

「CFRPの真空対応ケミカルリサイクルシステム」の成果の概要について

実施体制	主管実施機関 研究代表者名	京都府立大学 教授 宮藤久士	実施期間	令和4年度～ 令和6年度 (3年間)	実施規模	予算総額 (契約額) 44百万円		
	共同参画機関	国立研究開発法人森林研究・整備機構 (株)宮城化成		1年目		2年目	3年目	
				15百万円		14百万円	14百万円	

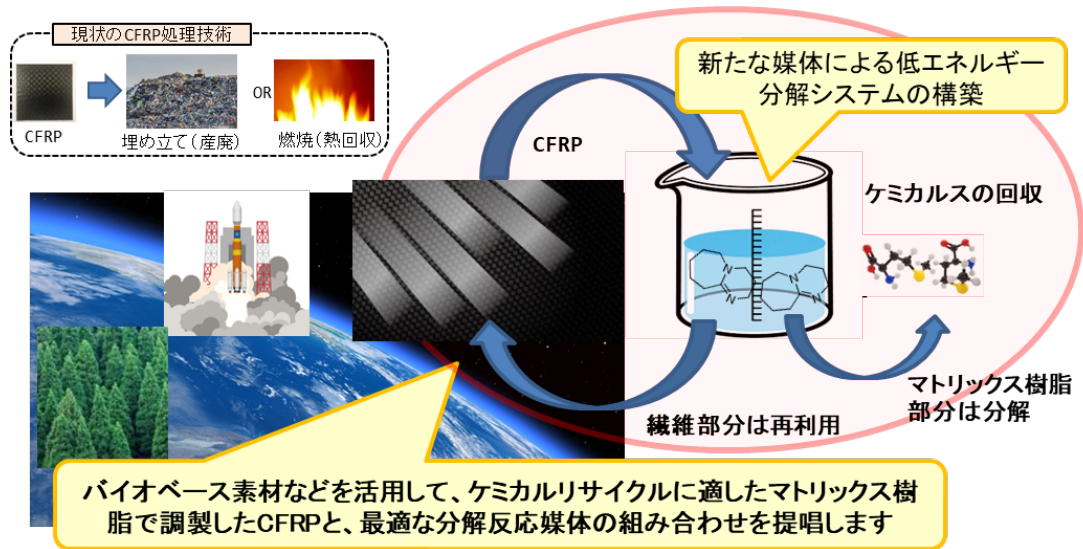
背景・目的・この事業で目標としたアウトプット

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、炭素繊維とマトリックス樹脂からなる複合材料であり、軽量・高強度・高耐熱性という優れた性能を持つため、航空宇宙分野における機体部材への導入が進められています。しかしながら、その高い耐久性と安定性がかえってリサイクルを困難にしており、現状では廃棄CFRPの大半が埋め立て処分されているという問題がある。将来の月面基地建設などを見据えると、不要となったロケットや宇宙探査機に使用されているCFRPをはじめとする各種部材を、貴重な炭素資源として徹底的に有効活用することが必要不可欠である。特に月面などの真空環境では、通常の蒸発性媒体を使用したリサイクル手法が適用できないため、揮発性の低い媒体を用いた新しいリサイクルシステムの構築が求められている。本研究は、航空宇宙分野でのCFRP利用と真空環境下でのリサイクルを想定し、揮発性の低い媒体中でのCFRPの分解およびケミカルリサイクル手法の開発と、それに適したCFRP用マトリックス樹脂の開発を目的とする。これにより、極限環境下でも活用できる新しいCFRPケミカルリサイクルシステムを提唱し、地球上での環境問題解決と将来の宇宙開発の両面に貢献することを目指す。

成果展開の状況・

期待される波及効果 (事業の目的に関するアウトカム)

中間報告時に設定した方針に基づき、ベンチスケールレベルのケミカルリサイクルシステム設計を行える企業をリグニンネットワーク (約100社が参加) を中心に選定中であり、宮城化成を通じた試験サンプル供給体制も数年以内の構築を目指している。今後の展望として、国内CFRP約2万トンのうち6,000トンの循環型リサイクルシステム構築、国内未利用木材約200万³/年の高付加価値化による林業地域への貢献、地上での航空産業への応用を経た宇宙分野への展開を目標とする。技術的には、DBU類縁体のリサイクル性向上によるプロセスコスト低減、回収炭素繊維の再利用可能性の検証、回収モノマーの樹脂原料としてのポテンシャル解明を進めることで、社会実装を推進していく。



背景

炭素繊維強化プラスチック（CFRP :Carbon Fiber Reinforced Plastics）は、炭素繊維とマトリックス樹脂からなる複合材料である。軽くて強く、耐熱性が高いなどの優れた性能を有しており、燃費の向上が期待できるため航空宇宙分野において機体の部材への導入の検討が進んでいる。しかしながら、その耐久性、安定性がゆえに、リサイクルが困難な材料として知られており、現状では廃棄CFRPのほとんどが埋め立て処分されている。将来の月面への人類の積極的な進出、それに伴う基地建設などを考えた際には、月面への移動や輸送などに使われたロケットや宇宙探査機などの本体が仮に不要となったとしても、内部に使用されているCFRPをはじめとする各種の部材は貴重な炭素資源として徹底的に有効利用することが必要であると考えられる。そこで、月面などの真空下においても蒸発しない媒体を用いるリサイクルシステムの構築が求められている。

目的 -本委託費を使用して世の中の何を変えるか-

炭素繊維強化材(CFRP)の航空宇宙分野での利用と宇宙空間などの真空下でのリサイクルを想定し、揮発性の低い媒体中でのCFRPの分解及びケミカルリサイクル手法と、それに適するCFRP用マトリックス樹脂の開発を目的とする

目的に対する指標

ケミカルリサイクルを可能とする新規反応媒体を見出せたか
物性とリサイクル性に優れたバイオベースCFRPが調製できたか

目標 -目的のために何をするか-

極限環境下でも活用できる新しいCFRPのケミカルリサイクルシステムを提唱する

目標に対する指標

既存の反応媒体より処理効率(処理時間)が優れているか

実施項目 -目標のために何をするか-

- ・CFRPのマトリックス樹脂分解に適している反応媒体の探索
- ・ケミカルリサイクルに適するCFRPのデザイン

事業内でのアウトプット

極限環境下でも活用できる新しいケミカルリサイクルに適したCFRP

①「CFRPのケミカルリサイクル技術の構築」

実施内容・成果

1-1 新規反応媒体の探索および分解条件の最適化

マトリックス樹脂中の改質リグニン含有率が高くなるほど、また反応時間が経過するにつれて樹脂分解率が高くなる。DBU類縁体Fについては、低リグニン含有率(含有率16.7%)、短時間処理の場合でも、DBUに比べて高樹脂分解率を達成した(48時間処理で100%)。(右図1参照)

