

2021年10月22日 第9回CMIシンポジウム

カーボンニュートラルを支える 高圧水素タンクの安全性評価技術

東京大学生産技術研究所 吉川暢宏

- カーボンニュートラルを支える高圧水素技術
- タンクの種別と用途
- タンクの信頼性を何で保証するか？
- 破壊力学的強度評価を阻むもの
- モニタリングによる信頼性確保の試み

カーボンニュートラルを支える 高圧水素技術

アンモニア等を媒体との可能性も
あるがモビリティに関しては
高圧水素が主流

モビリティの用途拡大



 Intelligent Energy

<https://www.intelligent-energy.com/our-products/uavs/>



<https://www.toyota-shokki.co.jp/news/release/2016/07/26/001318/index.html>



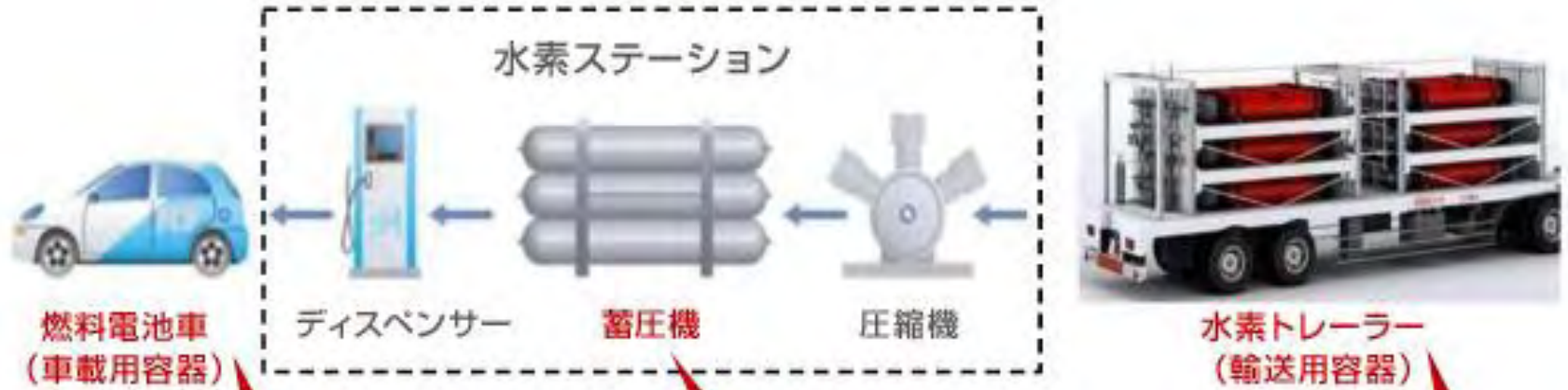
Alstom's Coradia iLint

<https://www.globalrailwayreview.com/news/77191/hydrogen-fuel-cell-train-tour/>



2023年販売開始

高圧水素容器を中核とする水素供給 マネジメント



<http://www.samtech.co.jp/products/hpc.html>

タンクの種類と用途

燃料電池自動車用はType4が主流

高圧水素容器の種別

Type1

低合金鋼製の一般容器

- ・スタンド用蓄圧器として実績増加中
- ・熱処理の問題等から厚さの制約あり

Type2

鋼製ライナーをCFRPで周方向強化

- ・安価で超高圧にも対応可能と期待
- ・海外での実績は多いが日本での実績は希少
- ・主要破壊モードはライナーの疲労

Type3

アルミ合金ライナーをCFRPで全面強化

- ・蓄圧器としては現状最も実績があり
- ・主要破壊モードはライナーの疲労

Type4

樹脂ライナーをCFRPで全面強化

- ・車載用で主流
- ・CFRPの強度をフルに活用することで軽量化の期待
- ・主要破壊モードは口金/ライナー/CFRP界面での破壊

車載用と水素スタンド用

車載用容器

- 常用圧力: 70 MPa (ガソリン車並みの走行距離)
- 温度範囲: 85°C (ガソリン車並みの高速充填) から
-40°C (寒冷地でのフルパワー走行)
- 寿命: 5000回 (普通乗用車の総走行距離)
- 軽量設計: コンパクト性および燃費低減の観点

水素スタンド用蓄圧器

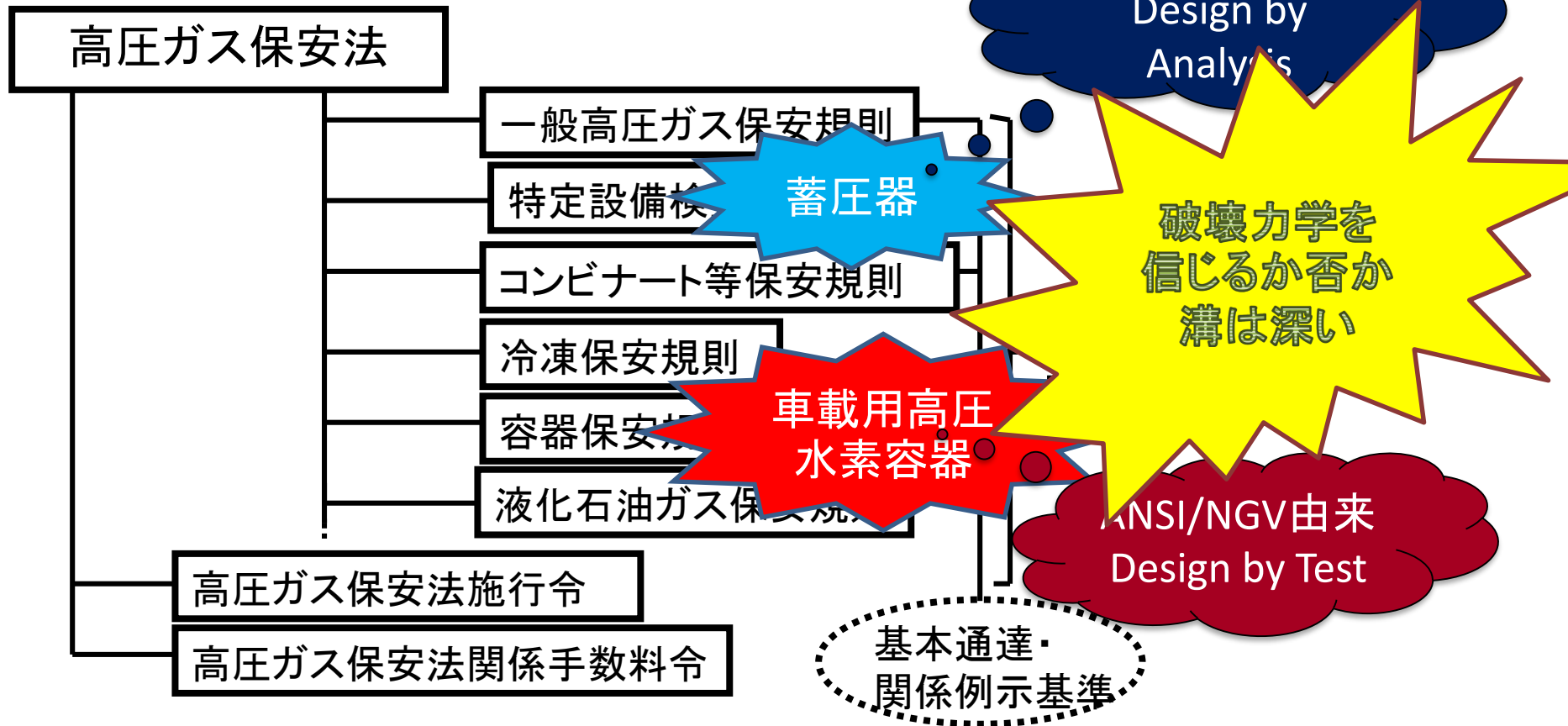
- 設計圧力: 100 MPa程度 (自動車への高速差圧充)
- 温度範囲: 外気温
- 寿命: 10万回程度 (事業者設定)
- 軽量設計: 価格低減の観点

