

平成29年度低炭素製品普及に向けた
3R体制構築支援事業

(廃棄CFRPの高度分級システムによる最適
マテリアルリサイクルシステムの構築)

報告書

平成30年2月28日

株式会社矢野経済研究所

本実証の概要

1. 背景と目的

炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics：以下 CFRP）は、強化材に炭素繊維（Carbon Fiber：以下 CF）を用いた繊維強化プラスチックであり、CFは鉄と比較して比重が 1/4、強度は 10 倍という優れた特性を持っている。CFRP はその優れた特性から、今後自動車などでの需要拡大が見込まれており、その使用増加に伴い、CFRP 廃棄量の増加も予想される。

CFRP は難燃性という特徴から現状は電気炉以外の燃焼炉では完全に燃焼できず、この燃え残った CF（＝未燃 CF）が電気集塵機（Electrostatic Precipitator：以下 EP）やバグフィルタに不具合を生じさせるという問題が発生しており、処理受け入れ拒否の動きもある。ただ、CFRP 廃棄品は他の素材と複合化している場合もあり分別が難しい為、意図せず電気炉以外の燃焼炉で焼却処理されるケースの増加と、それに伴う EP でのトラブル増加が想定される。そのため CFRP 普及の妨げとならぬ様、燃焼時に発生する未燃 CF を集塵し、EP 等に不具合を発生させない装置の開発が求められる。

そのほか、CFRP は製造時の重量単位当たりの CO₂ 排出量が鉄の 6～10 倍と大きく、15～30kg-CO₂/kg である。乗用車等では CFRP 採用による軽量化で燃費が向上（CO₂ 排出量が削減）するといわれているが、CFRP のライフサイクル全体を通しての環境負荷の低減を進めるためには、CFRP のマテリアルリサイクルの実現も求められる。マテリアルリサイクルによりバージン材と比較して低価格なりサイクル CF 材供給も期待できる。

未燃 CF を集塵し、集塵した CF のマテリアルリサイクルが実現できれば、EP の不具合の防止と共に、バージン CF 製造時の CO₂ 削減や、低価格リサイクル材活用による CFRP の低コスト化にも繋がると考えた。

そのため本実証事業では、集塵設備での不具合を発生させる未燃 CF を EP 前段の前処理集塵工程で集塵し、かつ集塵した CF を用いたリサイクル中間基材・成形品の開発を目的とした。

2 課題・実証事業概要

今回の事業では、EP の短絡の原因となる未燃 CF を EP 前段で集塵し、集塵した CF によりリサイクル品の開発を行うべく、以下 2 つを課題として設定した。

- (1) 未燃 CF を集塵するための高度分級システム（前処理集塵設備）の構築
- (2) 集塵した CF 繊維長に合わせたリサイクル中間基材・成形品の開発

(1) の未燃 CF を集塵するための高度分級システムの構築では、EP 前段に設置する前処理集塵設備の開発を行った。検討した前処理集塵設備は、サイクロン、スクラバ、帯電+メッシュの 3 方式である。

STEP1では繊維長3mm、12mm、50mmの未燃CFの集塵率を測定した。STEP2ではより実際の炉に近い条件で実証を行うため、各繊維長の未燃CFにダスト（乾灰）を混ぜた形で実証を行い、上記前処理集塵方式での未燃CFとダストとの分級性を評価した。

(2)の集塵したCF繊維長に合わせたリサイクル中間基材の開発では、(1)で集塵した未燃CFをリサイクル資源として、中間基材・成形品の試作を行った。集塵未燃CFとPA繊維を混ぜ合わせた試料をオープナーで開繊・混合した後、カード機によって不織布を作製、不織布を成形機にかけ成形品を作製した。その成形品についてバージンを用いた成型品との物性比較による用途検討を行った。

3 前処理集塵装置による未燃CF、未燃CF+ダスト集塵結果

STEP1の未燃CFのみを用いた集塵試験では、サイクロン、スクラバ、帯電+メッシュにおいて、3mm、12mm、50mmすべての繊維長の未燃CFがほぼ100%集塵できたことを確認した。

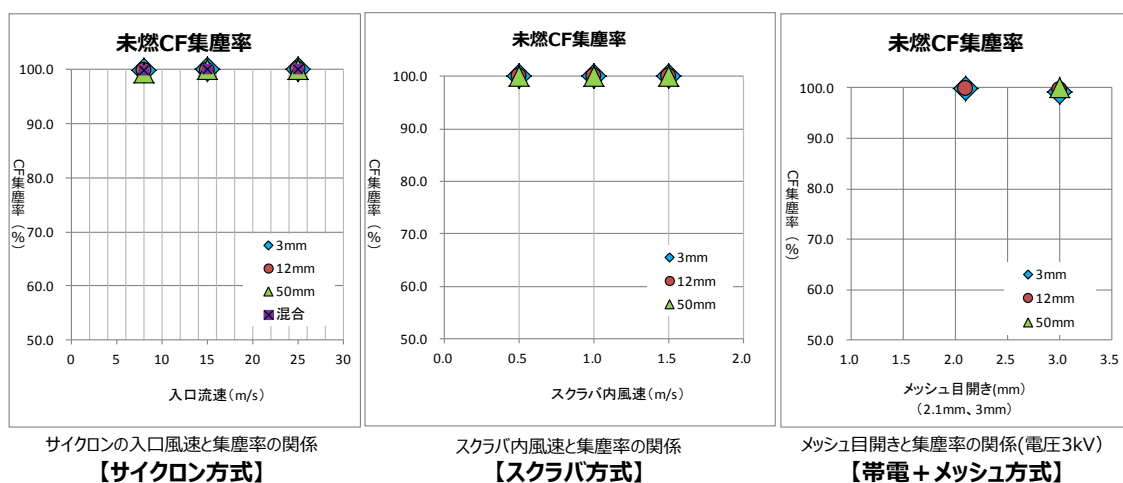
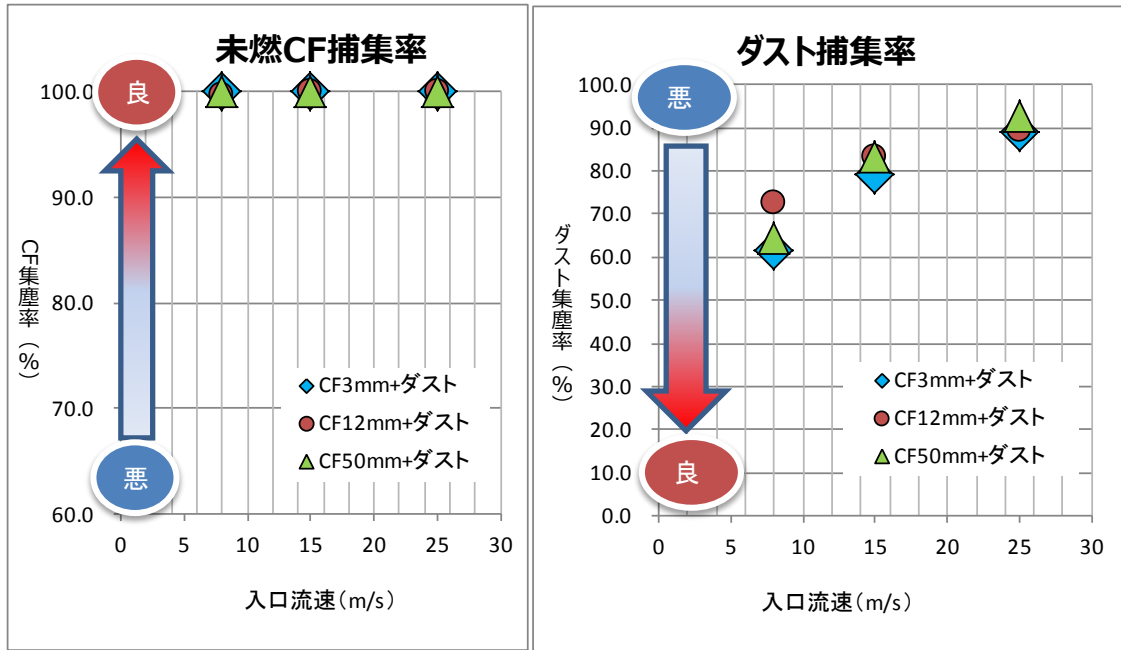


図.STEP1の集塵試験の結果

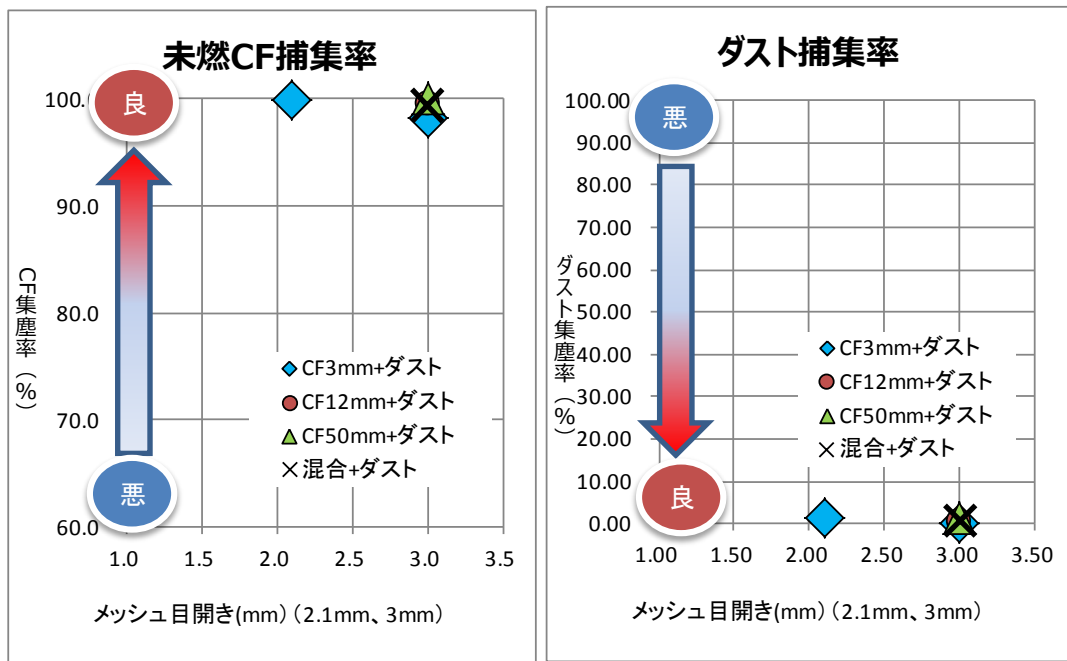
STEP2の未燃CF+ダストの集塵試験では、サイクロン及び帯電+メッシュによる実証を行った。サイクロンは遠心力によりダストを集塵する方式であり、入口流速は通常15~25m/sの範囲で計画される。入口流速が高い程細かな粒子の集塵率が低下することから、粒子径の異なる未燃CFとダストの分級性を高めるため入口風速を通常仕様の50%となる8m/sまで下げて試験を行った。帯電+メッシュでは、粒子径の異なる未燃CFとダストの分級精度向上のため、メッシュの目開きを変更した。

その結果、サイクロンでは入口風速を8m/sまで下げても60%以上のダストを集塵してしまっただが、帯電+メッシュではダストの集塵率を約1%に抑えることができた。



サイクロンの入口風速と未燃CF捕集率及び（右）ダスト集塵率の関係

図.STEP2 の集塵試験の結果（サイクロン）



帯電+メッシュのメッシュ目開きと未燃CF捕集率及び（右）ダスト集塵率の関係
（電圧3kV、試験の平均値）

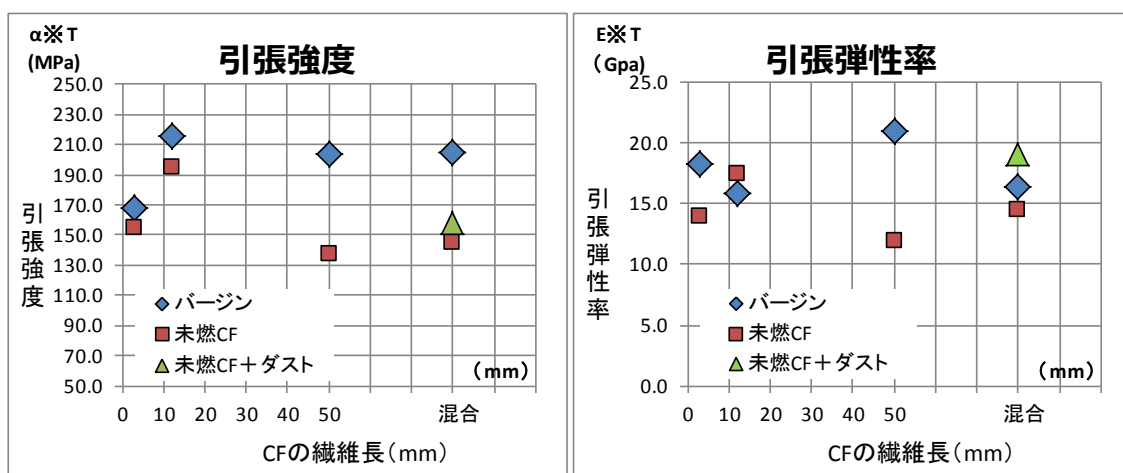
図.STEP2 の集塵試験の結果（帯電+メッシュ）

4 CF 繊維長に合わせたリサイクル中間基材・成形品の開発結果

CF 繊維長に合わせた中間基材の開発では (1) で集塵した未燃 CF と PA 繊維を混ぜ合わせた試料をオープナーで開繊・混合した後、カード機によって不織布を作製、不織布を成形機にかけ成形品を作製した。その成形品についてバージンを用いた成形品との物性比較を実施し、その結果を踏まえて、リサイクル品の用途検討を行った。

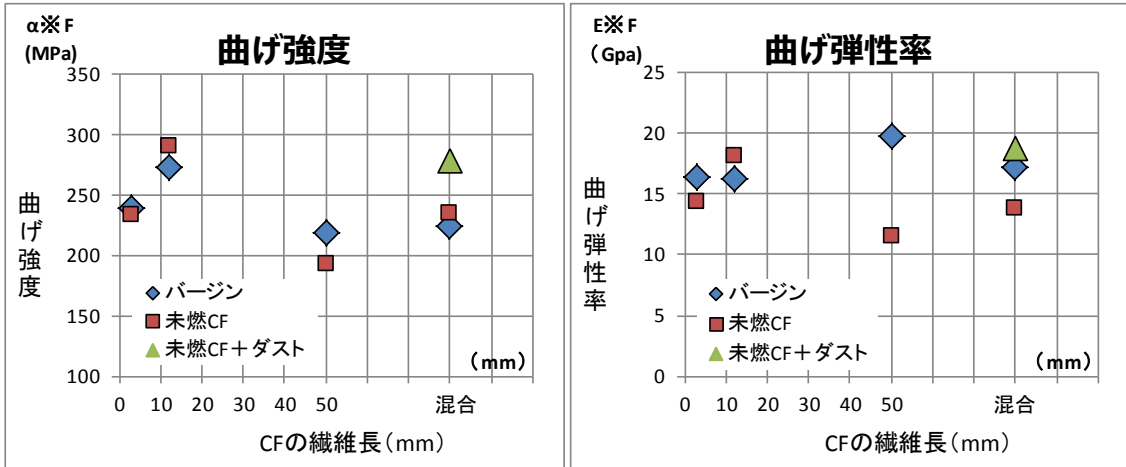
まず未燃 CF 単独による成形品はバージン品と比較し、大幅な物性低下はなく、成形品の引張強度・弾性率、曲げ強度・弾性率はバージン品に対して約 8 割の物性を保っていた。これは自動車向け材料の力学特性と同等であり、自動車用にも適用可能と判断された。

未燃 CF+ダストによる成形品については、CFRP の物性を確保するために、中間基材に混入し許容されるダストの重量は、未燃 CF との対比で 1:1 以下とすることが求められる。帯電+メッシュの集塵試験では、ダスト投入量に対するダストの集塵率を 1%まで改善できたが、そもそものダスト投入重量が大きいため、未燃 CF:ダストの重量比は 1:2 となった。ただし中間基材作成中にダストが脱落し、未燃 CF とダストの分離が更に行われ、結果的に 1:0.3 と目標の重量比以下を達成することができた。その結果未燃 CF+ダストによる成形品の物性 (引張強度・弾性率、曲げ強度・弾性率) も未燃 CF 単独の物性とほぼ同等の物性が確保できた。



※未燃CF (混合) +ダストはバージン品との物性比較は行なっていない

図.バージン CF 及び未燃 CF、未燃 CF+ダストによる成形品の物性比較



※バージン、未燃CFは4点曲げ試験の結果。未燃CF+ダストの結果のみ3点曲げ試験の結果。
 ※未燃CF（混合）+ダストはバージン品との物性比較は行なっていない

図.バージン CF 及び未燃 CF、未燃 CF+ダストによる成形品の物性比較

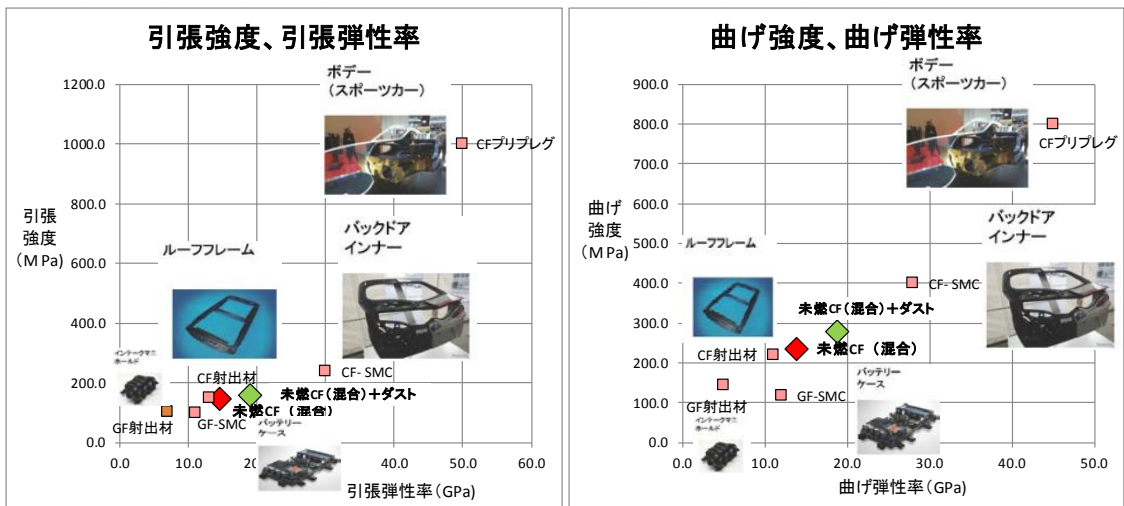


図. 自動車用の各材料と未燃 CF、未燃 CF+ダスト成形品の物性比較

5 CO2削減効果

CFRPの需要量推移から世界で廃棄されているCFRP量を2025年で42,000t、2030年で99,700tと推計した。

そこに過去実証の流動床炉でのCFRP燃焼におけるCF未燃率である約0.4%をCFのマテリアルリサイクル可能比率と仮定し算出すると2025年で168t、2030年で399tのCFが回収可能となる。

今回の実証で、リサイクルCFによるバージンCFへの代替が可能という判断がなされたことから、CF1tあたり生産時のCO2排出量を用いてCO2削減量を算出すると2025年で3,360t、2030年で7,976tと算出された。

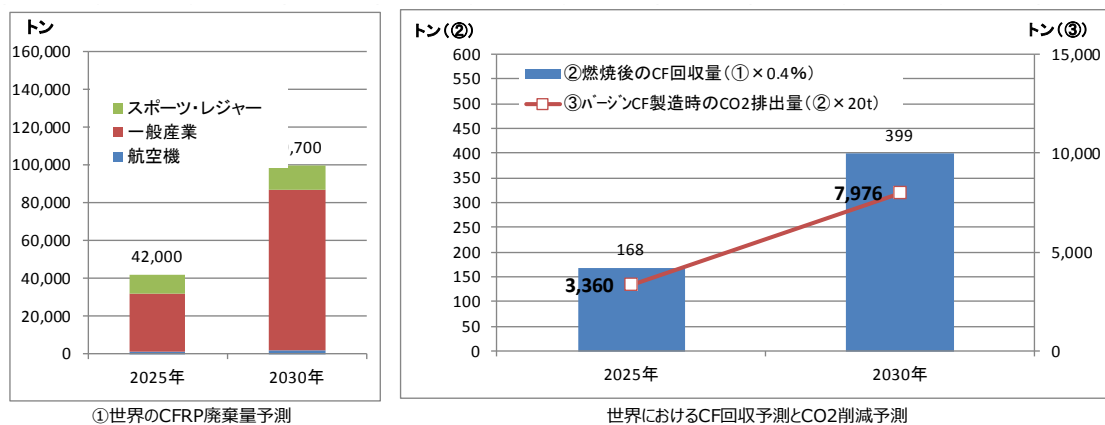


図.世界のCFRP廃棄量及びCF集塵予測とCO2削減量

6 事業実現可能性

今回の実証では前処理集塵機において EP やバグフィルタで問題となる未燃 CF を集塵することができ、環境的側面では、集塵機トラブル防止による CFRP 普及障壁の解決に繋がると考える。実際の炉を想定した条件下で未燃 CF が集塵出来ることが確認でき、実際の炉の状況下でも集塵できる可能性があると考えられる。

集塵した未燃 CF の物性低下は限定的で、力学特性的には自動車向け用途の適用範囲内となった。物性に影響を与えるダストについては、前処理集塵装置での分級が可能で、加えて中間基材成形工程での分離（自然脱落）が確認できた。ただし、実際の ASR 組成は一定ではなく、CF と共に集塵されるダストも組成が異なり、利用用途制限の可能性があるので、実際の ASR 燃焼処理施設において発生した未燃 CF の集塵や、それら集塵した未燃 CF 等の環境分析等を進める必要があると考える。それら結果により廃材なども使用されている土木用途への用途開発検討について継続評価を行っていく必要があると考える。

7 本実証の成果と課題

先述したように ASR の燃焼施設には、様々な炉があり燃焼方式や燃焼条件、燃焼物もその時々で異なり、CF やダストを含む ASR の燃焼残渣も一定ではない。今回の実証では過去実証事業で未燃 CF が最も明確に確認できた流動床炉を参照し、集塵装置を組み上げ、集塵試験を行った。そのため実際の炉と同じ条件での試験ではないが、今回の実証で集塵装置の有効性を確認できたため、今後の実用化に向けては、温度・気化物質等の条件の異なる流動床炉を含む他の炉でも同様に集塵が可能か、焼却炉保有メーカーの参加による実用化に向けた実証を行っていく必要がある。

リサイクル材としての課題は、試験材料についても同じく流動床炉を想定して作り出したものであるが、実際の炉の条件と同一ではない。参考とした炉の条件も 1 条件のみである。今回の実証では流動床炉とほぼ同様の条件で処理された未燃 CF を利用した成形品について、一定の力学性能が得られることを確認できたため、実用化に向けては、実際の炉からの集塵品をもとに、用途開発を進めていく道筋ができたと考えている。その一方で、CF とダストの分級性はその都度異なり、物性値もその都度変わる可能性がある。その場合のリサイクル品の製品保証や、分級性の違いからくる物性範囲、また有害物質の含有量についても継続検証していく必要があり、それらを明らかにすることが、事業化に向けた取り組みとなると考えている。そのほか、成形作業毎に CF の体積含有率が変わる恐れがあるため、用途展開にあたっては、安定した CF 体積含有率を実現できるように、中間基材や、成形方法作成の見直しを用途毎に合わせて進めていく必要がある。

表. 今回の実証範囲と事業化に向けた今後の取り組み

	今回の実証範囲（課題）	事業化に向けた今後の取り組み
<p>(1) 未燃CFを回収するための高度分級システム（前処理集塵設備）の構築</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 今回の実証では、時間的等の面で実際の焼却炉に前処理集塵システムを組み込んだ実証が出来ず、試験的に集塵システムを組み上げ、集塵試験を実施。 ■ 実際の炉と全て同じ条件での試験ではなく、また想定した条件も流動床炉の1条件。 ■ 試験設備による実証のため、実際の炉に設置した場合の経済性分析は未実施。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 集塵システムについて今回の実証で有効性（後処理集塵装置で問題となる10mm以上の未燃CFの集塵）は確認できた。 ■ 集塵システムの実用化に向けては、温度、気化物質等の条件の異なる流動床炉を含む他の炉でも同様に集塵が可能かを、焼却炉保有メーカーが参加し実用化に向けた実証が必要 ■ 実際の炉に設置した際のシステム全体の費用対効果を分析
<p>(2) 回収したCF繊維長に合わせたリサイクル中間基材の開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 今回の実証では、試験材料（未燃CF、ダスト）は、流動床炉を想定して擬似的に作り出したもの。 ■ そのため実際の炉から発生する未燃CF・ダストと全て同じ条件ではなく、また想定した条件も流動床炉の1条件。 ■ 実際は燃焼物の条件により、ダスト成分の変化が予想。 ■ 成形品のCF体積含有率が一定ではなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 流動床とほぼ同様の条件で処理された未燃CFを利用した成形品について、一定の力学性能が得られることを確認。 ■ 実用化に向け、実際の炉での回収品の物性確認やその他有害物質が含まれるかどうかの環境分析を進めていく。 ■ 実用化に向けては、実際の炉からの回収品をもとに、用途開発を進めていく道筋ができた。 ■ リサイクル材の物性はダスト成分、ダストの分級性に影響するため、その都度異なる可能性あり。リサイクル品の製品保証については、その物性の範囲を継続調査した上で、検討する必要あり。 ■ 安定したCF体積含有率を実現できるように、中間基材や、成形方法作成の見直しを用途毎に合わせて進めていく必要がある。

Overview of the Project

1. Background and Objectives

Carbon fiber reinforced plastics (hereafter referred to as CFRPs) are fiber reinforced plastics that use carbon fiber (hereafter referred to as CF) as reinforcement. CF exhibits excellent characteristics; its specific gravity is 25% that of iron and its strength 10 times. Due to its superior characteristics, CFRP is expected to expand its demand in the automobile and other industries in the future, and it is expected that the CFRP dumping amount will increase with the increase in its use.

