



# 「次世代構造部材創製・加工技術開発」

(事後評価)

プロジェクトの概要 **(公開)**

(2015年度～2019年度 5年間)

2020年11月4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

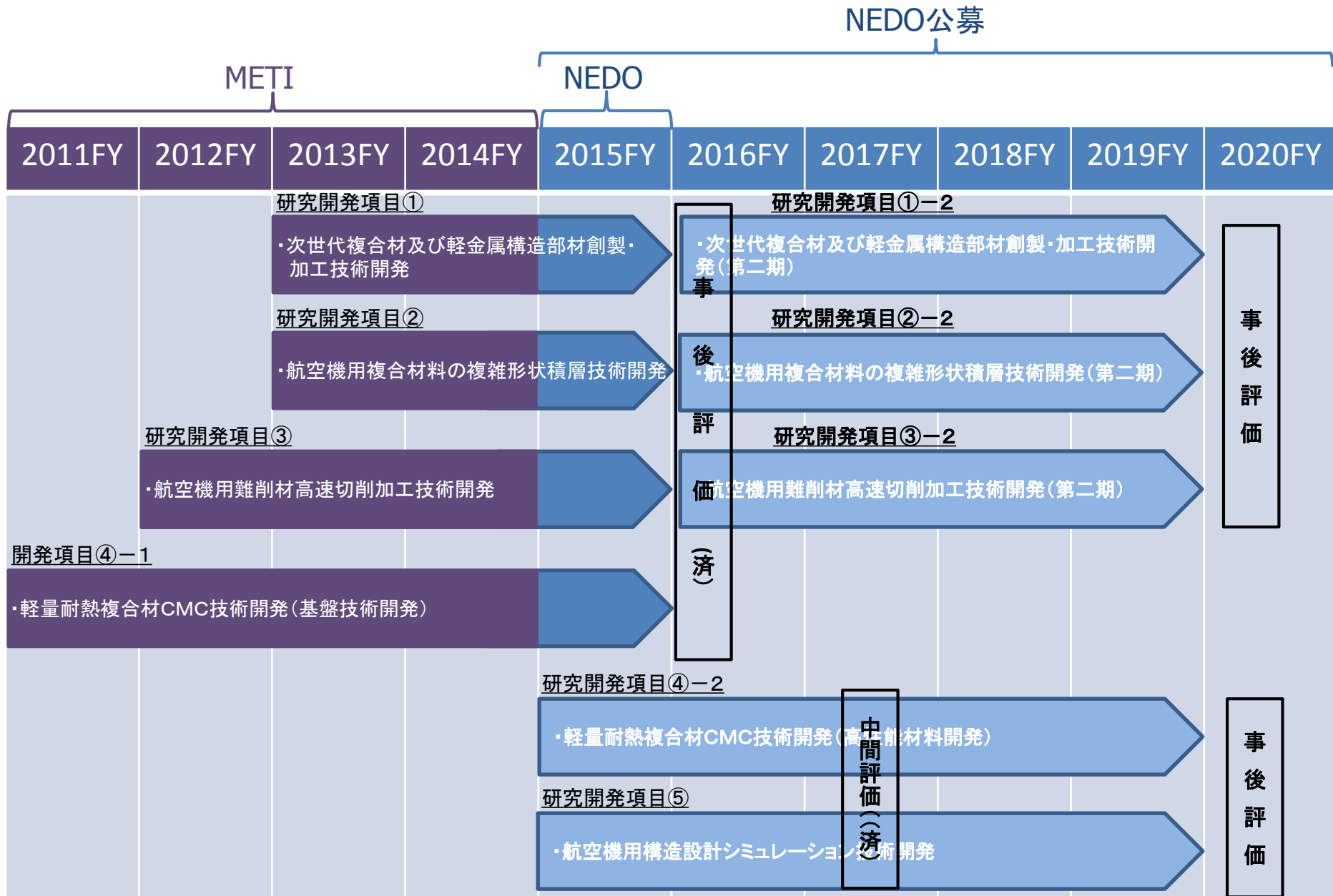
- I. 事業の位置付け・必要性
  - (1)事業の目的の妥当性
  - (2)NEDOの事業としての妥当性
  
- II. 研究開発マネジメント
  - (1)研究開発目標の妥当性
  - (2)研究開発計画の妥当性
  - (3)研究開発の実施体制の妥当性
  - (4)研究開発の進捗管理の妥当性
  - (5)知的財産等に関する戦略の妥当性
  
- III. 研究開発成果
  - (1)研究開発目標の達成度
  - (2)成果の詳細
  - (3)成果の普及
  - (4)知的財産権の確保に向けた取り組み
  
- IV. 成果の実用化
  - (1)成果の実用化に向けた戦略
  - (2)成果の実用化の見通し

# I . 事業の位置付け・必要性

---

# I. 事業の位置付け・必要性

## (1) 事業の目的の妥当性



## ◆事業実施の背景と事業の目的

### 【事業の必要性】

世界の民間航空機市場は、**年率約5%で増加**する旅客需要を背景に今後20年間で、累計約3万から3万5千機（4～5兆ドル程度）となる見通しである。「産業構造ビジョン2010」では、国内航空機産業を2020年迄に2兆円にほぼ倍増させるとともに、2030年には売上高3兆円を達成すると謳われている。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。また、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倍に及ぶ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及び軽金属等が積極的に導入**されており、**先進的な素材開発及び加工技術開発等が急務**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。また、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。

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、産官学の密接な連携の下での我が国の**航空機産業基盤の構築及び関連産業の成長**を実現する。

## ◆ 事業実施の背景と事業の目的

### 【参考】

「ICAO、CO2抑制義務化でシステム構築 排出量などクラウドに保存」(Aviation Wire; 2020年6月27日)

国連の専門機関ICAO（国際民間航空機関）は、二酸化炭素（CO2）排出量の抑制など航空業界の低炭素化に向けた取り組みに関連し、クラウドベースのデータ登録システムを正式に立ち上げた。国際航空を対象に2021年から始まる温室効果ガスのオフセット（相殺）義務化を前に、重要な節目としている。

低炭素化への取り組み「国際民間航空のカーボン・オフセットおよび削減スキーム（CORSIA）」に関連し、「CORSIAセントラル・レジストリ（CCR）」と呼ぶシステムを立ちあげた。CCRでは、運航会社のCO2排出量や適格燃料、キャンセルされた排出枠などのデータをクラウド上に保存する。

国際航空は多くの燃料を消費しており、人の活動に起因するすべての炭素排出の1.3%を占める。気候変動への対策が求められる中、ICAOは2016年総会でCORSIAを採択。国際航空で発生した温室効果ガスの排出を、2021年からはほかの活動で相殺することを義務付ける方針だ。航空各社では、バイオ燃料など代替航空燃料の導入などにより、CO2排出量の削減を目指す研究を進めている。

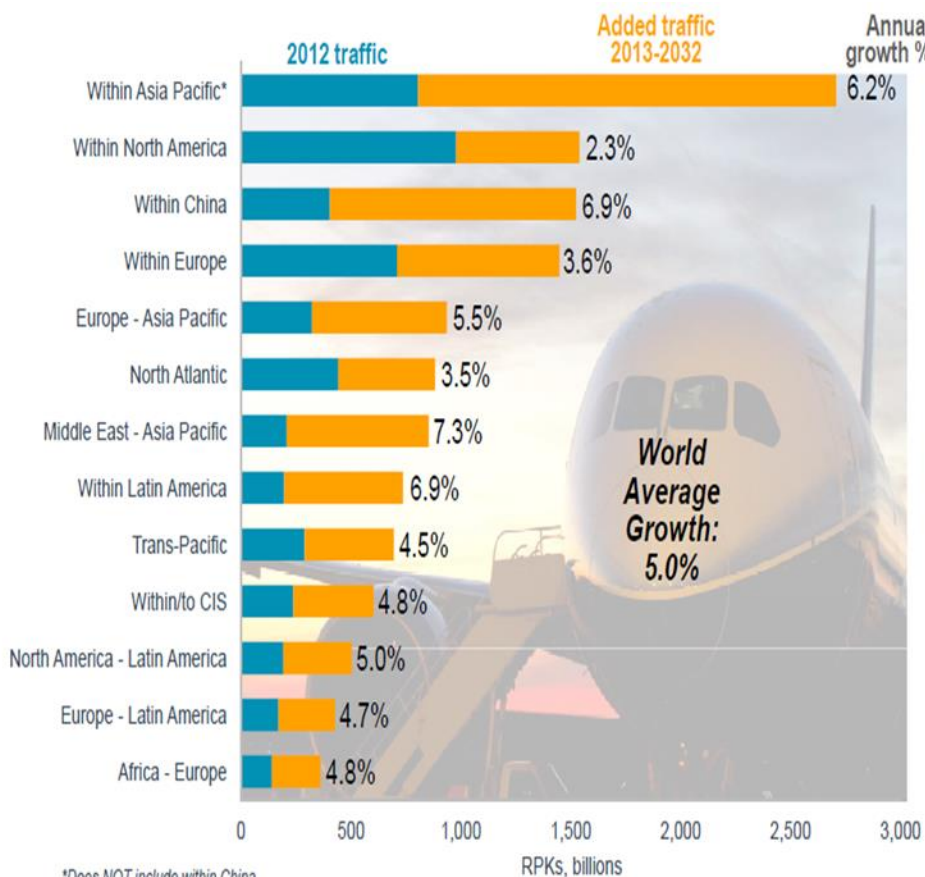
<https://www.aviationwire.jp/archives/205480>

# I. 事業の位置付け・必要性

## (1) 事業の目的の妥当性

○世界の民間航空機市場は、**年率約5%で増加する旅客需要**を背景に、今後20年間の市場規模は、約3万機・4～5兆ドル程度（ほぼ倍増）となる見通し。最も旅客需要が伸びるのはアジア太平洋地域。**最も機体需要が多いのは150席級（737、A320）**。

世界の旅客需要見通し

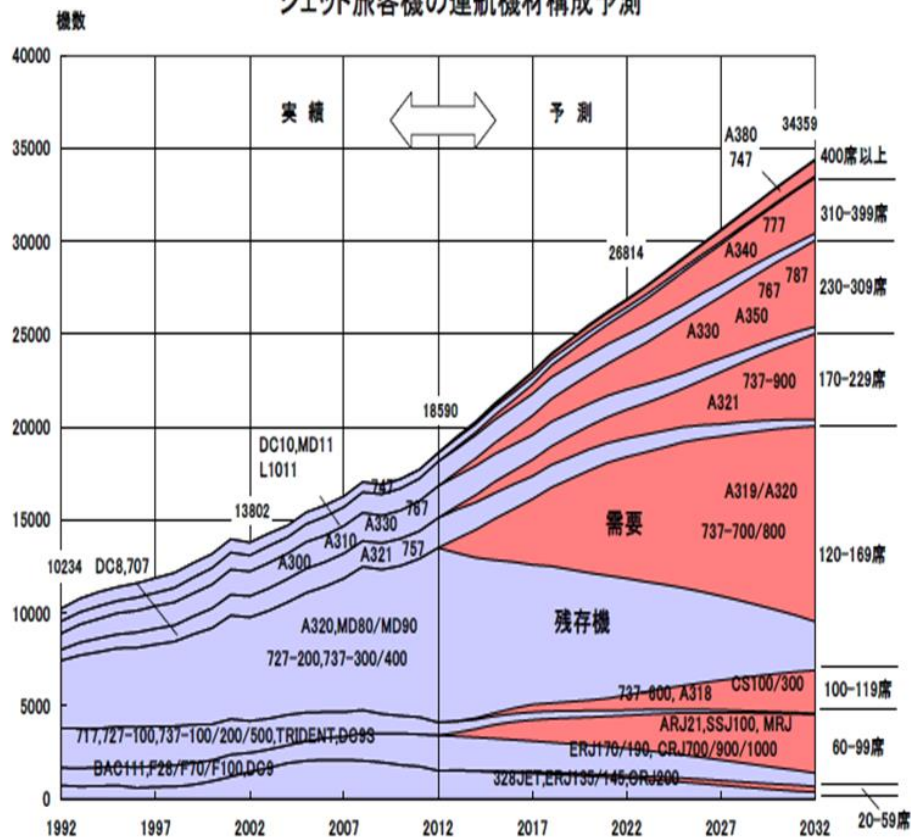


出典：航空機素材・製造技術の革新について（経済産業省, 2013）

有償旅客キロ (RPK)

各有償旅客が搭乗し、飛行した距離の合計。  
有償旅客数 × 輸送距離 (キロ)。

ジェット旅客機の運航機材構成予測



出典：航空機素材・製造技術の革新について（経済産業省, 2013）

### ◆政策的位置付け

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、「新産業構造ビジョン」（産業構造審議会）には、2030年度に**運輸部門のエネルギー起源CO2排出量を28%減**（2013年度比）とすることが謳われている。

