

2018年10月31日

報告書

実施期間 2017年7月3日～2018年3月9日

CFRPのCar to Carリサイクルへ向けた実証

デロイトトーマツコンサルティング合同会社

中西 啓、畑中 翼

日産自動車株式会社 材料技術部

服部 直樹、端野 直輝

概要

名称

CFRP の Car to Car リサイクルへ向けた実証

実施期間

2017年7月3日～2018年3月9日

調査 代表者

デロイトトーマツコンサルティング合同会社 中西 啓

実施者

デロイトトーマツコンサルティング合同会社 中西 啓、畑中 翼
日産自動車株式会社 材料技術部 服部 直樹、端野 直輝

目的

CFRP の Car to Car リサイクルチェーン構築のフェージビリティスタディを目的とし、リサイクルチェーン構築に必要な「工程」、「技術」、「課題」および課題を解決可能な有望技術を持つ「企業/研究機関」の特定を目的とした調査を実施する。

実施内容

CFRP リサイクル技術の洗い出しと整理、実現可能な Car to Car リサイクルチェーンの実現に向けた実証実験の初期案作成及びコンソーシアムの構築を実施した。

成果

リサイクル後の物性、コスト、量産性の観点から有望なリサイクル技術及び技術保有企業/研究機関を選定し、次年度以降のコンソーシアムによる実証計画を立案した。

本プロジェクトの概要

<本プロジェクトの目的>

- 現在、使用済み自動車におけるCFRP 廃材は量が限定的なこともあり、埋め立て処理がなされている。しかし、CFRP は軽量/高強度という特性により、2020 年代から自動車での採用が本格的に拡大する見込みであるが、リサイクルチェーンの確立なしには普及させることができない。現在、CFRP のリサイクルに関する技術開発においては CFRP からの CF 取り出し技術がクローズアップされており、その他の工程に関する技術開発は少ない。また、CFRP からの CF 取り出し技術についても、各社がそれぞれの条件で実験・評価を行っており、客観的な特徴や優劣が把握できない状況である。
- そこで本プロジェクトでは2017年7月～10月、2017年12月～2018年2月の約7ヶ月をかけ、CFRP の Car to Car リサイクルチェーンの実態把握のフィージビリティスタディを目的とし、
 - リサイクルチェーン構築に必要な「**工程**」、「**技術**」、「**課題**」および課題を解決可能な有望技術を持つ「**企業/研究機関**」の特定を目的とした『**A. CFRP リサイクル技術の洗い出しと整理**』および『**B. 公的研究機関の CFRP リサイクル研究整理と未検証領域の抽出**』
 - 実現可能なリサイクルチェーンを構想する『**C. Car to Car リサイクルチェーンの構築**』
 - リサイクルチェーンの実現に向けた『**D. 実証実験の初期案作成**』と『**E. コンソーシアムの構築**』
 - 具体的な実証実験の進め方・日程を決める『**F. 実証実験計画策定(内容精査)**』
 を行った。
- 以降、A～F について詳細を述べる。

<A. CFRP リサイクル技術の洗い出しと整理>

- CFRP のリサイクルチェーンの工程を**廃材回収**、**CF 取り出し**、**中間基材製造**、**部品成形**の4つに分けた上で、それらの中で必要な技術を①**廃材選別技術**、②**CF 取り出し技術**、③**中間基材製造技術**、④**成形技術**、⑤**評価技術**の5つに大別して整理/分析を行った。

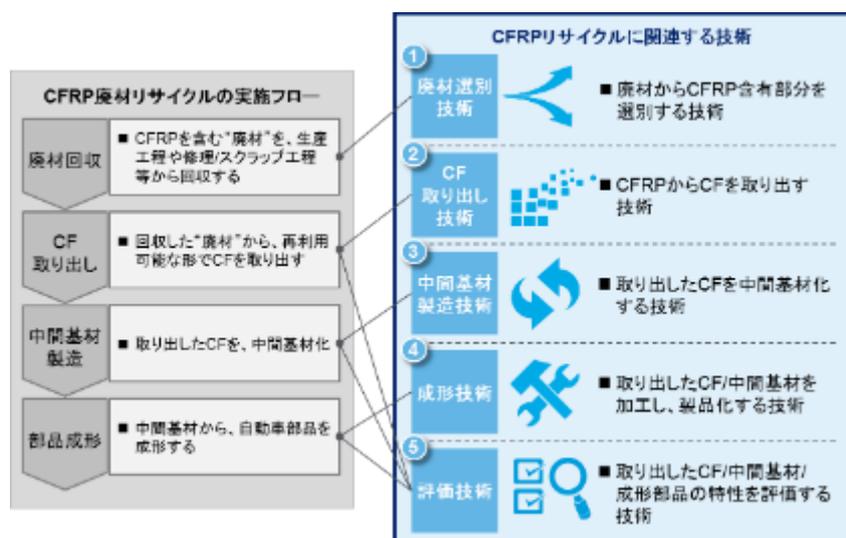


図 I CFRP リサイクルチェーンの工程と技術

① 廃材選別技術

- 回収後の後工程に鑑み、「出自特定」が最重要項目である。
- 比重選別や静電選別等が考案されているが、微細な廃材は分別できず精度向上が大きな課題である。
- 回収ポイントは7か所存在し、そのうち4パターン(自動車部品成形工程の端材/航空機部品成形工程の端材/修理工程からの廃材/解体工程からの廃材)が出自を特定可能であり、本リサイクルチェーンの対象となる。

② CF 取り出し技術

- 「強度劣化」「取り出しコスト・処理コスト」「処理量」「制約条件」の4つの技術評価の視点から、「2段階熱分解法」、「過熱水蒸気法」、「常圧溶解法」、「電解酸化法」の4技術を有望技術候補とした。

		技術評価			
		強度の劣化度	取り出し/処理コスト	大量処理可否	制約条件
熱分解法	1段階熱分解法	○	×	△	○
	過熱水蒸気法	○	○	○	△
	2段階熱分解法	△	△	○	△
化学分解法	常圧溶解法	○	△	△	△
	臨界流体法	○	—	×	○
	半導体熱活性化法	×	—	○	○
	電解酸化法	○	△	—	△
物理分解法	2段階粉砕処理法	—	—	△	△
	高電圧衝撃波法	—	—	—	△

○:良好 or 問題なし ×:問題があり改善の見通しも薄い
△:現在は問題があるが将来的に解消する可能性あり

「×」が付かなかった熱分解系と常圧溶解法、電解酸化法が有望技術と想定されるが、実用化に至っていないものがないため、現時点では有望度評価は頭打ち。実証実験によりどのCF取り出し技術が有望かを評価する必要あり

図 II CF 取り出し技術の技術評価結果

③ 中間基材製造技術・④成形技術

- リサイクル CF は不連続繊維となるため、本プロジェクトでは「不連続繊維に関する成形方法と中間基材」を対象とした。
- また、最終目的の部品の要求特性により成形方法が決まり、且つ、その成形方法によって適する中間基材も決まることが明らかとなった。
- 評価の結果、不連続繊維の成形方法としては **SMC 法/RTM 法/スタンピング成形法/射出成形法**が有望であり、対応する中間基材はそれぞれ **SMC/フェルト/スタンパブルシート/短繊維ペレット**であった。

⑤ 評価技術

- リサイクル CF は、経年劣化度合いや取り出し工程における劣化度合いのバラツキの影響を受け、強度等の品質にブレが発生する。そのため、品質評価体制を構築するには、品質のブレを前提とした上での統計学的アプローチにより、評価頻度等を決定することが重要であることがわかった。

- 以上より、CFRP のリサイクルチェーン構築に必要な「技術」について整理し、絞り込むことができた。

<B. 公的研究機関の CFRP リサイクル研究整理と未検証領域の抽出>

- 前項の『A. CFRP リサイクル技術の洗い出しと整理』と並行し、実証実験を行う上で既に行われている実験との重複を防ぐために、公的機関(文部科学省/経済産業省/環境省/国土交通省の 4 省)の CFRP リサイクル先行研究(全 58 件)をリサーチした結果、CF 取り出し技術は特にコスト面でまだ確立されておらず、且つ取り出し技術を横並び比較した研究はないことが分かった。
- そのため、本プロジェクトにおいて複数技術を品質やコスト面において、CF 単体・中間基材・成形品の状態にてそれぞれ同一条件にて比較することには大きな意義があると考えられる。

<C. Car to Car リサイクルチェーンの構築>

- 前述の技術分析の結果、リサイクルチェーンは『何を使うか(廃材回収)』および『どう使うか(最終目的物)』に依存することが判明した。
- 検討の結果、『どう使うか(最終目的物)』は、現在、CFRTP または CFRP の採用実績のある自動車部品を前提とした。

- フェーズ 1: 成形時端材を活用したリサイクルチェーン

- 前述までの技術評価に鑑み、「成形時端材の種類」と「最終目的物が熱硬化(CFRP)か熱可塑(CFRTP)か」を起点に 3 つのリサイクルチェーンを構想した。本フェーズでは Step1 として「B. CFRP to CFRTP チェーン」、Step2 として「A. CFRP to CFRP」を検討する。



図Ⅲ CFRP /CFRTP チェーンの概略図

- フェーズ 2: 廃材を活用した Car to Car チェーン

- フェーズ 2 としては、使用済み自動車や修理部品から回収した廃材を組み込んで再利用量を最大化した本格量産フェーズであり、最終目的である Car to Car リサイクルチェーンの構築を図る。
- 上記 2 フェーズにより、Car to Car リサイクルチェーンの構築を目指すこととした。

<D. 実証実験の初期案作成>

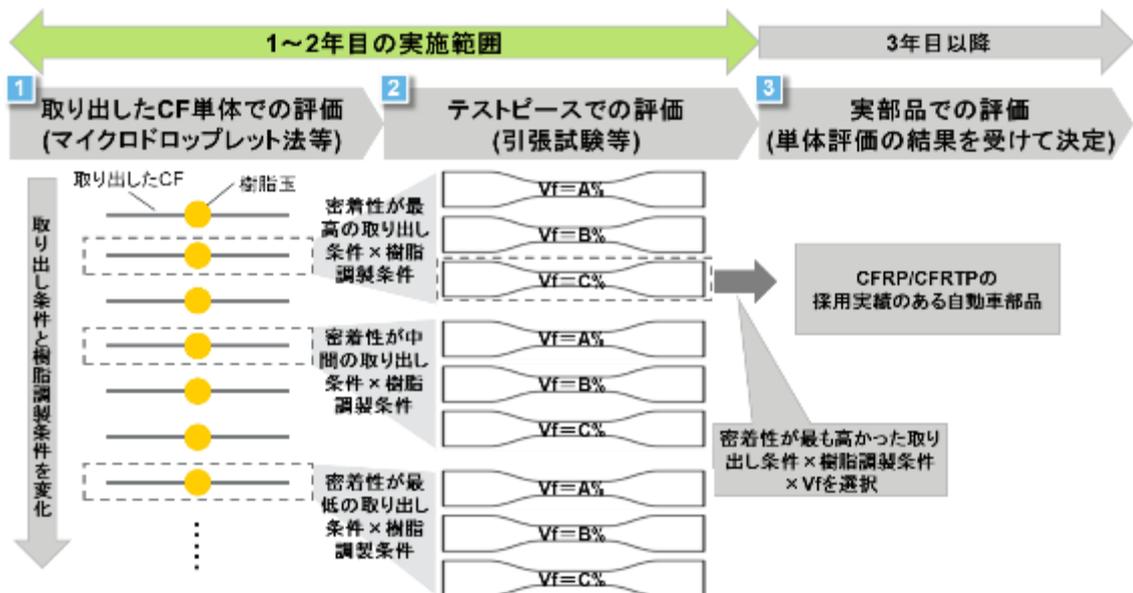
- 前項にて検討した通り、まずは「フェーズ 1:成形時端材を活用したリサイクルチェーン」構築に向けた実証実験を行い、3~5 年間をかけて CFRP リサイクルチェーンの基盤を構築する。
- 実証実験のゴールは「出自がわかる端材の回収スキーム構築」、「品質面/コスト面で最適な CF 取り出し技術の見極め」、「リサイクル CF の最適中間基材の選定と製造方法の確立」、「目的部品の最適な成形技術の確立」、「現実的かつ有効な品質評価/保証体制の構築」である。
 - 初年度は、自動車に採用されている CFRP から最適な CF 取り出し技術と取り出し条件の見極め、最適なマトリックス樹脂の見極めを目指す。

<E. コンソーシアムの構築>

- 本プロジェクトのコンソーシアム体制は以下の通りとした。
 - CF 取り出し工程: A 社(アドバイザーとして F 氏)、B 社(アドバイザーとして公的機関 G)、C 社
 - 中間基材製造工程: D 社(試作委託のみ)

<F. 実証実験計画策定(内容精査)>

- 今回構築したコンソーシアム体制にて、『D. 実証実験の初期案作成』に基づいて、まずは CF 取り出し工程に焦点を当て、CF 単体、テストピース、実部品の 3 段階での評価を経て、3 つの技術(2 段階熱分解法、過熱水蒸気法、電解酸化法)を同一条件にて比較する。



図IV 実証実験の進め方概念図

リサイクル源には、自動車用として採用実績のある CFRP の試作板を使用する。

- 1 年目はまずは図 V、VI のスケジュールにて CF 単体での評価のみを実施する。(2 段階熱分解法と電解酸化法については先んじてテストピースでの評価も行う予定)



図V 2段階熱分解法と電解酸化法の実験スケジュール



図VI 過熱水蒸気法の実験スケジュール

<目次>

1. 本プロジェクトの目的	P. 1
2. 実施内容	P. 1
A) CFRP リサイクル技術の洗い出しと整理	P. 1
① 廃材選別技術	P. 2
② CF 取り出し技術	P. 3
③ 中間基材製造技術	P. 9
④ 成形技術	P. 12
⑤ 評価技術	P. 14
B) 公的研究機関の CFRP リサイクル研究整理と未検証領域の抽出	P. 17
C) Car to Car リサイクルチェーンの構築	P. 19
D) 実証実験の初期案作成	P. 23
E) コンソーシアムの構築	P. 24
F) 実証実験計画策定(内容精査)	P. 24
3. 総括	P. 28

