

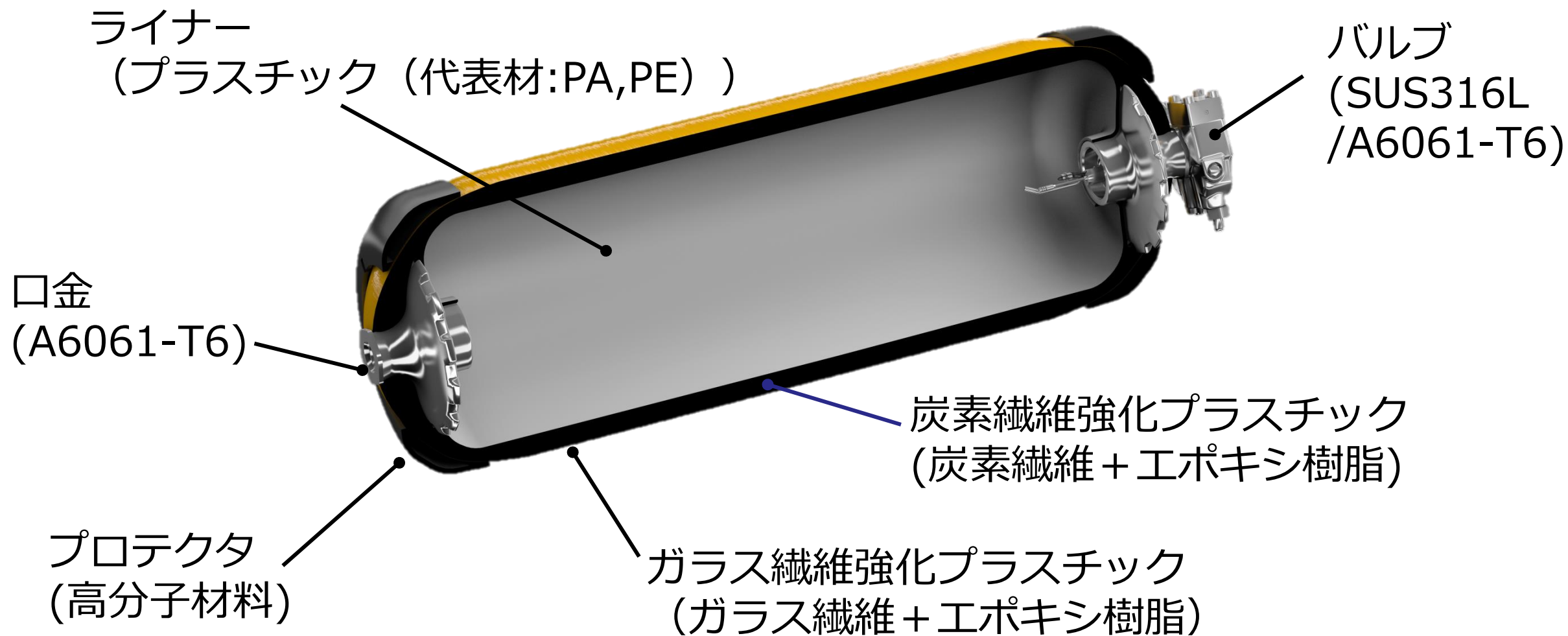
移動体水素貯蔵の課題とニーズ (高圧貯蔵)

2020年10月27日

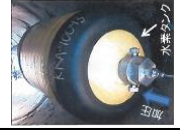
本田技術研究所 先進技術研究所 エキスパートエンジニア 漆山雄太
トヨタ自動車 FC製品開発部 主幹 高見昌宜

1. 高圧水素タンクの概要と普及に向けた取り組み
2. 高圧水素タンクの課題（現状の困りごと）
3. 将来に向けての提案

1. 高圧水素タンクの概要と普及に向けた取り組み
2. 高圧水素タンクの課題（現状の困りごと）
3. 将来に向けての提案

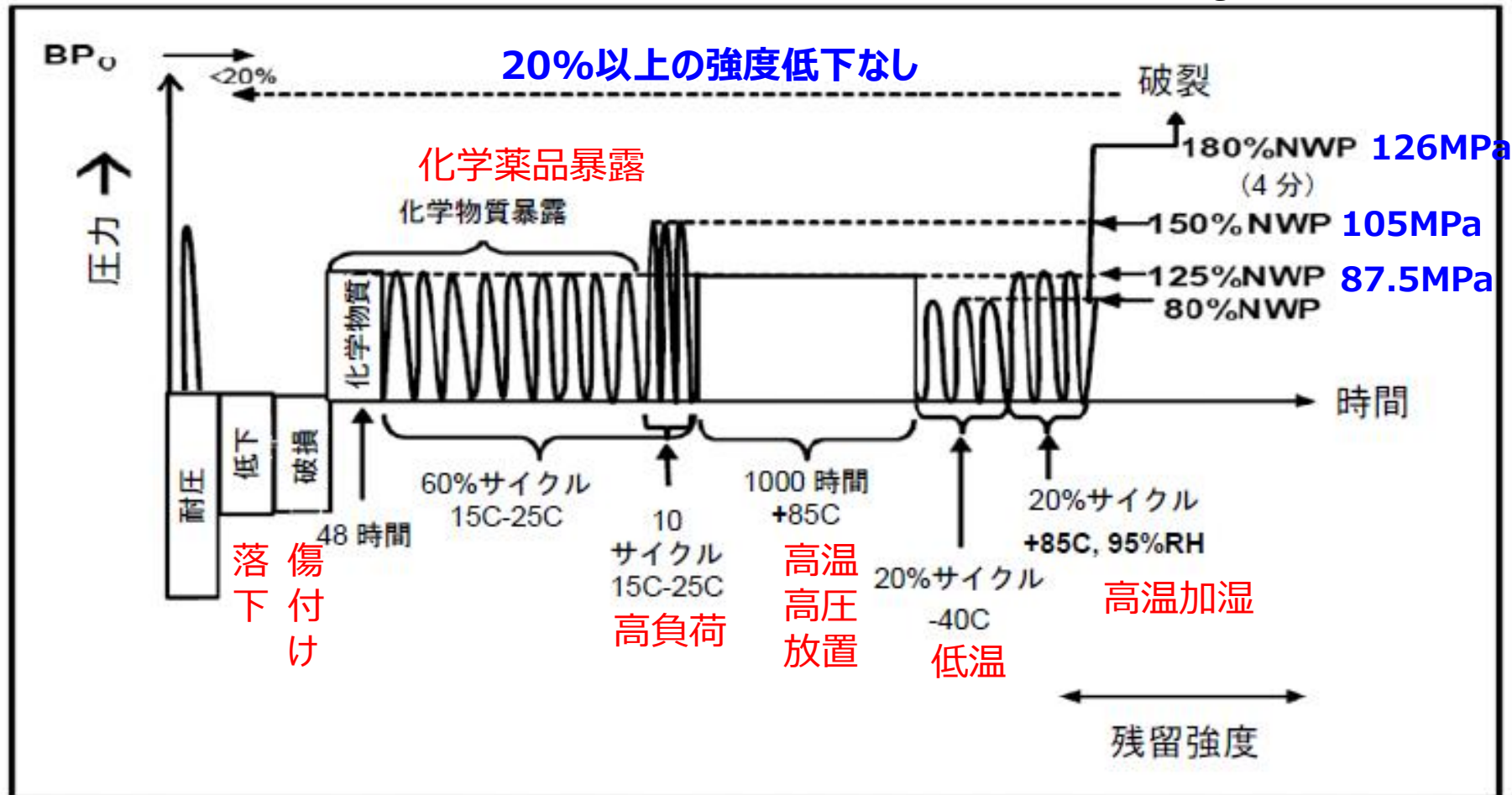


高圧水素タンクは、数種類の部品から構成

試験項目	認証試験内容	判定基準
破裂試験	非腐食性液体を用いて破裂するまで加圧 	破裂圧 $\geq 225\%$ NWP以上
常温圧力サイクル試験	圧力サイクルを付与 	a)11,000回漏れなし b)22,000回破裂なし
液圧シリーズ試験 ～3ヵ月	4方向落下⇒傷付け⇒低温振り子衝撃⇒薬液浸漬 ⇒各温度・圧力下でのサイクル ⇒破裂するまで加圧 	a)試験中漏れ破裂なし b)破裂圧 $\geq 180\%$ NWP以上 c)残存強度BP ₀ ：80%以上
ガス圧力シリーズ試験 ～3ヵ月	高圧保持⇒温度サイクル⇒透過量⇒温度サイクル ⇒透過量⇒高圧保持⇒破裂するまで加圧 	a)試験中漏れ破裂なし b)破裂圧 $\geq 180\%$ NWP以上 c)残存強度BP ₀ ：80%以上 d)排出水素量：46cc/h/L以下
火炎暴露試験	PRDと反対側を局所火炎暴露⇒全面火炎暴露 	a)破裂なし b)PRD作動しタンク内水素を1MPa以下まで放出

認証試験にて安全性を確認

Global technical regulation No. 13



＜要求特性＞

- ・耐内圧性
- ・耐外部衝撃
- ・化学安定性
- ・高温⇔低温
- ・高湿度

車載用タンクの使用環境を見据えた設計が求められる

スペック目標	現在	2020年頃	2025年頃	2030年頃
航続距離	650km	⇒	⇒	800km
最大出力密度	3.0kW/L	4.0kW/L	5.0kW/L	6.0kW/L
耐久性	乗用車15年	乗用車15年以上	乗用車15年以上 商用車15年	乗用車15年以上 商用車15年以上
貴金属使用量	—	—	—	0.1g/kW
水素貯蔵システム (貯蔵量5kg相当の場合)	5.7wt%	6wt%	—	—

コスト・価格水準	現在	2020年頃	2025年頃	2030年頃
車両価格 (ミライ級)	700万円強	—	同車格のHV車同等の 価格競争力を有する車両価格	—
FCシステム (内、スタック)	約2万円/kW※1	<0.8万円/kW (<0.5万円/kW)	<0.5万円/kW (<0.3万円/kW)	<0.4万円/kW (<0.2万円/kW)
水素貯蔵システム (貯蔵量5kg相当の場合)	約70万円※1	30~50万円	<30万円	10~20万円*

※1:公表資料より資源エネルギー庁推計。

* NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ

高圧水素タンクシステムのコスト目標は20万円@2030年、10万円@2040年

コストダウン

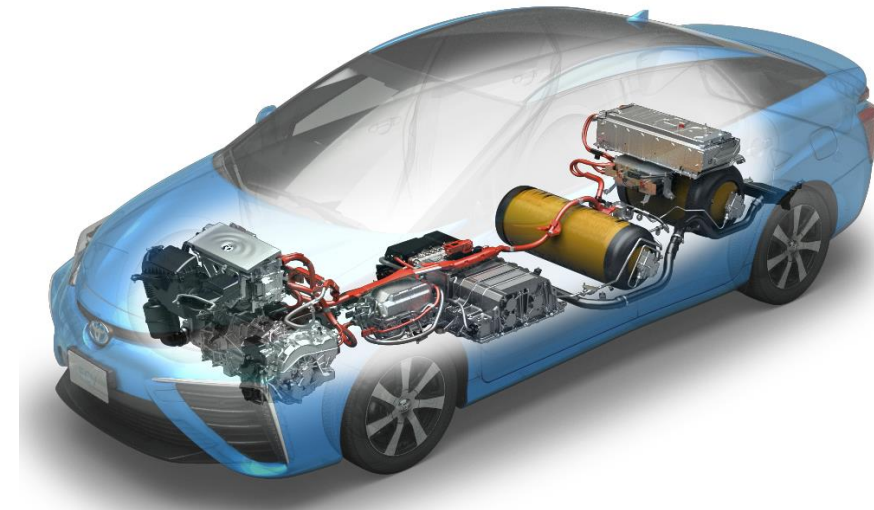
材料単価、材料使用量、生産性

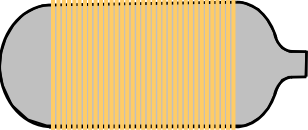
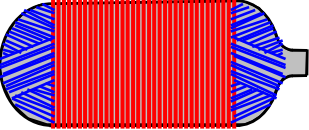
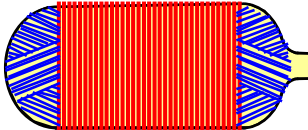
利便性向上