1-2 回収炭素繊維の物性および樹脂主剤モノマーの回収

改質リグニン含有CFRPで類縁体Fを用いた場合63.8%の主剤モノマー回収された。DBUでは改質リグニンが含有されていないCFRPでは、43.1%であった。また、DBU処理では58.3%であり、類縁体Fはモノマー回収性でもDBUよりも優れていた。

類縁体Fで処理した改質リグニン含有CFRPから回収された炭素繊維の引張強度は未処理炭素繊維と同等であった。(表1参照)

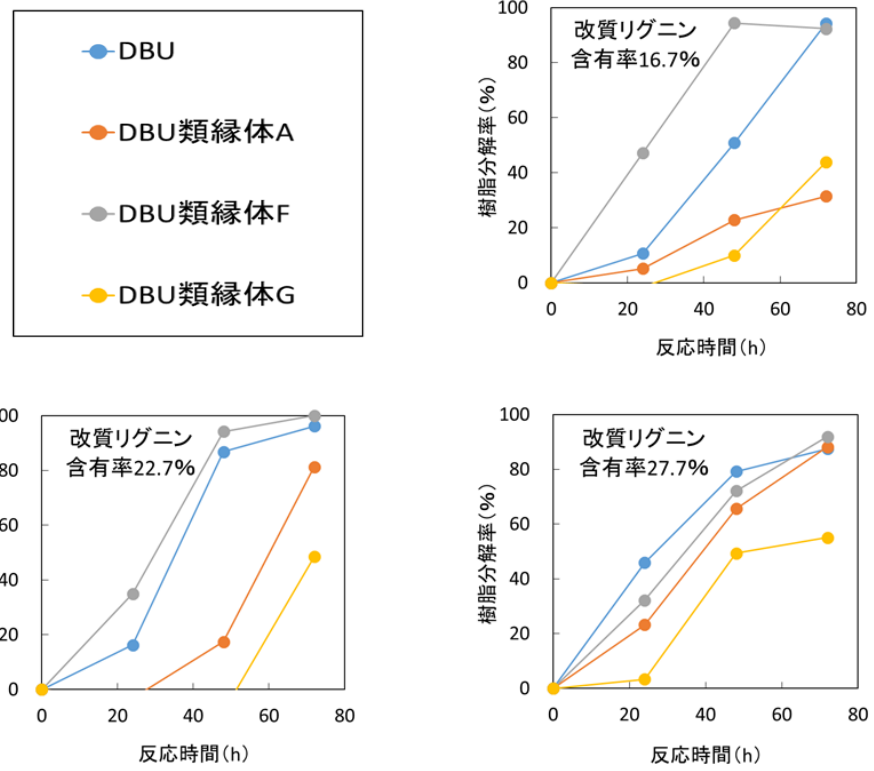


図1 各種反応媒体を用いた改質リグニン含有CFRPの反応時間と樹脂分解率の関係(処理温度:100℃)

表1 100℃、48時間で処理された各種試料の引張強度

試料	引張強度(N/mm ²)
未処理炭素繊維	130.1
DBU処理した炭素繊維束	39.4
DBU類縁体F処理した炭素繊維束	96.6
DBU処理でCFRPから回収した炭素繊維束	121.4
DBU類縁体F処理でCFRPから回収した炭素繊維束	132.3

② 「ケミカルリサイクルに適するCFRPのデザイン」

実施内容・成果

2-1 バイオベースCFRPのデザイン

① 改質リグニンの調製

当該用途に適する改質リグニン(GL)をデザインし調製に成功。

② 改質リグニン系エポキシ樹脂のCFRP化

GL含有量・GL種の効果を比較し試料の最適化を図った

- ・GL含有率増でCFRP機械強度は増加(弾性率は同等)
 - ・GL種は分子量が小さい程、機械強度は増加
- GL添加CFRPの設計時の指針が得られた。

③ 改質リグニン系不飽和ポリエステル(UP)のCFRP化

GL添加で硬化阻害が起こるUP樹脂で、アルキル化GL(MSシリーズ)添加にてCFRP化を実現にした。

④ 改質リグニン系ウレタン樹脂のCFRP化

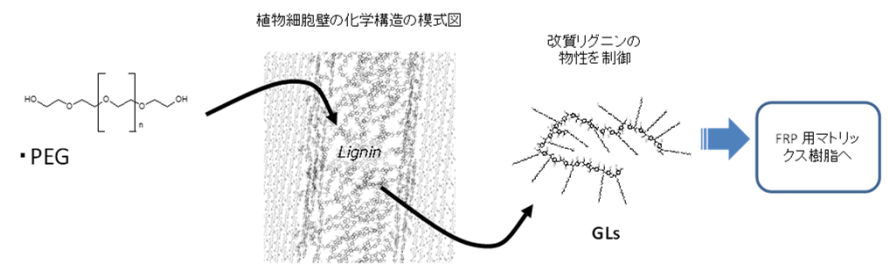
GL添加が、樹脂硬化時間制御のフィラーの役割をする事を見出しCFRP化を実現した。

- ・前述の②、③は、既存FRPの汎用樹脂である。廃棄時のリサイクル技術の確立は急務であり、本研究のリサイクル技術の意義は大きい。

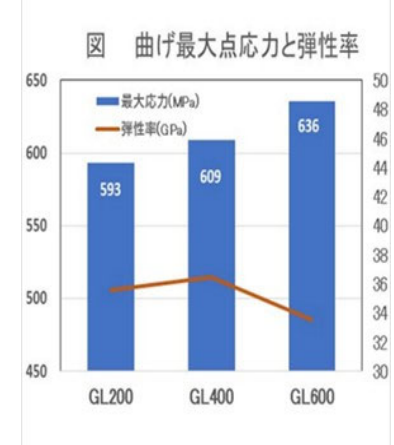
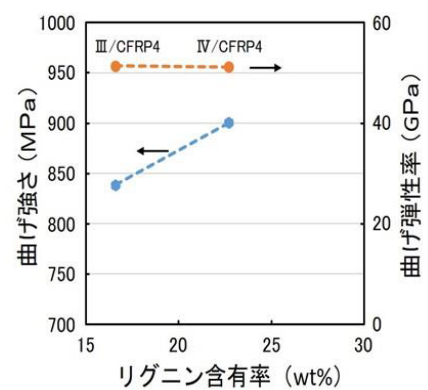
2-2 宇宙空間での材料耐性評価(追加項目)

宇宙空間での耐候性項目の中の原子状酸素AO(Atomic Oxygen)放射線試験を実施(JAXA協力)

