

令和 2 年度地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費
リサイクル炭素繊維の利用・
評価手法等に関する国際動向調査

2021 年 3 月 26 日

株式会社矢野経済研究所

目次

用語集.....	4
本事業の概要	5
1 章. 調査の目的と背景.....	6
2 章. 調査報告	9
2-1. 世界における rCF 開発状況調査.....	9
2-1-1. 用途別開発状況	9
(1) 民生機器	10
(2) 自動車構造材	12
(3) 航空機	14
2-1-2. rCF メーカー及び、研究機関別開発状況.....	15
(1) 日本.....	20
(2) 米国.....	57
(3) ドイツ	86
(4) 英国.....	103
(5) フランス	118
(6) イタリア	122
2-2. 環境付加価値向上調査	124
2-2-1. 廃 CFRP の工程端材・廃材の処分量	124
(1) 日本.....	128
(2) 欧州（ドイツ・英国・フランス・イタリア）	128
2-2-2. 廃 CFRP の廃棄方法	129
(1) 日本.....	130
(2) 欧州（ドイツ・英国・フランス・イタリア）	131
2-2-3. 廃 CFRP に関する法規制	132
(1) 日本.....	132
(2) 欧州.....	137
2-2-4. 地域・国による rCF への開発支援策等	151
(1) 日本.....	151
(2) 欧州.....	154
2-3. 欧州における研究機関調査	190
2-3-1. 現状の廃 CFRP のリサイクル技術（欧州、日本、その他）	190
(1) 廃 CFRP 選別方法	190
(2) 廃 CFRP 切断・粉砕・分級方法.....	190
(3) CFRP 分離方法	190

2-3-2. rCF の評価試験法	200
(1) 背景.....	200
(2) 機械特性の評価技術.....	200
(3) 炭素残渣量の定量評価技術.....	205
(4) 不純物元素の評価技術	206
2-3-3. rCFRP の評価試験法	211
(1) BMW 社 rCF 成形品の機械特性確認.....	211
(2) BMW-i3 内装材の機械特性確認	214
2-3-4. 欧州研究機関訪問.....	222
2-3-5. ラウンドロビンに向けた枠組み作り	222
2-4. 2-1～2-3 のまとめ.....	223
(1) 循環利用システム構築	223
(2) 評価試験法の確立	225
3 章. 今後の展望	226
3-1. CFRP 循環利用システム構築に向けた各課題の解決方法	226
(1) 循環利用システム構築	226
(2) 評価試験法の確立	228
3-2. 評価試験法のラウンドロビンに向けたロードマップ作成.....	230

用語集

用語	注釈
CF	炭素繊維 (Carbon Fiber)
rCF	リサイクル炭素繊維 (recycled Carbon Fiber)
vCF	バージン炭素繊維 (vergin Carbon Fiber)
CFRP	炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics)
SMC	シートモールディングコンパウンド (Sheet Molding Compound)
BMC	バルクモールディングコンパウンド (Bulk Molding Compound)
RTM	レジントランスファーモールディング (Resin Transfer Molding)
VaRTM	真空含浸工法 (Vacuum assisted Resin Transfer Molding)
NCF	多軸織物 (ノンクリンプファブリック : Non Crimp Fabric)
LFT	Long Fiber Thermoplastics
Vf	繊維体積含有率 (Fiber volume content)

本事業の概要

rCF の原料となる廃 CFRP には、生産工程内で発生する工程内端材と、廃材として排出される使用済 CFRP 製品がある。現状ではその多くがサーマルリカバリーもしくは埋め立て処理されているが、rCF としてのリサイクルも始まっているものの一部にとどまっている。

rCF 市場は、CFRP 等の複合材料のリサイクル研究に先行している欧州や米国を中心に形成されている。rCF の研究開発機関では、熱分解、加溶媒分解、超臨界流体による分解など、様々な分解方法が研究されているが、rCF 製品の製造・販売を事業化しているメーカーの多くは熱分解法を使用したリサイクルプロセスを行っている。

CFRP マテリアルリサイクル確立のためには、循環利用システム構築と rCF 評価試験法の確立が求められている。

1章.調査の目的と背景

CO₂ 排出削減が世界的な課題となる中、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は軽量かつ高強度という特性から、航空機や自動車等への普及が進んでおり、我が国はバージン CF（vCF）の生産量が世界一となっている。他方、その工程端材や廃材の大部分は埋め立て処理されており、ライフサイクル全体の環境負荷を低減するため、CFRP の循環利用に向けたリサイクルシステム等の確立が求められている。

係る状況のもと、欧州では Airbus 社等を中心に CFRP をリサイクルするための技術並びにサプライチェーンの構築に動き出しているが、現状、廃 CFRP を統一的に評価する手法が存在しておらず、効率的な循環利用システムの確立には至っていない。

欧州の対応が先行する中、vCF の生産量が世界一である日本が主導して、我が国にとって有用なリサイクル炭素繊維（rCF）評価手法を確立し国際標準規格を策定することで、CFRP リサイクル分野での日本企業の競争力を強化することは極めて重要である。また、先行している欧州各国試験機関とも協力することで、効率的な CFRP 循環利用システムを構築することも可能となる。

実際に 2019 年 4 月に開催された日 EU 産業政策対話気候変動・環境 WG では、欧州委員会との具体的な協力案件の一つとして、CFRP リサイクル促進に取り組むことが合意された。その後同年 10 月に開催した G20 資源効率性対話のワークショップでは国内外の関係者が東京に参集し、CFRP リサイクルシステム確立に向けた国際標準化の必要性等について確認。さらに 12 月に実施した日 EU 産業政策対話本会合でも当該協力への合意が WG の成果として報告され、本分野における日 EU 協力が期待されている。

本事業ではこのような背景事情を踏まえ、欧州等と協力しつつ、我が国が rCF の評価体制構築の議論をリードしていくため、各国での rCF の評価に向けた取組について動向調査を実施することで、日本が主導する rCF 評価手法の国際標準規格策定に向けた取組の検討を行う。また、欧州での廃 CFRP の排出量は日本の約 10 倍という報告もあり、欧州での CFRP リサイクルや rCF の輸出入管理の状況の他、rCF の用途開発状況等についても調査することで、日本における CFRP リサイクルの普及拡大に向けた検討を行う。

本調査では、以下の (1) (2) (3) の調査を行い、ここにその結果を取りまとめた。また、調査方針や調査方法については、有識者によって構成された検討委員会における議論を踏まえて決定した。

(1) 世界における rCF 開発状況調査

rCF メーカーの調査を行い、以下の項目を中心に、日本、米国、欧州における rCF 活用の先進事例の収集を行った。

- ①用途別開発状況
- ②rCF メーカー別開発状況

(2) 環境付加価値向上調査

文献調査を基本とし、日本及び欧州の CF メーカーへのヒアリングも行い、以下の項目を中心に現状の廃 CFRP の廃棄処分状況の情報収集を行った。

- ① 廃 CFRP の処分量
- ② 廃 CFRP の廃棄方法
- ③ 廃 CFRP に関する法規制
- ④ 地域・国による rCF への開発支援策 等

(3) 欧州における研究機関調査

日本が開発する評価試験方法のラウンドロビンに向けた欧州研究機関との協力関係の構築に向けた枠組み作りを目指し、以下の項目を中心に情報収集を行った。

- ① 廃 CFRP のリサイクル技術
- ② rCF の評価試験方法
- ③ 欧州研究機関との Web ミーティング

委員会について

大学、研究機関、CF 製造企業等の有識者からなる CFRP リサイクル検討委員会を設置した。本検討委員会は 4 回開催され、調査・検討内容に関する審議・決定や調査結果のとりまとめの方向性について議論いただいた。委員名簿は以下の通り。

<委員>

京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻機械材料力学講座適応材料力学分野 教授	北條 正樹 (委員長)
国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院工学研究科 助教 ナショナルコンポジットセンター 学術連携研究員 兼務	入澤 寿平
金沢工業大学 (ICC) 大学院工学研究科 高信頼ものづくり専攻教授 博士(工学)	鵜澤 潔
産業技術総合研究所 マルチマテリアル研究部門 ポリマー複合材料グループ グループ長	今井 祐介
産業技術総合研究所 マルチマテリアル研究部門 ポリマー複合材料グループ 研究員	杉本 慶喜
産業技術総合研究所 環境創生研究部門 環境計測技術研究グループ グループ長	中里 哲也
産業技術総合研究所 環境創生研究部門 環境計測技術研究グループ 研究員	槇納 好岐
早稲田大学 ナノ・ライフ創新研究機構 ナノプロセス研究所 (2/1～) 産業技術総合研究所 環境創生研究部門 資源価値創生研究グループ (1/31 まで)	加茂 徹

日本プラスチック工業連盟 規格部	斉藤 良
一般社団法人日本自動車工業会 環境技術・政策委員会 リサイクル・廃棄物部会 副部会長（本田技研工業株式会社）	堂坂 健児
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 ELC 委員会委員長（東レ株式会社）	山口 晃司
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 ELC 委員会委員（帝人株式会社）	恒川 浩
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 ELC 委員会委員（株式会社クレハ）	小野 丈樹
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 ELC 委員会委員（大阪ガスケミカル株式会社）	奥田 健二
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 ELC 委員会委員（日本グラファイトファイバー株式会社）	岸本 宏一
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 ELC 委員会委員（三菱ケミカル株式会社）	塚原 徹

＜オブザーバー＞

日本化学繊維協会 炭素繊維協会 業務調査グループ 主席部員	戸円 真弓
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 業務調査グループ 主任	新井 智子
経済産業省 産業技術環境局 資源循環経済課 課長補佐(国際担当)	山下 章仁
経済産業省 産業技術環境局 資源循環経済課 係長	利野 勇樹
中部経済産業局 資源エネルギー環境部 環境・リサイクル課 課長補佐	佐藤 陽子
中部経済産業局 資源エネルギー環境部 環境・リサイクル課 総括係長	高橋 佑香
中部経済産業局 資源エネルギー環境部 環境・リサイクル課 総括	森 正樹

＜事務局＞

株式会社矢野経済研究所 インダストリアルテクノロジーユニット ユニット長	相原 光一
株式会社矢野経済研究所 インダストリアルテクノロジーユニット 素材産業グループ 上級研究員	金 賢嬉
株式会社矢野経済研究所 インダストリアルテクノロジーユニット 素材産業グループ 上級研究員	船木 知子

2章.調査報告

2-1. 世界における rCF 開発状況調査

2-1-1. 用途別開発状況

矢野経済研究所が実施したヒアリング及び各種の文献調査によると、**rCF** 製品は主に下記の用途に採用されている。現在、**rCF** 製品の主要用途は、①電子製品向け（ノート PC ケース）、②風力発電関係（風車ナセルカバー等）、③自動車の部品向け（C ピラー等）、である。

米国では **DELL** を中心にノート PC ケース向けで **rCF** 製品が採用され、その他複数のブランド向けも一部採用が始まっている。また、エネルギー源として風力発電が発達している欧州では、風車ナセルカバー向けに **rCF** が採用されているとみられる。自動車向けは欧州や米国 OEM で使用量が増えており、**BMW** の 7 シリーズで注目された C ピラー以外にもルーフカバー等に採用されている。

その他、**rCF** は飛行機のサイドパネル・アクセスドア向けや宇宙機の AC コンポーネント向けでも採用実績を持つ。ただ、航空・宇宙関連向けは材料物性や性能へのスペックが高く、参入へのハードルが高いとされる。

表 2-1. rCF の主要採用用途一覧

製品別	rCF採用例
電子製品	ノートパソコンケース
	IC chip tray
エネルギー系	風力発電
自動車向け部品	ルーフカバー
	ブレーキローター
	ボンネット
	トランクパーテーション
	Cピラー
	Aピラー
飛行機	サイドパネル
宇宙関連	ACコンポーネント
スポーツ遊具	
3Dプリンティング関連	
メディカル機器向け	

出典：矢野経済研究所作成

矢野経済研究所が複数の欧州 rCF メーカーに行ったヒアリングでは、自動車用途向けで CFRP 再利用プロセスの構築が進んでいるため、今後自動車部品向けで rCF 製品の使用量の増加が期待されている。さらに、これ以外で今後 rCF 使用量の拡大が見込まれる用途として風力発電関係も挙げられた。

また、現時点においては一部の使用もしくは開発レベルに留まっているものの、3D プリント材関連（成形材）、医療機器（X-ray 等）向けも、rCF のポテンシャルマーケットとして試しているという回答があった。

rCF 製品は主にチョップドやミルド、ペレット、不織布等のフォーマットとして提供されるが、出荷形態は使用用途や顧客の要望に応じて対応している。

(1) 民生機器

DELL ノート PC ケース

民生機器ではノート PC ケースとして使用されており、世界大手 PC メーカーの DELL で採用実績がある。

rCF の採用開始年、採用部位・採用方法、採用量等

DELL は 2015 年 9 月に発表した循環型経済の実現に向けた取り組みの進展状況 (additional progress against its circular economy initiatives) において、クローズドリサイクルシステムによる再生プラスチックのサプライチェーンの拡大や、rCF の採用の方針を打ち出している。2015 年には業界で初めて rCF を使用した製品開発を推進、PC カバーに CFRP を使用した DELL のノート PC のシリーズである Latitude、Alienware の一部で rCF を採用した¹。

2019 年には rCF のサプライヤーである Carbon Conversions Inc. と提携して rCF とその他の材料との組み合わせを刷新、より軽量で耐久性を高めた製品開発の検討を実施し、蓋部分に rCF (含有量 18.8%) を使用して従来品に比べ 24g の軽量化を実現した Latitude7300 を発売している²。同製品には Carbon Conversions の高強度チョップドファイバー re-Evo® HSC が採用されている³。

・rCF の由来・回収元（排出メーカー・元用途：工程端材・廃材）

DELL では航空機メーカーと協力し、規格外、余剰分、スクラップの CF を集め、細かく刻んでペレット化した後、樹脂と複合化してノート PC カバーとして使用している⁴。

¹ <https://www.businesswire.com/news/home/20150928006001/en/Dell-Launches-Industry-First-Recycled-Carbon-Fiber-Advances-Circular-Economy-Model-for-IT-Industry>

² https://www.dell.com/en-us/work/shop/cty/pdp/spd/latitude-13-7300-laptop#features_section

³ <https://carbonconversions.com/carbon-conversions-partners-with-dell-to-forward-sustainability-goals/>

⁴ DELL ホームページ

<https://corporate.delltechnologies.com/ja-jp/social-impact/advancing-sustainability/sustainable-products-and-services/materials-use/waste-as-a-resource.htm>

・ **rCF 選定理由（他素材と vCF の物性・生産コスト比較等）**

DELL では 2030 年までに自社の製品の材料の 50%以上を再生材料とする方針⁵である。製品ライフサイクルから生じた廃棄物の処理及び素材のリサイクルは製品の循環型設計の重要な取り組みと位置付けており、rCF の採用もこの一環である。

⁵ Dell PROGRESS MADE REAL FY20 Social Impact Report

(2) 自動車構造材

BMW 車体構造材

自動車の燃費向上のための改善方法としては、エンジンの効率向上（熱効率向上、摩擦損失の低減）、空気抵抗の低減（ボディ形状の改良）、車体の軽量化（軽量化材料の採用拡大、構造の改良）、駆動系の改良、転がり抵抗の低減等が挙げられる。

これまでの燃費改善は主にパワートレインが中心であったが、新たな燃費改善策として自動車の軽量化技術に注目が集まっている。こうした中、BMW では CFRP を積極的に車体に採用し、ボディの軽量化を図っている。

BMW は 2012 年に航空機メーカーである Boeing 社との間で提携合意を締結、CF 製造プロセスのシミュレーションやオートメーション化のアイデアの共有など、CF リサイクルに関する共同研究の実施、および製造に関しての情報共有、オートメーション化の可能性の検討を行った⁶（本事業は既に終了している）。

・ rCF の採用開始年、採用部位・採用方法、採用量等

BMW では 2013 年にライフ・モジュールと呼ばれる主要骨格において CFRP を全面的に採用した EV (i3) を製品化し、工程内端材のリサイクルラインを構築した。工程内端材から回収した rCF は一部を自社の自動車で、その他は自動車分野以外の領域で再利用している。現在、BMW i3 に使用されている CF の約 10% がリサイクル材料である⁷。

2014 年 2 月にはルーフ等に CFRP を使用した M3 セダンや M4 クーペを発売。2015 年 10 月には 16 の CFRP 部材を車体の補強材に採用した 7 シリーズを発売するなど、CFRP を車体に採用した自動車をリリースしている。

工程内端材のリサイクルラインから回収された rCF は、i3 の外皮（ルーフ）⁷、7 シリーズの構造体（C ピラー）などで採用されている。

i3 のルーフはドライ状態（樹脂未加工）の廃 CF（製造過程で発生する織物の端材）を再利用した rCF を使用している。ドライ状態の廃 CF 端材は最大 95% 程度リサイクルが可能で、ルーフ材料として再利用することで自社製造工程内での CF リサイクルが実現した⁸。

7 シリーズでの C ピラーは rCF から製造した SMC を使用している。

・ rCF の由来（排出メーカー・元の用途：工程端材・廃材）

i3 の製造工程で排出される廃 CF には、ドライ状態（樹脂未加工）とウェット状態（樹脂が混ざった状態の CFRP）の 2 種類がある。ドライ状態は製造過程（予備成形）で発生する織物の端材であり、この端材はフリース状の生地にも再処理され、CF 織物の一部に利用されている。i3 の生産で使用する CF のうち 10% はドライリサイクル品である。NCF は

⁶ BMW グループ プレスリリース（2012 年 12 月 12 日）

⁷ BMW Medien information 「自動車生産の変革：BMW i の生産」

⁸ Polymers 2020, 12, 3003 Recycling of Carbon Fiber Reinforced Composit Polymers –Review-Part2: Recovery and Application of Recycled Carbon Fibers

織物とは異なりドライ状態のリサイクルの際に CF の回収率が高い。織物の場合は織をほどく必要があり、結局は短繊維にしてリサイクルする必要があるが、NCF ではその必要が無い。ウェット状態の廃棄品は樹脂と CF とを分離する必要があり、CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co.KG（三菱ケミカル）の熱分解設備により CF と樹脂を分離する。回収した CF はリアシートシェルの構造、自動車以外の分野などで利用されている。これらのリサイクルは SGL Carbon によって行われる⁹。

・ rCF 選定理由（他素材と vCF の物性・生産コスト比較等）

矢野経済研究所による今回のヒアリングから、一般論として rCF は vCF より 20～30% 安価であり、rCF はユーザーにとってコストメリットがあることが分かった。また、rCF を使用して CFRP 部品を製造する際、表面処理の後工程を省くことができ、生産工程でのプロセスコストや人件費などの削減が可能である。

鉄やアルミなどの他素材材料ではなく CFRP を使用する理由には車体の軽量化や部品点数の削減がある。軽量化に関して、i3 はアルミ製のドライブ・モジュールの上に CFRP 製の乗員室（ライフ・モジュール）を乗せた構造となっているが、既存材料よりも 200kg 以上の軽量化を実現している。部品点数については、通常の鋼鉄製車体の場合は 400 個の部品が使用されているが、ライフ・モジュールに CFRP を使用した i3 は車体構造の部品数が 100～120 個に抑えられている。

2014 年に発売された M3 及び M4 ではルーフ、トランクリッドの内部構造部材、プロペラシャフト、エンジンルーム内のストラット・ブレース等で CFRP を採用している。CFRP ルーフはスチール製と比較し、M4 クーペでは 6kg、M3 セダンでは 5kg 軽量化した。この他、CFRP プロペラシャフトでは一体成形が可能となり、中間ベアリングが不要となるため 40%の軽量化を達成した。また、エンジンルーム内のストラット・ブレースを CFRP 製とすることで剛性と軽量化を達成した。

・ rCF の現状の課題と将来展望

自動車の耐用年数を 10～15 年と仮定すると、BMW i3 が発売された 2013 年から 10 年後となる 2023～2025 年以降にはボディ・構造材が CFRP 製の廃車が発生する。BMW では廃車由来の廃 CFRP のマテリアルリサイクルについては、現状 CFRP を使用している部位など非構造部材での利用を考えており、パートナー企業と検討を行っている。

⁹ 矢野経済研究所レポート「2016 年版車載用 CFRP 市場の世界需要予測」

(3) 航空機

The Boeing Company

Boeing は 2004 年頃から宇宙航空向けの CFRP のリサイクル技術開発に取り組んでいる。Boeing787 では CFRP が多く利用されているが、端材からの CF の回収だけでなく、CF の表面特性や再生時の樹脂との密着性、再生品（成形品）の品質等の開発を推進している。

2006 年にはエンジンメーカーの Rolls Royce 等と共同で航空機材料のリサイクルを目的とした団体 Aircraft Flat Recycling Association (AFRA) を立ち上げた。AFRA は米国を始め、英国、フランス、イタリアの航空機パーツメーカー、素材メーカーなど 90 社以上のメンバーで構成されている。

AFRA では飛行機の解体に関する基準を設け、運用を終えた飛行機解体の認定施設を設置して退役飛行機の廃棄を管理している。また、機体に使用する CFRP リサイクルの取り組みも行っており、工程内端材に加え、退役飛行機廃材も対象としたリサイクルの技術開発を推進。参加企業である英国 ELG Carbon Fibre や Nottingham 大学、伊 Karborek、米国 Adherent Technologies 等が廃 CFRP からの CF 回収の開発を行っている。

・ rCF の採用開始年、採用部位・採用方法、採用量等

Boeing では 2014 年 12 月、Boeing787 Dreamliner の主翼下側のアクセスドアに Boeing787 製造工程で排出された端材から再生した rCF（ドライファイバー）を使用した CFRP を採用したとリリースした。これは航空宇宙部品からリサイクルされた CF が民間航空機の使用に適した部材として採用された最初の例である¹⁰。

・ rCF の由来（排出メーカー・元の用途：工程端材・廃材）

Boeing 787 Dreamliner のアクセスドアに採用された rCF は、Boeing Aerostructures Australia で製造された 787 Dreamliner のトレーリングエッジからリサイクルされた CF を利用して製造している。

Airbus S.A.S

Airbus では製造工程で発生する CFRP 端材（硬化品及び未硬化品）のリサイクルに向けた様々な研究及び技術開発プロジェクトが進行中であり、国境を越えて外部組織との協力の元で取り組みを進めている。

具体的には、2020 年から 2025 年までの間に生産工程で発生した CFRP 端材の 95%をリサイクルチャネルに乗せ、このうち 5%を航空機としてリサイクルすることが目標である

（2014 年 5 月発表）。Airbus ではこの取り組みについて、航空機産業の持続可能な未来の構築の一環であるとしており、航空機の設計、製造から運用、使用終了までのライフサイクル全体を通して環境への影響の軽減を目指す¹¹。

¹⁰<https://www.boeing.com/company/about-bca/washington/from-scrap-to-hatch-recycled-carbon-fiber-flies-on-ecode-monstrator-12-3-2014.page>

¹¹<https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2014/05/an-airbus-working-group-sets-out-a-composites-recycling-roadmap.html>

2-1-2. rCF メーカー及び、研究機関別開発状況

現在、rCF 事業を商業化した rCF メーカー及び、rCF に関する開発を行っている研究機関（対象地域：日本、米国、欧州）を別表に示す。

rCF 市場は、CFRP 等の複合材料のリサイクル研究に先行している欧州や米国を中心に形成されている。現在 rCF 製品の製造・販売を事業化しているメーカーのほとんどは熱分解法を使用したリサイクルプロセスを行っている。

主要な rCF メーカーには、米国の Carbon Conversions, Inc.（旧：MIT-RCF, LLC）、英国の ELG Carbon Fibre（旧：Recycled Carbon Fibre Ltd/Milled Carbon Ltd）、ドイツの CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG, carboNXT GmbH (Mitsubishi Chemical)、等がある。

矢野経済研究所が実施したヒアリングによると、これら 3 社の rCF 製品の販売量は、rCF 市場全体（全 rCF メーカーの rCF 製品販売量の合計、rCF 製品として出荷・販売されず内外部で再利用されるケースを除く）で約 6 割を占めている。

日本における rCF メーカーは、アイカーボン、アースリサイクル、ウイスカ、ACA、カーボンファイバーリサイクル工業、新菱、高安、富士加飾、等がある。

rCF の研究開発を行っている研究機関は JAXA 航空技術部門、埼玉県産業技術総合センター、信州大学、ファインセラミックスセンター、岐阜大学、名古屋大学、金沢工業大学等がある。

米国における rCF メーカーは、Adherent Technologies, Inc.、Carbon Conversions, Inc.（旧：MIT-RCF, LLC）、Carbon Fiber Remanufacturing (AdTech International, Inc.)、Composite Recycling Technology Center (CRTC)、Firebird Advanced Materials、Shocker Composites、Vartega、等がある。

CF の研究開発を行っている研究機関は、ACMA・IACMI・CHZ Technologies、Georgia Institute of Technology, Atlanta、Global Fiberglass Solutions・Washington State University、Mallinda/University Colorado Boulder、North Carolina State Univ.、Triumph Composites Systems・Washington State University、University of Southern California、Washington State University、等がある。

ドイツにおける rCF メーカーは、CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG, carboNXT GmbH (Mitsubishi Chemical)、HADEG Recycling GmbH、SGL Carbon、等がある。

CF の研究開発を行っている研究機関は、Fraunhofer (IGCV、ICT、IVV)、Hohenstein Institute、MAI Carbon、RWTH Aachen University、等がある。

英国における rCF メーカーは、ELG Carbon Fibre（旧：Recycled Carbon Fibre Ltd／Milled Carbon Ltd）、Hexcel Reinforcements UK Limited、Sigmatex、等がある。

CF の研究開発を行っている研究機関は、Cranfield University、Imperial College London、University of Birmingham、University of Bristol、University of Manchester、University of Nottingham、等がある。

フランスにおける rCF メーカーは、Vetrotex で、CF の研究開発を行っている研究機関は、Alpha Recyclage Composites、I2M Laboratory (Institute of mechanics and engineering, University of Bordeaux)、等がある。

イタリアにおける rCF メーカーは、KARBOREK Recycled Carbon Fibres 等がある。

表 2-2. 国内外の CFRP リサイクル事業化企業・研究機関一例 (1/3)

国	企業名／団体名	リサイクル方法	処理能力 (2019年)	前処理	温度・圧力	溶媒	触媒	再利用製品形態
日本	メーカー	アイカーボン	不明	粉碎	400～500℃	不要	不要	CF(乾式不織布向け(50mm程度)、射出成形ベレット・コングリート補強材向け(3～6mm)のサイズドファイバー)
			不明	粉碎	常温・常圧	濃硝酸、アルカリ	不明	CF(スラリー)
		アースリサイクル	20t/年	無し	275℃・常圧	グリコール系溶媒	アルカリ金属塩	CF(チョップド、ミルド、長繊維)
		ウイスカ	不明	粉碎	不明	不要	不要	CF(ミルド)
		ACA	不明	粉碎	不明	不要	不要	CF(ミルド)
		カーボンファイバーリサイクル工業	3,000t/年	不要	500～550℃	不要	不要	CF(チョップド、ミルド、長繊維)
		新菱	300t/年	裁断	600℃	不要	不要	熱可塑性樹脂とのコンパウンド品
		高安	約60t/年	不明	不明	不要	不要	不織布
		富士加飾	360t/年	裁断	400～480℃	不要	不要	熱可塑性樹脂とのコンパウンド品
		JAXA航空技術部門	-	裁断(10～50mm角)	常温・常圧	不明	不明	CF(短繊維)
	研究機関	埼玉県産業技術総合センター	-	不明	常温・常圧	HCl-BZA溶剤	不明	CF
		信州大学	-	不明	500℃	不要	不要	CF
		ファイナセンサミックスセンター	60t/年	裁断	500℃	不要	不要	CF(繊維状態で回収可能)

出典：矢野経済研究所作成

国内外の CFRP リサイクル事業化企業・研究機関一例 (2/3)

国	企業名／団体名	リサイクル方法	処理能力 (2019年)	前処理	温度・圧力	溶媒	触媒	再利用製品形態
米国	メーカー	熱分解	-	-	500℃	不明	不明	CF
		加溶媒分解法	-	-	-	不要	不明	CF
		化学プロセス (高温流体処理)	-	-	温度300℃以上、 圧力500PSI (3.45MPa)	不要	不明	CF
		化学プロセス (低温低圧流体処理)	-	-	圧力150PSI、 温度150℃	不要	不明	CF
		熱分解	-	粉碎	常圧	不要	不明	CF (チョップド、LFTペレット、不織布、短繊維のマットロール)
		CF生産工程内リサイクル	-	-	-	不要	不明	CF
		その他	-	-	-	不要	不明	CF
		マイクロ波	-	-	-	不要	不明	CF
		加溶媒分解法	-	-	-	不要	不明	CF
		加溶媒分解法	-	-	-	不要	不明	CF (チョップド、LFTペレット、不織布)
	研究機関	超臨界流体法	-	-	-	不要	不明	CF
		熱分解	-	-	-	不要	不明	CF
		アルコール分解	-	-	160～180℃	不要	不明	CF
		加溶媒分解法	-	-	-	不要	タノール、エタノール/ 水混合物、酸	CF
		ポリイミンの適用	-	-	-	不要	ポリイミン	CF
		不明	-	-	-	不要	不明	CF
		不明	-	-	-	不要	不明	CF
		アルカリ消化法・酸化的消化法	-	-	-	不要	不明	CF
		超臨界流体法	-	-	温度80～250℃	不明	水酸化カリウム、硝酸、リ ンタンガス、酸化、塩化 亜鉛、塩化マグネシウ ム、塩化アルミニウム、 塩化鉄	CF
		超臨界流体法	-	-	-	不明	不明	CF

出典：矢野経済研究所作成

国内外の CFRP リサイクル事業化企業・研究機関一例 (3/3)

国	企業名／団体名	リサイクル方法	処理能力 (2019年)	前処理	温度・圧力	溶媒	触媒	再利用製品形態	
ドイツ	メーカー	Mitsubishi Chemical Advanced Materials (ID: carbonXT or CFK Valley Stade Recycling)	-	無し	ガス分解	不要	不明	CF(ミルド、チョップド、ファイバーball、ファイバートube、rCFコンパウンド、不織布、Veil、rCF smc/ rCF bmc)	
		HADEG Recycling GmbH	-	-	-	不要	不明	CF(ショートファイバ、rCFコンパウンド、シート)	
		SGL Carbon	-	-	-	不要	不明	CF(不織布)	
	研究機関	Fraunhofer(IGCV、ICT、IVV)	マイクロ波による熱分解	-	-	-	不明	CF	
		Hohenstein Institute、MAI Carbon	微生物による分解	-	-	-	不明	CF	
		RWTH Aachen University	熱分解	-	-	600℃以上	不要	不明	CF
英国	メーカー	ELG Carbon Fibre (IB: Recycled Carbon Fibre Ltd /Milled Carbon Ltd)	-	切断	600～900℃	不要	不明	CF(トウ、ミルド、チョップド、ペレット)	
		Hexcel Reinforcements UK Limited	CF生産工程内リサイクル	-	-	-	不要	不明	CF
		Sigmatex	CF生産工程内リサイクル	-	-	-	不要	不明	CF
		Cranfield University	加溶媒分解	-	-	-	不要	不明	CF
	研究機関	Imperial College London	熱分解	-	-	-	不要	不明	CF
		University of Birmingham	熱分解、加溶媒分解	-	-	-	不要	不明	CF
		University of Bristol	熱分解	-	-	-	不要	不明	CF
		University of Manchester	化学プロセス	-	-	-	不要	不明	CF
		University of Nottingham	流動層処理	-	-	450~550℃	不要	不明	CF
			超臨界流体法	-	-	-	不要	不明	CF
フランス	メーカー	Vetrotex	溶媒洗浄法	-	-	不要	不明	CF	
	研究機関	Alpha Recyclage Composites	水蒸気熱分解	-	水蒸気で加熱	不要	不明	CF	
		I2M Laboratory	超臨界水加溶媒分解法	-	-	不要	不明	CF	
イタリア	メーカー	KARBOREK Recycled Carbon Fibres	熱分解	-	反応性雰囲気で廃CFRPを加熱処理	不要	不明	CF(ミルド、チョップド、フェルト)	

出典：矢野経済研究所作成

(1) 日本

① アイカーボン

企業・機関名	アイカーボン株式会社
国	日本
設立	2014年12月5日
本社所在地	青森県八戸市北インター工業団地五丁目3番13号
URL	http://www.aicarbon.co.jp/cp-outline.html

・ rCF 事業開始の経緯

アイカーボンは、国立八戸工業高等専門学校が開発した電解酸化法による CFRP からの rCF 回収技術の商業化を実現すべく 2014 年 12 月に設立された。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

電解酸化法とは、加熱焼成と電気分解により CF を水に分散した状態で取り出す方式である。まずは 50mm 以下のサイズに破砕した CFRP を、400～500℃で炭化処理した後、端材をアルカリ水溶液中で 3～5V の低電圧で電気分解する。この処理により CFRP が脆化するため、水中で高速攪拌処理することで破壊され、CF をろ過・分離・回収することができる。

同方式には、①大がかりな設備投資が不要なため低コストである、②電気分解により繊維表面が活性化し、繊維が母材樹脂に良く分散するため合材強度が高い、③水への分散性が高いため製紙、コンクリート混和材など水を媒介とする各種用途に展開が可能などのメリットがある。

また、新製法として酸アルカリ常温処理法での rCF 回収の研究開発も行っており、ユーザーとの間で用途を想定した開発が進んでいる。これは常温～最低でも 80℃という温度及び常圧下で CFRP を酸とアルカリ液を用いて交互に処理することで、CFRP 中のエポキシ樹脂のみを分解し rCF を回収するという技術である。

具体的には、カットした CFRP 廃材を濃硝酸洗浄水中で攪拌することで溶解し、脱水後に NaOH 洗浄水中で溶解・解繊した後、さらなる解繊と電気分解を経て rCF を取り出す。常温・常圧で安全性が高く、熱劣化の無い rCF の回収が可能である。硝酸処理により CF 表面が若干ではあるが非晶化されることで応力を緩和・吸収する効果が得られ、vCF よりも高強度な rCF が得られる。原料として使用する未硬化プリプレグは形状が均一でなく、扱いが難しいが、アイカーボンではこれをほぐして処理するプロセスも開発している。酸アルカリ常温処理法で回収された rCF は PA との相性が良い。同社では PP との密着性を高めるための表面改質の開発も進めている。

・ rCF の物性、品質保証方法

アイカーボンが参画した平成 31 年度戦略的基盤技術高度化支援事業（サポイン事業）「新規常温水中 rCF の量産技術確立とそれを利用した高強度樹脂複合材の開発」¹²にて、酸アルカリ常温処理法で回収された rCF の評価分析を行っている。

断面測定法により rCF と比較材（リサイクル前のバージン単糸）を評価したところ、rCF は比較材よりも引張強さが大きく、評価の際の目標基準とした単糸引張強さ 5,300MPa 以上であることを確認した。

エポキシ樹脂残渣は酸アルカリ交互処理で、熱重量分析装置の検出限界である 0.5wt% 以下であることを確認した。白色光共焦点顕微鏡の観察でも樹脂残渣は確認できなかった。

中和適定法による rCF 表面の全酸性官能基量は $1 \times 10^{-6} \text{mol/g}$ 以上であった。

・ rCF 採用用途・当該用途での採用理由、当該用途での販売量

アイカーボンでは異なる製法による 2 種類の rCF をラインナップしている。一つは加熱焼成・電気分解法によるサイズドファイバー、もう一つは酸アルカリ常温処理法によるアンサイズドファイバーである。

サイズドファイバーは乾式不織布や建築・土木（コンクリート補強材など）、熱可塑性樹脂との複合化による射出成形ペレットなどに適したもので、繊維の長さは乾式不織布向けが 50mm 程度、射出成形ペレットやコンクリート補強材向けが 3～6mm 程度である。

アンサイズドファイバーは湿式及び乾式不織布向けに適したもので、繊維の長さは湿式不織布向けが 6～12mm 程度、乾式不織布向けが約 50mm。水中で短い繊維から製品を製造する工程を有する製紙・繊維メーカーなどに提案している。

・ 企業や研究機関との協力関係

「中小企業のものづくり基盤技術の高度化に関する法律」に基づき、中小企業ものづくり基盤事業の向上につながる研究開発、試作品開発から販路開拓までの取り組みを一貫して支援することを目的とした平成 30 年サポイン事業（戦略的基盤技術高度化支援事業）に採択され、山形大学、（地独）岩手県工業技術センター、事業管理機関としての（地独）青森県産業技術センター八戸工業研究所と共に産官学連携で令和 3 年度まで研究開発を実施している。

・ rCF の現状の課題と将来展望 等

rCF の用途展開を考慮すると、製造量が 1 日あたりトンレベルでの量産化技術が必要である。常温・常圧下での化学薬品リサイクル法であるため、トンレベルでの量産体制の確立によって価格面での既存材料に対する優位性が示されることが期待される。

また、回収した rCF と樹脂との複合材料化に向けた研究開発も今後の課題となる。

¹² <https://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/portal/seika/2018/3020209010h.pdf>

②アースリサイクル

企業・機関名	アースリサイクル株式会社
国	日本
設立	1997年4月16日
本社所在地	兵庫県揖保郡太子町東南726
URL	https://www.earthrecycle.net/company.html

・rCF 事業開始の経緯

アースリサイクルは廃プラスチックの油化リサイクルを行うベンチャー企業として 1997 年に設立された。以来、廃棄物（廃プラスチック混合・複合材、廃電気材料等）及び、バイオマス（パーム搾りかす、竹、木材等）の利活用を推進する技術・装置・システムの開発に取り組んでいる。焼却、埋立てを最小限に抑え、地球温暖化防止（CO₂削減）と循環型社会樹立に貢献するため、協力会社とともに装置を開発、製作、供給。特に幅広い廃棄物に対応できる画期的な「湿式分離法」を開発し、プラスチック代替素材の製造法の研究開発を進めている他、CF、セルロースなどの販売も行っている。

CFRP からの rCF 再生事業については、2013 年にひょうごエコタウンにて炭素繊維リサイクル研究会に参加したことからスタートした。当時、CF は自動車、航空機、スポーツ用品、建材など様々な用途で金属に替わる軽量・高強度な素材として注目されたものの、複合材料であることから端材や使用済製品のリサイクルが難しいという点が問題視されていた。アースリサイクルでは自社の油化リサイクル技術（解重合法）を応用し、CFRP の樹脂と CF とを完全に分離し取り出す技術¹³を開発、2015 年に事業化している。

・rCF の由来・回収元（排出メーカー・元用途：工程端材・廃材）

アースリサイクルでは CFRP 部品メーカーから回収した CFRP 製品工程内端材から、rCF と樹脂を回収している。回収された端材の元用途はゴルフシャフト、パイプ、プロペラ等で、全て硬化後の端材である。CF メーカーや中間材（プリプレグ、ファブリック）メーカーからの回収は無い。また、現時点では自動車や飛行機、風力発電など市中に出た CFRP 製品廃棄物からの回収は無い。

・rCF の回収方法（有価・無償等）、年間の回収量

CFRP 製品生産工程から排出される CFRP 端材を有料で購入している。購入価格は数円～数十円/kg 程度。廃 CFRP 年間回収量は、年にもよるが最近は約 20t/年程度で、ここから 12～13t/年程度の rCF が回収される。

・rCF のマテリアルリサイクル技術

アースリサイクルでは、溶媒（グリコール系溶媒）を用いて CFRP などの複合材を分離

¹³ 特開 2013-6948(P2013-6948A)「複合系プラスチック廃棄物の分離回収方法及びそれに用いる分離回収装置」

する解重合法を採用している。もともと解重合法によるリサイクルは廃プラスチックの油化リサイクルを目的として開発されたもので、繊維（CF、GF、アラミド繊維）や紙、金属などとプラスチックとが複合化した混合プラスチック廃棄物を材料ごとに分離させる技術である。溶液に投入した混合プラスチック廃棄物のうち、熱分解油の原料に適した PE、PP、PS は選択的に分離され溶液表面に浮く。油化に適さない PET や PU、Ny は溶媒に溶解する。金属や繊維などは残渣として溶媒の中に沈む。このメカニズムで廃 CFRP から rCF を取り出すことができる。

具体的には、グリコール系溶媒を使用した溶液を入れた溶解槽に廃 CFRP を投入し、少量の触媒（アルカリ金属塩）を加えて 2～3 時間置くと、CFRP の樹脂成分（エポキシ）と CF が分離し、分離した CF（rCF）は溶液中に沈み、エポキシは溶液中に溶解したエポキシ分解物となる。処理温度は 275℃で常圧。

油化して溶液中に溶解したエポキシは、溶液を蒸発させてエポキシ分離物として再利用が可能である。蒸発させた溶剤は回収して再び分離処理に使用することができる。

溶剤で樹脂成分を溶解させ rCF だけを取り出す解重合法では、熱分解法に比べ処理温度が低く、処理時間も短いため、繊維表面が焦げたりすることがなく、vCF と同等のきれいな状態の rCF が回収できる。廃 CFRP は溶解槽に入るサイズであれば切断などの前処理が不要で、rCF を長いまま取り出せる。溶解槽の中では樹脂と CF、その他（部品に複合化された金属等）が完全に分離されるため、不純物の無い rCF の回収も可能である。

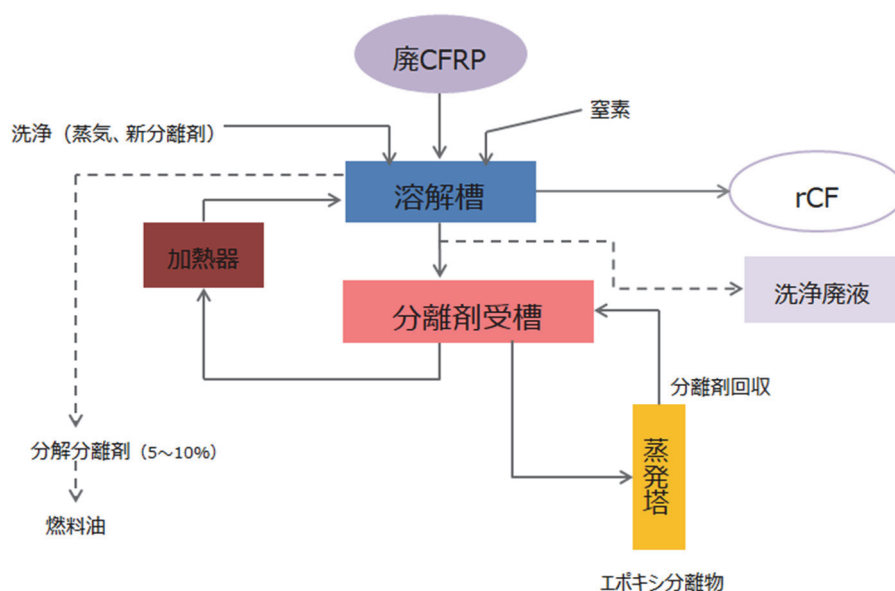


図 2-1. アースリサイクルの CFRP リサイクルフロー

出典：アースリサイクル資料

・ rCF の物性、品質保証方法

アースリサイクルでは解重合法で回収された rCF について、ひょうごエコタウン推進会議の研究補助を用いて評価を行い、以下の結果が得られた。

表 2-3. 廃 CFRP から回収した rCF の引張強度、引張弾性率試験結果

形状	分離条件	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)	平均繊維直径 (μm)
パイプ	280℃、3hr	3,670	304	7
板		3,418	479	7.1

出典：アースリサイクル資料

・ 企業や研究機関との協力関係

アースリサイクルはひょうごエコタウン推進会議の一員として混合プラスチック廃棄物のリサイクルに取り組んでいる。rCF 事業はその一環である。

ひょうごエコタウン推進会議は、兵庫県で古くから発達した産業基盤・物流基盤の活用による広域的な連携による資源循環の実現と、市民・NPO など幅広い関係者との連携による市民参加型のリサイクル活動を通じ、リサイクルの推進と地域産業の振興という課題解決の実現を目指して策定された「ひょうごエコタウン構想」に基づき、県民、事業者、大学、研究機関、団体、暁星など、様々な主体の参画・協働により組織されている。資源有効利用、食品リサイクル、廃棄物リサイクル、家電リサイクルを主な事業を柱とし、廃棄物リサイクル事業の一つに CF リサイクル事業がある。2013 年にひょうごエコタウン推進会議の中に CF リサイクル研究会が組織され、アースリサイクルが事業化を行った。

② ウィスカ

企業名	ウィスカ株式会社
国	日本
設立	2008年6月16日
本社所在地	大阪市中央区南船場3-5-25 科野ビル5F
URL	http://www.whisca.co.jp/company.html

・ rCF 事業開始の経緯

ウィスカはアシックスで開発された CFRP リサイクル技術を工業化するため、2006 年 6 月に設立された会社である。同社代表取締役である徳井康之氏は、元株式会社アシックス スポーツ工学研究所研究員である。

スポーツ用品メーカーであるアシックスでは、独自に工程内端材（成形品端材）を原料とした、新たな CF の製造技術の開発に成功している。この技術で製造された rCF は 2004 年からアシックス製品の部品に採用され、機能・耐久性の検証が行われてきた。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

原料から短繊維化までのフローは、①CFRP 原料購入、②粉砕、③分級、④樹脂熱分解（バッチ式）、⑤ミルド化を経て短繊維を製造する。

①原料は、CFRP 成形工場内で排出される CFRP 成形端材やプリプレグ材料である。②粉砕、③分級では破砕装置によって粉砕し、その後用途に応じた繊維長に分級する。高強度繊維であっても、一旦樹脂を繊維束に含浸させ、硬化（架橋）させて粉砕すれば容易に切断ができる。つまり CFRP 成形品そのものが短繊維化を容易にさせる原料でもある。硬化樹脂で含浸し繊維束を引きそろえた材料であるプリプレグシートも製造可能である。CFRP を破砕するには縦方向及び横方向は非常に強い力を必要とされるが、厚み方向は縦横に比較して弱いため、層間剥離を繰り返しながら細かく粉砕ができる。

CFRP の硬化樹脂を除去する方法として、ウィスカの特許技術である過熱水蒸気による自燃分解法を使用している。自燃分解法とは樹脂の分解ガスを充満することで無酸素状態をつくり、CF を酸化劣化させずに樹脂を除去する技術で、過熱水蒸気を用いることで rCF 表面に極性官能基が修飾され、様々な樹脂との親和性が向上する。

こうして得られた rCF 短繊維（ミルド形状）は通常の CF とは異なり、表面活性に優れているため、樹脂用フィラーとして有用である。さらにこの rCF 短繊維を用いた樹脂コンパウンドには耐摩耗性（摺動性）・寸法安定性・耐衝撃性・帯電防止性が発現し、機能性材料として期待できる。

・ rCF の物性、品質保証方法

ウィスカが製造販売する短繊維 Σ RF-006 は PAN 由来の高強度 CF を原料としている。CFRP 製品の製造時に生じる端材を出発原料としているため、環境にも配慮されたクリー

ンな繊維材料で、樹脂とのコンパウンド製品や成形加工がしやすい平均繊維長 $60\mu\text{m}$ のミルド形状繊維である。

繊維表面に極性官能基が存在するため、コンパウンド作成時にサイジング剤が不要であるため、サイジング剤由来のアウトガスが発生せず、成形時の金型腐食が抑制できる。

ΣRF-006 の特徴を以下に示す。

表 2-4. ΣRF-006 の特徴

型番	炭素繊維	平均繊維長 (μm)	平均繊維径 (μm)	アスペクト比	批准 (kg・cm ⁻³)
ΣRF-006	PAN系	60	7	8.6~10.0	1.7

出典：ウイスカ HP

熱可塑性樹脂に ΣRF-006 を添加し複合樹脂化することで、寸法安定性や耐摩耗性といった課題が解決する。ΣRF-006 は表面活性に優れたミルド繊維であるため、熱可塑性樹脂にも高い親和性を示す他、コンパウンドの成形には特殊な設備を必要とせず、通常の設定で射出成形が可能である。

例えば、汎用性の高い PC/ABS に ΣRF-006 とガラス繊維 (GF) を添加したコンパウンドにおいて、ベース樹脂の線膨張率の低減を確認している。また、ΣRF-006 添加量の調節により、線膨張率の制御が可能で、ガラスと同等の 10^{-6} オーダーの線膨張率を達成。ガラスとの一体化 (マルチマテリアル化) が可能である。

表 2-5. ΣRF006 と PC/ABS 複合樹脂の物性

ΣRF006とPC/ABS複合樹脂の物性						
	ΣRF-006添加量/wt%	ガラス繊維添加量/wt%	線膨張率/ $10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	引張強度/MPa	曲げ強度/MPa	曲げ弾性率/GPa
PCABS GF30	0	30	11.0	99	161	8.9
PCABS CF10GF30	10	30	9.0	106	165	11.4
PCABS CF15GF30	15	30	7.5	106	167	12.9

※掲載データは全て代表値であり、保証値ではない

出典：ウイスカカタログ

また、ポリアミド 66 (PA66) 樹脂をベースとしたコンパウンドでは、著しい耐摩耗性向上により優れた摺動特性が発現する。他の市販 CF を複合化したサンプルと比較して、鈴木式摩擦摩耗試験において ΣRF-006 のコンパウンドでは優れた耐摩耗性を示した。

ΣRF-006 を分散したマトリックス樹脂 (エポキシ樹脂) を長繊維クロスに含浸 (長繊維と短繊維をハイブリッド化) したハイブリッドプリプレグは CFRP の課題である耐衝撃性を改善する。長繊維と短繊維の複合化 (ハイブリッド化) により、耐衝撃性が著しく向上する。長繊維の種類によらず、高い添加効果を発揮し、長繊維を自由に選択できるため材

料設計の幅が広がる。

ΣRF-006 の優れた表面活性により、マトリックス樹脂（エポキシ樹脂）に機械的な攪拌のみで分散し、本プリプレグを用いたハイブリッド CFRP では、層間に ΣRF-006 が等方的に分散する。また、ハイブリッドプリプレグはオートクレーブ法などの通常設備で容易に成形が可能である。

表 2-6. ΣRF-006 ハイブリッドプリプレグ 実績例

長繊維種	クロス	曲げ弾性率/MPa	曲げ弾性率/GPa	衝撃強度/ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	備考
高強度中弾性率	平織	736	56	90	-
高強度標準弾性率	平織	796	45	103	-
高強度標準弾性率	疑似等方	1054	80	110	-
標準弾性率	平織	857	47	25	-
高強度標準弾性率	平織	660	50	104	海外品長繊維
標準弾性率	平織	868	59	50	海外品長繊維

出典：ウイスカ HP

④ACA

企業名	ACA株式会社
国	日本
設立	2016年5月17日
本社所在地	東京都港区港南4-1-10 リバージュ品川
URL	http://www.ss-aca.jp/reuse/

・ rCF 事業開始の経緯

ACA は 2016 年 5 月に設立された超微粒粉末原料を使用した商品の企画・開発・販売業務 及び装置開発・製造を行うベンチャー企業である。主な事業はリユース事業（CFRP リユース、天然無機素材リユース）、ハイブリッド事業（ナノフーズや高機能電子素材の開発・製造）。CFRP リユース事業では CFRP 製品メーカーの工程端材を引き取り、ACA が独自に開発した空気流による粉砕・分散技術で CF を回収し、高機能シート（高熱伝導シート、導電性シート、耐摩耗シート）や塗料材料（カーボン加工顔料）として再生する。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

ACA が独自に開発した空気流による粉砕・分散技術は、音速に近い超高速の空気流で CFRP 同士を衝突させ、そのエネルギーで CFRP を微細化するとともに樹脂と CF を分離するもので、燃やすこともなく、溶かすこともなく、目的に合わせた粒子へと廃 CFRP を変化させる技術である。分離した CF は最終的に直径 $1\mu\text{m}$ 、長さ $10\mu\text{m}$ 程度に微細化され、ACA 独自の表面加工処理にてカーボン加工顔料として再生する。2018 年には空気流による粉砕・分散技術で再生した rCF 粉末をシート状に再生する技術を確立した。

空気流による CFRP リサイクルは、従来の熱分解によるリサイクルに比べコストを 8 割減らせるほか、CO₂ を 30%減らせる効果がある。

⑤カーボンファイバーリサイクル工業

企業名	カーボンファイバーリサイクル工業株式会社
国	日本
設立	2008年
本社所在地	岐阜県可児郡御嵩町御嵩2193-102
URL	https://cfri.co.jp/

・rCF 事業開始の経緯

カーボンファイバーリサイクル工業はCF廃材からのCF再生事業を行うベンチャー企業として2008年に設立された。CFリサイクル自体は会社設立以前から自動車メーカーの要請を受け研究開発を開始していた。この要請とは、自動車メーカーが自社の自動車の天井材として使用するCFRPの原料であるCFの安定調達が難しくなったためCFRP端材からrCFを回収したいというものである。もともと保有していた還元焼成技術に応用し、二段階焼成によりCFRPからrCFを回収する技術を開発した。

2010～2012年度には、国立大学法人岐阜大学と共同で国立研究開発法人独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下NEDO）の「省エネルギー革新技术開発事業／先導研究／リサイクルCFの低コスト省エネ再生技術の研究開発」に係る研究開発を受託した。同研究はCFリサイクル技術に関わるものであり、低コストで長繊維のまま、かつCFが有する特性を維持したまま再生する技術の確立を目指したものである。

その後、実用化フェーズとして2014～2016年度にNEDOの戦略的省エネルギー技術革新プログラム 実用化開発において「リサイクル炭素繊維の省エネルギー連続回収プロセスの開発」を、2017～2018年度にはNEDOの戦略的省エネルギー技術革新プログラム 実用化開発「革新的省エネルギー技術により製造した再生炭素繊維省機能性自動車部材の開発と自動車の軽量化」を行っている。

・rCFの由来・回収元（排出メーカー・元用途：工程端材・廃材）

カーボンファイバーリサイクル工業では、CFメーカー、中間材（プリプレグ、ファブリック）メーカー、CFRP製品メーカーの工程内端材（廃CFRP）からrCFを回収している。自動車、飛行機、風力発電など市中に出たCFRP製品廃棄物からの回収は無い。

廃CFRPの年間回収量は400～500t/年程度で、回収元別構成比をみるとCFメーカー・中間材メーカーから排出される端材が40%（硬化前20%+硬化後20%）、CFRP部品メーカーから排出される端材が60%（硬化前50%+硬化後10%）。

回収された端材の元用途は、航空機部品、水素タンクなど。

・rCFの回収方法（有価・無償等）、年間の回収量

カーボンファイバーリサイクル工業ではCFメーカー、中間材メーカー、CFRP製品メーカーから廃CFRPを有償（数十円/kg程度）で購入している。回収量は、廃CFRPに含ま

れる CF の含有量によって異なるが、概ね回収された廃 CFRP 重量の 65%前後の rCF が回収可能であるものと推計される。ただ、現段階では同社の rCF は商業生産には至っておらず、年間の回収量についての詳細は不明である。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

カーボンファイバーリサイクル工業では廃 CFRP を二回に分けて熱分解する二段階熱分解法で rCF を回収している。

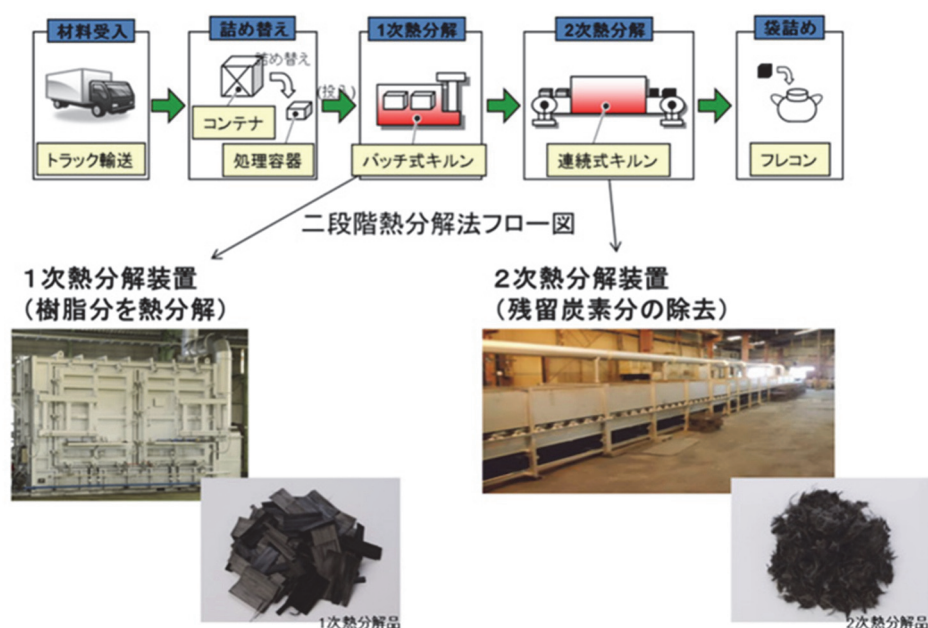


図 2-2. CF の再生プロセス

出典：カーボンファイバーリサイクル工業 HP

二段階熱分解法では、廃 CFRP を一次熱分解装置（バッチ式キルン）に投入し、約 500℃ に加熱（燃焼室内温度は約 900℃）して樹脂成分をガス化（熱分解）した後、二次熱分解装置に投入して高純度の rCF を回収する。処理時間は一次熱分解が約 23 時間、二次熱分解が約 2 時間。一次熱分解装置の過熱ボックスのサイズは約 7 m³あり、廃 CFRP の切断・粉碎などは不要である。

一次熱分解では CFRP の樹脂成分を無酸素状態でガス化し、発生したガス化成分は炭化炉の外側から間接加熱の熱源として使用する。熱分解過程で CF が酸化雰囲気火に晒されることはなく、エネルギーコストも削減できる。カーボンファイバーリサイクル工業では、発生ガスをエネルギーとして利用することで、再生装置の燃料である灯油の消費を約 50%、電気代を約 70%削減できるとしており、第一次熱分解での rCF 回収にかかるコストは石油や石炭から同等の CF を作る場合の約 1/30 程度と試算している。

rCF 表面は CFRP の樹脂成分のうちガス化できずに炭素成分となったもので覆われ、適度な硬さがあるため切断処理がしやすい。rCF 表面に付着する炭素被膜（残渣）は重量比 15%程度と推計される。

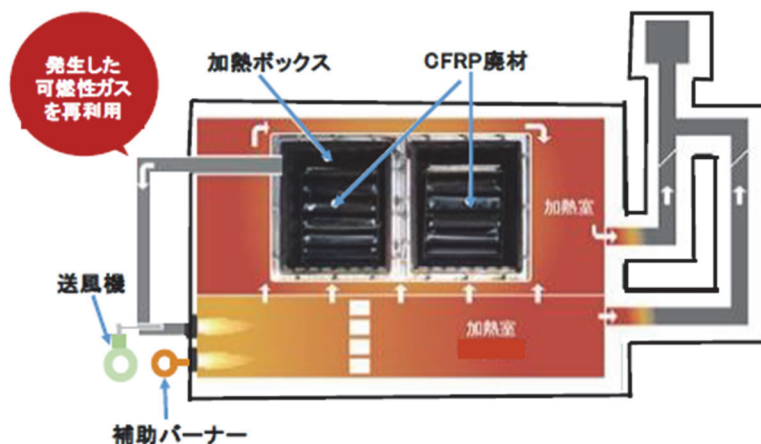


図 2-3. 一次熱分解装置（炭化炉）の構造

出典：「戦略的省エネルギー技術革新プログラム 実用化開発 リサイクル炭素繊維の省エネルギー連続回収プロセスの開発」



図 2-4. カーボンファイバーリサイクル工業で再生した再生 CF

出典：カーボンファイバーリサイクル工業 HP

一次熱分解後、取り出された rCF は二次熱分解装置（連続式キルン）に投入され、500～550℃の熱がかけられる。これにより、一次熱分解品の表面炭素被膜がほぼ消滅し、高純度の rCF の回収が可能になる。二次熱分解後の rCF 表面の炭素被膜残渣は 3%程度と推計される。

・ rCF の処理能力（工場能力、実績等）

カーボンファイバーリサイクル工業では岐阜県御嵩町に敷地面積約 56,000 m² の処理施

設を保有し、CFRP からの rCF 回収を行っている。一次加熱装置（炭化炉）は各炉 1t/日の CFRP 廃材の処理が可能で、この炭化炉（バッチ式キルン炉）を 12 台保有し、処理能力は最大で 3,000t/年。

・rCF の物性、品質保証方法

カーボンファイバーリサイクル工業では、NEDO の戦略的省エネルギー技術革新プログラム¹⁴において二段階熱分解法で回収された rCF と、vCF 及び従来の熱分解法で回収された rCF の生産エネルギー（MJ/kg）、繊維強度、繊維長の比較を行った。

生産エネルギーはバージン繊維の約 3%弱、従来の熱分解法の 18%弱と非常に省エネであり、繊維長は粉末から数 m の長繊維まで取り出すことが可能。また、繊維強度は vCF との比較ではやや弱いものの、80%以上という結果となった。

表 2-7. エネルギー自立二段階熱分解法の省エネ・用途比較（NEDO）

	バージン繊維	従来の熱分解法	エネルギー自立 二段階熱分解法
生産エネルギー (MJ/kg)	290.0	48.0	8.5
繊維強度	100%	-	80%以上
繊維長	長繊維（～km）	繊維粉末（＜1mm）	粉末～長繊維 （数mまで）
適用範囲	全用途	充填剤（フィラー）	混紡糸 不織布 充填剤（フィラー）

出典：「公益財団法人大阪府産業資源循環協会 先進事例調査 27」

・rCF 価格（コスト）

カーボンファイバーリサイクル工業では、一次熱分解において発生ガスをエネルギーとして利用することで、再生装置の燃料である灯油の消費を約 50%、電気代を約 70%削減できるとしており、rCF 回収にかかるコストは石油や石炭から同等の CF を作る場合の約 1/30 程度と試算している。

・企業や研究機関との協力関係

二段階熱分解による rCF 回収技術の理論化や品質向上に取り組む中で、岐阜大学工学部 応用化学科 工学研究科環境エネルギーシステム専攻 守富寛教授と共同開発を実施、NEDO プロジェクト「省エネルギー革新技術開発事業／先導研究／リサイクル炭素繊維の低コスト省エネ再生技術の研究開発」、「戦略的省エネルギー技術革新プログラム 実用化

¹⁴ 平成 22 年度～平成 24 年度成果報告書 省エネルギー革新技術開発事業 先導研究 リサイクル炭素繊維の低コスト省エネ再生技術の研究開発

開発 リサイクル炭素繊維の省エネルギー連続回収プロセスの開発」は岐阜大学との共同プロジェクトである。

この他、製紙メーカー、不織布メーカー、自動車メーカー、航空機メーカーなどと連携した製品開発、用途開発を進めている。

・rCFの現状の課題と将来展望 等

カーボンファイバーリサイクル工業が拠点を持つ中部地域は航空機の国内最大の製造拠点であるとともに、自動車関連企業の国内最大の集積地であり、先進性を持つリサイクラーや大学・研究機関が存在する。航空機メーカーからは製造時のCFRP端材が排出され、自動車メーカーはrCFの最大の活用先であり、これらを後押しする大学・研究機関、リサイクラーが域内に数多く存在する。同社では、こうした地の利を活かしてrCFの利用促進を進めていくためには単にrCFを単体で材料として販売するだけでなく、使用済CFRPや工程内端材を回収してrCFを取り出し、再利用するリサイクルチェーンの確立が不可欠であるとしている。

⑥新菱

企業・機関名	株式会社新菱
国	日本
設立	1964年10月1日
本社所在地	福岡県北九州市八幡西区黒崎3丁目9番22号
URL	https://www.shinryo-gr.com/

・rCF 事業開始の経緯

新菱は三菱ケミカルの100%出資子会社であり、産業廃棄物の無害化・再生、半導体製造装置部品の精密洗浄、シリコンウェハの再生、ファインケミカル、ヘルスケアなど多種多様なソリューションを提供している。

同社の事業は、サーキュラーエコノミー・3R推進事業、ファインケミカル事業、精密洗浄・表面加工事業、ウェハ再生事業、めっき受託加工（電子加工品）事業、ヘルスケア事業に分かれており、rCF事業はサーキュラーエコノミー・3R推進事業の中で展開している。

新菱の親会社である三菱ケミカルのrCF事業は、前身の一つである三菱レイヨンのCFリサイクル技術の開発から始まる。三菱レイヨンでは2006年に経済産業省補助事業「炭素繊維リサイクル技術の実証研究開発」に参加、同事業は2012年3月末まで続いた。さらに、2012年3月～2015年3月末までは、東レ、東邦テナックスと共同で「炭素繊維リサイクル技術開発組合」に参加していた。同組合は2015年3月末に解散し、2015年4月には、三菱レイヨンと新菱が共同でCFリサイクルの事業化を推進。同年6月に新菱の工場内にCFリサイクルのための試験設備（rCF生産能力200t/年）を設置しリサイクル技術のさらなる工場と事業化に向けた検討を行った。