At present, with a characteristic of being incombustible, CFRPs cannot be completely incinerated unless they are incinerated in an electric furnace. This presents the problem that remaining CF (= unburned CF) makes the electrostatic precipitator (EP) and bag filter faulty, and some incineration facilities, therefore, refuse to undertake disposal of products that uses CFRPs. Since CFRP waste is occasionally compounded with other materials, it is hard to sort them. Therefore, there are increasing cases that those CFRP compound wastes are unexpectedly incinerated in combustion furnaces other than electric furnaces, and expected to increase troubles in EP accompanying that. For this reason, it is necessary to develop a device which does not cause troubles to EP and bag filter by collecting unburned CF generated at the time of combustion, so as not to impede the expansion of CFRP.

In addition, CFRP has CO₂ emissions per unit of weight during production as large as 6 to 10 times that of iron, 15 to 30 kg-CO₂ / kg. It is said that adopting CFRP in passenger cars etc., could reduce the CO₂ emissions by achieving weight saving and improving fuel efficiency. However, in order to advance the reduction of environmental load throughout the entire life cycle of CFRP, realization of material recycling of CFRP is also required. We can also expect recycled CF materials to be supplied at a lower price compared to virgin materials.

It is assumed that it could lead to an improvement of troubles of EP as well as a reduction of CO₂ at virgin CF production and lower cost of CFRP by utilizing low price recycled material, if we can recover unburned CF and material recycling of recovered CF.

Therefore, the demonstration project aims to collect unburned CF which causes trouble in dust collecting equipment in the preprocessing dust collection process which is the pre-EP stage, and to develop intermediate recycled base material / molding using collected CF.

2. Project Overview

In this project, with the objective of collecting unburned CF, which causes the EP to short-circuit, before dust is collected with the EP and developing recycled products based on collected CF, we decided to address the following two challenges:

- (1) Construction of an advanced classification system (pre-precipitator) to collect unburned CF, and
- (2) Development of an intermediate recycled base material/molding appropriate for the length of the collected CF

In association with (1) the construction of an advanced classification system, we developed a pre-precipitator, an equipment to be placed before the EP. As the pre-precipitator, we considered three types: cyclone dust separator, scrubber, and equipment based on electrification and a mesh.

In Step 1, we put unburned CFs with three different fiber lengths (3 mm, 12 mm, and 50 mm) to determine what collection rates (i.e., dust collection rates) each type of pre-precipitator achieved for the fibers with different lengths. In Step 2, with the objective of conducting demonstration under conditions closer to the actual furnace conditions, we mixed dust (dried ash) with unburned CFs with the different fiber lengths to evaluate how much each type of pre-precipitator separated unburned CFs and dust.

In association with (2) the development of an intermediate recycled base material appropriate for the length of the collected CF, we prototyped an intermediate base material using the collected unburned CF in (1) as a recycled material and molded that base material. We mixed the collected unburned CFs and nylon fibers (PA fiber s) into a test sample, and then opened it and mixed fibers using an opener. After that, we made nonwoven fabric using a carding machine, and then molded that fabric using a molder. We considered applications of that molded product by comparing the physical properties between the molded product and a molded product based on virgin CF.

3. Construction of an Advanced Classification System

The dust collection test using only unburned CF in Step 1 has revealed that all of the cyclone dust separator, scrubber, and equipment based on electrification and a mesh could collect almost 100% of the unburned CFs regardless of the fiber length (3 mm, 12 mm, and 50 mm).

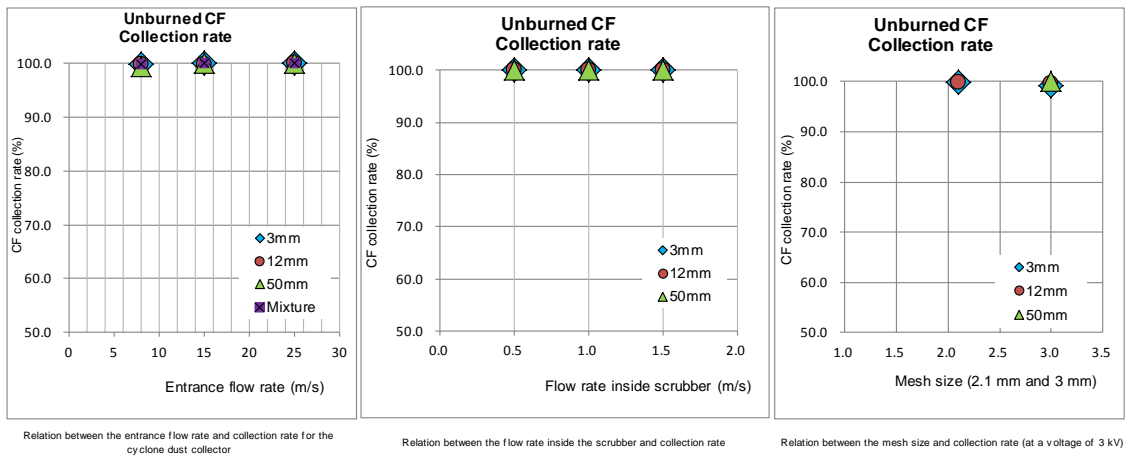


Figure: Results of the Dust Collection Testing in Step 1

The dust collection test based on unburned CF and dust in Step 2 used a cyclone dust separator and equipment based on electrification and a mesh. A cyclone dust separator uses centrifugal force to collect dust. The cyclone is a system for collecting dust by centrifugal force, and the inlet flow velocity is usually set in the range of 15 to 25 m / s. The higher the inlet wind speed, the lower the dust collection rate of fine particles. Therefore, in order to increase the accuracy of classification of unburned CF and dust with different particle sizes, the inlet wind speed is lowered to 8 m / s, which is 50% of the normal specification. In equipment based on electrification and a mesh, mesh opening was changed to improve classification accuracy of unburned CF and dust of different particle sizes. The results have shown that while the cyclone dust separator collects as much as 60% of the input dust in spite of the changes in the air velocity at the entrance, the equipment based on electrification and a mesh collects only approximately 1%.

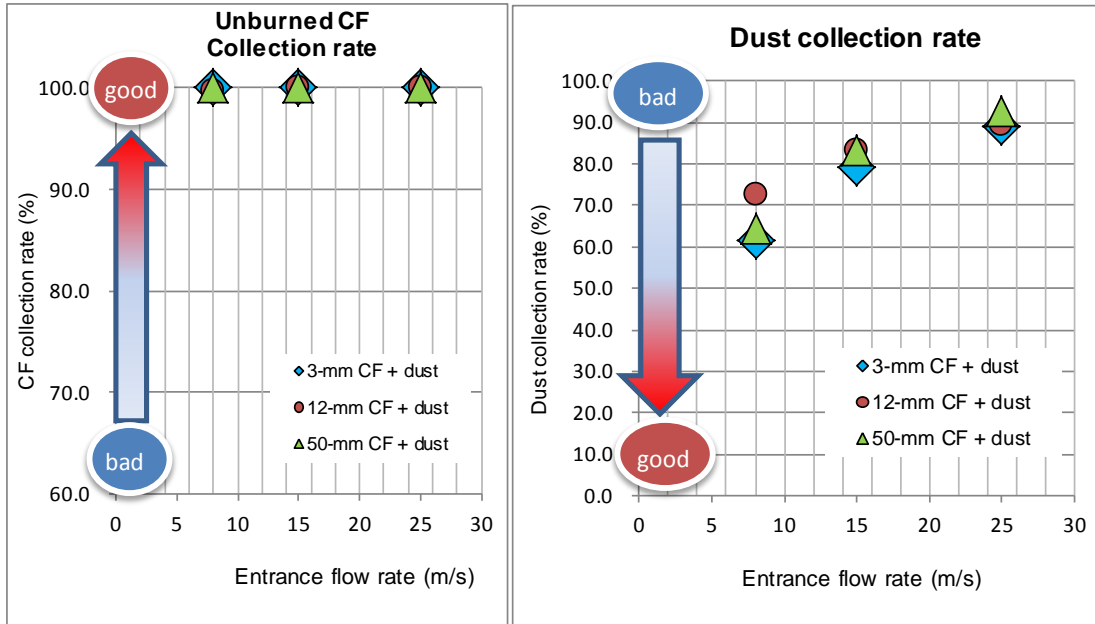


Figure: Relations between the entrance flow rate and unburned CF and dust (right) collection rates for the cyclone dust collector

Figure: Results of the Dust Collection Testing in Step 2 (for the Cyclone Dust Collector)

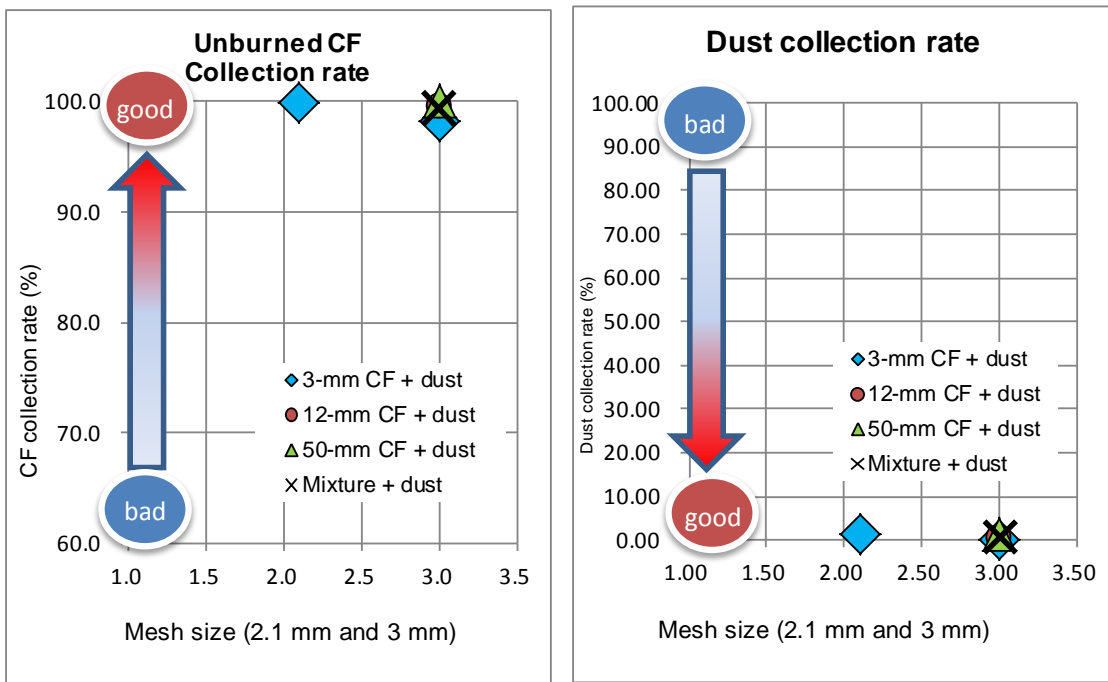


Figure: Relations between the mesh size rate and unburned CF and dust (right) collection rates for electrification + mesh (average test values at voltage of 3 kV)

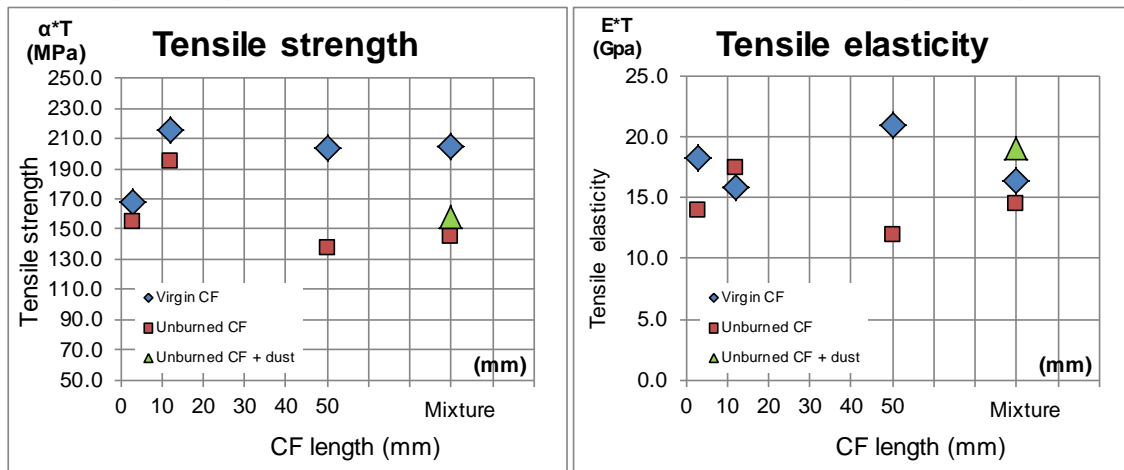
Figure: Results of the Dust Collection Testing in Step 2 (for the Equipment Based on Electrification and a Mesh)

4. Development Result of an Intermediate Recycled Base Materials /Moldings Appropriate for the CF Length

In the development of an intermediate recycled base material appropriate for the CF length, we mixed the collected unburned CFs in (1) and nylon fibers (PA fibers) into a test sample, and then opened it and mixed fibers using an opener. After that, we made nonwoven fabric using a carding machine, and then molded that fabric using a molder. We compared the physical properties between the molded product and a molded product based on virgin CF and based on the comparison results, considered applications of the recycled product.

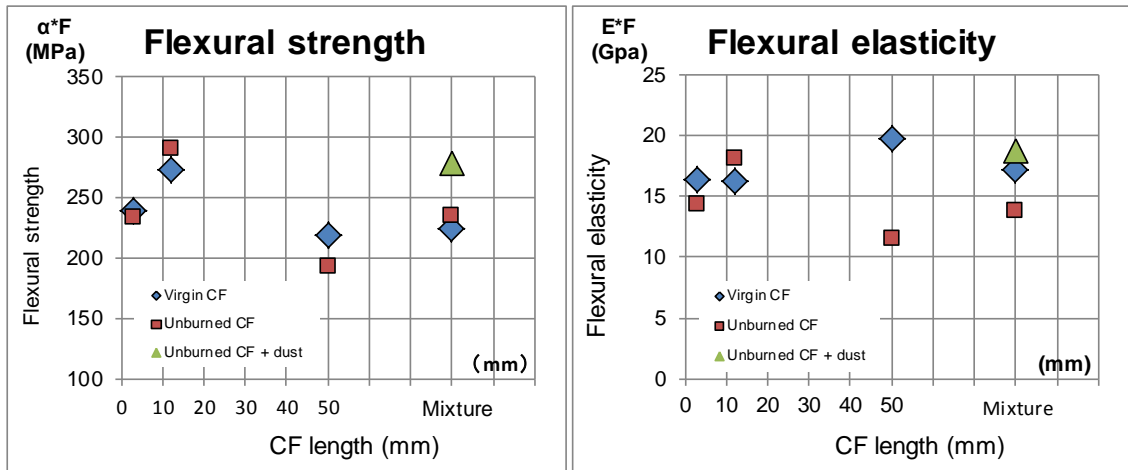
When compared to the product based on virgin CF, the molded product based on only unburned CFs did not show a significant degradation in physical properties, with its tensile strength/elasticity and flexural strength/elasticity maintained at 80% of those of the product based on virgin CF. With the same mechanical properties as materials for automobiles, the molded product was determined to be usable for automobiles.

For molding consists of unburned CFs and dust, it is required that the ratio of the dust mixed into the intermediate base material to unburned CF not be more than 1 to 1 in order to secure the physical properties of CFRPs. In the dust collection testing on the equipment based on electrification and a mesh, the dust collection ratio was improved down to 1% of the input dust. However, in the first place, the amount of the input dust was large and thus the ratio of the unburned CFs to dust was 1 to 2 in weight. In making the intermediate base material, however, dust came off, which promoted further separation between unburned CFs and dust, resulting in a weight ratio of 1 to 0.3 within the target range. As a result, the molded product based on unburned CFs and dust exhibited physical properties (tensile strength/elasticity and flexural strength/elasticity) almost the same as the molded product based on only unburned CFs.



※Unburned CF + dust did not conduct physical properties comparison with virgin CFRP.

Figure: Comparison of Physical Properties among Molded Products Based on Virgin CFs, Unburned CFs, and Unburned CFs + Dust



※Unburned CF + dust is the result of 3point bending test, the others are the result of 4point bending test.

※Unburned CF + dust did not conduct physical properties comparison with virgin CFRP.

Figure: Comparison of Physical Properties among Molded Products Based on Virgin CFs, Unburned CFs, and Unburned CFs + Dust

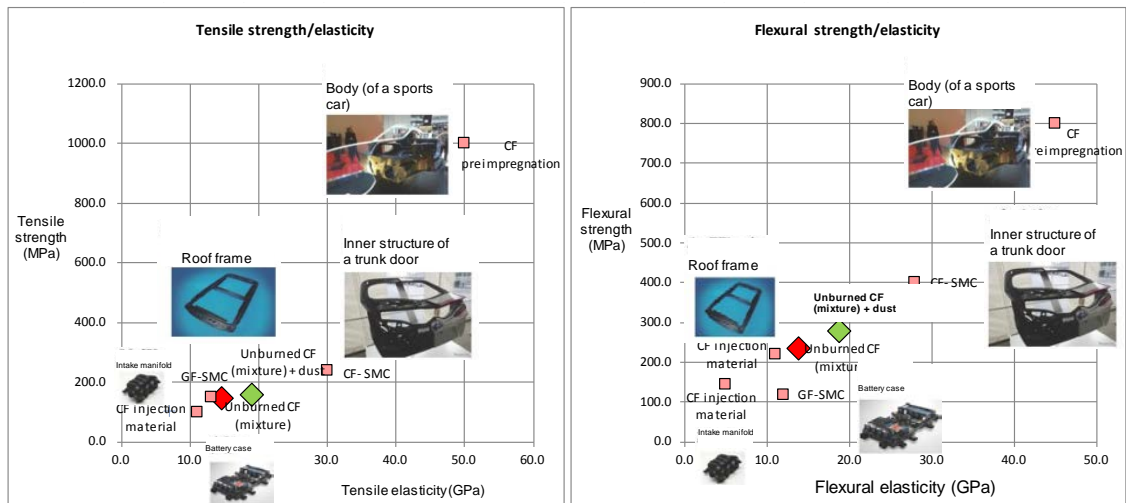


Figure: Comparison of Physical Properties among Materials for Automobiles, the Molded Product Based on Unburned CFs, and the Molded Product Based on Unburned CFs + Dust

5. Reduction of CO2 Emissions

Based on past and present statistics about the amount of CFRPs demanded, the amount of CFRPs (to be) dumped in the world was estimated as 13,400 tons in 2017, 20,700 tons in 2020, 42,000 tons in 2025, and 99,700 tons in 2030.

Given that the material recyclable rate of CF is 0.4%, which is the previously verified collection rate of CF in CFRP combustion with a fluidized-bed furnace, it will be possible to collect 54 tons of CF in 2017, 83 tons in 2020, 168 tons in 2025, and 399 tons in 2030.

Based on the result that recycled CF can replace virgin CF according to the demonstration conducted this time, the amount of CO2 emissions (to be) reduced were calculated based on the amount of CO2 emitted to produce 1 ton of CF as 1,072 tons in 2017, 1,656 tons in 2020, 3,360 tons in 2025, and 7,976 tons in 2030.

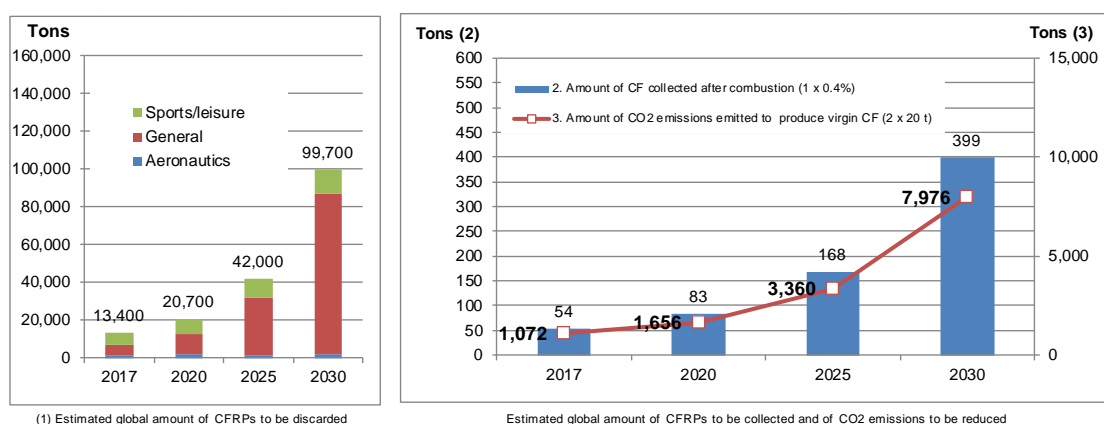


Figure: Estimated Global Amount of CFRPs to Be Discarded and Collected and of CO2 Emissions to Be Reduced

6. Project Feasibility

In this project, it is possible to collect unburned CF which becomes a problem in EP and bag filter in pretreatment dust collector. Moreover, in terms of environmental aspects, it is thought that this will lead to the solution of CFRP penetration barriers by preventing dust collector troubles. Since it was confirmed that unburned CF can be collected under conditions assuming an actual furnace, it is considered that there is a possibility of dust collection even under actual furnace conditions.

