

平成 28 年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「革新的省エネ型高品位リサイクル繊維連続回収システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成 29 年 3 月

担当局 中部経済産業局
補助事業者 高砂工業株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-1-1 研究開発の背景	1
1-1-2 研究目標	2
1-2 研究体制	3
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6
第2章 研究開発の詳細	7
2-1 ロータリーキルンの開発	7
2-1-1 設計・製造・試運転	7
2-1-2 ロータリーキルンの改良	12
2-2 高温過熱水蒸気生成機構の開発	13
2-3 CFRP切断加工条件の最適化	14
2-4 処理条件の最適化	16
2-4-1 運転の最適化	16
2-4-2 リサイクル繊維の評価	17
第3章 全体総括	19
3-1 複数年の研究開発成果	19
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	21

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

炭素繊維は低比重かつ高強度・高弾性率という優れた特徴を有することから、それを樹脂の強化材に用いた複合材料（Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP）は、軽量かつ高機能な素材として、その応用範囲が急速に拡大しつつある。特に、航空機、自動車、鉄道車両等の輸送機器の構造部材への適用は、軽量化による燃費削減効果が極めて有効であることから従来より精力的に検討されてきている。また、産業用機械分野においても、機械が行う作業のスピードアップを図るためには、ロボットアーム等の機械の軽量化が重要となる。その結果、炭素繊維の世界需要は2020年までに年14万トンにまで拡大すると予測されている。一方、炭素繊維の製造には多量のエネルギー（炭素繊維1kgあたり286MJ、CO₂発生量=22kgに相当）を必要とするため高コストであることや、今後のCFRPの需要拡大を受けて、生産工程で生じる端材や使用後の廃棄物が急激に増大することが懸念されている。したがって、これらの課題を同時に解決するためには、まずは、CFRP廃材から「高品位」の炭素繊維（リサイクル繊維）を、できる限り少ない使用エネルギーで回収する技術の確立が急務である。省エネルギーは低コスト化につながる。ここで、「高品位」とは、リサイクル繊維使用時の使いやすさを考慮して、「繊維特性が均質」で、かつ、「樹脂に対して優れた密着性」を有する状態を意味する。

1-1-2 研究目標

本研究では、CFRP 廃材の樹脂燃焼熱や廃熱から生成した過熱水蒸気を用いて、ロータリーキルン方式により繊維を連続回収する処理システムを開発する（図 1）。本システムは、CFRP 切断機、ロータリーキルン、廃熱回収ボイラからなる。これにより、優れた樹脂接着性を有する高品位なリサイクル繊維の回収と、使用エネルギーの大幅削減を可能にする。

表 1 に開発目標と実施結果を示す。

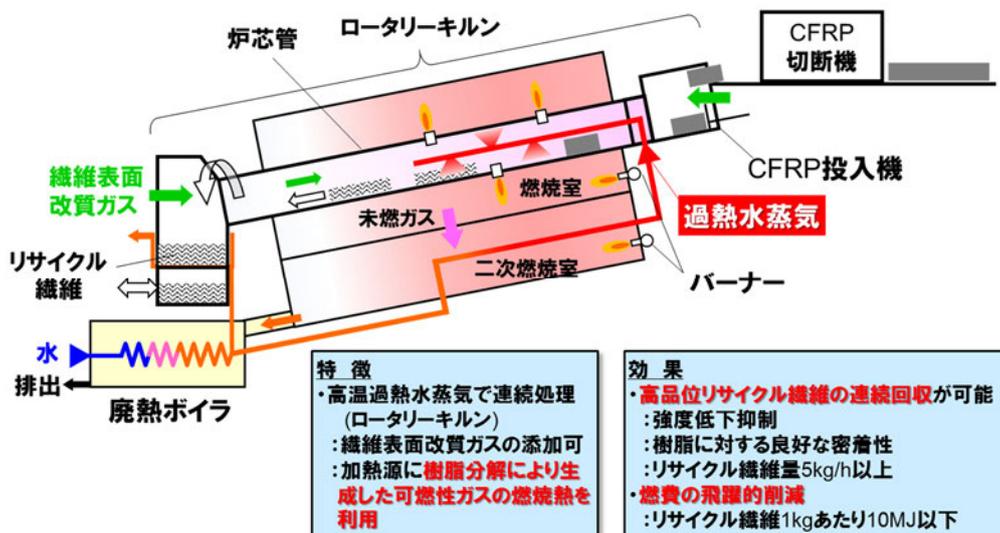


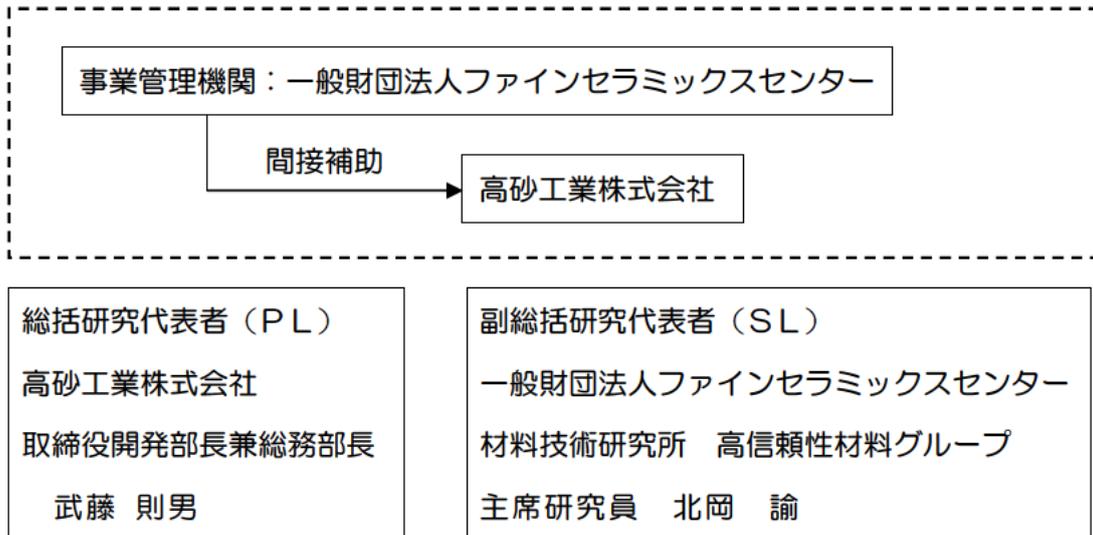
図 1 高温過熱水蒸気を用いた革新的省エネ型高品位リサイクル繊維連続回収システム

