

# 炭素繊維複合材料とリサイクル

2015年2月23日

三菱レイヨン株式会社

山藤家嗣

# 目次

---

1. 炭素繊維とは
2. 炭素繊維需要
3. 炭素繊維使用のメリット
4. エネルギー負荷 環境負荷
5. 航空機への適用 軽量効果
6. 自動車への適用 軽量効果
7. 炭素繊維リサイクル
8. 炭素繊維リサイクルの事業化の要件  
と今後の方向性

# 炭素繊維とは

## 1. 炭素繊維 (Carbon Fiber)

アクリル繊維 または ピッチ (石油、石炭、コールタールなどの副生成物) を原料に高温で炭化して作った繊維



## 2. 日本工業規格 定義

繊維用語 (原料部門) 2部:化学繊維 JIS L0204-2 (2001)

『有機繊維のプレカーサーを加熱炭素化処理して得られる、質量比で90%以上が炭素で構成される繊維。』

## 3. 使用法

合成樹脂などの母材と組み合わせた複合材料として用いる。

炭素繊維強化プラスチック (CFRP)

炭素/炭素複合材料 (C/Cコンポジット)等

## 4. 炭素繊維の特徴

1) 長所 「軽くて強い」 鉄と比較 比重:1/4 比強度:10倍 比剛性:7倍

耐摩耗性、耐熱性、低線膨張率、耐腐食性、電気伝導性

2) 短所 製造コストが高い 加工が難しい

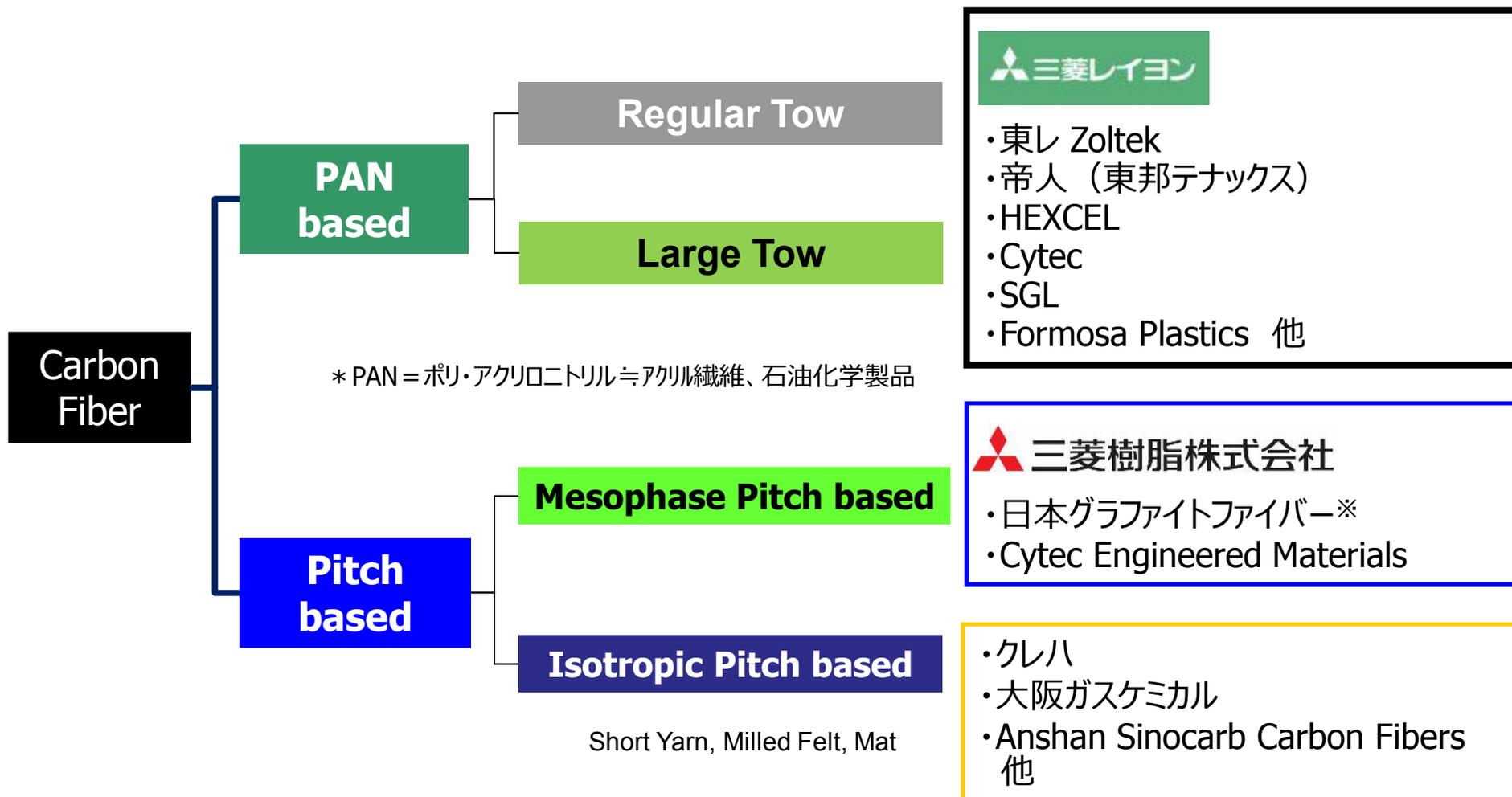
リサイクルが難しい (元の素材には戻らない)

