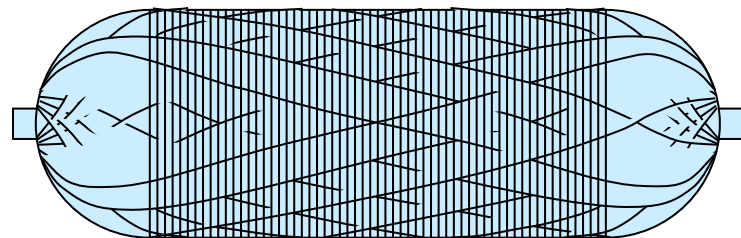
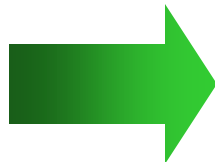
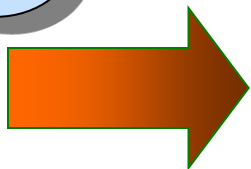
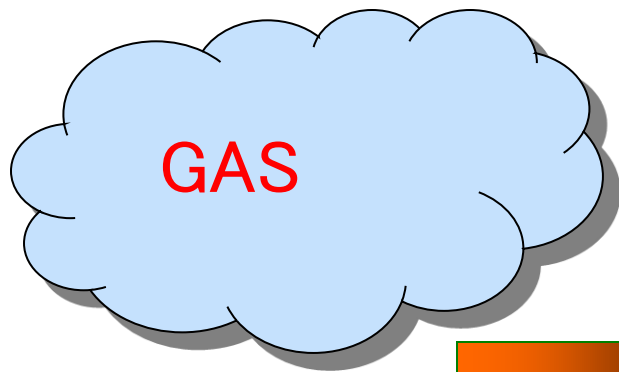


FRP複合容器の設計クライテリア

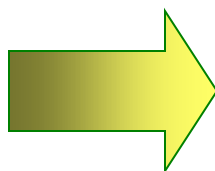
平成22年2月19日
高圧ガス保安協会
竹花 立美

容器軽量化の要望



最も軽量化が可能

FRP複合容器



海外

高張力鋼 1400MPa

アルミ合金7075

充てん出来るガス

酸素 10kg 4.5 倍

メタン 5kg 9 倍

水素 0.625kg 72 倍

(0.5kg) 90 倍

鋼製容器 質量 45kg

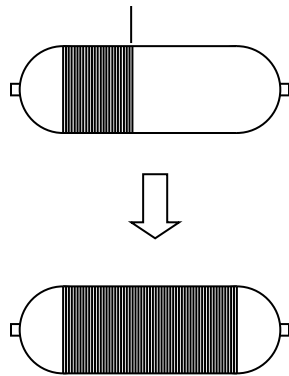
内容積 46.7 L

最高充てん圧力 14.7MPa

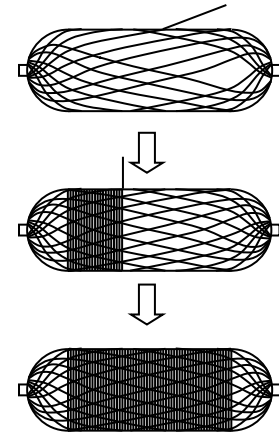
FRP複合容器

Fiber Reinforced Plastics Composite Cylinder

- 金属製またはプラスチック製のライナーと呼ばれる薄肉容器の外側に、樹脂を含浸させた長繊維（連続繊維）を巻付けて強化させた容器。
- Filament Winding 成形により製作 ⇒ 繊維の強度を最大に生かせるFRP



フープラップ容器



フルラップ容器

- 金属製ライナーの円筒胴部分の周方向を強化
- 円筒胴部分
周方向応力は軸方向の2倍
- フープラップ容器
軸方向応力を基準に設計
周方向をFWで補強
- 質量
アルミ／ガラス マンガン鋼製容器の半分程度
- 子午線方向と周方向を強化
- ライナーの子午線方向及び鏡部分を補強するヘリカル巻き又はインプレックス巻きに周方向を補強するフープ巻を加えた容器
- 質量
アルミ／ガラス Cr-Mo鋼製容器の1／2程度
アルミ／カーボン Cr-Mo鋼製容器の1／3程度

研究開発の民生利用

- 主に軍事及び宇宙開発のため研究報告を公表していなかった
- 1964年 Aerojet-General社
多数のロケットチャンバーの研究報告を公表
- 1966年 NASA CR-72124 コンピュータコード
金属製ライナーを有するフィラメント強化圧力容器の
解析のためのコンピュータプログラム
- 1970年 NASA 民生利用へ技術を応用
 - 消防用の空気呼吸器用FRP複合容器の開発が開始
アルミ合金製ライナー／S-ガラス繊維
最高充てん圧力 4000psig(281kg/cm²)
内容量6リットル強
クロモリ製容器に対して50%の軽量化
- 米国運輸省(DOT) E-6747(特別な認可)
 - ニューヨーク、ロサンゼルス、ヒューストンの市消防によりフィールドテスト
- NASA型容器とも呼ばれている

技術基準（米国）認可のためのガイドライン

□ 空気呼吸器等の移動式容器

- 米国CGA (COMPRESSED GAS ASSOCIATION)の要請で特別な認可のためのガイドラインを作成

□ ガラス繊維／アルミ合金容器

1981年 DOT FRP-1 Standard Fully Wrap

1982年 DOT FRP-2 Standard Hoop Wrap

□ カーボン繊維／アルミ合金容器

1997年 DOT CFFC Fully Wrap 1997年

□ 移動式容器に関して米国では、現在でも特別な認可が必要

□ CNG移動車用容器（燃料タンク）

- 1992年

米国規格協会(American National Standards Institute)/米国ガス協会(American Gas Association)
ANSI/AGA NGV2 規格が発行

- 1998年、2000年及び2007年に改正

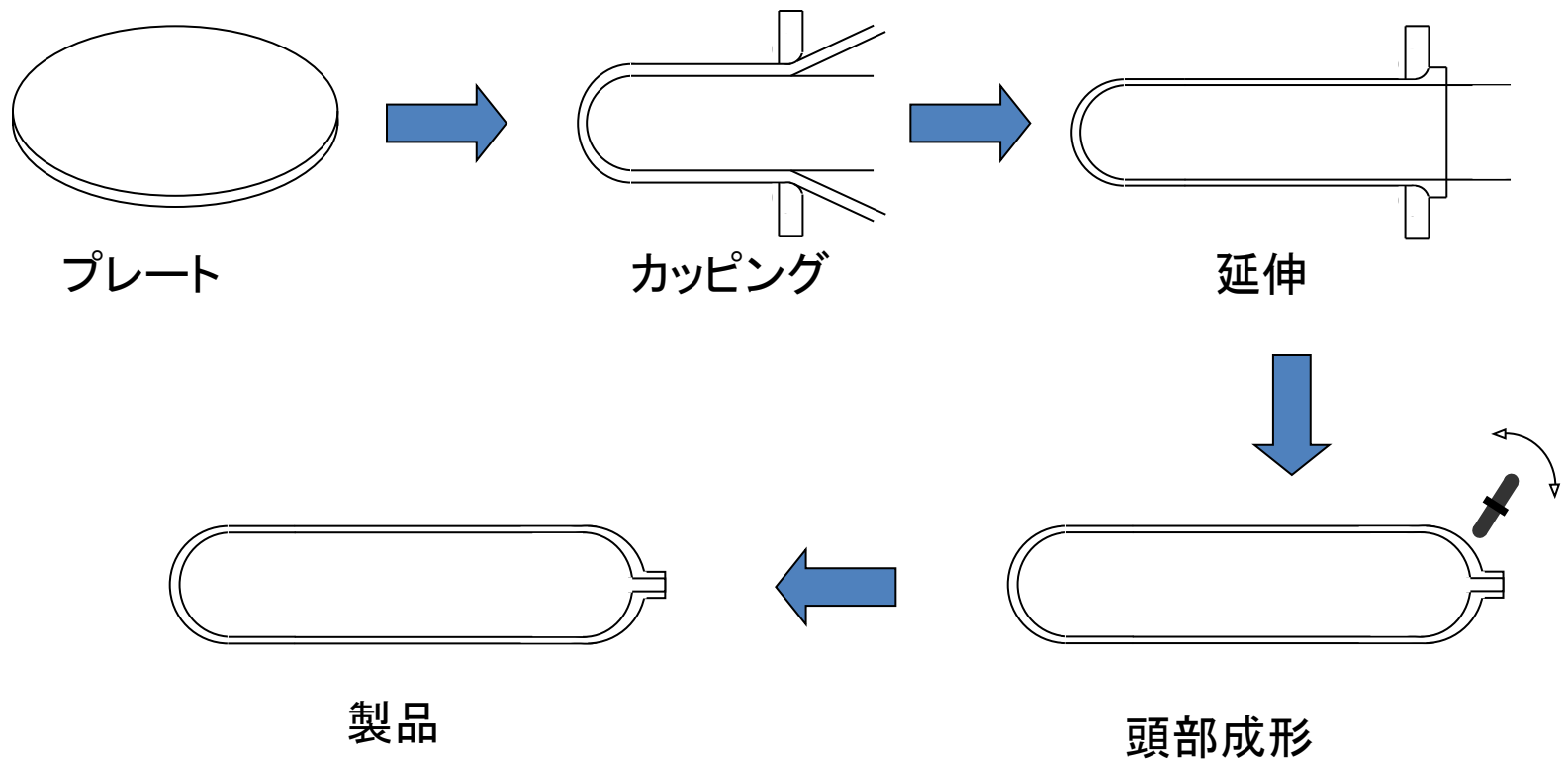
規格制定機関 AGAからCSA(Canadian Standards Association) Americaへ

□ 自らの燃料とするためのCNG用容器に関しては特別な認可の必要なし（米国）

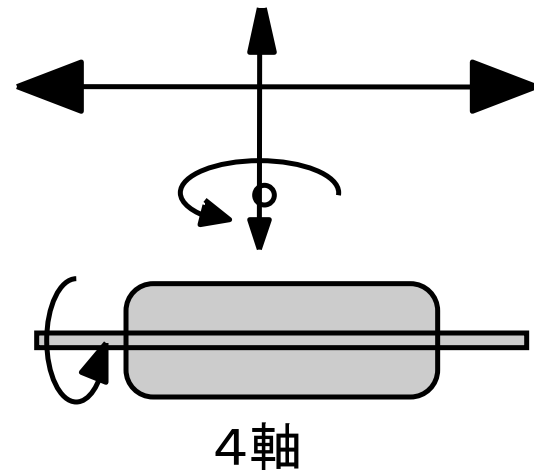
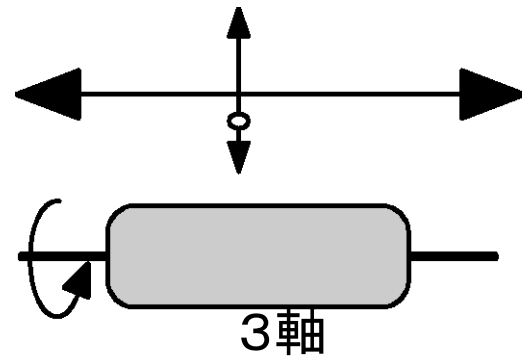
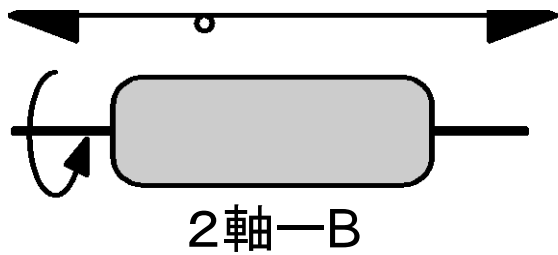
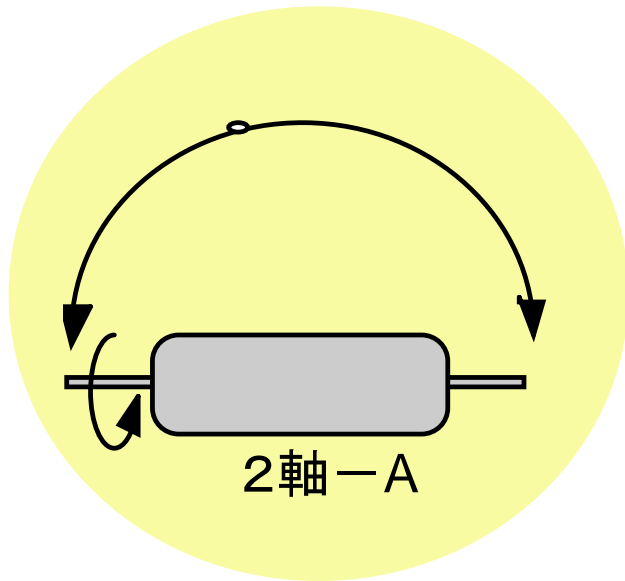
日本のFRP複合容器の開発と基準化

- 1965年 航空宇宙用に本格的に利用
固体ロケットのモータケース、気蓄器等
- 1982年 民生用に研究が開始 消防用 5L
- 1985年 高圧ガス保安協会において「軽量容器の開発研究」
- **1997年 特別認可から 一般基準化**
 - 別添6 ガラス繊維／アルミ合金 一般用
 - 別添8 ガラス繊維／アルミ合金 CNG車用
 - 別添9 CNG車両搭載用
ガラス繊維、カーボン繊維
シームレス容器、Hoop Wrap、Fully Wrap、アルミライナー、プラスチックライナー
 - 2000年 KHK S 0121 カーボン／アルミ合金、Fully Wrap 一般用
 - 2005年 JARI S001 圧縮水素車両搭載用 最高充てん圧力 35MPa
カーボン繊維、Fully Wrap、アルミライナー、プラスチックライナー
 - 2005年 JIGA-T-S/12/04 圧縮水素輸送自動車用（内容はJARI S001とほぼ同じ）
 - 2006年 JGA指-NGV07-05 CNG車両搭載用（別添9のバージョンアップ）
- 70MPa容器（予定）

ライナー製造工程 (カップリング方式の例)