航続距離、充填時間、搭載性

低環境負荷

LCA、リサイクル、廃棄



	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type (New)
構造					
ライナー材料	CrMo鋼	CrMo鋼	アルミ A6061-T6	プラスチック	
FRP	なし	フープ限定	フルラップ	フルラップ	

質量と疲労特性に課題

▲>50wt%

▲>20wt%

①極限まで進化 ②新構造

軽量なTypeIVタンクの進化に加え、新タンク構造にも挑戦

1. 高圧水素タンクの概要と普及に向けて取り組み
2. 高圧水素タンクの課題（現状の困りごと）
3. 将来に向けての提案

コストダウン

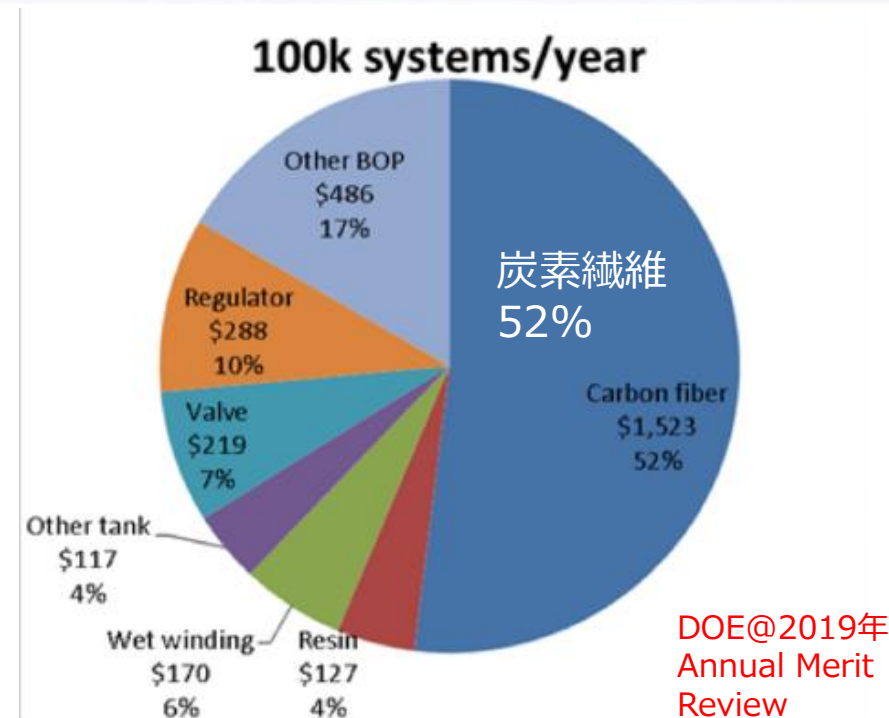
材料単価、材料使用量、生産性

利便性向上

航続距離、充填時間、搭載性、タンク診断

低環境負荷

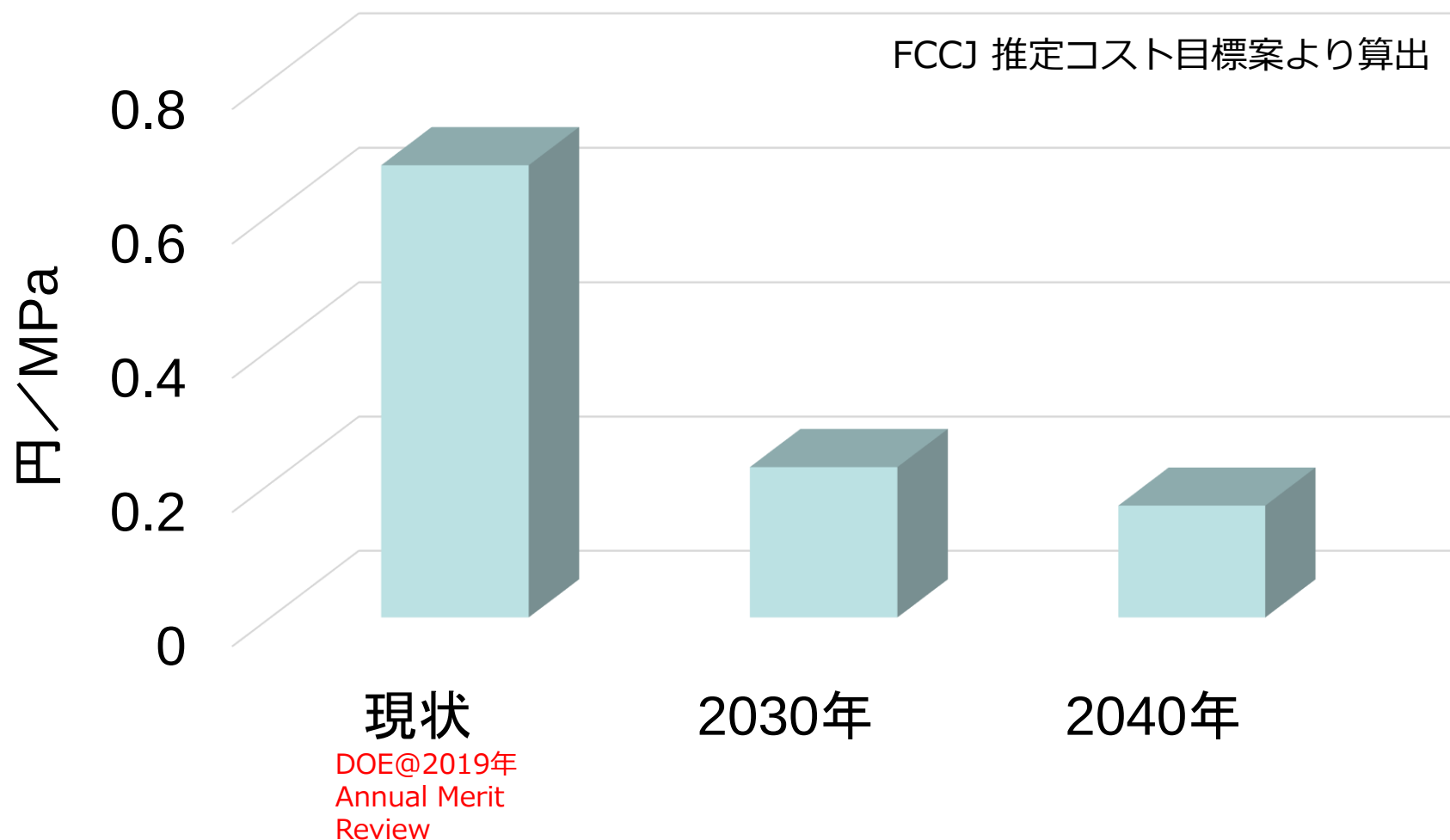
LCA、リサイクル、廃棄



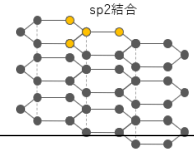
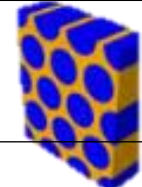
炭素繊維のコスト低減は必須課題

<開発のポイント>

- ①低コスト高強度繊維の開発
- ②繊維強度発現率の向上
(i)材料、(ii)製造



現状の繊維コストから1/3以下への低減が必要

理論	グラファイト	57GPa	
材料	炭素繊維1本	5GPa	
	炭素繊維1,000本～50,000本		
複合化	CFRP単層板（1方向）		
	CFRP積層板（1方向）		
	CFRP積層板（多方向）		
タンク	タンク構造（フープ・ヘリカル巻き）		

材料アプローチ

繊維強化理論に基づく改良

製造アプローチ

応力(歪)の集中低減・均一化

材料と製造のアプローチから、繊維強度低下の抑制を図る

繊維強度発現率の影響因子
(Kelly-Tysonの短繊維強化理論から)

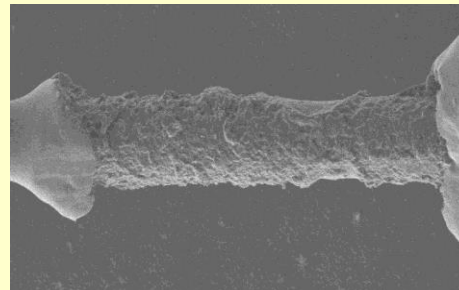
$$\sigma_c = \sigma_m(1 - V_f) + \sigma_f \left(1 - \frac{\sigma_f d}{4\tau l}\right) V_f C$$

σ_f : 繊維強度、 σ_m : 樹脂強度

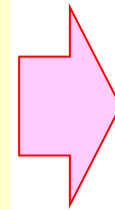
τ : 繊維⇔樹脂界面せん断力

C : 繊維配向度

V_f : 繊維体積含有率



マイクロトップレット測定後の繊維表面



炭素繊維の改良

- ・ 表面官能基(O/C)
- ・ 表面ラフネス
- ・ サイジング剤種、塗布量



期待するポイント

複合体としての界面設計
(接着性、濡れ性、均一性)

エポキシ樹脂の改良

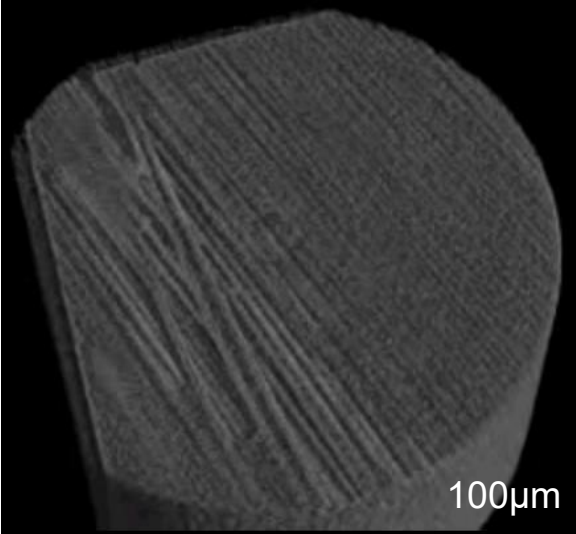
- ・ 官能基種、官能基数
- ・ 粘度、粘度変化速度
- ・ 結晶性、結晶化速度

繊維、樹脂各々の材料の特性を活かす界面設計が必要

繊維摩耗



配向乱れ



JCCM11 / Oct. 21, 2019
SOKEN/トヨタ自動車

破裂圧 確率分布のばらつき

$$\sigma^2(BP_0) = \sum \sigma^2(x_i) + 2 \sum \sigma(x_j, x_i)$$

頻度



設計下限圧

繊維うねり・屈曲
残留ボイド
FW張力バラツキ
繊維ダメージ etc.