これとは別に、新菱、同志社大学、株式会社フコクとの共同研究プロジェクト「炭素繊維リサイクルの事業化」（実施期間：2014年11月～2017年3月）¹⁵や、平成29年度（2017年度）の環境省委託事業「平成29年度低炭素製品普及に向けた3R体制構築支援事業 炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化¹⁶」を実施している。

・rCFの由来・回収元（排出メーカー・元用途：工程端材・廃材）

新菱ではrCFの由来・回収元について明らかにしていないが、親会社である三菱ケミカルではCF（PAN系、ピッチ系）及び炭素繊維複合材（クロス、プリプレグ）、成型加工品の生産・供給を行っている。そのため、三菱ケミカルが生産した複合材や成型加工品の端材や、三菱グループを始めとするCFの販売先から出る端材を回収しているものと推定される。

¹⁵ https://www.recycle-ken.or.jp/files/public/SeminarDetail/0/SeminarDetail_422_file.pdf

¹⁶ https://www.env.go.jp/recycle/car/pdfs/h29_report01_mat02.pdf

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

新菱が 2014 年（平成 26 年）11 月～2017 年（平成 29 年）3 月末まで、同志社大学、株式会社フコクと共同で実施した「炭素繊維リサイクルの事業化」共同研究プロジェクトにおいては、バッチ炉及び連続炉を併用した二段階加熱方式での rCF 回収を検討した。バッチ炉で行う一次加熱の処理温度は 600℃、処理時間は 30～50 分、雰囲気ガスは不活性ガス。一次加熱後に樹脂除去率を確認し、連続式の二次加熱炉に投入する。二次加熱の処理温度は 600℃、処理時間は 20～30 分で、雰囲気ガスは大気である。

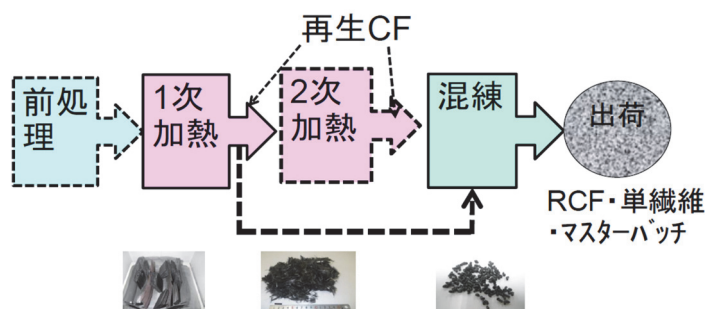


図 2-5. 二段階炉方式での rCF 回収プロセス

出典：「炭素繊維リサイクルの事業化」共同研究プロジェクト成果発表資料

この他、平成 29 年度の環境省委託事業「平成 29 年度低炭素製品普及に受けた 3R 体制構築支援事業 炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化」においては、CFRP からの rCF 回収と、太陽電池パネルからのガラス、アルミ、Ag、Cu の回収を共用炉で行うことを目標に、共用パイロット炉の建設と実証実験を実施。ここでは伝熱効率が高く、樹脂のクラッキング性能が高い過熱水蒸気による熱分解方式のパイロット炉を利用した検討及び実証を行った。

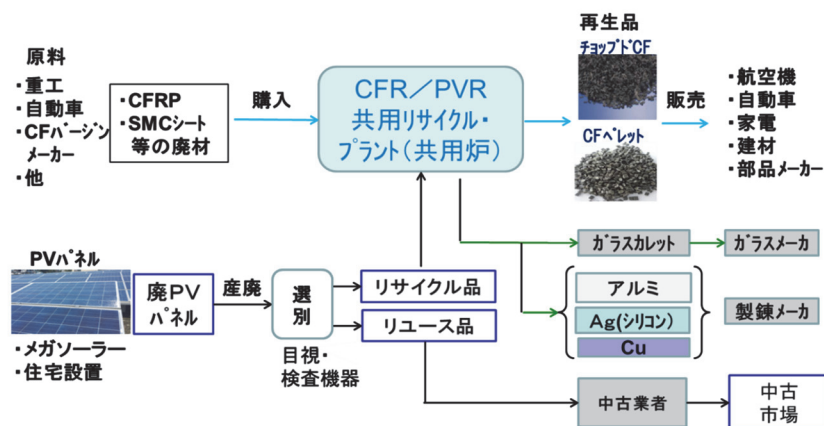


図 2-6. 共用リサイクルプラントによる CF/PV リサイクルスキーム

出典：平成 29 年度環境省委託事業「平成 29 年度低炭素製品普及に向けた 3R 体制構築支援事業 炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化」報告書

共用パイロット炉は、シール室、加熱室、冷却室、シール室という構成で、炉の出入口は薄肉な太陽電池パネルとバルキーな廃 CFRP を共用で処理することを可能とするため高さを稼げる特殊なシール構造とし、炉内温度は最高 700℃まで昇温可能、炉内雰囲気は常用過熱水蒸気雰囲気であるが、窒素雰囲気への切り替えを可能とした。

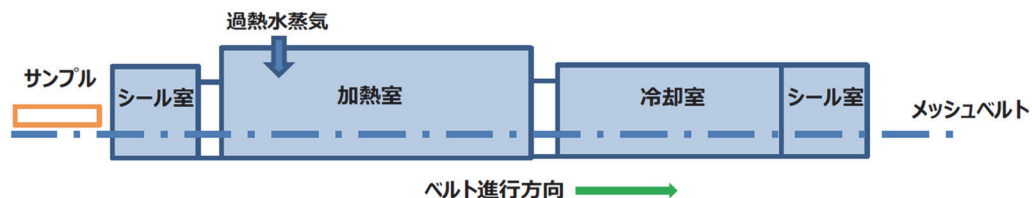


図 2-7. 共用パイロット炉の模式図

出典：平成 29 年度環境省委託事業「平成 29 年度低炭素製品普及に向けた 3R 体制構築支援事業 炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化」報告書

・ rCF の処理能力（工場能力、実績等）

新菱が現在保有しているパイロット設備での rCF の再生能力は 200t/年である。親会社である三菱ケミカルは廃 CFRP からの rCF の回収から rCF を樹脂と混練したコンパウンドの生産まで一貫した商業生産設備を立ち上げるべく、2021 年～2022 年の稼働を目指して新菱の敷地内に設備を建設している。商業生産設備の能力はコンパウンド換算で 3,000t/年。稼働後、当面の間は三菱ケミカル及び同社の CF の販売先から CFRP 端材や使用済 CFRP 製品を調達し、rCF を回収した後、熱可塑性樹脂とコンパウンドした rCF 強化樹脂として顧客に供給するというクローズドリサイクルを行う予定である。

・ rCF の物性、品質保証方法

新菱が実施した平成 29 年度（2017 年度）の環境省委託事業「平成 29 年度低炭素製品普及に向けた 3R 体制構築支援事業 炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化」事業において、廃 CFRP から回収した rCF の強度・品質評価を行っている。

評価にあたってはバッチ炉及び小型連続炉を用いた二段階加熱方式による rCF 回収を行った。一次処理は加熱水蒸気雰囲気で 600℃×30 分、二次処理は空気中で 500℃×30 分を標準条件とした。また、一般的に CF の機械特性はストランド試験で測定された値を使用するが、同事業での rCF は連続繊維での回収ができずストランド評価が実施できないため、リサイクル時にサンプルと同じ履歴を受けたバージン CF トウのストランド試験を行うという間接的評価となった。

廃 CFRP から回収した rCF（一次処理品）繊維強度を見積もるため、大気雰囲気下にて CF 強度に影響を与えない程度の抽出温度で加熱することにより樹脂残渣を除去し、単繊維強度測定を実施した。

測定条件は以下の通り。

- ・測定法：JIS R7606 に準拠（試長：10mm、試験数（n）：30 本）
- ・測定サンプル：廃 CFRP 一次処理品

（使用 ν CF：30t タイプ高強度品、熱処理条件：窒素雰囲気、600℃、1 時間）

その結果、未処理サンプルの単繊維強度は相対的に低い強度発現となった。樹脂残渣により繊維同士が軽く固着しているため、サンプル調整時の繊維取り出しの際の繊維へのダメージの蓄積により相対的に低い強度となったものと推定される。処理時間が増す（30 分～90 分）に連れて樹脂残渣による固着の程度が軽減し取り出し時のダメージが軽減するため、強度が向上する傾向が見られた。90 分以上の処理時間では強度が低下する傾向であった。これは、過剰な酸化処理により繊維に酸化痕等の欠陥点が導入されたためと推定される。

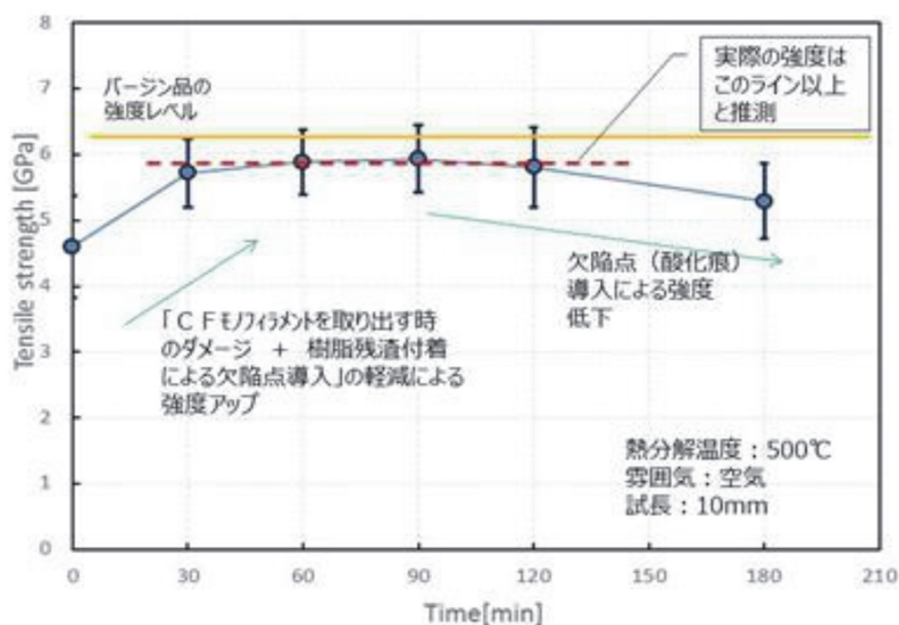


図 2-8. 一次処理品単繊維強度の熱分解処理時間依存性

出典：平成 29 年度環境省委託事業「平成 29 年度低炭素製品普及に向けた 3R 体制構築支援事業 炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化」報告書

・企業や研究機関との協力関係

新菱では 2014 年（平成 26 年）11 月～2017 年（平成 29 年）3 月末まで、同志社大学、株式会社フコクと共同で「炭素繊維リサイクルの事業化」共同研究プロジェクトを実施（研究者代表：新菱、共同研究者：同志社大学、フコク）。同研究では CF リサイクルの入り口～処理技術～出口及び技術の新規性に対して 5 つの課題（課題 A：用途開発の企業向け rCF 供給、課題 B：廃材排出状況及び含有障害成分対応、課題 C：本格設備のプロセス設計、課題 D：処理プロセス全体の最適化課題 E：再生処理技術の差異化、新規性）を検討した。

・ **rCF の現状の課題と将来展望 等**

新菱では市場に大量に出回る CFRP から回収する **rCF** の品質を保証するためには、分別回収方法の構築や異物混入検査・除去技術の開発や **rCF** の標準規格化が必要であると考えている。また、自動車のマルチマテリアル化に向けて **rCF** の回収だけではなく、併用されたスチールやアルミ等の他材料も同時に可能なリサイクル手法の開発も課題となるとしている。

⑦高安

企業・機関名	高安株式会社
国	日本
設立	1952年10月1日
本社所在地	岐阜県各務原市蘇原村雨町3-47
URL	http://www.takayasu-rf.co.jp/

・ rCF 事業開始の経緯

高安はプラスチックの「マテリアルリサイクル」をメインにリサイクル製品の研究・開発に取り組んでいる。rCF については 2004 年頃から CFRP またはプリプレグの端材から rCF を回収する研究開発を開始した。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

高安では、同社の基盤事業である合成繊維を製造する際に、熔融紡糸に用いる口金に付着した樹脂を除去するための加熱炉を利用し、廃 CFRP（プリプレグや硬化品）の樹脂を加熱分解する方法を検討した。試験規模においては不要な樹脂を分解し、CF だけを取り出すことに成功している。元々専用炉ではないため、廃材量が増加すると、熱分解が不安定になることから、更に商業化において適用可能な方法を探り、屋根瓦を製造する際の加工技術の採用検討を行った。この方法では、樹脂が分解された際に発生するガスを更に熱分解するため燃料の一部として使用することが可能となる。更に独自の熱処理工程を加えることで、CF にほとんどダメージを与えずに再生する技術を確立した。パイロットプラントで約 5t/月が処理可能である。更に短カットの検討を行い、短カット rCF を原料としたシート状材料（不織布、紙）を試作している。

・ rCF の物性、品質保証方法

高安では、rCF 及び rCF を使用したシート状材料（不織布・紙）について、特性評価を行い、その結果を参考に rCF の用途を効率よく開拓することを目指し、NEDO の平成 20 年度のエコイノベーション推進事業として「リサイクル炭素繊維シート状材料の用途及び市場調査研究¹⁷⁾」において rCF の特性評価を行った。

同事業において、熱分解により得られた rCF は、傷が少なく、弾性率もほとんど低下せず導電性も有し、また空気中で 500℃、不活性ガス中で 1,000℃を超える耐熱性を有していることが公共機関（岐阜県産業技術センター）の検査結果で確認されている。

¹⁷⁾ <https://seika.nedo.go.jp/pmg/PMG01B/PMG01BG02>

表 2-8. 再生 CF の特性評価（単糸引張強さ、伸び率、弾性率）

	A	B	C	D
繊維系 (μm)	7.0	6.4	4.4	4.8
引張強さ (N)	0.12	0.06	0.08	0.04
伸び率 (%)	1.6	1.2	1.8	1.0
弾性率 (GPa)	188	178	279	219
強度 (GPa)	3.2	1.9	5.3	2.1

出典：平成 20 年度エコイノベーション推進事業

「リサイクル炭素繊維シート状材料の用途及び市場調査研究」調査委託成果報告書

シート状材料の試作サンプルにおいては、rCF を用いた不織布としての機械的強度は PET 不織布と比較し低めであったが、同社によればこれは rCF に捲縮が無く、CF 同士が絡まりにくいと考えている。不織布自体の機械強度（引張強さ）は製造条件によって大きく変化するため、今後各用途の後加工等の条件に合わせて検討するとしていた。

不織布熱プレス品では、上記不織布と同様に PET 不織布プレス品と比較し引張試験の値が低い。これは不織布自体の強度が低いことと、今回の加工条件では PET が溶融してうまく rCF を覆えなかったためと考えられる。

表 2-9. 不織布、不織布の板状加工品、紙の特性評価

			不織布				不織布の板状加工品				紙		
			PET不織布	不織布 ①	不織布 ②	不織布 ③	PET不織 布プレス 品	不織布熱 プレス品 ④	不織布熱 プレス品⑤	不織布熱 プレス品⑥	再生CF 紙①	再生CF 紙②	再生CF 紙③
再生炭素繊維 (%)			－	80	60	40	－	80	60	40	80	60	40
PET繊維 (%)			－	20	40	60	－	20	40	60	20	40	60
バインダー繊維 (%)			－	－	－	－	－	－	－	－	1	1	1
目付(g/㎡)			－	500	500	500	－	500	500	500	102	92.7	105
厚み(mm)			－	5	5	5	－	5	5	5	0.622	0.554	0.566
試験項目													
引張強さ (N/mm ²)	※前処理なし	縦方向	744	24.2	42.2	64.1	4.21	0.609	0.906	2.1	－	－	－
		横方向	1354	183.9	215.5	318.3	4.54	2.18	2.55	2.04	－	－	－
	※前処理200℃ 120時間	縦方向	744	－	－	－	1.12	0.622	1.85	2.18	－	－	－
		横方向	1354	－	－	－	0.992	2.47	3.35	2.24	－	－	－
引張強さ (kN/m)	－	縦方向	－	－	－	－	－	－	－	－	0.465	0.886	1.82
		横方向	－	－	－	－	－	－	－	－	0.404	0.555	1.63
伸び率 (%)	(再生CF紙は破 断伸び(%))	縦方向	90.2	83.5	149	144.5	－	－	－	－	0.8	1.2	5.8
		横方向	73.6	32	43	54.5	－	－	－	－	1.1	1.4	7.6
曲げ試験 (N/mm ²)	※前処理なし	縦方向	90.2	－	－	－	0.563	0.309	0.548	0.54	－	－	－
		横方向	73.6	－	－	－	0.535	0.395	0.582	0.863	－	－	－
	※前処理200℃ 120時間	縦方向	90.2	－	－	－	0.342	0.31	0.532	0.52	－	－	－
		横方向	73.6	－	－	－	0.271	0.278	0.352	1.03	－	－	－
引き裂き強さ(mN)		縦方向	－	－	－	－	－	－	－	－	1440	2140	2460
		横方向	－	－	－	－	－	－	－	－	1520	1780	2500
破裂(kPa)			－	－	－	－	－	－	－	59.5	80.3	245	
厚さ(mm)			4.4	5.7	4.65	5.42	－	－	－	－	0.622	0.554	0.566
単位面積当たりの質量(g/㎡)			484	488	357	419	－	－	－	－	102	92.7	105
密度(g/cm ³)			－	－	－	－	－	－	－	－	0.16	0.17	0.19
摩耗強さ(級)			－	2	2	2	－	－	－	－	－	－	－
熱伝導率(W/mK)			－	0.064	0.05	0.049	－	－	－	－	－	－	－
体積抵抗率(Ω cm)			－	0.3～0.4	0.3～0.5	0.6～1.0	－	－	－	－	0.6～0.8	1.0～1.3	0.6～0.8

出典：平成 20 年度エコイノベーション推進事業

「リサイクル炭素繊維シート状材料の用途及び市場調査研究」調査委託成果報告書

⑧富士加飾

企業・機関名	富士加飾株式会社
国	日本
設立	2011年12月1日
本社所在地	兵庫県小野市万勝寺町358-25
URL	http://fujii-d.jp/

・rCF 事業開始の経緯

富士加飾では2018年に環境省が行った公募による実証事業「平成30年度省CO₂型リサイクル等設備技術実証事業¹⁸」に採択され、廃棄物処分・再利用事業を行うリーテム株式会社をパートナーとしてrCF生成技術「熱風循環式リサイクル法」の認証を受けた。CNGボンベや航空機端材、プリプレグ端材などの廃CFRP製品を原料とし、独自に開発した熱風循環式リサイクル法によるrCF回収技術を確立し、2019年度には環境省の設備補助を受け事業化に着手。2020年にはrCFとPA6を複合化した強化樹脂「コバトロンTM」を開発し、量産に向けた準備を進めている。

・rCFの由来・回収元（排出メーカー・元用途：工程端材・廃材）

富士加飾では生産から15年経過し、使用済となったCFRP製CNGガスボンベからrCFを再生する。使用済CNGガスボンベの供給はパートナー企業であるリーテム株式会社が行う。この他、リーテム株式会社が回収したCFRP端材（航空機端材、水素ガスボンベ等）の供給も受け、富士加飾がrCFの回収を行う。

・rCFのマテリアルリサイクル技術

富士加飾が独自に開発した熱風循環式リサイクル法とは、自社で開発した熱処理炉に投入した廃CFRPに風速10m/分以上の熱風を当てることで樹脂成分を除去しrCFを取り出すというものである。まず熱風により炉内温度が室温から300℃程度まで上昇したところでマトリックス樹脂が分解を開始する。次に炉内温度が380℃程度になったところで樹脂のデラミネーションが進行し内部層状物が均一に分解を開始、内部温度が400～480℃に上昇したところで層状剥離物の炭化が進み、緩やかな酸化が発生する。その後、炉内を室温に戻せば樹脂成分が除去され成形前の繊維配列に戻ったrCFが回収される。処理時間は3時間程度。処理温度が500℃以下と低く、セラミックファイバー炉と完全自動制御のLPGバーナーの組合せで精密処理を連続的に行うため1日数回の処理が可能であり、初期投資も従来法より小さいなど、コスト面での優位性が高い。

熱処理炉はバッチ炉であり、廃CFRPのマトリックス樹脂の種類、サイズ等に応じて熱分解パターンを選択でき、処理温度や時間を組み合わせることで用途やニーズに応じたrCFを回収できる。

¹⁸ http://www.env.go.jp/recycle/car/pdfs/h30_report01_mat03.pdf

得られた rCF の繊維表面は少量の熱分解炭素が繊維を結束するため、新品と同様の加工状態を作り出すことができ、コンパウンドやその他の 2 次加工に適した材料となる。富士加飾では rCF を 1 層ずつ剥離し、切断した後、PA6、PA66、その他の樹脂と複合化した rCF コンパウンドを「コバトロン™」のブランド名で展開、成形メーカー向けに提案。CFRP や CFRTP として CFRP 部品メーカーに戻す水平リサイクルの実現に向けた取り組みを進めている。

・ rCF の処理能力（工場能力、実績等）

2020 年 8 月には 30t/月の廃 CFRP 処理装置（リサイクル乾留装置）を設置、同年 10 月に稼働を開始している。また、rCF と樹脂を複合化した成形用コンパウンド「コバトロン™」を生産する二軸押出機の能力は 100t/年。

・ rCF の物性、品質保証方法

環境省の公募により富士加飾が実施した「平成 30 年度省 CO₂ 型リサイクル等設備技術実証事業 2 次加工性を考慮した新しいリサイクル炭素繊維を用いた繊維強化複合材料の商品化と実証」では、熱風循環式リサイクル法で回収した rCF 及び rCF と PA6 のコンパウンド樹脂（rCF30%含有）の物性評価を行った。

rCF 単繊維については名古屋大学大学院工学研究科材料デザイン工学専攻 田邊研究室（田邊靖博教授）に分析を依頼、550℃の高温処理を行っても、強度 2.6GPa で 80%以上の強度を維持しており、樹脂コンパウンドを行った場合の機械的性能は vCF と差異が無いという結果となった（熱風循環式リサイクル法で回収された rCF は結束力が強く、CF の劣化が始まる 500℃以降の処理を加えなければ測定は困難）。

表 2-10. rCF の強度評価

	平均直径 (μm)	標準偏差 (μm)	強度	標準偏差 (GPa)
新品材	7.26	0.32	3.25	0.66
rCF (500℃30分)	7.1	0.4	1.96※	0.61
rCF (550℃30分)	6.94	0.38	2.6	1

※残存マトリックスの影響大

出典：「平成 30 年度環境省 CO₂ 型 CFRP リサイクル等設備技術実証事業 2 次加工性を考慮した新しいリサイクル炭素繊維を用いた繊維強化複合材料の商品化と実証」

同実証事業では、回収した rCF と PC とを複合化したペレットの物性測定も実施している。測定はダイセルポリマーに依頼し、PC に 20%の rCF を複合化したもの、PC に 25%の rCF を複合化したものの品質を評価した。このうち PC-25rCF は新品材に匹敵する曲げ弾性率 17GPa をクリアした（PC-20～25CF 複合化樹脂に要求される曲げ弾性率は 16～18GPa）。また、引張強度、曲げ強度、シャルピー衝撃値は新品と同レベルであった。

表 2-11. 製造物（リサイクル成果物）の品質評価（ペレット）

特性	測定方法	測定条件	単位	PC-20rCF			PC-25rCF
				①	②	③	
MFR	ISO 1133	300℃/2.16kg	g/10min	7.5	7.0	5.6	(測定中)
		300℃/5kg		21.4	22.0	17.9	(測定中)
引張強度	ISO527	-	MPa	120.9	125.1	129.9	136.8
引張呼び歪み		-	MPa	1.8	1.7	1.6	1.3
曲げ強度	ISO178	-	MPa	172.9	180.8	197.7	201.9
曲げ弾性率		-	MPa	11175	11700	13872	17573
シャルピー衝撃値	ISO179/1eA	23℃	KJ/m ²	6.72	6.35	6.3	5.87
荷重たわみ温度	ISO75	1.80MPa	℃	148.3	146.4	147	147.4
密度	ISO1183	-	g/cm ³	1.265	1.234	1.27	1.311

出典：「平成 30 年度環境省 CO₂ 型 CFRP リサイクル等設備技術実証事業 2 次加工性を考慮した新しいリサイクル炭素繊維を用いた繊維強化複合材料の商品化と実証」

・ rCF 価格（コスト）

富士加飾では回収した rCF 単体で市場に出すのではなく、rCF と樹脂とを複合化したコンパウンド製品として再生する、CFRP to CFRP/CFRTP での水平リサイクルを展開する方針であり、PA6 に 30%の rCF（25mm チョップド rCF）を配合したもので 800～1,000 円/kg 程度での販売を予定している。

富士加飾では、熱風循環式リサイクル法で回収された rCF の価格は新品の 1/2～1/3 程度としており、この rCF を 30～60%配合する樹脂コンポジットは従来の CF 強化樹脂よりも大幅なコスト低減が可能であるとしている。

⑨JAXA 航空技術部門

企業・機関名	宇宙航空研究開発機構 航空技術部門
国	日本
設立	1955年
本社所在地	東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL	https://www.aero.jaxa.jp/

・rCF 事業開始の経緯

航空機構造材料として CFRP の適用割合は拡大しており、航空機が廃棄される際に大量の CFRP 廃材が生じることが予想される。航空機に適用される CFRP は熱硬化エポキシ樹脂をマトリックスとしているものが多く、樹脂の再利用が難しい。したがって生じた CFRP 廃材は埋め立て処理されることになるが、CFRP は耐腐蝕性に高い材料なので自然分解は困難である。環境負荷を考えると、CFRP のリサイクル手段が必要である。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）複合材グループでは、航空機の一次構造材として使用される高強度 CFRP から CF をリサイクルし、それを用いて航空機材料としてリユース可能な CFRP を製作するための研究を実施した¹⁹。

・rCF の由来・回収元（排出メーカー・元用途：工程端材・廃材）

- ① CFRP メーカー工程内から発生した端材（他の研究で使用し残ったプリプレグ、CF UD シート）を調達。
- ②市販のプリプレグ、定尺カット済み繊維を購入。

・rCF のマテリアルリサイクル技術

リサイクル元となる CFRP を 10mm 角、25mm 角、50mm 角に切り出し、常圧での加溶媒分解法を用いて 3 種類の長さを持った rCF を回収し、得られた rCF は短繊維なので、CFRP 化するため不織布にした。

不織布の製作はカード機で実施した。不織布内の繊維はある程度方向性を持つ。カード機のロール方向（多くの繊維が並んでいる方向）を 0 と定義し、これを一方向 [0]₄ と疑似等方 [45/0/-45/90]_s に積層し、VaRTM 法で樹脂を含浸させて rCFRP を成形した。

rCF には溶け残った樹脂が付着しているものも存在したが、樹脂自体の欠陥は見られなかった。

・rCF の物性、品質保証方法

リサイクル処理前の繊維と rCF を比較する短繊維引張試験を実施した。リサイクル前と後の繊維で 30 個ずつ試供体を作り試験を実施したが、得られた引張強度と弾性率はリサイ

¹⁹ <https://www.aero.jaxa.jp/about/pamphlets/pdf/apg2011-kenkyu01.pdf#page=36>

クル前後で値にほとんど差はなかった。化学処理による CF の劣化はほとんど生じていないと考えられる。

表 2-12. CF の単繊維引張試験結果

	引張強度 (MPa)	弾性率 (GPa)
リサイクル前	4005	252.2
リサイクル後	3929	249.8

出典：第 2 回 航空プログラムシンポジウム「リサイクル複合材に関する研究」

rCFRP の強度試験として、一方向積層板の引張強度試験及び疑似等方板の引張圧縮強度試験を行った。

一方向積層板の引張試験結果では、繊維の長さとともに引張強度も弾性率も増加した。荷重方向の繊維が長い方が rCFRP の強度が向上することがわかった。

疑似等方板の引張圧縮強度試験結果では、引張圧縮共に繊維長と強度の間に有意な傾向は観察されなかった。疑似等方積層板の厚さは一方向積層板の 2 倍ある。板厚が厚くなると樹脂の含浸性が悪くなる、もしくは繊維が面外の方を持つようになる可能性がある。今後、積層板内部の観察を実施して原因を調査する予定である。

⑩埼玉県産業技術総合センター

企業・機関名	埼玉県産業技術総合センター
国	日本
設立	1921年
本社所在地	埼玉県川口市上青木3-12-18
URL	https://www.pref.saitama.lg.jp/saitec/index.html

・rCF 事業開始の経緯

PP、PA、PC などの熱可塑性樹脂と CF を複合化した炭素繊維強化複合材料（CFRTP）は、短時間で低コストの成形加工が可能であり、今後の需要拡大が期待される。しかし現状では端材や使用済製品の再利用は難しく、環境負荷低減のためにもリサイクル技術の開発は不可欠である。現在開発中の CFRP リサイクル技術の中には廃 CFRP/CFRTP に熱や圧力をかけることで rCF を回収するというものもあるが、設備面や安全管理、燃料コストなどの点でハードルが高い。

埼玉県産業技術総合センターでは、2014 年より CFRP 廃材から常温常圧下で CF 樹脂及び溶剤を回収することを目的に、混合溶液による熱可塑性 CFRP（CFRTP）の化学処理リサイクルの検討を開始している。

2014 年度には Hansen 溶解度パラメータ（HSP）を利用して混合溶液を探索し、THF・シクロヘキサノン系混合溶液による CFRTP シートの溶解・回収実験を実施²⁰。2015 年度には樹脂溶解速度を向上させるため、改めて混合溶液の探索を行うとともに、溶解方法として超音波処理を用いて CFRTP シートの PC を溶解させ、CF を分離・回収する条件の検討を行った²¹。2016 年度にはマトリックス樹脂に PC を使用した CFRTP を 1,3-Dioxolane-THF 系混合溶液を用いて常温常圧下で CFRTP 中の PC を溶解させ、CF を分離回収した。²²2017 年度はマトリックス樹脂に PA6 を使用した CFRTP を用い、HC1-Benzyl Alcohol 溶剤を用いて常温常圧下で CFRTP 中の PA6 を溶解させ、CF を分離回収した²³。2018 年度には CFRTP メーカーから排出されたシート状廃材（廃 CFRTP）をプレス成形後、切断する際に発生したものを用い、溶剤により樹脂を溶解させ、CF、樹脂及び溶剤を分離回収する条件について検討し、回収物について物性評価を行った²⁴。

・rCF の由来・回収元（排出メーカー・元用途：工程端材・廃材）

CFRP シートメーカーから発生する端材を使用し rCF の回収を行っている。2018 年度に実施した廃 CFRTP リサイクル実験では、一村産業から CFRTP シート（PA6）の廃材の提供を受けている。

²⁰ <http://www.pref.saitama.lg.jp/saitec/kenkyukaihatsu/kenkyuhokoku/documents/14-2-2.pdf>

²¹ <http://www.pref.saitama.lg.jp/saitec/kenkyukaihatsu/kenkyuhokoku/documents/15-1-09.pdf>

²² <http://www.pref.saitama.lg.jp/saitec/kenkyukaihatsu/kenkyuhokoku/documents/16-1-01.pdf>

²³ http://www.pref.saitama.lg.jp/saitec/kenkyukaihatsu/kenkyuhokoku/documents/5_nylonrecycle.pdf

²⁴ <https://www.pref.saitama.lg.jp/saitec/kenkyukaihatsu/kenkyuhokoku/documents/01-nylonrecycle.pdf>

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

埼玉県産業技術総合センターで開発している溶剤による炭素繊維強化ナイロン複合樹脂のリサイクル方法は、Hansen 溶解度パラメータ (HSP) を利用して選択した HCl-Benzyl Alcohol 溶剤を用いて、常温常圧下で超音波処理により廃 CFRTP 中の PA6 を溶解させ、rCF を回収するものである。廃 CFRTP の溶解液を蒸留することで 90%以上の溶剤の回収が可能であり、回収した溶剤は HCl を再添加することで CFRTP の溶剤として再利用できる。

CFRTP を 10mol/L-HCl(5volHCl%)-Benzyl Alcohol 系混合溶液 (HCl-BZA 溶剤) に含浸し、周波数 28kHz の超音波を 3 時間照射する。超音波処理を 2 回行うことで PA6 は 100%溶解し、rCF が 100%回収される。

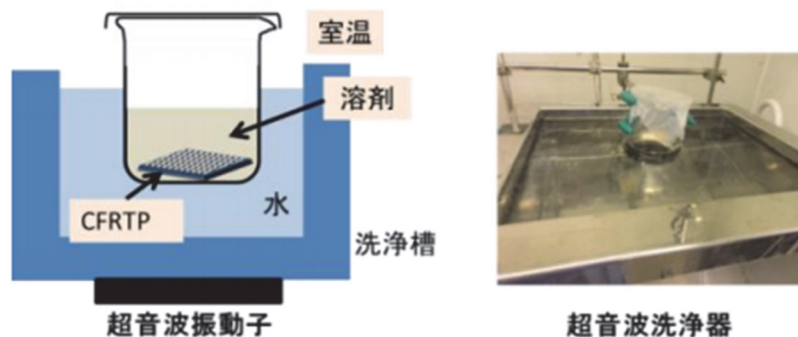


図 2-9. 混合溶液による CFRTP 溶解装置

出典：埼玉県産業技術総合センター研究報告 第 17 卷 (2019)「溶剤による炭素繊維強化ナイロン複合材料のリサイクル (第 2 報)」

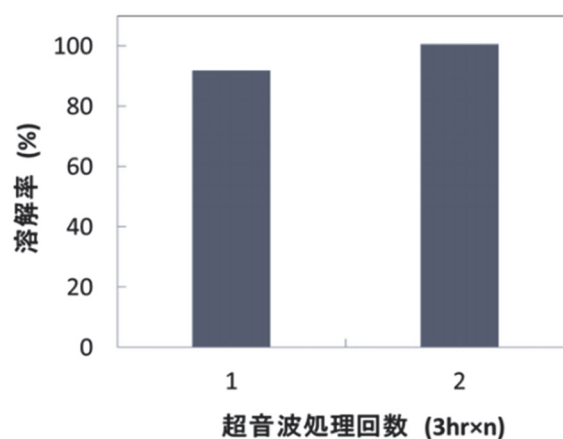


図 2-10. 廃 CFRTP の溶解率

出典：埼玉県産業技術総合センター研究報告 第 17 卷 (2019)「溶剤による炭素繊維強化ナイロン複合材料のリサイクル (第 2 報)」

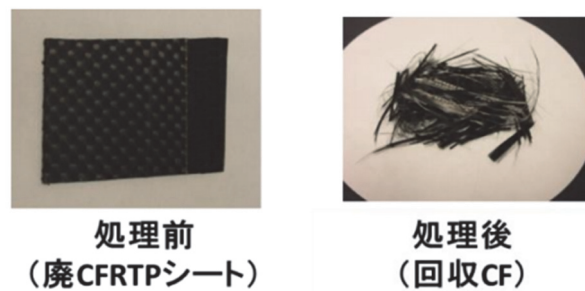


図 2-11. 溶解処理前の廃 CFRTP と処理後の CF

出典：埼玉県産業技術総合センター研究報告 第 17 巻（2019）「溶剤による炭素繊維強化ナイロン複合材料のリサイクル（第 2 報）」

rCF を回収後の溶解液を蒸留し、溶剤の回収を行った結果、回収率は 92.3%。回収された溶剤に HCl-BZA 溶剤を 5vol%追加して再度超音波処理により CFRTP を溶解する実験を行ったところ、3 時間の超音波処理 2 回で PA6 を 100%溶解し rCF を 100%回収できた。

・ rCF の物性、品質保証方法

溶解処理した CF の表面を走査型電子顕微鏡（SEM 顕微鏡）で換算した結果、HCl-BZA 溶剤で回収した rCF の SEM 画像からは、新品の CF と比較して損傷も見られず、表面上に差異は見られなかった。

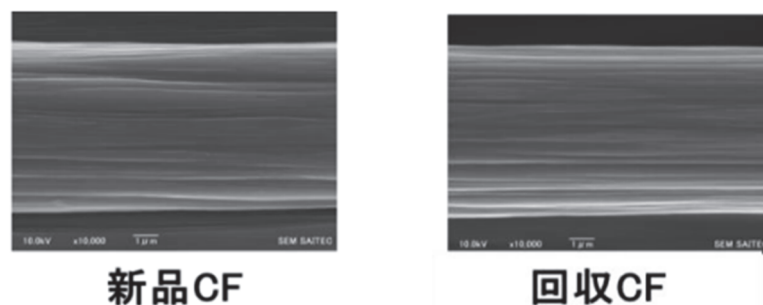


図 2-12. CF の SEM 画像

出典：埼玉県産業技術総合センター研究報告 第 17 巻（2019）「溶剤による炭素繊維強化ナイロン複合材料のリサイクル（第 2 報）」

・ rCF の現状の課題と将来展望 等

rCF 回収にかかるコストと rCF の品質が課題と考えている。また rCF ならではの用途開発が必要であり、新品 CF を使用した CFRP よりも安価な rCF 使用の CFRP が得られれば、より広範囲な普及が見込まれるとしている。

⑪信州大学

企業・機関名	国立大学法人信州大学
国	日本
設立	1949年
本社所在地	長野県松本市旭3-1-1
URL	https://www.shinshu-u.ac.jp/

・rCF 事業開始の経緯

半導体の熱活性 (Thermal Activation of Semiconductors : 以下 TASC) は、信州大学 繊維学部の水口仁氏が見出した新規な現象である。半導体は室温では全く触媒効果を示さないが、350-500℃の過熱では、突如として強い酸化作用を発現する。強い酸化力とは、つまり電子を引き抜く力が強いということに繋がる。この作用を用いて CFRP からの CF 分離に関する研究も行っている。

水口氏は 2013 年に TASC を柱として大学発ベンチャー企業である株式会社ジンテク²⁵を設立、代表取締役役に就任した。

・rCF のマテリアルリサイクル技術

TASC による CFRP からの rCF リサイクル技術は溶剤を 1 滴も使用しない 100%乾式法である。温度条件 (350～500℃に加熱) を満たしていれば 10 分程度の処理時間で CFRP から rCF を回収することができる。

TASC 法の一例として、Cr₂O₃ をコーズライト組成のハニカム上に塗布した支持体を用意する。この上にプラスチック板を置き、空気中で 500℃に加熱する。強い酸化力を持つ酸化クロムはポリマーとの接触点でポリマーから結合電子を引き抜き、ポリマー内に不安定なカチオン・ラジカルを形成する。500℃に加熱されたポリマーでは、ラジカルはポリマー内を自由に走破し、ポリマー全体を不安定化する。その結果、ポリマーは安定状態を維持できずに自滅し、小さな分子へと逐次分裂する。これがラジカル開裂と呼ばれる現象である。エチレンやプロパンのように裁断化された分子は空気中の酸素と反応し、水と炭酸ガスになる (完全燃焼)。

ポリマーの分解プロセスは、半導体の酸化力による①ラジカルの生成、②ラジカル開裂、③小分子の酸素との完全燃焼反応の 3 つの素過程から構成される。ポリマーやタール等の分子は裁断化され、酸素との反応で燃焼するから、ポリマーやタールは熱エネルギーとして 100%回収されていることになる。

TASC 法に使用できる半導体は、基本的に高温、酸素下で安定なものであれば良い。基本的には、以下表 に示す一連の酸化物半導体が対象となる。

²⁵ <http://jintech.org/>

表 2-13. 半導体触媒と被分解対象物

Oxide semiconductors	Cr ₂ O ₃ , NiO, Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZnO, etc.
Thermoplastic resins	PET, PP, PE, PVC, PS, ABS, etc.
Thermosetting resins	Epoxy, phenol resins, etc.
Diesel exhaust	Benzene, toluene, PM (particulate matter)
VOC	Volatile organic compounds
Others	Odor, tar, tobacco smoke etc.

出典：株式会社ジンテク HP

TASC 法では、ラジカルは自己増殖 (spontaneous multiplication) することから、樹脂内に「種」ラジカル (seed radical) さえ生成すれば、自然発生的に小分子化が達成できる。つまり、CFRP と半導体が 1 か所でも接触していればラジカルが生成され、これが開始剤 (initiator) = 種ラジカルとなり、小分子化が進行する。

CFRP をハニカム (酸化クロム (Cr₂O₃) をコージライト組成 (2MgO・2Al₂O₃・5SiO₂) のハニカム上に塗布した支持体) で挟み、熱処理 (空気中で 400℃、10 分) した場合、無傷の CF が回収できる。CF 表面にコーティングされていたサイジング剤も除去できていた。

⑫ファインセラミックスセンター

企業名	一般社団法人ファインセラミックスセンター（JFCC）
国	日本
設立	1985年4月1日
本社所在地	名古屋市熱田区六野二丁目4番1号
URL	https://www.ifcc.or.jp/

・rCF 事業開始の経緯

一般社団法人ファインセラミックスセンターでは、2011 年度から「知の拠点あいち」において、過熱水蒸気による CFRP からの CF 回収技術の開発を行った。「知の拠点あいち」とは、付加価値の高いモノづくりを支援するため、愛知県が愛・地球博会場跡地において整備を進めている研究開発拠点である。2011 年度から 5 年間の重点プロジェクト事業を完了し、その一つとして「低環境負荷型次世代ナノ・マイクロ加工技術の開発プロジェクト」が行われた。ファインセラミックスセンターでは同プロジェクトにおいて過熱水蒸気を用いた繊維処理／回収技術を開発した。

その他、ファインセラミックスセンターは、高砂工業と共同で、26 年度戦略的基盤技術高度化支援事業（サポイン事業）を獲得し、「革新的省エネ型高品位リサイクル繊維 連続回収システムの開発」²⁶を実施した。

・rCF の由来・回収元（排出メーカー・元用途：工程端材・廃材）

ファインセラミックスセンターは設備開発に向けて、研究開発用に航空機端材や水素タンクなどからの rCF 回収を行っている。

・rCF のマテリアルリサイクル技術

ファインセラミックスセンターでは、大同大学、大同（岐阜県多治見市）と共同で、過熱水蒸気を用いて CFRP から rCF を回収する技術を開発した。過熱水蒸気とは、飽和状態の水蒸気を更に加熱して得られる沸点以上の乾いた水蒸気のことであり、加熱空気による乾燥と比較すると、逆転点と呼ばれる温度を超えると乾燥速度を上回るという特異な性質を持つ。更に他の水流体と比較し低密度で動粘度が高い流体でありながら、拡散が遅く固体の細孔内部まで気につに到達しやすい特徴を有する。

CFRP を、微量のガスを添加した加熱水蒸気中に所定時間曝露することで、CFRP 中の樹脂を完全に除去する。実験では、PA66 をマトリックス樹脂とする CFRP の板材（50×15×1 mm：綾織の繊維構造で、シート積層数は 4 層、CF の体積含有率は 47vol%）を用いて実験を行った。上記 CFRP の板材は 500℃以上の過熱水蒸気で 10 分間処理したところ、樹脂除去率は 100%となった。rCF を織物状態で回収できることから、材料トレーサビリティを確保することが可能である。過熱水蒸気処理により回収した繊維は、他の熱処理法（大

²⁶ <https://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/portal/seika/2014/0419h.pdf>

気中、Ar 中) に比べ、強度の低下とそのバラツキが小さいことが明らかとなっている

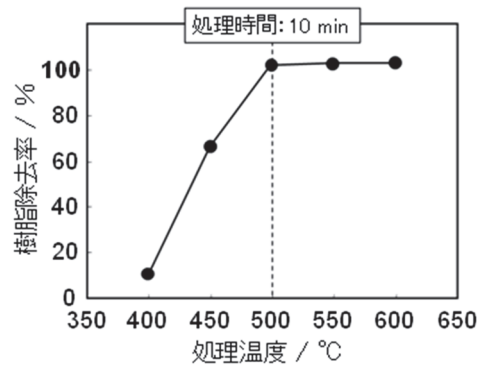


図 2-13. CFRP の樹脂除去率と過熱水蒸気処理温度との関係

出典:ファインセラミックスセンターHP

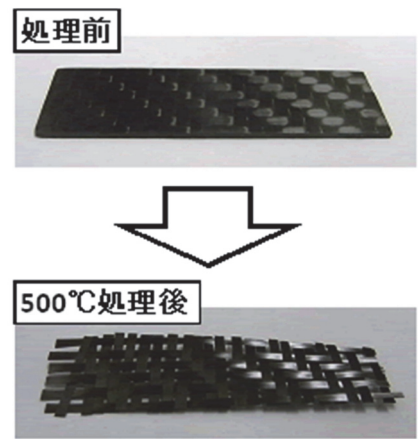


図 2-14. 過熱水蒸気処理（500℃）前後の CFRP の外観写真

出典:ファインセラミックスセンターHP

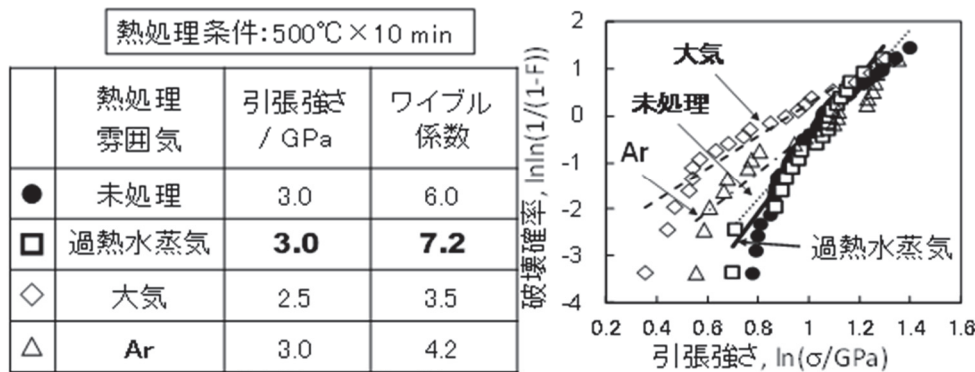


図 2-15. 500℃の過熱水蒸気及び他の熱処理法で処理した CFRP から回収した繊維の引張強さ

出典:ファインセラミックスセンターHP

2014年度～2016年度にかけて、経済産業省・戦略的基盤技術高度化支援事業（サポイン事業）として、高砂工業と協働で省エネ型の高品位 rCF 連続回収システムの開発を実施した。同プロジェクトでは、高温の過熱水蒸気を用いて、CFRP 廃材から繊維を連続回収する処理システム（ロータリーキルン方式）を開発している。

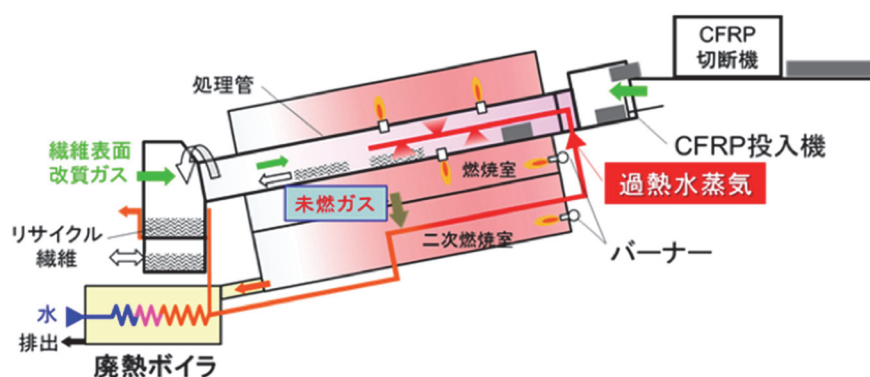


図 2-16. ロータリーキルン

出典:ファインセラミックスセンターHP

ロータリーキルン方式では原料となる CFRP 廃材の切断から処理装置への投入、熱処理、rCF の取り出しまで連続処理が可能であるとともに、CFRP を処理する際に発生する樹脂分解ガスを燃料として利用することにより、低コストで rCF の回収が可能である。

CFRP 投入機は、リサイクル繊維を不織布に展開することを想定して 50～100mm 程度に切断した CFRP をロータリーキルンに供給できる設計とした。炉体本体の立ち上げは、バーナーを点火し所定の温度まで昇温する。バーナーはガス流量調整器と燃焼空気用ファンでコントロールして温度を調整している。

可燃ガスのほとんどは加熱室で燃焼されるが、温度制御を行うことにより一部のガスは未燃状態となる。未燃ガスは炉の下部に設置した二次燃焼バーナーで完全燃焼する。二次燃焼後の排熱は 800～1,000℃であり、熱容量が大きい。そのため、その排ガスを利用して過熱水蒸気を生成する。具体的には室温の水をロータリーキルンの二次燃焼室に設置した廃熱ボイラを用いて 150℃の水蒸気にする。

これを IH 方式で発熱するペレット型ヒーターを積層搭載したセラミックス管内に通すこと 800℃の加熱水蒸気を生成する。その際に、廃材樹脂部の分解により生成した可燃性ガスを燃焼させて、処理用の高温過熱水蒸気を生成することで、処理エネルギーの大幅削減が可能となる。また、過熱水蒸気処理時に繊維表面改質ガスを添加することにより、優れた樹脂接着性を有する高品位なリサイクル繊維の回収を目的としている。

rCF 回収の最適条件は、ロータリーキルンに投入する CFRP の種類、投入量などにより異なる。熱可塑性樹脂を使用した CFRP (CFRTP) を 600℃以下で過熱水蒸気で処理する

ことにより、樹脂残渣の無い **rCF** を容易に取り出すことができた。一方、熱硬化性樹脂を使用した **CFRP** は 600℃以上の酸素を含む過熱水蒸気で処理することにより樹脂残渣の無い **rCF** を取り出すことができたが、高温の酸素を含む雰囲気で処理したため **rCF** の引張強度は大きく低下した。そこで、**rCF** の強度低下を抑えつつ樹脂を完全に除去するため、最初に 600℃以下の過熱水蒸気のみで処理して樹脂の大部分を除去し、その後、酸素を点火した過熱水蒸気雰囲気で樹脂残渣を除去する二段階のロータリーキルン処理を行う方式とした。その結果、回収した **rCF** の引張強度は **vCF** と比較して 70%以上の相対強度を有することを確認した。

過熱水蒸気処理時の温度、処理時間、処理に要する過熱水蒸気量を最適化し、熱硬化樹脂 **CFRP** を 20kg/h で供給して試験した場合の **rCF**1kg 当たりの使用エネルギー量を測定したところ、変動はあるものの 10MJ を下回る時間帯が確認された。

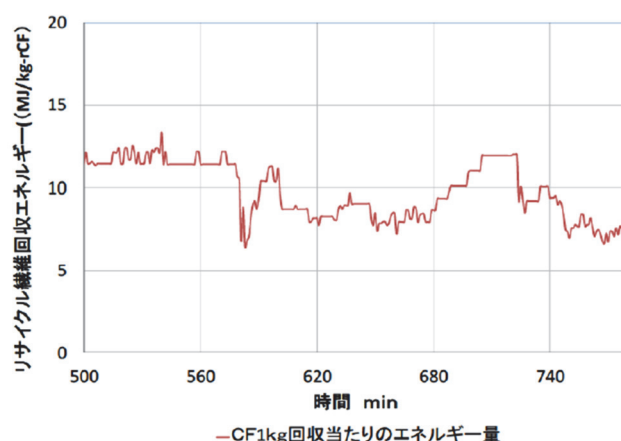


図 2-17. **rCF** を 1kg 回収するのに必要なエネルギー

出典：平成 28 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「革新的省エネ型高品位リサイクル繊維連続回収システムの開発」

・ **rCF** の処理能力（工場能力、実績等）

60t/年

・ **rCF** の物性、品質保証方法

熱硬化性樹脂を使用した **CFRP** を二段階のロータリーキルン処理により回収した **rCF** の引張強度を評価した。ロータリーキルン処理における **CFRP** の炉内滞留温度は 1 時間であるが、連続処理を行い、処理開始から 2 時間後と 6 時間後に採取した **rCF** について評価した結果、**rCF** の引張強度は **vCF** に対して相対強度で 70～80%であることが明らかになり、比較的高強度のリサイクル繊維が安定的に回収可能であることが確認できた。

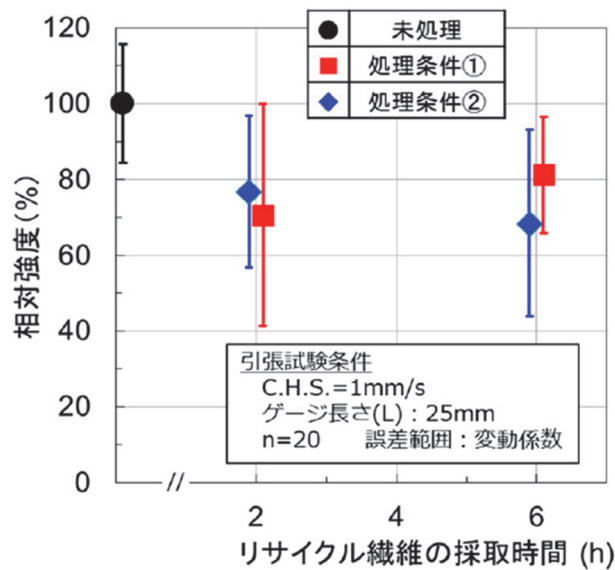


図 2-18. rCF の引張強度 (vCF の強度に対する相対強度)

出典：平成 28 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「革新的省エネ型高品位リサイクル繊維連続回収システムの開発」

次に処理条件①で処理を行い、処理開始から 6 時間後に採取した rCF を用いて樹脂との密着性を評価した。樹脂との密着性は、主材にビスフェノール A 型エポキシ樹脂、硬化剤にトリエチルテトラミンを用いてフラグメンテーション法により評価した。その結果、rCF の樹脂との密着性は、サイジング剤付きの vCF の約 70% の値であった。

実際の CF の表面形態は平滑なものから凹凸を有するものまで多様であり、用途に応じて使い分けられている。ファインセラミックスセンターでは水蒸気処理後の CF 強度に対し、「繊維表面形態」および「酸素ガス分圧」の影響を評価し、強度低下を抑制するための因子を明らかにした。

表面形態の大きく異なる 2 種類の繊維を用いて、過熱水蒸気処理中の酸素分圧に対し引っ張り強さをプロットしたところ、繊維の表面形態によらずあるしきい値より酸素分圧が高くなると、引張強さが減少傾向を示すことが確認された一方で、表面が平坦な繊維より、表面凹凸の大きい繊維の方が強度低下しにくいことが明らかになった。これは過酷な繊維回収条件（酸素混入、リサイクル回数の増加）にも耐えうる繊維の仕様を示唆する。

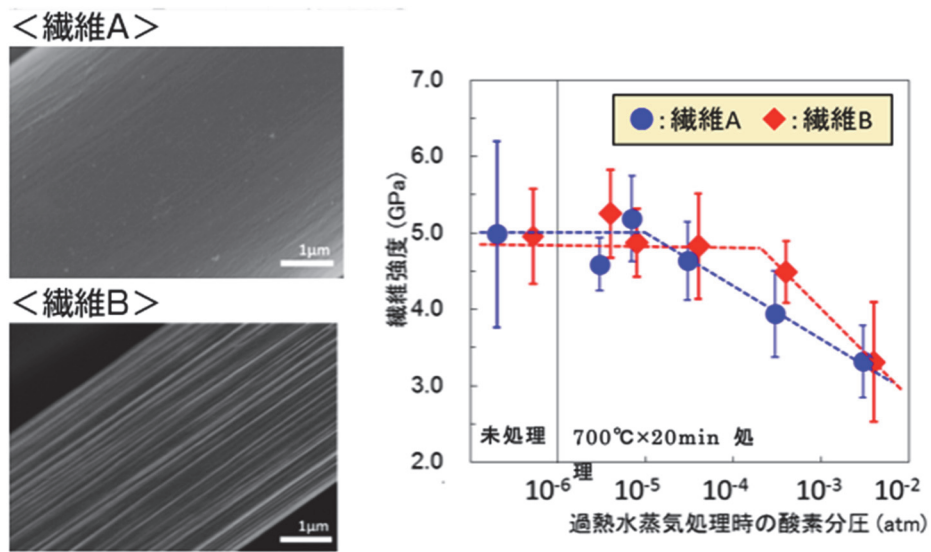


図 2-19. 過熱水蒸気処理後の rCF 強度に対する繊維表面形態及び酸素ガス圧の影響評価

出典: ファインセラミックスセンターHP

(2) 米国

① Adherent Technologies, Inc.

企業・機関名	Adherent Technologies, Inc.
国	米国
設立	1990年
本社所在地	11208 Cochiti SE Albuquerque, NM 87123
URL	https://www.adherent-tech.com/

・ rCF 事業開始の経緯

Adherent Technologies, Inc. (以下 ATI) は 1990 年に設立され、rCF 製造プロセスの開発等を行っている。設立当初より熱分解による CFRP リサイクル技術に取り組み、真空熱分解法 (Vacuum pyrolysis Process) 並びに溶媒分解法を開発している。

ATI は NASA、US Army、US AirForce、US Navy 等の国家防衛組織や Boeing、Lockheed Martin、Hughes Missiles and Space、GE、Honeywell、IBM 等の航空宇宙産業関連のクライアントを多く保有している。

・ rCF 関連プロジェクト

国防高等研究計画局 (DARPA) や、米国エネルギー省 (DOE)、EPA、米航空宇宙局 (NASA)、Boeing などの資金援助のもと開発を行っている。以下に同社が行った CF リサイクル関連プロジェクトの一例を示す。

表 2-14. Adherent Technologies, Inc. の CF リサイクル関連のプロジェクト一例

期間	参加PJ
1993年／1995年	航空機のプラスチックおよび複合材料のリサイクルプロセス (RECYCLING PROCESS FOR AIRCRAFT PLASTICS AND COMPOSITES)
1996年／1998年	複合航空機コンポーネントの触媒変換によるリサイクルプロセス Phase I (Catalytic Conversion Recycling Process for Composite Aircraft Components Phase I)
1997年／1998年 ～2000年	ポリマーベースの自動車部品のための第三のリサイクルプロセス Phase I (Tertiary Recycling Process for Polymer-Based Automotive Components Phase I) 廃車からのプラスチックと複合材料のリサイクルプロセス フェーズ II (Recycling Process for Scrap Automotive Plastics and Composite Phase II)
2001年	低温複合リサイクルプロセス (Low Temperature Composite Recycling Process)
2001年	リサイクル複合材料の第I相からフェノールホルムアルデヒド樹脂の製造 (Production of Phenol Formaldehyde Resins from Recycled Composite Materials Phase I)
2006年	閉ループ複合リサイクルプロセス (Closed Loop Composite Recycling Process)

出典：Adherent Technologies, Inc. 公開資料より矢野経済研究所作成

・rCFのマテリアルリサイクル技術

ATIのCFRPのリサイクル技術は、①熱分解処理と、②化学プロセスの大きく二つに分類され、廃材の状態や形状に合わせて技術を使い分けている。

熱分解プロセス (Vacuum pyrolysis Process)

ATIでは真空熱分解装置 (vacuum pyrolysis unit) を開発している。真空熱分解プロセスは、ポリマー三次リサイクル研究の結果生まれたものである。真空中でプラスチックを加熱することにより、ガス化せずに廃CFRPを液体原料や燃料に変換することができる。反応器内の温度は、4つのガス燃焼バーナーを介して調整することができる (160~525℃の間で調節可能)。4mの加熱ゾーンを通り、6m (長さ) × 15cm (直径) のスクリーオーの回転に基づき自動車かたコンベヤを通して反応器に供給される。

同ユニットによる廃CFRPからのCF回収ではCFの純度が99.5%の所望のレベルには到達しておらず、CF表面に不純物が残存しており、再利用する際にCFと樹脂の密着性等に閉胸を与えると考えられる。

この技術は混合プラスチック廃棄物、電子機器スクラップ、自動車シュレッダー残留物、食品サービス廃棄物等を含む多くの廃棄物を対象にパイロットラインで開発されている。

化学プロセス (Wet chemical process)

-高温流体処理 (high temperature wet-chemical process)

高品質なCFを得るためATIは湿式化学処理の研究を開始し、高温・高圧のアプローチを検討した。熱伝達流体と独自の触媒を使用することでバージンに近いCFを取り出すことができた。rCFは、実験では99.9%の純度に達することが成果として示され、繊維のSEM試験でもvCFと遜色ないレベルであった。機械的試験でも短繊維の引張試験ではバージン材の強度と比較し10%未満の減少にとどまった。

ただ、同プロセスはバージンに近いCFを回収でき、ほぼ全ての複合材料で適用可能という利点がある一方で、同技術では温度300℃以上、圧力500PSI (3.45MPa) を発生させるため、ANSI (米国規格協会・米国標準協会) で定められた条件を超える特殊な設備が必要となる。これらの設備は一般品ではなくカスタム対応となるため高品質の製品を回収できる一方で、スケールアップすることで非常に高コストとなることが判明した。また、熱伝達液体は長期で使用していくと低沸点不純物を蓄積してしまうため、それらの処理も必要となる。

-低温低圧流体処理 (Low temperature liquid process)

ATIでは、上記の高温流体処理はスケールアップすると非常に高コストとなることがわかったため、低温低圧処理プロセスの検討を行った。これは圧力150PSI、温度150℃環境下において触媒を用いてポリマーをプレポリマーの出発原料である低分子量画分に分解し、

CFを回収する方法である。同方法で回収したCFは特性劣化がほとんどない状態であるとの結果を示した。

ただし、低温プロセスの欠点是不純物の除去が不十分であり、全ての樹脂に適用できるわけではないという点である。Run1～3は、典型的な航空機グレード（7 μ m）のCFの破断強度である15gの数値の10%以内に収まっている。Run4から回収されたCFは軍用航空部品から回収されたものであるが、強度が大幅に低下している。元々のCF物性が低かったことが想定されるが、元の組成の正確な情報は不明。

上記のリサイクル技術を用いた取り組み例としては、航空機のスタビライザー、B787の廃材などが紹介されており、真空熱分解と低温流体処理による複合手法により樹脂や混入物の除去に成功している。

② Carbon Conversions, Inc. (旧 : MIT-RCF, LLC)

企業・機関名	Carbon Conversions, Inc.
国	米国
設立	2005年
本社所在地	150 Godley Morris Boulevard, Lake City, South Carolina 29560
URL	https://carbonconversions.com/

・ rCF 事業開始の経緯

Carbon Conversions, Inc. (旧 MIT-RCF, LLC、2015 年 6 月に社名変更、以下 Carbon Conversions) は 2010 年 4 月に Materials Innovation Technologies LLC (以下 MIT LLC) の子会社として設立された。MIT LLC は複合材料の開発を行う企業として 2004 年 12 月に設立された。

Carbon Conversions は、2015 年に TOYOTA Tsusho America, Inc.、Advanced Technology International、South Carolina Research Authority (SCRA)、European Family Office Affiliated with Alpheus Capital が出資を行ったことで、MIT-RCF, LLC から Carbon Conversions, Inc. に社名を変更した。これにより Carbon Conversions は新たな複合材料研究開発センターを建設しプラントを拡張した。

その後、2016 年 12 月には Hexcel Corporation から出資が行われた。この投資により、複合材料と CF 製造大手である Hexcel と、rCF 市場の大手である Carbon Conversions との間にパートナーシップが生まれた。

同社はドライ・ウェットプロセス、及び硬化後の製品からも CF を再生、または再生された CF を新しい高性能コンポーネントの製造に再利用するリサイクル仕組み作りに取り組んでいる。Hexcel との協力を通じ、再生 CF の特定の航空宇宙アプリケーション向けの共同技術コラボレーションと事業の開発に取り組んでいる。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

CarbonConversions は、熱可塑性接着プリフォームとそれとともに形成される熱硬化性マトリックスに関するの特許を取得している。同社は「Thermoplastic Bonded」というタイトルで米国特許 # 10,406,776 を取得したと発表した²⁷。

同社の特許は CF を様々な熱可塑性繊維と合わせ、「熱可塑性結合プリフォーム」と呼ばれる「制御された物理的特性を持つ結合熱可塑性プリフォーム」を作成する技術である。この技術は、複合材の循環型ソリューションとして再生 CF を再利用するための新たな採用形態になる可能性が高く、チョップドカーボンファイバーや従来のカーボンファイバー不織布フォーマットを超えた同社の独自製品として展開されている。

Carbon Conversions は、CF メーカーや成形加工メーカー等から工程内で発生する CF

²⁷<https://carbonconversions.com/carbon-conversions-granted-us-patent/>

廃材（ドライカーボン）、CF 織物、CF プリプレグや CFRP を引き受けている。同社のリサイクルプロセスは、1 インチの正方形に切断された廃棄物から開始する。これらの切断された端材は、ほぼ無酸素環境下において熱分解プロセスにより樹脂と CF が分離される。分離された繊維は、成形で使用するため新しい樹脂と組み合わせられ、チョップド rCF や、LFT（Long fiber thermoplastic）ペレット、また 3-DEP™技術を用いて短繊維のマットロール等加工され販売される。

・ rCF 採用用途・当該用途での採用理由、当該用途での販売量

Hexcel や自動車会社との提携により航空宇宙分野向けや自動車部品向けの採用拡大を目指しているほか、電子製品向け（ノート PC ケース等）やレース用ヨット向け等のスポーツ道具向けの用途拡大にも力を入れている。

・ 企業や研究機関との協力関係

●2011 年 Trek Bicycle とのパートナーシップ

Carbon Conversions は 2011 年 4 月に自転車メーカーである Trek Bicycle と廃 CFRP リサイクルプロジェクト（パイロットプロジェクト）を締結した。2011 年に Trek Bicycle は自転車用 CFRP のリサイクルプログラムを開始すると発表しており、Cycling News のウェブサイトによれば、まずは毎年 54,000lb（24,500kg）を再利用していく。

リサイクルに使用される廃 CFRP は、フレーム生産で残った端材、不適合成形品やテストで破損したフレーム等が含まれる。Trek Bicycle は 3,500～4,500lb/月（1,590～2,040kg/月）の廃棄品を MIT-RCF に提供している。

●2010～2013 年 DOE「Low Cost Carbon Fiber Composites for Lightweight Vehicle Parts」（自動車軽量化のための低コスト炭素繊維複合材料）

Carbon Conversions は DOE の「Low Cost Carbon Fiber Composites for Lightweight Vehicle Parts²⁸」（2010～2013 年）プログラムにおいて、廃棄物から CF を再生しかつ複合部品の補強材として再利用するための、不織プリフォーム湿式プロセスである「3-DEP™ machine」（熱分解法）の開発を行った。

同社は 2010 年にノースカロライナ州の Lake City において CF の再利用のための新設備 MIT-RCF を建設した。この設備は 300-500 万 lb（1,361～2,268t/年）の廃 CFRP 処理能力がある。製造した製品をティア 1 自動車部品サプライヤー等へ供給していくとしていたが、実際の仕向け先は不明である。

・ rCF の物性

Carbon Conversions では CF、CF プリプレグ、CFRP の工程内端材及び使用済み製品で

²⁸<https://www.energy.gov/eere/vehicles/downloads/low-cost-carbon-fiber-composites-lightweight-vehicle-parts>

ある飛行機やスポーツ道具等を熱分解し CF を回収、それを加工したチョップド CF、LFT ペレット、CF 不織布、また 3-DEP®技術を用いて製造した短繊維のマットロールを販売している。マットの重量は 50～1,000g/ m² であり、幅は最大で 1.2m である。例えば rCF40% に対して 60%の PPS 等のブレンドを行っている。

CarbonConversionsre は Dell と提携し、同社の re-Evo®HSC 製品は Dell のノートパソコンカバーに採用された。採用されたモデルは Dell のプレミアムモデルである Latitude 7300²⁹。

同社は 2020 年には他の複合材料を組み合わせリサイクル材料も開発しており、今後も Dell の Latitude シリーズやパソコン向けの採用拡大に力を入れていくとみられる。

また、特許取得済みの 3DEP®プロセスを使用した 3D プリフォームの製造も行っている。製品ラインナップは下記表の通り。

2005 年に Carbon Conversions は 3-DEP™ (Three Dimensional Engineered Preform) 技術を用いて自動車の B ピラーの成形に成功した。3-DEP™技術とは、スラリー状になった水槽中のチョップドファイバーとバインダーを真空引きしたスクリーンで吸引するプリフォーム作成法である。また、3-DEP™ 技術を用いて Boeing の協力の下、F-18 (戦闘機) の廃棄品を利用し、Corvette 部品の製造を行った実績もある。

表 2-15. 3DEP®プロセスを使用した 3D プリフォーム製品

製品コード	備考
BCF	Bulk chopped fibers for BMC, SMC, and milling
HSC	high strength chopped fiber
IMC	intermediate modulus chopped fiber
MCF	100% recycled carbon fiber mat (available 3-Dimensional preforms using patented 3DEP process)
MCO	recycled carbon fiber mat commingled with thermoplastic fiber (available 3-Dimensional preforms using patented 3DEP process)

出典：Carbon Conversions, Inc. HP より矢野経済研究所作成

²⁹<https://carbonconversions.com/carbon-conversions-partners-with-dell-to-forward-sustainability-goals/>

③ Carbon Fiber Remanufacturing (AdTech International, Inc.)

