

「次世代複合材創製・成形技術開発④、⑤及び⑥」
終了時評価報告書

2024年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

2024 年 3 月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 斎藤 保 殿

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 木野 邦器

NEDO技術委員・技術委員会等規程第34条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

「次世代複合材創製・成形技術開発④、⑤及び⑥」
終了時評価報告書

2024年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

目 次

はじめに	1
審議経過	2
分科会委員名簿	3
研究評価委員会委員名簿	4
第1章 評価	
1. 評価コメント	1-1
1. 1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋	
1. 2 目標及び達成状況	
1. 3 マネジメント	
（参考）分科会委員の評価コメント	1-3
2. 評点結果	1-13
第2章 評価対象事業に係る資料	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会公開資料	2-2
参考資料1 分科会議事録及び書面による質疑応答	参考資料 1-1
参考資料2 評価の実施方法	参考資料 2-1

はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「次世代複合材創製・成形技術開発④、⑤及び⑥」の終了時評価報告書であり、NEDO 技術委員・技術委員会等規程第 32 条に基づき、研究評価委員会において設置された「次世代複合材創製・成形技術開発④、⑤及び⑥」（終了時評価）分科会において評価報告書案を策定し、第 76 回研究評価委員会（2024 年 3 月 18 日）に諮り、確定されたものである。

2024 年 3 月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

審議経過

● 分科会（2023 年 12 月 13 日）

公開セッション

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明

非公開セッション

6. プロジェクトの詳細説明
7. 全体を通しての質疑

公開セッション

8. まとめ・講評
9. 今後の予定
10. 閉会

● 現地調査会（2023 年 12 月 6 日）

UBE 株式会社 宇部ケミカル工場（山口県宇部市）

● 第 76 回研究評価委員会（2024 年 3 月 18 日）

「次世代複合材創製・成形技術開発④、⑤及び⑥」（終了時評価）

分科会委員名簿

(2023 年 12 月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	しぶたに ようじ 渋谷 陽二	大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授
分科会長 代理	りのいえ けんいち 李家 賢一	東京大学 大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻 教授
委員	おくだ あきのぶ 奥田 章順	株式会社航想研 代表取締役社長
	たなか ひろあき 田中 宏明	防衛大学校 システム工学群 航空宇宙工学科 教授
	のだ えつお 野田 悦生	株式会社本田技術研究所 先進パワーユニット・エネルギー研究所 Executive Chief Engineer
	よこぜき ともひろ 横関 智弘	東京大学 大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻 准教授
	わたなべ としやす 渡邊 敏康	PwC コンサルティング合同会社 Public Services（公共事業部）執行役員 パートナー

敬称略、五十音順

研究評価委員会委員名簿

(2024 年 3 月現在)

	氏 名	所属、役職
委員長	きのの くにき 木野 邦器	早稲田大学 理工学術院 教授
委員	あさの ひろし 浅野 浩志	岐阜大学 特任教授 一般財団法人電力中央研究所 研究アドバイザー
	いなば みのる 稲葉 稔	同志社大学 理工学部 教授
	ごないかわ ひろし 五内川 拡史	株式会社ユニファイ・リサーチ 代表取締役社長
	すずき じゅん 鈴木 潤	政策研究大学院大学 政策研究科 教授
	はらだ ふみよ 原田 文代	株式会社日本政策投資銀行 常務執行役員
	まつい としひろ 松井 俊浩	東京情報デザイン専門職大学 情報デザイン学部 学部長・教授
	まつもと ま ゆ み 松本 真由美	東京大学 教育学部附属教養教育高度化機構 環境エネルギー科学特別部門 客員准教授
	よしもと ようこ 吉本 陽子	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 政策研究事業本部 経済政策部 主席研究員

敬称略、五十音順

第 1 章 評価

1. 評価コメント

1. 1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

本事業は、CO₂排出量削減を目指し、航空機エンジン向けの次世代高耐熱・軽量材料として、世界では未だ実用化されていない1,400℃級のCMC部材を開発するものである。そのアウトカム達成までの道筋は、量産化の見通しを立てることや材料認定を受けるプロセスが本事業の後継となる経済安全保障重要技術育成プログラム（K Program）に盛り込まれており、時間軸も含めて明確であり評価できる。知的財産の取り扱いについては、基礎的技術は特許、論文、研究発表・講演を実施し公開し、各社で保有すべき技術やノウハウを非公開とするオープン・クローズ戦略は明確であり、妥当であると判断する。

一方で、本事業の成果がK Programにおいて十分に活用できるように、その体制や役割分担が明確になるように計画を進めていくことが望まれる。また、K Programにおいて研究開発が継続されない本事業の成果についても、実用化に進めるよう何らかのサポートの検討をお願いしたい。さらに、標準化や認定取得にあたっては、サプライチェーンに関わる各事業者の連携が不可欠であり、例えば、海外エンジンOEMの計画や対象部位に対する考え方を、公表情報の範囲で、本プロジェクト事業者全体で共有化することなどは有効と考えられる。加えて、将来を見据えた産業振興の観点からは、実績のある企業のみならず、新たな企業の参入のできる仕組みや仕掛けを考えてみていただきたい。

注）CMC: Ceramic Matrix Composites（セラミック基複合材料）

1. 2 目標及び達成状況

アウトカム目標は、航空業界の「脱炭素化」の流れ等から適切であり、その目標を設定した背景、道筋も具体的で、今回のプロジェクト成果の社会実装は十分期待できる。アウトプット目標は、将来のジェットエンジンへの実装に向けて具体的に設定されており適切と考える。全ての目標を達成（一部見込み）したことはすばらしい成果である。なかでも、先行してエンジン試験まで行ったことや、品質の安定化、低コスト化に重点を置いた研究開発は、事業化に向けて良い方針であったと評価できる。

一方で、本事業で開発された技術の社会実装による効果で、CO₂排出量削減が見込まれるが、今後、受注の数値目標、そのための技術的優位性、国際的認証の取得（世界の主要航空局からの材料認定）、国内外のサプライチェーンの確立といった観点から、バックキャスト的な思考に基づいた継続的な検討が望まれる。また、アウトプット目標は達成しているが、今回目標とした性能以外にも、材料として実用に耐えられる高い特性を目指し、向上につとめていただきたい。さらに、人材育成については、企業間の連携や産学連携なども含めたより幅広い取り組みによる波及効果も期待したい。

1. 3 マネジメント

各実施者の戦略・考え方等が異なる中、プロジェクトリーダー（PL）が全体・個別の調整に注力し、柔軟かつ適切なマネジメントを行うことによって、最終的なアウトプットとして期待どおりの成果を創出した点は高く評価できる。不測の事態に対しても、期間延長や追加予算といった適切な措置が適切な時期になされ、確実に対処された。目標達成にむけて NEDO、PL、関係者や実施者間での指揮命令系統等は十分に機能していたと評価できる。研究開発計画は、目標達成に向けて必要な項目にブレークダウンされ、実機を用いた実証実験や、生産工程を含めた将来的に重要となる項目等も網羅されており、適切に実行された。要素技術間での連携に関しては、各実施者の事情もあり一部十分ではない点が見られたが、各実施者が得意とするエンジン部位の事業化を目指している点は、現実的であり評価できる。

一方で、今回の取り組みにおいて、産学の中で「学」の存在感が薄く感じられた。全体的な連携の取り組みや知見共有の観点から、「学」が協調領域においてより活動することが望ましいと考えられ、今後の改善が期待される。今後は、各研究開発項目において得られた様々なノウハウや知見は、差支えの無い範囲内で情報共有ができるような実施者間の連携強化を図る方策の検討が望まれる。また、従来技術や競合技術との性能比較についても積極的に発表・発信しながら、社会実装に向けた取り組みを期待したい。

(参考) 分科会委員の評価コメント

1. 1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

＜肯定的意見＞

- ・ 2020 年頃から始まったコロナウイルス感染拡大が、本プロジェクトに直接的な影響を与えたことは否定できず、道筋の大幅の変更は余儀なくされたことは事実である。それにもかかわらず、当初計画されていたアウトプットをほぼ達成し、アウトカム達成の道筋をつけたことは高く評価できる。
- ・ 日本の企業の持つ守秘義務と相反するオープン化においては、一筋縄ではいかないことは十分理解できる。そのような状況の中でも企業間の連携が見られ、国家プロジェクトの意義と意図が少しずつ理解されたことは評価に値する。
- ・ 将来像としての CO₂ 削減の方向性は、社会的にも重要な目標として認知されており、これに向けて、本事業が 1,400℃ クラスの世界では未だ実用化されていない CMC 材を開発することで、その一翼を担うことになることは十分に理解できる。そのための道筋としては、本事業の後継となる K Program において、量産化の見通しを立てること、ならびに材料認定を受けるプロセスとなっており、これらの道筋は時間軸も含めて明確である。
- ・ 基礎的技術は公開し、設計情報といった実用化技術は非公開とするオープン・クローズ戦略は明確であり、妥当であると判断する。
- ・ 事業者それぞれとしては、アウトカム達成までの道筋見直しや、その工程での外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等は概ね考慮されていると考える。
- ・ オープン・クローズ戦略は適切に実施され、事業者間で整合がとれていると考える。標準化戦略に関しては基本的な部分は概ね適切に取り組まれていると考える。
- ・ 今回開発を行った技術の社会実装までの道筋に関して、後継となるプロジェクトとの繋がり、実装に向け必要となるステップ、そのタイムスケジュールも明確であると考え。
- ・ 各社で保有すべき技術やノウハウを適切にクローズ化した上で、特許公開や研究報告を実施しており、良い成果が得られていると考える。
- ・ 今後のさらなる事業化に向けた K Program は重要で適切であると感じた。
- ・ 知的財産の取扱いやオープン・クローズ戦略は企業の利益を守る上で適切だと思う。
- ・ 実用化を目指して、着実な技術レベルを上げる取り組みがなされている。世界的にも優れた性能の実現は、大変挑戦的な取り組みであるが、課題を明確化し、品質の安定性、低コスト化・量産化に必要な技術を開発するための All Japan での取り組みを実施している点は高く評価できる。
- ・ 繊維・CMC 成形・部材製作までを一貫した研究開発を実施しており、日本での川上～川下間での技術共有ができている点は評価できる。複数の成形手法による開発・取り組みを実施できており、共通した製造・コスト意識をもった開発を進めており、また、オープン・クローズ戦略をしっかりと練って開発が進められている。

- ・ 事業全体のゴール（アウトプットからアウトカム）に対して、研究開発項目ごとの取り組むべきアウトプット、並びにそれぞれの役割を踏まえた事業終了後の道筋を示している。
- ・ 研究開発項目ごとのアウトプットに向けた活動は研究代表者が中心となって整理されており、その文脈の中で知財・標準化の活動の必要性についても一定度、議論されているものと捉えている。

＜問題点・改善点・今後への提言＞

- ・ 各研究開発項目の設定は妥当と思われるが、オールジャパンとして機能するためには、それらが活かされる認証過程への道筋や、企業間連携の有効・実質化等が不可欠である。これらについては、NEDO 内部とともに、当該分野の市場分析や認証を視野に入れた戦略に長けたコンサルティングといった民間からの登用、そして技術も理解できる国内外からの専門家等から構成される複数の PI を含めた責任体制が不可欠である。
- ・ 当該分野の将来を見据えた産業振興の観点から、実績のある企業のみならず、アイデアを持つベンチャー企業の参入できる仕組みが必要で、そのためのオープン・クローズ戦略を再考すべきと考える。素材作り、部品作りのできる施設や経験の持たない企業でも、アイデア創出に貢献できる可能性がある。NEDO 主導でそのような新たな企業参入のできる仕組みや仕掛けが今後必要と思われるし、期待したい。
- ・ アウトカム達成のためには、本事業の成果だけでは不十分で、本事業の後継となる K Program において、更なる努力が必要になることもあり、本事業の成果が K Program において十分に活用できるように、その体制や役割分担が明確になるように計画を進めていってもらう必要がある。また K Program に入らない本事業の成果もあるかと思われるが、これらの成果が実用化に進むように、何らかのサポートも必要ではないかと考える。
- ・ 今回開発している材料が、実際のエンジンに搭載されるためには、材料認定といった標準化戦略が必須であるが、本事業では材料の開発段階にとどまっており、標準化自体について細かく議論することはできていない。本事業の後継である K Program において、材料認定がとれることが強く望まれる。
- ・ アウトカム＝社会実装という考え方の中で、実際の事業化に向けてのアウトカム達成までの道筋やその見直しは、各社の経営計画やエンジン OEM とのパートナーシップなどで異なる点は十分理解されるが、本プロジェクト事業者全体で共有し、かつ、それを全体として見直すべき事項について、さらなる検討と共有化を進めることが重要。例えば、事業化においては海外エンジン OEM のエンジン計画や対象部位に対する考え方は重要となり、これらの情報を公表情報の範囲で共有化することは必要と考える。その意味で「アウトカム達成までの道筋」を示す上で考慮すべき事項の理解が事業者ごとにややバラバラ感があるため、この点が改善されれば、さらに良くなると考える。

- ・標準化については、SiC 繊維開発→成形・積層（製織）→CMC 製造のサプライチェーンのそれぞれの部分で標準化や認証・認定に対する考え方や状況は事業者によって異なってくる。一方、標準化や認定取得にあたっては、サプライチェーンに関わる各事業者の連携が不可欠となる。この点について本プロジェクトでの各事業者の取組や考え方がやや分かりにくいところが見られた。一方で標準化やそれに向けた評価など具体的な取組は K プロジェクトで今後実施していくものとも理解でき、このあたりの状況を分かりやすく説明することは重要かと考える。
- ・オールジャパン体制でのアウトカム達成に向けた組織作り・役割分担などがあればなお良いと感じた。
- ・知的財産に関して、もう少し本事業全体（参加者全体）としての戦略的取り組みがあると良いと感じた。
- ・航空機エンジンでの事業化を目指すうえで、標準化や認証への取り組みは必須である。他の事業と協力しながら、本事業成果を活かして、なるべく早期に進めていただきたい。
- ・多くの学会発表等の取り組みもあるが、事業者間でばらつきがあるようである。コンペティターとなる事業者間でも可能な範囲で知見共有や協調・協力関係ができると望ましい。
- ・CO₂排出量の削減に加えて、社会・技術・制度・産業・人財といった波及効果に対するアウトカムの議論を深めていく・具体化していくことを期待したい。
- ・CMC を今後の産業として成長させていく観点で捉えると、現時点の研究開発項目ごとの活動は、個々の活動が中心になっている面がある。このため、知財・標準化の側面では、クローズな活動に重点がおかれている傾向があるため、規格・仕様の主要項目を協調領域で棚卸しを推進していくなど、オープン戦略に向けた議論を今後も関係者の中で議論頂くことを期待したい。

1. 2 目標及び達成状況

<肯定的意見>

- ・CO₂削減は、COP28 での厳しい国際的要請の環境下で達成しなければいけない目標であることに疑いの余地はない。したがって、その目標設定には意義があり、アウトプットの積み上げがその目標に向かうことは間違いないことと理解できる。
- ・引張強度、クリープ強度、そして生産工程におけるレートといった具体的目標が設定され、それらをほぼ達成してきた道筋から判断すると、当初計画されたアウトプット目標は妥当であったと判断できる。
- ・本事業の後継である K Program の活動を通じて、ここで開発されている CMC 材料の材料認定が取得でき、かつ CMC 材料の実用化、商品化、量産化が実現することで、ここで提案されてきたアウトカム目標の達成に向けての第二歩目となることは明確であり、その一步手前の段階を実施している本事業の立ち位置はアウトカム目標の面から見ても明瞭となっている。

- ・ 1,400℃級 CMC 材料の実用化にむけてのアウトプット目標としては、妥当なものであった。④の SiC 繊維開発について、目標とする繊維開発をできたことは評価される。
- ・ ⑤(1)の CMC 部材開発について、エンジン試験を行って実証もできた点は、高く評価される。三次元プリフォーム製法確立においては、目標とする形状でのプリフォーム製作に成功しており、評価される。⑤(2)の生産性の高い CMC 部材開発について、目標値は達成できていることは評価される。⑥の製織工程の高速化について、実施期間の見直しがあったため、未だ事業は進められているが、目標達成の見通しが立っている点は評価される。
- ・ アウトカム指標・目標値は航空界の「脱炭素化」の流れ等からは適切である。アウトカム目標達成の見込みについては、各社がそれぞれ定量的・定性的に評価を実施しており、ある程度は達成見込みは示されている。
- ・ アウトプット指標・目標値の見直し、最終目標達成、波及効果評価、オープン・クローズ戦略は概ね適切に実施されていたと考える。
- ・ アウトカム目標を設定した背景、根拠となる技術に関しては、その技術の社会実装に向けた道筋も具体的で、今回のプロジェクトの成果から当該技術の社会実装は十分期待きる。
- ・ アウトプット目標は将来のジェットエンジンへの実装に向けて具体的に設定されており、また内容も適切と考える。このアウトプット目標に対して、開発研究が着実に実施され、目標を達成しており、優れた成果が得られている。
- ・ 昨今のカーボンニュートラルが求められる状況で CO₂ 削減量を目標にしたのは良いと感じた。
- ・ 全ての目標を達成（一部見込み）したことはすばらしい成果である。材料・製法研究の段階で先行してエンジン試験まで行っているのはリスクマネジメントとして良かった。ニアネットシェープ製法の技術は今後強みになると感じた。各社事業化に必須の低コスト化に重点を置いているのは事業化に向けて良い方針である。
- ・ 次世代ジェットエンジンへの搭載を目指しての技術開発目標をブレークダウンし、適切に設定している。
- ・ 計画修正も適切に実施し、設定した最終目標を達成している。また、量産化に関わる課題についても見通しを立てており、評価できる。一部の項目（5(1)）では、予定よりも大幅な進展があった点は特筆すべきである。SiC 繊維や CMC はコア技術であり、オープン化が難しい点もあるが、多くの対外発表などの成果がなされており、評価できる。
- ・ CO₂ 排出量の削減に寄与する各種研究開発の成果、並びに今後の上市に向けた活動シナリオを検討し、実行に向けた準備を進めている。
- ・ CMC 関連技術の発展に向けて、研究開発項目ごとに掲げられたアウトプット目標に対して、コロナ禍における実施期間中の困難な状況下においても実施、達成している。

<問題点・改善点・今後への提言>

- ・ 2040 年までの次世代航空機 6,000 機の見積もりに基づき CO₂ 削減の根拠データを算出したことは理解できるが、受注するための数値目標がまずあり、そのためにはどのような技術的優位性、国際的認証の道筋、国内外のサプライチェーンの確立といったバックキャスト的な思考に基づく目標が第一のアウトカム目標と思われる。その結果として、CO₂ 削減への道筋が具現化されるので、アウトカムの定義付けの再検討が今後必要である。
- ・ 技術的な報告において一部科学的根拠を持たない表現があった一方、それらは研究開発の段階で、より多くの科学的・数値的根拠の議論がプロジェクト内部であったと理解している。したがって、現在のアウトプット目標値はやや簡便すぎており、例えば強度だけでなく、延性や破壊靱性においても目標値に落とし込める余地がまだあると判断できる。あるいは、材料特性のみならず、機能性に関わる物理的特性値や生産レートのみならず不良率との複合指数等も考えられる。その目標設定の思考過程の中で設定できるキーとなる技術の議論がプロジェクト策定の前段階で必要であり、プロジェクト実施期間中でも適宜修正するプロセスがあっても良い。
- ・ 本事業で設定されたアウトカム目標は、将来必要とされる航空機の機体数、それに搭載されるエンジンの中で CMC 材料がどの程度の割合適用されるか、そしてこの CMC 材料を用いることでエンジンの燃料消費率が減少するかといった様々な数字を掛け合わせて得られた「CO₂ 排出量」の削減となっている。すなわち、本事業でいくら優秀な材料を開発されたとしても、社会的経済的理由で将来に必要とされる機体数が今回見込んだ数を下回れば、このアウトカム目標は達成できないことになってしまう。そういう意味では、本事業のアウトカム目標を例えば「世界でこれまで実用化されたことのない 1,400℃クラスの CMC 材料を開発して、エンジン辺りの燃料消費量を...%削減することで、全世界の航空機 CO₂ 排出量削減に寄与する。」といった程度にとどめておいても良かったのかもしれないと、いまさらながら感じた。
- ・ ④の SiC 繊維開発について、今後はその量産化を是非すすめてもらいたい。また更なる性能向上を目指して努力を重ねていただきたい。⑤(1)の CMC 部材開発について、製造能力の向上という面でも、引き続き開発を続けて行ってもらいたい。三次元プリフォーム製法については、単独では製品とはならないため、他社の動向が決まらないと量産体制に入れない留意点がある。そのため、是非今回開発した技術やノウハウについては、そのときが来るまで維持しておく体制をとっていただきたい。⑤(2)の生産性の高い CMC 部材開発について、今回目標とした性能以外にも、材料として実用に耐えられる高い特性を出せる性能といった観点からも、現在の材料の性能向上につとめていていただきたい。⑥の製織工程の高速化について、開発された燃焼器パネルの実用化、量産化に向けての取り組みを是非続けて行っていただきたい。本事業としては、SiC 繊維を開発し、それを用いて CMC 部材を開発し、その量産化にすすむというプロセスが、本来目指すべき進め方であったと考えるが、

事業期間に鑑みて、それぞれが別々に実施されたため、事業者間での連携がいまいち不十分であったように感じている。今後は、ぜひ、一貫通貫的に CMC 材料開発がすすめられるような体制を考えていただきたい。

- 各社が推計している達成見込みと全体のアウトカム目標の達成見込みのつながり、整合性が不明確な印象を受ける。各社の目標達成見込みの積み上げと全体として達成見込みの関係が定量的に分かると、この点は解決され理解しやすくなると考えられる。
- アウトプット指標・目標の見直しにあたっては、最終的な事業ではエンジン OEM の情報・認定が必須となるため、その点が本プロジェクトの難しさの要因の一つと考えられる。このため国産エンジン（F-7 エンジン）の活用は評価や見直しにあたり非常に有効であった。一方で他のエンジン OEM（例えばホンダ）などを加えることも将来的には有用ではないかと考えられる。波及効果に関しては、SiC 繊維開発→成形・積層（製織）→CMC 製造のサプライチェーンごとで発生することが考えられ、波及の特性が異なるため、この点が分かるように波及効果を示すことは重要と考える。サプライチェーンごと（材料、製造技術、製品開発）に波及効果を整理すると分かりやすくなる。
- 開発された技術の社会実装と、CO₂削減というアウトカム目標が関連していることは理解できるが、600 万トンという具体的な数値目標とこの技術の成果の関係が明確でない。これは計画申請時と今回の評価時で、評価方法が変わったことにも原因があるように思えるため、各々のプロジェクトでは、プロジェクトの途中で評価方法を変えないようにすべきと思う。
- 似た課題に対する各社で設定されたアウトプット目標の中で、目標設定が少し異なる部分があった。課題設定によって目標設定が異なることは理解できるものの、類似の課題に対しては統一性のある目標設定となっていれば、なお良いと感じた。
- 競合他社の現在の研究開発状況が不明なため、すでに量産されているものと比較しているが、競合の動向をあらゆる情報から予測して目標値の過不足を考察する必要があると感じた。
- 目標達成を重視しすぎると低めの目標設定となるので、少しチャレンジングな設定をして到達した技術の高さで評価する方が良いと思う。製造工程のビデオ等はノウハウの関係で見ることができなかったが、技術の高さを理解し評価するためには必要であると感じた。
- 低コスト化・量産への目標や取り組みはあるものの、それが現状と比較してどの程度になる見込みなのか、それにより海外との競争で市場を獲得するための目標となっていたのかは不明点もあり、説明の改善が必要である。
- 目標は達成しているが、副次的成果や波及効果の説明が曖昧である。達成した目標から次のステップ（事業化・シェア獲得）への将来目標をより具体化する必要がある。人材育成についても各社内に留まっており、もう少し横通しの連携や産学連携なども含めた幅広い人材育成の取り組みも必要である。

- ・ 社会・技術・制度・産業・人財といった波及効果に対するアウトカムの議論について、引き続き的な活動を進めて頂きたい。加えて、オープン・クローズ戦略のような知財・標準化の領域についてはアウトカムへの寄与が高い領域と捉えているので、産官学の議論の枠組みを整備していくことが求められる領域と捉えている。
- ・ アウトプットの KPI として TRL を設定しているところを、他の xRL (BRL や GRL のような事業、ガバナンス面) についてもアウトプットの考慮すべき要素と捉えて取り組むと良いのではないかと捉えている。そのことによって、アウトカムに向けた議論が多層的・多面的な形で捉えることが可能なのではないかと。

1. 3 マネジメント

<肯定的意見>

- ・ 助成対象者との日頃からのコミュニケーションは首尾良く実施されていると判断できる。それゆえに、不測の事態に対しても、期間延長や追加予算といった適切な措置が適切な時期に判断がなされ、確実に実行されたと言える。
- ・ 素材、部材、部品といった過程の中で、相互連携してプロジェクトが進められている面があり、それらは高く評価できる。また、実機を用いた実証実験の実施や、生産工程を含めた将来的に重要になる開発項目等も網羅され、研究開発計画は適切に実行されたと言える。
- ・ コロナ下での事業開始、昨今の半導体不足等、事業実施を阻害するいくつかの外的要因があったにもかかわらず、また実施期間の見直しを行った事業があったものの、目標達成にむけて関係者、実施者間での指揮命令系統等はきちんと機能していたと考えられ、関係者の目標達成に向けての努力について評価したい。
- ・ 実施期間の見直しを行った研究項目があったにもかかわらず、相対的にきちんと研究開発なされてきており、その管理体制や進捗状況把握の体制に関しては、十分であったと判断される。
- ・ 本プロジェクトは SiC 繊維開発→成形・積層（製織）→CMC 製造のサプライチェーン全体で航空機エンジンのホットセクション参画を目指し、将来の CO₂ 削減に寄与することを目的に実施されている点、また各実施者が技術開発・事業化に向けて独自の能力を発揮している点は評価される。素材開発・成形積層・CMC 製品開発のそれぞれで実施者が概ね連携し、実用化を目指した体制を構築、プロジェクトが実施されている点は評価される。データ利活用、オープン・クローズ戦略は適切に実施され、実施体制は概ね効果的なものと考ええる。個社の戦略・考え方等が異なる中で、プロジェクトリーダーが全体・個別の調整に注力して、マネジメントを適切に実施して、成果に結び付けている点は高く評価できる。
- ・ 各事業者の研究開発目標は十分に達成されており評価される。要素技術間の連携については、個社の事業戦略や OEM 等とのパートナーシップで制約もある中で、例えば、SiC 繊維開発で独自にミニコンポジットを開発し評価時間を短縮、成形積層においても複数の SiC 繊維を適用、双方の違いやそれをベースとしての将来の適用

可能性を検討している点、CMC 製造で複数の技術を適用して、各社が得意とする部位の事業化をまず目指している点は現実的で高く評価される。また、事業者が F7 エンジンで実証試験を実施している点、委託先の設備不具合に対して適切かつ迅速に対応している点は高く評価され、進捗管理は適切であったと考える。今後、事業化に向けては各社の方針・エンジン OEM とのパートナーシップなどにより異なると考えられるが、その方向性がある程度示された点は評価される。

- ・ 新型コロナウイルス禍や世界的な半導体不足など難しい問題がある中で、競合する企業の連携となるチームを適切にマネジメントされ、アウトプット目標達成に導いた実施体制は優れたものであると感じる。
- ・ アウトプット目標の達成に向けた研究開発計画は明確で、着実に実施されたと考える。
- ・ 競合関係にある企業をうまくリードして目標値の整合と達成に尽力している。
- ・ コロナ禍の中で大きな遅延なく進めることができていたのは良かった。
- ・ 繊維製造から CMC 製造、部材製造までを一貫して実施する体制をとっており、また、各コア技術を有する実施者で構成された体制で行った実用化研究である。本助成事業により、高性能化・低コスト化技術を確立し、各事業者内で技術・知見の蓄積が達成されている点は評価できる。
- ・ 目標達成に向けた必要な研究項目はブレークダウンされており、適切である。計画変更にも柔軟にスケジュール変更など対応できている。
- ・ プロジェクトリーダー並びにプロジェクトマネージャの強いリーダーシップのもと、コロナ禍における困難な状況下においても、全体ビジョンを描きつつ、研究開発項目ごとのマネジメントを着実に実施してきている。オープン・クローズ戦略のような足の長いテーマについては、引き続き今後の事業化に向けた論点として取り組むことを検討している。
- ・ 一部の研究開発項目において実施上、クリティカルな事項があった際に、研究開発の優先順位や実施期間を調整するなど、柔軟かつ適切なマネジメントによって、最終的なアウトプットとして期待どおりの成果を創出している。

<問題点・改善点・今後への提言>

- ・ プロジェクト全体を統括する PL が 1 名であること、またマネジメントする PM も 1 名であること、そしてこれらの人材が日本の中に留まっていることが問題である。研究開発成果をいち早く認証、国際標準に結びつける戦略を企画できる適切な人材を国内外から登用することが不可欠であり、それらの人材を含めたマネジメントチームの構築を今後検討願いたい。
- ・ 研究開発項目間での相互理解とよりオープンな情報交換を拡充させる努力は引き続き必要である。素材が部材化される段階での特性変化と期待される数値目標に関わる情報は、インタラクティブにかつタイムリーに行われることで、無駄のないより充実した素材開発となる。また、そのような議論の中で、キーとなる技術ポイ

ントや解決されるべき学術的論点の見出される可能性が高く、頻度高く柔軟な議論の場としての環境作りが今後期待される。

- ・ 各研究項目において得られた様々なノウハウや知見は、他の研究項目実施者にとっても有益になる情報があると考えられ、差支えの無い範囲内での情報共有ができるような体制がとられてもよいかと考える。
- ・ 今回のような研究開発体制を引き続き後継事業においても、しっかりと維持していただきたい。
- ・ 我が国がエンジンのホットセクションに **CMC** で参画するためにはサプライチェーンを実現化し、それを効果的な活用していくことが重要となるが、サプライチェーンをつなぐ連携はなされているものの、必ずしも十分ではない点がみられた。個社の事業計画・方針等が異なるのは、各社が製品化を目指している **CMC** 製品部位が異なり、かつ、海外 **OEM** との連携体制及びそれに伴うコンフィデンシャルな部分がある点は理解でき、この点についてはリーダが適切なマネジメントを実施したと理解している。この点について、護送船団方式やオールジャパン体制を求めているわけではなく（こうした体制は現実的ではないと考える）、本プロジェクトでの事業化実現に向けての大きな「戦略」を描き共有化することが重要となるが、この点が明確ではなかった。大きな「戦略」は個社の活動を制約するものではなく、事業者が共有できる「戦略」を意味し、この大きな「戦略」を共有し、それを見直す中で、個社がそれぞれの事業化に向けて本プロジェクトで成果をあげていくことが重要で、かつ、第三者に分かりやすくなると考える。
- ・ 要素技術間での連携に関しては、各社の事情もあり一部十分ではない点がみられた（例えば、素材メーカは **CMC** 製造メーカからの評価情報が遅いことからミニコンポジットを自ら開発したりしている）。可能な範囲で、更なる連携強化を図る方策の検討は重要と考える。このためには大きな戦略を明確化して共有化することが有効と考える。
- ・ 今回の取り組みにおいて、産官学の中で“学”の存在感が薄く感じた。競合する企業間での交流や情報交換など、“学”が果たすべき役割は大きいと思うので改善が期待される。また他委員からの意見にもあったが、参加機関に限られる傾向とを感じる。新しい企業や大学が新たに参入できる取り組みも必要に感じる。
- ・ 他の課題にて開発された技術が、別の課題で生かされるなど、関連する技術開発間での交流がある研究開発計画であればなお良かったと感じる。
- ・ 競合している企業を同じプロジェクト内で運営するのは難しいと感じた。
- ・ 委託先や共同研究先との役割分担が不明確な点もあり、可能な範囲で説明を果たすべきである。事業化にむけて、従来技術や競合技術との性能比較についても積極的に発表・発信し、社会実装に向けた取り組みを期待したい。
- ・ 材料～製造間の連携はあるものの、異なるプロセス間による連携や知見共有も、**CMC** 技術の底上げや日本全体の技術レベル維持・向上のためには必要である。産学で取り組み、「学」が協調領域となって活動することが望ましい。競合も含めた全

体的な連携の取り組みや知見共有の機会も今後は考えていくべきである。

- ・ オープン・クローズ戦略のうち、特に標準化の領域については、産学の連携をテーマごとに深化させて頂き、人財育成や産業化に向けたシナリオとも連動した活動へと転換していってもらうことを期待したい。そのためには、産から学への働きかけや連携、CMC の産業化に向けた産官学の議論・枠組み作りが求められていくものと捉えている。
- ・ 研究開発項目、研究代表者間の連携はクローズ戦略、ノウハウの面で難しいところがあることは想定されるものの、アウトカムの創出に向けた協調領域に関連した議論や対話の場を意図的にも受けていくことも望ましいものと捉えている。

2. 評点結果

評価項目・評価結果		各委員の評価							評点
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋									
(1)アウトカム達成までの道筋		A	A	A	A	A	A	B	2.9
(2)知的財産・標準化戦略		A	A	B	A	B	B	B	2.4
2. 目標及び達成状況									
(1)アウトカム目標及び達成見込み		A	B	B	B	B	B	B	2.1
(2)アウトプット目標及び達成状況		A	A	A	B	A	B	B	2.6
3. マネジメント									
(1)実施体制		A	A	A	A	B	A	B	2.7
(2)研究開発計画		A	A	A	B	A	B	B	2.6

《判定基準》
A：評価基準に適合し、非常に優れている。
B：評価基準に適合しているが、より望ましくするための改善点もある。
C：評価基準に一部適合しておらず、改善が必要である。
D：評価基準に適合しておらず、抜本的な改善が必要である。

（注）評点は A=3、B=2、C=1、D=0 として事務局が数値に換算・平均して算出。

第2章 評価対象事業に係る資料

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「次世代複合材創製・成形技術開発④、⑤、及び⑥」
(終了時評価)

事業原簿 【公開】

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 材料・ナノテクノロジー部
-----	---

—目次—

内容

概 要	2
プロジェクト用語集	6

研究開発項目ごとの成果

- 別添 1 研究開発項目④：「超高性能 SiC 繊維の品質安定性向上に向けた開発」
UBE 株式会社
- 別添 2 研究開発項目⑤(1)：「1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発」
株式会社 IHI
- 別添 3 研究開発項目⑤(1)：「1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発」
シキボウ株式会社
- 別添 4 研究開発項目⑤(2)：「1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発」
三菱重工航空エンジン株式会社
- 別添 5 研究開発項目⑥：「高レート・低コスト生産可能な CMC 材料およびプロセス開発」
川崎重工業株式会社

(添付資料)

- ・プロジェクト開始時関連資料（事前評価結果、パブリックコメント募集の結果）
- ・特許論文等リスト

概 要

		最終更新日	令和 5 年 12 月 13 日	
プロジェクト名	NEDO プロジェクト名 「次世代複合材創製・成形技術開発④、⑤及び⑥」 METI 予算要求名称 次世代複合材創製技術開発事業		プロジェクト番号	P20010
担当推進部/ P Mまたは担当者 及び METI 担当課	材料・ナノテクノロジー部 P M 松井 克憲（令和 3 年 9 月～令和 5 年 12 月現在） 材料・ナノテクノロジー部 P M 長島 敏夫（令和 2 年 7 月～令和 3 年 8 月） 材料・ナノテクノロジー部 P M 大中道 俊亮（令和 2 年 4 月～令和 2 年 6 月） 材料・ナノテクノロジー部 専門調査員 桑原 智彦（令和 2 年 7 月～令和 5 年 12 月現在） METI 担当原課：航空機武器宇宙産業課			
0. 事業の概要	航空機の燃費改善、環境適合性向上、整備性向上、安全性向上といった要請に応えるため、複合材料を始めとした我が国が強みを持つ材料分野における技術革新を促進し、航空機に必要な信頼性・コスト等の課題を解決するための要素技術を開発する。これにより、航空機の燃費改善によるエネルギー消費量とCO2 排出量の削減、整備性向上、安全性の向上並びに我が国の部素材産業及び川下となる加工・製造産業の国際競争力強化を目指す。産学官の密接な連携の下での我が国基盤の構築及び関連産業の成長を実現する。			
1. 事業のアウトカム（社会実装）達成までの道筋				
1.1 本事業の位置 付け・意義	【事業の必要性】 航空機産業における世界の民間航空機市場は、各社、コロナの影響により今後のデリバリー見通しを下方修正したものの、ワクチン普及によるコロナ終息後の旅客需要の回復予測や、CO2削減に貢献する効率の高い機体への代替需要が見込まれる事から、2019年末の約2.4万機から旅客需要で年率約5%増加、2040年末には、市場規模は約3.9万機(5～6兆ドル程度)となる見通しである。 国際的な産業競争が激化する厳しい競争の中で、航空機産業では高度な先進技術開発が進められてきており、サプライヤービジネスにおいても今後激しい競争にさらされていくことが予想されるため、我が国においても航空機産業の国際競争力を維持・拡大していく必要がある。航空機は、幅広い分野の技術の組み合わせた複雑なシステムを有しており、その部品点数は、自動車の2～3万点の約100倍に及び300万点もの部品から成り立っており、産業構造の裾野が広い。 燃費改善、環境適合性等の市場のニーズに応えるため、近年の航空機（機体・エンジン・装備品）では、軽量化のために構造部材として複合材(CFRP)が積極的に導入されており、先進的な素材開発及び成形組立技術開発等が急務となっている。我が国の強みを活かしつつ、民間航空機に求められる安全性、環境適合性、経済性という課題において、他国より優位な技術を獲得し航空機産業の国際競争力を維持・拡大していくことは、極めて重要である。これらを他産業分野へ波及させることにより、輸送機器をはじめとした様々な分野における製品の高付加価値化を進める上で、重要な役割を果たすことも期待されている。 【本事業のねらい】 航空機の燃費改善、環境適合性向上、整備性向上、安全性向上といった要請に応えるため、複合材料等の関連技術開発を中心として、航空機に必要な信頼性・コスト等の課題を解決するための要素技術を開発する。 今後の航空機需要の70%を占めると予想されている細胴機の製造プロセスで必須となる、複合材を用いた部材の低コスト・高レートな新しい成形組立技術の確立を目指す。 航空機の燃費改善によるエネルギー消費量とCO2 排出量の削減、整備性向上、安全性の向上並びに我が国の部素材産業及び川下となる加工・製造産業の国際競争力強化を目指す。 【政策的位置づけ】			

	本事業は、総合科学技術・イノベーション会議により策定されている「科学技術イノベーション総合戦略」、「エネルギー・環境イノベーション戦略」等に則り、構造材料の飛躍的な軽量化等によって輸送機器のエネルギー利用効率の向上を目指すために実施するものである。 【NEDOが関与する意義】 NEDOは第四期中長期目標におけるミッションとして、「エネルギー・環境問題の解決」、「産業技術力の強化」に貢献することをミッションとしている。 本プロジェクトの狙いは、産業構造の裾野が広い航空機産業の国際競争力を維持・拡大し、これらを他産業分野へ波及させることにより、輸送機器をはじめとした様々な分野における製品の高付加価値化を進めることで日本の主要産業の競争力を強化し、新たな産業創成を目指すものであることから、NEDOのミッションと合致する。さらに、素材開発から材料、部材と航空機に採用されるまでには長い研究開発期間を要するためリスクが大きく、また単独企業での開発ではなく産学官の密接な連携の下で激化する厳しい国際的な産業競争に勝つ必要があることから、NEDOプロジェクトとしての実施が妥当である。
1.2 アウトカム達成の道筋	本事業で、研究開発の進捗管理、きめ細やかな指導及びマネジメントを実施することで、研究開発を最大限推進し、最終目標を達成させる。 事業の完了年度の翌年度以降 5 年間、企業化状況報告書でモニタリングを継続する。また、経済安全保障重要技術育成プログラム／航空機エンジン向け先進材料技術の開発・実証プロジェクトを通じ、CMC の量産化技術を確認し実用化へ繋げる。 2030 年度に投入予定の次世代航空機に CMC を適用させる。
1.3 知的財産・標準化戦略	NEDO のルールに従い、助成事業の実施により得られた知的財産権等の研究成果は助成先に帰属することから、NEDO による指示は実施せず事業者に委ねる。
2. 目標及び達成状況	
2.1 アウトカム目標及び達成見込み	■ アウトカム目標 本事業で開発した成果（CFRP 及び CMC）が、次世代航空機に搭載され 2040 年において、CO2 排出量を 1500 万トン/年削減する。 ■ 達成見込み 上記 1.2 アウトカム達成の道筋に記載の通り進捗が進む見込みである。但し、エンジン完成メーカーの OEM の次世代航空機の投入時期や開発された CMC が認定され、次世代航空機にどの程度搭載されるかにより CO2 排出量の削減量に増減がある見込みである。
2.2 アウトプット目標及び達成状況	■ 研究開発項目④「超高性能 SiC 繊維の品質安定性向上に向けた開発」 【アウトプット目標】 ・引張強度 3.0GPa 以上、2700°F（1482℃）×400 時間曝露後、強度低下 20%以下を満足し、高温クリープ特性に優れる SiC 繊維を開発する。 ・SiC 繊維の特性ばらつきを抑制する製造技術を確認する。 【達成状況】 ・最適ポリマー組成を決定し、製造条件を確認することにより、強度、耐熱性、高温クリープ特性について目標を達成した。 ・ポリマー合成、紡糸技術について、繊維中の欠陥を低減する技術を確認し、繊維強度のばらつきを低減することができた。 ■ 研究開発項目⑤「1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発」 【アウトプット目標】研究開発項目⑤(1) ・マトリックス、製織の方法、耐環境性コーティングの最適化を実施して、CMAS の存在する環境下で、室温引張強度 300MPa 以上、1400℃×400 時間曝露後、強度低下 20%以下を満足する CMC 部材を開発する。 【達成状況】研究開発項目⑤(1)