k

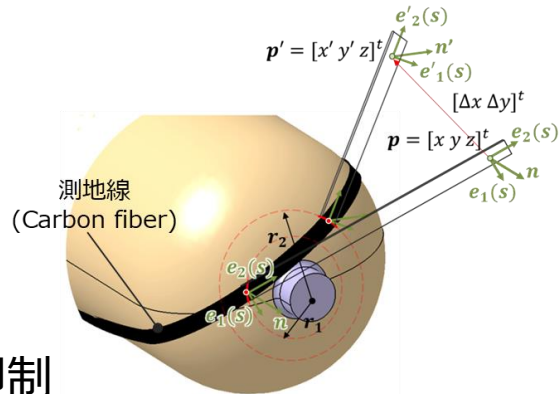
強度

BP_0

製造装置・管理方法など、製造バラツキを抑える対策が必要

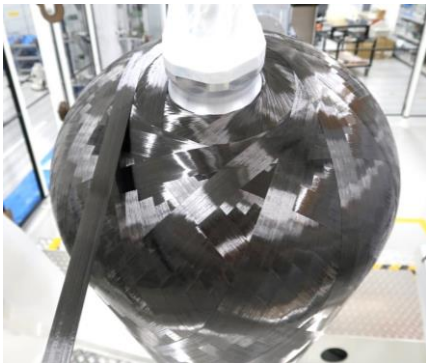
FW給糸精度

ドーム部曲面(接平面)上でのCFRP給糸姿勢の精度向上



繊維はずれの発生を抑制

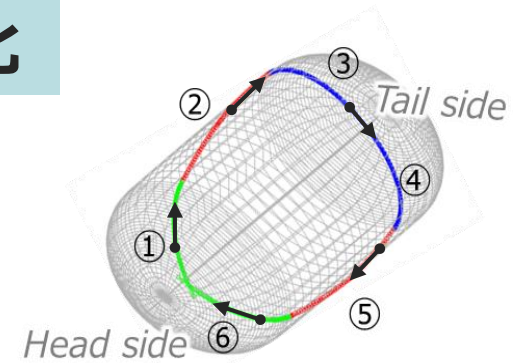
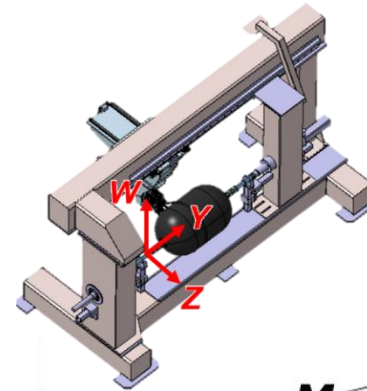
Better



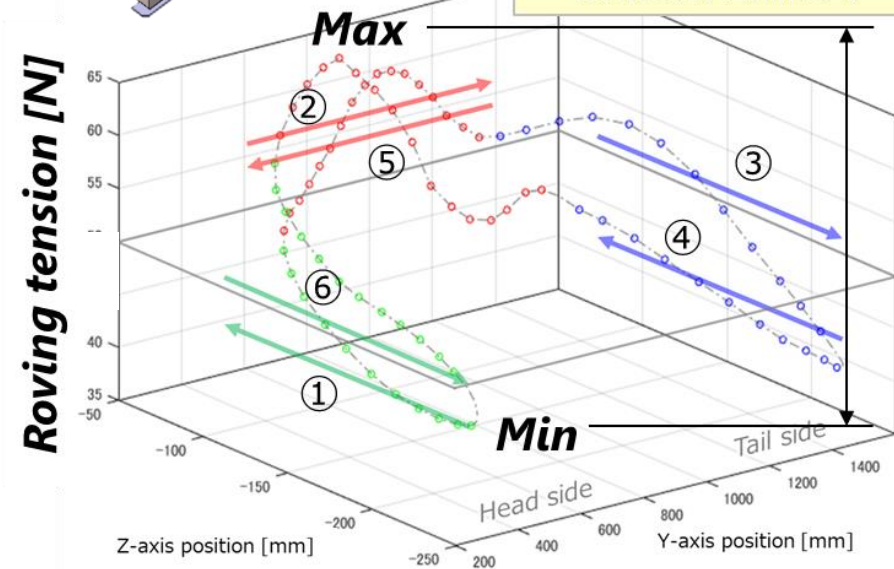
Worse



FW張力安定化



高速FWにより
張力変動増加傾向



製造バラツキを抑制しながら、高速との両立も必要

コストダウン

材料単価、材料使用量、生産性

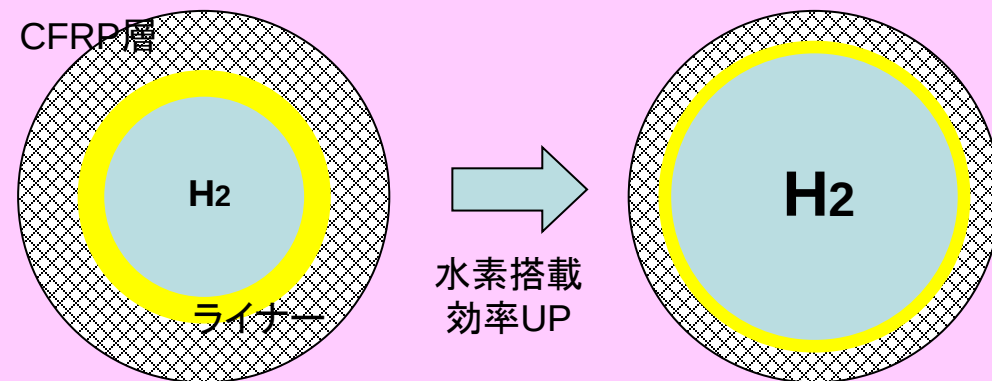
利便性向上

航続距離、充填時間、搭載性

低環境負荷

LCA、リサイクル、廃棄

CFRP層数低減、ライナー薄肉化



1. 疲労特性を押えた設計

①CFRP疲労

②ライナー疲労

2. 革新的構造⇒講演後半の主題

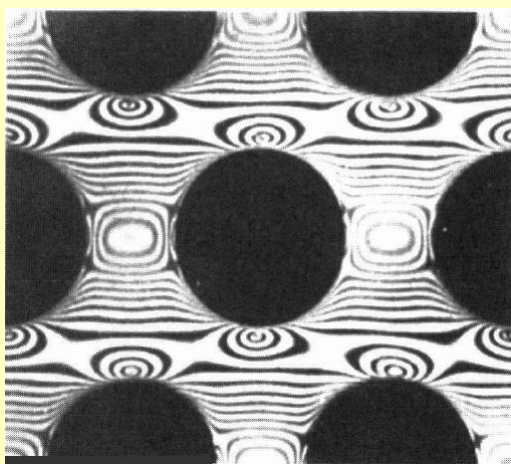
CFRP（複合材）の疲労現象把握の難しさ

塑性変形による荷重の再配分が進みにくく、脆性的破壊が起こる（強度破壊則が未確立）。

CFRP（複合材）の疲労現象（現状認識）

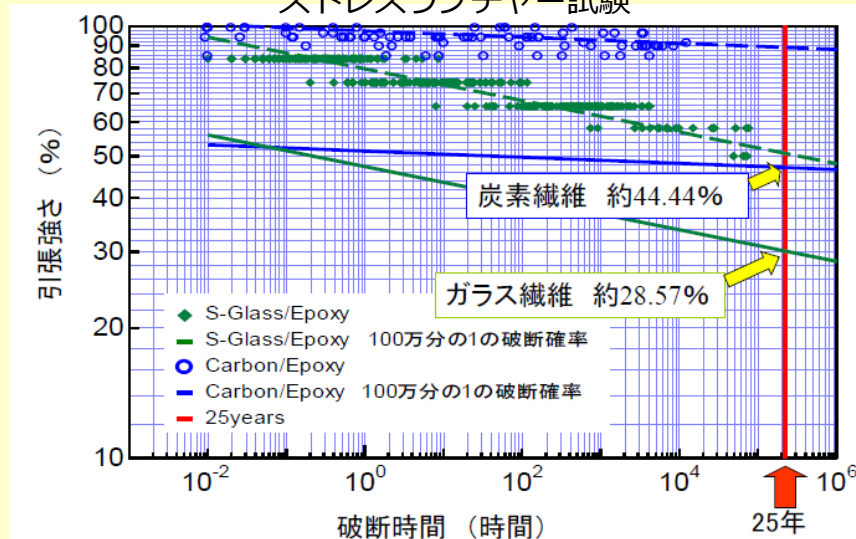
樹脂破壊&/or繊維⇔樹脂界面破壊 ⇒ 層間破壊 ⇒ 繊維破断

90°引張時FRPの光弾性解析



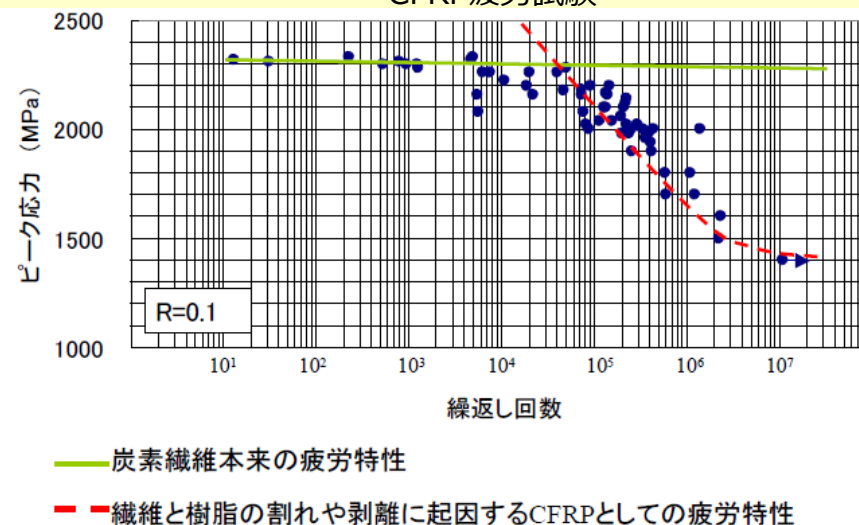
Puck, Kunststoffe, 57(1967),965

ストレスラプチャー試験



KHK殿“FRP複合容器の設計クライテリア”から抜粋

CFRP疲労試験



CFRP(複合材)の疲労メカニズムの一般解化を要望

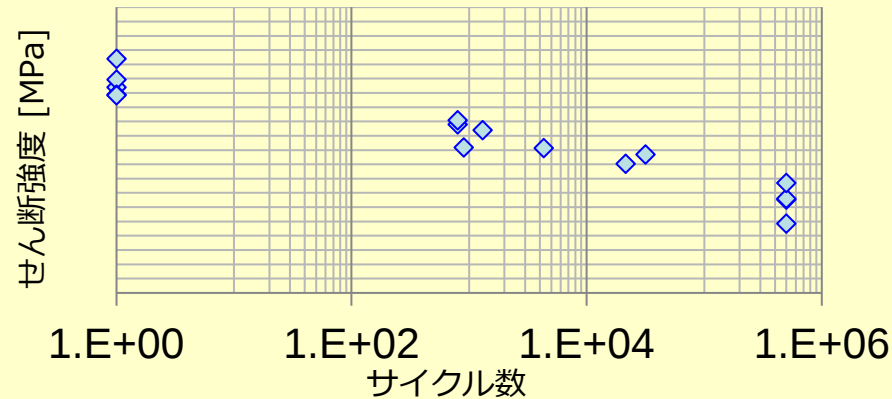
疲労メカニズムの一般解化に向け

損傷観察・解析技術

実タンクの疲労現象
を反映したストレスを
提示

損傷の進展が実タンク
と整合しているか
を確認

CFRPテストピース動的試験



- ・ 1軸引張試験(0°、90°)
- ・ 2軸引張試験
- ・ 多層体での引張試験
- ・ 層間せん断試験(ILSS)
- ・ G1C、G2C、G3C
- ・ 新規手法