企業・機関名	Carbon Fiber Remanufacturing (AdTech International, Inc.)
国	米国
設立	2011年
本社所在地	P.O. Box One, 215 S. Main Street, Whitewater, KS 67154 USA
URL	https://carbonfiberremanufacturing.com/

・ rCF 事業開始の経緯

Carbon Fiber Remanufacturing は、1997 年に設立された AdTech International, Inc. の一部門として 2011 年に設立された。同社は長年、埋め立てに取って代わる使用済みの CFRP 製品のリサイクル方法を開発している。協力会社として ReComposite LLC がある。

同社では様々な形状の rCF 製品ラインナップし、顧客のニーズや用途に見合った提案活動等により今後の採用拡大に力を入れている。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

Carbon Fiber Remanufacturing はポリアクリロニトリル (PAN) 繊維を炭素分が 62% になるように焼成した耐燃絶縁繊維の工程内端材を回収・加工し、販売を行っている。Pyron は Zoltek から、Panox は SGL から入手しているとみられる³⁰。

同社の rCF 製品の特長として熱分解処理及び化学処理も行っていないため劣化がみられないことが挙げられる。焼成温度は 1,000℃以下であるため、100%炭素の通常 CF と比較しても引張強度は約 1/10、引張弾性は約 1/100。

リサイクルされた製品は精密カットファイバー、ミルドファイバー、成形コンパウンド、糸/毛糸（難燃剤、補強材、ブレンド）、断熱針マットや不織布ベール等の形態で出荷される。

・ rCF の処理能力（工場能力、実績等）

Carbon Fiber Remanufacturing の生産能力は約 20t/月とされるが、2018 年時点で 1,000t 以上の在庫を保有していた。また、Carbon Fiber Remanufacturing が保有する設備能力について同社は同社 HP で下記のように情報公開している。

-Carbon Fiber Remanufacturing Current Rates and Capacity Summary

- ・ Recycling Rate: 130,000 lbs./month (and Growing)
- ・ 60,000 sf warehouse in Ohio, 100,000 sf of warehouse in NC and SC
- ・ 300,000 lbs/month fiber detangling capacity
- ・ 200,000 lbs/month precision cutting capacity (Facility #1)
- ・ 80,000 lbs/month precision cutting capacity (Facility #2)
- ・ 60,000+ lbs/month yarn manufacturing capacity

³⁰ Carbon Fiber Remanufacturing™ Guide to Reclaimed Carbon Fiber & Market Applications

④ Composite Recycling Technology Center (CRTC)

企業・機関名	Composite Recycling Technology Center (CRTC)
国	米国
設立	2015年
本社所在地	2220 W 18th St, Port Angeles, WA 98363
URL	https://www.compositerecycling.org/

・ rCF 事業開始の経緯

2015年9月に設立された Composite Recycling Technology Center (CRTC) は、独立した非営利法人で、テクノロジーと製造技術の革新を通し世界における複合リサイクルコミュニティを支え成長させることをポリシーにしている。CRTC は製品製造に関する技術設計サービスを提供することで、様々な産業分野からアプローチ可能な低コストの rCF を生産・提供するまでの仕組み作りに貢献することをターゲットとした研究開発が行われている。

米国の Port Angeles (ワシントン) にある同センターは、25,000 平方フィートの敷地にオフィスや、研究室、教室やリサイクルセンター及び Peninsula 大学の先端ものづくり製造スペース (Peninsula College's Advanced Manufacturing) を有する。

・ 企業や研究機関との協力関係

2017年に Composite Recycling Technology Center (CRTC) と英国に本拠を置く ELG Carbon Fibre Ltd (ELG) は CF のリサイクルに関する協力について発表している。

CRTC と ELG は、ELG の最先端熱分解プロセスによって再生された CF を利用する革新的な方法を開発し、人々の生活と環境にプラスの影響を与える付加価値製品の製造に貢献する取り組みに両社が協力するとの内容である。

両社が保有するリサイクルプロセス及び技術的ノウハウにより、硬化した材料からも競争力のある価格で CF を回収することができ、回収した CF と再利用した CF プリプレグを組み合わせ、幅広い付加価値製品を生み出すことが可能になるとみられる。さらに、CRTC は ELG の rCF と熱可塑性プラスチックのブレンドから製品を製造することに高い関心を持っており、このような高性能で低コストの素材の開発により複数の製品アプリケーションでのコラボレーションが可能となることが期待される。

2017年8月、CRTC と ELG はミシガン州デトロイトで開催された Automotive Lightweight Materials Summit でリサイクルカーボンファイバーコンポジットから作られた自動車用シートバック製造を共同で発表した³¹。同製品製造に使用された設備等は Advanced Composite Manufacturing Innovation (IACMI) から提供されたものである。

³¹<https://www.compositerecycling.org/news/composite-recycling-technology-center-produces-first-ever-automotive-seatback-using-recycled-carbon-fiber-from-elg-carbon-fibre-ltd>

バケットスタイルのシートバックは、高さ約 24 インチ・幅 19 インチで、サイドフランジの最深部は約 5 インチ。1.3kg の ELG の CarbisTM PA6 60%SM45D が使用された。リサイクルファイバー/ナイロン 6 樹脂は、CRTC で Wabash / MPI 300t プレス熱板を使用し 435F の高温圧縮サイクルで成形された。シートバックは、IACMI 開発されたアルミニウム装置で成形。

このプロジェクトでは様々な機能性や特徴を検証し、リサイクル材料の製造可能性が実証された。同プロジェクトは最終プロトタイプ製造段階までを想定したもので、非常に競争力のあるコストでリサイクルされた CF/熱可塑性材料の自動車内装分野での活用を目指したものである。ELG、CRTC、及び IACMI はさらなる開発や改善を行いながら実用化に向け取り組んでいる。

また、CRTC は IACMI との新しい契約の元、ワシントン州で発生する CF スクラップ処理を自動化し、新しい製品へ再製造する方法を開拓するプロジェクトにも着手。この技術革新は大量に発生する CF スクラップを処理するために不可欠なものであり、省エネやカーボン削減等の可能性を実現し、将来的にはグローバルな複合材料リサイクル産業を構築できるとみられる。

なお、CRTC はスクラップの供給と材料開発に関して Toray Composite Materials America と多方面での協力合意を結んでおり、戦略的パートナーとして協力関係を築いている。

・ rCF 採用用途等

CRTC ではスポーツ用運動道具向けにリサイクルされた CF の採用を拡大させている。

2018 年 6 月、CRTC と Pickleball Central は新しいポータブルピックルボールネット「SwiftNetTM」の発売を発表した。SwiftNetTMはポータブル型ピックルボールネットでピックルボールコートを設置場所を自由に変えられ、どこでも競技ができるような移動式ネットである。SwiftNetTMはリサイクルされた CF が使用されており、他のポータブルネットの約半分の重量になっている。また、rCF を使用した Pickleball 用 Paddle も販売している。

Pickleball（ピックルボール）は、コートにおいてプラスチック製で中空のボールに多数の穴があいたものを、木製などの固いパドル（ラケット）で打ち合う競技で卓球・テニス・バドミントンを元に考えられた競技である）。

そのほか、CRTC では rCF を使用したベンチを製作し「The Adopt-A-Bench program」として 2018 年には Washington Recreation and Park Association (WRPA) と協業で公共エリアに OLYMPUS BENCH が設置された。

⑤ Firebird Advanced Materials

企業・機関名	Firebird Advanced Materials
国	米国
設立	2005年
本社所在地	6304-C Westgate Road, Raleigh, NC, 27617
URL	-

・ rCF 事業開始の経緯

Firebird Advanced Materials は、2005 年に設立されたノースカロライナ州にある CFRP リサイクル業者である。米国空軍（US Air Force）および米国国立科学財団（National Science Foundation）のファンドを受けており、技術面では North Carolina State University と提携を行い、マイクロ波を利用した CFRP のリサイクル設備を保有している。

表 2-16. Firebird Advanced Materials の CF リサイクル関連のプロジェクト一例

年	テーマ
2006年／2007年	コンポジットスクラップや廃棄物の材料のリサイクルフェーズⅠ、フェーズⅡ (Recycling Composite Scrap and Waste Materials)
2007年	SBIRフェーズⅠ:rCFの利用(SBIR Phase I: Utilization of Recycled Carbon Fibers)
2010年	SBIRフェーズⅠ:シート成形材料におけるrCFの使用(SMC) (SBIR Phase I: Use of Recycled Carbon Fibers in Sheet Molding Compounds (SMC))

出典：Firebird Advanced Materials.公開資料より矢野経済研究所作成

同社は、熱分解で製造された繊維は劣化が進んでいるためほとんどのアプリケーション用途には適した状態ではないとしている。熱分解プロセスでは CF と樹脂結合を促進することができる非常に活性な CF 表面とすることができるが、熱分解プロセスによりサイジングが消失しフワフワした「コットンボール」状態となるため、Firebird Advanced Materials では vCF に近い rCF を製造するため、マイクロ波によるリサイクル技術の開発に取り組んでいるとしている。

2010 年には 1,000t(220 万 lb) 処理可能なプラントの建設を予定し、North Carolina State University とのコラボレーションを行い US Air Force/National Science Foundation から資金 (SBIR) の助成金 (€738 000) を得た。

⑥ Shocker Composites

企業・機関名	Shocker Composites, LLC
国	米国
設立	2016年
本社所在地	Bldg 122C, 3800 Oliver, Wichita, KS 67210
URL	https://www.shockercomposites.com/

・ rCF 事業開始の経緯

Shocker Composites は 2016 年に設立された Wichita State University のベンチャー企業として設立された会社である。設立者は Wichita State University の Vamsidhar Patlolla 氏で、当時研究していた複合材料の研究プロジェクト中に加溶媒分解法という CFRP をリサイクルする方法を開発した。

rCF の再生方法として加溶媒分解法は商業化されず、研究ベースでの取り組みがメインであったが、同社より生産ラインの導入や販売が開始された。加溶媒分解プロセスの導入により回収された繊維は熱分解での回収方法より損傷が少なく、熱エネルギー節約等による低コストでの生産が可能であることもメリットとして挙げられる。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

Shocker Composites では rCF のリサイクル技術として加溶媒分解法を用ったリサイクルプロセスを開発している。

同プロセスは加溶媒分解で樹脂を溶解し、繊維から完全に樹脂を除去する方法である。溶媒を使用し樹脂を溶解する加溶媒分解は繊維の物性の劣化がそれほどみられず、高品質の繊維が回収できる利点がある。しかし、大量量産設備としての取り組み例等は少なく、パイロットレベルでのバッチ生産が主力であったが、同社は加溶媒分解法を用ったリサイクルプロセスのラインを構築した。これによりリサイクルされた CF は高品質でバーゲン航空宇宙グレードの繊維と同じ特性を示す結果を残した。また、生産面でもコスト削減につながっている。

2017 年に権利化した特許 US 9,776,107 B1 「System and method for recycling of pre-impregnated composite fibers」³²は、硬化前であるが、使用期限が切れたプリプレグを溶剤に入れ、樹脂に音響エネルギー反応を与えることで溶解除去する方法である。溶剤の例としては、ジメチルホルムアミド、N、N-ジメチルーアセトアミド、アセトン、トルエン、アセトニトリル、ヘキサン、テトラヒドロフランなどの有機溶媒を挙げている。音響エネルギーの周波数は 1Hz から 100GHz の範囲で変えられ、音響エネルギーの照射時間は 1sec から 60min の範囲で設定できる。

³² <https://patents.google.com/patent/US9776107B1/en>

・ rCF の物性、品質保証方法

Shocker Composites は幅広い炭素繊維強化エンジニアグレードの熱可塑性ペレット製品をラインナップしている。

同社のペレットは、高強度再生 CF を利用し設計されているため樹脂の強度向上に繋がるとしている。ショッカーのカーボンファイバーは、軽量化及び部品の強度や耐久性向上にも役立つとしている。

⑦ Vartega

企業・機関名	Vartega Inc
国	米国
設立	2014年
本社所在地	15000 W 44th AVE, STE F, Golden, CO 80403
URL	https://www.vartega.com/

・rCF 事業開始の経緯

2014年に設立された Vartega は最先端材料のリサイクル技術を研究し、循環型サプライチェーンを構築することで素材の製造から再利用システムまでの仕組み作りに取り組んでいる。Vartega は CF リサイクルプロセス関連の特許を取得、製造時に発生する工程内端材の再利用を Vartega's Hardware-as-a-Service subscription platform (HaaS) というリサイクルプロセスとして構築している。

Vartega によると同社の rCF 製品は自動車および産業用途向けに vCF の代替品としての需要があり、ドライファイバーとプリプレグスクラップから再生される同社の rCF は vCF と近い特性を有しているとしている。同社の繊維は半製品、チョップド、ミルド等のフォーマットで提供しており、熱可塑性プラスチック、不織布、成形コンパウンド用途向けに適しているとしている。

2020年5月、同社はリサイクルプログラムを拡大し、新しいグリーンセクターの雇用を創出する計画が認められ、364,000ドルの助成金を授与した。この資金は、コロラド州公衆衛生環境局（CDPHE）によって管理されているリサイクル資源経済機会（RREO）助成プログラムの一環である。

（RREO 助成プログラム：リサイクル資源経済機会法（HB 07-1288）は、廃棄物として扱われるリサイクル可能な材料の生産的管理を通じて経済発展を促進する実施プロジェクトに資金を提供することを目的として、RREO 助成プログラムを運営。資金はコロラド州全体の企業、地方自治体、非営利団体、学校や大学に授与されている）

・rCF の由来・回収元（排出メーカー・元用途：工程端材・廃材）

Vartega の回収元はスクラップ発生率が通常 30%と言われる航空宇宙産業からの工程内端材が多く、航空宇宙部品向けに使用される CFRP は高品質のプリプレグスクラップ材料がほとんどであるため、高品質なスクラップが入手できるとしている。

このような航空宇宙構造物からのスクラップ CF は廃棄物でありながらも、素材自体が高品質であるため再利用は十分可能で、航空機の内装、自動車用途、消費財、またはスポーツ用品で再利用できるとし、そのリサイクルシステム作りに力を入れている。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

Vartega は加溶媒分解法や超臨界流体法によるリサイクル技術を開発している。

Vartega は Steelhead Composites(Golden, Colo.)及び SGL Carbon SE(Evanston, Wyo.)とも協力し、Vartega によって CFRP から回収された CF の引張強度を評価した。Steelhead Composites は、試験用に TCR Composites Inc.(Ogden, Utah)によって製造された期限切れのトウプレグ(T700, 12k tow)のロールを Vartega に提供し、Vartega は2つの材料を処理し、ASTM D4018 に従って引張試験を行った。Vartega によって回収された CF は未使用品に匹敵する機械的特性を持つとの結果であった。

・ rCF の処理能力（工場能力、実績等）

Vartega では2019年7月にCFリサイクル事業と生産能力を拡大するため、新しい10,000平方 feet(930 m²)の製造施設を正式に開設し、新しい拠点では年間 168t の 65%FVF(Fiber Volume Fraction:繊維体積率)の CF プリプレグを処理し、109t の CF と 59t のエポキシ樹脂を生産する。この CF のほとんどは射出成型用の材料として熱可塑性樹脂と配合される。Vartega には、独自のコンパウンディングを行うための2軸押出機も設置した。

その後同社は2020年末までに最初の Hardware as a Service(HaaS)製品をミシガン州デトロイトのコークタウンにある IACMI の SURF 製造デモンストレーション施設に設置する計画に着手した。HaaS はモジュール式で、複合材料製造施設に設置するために設計された年間 100t の CF リサイクルシステムである。製造業者は HaaS を使用して、硬化前のプリプレグスクラップを現場で処理し、CF と樹脂を回収できるプロセスである。

・ rCF 採用用途・当該用途での採用理由、当該用途での販売量

リサイクルされた CF はエンジニアリング熱可塑性プラスチックとコンパウンドされる。典型的な炭素繊維強化熱可塑性プラスチックには、ABS、PA6、PA66、PBT、PC、PE、PEI、PEEK、PEK、POM、PP、PPS、PSU、PU がある。

Vartega は独自のリサイクルプロセスを使用し、低コストグレードの rCF を開発した。このグレードは vCF と同様の機械的特性を持つという。Vartega のリサイクル繊維は不織布、熱可塑性ペレット、3D 印刷フィラメント等、幅広い用途で使用されている。

Vartega の Andrew Maxey CEO インタビューによると、Vartega ではリサイクルされた CF 製品は vCF で作られた製品の約半分のコストで販売しているという。Maxey 氏によると、現在最大の需要は PP と PA の CFRP で、この rCF を使用する顧客には消費財企業、スポーツ用品メーカー、自動車産業が含まれている。同社の rCF 製品は航空宇宙構造物からのスクラップ CF をリサイクルしているため、回収元としての素材が高品質で航空機の内装、自動車用途、消費財、またはスポーツ用品で再利用できるとし、用途拡大に力を入れ

ている³³。

航空機備品などの CFRP 製品を製造している Janicki Industries(Sedro-Woolley,WA)等に CFRP から回収した CF サンプルを提供し透過性、熱膨張、寸法安定性および機械加工性評価を行う等、航空機の内装向け採用に向け積極的に取り組んでいる。

また、同社は圧力容器製作の Steelhead Composites、集束材製造の Michelman と回収 CF を使用した世界初の圧力容器を製作した（2017 年 5 月 Press 発表）。

・企業や研究機関との協力関係

2016 年 10 月、Vartega は自転車フレームビルダーである Alchemy Bicycle Co.と共同リサイクル契約を締結した。これにより Alchemy は Vartega リサイクルプロセスでリサイクルするためにスクラップ CF を Vartega に提供し、Vartega は回収されたスクラップをリサイクル、Alchemy はこのリサイクルされた CF を再度バイク部品製造に使用する等、循環型リサイクルシステム構築の一環としての試みである。

Vartega は IACMI (The Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation) と協力し、自動車部品製造時に発生する CF スクラップをリサイクルし、自動車部品製造用の素材として再利用する仕組み作りプロジェクトに取り組んでいる。

同プロジェクトの目標は車両の軽量化のため使用量が増えている CFRP 材料の需要量の一部をリサイクルした CFRTTP で代用できるような仕組み作りである。このプロジェクトのパートナーには、Ford、Dow、Michelman、Techmer PM、Michigan State University、Colorado School of Mines、Oak Ridge National Laboratory、the University of Tennessee、the University of Dayton Research Group が含まれている。

同社 CEO である Maxey 氏によると、CF リサイクル技術は過去 10 年間で大幅に進化してきたが、自動車用途としての rCF の製造及び、採用にはいくつかの課題が残されているとし、このような業界全体のアプローチにより課題改善に取り組むべきであるとしている。

³³ <https://www.vartega.com/news-and-media>

⑧ ACMA, IACMI, CHZ Technologies

企業・機関名	ACMA, IACMI, CHZ Technologies
国	米国
URL	https://acmanet.org/
	https://iacmi.org/
	http://chztechnologies.com/

・ rCF 事業開始の経緯

2015年に米国エネルギー省(DOE)は IACMI-TheCompositesInstitute（製造革新のための2億5900万ドルのプログラム）を立ち上げた。その半年後には ACMA(American Composites Manufacturers Association)と IACMI(The Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation)はリサイクルを含む幅広いトピックについて協力することに合意した。

2017年には ACMA と IACMI は CHZ Technologies の Thermolyzer 技術のプロジェクトの開始を発表した。この技術は複合材料を別分解し、タール、油を回収し、合成ガスに変換する方法で、これによって、GE や John Deere から排出された風力発電設備の GFRP、CFRP などの部品をリサイクルできる。

なお、2017年11月に CHZ Technologies,LLC によって権利化した特許 U.S.Patent 9816033³⁴の内容は以下の通り。熱分解システムは、2つ以上の反応器、2つ以上のガラススクラバー、オイル/水分離器、およびオイル/タール分解器を含む。廃棄物減量は、カーペット、敷物、プラスチック、タイヤ、肥料、自動車シュレッターダスト、GF 複合材料、CF 複合材料、都市固形廃棄物、都市廃棄物、廃木材を含む。反応器が 300℃-800℃の温度で、タール、オイル、クリーン燃料ガス、チャーを生成する。オイルとタールは、2つ以上のガススクラバーでクリーン燃料ガスから分離され、その後、オイル/タール分解器で分解され、二次反応器に戻される。複合材料を含む様々な廃棄物を対象とした熱分解法である。

その後、2020年に IACMI は複合材料の再利用方法に関するプロジェクトを開始、ACMA が同プロジェクトの主幹となり、Continental Structural Plastics、CHZ Technologies、A. Schulman Inc.及び Tennessee 大学を含めたチームが結成された。

使用済み製品として廃棄物となった複合材料は他の素材よりリサイクルが難しいため、今回のプロジェクトを通し複合材料関連業界に対しリサイクル可能な技術的な証拠を提示することで、複合材料におけるリサイクルの認識改善を求めることを掲げている。

技術提携等を通し残留粉塵/繊維エネルギーの価値向上につながるマテリアルリサイクル及び熱分解方法の開発に取り組んでおり、今後5年以内に複合材料の再利用率を80%まで引き上げることが IACMI の目標であるとしている。また、複合材料のサステナビリティ

³⁴ <https://patents.justia.com/assignee/chz-technologies-llc>

向上と共に、埋め立てされる複合材料の廃棄物の量を減らすことも同プロジェクトの目的である。同プロジェクトではガラス及び CF を再生し、複合材料から得られた液体・オイルを再利用しクリーンな合成ガスに変換させる CHZ Technologies の熱分解技術を研究・評価する予定である。

・rCF 関連プロジェクト

電力発電（風力産業）

近年、米国とヨーロッパでは使用済み風力タービンの処理等、廃棄物処理への課題が注目されている。このような巨大な複合コンポーネントをリサイクルするための技術や設備は限定されており、NPR、BBC、ブルームバーググリーンなどのメディア報道によると、今後米国だけでこれらのブレードうち、年間約 8,000 枚が廃棄され、埋め立て地に運ばれる予定となっているという。この問題に米国とヨーロッパの企業は、様々な風力タービンのリサイクルソリューションを試しており、米国のリサイクル機関やリサイクル業者等も共同プロジェクトとしてこの問題に取り組んでいる。

ACMA は IACMI、CHZ Technologies、Continental Structural Plastics、A.Schulman、テネシー大学ノックスビル校と協力し、風力ブレードやその他の熱硬化性複合材料をリサイクルする技術を開発してきた。最終目標はガラス繊維と CF を再生するだけでなく、それらの生産に使用されるエネルギーも回収することでもある（Energy Recovery（助燃材））。同チームは、CHZ の Thermolyzer™テクノロジーを使用したいくつかの異なる複合材料のテストから始めた。この施設は複合材、枕木、電柱、プラスチック等、様々な材料をリサイクルするように設計されている施設で、1 日に 6～10t の材料を処理できる能力を持つ。

CHZ の Thermolyzer 技術は、前述したように連続的な無酸素の熱分解を使用し、複合材料をガラス繊維または CF を別分解しタール、油を回収し、合成ガスに変換する方法である。

プロジェクトの最初のフェーズで、Thermolyzer は 4 つの異なるソースからの複合材料を処理した（ガラス繊維と CF の両方を含むトラクターパネル、GFRP シートモールディングコンパウンド（SMC）自動車パネル、CF 製の風力タービンブレードキャップ、ガラス繊維、バルサ材、その他の素材を使用したウィンドブレード）。これらの材料はそれぞれ独特の特徴を持った異なる樹脂と異なる繊維を持っており、回収された繊維の特性を最適化する方法で処理する必要があることが同研究成果で得られた。

そのためには、温度と滞留時間を調整する必要があり、ガラス繊維を含む複合材料の場合、ガラス繊維にかかるひずみと応力を低減するようにプロセスを変更、ガラス繊維が可能な限り多くの弾性率と剛性を保持するようにプロセスを改善した。また得られた再生繊維の一部をケンタッキー大学と他の業界パートナーに送り、洗浄、テスト、複合材料への加工を行った。

2019 年に開始されたプロジェクトの第 2 フェーズでは、風力ブレードのリサイクルと、バックエンドで一貫したガラス繊維を製造するためのプロセスの最適化に重点を置いた。長さ 157 フィート、重さ約 15,000 ポンドの風車は、最初にセクションに切断され、カナダの Shred-Tech の移動式フィールドシュレッダーで処理した。ブレードの残骸は幅数インチ、長さ約 1 フィートであった。これらの大きな破片の約 1,000 ポンドは別のシュレッダーでさらに細かく分解、大きなピースの量を最小限に抑え、均一にした。これらの残骸はリサイクルするためにドイツに送られた。複合残骸は 2 つのバッチで処理され、この処理フェーズでのテストで連続プロセスにて材料を供給しながら、温度と処理条件を設定する必要があることが判明した。

CHZ Technologies によると、近い将来に同社の Thermolyzer テクノロジーを米国に導入する予定で、同社は ORNL (Oak Ridge National Laboratory : オークリッジ国立研究所) と協力し、複合材料用に最適化されるラボサイズ (2.5~4t) や技術の開発に取り組むとしている。同プロジェクトに参加したメンバーは使用済みの風力タービンの問題の解決策を見つけることは電力業界と複合材料業界の両方にとって重要であるとの認識としており、今後もコラボレーションを通し、CF のリサイクル技術やその仕組み作りについて取り組んでいくとしている。

⑨ Georgia Institute of Technology, Atlanta

企業・機関名	Georgia Institute of Technology
国	米国
設立	1885年
本社所在地	North Avenue, Atlanta, GA 30332
URL	https://www.gatech.edu/

・ rCF 事業開始の経緯

米国の公立研究大学である The Georgia Institute of Technology は、6つのカレッジと Georgia Tech Research Institute (GTRI) 全体で年間 10 億ドル以上の研究賞を授与されており、全米で最も研究集約度の高い大学の一つとなる。

The Georgia Institute of Technology は 2016 年に CF の新リサイクル技術開発の成果を発表している。研究・実験開発を行った学部は The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering at Georgia Tech である。

2016 年に発表された新しい CF リサイクル技術は、エチレングリコール (EG) に複合材料を浸漬した後温度を上げると、EG 分子が共有結合適合性ネットワーク (Covalent Adaptable Network: CAN) 内の結合交換反応 (Bond Exchange Reactions: BER) が加わることで、長いポリマー鎖を小さなセグメントに切断でき、エポキシマトリックスを溶解することが可能であるとの実験・研究に基づいたリサイクル技術である。

クリーンな CF は、その後、vCF と同様な機械的特性を持ち再利用することができる。CAN を完全に溶解するために必要な溶解速度及び最小量の EG が決まっており、溶解した溶液をさらに加熱するとエポキシマトリックスの再重合に結合することで、リサイクルされた繊維とエポキシを使用して新世代の複合材料を製造することができるとする研究結果となっている。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

The Georgia Institute of Technology が研究している rCF のリサイクル技術は上記に説明した通り、CF をアルコールに浸すことで CF を分解・分離させるリサイクル技術³⁵。

トランスエステル化型・結合交換反応 (BER) が可能な熱硬化性ポリマーは、エポキシマトリックス (≒350℃) と CF (≒500℃) の熱分解温度を下回る温度 (160～180℃) でアルコール溶媒に完全に分解する。分解したポリマー溶液をさらに加熱すると、残留アルコール溶媒の蒸発が起き、新しいポリマーと同じ熱力学的特性を有する熱硬化性樹脂の再重合が起きる。

このことから、CAN を複合バインダーとして使用すると、熱硬化性マトリックスと CF の両方を元の特性を維持したまま再生でき、CFRP 複合体内のポリマーマトリックスを修

³⁵ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.201602056>

復し、再生繊維と溶解ポリマー溶液を用いて CFRP を完全にリサイクルすることが可能となる。また、The Georgia Institute of Technology ではこのようなリサイクルパラダイム (Recycling Paradigm) により、低コストでの事業化も容易になるとしている。

・企業や研究機関との協力関係

リサイクル技術開発の実験・実施にあたっては Xian Jiantong University、Singapore University of Technology and Design の研究者が協力している。

また、同研究は国立科学財団 (National Science Foundation)、中国国立自然科学財団 (National Natural Science Foundation of China)、シンガポール A*Star 公共セクター基金 (Singapore A*Star Public Sector Fund)、シンガポール NRF の支援を受けたデジタル製造・設計センター (DManD) がスポンサーとなった。

⑩ Global Fiberglass Solutions, Washington State University

企業・機関名	Global Fiberglass Solutions, Washington State University
国	米国
設立	2009年
本社所在地	21222 30th Dr. SE, Bldg C, Suite 130, Bothell, WA 98021
URL	https://www.globalfiberglassinc.com/

・ rCF 事業開始の経緯

Global Fiberglass Solutions は Washington State University の Composite Material & Engineering Center と共同でガラス繊維複合材をリサイクルするプロセスを開発した。

2009 年に設立された Global Fiberglass Solutions は、風力エネルギー、航空宇宙、海洋、製造業などの産業分野においてガラス繊維廃棄物のリサイクルサービスを提供しており、ガラス繊維のリサイクル分野では有力企業である。また、特許を取得しているリサイクルプロセスや材料追跡システムは同社独自の取り組みであり、ブロックチェーンなどの技術の活用及び強化に力を入れている。

Global Fiberglass Solutions は Washington State University の Composite Material & Engineering Center と共同で可溶性分解方法であるガラス繊維複合材をリサイクルするプロセスを開発した。

同技術は、タノール、エタノール/水混合物、水単位で、酸を触媒として使用し、比較的低温で熱硬化性樹脂を分解する方法で、触媒の効果により炭素・窒素結合またはエステル結合を分解するものである。

また、Global Fiberglass Solutions テキサス州工場では、熱硬化性ガラス繊維をリサイクルするための Mechanical process により風力発電用のタービンのブレードをリサイクルし、リサイクル新製品を製造にも取り組んでいる。

その他、使用済み Wind blade のガラス繊維廃棄物リサイクル事業をサポートするソフトウェア開発関連でデジタル技術特許を取得している。「BladeTracker」と呼ばれるソフトウェアは、リアルタイムのデータ、スペック、各ブレードパーツの位置情報を提供、このソフトウェアを利用することで Global Fiberglass Solutions は各ブレードの複合材構造を追跡することができ、リサイクルプロセスをより簡単かつ効率的に行うことが可能となるという仕組みである。

また、各ブレードパーツは回収から製造まで追跡され、すべての製造には使用されたリサイクルブレードを識別する製造証明書が添付され、OEM や風力発電所の運営者は廃炉証明書 (certificate of decommissioning) を受け取り、環境配慮への取り組みを証明することができる。

⑪ Mallinda/University Colorado Boulder

企業・機関名	Mallinda/University Colorado Boulder
国	米国
設立	2014年
本社所在地	7270 Gilpin Way #180, Denver, Colorado 80229
URL	https://www.mallinda.com/the-technology

・ rCF 事業開始の経緯

Mallinda 社は 2014 年に設立されて以来、熱硬化性樹脂で比較的低温で成形、再成形、溶接、修理、リサイクルが可能なポリマーを開発してきた。同社では University of Colorado Boulder で開発されたポリイミンを適用した CFRP を開発した。このポリイミンは熱硬化性だが、室温の有機溶媒に 24h 浸すだけで溶解するため、エネルギーを使うことなく CF を回収できるとの特徴がある。Mallinda は米国 DOE を含めた複数の補助金を得ていて、総額は 120 万ドル（約 1 億 3 千万円）以上である。

同開発は、織られた CF の全長を維持したまま回収することが可能であるため、Mallinda 社では次なるステップとして繊維の複数回の再利用への取り組みを行っている。複数回の再利用にあたり繊維強度への影響など再生された繊維のライフサイクル分析にも焦点を置いている。

・ rCF 採用用途について

現在、Mallinda 社はプリプレグ形状の rCF の採用用途として、スポーツ用品、航空宇宙、自動車、風力エネルギー、ガス貯蔵圧力容器等への市場参入を検討している。

なかでも、初期の採用用途としては比較的参入へのハードルが低いとされるスポーツ用品向けを検討し、スポーツ用品会社の OEM 社と共に成形可能な Sports Protective gear（シンガード：スポーツに参加するアスリートの安全を保障する個人用保護具）製品を開発している。同製品は、ユーザーが保護材料（Protective material）を加熱し、身体にフィットするように可鍛性を活かすことが可能であるとしている。Mallinda 社とそのパートナーが開発したスポーツ用保護具（シンガード等）は 2018 年に採用されたとみられる。

⑫ North Carolina State Univ.

企業・機関名	North Carolina State University
国	米国
設立	1887年
本社所在地	Raleigh, NC 27695
URL	https://www.ncsu.edu/

・ rCF 事業開始の経緯

North Carolina State University ではいくつかの rCF 評価結果についての論文を発表している。評価対象である rCF は Adherent Technologies, Inc.、 Milled Carbon Ltd. (現 ELG Carbon Fibre Ltd.)、 Materials Innovation Technologies、 Karborek Recycling Carbon Fibers から回収し、評価試験を行ったものである。

評価方法は光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡による CF 表面観察、単繊維引張試験、フラグメンテーション試験、エネルギー分散型 X 線分析、X 線光電子分光などで、射出成型機、押出成型機を用いて回収 CF を用いたリサイクル CFRP を作製、引張試験等の評価を行った。なお、同大学は Boeing Research and Technology(BRT)が中心となる"Boeing Project"にも参加している。

・ rCF 評価に関する論文

Characterization of Recycled Carbon Fibers and Their Formation of Composites Using Injection Molding³⁶

本研究では、異なる技術を用いて回収された 2 つの rCF の特性と、押出および射出成型技術を用いた複合材料への導入について評価を行った。なお、同研究には再利用繊維の特徴や vCF との比較も含まれている。評価試験方法としては、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡、エネルギー分散分光、X 線光電子分光法、単繊維引張試験、および単繊維複合フラグメント化試験を行った。リサイクルされた CFRP の特徴を比較するため、市販されている vCF との比較を行った結果、rCF は vCF の繊維に匹敵する特性を有することが証明された。

この研究結果から、rCF の表面に大きな損傷はなく、再生繊維は引張特性の 81%以上の保持を示し、繊維の断片は測定した vCF ファイバーと同様、もしくはより良い結果を示した。評価した rCF の一つのサンプルを除き、複合および射出成型された再生繊維セットは、特性の評価試験において vCF 同様の特性を示したため、現在の CF リサイクル技術で回収処理された rCF は vCF が使用されている製品向けの使用が可能であることを示している。

³⁶ <https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/673>

Study and Analysis of Carbon Fiber Recycling³⁷

本研究では、rCF を複数の物質源から系統的に評価し、複数のリサイクルプロセスを 3 段階で実施した。

本研究の第 1 ステックでは、Milled Carbon と ENEA/Karborek の rCF の評価が実施された。結果ではリサイクルプロセスの違いによりリサイクル標準弾性率(SM)繊維とリサイクル中間弾性率(IM)繊維結果が大きく異なることが証明された。第 2 ステックでは、Materials Innovation Technologies と Recycled Carbon Fibre, Ltd.の rCF を評価した。Materials Innovation Technologies の SM ファイバーは、SM 繊維と近い試験結果が得られた。第 3 ステックでは、vCF と rCF を使用しシート成形化合物(SMC)を製作し評価試験を行い、この混合した SMC シートは一般的に入手可能なバージングラスファイバーSMC と比較しても優れた性能を示し、他の rCF SMC と比較でも優れた数値での結果が証明された。

rCF の特性の違いはリサイクル原料、リサイクルされた CF の種類、及びリサイクルプロセス等によりその結果が異なること等が記されており、この研究は CF リサイクルコミュニティが機械性能とリサイクル能力を向上させ、多様な CFRP 材料を取り扱い、将来的な rCF の用途を実証するために取り組みであり、rCF の進化を示している。

³⁷ <https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.16/6885/etd.pdf?sequence=2>

⑬ Triumph Composites Systems, Washington State University

企業・機関名	Triumph Composites Systems, Washington State University
国	米国
設立	1990年
本社所在地	1514 Flint Rd, Spokane, WA 99224
URL	https://www.triumphgroup.com/

・ rCF 事業開始の経緯

Triumph Composites は 1990 年に Boeing 社がワシントン州に製造施設として開設したことから始まった。この施設ではフロアパネルと環境制御システムのダクトという特殊な複合材製品の製造をサポートするために設計された。その後、2002 年に Boeing Spokane が Triumph Group, Inc. に買収され、Triumph Composite Systems, Inc. となった。

Triumph Composite Systems としてビジネスを行う前までは、顧客の製造設計に合わせた部品製造が主力であり、設計事業等は行っていなかった。しかし、買収後は航空宇宙産業のトレンドに合わせた設計、エンジニアリング、製造、アフターマーケットサービスを含む包括的なシステムソリューションビジネスに転換を行い、このような設計事業は同社の主力事業となった。

Triumph Composites Systems 社は Washington State University と共同で、床材や換気装置など多くの航空機部品に使用されている CFRP のリサイクルに関するプロジェクト実施した。同プロジェクトでは Joint Center for Aerospace Technology and Innovation

(JCATI) の助成金を受け、低エネルギーの方法で複合材を再加工し新しい部品の製造に取り組んだ。さらに、同プロジェクトでは Triumph 社の工程内端材を利用し、樹脂や添加物を加えないリサイクル製品の製造も行った。

また、同社は The Center of Excellence for Advanced Materials in Transport Aircraft Structures (AMTAS) consortium、Applied Science Laboratory (ASL) にもパートナー企業として加盟している（同パートナーシップも JCATI が支援）。

Triumph Group は、2020 年 8 月に複合材料事業を Arlington Capital Partners に売却することで最終合意したことを発表している。

・ rCF 採用用途等

rCF の用途としては、主に航空宇宙産業に関わるパーツ・部品を想定している。Triumph Group 社が旅客機・軍事用機などを製造しており、開発された rCF はそういった航空機の喚起設備部分、フロアパネル（床材）、その他付属部品への製造に再利用されているとみられる

⑭ University of Southern California

企業・機関名	University of Southern California
国	米国
設立	1880年
本社所在地	3651 Watt Way, VHE 602, Los Angeles, California 90089-0241
URL	https://www.usc.edu/
	https://composites.usc.edu/

・rCF 事業開始の経緯

University of Southern California (以下、USC) の研究センターの一つである M.C. Gill Composites Center は 2002 年に M.C. Gill 氏からの寄付により設立された。M.C. Gill Composites Center では、複合材料および複合構造物の製造などに関連するテーマについて研究を行っている。化学工学、機械工学、材料工学の研究生を対象としたスポンサー支援を行っており、研究プロジェクトを通じたトレーニングも実施。センターの職員は高分子科学、製造技術の専門スキルを持つ研究教授等によって構成されており、幅広い専門知識を持つ教員はさらに産業界のスポンサーなどとも連携し協力関係にある。

2019 年に開かれた USC Wrigley Institute for Environmental Sustainability Prize コンテストで USC の研究チームは新しいリサイクル技術を発表し、同技術のビジネス化のための資金援助を受けることとなった。

事業化への具体的な案としては、Boeing 社や Airbus 社などの航空関連の製造者から安価な廃棄物（工程内端材を含む）を買い取り、回収した廃棄物をリサイクル・販売を行うことで利益を確保できる仕組みを作る計画。

さらに、米国・モハベ（カリフォルニア州の砂漠）で野ざらしになっている退役機などの使用済み廃棄物もリサイクル対象として検討している。

・rCF のマテリアルリサイクル技術

University of Southern California の研究グループは、CFRP 廃棄物のリサイクルソリューション技術を開発。自動車、風力タービン等、従来 CFRP が使用されている製品向けに再利用するため、高品質な CF を抽出する繊維を繋ぎとなるプラスチックのような樹脂を脱重合させる化学プロセスの構築に成功した。

また、研究論文では Chemical Recycling method の実験を多数行っており、3 つのリサイクル技術方法を軸に実験を実施している（アルカリ消化法・酸分解法（alkali digestion method・acid digestion method）、酸化的消化法（oxidative digestion method）、脱重合法（depolymerization））。アルカリ消化法・酸化的消化法は、大気圧・低温（<200℃）で化学処理を行う方法で、脱重合法によるリサイクル方法では、CF を回収しながら、複合材

料を石油化学原料へのリサイクルが可能であることにも注目している。

しかし架橋密度の高い熱硬化性樹脂で構成される従来の CFRP の脱重合は困難であり、また高性能複合材料に幅広く使用されているアミン硬化型エポキシの再生能力については不明な点が多い等の課題も残されており、現在は改善方法等について研究が行われている。

・ rCF 関連プロジェクト

Recycling of Carbon Fiber-Reinforced Thermoset Composites

-プロジェクト名称：Recycling of Carbon Fiber-Reinforced Thermoset Composites

-プロジェクトメンバー：Yijia Ma

-プロジェクト概要：本プロジェクトは、安全な化学薬品（溶剤や触媒）とスケラブルな条件（大気圧、適度な温度）を用いて、熱硬化性マトリックスを効果的に分解し、CF を分離するケミカルリサイクル法を開発することをターゲットとしている。また、触媒を介して分解されたポリマー成分は、特性の劣化がみられず新たな用途への再利用することができ、材料の再利用循環ループを構築することが可能であるとしている。

・ rCF 採用用途等

M.C. Gill Composite Group は 2014 年に「Infinipreg（Infinite+Prepreg の造語）」を開発。Infinipreg はプリプレグチップのスクラップ（廃材）から形成されるシート成形用コンパウンドであり、既に様々な製品に実験製造として活用されており、将来的には航空宇宙、自動車、風力エネルギー部品製造産業での再利用を想定している。

また、CFRP は軽量性や優れた構造性能だけでなく、外観の良さ（表面上の仕上がり）もその特徴として挙げられる。非構造物（non-structural）であるアームレストや携帯電話ケース、カップホルダー、または構造物であるホームやオフィス家具など、外観の良さという特徴が評価され CFRP が採用されているケースも多く、Infinipreg で製造された製品は表面にランダムに配置されたチップが入射光を反射してキラキラとしたコーティング感を演出できるため、こうした外観の良さが評価され CFRP が採用された用途向けへの展開も検討している。

医療機器分野では、CFRP の放射性光特性を利用して、病院/ICU 病床や医療機器の構造用ケーシングの製造が可能。また、廃材の CF/エポキシプリプレグから義足（Gazelle™）の製造にも成功。スポーツ・レクリエーション用品としては、スケートボード、スノーボード、スノースレッド、ゴーカート、カヤックへの展開が考案されている。

⑮ Washington State University

企業・機関名	Washington State University
国	米国
設立	1890年
本社所在地	Pullman, WA, United States, P.O. Box 645815, Pullman, WA 99164-5815
URL	https://cmec.wsu.edu/

・ rCF 事業開始の経緯

Washington State University はワシントン州プルマンにある公立の研究大学である。同大学は R1: Doctoral Universities - Very high research activity に分類されており、2018 年は研究開発に 3 億 6000 万ドルを投資した。

Recycled carbon fibre、CFRP 等の複合材に関しては「Composite Materials and Engineering Center」の Polymeric Materials 担当グループの研究者らが研究を行っている。同大学ではリサイクル資源やバージン資源 (virgin resources) を利用し、新しい建材や燃料の開発をしている。さらに、新しい材料を効果的に利用する再利用循環構造システムの設計も行っている。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

School of Mechanical and Materials Engineering & Composite Materials and Engineering Center の Jinwen Zhang 教授と彼のチームはエタノール(EtOH)、エタノールと水の混合液、または水だけで (比較的) 低温の弱酸を触媒として使用し熱硬化性樹脂を分解する新しい Chemical Recycling 法を開発した³⁸。

触媒としては、水酸化カリウム(KOH)、硝酸、りんタングステン酸(HPW)、塩化亜鉛(ZnCl₂)、塩化マグネシウム(MgCl₂)、塩化アルミニウム(AlCl₃)、塩化鉄(FeCl₂)、を用いた。処理条件は温度 80-250℃、時間 2-10 h とした。その結果、樹脂溶解率が 90%以上になった条件としては、65%硝酸/水/80℃/10h : 100%、65%硝酸/水/80℃/2h : 95.6%、32%硝酸/水/80℃/2h : 94.9%、20%ZnCl₂EtOH/220℃/5h : 89.8%、20%ZnCl₂/水/250℃/5h : 91.8%であった。

研究成果から同チームは、塩化亜鉛 (ZnCl₂) /エタノール触媒システムを用いて、T_g が約 210℃ の CFRP を mild chemical recycling するための効率的なアプローチを導いた。ZnCl₂/エタノールの高効率化は ZnCl₂ の C-N 結合との強い配位効果、エタノールの強い膨潤性が、架橋ポリマーの化学結合を破壊することに起因していると考えられる。また、分解温度が 200℃以下と比較的低温であるため、回収された繊維にはほとんどダメージがなかった。分解されたマトリックスポリマー (Decomposed matrix polymer) はオリゴマー形

³⁸: 「Mild chemical recycling of aerospace fiber/epoxy composite wastes and utilization of the decomposed resin, 2017」
<http://polympart.com/wp-content/uploads/2017/06/Mild-chemical-recycling-of-aerospace-fiber-epoxy-composite-wastes-and-utilization-of-the-decomposed-resin.pdf>

態であり、多官能の反応性基を有していた。反応性成分として DMP を 15wt%まで添加した場合、得られた架橋ポリマーは DMP を添加しなかった場合と比較し、高強度と高弾性率を維持することがわかった。

触媒と溶媒の組み合わせが効果的であることが証明されたことで、硬化した材料を効果的に分解するために触媒を含む液体が複合体に浸透し、複雑な構造を分解できるように材料の温度を上げた。溶媒（例えば、エタノール／水）はまず樹脂を膨張させ、次に触媒の効果で炭素-窒素結合またはエステル結合を分解するために使用された。

(3) ドイツ

① HADEG Recycling GmbH

企業・機関名	HADEG Recycling GmbH
国	ドイツ
設立	1995年
本社所在地	Julius-Leber-Weg 11 D-21684 Stade
URL	http://www.hadeg-recycling.de/

・ rCF 事業開始の経緯

HADEG Recycling GmbH は 1995 年に設立された廃棄物の回収・処理から再利用可能な材料に CF をリサイクルする最初のドイツ専門業者で、CFK Valley Stade にも参加している。

同社では廃棄物の回収や CF の加工製品の販売拡大に力を入れており、プリプレグ端材から製造したシートや短繊維等の生産を行っている。

・ rCF 関連プロジェクト

Verstärkte Folien aus rezyklierten Kohlenstofffasern

HADEG Recycling GmbH は 2008 年 7 月から 2010 年 6 月にかけて、rCF から強化フィルム製造するプロジェクト「Verstärkte Folien aus rezyklierten Kohlenstofffasern」に参加した。

同プロジェクトは、ドイツの産業研究協会（Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V.）の資金援助を受けたもので、同社及びクラウスタール工科大学、Held Technologie GmbH、IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH、Webac Gesellschaft für Vibrationstechnik mbH、TenCate Advanced Composites BV、Otto Bock Health Care GmbH、KraussMaffei Berstoff GmbH、SGL Technologies GmbH が参加した。

Graphit 2.0

HADEG Recycling GmbH では Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm が主導する Graphit 2.0 プロジェクトにおいて、Dieffenbacher GmbH と共同で「CFRP から再生グラファイトを得るための技術開発（TECHNOLOGIEENTWICKLUNG ZUR GEWINNUNG VON SEKUNDÄRGRAPHIT AUS REZYKLIERTEN KOHLENSTOFFFASERN）」に関する開発を行っている。このプロジェクトは CF へのリサイクルに直接関連するものではないが、廃 CFRP からカーボンを再生し、LIB 等の新たな用途で活用するというものである。

・rCF のマテリアルリサイクル技術

ドイツの技術者協会資源効率センター有限会社(VDI・ZRE) が発刊している「車両資源効率と技術の炭素繊維強化プラスチック (Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau Ressourceneffizienz und Technologien) Mai 2013」によれば、同社は航空機 (Airbus) から廃 CFRP (主にプリプレグ) を引き取り、熱分解処理により CF のリサイクルを行っているとしている。

HADEG Recycling GmbH ではプリプレグ端材から製造したシートや短繊維等を製造している。

② Mitsubishi Chemical Advanced Materials (former known as carboNXT or CFK Valley Stade Recycling)

企業・機関名	Mitsubishi Chemical Advanced Materials (former known as carboNXT or CFK Valley Stade Recycling)
国	ドイツ
設立	2007年
本社所在地	Stader Straße 55-63・21737 Wischhafen
URL	https://www.cfk-recycling.de/index.php?id=5 https://www.carbonxt.de/en/

・rCF 事業開始の経緯

CFK Valley Stade Recycling GmbH は 2007 年に CFK-Valley Stade e.V. と Karl Meyer AG の 100% 子会社として設立された。同組織は Karl Meyer グループから 500 万€（1 €＝120 円の場合、6 億円）、EU から 1,700 万€（同 20.4 億円）の資金提供を受け、技術面では DOW Chemical からのサポートを受けながら運営している。

同社は主に Airbus 向けの CFRP リサイクル会社として運営されており、Airbus のドイツ子会社である CTC GmbH と共に Airbus 向けの内装側壁に rCF を配合した成形品を用いる技術等も開発している。

2007 年には The CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG の子会社として、再生品を販売する CarboNXT GmbH が設立された。

CFK Valley Stade Recycling GmbH のリサイクル方法は、熱分解プロセスでミルド、チップドの rCF を生産している。また、不織布製造機を購入して CF 不織布を生産する技術も開発中である。

※CFK-Valley Stade e.V.（以下 CFK-Valley）は 2004 年に設立された CFRP の開発・応用・普及を目的に形成された研究開発クラスターで、同クラスターは航空用の複合材料ネットワークが活動の中心となっている。なかでも、Airbus が同クラスターの形成を主導し、CFRP が航空機の機体に広く用いられるようになった Airbus は自ら複数のプロジェクトに参画し、活発な応用研究を続けている。

CFK-Valley 事務局自体は非営利の協会であり、実際の研究開発に関与しているわけではないが、ドイツを中心とした 100 以上の加盟企業・組織が CFK-Valley に参加しており、これらの企業・組織は CFK-Valley 内に支店設置や、技術者の派遣、情報収集等を行っている。日本からは東レ、東邦テナックス（現・帝人）、日華化学が参加している。

その他 CFK-Valley の開発ネットワークの一つとして、Composite Technology Center Stade（CTC GmbH：Airbus ドイツ法人の子会社）がある。航空機、船舶、乗用車、商用車などを対象とした複合材の成形（RTM や VARI：Vacuum Assisted Resin Inflation）・製

造技術の研究開発を行っている。

2020 年 8 月、CFK Valley Stade Recycling GmbH 及び carboNXT GmbH は三菱ケミカル株式会社を買収された。三菱ケミカルは欧州で、CF や CFRP などの製造、回収、リサイクルまで一貫して実施できる体制を整える目的で、CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG 及び carboNXT GmbH を買収した。CFK Valley Stade Recycling GmbH は回収した CFRP から CF をエポキシ樹脂などと分離、再生した CF は主に欧州にある三菱ケミカルグループの拠点で再利用される予定。

・ rCF の由来・回収元（排出メーカー・元用途：工程端材・廃材）

CFK Valley Stade Recycling の回収プロセス詳細については明らかにされていないが、廃材の処理・運搬等に関しては Karl Meyer グループの協力のもと実施している。主な廃 CFRP の入手元は Airbus 等の航空機や自動車部品メーカー等の CFRP 部品製造時に発生する工程内端材、廃棄物処理業者から入手しているとみられる。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

CFK Valley Stade Recycling GmbH のリサイクル方法は、熱分解プロセスでミルド、チョップドの rCF を生産している。

・ rCF 採用用途・当該用途での採用理由、当該用途での販売量

CFK Valley Stade Recycling GmbH の rCF 製品の販売は carboNXT GmbH が担当する。同社はミルド、チョップド、ファイバーball、ファイバーtube、rCF コンパウンド、不織布、Veil、rCF smc/ rCF bmc の rCF 製品をラインナップしている。

同社の rCF 製品は自動車部品向けや飛行機の内部側壁のサイドパネル向け等に採用されている。rCF の採用理由については、rCF は一般的に vCF より低価格でありユーザーにとってコストメリットがあることや、近年では環境への配慮からリサイクル材料への意識変化によりリサイクル製品の採用が拡大していることを挙げた。

また、今後期待される rCF の採用用途については、採用が徐々に増えている 3D プリンティングの成形材のほか、メディカル関連（医療機器向け）に注目している。

・ 企業や研究機関との協力関係

CFK Valley Stade Recycling GmbH は Composite Technology Center (CTC) と航空機における rCF 製品製造やその設計等の技術を共同開発している。CTC は CFK-Valley ネットワークの核となっており、CTC は Airbus のためだけでなく、他の産業に対しても先進的な技術を提供している。

2013 年頃から CTC の研究者である Tassilo Witte 氏は、航空用途（内部壁用パネル）の

ための rCF 材料を開発するため、CFK Valley Stade Recycling GmbH 等と協力関係を構築している。CTC は 2014 年に CarboNXT GmbH の rCF の評価試験を行っており、熱可塑性マトリックスを使用したテストでは優れた接着性が示された。CTC では、CarboNXT の rCF を使用し航空機内部側壁パネルの生産することにも取り組んでいる。

③ SGL Carbon

企業・機関名	SGL Carbon
国	ドイツ
設立	2009年
本社所在地	Söhnleinstraße 8, 65201 Wiesbaden
URL	https://www.sglcarbon.com/en/

・ rCF 事業開始の経緯

SGL Carbon（旧 SGL Automotive Carbon Fibers）は 2009 年に BMW（Munich DE）と SGL（Wiesbaden DE）の出資によって設立された合弁会社である。同社は BMW の自動車向け CFRP 部品製造時に生産工程で発生する廃材、ならびに使用済み自動車 CFRP 部品から CF を回収し、再び BMW 自動車の CFRP 部品として再利用することを目的とし設立された。

2010 年からはプリフォーム破材等からも CF を回収し、様々な自動車部品への再利用の検討を行ってきた。自動車のセンターピラーやトランクルームパーテーション等に利用する技術などを検討し、2013 年からは BMW i3 のルーフ、リアシートに再利用され、BMW が使用する CFRP 部品の約 10% が rCF を使用した部品となった。

2017 年 11 月、BMW は SGL Carbon との合弁事業を解消することを発表した。これにより、2018 年にはドイツと米国にある合弁会社 SGL Automotive Carbon Fibers の持ち分をすべて SGL Carbon に売却し、SGL Automotive Carbon Fibers は SGL Carbon として事業を継続することとなった。ただ、これまで SGL Automotive Carbon Fibers から調達してきた CFRP 材料についてはその後も継続的に供給を受けている。

・ rCF の物性、品質保証方法

SGL Carbon では、rCF 製品として硬化前の工程内端材から回収しリサイクルした rCF である RECAFIL® やそれら rCF を利用した不織布である RECATEX® を展開している。

RECAFIL® の主な用途（230 μm 品）は帯電防止または導電性材料を製造するための添加剤として利用されている。RECATEX® に関しては BMW i3 のルーフ等で利用されている。

・ rCF 採用用途・当該用途での採用理由、当該用途での販売量

2013 年より BMW では CFRP を車体構造部に採用した EV（i3 や i8）を製品化し、当時 BMW と合弁会社であった SGL Automotive Carbon Fibers（現 SGL Carbon）は BMW の CFRP 部品製造時に工程内で発生する廃材を回収・リサイクルし、BMW の部品として再利用するリサイクルを行った。

BMW では CFRP の工程内端材のリサイクルラインを完備しており、CF の廃棄品にはドライ状態（樹脂未加工）とウェット状態（樹脂が混ざった状態の CFRP）の 2 種類がある。

ドライ状態は製造過程（予備成形）で発生する織物の端材であり、この端材はフリース状の生地にも再処理され、CF 織物の一部にも利用されている。ウェット状態の廃棄品に関しては熱分解設備により CF と樹脂を分離する。

これら BMW のリサイクルは全て SGL Automotive Carbon Fibers によって行われているが、廃 CFRP からの CF 分離に関しては CFK Valley Stade Recycling により行われている。

BMW i3 の生産で使用される CF のうち、10%はドライリサイクル品であり、BMW 7 シリーズの C ピラーは rCF SMC 製品が使用されている。その他、BMW i3 のルーフにもリサイクル品が使用されている。

④ Fraunhofer (IGCV、ICT、IVV)

企業・機関名	Fraunhofer IGCV
国	ドイツ
設立	2016年
本社所在地	Am Technologiezentrum 2 86159 Augsburg
URL	https://www.igcv.fraunhofer.de/

企業・機関名	Fraunhofer ICT
国	ドイツ
設立	1959年
本社所在地	Joseph-von-Fraunhofer Strasse 7, 76327 Pfinztal
URL	https://www.ict.fraunhofer.de/en.html

企業・機関名	Fraunhofer Institute for Process Engineering and Packaging IVV
国	ドイツ
設立	-
本社所在地	Giggenhauser Strasse 35, 85354 Freising
URL	https://www.ivv.fraunhofer.de/en.html

Fraunhofer-Gesellschaft（フラウンホーファー研究機構）は、ヨーロッパ最大の応用研究機関であり、ドイツ国内に点在する 67 の研究所および研究ユニットでは実用化のための研究をテーマに応用研究が行われている。

研究ユニットのなかで rCF に関する研究を行っている機関は Fraunhofer IGCV、Fraunhofer ICT、Fraunhofer IVV とみられる。下記にはそれぞれの研究ユニットが行っている技術研究及びプロジェクトについて記述する。なお、これらの研究ユニットは共同研究や開発等を行っており、Fraunhofer の一つの組織として機能している。

・ rCF 事業開始の経緯

1959 年に設立された Fraunhofer ICT（Pfinztal, Germany）ユニットでは、高分子工学分野において CFRP の研究も行っている。射出成形、押出成形、マイクロ波およびプラズマによる硬化、LFT（長繊維強化熱可塑性樹脂）などの技術を開発している。CFRP のリサイクル技術に関しては、マイクロ波による熱分解プロセスの研究を行っている。

Fraunhofer IGCV は 2016 年に設立。当初は Fraunhofer ICT の機能統合軽量設計 FIL プロジェクトグループ、Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology IWU の Resource-Efficient Mechatronic Processing Machines RMV プロジェクトグループ、とミュンヘン工科大学の成形技術・鋳造技術チェア（utg）の鋳造作業グループから形成された。同ユニットは Fraunhofer-Gesellschaft、ミュンヘン工科大学、バイエルン州経済省がスポンサーとなっている。

Fraunhofer IVV では、高品質なプラスチック複合材のリサイクル技術の開発に力を入れ

ており、プラスチックとプラスチック複合材料、プラスチックと他の材料（金属、他のポリマー、セラミック）との複合材料等の複合材料の加工技術について研究している。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

Fraunhofer ICT では、マイクロ波による熱分解プロセスに関する研究が行われている³⁹。通常の熱分解プロセスでは、空気排除環境下で、500～600℃の温度で CFRP のポリマーマトリックスを分解し、CF を取り出す。

マイクロ波熱分解は、廃 CFRP をマイクロ波（300MHz～300GHz）により直接加熱する熱分解の特殊な方法である。CF は導電帯であり、マイクロ波を吸収しやすい。マイクロ波は部品に ohmic warming（オーミック加熱）を引き起こし、turbulent flow（乱流）を誘導する。CFRP は導電性を有しているため、マイクロ波が数ミリメートルで内部に到達することを利用した分解方法である。

マイクロ波熱分解炉の主要な設計上の特徴は、そのモジュラー構造であり、高スループットでシステムにスケーリングする実験装置を可能とする。強力な周波数のマグネトロンは、低価格で入手可能であり、使用するマイクロ波周波数は 915MHz である。915MHz のマイクロ波の長波長は、より大きな直径を有するシートやフレークの熱分解を可能とする。平面のセラミックトレイを装備したスチールバンドは、オープンを通して引っ張られている。セラミックトレイには廃 CFRP（フレーク又はシート）を充填し、熱分解炉を通して搬送され、熱分解ガスは排気される。

