

「航空機エンジン向け先進材料技術の開発・実証」に関する研究開発構想（個別
研究型）

令和4年12月

内閣府
経済産業省

目次

1. 事業の背景、目的、内容	4
（1）事業の目的	4
①政策的な重要性	4
②我が国の状況	5
③世界の取組状況	5
④本事業のねらい	6
（2）事業の目標	6
①アウトプット目標	6
②アウトカム目標	7
（3）事業の内容	7
研究開発項目① 1,400°C級 CMC 材料の製造・量産技術開発	7
ア. 研究開発の必要性	8
イ. 具体的研究内容	8
ウ. 達成目標	9
研究開発項目② 材料認証取得に向けた評価プロセスの実証	9
ア. 研究開発の必要性	10
イ. 具体的研究内容	10
ウ. 達成目標	11
2. 実施方法、実施期間、評価	11
（1）事業の実施・体制	11
（2）事業の実施期間	11
（3）評価に関する事項	12
（4）社会実装に向けた取組	12
（5）総予算	13
（6）経済産業省の担当課室	13
3. その他重要事項	13
（1）研究開発成果の取扱い	13
①共通基盤技術の形成に資する成果の普及	13
②標準化施策等との連携	14
③知的財産権の帰属、管理等の取扱い	14

(2) 「研究開発構想」の見直し	14
(3) 研究開発の対象経費	14
4. 研究開発構想の改定履歴	15

1. 事業の背景、目的、内容

(1) 事業の目的

①政策的な重要性

世界の CO2 排出量の約 4 %は航空輸送が占めており、航空産業は CO2 排出量の低減を強く要請されている。そのためには、(1) 航空機の技術革新による効率の向上、(2) 運航方式の工夫による燃料消費の低減、(3) SAF (Sustainable Aviation Fuel) の使用、の 3 つの取組が必要。中でも航空機の効率の向上のためにはエンジンの効率改善が大きく寄与するが、そのためにはエンジンのタービン入口温度 (TIT : Turbine Inlet Temperature) を上げることが重要である。現在、エンジンの高温・高圧部にはニッケル基超合金が使用されているが、その耐熱温度は 1,100°C程度に留まり、TIT を上げるためには冷却空気が必要となり、結果として効率を含めエンジンの性能向上を妨げている。これに対して、軽量かつ高い耐熱性を有するセラミックス複合材 (CMC : Ceramic Matrix Composites) は、冷却空気を削減しエンジン性能を大きく向上することが期待されているため、ゲームチェンジ技術として国際的に注目されている。他方で、性能、コスト、量産時の品質安定性に課題があり、米国の一部企業を除いてエンジンの高温・高圧部での実用化は限定的。我が国は民間航空機のエンジンについて国際共同開発を基調として発展してきたが、付加価値が高くエンジンの性能を左右する重要な箇所である高温・高圧部には適用されていない。CMC の実用化を推進し、高温・高圧部へ適用することは、エンジンのサプライチェーン上において我が国が戦略的不可欠性を獲得するために重要である。また、将来的に防衛航空機のエンジンに適用された場合においても、その性能向上を実現することが可能となり、我が国の安全にも寄与する。

現行の政府計画においても 2015 年に基幹産業化に向けた航空ビジネス戦略に関する関係省庁会議によって決定された航空産業ビジョンにおいて、エンジンの国際共同開発の更なるシェア拡大のため、我が国が今後優位性を獲得すべき重要な技術として、高圧タービン、燃焼器技術等の高温・高圧部について研究開発を進めることとしている。