FWマシンの制御の軸数



規定規格と性能規格

□ 規定規格

- 圧力容器の構造設計基準の基本思想は「公式による設計(Design by Rule)」と「解析による設計(Design by Analysis)」に大別される。
- 公式による設計(Design by Rule)は、構造と材料と計算式が規格で与えられ、単純な計算式によって応力が許容応力以下であることを確認する。
- 起こり得る全ての破損モードを考慮していない分だけ、安全率は高く見積もられている。
- 解析による設計(Design by Analysis)は、起こり得る全ての破損モードを考慮し、これらに対して応力制限、温度制限などを設定し詳細解析によって制限を満足することを確認する。詳細な解析が要求される反面、設計に自由度がある。また、詳細な試験・検査も別に設定されている。したがって合理的かつ高い水準の構造健全性が確保できる。
- 公式による設計は、内圧に対して十分な肉厚を持つのに対して、解析による設計は、贅肉を落としてスリムになり、熱応力等が軽減できる。

□ 性能規格

- 性能(Performance based Standards)規格
- 一般に、使用方法、使用環境、使用条件等が明確な場合に、達成目標と目的を満たしていることを証明するための方法とともに示している。
- 証明する方法は、例えば、試験と検査

FRP複合容器の設計と構造の特徴

□ シームレス容器

- 最高充てん圧力で80,000回、または耐圧試験圧力で12,000回
- 使用期限の制限なし

□ FRP複合容器

- 容器に充てんする回数(内圧荷重の繰返し回数)
- 使用期限を制限
- <例>使用形態 充てん回数 750回/年 15年間使用

- | | |
|-----------|---|
| 1) 容器 | 最高充てん圧力までの繰返し荷重(約11,250回)
15年間保持される充てん圧力に耐える |
| 2) ライナー | 繰返し荷重に対して十分な安全率 |
| 3) フィラメント | ライナー以上の繰返し回数
15年間の保持された内圧荷重(応力レベルを設定) |

- 応力レベルと疲労寿命の2点を同時に満足
- 使用中の傷に対して考慮

保持される圧力に耐える特性 ストレスラプチャー特性

- 金属材料のクリープとよく似た現象
- 常温で起こる現象であり、変形(歪)が時間とともに明確に増す現象ではないためストレスラプチャーと呼ばれている。
- ガラス繊維は、負荷状態で長期間置かれると環境中の酸及びアルカリ等により劣化し破断する
- 炭素繊維は、その化学的成分から環境による劣化はないと考えられているが、実証するデータは極めて少ない。
- ストレスラプチャーに関する研究 1970年頃 米国 LLNL
- ガラス繊維:破断応力の30%を負荷した場合
15年後の破壊確率は1/1,000,000となる

フィラメント材料の応力レベル

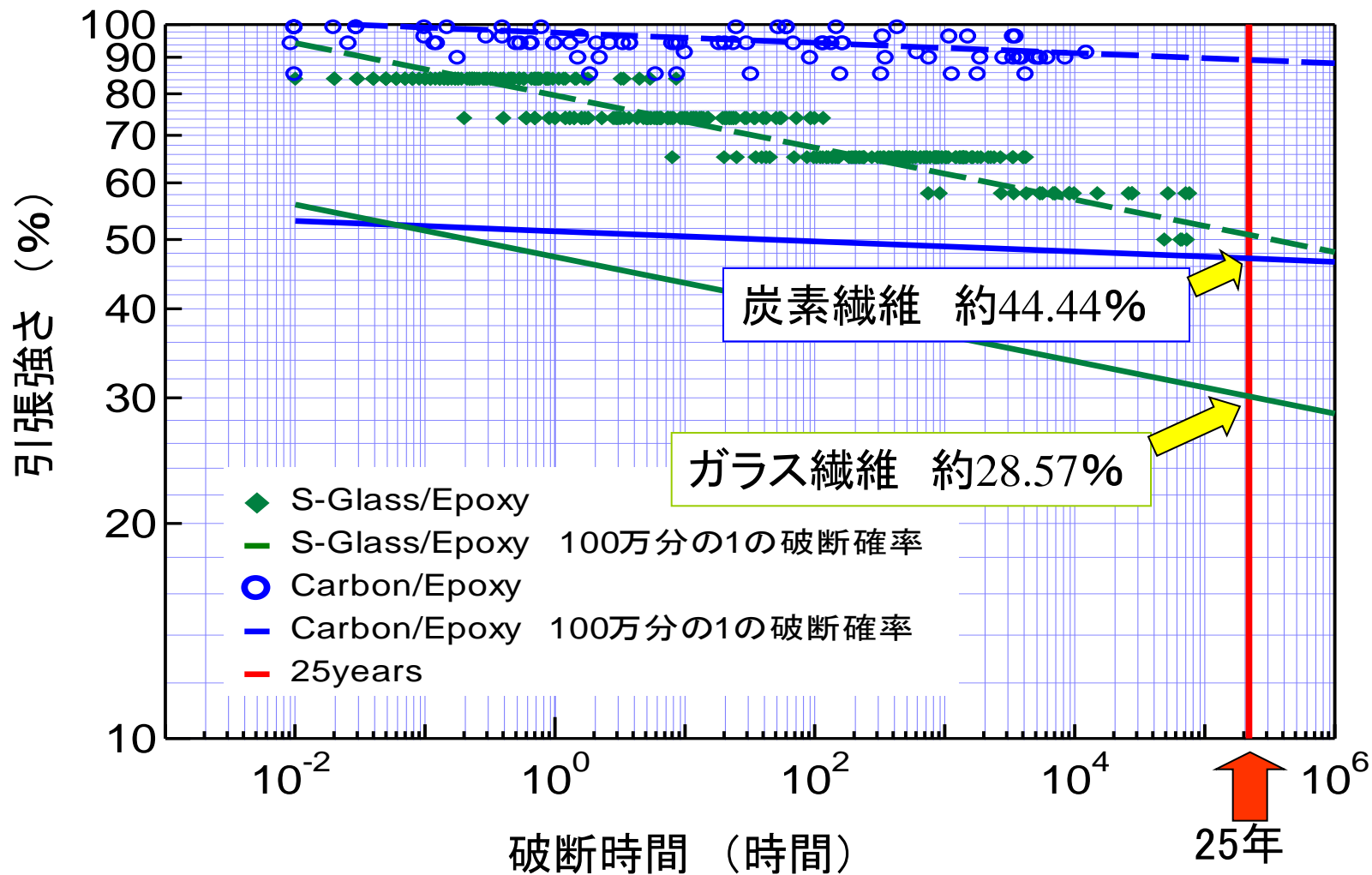
	一般産業用容器※	CNG自動車 燃料装置用容器※※
ガラス繊維	30%	28.57% (1/3.5)
アラミド繊維	30%	33.33% (1/3)
カーボン繊維	30%	44.44% (1/2.25)

$$\text{応力レベル} = \frac{\text{最高充てん圧力時の繊維の応力}}{\text{容器が破裂するときの繊維の応力}}$$

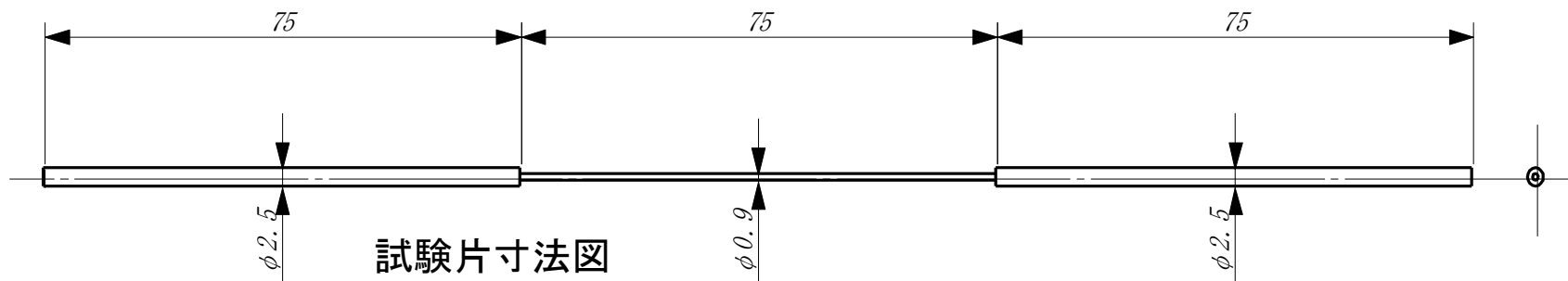
- ※ ガラス繊維 : 容器保安規則例示基準別添6及び
米国DOT FRP-1 Standard
- アラミド繊維 : 米国DOT FRP-1 Standard
- カーボン繊維 : 米国CGA CFFC
- ※※ 容器保安規則例示基準別添9及び米国ANCI/AGA NGV2(1998)

- 一般産業用FRP複合容器では、使用中に生じる傷を考慮して応力レベルは全て30%
- 重要な項目のため、容器の型式毎に設計確認試験及び組試験における破裂試験で確認

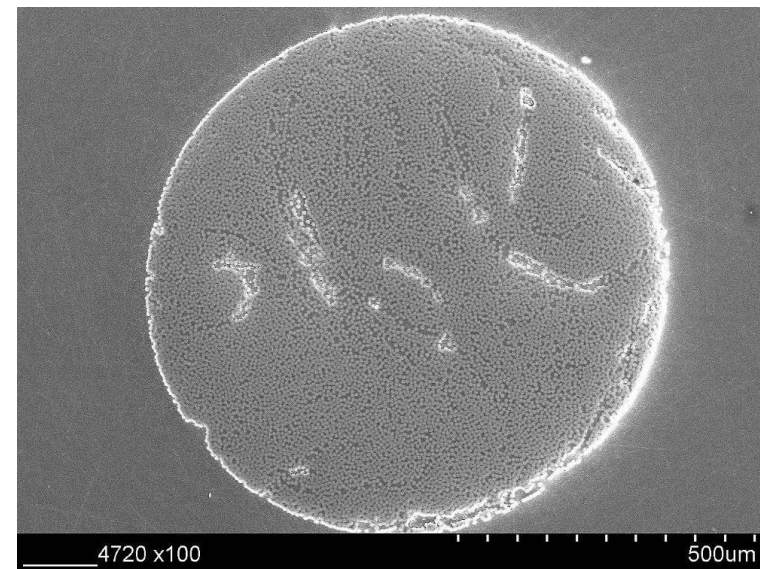
CNG容器の安全率の根拠となった ストレスラプチャー特性 (1984年)



ストレスラプチャー試験片と試験装置



ストレスラプチャー試験機

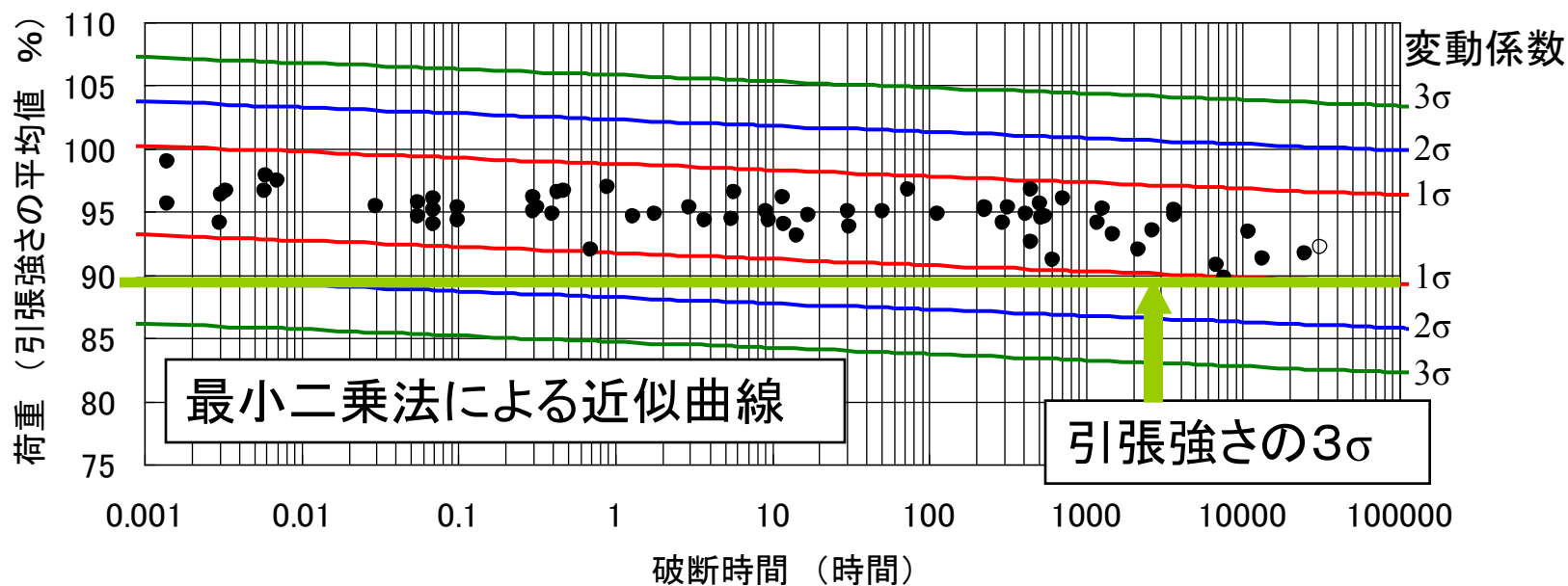
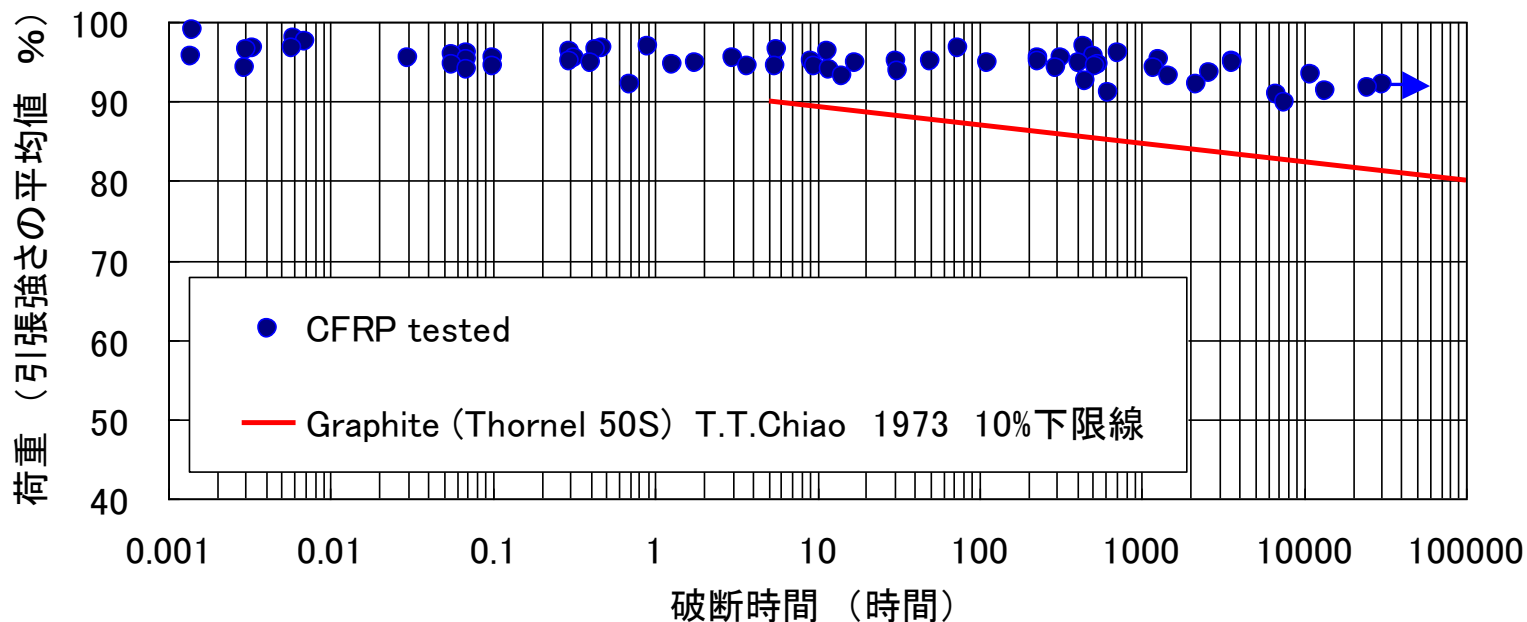