マイクロ波が発生するマグネトロンはモジュールの後部に接続され、オープンはその摂取出力開口部にフランジされる。それに追加のモジュールを接続することにより拡張することができる。モジュールは、金属板で前に閉じられている。

実験には、2 種類の CFRP を用意した。一つは長繊維 CF＋不飽和ポリウレタン樹脂(UP)のシートであり、もう一つは 連続 CF＋エポキシ樹脂のプリプレグである。シート／プリプレグの幅は 6 cm、厚みは 4 cm、長さは 12 cm である。

通常の熱分解法では、600℃の温度において 1 時間 20 分で CF と樹脂の分離が行われた。一方、マイクロ波による熱分解では、6 枚のシートをセラミックトレイの片方に積み重ね 600W、180 秒間のマイクロ波にさらし、マトリックス樹脂が除去された。4 枚のプリプレグを積層した際は、150 秒の電力出力で熱分解した。

マイクロ波熱分解によって得られた CF と熱分解により得られた CF 及び vCF を比較した。全ての繊維は肉眼では繊維表面に樹脂残渣や損傷が確認されなかった。ただ、詳細にみると熱分解及び vCF と比較し、マイクロ波により分解された表面繊維は繊維の損傷があった。中間領域では繊維は樹脂の残留物が無く、繊維の損傷もなかったが、完全に熱分解

³⁹<https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2018/april/cfrp-recycling-into-the-battery-instead-of-the-garbage.html>

されていない部分もあった。

平均繊維径はバージン繊維と比較し、11.3%減少している。マイクロ波による熱分解は繊維径の減少をもたらすが、その減少は採取されたゾーン（表面、中央等）に依存する。最も優れたデータでは中央部の縮小が 4.4%であったが、表面ゾーンでは繊維体積が 20.3%減少した。

マイクロ熱による CF の特性減少は、マイクロ波の熱分解中の不十分なプロセス管理が考えられる。繊維過熱及び結果の熱損傷を排除することができず、機械的特性の低下の原因となるため、次の発達段階では適切にプロセスを管理し、適正な温度管理を行う必要があるとしている。

・rCF 関連プロジェクト

Project reCaHiT

プロジェクト名称：Project reCaHiT

プロジェクト期間：2018 年 12 月～2020 年 12 月

プロジェクト内容：Recycled raw material における課題として「short fibre に限定される」、「リサイクル製品採用への抵抗」、「不安定な品質」などが挙げられており、こうした課題に取り組むべく reCaHiT プロジェクトを開始。Recycled carbon hybrid yarn を raw material と代替することにより Mechanical property の良さの証明し、各分野でもリサイクルマテリアルが受け入れられるように同プロジェクトの開発で取り組むことを目的としている。

プロジェクト reCaHiT では、Karlsruhe Institute of Technology (KIT) と Institute for Applied Materials (IAM-WK) が協力パートナーである。

CaRinA (Carbon fiber recycling materials for industrial applications)

-プロジェクト名称：CaRinA (Carbon fiber recycling materials for industrial applications)

-プロジェクト期間：2017 年 3 月～2020 年 9 月

-プロジェクトパートナー：Airbus Helicopters GmbH、Carbon Truck & Trailer GmbH、CUeV、EDAG Engineering GmbH、ELG Carbon Fiber Ltd.、Faurecia Emissions、Control Technologies、Huntsman International LLC、ITA Augsburg GmbH、LAMILUX Heinrich Strunz Holding GmbH、Rochling Automotive SE & Co. KG、SGL Technologies GmbH、Tenowo GmbH

-プロジェクト概要：「CaRinA」プロジェクトの目的は環境問題への配慮も考慮し、rCF の製造技術確立を通し CFRP リサイクルチェーンを構築させることである。CFRP の需要が拡大していくなか、将来的に使用済み製品となる CFRP 廃棄物のリサイクルについても考える必要がある。EU では既にプラスチック廃棄物の埋め立ては認められず、新たなリサ

イクル技術の確立が必要となると考えられ、同プロジェクトを通じ CF のリサイクル方法及び rCF 材料の供給体制等再利用の仕組み作りについて取り組むことを目標として掲げる。

不織布形態 rCF の供給を拡大させ、今後の需要拡大に対応することである。

このプロジェクトの主要な目的は、①CF を用いたウェブ形成の調査と改良、②熱可塑性マトリックスを用いた rCF 不織布の含浸技術の開発と改良、③異なる熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂を用いた rCF 不織布からなる rCF の市販および開発中の材料の生成、④技術者、開発者、設計者等、製品設計に関わる関係者がよりスムーズに材料選択を可能にするためのソフトウェアツール及び共通材料としての rCF 材料の提供、である。

「CaRinA」プロジェクトでは、CF の端材や使用済み製品は廃棄物として処理されるだけでなく、高品質で軽量建築材料の安価な供給源として捉えており、活用方法によっては、rCF はコスト効率の高い軽量建築の確立に貢献するだけでなく、材料生産における原材料とエネルギーの節約にも貢献できるとの見方をしている。

HErzSchLag (Heartbeat)

-プロジェクト名称：HErzSchLag (Heartbeat)

-プロジェクト期間：2016 年 10 月～2018 年 10 月

-プロジェクトパートナー：BMW、Audi AG、SGL Group、MAI Carbon など

-プロジェクト概要：CFRP は優れた軽量材料であり、特に自動車産業からの需要は今後も増加していくと予想される。しかし、CFRP 部品の製造時に発生する工程内端材の比率が高く、全体的な生産コストのアップにつながっているのが現状である。こうした観点から、工程内端材をリサイクルし自動車部品として再利用する取り組みとして、自動車メーカーや rCF メーカー・研究機関が協力し、リサイクルシステムについて開発を行った。

再生された CF の自動車用途向けでの採用可能性を検証するため、CF の連続(continuous)加工、ATL と AFP 技術の near-net 形状、strip-wise 層状構造などの既存技術を活用し、Efficiency and Balancing チームでフラットコンポーネント構造のための新たなシステムとしてリサイクルブリフォーム技術が開発・検証された。その結果、製造コストの削減にも貢献できることが証明され、その後量産ライン向けの導入に向けパートナーと共にパイロットプラントで検証が行われた。

・企業や研究機関との協力関係

Fraunhofer-Gesellschaft が保有する研究ユニットのなかで rCF に関する研究を行っている機関は Fraunhofer IGCV、Fraunhofer ICT、Fraunhofer IVV とみられ、これらの研究ユニットは共同研究や開発等を行っており、Fraunhofer の一つの組織として機能している。

ドイツの大学や研究機関とのコラボレーションだけではなく、自動車産業を含む様々な分野の民間企業との共同プロジェクトを実施しており、CFRP リサイクルチェーンの構築のため研究を続けている。

⑤ Hohenstein Institute

企業・機関名	Hohenstein Institute
国	ドイツ
設立	1946年
本社所在地	Schlosssteige 1 74357 Bönningheim
URL	https://www.hohenstein.com/en/

・ rCF 事業開始の経緯

Hohenstein Institute（ホーエンシュタイン研究所）は 1946 年に創立された民間の研究所以、ドイツ南西部・ハイルブロン市の郊外に位置する。1995 年には研究室ネットワークを拡大し、Hohenstein Academy も設立し、ドイツの本拠地を含め海外にも拠点を持つ世界的な研究機関となった。

Hohenstein Institute のプロジェクトチームは、様々な研究プロジェクトに関わっており、新たな応用分野の開拓に力を入れている。取り組みとして企業のイノベーションにも参画し、研究開発の知見や成果を民間企業に提供する等、研究した技術の実用化に向けてのサポート等の活動も行っている。また、Hohenstein はドイツの繊維研究の分野では有数の研究機関であり、繊維分野においてその機能化や性能、バイオ関連や環境への影響などのテーマに力を入れている。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

2015 年 4 月、Hohenstein Institute は、バイオテクノロジーを用いた CF リサイクルに関して研究を行っていると発表した⁴⁰。

Hohenstein Institute の試験では、バイオテクノロジーを使って CF の新しいリサイクル方法を生み出せることが示された。Christin Glöckner 氏が率いるチームは、樹脂を分解するため微生物学システムを使用し、合成マトリックスで制御された分解を実現している。CFRP 中のエポキシ樹脂の場合、微生物の混合物を用いて分解を行い CF は損傷することなく利用が可能としたものである。

Biological : Biotechnical Process

Hohenstein Institute は、バイオテクノロジーのリサイクルに基づく有望な新しい代替ソリューションの開発を研究している。特定の微生物がポリエーテル樹脂などの化学物質を生化学的プロセスで代謝できるというセオリーに基づき、適切な微生物を選別することで、通常はエポキシ樹脂でできている CFRP のプラスチックマトリックスを分解することに成功した（プラスチックマトリックスを微生物学的に分解し、代謝物（metabolite）として材料サイクルに戻す仕組み）。同時に、CF は傷つけることなく抽出が可能であるため、rCF は vCF と同様の使用用途向けに再利用することが可能であるとの成果報告である。

⁴⁰<https://www.innovationintextiles.com/hohenstein-uses-biotechnology-to-find-ways-of-recycling-carbon-fibres/>

将来的に **rCF** の採用用途としては、現在 **CFRP** が使用されている自動車、飛行機、風力発電（Turbine blades）向け等が挙げられるが、**Hohenstein Institute** では長年テキスタイル（繊維）分野に力を入れているため、独自のリサイクル方法で回収した **rCF** もテキスタイル用途で活用可能な用途を模索しつつ、テキスタイル関連企業の新製品への貢献を最終的な目的として掲げている。

研究チームによると、リサイクルされた **CF** の再利用する産業のニーズにより効果的提供、商業化レベルを目指すにはリサイクル繊維の品質基準を定義する必要性もあるとしている。

⑥ MAI Carbon

企業・機関名	MAI Carbon
国	ドイツ
設立	2012年
本社所在地	Am Technologiezentrum 5, 86159 Augsburg
URL	https://composites-united.com/en/

・ rCF 事業開始の経緯

最先端クラスターである MAI Carbon は、2012 年に Carbon Composites e.V. (CCeV) により設立され、Munich-Augsburg-Ingolstadt 地域の 70 以上の企業、教育機関、研究機関、組織で構成されている。

MAI Carbon の設立パートナーは以下の通り：Audi、BMW、Premium Aerotec、Eurocopter、Voith、SGL Group、IHK Schwaben、the department for carbon composites (LCC) of the TU Munich、及び CCeV で、現在 MAI Carbon は Composites United e.V.

(CUeV) の傘下にある。全パートナーは繊維強化複合材料の技術分野及び CFRP 分野で活躍しており、特に自動車・航空宇宙関連、機械工学、プラント工学の分野の研究開発に注力している。

現在、130 社以上のパートナー（CU のメンバーも含む）は、CFRP 部品の大量生産における先進技術の確立及び、その知見や情報を共有することで繊維複合材技術の分野で世界的な活躍を目指している。

・ rCF 関連研究プロジェクト

MAY CC4 CaRinA

-プロジェクト名称：MAY CC4 CaRinA

-プロジェクトパートナー：Tenowo Hof GmbH、SGL Carbon GmbH、Röchling Automotive SE & Co. KG、Institute for Textile Technology Augsburg GmbH – ITA、Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH、Fraunhofer IGCV - facility for foundry, composite and processing technology、Faurecia Composite Technologies GmbH、ELG Carbon Fiber Ltd、EDAG Engineering GmbH、Carbon TT - Carbon Truck & Trailer GmbH、Airbus Helicopters Deutschland GmbH

-プロジェクト概要：Fraunhofer IGCV でも紹介しているが、「CaRinA」プロジェクトの目的は不織布形態 rCF の供給を拡大させ、今後の需要拡大に対応することである。

このプロジェクトの主要な目的は、①CF を用いたウェブ形成の調査と改良、②熱可塑性マトリックスを用いた rCF 不織布の含浸技術の開発と改良、③異なる熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂を用いた rCF 不織布からなる rCFK の市販および開発中の材料の生成、④技術者、開発者、設計者等、製品設計に関わる関係者がよりスムーズに材料選択を可能にするためのソフトウェアツール及び共通材料としての rCF 材料の提供、である。

また、「CaRinA」プロジェクトでは、CFの端材や使用済み製品は廃棄物として処理されるだけでなく、高品質で軽量建築材料の安価な供給源として捉えており、活用方法によっては、rCFはコスト効率の高い軽量建築の確立に貢献するだけでなく、材料生産における原材料とエネルギーの節約にも貢献できるとの見方をしている。このように「CaRinA」プロジェクトは「新素材」助成プログラムとして取り組みが行われている。

rCF mobile

-プロジェクト名称：rCF mobile

-プロジェクトパートナー：Institute for Composite Materials GmbH (IVW)、ACE

Advanced Composite Engineering GmbH

-プロジェクト期間：2018年1月1日～2019年12月31日

-プロジェクト概要：Resin Transfer Molding (RTM) による熱硬化性 (thermoset) 繊維プラスチック複合部品の製造では、工程内端材の発生量を含め製造時に多くの繊維が廃棄されている現状であり、これは市場状況からも収益率が低い。「rCF-Mobil」プロジェクトは、繊維端材を熱硬化性 (thermosetting) FRP プロセス技術で利用することで通常は廃棄物として分類されている工程内端材でも再利用できるような仕組み作りに取り組んだプロジェクトで、FRP 部品の製造におけるコストダウンの改善のみならず、工場内でのマテリアルサイクル (Closed-end cycle) 仕組み作りを目指したものである。

開発される加工プロセス及び再利用へのルート確立により、rCFとして熱硬化性構造部品の製造に再度使用されること、その比率を高め、最終的にはクローズドリサイクルサイクル (Closed-Recycle：加工工場内で発生した工程内端材を内部でリサイクルすることで、廃棄材をして外部に排出することなく、内部資源として再利用する仕組み) による廃棄物のない FRP 部品の生産を目指している。

MAI Recycling

-プロジェクト名称：MAI Recycling

-プロジェクトパートナー：BMW AG、bifa Umweltinstitut GmbH、AUDI AG

-プロジェクト期間：2012年7月1日～2015年6月30日

-プロジェクト概要：「MAI Recycling」の目的は CFRP 製品製造時に発生する工程内端材や混合材料等の再利用に向け端材扱いとなる CF の回収から加工プロセスまでのリサイクルプロセスチェーンを構築することにある。

熱分解等の様々なリサイクルプロセスを研究、リサイクルされた CF をその材料特性ごとに分類・加工した品質保証方法を開発し、再生 CF をより環境的・経済的に付加価値の高い製品としての展開拡大を目指している。MAI Carbon では CFRP のリサイクル循環システムの構築及び拡大は、エネルギー資源の節約につながると考えており、このプロジェクトは CFRP 材料の生産から回収・再利用までの持続可能で効率的なプロセスを開発するとの

最終的な MAI Carbon Cluster の目標の一環でもある。

MAI RecyTape

-プロジェクト名称：MAI RecyTape

-プロジェクトパートナー：RWTH Aachen University, teaching and research area

Technology of Energy Resources TEER

-プロジェクト期間：2015 年 3 月 1 日～2017 年 6 月 30 日

-プロジェクト概要：共同プロジェクトである「MAI RecyTape」は、再生 CF の使用による大幅な繊維コストの削減を目指したプロジェクトである。

また、rCF の製品展開において不織布フォーマットとしての出荷及び採用用途については関連業界や研究機関からの様々なアプローチが行われているが、課題となっているのは不織布タイプの CF の配向性と均一性が不十分であることにある。これにより rCF を使用した部品の強度を低下させる可能性があることに注目し、リサイクルプロセスの開発においてこうした課題への改善も試みたものである。

新しいリサイクルプロセスの開発により、rCF の使用によるコストの削減のみならず、このような課題を解決することを目標とした MAI RecyTape プロジェクトは RWTH Aachen University 等との大学・研究機関との共同プロジェクトとして推進された。

・企業や研究機関との協力関係

クラスターとして MAI Carbon と協力関係であるパートナー企業・研究機関は以下の通り。

- | | |
|---|------------------------|
| ・ Audi | ・ BMW |
| ・ Tenowo Hof GmbH | ・ SGL Carbon GmbH |
| ・ Fraunhofer IGC | ・ ELG Carbon Fibre Ltd |
| ・ Röchling Automotive SE & Co. KG | |
| ・ Institute for Textile Technology Augsburg gGmbH – ITA | |
| ・ Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH | |
| ・ RWTH Aachen University | など |

クラスター以外での協力関係にあるパートナーは以下の通り。

- | | |
|--|----|
| ・ CFK Valley Stade Technology （三菱ケミカル） | |
| ・ VDMA Forum Composite Technology | |
| ・ Das Kunststoff-Zentrum | |
| ・ Germany Trade & Invest | |
| ・ Composites Germany | |
| ・ Sampe Europe | など |

⑦ RWTH Aachen Univ

企業・機関名	RWTH Aachen University
国	ドイツ
設立	1870年
本社所在地	Templergraben 55,52062 Aachen
URL	http://www.rwth-aachen.de/

・ rCF 事業開始の経緯

RWTH Aachen 大学（Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen、英称：RWTH Aachen University）はドイツのノルトライン（ヴェストファーレン州アーヘン）にある工科大学である。同大学は繊維（テキスタイル）関連分野に注力をしている大学機関であるため、Recycle Carbon Fibre に関連するプロジェクトも関連部門での研究が行っている様子である。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

CFRP を熱分解して CF を回収する場合、樹脂の分解物が炭素化して残留することが多いが、ドイツの Aachen University では後処理によって除去する方法を検討した。この熱分解リサイクルは、酸素に反応する不活性雰囲気での熱分解（少なくとも化学量論的酸素濃度での自己熱焼却）、または酸化性非酸素雰囲気（アロサーマル（allothermal）水蒸気または二酸化炭素（CO₂）ガス化）である。

その結果、CO₂ と水蒸気雰囲気、600℃以上の温度で、CF に損傷を与えることなく除去できた研究結果を報告している。

この後処理により残留炭素の減少は肉眼でも明らかであるが、顕微鏡でも証明することができた。温度が高いほど必要な処理時間が短くなり、750℃までは目に見える CF の損傷はなく、1000℃でもほとんどの繊維に損傷の兆候はなかった。ただし、CO₂ 雰囲気の 1000℃では、一部の繊維が表面全体に渡って大きな損傷を受けたとの成果が発表された。

(4) 英国

① ELG Carbon Fibre (旧 : Recycled Carbon Fibre Ltd/Milled Carbon Ltd)

企業・機関名	ELG Carbon Fibre (旧 : Recycled Carbon Fibre Ltd/Milled Carbon Ltd)
国	英国
設立	2009年
本社所在地	Cannon Business Park, Darkhouse Lane Coseley West Midlands WV14 8XQ United Kingdom
URL	http://www.elgcf.com/

・ rCF 事業開始の経緯

Milled Carbon Ltd は、CF のリサイクルを行うために 2003 年に設立された企業である。同社は 2006 年に Boeing 社を中心に設立された航空機材料のリサイクルを目的としたグループである AFRA (Aircraft Fleet Recycling Association) の創設メンバーの 1 社である。

Milled Carbon Ltd は連続熱分解プロセスを構築していたが、2008 年 10 月に Recycled Carbon Fibre Ltd がこのリサイクル技術を採用し、rCF の生産を開始・事業化した。

その後、2011 年 9 月にドイツのステンレス鋼やチタン等のリサイクルを行う ELG Haniel GmbH が Recycled Carbon Fibre Ltd を買収し、ELG Carbon Fibre となった。2018 年 12 月には三菱商事株式会社から 25% の出資を受け、事業参画にも合意した。

なお、同社は 2016 年に「廃 CFRP (工程内端材、廃材) からの CF 回収」及び「rCF 材料や製品の製造」に関して航空宇宙産業品質マネジメントシステム認証である AS/EN9100 認証を取得している。

・ rCF の由来・回収元 (排出メーカー・元用途 : 工程端材・廃材)

ELG Carbon Fibre では航空宇宙、自動車向け等に使用される CFRP 部品製造時に発生する工程内端材) を回収しリサイクルを行っている。廃 CFRP は切断、熱分解され、CF が取り出される。これら繊維からミルドファイバー、チョップドファイバー等が製造される。

・ rCF の物性

ELG Carbon Fibre では、CF トウやミルドファイバー、チョップドファイバー等を製造しており、CARBISO™MF(ミルドファイバー)、CARBISO™CT(チョップドトウ)、CARBISO™CT+簡易コンパウンド材、CARBISO™C(熱分解回収 CF)、CARBISO™M 等の rCF 製品をラインナップしている。詳細は下記の通り。

CARBISO™MF(ミルドファイバー)、CARBISO™CT(チョップドトウ)、CARBISO™CT+簡易コンパウンド材、CARBISO™C(熱分解回収 CF) は、PP、PA6、PA66、PC、PPA、PPS、さらに PEEK にも使用可能で、優れ高引張強度、高弾性率、寸法安定と低熱膨張率、導電性、電磁波シールド性等の特性を持ち、低比重 CF フィラーは結果としてコンポーネント軽量化にも貢献している。

CARBISOTMM と CARBISOTMTM は 100%および混紡の CF 不織布で既存の成形方法にも対応可能で、CARBISOTMTM ハイブリッド不織布はマトリックス樹脂糸と回収 CF が混紡されており、そのままプレス成形が可能。100%回収 CF の CARBISOTMM は RTM などの注入含浸成形もしくはプリプレグ、SMC 基材としても使用可能である。

これらの不織布製品は、低コストのパネルやパーツ成形に適しており、2.7m という世界最大級の回収 CF 不織布の製造も可能である。

・ rCF 採用用途・当該用途での採用理由、当該用途での販売量

ELG Carbon Fibre で自動車、鉄道、飛行機等、現在 CFRP 部品が使用されている用途向けを中心に rCF 製品の販売拡大を考えている。下記は、ELG Carbon の公式サイトに掲載されている想定用途についての記述である。

自動車

ELG Carbon Fibre の見解ではミルドファイバーや精密にカットされたチョップドファイバーはエンジニアリングプラスチックの物性向上や高速複雑成形に適した射出材料に向いているとしている。100%CF 及び熱可塑性樹脂混紡不織布はプレス成形や含浸成形、プリプレグ化、SMC 化に向いており、既に自動車のシャシー、パネル、フロア、ルーフ、ボンネットインナーに採用されている。ELG Carbon Fibre では自動車及び自動車部品メーカーとの協力の元工程内端材を回収し、自動車部品への再利用に取り組んでおり、OEM や Tier1 に対して競争力のある価格で安定した特徴・スケールで中間材料を提供する循環型ビジネスの構築に力を入れている。

鉄道

ELG Carbon Fibre では鉄道部門軽量化においても rCF に大きな可能性があると考えている。鉄道産業は経済性のある軽量化素材とデザインのフレキシビリティや設置時間の短縮、メンテナンスの簡便化が求められており、今後コンポジット素材の採用拡大が予想される。

グラスファイバーは既に鉄道車両内外装で使われていたものの、vCF はコストが高く使用されるパーツは限定的である。vCF に比べ低コストである CARBISO ラインはこのような鉄道車両のパネルやフロア、壁材、複雑形状の外装や内装材部品向けの採用拡大が期待される。

飛行機

ELG Carbon Fibre では rCF はコンポーネント設計や製造方法の進化によって航空機向けに採用拡大が期待できると考えている。既に vCF 材料は航空機向けに多く使用されている。現在、飛行機向けで rCF の採用実績はそれほどないが、同社では CARBISOTMラインナップよりシートやラゲージストレージ、開閉口やフリップ、フェアリングにおいて rCF の使用

が可能であるとみている。正しい設計によって CARBISO™M や CARBISO™TM はこれまで vCF を使用していた部品向けに使用が可能とみている。なお、グラスファイバー及び短繊維の SMC の代替品としても使用可能。

・企業や研究機関との協力関係

ELG Carbon Fibre は研究開発にも大型投資を行っており、著名な大学や全世界の研究機関と共同研究を行い常に rCF 製品の開発を行っている。また、同社はユーザーサイドとも協力し、テストや開発を行うなど rCF ユーザーに適した rCF 製品作りや使用方法についても具現化している。なお、同社は 2016 年に米国の複合材研究機関である IACMI に加入した。

●ELG and Aerocircular N.V. develop closed-loop recycling scheme for end-of-life aircraft (2020 年 7 月)

ELG Carbon Fibre は Aerocircular N.V. と協力し、使用済み航空機の CFRP 廃棄物の循環型リサイクルスキーム (a closed-loop recycling scheme for end-of-life aircraft CFRP waste) に参加している。Aerocircular と協力し、使用済み航空機のリサイクルについて検討し、CF を使用した廃棄物が増えていくことへの備えやその課題について取り組み、環境への配慮やその対応方法についてリサイクル技術を活かした解決方法等の提案活動を行っている。

●INEOS Team UK manufactures 'Britannia' boat cradles with ELG recycled carbon fibre (2019 年 11 月)

ELG Carbon Fibre と Ineos Team UK は技術的パートナーシップを結んでいる。廃棄されていた CFRP 製品のリサイクルを行い、これらのファイバーを使用した ELG の再生不織布カーボンファイバーマットを使用し、Ineos TeamUK はボートレース用グレードを製作した。

Ineos TeamUK からは ELG の rCF 製品はクレードルアプリケーションに適しており、それらのリサイクルされた材料は、取り扱いも簡単に優れた性能を持つと評価された。

●Boeing, ELG Carbon Fibre find new life for airplane structure material in groundbreaking partnership (2018 年 12 月)

2018 年 12 月 5 日に ELG Carbon Fibre は航空機製造の最大手 The Boeing Company とパートナーシップを結んだ。Boeing 飛行機製造工場から発生する工程内端材を ELG Carbon が回収・リサイクルし、ノートパソコンケースや自動車のパーツ等に再利用する協力提携である。

この新たなリサイクルモデルが大規模なスケールでも実施できるように、両社は 18 カ月

間にわたって米ワシントン州の **Boeing Everett** 工場から廃棄された 172t (月 10t、380,000 pounds) の CF を回収・リサイクルし、電力会社と自動車会社に販売した。この実験の成功を受け、Boeing は同社の 11 工場から出る廃棄素材の大部分を節約でき、これは同社が掲げる 2025 年までにごみ 25%削減という目標に貢献しているとコメントした。今後も ELG Carbon Fibre と Boeing は協力し、この活動をカナダや中国、マレーシアにある工場にも拡大していく予定である。

そのほか、同社は「World's first carbon fibre rail bogie unveiled at 'Unlocking Innovation' rail conference at the University of Huddersfield (2019 年 12 月)」、「ELG Carbon Fibre will work with Land Rover BAR to recycle and reuse carbon fibre products from America's Cup campaign (2017 年 11 月)」、「New ELG Technical Note for Nomenclature of Recycled Carbon Fibres New ELG Technical Note for Nomenclature of Recycled Carbon Fibres(2017 年 3 月)」、「Recycled Carbon Fibres Used in Novel Rail Vehicle Project (2017 年 2 月)」、「ELG Carbon Fibre and Adesso Advanced Materials Cooperate on Recycled Carbon Fibre for Automotive Applications (2017 年 2 月)」等、各業界方面から共同プロジェクトやパートナーシップを結び協力している。

② Hexcel Reinforcements UK Limited

企業・機関名	Hexcel Reinforcements UK Limited
国	英国
設立	2016年
本社所在地	3A, Cutters Close Industrial Estate, Cutters Cl, Narborough LE19 2FZ
URL	https://www.hexcel.com/

・ rCF 事業開始の経緯

Formax UK Ltd.（前身）は 1998 年に設立されたが、2014 年 12 月に Hexcel が 50% の持分を取得、その後 2016 年 1 月に Hexcel が投資し Formax UK Ltd を買収、100% 子会社となり、Hexcel Reinforcements UK Limited となった。英国拠点がある Leicester には繊維製造の長い歴史を持つ主要な商業環境や同社の製造センターがあるが、現在は英国以外にも EU 地域や米国を中心に世界中に拠点を保有している。

Hexcel Reinforcements UK は、軽量 CF 多軸繊維と高度に設計されたガラス繊維およびアラミド繊維の非圧着布の製造を専門とする複合強化材の大手メーカーである。展開する主要製品は CF、強化繊維、プリプレグ&樹脂等で、航空宇宙用途や産業用途向けに製品販売を行っており、民間航空宇宙産業向けのハニカム製造分野に強みを見せている。

同社は CF 等の製造時に発生する内部工程内端材をリサイクルし、50～75mm の CF 繊維と目付 200～300g/m² の不織布を製造しているとみられる。

③ Sigmalex

企業・機関名	Sigmalex
関係会社・組織	Sigmalex High Technology Fabrics Inc., Sigmalex Carbon Textile Solutions Inc., Sigmalex (Shanghai) Composite Materials Company Ltd
国	英国（関係会社は米国及び、中国）
設立	1986年
本社所在地	Manor Farm Road, Manor Park, Norton Runcorn, Cheshire, WA7 1TE
URL	https://www.sigmalex.com/

・ rCF 事業開始の経緯

Sigmalex は複合材料用途向け CF を開発・製造している会社である。Sigmalex は英国の他、米国・中国にも拠点を有し、これらの拠点から自動車や航空宇宙用途向けに自社製品の出荷を行っている。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

Sigmalex では rCF 製品を開発している。CF 生産廃材を用いてポリアミド (PA)、ポリエーテルスルホン (PES)、ポリエーテルイミド (PEI)などを混合し、目付 220g/ m²の不織布等を製造している。これらの rCF 製品は、自社の CFRP 製品製造時に発生する工程内端材や顧客の製造プロセスにおいて発生するスクラップを活用しているため、vCF より大幅なコストダウンが図れるとしている。

この不織布は高品質の CF 廃棄物から製造されたため、繊維と樹脂の結合強度が向上され面積重量は 100gsm～600gsm。Sigmalex によると同社のプロセスは化学や熱分解などの他のリサイクル回収方法とは異なり、使用するエネルギー熱も他の方法に比べ約 10～20%しか使用しないエネルギー効率の非常に高い回収方法であるとしている。

④ Cranfield University

企業・機関名	Cranfield University
国	英国
設立	1946年
本社所在地	College Road, Cranfield, MK43 0AL
URL	https://www.cranfield.ac.uk/

・ rCF 事業開始の経緯

Cranfield University では Professor Gary A. Leeke らを中心に CFRP、rCF に関して研究を行っている。Professor Gary A. Leeke は University of Birmingham で PhD を取得後、2016 年より Cranfield University で研究者として rCF、CFRP 関連の研究開発を行ってきたが、2020 年より University of Birmingham で同関連の研究を行っていると思われる。

Professor Gary A. Leeke は Cranfield University で研究を行っていた時より University of Birmingham の教授・研究者、その他大学・研究機関の方々と共同で rCF 及び CFRP 関連の研究を行い、現在では University of Birmingham で関連研究を続けていると思われる。

Professor Gary A. Leeke 以外の Cranfield University の研究者も rCF、CFRP 関連の共同研究・実験等を行っている。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

Cranfield University では主に Solvolysis (加溶媒分解) CF 回収方法を研究している⁴¹。研究員らが行っている加溶媒分解プロセスを使用した CFRP (EP)回収方法はアセトンと水の超臨界溶媒混合物を使用して温度：300-380℃（最適 320℃）、圧力：18.0-32.5MPa（最適 19.5MPa）、時間：5min-2.5h（最適 2.0h）、前処理：なし、の条件のもと材料を処理する方法で、この方法を用いることで回収された CF の劣化を大幅に防ぐことが可能となるとしている。

この研究ではこれらの条件で加溶媒分解によって回収されたリサイクル繊維が非常に優れた強化特性を有するうえ、繊維表面の配向も良好であったことで vCF に近い物性が確認できたと発表している。研究結果を改善するために加溶媒分解プロセスを改善してリサイクル繊維の表面の有機残留物を除去し、新しい樹脂との接着や整列プロセスを改善が必要となるようだ。ファイバーの長さの範囲に従ってファイバーを並べ替え、ランダムマットの場合は短いものを使用、再アライメントの場合は長いものを使用することで、結果をさらに最適化すると報告している。

⁴¹ <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/10334>

⑤ Imperial College London

企業・機関名	Imperial College London
国	英国
設立	1907年
本社所在地	Exhibition Rd, South Kensington, London SW7 2BU
URL	https://www.imperial.ac.uk/composites-centre

・ rCF 事業開始の経緯

Imperial College London は The Composites Center を設立し、ここ 35 年間で航空学 (Aeronautics)、化学工学 (Chemical Engineering)、化学 (Chemistry)、土木工学 (Civil Engineering)、機械工学 (Mechanical Engineering)、材料 (Materials) のカテゴリーを中心に研究を行っている。

研究チームは様々な資源に対する複合材料の研究を行い、新しい合成材料や建築・デザインなどの開発を継続させることをビジョンとして掲げており、複合材料としてリサイクル CFRP の再利用技術等の研究が行われているとみられる。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

Imperial College London では、熱分解 (Pyrolysis) や Mechanical recycling 技術の研究を行っている。

Imperial College London では条件の異なる熱分解法で回収した CF を用いて CFRP を作製し、機械的性質を測定する研究を行っており、回収された rCF は新品の CF を用いた場合よりもやや劣る程度であったとの研究成果を発表し、回収 CF の単繊維引張強さは CFRP の機械的性質に大きな影響を与えたとの研究結果を出している。

⑥ University of Birmingham

企業・機関名	University of Birmingham
国	英国
設立	1825年
本社所在地	Edgbaston, Birmingham, B15 2TT, United Kingdom
URL	https://www.birmingham.ac.uk/index.aspx

・ rCF 事業開始の経緯

University of Birmingham では Professor Gary A. Leeke（2020 年以前は Cranfield University に在籍）、Dr. Andy Ingram を中心に Cranfield University や University of Nottingham の研究者と共に rCF に関する研究・実験を行っている。

同大学では Recycling and Circular Economy Group を運営している。同 Group の調査・研究エリアはバッテリー、混合プラスチック廃棄物、複合リサイクル材、超臨界流体等が含まれており、使用済み製品である廃棄物のリサイクル・リユーズ加工等による再利用プロセスの構築等の環境に優しい循環システムに関する研究等を行っていると言われる。

取り組みの一環として同大学チームは複合材料を業界全体で再利用する方法を示し、廃棄物から材料を製造する可能性を示すためのプロトタイプ製品のデモンストレーション等を行っている。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

University of Birmingham では、主に Solvolysis（加溶媒分解）CF 回収方法を研究しているが、rCF の使用用途・素材によって再生方法も異なることから熱分解(Pyrolysis)等の回収方法の実験も行っている。そのほか、超臨界流体プロセスについても研究が行われている。

⑦ University of Bristol

企業・機関名	University of Bristol, Composites Institute (ACCIS)
国	英国
設立	1909年
本社所在地	Beacon House, Queens Road, Bristol BS8 1QU, UK
URL	http://www.bristol.ac.uk/composites/

・ rCF 事業開始の経緯

University of Bristol では、2017 年 3 月に設立した Bristol Composites Institute で rCF 関連を含む複合材の研究が行われている。Bristol Composites Institute は Advanced Composites Collaboration for Innovation and Science (ACCIS) の研究を引き継ぐ形で開設された University of Bristol 内の研究ユニットであり、国内外の様々な団体・業界との連携・協力の元研究フィールドを拡大していくことを目標としている。

Bristol Composites Institute のリサーチテーマとしては、材料 (Materials)、構造 (Structures)、製造および設計 (Manufacturing and design) 等があり、CF に関する研究も同機関で行われている。Bristol Composites Institute では、複合材や rCF に関する研究開発において Cranfield University、Imperial College London 等と連携しプロジェクトを実施している。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

リサイクルマテリアル技術としては、主に Pyrolysis (熱溶分解) 方法を研究しているが、University of Bristol の研究チームは大きな枠組みとして「Closed-loop recycling of carbon fibre : リサイクル、回収、再製造 (再利用) までを一つの Closed-loop として捉えた素材の製造から再利用までの仕組みづくり」の技術開発に力を入れている。

その中で、「再製造 (remanufacturing)」の方法として University of Bristol では HiPerDiF (High Performance Discontinuous Fibre : 高性能不連続繊維) 技術を開発し、回収された使用済み製品のリサイクル処理法として不連続繊維複合材料の製造プロセス作りに取り組んでいる。

⑧ University of Manchester

企業・機関名	University of Manchester
国	英国
設立	1851年
本社所在地	Oxford Rd, Manchester M13 9PL
URL	https://www.manchester.ac.uk/

・ rCF 事業開始の経緯

University of Manchester では Advanced Materials をはじめ、環境、エネルギー等、幅広い研究分野を保有しているが、rCF、CFRP 関連の研究は材料学科 (Department of Materials)、土木工学 (Civil Engineering)、航空宇宙 (Aerospace) の研究を行っている教授・研究員が担当している。

University of Manchester で、CFRP フィールドに関わっているのは Dr. Matthieu Gresil と Dr. Meini Su である。Dr. Meini Su は 2018 年に University of Shenzhen と共同研究を行った「The EHD green recycling method for carbon fibers」の研究で第 46 回国際発明展ジュネーブで AJF 金メダルを受賞している。

・ rCF 関連研究プロジェクト

現在行われている主な rCF 関連のプロジェクトは「Green Recycling and re-manufacturing of Carbon fibre composites for a circular Economy (GRACE)」で、概要は下記の通り。

-プロジェクト名称: Green Recycling And re-manufacturing of Carbon fibre composites for a circular Economy (GRACE)

-プロジェクト期間: 2019 年 4 月 1 日～2022 年 3 月 31 日

-プロジェクト参加機関: Department of Materials、Department of Mechanical, Aerospace & Civil Engineering、Shenzhen University and ACC (Beijing) Science and Technology Co. Ltd.

-プロジェクト概要: rCF 樹脂の再重合、連続糸製造、機械的特性試験、再生 CF および複合材料の特性評価に関する実験及び研究

なお、同プロジェクトは中国の Shenzhen University と ACC Science and Technology Co., Ltd.、Beijing Mega Material Innovation Work Co、China Communications Construction、Atkins、Xiros Plc などが参加している。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

University of Manchester では、Mechanical recycling method での研究を行っている模様。High voltage fragmentation (HVF)、Chemical recycling method、Mechanical recycling method (Milling 方法) 等のリサイクル方法について研究が行われているとみら

れる。

また、Electrically driven Heterocatalytic Decomposition (EDH) 技術も活用している。EDH 技術は Dr. Meini Su が Shenzhen University の研究者と共同研究した CFRP リサイクル方法とされる。

EDH 技術とはシンプルな装置と毒性のない電解質成分を使用することで、無傷の CF を大気圧下と室温で効率的にリサイクルすることを可能にした方法で、**rCF** の残留強度は **vCF** の残留強度に近く保てる。同技術の特徴としてはプロセスの省略化により低コストを実現、より身近な方法でリサイクル事業の実用化に結び付けることが可能であることが挙げられる。

⑨ University of Nottingham

企業・機関名	University of Nottingham
国	英国
設立	1881年
本社所在地	University of Nottingham University Park Campus, Nottingham NG7 2RD
URL	https://www.nottingham.ac.uk/

・ rCF 事業開始の経緯

University of Nottingham では、Prof.Steve Pickering を中心に流動層処理（Fluidised bed process）、超臨界流体処理（Supercritical fluid）を用いたリサイクル法の研究を進めている。Nottingham 大学は複合材料関連プロジェクトに数多く参画しており、CFRP のリサイクルに関する研究も行っている。

Prof.Steve Pickering が率いる Composites Group のリサイクルに関する研究は、1990 年代初頭に廃棄されたガラス／ポリエステル製ボディパネルのリサイクル研究課題として Ford 社と共同で開始された。

その後も University of Nottingham は HIRECAR や AFRECAR など、複合材のリサイクル関連テーマで民間企業との共同プロジェクトを遂行するなどの研究活動が続いている。2012 年からは University of Nottingham と Boeing で CFRP リサイクルに関して戦略的共同研究を開始し、Boeing 社から年間 100 万ドルが投資されている。

同研究チームは Boeing 社の使用済みの航空機や飛行機製造時に発生する工程内端材のリサイクルプロセスの開発を続け、Boeing 社は University of Nottingham に 300 万ドル以上を投資し、Nottingham キャンパス内に商業規模の流動層処理プロセスのパイロットプラントを建設した。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

流動層処理（fluidised bed process）とは、ポリマーを除去するための流動床炉「fluidised bed」を利用して、廃 CFRP から CF を回収するものである。その工程は廃 CFRP を細断した後、流動床炉に供給され、流動床炉内の熱（450～550℃）によりポリマーを除去するというものである。

流動層処理（fluidised bed process）は University of Nottingham で開発されたもので、下記の通りに処理を行う。

- ・ 複合廃棄物を細断し、「流動床炉」に投入
- ・ 流動床炉ではポリマーを除去する
- ・ その後、繊維は加熱用ヒーターに移動
- ・ 分離された繊維はサイクロン内に移動
- ・ その後、再燃焼装置に移動し、清掃とエネルギー回収を行う

このプロセスは、カーボンおよびガラス繊維複合材料の両方に使用できる。ガラス繊維はリサイクル処理時に引張強度の約 50%が減少するが、450℃の条件で処理すると剛性が保たれ、ポリマー樹脂を除去することが可能である。なお、同プロセスでは排熱利用も可能で、流動層処理により回収された CF は引張強度が 25%減少、弾性率の変化が少なく酸化はないとされる。

また、流動層処理 (fluidised bed process) のほか、University of Nottingham では超臨界流体処理 (supercritical fluid) の研究も行われている。同大学では溶媒を用いて CF から樹脂を分離する方法を研究しており、この方法では CF に加えてエポキシ樹脂を回復することができるという。

・ rCF 関連研究プロジェクト

HIRECAR Project (2006 年～2008 年)

HIRECAR とは High value composite materials from REcycled CARbon fibre の略であり、自動車サプライチェーン上の組織を集め、高品位・低コストの rCF 製造を目的としたプロジェクトである。リサイクル時の CF の繊維長は短いため、BMC (Bulk Moulding Compound) や SMC (Sheet Moulding Compound) により、自動車のボディパネルや構造部材等への使用が想定されている。

University of Nottingham によると、年間数百 t 規模のプラントにおいて、短繊維 (チョップド) でのリサイクル費用は 1kg 当たり約 11b 程度が見込まれている。リサイクルされた短繊維は十分な長さを有しているため、BMC 成形の際には低コストで高品位な強化材となり得るとしている。金属製の自動車はシェル構造で構成されており、耐荷重性を向上させるために小プレス成形や鋳造によって作られた部品が数多く接合されているが、そのような部品が全体のコストや重量を大きくしている。そのような背景に注目し、HIRECAR プロジェクトでは以下の技術開発を掲げ、rCF の積極的な利用により、パーツ製造時のコストを低減させ、リサイクルしやすい自動車を形成していくことを目指している。

- ・既存の SMC 成形技術を活かし、部分的に 3D 構造をした平板構造部品の形成
- ・鋳造アルミニウムよりも優れた構造特性を有する大きな 3D 構造部品の形成
- ・新規製造方法を用いた小さな 3D 部品の形成

なお、HIRECAR プロジェクトは旧英国貿易産業省 (Department of Trade and Industry : DTI) により資金提供を受けており、先進複合材料及び構造技術プログラム (Advanced composite materials and structures technology programme) の一環としてのプロジェクトである。Ford、東邦テナックス、Advanced Composites Group、Technical Fibre Products の 4 社が参加した。

The AFRECAR (Affordable Recycled Carbon Fibres) Project (2009 年～2011 年)

AFRECAR (Affordable Recycled Carbon Fibres) は、University of Nottingham が主

導した、**rCF** の自動車分野への応用に関するプロジェクトである。Nottingham 大学がそれまでに行っていた **CFRP** リサイクルに関する研究が出発点となっており、**HIRECAR** の派生プロジェクトである。

同プロジェクトは英国技術戦略委員会 (Technology Strategy Board : TSB) により資金提供 (£900,000) されている。Boeing、Ford、複合材成形メーカーの Advanced Composites Group、繊維加工会社の Technical Fibre Products、CF 製造の東邦テナックス、**CFRP** リサイクルを先導している Milled Carbon (現 ELG Carbon Fibre) が参加している。なお Boeing が同プロジェクトに年間 100 万ドルを提供している。

AFRECAR では **CFRP** リサイクルに関する課題として、①**rCF** の機械特性の向上、②リサイクルプロセスの改善、を挙げており、これらの課題に対して、以下に示すようなアプローチで、宇宙航空業用と自動車業用の高品位な **rCF** の開発を行っている。

- ・ **rCF** を用いた従来よりも繊維含有量の多く、低コスト・高強度の複合材成形・開発
- ・ 超臨界流体プロセス (supercritical fluid processing) を用いて、高品位の **rCF** 回収。および接着時等に用いられるポリマー樹脂の回収
- ・ 大規模・高効率な **CFRP** リサイクル技術の確立

また、同大学ではリサイクル後の成形についても研究を行っている。一般に **CFRP** の弾性率は V_f (体積含有率) に比例するが、高 V_f を目的とした高い成形圧は、繊維長の減少を招きかえって力学特性が低下することが指摘されている。そのため、同大学では繊維のアライメント (方向制御) によって低い成形圧力で、高い V_f を確保し、力学特性に優れたリサイクル材を成形する方法に注目している。現在では湿式ドラムを利用した方向制御についての研究を進めている。

Processing Recycled Carbon Fibre for High Grade Applications (2002 年～2005 年)

プロジェクトは流動層処理技術に基づいた **CFRP** を使用した製品製造に発生する工程内端材をリサイクルするプロセスを開発し、高付加価値のある **rCF** を **vCF** の代替品として置き換えることを試みた研究である。研究成果としてリサイクルされた **CF** はエポキシ樹脂との結合が可能な表面材として使用できる等の特徴が判明された。

(5) フランス

① Vetrotex

企業・機関名	Saint-Gobain Vetrotex
国	フランス
設立	-
本社所在地	Les Miroirs - 18, Avenue d'Alsace 92400 Courbevoie
URL	https://www.vetrotextextiles.com/

・ rCF 事業開始の経緯

Saint-Gobain Vetrotex は様々な用途で使用するガラス繊維材料の大手メーカーである。Vetrotex は親会社である Saint-Gobain はガラス製造業界大手であり、長年の経験を積んでいる。同社の主なガラス繊維製品は E-Glass 単糸、ボリュウム化糸、テクスチャ化糸、ビーム糸、ZeroTwist®、ダイレクトロービングなどがある。

Vetrotex はオーストラリア、チェコ共和国、インド、日本、韓国、米国、フランス、中国、マレーシアに営業所があり、ヨーロッパと北米に生産施設を保有している。

Vetrotex は CF 及び CF のプリプレグ樹脂を洗浄し繊維を回収する装置に関する米国特許 (US Patent 6,626,193) を権利化している⁴²。この回収装置は、繊維材料に樹脂が含浸されている繊維材料のスクラップを洗浄する装置で、溶剤を使用し樹脂を抽出する。投入口と回収口を有する閉鎖された中空の容器内にコンベヤベルトが設置されており、その上にオーバーベッドスプレー装置が設置されており、溶剤タックから溶剤を供給する。

同特許における繊維材料は CF 及びポリアミド繊維を対象としており、洗浄用の溶剤に関してはスピリッツ・ケトン・水が対象である。スピリッツはエタノールとみられる。

⁴² <https://patents.justia.com/patent/6626193>

② Alpha Recyclage Composites

企業・機関名	Alpha Recyclage Composites
国	フランス
設立	2009年
本社所在地	4 rue Jules Védrynes, 31031 Toulouse Cedex 4
URL	www.arcomposites.com

・ rCF 事業開始の経緯

2009年に設立された Alpha Recyclage Composites 社は Clément Ader Institute と Mines Albi-Carmaux 工学部と共同で水蒸気熱分解技術（Steam thermolysis technology）を用いた CFRP のリサイクル技術を開発している。なお、この水蒸気熱分解技術は、姉妹会社である Alpha Recycling Franche-Comté 社で使用済み製品であるタイヤのリサイクル技術の開発に取り組んでいるとされる。また、Alpha Recyclage Composites 社はリサイクルの主要企業としての地位を確立するために学術研究との緊密なパートナーシップを結び、効率的な回収プロセスを開発している。

そのほか、同社はリサイクル繊維を使用した半製品の製造プロセスや、第二世代複合材料で処理された繊維の再利用条件の検証も行っている。

・ rCF の由来・回収元（排出メーカー・元用途：工程端材・廃材）

Alpha Recyclage Composites 社の主な回収元は CFRP 製造時に発生する工程内端材や、使用済み製品である飛行機、車両からの回収を検討し、2022 年までに年間 400t の rCF の供給を目指している。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

Alpha Recyclage Composites 社では、rCF のリサイクル技術として水蒸気熱分解技術（Steam thermolysis technology）を開発している。同リサイクル技術は複合材を水蒸気で加熱してマトリックス中の樹脂を分解し CF を抽出するものである。

水蒸気熱分解技術は、従来 University of Toulouse が研究開発したもので、それを Alpha Recyclage Composites が採用している模様。同大学及び関連研究論文によると、水蒸気熱分解技術は、環境圧力の高い過熱水蒸気を用いて有機物を分解する熱化学プロセスで、再生繊維の後処理にエネルギーを必要としない上、不連続な作業流や高価な反応器を必要とする高圧環境が不要なため、コスト効率の高い技術とされる。

同社の見解では、水蒸気熱分解法を CFRP 廃棄物からの CF の回収に適用した研究開発の事例はそれほどなく、水蒸気熱分解は CFRP 廃棄物の有機マトリックスを効率的に分解することを可能にした重要な代替技術としている。

水蒸気熱分解技術を用いた複合材廃棄物の処理は、Alpha Recyclage Composites 社が数

年にわたり開発し、現在は姉妹会社（Alpha Recyclage Franche-Comté）が使用済みタイヤを回収し、その後リサイクル処理を行う形で商業化の段階にある。水蒸気熱分解リサイクル後に得られた rCF は複合材料の製造に使用される半製品の製造に使用される。

同社が行っている水蒸気熱分解技術の特徴としては、CF 上の樹脂除去率が 99%以上であること、独自の回収方法により回収した CF の表面や機械的性質の劣化がないこと等が挙げられる。なお、水蒸気熱分解技術は学術研究（Institut Clément Ader - Albi、Albi-Carmux School of Mines の RAPSODEE センター）との継続的なパートナーシップのもと、国際特許を取得している。

・ rCF 採用用途・当該用途での採用理由、当該用途での販売量

主な用途は航空産業、自動車、輸送産業、建築、再生エネルギー産業、スポーツ・レジャー産業などを想定しており、用途に応じてコンパウンド（compound）やマット（mat）、ヤーン（yarn）、トウ（tow）、カミングル（comingled）、編物（knitted fabric）等の形態での出荷を検討している。

・ 企業や研究機関との協力関係

Clément Ader Institute と Mines Albi-Carmaux 工学部と共同で水蒸気熱分解技術を開発し、姉妹会社である Alpha Recycling Franche-Comté とも協力関係にあるほか、2019 年から複合材のための地域的なリサイクルセクターの展開を支援するべく、航空メーカー 2 社、STS Groupe 社と Freyssinet Aeroequipment 社の資本への参入を発表している。

STS Groupe 社と Freyssinet Aeroequipment 社の資金援助（60 万ユーロ）により、Alpha Recyclage Composites は、2019 年から Occitania で複合材リサイクル部門を構築するためのプロセスの工業化を計画している。同プロジェクト・取り組みは RAPID 研究プログラムの一環であり、DGA（フランス防衛省）と BPI（政府機関）の支援を受けており、将来的に同航空メーカー 2 社からは廃棄される航空関連の端材は Alpha Recyclage Composites 社に提供されるとみられる。

そのほか、協力関係にあるパートナー企業・団体は Mines Albi-Carmaux、CNRS（RAPSODEE センター）、Institut Clément Ader、Alpha Recyclage Franche-Comte、DGA、Direction Generale des Entreprises（DGE）等。

③ I2M Laboratory (Institute of mechanics and engineering, University of Bordeaux)

企業・機関名	I2M Laboratory
国	フランス
設立	2011年
本社所在地	Bordeaux, France
URL	https://www.i2m.u-bordeaux.fr/en

・ rCF 事業開始の経緯

Institute of mechanics and engineering（機械工学研究所、通称：I2M Laboratory、以下 I2M）は Bordeaux University のキャンパス内にあるフランスの研究所であり、I2M は Bordeaux University、CNRS / INSIS、ArtsetMétiersParisTech、Bordeaux INP、の管轄下にある研究機関である。

I2M には 300 人以上のが在籍しており、主な研究テーマは非破壊検査、複合材料、プロセスエンジニアリング、シビルエンジニアリング、エネルギー等である。I2M の研究ユニットは主に 6 つのチームに分かれており、CFRP 及び、rCF 等の研究は MPI (material sciences and process engineering) チームで行われている様子。

I2M には Carbon Fibre Recycling Platform があり、織り直し (unweaving)、再編成 (realignment)、結束 (binding) 等、再編成された CF の連続に変換するプロセスを可能にする I2M 独自の装置を保有している。このリサイクルプロセスの研究により、CF 関連の 2 つの国際特許を取得している。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

I2M では、rCF リサイクルに関する技術として超臨界水加溶媒分解法 (SuperCritical Water Solvolysis) を活用した研究開発が行われているとみられる。

同社によると Chemical recycling は、rCF を高価値のアプリケーションに再利用するための最良の結果を示しているが、超臨界流体 (Supercritical fluids) やベンジルアルコールなどの触媒を使用することで、半長尺または長尺の rCF を製造することが可能であるとしている。なお、超臨界水加溶媒分解法は環境に優しいリサイクルプロセスであることから同リサイクル技術の実用化に向け研究が行われている。

(6) イタリア

① KARBOREK Recycled Carbon Fibres

企業・機関名	KARBOREK Recycled Carbon Fibres
国	イタリア
設立	2008年
本社所在地	Zona Industriale P.IVA 04524410752 73020 Martignano (Le)
URL	http://www.karborekrcf.it/

・ rCF 事業開始の経緯

KARBOREK Recycled Carbon Fibres の前身である KARBOREK S.p.a は、熱分解処理による CFRP リサイクルを確立するため、1999 年にレッツェ県のマルティニャーノ (martignano lecce) に設立された企業である。

KARBOREK は 2002 年にイタリアの経済開発省 (MED/MSE) 傘下の新技術エネルギー環境局 (ENEA) と協力し特許 (Ex: 特許出願番号 RM 2002 A 000217S e successiva richiesta di estensione n. PCT/IT2003/000247「PP/複合材料から炭素及び/又はガラス繊維を回収するための方法及び装置」) を取得 (特許 No は 0001333539.March2012⁴³)、レッツェ県 (Lecce Province) により認証を得ている。

上記特許を商業化するため (航空機向け複合材料等のリサイクル)、2008 年に Boeing とイタリアの航空機メーカーの Alenia Aeronautica の共同出資により設立されたのが KARBOREK Recycled Carbon Fibres (以下、KARBOREK)。同社は認可された廃棄物管理会社であり、安全で持続可能なリサイクルを提供することを目標に掲げ、CF を含む生産廃棄物と使用済み廃棄物の収集・処理を行っている。

なお、ENEA はエネルギー、環境、新技術の分野での研究活動に加えて、技術イノベーションの推進や技術移転、民間セクターに対する技術支援やコンサルタントサービスの提供などの事業を行っている。その他、ENEA が推進する官民パートナーシップの一つの研究機関である CETMA (Centro di Progettazione, Design e Tecnologie dei Materiali) も KARBOREK のパートナーとなっている。

同社及び ENEA は CF リサイクル技術に関して東レのフランスにおける CF 製造販売子会社である Société des Fibres de Carbone S.A.(以下 SOFICAR)と rCF 開発に関して協力関係を構築している。

・ rCF のマテリアルリサイクル技術

KARBOREK 及び ENEA が開発した CF 回収プロセス (熱分解) は、反応性雰囲気において、廃 CFRP を加熱処理し CF を回収する方法である。同社によるとこの方法で回収された CF は vCF と比較し 70~90%の機械的特性を保持し、製造コストは vCF の 20~30%

⁴³ http://www.karborekrcf.it/index_eng.html

であるとしている。

なお、Boeing787 の胴体部部分 (Section44 及び Section 46) は、ALENIA AERMACCHI の Grottaglie 工場 (イタリア) で、水平尾翼は Foggia (イタリア) 工場で製造されているが、同社は航空機製造工程で発生する工程内端材や廃棄され待機されている飛行機本体を含め、これらのイタリア工場からリサイクルソースを調達しているとみられる。

・ rCF の物性

KARBOREK では、チョップドファイバーやフェルト、ミルド形状の rCF を生産している。製品スペック及び特徴は下記表の通り。

表 2-17. KARBOREK Recycled Carbon Fibres の rCF 製品スペック

DRY KARBOCHOP		KARBOCHOP sizing
使用するための推奨事項	繊維の高分散グレード	熱硬化性樹脂: エポキシ樹脂、ビニルエステル樹脂、ポリエステル、フェノール樹脂
用途	セメントモルタル、建物、プラスチック	自動車、航空宇宙、化学工業、繊維強化コンクリート、軍事用途、スポーツアクセサリ、モータースポーツ
繊維径 (M 平均)	5.2	7
繊維長 (MM 公称)	10-15、30-60、60-90、120-150	10-15、30-60、60-90、120-150
繊維密度 - ベール (KG/ M3)	45	65
引張強度 (MPA)	3900	3900
引張弾性率 (GPA)	250	250
サイジング (%)	0	1.5
KARBO FELT		
重量	200 GSM - 400 GSM - 600 GSM - 800	

出典：KARBOREK HP から矢野経済研究所作成

・ rCF 採用用途

KARBOREK の rCF 製品は航空宇宙、自動車、産業用、航海、ミリタリー、スポーツ等で採用されている。

具体的にはチョップドの主な用途は Antistatic coating や塗料、熱可塑性樹脂の強化や帯電防止剤、EMI シールド、フローティングモジュール内のエポキシ塗料等である。フェルトの用途は帯電防止コーティングおよび塗料、熱可塑性樹脂の強化や帯電防止剤、EMI シールド、高温断熱材等である。

2-2. 環境付加価値向上調査

2-2-1. 廃 CFRP の工程端材・廃材の処分量

廃 CFRP は大きく分けてイ) 生産工程内で発生する工程内端材（CF、CF 織物、CF プリプレグ）と、ロ) 廃材として排出される CFRP の 2 つがある。図 2-20. リサイクル品の発生源からイ) については下記図①～⑤が該当する。このうち①②③は樹脂などと複合化していない CF 単体で排出されるもので、④～⑦は CF と樹脂とが複合化した状態で排出される。

④～⑦で排出された廃 CFRP の処理方法としては、現状では電炉等によるサーマルリカバリーや埋め立て処理が中心である。マテリアルリサイクルについては欧州や米国で一部製品化されたものがあるが、大部分は少量生産にとどまっている段階である。⑥⑦については、現段階では CFRP を使用した製品のほとんどは耐用年数が終了しておらず、使用済製品としての廃棄量はごく一部にとどまるものと推定される。

①～③の廃 CF のうち、①はボビンに残ったヤーンの形で排出されるため長い繊維として回収され、再生業者が引き取り CF としてリユースされるケースが多い。②及び③は織物の状態になっているため長い糸に戻すことができず、30～50mm 程度に裁断され、ミルドやチョップド糸、不織布等の製品としてリサイクルが可能である。

廃 CFRP である④⑤については、既に樹脂を含有した状態のものであるため、rCF を回収するには熱分解等の処理により CF のみを取り出す必要がある。④⑤に関してもミルドやチョップド糸、不織布等への再利用が検討されているが、研究機関やリサイクラーの中には水素タンクから数 m 程度の長さで rCF を取り出す技術開発を進めているところもある。

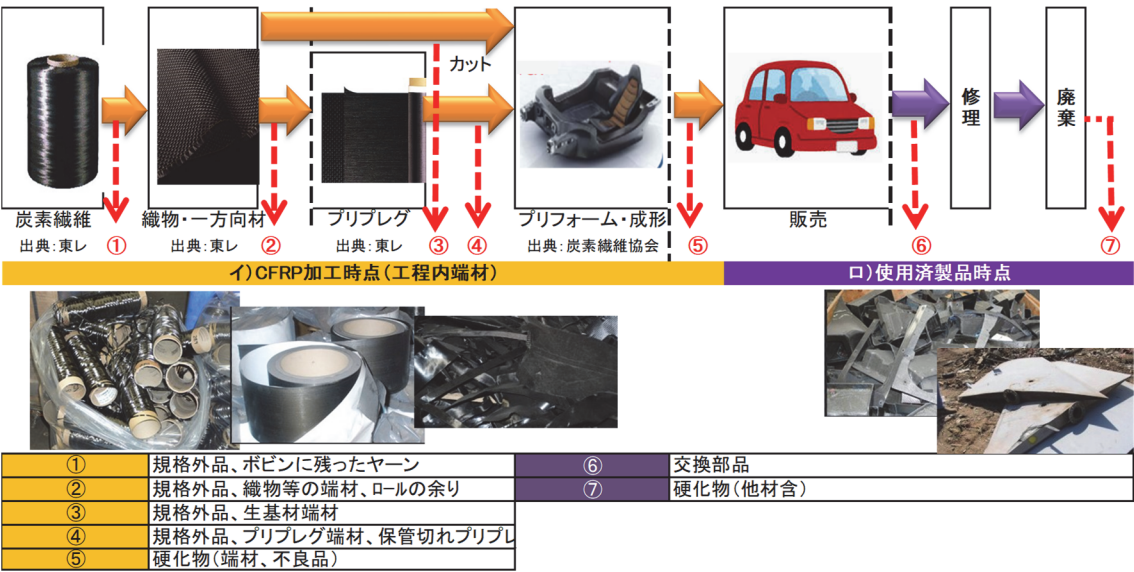


図 2-20. リサイクル品の発生源

出典：各種資料から矢野経済研究所作成

自動車や航空機など最終製品の部材として搭載された CFRP は、耐用年数が過ぎれば全て廃棄物（所謂退役製品）となる。米国モハベ空港で解体を待つ使用済航空機のように野ざらしで保管されるケースもあるが、先述のように現時点ではほとんどの製品が耐用年数に達していないものが多い。また、テニスラケットやゴルフクラブのような一般消費財に関しては、消費者が家庭ごみとして排出し地方自治体によって処理されているとみられる。

廃 CFRP の処分量

工程端材処分量

矢野経済研究所が国内外の rCF メーカーにヒアリングした結果、2019 年の世界市場での CFRP の市場規模は 140,000t/年程度であった。文献調査⁴⁴による 2019 年の世界市場での CFRP 市場規模はヒアリング結果とほぼ一致する。

表 2-18. 2019 年における CFRP 及び CF 世界市場規模（2019 年）

	2019年	
	文献調査	ヒアリング結果
CFRP市場規模		140,000
CF市場規模		—
CF体積含有量(Vf)		—
CFRP端材発生量		19,000
CFRP端材発生率		14%

出典：Industry Experts,Inc.「Carbon Fibers & Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) A Global Market Overview」(2018 年) 及び矢野経済研究所ヒアリング結果

CFRP 製造工程で排出される廃 CFRP の世界市場規模について統計データなどはないが、欧州及び日本の rCF メーカーへのヒアリングによると、2019 年で 19,000t/年（硬化前端材 10,000t/年+硬化後端材 9,000t/年）程度との見方が一般的であった。このことから、CFRP 製造工程での端材発生率は 14%程度と推計される。

地域別での工程内端材発生量は CFRP 需要量の地域別構成比に比例するものと推計される。文献調査⁴⁴ 及び矢野経済研究所によるヒアリング調査の結果により推計される 2019 年の CFRP 需要量の地域別構成比をもとに、廃 CFRP 発生量の 19,000t/年を地域別構成比に掛け合わせると、北米が 6,460t、欧州が 5,510t、日本が 1,330t、アジアが 4,750t、その他が 950t となった。

今回、矢野経済研究所がヒアリングした複数の欧州 rCF メーカーでは、世界における端材発生量 19,000t のうち、EU における廃 CFRP 端材発生量について 30～40%との見方を

⁴⁴ Industry Experts,Inc.「Carbon Fibers & Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) A Global Market Overview」(2018 年)

していた。廃 CFRP 発生量の 30%とすると 5,700t、40%とすると 7,600t となり、30%とした場合はほぼ計算値と同等であるが、40%とした場合は計算値との開きが大きくなる。ヒアリング先からは、rCF メーカーによって回収先や調達量が異なるため、正確な数値の把握は難しいとのコメントも得られており、5,510t という計算値は大きくは外れていないものと考えられる。

表 2-19. 地域別 CFRP 工程内端材発生量推計（2019 年）

	2019年		
	CFRP市場規模	地域別構成比	廃CFRP市場規模
北米			6,460
欧州			5,510
日本			1,330
アジア			4,750
その他			950
合計			19,000

