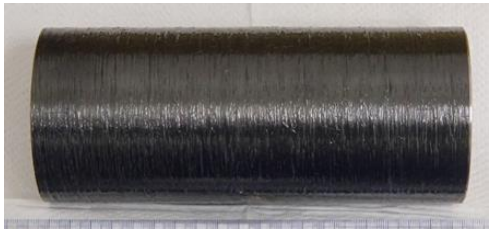
	ヤング率 [GPa]			ポアソン比 [-]		
	x	*y*	*z*	*xy*	*xz*	*yz*
炭素繊維	23	23	230	0.26	0.026	0.026
エポキシ樹脂	3.3			0.41		

1-(3) 円筒試験体評価法の検討

1-(3) 円筒試験体評価法の検討
フープラップ複合圧力容器対応円筒試験体の評価(１)

目的）自緊処理を変えた試験体の圧力サイクル試験を実施し、ライナー及びCFRPの応力状態と疲労特性に及ぼす自緊処理の効果を把握する





○試験体製作

ライナーは、実容器で想定される強度の下限と上限を狙った2種類(805、920MPa)の材料を使用して製作した

○試験

・破裂試験

・圧力サイクル試験

	自緊圧力 [MPa]	圧力サイクル試験		
		90%⇔0% 完全片振り 圧力範囲[MPa]	90%⇔50% 部分片振り 圧力範囲[MPa]	90%⇔70%
試験体A	79	0～72	44～72	今後検討
試験体B	99	0～82	50～82	今後検討

*）自緊条件及びサイクル試験条件は、引張強度で規準化した応力が同一となるように圧力範囲を設定した

1-(3)　フープラップ複合圧力容器対応円筒試験体の評価(２)

圧力サイクル試験内容および試験本数

鋼種	試験体A SCM435TK シームレス管		試験体B SCM435 鍛造丸棒		試験実施
種類	自緊なし	自緊あり	自緊なし	自緊あり	
90%⇔0% (完全片振り)	2	2	2	2	実施中
90%⇔50% (部分片振り)	2	2	2	2	
90%⇔70%	2	2	2	2	2019年度 後半

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

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３実容器サブスケール品の概要と試験内容

目的）疲労寿命設計線図を用いた設計手法を実証するための実容器圧力サイクル試験データを取得する

○ **容器仕様**

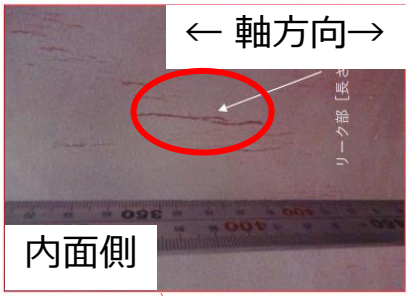
材質	ライナー；A6061-T6，　繊維；PAN系炭素繊維
内容積	76ℓ
設計圧力	99MPa
容器寸法	外径：458.7mm　長さ：1,520mm
損傷形態	胴部漏洩
最小破裂圧力	223ＭＰa(設計圧力の2.25倍)以上　←252.9MPaを確認

○ **試験内容**

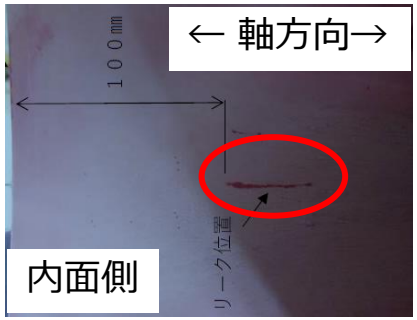
（１）試験方法：圧力サイクル試験　（試験温度：常温～約50℃）
（２）試験圧力条件：90%⇔0%, 90%⇔30%, 90%⇔50%, 90%⇔70%
（水素ステーション蓄圧器の使用条件を想定）
（３）圧力媒体：50%エチレングリコール水溶液
（４）試験後の確認ポイント
①損傷箇所
②疲労寿命に及ぼす圧力振幅の影響、圧力下限・平均圧力の影響

