

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

報告書

平成 31 年 2 月 28 日

株式会社リーテム

要約

(1) 業務の目的

高機能、軽量化、省資源化等に伴う CFRP（炭素繊維強化プラスチック）の将来の利用増に対し、廃棄時は埋立処分が大半で、セメント燃料化では電気集塵機荷電障害に問題が生じたり、再利用においても、従来提案されている熱分解法では、欧米メーカーは建築用の不織布が主用途である。国内においても技術開発が遅れており、その必要性が高い。これは、インジェクション用コンパウンドや長繊維コンポジットに適用できる性能および形状のリサイクル品が回収できていないためである。

そこで、本計画は、CFRP 回収技術を用いて、束状に RCF（リサイクル炭素繊維）を回収し、富士加飾(株)が保有する 2 次加工技術に関するノウハウと応用技術を用いて、射出成型用コンパウンドや長繊維コンポジットを製造する炭素繊維の回収から、最終製品までの一貫処理のシステムを構築するため実証を行う。

(2) 解決すべき課題

今回の実証事業の目標は、下記 3 項目の検討を通じて、CFRP の再製品化に係る技術システムの構築を図り、新たな市場開発に向けた具体的な成果を得ることにある。

- ① CFRP の束状回収技術の実用化実証
- ② CNG ボンベを活用した半導体等製造治具の製品化に向けた一貫利用システムの確立
- ③ 航空機製造端材、風力発電プロペラ端材等多様なリサイクル源にアクセスし、安定した回収源の確保と RCF2 次加工製品市場開発の課題整理

(3) 実証事業の内容

実証事業は、下記の項目に基づき実施した。

- ① 原料回収に係る現状と評価
- ② 回収分別に係る現状と評価
- ③ コンパウンドに係る現状と評価
- ④ 環境負荷低減効果の検証
- ⑤ 事業化可能性等の検証
- ⑥ 本事業のまとめと今後の見通し

(4) 実証事業の成果

先の解決すべき課題の 3 項目に対し、実証事業を踏まえた成果は、次のようにまとめられる。

① CFRP の束状回収技術の実用化実証

CFRP の束状回収は、富士加飾(株)実験炉及び(株)リーテム水戸工場の両設備において実証作業が進められ、その結果、設備改造を伴う混燃バーナーと、自動制御システムの導入で、商用化システムとしての量産化の対応が可能となり、温度プログラムの標準化によ

り、多様なリサイクルソースへの対応が容易に行えるという結果が得られた。

具体的には、設備改造を行い、燃焼系の改善を図り、空気と LP ガスによる混燃バーナーを設置することにより、燃焼時間の短縮、発生ガスの安定燃焼、反応槽内の空気流量・流速の安定制御が図りうるという効果が得られた。また、自動制御システムは、対象原料の多様性や、燃焼特性・温度制御の差異を踏まえたいずれの CFRP（CNG ボンベ、水素燃料ボンベ、航空端材、プリプレグ端材等）に対して、マトリックス樹脂の多様性、熱履歴の多様性に対応でき、安全でかつ、省力化できる商用システムとして利用できる可能性が得られた。

本燃焼方式を用いた CFRP の束状回収は、2 軸押出機への長繊維の自動投入が可能であり、樹脂との結合性が高まるなどリサイクル材特有の特性を見出した。

RCF 繊維含有率は、コンポジット開発において 40%~60%程度に制御可能となるため、利用用途も、ペレットのみならず、押出材（チョップド利用）としてマグネシウム代替 CFRTP コンポジットの製品化に可能性が広がる等、先進ヨーロッパ技術の水準以上の成果が期待できる。

なお、処理に伴う副生物としての排ガスや、粉塵に伴う周辺環境や、作業環境への影響についても、排ガス処理設備や、集塵設備の整備により十分な制御が行え、商用化の制約にはなりえないという結果が得られた。

② CNG ボンベを活用した半導体等製造治具の製品化に向けた一貫利用システムの確立

CNG ボンベは古くからアメリカで使用されており、日本にも多く納入されているが、最近では日本メーカーも参入し、天然ガス以外にも多岐にわたる用途が開発されている。CNG ボンベの廃棄量も現段階では市場内での賦存量もあり、当面の廃棄量は見込める（9 千本；15 年累積量）ものの、次世代自動車は、水素ガスボンベが採用されており、当初予定の CNG ボンベのみを対象とした事業化は困難であると判断した。

そのため、水素燃料ボンベ、航空端材、プリプレグ端材まで対象を拡大し、廃棄特性（数量、場所、今後の伸び等）や、RCF 回収に係る製品特性（異物、温度制御など）を検討した。

多様な廃材に対し、適切な処理条件を見出し、回収された RCF は T300、T700、T800 に集約でき、2 次加工のステージでは、大きく 3 種類の RCF として扱えることを見出した。

さらに、海外（特に CFRP 生産基地の多い中国、米国など）において原料回収・利用に係る企業ネットワークを構築し、当初危惧された原料確保に係る本実証事業の事業化に進むうえでのリスクが、低減された。

一方、製品化については、2 軸押出機を用いた RCF コンパウンドの量産対応は完了。自主開発により、長繊維コンポジット、長繊維不織布など、回収源ごとの製品化可能性を見出せた。

また、RCF 回収物（単繊維）、製品化物（ペレット、長繊維コンポジットなど）の品質評価が進み、RCF 回収物は新品 CF と比べて単繊維評価では 80%の強度が得られること、ペレット（PC+25%RCF）は、新品炭素繊維成形品と同等の機械的性能を保持しており、半導体・液晶製造分野における商品化に向けた物性評価は完了した。

以上、原料の安定確保から、回収利用、再製品化の品質確保に至る一貫利用システムの検証が得られたことから、今後は、多様な需要家と具体的に連携し、リサイクルソースごとの再製品化のレシピ開発や、実際の販売ステージに入る予定としている。

③ 航空機製造端材、風力発電プロペラ端材等多様なリサイクル源にアクセスし、安定した回収源の確保と RCF2 次加工製品市場開発の課題整理

実証事業を進める中で、リサイクルソースは、CNG ボンベ、水素燃料ボンベ、航空端材、プリプレグ端材、その他海外（中国、米国）など回収源との連携が進み、初期段階の事業化は可能という結果が得られた。

一方、再製品化については、ペレット、押出材、不織布の 3 種類の用途に照準して、今後、具体的な需要家と連携の上で、製品レシピの構築、品質管理、安定供給、事業性の評価などの事業課題に、引き続き取り組む必要があると考えている。

実証事業の終了にあたり、一貫利用システムに係る様々な成果のとりまとめが進んだ。しかしながら、得られた結果は、再製造化の主体、いわゆるメーカー視点での開発に過ぎない。今後、得られた成果をもとに事業化を行うためには、さらに、廃棄製品の種類、回収分別の方法（長繊維、短繊維）、再製品化の方法、市場性などの観点で、数多くの具体的なデータの積み上げが必要となる。

(5) 今後の見通し

これまで、半導体製造治具、搬送用ロボットアーム等を利用用途に検討を行い、新品炭素繊維と同等の性能を有する製品化のレベルに達しており、原料回収元、利用需要先との連携を具体的に推進中である。

また、25mm 繊維長を有する RCF の押出成形により、長炭素繊維含有率 40%以上で、残存繊維長 1mm～5 mm以上のコンポジットの開発も進行中である。

事業化は、事業投資を行い、（実証設備でなく）量産の事業設備を整備した後、需要家と連携の上で、改めて再製品化のレシピ構築、品質管理、安定供給、事業性などの課題をクリアして初めて実現する。

一方、更なる用途開発を通じて大学、研究所、海外を含む需要家等との今後の連携ニーズが高いことがわかった。

そこで、今後、複数年をかけて、事業投資を行い、具体的に需要家対応を進め、事業成果が得られるよう引き続き取り組みを進める予定としている。

SUMMARY

1. Purpose

The purpose of this project is to demonstrate building a system for a set of processes from producing multifilament of recycled carbon fiber (RCF) from used carbon fiber reinforced plastics (CFRP) to manufacturing mold injection compound resin and multifilament composite, by using CFRP recycling technology, technology and knowhow on fabricating RCF developed by Fuji Design Co.,Ltd.

Demand for CFRP is foreseen to increase in the future, while most of used CFRP are disposed of in the way of placed in landfills. In the process of reuse and recycle of used CFRP, currently there are several problems; for example, charged ion problem in dust collector of cement plant and degraded non-woven recycled material.

We aimed to demonstrate in this project a set of “up-cycle” production line consisting of recycling multifilament of RCF from used CFRP and producing high-valued compound resin materials from the RCF.

2. Goals to be achieved

In this project, we set the following goals to launch a CFRP recycling business:

- 1) To demonstrate practical use of technology for producing multifilament of RCF from CFRP
- 2) To build a production system to produce compound resin materials for manufacturing jig for semiconductor using RCF recycled from compressed natural gas (CNG) bombs
- 3) To build a steady collection system of used CFRP products such as unused materials in manufacturing process of aircraft and wind power generator as well as to clarify issues in RCF product market development

3. Outline of the project

We conducted the following project activities and made a final report:

- 1) On-site research and evaluation on current status of collecting used CFRP products
- 2) Test production and evaluation on the RCF production process
- 3) Test production and evaluation on compound process (used CFRP product origin)
- 4) Validation of effect to reduce environmental impacts of the production system
- 5) Feasibility study on business for producing RCF and compound resin materials
- 6) Conclusion and plan in the future

4. Results of this project

- 1) To demonstrate practical use of technology for producing multifilament of RCF from CFRP

To produce multifilament of RCF on a large scale from a various kind of used CFRP products, it is necessary to implement a mixed combustion burner and an automatic temperature-control system.

Improving existing combustion burner to mix air and low-pressure gas resulted in saving of combustion time and steady combustion and stable control of volume and speed of air flow. Automatic temperature-control system was shown its availability for safe and energy-saving operation as well as response to variety of material properties of used CFRP products.

Multifilament of RCF produced by this combustion process is able to be put mechanically into double-screw extruder in the next process. It has also advantage in bonding property with resin, compared with CF.

Fiber content of the RCF will be controllable in a range of 40% to 60% in the compound process. This technology and knowhow will expand application of RCF, including CFRTP (carbon fiber reinforced thermos plastics) composite as an alternatives of magnesium, which will be expected beyond the leading technology in EU.

As a result, by-products of gas and dust in the system are controllable, so that they won't disrupt practice use of this RCF production process.

- 2) To build a production system to produce compound resin materials for manufacturing jig for semiconductor using RCF recycled from CNG bombs

In the material collection phase, we found that the amount of available used CNG bombs was approximately 9000 in 2015, which is not enough to do business for producing RCF. We expanded target materials to hydrogen fuel bombs, unused materials in manufacturing process of aircraft and prepreg, regarding which we did research on disposal volume and collection points as well as material properties. Also, we built a corporate network in China and U.S. to collect those target materials for stable supply.

In the RCF production phase, our multifilament of RCF produced from the target materials are categorized into T300, T700 and T800, all of which become materials in the next compound and fabricating phase.

In the compound and fabricating phase, we completed a system to produce compound resin and fabricate pellet and extruded sheet by double-screwed extruder in a large scale. We also found the possibility to develop new products such as long-fiber composite and long-fiber non-woven material. According to a result of quality analysis, a piece of our RCF and one kind of our pellet (PC and 25% of RCF) met a quality requirement in semiconductor and liquid crystal manufacturing sector, which includes intensity (80% against a piece of virgin CF) and mechanical property.

We showed feasibility of a production system from collection of used CFRP products to reproduction of RCF materials for manufacturing jig for semiconductor.

- 3) To build a steady collection system of used CFRP products such as unused materials in manufacturing process of aircraft and wind power generator as well as to clarify issues in RCF material market development

As mentioned above, we built a corporate network in China and U.S. to collect those target

materials for stable supply, so that we concluded that business for producing RCF is feasible.

However, regarding business for fabricating RCF materials, we must respond to requirements of users, focusing on pellet, extruded sheet and non-woven material. Users' requirements include RCF content, quality management, stable supply and competitiveness. To develop market for our RCF products after this project, it is necessary to improve RCF production operation (in particular, separation of long fiber and short fiber) and compound and fabricating process operation as well as to do in-depth research on used CFRP products and competitive RCF products.

5. Next step

In this project, we had made progress to build a production system to produce compound RCF materials for manufacturing jig for semiconductor and achieved goals set. Our next step includes advancing collaboration with generators of used CFRP products and users of RCF materials as well as developing new RCF products such as RCF composite with long RCF (more than 40% content) and 1mm to 5mm long residual fiber.

To launch business, we plan to install production equipment in large production scale, improving product recipe, quality management, stable supply and productivity, in corporation with users. In medium term, we will make investment year by year to expand this business and to develop new products in corporation with other R&D institutes and both domestic and foreign users.

目次

要約

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第1章 実証事業の概要..... | 1 |
| 1.1 実証事業の目的..... | 1 |
| 1.2 実証事業の概要..... | 1 |
| 1.3 実証事業の検討内容..... | 2 |
| 1.4 解決すべき課題..... | 3 |
| 1.5 実証事業の実施体制..... | 4 |
| 1.6 実証事業スケジュール..... | 5 |
| 第2章 原料回収に係る現状と評価..... | 6 |
| 2.1 CFRPの回収可能性の検討..... | 6 |
| 2.1.1 CNGボンベ等..... | 6 |
| 2.1.2 航空機端材の特性..... | 9 |
| 2.2 原料回収に係る取組結果..... | 15 |
| 2.3 品目別の燃焼特性..... | 19 |
| 第3章 回収分別に係る現状と評価..... | 21 |
| 3.1 適正な操縦方法の確立..... | 21 |
| 3.1.1 既存システムを活用した実証炉の整備状況..... | 21 |
| 3.1.2 実証炉の温度管理手法の検討..... | 22 |
| 3.1.3 他の品目のリサイクル手法の検討..... | 39 |
| 3.1.4 他のリサイクル事業との比較..... | 40 |
| 3.1.5 RCF切断工程における管理手法の検討..... | 46 |
| 3.2 CNGボンベから回収するRCFの単位処理能力評価..... | 47 |
| 3.2.1 初期段階の実証におけるRCF単位回収コスト..... | 47 |
| 3.2.2 CNGボンベの単位処理能力の向上のための検討..... | 48 |
| 3.3 リサイクル炭素繊維の回収処理プロセスの管理..... | 50 |
| 3.3.1 CNGタンクの前処理工程における管理項目..... | 51 |
| 3.3.2 燃焼処理工程における管理項目..... | 54 |
| 3.3.3 RCF切断工程における管理項目..... | 54 |
| 3.3.4 その他の管理事項..... | 55 |
| 第4章 コンパウンドに係る現状と評価..... | 56 |
| 4.1 コンパウンドの製品化..... | 56 |
| 4.1.1 コンパウンド設備等の調整..... | 57 |
| 4.1.2 運転管理の実施..... | 59 |
| 4.1.3 関係企業との調整..... | 59 |
| 4.2 マーケットを絞り込んだグレード開発..... | 61 |
| 4.3 コンパウンド成形性の確認評価..... | 63 |

| | |
|---|----|
| 4.3.1 ペレット性状..... | 63 |
| 第5章 環境負荷低減効果の検証 | 66 |
| 5.1 排ガス制御..... | 66 |
| 5.1.1 排ガス対策の概要..... | 66 |
| 5.1.2 排ガス測定結果 | 66 |
| 5.2 作業環境 | 67 |
| 5.2.1 粉塵対策の概要 | 67 |
| 5.2.2 粉塵測定結果..... | 68 |
| 5.3 環境改善効果の評価方法とCO ₂ 削減効果等 | 69 |
| 第6章 事業化可能性等の検証..... | 74 |
| 6.1 原料回収システム..... | 74 |
| 6.2 製品評価 | 75 |
| 6.3 需要評価 | 76 |
| 6.4 事業化に係る総合評価 | 77 |
| 6.4.1 検討の枠組み..... | 77 |
| 6.4.2 事業スキームについて..... | 77 |
| 6.4.3 事業化の計画条件..... | 80 |
| 6.4.4 事業性の確保に向けた課題と、今後の取組目標の明確化..... | 85 |
| 第7章 本事業のまとめと今後の見通し | 87 |
| 7.1 実現可能性..... | 87 |
| 7.1.1 経済的視点..... | 87 |
| 7.1.2 技術的視点..... | 87 |
| 7.2 横展開の可能性 | 87 |
| 7.2.1 経済的視点..... | 87 |
| 7.2.2 技術的視点..... | 88 |
| 7.3 今後の見通し..... | 88 |
| 第8章 総括 | 91 |

| | | |
|--------|-------------------------|----|
| 表 1.1 | 実証事業における検討項目と成果目標 | 3 |
| 表 1.2 | 実証事業スケジュール | 5 |
| 表 2.1 | 日本の航空機部品製造メーカーの生産状況 | 12 |
| 表 2.2 | 航空機関係各社の CFRP 端材の排出量 | 14 |
| 表 2.3 | 原料回収に係る活動実績 | 15 |
| 表 2.4 | CNG ボンベ回収に係る業界団体との連携 | 16 |
| 表 2.5 | 複合容器の製造・販売メーカー | 16 |
| 表 2.6 | 原料回収に関する課題と対応 | 16 |
| 表 2.7 | CNG ボンベ、水素燃料ボンベの回収結果の総括 | 17 |
| 表 2.8 | 航空端材及びプリプレグ端材の回収結果の総括 | 17 |
| 表 2.9 | CFRP 等の存在状況のまとめ | 19 |
| 表 2.10 | 炭素繊維の種類別の処理特性 | 20 |
| 表 2.11 | 原料の種類別の特性 | 20 |
| 表 3.1 | 初期段階の実証炉の運転手順 | 24 |
| 表 3.2 | ポテンシャル水素量の測定値 | 25 |
| 表 3.3 | 温度変移（コンロ利用） | 28 |
| 表 3.4 | 設備構造の変更内容と期待される効果 | 29 |
| 表 3.5 | 運用方法の改良点 | 31 |
| 表 3.6 | 改良後設備の運転手順 | 31 |
| 表 3.7 | 温度変移（バーナー利用） | 33 |
| 表 3.8 | 電気炉を用いた品質評価の手法 | 34 |
| 表 3.9 | 電気炉での品質評価（1 枚） | 36 |
| 表 3.10 | 電気炉での品質評価（2 枚の内の上部） | 37 |
| 表 3.11 | 電気炉での品質評価（2 枚の内の下部） | 38 |
| 表 3.12 | RCF の強度評価 | 39 |
| 表 3.13 | 電気炉での品質評価（航空機端材） | 40 |
| 表 3.14 | カーボンファイバーリサイクル関連企業 | 41 |
| 表 3.15 | RCF を使用したコンパウンド企業製品の特長 | 45 |
| 表 3.16 | RCF 切断工程における問題の要因と改善策 | 47 |
| 表 3.17 | RCF 単位回収コスト（初期段階） | 48 |
| 表 3.18 | 処理能力向上のための見直し | 49 |
| 表 3.19 | RCF 単位回収コスト（実証事業終了時） | 50 |
| 表 3.20 | CNG タンクの前処理工程 | 51 |
| 表 3.21 | CNG タンクの前処理工程における管理項目 | 54 |
| 表 3.22 | 燃焼処理工程における管理項目 | 54 |
| 表 3.23 | RCF 切断工程における管理項目 | 55 |
| 表 4.1 | コンパウンドに係る活動実績 | 56 |
| 表 4.2 | コンパウンド設備等の調整と検証項目 | 58 |
| 表 4.3 | 運転管理に係る項目 | 59 |

| | | |
|--------|---|----|
| 表 4.4 | コンパウンドに関する課題と対応 | 60 |
| 表 4.5 | 製造物（リサイクル成果物）の品質評価（ペレット） | 65 |
| 表 5.1 | 排ガス測定結果..... | 67 |
| 表 5.2 | 粉塵測定結果 | 69 |
| 表 5.3 | CFRP の従来の処分方法の回避..... | 70 |
| 表 5.4 | CNG ボンベの原料回収に伴うエネルギー使用及び CO ₂ 排出量..... | 71 |
| 表 5.5 | 各項目の LCA 検討データ等 | 72 |
| 表 5.6 | LCA の評価結果（埋立処分及び新材製造との比較） | 73 |
| 表 6.1 | 原料回収の想定量..... | 74 |
| 表 6.2 | RCF の強度評価 | 75 |
| 表 6.3 | 製造物（リサイクル成果物）の品質評価（ペレット） | 76 |
| 表 6.4 | CF の用途別需要予測 | 77 |
| 表 6.5 | 事業化の計画条件..... | 80 |
| 表 6.6 | 事業評価の前提条件（ベースケース） | 80 |
| 表 6.7 | 原料回収の計画 1（日本国内の回収可能量） | 81 |
| 表 6.8 | 原料回収の計画 2（海外の回収可能量） | 82 |
| 表 6.9 | 事業化及び設備投資のステップ（大枠） | 82 |
| 表 6.10 | 事業採算性の検討項目..... | 83 |
| 表 6.11 | 事業性の評価結果（環境省補助金；設備額×1/2） | 85 |
| 表 7.1 | 事業化に向けた具体的なステップ | 90 |

| | | |
|--------|--|----|
| 図 1.1 | 燃焼法の特徴 | 2 |
| 図 1.2 | 実証事業のスキーム | 4 |
| 図 1.3 | 業務の実施体制..... | 5 |
| 図 2.1 | バスの屋根上の設置例..... | 6 |
| 図 2.2 | CNG ボンベ (CFRP 製) | 7 |
| 図 2.3 | 金属ライナー製..... | 7 |
| 図 2.4 | CNG ボンベ (CFRP+GFRP) | 7 |
| 図 2.5 | プラスチックライナー製..... | 7 |
| 図 2.6 | 医療用ボンベ..... | 8 |
| 図 2.7 | 医療用ボンベ構造..... | 8 |
| 図 2.8 | 天然ガス自動車の導入状況..... | 8 |
| 図 2.9 | CNG ボンベの型式別数 (鋼製/複合容器) (単位;個) | 9 |
| 図 2.10 | 容器型式別の検査数 (=製造数) (単位;個) | 9 |
| 図 2.11 | Boeing787 の CFRP 採用部位..... | 10 |
| 図 2.12 | AIRBUS 社向けの垂直尾翼の一次構造部材..... | 11 |
| 図 2.13 | エアバスの素材..... | 11 |
| 図 2.14 | Boeng787 における生産分担..... | 12 |
| 図 2.15 | 三菱重工業の航空機端材 | 13 |
| 図 2.16 | 2017 年の CFRP 端材 (有)カワサキテクノロジーリサーチ推定) | 13 |
| 図 3.1 | 初期段階の実証炉の外観..... | 21 |
| 図 3.2 | 初期段階の実証炉の概略設計図 | 22 |
| 図 3.3 | CNG ボンベ (入荷時の様子) | 22 |
| 図 3.4 | CNG ボンベ (燃焼処理前) | 22 |
| 図 3.5 | CNG ボンベ (燃焼処理後) | 23 |
| 図 3.6 | RCF 束状回収物 | 23 |
| 図 3.7 | 燃焼処理の温度変移の概要 | 23 |
| 図 3.8 | 初期段階の実証炉の温度変移の概要..... | 24 |
| 図 3.9 | 風速試験の概要図..... | 26 |
| 図 3.10 | 風速試験の様子..... | 26 |
| 図 3.11 | 吹き流しを設置した反応炉内の状態..... | 26 |
| 図 3.12 | 風速試験結果 | 27 |
| 図 3.13 | 反応炉内の温度計の位置 | 28 |
| 図 3.14 | 設備改良の概略図 | 30 |
| 図 3.15 | バーナー設置前..... | 30 |
| 図 3.16 | バーナー設置の様子 | 30 |
| 図 3.17 | 自動制御システム (富士加飾内) | 30 |
| 図 3.18 | 4 等分に切断した CNG ボンベ..... | 31 |
| 図 3.19 | 試料の間に隙間を作り並べた様子..... | 31 |

| | | |
|--------|-------------------------------------|----|
| 図 3.20 | 試料投入の様子..... | 31 |
| 図 3.21 | 改良後の実証設備の温度変移の概要..... | 32 |
| 図 3.22 | 電気炉..... | 34 |
| 図 3.23 | るつぼと電子計量器..... | 34 |
| 図 3.24 | 9 等分に番号付けした CNG ボンベ..... | 35 |
| 図 3.25 | 9 等分に切断した CNG ボンベ..... | 35 |
| 図 3.26 | 9 等分した CNG ボンベを 6 層に剥離したもの..... | 35 |
| 図 3.27 | 9 等分した CNG ボンベを 6 層に剥離したもの（全量）..... | 35 |
| 図 3.28 | 試料への番号の付し方..... | 38 |
| 図 3.29 | 航空機端材（燃焼処理前）..... | 39 |
| 図 3.30 | 航空機端材（燃焼処理後）..... | 39 |
| 図 3.31 | 燃焼処理後の航空機端材を層ごとに剥離したもの..... | 40 |
| 図 3.32 | 燃焼処理後の航空機端材の表面の様子..... | 40 |
| 図 3.33 | ELG CarbonFiber 工場の作業の様子..... | 41 |
| 図 3.34 | ELG CarbonFiber 工場の設備..... | 41 |
| 図 3.35 | ELG CarbonFiber の製品..... | 42 |
| 図 3.36 | ELG CarbonFiber の日本国内の展開..... | 42 |
| 図 3.37 | カーボンファイバーリサイクル工業(株)の工場..... | 43 |
| 図 3.38 | 一次加熱装置..... | 43 |
| 図 3.39 | 二次加熱装置..... | 43 |
| 図 3.40 | 高安の CF リサイクル事業展開..... | 44 |
| 図 3.41 | CFRP を使用した製品（プリウス）..... | 45 |
| 図 3.42 | 切断機..... | 46 |
| 図 3.43 | 切断後の RCF 回収物（25mm）..... | 46 |
| 図 3.44 | RCF 切断の刃（研磨後）..... | 47 |
| 図 3.45 | 本実証事業における技術システム図..... | 51 |
| 図 3.46 | 残ガス燃焼のため CNG ボンベをコンロに繋ぐ..... | 52 |
| 図 3.47 | 残ガス燃焼の様子..... | 52 |
| 図 3.48 | CNG ボンベ切断の手順..... | 52 |
| 図 3.49 | CNG ボンベ切断後..... | 53 |
| 図 3.50 | 切断作業前..... | 53 |
| 図 3.51 | 切断作業後..... | 53 |
| 図 3.52 | 切断作業時の粉塵..... | 53 |
| 図 3.53 | 試料の保管..... | 54 |
| 図 4.1 | コンパウンド関係設備の概念..... | 58 |
| 図 4.2 | 2 軸押出機（設置時）..... | 58 |
| 図 4.3 | 2 軸押出機（全体）..... | 58 |
| 図 4.4 | 製品押出状況..... | 59 |
| 図 4.5 | 射出成型設備..... | 59 |

| | | |
|--------|----------------------------|----|
| 図 4.6 | RCF 原料 (25 mm切断) | 62 |
| 図 4.7 | PC (ポリカーボネート樹脂) | 62 |
| 図 4.8 | ペレット回収物 (PC+20%RCF) | 62 |
| 図 4.9 | 射出成型品 (PC+20%RCF ペレット活用) | 62 |
| 図 4.10 | パソコン筐体/PC+20%CF | 62 |
| 図 5.1 | VOC 除去装置設置時の概略図 | 66 |
| 図 5.2 | 排ガス測定の様子 | 67 |
| 図 5.3 | 切断作業場の状況 | 68 |
| 図 5.4 | 集塵機設置の概略図 | 68 |
| 図 5.5 | 切断機への集塵機設置の様子 | 68 |
| 図 5.6 | 粉塵測定場所 | 69 |
| 図 5.7 | LCA の検討概念 (埋立処分及び新材製造との比較) | 71 |
| 図 6.1 | CNG ボンベの保管状況 | 75 |
| 図 6.2 | CFRP 前処理・回収 | 75 |
| 図 6.3 | 事業内容に係る構想 | 79 |
| 図 6.4 | 事業用地と配置図 | 82 |
| 図 6.5 | 収入の内訳 (経年変化) | 84 |
| 図 6.6 | 収入の内訳 (3 年目) | 84 |
| 図 6.7 | 支出の内訳 (経年変化) | 84 |
| 図 6.8 | 支出の内訳 (3 年目) | 85 |
| 図 6.9 | 収入と支出及びキャッシュフロー累計 (単位: 千円) | 86 |

第1章 実証事業の概要

1.1 実証事業の目的

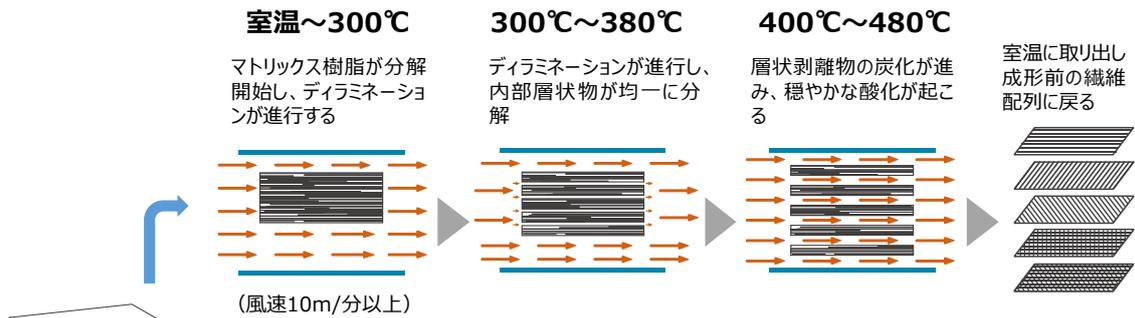
高機能化、軽量化、省資源化等に伴うCFRP（炭素繊維強化プラスチック）の将来の利用増に対し、再製品化などの有効な技術が確立しておらず、現状は埋立等の処分に供されている。また、セメントキルンでの高温焼成に際しては、炭素繊維が燃え残り、その導電特性から、処理システムの障害（電気集塵機の障害要因）を引き起こすなど、処理が困難な廃棄物となっており、その解決が求められている。

本調査は、富士加飾㈱（共同実施者）が開発したCFRP回収技術を用いて、CNGボンベ等（あるいは製造端材）から、2次加工性に優れたRCF（リサイクル炭素繊維）を束状で回収し、樹脂コンパウンド（ペレット等）として半導体製造装置部品、治具への製品化を行う一貫処理のシステムを構築するために、技術面、事業面の検討実証を行ったものである。

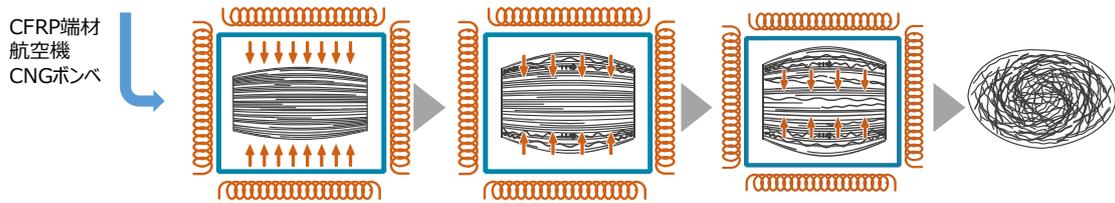
1.2 実証事業の概要

- 高機能、軽量化、省資源化等に伴うCFRP（炭素繊維強化プラスチック）の将来の利用増に対し、現状では埋立や低位な利用しかされておらず、再製品化を目指した技術確立の必要性が高い。
- 本計画は、①連携する富士加飾㈱が新しく開発したCFRP回収技術システム（平成29年6月8日、特許出願2017-113772／リサイクル炭素繊維収束体、およびその製造方法）と、②過去に事業化してきたCF新品材を用いた2次加工技術を応用し、RCFを市場に再生（商品化）させることを目的として、両社が協力して技術面（CF回収分別、製品原料化）や、事業面（原料回収、製品評価、需要評価、総合評価）の検討を行い、事業化可能性の実証を行うものである。
- また、平成31年度からの実事業化に向けて、研究開発を継続し商品化の目途（半導体等治具、搬送ロボットアーム等）を見極め、事業化に向けた原料回収元、利用需要先との連携を具体的に推進する。
- なお、本再生技術は、従来法（外部加熱の密閉タイプによる再生法）と比べ、一段と高性能、汎用化した技術である。具体的には、マトリックス樹脂が均一に除去され、トウ（束）状でのRCFの回収ができることから、製造・加工において新品材と同レベルの取り扱いが可能となる。さらに、将来の長繊維CFRTPの製造技術へ拡張し、航空機、自動車の軽量化に寄与できる可能性が高いと考えられる。

1) 今回の実証事業



2) 従来法（外熱式が主流）



※ 従来法による線状回収物は、不織布、湿式抄紙、紡糸等の利用が提案されているが、富士加飾の過去の開発、量産化の経験から、ハンドリング性が悪く、コストが高価で、汎用性も少ないと考える。

