

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2)

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

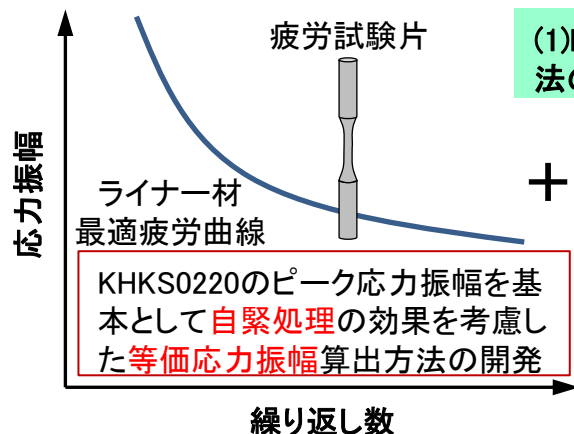
**超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業／
水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／
複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に
関する技術開発**

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

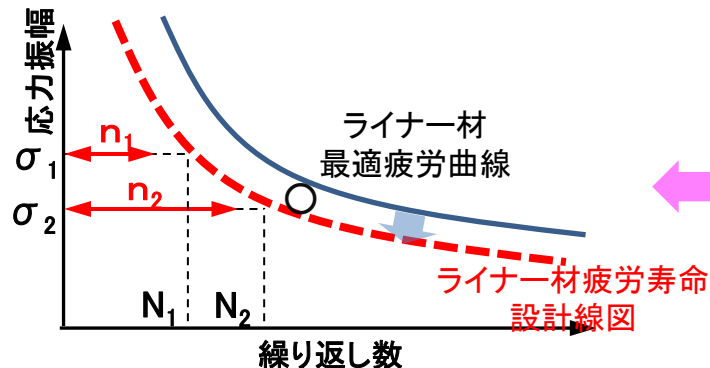
(1)a ライナー材最適疲労曲線の作成 (KHK)



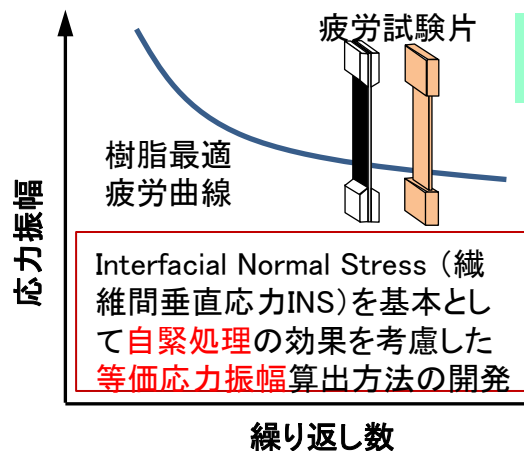
(1)b 円筒試験体評価法の検討 (JSW、東大)



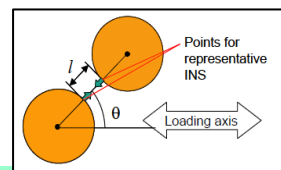
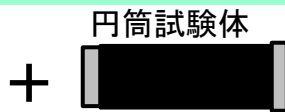
(1)c, (2) ライナー材・CFRP材樹脂疲労寿命設計線図作成 (東大)



(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)



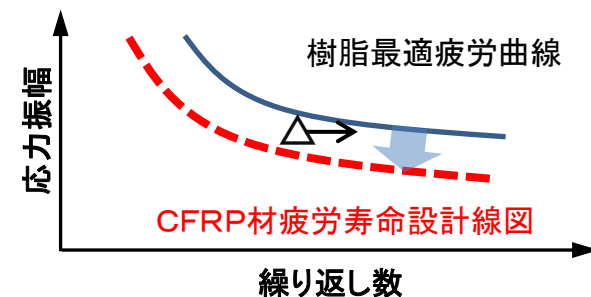
(3) 円筒試験体評価法の検討 (JSW、東大)



(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

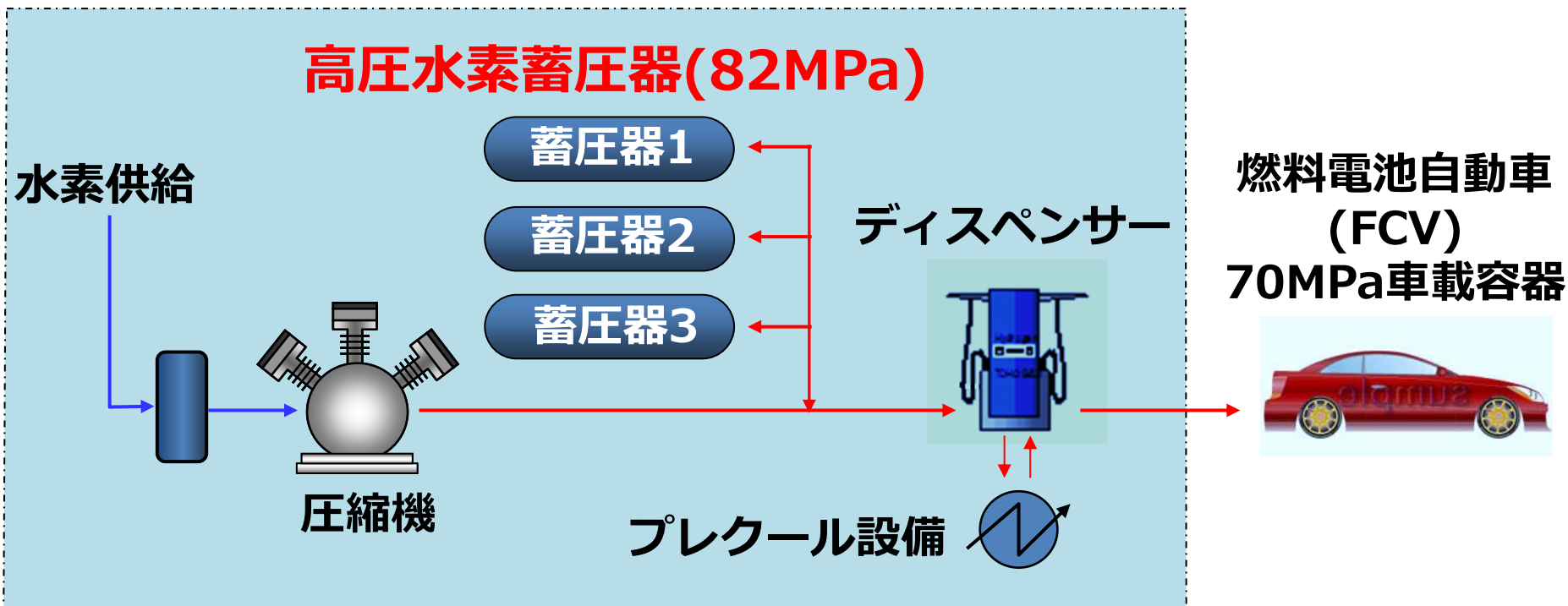
実容器試験結果から疲労寿命設計線図に基づき漏洩の予測が可能であることを実証
→ 累積損傷則: $n_1/N_1 + n_2/N_2 + \dots = 1$ を適用可能に