経済安全保障重要技術育成プログラムの研究開発ビジョンにおいても、宇宙・航空領域で支援対象とする技術において、

- 航空機エンジン向け先進材料技術が挙げられている。

本研究開発構想では、研究開発ビジョン (第一次) に定められた航空分野で

の先端的な優位技術を確保するため、個別研究型として上記の先進材料技術を研究開発し、当該材料を航空機エンジンにおける高温・高圧部へ適用することを目的とする。

②我が国の状況

CMCの素材である炭化ケイ素連続繊維（SiC繊維）は1975年に東北大学で開発され、商品化に成功したのは日本企業2社のみであり、日本国内にはCMCの開発に必要な要素が揃っている状況にある。こうした背景も踏まえ、「次世代構造部材創製・加工技術開発」（2015～2019年度）、「次世代複合材創製・成形技術開発」（2020年度～2024年度）を通じ、世界最高性能である1,400℃の耐熱性（1機あたり約6%のCO2削減効果）を有するCMC部材の研究室環境での作成を実現するなど、実用化に向けた技術開発を大きく進展させているところである。

なお、経済施策を一体的に講ずることによる安全保障の確保の推進に関する法律（令和4年法律第43号）に基づき、特定重要物資の安定供給確保のための個別施策として、航空機用CMCの国内生産基盤の確立等に関する取組に対する支援が検討されているところ、必要に応じ、本事業との適切な連携を図るものとする。

③世界の取組状況

米国ではエネルギー省（Department of Energy）の助成で開発が進められ、戦闘機用エンジン開発プログラムでCMCが試されている。特に米国の航空機エンジンメーカーはCMC部品の量産に世界で初めて成功しており、今後、その適用範囲を拡大する予定である。米・英の他のエンジンメーカーにおいても、米国内に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。中国においては、「中国製造2025」重点分野技術ロードマップ（2015年版）において、航空機エンジンの基幹部品・技術の1つとしてセラミックス基複合材料の高圧タービンブレード、燃焼器技術が指定されているとともに、基幹戦略材料の1つとして、セラミックス基の先進複合材料が位置づけられている等、国家レベルで研究開発を推進していると考えられる。2018年には、中国の航空機エンジンメーカーは、ロシアと共同開発している民間航空機向けのエンジンにCMC部品を適用すると発表している。

このように世界各国で研究開発が行われている中、我が国は世界のうち2社

しか製造できない CMC 部品の原料である SiC 繊維を強みとして持っており、1,400°C級の CMC 部品の開発にも成功しているため、他国に対して大きな強みをもっているものの、実用化までは至っていない。

④本事業のねらい

国民の安全・安心、経済活動に密接に関わる航空機の重要な要素であるエンジンにおいて、日本が性能面において他国に対して大きな強みを有する CMC は、性能を左右する付加価値の高い高温・高圧部への適用が見込まれる。実際のエンジンへの適用に向けた取組を進め、エンジンの重要な箇所において戦略的不可欠性を獲得することは、経済安全保障上の意義が大きい。

本事業では、2030 年代半ばに市場投入が想定される次期単通路機用の新型エンジンの開発（2020 年代後半に開始が見込まれる）において、軽量かつ高温部における冷却空気の低減に寄与する 1,400°C級 CMC 部品の高温・高圧部への適用を目指す。次期単通路機はエアラインが使用する機数の 50%以上を占めており搭載部品の生産の高レート化が必須。現状の研究室環境での試作・評価を越えて、安定した品質を保証するための基盤技術の高度化および高レートで低コストな生産を可能とするための革新的な製造技術を確立する。また、防衛航空機エンジンのほか、発電用ガスタービン、原子力用燃料棒などへの適用も期待される。

これまでも 1,400°C級 CMC の実用化を目指し研究開発を行ってきたが、研究室環境において作成可能な段階までの到達にとどまっているため、本プロジェクトにおいては安定した品質で高レート生産を実現する革新的な製造技術を開発することで次期単通路機用の航空機エンジンの生産性への対応を可能にするとともに、材料特性のデータ取得、評価、材料規格の確立を通じて、国産 CMC 部品の航空機エンジンへの適用の課題となっている材料認証に耐えうる合理的な評価プロセスを実証する。

(2) 事業の目標

①アウトプット目標

2022 年度までに実施した事業では、1,400°C級 CMC の開発と実証試験を行っており、本事業ではこの材料の品質安定、高速生産を実現する革新的な製造技術の開発を推進する。製造性の面では生産レートおよび生産コストについて高い要求のある次期単通路機の航空機エンジンへの適用を想定して革新的な製造工程の開発と最適化を実施する。また、品質・信頼性の面では、材料評価・