図 1.1 燃焼法の特徴

1.3 実証事業の検討内容

本提案の実証事業は、以下の3項目から構成される。

- ①リサイクル工程の実証運転（実機を考慮した検討）
 - ②リサイクル炭素繊維の2軸押出機によるコンパウンドの試作開発と商品化
 - ③多様なリサイクル源を考慮した炭素繊維の分類と、各対応した加工方法の検討と市場性の確認
- 解決すべき課題（①CFRPの束状回収技術の実用化実証、②CNGボンベを活用した半導体等製造治具の製品化に向けた一貫利用システムの確立、③多様なリサイクル源を考慮した製品市場開発の課題整理）の3項目に対し、実証を通じた成果を得ること。
 - 実証以降の事業実施に向けて、原料回収（市中回収物、製造端材などの原料をどの程度集められるか）、製品評価（回収分別の成果物を用いたコンパウンドの品質、数量は、利用需要先に評価いただけるか）、需要評価（利用需要者と具体的に連携できるか）、実用化に係る総合評価（バッチ方式による複数系列の効率的な運転管理、事業投資規模と売り上げ、利益のバランス）を行い、事業化の総合判断を行う。

表 1.1 実証事業における検討項目と成果目標

| | 技術面の検討 | | | | 事業面の検討 |
|------|--|---|--|---|--|
| | 1. CF 回収方法 | 2. CF 回収分別 | 3. 環境負荷 | 4. 製品原料化 | 5. 事業性 |
| 検討項目 | <ul style="list-style-type: none"> ◆CFRP、CFRTP の分類 ◆形状毎の回収方法・条件の検討 | <ul style="list-style-type: none"> ◆反応性の検証 (反応炉一加温炉の温度制御) ◆CNG ボンベの単位処理能力評価 (投入量変動) ◆リサイクル炭素繊維の回収・管理 (大きさ、形状、異物管理) | <ul style="list-style-type: none"> ◆排ガス制御 (ガス成分、白煙、臭気) ◆作業環境 (粉じん) | <ul style="list-style-type: none"> ◆コンパウンドの市場調査 ◆マーケットを絞り込んだグレード開発 ◆コンパウンド成形性の確認評価 | <ul style="list-style-type: none"> ◆原料回収システム (対象、費用、方法) ◆製品評価 ◆需要評価 (数量、費用) ◆実用化に向けた一連のシステムの検討 |
| 成果目標 | <ul style="list-style-type: none"> 1. 目的・用途毎の回収方法・条件の把握 | <ul style="list-style-type: none"> 2. 多様な種類別の回収実証 3. 商用化(量産化)の技術システムの開発 4. 効率的・合理的な運転管理 | <ul style="list-style-type: none"> 5. 排ガス及びカーボン(粉体)の適正性の確保 | <ul style="list-style-type: none"> 6. 販売先の用途、グレードに応じた製品開発 7. 効率的・合理的な運転管理 (量産化考慮) | <ul style="list-style-type: none"> 1. 事業化可能性の評価 2. 事業計画案の作成 |

1.4 解決すべき課題

(1) CFRP の束状回収技術の実用化実証

CFRP の束状での回収システムは、従来にない利用用途の拡がりに結び付く可能性がある。一方、当該技術システムは、現状では小規模な設備での検証は得られているものの、商用化システムとして考えた場合には、量産化の方法や、効率的・合理的な運転の管理方法の確立が必要となる。また、処理に伴う副生物としての排ガスの効率的な処理や、粉じんを伴う作業環境の制御のための方法論の確立などの検討を行う必要がある。

(2) CNG ボンベを活用した半導体等製造治具の製品化に向けた一貫利用システムの確立

主たる回収対象は、社会回収系で廃棄物処分に困っており、かつ、RCF 回収の束状回収ができれば、繊維長も長く異物混合が少ないなどハンドリング性が良い CNG ボンベとする。製品化は、熱回収法により回収した束状繊維を切断し、ペレットに加工することで、利用用途の拡大が期待できる。今回は、厳密な製品規格を伴わず実際の利用に結び付きやすいと考えられる半導体等製造治具等をターゲットに、炭素繊維の回収と、要求性能に合ったコンパウンドレシピの開発、一連のシステムの事業性などの確認が必要となる。

(3) 多様なリサイクル源を考慮した製品市場開発の課題整理

CFRP の廃材は、CNG ボンベ以外にも、航空機端材などの製造端材を含めて多様なものがある。今後、多様な製品用途へのリサイクルを考慮した場合には、原料となる廃

材の特性のみならず、それを利用した製品化の可能性の把握が重要となる。そのため、廃棄製品の種類、回収分別の方法（長繊維、短繊維）、製品化利用の方法、市場性などの観点で、課題整理を行う。

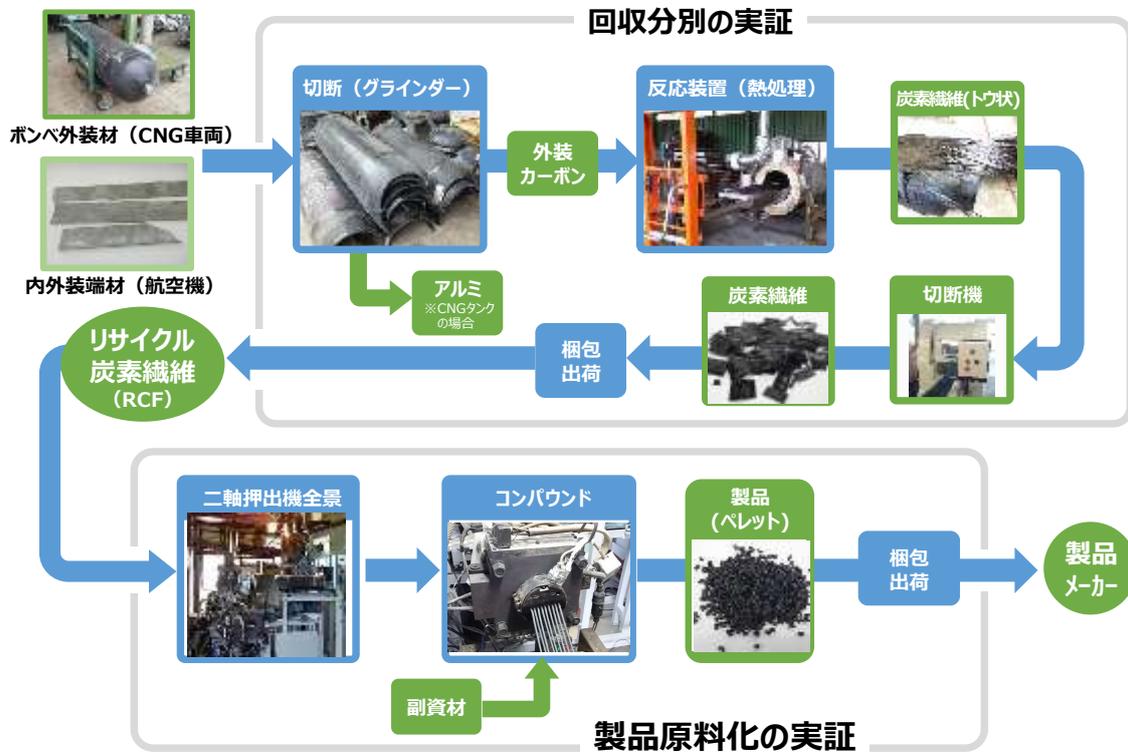


図 1.2 実証事業のスキーム

1.5 実証事業の実施体制

- ① (株)リーテムと富士加飾(株)は、連携し、共同実施を行う。
- ② 製品評価は淀川ヒューテック(株)、コンパウンド製造はダイセルポリマー(株)と連携して行う。
- ③ 半導体等の治具需要、CFRP 原料調達マーケティングは(有)カワサキテクノリサーチに外注。

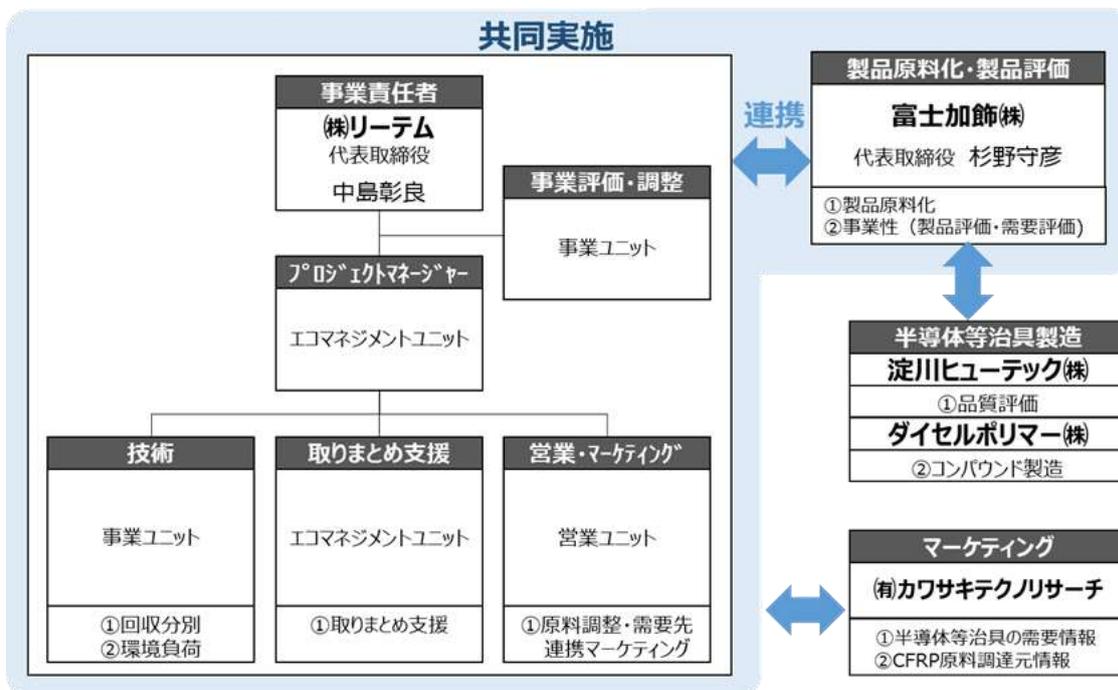


図 1.3 業務の実施体制

1.6 実証事業スケジュール

- ① 早期段階；実証設備を用いた技術の確立、CF 市場調査
- ② 中期段階；RCF（回収物）を活用したコンパウンド、コンポジット製造と、メーカー評価の取得、中間報告、現地視察
- ③ 後期段階；事業化評価と検証、事業計画の作成、最終報告、報告書とりまとめ

表 1.2 実証事業スケジュール

| 大項目 | 小項目 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 |
|------------------------|--|--|----|----|----|-----|-----|-----|----|----|
| 1 | CF 回収方法 ①CFRP, CFRTP の分類、②形状毎の回収方法・条件の検討 | [Progress bar from July to January] | | | | | | | | |
| 2 | CF 回収分別 ①反応性の検証、②CNG ボンベ他の単位処理能力、③リサイクル炭素繊維の回収・管理 | [Progress bar from August to January] | | | | | | | | |
| 3 | 製品原料化 ①コンパウンドの市場調査、②マーケットを絞り込んだグレード開発、③コンパウンド成形性の確認評価 | [Progress bar from July to February] | | | | | | | | |
| 4 | 事業性 ①原料回収システム、②製品評価、③需要評価、④実用化に向けた一連のシステムの検討 | [Progress bar from October to February] | | | | | | | | |
| 5 | 環境負荷 ①排ガス制御、②作業環境、③LCA 分析等 | [Progress bar from November to January] | | | | | | | | |
| 6 | とりまとめ ①全体とりまとめ、②報告書の作成、印刷、製本 | [Progress bar from December to February] | | | | | | | | |
| 中間報告・最終報告 (●)、現地視察 (■) | | | | | | | ●■ | | | ● |

第2章 原料回収に係る現状と評価

原料の発生及び利用特性を把握し、RCF（リサイクルカーボンファイバー）回収後の利用用途を考慮した回収方法、条件の把握を行う。

具体的には、CNGボンベ、航空端材等のCFRPの回収、燃焼などの特性を把握する。また、品目・形状ごとに、テープや、塗料などの異物状況、製品成型時の繊維方向などを把握し、RCFの回収方法・条件の検討を行う。

2.1 CFRPの回収可能性の検討

CFRPの代表的な利用品目として、CNGボンベ等（水素燃料ボンベ、医療系ボンベ含む）や、航空端材（プリプレグ端材含む）などの発生状況や、原料としての回収可能性の検討を行う。

2.1.1 CNGボンベ等

(1) CNGボンベ

天然ガス自動車で使用されるボンベで、鋼製と、複合容器（金属ライナー製、プラスチックライナー製）に区分でき、CFRPは複合容器に利用されている。アルミ合金でできた継目なしの円筒を内筒とし、その外側をエポキシ樹脂に含浸したカーボン繊維を多層に巻き付けた構造となる。内部気圧は200気圧（20Mpa）程度となっている。

天然ガス自動車は、次世代自動車に位置付けられており、全体として2030年までに新車販売に占める割合を5割～7割とすることを目指すとされている。

CNGボンベの耐用年数は、15年となる。容器の廃棄は、残留ガスの適切な処理及び、容器のくず化などを行い処分することとされている。

※くず化；容器を二つに切断する等、その後加工しても一度くず化された容器であることが容易に確認できるような処置を施すこと。

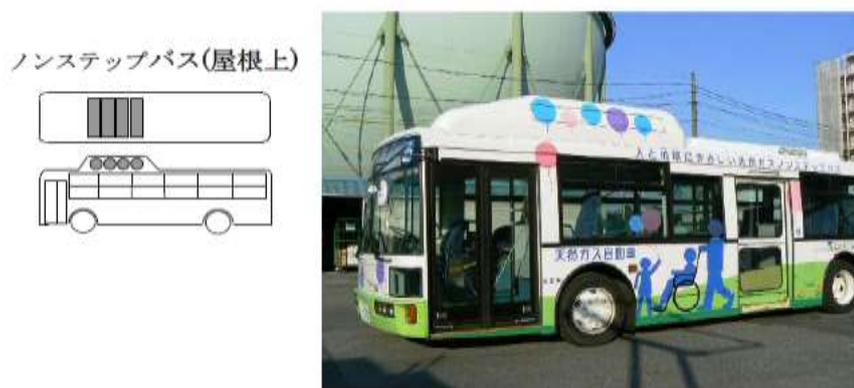


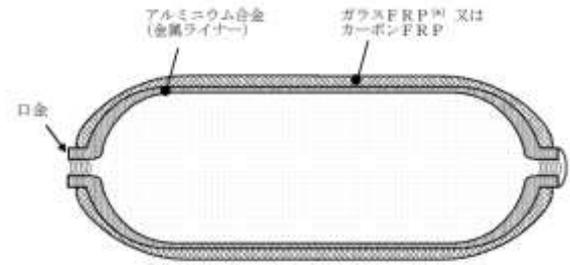
図 2.1 バスの屋根上の設置例



図2.2 CNGボンベ (CFRP製)

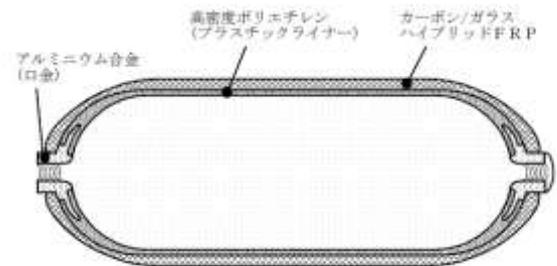


図2.4 CNGボンベ (CFRP + GFRP)



金属ライナー製複合容器の断面構造図

図2.3 金属ライナー製



プラスチックライナー製複合容器の断面構造図

図2.5 プラスチックライナー製

(2) 水素燃料ボンベ

燃料電池自動車で使用されるボンベで、アルミ合金でできた継目なしの円筒を内筒とし、その外側をエポキシ樹脂に含浸したカーボン繊維を多層に巻き付けた構造で、車両に搭載されるほか、運搬時、貯蔵時などもボンベが活用される。

アルミは、水素を透過することや、内部圧力が高いなどのため、接着材、不透過膜、CFRP層(厚みある)などで製造されている。内部気圧は、350気圧(35Mpa)～700気圧(70Mpa)となり、CNGボンベの200気圧(20Mpa)と比べて非常に高い。

(3) 一般複合容器

アルミ合金でできた継目なしの円筒を内筒とし、その外側をエポキシ樹脂に含浸したカーボン繊維(又はガラス繊維との混合)を薄く巻き付けた構造。

容量は、1～5ℓ、～30ℓ、～150ℓ、～300ℓに区分されるが、1～5ℓが85%、5～30ℓが14%程度となる。例えば、帝人のウルトレッサは、1987年からの販売実績で国内累計出荷本数40万本を超えるとされている。



図 2.6 医療用ボンベ



図 2.7 医療用ボンベ構造

(4) CNG ボンベ等の賦存量

CNG ボンベ等は、容器製造後、使用前の段階で、全て高圧ガス保安協会の容器検査を受ける必要がある。従って、容器型式ごとに、複合容器（鋼製以外）の検査数を把握し、賦存量として分析を行った。

- 自動車用天然ガス車両の累計台数は、4.7 万台（2017 年度末）、全世界 2300 万台の 0.2% と少ない。

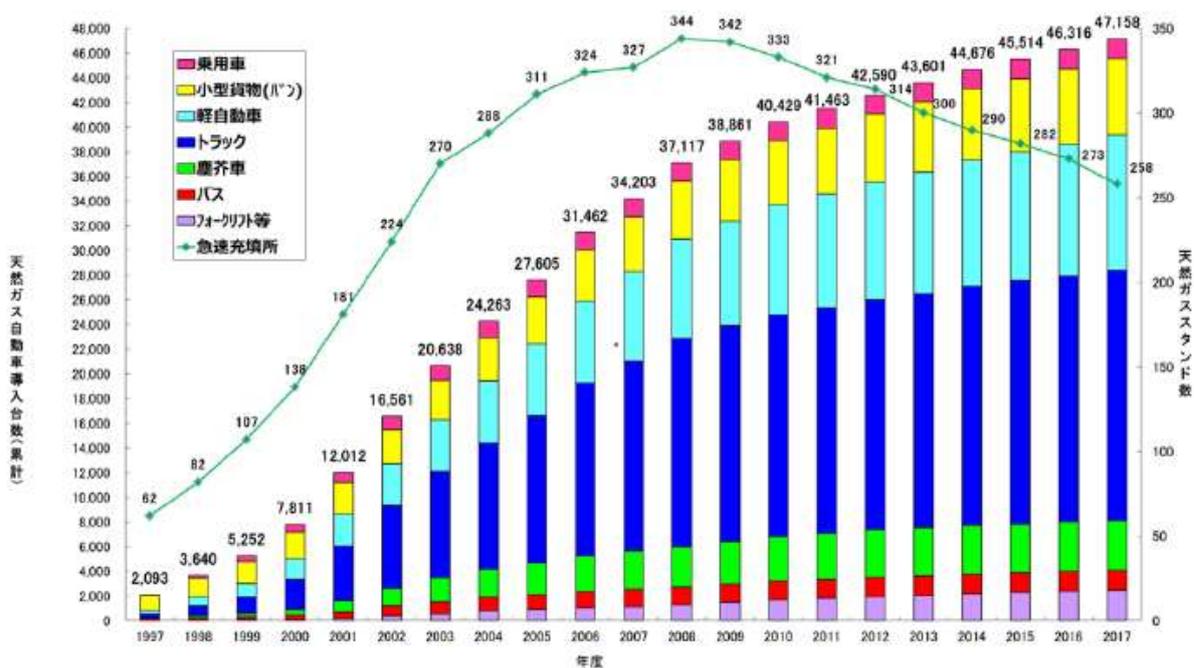


図2.8 天然ガス自動車の導入状況

- CNG ボンベ製造数は、統計データをもとに集計すると、8.7 万本（18 年累計；H12-H29）、6.1 万本（15 年累計；H15-H29）となっている（※耐用年数 15 年）。このうち複合容器（鋼製以外）は、9 千本（15 年累計）全体の 15%程度であり、鋼製 5.2 万本（85%）と比較して少ない。
- CNG ボンベ（複合容器）の製造は、近年減少しており、平成 29 年度には 35 本と平成 14 年度のピーク時 2,216 本の 1.6%と少ない。ボンベの法定耐用年 15 年を考慮すると、現在は、比較的多く排出しているとも考えられる。（今後は少なくなる）
- 一方、最近では水素ボンベの数量増が見られ、H28 年度は 1,038 本と CNG ボンベと逆転

し、増加傾向にある。(但し、本格排出時期は5年以上先)

- CFRP製のボンベ類には、CNGボンベ(鋼製以外)、水素燃料ボンベ(CFRP製)以外に一般複合容器が、100万本(15年累計)存在する。内容物は、酸素、窒素、空気等であり、主に消防用、医療用、家庭用などで使用されている。但し、大きさは、1~50と極小規模のものや、5~300と小規模のものがそれぞれ84万本(83%)、16.7万本(16%)で、この2種類で99.6%を占める。

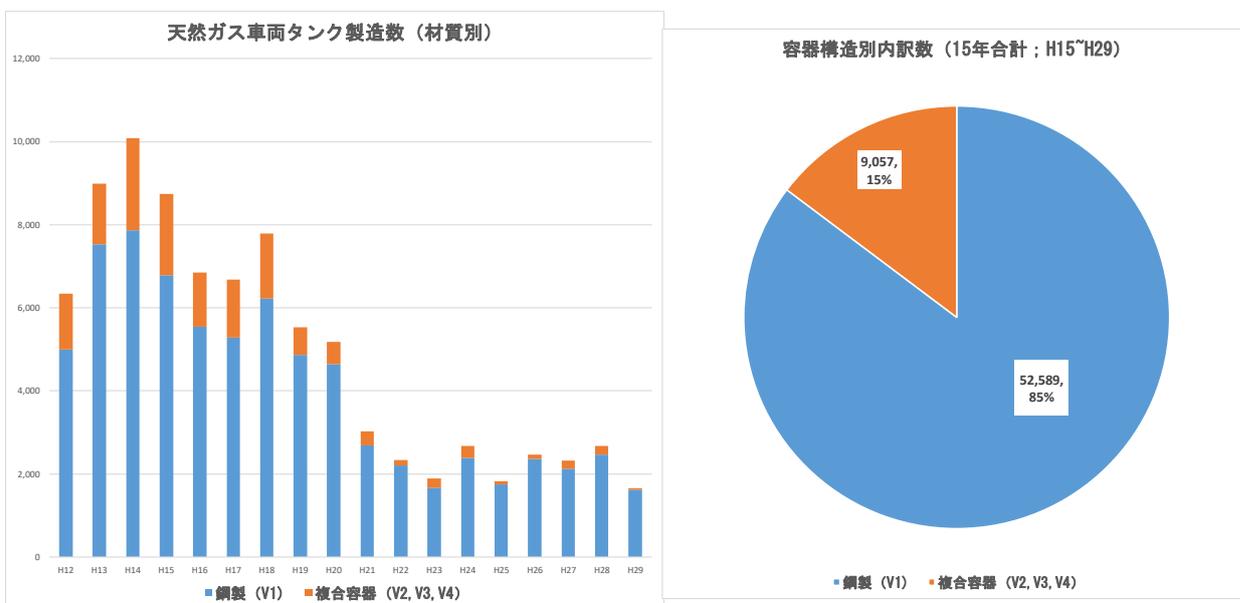


図2.9 CNGボンベの型式別数(鋼製/複合容器) (単位; 個)



図2.10 容器型式別の検査数(=製造数) (単位; 個)

2.1.2 航空機端材の特性

(1) CFRPの利用

炭素材は、軽く・強く比重が1.8前後、鉄の約4分の1と軽い材料で今後の金属材料を置き換える軽量化材料として注目されている。特長として、疲労せず、錆びず、化学

的・熱的にも安定といった特性を有し、厳しい条件下でも長期的に安定した信頼性の高い材料である。この航空機用の複合材として使用される PAN 系炭素材を製造しているのが日本の東レ、帝人、三菱ケミカル 3 社で生産量は世界の 70%とシェアは高く、航空機を始めとする炭素材の原料メーカーとしてのプレゼンスは非常に高い。



787は中型旅客機

787はカーボンファイバーを使った複合材を用いて作られているため後述の空調設備の快適性向上が可能になった。



777X



777は大型旅客機

777 1,900機以上(2017年4月)

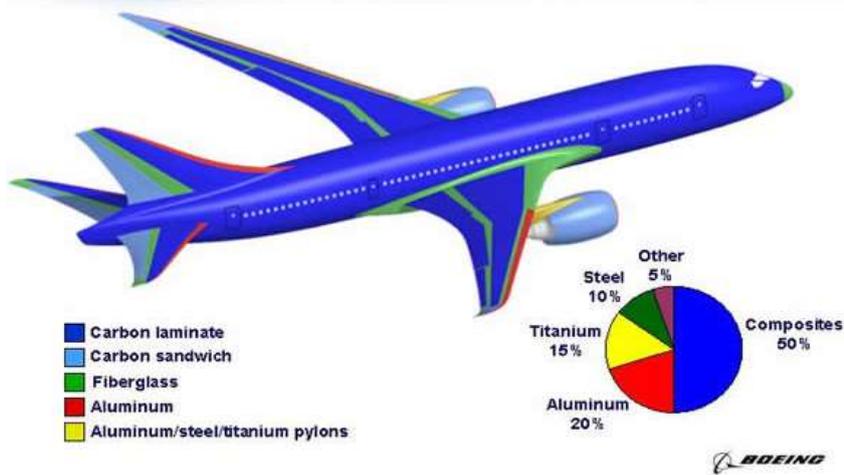


図 2.11 Boeing787 の CFRP 採用部位

出典 https://www.carbonfiber.gr.jp/field/images/plane02_b.jpg

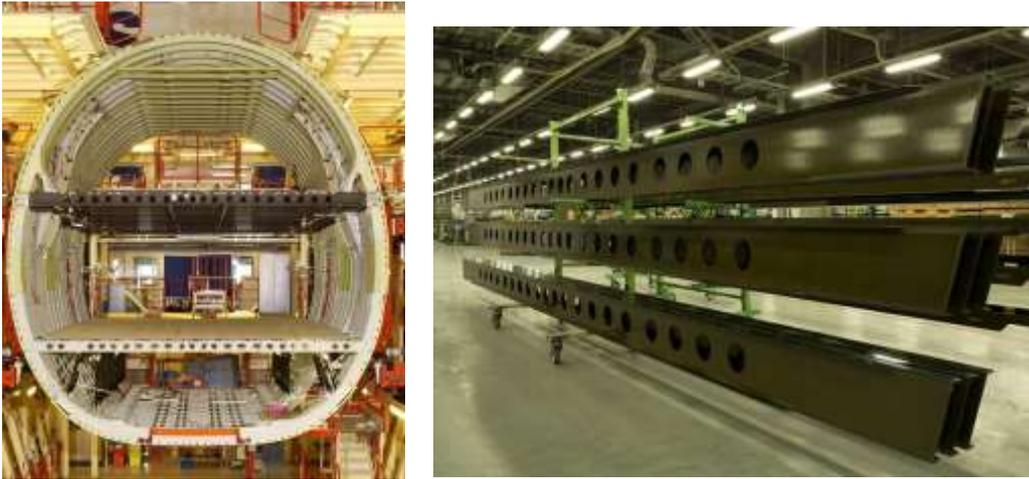


図 2.12 AIRBUS 社向けの垂直尾翼の一次構造部材
 ジャムコ社/アドバンスドプルトリュージョン (ADP 製法)
 出典 : <https://www.jamco.co.jp/ja/technology/story/adp.html>

A380 Composite applications

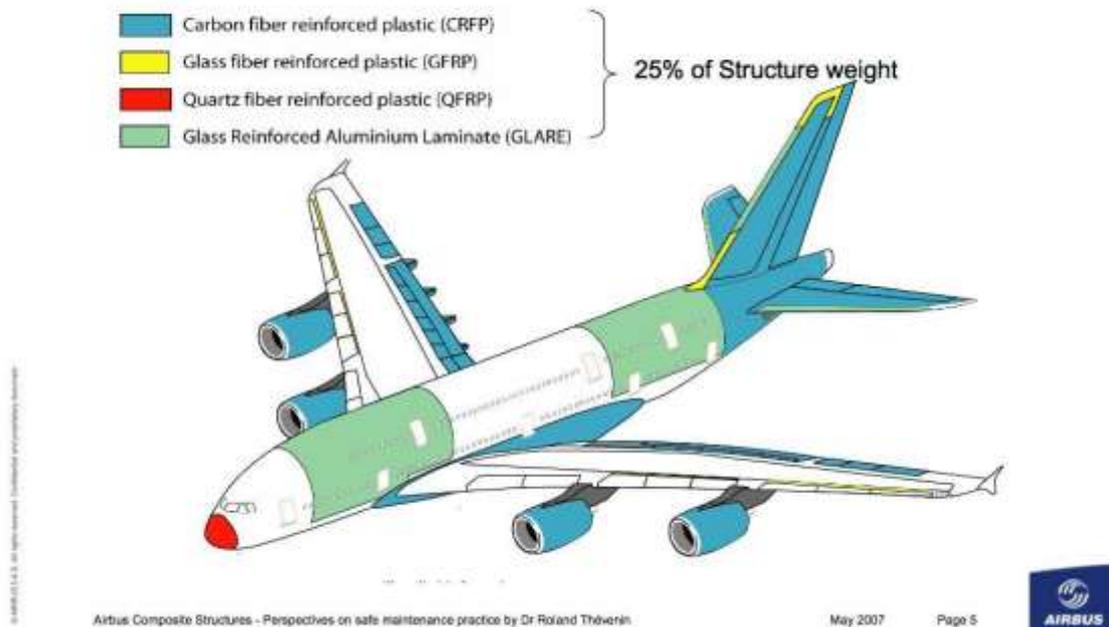


図 2.13 エアバスの素材

エアバスが使用する CFRP は、ボーイングと異なる。ボーイングでは胴体（前、後）に複合材が使用されていたが、エアバスでは、尾翼、周辺、エンジン回りが多い。

一方 CFRP の用途開発については海外勢の後塵を拝しているが、その中でも Boeing 社向けに日本の重工メーカー各社が航空機の各部品を納品している。また欧州の AIRBUS 社の本拠地はフランスであるが、帝人が欧州にて Jamco 社を通じて部品を供給している。Boeing 社が米国で主翼を自社製造し、また自社製造以外にも Triumph Aerostructures や、日本の三菱重工業にも製造を委託している。

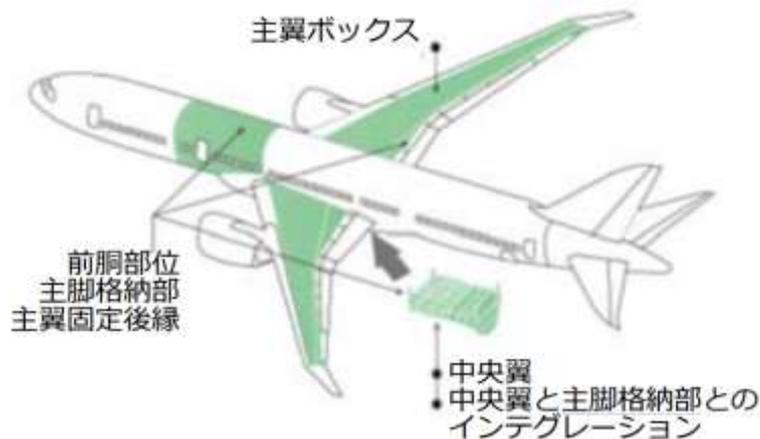


図 2.14 Boeng787 における生産分担

出典 : <https://travel.watch.impress.co.jp/docs/news/1027498.html>

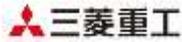
表 2.1 日本の航空機部品製造メーカーの生産状況

| Boeing B787 (242-330 席) | 主翼 ボックス | 前胴 部位 | 中胴 下部 構造 | 主翼 固定 後縁 | 中央 翼 | 主脚格納部 インテグレーション | 主翼 前後 桁 |
|----------------------------|------------|----------|----------------|----------------|---------|--------------------|---------------|
| 三菱重工業 | ○ | | | | | | |
| 川崎重工業 | | ○ | ○ | ○ | | | |
| SUBARU | | | | | ○ | ○ | |
| 新明和工業 | | | | | | | ○ |

(有)カワサキテクノリサーチ調べ)

(2) 航空機部品製造メーカーの端材

航空機部品メーカーは部品製造時に大量の CFRP 端材が出る。三菱重工業は Boeing 向けに主翼製造を担っているが、Boeing 以外にも子会社の三菱航空機/MRJ 向けも製造しており、国内企業としては CFRP 端材量が最も多く同社の技報によると年間約 1,000t が排出されている。おそらくそのほとんどが未処理のまま埋立て等廃棄処分されていると見られ、一部が国内外のリサイクル業者に引き取られていると見られる。