	・製織仕様の見直しおよびマトリックス含浸条件の改善・最適化により材料中の欠陥を大幅に低減した。耐環境コーティングについては従来材に比べて飛躍的に耐 CMAS 性が向上する新組成を見出した。これらを組み合わせて材料を評価した結果、CMAS 存在下の室温強度：494MPa、CMAS 暴露 1400℃×400 時間後の強度低下：17%となり、目標達成を確認した。また、当該 CMC にて高压タービンシュラウドを製作し、JAXA F7 エンジンに搭載して、エンジン試験実証も完了させた。 ・高性能 SiC 繊維を用いたニアネットシェイプでの三次元プリフォームについて、製法開発を行い XY 積層・Z 挿入について自動化装置を製作、試作に成功した。 過去の NEDO 事業（委託）にて、同じく高性能 SiC 繊維を用いた Vf（体積当たりの繊維含有率）30%以上の平板形状三次元プリフォーム製法の開発に成功していたが、今回ニアネットシェイプでの三次元プリフォームについても同等 Vf を達成した。 【アウトプット目標】研究開発項目⑤(2) ・生産性の高い MI 法において、新規界面コーティングの開発と UD 積層構造・マトリックス形成の最適化を行い、室温引張強度 300MPa 以上、室温弾性率 200GPa 以上、1400℃×400 時間暴露後の室温での弾性率低下が製造後の 30%以内を達成する CMC 部材を開発する。 【達成状況】研究開発項目⑤(2) ・新規界面コーティング繊維と Si 含浸マトリックスを組み合わせた CMC 特性は、破断応力は 303MPa で、弾性率は 294GPa で、目標とする強度特性が得られた。また、1400℃×400Hr 大気暴露後の弾性率低下は 8%で目標達成できていることを確認した。 ■ 研究開発項目⑥「高レート・低コスト生産可能な CMC 材料およびプロセス開発」 【アウトプット目標】 製織工程の高速化、CVI 工程、PIP 工程の短時間化を達成して、耐熱温度 1400℃の CMC 部材について、現行と比較して生産レート 10 倍向上を可能とする材料及びプロセス技術を開発する。 【達成状況】 ボトルネック工程の事業開始前生産レートを基準に、全工程の生産レートを 10 倍とする。 3 月までに現在 5 倍の CVI 繊維界面コーティング形成工程のバッチ当たり炉詰数を 2 倍とすることで、10 倍向上を達成する予定。	
3. マネジメント		
3.1 実施体制	経産省担当原課	製造産業局 航空機武器宇宙産業課
	プロジェクトリーダー	国立大学法人東北大学 大学院航空宇宙工学専攻 教授 岡部 朋永
	プロジェクトマネージャー	材料・ナノテクノロジー部 主査 松井 克憲
	助成先及びその委託先、共同研究先	研究開発項目④「超高性能 SiC 繊維の品質安定性向上に向けた開発」 助成先： UBE 株式会社 委託先： 株式会社超高温材料研究センター 山陽小野田市立山口東京理科大学 研究開発項目⑤「1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発」 助成先： ⑤(1)株式会社 I H I 委託先： ファインセラミックセンター(JFCC)、物質・材料研究機構(NIMS) 共同提案先（助成先）： シキボウ株式会社 助成先： ⑤(2)三菱重工航空エンジン株式会社 委託先： 京セラ株式会社、片柳学園東京工科大学 研究開発項目⑥

		「高レート・低コスト生産可能な CMC 材料およびプロセス開発」 助成先： 川崎重工業株式会社 委託先： イビデン株式会社、株式会社豊田自動織機 共同研究先： 宇宙航空研究開発機構(JAXA)、 東北大学				
3.2 受益者負担の 考え方 事業費推移 (会計・勘定別に NEDO が負担した実 績額（評価実施年 度については予算 額）を記載） (単位:百万円)	主な実施事項	R2fy	R3fy	R4fy	R5fy	備 考
	研究開発項目④					
	研究開発項目⑤(1)					
	研究開発項目⑤(2)					
	研究開発項目⑥					
	会計・勘定	R2fy	R3fy	R4fy	R5fy	総額
	特別会計（需給）	403	553	629	130	1715
	開発成果促進財源	0	146	28	45	219
	総 NEDO 負担額	403	699	657	175	1934
3.3 研究開発計画						
情 勢 変 化 へ の 対応 中 間 評 価 結 果 への対応 評 価 に 関 す る 事項	■ 事業開始時に想定しなかった社会情勢への対応 事業開始の 2020 年度には、「Covid-19」の発生、また 2021 年度頃から「半導体不足」により納期問題が発生したが、予算の見直しなど適宜実施し、最終目標に影響をしないように対応した。 ■ 委託先の設備不具合による開発への影響（研究開発項目⑥） 計画の変更と共に実施期間を 1 年延長して対応した。					
	－					
	事前評価	令和元年 7 月実施 担当部 材料・ナノテクノロジー部				
	中間評価	－				
	終了時評価	令和 5 年 12 月実施 担当部 材料・ナノテクノロジー部				
別添						
投稿論文		「査読付き」 2 件、「その他」 2 件				
特 許		5 件				
その他の外部発表 (プレス発表等)		学会発表・講演； 25 件、新聞・雑誌等への掲載； 4 件、その他（展示会等）； 4 件				
基本計画に関する 事項	作成時期	令和 2 年 2 月制定				
	変更履歴	令和 3 年 2 月改訂（研究開発項目⑤に関する研究開発内容の拡充） 令和 3 年 9 月改訂（研究開発項目⑥に関する実施期間の変更）				

プロジェクト用語集

研究開発項目④「超高性能 SiC 繊維の品質安定性向上に向けた開発」

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
クリープ	Creep	物体 に持続 応力 が作用すると、時間 の経過とともに 歪み が増大する現象。
セラミック複合材料・CMC	Ceramic matrix composite	セラミックを SiC 繊維などの繊維で強化した複合材料
ミニコンポジット	Mini-composite	繊維束 1 本にセラミックを含浸した複合材料

研究開発項目⑤(1)「1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発」

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
CMC	Ceramic Matrix Composite	セラミック基複合材料
EBC	Environmental Barrier Coating	耐環境コーティング
CMAS	CaO-MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	エンジンに吸い込まれる砂や火山灰等。カルシア, マグネシア, 鉄, アルミナ, シリカ成分等から成る。
OEM	Original Engine Manufacturer	民間航空機用エンジンの開発取りまとめ会社。GE, PW, RR の 3 社を指す。
LCF	Low Cycle Fatigue	低サイクル疲労
SiC	Silicon Carbide	炭化ケイ素：ケイ素と炭素の化合物
CT	Computed Tomography	物体内部構造を画像として構成する技術, またはそれを行う機器。
DL	Deep Learning	深層学習
RMSD	Root Mean Square Deviation	二乗平均平方根偏差
CCD	Charge-Coupled Device	電荷結合素子
DIC	Digital Image Correlation	デジタル画像相関法
YbDS	ytterbium disilicate	Yb ₂ Si ₂ O ₇ で表される Yb と Si の複合酸化物
YbMS	ytterbium monosilicate	Yb ₂ SiO ₅ で表される Yb と Si の複合酸化物
YbAG	ytterbium aluminum garnet	Yb ₃ Al ₅ O ₁₂ で表される Yb と Al の複合酸化物
TBC	Thermal Barrier Coating	遮熱コーティング
SS	Stress-Strain	応力－歪み

BN	Boron Nitride	窒化ホウ素
CVI	Chemical Vapor Infiltration	化学気相含浸法
MI	Melt Infiltration	熔融含浸法
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency	宇宙航空研究開発機構
HPT	High Pressure Turbine	高圧タービン：ジェットエンジンの燃焼ガスを運動エネルギーに変換する部位で温度が高くなる
MPa	Mega Pascal	圧力の単位
マトリクス	Matrix	繊維や界面などの保護材
界面	Interface	繊維とマトリクス間の相互作用を隔絶する中間物。カーボンや BN を使用する
コーティング	Coating	エンジンの部材の最外面を覆う保護材
疲労寿命	Fatigue Life	応力の繰り返し負荷により、亀裂が進展して部材が破断する現象
クリープ寿命	Creep Life	一定の応力負荷により、亀裂が進展して部材が破壊する現象
ボイド	void	材料中の気孔
グランド トゥルース	Grand Truth	機械学習で用いる正解データ
セマンティック セグメンテーション	Semantic Segmentation	画像内の全画素にラベルやカテゴリに関連付けるディープラーニングのアルゴリズム
コールド トラップ	Cold Trap	冷却することでガスを液化捕集する機器
擬三元系	Pseudo-ternary system	3 種の化合物からなる系
熱力学平衡計算	Thermodynamic equilibrium calculation	熱力学的系が熱的、力学的、化学的に平衡であるかの計算
トップコート	Top coat	EBC の最外層
アンダーコート	Under coat	EBC のトップコートの下と CMC 間に形成される中間層
シュラウド	Shroud	回転翼の外周に位置するエンジン部品
シュラウドサポート	Shroud Support	シュラウドをエンジン本体に取り付ける際のインターフェース

研究開発項目⑤(2)「1400℃級CMC材料の実用化研究開発」

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
CMC	Ceramics Matrix Composite	セラミックス繊維とセラミックスマトリックスを組み合わせた複合材

OEM	Original Equipment Manufacturer	実際に航空機エンジンを作るメーカーで、エンジンは、米 GE（ゼネラル・エレクトリック）、プラットアンドホイットニー（PW）、英ロールスロイス（RR）
MI	Melt Infiltration	溶融 Si 含浸により SiC マトリックスを形成する複合化方法の一種
非線形領域		材料に引張荷重を負荷したとき、弾性域を超えても弾性率が低下しながら破断せずに強度が増加する形態

研究開発項目⑥「高レート・低コスト生産可能な CMC 材料およびプロセス開発」

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
BN		Boron Nitride の略。窒化ホウ素。
BN コート		BN を用いた繊維界面コーティング層のこと。炭素コート（C コート）よりも耐熱性に優れる。
CMC		Ceramic Matrix Composite の略。セラミックス複合材料のこと。
CVD		Chemical Vapor Deposition の略。化学気相蒸着法のこと。
CVI		Chemical Vapor Infiltration の略。化学気相含浸法。
hBN		Hexagonal Boron Nitride の略。窒化ホウ素の内、六方晶系のもの。
MRL		Manufacturing Readiness Level 製造技術成熟度レベル
MTO 条件		Maximum Take off のこと。離陸時条件
PIP		Polymer Infiltration and Pyrolysis の略。ポリマー含浸焼成法
PSP		Pressure Sensitive Pain の略。感圧塗料、発行強度が圧力に応じて変化する。
SiC/SiC		SiC 繊維ならびに SiC 母相からなるセラミックス複合材料のこと。
TIT		Turbine Inlet Temperature。タービン入り口温度
TRL		Technology Readiness Levels 技術成熟度レベル
圧力比	Pressure ratio	ガスタービンにおける圧縮機入り口と、圧縮器出口での空気圧力の比。この圧力比が高いほど、熱効率がよく、燃費が向上する。
化学気相含浸法	Chemical Vapor Infiltration	専用炉内に設置したプリフォームに対し、原料ガスを導入・化学反応させることにより、プリフォーム内部に目的の物質を形成させる手法。特に繊維界面コーティングの形成に用いられる。
化学気相蒸着法	Chemical Vapor Deposition	真空容器内部に原料ガスを導入し、被対象物に目的の物質を蒸着・形成する手法
サイジング剤	Sizing agent	セラミックス繊維は撚られておらず、一体となっていないため、そのままでは製織が困難である。サイジング剤を用い

		ることで、複数繊維を束ね、製織を可能とする。また、摩擦性能を向上させる機能を有する。
セラミックス複合材料	Ceramic Matrix Composite	セラミックス複合材料のこと。本件では、特にセラミックス繊維およびセラミックス母相からなる複合材料を指す。
繊維界面コーティング	Fiber interfacial coating	繊維界面に形成されたコーティング相。セラミックス複合材料においては、本コーティング相がクラック伝搬を阻害することにより擬塑性を発現するため。特性に大きな影響を与える。
耐環境コーティング	Environmental Barrier Coating	セラミックス複合材料を保護するために付与されるコーティング層。特にセラミックスの酸化反応から保護するため、酸化雰囲気から隔絶するためのコーティング層を指す。
プリフォーム	Preform	最終製品を成形する際の間製品。本件では、繊維織物や繊維織物の繊維界面コーティングを施したものを指す。
抱合力	Conjugation force	繊維束が一体化している強さ。接着性。
ポリマー含浸焼成法	Polymer Infiltration and Pyrolysis	液状セラミックス前駆体ポリマーをプリフォームに含浸させ、その後焼成することにより、セラミックス母相を形成する手法。本件では、前駆体ポリマーに対し、フィラーを添加した場合も含める。
ボンドコート	Bond Coat	EBC や TBC において、接着性向上を目的に被対象物表面に施工するコーティング層。
マトリックス	Matrix	母相。ここでは、複合材料を形成する組織の内、繊維ならびに繊維界面コーティング相を覗いた部分を指す。
離陸時条件	Maximum Take off condition	航空機が離陸時のエンジン稼働条件のことを指す。温度面、荷重面で最も厳しい条件となる

添付資料

- プロジェクト開始時関連資料：事前評価結果、パブリックコメント募集の結果
- 特許論文等リスト

2019 年度事前評価結果

研究評価委員会において 2019 年度 NEDO 新規案件の事前評価を実施しました。結果は以下の通りです。

当該評価結果は、今後基本計画などに反映してまいります。

2019 年 7 月

案件名	次世代複合材創製・成形技術開発
推進部署	材料・ナノテクノロジー部
総合コメント	複合材料開発は、今後、我が国が保持・展開する技術として適切なものであり、競争力を維持するために必要なプロジェクトと考えられ、国による支援は欠かせない。本プロジェクトは、材料開発を中心としているが、材料としての性能クリアを目指すだけでなくその発現機能を明確にして、成果をアウトカムへと確実に繋げることを期待したい。また、一連の開発プロセスを一体的に進めるためには、シミュレーション技術の取り込みをより重視する必要があると考える。さらに、本技術は国際展開が重要であるため、国際競争力をどのように確保していくかを明確にするとともに、実施者間の相互連携やユーザー企業と協力して技術開発を行う体制の構築を期待したい。

「次世代複合材創製・成形技術開発（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

2020年3月5日

NEDO

材料・ナノテクノロジー部

NEDO POSTにおいて標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。

貴重なご意見をいただき、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間
2020年1月21日～2020年2月4日
2. パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞
計0件

・特許論文等リスト

表 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023 年 11 月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021FY	0	1	2	2	0	0	1	0	0
2022FY	0	0	1 4	2	0	2	1	1	0
2023FY	2	0	9	0	0	0	0	0	0
合計	2	1	2 5	4	0	2	2	1	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

表 特許の件数（内訳） 【2023 年 11 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2020FY	0	0	0
2021FY	0	0	0
2022FY	2	0	0
2023FY	2	0	1
合計	4	0	1

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

【特許】

番 号	出願者	出願番号	国内外 国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	UBE（株）	特願 2022-194271	国内	2022/12/05	公開	結晶性炭化ケイ素繊維、及びその製造方法、並びにセラミックス複合基材	隅野真央他
2	（株）IHI	特願 2022-116970	国内	2022/7/22	出願	耐砂塵被覆	山崎直樹他
3	（株）IHI	PCT/XXXXXX	PCT	出願準備中	出願	未定	山崎直樹他
4	（株）IHI	特願 XXXX-XXXX	国内	出願準備中	出願	未定	山崎直樹他
5	三菱重工航空 エンジン(株)	特願 2023-192996	国内	2023/11/13	出願	BN 被覆セラミックス繊維、それを備えたセラミックス複合材料、ならびに BN 被覆セラミックス繊維の製造方法	関川貴洋 松原将一 佐藤光彦

（Patent Cooperation Treaty: 特許協力条約）

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	北岡 聡	JFCC	CMAS 溶融物に対する Yb シリケートの腐食機構	公益社団法人日本セラミックス協会 2022 年度年会	無	2023/03
2	渡邊 文章	IHI	JAXA F7 エンジンでの 1400℃ 級 CMC シュラウド実証試験	IHI 技報	有	2023/01
3	北岡 聡	JFCC	CMAS degradation of ytterbium aluminum garnets	Journal of American Ceramic Society	有	2023 (投稿済み)
4	北岡 諭	JFCC	Mass transfer in Yb3Al5O12 films at high temperatures under oxygen potential gradients	JOURNAL OF THE EUROPEAN CERAMIC SOCIETY	有	2023 (投稿済み)

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	松永格	UBE(株)	SiC/SiC CMC 強化に用いられる炭化ケイ素系繊維（チラノ繊維®）	第 5 回「CMC（セラミックス複合材料）シンポジウム」	2022/12/07
2	山崎 直樹	IHI	Stabilization mechanism and water vapor resistance for Ytterbium Silicates Coatings	Thermal and Environmental Barrier Coatings VI	2022/06
3	田中 誠	JFCC	Ca-Mg-Fe-Al-Si-O 溶融物に対する Yb シリケート系環境遮蔽膜の腐食機構	JFCC 研究成果発表会	2022/07
4	北岡 聡	JFCC	遮熱・環境遮蔽コーティングの設計と機能発現機構	耐熱複合材料・コーティングの高度化研究会 2022 年度第 1 回ワークショップ	2022/07
5	北岡 聡	JFCC	遮熱・環境遮蔽コーティングの腐食機構	日本学術振興会耐熱金属材料第 123 委員会 戦略企画部分科会 令和 4 年 11 月期研究会	2022/11
6	中村 武志	IHI	Advances and Technical Challenges in development of CMC	Ceramic Matrix Composites II	2022/11
7	平野 洋人	IHI	Fabrication method of Yb based Oxide matrix for CMC	Ceramic Matrix Composites II	2022/11
8	中村 武志	IHI	航空エンジン向け SiC/SiC の開発状況	第 5 回 CMC シンポジウム	2022/12
9	中村 武志	IHI	Development and evaluation of EBC for CMC	TIC9	2022/12

10	山崎 直樹	IHI	Stabilization mechanism and CMAS corrosion behavior of rare-earth based coatings prepared by thermal spray	ICACC2023	2023/01
11	北岡 聡	JFCC	航空機用耐熱軽量部材の遮熱・環境遮蔽コーティングの現状と将来動向	日本学術振興会 先進セラミックス第 124 委員会 第 171 回会議	2023/02
12	山崎 直樹	IHI	航空機ジェットエンジン高温部材向け CMC/EBC の開発動向	セラミック協会 2023 年年会	2023/03
13	田中 誠	JFCC	CMAS 溶融物に対する Yb3Al5O12 焼結体の腐食機構	セラミック協会 2023 年年会	2023/03
14	伊藤 大志	JFCC	Ca-Mg-Fe-Al-Si-O 溶融物による Yb3Al5O12 焼結体の腐食挙動	日本顕微鏡学会 第 79 回 学術講演会	2023/6
15	伊藤 大志	JFCC	CMFAS 溶融物に対する EBC の耐食設計	2023 年度 JFCC 研究成果発表会	2023/7
16	田中 誠	JFCC	多結晶 Yb3Al5O12 の微構造変化	2023 年度 JFCC 研究成果発表会	2023/7
17	中村 武志	IHI	The Challenges of Ceramics Matrix Composite for Jet Engine Application	JISTES 2023 Kyoto	2023/7
18	武藤 慎治	IHI	Recent CMC Development Challenges in IHI	HT-CMC11	2023/08
19	中村 武志	IHI	TECHNICAL CHALLENGES IN DEVELOPMENT OF CMC TOWARDS 1400 DEGREE CELSIUS APPLICATION.	HT-CMC11	2023/08
20	土井 康平	IHI	Recession behavior of environmental barrier coating at elevated temperature in high-velocity steam jets.	HT-CMC11	2023/08
21	山崎 直樹	IHI	Development of Environmental Barrier Coatings systems with high CMAS Corrosion resistance	HT-CMC11	2023/08
22	田中 誠	JFCC	Corrosion mechanisms of Yb3Al5O12 exposed to molten CMFAS	HT-CMC11	2023/08
23	関川貴洋	三菱重工 航空エンジン (株)	NEW BN COATING ON SIC FIBERS AS THE INTERPHASE OF SIC/SIC COMPOSITES	第二回 サンタフェ CMC 会議 (Engineering Conferences International)	2022/11/17

24	田中拓磨	川崎重工業株式会社	航空機エンジン用繊維強化セラミックス基複合材料製燃焼器パネルの開発	JFC テクノフェスタ	2022/1/21
25	中谷浩	川崎重工業株式会社	材料技術による機械製品の革新、事業への貢献～川崎重工における事例～	大阪冶金会講演会	2022/3/24

(b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	JAXA	明日の「そら」へーJAXA のチャレンジー	日刊工業新聞	2022/05
2	川崎重工業株式会社	耐熱コーティング技術およびセラミックス複合材料開発の紹介	GT 学会誌	2021/07
3	川崎重工業株式会社	航空エンジン燃焼器ライナ用 CMC 部材開発	工業材料	2021/06
4	川崎重工業株式会社	航空機エンジン用 繊維強化セラミックス基複合材料製 燃焼器パネルの開発	JFCA FC レポート	2022/07

(c)その他

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	JAXA	Introduction of a turbofan engine as component-technology demonstration testbed	AIAA-GTTC-newsletter	2022/06
2	IHI	航空産業向け SiC 複合材料の開発	プラズマ・核融合学会誌	2022/08

別添 1

研究開発項目④

超高性能 SiC 繊維の品質安定性向上に向けた開発

UBE 株式会社

研究開発項目④「超高性能 SiC 繊維の品質安定性向上に向けた開発」

1. 実施者名、実施体制

実施者:UBE 株式会社

研究項目の一部を山口東京理科大学、超高温材料研究センターに委託。

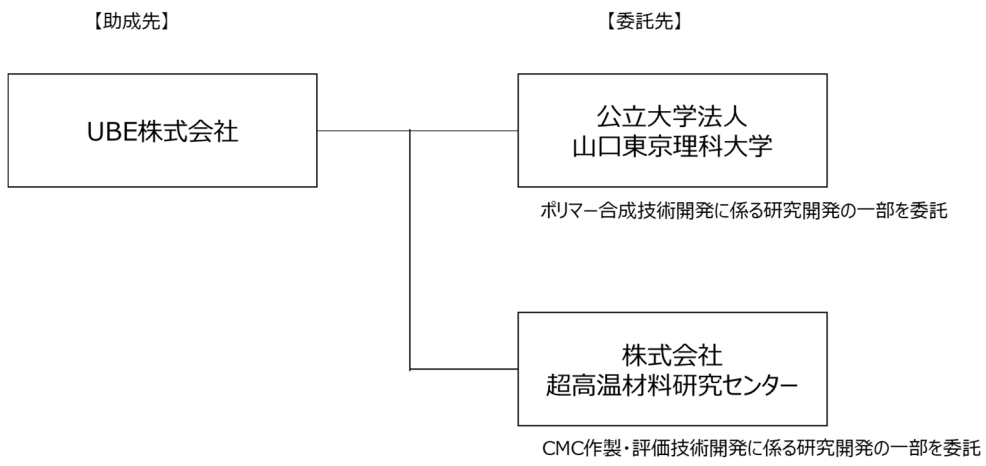


図1. 実施体制図

2. 期間、予算

期間:2020 年 8 月 25 日から 2023 年 3 月 31 日

予算:125,988,6832 円(補助率:1/2)

本研究開発は図2に示すスケジュールで実施した。

研究項目	FY2020	FY2021	FY2022	FY2023
ポリマー合成技術開発 設備導入 特性を発現するポリマー開発 不純物制御ポリマー合成 高精度合成技術	ラボスケール	設備設計・設置 既設設備	実証	K-program
紡糸技術開発 設備導入 不純物制御 外部異物制御 最適仕様	ラボスケール	設備設計・設置 既設設備	実証	K-program
CMC作製・評価技術開発 設備導入 作製・評価	設備設計・設置		CMCミニコンボジット作製・評価	K-program

図2. 本研究開発のスケジュール

3. アウトプット(最終)目標

高耐熱性を特徴とするセラミックス材料の欠点である低靱性に対して、長繊維強化 SiC/SiC 複合材料において SiC 繊維は強化材として利用することで、母材に生じたクラックを繊維がブリッジングし、損傷が許容されることにより、大幅な改善効果が期待できる。つまり、長繊維強化 SiC/SiC 複合材料において、SiC 繊維の特性向上は複合材料としての特性向上に欠かせない要素である。

一方、SiC 繊維の高温での強度と耐クリープ特性の関係は、基本的にトレードオフの関係にあることが知られている。例えば、NASA の報告によれば、高圧タービンプレード用の繊維として 2700°F(1482°C)の耐熱性を有する SiC 繊維が必要との研究結果から、NASA 自身で高性能 SiC 繊維の開発が試みられたが、高強度と高耐クリープ特性の両立させた SiC 繊維の実現はできなかった。従って、従来にない高温強度と耐クリープ特性を両立する SiC 繊維の製造には、前駆体ポリマー合成技術、紡糸技術などの基礎的な知見に立ち返った開発が必要であると言える。

SiC 繊維の特性評価は、通常樹脂含浸ストランド法により、ストランドに樹脂を含浸した FRP として評価されるが、CMC と FRP は破壊メカニズムが異なり、FRP で評価した特性と CMC としての特性に相関性が低い場合がある。CMC の作製工程は非常に長く、CMC 完成までに数か月間かかるため、本研究開発で試作した超高性能 SiC 繊維の CMC としての特性評価に時間を要し、効率的に研究開発を実施する上での大きな課題となる。ミニコンポジットサイズの CMC(CMC ミニコンポジット)作製・評価技術確立し、開発サイクルの大幅な短縮を実現することが必要である。

これらの観点から、以下の目標を設定し、本研究開発を実施した。

最終目標 2022 年度

目標1. 引張強度 3.0GPa 以上、2700°F(1482°C) × 400 時間暴露後、強度低下率 20%以下を満足した高温クリープ特性に優れる SiC 繊維(超高性能 SiC 繊維)を開発する。

目標2. SiC 繊維の特性ばらつきを抑制する製造技術確立する。

目標3. 超高性能 SiC 繊維の開発サイクル短縮のために、繊維メーカー独自でミニコンポジット作製技術及び特性評価技術を開発することで、SiC 繊維特性と CMC 部材特性評価を並行して実施可能な材料開発体制確立する。

4. 成果の達成状況と根拠

目標1. SiC 繊維の耐クリープ特性を向上させるためには SiC 結晶粒界を適切にコントロールすることが重要であるため、SiC 焼結特性と粒界制御をコントロール可能な前駆体ポリマーの最適組成を確立した。さらに最適な焼結条件を確立した。

本ポリマー組成で SiC 繊維の試作を行い、図3に示す全長 500m 以上の連続長繊維を作製した。強度、耐クリープ特性ともに目標特性に達していることを確認した。強度については図4に示すように、全長にわたって 3GPa 以上であることを確認、耐クリープ特性については、Super Sylramic-iBN の文献値の半分程度の歪速度であることを確認した。耐熱性についても図5に示すように、1482℃(2700°F)で 400 時間熱処理後においても顕著な強度が無いことを確認し、1482℃(2700°F)級の CMC 材料として必要な特性を有することを確認した。



図3. 本研究開発で試作した超高性能 SiC 繊維(右側)

* 左は通常の耐熱性炭素繊維

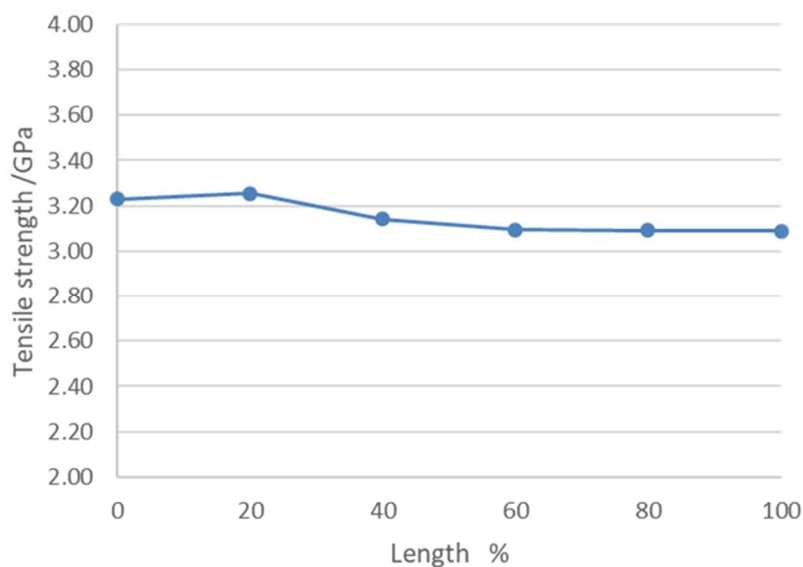


図4. 超高性能 SiC 繊維の強度(全長方向)

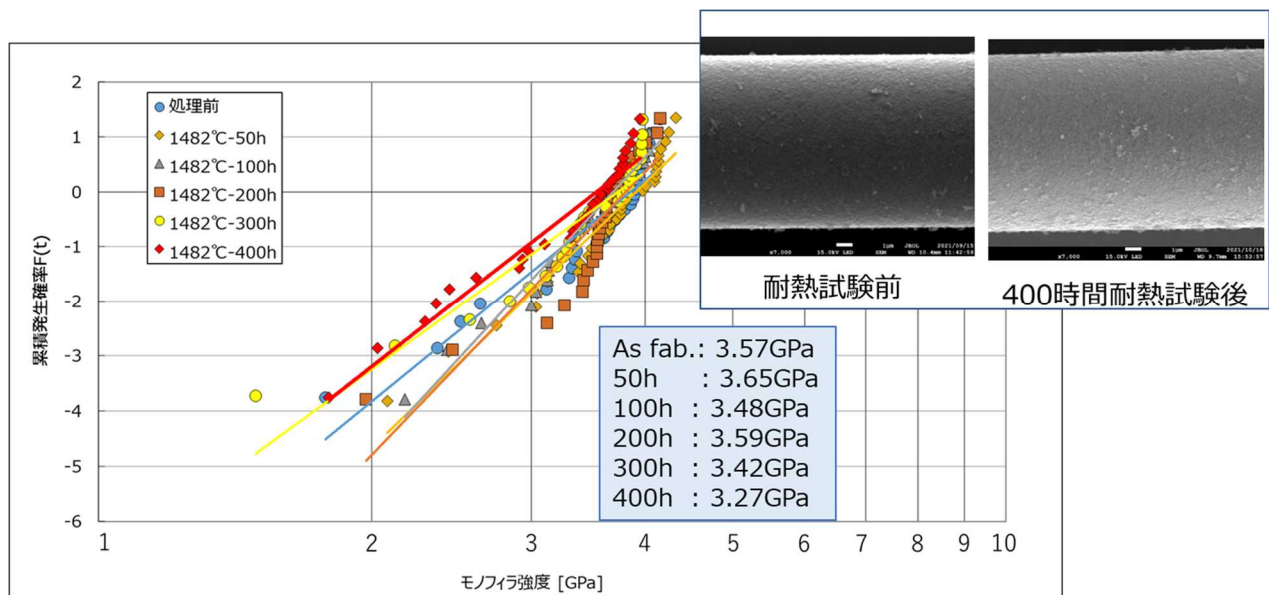


図5. 超高性能 SiC 繊維の耐熱試験結果 (Ar 中 1482°C)

目標2. 特性のばらつきを抑制するためには、繊維束を構成する単繊維一本一本の強度を安定化されること、糸切れのない高品質の繊維束を得ることが重要である。単繊維一本一本の強度を安定化させるためには、強度低下要因となる欠陥を制御することが必要である。欠陥としては、前駆体ポリマーに由来するもの、製造条件に由来するもの、環境に由来するものに大別でき、それぞれを厳密に制御することが必要不可欠である。

このような欠陥を低減するためには、優れた曳糸性と不融化性を両立する前駆体ポリマー品質を高精度で制御可能な合成技術の確立が必要であり、本研究開発では、優れた曳糸性と不融化性を両立するポリマーの分子量や分子構造を明らかにし、合成条件の最適化を行うとともに、新たに開発棟(図6参照)を建設し、図7に示すポリマー合成開発設備の設計・設置を行い、高精度反応制御技術の実証を行った。

さらに微細なゲル等の欠陥要因を除去しながら連続的に紡糸する技術を検討し、図8に示すパイロットスケールの紡糸開発設備の設計・設置を行い、技術実証を行った。

以上、ポリマー合成技術開発により、精密な分子量制御技術を確立するとともに、ミクロレベルの異物除去を可能とする紡糸技術を確立し、当初の目的通り強度の向上とばらつきの低減を確認できた。



図6. 開発棟外観



図7. ポリマー合成開発設備



図8. 紡糸開発設備

目標3. B インターフェース層を BN、マトリックスを SiC とし、インターフェース層、マトリックスともに同一の設備で形成可能な CVD 装置の設計・設置を行い、CMC ミニコンポジットの作製および評価を実施した。図9に作製した CMC ミニコンポジットの断面写真を示す。SiC 繊維表面に BN 薄膜が形成され、その外側に SiC マトリックスが形成されている。SiC 繊維表面に形成される BN 層の厚みは繊維束中心側が薄く、繊維束外周側が厚くなる傾向が認められた。CMC ミニコンポジットを引張試験した後の破面観察から SiC 繊維のプルアウトが確認され、CMC として比較的良好な破壊形態を示しているが、上記のように BN 層の膜厚を繊維束全体で均一化することによりさらに良好な CMC 特性が得られるものと思われる。

この CMC ミニコンポジットは 2 日程度で作製が可能となり、また、ミニコンポジットの室温及び高温引張試験方法、さらに高温クリープ試験方法を確立することができた。今後、SiC 繊維の開発を効率的に実施することが可能となり、研究開発のスピードアップが期待される。

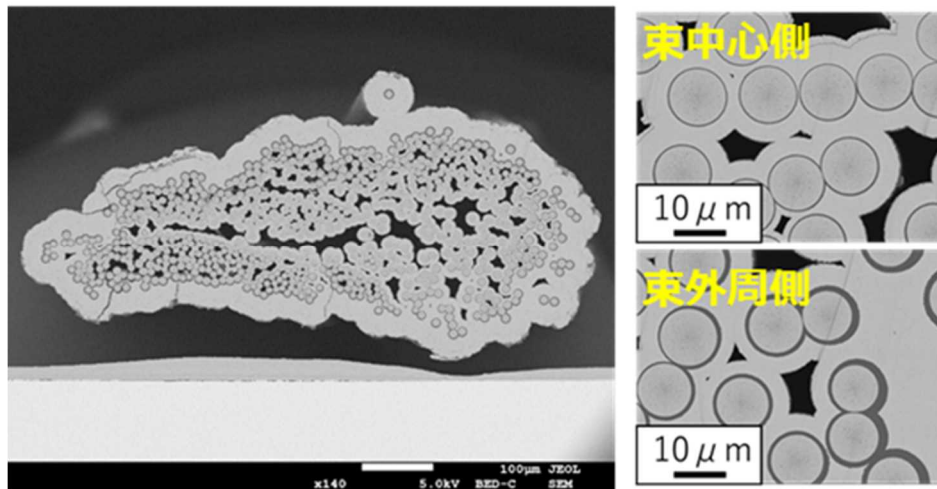


図9. CMC ミニコンポジットの断面

5. 成果の意義

高温クリープ特性に優れる SiC 繊維の開発に成功し、ポリマー合成技術および紡糸技術を確立することで品質的に問題となる特性のばらつき低減ができた。この繊維は、Super Sylramic-iBN を上回る高い耐クリープ特性および 1482°C (2700°F) 以上での耐熱性も強度低下がほぼ見られないため、次世代の 1482°C (2700°F) 級の CMC 材料用の繊維として、用いられる可能性が高い。現在、航空機エンジン用の CMC 材料は 1315°C (2400°F) 級のため、航空機エンジンでの更なる CMC 材料の適用範囲が広がることが期待される。

6. 実用化への道筋と課題

本事業で確立した技術を用い開発した SiC 繊維を、顧客でのサンプル供給・評価を実施していく。また、本事業で開発した SiC 繊維の材料認定が得られる高水準の工程まで改善を進めていく。航空機エンジンでの実用化画に応じ、量産体制の検討も進めていく。

別添 2

研究開発項目⑤(1)

1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発

株式会社 IHI

研究開発項目⑤ 1400℃級CMC材料の実用化研究開発

1. 実施者名、実施体制

株式会社 IHI
シキボウ株式会社
一般財団法人ファインセラミックスセンター
国立研究開発法人物質・材料研究機構



2. 期間、予算

期間 2020年8月26日から2023年3月31日

予算 455, 231, 000円

3. アウトプット(最終)目標

マトリックス、製織の方法、耐環境性コーティングの最適化を実施して、CMASの存在する環境下で、室温引張強度300MPa以上、1400℃×400時間曝露後、強度低下20%以下を満足するCMC部材を開発する。

4. 成果の達成状況と根拠

成果の達成状況

製織仕様の見直しおよびマトリックス含浸条件の改善・最適化により材料中の欠陥を大幅に低減した。耐環境コーティングについては従来材に比べて飛躍的に耐CMAS性が向上する新組成を見出した。これらを組み合わせて材料を評価した結果、CMAS存在下の室温強度:494MPa, CMAS暴露1400℃×400時間後の強度低下:17% となり、目標達成を確認した。

また、当該CMCにて高圧タービンシュラウドを製作し、JAXA F7エンジンに搭載して、エンジン試験実証も完了させた。

その他の開発項目とあわせて表1に成果の達成状況を示す。

根拠

別紙1 参照のこと。(非公開)

表 1 成果の達成状況まとめ

開発項目	担当	目標値	達成状況
材料開発	IHI	1400℃級 CMC 材料および EBC について材料試験を行い、CMAS の存在する環境下で、室温引張強度 300MPa 以上、1400℃×400 時間曝露後、強度低下 20% 以下となることを確認する。	達成
		高温ガス流試験を実施し、エンジン運転環境に近い条件での耐久性の確認を行う。	達成
		1400℃×400 時間 CMAS 耐食試験後の EBC の組織評価を行う。	達成
	JFCC	CMAS 耐食試験を行った EBC に対し、ミクロ組織観察や分析等を行い、耐 CMAS 性のある EBC 候補材に対して優劣の評価を行う。	達成
	NIMS	開発した耐 CMAS 性を有する EBC 候補材につき、確定したプロセスで CMC 上に EBC を施工完了する。また、施工した EBC が健全であることを確認する。	達成
エンジン 実証試験	IHI	実際の航空エンジンに CMC タービンシュラウドを組み込み、エンジン搭載試験を行う。エンジン試験完了後に各種検査を行い、損傷の有無等を確認する。	達成

5. 成果の意義

CMC の高温特性をジェットエンジンに組み込むことで燃費の改善が見込まれることから多くの国で開発が行われている。米国では特に GE 社が積極的な開発を行い、Boeing 737MAX や Airbus A320neo に搭載される Leap エンジンの 1300℃級 CMC 製のタービンシュラウドの量産に世界で初めて成功している。また、米国大手エンジンメーカーの Pratt & Whitney 社は 2010 年代前半に CMC 開発が減速したが 2017 年頃から再開し、2019 年に米国カリフォルニアに新たな CMC 研究拠点を開設し、次世代のエンジンに CMC 部品を適用することを目標として開発を進めている。英国の Rolls & Royce 社は Trent1000 エンジンを使い CMC タービンシュラウドを試験し、更に米国の CMC R&D 拠点に 30 億円を追加投資して開発を加速している。現在開発中の UltraFan Engine で CMC 部品を適用すると発表している。