タンクの信頼性を何で保証するか？

破壊力学の適用可能性次第

法規にも垣間見える破壊力学の壁

高压ガス保安法令等の主な体系



1. 適用範囲
2. 用語の意味
3. 材料
4. 設計
 4. 1 設計一般
 4. 2 設計の基本事項
 4. 3 内圧を受ける円筒胴
 4. 4 疲労解析
 4. 5 円筒胴及び関連部位の強度解析と疲労解析
 4. 6 疲労強度の実験的評価
 4. 7 破裂前漏洩の評価
 4. 8 き裂進展解析
5. 工作及び検査
6. 耐圧試験
7. 気密試験

設計の基準であり実容器を用いた破壊試験は行わない！

燃料電池自動車用タンクの 設計確認試験

1. CFRPに関しては試験片を用いた標準試験による許容応力決定との方法論に持ち込めない
2. 供用中の容器が受けるであろう負荷を模擬し試験を実証的に課すことで容器の信頼性を確保
3. 試験の項目設定は経験則に基づく(元を辿れば 天然ガス自動車用CFRP容器の設計確認試験)
4. 設計ではないので不具合への対処がモグラたたきになりがち

より実証主義的に容器の一生を 模擬したシリーズ試験化

水素燃料電池自動車に関する国連規則 (UNR134)