**試験法を
標準化**

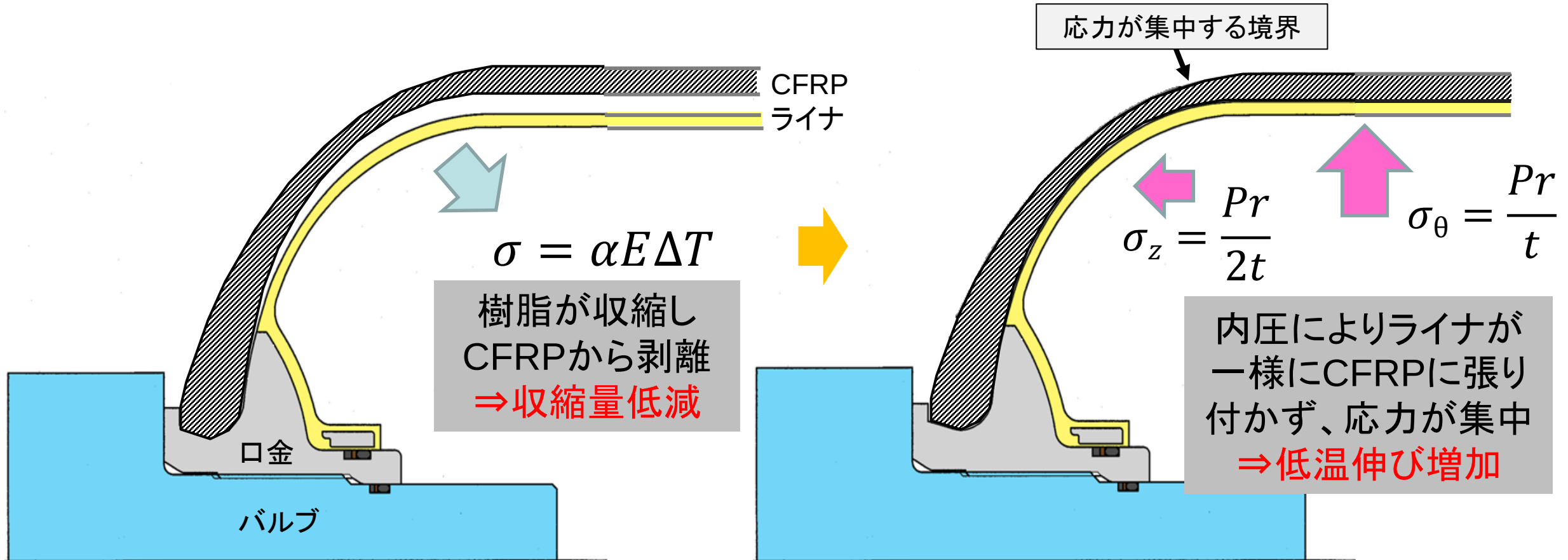
疲労モデルの進化

改良指針提示

繊維・樹脂開発

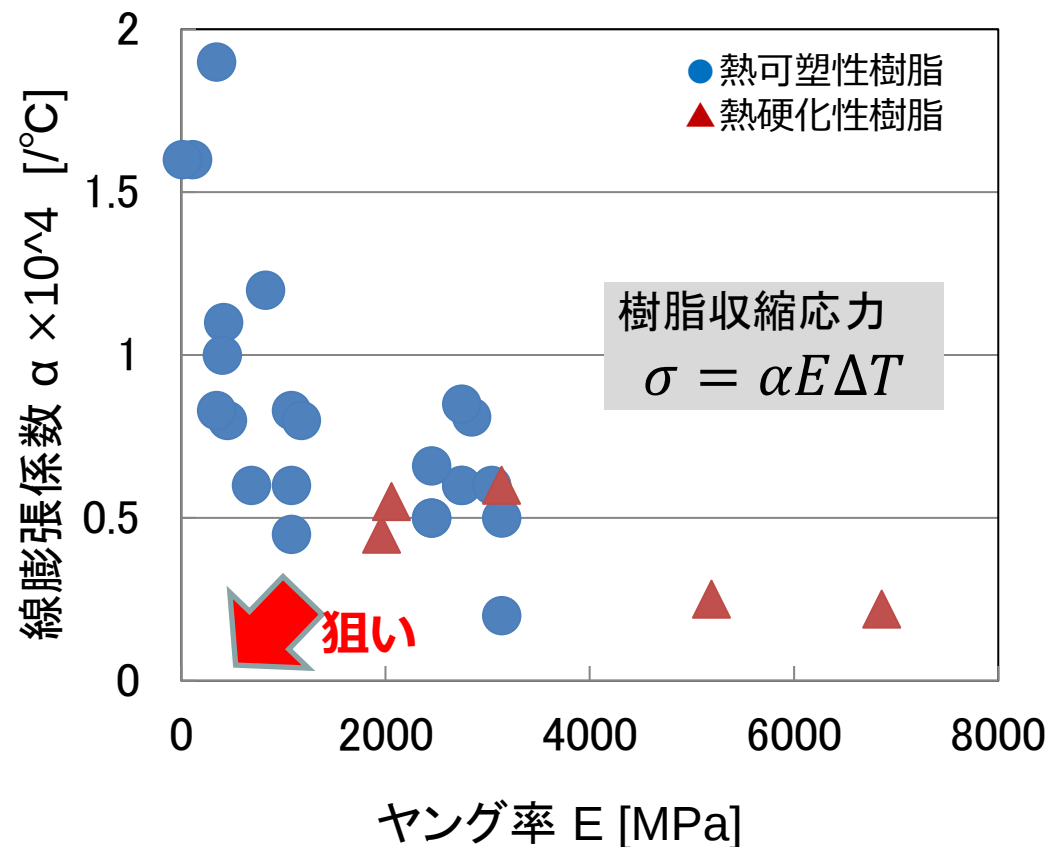
テストピース試験法を標準化し、許容応力の決定手法を確立する

連続走行後(低温・低圧)に、水素を急速充填した際のライナー挙動

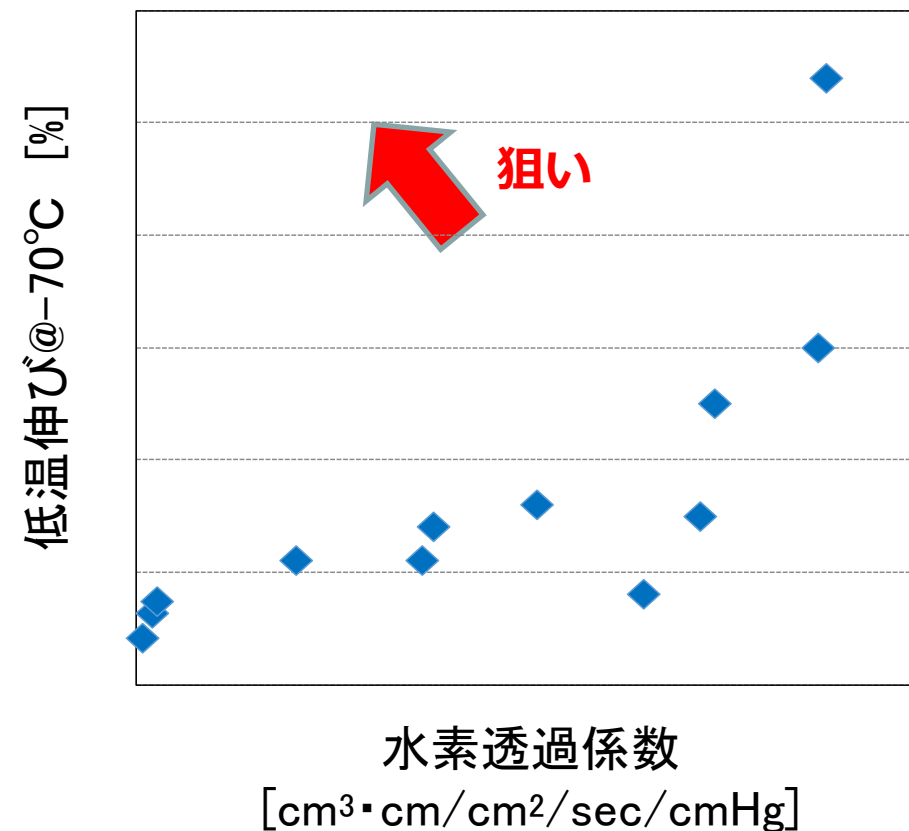


CFRP⇔ライナー間の剥離・張り付き挙動に対応した樹脂設計が必要

収縮量を低減



低温伸びとガス遮断性の両立



通常の樹脂設計では相反する物性の両立化に期待

コストダウン

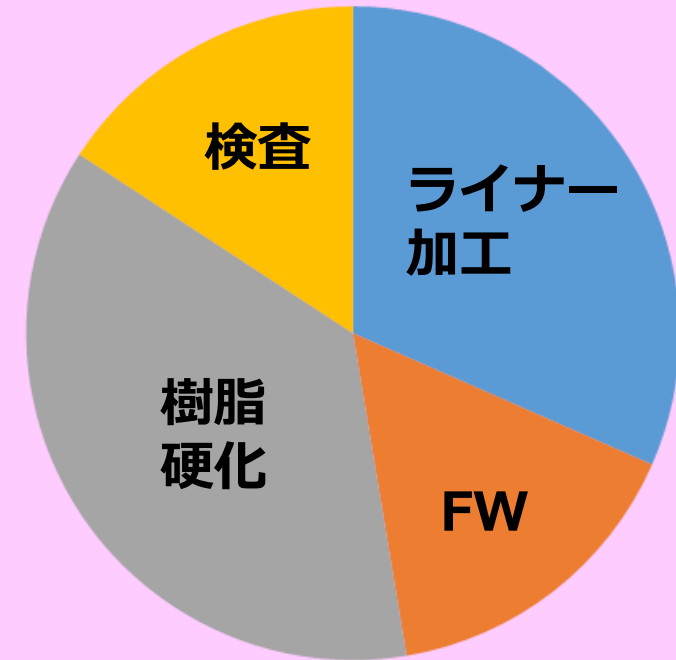
材料単価、材料使用量、生産性

利便性向上

航続距離、充填時間、搭載性

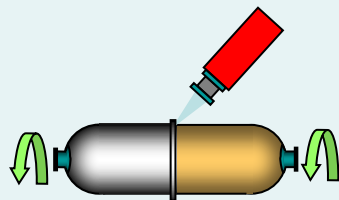
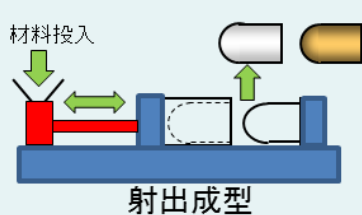
低環境負荷