中国においては、「中国製造 2025」で、「高推力重量比での高バイパス比ターボファンエンジンなどの技術でのブレークスルーを実現」として、国家レベルで研究開発を鋭意推進していると推察される。2018 年に中国航空发动机集团有限公司(AECC; Aero Engine Corporation of China)が、B787 クラスの機体としてロシアと共同開発している旅客機 CR929 型機搭載エンジン AEF3500 のタービンシュラウドに CMC 部品を適用すると発表している。同じく ASC2018 において、江苏大路航空产业发展有限公司は CMC 部材を展示し自国製で量産中と説明している。同社の HP では、1300℃クラスの耐熱性を有し、エンジン高温部の部品と紹介している。

このように世界中で 1300℃級の CMC の開発が進められているなか、本研究開発において 1400℃級 CMC にてタービンシュラウドの試作を行い、エンジン試験まで成功裏に完了したこと(図1)、および 1400℃級 CMC 用の耐環境コーティング(EBC:Environmental Barrier Coating)を開発した成果は、世界の先頭を走るものである。この技術を社会実装することで世界中のジェットエンジンのさらなる燃費改善に寄与するとともに、ジェットエンジンの高度なサプライチェーンの中で替えのきかない重要な位置を占めることにつながる。

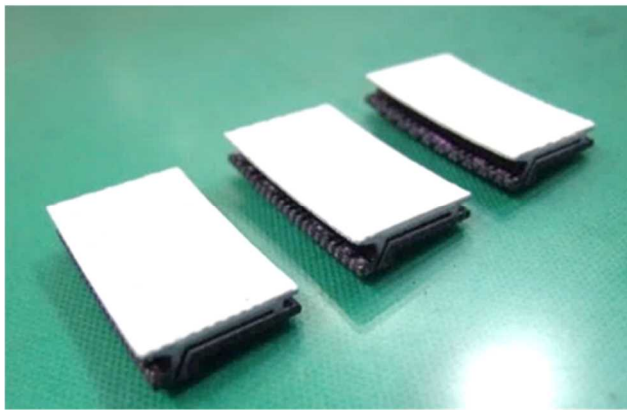


図 1 1400℃級 CMC タービンシュラウドとエンジン試験に供試した JAXA F7 エンジン

6. 実用化への道筋と課題

民間航空業界の次の大きな開発は 2030 年代半ばに商用運航開始が見込まれる次世代狭胴機であり、本研究開発の成果である 1400℃級 CMC はこの次世代狭胴機用の新型エンジンが第一の適用候補となる。狭胴機は月産 60 台以上の生産レートが求められ、搭載されるエンジンもハイレートでの生産が必要となることから、CMC を適用するにあたっては相応の生産性を確保することが求められる。1400℃級 CMC は図 2 に示すように、多くの工程をへて製造されるため、ボトルネックを作らないようすべての工程の生産性を向上させて、生産レート実現しつつコスト競争力を確保することが実用化への課題となる。

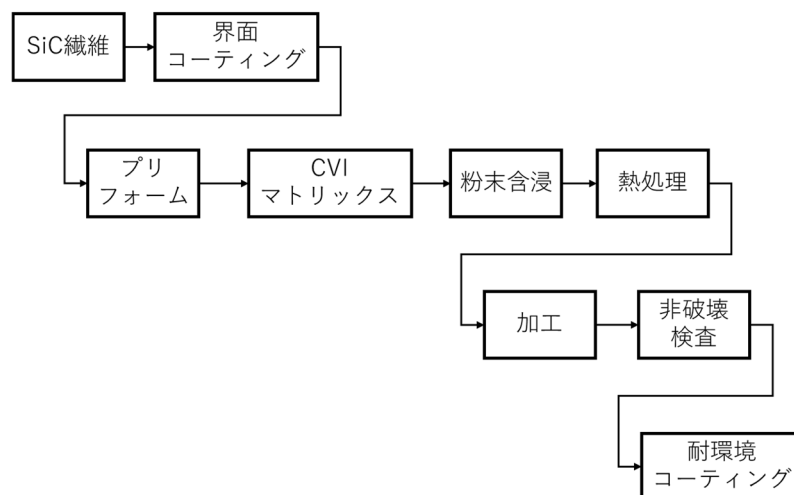


図 2 1400℃級 CMC の製造工程

この課題に対処するため、以下の4点の製造技術に特に注力して今後も引き続き開発を継続する。なお、各工程の生産性は前後工程の品質や要求とも密接に関係するため、CMC 製造工程全体を見渡しながら量産向けの材料・工程の仕様の最適化を進める。

- ・SiC 繊維への界面コーティング技術
- ・CMC の高速製造技術
- ・CMC の高速加工・検査技術
- ・低コスト耐環境コーティング施工技術

また、CMC 製造専用棟(図 3)の立ち上げと製造能力の増強を進め、材料と工程の認証を取得したうえで、コスト競争力の向上を図る。



図 3 CMC 製造専用棟(株式会社 IHI 横浜事業所内)

別添 3

研究開発項目⑤(1)

1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発

シキボウ株式会社

研究開発項目⑤：「1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発」

1. 実施者名、実施体制

シキボウ株式会社

2. 期間、予算

期間：2020年8月24日（交付決定日）～2023年2月28日

予算：197,756,000 円（補助率 1/2 以内 助成金額 98,878,000 円）

3. アウトプット（最終）目標

3.1 背景と目的

SiC 繊維は東北大で開発されて以来、長らく日本の2社（日本カーボン、およびUBE）しか製造できなかったが、日本カーボン社・GE社・SAFRAN社の3社による繊維の合弁会社（NGSアドバンストファイバー）が設立され、海外での生産が始まろうとしている。また CMC（セラミック基複合材料）は既に実用化・量産化が開始されており、金属から CMC 部品への大きな転換期を迎えており、日本としてもこの競争を勝ち抜くための最大限の努力が必要な時期となっている。

そこで本開発では、2015～2019 年度に実施された「次世代構造部材創製・加工技術開発」研究項目④-2 にて開発された 1400℃級の SiC 繊維を用いた CMC 部材の、航空機エンジンにおける実機適用に向けた技術開発を行った。

先の開発では、脆性で製織が難しい SiC 繊維、その中でも更に難易度が高い第3世代 SiC 繊維（焼結繊維）を用い、繊維体積率 30%以上の三次元プリフォームの製作を可能とした。

本開発では、高圧タービンシュラウド等具体的な CMC 部材を想定し、高性能 SiC 繊維を用いたニアネットシェイプ（最終製品に近い形状）での三次元プリフォーム製作を目指す。ニアネットシェイプでの三次元プリフォームを実現する事により以下の効果が期待される。（図1参照）

- ・形状に合わせた繊維配列が可能

例えば平板形状から加工を行う場合に比べ、機械的特性に優れた部品製作が可能となる。

- ・使用する高性能 SiC 繊維のロス削減

最終形状に近い形状の為、加工によるロス削減、また高性能 SiC 繊維の使用量が必要最低限となる。

- ・CMC 工程の短縮

必要最低限の体積となる為、CMC 化にかかる時間が減少する。

- ・機械加工工程の短縮

最終形状に近い形状の為、機械加工にかかる時間が減少する。

その為 CMC 材料の実用化・市場参入において、性能面でもコスト面でも優位になり、市場で活躍できると考えられる。

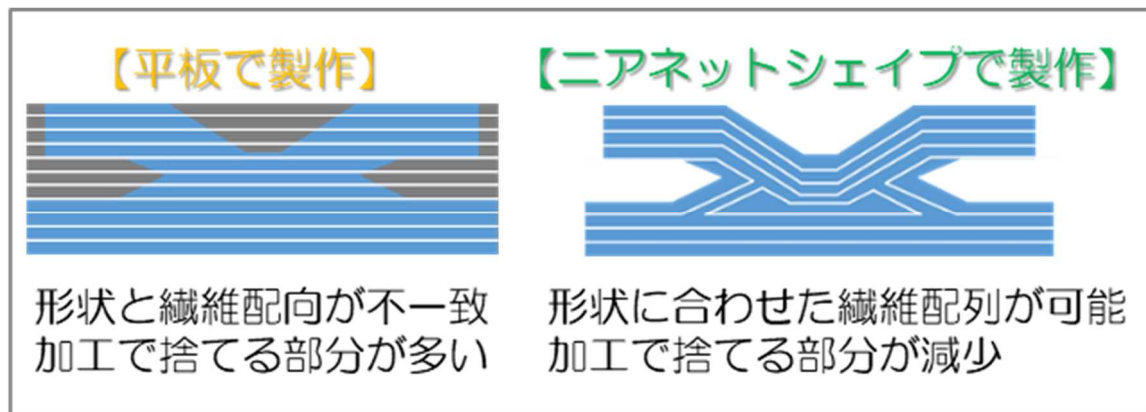


図1 平板形状/ニアネットシェイプの繊維配向

3.2 目標

具体的な形状を想定したニアネットシェイプでの三次元プリフォーム製法確立と、プリフォーム製造装置の開発を行う。また中間目標として、ニアネットシェイプでの生産を考慮したサイジング剤の開発および施工プロセスの開発・繊維配列方法・配列装置の設計開発を設定し、それぞれ必要な要素技術について開発を進める。

3.3 全体計画

表1に本研究開発事業の全体計画について示す。事業項目としてはサイジングに関わる開発と基材に関わる開発の大きく2項目の構成として研究開発を進めることとした。

3.4 実施体制

図2に本研究の実施体制を示す。

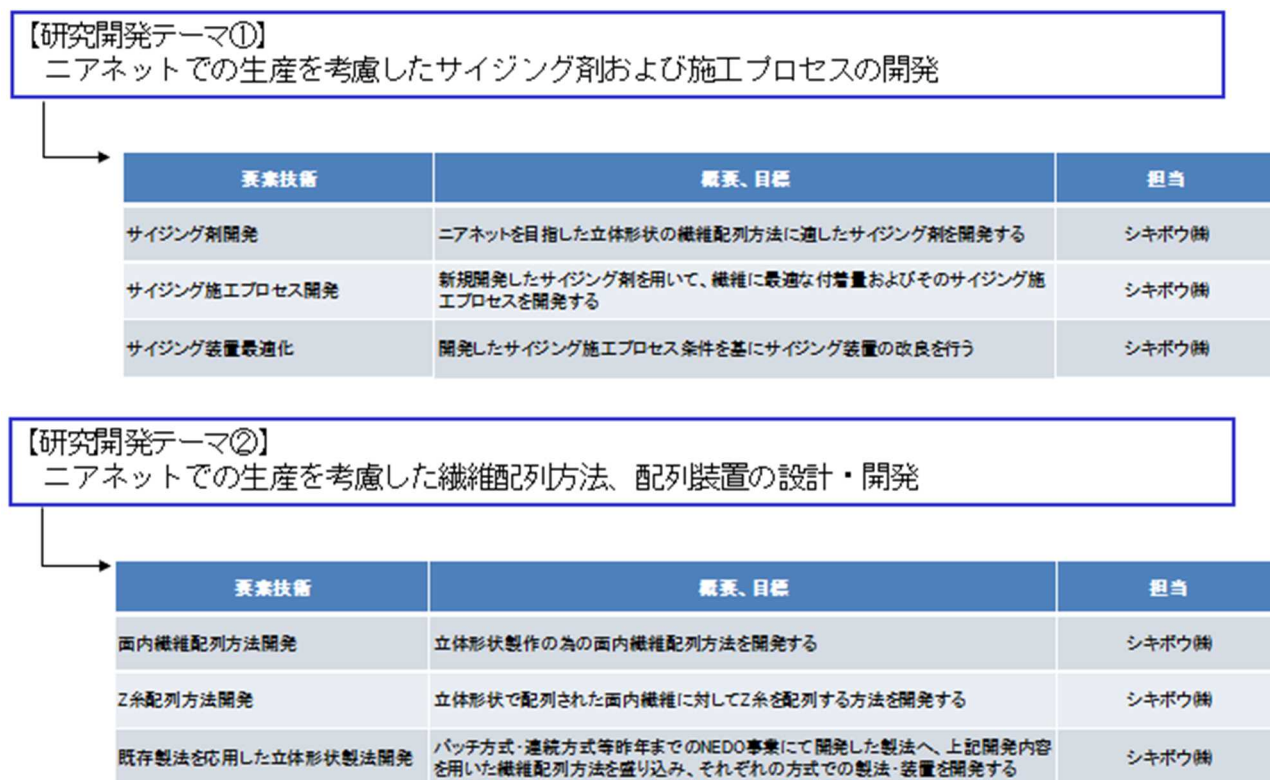


図2 実施体制

4. 成果の達成状況と根拠

4.1 研究開発成果

4.1.1 ニアネットでの生産を考慮したサイジング剤および施工プロセスの開発

サイジングとは繊維をコーティングして毛羽立ちや繊維切れを防ぐ工程を指す。図3-1、2にサイジング工程のイメージを示す。基本的には原糸を開発されたサイジング液に浸漬し、乾燥炉内で乾燥後巻き取る方式とした。SiC 繊維は非常に脆性的（折れやすい）な特性を示すため、プリフォーム製作時の繊維～治具間や繊維間の擦れ、摩擦による切断などの不具合を低減可能な専用サイジング剤の開発を行った。その結果、摩耗特性を向上するサイジング剤の開発に成功した。また繊維配列方法の一環として、繊維の剛直性を持たせるためのコーティング剤・専用コーティング引取装置の開発を行った。

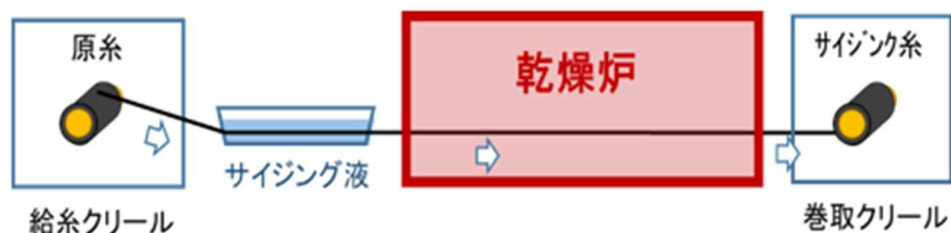


図3-1 サイジング工程イメージ図

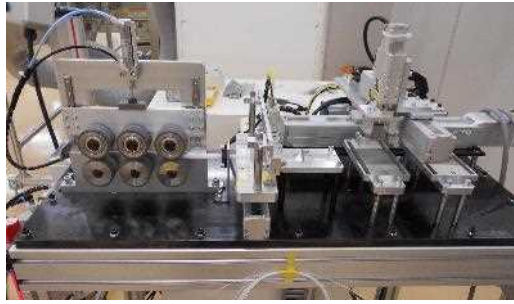


図 3-2 コーティング剤専用繊維コーティング引取装置

4.1.2 ニアネットでの生産を考慮した繊維配列方法、配列装置の設計・開発

ニアネットシェイプでの三次元プリフォーム製法について検討を行った結果を記す。SiC 繊維の脆性をサイジング剤で補いながら最適条件を探し出すための試験を繰り返すことで、ニアネットシェイプで連続的に三次元プリフォームを製造可能な装置を開発、試作に成功した。あわせて、SiC 繊維の特性にバラつきがある事を考慮し繊維状態によらない三次元プリフォームの製法を検討、剛直性を持たせた繊維を用いる事で繊維の特性バラつきに影響を受けない三次元プリフォーム製法を開発、試作と装置開発に成功した。図 4-1 に連続的に三次元プリフォームを製造可能な装置における引き取り部の外観を示す。図 4-2 にニアネットシェイプ三次元プリフォームの外観を示す。また、図 4-3 に繊維状態に影響されない製法による三次元プリフォーム試作品の外観を示す。

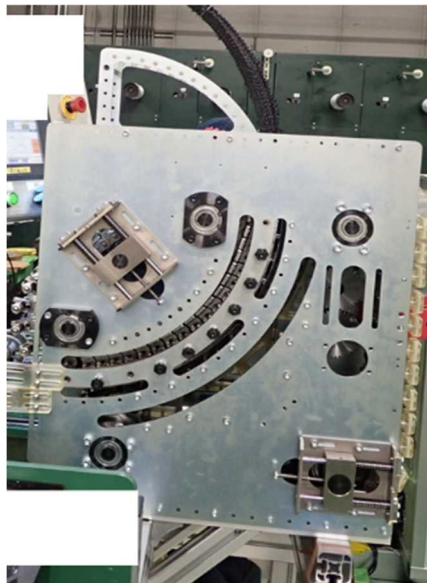


図 4-1 三次元プリフォーム製造装置（ニアネットシェイプ形状での引取部）



図 4-2 目標形状を模擬したニアネットシェイプでの SiC 繊維三次元プリフォーム試作品



図 4－3 繊維状態によらないニアネットシェイプでの三次元プリフォーム試作品

4.2 成果の達成状況と根拠

【成果の達成状況：○】

高性能 SiC 繊維を用いたニアネットシェイプでの三次元プリフォームについて、製法開発・自動化装置の製作を実施し、目標形状・Vf（体積当たりの繊維含有率）にてプリフォーム製作に成功、繊維配向も設計どおりとなっている事を確認した。過去の NEDO 事業（委託）にて、同じく高性能 SiC 繊維を用いた Vf30%以上の平板形状三次元プリフォーム製法の開発に成功していたが、今回ニアネットシェイプでの三次元プリフォームについても同等 Vf を達成した。

5. 成果の意義

5.1 成果の意義

現時点において、高性能 SiC 繊維を用いたニアネットシェイプでの三次元プリフォームを製造できるのはシキボウのみである。3.1 項でも触れているが、ニアネットシェイプでの三次元プリフォームは、一般的な二次元積層品に比べて性能面でもコスト面でも優位となる。

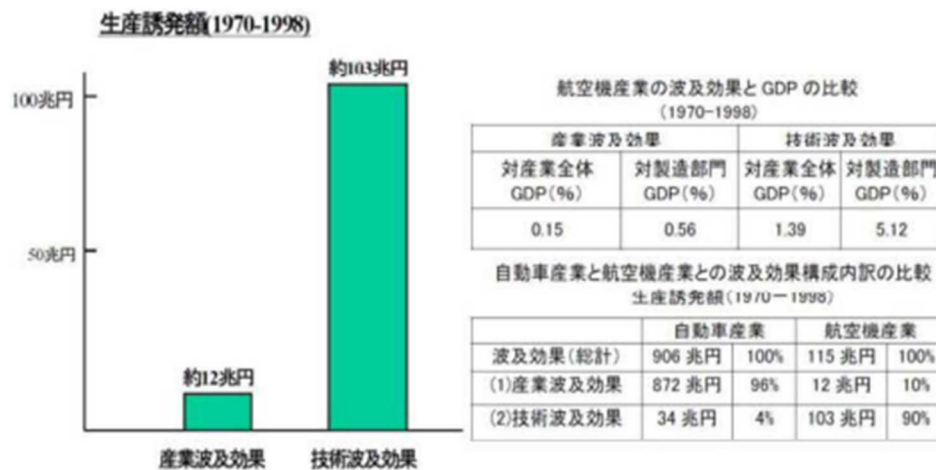
5.2 事業による効果

CMC 部品の実用化により、従来のニッケル部品より冷却空気を削減でき、熱効率向上および軽量化による燃料削減、CO₂排出量の削減が可能になる。CMC タービンシュラウドを航空エンジンに搭載した場合、金属製部品を搭載したエンジンと比較し、燃料削減効果は 0.5%程度と推定される。

CMC 部品の実用化により、従来は欧米のエンジンメーカーが独占していた高圧タービンへの参入が可能となり、シェア拡大による売上増加および雇用の増加に繋がる。また国内の繊維・織物産業への経済的波及効果も期待できる。

また、日本航空宇宙工業会（SJAC）の 1970 年から 1998 年の期間における調査によれば、航空産業の産業波及効果（航空機産業の技術が航空機産業そのものへ及ぼす効果）は約 12 兆円であり、その技術波及効果（航空機産業の技術が他の産業にも影響を及ぼす効果）に至っては約 103 兆円にも広がるものであることが明らかにされている。航空産業の他産業への経済波及効果として約 10 倍の経済的波及効果が見込まれる。（図 5 参照）

さらに、高圧タービンシュラウド実用化後、高圧タービン静翼、動翼へと適用部位を拡大することにより、さらなる燃料消費削減および CO₂排出量削減効果（シュラウド、静翼、動翼合わせて 3～4%）が期待でき、売上、雇用、技術波及効果のさらなる拡大が期待できる。



(日本航空宇宙工業会、「2000 年度 産業関連費を利用した航空機関連技術の波及効果
定量化に関する調査」)

図 5 航空関連技術の波及効果資料

6. 実用化への道筋と課題

6.1 実用化への道筋

6.1.1 IHI 様で予定しているエンジン開発プログラムへの協力

具体的にはシュラウド・ノズル・フラップ・静翼・動翼などの部材（今回はシュラウドがターゲット）について、設備開発、量産準備を行い実用化を目指す。図 6 に 2035 年から新型エンジンが商用運行された場合の部品開発スケジュールを示す。

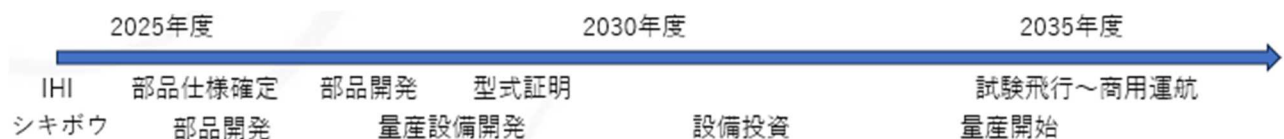


図 6 2035 年から新型エンジンが商用運航される場合のスケジュール

6.1.2 SiC 繊維製織技術の展開

本開発で培ったニアネットシェイプでの三次元プリフォーム製法技術を、航空機、自動車（ブレーキディスク）・原子力（被覆管）など、SiC 繊維を用いた CMC 部材のニーズがある分野や、複合材に複雑な形状が求められる分野へ技術展開を行えるよう、展示会や HP などを活用しマッチング先を探す。図 7 にニアネットシェイプでの三次元プリフォームの技術展開として作製したブレーキディスク形状模擬品の外観写真を示す。



図7 ニアネットシェイプでの三次元プリフォーム製法技術を応用して製作した
ブレーキディスク形状模擬品

6.2 課題

エンジン開発については IHI 様や最終顧客のスケジュールに依存する形となること、現状ではシキボウ単体で CMC 化を行うことができず、あくまでプリフォームの提供のみとなってしまうことから、プリフォームの量産準備を除けばシキボウが自社で CMC 部材実用化について具体的な動きをとることができないなどが課題と考える。

以上

別添 4

研究開発項目⑤(2)

1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発

三菱重工航空エンジン株式会社

研究開発項目⑤(2)：「MI法による1400℃級CMC材料の実用化研究開発」

1. 実施者名, 実施体制

実施者: 三菱重工航空エンジン株式会社

委託先: 京セラ株式会社, 学校法人片柳学園東京工科大学

2. 期間, 予算

期間: 2021 年 7 月 16 日～2023 年 3 月 31 日

予算: 182,491,500 円

3. アウトプット(最終)目標

本研究で, SiC 繊維を保護する界面コーティング, 設計自由度が広い UD(一方向繊維配向)シートを用いた積層構成および生産性の高い MI 法による CMC 技術が開発できれば, 海外 OEM が求める低コストで量産性の高い CMC 製造技術を確保できる。

開発する CMC 材料の目標値は, 室温引張強度 300MPa 以上, 室温弾性率 200GPa 以上, 部材適用時の弾性率低下が 30%以下とする。

CMC 部材適用が予想される次期エンジンは, 2030 年以降に商用運転が開始されることが計画されており, 助成期間終了後 5 年間は材料技術開発フェーズから製品開発フェーズに移行して, 材料設計データ取得を実施する。2030 年度までは製品開発と部品認証を実施するための投資期間であり, 生産・販売に伴う事業化は 2031 年度以降になると予想される。

4. 成果の達成状況と根拠

○: 達成(見込み)

航空エンジンタービン部材に CMC を適用することで, その適用部品の耐熱温度を上げ, 冷却空気流量を削減することにより, エンジン熱効率が向上し, 燃費改善と CO₂ 排出量削減が期待できる。CMC の部品適用のためには, 生産に見合った材料コスト, 量産性, 品質を満足する生産技術の開発及び設計に必要な部品変形量の抑制・管理が不可欠であり, 製造性を考慮した新規界面コーティングの開発や積層構成やマトリックス形成の最適化が必要である。

1400℃級 CMC 材の実用化のために, 生産性が高く, かつ緻密なマトリックスが得られ, UD 積層構造と新規界面コーティングが持つポテンシャルを最大限に発揮できる MI 法を適用した CMC 開発を実施してきているが, 強度に加えて, 荷重負荷による変形量を実用レベルに抑制する必要がある。荷重負荷による変形量は弾性率の逆数と荷重の積であり, CMC 部材の弾性率は使用時に主に繊維/マトリックス間の反応・劣化により低下する。従って, 変形量抑制には使用環境での弾性率低下を最小にすることが必要となる。

本研究では, 生産性の高い MI 法において, 新規界面コーティングの開発と UD 積層構造・マトリックス形成の最適化を行った。開発した CMC の技術レベルと目標達成度を評価するため, 新規界面コーティングの開発と複雑な部品形状に対応して設計自由度が高い UD 積層構成と緻密マトリックスの開発を実施した。開発する CMC 材料の目標値は, 室温引張強度 300MPa 以上, 室温弾性率 200GPa 以上, 1400℃×400Hr 暴露後の室温での弾性率低下が製造後の 30%以内とした。

(1)UD 積層成形技術の開発

プリプレグ積層成形後の粗大ボイドは MI 法マトリックス成形時のボイドや余剰 Si の原因となるため、プリプレグ組成に合わせた硬化条件の設定が必要である。そのため、材料の熱分析に基づいた AC(オートクレーブ)成形による、粗大ボイドを削減する成形方法の目途付けを行った。

プリプレグ作製方法ごとに成形プロセスでは、脱気法の適正化、加熱・加圧によるボイド発生抑制、硬化反応の制御により成形・硬化条件を検討し、粗大ボイド低減の目途付けができた。図 1-1 にプレス成形からオートクレーブ(AC)成形へ変更し、プリプレグ作製時のボイドを低減した事例を示す。

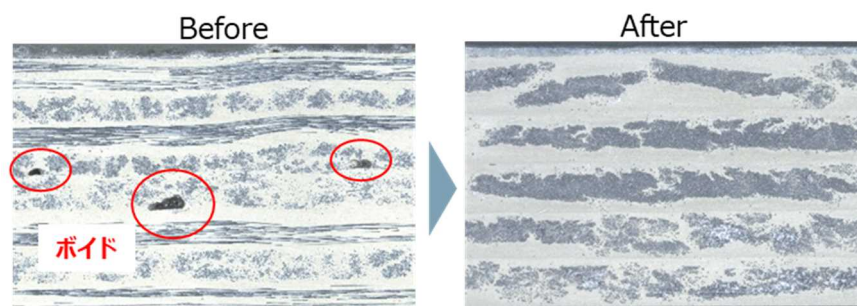


図 1-1 プリプレグ積層成形後の断面観察におけるボイド低減事例

東京工科大学製界面コーティング SiC 繊維と京セラ製プリプレグを用いて、AC 成形を実施した。図 1-2 に示すように断面観察の結果、繊維開繊は良好で、粗大ボイドがないプリプレグ積層成形体を作製する条件を設定した。



AC成形品の外観



界面コーティング繊維を用いたAC成形品の断面

図 1-2 プリプレグ積層成形体外観と断面マイクロ写真

(2)MI 法による緻密マトリックスの開発

緻密なマトリックスを持つ CMC 材料を得るために、出発点であるプリプレグ組成の適切な条件設定が必要である。本研究開発では、界面コーティングされた繊維にスラリーを含浸し、シート状のプリプレグシートを積層する方法で、成形体を作製後、脱脂条件最適化を検討する必要がある。空孔条件及び C 充填量は複合化時の組織状態(余剰 Si, ボイド, 未反応 C)に大きく影響する。そのため、脱脂体に C を後添加することで空孔条件及び C 充填量を調整し特性制御する必要がある。

プリフォーム作製時の炭化处理条件の適正化やプリプレグ材料の炭素量、空孔条件の最適化を実施した。図 2-1 に Si 含浸に適したプリフォーム形成するための条件として、余剰 Si 率とボイド率をパラメーターを設定した。

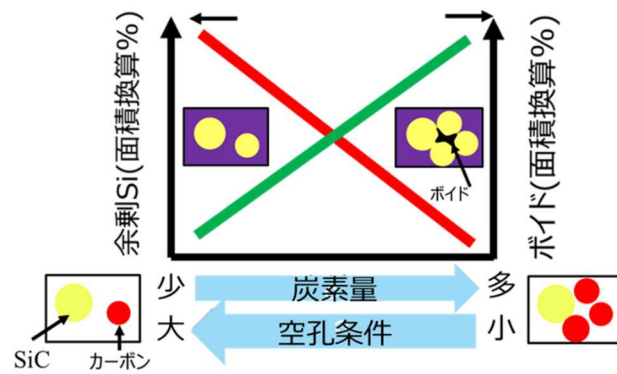


図 2-1 Si 含浸に適したプリフォーム形成するため検討方法

CMC の製造プロセスの中で、熔融 Si をプリフォーム体中含浸し、プリフォーム体中の炭素との反応を利用して CMC を作製する MI (Melt Infiltration) 法では、図 2-2 に示す複合化のメカニズムに基づき、ポイド 10vol% 以下、余剰 Si 15vol% 以下の目標値を達成するためのプリフォーム体中の炭素量を最適値を調査した。図 2-3 に示すシート成形機を設置し、図 2-4 はシート作製機の使用状況と作製したシートを示している。作製機を使用することで、繊維配列のバラつき抑制とシート厚みの調整が可能であることを確認した。

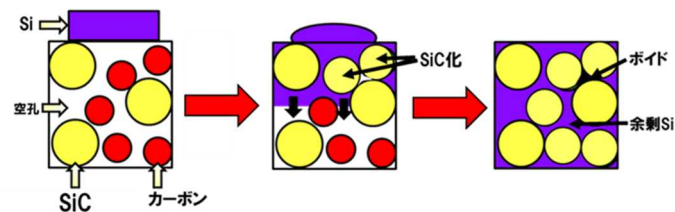


図 2-2 プリフォーム体への Si 含浸と SiC マトリックス形成の概要図

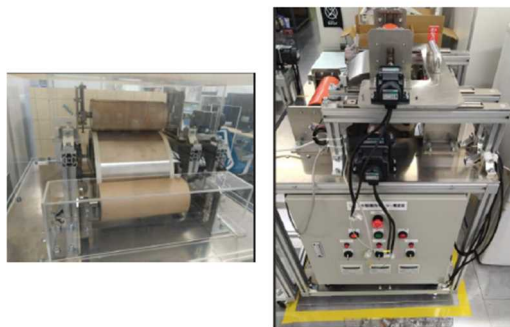


図 2-3 シート成形機の外観写真

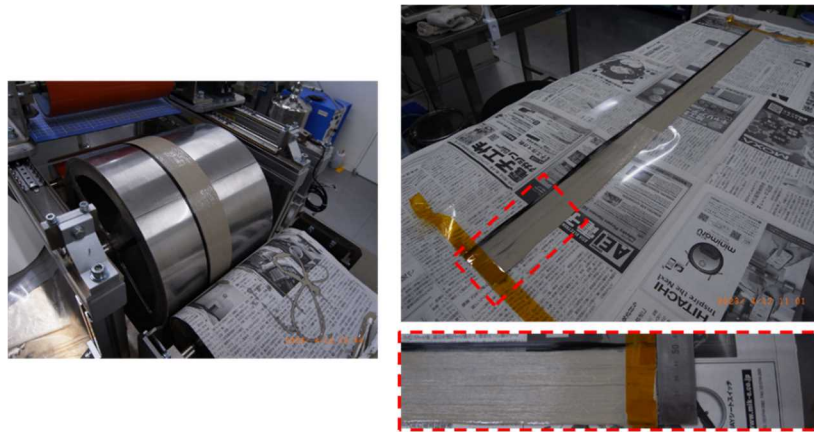


図 2-4 シート成形機の概略図

次に、図 2-2 で示したプリフォーム体への Si 含浸と SiC マトリックス形成条件について、マトリックス単体での余剰 Si とボイドの残存割合を調整し、ボイド 10vol%以下、余剰 Si 15vol%以下の目標値を達成するための遊離炭素量と細孔径分布の条件を調査した結果と CMC マトリックス調整確認結果を図 2-5 に示す。

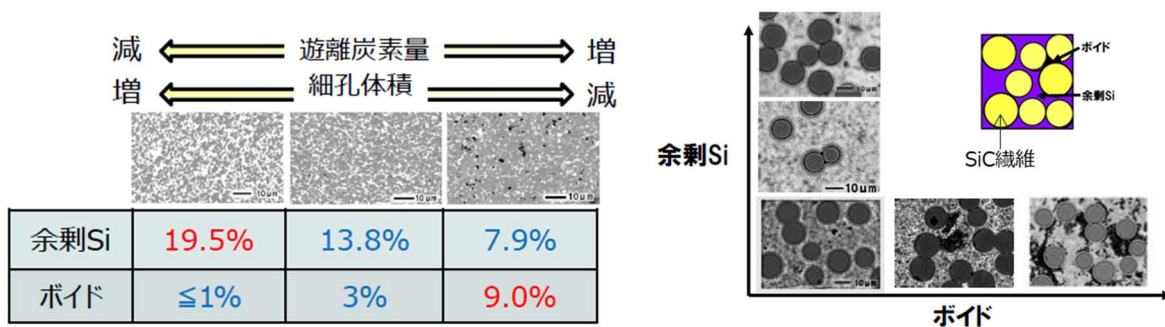


図 2-5 余剰 Si やボイドの増減と遊離炭素・細孔径分布の関係性調査結果

プリフォーム体へ Si 含浸した CMC 試験片を強度確認するために、図 2-6 に示す引張試験機を京セラ株式会社を設置した。図 2-7 は試験の様子を示している。作製した CMC サンプルの歪み、応力を測定し、応力・歪曲線及び弾性率の算出を行った。



- 引張試験機概要
- ・最大負荷容量：50kN、試験力精度1級保証範囲（ロードセル定格容量の1/1000～1/1）
 - ・標準機長、標準幅、飛散防止カバー付
 - ・キット構成：本体フレーム、ロードセルセット、上部継手、下部接手

図 2-6 引張試験機の概略図

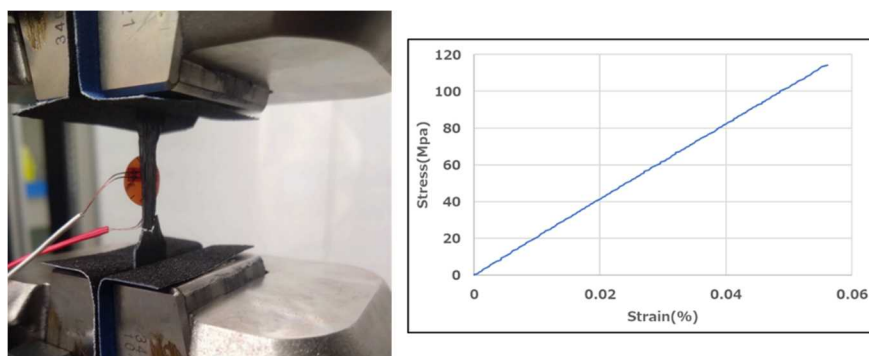


図 2-7 引張試験の様子

(3)新規界面コーティングの開発

(3-1)材料設計・装置製造

従来, SiC 系繊維に BN 被覆する方法としては, ハロゲン化ホウ素とアンモニアを原料とした熱 CVD 法が多く採用されている。しかしながら, CVD 処理による, SiC 系繊維の大きな強度低下が課題となっている。本開発では, 繊維の強度低下が小さく, 1000℃以下の比較的低温で結晶性 BN 被覆が期待できることから, 前駆体を原料とした熱 CVD 法を検討した。

本開発では, BN コーティング層の前駆体を検討するため, B-N 結合から構成され炭素を含有しないアンモニア系ボラジンを出発物質として利用し, その熱分解ガスとして発生するボラジンを経由して CVD 原料とする方法を採用した。図 3-1 に新規界面コーティングの特徴を, 図 3-2 にコーティングの X 線回折パターンと SEM 観察写真を示す。アンモニア系ボラジンを原料にした BN コーティングは膜厚 300nm 以上が得られ, 組織制御した結晶性 BN が得られていることを確認した。

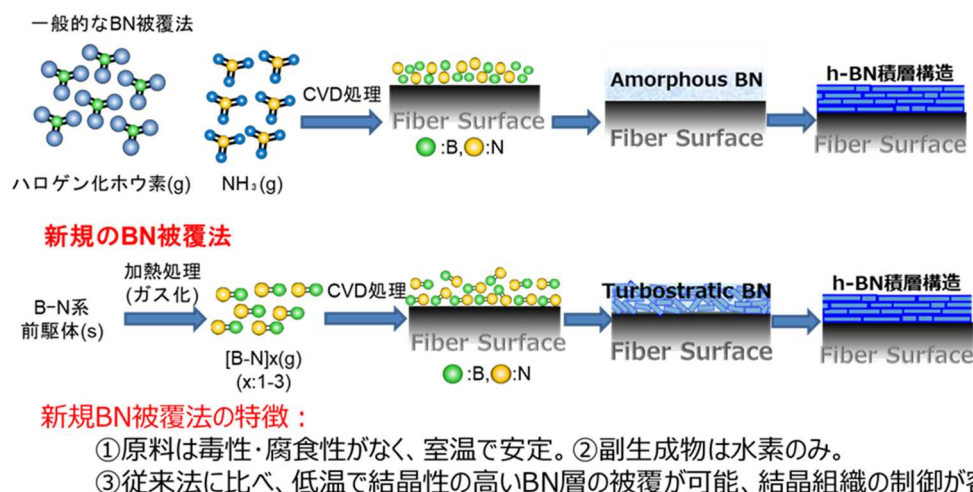
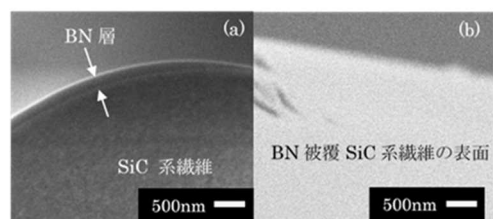
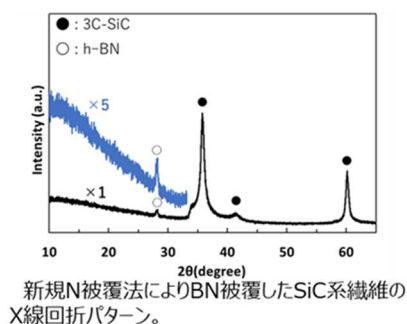


図 3-1 新規界面コーティングの特徴



新規N被覆法によりBN被覆したSiC系繊維のSEM観察結果。
(a)断面写真、(b)表面写真

図 3-2 コーティングの X 線回折パターンと SEM 写真

BN 被覆繊維の長尺化, 処理量増加のためには, ある程度大きな CVD 処理装置が必要となる。本研究開発では, バッチ式 CVD 炉に BN 系前駆体の加熱分解ガスを供給する装置を接続した界面コーティング試験装置を検討し, 新規界面コーティングを開発する東京工科大学に装置を設置した。その設備本体の概略図を図 3-3(1)に, 外観写真を図 3-3(2)に示す。