異方性材料なので積層で方向性制御必要

注)比強度, 比剛性 材料の強度、弾性率を材料の密度で除した指標

軽量化の指標: 高いほど軽量化効果が高い

# 炭素繊維の分類と特徴



\*ピッチ系 = 石炭、天然ガス、石油から採取される「タール」からの副生成物の名称

# 炭素繊維製造メーカー

## PAN based Carbon Fiber Manufacturer and the Name Plate Capacity (x千トン/年)

Manufacturer	2012	2013	2014	2015	Tow (L: Large, R:Regular)
東レ	18.9	21.1	26.1	27.1	R
三菱レイヨン	10.9	10.9	10.9	10.9	R / L
東邦テナックス	13.9	11.4	11.4	11.4	R
Hexcel	7.2	7.2	8.6	10.0	R
Cytec	2.4	2.4	2.4	3.4	R
台湾プラスチック	8.8	8.8	8.8	8.8	R
Zoltek (東レ)	12.2	13.0	14.3	14.3	L
SGL	9.0	9.0	12.0	12.0	L
AKSA	3.5	3.5	3.5	3.5	R
HCC	0.0	0.0	1.5	1.5	R?
SABIC	0.0	3.0	3.0	3.0	L?
泰光	1.5	1.5	1.5	1.5	R
暁星	0.0	2.5	2.5	2.5	R
インド	0.3	0.3	0.3	0.3	R
中国	11.6	13.1	13.1	13.1	R
合計	100.2	107.7	119.9	123.3	

2014年 第27回炭素繊維協会複合材料 東レ(株)殿 発表資料より

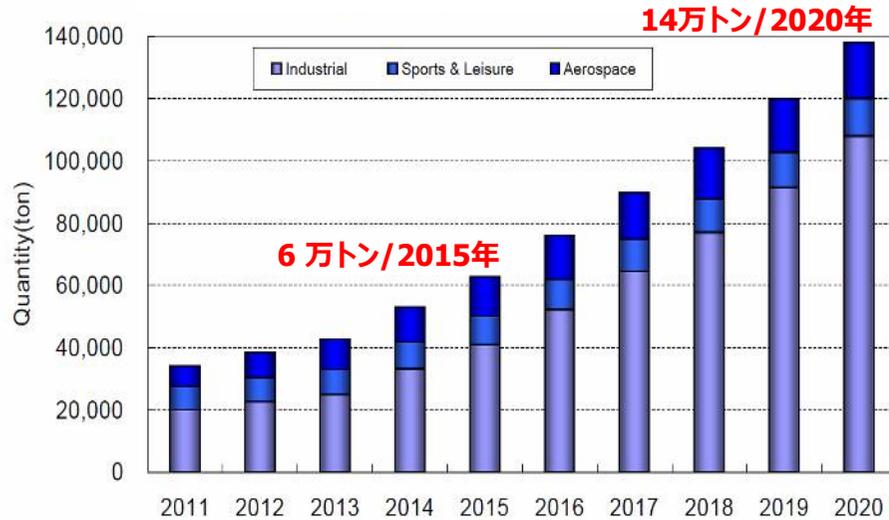
## Pitch based Carbon Fiber Manufacturer and the Name Plate Capacity (x千トン/年)

Manufacturer	Capacity/2015	原料	光学的特性	Fiber form
クレハ	1.45	Petroleum	Isotropic	Short
大阪ガスケミカル	0.60	Coal	Isotropic	Short
三菱樹脂	1.00	Coal	Mesophase	Long
新日鐵住金	0.18	Coal	Mesophase/Isotropic	Long
Cytec	0.23	Petroleum	Mesophase	Long
合計	3.46			