出典：Industry Experts, Inc. 「Carbon Fibers & Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) A Global Market Overview」(2018 年) 数値を元に、廃 CFRP 市場規模を矢野経済研究所が推計

使用済 CFRP 製品由来の廃材処分量

使用済 CFRP 製品由来の廃材とは、航空機やスポーツ・レジャー用品、自動車等、CFRP を使用した製品が市場として市場に出た製品が耐用年数を終え、使用済製品として廃棄されたものを指す。端材発生量と同様に市場規模についての統計資料が無い場合、製品ごとの CFRP 使用量、用途別 CF 需要量の推計値と、各製品の耐用年数を元に推計した。

耐用年数は、航空機を 30 年、その他（スポーツ・レジャー用品、風力、圧力容器、自動車等）を 10 年とした。

航空機については、一般財団法人 日本航空機開発協会のデータ⁴⁵を元にした 1989 年時点の機種別の受注台数に加え、文献調査⁴⁶による当時の一機種当たりの CFRP 使用データを基に推計した。その他用途については、矢野経済研究所作成の調査レポート⁴⁷の CF 分野別需要世界推移のデータを基に、各用途での製造時点での工程内発生率を 50%、CFRP の Vf を 55%として廃材発生量を推計した。その結果、2019 年における使用済 CFRP 製品由来の廃材発生量は 18,794 t となった。

CF 需要量の増加に伴い、使用済 CFRP 製品由来の廃材発生量が増加していく。例えば航空機において Boeing の市場予測（2019 年～2038 年）⁴⁸によれば、今後 20 年で 44,040 機の新しい飛行機が必要になると予測している。2020 年は新型コロナウイルスの影響により

⁴⁵ 一般財団法人日本航空機開発協会「令和元年度 民間航空機関連データ集」

⁴⁶ 東レ「炭素繊維“トレカ”の戦略的事業拡大について」

⁴⁷ 矢野経済研究所「2011 年版機能性炭素繊維市場の現状と将来展望」

⁴⁸ ボーイングジャパン ニュースリリース（2019 年 6 月 17 日）

世界全体の飛行機生産台数は大きく落ち込み、Boeing としても 2019 年レベルに回復するまでに 3 年はかかるとみているが⁴⁹、長期的にみれば飛行機生産台数は増加していくものと推測され、その中で古い航空機はより効率的で新しい世代の飛行機に置き換えられる。またそれら効率的な飛行機には CFRP を含む複合材料が多く使用されると推測されており、ますます廃材における廃 CFRP 発生量が増加していくと推測される。

表 2-20. 使用済 CFRP 製品由来の用途別廃材発生量推計 (2019 年)

使用CFRP製品	耐用年数	計算式	①2019年の廃CFRP発生量(t)		使用済CFRP製品由来の2019年の廃CFRP発生量(t) (①+③)
航空機	30年	1989年のCFRP使用量	1,212		
使用CFRP製品	耐用年数	計算式	②2019年の廃CF発生量(t)	③Vf55%の場合の2019年の廃CFRP発生量(t) (②÷0.55)	
一般産業※	10年	(2009年のCF需要量)×インプラントゴミ発生率50%	10,000	18,182	

18,794

※風力発電、スポーツ・レジャー用品、CMGタンク等

出典：矢野経済研究所推計

CFRP 材料が使用された部品製造が拡大し、2019 年の世界市場での CFRP の市場規模は 140,000t/年程度まで拡大した。これに伴い、CFRP が使用された製品の廃棄量も年々増加していくとみられる。「A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis : February 2020 」によると、これまでリサイクルされずに蓄積された廃 CFRP 量（使用済み廃棄品、End of Life products : 廃棄物）は 2020 年には 62,000t まで増加するとの予測もある。この廃棄量の内訳は、主に航空機、風力発電（風力タービン等）が大部分を占めており、このうち航空機関連では 23,360t / y になると推計している。

同文献では CFRP 材料を使用した製品群や使用量の増加に従い、今後もこの廃棄量はさらに急拡大し、2050 年時点には米国では 162,083 t/y、欧州では 144,724 t/y、アジアでは 102,500 t/y、まで蓄積量が増加していくとしている。

⁴⁹ <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/>

(1) 日本

廃 CFRP の処分量

先述したように、廃 CFRP には工程内で発生する工程内端材と、製品として市場に出た後、耐用年数を過ぎて廃棄された廃材の 2 つがあるが、このどちらもどの程度の発生量かの統計値が存在しない。各リサイクル技術開発企業、大学が発表している数値から日本での廃 CFRP 量を推計する。ただし、以下数値は工程内端材の発生量である（使用済 CFRP 製品由来の廃材の地域別発生量の算出は困難であるため）。

矢野経済研究所が 2015 年 12 月末に実施した CFRP 関連企業でのヒアリングにおいて、日本国内での廃 CFRP 発生量は 1,000～1,500t/年と推計した。日本の廃 CFRP 発生量に関する文献調査結果では、2017 年で 1,000 数百 t/年であり、ヒアリング結果とほぼ一致する。その主な発生源は航空機の工程内端材であり、国内の航空機メーカーから 1,000t/年の廃 CFRP が排出されているものと見られる⁵⁰。

文献調査以外に、欧州及び日本の rCF メーカーへのヒアリングによる 2019 年のグローバルでの廃 CFRP 発生量(19,000t/年)と CFRP の世界市場規模に占める日本の構成比(7%)から計算した 2019 年の日本国内における廃 CFRP 発生量は 1,330t/年と推計される。

表 2-21. 日本での廃 CFRP 処分量（2019 年）

国・地域	CFRP廃材量* (2019年)	CFRP埋立量	備考
日本	1,000～ 1,500t/年	不明	【平成29年度環境省事業 平成29年度低炭素製品普及に向けた3R体制構築支援事業「炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用における早期事業化」報告書(株式会社新菱) 31p】 CFは出荷量の約30%が加工端材として排出されと考えられ、現状においても、既に、国内の鋳区久喜メーカーだけでも年間1,000tの廃CFが排出されている。 【平成29年度環境省事業 平成29年度低炭素製品普及に向けた3R体制構築支援事業「炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用における早期事業化」報告書(株式会社新菱) 58p】 表3-4. 再生CF原料(入口)調査結果 【矢野経済CFRP関連企業ヒアリング(2015年12月、2020年12月)】 CFRP関連企業へのヒアリングによると、2015年当時における日本で発生している廃CFRP量は1,500t程度。2020年においても同レベルの結果であることをCFRP関連企業にヒアリングした。

*使用済CFRP製品由来の廃材の地域別発生量の算出は困難であるため、CFRP廃材量は主に工程内端材の発生量である

出典：各種文献及びヒアリングより矢野経済研究所作成

(2) 欧州（ドイツ・英国・フランス・イタリア）

廃 CFRP の処分量

日本と同様に工程内端材と廃材がどの程度の発生量かの統計値が存在しない。各リサイクル技術開発企業、大学が発表している数値から欧州での廃 CFRP 量を推計する。ただし、以下数値は主に工程内端材の数値と推測される。

⁵⁰ 平成 29 年度環境省事業 平成 29 年度低炭素製品普及に向けた 3R 体制構築支援事業「炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用における早期事業化」報告書（株式会社新菱）

矢野経済研究所が欧州の rCF メーカーに実施したヒアリングでは、世界の廃 CFRP 発生量に占める欧州の比率は 30～40%である。2019 年の世界全体の廃 CFRP 発生量は 19,000t/年と推計されることから、同年の欧州の廃 CFRP 発生量は 5,700～7,600t/年と推計される。

矢野経済研究所の文献調査による 2019 年の CFRP 需要量に占める欧州の構成比は 29%であり、廃 CFRP 発生量を 19,000t/年として掛け合わせると 5,510t/年となり、ヒアリング結果とほぼ同等となった。

矢野経済研究所のヒアリング結果に基づき、2019 年の欧州の rCF 生産量は 700t/年と推計され、Vf55%で計算した場合、マテリアルリサイクルされた廃 CFRP の量は約 1,280t/年となる。先に述べた 2019 年の欧州における廃 CFRP 発生量は 5,700～7,600t/年であり、リサイクル量を除いた埋め立て量は工程内端材分だけで 4,420～6,320t/年と推計される。

表 2-22. 欧州での廃 CFRP 処分量 (2019 年)

国・地域	CFRP廃材量* (2019年)	CFRP埋立量	備考
欧州	5,700 ～7,600t/年	4,420～ 6,320t/年	【欧州rCFメーカーへのヒアリング】 ・2019年の世界市場におけるCFRP端材の発生量は19,000t/年であり、このうちEUからの発生量は30～40% (5,700～7,600t)である。 ・廃CFRPの処理方法は埋め立てかサーマルリカバリーである。 ・EUは埋め立てによる廃棄物処理に対する規制が厳しいが、法的拘束力を持つものではなく推奨レベルであるため、現状では国によって埋め立て処理されている。 ・2019年のrCFの市場規模は世界全体で2,000t/年程度、このうち700t/年程度が欧州での生産量である。 【公益財団法人 航空機国勢協働開発基金 解説概要 R1-3 炭素繊維リサイクルの現状と今後の展望】 炭素繊維は製造時に膨大なエネルギーを消費し、現状では工程廃材や使用済製品の大部分は埋め立て処理されている。EUでは2030年までに全ての種類の埋め立て廃棄量を最大10%までに制限することを計画しており、原則として全ての資源を循環利用し、できないものは初めから使用すべきでないと考えられている。

出典：各種文献及びヒアリングより矢野経済研究所作成

2-2-2. 廃 CFRP の廃棄方法

廃 CFRP は二つの分類に分けられる。①生産工程内で発生する工程内端材（CF、CF 織物、CF プリプレグ）と、②廃棄物として処理された使用済み製品の二つである。

CFRP の処理の難しさの一つは、一般ごみの単純焼却炉では完全には燃えないほか、セメント等におけるサーマルリカバリー時において電気集塵機用設置炉では燃え残りの短い繊維（フライ）により荷電不良を招くとされる⁵¹。そのため、現状の廃 CFRP は電炉をはじめとするサーマルリカバリーや埋め立て処理が主に行われているものと推定されるほか、一部では CFRP を粉砕してコンクリート補強材等としてマテリアルリサイクル（カスケードリサイクル）されるケースもあるとみられる。

今回、国内外の rCF メーカーにヒアリングしたところ、世界市場での CFRP の市場規模は 140,000t/年程度、このうち CFRP の工程内端材量は 19,000t/年程度との見方が多かった。

⁵¹ https://j-far.or.jp/wp-content/uploads/2019report_CFRP.pdf

工程内端材の内訳は硬化前端材が 10,000t/年、硬化後端材が 9,000t/年と推計される。

工程内端材

工程内端材の廃棄方法は、CF メーカー、CFRP 製品メーカー、CFRP 製品ユーザーともに委託処理業者による引き取りが主体となる。処理業者による引き取り後に関する詳細は不明であるものの、①リユース・サーマルリカバリー・リサイクル（マテリアル・ケミカル）、②埋め立てがメインであるとみられる。

工程内端材の発生元を区分すると、CF メーカーから排出されるボビンに残ったヤーンの状態のもの（CF 繊維）、CF 織物・CF 一方向材（樹脂含浸させていないもの）、CF 織物・一方向材と樹脂を複合化したプリプレグがある。

このうち CF メーカーから排出されるヤーン状のもの（CF くず）は再生業者が引き取りリユースされるため、CF メーカーから端材として排出される量はほとんどない。樹脂と含浸前の CF 織物・一方向材は 30～50mm 程度に裁断され、ミルドやチョップド糸、不織布等の製品としてリサイクルされる。

使用済製品廃材

使用済製品由来の廃材は、法律によって処理方法が規定されている製品を除きリサイクルされるケースは少なく、ほとんどは廃棄物としてサーマルリカバリーもしくは埋め立て処理されているとみられる。

現在、CFRP リサイクル企業の主な回収元は工程内端材で、今回のヒアリングでは使用済み廃棄物を回収・リサイクルし、rCF 製品として再利用するケースはほとんどないという回答であった。廃棄品から CF を抽出しリサイクルする等、rCF 試作品やテストは行われているが、開発・研究レベルに留まっている。

(1) 日本

日本における廃 CFRP は大部分が工程内端材である。CFRP 工程内端材の処理方法としては硬化前のもの、硬化後のものともに処理業者が引き取り、電炉等にてサーマルリカバリーされているものと考えられるほか、サーマルリカバリーで処理できなかった場合、埋め立て処理されているものと推測される。

一方、製品化された後の CFRP 廃材については、CNG 車に使用される高压タンクは高压ガス保安法に基づき処理されているが（今後発生する燃料電池車も同様）⁵²、その他は主に埋め立て処分されているものと推定される。

また、rCF メーカー（リサイクラー）では CF メーカー、中間材メーカー、CFRP 製品メーカーから端材を買い取り、rCF 回収の研究開発や、rCF のサンプル販売を行っている。

⁵² 環境省「平成 25 年度次世代自動車に係る処理実態調査業務報告書」

大手リサイクラーの中には **rCF** 事業を安定的に展開するには原料となる廃 **CFRP** を一定の規模でストックする必要があるとして、廃 **CFRP** を購入の上で備蓄しているケースもある。例えば、**rCF** リサイクル事業を行うカーボンファイバーリサイクルでは、年によって多少の差はあるものの、おおよそ 400～500t/年程度の廃 **CFRP** を備蓄している。

(2) 欧州（ドイツ・英国・フランス・イタリア）

欧州では、**CFRP** 工程内端材に関しては一部熱分解によるリサイクルが行われているが、多くは処理業者に引き渡された後、サーマルリカバリーか埋め立てによって処理されている。

使用済みの **CFRP** 製品に関してはリサイクルされるケースは少なく、ほとんどがサーマルリカバリーか埋め立て⁵³による処理が一般的である。使用済 **CFRP** 製品を回収しリサイクルを行い再利用する仕組みを構築すべく、**CFRP** の使用が拡大している自動車や航空機メーカーや研究機関、**rCF** メーカーもパートナーシップを結び **CFRP** 循環システムの構築に力を入れているが、開発レベルに留まっているのが現状である。

欧州地域では、欧州全体の指令で廃棄物の埋め立てによる廃棄物処理は禁止されているものの、これは法的効力を持たない推奨レベルとされる。欧州諸国それぞれが廃棄物処理に関する規定を保有しており、各国ごとに廃棄物処理方法に関する規制が異なっている。

ドイツでは、政府方針で埋め立ては基本的に禁止されており、排出者もそれを守る行動をとるが、強い法的規制に基づいて廃棄物が処理されているわけではないため、一般ごみとして処理をするなどグレーゾーンが存在する。フランスは、政府が所有する土地での埋め立ては許可されている。このように欧州地域でも各国それぞれ廃棄物処理の方法に対する規定が異なっている。

⁵³ 公益財団法人航空機国際共同開発促進基金 解説概要「R1-3 炭素繊維リサイクルの現状と今後の展望」

2-2-3. 廃 CFRP に関する法規制

(1) 日本

日本の「循環型社会推進基本法」では、廃棄物やリサイクルに係る問題解決のため、「大量生産・大量消費・大量廃棄」型の経済社会から脱却し、環境への負荷が少ない「循環型社会」の形成推進を目的とした基本的な枠組みとなる法律で、「循環型社会」の概念が示されている。

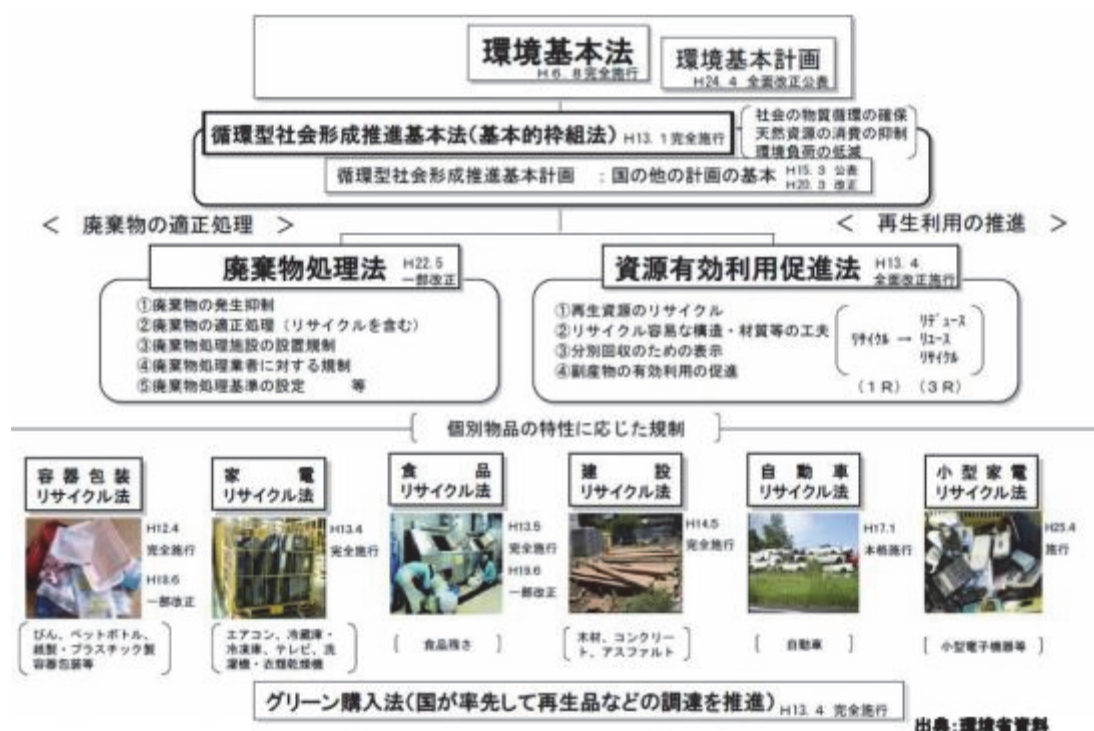


図 2-21. 循環型社会形成推進のための法体系

出典：平成 26 年 8 月 29 日経済産業省産業技術環境局リサイクル推進課

「資源有効利用促進法の概要及び施行状況について」

2019 年 5 月には資源・廃棄物制約、海洋プラスチックごみ問題、地球温暖化、アジア各国による廃棄物の輸入規制等の幅広い課題に対応するため、3R+Renewable（再生可能資源への代替）を基本原則としたプラスチックの資源循環を総合的に推進するための戦略「プラスチック資源循環戦略」を政府として策定した⁵⁴。

循環型社会形成推進基本法に規定する基本原則を踏まえ、①ワンウェイの容器包装・製品をはじめ、回避可能なプラスチックの使用を合理化し、無駄に使われる資源を徹底的に

⁵⁴ <https://www.env.go.jp/press/files/jp/111747.pdf>

減らすとともに、②より持続可能性が高まることを前提に、プラスチック製容器包装・製品の原料を再生材や再生可能資源（紙、バイオマスプラスチック等）に適切に切り替えた上で、③できる限り長期間、プラスチック製品を使用しつつ、④使用後は、効果的・効率的なリサイクルシステムを通じて、持続可能な形で、徹底的に分別回収し、循環利用（リサイクルによる再生利用、それが技術的経済的な観点等から難しい場合には熱回収によるエネルギー利用を含め）を図ることを基本原則としている。

さらに、2020年5月には経済産業省資源循環経済課が今後の循環経済政策の基本的な方向性を提示するべく、国内外の資源循環の現状と課題についての調査・分析を行った「循環経済ビジョン 2020」を公表した⁵⁵。これは我が国企業がこれまでの3Rの取組の中で培ってきた強みをグローバル市場で発揮し、中長期的な産業競争力強化につなげるべく、①循環性の高いビジネスモデルへの転換、②市場・社会からの適正な評価の獲得、③レジリエントな循環システムの早期構築の3つの観点から、我が国の循環経済政策の目指すべき基本的な方向性を提示している。

このなかで「循環システムの検討が急がれる分野」の一つとして、プラスチックや繊維などに加えて、CFRPが下記の通り言及されている。

軽量で耐熱性に優れた強固な素材であるCFRPは、軽量化による温室効果ガス排出量削減効果等を理由に、自動車や航空機をはじめとする製品において更なる需要の拡大が見込まれている。我が国企業はCFRPの製造で高い世界シェアを持ち、技術開発にも力を入れている。一方で、その特性から既存の処理プロセスでの処理・リサイクルが困難であり、用途も含めた効率的なリサイクル手法の開発が求められている。

現在、CFRPの製造事業者や利用事業者が参画し、リサイクル技術の開発や再生されたCFの評価手法の開発に取り組んでいるところである。例えば、新構造材料技術研究組合（ISMA）では、組合員が連携して世界で初めて熱可塑性CFRP性シャシーの製造に成功した。こうした取組を加速していくとともに、欧州と連携し、グローバルな循環システムを構築していくことが重要である。

① 廃CFRP廃棄法

日本における廃棄物に関する法律は廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和45年12月25日法律第137号）であり、廃棄物の排出抑制と処理の適正化により、生活環境の保全と公衆衛生の向上を図ることを目的としている。同法律は廃棄物処理法、廃掃法と略される。最終改正は令和元年六月一四日法律第三七号である。

廃棄物は、産業廃棄物と一般廃棄物に分類される。産業廃棄物はビルの建設工事や工場で製品を生産する等の事業活動に伴って生じた廃棄物である。その種類は廃棄物処理法で燃え殻、汚泥、廃油、廃酸、廃アルカリ、廃プラスチック類などの20種類が指定されてい

⁵⁵ <https://www.meti.go.jp/press/2020/05/20200522004/20200522004-2.pdf>

る。廃 CFRP は産業廃棄物において「廃プラスチック」に分類される。産業廃棄物の処理責任者は排出事業者である。これら産業廃棄物として排出された廃 CFRP は、廃プラスチック類（金属原料化）の許可を取得している産業廃棄物処理業者に引き取ってもらい、セメントや鉄鋼の原燃料として利用されている。

② 廃 CFRP の管理主体（生産者責任、排出者責任）

一般廃棄物は産業廃棄物以外の廃棄物を示す。CFRP が使用されているテニスラケットや自転車等の一般廃棄物においては、「燃えないごみ」又は「粗大ごみ」として処理されていると推測される。これらは、不燃ごみ処理／粗大ごみ破砕処理施設において細かく粉砕され、有価金属（鉄とアルミ）が分別回収され、CF 部分は埋め立て処理又は焼却処理がなされていると考えられる。

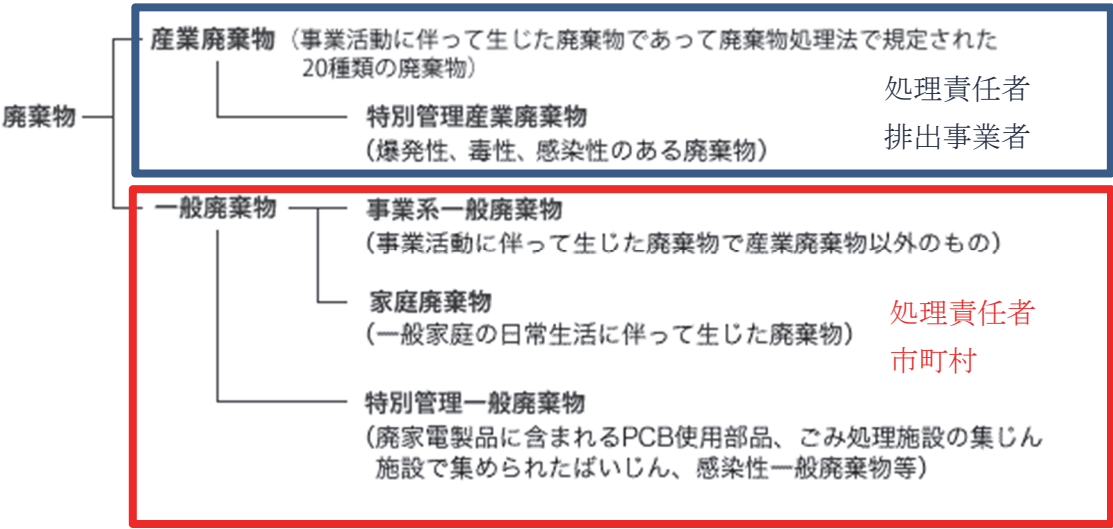


図 2-22. 廃棄物の分類と具体例

出典：公益財団法人日本産業廃棄物処理振興センター

表 2-23. 廃棄物の分類と具体例

種類		具体例
あらゆる事業活動に伴うもの	(1) 燃え殻	石炭がら、焼却炉の残灰、炉清掃掃出物、その他焼却残さ
	(2) 汚泥	排水処理後および各種製造業生産工程で排出された泥状のもの、活性汚泥法による余剰汚泥、ビルビット汚泥、カーバイト汚泥、洗車場汚泥、建設汚泥等
	(3) 廃油	鉱物性油、動植物性油、潤滑油、絶縁油、洗浄油、切削油、溶剤、タールピッチ等
	(4) 廃酸	写真定着廃液、廃硫酸、廃塩酸、各種の有機廃酸類等すべての酸性廃液
	(5) 廃アルカリ	写真現像廃液、廃ソーダ液、金属せっけん廃液等すべてのアルカリ性廃液
	(6) 廃プラスチック類	合成樹脂くず、合成繊維くず、合成ゴムくず(廃タイヤを含む)等固形状・液状のすべての合成高分子系化合物
	(7) ゴムくず	生ゴム、天然ゴムくず
	(8) 金属くず	鉄鋼または非鉄金属の破片、研磨くず、切削くず等
	(9) ガラスくず、コンクリートくずおよび陶磁器くず	ガラス類(板ガラス等)、製品の製造過程等で生ずるコンクリートくず、インターロッキングブロックくず、レンガくず、廃石膏ボード、セメントくず、モルタルくず、スレートくず、陶磁器くず等
	(10) 鉱さい	鑄物廃砂、電炉等溶解炉かす、ボタ、不良石炭、粉炭かす等
	(11) がれき類	工作物の新築、改築または除去により生じたコンクリート破片、アスファルト破片その他これらに類する不要物
	(12) ばいじん	大気汚染防止法に定めるばい煙発生施設、ダイオキシン類対策特別措置法に定める特定施設または産業廃棄物焼却施設において発生するばいじんであって集じん施設によって集められたもの
特定の事業活動に伴うもの	(13) 紙くず	建設業 工作物の新築、改築、または除去に伴って生ずる紙くず、建材の包装紙、板紙など
		パルプ・紙・紙加工品の製造業、新聞業、出版業、製本業、印刷物加工業 印刷くず、製本くず、裁断くずなど
	(14) 木くず	建設業 工作物の新築、改築、または除去に伴って生ずる木材(伐採材や伐根を含む)
		木材製造業、木製品製造業、パルプ製造業、輸入木材の卸売業 廃木材、おがくず、パーク類、梱包材くず、板きれ、廃チップ等
	(15) 繊維くず	建設業 工作物の新築、改築、または除去に伴って生ずる繊維くず、ロープ等
		衣類などの繊維製品製造業を除く繊維工業 木綿・羊毛・麻などの天然繊維くず、糸くず、布くず、不良くず、落ち毛、みじん等
	(16) 動植物性残さ	食料品製造業、医薬品製造業、香料製造業 原料として使用した動物・植物にかかる固形状の不要物
	(17) 動物系固形不要物	畜産農業 と畜場において処分した獣畜、食鳥処理場において処理した食鳥に係る固形状の不要物
	(18) 動物のふん尿	畜産農業 畜産農業から排出される牛、馬、豚、めん羊、にわとり等のふん尿
	(19) 動物の死体	畜産農業 畜産農業から排出される牛、馬、豚、めん羊、にわとり等の死体
(20) 以上の産業廃棄物を処分するために処理したもので、上記の産業廃棄物に該当しないもの(例えばコンクリート固型化物)		

出典：公益財団法人日本産業廃棄物処理振興センター

③ 廃 CFRP の廃棄・リサイクル関連法規

イ) 資源有効利用促進法

資源有効利用促進法は、循環型社会を形成していくために必要な 3R（リデュース：廃棄物の発生抑制・リユース：再使用・リサイクル：再資源化）の取り組みを総合的に推進するための法律である。正式名称は「資源の有効な利用の促進に関する法律」であり、平成 13 年 4 月に施行（平成 12 年 6 月公布、平成 3 年に制定された「再生資源の利用の促進に関する法律」を一部改正）。

特に事業者に対して 3R の取り組みが必要となる業種や製品を政令で指定し、自主的に取り組むべき具体的な内容を省令で定めることとしている。10 業種・69 品目を指定して、製品の製造段階における 3R 対策、設計段階における 3R の配慮、分別回収のための識別表示、事業者による自主回収・リサイクルシステムの構築などが規定されている。なお、この 10 業種には自動車が含まれている。

■ 自動車（使用済自動車の再資源化等に関する法律）

自動車用の場合は、日本では破碎くず（シュレッターダスト）のリサイクル率を一定水準以上にすることが自動車リサイクル法により定められている。なおここでのリサイクル率とはマテリアルリサイクルだけでなく、サーマルリカバリーも含む。CNG タンクに関し

て、解体業者が CFRP を排出した場合は自動車リサイクルされる工程で自動車破碎残さ (ASR) として処分されるため、この対象となる。

指定再資源化による ASR の再資源化においては、自動車リサイクル法第 25 条第 2 項及び施行規則第 26 条で再資源化率の計算式及び満たすべき基準値 (再資源化率の基準値は ASR が 70%) が定められている。ASR の再資源化率は 96.3%であった⁵⁶。自動車メーカーや輸入業者は協力し合いながら再資源化率の向上に取り組んでいる。

なおリサイクルの定義に関しては、後述する EU と比較を行うと、日本はサーマルリサイクルを含めてリサイクルとしているのに対して、EU ではマテリアルリサイクル (メカニカルリサイクル) 及びケミカルリサイクル (フィードストックリサイクル) のみをリサイクルと定義し、サーマルリサイクル (サーマルリカバリー) はリサイクルに含めていない。

用語定義の考え 具体例	日本ASR		EU (車両換算: 全体)		
<不燃物の利用> ・金属 ・再生プラスチック ・スラグ ・セメント	マテリアルリサイクル		メカニカルリサイクル		
<可燃物の化学的利用> ・高炉還元剤利用 ・ガス化 ・油化 等	ケミカルリサイクル	リサイクル 2015年85%	フィードストックリサイクル	リサイクル 2015年85%	リカバリー 2015年95%
<可燃物の熱利用> ・PDF RPF	サーマルリサイクル		エネルギーリカバリー		
廃棄物焼却施設での焼却 埋め立て地への最終処分	焼却 埋立	処分	焼却		処分

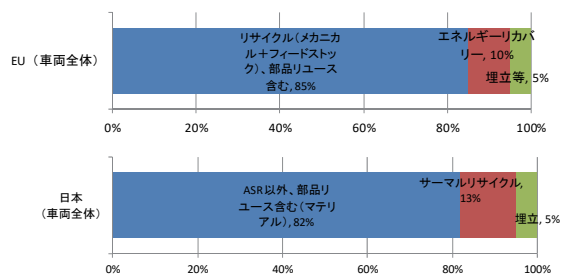


図 2-23. 日本と EU のリサイクル率定義の違い

出典：2014 年 11 月 11 日一般社団法人日本自動車工業会「自動車リサイクル制度の評価・検討について」

④ 廃 CFRP の廃棄・リサイクル関連法規の今後の展望

日本においては、自動車リサイクル法でリサイクル (再資源化) 率の目標が設定されているほか、「プラスチック資源循環戦略」においても数値目標が示されている。

リデュースでは、①2030 年までにワンウェイプラスチックを累積 25%排出抑制、リユース・リサイクルでは、②2025 年までにリユース・リサイクル可能なデザインに、③2030 年までに容器包装の 6 割をリユース・リサイクル、④2035 年までに使用済プラスチックを 100%リユース・リサイクル等により有効利用、再生利用・バイオマスプラスチックでは⑤2030 年までに再生利用を倍増、⑥2030 年までにバイオマスプラスチック約 200 万 t 導入を掲げている⁵⁷。

⁵⁶ 自動車リサイクルデータブック 2019

⁵⁷ <https://www.env.go.jp/press/files/jp/111746.pdf>

(2) 欧州

EU では、2010 年に策定された EU の成長戦略「Europe2020」が掲げる 7 つの旗艦イニシアティブの一つに「資源効率的な欧州」が位置づけられ、これを受けて「資源効率的な欧州へのロードマップ (Roadmap to a Resource-Efficient Europe)」により、2050 年のビジョンと 2020 年までのマイルストーンが示された。

その後は 2015 年 12 月に循環経済パッケージ (Circular Economy Package、以下 CE パッケージ) が公表され、その一環として自治体廃棄物、包装廃棄物リサイクル率の目標を設定してきたが、2018 年 1 月に「EU プラスチック戦略」(EU Plastics Strategy)、さらに 2020 年 3 月には新循環経済行動計画 (New Circular Economy Action Plan、以下 CE アクションプラン) も発表されており、EU 諸国および英国はこれらに基づき国内法規制を整備している。

CE パッケージでは、行動計画として海洋プラスチックごみの大幅削減や二次資源の品質基準の開発などのほか、廃棄物法令の改正案として 2035 年までに一般廃棄物 (都市ごみ) の 65%、2030 年までに包装廃棄物の 70%を再使用またはリサイクルすること、2035 年までに一般廃棄物 (都市ごみ) の埋立量を最大 10%に削減することを掲げた⁵⁸。

EU プラスチック戦略では、2025 年までに 1,000 万 t の再生プラスチックを利用することを目標に、リサイクルの経済性と品質の向上に向けてリサイクル性に優れた製品設計の改善、選別及びリサイクル能力の拡大などに取り組む必要があることを訴求した⁵⁹。

CE アクションプランでは、2050 年までに温室効果ガス排出の実質ゼロを目標にする「欧州グリーン・ディール」および EU 産業の競争力維持等を目指す「欧州新産業戦略」の一部をなす新たな行動計画として、環境に優しい未来にふさわしい経済の実現、競争力と環境保護の両立、消費者の権利強化を目的とする。2015 年に発表された CE パッケージの成果を踏まえ、今回のアクションプランは設計と生産に焦点を当て、資源を可能な限り EU の経済活動の内部に引き留めることを目標に据えている⁶⁰。このうち、プラスチックに関しては製品のリサイクル含有量の測定に関するルールを初めて開発することとも言及されている⁶¹。

⁵⁸https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/first_circular_economy_action_plan.html

⁵⁹<https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/plastics-strategy-brochure.pdf>

⁶⁰<https://www.jetro.go.jp/biznews/2020/03/5ba822c725506e14.html>

⁶¹https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/new_circular_economy_action_plan.pdf

① 廃 CFRP 廃棄法

イ) 欧州全体

＜廃棄物・ごみ処理関連の取り扱い＞

特に廃棄物処理に関して見ると、最初の取り組みは 1975 年制定の Waste Directive (75/442/EEC) や Hazardous Waste Directive (91/689/EC) に遡るが、最新の廃棄物処理関連の指令等規定は以下の通りである。

■ 廃棄物枠組指令 (Waste Framework Directive (2008/98/EC))

廃棄物発生と廃棄物管理における有害な影響を防止し、環境や人の健康を保護することを目的としている。EU 加盟国が従うべき 5 段階の廃棄物管理の優先順位を定めている。優先度の高い順から、廃棄物の①予防 (Prevention)、②再利用のための準備 (Preparing for re-use)、③リサイクル (Recycle)、④エネルギー回収 (other recovery, in particular energy recovery and backfilling operations)、⑤処分 (Disposal) としている。なお、日本ではエネルギー回収を (サーマル) リサイクルとしてカウントするが、EU ではリサイクルに含めていない。今回の調査を通じて EU 当局に確認したところ、この廃棄物管理の優先順位は変わることなく、上位の処理方法によって廃棄物処理を推進しているという回答であった。

廃棄物の分類に関しては、廃棄物カタログ (European Waste Catalogue (2014/955/EU)) に従って有害か無害かによって区分される。特定廃棄物 (Hazardous waste, 有害廃棄物) では、爆発物、酸化物、引火性物質、皮膚刺激物、毒物、発がん性物質などを 14 種の物質を対象に処理に関する要求事項を規定している。

なお、「EU 廃棄物カタログ」(The European Waste Catalogue) は 1993 年 10 月に定義され、この EU 廃棄物カタログこそが EU における廃棄物の定義の基礎となっている。加盟国はそれぞれの国内法でこの廃棄物カタログを導入している。

「EU 廃棄物カタログ」は初版から複数回改訂が重ねられており、最新版である 2014 年更新版 (2014/955/EU) は 20 章にまたがり、計 907 の廃棄物に分類されている。廃棄物カタログは 907 品目の廃棄物にそれぞれ単一の 6 桁のコードを与え、それぞれの桁は廃棄物の種類を特定するのに役立つように構成されている。

1994 年に EU の有害廃棄物リスト (The hazardous waste list) も導入された。この有害廃棄物リストでも廃棄異物カタログと同様に 237 種類の有害廃棄物を特定の 6 桁コードで定義され、この EU 有害廃棄物リストも EU 諸国共通のリストとして各国の廃棄物関連法に準拠された。

さらに、2018 年 4 月に EU は「廃棄物分類についてのテクニカルガイダンス (technical guidance on the classification of waste (2018/C 124/01))」を発刊、分類が困難な廃棄物について例示しながら説明している。

■ 埋立指令：Directive on Landfill of Waste (99/31/EC)

EU 圏における廃棄物の埋立処分に関するルールを総合的に定めている。全体的な埋立量の削減以外にも、有害性低減のための廃棄物処理の実施、有害廃棄物・非有害廃棄物・不活性廃棄物の混合処分の禁止、埋立処分場の許可制化などを定める。

2018 年には新埋立指令 (New Landfill Directive (2018/850)) が発令された。これは 2035 年までに自治体から排出される埋立削減目標を 10%以下にすることを目標にしている。

以下に関連指令に関して記す。

■ 産業排気ガス指令：Industrial Emissions Directive (2010/75/EU)

2014 年より焼却指令 (Waste Incineration Directive (2000/76/EC)) を包含。人体の健康と環境を守るため「利用可能な最善の手法 (Best Available Techniques (BAT))」を採用し、EU 全体における有害な産業廃棄ガスの排出を抑制することを目指す。

■ 廃棄物輸出規制：The Regulation on Trans-border Shipment of Waste (EC/1013/2006) [別名 Shipment of Waste]

廃棄物の国境を越える輸送に関する手続きを定めた。バーゼル条約の元となる欧州議会・理事会における規定。

ロ) ドイツ

廃棄物処理に関する基本法は「循環経済廃棄物法」(Kreislauf Wirtschafts Gesetz、略称 KrWG ; 英語表記 Circular Economy and Safeguard the Environmentally Compatible Management of Waste または Closed Cycle Management Act) である⁶²。循環経済廃棄物法 (別名：循環経済法) とは、1972 年に制定された廃棄物処分法を改訂し、循環型経済の構築を目的とし 1996 年に施行された法律である。

循環経済廃棄物法は EU 廃棄物枠組み指令 (2008/98/EC) 同様、prevention、preparing for re-use、recycling、other recovery, in particular energy recovery and backfilling operations、disposal の 5 階層で構成されている。他の法も基本的に EU 指令と同じ内容をカバーする。例えば、電気電子機器に関する WEEE 指令に対応する 電気電子機器法 (Elektro- und Elektronikgerätegesetz、略称 ElektroG ; 英語表記 Electronic Equipment Act) は、電気電子機器のリサイクルについて規定し、廃棄自動車については AltfahrzeugV (英語表記：End-of-life vehicles ordinance) が 2006 年より運用されている。そのほか、2019 年には容器包装廃棄物法 (Verpackungsgesetz、略称 VerpackG ; 英語表記 Packaging

62

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/kreislaufwirtschaftsgesetz_en_bf.pdf

Act) を施行し、包装（パッケージ）に関して、2023 年までにリサイクル比率を 36% から 63% にまで引き上げるとしている。

廃棄物の定義も循環経済廃棄物法が規定している。有害か無害かで区分し、利用(再生) される廃棄物「利用廃棄物」と再利用できない「処分廃棄物」とに大別される。同法付録 における定義（カテゴリー品目）は EU 廃棄物カタログに則る。

ドイツでは「廃棄物処理に関する技術指針」が異なる廃棄物品目同士を混合することを 禁止している。ドイツの廃棄物管理当局は廃棄物発生者の廃棄物管理台帳を調べることで 異なった廃棄物の混合がなされていないかを検査する⁶³。

なお、埋立に関しては 1990 年代から法規制があったが、EU 指令を受ける形で法律が規 定されたのは 2001 年と 2002 年（廃棄物保管規制・埋立規制 Abfallablagerungsverord- nung and Deponieverordnung (waste storage regulation and landfill regulation)) であ る⁶⁴。

2013 年、政府が設置した Waste Avoidance Programme により、人体に有害なごみ処理 方法を削減することや再利用の促進など定性的目標が掲げられたが、このプログラムには 数値目標はない。

ハ) 英国

英国は法制度上、EU の法律を国内法に受け入れるにあたっては、その旨を記載した法律 を制定することを必要とする。そのため、英国議会は欧州共同体に加盟した際、「1972 年欧 州共同体法（European Communities Act 1972、以下「ECA1972」）」を制定、EU の規則 が英国内で直接効果を持つこと、EU の指令が国内で効力を持つために必要となる法律を制 定すること、および EU の裁判所などの決定を尊重しなければならないことを記載した。 この ECA1972 の存在により、英国において EU 法の効力が生じていた。

なお、2020 年 1 月 31 日をもって英国は EU 脱退を決断したが、Brexit のタイミングで 英国において有効な全ての EU の規則、指令、判例などは英国国内法に変換されたうえで 効果が継続することをあらかじめ「2018 年 EU 離脱法(The European Union (Withdrawal) Act 2018 (Exit Day) (Amendment) (No. 2) Regulations 2019) ⁶⁵」にて制定しているため、 実質的には EU 法は引き続き適用されている⁶⁶。

ニ) フランス

フランスの廃棄物規制は、「環境法」（別訳「環境法典」、Code de l' Environnement）に より、基本的な枠組みが規定されている。「環境法」は 2000 年に初めて制定され（LOI no.2000-914）、その後数次にわたり改定。環境に対する責任、環境破壊・汚染等の予防、

⁶³ 経産省「欧州における廃棄物法の諸側面」https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/pdf/23_02.pdf

⁶⁴ <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/waste-resources/waste-disposal/landfill>

⁶⁵ <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2019/859/introduction/made>

⁶⁶ 商事法務ポータル <https://www.shojihomu-portal.jp/article?articleId=9809762>

環境保護への市民参加を原則とする基本法である。この憲法上の原則に従い、環境保護に向けた政策が策定されている。同法は EU 廃棄物指令 (Waste Directive (2018/851/EU)) に基づき、再利用とそのための準備 (re-utilization and preparing for re-utilization) および最終廃棄物処理 (end-of-waste) について言及している。廃棄物及び有害物質に関しては、環境法 L.541-1-1 が規定している。

ホ) イタリア

イタリアの廃棄物規制の基本法となるのは、2006 年 4 月に施行された Legislative Decree 152/2006⁶⁷ (通称 Environment Code、ECA (原名 Norme in materia ambientale or Codice dell'Ambiente、)) である⁶⁷。ECA は 6 つの項目 (環境方針、環境アセスメント (EIA) /IPPC 認可 (autorizzazione integrata ambientale ; AIA 認可)、水資源管理・土壌管理、廃棄物・包装パッケージ管理、汚染土壌の修復、大気汚染・排気ガス、環境破壊) から成り立つ⁶⁸。

主要管轄当局は環境・国土・海保護省 (英語表記 Ministry of the Environment and Protection of Land and Sea、原名 Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare 通称 MATTM)。

イタリアにおいて環境法は拘束力を持ち、違反については刑事罰・民事罰のいずれも課され得る。刑事では Legislative Decree no. 231 of 2001 を根拠として裁かれる⁶⁹。

埋立処理はイタリアにおいても縮小傾向にあり、2013 年にはシチリア地方をはじめ、全国に 180 か所あった埋立処理場が 2018 年には 127 か所まで減少している。一方、リサイクル率は 2009 年 29.7%だったのが 47.7%と拡大している。産廃、特別廃棄物については専門業者が請け負う⁷⁰。

② 廃 CFRP の管理主体 (生産者責任、排出者責任)

ドイツでは廃棄物処理については製造者責任の観点を支持しており、包装用品のリサイクル、リカバリーなどを推進されている。なお、同法は 2020 年 2 月 12 日には、環境・自然保護・原子力安全相が提出した同法の改正案が閣議決定されている⁷¹。

イタリアについて、改訂 Waste Framework Directive ((EU) 2018/851)にて規定された、責任の所在に関する部分については、イタリアは製造者に責任を求めるか否かを決定していない。

⁶⁷ (NORME IN MATERIA DI GESTIONE DEI RIFIUTI E DI BONIFICA DEI SITI INQUINATI [廃棄物の管理と汚染の修復に関する規則]、GESTIONE DEI RIFIUTI [廃棄物管理]) "Norme in materia ambientale" <https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/06152dl.htm>

⁶⁸ Environmental law and practice in Italy: overview [https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/1-503-2608?transitionType=Default&contextData=\(sc.Default\)&firstPage=true](https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/1-503-2608?transitionType=Default&contextData=(sc.Default)&firstPage=true)

⁶⁹ Environmental law and practice in Italy: overview [https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/1-503-2608?transitionType=Default&contextData=\(sc.Default\)&firstPage=true](https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/1-503-2608?transitionType=Default&contextData=(sc.Default)&firstPage=true)

⁷⁰ <https://www.statista.com/statistics/617053/munbero-of-landfills-italy/>

⁷¹ <https://www.jetto.go.jp/biz/areareports/special/2020/0601/c3af8f0eaf6ca6e1.html>

フランス「環境法」によると、廃棄物処理の責任は主に製造者にあるとされ、環境保全のために適切な最終処理を行うべきとしている⁷²。

英国については不明。

③ 廃 CFRP の廃棄・リサイクル関連法規

イ) 欧州全体

以下に各種関連指令に関して記す。

- 自動車廃棄指令：End-of-Life of Vehicles Directive (2003/53/EC)
使用済み自動車（廃車、ELV）の解体時に取り除く部品の指定、無償引き取り、廃車処理施設の環境基準、リサイクル達成目標率、回収管理システムの確立などを定める。環境保全と省エネルギーを実現し、EU 内での競争上の不公平を回避することを目的とする。
同指令ではリユース+リサイクル率を 80%以上、リユース+リカバリー率を 95%以上とすることを目標にしている。目標値達成の責務は加盟国政府が負う。
- 電気電子機器廃棄指令：Waste of Electrical and Electronic Equipment [WEEE] Directive (2012/19/EU)
電気電子機器廃棄物 [WEEE] に関して交付された。初版は 2002/96/EC。WEEE の発生を抑制、再利用・リサイクルを促進。WEEE の全体量を削減すべく、EU 加盟国および生産者に WEEE の回収・リサイクルシステムの構築・費用負担を義務付けている。
- 電気機器における有害物質使用規制：Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment Text with EEA relevance (2011/65/EU)
電気電子機器に関する特定有害物質の使用制限に関する指令。EU 市場に上市される電気電子製品への鉛、水銀、カドミウム、六価クロムなどの 10 物質群の使用を原則禁止。生産者に適合性評価や宣言、情報提供などの義務を課す。RoHS Directive (2002/95/EC)を現況に合わせて改訂したもの。
- 船舶リサイクル規制：Regulation (EU) No 1257/2013 of the European Parliament

⁷² <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=0ad81c3d-6fc8-4113-9331-71edc7549323>

and of the Council of 20 November 2013 on ship recycling and amending Regulation (EC) No 1013/2006 and Directive 2009/16/EC (Text with EEA relevance)

2009年に採択された「船舶の安全かつ環境上適正な再生利用のための香港国際条約（通称シップリサイクル条約）」に基づく。条約では、500 国際総トン以上の全船舶にインベントリ（船舶に存在する有害物質等の概算量と場所を記載した一覧表）の作成及び維持管理が義務付け、所管官庁により承認された船舶リサイクル施設でなければ船舶を解体・リサイクルすることができないとしている。

- 物質及び混合物の分類、表示及び包装に関する規則 : Regulation (EC) No 1272/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures
物質及び調剤に対する分類・表示及び包装に関する欧州議会・理事会規定。原則、EU 域内で製造、輸入されるすべての化学品について、EU に上市される前に危険有害性の分類を行うことを規定したもの。

なお、強化プラスチック(FRP、CFRP、GFRP 等)の廃棄について、EU 指令においてその処理や対応は具体名では言及されていない。

英国のステークホルダーによる調査⁷³によれば、FRP の廃棄にあたっては、適用されるのは廃棄物枠組み指令 Waste Framework Directive (2018/851/EU)以下、前述の指令とそれに基づく各国における規制である。廃棄物分類カタログにて、主要成分を元に品目を判断し、またそれが危険物 (hazardous) かそれ以外 (non-hazardous) かを判断することで、埋立・焼却といった処理方法や、輸出規制 (trans-border shipment control) の適用範囲を判断している状況にある。

フランス国立科学研究センターの資料においても、2019 年 1 月時点で FRP の廃棄処理を検討する際に参照可能な法規制は前述の EU 指令しか存在しない。また、リサイクルについても、個別状況に応じた研究がなされているのみである⁷⁴。

包括的ルールが指定されない、できない主な理由としては、強化プラスチックは成分が製品ごと、用途ごとに異なることから廃棄物分類カタログ (2014/955/EU) に照らした時、複数カテゴリーが当てはまることが挙げられる。

例えば「バージン FRP (バージン繊維、バージンプラスチック)」であれば「有機化合物からの廃棄物」のサブカテゴリー07 02「プラスチック、合成ゴム、人工繊維の製造、配合、使用からの廃棄物」下、サブ・サブカテゴリー07 02 13「プラスチックごみ」(‘plastic waste’)

⁷³ “Composite Recycling: Where are we now?” CompositesUK Ltd., University of Birmingham, University of Nottingham, University of Manchester

⁷⁴ Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste management <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01977839/document>

に分類される。07 02 13 は非有害物（non-hazardous）とみなされるため、非有害廃棄物の処理と輸送で良いということになる。同様に、カテゴリー12 01 05, 16 01 19, 17 02 03, 19 12 04, 20 01 39 に分類可能な FRP も、原則として非有害廃棄物の処理法と輸送方法が適用される⁷⁵。

- カテゴリー 07 02 13: 有機化合物からの廃棄物-プラスチック、合成ゴム、人工繊維の製造、配合、使用からの廃棄物-プラスチック (Category 07 02 13: Wastes from the Manufacture, Formulation, Supply and User (MFSU) of plastics, synthetic rubber and man-made fibres-plastics.)
- カテゴリー12 01 05: 金属とプラスチックの形成、および物理的・機械的表面処理からの廃棄物-プラスチック片・削り屑。熱硬化性樹脂の機械加工処理廃棄物が該当する可能性 (Category 12 01 05, Waste from shaping and physical and mechanical surface treatment of metals and plastics - plastic shavings and turnings. This category is possibly applicable for waste from machining of thermosetting components.)
- カテゴリー16 01 19: その他に分類できない廃棄物-自動車 EoL-プラスチック (Category 16 01 19, Waste not otherwise specified –end-of-life vehicles - plastics.)
- カテゴリー17 02 03: 建設・解体廃棄物-プラスチック (Category 17 02 03, Construction and demolition waste- plastic.)
- カテゴリー17 02 04*: 建築・解体廃棄物-木材、ガラス、プラスチック。危険化学物質に汚染された化学工場機器が該当する可能性 (Category 17 02 04* (M), Construction and demolition waste – wood, glass and plastic. This category could possibly be applied to chemical process plant equipment contaminated with hazardous chemicals.)
- カテゴリー 19 12 04: 廃棄物処理施設からの廃棄物-加工的处理（熱加工処理？） - プラスチック・ゴム (Category 19 12 04, Waste from waste management facilities - mechanical treatment of waste - plastics and rubber.)
- カテゴリー 20 01 39: 公共廃棄物-個別回収物、破片物-プラスチック (Category 20 01 39, Municipal waste – separately collected fractions – plastics.)

※アスタリスク（*）は、『廃棄物分類カタログ』の中で元々つけられているもので、アスタリスクがつけられたカテゴリーの廃棄物は、廃棄物枠組指令、有害物廃棄指令（2008/98/EC）の中で有害物とされたものを示す

⁷⁵ 「例えばバージン FRP であれば」以下「カテゴリー20 01 39」の説明までの出展 : Plastics Europe, “Classification and handling of UP waste within current EC legislation

“ <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/435-classification-and-handling-waste-within-current-ec-legislation>

また、GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）の場合は、ガラス繊維をポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂、エポキシ樹脂、フェノール樹脂などで固めていることから 4 章 02 の繊維業からの廃棄物（wastes from the textile industry）以下の、04 02 09 複合材廃棄物 wastes from composite materials (impregnated textile, elastomer, plastomer), 04 02 22 wastes from processed textile fibres, 04 02 99 wastes not otherwise specified, あるいは 10 1103 wastes from manufacture of glass and glass products: waste glass-based fibrous materials も適用される可能性がある。

一方、カテゴリー17 02 04* 「建設・解体廃棄物-木材、ガラス、プラスチック」に分類される場合、17 02 04はhazardous wasteとされているため、有害物廃棄指令（2008/98/EC）に適合した処理が求められる。

欧州各国においては、すべての廃棄物は「EU 廃棄物カタログ」および「危険物廃棄指令」に従い分類され、廃棄処理される。また、廃棄物を別国に輸出する場合には、廃棄物輸出規制に基づく手続きが求められる。すなわち、処理方法として「埋立」が選ばれる場合には、埋立指令(2018/850)が適用され、同様に、廃棄物の焼却については焼却指令（現・産業排気ガス指令(2010/75/EU)）が適用される。ただし、各国において基本的に有機物の埋立処理が禁止されつつあることや、二酸化炭素排出量削減の動きから、廃棄物はできる限り埋立や焼却よりもリサイクル・リカバリーが強く求められる傾向にある。

各国法規制においても処理方法の選択は FRP の主要成分が何であるかに依存し、こうした理由から、用途別・業界別にそれぞれが使用する強化プラスチックの特性に応じた廃棄方法を検討する動きが出てきている。例えば自動車業界の End-of-Life Vehicle (ELV) Directive, 電気機器業界の WEEE Directive などは既に運用段階にある。

他方、FRP 市場の主要部分を占めるもの航空機や風力発電機（羽）などの廃棄については個別の定めがない。下記のような業界団体、国際プロジェクト、国連関連事業などが検討に動き出しているが、各国の法律レベルにおいては 2020 年時点において存在が確認できない。

< 業界団体 >

- 航空機 : Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA) 、Consiglio Nazionale Delle Ricerche (イタリア学術会議)⁷⁶
- プラスチック全般 :
ReDisCoverR project⁷⁷

⁷⁶ Boeing, Bombardier, Embraer, Rolls-Royce 等の航空機メーカー、航空会社、研究機関、リサイクル業者からなる業界団体。 <https://afraassociation.org/> Best Management Practices (BMP) Guide for aircraft materials recycling を発行。 <https://afraassociation.org/accreditation/the-afra-bmp/> Ver4.0。 Article III a) - Location characteristics: Identification and Compliance with Relevant Standards という項に各 facility がその管轄法規制に従うこと、とある。

⁷⁷ ReDisCoverR project, led by the National Composites Centre on behalf of the government's High Value Manufacturing Catapult, is seeking waste management solutions to help secure an environmentally and

European Composite Recycling Services Company (ECRC) ⁷⁸

European Plastics Converters (EuPC) ⁷⁹

European Composite Industry Association (EuCIA) ⁸⁰

European UP/VE Resin Association, a Cefic Sector Group (European Chemical Industry Council)⁸¹

各国において強化プラスチックに対するピンポイントな法規制は確認できない。しかし、廃棄物の処理全般に関しては、主にサステナビリティの観点から、EU 指令に準拠する法規・条例を定め、運用している。以下、ドイツ、英国、フランス、イタリアにおける関連法規制について記述する。

ロ) ドイツ

環境保全、サステナビリティ、廃棄物管理等に関する国内法は EU 法に則っており、特に関連する法規制は以下の通りである⁸²。

- 排気量規制(Bundes-Immissionsschutzgesetz、略称 BImSchG；英語表記 Emission Control Act)
- 水管理規制 Water control and management under the Federal Water Resources Act (Wasserhaushaltsgesetz) (WHG)
- 土壌管理規制 Soil conservation under the Federal Soil Protection Act (Bundes-Bodenschutzgesetz) (BBodSchG)
- 自然・風景保護法 (Nature and landscape conservation under the Nature Protection and Landscape Conservation Act (Bundes-Naturschutzgesetz) (BNatSchG))
- 環境インパクトアセスメント法 (Environmental impact assessment under the Environmental Impact Assessment Act、(Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz) (UVPG))

economically sustainable future for the composites industry. ReDisCoveR は 2019 年 4 月発足

⁷⁸ Composites World <https://netcomposites.com/news/eu-define-frp-composite-recycling-regulations/>

⁷⁹ European Plastics Converters <https://www.plasticsconverters.eu>

⁸⁰ www.eucia.org

⁸¹ <http://www.upresins.org>

⁸² Environmental Law and Practice in Germany

https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/Document/I203078ff1cb611e38578f7ccc38dcbee/View/FullText.html?navigationPath=Search%2Fv1%2Fresults%2Fnavigation%2Fi0ad6ad3e00000175208b63309704f0fe%3FNav%3DKNOWHOW_UK%26fragmentIdentifier%3DI203078ff1cb611e38578f7ccc38dcbee%26parentRank%3D0%26startIndex%3D1%26contextData%3D%2528sc.Search%2529%26transitionType%3DSearchItem&listSource=Search&listPageSource=0c6dd9807c23c1ebdd7730468f49b7df&list=KNOWHOW_UK&rank=1&sessionScopeId=3f90aa4144a8812a49c9f1ea21854dd22f0604bc5a2d2299e133bc0821708a27&originationContext=Search+Result&transitionType=SearchItem&contextData=%28sc.Search%29&comp=pluk

ハ) 英国

関連する法規・規制・計画・規格には以下のようなものがある。

- 環境保護法 (Environmental Protection Act 1990)
環境汚染を防止、削減、要因排除することを定める法律。適用範囲（地域）はイングランド、ウェールズ、スコットランドである⁸³。
- 2018 環境 25 カ年計画 (Green Future 25 Year Environment Plan) ⁸⁴
英国政府が発表した環境行動計画。目的としては、プラスチック廃棄物の削減ほか、野生生物の保護（絶滅危惧種保護）、土壌回復、森林創出、密猟対策、プラスチック廃棄物対策での途上国支援、海洋保護区のネット EU 離脱後の政府の環境基準遵守を監査する独立した監査機関創設など。
- 廃棄物管理許可制 (Waste Management Licensing Regulations 1994 (WMLR)) ⁸⁵
環境保護法 1990 に則る廃棄物処理について、処理業を営む事業者への許認可を行う上での規制。指定の廃棄物管理研修を受講し、施設運用の認証を受けたものだけが廃棄物処理を行うことができる。
- サーキュラーエコノミーに関する規格 BS8001:2017 (Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations) ⁸⁶
企業や個人がサーキュラーエコノミーの目的である経済、環境、社会に資する資源の使い方を検討するためのガイドライン。
- 船舶使用材リサイクル規定 (The Ship Recycling Regulations 2019 [Facilities and Requirements for Hazardous Materials on Ships]) ⁸⁷
EU 船舶リサイクル指令に基づく運用を規定するもの。2015 船舶使用材リサイクル規定改訂版。
- 埋立規定 (Landfill Allowance Trading Scheme (England) and Landfill Allowance Scheme (Wales)) ⁸⁸
EU 埋立指令を英国に適用した法律。未処理廃棄物、液体廃棄物の埋立を禁止、hazardous と non-hazardous waste の同処理場への埋立も禁止した。また、家庭ごみからの有機ごみの埋立を禁じている。イングランド、ウェールズに適用、スコットランドと北アイルランドは多少条件が異なる。

⁸³ <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/1990/43/contents>

⁸⁴ 25 Year Environment Plan, “Green Brexit: Our waste, our resources: a strategy for England - Gov.uk”
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/765914/resource-s-waste-strategy-dec-2018.pdf

⁸⁵ <https://www.legislation.gov.uk/uksi/1994/1056/contents/made>

⁸⁶

<https://www.bsigroup.com/en-GB/about-bsi/media-centre/press-releases/2017/june/Ground-breaking-British-Standard-for-the-circular-economy-launched/>

⁸⁷ <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2019/277/contents/made>

⁸⁸ <http://www.environmentlaw.org.uk/rte.asp?id=243>

■ The Climate Change (Carbon Budgets) (Wales) Regulations 2018⁸⁹

気候変動 による地球の気温上昇を一定のレベルに抑える場合に想定される 温室効果ガスの累積排出量（過去の排出量と将来の排出量の合計）の上限値を定める「カーボンバジェット」について、英国は 2016 年、2032 年までに二酸化炭素排出量を 1990 年比で 57%削減するという目標を発表。その実現にむけて制定された法律。

■ 汚染防止・管理指令（大規模焼却場に関する指令、焼却指令、国別排出量上限指令の定義づけに関する指令）The Pollution Prevention and Control (Designation of Council Directives on Large Combustion Plants, Incineration of Waste and National Emission Ceilings) Order 2002⁹⁰

EU の焼却規制（2000/76/EC）、大規模焼却場からの特定汚染物質排出量規制（2001/80/EC on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants）、特定大気汚染物質国別排出上限指令（Council Directive 2001/81/EC on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants）の英国国内法適用指令。

二) フランス

フランス国内の廃棄物マネジメントの枠組みは「グルネル法第 I 法」（Grenelle I Law）、「グルネル法第 II 法」（Grenelle II Law）とよばれ、それぞれ 2009 年、2010 に採択されている。気候変動の緩和、生物多様性と自然景観の保全、健全な環境への寄与に関する目標と方針をベースに、グルネル第 I 法は建築物のエネルギー性能向上、交通問題、エネルギーと気候、生物多様性、工業的リスク、廃棄物管理、土壌汚染、企業の環境的責任、公的調査、環境アセスメント、施設分類等に関する全般的な規定を明記している⁹¹。グルネル法第 I 法において規定された目標を国家的な取り組み事項に落とし込んだものがグルネル第 II 法である。

具体的には、「グルネル法第 II 法」は有機廃棄物の大量生産者に対する「分別」義務付け（対象：食品小売業、外食産業、農業食品産業（製造業）、公園など）、廃棄物保管施設・焼却施設の容量制限、リサイクル・価値化（valorisation）の推進・強化（数値目標を設定）などを示す規定である⁹²。

⁸⁹ <https://www.legislation.gov.uk/wsi/2018/1303/contents/made>

⁹⁰ <https://www.legislation.gov.uk/ukxi/2002/2528/contents/made>

⁹¹ https://www.jetro.go.jp/ext_images/jfile/report/07000444/france_kankyo_seisaku.pdf

⁹² Recycling regulation in France

<https://www.paprec.com/en/understanding-recycling/recycling/recycling-regulation-france>

公益財団法人流通経済研究所「海外における食品廃棄物等の発生状況及び再生利用等実施状況調査」

https://www.maff.go.jp/j/shokusan/recycle/syoku_loss/pdf/hokoku.pdf

＜その他フランスにおける関連取組み＞

- 廃棄物処理場とその事業（者）は、環境保護目的に指定を受けた特定施設（ICPE; Installation Classée pour la Protection de l'Environnement)に指定されており、その運用は ICPE の規定に準ずることが義務付けられている。管轄は地方環境・開発・住宅局（Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement – DREAL）⁹³。
- 危険物輸送及び分類調和専門家委員会（The United Nations Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals = CETDGGHS）が策定した「危険物輸送に関する勧告(Recommendations on the Transport of Dangerous Goods)」のうち、特に「欧州危険物国際道路輸送協定(ADR)」（European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road / Economic Commission for Europe, Committee on Inland Transport UN 2012 2v.に則る運用が義務付けられ、回収者・運送者は事業者としての登記、産廃物の管理票（Waste manifest）が必須である⁹⁴。
- リサイクルに関しては、2020 年 2 月 10 日にサーキュラーエコノミー法を公布。同法は使い捨てプラスチック製品の禁止、消費者向け情報開示、廃棄物規制、製造者責任の大きく 4 つの柱で構成されおよそ 50 の廃棄に関する行動指針が設定された（Loi n° 2020-105 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire [Law No. 2020-105 Regarding a Circular Economy and the Fight Against Waste])⁹⁵。
- 車両（廃車）については、自主規制(1993)と ELV 管理法(Decree No 10)(2003 /3/13) の 2 法が適用される。内容は EC 自動車廃棄指令（2003/53/EC）同等⁹⁶。