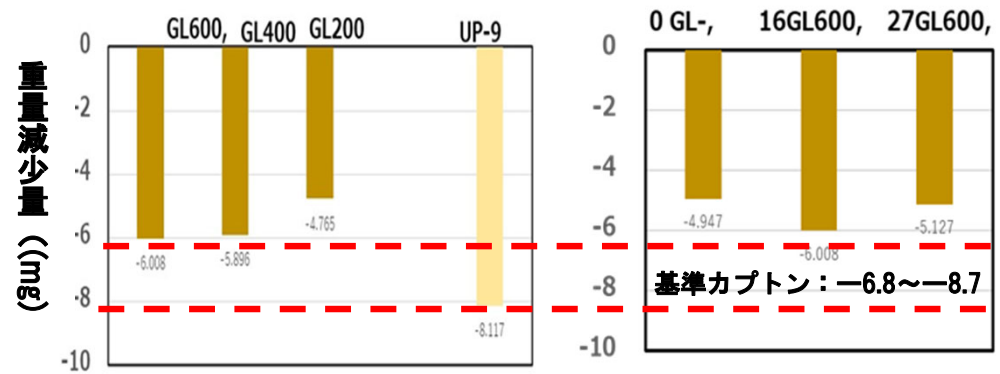
- ・GL添加エポキシ樹脂系CFRPのAO耐性は宇宙空間で使用できるレベルにあることを確認した。
- 衛星材料設計の一助としていきたい。



木材からの改質リグニン(GL)調製の模式図



GL導入したCFRPの物理特性



GL導入したCFRPのAO試験

その他の成果

これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	特許出願	査読付き 投稿論文	その他 研究発表	実用化事業	プレスリリー ス・取材対応	展示会出展
	国内：0 国際：0	国内：0 国際：0	国内：4 国際：0	国内：0 国際：0	国内：0 国際：0	国内：○ 国際：○
	受賞・表彰リスト		なし			

成果展開の状況・期待される波及効果(事業の目的に関するアウトカム)

中間報告時に設定した「アウトカムに関する事後自己点検の実施方針」では、実施項目①については「ベンチスケールレベルのケミカルリサイクルシステム設計へ移行できる技術の構築」と「システム設計や試作を行えるパートナーの確保」を効果・効用および波及効果の指標とし、実施項目②については「試験サンプルの供給」と「CFRPを用いた製品を活用するメーカーが試験的に活用すること」を指標として設定していた。

企業等との連携：リグニンネットワーク（参加法人会員約100社）だけでなく、これまでに繋がりのあった企業を中心に、ベンチスケールレベルのケミカルリサイクルシステム設計を行える企業を選定中であり、今後も継続していく。

CFRP製造・使用企業との連携：宮城化成を通じて、試験サンプル供給の実施体制を構築中であり、数年以内の構築を目指す。

予想される効果・効用

FRP産業の構造転換：国内FRP生産量約120万トンのうち、CFRP約2万トン（全体の約1.7%）に改質リグニン系マトリックス樹脂が採用され、そのうち約30%（6,000トン）がケミカルリサイクルされる循環型システムの構築を当面の目標とする。

森林資源の高付加価値化：改質リグニンの工業利用により、国内未利用木材約200万m³/年（全体の約10%）が高付加価値材料として活用され、林業地域に新規の付加価値を創出する。

今後の研究開発計画

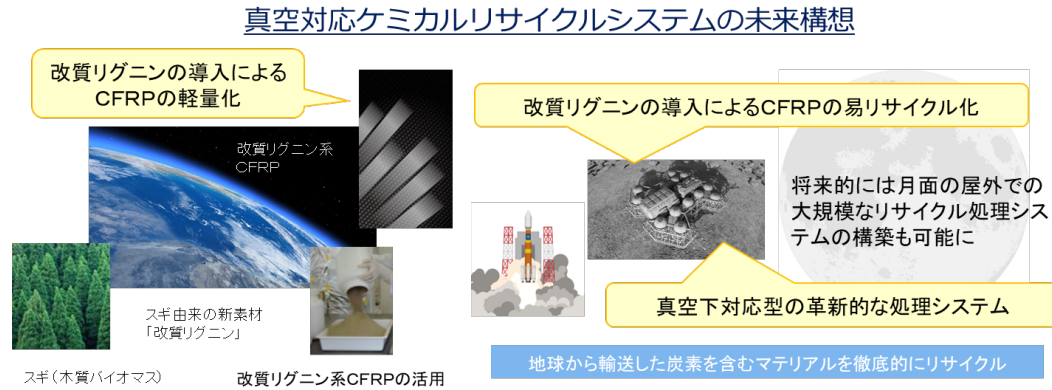
航空・宇宙開発分野への展開：まずは地上において、航空産業などCFRPを利用している製品への応用を図る。利用実績に基づく製品の改良を重ねながら、宇宙分野への展開も図っていく。

技術的なアプローチとしては、以下の点を検討していく。

新規反応媒体のリサイクル性：本研究で見出した新規反応媒体であるDBU類縁体について、そのリサイクル性について確認する。リサイクル性を向上させることで、プロセスコストの低減を目指す。

回収炭素繊維の再利用性：回収炭素繊維を用いて、再度CFRPを作成し、その利用性について確認する。元の製品と同じ仕様ではなくても利用可能な利用方法を模索する。

回収モノマーの再利用性：DBU類縁体中に回収された樹脂主剤モノマーについて、抽出するとともに再度樹脂原料としてのポテンシャルを明らかにする。



事後評価票

令和7年3月末現在

1. プログラム名 宇宙航空脱炭素技術等創出プログラム
2. 課題名 CFRPの真空対応ケミカルリサイクルシステム
3. 主管実施機関・研究代表者 京都府公立大学法人京都府立大学 教授 宮藤久士
4. 共同参画機関 国立研究開発法人森林研究・整備機構、株式会社宮城化成
5. 事業期間 令和4年度～令和6年度
6. 総経費 44百万円
7. 自己点検結果
(1) 課題の達成状況
「所期の目標に対する達成度」
◆ 所期の目標
炭素繊維強化材(CFRP)の航空宇宙分野での利用と宇宙空間などの真空下でのリサイクルを想定し、揮発性の低い媒体中でのCFRPの分解及びケミカルリサイクル手法と、それに適するCFRP用マトリックス樹脂の開発を目的とする。樹脂開発においてはエポキシ樹脂系を中心に検討を進めるが、硬化剤として導入する生物資源由来(バイオベース)の素材であるPEG改質リグニン(改質リグニン)が分解効率を向上する鍵であり、その適応性を精査する。分解媒体においては、ジアザビシクロウンデセン(DBU)などが真空下でバイオベースの樹脂を分解できることを掴んでおり、この特性を最大限に利用して、極限環境下でも活用できる新しいCFRPのケミカルリサイクル技術を提唱する。
◆ 業務計画に対する達成度
1. 全体達成状況
本研究は、炭素繊維強化材(CFRP)の航空宇宙分野での利用と宇宙空間などの真空下でのリサイクルを想定し、揮発性の低い媒体中でのCFRPの分解及びケミカルリサイクル手法と、それに適するCFRP用マトリックス樹脂の開発を目的として、令和4年度から令和6年度までの3年間実施した。中間報告時に設定した評価指標に基づき、実施項目①「CFRPのケミカルリサイクル技術の構築」および実施項目②「ケミカルリサイクルに適するCFRPのデザイン」の両項目において、フルサクセス目標であるTRL4～5レベルを達成し、当初計画を100%完遂した。
※以下では、ポリエチレングリコール(PEG)200、400、600を用いて調製された改質リグニンをそれぞれGL200、GL400、GL600と表記する。