表 1 研究開発目標と実施結果

項目	開発目標	実施結果	達成度
ロータリーキルンの開発	<ul style="list-style-type: none"> 回収炭素繊維量：5kg/h 以上 CFRP 投入量：10kg/h 以上 	<ul style="list-style-type: none"> 回収炭素繊維量：10kg/h CFRP 投入量：20kg/h 	○
高温過熱水蒸気生成機構の開発	<ul style="list-style-type: none"> 入口温度：800℃以上 蒸気量：10kg/h 	<ul style="list-style-type: none"> 入口温度：800℃ 蒸気量：50kg/h 	○
CFRP 切断加工条件の最適化	<ul style="list-style-type: none"> 数 10mm の小片に、10kg/h 以上の速度で切断 	<ul style="list-style-type: none"> 1,600 × 1,600mm の CFRP 廃材を 70mm 角にまで、27kg/h で切断 	○
処理条件の最適化	<ul style="list-style-type: none"> 使用エネルギー：10MJ/1kg-回収炭素繊維 回収炭素繊維の特性評価 	<ul style="list-style-type: none"> 使用エネルギー：10MJ/1kg-回収炭素繊維以下 回収炭素繊維の引張強度は、バージン炭素繊維に対して相対強度で 70-80% 	○

1-2 研究体制

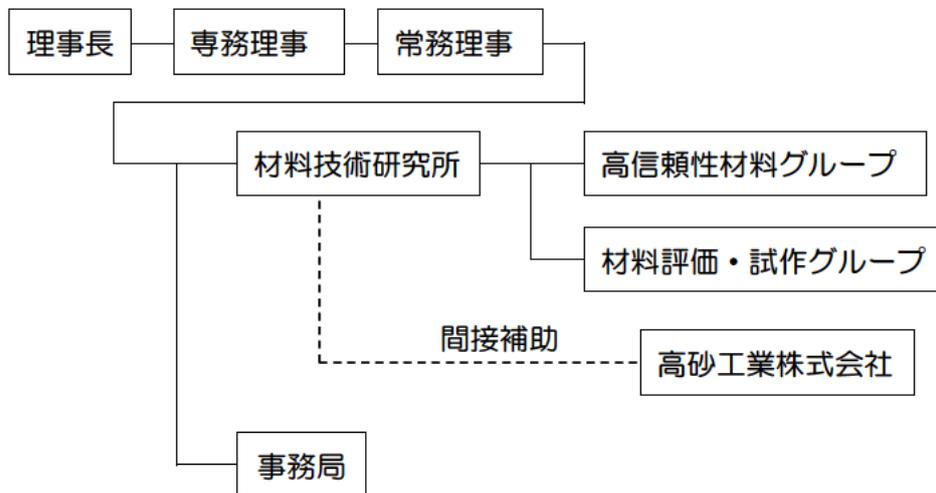
1) 研究組織 (全体)



2) 管理体制

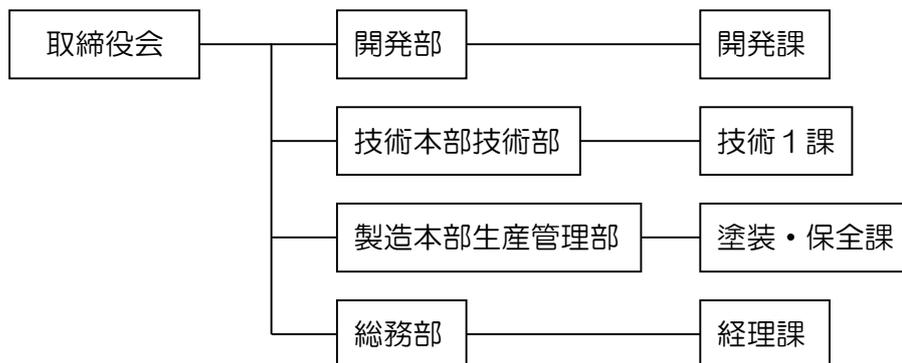
① 事業管理機関

一般財団法人ファインセラミックスセンター



② 間接補助先

高砂工業株式会社



3) 研究者氏名

① 事業管理機関

一般財団法人ファインセラミックスセンター

氏名	所属・役職
北岡 諭	材料技術研究所 高信頼性材料グループ 主席研究員
森 匡見	材料技術研究所 高信頼性材料グループ 主任研究員
和田 匡史	材料技術研究所 高信頼性材料グループ 上級研究員
林 一美	材料技術研究所 高信頼性材料グループ 上級技師補
永納 保男	材料技術研究所 材料評価・試作グループ 上級研究員補

② 間接補助先

高砂工業株式会社

氏名	所属・役職
加藤 双美彦	開発部開発課 課長
大島 士月	開発部開発課 課長代理
中村 寿樹	開発部開発課 主任
西川 雅之	開発部開発課 主任
鈴木 基晴	技術本部技術部技術1課 課長
嶋田 真二	製造本部生産管理部塗装・保全課

1-3 成果概要

【1. ロータリーキルンの開発】

【1-1】設計・製造・試運転

高温過熱水蒸気により CFRP 廃材中の樹脂を加水分解・気化することで、5kg/h のリサイクル繊維の連続回収を可能にするロータリーキルンを設計・製造した。リサイクル繊維の目標回収能力を達成するために、繊維含有率 50% の CFRP を想定し、投入機の処理能力は 10kg/h(CFRP 換算)以上に設定した。

【1-2】ロータリーキルンの改良

投入機の改良により、20kg/h(CFRP 換算)の供給が可能になった。あわせてロータリーキルンの処理能力を確認した結果、当初計画の 2 倍の 10kg/h でリサイクル繊維の連続回収が可能であることが明らかになった。さらに、長時間の安定動作や均一なリサイクル繊維の回収が可能になるように改良を進めた。

【2. 高温過熱水蒸気生成機構の開発】

廃熱回収ボイラと二次燃焼室において高温の排ガスから熱回収することにより、ロータリーキルン入口温度は最高 800℃で、10kg/h 以上の過熱水蒸気が生成可能であることを確認した。廃熱として排出される熱を利用することにより、低燃費で過熱水蒸気処理が可能なシステムの構築に成功した。