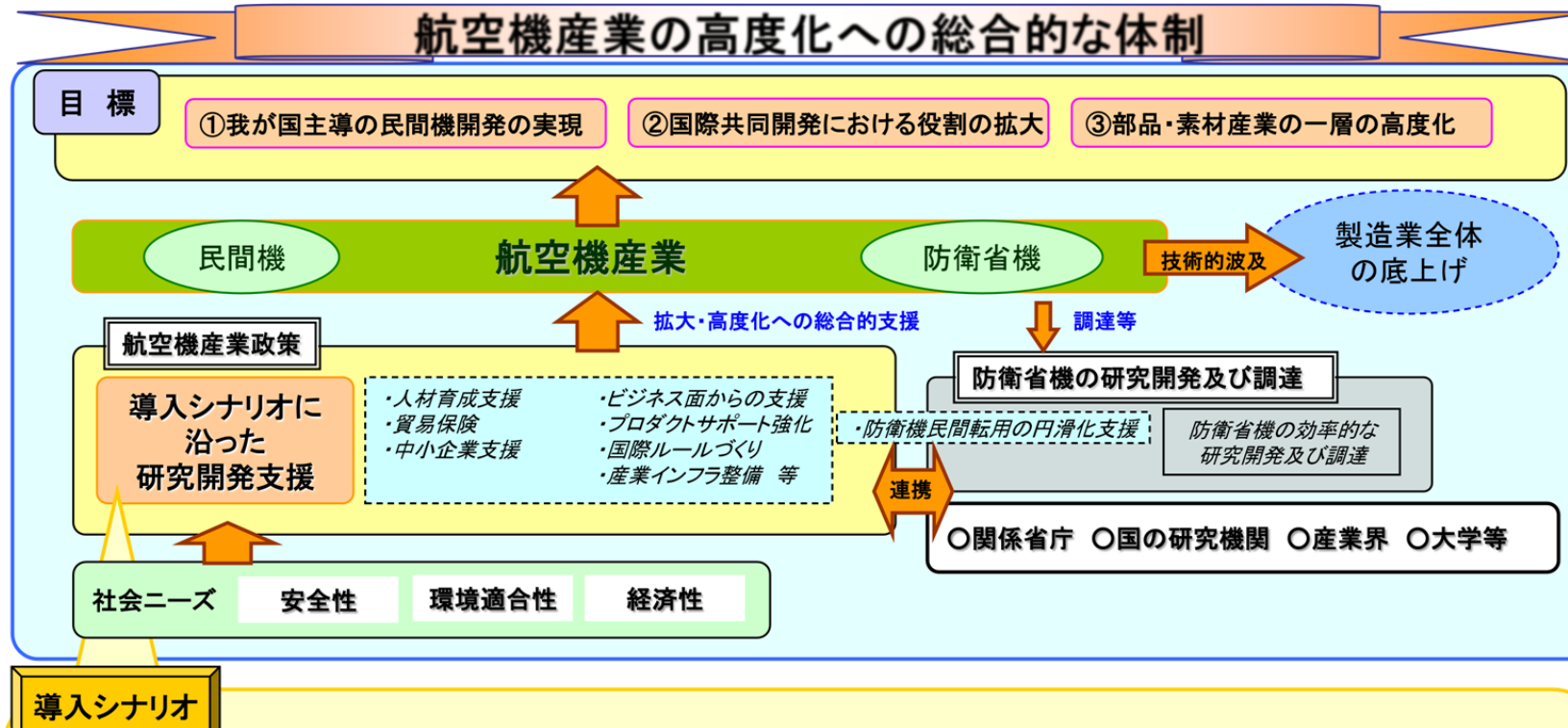
さらに、「革新的環境イノベーション戦略」（統合イノベーション戦略推進会議）には、運輸分野の温室効果ガス削減のため、航空機分野で**燃費向上に資する機体やエンジンの材料軽量化等の開発を進めること**が謳われている。

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。



◆ 技術戦略上の位置付け

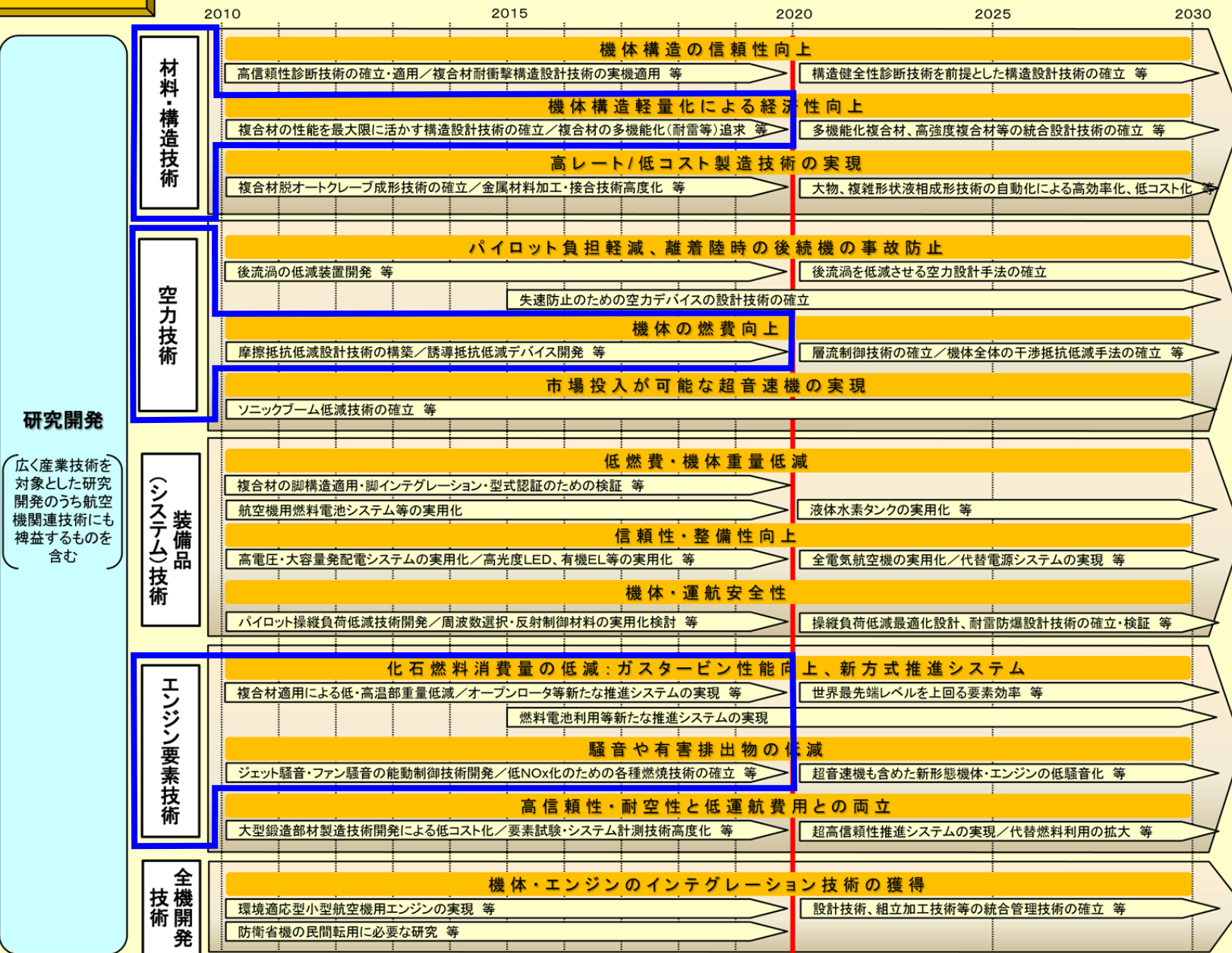
経済産業省策定「技術戦略マップ2010」における航空機産業の研究開発



# I. 事業の位置付け・必要性

## (1) 事業の目的の妥当性

### 導入シナリオ



## 材料・構造技術分野 — 概要及び課題 —

### 技術の概要

航空機構造は、構造体として必要な強度、信頼性を確保したうえで、**軽量である事、低コストで製造できること、高レートで製造できることが求められる。**そのためには、材料を規格化する技術標準化・認証、材料特性を生かし安全性確保や軽量化に寄与する構造設計技術、製造品質を保証し、信頼性を確保する検査技術や構造評価技術、運用中の信頼性を確保するための構造健全性診断技術、修理技術などに加え、高性能な材料を開発する技術、高効率な製造を可能とするプロセス技術が不可欠であり、これらの基盤となる基盤的技術の充実を推し進める必要がある。

### 国際競争力

- 炭素繊維複合材は性能、品質の点で先行している。今後材料の高い性能を生かす構造設計技術を高める事で、本分野の優位性を確保することが可能である。
- 今後必要となる複合材料構造の**低コスト製造技術、高レート製造技術に関しては、欧米に先行されており、キャッチアップが急務な状況**である。
- 複合材料開発に関し、欧米では国が主導する産学官連携が構築されており、我が国においても、材料認証・構造強度保証も含め、連携強化による効率的な開発体制の構築が必要である。

## 主要技術課題(1/2)

### 短期課題(~2015頃)

#### 機体構造の信頼性向上

／(安全性向上、国際競争力)

✓ 複合材料構造に対する高精度な耐衝撃、耐衝突構造設計技術の確立

✓ 高信頼性システム(センサ装着、修理技術、計測技術)の確立  
✓ 高信頼性診断技術の確立

✓ 非破壊検査データベース、シミュレーション技術の構築  
✓ 複合材料修理技術基盤の確立

### 中期課題(~2020頃)

✓ 高精度な耐衝撃、耐衝突構造設計技術の実機適用

✓ 認証制度の確立、実運用(点検作業)への本技術の適用

✓ 非破壊検査技術の高効率化、高精度化技術の確立  
✓ 複合材料修理技術の強度評価、経年変化評価

### 長期課題(~2030頃)

✓ 構造健全性診断技術を前提とした構造設計技術の確立

✓ 統合化非破壊検査技術  
✓ 複合材料修理技術の認証取得、実機適用、長期経年変化評価

#### 対応技術

構造安全設計技術

構造健全性診断技術

点検・修理技術

## 主要技術課題(2/2)

### 短期課題(~2015頃)

### 中期課題(~2020頃)

### 長期課題(~2030頃)

#### 機体構造軽量化による経済性向上 / (環境適合性・経済性向上、国際競争力)

✓ 複合材料の性能を最大限に生かす構造設計技術の追求

✓ 強度メンバと他の機能の統合化による軽量構造様式技術の確立

✓ 構造健全性診断技術による構造信頼性確保に基づく軽量設計の追及

✓ 複合材料の多機能化(耐雷、帯電防止)、高強度化、高弾性化の追求

✓ 多機能化複合材料、高強度、高弾性化複合材料の規格化、認証取得

✓ 多機能化複合材料、高強度、高弾性化複合材料の統合設計技術確立

✓ 高強度化技術推進

✓ 複合材料との組み合わせによる最適構造様式の追及

✓ 多機能化複合材料、高強度複合材料との最適組み合わせの追及

#### 高レート/低コスト製造技術の実現 / (経済性向上、国際競争力)

✓ プリプレグ成形技術高度化、液相成形技術高度化、熱可塑複合材料高度化、プリフォーム技術高度化追及

✓ 脱オートクレーブ成形技術、大物、複雑形状液相成形技術の確立

✓ 脱オートクレーブ成形、大物、複雑形状液相成形技術の自動化による高効率化、低コスト化追求

✓ ニアネットシェイプ成形基盤技術の確立

✓ ニアネットシェイプ成形技術の実機適用、大物、複雑形状対応技術追及

✓ ニアネットシェイプ成形の高効率化、低コスト化技術の追求

✓ 金属材料加工(切削、穿孔)、接合技術(FSW, FSJ, LBW)、複合材大型一体化構造製造技術の高度化

✓ 金属材料加工、接合技術高度化、治具レス組立技術、複合材大型一体化構造多機能化(耐雷、帯電性改善)

#### 国際協同開発/独自開発へ向けた基盤技術整備 / (国際競争力)

✓ 試験技術高度化、標準化、認証取得促進

✓ データベースの充実化、高度化

✓ バーチャル材料試験技術の確立

✓ 試験技術高度化、標準化、認証取得促進

✓ データベースの充実化、高度化、共通的設備の充実、高度化(耐衝突・耐衝撃試験、耐雷試験)

✓ バーチャル構造試験技術の確立

対応技術

軽量構造様式技術

空力弾性向上技術

複合材料高性能化技術

金属材料高性能化技術

複合材成形技術

金属材料成形技術

組立コスト削減技術

材料評価技術、標準化、認証技術

構造試験技術、標準化、認証技術



エンジン要素技術分野 – 概要及び課題 –

技術の概要

航空エンジンの開発においては、航空機の利便性を向上させつつ、環境適合性、安全性、経済性を高度に両立しなければならない。その際、化石燃料消費量低減による経済性および環境適合性向上に資する新方式も含めた高性能化、高温化、軽量化技術とともに、優れた環境適合性を実現する騒音や有害排出物低減技術、ならびに高い安全性と経済性を両立する設計・製造・試験基盤技術等の高度化を図る必要がある。

国際競争力

- ・複合材、耐熱合金等の先進材料の設計・製造技術や、流体、燃焼、構造等の大規模シミュレーション技術については、欧米と比べ遜色の無いレベルにある。
- ・国際共同開発で培った設計・製造基盤技術、防衛エンジン開発で培ったインテグレーション技術などをベースにした一部の技術開発においては今後の取組み次第で日本が優位に立てる可能性があるが、実機開発・運用の固有技術等においては、豊富な実績及び検証データの蓄積を有し、戦略的に標準化を進めている欧米が先行している。

主要技術課題(1/2)

短期課題(~2015頃)