複合材主翼の製造工場



硬化済み炭材



プリプレグ炭材

図 2.15 三菱重工業の航空機端材

出典：三菱重工業技報 vol.55 no.2 (2018)「航空機複合材廃材のリサイクル利用による環境負荷低減」

航空機関連企業は機密情報もあるために情報源は限定されるが、(有)カワサキテクノロジーによる関係者へのヒアリングの結果は、以下のように端材量が推定できるとした。航空機関連企業の端材だけでも国内で年間約 1,500t と推定され、その他をあわせると 2,000t 弱になると推定している。



排出量 **4社の端材合計1431.9t(東レのPAN)**

図 2.16 2017 年の CFRP 端材 (有)カワサキテクノロジー推定)

表 2.2 航空機関係各社の CFRP 端材の排出量

| CFRP使用企業 | 複合材料工場 | 分担部位 | Boaing | | | エアバス | | MRJ | 2017年 排出量 (t) |
|-----------|------------------|-----------------|--------|-----|------|------|-----|-----|------------------|
| | | | 777 | 787 | 777X | 350 | 380 | | |
| 三菱重工業 | 名古屋航空宇宙システム製作所 | 主翼 (CFRP) | ○ | ○ | ○ | | | ○ | |
| | 広島製作所江波工場 | 尾部胴体 後部胴体パネル | | | | | | | |
| 合計 | | | | | | | | | 800 |
| 川崎重工業 | 名古屋第一、第二 岐阜工場 | 前部・中部胴体向 | ○ | × | ○ | | | | |
| | 岐阜工場 | 前部胴体 | | ○ | | | | | |
| 合計 | | | | | | | | | 400 |
| SUBARU | 愛知県 半田工場 | 中央翼 | | | | | | | |
| | 半田西工場 | 中央翼 (複合材) | | ○ | | | | | |
| | 栃木県 宇都宮工場 | 中央翼 | | ○ | | | | | |
| 合計 | | | | | | | | | 150 |
| 新明和工業 | 兵庫県神戸市 | 翼胴フェアリング | ○ | | ○ | | | | |
| | | 主翼スパー | | ○ | | | | | |
| 合計 | | | | | | | | | 80 |
| 日本飛行機 | 神奈川県大和市 | インスパーリブ | ○ | | | | ○ | | |
| Jamco | 東京都立川市 | 垂直尾翼用構造部材 | | | | ○ | ○ | | |
| | | 二階床構造部材 | | | | | ○ | | |
| 合計 | | | | | | | | | |
| 天竜コンポジット | 岐阜県各務原市 | | ○ | | | | | | |
| その他 | | | | | | | | | 500 |
| 合計 | | | | | | | | | 1,930 |

((有)カワサキテクノリサーチ調べ)

2.2 原料回収に係る取組結果

RCFの原料として照準したCFRP製のCNGボンベ等の回収調査は、ボンベ改造・修理業者、自動車解体業者及び自動車解体リサイクル業界と連携し、原料買取、ボンベ物流などを実施。その結果、一定規模の原料回収ルートを確立した。

表 2.3 原料回収に係る活動実績

| 時期 | 内容 |
|-----|--|
| 6月 | <p>●営業アプローチ開始（CNGボンベ「くず化業者」）</p> <p>①情報収集・業界連携等</p> <ul style="list-style-type: none"> ・企業訪問 炭素繊維の廃棄素材の買取；A社 |
| 7月 | <p>●水戸工場におけるCNGボンベ入手時の対応確認</p> <p>①原料回収対象企業との商談</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CNGボンベ原料回収の商談；B社、C社、D社、E社 ・水戸工場においてCNGボンベ原料回収の商談；F社 <p>②情報収集・業界連携等</p> <ul style="list-style-type: none"> ・東京都交通局訪問—事業説明およびCNGバスの解体入札情報ヒアリング ・日本ELVリサイクル機構との協議—原料回収への協力を依頼 |
| 8月 | <p>①原料回収対象企業との商談</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CNGボンベ原料回収の商談；G社、H社、I社 ・水戸工場において水素燃料ボンベ原料回収の商談；J社 <p>②情報収集・業界連携等</p> <ul style="list-style-type: none"> ・日本トラックリファインパーツとの協議—原料回収への協力を依頼 |
| 9月 | <p>①原料回収対象企業との商談</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CNGボンベ原料回収の商談；K社、L社 <p>②製造メーカー等向けの実証事業の説明と商談</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CFRPリサイクル実証事業の説明と商談；M社（自動車関係） |
| 10月 | <p>①原料回収対象企業との商談</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CFRP原料回収の協議；N社、O社 ・航空端材等の原料回収の協議；P社（重工メーカー） <p>②情報収集・業界連携等</p> <ul style="list-style-type: none"> ・東日本自動車解体処理協同組合との協議—原料回収への協力を依頼 ・CFRP製造現場の視察及び原料回収・利用の協議；Q社 |
| 11月 | <p>①原料回収対象企業との商談</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CNGボンベ原料回収の商談；R社、S社 ・医療用酸素ボンベの原料回収の商談；T社 ・航空端材等の原料回収の協議；U社（重工メーカー） <p>②情報収集・業界連携等</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ボンベ製造メーカー・商社向け動向把握；V社、W社、X社、Y社 ・炭素繊維工場の見学；Z社 |
| 12月 | <p>①情報収集・業界連携</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CFRPリサイクル実証事業の説明と商談；a社（自動車関係） ・海外のリサイクルソースの調査と商談（一部現地視察含む）；中国、米国 |
| 1月 | <p>①原料回収対象企業との商談</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CNGボンベ原料回収の商談；b社、c社 |
| 2月 | <p>①原料回収対象企業との商談</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CNGボンベ原料回収の商談；d社 ・航空端材等の原料回収の協議；e社（重工メーカー） |

表2.4 CNGボンベ回収に係る業界団体との連携

| | 団体名 | 事業所名 | 地区 | 概要 | CNGボンベ排出状況 |
|---|-------------------------|-----------------|----|---|--|
| 1 | (一社) 日本ELV リサイクル機構 | 本部 | 東京 | ・自動車リサイクル法に基づく自動車解体業者の認可団体 (500社加盟) ・事務局を通じて、CNGボンベの発生等の情報収集 | ・500社と最大会員を抱えるが、乗用車が主体のためCNGボンベは排出しない。 |
| 2 | (一社) 日本トラック リファインパーツ | 本部 | 金沢 | ・トラックの解体を行う業者が加盟 (46社) ・幹事会を通じて連携 | ・CNGボンベもあるが、鋼製が主体 |
| 3 | 東日本自動車解体 処理協同組合 | むつパーツ (代表理事) | 青森 | ・全部再資源化事業者の集まり (72社)のため、丁寧な解体を行う事業者集団。 ・理事会で意見交換。 | ・乗用車が多い |

さらに、CNG ボンベ、水素ボンベ等の今後の生産動向の把握や、一般複合容器についての原料回収の可能性については、下記の複合容器の製造・販売業者に対する情報収集を進めた。

表 2.5 複合容器の製造・販売メーカー

| 製造業者 | 符号 | 販売業者 | 所在地 |
|-----------------------------------|----------------------------|--|-----------|
| Dynetek (カナダ) | Dynetek KD Dynetek JFEG | JFE コンテナ(株)高圧 ガス容器事業部 | 川崎市川崎区 |
| SCI (アメリカ) | TEIJIN | 帝人エンジニアリング(株) 機器システム事業部 | 東京都港区 |
| 天龍コンポジット | 天龍コンポジット | 天龍コンポジット(株)営業 部 | 岐阜県加茂郡川辺町 |
| Hexagon Lincoln Inc. (アメリカ) | LINCOLN COMPOSITES | 三井物産プラスチック(株) ※三井物産オートモチ ーブ、三井物産から移管 | 東京都港区 |

原料回収に係る企業連携については、月間課題を踏まえた対応策を検討し、推進した。

表 2.6 原料回収に関する課題と対応

| 時期 | 課題 | 対応 |
|----|-------------------------------------|---|
| 6月 | くず化業者を対象に、有価買取法を実施。 | 今は取扱いのない会社も存在。そのため、全国のくず化業者を対象に拡大して推進。 |
| 7月 | 高圧ガスの有無による運搬方法の区分を明確化 (ガスなしは宅急便で対応) | 高圧ガス運搬車両による水戸工場受入に関しては、車両の積替え、受取・支払い対応などの確認を行った。 |
| 8月 | 「くず化業者」の他に、アプローチ先を拡大 | くず化業者のみを対象とした場合、予定数量の確保が見込めないと判断し、自動車解体業者、処理業者、自動車解体業者団体等に拡大してアプローチを実施。 |
| | ボンベのタイプ別の仕入れ課題の明確化 | ①グレーのタイプはカーボンファイバー+ガラス繊維、②極小タイプは作業面の制約から、仕入れを検討 |
| 9月 | 解体業者へのアプローチを強化 | バスの買取や、主力の解体業者の状況を把握。全国のバス解体の大手4社の情報を入手し、連携強化。 |

| | | |
|-----|--|-------------------------------------|
| | | 買取管理に関し、一部事業者向けに破壊証明書を発行 |
| 10月 | バスの買取を重点に対応。 航空機や自動車関連とのアポイントを開始。 | ガラスファイバー巻きあるいは、一部ガラスファイバー層のあるボンベも入手 |
| 11月 | 「くず化業者」向け CNG ボンベ (CFRP 製) 買取、継続商談。 水素燃料ボンベ、航空機端材、プリプレグ端材に関する商談 | |
| 12月 | 医療用ボンベ、航空機端材 (プリプレグ端材) の買取を実施。 | 各関係先の処理・リサイクルニーズが高い |

表2.7 CNGボンベ、水素燃料ボンベの回収結果の総括

| 項目 | 内容 |
|-----------|--|
| 排出元との連携状況 | 訪問ヒアリング ： くず化業者 6社、 自動車解体業者大手 8社 製造・販売商社 4社 (国内品 1、輸入品 3) 回収に向けた協議 ： 水素自動車製造メーカー、 自動車リサイクル関係業界 (3 団体) |
| 回収実績 | ・ CNG ボンベ購入企業数 11社 (CFRP 製 131本、CFRP+GFRP 製 59本) (7月3日～2月6日) ・ 水素燃料ボンベ購入企業数 2社 (71本、1月16日～1月30日) |
| 総括 | ・ 天然ガス車両 (累計 47,158台) のうち CFRP 製はバス、トラック等に限定 ・ CFRP 製ボンベは生産減、数量少、15年累積合計は減少 CFRP+GFRP 製、水素燃料ボンベ、一般複合容器 (医療、消防用) ➡リサイクル源の拡大への対応 ・ 繊維情報・安定確保のノウハウ蓄積要 |

表2.8 航空端材及びプリプレグ端材の回収結果の総括

| 項目 | 内容 |
|-----------|--|
| 排出元との連携状況 | 訪問ヒアリング (連携中) ： 航空機製造を行う重工メーカー ※徐々に発生数量を把握 繊維メーカー (A社) 回収に向けた協議 (推進中) ： 自動車・二輪技術研究所 CFRP 製品化メーカー |
| 回収実績 | 1社 (サンプル出荷) (廃棄プリプレグ、航空端材取引ニーズ高) |
| 総括 | ・ 航空産業は、CFRP 発生量大 ・ 製造端材・廃棄プリプレグの大部分は埋立又は、高温・産廃処理 (電炉、ガス化溶解等) ・ 受入れには、機密対応の考慮や、異物除去、端材等の種類・形状・繊維種類が雑多であるなどを考慮した利用法の検討要 |

(まとめ)

①CNG ボンベの回収

9千本(15年累計)のうち、下記のとおり、ペレット(5t/月)供給量を想定すると、年間648本の回収が必要ということになる。その結果、CNGボンベのみの回収での事業化は中長期的には厳しいと考えられる。なお、4製造メーカーごとの炭素繊維の質の考慮も必要となる。

(参考) 淀川ヒューテック RCFペレット供給量(5t/月)の数値規模の場合

PC+20RCF 5t/月製造(から逆算) →RCF 1t/月供給(20%混合分)

→CFRPボンベ54本/月(648本/年)

※CNGボンベからのRCF回収量 18.6kg/本

②水素燃料ボンベの回収

4.7千本(15年累計)は、原料回収に寄与する。しかしながら、本格的な排出時期は数年先(5年程度)となると想定される。また、CNGボンベと異なり、水素の透過防止のためアルミ材とCFRP層の間に接着層があるため、切断か、燃焼手間(アルミ付きの状態では燃焼要)などを要するなどにも考慮が必要となる。

③一般複合容器の回収

量的には圧倒的に多いが、300未満の小規模容器が99.6%。CFRPの回収については、厚みも薄く、CFとGFの混合によるテープワインディング製のため、CFとGFの分離ができないため、混合状態での用途開発が必要となる。

④ 航空端材及びプリプレグ端材

大部分は埋立又は、高温・産廃処理(電炉、ガス化熔融等)がされている状況で、有意なリサイクル方策が見いだせれば、原料回収の可能性は高い。なお、利用にあたっては、機密対応の考慮や、異物除去などの対応、さらに、リサイクルの安定品質の確保に向け、端材等の種類・形状・繊維種類などを考慮した利用法の検討が必要となる。

⑤ 海外調達(風車ブレード、航空端材等)

リサイクルソースの安定確保の一貫として海外からの調達の検討も進めた。

国内では、炭素繊維が2次加工や、消費される量が少ないため、必然的に廃材、製造端材の原料回収も海外と比較して少ない。炭素繊維の大量消費は、EU、アメリカ、中国であるが、EU圏は比較的リサイクルメーカーの材料手当てが進んでおり、新規確保は困難である。一方、中国は、政府が埋め立てを禁止しており、端材が生産量増加とともに大量に発生しており、品種もT300に限られる。そのため、関係構築のため、現地で風力発電設備を製造する大手メーカーと協議するとともに、サンプル材を持ち帰り、直ちに処理を行い使用可能であるとの確認を行った。

アメリカは、ボーイング1社で十分な発生量があるが、整備されたアメリカのシステムにおいて、リサイクルソースへのアクセスは容易でないが、これまでのネットワークを活かし、ボーイングの認定回収業者である会社との連携の可能性を見出した。

なお、海外からの輸送費用、通関等の費用も懸念材料であったが、海外輸送費を見積りした結果、上海—神戸便、シアトル—神戸便及び神戸港—現場(兵庫県小野市で試算)というルートであれば、輸送費は国内と同レベルの20~40円/kg程度の見積もりとなり、海外からのリサイクル材調達に関しても、コスト面では大きな問題とはならないと把握

できた。

表 2.9 CFRP 等の存在状況のまとめ

| 種類 | 発生元 | 賦存量 (存在量) | 現状の処理法 | 回収可能性 |
|---------------------|-----------------------------------|---|--|------------------------------|
| CNG ボンベ (CFRP 製) | 車両解体業者、 くず化業者 | 累計本数；9,057 本（容器耐用年 数；15 年間/H15 ～H29） | 埋立処分 （重機で揉ん で、アルミを回 収） 一部、電炉利用 | バス解体業者、 くず化業者と連 携 |
| CNG ボンベ (GFRP 含) | | | | |
| 水素燃料ボンベ | 車両解体業者 (一部) | 累計本数；5,004 本（H18 以降製 造） | 埋立処分 | 自動車メーカー と連携 |
| 航空端材 | 重工系 4 社 (三重、川重、 SUBARU、新明和) | 508t/年程度 (推計値) | 埋立処分 一部、電炉利用 一部、海外輸出 | 重工メーカーと の連携。一部メ ーカー連携済 |
| プロペラ端材 (航空) | 同上 | 923t/年程度 (推計値) | 埋立処分 一部、電炉、ガス 化溶解処理 | 重工メーカーと の連携。一部メ ーカー連携済 |
| 風車ブレード [海外] | 風車製造会社 (中国；台湾系) | 風車の生産基地 が集積。端材は 保管中 | 倉庫に保管 (埋立禁止) | 海外(中国)との 連携 |
| 航空端材 [海外] | 航空機メーカ指 定処理会社 (米国) | 航空メーカーの 膝元で発生量大 | 埋立処分 | 海外(米国)との 連携 |

2.3 品目別の燃焼特性

品目別に燃焼特性や、燃焼後の処理法の把握のため、試験炉を活用し燃焼温度、異物、CF の使用法などの把握を行った。

その結果、品目別に CF（カーボンファイバー）の使用法が異なることや、燃焼温度も異なるとの知見を得た。

CFRP 原料は、リサイクル源が多様で、処理特性や、利用特性については、炭素繊維の分類や、燃焼による RCF 回収分別の方法、市場性などと密接に関わるため、今後とも、幅広いマーケットの検討が必要であると考えている。

- ①製品の強度、弾性率など、炭素繊維のグレードの考慮
- ②トレーサビリティを考慮したリサイクル材料の管理（異物除去含む）のあり方
- ③市場性；種類別の市場と要求性能、目標価格の設定

表 2.10 炭素繊維の種類別の処理特性

| グレード | 種類 | 弾性率 | 処理特性 | 利用特性 |
|------|--------------------------|--------|--|---|
| T300 | CNG ボンベ (20 年以上前に圧力容器認定) | 240GPa | (1)RCF 回収特性 ・熱反応装置の温度制御 (回収温度の工程) ・切断長 ・異物の除去 (2)製品原料化 ・副資材の内容 ・混合割合 | (1)利用用途 (想定) ・PC 筐体 ・その他 (携帯電話、車内装材、スポーツ用品、半導体製造治具、液晶製造治具等) (2)検討課題 ・グレード毎の性能確認 |
| T700 | 航空機、スポーツ用品、産業資材等 | 240GPa | | |
| T800 | 航空機機体 (最近の日本製造品) | 300GPa | | |

表 2.11 原料の種類別の特性

| 種類 | 形状等 | 特徴 | 燃焼特性 | 回収物 |
|---------------------|---------------------------|---|-----------------------|-------------|
| CNG ボンベ (CFRP 製) | 円筒形 主に L:1.5m×φ0.4m | テープワインディングで長繊維回収可能 表面塗料が異物 | <u>300~500℃</u> で燃焼管理 | 束状、チョップド |
| CNG ボンベ (GFRP+CFRP) | 同上 | 同上、表層に GFRP を使用 (衝撃吸収) 表面塗料が異物。 | <u>300~500℃</u> で燃焼管理 | 束状、チョップド |
| 水素燃料ボンベ | 円筒形 主に L:0.9m×φ0.6m | CNG ボンベと比較して、CFRP 層の厚み大 (容器圧力考慮) ;厚み 5cm | <u>300~500℃</u> で燃焼管理 | 束状、チョップド |
| 航空端材 | 板状物 主に 0.6m×0.1m | エポキシ樹脂との積層品。織物が多い。繊維、樹脂シート等が異物 | <u>300~500℃</u> で燃焼管理 | 束状、織物、チョップド |
| プリプレグ端材 (航空系) | 切れ端塊状 ロール状端材 | 加工前製品 (ロール含む)。織物が多い。暖めると加工しやすい。離形シートの除去必要 | <u>300~500℃</u> で燃焼管理 | 束状、織物、チョップド |
| 風車ブレード | 長方 (ブレード断面) | フルトルージョン品 表面塗料、GF 含む | <u>300~500℃</u> で燃焼管理 | 束状、解繊維状 |

第3章 回収分別に係る現状と評価

CNG ボンベ、航空機端材等の多様な種類の原料に対し、種類別の回収実証、商用化（量産化）の技術システムの開発、効率的かつ合理的な運転管理等の検討を行う。

具体的には、適正な操縦方法の確立、CNG ボンベから回収する RCF の単位処理能力評価、リサイクル炭素繊維の回収処理プロセスの管理について検討を行う。

3.1 適正な操縦方法の確立

実証炉の適正な運転管理と RCF の適正な回収を目指した方法の検討を行う。さらに、処理量を増加させた場合の管理項目や管理要件の相違点等の把握を行う。また、RCF 回収後の後処理である RCF の切断工程においては、CF 裁断時の切断集塵、工程管理（品質管理、品質基準）、保管・運搬方法等の検討を行う。

3.1.1 既存システムを活用した実証炉の整備状況

(1) 初期段階の実証炉の概要

RCF 回収のための実証炉のシステムは、共同実施者である富士加飾㈱が所有する CFRP 回収技術システム（平成 29 年 6 月 8 日特願 2017-113772／リサイクル炭素繊維収束体、およびその製造方法）によるラボ試験機の回収メカニズムを踏まえ、規模を拡大させ、処理量を増やすことを目指し、検討を行うものである。

実証炉の整備状況は、図 3.1、図 3.2 の通り（2018 年 4 月 13 日現在）。



図 3.1 初期段階の実証炉の外観

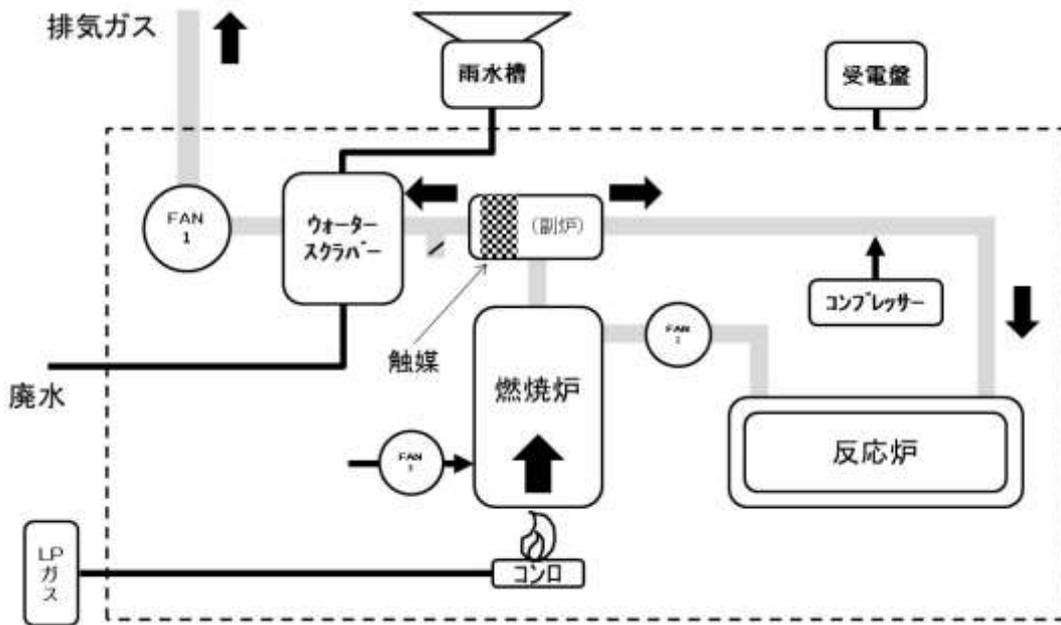


図 3.2 初期段階の実証炉の概略設計図

(2) 初期段階の実証炉の管理項目

燃烧炉にて加熱された熱風を循環ファンによって反応炉内に送り込み、炉内での燃烧反応を進めるものであり、炉内温度を見ながら、ガスの強さやファンの速さを変えて運転を行う。

(3) 実証炉の燃烧処理対象試料

実証炉にて燃烧処理を行う試料は、CNG ボンベとする。図 3.3 が入荷時の CNG ボンベの様子である。口金等の CF 以外の素材を取り除いた後に実証炉に投入し、燃烧処理を行う。燃烧処理前の CNG ボンベの前処理工程については、3.3 にて後述する。前処理を行い、実証炉に投入できる状態にしたものが図 3.4 である。



図 3.3 CNG ボンベ (入荷時の様子)



図 3.4 CNG ボンベ (燃烧処理前)

3.1.2 実証炉の温度管理手法の検討

(1) 初期の実証炉での燃烧処理の実施と問題点

本リサイクルシステムでは、熱処理によってマトリックス樹脂の均一な分解がなされ、

RCF が束状で回収できなくてはならない。目指す成果品は図 3.5、図 3.6 である。図 3.5 は試料を燃焼処理したもので、図 3.6 はそれを層ごとに剥離したものである。



図 3.5 CNG ボンベ（燃焼処理後）



図 3.6 RCF 束状回収物

ラボ試験機において、製品原料化（コンパウンド）可能な RCF が回収されるための温度領域は図 3.7 の通りである。このラボ試験機結果を踏まえ、実証炉における適正な温度管理及び燃焼時間を検討する必要がある。

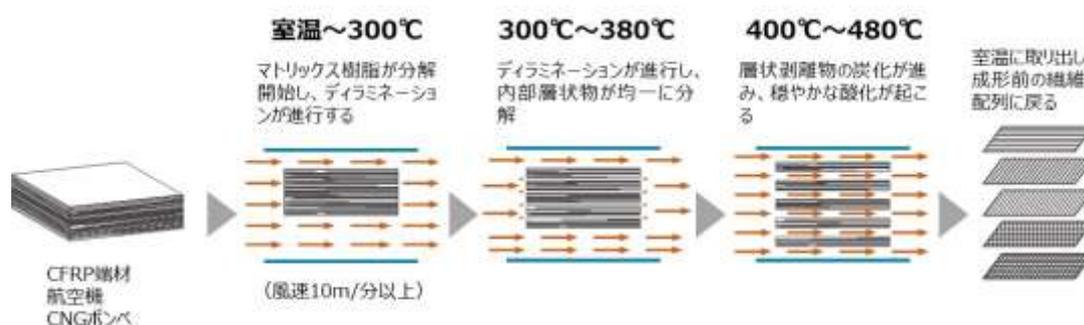


図 3.7 燃焼処理の温度変移の概要

2018 年 7 月から 9 月にかけて CNG ボンベを対象に燃焼処理を実施した。初期段階における実証炉を運転する上での手順は表 3.1 の通りである。この手順を踏まえ、適切な温度領域にて反応するための設備の整備や温度管理方法について検討した。

表 3.1 初期段階の実証炉の運転手順

| | 運転手順 | 時間 |
|----|--|------|
| 1 | 循環ファンとコンプレッサーを稼働 | |
| 2 | コンロ点火 | |
| 3 | 炉内温度（入口）が 300℃になったことを確認 | |
| 4 | 反応が進むため、ガスの強さやファンの速度を調整して温度上昇を緩やかにする | |
| 5 | 反応域（330℃付近）で、黒煙ではない煙が出ることを確認 | |
| 6 | ガスの強さやファンの速度を調整し、炉内温度を 330℃に保持 | 90 分 |
| 7 | ガスの強さやファンの速度を調整し、2 つ目の反応域（360℃付近）まで上昇させる | |
| 8 | ガスの強さやファンの速度を調整し、炉内温度を 360℃に保持 | 30 分 |
| 9 | ガスの強さやファンの速度を調整し、3 つ目の反応域（420℃付近）まで上昇させる | |
| 10 | ガスの強さやファンの速度を調整し、炉内温度を 420℃に保持 | 30 分 |
| 11 | コンロ消火 | |

反応が始まると煙が発生する。この温度域で温度を保持し、反応を進める必要がある。反応が終わると煙が収まってくるので、収煙を確認してから次の反応域まで温度を上昇させる。反応が終わる前に温度を上昇させると、反応しきれてない樹脂が炉内温度の上昇に伴って急速に反応し、炉内温度が急上昇する危険がある。これら管理項目を踏まえ、温度変移の概要を図 3.8 に示した。

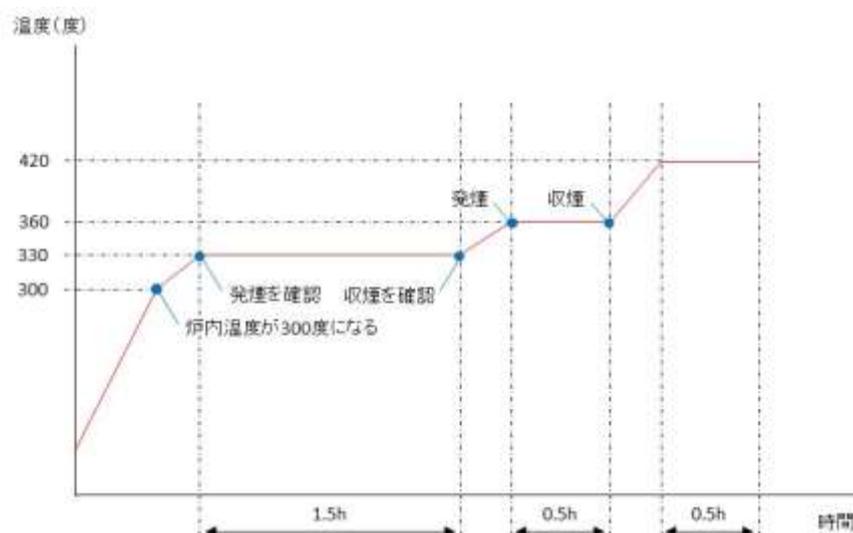


図 3.8 初期段階の実証炉の温度変移の概要

上記の運転手順に沿って燃焼処理を行い、RCF を回収した。回収した RCF は切断の後、共同実施者である富士加飾に輸送し、製品原料化（コンパウンド）される。コンパウンド工程では、定量供給機を用いて RCF を供給するが、この際には、CF が遊離し綿状に浮遊して詰まりを起こすことなく、供給されるように留意する必要がある。定量供給機に投入ができる繊維詰まりを起こすことがない RCF とは、束状であり、炭化したマトリックス樹脂が一定量

残存していることが条件となる。これは、ポテンシャル水素量で測定ができる。

●「平成 29 年 6 月 8 日特願 2017-113772／リサイクル炭素繊維収束体、およびその製造方法」より引用。

ポテンシャル水素量が質量基準で 600～8000ppm であることが重要である。

上記ポテンシャル水素とは、予め 2400～2800℃の高温で加熱されたグラファイトカーボン製のろつばに試料を投入し、2000～2400℃で加熱することにより、有機物あるいは無機水和物質等の水素を含む化合物を高温のグラファイトで水素に還元し、ガスクロマトグラフにて定量された全水素量を意味する。

上記ポテンシャル水素量が質量基準で 600ppm 未満では、アモルファスカーボン前駆体が少なく、トウ状を維持できず、炭素繊維が毛羽立ち、綿状の収束体となる。その結果、安定計量が難しく、押出機への安定供給が難しくなり、そのリサイクル性（リサイクル価値）が低下する。従って上記ポテンシャル水素量は質量基準で 600ppm 以上であり、好ましくは 1000ppm 以上、より好ましくは 2000ppm 以上である。しかし、アモルファスカーボン前駆体が多く、炭素繊維同士が強固に結合した塊状となる。その結果、安定計量が難しく、押出機への安定供給が難しくなるため、物の意味でリサイクル価値が低下する。従って上記ポテンシャル水素量は質量基準で 8000ppm 以下であり、好ましくは 6000ppm 以下、より好ましくは 5000ppm 以下である。

初期段階の実証炉にて燃焼処理をした RCF を 25mm で切断したもの 4 ロットとラボ試験機にて燃焼処理をして RCF を 25mm で切断したもの 2 ロットについて、神鋼溶接サービス(株)にてポテンシャル水素量を測定した。その結果を表 3.2 に示す。

表 3.2 ポテンシャル水素量の測定値

| 試料符号 | 水素 単位：ppm（質量分率） | | | | | |
|---------|-----------------|------|-------|------|------|------|
| | n1 | n2 | n3 | n4 | 平均 | 差 |
| 実証炉 1 | 2700 | 3600 | 11400 | 6100 | 5900 | 8700 |
| 実証炉 2 | 3800 | 4800 | 5900 | - | 4800 | 2100 |
| 実証炉 3 | 7600 | 6500 | 8500 | - | 7500 | 2000 |
| 実証炉 4 | 10100 | 5900 | 8400 | - | 8100 | 4200 |
| ラボ試験機 1 | 1900 | 3000 | 3000 | - | 2600 | 1100 |
| ラボ試験機 2 | 3200 | 2400 | 1900 | - | 2500 | 1300 |

ポテンシャル水素量の基準（600ppm 以上 8000ppm 以下）外

実証炉の RCF は、ポテンシャル水素量の基準（600ppm 以上 8000ppm 以下）を上回っているものがあること、同じロットでもばらつきが大きいことがわかる。このことから、実証炉では、反応炉内の場所によって燃焼が十分に進まない所があり、焼け残りが発生するという問題が生じていることが判明した。

(2) 初期の実証炉の課題の抽出

ポテンシャル水素量の測定結果から、反応炉の中でも燃焼が十分に進まない場所があるという問題があることがわかった。この問題から、燃焼処理中の炉内にて十分な風速の風が

流れていない場所があり、そのために燃焼が進まないと推察された。

そこで、実際にどのように風が流れているのかを把握するための風速試験を実施した。風速試験は、金属製のメッシュの9箇所吹き流しを付けたものを反応炉の入口、中央、排出口の3箇所に設置し、実際に炉を稼働させ、吹き流しの流れ方を観察して行う。反応炉内を観察するため、炉を閉めず、代わりにアクリル板を蓋として使用した。概要は図3.9に示す通り。