工程評価を行ったうえで規格を制定し、これに準拠して CMC を製造し、材料データベースを取得することで、材料認証取得における評価プロセスを実証、提案する。

【最終目標】

<航空機エンジン向け 1,400°C級 CMC 材料技術>

CMC の品質：量産仕様の製造工程を確立し、品質・歩留まりを実証のうえ、材料規格・工程規格を制定し、世界の主要航空局の認証を得るためのプロセスを確立する。

CMC の製造性：上記規格に沿った品質を確保したうえで、量産時の製造タクトタイム5分に目途をつける。

CMC の信頼性：確立した工程で製造した CMC の材料特性データベースを取得し、世界の主要航空局の認める統計手法に準拠して設計許容値を定める。

②アウトカム目標

- (ア) 2040 年における世界の航空機エンジンに搭載される CMC 部品のうち、本事業で開発した CMC がシェア 25%を獲得していること。
- (イ) CMC 適用を足掛かりに高温・高圧部への本格的な参入を果たすことで、航空機エンジン分野において世界のなかで確固たる地位が確保されていること。
- (ウ) 航空機への新材料適用へ向けた国内企業の認証活動において、本事業の成果が参照されていること。

(3) 事業の内容

本事業で研究開発を実施する CMC の革新的な製造技術は、国民の安全・安心、経済活動に不可欠な航空機の重要な要素であるエンジンの開発を他国に過度に依存することなく自律的に行う能力を担保する上で、重要な技術であり、世界的にも本技術は確立されておらず、民生利用のみならず公的利用につながっていくことが前提となっている。さらに、新材料部品に関する認証を取得するために必要な知見を提供することを目的としており、国内航空機産業への波及効果大きい。そのため、以下の研究開発項目は全て委託で実施するものとする。

また、以下の研究開発項目において開発した製造・量産技術の妥当性を確認するために、必要に応じて公的機関やエンジン製造事業者に試作品または試作

品の試験結果を提供し、評価を受けることとする。

研究開発項目① 1,400°C級 CMC 材料の製造・量産技術開発

ア. 研究開発の必要性

1,400°C級 CMC 部品の次期単通路機用の新型エンジンへの適用に向けては、研究開発項目②における評価プロセスの実証も見据えて、品質安定性と生産性を両立し、コスト競争力を確保するための製造技術と、量産品質を保証するための検査技術を確立させることが極めて重要である。

品質の安定化を図るためには、強度発現に決定的な影響を及ぼす SiC 繊維の表面に施工する界面コーティングの品質の安定化が必要である。

また、CMC 適用を目指す高温・高圧部品は従来精密鋳造が行われる複雑形状部品も含まれ、CMC への置き換えを行う上では複雑形状に対応できる SiC 繊維プリフォームの製造に関するコスト競争力のある技術の確立が必要である。さらに 1,400°C級 CMC の高温特性面で重要な役割を担う SiC マトリックスの形成工程の生産性の向上が必要となる。また、CMC 特有の課題として、従来の金属材料に適用されている放電加工が行えないこと等に対応するため、独自の高速加工技術の確立が必要となる。

さらに、CMC を航空機エンジンに適用するために必要となる CMC 部品の品質保証に関しては、残存ポイド率や繊維配向、異物の検出等の非破壊検査技術の高度化が必要となる。

また、近年のジェットエンジンにおいて問題となっている溶融した砂による腐食（CMAS 腐食）に対して、優れた性能を示す耐環境コーティング（EBC：Environmental Barrier Coating）の施工技術の開発が必要となる。

イ. 具体的研究内容

（イ-1）SiC 繊維への界面コーティング技術の開発

SiC 繊維に界面コーティングを施工した Mini-Composite や、CMC サンプルに対して行う各種試験等の基礎的な界面評価技術を確立する。また、それらから得られる特性データ等から界面コーティングの品質要求を設定する。さらに、繊維そのものへの改良等も検討することで、量産を見据えた界面施工工程の確立を行ったうえで、工程の歩留まりとコストの観点も踏まえて、最適な検査方法と頻度の設定を行い、施工工程、検査時間の高速化について実証を行う。