化石燃料消費量の低減: ガスタービン推進の性能向上

✓エンジン内部の翼面、壁面の損失低減、多段CFD技術の確立

✓複合材部材設計製造技術の確立

✓耐熱複合材・耐熱合金部材設計製造技術の確立

✓GTF推進システムの実現

✓アクセサリギアボックスの損失低減

中期課題(~2020頃)

✓複雑な流れの原理理解に基づく損失低減、流体制御方法の確立

✓複合材適用による低温部重量低減

✓複合材適用による高温部重量低減、冷却空気量削減

化石燃料消費量の低減: 新方式の推進システムの実現(経済性、環境適合性)

✓オープンロータ等新たな推進システムの実現

✓電気エンジン要素技術およびシステム技術の確立

長期課題(~2030頃)

/(経済性、環境適合性)

✓世界最先端レベルを上回る要素効率とストールマージンの維持・向上

✓更なる軽量化を図るための先進材料の実用化

✓燃料電池利用等新たな推進システムの実現

対応技術

要素高性能化技術

軽量化技術

高温化技術

冷却高性能化技術

エンジン高性能化技術

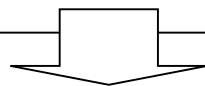
高性能制御システム・機器技術

### ◆NEDOが関与することの意義

NEDOは第三期中期計画におけるミッションとして、「我が国の経済社会が必要とする具体的成果を創出するとともに、我が国の産業競争力の強化、エネルギー・環境制約の克服に引き続き貢献するものとする。」ことを掲げている。

また、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が持つこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業

## ◆実施の効果（費用対効果）

本プロジェクトの総費用	109億円* <sup>1</sup> （2015～2019年）
CO <sub>2</sub> 排出量削減	CO <sub>2</sub> 排出削減量25万トン* <sup>2</sup>
2025～2030年累積	9.6万キロリットルの原油削減 費用削減効果は33億円* <sup>3</sup>
市場創出効果 2030年想定	約1兆円／年* <sup>4</sup>

\* 1 2011～2014年のMETI執行分は20.6億円

\* 2 軽量化とエンジンの高効率化を合わせて15%燃費向上が達成されると期待

\* 3 原油1バレル：50ドル、1ドル：110円で換算

\* 4 2030年の市場規模26兆円／年（JADC統計）

## Ⅱ．研究開発マネジメント

---



## Ⅱ. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

### ◆ 研究開発目標と開発内容

#### ① – 2次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発 (第二期)

研究開発項目	研究開発目標 (2019年度最終目標)	主な開発内容及び成果
<p>(1)複合材構造部材</p> <p>アルミニウム合金構造と同等の<b>高生産性・低コスト生産技術</b>の研究開発、複合材構造に由来する内部剥離等の<b>検査技術</b>確立、及び複合材本来の特性を生かした軽量化技術開発を実施する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 確立した高生産性・低コスト生産技術の要素技術を、航空機の適用部位を明確にして、想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。</li> <li>● 確立した複合材本来の特性を生かした軽量化を可能とする基礎技術を用いて、航空機の適用部位に必要な部材としての構造材料データを取得し、構造設計を行い想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。</li> <li>● 複合材由来の欠陥等の検査技術の外部審査によるTRL7を取得する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ボルトレス組立の処理条件の最適化により、目標である接着剤凝集破壊(せん断強度30MPa相当)を達成。</li> <li>● 高速成型技術開発、本研究の試作結果に基づく試算により、従来部品の半分以下の成形時間および70%程度の製造コストで製造可能なことを確認。</li> <li>● 広域歪み分布計測システムにより、メンテナンスコストを20%低減できることを確認。</li> <li>● 超音波ラム波を用いたSHM技術により、飛行実証を行い、ユーザーが容易に計測できることを確認。</li> </ul>
<p>(2)軽金属構造部材</p> <p>マグネシウム合金の開発、加工法の開発とその信頼性の向上検討を実施し、<b>マグネシウム合金の航空機構造材料への適用技術開発</b>を実施する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● マグネシウム合金において、明確にした航空機の適用部位に必要な部材としての構造材料データを取得し、構造設計を行い想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 押出速度については、鋳造不燃押出材、急冷凝固耐熱押出材共に最終目標を達成した。</li> <li>● 鋳造不燃押出材の特性(引張降伏強さ、伸び、腐食速度、発火温度)は、最終目標を達成した。</li> <li>● 急冷凝固耐熱押出材の材料特性(強度、伸び、腐食速度、発火温度、破壊靱性値、亀裂進展速度)は、最終目標を達成した。</li> <li>● スケールアップに伴い生じる品質のバラつきや特性低下の要因を特定し、品質の安定化と特性改善を達成。</li> </ul>
<p>(3)総合調査研究</p> <p><b>国内外の研究開発動向や政策支援の状況</b>、ボーイング、エアバス等OEM、及びエアラインの動向等を<b>調査・分析</b>し、研究開発の方向性や目標レベル等を常に確認し、研究開発を効率的・効果的に推進していくための調査を実施する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 航空機の材料評価から設計、製造、運航に至るまでの各フェーズにおいて、実用化のために解決すべき課題を整理するとともに、国内外の技術動向や政策支援を調査し、本研究開発の方向性、達成レベル等を明確化する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 「SHM実用化」では、TRL7達成に貢献するとともに、認証取得・実用化への道筋を明らかにした。</li> <li>● 「高レート設計・製造技術開発」では、研究開発期間途中での体制強化を行い、TRL5達成に貢献した。</li> <li>● 「マグネシウム合金開発と航空機への適用研究」では、研究開発期間途中での体制強化(材料メーカー参画)を行い、目標達成に貢献した。</li> </ul>

## Ⅱ. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

### ◆ 研究開発目標と開発内容

#### ② - 2 航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発 (第二期)

研究開発項目	研究開発目標 (2019年度最終目標)	主な開発内容及び成果
<p>(1) 小型タイプ自動積層装置の製造適用に向けた開発</p> <p>小型タイプ自動積層装置について、その製造適用に向け、障壁となる技術課題を要素技術の深化・成熟化を通して解決し、複合材部材製造の高生産性・低コスト生産に対応可能な安価で汎用性・量産性を持った装置を開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 種々の複雑形状の積層に対し、作業者による手積層と同等の品質を確認する。</li> <li>● 将来の複合材部材製造の高生産性・低コスト生産に対応可能な積層速度で、連続積層可能で、製造適用に必要な易操作性、易メンテナンス性を有し、汎用性を持つ安価小型タイプ自動積層装置を開発して装置仕様を決定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 製造適用に必要な易操作性、易メンテナンス性を有し、汎用性を持つ安価小型タイプの自動積層装置を開発。</li> <li>● 試作部材積層時の積層不良発生頻度を半減</li> <li>● 積層検査を無人で実施し、積層作業に関わる時間を低減</li> <li>● 適用部材拡大 (半径3m×周長3m程度の湾曲部材) への積層検査自動化に対応</li> </ul>
<p>(2) 実機部材形状に適用可能な設計・製造技術の開発</p> <p>小型タイプ自動積層装置による中小型複雑形状部材の設計・製造技術について、適用部材拡大を念頭に置き、実機部材形状に適用可能な設計・製造技術を開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 種々の複雑形状に対し、開発した装置を用いて部材の試作を実施し、その品質評価により、製造適用に向けて高度化した設計・製造技術の確立を確認する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 開発した小型タイプ自動積層装置を用いた試作・品質評価により、製造適用に向けて高度化した設計・製造技術の確立を確認した。</li> <li>● 湾曲部材を設計・積層・製作し、品質を評価 (ポイド率2%以下)</li> </ul>

## Ⅱ. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

### ◆ 研究開発目標と開発内容

#### ③ - 2 航空機用難削材高速切削加工技術開発 (第二期)

研究開発項目	研究開発目標 (2019年度最終目標)	主な開発内容及び成果
<p>航空機用難削材の高速切削、ロボット切削、並びに、切削・金属ディポジション複合加工において、予測が必要なものは、加工力、工具や工作物の温度、仕上げ面残留応力、工具摩耗、炭素繊維複合材の剥離寸法、クーラントの流れ、熱応力などであるが、難削材の種類や加工プロセスによって、最低限必要なものが異なる。加工プロセスの予測には多大な時間とコストが必要となるため、各プロセスの最適化や高性能な工具の開発にあたっては、最低限必要な物理量を効率的に求められるよう、<b>有限要素法や有限体積法に基づくシミュレーション技術及び切削理論に基づくコンパクトでかつ高度な解析技術を開発</b>する。これにより、予測技術をベースとしたスマートな航空機難削材高速切削加工技術の高度化を図り、革新的な切削加工技術開発を促進する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 予測技術の精緻化を図り、発展させて、加工費あるいは加工時間を30%以上削減する高性能加工技術を確立する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 炭素繊維複合材の高速高品質切削加工技術の開発 シミュレーションの妥当性ととも、CFPRおよびチタン合金との重積材の穿孔や切抜きに対して、有効な工具切削条件を見出した。</li> <li>● 先進アルミ合金の高速高品質切削加工技術の開発 有限要素法解析を用いて反転バニング切削の加工条件を最適化することで、Al-Li合金の平面大型薄物部材へのポケット加工後の変形を現状比で80~120%軽減した。</li> <li>● チタン合金の高速高品質切削加工技術の開発 圧縮性残留応力を改善する工具形状を最適化して、マシニングセンタおよびオービタル加工装置での切削条件を最適化し、疲労寿命試験を行い、現状のドリル加工+リーマ加工と同等あるいはそれ以上を得た。</li> <li>● ロボット切削システムによる高速切削加工技術の開発 アルミニウム合金製フレーム部品に対して、深さ精度±0.1mmのポケット加工を行った。</li> <li>● 切削-金属ディポジション複合化技術の開発 アルミ合金母材上に中間層Ni-Cu合金および最上層ステンレス鋼を積層するための最適条件を明らかとした。また、積層造形と切削加工の二つの工程をオンマシンで実施し、ブッシュ部品のプロトタイプを製作した。</li> </ul>

## Ⅱ. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

### ◆ 研究開発目標と開発内容

#### ④ – 2軽量耐熱複合材CMC技術開発 (高性能材料開発)

研究開発項目	研究開発目標 (2019年度最終目標)	主な開発内容及び成果
<p>(1) CMC材料の開発</p> <p>耐熱温度1400℃を達成する第3世代SiC繊維の生産技術を確立するとともに、CMC材料を開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 1400℃×400Hr曝露後強度低下20%以下を満足するCMC材料を製造可能な、引張強度2.0GPa以上のSiC繊維の低コスト量産プロセスを確立する。</li> <li>● 室温引張強度200MPa以上、1400℃×400Hr曝露後強度低下20%以下を満足するCMC材料を開発する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● SiC繊維の欠陥を低減する対策を実施した結果、強度2GPa以上、ばらつき低減を達成。</li> <li>● 強度ばらつきを抑制するためのポリマー改良を目的に、強度低下の要因となるポリマー中の異物除去方法を確立。</li> <li>● バッチ焼結プロセスを確立し、CMC部材開発用にSiC繊維を供給するため、新規バッチ式焼結設備を設置。</li> <li>● 連続焼結プロセスを確立し、低コスト量産プロセスを実現するため、連続焼結プロセスを検討。実現可能性を見出した。</li> <li>● 室温引張強度200MPa以上を達成。燃焼器内のCMCパネル近傍相当の水蒸気分圧、1400℃、400Hr曝露後の平均強度低下率20%以下を達成。</li> </ul>
<p>(2) 高性能SiC繊維の開発</p> <p>応力負荷が大きく環境条件の厳しい部材に適用可能な高性能SiC繊維を開発する。開発したSiC繊維を用いてCMC材料の適用可能性を検証する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 引張強度3.0GPa以上で高温クリープ特性に優れるSiC繊維を開発、さらに試作条件を確立し、CMC部材評価用試料を供給する。</li> <li>● 高性能SiC繊維における三次元プリフォームの量産を可能とするプロセスを開発し、繊維体積割合30%以上のプリフォームを試作する。</li> <li>● 開発したSiC繊維が、CMC材料に適用可能であることを確認する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 高性能SiC繊維用ポリマーの開発は、高強度と高温クリープ特性を両立する焼結助剤成分の基本的な化学組成を決定した。</li> <li>● 高性能（高強度）SiC繊維の開発は、合成したポリマーの繊維化を実施し、強度3.0GPa以上のSiC繊維が得られた。</li> <li>● 目標である繊維体積含有比率30%以上を大きく上回る36%の三次元プリフォームの作製に成功した。</li> <li>● 開発したSiC繊維の特性を評価し、CMCへ適用可能であることを確認した。また、開発繊維を用いたCMCの材料特性を評価した。</li> </ul>