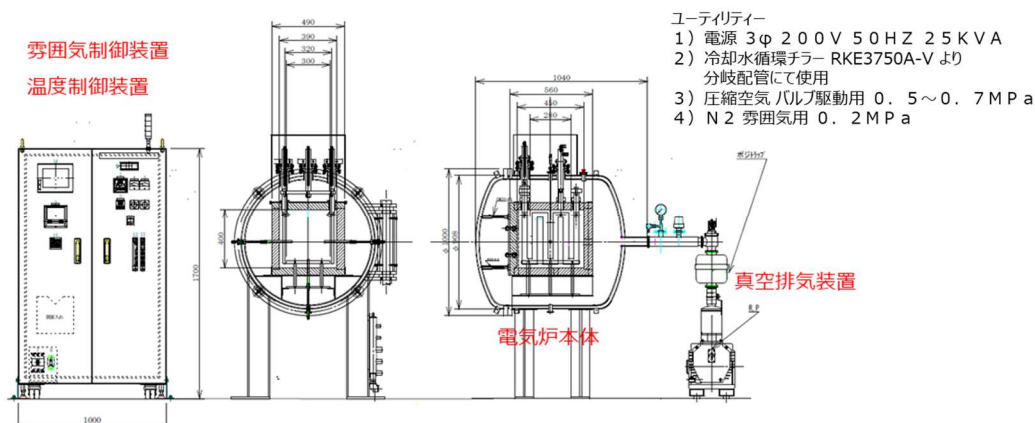


図 3-3(1) 界面コーティング試験装置・本体設備の概略図

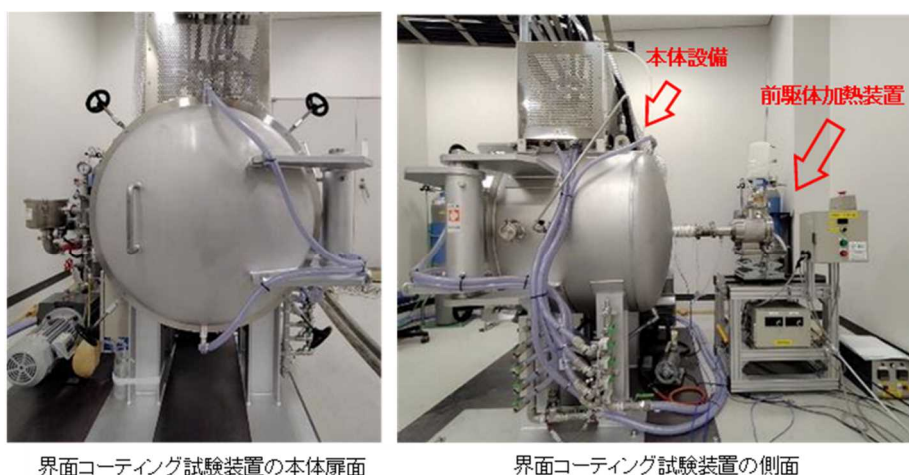


図 3-3(2) 界面コーティング試験装置の組み立て設置後の外観写真

(3-2)新規界面コーティングの開発

アンモニア系ボラジンを原料にした熱 CVD 処理して得られた BN 被覆 SiC 系繊維(ハイニカロン・タイプ S)について、JIS 規格 R1657「長繊維強化セラミックス複合材料の強化材特性試験方法」に準じて単繊維引張試験を実施した。引張強度を計算する場合、被覆層の厚さは無視した。CVD 処理前の SiC 系繊維の引張強度が約 3.7GPa であったのに対して、BN 被覆 SiC 系繊維の引張強度は約 3.2GPa で強度保持率は 86.5%であった。また、CVD 処理を複数回繰り返した場合、明確な強度低下が確認できるのは初回の CVD 処理の場合のみで、2 回目以降の CVD 処理では強度低下は認められなかった。CVD 処理による強度劣化は無視できるレベルではないため、被覆繊維の強度改善に向けて CVD 処理条件を検討した。

500℃設定で CVD 処理した場合に得られた BN 被覆ハイニカロン・タイプ S について引張強度を評価するため、上記と同様に単繊維引張試験を実施した。未処理のハイニカロン・タイプ S の平均引張強度が約 3.7GPa であるのに対して、アンモニアボラン系前駆体を原料として 500℃設定の CVD 処理(その後に 1000~1100℃でアニール)により BN 被覆したハイニカロン・タイプ S の平均引張強度は 3.7~3.8GPa となり、引張強度の変化は誤差範囲内であると思われる。このように、アンモニアボラン系前駆体を原料に 550℃以下での CVD 処理を利用して BN 被覆した場合、被覆処理による繊維強度の低下を防止できることがわかった。

RMI 法(溶融 Si 含浸法)により SiC/SiC 複合材料を製造するには、SiC 系繊維およびその繊維表面の BN 被覆層を、溶融 Si の腐食から保護するため、BN 被覆層の更に表面に保護層を形成させる必要がある。C 被覆を目的とした CVD 処理は、市販の処理業者が多く存在する。そこで本研究開発における SiC 系保護層の被覆処理は、本研究開発で得られた BN 被覆ハイニカロン・タイプ S に、熱 CVD 処理により厚さ 1.5~4.0 μm の SiC を被覆した。得られた BN/SiC 2層コート SiC 系繊維を、RMI 法による複合化プロセスに提供した。図 3-4 に SiC 保護層を被覆した後の BN/SiC 2層コート ハイニカロン・タイプ S の外観と SEM 観察写真を示す。

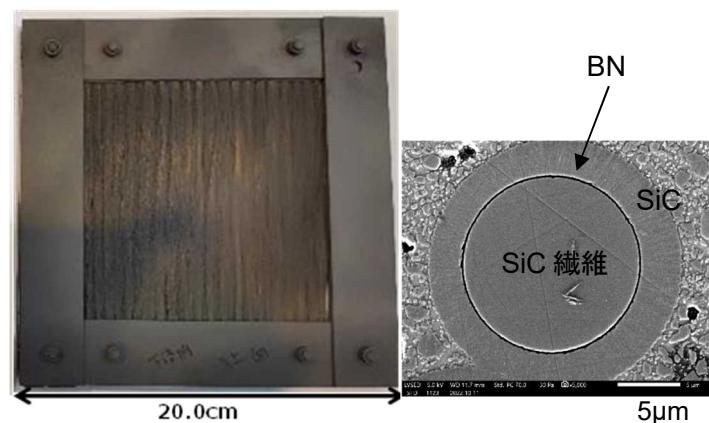


図 3-4 SiC 保護層を被覆した後の BN/SiC 2層コート SiC 繊維の外観と断面 SEM 写真

(4) CMC 特性評価

(1)~(3)項で実施した本研究開発の要素技術を組込んだ CMC 特性評価を実施した。CMC は、SiC 繊維にハイニカロン・タイプ S を用いて、界面コーティングを被覆した SiC 繊維と Si 含浸マトリックスを組み合わせた CMC 試験片であり、室温引張強度 300MPa 以上、室温弾性率 200GPa 以上を目標とした。

試験片加工は ASTM C1275 の形状を参考に実施したが、厚みに 1.5–3.0mm のばらつきがあった。引張試験も同様に ASTM C1275 に従い、伸び計 GL:12mm, 歪みゲージ GL:2mm, ストローク速度 0.3mm/min で実施した。

図 4-1 に室温引張試験の応力・歪曲線を示す。破断応力は 303MPa で、弾性率は 294GPa であり、目標値に到達していることが確認できた。一方で、歪が 0.1%程度であり、複合材特有の非線形挙動が発現していないことから、マトリックス破断と同時に繊維破断に至っていることがわかった。図 4-2 は引張試験後の CMC 破断面の SEM 写真である。マトリックスに粗大ポイドは認められず、緻密マトリックスが形成されていることが確認できたが、SiC 繊維の引抜け長さは短く、界面滑りがほとんど生じていなかったことがわかった。このときの繊維体積分含有率(Vf)は 5vol.%程度と低くなっており、マトリックスクラック発生から CMC 破断に至るまでに、SiC 繊維への荷重分担が不十分であった可能性がある。これは、SiC 繊維近傍の元素分析から BN 層に C や O の元素拡散が認められており、Si 含浸時に BN 層に組織変化が起こっている可能性がある。

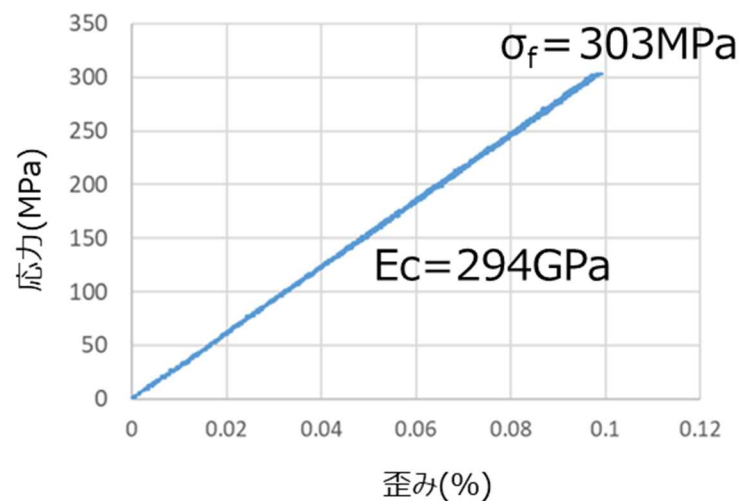


図 4-1 CMC の応力-歪曲線図

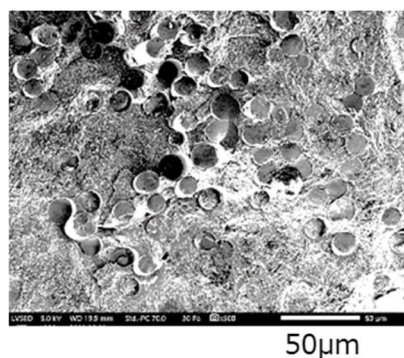


図 4-2 引張試験後の CMC 破断面 SEM 写真

大気暴露後に室温で引張特性(強さ, 弾性率)を評価し、大気暴露後の室温での弾性率低下を評価した。最終目標評価は、大気中 1400℃で 400 時間暴露後に室温で弾性率を測定し、製造後の弾性率と比較評価することであり、室温での弾性率低下は製造後の 30%以内を目標とした。

CMC 試験片は 1400℃に設定したマッフル炉(カンタルスーパー発熱体)で 400 時間の暴露を行い、CMC 組織変化を確認した。図 4-3 に CMC 作製後、200 時間暴露後、400 時間暴露後の断面 SEM 写真(反射電子像)を示す。大気暴露によるマトリックスの組織形態に大きな変化は認められないが、400 時間暴露後の写真(c)では界面コーティングの膜厚が薄い SiC 繊維が劣化している様子(赤矢印)が確認された。

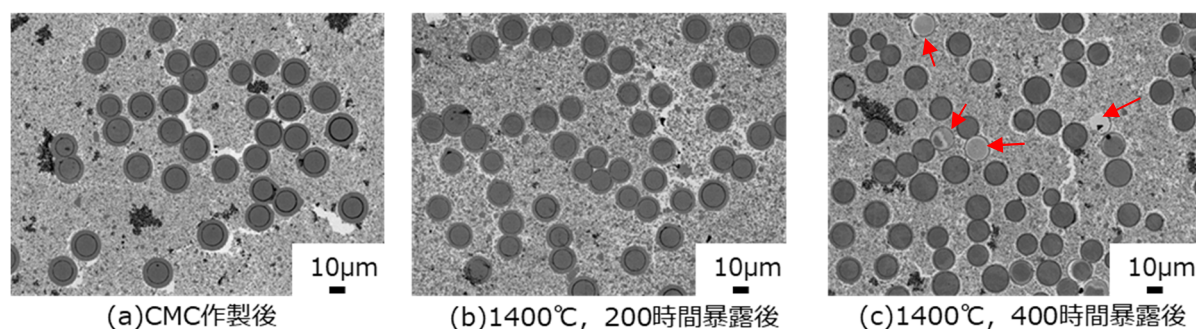


図 4-3 CMC 大気暴露試験における断面 SEM 写真(反射電子像)

次に 1400℃で 400 時間の大気暴露後に室温で引張特性(強さ, 弾性率)を評価した結果を表 4-1 に示す。ここで、本研究での開発 CMC は、(3)項の新規界面コーティングの SiC 繊維(Hi-Nicalon Type-S)を使用して(1)および(2)項の緻密マトリックスを適用した材料である。また、CMC の Vf を向上させるために外注加工で従来 BN と SiC または Si-N 系の保護層を適用した界面コーティングの SiC 繊維(Hi-Nicalon Type-S)を使用して(1)および(2)項の緻密マトリックスを適用して Vf 10~14vol.%の材料を作製して開発 CMC の比較材として評価した。表 4-1 に大気暴露後の引張特性を示す。開発 CMC (Vf 5vol.%)では弾性率は 260GPa を超えて緻密マトリックスによる高い耐酸化性を示したが、引張強さは 100MPa 程度で繊維劣化の影響が大きかった。Vf を向上させた比較材では、1400℃で 400 時間の大気暴露後でも引張強さ 269MPa で、弾性率 260GPa であり、Vf 向上および界面コーティング保護層の改良が暴露後の力学特性改善に効果があると考えられる。

大気中 1400℃で 400 時間暴露後に室温で弾性率を測定し、製造後の弾性率との変化率を評価した結果を表 4-2 に示す。上記と同様に開発 CMC と比較材を用いて大気暴露前後での弾性率を比較したものであり、大気暴露後の弾性率低下は 10%以内で目標達成できていることを確認した。一方、引張試験の応力・歪曲線では、非線形領域が発現しない脆性的な破壊を呈しており、界面コーティング保護層改善、繊維量増加(Vf 向上)高緻密成形法の見直しが必要であることがわかった。

表 4-1 大気暴露(1400℃, 400h)後の引張特性(室温)結果

試験片		強さ(MPa)	弾性率(GPa)
NEDO 開発材 → 比較材 →	開発BN + SiC Si含浸(Vf 5%)	103	266
	従来BN + SiC Si含浸(Vf 10~12%)	176	290
	従来BN + Si ₃ N ₄ Si含浸(Vf 14%)	269	260

表 4-2 大気暴露(1400℃, 400h)前後での弾性率比較

	試験片	引張試験	弾性率(GPa)	暴露前後の 変化率
NEDO 開発材	開発BN + SiC Si含浸(Vf 5%)	製造後	289	8%
		1400℃, 400h 大気暴露後	266	
比較材	従来BN + SiC Si含浸(Vf 10~12%)	製造後	266	10%
		1400℃, 400h 大気暴露後	240	
	従来BN + Si ₃ N ₄ Si含浸(Vf 14%)	製造後	264	2%
		1400℃, 400h 大気暴露後	260	

本研究開発で、550℃以下での CVD 処理を利用して BN 被覆した場合、被覆処理による繊維強度の低下を防止することがわかった。また、粗大ボイドがないプリプレグ積層成形体を作製する条件を設定し、プリフォーム体の遊離炭素量と細孔径分布の条件を調整した結果、Si 含浸による MI 緻密マトリックスは、ボイド 10vol%以下、余剰 Si 15vol%以下の目標値を達成することができた。

開発した界面コーティング繊維と Si 含浸マトリックスを組み合わせた CMC 特性は、破断応力は 303MPa で、弾性率は 294GPa で、エンジン部材の CMC に必要となる室温引張強度 300MPa 以上、室温弾性率 200GPa 以上の強度特性が得られた。

また、CMC 部材の実用化のためには、強度に加えて、荷重負荷による変形量を実用レベルに抑制する必要がある。荷重負荷による変形量は弾性率の逆数と荷重の積であり、CMC 部材の弾性率は使用時に主に繊維/マトリックス間の反応・劣化により低下する。したがって、変形量抑制には使用環境での弾性率低下を最小にすることが必要となる。本研究開発では、1400℃×400Hr 暴露後の室温での弾性率低下が製造後の 30%以内の CMC 部材成立許容値に対して、大気暴露後の弾性率低下は 10%以内で目標達成できた。一方で、開発した CMC をエンジン部材に適用させるためには、非線形領域が発現しない脆性的な破壊を改善するために界面コーティング保護層改良、繊維量増加(Vf 向上)および高緻密成形法の見直しが必要である。

航空機用ガスタービンエンジン部品としての実機適用に当たっては、コスト・生産性が重要視される。本提案では、界面コーティングを施した SiC 繊維を UD シート化してロール状に保管することが可能なプリプレグ積層と生産性の高い MI 法によるマトリックス形成技術を適用することにより、将来の製造自動化を可能にする CMC 製造プロセスを選定した。現時点では SiC 繊維、界面コーティング施工、UD シート作製、MI 法によるマトリックス形成のプロセスは試験片毎に調達・発注しているが、プロセス自体は自動化可能な手法であり、自動化要素技術開発と設備開発を経て量産目途付けすることにより、既存の金属材料と比較してコスト競争力を有する CMC 部材開発が可能であると考えている。

また、実用的なレベルの特性を満足した CMC を国内の大学や国研に供給できることは国内全体の研究レベルを向上させて、国際的な共同研究に発展させるためには大きな役割を果たすことが期待できる。

5. 成果の意義

CMC 部材の繊維/マトリックス間の反応・劣化を防止するために、新規の界面コーティング開発を行い、複雑な部品形状に対応するために、設計自由度が高い UD 積層構成とマトリックス形成の最適化することにより、1400℃級 CMC 材の実用化のために、生産性が高く、かつ緻密なマトリックスが得ら

れ、UD 積層構造と新規界面コーティングが持つポテンシャルを最大限に発揮できる MI 法による CMC を開発することができる。

CMC の製造プロセスの中で、熔融 Si をプリフォーム体中含浸し、プリフォーム体中の炭素との反応を利用して CMC を作製する MI (Melt Infiltration) 法は、製造時に SiC 繊維が劣化するような高温になるために、SiC 繊維を保護するために含浸前に SiC 繊維表面に BN や SiC を CVD (化学的気相成長) 法でコーティングする技術が必要になっている。この MI 法は、大量生産に向いている技術であり、繊維の劣化を防止し、しかも、実用的な複合材部材としての積層・成形方法を確立できれば、極めて有効な工業技術になりうるものである。

航空機用ガスタービンエンジン部品としての実機適用に当たっては、コスト・生産性が重要視される。本提案では、界面コーティングを施した SiC 繊維を UD シート化してロール状に保管することが可能なプリプレグ積層と生産性の高い MI 法によるマトリックス形成技術を適用することにより、将来の製造自動化を可能にする CMC 製造プロセスを選定した。現時点では SiC 繊維、界面コーティング施工、UD シート作製、MI 法によるマトリックス形成のプロセスは試験片毎に調達・発注しているが、プロセス自体は自動化可能な手法であり、自動化要素技術開発と設備開発を経て量産目途付けすることにより、既存の金属材料と比較してコスト競争力を有する CMC 部材開発が可能であると考えている。

また、実用的なレベルの特性を満足した CMC を国内の大学や国研に供給できることは国内全体の研究レベルを向上させて、国際的な共同研究に発展させるためには大きな役割を果たすことが期待できる。

6. 実用化への道筋と課題

CMC 部材適用が予想される次期エンジンは、2030 年以降に商用運転が開始されることが計画されており、本研究開発で対象とした 1400℃級 CMC のエンジン燃焼器や高温高圧部品への適用は、2035 年以降に設定されている。

次期段階研究終了後 5 年間は材料技術開発フェーズから製品開発フェーズに移行して量産製造技術・設備の整備を実施する。2028 年度から 2029 年度で強度検証やリグテストなどの環境評価を実施するとともに、材料設計データ取得を実施する。2030 年度から 2032 年度はエンジン試験や製造認証に着手して事業化の具体的構想を設定する。2035 年度までは製品開発と部品認証を実施するための投資期間であり、生産・販売に伴う収益発生は 2036 年度以降になると予想される。

本研究開発では、1400℃×400Hr 暴露後の室温での弾性率低下が製造後の 30%以内の CMC 部材成立許容値に対して、大気暴露後の弾性率低下は 10%以内で目標達成できた。一方で、開発した CMC をエンジン部材に適用させるためには、非線形領域が発現しない脆性的な破壊を改善するために界面コーティング保護層改良、繊維量増加 (Vf 向上) および高緻密成形法の見直しが必要である。

航空機用ガスタービンエンジン部品としての実機適用に当たっては、コスト・生産性が重要視される。本提案では、界面コーティングを施した SiC 繊維を UD シート化してロール状に保管することが可能なプリプレグ積層と生産性の高い MI 法によるマトリックス形成技術を適用することにより、将来の製造自動化を可能にする CMC 製造プロセスを選定した。現時点では SiC 繊維、界面コーティング施工、UD シート作製、MI 法によるマトリックス形成のプロセスは試験片毎に調達・発注しているが、プロセス自体は自動化可能な手法であり、自動化要素技術開発と設備開発を経て量産目途付けすることにより、既存の金属材料と比較してコスト競争力を有する CMC 部材開発が可能であると考えている。

別添 5

研究開発項目⑥

高レート・低コスト生産可能な CMC 材料および
プロセス開発

川崎重工業株式会社

研究開発項目⑥：「高レート・低コスト生産可能なCMC材料およびプロセス開発」

1. 実施者名、実施体制

川崎重工業株式会社が実施者として、事業を遂行する。本事業は、CMC 材料の製造プロセスの高レート・低コスト化開発が目的であり、CMC 製造プロセスであるセラミックス繊維プリフォームや繊維界面形成、マトリックス形成に関して、技術や知見を持つ、株式会社豊田自動織機およびイビデン株式会社に開発委託を行った。また CMC の評価や CMC の効果的な使用方法の開発に対して、技術や知見を持つ、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構および国立大学法人東北大学と共同研究を行った。

実施体制を図1に示す。

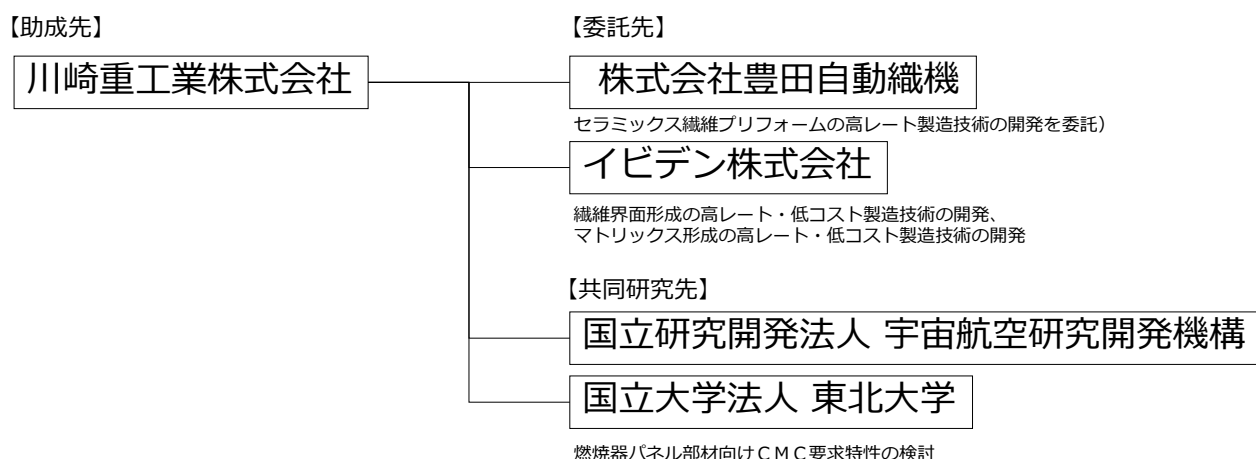


図1 実施体制

2. 期間、予算

本事業の実施期間を下記に、また各年度の予算を表1に示す。

期間：2020 年度～2023 年度

表1 各年度の予算

区分	2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度	計
助成事業に要する経費(円)	290,344,197	210,666,799	460,928,473	349,614,420	1,311,553,889
助成金交付申請額(円)	145,172,000	105,333,000	230,464,000	174,807,000	655,776,000

3. アウトプット(最終)目標

製織工程の高速化、CVI工程、PIP工程の短時間化を達成して、耐熱温度1400℃のCMC部材について、現行と比較して生産レート10倍向上を可能とする材料及びプロセス技術を開発する。

4. 成果の達成状況と根拠

3 項で示したアウトプット目標を達成するために、下記の項目について開発を実施した。

- ① CMC用セラミックス繊維プリフォームの高レート製造技術
- ② CVI繊維界面コーティング形成の高レート・低コスト製造技術
- ③ マトリックス形成の高レート・低コスト製造技術
- ④ 燃焼器パネル部材向けCMC要求特性の検討

成果概要と達成度(見込み)を表 2 に示す。

表 2 成果概要と達成度(見込み)

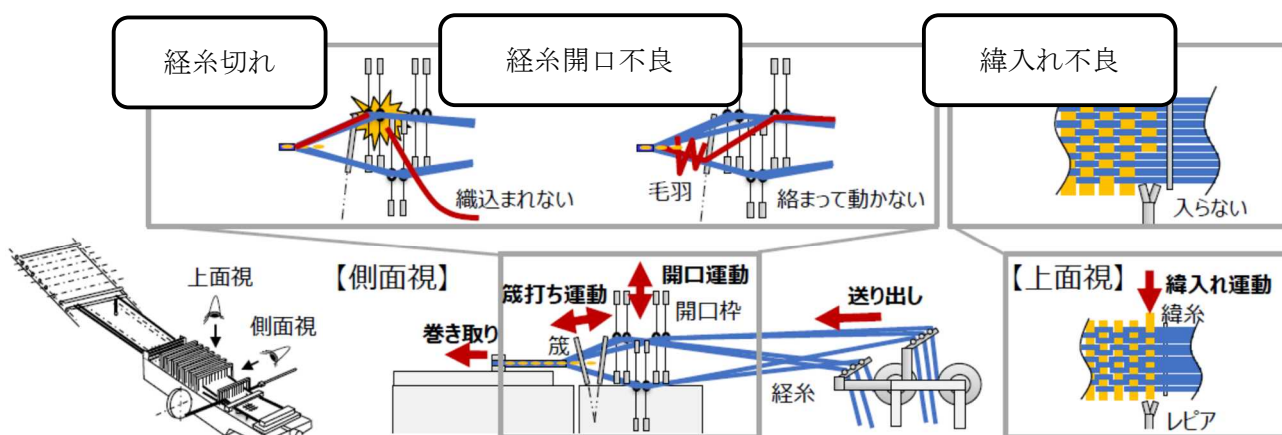
成果(実績)概要 (2023 年 12 月時点)	達成度 (見込み)
① CMC用セラミックス繊維プリフォームの高レート製造技術 製織異常監視の自動化の検討および製織装置へ組み込み、ならびに連続製織の実証・改良によるサイジング剤の評価および最適化を行った。	○
② CVI繊維界面コーティング形成の高レート・低コスト製造技術 副生成物の少ない新規原料の成膜条件を決め、製作した供試体の物性評価、および賦形型の小型化等によるプロセスの同時施工数の増加を実現した。	○ (見込み)
③ マトリックス形成の高レート・低コスト製造技術 焼成後の余剰樹脂除去作業の省力化、スラリー(材料)の高収率化による作業工数低減、スラリー歩留まり向上を行った。	○
④ 燃焼器パネル部材向けCMC要求特性の検討 CMC の使用状態を設定し、探索したプロセスウインドウ内の成膜条件で作製したCMCの試験結果と比較し、妥当性の確認を行った。	○ (見込み)

下記に各項目の成果の詳細を示す。

① CMC用セラミックス繊維プリフォームの高レート製造技術

(1) CMC用セラミックス繊維プリフォームの高レート製造技術

セラミックス繊維は脆く、折損しやすいため、製織工程の高レート化のためには、製織異常（糸切れ、開口不良等）（図①-(1)-1）の早期発見や製織異常発生抑制が不可欠である。また、折損しやすいセラミックス繊維を製織時には束ね、成膜時には短時間で除去できるようなサイジング剤による工程短縮化が不可欠である。そこで、自動化した製織異常監視システムを製織装置に織り込み連続製織の実証を行うとともに、製織異常の抑制と脱サイジング工程を短時間化できるサイジング剤仕様の選定（種類・塗布量など）を実施した。

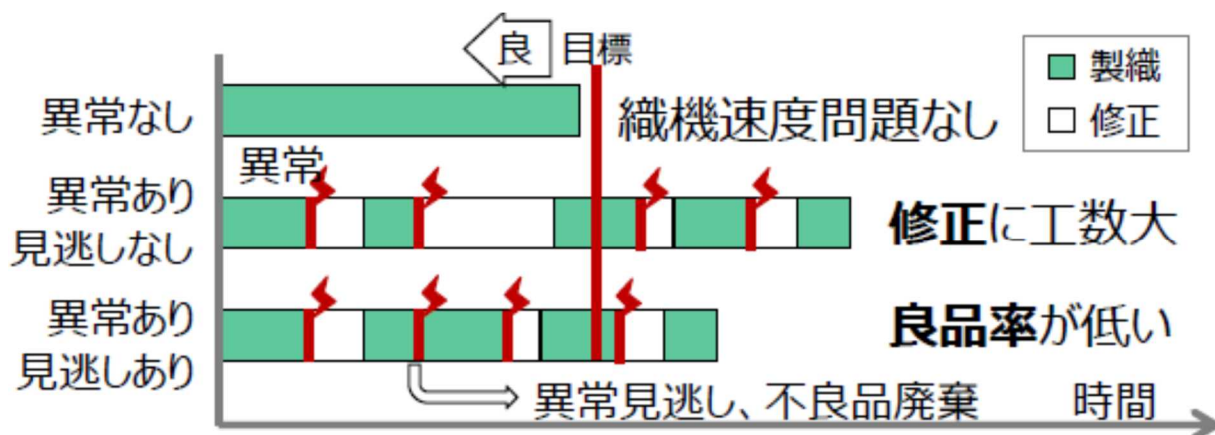


図①-(1)-1 主な製織時の異常

(2) 製織異常監視の自動化

製織異常の検出遅れによる修正作業時間の増長や検出漏れによる不良品製造が、製造レート向上に向けた大きな課題であった（図①-(2)-1）。しかし、従来の検出機構では接触式が多く、セラミックス繊維の折損を助長してしまう危険性が高いため異常監視を人の目に頼る点が多く、属人的になっていた。そこで、本開発では非接触の画像処理を活用した検出装置やロジックの適正化を行い、異常監視を自動化することで、課題の解決を図った。また、製織実証により、その効果の確認を行った。

本自動化により、製造レートの向上に加えて、製織監視人員の削減も可能となり、低コスト化にも大きな効果が認められた。



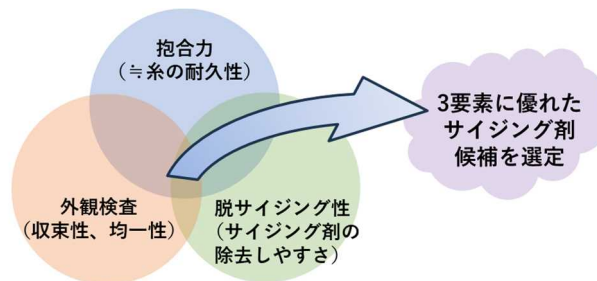
図①-(2)-1 製織異常監視の課題

(3) 脱サイジング工程の短時間化

折損しやすいセラミックス繊維の製織に使用されるサイジング剤には、

- (i) 繊維を束ねて製織性を向上させ製織異常発生を抑えること
- (ii) 後工程の繊維界面コーティング時に不純物を残さないこと
- (iii) 短時間で容易に除去できること

が求められる(図①-(3)-1)。



図①-(3)-1 サイジング剤への要求事項

従来のサイジング剤では、(iii)が達成できていないことが課題であった。具体的には、製織後に湯洗いを行っており、湯中の成分をサンプリングし、サイジング剤成分濃度が一定量以下になることを完了基準としていたが、パネルの大きさ次第で10時間近くかかることもあり、また完了基準から同時に多数のプリフォーム対象に作業を行うことが出来ず、作業中にプリフォームの織組織を損傷させることもあるなど大きな課題であった。

本開発では、後工程であるCVI工程において、高温熱処理されることを利用して、高温熱処理で除去できるサイジング剤候補から、上記(i)から(iii)を満たすものを選定し、脱サイジング工程にかかる時間を大幅に短縮することが出来た。

② CVI繊維界面コーティング形成の高レート・低コスト製造技術

(1) CVI繊維界面コーティング形成の高レート・低コスト製造技術

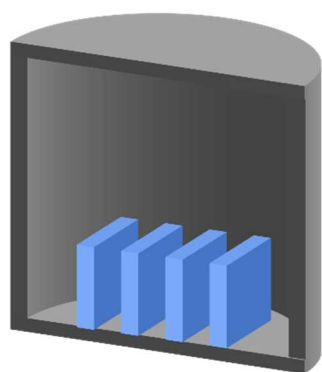
本項目では、高レート化に対して、バッチ処理である CVI 工程における CVI 炉への炉詰め数の増加を目的とし、賦形型の小型化や炉内分布の把握と配置の適正化および、CVI 炉のバッチごとのメンテナンス時間短縮を目的とした、副生成物への対策を実施した。また低コスト化に対しては、使い捨てであった CVI 賦形型の再利用を目的とした、賦形型の再生方法の開発を実施した。

(2) 賦形型の小型化や炉内分布の把握と配置の適正化

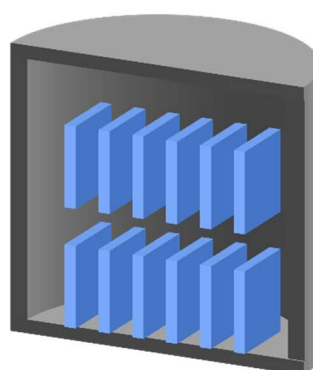
CVI 工程では、①専用の型に製織済みのサンプルをはさみこみ、②ガスを導入、③化学反応させることで、界面コーティングやマトリックスを形成する。このとき、プリフォーム賦形時の型内部のキャビティ形状に沿って CVI 後の形状が決まるが、CVI 時のガスの浸透性から、開口面積を大きく薄肉である方が CVI においては有利である。また、薄肉形状の型は、炉内の占有体積が小さくなり、炉詰め効率も優れる。一方、このような型では、プリフォームの反力によって大きく変形し、寸法精度の確保が難しい問題が発生する。本件では、許容できる製品の寸法公差から、型の変形許容量を決め、CVI 時の成膜性を考慮した上で、賦形型の検討を行うことで型を小型化し、炉詰め効率の向上を実現した。

また、炉内温度や原料ガスの分布の配置可能な領域を求め成膜可能領域を設定した。更にガス導入方法やサンプルの配置方法の変更によるガスの流れの最適化検討を実施し、実際の成膜試験を通して成膜可能範囲が拡大できていることを確認した。

これら 2 つの組みあわせにより、開発前の 3 倍以上の炉詰めが可能であることまで確認できており、今年度末までに 6 倍以上の炉詰め効率を達成できる見込みである。



(a) 改善前炉詰めイメージ



(b) 改善後炉詰めイメージ

型の小型化及び均一成膜エリアの拡大

図②-(2)-1 炉詰めイメージの比較

(3) 副生成物への対策(公開部)

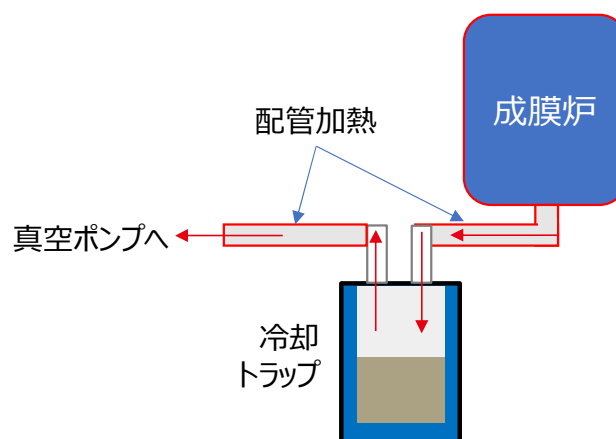
SiCl_4 , CH_3SiCl_3 等クロロシラン系の原料を用いた SiC 成膜プロセスでは、クロロシランポリマーと呼ばれる副生成物が排気系統配管に付着することが知られている⁽³⁾⁻¹。クロロシランポリマーは、可燃性ではあるが、爆発威力は小さい。一方、低低温での加水分解により生成していたクロロシランポリマー類の加水分解生成物の発火・爆発危険性は、クロロシランポリマー類と比較して、摩擦感度及び静電気火花感度は低い、熱感度や打撃感度が高く、爆発威力はきわめて大きいという性状を有する事が知られている。推奨される対策として、クロロシランポリマー類等が装置や配管に堆積しにくい設計とすることや、クロロシランポリマー類等が装置や配管に堆積する構造であっても、容易かつ安全に堆積物が除去できる設計とすることが推奨されている⁽³⁾⁻²。

本研究開発において、安全対策として環状ポリシラン系の新原料を選択する場合においては、クロロシランポリマー類は発生しない。よって、新原料使用が副生成物への対策となる。この場合、配管に堆積した副生成物除去工程が不要となり、省メンテナンスが達成され、これにより、CVI-SiC 成膜バッチ時間 3 割削減が可能となる。

一方で、従来原料である SiCl_4 を用いた成膜についても、バックアッププランとして検討を進めてきており、この中で安全対策についての検討を実施した。副生成物を配管に堆積させない・容易かつ安全に堆積物が除去できる排気系統仕様について検討を行い、排気系統について検討を行い、図②-(3)-1 に示す、加熱排気配管・冷却トラップから構成される排気系統仕様を見出した上で、ラボレベルでの実証試験、反応速度連成 CFD シミュレーションを行い、効果検証・定量化を試みた。

結果、ラボレベルの実証試験において、排気部を高温とした上で冷却トラップにて選択的に副生成物を析出・回収できること、冷却トラップ前後の排気配管に副生成物の析出が無いことを目視レベルで確認した。シミュレーション結果から、冷却トラップにおいて副生成物の 5 割程度が捕集され、残りは排気に含まれ系外に排出されるが、冷却トラップにおける凝縮により、下流配管表面に析出しないレベルまで排気ガス中の副生成物の分圧が下げられた結果、冷却トラップ後方で析出が抑制されているものと考えられる。

以上、CVI-SiC 成膜において、新原料・従来原料、それぞれについての副生成物対策について検討し、いずれの場合においても、少なくとも、副生成物を配管に堆積させない・容易かつ安全に堆積物が除去できる排気系統の仕様を実証・明確化でき、十分な成果が得られたと判断する。



図②-(3)-1 爆発性副生成物対策排気系統仕様

参考文献

(2)-1 三菱マテリアル株式会社四日市工場高純度多結晶シリコン製造施設における爆発火災事故調査委員会中間報告(2014 年 4 月 3 日)

(2)-2 平成26年6月26日 厚生労働省 基安発0626第2号

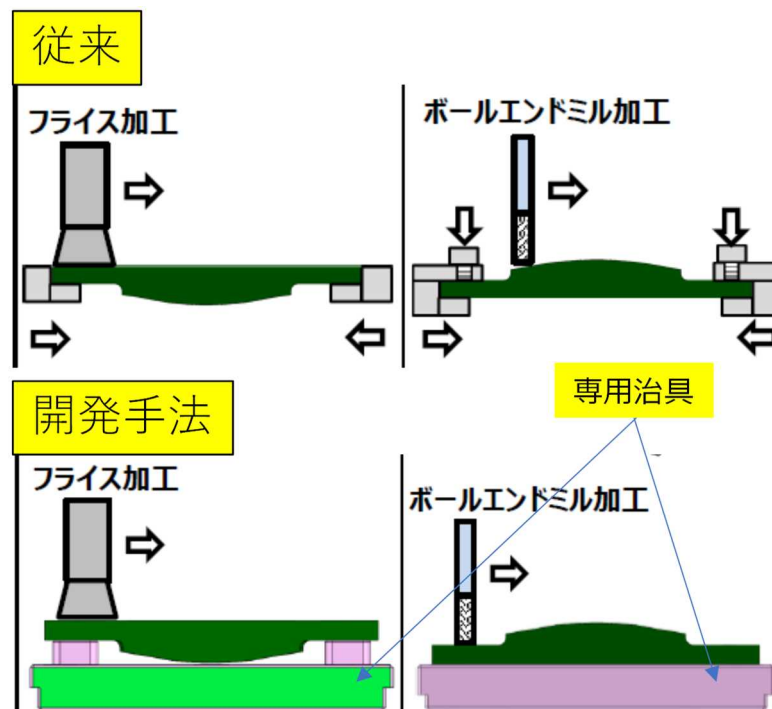
(4) 賦形型の再生方法の開発

CVI-SiC 成膜においてプリフォームを所定形状に格納する賦形型は、成膜時に数 μm 程度の SiC 膜が堆積すると考えられ、徐々に製造時の寸法からのズレが大きくなり、繰り返し利用が難しくなる。一方で、少ない回数での破棄、新作を繰り返すと、製造コストが大きくなる他、昨今、廃棄物発生を最小化するサーキュラーエコノミー化の流れとも逆行するため、賦形型を再生の上、繰り返し利用することが望ましい。

賦形型を再生する手法として、様々な対策を検討の上、形成された CVI-SiC 層を物理的に除去し、製造寸法に戻す手法について選定の上、技術開発を行った。具体的には、CVI-SiC 層を機械加工により除去するが、数十 μm 程度の層を除去する精密性が要求されるのに加え、形成された SiC 層の影響で、加工の基準を取る事が難しいことが課題であった。例えば、通常行われるような、治具をクランプ固定し、面出しのためのフライス加工・形状出しのためのエンドミル加工を行うと、クランプ固定時の傾き(基準面精度ズレ及び固定方法に起因)の影響を受けるほか、加工速度についても制限され、要求寸法に対し、0.2mm 程度ズレが発生することを確認している。