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

水素ステーション用蓄圧器への要望



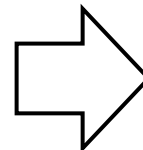
水素基本戦略

⇒ステーションコスト半減

将来必要な充填回数

・100 台/日 × 20 年

⇒充填回数: 730,000回



蓄圧器への要望

低コスト

かつ

長寿命

本テーマの目的と目標

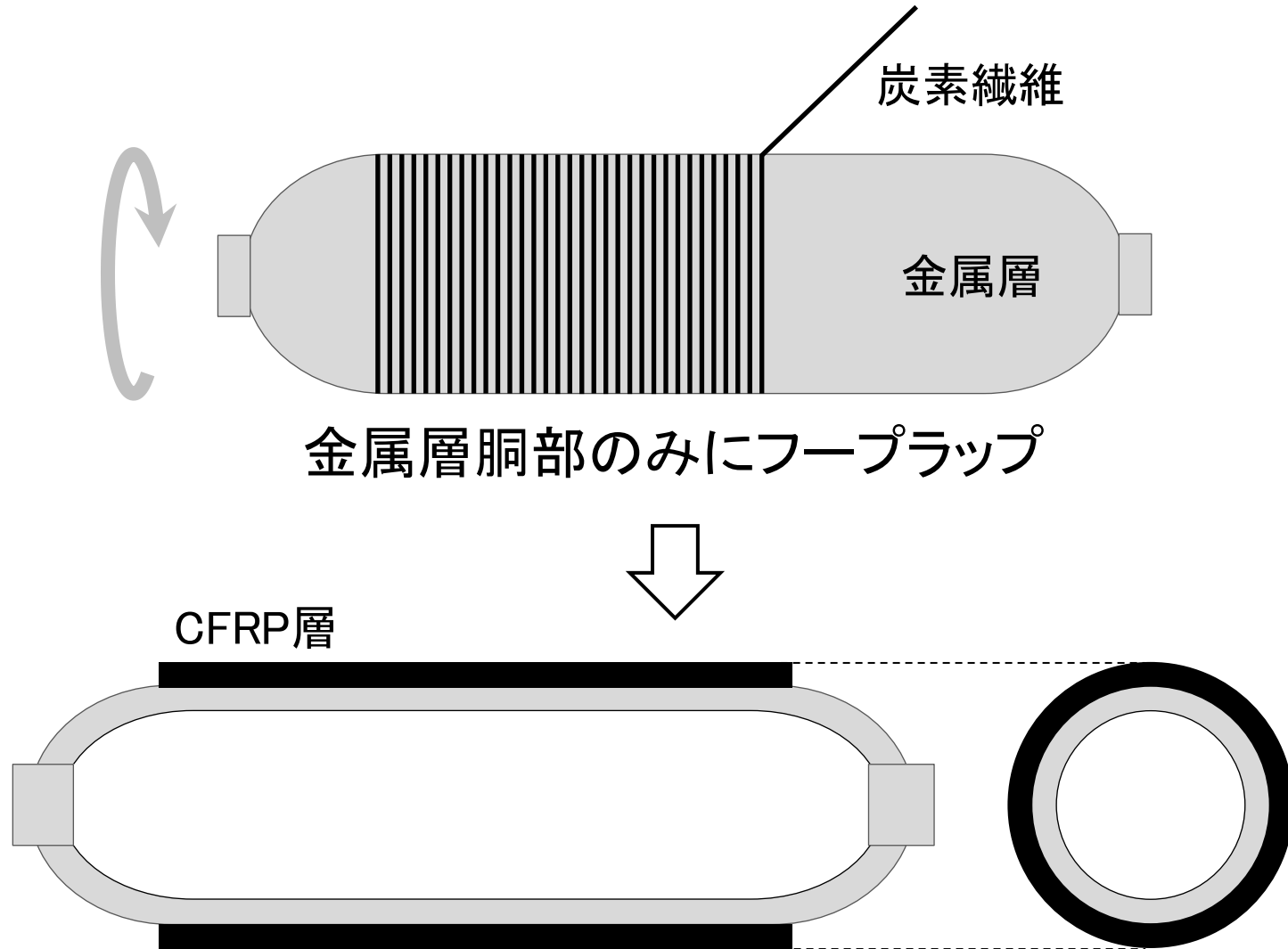
目的

タイプ2蓄圧器の普及を促進し、水素ステーションの整備費、運営費の低減に貢献する

目標

2020年度末までに、タイプ2蓄圧器の製造(材料、公式による設計方法、解析による設計方法、工作及び検査等)に関する技術文書(JPEC-Technical Document)を発行する