1. 本プロジェクトの目的

現在、使用済み自動車における CFRP 廃材は量が限定的なこともあり、埋め立て処理がなされている。しかし、CFRP は軽量/高強度という特性により、2020 年代から自動車での採用が本格的に拡大する見込みであるが、リサイクルチェーンの確立なしには普及させることができない。現在、CFRP のリサイクルに関する技術開発においては CFRP からの CF 取り出し技術がクローズアップされており、その他の工程に関する技術開発は少ない。また、CFRP からの CF 取り出し技術についても、各社がそれぞれの条件で実験・評価を行っており、客観的な特徴や優劣が把握できない状況である。

そこで本プロジェクトでは 2017 年 7 月～10 月、2017 年 12 月～2018 年 2 月の約 7 ヶ月をかけ、CFRP の Car to Car リサイクルチェーンの実態把握のフェージビリティスタディを目的とし、

- リサイクルチェーン構築に必要な「工程」、「技術」、「課題」および課題を解決可能な有望技術を持つ「企業/研究機関」の特定を目的とした『A. CFRP リサイクル技術の洗い出しと整理』および『B. 公的研究機関の CFRP リサイクル研究整理と未検証領域の抽出』
 - 実現可能なリサイクルチェーンを構想する『C. Car to Car リサイクルチェーンの構築』
 - リサイクルチェーンの実現に向けた『D. 実証実験の初期案作成』と『E. コンソーシアムの構築』
 - 具体的な実証実験の進め方・日程を決める『F. 実証実験計画策定(内容精査)』
- を行った。

以降、A～F の実施内容について詳細を述べる。

2. 実施内容

A) CFRP リサイクル技術の洗い出しと整理

図 1 に示すように、CFRP のリサイクルチェーンの工程を廃材回収、CF 取り出し、中間基材製造、部品成形の 4 つに分けた上で、それらの中で必要な技術を①廃材選別技術、②CF 取り出し技術、③中間基材製造技術、④成形技術、⑤評価技術の 5 つに大別して整理/分析を行った。

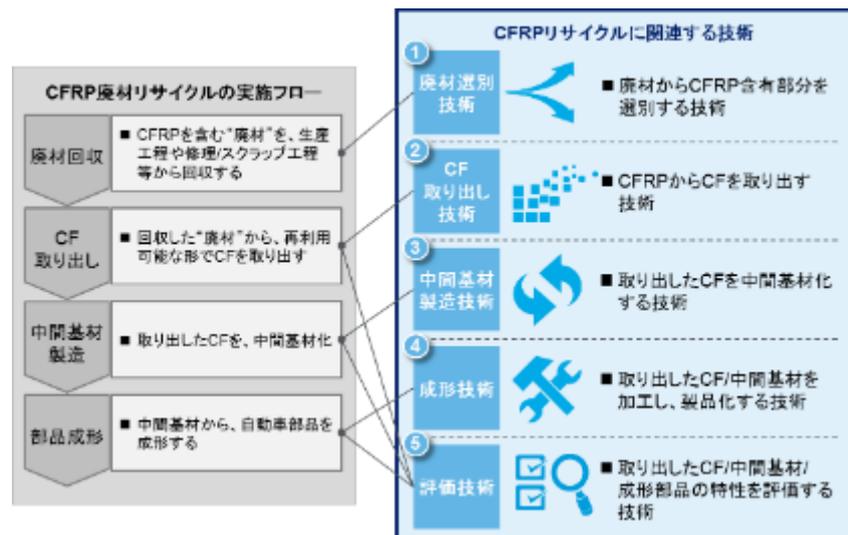


図 1 CFRP リサイクルチェーンの工程と技術

① 廃材選別技術

まず、廃材を選別/回収する技術/方法を評価する視点として、

- 廃材回収プロセス構築の難易度は？
 - (ア) 構築難易度: 廃材回収プロセスを構築する難易度は？
- 十分な量が回収できるか？
 - (イ) 廃材回収量: 廃材の回収可能な量はどの程度か？
- 回収コストは許容できるか？
 - (ウ) 回収コスト: 回収コストはどの程度か？
- 後工程で使い易いか？
 - (エ) 含浸有無: 樹脂含浸済か？繊維形状での回収は可能か？
 - (オ) 劣化有無: 材料の劣化(経年/破断)による品質低下度合いは？
 - (カ) 出自特定: CFRP/CFRTP等の区分けや、製品グレードの分類は可能か？

の6つを設定した。

6つの中でも、「後工程で使い易いか？」の「(カ). 出自特定」が最重要項目と想定している。

次に回収の工程と回収ポイントを図2に示すように整理した。回収の工程は「A. 製造工程で発生する端材からの回収」「B. 自動車修理の部品交換での回収」「C. 使用済み自動車廃材からの回収(人力 or 機械選別)」の3つがあり、回収ポイントはA-1～C-6の7か所が存在することが分かった。

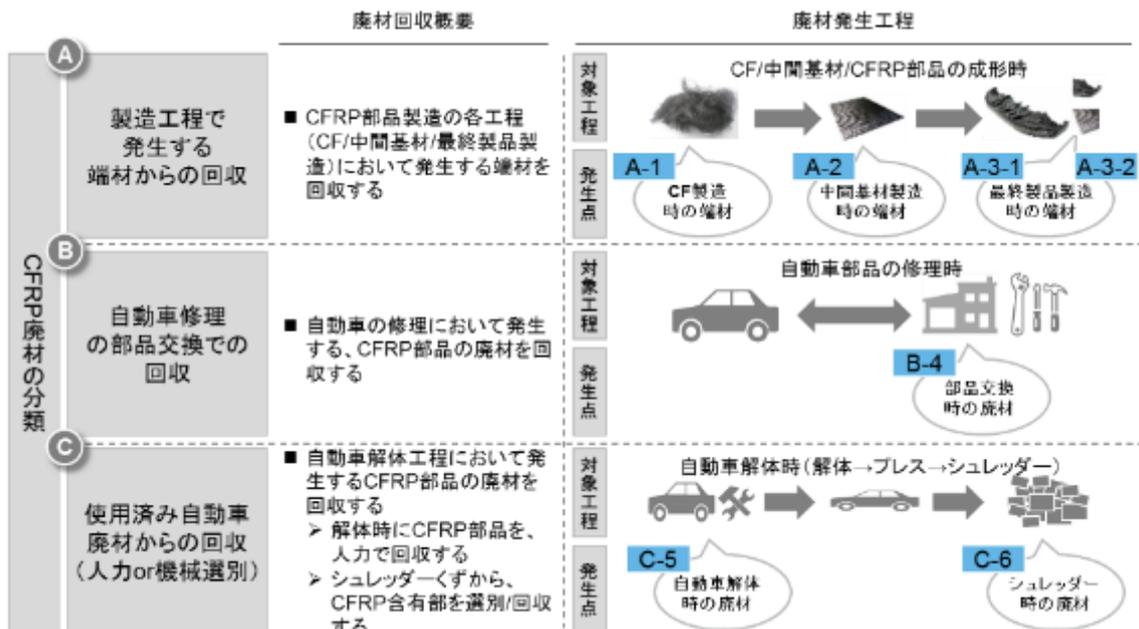


図2 CFRP 廃材回収工程と回収ポイント

こうして整理した7つの回収ポイントを前述の(ア)～(カ)の6つの視点で評価すると図3のようになり、出自が明確で、品質も良好な「A-3-1. 自動車部品成形工程の端材」、「A-3-2. 航空機部品成形工程の端材」が試験的導入に有望だと判断した。

○ : 良好 or 問題なし ✕ : 問題があり改善の見通しも薄い
 △ : 現在は問題があるが将来的に解消する可能性あり

回収ポイント	発生場所	構築難易度	廃材回収量	回収コスト	含浸有無	劣化有無	出自特定	評価の最重要項目	
製造工程で発生する廃材からの回収	A-1 CF製造工程からの廃材	CF製造メーカーのCF製造工程	△	✕	○	○	○	△	回収対象外と想定 ✓ 出自非開示の可能性が高く廃材発生量が僅少
	A-2 中間基材製造工程からの廃材	中間基材メーカーの中間基材製造工程	△	✕	○	△	○	△	構築は最も容易か ✓ 出自が明確で、品質も良好だが、現時点で発生量が僅少
	A-3-1 自動車部品成形工程の廃材	自動車部品成形工程	構築難易度は低い	現時点で発生量は少ない	○	△	△	出自が明確で品質も良好	✓ 出自が明確で、品質も良好。発生量も多い
	A-3-2 航空機部品成形工程の廃材	航空機部品成形メーカーの成形工程	構築難易度は低い	発生量は多い	○	△	△	出自が明確で品質も良好	試験的導入に有望 ✓ 出自が明確で、品質も良好。発生量も多い
自動車修理の部品交換での回収	B-4 修理工程からの廃材	修理業者の修理工場	✕	△	△	✕	✕	△	構築優先度は低い ✓ 修理/解体工程では出自は明確だが、劣化大 ✓ 将来的には発生量が多くなる見通し
使用済み自動車廃材からの回収	C-5 解体工程からの廃材	解体業者の解体工程	△	△	△	✕	✕	△	出自は特定可能 ✓ 将来的には発生量が多くなる見通し
	C-6 シュレッダー工程からの廃材	シュレッダー業者のシュレッダー工程	✕	△	✕	✕	✕	✕	廃材のため、低品質 回収対象外と想定 ✓ 出自が特定できる可能性が低く、質は低い

図3 7つの回収ポイントの評価結果

② CF 取り出し技術

CF 取り出し技術においては、図4に示すように技術方式を熱分解法/化学分解法/物理分解法の3つに分類した上で、各技術を評価した。

	技術の定義	技術の特徴	技術の課題
 熱分解法	<ul style="list-style-type: none"> 加熱によって、CFRPの樹脂部分を熱分解し、CFと樹脂を分離させる 	<ul style="list-style-type: none"> 熱処理が主体のため比較的低コストで、大型処理の設備を作り易い 取り出したCFの特性劣化は少ない 	<ul style="list-style-type: none"> コスト/品質/大量処理化のバランスがとれているが、実用化の要求水準には至っていない
 化学分解法	<ul style="list-style-type: none"> 熱分解以外の化学反応(主に溶液)によって、CFと樹脂を分離させる 	<ul style="list-style-type: none"> 取り出したCFの特性劣化が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> 高圧プロセスを含む場合は高コストで、大量処理化にも課題あり
 物理分解法	<ul style="list-style-type: none"> CFRPへの物理的衝撃によって、CFと樹脂を分離させる 	<ul style="list-style-type: none"> 物理破壊の装置への投資コストは、熱/化学分解法と比較し安価 大量処理への設備転用も容易 	<ul style="list-style-type: none"> 粉砕してしまうため、取り出せるCFの形状は粉末状のみ 衝撃を加えるため、取り出したCFの品質は低い

図4 3つの取り出し技術の概要

評価する視点としては図5に示すように、「強度の劣化度」「取り出し/処理コスト」「大量処理可否」「制約条件」の4つを設定した。

		評価項目/項目の概要	評価の意味合い
CF 取り出し技術分析の4つの視点	品質は？	強度の劣化度 ✓ バージン繊維と比較した場合の強度は？(引張強度等)	■ 繊維の強度は、引張試験による評価が一般的 ■ 強度が十分であれば、破断は起こらず、十分な品質といえる
	取り出し/後続処理のコストは？	取り出し/処理コスト ✓ 取り出しにかかるコスト、後続処理(サイジング剤塗布等)のコストは？	■ CF1Kgあたり1,000円以下を許容と想定し、当該値に近いものを高評価とする
	大量処理向きか？	大量処理可否 ✓ 日に処理できる上限は？ ✓ タクトタイムは？ ✓ 連続して処理が可能か？	■ 自動車で求められる大量処理が実現可能な技術を高評価とする
	留意すべき制約は？	制約条件 ✓ 取出されるCFの形状に制約はあるか？ ✓ 除去できる樹脂に制限はあるか？	■ そのほか、実用化に向けたボトルネックとなる制約条件を確認

図5 CF 取り出し技術の評価の視点

CF 取り出し技術においては、強度・コスト・供給量が重要であるため、「強度劣化」「取り出しコスト・処理コスト」「処理量」の3点と、実用化に向けてボトルネックがないか確認するため「制約条件」を評価項目とした。

i. 熱分解法

熱分解法には以下の3つの技術方式がある。

- (ア) 1段階熱分解法: ~700°Cの熱雰囲気においてCFから樹脂を熱分解によって取り除く技術
- (イ) 過熱水蒸気法: 比較的低温である300~500°Cの過熱水蒸気による熱処理で樹脂を分解してCFを回収する技術
- (ウ) 2段階熱分解法: 1段階目に樹脂を熱分解させ、その生成ガスを2段階目の燃料とし、低酸素雰囲気で燃焼することでCFの劣化を抑制して取り出す技術

熱分解法全般の特徴としては品質とコストのバランスが良く、大量処理向きであることが挙げられる。

これらの技術方式に対して先述の4つの視点から評価すると図6に示す結果となり、1段階熱分解法は「取り出し/処理コスト」において「問題があり改善の見通しも薄い」との評価になったことで、今回の有望技術としては不適切と判断した。よって、熱分解法の中では、「問題があり改善の見通しも薄い」の評価がなかった「過熱水蒸気法」と「2段階熱分解法」が有望技術として抽出された。

また、参考として各技術方式の主要プレイヤーと動向を図7に整理した。

- 1段階熱分解法: 現在は東レ×豊田通商が主要なプレイヤーで、以前は東レ×帝人×三菱レーヨン(当時)も共同研究を実施(2015年3月に共同研究を解消)
- 過熱水蒸気法: 高砂工業×ファインセラミックスセンターが主要なプレイヤーで、信州大学等も研究を実施(ファインセラミックスセンターは国家プロジェクトにも参画)
- 2段階熱分解法: カーボンファイバーリサイクル工業×岐阜大学が主要プレイヤー