2. 実施項目①「CFRPのケミカルリサイクル技術の構築」の達成度

2.1 目標値と達成状況

中間報告時の目標値は「樹脂分解率 50%程度以上を可能とする新規反応媒体とその処理条件が見出され、TRL4 が達成される」であった。本研究では、この目標を上回る成果を達成した。

令和4年度の成果: DBU 類縁体 A、B、F、G の4種類が 100°Cで樹脂分解可能であることを確認した。このうち DBU 類縁体 A、F、G の3種類が DBU と同程度の分解能(72 時間処理で樹脂分解率 90%以上)を有することを見出した。これにより年度目標である「複数の新規反応媒体候補の発見」を達成した。(達成率 100%)

令和5年度の成果: 3種類の候補から DBU 類縁体 F を最適反応媒体として選定した。GL200 含有 CFRP(樹脂中の改質リグニン含有率 16.7%)に対して、80°C、24 時間処理で樹脂分解率約 100%を達成した。100°C 処理では、GL200 含有 CFRP で約 100%、GL600 含有 CFRP で 63%程度の樹脂分解率であることを見出した。これにより年度目標である「新規反応媒体の1つへの絞り込み」を達成した。(達成率 100%)

令和6年度の成果: GL400 含有 CFRP(バイオマス度 16.7%)に対して、類縁体 F による 100°C、48 時間処理で樹脂分解率 100%程度を達成した。また、GL600 含有 CFRP(バイオマス度 16.7%)でも約 100%の高い分解率が得られた。これにより、分散性評価指標の設定として、最適バイオマス度 16.7%を特定できた。これにより目標である「分散性評価指標の設定と樹脂分解率との相関関係の導出」を達成した。(達成率 100%)

2.2 定量的根拠に基づく評価

樹脂分解率は目標値 50%を大幅に上回る 90%以上を達成した。さらに、処理温度についても当初想定 of 100°Cから 80°Cへの低温化に成功し、エネルギー効率の観点からも優れた成果を得た。類縁体 F は揮発性が低く(100°C減圧処理 8 時間で重量減少率 5.8%)、真空中でも使用できる可能性を見出した。

3. 実施項目②「ケミカルリサイクルに適する CFRP のデザイン」の達成度

3.1 目標値と達成状況

中間報告時の目標値は「①のリサイクル法に適する改質リグニン系 CFRP が製造可能となり、TRL4 が達成される」であった。本研究では、この目標を達成するとともに、複数の樹脂系への展開にも成功した。

令和4年度の成果: PEG200、400、600 を用いた3種類の改質リグニン(GL200、GL400、GL600)を製造し、CFRP 製造のために供給することができた。GL400 含有エポキシ樹脂系 CFRP を5水準(バイオマス度 0-27.7%)で製造し、評価試料として実施項目①へ提供できた。曲げ最大点応力は改質リグニン含有率の増加とともに向上傾向を確認できた。これにより、年度目標である「3種類以上の改質リグニンの試作と供給」を達成できた。(達成率 100%)

令和5年度の成果: GL 種の違いによる物性評価を実施し、GL600 が最も優れた加工性と機械的物性を示すことを実証した。GL600 含有 CFRP(バイオマス度 16.7%)で曲げ最大点応力 636MPa を達成した。樹脂調製温度を GL200 の 105°Cから GL600 の 85°Cへ 20°C低減し、加工性を大幅に改善できた。MS シリーズを開発し、不飽和ポリエステル樹脂系 CFRP の製造に成功した。その曲げ最大点応力は、MS 添加率 10%で 360MPa であった。これにより、年度目標である「ケミカルリサイクルに適した系の発見と評価、不飽和ポリエステル樹脂への展開開始」を達成できた(達成率 100%)

令和6年度の成果: 炭素繊維の再利用性評価において、DBU 類縁体 F 処理では未処理炭素繊維と同等の引張強度を維持することを見出した(DBU 処理では約 40%低下した)。エポキシ主剤モノマー回収率は、GL 含有 CFRP で 60%以上を達成した。ポリウレタン樹脂系 CFRP の製造に成功し、3種類の樹脂系(エポ

キシ、不飽和ポリエステル、ポリウレタン)への展開を達した。JAXAに依頼しAO耐性試験を実施し、GL添加エポキシ樹脂系CFRPが標準材料カプトンと同等の耐性を有することを実証した。これにより目標である「物理特性の解明、カーボンファイバーの再利用性の実証」を達成できた。(達成率100%)

3.2 定量的根拠に基づく評価

改質リグニン系エポキシ樹脂CFRPにおいて、GL600で機械的強度636MPaを達成し、エンジニアリングプラスチックとして十分な性能を確保した。炭素繊維の回収率は95%以上、引張強度は類縁体F処理で未処理と同等を維持し、実用レベルでの再利用可能性を定量的に実証した。また、3種類の樹脂系へ展開することで、FRP市場の過半を占める汎用樹脂への適用可能性を示すことができた。

4. 総合評価

実施項目①②ともに、中間報告時に設定したフルサクセス目標であるTRL4-5を達成した。特に、樹脂分解率100%程度、炭素繊維回収率95%以上、主剤モノマー回収率60%以上という定量的成果により、極限環境下でも活用できる新しいCFRPケミカルリサイクルシステムの実現可能性を技術的に実証した。さらに、当初計画になかったAO耐性評価により宇宙環境での適用可能性も定量的に確認し、エクストラサクセスに向けた知見も獲得した。これらの成果により、当初の業務計画を100%達成したと評価する。

「必要性」

評価項目の選定

本課題の必要性を評価するにあたり、以下の2つの評価項目を選定する。

○科学的・技術的意義(独創性、革新性、先導性、発展性等)

