

炭素繊維のリサイクルはどうあるべきか？

—【前編】リサイクルを前提とする CFRP の材料・構造設計—

2026 年 8 月 26 日

サステナビリティコンサルティング部

小川大輔、後藤嘉孝

2026 年 5 月 29 日付レポート「[自動車の炭素繊維は規制されるのか？（続報）](#)」では、欧州 ELV 規則における炭素繊維に関する規制の最新状況と今後のリサイクルを前提とした循環設計において、いかにリサイクルの社会実装を進めていくかが問われる段階に入ったといえる、と述べた。

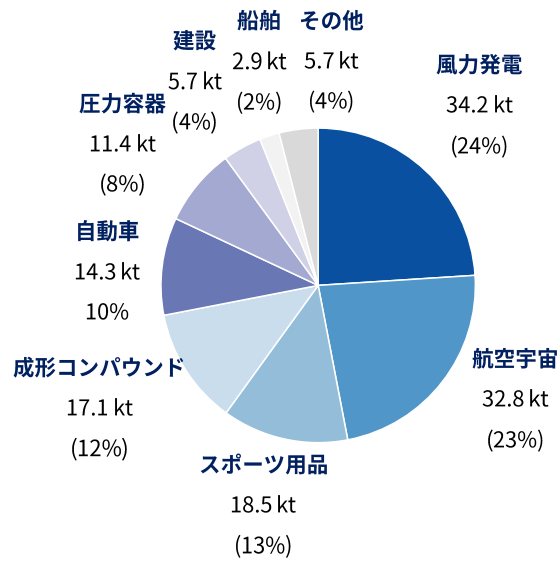
自動車分野における CFRP（炭素繊維強化プラスチック）は、車体軽量化の一部高機能用途や高圧水素タンク用途に利用されている。他方、量産車への広範な適用には、材料コスト、成形サイクル、修理・解体性、使用済み複合材の回収・再資源化といった課題が残る。また、CFRP は航空機や風力発電など様々な用途に用いられることから、自動車分野で見られる CFRP の回収・再資源化の課題は他の業種でも共通する課題である。そのため炭素繊維のリサイクルスキームの構築は、自動車分野だけではなく CFRP を素材として用いる業種の垣根を越えて取り組む必要がある。

こうした中、熱硬化性 CFRP のリサイクル技術高度化に加え、再成形性・高速成形性を有する熱硬化性 CFRP や熱可塑性樹脂の開発も進展していることから、本稿では、自動車分野にとどまらず最近の CFRP のリサイクル関連技術についてレビューし、今後の CFRP のリサイクル促進に向けた方向性を考察する。前編では、CFRP のリサイクルにおける課題について概観し、CFRP のリサイクルを前提とする材料・構造設計の動向を紹介する。

🔗 [「後編のレポートはこちら」](#)

1. CFRP リサイクルにおける課題

CFRP は、炭素繊維と樹脂からなる複合材料であり、軽量でありながら高い強度・剛性を有する高機能材料である。この特性から、航空宇宙、風力発電、スポーツ用品、自動車等の分野で利用が拡大している。自動車分野においても、車体軽量化や高強度部材への適用に加え、近年では燃料電池車等に用いられる高圧水素タンク用途を中心に重要性が高まっている。