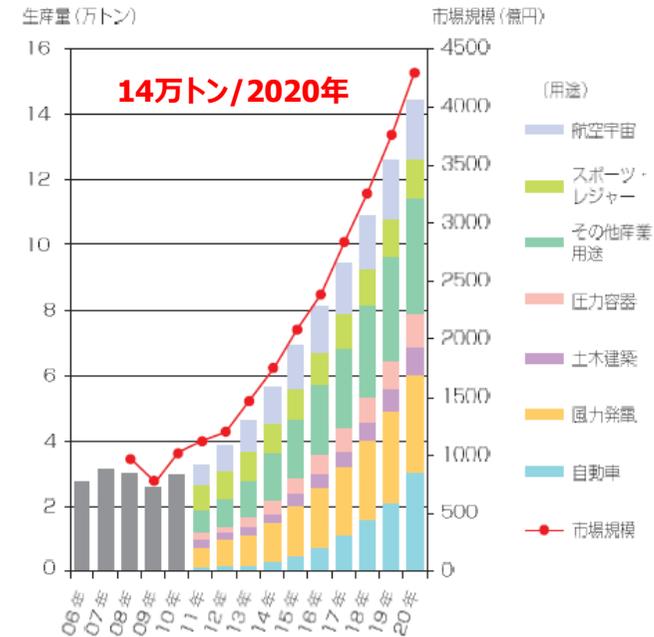
2014年 第27回炭素繊維協会複合材料 大阪ガスケミカル(株)殿発表資料より

# 炭素繊維需要

World Growth Forecast of Carbon Fiber Demand



第26回複合材料セミナー



資料：「高機能繊維と応用製品市場の現状と将来展望」（富士経済）及び企業推定情報から経済産業省作成

2014年経済産業省ものづくり白書

- 1) 2020年約14万トン/年の炭素繊維需要があると見込まれている。(年率15%予想)
- 2) 実際に使用される炭素繊維のうち数割は製造工程で廃材となる。
- 3) 残りは製品として使用され、すぐに故障や事故で廃棄となる場合を除くと、自動車では約10年、航空機で20-30年後に使用済み(退役)廃材として排出されると予想する。

# 炭素繊維の特徴と適用方向性

## 1. 用途展開

軽い、強い、硬い、低線膨張率、高熱伝導率、錆びない等の特徴の  
生きるところで使用される。

## 2. 今後炭素繊維適用の方向性

- 1) 既存材料の置き換えで軽量化 軽量化指標 比剛性、比強度
- 2) 環境負荷、エネルギー負荷低減で量の拡大
- 3) 比強度・比剛性及びコストが新規採用のドライバー
- 4) マトリックス樹脂と合わせたCFRPは、200℃以上の耐熱用途の適用には難
- 5) 既存材料との共存(ハイブリッド)で適用が増える。

但し、既存材料と比べると生産量には大きな差があるので置き換えにも限界がある。

粗鋼生産量	16億 722万トン(2013年)	(2013年:世界鉄鋼協会)
アルミ生産量	2040万トン(2015年予想)	(2013年:経済産業省非鉄金属戦略)
マグネシウム世界需要	38万トン(2003年)	(2013年:経済産業省非鉄金属戦略)
ガラス繊維生産能力	460万トン(2012年)	(2012年:Jushi Group Presentation in Brazil)
炭素繊維生産能力	<b>12万トン</b> (2015年予想)	(2014年:第27回複合材料セミナー資料)