●電解酸化法: 八戸高専×リサイクル材料技術研究所×アイカーボンが主要プレイヤー



図6 熱分解法の評価結果



図7 熱分解法における各技術方式の主要プレイヤーと動向

ii. 化学分解法

化学分解法には以下の4つの技術方式がある。

(ア) 常圧溶解法: 約200℃のアルコール溶液と触媒を用いて樹脂を溶解する技術

(イ) 臨界流体法: 高温・高圧の臨界状態のアルコール蒸気を用いて樹脂を溶解する技術

(ウ) 半導体熱活性法: 400°Cに加熱した炉の中で、酸化物半導体で挟み込むことで、酸化作用によって樹脂を分解してCFを取り出す技術

(エ) 電解酸化法: 前処理として焼成したCFRPを陽極とし、電解液中で電気分解することで樹脂を除去する技術

化学分解法全般の特徴としては比較的強度劣化が少ないものの、コスト高な傾向があることが挙げられる。

これら4技術に対して先述の4つの視点で評価すると図8に示す結果となり、臨界流体法は「大量処理可否」において、半導体熱活性法は「強度の劣化度」において「問題があり改善の見通しも薄い」との評価になったことで、今回の有望技術としては不適切と判断した。よって、化学分解法の中では、「問題があり改善の見通しも薄い」の評価がなかった「常圧溶解法」と「電解酸化法」が有望技術として抽出された。

また、参考として各技術方式の主要プレイヤーと動向を図9に整理した。

- 常圧溶解法: 日立化成が主要なプレイヤーで、産総研等も研究を実施
- 臨界流体法: 静岡大学が主要なプレイヤーで、名古屋大学等も研究を実施
- 半導体熱活性法: 信州大学が主要プレイヤー
- 電解酸化法: 八戸高専×リサイクル材料技術研究所×アイカーボンが主要プレイヤー

○ : 良好 or 問題なし ✖ : 問題があり改善の見通しも薄い
▲ : 現在は問題があるが将来的に解消する可能性あり

	技術概要	技術評価			
		強度の劣化度	取り出し/処理コスト	大量処理可否	制約条件
化学分解法	常圧溶解法  <ul style="list-style-type: none"> ■ 約200°Cのアルコール溶液と触媒を用いて樹脂を溶解 ■ 塩酸等の溶媒を使用する技術も存在 	○ 引張強度はバージン繊維とほぼ同等	<ul style="list-style-type: none"> ■ 30~40MJ/kg (300~400円/kg程度?) ■ 追加でサイジング剤処理が必要か? 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 0.08トン/日の処理能力(12トン/年との記載*)から年間200日稼働で算出) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 分解可能な樹脂が不飽和ポリエステル、臭素化エポキシに限定
	臨界流体法  <ul style="list-style-type: none"> ■ 高温・高圧の臨界状態のアルコール蒸気を用いて樹脂を溶解 	○ 引張強度はバージン繊維の96%	■ 言及なし	<ul style="list-style-type: none"> ■ 高圧装置の大型化に課題があり、大量処理は困難と想定 	○ 特になし
	半導体熱活性法  <ul style="list-style-type: none"> ■ 400°Cに加熱した炉の中で、酸化物半導体で挟み込むことで、酸化作用によって樹脂を分解 	✖ 市販CF比で3点曲げ強度は90% ✖ 酸化による品質劣化を懸念	<ul style="list-style-type: none"> ■ 処理コストの言及なし ■ 追加でサイジング剤処理が必要か 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 連続処理試作機の処理能力から、8トン/日の処理が可能と試算 	○ 特になし
	電解酸化法  <ul style="list-style-type: none"> ■ CFRPを陽極とし、電解液中で電気分解することで樹脂を除去(前処理として焼成を実施している) 	○ 強度劣化はないとの記載	<ul style="list-style-type: none"> ■ 取出CFの販売価格はバージンの半額以下 ■ 官能基生成のため、サイジング剤処理不要 	■ 言及なし	<ul style="list-style-type: none"> ■ 粉碎処理が必要で、繊維長は0.5~40mmの範囲(繊維長は制御可能)

図8 化学分解法の評価結果

化学分解法の主要プレイヤーと動向

	主なプレイヤー/連合(1)		主なプレイヤー/連合(2)	
	主なプレイヤー	想定注力度と取組例	主なプレイヤー	想定注力度と取組例
常圧溶解法		<ul style="list-style-type: none"> 2014年9月にCFRP等のリサイクル事業化を促進、とのプレスリリースあり 近年の活動状況は不明 		<ul style="list-style-type: none"> 環境省の助成や文部科学省の科研費を受けて研究を実施 事業化に向けた実証実験等の情報は不明
臨界流体法		<ul style="list-style-type: none"> 2007-2010年にNEDOの助成を受けて研究を実施 2016年の段階で未だ試作・実験段階だった模様* 		<ul style="list-style-type: none"> 後藤教授は熊本大学時代から臨界流体法の研究を実施 近年、事業化に向けた実証実験等の情報は不明
半導体熱活性化法		<ul style="list-style-type: none"> 2012-2014年に環境省の助成を受けて研究を実施 「株式会社ジンテック」を立ち上げ、「FRP連続分解装置」を販売中 		<p>実用化に向けて精力的に活動</p>
電解酸化法		<ul style="list-style-type: none"> 取り出しCFを短繊維ペレットを製造する素材メーカーに販売予定²とのことで、販売体制も整っている模様 		<p>実用化状況は不明</p>

図9 化学分解法における各技術方式の主要プレイヤーと動向

iii. 物理分解法

物理分解法には以下に示す2つの技術方式がある。

- (ア) 2段階粉碎処理法: 低速破砕機と気流粉碎による2段階の粉碎処理により、樹脂とCFを分離する技術
- (イ) 高電圧衝撃波法: 水中で数百kVの高電圧をパルス状に印加して衝撃波を発生させ、CFRPを破壊して樹脂とCFを分離する技術

物理分解法の特徴としては、CFRPを物理的に破壊/粉碎するため、取り出したCFの品質の劣化が大きいことが挙げられる。

図10に示す評価の結果、具体的な言及はなかったものの、原理的に強度の劣化が大きいと想定されるため、有望技術は抽出されなかった。また、参考として各技術方式の主要プレイヤーと動向を図11に整理した。

- 2段階粉碎処理法: リバーステクノロジーが主要なプレイヤーで200トン/年の処理能力を保有
- 高電圧衝撃波法: 太平洋セメント×東北大学×早稲田大学が共同研究を実施していた模様であるが、現在の状況は不明

○ : 良好 or 問題なし ✕ : 問題があり改善の見通しも薄い
△ : 現在は問題があるが将来的に解消する可能性あり

	技術概要	技術評価			
		強度の劣化度	取り出し/処理コスト	大量処理可否	制約条件
物理分解法	1段階目  2段階目  ■ 低速破砕機と気流粉砕による2段階の粉砕処理により、樹脂とCFを分離	■ 言及なし	■ 熱分解法より低コストとの記載のみ	■ 1トン/日の処理能力(200トン/年の設備との記載*)から年間200日稼働で算出)	■ 取り出せるのはミルドファイバのみ
	 ■ 水中で数百kVの高電圧をパルス状に印加して衝撃波を発生させ、CFRPを破壊して樹脂とCFを分離	■ 言及なし	■ 言及なし	■ 言及なし	■ 取り出しCFの平均長は0.1~0.6mm ²

図 10 物理分解法の評価結果



図 11 物理分解法における各技術方式の主要プレイヤーと動向

以上、3 技術方式の評価結果をまとめると図 12 の通りで、有望技術としては「過熱水蒸気法」と「2 段階熱分解法」、「常圧溶解法」、「電解酸化法」の 4 つが抽出された。

○ : 良好 or 問題なし ✕ : 問題があり改善の見通しも薄い
△ : 現在は問題があるが将来的に解消する可能性あり

	技術概要	技術評価			
		強度の劣化度	取り出し/処理コスト	大量処理可否	制約条件
A 熱分解法	1段階熱分解法	○	✕	△	○
	過熱水蒸気法	○	○	○	△
	2段階熱分解法	△	△	○	△
B 化学分解法	常圧溶解法	○	△	△	△
	臨界流体法	○	—	✕	○
	半導体熱活性化法	✕	—	○	○
C 物理分解法	電解酸化法	○	△	—	△
	2段階粉砕処理法	—	—	△	△
	高電圧衝撃波法	—	—	—	△

図 12 CF 取り出し技術の評価結果まとめ

③ 中間基材製造技術

図 13 に本プロジェクトで対象とする中間基材の種類を示す。SMC、フェルト、ミルドファイバ等が対象となる中間基材となる。ここで、リサイクルされた CFRP 部品から取り出せる CF は不連続繊維もしくは粉末状に限られるため、プリプレグや織物等の連続繊維系の中間基材は製造できないことを前提としている。

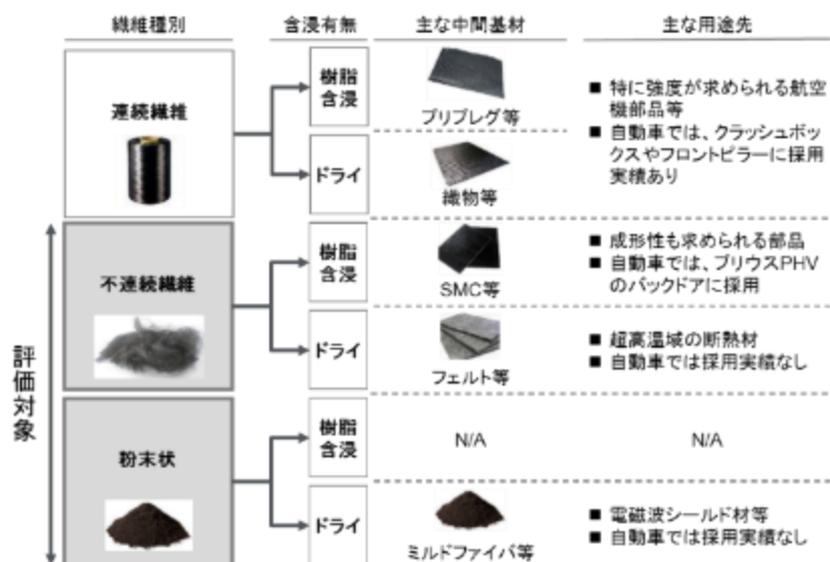


図 13 本プロジェクトで対象とする中間基材

また、中間基材の種類は部品成形法によって決まるため、現在有望な不連続繊維系成形法である「SMC/BMC 法」「RTM 法」「スタンピング成形法」「射出成形法」の 4 つに対応する中間基材を図 14 に示す。「SMC/BMC 法」と「RTM 法」は CFRP (熱硬化型) の成形法であり、「スタンピング成形法」と「射出成形法」は CFRT (熱可塑性) の成形法である。「SMC/BMC 法」には「SMC」、「RTM 法」には「フェルト」、「スタンピング成形法」には「スタンパブルシート」、「射出成形法」には「短繊維ペレット」がそれぞれ対応している。

- (ア) **SMC**: 熱硬化性樹脂に不連続 CF を分散させたシート状の樹脂含浸系中間基材
- (イ) **フェルト**: 不連続繊維の束をニードルパンチやカード機等で一体化し、マット/フェルト/不織布状にしたドライ系中間基材
- (ウ) **スタンパブルシート**: 熱可塑性樹脂に、不連続 CF を分散させたシート状の樹脂含浸系中間基材
- (エ) **短繊維ペレット**: 熱可塑性樹脂に、不連続 CF を分散させた粒状/俵状の樹脂含浸系中間基材

ここで、どの中間基材/成形法を選定するかは部品に求められる要求特性に依存するため、先にターゲットとする部品ならびにその要求特性を決定する必要があることに留意されたい。



図 14 不連続繊維系における4つの有望成形法に対応する中間基材

こうして特定された4つの中間基材をCFRP/CFRTPの廃材/端材から取り出したCFから製造する方法を検討すると、図15に示す「i. リサイクルCFから中間基材を製造」と「ii. 廃材から直接中間基材を製造」の2つのパターンとなった。



図 15 CFRP/CFRTPの廃材/端材から取り出したCFから中間基材を製造する方法

i. リサイクルCFから中間基材を製造

当該パターンのリサイクル対象はCFRPとCFRTPの両方であり、CF取り出し方法によっては表面処理が追加が必要となるため、コスト高になる可能性がある。

当該パターンにおいて想定される中間基材製造ステップを図16に示す。基本的には通常の中間基材製造と同様だが、表面処理/後工程のために開織/紡績/切断/分級等の形態加工が必要と想定される。表面処理についてはCF製造メーカーのノウハウ/ブラックボックスとなってい

るため、CF 製造メーカーと組んで検討する必要があると考えている。当該パターンではこのような前処理を経て、フェルト/SMC/スタンパブルシート/短繊維ペレットの 4 種類の間基材を製造することができる。