本開発では、図②-(4)-1 の通り、まず、固定方法に着目し、クランプ固定から、締結固定へ変更すべく、基準面側加工用・製品面側加工用の専用治具をそれぞれ開発した。それに合わせて、加工条件の見直しも行い、再生加工を実施した結果、最大での要求寸法とのズレにおいて、 -0.02mm を達成した。JIS B 0405 面取り部分を除く長さ寸法に対する許容差に照らし合わせると、精級を満たす加工精度であり、再生加工としては十分のレベルであることが確認できた。

参考ではあるが、繰り返し利用回数については、JIS B 0405 を基に試算した。中級相当での許容差が 0.1mm 、先ほどの機械加工が実現でき精度を JIS B 0405 精級相当とすると、治具上に形成される CVI-SiC 層の許容厚みの最低値は 0.05mm (中級許容厚み-精級許容厚みに相当)となる。仮に、CVI-SiC 層が 1 バッチ当たり $2\mu\text{m}$ 形成されるとすると、25 回の繰り返し使用が可能である。再生加工によるむしれ等の発生は無いことを確認しており、1 度の再生加工は確実に可能で、少なくとも 50 回以上は繰り返し使用可能となる見込みである。



図②-(4)-1 再生加工概要

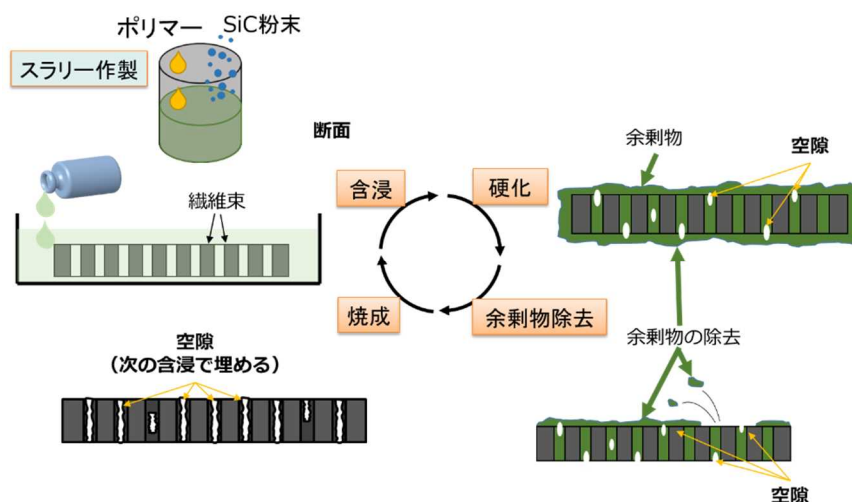
③ マトリックス形成の高レート・低コスト製造技術

(1) マトリックス形成の高レート・低コスト製造技術

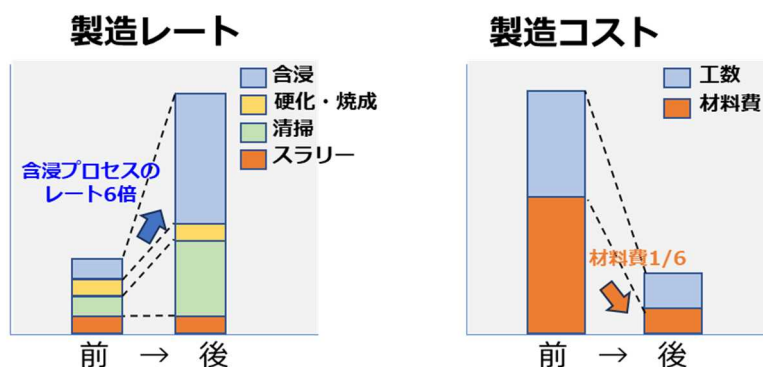
現在、CVI 後のプリフォームのマトリックス形成手法として、対象部品に要求される熱伝導率を満たし、プリフォームへの含浸性が良好であった PIP(Polymer Impregnation and Pyrolysis)をマトリックス形成手法として採用している。図③-(1)-1 に示すように、PIP 工程は、含浸、硬化、清掃、焼成を一つのサイクルとして含むが、焼成時にポリマーの熱分解ならびに体積収縮が生じ、プリフォーム内部に空隙が生じる。この空隙を埋め、部品に要求されるマトリックス密度を達成するために PIP 工程は複数回繰り返す必要がある。

本研究では、マトリックス形成として用いる PIP 工程の高レート化・低コスト製造技術に対して、繰り返し含浸回数半減を目的とした(1)高収率スラリーの開発、含浸枚数を3倍に向上させることを目的とした(2)含浸条件最適化、PIP 工程の律速過程である余剰硬化物の清掃作業短縮を目的とした(3)清掃作業効率化、および PIP 工程の製造コストのうち半分以上を占める材料費の低減を目的とした(4)スラリー再利用の開発を実施した。

マトリックス形成の高レート・低コスト製造技術の開発前後の PIP 工程のパネル製造レートならびにパネル製造コストを図③-(1)-2 に示す。上記(1)~(4)の開発を実施することで、PIP 工程の製造レートを全体としては 2.5 倍程度、特に含浸工程は 6 倍、製造コストは工数の半減ならびに材料費を 1/6 まで低減することが可能である。これら開発の詳細について、(1)~(4)項で詳細を記述する。



図③-(1)-1 PIP の工程サイクル



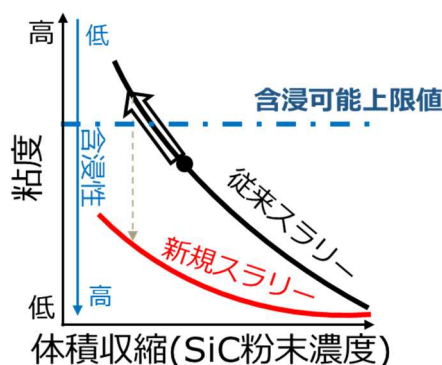
図③-(1)-2 マトリックス形成の高レート・低コスト製造技術の開発前後の製造レート、製造コスト

(2) 高収率スラリーの開発

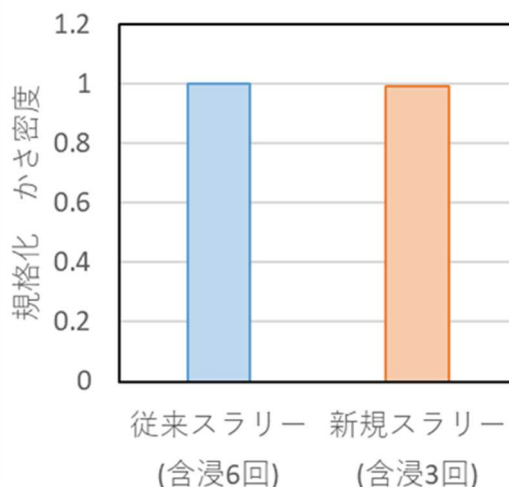
前述の通り PIP 工程は複数回繰り返す必要があるため、繰り返し回数を削減することが高レート化ならびに低コスト化に有効である。PIP 工程の繰り返し回数を削減するには、①プリフォーム内部にまで含浸できるような低粘度のスラリーを含浸すること、②焼成時の体積収縮が少なく(≒ポリマーの体積分率が少ない)、体積収率の良いスラリーを含浸することが求められる。しかし、①と②は二律背反であり、スラリーの体積収率を向上させるために SiC 粉末濃度を上げるとスラリーの粘度が急激に上昇し、プリフォーム内部まで含浸できなくなってしまい、空隙率(特に閉気孔)が上昇することで、要求されるマトリックス密度を満足できない。一方、プリフォーム内部まで含浸させるために SiC 粉末濃度を下げるとスラリーの体積収率が低下し、空隙率(特に開気孔)が上昇するため、要求されるマトリックス密度を満足するには繰り返し回数を増やさなければならない。以上のことから、低粘度かつ焼成収率の良いスラリーが求められる。

上記目標を達成するため、SiC 粉末の粒度分布に着目して新規スラリーを開発した。新規スラリーは従来スラリーと比較して、体積収率を向上させる、つまり SiC 粉末濃度を上げた場合でも粘度の上昇幅が小さく、含浸性と体積収率のバランスの良い性能を示した(図③-(2)-1)。また、新規スラリーを用いて含浸試験を実施し、含浸回数が3回と従来スラリーから半減した場合において、従来スラリーと同等のマトリックス密度(かさ密度)を達成できることが明らかとなった(図③-(2)-2)。

以上より、PIP 工程の回数を半減し、マトリックス形成の高レート・低コスト化を達成した。



図③-(2)-1 新規スラリーならびに従来スラリーの粘度と体積収率の関係



図③-(2)-2 新規スラリーならびに従来スラリーを用いて作製したプリフォームのマトリックス密度

(3) 含浸条件最適化

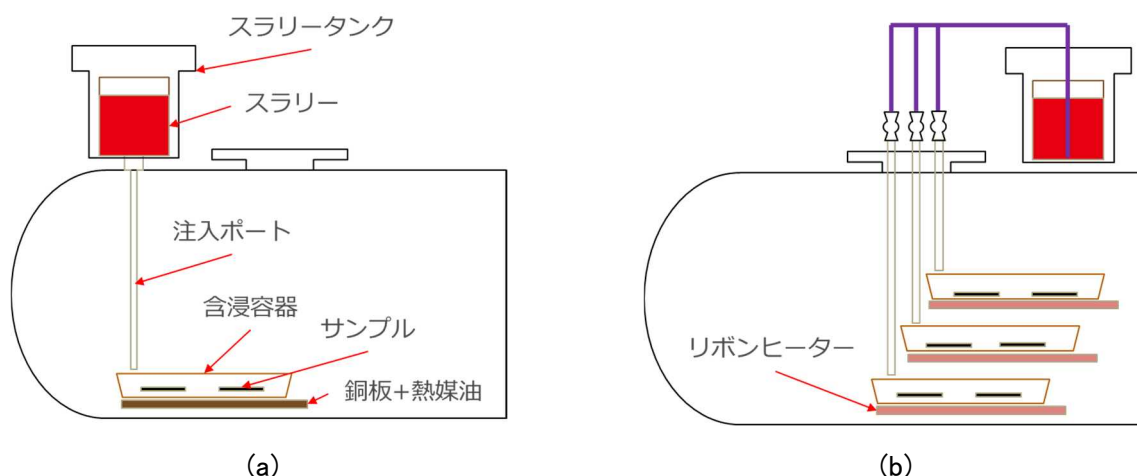
PIP 工程の高レート化に関して、PIP 工程のクリティカルパスとして、含浸作業ならびに余剰硬化物の清掃作業が挙げられる。含浸作業について、1 バッチ当たりの処理枚数向上による高レート化を検討した。

従来の含浸炉では真空・加圧容器の上部にスラリータンクがあり、スラリータンクからステンレス管を通して含浸容器にスラリーを注ぎ込む方式でスラリー注入を実施していた。また、熱媒油を用いた配管ヒーターの上に含浸容器を置くことで加熱を実施していた。従来方式では、これらの制約のため一つの含浸容器を用いることしかできず、処理枚数は加熱部の大きさが律速する状態であった。

新規の含浸炉ではスラリー注入ポートを 3 本に増設し、別々のスラリータンクから各スラリー注入ポートを通して、三つの含浸容器それぞれにスラリーを注入することを可能とした。また、熱媒油ヒーターではなく、リボンヒーターを用いることで 3 段積みにした状態でそれぞれを加熱することができるようにした。

改造前後の含浸炉の模式図を図③-(3)-1 に示す。改造後の含浸装置を用いて、スラリー注入並びに加熱試験を実施し、3 段積み of 含浸容器にスラリー注入ができること、スラリー温度を設定温度で維持できることを確認した。

以上より、1 バッチ当たりの処理枚数が 3 倍に向上し、含浸工程の高レート化を達成した。



図③-(3)-1 含浸炉模式図 (a)改造前、(b)改造後

(4) 清掃作業効率化

本項目では、PIP 工程において多くの工数を要していたスラリー硬化処理後の余剰硬化物の清掃作業について示す。PIP では、空隙を埋めるために繰り返し含浸する。スラリーを含浸して硬化処理を実施した後、次の含浸のために余剰硬化物を除去（清掃作業）する必要がある（図③-(4)-1）。従来、清掃作業を手作業で行っており、CMC のパネル1枚あたり数時間かかっていた。そこで機械化を検討し、装置を選定して最適条件を見つけることによりパネル1枚あたり数十分まで短縮できた。

・清掃作業の機械化

特殊な砥粒を用いた研磨装置により、繊維や CVI 工程でできた膜を傷つけることなくスラリーの余剰硬化物のみを除去可能となった。さらに本研磨装置に関して、最適な清掃条件を見出し、繰り返し含浸される PIP 工程で次の含浸パスを確保できるようになった。さらに、研磨装置の自動化についても検討を進めており、今後は無人運転で 24 時間稼働させることを考えている。これにより、更なる高レート・低コスト化を進めることができる予定である。

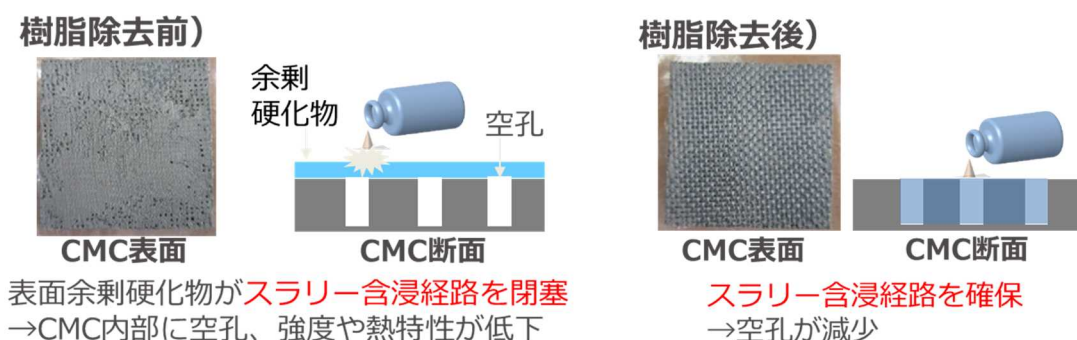


図 ③-(4)-1 余剰硬化物の除去前後の状況

・硬化熱処理条件と清掃前処理の最適化

手作業で清掃作業をしやすくするために前処理工程が必要であり、その作業についても、多くの時間を要していた。そこで、機械化に合わせて短時間で処理可能な方法を考えた。また、硬化熱処理の条件も機械化に合わせて見直し、研磨装置にとって最適かつ時間短縮できる条件を決定した。

以上により、スラリーの余剰硬化物の清掃作業を 60%以上削減することが可能となった。

(5) スラリー再利用

PIP 工程の低コスト化に関して、図③-(1)-2 に示す通り、パネル製造コストのうち材料費が半分以上を占める。特にスラリーに用いるポリマーの費用が最も大きく、本項では材料費を 1/6 まで低減することを目的に、ポリマーの劣化試験ならびに基礎物性評価試験を実施し、スラリー再利用を検討した。

スラリーはポリマーと SiC 粉末で構成されているが、特にポリマーは架橋反応や吸湿による劣化が懸念されることから、ポリマーに対して劣化試験を行い、ポリマーの基礎物性評価ならびにポリマー焼成物の物性評価を実施した。評価項目を表③-(5)-1 に示す。試験結果から、劣化試験前後で主に変化が確認できた物性は分子量分布ならびに粘度であり、ポリマー劣化(主に架橋反応)により粘度つまり含浸性に影響を及ぼす可能性が示唆された。

以上のことから、含浸性と相関のある粘度を評価指標とし、リユーススラリーを用いた粘度測定、含浸試験を行い、プリフォームへの含浸性評価を今年度中に実施し、材料費を 1/6 まで低減する見込みである。

表③-(5)-1 ポリマーの基礎物性評価ならびにポリマー焼成物の基礎物性評価 試験項目

		劣化有無	分子量分布測定	化学構造解析	粘度測定	熱重量- 示差熱分析	組成分析
Lot No.	A	無	○	○	○	-	○
	B	無	○	○	○	○	○
	C	無	○	○	○	○	○
	A	有	○	○	○	-	○
	B	有	○	○	○	-	○
	C	有	○	○	○	○	○
試験結果	Lot差	無	差異あり	差異なし	差異あり	差異なし	差異なし
	劣化試験前後	無	変化あり	変化なし	変化あり	変化なし	変化なし

④ 燃焼器パネル部材向けCMC要求特性の検討

(1) 高レート・低コスト製造技術によるCMC特性評価

本開発における、早期に成膜条件を決定すべく、基礎的な試験を活用した高サイクル試作・評価を実施することとした。CMC 特性評価については、SiC 繊維束からプリフォームを製作の上、これに CVI 工程・PIP 工程を経て、試験体を作製の上、機械加工にて試験片を得た上で評価することが一般的であるが、リードタイムが非常に長く、高頻度での試験実施は難しい。本開発では、これに代わる手法として、ロービング試験を検討した。ここでは、SiC 繊維束に界面コーティングを行ったミニコンポジットを作製し、この繊維束を試験片化し、引張試験を行うことで力学的な特性を評価する。繊維束に CVI 処理を行うだけで試験片を作製することができるので、評価の高頻度化が可能となる。

ここでは、様々な条件で試作したミニコンポジットから、成膜性が比較的良好であることが確認されたサンプルについて、評価を行った。以前、従来原料を用いて作製・評価した試験体(バルク試験体、ロービング試験片ではない)では破断ひずみが 0.3%程度であったが、ロービング試験片では 0.6%以上出ており、SiC 繊維物性に近い数値が出ていることが確認できた。



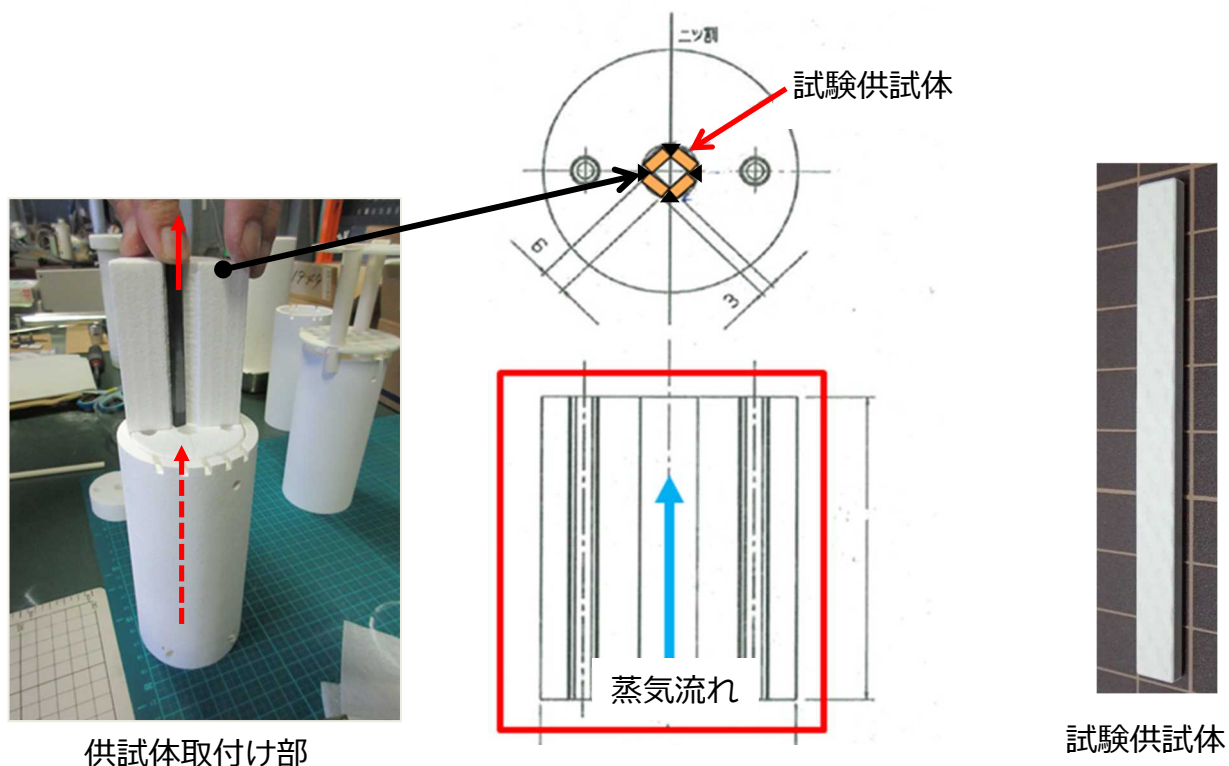
図④-(1)-1 ロービング試験概要と試験の様子

(2) 燃焼器パネル部材評価の実施

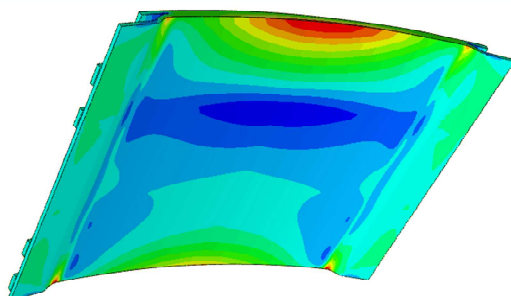
本項目では、本事業で開発した製造方法を反映した CMC を用いて、燃焼器パネルの設計が可能かを評価する。燃焼器パネルの温度分布を予測し、熱応力解析を行い、その結果と特性評価結果と比較する。ここでは基礎試験の結果から、許容ひずみを決め、指標にすることとした。

使用時の劣化に対しては、今回は水蒸気酸化試験を行い、試験後の強度劣化を考慮した評価を行うこととした。水蒸気酸化試験の試験装置、供試体を図④-(2)-1 に示す。使用時の最高温度条件で曝露後に強度試験を行ったところ、試験前と比較して破断強度の劣化は 20%未満であった。

今回は基礎試験の結果、使用時の劣化、安全係数から許容ひずみを決め、熱応力解析(図④-(2)-2)結果と比較し、許容ひずみ量以下であることから、燃焼器パネルとして使用可能であると判断する。



図④-(2)-1 試験装置および供試体

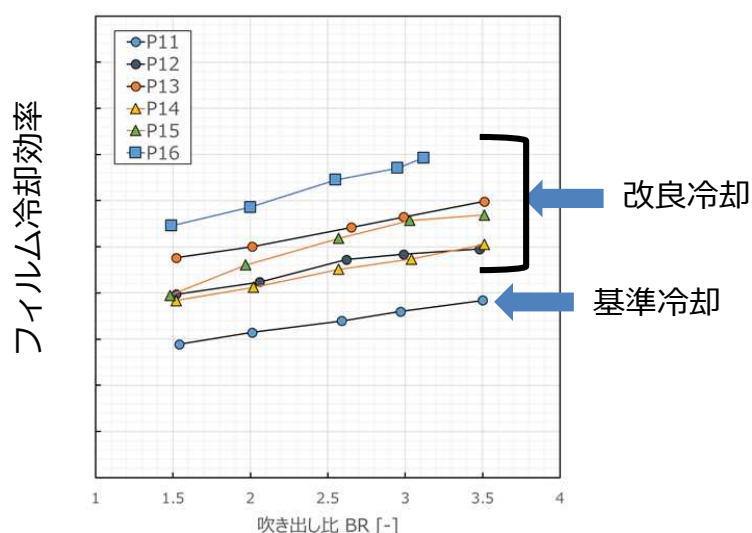


図④-(2)-2 解析結果例(ひずみ分布)

(3) 燃焼器パネル部材向けCMC要求特性の改善

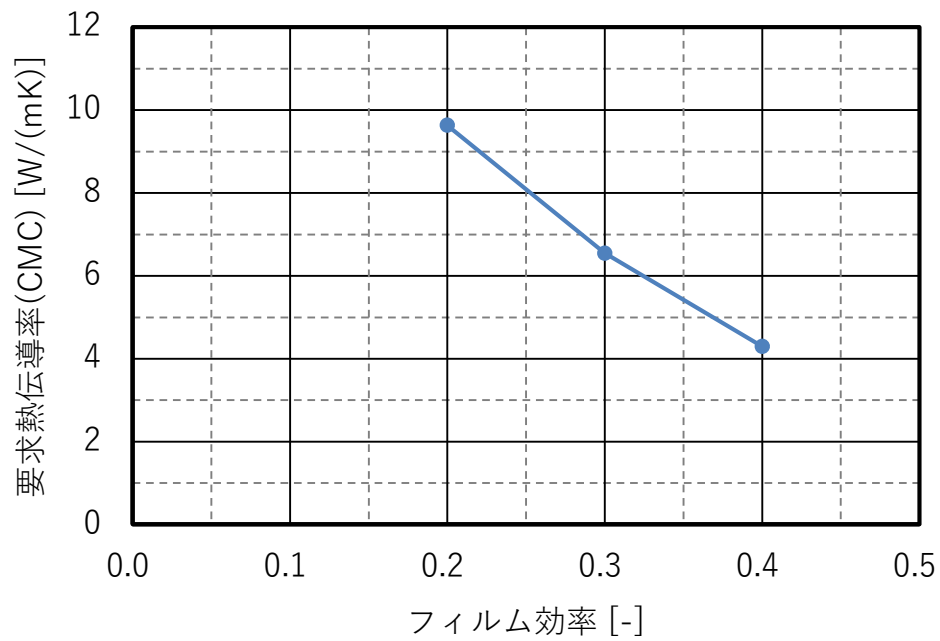
CMC 燃焼器パネルが晒される、燃焼器内部のガス温度は、エンジンの中で最も高温であり、局所的には最高で 2000℃以上となることもある。このため、耐熱性の高い CMC でも、冷却を行い使用する必要があり、効果的に冷却を行うためには熱伝導率が高い方が望ましい。一方で熱伝導率を高めるには、マトリックスの充填率を上げるなど、製造レートや歩留まりに影響があるため、熱伝導率に対する要求値が低くできることが望ましい。本開発項目では、事業開始前の CMC の熱伝導率で、CMC の使用上の許容温度以下とするために必要な冷却空気量を基準として、CMC パネルの冷却改善や適正化を行うことで、同等の冷却空気量で、CMC 燃焼器パネル温度を同等とするために必要な熱伝導率を緩和することを目的としている。ただし、実用時においては、冷却の改善は、そのまま冷却空気量を削減することや、使用温度を下げることによる耐久性の向上に割り振ることも可能である。これらについては、燃焼器開発の状況や要求を勘案して決める予定である。

CMC 燃焼器パネルの冷却改善は CMC に対する加工性も考慮し、フィルム冷却は多数の小径孔からなるエフュージョン冷却とし、孔径、板厚方向に対する角度、ガス流れに対する角度、配置の適正化に絞り込み、適正な仕様を決めた。図④-(3)-1 に改善前後でのフィルム効率の比較を示す。



図④-(2)-1 基準冷却と改良冷却のフィルム効率比較

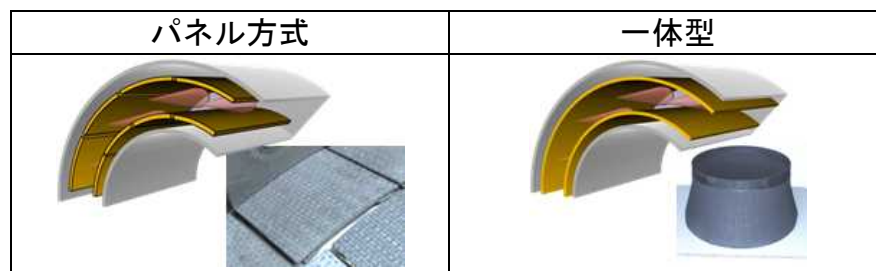
燃焼器パネルへの入熱条件とパネル低温側の熱伝達を固定で、パネルの高温側温度を所定の温度以下となるフィルム効率と CMC 熱伝導率の関係例を図④-(2)-2 に示す。本結果は平均としての効果を示すものであり、フィルム冷却仕様の観点では、局所的な調整も可能である。



図④-(2)-2 フィルム効率と要求熱伝導率の例

5. 成果の意義

パネル方式の燃焼器部材としては世界初。燃焼器ライナ全体を一体で CMC 化する場合と比較して、界面形成やマトリックス形成時の炉詰め効率や歩留まりに優れる。



6. 実用化への道筋と課題

本 NEDO 事業にて製造レートやコストが量産事業への適応に見合う目途を得る見込み。CMC パネル燃焼器としての設計の成熟度向上と、CMC 材料としての製造技術成熟度の向上が課題であり、実用化までのステップとして、本 NEDO 事業後に TRL や MRL 向上のための、開発試験やパイロットプラントの構築、認証準備をエンジン開発時期に間に合うように行う計画である。

2. 分科会公開資料

次ページより、推進部署・実施者が、分科会において事業を説明する際に使用した資料を示す。

「次世代複合材創製・成形技術開発④、⑤及び⑥」(終了時評価)

プロジェクトの概要(公開版)

2023年12月13日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
材料・ナノテクノロジー部

次世代複合材創製・成形技術開発



プロジェクトの概要

航空機のCO2排出量削減、環境適合性向上、整備性向上といったICAO等からの要請に応えるため、複合材等の技術開発を実施する。今後の航空機需要の70%を占めると予想されている次世代細胴機の製造プロセスで必須となる熱可塑性CFRPと、熱可塑性CFRPを用いた低コスト・高レートな構造部材の成形組立技術、並びにエンジン効率向上に繋がるCMC部材を開発する。これにより航空機の軽量化とエンジン効率の向上による燃費改善を達成し、CO2排出量の削減を目指すとともに、あわせて海外OEMからの次世代細胴機の製造分担量の増加も目指す。

想定する出口イメージ等

アウトプット 目標 (一部抜粋)	①複合材時代の理想機体構造を実現する機体設計技術の開発 アルミをCFRPで置き換えただけの従来構造とは異なる新しい機体設計コンセプトをシミュレーションにより提案するための技術を開発する。 ②熱可塑性CFRPを活用した航空機用軽量機体部材の高レート成形技術の開発 高度な一体成形、さらなる軽量化、高レートな大型部材成形技術を確立する。 ③航空機部品における複合部材間および他材料間の高強度高速接合組立技術の開発。ファスナー使用箇所の半減およびアルミ機体と同等以上の生産技術を開発する。 ④超高性能SiC繊維の品質安定性向上に向けた開発 引張強度3.0GPa以上、2700°F（1482℃）×400時間曝露後、強度低下20%以下を満足し、高温クリープ特性に優れたSiC繊維を開発する。 ⑤1400℃級CMC材料の実用化研究開発 室温引張強度300MPa以上、1400℃×400時間曝露後、強度低下20%以下を満足するCMC部材を開発する。 ⑥高レート・低コスト生産可能なCMC材料およびプロセス開発 現行と比較して生産レート10倍向上を可能とする材料及びプロセス技術を開発する。
アウトカム 目標	本事業で開発した成果が次世代航空機に搭載され、軽量化とエンジンの高効率化による燃費の改善が図られることにより、 2040年において、1500万トンのCO2削減 が期待される。
出口戦略 (実用化 見込み)	B737max・A320neo後継の次世代細胴機は、2030年代就航が予想されており、ここでの機体及び搭載エンジンの製造分担獲得を狙う。 材料メーカーと航空機メーカー等が協同しながら実機評価を行い、我が国の技術的優位性を活かした実用化を目指す。
グローバル ポジション	PJ開始時：R A (Run after) ⇒ PJ終了時：D H (Dead heat) ①～③は国内Tier1、海外OEMと協力して進める。④～⑥はSiC繊維を国内に持っている強みを活かし、先行するGEに追従して高圧部材に新規参入を目指す。

既存プロジェクトとの関係

○2014～2022年度NEDOプロジェクト
「革新的新構造材料等研究開発」ISMA事業
自動車等の抜本的な軽量化に向けて、革新的なアルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、鋼板、CFRP等の開発を実施。

○2018～2022年度内閣府SIP「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」
航空機を始めとした輸送機器等への適用を目標に、樹脂・CFRP、耐熱合金・金属間化合物等、革新的構造材の開発を実施。

→上記PJは本PJとは異なる材料を対象とした研究開発を行っているものや、同じ材料においても異なる出口や開発のアプローチで研究開発を行っているものであるが、相互に情報共有を行い、上記PJの成果を本PJへ活用する等、協力・連携を図っていく。

事業計画

期間：2020～2024年度（5年間）
総事業費（NEDO負担分）：62.8億円（予定）（委託、助成）

<研究開発スケジュール・評価時期・想定する予算規模>

	2020	2021	2022	2023	2024	2025
研究開発 項目① (委託)	①複合材時代の理想機体構造を実現する 機体設計技術					
研究開発 項目 ②～③ (助成)	②熱可塑性CFRPを活用した高レート成形 技術の開発 ③複合部材間および他材料間の高強度高速 接合組立技術の開発					
研究開発 項目 ④～⑥ (助成)	④更なる高性能SiC繊維の開発 ⑤(1)1400℃級CMC材料の開発 ⑤(2)1400℃級CMC 材料の開発 ⑥高レート・低コスト生産可能なCMC材料と プロセス開発					
評価			中間 評価	終了時 評価		終了時 評価
予算 (億円)	14.5	13.5	13.2	12.0	10.0	

1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋



2. 目標及び達成状況(概要)



3. マネジメント

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

- 事業の背景・目的・将来像
- 政策・施策における位置づけ
- 技術戦略上の位置づけ
- 国内外の動向と比較
- 他事業との関係
- アウトカム達成までの道筋
- 知的財産・標準化戦略

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

- アウトカム目標の設定及び根拠
- 本事業における「実用化・事業化」の考え方
- アウトカム北表の達成見込み
- 波及効果
- 費用対効果
- アウトプット目標の設定及び根拠
- アウトプット(研究開発成果)のイメージ
- アウトプット目標の設定及び根拠
- アウトプット目標の達成状況
- 研究開発成果の意義(副次的成果)
- 特許出願及び論文発表

(1)実施体制
(※)受益者負担の考え方
(2)研究開発計画

- NEDOが実施する意義
- 実施体制
- 個別事業の採択プロセス
- 研究開発のスケジュール
- 予算及び受益者負担
- 進捗管理
- アウトプット(研究開発成果)のイメージ
- 目標達成に必要な要素技術
- 進捗管理: 動向・情勢変化への対応
- 進捗管理: 開発促進財源投入実績

(※) 評価対象外

1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

- 事業の背景・目的・将来像
- 政策・施策における位置づけ
- 技術戦略上の位置づけ
- 国内外の動向と比較
- 他事業との関係
- アウトカム達成までの道筋
- 知的財産・標準化戦略

2. 目標及び達成状況(概要)

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

3. マネジメント

(1)実施体制
(※)受益者負担の考え方
(2)研究開発計画

(※) 評価対象外

＜評価項目 1＞ 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(※) 本事業の位置づけ・意義 * 終了時評価においては対象外

(1) アウトカム達成までの道筋

(2) 知的財産・標準化戦略

事業の背景・目的・将来像

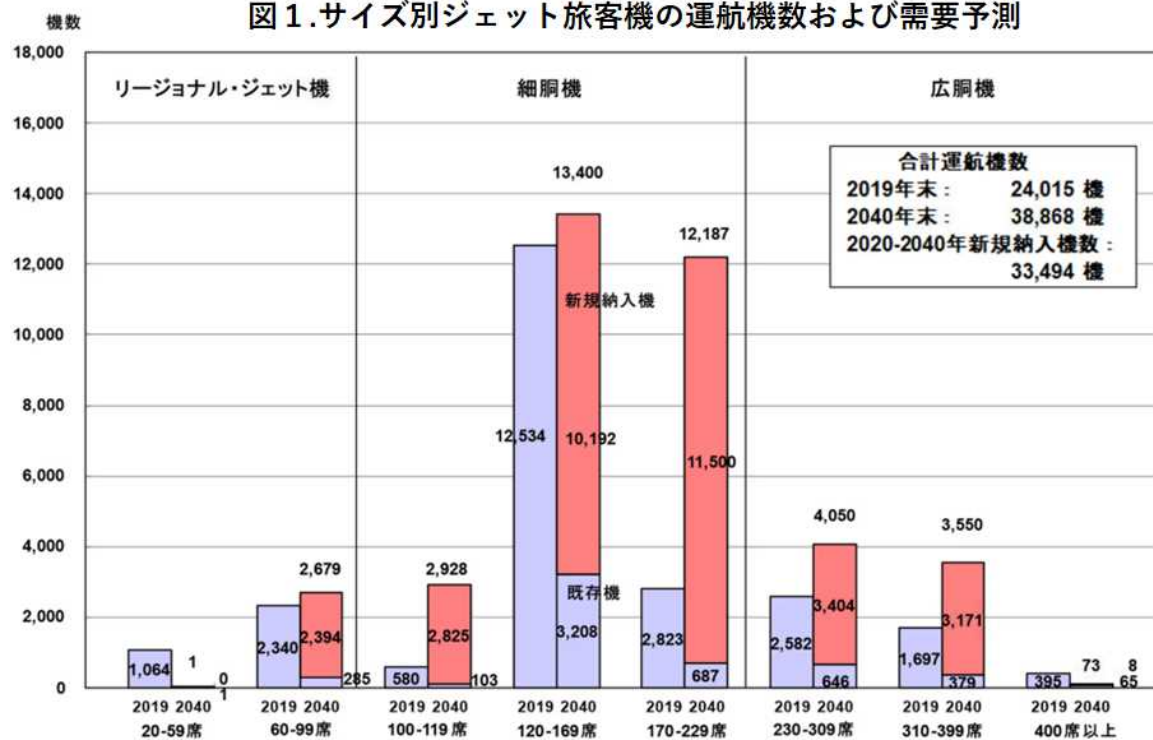
【事業の背景】

- 世界の民間航空機市場は、各社、コロナの影響により今後のデリバリー見通しを下方修正したものの、旅客需要の回復予測や、CO2削減に貢献する効率の高い機体への代替需要が見込まれている。
- 更に、燃費改善、環境適合性等の市場のニーズに応えるため、軽量化のための構造部材としての複合材の適用が急務となっている。

【目的】

- 今後の航空機需要の70%を占めると予想されている細胴機の製造プロセスで必須となる、**複合材を用いた部材の低コスト・高レートな新しい成形組立技術の確立**を目指す。
- 航空機の燃費改善によるエネルギー消費量とCO2排出量の削減**を目指す。

図1. サイズ別ジェット旅客機の運航機数および需要予測



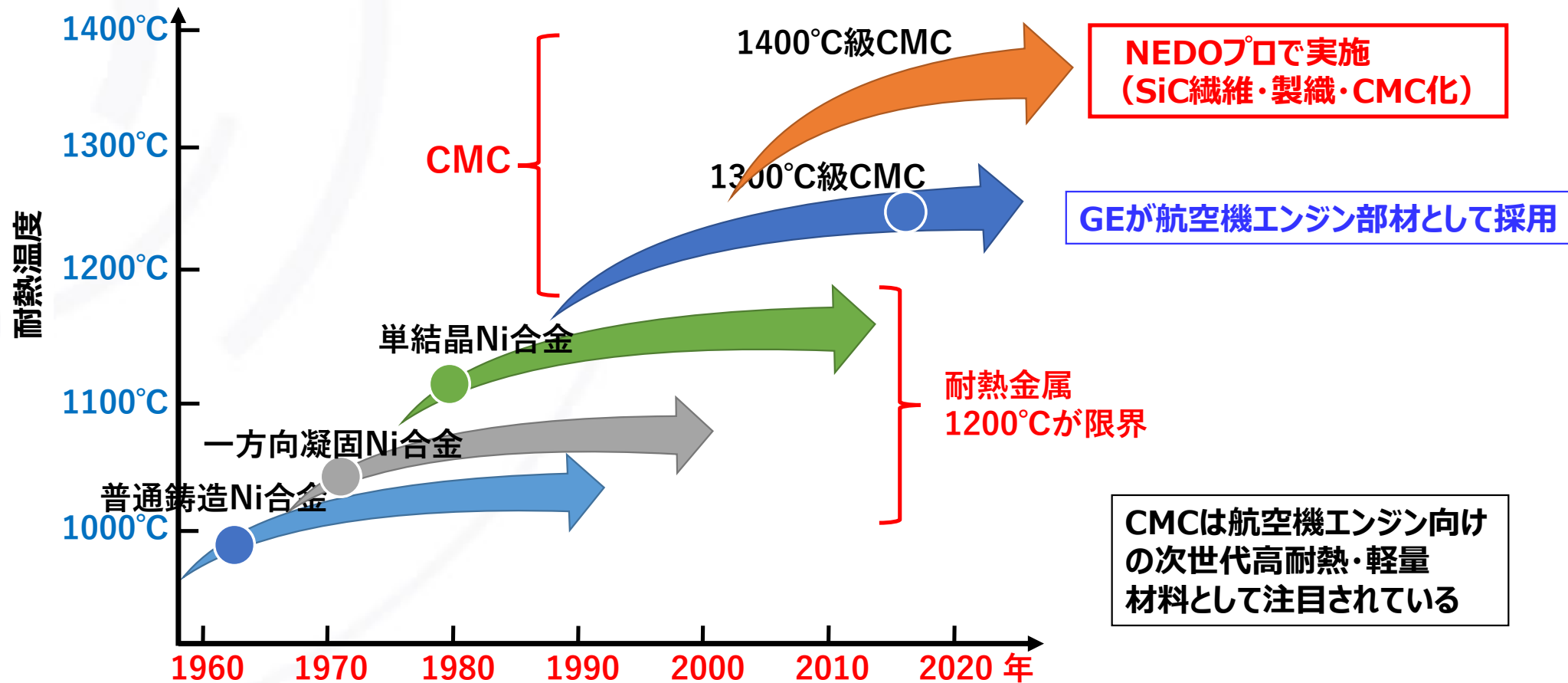
出所: 日本航空機開発協会

政策・施策における位置づけ

- 本事業は、総合科学技術・イノベーション会議により策定されている「**科学技術イノベーション総合戦略**」、「**エネルギー・環境イノベーション戦略**」等に則り、構造材料の飛躍的な軽量化等によって**航空機のエネルギー利用効率の向上を目指すために実施するものである。**
- また、「**革新的環境イノベーション戦略**」（統合イノベーション戦略推進会議）には、運輸分野の温室効果ガス削減のため、航空機分野で**燃費向上に資する機体やエンジンの材料軽量化等の開発を進めることが謳われている。**