図表 1 世界における炭素繊維の使用用途（2018 年）

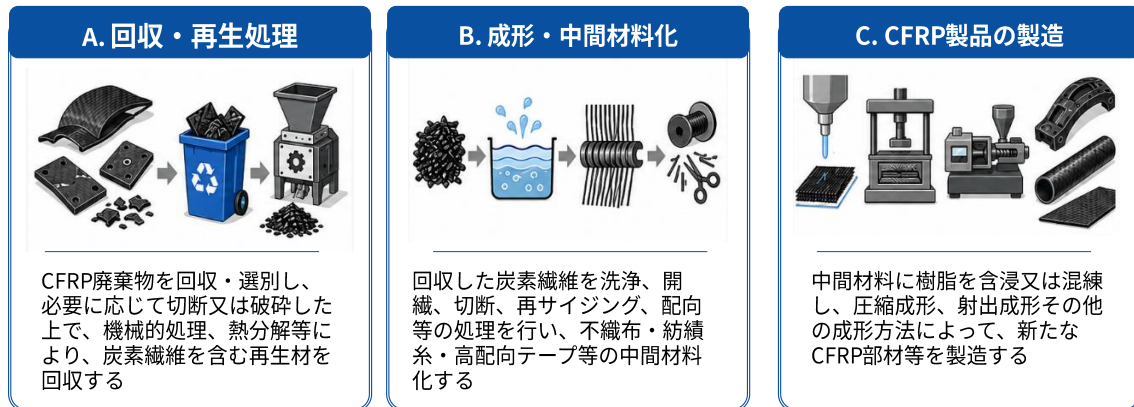
（出所）Zhang et al. (2020) をもとにみずほ総合研究所が作成

一方で、CFRP の利用拡大に伴い、使用済み複合材の回収・再資源化が大きな課題となっている。世界で排出された CFRP 端材・廃材は、2022 年に 55,610 トンと推計されているのに対し、リサイクルされた量は推計 3,730 トンで、約 6.7%にとどまり、多くが埋立てまたは焼却によって処理されていることがうかがわれる（環境省, 2025）。今後 ELV 規則の適用が進むなど、自動車分野でサーキュラーエコノミーの進展が予想されることを踏まえると、リサイクルスキーム構築が望ましい材料と考えられる。

製造工程で発生する CFRP 端材や使用済み製品から取り外された CFRP 部材を再び製品として利用するためには、単に炭素繊維を回収するだけでなく、回収材を中間材料化し、再び製品へ適用する一連のプロセスが必要となる（図表 2）。

現在広く用いられている熱硬化性 CFRP は、加熱しても再溶融・再成形することができない。回収・再生処理プロセス中（図表 2 A.）で炭素繊維と樹脂を分離するには、機械的処理、熱分解または化学分解等の処理が必要となる。これらの処理によって回収され、再利用可能な状態に調整された炭素繊維（以下、「リサイクル炭素繊維」という）の品質および再利用可能な用途は、採用する回収方法や中間材料化技術に大きく左右される。特に、従来の機械的または熱的リサイクルでは、繊維長の短縮、繊維の向きの乱れ、炭素繊維表面の処理剤の喪失¹、表面損傷、残留樹脂・残留炭素、引張強度の低下等が生じる場合があり、リサイクル炭素繊維の新たな用途探索が必要となる（Keith et al., 2025）。

¹ 処理剤とは炭素繊維を保護し、樹脂との接着性を高めるために繊維表面に施されるものを指す。



図表 2 炭素繊維のリサイクルプロセス

(出所) 各種資料を参考にみずほ総合研究所が作成

そのため、CFRP のリサイクルを促進するためには、使用後の回収・再資源化を見据え、熱可塑性樹脂や分解可能な熱硬化性樹脂の採用等を材料設計段階から組み込む「**①リサイクルを前提とした材料設計**」と、既に市場に存在する使用済み CFRP から、炭素繊維の性能を可能な限り維持しつつ、炭素繊維および樹脂成分を回収・再資源化する「**②リサイクル技術の高度化**」を並行して進める必要がある（図表 3）。



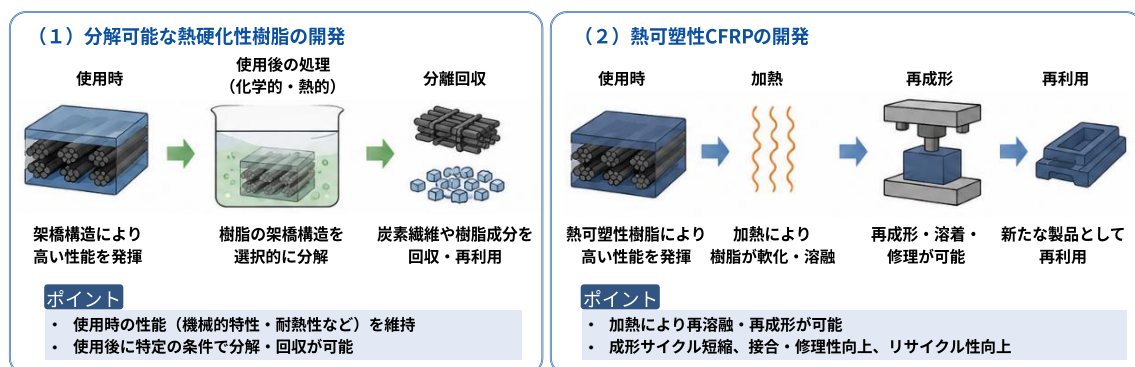
図表 3 炭素繊維リサイクルの促進に向けたポイント

(出所) 各種資料を参考にみずほ総合研究所が作成

CFRP のリサイクルを検討する際には、既に市場に存在する CFRP をいかに効率的かつ高品質に再資源化するかという、リサイクル技術そのものに注目が集まりやすい。しかし、循環性を製品の設計段階から組み込む **Design for Circularity（循環のためのデザイン）** の考え方に立てば、まず使用後の回収、分離および再資源化を前提とする材料・構造設計の取組を進め、その上で、既に市場に存在する従来型 CFRP や、設計上の対応のみでは循環利用が困難な CFRP については、リサイクル技術の高度化を進めることが重要である。したがって次の章では、まず、使用後の回収・再資源化を見据えた CFRP の材料・構造設計について概観し、後編でリサイクル技術の高度化について紹介する。