【3. CFRP 切断加工条件の最適化】

リサイクル繊維に対する付加価値をできるだけ維持するために、CFRP を長さ数 10mm の小片に切断しつつ、投入機の処理性能と同様に、CFRP の切断速度として 10kg/h(CFRP 換算)以上が可能な切断機を選定した。導入した切断機を用いて実証試験を行ったところ、切断速度は 27kg/h(CFRP 換算)であった。

【4. 処理条件の最適化】

【4-1】運転の最適化

過熱水蒸気処理時の温度、処理時間、処理に要する過熱水蒸気量を最適化して、CFRP を 20kg/h で供給してロータリーキルン処理を行った結果、リサイクル繊維 1kg

あたりの使用エネルギーが 10MJ 以下になることを確認した。これは他の技術と比較してもトップクラスの使用エネルギーの少なさである。一方、リサイクル繊維の強度低下を抑制するため、CFRP を過熱水蒸気のみで処理して樹脂の大部分を除去した後、酸素を添加した過熱水蒸気雰囲気中で樹脂残渣の除去を行う 2 段階のロータリーキルン処理を実施した。

【4-2】リサイクル繊維の評価

2 段階のロータリーキルン処理により回収したリサイクル繊維の引張強度は、バージン炭素繊維の強度に対して 70~80%の相対強度であることが明らかになった。さらに樹脂との密着性は、バージン炭素繊維（サイジング剤付き）に対して、約 70%の値であることが確認できた。このようにロータリーキルン装置を用いて、高品位なリサイクル繊維の回収が可能であることを明らかにした。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

高砂工業株式会社 開発部開発課

大島 士月

TEL : 0572-59-1234

FAX : 0572-59-2033

E-mail : shizuki_ohshima※takasago-inc.co.jp (※を@に変更して下さい)

第2章 研究開発の詳細

2-1 ロータリーキルンの開発

2-1-1 設計・製造・試運転

飽和水蒸気をさらに加熱することにより得られる過熱水蒸気は、低酸素分圧下での処理が可能であるため、CFRP 廃材の処理に適用した場合、リサイクル繊維の酸化劣化を極力抑えた処理が可能である。また、過熱水蒸気は被処理品への浸透作用が大きく、厚肉・複雑形状品の高速・均一加熱が可能であることから、樹脂を効率よく均一に除去することができる。さらに、我々はリサイクル繊維表面に樹脂との接着活性点（酸性・塩基性点）を導入できることを見いだしており、繊維回収だけでなく、繊維-樹脂間の密着性の向上も同時に期待できることを明らかにしている。このことは、リサイクル繊維のサイジング処理等の後処理工程を省略し、CFRP の製造コストを大幅に削減できる可能性を示唆している。

このような背景のもと我々は、バッチ式の小型の過熱水蒸気処理システムを使用して、実験室レベルで、過熱水蒸気処理が高品位リサイクル炭素繊維の回収に極めて有効であることを示してきた。その一方で、リサイクル繊維の回収能力が 1kg/日と非常に小さいことと、廃熱回収して過熱水蒸気を生成すること等の省エネ対策を施していないため、1kg のリサイクル繊維を得るのに要するエネルギーが大きいことが課題であった。そこで、大量の高品位リサイクル繊維の回収が可能な省エネ型の大型連続処理システムの開発を検討した。

本研究開発では炉芯管を外部からバーナで加熱する外熱式のロータリーキルンを採用した。炉芯管にはパイプが付けられており、内部で発生した可燃性ガスを炉芯管の外部に排出して燃焼することができる。CFRP を処理する場合、CFRP の樹脂から発生した分解ガスを燃焼させて熱源として利用することができるため、外部からエネルギーを与えなくても過熱水蒸気を生成することが可能であり、低コストで連続的に炭素繊維を回収することができる。

図 2 に装置の全体構成を、図 3 に開発装置の 3D モデルを、図 4 に外観写真をそれぞれ示す。開発した装置は、CFRP 投入機、炉体本体、廃熱ボイラ、集塵装置で構成されており、詳細を以下で説明する（ただし、廃熱ボイラは 2-2 に記載）。