LCA、リサイクル、廃棄

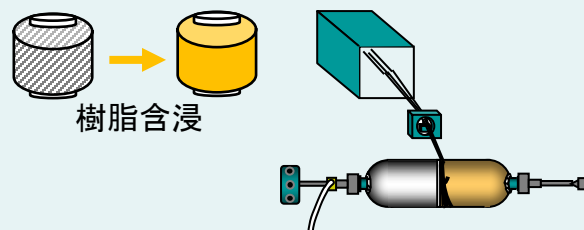


タンク製造工程の時間割合

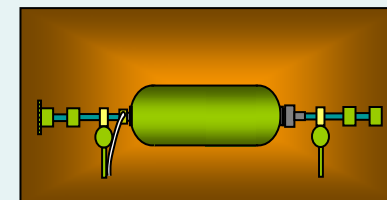
ライナー成形・加工



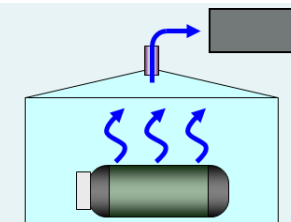
フィラメントワインディング



エポキシ樹脂硬化



完成検査



工程内での現象

樹脂の硬化反応が進行し粘度が変化

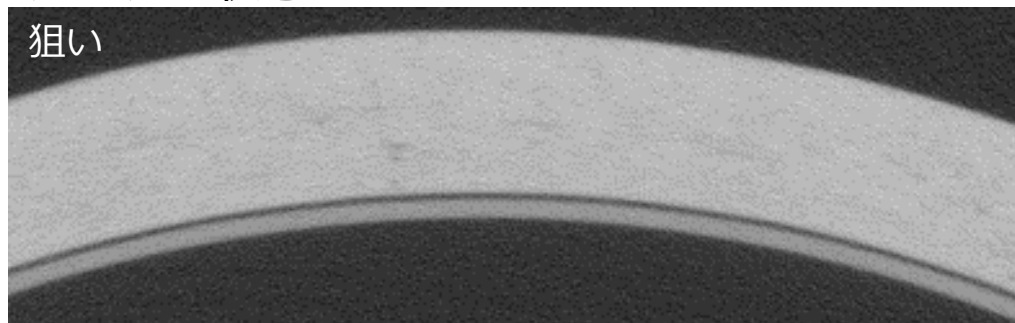
- ・ 繊維束への樹脂含浸性が悪化
- ・ CFRPのタック性が変化、糸絡まり発生

樹脂がCFRP層内を移動

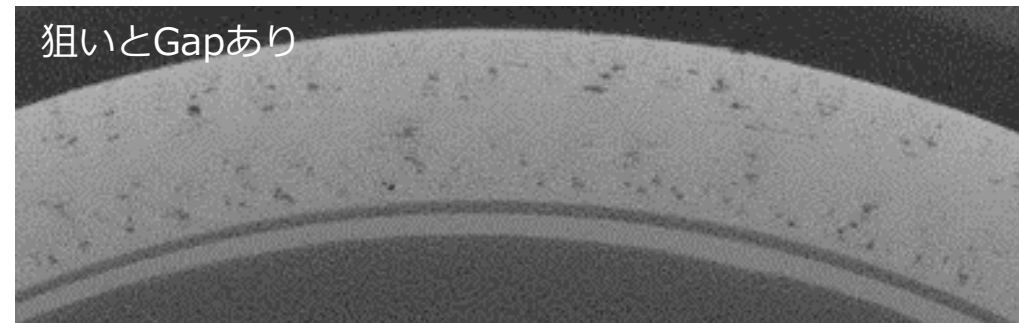
- ・ 樹脂ダレが発生、ボイドも形成
- ・ 繊維の巻き緩みが発生し蛇行
- ・ 表面では泡を形成

タンクの状態

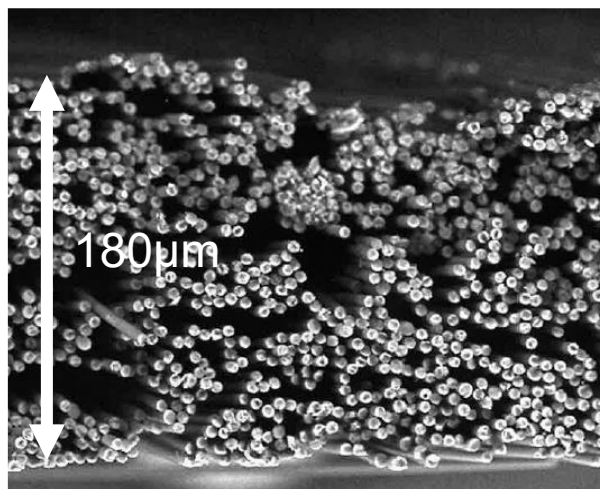
狙い



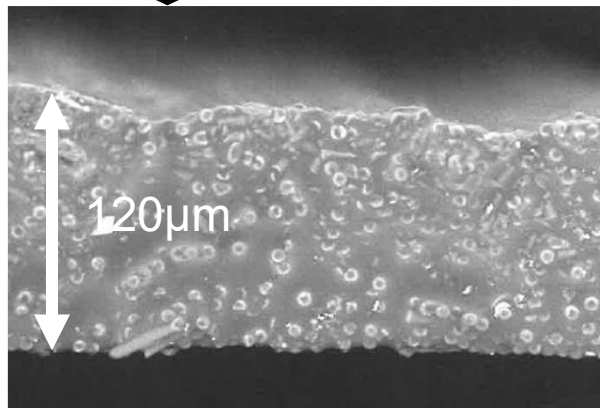
狙いとGapあり



工程のボトルネックの1つは“生モノ”であるエポキシ樹脂の挙動制御



エポキシ樹脂を繊維束中に含浸



【含浸理論:Gutowskiモデル】

$$U_Z = \frac{r_f^2 \left(\sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^3}{4k^* \left(\sqrt{\frac{V_a}{V_f}} + 1 \right)} * \frac{\Delta P}{\eta L_Z}$$

- ・ 樹脂含浸直後は繊維束間に樹脂が充填
- ・ 樹脂の硬化反応進行に伴う状態変化は不明

樹脂の“粘弾性”、“塑性”、“チキソトロピー性”を
樹脂構造から捉える**レオロジー**の理解が不足

樹脂のレオロジーを把握し、生産条件への反映が必要
エポキシ樹脂以外(熱可塑性樹脂等)の可能性検証にも期待

J2601 DEC2016

コストダウン

材料単価、材料使用量、生産性

利便性向上

航続距離、充填時間、搭載性

低環境負荷

LCA、リサイクル、廃棄

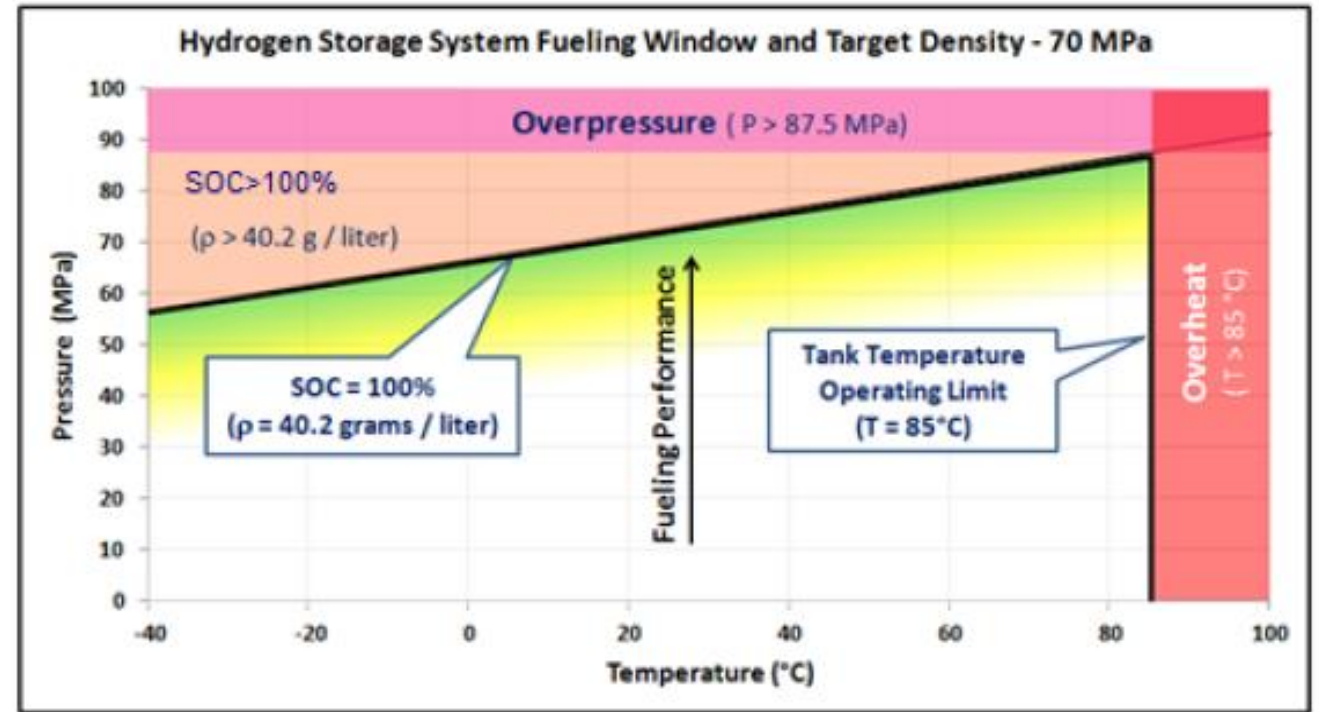
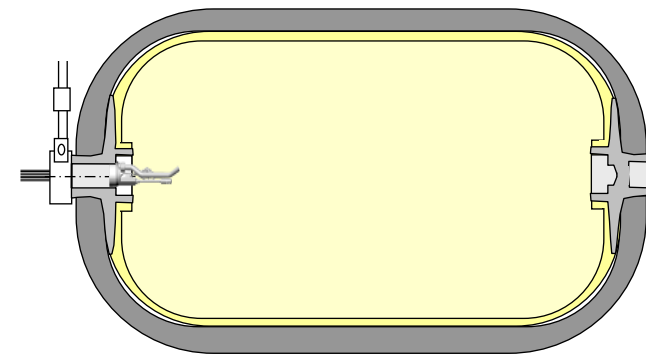