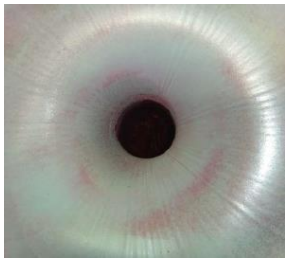
1-(5)　タイプ３実容器サブスケール品の圧力サイクル試験結果

○ 90%⇔0% 試験： 11.1万回 胴部漏洩

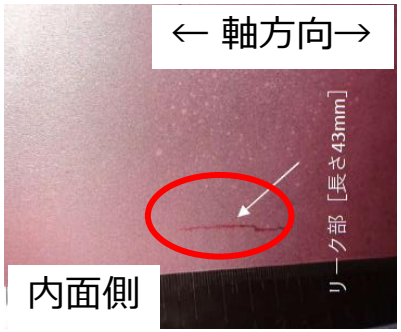


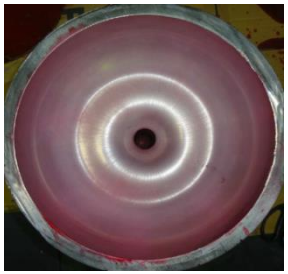
○ 90%⇔50%試験： 36.5万回 胴部漏洩



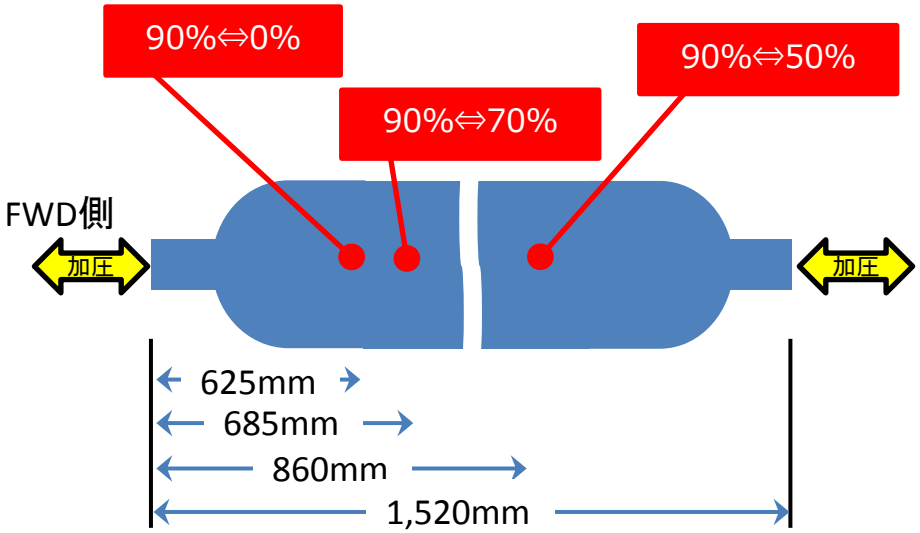


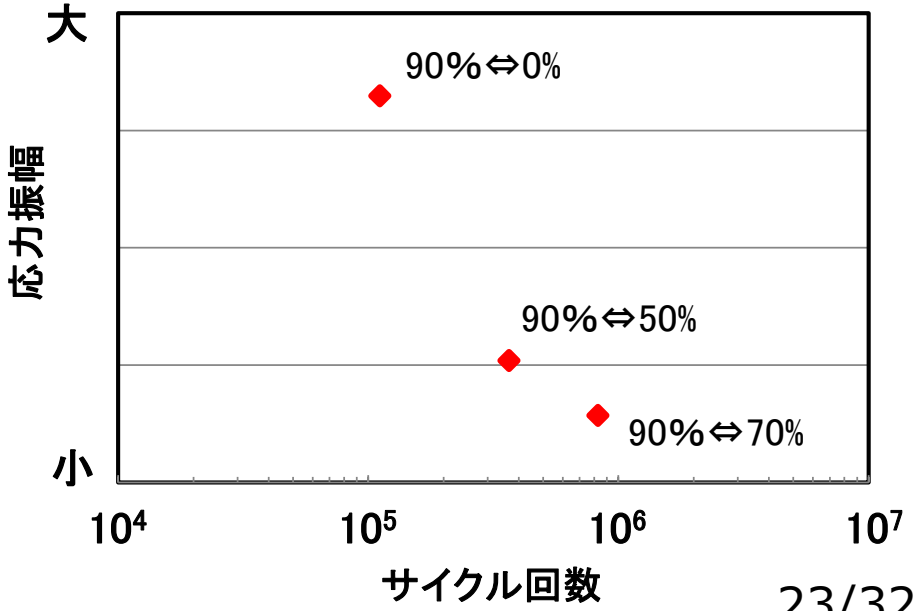
○ 90%⇔70%試験： 82.7万回 胴部漏洩





○ 90%⇔30%試験： 実施中

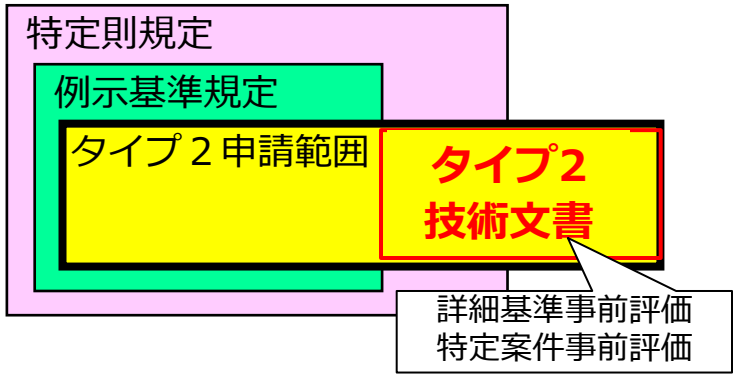




２　技術基準の整備に向けた技術開発

2 複合圧力容器の技術基準の整備に向けた技術開発
2-(1)　タイプ2技術文書(案)策定