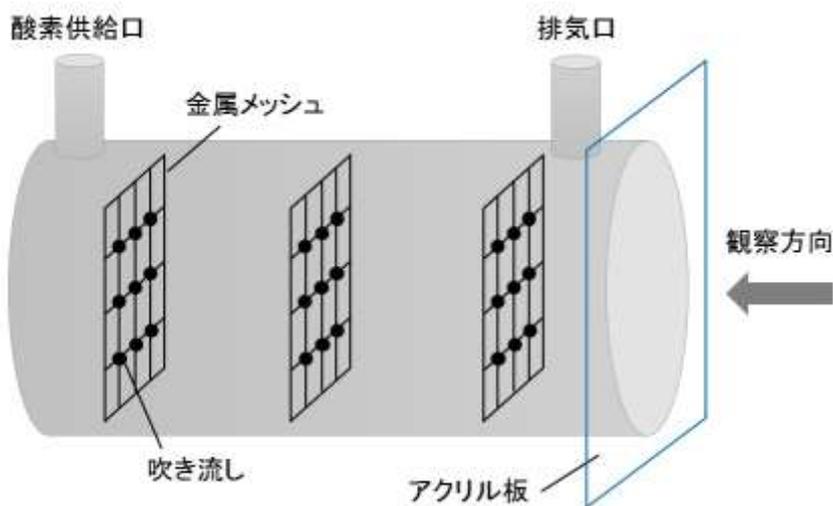


図 3.9 風速試験の概要図



図 3.10 風速試験の様子



図 3.11 吹き流しを設置した反応炉内の状態

風速試験の結果は図3.12の通りである。酸素供給口から供給される風（燃焼炉で燃せられた雰囲気ガス）は、反応炉内を観察方向から見て右回転しながら排出口に向かって流れており、風が弱い場所や風が全く流れていない場所があることが分かった。

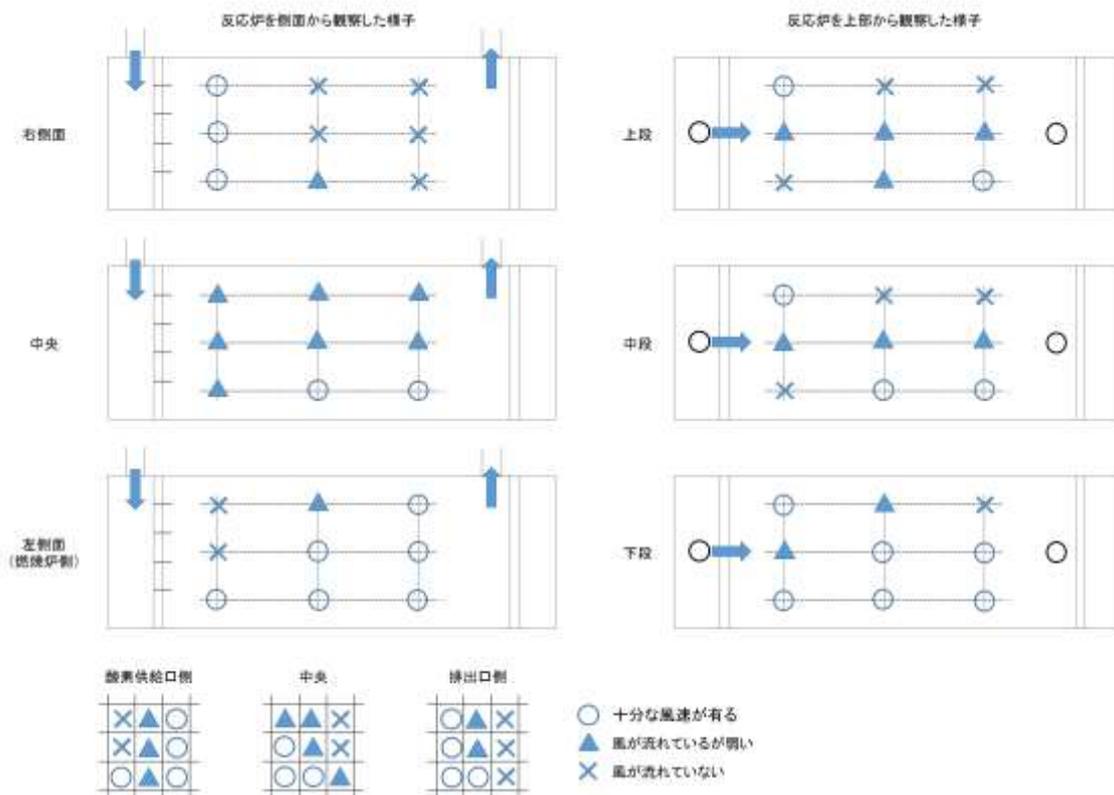


図 3.12 風速試験結果

吹き流しの流れ方を観察しながら、酸素供給口側に仕切り板を差し込み、角度を調整して、全ての吹き流しが均一に流れる状態を探し、その状態で板を固定した。仕切り板を差し込んだ結果、反応炉内に風が均一に流れるようになったが、風速の不足の解決には至らなかった。風速が足りない場合、反応炉の酸素供給口側と排出側で温度差が生じることになる。温度差は、反応炉の酸素供給口側と排出側で 50℃に及んだ。要因として、1 回の燃焼で処理する CFRP 試料の量を増やしたこと、ラボ試験機に比べて反応炉の長さが長いことが考えられた。

なお、雰囲気ガスの平均流動速度は 1~20m/分が望ましいとされている。

そこで、現状の自然吸気、自然対流による空気量の不足を補うため、ファンを増設し、空気流量の増加による安定燃焼を図った。燃焼処理中の温度の変移を表 3.3 に示す。温度計の設置場所は図 3.13 の通り。温度計は炉内の 3 箇所（入口（酸素供給口側）、中央、出口（排出口側））に設置しているが、温度管理は、入口、中央の 2 箇所を観測して行う。出口付近の熱風は試料を通過した後の風であり、この部分に温度の指標を取って運用すると炉内温度が上がり過ぎる可能性があるためである。しかし、処理後の RCF の品質向上のため、入口と出口の温度差を極力少なくする必要があるため、出口の温度は運用の指標とはしないが、ムラなく燃焼が進んでいるかどうかを評価するための参考にしていく。

表 3.3 温度変移（コンロ利用）

| 試料の枚数 日時 時間(分) | 2枚 10月10日 | | 2枚 10月11日 | | 2枚 10月12日 | | 2枚 10月16日 | | 4枚 10月17日 | | 4枚 10月18日 | |
|----------------------|--------------|-----|--------------|-----|--------------|-----|--------------|-----|--------------|-----|--------------|-----|
| | 入口 | 中央 |
| | 0 | 20 | 19 | 20 | 20 | 19 | 18 | 18 | 16 | 19 | 19 | 19 |
| 10 | 88 | 69 | 205 | 145 | 164 | 117 | 123 | 94 | | | | |
| 20 | 113 | 91 | 256 | 187 | 228 | 181 | 228 | 172 | 209 | 117 | | |
| 30 | 200 | 156 | 278 | 208 | 260 | 213 | 282 | 216 | 272 | 190 | 281 | 146 |
| 40 | 217 | 174 | 300 | 226 | 278 | 231 | 305 | 240 | 305 | 222 | 276 | 209 |
| 50 | 235 | 196 | 322 | 258 | 301 | 256 | 322 | 257 | 315 | 232 | 294 | 230 |
| 60 | | | 325 | 268 | 312 | 268 | 323 | 267 | 324 | 240 | 306 | 241 |
| 70 | 269 | 223 | 328 | 274 | 320 | 277 | 323 | 274 | 325 | 248 | 322 | 254 |
| 80 | 310 | 253 | 322 | 280 | 321 | 281 | 323 | 281 | 322 | 254 | 328 | 283 |
| 90 | 313 | 268 | 330 | 288 | 316 | 281 | 323 | 289 | 324 | 257 | 334 | 272 |
| 100 | 311 | 270 | 332 | 294 | 308 | 278 | 323 | 294 | 321 | 258 | 341 | 276 |
| 110 | 308 | 273 | 334 | 297 | 313 | 283 | 323 | 300 | 324 | 263 | 342 | 280 |
| 120 | 307 | 277 | 334 | 303 | 322 | 291 | 324 | 305 | 321 | 263 | 346 | 287 |
| 130 | 317 | 283 | 330 | 304 | 331 | 299 | 323 | 310 | 322 | 265 | 348 | 291 |
| 140 | 319 | 291 | 328 | 309 | 334 | 304 | 323 | 312 | 323 | 266 | | |
| 150 | 322 | 299 | 328 | 311 | 336 | 311 | 323 | 314 | 326 | 271 | 351 | 291 |
| 160 | 328 | 310 | 332 | 319 | 334 | 314 | 322 | 314 | 321 | 272 | 350 | 301 |
| 170 | 340 | 327 | 335 | 324 | 333 | 316 | 320 | 314 | 332 | 285 | 354 | 306 |
| 180 | 340 | 331 | 334 | 326 | 333 | 319 | 320 | 314 | 337 | 288 | 349 | 322 |
| 190 | 331 | 327 | 329 | 323 | 339 | 325 | 337 | 324 | 335 | 289 | 348 | 335 |
| 200 | 326 | 325 | 335 | 327 | 333 | 324 | 353 | 331 | 339 | 292 | 334 | 326 |
| 210 | 338 | 331 | 328 | 324 | 332 | 324 | 384 | 354 | 331 | 287 | 343 | 334 |
| 220 | 341 | 332 | 340 | 330 | 334 | 326 | 401 | 371 | 334 | 289 | 341 | 333 |
| 230 | 345 | 337 | 358 | 341 | 337 | 325 | 406 | 371 | 333 | 289 | 379 | 356 |
| 240 | 347 | 339 | 385 | 360 | 354 | 338 | 410 | 386 | 334 | 290 | 403 | 375 |
| 250 | 350 | 340 | 397 | 370 | 358 | 343 | 410 | 389 | 344 | 296 | 423 | 393 |
| 260 | 375 | 356 | 400 | 372 | 365 | 347 | 407 | 392 | 359 | 307 | 424 | 403 |
| 270 | 384 | 363 | 403 | 381 | 385 | 363 | 427 | 403 | 387 | 311 | 422 | 406 |
| 280 | 400 | 375 | 409 | 391 | 398 | 374 | 429 | 410 | 392 | 321 | 422 | 409 |
| 290 | 410 | 385 | 410 | 393 | 408 | 384 | 428 | 412 | 401 | 328 | 423 | 411 |
| 300 | 420 | 392 | 411 | 396 | 417 | 393 | | | 409 | 337 | 422 | 412 |
| 310 | 434 | 403 | 410 | 397 | 415 | 396 | | | 413 | 340 | 431 | 417 |
| 320 | 442 | 412 | 410 | 399 | 418 | 399 | | | 420 | 345 | 435 | 420 |
| 330 | 441 | 417 | 419 | 405 | 424 | 403 | | | 422 | 351 | 441 | 425 |
| 340 | 440 | 420 | 424 | 408 | 430 | 408 | | | 424 | 355 | 444 | 427 |
| 350 | 435 | 423 | 428 | 412 | 433 | 411 | | | 425 | 358 | 440 | 428 |
| 360 | 438 | 425 | 431 | 415 | 433 | 412 | | | 423 | 360 | 440 | 428 |
| 370 | 437 | 427 | 430 | 417 | 432 | 415 | | | 423 | 362 | 440 | 429 |
| 380 | 436 | 429 | 430 | 419 | 432 | 415 | | | 424 | 365 | 441 | 430 |
| 390 | | | 430 | 420 | 432 | 417 | | | 425 | 366 | | |
| 400 | | | | | | | | | 424 | 368 | | |
| 410 | | | | | | | | | 424 | 367 | | |
| 420 | | | | | | | | | 428 | 370 | | |
| 430 | | | | | | | | | 433 | 374 | | |
| 440 | | | | | | | | | 438 | 378 | | |
| 450 | | | | | | | | | 440 | 380 | | |
| 460 | | | | | | | | | 439 | 382 | | |
| 470 | | | | | | | | | 437 | 384 | | |
| 480 | | | | | | | | | | | | |
| 490 | | | | | | | | | | | | |
| 500 | | | | | | | | | | | | |

単位: 度

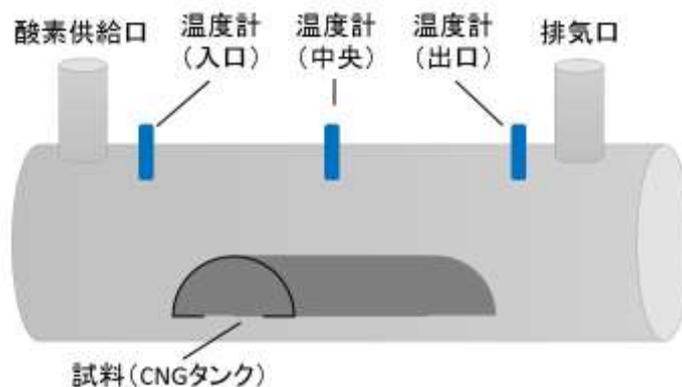


図 3.13 反応炉内の温度計の位置

入口の温度が初めの反応域である 300℃になってから、中央の温度が同じく 300℃になるまで、70 分程度かかり、試料の枚数を増やすと 100 分以上かかっていることから、ファンの増設により反応炉内の温度の低下を招いていることがわかる。その他にも、コンロからの空気の逆流、白煙の増加などの現象となった。

よって、解決すべき課題は以下の 3 点である。

- ① 反応炉内において、安定した温度で十分な流速の熱風を保持すること
 - ② 反応炉内の空気の流れを均一にすること
 - ③ エポキシ樹脂等が気化し、燃焼させるために十分な空気量（酸素量）を確保すること
- また、初期段階の実証炉では、反応炉内の温度変化を見てガスとファンの強さを変更して運用しており、属人的な管理となっていることも処理後の成果品の品質にばらつきがでる要因として考えられたため、安定的な運用を考慮した場合、4 点目の課題として以下の解決も必要と考えられる。
- ④ 自動制御により人の手によって調整する管理項目を減らすこと

(3) 設備構造の改良方針

上記の課題を踏まえ、LP ガスを用いたコンロ燃焼熱源にて、自然吸気・自然対流との組み合わせで燃焼を行っていたものを新しいタイプの加圧式混燃バーナーに代え、自主開発を進めている自動プログラム燃焼技術を導入し、属人的な管理から自動制御可能な設備に改良することとした。これらは、共同実施者である富士加飾の小野実験室にて自主開発した技術である。

表 3.4 設備構造の変更内容と期待される効果

| 設備構造の変更内容 | 期待される効果 |
|---------------------|--|
| コンロに代えて加圧式混燃バーナーの導入 | 熱源空気を自然吸気、自然対流に任せることなく、800℃から 1000℃の高速高温熱風を反応炉内に強制的かつ大量に循環できる。結果、炉内の温度分布の差異がなくなり、成果物の品質安定化に繋がる。 さらに、高速熱流循環により、エポキシ樹脂の気体をガス化し、効率的に熱源として活用できる。 |
| 自動プログラム燃焼技術の導入 | プログラム制御により、自動運転・制御ができるため、風量や燃焼温度の管理が可能になる。 多様な製品群（品目、CFRP の厚み、樹脂、炭素繊維の種類、燃料管理温度）に対し、反応炉における 300℃～500℃以下の燃焼特性に応じて、2 段階の温度域で樹脂の気化と、アモルファスカーボン前駆体の形成などの管理（寸止め）を行い、安定した束状 RCF の回収を行う。 |

(4) 設備構造の改良状況

初期段階の実証設備を改良し、コンロに代えて加圧式混燃バーナーを導入した。自動プログラム燃焼技術の導入については、将来の改良項目として引き続き、検討をしていく。

改良の概要は図 3.14 の通りである。

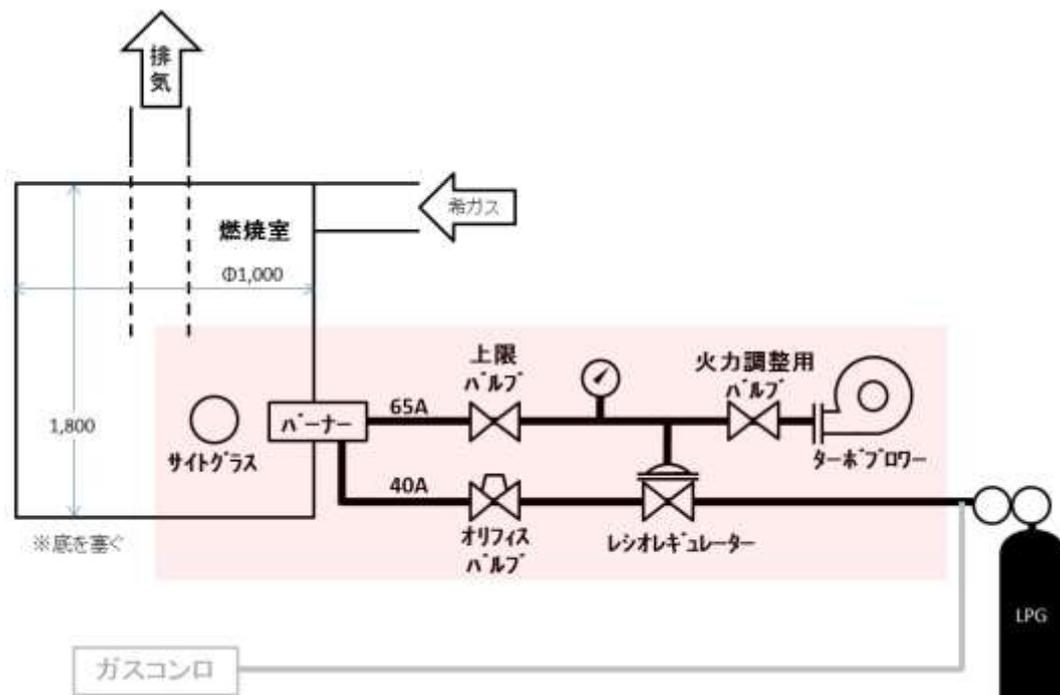


図 3.14 設備改良の概略図



図 3.15 バーナー設置前



図 3.16 バーナー設置の様子



図 3.17 自動制御システム (富士加飾内)

(5) 改良設備での運用状況

設備の改良を踏まえ、運用方法についても再検討を行った。検討の結果、改良した点は表 3.5 の通りである。

表 3.5 運用方法の改良点

| 運用方法の改良内容 | 期待される効果 |
|---|----------------------------|
| 試料として CNG ボンベを 2 等分に切断したものを重ねて炉に投入していたが、試料全体にムラなく熱風をあてるため、4 等分に切断したものを使用し、重ならないように隙間をあける。 | 焼け残りが減少する |
| 加圧式混燃バーナーの導入により、コンロ使用時に比べて温度管理が容易になった。そのため、燃焼処理中は、ファンの強さは一定を保ち、温度管理には火力調整用バルブのみ使用する。 | 属人的な管理では無くなるため、運用管理方法が確立する |



図 3.18 4 等分に切断した CNG ボンベ



図 3.19 試料の間に隙間を作り並べた様子



図 3.20 試料投入の様子

改良後の設備における運転手順は表 3.6 の通りである。

表 3.6 改良後設備の運転手順

| | 運転手順 | 時間 |
|----|---------------------------------|------|
| 1 | 循環ファンとコンプレッサーを稼働（一定の出力を保つ） | |
| 2 | VOC 装置を稼働 | |
| 3 | バーナー点火 | |
| 4 | 炉内温度（入口）が 300℃になったことを確認 | |
| 5 | 反応が進むため、火力調整バルブを操作し、温度上昇を緩やかにする | |
| 6 | 炉内温度（中央）が 315～320℃になったことを確認 | |
| 7 | 火力調整バルブを操作し、炉内温度を 315～320℃に保持 | 90 分 |
| 8 | 火力調整バルブを操作し、炉内温度を 420℃まで上昇させる | |
| 9 | 火力調整バルブを操作し、炉内温度を 420℃に保持 | 30 分 |
| 10 | 火力調整バルブを操作し、炉内温度を 430℃まで上昇させる | |
| 11 | バーナー消火 | |

初期段階の実証炉では、1 つ目の反応域を 330℃、2 つ目の反応域を 360℃、3 つ目の反応域を 420℃とし、運転をしたが、検討の結果、315～320℃の温度域から 420℃まで上昇させても品質の高い成果品が生産できたため、ここでは反応域を 2 つ（315～320℃と 420℃）と

している。成果品の品質評価については後述する。

上記の運転手順を踏まえ、温度変移の概要を図 3.21 に示した。

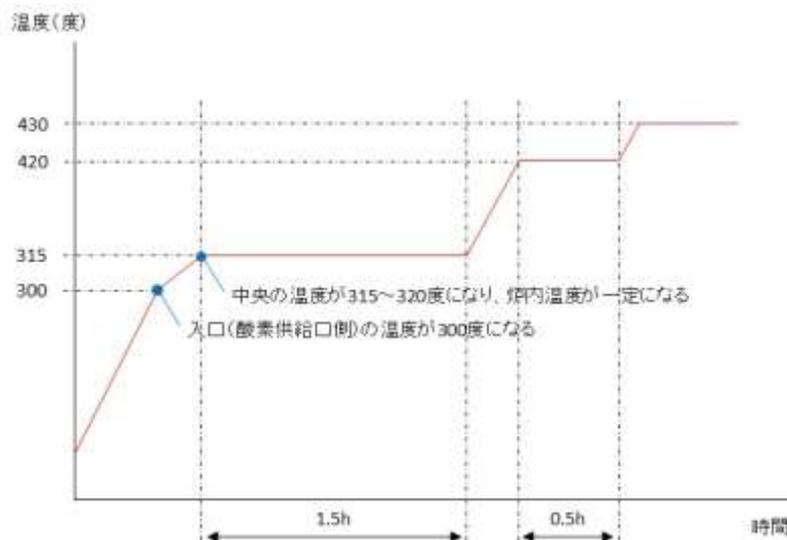


図 3.21 改良後の実証設備の温度変移の概要

上記の手順に沿って運転を行い、適切な温度領域にて反応するための設備の整備や温度管理方法について検討した。燃焼処理の温度の変移は表 3.7 の通りである。コンロ利用時に比べ、入口の温度が 300°C になってから中央の温度が 300°C になるまでの時間が短くなり、想定していた炉内温度のムラが少なくなるという効果が確認できた。

表 3.7 温度変移（バーナー利用）

| 試料の枚数 日時 時間(分) | 1枚 1月11日 | | 1枚 1月14日 | | 1枚 1月15日 | | 2枚 1月16日 | | 2枚 1月17日 | | 3枚 1月21日 | | 3枚 1月22日 | |
|----------------------|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|
| | 入口 | 中央 |
| 0 | 160 | 215 | 0 | 0 | 4 | 2 | 9 | 10 | 6 | 6 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| 10 | 200 | 252 | 200 | 219 | 260 | 176 | 250 | 170 | 220 | 142 | 172 | 124 | 256 | 196 |
| 20 | 320 | 285 | 320 | 253 | 330 | 247 | 330 | 250 | 318 | 236 | 292 | 327 | 330 | 262 |
| 30 | 322 | 298 | 325 | 275 | 332 | 282 | 321 | 270 | 327 | 265 | 314 | 265 | 323 | 275 |
| 40 | 327 | 307 | 325 | 287 | 343 | 352 | 328 | 285 | 336 | 287 | 320 | 276 | 329 | 287 |
| 50 | 325 | 310 | 325 | 290 | 345 | 312 | 321 | 297 | 348 | 304 | | | 327 | 300 |
| 60 | 328 | 315 | 333 | 300 | 349 | 319 | 329 | 309 | 353 | 315 | 317 | 288 | 335 | 304 |
| 70 | 335 | 320 | 335 | 300 | 354 | 225 | 331 | 307 | 346 | 317 | 321 | 290 | 343 | 315 |
| 80 | 339 | 325 | 342 | 310 | 364 | 334 | 334 | 312 | 346 | 321 | 330 | 305 | 337 | 315 |
| 90 | 345 | 329 | 347 | 315 | 349 | 337 | 337 | 316 | 342 | 321 | 330 | 306 | | |
| 100 | 353 | 335 | 350 | 320 | 333 | 327 | 333 | 318 | 338 | 321 | 334 | 315 | 339 | 321 |
| 110 | 343 | 330 | 354 | 321 | 346 | 325 | 322 | 310 | 345 | 320 | 338 | 320 | 341 | 325 |
| 120 | 351 | 333 | 359 | 330 | 350 | 329 | 333 | 317 | 333 | 322 | 338 | 322 | 345 | 331 |
| 130 | 355 | 339 | 353 | 331 | 353 | 331 | 336 | 320 | 326 | 318 | 341 | 327 | 351 | 336 |
| 140 | 358 | 344 | 352 | 331 | 400 | 357 | 340 | 329 | 352 | 330 | 346 | 332 | 355 | 342 |
| 150 | 346 | 339 | 352 | 331 | 400 | 364 | 342 | 327 | 404 | 362 | 344 | 334 | 332 | 329 |
| 160 | 362 | 345 | 352 | 331 | 407 | 380 | 347 | 331 | 346 | 345 | 337 | 331 | 332 | 327 |
| 170 | 368 | 350 | 350 | 331 | 400 | 384 | 350 | 335 | 370 | 349 | 334 | 326 | 339 | 331 |
| 180 | 373 | 360 | 388 | 354 | 395 | 384 | 354 | 339 | 387 | 362 | 342 | 334 | 341 | 324 |
| 190 | 403 | 375 | 400 | 364 | 435 | 401 | 355 | 341 | 400 | 373 | 330 | 334 | 341 | 335 |
| 200 | | | 395 | 358 | 450 | 415 | 327 | 327 | 388 | 375 | 337 | 332 | 342 | 335 |
| 210 | 439 | 415 | 403 | 380 | 441 | 421 | 328 | 325 | 399 | 376 | 335 | 331 | 341 | 335 |
| 220 | 444 | 420 | 403 | 389 | 449 | 426 | 353 | 326 | 424 | 395 | 342 | 336 | 340 | 335 |
| 230 | 450 | 430 | 400 | 384 | 460 | 425 | 403 | 365 | 440 | 414 | | | 385 | 366 |
| 240 | | | 430 | 400 | | | 371 | 366 | 443 | 423 | 348 | 342 | 400 | 378 |
| 250 | | | 448 | 415 | | | 326 | 342 | 426 | 419 | 349 | 343 | 430 | 405 |
| 260 | | | 450 | 420 | | | 377 | 345 | 450 | 430 | 349 | 344 | 444 | 423 |
| 270 | | | 455 | 427 | | | 380 | 360 | | | 350 | 345 | 428 | 420 |
| 280 | | | 452 | 430 | | | 390 | 367 | | | 351 | 346 | 431 | 423 |
| 290 | | | 450 | 434 | | | 400 | 380 | | | 365 | 356 | 424 | 420 |
| 300 | | | 448 | 432 | | | 410 | 390 | | | 370 | 362 | 443 | 431 |
| 310 | | | | | | | 417 | 400 | | | 376 | 366 | | |
| 320 | | | | | | | 447 | 420 | | | 377 | 370 | | |
| 330 | | | | | | | 438 | 425 | | | 379 | 373 | | |
| 340 | | | | | | | 430 | 424 | | | 385 | 377 | | |
| 350 | | | | | | | 440 | 430 | | | 387 | 381 | | |
| 360 | | | | | | | | | | | 392 | 385 | | |
| 370 | | | | | | | | | | | 420 | 407 | | |
| 380 | | | | | | | | | | | 443 | 423 | | |
| 390 | | | | | | | | | | | 426 | 420 | | |
| 400 | | | | | | | | | | | 425 | 419 | | |
| 410 | | | | | | | | | | | 444 | 430 | | |
| 420 | | | | | | | | | | | | | | |
| 430 | | | | | | | | | | | | | | |
| 440 | | | | | | | | | | | | | | |
| 450 | | | | | | | | | | | | | | |
| 460 | | | | | | | | | | | | | | |
| 470 | | | | | | | | | | | | | | |
| 480 | | | | | | | | | | | | | | |
| 490 | | | | | | | | | | | | | | |
| 500 | | | | | | | | | | | | | | |

単位: 度

(6) 改良後設備の成果品の品質評価

改良後の実証設備にて燃焼処理をし、回収した RCF については、電気炉を用いた残存樹脂量の測定によって、品質評価を行った。電気炉は図 3.22 に示す小型のものを導入した。事業化を考慮した際、工程内の中間検査あるいは製品検査をタイムリーに行う必要がある。

また、リサイクル炭素繊維の品質に関わる工程変更には、ポテンシャル水素測定による焼成状態のチェックを行う。

品質の評価の手法は表 3.8 に示す通りである。



図 3.22 電気炉



図 3.23 るつぼと電子計量器

表 3.8 電気炉を用いた品質評価の手法

| 品質評価の手法 | |
|---------|-----------------------------------|
| 1 | 空のるつぼ（図 3.23 のもの）の重量を測定する |
| 2 | るつぼに品質評価を行う燃焼処理後の RCF を入れ、重量を測定する |
| 3 | るつぼを電気炉に入れ、30 分かけて 800℃まで温度をあげる |
| 4 | 800℃の炉内温度を 45 分維持する |
| 5 | 炉の電源が切れたことを確認し、るつぼを取り出す |
| 6 | るつぼの重量を測定する |
| 7 | 灼減率を計算する |

表 3.8 の 7 における灼減率の計算式は以下の通りである。電気炉で燃焼させることで、燃焼処理後の RCF に残っている樹脂が全て焼け、その分の重量が減少する。減少した重量によって、RCF にどのくらい樹脂が残っていたのかがわかり、実証炉での燃焼処理が十分であったのかが評価できる。灼減率が 5%以下である時、樹脂残りが少ない、すなわち十分に燃焼処理ができており、焼け残りがないと評価される。

| |
|--|
| $\text{灼減率} = \text{損失重量} \div \text{正味重量}$ $\text{損失重量} = \text{総重量} - \text{灼減重量}$ $\text{正味重量} = \text{総重量} - \text{壺重量}$ <p>※総重量：表 3.8 の 2 にて測定した重量</p> <p>※灼減重量：表 3.8 の 6 にて測定した重量</p> <p>※壺重量：表 3.8 の 1 にて測定した重量</p> |
|--|

燃焼処理後の RCF は、実証炉内に生じる温度差による品質の差を評価する目的で、図 3.24、図 3.25 のように燃焼処理後の CNG ボンベを 9 等分し、さらにそれらを図 3.26、図 3.27 のように 6 層に剥離し、その中の上から 2 層目、3 層目、5 層目の 3 つの試料をピックアップして、計 27 個の試料の品質評価を行うこととする。

品質評価のための電気炉での燃焼試験の結果は表 3.9、表 3.10、表 3.11 の通りとなった。表 3.9 は CNG ボンベ 1 枚のみを実証炉で燃焼させた際の RCF の品質評価の結果である。

表 3.10 は CNG ボンベ 2 枚を重ねて同時に燃焼処理した際、上に重ねたもの、表 3.11 は同じく 2 枚同時に処理した際、下に置いたものの品質評価結果である。CNG ボンベ 1 枚と

は、1本のCNGボンベを2つに切断した分の1つ分である。

なお、試料への番号の付し方は図3.28の通りである。

電気炉での試験の結果、CNGボンベ2枚を同時に燃焼処理した場合、反応炉の出口付近で焼け残りがみられるが、CNGボンベ1枚を燃焼処理したRCFについては、十分に燃焼処理がなされ、その後のコンパウンド工程で利用可能な品質のRCFができており、品質が安定していると評価できた



図 3.24 9等分に番号付けしたCNGボンベ



図 3.25 9等分に切断したCNGボンベ



図 3.26 9等分したCNGボンベを6層に剥離したもの



図 3.27 9等分したCNGボンベを6層に剥離したもの(全量)