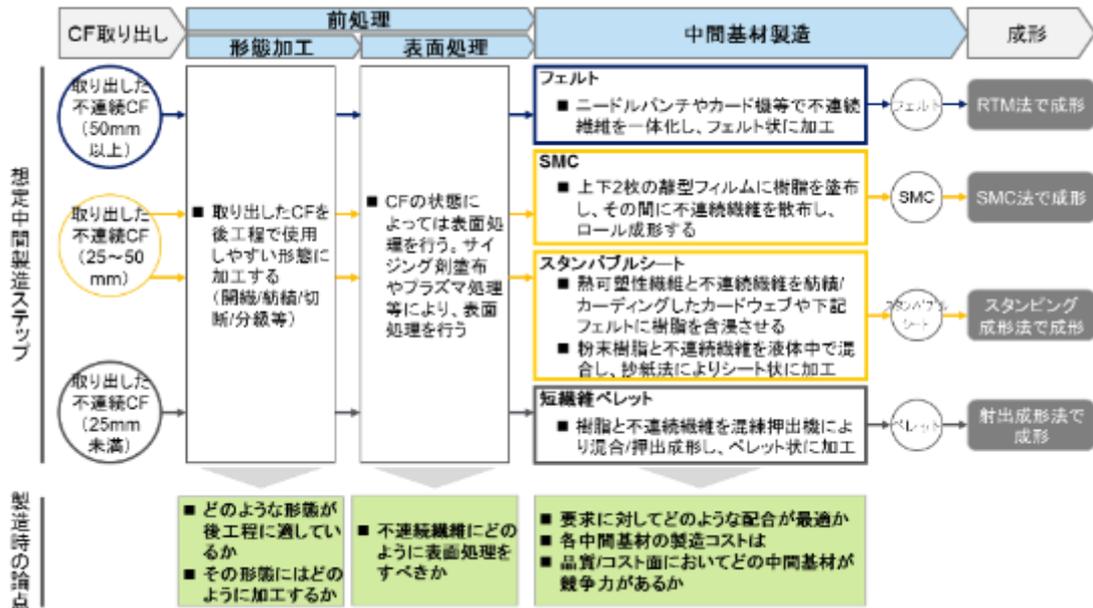


図 16 リサイクル CF から中間基材を製造するパターンにおいて想定される中間基材製造ステップ

ii. 廃材から直接中間基材を製造

当該パターンのリサイクル対象は CFRTP のみであり、端材/廃材から直接製造できるため低コストと想定されるが、樹脂の劣化度合いによっては低品質になってしまう可能性がある。

当該パターンにおいて想定される中間基材製造ステップを図 17 に示す。溶融して再利用するため表面処理は不要だが、樹脂の劣化度に応じて、新規に樹脂を追加する等の対応が必要と想定される。破碎/新規樹脂追加(樹脂の劣化度合いに応じて)を経て、スタンパブルシート/短繊維ペレットの 2 種類の間基材を製造することができる。

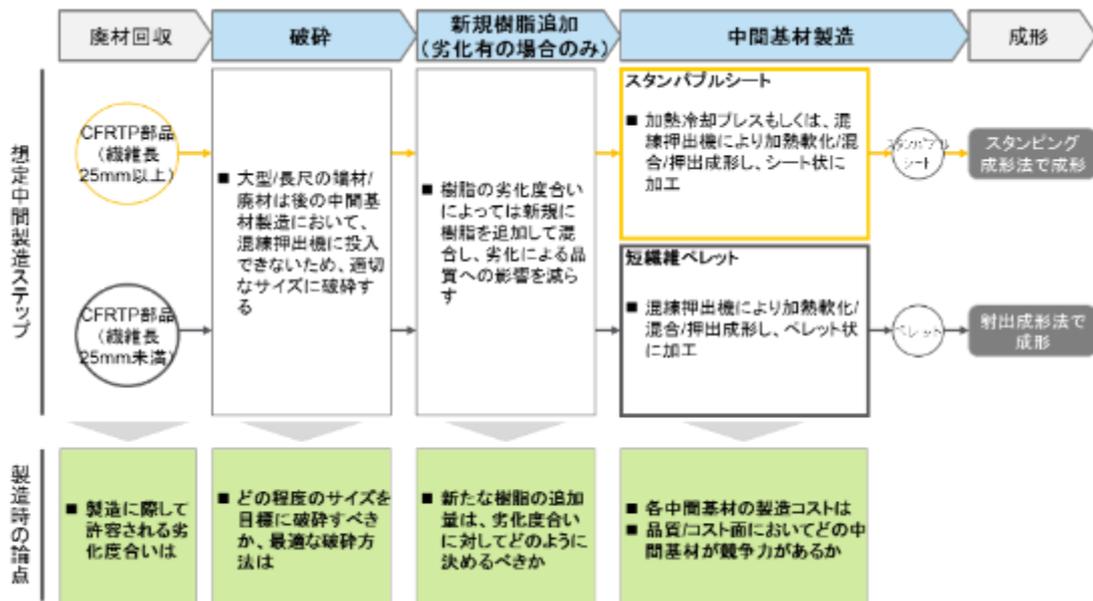


図 17 廃材から直接中間基材を製造するパターンにおいて想定される中間基材製造ステップ

④ 成形技術

成形技術については、部品の要求特性に応じて使い分けられるため、図 18 に各自動車部材に対して適正のある CFRP 成形技術を整理した。最も高強度を補強用途においてはプリプレグプレス成形法/RTM 法が適しており、構造部品用途では RTM 法/引抜成形法、衝撃吸収用途ではスタンピング成形法/射出成形法/引抜成形法、外板用途には RTM 法/SMC 法がそれぞれ適していると想定している。

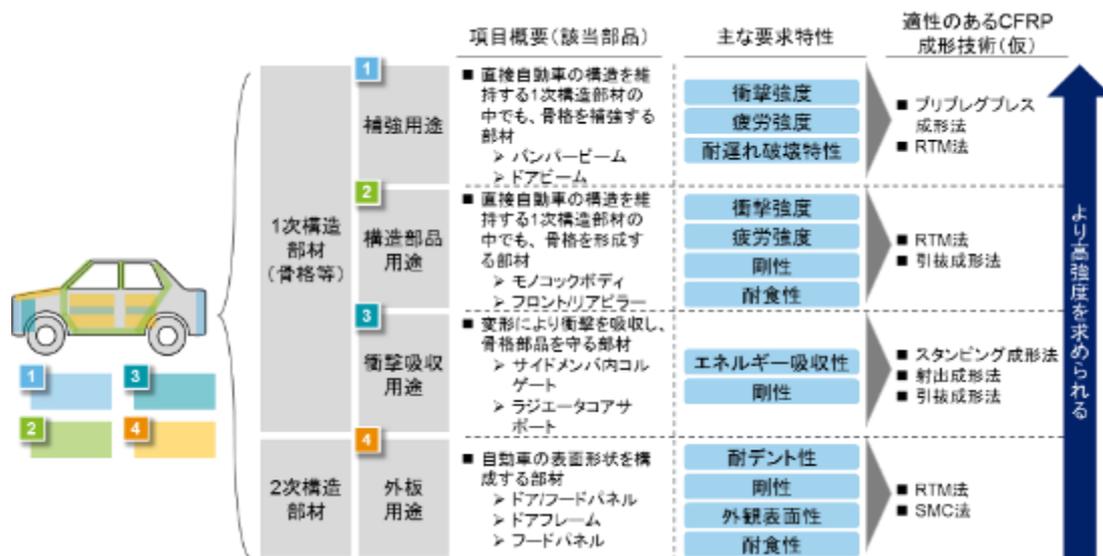


図 18 各自動車部材の概要/要求特性とそれらに対して適正のある CFRP 成形技術

また、先述した通り、リサイクルされた CFRP 部品から取り出せる CF は不連続繊維もしくは粉末状に限られるため、図 19 に整理した成形技術の中でも「SMC/BMC 法」「RTM 法」「スタンピング成形法」「射出成形法」「3D プリンター成形法」の 5 つが今回の検討対象となる。

	技術分類概要	代表的プレイヤー	対象技術名
加圧成形	面加圧成形 ■ プレス機や気体等で加圧して成形する方法	■ 東レ ■ 三菱レイオン ■ 豊田自動織機 ■ トヨタテクノクラフト ■ 東京大学 ■ 名古屋大学	■ プリプレグプレス成形法 ■ SMC ¹ /BMC ² 法 ■ RTM ³ 法 ■ スタンピング成形法 ■ オートクレープ成形法 ■ 肉圧成形法
	細径圧入成形 ■ スクリュー等で材料を金型/ダイに圧入して成形する方法	■ カルソニックカンセイ	■ 引抜成形法 ■ 射出成形法 ■ 3Dプリンター成形法
ワインディング成形	■ 樹脂を含浸した繊維束や、プリプレグ等のシートを芯材に巻き付けて成形する方法 ■ 芯材の形状(管状)の部品しか成形できない	■ 東レ	■ 湿式フィラメントワインディング成形法 ■ 乾式フィラメントワインディング成形法 ■ シートワインディング成形法
オープンモールド成形	■ 積極的な加圧をせずに繊維・樹脂を積層・塗布して成形する方法 ■ 成形形状の自由度は比較的高い	■ サカイ産業	■ ハンドレイアップ成形法 ■ スプレーアップ成形法

リサイクルCFを使ったCFRP/CFRTP成形においては、当該5つの工法での部品成形を検討する必要がある

図 19 CFRP の成形技術および不連続繊維に対して使用可能な成形技術

上記5つの成形法を「成形品強度」「タクトタイム」「多様な形状への対応」「その他制約条件」の4視点で評価した結果を図20に示す。「3Dプリンター成形法」は「成形品強度」と「タクトタイム」の2つにおいて「問題があり改善の見通しも薄い」という評価となったため除外され、「SMC/BMC法」「RTM法」「スタンピング成形法」「射出成形法」の4つが有望技術として抽出された。CFRP（熱硬化型）である「SMC/BMC法」「RTM法」は強度が高いがタクトタイムが長い、CFRTP（熱可塑性）である「スタンピング成形法」「射出成形法」は強度は低いがタクトタイムが短い、という特徴がある。

● : 非常に良好 ○ : 良好 or 問題なし
△ : 一部問題あり or 現在は問題があるが将来的に解消する可能性あり
✖ : 問題があり改善の見通しも薄い

	成形法	技術概要	技術評価			
			成形品強度	タクトタイム	多様な形状への対応	その他制約条件
加圧成形	SMC/BMC法	樹脂にCFを分散させたSMC/BMCを、プレス機で加圧/加熱/冷却して成形する方法	不連続繊維系の中では高強度 △	4~5分 △	大型部品成形向き 複雑形状が成形可能 ○	特になし ○
	RTM法	ドライ系CFシートを型内に配置し、樹脂を注入しながらプレス機で加圧/加熱/冷却して成形する方法	不連続繊維系の中では最も高強度 △	6~10分 △	大型部品成形向き 複雑形状が成形可能 ○	特になし ○
	スタンピング成形法	CFを分散した樹脂のシートを加熱/溶融した後、冷却しながらプレス成形する方法	SMCと射出成形の中間程度 △	1分以内 ○	大型部品成形向き 複雑形状が成形可能 △	表面に凹凸が出るため、意圧性は低い △
	射出成形法	ペレット(樹脂と短繊維を混ぜたもの)に射出圧を加えて金型に押し込み、冷却して成形する方法	成形時に短繊維が折れるため、強度は劣る △	40秒 ○	複雑形状向き 大型部品に不向き △	表面に凹凸が出るため、意圧性は低い △
細径圧入成形	3Dプリンター成形法	急速硬化熱可塑性樹脂とCFをノズル内で複合化しながら射出して成形する方法	成形法によっては強度が出せるが、基本的に強度は低め ✖	1mm秒と非常に遅い ✖	GADデータが必要だが、複雑成形向き ○	特になし ○

成形における有望技術と想定

※エヌ・ディー・エス(2015年)「CFRPの成形・加工・リサイクル技術最前線」

図20 不連続繊維系成形法の評価結果

また、参考として上記4技術の採用動向と採用拡大に向けての課題、課題解決へのアプローチを図21、図22に示す。CFRP系の成形技術ではタクトタイムの短縮が課題で、一方CFRTP系の成形技術では高強度化が課題となっており、それぞれ成形技術/中間基材の両面から解決のためのアプローチがなされている。

	自動車部材への採用ステップ(仮説)			採用拡大に向けての課題
	現状 (主に非量産車)	~2020年 (主に量産車)	2020年~ (主に量産車)	
SMC/BMC法	■高強度を求められない骨格/補強部材に採用 > リアピラー > バックドアフレーム	■ある程度強度が求められる部材と外板用途に採用 > 骨格系部材 > 外板系部材	■ある程度強度が求められる部材と外板用途で拡大 > 骨格系部材 > 外板系部材	成形品強度 ✖ タクトタイム ✖ 多様な形状への対応 ✖ ■ タクトタイムの短縮 > 成形/溶接のタクトタイム短縮 ■ 表面特性 > 樹脂の熱収縮で表面に凹凸が発生
RTM法	■不連続繊維系では採用例なし > N/A	■高強度が求められる単純形状の骨格部材に採用 > シャシー > アンダーカバー	■高強度が求められる単純形状の骨格部材で拡大 > シャシー > アンダーカバー	成形品強度 ✖ タクトタイム ✖ 多様な形状への対応 ✖ ■ タクトタイムの短縮 > 成形/溶接のタクトタイム短縮 ■ 表面特性 > 樹脂の熱収縮で表面に凹凸が発生
スタンピング成形法	■主に、変形して衝撃を吸収する部材に採用 > サイドメンバ内コルゲート	■強度が向上し、骨格系部材への採用が増える > 骨格系部材	■表面特性をハイブリッド材で補い、外板等採用拡大 > 骨格系部材 > 外板系部材	成形品強度 ✖ タクトタイム ✖ 多様な形状への対応 ✖ ■ 高強度化 ■ 表面特性 > 樹脂の熱収縮で表面に凹凸が発生
射出成形法	■主に、変形して衝撃を吸収する部材に採用 > ラジエータコアサポート	■強度は求められない電磁波遮蔽部材に採用 > バッテリーケース	■強度は求められない電磁波遮蔽部材で拡大 > バッテリーケース	成形品強度 ✖ タクトタイム ✖ 多様な形状への対応 ✖ ■ 高強度化 > 成形時に短繊維化してしまう ■ 表面特性 > 樹脂の熱収縮で表面に凹凸が発生