○国費を用いた研究開発としての意義(国や社会のニーズへの適合性、機関の設置目的や研究目的への適合性)

1. 科学的・技術的意義

1.1 独創性・革新性

本研究の最大の独創性は、真空環境下でのCFRPケミカルリサイクルという世界初概念を提唱し、その実現可能性を実証した点にある。従来のCFRPリサイクル技術は、熱分解法(450~700°C)、超臨界流体法(350~400°C、25MPa)、化学分解法(常圧、有機溶媒使用)が主流であったが、いずれも地球上での実施を前提としており、揮発性溶媒の使用や高温・高圧条件が必須であった。これに対し、本研究で開発したDBU類縁体Fは、蒸気圧が極めて低く(100°C減圧処理8時間で重量減少率5.8%)、80~100°Cの比較的低温で樹脂分解率約100%を達成した。この性能は、従来技術と比較して処理温度を約70~80%低減し、かつ真空環境での使用を可能にした点で革新的である。

さらに、バイオベース素材である改質リグニンをCFRPマトリックス樹脂に導入することで、①石油化学系樹脂からの転換、②軽量化による燃費向上(同強度で約20%軽量化)、③リサイクル性向上という3つの脱炭素効果を同時に達成する技術体系を構築した。特に、改質リグニンがケミカルリサイクルの「トリガー」として機能する機構を解明し、バイオマス度16.7%において最適な分解性能と機械的強度(636MPa)の両立を実現した点は、材料設計における新しい指針を提示するものである。

1.2 先導性・発展性

本研究は宇宙空間での資源循環という未開拓領域に先導的に取り組んだ。月面基地構想やアルテミス計画など、今後の宇宙開発において炭素のリサイクルは重要かつ不可欠であり、本技術はその実現に向

けた先導的研究として位置づけられる。実際、JAXA に実施を依頼した A0（原子状酸素）耐性試験では、開発した GL 添加エポキシ樹脂系 CFRP が標準材料カプトンと同等の耐性（重量減少量 6.77~8.65mg 範囲内）を示し、宇宙での使用可能性も示された。

発展性の観点では、3 種類の樹脂系（エポキシ、不飽和ポリエステル、ポリウレタン）への展開に成功し、FRP 市場の過半を占める汎用樹脂への適用可能性を示した。特に、改質リグニン MS シリーズの開発により、従来困難とされていた不飽和ポリエステル樹脂への改質リグニン導入を実現し、MS 添加率 10%で強度 20%向上を達成した。これにより、自動車用内外装部材、建築設備部材、医療機器筐体など、年間約 50 万トン（国内 FRP 生産量の約 40%）の不飽和ポリエステル系 FRP への適用が期待される。

2. 国費を用いた研究開発としての意義

2.1 国や社会のニーズへの適合性

日本政府は 2050 年カーボンニュートラル実現を宣言し、航空宇宙分野でも CO₂排出削減が喫緊の課題となっている。航空機の CFRP 使用量は、ボーイング 787 で機体重量の約 50%、エアバス A350XWB で約 53%に達し、今後も増加が見込まれる。しかし、CFRP は「腐らない、錆びない」という高性能ゆえに廃棄後の分解が困難で、現状では埋め立てや燃焼によるサーマルリサイクルが主流であり、年間我が国で発生している約 5.5 万トンの廃 CFRP（2022 年実績）の適切な処理が社会的課題となっている。

本研究の成果は、この課題に対して定量的な解決策を提供する。炭素繊維回収率 95%以上、引張強度の維持、主剤モノマー回収率 60%以上という性能により、CFRP のリサイクルシステムの構築が可能となる。これにより、年間約 5.5 万トンの廃 CFRP から約 3.3 万トンの炭素繊維と約 13,200~17,600 トンのマトリックス樹脂モノマーを回収できる計算となり、新規炭素繊維生産に伴う CO₂排出削減に貢献できる。

2.2 宇宙航空脱炭素技術等創出プログラムへの適合性

本研究は「宇宙航空脱炭素技術等創出プログラム」の趣旨に完全に合致する。宇宙開発においては、地球から持ち込んだ資源の徹底的なリサイクルが必須であり、本技術はその実現に向けた基盤技術を提供する。月面環境（真空度 10⁻¹²Pa、温度範囲-170~130℃）での使用を想定し、揮発性の低い反応媒体と低温処理条件（80~100℃）を実現した点は、プログラムの目的に直結する成果である。さらに、バイオベース素材の活用により、石油化学系樹脂使用量を削減可能であることを実証し、航空宇宙分野での持続可能な材料利用モデルを提示した。改質リグニンは国内森林資源（年間約 2,000 万 m³の未利用木材）から製造可能であり、資源自給率向上と地域経済活性化にも貢献する。

2.3 民間単独では困難な基礎研究の必要性

本研究は、①宇宙環境という極限条件での技術実証、②10 年以上の長期的視点での材料開発、③複数機関（大学、国立研究所、民間企業）の連携が必要な学際的研究であり、民間企業単独では投資回収が困難である。国費による支援により、森林総研のベンチプラントを活用した改質リグニンの安定供給体制、JAXA の真空複合環境試験設備を用いた A0 耐性評価など、高度な研究インフラを活用した技術開発が可能となった。これらの成果は、将来的な産業化の基盤となる公共財としての価値を有しており、国費を投入する必然性が高い研究であったと評価できる。

「有効性」

評価項目の選定

本課題の有効性を評価するにあたり、以下の 2 つの評価項目を選定する。

○新しい知の創出

○（見込まれる）直接・間接の成果・効果やその他の波及効果の内容

1. 新しい知の創出

1.1 真空環境下でのケミカルリサイクル機構の解明

本研究により、真空環境下での CFRP ケミカルリサイクルという新しい学術領域を開拓した。特に、DBU 類縁体が真空下（100℃減圧処理 8 時間）でも重量減少率 5.8%と極めて低い揮発性を示し、かつ樹脂分解率約 100%を達成することを見出した。HPLC 分析により、エポキシ樹脂主剤モノマー由来のビスフェノール A ビス(2,3-ジヒドロキシプロピル)エーテルのピークを同定し、主剤モノマー回収率 60%以上を定量的に実証した。これは、単なる樹脂の分解ではなく、モノマーレベルでの化学的回収が可能であることを示す新規性の高い知見である。