試験片断面のSEM写真

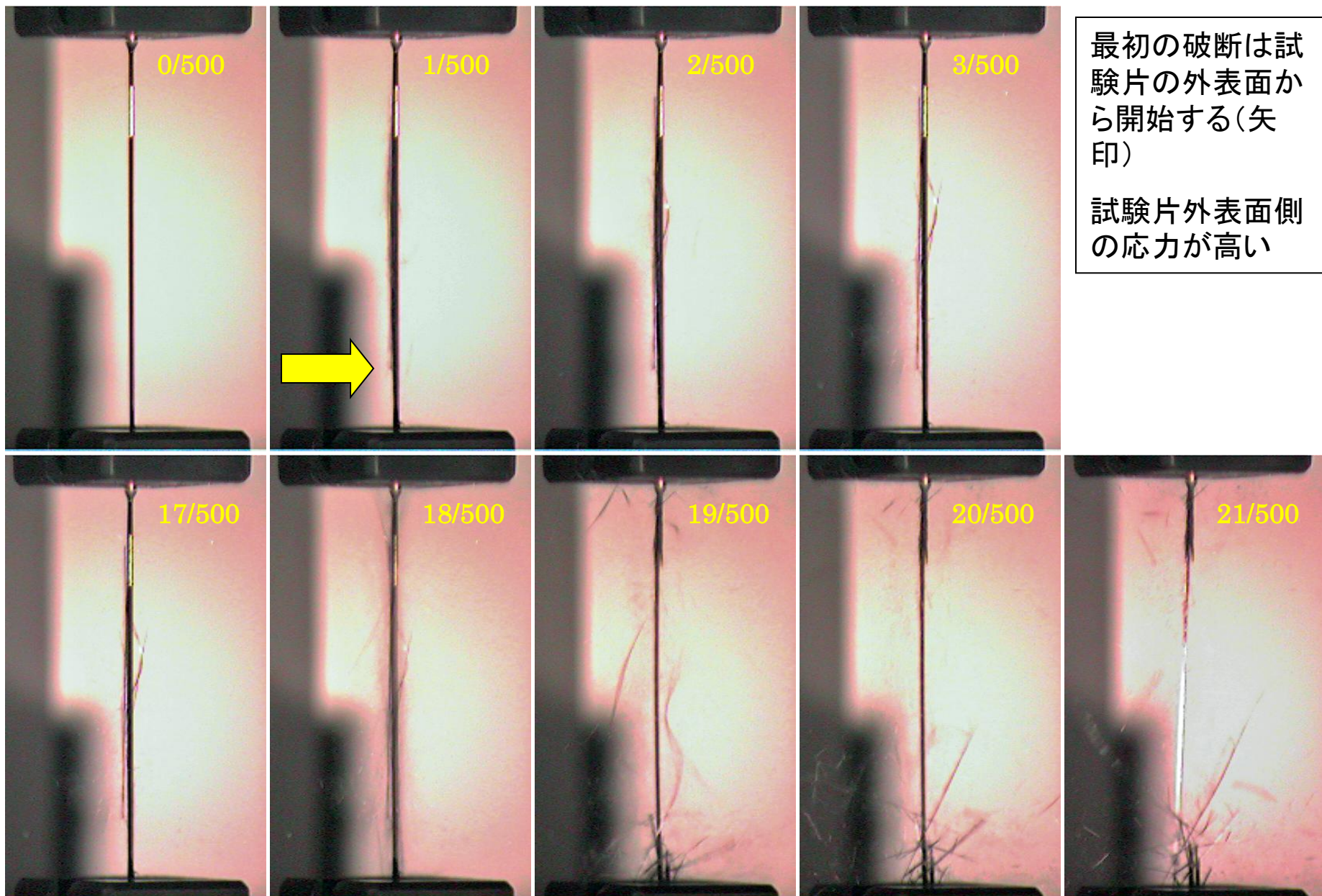
直径 0.9mm

単繊維数 12,000本 (T700SC)
18,000本 (M30)

ストレスラプチャー試験結果 現在数多く使用されている炭素繊維の例



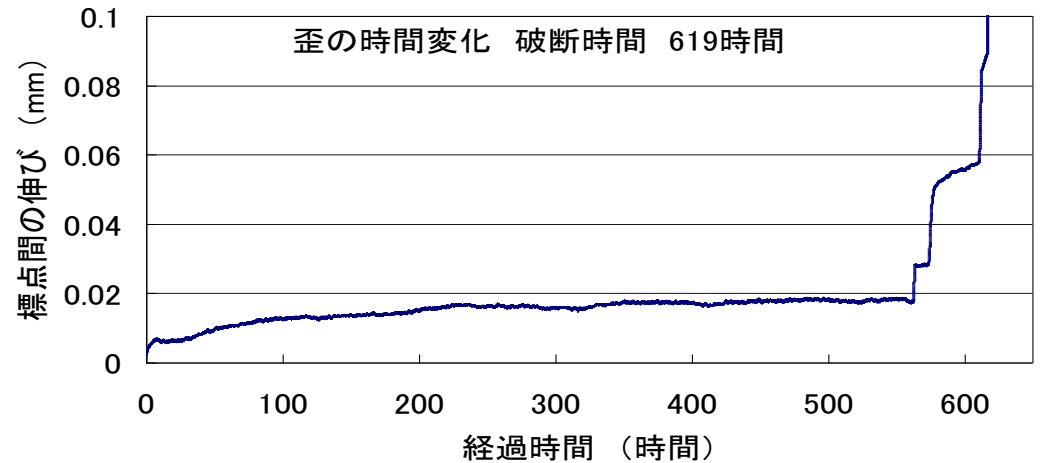
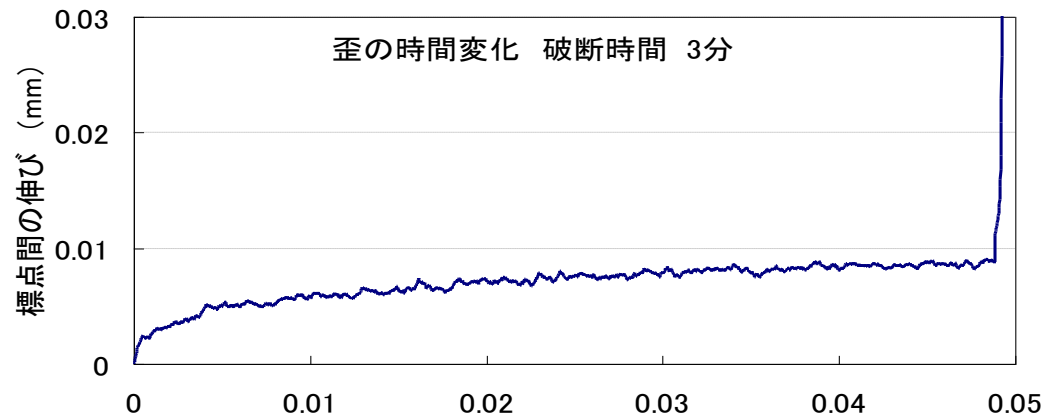
ストレスラプチャー試験破断時の高速写真



伸び計による歪の経時変化測定



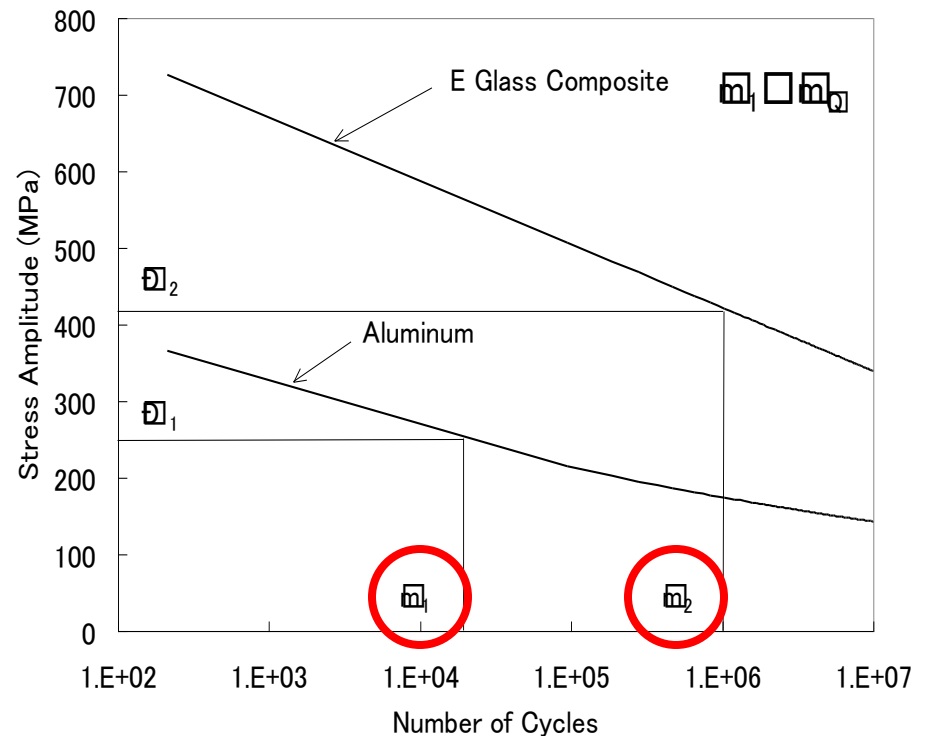
伸び計



- 破断は外面の繊維から開始している
- 歪は経時的に増加している
- 同じ荷重範囲で、1時間未満で破断するものと40,000時間を超える試験片が存在
- 時間依存性のない現象
- **ストレスラプチャー試験による強度低下は、樹脂材料の常温クリープによるものと推定**

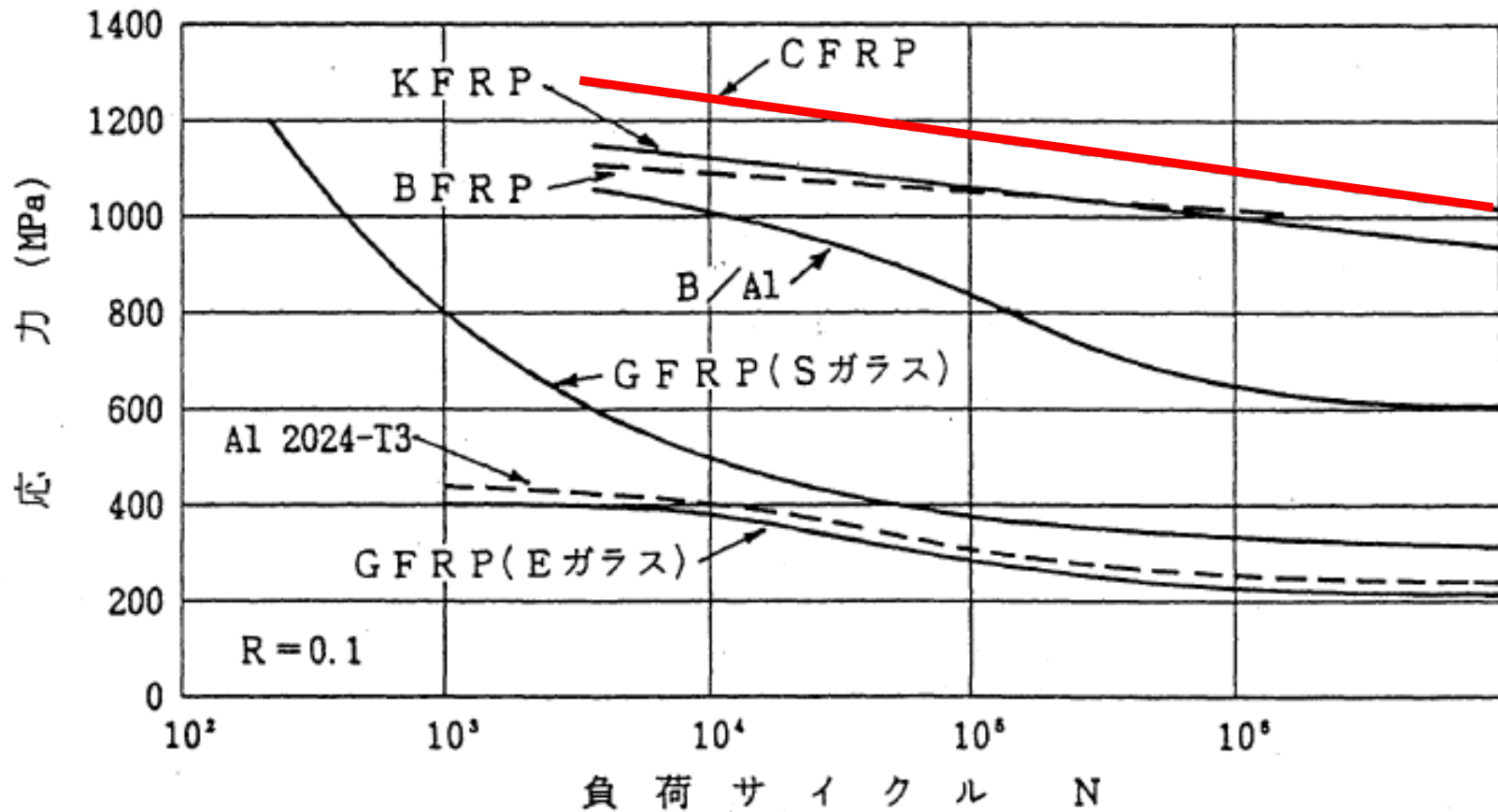
疲労特性 ライナーとFRPの疲労特性とLBB

- ライナーの寿命 N_1 より FRPの寿命 N_2 を十分長く設計する
- 荷重の繰返しにより容器全体が破裂する前に漏洩が開始
- 破裂前漏洩
(LBB: Leak Before Burst)が成立し、容器破裂による災害を最小限に食い止める