表 3.9 電気炉での品質評価 (1 枚)

| | | 壺番号 | 壺重量 | 総重量 | 正味重量 | 灼減重量 | 損失重量 | 灼減率 |
|---|---|-----|-------|-------|------|-------|------|-------|
| 1 | 1 | 102 | 23.93 | 30.13 | 6.20 | 29.92 | 0.21 | 3.39% |
| | 2 | 177 | 25.13 | 32.43 | 7.30 | 32.26 | 0.17 | 2.33% |
| | 3 | 126 | 23.97 | 31.53 | 7.56 | 31.39 | 0.14 | 1.85% |
| 2 | 1 | 135 | 25.12 | 34.66 | 9.54 | 34.41 | 0.25 | 2.62% |
| | 2 | 155 | 24.34 | 31.02 | 6.68 | 30.78 | 0.24 | 3.59% |
| | 3 | 126 | 23.95 | 31.22 | 7.27 | 31.02 | 0.20 | 2.75% |
| 3 | 1 | 135 | 24.93 | 32.97 | 8.04 | 32.73 | 0.24 | 2.99% |
| | 2 | 150 | 24.55 | 31.14 | 6.59 | 30.92 | 0.22 | 3.34% |
| | 3 | 163 | 25.51 | 32.81 | 7.30 | 32.63 | 0.18 | 2.47% |
| 4 | 1 | 160 | 25.47 | 32.76 | 7.29 | 32.58 | 0.18 | 2.47% |
| | 2 | 155 | 24.37 | 31.34 | 6.97 | 31.11 | 0.23 | 3.30% |
| | 3 | 135 | 25.17 | 32.95 | 7.78 | 32.72 | 0.23 | 2.96% |
| 5 | 1 | 177 | 25.11 | 31.81 | 6.70 | 31.57 | 0.24 | 3.58% |
| | 2 | 126 | 23.95 | 31.77 | 7.82 | 31.54 | 0.23 | 2.94% |
| | 3 | 163 | 25.51 | 33.46 | 7.95 | 33.21 | 0.25 | 3.14% |
| 6 | 1 | 150 | 24.59 | 31.67 | 7.08 | 31.27 | 0.40 | 5.65% |
| | 2 | 163 | 25.53 | 33.03 | 7.50 | 32.79 | 0.24 | 3.20% |
| | 3 | 126 | 23.95 | 32.36 | 8.41 | 32.02 | 0.34 | 4.04% |
| 7 | 1 | 160 | 25.49 | 33.50 | 8.01 | 33.25 | 0.25 | 3.12% |
| | 2 | 135 | 24.96 | 32.37 | 7.41 | 32.08 | 0.29 | 3.91% |
| | 3 | 155 | 24.37 | 32.47 | 8.10 | 32.16 | 0.31 | 3.83% |
| 8 | 1 | 126 | 23.97 | 31.82 | 7.85 | 31.22 | 0.60 | 7.64% |
| | 2 | 102 | 23.93 | 30.75 | 6.82 | 30.22 | 0.53 | 1.72% |
| | 3 | 177 | 25.13 | 32.33 | 7.20 | 32.10 | 0.23 | 0.71% |
| 9 | 1 | 135 | 25.13 | 32.98 | 7.85 | 32.79 | 0.19 | 0.58% |
| | 2 | 135 | 24.92 | 30.52 | 5.60 | 30.36 | 0.16 | 0.52% |
| | 3 | 160 | 25.46 | 33.28 | 7.82 | 33.07 | 0.21 | 0.63% |

表 3.10 電気炉での品質評価 (2枚の内の上部)

| | | 壺番号 | 壺重量 | 総重量 | 正味重量 | 灼減重量 | 損失重量 | 灼減率 |
|---|---|-----|-------|-------|------|-------|------|-------|
| 1 | 1 | 102 | 23.90 | 31.85 | 7.95 | 31.37 | 0.48 | 5.04% |
| | 2 | 150 | 24.57 | 30.72 | 6.15 | 30.40 | 0.32 | 5.20% |
| | 3 | 155 | 24.37 | 31.39 | 7.02 | 31.07 | 0.32 | 4.56% |
| 2 | 1 | 177 | 25.08 | 33.03 | 7.95 | 32.65 | 0.38 | 4.78% |
| | 2 | 135 | 24.94 | 31.03 | 6.09 | 30.77 | 0.26 | 4.27% |
| | 3 | 93 | 25.10 | 32.37 | 7.27 | 32.19 | 0.18 | 2.48% |
| 3 | 1 | 177 | 25.12 | 31.96 | 6.84 | 31.77 | 0.19 | 2.78% |
| | 2 | 102 | 23.91 | 30.65 | 6.74 | 30.47 | 0.18 | 2.67% |
| | 3 | 135 | 25.12 | 32.12 | 7.00 | 31.95 | 0.17 | 2.43% |
| 4 | 1 | 126 | 23.96 | 30.02 | 6.06 | 29.84 | 0.18 | 2.97% |
| | 2 | 150 | 24.56 | 30.35 | 5.79 | 30.15 | 0.20 | 3.45% |
| | 3 | 135 | 24.93 | 33.23 | 8.30 | 32.88 | 0.35 | 4.22% |
| 5 | 1 | 160 | 25.47 | 33.09 | 7.62 | 32.86 | 0.23 | 3.02% |
| | 2 | 155 | 24.37 | 30.83 | 6.46 | 30.61 | 0.22 | 3.41% |
| | 3 | 160 | 23.95 | 30.36 | 6.41 | 29.90 | 0.46 | 7.16% |
| 6 | 1 | 126 | 23.98 | 31.41 | 7.43 | 31.20 | 0.21 | 2.83% |
| | 2 | 102 | 23.95 | 31.40 | 7.45 | 31.13 | 0.27 | 3.62% |
| | 3 | 177 | 25.16 | 32.38 | 7.22 | 32.13 | 0.25 | 3.46% |
| 7 | 1 | 93 | 25.11 | 34.30 | 9.19 | 34.05 | 0.25 | 2.72% |
| | 2 | 135 | 25.14 | 32.50 | 7.36 | 32.30 | 0.20 | 2.72% |
| | 3 | 155 | 24.36 | 31.35 | 6.99 | 31.09 | 0.26 | 3.72% |
| 8 | 1 | 135 | 24.94 | 31.97 | 7.03 | 31.61 | 0.36 | 5.12% |
| | 2 | 150 | 24.57 | 30.98 | 6.41 | 30.76 | 0.22 | 3.43% |
| | 3 | 160 | 25.47 | 33.23 | 7.76 | 32.96 | 0.27 | 3.48% |
| 9 | 1 | 126 | 23.85 | 31.33 | 7.48 | 31.07 | 0.26 | 3.48% |
| | 2 | 93 | 25.10 | 31.52 | 6.42 | 31.29 | 0.23 | 3.58% |
| | 3 | 135 | 25.14 | 31.60 | 6.46 | 31.39 | 0.21 | 3.25% |

表 3.11 電気炉での品質評価 (2枚の内の下部)

| | | 壺番号 | 壺重量 | 総重量 | 正味重量 | 灼減重量 | 損失重量 | 灼減率 |
|---|---|-----|-------|-------|------|-------|------|-------|
| 1 | 1 | 177 | 25.13 | 31.88 | 6.75 | 31.69 | 0.19 | 2.81% |
| | 2 | 126 | 23.98 | 31.58 | 7.60 | 31.37 | 0.21 | 2.76% |
| | 3 | 102 | 23.91 | 33.87 | 9.96 | 33.55 | 0.32 | 3.21% |
| 2 | 1 | 150 | 24.54 | 33.30 | 8.76 | 33.08 | 0.22 | 2.51% |
| | 2 | 126 | 23.91 | 31.90 | 7.99 | 31.75 | 0.15 | 1.88% |
| | 3 | 135 | 24.92 | 32.63 | 7.71 | 32.49 | 0.14 | 1.82% |
| 3 | 1 | 160 | 25.47 | 31.77 | 6.30 | 31.59 | 0.18 | 2.86% |
| | 2 | 155 | 24.37 | 32.33 | 7.96 | 32.09 | 0.24 | 3.02% |
| | 3 | 177 | 25.12 | 32.53 | 7.41 | 32.17 | 0.36 | 4.86% |
| 4 | 1 | 102 | 23.91 | 30.14 | 6.23 | 29.81 | 0.33 | 5.30% |
| | 2 | 135 | 25.11 | 30.77 | 5.66 | 30.47 | 0.30 | 5.30% |
| | 3 | 126 | 23.96 | 30.29 | 6.33 | 30.05 | 0.24 | 3.79% |
| 5 | 1 | 93 | 25.09 | 33.41 | 8.32 | 32.96 | 0.45 | 5.41% |
| | 2 | 135 | 24.89 | 31.52 | 6.63 | 31.22 | 0.30 | 4.52% |
| | 3 | 160 | 25.45 | 32.53 | 7.08 | 32.16 | 0.37 | 5.23% |
| 6 | 1 | 155 | 24.32 | 32.26 | 7.94 | 31.77 | 0.49 | 6.17% |
| | 2 | 150 | 24.53 | 30.82 | 6.29 | 30.56 | 0.26 | 4.13% |
| | 3 | 126 | 23.96 | 32.18 | 8.22 | 31.71 | 0.47 | 5.72% |
| 7 | 1 | 155 | 24.40 | 30.90 | 6.50 | 30.62 | 0.28 | 4.31% |
| | 2 | 135 | 25.12 | 31.15 | 6.03 | 30.81 | 0.34 | 5.64% |
| | 3 | 177 | 25.18 | 31.09 | 5.91 | 30.83 | 0.26 | 4.40% |
| 8 | 1 | 126 | 23.98 | 30.16 | 6.18 | 29.85 | 0.31 | 5.02% |
| | 2 | 135 | 25.12 | 31.22 | 6.10 | 31.11 | 0.11 | 1.80% |
| | 3 | 150 | 24.57 | 31.20 | 6.63 | 31.09 | 0.11 | 1.66% |
| 9 | 1 | 93 | 25.08 | 32.83 | 7.75 | 32.51 | 0.32 | 4.13% |
| | 2 | 160 | 25.48 | 31.43 | 5.95 | 31.11 | 0.32 | 5.38% |
| | 3 | 126 | 23.96 | 31.52 | 7.56 | 31.45 | 0.07 | 0.93% |

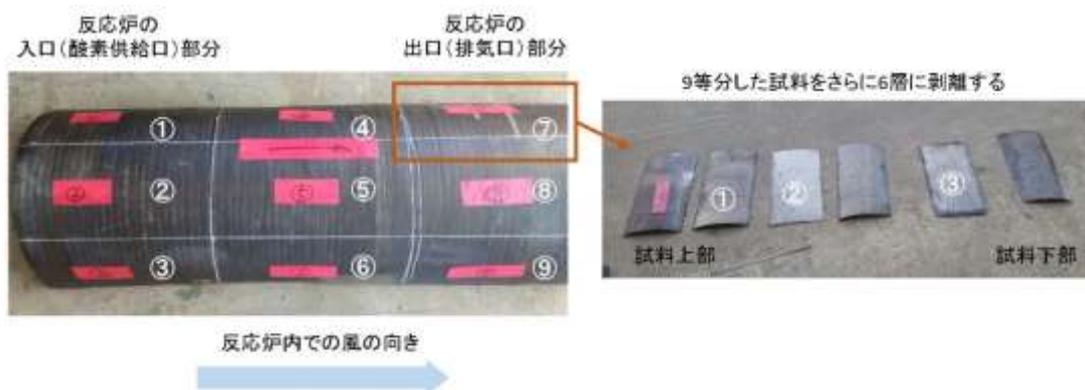


図 3.28 試料への番号の付し方

(7) RCF の強度の評価

燃焼試験によって回収した RCF について、T300 グレードを用いて、RCF 単繊維を取出し、500℃及び 550℃で 30 分加熱して繊維強度の分析を行った。分析は名古屋大学田邊研究室に委託をした。結果は表 3.12 の通りとなった。

表 3.12 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 度 30 分) | 7.1 | 0.4 | 1.96※ | 0.61 |
| RCF (550 度 30 分) | 6.94 | 0.38 | 2.6 | 1 |

※残存マトリックスの影響大

550°Cの高温処理を行っても、強度 2.6GPa (80%) の強度であったことから、80%以上の強度を維持していることが確認できた。引き続き 470°Cでの単繊維分離取出サンプルを評価中である。なお、コンパウンドを行った場合の機械的性能は、新品 CF 使用と差異がない。

なお、回収繊維は結束力が強く、炭素繊維の劣化が始まる 500°C以降の処理を加えなければ測定困難である。また、現在、T800 グレードサンプルも測定中である。

3.1.3 他の品目のリサイクル手法の検討

CNG ボンベから RCF を回収するリサイクル手法については前述の通りである。将来の事業化に向け、CNG ボンベ以外の試料からの RCF 回収手法についても確立の必要がある。ここでは、航空機端材からの RCF 回収の手法について検討を行った。

検討は、適切な温度や時間を把握する目的で、電気炉を使用した燃焼処理を実施した。実証炉での燃焼処理は、炉が大きいと、温度設定を誤ると温度が急激に上昇し、燃焼処理が進みすぎるなどのリスクが生じる。よって、少量で燃焼が可能な電気炉を使用することとした。電気炉では実証炉と異なり熱風の循環がないため、RCF を束状で回収することは不可能であるが、適切な温度や時間を把握するための試験には電気炉で十分であると判断した。

燃焼試験は、CNG ボンベと同じ温度と時間で実施した。図 3.29 が燃焼処理前の航空機端材、図 3.30 が燃焼処理後の航空機端材の様子である。燃焼処理した航空機端材を図 3.31 の様に層ごとに剥離し、これらについて電気炉を使用して品質評価を行った。なお、剥離した航空機端材の表面を見ると、CNG ボンベとは異なった CF の織り方がされていることがわかる (図 3.32)。

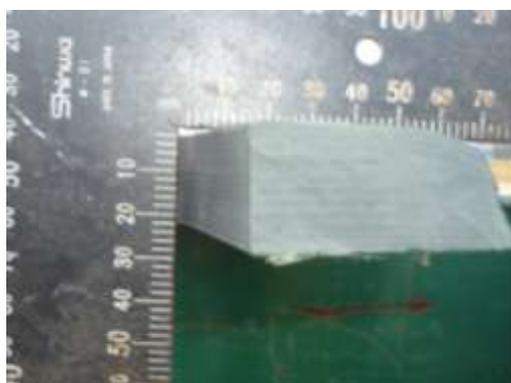


図 3.29 航空機端材 (燃焼処理前)



図 3.30 航空機端材 (燃焼処理後)



図 3.31 燃焼処理後の航空機端材を層ごと剥離したもの



図 3.32 燃焼処理後の航空機端材の表面の様子

品質評価の結果は表 3.13 の通りとなった。概ね灼減率 5%以下となり、まだ改善は必要であるが、実証炉と同様の設備での RCF 回収が可能であると評価できる。

表 3.13 電気炉での品質評価（航空機端材）

| | 壺番号 | 壺重量 | 総重量 | 正味重量 | 灼減重量 | 損失重量 | 灼減率 |
|---|-----|-------|-------|------|-------|------|-------|
| 1 | 160 | 25.19 | 29.62 | 4.43 | 29.43 | 0.19 | 4.29% |
| 2 | 135 | 24.81 | 28.31 | 3.50 | 28.05 | 0.26 | 7.43% |
| 3 | 93 | 25.01 | 28.07 | 3.06 | 27.99 | 0.08 | 2.61% |
| 4 | 126 | 23.93 | 27.86 | 3.93 | 27.74 | 0.12 | 3.05% |

3.1.4 他のリサイクル事業との比較

3.1.2 にて述べた本事業の CF リサイクルの実証実験の独自性を明確にする目的で、他の CFRP リサイクル事業の動向を調査し、それらとの比較を行った。調査は、(有)カワサキテクノリサーチの協力を得て、文献調査およびヒアリングを行った。

調査の結果、国内の CFRP リサイクル事業に関わっている企業は、表 3.14 の 5 社であることがわかった。この業界の最大手は英国の ELG CarbonFiber 社で、世界の東レ系の航空機用の CFRP 端材を収集しており、処理能力も 1200t/年という世界最大規模である。日本国内で排出される端材 CFRP についても、英国まで輸入している。一方、日本での大手は、カーボンファイバーリサイクル工業(株)（岐阜）であり、2017 年頃より積極的にリサイクル展開を進めている。今のところ本格的な稼動には至っていないが、水面下での動きがある。

また、今後、カーボンファイバーメーカー各社は、炭素繊維の製造からリサイクルまでのトータルで囲い込もうという動きがあるが、それもまだ緒に就いたばかりである。

いずれにせよ、現在 CFRP 端材は未処理でそのまま埋め立てられる場合が多く、国内で本格的なリサイクルを進めることが急務とされている。

表 3.14 カーボンファイバーリサイクル関連企業

| 企業名 | 処理法 | 特徴 |
|----------------------|---------|---|
| ELG CarbonFiber (英国) | 熱分解法 | 東レの PAN 端材と世界中から収集しリサイクルしている。英国工場は 1200t/年の熱分解能力を有する。 |
| カーボンファイバーリサイクル工業(株) | 二段階熱処理法 | CF を劣化させずに残留炭素だけを燃焼する燃焼工程。 |
| 高安(株) | 熱分解法 | 長い CF が回収できる技術。 |
| (株)新菱 | 熱分解法 | 三菱ケミカルグループでリサイクル技術の確立を目指す。50~100t/年。 |
| アイカーボン(株) | 電解酸化法 | 高性能、低コスト化を自小津源。新品材と同等製品。 |

(有)カワサキテクノリサーチ調べ)

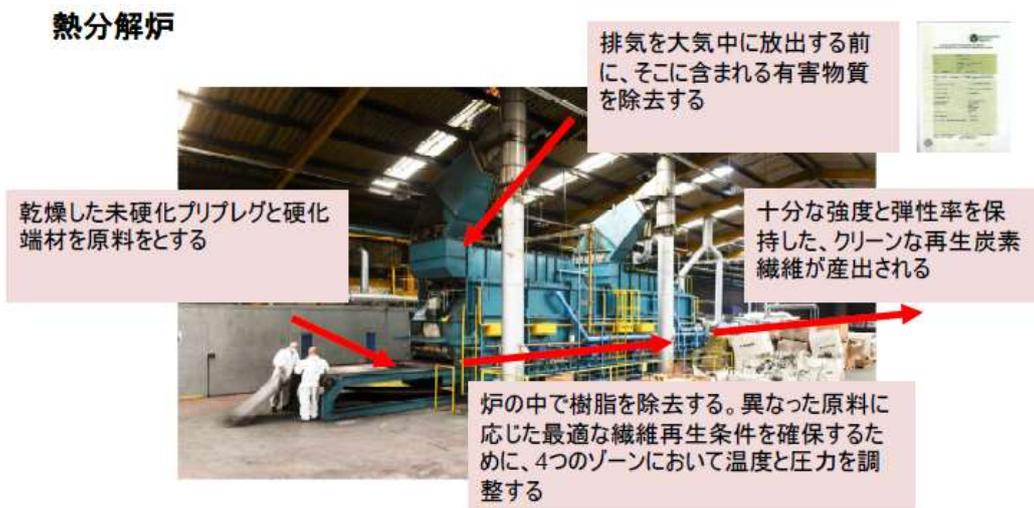
(1) ELG CarbonFiber

同社は英国にある企業であり、1200t/年の処理能力を有する工場を持ち、大量に CFRP 廃材を収集している (図 3.33、図 3.34)。また、日本の横浜に営業拠点を構え、端材の収集と販売の営業を推進している。



図 3.33 ELG CarbonFiber 工場の作業の様子

(出典：ELG 社パンフレット)



生産能力: 再生炭素繊維年間1,200トン~1,500トン

図 3.34 ELG CarbonFiber 工場の設備

同社の製品には、図 3.35 にある通り、チョップドファイバー、ミルドファイバー、不織布とされているが、実情は、研磨剤としての利用が圧倒的に多いとされている。



図 3.35 ELG CarbonFiber の製品



図 3.36 ELG CarbonFiber の日本国内の展開

(有)カワサキテクノロジー調べ)

(2) カーボンファイバーリサイクル工業株

同社は、今後このカーボンファイバーのリサイクル事業を本格的に展開すべく準備しており、銀行系から 4 億円、さらに欧州航空機エアバスを含むベンチャーキャピタル (UMI) より 7 億円、合計 11 億円の出資を得ている。図 3.37 が同社の工場の様子であるが、左側の白い建物に最新設備を導入している。



図 3.37 カーボンファイバーリサイクル工業㈱の工場
(出典：カーボンファイバーリサイクル工業㈱パンフレット)

同社の特長は CFRP の端材を炉に入れて蒸し焼き状態にするもので、その温度は 500～600℃となる。反応炉が 2 重構造になっており、気化したエポキシ樹脂等からメタン、エタンガスが発生し、そのガスを再利用し燃やす技術とされている。一次加熱後の製品は樹脂コンパウンド向け、二次加工後の製品は不織布製品として、RCF で出荷するとしている。



図 3.38 一次加熱装置



図 3.39 二次加熱装置

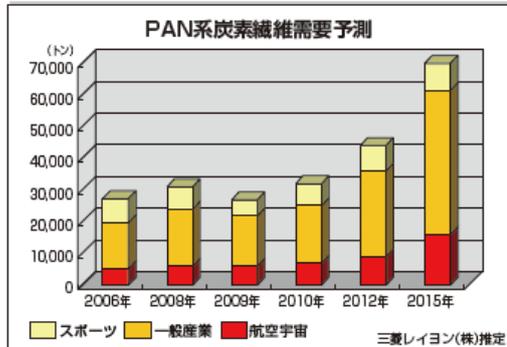
(出典：カーボンファイバーリサイクル工業㈱パンフレット)

(3) 高安㈱

同社における CFRP リサイクル事業は図 3.40 の通り、再生ファイバー（高安リサイクル炭素繊維）として販売するとしている。

1. 背景

CFRPとは…炭素繊維強化プラスチックの意味です。
炭素繊維は高強度・高弾性率で軽量であることから燃費向上の目的で航空機をはじめ、自動車部品にも用いられてきており、需要は急増しています。



2. 炭素繊維リサイクルの理由・必要性

日本は炭素繊維の生産量が世界最大で、約7割のシェアを占めます。リサイクルは日本に課せられた責任でもあります。航空機産業・自動車産業からの炭素繊維の廃材が増加すると予想されます。

3. 実施内容



4. 研究開発内容

再生CFファイバー及び短カットの量産化を検討し、それをういた不織布の生産技術確立を行っています。再生ファイバーを使用した不織布は耐熱性、耐摩耗性、寸法安定性、耐光性、耐薬品性、導電性等の特性が期待できます。



図 3.40 高安のCFリサイクル事業展開 (出典：高安(株)パンフレット)

(4) ㈱新菱

三菱ケミカルグループ内でCFRP事業を立ち上げている。関連企業内の端材の回収システムがあり、製品としてはトヨタのプリウスPHVのバックドアに採用されている。



図 3.41 CFRP を使用した製品 (プリウス)

出典 : https://engineer.fabcross.jp/archeive/170307_mrc_smc.html

(5) アイカーボン(株)

同社の特長は、電解酸化法、低コストで CFRP を分離回収し、高強度のリサイクル炭素繊維 (RCF) を製造・販売するとされている。

(6) 各社のコンパウンド企業との協力・連携体制

上記の CFRP リサイクル企業とコンパウンドメーカーの関係を表 3.15 に示した。コンパウンドでは、関西にあるウイスカやコイネックスなどの企業が既に CFRTF 製品を上市している。また、リサイクル企業では、リサイクルファイバー、RCF 不織布を販売している。リサイクル企業とコンパウンド企業の関係については今後も調査を要するが、コンパウンド工程を考慮した RCF の回収・提供をリサイクル企業が行うなどの協力体制にはないと推察され、今後の事業化を考慮する際、アプリケーション開発に積極的なコンパウンド企業と提携して事業に取り組む等のコンパウンド企業との協力・連携体制が求められると考える。

表 3.15 RCF を使用したコンパウンド企業製品の特長

| リサイクル企業 | 処理法 | コンパウンド企業 | 特長 | ミルF | チップF | 短繊維 | 長繊維 | 平均繊維長 | 平均繊維径 | コンパウンド |
|----------------------|---------|-------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| | | | | 1mm以下 | 1mm以上 | 1cm以下 | 1cm以上 | mm | mm | |
| | | ウイスカ(株) | 毒性を残した処理 | ○ | | | | 80 | 7 | PA66, PC/ABS |
| | | コイネックス(株) | | | | | | | | PA |
| ELG Carbon Fibre (英) | | MIRAREED(株) | | ○ | ○ | | | | | PP, ABS, PC |
| カーボンファイバーリサイクル工業(株) | 二段階熱処理法 | 中屋敷技研(株) | CFを劣化させずに残留炭素だけ燃焼する焼成工程 | | | | | | | |
| アイカーボン(株) | 電解酸化法 | | 低コスト化を表現 | | | | | | | |
| 高安(株) | 熱分解法 | | | | | | | | | |
| 樹新(株) | | | | | | | | | | |

(有)カワサキテクノリサーチ調べ

3.1.5 RCF 切断工程における管理手法の検討

実証炉にて燃焼し回収した RCF は層状になっているため、一層ずつ剥離し、切断機で切断を行う。切断のための設備の様子は図 3.42 の通り。この切断機に図 3.6 の形状の束状 RCF を投入し、一定の長さに切断していく。切断後の成果品のイメージは図 3.43 である。



図 3.42 切断機



図 3.43 切断後の RCF 回収物 (25mm)

切断の後、共同実施者である富士加飾に送付し、製品原料化（コンパウンド）される。コンパウンド工程では、定量供給機を用いて RCF を供給するが、この際には、CF が遊離し綿状に浮遊して詰まりを起こすことなく、供給されるように留意する必要がある。定量供給機に投入ができる繊維詰まりを起こすことがない RCF とは、束状であり、炭化したマトリックス樹脂（アモルファスカーボン前駆体）が一定量残存していることが条件となる。当初は、燃焼処理後の切断工程で以下の問題が生じ、結果、定量供給設備に投入できず、製品原料化（コンパウンド）不可能であった。

- ① 切断後の成果品に長い束状繊維のミスカットが混入
- ② 粉状や綿状の切断屑が混入
- ③ 綿状解繊比率が高い（切断後の RCF が輸送過程で硬く締まり、解繊部が固まりに成長してしまい、富士加飾の定量供給装置で完全にほぐれない）
- ④ 切断面がシャープでないために切断時に束状態が崩れる

これら問題を解決するため、富士加飾の小野実験室と技術交流を行い、問題の要因を検討した結果、表 3.16 の改善に至った。結果、後工程であるコンパウンドにて利用可能であると評価しうる成果物を得られるよう技術確立ができた。

表 3.16 RCF 切断工程における問題の要因と改善策

| 問題 | 要因 | 改善策 |
|----------------------------------|--|--|
| ① 切断後の成果品に長い束状繊維のミスカットが混入 | RCF を重ねて切断機に投入したため、刃が RCF に均一に当たらず、ミスカットが増え、粉状や綿状の切断屑が発生。 切断機の刃が下りた振動で一定の長さに切れず、切断屑が発生。 | RCF は一層ずつ切断し、重ねない。 切断機の振動を最小限に抑えるため、切断の速さを遅くする（送りコンベアの速さを遅くする）。 |
| ② 粉状や綿状の切断屑が混入 | | |
| ③ 綿状解繊比率が高く、富士加飾の定量供給装置で完全にほぐれない | 切断後の RCF が輸送過程で硬く締まり、解繊部が固まりに成長してしまう。 | 空気を含ませて梱包し、輸送する |
| ④ 切断面がシャープでないために切断時に束状態が崩れる | RCF 切断に用いる刃が摩耗している。 切断機の刃が下りた振動で切断面がシャープでなくなる。 | 180kg 分の RCF を切断したら、刃を研磨するようにした（図 3.44）。 切断機の振動を最小限に抑えるため、切断の速さを遅くする（送りコンベアの速さを遅くする）。 |



図 3.44 RCF 切断の刃（研磨後）

3.2 CNG ボンベから回収する RCF の単位処理能力評価

CNG ボンベの処理について、自動化及び量産が可能な設備に仕上げることを考慮し、管理項目を明確にするとともに、省エネ運転、生産性向上、RCF 回収物の品質管理基準、環境管理方法等の管理指標についての検討を行う。

3.2.1 初期段階の実証における RCF 単位回収コスト

CNG ボンベを燃焼処理して回収する RCF の単位回収コストを算出するにあたり、検討した範囲は、CNG ボンベの前処理、実証炉での燃焼、RCF 切断、切断後の RCF の輸送とした。

実証実験の初期段階である 9 月に算出した CNG ボンベの単位処理コストは表 3.17 の通りである。試算は、CNG ボンベ 2 本を処理した際の工場経費を回収できた RCF の重量で割るこ

とで算出した。処理コストは 1,926 円/kg と高額となり、その後の製品原料としての売却益を鑑みても、事業化が実現可能なコストではないとの評価に至った。

表 3.17 RCF 単位回収コスト（初期段階）

| 工程 | 必要資材・工具・消耗品 | 内容 | 単価 | 金額（円） |
|------------------|-------------|---------------|----------|---------|
| 前処理 | 人件費 | 1本当たり0.35時間 | 3000円/h | 2,100 |
| | ペーパーサンダー | 1本当たり0.75kwh | 26円/kwh | 14 |
| | 砥石 | 刃1枚当たり35本切断 | 700円/枚 | 40 |
| | 小計 | | | 2,154 |
| | 作業時間（時間） | | | 0.7 |
| 燃焼処理 | 人件費 | 8時間 | 3000円/h | 24,000 |
| | LPガス | 1本当たりLPガス2/3本 | 7500円/本 | 10,000 |
| | 循環ファン | 0.7kwh | 26円/kwh | 146 |
| | 排気ファン | 2.2kwh | 26円/kwh | 458 |
| | コンプレッサー | 0.75kwh | 26円/kwh | 156 |
| | VOC | 8.4kwh | 26円/kwh | 1,747 |
| | 小計 | | | 36,507 |
| 作業時間（時間） | | | 8 | |
| 切断 | 人件費 | 1本当たり1.5時間 | 3000円/h | 9,000 |
| | 切断機 | 1.5kwh | 26円/kwh | 117 |
| | 切断機刃研磨 | およそ120kg切断時研磨 | 12200円/回 | 3,766 |
| | 集塵機 | 3.7kwh×2基 | 26円/kwh | 577 |
| | 小計 | | | 13,460 |
| 作業時間（時間） | | | 3 | |
| 輸送 | 送料 | 1本あたり3箱 | 1469円/箱 | 8,814 |
| | 人件費 | | 3000円/h | 3,000 |
| | 小計 | | | 11,814 |
| 作業時間（時間） | | | 1 | |
| 売却 | | 1本あたりアルミ27kg | 118円/kg | ▲ 6,372 |
| 廃棄 | タンク両端 | 1本あたり理立6kg | 18.4円/kg | 221 |
| | | | | 57,784 |
| 1本当たりRCF回収量 15kg | | | | 30 |
| RCF 1 kg当たり単価 | | | | 1,926 |
| 作業時間 | | | | 13 |

3.2.2 CNG ボンベの単位処理能力の向上のための検討

CNG ボンベの処理能力向上のため、設備や運転管理方法の見直しを行った。見直しの内容は表 3.18 の通りである。併せて、これら見直し内容が処理コストを増加させる要因となるか減少させる要因となるかについても記した。これらを踏まえ、処理コストの見直しを行った結果は表 3.19 の通りとなり、処理コストは 802 円/kg まで減少した。

表 3.18 処理能力向上のための見直し

| 内容 | コスト増／減要素 |
|--|----------|
| CNG ボンベの前処理工程である切断作業において、粉状の切断屑が発生し、作業環境が悪化する問題が発生したため、防塵服、防塵マスク、手袋を購入し、着用 | コスト増 |
| VOC 除去装置を 1 台から 2 台に増設 | コスト増 |
| 切断機の能力に対して 100%の稼働を想定していたが、効率的な稼働を実施（切断機への投入方法を見直し、ミスカット等が減少したため、切断機の稼働率を 40%に下げたが稼働時間は変わらず） | コスト減 |
| ファンの能力に対して 100%の稼働を想定していたが、効率的な稼働を実施（循環ファン 50%、排気ファン 90%、冷却ファン 50%） | コスト減 |
| コンパウンド工程を実証炉と同じ施設敷地内にて行うことを想定し、RCF 輸送コストを削除した | コスト減 |
| 産業廃棄物として埋立処理を行っていた CNG ボンベの両端の部分から RCF が回収できることがわかったため、埋立処理コストを削除した | コスト減 |
| 燃焼処理工程および切断工程における管理項目が確立し、ロスが減ったため、回収できる RCF が増えた | コスト減 |
| 事業化に向けて燃焼処理量増加を目指して検討を進めた結果、CNG ボンベ 4 本の燃焼処理が可能な運用状況になった | コスト減 |