# 部品構造設計と材料特性

1. 自動車・航空機ともに**強度設計**、**剛性設計**で**軽量化効果**
2. 曲げ剛性設計では剛性が部材の厚さの3乗で効くため、比重の効果大きい

例 ヤング率がスチールの1/8でも、部材厚さをスチールの2倍にすれば、曲げ剛性は同じ。  
比重(密度)が1/6なら、部材の重量は1/3になる。

3. 新材料の導入可否は、**設計・生産性・コスト・リサイクル性等総合判断**
4. 材料別課題

## 1)スチール

自動車の既存材料。比強度はハイテンで向上。比剛性不利だが形状因子でカバー  
ただし成形複雑となりハイテンでは成型性に課題

## 2)アルミニウム合金

航空機でCFRPと競合。自動車でも軽量化効果。  
材料費はCFRPと同等。スチールに比べ曲げ剛性は有利だが引張剛性はあまり  
メリットなし。

## 3)マグネシウム合金

曲げ剛性では有利。リサイクル性、腐食性に課題。

## 4)CFRP

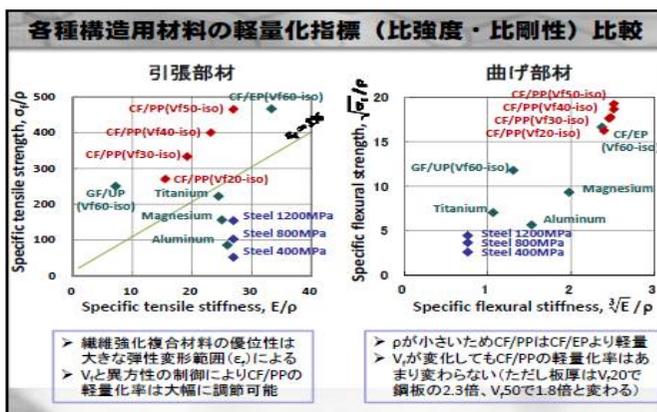
比剛性、比強度ともに他材料に比べ有利。  
成型性に課題も、モジュール化等で改善の可能性。

### 強度設計

- a) 比引張強度  $\sigma_f / \rho$
- b) 比曲げ強度  $\sqrt[3]{\sigma_f / \rho}$

### 剛性設計

- a) 比引張剛性  $E / \rho$
- b) 比曲げ剛性  $\sqrt[3]{E / \rho}$



	鉄鋼板	CF/PP板	鉄鋼板比
弾性率 (E)	E <sub>s</sub> = 200GPa	E <sub>c</sub> = 25GPa	1/8
厚さ (t)	t	2t	2
体積 (V ∝ t)	V	2V	
曲げ剛性 (EI ∝ Et <sup>3</sup> )	E <sub>s</sub> t <sup>3</sup>	E <sub>c</sub> (2t) <sup>3</sup>	1
たわみ (δ ∝ P/EI)	荷重 (P)	荷重 (P)	1 曲げ変形量が同じ
表面のひずみ (ε)	ε	2ε	2
表面の応力 (σ)	σ <sub>s</sub> = E <sub>s</sub> * ε	σ <sub>c</sub> = E <sub>c</sub> * 2ε	1/4
断面強度	P <sub>s</sub> = π <sup>2</sup> E <sub>s</sub> I <sub>s</sub> / L <sup>2</sup>	P <sub>c</sub> = π <sup>2</sup> E <sub>c</sub> I <sub>c</sub> / L <sup>2</sup>	1
密度 (ρ)	7.8	1.3	1/6
質量 (W)	7.8V	1.3 * 2V	1/3

# CFのライフサイクルエネルギー – 負荷と環境負荷



以上 2008年炭素繊維協会 データ

比較 製造エネルギー (MJ/kg)	アルミニウム	205	スチール	23.0
CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /kg)	アルミニウム	11	スチール	1.8

東京大学 高橋 淳 教授

1. 炭素繊維の製造でのエネルギー負荷は他材料に比べ大きい。
2. 炭素繊維リサイクルで製造時のエネルギー負荷の1/6で炭素繊維を取り出せる。
3. 炭素繊維複合材料の使用に伴う軽量化で使用段階におけるエネルギー負荷(燃費)、環境負荷(CO<sub>2</sub>排出)の軽減が期待される。

# 炭素繊維協会LCAモデル まとめ

	自動車	航空機
従来車・従来機的前提	ガソリン車 4ドア FF 既存車両重量 1,380kg 実走行燃費 <b>9.8</b> km/リッター 生涯走行距離9.4万km (10.1年) 出典 自工会 国土交通省	中型旅客機(B767) 国内線仕様 機体構造重量60トン 運航 羽田-千歳 500マイル 証顔運航距離 年間2000便X10年 出典 ANA
従来車・従来機の生涯CO2排出量	<b>83</b> %は走行時発生	<b>99</b> %は運航時発生
炭素繊維協会 CFRPモデル 航空機・自動車 重量	CFRP <b>17</b> %採用 重量 <b>970</b> kg ▲410kg(30%)	CFRP <b>50</b> %採用 機体重量 <b>48</b> トン ▲12トン(20%) 総重量134トン⇒ <b>122</b> トン ▲ 9%
CO2削減量	▲0.5 トン/(台・年) 削減	▲2,700 トン/(機・年) 削減
燃費改善	▲	▲

# 自動車関連規制 燃費・CO<sub>2</sub>排出量/リサイクル

年	日本			US	EU	
	燃費 km/リッター	リサイクル (イニシアチブ)		燃費 km/リッター	CO <sub>2</sub> 排出量 g/km	リサイクル(指令)
		埋立率	リサイクル率			リサイクル率
2002		1996年 の3/5	85%以上			
2006						85%以上 内サーマルリサイクル5%以下
2010	15.1以上					
2011				11.6以上	140以下	
2015	16.8以上	1996年 の1/5	95%以上		130以下	95%以上 内サーマルリサイクル10%以下
2020	20.3以上			15.9以上	95以下	
2025				23.0以上 54.5 miles/gallon		