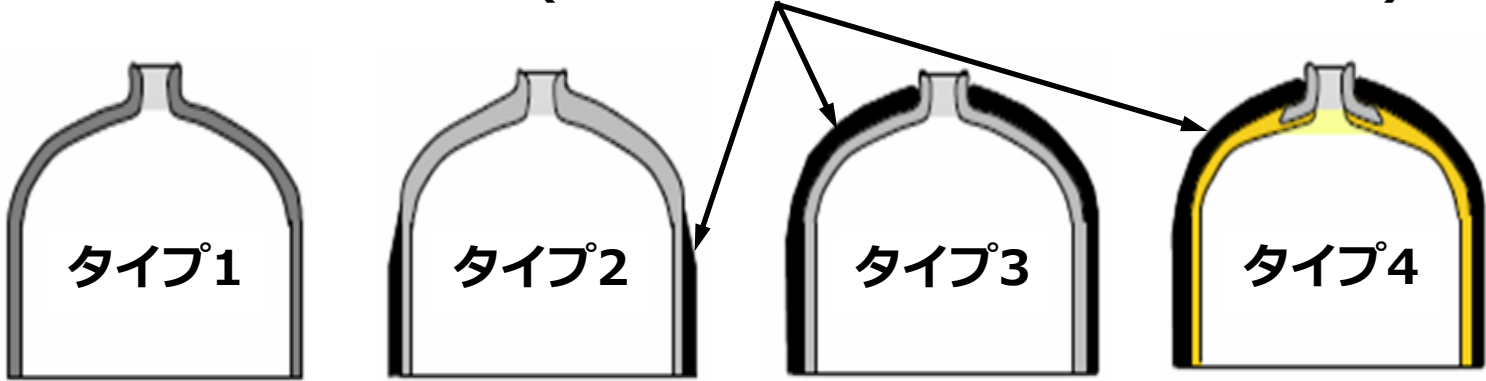
タイプ2蓄圧器の特徴



✓ 軽量で長寿命が期待できる

水素ステーション用蓄圧器に関する技術基準

炭素繊維強化プラスチック：CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)



機能	型式			
	タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4
ガス封入	低合金鋼	低合金鋼金属層		アルミライナー
耐圧構造		低合金鋼金属層	CFRP (周方向)	樹脂ライナー 金属ボス部
技術基準	KHKS0220等	技術基準が存在しない		KHKS0225
設計手法	公式による設計 解析による設計			試験による設計

圧力設備の強度設計法

参考:(日本規格協会)新版圧力容器の構造と設計

強度設計	適用事例	考え方
公式による設計 (Design by Rule)	特定設備 (圧力が低い場合)	➤ 設計に用いる公式が与えられている ➤ 起こりうる全ての破壊モードを考慮せず、大きい安全係数を設定し、他の破壊モードに対する安全性を確保する
解析による設計 (Design by Analysis)	特定設備 (圧力が高い場合)	➤ 起こり得る全ての破壊モードを考慮し、詳細応力解析を実施して、安全性を確保する ➤ 結果として安全係数を小さく設計できる
試験による設計 (Design by Test)	車載容器	➤ 実容器を試験体とし、実際の使用環境を模擬した負荷を付与して安全性を検証する

タイプ2蓄圧器の課題と解決方針

- 国内にタイプ2蓄圧器の設計・製造に関する技術基準が存在しないことが、水素ステーションへのタイプ2導入が遅れている一因である
- ASME Sec.VIII Div III等に参加となる基準があるが、試験による設計のため製造認可取得までに膨大な費用と時間がかかる

出典: 日本製鋼所 H27-29NEDO成果報告書

ASMEで規定されている実容器試験項目

CFRP層厚さ測定
目視検査
水圧試験
体積膨張試験
液圧サイクル試験
破裂試験
繊維含有率測定



液圧サイクル試験の一例

- ✓ タイプ2蓄圧器を普及させるためには、設計・製造に関する技術基準が必要である
- ✓ 実容器試験を行わない、公式および解析による設計方法確立する

前NEDO事業の成果(2013-2017年度)

- ・応力解析をもとに設計したタイプ2蓄圧器を用いて実容器試験を実施

出典: JPEC他 H25-29NEDO成果報告書

46万サイクル試験して漏洩無し



液圧サイクル試験

出典: 日本製鋼所 H27-29NEDO成果報告書

解析で予測された破裂圧力: 235MPa
破裂した圧力: 233MPa

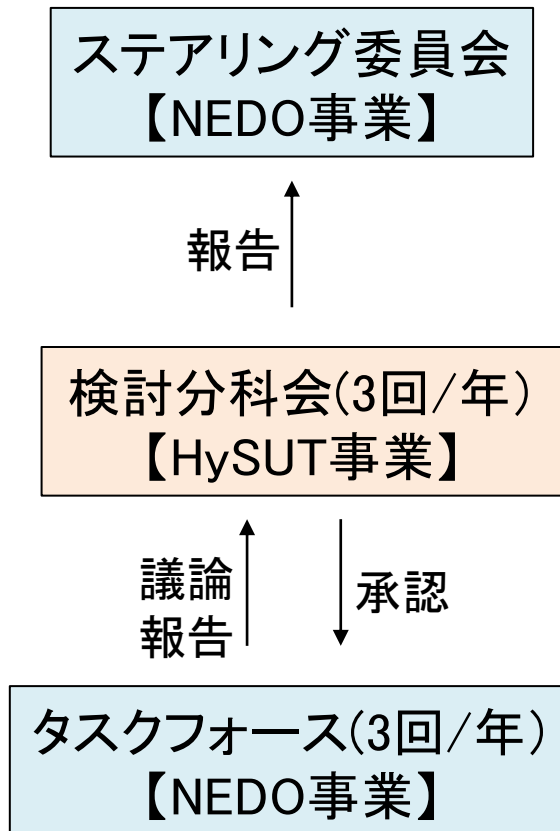


解析で予測された位置で破裂

破裂試験

✓ 前事業で応力解析に基づいてタイプ2蓄圧器が設計できることを実証した

タイプ2技術文書検討体制



タイプ2複合容器蓄圧器技術文書 検討分科会

主査	辻 裕一	東京電機大学 工学部 教授
委員	吉川 暢宏	東京大学 生産技術研究所 教授
委員	小川 武史	青山学院大学 理工学部 客員教授
委員	小茂鳥 潤	慶應義塾大学 理工学部 教授
委員	澁谷 忠弘	横浜国立大学 リスク共生社会 創造センター 教授
委員	小林 訓史	東京都立大学 教授
事務局	一般財団法人石油エネルギー技術センター	