さらに、改質リグニンがケミカルリサイクルの「トリガー」として機能する新しい概念を確立した。改質リグニン含有率と樹脂分解率の相関関係を定量的に解析し、バイオマス度 16.7%において最適な分解性能（GL200、GL400、GL600 でいずれも約 100%）を発現することを見出した。この知見は、材料設計時に「リサイクル性」を組み込むという「Design for Recycling」の新しいパラダイムを提示するものである。SEM 観察により、DBU 類縁体処理では残存樹脂が微細に分散するのに対し、DBU 処理では大きな残存樹脂塊が生成することを明らかにし、反応媒体の違いが分解挙動に及ぼす影響を微視的に解明した。

1.2 バイオベース素材の機能設計に関する新知見

改質リグニンの分子量制御が CFRP 特性に及ぼす影響を体系的に解明した。GL200（Mw=9000、Mn=2300）、GL400（Mw=6000、Mn=2100）、GL600（Mw=5900、Mn=2000）の 3 種類について、熱特性（TMA、TGA）、機械的特性、リサイクル性を包括的に評価し、以下の定量的知見を得た。樹脂調製温度は、GL200 で 105℃、GL400 で 95℃、GL600 では 85℃となり、GL200 から GL600 までに 20℃低減できることが分かった。曲げ最大点応力は GL200 では 500MPa であったが GL600 では 636MPa と増加することが分かった。熱分解開始温度（Tdst）は、GL200 で 246℃、GL400 で 275℃、GL600 で 292℃となり、GL200 から GL600 までに 50℃程度上昇することが分かった。これらのデータにより、PEG 分子量が大きいほど加工性と機械的強度が向上する一方、リサイクル性は GL200 が最も高いという相反する特性を定量的に明示し、用途に応じた最適な改質リグニン設計指針を確立した。

さらに、不飽和ポリエステル樹脂への改質リグニン適用という従来困難とされていた課題に対し、アルキレンオキシド誘導体化 GL の MS シリーズおよびエチレンカーボネート（EC）による誘導体化という新しい化学修飾法を開発した。赤外分光分析により、フェノール性水酸基の保護とエチレングリコール鎖の導入を確認し、レオメーター解析により硬化挙動が正常化することを実証した。この知見は、リグニン化学における新しい応用展開を示すものである。

1.3 宇宙環境材料工学への貢献

JAXA 真空複合環境試験設備を用いた A0 耐性評価（ 5×10^{20} atoms/cm²、180 時間照射）により、GL 添加 CFRP 材料の宇宙環境適合性を定量的に評価した。GL200 添加 CFRP が最も優れた A0 耐性を示し、GL400、GL600 がカプトン（基準値 6.77~8.65mg）と同等であることを明らかにした。これは、バイオベース材料の宇宙環境での挙動を定量的に評価した新規性の高い事例であり、今後の宇宙材料開発に重要な基礎データを提供する。

2. 直接・間接の成果・効果やその他の波及効果

2.1 直接的成果：循環型 CFRP システムの技術基盤確立

本研究により、以下の定量的な直接成果を達成した。

炭素繊維回収：回収率 95%以上を達成し、引張強度は DBU 類縁体処理で未処理と同等を維持（DBU 処理では約 40%低下）。これにより、回収炭素繊維の再利用が技術的に実証された。年間約 2 万トンの国内廃 CFRP から約 1.2 万トンの再利用可能な炭素繊維を回収できる計算となり、新規炭素繊維製造コスト（約 3,000～5,000 円/kg）の大幅削減が期待される。

モノマー回収：エポキシ主剤モノマーの回収率 60～80%を達成し、化学的リサイクルの可能性を実証した。これにより、年間約 4,800～6,400 トンのマトリックス樹脂モノマーを回収可能となり、石油資源使用量の削減に直接貢献する。

環境負荷低減：新規炭素繊維生産に伴う CO₂排出の削減が期待できる。

2.2 間接的効果：産業応用への波及

FRP 産業全体への展開：3 種類の樹脂系（エポキシ、不飽和ポリエステル、ポリウレタン）への展開により、FRP 市場の約 70%をカバーする樹脂に対する技術への適用可能性を示すことができた。特に、不飽和ポリエステル系 FRP（国内年間生産量約 16 万トン（2023 年）、市場規模約 1,130 億円）への適用により、自動車部品、建築材料、貯蔵タンクなど広範な産業分野での循環型システム導入が可能となる。MS 添加率 10%で強度 20%向上という性能向上効果により、単なるリサイクル性付与だけでなく、高付加価値化も実現できる。

森林資源の新規利用：改質リグニンの工業利用により、国内未利用木材資源（年間約 2,000 万 m³）の高付加価値化が促進される。

2.3 波及効果：宇宙開発と持続可能社会への貢献

月面・宇宙基地への応用：真空環境下での炭素材料リサイクル技術は、今後の月面基地構想において不可欠な要素技術である。本技術により、月面で使用する CFRP 構造材や機器筐体の現地リサイクルが可能となり、地球からの物資輸送コストの削減に貢献する。

カーボンニュートラル社会への貢献：バイオベース材料（改質リグニン）とリサイクルシステムの組合せにより、CFRP のライフサイクル全体での CO₂排出量を削減が可能と考えられる。これは、2050 年カーボンニュートラル実現に向けた航空宇宙産業の脱炭素化戦略の重要技術として捉えられる。

国際競争力の向上：本技術は世界初の真空対応 CFRP リサイクルシステムであり、国際特許出願により我が国の技術的優位性を確保できる。今後、宇宙開発関連産業の国際競争力向上に寄与する。

「効率性」

本課題の効率性を評価するにあたり、以下の評価項目を選定する。

【研究開発の手段やアプローチの妥当性】

1. 研究開発の手段やアプローチの妥当性

1.1 段階的絞り込みアプローチの有効性

本研究では、新規反応媒体の探索において段階的絞り込みアプローチを採用し、高い効率性を実現した。

令和 4 年度（初年度）：DBU および 7 種類の DBU 類縁体（A、B、C、D、E、F、G）を用いた広範なスクリーニングを実施。このうち、室温で液体であり正確な樹脂分解率測定が可能な 4 種類（A、B、F、G）を抽出し、さらに 72 時間処理で高い分解率（90%以上）を示す 3 種類（A、F、G）に絞り込んだ。

令和 5 年度（2 年目）：3 種類の候補に対して、改質リグニン含有率の異なる各種 CFRP を用いた詳細評

価を実施。特に DBU 類縁体 F が、低リグニン含有率・短時間処理の条件でも高い分解性を示すことを発見し、最終候補として選定した。前年度の知見を活用することで、処理温度・時間・改質リグニン種の最適化を完了した。

令和 6 年度（最終年度）：確立された最適条件（類縁体 F、100℃、48 時間、バイオマス度 16.7%）を用いて、炭素繊維の再利用性評価、モノマー回収性評価、不飽和ポリエステル系・ポリウレタン系への展開を実施し、当初計画を超える成果（3 樹脂系への展開、A0 耐性評価）を達成した。