Degradation of physical properties of dust-collected unburned CF is limited, and it is within the applicable range of application for automobiles from the viewpoint of mechanical characteristics. As for the dust affecting the physical properties, it was possible to classify with the pretreatment dust collector, and additionally it was confirmed that separation (spontaneous dropout) was possible in the intermediate recycled base material/molding step. However, the actual composition of ASR is not constant, and dust collected together with CF also has a different composition. Accordingly, there is a possibility of restricting usage. Therefore, it is thought that it is necessary to proceed with work including dust collection of unburned CF generated in the actual ASR combustion treatment facility and environmental analysis of substances including those collected unburned CF. Based on these results, we believe that it is necessary to continue evaluating the application development study for civil engineering applications where waste materials and others are used.

7. Results of the Project and Challenges to be Addressed

As stated above, ASR incineration facilities use different furnaces and each of them, on a moment-to-moment basis, uses different combustion systems and conditions and burns different

combustibles, thus yielding different combustion residues including CF and dust. In this project, referring to the fluidized bed furnace where the confirmation of unburned CF was the most confirmed in past projects, a dust collector was assembled and a dust collection test was conducted. Although the testing was not conducted under the same conditions as actual furnaces, the project has verified that the dust collection system is effective. Toward practical implementation in the future, it is required to work together with manufacturers that own incineration furnaces to verify whether or not the system can equally collect dust for other furnaces, including fluidized-bed furnaces, operated under different conditions such as temperature and vaporized substance.

The developing recycled products as well as the testing material assumed a fluidized-bed furnace. This presents the problem that as a recycled material, it was not produced under the same conditions as actual furnaces. Furthermore, the testing used only one set of conditions. The demonstration project conducted this time has verified that a molded product based on unburned CF yielded under almost the same conditions as a fluidized-bed furnace exhibits a certain level of mechanical performance. For practical application, we believe that we have developed a pathway to develop applications based on collected items from actual furnaces. On the other hand, the classification property of CF and dust is different each time, thus the property value may change each time. Therefore, it is necessary to continuously verify the product guarantee of the recycled product in that case, the range of physical properties resulting from the difference in classification properties, and the content of harmful substances. We also believe that revealing them will be an initiative for commercialization. Besides that, there is a risk that the volumetric content of CF will change for each molding operation. In deploying applications, it is necessary to advance the intermediate base material and the review of the forming method preparation together for each development, and realize a stable CF volume content.

Table. Future Prospects for this Demonstration Scope and Commercialization

	The scope of this demonstration (Task)	Future efforts for commercialization
(1) Construction of advanced classification system (pretreatment dust collection facility) for recovering unburned CF	<ul style="list-style-type: none"> ■ In this demonstration, we could not incorporate a pretreatment dust collecting system into an actual incinerator in terms of time, so we assembled a dust collection system experimentally and conducted a dust collection test. ■ It was not a test under the same conditions as the actual furnace, and the condition assumed was also limited to one condition of the fluidized bed furnace. ■ Since the demonstration was conducted by the test equipment, an economic analysis when installed in an actual furnace has not been carried out. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ With regard to the dust collection system, we confirmed the effectiveness (dust collection of unburnt CF of 10 mm or more which becomes a problem in post-treatment dust collector) by this demonstration experiment. ■ For practical application of dust collection system, incinerator makers are required to participate in the demonstration to verify that even in other furnaces including fluidized bed furnaces with different conditions such as temperature, vaporized substances can collect dust. ■ The cost-effectiveness of the entire system when installed in an actual furnace was analyzed.
(2) Development of a recycled intermediate base material adapted to the collected CF fiber length	<ul style="list-style-type: none"> ■ In this demonstration, the test materials (unburned CF, dust) are simulated by assuming a fluidized bed furnace. ■ Therefore, it is not the same condition as the unburned CF · dust generated from the actual furnace, and the assumed conditions are limited to one condition of the fluidized bed furnace. ■ In the actual situation, the change of dust component is expected according to the condition of the burned material. ■ The CF shrinkage percentage of the molded article was not constant. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ It was confirmed that certain mechanical performance can be obtained for molded articles using unburned CF which was treated under substantially the same condition as the fluidized bed. ■ For the practical application, we will proceed with environment analysis to confirm the physical properties of collected items in actual furnaces and whether other harmful substances are included. ■ Based on the collected items from the actual furnace, I saw a pathway to advance the application development for practical use. ■ Since the physical properties of recycled materials influence the dust component and the classification property of dust, they may be different each time. Regarding the product warranty of recycled products, it is necessary to be investigated after investigating the scope of the physical properties. ■ In order to realize a stable CF volumetric content ratio, it is necessary to review the intermediate base material and the preparation method of molding in accordance with application development.

目次

1. 事業の目的と事業体制・事業内容	1
1-1. 事業の目的	1
1-2. 実施体制	2
1-3. 本実証における検討内容	3
1-4. 事業スケジュール	3
2. 前処理集塵設備試験、未燃 CF による中間基材・成形品試作条件検討	4
2-1. バージン CF の物性と繊維長	5
2-2. 未燃焼 CF の準備	5
2-3. ダスト準備	6
2-4. ダストと未燃 CF の比率	8
3. 前処理集塵装置の構築	9
3-1. 装置全体フローの検討	9
3-2. 前処理集塵装置 3 方式の設計・検討	11
3-3. STEP1 未燃 CF の投入・集塵結果	15
3-4. STEP2 未燃 CF+ダストの投入	19
3-5. 前処理集塵装置の構築まとめ	22
4. 未燃 CF 等による中間基材・成形品試作	23
4-1. プレ中間基材試作	24
4-2. 中間基材試作	28
4-3. 成形品試作	35
5. 事業可能性評価	44
5-1. 評価	44
5-2. 課題	45
6. 環境負荷低減効果	47

1. 事業の目的と事業体制・事業内容

1-1. 事業の目的

炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics：以下 CFRP）は、強化材に炭素繊維（CF）を用いた繊維強化プラスチックであり、CF は鉄と比較して比重が 1/4、強度は 10 倍という優れた特性を持っている。CFRP はその優れた特性から、航空・宇宙、スポーツ用途等に加えて、一般産業用途や自動車用途での需要拡大が見込まれている。

一方、CFRP 使用量の増加に伴い CFRP 廃棄量の増加も予想される。CFRP の廃棄において炭素繊維協会は埋め立てを推奨しているが、意図せず他の廃棄物に混入し焼却される場合もある。しかも CFRP は難燃性という特徴から現状は電気炉以外の燃焼炉では完全に燃焼しない。燃焼炉には大気汚染防止のため電気集塵機（Electrostatic Precipitator：以下 EP）やバグフィルタが設置されているが、燃え残りの CF（以下未燃 CF）により EP の電気短絡やバグフィルタの目詰まりによる操業上の不具合を生じさせるという問題が発生しており、処理受け入れ拒否の動きもある。

CFRP 廃棄品には、製造工程中に発生するインプラントゴミ、廃棄物から発生する市場ゴミの 2 種類があるが、インプラントゴミは CF の判断が行いやすく、比較的埋立て処理が行ないやすい。一方で市場ゴミは CFRP と判断することが難しいほか、判断できた場合でも他材料と複合化している場合が多く、分解・分別する必要がある、意図せず電気炉以外の燃焼炉で焼却処理される場合もある。今後 CFRP 廃棄量の増加に伴い、上述した様な燃焼時の EP でのトラブル増加も想定されるため、燃焼時に発生する未燃 CF を集塵し、EP 等に不具合を発生させない装置の開発が求められる。

そのほか、CFRP は製造時の重量単位当たりの CO₂ 排出量が鉄の 6～10 倍と大きく、15～30kg-CO₂/kg である。乗用車等では CFRP 採用による軽量化で燃費が向上する（CO₂ 排出量が削減される）といわれているが、CFRP のライフサイクル全体を通しての環境負荷の低減を進めるためには、CFRP のマテリアルリサイクルの実現も求められる。また CFRP のマテリアルリサイクルが実現すれば、バージン材と比較して低価格なりサイクル CF 材供給も期待できる。

未燃 CF を集塵し、集塵した CF のマテリアルリサイクルが実現できれば、EP の不具合の防止と共に、バージン CF 製造時の CO₂ 削減や、低価格リサイクル材活用による CFRP の低コスト化にも繋がると考えた。

そのため本実証事業では、集塵設備に不具合を発生させる未燃 CF を EP 前段の前処理集塵工程で集塵し、かつ集塵した CF を用いたりサイクル中間基材・成形品の開発を目的とした。

1-2. 実施体制

本実証では、矢野経済研究所が申請代表者となり、集塵機メーカーである三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション、CF メーカー団体である日本化学繊維協会と連携し実証を行った。

表 1-1. 本実証の実施体制

法人名	事業実施における具体的な役割
株式会社矢野経済研究所	<ul style="list-style-type: none"> 試験内容の調整 事業の進捗管理 事業取りまとめ
三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション株式会社（以下MHPS-ES）	(1) 未燃CFを集塵するための高度分級システム（前処理集塵設備）の構築 <ul style="list-style-type: none"> 前処理集塵設備開発 未燃CF集塵システム構築
日本化学繊維協会 炭素繊維協会委員会	(2) 集塵したCF繊維長に合わせたリサイクル中間基材・成形品の開発 <ul style="list-style-type: none"> 中間基材・成形品の試作 開発材料の品質評価
一般社団法人 日本自動車工業会リサイクル廃棄物部会	<ul style="list-style-type: none"> 事業全体の監督、助言 アドバイザー

出典：矢野経済研究所作成

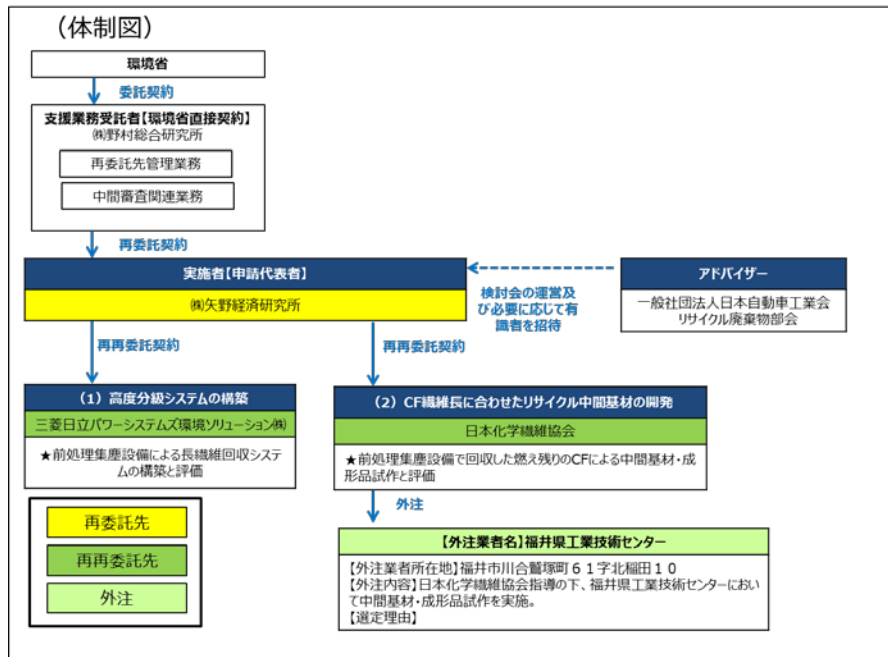


図 1-1. 本実証の実施体制図

出典：矢野経済研究所作成

1-3. 本実証における検討内容

今回の事業では、EPの短絡の原因となる未燃CFをEP前段で集塵し、集塵したCFによりリサイクル品の開発を行うべく、以下2つを検討課題として設定した。

- (1) 未燃CFを集塵するための高度分級システム（前処理集塵設備）の構築
- (2) 集塵したCF繊維長に合わせたリサイクル中間基材・成形品の開発

(1) の未燃CFを集塵するための高度分級システムの構築では、燃焼後の未燃CFを集塵し、かつ短絡を防ぐEP前段に設置する前処理集塵設備の開発を行った。検討した前処理集塵設備は、サイクロン、スクラバ、帯電+メッシュの3方式である。

STEP1では繊維長3mm、12mm、50mmの未燃CFを上記前処理集塵設備に投入し、各集塵方式で各繊維長の未燃CFの集塵率を測定した。STEP2ではより実際の炉に近い条件で実証を行うため、各繊維長未燃CFにダスト（乾灰）を混ぜて集塵し、上記前処理集塵方式での未燃CFとダストとの分級性を評価した。

(2) の集塵したCF繊維長に合わせたリサイクル中間基材の開発では、(1) で集塵した未燃CFをリサイクル資源として、ナイロン繊維（以下PA繊維）を混ぜ合わせた試料をオーブナーで開繊・混合した後、カード機によって不織布を作製、不織布を成形機にかけ成形品を作製した。成形品についてバージンを用いた成型品との物性比較による用途検討を行った。

1-4. 事業スケジュール

表 1-2 に主な事業実施スケジュールを示す。

試験装置の設計及び試作では、2017年7月～9月の期間において実際の炉に追設可能な前処理集塵設備を想定し、装置組み立てまでの計画立案、設計を行った。

未燃CF及びダスト準備では2017年8月～10月の期間において過去実証試験より、未燃CFが最も明確に確認できた流動床炉をモデルに未燃CF、ダスト（乾灰）を準備した。試験装置における未燃CF、未燃CF+ダストの集塵実施は、11月～12月に実施した。

試験装置で集塵した未燃CF等による中間基材・成形品試作（バージン含む）を11月～1月の期間に実施した。

表 1-2. 主な事業実施スケジュール

実施項目			6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
			3 4	1 2 3 4	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5
(1) 高度分級システムの構築	1) 試験装置の設計及び試作	①装置の計画									
		②装置制作									
		③装置組み立て・試運転									
(2) CF繊維長に合わせたリサイクル中間基材の開発	2) 未燃CF及びダスト準備	①試験									
		②データ整理・報告書作成									
		③装置組み立て・試運転									
(2) CF繊維長に合わせたリサイクル中間基材の開発	3) 試験装置における未燃CF、未燃CF+ダストの集塵実施	①成形品試作									
		②データ整理・報告書作成									
		③装置組み立て・試運転									
-	4) 試験装置で回収した未燃CF等による中間基材・成形品	①成形品試作									
		②データ整理・報告書作成									
		③装置組み立て・試運転									
		④環境負荷低減効果の検証									
-	5) 事業実現可能性の検証	①成形品試作									
		②データ整理・報告書作成									
		③装置組み立て・試運転									
-	6) 事業実現可能性の検証	①成形品試作									
		②データ整理・報告書作成									
-	7) 実施結果の取りまとめ等	①成形品試作									
		②データ整理・報告書作成									

出典：矢野経研究所作成

2. 前処理集塵設備試験、未燃 CF による中間基材・成形品試作条件検討

今回の実証試験では、選定した前処理集塵装置（サイクロン、スクラバ、帯電+メッシュ）において未燃 CF の集塵、未燃 CF とダストの分級が可能か確認を行なうため、試験的に集塵装置を組み上げ、ラボレベルでの実証を行なった。

ラボレベルで試験を行なうにあたっては実際の ASR 燃焼施設（炉）での燃焼条件を参考に試験条件を設定した。ASR 燃焼施設（炉）には、セメントキルン炉（ロータリーキルン炉）、シャフト炉、流動床炉、サーモセレクト炉等様々なタイプがあり、燃焼方式や燃焼温度等条件も異なる。加えて、ASR の燃焼状況や、集塵設備に流れる未燃 CF やダストの状況（形状・量等）が常に一定でない。今回の実証では未燃 CF が最も明確に確認できた炉の条件下で 10mm 以上の未燃 CF の集塵が出来るのであれば、他の炉にも集塵装置が適用可能と考えた。

環境省「CFRP を含む ASR の再資源化に関する検討（2016 年度）」において、既に電気炉、ガス化熔融路、流動床炉、炭化炉等での CFRP の燃焼試験が行われているが、この際に未燃 CF が最も明確に確認できた炉が流動床炉であった。流動床炉での実証事業で原料中の CFRP 比率が 16wt% 程度の際に、約 0.4% の未燃 CF が焼却後残渣に含まれていた。今回の実証では環境省事業の流動床炉の条件を参考とすることとした。

表 2-1. 今回の試験条件まとめ

		実際の条件	今回の試験条件	
前処理集塵装置の集塵環境		実際の炉においてEP前段に設置。前処理集塵装置に流れ込む排気の温度や気化成分は燃焼物により異なる。	ラボレベルにおいて装置を組み立て、常温環境下で集塵試験を実施。	
集塵対象物	未燃CF	燃焼条件	炉内を想定した800℃で1時間の環境下（DBE-15型陶芸窯）で、CF単独で燃焼を行った。	
		CF種類	東レ製 T700SC-12K-50C 繊維長は3mm、10mm、50mmに設定	
	ダスト	組成	一定ではない。	集塵において問題となる粒径を指標とし、市販のフライアッシュ（石炭灰）（乾灰）を使用。組成自体は実際の炉から発生するダストを想定したものではない。
		燃焼条件	未燃CFと共に炉内で燃焼。	未燃CFと共に燃焼していない。
ダストと未燃CFの比率		その時々未燃CFの投入量による	過去の実証を参考に未燃CFの確認が最もできた流動床炉における燃焼後のダストと未燃CFの比率を適用	
中間基材・成形品試作		実際の炉に設置された前処理集塵装置からの回収物による試作	上記の条件設定における回収物による中間基材・成形品試作	

出典：矢野経済研究所作成

また、前処理集塵装置において使用する集塵対象物（未燃 CF 及びダスト）についても、流動床炉の条件を参考に擬似的に作成（用意）を行なった。今回の実証では未燃 CF とダストの分離が出来ず、残渣を含めて成型品に利用することも想定されたため、マニフェスト上 ASR も利用困難と判断した。表 2-1 に示した条件で集塵試験及び、集塵した未燃 CF 及びダストによる中間基材・成形品試作を行った。

2-1. バージン CF の物性と繊維長

本実証で用いるバージン CF の物性を表 2-2 に示す。本実証では東レ製 T700SC-12K-50C を使用した。CF の繊維長について EP において問題となる（集塵機の短絡を発生させる）10mm 以上を前処理集塵装置で集塵できるか確認できるように、集塵対象とする CF 繊維長を 50mm、12mm、3mm の 3 種類に設定した。

図 2-1 に示すように NEDO 「自動車に用いられる炭素繊維複合材料のリサイクル技術に関する検討」では、10mm 以下の CF の場合、概ね集塵能力を維持する 40～50kV の電圧を湿式 EP であれば確保できるとされている。

表 2-2. バージン CF の物性値（東レ製 T700SC-12K-50C）

引張項目		バージンCF
強度	MPa/kgf/mm ²	4,700
引張弾性率	GPa/kgf/mm ²	230
伸び	%	2

出典：日本化学繊維協会資料

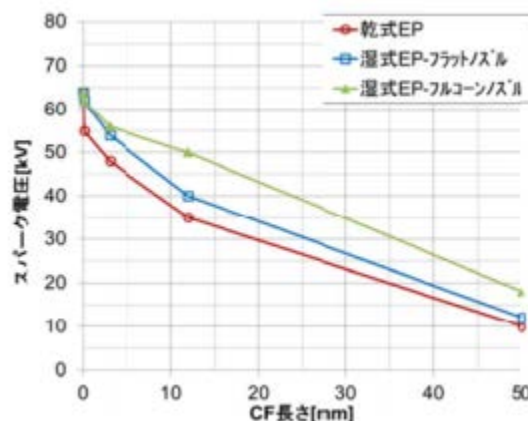


図 2-1. EP における CF 繊維長とスパーク電圧の関係

出典：NEDO 「自動車に用いられる炭素繊維複合材料のリサイクル技術に関する検討」（平成 28 年 2 月）

2-2. 未燃焼 CF の準備

今回の実証を行うにあたり、未燃 CF 及びダストは実際の炉で発生したものを利用していない。この理由の一つとして、自動車リサイクル法の対象となる ASR の燃焼後残渣（ダスト）を利用した場合、これらを成型品に利用するため、マニフェスト上 ASR は利用困難と判断し、実際の炉に近い環境で未燃 CF の作成を行うこととした。

未燃 CF の燃焼温度については炉内を想定した 800℃で行った。シンボ工業の DBE-15 型陶芸窯で 800℃、1 時間燃焼処理を行った。酸素濃度については、環境省の報告書^{*}から大気同様の 20.9%を採用した。

※ 「平成 28 年度低炭素型 3R 技術・システム実証事業（CFRP を含む ASR の再資源化に関する検討）」

未燃 CF 製造時（800℃処理）の CF の未燃率を表 2-3 に、バージン CF 及び 800℃処理前後の CF の状態（写真）を図 2-2 に示す。未燃率は燃焼処理前後の重さを測定して求めた。どの繊維長も同様に約 80%の未燃率であった。繊維長は燃焼処理前と同様の繊維長を保っていた。

$$\text{未燃率(\%)} = \text{処理後重量} / \text{処理前重量} \times 100$$

表 2-3.バージン CF 燃焼後の未燃率

繊維長	3mm	12mm	50mm
未燃率	81%	83%	83%

出典：日本化学繊維協会資料

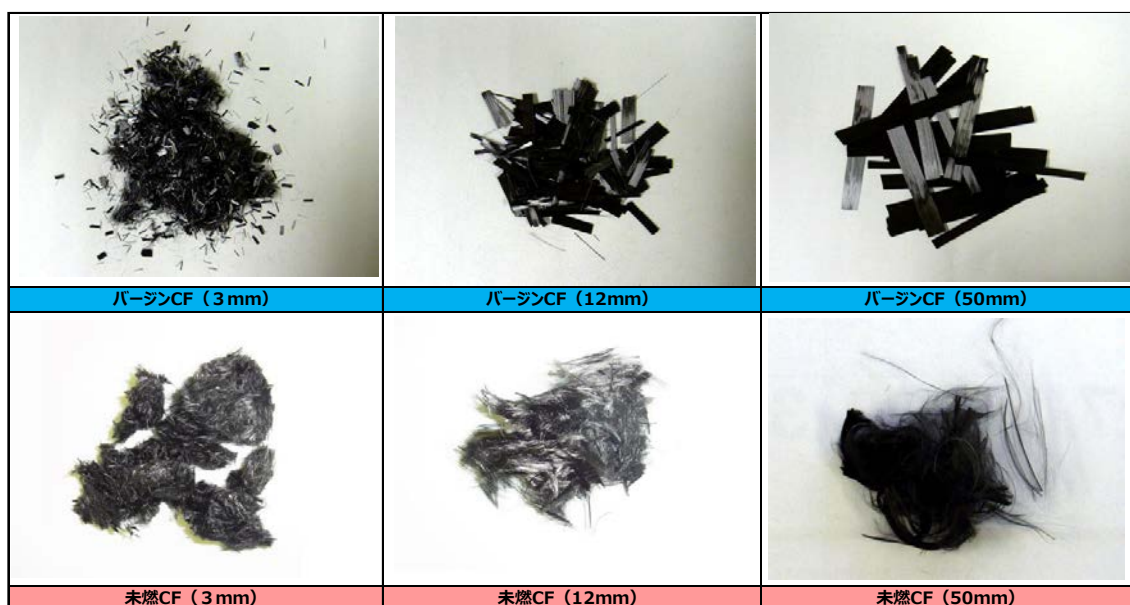


図 2-2.バージン CF 及び 800℃処理前後の CF の状態（写真）

出典：日本化学繊維協会資料

2-3. ダスト準備

先述したように、今回の実証では未燃 CF 及びダストは実際の炉で発生したものを利用していないため、擬似的にダストを作り出した。今回の実証では過去の実証実験※を参考に、流動床炉をモデルケースとして、燃焼後ダストと未燃 CF の比率、燃焼後ダストの粒子径を設定した。