Figure 3 - J2601 Normal H70 boundary conditions

水素充填の際、タンク内温度と圧力が各々の上限値を超えない運用が必要

<これまで>

熱容量の大きい金属部品：口金の放熱性を利用
⇒短時間での充填が可能（但し、プレクールも活用）



<これから>

タンクの大容量化、温度差が付きやすい複数本タンクシステム化
⇒“タンクの放熱性”を向上し、満充填前の上限温度・内圧到達を回避

<期待>

1. 材料の熱伝導率向上（ライナ、CFRP）（例）炭素繊維：PAN系<<ピッチ系
(100倍)
2. 新規放熱機構を追加

短時間充填を維持する為に、タンクの放熱性向上を実現したい

コストダウン

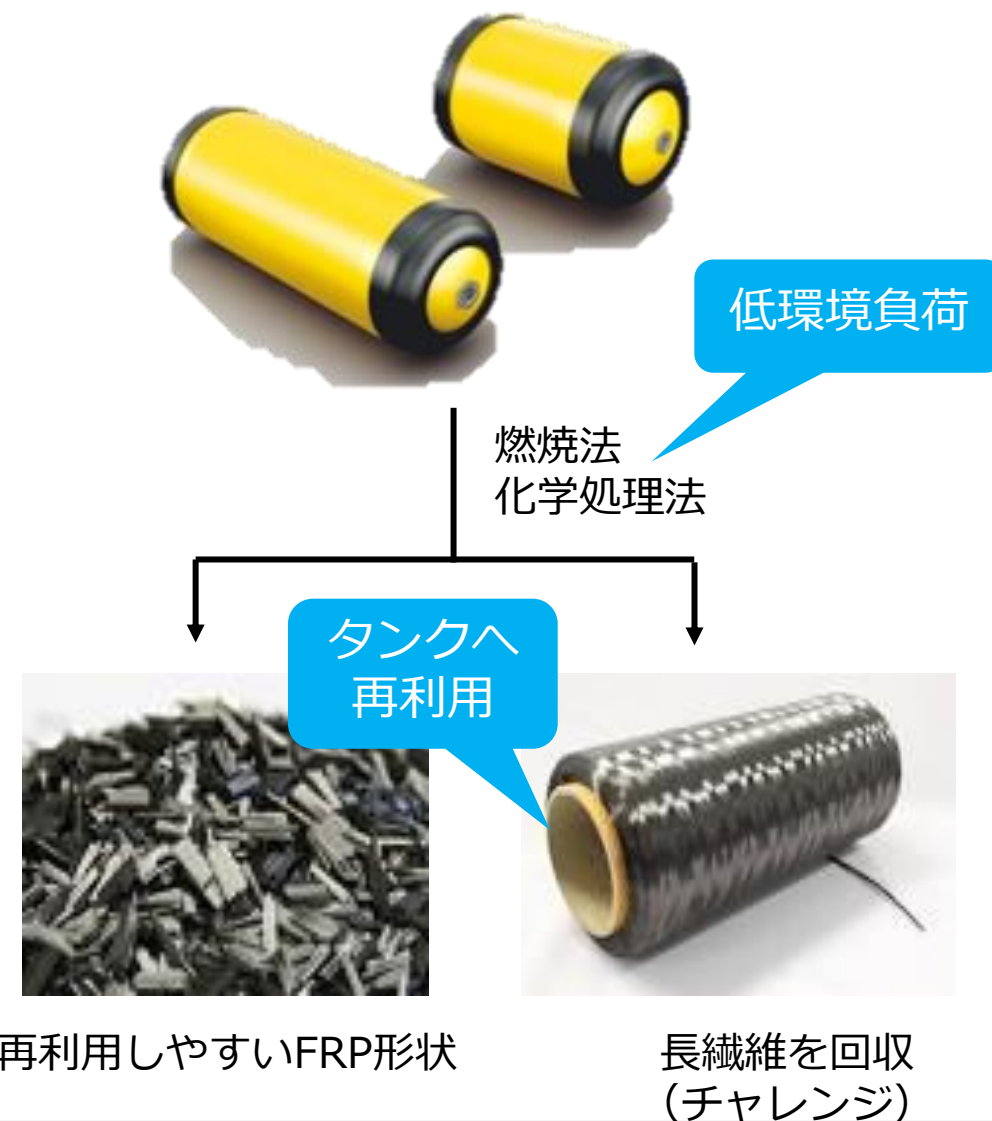
材料単価、材料使用量、生産性

利便性向上

航続距離、充填時間、搭載性

低環境負荷

LCA、リサイクル、廃棄



普及に向けた狙い		期待する内容	
コストダウン	材料単価低減	炭素繊維単価(円/MPa)を現状の1/3に低減 繊維強度発現率の向上 (i)界面せん断強度の向上 (ii)フィラメントワインディング FW時の制御	材料 材料 工法
	材料使用量低減	CFRP層低減時の疲労向上 (i)CFRP試験片の動的試験の標準化 (ii)実タンク・TP疲労状態の解析技術 ライナー薄肉化：物性の両立（水素透過性と低温伸び 他）	構造 計算 解析 材料
	生産性向上	“生モノ”である樹脂の流動性(レオロジー)制御	材料 工法 解析 計算
利便性向上	航続距離延長	(材料使用量低減の項と同じ)	
	充填時間維持	放熱性の向上 (i)CFRP、ライナの熱伝導率向上 (ii)放熱部位の設置	材料 構造
低環境負荷	リサイクル	タンクから回収した長繊維をタンクへ再利用	材料 工法

2020年

2025年

2030年

2035年

TYPE 4 タンクの進化

優越的競争力（新構造・新工法）

モデル化技術

解析技術

疲労実体把握
非破壊検査

新材料開発

炭素繊維
ライナ材
FRP樹脂

新構造

Feasibility Study
検証(モデル・タンク)
実証(モデル・タンク)

新工法

CFRP成形
ライナ成形
接合・接着技術

①

①CFRP製水素タンクのマルチスケール設計・評価・解析技術の研究開発(東京大、筑波大、日本大)

刈り取り

②

②低コストと高性能を両立した炭素繊維の研究開発(名古屋大、九州大)

材料FIX

③

③車載機器用高圧水素適合性高分子材料評価法およびデータベースの確立(九州大、滋賀県大、量子科技研)

コンセプト提案

絞り込み

統合

1. 高圧水素タンク概要と普及に向けて取り組み
2. 水素タンクの課題（現状の困りごと）
3. 将来に向けての提案

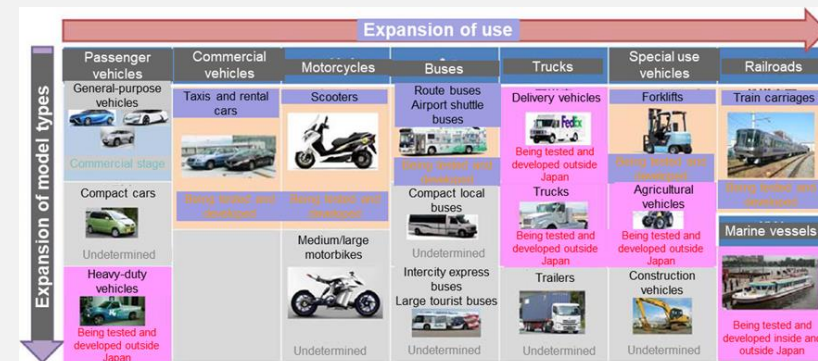
タンク形状自由度の拡大を踏まえ、構造と工法のコンセプトを提案する

コストダウン 材料単価、材料使用量、生産性

利便性 航続距離、搭載性、充填性、ダメージ診断、

低環境負荷 LCA、リサイクル、廃棄

適用拡大 多品種設計 設計理論構築



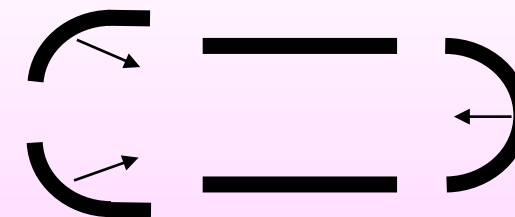
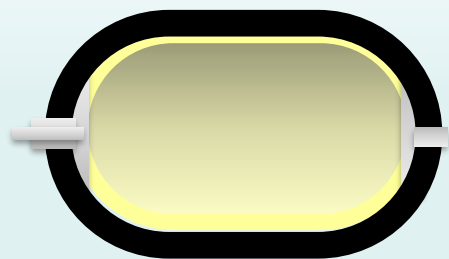
Source: Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells (METI)