LBB成立のためのライナーとFRPの疲労特性 (模式図)

FRP材料の疲労特性 (1984: Menges, Polymer Composites)



- この時代、CFRPは疲労特性が極めて良いと紹介されているが現在主流となっている炭素繊維とは異なる
- 設計に使用できる公表されたデータはない
- 高強度材料であるため試験自体が難しい

試験片の問題点と対応



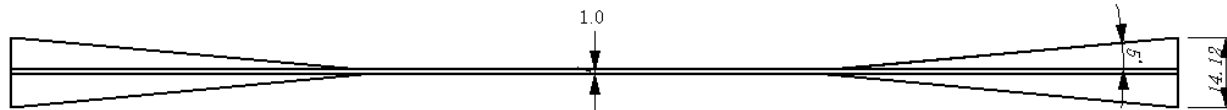
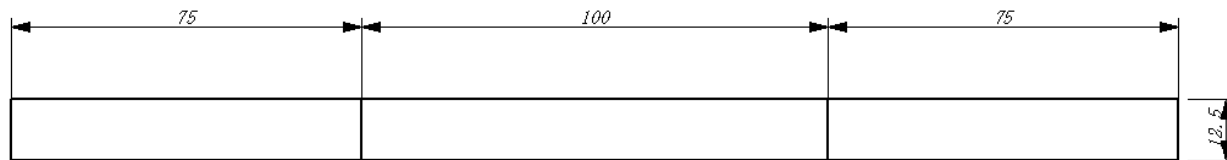
問題点

グリップ内部で応力集中を起こすため
正確なデータが得られない

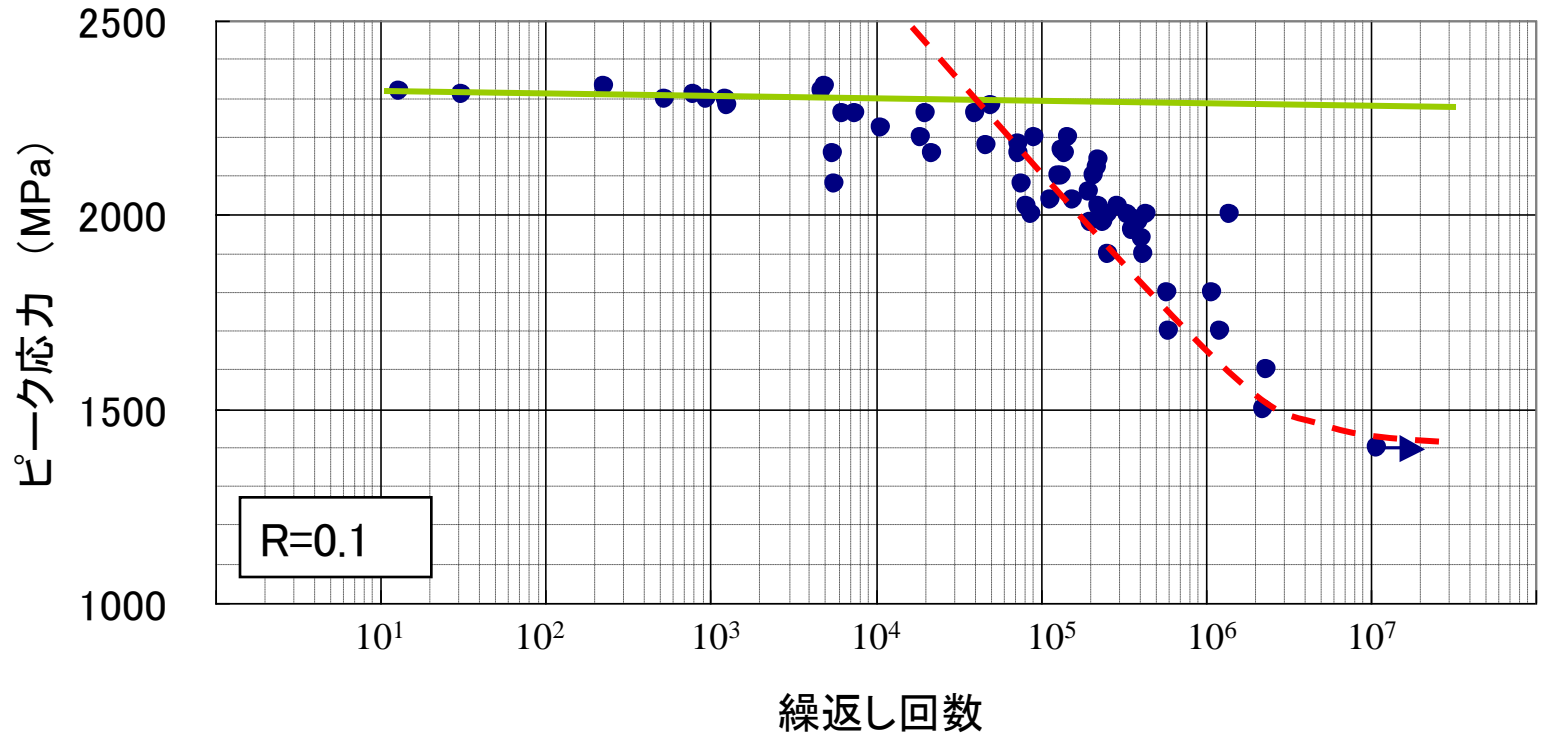


対応

ガラス製タブをアルミ製に変更し、塑性変形によりグリップ荷重を分散させる
テーパ形状によりグリップ力を低減



CFRP (T700SC) 疲労試験結果



— 炭素繊維本来の疲労特性

- - 繊維と樹脂の割れや剥離に起因するCFRPとしての疲労特性

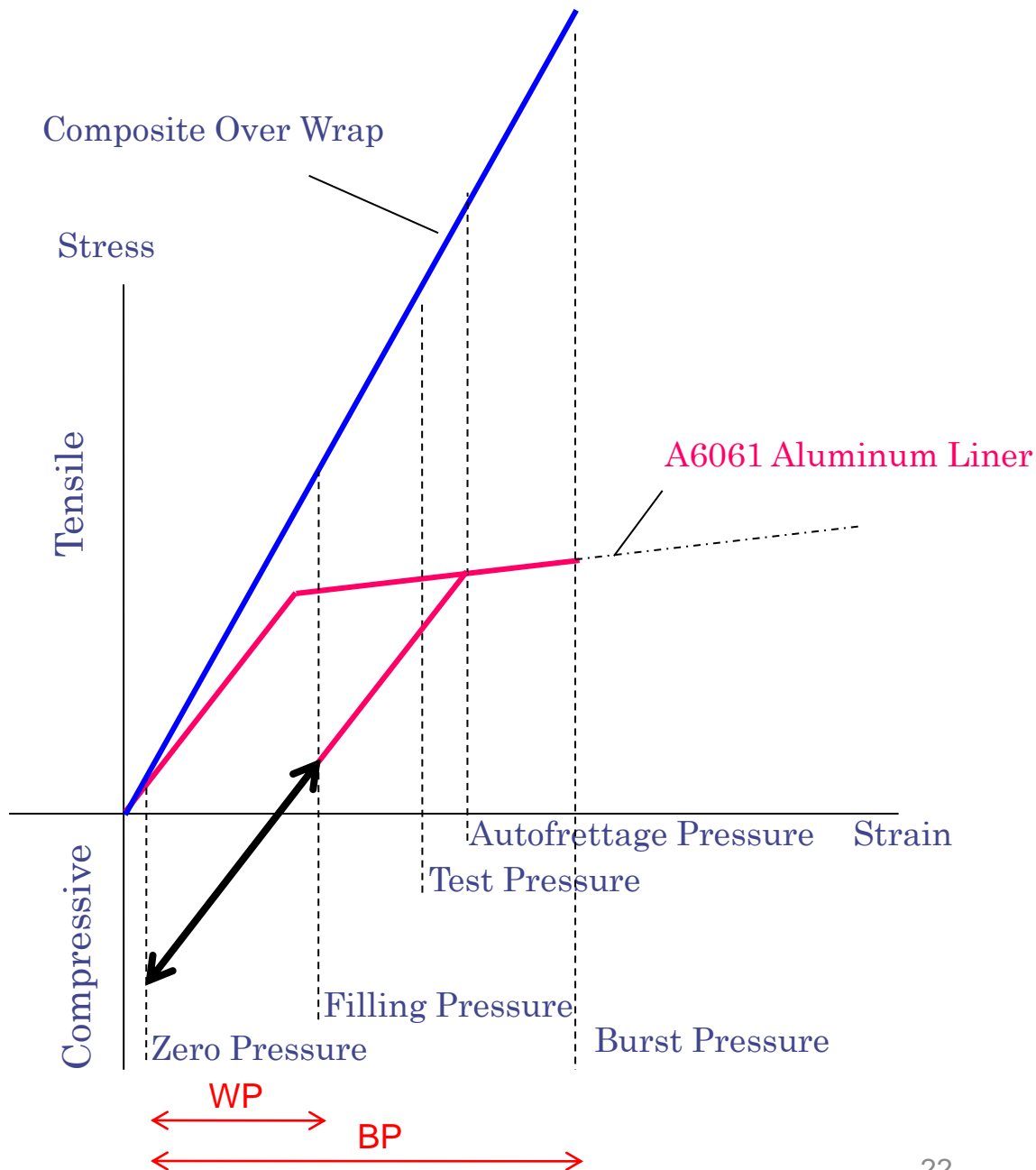
エポキシ樹脂の疲労特性に影響される

高強度CFRPではさらに顕著となる

繊維と樹脂の割れを詳細に観察することで寿命推定の可能性がある

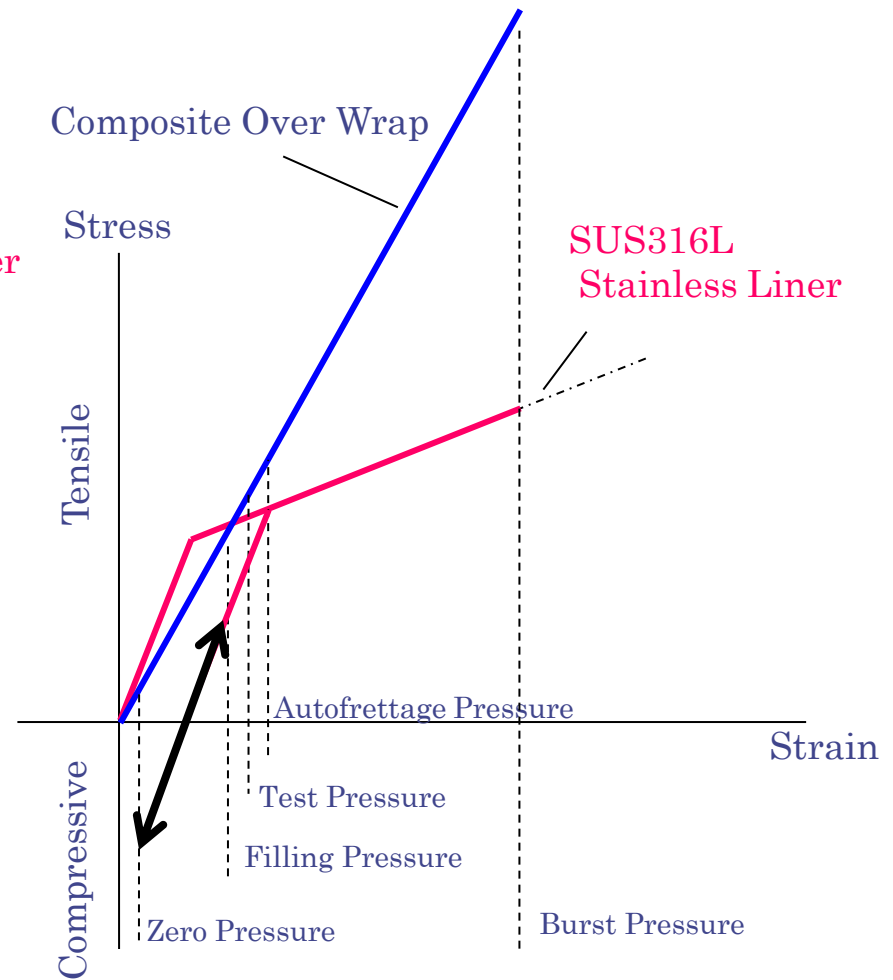
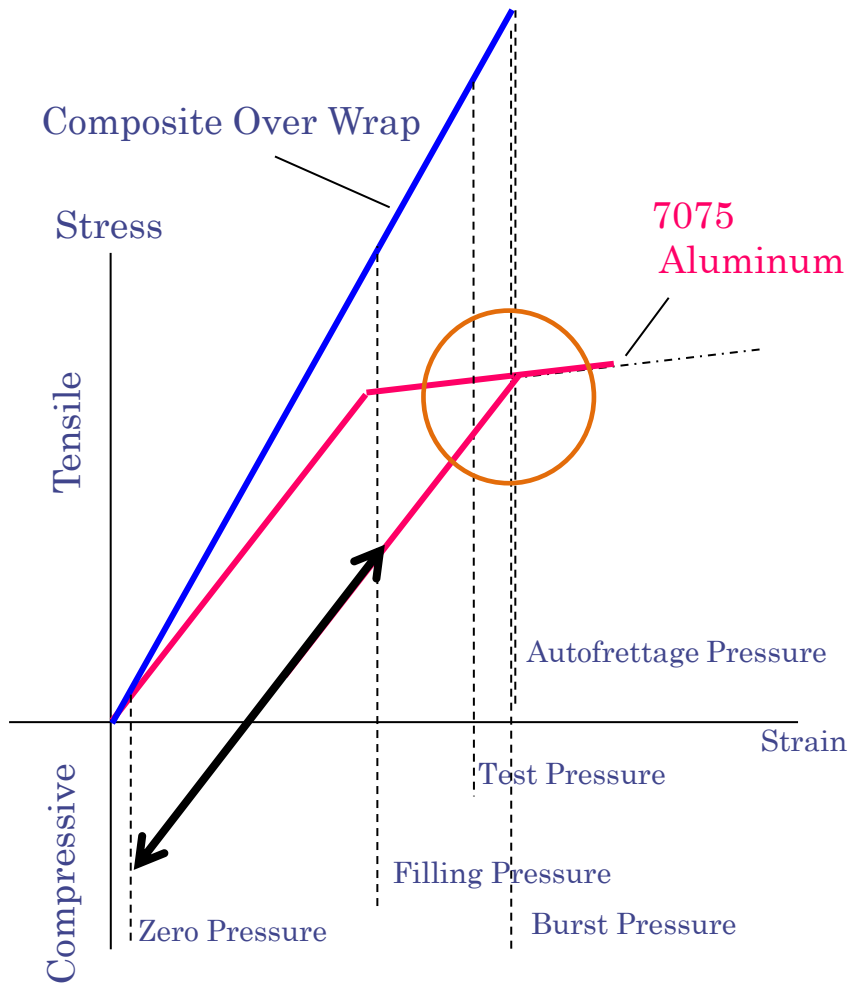
自緊処理