表 3.19 RCF 単位回収コスト（実証事業終了時）

| 工程 | 必要資材・工具・消耗品 | 内容 | 単価 | 金額（円） |
|------------------|-------------|--------------------|----------|---------|
| 前処理 | 人件費 | 1本当たり0.5時間 | 3000円/h | 6,000 |
| | 防塵服 | 20時間ごとに交換 | 500円 | 50 |
| | 防塵マスク | 初期投資 | 30000円 | — |
| | 防塵マスクフィルター | 20時間ごとに2個交換 | 1280円 | 128 |
| | 手袋 | 20時間ごとに交換 | 260円 | 26 |
| | ベビーサンダー | 1本当たり0.75kwh×0.5時間 | 26円/kwh | 24 |
| | 砥石 | 刃1枚当たり20本切断 | 700円 | 140 |
| | 集塵機 | 3.7kwh×2基 | 26円/kwh | 8 |
| | 小計 | | | |
| 作業時間（時間） | | | | 2 |
| 燃焼処理 | 人件費 | | 3000円/h | 24,000 |
| | プロパンガス | 8時間の平均使用量36kg | 300円/kg | 10,800 |
| | 循環ファン | 2.2kwh×50% | 26円/kwh | 229 |
| | 排気ファン | 3.7kwh×90% | 26円/kwh | 693 |
| | 冷却ファン | 0.75kwh×50% | 26円/kwh | 78 |
| | VOC | 8.4kwh×2基 | 26円/kwh | 3,494 |
| | 小計 | | | |
| 作業時間（時間） | | | | 8 |
| 切断 | 人件費 | 1本当たり1.5時間 | 3000円/h | 18,000 |
| | 切断機 | 1.5kwh×40% | 26円/kwh | 94 |
| | 切断機刃研磨 | およそ180kg切断時研磨 | 12200円/回 | 5,422 |
| | 集塵機 | 3.7kwh×2基 | 26円/kwh | 1,154 |
| | 防塵服 | 20時間ごとに交換 | 500円 | 50 |
| | 防塵マスク | 初期投資 | 30000円 | — |
| | 防塵マスクフィルター | 20時間ごとに2個交換 | 1280円 | 128 |
| | 手袋 | 20時間ごとに交換 | 260円 | 26 |
| | 小計 | | | |
| 作業時間（時間） | | | | 6 |
| 売却 | | 1本あたりアルミ27kg | 118円/kg | ▲ 6,372 |
| | | | | 64,172 |
| 1本当たりRCF回収量 20kg | | | | 80 |
| RCF 1kg当たり単価 | | | | 802 |
| 作業時間 | | | | 16 |

3.3 リサイクル炭素繊維の回収処理プロセスの管理

CNG ボンベのガス抜きや、切断、炉の運転、RCF 切断、その他のメンテナンス等の一連の項目についての対応や管理の在り方の検討を行う。

本実証事業における技術システムは図 3.45 の通りである。この内、RCF 回収に係る部分は、3.2 にて RCF の回収における単位処理能力の検討を実施した範囲（CNG ボンベの前処理、実証炉での燃焼処理、RCF 切断）となっている。本項では、それぞれの工程における管理すべき項目の検討結果をまとめる。

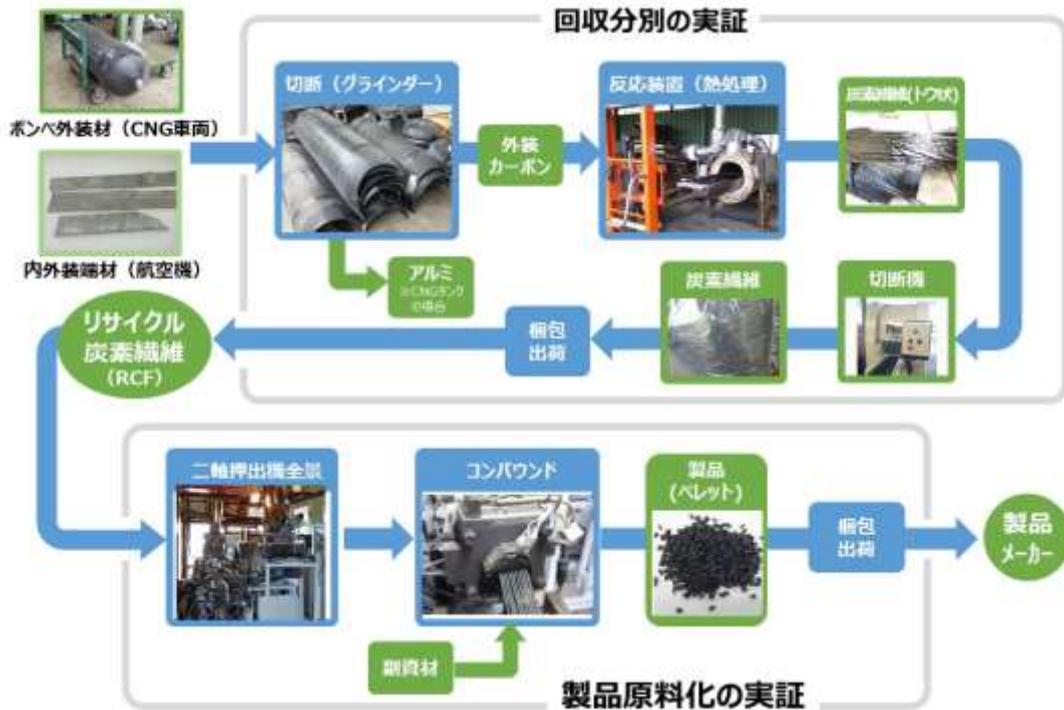


図 3.45 本実証事業における技術システム図

3.3.1 CNG タンクの前処理工程における管理項目

CNG タンクの前処理工程は表 3.20 の通りである。この手順を踏まえ、表 3.21 に管理項目を示す。

表 3.20 CNG タンクの前処理工程

| 前処理工程 | |
|-------|------------|
| 1 | シリアル番号の確認 |
| 2 | ガス抜き |
| 3 | CNG タンクの切断 |
| 4 | 試料の保管 |

(1) シリアル番号の確認

CNG タンクの所有者の要望に応じて、シリアル番号を確認の上、処理証明書を発行する。

(2) ガス抜き

使用済み CNG タンクは、入荷の時点でガスが残っている可能性があるため、ガス抜きを必要とする。口金を開けて大気中にガスを放出すると環境負荷が大きいだけでなく、火災リスクも生じるため、コンロに繋いで燃焼させる。初期段階の実証炉では燃焼処理にコンロを使用していたため、CNG タンクの残ガスを燃焼処理のために有効活用していたが、改良によって加圧式混錬バーナーを導入した後は、特に活用等はしていない。図 3.46、図 3.47 は、コンロでガスを燃やしている様子である。



図 3.46 残ガス燃焼のため CNG ボンベを
コンロに繋ぐ



図 3.47 残ガス燃焼の様子

(3) CNG ボンベの切断

CNG ボンベはそのまま燃焼処理できないため、実証炉に投入可能な形状に切断する必要がある。まず、残ガスがないことを確認し、次にサンダーで CNG ボンベを切断して CFRP の外装を取り外す。CNG ボンベの切断は図 3.48 にある通り、CF の織り方が変わっている部分にサンダーの刃を入れ、円形に切断し、その後、縦に切り込みを入れて CFRP の外装だけ剥がす。切断した後、CNG ボンベの両端は図 3.49 のように外装が残った状態になる。これは当初は埋立処理せざるを得ないと考えていたが、口金の部分に丸く切り込みを入れることで、両端の外装も取り外すことができ、このドーム状の外装についても、他の試料と同じく燃焼処理により RCF が回収できることがわかった。よって、切断工程で CFRP の外装は全て燃焼処理により RCF が回収でき、残った部材についてもアルミ製であるので金属資源として有価売却ができるため、廃棄物として生じる物はない。

CFの織り方が変わっている堺



図 3.48 CNG ボンベ切断の手順



図 3.49 CNG ボンベ切断後

CNG ボンベの切断については、CFRP の粉塵が発生するため、防塵服と防塵マスクを着用する。防塵服は図 3.50、図 3.51 にあるように黒く汚れるため、作業時間 20 時間程度で交換を要する。防塵マスクのフィルターについても、図 3.52 のように粉塵が付くため、同じく 20 時間で交換する。これらの費用については、3.2.2 の単位回収能力の試算において、経費として考慮している。



図 3.50 切断作業前



図 3.51 切断作業後



図 3.52 切断作業時の粉塵

(4) 試料の保管

CNG タンクから取り外した外装は燃焼処理の試料とする。有害物流出のリスクもないため、図 3.53 の通り、屋外での保管とした。



図 3.53 試料の保管

表 3.21 CNG タンクの前処理工程における管理項目

| 前処理工程における管理項目 | |
|---------------|-------------------------------------|
| 1 | シリアル番号の確認（顧客要望に応じて） |
| 2 | 素材が CF であること（グラスファイバーなどの他の素材ではないこと） |
| 3 | 残ガスがないこと |
| 4 | 切断作業者の防塵服および防塵マスクの着用 |

3.3.2 燃焼処理工程における管理項目

燃焼処理工程の手順は 3.1.2 で述べた通りである。ここでは、その管理項目を表 3.22 に整理した。

表 3.22 燃焼処理工程における管理項目

| 燃焼処理工程における管理項目 | |
|----------------|--|
| 1 | 試料と試料の間に隙間を設け、熱風が滞りなく流れるように炉に投入すること |
| 2 | 適正な温度管理（今後、自動プログラム燃焼技術の導入によって自動運転が可能） |
| 3 | 炉内入口の温度が 300℃に達してから炉中央の温度が 300℃になるまでの時間が短いこと |
| 4 | 炉内に熱風が満遍なく行き渡り、温度差が少ないこと |
| 5 | 回収した RCF の灼減率は 5%以下（残存樹脂量が少ないこと） |

3.3.3 RCF 切断工程における管理項目

RCF 切断工程の手順は 3.1.5 で述べた通りである。ここでは、その管理項目を表 3.23 に整理した。

表 3.23 RCF 切断工程における管理項目

| RCF 切断工程における管理項目 | |
|------------------|--|
| 1 | 切断時の粉塵発生により作業環境が悪化しない様、集塵機を稼働させる |
| 2 | 切断作業者の防塵服よび防塵マスクの着用 |
| 3 | RCF を層ごとに剥離し、重ねずに切断する |
| 4 | 切断機の振動を最小限に抑えるため、切断の速さを性能の 40%程度まで遅くする (送りコンベアの速さを遅くする) |
| 5 | 切断の刃は 180kg 分を切断した時点で交換し、研磨する |

3.3.4 その他の管理事項

燃焼処理工程において、炉内温度が急激の上昇し、爆発や火災の危険性が認められる等の緊急時の対応としては、ガスを止め、炉内に炭酸ガスを吹き入れる事とする。

第4章 コンパウンドに係る現状と評価

RCFを利用した半導体等製造治具の製品化に向けて、当該用途、グレードに応じた製品開発と、効率的・合理的な運転管理（量産化考慮）の検討を行う。

具体的には、コンパウンドの製品化、マーケットを絞り込んだグレード開発、コンパウンド成形性の確認評価を行う。

4.1 コンパウンドの製品化

CNGボンベからRCFを回収分別後、6mm及び25mmチョップを用いてPC（スーパーエンブラ樹脂）-20~25%RCFとして試作品（ペレット）を作成する。

実証に向けては、コンパウンド設備等の調整、運転管理の実施、関係者との調整などを行った。

表 4.1 コンパウンドに係る活動実績

| 時期 | 内容 |
|----|--|
| 6月 | <ul style="list-style-type: none"> ●2軸押出機の総合的活動計画の策定 ①コンパウンド設備等の調整 <ul style="list-style-type: none"> ・設備設置状況の把握、業務管理方法の確認 ・PC-20CF 試作試運転を行い、コンパウンド設備の不具合点の抽出 |
| 7月 | <ul style="list-style-type: none"> ①コンパウンド設備等の調整 <ul style="list-style-type: none"> ・2軸押出機の整備（動作確認、不具合点抽出、是正案検討） ・2軸押出機周辺設備の整備 ・コンパウンド実施に係る炭素繊維飛散防止対策の実施 ②関係企業との調整 <ul style="list-style-type: none"> ・ダイセルポリマーとの協議 ・カワサキテクノロジーサーチとの意見交換 ・A社とPC（ポリカーボネート）購入に関する協議 ・B社とLCP（液晶ポリマー）購入に関する協議 ・C社との材料分析方法に係る協議 |
| 8月 | <ul style="list-style-type: none"> ①コンパウンド設備等の調整 <ul style="list-style-type: none"> ・2軸押出機回りの①防塵カーテン、②集塵機、③エアシャワー、④原材料投入用足場等の設計及び設置（独自費用） ・ペレタイザーの搬入・設置 ・RCF切断機の搬入 ②運転管理 <ul style="list-style-type: none"> ・2軸押出機の試運転。水戸工場製のRCFの送給性の確認 ・RCFクロスを用いた成型品の検討実験 ・コンパウンド試作機の運転状況の確認 |
| 9月 | <ul style="list-style-type: none"> ①コンパウンド設備等の調整 <ul style="list-style-type: none"> ・PC-20RCF 試作に向けての機械調整 ・湿式不織布関係会社との協議、同検討開始 ・第3回試作に向けての装置整備 ②運転管理 <ul style="list-style-type: none"> ・PC-20RCFの第1回試作、第2回目試作 ・PC-20RCF 量産試作（20kg連続投入） ・湿式抄紙作成用RCFサンプル製造 |

| | |
|-----|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> ・H社他への各種サンプル準備 <p>③関係企業との調整</p> <ul style="list-style-type: none"> ・リーテムとの技術交流。設備見学、RCF 切断指導等。 |
| 10月 | <p>①運転管理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンパウンド試作 ・成型品試作 <p>②関係企業との調整</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実験結果のまとめ、データ測定 ・リーテム技術者等との技術交流。2軸押出機、リサイクル炉等のデモンストレーション（参加；リーテム、ダイセルポリマー、カワサキテクノリサーチ） ・実験結果のまとめ、データ測定 |
| 11月 | <p>①運転管理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンパウンド試作 ・成型品試作 |
| 12月 | <p>①運転管理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・二軸押出機の再整備 ・長繊維コンポジットの開発調査 ・コンパウンド関係の機械整備 |

4.1.1 コンパウンド設備等の調整

実証事業の準備段階として、設備などの調整を行った。

準備段階における機能性については、PC-20RCFの混練性、押出性を検証。RCFは新材と同等のコンパウンド挙動を示したため、適正な性状のRCF回収ができれば、半導体製造治具むけ商品開発が可能であることを確認した。

また、RCFと樹脂との濡れ性も良好であった。

※RCFは、通常の炭素繊維と異なり、カップリング材、収束材の表面処理がされておらず、一般的な樹脂とのなじみが悪いとの意見もあったが、繊維の濡れ性が影響する成形品表面外観が、新品炭素繊維使用品と遜色がないことを確認した。

さらに、RCFのコンパウンド設備への送給性の確認試験を行った結果、2軸押出機へのサイドフィーダーの詰まりが生じるなどの問題がなく、すぐに量産体制に入れることを確認できた。

作業に伴う発塵の防止対策（電氣的に障害の抑止）は、粉塵発生部での中性能フィルターによる炭素繊維集塵と系外への飛散を防止する隔膜（プラスチックフィルム）の設置を行った。

最後に、試作環境の整備として、試作材料の保管管理、材料投入から押出後のペレタイズまでのライン整備を行った。2軸押出機のラインの最終工程のペレタイザーの調整が終了し、試運転、試作工程に入った。また、ゾーンごとの温度設定も終了し、PC-20RCFの試作に着手し、成果物（ペレット）の回収を行った。

検証項目は、下記のとおりとなる。

表4.2 コンパウンド設備等の調整と検証項目

| 事項 | 検証事項 | 備考 |
|-----------------------|---|--------------------|
| 2軸押出機の検証 | ①混練性の確認 ②押出性の確認 | PC+20RCFの製造 |
| | ①温度計測位置 ②均熱性（ゾーン毎の温度設定） | 量産時の信頼性の向上 |
| RCFの搬送装置 （サイドフィーダ） | ①送給性の確認 | 流動供給性の向上 |
| 稼働に伴う周辺環境の整備 | ①集塵機の設置 ②粉じん発生部での中性能フィルター（隔膜設置） ③エアシャワーBOXの設置 ④電気ボックス内部への清浄空気の供給 | 炭素繊維の浮遊による電気トラブル防止 |
| ライン整備 | ①試作材料の保管 ②材料投入～押出後のペレタイズまで一連の設備 | 試作環境の整備 |

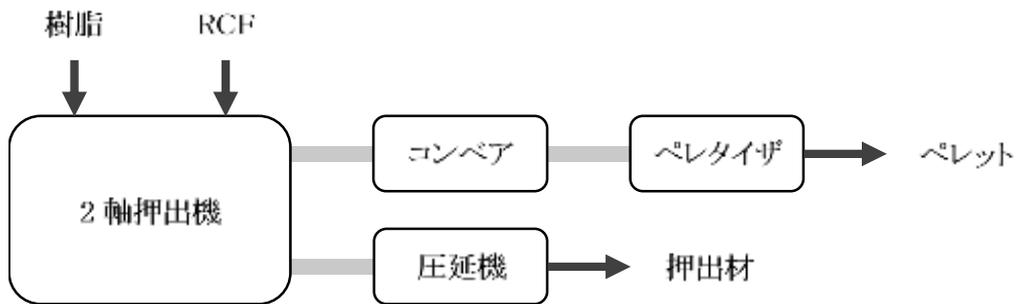


図4.1 コンパウンド関係設備の概念

RCFは、マトリックス樹脂（アモルファスカーボン前駆体）を残すのが特徴で、サイジング材としてサイドフィーダーに供給する。

※特別に調整した計量器から、富士加飾㈱が開発した特殊サイドフィーダーに供給



図4.2 2軸押出機（設置時）



図4.3 2軸押出機（全体）

4.1.2 運転管理の実施

運転管理については、2軸押出機を用いたコンパウンド試作、射出成型品試作、抄紙作成用 RCF サンプル製造などを対象に行った。RCF は、新材と比べ、熱処理により活性化が拡大することで、反応性、濡れ性、吸着性が向上し、強度が生じやすい状況にある。

(※炭素繊維の新材は、そのままでは樹脂との結合性が悪い)

詳細は、開発ノウハウに相当するため、開示できないが、下記項目について実証実験を通じて情報の蓄積を進めた。

表4.3 運転管理に係る項目

| 事項 | 検証事項 | 備考 |
|-------|----------------|--------------------------------|
| 2軸押出機 | ①2軸スクリーウの調整 | 圧力、温度、スクリーウ回転数、 切換え位置等 |
| | ②樹脂別の温度管理 | PC、LCP、PES |
| | ③RCFの定量供給の安定化 | RCFの絡まり・膨らみ防止、供給 部の接合性、逆流防止 |
| | ④樹脂の逆流固化 | 洗浄（クリーニング） |
| | ⑤適正な押し出し | 回転数とベルコン速さの調整 |
| | ⑥コンポジットの劣化防止 | 水濡れ防止 |
| 射出成型機 | できるだけ繊維状態を残すこと | 途中で折れないこと |

実際の運転管理については、下記が重要であるため、それらを意識したノウハウの蓄積を図った。

- 試作段階の再現性
- 量産段階の安定性



図4.4 製品押し出し状況



図4.5 射出成型設備

4.1.3 関係企業との調整

関係企業としては、ダイセルポリマー（RCF を利用した成型品作成）との調整、ダイセルポリマー（需要家としての要求品質）、プラ素材である PC、LCP 等の購入に関する協議などを主体に推進した。

なお、ペレット製造時に、樹脂の基材として活用する PC（ポリカーボネート）や、LCP（液晶ポリマー）等については、高価なエンジニアリングプラスチックとなる。実証時及び事業時には、製造メーカーと連携の上で、供給安定化を図る必要がある。

表 4.4 コンパウンドに関する課題と対応

| 月 | 課題 | 対応 |
|----|----------------------------|---|
| 6月 | PC-20CF (20%) を用いて試作試運転 | 設備準備状況や、不具合点の抽出 |
| 7月 | PC-20RCF の混練性、押出性の検証 | RCF は新品材と同等のコンパウンド挙動。ダイセルポリマーで受入可能となれば、半導体製造治具むけ商品利用が可能。 |
| | RCF と樹脂との濡れ性の確認 | 濡れ性は良好。 ※RCF は、カップリング材、収束材の表面処理がされていないため、一般的な樹脂とのなじみが悪いとの意見もある |
| 8月 | 本格試作を前に、試作環境の整備 | 試作材料の保管管理、材料投入から押出後のペレタイズまでのライン整備 |
| | 作業に伴う発塵対策 | 電氣的に障害を発生する炭素繊維の飛散防止のため、粉塵発生部での中性能フィルターによる炭素繊維集塵、系外への飛散防止の隔膜（プラスチックフィルム）を設置 |
| | RCF の水戸からの供給品の精度の把握 | RCF のコンパウンド設備への送給性の確認試験の結果、2軸押出機へのサイドフィーダーに供給に不具合 |
| | RCF の品質改善の課題整理 | ①ミスカット品の混入：長いトウ状繊維の混入 ②綿状解繊比率が高く、かつ、入手時に解繊部が固まりに成長のため、定量供給装置でも完全にほぐれない ③切断時にトウ状態が崩れるような切り方（切断面がシャープでない） ④粉状の切断屑の混入 |
| 9月 | 試運転、試作工程 | 3回実施し、20 kgの連続運転に成功。成果物（ペレット）を回収。今後は、客先ニーズに応じた品質、性能の調整を実施。 |
| | RCF 繊維長は、25 mmを採用する。 | 通常、2軸押出機に供給する炭素繊維の限界繊維長は6 mm程度であるが、富士加飾の設備では25mmでも使用できるため、今後の製造コストも勘案して25 mmを使用した。残存繊維長が長いこと、衝撃値には有利に働くことが想定される。 |
| | ペレット（成果物）の品質確認をダイセルポリマーに依頼 | 従来の新品 CF との品質差異のチェックと、物性測定。当該評価試験は、成型分野でトップレベルの評価 ※ダイセルポリマーは、低せん断スクリーによる射出成型機を保有し、残留繊維のダメージを抑えた成型が可能 「25 mmチョップ RCF は、ダイセルポリマーが販売する Long Fiber Pellet と競合しうる」 |
| | ペレットを用いた射出成型機による成形性を確認 | 射出成型は、若干の離型性の改良が必要であるが、微調整の範囲と判断できる |
| | 水素ボンベ等多種類のボ | 例えば A 社品は+30℃設定を上げる必要あり。 |

| | | |
|-----|-------------------------------------|--|
| 10月 | ンベの回収方法とその用途の検討 | |
| | 半導体製造装置用治具、ロボットアームのターゲット先 | 台湾のポリカーボネートメーカーの関連企業から、コンパウンド開発のできる共同開発先を探しているという情報を入手。 |
| | 今後のポリカーボネート樹脂の供給の安定化 | 価格面、対応面を考慮し、供給安定性を考慮した企業連携の対応 |
| 11月 | CFRP 端材の海外からの回収可能性 | 中国（風車ブレード）、米国（ボーイング社の航空端材、CNG ボンベ等）の対象化 |
| | 新たな用途開発に係る検討 | 不織布、長繊維回収利用 |
| | RCF ペレット（PC + 25%RCF）を用いた射出成型品の製品評価 | ダイセルポリマー、淀川ヒューテックに提供。品質試験結果は、2019年1月中旬以降 |
| | 新たな用途開発に向けて名古屋大学との連携 | RCF 自体（単繊維1本ずつ）の強度試験。結果は、2018年年末 |
| 12月 | 海外からのリサイクルソースの確保 | 中国（風車ブレード端材）とアメリカ（航空機端材）の十分な確保に目途。中国から持ち帰った CFRP 端材でリサイクル確認済。 |
| | 米国ボーイングとELGの提携発表（2018年12月3日）を踏まえた対応 | 同ポジションでの連携でなく、2次加工のアプリケーション確立後の連携提案に軸足を置く。 |
| | 新規の用途開発 | 余熱を利用したプリプレグの前処理、樹脂含浸不織布の活性化処理等のできる多機能炉に適用範囲を拡大 炭素材料学会の炭素繊維に関する研究開発テーマは、25mm以上、できれば50mm以上の長炭素繊維を用いたコンポジットの開発（研究成果が渴望） |
| | 淀川ヒューテックより、ダンベル形状試験片の要求 | ダイセルポリマーに依頼し入手。機械試験データを踏まえて、今後、淀川ヒューテックを訪問し、販売活動に入る。 |

4.2 マーケットを絞り込んだグレード開発

RCFを用いた樹脂との組み合わせで、利用用途を踏まえてPCとの組み合わせを行い、薄肉軽量の半導体製造装置に使用する部品のグレード開発を行う。

リサイクル炭素繊維の参入目標である、半導体製造装置用治具、ロボットアームに関して、淀川ヒューテック社をターゲットとしている

検討の結果、以下の結果が得られた。

- ① リサイクル CF の回収形状とサイドフィード機のマッチングを検討し PC 樹脂で条件を確立。RCF25 mmの2軸押出機での対応が可能であること。（※通常は、限界繊維長は6 mm程度とされている）2軸押出機ラインで、長繊維（1～10 mm）を残存させる押出法がクリアした。
- ② PC - 20, 25%RCF（繊維長；25 mm）の試作完了成果物を回収した結果、リサイクル CF コンパウンドは新品 CF とほぼ同等の性能が得られると評価。さらに、ダンベル形状サンプルを準備し、データシートと共にユーザーへ提出した。

- ③ サイジング剤塗布なしでも、リサイクル CF の樹脂に対する濡れ性良好、新品 CF と成形性に差はなし。
- ④ RCF のマトリックス樹脂を LCP、PES に拡大し、長繊維 CFRTTP を試作を推進。25mm 長のリサイクル CF を用いた試作において、T300 回収品と T800 回収品でデータで明確な差異が認められる。
- ⑤ 試作ペレット中の繊維長残存長は 1~3mm と長く、性能向上に寄与している
- ⑥ リサイクル CF 単繊維の性能調査を大学に委託、80%以上の性能確保中間報告を得た。



図4.6 RCF原料 (25mm切断)



図4.7 PC (ポリカーボネート樹脂)



図4.8 ペレット回収物 (PC+20%RCF)



図4.9 射出成型品 (PC+20%RCFペレット活用)



図4.10 パソコン筐体/PC+20%CF

今後、事業化に向けては、需要先に併せた品質、性能の調整を考慮した製品開発と同時に、SDS（安全データシート）、包装形態、包装単位（特に、RCF、コンパウンド品、不織布等）、価格などの整備が必要となる。

炭素材料学会の炭素繊維に関する研究開発テーマは、25mm以上、できれば50mm以上の長繊維を用いたコンポジットの開発としており、25mm～50mmRCFを用いた事業化は渴望されていると聞いている。

事業化の成否は、原料回収量、RCF 回収量をバランスよく市場に流通させることが必要であり、先発企業が苦戦している炭素繊維販売に頼らず、2次加工あるいは、さらに川下分野を目指すことで、需要家とのマッチングがさらに進みうるものと考えている。

成果物がペレットという、一つの商品に依存するのは危険と判断し、12月後半から、リサイクル炭素繊維の2次加工技術についての検討を追加し、自主開発テーマとして押出材や不織布など種々の再製品化の試作や開発を行った。その結果、市場調査の段階から、RCFの商品開発ステージへステップアップすることが可能となった。

現状の評価は、下記のようになっている。

- ① 2軸押出機により25mm繊維長のRCFを板状に押し出したものは、マトリックス樹脂がPC、PES、LCPのいずれも繊維の破損が少なく、将来プレス用構造材としての市場開発の展開が期待できる。現在、世界でトップクラスといわれているドイツのフラウンホーファー研究所より残存繊維長が長く、Vf（体積分率）も60%程度まで上げることができるため、海外マーケットでも優位性を以て事業展開しうると考えられる。
- ② RCF湿式不織布は樹脂との濡れ性が良いことから樹脂含浸を行い、表面物性を付与することができた。不織布のみの販売では事業としての競争力がないため、さらに加工のレベルを上げRCFの特徴を生かした商品開発を行う。
- ③ 25mmRCFは、熱硬化性樹脂とのなじみもよく混練品の押出、ロール成形が可能である。これらの物性と成形性を生かした用途開発を行う。それらの需要家の求める弾性率や、衝撃値、さらには流動性、表面性などで異なる。
- ④ 基本的には、リサイクル対象材発生会社に対し、リサイクルRCFの販売でなくコンパウンドペレット、プレス成型用押出板材（熱可塑タイプ、熱硬化タイプ）を選んでいただき共同開発ステージに持ち込み、商品開発品の納入により継続的な需給関係を構築する。

なお、RCFの商品化について多くの可能性を見出しているが、多くのポテンシャルカスタマーに対し、試行錯誤の要素を含む開発から商品化については、一定期間の調整が必要となると考えている。

4.3 コンパウンド成形性の確認評価

コンパウンド成形性の確認評価を行い、評価が得られたものについてはカタログの作成を行う。なお、評価のため、試験材の成形や、流動性等の試験金型の準備を行う。

4.3.1 ペレット性状

物性評価は、ダイセルポリマーに依頼して行った。ダイセルポリマーは、共通のPC-CF系の量産経験がある。そのため、今回のコンパウンド製造ラインの工程能力を含めて試作品が商品として安定しているか等の評価を依頼した。評価試験は、成

形分野でトップレベルの評価となる。

試験概要及び、結果は、以下の通りとなっている。

①目的

PC/RCF 20%、25%コンパウンド品の物性測定

②材料

富士加飾(株) 試作品

③測定条件

【成形条件】

成形機：ファナック αS100iA (型締め力 100t)

金型：ISO 多目的試験片金型

成形温度：300℃

金型温度：80℃

射出速度：25mm/sec

1次圧／保圧：170MPa/45MPa

保圧時間／冷却時間：20sec/25sec

【試験内容】

試験規格と測定条件は別紙に記載。

引張り試験 : n 数=3

曲げ試験 : n 数=2

シャルピー衝撃 : n 数=3

HDT(高荷重) : n 数=2

④測定結果

PC-20RCF、PC-25RCF のコンパウンド品の物性測定の結果を示す。

- PC-20～25CF 系は、16～18Gpa の曲げ弾性率を要求される。今回の試作品 PC-25RCF は 17Gpa をクリアし、新品材に匹敵している。
- 引張強度、曲げ強度、シャルピー衝撃値は、新品品と同レベルで遜色ない。

※淀川ヒューテックには、データシートを送付し、機械的性能の事前評価について了解が得られた。その結果、現在は取引に係る見積段階に既に移行している。(別途、PC-25RCF のダンベル形状試作成形品を提供)

表 4.5 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 ① | PC-20RCF ② | PC-20RCF ③ | PC-25RCF |
|----------|-------------|-----------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| MFR | ISO 1133 | 300℃ /2.16kg | g/10min | 7.5 | 7.0 | 5.6 | (測定中) |
| MFR | ISO 1133 | 300℃ /5kg | g/10min | 21.4 | 22.0 | 17.9 | (測定中) |
| 引張強度 | ISO 527 | - | Mpa | 120.9 | 125.1 | 129.9 | 136.8 |
| 引張呼び歪み | ISO 527 | - | Mpa | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.3 |
| 曲げ強度 | ISO 178 | - | Mpa | 172.9 | 180.8 | 197.7 | 201.9 |
| 曲げ弾性率 | ISO 178 | - | Mpa | 11175 | 11700 | 13872 | 17573 |
| シャルピー衝撃値 | ISO 179/1eA | 23℃ | kJ/m ² | 6.72 | 6.35 | 6.3 | 5.87 |
| 荷重たわみ温度 | ISO 75 | 1.80MPa | ℃ | 148.3 | 146.4 | 147 | 147.4 |
| 密度 | ISO 1183 | - | g/cm ³ | 1.265 | 1.264 | 1.27 | 1.311 |

RCF性状及び、ペレット品質の把握を行った結果、競合他社品の機械的強度と遜色がないことから、今後、試作実績を積み重ねテーターシート作成を行う。

第5章 環境負荷低減効果の検証

CF回収分別に係る処理に伴い生じる排ガスやCNGボンベの前処理切断やRCF後処理裁断に伴う粉体カーボンの適正性の確認を行う。また、RCFを活用した再製品化に関する環境改善効果についての検討を行う。

5.1 排ガス制御

CF回収分別にて発生した排ガス測定の結果から、ガス成分、白煙、臭気などの確認を行う。

5.1.1 排ガス対策の概要

初期段階の実証炉では、ウォータースクラバを用いた排ガス洗浄および脱臭を行っていたが、排気ガスの煙の色や臭いに問題が見られたため、VOC（揮発性有機化合物）除去装置を導入した。

VOC除去装置を1台レンタルし設置した上で、排気ガスの煙の色や臭いを観察し導入を検討したが、より効果を出すため2台を直列接続して設置することとした。設置時の実証炉の概略図を図5.1に示す。ウォータースクラバからVOC除去装置2台に代えたことで、循環するガスの空気抵抗が高くなり、適当な量のガスが排出されない問題が生じたが、循環ファンの能力をあげることで対応した。