搭載性、パッケージング性向上

自由度の拡大

ロングシリンダー

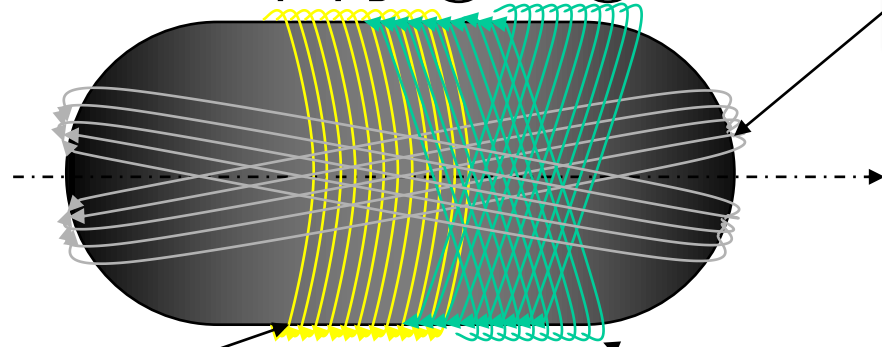
断面形状バリエーション



分割成形・一体化構造のコンセプト

設計上の5つの支配因子

FW + CFRPの因子①～③

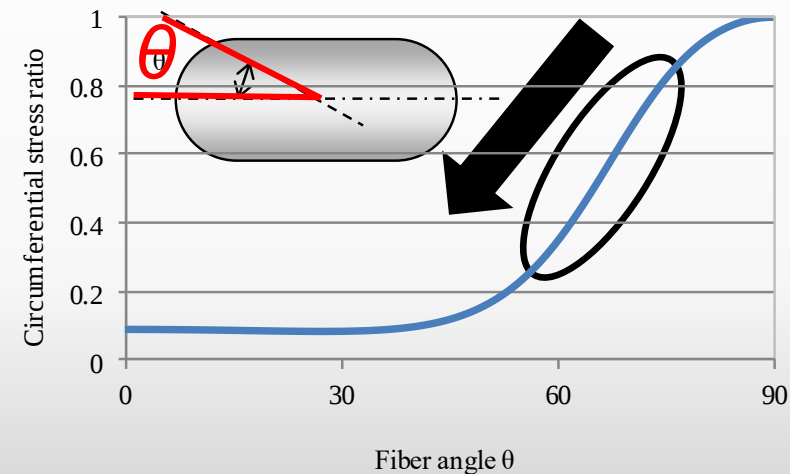


① フープ層

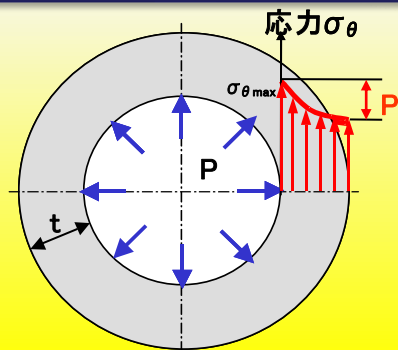
② ヘリカル層

③ 高角度ヘリカル層

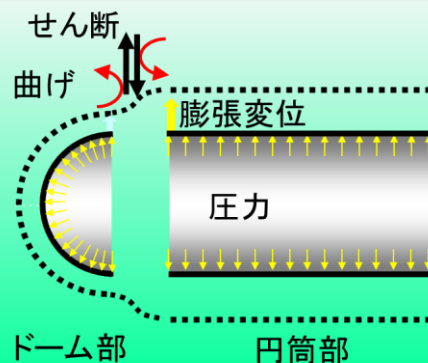
シリンダー部にかかるヘリカル層は低応力



断面の内層が高応力



胴体部⇔ドーム部の結合部制御（せん断と曲げの影響）



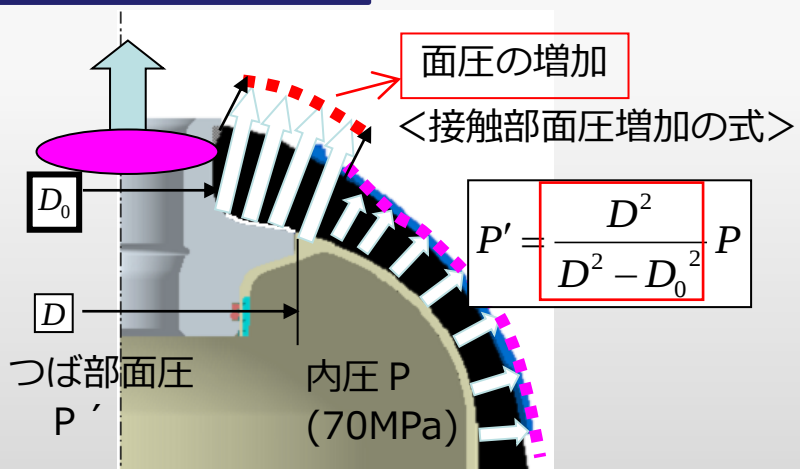
シリンダーとドーム接合点近傍応力

$$\text{結合部応力} = \frac{P \cdot R}{2t} + 6 \frac{M}{t^2}$$

P : 圧力, R : 半径, t : 厚み, M : モーメント

設計上の支配因子④ 口金部とCFRP

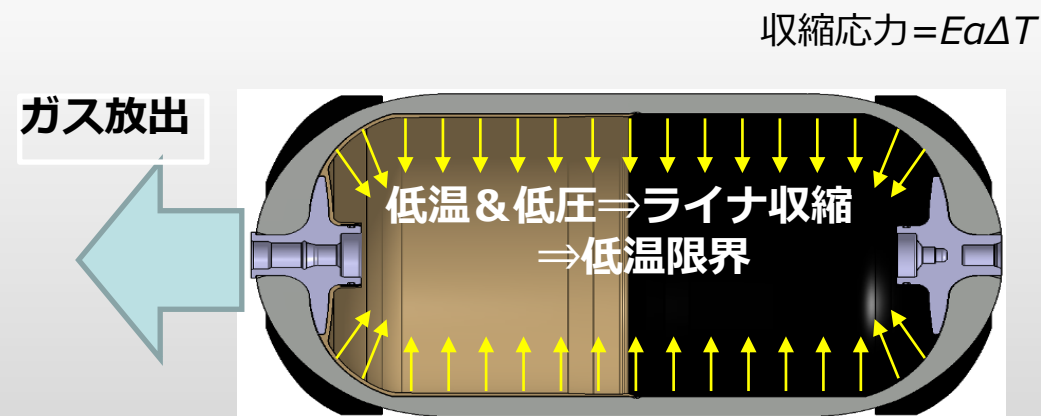
④. 口金部面圧



- ・ 口金開口部の影響で面圧増加
- ・ 口金とCFRPの剛性差から面圧増加箇所の発生
- ・ 繊維方向外の応力も大きい

設計上の支配因子⑤ ライナー

⑤. ライナの収縮



- ・ 低温時のライナー収縮
- ・ 材料の低温の伸びが課題

設計上の5つの支配因子

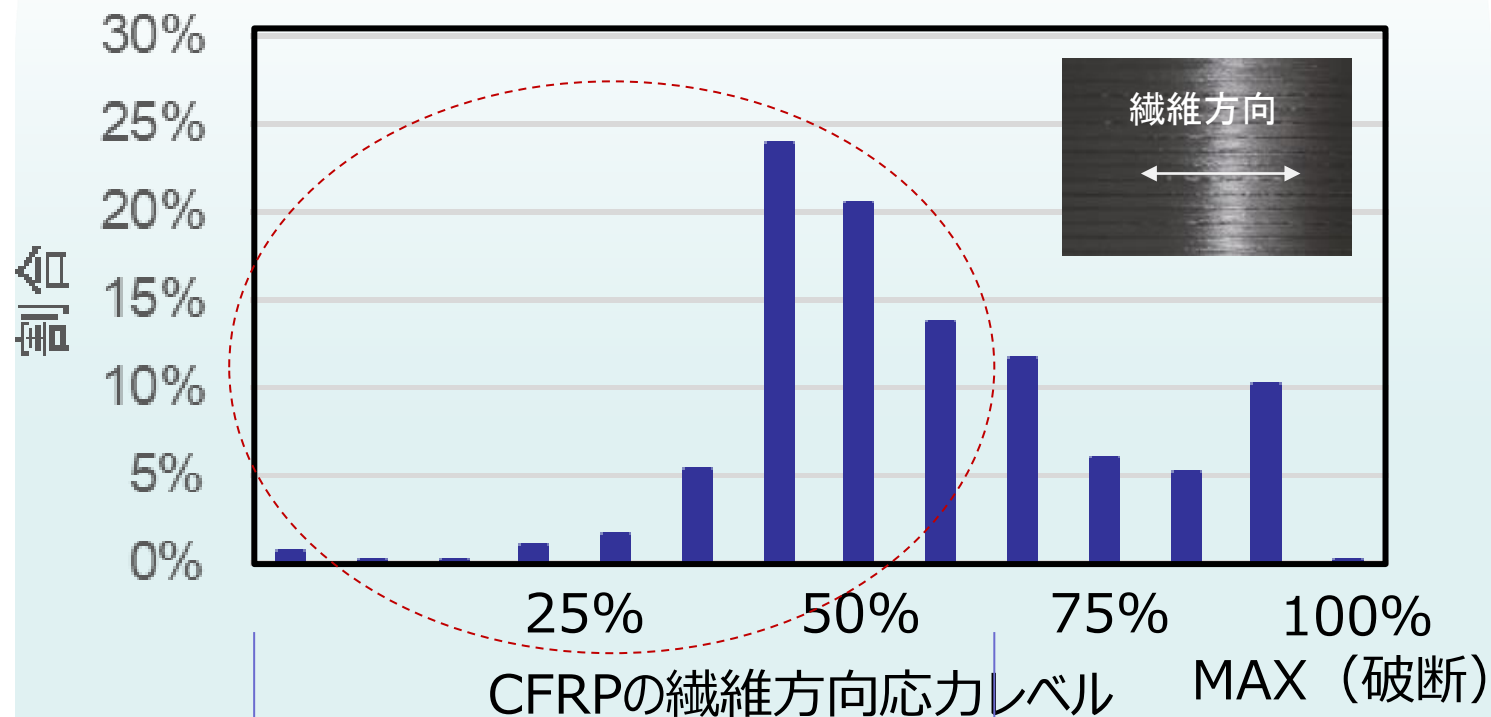
- ①内層の高応力を手当
- ②繊維角度でヘリカル層が無駄
- ③胴体部⇔ドーム部の結合部制御
- ④口金部面圧
- (⑤ライナの収縮)



現状はFW製法は最適化しつつも、
CFRP材料削減の余地が大きい

FW製法ではタンク形状が球形に至る

タンク破裂直前でのCFRP応力分布割合 (FEM)



CFRPの2/3には
強度余裕がある

ドームと周辺

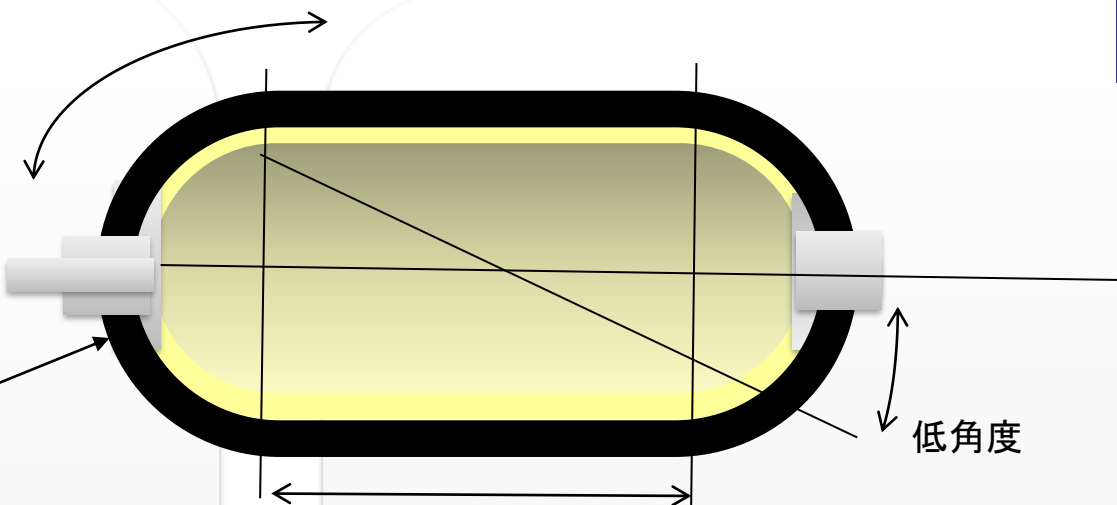
- ・最適方向＋必要最低限の配置
- ・せん断、曲げ応力対応は厚みでカバー、内部の繊維量は低減
- ・CFRP成形自由度向上で口金取付け形状と面外特性の最適化