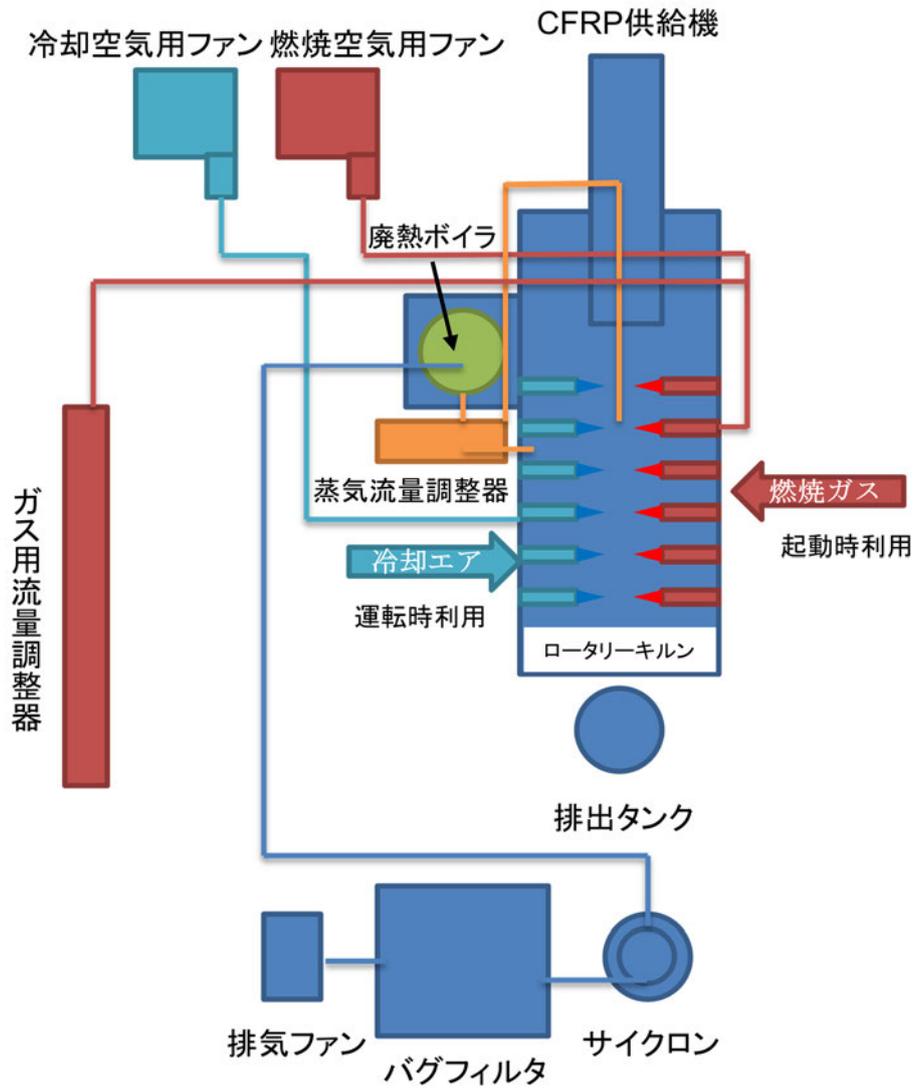


図 2 開発ロータリーキルン装置の全体構成

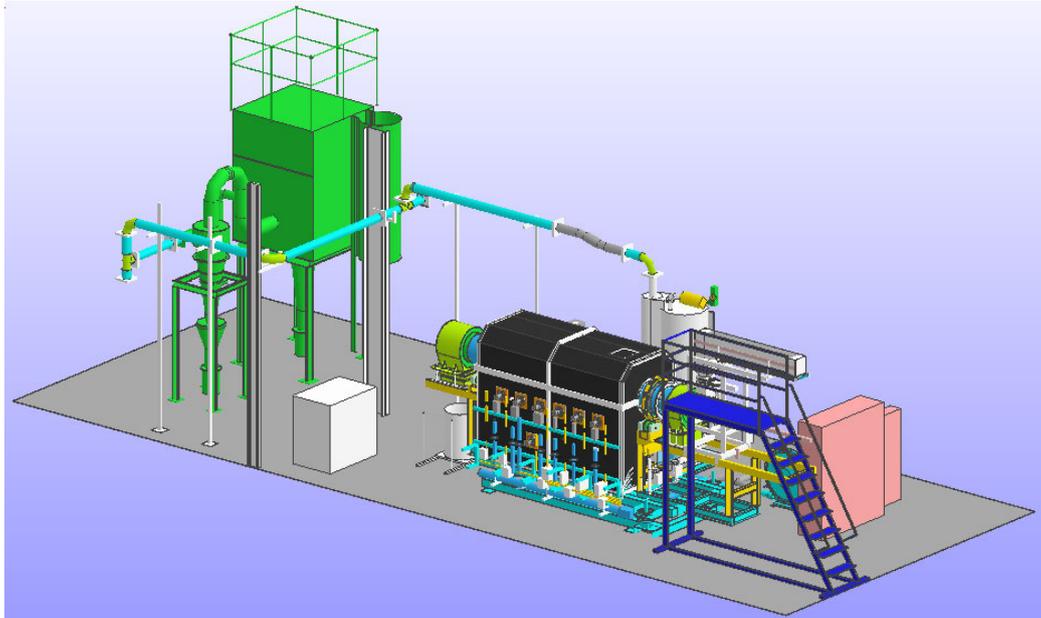


図3 開発ロータリーキルン装置の3Dモデル



図4 開発ロータリーキルン装置の外観

①CFRP 投入機

CFRP 投入機は、リサイクル繊維を不織布へ展開することを想定して、50~100mm程度に切断した CFRP をロータリーキルンに供給できるように設計した。図5に示す通

り、ベルトコンベア、計量器、ダンパー、プッシャー式供給装置で構成されている。ベルトコンベアに CFRP 廃材を供給し、計量器で定量になると計量板が下がり、1 段目のダンパー内へ材料が供給される。1 段目のダンパーが閉まると 2 段目のダンパーが開き、プッシャーの供給管に供給される。このダブルダンパーにより、過熱水蒸気が CFRP 供給側へ排出されるのを抑止している。プッシャーの供給管に供給された CFRP 廃材はエア式のシリンダで炉芯管内へ供給される。

開発した投入機を用いて CFRP の供給試験を実施した結果、目標値の 10kg/h で CFRP を供給可能であることを確認した。

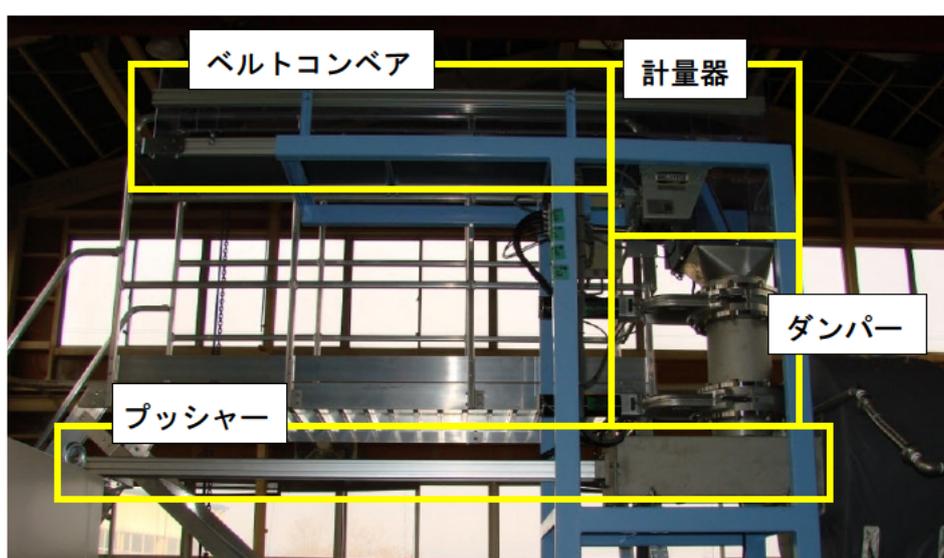


図5 CFRP 投入機

②炉体本体

立ち上げ時は、バーナを点火し所定の温度まで昇温する。バーナはガス流量調整器と燃焼空気用ファンでコントロールして温度を調整している。CFRP を供給してからの温度調節の機構を以下で説明する。