ホ) イタリア

廃棄物規制に関して特に関連するのは ECA 第 4 部第 177 項―第 238 項であり、この中に以下のような内容が含まれる。

- 電気電子機器廃棄規制（Legislative Decree no. 49/2014 as amended by Law no. 37 of 3 May 2019）
- 医療廃棄物規制（Medical waste ; Presidential Decree no. 254 of 15 July 2003）
- 廃車廃棄規制（End-of-life vehicles (Legislative Decree no. 209 of 24 June 2003)）

⁹³ ICPE 検査局 <http://www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr>

⁹⁴ 国立国会図書館 https://rnavi.ndl.go.jp/research_guide/entry/1-2-2013320-the.php

⁹⁵ <https://www.loc.gov/law/foreign-news/article/france-new-anti-waste-law-adopted/>

<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/loi-anti-gaspillage>

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031044385>

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichLoiPreparation.do?idDocument=JORFDOLE000036562265&type=general&typeLoi=proj&legislature=15>

⁹⁶ 経産省 <http://www.env.go.jp/council/former2013/03haiki/y035-19/mat07.pdf>

- アスベスト混廃棄物処理規制 (Wastes and goods containing asbestos (Law no. 257 of 27 March 1992)
- 鉛蓄電池・蓄圧器の廃棄に関する規制 (Spent lead batteries and lead waste、 waste batteries and accumulators (WBA) ; Legislative Decree no. 188/2008)
- 使用済み鉱油廃棄規制 (Used mineral oils ; Legislative Decree no. 95 of 27 January 1992

2-2-4. 地域・国による rCF への開発支援策等

(1) 日本

日本では、2000 年以降において経済産業省や NEDO において、CF リサイクル技術の研究や、実証実験を行っている。熱分解法では化学繊維技術会全員会及び日本コークス工業が福岡県の大牟田市でのパイロットプラント建設及び実証実験を行った。その他カーボンフィアバーリサイクル工業や、ファインセラミックセンター等が開発を行っている。化学プロセスでは静岡大学などが技術開発を行っている。

日本のCFRPリサイクル関連プロジェクト概要 (2/2)

期間	委託元	テーマ	参加人員	目的	結果	予算
2008～2009年度	NEDO	平成20年度エコバリエーション推進事業「リサイクル炭素繊維シート材料の用途及び市場調査研究」	高安	高安では、再生炭素繊維及び再生炭素繊維を使用したシート材料（不燃布）について、特性評価を行い、その結果を参考に再生炭素繊維の活用を図りたいと考えている。平成20年度の「リサイクル炭素繊維の活用に関する実証実験」において、再生炭素繊維を用いたシート材料は、従来の不織布・織物と比べて、繊維の強度は通常の不織布や不織布と同等レベルだが、製造条件により強度が異なる。PET繊維を配合したシート材料でも体積抵抗率は低い。面状発熱体や、電磁波遮蔽用途に利用できる可能性もある。再生炭素繊維を利用できる可能性はある。同社製品が電線用シート材、パッキン、電子部品における断電取り置きでは、同社製品が電線用シート材、パッキン、ガスケット材、フィルター材、断熱材、耐熱材が有望とみられる。	炭素繊維の再生処理には、炭素繊維を焼くことがほとんどなく、機械的特性は若干劣化があったものの、ほとんどが維持されている。また、面状で500℃、不透気状態で1000℃の短時間加熱を行っている。不織布・織物の機械的強度はシート材料の試験用サンプルにおいては、不織布・織物とほぼ同等である。通常の不織布・布とは別次元であったが、製造条件により強度が向上する。PET繊維を配合したシート材料でも体積抵抗率は低い。面状発熱体や、電磁波遮蔽用途に利用できる可能性もある。再生炭素繊維を利用できる可能性もある。同社製品が電線用シート材、パッキン、ガスケット材、フィルター材、断熱材、耐熱材が有望とみられる。	平成20年度予算書他 4,164万円
2010～2012年度	NEDO	省エネルギー革新技术開発事業 先端研究「リサイクル炭素繊維の低コスト省エネ再生技術の研究開発」	カーボンファイバーリサイクル工業株式会社、国立大学法人 岐阜大学	【岐阜大学】 ・1次、2次加熱処理の小型ベンチ規模装置による開発 ・最適温度制御条件の確立と検証 ・再生炭素繊維の評価 【カーボンファイバーリサイクル工業】 ・切断、専用設備等の前処理段階の開発 ・パイロットプラントにおける運転試験 【共同で実施】 ・小型ベンチ試験装置で得られた運転条件の確認 ・通熱水蒸気によるガス化、粉砕排灰利用の研究	炭素繊維のリサイクル技術に関わるものであり、低コストで長繊維のまま、かつ炭素繊維が有する特性を維持したまま再生する技術の確立を目指したものであり、最終目標としては、24時間連続自動運転することによって、現状トータル33.6MJ/kgから40%の省 エネルギー（13.44MJ/kg）、処理コスト250円/kg 以下を実現する。またマトリックス由来不純物などリサイクル上の問題の抽出を行う	1年あたり年間1億円程度 (負担率1/)
2014～2016年度	NEDO	繊維的省エネルギー革新技术新プログラム 要約化開発「リサイクル炭素繊維の省エネルギー連続回収プロセスの開発」	カーボンファイバーリサイクル工業株式会社、国立大学法人 岐阜大学	リサイクル炭素繊維の製造プロセスの省エネ化(実用化フェーズ)	炭化炉削減熱量 8.99MJ/kg-GF(最大56%達成) + 焼成炉削減電力 11.82MJ/kg -GF(最大95%達成) システム全体の削減消費 熱量 2041MJ/kg-GF(最大 60%達成) 省エネ目標の達成により 処理コスト250円/kg-GF の算出が可能と見込まれた。	1年あたり年間3億円程度 助成(助成率:2/3以内)
2017年度～2013年度	知の拠点あいち	「知の拠点あいち」重点プロジェクト事業、低環境型次世代ナノマイクロ加工技術の開発プロジェクト「通熱水蒸気による炭素繊維強化プラスチックからの繊維回収」	ファイナセラムシグマセンター	GFRPの(低コスト化)時 表の炭素繊維の飛散防止の増大を同時に解決するため、通熱水蒸気を利用して低環境な省エネの処理により、GFRPから炭素繊維を植物状態まで回収するリサイクル技術を開発する。	(1) CFRP(樹脂: Polyamide 66) を500℃以上の通熱水蒸気で短時間処理することにより、長繊維状態が可能である。また、繊維状態で回収できることから、材料トレーサビリティを確保することが可能である。 (2) 通熱水蒸気処理により回収した繊維は、他の熱処理法(大気中、A中)に比べ、湿度の低下とそのバラツキが小さい。	-
2014～2016年度	中部経済産業局	26年度 戦略的基盤技術高度化支援事業(サポーン事業)「革新型省エネ革新品位リサイクル繊維 連続回収システムの開発」	認定事業者：豊功工業㈱(岐阜県) 共同研究者：(一財)フライングセラミックスセンター(愛知県) アドバイザー：トヨタ自動車㈱(愛知県)、アドバンサー・テクノロジー㈱(愛知県)、東洋大学(東京都)	本研究では、高温の通熱水蒸気を用いて、CFRP廃材から繊維を連続回収する「処分システム(オートクリン方式)」を開発する。その後炭素繊維部との分離により生じた可燃性ガスを燃焼させて、処理用の高温通熱水蒸気を生成することによって、処理用エネルギーの大幅削減に貢献する。また、通熱水蒸気処理時に繊維表面改質層を添加することで、優れた樹脂接着性を有する高品位なリサイクル繊維の回収が可能になる。	炭素繊維の再生処理では、炭素繊維を焼くことがほとんどなく、機械的特性は若干劣化したものの、ほとんどが維持されている。また、面状で500℃、不透気状態で1000℃の短時間加熱を行っている。不織布・織物の機械的強度はシート材料の試験用サンプルにおいては、不織布・織物とほぼ同等である。通常の不織布・布とは別次元であったが、製造条件により強度が向上する。PET繊維を配合したシート材料でも体積抵抗率は低い。面状発熱体や、電磁波遮蔽用途に利用できる可能性もある。再生炭素繊維を利用できる可能性もある。同社製品が電線用シート材、パッキン、ガスケット材、フィルター材、断熱材、耐熱材が有望とみられる。	交付決定額 4,164万円
2014～2022年度	NEDO	革新的新規機軸材料等技術開発(熱可塑性GFRPの開発)	名古屋大学、産業技術総合研究所、島津製作所、トヨタ自動車、本田技術研究所、スズキ、東し、帝人、アインテック、共和工業、SUBARU、福井ファイバー、KADO、トヨカスカスマイジング&ディベロップメント、フライングセラミックスセンター、豊功工業、コニカミネルタ	2018～2020年度 ・リサイクルGFRP回収技術の研究を行い、LFT-D案件に適応する基本プロセスを開発を行う。 ・リサイクルGFRPを用いたLFT-D形状プロセスおよびLFT-D廢材の再利用技術、並びに設備システムの研究を行う 2021～2022年度 ・リサイクルGFRP回収技術を確立する。 ・リサイクルGFRPのLFT-D形状技術、およびLFT-D廢材のリサイクル技術を開発する	-	-
2015年度～2017年度	NEDO	平成27年度戦略的省エネルギー革新技术新プログラム 採択テーマ「革新省エネルギー一般廃棄物法による高効率リサイクル 炭素繊維製造技術の開発」	東し株式会社 豊田通商株式会社	炭素繊維のリサイクルプロセスに関して、マトリックス樹脂の可能性と、炭素繊維を乾燥して再利用する「革新省エネルギー一般廃棄物」を開発し、製造エネルギーの処理的な省エネを図る。	2016年度に豊田(オクモ)エンジニアリング(愛知県半田市)に設置、バーンオフ対比で製造エネルギーを1/10に低下させることができた。さらに、従来採取していた部分廃屑によるエネルギーよりも大幅に低下させることができた。	-

(2) 欧州

EU のファンディングシステムとしては **Horizon 2020** が代表的である。これは全欧州規模で実施される研究及び革新的開発を促進するための欧州研究・イノベーション枠組み計画 **Framework Programme (FP)** で、2014～2020 年にわたり約 800 億ユーロ（約 10 兆円）に上る EU からの公的資金が投入されている。

Boeing や Ford 等の完成品メーカーだけでなく、Advanced Composites Group 等の成形メーカー、ELG Carbon Fibre（旧：Recycled Carbon Fibre Ltd／Milled Carbon Group）といった CF リサイクル企業等が一体となって開発が進められている。

以下に CFRP リサイクル関連のプロジェクト一覧及びプロジェクト概要を記す。これらのなかには CFRP リサイクルそのものを対象としたプロジェクトのほか、航空機や風力発電機のリサイクルの一環として CFRP リサイクルの研究に取り組んでいるものもある。

表 2-25. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト一覧 (1/5)

プロジェクト名称	期間	総予算	受益者	
			コーディネーター	パートナー
HIRECAR リサイクル炭素繊維から高品位な複合材料製造	2008年から2010年まで	£341,637.00	英国The University of Nottingham	米国Ford, 東邦デナツクス, 英国Advanced Composites Group, 英国Technical Fibre Products
AFRECAR 手ごろな価格のリサイクル炭素繊維	2008年から2010年まで	£900,000.00	米国Boeing, 米国Ford Motor Company	英国Advanced Composites Group, 英国Technical Fibre Products, 東邦デナツクス, Milled Carbon
リサイクル炭素繊維のリサイクル技術	2010年から2012年まで	不明	(いづれもドイツ) FIBER, Technische Universität Chemnitz, Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V., AKE Systemtechnik GmbH, HUSTER Sondermaschinenbau und Metallbau GmbH & Co. KG, SMK V-Fabrik GmbH & Co. KG, ASGLAWO technofibre GmbH, ERMAFA Sondermaschinen- und Anlagenbau GmbH	
HVRCFM リサイクルされた炭素繊維の糸とテープの高価値の布と材料への変換	2011年10月1日から 2013年9月30日まで	250,000.00 €	英国SIGMATEX (UK) LIMITED	英国Tilisatec
SUSRAC 航空機複合材料の持続可能なリサイクル	2011年12月1日から 2013年11月30日まで	139,626.00 €	イタリアCONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE	スペインFUNDACION TECNALIA RESEARCH & INNOVATION
CRESIM 高速離型 高圧スプレー噴射を使用した、再生炭素繊維からのエネルギー効率の高いCFRP再製造	2012年8月1日から 2016年1月31日まで	2,070,040.00 €	イタリアAFROS SPA	イタリアTECNOS SpA (CANNONホールディング)
SELFRAG CFRP 繊維強化複合材料をリサイクルするための高電圧パルスプラズマメーショニング技術	2012年10月1日から 2014年5月31日まで	435,000.00 €	スイス SELFRAG AG	-
GENVIND	2012年から2016年まで	DKK 43,500,000.00	デンマークDanish Technological Institute	風力タービン業界、建築部門、カラー/ラッカー業界などのデンマーク企業。 デンマークTechnical University of Denmark, デンマークAalborg University Esbjerg, 英国University of Nottingham, デンマークFORCE Technology, イノベーションネットワークとデンマークガラスネットワーク連盟
IRECE 乳化によるCFRPリサイクル	2013年4月1日から 2014年3月31日まで	227,350.00 €	イタリアCONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE	イタリアResnovadie, イタリアICTP
EXHUME 製造における異種材料の効率的なセクター使用	2013年から2016年まで	£1,420,000.00	Cranfield University	英国Innovate UK (formerly the Technology Strategy Board), 英国National Composites Centre, industry (フランスAirbus Group, 英国EnginSoft UK Ltd, 英国Kirtan Kayaks Ltd, 英国Lanner Group Ltd, 英国 (米国) Meggitt Aircraft Braking Systems and TWI Ltd) and other institutions (英国universities of Birmingham, 英国Manchester and 英国Exeter).

出典：矢野経済研究所作成

欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト (2/5)

プロジェクト名称	期間	総予算	受益者	
			コーディネーター	パートナー
FIBRALSPEC コスト効率と調整された特性を備えた新しい前駆体から開発された機能化された革新的な炭素繊維	2014年1月1日から 2017年12月31日まで	8,126,545.99 €	ギリシャNATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS - NTUA	イタリアPolitecnico di Torino、英国University of Birmingham、フランスThales Research and Technology、英国Global Safeguard LTD、英国Open source management LTD、ポルトガルAnthony、Patrick & MurtaExportação、ウクライナFrantsevich Institute for problems of materials science、英国CTM Equipment Limited、ウクライナYuzhnoye SDO、チェコEuromobilita sro
ForCycle 金属-プラスチック複合材料およびハイブリッド材料のリサイクル	2014年から2016年まで	不明	ドイツUniversity of Augsburg	ドイツFraunhofer IVV
TPC Cycle	2015年9月から2019年まで	不明	オランダTPRC	オランダToray Advanced Composites (Toray Group)、オランダNido Recycling Techniek、DTC、オランダCato Composite Innovations、英国GKN Fokker Aerostructures、オランダSaxion Lectoraat Industrial Design
RESET 熱可塑性複合材料の再利用	2016年1月1日から 2018年4月30日まで	349,156.25 €	スペイン ACONDICIONAMIENTO TARRASENSE ASOCIACION	フランスAXYAL S.A.S.
ECO-COMPASS 航空機の内部および二次構造に適用するための生態学的および多機能複合材料	2016年4月1日から 2019年6月30日まで	1,893,685.00 €	ドイツDEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT - UND RAUMFAHRT EV	フランスAIRBUS、英国THE UNIVERSITY OF MANCHESTER、スペインCENTRE INTERNACIONAL DE METODES NUMERICS EN INGENYERIA、スペインACONDICIONAMIENTO TARRASENSE ASSOCIACION、ギリシャPANEPISTIMIO PATRON、ポルトガルINEGI - INSTITUTO DE CIENCIA E INOVACAO EM ENGENHARIA MECANICA E ENGENHARIA INDUSTRIAL、フランスUP SAS
Dreamwind 風力エネルギーのためのリサイクル可能な先端材料の設計	2016年から 2020年まで	26,800,000.00 €	デンマークAarhus University	デンマークVestas、デンマークDanish Technological Institute
ReRoBalsa 断熱材の製造に向けたパルサ材/発泡体を回収するためのローターブレードのリサイクル	2017年1月8日から 2019年3月1日まで	不明	ドイツFraunhofer WKI	Technische Hochschule Nürnberg (Nuremberg Tech)、ドイツMATETEC、ドイツKovalex GmbH、ドイツBINOS GmbH

出典：矢野経済研究所作成

欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト一覧 (3/5)

プロジェクト名称	期間	総予算	受益者	
			コーディネーター	パートナー
FiberEUse 寿命末期の繊維強化複合材料の再利用に基づく新しい循環経済バリューチェーンの大規模なデモンストラーション	2017年6月1日から 2021年9月30日まで	11,943,963.75 €	イタリアPOLITECNICO DI MILANO	イタリアCONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE、イタリアRivierasca S.p.A.、フランスNOVELLINI FRANCE S.A.R.L.、イタリアHOLONIX SRL-SPIN OFF DEL POLITECNICO DI MILANO、スペインFUNDACION TECNALIA RESEARCH & INNOVATION、スペインSiemens Gamesa Renewable Energy、スペインBATZ SOCIEDAD COOPERATIVA、スペインMAIER SCOP、スペインAernnova Aerospace S.A.U.、フィンランドTampere University、ドイツFRAUNHOFER GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.、英国UNIVERSITY OF STRATHCLYDE、ドイツEDAG ENGINEERING GMBH、ドイツINVENT INNOVATIVE VERBUNDWERKSTOFFEREALISATION UND VERMARKTUNG NEUERTECHNOLOGIEN GMBH、イタリアGREEN COAT SRL、オーストリアHEAD Sport GmbH、オーストリアSAUBERMACHER DIENSTLEISTUNGS AG、オーストリアdesignaustria、ドイツAVK-INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTARKTEKUNSTSTOFFE EV
ECOBULK パルク製品と車内部品のコブデザインは循環プロセス	2017年6月1日から 2021年11月30日まで	11,790,041.52 €	スペインUNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA、英国Exergy	イタリアIstituto per i Polimeri Compositi e Biomateriali (IPCB-CNR)、英国Cranfield University、イタリアCentro Ricerche Fiat、フランスFrench Inst. of Tech. for Forestbased and Furniture Sector (FCBA)、スペインInstituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística (ITENE)、イタリアNext Technology、オランダTechnische Universiteit Delft、スペインUniversitat Politècnica de Catalunya - MCI、オランダAkzoNobel、トルコKastamonu Entegre (KEAS)、スペインMAIER、イタリアTechnoplasts srl、ルウェーモラ、フィンランドConenor Ltd、英国Granta Design Ltd、スペインIRIS、KNEIA、英国Microcab、ドイツTECNARO GmbH 等 計28社
ECOBULK パルク製品と車内部品のコブデザインは循環プロセス	2017年6月1日から 2021年11月30日まで	11,790,041.52 €	スペインUNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA、英国Exergy	イタリアIstituto per i Polimeri Compositi e Biomateriali (IPCB-CNR)、英国Cranfield University、イタリアCentro Ricerche Fiat、フランスFrench Inst. of Tech. for Forestbased and Furniture Sector (FCBA)、スペインInstituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística (ITENE)、イタリアNext Technology、オランダTechnische Universiteit Delft、スペインUniversitat Politècnica de Catalunya - MCI、オランダAkzoNobel、トルコKastamonu Entegre (KEAS)、スペインMAIER、イタリアTechnoplasts srl、ルウェーモラ、フィンランドConenor Ltd、英国Granta Design Ltd、スペインIRIS、KNEIA、英国Microcab、ドイツTECNARO GmbH 等 計28社

出典：矢野経済研究所作成

欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト一覧 (4/5)

プロジェクト名称	期間	総予算	受益者	
			コーディネーター	パートナー
AIRPOXY 熱成形可能で、修復可能で接着可能なsmart ePOXYベースのエアロ構造用複合材料	2018年9月1日から 2022年2月30日まで	6,497,512.50 €	スペインFUNDACION CIDETEC	スペインCIDETEC、ドイツInstitut für Verbundwerkstoffe GmbH、ベルギーCoexpair SA、スペインEURECAT、イタリアEnteComposites Teoranta、スペインIngeniería y Desarrollos en Composites, S.L (IDEC)、ベルギーSociété Nationale de Construction Aéronautique SA (SONACA)、ギリシャUniversity of Ioannina、フランスAltair Engineering France SARL、フランスARTTIC SAS、スペインAsociación Española de Normalización
R3FIBER 資源効率の高い循環経済のための複合材料リサイクルにおけるエコノバージョン	2018年9月1日から 2018年8月31日まで	71,429.00 €	スペインTHERMAL RECYCLING OF COMPOSITES, SOCIEDAD LIMITADA	-
Repair3D 高度な3D印刷アプリケーションのためのプラスチック廃棄物のリサイクルと転用	2019年1月1日から 2023年1月31日まで	5,998,832.50 €	イタリアWarrant Hub S.p.A.	ギリシャThe National Technical University of Athens、ベルギーGhent University、スペインFundació Eurecat、スペインInstituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística (ITENE)、スペインCentro Tecnológico LEITAT、フランスInstitut de Recherche Technologique Jules Verne (IRT JULES VERNE)、英国Sigmamex Ltd.、ギリシャAdamant Composites (ADCO)、英国Cambridge Nanomaterials Technology Ltd.、Techedge S.p.a.、イタリアCalzaturificio Dal Bello Srl、ベルギーCenter Scientific & Technique de L'Industrie Textile Belge、スペインMaier Scoop、スペインBioG3D- New 3D Printing Technologies、ベルギーInnovation in Research and Engineering Solutions (IRES)、ギリシャYiotis Anonimos Emporiki & Viomixaniki Etairia.、ギリシャLavrion Technological and Cultural Park (LTCP)
CUSTOMIZE ポリマーおよびメント系複合材料の機械的特性を改善するためのリサイクル廃棄物繊維の新しいレーザードサイジング戦略	2019年4月1日から 2021年9月30日まで	499,858.75 €	スペインACONDICIONAMIENTO TARRASENSE ASSOCIACION	フランスRESCOLL、フランスALPHA RECYCLAGE COMPOSITES
CIRCE 炭素繊維アブリグの循環経済モデル	2019年9月1日から 2022年8月31日まで	2,278,694.00 €	イタリアHPDインボシットSPA	イタリアCETMA (CENTRO DI RICERCHE EUROPEO DI TECNOLOGIE DESIGN E MATERIALI)、イタリアPETRO (PETROCERAMICS SPA)、イタリアALCI (ALCI SRL)、イタリアBASEPRO (BASE PROTECTION SRL)
d-CFRPs 最先端のナノ改質技術を使用し、機械的特性、破壊特性、疲労特性を調整した高性能の再生炭素繊維強化プラスチックの開発	2019年9月2日から 2021年9月1日まで	187,572.48 €	オランダTECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT	-

出典：矢野経済研究所作成

欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト一覧 (5/5)

プロジェクト名称	期間	総予算	受益者	
			コーディネーター	パートナー
Green-Insulation Green-Techファイバー断熱材	2019年12月1日から 2020年4月30日まで	71,429.00 €	デンマークMILJOSKAERM APS	-
MANIFICA Recycling リサイクル炭素繊維による製造と革新	2020年1月1日から 2023年9月30日まで	2,116,783.75 €	フランスUNIVERSITE DE BORDEAUX	フランスTORAY CARBON FIBERS EUROPE SA、フランスVESO Concept、フランスPAPREC FRANCE
HELACS 使用済み航空機複合構造における費用効果の高い持続可能な管理のための全体的なプロセス	2021年1月1日から 2023年12月31日まで	1,918,500.00 €	スペインFUNDACION AITIIP	スペインCONSORCIO AERODROMO AEROPUERTO DE TERUEL、ベルギー-CENTRE SCIENTIFIQUE & TECHNIQUE DEL'INDUSTRIE TEXTILE BELGE ASBL、英国ELG CARBON FIBRE LIMITED
LEVIS エコデザインと循環経済戦略の統合による持続可能な電気自動車のための高度な軽量材料	2021年2月1日から 2024年1月31日まで	5,570,578.75 €	スペインINSTITUTO TECNOLÓGICO DE ARAGON	イタリアMARELLI SUSPENSION SYSTEMS ITALY SPA、フランスMERSEN FRANCE ANGERS SAS、イタリアPRIVE' SRL、トルコYESILOVA HOLDING AS、トルコTOFAS TURK OTOMOBIL FABRIKASI ANONIM SIRKETI、スペインASOCIACION DE INVESTIGACION METALURGICA DEL NOROESTE、フランスASSOCIATION POUR LE DEVELOPPEMENT DE L'ENSEIGNEMENT ET DES RECHERCHES AUPRES DES UNIVERSITES, DES CENTRES DE RECHERCHE ET DES ENTREPRISES D'AQUITAINE、スペインLEARTIKER, SCOOP、スウェーデンRISE SICOMP AB、フランスCOMMISSARIAT A L ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES、オランダSTICHTING CENEX NEDERLAND、ドイツSTEINBEIS INNOVATION GGMHBH

出典：矢野経済研究所作成

表 2-26. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	HIRECAR リサイクル炭素繊維からの高品位な複合材料製造		
	HIRECAR High value composite materials from REcycled CARbon fibre		
プロジェクトアレンス	不明		
期間	2006年から2008年まで		
総予算	£341,637.00	英国貿易産業省からの支援	£341,637.00
受益者	英国The University of Nottingham		
	米国Ford、東邦テナックス、英国Advanced Composites Group、英国Technical Fibre Products		
目的	自動車サブライチェーン上の組織を集め、高品位・低コストのリサイクル炭素繊維製造を目的としたプロジェクトである。リサイクル時の炭素繊維の繊維長は短く、BMC (Bulk Moulding Compound) やSMC (Sheet Moulding Compound) により、自動車のボディパネルや構造部材等への使用が想定されており、最終的には自動車の50%以上をそのようなリサイクル炭素繊維で構成することを目指している。 ・既存のSMC成形技術を活かし、部分的に3D構造をした平板構造部品の形成 ・鋳造アルミニウムよりも優れた構造特性を有する大きな3D構造部品の形成 ・新規製造方法を用いた小さな3D部品の形成		
結果	-		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-27. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	AFRECAR 手ごろな価格のリサイクル炭素繊維 AFRECAR Affordable Recycled Carbon Fibres		
プロジェクトアレンス	不明		
期間	2008年から2010年まで		
総予算	£900,000.00	英国技術戦略委員会からの支援	£900,000.00
受益者	コーディネーター	米国Boeing、米国Ford Motor Company	
	パートナー	英国Advanced Composites Group、英国Technical Fibre Products、東邦デナックス、Milled Carbon	
目的	HIRECARの派生プロジェクト。ハッティンガム大学がそれまでに行っていた炭素繊維・複合材料リサイクルに関する研究が出发点となっているリサイクル炭素繊維の自動車分野への応用に関するプロジェクトである。炭素繊維・複合材料リサイクルに関する課題として、以下2点を挙げている。 ・リサイクル炭素繊維の機械特性の向上、 ・リサイクルプロセスの改善 これらの課題に対して、以下に示すようなアプローチで、宇宙航空業用と自動車業用の高品位なリサイクル炭素繊維の開発を行っている。 ・リサイクル炭素繊維を用いた従来よりも繊維含有量の多く、低コスト・高強度の複合材成形・開発。 ・超臨界流体プロセス（supercriticalfluidprocessing）を用いて、高品位のリサイクル炭素繊維回収。および接着時等に用いられるポリマー樹脂の回収。 ・大規模・高効率な炭素繊維・複合材料リサイクル技術の確立。		
結果	－		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-28. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称		リサイクル炭素繊維のリサイクル技術 Verwertungstechnologien für rezyklierte Kohlenstofffasern (Recycling technologies for recycled carbon fibers)	
プロジェクトアブレンス		FKZ VP2444804VT0	
期間		2010年から2012年まで	
総予算		不明	連邦経済技術省 (BMW) の中央イノベーションプログラム (ZIM) からの支援 不明
受益者	コーディネーター	(いづれもドイツ) FIBER, Technische Universität Chemnitz, Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V., AKE Systemtechnik GmbH, HUSTER Sondermaschinenbau und Metallbau GmbH & Co. KG, SMK V-Fabrik GmbH & Co. KG, ASGLAWO technofibre GmbH, ERMAFA Sondermaschinen- und Anlagenbau GmbH	
	パートナー		
目的		・リサイクル炭素繊維の新たなアプリケーションを開拓。 ・リサイクル炭素繊維を用いた新たな特性を持つ繊維リリース製造のためのプロセス技術の開発。 ・炭素繊維ロービングの残留ボビン (残留炭素繊維) 回収のための機器の開発。 ・Organofolils (強化熱可塑性及びリサイクル炭素繊維で箔を作成) の長繊維加工技術の開発。 ・新しいリサイクル炭素繊維から製造されたCFRPを製造するための工程や技術開発。	
結果		-	

出典：矢野経済研究所作成

表 2-29. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	HVRCFM リサイクルされた炭素繊維の糸とテープの高価値の布と材料への変換			
	HVRCFM The Conversion of Recycled Carbon Fibre Yarn and Tape Into High Value Fabrics and Materials			
プロジェクトアレンス	FP7-JTI Grant agreement ID: 296722			
期間	2011年10月1日から2013年9月30日まで			
総予算		250,000.00 €	EUからの支援	187,500.00 €
受益者	コーディネーター	英国SIGMATEX (UK) LIMITED		
	パートナー	英国Tilsatec		
目的	このプロジェクトは、リサイクルまたは回収された炭素繊維の供給源を特定し、他の適切な原材料とブレンドすることによって補強材に変換する技術を開発することを目的とする。これらの補強材は、さまざまな用途の複合部品を製造するために、最終的に熱硬化性または熱可塑性樹脂と組み合わせることができる。			
結果	ドライプリプレグを提供するために、費用対効果の高いrCF / PA66非圧着二軸配向繊維を製造するための新しいプロセスを開発した。NCF熱可塑性プリプレグ (400g / m ²) は、軽量複合用途向けの有望な材料と見なすことができる。rCFは比較的整列しており、マトリックス繊維と十分に分散/ブレンドされていることがわかった。したがって、NCF熱可塑性複合材料の優れた機械的特性を達成した。しかしながら、より細い樹脂繊維、繊維のより良い混合、および改善された複合材料製造技術を使用することによって、特性がさらに改善されたと考えられる。			
	新しい費用対効果の高いrCF熱硬化性非圧着二軸配向繊維が廃棄CFから開発されたが、NCF熱硬化性プリプレグには非常に低い割合のCFが含まれている。ファブリックプリプレグは非常に軽量 (300g / m ²) であり、複雑な複合形状に適していることがわかった。rCF / エポキシ複合材料の機械的特性も、ラミネートのCF%に基づいて良好であることがわかったが、プリプレグのCF%を増やすことでさらに改善できる。また、NCFは、樹脂フィルム積み重ねよりも樹脂注入プロセスに適していることがわかり、機械的特性が向上する可能性がある。			
	熱可塑性および熱硬化性複合材料の両方の用途のNCFは、バージンCFおよびガラス繊維複合材料の潜在的な代替品として多くの用途の複合材料エンドユーザーにとって魅力的な材料になり得る。廃棄物/リサイクルCFからのNCF製造プロセスは、廃棄物繊維を現在廃棄物に一般的に使用されているものよりも価値の高い複合製品に再利用するための適切なプロセスの1つとなる。			

出典：矢野経済研究所作成

表 2-30. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	SUSRAC 航空機複合材料の持続可能なリサイクル			
	SUSRAC Sustainable recycling of aircrafts composites			
プロジェクトアレンス	FP7-JTI Grant agreement ID: 296546			
期間	2011年12月1日から2013年11月30日まで			
総予算		139,626.00 €	EUからの支援	104,717.50 €
受益者	コーディネーター	イタリアCONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE		
	パートナー	スペインFUNDACION TECNALIA RESEARCH & INNOVATION		
目的	このプロジェクトは、使用済み航空機の解体から得られる熱硬化性および熱可塑性炭素繊維強化複合材料のリサイクルに対する、持続可能で費用効果の高い、純粋に物理的なアプローチを開発することを目的とする。			
結果	(1) マトリックスとファイバーの両方の観点から、材料の特性評価を目的とした適切な分析手法を開発した。この手順は、材料のデータシートによって提供される情報とともに、最良のリサイクルおよび再利用オプションの考案にも役立つ。 (2) リサイクルされた化合物は、自動車、内装、屋外の設計、および航空機産業の非構造部品に使用される。リサイクルされた化合物の機械的、熱的、および耐老化性の特性の改善は、適切な相溶化剤の使用によって得られる。熱可塑性コンポーネントが関係している場合、適切な熱可塑性樹脂を加えることで、形態と引き張り、衝撃および動的機械的性質の観点から特徴を付与できる。 (3) 熱硬化性樹脂に関する活動は、安定化された繊維強化エポキシベースの複合材料をリサイクルするための新しい方法を開発した。①500ミクロン以下の粒子を得るために、適切な粉碎システムを調査して、複合材料の寸法を縮小した。②独自のプロセスに従って、得られた顆粒を流動化ポリマーマトリックスと混合し、少なくとも50wt%の熱可塑性および/または熱硬化性残留物を含む流体複合材料の製造を目指した。③得られたコンパウンドを、屋外用家具（タイル、フローリングなど）に使用できるさまざまな厚さの固体プレート、または従来の射出成形装置で処理してテーラードシェイプの製品を得るポリマー顆粒に加工した。			

出典：矢野経済研究所作成

表 2-31. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	CRESIM 高速離型高圧スプレー噴射を使用した、再生炭素繊維からのエネルギー効率の高いCFRP再製造 CRESIM Energy-efficient CFRP remanufacture from regenerated carbon fibres, using fast demoulding high pressure spray injection			
プロジェクトアレンス	LIFE11 ENV / IT / 000095			
期間	2012年8月1日から2016年1月31日まで			
総予算	2,070,040.00 €		EUからの支援	1,017,520.00 €
受益者	コーディネーター	イタリアAFROS SPA		
	パートナー	イタリアTECNOS Spa (CANNONホールディング)		
目的	CRESIMプロジェクトの目的は、リサイクル炭素繊維から炭素繊維強化ポリマー（CFRP）複合材料を製造するための、高速離型と高圧注入、スプレー、液体レイダウンを含む革新的なパイロットプロセスを実証すること。			
結果	CRESIMプロジェクトは、リサイクルされた炭素繊維からCFRPを製造するための革新的なパイロットプロセスを実証した。このプロジェクトでは、市場に出回っている炭素繊維を分析し、炭素繊維をさまざまな用途にリサイクルするための高圧注入、スプレー、液体レイダウン成形プロセスを開発した。各アプリケーションは、ライフサイクルアセスメント（LCA）とその潜在的な市場価値の観点から分析された。 プロジェクトチームは、最初に市場で入手可能なさまざまなタイプの炭素繊維を特徴づけたのち、リサイクル炭素繊維を使用した製造用にプロセスラインを最適化された。プロジェクトチームは、デモンストレーション用のパイロットプラントを設計および組み立て、さまざまなタイプの複合材料を製造するためのいくつかの産業プロセス（繊維との組み合わせを含む）を開発した。CFRPは、スプレー、リキッドレイダウン、または閉じた金型への高圧注入を使用して、開いた金型内の高速反応樹脂に含浸した。プロセスラインの2つの革新的なコンポーネントである「横方向制御付きインジェクター」と「中空キャビティコア除去」が特許を取得した。これらのラインで、プロジェクトチームはさまざまな産業用アプリケーション用に13個の部品を製造した（例：エンドユーザーから提供された仕様に基いて、リサイクルされた炭素繊維を使用したパラバンデナ、車のバンパー、スケートボード、ロボットアーム）。これらのデモンストレーションピースの機械的特性は、65回の試行と多くの実験室テストを通じて得られた。			

出典：矢野経済研究所作成

表 2-32. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	SELFrag CFRP 繊維強化複合材料をリサイクルするための高電圧パルスフラグメンテーション技術 SELFrag CFRP High Voltage Pulse Fragmentation Technology to recycle fibre-reinforced composites		
プロジェクトアブレンス	FP7-JTI Grant agreement ID: 323454		
期間	2012年10月1日から2014年5月31日まで		
総予算	435,000.00 €	EUからの支援	217,500.00 €
受益者	コーディネーター	スイス SELFrag AG	
	パートナー	－	
目的	主な目的は、CFRP処理のための特定の電気力学的フラグメンテーションプラントを実装し、損傷していない炭素繊維を回収し、航空機からの寿命の切れたCFRP複合材料を実際にリサイクルすること。SELFragは、電気力学的フラグメンテーション装置の製造業者および専門家であり、CleanSkyイニシアチブ内でデモンストレーターを開発する。		
結果	・電気力学的フラグメンテーションにより、2kWh/kg未満のエネルギーレベルでさまざまなCFRP材料を処理。 ・熱硬化性CFRPの処理は、ポリマーからの繊維の遊離が良好であることを確認。 ・PEEK系CFRPの処理は、追加の処理を必要とせずに直接リサイクルの可能性を確認。レオロジー試験では、材料強度の低下はわずかであり、リサイクル率は60%を超えた。 ・ラボからデモンストレーター規模までのプロセス開発の成功を確認した。 ・大きなCFRPコンポーネントも電気力学的フラグメンテーションによって処理できることを実証した。 ・最高のデモンストレーター設定は、1.2kWh/kgを使用して5.65kg/hのスループットを達成した。		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-33. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	GENVIND		
プロジェクトアレンス	不明		
期間	2012年から2016年まで		
総予算	DKK 43,500,000.00	デンマーク科学技術革新庁からの支援	DKK 19,000,000.00
受益者	コーディネーター	デンマークDanish Technological Institute	
	パートナー	風力タービン業界、建築部門、カラー/ラッカー業界などのデンマーク企業。 デンマークTechnical University of Denmark、デンマークAalborg University Esbjerg、英国University of Nottingham、デンマークFORCE Technology、イノベーションネットワークとデンマークプラスチック連盟	
目的	GENVINDの目的は、デンマークにおいて複合材料の持続可能なリサイクルのための新規および既存の戦略を特定および開発することにある。このコンソーシアムは、家具、スケートボード、建築部品や塗料などのさまざまな製品、コンポーネント、構造で廃棄物を再利用できることを実証することを目的とする。コンソーシアムは、デンマーク政府が提示した資源戦略をサポートしている。GENVINDは、この戦略に沿って、廃棄物を環境と産業の利益のために新しい資源として再利用するサイクルに再導入することを指す。		
結果	記述なし		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-34. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	IRECE 乳化によるCFRPリサイクル IRECE INDUSTRIAL RECYCLING OF CFRP BY EMULSIFICATION		
プロジェクトアレンス	FP7-JTI Grant agreement ID: 335277		
期間	2013年4月1日から2014年3月31日まで		
総予算		227,350.00 €	EUからの支援 164,450.00 €
受益者	コーディネーター	イタリアCONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE	
	パートナー	イタリアResnovadie、イタリアICTP	
目的	主な目的は、ポリスチレンマトリックスとCFRP分散相に基づく熱可塑性の高充填複合材料の工業生産により、航空機産業の環境への影響を軽減すること。これらの材料の回収とリサイクルを検討し、航空産業や製造業の他のセクター向けの製品として使用される熱可塑性材料を製造すること。		
結果	CFRPの変換と再利用プロセスは、EPSと乳化剤のゲル溶液の作成に基づいて実施した。この溶液では、CFRPの粉末または粉砕部分を分散させて、最終構成で70wt%のCFRPと30%のEPSで構成される混合物を生成した。これにより、実験室での実験プロセスの開発が可能になった。これは、実験段階の結果を工業プロセスの実現に適用できるようにするために必要なすべてのソリューションを検出している。得られた材料には、軽さ、堅牢性、耐疲労性、成形性の特徴がある。		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-35. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	EXHUME 製造における異種材料の効率的なXセクター使用 EXHUME Efficient X-sector use of Heterogeneous Materials in Manufacturing		
プロジェクトアレンス	不明		
期間	2013年から2016年まで		
総予算		£1,420,000.00	Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) からの支援 不明
受益者	コーディネーター	Cranfield University	
	パートナー	英国Innovate UK (formerly the Technology Strategy Board), 英国National Composites Centre, industry (フランスAirbus Group, 英国EnginSoft UK Ltd, 英国Kirkton Kayaks Ltd, 英国Lanner Group Ltd, 英国 (及び米国) Meggitt Aircraft Braking Systems and TWI Ltd) and other institutions (英国universities of Birmingham, 英国Manchester and 英国Exeter).	
目的	複合材料は多様な（不均一な）組成と性質を有するためリサイクルが困難であることから、これらの材料をリサイクルおよび再製造するための新しいプロセスの開発を目的とする。		
結果	複合材料における材料の性能を維持/改善しながら、最小限のエネルギー、水、コストでスクラップの再利用を促進するための新しいプロセスエンジニアリング技術、材料の再利用を可能にするための最適化された製造プロセス、再処理されたスクラップを組み込んだ新しい製造プロセスを開発した。		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-36. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	FIBRALSPEC コスト効率と調整された特性を備えた新しい前駆体から開発された機能化された革新的な炭素繊維		
	FIBRALSPEC Functionalised Innovative Carbon Fibres Developed from Novel Precursors With Cost Efficiency and Tailored Properties		
プロジェクトアレンス	FP7-NMP Grant agreement ID: 604248		
期間	2014年1月1日から2017年12月31日まで		
総予算	8,126,545.99 €	EUからの支援	6,083,991.00 €
受益者	コーディネーター	ギリシャNATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS - NTUA	
	パートナー	イタリアPolitecnico di Torino、英国University of Birmingham、フランスThales Research and Technology、英国Global Safeguard LTD、英国Open source management LTD、ポルトガルAnthony、Patrick & Murta Exportação、ウクライナFrantsevich Institute for problems of materials science、英国CTM Equipment Limited、ウクライナYuzhnoye SDO、チェコEuromobilita sro	
目的	・リグニンや再生可能資源などの「グリーン」前駆体からの炭素繊維の生産の改善と、前駆体の酸化処理の制御 ・環境にやさしい生産技術による繊維強化複合材料の製造 ・主にコスト削減に加え、機械的および化学的的特性の改善 ・廃棄CFの関連用途へのリサイクルCFの提供 ・LCAを適用して、再利用およびリサイクル戦略のグリーン認証を前駆体開発から炭素繊維廃棄物までの定量化 ・新規炭素繊維によるラミネートとグリアプレグの製造のテスト等 ・CFと複合材料の特性を決定するために、コストモデリングとともに数学的モデリングの実施、など		
結果	炭素繊維複合材料のリサイクル方法として、粉砕法と熱分解法を使用した。粉砕法では、複合材料を粉砕して炭素粉末にし、炭素粉末をマトリックスの充填剤として使用した。熱分解法では、熱重量分析（TGA）を使用して炭素繊維複合材料の熱分析を実施した。		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-37. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	ForCycle 金属-プラスチック複合材料およびハイブリッド材料のリサイクル ForCycle Recycling of metal-plastic composites and hybrid materials		
プロジェクトアレンス	不明		
期間	2014年から2016年まで		
総予算	不明	バイエルン環境消費者保護省からの支援	不明
受益者	コーディネーター	ドイツUniversity of Augsburg	
	パートナー	ドイツFraunhofer IVV	
目的	本プロジェクトの目的は、金属-プラスチック複合材料の成分を高品質で完全に分離し、これらを新しい材料にリサイクルできるようにすることにある。 溶剤ベースのリサイクルおよび分離プロセスは、脱バインダーシステムとインライン乾燥（真空押出）を使用して実行され、インラインろ過（大容量溶融ろ過）の配合技術と組み合わせられる。Fraunhofer IVVで開発された溶剤ベースのCreaSolv®プロセスにより、穏やかな条件下で金属-プラスチック複合材料を分離できるため、高品質のプラスチックリサイクル品を回収できる。		
結果	記述なし		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-38. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	TPC Cycle		
プロジェクトアレンス	不明		
期間	2015年9月から2019年まで		
総予算	不明	オランダ科学研究機構 (NWO) の一部である RegieorgaanSIAからの支援	不明
受益者	コーディネーター	オランダTPRC	
	パートナー	オランダToray Advanced Composites (Toray Group) 、オランダNido Recycling Techniek、DTC、オランダCato Composite Innovations、英国GKN Fokker Aerostructures、オランダSaxion Lectoraat Industrial Design	
目的	TPC-Cycleプロジェクトは、TPC材料のリサイクルルートの開発を目的としている。この研究は、TPC廃棄物を費用対効果の高い方法で再処理して、可能な限り最高のパフォーマンスを実現するための最適なプロセスとプロセス設定に焦点を当てている。このプロジェクトは、設計やサイズの縮小から部品の成形まで、バリューチェーン全体をカバーしている。材料の機械的性能への影響を理解するために、すべての処理ステップがプロジェクトに含まれる。性能は、剛性、強度、衝撃靱性に関する材料性能によって測定される。また、ソリューションの価値に対するサイクルの経済的コスト、および関連する実現可能性とリスクを含みながら検証する。		
結果	記述なし		

※TPC = Continuous fiber reinforced thermoplastic composites

出典：矢野経済研究所作成

表 2-39. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	RESET 熱可塑性複合材料の再利用 RESET Re-use of Thermoplastic Composite		
プロジェクトアレンス	H2020-EU.3.4.5.4. Grant agreement ID: 686636		
期間	2016年1月1日から2018年4月30日まで		
総予算		349,156.25 €	EUからの支援 325,006.25 €
受益者	コーディネーター	スペインACONDICIONAMIENTO TARRASENSE ASSOCIACION	
	パートナー	フランスAXYAL S.A.S.	
目的	RESETプロジェクトは、埋め立て地、ポリマー熱分解による炭素繊維の回収、またはエネルギー回収が難しい熱可塑性複合材料にセカンドライフをもたらすことを目的としている。これらの材料の選別および粉碎プロセスを通じて達成することで、短いサイクルで強化熱可塑性樹脂（顆粒）につなげる。これらの調整された残渣は、その後、単一成分と二成分ブレンドの両方を考慮して、バージンポリマーと一緒に溶融配合することにより、新しい強化熱可塑性複合材料を得るために使用する。さらに、再生材料の特性の評価は、デモンストレーター（ブラケット、クランプなど）の最終用途に関する製品の適合性を確認するために、再現性、加工性、および最終製品の特性の観点から実行する。また、プロトタイプ金型の設計および評価中にプロセスパラメータを定義する。		
結果	記述なし		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-40. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	ECO-COMPASS 航空機の内部および二次構造に適用するための生態学的および多機能複合材料 ECO-COMPASS Ecological and Multifunctional Composites for Application in Aircraft Interior and Secondary Structures			
プロジェクトアアレンス	H2020-EU.3.4. Grant agreement ID: 690638			
期間	2016年4月1日から2019年6月30日まで			
総予算	1,893,685.00 €		EUからの支援	1,893,685.00 €
受益者	コーディネーター	ドイツDEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT - UND RAUMFAHRT EV		
	パートナー	フランスAIRBUS、英国THE UNIVERSITY OF MANCHESTER、スペインCENTRE INTERNACIONAL DE METODES NUMERICOS EN INGENYERIA、スペインACONDICIONAMIENTO TARRASENSE ASSOCIACION、ギリシャPANEPISTIMIO PATRON、ポルトガルINEGI - INSTITUTO DE CIENCIA E INOVACAO EM ENGENHARIA MECANICA E ENGENHARIA INDUSTRIAL、フランス - UP SAS		
目的	ECO-COMPASSは、中国とヨーロッパでの研究の知識を組み合わせることで、航空機の二次構造と内部で使用するための生態学的に改善された複合材料を開発することを目的としている。これにより、パイオペースの補強材、樹脂、サンドイッチコアが開発され、航空用途向けに最適化される。さらに、パイオコンポジットの機械的強度と多機能性を高めるために、 リサイクルされた人工繊維の使用を評価 する。航空環境における特別なストレスに耐えるために、火災、雷、および湿気の取り込みのリスクを軽減するための保護技術を調査する。適応されたモデリングとシミュレーションにより、複合設計の最適化が可能になる。電磁干渉シールドおよび落雷保護用の導電性複合材料も調査する。新しいエココンポジットを最先端の材料と比較するために、ゆりかごから墓場までのライフサイクルアセスメント（LCA）を実施する。			
結果	リサイクル炭素繊維に関する報告をみると、rCFと天然繊維（亜麻繊維）で作られたハイブリッド複合材料は、純粋な天然繊維強化ポリマーと比較して、エポキシ複合材料の曲げ機械的特性を改善できたことを確認している。実験データでは、rCFの含有量が多いほど曲げ特性が良くなることを示した。繊維の密接な混合は、亜麻繊維の含有量を増やすときの曲げ特性の低下を少なくすることに貢献した。			

※EU以外に中国産業情報省からの助成金もあり、中国11社と共同で実施された

出典：矢野経済研究所作成

表 2-41. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	Dreamwind 風力エネルギーのためのリサイクル可能な先端材料の設計		
	Dreamwind Designing REcyclable Advanced Materials for WIND energy		
プロジェクトアレンス	不明		
期間	2016年から2020年まで		
総予算	26,800,000.00 €	Innovation Fund Denmarkからの支援	不明
受益者	コーディネーター	デンマークAarhus University	
	パートナー	デンマークVestas、デンマークDanish Technological Institute	
目的	風力タービンのBraidに使用されている高度な技術を用いた複合材料は、リサイクル可能な風力タービンの生産において最も大きな障壁となっている。Dreamwindプロジェクトは高強度複合材料用の新しい材料の開発に取り組み、ブレードを分解してコンポーネントを再利用することを目指している。開発の一部は使用後に分解できる刺激応答性材料へ、一部は新しい材料にバイオベースのリソースとして組み込む。さらに、材料開発における最新の知識を使用して、製品が最先端の材料の性能に匹敵することを目指している。		
結果	記述なし		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-42. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	ReRoBalsa 断熱材の製造に向けたバルサ材/発泡体を回収するためのローターブレードのリサイクル ReRoBalsa Recycling of rotor blades in order to recover balsa wood/foam for the production of insulation materials		
プロジェクトアレンス	不明		
期間	2017年1月8日から2019年3月1日まで		
総予算	不明	ドイツ連邦教育研究省からの支援	不明
受益者	コーディネーター	ドイツFraunhofer WKI	
	パートナー	Technische Hochschule Nürnberg (Nuremberg Tech)、ドイツMATETEC、ドイツKovalex GmbH、ドイツBINOS GmbH	
目的	研究プロジェクトの主な目的は、ローターブレードからバルサ材と発泡プラスチックを回収するための革新的なリサイクル技術の開発である。さらに、これらのリサイクル品の革新的なリサイクル技術を開発し、新しい改良された断熱材や建築材料の製造に利用する。		
結果	現場でのローターブレードの解体の早い段階で、ファイバー材料のある領域を切断し、別の処理と高品質のリサイクル手順を選定している。これにより、使用済みバルサ材と発泡体の再生利用とマテリアルリサイクルに必要なすべての処理ステップを全体的な観点から実施できる。セメント工場での材料/エネルギー回収による切断された繊維含有領域の回収は、産業パートナーを通じて確保することができる。 GFRP廃棄物を破砕するための産業プラントは、通常、2段階の破砕プロセスを組み込んでいる。第一段階では、一次破砕機で粗粉砕し、第二段階では、クロスフローグラインダーまたはインパクトアクターで細かく破砕し、製紙業からの湿式廃棄物を加える。金属は微粉砕に続いて、磁気分離器と下流の渦電流分離器を介して分離する。組み込まれたファイバー材料の分離は現在行っていない。 使用済み（耐用年数を過ぎた）バルサ材をリサイクルして建築材料や原材料を作成する場合、一般に、接着剤またはセメントで接着されたパーティクルボードの基礎となる木材チップや繊維の製造が行われる。本プロジェクトでは、特定の用途によってローターブレードから抽出された二次バルサ材とプラスチックフォームの利用を調査およびテストしている。		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-43. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

	FiberEUse 寿命末期の繊維強化複合材料の再利用に基づく新しい循環経済バリューチェーンの大規模なデモンストレーション		
プロジェクト名称	FiberEUse Large scale demonstration of new circular economy value-chains based on the reuse of end-of-life fiber reinforced composites.		
プロジェクトアアレンス	H2020-EU.3.5.4. Grant agreement ID: 730323		
期間	2017年6月1日から2021年9月30日まで		
総予算	11,943,963.75 €	EUからの支援	9,793,548.75 €
受益者	コーディネーター	イタリアPOLITECNICO DI MILANO	
	パートナー	イタリアCONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE、イタリアRivierasca S.p.A.、フランスNOVELLINI FRANCE S.A.R.L.、イタリアPHOLONIX SRL-SPIN OFF DEL POLITECNICO DI MILANO、スペインFUNDACION TECNALIA RESEARCH & INNOVATION、スペインSiemens Gamesa Renewable Energy、スペインBATZ SOCIEDAD COOPERATIVA、スペインMAIER SCOOP、スペインAermnova Aerospace S.A.U.、フィンランドTampere University、ドイツFRAUNHOFER GESELLSCHAFT ZUR FORDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.、英国 UNIVERSITY OF STRATHCLYDE、ドイツZEDAG ENGINEERING GMBH、ドイツINVENT INNOVATIVE VERBUNDWERKSTOFFEREALISATION UND VERMARKTUNG NEUERTECHNOLOGIEN GMBH、イタリアGREEN COAT SRL、オーストリアHEAD Sport GmbH、オーストリア SAUBERMACHER DIENSTLEISTUNGS AG、オーストリアdesignaustria、ドイツAVK-INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTARKTEKUNSTSTOFFE EV	
目的	FiberEUseは、複合材料のリサイクルと付加価値製品での再利用の収益性を高めるための包括的なアプローチを通じて、さまざまなイノベーションを統合することを目的とする。バリューチェーン統合のための新しいワッドベースのICTソリューション、新しい市場の開拓、法規制の障壁の分析、さまざまなリバースロジスティックオプションのライフサイクルアセスメントを通じて、FiberEUseはコンボシットの循環経済モデルへの移行において業界をサポートしていく。 (i) 機械的または熱的にリサイクルされたEoL GFRPおよびCFRP複合材料の収益性の高い再利用オプションの開発に取り組み革新的な再製造技術の統合により、操作の容易さ、大幅なコスト削減、環境への影響を最小限に抑えたEU指令への準拠が可能になる。新しいバリューチェーンが作成され、さまざまな製造セクターをカバーするいくつかのデモケースの実現を目指す。 (ii) OEMからTier 1サプライヤー、ロジスティクスオペレーター、テクノロジープロバイダーとエクスポジト、デザイナー、エンドユーザー協会まで、コンボシットに関連するすべてのセクターの利害関係者を動員およびネットワーク化するためのイノベーション戦略を開発し、結果の伝達と普及のためのプラットフォームを提供する。単純な「リサイクル」から「再利用と再製造による価値化」への認識のパラダイムシフトを促進させる。		
結果	-		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-44. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	ECOBULK バルク製品と車内部品のエコデザインな循環プロセス		
プロジェクトアレンス	ECOBULK Circular Process for Eco-Designed Bulky Products and Internal Car Parts		
期間	2017年6月1日から2021年11月30日まで		
総予算	11,790,041.52 €	EUからの支援	9,665,562.88 €
受益者	コーディネーター	スペインUNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA、英国Exergy	
	パートナー	イタリアIstituto per i Polimeri Compositi e Biomateriali (IPCB-CNR)、英国Cranfield University、イタリア Centro Ricerche Fiat、フランスFrench Inst. of Tech. for Forestbased and Furniture Sector (FCBA)、スペイン Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística (ITENE)、イタリアNext Technology、オランダ Technische Universiteit Delft、スペインUniversitat Politècnica de Catalunya - MCIÀ、オランダAkzoNobel、トルコKastamonu Entegre (KEAS)、スペインMAIER、イタリアTechnoplants srl、ルクセンブルグTOMRA、フィンランドConenor Ltd、英国Granta Design Ltd、スペインIRIS、KNEIA、英国Microcab、ドイツTECNARO GmbH 等 計28社	
目的	ECOBULKは、自動車、家具、建築部品の産業部門におけるバリューチェーン複合製品の新しい循環経済モデルの実証と実装を目指す。部門間の再現性と他の産業部門への応用可能性が高く、再利用、アップグレード、改修、リサイクルを促進する。 ECOBULKは以下の開発により新しい経済モデルを構築する。 ・円形に設計された複合製品を作成するための設計戦略と手順。 ・製品と部品のアップグレード、再利用、リサイクル、および（再）製造のための材料回収を促進するために、選択したセクターのバリューチェーンとサプライチェーンを再設計する。 ・収集、保守、再利用、追跡、ラベリングシステム、および設計者、製造業者、小売業者、廃棄物会社を含むすべての利害関係者間でバリューチェーンデータを共有する統合データベースプラットフォームを構築する。 ・関連する産業規模の技術コンポーネント、大規模なデモンストラティブプロジェクトによる循環設計ソリューションの実証。		
結果	上記取り組みのうち材料に関しては、リサイクルされたGFRP廃棄物を補強材として風力タービンプレートに使用し、配合、製造、テストを行っている。その他、ECOBULKで現在テストされているその他の材料には、バイオベースのポリマー（PLAなど）、天然繊維と再生炭素繊維の複合材料、天然繊維と再生繊維を使用した不織布複合材料、新しいより持続可能な（ホルムアルデヒドを含まない）バインダーを組み込んだ木製パーティクルボードなどがある。		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-45. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	風力タービンの省資源解体のための概念と対策の開発 Developing a concept and measures for resource saving dismantling of wind turbines		
プロジェクトアレンス	不明		
期間	2017年から2019年まで		
総予算	不明	ドイツ連邦環境庁からの支援	不明
受益者	コーディネーター	ドイツRamboll Environ（デンマークRamboll Group A/S）	
	パートナー	不明	
目的	本プロジェクトでは、廃棄物の最小化と再利用に関して、より適切な風力タービンコンポーネントの設計を行うためにメーカーにフィードバックする。また、陸上風力タービンの解体の現状に関して調査を実施し、関連する廃棄物の流れ（炭素繊維コンポーネント、ギアボックス、潤滑剤、永久磁石などを含む）を評価する。 さらに、本プロジェクトでは将来のベストプラクティス管理のための技術的アプローチを開発し、さまざまな廃棄物の流れのベストプラクティス管理に関する規制ガイダンスと法律の開発に関する推奨事項を提示する。		
結果	記述なし		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-46. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	AIRPOXY 熱成形可能で、修復可能で接着可能なsmart ePOXYベースのエアロ構造用複合材料 AIRPOXY ThermoformAble, repairable and bondable smart ePOXY based composites for aero structures			
プロジェクトアパレンス	H2020-EU.3.4. Grant agreement ID: 769274			
期間	2018年9月1日から2022年2月30日まで			
総予算	6,497,512.50 €		EUからの支援	6,497,512.50 €
受益者	コーディネーター	スペインFUNDACION CIDETEC		
	パートナー	スペインCIDETEC、ドイツInstitut für Verbundwerkstoffe GMBH、ベルギーCoexpair SA、スペインEURECAT、アイルランドÉireComposites Teoranta、スペインIngeniería y Desarrollos en Composites, S.L (IDEC)、ベルギーSociété Nationale de Construction Aéronautique SA (SONACA)、ギリシャUniversity of Ioannina、フランスAltair Engineering France SARL、フランスARTTIC SAS、スペインAsociación Española de Normalización		
目的	AIRPOXYの目的は、従来の熱硬化性樹脂のすべての利点を維持しながら、簡単に処理および修理でき、さらにはリサイクルできる新しい熱硬化性複合材料ファミリーを導入することにより、航空部門の複合部品の製造および保守コストを削減することにある。 AIRPOXYは、3R (Repairable, Reprocessable, Recyclable) と呼ばれる新世代のスマートエポキシ複合材料に基づく。 これは、硬化した熱硬化性樹脂に可逆的な架橋を生成する動的硬化剤を使用して得られる。3R複合材料が製造されると、硬化した樹脂の動的化学結合は、温度や特定の化学薬品への暴露などにより再チャップルできるため、3R複合材料は簡単に再処理、修理、リサイクルできる。 AIRPOXY固有の目的は次のとおり。 ・熱硬化性樹脂の新しい処理技術である3R-熱成形技術を開発することにより、熱硬化性炭素複合部品の製造コストをオートクレーブ製造と比較して35%以上削減する。これは、オートクレーブ製造と比較してより高いレベルの自動化で100倍高速となる。 ・熱硬化性カーボンポジット (CC) 部品の修理または交換に関連するMRO (保守、修理、オーバーホール) の現在のコストを50%削減する。これは、迅速な修復のための適用された技術を活用した層間剥離と樹脂の微細クラックの早期検出と定量化、および現在のバッチ技術より55%高速な新しい3R修復技術の開発の組み合わせによって達成する。 ・熱硬化性CC部品の現在の接着結合のコストを50%以上削減し、堅牢性を20%向上させる。これは、3R-Bondingと呼ばれる新しいボンディングプロセスの開発によって達成される。 ・ライフサイクルアセスメント (LCA) およびライフサイクルコスト (LCC) の方法論を使用して、従来のCC部品と比較した場合の3R CC部品の寿命 (EOL) でのリサイクル可能性の環境上の利点を定量化する。 ・開発された3Rテクノロジーの適切な普及と将来の活用を確実にする。			
結果	-			

出典：矢野経済研究所作成

表 2-47. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	R3FIBER 資源効率の高い循環経済のための複合材料リサイクルにおけるエコイノベーション			
	R3FIBER Eco-innovation in Composites Recycling for a Resource-Efficient Circular Economy			
プロジェクトアブレンス	H2020-EU.3.5./H2020-EU.2.3.1. Grant agreement ID: 809308			
期間	2018年月1日から2018年8月31日まで			
総予算		71,429.00 €	EUからの支援	50,000.00 €
受益者	コーディネーター	スペインTHERMAL RECYCLING OF COMPOSITES, SOCIEDAD LIMITADA		
	パートナー	－		
目的	R3FIBERプロセスは、風力タービンブレードやその他の複合材料をリサイクルするためのソリューションを提供し、クリーンでエネルギー効率の高い、自立した高品質のガラス繊維と炭素繊維、熱とエネルギーを取得する。 新たなプロセスは、循環経済（COM / 2015/0614）、資源効率率（COM（2011）571）、低炭素経済（2050ロードマップ）に関連するヨーロッパの優先事項への取り組みに貢献する。フェーズ1では、R3FIBERの技術的および経済的実現可能性を調査して、市場導入の主要セクターを定義し、主要な利害関係者との戦略的提携を確立する。フェーズ2では実装および産業開発のための産業プラントのスケールアップを設計する。			
結果	記述なし			

出典：矢野経済研究所作成

表 2-48. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	Repair3D 高度な3D印刷アプリケーションのためのプラスチック廃棄物のリサイクルと転用			
	Repair3D Recycling and Repurposing of Plastic Waste for Advanced 3D Printing Applications			
プロジェクトアレンス	H2020-EU.2.1.3./H2020-EU.2.1.2. Grant agreement ID: 814588			
期間	2019年1月1日から2023年1月31日まで			
総予算		5,998,832.50 €	EUからの支援	5,998,832.50 €
受益者	コーディネーター	イタリアWarrant Hub S.p.A.		
	パートナー	ギリシャThe National Technical University of Athens、ベルギーGhent University、スペインFundacióEurecat、スペインInstituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística (ITENE)、スペインCentro Tecnológico LEITAT、フランスInstitut de RechercheTechnologique Jules Verne (IRT JULES VERNE)、英国Sigmalex Ltd、ギリシャAdamant Composites (ADCO)、英国Cambridge Nanomaterials Technology Ltd、Techedge S.p.a.、イタリアCalzaturificio Dal Bello Srl、ベルギーCenter Scientifique & Technique de L'industrie Textile Belge、スペインMaier Scoop、スペインBioG3D- New 3D Printing Technologies、ベルギーInnovation in Research and Engineering Solutions (IRES)、ギリシャYiotis Anonimos Emporiki & Viomixaniki Etaireia、ギリシャLavrion Technological and Cultural Park (LTCP)		
目的	Repair3Dプロジェクトは、耐用年数を経たプラスチックおよび炭素繊維強化ポリマー（CFRP）コンポーネントの革新的な再生および転用ルートを開発することを目標としている。これは、高度な機能を備えた高付加価値の3D印刷製品を製造するために、高度なナノテクノロジーソリューション、アディティブマニファクチャリング（AM）、およびリサイクルリソースを採用することによって実現される。 AM、ポリマー処理、およびリサイクル技術の組み合わせは、分散型リサイクルプロセスの新しいパラダイムを構成し、産業部門および収集施設と協力してローカル規模で簡単に実装し、競争力のある高度にカスタマイズ可能な製品を作成することができる。エコデザインの可能性を完全に解明し、スマートな固有の自己検知、自己修復、およびリサイクルオプションの統合を可能にする柔軟なデジタル環境で、製造コストを削減します。 このプロジェクトは、リサイクル資源からの熱可塑性およびCF強化熱可塑性3D印刷材料開発に取り組むことを目的としている。適切な廃棄物の流れの選択、材料修理の戦略、AM処理への互換性とアップグレード、さまざまな熱可塑性マトリックス間の互換性、強化繊維とナノ粒子、さまざまなAM熱可塑性プラスチック加工技術の比較評価、および加工性と性能の観点からのクロースドループ材料の最適化に取り組む。			
結果	-			