## II. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

### ◆ 研究開発目標と開発内容

#### ⑤ 航空機用構造設計シミュレーション技術開発

研究開発項目	研究開発目標 (2019年度最終目標)	主な開発内容及び成果
航空機用 <b>構造設計シミュレーション</b> 技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 解析検証を終了し、数値シミュレーションの実用性を確認する。</li> <li>● 数値シミュレーションツールをソフトウェア化し、最適設計技術として確立する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 分野横断（空力・構造・強度）シームレス機体設計シミュレーターの開発</li> <li>● これまで逐次的に翼形や設計条件を変えながら実行せざるを得なかった解析を、自動で行うことが可能となった。</li> <li>● シミュレーション援用による認証プロセスの低コスト化</li> <li>● OHT 強度試験に関して、供試体の種類で4分の1以上が削減可能となり、供試体数においても約19%の削減が可能となることを見込まれた。</li> <li>● 複合材の特性を活かした機体構造設計シミュレーターの開発と実験的検証</li> <li>● 簡易AFP 装置を作製し、最適化された曲線繊維複合材が、従来の直線繊維複合材よりも高い強度を有することを実験的に示した。</li> <li>● 層流化技術開発</li> <li>● 後退翼における圧縮性三次元境界層の乱流遷移を高い精度で予測するためのツール開発を行い、安定解析と直接数値解析を組み合わせた統合遷移解析システムを構築し、大規模かつ詳細な遷移予測が可能となった。</li> <li>● 複合材構造部材ライフサイクルシミュレーション</li> <li>● VaRTM、OoA プリプレグによる異種材料ハイブリッド一体構造の変形予測技術開発を達成した。</li> <li>● エンジン－機体統合性能予測CFD技術の構築</li> <li>● 機体と稼働エンジンとの統合解析を達成し、機体とエンジン・ナセルとの相互作用の予測を可能とする基盤技術を開発した。</li> <li>● 非巡航時における高精度非定常流体解析</li> <li>● 構築した高精度LES データベースを基に平衡/非平衡壁面モデルLES を実施し、壁面モデルLES の予測精度および非平衡効果のモデル化について問題点や改善点を明らかにし、当初の目的を達成した。</li> </ul>

## Ⅱ. 研究開発マネジメント (2) 研究開発計画の妥当性

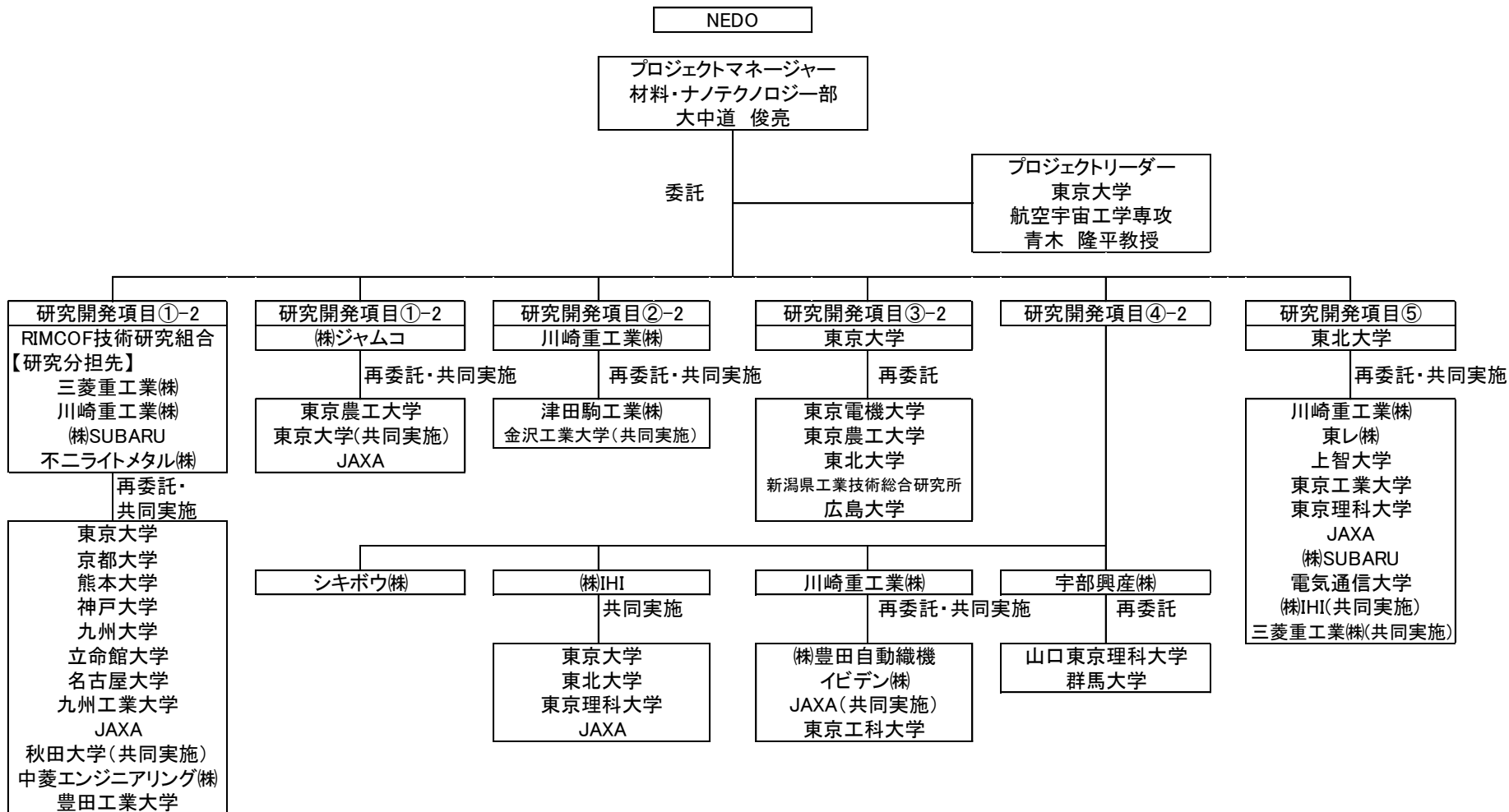
### ◆プロジェクト費用

(単位：百万円)

研究開発項目	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
①-2次世代複合材及び軽金属構造部 材創製・加工技術開発（第二期）	-	202	458 うち 加速予算 55	554 うち 加速予算 9	585 うち 加速予算 22	1,798
②-2航空機用複合材料の複雑形状積 層技術開発（第二期）	-	100	280 うち 加速予算 80	280	285	945
③-2航空機用難削材高速切削加工技 術開発（第二期）	-	50	195 うち 加速予算 15	141	167 うち 加速予算 6	552
④-2軽量耐熱複合材CMC技術開発 （高性能材料開発）	642 うち 加速予算 182	885	1,990 うち 加速予算 300	2,165 うち 加速予算 31	1,636 うち 加速予算 49	7,319
⑤ 航空機用構造設計シミュレーション 技術開発	37	37	37	75	76	262
合計	679	1,274	2,961	3,214	2,749	10,877

## II. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

### ◆ 研究開発の実施体制



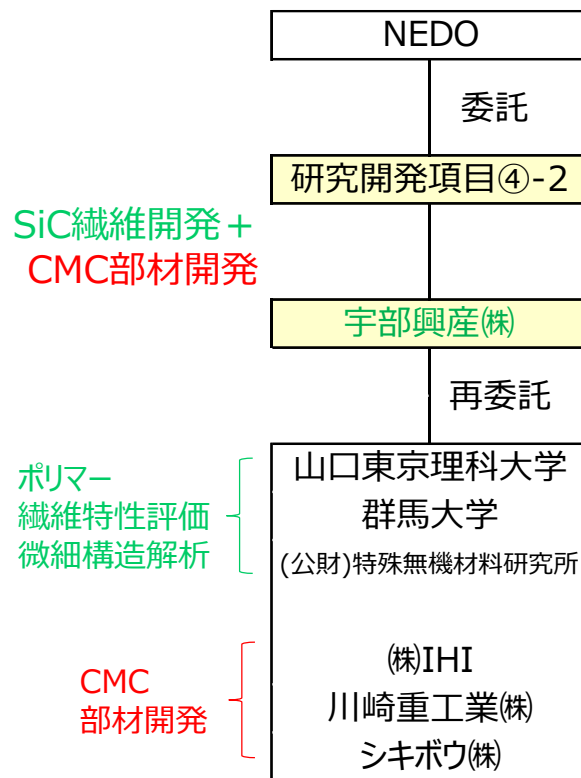


◆ 研究開発の実施体制の変更 (研究体制の強化)

- ・実施体制を変更して、SiC繊維開発の前倒しとCMC部材開発を推進
- ・適切な体制変更によって、NEDOと実施者間の連携が改善され、宇部興産も繊維開発に専念

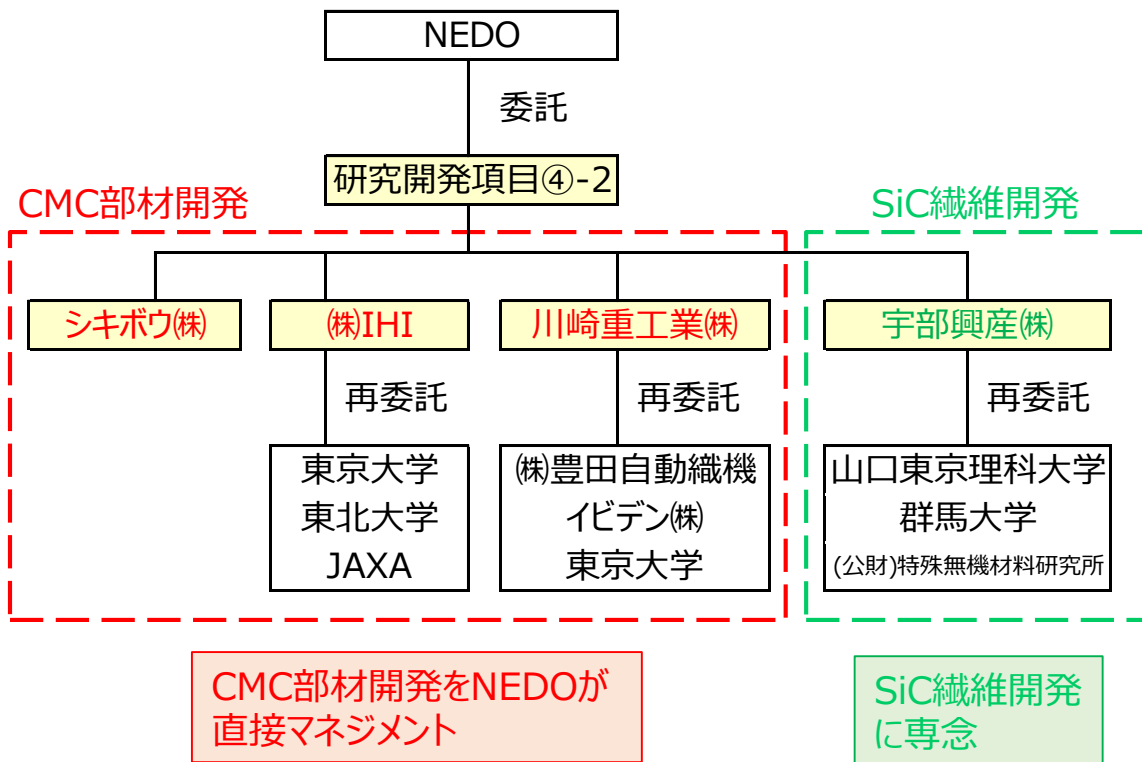
変更前

2015年8月スタート時



変更後

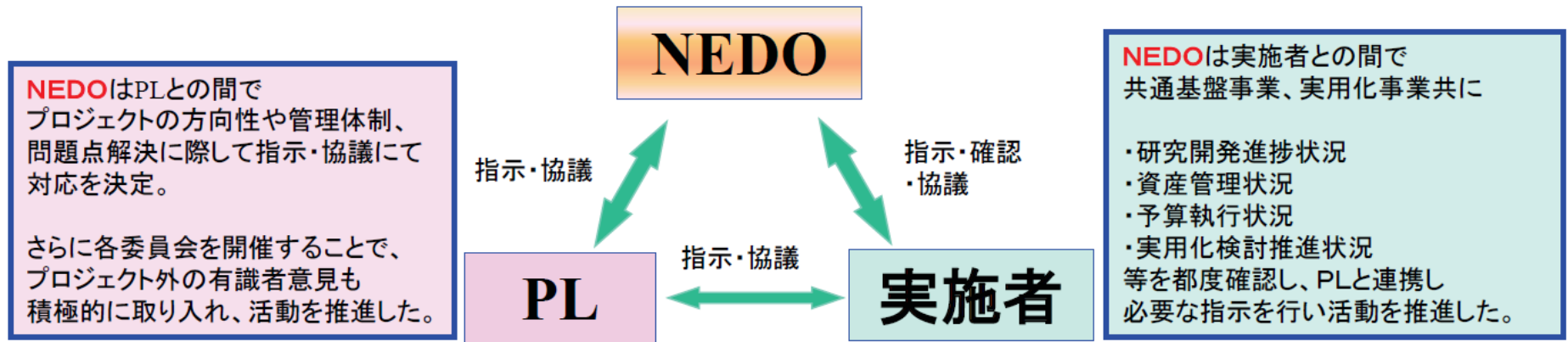
2015年11月の技術推進委員会で妥当とのご判断





◆ 研究開発の進捗管理

◆ 動向・情勢の把握と対応 PLとの連携・情報共有



NEDOはPLと実施者の連携を強化することで、**コミュニケーションの向上を図り**、研究目標の達成を目指し、また実用化に向けた活動を推進した。

### ◆研究開発の進捗管理

### ◆動向・情勢の把握と対応

- 四半期毎に開発目標と達成度をチェックし、翌四半期計画を見直し。
- 年1回のNEDO主催の技術推進委員会で、外部有識者の意見を参考に開発計画を見直し。
- 研究開発テーマ毎に技術委員会を運営。
- CMC開発では、4実施者持回りで技術委員会を運営して、横の繋がりを活かしたシナジーを期待。
- 必要なタイミングで予算の追加配賦を行い、研究開発を加速。
- 広報活動（2017年8月モノづくり日本会議 新産業技術促進検討会、2019年1月nano tech、2020年1月nano tech）