- フィラメントの破断伸び
カーボン繊維 1.5%程度
金属ライナーの0.2%耐力に
おける歪の数倍
- **自緊処理** ライナー 圧縮応力
フィラメント引張応力
- 疲労寿命を延ばす
- 適切な安全率を確保



A7075 自緊処理時に破裂の可能性大

SUS316L 安全率過大 8程度



材料の種類	弾性率 (GPa)	0.2%耐力 (MPa)	自緊処理後の弾性範囲 (%)	最高充てん圧力までの歪 (%) 自緊処理ひずみの1/1.5	充てん圧力と破裂圧力との関係 繊維破断歪を1.4%とした例
6061-T6	68.6	280	0.816	0.544	2.57
7075-T6	68.6	510	1.487	0.991	1.41
SUS316L	190	250	0.263	0.175	7.98
6061HS-T6	68.6	330	0.962	0.641	2.18

FRP複合容器の設計方法

網目理論による概略設計とFEMによる詳細設計

□ 網目理論

- 例: NASA CR-72124 (1966)

力の釣合い式

歪適合式

弾塑性解析

- ドーム形状: 等張力測地線

ドームの全ての部分で張力が等しい

繊維の張力のみでせん断力はかからない

- 網目設計ではドーム部の内圧による変形を計算できない

□ FEMによる詳細設計

- 2次元軸対称ソリッド要素で可能

弾塑性解析

FRP

直行異方性

弾性

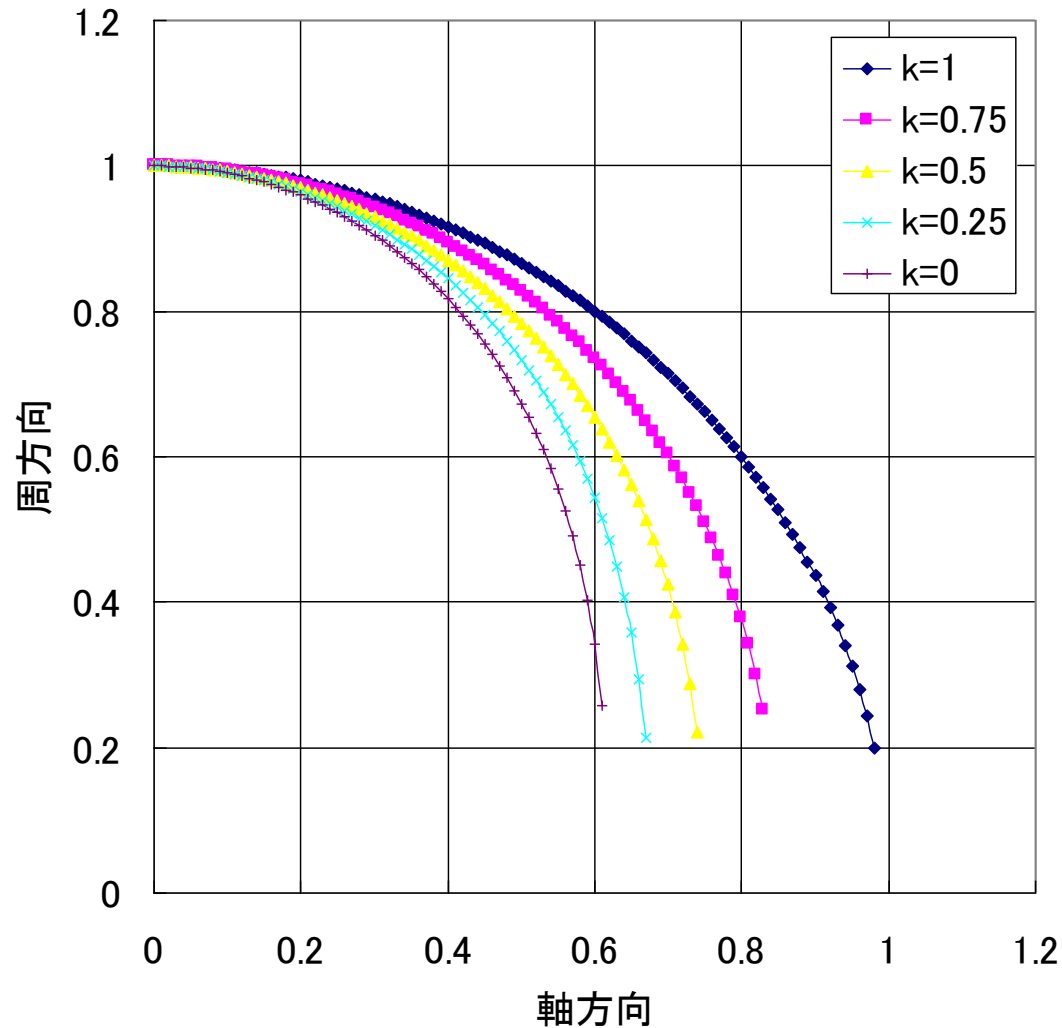
アルミライナー

等方性

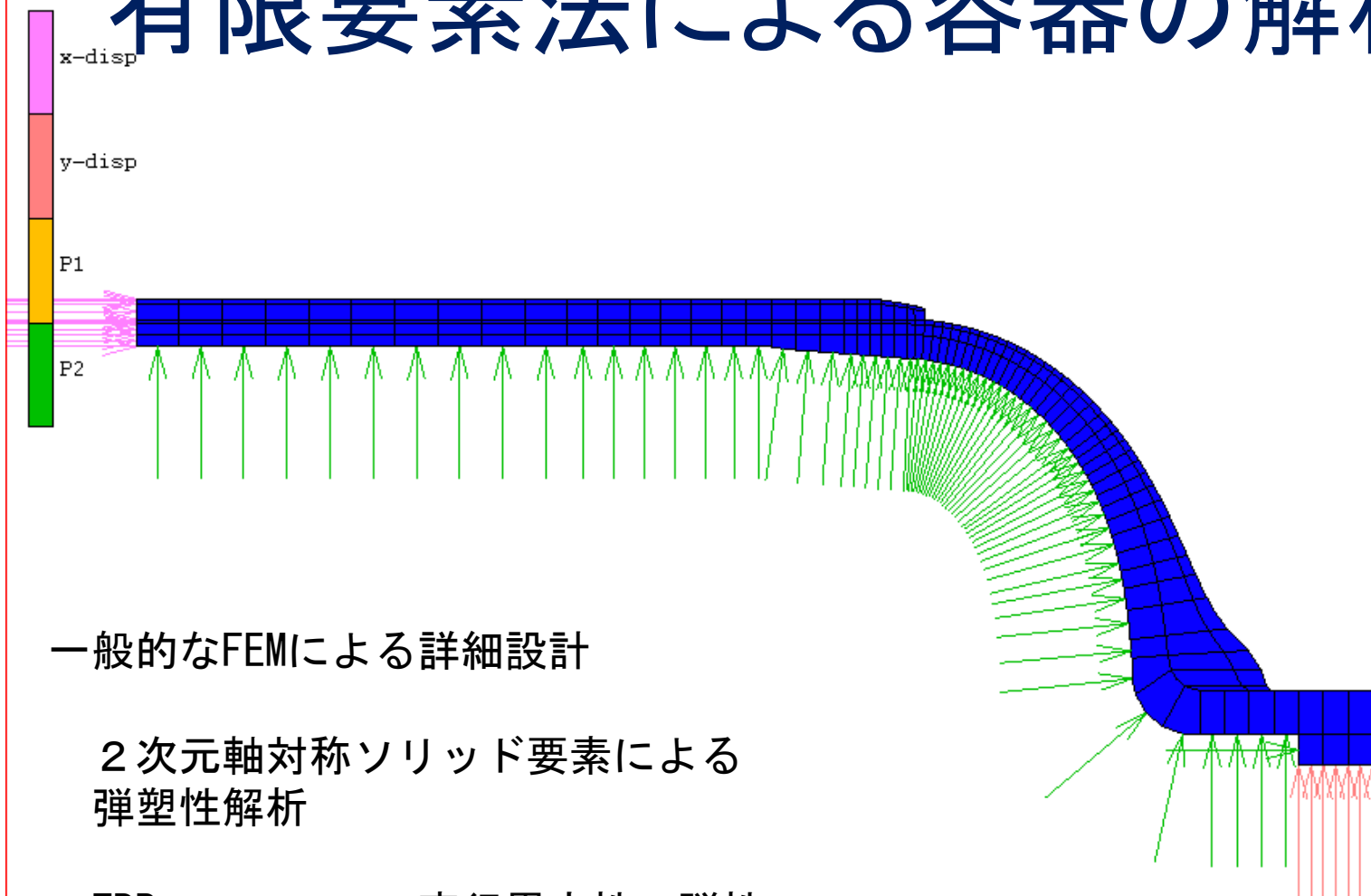
弾塑性

等張力測地線に基づく形状

k:ライナーの荷重分担比 ボス/直径=0.2



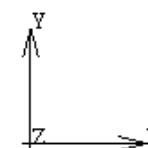
有限要素法による容器の解析



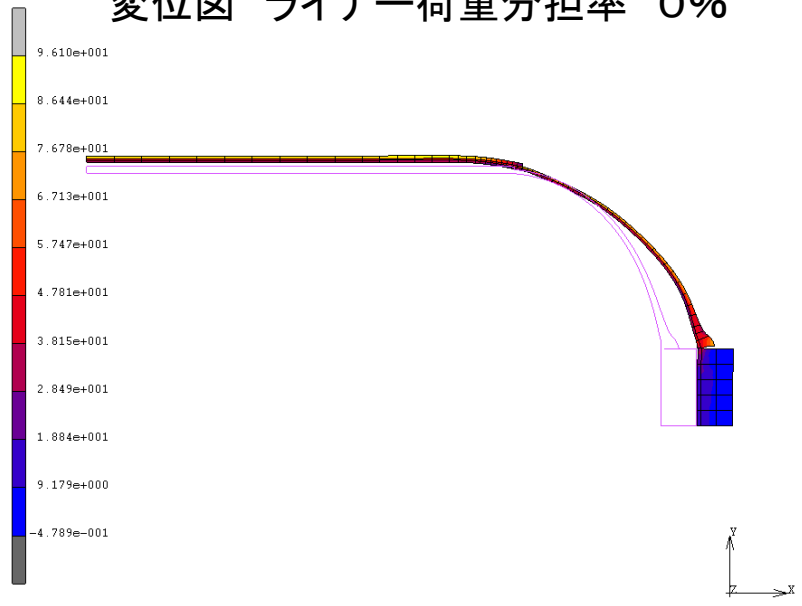
一般的なFEMによる詳細設計

2次元軸対称ソリッド要素による
弾塑性解析