図21 有望4技術の採用動向と採用拡大に向けての課題

	採用拡大に向けた課題	課題解決アプローチ	
		成形法	中間基材
SMC/BMC法	<ul style="list-style-type: none"> ■ タクトタイムの短縮 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 部品成形/接合工程のいずれもタクトタイム短縮が求められる 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 接合の迅速化 ■ 急速加熱/冷却が可能なプレス機の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 急速硬化可能な熱硬化樹脂の開発
RTM法			
スタンピング成形法	<ul style="list-style-type: none"> ■ 高強度化 <ul style="list-style-type: none"> ➢ ヤング率を保ちつつ、強度を高める 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 強度向上とタクトタイム短縮を実現する成形法の研究(LFT-D) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 樹脂組成の変更 ■ 繊維含有率の変更
射出成形法	<ul style="list-style-type: none"> ■ 高強度化 <ul style="list-style-type: none"> ➢ ペレット内のCFをなるべくそのままの長さを保って成形 	<ul style="list-style-type: none"> ■ スクリュー形状の改善 ■ 金型形状/射出圧力/温度制御の最適化 	

図 22 有望 4 技術の採用拡大に向けての課題と解決アプローチ

⑤ 評価技術

リサイクル CF における論点は「品質のブレが大きい前提で品質保証体制をいかに構築するか」であり、図 23 に示すように、品質評価/保証は CF 取り出し/中間基材製造/部品成形の各工程で実施される。

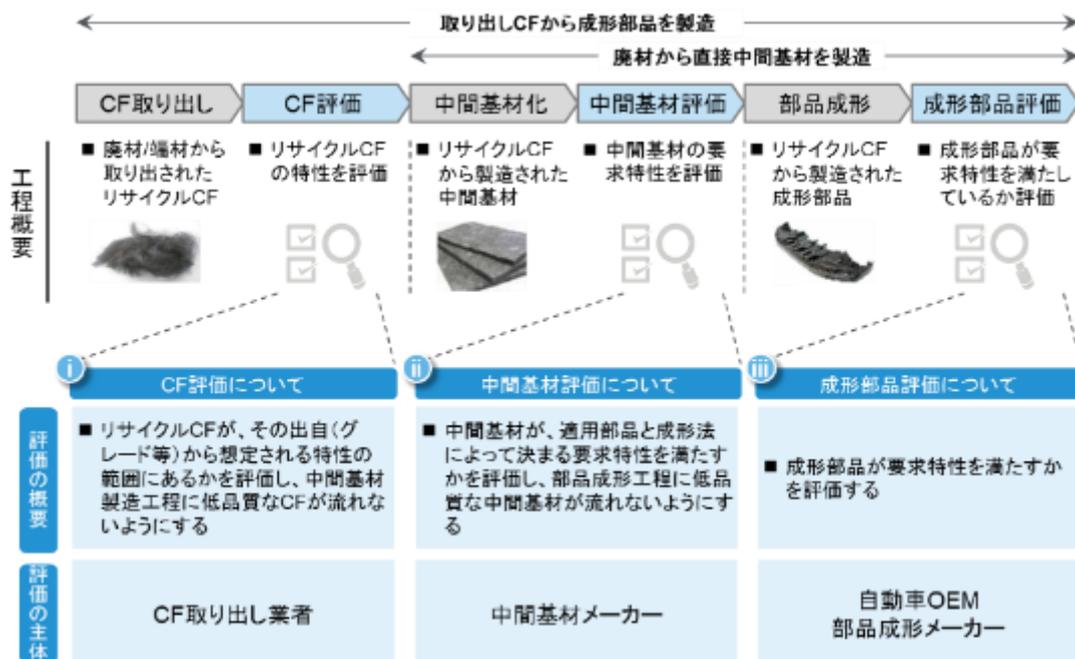


図 23 リサイクル CF における品質評価/保証のステップ

i. CF 取り出し工程での評価

CF 取り出し工程での評価では、リサイクル CF がその出自(グレード等)から想定される特性の範囲にあるかを評価し、中間基材製造工程に低品質な CF が流れないようにすることを目的としている。

当該工程における評価項目を図 24 に示す。一般的な CF 製造時の評価項目と比べると、リサイクル CF の評価では「繊維長分布」が追加され、「サイジング剤付着量」は「樹脂残留量」に変更されると想定している。

一般的なCF製造時の評価項目			リサイクルCFの評価項目		
評価項目	概要	評価方法	評価項目	概要	評価方法
引張強度/歪み/伸び/弾性率	■ 所定の引張強度/歪み/伸び/弾性率になっているかを評価	■ 引張試験	引張強度/歪み/伸び/弾性率	■ 引張強度/歪み/伸び/弾性率のバーजन比率を評価	■ 引張試験
せん断強度/歪み	■ 所定のせん断強度/歪みになっているかを評価	■ マイクロトモグラフィ法/フラグメンテーション法等	せん断強度/歪み	■ せん断強度/歪みのバーजन比率を評価	■ マイクロトモグラフィ法/フラグメンテーション法等
織度/比重	■ 所定の太さになっているか/最適な焼成が行われたかを評価	■ 重量測定/アルキメデス法等	織度/比重	■ CF太さのバーजन比率を評価	■ 重量測定/アルキメデス法等
捻れ	■ 切断等に繋がる捻れが発生していないかを評価	■ 目視点検等	捻れ	■ 切断等に繋がる捻れが発生していないかを評価	■ 目視点検等
ゴミ/毛羽立ち有無	■ CF表面にゴミや毛羽立ちがないかを評価	■ 目視点検	ゴミ/毛羽立ち有無	■ CF表面にゴミや毛羽立ちがないかを評価	■ 目視点検
サイジング剤付着量	■ 所定のサイジング剤付着量になっているかを評価	■ 示差熱分析法	残留樹脂量	■ CF表面に残留した樹脂の量を測定	■ 示差熱天秤法
電気抵抗	■ 所定の電気抵抗になっているかを評価	■ 4端子法等	電気抵抗	■ 所定の電気抵抗になっているかを評価	■ 4端子法等
比表面積	■ 所定の比表面積になっているかを評価	■ 気体吸着法等	比表面積	■ 所定の比表面積になっているかを評価	■ 気体吸着法等
			繊維長分布	■ リサイクルCFの長さの分布を評価	■ 顕微鏡による長さ測定

図 24 CF 取り出し工程での評価項目

ii. 中間基材製造工程での評価

中間基材製造工程での評価では、中間基材が適用部品と成形法によって決まる要求特性を満たすかを評価し、部品成形工程に低品質な中間基材が流れないようにすることを目的としている。

当該工程における評価項目を図 25 に示す。リサイクル CF での評価項目は、バーजन CF を使用した一般的な中間基材製造における評価項目と変わらないと想定しているが、中でも「繊維長分布」「繊維含有量」「樹脂の分子量」が品質を左右する重要な評価項目となっている。

バージンCF及びリサイクルCFを使用した中間基材製造時の評価項目		
評価項目	概要	評価方法
特に重要な 評価項目	繊維長分布	■ 中間基材中のCF長さの分布を評価 ■ 樹脂を除去し、CF長さを顕微鏡により測定
	繊維含有率 (Vf)	■ 中間基材中のCFの体積含有率を評価 ■ 樹脂を除去し、CFの体積を測定し算出
	樹脂の分子量	■ 樹脂の分子量を測定し、樹脂の劣化度合いを評価 ■ ゲル透過クロマトグラフィー (GPC) 等で測定
繊維分布	■ 中間基材内でCFが均一に分布しているかを評価 ■ 樹脂を除去し、CFの体積を測定し算出	
引張強度/歪み/伸び/弾性率	■ 所定の引張強度/歪み/伸び/弾性率になっているかを評価 ■ 引張試験で測定	
曲げ強度/歪み/曲げ弾性率	■ 所定の曲げ強度/歪み/弾性率になっているかを評価 ■ 3点曲げ試験等で測定	
せん断強度/歪み	■ 所定のせん断強度/歪みになっているかを評価 ■ せん断試験で測定	
圧縮強度/歪み	■ 所定の圧縮強度/歪みになっているかを評価 ■ 圧縮試験で測定	
粘度	■ 成形時の流動性の指標としての樹脂の粘度 ■ レオメータ等で測定	

図 25 中間基材製造工程での評価項目

iii. 部品成形工程での評価

部品成形工程での評価では、最終的な成形部品が要求特性を満たすかを評価することを目的としている。

当該工程における評価項目を図 26 に示す。リサイクル CF での評価項目は、バージン CF を使用した一般的な部品成形における評価項目と変わらないと想定している。

バージンCF及びリサイクルCFを使用した部品成形時の評価項目		
評価項目	概要	評価方法
静的 評価	引張強度/歪み/伸び/弾性率	■ 所定の引張強度/歪み/伸び/弾性率になっているかを評価 (有孔/高温高湿での評価も想定) ■ 引張試験で測定
	曲げ強度/歪み/曲げ弾性率	■ 所定の曲げ強度/歪み/弾性率になっているかを評価 (有孔/高温高湿での評価も想定) ■ 3点曲げ試験等で測定
	せん断強度/歪み	■ 所定のせん断強度/歪みになっているかを評価 (切欠きを導入した状態、高温高湿での評価も想定) ■ せん断試験で測定
	圧縮強度/歪み	■ 所定の圧縮強度/歪みになっているかを評価 (有孔/高温高湿での評価も想定) ■ 圧縮試験で測定
	衝撃強度	■ 所定の衝撃強度になっているかを評価 ■ シャルピー衝撃試験、落錘試験等で測定
	傷/空孔/異物有無	■ 成形品の表面/内部に傷/空孔/異物等がないかを評価 ■ 超音波探傷試験やX線透過試験等で評価
	表面/体積抵抗	■ 所定の表面抵抗値/体積抵抗率になっているかを評価 ■ 超音波探傷試験やX線透過試験等で評価
動的 評価	引張/曲げクリープ強度	■ 所定の引張/曲げクリープ強度になっているかを評価 (有孔/高温高湿での評価も想定) ■ 引張/曲げクリープ試験で測定
	繰返し引張/曲げ強度	■ 所定の繰返し引張/曲げ強度になっているかを評価 (有孔/高温高湿での評価も想定) ■ 繰返し引張/曲げ試験で測定

図 26 部品成形工程での評価項目

B) 公的研究機関の CFRP リサイクル研究整理と未検証領域の抽出

前項の『A. CFRP リサイクル技術の洗い出しと整理』と並行し、実証実験を行う上で既に行われている実験との“被り”を防ぐために、公的機関(文部科学省/経済産業省/環境省/国土交通省の4省)のCFRP リサイクル先行研究を調査したところ、全58件が抽出され、技術分類と実用化目処で整理した結果を図27に示す。58件中、リサイクルCFに関する研究は12件のみであった。また、中間基材製造技術と加工技術に関する研究、特に既に実用化されている技術の改良に関する研究が多くの割合を占めていることが分かった。

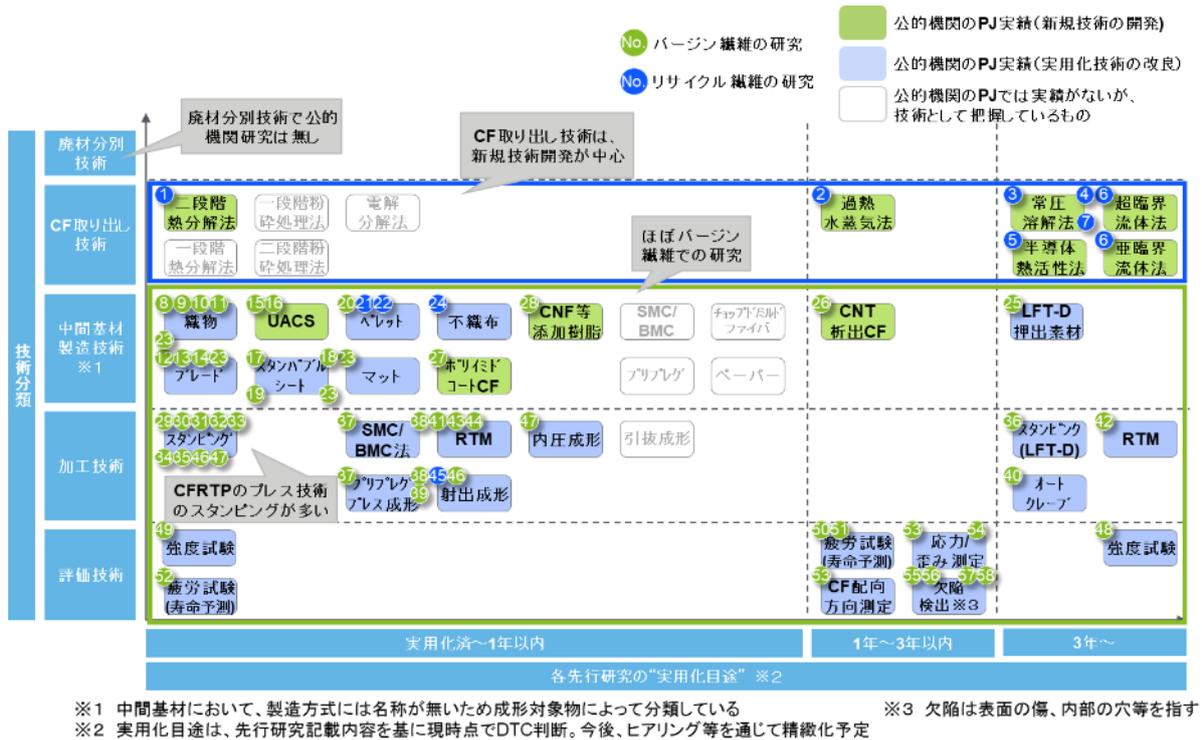


図 27 CFRP リサイクル先行研究の調査結果

また、以下に概略を記した各技術分類における先行研究実施の方向性を図28にまとめた。

- 廃材分別技術: 先行研究なし
- CF取り出し技術: 取り出したCFの強度/耐久性についての研究が大部分を占め、コストやタクトタイムに関する言及は僅少であった。また、CF取り出し技術を横並び比較した研究は皆無で、強度等の測定方法も研究ごとにバラバラであった
- 中間基材製造技術: 中間基材の強度/耐久性についての研究が大部分を占め、コストやタクトタイムに関する言及は僅少であった
- 加工技術: 自動車向けの研究が大半であり、自動車へのCFRP/CFRTP採用におけるボトルネックと言われる、タクトタイム短縮に関する研究が大部分を占める
- 評価技術: 非破壊による評価技術の研究が目立った