◆ 研究開発の進捗管理

◆ 中間評価結果の反映

改善すべき点（中間評価）

各グループ間での連携が希薄に感じられるため、研究成果の相互の関連性を認識する機会を出来るだけ設けて情報の共有化を行うなど、有機的な連携体制の構築を望む。

実用化に向けては使用する際の制約や条件に対応した信頼性が求められるため、定量的な指標を用い、客観的表現で研究結果を評価する必要がある。

ご指摘に対する対応

CMC部材開発に関わる企業間で連携して技術開発を推進していくために、技術委員会を設置し、協調領域において情報の共有化を行うなど、有機的な連携体制の構築した。

各実施者の最終目標に、評価基準として定量的な条件設定を行った。

## ◆ 知的財産管理

## NEDO知財方針

## 【基本方針】

1. プロジェクトの知財マネジメントの強化を図り、  
国民経済へのアウトカムの最大化を目指す。

- (1) 知財戦略を踏まえたプロジェクト企画の強化
- (2) プロジェクトにおける知財マネジメント強化
- (3) 公募・契約段階からの知財方針の明確化
- (4) 秘密漏洩防止、技術情報流出防止の管理の徹底
- (5) NEDOにおける知財マネジメント及びサポート体制の強化

2. 未利用成果等の活用促進の強化を図り、  
国民経済へのアウトカムの最大化を目指す。

- (1) 成果の利用実態分析の強化（バイ・ドール調査への協力義務化）
- (2) 未利用成果等の活用促進（マッチング・システムの構築等）

## ◆ 知的財産管理

- ▶ NEDO知財方針に則り知財合意書を作成し、知財運営委員会を設置  
知財合意書はNEDO委託契約締結の前提となるもの（スタート前に合意）
  - ・特許を受ける権利の帰属
  - ・大学等と企業の共願特許の持ち分確定
  - ・プロジェクト内での実施許諾
- ▶ 知財運営委員会の運用
  - ・メンバーは、再委託を含めた全参加者で構成
  - ・PJ期間中、出願・実施許諾依頼の都度開催

◆ 知的財産権等に関する戦略

▶ オープン／クローズ戦略の考え方

各実施者から非公開の場で説明の予定

	非競争域	競争域	
公開	競合関係にある複数の大学や企業間であっても、研究成果の共有・公開を可能にする基礎的・基盤的研究領域であって、特許出願等、成果が公開されることが考えられる領域。	競合関係にある複数の大学や企業間で競争が発生する領域であって、積極的に出願・権利化を目指すことが良いと考えられる領域。	積極的に 権利化
非公開	競合関係にある複数の大学や企業間であっても、研究成果の共有・公開を可能にする基礎的・基盤的研究領域であって、ノウハウ等、成果をブラックボックス化して秘匿することが良いと考えられる領域。	競合関係にある複数の大学や企業間で競争が発生する領域であって、製品を分析しても技術の本質や製造プロセスを解析されないことがない等、ノウハウとしてブラックボックス化して秘匿することが良いと考えられる領域。	ノウハウとして 秘匿

## Ⅲ. 研究開発成果

---

①—2 次世代複合材及び軽金属構造部  
材創製・加工技術開発(第二期)

RIMCOF技術研究組合



## ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

### ① KUMADAIマグネシウム合金の材料開発

- 【最終目標】**
- ① 鑄造不燃および急冷凝固耐熱押出材の押出速度は、500mm/min以上
  - ② 鑄造不燃押出材の特性は、引張降伏強さ:250MPa以上、伸び:5%以上、腐食速度:0.6mm/y以下、発火温度750°C以上。
  - ③ 急冷凝固耐熱押出材の特性は、引張降伏強さ:400MPa以上、伸び:5%以上、腐食速度:0.6mm/y以下、発火温度750°C以上、破壊靱性:20MPa・√m以上、き裂進展速度特性:p6に示すレベル。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	押出速度については、鑄造不燃押出材、急冷凝固耐熱押出材共に最終目標を達成した。	◎	なし	
②	鑄造不燃押出材の特性(引張降伏強さ、伸び、腐食速度、発火温度)は、最終目標を達成した。	○	なし	
③	急冷凝固耐熱押出材の材料特性(強度、伸び、腐食速度、発火温度、破壊靱性値、亀裂進展速度)は、最終目標を達成した。	○	製造研究	

## ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

### ② KUMADAIマグネシウム合金の航空機構造適用

#### 【最終目標】

- 介在物の少ない大型素材を製造し、大型素材製造における品質(強度250MPa以上、伸び5%以上)の安定化と低コスト化を達成する。
- 高品質低コスト大型素材製造技術を確立した上で、実用化の妥当性を確認する。

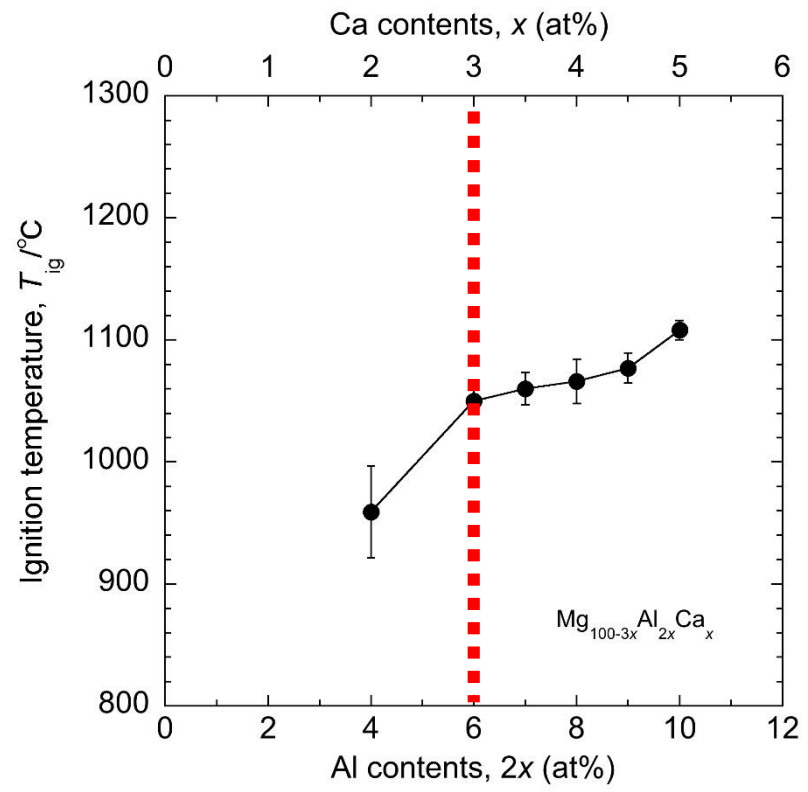
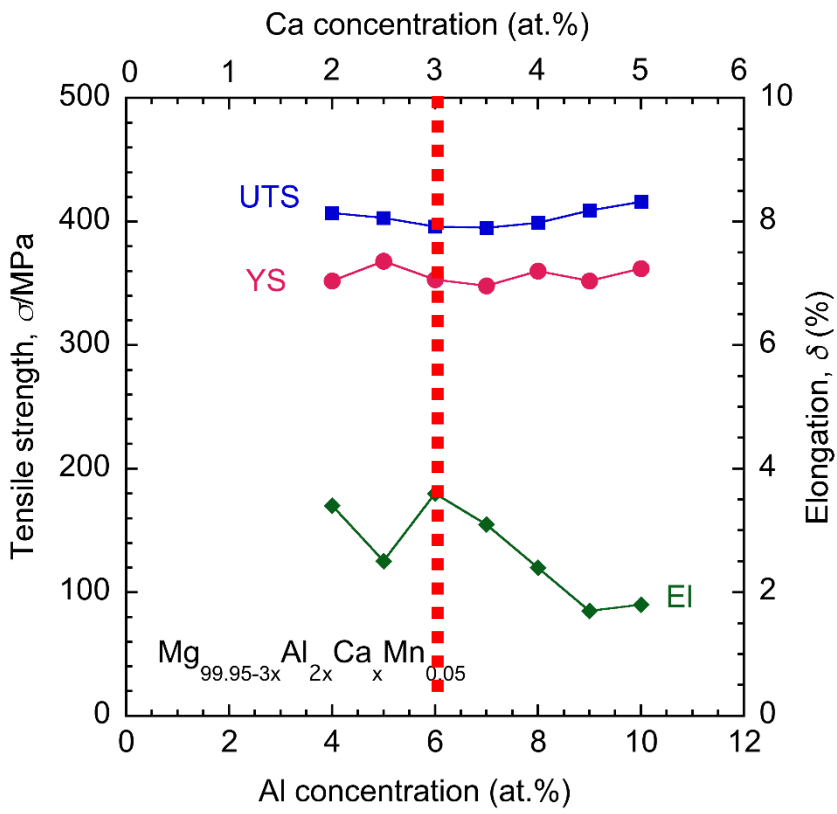
	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	スケールアップに伴い生じる品質のバラつきや特性低下の要因を特定し、合金組成・鑄造条件の最適化、プロセス改善(フィルタリング)を実施。品質の安定化と特性改善を達成。	○	製造コストの検証	量産時の製造コストを試算・検証する。
②	強度と延性の両立に苦労したが、どちらも目標を超える押出条件の導出に成功。	○	なし	
③	Lアングル、Cチャンネル材の押出試作を4回実施。目的の材料特性を有する型材の試作に成功。素材特性は、A値・B値で目標を達成。	○	なし	
④	試作部品の抽出 部品試作及び評価完了	○	適用候補部品の選定 防食システム・組立工法	実機適用方針の整理 防食システム・組立工法検討

① KUMADAIマグネシウム合金の材料開発

➤ 鑄造不燃(Mg-Al-Ca-Mn)合金の開発

- ✓ Mn添加(0.03 at%)により耐食性向上。
- ✓ Mg-6at%Al-4at%Ca-0.05at%Mn成分により、高強度と高延性を両立。

成分希釈化による機械的特性の最適化と不燃性の確保

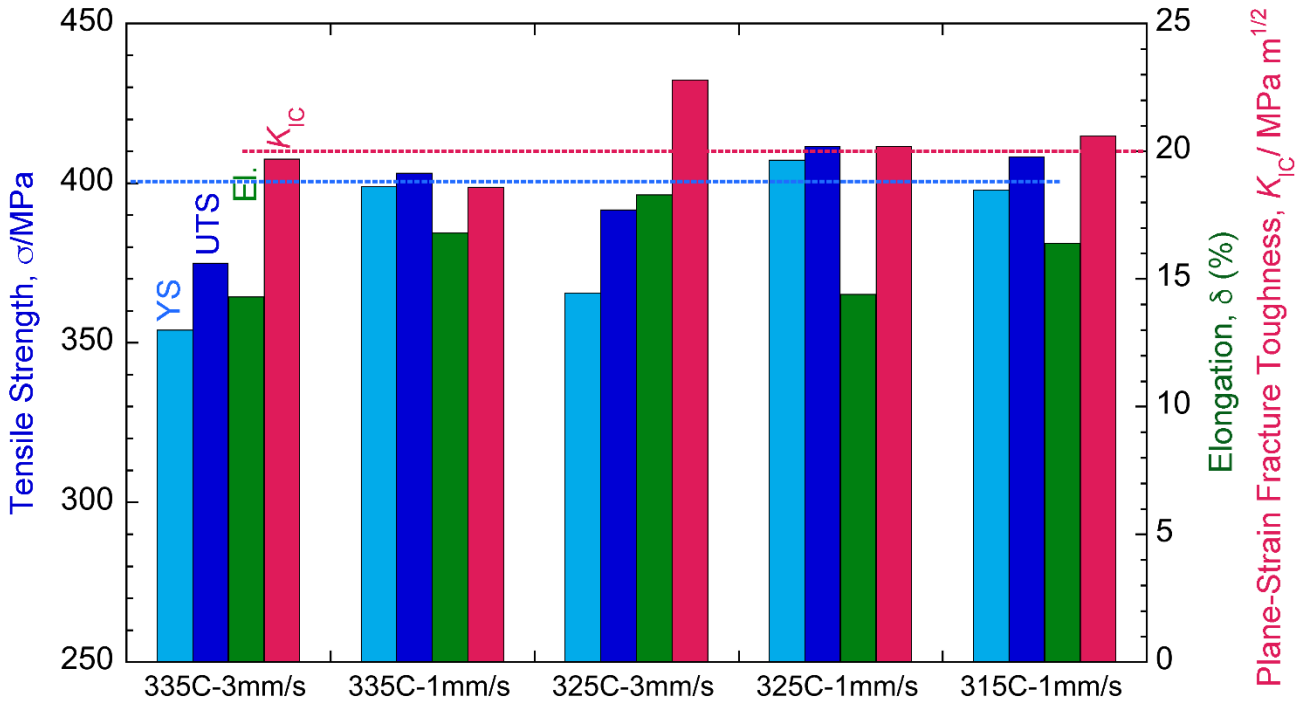


押出条件: R15, Vr: 2.5 mm/s, Te: 350°C

① KUMADAIマグネシウム合金の材料開発

➤ 急冷耐熱(Mg-Zn-Y-Al)合金の開発

- ✓ 押出前熱処理条件および押出加工条件の最適化により高破壊靱性(20 MPa√m)と高強度(400 MPa)を達成。
- ✓ 押出前熱処理に適した合金成分Mg-0.9Zn-2.05Y-0.15Al (at%)を開発。