FRP	直行異方性	弾性
アルミライナー	等方性	弾塑性

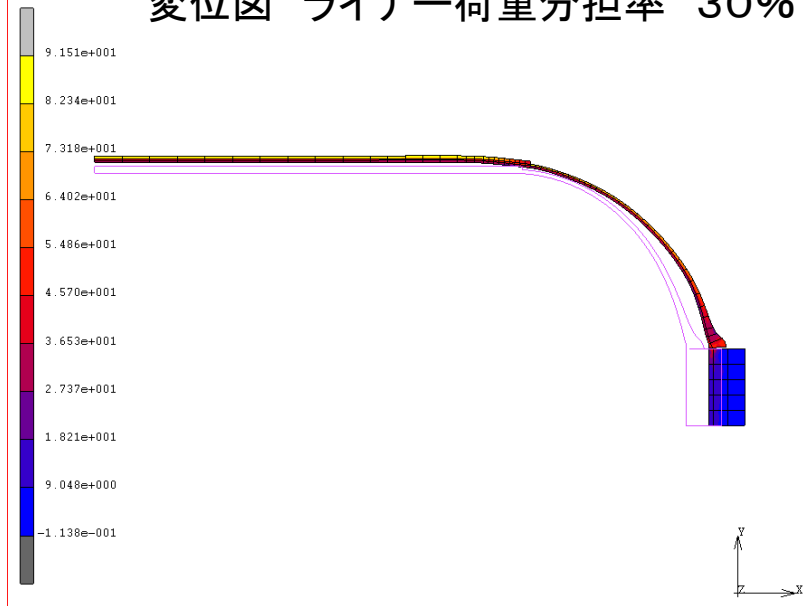


変位図 ライナー荷重分担率 0%



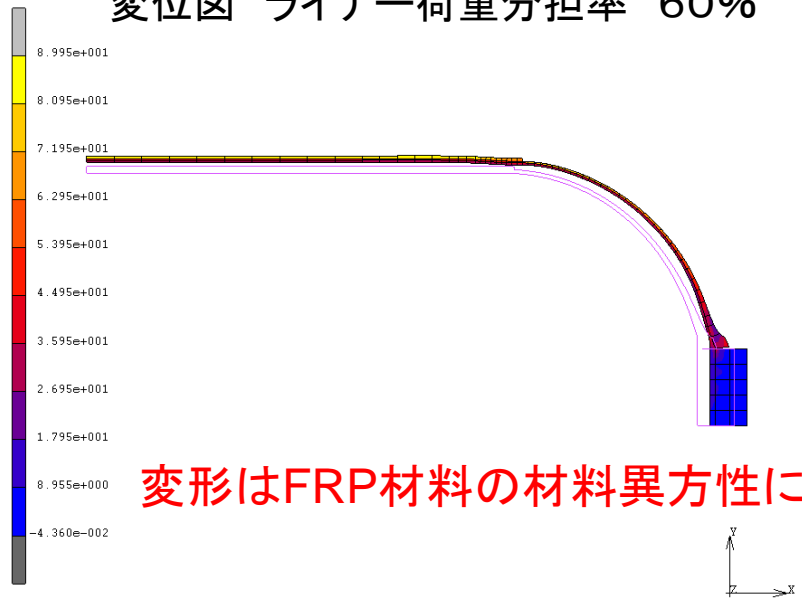
lcase1
Principal Stress Max

変位図 ライナー荷重分担率 30%



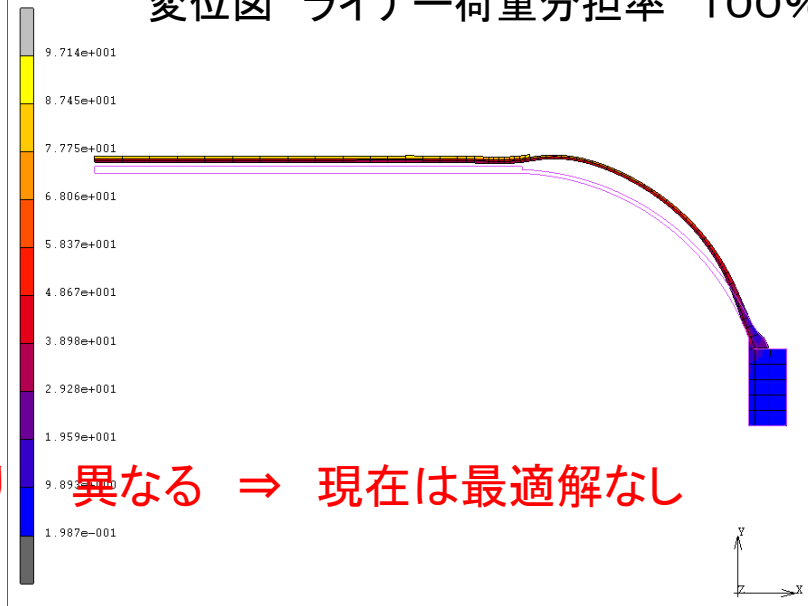
lcase1
Principal Stress Max

変位図 ライナー荷重分担率 60%



lcase1
Principal Stress Max

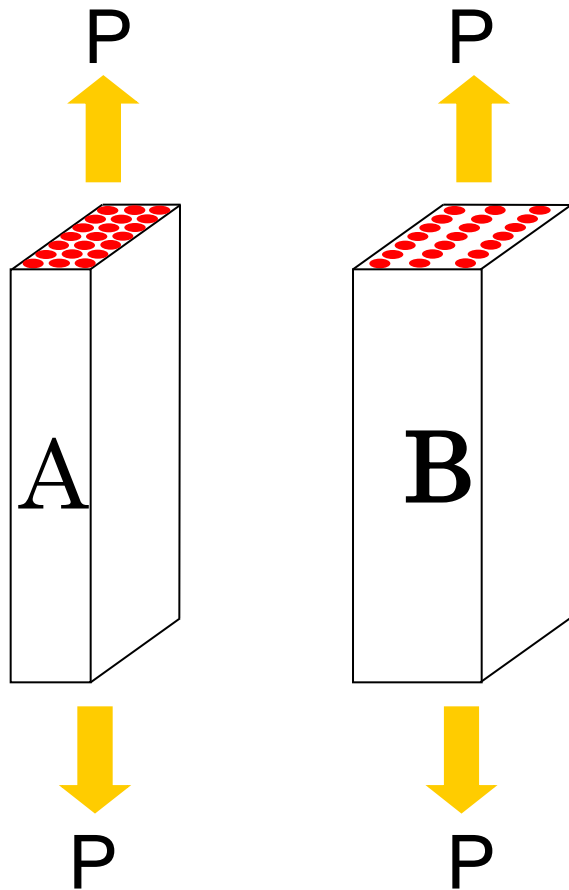
変位図 ライナー荷重分担率 100%



lcase1
Principal Stress Max

変形はFRP材料の材料異方性により異なる ⇒ 現在は最適解なし

FRP材料の強度評価



強度のほとんどは繊維が受持つ

繊維本数は同じ

荷重Pも同じ

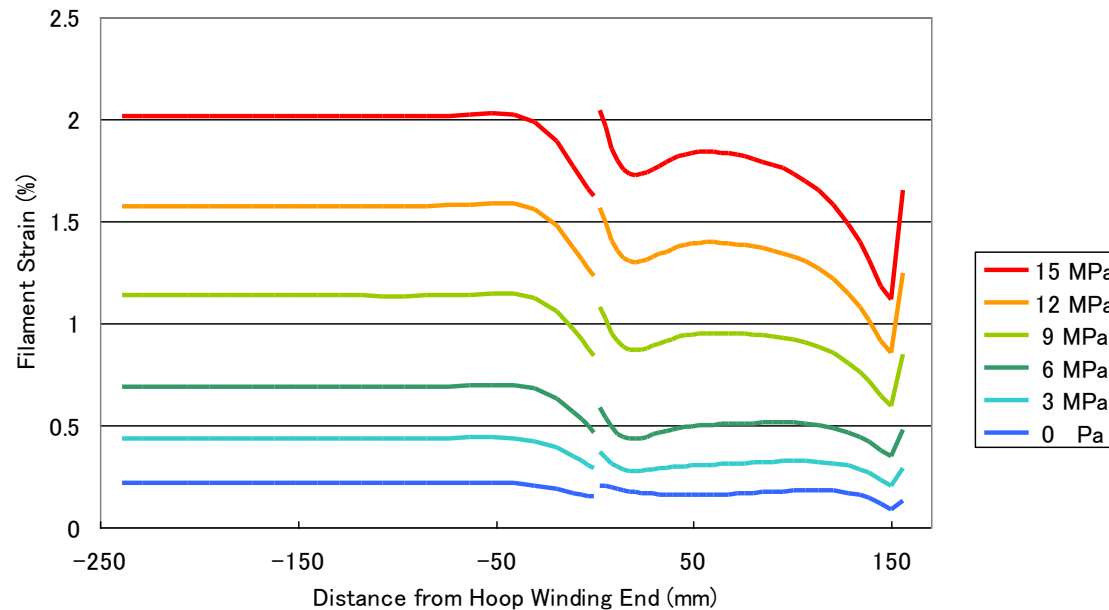
•応力で表現

$$\sigma_{(A)} = P/A_{(A)} > \sigma_{(B)} = P/A_{(B)}$$

•歪で表現

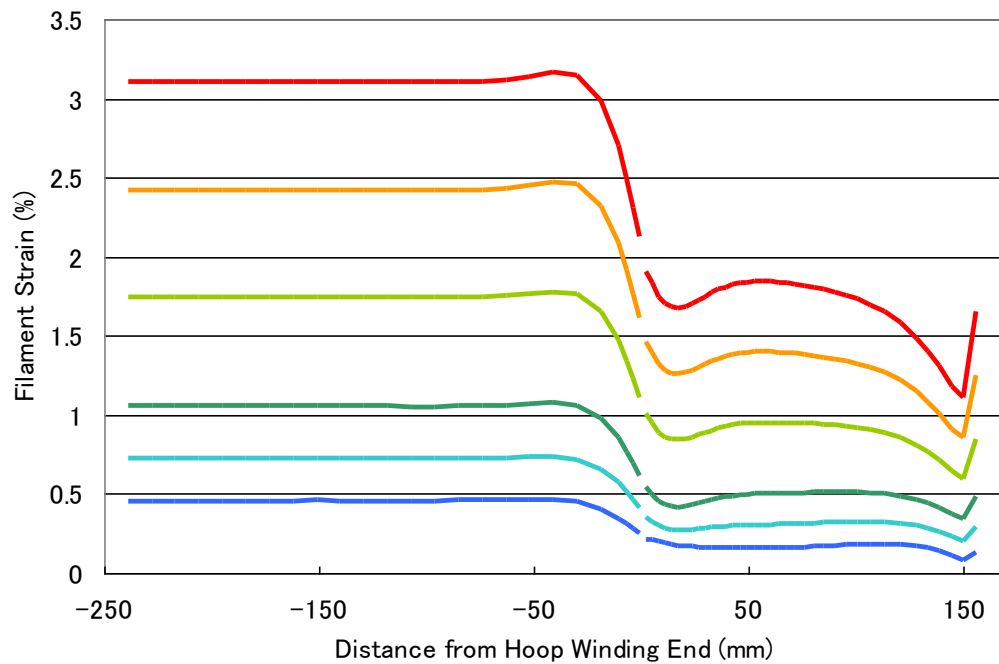
$$\varepsilon_{(A)} \doteq \varepsilon_{(B)}$$

FRP複合容器の強度評価の方法

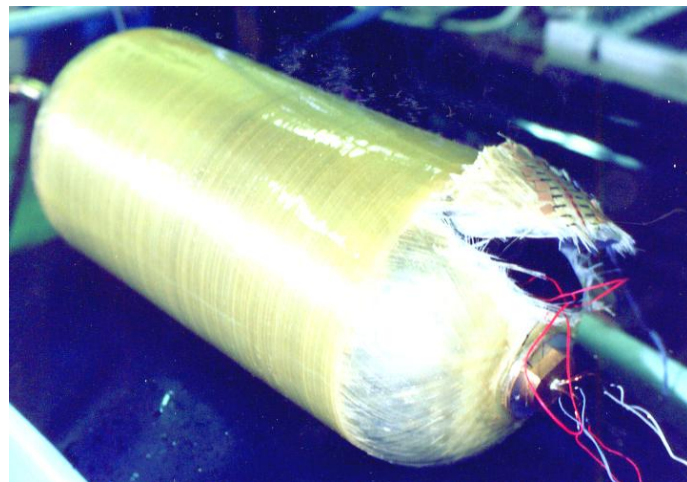
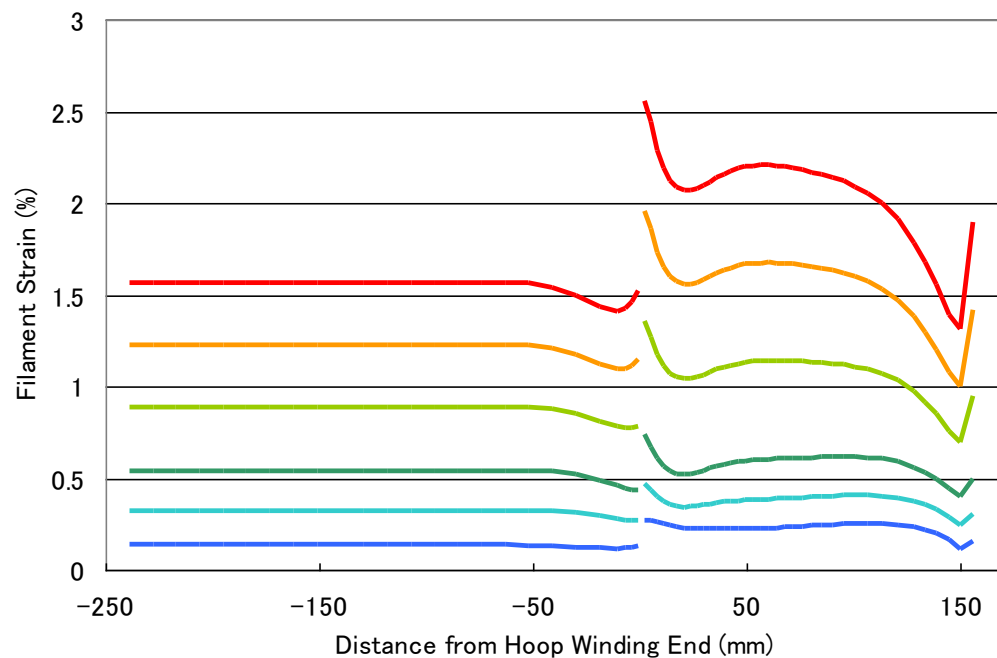


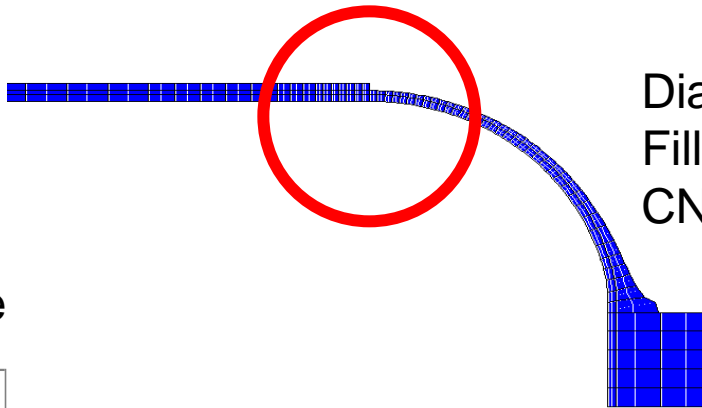
- 横軸 容器の位置 ー側 胴部 +側 ドーム部
- 縦軸 フィラメント(複合材料)の歪
- 胴部 フープ巻 ドーム部 ヘリカル巻
- フィラメントの歪の大きい個所で破裂開始