本事業はこれらの政策を進めるために実施するものである。

技術戦略上の位置づけ

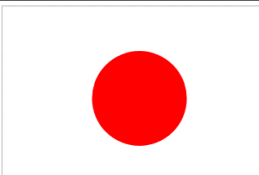


国内外の動向と比較

■ 航空機産業の業界構造（欧米中心の寡占状態）

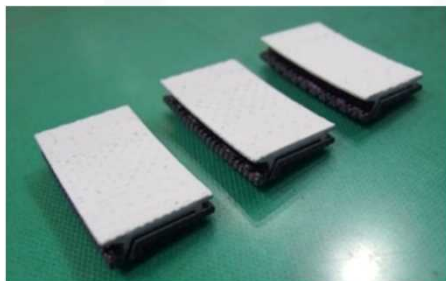
航空機完成機メーカー	ボーイング社（米）	エアバス社（欧）	
航空機エンジンメーカー	GE社（米）	Rolls-Royce（英）	Pratt & Whitney（米）

■ CMC事業

国	事業社	CMCの耐熱温度	技術レベル
 米国	GE Aviation	1300℃級	2012年NGSアドバンスファイバー株式会社設立（日本カーボンと仏サフランとの合併会社） 1300℃級のCMC部品(タービンシュラウド)を航空機エンジンに採用。
 日本	株式会社IHI 川崎重工業株式会社 三菱重工航空エンジン（株）	1400℃級	TRL(Technology Readiness Level) 4 技術成熟度レベル 実用化はされていない。

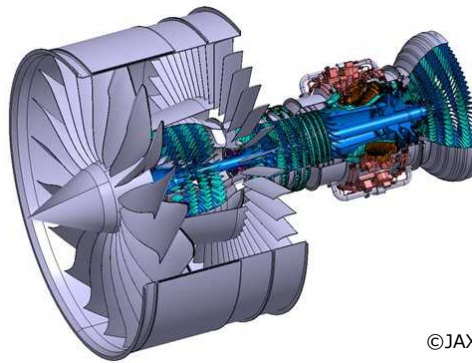
他事業との関係

次世代複合材創製・成形技術開発 (本プロジェクト)



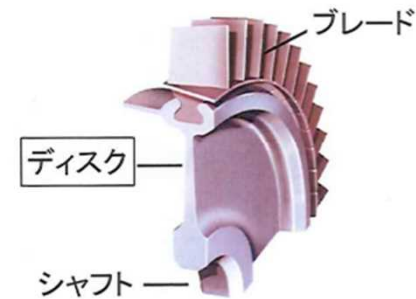
1400℃級CMCタービンシュラウド

航空エンジン高温部(タービンシュラウド)へのCMC適用により冷却空気削減による熱効率向上



©JAXA

航空機エンジン向け材料開発・評価システム基盤整備事業

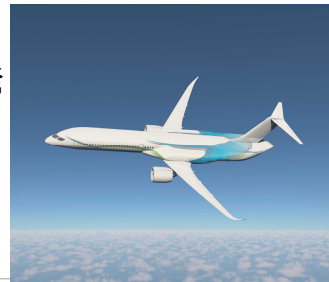


出典: ザ・ジェット・エンジン(2011), P275,
(社)日本航空技術協会

航空エンジン高温部(ディスク、ブレード)への耐熱合金適用により冷却空気削減による熱効率向上

グリーンイノベーション基金事業／次世代航空機の開発

- ・水素航空機向けコア技術開発
- ・主要構造部材の複雑形状、飛躍的軽量化開発

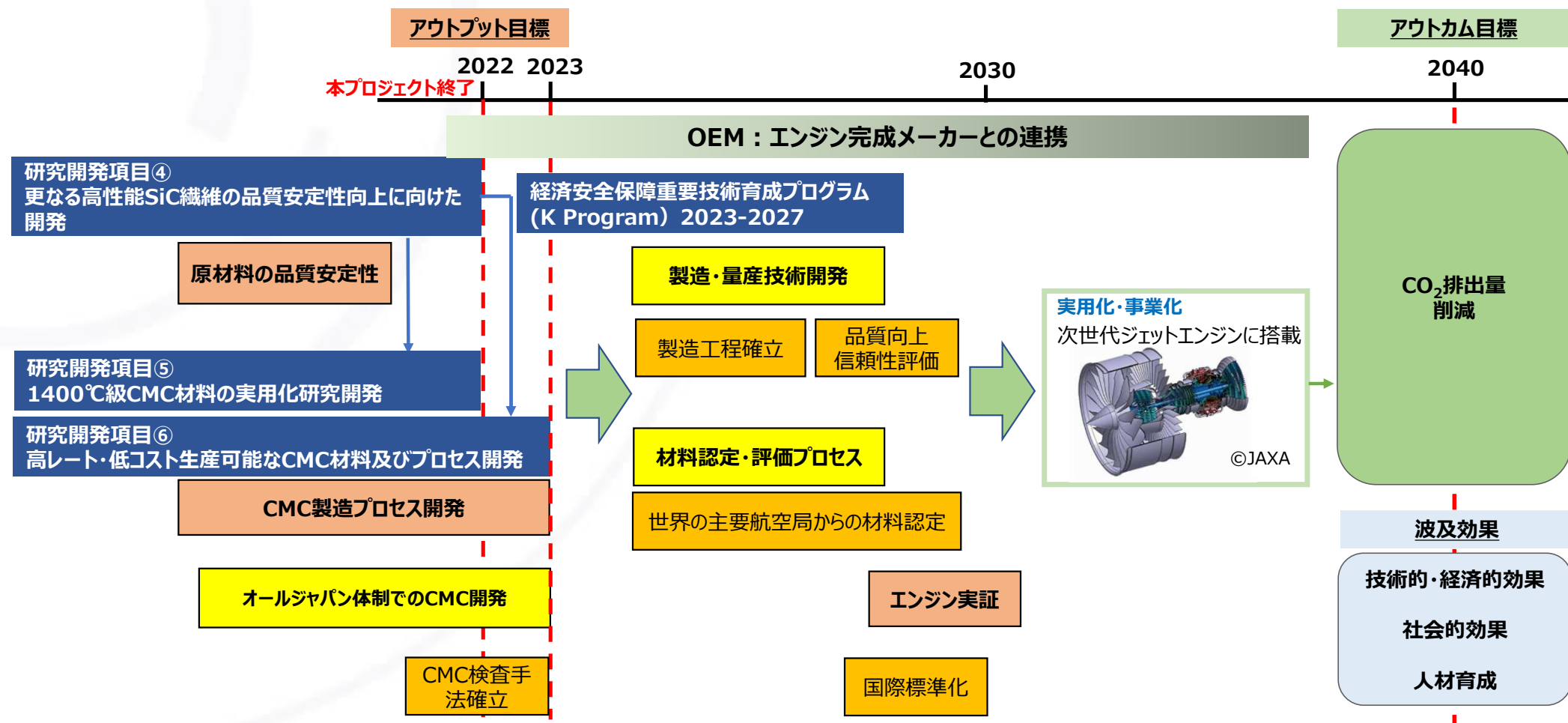


国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

クリーンエネルギー分野における革新的技術の国際共同研究開発事業／セラミックス基複合材料 (CMC)の信頼性保証手法開発

- ・CMCの損傷許容性について複数の検査項目を複数の検査技術で評価する新手法の開発
- ・国際共同研究により、国際的に認知された方法へ発展させ、方法論や測定装置の国際標準化を目指す

アウトカム（社会実装）達成までの道筋



知的財産・標準化戦略

●助成事業

NEDOのルールに従い、**助成事業の実施により得られた知的財産権等の研究成果は助成先に帰属することから、NEDOによる指示は実施せず事業者に委ねる。**

●オープン・クローズ戦略

基礎的で広く産業の発達に寄与する技術は公開
(特許/論文など)
実用化技術(設計情報)は非公開
(ノウハウ秘匿or限定開示)

●知的財産権の帰属

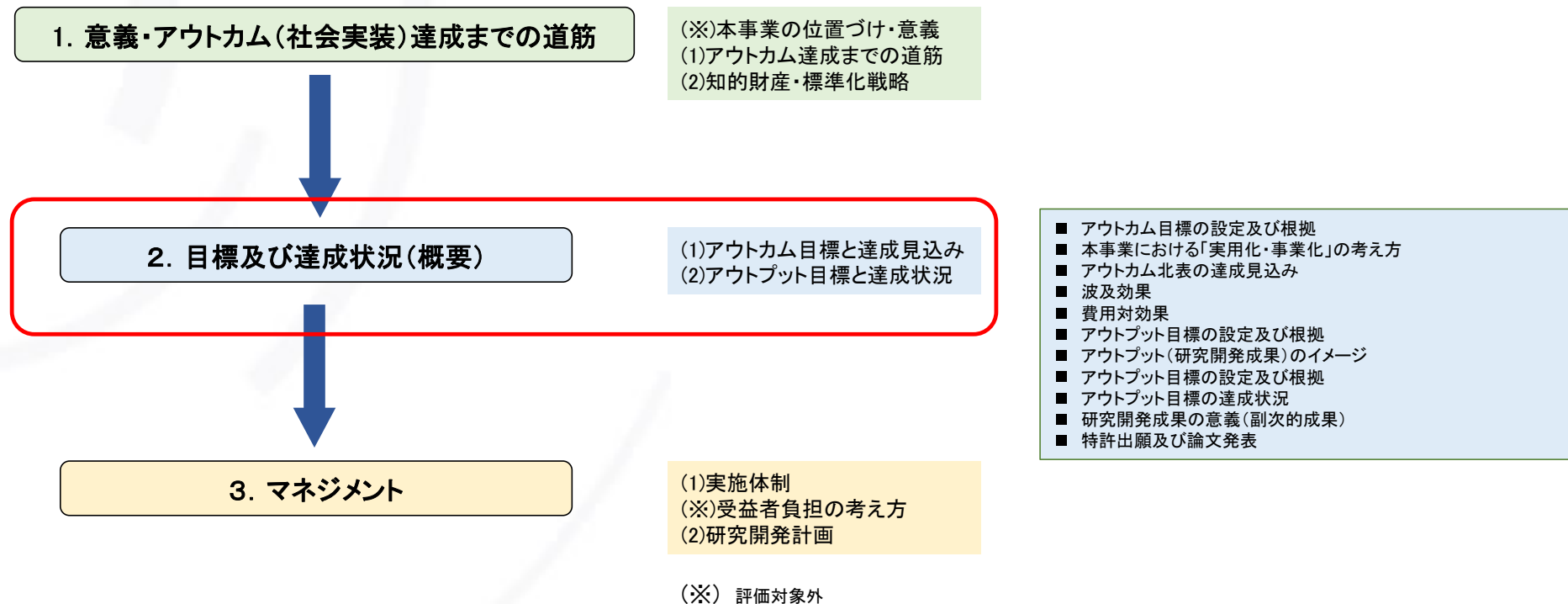
委託事業と補助・助成事業



項目	委託(共同研究含む)	補助・助成
事業の主体	NEDO	事業者
事業の実施者	委託先	事業者
取得資産の帰属	NEDO (約款20条1項該当)	事業者
事業成果 (知的財産権)の帰属	NEDO バイ・ドール条項遵守の 場合は委託先帰属 (注)	事業者
収益納付	なし	あり

(注) 実証事業及び調査事業の委託では、約款上バイ・ドール条項に関する規定はない。

NEDO Web 掲載「知的財産権に関する説明資料(2022年7月版)抜粋



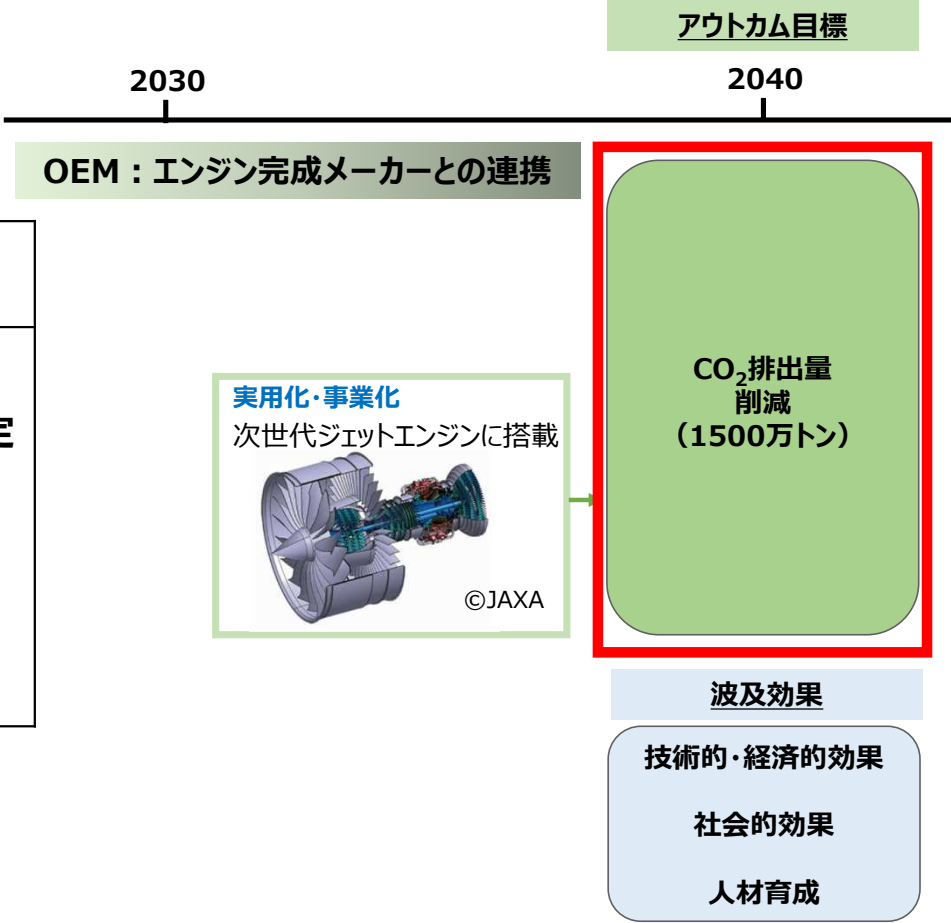
＜評価項目 2＞ 目標及び達成状況

- (1)アウトカム目標及び達成見込み
- (2)アウトプット目標及び達成状況



アウトカム目標の設定及び根拠

アウトカム目標	根拠
本事業で開発した成果（CFRP及びCMC）が、次世代航空機に搭載され 2040年 において、CO2排出量を 1500万トン /年削減する。	2040年の次世代航空機を6000機と想定 うち50%程度CMC材料が採用されると CMC事業で約600万トン削減可能。 その他CFRP事業で、約900万トン削減。 合算で1500万トン削減する。



本事業における「実用化・事業化」の考え方

プロジェクト類型	実用化・事業化の考え方
標準的研究開発	プロジェクト終了後5年を目処に、 事業化 まで達することを目指す研究開発
基礎的・基盤的研究開発	プロジェクト終了後5年を目処に（もしくはそれ以上の期間で）、 実用化 まで達することを目指す研究開発
知的基盤・標準整備等の研究開発	知的基盤・標準整備等を目的としており、研究開発成果による 事業化・実用化 を目標としていない事業

アウトカム目標の達成見込み

	現状の課題	達成見込み
製品イメージ	海外OEMのニーズを満足させるため、世界の主要航空局からの材料認定が課題	経済安全保障重要育成プログラムなどを通じ材料認定は達成見込み
競合技術	性能面での優位性はあるが、低コスト施工技術に課題	経済安全保障重要育成プログラムなどを通じ他社を凌ぐ1400℃級のCMC部材の量産化による低コスト化を達成し、商品化を行う見込み
量産化	量産化技術とコスト競争力の確立	経済安全保障重要育成プログラムなどを通じ量産化技術を達成見込み



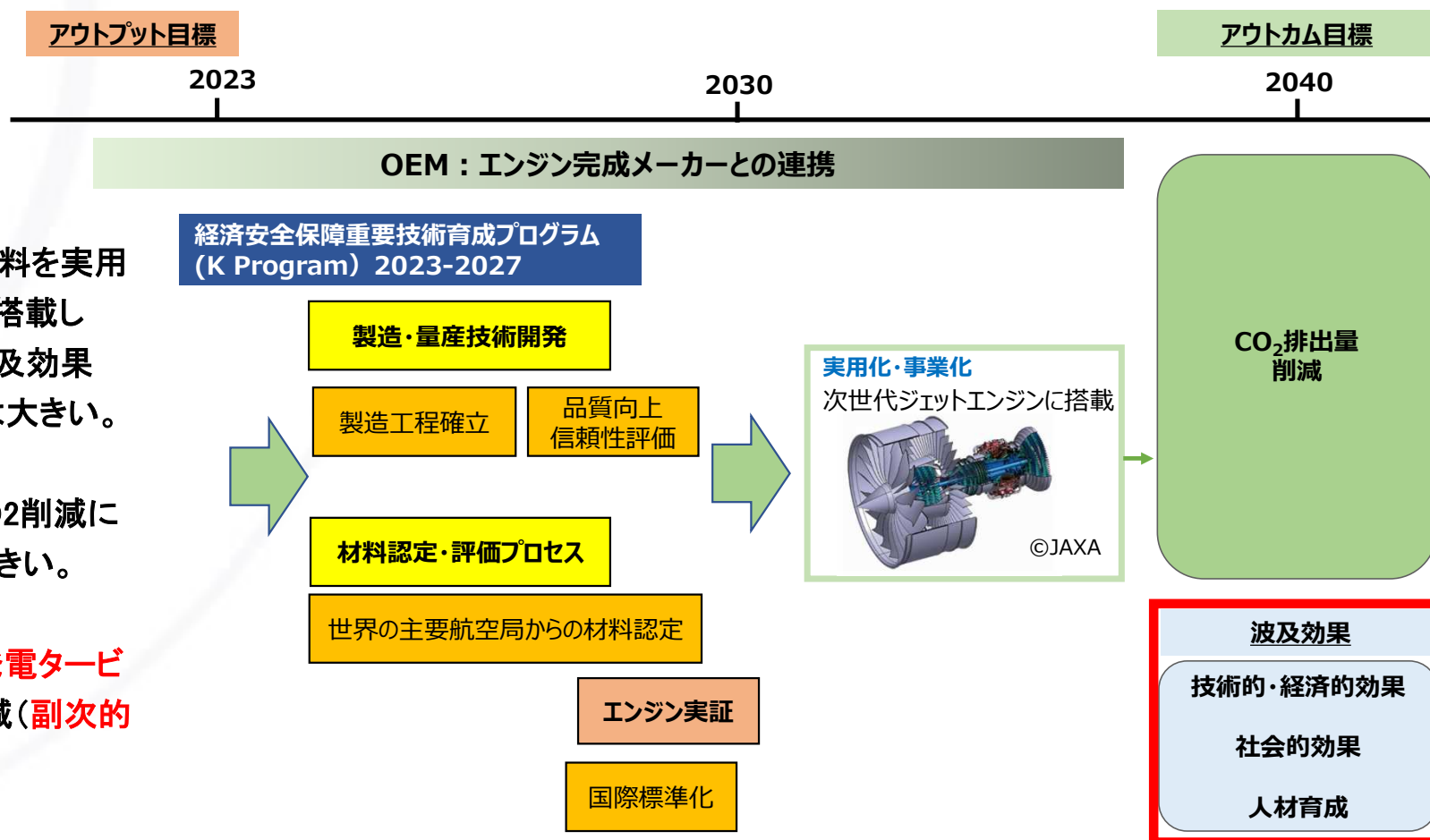
次世代航空機に搭載され**2040年**において、CMC事業としてCO2排出量を**600万トン**/年削減を目指す。

波及効果

■ 他社を凌ぐ1400℃級CMC材料を実用化し、次世代ジェットエンジンに搭載しシェアを拡大していくと、その波及効果（**技術的、経済的、人材育成**）は大きい。

■ 実用化・事業化において、CO2削減に大きく寄与され**社会的意義**も大きい。

■ 航空分野以外の発電分野(発電タービンなど)への適用によりCO2削減(**副次的成果**)も期待される。



費用対効果

本プロジェクトの総費用	63億円* ¹ (2020～2024年)
2040年のCO ₂ 排出削減量	CO ₂ 排出削減量1500万トン* ²
2040年での市場創出効果	機体3.2兆円 + エンジン1000億円獲得

* 1 研究開発項目①～⑥の総費用、研究開発項目④～⑥は、19億円

* 2 研究開発項目①～⑥の総削減量、2040年の新型機の細胴機を6000機と想定
(570万キロリットルの原油削減に相当。費用削減効果1960億円)

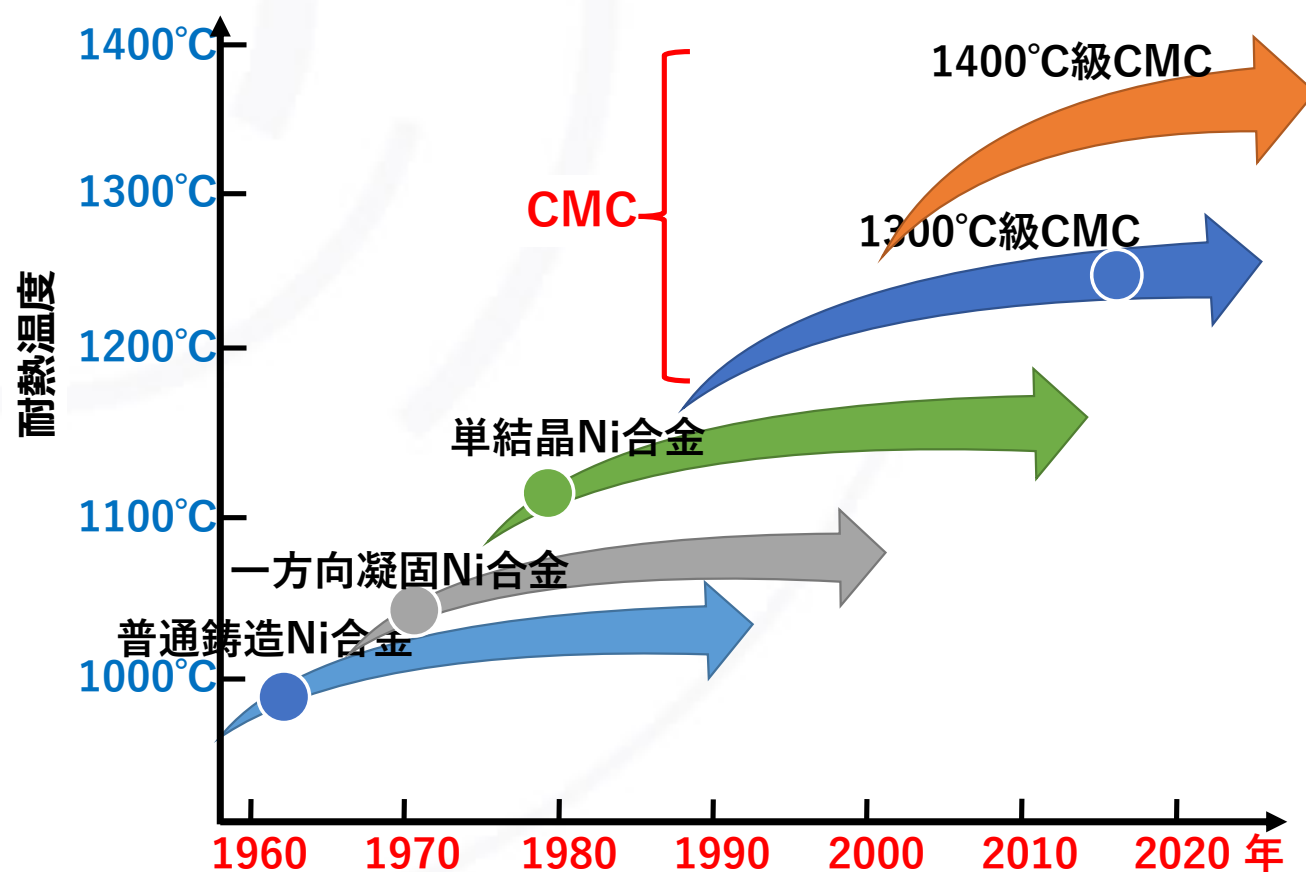
アウトプット目標の設定及び根拠(前身事業等)

【アウトプット目標】

- 引張強度3.0GPa以上、2700°F（1482℃）×400時間曝露後、強度低下20%以下を満足し、高温クリープ特性に優れるSiC繊維を開発する。
- マトリックス、製織の方法、耐環境性コーティングの最適化を実施して、CMASの存在する環境下で、室温引張強度300MPa以上、1400℃×400時間曝露後、強度低下20%以下を満足するCMC部材を開発する。
- 製織工程の高速化、CVI工程、PIP工程の短時間化を達成して、耐熱温度1400℃のCMC部材について、現行と比較して生産レート10倍向上を可能とする材料及びプロセス技術を開発する。

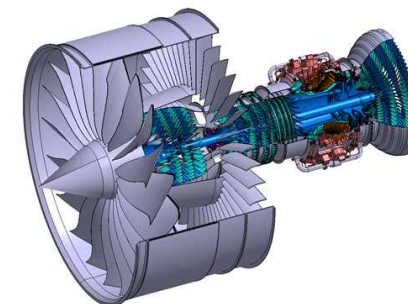
前身プロジェクト（次世代構造部材創製・加工技術開発）	取組の成果とその評価
2015～2019年度の前身プロジェクトにおいて、軽量耐熱複合材CMC技術開発を実施。 • 高性能SiC繊維の開発（引張強度3.0GPa以上、高温クリープ特性に優れるSiC繊維開発） • CMC材料の開発（室内引張強度200MPa以上、1400℃×400時間暴露後強度低下20%以下を満足）	• 合成したポリマーの繊維化を実施し、引張強度3.0GPa以上のSiC繊維が得られた。 • 左記条件を満足するCMC材料を開発した。

アウトプット(研究開発成果)のイメージ(全体像)



- 1400°C級CMCの開発
- 各種CMC製法の確立 (CVI法、PIP法、MI法^{*1})
- 品質向上、高レート化

エンジン部材へ
適用



*1)

CVI : 化学気相含浸法 (Chemical Vapor Infiltration) 耐熱性に優れる。

PIP : ポリマー含浸焼成法 (Polymer Impregnation and Pyrolysis)

MI : 溶融金属含浸反応法 (Melt Infiltration) 量産性に優れる。

アウトプット（終了時）目標の設定及び根拠

研究開発項目	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	
④超高性能SiC繊維の品質安定性向上に向けた開発					
⑤(1)1400℃級CMC材料の実用化研究開発					
⑤(2)1400℃級CMC材料の実用化研究開発					
⑥高レート・低コスト生産可能なCMC材料及びプロセス開発					

研究開発項目	最終目標（2022年3月）	見直し根拠
④ (UBE株式会社)	・引張強度3.0GPa以上、2700°F（1482℃）×400時間曝露後、強度低下20%以下を満足し、高温クリープ特性に優れるSiC繊維を開発する。 ・SiC繊維の特性ばらつきを抑制する製造技術を確立する。	—
⑤(1) (株式会社IHI、シキボウ株式会社)	・マトリックス、製織の方法、耐環境性コーティングの最適化を実施して、CMASの存在する環境下で、室温引張強度300MPa以上、1400℃×400時間曝露後、強度低下20%以下を満足するCMC部材を開発する。	—



アウトプット(終了時)目標の設定及び根拠

研究開発項目	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	最終目標
④超高性能SiC繊維の品質安定性向上に向けた開発					
⑤(1)1400℃級CMC材料の実用化研究開発					
⑤(2)1400℃級CMC材料の実用化研究開発					
⑥高レート・低コスト生産可能なCMC材料及びプロセス開発					

研究開発項目	最終目標（⑤(2)2023年3月、⑥2024年3月）	見直し根拠
⑤(2) (三菱重工航空エンジン株式会社)	・生産性の高いMI法において、新規界面コーティングの開発とUD積層構造・マトリックス形成の最適化を行い、室温引張強度300MPa以上、室温弾性率200GPa以上、1400℃×400時間暴露後の室温での弾性率低下が製造後の30%以内を達成するCMC部材を開発する。	—
⑥ (川崎重工業株式会社)	製織工程の高速化、CVI工程、PIP工程の短時間化を達成して、耐熱温度1400℃のCMC部材について、現行と比較して生産レート10倍向上を可能とする材料及びプロセス技術を開発する。	最終目標は同一 実施期間見直し

アウトプット目標の達成状況

研究開発項目④

UBE株式会社

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

研究開発項目	目標	成果（実績）概要 （2023年3月時点）	達成度	達成の根拠／ 解決方針
④	・引張強度3.0GPa以上、2700°F（1482℃）×400時間曝露後、強度低下20%以下を満足し、高温クリープ特性に優れるSiC繊維を開発する。 ・SiC繊維の特性ばらつきを抑制する製造技術確立する。	・最適ポリマー組成を決定し、製造条件を確立することにより、強度、耐熱性、高温クリープ特性について目標を達成した。 ・ポリマー合成、紡糸技術について、繊維中の欠陥を低減する技術確立し、繊維強度のばらつきを低減することができた。	○	当初の目的通り異物低減を図ることにより、強度の向上とばらつきの低減を確認できた。

アウトプット（研究開発成果）のイメージ

ポリマー合成技術の開発、紡糸技術の開発



新規建設開発棟



ポリマー合成開発設備



紡糸開発設備



試作したSiC繊維

- ・精密反応制御技術を確立
- ・異物/ゲルの低減が可能な生産技術を確立
- ・SiC繊維の強度改善及びばらつき低減を達成

アウトプット目標の達成状況

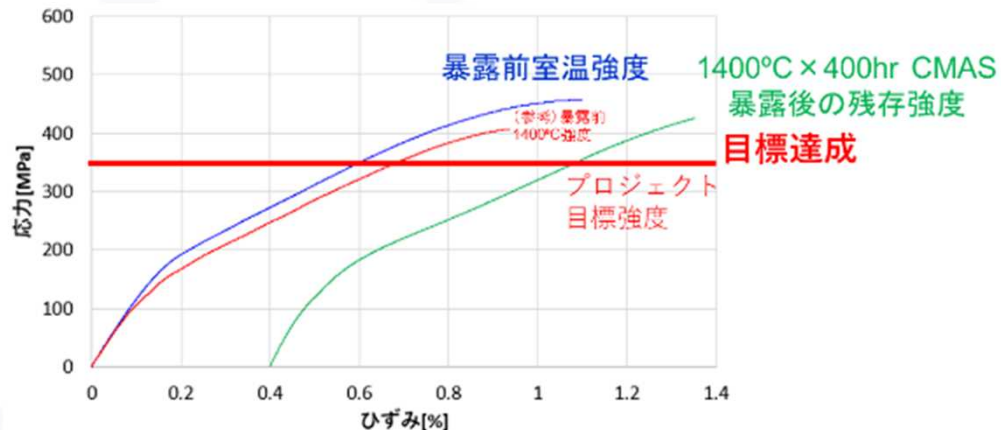
研究開発項目⑤(1)

株式会社IHI、シキボウ株式会社

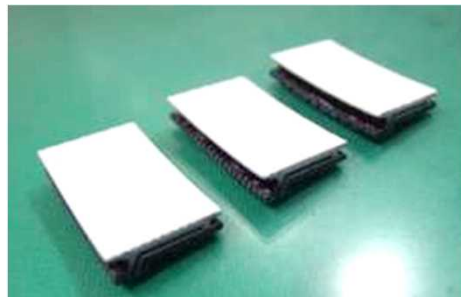
◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

研究開発項目	目標	成果（実績）概要 （2023年3月時点）	達成度	達成の根拠／ 解決方針
⑤ (1)	・マトリックス、製織の方法、耐環境性コーティングの最適化を実施して、CMASの存在する環境下で、室温引張強度300MPa以上、1400℃×400時間曝露後、強度低下20%以下を満足するCMC部材を開発する。	【株式会社IHI】 製織仕様の見直しおよびマトリックス含浸条件の改善・最適化により材料中の欠陥を大幅に低減した。耐環境コーティングについては従来材に比べて飛躍的に耐CMAS性が向上する新組成を見出した。 これらを組み合わせて材料を評価した結果、CMAS存在下の室温強度：494MPa、CMAS暴1400℃×400時間後の強度低下：17%となり、目標達成を確認した。また、当該CMCにて高圧タービンシュラウドを製作し、JAXA F7エンジンに搭載して、エンジン試験実証も完了させた。	◎	材料強度がアウトプット目標を達成したのみならず、当該材料による高圧タービン部品を搭載したエンジン試験実証も完了
		【シキボウ株式会社 製織】 高性能SiC繊維を用いたニアネットシェイプでの三次元プリフォームについて、製法開発を行いXY積層・Z挿入について自動化装置を製作、試作に成功した。過去のNEDO事業（委託）にて、同じく高性能SiC繊維を用いたVf（体積当たりの繊維含有率）30%以上の平板形状三次元プリフォーム製法の開発に成功していたが、今回ニアネットシェイプでの三次元プリフォームについても同等Vfを達成した。	○	目標形状・Vfにてプリフォーム製作に成功、繊維配向も設計どおりとなっている事を確認した。

アウトプット（研究開発成果）のイメージ



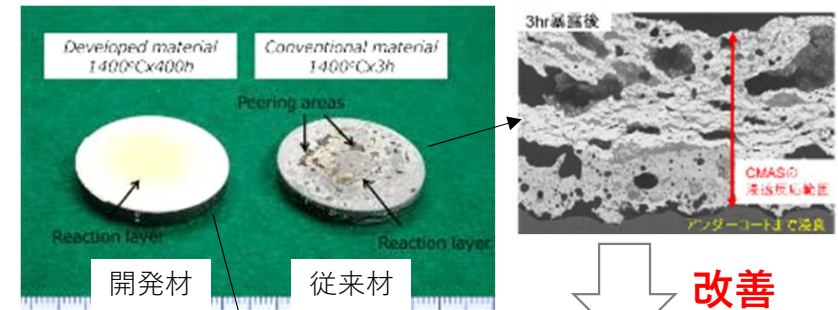
アウトプット目標「CMASの存在する環境下で室温引張強度300MPa以上、1400°C×400時間曝露後、強度低下20%以下を満足するCMC」を達成



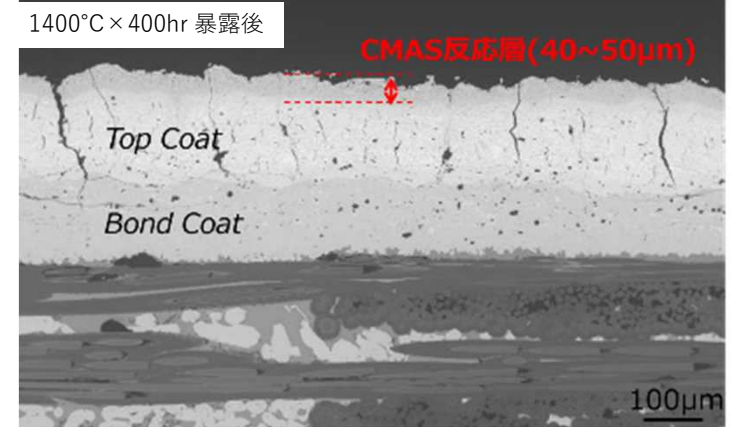
開発したCMCで高圧タービンシュラウドを試作
JAXA F7エンジンに搭載してエンジン試験を実施
計画通り試験を完了し、試験後のCMCシュラウドの評価を完了



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構



改善



1400°Cで耐CMAS性*を有する新たな耐環境コーティング（EBS）を開発
従来EBCは3時間の曝露でも激しく損傷していたが、新開発EBCは400時間曝露後でも剥離なく、CMASとの反応が表層に限られている。

(* CMAS：エンジンに吸い込んだ砂等が高温で溶融してコーティングを腐食させる問題。
中国・インド・中東での運航増加に伴い、近年大きな課題となっている)

アウトプット（研究開発成果）のイメージ

脆性的な特性を持つ高性能SiC繊維に対して、製織性を向上させるコーティング剤の開発と、その施工プロセスについて開発・自動化を行った。

また繊維状態によらない三次元プリフォーム製法の開発を行い、複数の製法にて目標通りの形状・Vfでの三次元プリフォーム製作に成功した。



繊維コーティング・カット装置



目標形状を模擬したニアネットシェイプでの三次元プリフォーム試作品

アウトプット目標の達成状況

研究開発項目⑤(2)

三菱重工航空エンジン株式会社

◎ 大きく上回って達成、○ 達成、△ 一部未達、× 未達

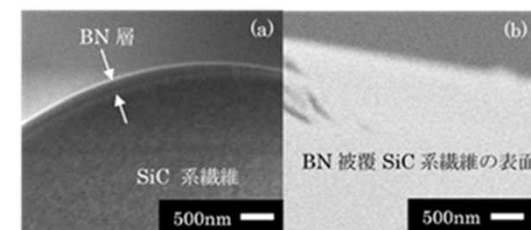
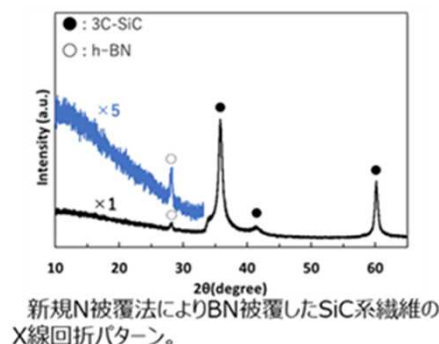
研究開発項目	目標	成果（実績）概要 （2023年3月時点）	達成度	達成の根拠／ 解決方針
⑤ (2)	・生産性の高いMI法において、新規界面コーティングの開発とUD積層構造・マトリックス形成の最適化を行い、室温引張強度300MPa以上、室温弾性率200GPa以上、1400℃×400時間暴露後の室温での弾性率低下が製造後の30%以内を達成するCMC部材を開発する。	新規界面コーティング繊維とSi含浸マトリックスを組み合わせたCMC特性は、破断応力は303MPaで、弾性率は294GPaで、目標とする強度特性が得られた。また、1400℃×400Hr大気暴露後の弾性率低下は8%で目標達成できていることを確認した。	○	エンジン部材のCMCに必要な強度特性が得られた。

アウトプット（研究開発成果）のイメージ

要素技術	成果
新規界面コーティング技術の開発	- BNコーティング（膜厚$\geq 300\text{nm}$）の組織制御条件を設定。 - コーティング処理による繊維強度維持率90~100%。
MI緻密マトリックス技術の開発	- UD積層材への緻密マトリックス形成条件を設定 - マトリックスのボイド10vol%以下，余剰Si 15vol%以下を達成。
CMC特性評価	- 室温引張強度300MPa以上，室温弾性率200GPa以上を達成。 - 大気暴露後の室温での弾性率低下は，製造後の8%を達成。（製造後の弾性率289GPa，大気暴露後の弾性率266GPa）