# 航空機への適用

## 1. CFRPの適用

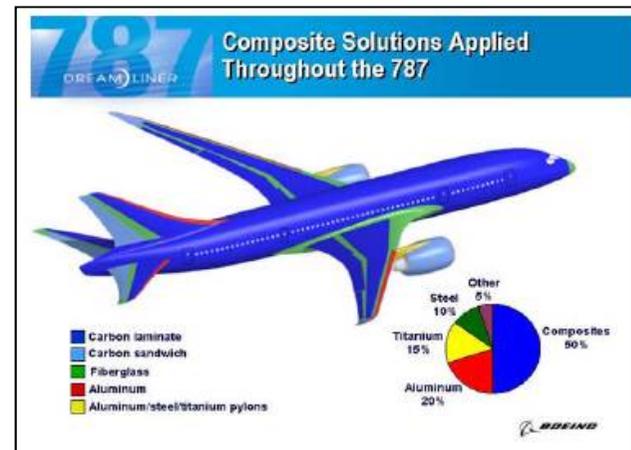
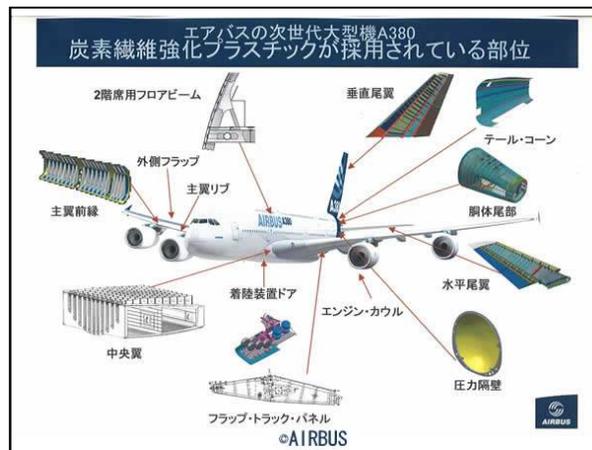
- 1) B787、A350XWBに見られるように高い比率で使用される
- 2) アルミニウム合金も実績があるため並行使用

## 2. 炭素繊維複合材料比率の向上

	A380	⇒	B787	⇒	A350	⇒	B777X
CFRP比率(%)	20%		50%		53%		?

## 3. ハイブリッド化CFRP

保護ガラス繊維層、かみなりよけ銅メッシュ付着、アルミハニカム等とハイブリッド化



# 自動車への適用

## 1. 適用

- ・今後もガソリン車は主流だが、ELV、FCV等も含め共通の軽量化課題を解決する素材としてCF比率は高まると予想する。量産車に適用されるまでは高級車からCF適用がすすむ。例 BMW i3、スポーツカー
- ・Type III, Type IV等車載用圧力容器への適用も増える。  
例 CNG車、FCV等



## 2. 成型コスト

- ・モジュール化で部品点数を下げ、RTM等一挙に成型する方法が進むと成型コスト・タクトタイムは下がってくる。

## 3. ハイブリッド化

- ・車体ではCFRPだけでなくスチール、アルミ等他材料とのハイブリッド化が進む
- ・圧力容器ではCFRP層の外側(最外層)にガラス繊維保護層 (GFRP)でハイブリッド化

# CFのリサイクルの特徴

## 1. リサイクル

- ・マテリアルリサイクル サーマルリサイクル ケミカルリサイクル の3種

## 2. 炭素繊維の原材料に戻ることはない。

- ・原材料： AN(アクリロニトリル)、PANポリマー、ピッチ、不融化糸

## 3. 連続長繊維にも戻らない。 ⇒ 連続繊維ボビン巻の形にはならない

- ・コンポジットでは繊維を切断し積層されているものがほとんど
- ・そのままリサイクルしても長繊維なので取扱い性に難  
⇒ 切断短繊維でリサイクルすると扱いやすい 長くとも100mm程度か

## 4. マテリアルリサイクルではチョップ形状のCF回収が適当

- ・理由：リサイクル処理を容易にするためあらかじめ破碎

## 5. マテリアルリサイクルのコストアップ要因

- ・チョップドからミルド(1mm長以下) ではチョップからさらに加工コストかかる。
- ・更なるコストアップ要因
  - ①繊維長を揃えるための分級 ②ハイブリッドの場合、異種材の除去
  - ③不織布付加価値化