図6に炉体本体の構造を示す。炉芯管内で分解したガスは、炉芯管の中腹部に設置したツノと呼ばれるパイプ（排出口）により炉芯管の外部へ排出される。ここで、炉内の温度が高く、酸素が十分にある場合、可燃性ガスは炉芯管の外で燃焼する。可燃性ガスの燃焼エネルギーが少ない場合は炉体に設置されたバーナを燃焼し、炉の温度低下を抑止する。また、可燃性ガスの燃焼エネルギーが大きい場合は炉自体が過加熱になるため、冷却空気用ファンより冷却空気を供給して温度制御する。

可燃性ガスのほとんどは加熱室で燃焼されるが、温度制御を行うことにより一部のガスは未燃状態となる。未燃ガスは、炉の下部に設置した二次燃焼バーナで完全燃焼する。

二次燃焼後の廃熱は 800~1000℃であり、熱容量が大きい。そのため、その廃ガスを利用して過熱水蒸気を生成する。これにより、廃熱として排出される熱量を炉内に還元し、廃熱損失を低減することができる。

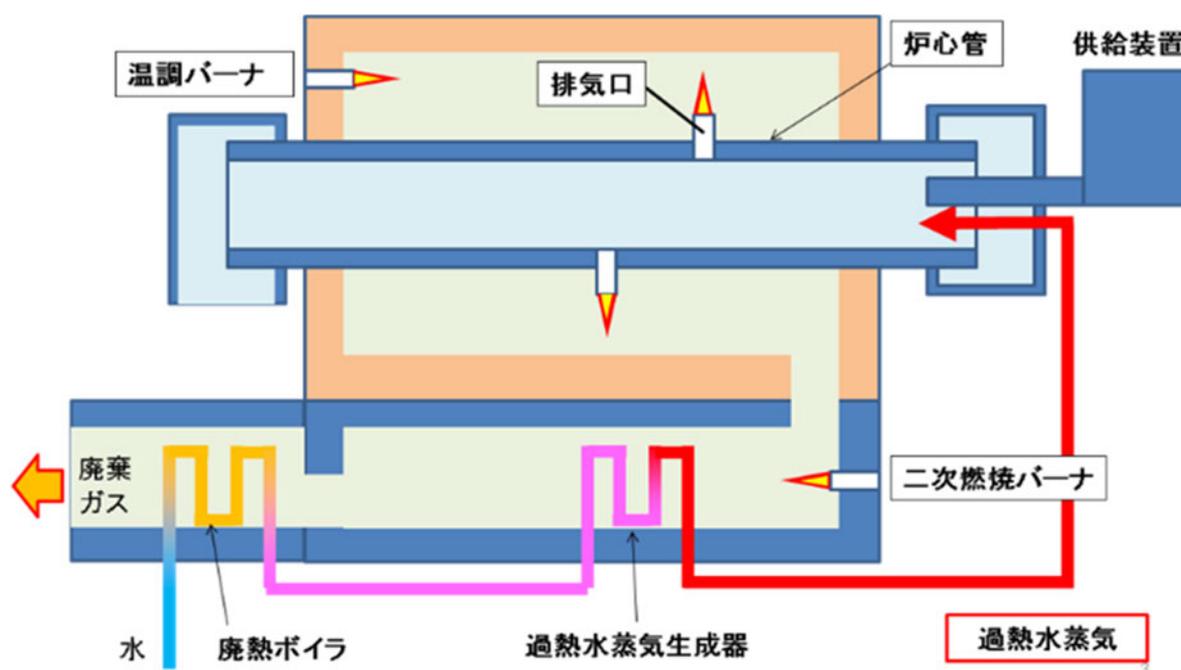


図6 炉体本体の構造

③集塵装置

炭素繊維が炉芯管の排気口を通過して排ガス中に混入する可能性があり、炭素繊維が大気中に放出されるのを防ぐため、集塵装置を設置した。集塵装置はサイクロンとバグフィルタで構成される。廃ガス中の炭素繊維を回収して、排気ファンで系外に排出している。

2-1-2 ロータリーキルンの改良

①CFRP 投入機の改良

ロータリーキルンを加熱して長時間の試験を行うと、CFRP 投入機のダンパーやプッシャーに CFRP が固着し、ダンパーの開閉不良やプッシャーの動作不良が生じた。そこで、ダンパーのバルブの変更やプッシャーの形状を改良することにより、安定動作が可能になった。

一方、プッシャーの長さを当初の半分にするこで、プッシャーの送り速度を速め、CFRP を 20kg/h で供給できるように改良した。また、改良した投入機を用いて CFRP のロータリーキルン処理を行った結果、目標値の 2 倍の10kg/h のリサイクル繊維の連続回収が可能であることを確認した。

②炉心管の改良

当初、ロータリーキルン処理後のリサイクル繊維を確認したところ、塊状の表面は十分に樹脂が除去されて繊維化していたが、塊の内部は未処理部分が残った状態であった。これは、ロータリーキルン処理によって樹脂が除去された炭素繊維が毛玉状に未反応の CFRP を覆い、毛玉状の炭素繊維が断熱層として作用したためと考えられた。そこで、攪拌ピンを一定間隔で設置した攪拌羽根を取り付けることにより、改善を検討した（図7、8）。ロータリーキルン処理時の回転動作により、ピンで炭素繊維を掻き取る構造にしたことより、炉内で CFRP が絡まった炭素繊維を除去し、均一な処理が可能になった。

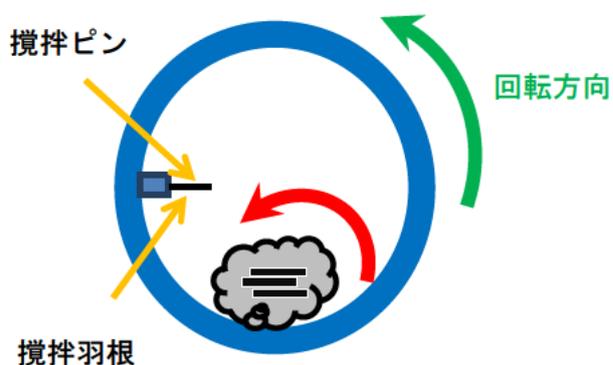


図7 CFRP の攪拌状態

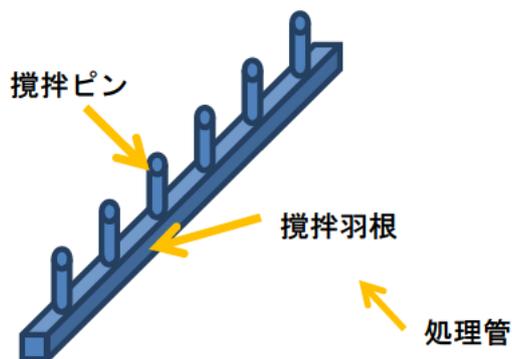


図8 攪拌羽根と攪拌ピン

2-2 高温過熱水蒸気生成機構の開発

30kg/h の室温の市水を、ロータリーキルンの二次燃焼室出口に設置した廃熱ボイラ（図9）を用いて、150℃の水蒸気にし、この水蒸気の一部を二次燃焼室と燃焼室内の配管に導入し、配管周囲の高温の燃焼ガスから熱回収することで、**最高温度 800℃、10kg/h 以上の過熱水蒸気の生成が可能であった。**