※環境省「CFRP を含む ASR の再資源化に関する検討（2016 年度）」

流動床炉の燃焼後のダストの粒度分布等のデータ（文献等含む）を基に代替ダストを用意し、実証実験で利用した。

図 2-3 に示すように文献調査では、ごみ焼却炉から排出されるダストの平均粒径は約 20 μm であり、流動床炉で燃焼させる場合、事前にごみを細かく砕く必要があるため、排出されるダストの粒径はストーカ炉から排出されるダストよりも細かくなると想定される (<20 μm)。

流動床炉のダスト粒径について調査を行った結果、煤塵でのダストの平均粒径が 30 μm であった。文献より粒径が大きいが、これは消石灰や活性炭の添加量によるものと推測される。

上記の結果から本実験では流動床炉から排出されるダストの平均粒径を 20~30 μm 前後と仮定して、市販のフライアッシュ（石炭灰）を使用した。ダストの外観及び組成を図 2-4 に示す。

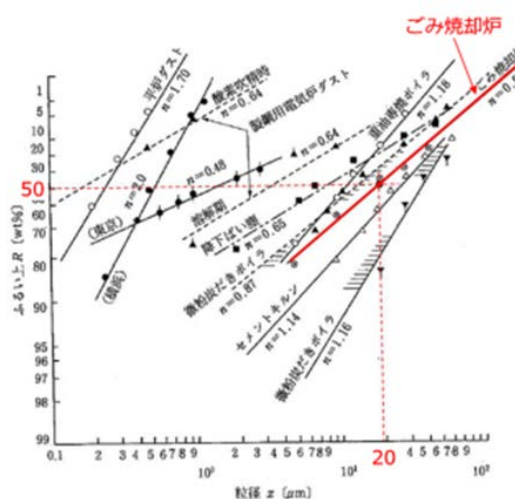


図 2-3.各種ダストの粒径分布例

出典：「環境圏の新しい燃焼工学」（1999 年）

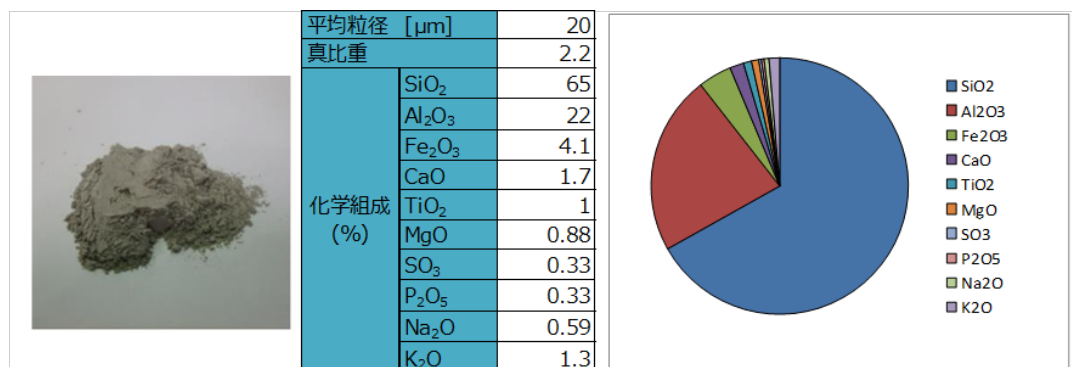


図 2-4.ダストの外観と組成

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料

なお、ASR によっては今回の実証で利用する乾灰だけでなく、燃焼温度低下後、粘着性の残渣が出てくるものも想定されるが、未燃 CF に付着した場合、粒形が大きくなり、より集塵しやすくなると想定される。今回は流動床炉の残渣を参照し、乾灰を使用することで、集塵 CF のリサイクル可能性について検証した。

2-4. ダストと未燃 CF の比率

未燃 CF と燃焼後のダストの配合比率も過去の流動床炉での実証数値^{*}を参考とし、未燃 CF が 0.4% に対してダストを 99.6% とした。

^{*}環境省「CFRP を含む ASR の再資源化に関する検討（2016 年度）」

3. 前処理集塵装置の構築

3-1. 装置全体フローの検討

(1) の未燃 CF を集塵するための高度分級システムの構築を行うため、小規模の実験設備を製作後、未燃 CF の集塵実証を行い、既存設備を活用したマテリアルサイクルの可能性を検討した。

図 3-1 に示すように今回検討した前処理集塵設備は、スクラバ、サイクロン、帯電+メッシュの 3 方式である。

まずは小規模実験装置の試作に関して試験装置の全体フローについて検討し、装置構成の決定を行った。試験装置の全体フローを図 3-2 に示す。未燃 CF を投入するための投入口、前処理集塵機、吸引ファン等から構成されている。ダクト類、サイクロンは金属(SS 製)で製作した。全体では縦 2,000mm、横 6,400mm~7,200mm である。

コンプレッサとフィーダを用いて未燃 CF 及びダストを供給する。最後段に誘引ファンを接続し、ファン回転数制御により風量調整可能 (10~30m³/min) な設計とした。前処理装置で集塵できなかった未燃 CF 及びダストの排出を防ぐため、フィルタを設置した。

限られた時間内で 3 方式の実証を行うために、各前処理集塵装置は取外し交換が可能な構造 (フランジ取り合い) とした。

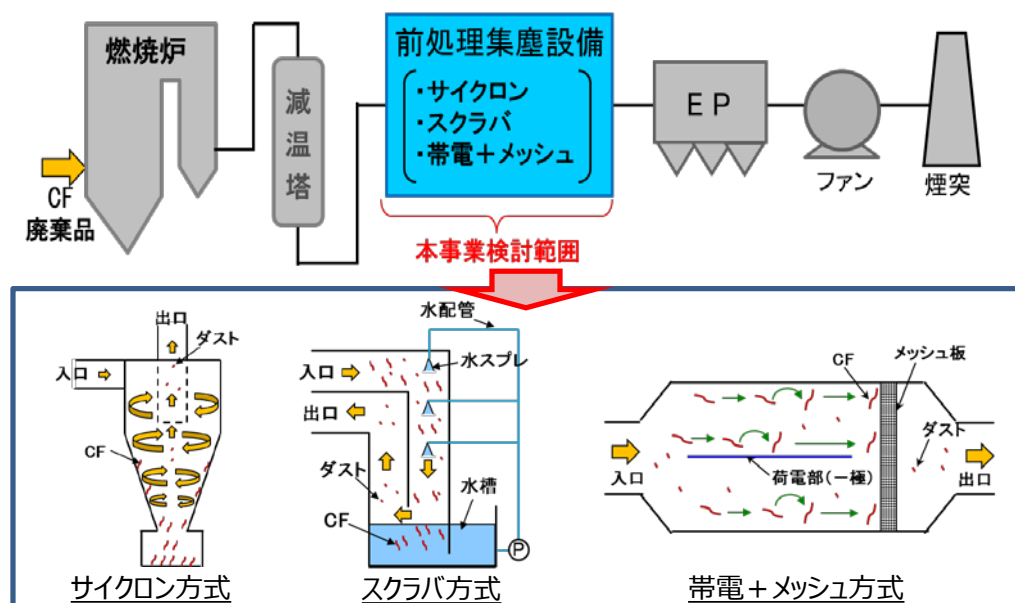


図 3-1.本実証で試験を行う前処理集塵機概要

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料より矢野経研究所作成

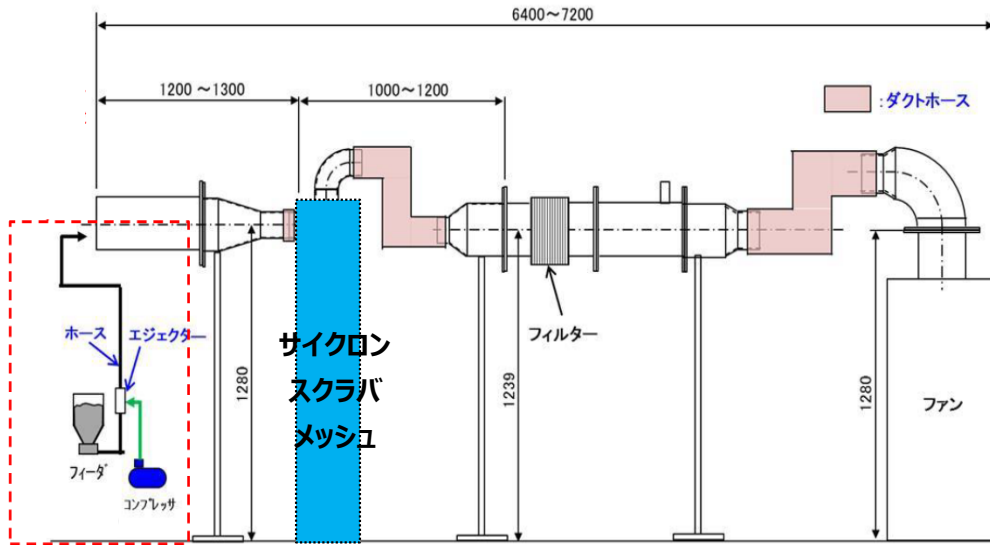


図 3-2. 装置全体のフロー

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料

表 3-1. 実験装置の基本設計

項目	詳細
試料供給量	約5g/m ³ N
風量	10~30 m ³ N/min

※m³N：0℃1気圧での1 m³のガス量

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料より矢野経研究所作成

表 3-1 に実験装置の基本設計を示す。試験供給量は粉体供給機能力とファン風量から設定を行った。風量に関しては 2015 年度の NEDO「自動車に用いられる炭素繊維複合材料のリサイクル技術に関する検討」の中で実施した集塵実験を参考に、前処理集塵装置内の風速を実機に合わせるため、10~30m³/min の範囲で風量調整を行った。

3-2. 前処理集塵装置 3 方式の設計・検討

今回の実証で検討を行う前処理集塵装置 3 方式の特徴を次に示す。

3-2-1. サイクロン

サイクロン方式は遠心力によりダストを集塵する方式である。サイクロン方式の集塵方法イメージ、装置仕様、写真を図 3-3 に、試験装置の全体像を図 3-4 に示す。通常サイクロンの入口流速は 15~25m/s の範囲で計画されるため、最大 25m/s まで試験可能な大きさとした。

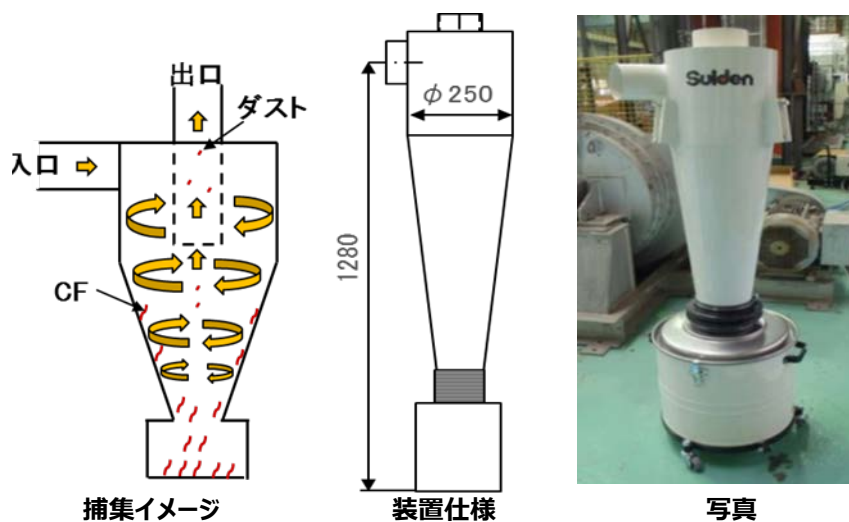


図 3-3.サイクロンの集塵方法イメージ、(中央) 装置仕様、(右) 写真

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料



図 3-4.サイクロンの試験装置全体像

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料

3-2-1. スクラバ

スクラバはスプレ噴霧によりダストを叩き落として集塵する方式であり、スプレの量や噴霧液径、ガス速度、除塵高さによって、集塵性能が決定する。本実証では、計画風量で集塵可能なレンタル品を採用することとした。集塵した CF はタンクから排水時に、フィルタを通して回収する。スクラバの集塵方法イメージ、装置仕様、写真を図 3-5 に、試験装置の全体像を図 3-6 に示す。

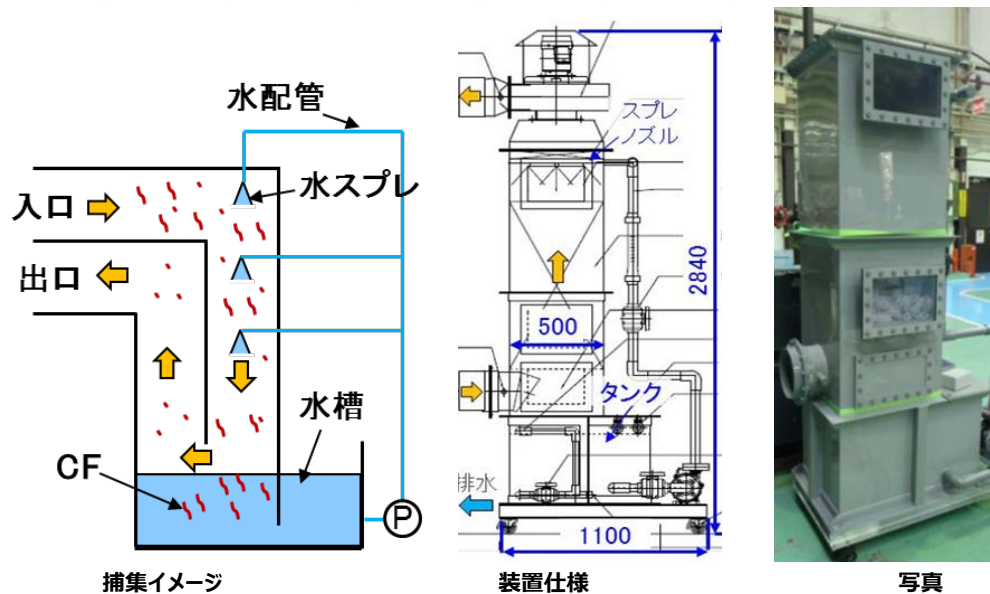


図 3-5.スクラバの集塵方法イメージ、(中央) 装置仕様、(右) 写真

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料

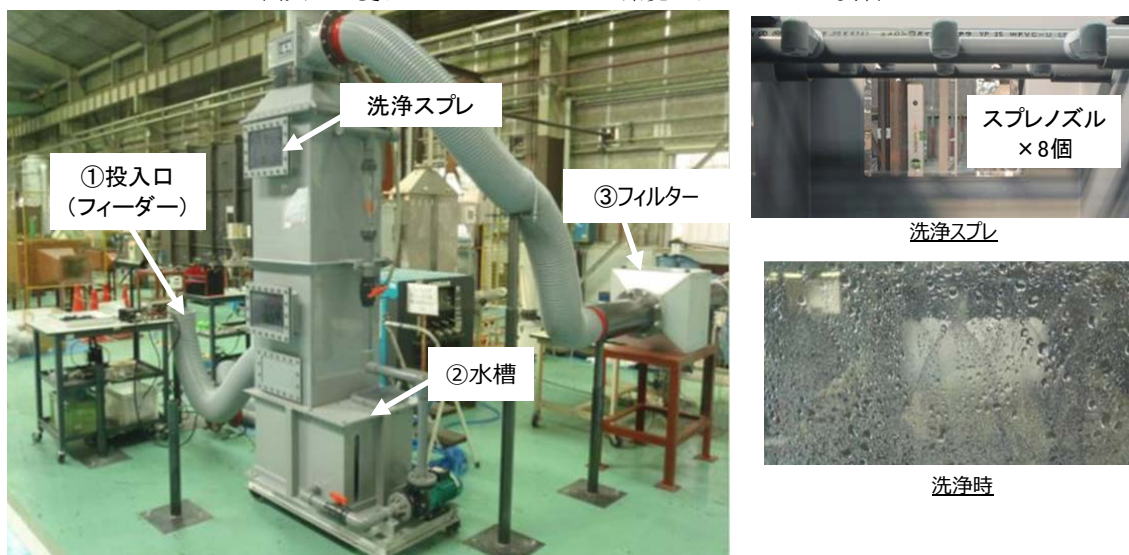


図 3-6.スクラバの試験装置全体像

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料

3-2-2. 帯電+メッシュ

帯電+メッシュは、静電気力で流れ方向と直角になるように CF の向きを変えて後段のメッシュで集塵する方式で、ダストは集塵されずにメッシュを通過する。帯電時間（速度、長さ）やメッシュ粗さによって集塵性能が決まる。

帯電区間は、縦 200mm、横 200mm、長さ 2m の塩ビダクト内とした。静電空間を作るため、塩ビダクト側面に鋼板を貼り付けた。パラメータは風量（風速、帯電時間）、メッシュの粗さ（目開き）とし、分級可能な最適条件を検討した。帯電+メッシュの集塵方法イメージ、装置仕様、写真を図 3-7 に、試験装置の全体像を図 3-8 に示す。内部可視化のため、透明アクリルを用いて角ダクトを製作した。

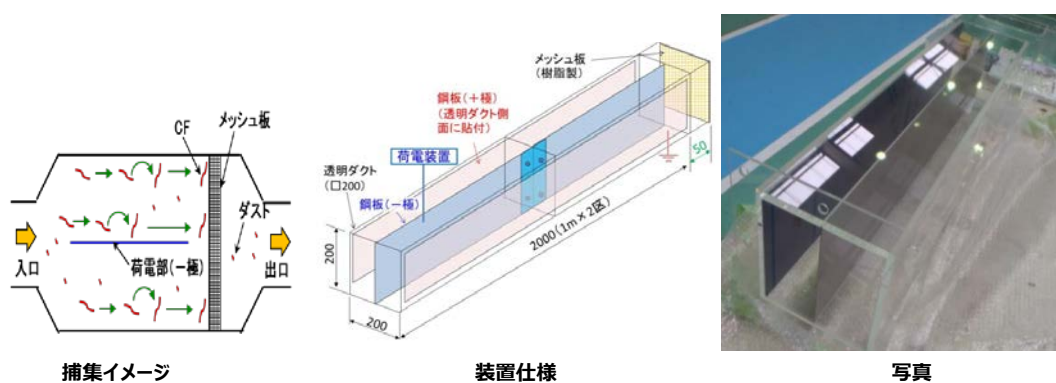


図 3-7.帯電+メッシュの集塵方法イメージ、（中央）装置仕様、（右）写真

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料

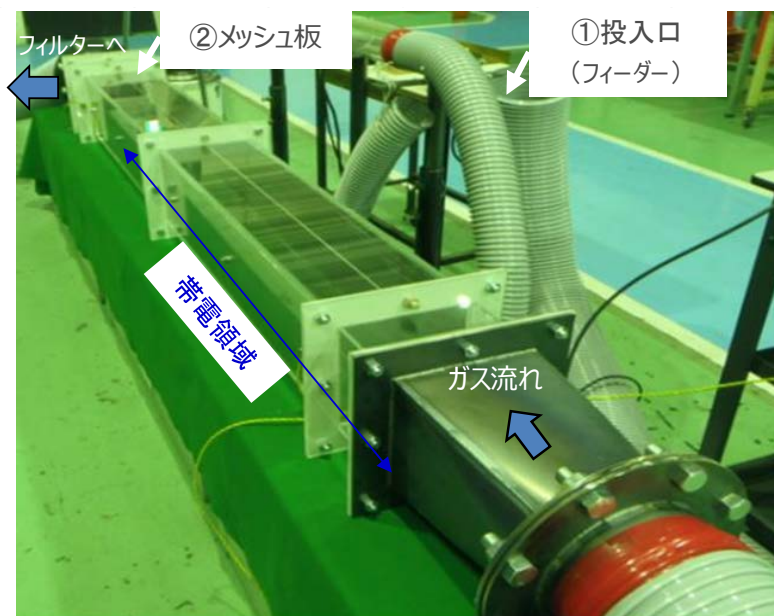


図 3-8.帯電+メッシュの試験装置全体像

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料

(1) 未燃 CF を集塵するための高度分級システムの構築では、STEP1 及び STEP2 の試験を実施した。表 3-2 に示した STEP1 の試験では、スクラバ、サイクロン、帯電+メッシュでそれぞれ 50mm、12mm、3mm の未燃 CF の集塵試験を行った（計 9 パターン：実証番号 1～9）。未燃 CF 投入量に対する前処理集塵装置での未燃 CF 集塵量を記録し、未燃 CF の集塵率を計算した。上記 3 方式から集塵効率の高かったサイクロンを選択し、50mm、12mm、3mm を等量ずつ混合した未燃 CF での集塵試験も行った（計 1 パターン：実証番号 10）。

表 3-3 に示した STEP2 では、STEP1 で集塵率が高かったサイクロン及び帯電+メッシュを選定し試験を行った。未燃 CF 及びダストを混合した試料を投入し、未燃 CF とダストの集塵率及び未燃 CF とダストの分級性を評価した。なお未燃 CF とダストの比率は重量ベースで未燃 CF を 0.4%、ダストを 99.6%とした。上記 2 方式でそれぞれ 50mm、12mm、3mm の未燃 CF 及びダストの集塵試験を行った（合計 6 パターン：実証番号 11～16）。更に未燃 CF とダストの分級性が高かった帯電+メッシュにおいて 50mm、12mm、3mm を等量ずつ混合した未燃 CF 及びダストの集塵試験を行った。

表 3-2.STEP1 未燃 CF の投入・集塵

実証番号	方式	投入する未燃CF長さ
1	スクラバ	3mm
2		12mm
3		50mm
4	サイクロン	3mm
5		12mm
6		50mm
7	帯電+メッシュ	3mm
8		12mm
9		50mm
10	サイクロン	3mm、12mm、50mm

出典：矢野経済研究所作成

表 3-3.STEP2 未燃 CF+ダストの投入・集塵

実証番号	方式	投入する未燃CF長さ	ダスト中の未燃CF比率（重量ベース）
11	サイクロン	3mm	0.40%
12		12mm	
13		50mm	
14	帯電+メッシュ	3mm	
15		12mm	
16		50mm	
17	帯電+メッシュ	3mm、12mm、50mm	