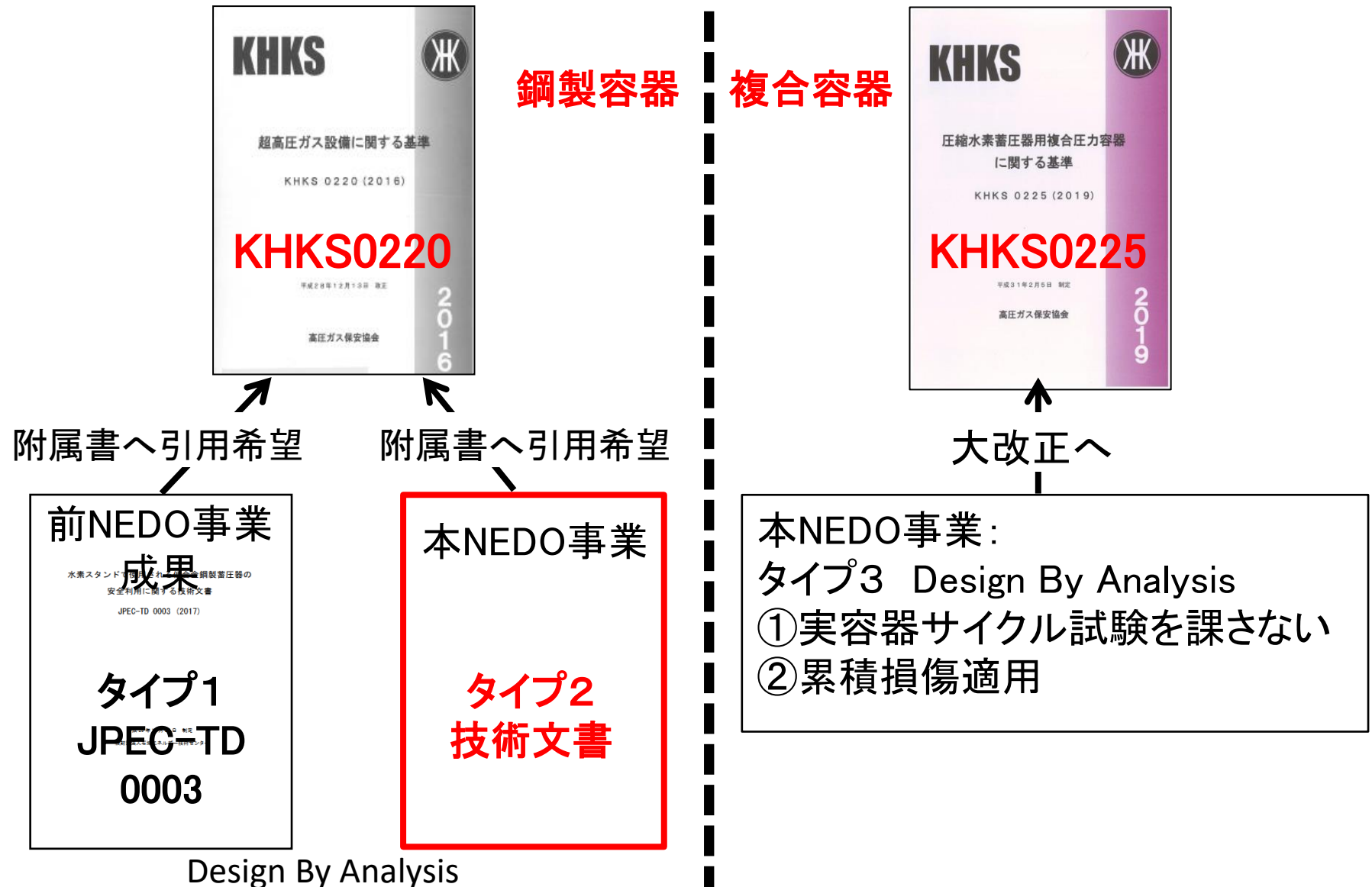
タイプ2複合容器蓄圧器技術文書 検討タスクフォース

- ・一般財団法人石油エネルギー技術センター
- ・高圧ガス保安協会
- ・国立大学法人東京大学
- ・株式会社日本製鋼所
- ・JFEスチール株式会社/JFEコンテイナー株式会社
- ・高圧ガス工業株式会社/高圧昭和ポンベ株式会社