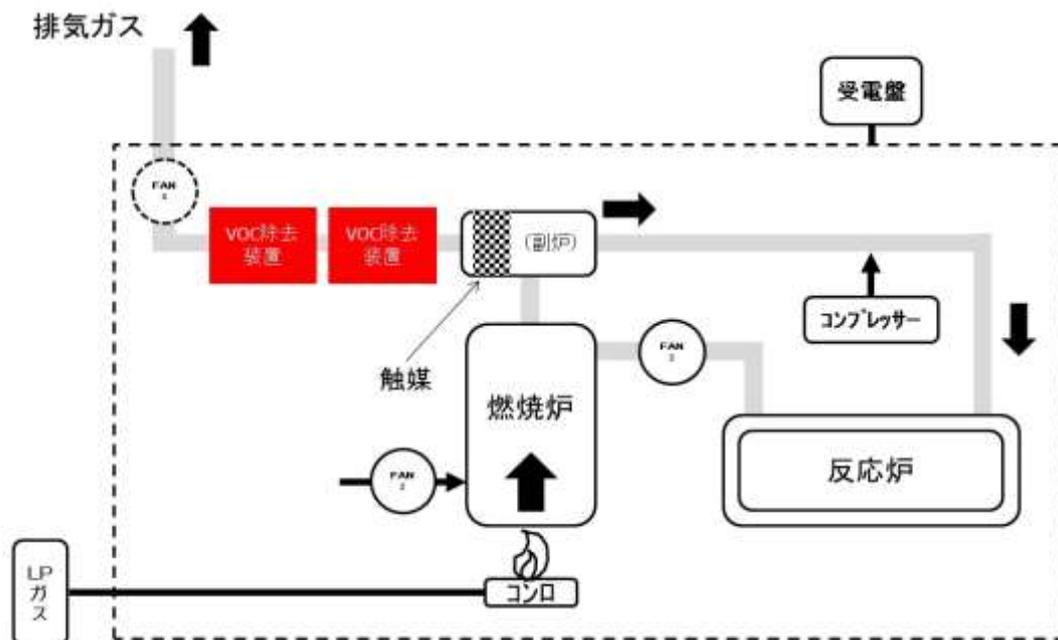


図 5.1 VOC 除去装置設置時の概略図

5.1.2 排ガス測定結果

VOC除去装置を設置後、その効果を検証する目的で、排ガスの環境測定を実施した。測定は一般社団法人茨城県環境管理協会に委託した。測定場所は、実証炉の排ガスの管内として



図 5.2 排ガス測定の様子

測定対象は、悪臭防止法に基づき、トルエンおよびキシレンとした。測定結果は表 5.1 の通りとなり、作業環境および周辺環境への影響は見られないと評価した。

表 5.1 排ガス測定結果

| 分析項目 | 分析結果 | 評価 |
|------|--|---|
| トルエン | $1.49 \times 10^{-3} \text{ N m}^3/\text{h}$ | 測定値（茨城町 A 区域）の地域排出基準値を大きく下回る （地域排出基準値：11 $\text{N m}^3/\text{h}$ 以下） |
| キシレン | $1.27 \times 10^{-4} \text{ N m}^3/\text{h}$ | 測定値（茨城町 A 区域）の地域排出基準値を大きく下回る （地域排出基準値：1 $\text{N m}^3/\text{h}$ 以下） |

5.2 作業環境

CNG ボンベの前処理切断や RCF 後処理の裁断に伴う粉塵の測定の結果から、作業環境の確認を行う。

5.2.1 粉塵対策の概要

燃焼処理にて回収した RCF は、切断機にて一定の長さに切り揃える。この切断工程にて発生する RCF の粉状の切断屑が作業環境を悪化させる要因となっている。これら粉塵対策として、切断作業場（コンテナ内）の外部に集塵機を導入した。集塵ホースは、作業台の上部と切断機排出口に設置した。設置の概略図は図 5.4、設置の様子は図 5.5 の通り。



図 5.3 切断作業場の状況

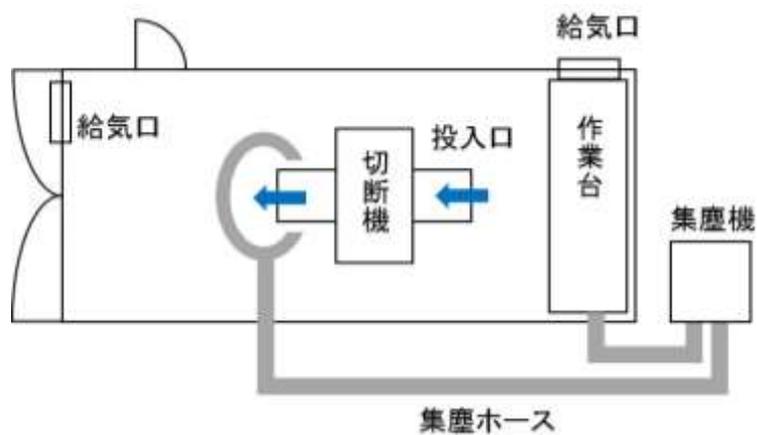


図 5.4 集塵機設置の概略図



図 5.5 切断機への集塵機設置の様子

5.2.2 粉塵測定結果

集塵機設置後、その効果を検証する目的で、粉塵の環境測定を実施した。測定は一般社団法人茨城県環境管理協会に委託した。測定は、集塵機を停止した状態と稼働した状態のそれぞれにおいて、図 5.6 の 7 箇所を実施した。測定の結果は表 5.2 の通りである。

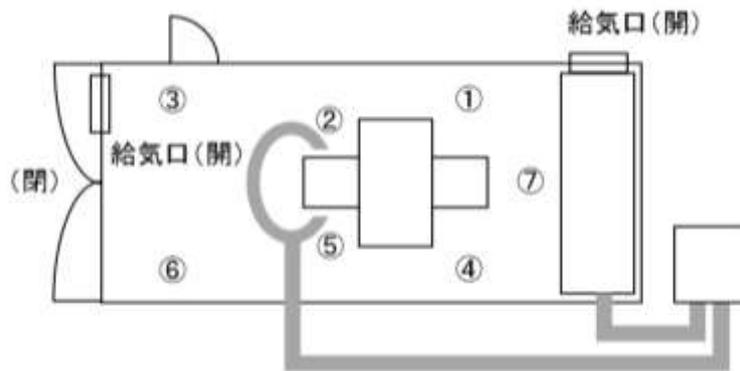


図 5.6 粉塵測定場所

表 5.2 粉塵測定結果

| 測定場所 | 集塵機停止 | | 集塵機稼働 | |
|------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|
| | 相対濃度 (cpm) | 質量濃度 (mg/m ³) | 相対濃度 (cpm) | 質量濃度 (mg/m ³) |
| ① | 1272 | 3.50 | 70 | 0.06 |
| ② | 2028 | 5.58 | 102 | 0.08 |
| ③ | 1974 | 5.43 | 54 | 0.04 |
| ④ | 1886 | 5.19 | 26 | 0.02 |
| ⑤ | 3310 | 9.10 | 26 | 0.02 |
| ⑥ | 2698 | 7.42 | 32 | 0.03 |
| ⑦ | 976 | 2.68 | 55 | 0.05 |

※遊離ケイ酸含有率はいずれも 0%であり、石英、クリストバライト、トリジマイトは 0%

粉塵測定の結果、集塵機を停止した状態で作業を行った場合、労働安全衛生法に基づく作業環境の第三管理区分となり、適切な作業環境ではないが、集塵機を稼働した場合は第一管理区分となり、適切な作業環境と評価された。よって、切断工程においては引き続き集塵機を稼働させた上で作業にあたることとする。

5.3 環境改善効果の評価方法と CO₂ 削減効果等

RCF の回収・利用に伴う環境改善効果の測定のため、最終処分量の回避効果や、埋立処分+新材製造と比較した場合の CO₂ 削減効果などの LCA 分析を行う。

(1) CFRP のリサイクルに伴う最終処分量の削減

従来、CFRP のリサイクルはあまり進んでおらず、単体での使用物は主に安定型埋立処分がされる。また、他のプラスチック素材との混合破碎後の ASR、SR は、焼却、セメント燃料利用（既存設備利用）などの処分・利用方法において、CFRP の混入に伴う処理システム上の障害となってきた。RCF の再製品化を通じて、この課題を回避できる可能性がある。

なお、環境改善効果の評価方法は、以下の点が考えられる。

- ① 「埋立又はセメント燃料処分量」と、「製品化利用量」の比較 (t/年)
- ② ①の処分費用 (▲費用/年) と、製品化による高付加価値化に伴う利益 (+利益/年) との経済効果。

表 5.3 CFRP の従来の処分方法の回避

| 品目 | 従来の処分方法 | 環境効果 |
|-------------------------|--|--|
| 使用済み/圧力容器等 (部材密着・外側部) | ・ ユンボで破壊し、安定型埋立処分 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 埋立処分の回避可能 ・ リサイクルの障害の回避が可能 (ASR、SR) ・ さらに、長繊維の回収で、付加価値の高い製品利用が可能 |
| 使用済み/成形品 (航空機、自動車等単一製品) | ・ ASR、SR として、セメント燃料利用の場合、CFRP の処理で電気集塵器の目詰まりの結果、機能障害を引き起こす | |
| 製造端材/中間基材 (プリプレグ端材) | ・ プリプレグ端材や、製造切り落とし材は、製品の 3 割程度が発生。一部利用を除き、処分 | |

(2) LCA 分析

LCA 分析は、RCF の回収、再製品化 (ペレット) との比較対象として、新材製造 (PAN 繊維) 及び利用後の埋立処分と比較して行う。

(処理法の特徴)

- CFRP の製造 ; 1800℃ の高温、ポリアクリルニトリル (PAN 系) を用いた製造で膨大なエネルギー利用とシアンガス発生 (環境影響大)。また、中間基材は海外製品化 (9割) され、物流手間とエネルギー、コスト大。
- 今回の実証事業 (リサイクル製品化) ; 500℃ 以下の熱気流。コンパウンドまで含めた一貫利用システム。

(推計方法)

CFRP の製造と、今回の一貫利用システムにおける分別回収 (RCF 回収) との比較において、CO₂ 排出量の削減効果の算定を行う。

- ① CFRP の原料回収、RCF 回収及び、ペレット製造・出荷に伴う CO₂ 排出量
炭素繊維の RCF 回収に伴う CO₂ 排出量は、反応炉での電気、LP ガス使用量及び、エポキシ樹脂の気化に伴うガス量から換算を行う。
- ② CFRP の埋立処分及び、炭素繊維の新材製造・出荷に伴う CO₂ 排出量
LCA 日本フォーラム及び、炭素繊維協会から情報収集を行う。

(推計結果)

- ① PC-25RCF ; 1.76 t-CO₂/製造 t
- ② 埋立+新材 ; 22.56 t-CO₂/製造 t

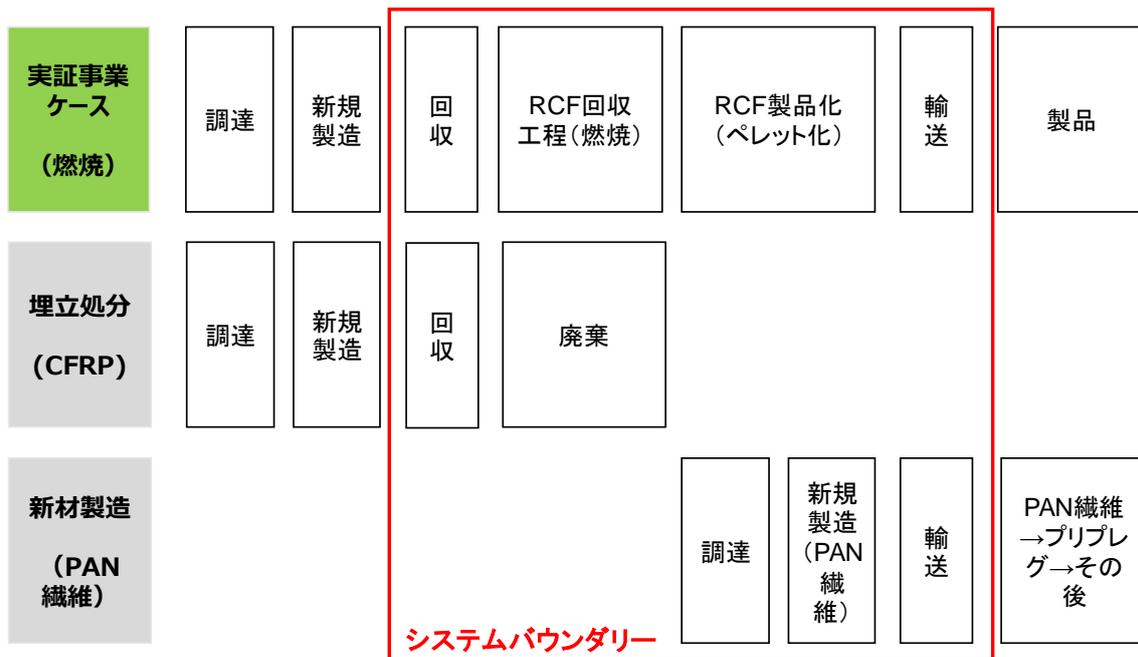


図 5.7 LCA の検討概念（埋立処分及び新材製造との比較）

LCA 分析は、CNG ボンベを対象に行う。

原料回収は、トラックでの効率的な運搬を考慮（原料購入費の削減）し、トラック 1 台分に相当するまで現場保管をお願いするなど、排出者の理解を得て行う前提とした。

なお、CNG タンクは、多数の回収元となる A 社からの輸送を前提に、エネルギー使用及び CO₂ 排出量の算定を行った。

その結果、原料回収に伴う CO₂ 排出量は、0.22 kg-CO₂/CFRP-kg (CFRP 重量換算値)となる。

表 5.4 CNG ボンベの原料回収に伴うエネルギー使用及び CO₂ 排出量

| 項目 | エネルギー使用量 | CO ₂ 排出量 | 備考 |
|----------------|---------------------|--|----------------------------------|
| CNG タンク | 3.66 G J (2t 当り) | 0.13 kg-CO ₂ /CNG ボンベ-kg | ※富山県—茨城県(500 km) 2t-40 本/車として |
| CFRP (タンク中) | 6.1 G J (2t 当り) | 0.22 kg-CO ₂ /CFRP-kg | CNG タンク中の CFRP 含有 は、60%とした。 |

(注) トンキロ法で試算。

輸送トンキロ当り燃料使用量；0.9680/トンキロ

輸送に係る CO₂ 排出係数；0.0687 kg-CO₂/MJ

表 5.5 各項目の LCA 検討データ等

| 類型 | 内容 | 検討の考え方 | 備考 | |
|---------|---------|--|--|--|
| 実証事業ケース | 回収 | 原料回収 CNG ボンベの回収 燃料(軽油) (0.22 kg-CO ₂ /CFRP-kg) (0.13 kg-CO ₂ /CNG ボンベ-kg) ※A 地点—茨城県 (500 km) 2t-40 本/車として | トンキロ法で試算。 輸送トンキロ当り燃焼使用量：0.9680/トンキロ 輸送に係る CO ₂ 排出係数：0.0687 kg-CO ₂ /MJ | |
| | RCF 回収 | 前処理 | CNG ボンベにグラインダーで CFRP を回収、カッティング (1/4) 電力 (4.08kwh/RCF-kg) | ・グラインダー電力 ・集塵機電力 |
| | | 燃焼 | LP ガスを熱源に、CFRP を燃焼。 電力 (ブロワ 48.05 kwh/RCF-kg、 排ガス処理 168 kwh/RCF-kg) LP ガス (45 kg/RCF-kg) | ・LP ガス使用量 ・各種ブロア電力 ・排ガス処理設備電力 |
| | | 樹脂気化 | エポキシ樹脂気化に伴う CO ₂ 当量 1.17 tCO ₂ /t (エポキシ樹脂 (分子量 255 g/mol) が 34% 含浸。(CFRP1 kg 当たり)) | ・完全燃焼で CO ₂ (分子量 44 g/mol) が 12mol 発生。 12×44=528 ・エポキシ樹脂処理に伴う CO ₂ 発生量 0.34 kg×528/255=0.704 kg ・炭素繊維回収量 0.6 kg として、0.704 kg/0.6 kg=1.17 tCO ₂ /t |
| | 切断 | RCF を裁断 電力 (12kwh/RCF-kg) | ・裁断機電力 ・集塵機電力 | |
| | RCF 製品化 | コンパクト 2 軸押出機で製造 (電力) ※RCF 混合率 25% | ・2 軸押出機電力 | |
| | 輸送 | 製品出荷 ペレットの出荷 (製品 1t) | ・トンキロ法で試算。 | |
| 埋立処分 | 回収 | 廃棄物輸送 原料回収と同程度に設定 | ・トンキロ法で試算。 | |
| | 廃棄 | 埋立処分 CFRP の埋立処分 ※アルミ内筒の除去手間は未考慮 | ・ゼロカウント | |
| 新規製造 | 調達 | 原料調達 原料の運搬 (製品 1t) ※原料回収と同程度に設定 | ・トンキロ法で試算。 | |
| | 新規製造 | 新規製造 CF 製造燃料 (合計 207.3MJ/製造 kg) (内訳/副生油・副生ガス 0.20、 石炭 154.61、重油 44.55、液化石油ガス 5.09、ナフサ 1.45、天然ガス 0.49、LNG0.87) 同電力 (5.41kwh/製造kg) | ・製品製造kg 当たり (LCA 日本フォーラムより) | |
| | 輸送 | 製品出荷 CF ボビンの出荷 (製品 1t) ※原料回収と同程度に設定 | トンキロ法で試算。 | |

検討の結果、PC-25RCF1t 製造 (1.76 t-CO₂) と、埋立+新材 1t 製造 (22.56 t-CO₂) で、リサイクルは新材製造の 7.8% 程度で可能という結果となった。RCF 利用の製品化

は、ユーザーから、新品 CF と遜色がないとの評価を得ており、利用事業が実現すれば、環境負荷低減の効果は高い。

表 5.6 LCA の評価結果（埋立処分及び新材製造との比較）

| 類型 | 内容 | 電気 | ガス | 燃料 | 原単位 | 備考 | 試算値 | |
|-----------|---------|-------|-----|------|---------|------|---------------------------|-------|
| 実証事業ケース | 回収 | 原料回収 | - | - | 3.66 | 0.13 | 1,000 トンキロ当り (CNG ボンベ 2t) | 0.027 |
| | RCF 回収 | 前処理 | 1.0 | - | - | 0.02 | RCF20 kg生産 | 0.01 |
| | | 燃焼 | 54 | 11.3 | - | 1.31 | RCF20 kg生産 | 0.75 |
| | | 樹脂気化 | - | - | - | 1.17 | エポキシ樹脂の CO2 当量 | 0.02 |
| | | 切断 | 3.7 | - | - | 0.09 | RCF20 kg生産 | 0.29 |
| | RCF 製品化 | コンパクト | 980 | - | - | 0.60 | PC-25RCF、800 kg生産 | 0.60 |
| | 輸送 | 製品出荷 | - | - | 3.66 | 0.13 | 1,000 トンキロ当り (CNG ボンベ 2t) | 0.065 |
| 実証事業ケース合計 | | | | | | | 1.76 | |
| 埋立処分 | 回収 | 廃棄物輸送 | - | - | 3.66 | 0.13 | 1,000 トンキロ当り (CNG ボンベ 2t) | 0.027 |
| | 廃棄 | 埋立処分 | - | - | - | 0 | ゼロカウント | 0 |
| 新規製造 | 調達 | 原料調達 | - | - | 3.66 | 0.13 | 1,000 トンキロ当り (CNG ボンベ 2t) | 0.065 |
| | 新規製造 | 新規製造 | 5.4 | - | 207.3MJ | 22.4 | 製品生産 (LCA 日本フォーラム) kg生産当り | 22.4 |
| | 輸送 | 製品出荷 | - | - | 3.66 | 0.13 | 1,000 トンキロ当り (CNG ボンベ 2t) | 0.065 |
| 埋立+新規製造合計 | | | | | | | 22.56 | |

(注) 単位/電気 (kwh)、ガス (kg)、燃料 (GJ)、原単位 (t-CO2/t)、試算値 (t-CO2)

第6章 事業化可能性等の検証

原料回収、製品評価、需要評価に関する情報を集約し、その上で、実用化に向けた一連のシステムの検討や、それに基づく事業化可能性の評価を行う。さらに、事業計画案の作成を行う。

具体的には、原料回収システム、製品評価、需要評価を踏まえて、実用化に係る総合評価を行う。

6.1 原料回収システム

CNG ボンベに関して、全国からの回収網の形成や、航空機内装端材やその他に関する原料回収・調達に関する排出元の意向を把握し、事業化の前提となる原料回収システムの構築に係る課題の把握と対応の方向性について検討を行う。

検討の結果、国内及び海外からの原料回収の可能性は、国内 106t/年、海外 648t/年程度と想定している。事業の初期段階の立ち上げには、十分な数量と理解している。

表 6.1 原料回収の想定量

| 種類 | 内訳 | 回収量 | 回収根拠 | 回収重量 |
|--|--|--------------------|--|--------------------|
| [国内] CNG ボンベ (CFRP 製、GFRP 含む) | ①A 社 (バス解体) ②B 社等 (くず化業者他) | ①200 本 ②50 本 | ①取引実績の 2 倍 ②取引実績と同程度 | ①12t/年 ②2t/年 |
| 水素燃料ボンベ | C 自動車メーカー | 150 本 | 取引実績の 3 倍 | 15t/年 |
| 航空端材 | D 重工 ※先行連携分 | (企業データによる) | D 社の発生量全量 | 32t/年 |
| プリプレグ端材 (航空機系) | D 重工 ※先行連携分 | (企業データによる) | D 社の発生量全量 | 45t/年 |
| [海外] ①風車ブレード ②航空機端材 | ①E 社/風車製造 (台湾系) ②F 社/航空機メーカーの廃棄物処理指定会社 (米国) | ①216t/年 ②432t/年 | ①中国生産拠点との連携 (コンテナ輸送) ②米国企業との連携 (コンテナ輸送) | ①216t/年 ②432t/年 |



図 6.1 CNG ボンベの保管状況



図 6.2 CFRP 前処理・回収

6.2 製品評価

利用需要先のメーカーの評価が得られた製品については、ペレット製品化の技術や、ペレットレシピの開発の結果について評価を行う。

RCF 性状及び、ペレット品質の把握を行った結果、競合他社品の機械的強度と遜色がないという結果が得られた。

(1) RCF (単繊維) の強度

RCF (T300 グレード) の単繊維は、名古屋大学田邊研究室に分析依頼の結果、表に示すとおり、550°Cの高温処理(※)を行っても、強度 2.6GPa であり、80%以上の強度を維持している。コンパウンドを行った場合、機械的性能は新品 CF 使用と差異がない。

(※回収繊維は結束力が強く、炭素繊維の劣化が始まる 500°C以降の処理を加えなければ測定困難)

表 6.2 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°C30分) | 7.1 | 0.4 | 1.96※ | 0.61 |
| RCF (550°C30分) | 6.94 | 0.38 | 2.6 | 1 |

※残存マトリックスの影響大

(2) ペレット (再製品) の品質

PC-20RCF、PC-25RCF のコンパウンド品の物性測定は、ダイセルポリマーに分析依頼の結果、表のとおり、今回の試作品 PC-25RCF は曲げ弾性率 17Gpa (※) をクリアし、新品材に匹敵している。

(※PC-20~25CF 系は、16~18Gpa の曲げ弾性率を要求される)

さらに、引張強度、曲げ強度、シャルピー衝撃値は、新品品と同レベルで遜色ない。なお、淀川ヒューテックとは、既に取り引に係る見積段階に移行している。

表 6.3 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 ① | PC-20RCF ② | PC-20RCF ③ | PC-25RCF |
|----------|-------------|-----------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| MFR | ISO 1133 | 300℃ /2.16kg | g/10min | 7.5 | 7.0 | 5.6 | (測定中) |
| MFR | ISO 1133 | 300℃ /5kg | g/10min | 21.4 | 22.0 | 17.9 | (測定中) |
| 引張強度 | ISO 527 | - | Mpa | 120.9 | 125.1 | 129.9 | 136.8 |
| 引張呼び歪み | ISO 527 | - | Mpa | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.3 |
| 曲げ強度 | ISO 178 | - | Mpa | 172.9 | 180.8 | 197.7 | 201.9 |
| 曲げ弾性率 | ISO 178 | - | Mpa | 11175 | 11700 | 13872 | 17573 |
| シャルピー衝撃値 | ISO 179/1eA | 23℃ | kJ/m ² | 6.72 | 6.35 | 6.3 | 5.87 |
| 荷重たわみ温度 | ISO 75 | 1.80MPa | ℃ | 148.3 | 146.4 | 147 | 147.4 |
| 密度 | ISO 1183 | - | g/cm ³ | 1.265 | 1.264 | 1.27 | 1.311 |

6.3 需要評価

製品化の用途を明確とした上で、当該用途の製品化に係る需要を把握する。さらに、将来の半導体製造治具、搬送用ロボットアーム等への使用拡大の可能性についての検討を行う。

実証を通じて、ペレット、押出材、不織布などの中間製品の開発が進んだ。まず、25 mm RCF を回収し、それを利用してペレット、押出材、不織布などの中間製品を作ること自体が世界初となる。また、新品材に匹敵する品質が担保されることもお墨付きいただいた。

今後は、長繊維（繊維を切らない）以外のチョップド、ミルド利用の用途については、全て代替の可能性があると考えており、それらは、輸送用機器、製造機器、土木・建築分野のいずれも照準しうると考えている。表に示す 2020 年以降は、2040 年頃に向けては 40 万 t 程度の利用がされるとの予測もある。製品中の CF 混合割合を考慮すると、100 万 t 以上の製品化需要が生じてくると考えている。

但し、今後は、需要家と連携の上で、利用原料、製品品質、製品数量、安定供給などの観点で、事業化の連携・調整を行う必要がある。

表 6.4 CF の用途別需要予測

| 分野 | 明細 | 2009年 | 2010年 | 2011年 | 2015年 | 2020年 | 伸び率 |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|------|
| 宇宙航空 | 民間航空機 | 2,940 | 3,381 | 3,888 | 6,800 | 73,687 | 1.15 |
| | その他 | 2,271 | 2,407 | 2,552 | 3,221 | 4,311 | 1.06 |
| | 小計 | 5,211 | 5,788 | 6,440 | 10,022 | 17,989 | 1.13 |
| スポーツ 他 | スポーツ | 4,110 | 4,129 | 4,275 | 4,629 | 5,110 | 1.02 |
| | その他 | 1,641 | 1,838 | 2,058 | 3,239 | 5,708 | 1.12 |
| | 小計 | 5,751 | 6,030 | 6,335 | 7,868 | 10,819 | 1.06 |
| 産業用 | 風車 | 6,330 | 7,786 | 9,577 | 21,920 | 61,711 | 1.23 |
| | 圧力容器 | 1,140 | 1,368 | 1,642 | 3,404 | 8,470 | 1.20 |
| | 自動車 | 1,620 | 1,863 | 2,142 | 4,569 | 15,096 | 1.23 |
| | その他 | 9,933 | 10,728 | 11,586 | 15,762 | 23,160 | 1.08 |
| | 小計 | 19,023 | 21,745 | 24,947 | 45,655 | 108,437 | 1.17 |
| 合計 | | 29,985 | 33,563 | 37,721 | 63,545 | 137,245 | 1.15 |

(出典) サプライチェーンを見据えた高性能繊維およびその活用・加工技術の実態調査
(東レ経営研究所) より

6.4 事業化に係る総合評価

事業化に向けて、原料確保・回収、実規模での処理方法(CFRP 再生処理、RCF 切断・保管)の確立、RCFの製品化レシピの開発と、利用需要先からの評価、用途に応じた需要規模、一連のコスト把握などをもとに事業化に係るコスト評価を行い、実施可能性についての総合判断を行う。

6.4.1 検討の枠組み

事業化の検討は、実証事業で対象とした「ペレット製造システム」のみならず、自主開発を通じて構築してきた「押出材」、「不織布」の製造についても併せ持つ、総合的なリサイクル事業化を対象に行うものとする。

なお、本格事業は、3年後に計画することを考えているが、1年目、2年目はそれぞれ下記のような対応を前提に、検討を行うものとする。

- 事業化は、当面は、ペレット製造システムを推進するとともに、これまで自主開発を進めてきた押出材、不織布なども照準した総合的な枠組みで検討を行う。
- 具体的には、次年度以降に、事業投資を行い、ペレット、押出材、不織布の用途ごとの更なる試作開発及び、需要先との具体的な連携を行い、原料ソース及び、成果物(製品)の品質目標の見極めを行う。
- その後、量産試作を進め、需要先の確定の後、本格事業への移行を想定する。
- 現在、既に、各方面から共同研究・検討の依頼が生じつつある状況にある。

6.4.2 事業スキームについて

事業スキームは、次図のように検討している。

- 原料は、「使用済材」のみでなく、「成形端材」、「成形工程中発生端材(プリプレグ)」など、多様な原料ソースを対象にそれぞれ精度の高い回収プログラムを標準化し、そのアウトプットを汎用グレード、T700、T800に分離して回収する。

- 全ての事業は、同列に対応することを意図するものではなく、量産試作を通じて、需要先との連携を見極め、準備の整ったものから製品化用途の拡大を図るといった手順を想定している。

なお、事業スキームに係る対応状況は、下記のようになっている。

- 成型品端材、使用済回収品は、従来からリサイクル対象となっているが、今回はプリプレグにまで回収源を拡げ、回収条件を確立した。
- それぞれの回収源は、大きく3レベルの回収温度プログラムに類型できる。
- プリプレグは、硬化処理の終わった成型品に対し、硬化温度での前処理が必要であるが、回収燃焼炉の中の温度処理プログラムの追加により、硬化品と同等の品質の確保を可能にした。
- 発生源、発生形態に関わらず回収された RCF は、T300 クラスの汎用グレードと、T700、T800 の高強度グレードに層別できる。コンパウンド製品レベルであれば、これらの3つのグループへの層別と標準化で製品の品質は安定してくると考えられる。
- これらの開発品については、引張強度とシャルピー衝撃値、及び曲げ強度、曲げ弾性率は、T300 と T700、T800 で、それぞれ特徴的な値を示すものと考えられる。
- 現在、残存繊維長（加工後）を1~10 mm以上に長く保ち、Vf を40~60%まで増加させたLCP、PESマトリックスのCFRTP板状押出材を開発中である。
- 今回の開発過程でRCFの（リサイクル品ならではの）特徴を見出すことができた。今後は、RCFが新品材に対し、特徴的な物性を持ちうる製品群を見極め、用途開発を推進する予定とする。

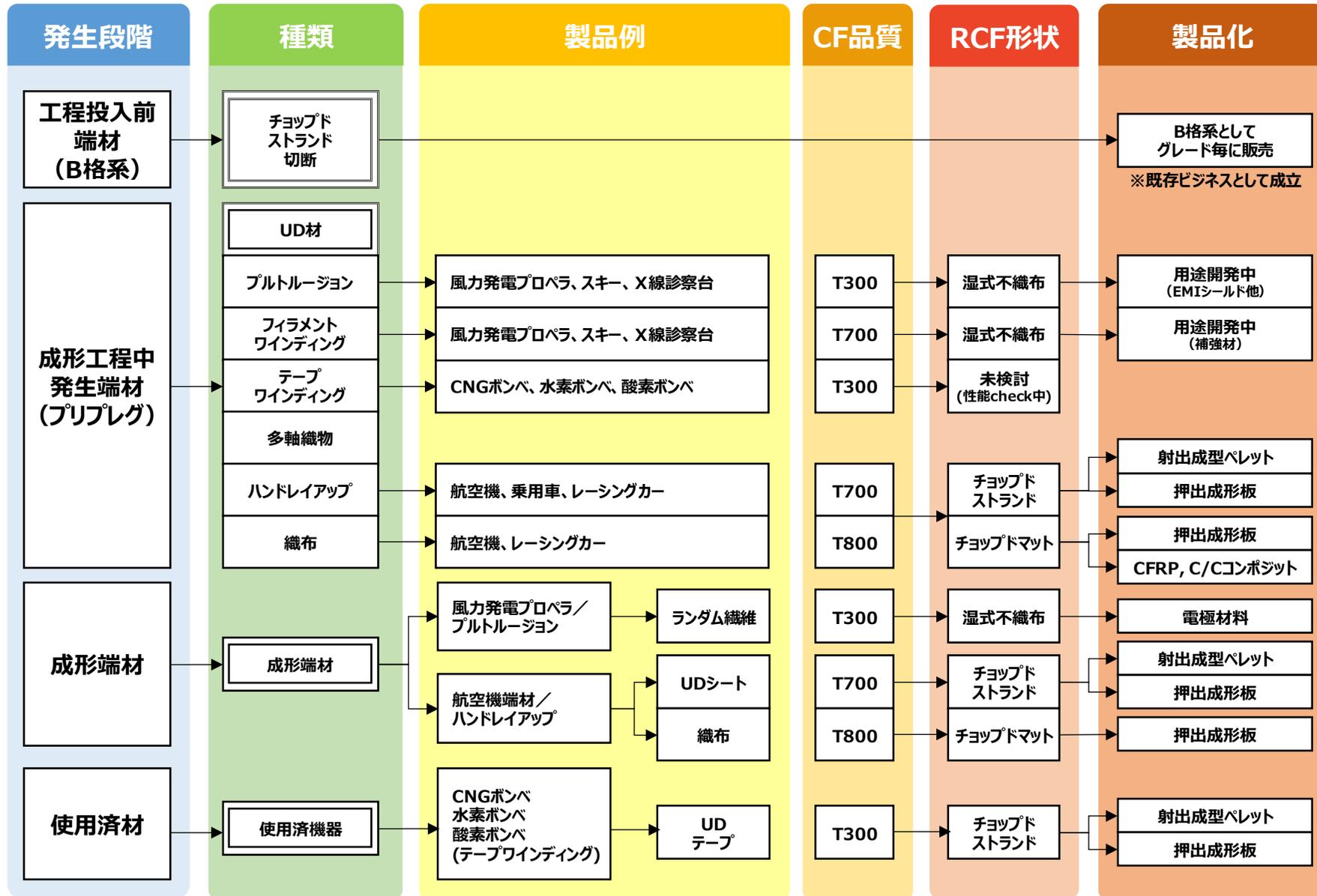


図 6.3 事業内容に係る構想

6.4.3 事業化の計画条件

- ① はじめに、ペレット製造システムの構築を考慮し、原料回収、回収分別、コンパウンドの一連の工程に要する総括原価の検討を行った。その結果をもとに、具体的な計画条件を見極め、損益分析や、キャッシュフロー分析を行うこととした。
- ② 計画の枠組みは、引き続き2社が連携の上で計画条件を検討し、事業投資に当たっては環境省の事業補助（設備費1/2）を考慮の上で、事業化の検討を行った。