出典：矢野経済研究所作成

表 2-49. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	CUSTOMISIZE ポリマーおよびセメント系複合材料の機械的特性を改善するためのリサイクル炭素繊維の新しいテーラードサイジング戦略		
	CUSTOMISIZE New tailor-made sizing strategies for recycled carbon fibres to improve the mechanical properties of polymeric and cementitious composites		
プロジェクトアアレンス	H2020-EU.3.4.5.4. Grant agreement ID: 831858		
期間	2019年4月1日から2021年9月30日まで		
総予算	499,858.75 €	EUからの支援	499,858.75 €
受益者	コーディネーター	スペインACONDICIONAMIENTO TARRASENSE ASSOCIACION	
	パートナー	フランスRESCOLL, フランスALPHA RECYCLAGE COMPOSITES	
目的	CUSTOMISIZEプロジェクトは、リサイクル炭素繊維（rCF）とポリマー（熱硬化性および熱可塑性樹脂）およびセメント系マトリックス間の界面接着を改善するために、炭素繊維のサイジングの新しいファミリーを開発することを目的としている。目標は、サイズ変更された繊維で調製された複合材料の強度、靱性、および環境安定性を改善することである。特定のサイジングは、リサイクルされた炭素繊維の不織布マットとチョップド繊維に開発される。新しくアップグレードされたrCFは、セメント系または高分子マトリックス（熱硬化性および熱可塑性）を含む新しい複合材料を製造するために使用される。 この戦略は、サイジング材料とともにカップリング剤を組み込むことにより、さまざまなポリマーおよびセメント系マトリックスの特定のサイジングを開発することにある。これにより、CF表面上でさまざまなメカニズム（共有結合、水素結合、ファンデルワールス相互作用など）によってアクティブポイントが作成される。8つの有機基に囲まれた剛直な有機立方形シリカ-炭素コアからなる多面体オリゴマーシレスキオキサン（POSS）の使用としての新しいアプローチが使用される。CUSTOMISIZEはまた、サイジングと相互作用できる繊維に化学的機能を導入するプロセスで、CFをリサイクルする現在の方法である水蒸気熱分解を検証することを提案している。さらに、ガラスの生存率は、ファイバー上に新しい化学的機能を作成する能力と、工業用電気化学プロセスと比較した利点のために研究される。rCFとさまざまなマトリックス間の界面せん断強度（IFSS）が最大90%増加すると予想する。		
結果	-		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-50. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	CIRCE 炭素繊維プリプレグの循環経済モデル CIRCE Circular economy model for Carbon fibre prepregs			
プロジェクトアレンス	LIFE18 ENV / IT / 000155			
期間	2019年9月1日から2022年8月31日まで			
総予算		2,278,694.00 €	EUからの支援	1,180,681.00 €
受益者	コーディネーター	イタリアHPコンポジットSPA		
	パートナー	イタリアCETMA (CENTRO DI RICERCHE EUROPEO DI TECNOLOGIE DESIGN E MATERIALI)、イタリアPETRO (PETROCERAMICS SPA)、イタリアALCI (ALCI SRL)、イタリアBASEPRO (BASE PROTECTION SRL)		
目的	LIFE-CIRCEの目的は、CFRPスクラップ（CFRPプリプレグ）が、複雑でエネルギー集約的な再処理を必要とせずに、さまざまな分野で便利に使用できることを実証すること。原材料と製造コストの両方を削減する。 プロジェクトの目的は次のとおり。 ・未硬化のCFRPスクラップの再利用を可能にすることにより、CFRPプリプレグのサイジング、処理、およびパッケージングを可能にする2つの革新的な産業用パイロットマシンを設計、構築、および検証する。 ・リサイクルされたCFRPを使用して新製品を製造し（例：カーボンセラミックブレーキ、トーキヤップ、補強リブ）、それらの技術的および経済的実行可能性を証明する。 ・産業の共生を通じて、これらの材料の循環経済モデルを作成し確立する。 LIFE-CIRCEは、イタリアの法律および関連する欧州指令2008/98によって再利用可能な工業用スクラップとして定義されている未硬化のCFRPプリプレグ材料の循環経済モデルを設定する。LIFE-CIRCEの最終的な目標は、この廃棄物を100%価値化することであり、他のエンドユーザーにとって有用な二次原料として提供する。したがって、このプロジェクトは、循環経済行動計画の目的と、廃棄物フレームワーク指令（2008/98; 最近指令2018/851によって修正された）や産業排出物に関する指令2010/75（統合汚染）などの他の関連指令の達成に貢献する。			
結果	—			

出典：矢野経済研究所作成

表 2-51. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	d-CFRPs 最先端のナノ改質技術を使用し、機械的特性、破壊特性、疲労特性を調整した高性能の再生炭素繊維強化プラスチックの開発		
	d-CFRPs Developing high-performance recycled carbon fibre reinforced plastics with tailored mechanical, fracture and fatigue properties using state-of-the-art nano-modification technology		
プロジェクトアブレンス	H2020-EU.1.3.2. Grant agreement ID: 842467		
期間	2019年9月2日から2021年9月1日まで		
総予算	187,572.48 €	EUからの支援	187,572.48 €
受益者	オランダTECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT		
	- パートナー		
目的	このプロジェクトは、最先端のナノ改質技術を使用して、機械的特性、破壊特性、疲労特性を調整した高性能RECYCLED / 不連続炭素繊維強化プラスチック (d-CFRP) の開発を目的としている。さらに、この研究の重要な副次的利点は、標準化に向けたCFRPの疲労試験方法のさらなる開発と検証を行う。 このプロジェクトには次の内容を実施する。(1) さまざまなナノ添加剤、つまりゴム、シリカ、カーボンナノチューブ、グラフェンで修飾された一連のエポキシを配合し、特性を評価する。(2) 選択されたナノ修飾エポキシとリサイクル炭素繊維に基づいて一連のd-CFRPを生成する。(3) d-CFRPの機械的特性、破壊特性、および耐疲労性を特徴づける。(4) 破壊メカニズムを調査し、準静的および疲労破壊の両方についてd-CFRPの破壊特徴を定量化して、破壊特徴とエネルギー消費の相関関係を構築する。(5) ESIS-TC4 (European Structural Integrity Society Technical Committee 4) の他の世界をリードする研究者とともに、標準化に向けたCFRPの疲労試験アプローチをさらに開発および検証する。		
結果	-		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-52. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	Green-Insulation Green-Techファイバー断熱材		
	Green-Insulation Green-Tech Fibre Insulation		
プロジェクトアレンス	H2020-EU.3./H2020-EU.2.3./H2020-EU.2.1. Grant agreement ID: 888396		
期間	2019年12月1日から2020年4月30日まで		
総予算	71,429.00 €	EUからの支援	50,000.00 €
受益者	コーディネーター	デンマークMILJOSKAERM APS	
	パートナー	-	
目的	風力タービンブレード（WTB）などの用途で使用する寿命末期（EOL）繊維強化プラスチック（FRP）複合材料をリサイクルするための機械的プロセスを開発する。FRPの約90%はガラス繊維強化プラスチック（GFRP）で構成され、残りは炭素繊維強化プラスチック（CFRP）となる。本プロジェクトでは費用対効果が高く、すべてのFRP材料を断熱材や防音壁の用途に使用できる材料にリサイクルする。		
結果	1) EOL WTBブレードは、道路輸送を容易にするために、風力発電所で大きな断片に切断する。 2) 金属部品は分別してリサイクルする。 3) FRP廃棄物は、特別に開発された細断および粉砕プロセスで細断されて顆粒を形成する。発生した粉塵やその他の形状やサイズの顆粒は、ふるい分け/分離プロセスで除去される。 4) 特別に開発されたプロセス（バインダーの追加の有無にかかわらず）では、緩い顆粒をバック/形成して、音響および/または断熱特性を最適化するプレート/スラブとして多孔質材料を形成する。 5) 自社開発のFRP顆粒は単独で断熱材として使用でき、アプリケーションの寿命が尽きた後は再びリサイクルできる。		

出典：矢野経済研究所作成

表 2-53. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	MANIFICA Recycling リサイクル炭素繊維による製造と革新 MANIFICA Recycling MANUFACTURE et Innovation avec Fibres de Carbone recyclées (Manufacturing and Innovation with Recycled Carbon Fibers)			
プロジェクトアレンス	H2020-EU.3.4.5.5. Grant agreement ID: 887104			
期間	2020年1月1日から2023年9月30日まで			
総予算		2,116,783.75 €	EUからの支援	174,582,363.00 €
受益者	コーディネーター	フランスUNIVERSITE DE BORDEAUX		
	パートナー	フランスTORAY CARBON FIBERS EUROPE SA, フランスVESO Concept, フランスPAPREC FRANCE		
目的	MANIFICAの世界的な目標は、「航空廃棄物から革新的な複合部品までの炭素繊維複合材料のリサイクルチェーンを確立することにある。MANIFICAは、高品質のリサイクル炭素繊維がリサイクル産業を経済的価値に向けて推進することをビジョンに持つ。 CFリサイクル部門は、ロジスティクス、リサイクル、すぐに使用できる半製品の製造から新しいrCFベースの産業デモンストレーターまで、すべての側面を考慮することにより、体系的なアプローチで検討する。そのため、MANIFICAコンソーシアムは、ボルドー大学（12M）、炭素繊維と廃棄物処理の2つの業界リーダーであるTORAY CFE、PAPREC Group、および1つの革新的な複合材料SMEであるVESOConceptで構成されている。 ・効率的でシンプルな選別シナリオを提案し、樹脂別に回収された繊維タイプごとに選別する必要があるかどうかを決定する。 ・選別方法を適用したのち、現実的に経済的に実行可能な条件下で実現するために、最適化されたロジスティクスで航空産業から直接廃棄物を収集する。 ・古いフリプレグの再利用またはリサイクルを、シェルフライブ延長のシナリオと捉える。 ・リサイクルされた炭素繊維を革新的で使いやすい半製品に変換するために、ボルドー大学の再形成プロセスを拡張する。 ・再調整されたrCF半製品の品質は、産業デモンストレーター（航空機内部の半構造部分や、鉄道や自動車などの他のセクター）を通じて検証する。これらの部品では、rCFコンボジットが従来の材料よりもパフォーマンスの向上につながるよう取り組む。			
結果	-			

出典：矢野経済研究所作成

表 2-54. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	HELACS 使用済み航空機複合構造における費用効果の高い持続可能な管理のための全体的なプロセス HELACS Holistic processes for the cost-effective and sustainable management of End of Life of Aircraft Composite Structures			
プロジェクトリアレンス	H2020-EU.3.4.5.1. Grant agreement ID: 101007871			
期間	2021年1月1日から2023年12月31日まで			
総予算	1,918,500.00 €		EUからの支援	1,796,775.00 €
受益者	コーディネーター	スペインFUNDACION AITIIP		
	パートナー	スペインCONSORCIO AERODROMO AEROPUERTO DE TERUEL、ベルギー-CENTRE SCIENTIFIQUE & TECHNIQUE DEL'INDUSTRIE TEXTILE BELGE ASBL、英国ELG CARBON FIBRE LIMITED		
目的	i) 使用済み航空機管理プロジェクトの実施結果（PAMELAやAIMEREなど）、ii) 航空機の分解と航空機の材料のリサイクルに関する推奨事項と基準のレビュー（ the Aircraft Fleet Recycling Association（AFRA）のために開発されたものなど）、iii) ヨーロッパ最大の保守、修理、およびオーバーホール（MRO）を行うテルエル空港（PLATA）の経験とサポートに基づきながら、HELACSでは炭素繊維強化ポリマー（CFRP）コンポーネントを解体およびリサイクルするためのコスト競争力のあるエネルギー効率の高いソリューションを目指している。これを行うために、航空機の設計、製造、リサイクルのバリューチェーンの複数の分野の利害関係者が、責任ある研究と革新（RRI）アプローチを通じて、下記を2本柱としながらプロジェクト中に協力する。			
	・機械学習 機能とCFRP切断および剥離用の専用ツールを備えた柔軟でポータブルなロボットプラットフォーム ・炭素繊維のリサイクル収率を向上させるための最適化された熱分解プロセスと、炭素繊維の機能性を向上させるためのサイジング配合に基づくリサイクルおよび価値化技術			
結果	HELACSの期間中、これらのプロセスはテルエル空港施設で開発、検証、実証される。ここでは、CFRPコンポーネントのリサイクル性を40%向上させ、従業員の安全性と満足度を70%向上させ、リサイクルされた炭素繊維の価値を85%保持し、削減に取り組んでいく。			

出典：矢野経済研究所作成

表 2-55. 欧州の CFRP リサイクル関連プロジェクト概要

プロジェクト名称	LEVIS エコデザインと循環経済戦略の統合による持続可能な電気自動車のための高度な軽量材料 LEVIS Advanced Light materials for sustainable Electrical Vehicles by Integration of eco-design and circular economy Strategies		
プロジェクトアブレンス	H2020-EU.3.4. Grant agreement ID: 101006888		
期間	2021年2月1日から2024年1月31日まで		
総予算	5,570,578.75 €	EUからの支援	4,990,113.63 €
受益者	コーディネーター	スペインINSTITUTO TECNOLÓGICO DE ARAGON	
	パートナー	イタリアMARELLI SUSPENSION SYSTEMS ITALY SPA、フランスMERSEN FRANCE ANGERS SAS、イタリアPRIVE' SRL、トルコYESILOVA HOLDING AS、トルコFAS TURK OTOMOBIL FABRIKASI ANONIM SIRKETI、スペインASOCIACION DE INVESTIGACION METALURGICA DEL NOROESTE、フランスASSOCIATION POUR LE DEVELOPPEMENT DE L'ENSEIGNEMENT ET DES RECHERCHES AUPRES DES UNIVERSITES, DES CENTRES DE RECHERCHE ET DES ENTREPRISES D'AQUITAINE、スペインLEARTRIKER, SCOOP、スウェーデンRISE SICOMP AB、フランスCOMMISSARIAT A L ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES、オランダSTICHTING CENEX NEDERLAND、ドイツSTEINBEIS INNOVATION GGMHBH	
目的	LEVISプロジェクトの目的は、大量生産の自動車アプリケーションに存在する現在の産業ギャップを埋めることができる新しい製造ルートを開発することにある。LEVISプロジェクトは、設計段階から耐用年数終了段階までエコおよびサーキュラー型の設計コンセプトを採用することにより、電気自動車の軽量構造部品を開発、検証および実証する。持続可能性の向上、原材料の使用効率、エネルギー効率、コスト効率の向上、軽量化を実現し、高い構造的完全性と信頼性の達成を目指す。LEVISは、FRPに基づくマルチマテリアルソリューションの使用を想定している。 LEVISは、システムと統合された熱可塑性プラスチックベースのCFRP / 金属ハイブリッド材料を使用した自動車の構造部品の開発を目指しており、対象部品の機械的な稼働性能を維持しながら大幅な軽量化を実現させていく。そのために、新しい持続可能な材料、適切な製造 / 組み立て手順、高度なシミュレーション方法論 / ワークフロー、革新的なセンシング / モニタリング技術を開発、実装、検証する。 これらの部品には、持続可能性を高めるために、リサイクル可能な樹脂、バイオリソースCF、リサイクルCFを開発し使用する。これらの軽量材料と構造部品の製造の実現可能性とスケールアップ能力を検証、実証する。部品内のコンポーネント（CFRPと金属）の再利用や、セカンドライフでの使用に十分な品質の樹脂と繊維の再生などを進め、サーキュラー型の設計アプローチを活用することで、耐用年数を最大化した構造部品の構築を図っていく。		
結果	-		

出典：矢野経済研究所作成

2-3. 欧州における研究機関調査

2-3-1. 現状の廃 CFRP のリサイクル技術（欧州、日本、その他）

現時点での CFRP 工程内端材の主なリサイクル方法は、①繊維を機械的に加工し、再利用する方法と、②熱分解による rCF の再生方法である。

(1) 廃 CFRP 選別方法

廃 CFRP は①生産工程内で発生する端材（CF、CF 織物、CF プリプレグ）と、②使用済製品の二つに分けられる。

①工程内端材には、CF くず（ボビンに残ったヤーン、織物等の端材、ロールの余り、生基材端材やこれらの規格外品）や、プリプレグくず（プリプレグ端材、保管切れプリプレグや規格外品）、CFRP くず（硬化物：端材、不良品）等がある。

②使用済製品は、製品化され耐用年数が過ぎて廃棄されたもの（End of Life products）である。

現在、事業を行っている rCF メーカーの主な回収元は、①CFRP 部品製造時に発生する工程内端材であり、②耐用年数を過ぎた使用済 CFRP 製品の廃棄品を回収し、リサイクルするケースはほとんどない。廃棄品から CF を抽出しリサイクルする等、rCF 試作品やテストは行われているが、開発レベルに留まっている。

CFRP が使用された使用済み廃棄品を回収しリサイクルを行い再利用する仕組み作りについては、CFRP 製品の使用が拡大している自動車や航空機メーカーや研究機関、rCF メーカーもパートナーシップを結び、CFRP 循環システムの構築に向けて取り組んでいる状況にある。

(2) 廃 CFRP 切断・粉砕・分級方法

廃 CFRP のリサイクルで重要な作業の一つが分別である。英国の大手 rCF メーカーである ELG Carbon fibre では、入手した廃 CFRP を 24 分類し、CFRP とそれ以外（金属、紙）や、CF メーカー別、また廃 CFRP 形態別（CF、CF 織物、プリプレグ、硬化物）、その他厚みなどにより分別し、その後適切な処理法で切断・粉砕を行っている。

これらを適正に行うことで物性の安定した rCF を生産することができるとみられが、各メーカー独自のノウハウに基づいた手法によって処理されている。廃 CFRP 切断・粉砕・分級方法についての詳細は公開されていない。

(3) CFRP 分離方法

廃 CFRP のリサイクル方法の詳細については下記に掲載する。CFRP から CF の分離方法（リサイクル方法）には、大きく分けて①熱、②化学、③その他（電気、半導体の熱活性、微生物）がある。

熱分解法は、現在多くの **rCF** メーカーが使用している量産化された技術で、**500-800℃** の高温空気により樹脂を分解し、**CF** を回収するものである。化学プロセスは、溶媒ないし触媒を用いて樹脂を分解、**CF** 及び樹脂を回収する方法で、欧州のメーカーや研究機関を中心に研究開発が進んでいる。

表 2-56. 廃 CFRP のリサイクル方法の比較

リサイクル方法	Status	分解可能な樹脂	分解時間	前処理の 必要性	温度等	圧力	溶媒	触媒	回収物
熱分解法 (Pyrolysis)	実用化済み	毒性のない樹脂全て	1時間～	粉砕	500-600℃ 600-900℃	常圧	不要	不要	・長繊維、チョップド、ミルドCF ・排熱
	加熱水蒸気 (Steam thermolysis technology)	毒性のない樹脂全て	10分	不要	500℃	常圧	不要	不要	・長繊維、チョップド、ミルドCF
	流動層プロセス (Fluidised bed process)	毒性のない樹脂全て	不明	粉砕	450-550℃	常圧	不要	不要	・チョップド、ミルドCF ・排熱
	マイクロ波分解法 (Microwave)	毒性のない樹脂全て	160～180秒	不要	915MHz、 600W	常圧	不要	不要	・長繊維、チョップド、ミルドCF
溶媒分解法 (Solvolytic)	実用化済み	毒性のない樹脂全て	不明	不明	不明	不明	水やアルコールなどの溶媒	不明	・短繊維、ペレット等
	超臨界流体法 (Supercritical fluids)	エステル系	20分～60分	場合によっては粉砕	300～400℃	10MPa	超臨界メタノール/プロパノール/アセトン	不要	・長繊維、チョップド、ミルドCF ・樹脂分解物
	亜臨界流体法 (Subcritical fluid)	エステル系	45分	場合によっては粉砕	250～350℃	20MPa 1MPa	亜臨界水	2.5wt%炭酸カリウム触媒添加	・長繊維、チョップド、ミルドCF ・樹脂分解物
	流体処理 (liquid process)	特定の樹脂	不明	場合によっては粉砕	150℃	150PSi (1.03MPa)	必要	必要	・長繊維、チョップド、ミルドCF ・樹脂分解物
電気分解 (Electrolysis)	研究開発	毒性のない樹脂全て	不明	炉の大きさの 応じて粉砕	400～500℃	3～5V	アルカリ水 溶液	不要	・長繊維、チョップド、ミルドCF
半導体の熱活性化 (Thermal Activation of Semiconductors)	研究開発	毒性のない樹脂全て	10分程度	炉の大きさの 応じて粉砕	400℃	常圧	不要	不要	・長繊維、チョップド、ミルドCF
微生物による分解 (Biotechnical Process)	研究開発	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明

出典：矢野経済研究所作成

① 熱分解法

熱分解法 (Thermal decomposition) は、CFRP のリサイクル技術としてもっとも多く採用されている技術である。現在 rCF 製品の製造・販売を事業化しているメーカーのほとんどは熱分解法を使用したリサイクルを行っている。

熱分解プロセスでは、CFRP は常に無酸素状態で加熱され (樹脂の分解ガスを充填することで無酸素状態となる、所謂蒸し焼き状態)、CF を酸化劣化させずに樹脂を除去する。CF は元々高温で熱処理 (2,000~3,000℃で黒鉛化) されて製造されているため、マトリックス樹脂の分解温度では加熱による大幅な強度低下は生じない。樹脂は低重量分子状態で揮発し、CF は不活性状態で最終的に回収される。熱分解法は分解できる樹脂に制限が少なく低コストであるため、大量処理に適している。

なお、熱分解法 (Thermal decomposition) には、熱分解 (Pyrolysis)、加熱水蒸気法、流動層プロセス (Fluidised bed process)、マイクロ波法等があるが、一般的には熱分解 (Pyrolysis) を指す。

イ) 熱分解 (Pyrolysis)

熱分解 (Pyrolysis) は、多くの rCF メーカーが使用している量産化された技術である。日本のみならず、欧州・米国の rCF メーカーも同リサイクル技術を使用し、rCF 製品を生産している。

同方式は CFRP を炭化炉 (熱分解) と焼成炉 (酸化焼成) で加熱処理し、CF 以外の樹脂だけを完全に除去するというものである。炭化過程では廃 CFRP に使用されている樹脂を無酸素状態でガス化分離 (熱分解) し、ガス化成分は炭化炉自身の外側から間接加熱の熱源として使用する。そのため CF が酸化雰囲気火の火に直接晒されることはない。炭化過程で残ったわずかな樹脂の炭素分は、焼成炉により完全に除去することができる。

ロ) 加熱水蒸気法 (Steam thermolysis technology)

加熱水蒸気法 (Steam thermolysis technology) は、複合材を水蒸気で加熱してマトリックス中の樹脂を分解し CF を抽出するもので、海外ではフランスの Alpha Recyclage Composites 社、ドイツの RWTH Aachen 大学、日本ではファインセラミックセンター等が開発している。

加水蒸気熱分解法 (Steam thermolysis technology) を採用し CFRP 廃棄物からの CF の回収に適用した研究開発の事例はそれほどないが、水蒸気熱分解は CFRP 廃棄物の有機マトリックスを効率的に分解することができる利点が高く評価されている。

Alpha Recyclage Composites 社では、rCF のリサイクル技術として水蒸気熱分解技術 (Steam thermolysis technology) を開発している。同水蒸気熱分解技術は、従来 University

of Toulouse が研究開発したもので、それを Alpha Recyclage Composites が採用している模様。水蒸気熱分解技術は、環境圧力の高い過熱水蒸気を用いて有機物を分解する熱化学プロセスで、再生繊維の後処理にエネルギーを必要としない上、不連続な作業流や高価な反応器を必要とする高圧環境が不要なため、コスト効率の高い技術とされる。

水蒸気熱分解技術を用いた複合材廃棄物の処理は、Alpha Recyclage Composites 社が数年にわたり開発し、現在は姉妹会社（Alpha Recyclage Franche-Comté）が使用済みタイヤを回収し、その後リサイクル処理を行う形で商業化の段階にある。水蒸気熱分解リサイクル後に得られた rCF は複合材料の製造に使用される半製品の製造に使用される。

同社が行っている水蒸気熱分解技術の特徴としては、CF 上の樹脂除去率が 99%以上であること、独自の回収方法により回収した CF の表面や機械的性質の劣化がないこと等が挙げられる。

RWTH Aachen 大学では、CFRP を熱分解して CF を回収する場合、樹脂の分解物が炭素化して残留することが多いことを改善し、後処理によって除去する方法として同リサイクル方法を検討した。この熱分解リサイクルは、酸素に反応する不活性雰囲気での熱分解（少なくとも化学量論的酸素濃度での自己熱焼却）、または酸化性非酸素雰囲気（アロサーマル（allothermal）水蒸気または二酸化炭素（CO₂）ガス化）である。

この後処理により残留炭素の減少は肉眼でも明らかであり、顕微鏡でも証明することができている。温度が高いほど必要な処理時間が短くなり、750℃までは目に見える CF の損傷はなく、1000℃でもほとんどの繊維に損傷の兆候はなかった。ただし、CO₂ 雰囲気の 1000℃では、一部の繊維が表面全体に渡って大きな損傷を受けた。

ファインセラミックセンターでは、廃材樹脂部の分解により生成した可燃性ガスを燃焼させて、処理用の高温過熱水蒸気を生成することで、処理エネルギーの大幅削減を可能にする。また過熱水蒸気処理時に繊維表面改質ガスを添加することにより、優れた樹脂接着性を有するリサイクル繊維の回収を可能にする方式である。通常の熱分解法（700℃以下）では、炉内を均一に加熱するために水蒸気を利用するが、同方式（700℃以上）では水蒸気を CF と樹脂の分離反応に利用している。

ハ) 流動層プロセス (Fluidised bed process)

流動層処理 (Fluidised bed process) とは、ポリマーを除去するため熱と酸素が豊富な流動床炉 (fluidised bed) を利用し、廃 CFRP から CF を回収するものである。流動層プロセスは University of Nottingham を中心に開発が進んでいる。

University of Nottingham で研究されている流動層処理 (fluidised bed process) は、ポリマーを除去するための流動床炉 (fluidised bed) を利用して、廃 CFRP から CF を回収するものである。その工程は廃 CFRP を細断した後、流動床炉に供給され、流動床炉内の

熱（450～550℃）によりポリマーを除去するというものである。

流動層処理（fluidised bed process）プロセスを使用することで、カーボンおよびガラス繊維複合材料の両方に使用できる。ガラス繊維はリサイクル処理時に引張強度の約 50%が減少するが、450℃の条件で処理すると剛性が保たれ、ポリマー樹脂を除去することが可能である。なお、同プロセスでは排熱利用も可能で、University of Nottingham によると流動層処理により回収された CF は引張強度が 25%減少、弾性率の変化が少なく酸化はないとされる。

ニ) マイクロ波分解法（Microwave：高周波分解法）

マイクロ波分解法は高周波マイクロ波による熱分解プロセスである。

Fraunhofer ICT では、マイクロ波による熱分解プロセスに関する研究を行っている。通常の熱分解プロセスでは、空気排除環境下で 500～600℃の温度で CFRP のポリマーマトリックスを分解して CF を取り出すが、マイクロ波分解法は廃 CFRP をマイクロ波（300MHz～300GHz）により直接加熱する熱分解の特殊な方法である。

CF は導電帯であり、マイクロ波を吸収しやすい。マイクロ波は部品に ohmic warming（オーミック加熱）を引き起こし、turbulent flow（乱流）を誘導する。CFRP は導電性を有しているため、マイクロ波は数ミリメートルで内部に到達することを利用した分解方法である。

Firebird Advanced Materials も同プロセスで開発を行っている。同社の見解では、通常の熱分解（Pyrolysis）プロセスではサイジングが消失しフワフワした「コットンボール」状態となるため、再利用されるアプリケーションが限定されるが、マイクロ波分解法ではより vCF に近い rCF を製造できるとしている。

② 化学プロセス

化学プロセスによる CFRP リサイクルは、アルコール類や超臨界流体等の反応媒体を利用し、低温下（350℃前後）でその反応が進むことを活用した分解方法で、加溶媒分解法、超臨界流体／亜臨界プロセス、流体処理等がある。溶剤を使用する方法は特性劣化の少ない CF を回収することができる利点があるが、溶剤の処理にコストがかかるデメリットがある。

イ) 加溶媒分解法（Solvolysis）

加溶媒分解（Solvolysis）プロセスは、ポリマーからの化学製品の回収する方法として、材料の劣化を最小限に抑えた高品質の CF の回収を提供するために考案された技術である。この方法は水やアルコールなどの溶媒が試薬の反応により CF を分離する、つまり、分子内の原子または原子のグループが別の原子または原子のグループに置き換えられる反応により CF を取り出す技術である。

rCF メーカーとしては Shocker Composites (Washington State University が設立したベンチャー企業) が同技術を使用し rCF 製品を製造・販売している。この技術は Washington State University を中心に開発されたもので、Shocker Composites のほかにも Washington State University と共同開発を進める Global Fiberglass Solutions も同技術を使用した開発を行っている。

そのほか、日本では JAXA 航空技術部門やアースリサイクルで研究が進んでいる。

Shocker Composites は 2016 年に設立された Wichita State University のベンチャー企業として設立された会社で、設立者は Wichita State University の Vamsidhar Patlolla 氏である。当時大学で研究していた複合材料の研究プロジェクト中に加溶媒分解法という CFRP をリサイクルする方法を使用し rCF ビジネスを事業化している。

当初は加溶媒分解法の商業化は進まず、研究ベースでの取り組みがメインであったが、同社より生産ラインの導入や販売が開始された。同プロセスの導入により回収された繊維は熱分解での回収方法より損傷が少なく、熱エネルギー節約等による低コストでの生産が可能であることもメリットとして挙げられる。

なお、Global Fiberglass Solutions は Washington State University の Composite Material & Engineering Center と共同で可溶性分解法によりガラス繊維複合材をリサイクルするプロセスを開発した。同技術はエタノール、エタノール/水混合物、水単位で、酸を触媒として使用し、比較的低温で熱硬化性樹脂を分解する方法で、触媒の効果により炭素-窒素結合またはエステル結合を分解するものである。

ロ) 超臨界流体法(Supercritical fluids)/ 亜臨界流体法 (Subcritical fluid)

超臨界流体とは、臨界温度と臨界圧力を超えた高密度の蒸気である。超臨界流体は液体と気体の双方の性質を併せ持つ。密度は液体の $1/10 \sim 1/2$ 程度であり、気体と比較し数百倍大きい。粘性率は気体並みに低く、自己拡散係数は液体と気体の中間にある。この流体は、気体分子と同程度の大きな運動エネルギーを持ち、液体に匹敵する高い密度をもつ非常にアクティブ物体である。温度と圧力を制御することで、密度や溶解度等のマクロな物性から、流体分子の溶媒和構造等のミクロな物性・構造まで制御することができる。

一方で、臨界温度以下で飽和蒸気圧以上の液体は亜臨界流体と呼ばれ、有機物に対して比較的大きな分解力をもっている。これを加圧処理とした方式が亜臨界プロセスである。

超臨界流体プロセスでは、CFRP 中の樹脂を超臨界流体 (10MPa、300℃前後) により分解し、可溶化樹脂と CF に分離する。可溶化樹脂は再硬化することで再利用が可能である。亜臨界プロセスでは CFRP 中の樹脂を亜臨界流体 (1~20MPa、300~400℃) により分解し、水溶性分解生成物と CF に分離する、水溶性分解生成物はフェノール類モノマーや燃料

ガスとして回収することができる。

超臨界、亜臨界に共通していることは、CF としての特性劣化が少ないものの、高圧環境下でリサイクルを行う必要があるため、設備が高額になり量産化には向かないという点である。

University of Nottingham では、流動層処理 (Fluidised bed process) 技術のほか超臨界流体処理 (Supercritical fluid) についても研究を行っている。そのほか、Washington 大学、Vartega でも超臨界流体法 (Supercritical fluids) について一部研究が行われている。

ハ) 流体処理 (liquid process)

Adherent Technologies, Inc. では、CFRP のリサイクル技術として熱分解以外にも化学プロセスによる分解方法も開発している。流体処理 (liquid process) 方法は Adherent Technologies, Inc. (以下、ATI) が開発したものである。

高温流体処理 (high temperature wet-chemical process)

高温流体処理 (high temperature wet-chemical process) 方法は、高品質な CF を得るため ATI が湿式化学処理の研究を開始し、高温・高圧のアプローチを検討したもので、熱伝達流体と独自の触媒を使用することでバージンに近い CF を取り出すことができた。同社が行った実験では、同方法で回収された rCF は 99.9% の純度に達することが成果として示され、繊維の SEM 試験でも vCF と遜色ないレベルであった。機械的試験でも短繊維の引張試験ではバージン材の強度と比較し 10% 未満の減少にとどまった。

ただ、同技術では 300℃ 以上の温度、500PSI (3.45MPa) の圧力を発生させるため、ANSI (米国規格協会・米国標準協会) で定められた条件を超える特殊な設備が必要となる。これらの設備は一般品ではなくカスタム対応となるため高品質の製品を回収できる一方で、スケールアップすることで非常に高コストとなることが判明した。また、熱伝達液体は長期で使用していくと低沸点不純物を蓄積してしまうため、それらの処理も必要となる。

低温低圧流体処理 (Low temperature liquid process)

低温低圧流体処理 (Low temperature liquid process) 方法は、圧力 150PSI、温度 150℃ 環境下において触媒を用いてポリマーをプレポリマーの出発原料である低分子量画分に分解し、CF を回収する方法である。

③ その他

イ) 電気分解等 (Electrolysis)

電解酸化法とは、電気分解により CF を水に分散した状態で取り出す方式である。まずは破碎 (短く切った) した CFRP の炭化処理 (400~500℃) を行う。その後、端材をアルカ

リ水溶液中で 3～5V の定電圧で電気分解し、廃 CFRP が脆化し、脆化した CFRP を水中で高速攪拌処理することで CFRP を破壊し、CF をろ過・分離・回収することができる。

同方式のメリットは、大規模な設備投資が不要なため低コストでリサイクルプロセスが可能であることや、水への分散性が高いため水を媒介とする各種用途に展開が可能であること（例：製紙、コンクリート混和材など）等が挙げられる。なお、同プロセスで再生された rCF は合材強度が高い（電気分解により繊維表面が活性化し、繊維が母材樹脂に良く分散するため）という特徴がある。

ロ) 半導体の熱活性 (Thermal Activation of Semiconductors : 以下 TASC)

半導体の熱活性 (Thermal Activation of Semiconductors : 以下 TASC) は、信州大学 繊維学部の水口仁氏が見出した新規な現象である。半導体は室温では全く触媒硬化を示さないが、350-500℃の過熱では、突如として強い酸化作用を発現する。強い酸化力とは、つまり電子を引き抜く力が強いということに繋がる。この作用を用いて CFRP からの CF 分離に関する研究も行っている。

TASC による CFRP からの rCF リサイクル技術は溶剤を使用しない 100%乾式法である。温度条件 (350～500℃に加熱) を満たしていれば 10 分程度の処理時間で CFRP から rCF を回収することができる。TASC 法では、ラジカルは自己増殖 (spontaneous multiplication) することから、樹脂内に「種」ラジカル (seed radical) さえ生成すれば、自然発生的に小分子化が達成できる。つまり、CFRP と半導体が 1 か所でも接触していればラジカルが生成され、これが開始剤 (initiator) = 種ラジカルとなり、小分子化が進行し、樹脂が分解される。同方式は少量処理に適した方式かもしれないが、CFRP リサイクルの量産処理には対応が難しいと考えられる。

ハ) 微生物による分解 (Biotechnical Process)

Hohenstein Institute は、バイオテクノロジーのリサイクルに基づく有望な新しい代替ソリューションの開発を研究している。

特定の微生物がポリエーテル樹脂などの化学物質を生化学的プロセスで代謝できるというセオリーに基づき、適切な微生物を選別することで、通常はエポキシ樹脂でできている CFRP のプラスチックマトリックスを分解することに成功した (プラスチックマトリックスを微生物学的に分解し、代謝物 (metabolite) として材料サイクルに戻す仕組み)。同時に、CF は傷つけることなく抽出が可能であるため、Hohenstein Institute によるとリサイクルされた繊維である rCF は vCF と同様に使用用途向けに再利用することが可能であるとされている。

二) 溶媒洗浄法

Vetrotex は CF 及び CF のプリプレグ樹脂を洗浄し繊維を回収する装置に関する米国特許

(US Patent 6,626,193) を権利化している。この回収装置は、繊維材料に樹脂が含浸されている繊維材料のスクラップを洗浄する装置で、溶剤を使用し樹脂を抽出する。投入口と回収口を有する閉鎖された中空の容器内にコンベヤベルトが設置されており、その上にオーバーベッドスプレー装置が設置されており、溶剤タックから溶剤を供給する。

同特許における繊維材料は CF 及びポリアミド繊維を対象としており、洗浄用の溶剤に関してはスピリッツ・ケトン・水が対象である。スピリッツはエタノールとみられる。

2-3-2. rCF の評価試験法

(1) 背景

種々の手法により製造された rCF を再び強化繊維等として活用するにあたっては、素材としての品質を供給側と需要側で共有するための共通基盤が必要である。新品の炭素繊維 vCF に関しては、例えば JIS R7606「炭素繊維—単繊維の引張特性の試験方法」や JIS R7608「炭素繊維—樹脂含浸ヤーン試料を用いた引張特性試験方法」のような評価手法が標準化されており、これらの手法によって評価された物性値が共有される。しかしながら、rCF は、ほとんどの場合において連続繊維ではなく短く破断した不連続繊維として回収され、vCF を対象とした既存の評価手法では特性の評価が難しい場合が多い。そこで、rCF の性状を踏まえた上で、必要とされる rCF の物性値を評価するための手法が求められる。また、rCF にはリサイクル処理プロセスで除去されなかった残渣成分やさまざまな不純物が混在する可能性が高く、素材の評価や環境規制への対応として、それらを分析するための手法も求められる。

このような背景を元に、NEDO 革新的新構造材料等研究開発プロジェクトの 1 テーマとして 2019 年度に「リサイクル炭素繊維の評価技術開発」が開始され、新構造材料技術研究組合(ISMA)組合員である産業技術総合研究所において、機械特性の評価手法と不純物の分析技術の開発が進められている。また、同 PJ の「熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発」テーマにおいて、当該テーマで開発している成形技術への rCF の活用を目指して、rCF の回収および評価技術の開発も平行して行われている。

本章では、以下、上記 PJ で開発が進められている評価手法の概要を説明する。また、本調査事業にて国内外の rCF メーカーから入手した rCF 試料に開発中の手法を適用して評価を実施し、開発手法の検証と課題抽出を試みた事例について述べる。なお、上記 PJ での評価手法開発状況の詳細に関しては、当該 PJ の成果報告書を参照されたい。

(2) 機械特性の評価技術

① rCF の機械特性評価技術の必要性

CFRP のリサイクルプロセスで rCF が回収される際、処理条件によっては、マトリックス樹脂の除去だけでなく、CF 自体になんらかの損傷が加わってしまう可能性がある。そのため、rCF の機械特性は元の CFRP に用いられていた vCF よりも低下してしまっている懸念がある。また、リサイクルプロセスで生じるマトリックス樹脂の残渣の存在、あるいは、vCF に施されていた表面処理の状態がリサイクルプロセスによって変化し得ること、などにより、rCF の表面状態も vCF とは異なっていると想定される。そのような rCF を再び強化繊維等として活用する際には、引張強度（ワイブル分布）、引張弾性率といった基本的な機械特性、および新たなマトリックス樹脂との界面の接着性を評価することが必要となる。しかしながら、既存の評価手法は vCF を前提として定められているため、そのままでは rCF の評価への適用が難しいことが多い。そこで、プロジェクトでは短く破断している rCF に

適用可能な評価手法の開発を進めている。

② フラグメンテーション試験による引張強度と界面せん断強度の同時評価技術

繊維 1 本を埋め込んだフィルム状試験片を引張ると、樹脂から繊維に力が伝わり、繊維が次第に破断していく。繊維の最終的な破断長さ（臨界繊維長）は、樹脂と繊維との接着性（界面せん断強度）に応じて決まる。この手法はフラグメンテーション試験として知られている。プロジェクトでは、フラグメンテーション試験の新たな測定・解析法を開発し、短く破断した rCF の繊維強度と界面せん断強度をひとつの試験法で同時に評価することを可能にした（図 2-24）。フィルムに少しずつひずみを加えていき、繊維の破断点密度の変化を追跡すると、ひずみの小さい初期の破断点の増加挙動から引張強度分布を、ひずみが十分に大きく、破断点密度が飽和した状態から界面せん断強度を評価することができる。5mm 程度にまで短くなった rCF についても、複数の試験で得られたひずみ-破断点密度のデータを重ね合わせることで、長い繊維と同等のデータを取得することができる。

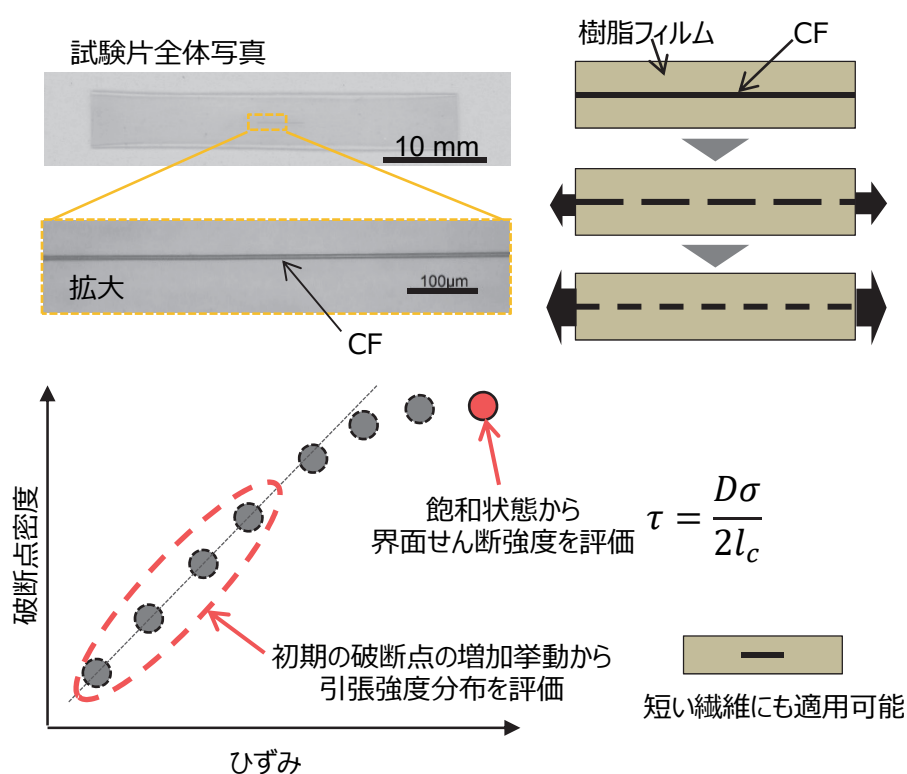


図 2-24. フラグメンテーション試験による引張強度と界面せん断強度の同時評価技術

出典：産業技術総合研究所

(参考) Sugimoto *et al.* *Carbon* 161 (2020) 83–88.

③ 繊維束引張試験による繊維機械特性の評価技術

比較的長さがあり、残渣も除去されている rCF の機械特性評価には単繊維引張試験 (JIS R7606) が用いられることがある。炭素繊維は脆性材料であり、元来、幅広い強度分布 (ワイブル分布) を示すため、信頼性を担保する観点から強度分布を評価することは非常に重要である。単繊維引張試験の場合は、試験を数多く (典型的には 100 本分程度) 行い、ワイブル分布のパラメータを得る、という手順になるが、測定にかかる手間 (時間コスト) が非常に大きい点がりサイクル材の評価法としては課題であった。そこで、プロジェクトでは、繊維の向きの揃った束 (繊維束) の引張試験により、数千~数万本の繊維からの強度分布パラメータを一度の試験で得る、繊維束引張試験の開発を行っている。繊維束引張試験としては、欧州規格 (EN1007-05) があるが、やはり vCF を前提とした規格であって rCF では条件を満たす試料が準備できないことが多い点、また、解析法として繊維間の相互作用が考慮されておらず、繊維特性を危険側に評価してしまう懸念がある点、などが課題である。①短いゲージ長の試料しか作製できない場合でも試験可能な剛性の高い測定システムの構築、②任意の本数の繊維束に適用可能とするための補正法、③繊維間の摩擦を考慮した解析手法、④繊維長が短い場合にも適用可能な繊維断面積の評価法、などの課題を解決することで、rCF の評価に適用可能な試験法として開発を進めている。

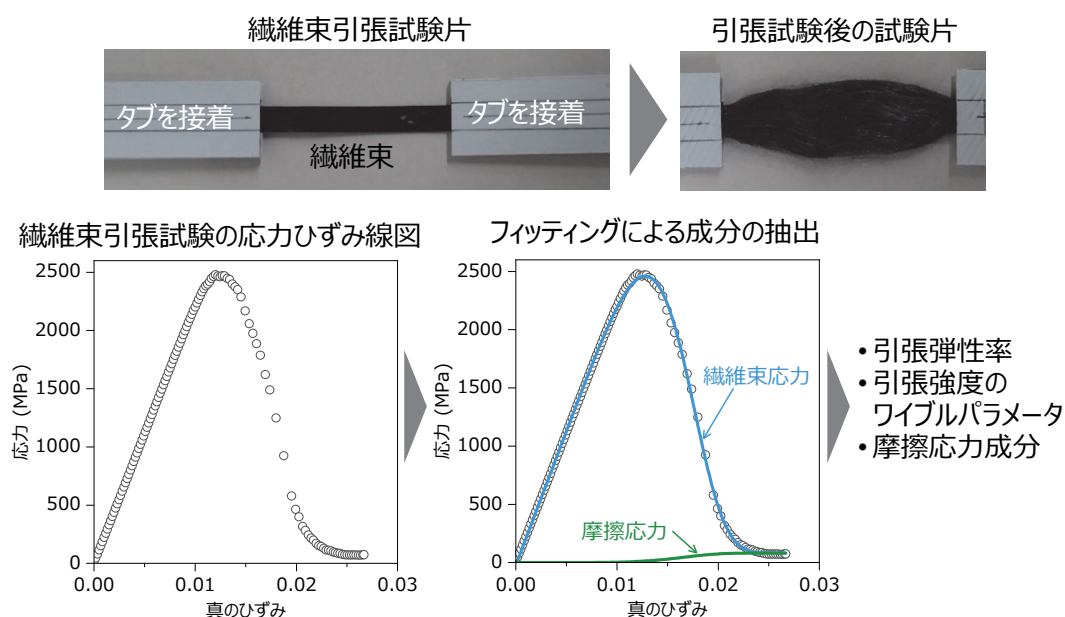


図 2-25. 繊維束引張試験による繊維機械特性の評価技術

出典：産業技術総合研究所

図 2-25 に開発中の繊維束引張試験の概要を示す。CF の束の両端に接着剤でタブを固定し、試験機治具に把持した際の繊維束の損傷を防ぎ、引張試験時にすべての繊維に荷重が加わるようにする。繊維束を引張った際の荷重および変位から、測定系のコンプライアンス補正を行って応力-ひずみ線図を作成すると、図 2-25 左下のグラフのように、始め直線的に増加する応力が、頂点を超えると少しずつ下がり、最後に小さい応力成分が残る、という挙動が見られる。少しずつ応力が下がることは、繊維束の中で繊維が少しずつ（強度の低いものから）破断することに対応している。また、最後に残る応力成分は、すべての繊維が破断した後にも、すぐに束は解れず（図中右上写真）繊維間に動摩擦が働いていることを示している。これらの挙動を理論的に記述する数式を導出し、応力ひずみ曲線全体をフィッティングすることで、引張弾性率、ワイブルパラメータ、摩擦応力成分の大きさ、を得ることができる。vCF を用いた検証により、本法によって得られる機械特性の値は、単繊維引張試験の値と一致した妥当な値が得られることを確認できている。

（参考） Sugimoto et al. J. Mater. Res. (2021) <https://doi.org/10.1557/s43578-020-00043-y>

④ rCF 実サンプルへの適用

本事業では、国内外のリサイクラー6社から計 13 種の rCF を入手した。



図 2-26. 入手した rCF 実サンプルの外観

出典：産業技術総合研究所

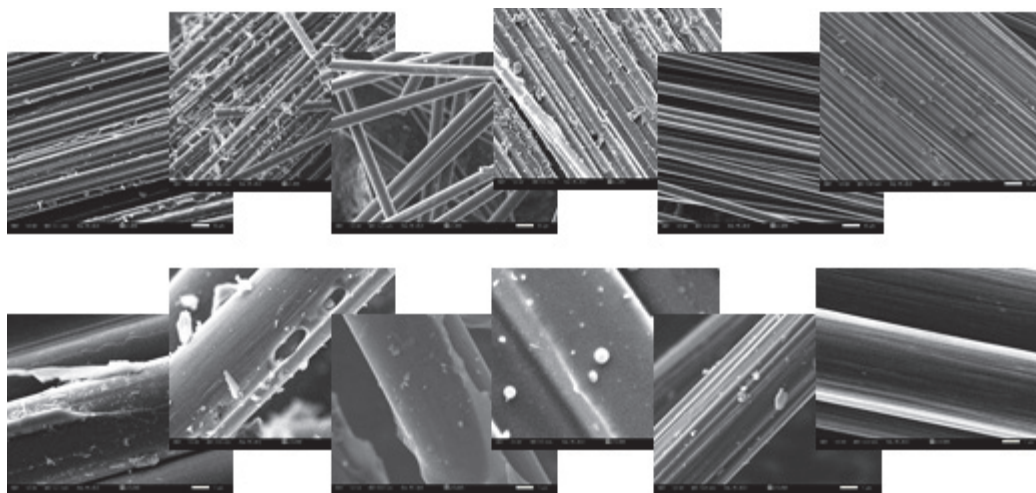


図 2-27. rCF 実サンプルの電子顕微鏡像

出典：産業技術総合研究所

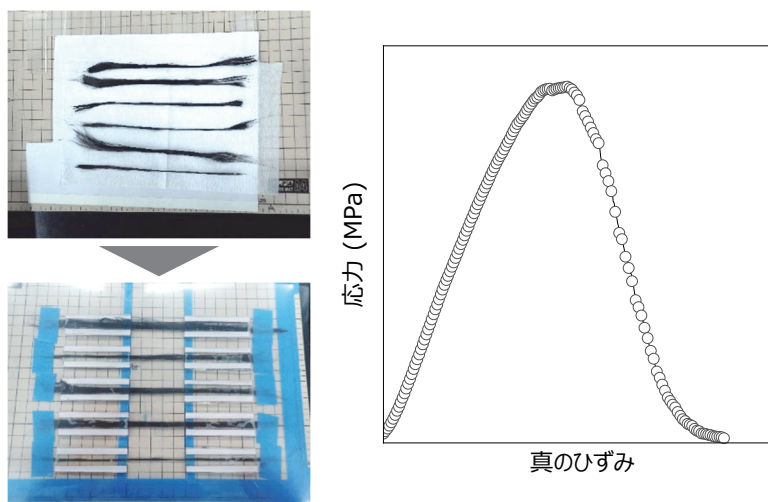


図 2-28. rCF 実サンプルから作成した繊維束試験片の引張試験

出典：産業技術総合研究所

外観と電子顕微鏡像を図 2-26、図 2-27 に示す。rCF には繊維長や残渣量、形態等の状態がさまざまに異なり、残渣の残留状態も試料によって異なっていた。

長さが十分にあり、残渣も除去されている rCF 実サンプルから、櫛で梳かして配向の乱れた繊維を除き、両端にタブを接着して試験片を作製した。引張試験を実施した例を図 2-28 に示す。この例では、引張弾性率 $210 \pm 18 \text{ GPa}$ と CF としてあり得る値が得られており、ワイブルパラメータの評価としても妥当な値が得られた。一方、試料によっては、複数の試験間でのばらつきがかなり大きい場合や、弾性率の評価値が市販されている CF の値からみて明らかに低い場合などが見られた。これらの結果は、試料の初期状態によっては、繊維束引張試験による特性評価法に改善の余地があることを示している。NEDO プロジェクトでは、引き続き、手法の改善に取り組んでいくこととしている。

(3) 炭素残渣量の定量評価技術

① 残渣量の定量評価技術開発の必要性

今回入手した実サンプルでも見られたように、CFRP から回収された rCF には、除去され切らなかったマトリックス樹脂由来の残渣成分が残っている場合が多い。残渣成分の量や状態は rCF の強化繊維としての再利用に影響を与えられるため、その定量技術が必要となる。通常、残渣成分と CF は耐熱性（酸化分解性）が異なるため、その差異を利用して残渣成分を定量する手法が考えられる。これまで、残渣の定量には、熱天秤等を用いて、加熱による重量減少を測定し、残渣量を定量することが行われてきたが、残渣量が少ない場合の測定精度等に課題がある。NEDO プロジェクトでは、残渣成分の分解によって生じる CO、CO₂ 等のガス濃度を測定することで、より簡便かつ高精度に残渣量を定量する手法の開発を進めている（図 2-29）。

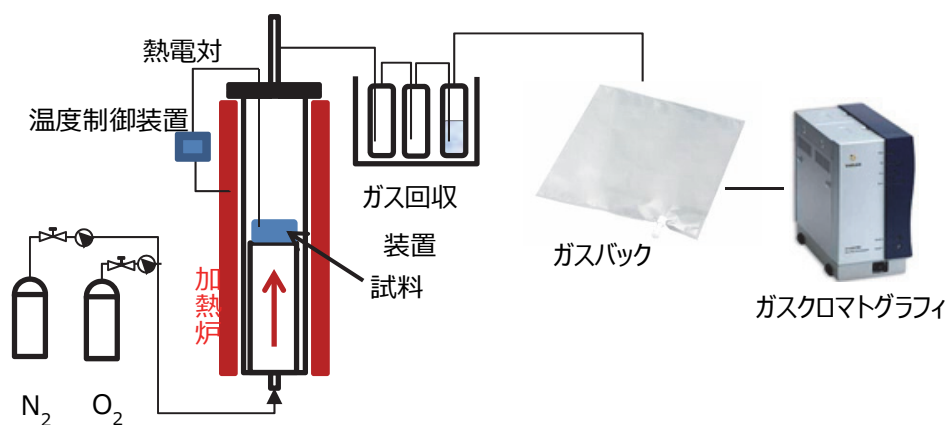


図 2-29. 開発中の残渣定量技術

出典：産業技術総合研究所

② 残渣の熱分解挙動の分析

開発手法において、適切な評価条件を決めるためには、残渣と CF それぞれの熱分解挙動を把握する必要がある。現在はさまざまな処理条件における分解挙動に関するデータの蓄積を進めている。一例として、rCF 試料を空気雰囲気下で加熱した際の重量変化と、それに伴うガス生成挙動を図 2-30 に示す。試料重量の減少速度は 500℃および 800℃で極大値を示した。前者は残渣の酸化反応、後者は炭素繊維の酸化反応と考えられ、残渣と炭素繊維の反応性は大きく異なり、それぞれを区別して定量できることが示唆された。CO および CO₂ の生成速度も 500℃付近で極大となり、残渣の酸化反応ではそれぞれがほぼ同じモル数生成していることが分かった。一方、より高温側の炭素繊維の酸化反応では、反応温度が高くなるに従って CO₂ の生成速度が増加したが、CO の生成は 700℃以上では減少し、炭素繊維の酸化反応は残渣とは異なる反応機構で進むことが示唆された。

航空端材から回収された rCF を空气中 500℃で長時間加熱した場合の、試料の重量減少

から算出した転化率（X）の対数値と加熱時間との関係は、2つの直線で示され、反応性の大きく異なる2つの反応がそれぞれ独立して起きていることが示唆された。二つの反応に漸近する直線の交点から、この試料に含まれる残渣は約19%であることが算出された。

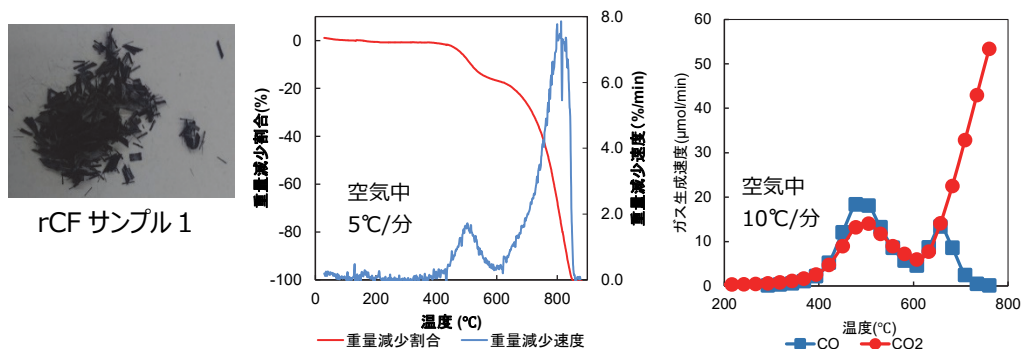


図 2-30. rCF の加熱分解に伴う重量減少とガス生成挙動

出典：産業技術総合研究所

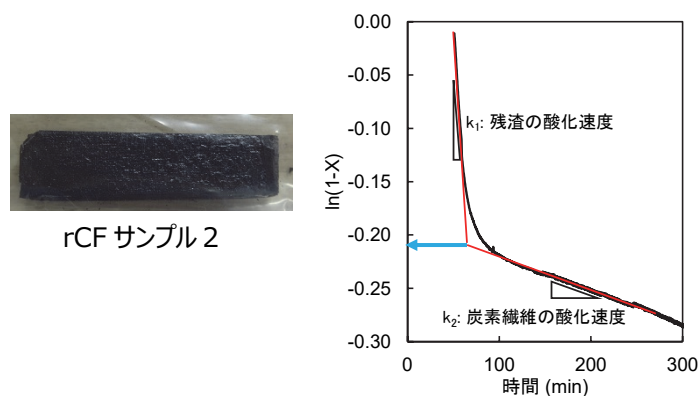


図 2-31. rCF の加熱分解に伴う転化率と加熱時間との関係

出典：産業技術総合研究所

(4) 不純物元素の評価技術

① 評価法の説明

rCF には、廃棄回収時に混入する金属粉、ガラス繊維、ほこりなどに由来する不純物元素が含まれていると考えられる。このため rCF の利活用のためには、環境規制対応および素材評価の面で不純物元素の管理が必要となる。環境規制の面では、例えば RoHS 規制対象の水銀、鉛、臭素といった有害元素の管理が必要であり、また、素材評価の面ではアルカリ金属や鉄など微量元素の管理が必要となると考えられる。NEDO プロジェクトではこれらの不純物元素の管理に資する rCF 中の不純物元素の分析法を開発している。今年度末までに不純物元素分析の原理手法を確立し、2022 年度末までに本分析法の確立を目指して研究開発を進めている。

開発中の分析法は環境規制対応および素材評価のための不純物元素を簡便・迅速に、か

つ多種類の元素を一斉に分析できるように、不純物元素の揮発性に応じた適切な分析前処理法と誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)による元素検出法を組み合わせた分析法を開発している。不揮発性元素分析は、マイクロ波支援酸分解法により rCF 試料を分解し、ICP-MS により元素を検出する。揮発性元素分析は、熱分解法により rCF 中の元素を気化して ICP-MS により検出する。図 2-32、図 2-33 に各分析法の概要を示す。

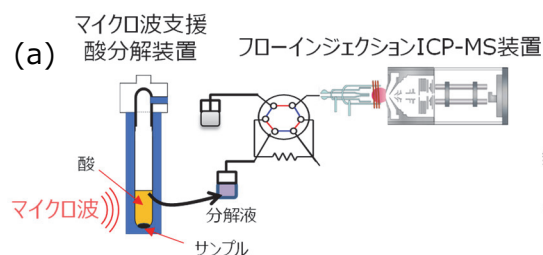


図 2-32. (a)マイクロ波支援酸分解/ICP-MS による不揮発性元素分析法

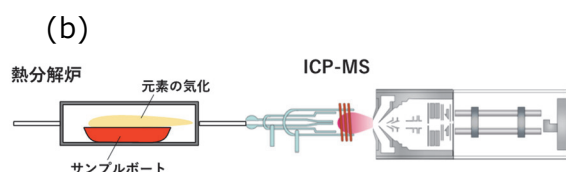


図 2-33. (b)熱分解/ICP-MS による揮発性元素分析法の概要

出典：産業技術総合研究所

② rCF 実サンプルへの適用

開発中の分析法を用いて、rCF 実サンプル 5 試料について分析を実施した。分析では、操作による汚染をできる限り抑制するため、可能な場合は rCF サンプルをそのまま分析に供した。形状が大きすぎる場合には、非金属性ハサミで切断した試料を用いた。不揮発性元素の分析は、分析前処理はマイクロ波支援酸分解法を用いて rCF 試料を分解し、この分解液を ICP-MS 測定した。分解条件を最適化することで、rCF の粉碎等を行うことなく、最低限の操作での分解を可能とした。揮発性元素の分析は、不揮発性元素分析に供した同じ試料を熱分解/ICP-MS の加熱ボートに導入し熱分解を行った。この熱分解して気化した元素をオンラインで ICP-MS 装置に導入し元素を検出した。今回の不純物元素分析においては、分析対象元素は環境規制対応および素材性能評価の対象となる可能性がある元素を中心に測定した。また、分析および試料中の含有元素のばらつきを確認するため 3 回繰り返し行った。なお、本分析法は開発中であるため、現時点では分析原理が確立されているものの rCF 試料の適用範囲や一部の元素の定量性など、まだ十分に検証されていない。また、rCF の試料の一部を採取してそのまま分析を行った。よって、今回報告する分析値はあくまで一例であり、各 rCF の代表値としては保証されない。

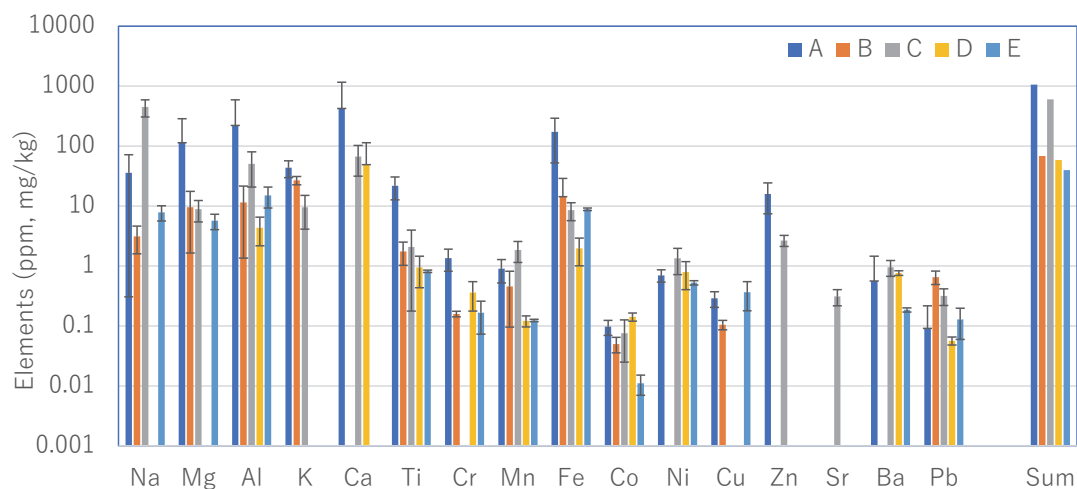


図 2-34. マイクロ波分解/ICP-MS によるリサイクル炭素繊維中の不純物元素の分析結果

出典：産業技術総合研究所

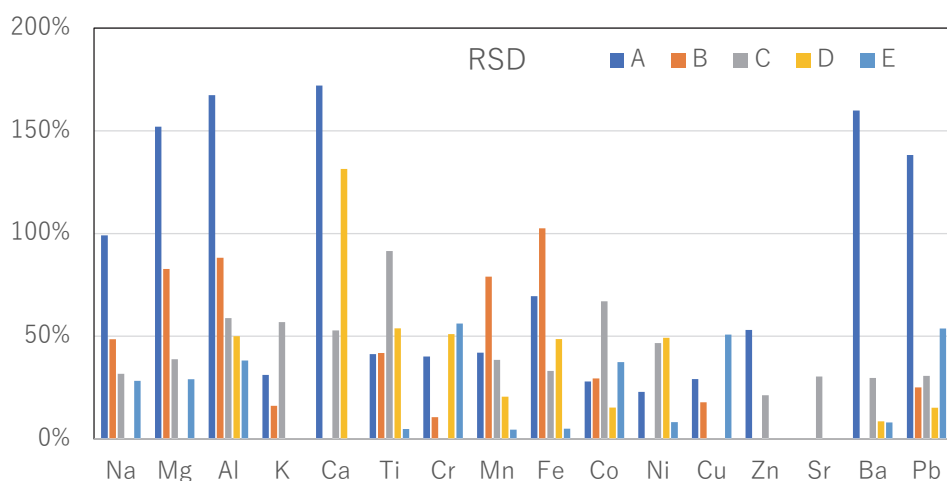


図 2-35. マイクロ波分解/ICP-MS による不純物元素分析の相対標準偏差(分析回数 3 回)