2. リサイクルを前提とした CFRP の材料・構造設計

前章で述べたように、従来の熱硬化性 CFRP は、加熱しても再溶融・再成形することができない。これは、硬化時に樹脂が不可逆的な三次元架橋構造を形成するため、炭素繊維と樹脂の分離が容易ではないことが原因である。この課題に対しては、（１）樹脂の架橋構造を選択的に分解し、炭素繊維と樹脂成分の回収を可能にする**分解可能な熱硬化性樹脂の開発**と、（２）再溶融・再成形が可能な**熱可塑性樹脂を用いる CFRP**（以下「熱可塑性 CFRP」という。）の**開発**という、大きく２つの方向で研究開発が進められている（図表４）。



図表 4 課題解決に向けた 2 つの研究開発の方向性

（出所）各種資料を参考にみずほ総合研究所が作成

（１）分解可能な熱硬化性樹脂の開発

従来は、使用済みの熱硬化性 CFRP を再び高品質な CFRP 材料としてリサイクルすることは容易ではないとされてきた。これに対し近年では、熱硬化性 CFRP そのものに循環性を付与しようとする設計思想のもと研究開発が行われている。その代表的な研究として、化学的に切断可能な結合を導入した**分解性エポキシ樹脂の開発**と、**ビトリマーに代表される共有結合適応性ネットワーク（CANs）の開発**が挙げられる。

これらは、使用時には架橋構造に基づく強度や耐熱性を維持しつつ、特定条件下では分解を可能にすることで、従来の熱硬化性樹脂では困難であった樹脂ネットワークの分解、材料の再加工、修復および炭素繊維の回収を可能にすることが意図されている。

分解性エポキシ樹脂の代表例として、化学的に切断可能な結合を樹脂ネットワークに導入した開裂性エポキシ（Cleavable epoxy）がある。Bodaghi et al. (2026) は、開裂性エポキシを用いた CFRP チューブを作製し、使用後に化学的処理によって長繊維のまま炭素繊維を回収したうえで、再びチューブ成形に用いる研究を報告している。この研究では、回収炭素繊維はバージン繊維に対して約 92% の引張強度を保持した。一方で、回収繊維を用いた再製造チューブでは、バージン繊維を用いた参照材に比べて周方向²荷重に対する強度が約 25～44% 低下することも確認されている。その要因として、炭素繊維表面の処理剤の喪失や繊維—樹脂界面の変化が示唆されている。

さらに、ビトリマーや共有結合適応性ネットワークに代表される、動的共有結合を有する熱硬化性樹脂の研究も進められている。従来の熱硬化性樹脂は、一度架橋構造を形成すると再成形や再加工が困難であった。これに対し、動的共有結合を導入した樹脂では、使用時には架橋構造に基づく機械的特性や耐熱性を維持しつつ、特定条件下では分解・再構成を可能にすることが検討されている。

Yang et al. (2026) は、難燃性とリサイクル性を両立させた CFRP の開発を目的として、反応性難燃硬化剤を用いた CFRP を作製した。得られた材料は高い難燃性を持ち、熱硬化性 CFRP と比較して一定の引張強度を示し、溶液処理による炭素繊維の回収率は 94.6% であった。他方、回収材を再成形した複合材料の引張強度は元の材料の約 41% にとどまり、再成形後の強度には著しい低下が確認されている。