また、最高能力の検証を行った結果、最高で 50kg/h の過熱水蒸気が生成できることを確認した。また、安定稼働ができるように下記の問題に対処した。

①ボイラの水位異常

ロータリーキルンの炉圧が変動することにより廃ガスボイラ内の熱量が変化し、ボイラ内の水位が装置の設定範囲を超えて上下することで、水位異常のエラーが発生した。そこで、ボイラの給水用ポンプの PID 調整を実施することにより対処した。

②炭素繊維の付着

CFRP の過熱水蒸気処理試験を実施する過程で廃熱ボイラの水管に炭素繊維が付着し、炉内の排気が阻害される問題が生じた。炉の排気出口にフィルタを設置し、ボイラの前段で炭素繊維をトラップする構造とした。

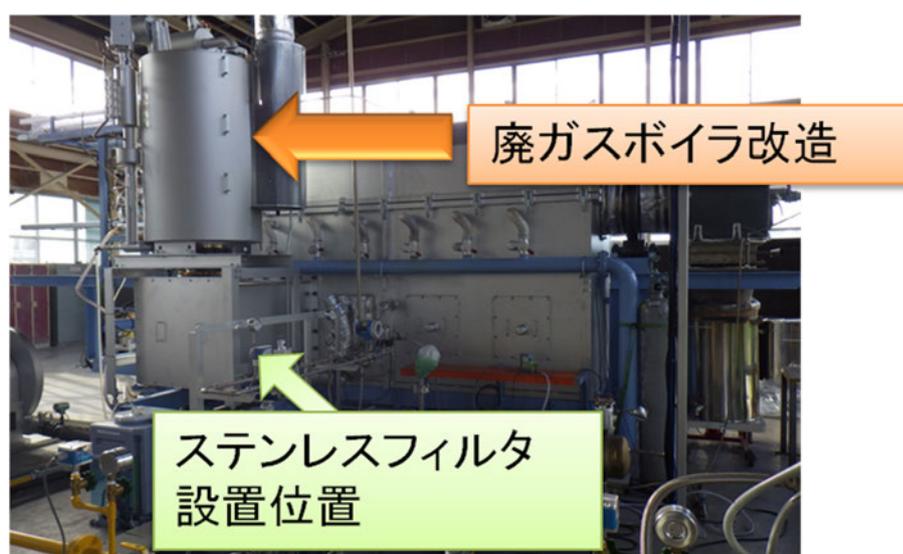


図9 廃熱ボイラ

2-3 CFRP 切断加工条件の最適化

導入する切断機の能力は 3t(板厚)×1,600×1,600mm (3.3kg) の CFRP 廃材を 50~100mm 角に 10kg/h 以上の切断速度で切断するとして、検討を実施した。このうち、切断前の CFRP の大きさは、自動車のルーフやボンネットなどのパーツを想定している。また、切断サイズはリサイクル繊維を樹脂繊維との不織布にすることを想定して、ヒアリング調査をもとに決定した。切断速度は、CFRP 投入機の処理能力と同等に設定した。次に、CFRP 切断機の候補として①ウォータージェット、②破碎機、③ノコ刃切断機を選定し、横並び比較した結果を表 2 に示す。このうちウォータージェットは、イニシャルコスト(設備導入費用)が高額であることと、既存の装置ではセッティングに時間が掛かることが課題である。さらに、ウォータージェットは焦点距離から遠くなると水流が拡散して切断できなくなる。自動車のボンネットやルーフ等は歪曲しており、厚みもあることから切断が難しい可能性が高い。次に、破碎機は切断処理能力が高く、イニシャルコストも安価なことから有望であるが、切断後の CFRP の形状のバラツキが大きいことが問題である。また、切断する形状を任意に変えることができない(刃の形状で決まる)。さらに、切断時に CFRP に剪断応力が加わるため、リサイクル繊維の強度低下につながる懸念される。したがって、切断速度が比較的速く、切断長さを任意に設定できる、円ノコ刃での切断方法が最適と判断した。なお、大型の CFRP 廃材を 1 台の切断機で 50~100mm 角に切断する場合、切断機が大型になりイニシャルコストが増加するため、1 次切断用(切断サイズ: 300~800mm 角)の切断機(図 10)と、2 次切断用(切断サイズ: 50~100mm 角)の切断機(図 11)をそれぞれ選定した。

導入した切断機の能力確認試験を行った。1 次切断機と 2 次切断機を用いて、多量の 3t×1,600×1,600mm の CFRP 廃材を 70mm 角にまで切断した結果、切断能力は 27kg/h であることが明らかになり、目標の 10kg/h (CFRP 換算)以上を達成した。

表 2 切断機の比較結果

試験装置概要			
切断方法	ウォータージェット	破碎	ノコ刃切断
消耗品	砥粒+水	ブレード	円ノコ刃
特徴			
切断形状	◎	△	◎
サイズ	◎	△	◎
イニシャルコスト	×	◎	○
ランニングコスト	◎ (砥粒無し) ○ (砥粒あり)	△	○
加工時間	○	◎	○
段取り時間	×	◎	◎
粉塵	◎	×	△
備考	セッティングに時間が掛かる、試験機はバッチタイプのため連続運用には向かない	切断後のサイズがバラバラになる。長いものや細かいものが混じる	粉塵装置が必要 刃の交換が容易