このアプローチにより、3 年間で候補数を 8→3→1 へと絞り込み、各段階で得られた知見を次段階に効果的に活用することで、目標を上回る成果を達成した。仮に全候補を並行して最終評価まで実施した場合、推定で約 2.5～3 倍の費用（約 30,000～40,000 千円）が必要であったと試算され、本アプローチの費用対効果は約 2.5～3 倍高いと評価できる。

1.2 既存インフラの戦略的活用

JAXA 真空複合環境試験設備の活用：令和 6 年度に外部委託費 1,841 千円を投資して A0 耐性試験を実施した。この投資により、当初計画になかった宇宙環境適合性という付加価値（エクストラサクセス）を定量的に実証でき、技術成熟度を TRL4 から TRL5 へと進展させた投資効果は高いと評価できる。

2. 費用構造の妥当性と費用対効果向上方策

2.1 3 年間の費用配分の合理性

総事業費 43,500 千円の内訳は、令和 4 年度 15,000 千円、令和 5 年度 14,250 千円、令和 6 年度 14,250 千円であり、各年度の研究内容に応じた適切な配分となっている。

令和 4 年度（初年度）：広範なスクリーニングのための物品費（試薬・材料費）に重点配分した。（物品費比率約 50%、人件費比率約 24%）

令和 5 年度（2 年目）：最適化研究と複数樹脂系への展開のための物品費に重点配分。（物品費比率約 46%、人件費比率約 28%）

令和 6 年度（最終年度）：A0 試験のための外部委託費を計上するとともに、最終の取りまとめのための人件費への配分を増加させた。（物品費比率約 25%、人件費比率約 37%、外部委託費比率約 12%）

各年度で研究フェーズに応じた柔軟な費用配分を行い、無駄のない資源投入を実現した。

（2）成果

「アウトプット」

1. 中間報告時の事後自己点検方針に基づく達成状況

中間報告時に設定した「アウトプットに関する事後自己点検の実施方針」では、実施項目①「CFRP のケミカルリサイクル技術の構築」については TRL4～5 レベル（新規反応媒体の発見と分散性評価指標の設定、樹脂分解率との相関関係の導出）、実施項目②「ケミカルリサイクルに適する CFRP のデザイニング」については TRL4～5 レベル（分解に適するマトリックス樹脂と物理特性の関係解明、カーボンファイバーの再利用性の実証）を目標としていた。本研究は、これらの目標を全て達成し、フルサクセスを実現した。

2. 実施項目①「CFRP のケミカルリサイクル技術の構築」の成果

2.1 性能評価手法と達成指標

樹脂分解性能の評価は、式(A)「樹脂分解率(%) = (CFRP 仕込み重量 - 残渣重量) / (CFRP 仕込み重量 × 樹脂含有率 40%) × 100」により定量化した。処理条件（温度、時間、反応媒体種類、改質リグニン種類・

含有率) を系統的に変化させ、最適条件を導出した。

達成した性能指標：

- 新規反応媒体として DBU 類縁体を選定し、エポキシ樹脂系 GL400 含有 CFRP (バイオマス度 16.7%) に対して 100°C、48 時間処理で樹脂分解率約 100%を達成
- GL600 含有 CFRP でも 100%、GL200 含有 CFRP では 80°C、24 時間処理で 100%を達成
- 分散性評価指標として最適バイオマス度 16.7%を特定
- 類縁体の揮発性を定量評価：100°C減圧処理 8 時間で重量減少率 5.8% (真空環境での使用可能性を実証)

2.2 カーボンファイバー再利用性の実証

引張試験 (試験機 Ez test SM-500N-168、標線間距離 25mm、試験速度 5mm/min) により、回収炭素繊維の機械的特性を定量評価した。

達成した性能指標：

- 炭素繊維回収率：95%以上
- 引張強度：DBU 類縁体処理では未処理炭素繊維と同等を維持 (DBU 処理では約 40%低下)
- エポキシ主剤モノマー回収率：GL 含有 CFRP で 60%以上 (HPLC 分析により定量)

この性能は、既存技術 (熱分解法：強度 60~80%維持) を大きく上回り、リサイクル炭素繊維の実用化可能性を高水準で実証した。

3. 実施項目②「ケミカルリサイクルに適する CFRP のデザイン」の成果

3.1 性能評価手法と達成指標

マトリックス樹脂および CFRP の性能評価は、以下の手法で実施した。

- 熱特性：TMA (ガラス転移温度 T_g 、熱熔融温度 T_f)、TGA (熱分解開始温度 T_{dst} 、熱分解最大温度 T_{dmax})
- 分子量：GPC 分析 (重量平均分子量 M_w 、数平均分子量 M_n)
- 機械的強度：3 点曲げ試験 (JIS K7074 準拠、支点間距離 50mm、試験速度 5mm/min)、引張試験
- 硬度：ショア D 硬度計

達成した性能指標 (エポキシ樹脂系)：

- GL600 含有 CFRP (バイオマス度 16.7%) で曲げ最大点応力 636MPa 達成 (GL200：500MPa 以上、GL400：中間値)
- 樹脂調製温度：GL200 (105°C) →GL600 (85°C) → 20°C低減による加工性向上
- 熱分解開始温度：GL200 (246°C) →GL600 (292°C) →向上による耐熱性改善

3.2 複数樹脂系への展開成果

不飽和ポリエステル樹脂系：MS 改質リグニン (GL400 含有率 20%) を開発し、MS 添加率 10%で曲げ最大点応力 360MPa 達成 (無添加 300MPa から 20%向上)。レオメーター解析により、フェノール性水酸基の保護による硬化挙動の正常化を定量的に実証。

ポリウレタン樹脂系：GL400 添加率 12.5%で CFRP 化に成功。曲げ試験で延性破壊を確認し、ウレタン樹脂への改質リグニン適用可能性を実証。

これにより、FRP 市場の約 70%を占める 3 種類の樹脂系 (エポキシ、不飽和ポリエステル、ポリウレタン) への展開を達成した。

3.3 新規評価項目：宇宙環境適合性の実証

中間報告時には設定していなかった評価項目として、JAXA 真空複合環境試験設備による A0（原子状酸素）耐性試験を追加実施した。

評価手法：A0 照射量 5×10^{20} atoms/cm²、180 時間照射、試料サイズ 20mm 角

達成指標：GL 添加エポキシ樹脂系 CFRP の重量減少量が標準材料カプトン (6.77~8.65mg) と同等 (GL200 が最優位、GL400・GL600 がカプトン同等)