成形厚みの自在化

VFの自在化

成形形状の自在化

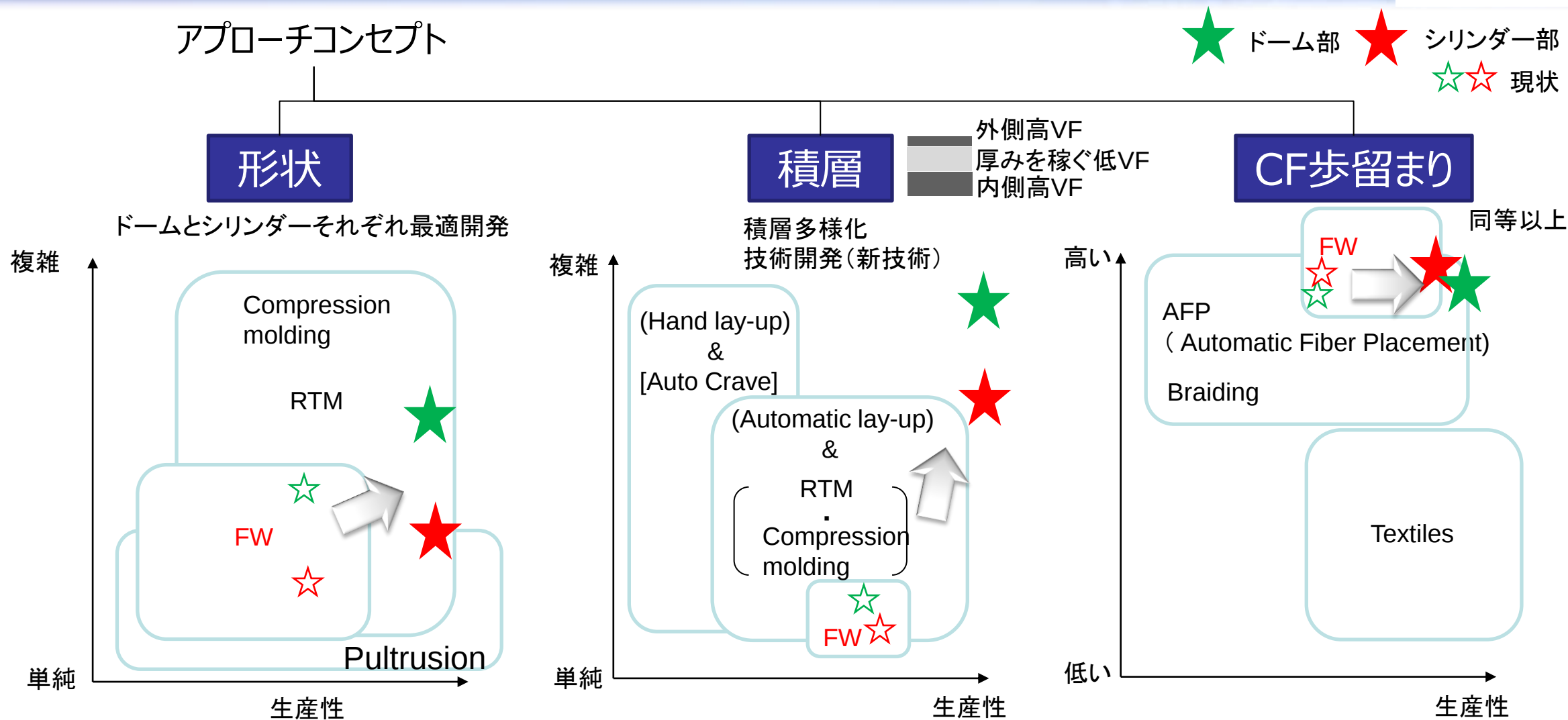
支配因子から方向性を探る



シリンダー

- ・繊維強度を使い切り、薄肉フープ層が望ましい
- ・低角度（ヘリカル）層は削減

- ・シリンダーとドームで成形ニーズが大きく別れる
- ・生産性向上は両者共通ニーズ

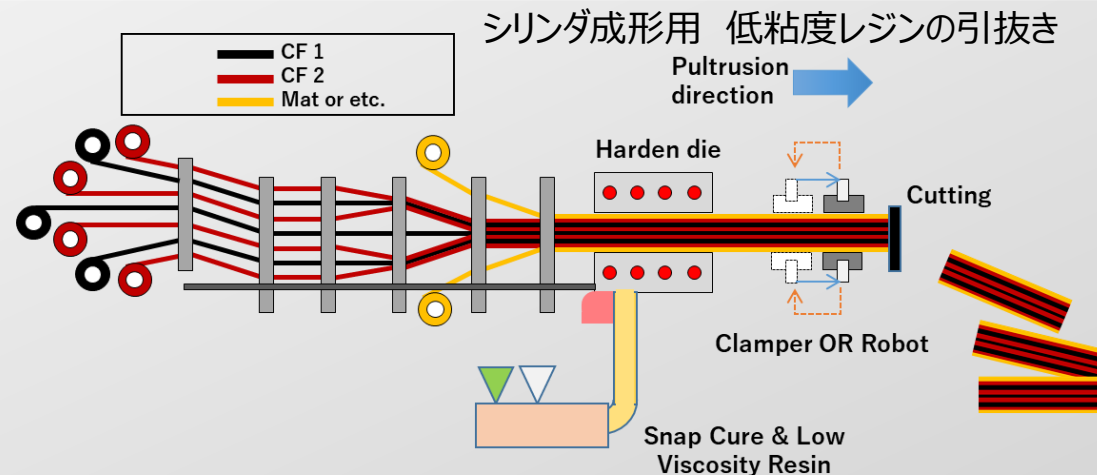
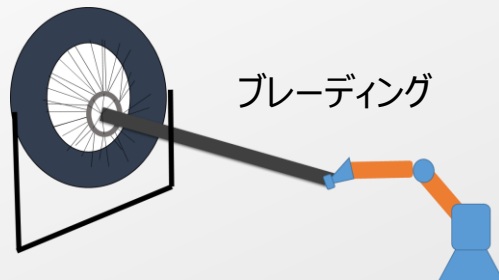
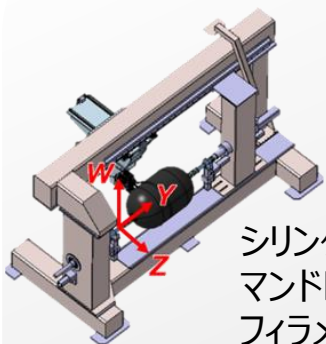


2次加工や溶融接合が可能な熱可塑樹脂は有利

積層種類の自由度拡大技術・生産性向上を主に工法開発が課題

成形法の適正化

技術候補、積層化・硬化・2次加工など工法マルチ化 工法を想定した材料開発も含む



コンプレッションモルディング

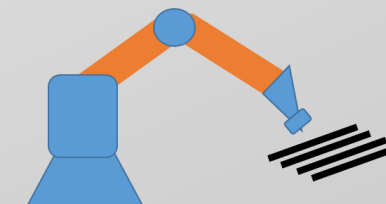
ウェット モルディング



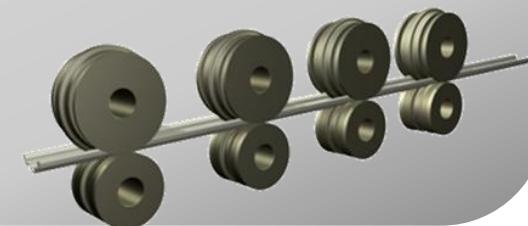
ドーム成形・一体化 C-RTM



積層および接合部補強 AFP オートファイバープレースメント

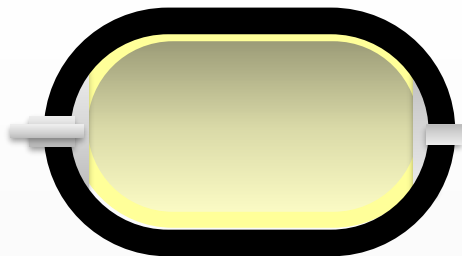


2次加工 ロールフォーミング



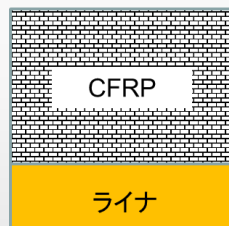
・ CFRP製法が変わると、FWの中子として使用しなくてもよい → さまざまな提案を期待

従来



ライナーを別体で成形し、CFRP層を形成

従来積層



工法案

ライナーをCFRP内面に塗工
CFRPをライナー型に形成後、型を除去

構造案

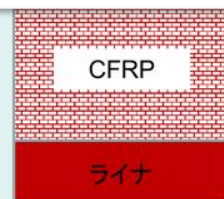
柔軟性の高いライナー利用

積層案1



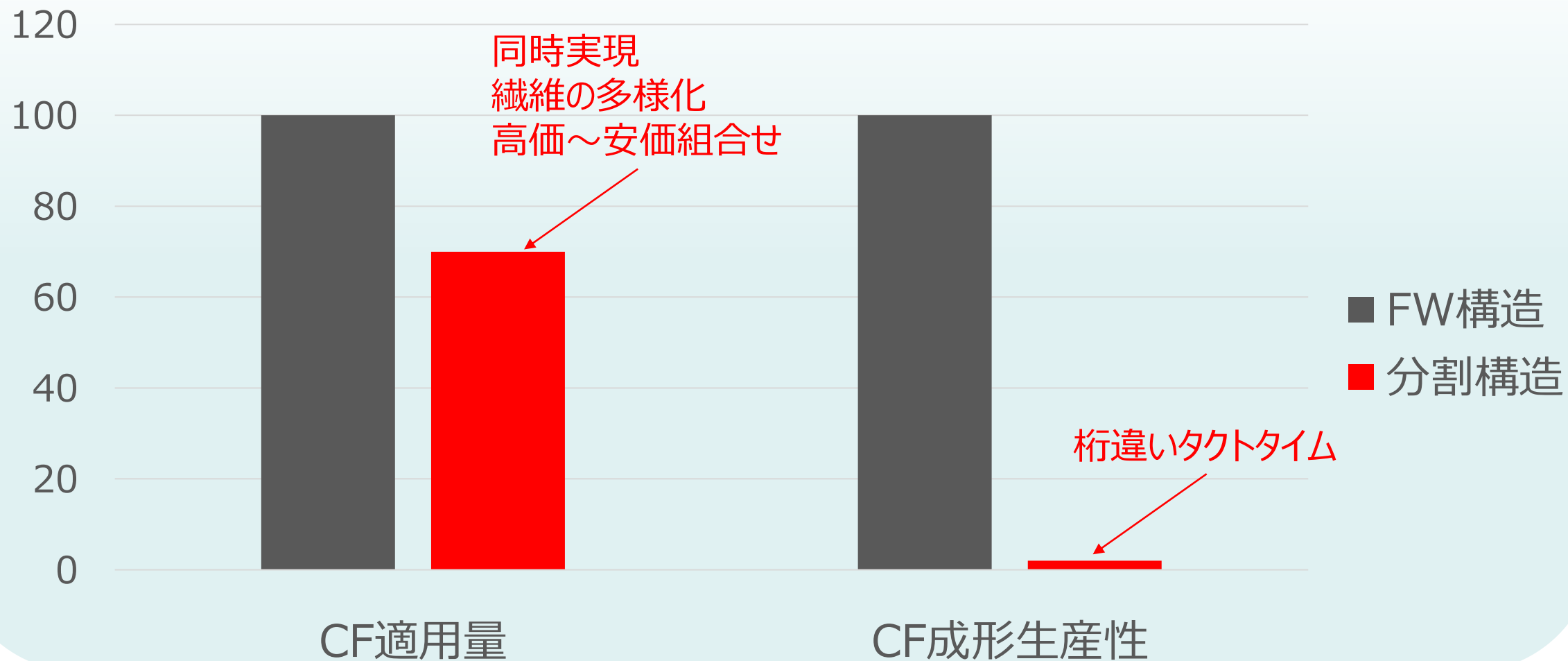
1. CFRP層とライナー界面に応力緩和層を形成
2. GLARE
(Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy)適用
⇒CLAR-TP
(Carbon Laminate Aluminum Reinforced Thermo Plastic)開発

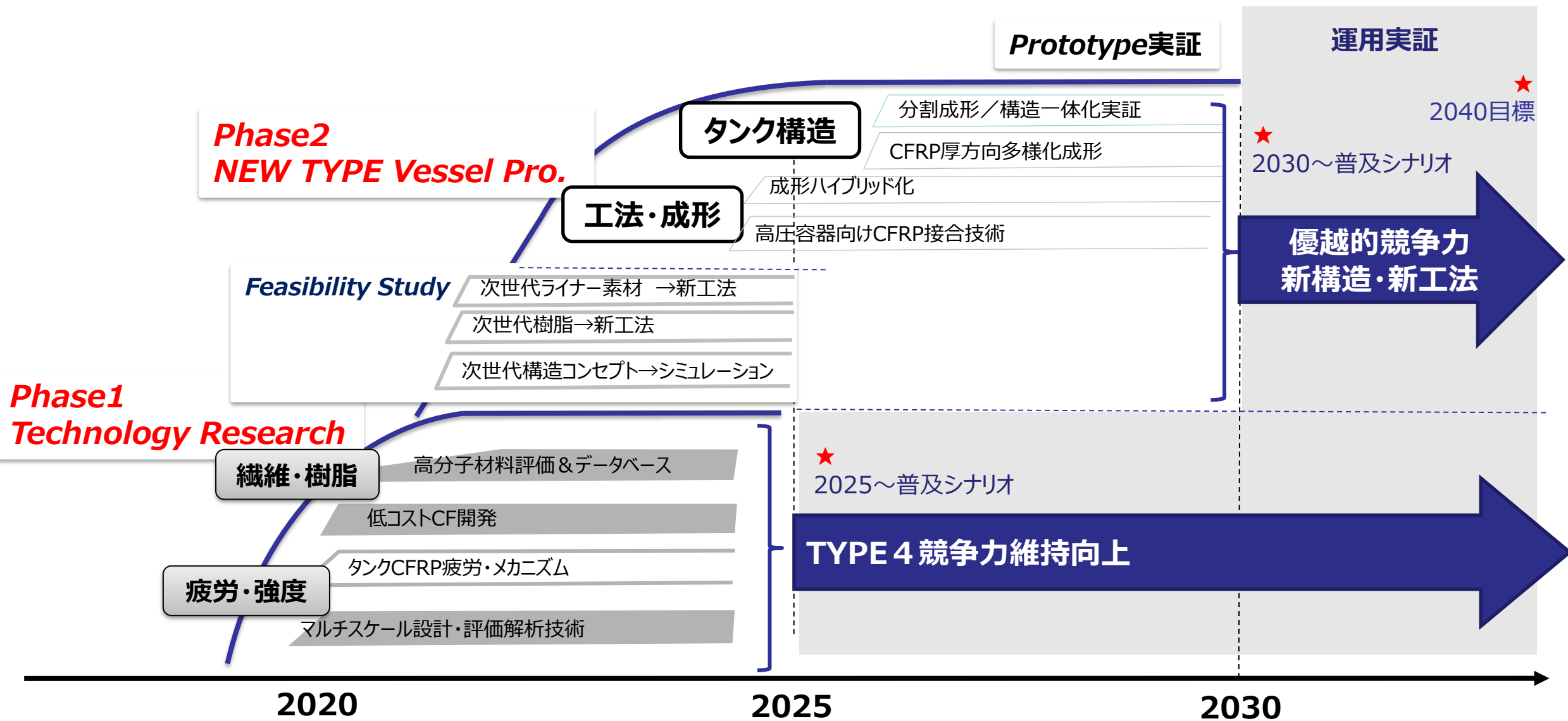
積層案2



CFRP中の樹脂を表層にライナーとして析出・形成
⇒熱可塑性樹脂の利用

期待値





END