図 10 一次切断機



図 11 二次切断機

2-4 処理条件の最適化

2-4-1 運転の最適化

ロータリーキルンに投入する CFRP の種類、投入量、処理時間、処理温度、過熱水蒸気量、空気打込量等を変化させて、処理条件の最適化を検討した。

熱可塑性樹脂 CFRP は、ロータリーキルンを用いて600℃以下の過熱水蒸気で処理することにより、樹脂残渣のないリサイクル繊維を容易に取り出すことができた。

熱硬化性樹脂 CFRP は、600℃以上の酸素を含む過熱水蒸気でロータリーキルン処理することにより、樹脂残渣のないリサイクル繊維を取り出すことができた。しかし、高温の酸素を含む雰囲気中で処理したため、回収したリサイクル繊維の引張強度は大きく低下した。そこで、リサイクル繊維の強度低下を抑えつつ樹脂を完全に除去するために、最初に 600℃以下の過熱水蒸気のみで処理して樹脂の大部分を除去し、その後、酸素を添加した過熱水蒸気雰囲気中で樹脂残渣を除去する 2 段階のロータリーキルン処理を検討した。その結果、回収したリサイクル繊維（図 1 2）の引張強度は、バージン炭素繊維と比較して 70%以上の相対強度を有することを確認した（詳細は 2-4-2 に記載する）。

一方、ロータリーキルン処理時の消費エネルギーを計測した。過熱水蒸気処理時の温度、処理時間、処理に要する過熱水蒸気量を最適化し、熱硬化性樹脂 CFRP を 20kg/h で供給して試験した場合のリサイクル炭素繊維 1kg あたりの使用エネルギー量の時間変化を図 1 3 に示す。変動はあるものの使用エネルギー量が 10MJ を下回る時間帯が確認され、リサイクル繊維 1kg あたりの使用エネルギーを 10MJ 以下が達成できることを明らかにした



図 1 2 リサイクル炭素繊維

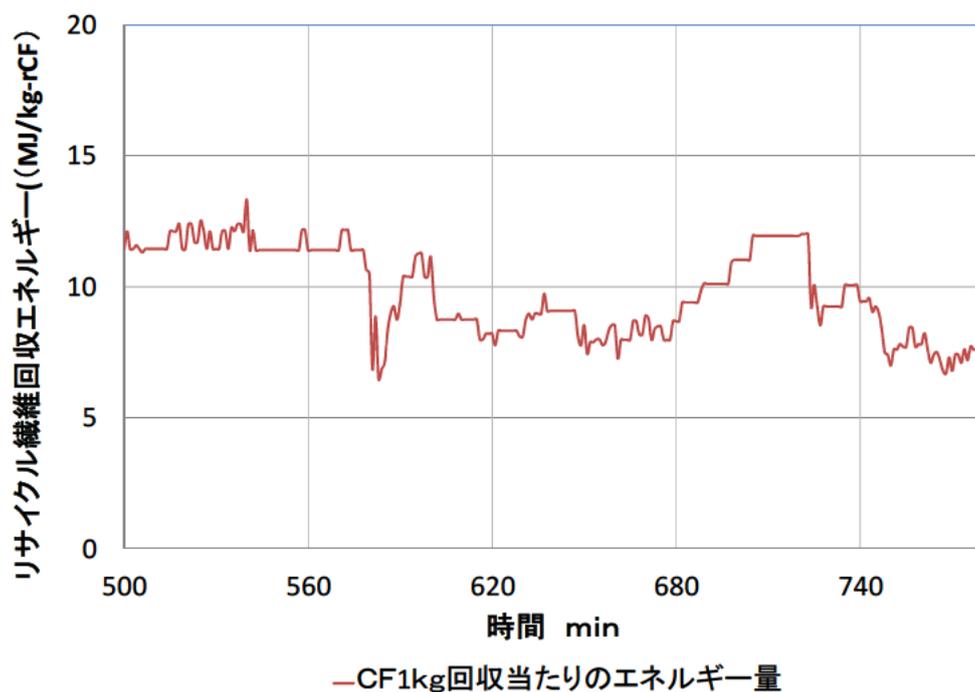


図13 リサイクル繊維を 1kg 回収するのに必要なエネルギー

2-4-2 リサイクル繊維の評価

熱硬化性樹脂 CFRP を 2 段階のロータリーキルン処理 (2-4-1 で実施) により回収した炭素繊維の引張強度を評価した。図14に、バージン炭素繊維の引張強度に対するリサイクル繊維の相対強度を示す。なお、2 種類の条件で 2 段階ロータリーキルン処理を行った結果を示す。ここで、ロータリーキルン処理における CFRP の炉内の滞留時間は 1 時間であるが、連続処理を行い、処理開始から 2 時間後と 6 時間後に採取したリサイクル繊維について評価している。その結果、リサイクル繊維の引張強度はバージン炭素繊維に対して相対強度で 70~80% であることが明らかになり、比較的高強度のリサイクル繊維が安定的に回収可能であることが確認できた。

次に、処理条件①で処理を行い、処理開始から 6 時間後に採取したリサイクル繊維を用いて、樹脂との密着性を評価した。樹脂との密着性は、主剤にビスフェノール A 型エポキシ樹脂、硬化剤にトリエチルテトラミンを用いて、フラグメンテーション法により評価した。その結果、リサイクル炭素繊維の樹脂との密着性は、バージン炭素繊維 (サイジング剤付き) に対して、約 70% の値であることが