下記の条件にて、目標値を達成  
 合金成分: Mg-0.9Zn-2.05Y-0.15Al (at%)  
 押出前熱処理条件: 425°C × 24h  
 押出条件: 押出温度325°C, 押出ラム速度1 mm/s

## ① KUMADAIマグネシウム合金の材料開発

### まとめ

#### KUMADAI鋳造不燃マグネシウム合金の開発

二次構造部材としての特性(強度、延性、耐食性、不燃性)を備えた合金成分の提示に至った。

#### KUMADAI急冷耐熱マグネシウム合金の開発

一次構造部材としての(強度、延性、耐食性、不燃性、破壊靱性値、き裂伝播速度)を備えた合金成分の提示および、押出前熱処理条件・押出加工条件の提示に至った。

破壊靱性値と強度の両立を達成するための組織制御技術(マルチモーダル組織制御技術)の提案に至った。

### ② KUMADAIマグネシウム合金の航空機構造適用

## 押出技術開発 大型素材の品質向上・安定化を図るため、製造条件の最適化を実施。

### 押出条件の導出、最適化

- ☑ 押出温度および成形速度を最適化し、目標の強度特性が得られる成形条件を獲得できた。
- ☑ ダイデザインの改良により、①集合組織発達の緩和（延性の改善）、②押出成形速度の向上、③押出圧力の低減 が可能となった。
- ☑ 目標特性を満足する大型押出素材（20m超）の製造ができた。



図 大型素材（20m超）の押出の様子（写真：左）とCチャンネル押出材の外観写真（写真：右）

表 大型素材（Cチャンネル）の引張試験結果

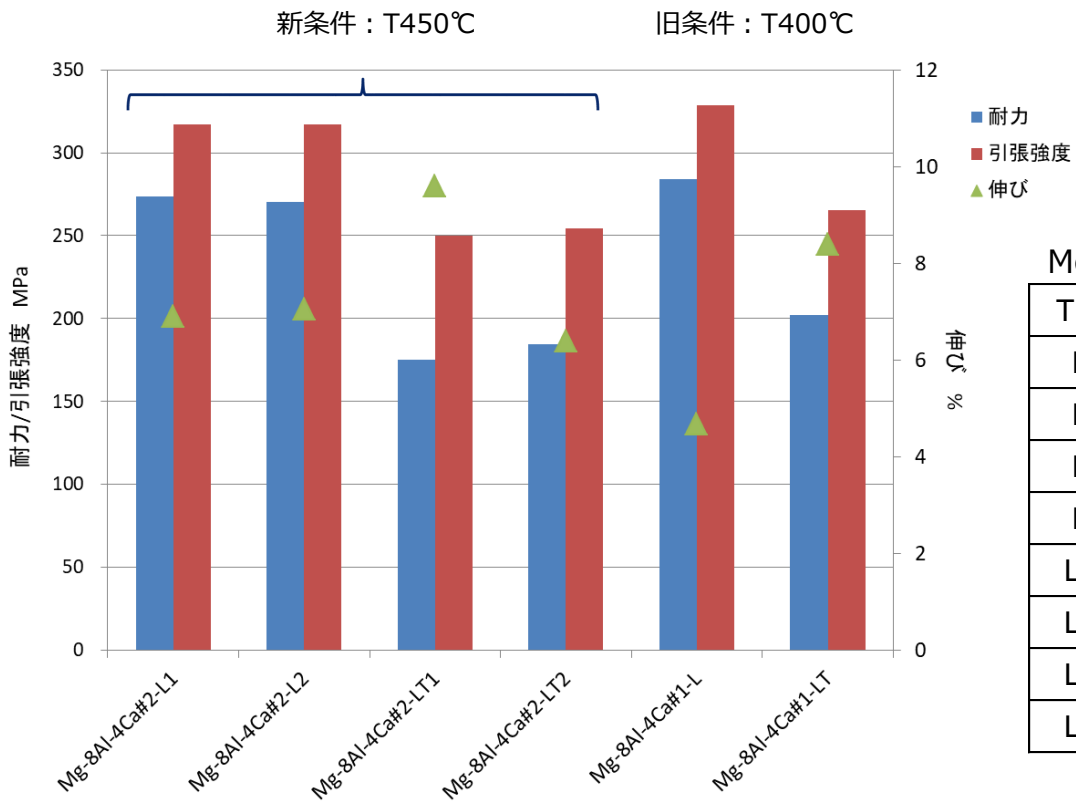
	0.2% 耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
MAX	284	307	6.3
MIN	263	299	4.6
Average	276	303	5.5
A値相当	<b>250</b>	<b>295</b>	-
B値相当	<b>261</b>	<b>298</b>	-
データ数	10	10	10

② KUMADAマグネシウム合金の航空機構造適用

◆ 材料特性評価

機械特性評価 – Mg-8Al-4Ca押出#2 引張試験

基本合金組成 : Mg-8Al-4Ca  
 Mn添加量 : 0.015%



Mg-8Al-4Ca-0.015Mn 試作#2引張試験結果

TP No.	耐力 MPa	引張強度 MPa	伸び %
L-01	268.8	315.3	6.3
L-02	278.9	319.3	7.5
L-11	268.0	316.6	6.5
L-12	272.8	317.3	7.6
LT-01	177.2	256.9	9.0
LT-02	172.9	243.5	10.2
LT-11	182.7	256.5	7.3
LT-12	185.8	252.1	5.5

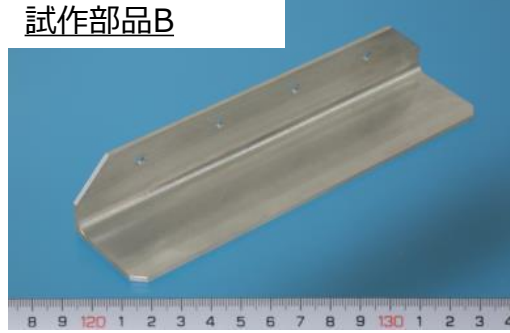
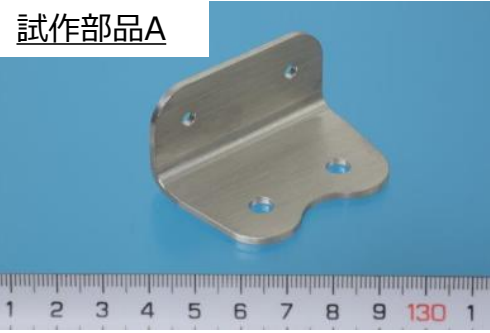


押出条件のチューニングにより 耐力=272MPa(平均) , 伸び=7.0%(平均) を達成

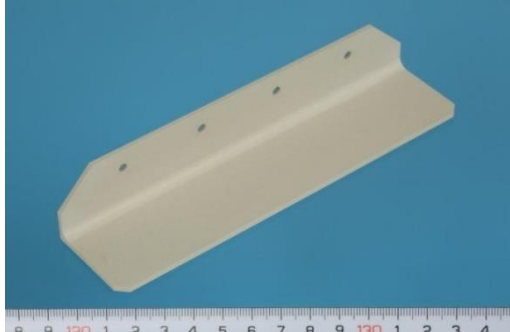
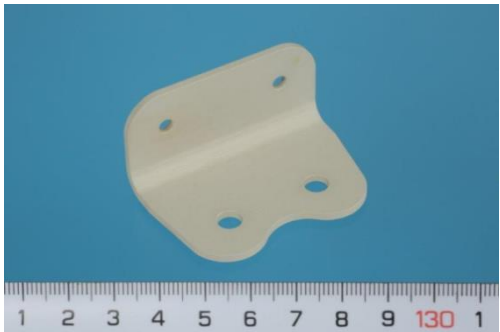
② KUMADAIマグネシウム合金の航空機構造適用

◆ 二次構造部品試作  
試作結果

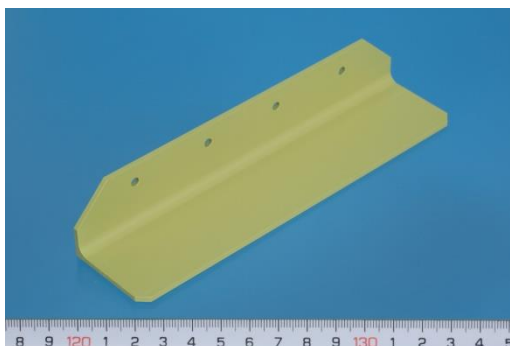
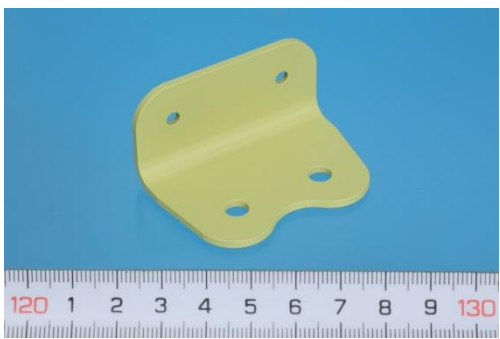
切削加工，機械加工後



表面処理後  
(陽極酸化)



塗装後  
(プライマ)





①ー2 次世代複合材及び軽金属構造部  
材創製・加工技術開発(第二期)

株式会社ジャムコ

◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

研究開発テーマ(もしくは研究開発項目): 次世代軽量カーボンハニカムパネルの開発  
 【最終目標】  
 ①航空機内装品のハニカムパネルに必要な耐火性や機械的性質等の特性を満たし、ガラスハニカムパネルの60%の重量を実現したカーボンハニカムパネルを完成させる。  
 ②ガラスハニカムパネルと同等のコストでの量産化に目途を付ける。  
 ③従来の複合材製スキン-ストリンガ胴体構造に対し、ラティス構造適用により15%の軽量化を達成する。胴体以外の3次元曲面構造への適用性のための設計製作技術を確立し、部分構造を試作して力学的特性を評価し、実用化の妥当性を確認する。(TRL5)

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	軽量化目標をおおよそ達成したカーボンハニカムパネルを開発し、耐空性評価(耐火・強度)を実施することで実用化の妥当性について確認した。	○		
②	低コスト材料・製造方法の検討により、ガラスハニカムパネルと同等のコストでの量産化に目途を付けた。	△	開発したハニカムコアのハンドリング性に課題があり、更なる検証を要する。	適用する紙・樹脂の検討を進める。 見込み時期(2022年3月)
③	3次元湾曲パネルの製造技術を確立し、試験片の製作を完了した。	△	3次元湾曲パネル設計技術に試行錯誤があり、評価試験が未完了である。	2020年度中に実施を計画している。 見込み時期(2021年3月)

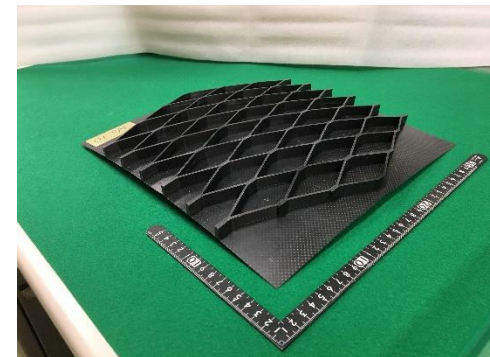
◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み(中間) / 一部達成(事後)、×未達

早期の実用化を見据え2種類の構成について評価した。

- 開発パネル①: 開発プリプレグ + 既存ハニカムコア
- 開発パネル②: 開発プリプレグ + 開発ハニカムコア

### 試験結果

- ・2種の開発ハニカムパネル共に、耐火要求を満たした。
  - ・Lavatory供試体については、2種の開発パネル共に要求強度を満たした。
  - ・開発パネル①を適用したGalley供試体では要求強度を満たし、実用化の妥当性を確認した。
  - ・開発パネル②を適用したGalley供試体では一部の試験で要求に未達となった。
- 
- ・2、3次元湾曲構造の量産化を見据えた低コスト製造技術を確立した。
  - ・2次元湾曲構造については、理論値と実験値が概ね一致した。
  - ・3次元湾曲構造の評価試験は2020年度内を計画する。



## ②-2 航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発(第二期)

### 川崎重工業株式会社

国産初の小型ロボットタイプのCFRP曲面積層機を開発

一複雑形状のCFRP部品の生産性向上と輸送機器のCO<sub>2</sub>排出削減に期待—

2020年2月25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  
津田駒工業株式会社

NEDOは、複雑形状に対する炭素繊維複合材料（CFRP）の自動積層技術開発に取り組んでおり、今般、津田駒工業（株）とともに、国産初となる小型ロボットタイプのCFRP曲面積層機（ロボットAFP）を開発しました。

本積層機は、高精度アームロボットに、津田駒工業（株）の小型積層ヘッドを搭載することで、曲面など複雑形状のCFRP部品の自動積層を、国産機として初めて実現しました。これにより、軽量で高強度なCFRP部品の生産性向上に加え、CFRP部品の適用拡大による航空機をはじめとする輸送機器の軽量化と二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出削減が期待できます。

今後、津田駒工業（株）は本積層機を、航空機産業を中心に展開していきます。また、将来はCFRPの利用拡大が期待される自動車産業などへの展開も図り、国内の素材産業や加工・製造分野の国際競争力強化に貢献します。