→ 落下試験

→ 表面に疵

→ 薬品による表面損傷

→ 常温圧力サイクルテスト

→ 過剰圧力によるサイクルテスト

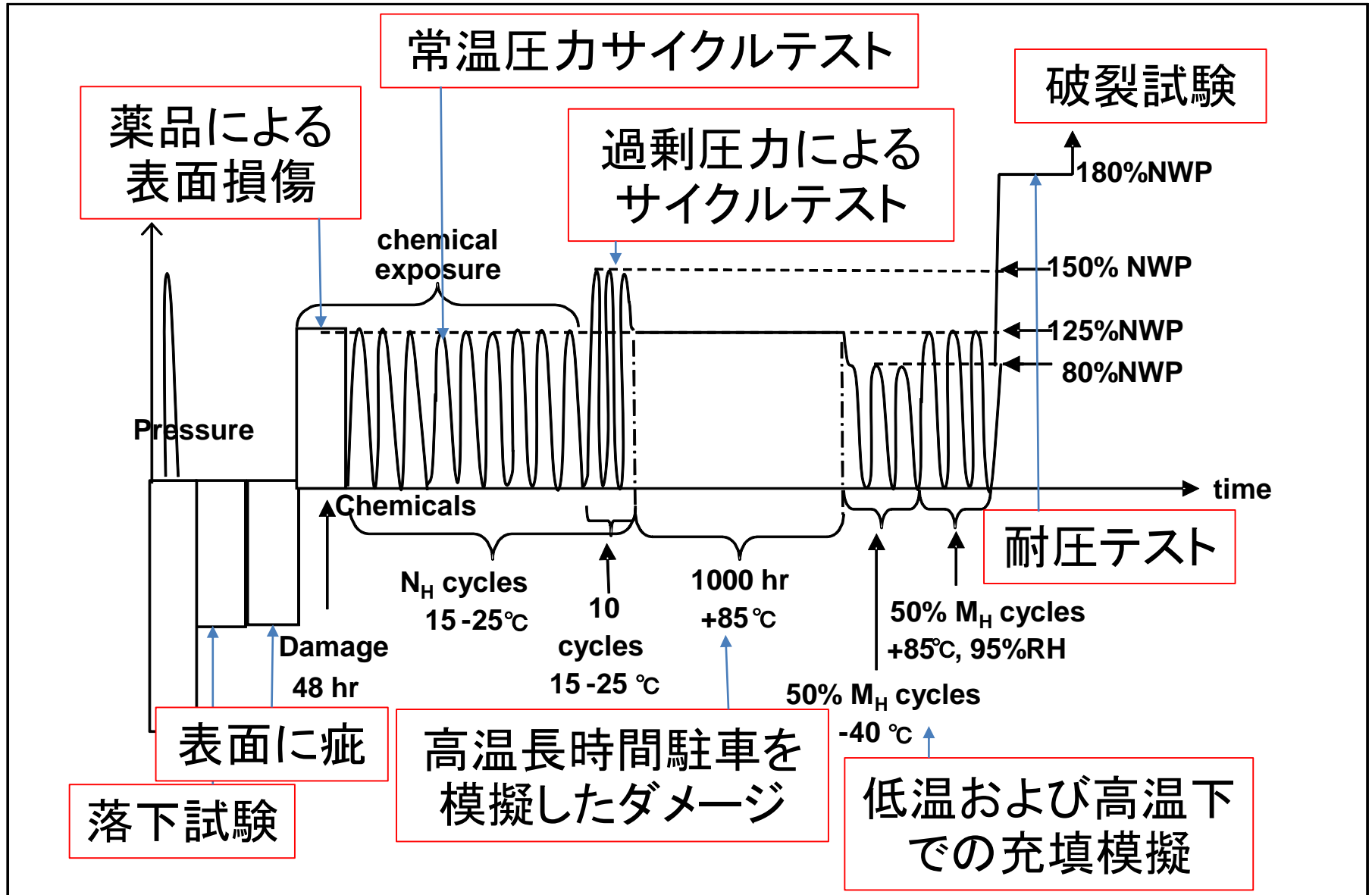
→ 高温長時間駐車を模擬したダメージ

→ 低温および高温下での充填模擬

→ 耐圧テスト 180% NWP

→ 破裂試験

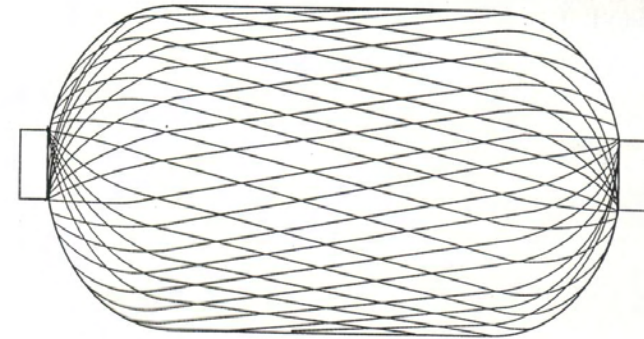
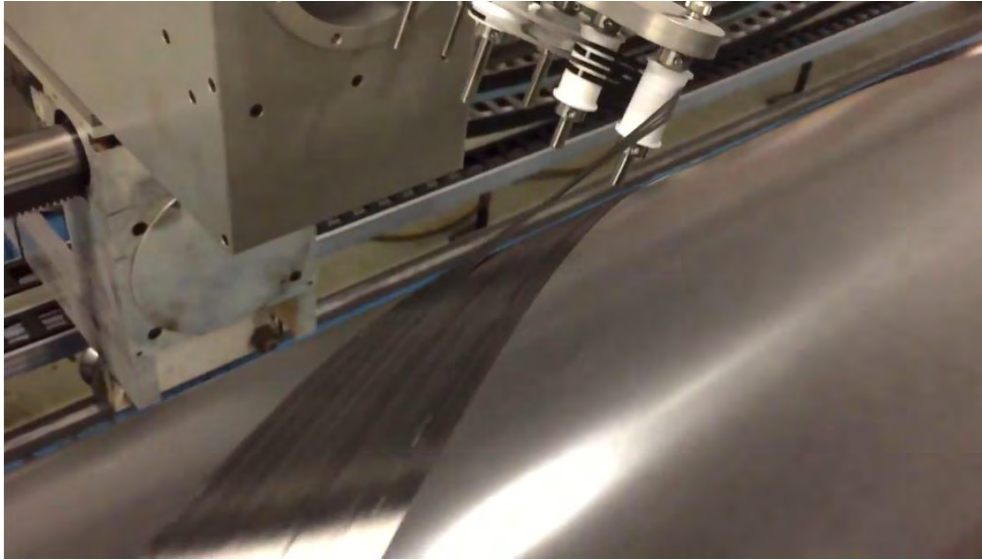
より実証主義的に容器の一生を 模擬したシリーズ試験化