目的） タイプ2の特定案件事前評価申請を想定し、特定則・例示基準の規定以外に考慮すべき注意事項及び判定基準などを例示した技術文書(案)を策定する

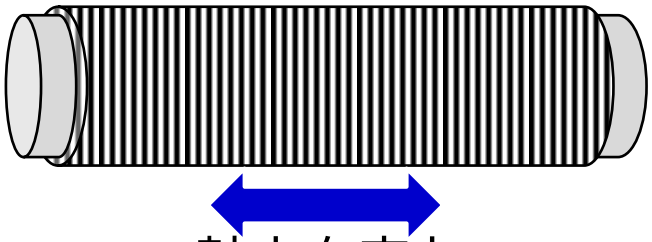


タイプ２技術文書(案)構成案

項目	主に参考とした規格	内容
1.適用範囲	KHKS 0225 ASME BPVC Sec.Ⅷ Div.3	内容積、設計圧力・温度、使用期間
2.用語の意味		
3.材料	JPEC TD-0003 低合金鋼技術文書 KHKS 0225	耐圧部分の金属材料・非金属材料
4.設計	ASME BPVC Sec.Ⅷ Div.3 JPEC TD-0003 低合金鋼技術文書 KHKS 0220	計算厚さの設定、詳細応力解析
5.工作および検査	KHKS 0220 KHKS 0225	材料の切断、成形、熱処理、内面検査、機械試験、口金部ねじ加工、電位差腐食防止、ワインディング、熱硬化処理等
		材料、設計、加工、構造の検査
6.耐圧試験	KHKS 0220	耐圧試験
7.気密試験	KHKS 0220	気密試験
引用規格		