（イ-2）CMC の高速製造技術の開発

FRP に使用される炭素繊維と比較して切れやすい SiC 繊維の特性に留意しつつ、複雑形状部品のプリフォームの製造を可能とするための高速製造技術開発を行う。

また、SiC マトリックス形成速度の大幅な向上を図るため、マトリックス形成炉の最適化および CMC の空隙に補助的なマトリックスを含浸する工程まで含めた処理条件の最適化を行う。さらに、生産性を劇的に向上させるため、マトリックス形成炉のオペレーション方法についても検討、実証を行う。

(イ-3) CMC の高速加工・検査技術の開発

CMC 加工に特化した加工ツールと加工条件を検討し、加工品質との相関を確認する。シール部の深溝等、従来の金属部品では放電加工を利用していた加工形状について、新たな加工方法の適用検討を行う。加工後の CMC については、クラック等の加工起因欠陥の有無についての検査方法を確立するとともに、CMC の強度試験を行い特性への影響の確認も行う。

また、CMC の内部欠陥検査のための非破壊検査技術においては、CMC 設置以降の工程についての自動化を行う。さらに、検査データについて、繊維・マトリックス・ボイド・異物等をデジタルで識別可能とし、AI 技術を適用すること等により、データ判定の高速化を行う。

(イ-4) 低コスト耐環境コーティング施工技術の開発

耐環境コーティング (EBC: Environmental Barrier Coating) の組成を最適化するとともに、組織安定化のための熱処理条件の最適化を行う。そのうえで CMC に EBC を施工した際の施工条件と EBC のミクロ組織、特性の相関を確認する。さらに部品形状が EBC ミクロ組織に与える影響を確認する。また、EBC 施工工程の高速化により生産性の向上を図る。

ウ. 達成目標

界面施工条件、界面特性、CMC 特性の相関を明らかにして、繊維界面の品質要求を設定し、界面の検査手法を確立したうえで、界面コーティング繊維として規格化を行う。

検査時間については従来の 1/10 を実現し、界面コーティングの施工歩留まりは 90%以上を達成する。

プリフォームと界面コーティング、加工について現状の 10 倍の生産性向上に目途をつけ、検査結果の判定を含めた非破壊検査工程の実証を行う。また、

EBC については、金属部品で適用されている Thermal Barrier Coating(TBC) 並みの生産性を確保する。

上記により CMC 製造工程全体の生産性を向上させることで、量産時の製造タクトタイム 5 分に目途をつける。

研究開発項目② 材料認証取得に向けた評価プロセスの実証

ア. 研究開発の必要性

新材料部品の航空機エンジンへの適用にあたっては、航空機エンジンが材料認証を取得できるよう当該部品を材料レベルから評価し、その安全性を航空当局に対して証明しなければならない。そのためには、材料の構成要素・要求特性・クライテリア・検査頻度・品質保証方法等を定義した材料規格と製造条件や品質保証方法等を定めた工程規格の制定が必須となる。これらの規格の要求値の設定および設計値の算出には、膨大なデータ取得が必要となる。

また、新材料を用いて設計した部品の実機適用可能性の評価にあたっては、データ取得のみならず、実環境での部品健全性の確認も必要である。そのために、実環境を模擬した試験での実証、および、解析による予測技術の妥当性検証を行う必要がある。

こうした新材料部品に関する材料認証取得に向けた取組は、大きな先行投資、時間を伴うばかりか合理的に進めるためにはノウハウが必要であり、材料技術に強みを有する我が国が航空機エンジンにおいて競争力を発揮する上での課題。認証取得のためのプロセスの最適化を目指した手法、環境の検討は、研究開発項目①で開発した CMC のみならず国産 CMC の適用拡大のために国内における協調領域としてノウハウ、環境等を波及させることが必要となる。