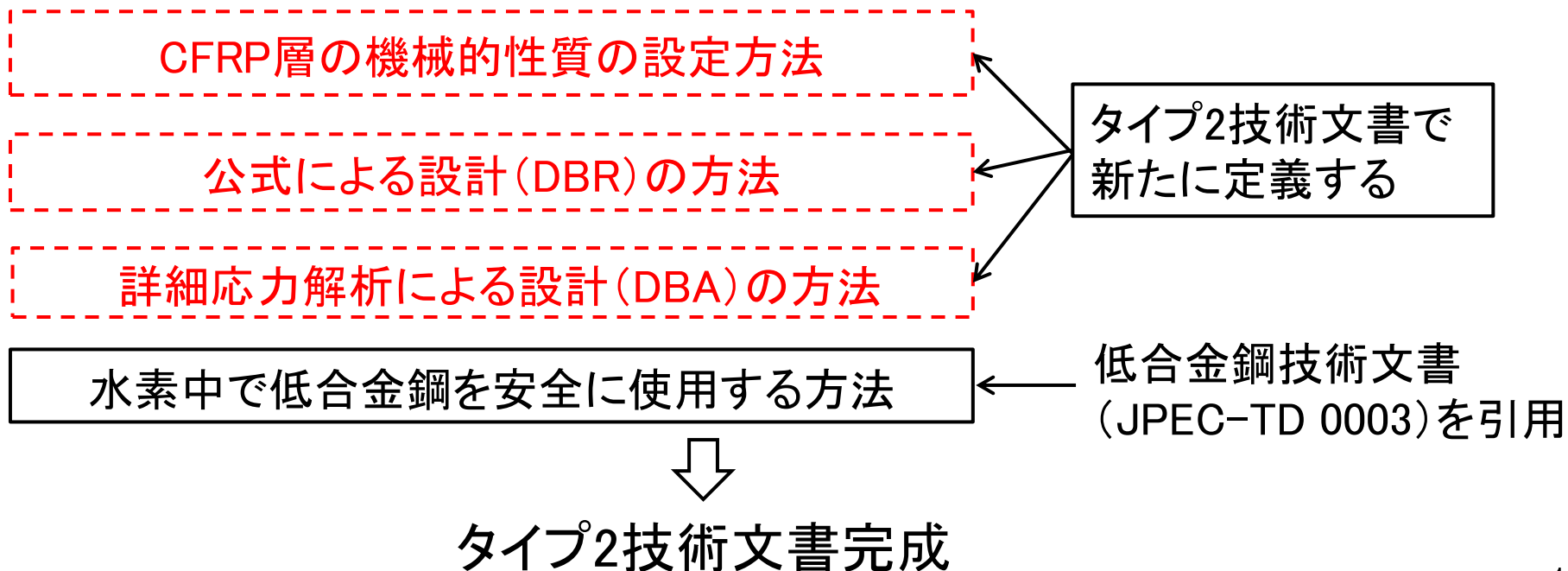
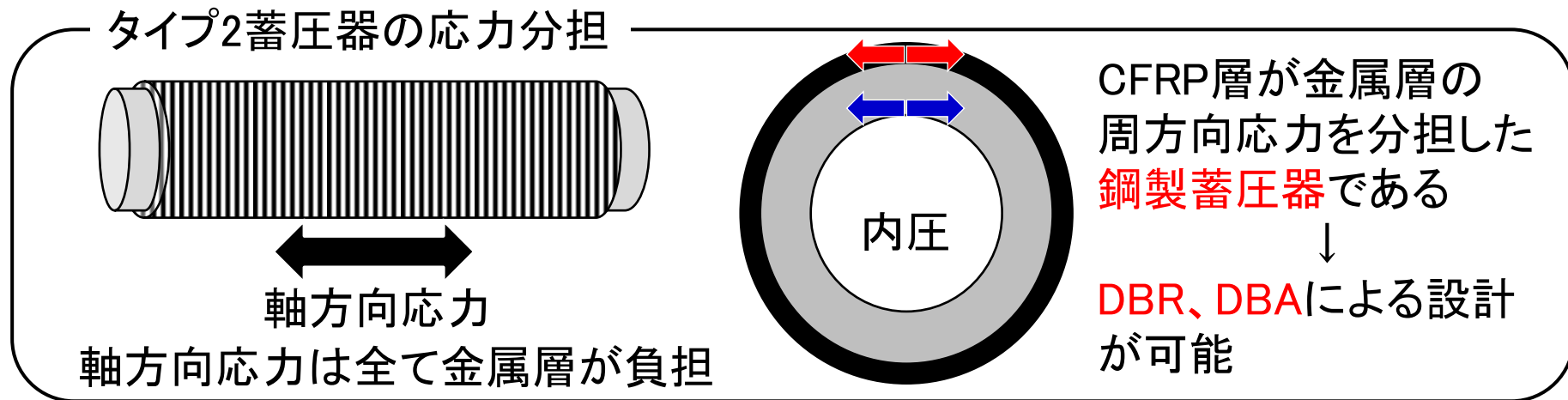
タイプ2技術文書作成スケジュール

	2018年度	2019年度	2020年度
タイプ2タスクフォース 課題の抽出および 解決方法の議論 課題解決のための試験 金属層異方性検証 技術文書化 考え方の議論 各項目の文書化 文書内容の修正	第1回 11/15 ★ 第2回 2/5 ★	第1回 5/30 ★ 第2回 10/8 ★ 第3回 2/19 ★	3回を予定 -----▶
タイプ2技術文書 検討分科会	第1回 12/5 ★ 第2回 3/5 ★	第1回 6/26 ★ 第2回 11/6 ★ 第3回 3/26 ☆	3回を予定 -----▶
複合容器ステアリング 委員会	第1回 9/18 ★ 第2回 1/18 ★ 第3回 3/26 ★	第1回 8/6 ★ 第2回 12/16 ★ 第3回 3/13 ★	-----▶
水素インフラ規格 基準委員会	審議過程の適正性の確認(プロセスレビュー)及び 技術基準の技術的評価(テクニカルレビュー)並びに 基準制定の承認に関する審議		JPEC-TD案 12月 ★ 完成