表 6.5 事業化の計画条件

| 項目 | 内容 |
|--------|---|
| 1 事業内容 | ①ペレット（樹脂メーカーとのタイアップ）、②押出材（構造材の開発）、③不織布 |
| 2 原料 | CNG ボンベ、水素燃料ボンベ、航空端材、プリプレグ端材、海外品（中国、米国） |
| 3 事業規模 | 製品化；100t/月（目標）。（例）ペレット 20t、押出材 50t、不織布 30t 等 |
| 4 事業用地 | 約 4,000 m ² （当面）－兵庫県内 |
| 5 事業主体 | 富士加飾株 ←リーテムは出資等による連携を想定 ※関係メンバーは、引き続き事業支援を継続。 |
| 6 投資規模 | 3 億円（想定） ・用地（自社）、・建物、・設備（燃焼炉×3 系列、二軸押出機×4 系列等） |
| 7 資金確保 | ①環境省の補助金の活用（設備費の1/2） ②日本政策金融公庫（裏負担分；銀行との協調融資も考慮） |
| 8 処理許可 | 廃棄物処理業ではなく、有価買取方式で事業化 |

事業の採算性を評価するにあたり、次のベースケースをもとに検討を行う。

表 6.6 事業評価の前提条件（ベースケース）

| 項目 | 主な内容 |
|---------------|---|
| 計画設備 | |
| 1. 計画施設規模 | 製品化数量 100t/月（目標） 内訳；ペレット 20t/月、押出板 50t/月、不織布 30t/月 |
| 2. 受入日数 | CFRP 含有量；ペレット 25%、押出板 40%、不織布 90% |
| 3. 稼働時間 | 年間 300 日 |
| 4. 稼働率 | 24 時間 1 年目 20%、2 年目 50%、3 年目以降 100%で算出 |
| 原料回収単価 | |
| 1. 購入単価 | 原料をゼロ円として購入を行う。（廃棄物処分費は徴収しない） |
| 2. 収集運搬費用 | 排出側で保管を行い、トラック積載量など効率的な運搬を考慮する。 |
| 製品売却収益 | |
| 1. ペレット | 1,000 円/kg |
| 2. 押出材 | 2,000 円/kg（LCP） |

| | |
|-------------|--|
| 3. 不織布 | 2,500 円/m ² |
| 4. アルミニウム | CNG ボンベの内管 ; 118 円/kg (27 kg/本) |
| 初期費用 | |
| 1. 敷地費用 | 富士加飾(株)所有の土地のため、対象外とした。 |
| 2. 設備補助金 | 環境省「平成 31 年度、32 年度に参加炭素排出抑制対策事業費等補助金 (省 CO2 型リサイクル等高度化設備導入促進事業)」による 1/2 補助を想定。 施設建設費全額を長期借入金とした。 |
| 3. 資金調達方法 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 資金名称 ; 日本政策金融公庫「新事業育成資金」 ※公庫の「成長新事業育成審査会」で認定を受ける必要がある。 ・ 融資条件 ; 新規性、成長性のある事業を始めて 7 年以内の事業 ・ 融資限度額 ; 直接貸付 6 億円、設備 20 年以内 (長期金利) ・ 利率 ; 上限 3% (特別利率 1.11~0.3% ; 10 年以内) ・ 返済及び返済猶予期間 : 長期金利—設備 20 年以内、短期金利—7 年以内 (いずれも据置最長 2 年) ➡返済期間は、2 年据置、7 年返済、返済方法は元利均等とした。 |
| 4. 償却率 | 建物 : 30 年 (定額法) 設備 : 7 年 (定率法) 付帯工事 : 15 年 (定率法) |
| 人件費 | |
| 1. 人員 | 社長 + 技術者 3 名 + 作業員 5 名 (3 直) × 4 班 + 事務 2 名 = 26 名 最大 26 名 |
| 2. 福利厚生費 | 人件費の 20%とした。 |
| 諸税 | |
| 1. 法人税等 | 以下の兵庫県小野市の税率を用いた。 法人税 : 税引前当期利益 × 23.2% (国税) 法人県民税 : 均等割 55 千円 + 法人税割 4.0% (兵庫県) 法人市民税 : 均等割 130 千円 + 法人税割 12.1% (兵庫県小野市) 法人事業税 : 400 万円未満 × 3.4%、400 万円 ~ 800 万円 × 5.1%、800 万円超 × 6.7% (兵庫県) 固定資産税 ; 土地・建物・設備 × 1.4% (兵庫県小野市) 都市計画税 ; 土地・建物 × 0.3% (兵庫県小野市) |

表 6.7 原料回収の計画 1 (日本国内の回収可能量)

| 種類 | 内訳 | 回収量 | 回収根拠 | 回収重量 | 収集費用 |
|------------|----------|-------|------------------|--------|---------|
| CNG ボンベ | A 社 | 200 本 | 取引実績 90 本の 2 倍程度 | 12t/年 | 81 円/kg |
| | B 社他 | 50 本 | 取引実績 50 本と同程度 | 2t/年 | |
| 水素ボンベ | 自動車メーカー系 | 150 本 | 取引実績 50 本の 3 倍程度 | 15t/年 | 36 円/kg |
| 航空端材 | 重工系 | - | 企業データ | 32t/年 | 27 円/kg |
| プリプレグ (不良) | 重工系 | - | 企業データ | 45t/年 | 22 円/kg |
| 合計 | | | | 106t/年 | |

(注) 収集費用は、対象物 1 kg 当たりの数値 (CFRP1 kg 当たりではない)

表 6.8 原料回収の計画 2 (海外の回収可能量)

| 種類 | 内訳 | 回収量 | 収集費用 |
|--------|----|-----------------|-----------|
| 風車ブレード | 中国 | 18t/月 216t/年 | 24.3 円/kg |
| 航空端材 | 米国 | 36t/月 432t/年 | 27.9 円/kg |
| 合計 | | 54t/月 648t/年 | |

(注) 収集費用は、対象物 1 kg 当たりの数値 (CFRP1 kg 当たりではない)



図 6.4 事業用地と配置図

表 6.9 事業化及び設備投資のステップ (大枠)

| 項目 | 2019 年 | 2020 年 |
|--------|--|--|
| 技術システム | <ul style="list-style-type: none"> 用途開発の継続 燃焼炉の開発 (実規模・熱利用効率大) | <ul style="list-style-type: none"> 事業開始 (小規模) ※2021 年大規模化 |
| 事業システム | <ul style="list-style-type: none"> 用地確保 (農用地転換)、整備 資金調達 環境省補助金の申請 (その 1) | <ul style="list-style-type: none"> 環境省補助金の申請 (その 2) <ul style="list-style-type: none"> 海外調達の具体化 |
| 事業投資 | ①設備系 <ul style="list-style-type: none"> 燃焼設備 (1) 二軸押出機 (1) + 既存 (1) ペレタイザー (1) 各種試験装置 (1) ②建築その他 <ul style="list-style-type: none"> 用地造成 工場棟、倉庫の構築 | ①設備系 <ul style="list-style-type: none"> 燃焼設備 (2) 合計 3 系列 二軸押出機 (2) 合計 4 系列 ペレタイザー (1) 合計 2 つ ②建築その他 <ul style="list-style-type: none"> とくになし |

表 6.10 事業採算性の検討項目

| | 項目 | 内容 | 備考 |
|-------------|--------|---|--------------------------------------|
| 収入 | 廃棄物処分費 | ゼロ | 有価買取。廃棄物処分としない。 |
| | 製品販売費 | ペレット、押出材、不織布 | 3 製品の加工・販売 |
| 支出 | 原料回収費 | 国内、海外(中国、米国) (30%→50%→70%→100%) | CNG ボンベ、水素燃料ボンベ、航空端材、プリプレグ端材、風車ブレード等 |
| | 設備運転費 | RCF 回収(燃焼)、製品化 | 電気、ガス、水道、材料費、消耗品等 |
| | 補修費 | 補修分 | 機械設備の補修 |
| | 人件費 | 社長、技術・営業、作業スタッフ、事務 | 3 年目に体制構築完了。 |
| | 福利厚生費 | 従業員向け | 人件費×20% |
| | 一般管理費 | 営業管理他 | 売上×15% |
| | 減価償却費 | 建物、設備 | 建物 38 年、設備 9 年 <u>(※環境省補助を考慮)</u> |
| 営業利益 | | (収入-支出) | |
| 支払利息 | | 借入返済 (※日本政策金融公庫、銀行連携) | |
| 税引前当期利益 | | (営業利益-支払利息) | |
| 税金等 | | 法人税、法人県民税、法人事業税、法人市民税、固定資産税、都市計画税 (※兵庫県小野市を想定) | |
| 当期利益 | | (税引前当期利益-税金等) | |
| 営業キャッシュフロー | | (税引前当期利益+減価償却費-税金等) | |
| キャッシュフロー累計 | | (前期キャッシュフロー累計+当期営業キャッシュフロー) | |
| IRR (内部収益率) | | ※事業判断の参考数値 (単位：%) | |

(1) 収入の内訳

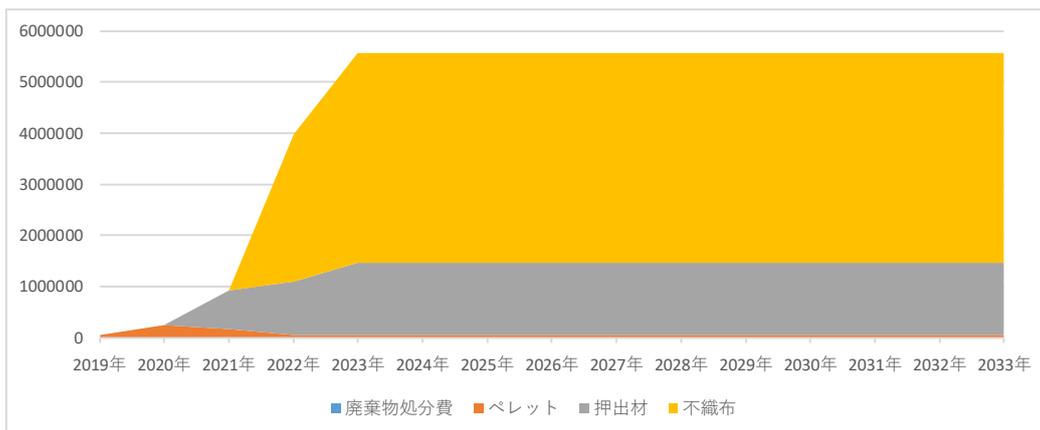


図 6.5 収入の内訳 (経年変化) (単位：千円)

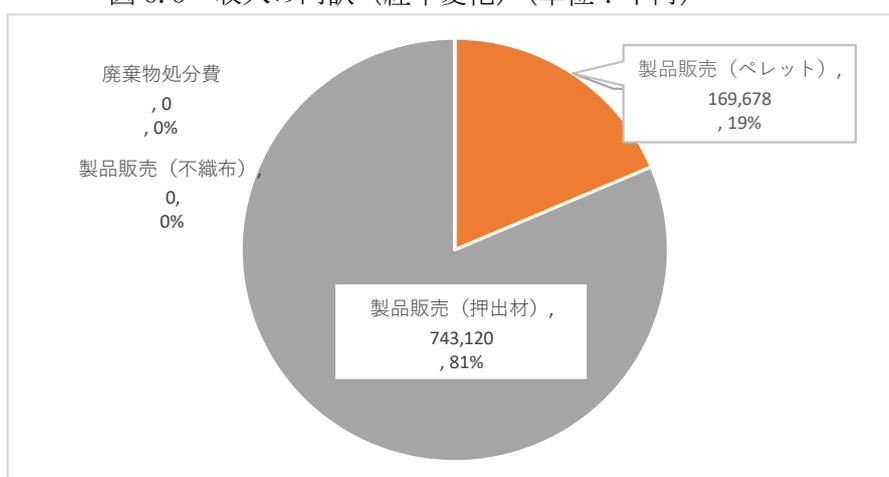


図 6.6 収入の内訳 (3年目) (単位：千円)

(2) 支出の内訳

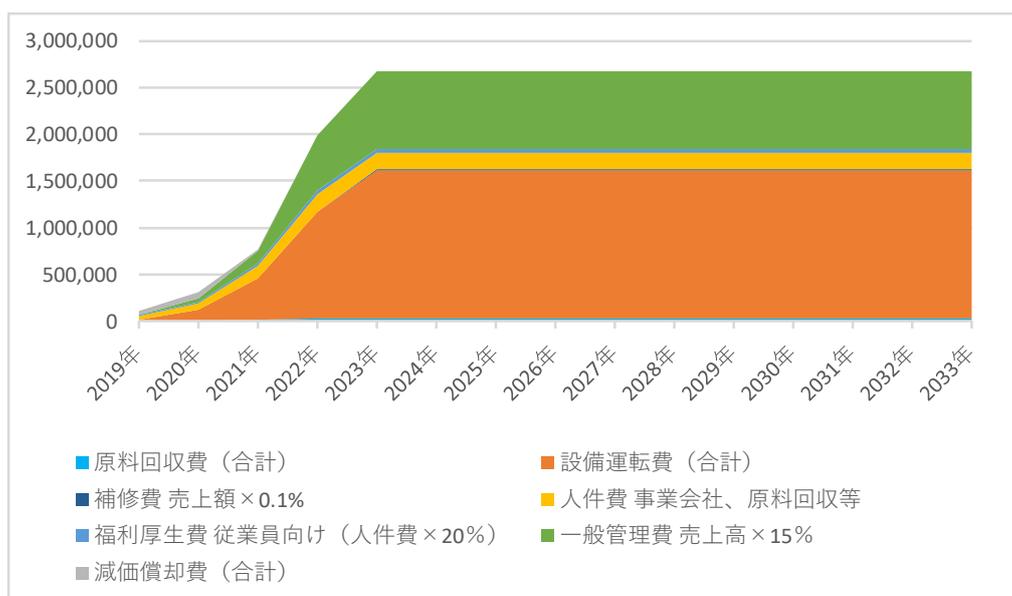


図 6.7 支出の内訳 (経年変化) (単位：千円)

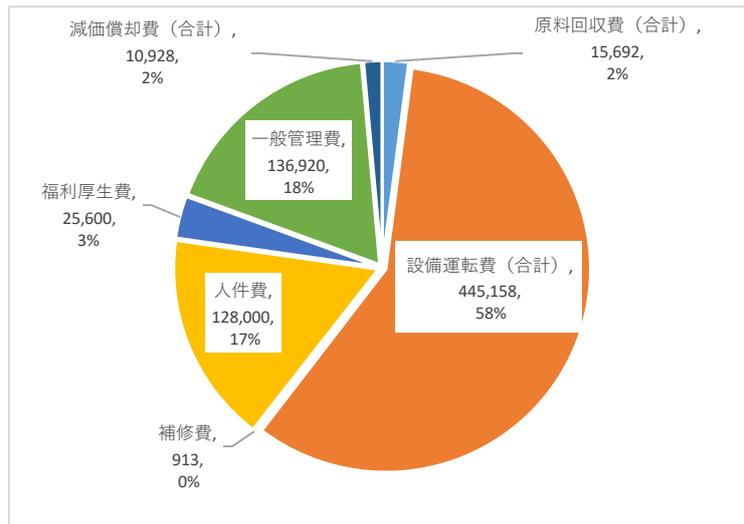


図 6.8 支出の内訳 (3 年目) (単位：千円)

6.4.4 事業性の確保に向けた課題と、今後の取組目標の明確化

事業性の評価は、投資回収年数、税引き後利益単年度黒字化年数、内部収益率 (IRR、4 年) の 3 つの指標を用いた。

なお、環境省補助金については、付与いただく前提で検討を行った。

- ① 評価指標のいずれも、良好な結果が得られた。特に、押出材、不織布は事業効率が高い。当面 1~2 年は、樹脂メーカーと連携したペレット製品化を主体に計画するが、その後、より付加価値の高い押出材、不織布の市場化ができれば、売上 50 億円超を見込める持続性の高い事業となる。押出材、不織布応用製品は、海外競争力が期待でき、さらに売上げを拡大したい。
- ② 原料回収の計画対象は、海外品の数量が多い。しかしながら、今後、量産化の成果が得られれば、国内の処分物 (主に埋立、電炉処理等) からの切替えによる受入量の拡大に容易に結びつきうるものと考えられる。
- ③ ペレット製造化は、目標とした上市に近い成果を既に得ている。今後は、引き続き、ペレット⇒押出材⇒不織布などの需要・企業連携の見極めを行う前提で、当面は「量産試作」として位置付け、安定稼働が担いうる事業投資に移行する必要がある。
- ④ 事業の立ち上げには、需要家との製品品質をめぐる調整など時間を要する。そのため、初期投資をできるだけ抑制しつつ、安定的な設備導入と、借入抑制を図るため、環境省による設備費の 1/2 補助金の取得は、事業の安定化に寄与する重要なテーマであると考えられる。

表 6.11 事業性の評価結果 (環境省補助金；設備額×1/2)

| 指標 | 数値 |
|-----------------|------|
| 投資回収年数 | 4 年 |
| 税引き後利益単年度黒字化年数 | 3 年目 |
| 内部収益率 (IRR；4 年) | 63% |

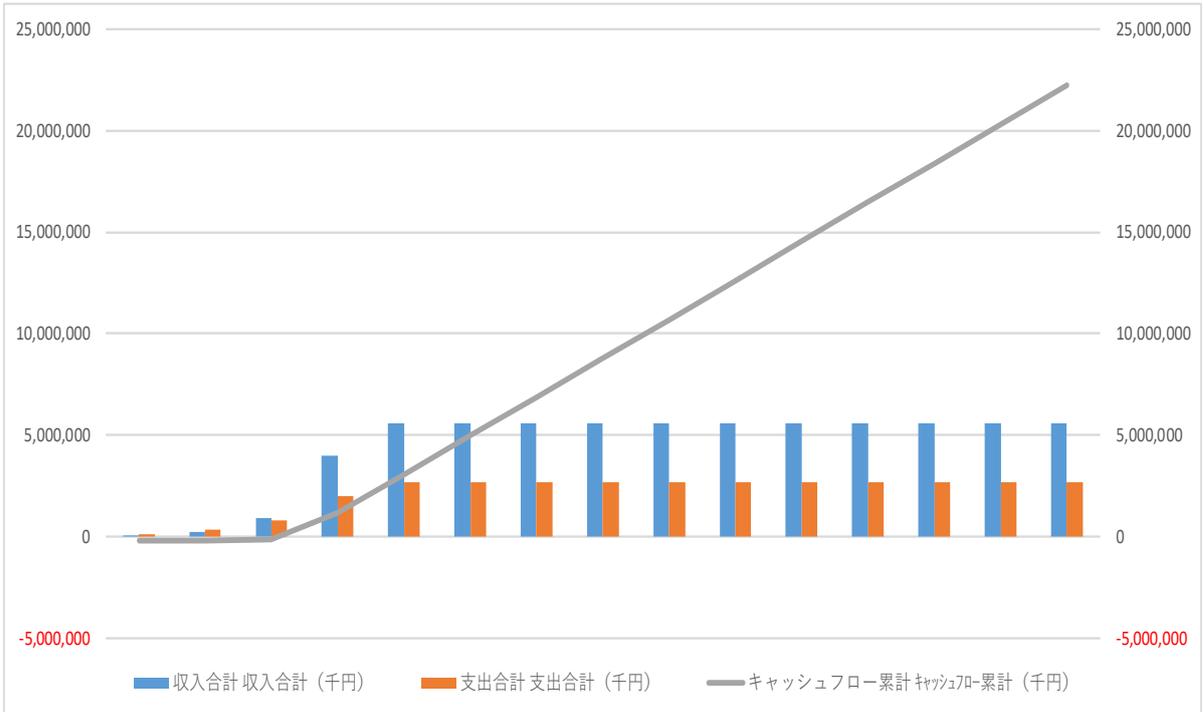


図6.9 収入と支出及びキャッシュフロー累計（単位：千円）

第7章 本事業のまとめと今後の見通し

本事業のまとめとして、実現可能性、横展開の可能性及び今後の見通しについて検討を行った。

7.1 実現可能性

7.1.1 経済的視点

原料回収・調達は、市中回収物（CNG ボンベ）、工程内の端材（航空機端材）、プリブレグ（不良品）などを対象に、企業連携の上で、国内、海外を含め当初段階の数量の用途がたつとの結果が得られた。

事業化は、ペレット、押出材、不織布などへの展開を想定するが、対応規模については、引き続き原料確保の方法（秘密保持も考慮）、実規模での処理方法の確立、需要家と連携した後の利用品質、利用量などの見極めで決まってくると考えている。

今後は、実現可能性等の検討で想定した兵庫県内での整備を想定した上で、事業投資規模を見極め、工場レイアウト、処理動線、施設管理方法、人員配置の検討を進める予定とする。

7.1.2 技術的視点

RCF（リサイクル炭素繊維）の回収装置（熱処理）では、炭素繊維表面が酸化せず、かつ、低環境負荷の条件で束状でのRCFの回収ができ、新品材と同等の性能を発現するものが回収できるという結果が得られた。

束状のRCF回収後、連続・定量供給、押出成型などの製品原料化において、RCFの価格は新品の1/2～1/3と低廉で付加価値の高い再製品（コンパウンド）の製造が可能となると考えている。

既に、半導体製品治具、搬送ロボットアームなどの製品化に向けて、実ベースの品質評価をいただき、今後は、取引条件としての利用原料、利用品質、利用数量、安定供給などの見極めと、詳細な検討の段階に移行することになる。

今回の実証は、短繊維（1mm～6mm）による回収・利用のみならず、長繊維（25～50mm）の回収・利用への拡張性などの可能性が広がるという結果が得られたことで、リサイクル容易な金属素材に対して、完全なリサイクルシステムが構築しうるものとなることで、金属材料に対し圧倒的な軽量化による、CO2低減を促進しうることが考えられる。

7.2 横展開の可能性

7.2.1 経済的視点

本技術システムの開発は、富士加飾が所有するCFRP回収技術システム（平成29年6月8日特願2017-113772／リサイクル炭素繊維収束体、およびその製造方法）を活用して実施したものである。

事業の横展開に向けては、㈱リーテムとの連携の下であれば、富士加飾㈱の特許の通常使用権の許諾の範囲を拡大し、他の事業者や、事業メーカー、利用メーカーなどのシステム関与者に対し、普及拡大を図るなどを想定している。

新たな展開は、将来の需要の伸びや、利用用途の拡大などの動向を踏まえて、商品、技術開発を推進する予定としている。

7.2.2 技術的視点

束状での RCF の回収技術は、長繊維 CFRTP の製造技術への拡張に至る「KEY となる技術」である。それをを用いて、今後、循環型製品普及モデルとするには、更に高性能かつ品質安定性の高い市場への採用が不可欠となる。

また、様々な需要家との連携を踏まえて、製品製造レベルでの事業対応が求められることになり、それに向けた事業展開の準備も必要となるものと考えている。

そのため、今後の出口戦略としては、新たな技術開発を継続し、引き続き金属材料の代替利用に向けて、量産加工性、商品化に向けた加飾性などの検討を行う。

なお、今後の出口戦略としては、以下のとおり、新たな技術開発を継続して行うなどが考えられる。

- ① リサイクル長炭素繊維含有量 50%以上のコンポジットによるアルミ、マグネシウム代替材料の開発（比重：1.8）
- ② 新しい概念の熱可塑性長繊維コンポジット材料と加工方法の開発（自動車、航空機）
※ USA、EU の CFRP、CFRTP の二次加工分野と比較しても、技術の優位性が高い。
- ③ CFRP 成形時に加工された塗装皮膜、メッキ、ガラス繊維等の除去法の開発、あるいは、少量の残留物を含有するリサイクル炭素繊維を用いた汎用コンパウンドの開発と商品化（一般産業資材、スポーツ用品）
- ④ リサイクル材と新品材のハイブリッド化による CFRP、CFRTP の適用部材の拡大（軽量化による省エネ、CO₂ 発生削減）一積層の上下に新品材を利用
- ⑤ 成形品への加飾技術の開発（仕上げの表面塗装が省略する低 VOC 加飾法に IMR 検討）

7.3 今後の見通し

今回の成果は、25 mm 繊維長の RCF による世界初のコンパウンド実験の成功ということが大きい。つまり、RCF は、マトリックス樹脂（アモルファスカーボン前駆体）を残し、サイジング材としてサイドフィーダーに供給し、連続押し出しが可能となったことで、ペレット、押出材等への利用の可能性が広がったことになる。

また、技術システムの革新については、燃焼システムの自動化については、新しい混燃バーナーシステムを導入し、1つのバルブで、LP ガスとリサイクル材から発生するガスの完全燃焼状態を保つようにガス流路を形成したことで、事業化の見通しが得られる結果となった。具体的には、手動バルブで安定したプログラム燃焼が可能であることを確認したのち、手動バルブの機能を自動化した。さらに手導で昇温、定温保持を行っていた焼成プログラムを多段プログラム式制御器の導入で、標準化した温度プログラムで

再現性良くリサイクル回収ができるようになった。大型プラントや原子力施設では当然行われている制御ではあるが、同様の制御方式をリサイクルシステムに導入した意義は大きい。

リサイクル対象となっている回収材は、成形後の端材と使用済み部材でありプリプレグは対象となっていない。上記の自動化運転を行うと、プリプレグの硬化反応もプログラムに組み込むことができるため、ハンドリングが困難なプリプレグ回収材から最終熱処理品としてリサイクル炭素繊維が取り出せる。これにより、国内で未着手のプリプレグ材も回収対象になり、事業化判断の大きな材料になった。

一方、事業化の成否は、原料回収量、RCF 回収量をバランスよく市場に流通させることが必要であり、先発企業が苦戦している「炭素繊維販売のみ」ではなく、2次加工あるいは、さらなる川下分野への展開が重要となる。

今回の実証事業を通じて、リサイクル工程の開発とサンプル提出、市場調査の段階から、RCF の商品開発ステージへステップアップすることが可能となった。つまり、RCF の商品化について多くの可能性を見出しているが、多くのポテンシャルカスタマーに対し、試行錯誤の要素を含む開発から商品化については、今後、さらなる実証期間が必要となると考えている。

そこで、今後の見通しとしては、下記を想定して取組を推進する。

- RCF（リサイクル炭素繊維）のリサイクル工程からリサイクル品の品質、特性に合わせた複数の事業の商品開発ステージを実証することを継続する。
- 確立した技術システムを用いた量産化施設の整備を計画的に推進する。具体的には、2019～2020年度にかけて事業体を形成する。
- 商品開発は、ノウハウの塊であり、通常は大手商社や大企業の専権事項と考えられているが、グローバル化の中で欧米、中国に立ち遅れている（と想像される）炭素繊維2次加工分野を照準するものとする。
- 本テーマは、需要家との連携を通じて、実際の手法を開示、実証することにより多くの開発者、中小企業を含む開発会社に対してもこれらの手法を開示、実証したい。

実事業化に向けて、新たな用途開発（原料種類、リサイクル方法による別グレードの開発と需要連携）、原料回収の拡大（海外調達への対応）、事業主体の立ち上げ（資金、人材確保）などに移行する。

その際は、下記に留意して引き続き㈱リーテムと、富士加飾㈱との連携を強化する予定としている。

- ① 引き続き富士加飾との連携で、事業化を推進。（富士加飾による先導性にシフト）
- ② 新規の用途開発の推進（資金調達）
※リサイクルソースごとの製品化（①ペレット、②押出板、③不織布）
- ③ 設備補助の獲得（環境省の事業補助の活用；補助率1/2）
- ④ 原料回収は、国内の拡大及び、海外調達（中国、米国）の具体化。

表 7.1 事業化に向けた具体的なステップ

| 項目 | 2019 年度（量産試作） | 2020 年度（事業段階） |
|--------|--|---|
| 技術システム | <ul style="list-style-type: none"> ・用途開発の継続 ・燃焼炉の開発（実規模・熱効率大） | <ul style="list-style-type: none"> ・事業開始 ➡2021 年以降、本格事業 |
| 事業システム | <ul style="list-style-type: none"> ・用地確保（農用地転換）・整備 ・資金調達 ・環境省補助金の獲得（その 1） | <ul style="list-style-type: none"> ・海外調達の実体化 ・環境省補助金の獲得（その 2） |

第8章 総括

今回の実証事業は、株式会社リーテムと、共同実施者として富士加飾株式会社が共同で実施したものです。

リサイクル炭素繊維の回収プロセスの検討に際し、多くの先発会社や、炭素繊維メーカー、大手自動車メーカー等の先発技術に対し、弱小な中小企業チームの挑戦であったが、先発技術を超える新しい実証ができたと自負している。

これを可能にしたのは、環境省の明確な現状分析に基づくご判断であり謝意を表したい。

弊チームは、炭素繊維回収技術開発の狙いを、後工程の商品化とその市場の立ち位置から何を開発すれば新品炭素繊維を同じ市場で評価されるかを常に念頭に置き開発を続けた。

現状では、名古屋大学に委託し、単繊維の引張り強度が新品の80%以上の評価結果が出ており、さらに解析を続けていただいているが、引張り強度の評価はさらに100%に近づくであろうとのコメントをいただいている。さらに、コンパウンド品に加工した場合の機械試験結果では、新品炭素繊維使用と同レベルとなっている。

CFRTPは、連続繊維からの束状切断品を得る場合とプロセスに投入した後の短尺連続繊維から得る切断品が使用されているが、今回実証事業として確立した束状RCFは、コンパウンド用として一般的に使用されているこれら連続繊維の切断品から順次置き換え可能になるものと思われる。

RCFの価格は新品の1/2~1/3になるため、今後はコンパウンド品の価格を改善することができるものと思われる。特に、30~60%のRCFを使用するコンポジットは、従来品に対し大幅なコスト低減が可能になり用途が広がる。

これらは、新品の連続繊維に市場に影響を与えられがちであるが、連続繊維を使用する工程から発生する端材（プリプレグ端材含む）は発生側が処理コストを負担する産業廃棄物として埋め立てや、セメント、鉄鋼溶解炉（電炉）で処理されているのに対し、本実証事業では有価物として回収する基本ポリシーで臨み、再利用による環境負荷の低減と合わせて、連続繊維加工メーカーへの負荷を減らしうるものとなる。

リサイクル容易な金属素材に対して、完全リサイクルシステムが組めず劣勢であった炭素繊維の素材としての地位の改善が可能となり、工程端材、原材料廃棄物を気にしない連続繊維の市場が開け、金属材料に対し圧倒的な軽量化による、CO₂低減を促進しうるものとなる。

原料回収面では、15年経過し、使用済みとなったCFRP（CNGボンベ）は、本実証事業の主テーマとして実行し、リサイクル源の調査から、製品回収、RCF回収、束状切断、コンパウンド工程を経て、従来品と遜色がないという結果を実証したが、炭素繊維の安定性

から今後さらに年数を経た航空機本体 CFRP の回収も問題なく実施できるものと思われる。

今後の課題は、リサイクル炭素繊維とひとくくりに分類されている多様な回収材に対して、2次加工以降の RCF 強化材の信頼性を向上させるための標準化が重要課題となる。

本報告書には、多様なリサイクル源と大きく 3 種類に分かれるリサイクル形状に対して、アウトプットの炭素繊維原糸の分類を表にまとめて対応付けており、今後は、リサイクル方法とその処理温度、処理雰囲気、抽出溶媒等の分類を加味することにより、RCF は、原材料としての市民権を得るものと思われる。

リサイクル適正の表示：印刷用の紙にリサイクルできます

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料 [A ランク] のみを用いて作製しています。