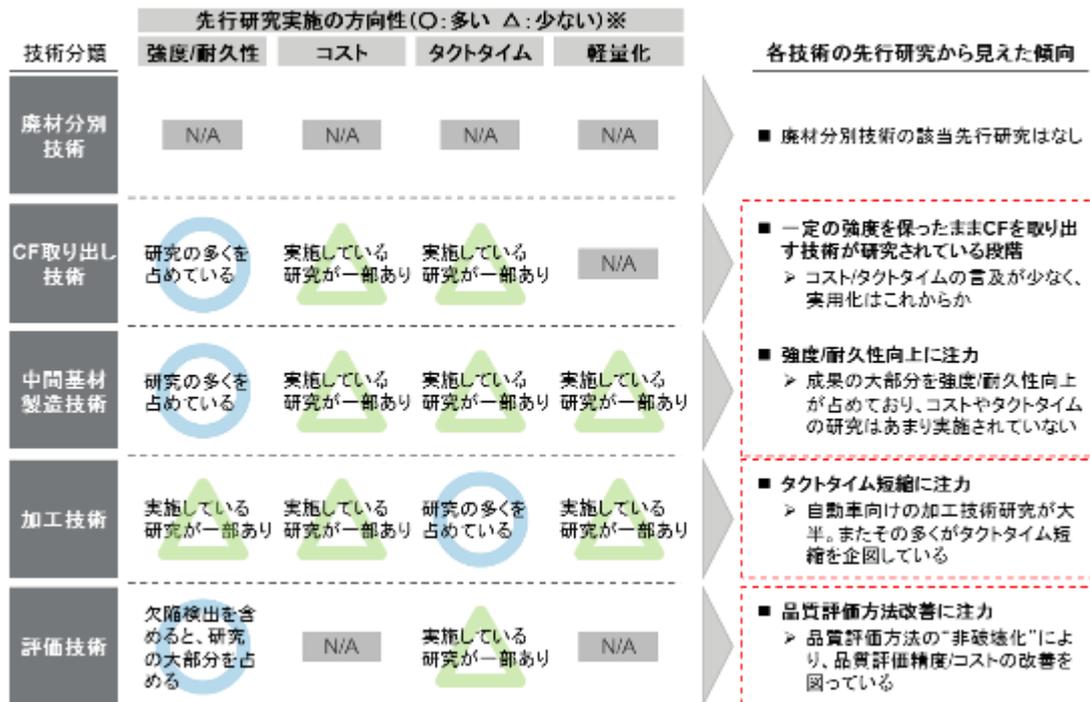


図 28 各技術分類における先行研究実施の方向性

本調査によって、公的機関による CF 取り出し技術に関する研究はまだ限定的であり、特にコスト面で課題を抱えていることが分かった。更に、種々の取り出し技術を横並び比較した研究はないため、本プロジェクトで複数の取り出し技術を品質やコスト面において、CF 単体・中間基材・成形品の状態にてそれぞれ同一条件下で比較することには大きな意義があると考えられる。

C) Car to Car リサイクルチェーンの構築

前述の技術分析の結果、リサイクルチェーンは『何を使うか(廃材回収)』および『どう使うか(最終目的物)』に依存することが判明した。

今回、『どう使うか(最終目的物)』は、現在、CFRTP または CFRP の採用実績のある自動車部品を前提としたため、『何を使うか(廃材回収)』を基軸にチェーン構築を検討した結果、図 29、図 30 に示すように、「フェーズ 1: 成形時端材を活用したリサイクルチェーン」と「フェーズ 2: 使用済み自動車から回収した廃材を活用した Car to Car チェーン」の 2 フェーズでリサイクルチェーンを構築することを検討した。

- フェーズ 1: 成形時端材を活用したリサイクルチェーン: 成形時端材を活用した CFRP リサイクルの基礎的検証フェーズであり、グレード等の出自が容易に特定でき、品質も安定している成形時端材を原料とし、対象成形品も絞った形で試験的に運用する
- フェーズ 2: 使用済み自動車から回収した廃材を活用した Car to Car チェーン: 使用済み自動車/修理部品から回収した廃材を組み込んで再利用量を最大化した、本格量産フェーズで、品質のブレが大きい廃材を再利用する際にも、量産車要求を満たす選別回収/製造/品質保証体制を構築/運用する

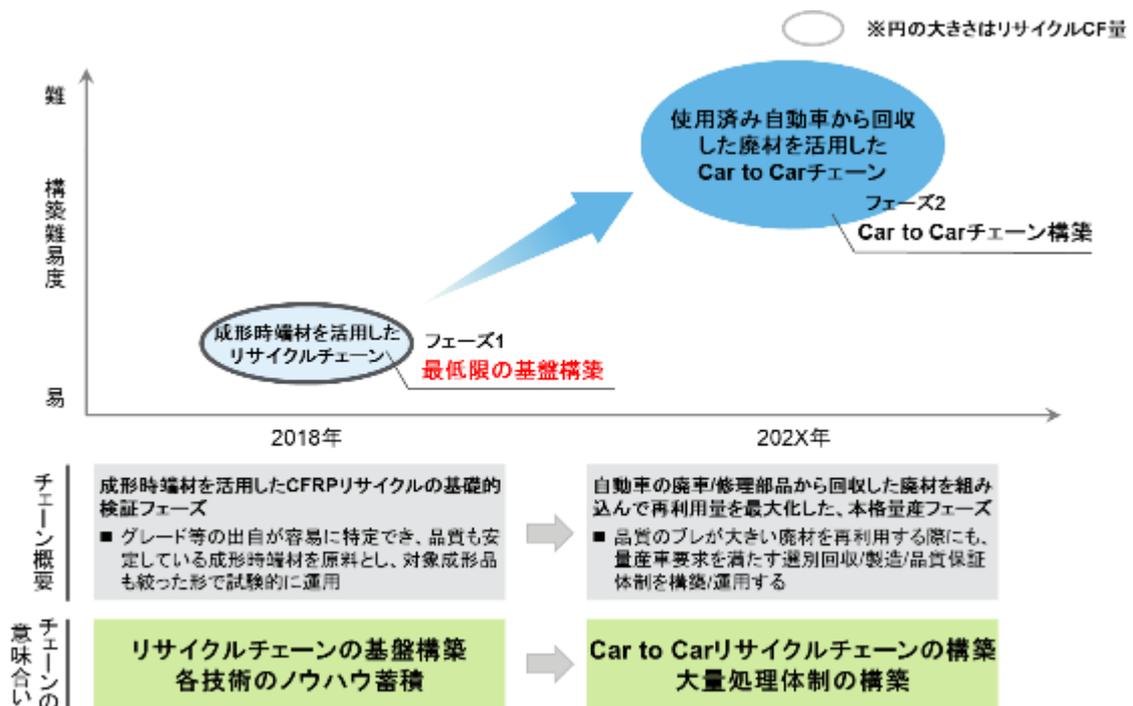


図 29 リサイクルチェーン構築のイメージ

		フェーズ1 成形時端材を活用した リサイクルチェーン	フェーズ2 使用済み自動車から回収した廃材 を活用したCar to Carチェーン
チェーンの特徴	取扱量	取扱量は限定的 ■ 対象廃材は航空機の端材がメインだが、自動車部品製造からの端材発生も見込む ■ 量は限定的なものの安定供給が望める	取扱量が最大化 ■ 航空機/自動車部品成形工程の端材に、自動車の廃車/修理部品からの廃材が加わる
	成形品	品質/コスト共に量産率要求とのGAP有 ■ 原料品質は高いが、CF取り出し/中間基材製造/成形技術の高度化が途上と想定	一部を除き量産率要求とのGAP解消 ■ 廃材を再利用した成形品は歩留まりに課題が残る可能性があるが、その他はGAP解消
	対象範囲	■ (廃材回収)航空機端材(CFRPのみの想定) ■ (成形)自動車用CFRTP/CFRP採用実績部品	■ (廃材回収)航空機/自動車部品成形工程の端材、自動車の廃車/修理部品からの廃材(CFRP/CFRTP両方) ■ (成形)量産車用途の成形品
リサイクル材料	中間基材端材(ドライ)	-	○
	中間基材端材(含浸)	○ (CFRP/CFRTP)	○ (CFRP/CFRTP)
	自動車部品廃材	-	○ (CFRP/CFRTP)

図 30 リサイクルチェーン構築における 2 つのフェーズ概要

フェーズ 1 でのリサイクルチェーンのパターンは図 31 に示すように 3 つが考えられるが、検討の結果、まずは Step1 として航空機部品及び自動車部品成形時に発生する CFRP 端材を CFRTP 部品にリサイクルする、「B. CFRP to CFRTP チェーン」に注力することとした。当該パターンでは航空機部品メーカー/自動車部品メーカーから CFRP 端材を提供してもらい、そこから CF を取り出し、押出機メーカーの協力の下、ペレット化し、最終的に部品成形メーカーにて射出成形法で部品を成形することを想定している。そして Step1 の後、「A. CFRP to CFRP チェーン」を Step2 として検討する予定である。



図 31 フェーズ 1 におけるリサイクルチェーンのパターン

また、図 32 にフェーズ 1 における各工程の実施項目とチャレンジの概要、図 33 にフェーズ 1 におけるチャレンジ詳細を示す。本フェーズにおいては、チェーンの基盤を構築するため“見極め”と“手法確立/スキーム構築”を目的としたチャレンジが中心となる。

	廃材回収	CF取り出し	中間基材製造	部品成形
工程概要	<ul style="list-style-type: none"> 航空機部品メーカー/自動車部品メーカーの製造工程で出る端材を回収する(端材のグレードは1種類に限定する) 	<ul style="list-style-type: none"> 樹脂含浸済みの端材からCFを取り出す CFを抜き取り、サンプリング評価を行う 	<ul style="list-style-type: none"> リサイクルCFから中間基材を製造する 製造した中間基材を抜き取り、サンプリング評価を行う 	<ul style="list-style-type: none"> リサイクルCFから製造した中間基材から所望の部品を成形する 製造した成形部品を抜き取り、サンプリング評価を行う
成立に向けたチャレンジ	<ol style="list-style-type: none"> 航空機/自動車部品メーカーとの、グレード情報開示を前提とした端材回収のスキーム構築 	<ol style="list-style-type: none"> 品質面/コスト面で最適なCF取り出し技術の見極め 取り出しから品質評価/保証までのスキーム構築 	<ol style="list-style-type: none"> リサイクルCFからの中間基材製造方法の確立 中間基材の品質評価/保証体制の構築 	<ol style="list-style-type: none"> 所望の部品を成形するための最適な成形法の確立 成形部品の品質評価/保証体制の構築
協業プレイヤー	航空機部品メーカー 自動車部品メーカー	CF取り出し企業	中間基材メーカー	自動車部品メーカー

図 32 フェーズ1における各工程の実施項目とチャレンジの概要

	チャレンジの内容
廃材回収 <ol style="list-style-type: none"> 航空機/自動車部品メーカーとの、グレード情報開示を前提とした端材回収のスキーム構築 	<ul style="list-style-type: none"> グレード情報を開示の上、安定的に一定量を供給するという販売契約を航空機/自動車部品メーカーと締結する
CF取り出し <ol style="list-style-type: none"> 品質面/コスト面で最適なCF取り出し技術の見極め 取り出しから品質評価/保証までのスキーム構築 	<ul style="list-style-type: none"> 2段階熱分解法/過熱水蒸気法/常圧溶解法の、一定条件下での実験を複数回行い、品質面/コスト面で優れたCF取り出し技術と処理条件を見極める CF取り出し/品質評価/選別の一連の工程を、どの企業が担当し、どのように品質を保証するのかを検討/決定する
中間基材製造 <ol style="list-style-type: none"> リサイクルCFからの中間基材製造方法の確立 確実かつ効率的な品質評価/保証体制の構築 	<ul style="list-style-type: none"> リサイクルCF(不連続/表面処理無し)から、中間基材化する最適な工法(どのような樹脂に改質/調整するか等)を検討/実験し、製造法を確立する 中間基材製造における、確実かつ効率的な評価項目を特定した上、品質評価/保証体制を構築する(誰がどのように行うか決める)
部品成形 <ol style="list-style-type: none"> 所望の部品を成形するための最適な成形法の確立 確実かつ効率的な品質評価/保証体制の構築 	<ul style="list-style-type: none"> CFRTP採用実績部品を成形するための最適な成形方法/成型条件を実証実験を通じて確立する 部品成形における、確実かつ効率的な評価項目を特定した上、品質評価/保証体制を構築する(誰がどのように行うか決める)

図 33 フェーズ1におけるチャレンジ詳細

次いで、図 34 にフェーズ 2 における各工程の実施項目とチャレンジの概要、図 35 にフェーズ 2 におけるチャレンジ詳細を示す。本フェーズは「本格量産フェーズ」との位置付けであり、“出自が明確な状態で廃材を回収すること”と、“品質のブレが大きい前提での品質保証体制の構築”が主なチャレンジとなる。