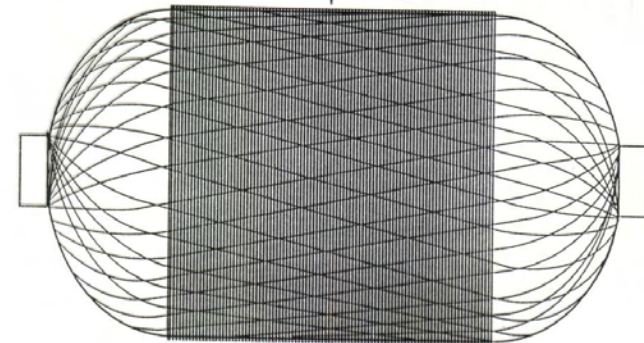
破壊力学的強度評価を阻むもの

CFRPの非均質性に由来する
複雑な力学場

フィラメントワインディング製法

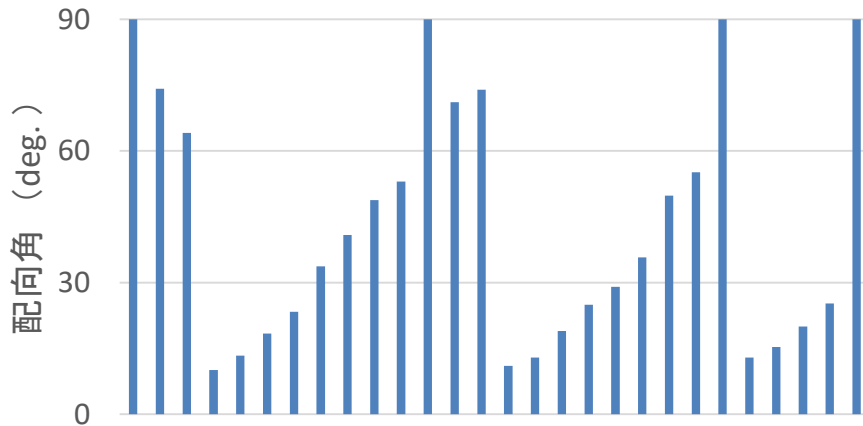


ヘリカル巻き



フープ巻き

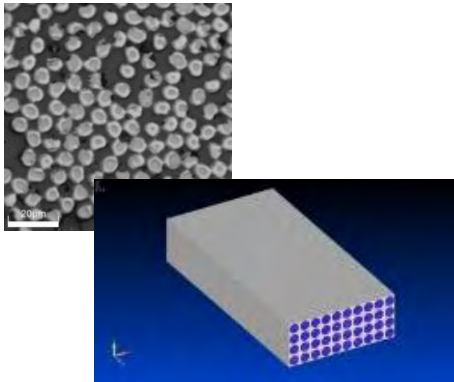
多様な巻き角度で鏡部
形状を整える必要あり
=> 応力解析困難



実容器の積層構成例

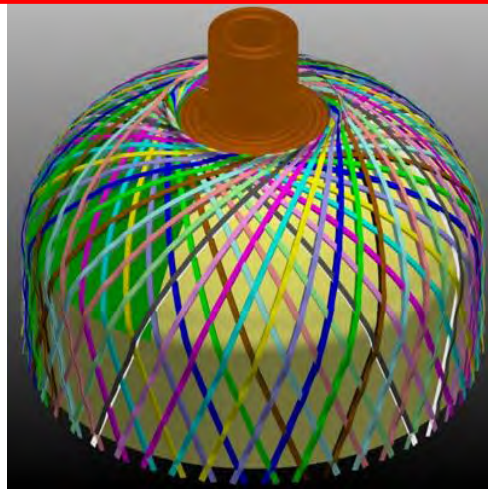
CFRPのメゾスケールモデル化

Micro-scale



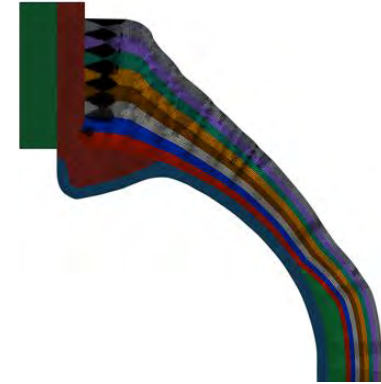
- ✓ 3次元立体モデル化
- ✓ 炭素繊維：直行異方性連続体
- ✓ 樹脂：等方性連続体