NEDO事業成果による蓄圧器技術体系のイメージ



タイプ2技術文書のコンセプト

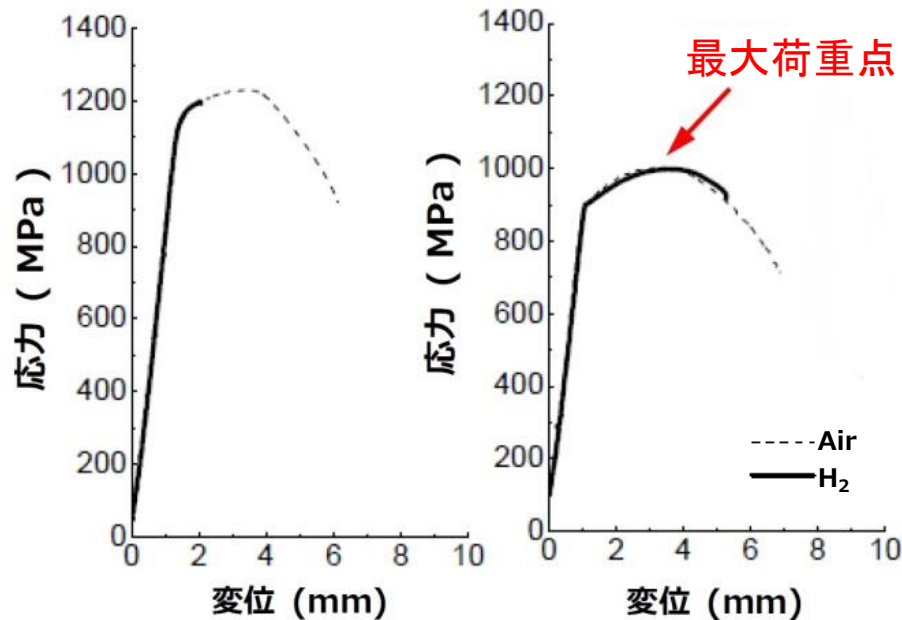


金属層に用いる低合金鋼の水素適合性評価

- 低合金鋼は水素の影響により材料特性が低下する場合がある。
- 水素適合性(水素に対する安全性)評価のため、SSRT・疲労試験を実施する。

出典: JPEC-TD 0003

水素中でも最大荷重点を超えること

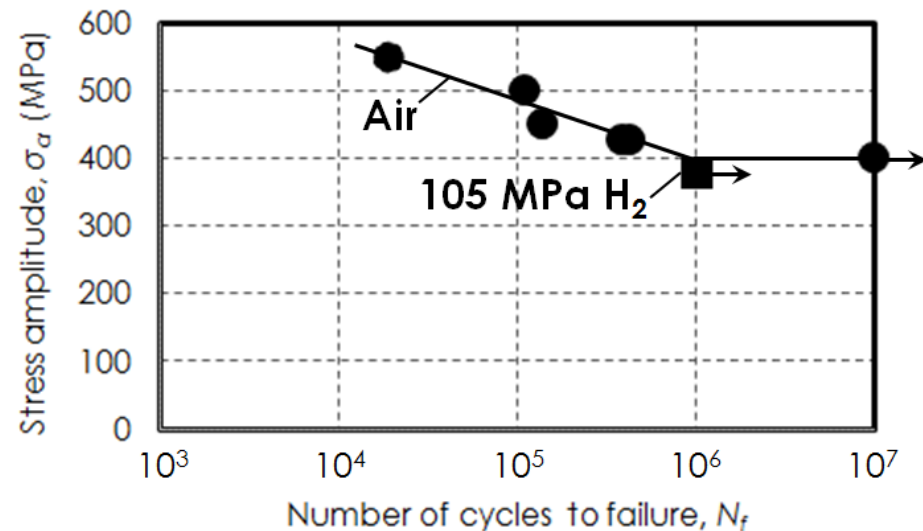


(a) 不適合

(b) 適合

水素中SSRT

水素中の疲労限度が大気中の疲労限度よりも低下しないこと



水素中疲労試験

- ✓ 金属層に用いる低合金鋼は水素適合性を満足する材料を使用しなければならない。

タイプ2設計コンセプト案 (Design by Rule)

公式(厚肉組み合わせ円筒の式)により各層の厚さを設定

金属層に発生する周方向応力が金属層材料の許容引張応力以下
CFRP層に発生する周方向ひずみが許容ひずみ以下

水素中の疲労限度が大気中よりも低下しない材料であることが確認されている

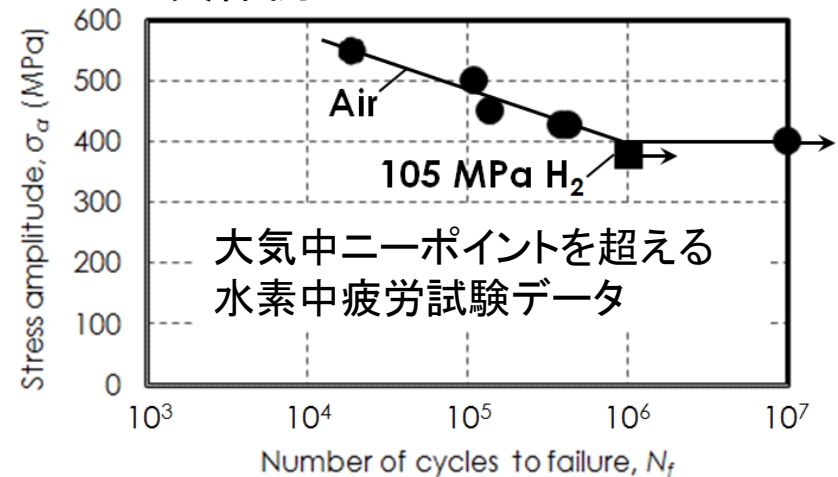
NO

水素中疲労試験を実施し
確認が必要

YES

設計完了

具体例



金属層およびCFRP層厚さの計算に用いる公式

- 厚肉組み合わせ円筒の式(1)の適用を検討した。

出典：機械工学便覧基礎編2007 α3-64

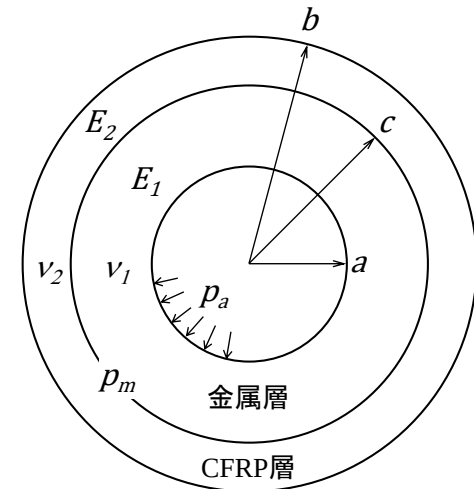
$$p_m = \frac{\frac{-\delta}{c} + 2 \left\{ \frac{p_a}{E_1} \frac{a^2}{(c^2 - a^2)} \right\}}{\left\{ \frac{1 - \nu_1}{E_1} + \frac{1 + \nu_2}{E_2} \right\} + 2 \left\{ \frac{1}{E_1} \frac{a^2}{(c^2 - a^2)} + \frac{1}{E_2} \frac{c^2}{(b^2 - c^2)} \right\}} \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta \text{ metal}} = \frac{p_a a^2}{(c^2 - a^2)} \left(\frac{c^2}{r_1^2} + 1 \right) - \frac{p_m c^2}{(c^2 - a^2)} \left(\frac{a^2}{r_2^2} + 1 \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{\theta \text{ CFRP}} = \frac{p_m c^2}{(b^2 - c^2)} \left(\frac{b^2}{r_2^2} + 1 \right) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\theta \text{ CFRP}} = \sigma_{\theta \text{ CFRP}} / E_2 \quad (4)$$

$$\sigma_{z \text{ metal}} = a^2 P_a / (c^2 - a^2) \quad (5)$$



p_m : 金属層とCFRP層接触面における圧力(MPa)

p_a : 内圧(MPa)

a : 金属層内半径 (mm)

b : CFRP層外半径 (mm)

c : 金属層外半径またはCFRP層内半径 (mm)