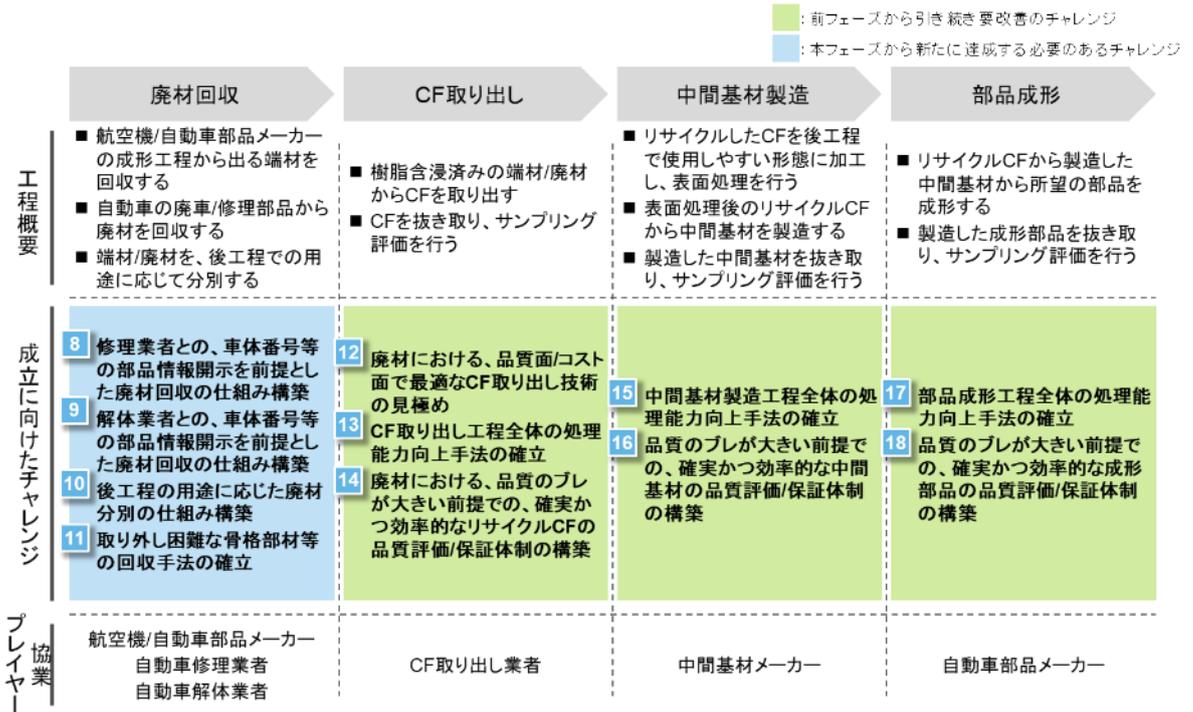


図 34 フェーズ 2 における各工程の実施項目とチャレンジの概要

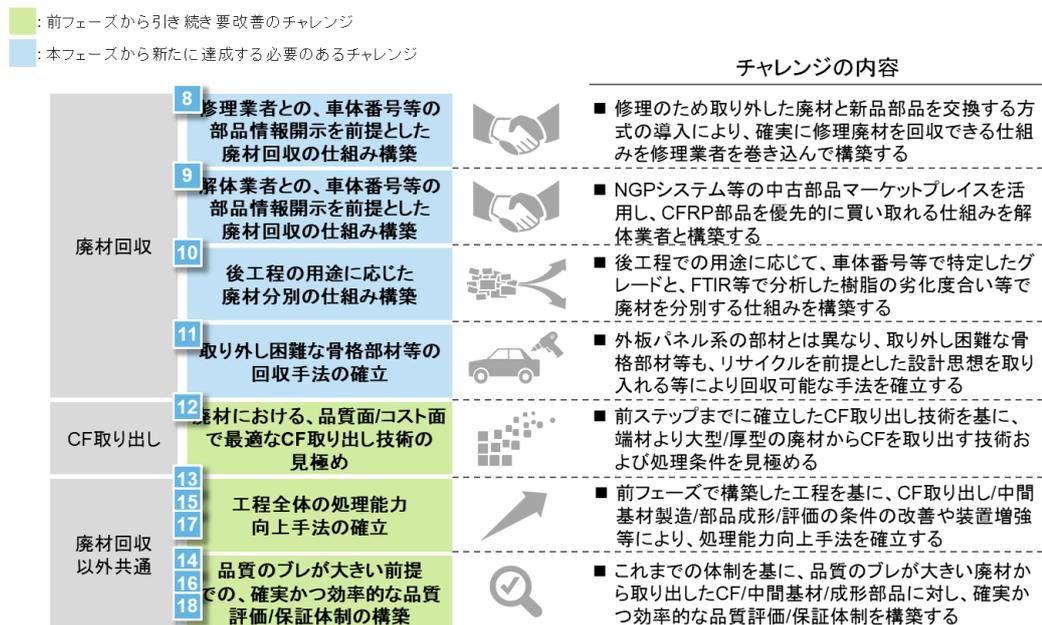


図 35 フェーズ 2 におけるチャレンジ詳細

D) 実証実験の初期案作成

前項にて検討した通り、まずは「フェーズ 1: 成形時端材を活用したリサイクルチェーン」構築に向けた実証実験を行う。実証実験のゴールは図 36 に示すように、「1. 出目がわかる端材の回収スキーム構築」、「2. 品質面/コスト面で最適な CF 取り出し技術の見極め」、「3. リサイクル CF の最適中間基材の選定と製造方法の確立」、「4. 目的部品の最適な成形技術の確立」、「5. 現実的かつ有効な品質評価/保証体制の構築」の 5 つのテーマを検証することであり、図 37 に示す時系列に沿って 3~5 年間をかけて CFRP リサイクルチェーンの基盤を構築する予定である。初年度は、「2. 品質面/コスト面で最適な CF 取り出し技術の見極め」において、最適な CF 取り出し技術と取り出し条件の見極め、「3. リサイクル CF の最適中間基材の選定と製造方法の確立」において、最適なマトリックス樹脂の見極めを目指す。

「4. 目的部品の最適な成形技術の確立」については、「3. リサイクル CF の最適中間基材の選定と製造方法の確立」で最適な中間基材とその製造方法が確立を待ってからの開始となるため、並行して進めることができないこともあって、実証実験の期間は 3~5 年間と比較的長めに見込んでいる。

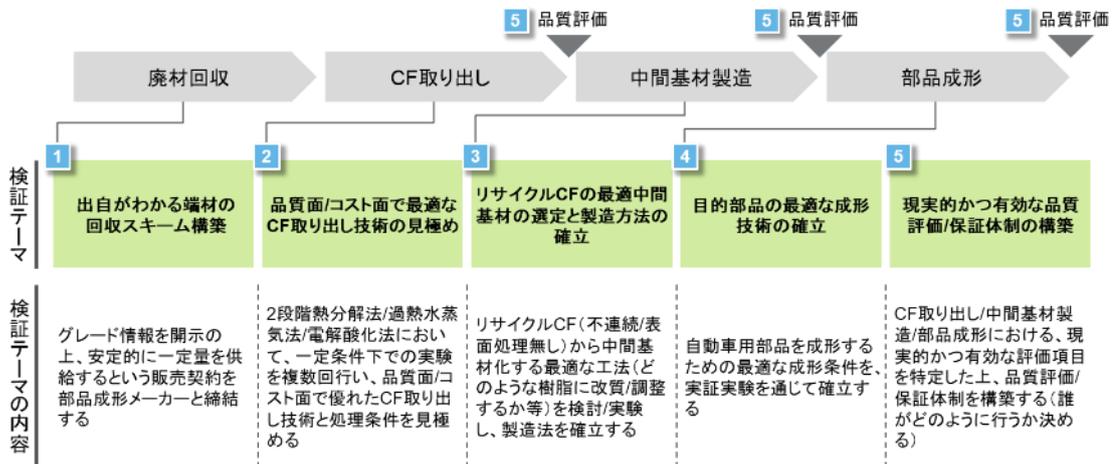


図 36 実証実験における検証テーマ

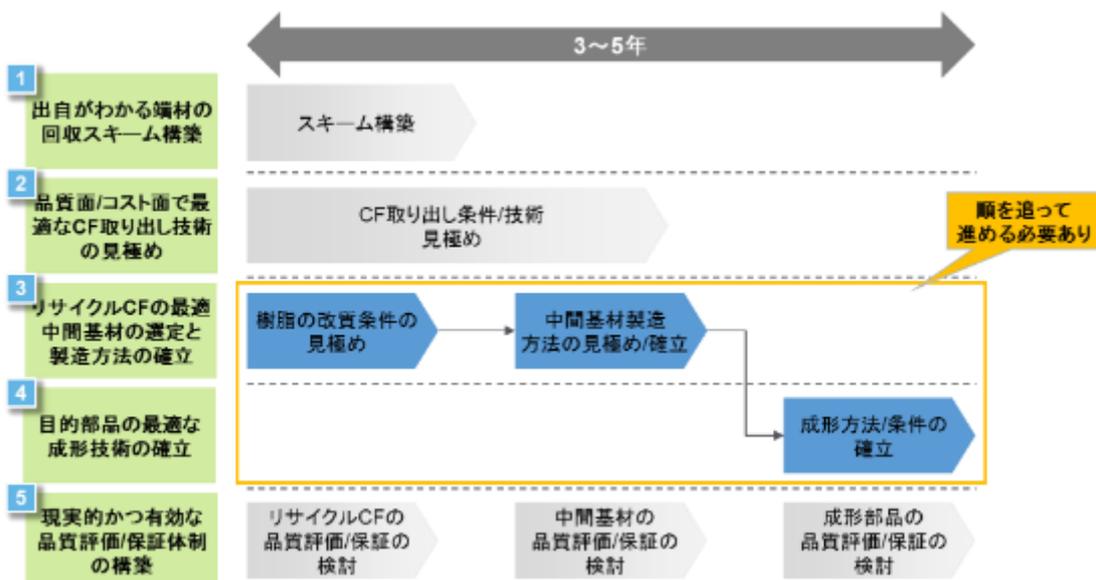


図 37 実証実験のスケジュール概要

E) コンソーシアムの構築

本プロジェクトのコンソーシアム体制は以下の通りとした。

- CF 取り出し工程: A 社(アドバイザーとして F 氏)、B 社(アドバイザーとして公的機関 G)、C 社
- 中間基材製造工程: D 社(試作委託のみ)

F) 実証実験計画策定(内容精査)

今回構築したコンソーシアム体制にて、『D. 実証実験の初期案作成』に基づき、まずは CF 取り出し工程に焦点を当てる。リサイクル源には、自動車用として採用実績のある CFRP の試作板を使用し、図 38 に示すように CF 単体、テストピース、実部品の 3 段階での評価を経て、3 つの取り出し技術(2 段階熱分解、過熱水蒸気法、電解酸化法)を同一条件にて比較する。本報告書では 1~2 年目に実施する予定である「取り出した CF 単体での評価」と「テストピースでの評価」について言及する。

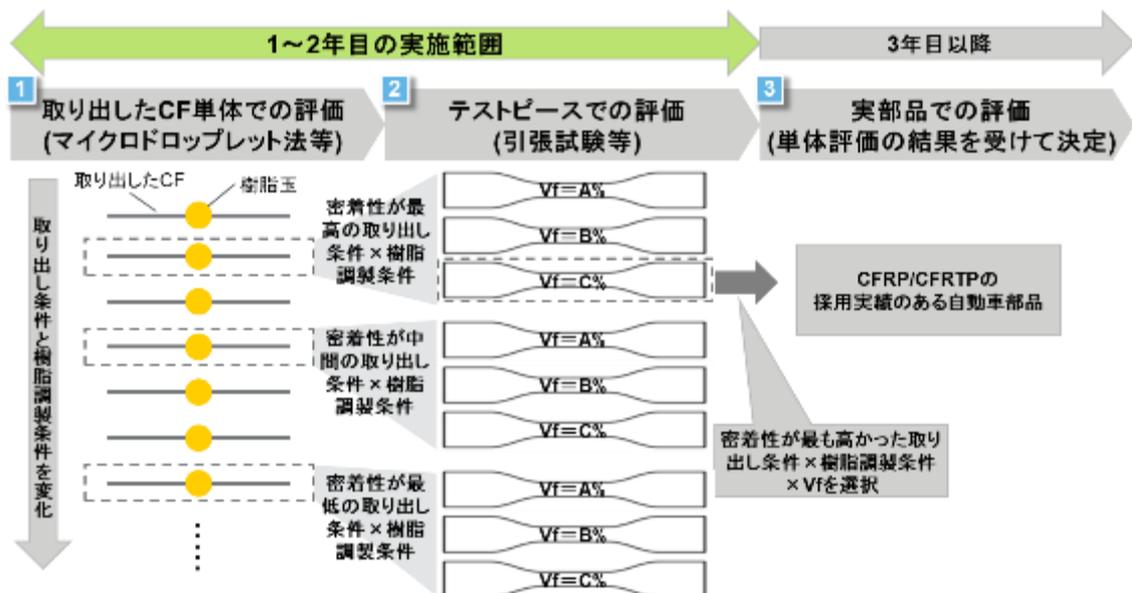


図 38 実証実験の進め方概念図

フェーズ 1 の 1~2 年目に実施する予定である「取り出した CF 単体での評価」と「テストピースでの評価」の内容と意味合いについて図 39 に示し、具体的な評価条件等を図 40 に示す。「取り出した CF 単体での評価」では引張試験/マイクロドロプレット試験/XPS による表面分析を行うことで、比較を行う。3 つの取り出し技術において、取り出し条件を 3 条件、樹脂調製条件では添加剤濃度を変化させて 3 条件振る予定であり、ベンチマークとしてバージン CF に対しても同様の評価を行う。「テストピースでの評価」では引張試験/曲げ試験/衝撃試験/CF 長分布測定を行うことで、それぞれ各種強度/テストピース内の CF 長分布を評価し、テストピースにしても CF 単体と同じ傾向かを確認すると共に、最適な Vf を見極める。3 つの取り出し技術において、CF 単体での評価において樹脂との密着性が最高/中間/最低だった取り出し条件と樹脂調製条件の組み合わせ(計 3 条件)に対し、Vf を 3 条件で評価を行う。本評価においても、ベンチマークとしてバージン CF に対しても同様の評価を行う。