歪分布と破裂位置 ヘリカル強化



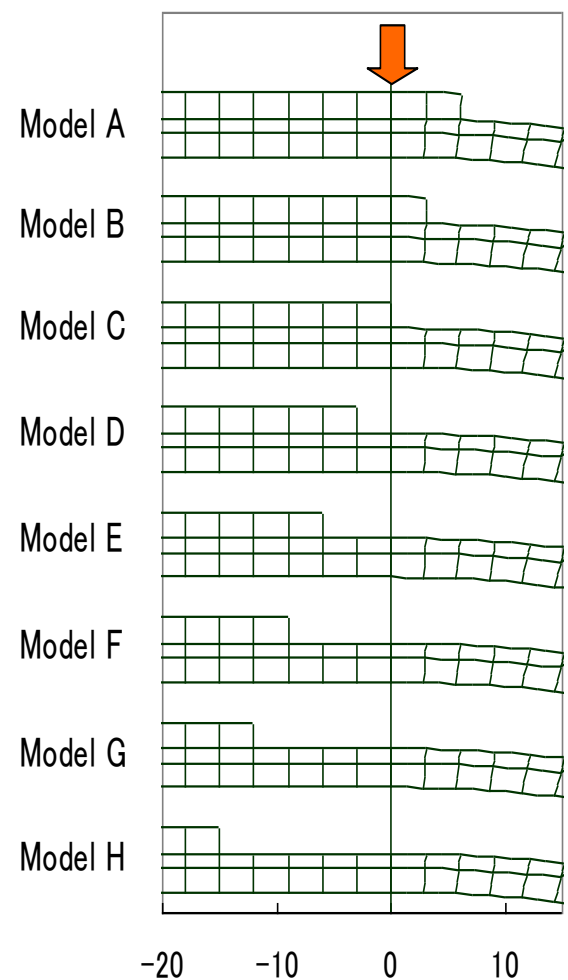
歪分布と破裂位置 フープ強化





Diameter : 300mm
 Filling Pressure : 20MPa
 CNG Cylinder

Tangent Line



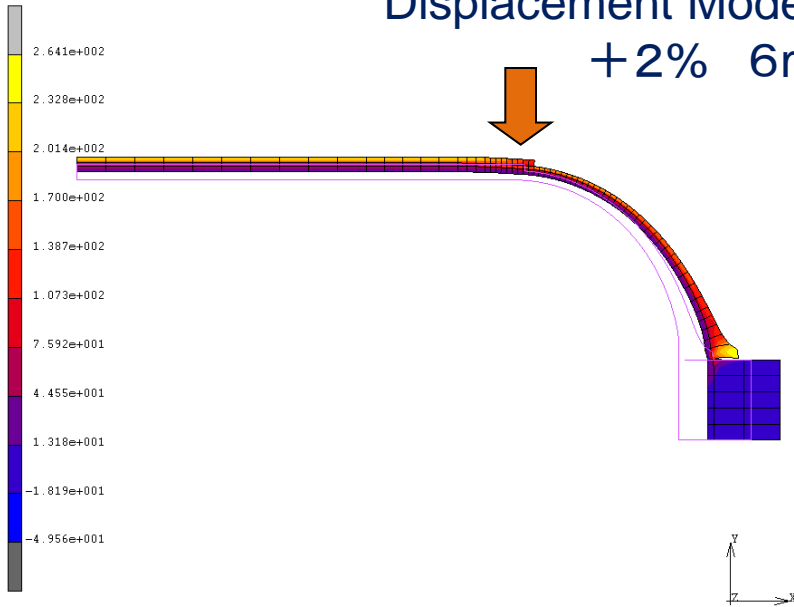
Model	Position of the end of hoop layer	Percentage to diameter
A	To dome side, +6mm	+2%
B	To dome side, +3mm	+1%
C	Tangent line	0%
D	To cylinder side, -3mm	-1%
E	To cylinder side, -6mm	-2%
F	To cylinder side, -9mm	-3%
G	To cylinder side, -12mm	-4%
H	To cylinder side, -15mm	-5%

Distance from Tangent Line (mm)

Inc: 27
Time: 2.700e+001



Displacement Model A +2% 6mm

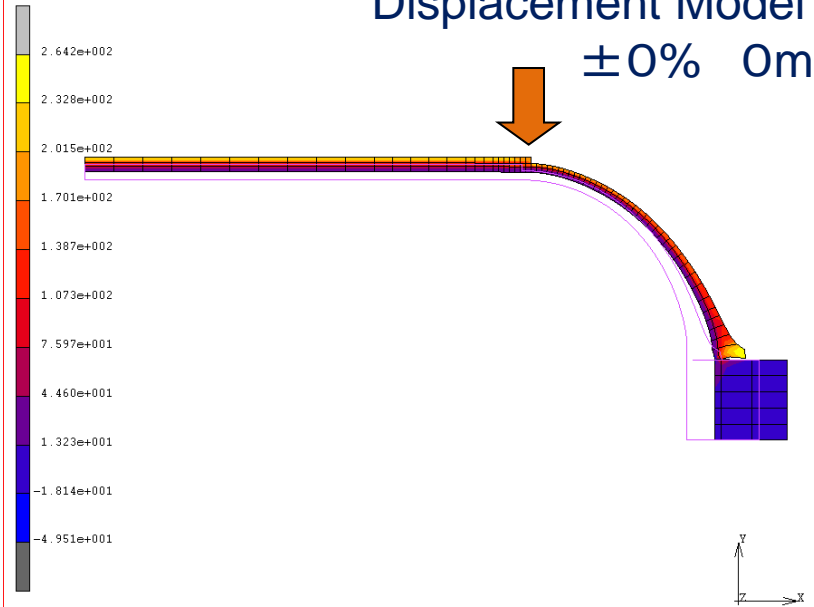


lcase1

Inc: 27
Time: 2.700e+001



Displacement Model C $\pm 0\%$ 0mm

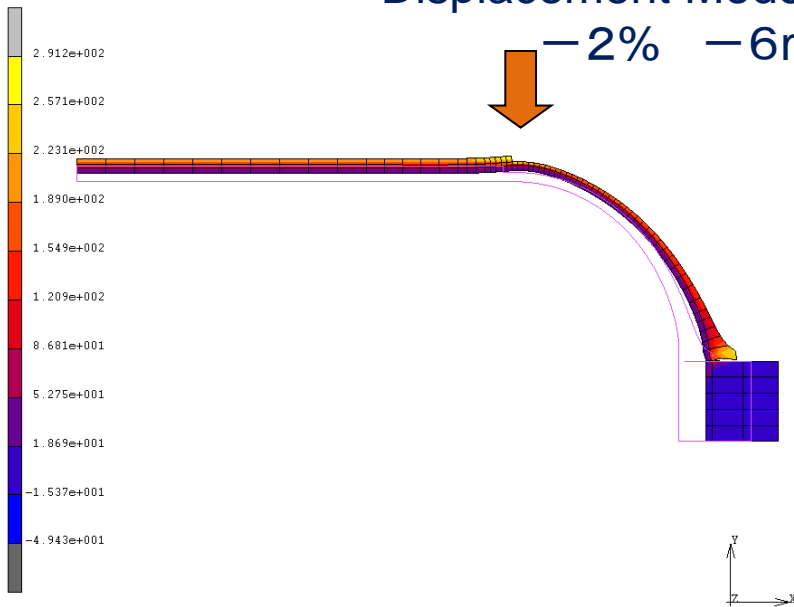


lcase1

Inc: 27
Time: 2.700e+001



Displacement Model E -2% -6mm



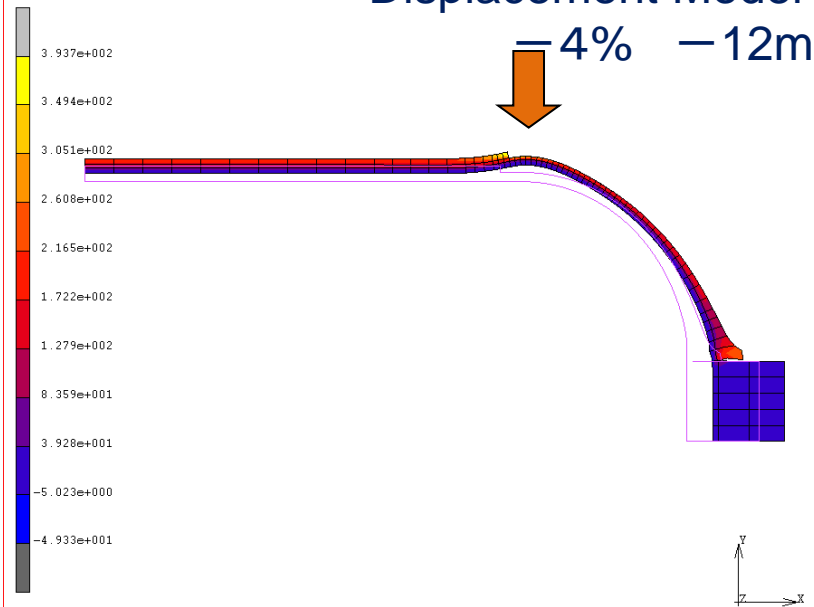
lcase1

Principal Stress Max

Inc: 27
Time: 2.700e+001



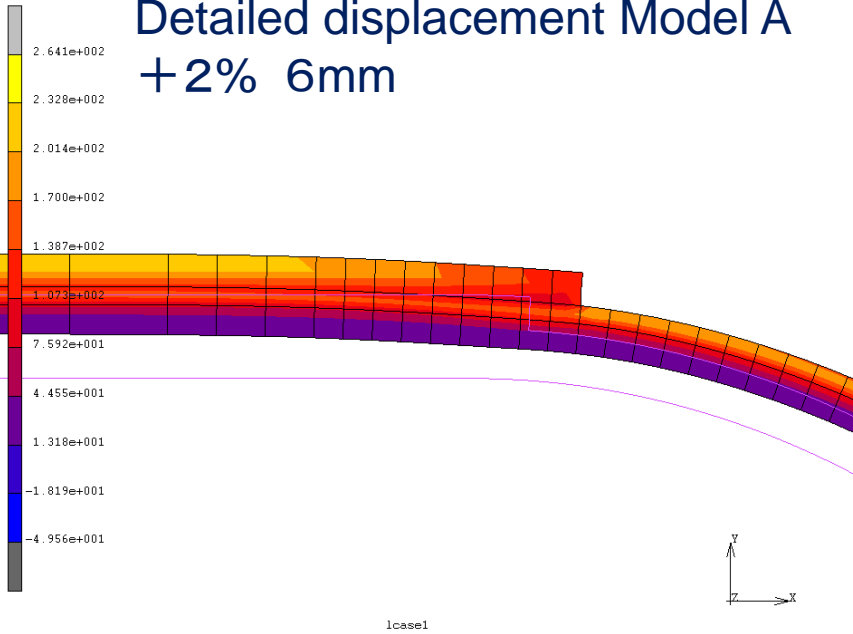
Displacement Model G -4% -12mm



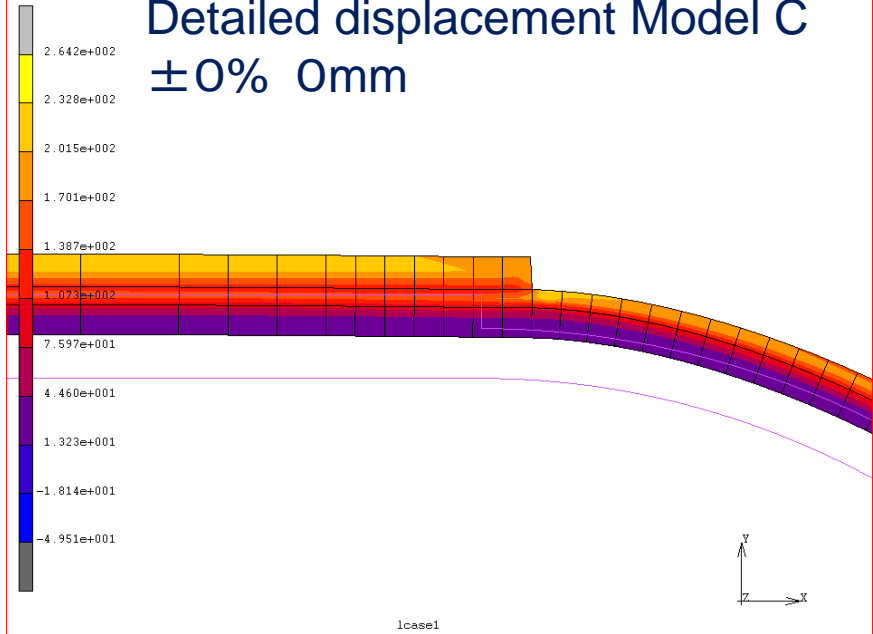
lcase1

Principal Stress Max

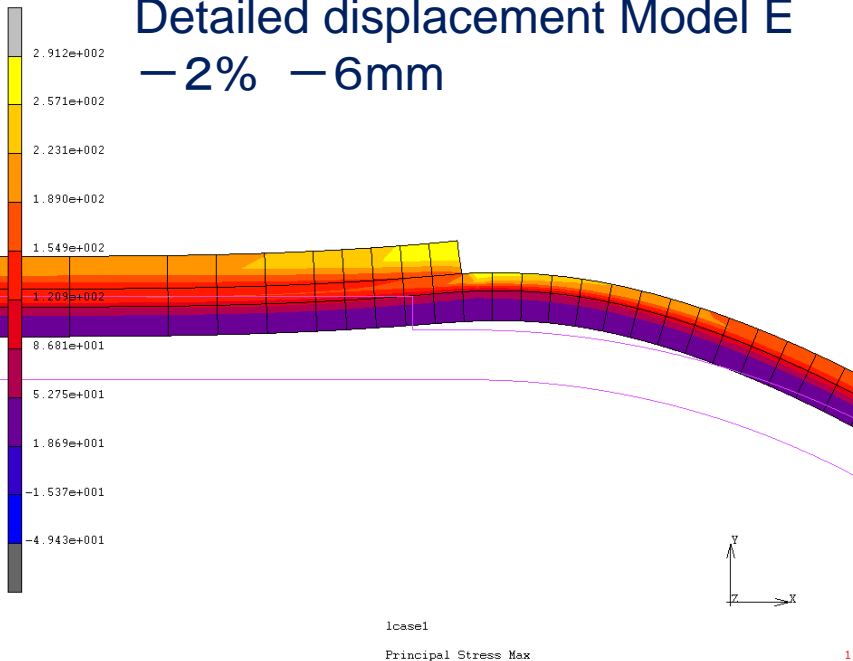
Detailed displacement Model A +2% 6mm



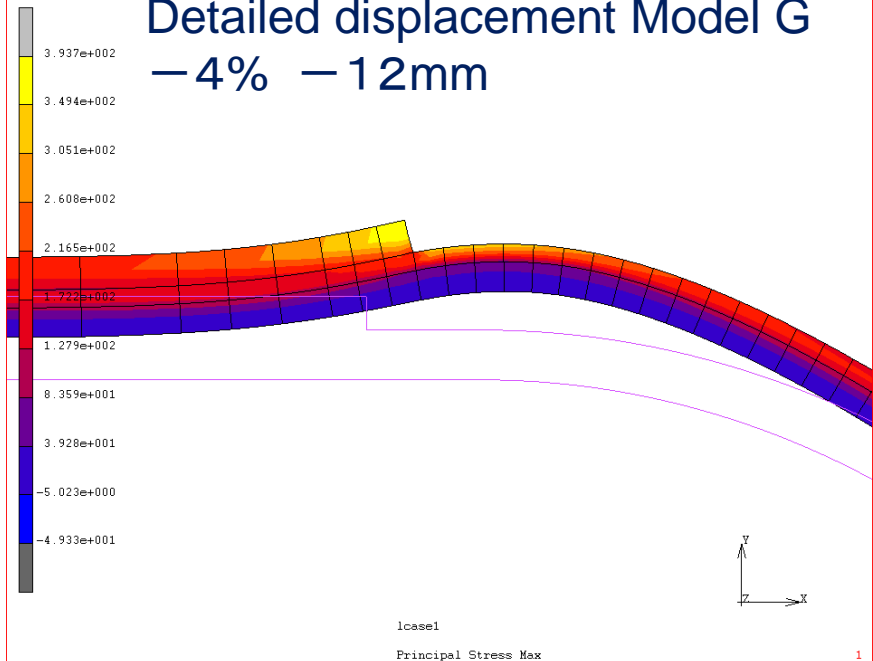
Detailed displacement Model C $\pm 0\%$ 0mm