（２）熱可塑性 CFRP の開発

熱可塑性 CFRP では、加熱による再溶融・再加工、溶着、修理、リサイクルへの展開が期待される。

Jaffel et al. (2026) は、Type IV 水素貯蔵容器に用いられる CFRP における熱硬化性エポキシ樹脂の代替候補として、PP（ポリプロピレン）、PA6（ナイロン 6）、PA12（ナイロン 12）、HDPE（高密度ポリエチレン）、PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）等の熱可塑性樹脂に加え、液状熱可塑性アクリル樹脂である Elium を取り上げ、熱可塑性樹脂の利用可能性を整理している。また、熱可塑性 CFRP は、使用後のリサイクル性だけでなく、成形サイクルの短縮、溶着による接合・組立への展開、修理性の向上といった製造・利用段階の利点も併せ持つ。自動車や水素タンクのように、量産性、軽量化、使用後の処理が同時に求められる用途では、今後の有望な材料設計の一つといえる。一方、熱可塑性樹脂は一般に溶融粘度が高く、炭素繊維束への含浸、成形時の加熱・加圧、層間の接合および空隙の抑制が

² 周方向とはチューブの円周に沿った方向、輪を広げるような方向のことをいう

難しい。また、大型圧力容器の製造では、樹脂の加熱と繊維の積層・圧密を同時に制御する必要があり、成形速度、品質の均一性および複雑なドーム形状への適用に課題が残るとして

いる。

航空分野では、エアバスが主導した欧州の航空研究開発事業「クリーン・スカイ 2」において、全長約 8 メートルの熱可塑性複合材製胴体円筒構造が製作され、部材を溶着して組み立てる技術が実証されている。

以上のように、近年では、分解・再構成可能な熱硬化性樹脂の開発や、再溶融・再成形が可能な熱可塑性 CFRP への転換など、使用後の回収・再利用を設計段階から織り込む研究開発が進展している。これらは、従来の熱硬化性 CFRP が抱えてきたリサイクル上の制約を材料設計の側から克服しようとする有望な方向性として期待される。

一方で再成形後の材料では元の材料に比べて力学特性の低下も確認されているなど、いずれの研究開発においてもすべての課題を解決できるわけではない。つまり、CFRP の循環利用には、**リサイクルを前提とした材料・構造設計だけでなく、回収材の価値・品質を維持するためのリサイクル技術の高度化を、両輪として進めることが重要**である。

後編では、使用済み CFRP から炭素繊維を回収するリサイクル技術の現状と課題を整理し、循環システムの構築に向けた方向性を考察する。

当記事の内容は執筆時点の情報に基づくものであり、その正確性・完全性・最新性を当社が保証するものではありません。閲覧者の判断と責任にてご利用ください。

🔗 [「後編のレポートはこちら」](#)

参考文献

- ・ 環境省（2025）令和6年度脱炭素型循環経済システム構築促進事業（うち、プラスチック等資源循環システム構築実証事業）（新規溶媒溶解法による CFRP リサイクルプロセス実証事業）委託業務成果報告書（委託先：東レ株式会社），
<https://www.env.go.jp/content/000311345.pdf>
- ・ Bodaghi, M., Mugemana, C., Ozyigit, S., Bayreuther, C. G., Klein, S., El Moumen, A., et al. (2026). On the advancement of sustainable filament-wound composites: Benchmarking cleavable epoxy resin with recovered continuous carbon fibres against conventional epoxy. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 208, 109924. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2026.109924>
- ・ Yang, Y., Jiang, Z., Dou, Q., Zhao, Y., Liu, B., Duan, J., et al. (2026). The construction of controllable dynamic bonds based on dynamic ester linkages and steric hindrance effect for efficient recycling of flame-retardant epoxy-based carbon fiber composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 9, Article 191. <https://doi.org/10.1007/s42114-026-01716-8>
- ・ Jaffel, L., Ejday, M., Pastor, M.-L., Guermazi, N., Le Guennec, C., & Grohens, Y. (2026). Thermoplastic alternatives to thermosets in Type IV COPVs: A review of materials, manufacturing, and performance for hydrogen storage. *Polymer Composites*, 47, 5841–5874. <https://doi.org/10.1002/pc.70541>
- ・ Keith, M. J., Al-Duri, B., McDonald, T. O., & Leeke, G. A. (2025). Solvent-based recycling as a waste management strategy for fibre-reinforced polymers: Current state of the art. *Polymers*, 17, 843. <https://doi.org/10.3390/polym17070843>
- ・ Yuan, M., Li, Z., & Teng, Z. (2024). Progress and prospects of recycling technology for carbon fiber reinforced polymer. *Frontiers in Materials*, 11, 1484544. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1484544>
- ・ Zhang, J., Chevali, V. S., Wang, H., and Wang, C. H. (2020). Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling. *Composites Part B: Engineering*, 193, 108053. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108053>
- ・ Clean Aviation Joint Undertaking. Multi-Functional Fuselage Demonstrator. <https://www.clean-aviation.eu/multi-functional-fuselage-demonstrator>