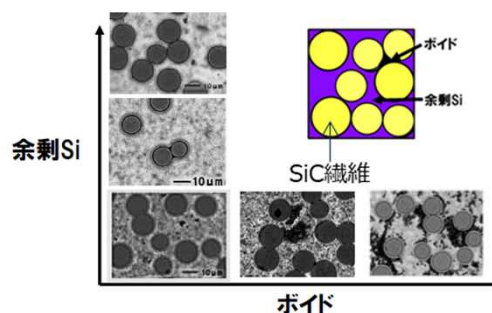
新規界面コーティング（BN）の特徴

- ①原料は毒性・腐食性がなく、室温で安定。
- ②副生成物は水素のみ。
- ③従来法に比べ、低温で結晶性の高いBN層の被覆が可能、結晶組織の制御が容易

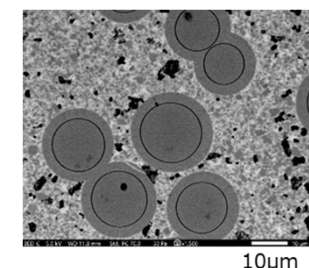


新規N被覆法によりBN被覆したSiC系繊維のSEM観察結果
(a)断面写真、(b)表面写真

MI緻密マトリックスでのマトリックス形成条件探索



余剰Si・ボイドの増減の関係性確認



代表的なCMC断面のSEM写真

アウトプット目標の達成状況

研究開発項目⑥

川崎重工業株式会社

◎ 大きく上回って達成、○ 達成、△ 一部未達、× 未達

研究開発項目	目標	成果（実績）概要 （2023年11月時点）	達成度 （見込み）	達成の根拠／ 解決方針
⑥	製織工程の高速化、CVI工程、PIP工程の短時間化を達成して、耐熱温度1400℃のCMC部材について、現行と比較して生産レート10倍向上を可能とする材料及びプロセス技術を開発する。	下記の項目について技術開発を実施した。 ①CMC用セラムックス繊維プリフォーム(4倍) 異常監視自動化及び サイジング条件改善：レート4倍 ②CVI 繊維界面コーティング形成(5倍) バッチ当たり炉詰数3倍：レート3倍 副生成物対策によるメンテ時間減でのバッチ数増：レート1.5倍 ③マトリックス形成(2.5倍) スラリー改良により回数半減：レート2倍 含侵条件最適化：含侵工程レート3倍 余剰樹脂作業機械化：除去作業時間60%以上減 ④燃焼器パネル部材向けCMC要求特性の検討 開発したCMCの特性が要求特性を満たすことを確認	○ 2024年 3月に 達成予定	ボトルネック工程の事業開始前生産レートを基準に、全工程の生産レートを10倍とすることが目標。事業開始前のボトルネック工程は②であり、この工程が現在5倍に出来ることを確認済み。 残り期間で②工程のバッチ当たり炉詰数を現状から2倍とすることで、10倍向上を達成する予定。

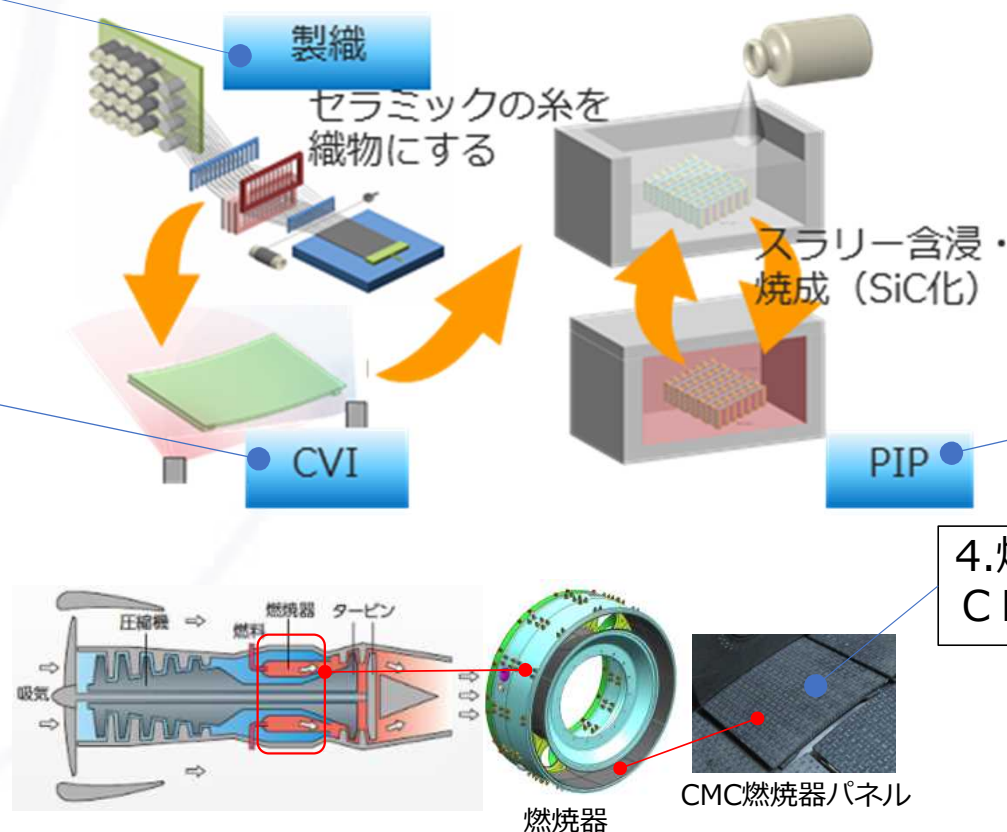
アウトプット（研究開発成果）のイメージ

1. プリフォームの高レート製造技術開発

2. CVI工程の高レート・低コスト製造技術開発

3. PIP工程の高レート・低コスト製造技術開発

4. 燃焼器パネル部材向けCMC要求特性の検討



航空機エンジンの構成

研究開発成果の意義(副次的成果)

研究開発成果の意義

- ・ **ALL JAPAN**(SiC繊維、成形・積層製織、CMC製品化)で取組
- ・ CMCの**各種マトリックス含浸手法**(CVI、PIP、MI)での取組
- ・ 他社を凌ぐ1400℃級のCMC開発。**量産化/実用化に向けての目途付け**

副次的成果

- ・ 航空分野以外の様々な分野(例:**発電用ガスタービン**など)での適用における基盤技術となることが想定される。

特許出願及び論文発表

※2023年11月30日現在

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度	計
特許出願 (うち外国出願)	0	0	2 (1)	3 (1)	5 (2)
論文	0	1	1	2	4
研究発表・講演	0	2	14	9	25
受賞実績	0	0	1	0	1
新聞・雑誌等への掲載	0	2	2	0	4
展示会への出典	0	1	3	0	4

1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

2. 目標及び達成状況(概要)

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

3. マネジメント

(1)実施体制
(※)受益者負担の考え方
(2)研究開発計画

(※) 評価対象外

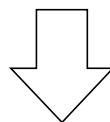
- NEDOが実施する意義
- 実施体制
- 個別事業の採択プロセス
- 研究開発のスケジュール
- 予算及び受益者負担
- 進捗管理
- アウトプット(研究開発成果)のイメージ
- 目標達成に必要な要素技術
- 進捗管理:動向・情勢変化への対応
- 進捗管理:開発促進財源投入実績

＜評価項目 3＞ マネジメント

- (1) 実施体制
- (2) 研究開発計画

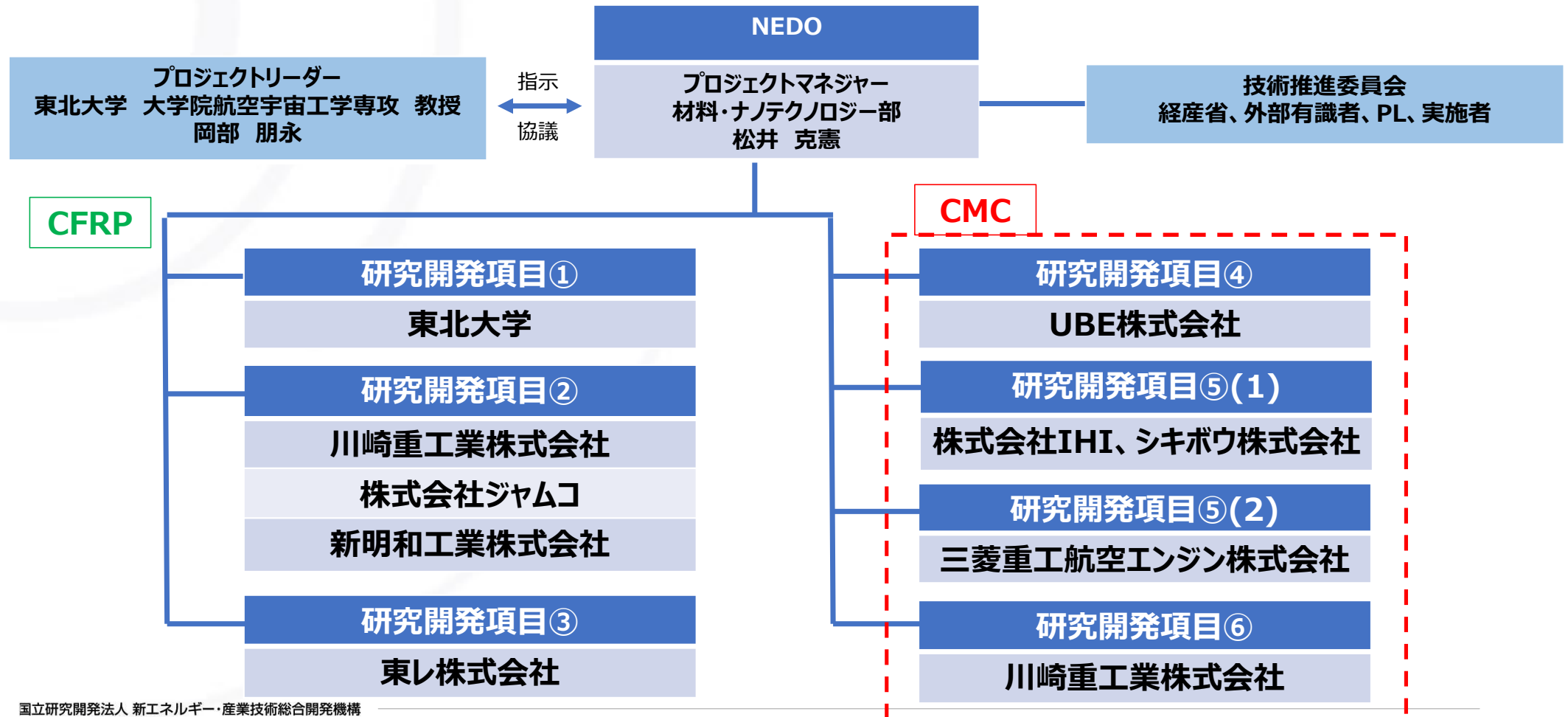
NEDOが実施する意義

- NEDOは、第四期中期計画においては、「**成果の社会実装によりエネルギーの安定的・効率的な供給の確保及び経済・産業の発展に資する研究開発プロジェクトを推進する。**」ことを掲げている。
- 本プロジェクトの狙いは、産業構造の裾野が広い**航空機産業の国際競争力を維持・拡大**し、これらを他産業分野へ波及させることにより、輸送機器をはじめとした様々な分野における製品の高付加価値化を進めることで**日本の主要産業の競争力を強化し、新たな産業創成を目指す**ものであることから、NEDOのミッションと合致する。さらに、**素材開発から材料、部材と航空機に採用されるまでには長い研究開発期間を要するためリスクが大きく、また単独企業での開発ではなく産学官の密接な連携**の下で激化する厳しい国際的な産業競争に勝つ必要があることから、NEDOプロジェクトとしての実施が妥当である。



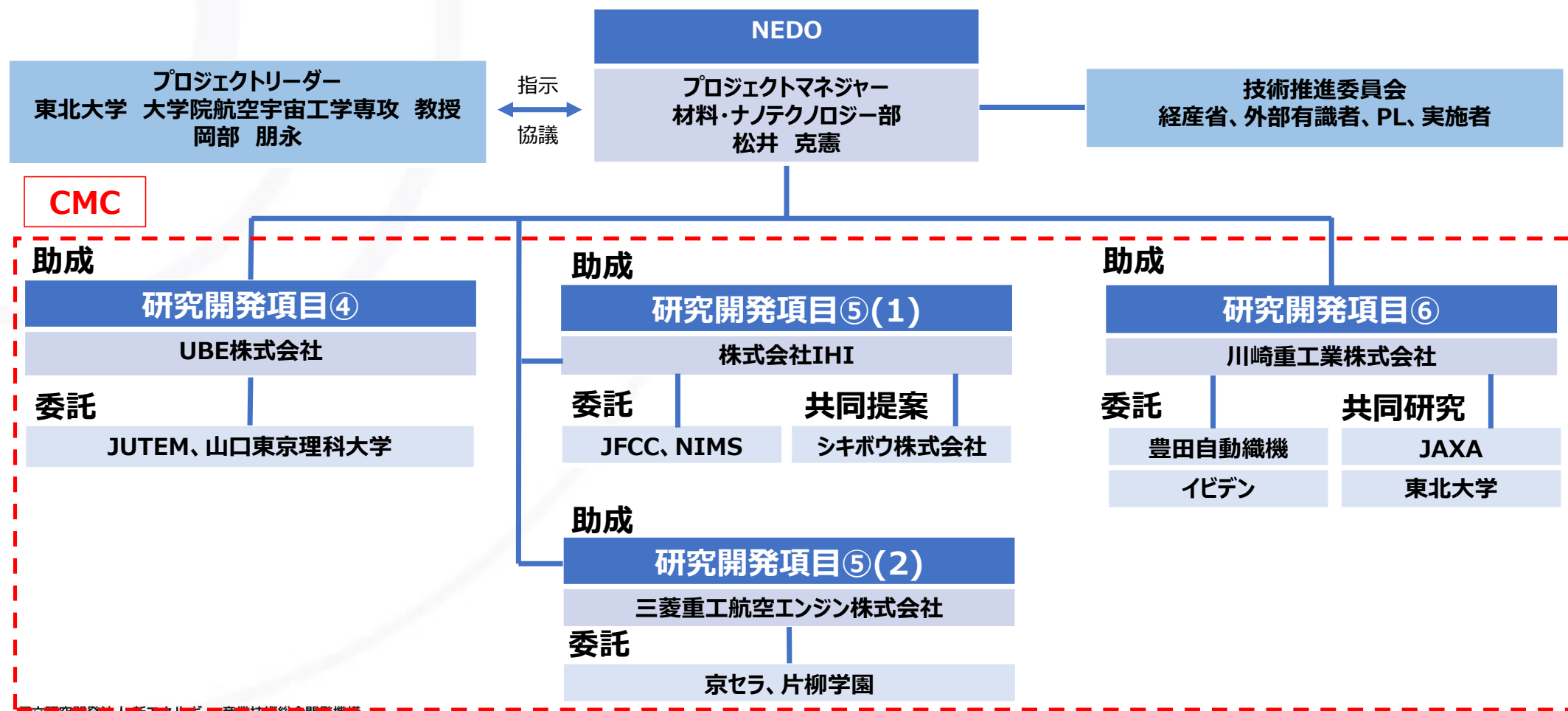
NEDOが保有する知識・実績を活かして推進すべき事業

実施体制（責任体制）（「次世代複合材創製・成形技術開発」PJ全体）





実施体制（責任体制）（CMC事業）



実施体制（実施者間での連携）

1400℃級CMC材料の研究開発

原材料：SiC繊維の開発

研究開発項目④

UBE株式会社



成形・積層技術開発

研究開発項目⑤(1)

シキボウ株式会社

研究開発項目⑤(2)

京セラ、片柳学園

研究開発項目⑥

豊田自動織機

1400℃級CMC製作

研究開発項目⑤(1)

株式会社IHI

研究開発項目⑤(2)

三菱重工航空エンジン株式会社

研究開発項目⑥

川崎重工業株式会社

ALL JAPANでの研究開発

個別事業の採択プロセス

■ 2020年度開始事業

1. 対象：研究開発項目④⑤(1)⑥
・「次世代複合材創製・成形技術開発」
2. 公募：
・公募予告（2/7）⇒公募（3/10）⇒公募〆切（4/20）
3. 採択：
・採択審査委員会（4/21～5/1）（書面審査）
・審査項目：NEDOの標準的採択審査項目で実施した。
①提案者の評価（事業遂行能力の適合性、実施体制の妥当性）
②提案内容の評価（技術開発計画の妥当性、優位性・新規性、実現可能性）
③成果の実用化（実用化・事業化計画の妥当性、優位性）
・採択条件
研究開発項目④：予算の精査をすること
研究開発項目⑤(1)：特になし
研究開発項目⑥：特になし
・留意事項
研究の健全性・公平性の確保に係る取組；公募の際にその他の研究費の応募・受入状況を確認し、不合理な重複及び過度の集中がないか確認した。

■ 2021年度開始事業

1. 対象：研究開発項目⑤(2)
・「次世代複合材創製・成形技術開発」
2. 公募：
・公募予告（1/27）⇒公募（3/1）⇒公募〆切（4/6）
3. 採択：
・採択審査委員会（4/26）
・審査項目：NEDOの標準的採択審査項目で実施した。
①提案者の評価（事業遂行能力の適合性、実施体制の妥当性）
②提案内容の評価（技術開発計画の妥当性、優位性・新規性、実現可能性）
③成果の実用化（実用化・事業化計画の妥当性、優位性）
・採択条件
研究開発項目⑤(2)：特になし
・留意事項
研究の健全性・公平性の確保に係る取組；公募の際にその他の研究費の応募・受入状況を確認し、不合理な重複及び過度の集中がないか確認した。

研究開発のスケジュール

研究開発項目	2020FY	2021FY	2022FY	2023FY	2024FY	2025FY
研究開発項目① (委託事業) 東北大学	①複合材時代の理想機体構造を実現する機体設計技術の開発					終了時評価
			中間評価			
研究開発項目②③ (助成事業) (CFRP) ②新明和工業 ジャムコ 川崎重工業 ③東レ	②熱可塑性CFRPを活用した航空機用軽量機体部材の高レート成形技術の開発 ③航空機部品における複合部材間および他材料間の高強度高速接合組立技術の開発					
▼アウトプット最終目標						
研究開発項目④⑤⑥ (助成事業) (CMC) ④UBE ⑤(1)IHI/シキボウ ⑤(2)三菱重工航空エンジン ⑥川崎重工業	④超高性能SiC繊維の品質安定性向上に向けた開発 ⑤(1)1400℃級CMC材料の実用化研究開発 ⑤(2)1400℃級CMC材料の実用化研究開発			終了時評価		
	⑥高レート・低コスト生産可能なCMC材料及びプロセス開発					

CMC

予算及び受益者負担

◆予算

研究開発項目		補助率	NEDO負担額（単位：百万円）				
			2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	合 計
④	超高性能 S i C 繊維の品質安定性向上に向けた開発	50%	121	330	183	—	634
⑤(1)	1 4 0 0 ℃級 C M C 材料の実用化研究開発	50%	137	218	200	—	555
⑤(2)		50%	—	46	44	—	90
⑥	高レート・低コスト生産可能な C M C 材料およびプロセス開発	50%	145	105	230	175	655
合 計			403	699	657	175	1, 934

◆助成事業の理由

技術的な難易度が高く、実用化に向けて企業の積極的な関与により推進すべき研究開発であることから、助成事業として実施する。

進捗管理

名称	参加者	目的	開催頻度
来期計画説明会	PL,事業者,NEDO	各年度末に次年度計画を確認し、方針決定する	年1回
技術委員会&サイトビジット	PL,事業者,NEDO	研究開発の進捗状況の確認及び現場にて技術者と意見交換する 助成先の委託先もPLと訪問し意見交換	適宜
予算執行状況調査	書面	研究開発が計画通り実施されているか予算面から確認する	毎月
四半期報告会	NEDO	NEDO担当理事に懸案事項/課題解決状況を報告する	四半期毎
技術推進委員会	技術推進委員,経産省,PL,事者,NEDO	外部有識者と研究開発の方向性を議論する	年1回程度

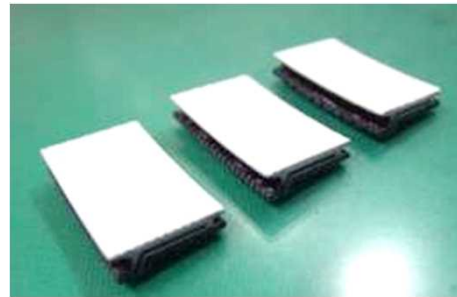
目標達成に必要な要素技術



SiC繊維



製織



CMC部品



エンジン実証



今後必要な要素技術

製造・量産技術開発

製造工程確立

品質向上信頼性評価

材料認定・評価プロセス

世界の主要航空局からの材料認定

国際標準化

進捗管理：動向・情勢変化への対応

日々の実施者とのコミュニケーションや情報収を通じて動向・情勢の把握を行い、**必要な計画の見直しがないか、NEDOから積極的に働きかけを行い、計画変更を柔軟・迅速に実施。**

■ 事業開始時に想定しなかった社会情勢への対応

事業開始時の2020年度に、「**Covid-19**」が発生、また2021年度頃から「**半導体不足**」により納期問題に直面したが、予算の見直しなど適宜実施し、最終目標に影響をしないように対応。

■ 委託先の設備不具合による開発への影響（研究開発項目⑥）

計画の変更と共に実施期間を1年延長して対応実施。

進捗管理：開発促進財源投入実績

件名	年度	金額 (百万円)	目的	成果・効果
【研究開発項目④】 SiC繊維品質評価装置の購入	2021年度	121	高性能SiC繊維の品質を評価するため	品質についてきめ細かく評価できるようになった。
【研究開発項目⑤】 界面コーティングに関する装置導入	2021年度 2022年度	50	製造条件確立と界面形成工程確立のため	界面コーティングに関する評価を確立可能となった。
【研究開発項目⑥】 従来原料での安全性評価 新原料でのCMC作製	2022年度 2023年度	25 45	再発防止の安全対策のため プロセス確立のため	安全対策を確立できた。 より多くの作製を実施する事によりプロセスのデータを取得出来た。

参考資料 1 分科会議事録及び書面による質疑応答

研究評価委員会

「次世代複合材創製・成形技術開発④、⑤及び⑥事業」(終了時評価) 分科会 議事録及び書面による質疑応答

日 時 : 2023 年 12 月 13 日 (水) 10 : 30 ~ 17 : 35

場 所 : NEDO 川崎本部 23 階 2301 ~ 2303 会議室 (オンラインあり)

出席者 (敬称略、順不同)

< 分科会委員 >

分科会長	渋谷 陽二	大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授
分科会長代理	李家 賢一	東京大学 大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻 教授
委員	奥田 章順	株式会社航想研 代表取締役社長
委員	田中 宏明	防衛大学校 システム工学群 航空宇宙工学科 教授
委員	野田 悦生	株式会社本田技術研究所 先進パワーユニット・エネルギー研究所 Executive Chief Engineer
委員	横関 智弘	東京大学 大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻 准教授
委員	渡邊 敏康	PwC コンサルティング合同会社 Public Services (公共事業部) 執行役員 パートナー

< 推進部署 >

金子 和生	NEDO 材料・ナノテクノロジー部 部長
佐々木 訓	NEDO 材料・ナノテクノロジー部 統括主幹
松井 克憲(PMgr)	NEDO 材料・ナノテクノロジー部 主査
桑原 智彦	NEDO 材料・ナノテクノロジー部 専門調査員

<実施者※メインテーブル着席者のみ>

岡部 朋永(PL)	東北大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 教授
松永 格	UBE 株式会社 機能品事業部機能品営業部チラノ繊維グループ グループリーダー
山岡 裕幸	UBE 株式会社 機能品事業部無機材料開発部無機繊維開発グループ グループリーダー
中村 武志	株式会社 IHI 航空・宇宙・防衛事業領域 技術開発センター 材料技術部 主幹
武藤 慎治	株式会社 IHI 航空・宇宙・防衛事業領域 民間エンジン事業部 技術部 主幹
岩崎 康彦	シキボウ株式会社 中央研究所 所長
市川 久仁朗	シキボウ株式会社 中央研究所 課長
田中 雅典	シキボウ株式会社 中央研究所 課長
関川 貴洋	東京工科大学 片柳研究所 助教
水谷 孝治	三菱重工航空エンジン株式会社 民間エンジン事業推進部 部長
松原 将一	三菱重工航空エンジン株式会社 民間エンジン事業推進部 技術マネジメントグループ社員
後藤 淳	川崎重工業株式会社 航空宇宙システムカンパニー 航空エンジンディビジョン エンジン技術総括部 総括部長
中山 良博	川崎重工業株式会社 航空宇宙システムカンパニー 航空エンジンディビジョン エンジン技術総括部 エンジン材料技術部 部長
小田 剛生	川崎重工業株式会社 航空宇宙システムカンパニー 航空エンジンディビジョン エンジン技術総括部 エンジン技術開発部 基幹職

<オブザーバー>

村中 祥子	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 課長補佐
亀山 孝広	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 課長補佐
浅野 常一	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 技術評価係長
小林 義昭	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 評価企画係長
渡辺 智	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 技術評価専門職員
宝関 義隆	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 技術評価専門職員

<評価事務局>

三代川 洋一郎	NEDO 評価部 部長
山本 佳子	NEDO 評価部 主幹
木村 秀樹	NEDO 評価部 専門調査員
中島 史夫	NEDO 評価部 専門調査員

議事次第

(公開セッション)

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明
 - 5.1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋
 - 5.2 目標及び達成状況（概要）
 - 5.3 マネジメント
 - 5.4 質疑応答

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明
 - 6.1 研究開発項目④「超高性能 SiC 繊維の品質安定性向上に向けた開発」（UBE 株式会社）
 - 6.2 研究開発項目⑤(1)「1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発」（株式会社 IHI）
 - 6.3 研究開発項目⑤(1)「1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発」（シキボウ株式会社）
 - 6.4 研究開発項目⑤(2)「1400℃級 CMC 材料の実用化研究開発」（三菱重工航空エンジン株式会社）
 - 6.5 研究開発項目⑥「高レート・低コスト生産可能な CMC 材料及びプロセス開発」（川崎重工業株式会社）
7. 全体を通しての質疑

(公開セッション)

8. まとめ・講評
9. 今後の予定
10. 閉会

議事内容

(公開セッション)

1. 開会、資料の確認

- ・開会宣言（評価事務局）
- ・配布資料確認（評価事務局）

2. 分科会の設置について

- ・研究評価委員会分科会の設置について、資料1に基づき事務局より説明。
- ・出席者の紹介（評価委員、評価事務局、推進部署）

【渋谷分科会長】 今回、分科会長を仰せつかりました大阪大学の渋谷でございます。専門分野は、材料の強度や変形をなど様々なスケールで調べる機械工学におけます固体力学分野です。今日はどうぞよろしくお願い申し上げます。

【李家分科会長代理】 分科会長代理を仰せつかりました東京大学の李家と申します。専門分野は航空機設計の全般になります。今日はよろしくお願いいたします。

【奥田委員】 航想研の奥田と申します。以前、三菱総合研にいた頃から30年ほど航空宇宙関係のいろいろな事業コンサル等をお手伝いさせていただいておりました。本日はどうぞよろしくお願いいたします。

【田中委員】 防衛大学の田中と申します。今回、委員として参加させていただきます。専門は航空機や宇宙機の構造システム全般になります。どうぞよろしくお願いいたします。

【野田委員】 本田技術研究所の野田と申します。私の専門といいますか、ホンダジェットに搭載されているターボファンエンジンをGEと一緒に共同開発した際、ホンダ側の開発責任者をやっておりました。現在は、そのガスタービンやターボファンの技術評価を担当しております。どうぞよろしくお願いいたします。

【横関委員】 東京大学の横関と申します。航空機や宇宙機の構造力学、材料開発、複合材料を中心とした研究開発を進めております。本日はどうぞよろしくお願いいたします。

【渡邊委員】 PwC コンサルティングの渡邊です。私は、事業会社で航空機、自動車の設計、商品企画等を経て今の業種・業態におります。現在は、技術戦略や国際標準化戦略など中央省庁や国研の方々、民間企業の方々などのご支援をさせていただいております。本日はどうぞよろしくお願いいたします。

3. 分科会の公開について

評価事務局より資料2及び3に基づき説明し、議題6.「プロジェクトの詳細説明」及び議題7.「全体を通しての質疑」を非公開とした。

4. 評価の実施方法について

評価の手順を評価事務局より資料4-1～4-5に基づき説明した。

5. プロジェクトの概要説明

- (1) 意義・社会実装までの道筋、目標及び達成度、マネジメント

推進部署より資料5に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【渋谷分科会長】 ご説明ありがとうございました。

それでは、ご意見、ご質問等をお受けいたします。李家会長代理、お願いします。

【李家分科会長代理】 2点お伺いいたします。1点目は、資料8ページに技術戦略上の位置づけのグラフがございましたけれども、その中の説明で、世界でGEが行っているものと、それと今回のUBE殿の行っているものの2つがあるというお話でした。このCMC関係で、世界のほかのところではどのような開発状況の見込みであるか、何か情報をお持ちでしたら教えてください。

それから2点目は、例えば18ページでK Programの説明がありましたが、今回の成果を使って次のK Programでの実用化といいますか、材料認定であるとか、量産技術開発といった予定があるとのことでしたので、その点について、可能な範囲でどのような感じで進めようとしているのかを教えてくださいけると助かります。以上です。

【松井 PMgr】 まず8ページ目のCMC開発ということで、情報としてはGE社が1,200℃級か1,300℃級のCMCを開発したという情報は出ていますが、それ以外の情報は入ってきておりません。さらにGE社が今後どのような開発を進めるのかという情報も入ってこないといった状況で、かなり進んでいる可能性もありますし、日本勢も追いつき追い越せで進める必要があると考えます。

もう一つの18ページ目について、経済安全保障重要技術育成プログラム(K Program)というのは、今年度から既に始まっており、事業者として具体的にはIHI様、UBE様が今採択されて、継続して開発に取り組んでいます。IHI様から午後に詳細な説明があると思いますが、製造の一部はエンジンの搭載をして試験をやられていますが、まだ試作段階の物がやっとできたというところですよ。これを実用化・実装化に向けて立ち上げたプログラムでありますから、5年間で量産化させ低コスト化に繋がる体制に持っていくというのが一つございます。それから航空機の部材に提供するためには、どうしても航空局から認定が必要になります、その認定作業に非常に時間がかかります。最近の例で言えば、三菱重工様がMRJ、スペースジェットでなかなか認定が取れずにやめられた例もございます。航空局からの認定は非常に重要だということで、これらの2本柱として経済安全保障プログラムを通じ、採択された事業者はこれをやっていき、採択されていない事業者に関しては、独自で並行し、継続して開発するという形になると思います。

【李家分科会長代理】 ありがとうございます。

【岡部 PL】 分科会長、私から補足をよろしいでしょうか。

【渋谷分科会長】 お願いいたします。

【岡部 PL】 ご質問ありがとうございます。資料の9ページに航空エンジンメーカー主要3社が記載されております。GE社、Rolls-Royce、Pratt&Whitneyの3社とも、恐らく社内では検討が進んでいるとは思いますが、もともとCMCというのは1980年代にK.W.Prewéという非常に天才的なエンジニアが界面コーティングに成功し、鉄筋コンクリートの考え方を高温材料にも適用したものです。また1990年代にA.G.Evans、J. W. Hutchinson、James Rice、B. Budianskyといった非常に優秀な西海岸の研究者、東海岸の研究者が集結して動かしてきたところがございます。しかしながら、理論的には使えるものの、実際に実装するとなるとなかなか難しいということで、1990年代後半から急速に、こういうものに関してはジェットエンジンだけではなく、日立、三菱、東芝といった発電用タービンにも使おうということで一回盛り上がるのですが、1990年代の後半にコスト面もしくは技術的な課題が大き過ぎて難しく撤退したということがございます。そのときにコアになった2社がございまして、日本カーボン社とUBE(旧・宇部興産)の2社が漸次トツに駆け抜けました。世界においてジェットエンジン系で使えるセラミック繊維というのはこの2社しかつけないという状況にまでいったのですが、社会実装ができなかったというのが実態です。非常に多くの会社がそこで撤退したのですが、GE社は細々と続けました。また、当時1990年代の終わりに、日本の重工各社、もしくは重電メーカーも実はある程度500時間耐久試験等で成功していたのですが、景気のリセッション等も起きて皆撤退していったところがございます。その中で、GE社はこつこつとやって社会実装にまでつなげたというのが2010年代以降のところだと私は理解しております。その点におきましては、はっきり申しまして、あの当時フランス、日本、米国の3国が、英国の一部もサリー大学を中心にございましたが、圧倒的に米国と日本が進んでいたということがあって、その遺産がございますので、今なお世界的に見てコンペティティブな状況にあるというところで、GEの執念といいますか、CMCというのは「消えては浮かび、消えては浮かび」と言えるでしょうか。

【渋谷分科会長】 申し訳ございません。ほかにも質問がございますので、説明は手短にお願いいたします。

【岡部 PL】 長くなりまして、すみません。バックグラウンドについて重要でしたので、これだけ言わせてください。1,200℃が限界なのです。例えばグリーンが大事だとか、燃費の効率を上げるといって、必ず1,200℃以上という話が毎回出てきます。これをベースに、やはり実現したいということが出てきて、取り組むといったところがございます。これが一応 CMC のバックグラウンドとなります。以上です。

【渋谷分科会長】 それでは、ほかのご質問をお受けいたします。野田委員、お願いします。

【野田委員】 9 ページについて、日本の重工 3 社の関係ですが、資料だけを見させていただくと完全に別々にやっておられるようにも見えました。お互い競合関係にあるので仕方ないのかもしれませんが、何か緩やかな協力関係といったところは特にやられていないのでしょうか。

【松井 PMgr】 ご承知のとおり、重工各社はそれぞれの製法で CMC の開発を独自にやられています。例えば、CVI 法や PIP 法、三菱様は MI 法とそれぞれの方式で CMC 作製をされています。当然ながら、今おっしゃられたとおり各社コンペティターになりますので、マル秘の情報を他社に開示するわけにはいかないところもございますが、NEDO としてはできる限り外部に出せる情報、基礎的な情報、試作品を展示会へ出品、学会発表といったことは積極的に進めております。そこで他社との連携にはならない可能性はあるのですが、他社はこういったことをやっているのならうちもやらないといけなといった話にはなと思います。基本的にはコンペティター同士なので、重工各社様と例えば本田様が協力関係ができますかと言えば多分できないといった話になると思います。先ほど申しましたように、できる限り外部に技術的な成果物を出していくようにお願いしています。

【野田委員】 ありがとうございます。

【渋谷分科会長】 ほかにいかがですか。田中委員、お願いします。

【田中委員】 2 点伺います。まず 1 点目が、今回、評価指標を拝見したときに「アウトカムを意識した評価をしてください」と言われていまして、一方、多分当初設定されたときにはそこまで意識をしていなかったのではないかと思います。実際のアウトカム目標、CMC 事業、600 万 t の CO₂ 削減というものに対して、今回のアウトプットの目標がどういう対応がついているのかが分かりづらいところがありました。もし可能であれば、そこを少し教えていただきたいです。

もう一点は、この成果を今後エンジンの開発などに使おうとすると、実際には解析等にこれを載せていく必要があると思います。今回のいろいろ検討をされた材料の材料特性に関して、例えば構成則であるとか、破壊がどういうモデルになるのかといった解析のモデル化をしていくことは今回の取組ではないのでしょうか。または、どこか別の取組でやられているのであれば、それも教えていただきたいと思います。その 2 点をお願いいたします。

【松井 PMgr】 まず 1 点目のアウトカムの目標ですが、CMC 事業 600 万 t、全体の事業で 1,500 万 t という目標を立てたのは、本事業が 2020 年から 2025 年までの事業ですので、事業開始する前の段階、恐らく 2018 年ぐらいの各事業者、経産省等いろいろ集めた情報で目標を立ててこのプロジェクトを開始しており、それを踏襲しているというところではあります。先ほどもおっしゃったように事業環境が変わってくるであるとか、海外 OEM がいつ頃、次世代航空機を導入するであるとか、2020 年にこのプロジェクトが始まってから、コロナや半導体といった様々な外的要因もあり、いろいろな試算があると思いますけれども、2040 年度までに完成し、半分ぐらいは CMC 材料が適用できるという過程の試算を入れ込んで 600 万 t 算出させていただいております。後ほど非公開のときに報告があると思いますが、各事業者が保有するそれぞれ最新の情報から想定し算出をしている指標になると思います。最終的に参考資料として NEDO としても精査していく所存です。

【岡部 PL】 2 点目は、私からお答えいたしましょうか。

【松井 PMgr】 お願いいたします。

【岡部 PL】 2 点目に関しては、先ほどもお話をしたとおり、1990 年代にほぼ理論的な体系は出来上がっていますので、各社それをもうツールの中に入れてあると思います。もちろん新素材になると特性が変わるとか、耐熱性とか、微妙なところは変わるとは思いますけれども、各社は基本的なナレッジは持っているとは私は認識しております。

【田中委員】 ありがとうございます。

【渋谷分科会長】 ほかにございますか。横関委員、お願いします。

【横関委員】 2 点質問させてください。1 点目は、今回、製法の違う幾つかのコンペティター間でということなのですが、5.(2)だけ 2 年目からになっています。例えばいろいろな事情があるかと思うのですが、技術的にメルトインフィルトレーションであるとか、つまり、そちらが少し遅れてのスタートになったというのは、何か技術的なブレイクスルーであるとか、何かしら事情があったのでしょうか。技術的な観点から、もし可能な範囲で理由がありましたら教えてください。

それから 2 点目は、対外発表を含めてオープンクローズ戦略で幾つか成果を積極的に各社様より出していただいたとご説明いただきましたが、非常に多くあるのではないかと思います。もともと助成事業なので努力目標なのかもしれませんが、当初、NEDO 側で例えば想定したものに比較してどれぐらいなのかといった印象だけお聞かせください。よろしくお願いします。

【松井 PMgr】 1 点目の 2 年目から三菱様が参画に至った理由ですが、まず CMC の製法として、CVI 法、PIP 法と MI 法と大きく 3 つのマトリクス含侵手法がございます。これらの製法がある中で、CVI と PIP は耐熱性が高いですが、高コストで、製造時間もかかるということがあります。一方、MI 法は比較的安く早く製造できるということですので、いろいろラインナップを全部持っておこうと。どこかが転んでも、どこかがうまくできればよいといったこともございますから、MI 法を追加でやってみたらどうかとなりました。ただ、MI 法は先ほど申しましたとおり、1,400℃級という耐熱性が CVI 法とか PIP 法に比べて弱いところがございます。ただ、量産化に向けては、MI 法で早く製造できるということで、最終的には燃焼機周りの温度でいきますと 1,500℃から 2,000℃ぐらいになるのですが、そこに 1,400℃級の CMC を設置しても、空気で冷却させないといけないということで、耐熱性の低い例えばタービン周り等にも提供できるのではないかとといったところを考えております。申し訳ございません、2 つ目は何だったのでしょうか。

【横関委員】 対外発表になります。もともと NEDO 側で想定していたよりもどのくらいよかったのかという印象だけでもお聞かせいただければと思います。非常にコア技術なので難しいとは思っているのですが、私として結構されたような印象がありまして、努力もあると思うのですが、そのあたりの印象や取組を教えていただければと思います。

【松井 PMgr】 なかなか初年度、次年度は研究開発始めということもありましてあまり出されていないのですが、やはり非公開の情報が多くなかなか出しにくい状況といったところで、募集をしてもあまり出してくれないというのは、ここに限らずほかの事業者にもそれは同様な状況でございます。しかしながら、国の税金を投入しており公開する必要がありますので、試作品とか出せるものを、例えば nanotech の会場で展示して公開してもらいました。研究発表は比較的写真のない形で見せるような状況もできるので、そちらが少し多いように思っており、展示会が少ないのは試作品が非公開のものが多いう理由からではないかと考えております。比較的事業の後半にかけて何とか頑張ってお出してもらったという印象はあります。

【横関委員】 ありがとうございます。

【渋谷分科会長】 ほかにいかがですか。奥田委員、お願いします。

【奥田委員】 事業の道筋についてお伺いします。11 ページのところで、次世代のジェットエンジンをターゲットにされているということで、恐らく小型航空機のセグメントの次世代のエンジン、それから次世代の小型機というのが出てくるのは多分 2035 年以降になってくると思うのです。そうすると、2030

年ぐらいにおいては、今の GTF であるとか、先日フルのテストをした Rolls-Royce のウルトラファンが中心になってくると思うのですが、そういう意味では、そういった既存のエンジンの発展型もターゲットとして入っていらっしゃるのかどうか。そのあたりを少し教えてください。

【松井 PMgr】 今のご質問に関しては、NEDO 側で情報を持っておらず、できれば午後からの各事業者様に同じ質問を出していただいたほうが正確な情報が出るものと思いますので、申し訳ございませんが、よろしくお願いいたします。

【奥田委員】 分かりました。あともう一つ、9 ページで TRL4 と書かれているのですが、多分 26 ページの IHI 様のものを見ると実証試験もやられていますので、このあたりは TRL5 までいっているという気がいたします。そういう意味では、少し幅があるような印象を受けました。