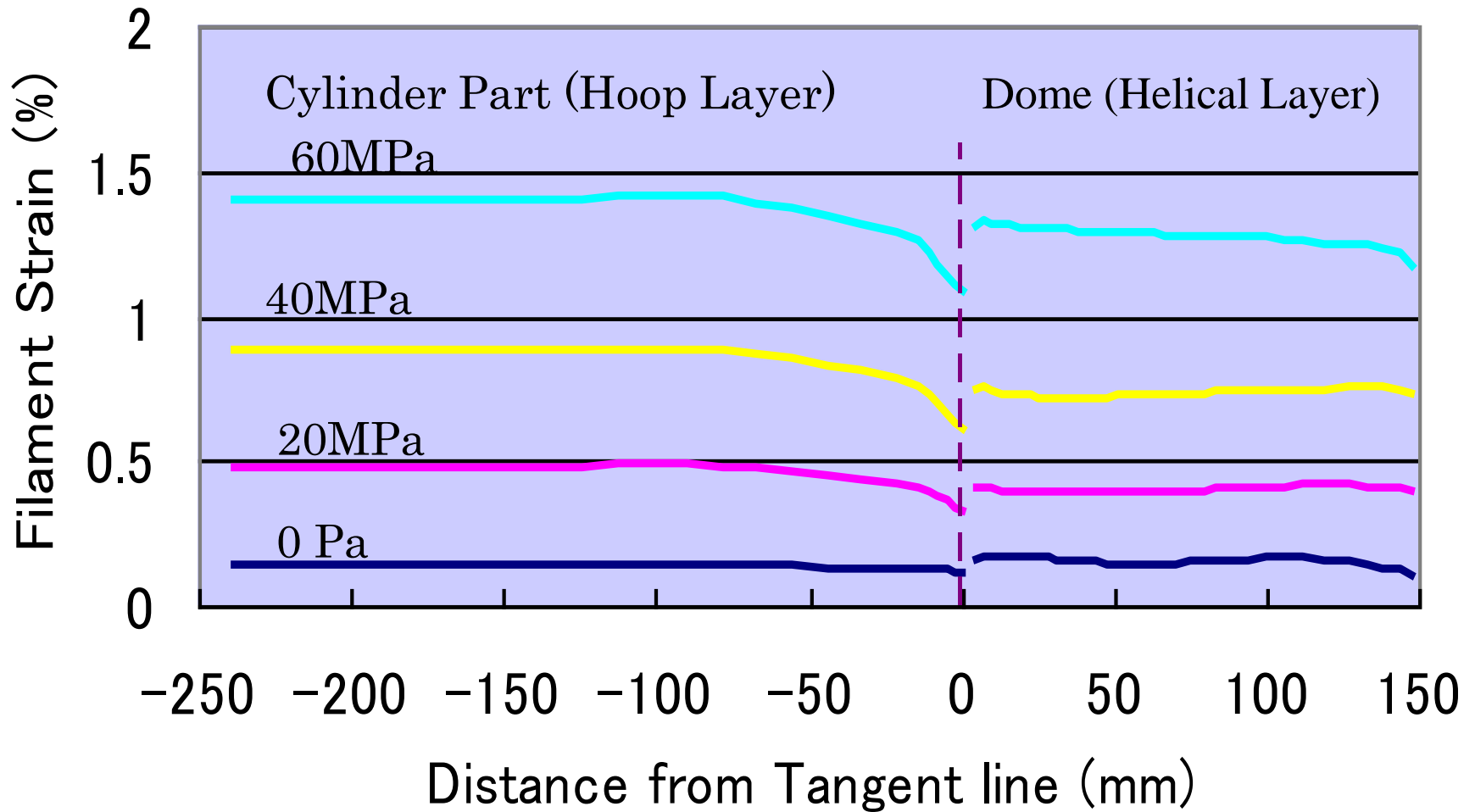


Detailed displacement Model E -2% -6mm

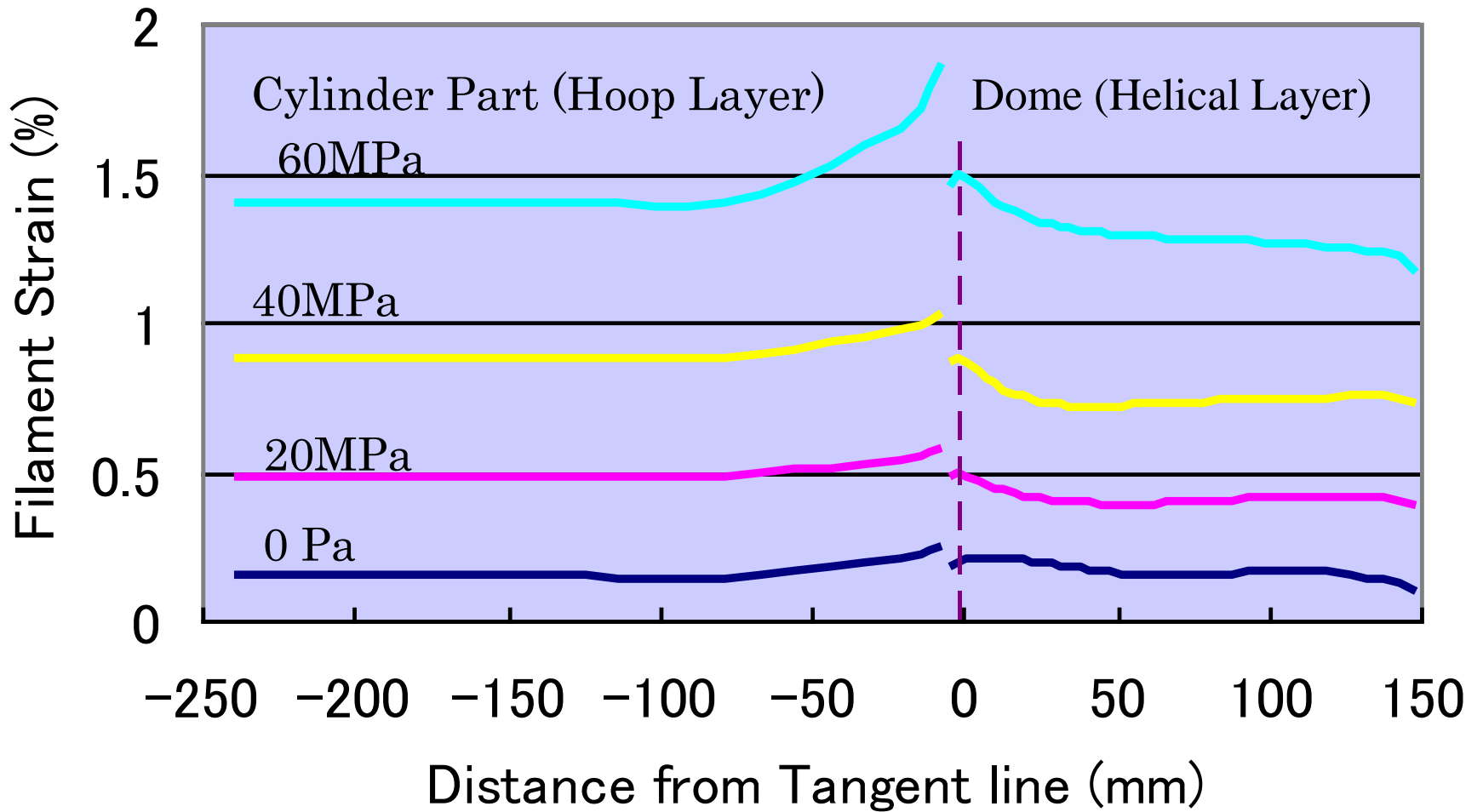


Detailed displacement Model G -4% -12mm

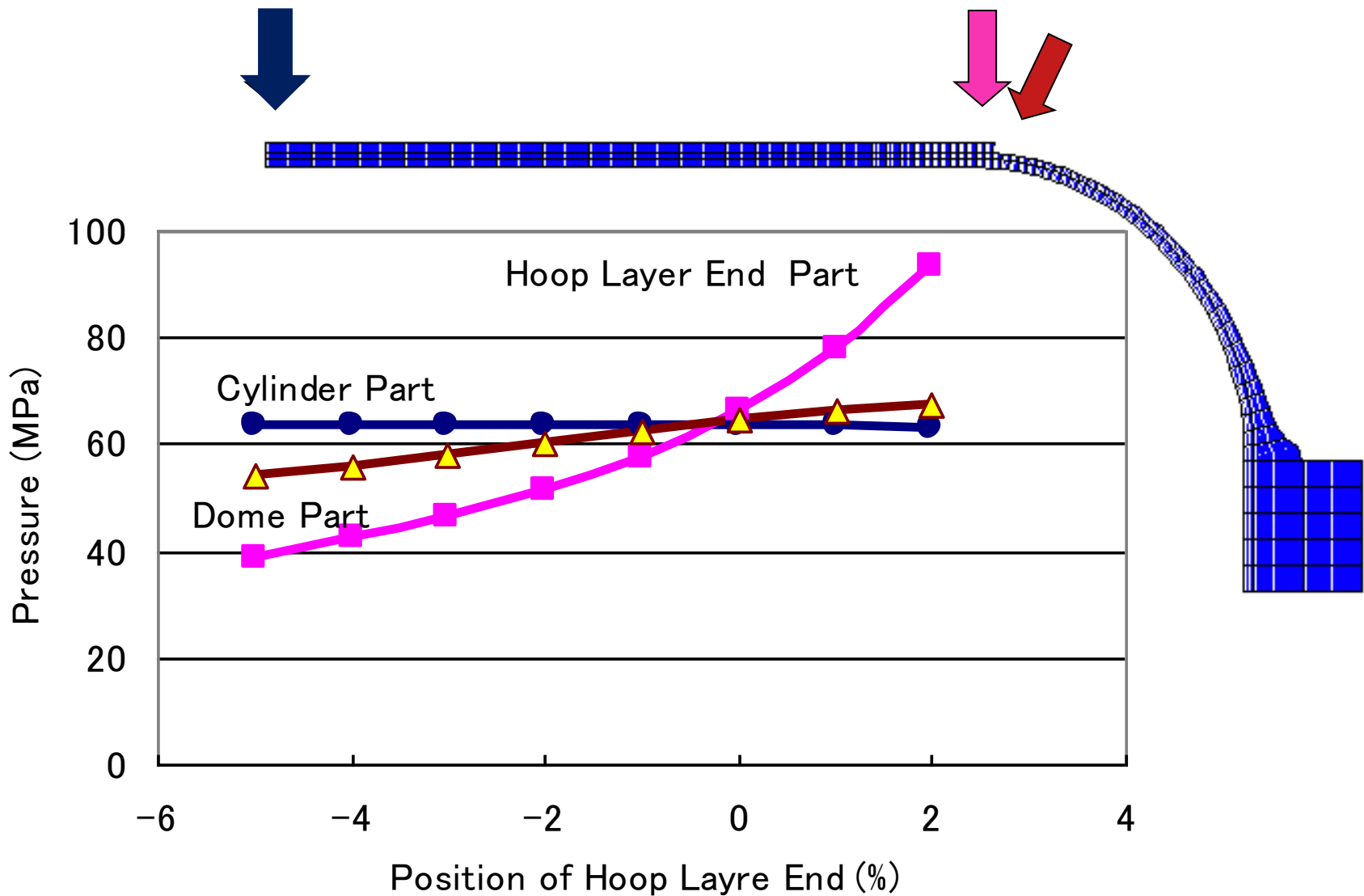




**Distribution of Filament Strain +2%
from Original Hoop Layer End (A)**



**Distribution of Filament Strain –2%
from Original Hoop Layer End (E)**



フープ巻端部の位置 と 繊維の破断歪が1.5%と仮定したときの
破裂圧力の関係 (CNG容器の例)

推定破裂圧力 (at 1.5% Strain of FRP)

Cylinder Model	Estimated Burst Pressure	
	(MPa)	(%)
A	63.16	99.06
B	63.43	99.48
C	63.76	100
D	57.70	90.50
E	51.36	80.55
F	46.31	72.63
D	42.28	66.32
H	38.59	60.53

供用中の損傷

- FRPの損傷は定期的な非破壊検査では判断できない
- 使用中に生じる外部損傷は、擦傷、切傷、衝撃傷及び熱損傷等
- 傷の拡大 金属材料とは異なる
 - マトリックスの割れ、層間剥離が生じる
 - 繊維材料を切断して進行しない
- 切傷（深くて短い傷）
 - 傷近傍の他の傷がどのように強度に影響するか不明確
 - 幾つの傷がどのような分布で発生するとどのように影響するかが不明確
- 広い面積で比較的浅い傷の値を許容傷深さとして採用
- 規則（現在）
 - 損傷補修による強度回復は不可能
 - 残存するFRP層の応力が規定値（応力レベル）を下回らない傷を許容
 - 圧力の繰返し回数と使用期間を制限
- 今後の研究に期待

軽量 → 水素で劣化しない構造 + 軽量

□ 燃料電池等水素用容器

35MPa ⇒ 70MPa	180L	35MPa	4kg	300km
	160L	70MPa	6kg	500~700km

更なる軽量化技術が必要

□ 貯槽もFRP複合構造へ

105MPaの貯槽 KHK、ASME、ISO等
圧力の繰返し回数、使用期限が増加

移動式容器とは異なる設計技術が必要

□ CFRP容器にはストレスラプチャー基準に代わる新たな設計基準が必要