図 開発したロボットAFPの積層ヘッド

## ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

### 研究開発項目②-2

#### 「航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発(第二期)」

➢ 研究開発の目的: 民間航空機の中小型複雑形状部材に対応可能な小型タイプ自動積層装置による、航空機用複合材料の積層技術を開発する。

研究開発の目標	最終目標(2019年度)
(1) 小型タイプ自動積層装置の製造適用に向けた開発	製造適用に必要な易操作性、易メンテナンス性を有し、汎用性を持つ安価小型タイプの自動積層装置を開発する。 ・試作部材積層時の積層不良発生頻度を半減 ・積層検査を無人で実施し、積層作業に関わる時間を低減 ・適用部材拡大(半径3m×周長3m程度の湾曲部材)への積層検査自動化に対応
(2) 実機部材形状に適用可能な設計・製造技術の開発	開発した小型タイプ自動積層装置を用いた試作・品質評価により、製造適用に向けて高度化した設計・製造技術の確立を確認する。 ・上記湾曲部材を設計・積層・製作し、品質を評価(ポイド率2%以下)

項目	最終目標(2019年度)	達成度
積層不良発生頻度	・試作部材積層時の積層不良発生頻度を半減	100%
積層検査・対象部材	・積層検査を無人で実施し、積層作業に関わる時間を低減 ・適用部材拡大(半径3m×周長3m程度の湾曲部材)への積層検査自動化に対応	100%
部材品質	・ポイド率2%以下	100%

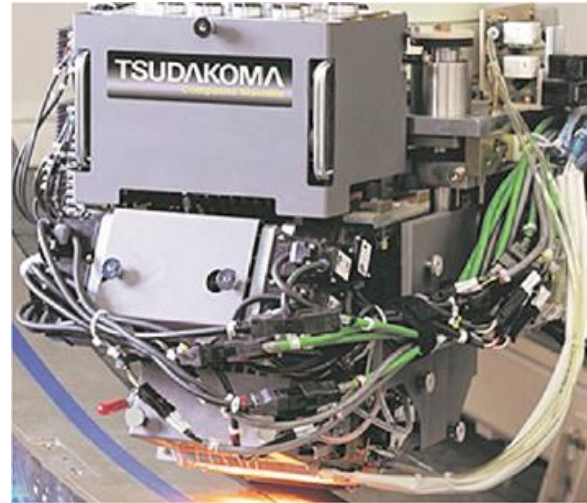
## 2. 研究開発成果 (2) 成果の詳細

### 研究開発項目②-2

#### 「航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発(第二期)」

本研究開発事業では、航空機の中小型複雑形状部材に対応可能な小型タイプの自動積層装置による、航空機用複合材料の積層技術を開発することを目的として、以下の項目を実施し、開発目標を達成することができた。

- ・「積層装置の仕様策定・見直し」
- ・「積層装置製造適用化技術の開発」
- ・「積層装置の設計・製作」
- ・「適用部材拡大に向けた積層装置開発」
- ・「積層・動作計画ソフトウェアの開発」
- ・「航空機複合材部材の試作」
- ・「適用部材の拡大」



開発した積層ヘッド部の外観

③—2 航空機用難削材高速切削加工技術開発(第二期)

東京大学



## ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

**【最終目標】**

①炭素繊維複合材の高速高品質切削加工技術の開発

炭素繊維複合材の高速高品質切削加工技術の開発: CFRPおよびCFRPとチタン合金の重積材の穿孔と切抜き加工に対し、切削シミュレーションの高度化を図り、これを併用することで、高精度な加工を実現し、能率またはコストを従来よりも30%改善する。

②先進アルミ合金の高速高品質切削加工技術の開発

②-1. Al-Li合金の平面大型薄物部品の加工後の変形(歪み)を、現状比で50%以上軽減し、矯正のための後工程をゼロとすること。また、有限要素解析による残留応力および変形状態の予測技術を確立すること。②-2. 実部品を想定した標準的な形状モデルについて、加工時間を30%以上短縮する。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	シミュレーションの妥当性ととも、CFPRおよびチタン合金との重積材の穿孔や切抜きに対して、有効な工具切削条件を見出した。	◎	複雑工具形状や工具経路に対するシミュレーションの高速演算対応。開発工具の品質管理・安定供給	高速演算用計算機の導入。工具成形工程の改善
②	1.歪みを低減可能な加工技術として、反転仕上切削とバニシング加工を組合わせた反転バニシング切削を開発した。また、有限要素法解析を用いて反転バニシング切削の加工条件(特に一刃送り量と切込み深さ)を最適化することで、Al-Li合金の平面大型薄物部材へのポケット加工後の変形を現状比で80~120%軽減した。 2. 研究開発したびびりを生じにくい仕上げ加工用工具や高速化・高切込み化を可能とする工具ホルダーの適用により、モデル部品加工における加工時間を30%以上短縮した。	1.◎ 2.○	1.目標を大きく上回る80~120%の歪みを低減できた。また、実部品に適用するには、より複雑な形状、加工経路における最適加工条件を継続的に検討する必要がある。	1.歪みをほぼゼロ(100%低減)にするために、実際の生産条件の目標形状や加工工程に合わせて最適な反転バニシング条件をチューニングする。



◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

【最終目標】

- ③チタン合金の高速高品質切削加工技術の開発 オービタル加工においてドリル加工と同等の孔壁面の圧縮残留応力となる加工技術を開発
- ④ロボット切削システムによる高速切削加工技術の開発 ケミカルリング法による加工と同等の精度をロボット加工で得る
- ⑤切削-金属ディポジション複合化技術の開発 アルミ合金母材上に中間層としてNi-Cu合金、最上層にステンレス鋼を積層するための最適条件を明らかとする。金属AM-切削加工の複合化によりトータルの加工時間の短縮、加工コスト削減を実現する。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
③	圧縮性残留応力を改善する工具形状を最適化して、マシニングセンタおよびオービタル加工装置での切削条件を最適化し、疲労寿命試験を行い、現状のドリル加工+リーマ加工と同等あるいはそれ以上を得た。	○	なし	なし
④	縦1 m、横2 mの大きさのアルミニウム合金製フレーム部品に対して、深さ精度± 0.1 mm のポケット加工を行った。	○	事前の測定動作無しでのロボット動作	ロボット誤差要因の詳細な解析による計算による補正 動作中の測定による補正
⑤	応答曲面法を基にした実験計画法により、アルミ合金母材上に中間層Ni-Cu合金および最上層ステンレス鋼を積層するための最適条件を明らかとした。また、積層造形と切削加工の二つの工程をオンマシンで実施し、ブッシュ部品のプロトタイプを製作した。	○	切削加工後の仕上げ面上への再積層時の熱変形発生	シミュレーションを活用した熱変形挙動予測

研究開発項目	成果
①炭素繊維複合材の高速高品質切削加工技術の開発	シミュレーションの解析精度の確認した。CFRPの切削特性評価法を確立した。CFRP／チタン重積材の標準工具で安定した切削状態を達成する切削条件を設定できた。PCDエンドミルによる高能率トリム加工を実現した。
②先進アルミ合金の高速高品質切削加工技術の開発	1.反転仕上切削によって加工後の歪みを約20%低減できること、バニシング切削によって歪みを20～40%低減できることを示し、反転仕上とバニシング切削を組合わせた複合切削によって歪みを80～120%低減できることを示した。 2.びびりを低減する工具刃先の最適形状を把握した。剛性を考慮した側壁仕上げ代形状により加工精度向上が可能であることを示した。さらに、安定限界理論に基づく安定ポケットを高能率化する工具ホルダー設計技術を開発し、高速化と高切込み化が可能であることを実証した。
③チタン合金の高速高品質切削加工技術の開発	市販工具の一部を改善した穿孔工具を開発し、内壁の残留応力改善する切削条件を最適化し、アルミ合金とチタン合金の積層材を穿孔した。現状よりも高い疲労寿命(アルミ合金で1.3倍、チタン合金で約5倍)を得た。
④ロボット切削システムによる高速切削加工技術の開発	空運転しながらレーザートラッカーで測定し、誤差が小さくなるよう動作経路を補正してから加工することで、縦1m×横2mの範囲において目標の深さ精度±0.1mmを達成した。超音波プローブによって加工したワークの板厚測定を自動化するためのシステムを開発した。切りくず除去を行い、板厚測定の準備と実際の測定を自動で行うことができた。
⑤切削－金属ディポジション複合化技術の開発	航空機の構造部材として用いられるアルミ合金母材上にステンレス鋼が有する耐食性を付与する積層造形技術を開発し、金属AM-切削複合化技術を構築した。本技術は一つの工作機械で実施可能で、加工時間、製造コストの大幅な削減が可能となる。

④-2 轻量耐热性複合材CMC技術開発  
(高性能材料開発)

宇部興産株式会社

## ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

実施項目1：SiC繊維の生産技術開発  
 (最終目標：2019年度)  
 実施項目1 ・引張強度2.0GPa以上のSiC繊維の低コスト量産プロセスを確立する。  
 (連続プロセス不可の場合の代替案：バッチ焼結プロセスで低コスト量産プロセスを確立する)

成果	達成度	今後の課題	研究方針
① <b>SiC繊維の欠陥解析</b> を実施し、欠陥の要因と強度への影響を明らかにした。さらに、欠陥を低減する対策を実施した結果、強度2GPa以上、ばらつき低減を達成。	○	完了	—
② <b>焼結機構の解明</b> を行い、SiC繊維の焼結において重要となるパラメータを見出し、その最適化を行った。この知見を基に、バッチ焼結試作設備の設計を実施。 再委託成果含む。特殊無機材料研究所(H27-29)	○	完了	—
③ <b>強度ばらつきを抑制するためのポリマー改良</b> を目的に、強度低下の要因となるポリマー中の異物除去方法を確立。 再委託成果含む。群馬大学	○	完了	—
④ <b>バッチ焼結プロセスを確立</b> し、CMC部材開発用にSiC繊維を供給するため、新規バッチ式焼結設備を設置。 再委託成果含む。山口東京理科大学	◎	完了	—
⑤ <b>連続焼結プロセスを確立</b> し、低コスト量産プロセスを実現するため、連続焼結プロセスを検討。実現可能性を見出した。 再委託成果含む。山口東京理科大学	○	完了	—

達成度：◎ 大きく上回って達成、○ 達成、△ 達成見込み、× 未達

## ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

実施項目2：高性能SiC繊維の開発

(最終目標：2019年度)

実施項目2 ・引張強度3.0GPa以上で高温クリープ特性に優れるSiC繊維の試作プロセスを開発する。

	成果	達成度	今後の課題	研究方針
①	<b>高性能SiC繊維用ポリマーの開発</b> は、高強度と高温クリープ特性を両立する焼結助剤成分の最適化を重点的にラボスケールで実施。基本的な化学組成を決定。 再委託成果含む。群馬大学	○	完了	—
②	<b>高性能（高強度）SiC繊維の開発</b> は、計画を前倒し、上記ラボスケールで合成したポリマーの繊維化を実施。強度3.0GPa以上のSiC繊維が得られている。	○	完了	—
③	<b>高性能SiC繊維の試作条件確立</b> は、上記①及び②の成果を受けて2019年度実施。 再委託成果含む。特殊無機材料研究所(H27-29)	○	完了	—
④	<b>高温クリープ特性評価技術</b> として、比較的簡便なBSR法とともに、定量的なクリープ速度の測定が可能な単繊維引張クリープ法を検討。両者とも再現性良く測定可能であることを確認。	○	完了	—

達成度：◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

2. 研究開発成果 (2) 成果の詳細

実施項目 1 連続焼結プロセス確立に関する成果の一例

バッチ焼結法で昇温速度、保持温度等の最適化を実施しており、このような温度プロファイルの実現が可能なる多ゾーンからなる連続焼結炉を設計し、連続焼結プロセスの開発を実施した。  
生産能力はバッチ焼結法：200kg/年から、連続焼結法：>1t/年に向上、SiC繊維の特性は同等を確認。



バッチ焼結設備



連続焼結設備

連続焼結法で試作したSiC繊維の特性

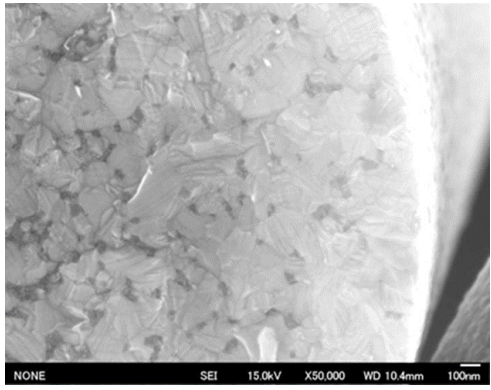
	強度(GPa)	弾性率(GPa)
連続焼結法	2.53 ( $\sigma$ :0.14)	378 ( $\sigma$ :5)
バッチ焼結法	2.53 ( $\sigma$ :0.15)	377 ( $\sigma$ :13)