【松井 PMgr】 事業者によっては、TRL3 とか、TRL4 とか、今おっしゃられたら TRL5 になっているところもありますが、大体 4 ぐらいであると NEDO としては認識している次第です。

【岡部 PL】 私からもよろしいでしょうか。多分 IHI 様のものは、いわゆるミリタリー系のものとなりますので、ここで考えている民間航空機向けといった感じで言うと、やはり 4 が妥当ではないかと私は思っています。

【渋谷分科会長】 ありがとうございます。それでは、渡邊委員をお願いします。

【渡邊委員】 18 ページになりますが、アウトカムのところでは CO₂ 排出の話があったと思います。これを言い換えると、収めた製品に対してエンジンメーカーにどれだけのシェアが入って納入できたかという言い換えになるものと捉えています。このアウトカムについては、このページにも書いているような波及効果がどこにあるか、定性的なものも入るほうが良いものと考えています。人材育成をはじめ航空機関連の開発の理解をいろいろな形で醸成していくこともとても大事だと思っております。現在の研究開発終了後に、今後、どのような組織や団体と連携して行くか考えているのか、ご紹介いただけると大変助かります。

【松井 PMgr】 2040 年の CO₂ 排出量と波及効果ということで、NEDO としては現在のプロジェクトが 3 月に終わり、経済安全保障重要技術育成プログラムの一部事業者には NEDO としてマネジメントを継続して実施しているところであり、それ以外の事業者に関しては定期的にフォローを何年間かやっていく予定にはしております。注力としては、経済安全保障が実際に動き出していますので、こちらがメインになってくるのですが、量産化や認定に持っていけないといけないと思っております。先ほど奥田委員から言われたように、2035 年代頃に導入予定の次世代航空機に搭載していけば経済的な効果もありますし、大きな量産工場も必要となり、技術的な向上に繋がり、人材育成といった副次的効果を今期待しているところでございます。

【渋谷分科会長】 それでは私からお伺いします。先ほどの渡邊委員のご質問にも近いのですが、今回アウトカム、社会実装という目標が新たに設定されました。アウトプットとアウトカムは定義付けが異なると思います。アウトプットは新たに作り出すもの・ことであり、それを社会が受け入れるかどうかはその時点では問わないと思います。一方、アウトカムは社会が受け入れる形に成果として出すというのが必須だと思います。そういう意味で「社会実装」という言葉が使われているのだと思います。そうすると、6,000 機の航空機を想定され、それに CMC が用いられることで CO₂ が削減されるというシナリオよりも、どれだけ受注をして、どれだけ産業振興に貢献したかということの方が、もっと重要ではないでしょうか。それを社会実装、アウトカムの目標にすべきではないかと思います。おそらくこの数字を出されるときに JADC（一般財団法人 日本航空機開発協会）のレポート等を参考にされて数値を出されたかと思いますが、例えば年間の細胴機の受注を 1,000 機程度とした時に一体どれくらいの割合を受注できるかといった具体的な道筋が、2030 年までの間にできておくことが本当の意味でのアウトカムになると思います。その点はいかがでしょうか。

【松井 PMgr】 ご指摘の通りと思いますが、最終的には、開発した物は各事業者様もお金を半分投資しますので、当然回収するために次世代のエンジンにも適用していくということが第一目標になります。海外 OEM も新しいジェットエンジンをどんどん開発していきますし、2035 年から 2040 年に何千機になるかという予想について NEDO としては予測するのは非常に難しいものがございます。社会的には CO₂ 排出量がどうしても問われていますので、2040 年でどれだけの削減量が見込めるかというのが一番社会に向けても分かりやすい指標ではないかと思います。当然おっしゃられることはよく分かりますし、航空機メーカーとしては、次世代エンジンに開発であるとか、各事業者の開発した部材等が適用されて社会実装に繋がるのが最終的なゴールだと思いますが、その結果として、CO₂ 削減量の方が、皆様が分かりやすい指標で、これだけ航空機業界も CO₂ 削減ができましたということに繋がったという考えであります。

【渋谷分科会長】 ありがとうございます。それでは予定の時間になりましたので、ほかにもご意見、ご質問あると思いますが、以上で議題 5 を終了いたします。

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明

省略

7. 全体を通しての質疑

省略

(公開セッション)

8. まとめ・講評

【渡邊委員】 今日は、いろいろな形でお話しさせていただきまして、どうもありがとうございました。今回の事業は、非常に足の長い、リスクをはじめ色々な要素がある中で、各社も助成事業として、自社の開発のリソースやリスクも負いながら、着実に成果を出していただいていると再認識したところです。

「社会実装の道筋」という議論が色々あったものと思っております。今回のそれぞれのテーマでは、CMC の多様な製法やエンジンの適用先、そこにおけるスペックをどうするかなど、各社がそれぞれのテーマの中で模索されながら成果を出していただいているものと捉えています。今後は、TRL のレベルをどのように上げていくかが課題になってくるものと考えています。標準、規格のような、CMC としてスペックをどうするか、それを OEM に適用されるための認証をどうするかは、今後、向き合っていかなければいけない課題だと思っております。今回の研究開発では、TRL に着目されていましたが、広くは xRL のような形で、例えば標準や環境の整備といった GRL はどのレベルにすべきかであるかや、それをエコシステムとしてどうしていくかといった SRL といった話であるなど、ほかのレディネスレベル (Readiness Level) も意識されながら次のフェーズに昇華していただければと思います。今日はどうもありがとうございました。

【渋谷分科会長】 ありがとうございます。次に、横関委員お願いいたします。

【横関委員】 本日は、ご説明いただきありがとうございました。コロナや計画変更等々いろいろな状況において柔軟に対応いただいたマネジメントに非常に興味いたしました。また社会実装に向けた課題としてブレイクダウンして、耐熱性能あるいは耐熱性能を上げながら、低コスト化・量産化という適切なアウトプット目標を立てて実施された点は大いに評価できると思います。特に、繊維をつくる場所、CMC の製造技術、部材製作まで一貫した体制を取って実施されている点は、技術の底上げであるとか、技術レベルの向上、あるいは CMC は非常に付加価値の高いものですから、先進技術を皆で維持するといったところは非常に重要なプロジェクトだったと思っています。今後もこういった国として支援

すべき先進技術というのは必要だと思いますので、ぜひ継続的な取組があるとよいと個人的には考えております。一方、この技術を社会実装するためには、いろいろな製法がある中で各社がやっているというところはあるのですが、なるべく基礎技術を含め、CMC をどうすべきか、どう設計すべきか、どうしたら社会実装の壁を越えられるのかといったところに関しては共通の何かしらのアイデアであるとか、議論の場が必要ではないかと思います。そのためにも特に産学連携を含めたところの体制を取りながら、協調領域が増えるとうよいと思ひながら本日は聞いていました。ぜひ今回のプロジェクトの成果を今後に生かすためにも、そういった改善点も含め、議論していただければと思っています。本日はありがとうございました。

【渋谷分科会長】 ありがとうございます。次に、野田委員お願いいたします。

【野田委員】 本日はありがとうございました。私はこの分野は、ほとんど知見はなかったのですが、分かりやすい資料や説明でよく理解することができました。ありがとうございます。また、もろにコロナとぶつかっているような期間で全ての目標を達成しているというのは、自分たちの会社のことを考えると、これはすばらしい成果だと思います。日本の得意とする技術をオールジャパン体制で世界に打って出るという取組、考え方、やり方というのも非常によいと思いました。それから、今回のテーマは、材料や製造方法の割と基礎的なところになりますが、部分によっては、もうエンジンにも投入されて試験ができていのは、リスクマネジメントとしてもすごいと感じます。つくりのほうでも、ニアネットシェイプの製造方法、ちょっとビデオは見せてもらえなかったのですが、これはかなりの強みになるのではないかと感じました。私たち本田も GE と付き合っていて、欧米の三大エンジンメーカーというのは、なかなか高圧系のタービンやコンプレッサーや燃焼機というところの設計には絶対に触れさせないといいますか、自分たちで守り抜くという考えをしているのですが、材料や製造というところは、よいものはあればどんどん使っていこうという姿勢で実際に使っていると思いますし、認定などのサポートも十分期待できると思いますので、今後の事業化に向けて、ぜひ頑張ってくださいと思います。以上です。

【渋谷分科会長】 ありがとうございます。次に、田中委員お願いいたします。

【田中委員】 今日は非常に貴重なお話をいろいろ伺えて、本当に私自身も非常に勉強になりました。特に、コロナ禍で非常に活動が難しい中、ここまでまとめていただいた推進部の方々、実際に行われた各企業様に本当に尊敬をいたします。実際アウトカム目標もほぼ達成されていますし、非常に充実した成果が得られていると思います。各社それぞれ独自の技術で工夫をされていることもよく分かりますし、非常に期待が持てると感じました。実際、社会実装に向けても道筋も各社で種々考えていただいでいて分かりやすく、非常によいものだと思っています。そうした上で、少し気になった点が2点あります。まず1点目は、社会実装に対する道筋は分かりやすかったのですが、ここに掲げられているアウトカム目標でCO₂の話が突然出てきていて、アウトカム目標というものが本当にこれでよかったのかどうか、アウトプット目標との関わりがちょっと分かりづらかったかというのが正直なところです。あまりよくはないのかもしれませんが、アウトプット目標に対して道筋がしっかり見えるアウトカムの目標みたいなものがあつたほうが、それをワンステップとしてCO₂だと分かりやすかったのですが、突然CO₂になっていたのもそこが気になったところでした。2点目は、1、2、3の項目になりますが、CFRP 側の中間評価の際にも参加させていただきまして、そのときに岡部先生をはじめとした東北大の皆様が非常にコアなところ担っていらっしゃるって主導的に活動されていたということで非常に産学連携がうまくいっていると感じていたのですが、今日話を伺っていると学側の部分が見えづらかったところがありました。そこには学側の頑張りも必要とは思ひのですが、もう少し産学連携が見えるとよいと感じた次第です。以上になります。

【渋谷分科会長】 ありがとうございます。次に、奥田委員お願いいたします。

【奥田委員】 本日はありがとうございました。とても有意義な委員会だったと思います。各社様のお話を伺っていても、事業化に向けて非常に技術開発が進んでいる印象を受けましたし、現状 **TRL4** ということですが、今後これを **TRL5** や **TRL6** に上げていただくとともに力を入れていただきたいと思っています。アウトカム、社会実装を考えると、技術開発とともに今後出てくるのは、恐らく認証・認定の話と事業化の話だと思っており、そこをやろうとすると、どうしてもエンジン **OEM** との関係は不可欠になってくると思うのです。ただ、この部分は各社様のそれぞれの方針で決まってくるものだと思うのですが、一方、アウトカムを実現するために各社様が進めているものをまたサポートしていくことも今後必要だと思います。特に、そのサポートを選択的に行っていくことがすごく重要だと思っており、そここのところを今後きちんと進めていただきたいということなのです。まだ先になるとは思いますが、将来的には **CMC** を積んだエンジンは誰が使うかと言うと、航空会社様が使うわけで、航空会社様が使おうとすると、出来た製品を長く使っていかねばいけなないので、当然そここのところのニーズも出てくる。そういうのは日本の場合は **JAL** 様、**ANA** 様といった非常に世界をリードしている航空会社様もありますから、そういうところのニーズを先取りしていくということも一つ今後は有効ではないかと思いました。本日はどうもありがとうございました。

【渋谷分科会長】 ありがとうございました。次に、李家会長代理お願いいたします。

【李家分科会長代理】 本日いろいろ詳しい話を伺いまして、この研究テーマに関して、最初が **SIC** の繊維をつくること、それから製織性、それから **CMC** に仕上げていくといったところで、各社様々な工夫をされて、よりよいものをつくろうとされていることがよく分かりました。その中でも、それぞれの分野で秀でたものがあるようですので、それを総合的に使うことで、最後の目標となっていたと思いますけれども、単通路機向けのエンジンに実装されるような、実際の機体の開発に向けて、ハードルは高いと思いますが、そちらに向けて進んでいただければと思います。そのためには、どうしても個社ごとにいろいろな活動はされていますが、そのあたりの成果を全体で活用するということをうまく考えていただけたらと思います。なかなか会社ごとですとそれができないと思いますから、今回のような枠組みの中で各社の成果が有効利用されて、それでよりよいものをそれぞれの会社がつくり出せるようになっていけばよいと思っております。この計画はこれで終了となっていますが、午前話でも **K Program** に続いているということでしたので、その中で社会実装に向けて様々なことをやっていただければ幸いです。本日はありがとうございました。

【渋谷分科会長】 ありがとうございました。それでは、最後に私から講評をさせていただきます。まずは、委員の皆様方、本日は朝から本評価会にご出席賜りありがとうございました。適切なコメントとご意見をいただき、非常に有意義な終了時評価になったと思っております。また、岡部 **PL** と松井 **PMgr** は本当に大変なご苦勞をされたと思います。何十年も前になりますが、私も民間会社にいましたので、守秘義務で非常にご苦勞されるというのはよく分かります。そうした中でも、以前から横連携が必要だと折に触れて我々もお伝えしてきましたが、それを少しでも実現しようとする努力をなされていることがよく分かりましたし、徐々にですが進展していることを感じました。また、川重様が不測の事態でトラブルが起きたときに、一年ずらして継続するというマネジメントのご判断が適切に行われてたと思います。そこで中止してしまうと、もうその進展はありません。どんなリスクを負ってでも、やはり最後まで実行するという姿勢は国のプロジェクトとして必要ですし、それができるのだというのを、今日改めて川重様の話を聞きながら思った次第です。そのときのご決断は非常にご苦勞だったと思いますが、非常によいご判断をされたものと理解いたします。

私事で恐縮ですが、9月から1か月ほどヨーロッパに滞在し、前半スペインのマドリード州が出資している研究所にしばらくおりました。ご存じのように、スペインは日本の国力に比べて非常に小さい国ですが、マドリードの自治州が研究所をつくり、材料に関わる研究を行っております。そこでは **EU** という枠組みの中で、ヨーロッパ各国の大学や企業との共同研究、産学連携を積極的に行っています。国

単体で見ると日本よりも研究費が少ないはずですが、我々よりも人も設備も整っていることに大変ショックを受けました。先ほど岡部 PL が言われたように、産学連携の在り方を考えないといけないのですが、なかなか日本の中でそういった拠点を設けても、継続性があまりありません。この原因の一つとして学の方にも問題があります。我々の教員の意識改革も必要と思います。また、ヨーロッパにいますと、よく「日本は素材が強い」ということを周囲の人から聞きます。後半はドイツのデュッセルドルフに行ったのですが、東レ、帝人等をはじめとする日本の素材メーカーが非常に精力的に企業活動をしています。ただ、部材・部品化する段階では、それが弱くなってしまって、最後に物にするところまで続かない。そのために各素材メーカーはいろいろな会社を買収して、弱みを補い、強みを活かしているのだと思います。部材・部品化についてはドイツのメーカーが非常に強いので、両者が手を結んでいる実態はよく理解できます。先ほど奥田委員も言われたように、別に日本にとどまる必要は全くなく、海外と柔軟に手を結び合う時代になっていることを実感します。大学教員も日本にとどまる必要はなく、海外の適切な大学や研究所に滞在し、より共同研究を律速し、海外から情報発信を素速くする時代にそろそろ入りつつあると思います。そそうする活動が、認証や国際標準化等の困難な問題に対して少しでも柔軟に対応できる仕組みができるのではないかと思います。

最後に、こういう場に参加をさせていただいて、企業様の顔ぶれはいつも同じと感じます。先週、現地調査をさせていただき非常に感銘を受けました。企業自身のソースを用いて精力的に取り組んでいる会社様ももちろんあると思うのですが、従来からの流れに沿って実施しているというイメージの印象を受ける場合もあります。やはり、ここは新しい風を入れる必要があるのではないのでしょうか。なかなか該当する新規企業は見あたりませんし、未知数な企業に対するリスクもあると思うのですが、国のお金である以上、思い切ってそのような試みもプロジェクトに含めて良いと思います。航空機産業は大型の設備が必要ですし、継続的なノウハウや技術を受け継ぐ人材も必要だというのはよく分かっているのですが、一方新しいアイデアを吸い上げるような仕組み・仕掛けがあってもよいと思います。今日一日いろいろな報告を聞かせていただいて、非常に皆様 CMC に対して成果を挙げられていますし、プロジェクトの研究開発項目①②③の CFRP と研究開発項目④⑤⑥の CMC は両輪だと思います。これらが NEDO で中心的に位置づけされるプロジェクトとしてますます発展することを期待いたします。今日はどうもありがとうございました。

【中島専門調査員】 委員の皆様、貴重なコメントありがとうございました。それでは委員の皆様からのご講評を受けまして、材料・ナノテクノロジー部、金子部長より一言お願いいたします。

【金子部長】 ただいまご紹介にあずかりました NEDO の金子でございます。本日、朝から夕方までの終日、この長丁場の委員会におきまして活発にご議論いただきましたことに改めて御礼を申し上げます。ありがとうございます。先生方からいただいたお褒めの言葉、またご指摘もいろいろあったかと思います。中には厳しいお言葉もございましたが、それは、ある意味この技術に対する期待に対する大きさだと思っております。この事業は、前身事業もあり長年開発を行っているわけではございますけれども、ようやくここまで来たといったところでもございます。これからの事業におきましても、先生方からいただいたアドバイス、ご指摘、そういったものを踏まえまして、我々としても事業者と一緒にこの事業、この技術を育て、社会実装にぜひともつなげていきたいと改めて感じた次第でございます。先生方におかれましても我々の事業を見守っていただき、またアドバイス等を引き続きいただければと思います。本日はどうもありがとうございました。

【中島専門調査員】 ありがとうございます。続きまして、岡部 PL から一言お願いいたします。

【岡部 PL】 本日は、長い時間ご審議いただきまして誠にありがとうございました。やっこの事業、CFRP、CMC で半分終わるところで、少しほっとしている部分はございます。まず渡邊委員からご指摘いただきましたように、今後実際に使っていくときには規格、これは奥田委員からもお話があったところですが、認証・認定もしくは規格といったところが肝になってくると思っております。MRJ

と同じ轍を踏まないためにも、早めの認証・認定、メーカーの認定も含めたところを進めていくことが重要であります。その点に関しては事業者の方々に改めて再確認していただきたいと思っています。また、横関先生がおっしゃっていたように、やった仕事がなくなってしまうというのが問題ではないかということで、例えば今回3つの製法であるのですが、こういうプロジェクトがあるから3つあるということを認識できるわけで、そういう意味でも、それは田中委員からのご指摘でもあるのですが、先ほども言いました産学連携がもう少しCMC分野で進まない、企業はやはり利益の現場ですから、ロジスティックとして支える学側がないというのは少し問題ではないかと、私はCMCという分野の人材不足を非常に喫緊の課題として強い認識を持っています。JAXAも含め、日本のアカデミアはこの分野に速やかに手当てをしていくべきであろうと考えます。それというのは、世界を代表する糸が2つとも、今その一つは合併会社になっていますけれども、日本初の会社が市場を寡占している状態ですので、我々としてはもう少しサポートができればよいと思っています。それから野田委員からご指摘がありましたように、我々、今回材料ということで、これは渋谷分科会長からのお話にもありましたが、素材というのは日本の強みだと理解していますので、ぜひこういう事業を社会実装につなげていただけるように、この事業は終わりますけれども、今後も事業者に働きかけていきたい、また、K ProgramのPOを仰せつかっていますので、K Program含めて働きかけていきたいと思っています。また私たちは金属でも強いのですが、マドリードにIMDEA(Madrid Institute for Advanced Studies)といったところがございます、渋谷分科会長はそこに行かれたのではないかと理解をしています。やはりヨーロッパのアカデミアというのは、いわゆるリアリスティックな問題から学問を抽出する力が非常に強いと思っています、日本の研究者は教科書の中から問題を抽出する。やはり、こういうリアリスティックな問題にぜひCMCに関心を若い世代に持ってもらいたいというのが、今回プロジェクトをやっていて感じたところです。それで、10年ぐらい前はNEDOプロでも大学の集中権方式で大学に企業が集まるとというのが結構あったのですが、ちょっとまた個社に戻ってきている。渋谷分科会長がおっしゃっていたような、企業に新風、メンツに新風という意味では、これは利益誘導をしたいから言っているわけではなく、アカデミアみたいなところでオープンプラットフォームを立てて、そこに企業が入って人材を育てていく。そこで認証・認定もしくは製法をジェネライズするということも考えていってもよいのではないかと思います。それが李家会長代理の言う単通路機の我々日本の産業競争力強化につながればよいと考えます。最後に、田中委員がおっしゃっていたアウトカムについて、今日何度か指摘がありましたけれども、この点は真摯に捉え、我々なりにもう一回考えてみたいと思います。本日は長い間ありがとうございました。

【渋谷分科会長】 ありがとうございました。それでは、以上で議題8を終了いたします。

9. 今後の予定

10. 閉会

配布資料

資料 1	研究評価委員会分科会の設置について
資料 2	研究評価委員会分科会の公開について
資料 3	研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて
資料 4-1	NEDO における技術評価について
資料 4-2	評価項目・評価基準
資料 4-3	評点法の実施について
資料 4-4	評価コメント及び評点票
資料 4-5	評価報告書の構成について
資料 5	プロジェクトの概要説明資料（公開）
資料 6	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
資料 7-1	事業原簿（公開）
資料 7-2	事業原簿（非公開）
資料 8	評価スケジュール
番号なし	質問票（公開 及び 非公開）

以上

以下、分科会前に実施した書面による公開情報に関する質疑応答について記載する。

「次世代複合材創製・成形技術開発④、⑤及び⑥」（終了時評価）分科会

ご質問への回答（公開分）

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 5 P.10	本プロジェクトの成果と他事業の成果がどのように関連していくのかを、関連性が分かるようにご説明ください。また、本プロジェクトと他事業成果を組み合わせることによる創出される、我が国の強みは具体的にどのようなものとなりますか？	奥田委員	本事業の CMC と耐熱合金は航空機エンジン軽量化を目指しています。CMC を実用化するために信頼性保証手法の標準化を組み合わせる必要があります。また将来の水素航空機にも CMC や耐熱合金は使用されていく可能性があります。
資料 5 P.15	図の右下に「技術的・経済的波及効果」。「社会的波及効果」とありますが、これらは定性・定量的に分析・試算などがなされているのでしょうか？ P.2 のアウトカム目標には記されていない項目ですが、取り扱いはどのようなのでしょうか？	奥田委員	NEDO は、波及効果の定量的な分析・試算などは実施しておりません。アウトカム目標に向けて、各事業者がそれぞれの取り組みを行う中で、これらの波及効果があることを期待しています。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 5 P.17	アウトカム達成の見込みについての根拠がいずれも経済安全保障育成プログラムで達成見込みとなっていますが、本プロジェクトの位置づけ、経済安全保障育成プログラムで達成できる見込みの根拠などが不明です。このまま読めば、本プロジェクトではアウトカム達成は難しく、達成は経済安全保障育成プログラム次第ということですか？	奥田委員	経済安全保障育成プログラムの中で継続して研究されている事業者もありますが、独自で継続して研究されている事業者もおられます。それぞれで、実用化、実装化を目指していますので、経済安全保障育成プログラムだけと言うわけではございません。もちろん達成出来るかは各事業者次第となりますが、可能な限り NEDO として支援していく予定です。
資料 5 P.29,P.31	次世代複合材創製・成形技術開発の成果から、今後の課題、取り組むべき項目で、特に重要と考えらえる事項がございましたら、お聞かせください。	奥田委員	技術的には、ラボレベル程度と認識しておりますので、これから量産化、材料の航空局からの認定、標準化などが重要な課題と想定しています。
資料 5 15 頁	量産化された 1400℃級の CMC がジェットエンジンが次世代航空機（6000 機の 50%）に採用されることがどの様に、CO ₂ 排出量 600 万トン削減につながるか教えてください。	田中委員	CMC 適用による軽量化及び冷却空気量削減による熱効率向上により、細胴機 1 機あたりの CO ₂ が約 2000 トン削減が見込める事から 3000 機として 600 万トン削減に繋がると想定してます。
資料 5 40 頁	課題④の成果が、他の課題に反映されることはわかったのですが、他の課題(項目⑤-(1),⑤-(2),⑥)間での繋がり、情報共有などはどの様に行われていますでしょうか。	田中委員	項目⑤-(1),⑤-(2),⑥の事業者は、基本的にコンペチターであるため非公開情報の情報共有はされてません。公開情報については、学会、文献、展示会などを通じ情報発信されてます。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 5 P31	解決の方針のところで「残り期間で現在5倍の②工程のバッチ当たり炉詰数 3 倍⇒6 倍とすることで、10 倍向上を達成する予定」とあるが、この文では意味がよくわからない。意味のわかる記述に変更していただけないか？また、このプロセスのみを3倍→6倍にすることで、全体効率が5倍→10 倍になる根拠も示してもらえるとわかりやすいです。	横関委員	ボトルネック工程の事業開始前生産レートを基準に、全工程の生産レートを10倍とすることが目標としています。事業開始前のボトルネック工程は②であり、この工程が現在 5 倍に出来ることを確認済みです。 残り期間で②工程のバッチ当たり炉詰数を現状から 2 倍とすることで、10 倍向上を達成する予定です。

参考資料 2 評価の実施方法

NEDO における技術評価について

1. NEDO における技術評価の位置付けについて

NEDO の研究開発の評価は、事業の実施時期毎に事前評価、中間評価、終了時評価及び追跡評価が行われ、研究開発のマネジメントにおける PDCA サイクル（図 1）の一角と位置づけられています。さらに情勢変化の激しい今日においては、OODA ループを構築し、評価結果を計画や資源配分へ適時反映させることが必要です。

評価結果は、被評価事業等の資源配分、事業計画等に適切に反映させることにより、事業の加速化、縮小、中止、見直し等を的確に実施し、技術開発内容やマネジメント等の改善、見直しを的確に行っていきます。

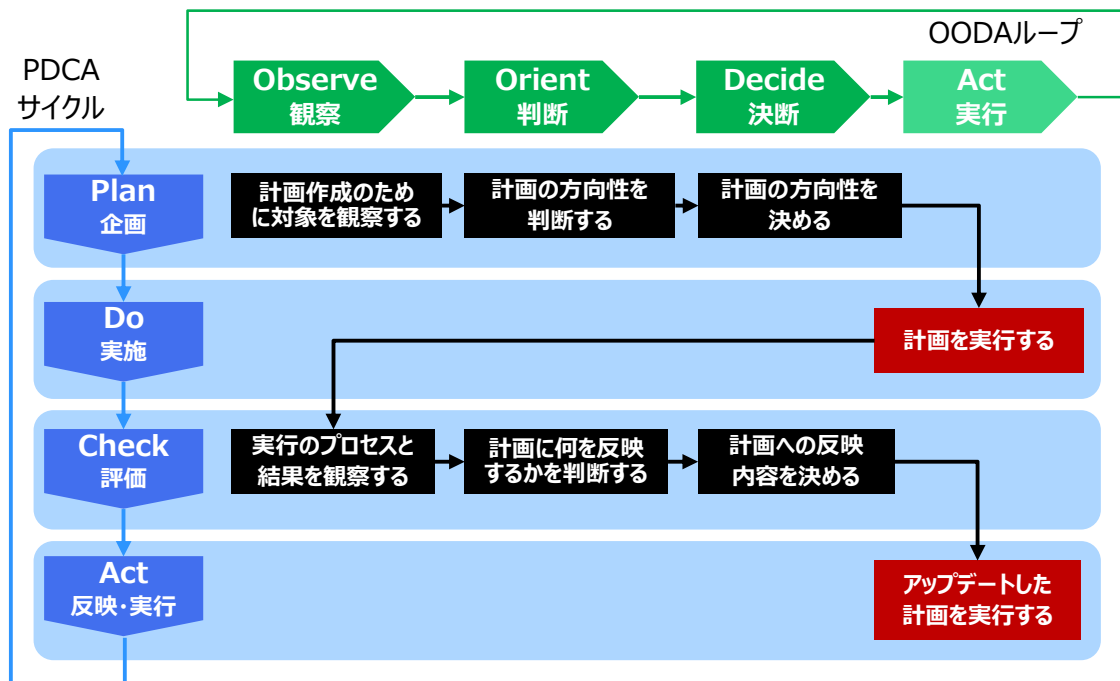


図 1 研究開発マネジメント PDCA サイクルと OODA ループ組み合わせ例

2. 技術評価の目的

NEDO では、次の 3 つの目的のために技術評価を実施しています。

- (1) 業務の高度化等の自己改革を促進する。
- (2) 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む。
- (3) 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進する。

3. 技術評価の共通原則

技術評価の実施に当たっては、次の5つの共通原則に従って行います。

- (1) 評価の透明性を確保するため、評価結果のみならず評価方法及び評価結果の反映状況を可能な限り被評価者及び社会に公表する。なお、評価結果については可能な限り計量的な指標で示すものとする。
- (2) 評価の明示性を確保するため、可能な限り被評価者と評価者の討議を奨励する。
- (3) 評価の実効性を確保するため、資源配分及び自己改革に反映しやすい評価方法を採用する。
- (4) 評価の中立性を確保するため、可能な限り外部評価又は第三者評価のいずれかによって行う。
- (5) 評価の効率性を確保するため、研究開発等の必要な書類の整備及び不必要な評価作業の重複の排除等に務める。

4. プロジェクト評価の実施体制

プロジェクト評価については、図2に示す実施体制で評価を実施しています。

- (1) 研究開発プロジェクトの技術評価を統括する研究評価委員会をNEDO内に設置。
- (2) 評価対象プロジェクト毎に当該技術の外部の専門家、有識者等を委員とした分科会を研究評価委員会の下に設置。
- (3) 同分科会にて評価対象プロジェクトの技術評価を行い、評価報告書（案）を取りまとめた上、研究評価委員会に諮る。
- (4) 研究評価委員会の審議を経て評価報告書が確定され、理事長に報告。

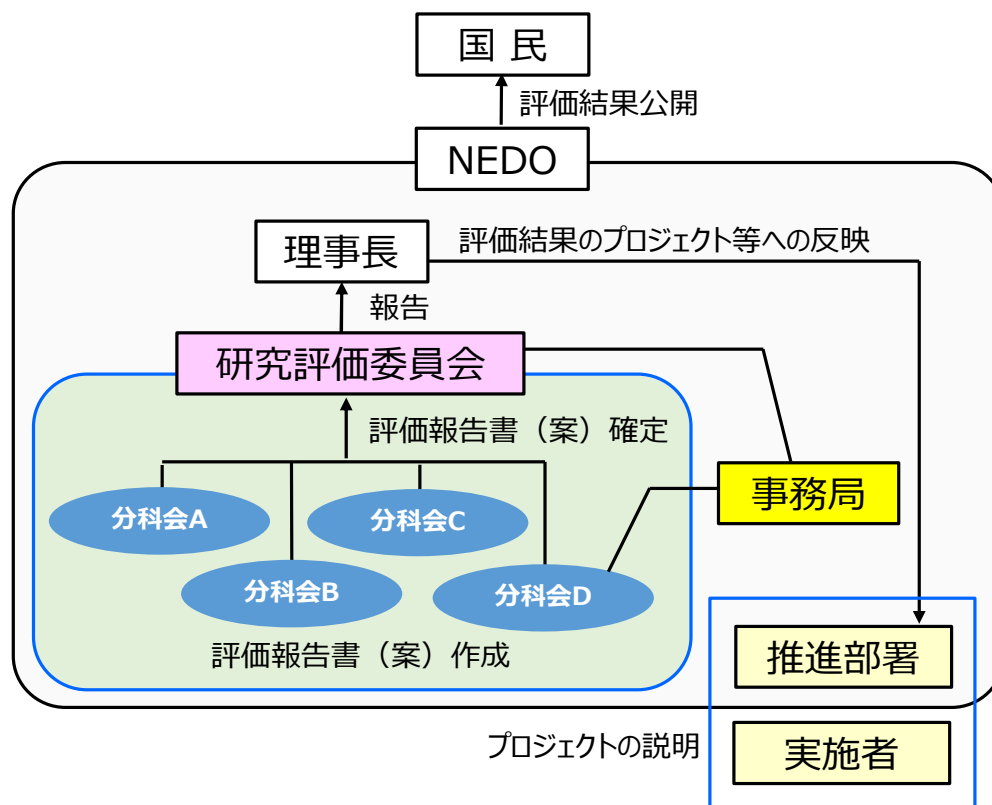


図2 評価の実施体制

5. 分科会委員

分科会は、研究開発成果の技術的、経済的、社会的意義について評価できる NEDO 外部の専門家、有識者で構成する。

6. 評価手順

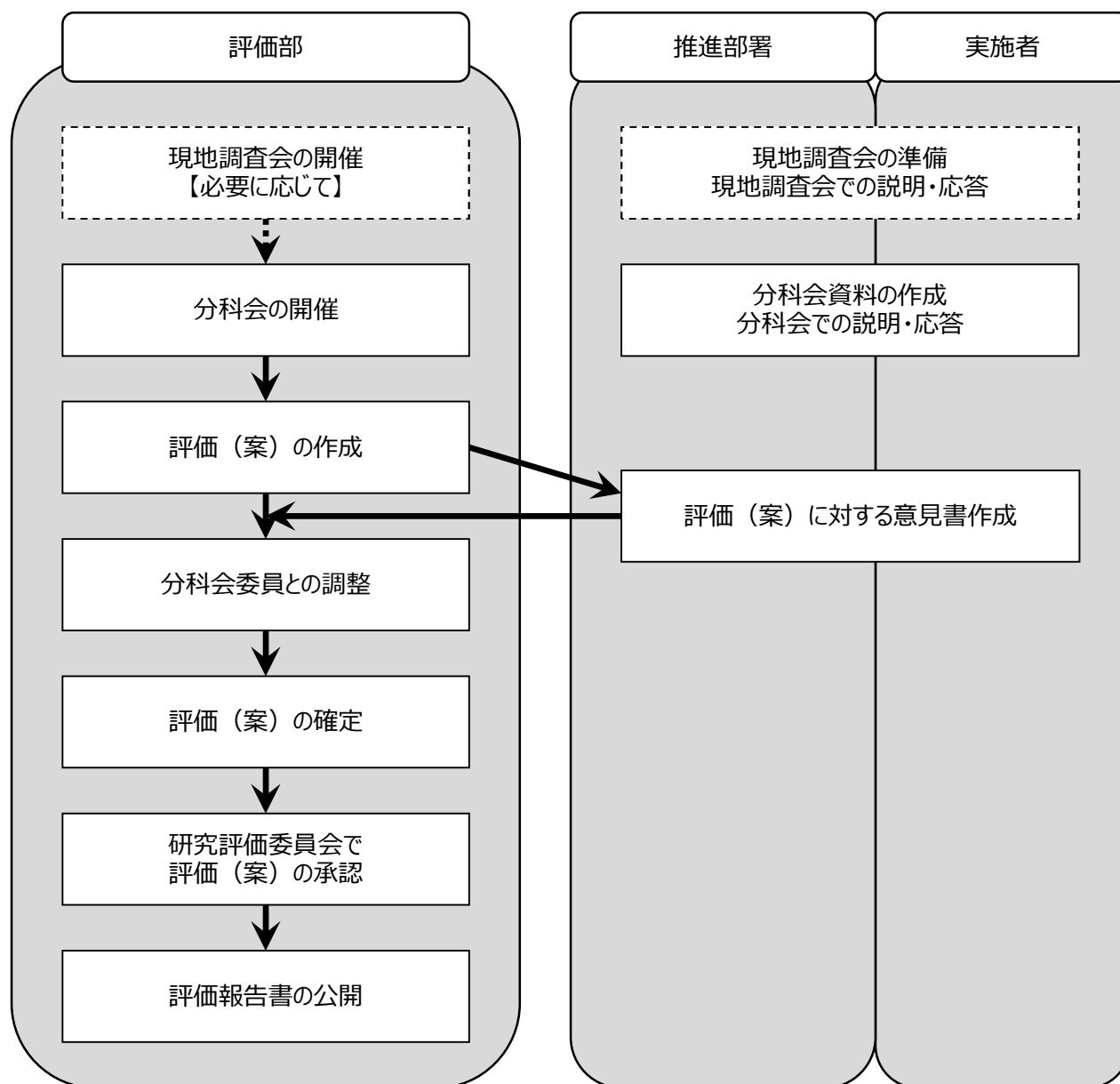


図3 評価作業フロー

「次世代複合材創製・成形技術開発④、⑤及び⑥」（終了時評価）分科会に係る
評価項目・評価基準

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(1) アウトカム達成までの道筋

- ・「アウトカム達成までの道筋」※の見直しの工程において、外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を考慮したか。

※ 「アウトカム達成までの道筋」を示す上で考慮すべき事項

- ・将来像（ビジョン・目標）の実現に向けて、安全性基準の作成、規制緩和、実証、標準化、規制の認証・承認、国際連携、広報など、必要な取組が網羅されていること。
- ・官民の役割分担を含め、誰が何をどのように実施するのか、時間軸も含めて明確であること。
- ・本事業終了後の自立化を見据えていること。
- ・幅広いステークホルダーに情報発信するための具体的な取組が行われていること。

(2) 知的財産・標準化戦略

- ・オープン・クローズ戦略は、実用化・事業化を見据えた上で、研究データも含めた上で、クローズ領域とオープン領域が適切に設定されており、外部環境の変化等を踏まえてもなお、妥当であったか。
- ・本事業の参加者間での知的財産の取扱い（知的財産の帰属及び実施許諾、体制変更への対応、事業終了後の権利・義務等）や市場展開が見込まれる国での権利化の考え方は、オープン・クローズ戦略及び標準化戦略に整合し、研究開発成果の事業化に資する適切なものであったか。
- ・標準化戦略は、事業化段階や外部環境の変化に応じて、最適な手法・視点（デジュール、フォーラム、デファクト）で取り組んでいたか。

2. 目標及び達成状況

(1) アウトカム目標及び達成見込み

- ・外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトカム指標・目標値を適切に※見直していたか。
- ・アウトカム目標の達成の見込みはあったか（見込めない場合は原因と今後の見通しは妥当であったか）。

※ アウトカム目標を設定する上で考慮すべき事項

- ・本事業が目指す将来像（ビジョン・目標）と関係のあるアウトカム指標・目標値（市場規模・シェア、エネルギー・CO₂削減量など）及びその達成時期が適切に設定されていること。
- ・アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果が優れていること。
- ・アウトカム目標の設定根拠は明確かつ妥当であること。
- ・達成状況の計測が可能な指標が設定されていること。

(2) アウトプット目標及び達成状況

- ・外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトプット指標・目標値を適切に[※]見直していたか。
- ・最終目標は達成しているか。未達成の場合の根本原因分析や今後の見通しの説明は適切だったか。
- ・副次的成果や波及効果等の成果で評価できるものがあつたか。
- ・オープン・クローズ戦略や実用化・事業化の計画を踏まえて、必要な論文発表、特許出願等が行われていたか。

※ アウトプット目標を設定する上で考慮すべき事項

- ・アウトカム達成のために必要なアウトプット指標・目標値及びその達成時期が設定されていること。
- ・技術的優位性、経済的優位性を確保できるアウトプット指標・目標値が設定されていること。
- ・アウトプット指標・目標値の設定根拠が明確かつ妥当であること。
- ・達成状況の計測が可能な指標（技術スペックとTRL[※]の併用）により設定されていること。

※ TRL：技術成熟度レベル（Technology Readiness Levels）の略。

3. マネジメント

(1) 実施体制

- ・実施者は技術力及び実用化・事業化能力を発揮したか。
- ・指揮命令系統及び責任体制は明確であり、かつ機能していたか。
- ・実施者間での連携、成果のユーザーによる関与など、実用化を目指した体制となっていたか。
- ・個別事業の採択プロセス（公募の周知方法、交付条件・対象者、採択審査の体制等）は適切であったか。

- ・本事業として、研究開発データの利活用・提供方針等は、オープン・クローズ戦略等に沿った適切なものであったか。また、研究者による適切な情報開示やその所属機関における管理体制整備といった研究の健全性・公平性（研究インテグリティ）の確保に係る取組をしたか。

(2) 研究開発計画

- ・アウトプット目標達成に必要な要素技術の開発は網羅され、要素技術間で連携が取れており、スケジュールは適切に計画されていたか。
- ・研究開発の進捗を管理する手法は適切であったか（WBS※1 等）。進捗状況を常に関係者が把握し、遅れが生じた場合、適切に対応していたか。

※1 WBS：作業分解構造(Work Breakdown Structure)の略。

本研究評価委員会報告は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

NEDO 評価部

部長 三代川 洋一郎

担当 中島 史夫

* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。
(https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html)

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地

ミューザ川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5160 FAX 044-520-5162