出典：矢野経済研究所作成

3-3. STEP1 未燃 CF の投入・集塵結果

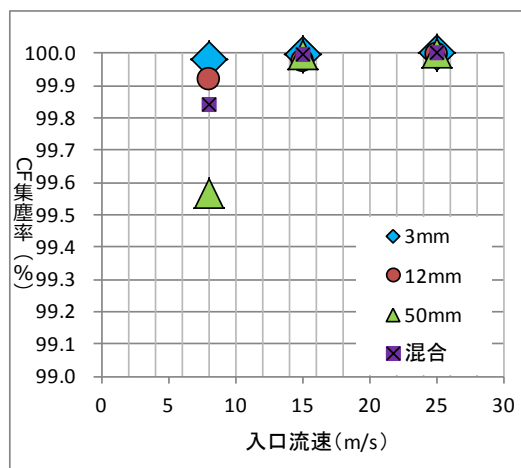
3-3-1. サイクロン

先述したようにサイクロンは遠心力によりダストを集塵する方式で、入口流速が高い程分離する粒子径が小さくなり集塵性能は向上するが、ある程度以上の高速になると流れの乱れで性能が低下する。サイクロンでは入口流速を 8 m/s、15 m/s、25 m/s と変化させ 3mm、12mm、50mm 及び混合品の集塵試験を実施した。試験の結果を表 3-4、図 3-9 に示す。3mm、12mm、50mm、混合の未燃 CF 共に、重量比でほぼ 100%集塵可能であった。入口流速 8 m/s の 50mm の未燃 CF の集塵試験では図 3-9 の右図に示すように一部の未燃 CF (0.0731g) がフィルタに付着してしまっただものの、集塵率は 0.3~0.4%程度の低下に留まった。

表 3-4.サイクロンでの集塵結果

STEP1 : サイクロン方式													
実証番号		1			2			3			10		
CF長さ	mm	3			12			50			混合		
入口流速	m/s	8	15	25	8	15	25	8	15	25	8	15	25
ガス量	m ³ /min	3.6	6.8	11.3	3.6	6.8	11.3	3.6	6.8	11.3	3.6	6.8	11.3
入口濃度	g/m ³ N	1											
CF供給時間	min	5											
CF供給量	g	16.87	31.63	52.71	16.87	31.63	52.71	16.87	31.64	52.74	16.87	31.63	52.71
フィルターCF付着量	g	0.003	0.0013	0.0001	0.0136	0.007	0.0008	0.0731	0.0006	0.0005	0.0271	0.0004	0.0003
集塵率	%	100.0	100.0	100.0	99.9	100.0	100.0	99.6	100.0	100.0	99.8	100.0	100.0

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料から矢野経済研究所作成



サイクロンの入口風速と集塵率の関係



実験後フィルター前段 (CF 50mm, 8m/s)

図 3-9.サイクロンでの入口風速と集塵率の関係、(右) フィルタの様子

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料から矢野経済研究所作成

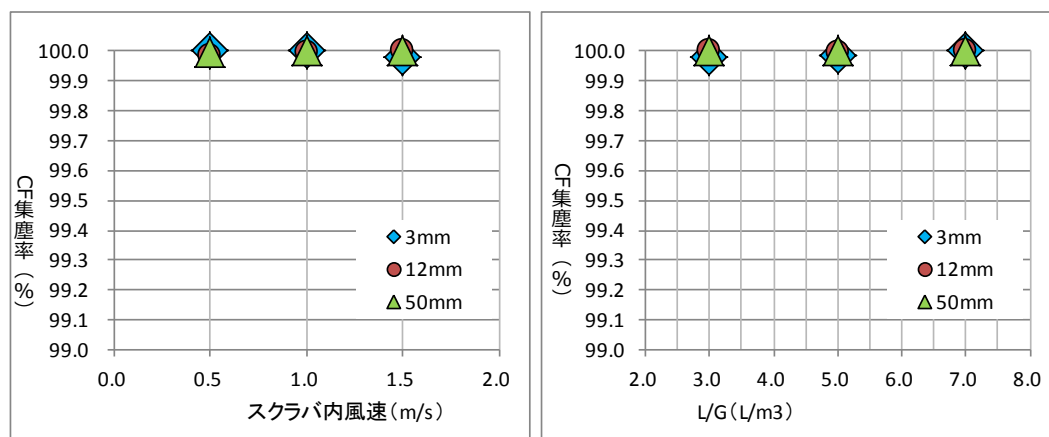
3-3-2. スクラバ

スクラバにおいて一般的な洗浄集塵装置（スプレー塔）の場合、風速は1~2m/s、液ガス比（スプレ量[L]/ガス量[m3]）2~3の範囲である。風速が遅いほど、また液ガス比が大きいく程、集塵率が向上するため、本実験では液ガス比 5.0 の条件においてスクラバ内風速を 0.5m/s、1.0m/s、1.5m/s と変化させ、風速 1.0 m/s の条件においてまた液ガス比を 3.0、5.0、7.0 で調節し 3mm、12mm、50mm の未燃 CF の集塵試験を実施した。表 3-5、図 3-10 に示すようにスクラバもサイクロンと同様、繊維長 3mm、12mm、50mm の未燃 CF を 100% 集塵できた。

表 3-5.スクラバでの集塵結果

STEP1: スクラバ方式																
実証番号		4					5					6				
CF長さ	mm	3					12					50				
スクラバ内流速	m/s	0.5	1.0	1.5	1.0	1.0	0.5	1.0	1.5	1.0	1.0	0.5	1.0	1.5	1.0	1.0
風量	m ³ /min	7.5	15.0	22.5	15.0	15.0	7.5	15.0	22.5	15.0	15.0	7.5	15.0	22.5	15.0	15.0
液ガス比L/G	-	5.0	5.0	5.0	3.0	7.0	5.0	5.0	5.0	3.0	7.0	5.0	5.0	5.0	3.0	7.0
入口濃度	g/m ³ N	1														
CF供給速度	g/min	7.23	14.47	21.7	14.47	14.47	7.23	14.47	21.7	14.47	14.47	7.23	14.47	21.7	14.47	14.47
CF供給時間	min	3														
CF供給量	g	21.70	43.41	65.11	43.41	43.41	21.70	43.41	65.11	43.41	43.41	21.70	43.41	65.11	43.41	43.41
フィルター-CF付着量	g	0.0001	0.0002	0.0116	0.0053	0.0001	0.003	0.0005	0.0003	0.0011	0.0001	0.0007	0.0002	0.0001	0.0003	0.0001
集塵率	%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料から矢野経済研究所作成



スクラバ内風速と集塵率の関係

L/G(スプレ量/ガス量)と集塵率の関係

図 3-10. スクラバでの集塵結果

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料から矢野経済研究所作成

3-3-3. 帯電+メッシュ

帯電+メッシュでは、メッシュの目開きを変更することで集塵対象物のサイズ（粒径）を変化させることができる。本実験では、メッシュの目開きを2.1mm、5.5mm、3mmと変化させ集塵試験を行った。試験の結果を表3-6、図3-11に示す。2.1mmのメッシュでは3mm、12mmの未燃CF共に、重量比でほぼ100%集塵可能であることを確認した。3mmのメッシュでも、3mm、12mm、50mmの未燃CF共に重量比でほぼ100%捕集可能であった。

メッシュの目開きが5.5mmでは3mm及び12mmの未燃CFの集塵率が低下した。メッシュの目開き5.5mmにおける3mmのCFの集塵試験の様子（メッシュ及びフィルター）を図3-11の右図に示す。

表 3-6.帯電+メッシュでの集塵結果

STEP1：帯電+メッシュ													
実証番号		7			8			7			8		
メッシュ目開き	mm	2.1mm (10mesh)			5.5mm(4mesh)			3mm(7mesh)					
CF長さ	mm	3			12			3			50		
電圧	kV	3	0	3	0	3	0	3	3	3	3		
荷電時間	s	0.20											
入口流速	m/s	10											
ガス量	m ³ /min	24.0											
入口濃度	g/m ³ N	0.0040											
CF供給時間	min	5											
CF供給量	g	0.4457	0.4455	0.4454	0.4457	0.446	0.4466	0.4468	0.4477	0.4471	0.4468		
フィルターCF付着量	g	0.0003	0.0003	0.0007	0.0001	0.1481	0.1162	0.017	0.0033	0.0016	0		
集塵率	%	99.9	99.9	99.8	100.0	66.8	74.0	96.2	99.3	99.6	100.0		

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料から矢野経済研究所作成

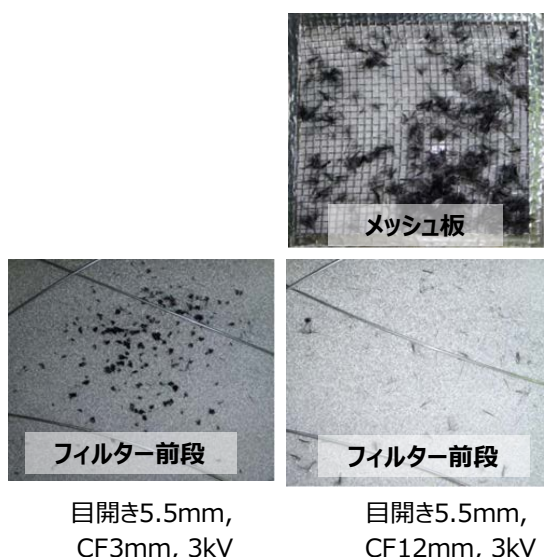
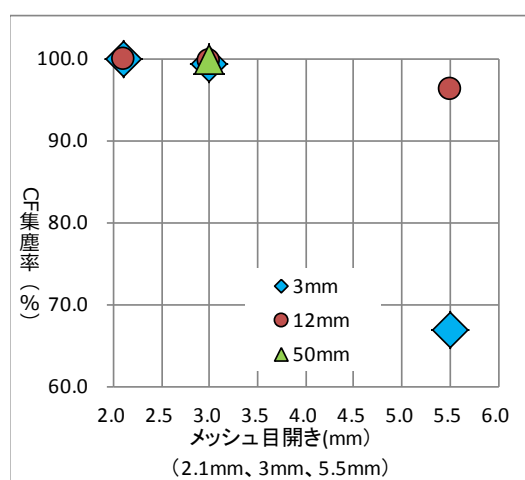


図 3-11.帯電+メッシュでの集塵率及びフィルタ及びメッシュの様子

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料から矢野経済研究所作成

3-3-4. STEP1 のまとめ

サイクロンは入口風速15 m/s、25 m/sにおいて全ての繊維長の未燃CFの集塵率がほぼ100%であった。スクラバは風速、液ガス比に関係なく全ての繊維長の未燃CFの集塵率がほぼ100%であった。帯電+メッシュでは、メッシュの目開き2.1mm及び3mmにおいて全ての繊維長の未燃CFの集塵率がほぼ100%であった。その中でも特にスクラバの集塵率が高い値を示していた。

3-4. STEP2 未燃 CF+ダストの投入

STEP2 の試験では、未燃 CF とダストの分級性が期待できるサイクロン及び帯電+メッシュで試験を行なった。一般的にスクラバはサイクロンよりも微細なダストを多く集塵するため、分級性は低いと考えられる。帯電+メッシュではメッシュの目開き変更により粒子径の異なる未燃 CF とダストの分級性を向上できると考えた。

3-4-1. サイクロン

サイクロンの試験結果を表 3-7、図 3-12 に示す。サイクロンの通常仕様は入口風速 15～20m/s で計画されるが、今回入口風速 8m/s と通常仕様の 50%の値とすることで未燃 CF とダストとの分級性を期待したが、60%以上のダストが未燃 CF と共に集塵された。

表 3-7.サイクロンでの集塵結果

STEP2 : サイクロン方式										
実証番号		11			12			13		
CF及びダスト条件		CF3mm+ダスト			CF12mm+ダスト			CF50mm+ダスト		
入口流速	m/s	8	15	25	8	15	25	8	15	25
ガス量	m ³ /min	3.6	6.8	11.3	3.6	6.8	11.3	3.6	6.8	11.3
CF+ダスト入口濃度	g/m ³ N	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.8	1.0	1.0
CF+ダスト供給時間	min	10								
CF+ダストCF供給量	g	29.4	62.3	105.3	29.3	62.6	105.3	28.6	61.9	105.3
CF供給量	g	0.13	0.25	0.42	0.13	0.25	0.42	0.14	0.26	0.42
CF含有率	%	0.44	0.40	0.40	0.44	0.40	0.40	0.49	0.42	0.40
捕集缶捕集量	g	18.11	49.25	93.58	21.29	52.06	94.33	18.50	51.65	97.67
フィルターCF付着量	g	0	0	0	0.0003	0	0	0	0	0
未燃CF集塵率	%	100.0	100.0	100.0	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
ダスト集塵率	%	61.5	79.0	88.8	72.7	83.1	89.5	64.6	83.4	92.7

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料から矢野経済研究所作成

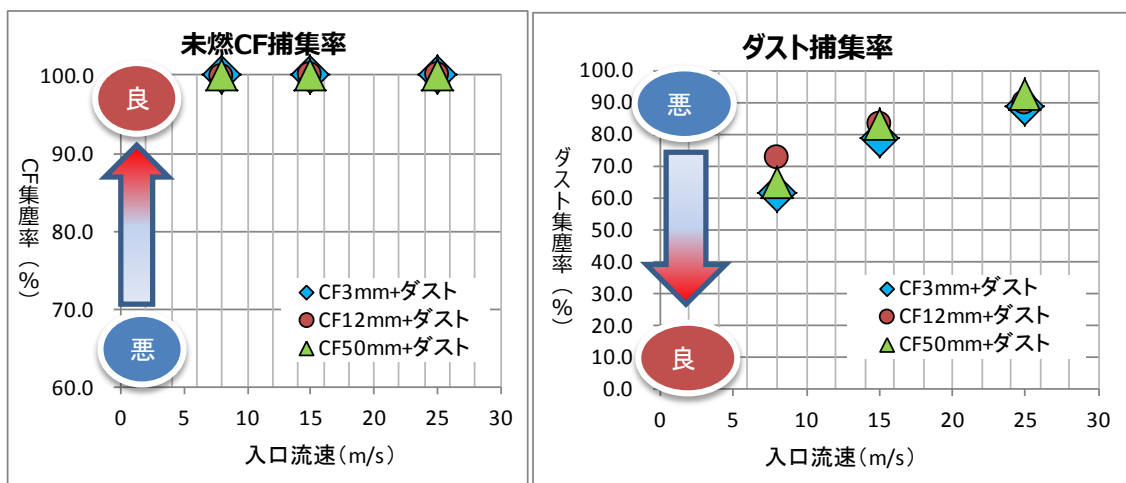


図 3-12. サイクロンでの集塵結果

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料から矢野経済研究所作成

CF 繊維長 12mm+ダストの試験における捕集缶の様子を図 3-13 に示す。一般にサイクロンは風速が遅いほど集塵率が低下するが、上記よりさらに流速が低い範囲は重力沈降（自然沈降）と同等となり、サイクロンによるダストと未燃 CF の分級について、大幅な改善は期待できないと考えられる。



実験後のサイクロン捕集缶（CF 12mm, 8m/s）

図 3-13.実験後のサイクロン集塵缶

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション撮影

3-4-2. 帯電+メッシュ

帯電+メッシュでは、メッシュの目開き 2.1mm、3mm で集塵試験を行なった。試験結果を表 3-8、図 3-14 に示す。

表 3-8.帯電+メッシュによる未燃 CF+ダストの分級試験結果

STEP2：帯電+メッシュ															
実証番号	14						15			16			17		
CF及びダスト条件	CF3mm+ダスト						CF12mm+ダスト			CF50mm+ダスト			混合+ダスト		
メッシュ目開き	2.1mm (10mesh)						3mm (7mesh)								
n数	1回目	2回目	3回目 現地視察	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
電圧	kV														3
荷電時間	s														0.2
入口流速	m/s														10
ガス量	m ³ /min														24
CF+ダスト入口濃度	g/m ³ N														1.00
CF+ダスト供給時間	3	5					3								
CF+ダストCF供給量	67.34	112.19	111.88	67.17	67.19	67.23	67.27	67.39	67.3	67.25	67.28	67.28	67.3	67.32	67.38
CF供給量	0.27	0.45	0.45	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
CF含有率	%														0.4
メッシュ捕集量	0.363	0.5552	5.3635	0.3237	0.3073	0.3088	0.7089	0.7062	0.6128	1.084	1.656	1.1253	0.7843	0.7822	0.4992
フィルターCF付着量	0.0001	0	0	0.0039	0.0026	0.0073	0.0006	0.0013	0.0016	0	0	0	0.0022	0.0017	0.0008
未燃CF集塵率	100.0	100.0	100.0	98.5	99.0	97.3	99.8	99.5	99.4	100.0	100.0	100.0	99.2	99.4	99.7
ダスト集塵率	0.14	0.10	4.41	0.09	0.06	0.07	0.66	0.65	0.51	1.22	2.07	1.28	0.77	0.77	0.34

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料から矢野経済研究所作成

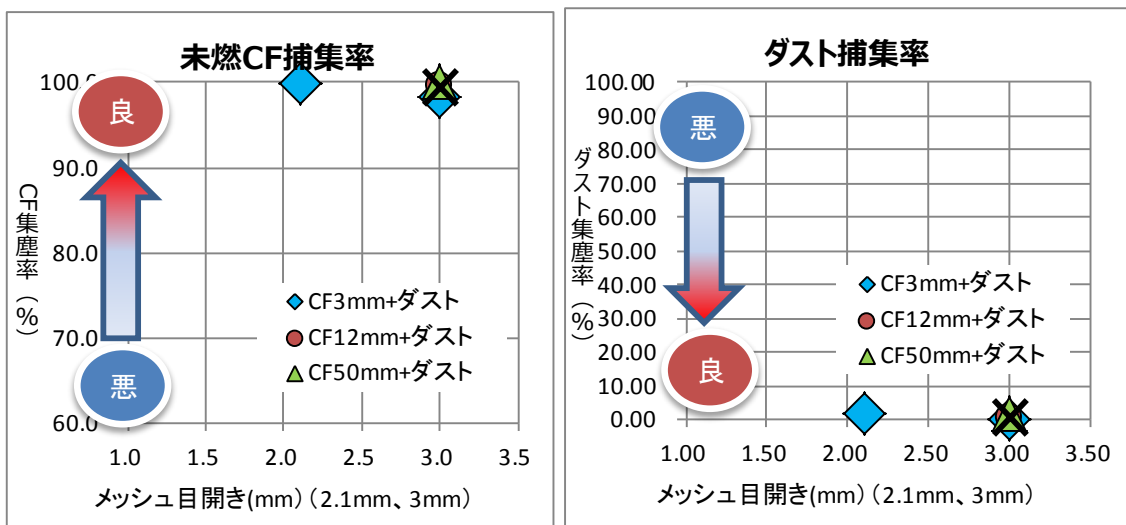


図 3-14. 帯電+メッシュによる未燃 CF+ダストの分級試験結果

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション資料から矢野経済研究所作成

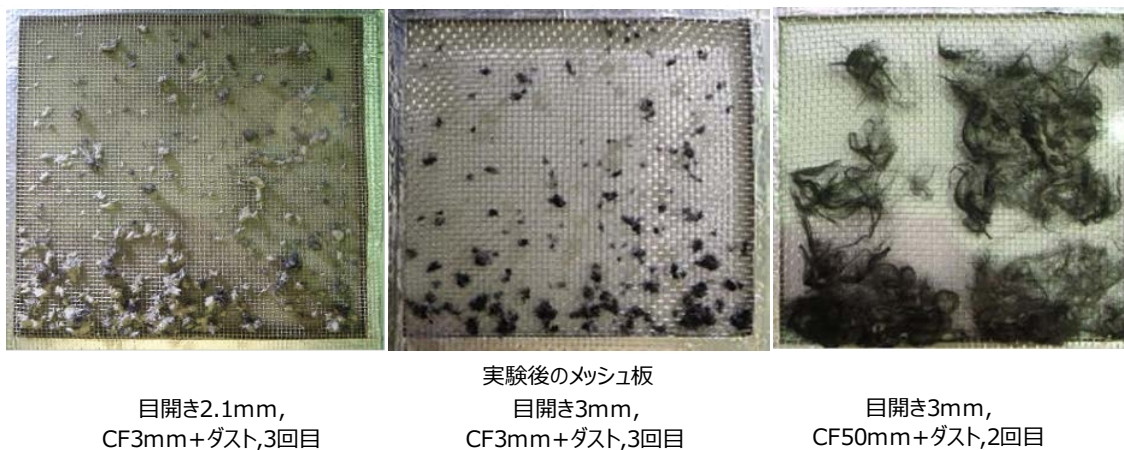


図 3-15.帯電+メッシュのメッシュの様子

出典：三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション撮影

メッシュの目開き 2.1mm における CF3mm+ダストの集塵試験では、分級性が高かった 1 回目 (ダスト集塵率 0.14%)、2 回目 (同 0.10%) の試験結果と比べて、3 回目においてダストの集塵率が 4.41%に増えてしまった。これは未燃 CF がダストよりも先に多く流れてしまい、メッシュを塞いだため、ダスト残存量が多くなったと推定される。ダストの残存量を減らす解決策としてメッシュの目開きを 3mm に拡大させた。また試験結果がばらつく可能性があるため、同条件で 3 回実施した。メッシュの目開きを拡大させた結果、未燃 CF とダストの分級性が向上し、全ての繊維長の未燃 CF+ダストの分級試験においてダストの集塵率が 0.数%~2%にまで低下させることができた。目開きの違いによるメッシュの様子を図 3-15 に示す。

3-4-3. STEP2 のまとめ

STEP2 の未燃 CF+ダストの集塵試験では、サイクロン及び帯電+メッシュで実証を行った。サイクロンは遠心力によりダストを集塵する方式であり、入口流速は通常 15~25m/s の範囲で計画される。入口流速が高い程細かな粒子の集塵率が低下することから、粒子径の異なる未燃 CF とダストの分級性を高めるため入口風速を通常仕様の 50%となる 8m/s まで下げて試験を行った。帯電+メッシュでは、粒子径の異なる未燃 CF とダストの分級精度向上のため、メッシュの目開きを変更した。

その結果、サイクロンでは入口風速を 8m/s まで下げても 60%以上のダストを集塵してしまっただが、帯電+メッシュではダストの集塵率を約 1%に抑えることができた。

3-5. 前処理集塵装置の構築まとめ

表 3-9 に各前処理方式に対する評価を示す。未燃 CF 単独の集塵性は 3 方式共に優れていたが、ダストとの分級性は帯電+メッシュが最も優れているという結果となった。

表 3-9. 各前処理方式に対する評価

	サイクロン	スクラバ	帯電+メッシュ
未燃CFの集塵性	○	○	○
ダストとの分級性	×	× (推定)	○

出典：矢野経済研究所作成

4. 未燃 CF 等による中間基材・成形品試作

(2) 集塵した CF 繊維長に合わせたリサイクル中間基材（不織布）の開発を行なった。図 4-1 に示すように CF と PA 繊維を大和機工の Op-200 型オープナーで開繊・混合した後、東亜ノンウーヴェンマシナリー M18S-400 型カード機によって中間基材を作製、中間基材を熱プレス成形することで板状（250mm×250mm）の成形品（熱可塑性 CFRP）を試作した。バージン CF による成形品と、未燃 CF による成形品の物性比較を行いマテリアルリサイクルの可能性を検討した。実証方法を表 4-1 に示す。なお各繊維長の集塵未燃 CF は最も集塵率の高かった方式（サイクロン、スクラバ、帯電+メッシュ）の集塵品を利用した。使用した PA 繊維は EMS-GRIVORY 製 Grilon（38mm）である。PA は PP とほとんど価格が変わらない一方で、物性は高く、また採用実績も PP よりも多いため選定した。