## 6. リサイクルで繊維特性は劣化する

- ・繊維長 ⇒ 短くなる リサイクル毎に短くなる
- ・特性 ⇒ 強度は 同等 あるいは 低くなる
- ・表面(界面)特性 ⇒ 変わる 可能性高い

## 7. マテリアルリサイクルを行ってもリサイクル回数は限られる

- ・理由は繊維長が短くなると利用価値がなくなる



MIT 破碎廃材

# マトリックス分解法マテリアルリサイクルの事業化団体

	団体	国	備考 処理能力(ton/Year) 等
熱分解法	ウイスカ(株)	日本	
	ELG Carbon Fibre	ドイツ、イギリス	2000 ton/year
	HADEG Recycling GmbH	ドイツ	
	ReFibre	デンマーク	
	YF-International	オランダ	
	Procotex	フランス	
	Technical Fibre Products	イギリス	
	Karborek	イタリア	1000 ton/year
	CFK Valley	ドイツ	1000 ton/year
	Material Innovation Technologies	アメリカ	2200 ton/year
	炭素繊維リサイクル技術開発組合	日本	1000 ton/year
	カーボンファイバーリサイクル工業	日本	
	ファイヤバード	アメリカ	マイクロウェーブ+加熱炉
化学分解法	日立化成工業(株)	日本	触媒・常圧 200 ton/year?
超・亜臨界分解法	静岡大学(日本)	日本	超臨界アルコール 加圧
複合系(熱+化学)	Adherent Technologies	アメリカ	400ton/year (2014~)
電界酸化法	八戸リサイクル技術研究所	日本	500ton/year (2015~)
加熱水蒸気法	ファインセラミックセンター	日本	加熱水蒸気分解