出典：産業技術総合研究所

不揮発性元素分析について、rCF 試料中の不純物元素含有濃度の結果を図 2-34 に示す。今回の試料で検出した元素はアルカリ金属、アルカリ土類金属、チタン、アルミニウム、および重金属の 16 元素であった。また、各元素濃度を現時点で検証した範囲での暫定的な定量法により測定したところ、0.011ppm～450ppm と広範囲の濃度域で、かつ試料毎に大きく異なっていた。ナトリウム、カリウム、マグネシウム、カルシウムといったアルカリ金属およびアルカリ土類金属の軽元素に加えて、アルミニウムお

よび鉄の濃度が高く 1~100ppm レベルであった。一方、鉄を除く重金属元素は濃度が低くおおむね 0.01~1ppm レベルであった。また、各元素の濃度は試料によって大きく異なり、今回測定した元素の合計濃度(図 2-34 の sum)は、40ppm~1056ppm と約 26 倍の濃度差があった。

また、各試料についての繰り返し分析結果のから得られた相対標準偏差(RSD)を図 2-35 に示す。各元素分析の RSD 値は 5%~172%と広範囲であり、かつ試料毎に大きく異なった。全体の傾向としては、ばらつきは試料および元素に大きく依存していた。例えば、試料 A は他の試料と比較してばらつきが大きい元素が多かった。また、元素の種類によってばらつきは大きな差があり、試料 A ではナトリウム、マグネシウム、アルミニウム、カルシウム、鉛などのばらつきが非常に大きい一方、コバルト、ニッケル、銅、亜鉛などの重金属類は他の試料と同程度に小さかった。一方、試料 E は全体的にばらつきが小さく、かつばらつきの元素間の差も小さかった。今後、本分析法の開発においては不均一な試料の分析条件について検討していく予定である。なお、分析法自身の精度については、元素濃度が均一な試料は 10%以下となっており(例:試料 E の鉄、ニッケルなど)、高精度な分析の可能性があると考えている。

揮発性元素分析については、現段階で元素定量法は確立されていないが、今回の 5 試料の分析においては試料に含有する臭素、カドミウム、水銀、および鉛を検出した。熱分解 ICP-MS による元素検出信号プロファイルを図 2-36 に示す。熱分解温度は初期温度 200℃から 5 分で 1200 度まで昇温した。臭素や水銀は加熱直後の 200℃程度から検出信号が観測され始め、カドミウムや鉛は 600℃付近から信号が検出された。鉛を除いた 3 元素は、単体の沸点が今回の熱分解温度以下であるため気化して十分検出できると考えられる。一方、鉛単体の沸点は 1749 度であり今回の熱分解条件では蒸発しないため、鉛は低沸点化合物が気化して検出されたと考えられる。また、臭素は 2 つのピークが生じていることから少なくとも 2 種類の化学形態の臭素化合物が含まれていることが示唆された。

図 2-37 には 3 回の繰り返し測定における検出信号強度の相対標準偏差 (RSD) を示す。各元素分析の RSD 値は 4%~136%と広範囲であり、かつ臭素、カドミウム、鉛は試料毎に大きく異なった。例えば、カドミウムについては、試料 B は 100%を超える大きな RSD 値を示す一方で、試料 C は 10%未満となった。熱分解/ICP-MS も前述の不揮発性元素分析法と同じく、不均一性試料の分析への対応を今後検討し、また、元素の定量法も検討し分析法として確立していく予定である。

以上、今後の不純物元素分析法の開発は、分析の定量性や精度を高め、また、rCF の実試料に対応した汎用的で簡便・迅速な不純物元素分析法の確立を目指していく。

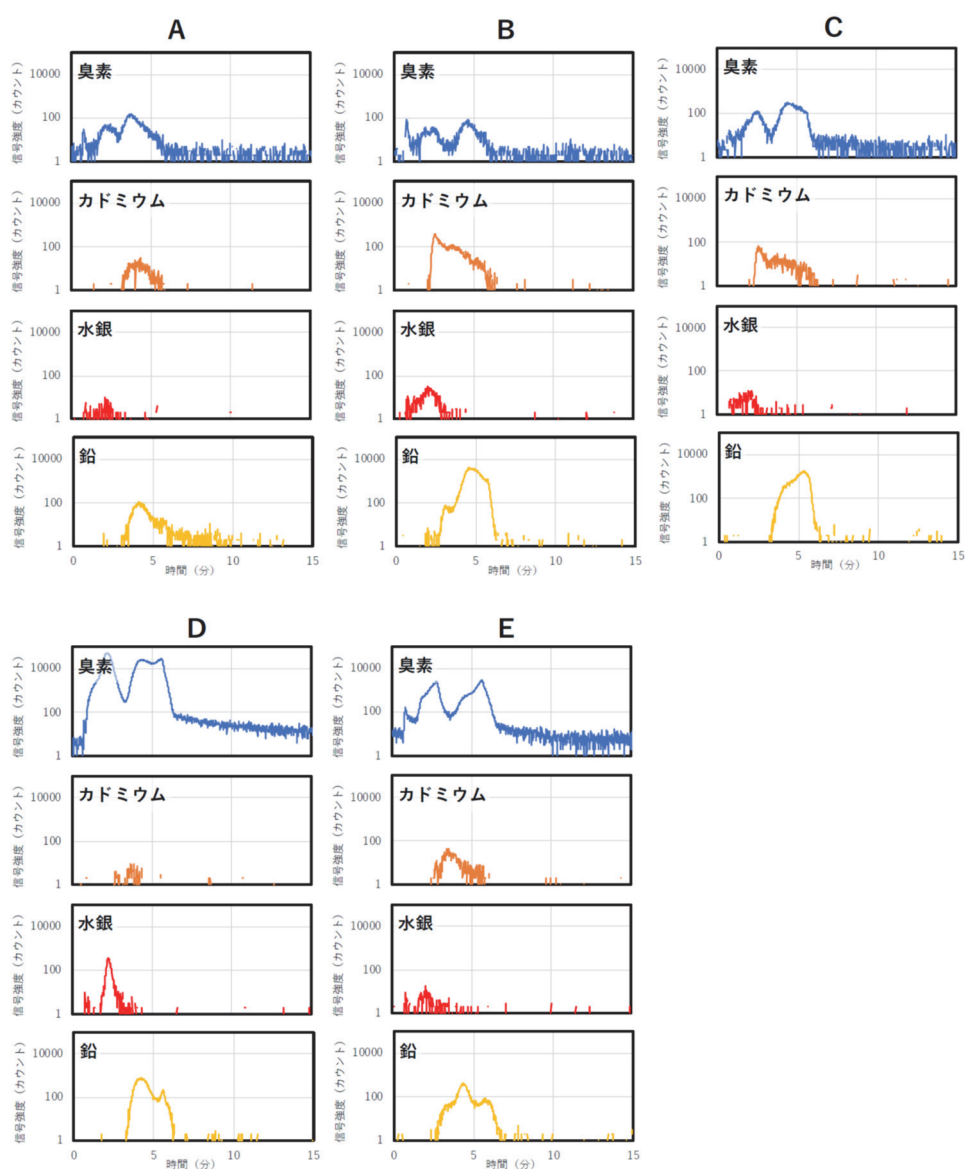


図 2-36. 熱分解/ICP-MS によるリサイクル炭素繊維中の不純物元素の検出信号

出典：産業技術総合研究所

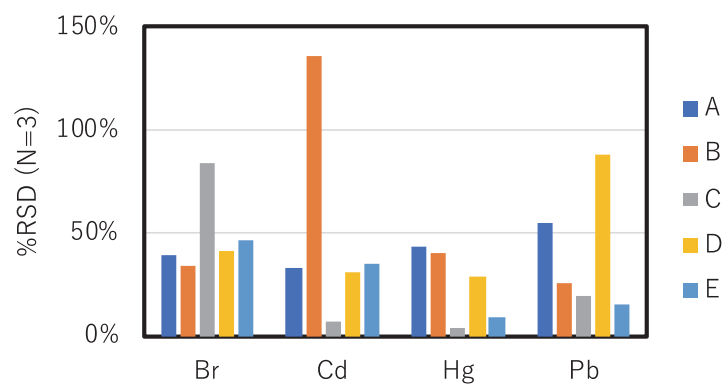


図 2-37. 熱分解/ICP-MS による不純物元素分析の相対標準偏差(分析回数 3 回)

出典：産業技術総合研究所

2-3-3. rCFRP の評価試験法

(1) BMW 社 rCF 成形品の機械特性確認

① SGL 社リサイクル CF マット材の HP-RTM 成形性確認

BMW-i3/i8 には SGL 製 MA 材による HP-RTM 成形部材が用いられている。HP-RTM 成形のプロセスは、CF 織物(MA 材)からパターンカットし成形品にあわせて立体賦形するプリフォーミング工程と、RTM 成形装置による樹脂含浸・硬化工程の 2 つからなっている (図 2-38)。RTM 成形は金型内で 6 面加工が可能なため、部材成形後のトリム加工(部材周囲の余分な端部の切り落とし)は最小限ですむことから製造工程内から発生する端材は CFRP ではなく、プリフォーム成形時の材料裁断の端材が主なリサイクル対象材料となる。

BMW 社では工程内端材から回収した rCF を内装材などの非構造部材の材料として利用している。そこで、このドライファイバーMA 材を裁断し不織布状に加工した rCF 製マット材について、成形性の確認を行った。

成形方法は BMW 社の i3/i8 に用いられている HP-RTM 成形法とし、金工大 ICC の Krauss Maffei 社製 HP-RTM 装置 (図 2-39) を用いた。図 2-40～図 2-42 は、BMW 社のリサイクル材と同様に MA 材のからリサイクル処理された SGL 社製の rCF 製マット材を用いて成形した結果である。成形形状には自動車のファイアーウォールを模擬した 1/2 スケールの成形評価モデルを用いた。本モデルは複雑な凹凸があり、連続繊維基材によるプリフォーム成形では自動化が難しいが、不連続繊維からなる rCF 製マット材は、簡単なプレス型によって、比較的容易にプリフォームを成形することが出来た。

図 2-40 は、HP-RTM 成形法にて、Vf25%となる量の rCF 製マット材を金型内にセットして樹脂注入をおこなった結果である。CF マット材は CF が複雑な方向に絡み合っているため、プリフォーム内部の樹脂流動性が悪く、本装置の樹脂注入圧力とエポキシ樹脂の粘度の組み合わせでは正しく成形することが出来なかった。rCF 製マット材の量を減らして Vf を下げた場合は、プリフォーム内の樹脂流動性が増し、図 2-41 の様にボイドやドライスポットの無い十分な品質の成形品を得ることが出来た。ちなみに、図 2-42 は、C-RTM 成形法における成形トライの結果である。C-RTM 成形法は樹脂注入圧を低く抑えた成形が可能であるが、樹脂注入口から遠い部位にドライスポットが残ってしまい、十分な品質の成形品が得られなかった。

以上から、マット材などの不連続・ランダム繊維配向の基材を RTM 成形する場合は、高 Vf の部材よりも低 Vf の部材の方が好ましく、その意味から、rCF 製マット材は非構造部材へ利用することが適している、と言える。あるいは、SMC 材など中間加工により樹脂との混練を行う事で、より高い Vf の部材を成形する事が可能となるが、その場合は SMC 材の成形コストが課題となる。

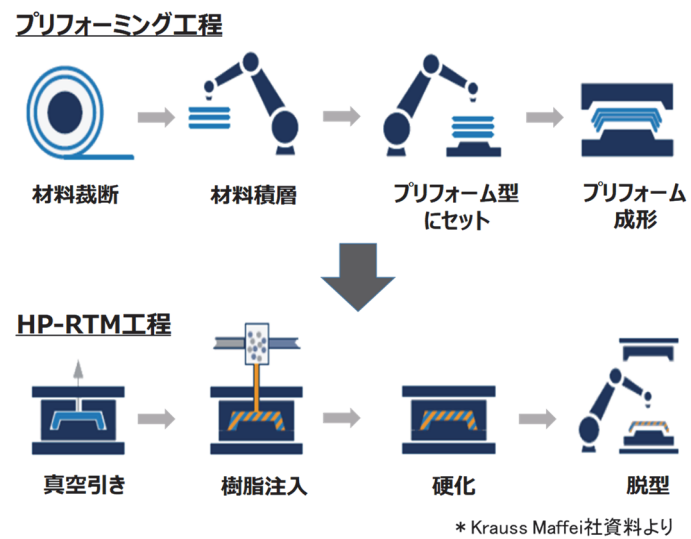


図 2-38. HP-RTM (High-Pressure RTM) 成形システム
出典：金沢工業大学



図 2-39. 金工大 ICC の HP-RTM 装置外観(Krauss Maffei 社)
出典：金沢工業大学

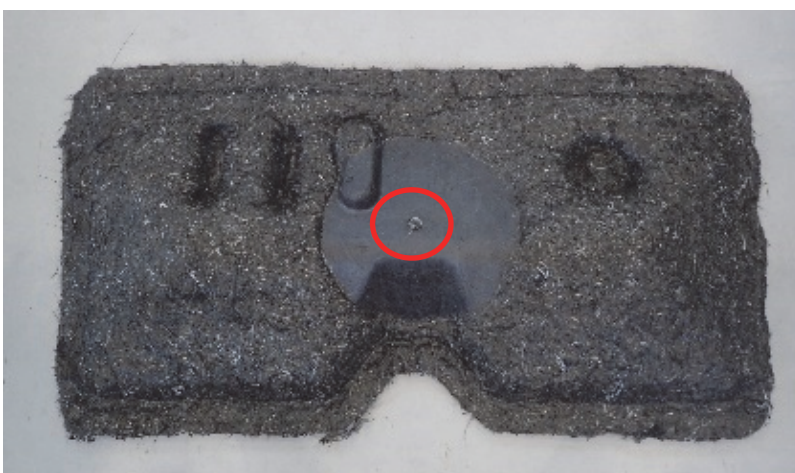


図 2-40. SGL 社製の rCF 製マット材による RTM 成形結果
(Vf25%の HP-RTM 成形結果、赤丸は樹脂注入口を示す)

出典：金沢工業大学



図 2-41. SGL 社製の rCF 製マット材による RTM 成形結果
(Vf12%の HP-RTM 成形結果)

出典：金沢工業大学



図 2-42. SGL 社製の rCF 製マット材による RTM 成形結果
(Vf25%の C-RTM 成形結果、赤丸部分がドライスポット)

出典：金沢工業大学

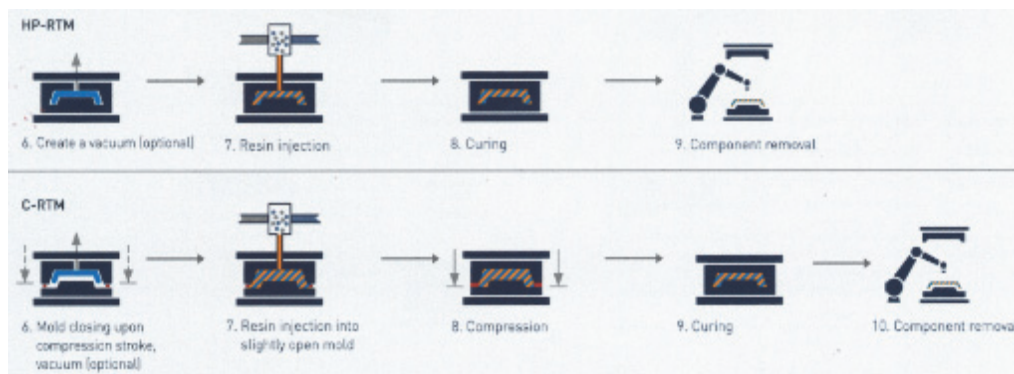


図 2-43. HP-RTM と C-RTM 成形プロセスの比較

出典：金沢工業大学(Krauss Maffei 社資料引用)

(2) BMW-i3 内装材の機械特性確認

BMW 社は自社の製造ラインから出た上記の rCF を裁断し・不織布に加工して内装材の基材とし再利用している。BMW-7 シリーズに用いられている rCF から製造された SMC 材による内装材について、その材料特性を確認した。

図 2-44 にピラーカバーの外観と強度確認のための試験片切り出し位置を示す。図 2-45 と表 2-57 に切り出した試験片の外観写真と寸法、重量を示す。内装材の密度は約 1.35g であり、CF の密度を 1.8 (g/cm³)、エポキシ樹脂の密度を 1.2 (g/cm³) とすると、ほぼ Vf30% 程度の成形品であることが分かった。

材料特性の確認として、曲げ試験 (JISK7074 に準拠、サポートスパン 80mm) を実施した (図 2-46 は試験中の写真)。変位・応力線図を図 2-47 に示す。成形品から切り出した試験片のため、一部の試験片は平面形状ではないことから荷重負荷後に非線形な挙動を示したが、図 2-48 と図 2-49 に示す様に概ね適正な精度で計測することは出来た。その結果、平均強度は 223MPa、平均弾性率は 14.4GPa に対して CV はともに 15%程度となった。不

連続繊維材料である事と Vf が低い事などを考慮すれば、CV が大きい事は概ね妥当な結果であると言えるが、強度や弾性率の値は、Vf30%の成形品に対しては、多少低めの値であると言える。

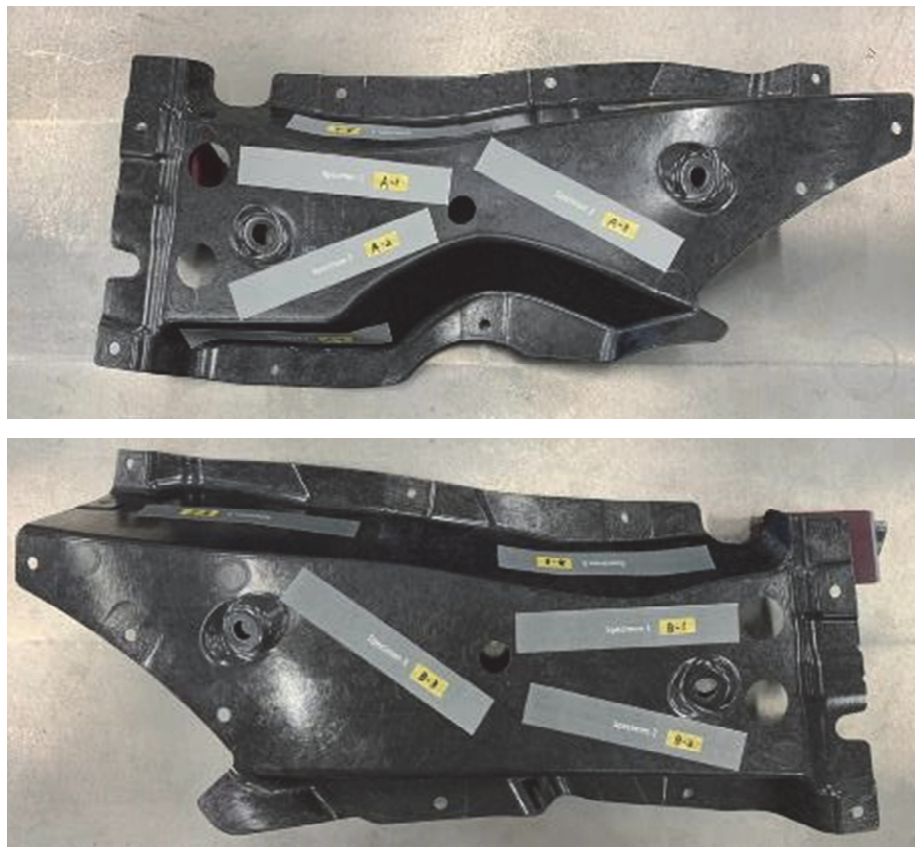


図 2-44. BMW-7シリーズのピラーカバーと強度確認のための試験片切り出し位置

出典：金沢工業大学

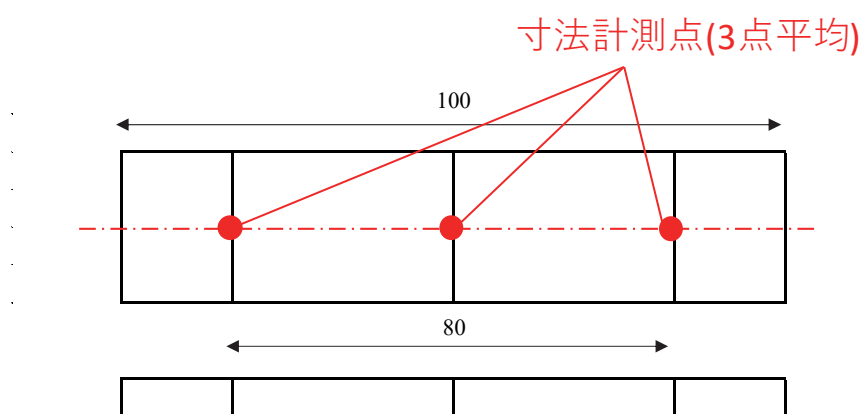
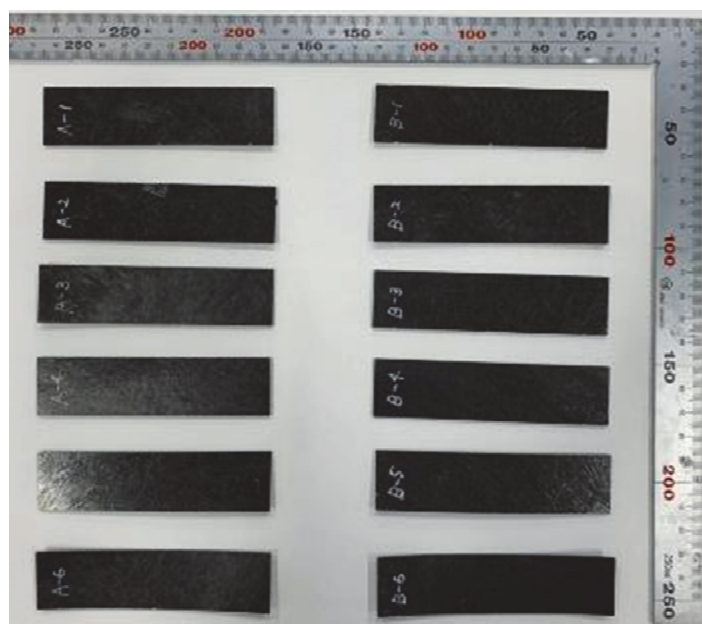


図 2-45. BMW-i3 のピラーカバーから切り出した試験片と寸法計測位置
出典：金沢工業大学

表 2-57. 試験片の寸法と重量

試験片 A											
No.	幅				厚さ				長さ L(mm)	重量 (g)	密度 (g/cm ³)
	1	2	3	平均	1	2	3	平均			
1	25.01	25.02	25.07	25.03	1.725	1.752	1.779	1.752	100	6.03	1.37
2	25.10	25.03	25.00	25.04	1.794	1.801	1.800	1.798	100	6.07	1.35
3	24.99	24.97	24.92	24.96	1.813	1.795	1.752	1.787	100	6.06	1.36
4	25.06	25.13	25.06	25.08	1.732	1.669	1.672	1.691	100	5.66	1.33
5	25.10	25.02	25.06	25.06	1.618	1.663	1.665	1.649	100	5.48	1.33
6	25.08	25.14	25.09	25.10	1.764	1.658	1.656	1.693	100	5.77	1.36
平均	25.05				1.73				100	5.85	1.35

試験片 B											
No.	幅				厚さ				長さ L(mm)	重量 (g)	密度 (g/cm ³)
	1	2	3	平均	1	2	3	平均			
1	25.03	24.98	25.02	25.01	1.786	1.810	1.805	1.800	100	6.09	1.35
2	25.02	25.02	25.03	25.02	1.777	1.794	1.842	1.804	100	6.11	1.35
3	25.11	25.09	25.04	25.08	1.702	1.718	1.745	1.722	100	5.83	1.35
4	25.05	25.05	25.07	25.06	1.530	1.554	1.565	1.550	100	5.25	1.35
5	25.07	25.03	25.10	25.07	1.708	1.702	1.711	1.707	100	5.73	1.34
6	25.03	25.13	24.91	25.02	1.758	1.758	1.767	1.761	100	5.92	1.34
平均	25.04				1.72				100	5.82	1.35

出典：金沢工業大学

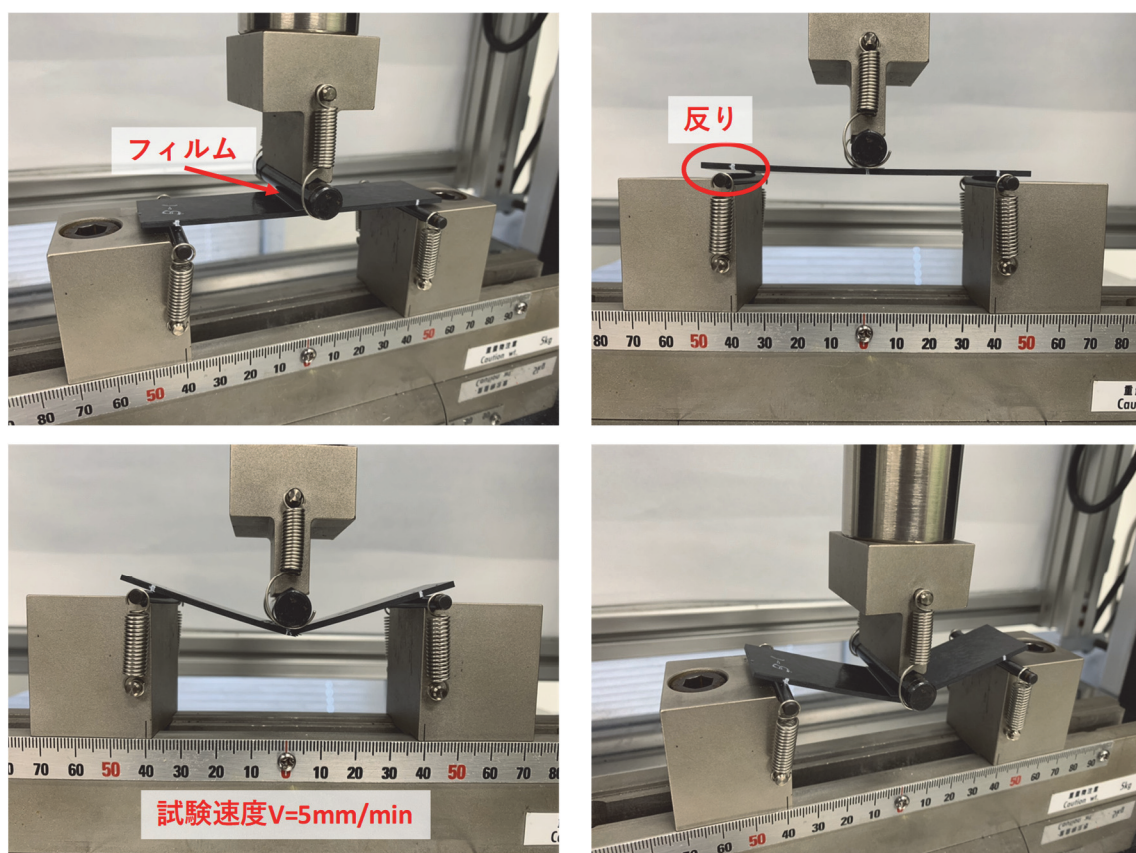


図 2-46. 曲げ試験中の様子

出典：金沢工業大学

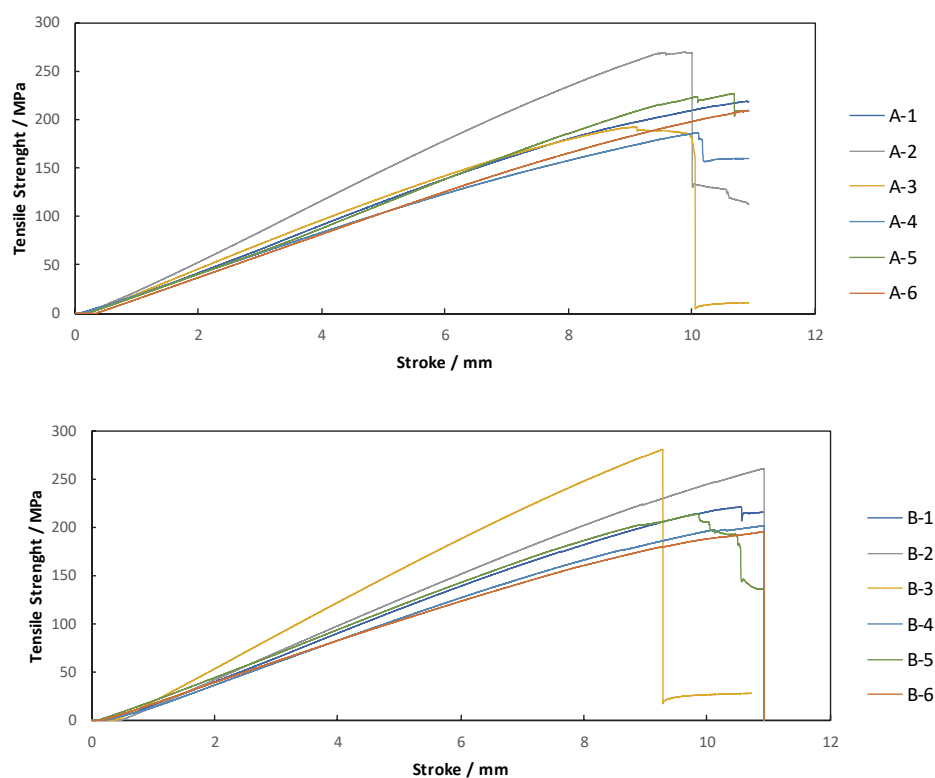
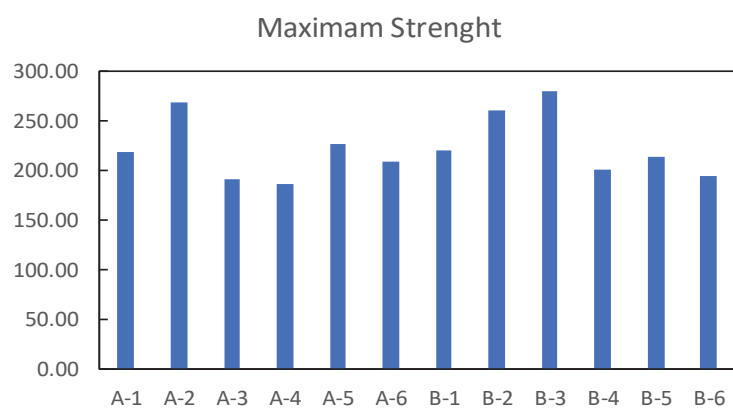


図 2-47. BMW-i3 のピラーカバーから切り出した試験片曲げ試験結果(変位—応力)
出典：金沢工業大学



No.	最大荷重 / N	最大応力 / Mpa	弾性率 / Gpa
B-1	149.30	221.10	13.50
B-2	176.94	260.76	16.55
B-3	173.90	280.60	19.90
B-4	101.18	201.66	11.92
B-5	129.95	213.47	14.21
B-6	126.26	195.27	12.45

図 2-48. BMW-i3 のピラーカバーから切り出した試験片曲げ試験結果(強度)
出典：金沢工業大学

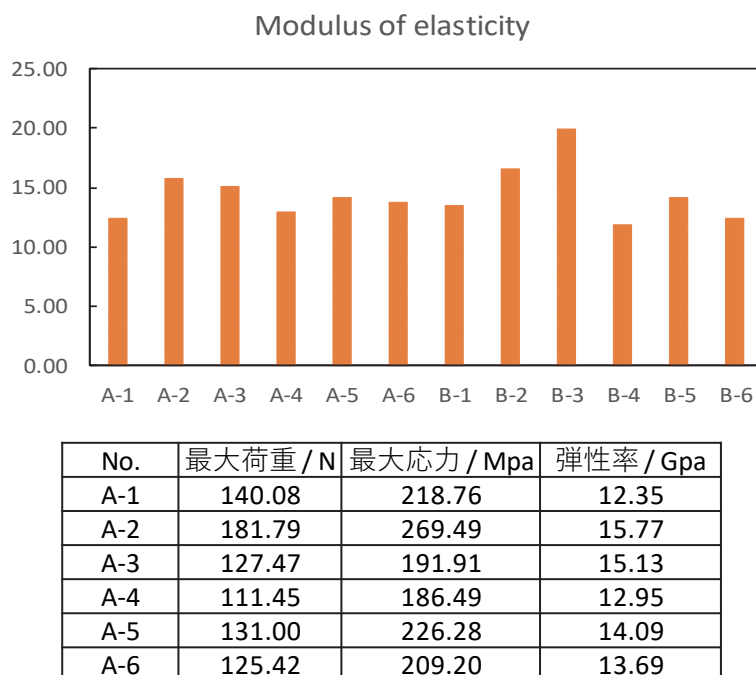


図 2-49. BMW-i3 のピラーカバーから切り出した試験片曲げ試験結果(弾性率)

出典：金沢工業大学

① rCF/熱可塑繊維混織マット基材による連続シート材成形

某社製の rCF と PP 繊維の混織によるマット材(rCF 製熱可塑マット基材)は、熱可塑性樹脂のコミングル基材として、ヒート&クール成形法などプレス成形による成形が可能であるが、よりハイサイクル・低コストの成形を実現するためには、成形されたシート材(スタンパブルシート)によるスタンピング成形が望ましい。

そこで、低コストでスタンパブルシートを製造する技術として、金工大 ICC のダブルベルトプレス装置により連続製造試作を行った。金工大 ICC のダブルベルトプレス装置は図 2-50 に示す様に、ローラー式のプレスシステムでありことから、上下ベルト間のギャップを自由にコントロールすることが出来る。そのため、傘高い混織マット基材から薄いシートの成形を行うことが可能となり、さらにベルトの両端からの材料流出が起きないような最低厚さの管理も可能となる。

図 2-51 と図 2-52 に材料目付 350 g/m² (CF+PP) のドライファイバーマット材によるシート成形の様子を示す。本図では、ドライファイバー厚さ 3mm のマット材を加熱溶融と冷却加圧を連続的に行う事で約 t0.3mm の熱可塑シート材を 5m/分で成形している。他に成形後のシート厚さ 2mm のシート成形も行い、ダブルベルト投入前のドライファイバーマットの厚さは 30mm であったが、問題なく連続的に成形することが出来た。ICC のダブルベルト装置の加熱・冷却エリアは 2m 以下の長さであるが、このコンパクトな装置にて、数 m/分の連続成形が可能であった。

以上の様に、ダブルベルトプレス装置による低コスト連続シート製造は、rCFの製品化/実用化において必須となる、安い材料価格/リーズナブルな材料特性に見合った、低コストなモノづくり/商品化にたいして、有効な中間基材製造技術であると言える。

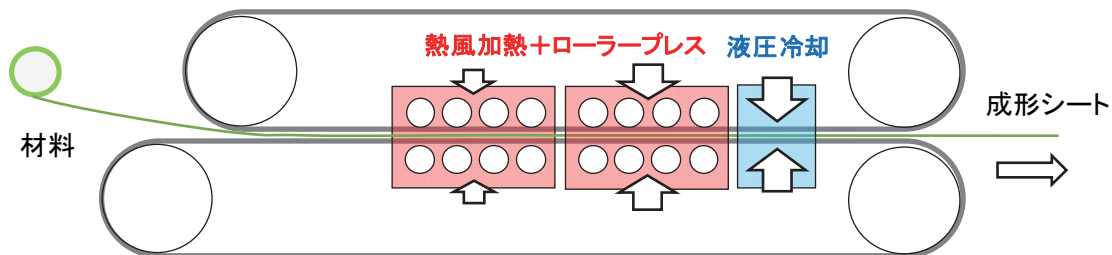


図 2-50. 金工大 ICC のダブルベルトプレス装置システム)

出典：金沢工業大学

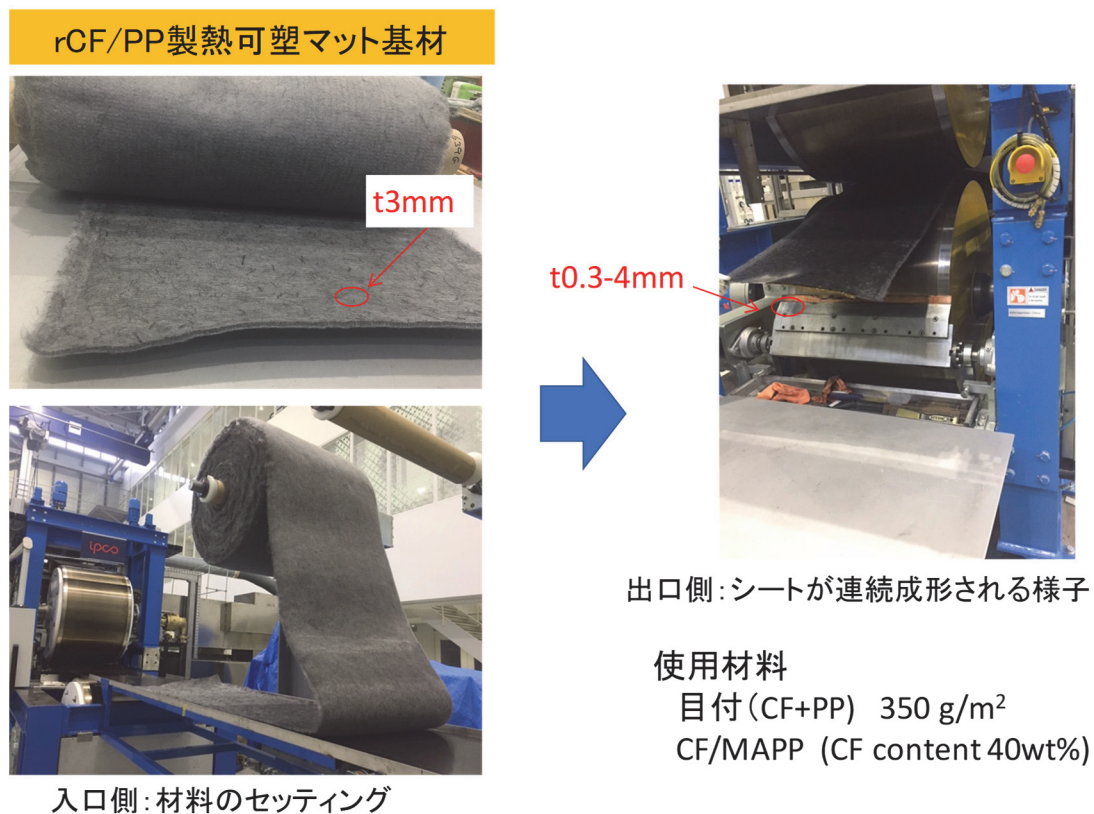


図 2-51. 金工大 ICC のダブルベルトプレス装置による連続シート成形の様子

出典：金沢工業大学

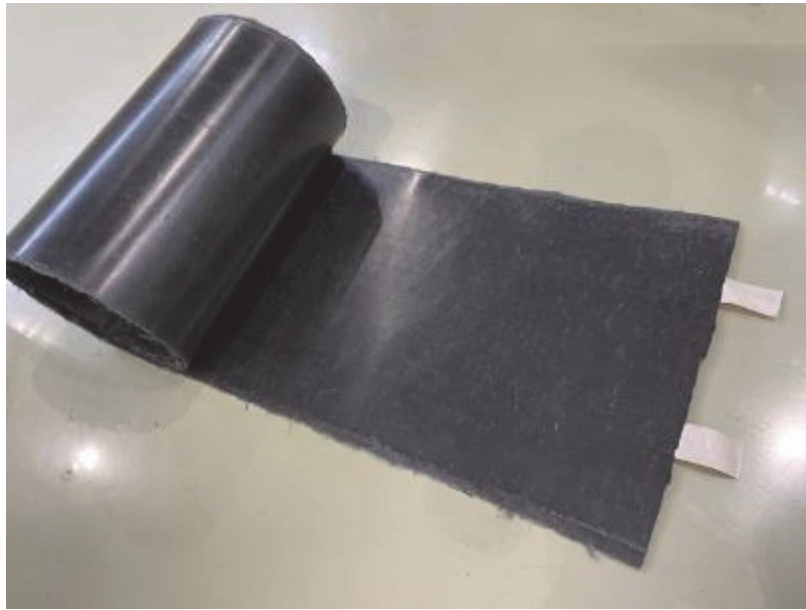


図 2-52. ダブルベルトプレス装置による連続シート材
出典：金沢工業大学

2-3-4. 欧州研究機関訪問

本評価試験方法を活用したラウンドロビンを想定し、2021年1月19日に欧州研究機関のうち rCF の評価試験を行っている Fraunhofer IGCV とのオンライン面談を実施した。同研究所でも同様に rCF の評価試験を行っているため、まずは AIST と Fraunhofer IGCV 双方の評価試験結果の交換を実施することになった。

2-3-5. ラウンドロビンに向けた枠組み作り

今後は AIST が開発した rCF 評価試験方法に関して同じ治具、同じ評価試験方法を用いたラウンドロビンに向けた枠組み作りが課題となる。今回の調査事業を通じて Fraunhofer IGCV とのコンタクトポイントを築いたことで、その足がかりを得ることができた。いずれは他の欧州拠点や米国、中国等との連携も必要になってくるため、まずは Fraunhofer IGCV との双方向のやり取りから発展及び他の研究機関やメーカー、ユーザー等へと拡張させていくことが求められる。

2-4. 2-1～2-3 のまとめ

CFRP のマテリアルリサイクルを拡大していくためには、(1) 循環利用システム構築と(2) 評価試験法の確立等がまずは求められる。

(1) 循環利用システム構築

CFRP リサイクルを事業化していくには、生産工程及び使用済製品からの廃 CFRP 回収、廃 CFRP からリサイクルされた rCF の価格設定（ブランド化）、rCF 販売（用途開拓）をセットで成立させていく必要がある。これは一部のメーカーやユーザーのみの取り組みでは難しいため、サプライヤー、ユーザー、リサイクル業者、研究者が一体となり、CFRP の回収から再利用のスキームを構築していくことが求められる。

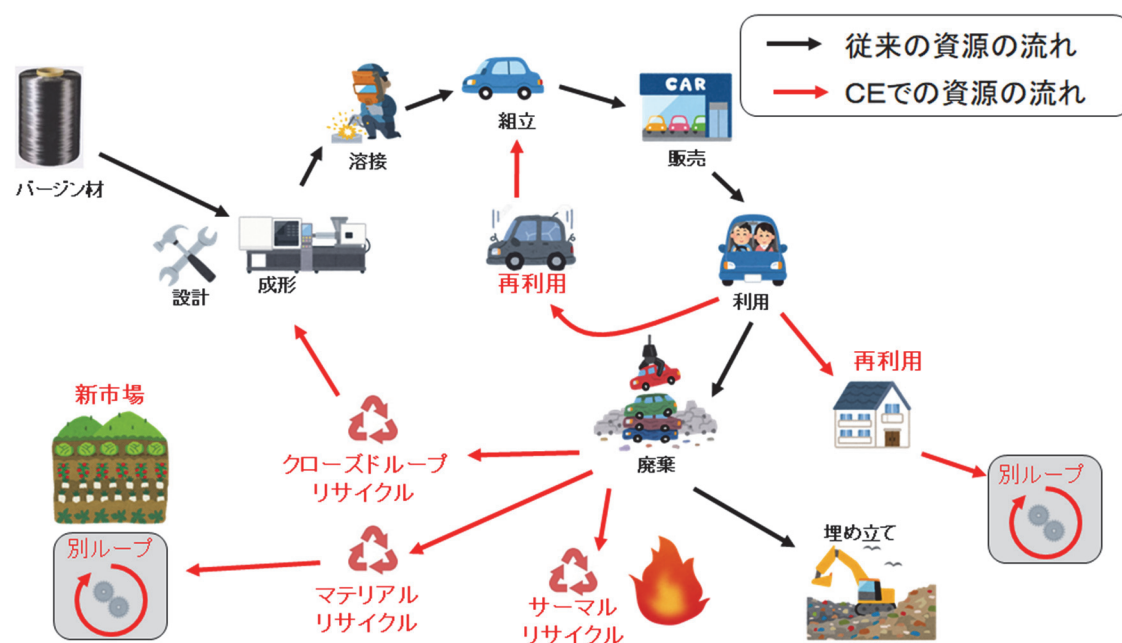


図 2-53. “rCF” を使ったサーキュラーエコノミー（CE）の構築

出典：矢野経済研究所作成

① 回収

まずは安定かつ継続した廃 CFRP の安定的かつ継続的な回収（入手）が事業化の最低条件となる。廃 CFRP の回収では、現状は工程内端材からの回収が行われているが、使用済製品である廃材からの回収も今後検討していく必要がある。現状、CF は航空機、スポーツ・レジャー、その他自動車、風力、压力容器等で使用されているが、これらの用途の中である程度まとまった数量（廃 CFRP）を確保可能な用途は航空機、自動車、風車、压力容器等と考えられる。ただし、風車や压力容器は CFRP 単体だけでなく CFRP との複合品も多く、rCF をうまく有効活用する方法確立も必要になる。

また、廃 CFRP は国内よりも海外での発生量の方が多いため、これらを海外から国内に持ち込むことができれば、CFRP リサイクルにおける rCF 原料の安定回収が可能となる。ただ、有害廃棄物の国境を超える移動及びその処分の規制に関するバーゼル条約（1993 年条約第 7 号。以下「バーゼル条約」という。）の付属書の一部が 2019 年 9 月 24 日に改正され、2021 年 1 月 1 日から効力を生じている。これにより、リサイクルに適さない廃プラスチックの輸出入が規制対象となっており、海外からの廃 CFRP の輸入がバーゼル条約の規制対象となる可能性があり、今後の安定回収を図る上での懸念事項である。

② 価格

rCF の価格は形態やオーダーの量によっても異なるため一概には言えないが、2016 年時点において vCF の価格 24～30USD/kg に対し、rCF は 15USD/kg 程度で販売されているとみられる⁹⁷。一般的に rCF の価格は vCF よりも安価な価格で販売されることが多いが、それでも rCF のユーザーサイドからは高価であると捉えられている。実際に、今回の調査において以前は rCF を採用していたが現在はストップしているという欧州自動車メーカーに確認したところ、採用のポイントは rCF であるかどうかではなく、価格的な優位性（安価な CF かどうか）であるという回答があった。循環利用システムが要求されているが、ユーザーがその価格を転嫁することができていない。マーケットを開拓していくうえでは rCF メーカー自身がコストダウンをより進めていくと同時に、循環システムのなかで rCF に付加価値を付与する社会的な仕組みが必要である。

③ 用途開拓

rCF は冒頭で述べたようにノート PC ケース等で使用されているが、採用用途はまだ少ない。最終製品ユーザーとしては安定調達に rCF 採用の最低条件となるが、それ以前に rCF の出口戦略が不明瞭であるという課題がある。

先述したように、EU プラスチック戦略では 2025 年までに 1,000 万 t の再生プラスチックを利用することを目標に掲げているが、それを踏まえて EU では包装、建設資材に加え、自動車などにおいても再生プラスチック含有量の増加と廃棄物排出削減を必須条件にしようとする動きもある⁹⁸。廃 CFRP に関しても同様にリサイクルニーズが高まることが予想されるため、rCF を使用した再生プラスチックの採用を増やす可能性についてはさらなる調査が必要となる。

⁹⁷ <https://recyclinginternational.com/magazine/september-2016/>

⁹⁸ https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/new_circular_economy_action_plan.pdf

(2) 評価試験法の確立

vCFには多種多様なタイプがある。引張弾性率と引張強度でプロットしただけでもさまざまな種類があるうえ、同様なスペックであってもvCFメーカーによって同じカテゴリーであっても、それらの特性には差異がある。ただ、vCFはメーカーサイドで原料～紡糸工程及びサイジング材など一通りの由来を把握できているのに対し、rCFは様々な用途から回収されるため、元はどのようなCFであったか遡って把握することができない。もともとのvCFが多種多様である上に、幅広い用途から回収された廃CFRPから取り出されたrCFに対し、rCFの性能を特性させる取り組みが必要である。

3章.今後の展望

3-1. CFRP 循環利用システム構築に向けた各課題の解決方法

前掲した各課題に対する解決方法を以下にて提示する。世界の英知を集め、CF の循環システム構築（回収、ブランド化、用途開発の推進）とそれらの基準作りを主導的に進めることで、日本を CF の開発・生産する拠点だけでなく、CF を再生させ、その利用を実践する渠底となる。また、再生・再利用の仕組みとそれに伴う設備を輸出していくことで、世界における CF の循環システム構築を促進、主導する。

(1) 循環利用システム構築

① 回収

安定かつ継続した廃 CFRP の回収（入手）に対し、まずは国と事業者（自動車、航空機等の CFRP ユーザー、CFRP メーカー、その他関係企業）の連携が必要となる。例えば、廃車に関しては自動車リサイクル法が適応されるため、廃車由来の廃 CFRP も自動車リサイクル法のもとで処理されることになるが、リサイクル法が無い製品の場合は使用済製品の回収から再利用までの流れが決まっていない。廃 CFRP の回収を実施するためには、CFRP のユーザーである事業者による国に対する関係法令整備への働きかけが求められる。

また、風車や圧力容器で使用されている CFRP と GFRP の複合品の技術開発の進展が必要となる。特に、rCF を安価で販売するためには、CFRP と GFRP などとの異素材との分離もしくは統合した活用を低コストで実現することも想定しておかなければならない。

海外から国内への廃 CFRP の輸入においては、廃 CFRP が有害廃棄物ではないということを確認し、リサイクルに適したプラスチックとして持ち込みを可能とすべく、改正バーゼル条約への対応のため国家間で協議することが必要となる。

② 価格

マーケットを開拓していくうえでは rCF メーカー自身がコストダウンをより進めていく必要がある一方で、現状のままでは rCF の低価格化のアプローチには限界がある。具体的には、rCF の回収には CFRP の工程内端材もしくは使用済製品の回収、解体、分離、処理という多くの工程を踏まなければならないため、rCF メーカーで可能なコストダウンの余地は少ない。

こうした中、顧客の rCF 選定理由をコストから価値へとシフトさせる「rCF のブランド化」を検討することが有効となる。rCF は vCF と比べて CO₂ 排出量は圧倒的に少ない⁹⁹。家電やファッション等、消費者に近い業界では自社の環境対応姿勢を訴求するため CO₂ 排出量の削減に積極的に取り組んでいる企業が多い。今回の調査において EU 当局にヒアリ

⁹⁹ <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/552/552004.pdf>

ングしたところ、リサイクル促進に向けて、容器包装等ではリサイクル材の使用をラベル等で表示する方向であるなど、今後、「リサイクル」をブランド化するという動きがあることも確認できた。**rCF** というリサイクル材の活用が **SDGs** やサーキュラーエコノミーに資することを訴求し、**rCF** 自体を **SDGs** 対応製品としてブランド化するなど、高価格帯でも需要を生み出せるような取り組みも求められる。

③ 用途開拓

CFRP に限らずマテリアルリサイクルを実現するためには、使用済製品の回収～再利用までの、所謂静脈産業の確立が必須であるが、現状では静脈産業がビジネスとして成立しているのは鉄やアルミなどの限られた資源にとどまっている。ただ、鉄やアルミで整備されているリサイクル体制は、そのほとんどがカスケードリサイクルであり、容器リサイクルで行われているアルミ缶 to アルミ缶や PET ボトル to PET ボトルのような水平リサイクルが実現しているものは非常に少ない。

CFRP に関しても、将来的には压力容器 から压力容器を再生する水平リサイクルが実現できれば良いが、そのためには回収システムの構築やリサイクル技術及び評価方法の確立など超えるべきハードルが高く、まずはカスケードリサイクルを前提とした仕組み作りに着手する必要がある。現状、自動車においては骨格に用いた **CFRP** を C ピラーにカスケードリサイクルした実績が既にある。このような同じ業界内でのカスケードリサイクルのほか、たとえば航空機から建設資材など異業種由来のカスケードリサイクルも検討する必要がある。

なお、廃 **CFRP** から取り出せる **CF** の長さは最長でも 2～10m（ロール状にまかれて残ったプリプレグ等）と考えられる。仮に **vCF** と同等の性能を有した **CF** が回収できたとしても長さの制約があるため、織物やプリプレグ生産に利用することはできない。

繊維長さが 25～50mm であれば不織布生産や **SMC** の強化材として利用できる。繊維長さが 10mm 以下であれば PP や PA 等とコンパウンドし、射出成型用の強化材として利用が可能となる。

1cm										2cm	3cm	4cm	5cm	6cm	7cm
1mm					2mm	3mm	5mm	6mm	8mm	9mm	10mm				
200 μm	400 μm	600 μm	800 μm	1000 μm											
ミルド 数十～数百 μm					チョップド 0数～数mm						短繊維		長繊維		
※樹脂やゴム、セメント等の母材の強化繊維、					※射出成形: 0.1～3mm						※プレス成形(SMC)、不織布		※プレス成形		

図 3-1. 繊維長さと主な用途

出典：矢野経済研究所作成

用途開発を促進させるためには、**rCF** での製品実証が欠かせない。具体的な製品を **rCF** で作製し、それらの実証実験を通じて、部品信頼性を証明する。これらの取り組みが **rCF**

の耐久性、信頼性の向上につながり、リサイクル品の取り扱いで障壁となる品質保証を補強することになる。

また、回収した廃 CFRP からユーザーサイドが使いやすい rCF を取り出し、提案するという取り組みも求められる。

rCF を得る際、多くは熱分解によって行われるが、一次熱分解時点で得られた rCF はマトリックス樹脂被膜で覆われており、重量比で 15% 程度のマトリックス樹脂残渣が含まれている。その後、二次熱分解により一次熱分解品の表面の炭素被膜はほぼ消滅し、炭素残渣 3% 程度のしなやかな繊維状の rCF が取り出せる。例えば水素タンクを丸ごと二次熱分解まで行うことで長尺の rCF が取り出され、これらを二次加工することで、連続繊維に近いサンプルを開発することができる。

一方、一次熱分解した炭素残渣の多い rCF は外側がマトリックス樹脂被膜で覆われバリバリした状態であるため切断が容易であり、長繊維の状態から繊維を短く切断したチョップド rCF を取り出すことも可能である。

このように、マトリックス樹脂残渣が多い rCF は「使用できない」と結論付けるのではなく、使い方の工夫や炭素残渣が多い rCF に適した用途開拓も必要となってくる。また、CF が熱に安定的であることから、再利用時にも力学特性低下が限定的であり、その他特性も低下しないことを有効に使うことも重要である。ノート PC に留まらず、航空機、自動車部品への再利用、耐熱パネル、防音パネルなどへの活用、また、水処理技術への転換などの各種用途向けに実証、実績を積み上げる必要がある。

(2) 評価試験法の確立

rCF の用途開拓を行ううえで、最終ユーザーが vCF と同様に rCF を活用できる品質評価方法の確立が必要となる。

通常 vCF の原料は明瞭で、CFRP を製造するプロセスにおいて想定外の化学物質が混入することはまずない。しかし、rCF は原料である CF の種類が不明瞭であるうえ、廃 CFRP として回収されるまでの熱履歴や添加された薬剤・化学品など、材料としての由来をど証明することは不可能である。このことに理解を示すユーザーでなければ、rCF の採用拡大は難しい。逆に、こうしたユーザーのマッチングができれば、そこを起点にさらに採用ユーザーの拡大を進めることもできるだろう。

最終ユーザーが安心して rCF を活用するための基準となる品質評価では、材料とプロセスの両面からチェックする必要があるが、全数検査を実施することはコスト面で非現実的であるため、抜き取り検査によって品質評価を行うことをユーザーに受け入れてもらうことが求められる。最終ユーザーが行う品質評価では、rCF を使用したペレットやマットなどの中間基材が対象になるが、さらに遡及して中間基材原料となる rCF そのものの品質評価方法を確立することで、バリューチェーン全体で rCF の品質評価体系の確立を目指す必

要もあるだろう。

現在、AISTにおいて **vCF** のみならず **rCF** の評価試験方法の研究に取り組んでおり、現段階では力学試験と残渣評価の試験法に焦点を当てている。今回の欧州ヒアリングの結果、**Fraunhofer** でも **rCF** の界面特性評価試験法の開発を行っていた。こうした評価試験方法が有効であることを世界の研究機関などとも確認するとともに、評価試験方法の **ISO** 化に結び付けることで **rCF** の商業化を推進していくことが可能になると考えられる。

3-2. 評価試験法のラウンドロビンに向けたロードマップ作成

最終ユーザーが rCF を活用しやすくするためには、世界中で同じ品質、同じレベルのものを調達できるように、評価試験方法の ISO 規格化を実現することが求められる。そのためには、まずは AIST で開発中の評価試験方法についてドイツや英国などの他国研究機関においてラウンドロビンテストを実施し、その結果を取りまとめることが必要となる。

ISO・TC61/SC13 では、繊維強化材料及び強化用繊維（GF、CF 等）に関する規格の制定・改正等を行っている。まずは年 1 回開催される国際会議において NP（New work item proposal）を申請し、ワーキンググループ（WG）内での検討を経て、rCF 評価方法開発を通じて、rCF に関する新規 WG 設立を目指すことが求められるだろう。

なお、CFRP リサイクル検討委員会での協議のなかで、rCF 中間基材や rCF 用語定義統一等に関する取り組みも必要となるという指摘もあったため、「図 3-3. rCF 中間基材等評価試験法のラウンドロビンに向けたロードマップ」として別途記載する。

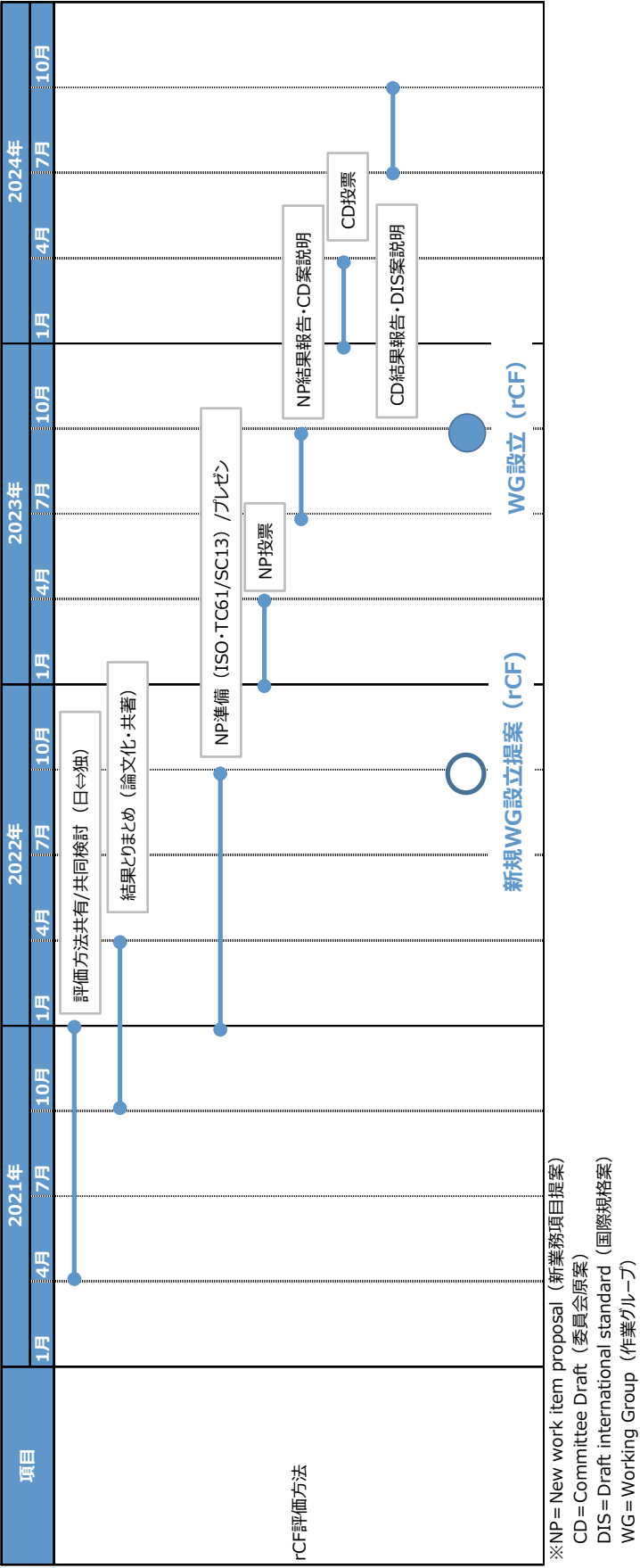


図 3-2. rCF 評価試験法のラウンドロビンに向けたロードマップ

出典：矢野経済研究所作成

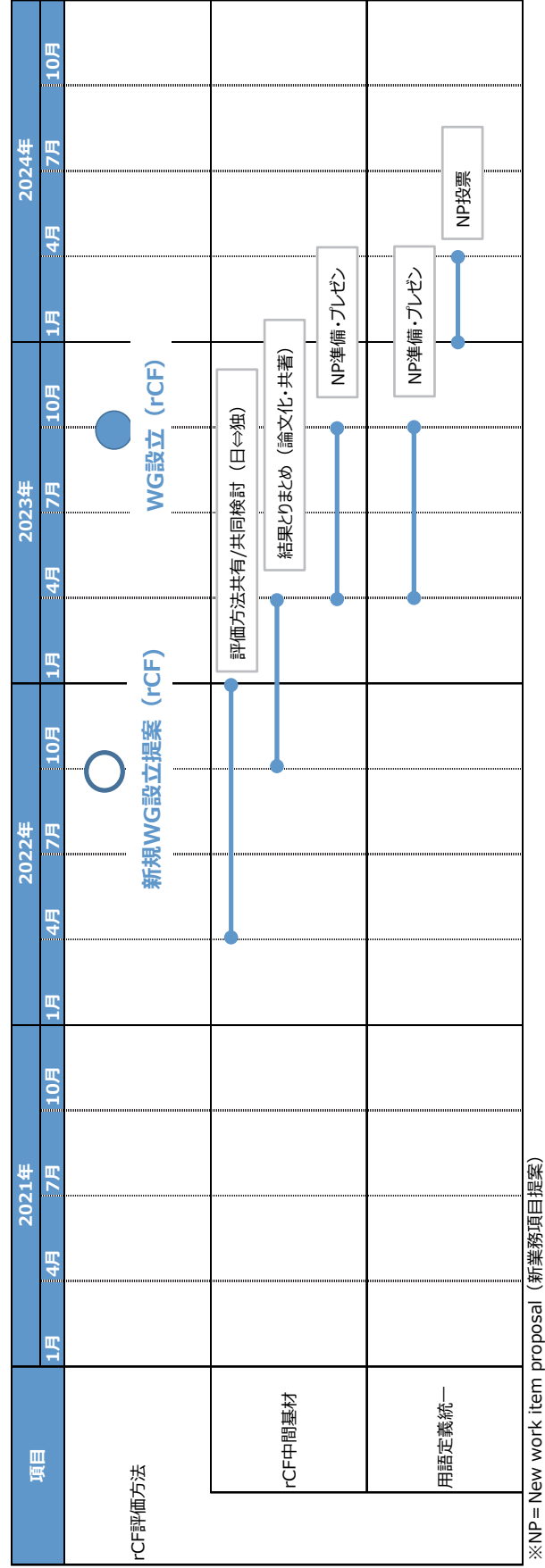


図 3-3. rCF 中間基材等評価試験法のラウンドロビンに向けたロードマップ

出典：矢野経済研究所作成

二次利用未承諾リスト

報告書の題名 リサイクル炭素繊維の利用・
評価手法等に関する国際動向調査

委託事業名 令和2年度地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費

受注事業者名 矢野経済研究所

[illegible]