イ. 具体的研究内容

(イ-1) CMC の材料規格・工程規格制定と材料データベース構築

本事業では開発項目①の成果を適用しながら CMC 製造工程の確立をすすめる、航空当局による認証を想定した材料規格・工程規格の制定を行ったうえで、材料特性データの取得（複数温度域における静的な引張強度、圧縮強度、せん断強度、疲労特性・クリープ特性等）、設計許容値の確立を行い、実際のエンジンの CMC 部品の設計に利用できる信頼性を持った評価プロセスを実証する。

(イ-2) CMC の要素試験および解析技術開発

CMC 部品を構成する特徴的な形状の解析の評価に必要な要素試験計画を立案し、円孔付きのクーポン試験片やL字の試験片等の試験片設計と試験条件を設定する。そのうえで実際に試験片を作成して常温から高温において要素試験を実施し、破壊位置、破壊モード、破壊荷重を確認し、解析結果と比較することで、解析手法を確立する。

また、CMC 部品の使用環境を模擬した試験計画を立案する。そのうえで、試験に供する試験片の設計・製作を行い、実環境模擬試験を実施し、解析結果と比較することで、実機適用が可能であることを実証し、CMC の材料認証取得に必要なノウハウ、環境等を国内協調領域として波及させる。

ウ. 達成目標

国内において材料試験を完了して材料データベースを構築し、統計的手法に基づいた設計許容値を確定させる。これを通じて、世界の認証当局もしくは航空機エンジン OEM (Original Equipment Manufacturer) によって妥当性が認められる評価プロセスを確立する。

2. 実施方法、実施期間、評価

(1) 事業の実施・体制

本事業は、内閣府、内閣官房、文部科学省、経済産業省を含む関係府省が設置したプログラム会議が定める「経済安全保障重要技術育成プログラムの運用・評価指針」に基づき事業を実施する。

研究推進法人 (Funding Agency: FA) は、国から示された研究開発ビジョン及び研究開発構想に基づき、公募により研究開発課題を採択するとともに、その進捗管理・評価等の責務を担う。本事業の FA 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) である。

研究開発課題の実施責任者 (以下「研究代表者」という。) の所属する機関は、国内に研究開発拠点を有し、日本の法律に基づく法人格を有している機関とする (以下「研究代表機関」という)。また、研究代表者及び主たる研究分担者は日本の居住者であることとする。(ここで言う居住者とは外為法の居住者 (特定類型該当者を除く) であること。)

本事業の公募では、事業全体に対する提案を想定しており、研究代表機関が必要な分担機関と共同で事業全体を実施するものとする。

(2) 事業の実施期間

本研究開発構想に基づく、本事業は2023年度から2027年度までの5年間とする。研究開発はステージゲート方式を採用し、図1に示す2つのフェーズで実施するものとする。

	第1期 (～2025年度)	第2期 (～2027年度)
【研究開発項目1】1,400°C級CMC材料の製造・量産技術開発		
SiC繊維への界面コーティング技術の開発	界面評価技術の確立 施工工程・検査手法の確立	工程高速化の実証
CMCの高速製造技術の開発	高速製造技術開発 処理条件の最適化	マトリックス形成炉の運用実証
CMCの高速加工・検査技術の開発	加工、検査設備導入 加工品質、検査方法の確立	工程高速化の実証
低コスト耐環境コーティング施工技術の開発	EBC組成、処理条件の最適化 ミクロ組織分析	工程高速化の実証
【研究開発項目2】材料認証取得に向けた評価プロセスの実証		
CMCの材料規格・工程規格制定と材料データベース構築	材料・工程規格の制定 試験内容・計画の策定	評価プロセスの実証 材料データベースの構築
CMCの要素試験及び解析技術開発	試験片、試験条件の設定 要素試験の実施	実環境模擬試験の実施 解析手法の確立

★：ステージゲート

図1 研究開発のスケジュール

(3) 評価に関する事項

本事業は、「経済安全保障重要技術育成プログラムの運用・評価指針」に基づき、評価を実施する。

研究代表者は自己評価を毎年実施し、PO（プログラム・オフィサー）に報告する。NEDOは外部評価として中間評価を2025年度（事業開始から3年目）、事後評価を2027年度（事業終了年）に実施することとし、事業の進捗等に応じて評価時期を早める場合は、PO及び所管省庁と連携して、あらかじめ適切な実施時期を定める。