確認できた。

このように、開発したロータリーキルン装置を用いて、CFRP から高品位なリサイクル繊維が回収可能であることが明らかになった

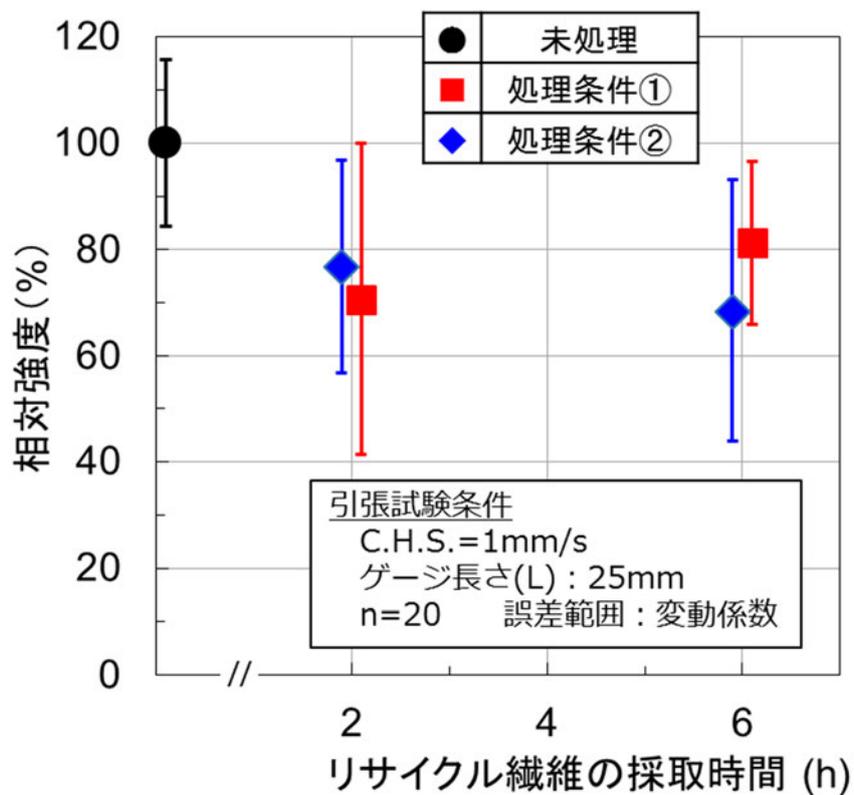


図1 4 リサイクル繊維の引張強度（バージン炭素繊維の強度に対する相対強度）

第3章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

高温過熱水蒸気により CFRP 廃材中の樹脂を加水分解・気化することで、リサイクル繊維の連続回収が可能なロータリーキルンを設計・製造した。開発した装置は、①CFRP投入機、②炉体本体（炉芯管、燃焼室、二次燃焼室）、③廃熱回収ボイラ、④集塵機で構成されている。5kg/h のリサイクル繊維の連続回収ができるように、繊維含有率 50%の CFRP を想定して投入機の処理能力は 10kg/h(CFRP 換算)以上で設計した。その後、投入機等の改良を進め、長時間の安定動作ができるようにするとともに、20kg/h(CFRP 換算)の供給を可能にした。改良した投入機を用いることにより、当初計画の 2 倍の 10kg/h でリサイクル繊維の連続回収が可能になった。一方、炉芯管の構造を改良し、炉内における処理品の攪拌性を高めることにより、樹脂残渣がなく、均一なリサイクル繊維の回収が可能になった。

CFRP 中の樹脂が燃焼すると大きな熱量を得ることができる。ロータリーキルンの炉芯管から排出される可燃性の分解ガスを燃焼室で燃焼させて、炉芯管内の過熱水蒸気温度を高温に維持できるようにした。また、二次燃焼室と廃熱回収ボイラにおいて、高温の廃熱から熱回収することにより、ロータリーキルンの入口温度で最高 800℃、10kg/h 以上の過熱水蒸気が生成可能であることを確認した。このように、廃熱として排出される熱量を利用して、低燃費で過熱水蒸気処理が可能なシステムを構築した。

ここで、実際の CFRP 廃材は様々な形状を有するため、ロータリーキルンに CFRP 廃材を投入する場合、ある程度の大きさに切断する必要がある。リサイクル繊維を付加価値の大きい不織布に展開することを想定して、50~100mm 角のサイズに切断するとし、さらに 10kg/h 以上で切断可能な装置としてノコ刃切断機を導入した。導入した切断機を用いて、多量の 3t×1,600×1,600mm の CFRP 廃材を 70mm 角に切断する試験を行った結果、切断能力は 27kg/h(CFRP 換算)であった。

開発・改良したロータリーキルン装置を用いて、過熱水蒸気処理時の温度、処理時間、処理に要する過熱水蒸気量を最適化し、熱硬化性樹脂 CFRP を 20kg/h で供給して試験を行った結果、リサイクル繊維 1kg を回収するのに必要なエネルギーが 10MJ 以下になることを確認した。

次に、熱硬化性樹脂 CFRP から回収したリサイクル繊維の強度低下を抑制するため、CFRP を過熱水蒸気のみで処理して樹脂の大部分を除去した後、酸素を添加した過熱

水蒸気雰囲気中で樹脂残渣を除去する 2 段階のロータリーキルン処理を検討した。その結果、この方法で得られたリサイクル繊維の引張強度はバージン炭素繊維に対して相対強度で 70～80%であることが明らかになった。さらに樹脂との密着性は、バージン炭素繊維（サイジング剤付き）に対して、約 70%の値であることを確認した。

以上、CFRP 廃材から高品位リサイクル繊維を連続かつ大量に回収が可能な省エネ型の処理システムの開発に成功した。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

①研究開発後の課題

熱硬化性樹脂 CFRP を 2 段階処理することにより、バージン炭素繊維に対して相対強度が 70~80%のリサイクル繊維を得ることができたが、言い換えると処理によって 20~30%の強度低下が生じていることになる。更に強度低下が小さいリサイクル繊維を得るために、処理条件の最適化を検討する必要がある。

CFRPを構成する樹脂種によっては、樹脂の完全除去が困難であり、2 段階処理を行ってもリサイクル繊維の特性評価にまで至らなかったものもあった。樹脂毎に最適な処理条件は異なると予想され、樹脂種と処理条件の関係をデータベース化できると、装置販売の際に助けになるものと期待される。

今回、2 段階のロータリーキルン処理は、同じ装置に 2 回サンプルを通して実施したが、このような方法は効率が悪い。異なる温度や雰囲気処理可能な処理室を複数備えた装置を開発し、2 段階処理をシームレスに行えるようにする必要がある。

②事業化展開

今回開発した装置はあくまで一例であり、ロータリーキルン以外の形態もあり得る。本研究開発で培った過熱水蒸気処理に関する知見と、通常の事業で行っている雰囲気炉等の製造技術をあわせることにより、顧客の要望（CFRP 廃材の形状やリサイクル繊維の利用方法）に応じて最適な構造の過熱水蒸気処理装置を提案し、販売につなげたい。

具体的には展示会などに出展し装置の宣伝を行い顧客からのさらなるニーズを取り込むことで顧客への装置の販売を行っていく。展示会は年 3~5 回の出展を計画している。リサイクル分野へは環境展に出展することで、産業廃棄物処理業者やそれに関連する業種に宣伝を行う。自動車分野へは、オートモーティブ ワールドなどに出展して、自動車会社各社への宣伝を行う。当社の特徴であるオーダーメイドでの装置設計を行うことで顧客ごとに最も適した CFRP 処理装置を提供する。オーダーメイドで作製することで他社との差別化を行うことができ競争力の高い装置を販売することができる。