Good Chemistry for tomorrow<sup>®</sup>  
人、社会、そして地球環境のより良い関係を創るために。

三菱ケミカルホールディングス

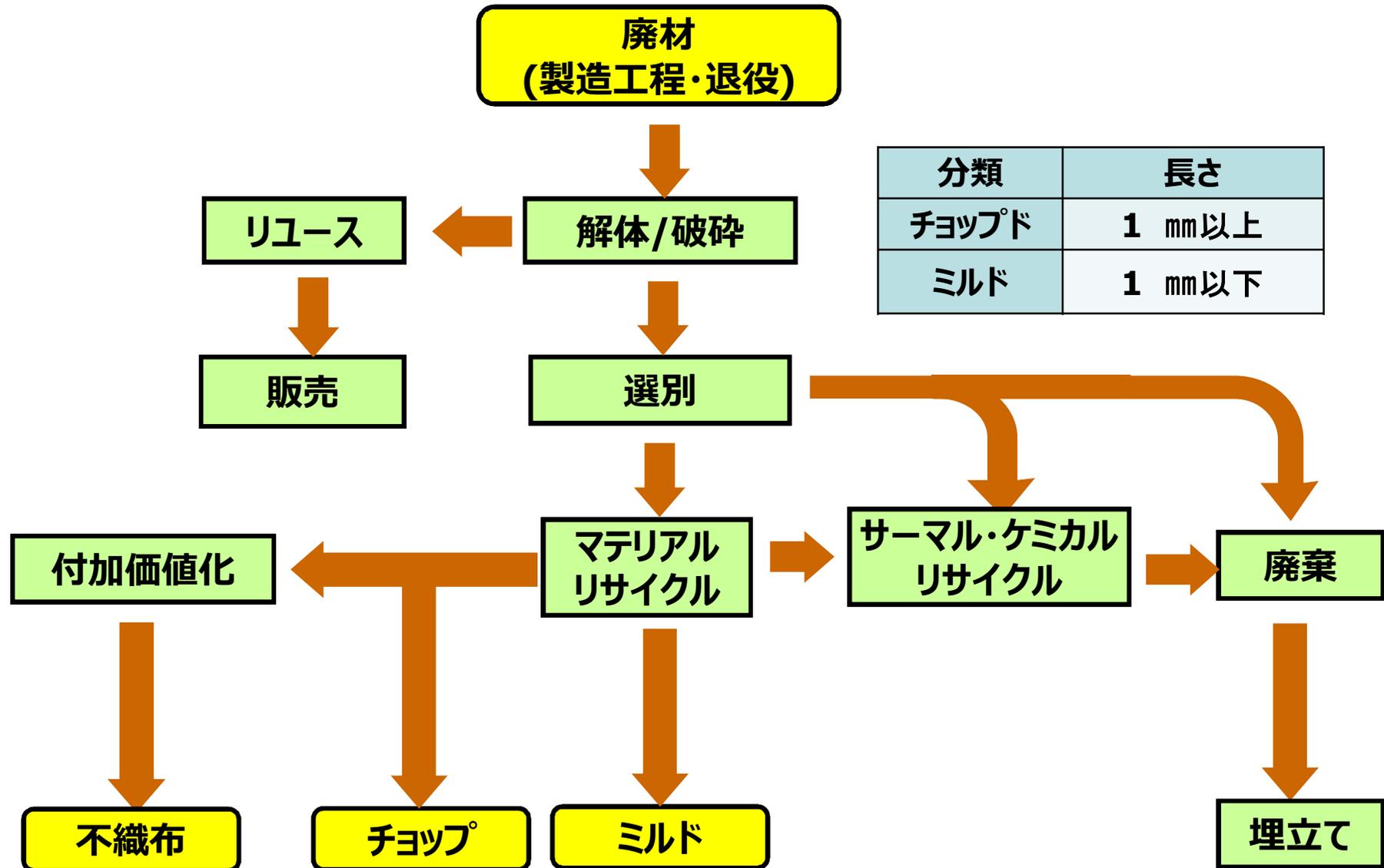
事業化

開発中

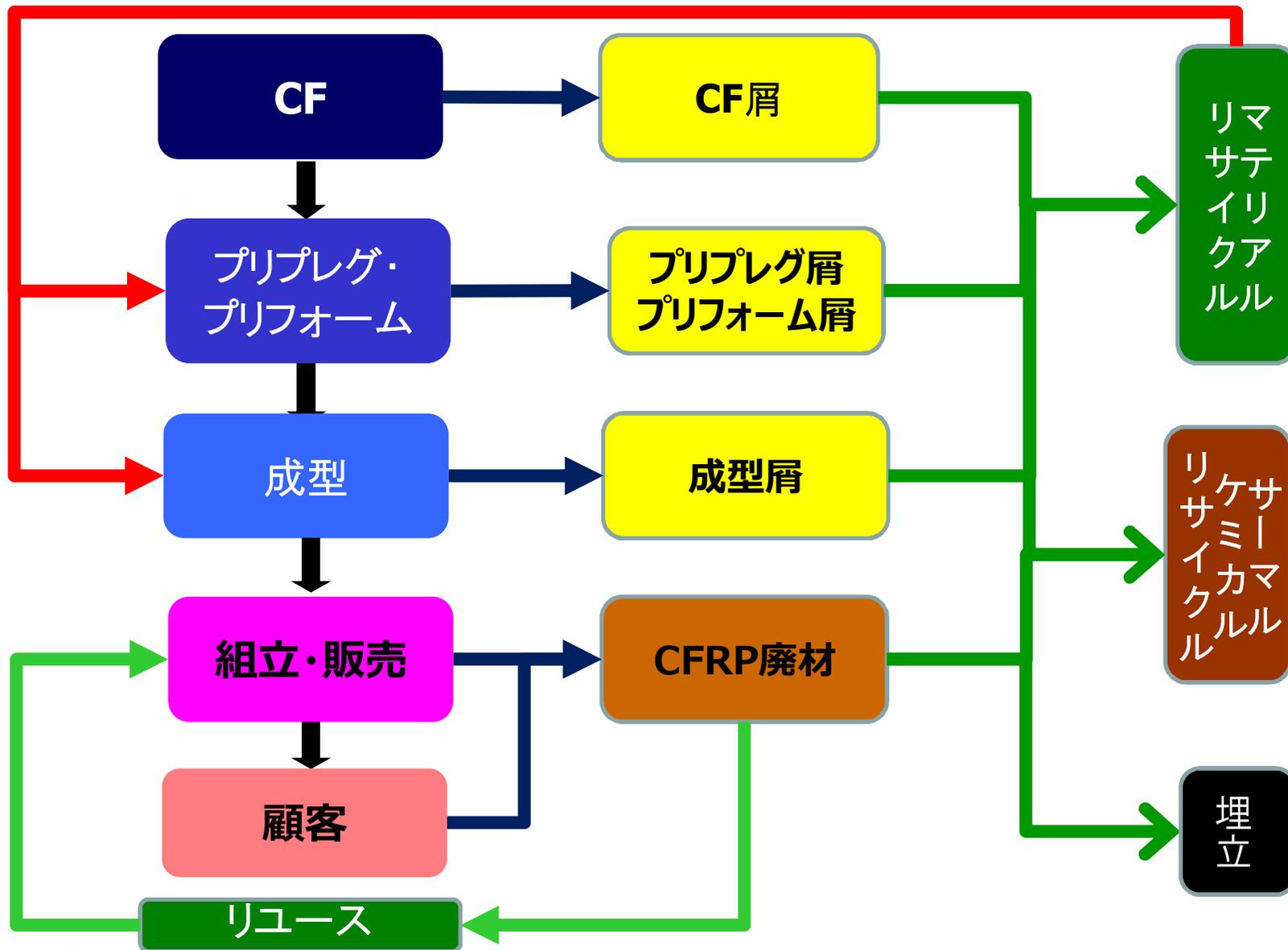


BEST QUALITY  
 JCMAR Proprietary

# CFリサイクルの流れ



# 使用済み材料とリサイクル流れ



Good Chemistry for Tomorrow®

人、社会、そして地球環境のより良い関係を創るために。

三菱ケミカルホールディングス



BEST QUALITY  
FOR A BETTER LIFE

# CF廃材とリサイクル製品 例

## ELG Carbon Fibre ホームページ 製品群



ミルトMF



チョップドCFRAN



ミルトペレットMFP



チョップドペレットCFP



CFK Valley ホームページ 廃材



戦闘機



チョップドファイバー



自動車に適用



プリフォーム



成型品



不織布

## Material Innovation Technologies ホームページ

Good Chemistry for Tomorrow®

人、社会、そして地球環境のより良い関係を創るために。

三菱ケミカルホールディングス

三菱レイヨン

BEST QUALITY  
FOR A BETTER LIFE

# 各用途のCFリサイクル状況

## 1. 航空機のリサイクルシステム

- 1) 航空機は金属材料を中心にリサイクルシステムが確立されている
  - ・特に主要な空港の周りに集約されている
  - ・複合材料比率が高まっており、複合材料リサイクルシステムの構築急務となっている。  
BOEING : AFRA、 AIRBUS : PAMELA 等コンソーシアム等
- 2) 製造工程廃材のリサイクル(プリプレグ)
  - ・伊 Alenia (BOEINGのサブコントラクター : プリプレグ廃材のリサイクル)
- 3) 自動車業界とのリサイクル関連関係強化
  - ・BOEINGとBMWの関係 …… 共通の課題として連携
- 4) マテリアルリサイクルCFへの期待
  - ・航空業界内部だけでなく一般用途へのマテリアルリサイクル展開

## 2. 自動車のリサイクルシステム

- 1) 自動車リサイクル法でリサイクル(再資源化)率目標値の設定