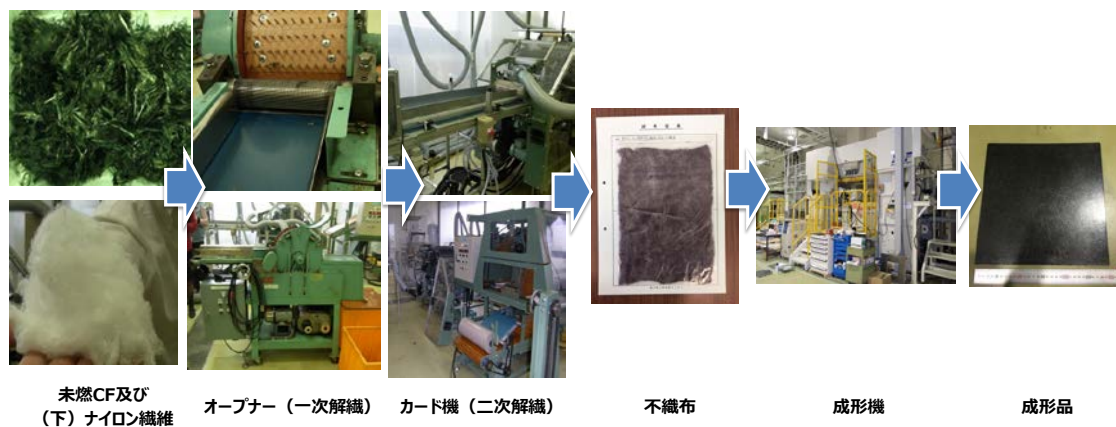


図 4-1.中間基材、成形品試作工程

出典：矢野経済研究所作成

表 4-1.集塵未燃 CF 等による成形品試作

実証番号	使用するCF長さ	CF種類	使用樹脂	成形品のCF 体積含有率 (Vf%)	成形法
18	3mm	バージン	熱可塑性樹脂（ナイロン）	約25%	プレス成形
19		集塵未燃CF			
20	12mm	バージン			
21		集塵未燃CF			
22	40mm	バージン			
23		集塵未燃CF			
24	混合	バージン（各長さ等量）			
25		集塵未燃CF			
26	混合+ダスト	集塵未燃CF+ダスト	—		

※混合：3mm、12mm、50mmのCFが混合

出典：矢野経済研究所作成

4-1. プレ中間基材試作

表 4-1 で示した実証試験の前に中間基材の作成方法の検討を進めるため、プレ中間基材試作を行なった。表 4-2 に示すように繊維長約 10mm のバージン CF（予備試験①）と未燃 CF（予備試験②）を用いて CF の重量含有率 35wt% の不織布の作成を行なった。未燃 CF は 800℃ で 1 時間燃焼したものである。試験で使用したバージン CF、未燃 CF、PA 繊維を図 4-2 に示す。

表 4-2. 予備試験使用材料

試験番号	使用材料		
予備試験 ①	CF	東レ製T700SC-12K-50C	繊維長10mm
	ナイロン繊維	EMS-GRIVORY製Grilon	繊維長38cm
予備試験 ②	未燃CF	東レ製T700SC-12K-50C ※800℃で1時間焼却、焼却後の減量率は4.7%	繊維長10mm
	ナイロン繊維	EMS-GRIVORY製Grilon	繊維長38cm

出典：日本化学繊維協会資料



10mmのバージンCF

10mmの未燃CF
(800℃で1時間燃焼)

PA繊維

図 4-2. バージン CF、未燃 CF、PA 繊維

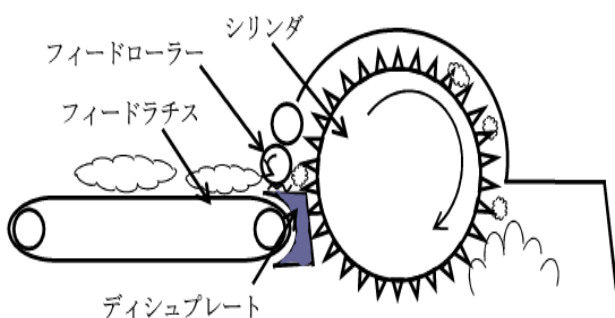
出典：日本化学繊維協会資料

中間基材の試作では図 4-3 のオープナー(1次解繊機)及び図 4-4 のカード機(二次解繊)を用いて試作を行った。なおカード処理条件は、フィードローラー(供給)速度 0.5rpm、ドファ(送出)速度 5.0rpm である。

当初は図 4-5 の作成方法 1 のように、CF と PA 繊維を軽く混ぜ合わせた資料をオープナーで開繊・混合した後、カード機によって中間基材を作成する予定であったが、予備試験①のバージン CF は繊維が硬く、図 4-6 に示したようにオープナーのディッシュプレート部に落下して(挟まって)しまった。落ちることを想定し、CF を多めに(50%)入れて中間基材を試作したが、やはりバージン CF が落ちてしまうためやり方を変更した。

予備試験①のバージン CF 及び PA 繊維による中間基材作成では、まずはオープナーで PA の不織布を 2 枚製造する。その PA 不織布 2 枚の間に半量のバージン CF を挟みカード処理を行った。この製造された不織布にさらに半量の CF を挟んで、カード機にかけて中間基材を作成した(図 4-5 の中間基材作成方法 2)。

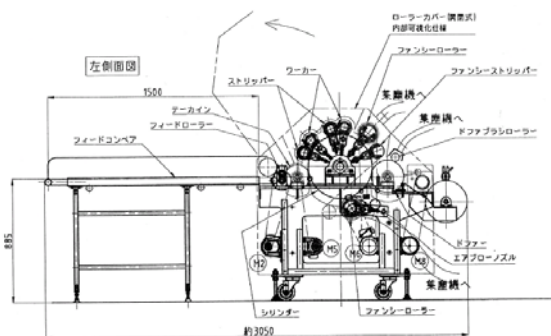
予備試験②の未燃 CF 及び PA 繊維による中間基材作成でも、まずはオープナーで PA の不織布を先に製造する。その PA 不織布 2 枚の間に全量の CF を挟んで、カード機にかけて中間基材を作成した(図 4-5 の中間基材作成方法 3)。



オープナー(一次解繊)：大和機工(株) Op-200 型

図 4-3.オープナー(1次解繊機)

出典：日本化学繊維協会資料



カード機(二次解繊)：東亜ノウヴェンマシナリー(株) M18S-400 型
(フィードローラー(供給)速度 0.5rpm、ドファ(送出)速度 5.0rpm)

図 4-4.カード機(二次解繊)

出典：日本化学繊維協会資料

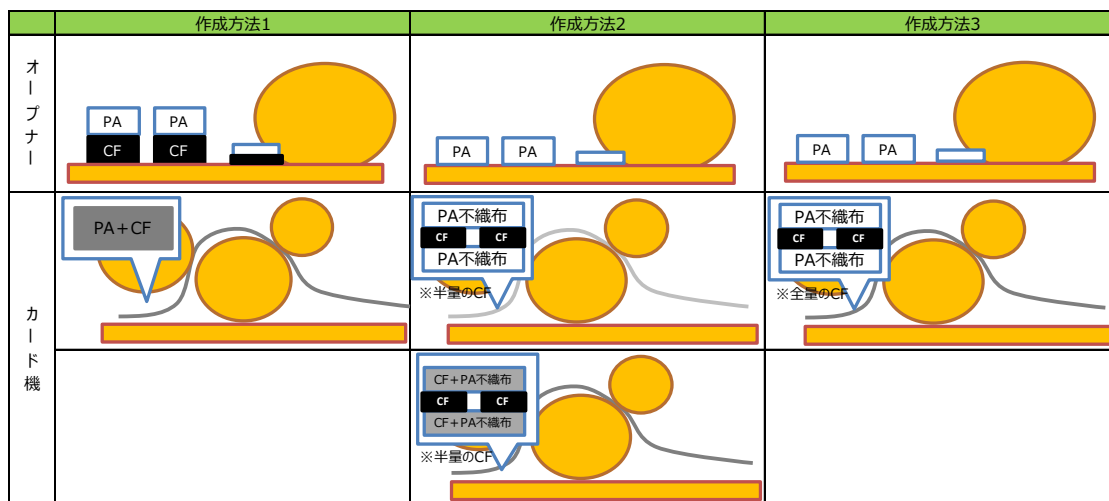


図 4-5.中間基材作成方法

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成



図 4-6.オープナーのディシュプレート部に挟まったCF

出典：日本化学繊維協会資料

作成した中間基材におけるCF含有率を測定した。測定方法は、作成した不織布からランダムに10箇所を選び各箇所1gずつの繊維を採取し、坩堝にいれ、(株)アドバンテックKL-160型電気炉で600℃で1時間処理した後、重量を測り、図4-7の計算式に基づき含有率を算出した。それに基づく予備試験結果を表4-3に示す。予備試験①と予備試験②を比較したときに、予備試験②の未燃CFのほうが試作品重量が重かったことから、途中で脱落したCF量、PA量が少なかったといえる。この要因として未燃CFのほうが綿状になっているため、カード処理に適していたと考えられる。また予備試験①および②の中間基材

の写真を図 4-8 に示す。未燃 CF を用いた予備試験②の中間基材のほうが CF と PA 繊維がより混合していた。

不織布未燃量 (g) =	CF未燃量 (g) + PA未燃量 (g)	(1)
=	(CF未燃率 %) × CF含有量 (g) + PA未燃率 % × (1 - (CF含有量 (g)))	(2)
PA未燃率 (%) =	PA 100% 不織布の未燃量 (g) ÷ 1(g)	
CF未燃率 (%) =	CF繊維 100% 不織布の未燃量 (g) ÷ 1(g)	
CF含有量 (g) =	$\frac{\text{不織布未燃量 (g)} - \text{PA未燃率 \%}}{\text{CF未燃率 \%} - \text{PA未燃率 \%}}$	(3)
CF含有率 (%) =	CF含有量 (g) ÷ 1(g) × 100	(4)

※CF=炭素繊維、PA=ナイロン繊維

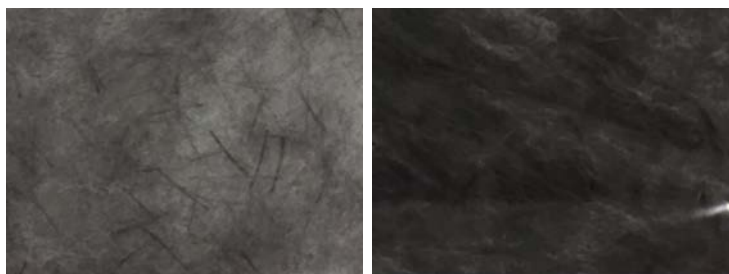
図 4-7.CF 含有率の計算式

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成

表 4-3.予備試験結果

試験	種類	重量	中間基材 化率	試料投入量と回収量			結果
				-	CF	PA	
予備試験 ①	バージン CF+PA	試料投入量	-	投入重量 (g)	250	250	CF含有量 35wt%の不織 布を作成できた
		500g		想定含有量 (wt%)	50	50	
		試作品重量	72%	重量 (g)	171	189	
		360g		含有量 (wt%)	47.5	-	
予備試験 ②	未燃CF +PA	試料投入量	-	投入重量 (g)	250	250	未燃CFのほう が綿状になって いるため、カード 処理に適していた。
		500g		想定含有量 (wt%)	50	50	
		試作品重量	89%	重量 (g)	216	229	
		445g		含有量 (wt%)	48.5	-	

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成



①の中間基材

②の中間基材

図 4-8.予備試験①および②の中間基材

出典：日本化学繊維協会撮影

4-2. 中間基材試作

4-2-1. 中間基材作成

中間基材の CF 繊維重量含有率 35 wt% を目指し、バージン CF、未燃 CF、未燃 CF+ダストによる中間基材試作を行なった。中間基材の作成方法及び中間基材の CF 繊維含有量の結果を表 4-4 に示す。

表 4-4. 中間基材作成方法及び中間基材の CF 繊維含有量

実証番号	CF			PA	作成方法	CF繊維重量含有率 (wt%)
	長さ	種類	投入量 (g)	投入量 (g)		
18	3mm	バージンCF	260	200	図4-5作成方法3	30%
			375	200	図4-5作成方法3 (投入CF量を375gに増量)	37%
19		未燃CF	260	200	図4-5作成方法3	47%
20	12mm	バージンCF	260	200	図4-5作成方法3	53%
21		未燃CF	250	250	図4-5作成方法1	37%
22	50mm	バージンCF	250	250	図4-5作成方法1	44%
23		未燃CF	250	250	図4-5作成方法1	42%
24	混合	バージンCF	250	250	図4-5作成方法1	42%
25		未燃CF	250	250	図4-5作成方法1	45%
26	混合+ダスト	未燃CF	250 ※ダスト含む	250	図4-5作成方法1	—

※混合：3mm、12mm、50mmのCFが等量配合

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成



図 4-9. カード機のテーカインの下に脱落した CF

出典：日本化学繊維協会撮影

繊維長 3mm のバージン CF、3mm の未燃 CF、12mm のバージン CF 及び PA 繊維による中間基材作成ではオープナーのディッシュプレート部の隙間に CF が挟まり、オープナーが停止した。そのため CF がカード機の入口部分にあるテーカインで運ばれるよう、先述した図 4-5 の作成方法 3 で中間基材の作成を行なった。特にバージン CF は剛直なうえ油剤が付いており摩擦力が弱く、オープナーやカード機の入口部にあるローラーに沿って移動しにくい。それによりローラーの前に溜まったり、ローラーの下側を通り過ぎて落下しやすかった。またカード機に直接かける場合でも、CF が短いと図 4-9 に示したようにテーカインの下に CF が脱落する量が多く、CF 含有量 35wt%以上を達成できなかった。バージン CF と比較し未燃 CF は油剤もなく柔軟性も付与され、オープナーなどで処理しやすくなったが、繊維長 3mm については凝集力が強く、大きな塊がオープナーのディッシュプレート部に詰まってしまった。

繊維長 50mm の CF は若干の柔軟性とキャリアの PA 繊維との絡みもあり、図 4-5 の作成方法 1 であるオープナーやカード機で処理できた。混合、混合+ダストについても、図 4-5 の作成方法 1 で作成を行なった。図 4-10 に示したように混合+ダストによる中間基材試作では未燃 CF 以外の粉塵状の不純物（ダスト）が混ざっており、オープナーの下に落下するより舞い上がる量が多かった。なお落下物は主に 3mm および 12mm の短い繊維長の CF であった。その結果表 4-4 に示したように 3mm のバージン CF 以外、中間基材の CF 繊維重量含有率 35 wt%以上を達成した。

表 4-4 に示したように 3mm のバージン CF のみ目標の CF 繊維重量含有率 35wt%を超えなかったため、投入 CF を増やし（200 g → 375g）、図 4-5 の作成方法 3 で作成した結果、CF 含有量が 37%wt%となった。

作成した不織布の外観を図 4-11、図 4-12 に示す。

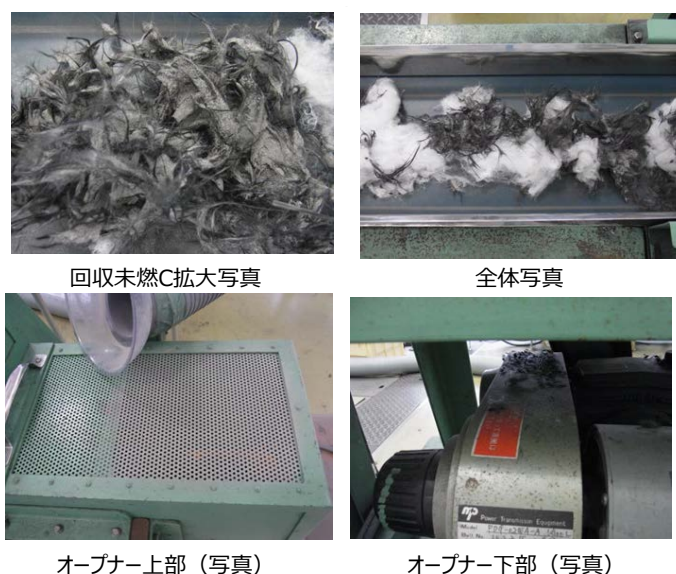


図 4-10. 未燃 CF+ダストによる中間基材作成の様子

出典：日本化学繊維協会撮影

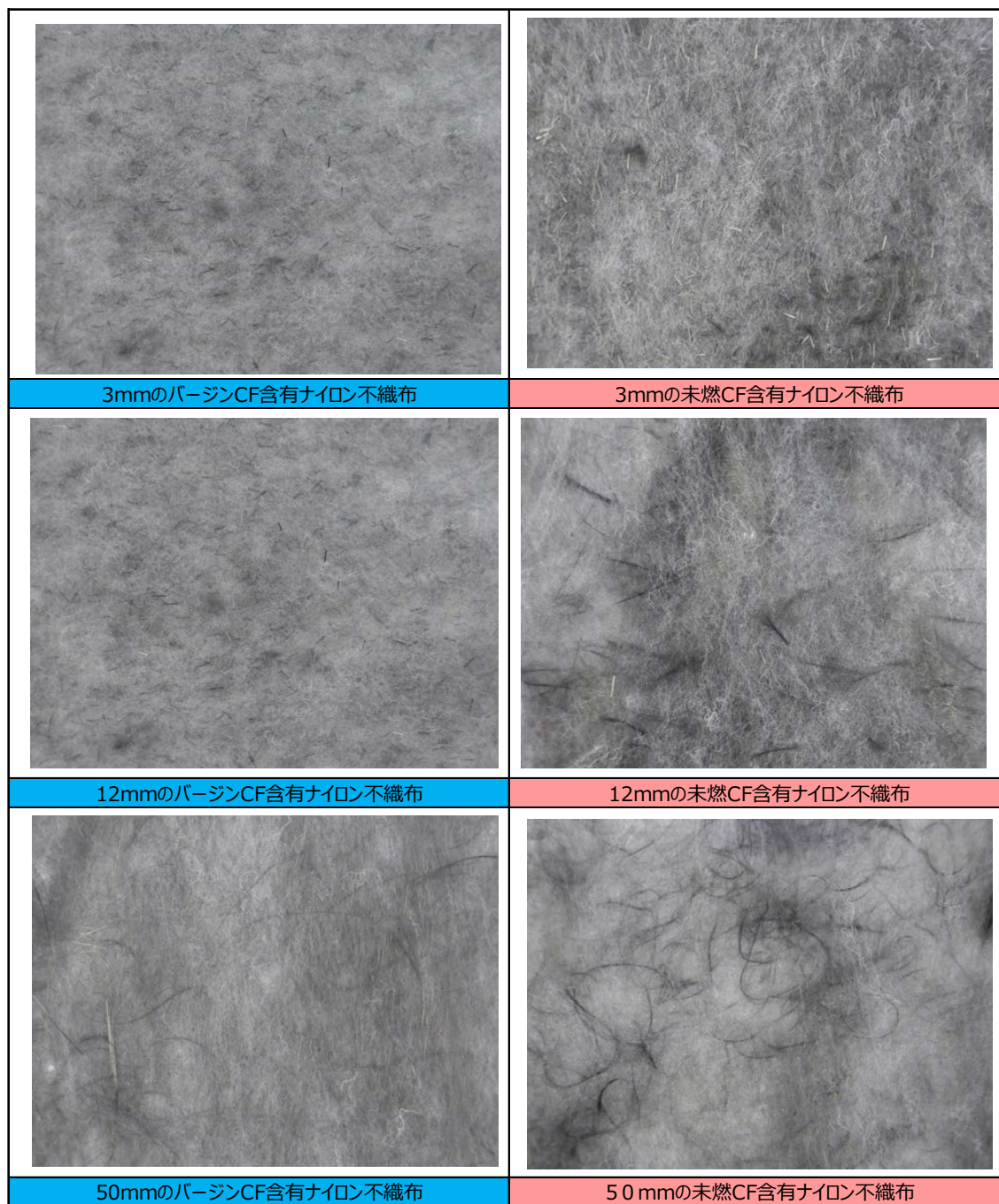


図 4-11.不織布外観①

出典：日本化学繊維協会撮影

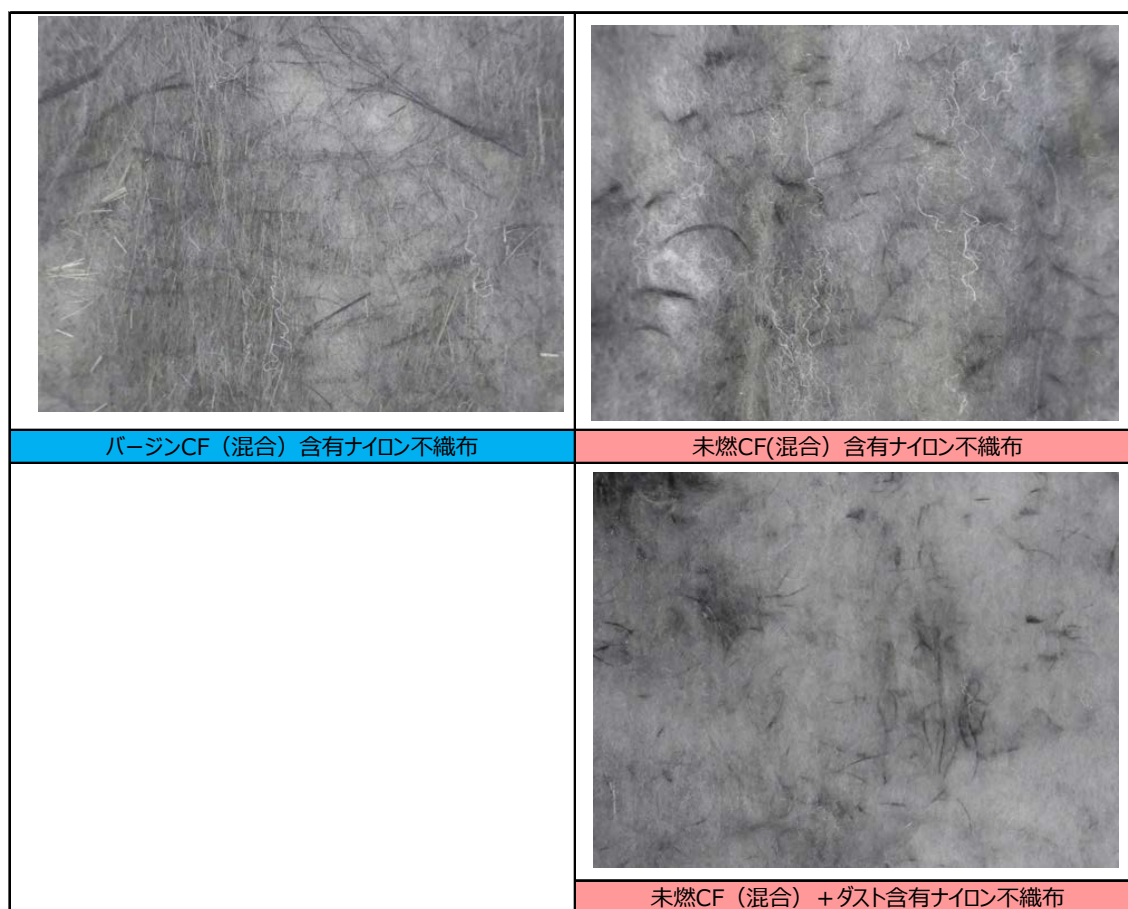


図 4-12.不織布の外観②

出典：日本化学繊維協会撮影

4-2-2. 未燃 CF（混合）+ダスト含有 PA 不織布の蛍光 X 線分析

混合+ダストの中間基材について、ダストの含有量を測定するため不織布化前後の試料について蛍光 X 線分析を行った。

不純物が混入した混合+ダストの中間基材の蛍光 X 線分析の結果、C、O、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Ti、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Sr、Zr、Ba を検出した。このうち C と O が 99mass%を占めていた。不純物の混入がない未燃 CF 混合中間基材と、不純物が混入した混合+ダストの中間基材の蛍光 X 線分析結果を比較したところ、0.01mass%以上差がある元素は Al、Si、K、Ca、Fe の 5 種類であった。不純物に含まれる C、O 以外の主な元素はこの 5 種類と推定し、不織布化前後の未燃 CF+ダスト試料について、これらの元素の半定量分析値（FP 法）を測定し表 4-5 に示した。どの元素についても、不織布化後に大幅に分析値が下がっていた。これは不織布化によりダストが脱落したためと考えられる。