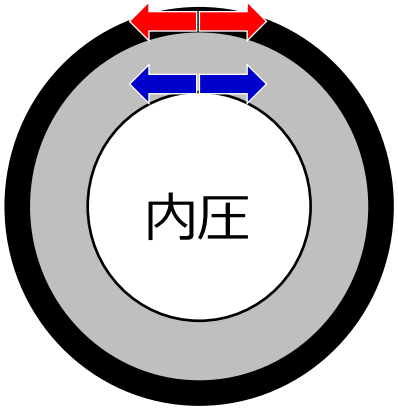
2-(1)　タイプ2蓄圧器設計のコンセプト

タイプ2蓄圧器の応力分担



軸方向応力

軸方向応力は全て金属層で負担



CFRPは周方向応力を分担して金属層を補強する

↓

多層円筒胴の考え方で応力計算が可能

⇩

金属層/CFRP層の機械的性質の設定

⇩

弾性解析による計算厚さの設定

⇩

詳細応力解析による安全性評価

JPEC-TD 0003　容器寿命の評価

技術文書で新たに定義

2-(2)　KHKS 0225の改正

目的）応力解析・疲労解析に基づく容器設計手法及び累積損傷則の適用方法を導入して改正する

［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

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

タイプ３＆４用
複合容器技術基準制定

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

NEDO事業成果による蓄圧器の技術体系イメージ

鋼製容器

複合容器

附属書へ引用希望

附属書へ引用希望

大改正へ

タイプ２
技術文書

本NEDO事業

本NEDO事業：
タイプ３　Design By Analysis
①実容器サイクル試験を課さない
②累積損傷適用

Design By Analysis

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(予定)	2022年度(予定)
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	容器設計の基礎となる疲労曲線作成			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圧力サイクル試験 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(案)策定			タイプ3：KHKS0225改正に向けた提案 ISO TC197 WG15への提案	

まとめ／今後の計画

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－（１）　ライナー試験片評価法の検討

【成果・進捗】・過去の実験結果を用いて2種類の最適疲労曲線とその実験式を提案した

【今後の計画】・ライナーの疲労試験を実施しデータ件数を増やすとともに、A6061-T6に関する最適疲労曲線（実験式）に関する検討を継続し、作成する

１－（２）　CFRP試験片評価法の検討

【成果・進捗】・CFRP試験片、エポキシ樹脂単体試験片を製作し、圧力サイクル試験を開始した

・CFRP試験片の炭素繊維と樹脂の応力をInterfacial Normal Stress(INS)により整理する有限要素シミュレーション手法を検討した

【今後の計画】・各試験片の疲労試験結果及びミクロスケール有限要素シミュレーションから、樹脂の最適疲労曲線を作成する

１－（３）　円筒試験体評価法の検討

【成果・進捗】・フープラップ複合圧力容器対応円筒試験体を製作し、圧力サイクル試験を開始した

【今後の計画】・ライナーおよびCFRPの応力状態と疲労特性に及ぼす自緊処理の影響を把握する

１－（４）　自緊効果を考慮した疲労寿命設計線図の作成

【成果・進捗】・樹脂単体試験片を用いた疲労試験結果とミクロスケール有限要素シミュレーションの解析結果を用いてCFRPの疲労寿命設計線図を作成する手法について検討した

【今後の計画】・各試験片の疲労試験結果により作成した最適疲労曲線に基づき、圧力サイクル時の容器の応力状態を勘案して、タイプ2複合圧力容器のライナー及びCFRPに関する疲労寿命設計線図を導出する

まとめ／今後の計画

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

【成果・進捗】・胴部漏洩仕様のタイプ３実容器サブスケール品を用いた圧力サイクル試験を開始した

【今後の計画】・圧力サイクル試験を継続し、疲労寿命設計線図を用いた設計手法を実証する為のデータを蓄積する

2　複合圧力容器の技術基準の整備に向けた技術開発

【成果・進捗】・タイプ2技術文書(案)策定のため、検討分科会及びタスクフォースを立ち上げ、材料と設計に関する課題を抽出し、議論を開始した

・KHKS 0225に関するメーカーの改正要望を抽出した

【今後の計画】・課題に対する検討を継続し、タイプ2技術文書(案)を策定する

・KHKS 0225の改正方針を検討し、改正提案につなげる

ご清聴ありがとうございました