  - ・サーマルリサイクル・ケミカルリサイクルを中心にリサイクル率目標を達成を目指している。

## 3. その他用途CFRP廃材

- 1) 廃棄物は廃プラとして処理されている。選択的な廃材収集システムはない。
- 2) 多くは埋立てされているが、その他廃棄物に紛れ込み焼却炉・セメント工程などで問題を発生させている。

# CFリサイクル事業化の要件と方向性

## 1. マテリアルリサイクル事業化

### 1) 回収—CF取出し—販売(用途展開)がセットで成立

- ・廃材の回収が安定し、継続的に入手できることが事業化の最低条件
- ・リサイクル品の顧客・用途が確保できていること
- ・廃材中のCFの素性が確認できていることが望ましい。

### 2)リサイクル製品品質

- ・高価格化の要件  
単一素材、繊維が長い、繊維長分布狭い、性能保持ばらつき狭い等  
⇒ コンタミがあると商品価値は下がる。

### 3)用途展開(販売)

- ・品質安定性(品質保証)、継続供給性、適正価格
- ・競合既存材料との競争性を明確にして事業性の判断  
価格、供給量、特性等 既存材に比べメリットがないと置き換えにならない。  
軽い、強い、腐食しにくい、導電性高い等考えれば用途は広がる。

### 4)いくらリサイクルをしても最後は廃棄か

- ・CFマテリアルリサイクルには限界があり最終的には処分が必要

# CFリサイクル事業化の要件と方向性

## 2. CFRP廃棄物を包括的に処理するリサイクルシステムの構築

現時点は廃棄量は限定されるが将来の廃棄量の増加に対して

### 1) 散逸するCFRP廃棄物・廃材の収集(分別収集)

- ・用途別のCFRP廃材回収システム
- ・廃棄物の場合、廃プラスチック以外のカテゴリで分別収集
- ・収集団体・集積地の存在

### 2) 最終処分方法の整備

- ・サーマルリサイクル  
⇒炭素繊維用焼却炉の改善  
燃焼温度、燃焼効率、焼却炉構造、粉じん対策等
- ・ケミカルリサイクル  
⇒電炉、セメント等での処理、粉じん対策
- ・埋立て  
⇒無害化

**経済原理で処理が円滑に行われるシステムの構築が必要**

---

ご清聴ありがとうございました。  
**End**

Good **Chemistry** for Tomorrow®

人、社会、そして地球環境のより良い関係を創るために。

三菱ケミカルホールディングス



BEST QUALITY  
FOR A BETTER LIFE