表 4-5、図 4-13 に各元素の量及び残存率（不織布化後の分析値/不織布化前の分析値）を示す。この変化率をみると、元素によりデータにばらつきがみられるが、これは不純物の分布が不均一なためと考えられる。そこで、これらの変化率を平均した 0.141（14%）から予測し、約 85%が不織布化によって取り除かれたと推察した。

未燃 CF+ダストによる成形品について、CFRP の物性を確保するために、中間基材に混入し許容されるダストの重量は、未燃 CF との対比で 1:1 以下とすることが求められる。帯電+メッシュの集塵試験では、ダスト投入量に対するダストの集塵率を 1%まで改善できたが、そもそものダスト投入重量が大きいため、未燃 CF:ダストの重量比は 1:2 となった。ただし中間基材作成中にダストが脱落し、未燃 CF とダストの分離が更に行われ、結果的に 1:0.3 と目標の重量比以下を達成することができたと推測される。

表 4-5.中間基材（不織布）の蛍光 X 線分析

ダスト組成 (mass%)	Al	Si	K	Ca	Fe	平均
不織布前	0.087	0.33	0.049	0.043	0.066	—
不織布後	0.0083	0.061	0.014	0.0037	0.0036	—
不織後の残存率	10%	18%	29%	9%	5%	14%

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成

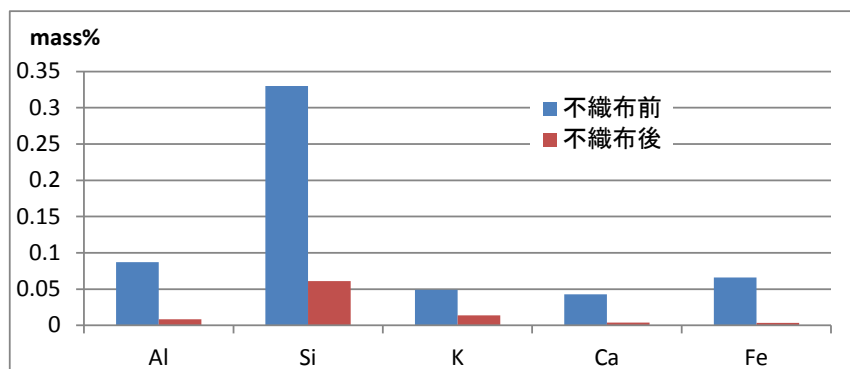


図 4-13. 中間基材（不織布）の蛍光 X 線分析

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成

4-2-3. 中間基材試作まとめ

CF 及び PA 繊維の中間基材について、繊維長が 50mm の CF であればバージン CF も未燃 CF も工業的に連続して製造することが可能であると考えられる。しかし、繊維長 3mm、12mm の CF については以下の理由により工業的な製造は難しいと考えられる。

- PA 不織布で CF を挟む方法であるが、フィーダによる CF の定量供給などを検討したところ、ホッパー詰まりなどトラブルが多く、結果、人が手作業で行った。
- カード機で脱落する CF が多すぎる（最大で、3mm では投入 CF 量の 69%が、12mm では 41%が脱落）。
- カード機の入口部分（テーカイン）と出口部分（ドファ）に溜まった CF が、不織布に引き込まれる場合があり CF が不織布中で一箇所に集中してしまう場合がある。その様子を図 4-14 に示す。



図 4-14.溜まった CF を引き込んだ状態の中間基材

一方、3mm、12mm、繊維長 50mm の CF が入った混合試料の場合は、繊維長 50mm の CF 100%の場合と同様に、中間基材の CF 繊維含有量が 40%を超える結果が得られており、脱落した CF 量が 3mm、12mm と比較し少なかったと推測される。これは繊維長 50mm の CF が、短繊維長の CF のキャリアとして働いたためと考えられる。

本研究では、CF を 800℃で 1 時間処理しても未処理 CF と同等の繊維長を保っていることが分かった。また、繊維長 3mm、12mm、50mm の未燃 CF およびこれらの混合試料で CF が 35wt%以上の中間基材を作製することができた。ただし、3mm、12mm のような短繊維長の CF はオープナーでの処理が難しいうえ、カード機で CF の脱落が発生するため CF を 2 枚の PA 不織布で挟んでから投入するなどの工夫が必要である。

実際の炉で発生する未燃 CF は異なる繊維長が混合しているため、本研究に供した試料の中では混合試料が一番現実的な試料に近いと思われ、工業的に不織布化が行える可能性があると考えられる。

4-3. 成形品試作

4-3-1. 成形品作成

4-2 の中間基材試作で作成された中間基材を熱プレス成形し、成形品（熱可塑性 CFRP）試作を行った。プレス成形機は(株)エイチアンドエフ製である。高温の熱盤と冷却用熱盤の 2 つの成形ゾーンを有しており、1 ゾーンの出力は 125 t である。このプレス成形機は、それぞれのゾーンで独立に圧力および温度制御が可能である。まず、高温側の熱盤に成形面積が一辺 300 mm の正方形で、かつシアエッジクリアランスが常温で 0.04±0.01 mm の雄雌型の平板成形用金型を取り付け、270℃で加熱圧縮成形した後、圧力および金型のクランプを解除し、冷却用熱盤に金型を搬送し、70℃に冷却されるまで冷却圧縮成形した。表 4-6 に詳細な成形条件を示す。なお、今回は予め 270℃で昇温した金型に、予め 80℃で 16 時間以上減圧乾燥し 3 mm 厚になるように調整した複合不織布をチャージして成形板を作製した。作製した板は湿式ダイヤモンドカッターを用いて物性評価のためのサンプルを切断した。

表 4-6. 熱可塑性 CFRP 成形条件

温度 (°C)	時間(min)	圧力(MPa)	状態
270	10	1	熔融
	30	10	含浸
270→70	30	10	硬化

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成



図 4-15. 熱可塑性 CFRP 成形機 (株)エイチアンドエフ製)

出典：日本化学繊維協会撮影

4-3-2. 力学特性の評価方法

成形された複合材料の力学特性は、精密万能試験機（株島津製作所製 AG-100kN IS）を用いた。引張試験は、JIS K 7164 に準拠して行った。ビデオ伸び計を用いて試験片中央から 25mm 上下に離れた長さを、変形と共に計測してひずみを算出した。サンプル形状と試験条件を表 4-7 に示す。また、曲げ試験については、JIS K 7017 に準拠し 4 点曲げ試験を行った。さらに、たわみ計を用いて試験片中央のたわみを測定し、曲げひずみを算出した。表 4-8 に曲げ試験時のサンプル形状と試験条件を示す。また、試験は全て 80℃、16 時間以上、減圧乾燥した絶乾状態の試験片を用いて力学特性を評価した。

表 4-7. 引張試験のサンプルと試験条件

試験片の長さ (mm)	試験片の幅 (mm)	試験片の厚さ (mm)	タブの長さ (mm)	クロスヘッドスピード (mm/min)
250	25	3	50	1

出典：日本化学繊維協会資料

表 4-8. 曲げ試験のサンプルと試験条件

試験片の長さ (mm)	試験片の幅 (mm)	試験片の厚さ (mm)	スパン長 (mm)	圧痕の半径 (mm)	サポートの半径 (mm)	クロスヘッドスピード mm/min
80	10	3	48	2	2	1

出典：日本化学繊維協会資料

4-3-3. CF 体積含有率 (Vf) の計測結果

プレス成形した際、金型から樹脂が流出したことから、それぞれの複合材に含まれる CF の体積含有率 (Vol.%) を評価した。成形品を電気炉にて 400℃で 15 時間燃焼させた際の試験片の重量変化から Vol.%を算出した。その結果を表 4-9、図 4-16 に示す。

プレス成形する前の段階での Vol.%は 25%に設定していることから、CF の熱処理、繊維長の有無に関わらず、Vol.%が増加していることがわかる。プレス成形する前の段階での Vol.%は 25%に設定していることから、プレス成形時に樹脂が金型から流出することで Vol.%が増加していると考えられる。CF 繊維間への樹脂流動が起こりにくく、熔融樹脂が金型から流出しやすくなったと考えられる。未燃 CF を用いた際の Vol.%は、繊維長によらずバージン CF を用いた場合と比較して、低い値を示した。これは、未燃 CF は表面処理剤が取り除かれることで、CF 繊維間への樹脂流動が改善し、金型外部への樹脂流出が低減されたと考えられる。成形後の CF の様子からプレス時の樹脂の流動状態が把握できると考え、図 4-17 にプレス成形された後の CF の状態をマイクロスコープにて観察した結果を示す。バージン CF を用いた複合材料では、CF 繊維の束が残っているのに対して、未燃

CF を用いた複合材料では CF 繊維が比較的、バラバラに存在していることがわかる。従って、熱処理されることで表面処理剤が除去され CF 繊維がバラバラになることで、未燃 CF を用いた際の金型外部への樹脂流出が減ることに起因して Vol.% が小さくなったと考えられる。

表 4-9.CFRP 成形品中の CF 含有量

	CF 繊維長		3mm	12mm	50mm	混合	混合+ダスト
	CF 含有量	Vol%					
バージンCF成形品	バージンCF含有量	Vol%	44.9	41.6	54	47.7	-
未燃CF成形品	未燃CF含有量	Vol%	37.9	38.8	41.7	42.6	27.6
	ダスト含有量	Vol%	-	-	-	-	0.24

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成

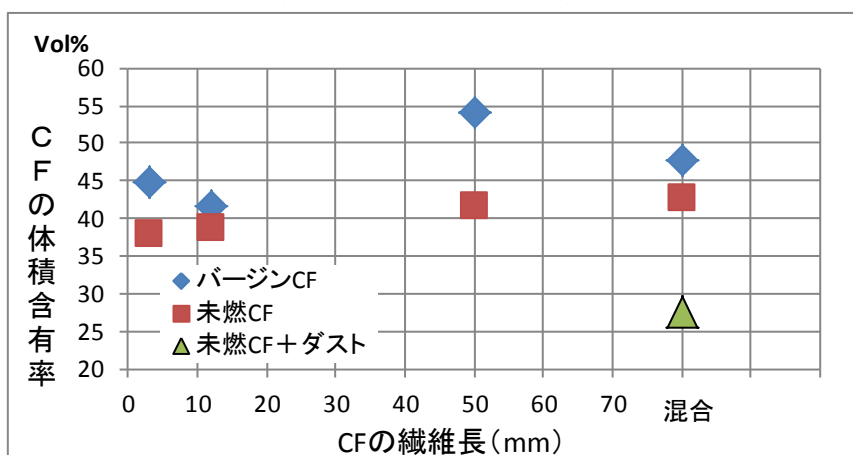


図 4-16. CF の体積含有率および CF の繊維長

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成

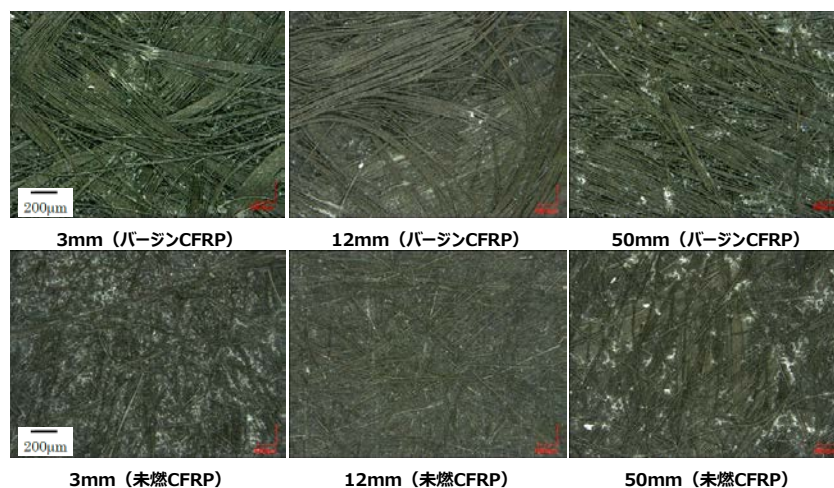


図 4-17.CFRP 成形品の表面写真

出典：日本化学繊維協会資料

4-3-4. 力学特性の評価結果

表 4-10、表 4-11 に成形板の引張りと曲げ変形下における強度と弾性率とそれぞれの標準偏差を示す。ここで、 α_T 、 α_F は引張り及び曲げ強度を、 E_T 、 E_F は引張り及び曲げ弾性率を示している。

また表 4-9 で示した CF 含有量(Vol.%) を用いて、基準とする繊維体積含有率 V_f を 25 vol.%とし、式 1) と式 2) により強度及び弾性率とそれぞれの標準偏差を換算した。換算した引張り及び曲げ強度をそれぞれ $\alpha_{※T}$ 、 $\alpha_{※F}$ 、引張り及び曲げ弾性率をそれぞれ $E_{※T}$ 、 $E_{※F}$ として結果を表 4-12、図 4-18、表 4-13、図 4-18 に示す。

表 4-10.熱可塑性 CFRP の引張試験結果

		引張強度 α_T (MPa)	標準偏差 (MPa)	比強度 (r/v)	引張弾性率 E_T (Gpa)	標準偏差 (GPa)	モジュラス比 (r/v)	
3mm	バージン	302.5	21.9	0.78	33.0	1.9	0.65	
	未燃	235.5	2.6		21.3	1.0		
12mm	バージン	359.4	26.0	0.84	26.3	2.2	1.03	
	未燃	302.9	13.2		27.2	1.1		
50mm	バージン	439.5	20.2	0.52	45.0	2.4	0.44	
	未燃	229.5	3.2		19.8	0.8		
混合	バージン	391.1	28.4	0.63	31.3	1.2	0.79	
	未燃	247.8	42.5		24.7	1.2		
混合+ダスト		未燃	175.1	68.3	-	21.0	1.5	-

※混合+ダストはバージン品との物性比較は行っていない

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成

表 4-11. 熱可塑性 CFRP の曲げ試験結果

		曲げ強度 α_F (MPa)	標準偏差 (MPa)	比強度 (r/v)	曲げ弾性率 E_F (Gpa)	標準偏差 (GPa)	モジュラス比 (r/v)	
3mm	バージン	430.0	14.7	0.83	29.5	1.5	0.74	
	未燃	355.1	13.8		21.7	0.9		
12mm	バージン	455.1	25.4	0.99	27.2	1.5	1.03	
	未燃	451.7	8.4		28.0	1.3		
50mm	バージン	473.9	20.5	0.68	42.8	1.7	0.45	
	未燃	322.6	6.1		19.1	0.8		
混合	バージン	428.2	9.2	0.94	32.9	2.4	0.71	
	未燃	401.5	5.1		23.5	0.5		
混合+ダスト		未燃	307.4	23.5	-	20.7	1.6	-

※混合+ダストは3点曲げ試験結果、それ以外は4点曲げ試験結果

※混合+ダストはバージン品との物性比較は行っていない

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成

$$\sigma_{T,F}^* = \tau_{T,F} \frac{V_f'}{V_f} \quad \text{式1)}$$

$$E_{T,F}^* = E_{T,F} \frac{V_f'}{V_f} \quad \text{式2)}$$

図 4-18.換算式

出典：日本化学繊維協会資料

表 4-12、図 4-19 に標準体積分率（体積 25%）を用いて計算した熱可塑性 CFRP の引張試験結果を示す。

引張強度（ $\alpha \times T$ ）に関して 3mm、12mm の未燃 CF を用いた成形品はバージン CF 成形品に対して約 90%の物性を保持している。50mm 及び混合品は若干低下するものの約 70%の引張強度を保持している。先述したように混合+ダスト品については、ダスト比率が重量比率で 1%以下という結果が出た。そのため、混合+ダスト品の物性値（引張強度）も混合品とほぼ同等の値という結果となった。

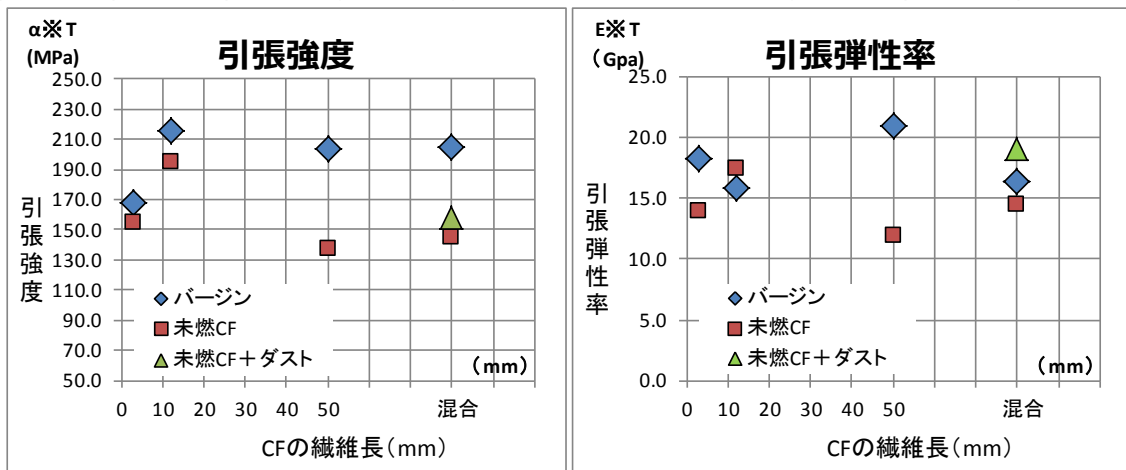
引張弾性率（ $E \times T$ ）では、3m の未燃 CF を用いた成形品はバージン CF 成形品に対して約 80%の引張弾性率を保持している。混合品は約 90%の物性を保持している。12mm については未燃品がバージン品の物性を超えているが、これは誤差の範囲内である。50mm 品は約 60%と低い値となった。

表 4-12. 標準体積分率（体積 25%）を用いて計算した熱可塑性 CFRP の引張試験結果

		引張強度 $\alpha_{\times T}$ (MPa)	標準偏差 (MPa)	比強度 (r/v)	引張弾性率 $E_{\times T}$ (Gpa)	標準偏差 (GPa)	モジュラス比 (r/v)
3mm	バージン	168.4	12.2	0.92	18.3	1.1	0.76
	未燃	155.3	1.7		14.0	0.6	
12mm	バージン	216.0	15.6	0.90	15.8	1.3	1.11
	未燃	195.2	8.5		17.5	0.7	
50mm	バージン	203.5	9.3	0.68	20.9	1.1	0.57
	未燃	137.6	1.9		11.9	0.5	
混合	バージン	205.0	14.9	0.71	16.4	0.7	0.88
	未燃	145.5	24.9		14.5	0.7	
混合+ダスト	未燃	158.6	61.9	-	19.0	1.3	-

※混合+ダストはバージン品との物性比較は行っていない

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成



※未燃CF（混合）+ダストはバージン品との物性比較は行なっていない

図 4-19. 標準体積分率（体積 25%）を用いて計算した引張強度

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成

表 4-13、図 4-20 に標準体積分率（体積 25%）を用いて計算した熱可塑性 CFRP の曲げ試験結果を示す。

曲げ強度（α×F）では全ての繊維長（混合、混合+ダスト含む）の未燃を用いた成形品はバージン CF 成形品に対して約 90%以上の物性を保持していた。12mm、混合品の未燃 CF 成形品はバージンの値を上回っていたが、試験片の厚み方向の CF 配向によるため、必ずしも未燃 CF 成形品の物性がバージン品よりも優れているという判断はできない。

曲げ弾性率（E×F）では 50mm 品を除き、未燃 CF を用いた成形品はバージン CF 成形品に対して約 80%以上の物性を保持している。ただし、50mm 品に関しては約 60%と低い値となっている。

また図 4-21 に未燃 CF とバージン CF の引張/曲げ強度比・引張/曲げ弾性比を示す。未燃 CF 成形品では、CF 繊維長が 12mm を境に強度比、弾性比の値が減少している。おそらく、熱処理された CF 表面のサイジング剤が除去されたことによる CF 繊維の分散性が向上すると共に、CF 繊維の真直性が低下することに起因していると考えられる。従って、CF の真直性を可能な限り保ったまま、樹脂繊維と複合化することが重要となる。

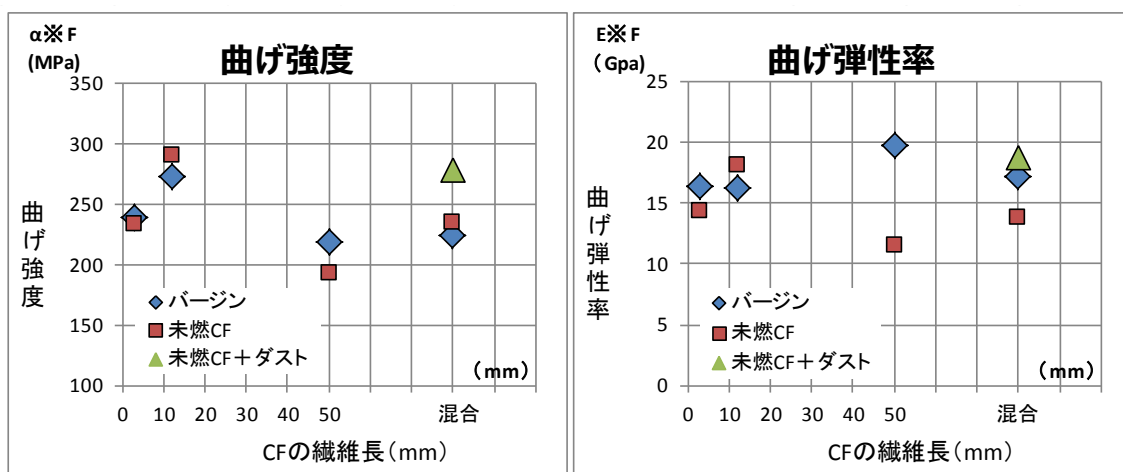
表 4-13. 標準体積分率（体積 25%）を用いて計算した熱可塑性 CFRP の曲げ試験結果

		曲げ強度 α_{CF} (MPa)	標準偏差 (MPa)	比強度 (r/v)	曲げ弾性率 E_{CF} (Gpa)	標準偏差 (GPa)	モジュラス比 (r/v)
3mm	バージン	239.4	8.2	0.98	16.4	0.8	0.87
	未燃	234.2	9.1		14.3	0.6	
12mm	バージン	273.5	15.3	1.06	16.3	0.9	1.11
	未燃	291.0	5.4		18.1	0.8	
50mm	バージン	219.4	9.5	0.88	19.8	0.8	0.58
	未燃	193.4	3.7		11.5	0.5	
混合	バージン	224.4	4.8	1.05	17.2	1.2	0.80
	未燃	235.6	3.0		13.8	0.3	
混合+ダスト	未燃	278.4	21.3	-	18.7	1.5	-