δ : 金属層とCFRP層の間のすき間 (mm)

r_1 : 金属層半径 (mm)

r_2 : CFRP層半径 (mm)

E_1 : 金属層材料の縦弾性係数 (MPa)

E_2 : CFRP層材料の縦弾性係数 (MPa)

ν_1 : 金属層材料のポアソン比

ν_2 : CFRP層材料のポアソン比

$\sigma_{\theta \text{ metal}}$: 金属層周方向応力 (MPa)

$\sigma_{z \text{ metal}}$: 金属層軸方向応力 (MPa)

$\sigma_{\theta \text{ CFRP}}$: CFRP層周方向応力 (MPa)

$\varepsilon_{\theta \text{ CFRP}}$: CFRP層周方向ひずみ

公式の妥当性に関する検証

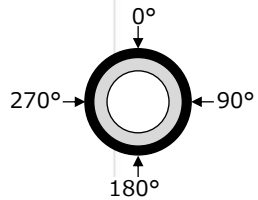
出典: 日本製鋼所 H27-29NEDO成果報告書

ひずみゲージ実測値

— 270° — 180° — 90° — 0°

— 有限要素解析 ● 公式による計算値

容器中央部4等配(0,90,180,270° 位置)で
外面ひずみを測定

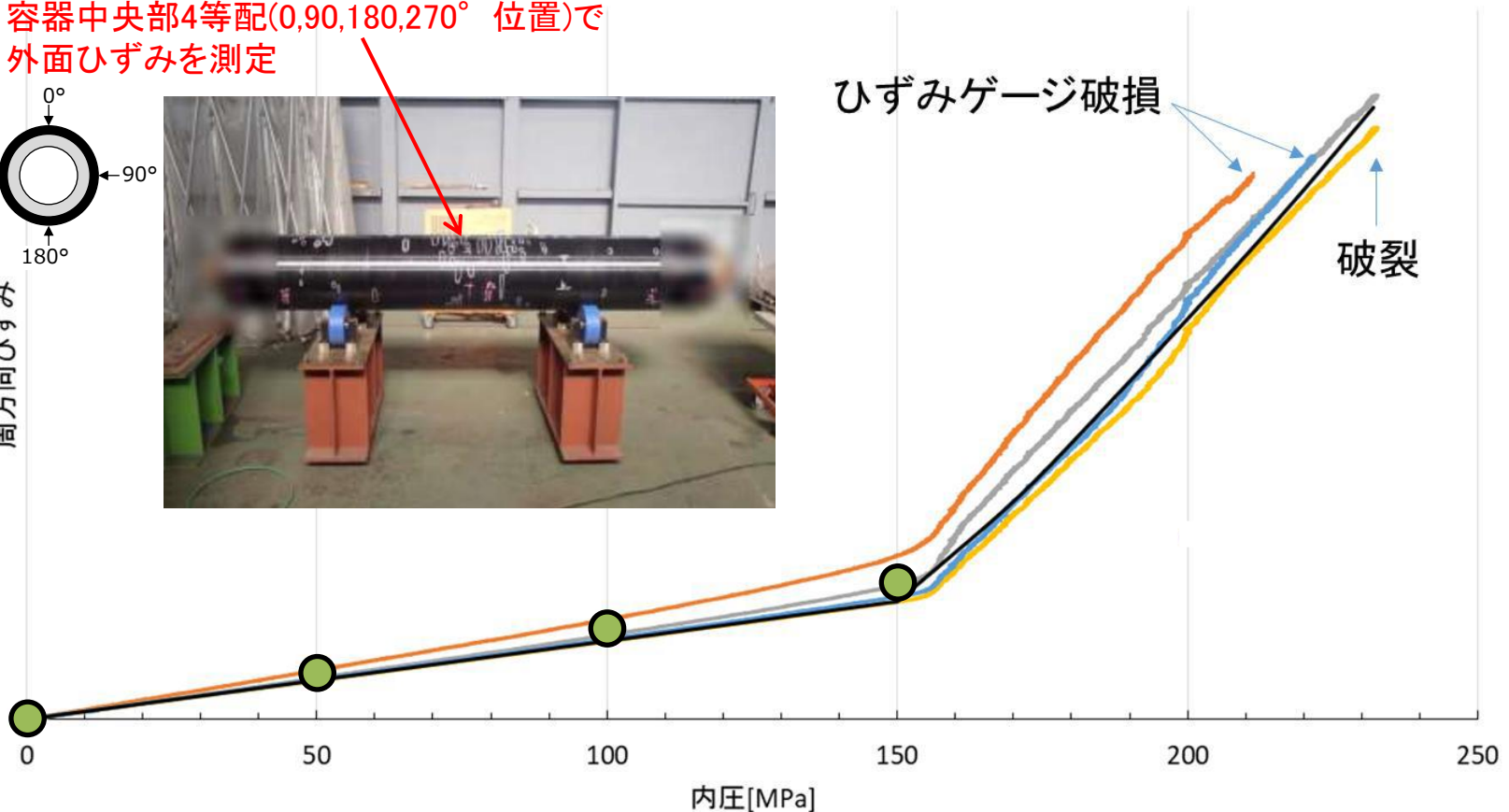


周方向ひずみ



ひずみゲージ破損

破裂



✓ 周方向ひずみの実測値と公式による計算値はよく一致しており、
公式が妥当であることを確認した。

金属層の許容引張応力、CFRP層の許容ひずみ

- 各層の厚さを設定するためには、許容引張応力(ひずみ)の定義が必要
$$\text{許容引張応力(許容ひずみ)} = \text{基準となる強度(ひずみ)} / \text{設計係数}$$
- 設計係数は圧力容器規格を参考に、金属層材料:3.5、CFRP層:2.5とした。

金属層材料		参考規格
引張強度 (MPa)	800	
設計係数	3.5	特定設備 検査規則
許容引張応力 (MPa)	228	

CFRP層		参考規格
破断ひずみ (%)	1.5	
設計係数	2.5	ASME Sec.VIII Div.3
許容ひずみ (%)	0.60	

※設計係数以外の数値は一例

- ✓ 公式を用いて、各層に発生する応力(ひずみ)が許容引張応力(ひずみ)以下になるように、金属層厚さ、CFRP層厚さを設定する。

DBRによる厚さ計算の例

金属層内径(mm)	400
金属層厚さ(mm)	86
CFRP層厚さ(mm)	50
金属層引張強度(MPa)	800
金属層許容引張応力(MPa)	228
金属層内面周方向応力(MPa)	227
金属層内面軸方向応力(MPa)	94
CFRP層破断ひずみ(%)	1.5
CFRP層許容ひずみ(%)	0.60
CFRP層内面周方向ひずみ(%)	0.07