Meso-scale



- ✓ 3次元立体モデル化
- ✓ 炭素繊維束：直交異方性連続体
- ✓ 樹脂：等方性連続体

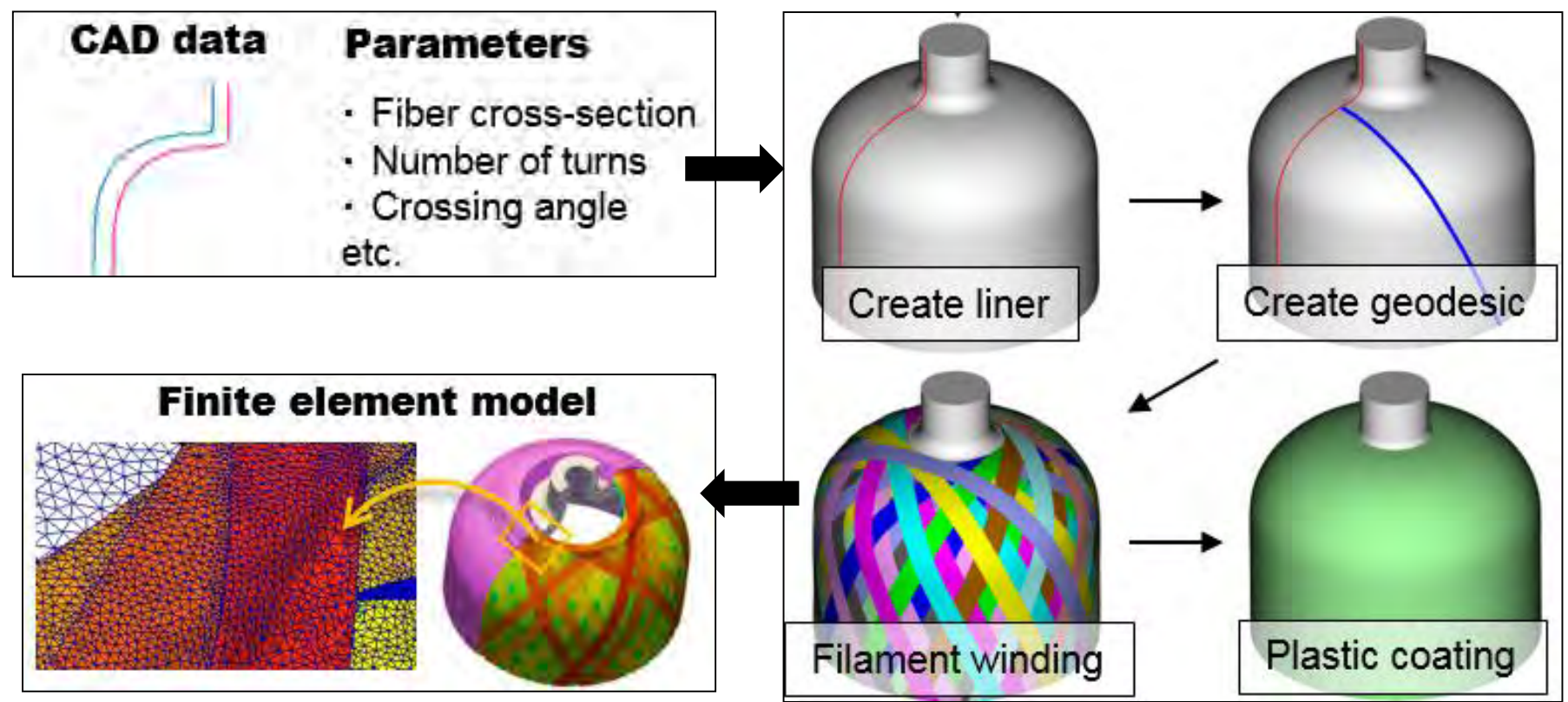
Macro-scale



- ✓ 2次元軸対称モデル化
- ✓ 炭素繊維強化プラスチック：直交異方性連続体

- ✓ 炭素繊維束と樹脂を区分
- ✓ それぞれの強度モデルを直接導入

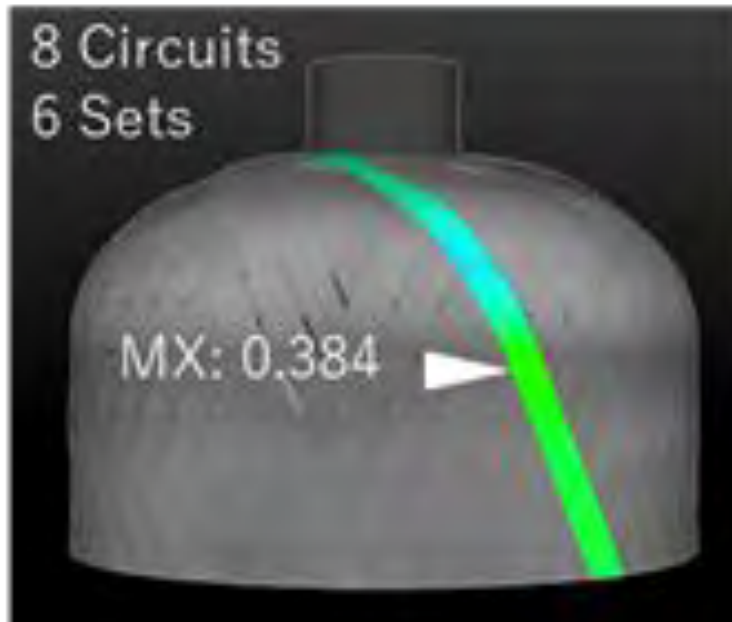
CFRPタンクメゾスケールモデル化



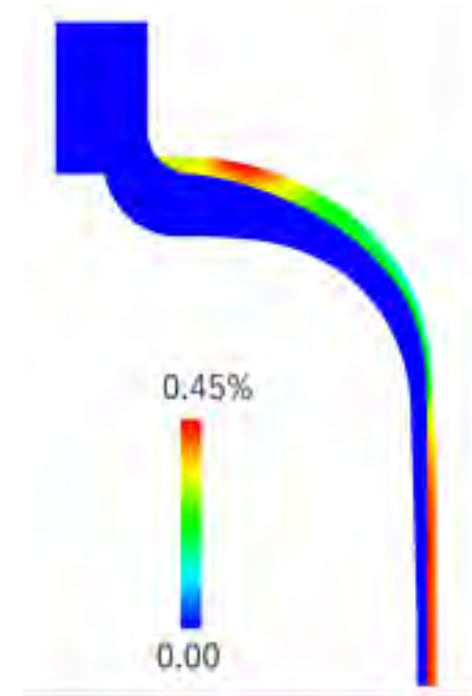
- ✓ 有限要素モデル作成ソフトウェアを開発済み
- ✓ 解析にはスーパーコンピューターが必須

メゾスケールモデルによる 正確なひずみ評価

Meso-scale



Macro-scale

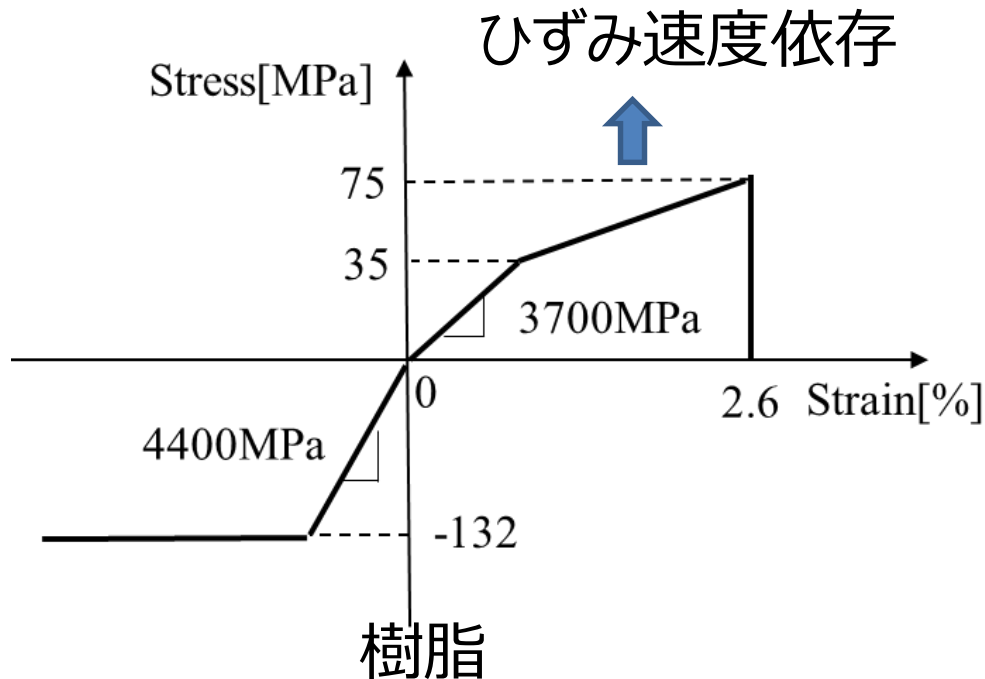


容器破裂圧力を支配する炭素繊維束
繊維方向ひずみの局所の上昇を評価可能

破壊モデル設定

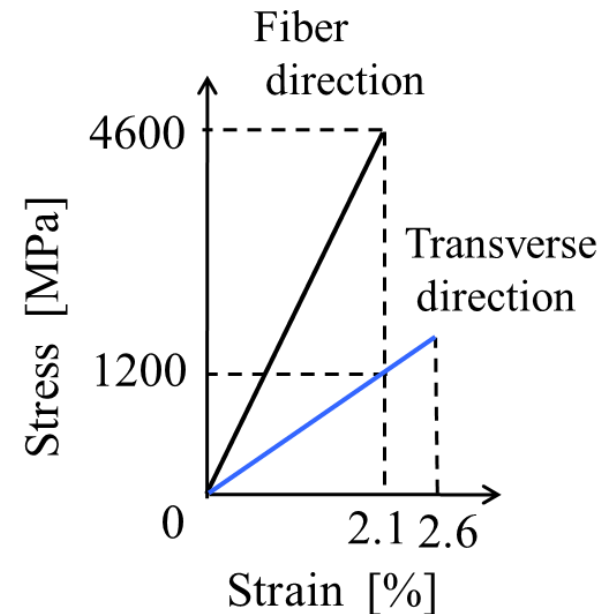
樹脂:

- ✓ ひずみ速度依存弾塑性体
- ✓ 引張／圧縮の非対称性



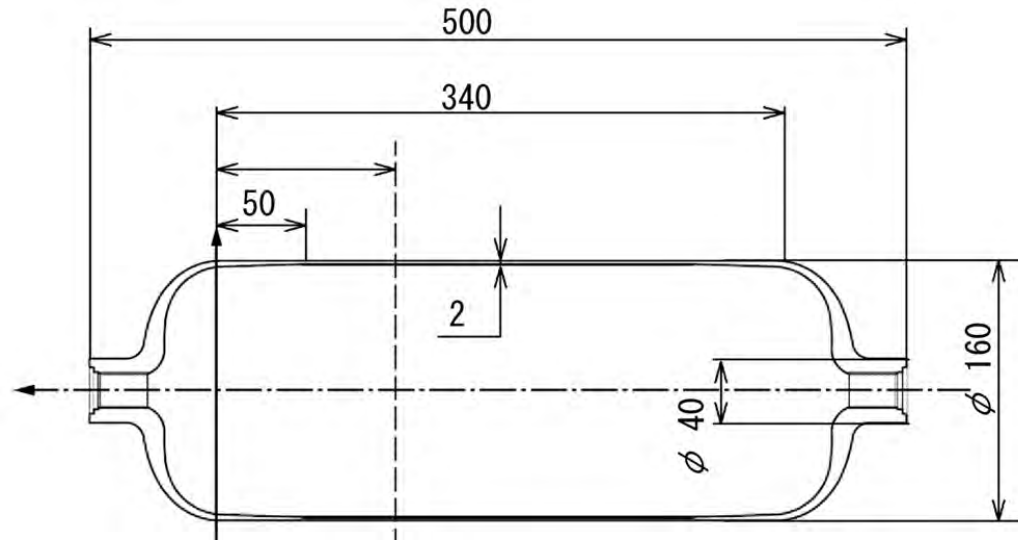
炭素繊維束:

- ✓ 直交異方性線形弾性体



炭素繊維束

破裂試験による実証



A6061 liner of 7.5 L

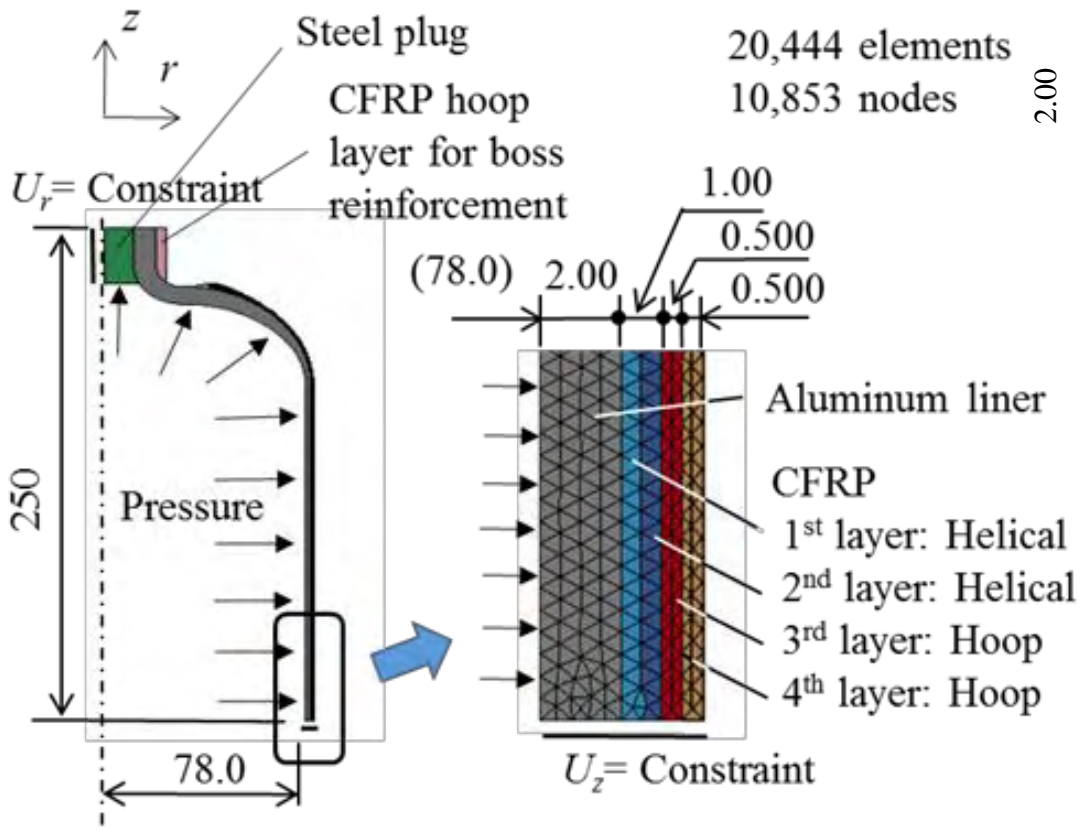


Type 3 試験体

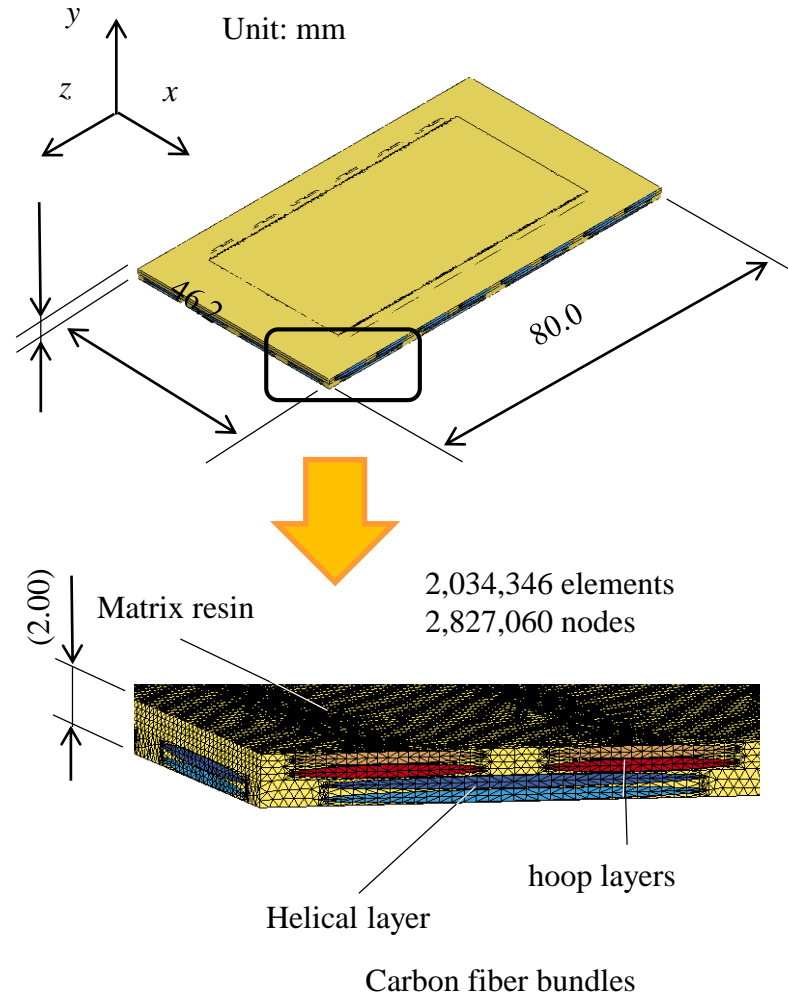


破裂様相

メソスケールブーミング解析



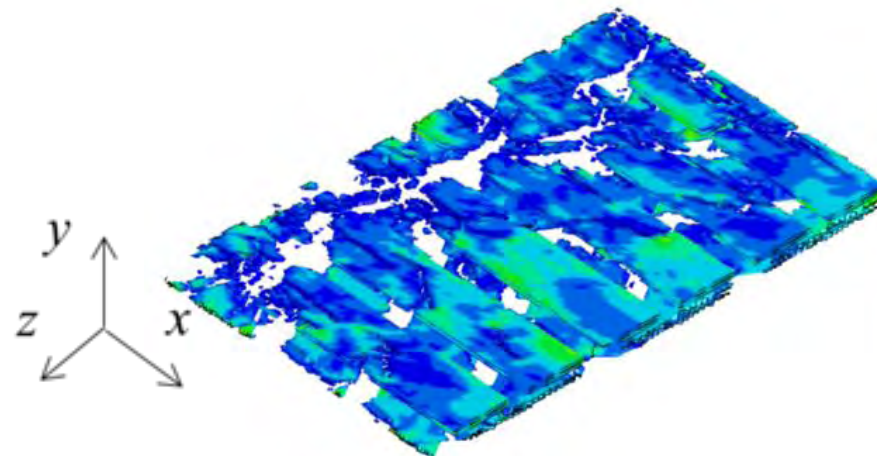
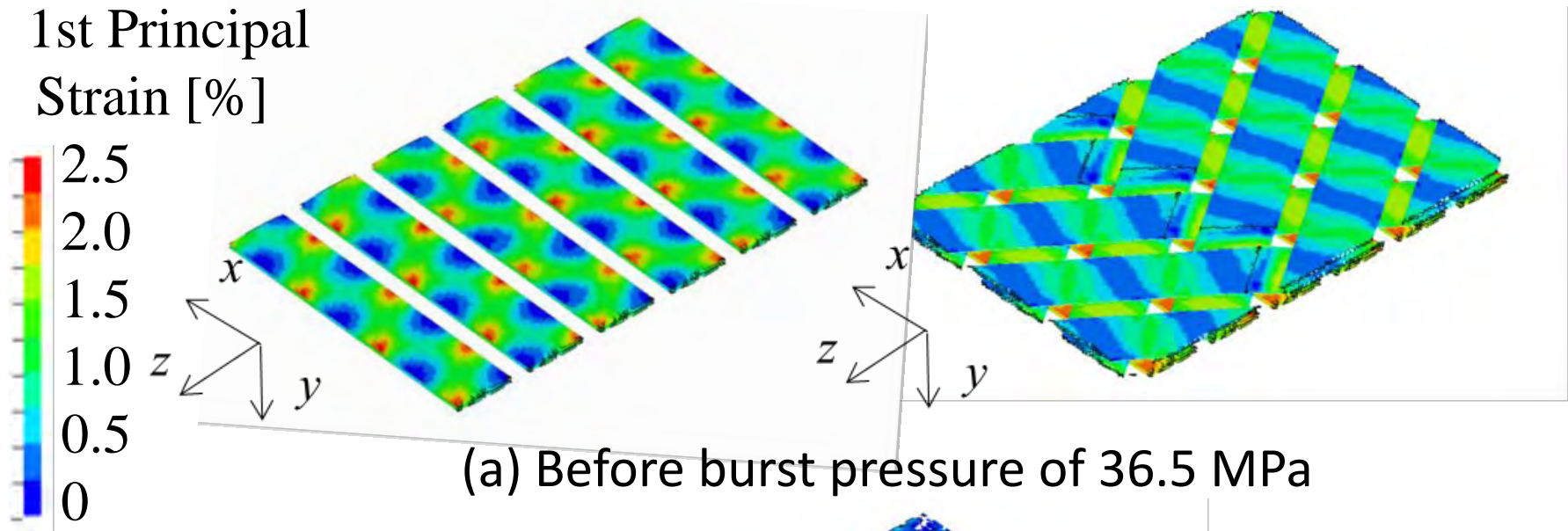
20,444 elements
10,853 nodes