※混合+ダストは3点曲げ試験結果、それ以外は4点曲げ試験結果

※混合+ダストはバージン品との物性比較は行っていない

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成



※バージン、未燃CFは4点曲げ試験の結果。未燃CF+ダストの結果のみ3点曲げ試験の結果。

※未燃CF（混合）+ダストはバージン品との物性比較は行っていない

図 4-20. 標準体積分率（体積 25%）を用いて計算した曲げ強度

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成

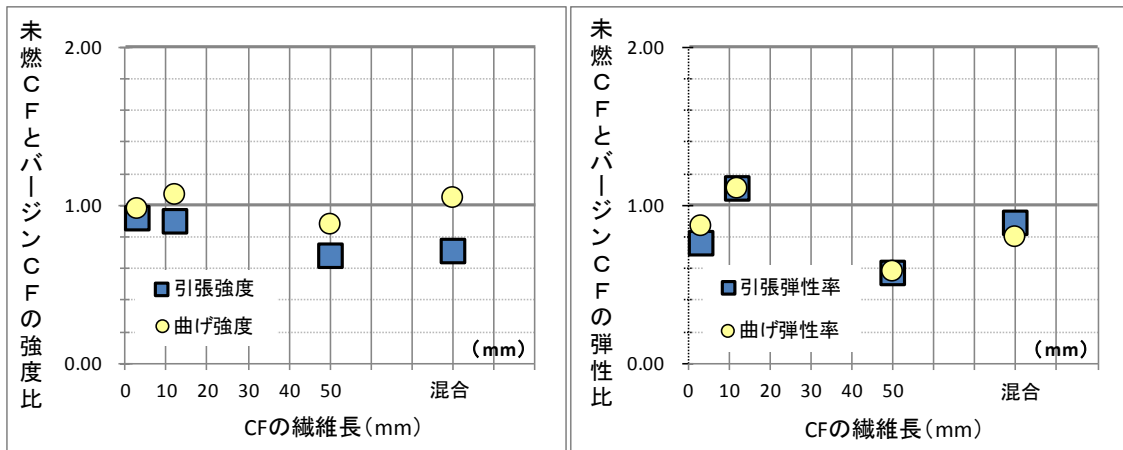


図 4-21. 未燃 CF とバージン CF の引張／曲げ強度比・引張／曲げ弾性比

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成

4-3-5. 成形試験まとめ

バージン CF と、未燃 CF、未燃 CF+ダストの成形性と力学特性を評価した結果、熱処理によりサイジング剤が除去されることで、CF の分散性が向上し成形性が向上することが示唆された。未燃 CF による成形品の力学特性は、バージン CF による成形品と同等の力学特性を示すことがわかった。未燃 CF (混合)、未燃 CF (混合) +ダストによる成形品はは図 4-22 で示したような自動車向け材料の力学特性同等と考えられ、自動車用に適用可能と考えられる。ただし、実際の炉から集塵された未燃 CF は様々な物質と共に燃焼されたものであり、未燃 CF の付着物は常には一定でなく、分級性の違いから物性は変化すると考えられる。また、未燃 CF はハロゲン等の有害物質を含む可能性も考慮した上で、表 4-14 に示すように各用途での要求事項を考慮し、用途開発を進める必要があると考える。

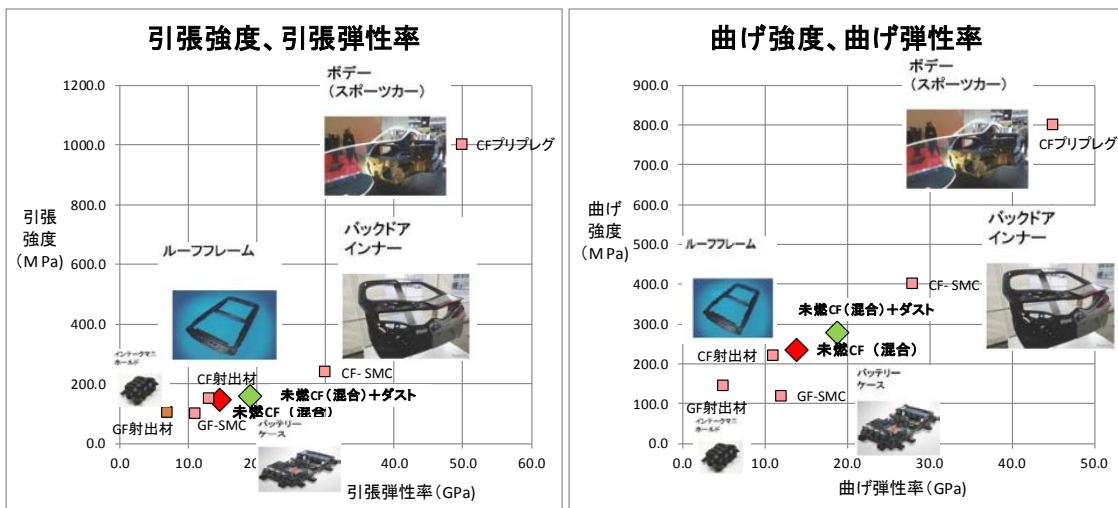


図 4-22. 自動車用の各材料と引張強度・弾性率、曲げ強度・弾性率の比較

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成

表 4-14.各用途での要求事項一例

	自動車部品	土木	電子部品	食品
力学特性	高	高	中	低
金属コンタミ	低	低	高	高
有害物質混入	高	低 溶出無し	高	高

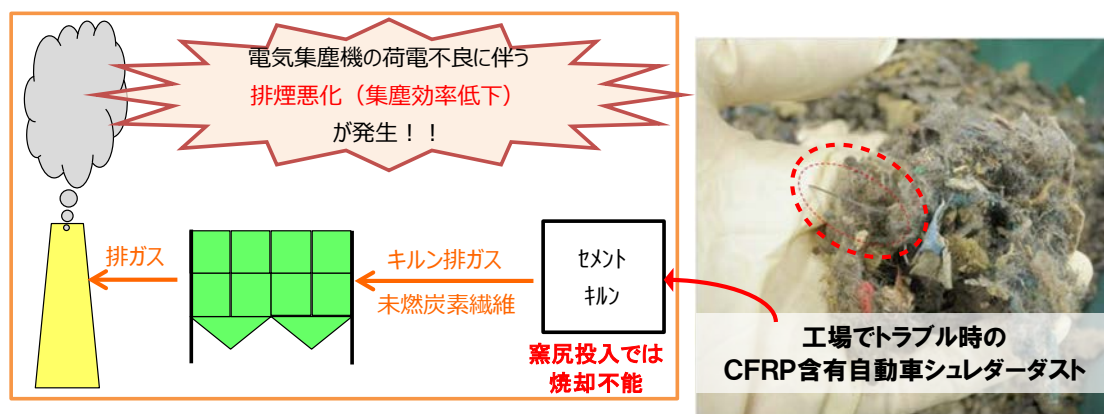
※高、中、低は各用途の要求度の違い (Ex : 高 = 要求度が高い) □

出典：日本化学繊維協会資料から矢野経済研究所作成

5. 事業可能性評価

5-1. 評価

今回の実証では前処理集塵機において EP やバグフィルタで問題となる未燃 CF を集塵することができ、環境的側面では、集塵機トラブル防止による CFRP 普及障壁の解決に繋がると考える。ASR 等燃焼施設においては、未燃 CF による EP の荷電不良に伴う排煙悪化が発生しており、最悪の場合 EP の停止及び操業停止に繋がる。そのため、図 5-1 に示すようにセメント業者では CFRP 混入が疑われる廃棄物については受入全面拒否としている。今回実証した前処理集塵装置により、実際の炉を想定した条件下で未燃 CF が集塵出来ることが確認され、実際の炉の状況下でも集塵できる可能性があると考えられる。



※ 炭素繊維は燃えにくく、循環濃縮するため
バグフィルタでも目詰まりする可能性あり。

現状の対策：CFRP混入が疑われる廃棄物については受入全面拒否

図 5-1.セメント業者でのトラブルの一例と方針

出典：セメント業者提供試料

補集した未燃 CF の物性低下は限定的で、成形品の力学特性的には自動車向け用途の適用範囲内となった。成形品の物性に影響を与えるダストについては、今回の実験環境下において前処理集塵装置での分級および中間基材成形工程での分離（自然脱落）が可能と確認できた。ただし、実際の ASR 組成は一定ではなく、CF と共に集塵されるダストも組成が異なり、利用用途制限の可能性があるので、実際の ASR 燃焼処理施設において発生した未燃 CF の集塵や、それら集塵した未燃 CF 等の環境分析等を進める必要があると考える。それら結果により廃材なども使用されている土木用途への用途開発検討について継続評価を行っていく必要があると考える。

上述のように前処理集塵機の導入によってCFRPはASRとして処理することが可能となるわけであるが、現状のASR 焼成施設では処理できず、CFRP が混入したASR は受入拒否をする動きがある。解体段階でCFRP が認識できずにEP が停止してしまった場合、EP からのCFRP 除去等の期間が必要で、焼成炉は操業停止に追い込まれてしまう。実際、セメント業者で過去発生した事例でも数日間、操業停止となっており、その経済的損失は非常に大きいということになる。

結果的にCFRP 混入のASR は埋立処分されることになるが、最終処分場の残余容量は限られ、全国では16.0年、中でも首都圏では5.4年と推測され、厳しい状況にある（2015年4月1日現在、環境省）。

ASR の埋立先である管理型処分場の費用は、地域や処分場規模等によっても異なるが、トンあたり2万円程度であるため、CFRP 混入ASR の発生量に応じて、処分費用がかかることになる。自動車リサイクル法施行後、リサイクル率の向上によりASR が最終的に埋立処分される量は大幅に減少しているが、最終処分場の逼迫から、埋立費用が上昇する可能性もある。そのため、車両へのCFRP 採用拡大にともない、今後、最終ユーザーが負担する自動車リサイクル料金が上昇することも考えられる。

直近でもEP の荷電不良が発生していると言われており、この前処理集塵機導入によってトラブルを防止するとともに、経済的損失が回避できることになる。

5-2. 課題

今回の実証範囲と、事業化に向けた今後の取り組みについて表5-1に示す。

今回の実証では、時間等の面から試験的に集塵システムを組み上げ、集塵試験を行った。そのため実際の炉と全て同じ条件での試験ではなく、また想定した条件も流動床炉の1条件であった。

試験材料についても、流動床炉の焼成温度をもとに擬似的に作り出したもので、またダストについても流動床炉の焼成後ダストの粒形を参照したものとなり、実際の炉のすべての条件と同一ではない。とはいえ、流動床炉を参照した条件で処理された未燃CF を利用した成形品について、一定の力学性能が得られることが確認できたため、実用化に向けては、実際の炉からの集塵品をもとに、用途開発を進めていく道筋ができたと考えている。

その一方で、CF とダストの分級性はその都度異なり、物性値もその都度変わる可能性がある。その場合のリサイクル品の製品保証はどうするのかという問題も想定され、分級性の違いからくる物性の範囲や、また有害物質の含有量についても継続検証していく必要があり、それらを明らかにすることが、事業化に向けた取り組みとなると考えている。

そのほか、成形作業毎にCF の体積含有率が変わる恐れがあるため、用途展開にあたっては、安定したCF 体積含有率を実現できるように、中間基材や、成形方法作成の見直しを展開用途に合わせて進めていく必要がある。

表 5-1. 今回の実証範囲と事業化に向けた今後の取り組み

	今回の実証範囲（課題）	事業化に向けた今後の取り組み
<p>(1) 未燃CFを回収するための高度分級システム（前処理集塵設備）の構築</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 今回の実証では、時間的等の面で実際の焼却炉に前処理集塵システムを組み込んだ実証が出来ず、試験的に集塵システムを組み上げ、集塵試験を実施。 ■ 実際の炉と全て同じ条件での試験ではなく、また想定した条件も流動床炉の1条件。 ■ 試験設備による実証のため、実際の炉に設置した場合の経済性分析は未実施。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 集塵システムについて今回の実証で有効性（後処理集塵装置で問題となる10mm以上の未燃CFの集塵）は確認できた。 ■ 集塵システムの実用化に向けては、温度、気化物質等の条件の異なる流動床炉を含む他の炉でも同様に集塵が可能かを、焼却炉保有メーカーが参加し実用化に向けた実証が必要 ■ 実際の炉に設置した際のシステム全体の費用対効果を分析
<p>(2) 回収したCF繊維長に合わせたリサイクル中間基材の開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 今回の実証では、試験材料（未燃CF、ダスト）は、流動床炉を想定して擬似的に作り出したもの。 ■ そのため実際の炉から発生する未燃CF・ダストと全て同じ条件ではなく、また想定した条件も流動床炉の1条件。 ■ 実際は燃焼物の条件により、ダスト成分の変化が予想。 ■ 成形品のCF体積含有率が一定ではなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 流動床とほぼ同様の条件で処理された未燃CFを利用した成形品について、一定の力学性能が得られることを確認。 ■ 実用化に向け、実際の炉での回収品の物性確認やその有害物質が含まれるかどうかの環境分析を進めていく。 ■ 実用化に向けては、実際の炉からの回収品をもとに、用途開発を進めていく道筋ができた。 ■ リサイクル材の物性はダスト成分、ダストの分級性に影響するため、その都度異なる可能性あり。リサイクル品の製品保証については、その物性の範囲を継続調査した上で、検討する必要がある。 ■ 安定したCF体積含有率を実現できるように、中間基材や、成形方法作成の見直しを展開用途に合わせて進めていく必要がある。

出典：矢野経済研究所作成

6. 環境負荷低減効果

本実証事業における高度分級システム（前処理集塵設備）が世界的に普及した場合の環境負荷低減効果を算出した。今回開発した高度分級システムは、既存の集塵設備に追設可能なものであるため、2025年以降の導入率を100%と仮定している。

環境負荷低減効果を算出するにあたり、世界のCF需要量から市場ゴミとしてのCF（CFRP）廃棄量を予測した。過去実証から未燃CFが最も明確に確認できた流動床炉でのCF未燃率を適用し、CFのマテリアルリサイクル可能比量を推計した。今回開発した高度分級システムが実際の炉を想定した条件下で未燃CFをほぼ100%集塵出来ることが確認されたため、炉において発生する未燃CFのほぼ100%を集塵できると仮定した。ただし、実際に設置した際に未燃CFとダストを分級できるかは、実機ベースでの試験が必要である。

そのほか800℃、1時間熱処理したモデル的な未燃CFを用いたCFRPがバージンCF複合材料と同等の力学特性を示すことがわかったため、バージンCFの代替可能性があると考え、バージンCF製造時のCO2排出量から今回の環境負荷低減効果を算出した。

表 6-1.環境負荷低減効果算出における条件

項目	詳細
高度分級システム（前処理集塵設備）普及率	本実証事業における高度分級システム（前処理集塵設備）は既存の集塵設備に追設可能なため、世界的に普及した場合（導入率を100%）と仮定。
CF廃棄量	世界のCF需要量から市場ゴミとしてのCF（CFRP）廃棄量を予測。
炉におけるマテリアルリサイクル可能量	過去実証を参照し流動床炉でのCF未燃率（0.4%）を適用。
高度分級システム（前処理集塵設備）の集塵率	今回の実証結果から炉において発生する未燃CFのほぼ100%を集塵できると仮定。
リサイクル中間基材・成形品	高度分級システムで回収した未燃CFを100%リサイクルと仮定。
バージンCF代替可能性量	今回の実証結果が800℃、1時間熱処理したモデル的な未燃CFを用いたCFRPがバージンCF複合材料と同等の力学特性を示すことがわかったため、バージンCFの代替可能性があるとして仮定。

出典：矢野経済研究所作成

矢野研究所推計による世界のPAN系CFの用途別需要量を図6-1に示す。2017年の世界のPAN系CF需要量は約71,000tと推測される。

CFの主な需要先は航空機、自動車、スポーツ・レジャー、その他一般産業向けである。一般産業向けの用途としては建築・土木（耐震補強向け、吊り橋のケーブル、鉄骨代替材、電磁波シールド等）や、電子機器・産業機械（ノートパソコン等の筐体、カメラボディー等）、医療機器やその他（レントゲン機器、車いす、介護用ベッド、携帯用スロープ、床暖房の発熱体等）等多岐に亘る。

CFRP 量としては、東邦テナックス株式会社資料（CFRP の材料、成形加工の最新技術と自動車への適用）から、CF 体積含有率（以下 Vf）を 60%と仮定している。

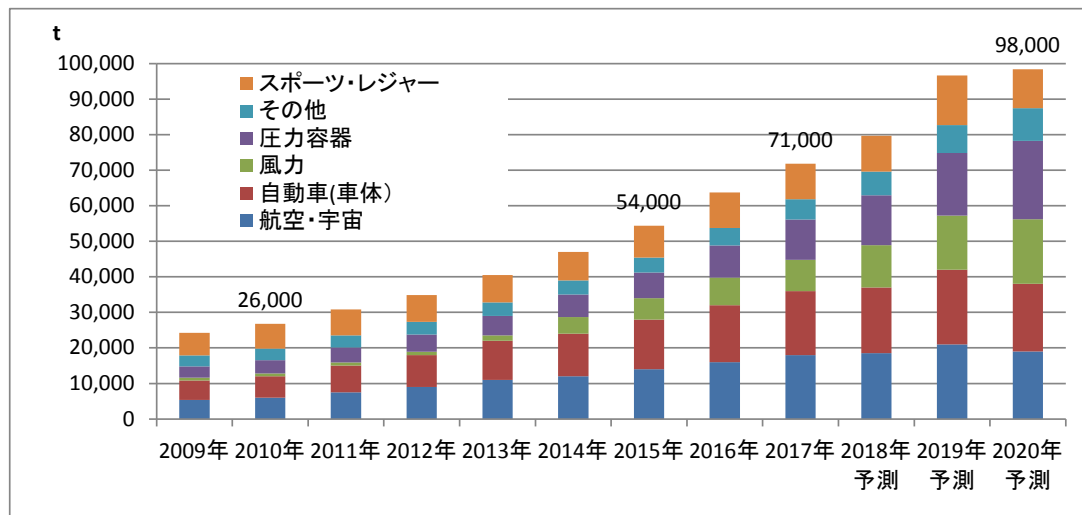


図 6-1.世界の PAN 系 CF の用途別需要量

出典：矢野経済研究所推計

上記 CF 需要量（PAN 系）から以下の方法により CF 及び CFRP のインプラントゴミ、市場ゴミ発生量を推計する。なおインプラントゴミとは生産工程内で発生する経年劣化していないゴミ（CF、CF 織物、CF プリプレグ）であり、市場ゴミは製品として使用された後の経年劣化している CFRP である。先述したようにインプラントゴミは CF の判断が行いやすく廃棄後の埋立て等による処理が比較的安易である。一方で市場ゴミは CFRP と判断することが難しく、他の材料と複合化している場合もあり意図せず燃焼処理が行われる可能性が高いため、今回の廃棄 CFRP 量では市場ゴミを対象とした。世界の CFRP 廃棄量推計、世界における CF 集塵予測と CO2 削減予測を表 6-1、図 6-2 に示す。

市場ゴミに関しては、2008 年以前の各用途でのインプラントゴミ発生率を 50%として、各年での製品化 CFRP 量を推計した。2008 年以後は各用途でのインプラントゴミ発生率を適用し、航空機 15%、自動車 30%、風力発電 5%、圧力容器 5%。その他 10%、スポーツ・レジャー30%と仮定し製品化 CFRP 量を推計した。かつ航空での耐用年数を 30 年、その他（スポーツ・レジャー用品、風力、圧力容器、自動車等）を 10 年とし、CFRP 廃棄量を推計した。2025 年は 42,000t、2030 年は 99,700t と推計される。

表 6-2.世界の CFRP 廃棄量推計、世界における CF 集塵予測と CO2 削減予測

		2025年	2030年
【1】世界の CFRP製品廃棄量	CF (CFRP) 生産年	1995年	2000年
	航空機 (耐用年数30年)	1,000	2,000
	CF (CFRP) 生産年	2015年	2020年
	一般産業 (耐用年数10年)	30,500	84,900
	CF (CFRP) 生産年	2015年	2020年
	スポーツ・レジャー (耐用年数10年)	10,500	12,800
	合計	42,000	99,700
【2】世界のCF回収量	①燃焼後のCF回収量 (【3】×0.4%)	168	399
	②バージンCF製造時のCO2排出量 (①×20t)	3,360	7,976

※CFRP製品廃棄量とは各用途のCF需要量にインプラントゴミ発生率を考慮した数値

(各用途のCF需要量×(1-インプラントゴミ発生率) = 製品化CF量、製品化CF量÷0.6 = 製品化CFRP量

※インプラントゴミ発生率は、2007年以前は全ての用途を50%として推計、

2008年以後は各用途でのインプラントゴミ発生率を航空機15%、自動車30%、風力発電5%、圧力容器5%。その他10%、スポーツ・レジャー30%と仮定

※環境省「CFRPを含むASRの再資源化に関する検討(2016年度)」では、

流動床炉でのCFRP燃焼における集塵工程でのCF回収率は約0.4%としている

※炭素繊維協会によればバージンCFを1t生産する際のCO2排出量は20t/CF-t

出典：矢野経済研究所推計

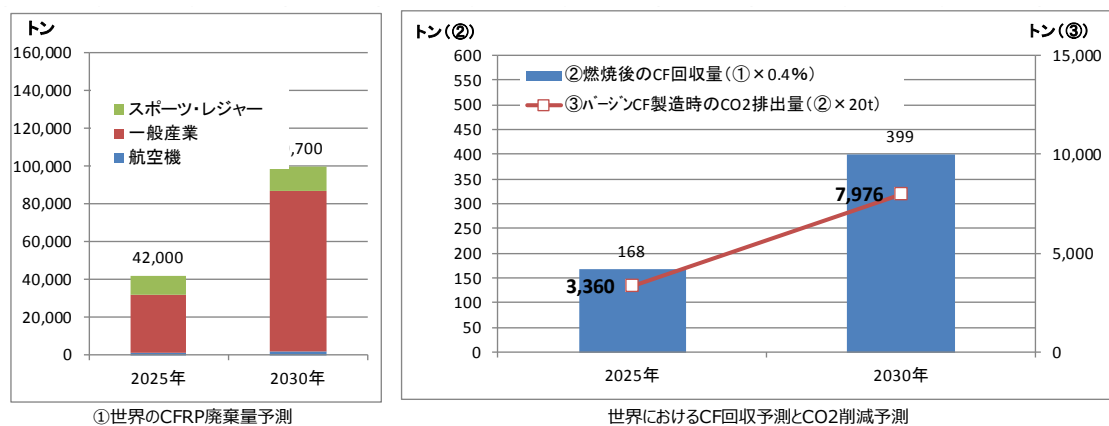


図 6-2. 世界における CF 集塵予測と CO2 削減予測

出典：矢野経済研究所推計

ASR 燃焼炉には様々なタイプがあるが、過去実証から未燃 CF が最も明確に確認できた流動床炉での CF 未燃率の約 0.4%を CF のマテリアルリサイクル可能比率と仮定した。2025 年で 168t、2030 年で 399t の CF が集塵可能となる。炉への廃 CFRP 投入量や、炉の種類によって未燃 CF 率が変化するため、仮定として今回は上記値を適用した。

今回の実証で、リサイクル CF によるバージン CF への代替可能性が示されたことから、CF 1 t あたり生産時の CO2 排出量を用いて CO2 削減量を算出すると 2025 年で 3,360t、2030 年で 7,976t と算出された。

本実証事業における高度分級システム（前処理集塵設備）が普及した場合、先述したバージン CF 代替に伴う CO₂ 削減効果だけでなく、EP 短絡による集塵機の不具合や炉の操業停止を防ぐことができる。仮に EP 短絡により炉の操業が停止した場合、炉の冷却、EP の不具合改善等、再稼動までに数日を要する。再稼動に伴い消費されるエネルギー等も増加すると想定される。