- ✓ 公式を用いて、各層に発生する応力(ひずみ)が許容引張応力(ひずみ)以下となる厚さを設定し、設計が完了する。

タイプ2設計コンセプト案 (Design by Analysis)

技術文書
本文

組み合わせ円筒胴の式による初期厚さの設定

①最大許容圧力の確認

②金属層単体の破裂圧力

③CFRP層に発生するひずみの確認

④破裂前漏洩の確認

⑤金属層の疲労解析

設計完了

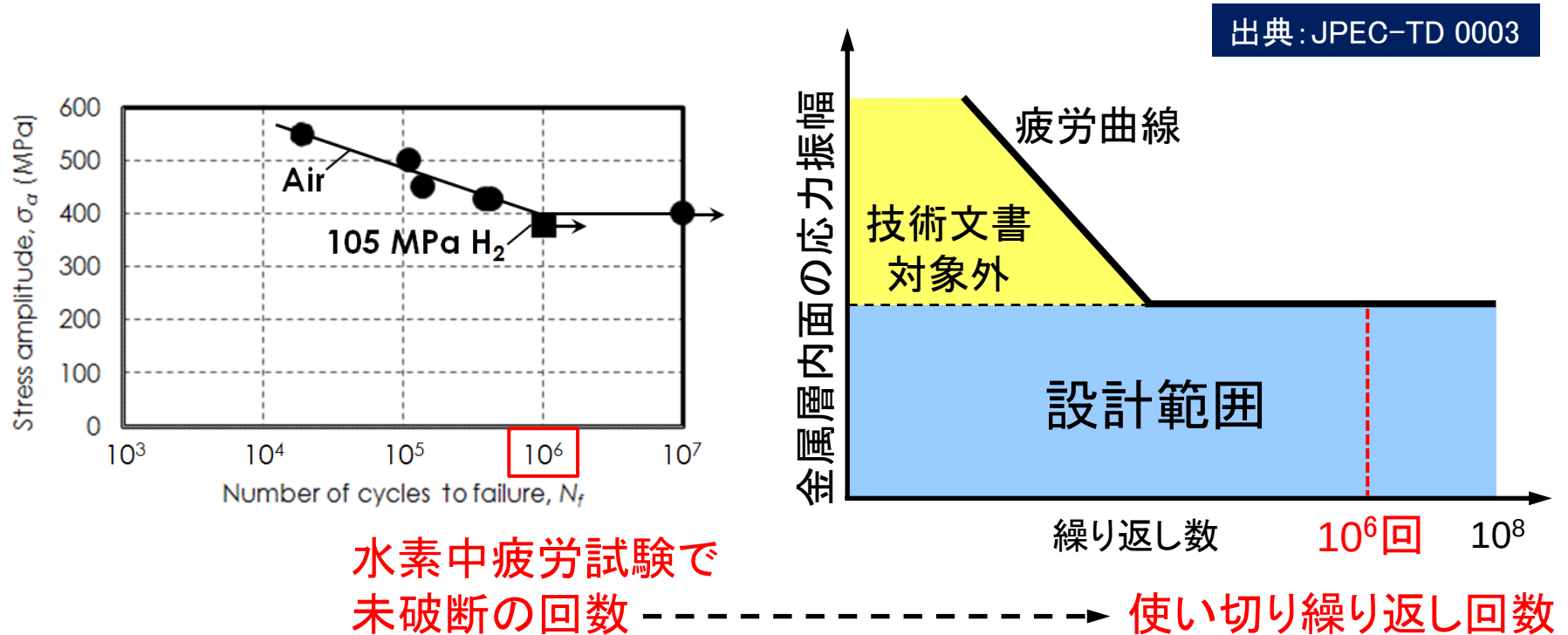
解説

疲労き裂進展解析

検査周期設定方法の一例

疲労解析 蓄圧器の使い切り繰り返し回数の決定

- タイプ2技術文書は疲労限度設計を要求する。
- 前NEDO事業で作成した低合金鋼技術文書(JPEC-TD 0003)の考え方を引用し、蓄圧器の使い切り繰り返し回数を決定する。



- ✓ 蓄圧器の使用回数は水素中疲労試験で未破断であることを確認した回数までとする。

まとめ(タイプ2技術文書案の概要)

- ✓ タイプ2蓄圧器はCFRP層が金属層の周方向応力のみを分担した鋼製蓄圧器と考える。
- ✓ 金属層とCFRP層の肉厚計算は公式による設計により行い、必要に応じて解析による設計(応力解析と疲労解析)を行う。
- ✓ 実容器による破裂試験や液圧サイクル試験等は課さない。
- ✓ 金属層材料については、SSRTで水素適合性を評価する。水素中疲労特性も確認する。
- ✓ 金属層の疲労解析により蓄圧器使い切り繰り返し回数を決定する。

2019年度のまとめと検討中の課題

項目	検討済み	検討中の課題
全体方針	・KHKS0220の附属書を目指す ・定置式の高層容器である(特定則が適用される)	
材料	・金属層材料の水素適合性評価方法 低合金鋼技術文書の考え方を引用 ・CFRP層許容ひずみの設定方法 CFRP層破断ひずみ×40%で安全設計	・PITCH系炭素繊維の使用
設計	・Design by Ruleの設計コンセプト 厚肉組み合わせ円筒の式で各層の厚さを決定する すき間がある場合も計算可能である	
	・Design by Analysisの設計コンセプト 金属層材料の疲労解析方法 金属層の疲労解析で蓄圧器の寿命を決める 疲労限度設計とする ・試験体による自緊減衰挙動検証は不要	・破裂前漏洩の評価方法
工作 および 検査		・自緊圧力の上限 ・製造した蓄圧器の健全性 確認方法

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