Macro-model

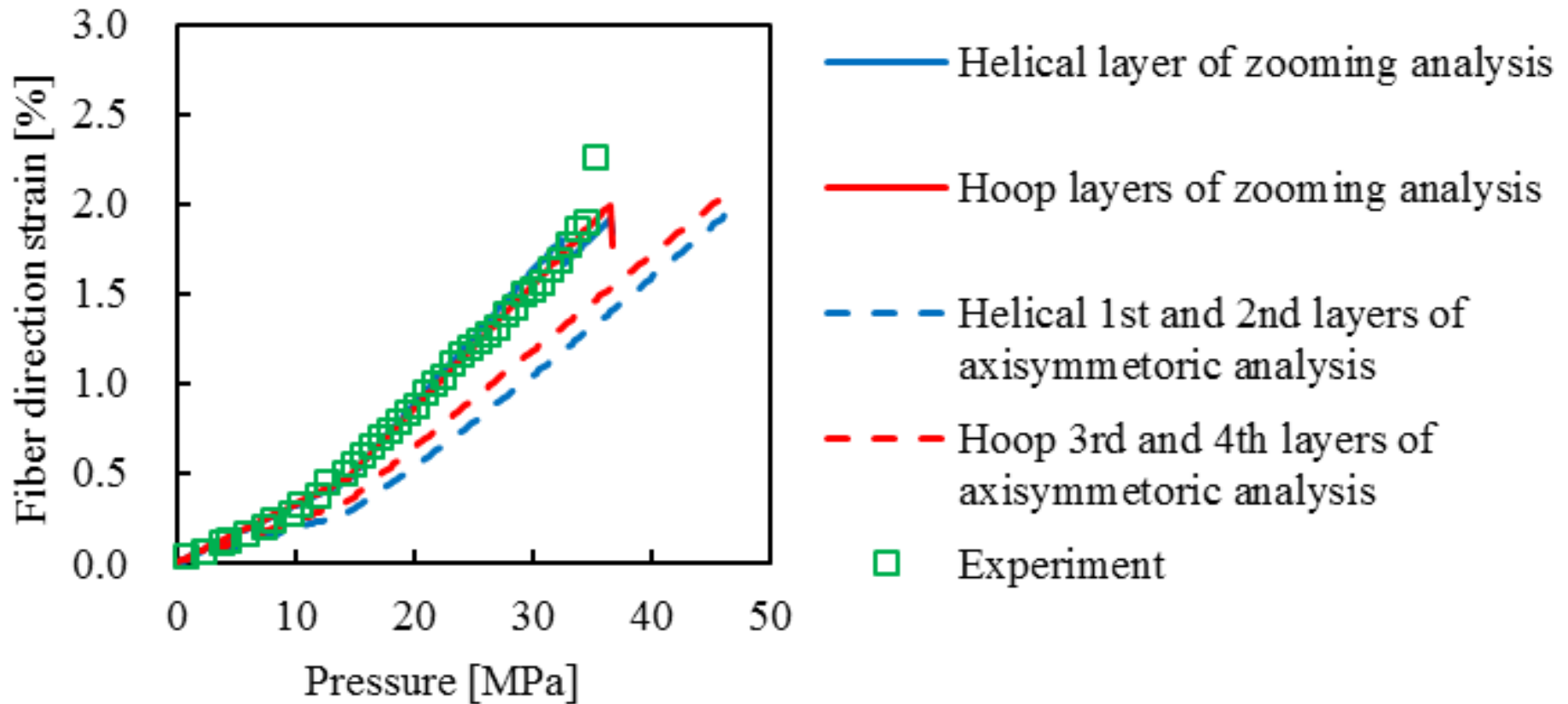
Meso-model

第1主ひずみの局所的上昇



(b) After burst pressure of 36.8 MPa

破裂圧力予測



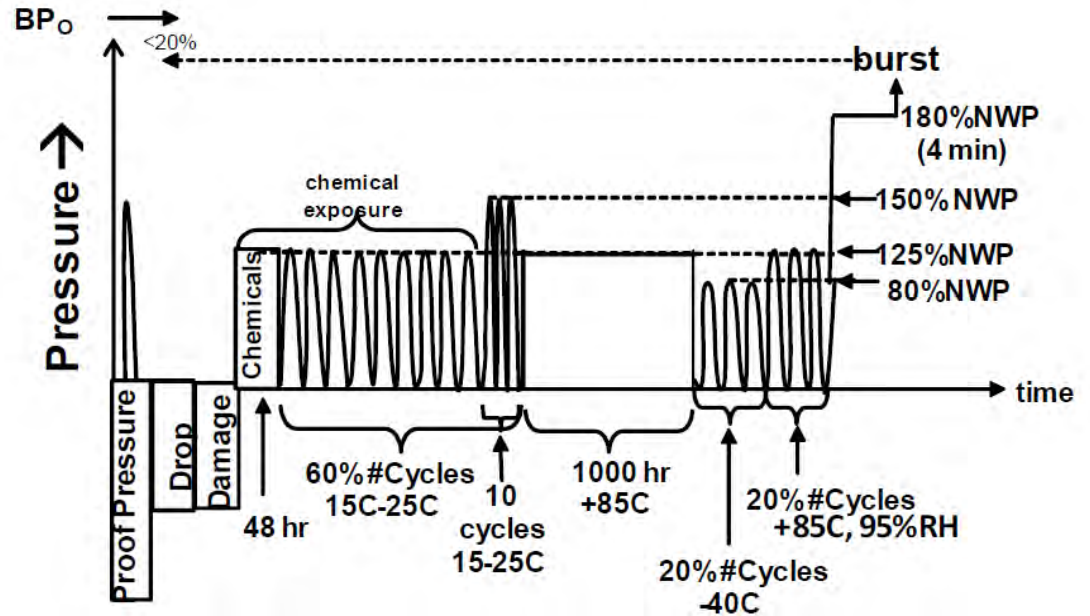
モニタリングによる信頼性確保 の取り組み

Condition Based Maintenance
(CBM)の展開

シリーズ試験による十分すぎる 安全裕度の確保

基本となる前提条件:

- ✓ 開放検査なしで15年の寿命を保証
- ✓ 15年を過ぎると容器の状態に依らず廃棄



Condition-based maintenance (CBM)

- ✓ ヘルスモニタリング技術
- ✓ 自動車通信技術
- ✓ 非破壊検査技術

まとめ

- ◆ 高圧水素容器に限らずCFRP製品に関しては破壊力学を適用した設計が行えない
- ◆ 主因は炭素繊維と樹脂により形成されるミクロ構造およびメゾ構造の非均質性
- ◆ 現状CFRP製品の長期信頼性を確保する手段は実部品を用いての実働荷重下での耐久試験のみ
- ◆ メゾスケールシミュレーションを機軸にCFRP容器の強度評価に破壊力学を取り込む試みを実施中
- ◆ モニタリングによるCBM適用を検討