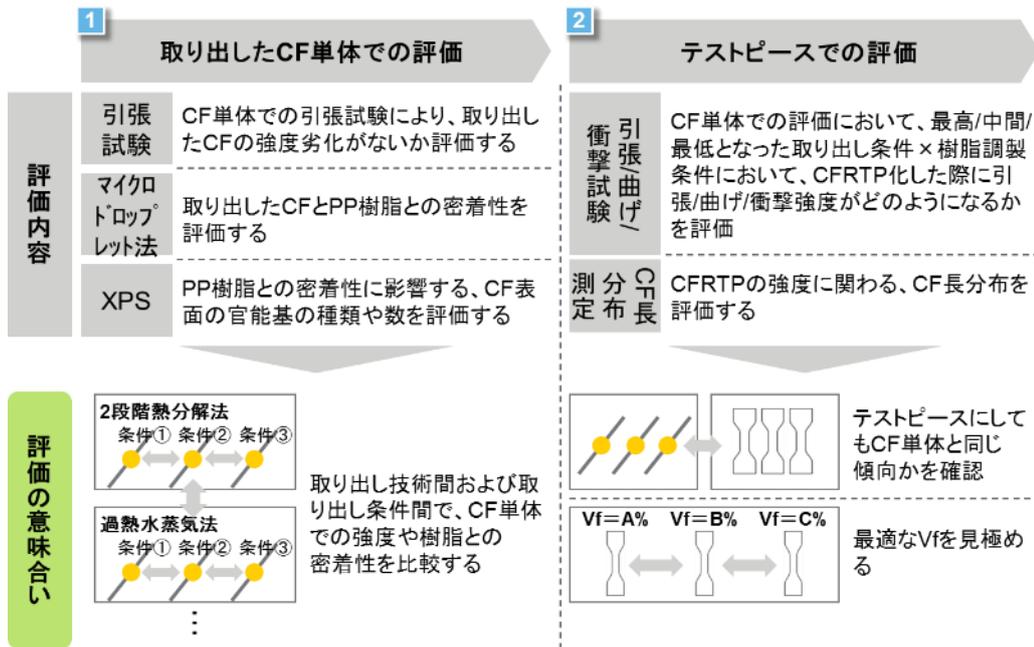
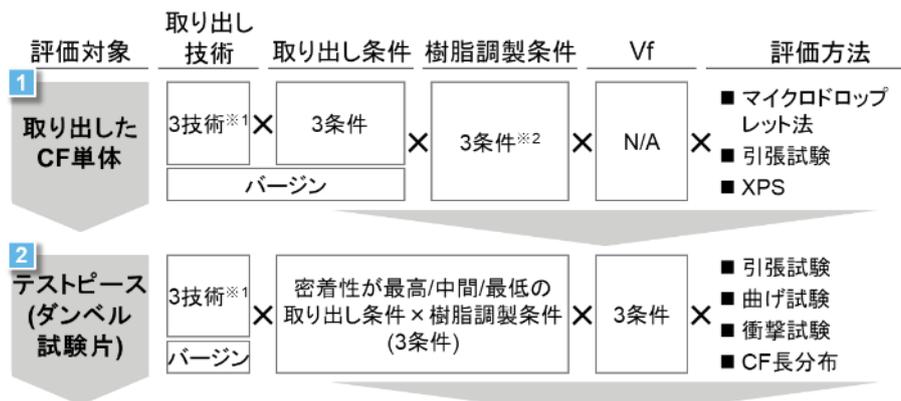


図 39 「取り出した CF 単体での評価」と「テストピースでの評価」の内容と意味合い



※1:2段階熱分解法、過熱水蒸気法、電解酸化法の3つ

図 40 「取り出した CF 単体での評価」と「テストピースでの評価」の具体的な評価条件等

評価の前提となる取り出し条件/樹脂調整条件/Vfについて図 41 に示し、各評価における目標値案を図 42 に示す。ここで、XPS と CF 長分布では目標値は設定しない。また、本実証実験における評価は、公平を期すために、第三者機関にて実施する。

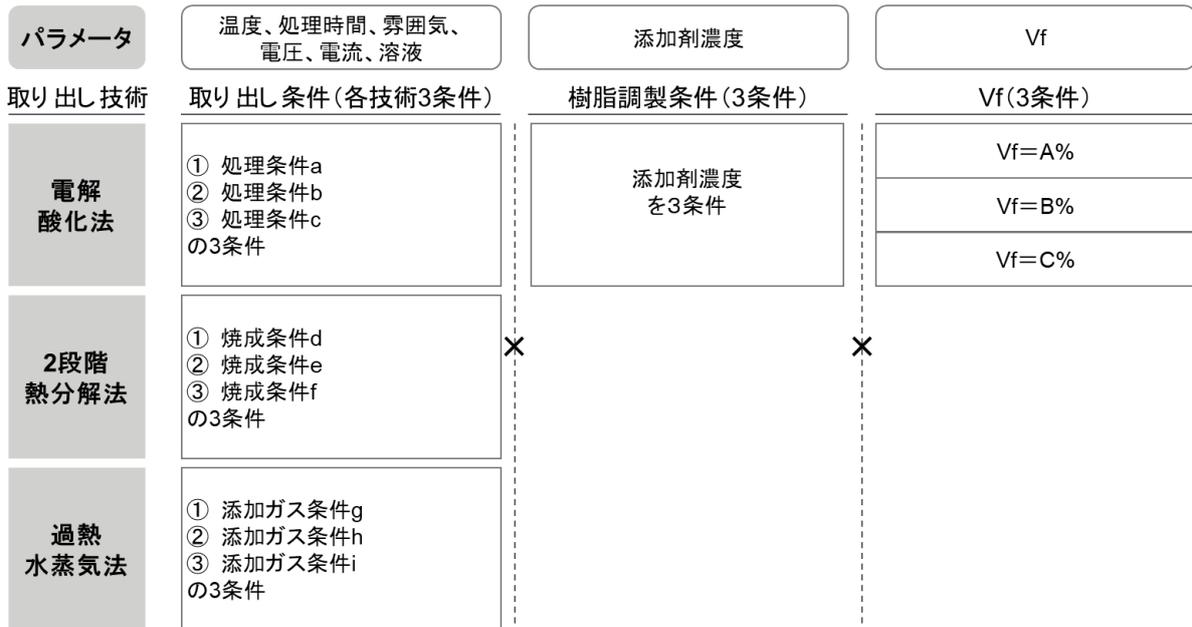
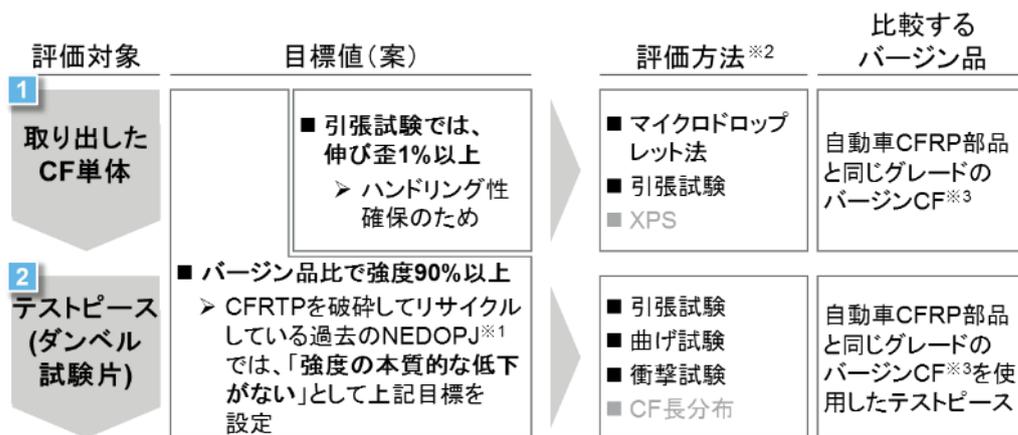


図 41 評価の前提となる取り出し条件/樹脂調整条件/Vf



※1: サステイナブルハイパーコンポジット技術の開発(2008-2012) ※2: グレー字の評価は目標値を設定せず ※3: 通常購入できるサイジング処理済品

図 42 「取り出したCF単体での評価」と「テストピースでの評価」における目標値案

初年度は9ヶ月(2018年7月~2019年3月)の予定のため、まずは図43、44のスケジュールにてCF単体での評価のみを実施する予定である。(2段階熱分解法と電解酸化法については先んじてテストピースでの評価も行う予定)

ここで、2018年の4~6月は準備期間として、各種契約締結やCFRP試作板の作成/切断といった実証実験を始めるための準備を行う。



図 43 初年度の2段階熱分解法と電解酸化法の実験スケジュール



図 44 初年度の過熱水蒸気法の実験スケジュール

3. 総括

<2017 年度の成果と課題>

現在、使用済み自動車における CFRP 廃材は量が限定的なこともあり、埋め立て処理がなされている。しかし、CFRP は軽量/高強度という特性により、2020 年代から自動車での採用が本格的に拡大する見込みであるが、リサイクルチェーンの確立なしには普及させることができない。現在、CFRP のリサイクルに関する技術開発においては CFRP からの CF 取り出し技術がクローズアップされており、その他の工程に関する技術開発は少ない。また、CFRP からの CF 取り出し技術についても、各社がそれぞれの条件で実験・評価を行っており、客観的な特徴や優劣が把握できない状況である。そこでまずは CFRP の Car to Car リサイクルチェーンの実態把握を目的にフィージビリティスタディを行った。

その結果、CFRP の Car to Car リサイクルチェーン構築に必要な工程は、廃材回収・CF 取り出し・中間基材製造・部品成形の 4 つで、必要な技術は①廃材選別技術、②CF 取り出し技術、③中間基材製造技術、④成形技術、⑤評価技術の 5 つであることがわかった。そして、5 つの必要技術についての現状と課題を整理した。

①廃材選別技術

CFRP リサイクルチェーンの構築に向けては、使用部位や CF/樹脂グレードといった出自の特定が重要である。しかしながら、上記出自の特定に向けては技術的な課題のみならず、使用済み自動車 CFRP 部品の選別における政府主導の制度が存在しないことも課題であり、それらの解決の見通しは立っていないのが現状である。そのため、廃材選別工程はリサイクルチェーンの構築において、大きな課題の 1 つになると考えられる。

②CF 取り出し技術

CF 取り出し技術の評価を、CFRP の自動車への採用において課題となっている「強度劣化」「取り出しコスト・処理コスト」「処理量」の 3 視点と、その他ボトルネックがないかの確認のため「制約条件」を加えた 4 視点にて行った。一般的には、CF 取り出し技術は熱分解法・化学分解法・物理分解法の 3 種類に区分され、中でも熱分解法は実用化に向けた開発が先行しており、化学分解法は比較的新しい技術である。本プロジェクトでは、以下の 9 つの技術を対象とし、上記 4 視点から簡易評価を行った。

- 熱分解法・・・「1 段階熱分解法」、「過熱水蒸気分解法」、「2 段階熱分解法」
- 化学分解法・・・「常圧溶解法」、「臨界流体法」、「半導体熱活性化法」、「電解酸化法」
- 物理分解法・・・「2 段階粉碎処理法」、「高電圧衝撃波法」

その結果、9 つの技術の中で各評価項目に対して解決の見通しが立っていない技術を除く、「2 段階熱分解法」、「過熱水蒸気法」、「常圧溶解法」、「電解酸化法」の 4 技術が有望技術候補として浮かび上がった。しかしながら、これら 4 つの技術を同一条件下において横並びで比較した例はなく、現時点では技術的優劣の判断はできない。今後は 4 つの技術を同一条件下にて比較し、各 CF 取り出し技術の特徴や差異を明らかにすることが必要だと考える。

③中間基材技術及び④成形技術

③中間基材製造技術と④成形技術とは技術的な関連性が高いため、併せて検討を行った。ここで、CFRP リサイクルで得られる CF (以下、リサイクル CF と表記) は不連続繊維のみであり、連続繊維は対象外であることを前提とする。成形技術については、CFRP の自動車への採用において課題となっている「成形品強度」「タクトタイム」「多様な形状への対応」の 3 視点と、その他ボトルネックがないかの確認のため「その他制約条件」を加えた 4 視点により評価を行い、SMC/RTM 法/スタンピング成形法/射出成形

法が有望であることがわかった。そしてこれらに対応する中間基材は、それぞれ SMC/フェルト/スタンパブルシート/短繊維ペレットであった。

加えて、中間基材製造時における重要課題は、CFRP から取り出した CF を使用する際には表面処理方法であり、CF を取り出さず CFRTP 廃材から直接 CFRTP 部品に加工する場合は、樹脂の劣化に応じた処理方法であることがわかった。

さらに中間基材や成形技術の種類はどのような特性が求められるかによって決まり、その要求特性は自動車の部位により異なるため、リサイクル CF がどの自動車部位に適用できるかを検討することも今後の課題である。

⑤評価技術

中間基材製造工程及び部品成形工程における評価項目はバージン材と同様だが、CF 取り出し工程では、バージン材の評価項目に追加して繊維長分布を行う必要があることがわかった。

また、リサイクル CF は、経年劣化度合いや取り出し工程における劣化度合いのバラツキの影響を受け、強度等の品質にブレが発生する。そのため、品質評価体制を構築するには、品質のブレを前提とした上での統計学的アプローチにより、評価頻度等を決定することが重要であることがわかった。

今後はリサイクル CF の品質のブレが、中間基材・成形部品の特性に与える影響を考慮した評価頻度/手法の確立が必要である。

以上より、CFRP の Car to Car リサイクルチェーン構築に必要な 5 つの技術の現状と課題が明らかになった。しかしながら、これらの課題解決に向けては各工程で個社別・個別に検討するのではなく、全工程を通した全体最適の視点で課題解決策を検討することが重要である。

よって、2018 年度から CFRP の Car to Car リサイクルチェーン構築に向け、全工程のプレイヤーを集めたコンソーシアム体制による実証実験を試みる。そして 1 年目はまず CF 取り出し技術に焦点を当て、今回有望とした 4 つの技術を同一条件にて比較し、各技術の特徴と今後の開発の方向性を明らかにする。

2 年目以降はリサイクル CF を使用して CFRP のテストピースを作成して評価を行い、取り出し条件へのフィードバックにより改善を進めた後、実際の自動車部品を成形して評価を行い、利用可能な部位の特定まで行う。

以上