(4) 社会実装に向けた取組

本事業は、経済施策を一体的に講ずることによる安全保障の確保の推進に関する法律（令和4年法律第43号）に基づいて設置される指定基金協議会の下で推進していく。これにより、本事業によって生み出される研究成果等を活用し、民生及び公的な利用を促進するとともに社会実装につなげていくことを目指し、その実現に向け、潜在的な社会実装の担い手として想定される関係行政機関や民間企業等による伴走支援を可能とするとともに、参加者間で機微な情報も含む有用な情報の交換や協議を安心かつ円滑に行うことのできるパートナーシップを確立していく。

具体的には、本事業により開発を行う航空機エンジン向け 1,400°C級 CMC 材料技術は次期航空機エンジンの高温・高圧部における適用のみならず、防衛航空機エンジン、発電用ガスタービン、原子力用燃料棒など様々な分野での適用における基盤技術となることが想定される。このため、このような CMC 材料を利用する場合の将来的に想定される具体的なユースケースやその実現のために必要な機能等の情報を共有しつつ研究開発を進めることは、研究開発成果を将来の社会実装に円滑につなげていく上で、大きな意義がある。

本事業に係る協議会については、研究開発課題の採択後に、関係行政機関、PO、研究代表者等の協議会への参画者における十分な相談を行いつつ、運営していく。なお、協議会の詳細は別に示す。

（5）総予算

本事業の総予算は 50 億円を超えない範囲とする。各研究開発項目、フェーズ毎の配分については、必要に応じて、経済産業省からの指導に基づき目安を示す。これを変更する場合も同様とする。

（6）経済産業省の担当課室

本事業の運営に係る経済産業省の担当課室は、製造産業局航空機武器宇宙産業課とする。

3. その他重要事項

（1）研究開発成果の取扱い

①共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発課題実施者は、研究成果を広範に普及するよう努めるものとする。経済産業省及び NEDO は、経済安全保障の観点留意しつつ、研究開発課題実施者による研究成果の広範な普及を促進する。

経済安全保障の観点から、経済産業省は必要に応じて NEDO に対して助言を行い、NEDO は本助言を踏まえて、成果の普及について検討することとする。

②標準化施策等との連携

CMC 材料開発で得られた研究開発成果については、我が国の標準化等との連携を図ることとし、標準化に向けて開発する評価手法の提案、データの提供等を積極的に行い、事業終了後に必要な実施すべき取組のあり方及びより広範囲に適用先を広げるためのビジネスモデルについて立案する。

経済産業省、NEDO 及び研究開発課題実施者は、国際標準化に向けて積極的に役割を果たしていく。

③知的財産権の帰属、管理等の取扱い

研究開発成果を民生利用のみならず公的利用につなげていくことを指向し、社会実装や市場の誘導につなげていく視点を重視するという本プログラムの趣旨に則り、研究代表機関、研究代表者は、PO 及び研究分担者との協議の上、知的財産権の利活用方針を定めることとする。その際には、研究開発途中及び終了後を含め、知的財産権の利活用を円滑に進めることができるように努めることとする。

なお、研究開発成果の利活用にあたりその成果にバックグラウンド知的財産権が含まれる場合には、その利活用についても同様に努めること。

(2) 「研究開発構想」の見直し

経済産業省は、NEDO、PO 及び関連省庁と連携して、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、事業内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて、達成目標、実施期間等、本研究開発構想の見直しを行う。

(3) 研究開発の対象経費

「経済安全保障重要技術育成プログラムの運用・評価指針」に基づき、運用する。大学・研究開発法人等以外に関する間接経費の額の設定については、事業の性質に応じて経済産業省の担当課室から別に示す場合を除き、業務委託契約標準契約書に基づくものとする。

4. 研究開発構想の改定履歴

- (1) 令和4年12月、制定。