この成果により、地球軌道上での使用可能性を定量的に実証し、TRL5 レベル（実際の使用環境に近い条件での試験）に到達した。

4. 所期目標との関係における十分性

中間報告時の目標値「樹脂分解率 50%程度以上」に対し、実績値として 100%を達成した。改質リグニン系 CFRP の製造可能性についても、3 種類の改質リグニン (GL200、GL400、GL600) と 3 種類の樹脂系での実証により、当初目標を大幅に超えた。カーボンファイバーの再利用性では、回収率 95%以上、強度維持という高水準の性能を実証し、循環型リサイクルシステムの技術的実現可能性を示した。

これらの成果は、TRL4~5 レベルのフルサクセス目標を達成しただけでなく、A0 耐性評価による宇宙環境適合性の実証というエクストラサクセスの一部にも到達しており、アウトプットとして十分かつ優れた成果であると評価できる。

「短期アウトカム」 （令和 7 年 10 月末時点）

1. 中間報告時の方針に基づく達成状況

中間報告時に設定した「アウトカムに関する事後自己点検の実施方針」では、実施項目①については「ベンチスケールレベルのケミカルリサイクルシステム設計へ移行できる技術の構築」と「システム設計や試作を行えるパートナーの確保」を効果・効用および波及効果の指標とし、実施項目②については「試験サンプルの供給」と「CFRP を用いた製品を活用するメーカーが試験的に活用すること」を指標として設定していた。

2. パートナー確保の定量的成果

企業等との連携：リグニンネットワーク（参加法人会員約 100 社）だけでなく、これまでに繋がりがあった企業を中心に、ベンチスケールレベルのケミカルリサイクルシステム設計を行える企業を選定中である。

CFRP 製造・使用企業との連携：宮城化成を通じて、試験サンプル供給の実施体制を構築中である。

3. 学術的波及効果

論文発表：現時点で、成果を取りまとめた論文 1 報が投稿準備段階にある。

学会発表：これまでに 4 件の学会や研究会での発表を行っており、さらに 2025 年 11 月に国内学会 2 件での発表を予定しており、学術コミュニティへの成果発信を通じた認知度向上を図る。

（3）今後の展望（長期アウトカム）

1. 今後の展望

企業等との連携：引き続きベンチスケールレベルのケミカルリサイクルシステム設計を行える企業の選定を継続していく。

CFRP 製造・使用企業との連携：宮城化成を通じて、試験サンプル供給の実施体制を数年以内の構築を目指す。

2. 予想される効果・効用

FRP 産業の構造転換：国内 FRP 生産量約 120 万トンのうち、CFRP 約 2 万トン（全体の約 1.7%）に改質リグニン系マトリックス樹脂が採用され、そのうち約 30%（6,000 トン）がケミカルリサイクルされる循環型システムの構築を当面の目標とする。

森林資源の高付加価値化：改質リグニンの工業利用により、国内未利用木材約 200 万 m³/年（全体の約 10%）が高付加価値材料として活用され、林業地域に新規付加価値を創出する。

航空・宇宙開発分野への展開：まずは地上において、航空産業など CFRP を利用している製品への応用を図る。利用実績に基づく製品の改良を重ねながら、宇宙分野への展開も図っていく。

8. 評価点

A

評価を以下の 5 段階評価とする。

S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。

A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。

B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。

C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。

D) 成果はほとんど得られていない。

9. 評価理由

CFRP（炭素繊維強化材）のリサイクルは社会的課題として認識されつつあるなか、リサイクルに適した新規反応媒体の探索によるケミカルリサイクル手法の開発と、その手法に適する CFRP 用マトリックス樹脂の開発という 2 つの観点から研究を行った航空宇宙利用での意義の高い取り組みである。森林由来の改質リグニンをマトリクスに含有させ、DBU 触媒で 90%超の分解率を達成し、リサイクルが可能であることを実証したのが国独自の技術成果である。その特徴は、低温、低揮発性、短時間処理、再生炭素繊維の強度保持など産業上のメリットが大きい。また、AO 耐性も追加項目として評価し良好な結果を得ており、再生可能材料として宇宙で利用可能な CFRP を開発した点でも大きな成果である。膨潤とアウトガスの課題の検討が示されていなかったのが残念であるが、これらの成果は、独自性、有用性、国際競争力のいずれの観点からも特筆すべきものである。

しかしながら、具体的な数値を用いたアウトプット目標が設定されていなかったために、目標値と成果との関係がどうなのか読み取れにくく、脱炭素の観点では短期的なアウトプットの評価が難しかった。ヒアリングでは目標値は設定しなかったとのことで、計画や指標設定が不十分であった面もあると思われる。また、短期アウトカムとして示された FRP 産業の構造転換の指標は、長期アウトカム目標とすべきであり、両指標の混同が見受けられる。特に、社会実装に関わる活動は、概念的な開発計画は示されているが、特許出願がなされていない、短期的な学術成果の発信はあるが国際的な学会発表がない、実用化に向けた産業界との連携については企業選定が始まったばかり（宮城化成による試験サンプル供給が数年後）、カーボンニュートラル効果に関しても十分検討はされていないなど具体化には至っておらず、十分ではない。目標の達成に至るロードマップの明確化など、社会還元に至る道筋を具体的に示し、今後加速して実施されることが望まれる。また、組織/資金/人的体制の継続性に関する具体的な提示が無く、実現性に課題が残されているので、必要な資金や体制の確保についても努力してほしい。

以上により、本課題は、相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献していると認められる。

今後は、以下の点が期待される。

- 特許出願について最優先で実施すること。また、宮城化成による製造プロセスの構築時にも特許案件は出ると予想されるので、出願範囲は幅広く考えること。
- 成果の定量的/客観的評価、企業連携等の早期実現、それによる組織/資金/人的体制の継続と連携体制の形成に至るロードマップの具体化と実践などを解決するべく、継続してプログラムの社会適用に取り組んで、より充実したアウトカム成果の創出につなげること。
- リサイクルプロセスの確立までには継続的な研究開発が望まれるが、資金確保について NEDO（サーキュラーエコノミー部）等を活用するなど検討すること。
- ISS 利用等により宇宙環境における実証がなされること。
- 検討した CFRP 材の膨潤とアウトガス特性の評価や、宇宙機への適用性や使用における注意事項などの研究により、材料の宇宙機への応用の完成度を上げること。
- 現時点では成果の公開が限定的であるものの、世界的に大いに期待される研究と考えられるので、迅速に成果を公開し、研究成果を広く社会に発信することで、その公共的な意義を明確にすること。
- 実用化が期待できる分野であり、体勢作りも進んでいるが、どの程度のスピードで実現できるのか明確にすること。
- 本課題の成果を実社会で活用し、社会に貢献していくための継続的な活動を実施すること。