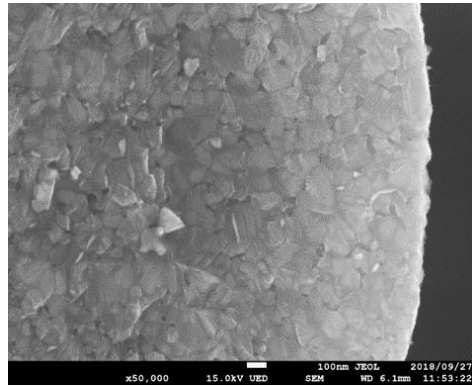
2. 研究開発成果 (2) 成果の詳細

実施項目2 高性能SiC繊維開発に関する成果の一例

化学組成及び焼結条件を最適化して試作したSiC繊維は微細な結晶から構成されるとともに、結晶界面の空孔等の欠陥も低減できている。



従来組成SiC繊維

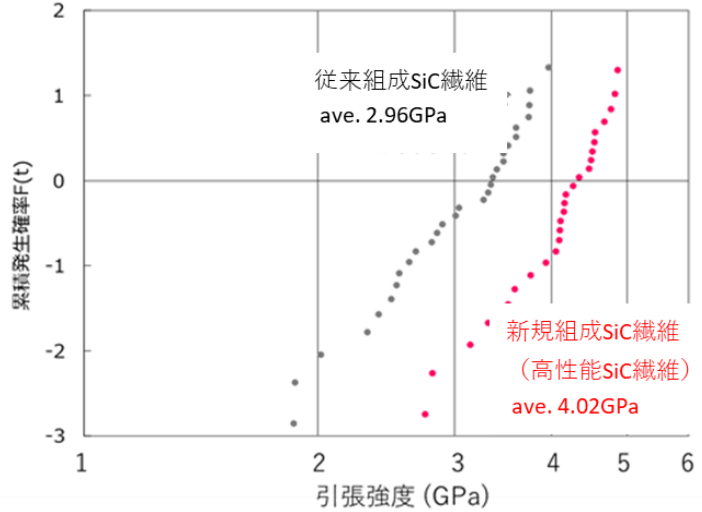


新規組成SiC繊維

引張強度は従来組成と比較して大幅な強度向上が認められ、樹脂含浸ストランド法で3.2GPa、単繊維法では平均強度として約4GPaが得られた。

樹脂含浸ストランド法による引張強度

	力学的特性 (樹脂含浸ストランド法)		耐クリープ特性 (BSR法@1500℃)
	引張強度(GPa)	引張弾性率(GPa)	
従来組成SiC繊維	2.5	380	<0.3
新規組成SiC繊維 (高性能SiC繊維)	3.2	400	0.5



単繊維法による引張強度

④-2 轻量耐热性複合材CMC技術開発  
(高性能材料開発)

株式会社IHI



## ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

研究開発テーマ1: 材料開発  
**【最終目標】**  
 ①複数バッチの材料データを取得する。  
 ②室温引張強度200MPa以上、1400℃×400Hr曝露後強度低下20%以下を満足するCMC材料を開発する。  
 ③1400℃で高温タービン部品の耐環境コーティングに要求される耐久性を満足する。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	第3世代繊維と耐水蒸気性に優れたマトリクスを用いてCMCを作製し、1 <sup>st</sup> バッチ(2018FY)と2 <sup>nd</sup> バッチ(2019FY)の強度特性を取得し、同等の強度特性を確認。目標を達成した。	○		
②	高温高圧水蒸気(1400℃)に400Hr曝露した後の強度低下が12%となるマトリクスを開発し、マトリクスの形成技術を部品形状に適用。目標を達成した。	○		
③	1400℃水蒸気雰囲気にも安定なEBC施工条件を見出し、ガス流試験(エロージョン)とラビング試験にて要求される耐久性を持つことを確認。目標を達成した。	○	飛行中に付着する砂(CMAS)等への耐性の確保。	次期プロジェクトでの改良を行う。

## ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

**研究開発テーマ2: 部品試作・評価**

**【最終目標】**

- ① 織物形状不良や繊維配向を予測可能な解析ツールを開発
- ② 第3世代SiC繊維を用いたCMC部品をエンジン搭載数程度製造し、製造性・組み付け性等を確認することで、エンジン搭載部品が製造可能であることを実証する。
- ③ 試作したCMC供試体・部品を用いた要素試験、およびエンジン搭載を想定した環境試験(1000回熱サイクル、400Hrガス流試験(コロージョン))を実施し、高圧タービンへの適用に目途を得る。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	形状不良を無くす織物展開形状や、繊維配向を予測可能なシミュレータを世界初で開発した。	○	/	/
②	形状検討により部品形状を選定し、応力解析にて設計の成立性を確認。部品製造性と組付け性を確認し、搭載部品が製造可能であることを実証。目標を達成した。	○	/	/
③	部品形状を模擬した供試体を製造し、要素試験、およびエンジン搭載を想定した環境試験(熱サイクル、ガス流;コロージョン)を実施した。要素試験でCMCの強度が十分あることを確認。熱サイクル、ガス流試験ではEBCに一部損傷が見られたものの、概ね目標を達成した。	△	熱サイクル、ガス流試験における耐久性の向上。	耐CMAS性向上と合わせ、次期プロジェクトでの改良を行う。

◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

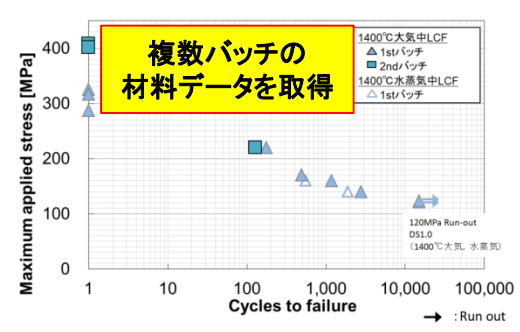
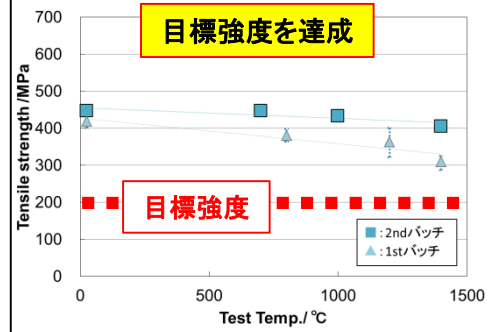
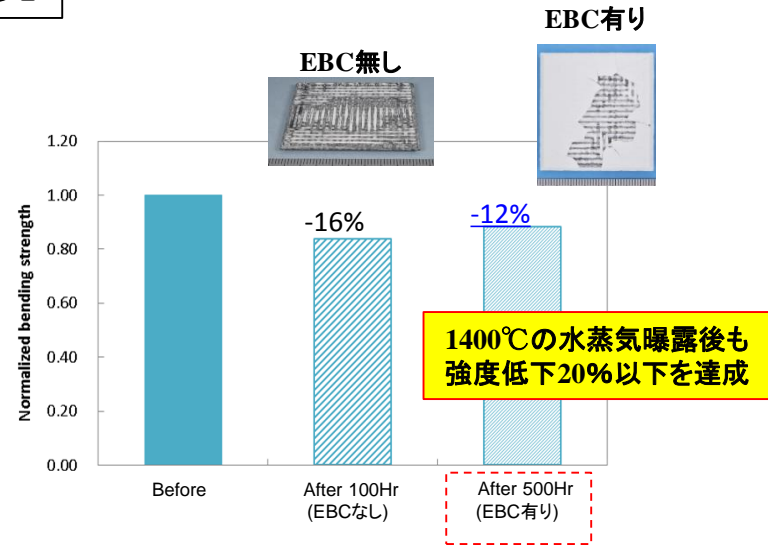
研究開発テーマ3: 高性能SiC繊維の開発  
**【最終目標】**  
 ①マイクロ組織を模擬した解析手法にて損傷のクライテリアを設定する。  
 ②開発したSiC繊維がCMC材料に適用可能であることを確認する

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	材料のマイクロ組織を模擬した損傷解析手法を設定し、直交3次元織物CMCの解析モデルの理論式を高度化した。損傷のクライテリアの設定が可能になり、さらに破断を予測できる見込みを得た。	○		
②	開発したSiC繊維の特性を評価し、CMCへ適用可能であることを確認した。また、開発繊維を用いたCMCの材料特性を評価。目標を達成した。	○		

## 2. 研究開発成果 (2) 成果の詳細

- 1400°C級のCMC材料を開発し、目標強度を達成した。また、複数バッチの材料データを取得した。
  - シュラウド形状を検討後、開発したCMC材を用いてシュラウドを試作し、熱サイクルや実体強度試験にてシュラウド部品としての成立性を確認した。また、航空エンジンに搭載可能なレベルの部品を製造した。
- ⇒ 上記成果により、世界に先駆けて1400°C級のCMCを用いたCMCの部材開発に成功した。

### 材料開発



複数バッチ試験での静的引張試験や引張LCF試験により材料の成立性を評価

### 部品開発

部品形状での発生応力を検討

LCFにおける応力発生部位色分け  
赤部分: 引張応力発生  
青部分: 圧縮応力発生

X糸 (軸) 方向応力分布    Y糸 (周) 方向応力分布    Z糸 (径) 方向応力分布

パーナー

CENTERING TOOL    PUSHER  
たわみ計  
荷重・変位  
BASE

フック部要素試験    評価部    供試体    器材  
フック部要素試験体

### 熱サイクル試験と実体強度試験で部品の成立性を評価



開発したCMC材でシュラウド部品を製造

④－2 軽量耐熱性複合材CMC技術開発  
(高性能材料開発)

シキボウ株式会社

## ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

研究開発テーマ(もしくは研究開発項目): 軽量耐熱複合材CMC技術開発(高性能材料開発)  
**【最終目標】**  
 ① SiC繊維が製織時の負荷に耐えられるような繊維コーティング方法を開発する  
 ② 高性能SiC繊維を用いた繊維体積含有比率30%以上の三次元プリフォームの製造方法の開発  
 および高性能SiC繊維の三次元プリフォームの量産を目指した装置を開発する

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	脆性特性を有するセラミック繊維を用いて複雑なプリフォームを作り上げるために、摺動および繊維ダメージ抑制特性に優れたサイジング剤(糊剤)が開発できた。 また、同サイジング剤は水洗で容易に除去可能。	○	低コスト化	製造工程の低コスト化の為、より安定した製造が行えるよう、繊維へのダメージをさらに減らすサイジング剤やサイジングプロセスの開発を行う。
②	第3世代SiC繊維および高性能SiC繊維のような非常に折れやすい繊維を用いて、複雑な三次元プリフォームを形作るための製造プロセスおよび自動化装置を開発できた。 特に、目標である繊維体積含有比率30%以上を大きく上回る36%の三次元プリフォームの作製に成功した。	◎		生産性(製造速度・省力化)を上げる開発を行う。 実際の用途・形状を明確にした開発を行う。

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み(中間) / 一部達成(事後)、×未達

- ◆ SiC繊維を補強する繊維コーティングについては最適なサイジング剤の独自開発に成功し、同時にサイジング・デサイズのプロセス開発も行い、量産化を念頭においた自動化装置の開発に成功した。
- ◆ 同三次元プリフォーム製造方法の研究開発においては、第3世代SiC繊維によるVf30%以上のプリフォームの試作に成功した後、それぞれに長所を有する「連続式」「バッチ式」の2方式について量産化を念頭においた装置の設計、試作、改良を進め、高性能SiC繊維において必要とされるVf30%を大きく上回る36%の良質な三次元プリフォームを製造することに成功した。

④-2 轻量耐熱性複合材CMC技術開発  
(高性能材料開発)

川崎重工業株式会社



## ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

研究開発テーマ: CMC材料の開発

**【最終目標】**

- ① 室温引張強度200MPa以上、1400°C×400Hr暴露後強度低下20%以下を満足するCMC材料を開発する。
- ② 中小型クラスの航空機用エンジンで燃焼器パネルがさらされる実環境を模擬した条件での燃焼評価試験を行い、健全に機能することを確認する。
- ③ CMC製燃焼器パネルに適した健全性評価手法を確立する。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	室温引張強度200MPa以上を達成。 燃焼器内のCMCパネル近傍相当の水蒸気分圧、1400°C、400Hr曝露後の平均強度低下率20%以下(11.6%)を達成。	○		
②	複数サイクルの燃焼試験を実施。目視および寸法検査で健全であること、IF(Indentation Fracture)法による母材の劣化評価において、健全であることを確認した。	○		
③	深層学習を用いた新規検査手法の開発を実施。特許取得に向けて活動中。種々の検査手法の長所短所を考慮し、複数の検査手法を組み合わせた健全性評価手法を確立。	○		

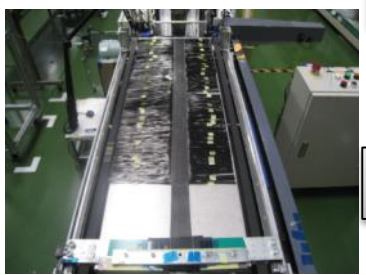
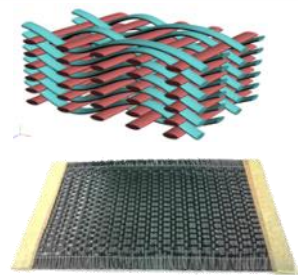
## ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

研究開発テーマ: CMC材料の開発  
**【最終目標】**  
 ① 開発した繊維が、CMC材料に適用可能であることを確認する。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	<p>繊維の化学的性質については変化が無い場合、プリフォーム製織可否の確認がなされれば、CMC材料としての適用可否についても判定できる。</p> <p>繊維単独での簡易評価により、製織性を定性的に評価する技術開発を実施。開発繊維に対し、簡易評価手法を適用することで製織性が従来と同等であることを確認。これによりこれまでと同等品質のプリフォームの製織が可能であり、CMC材料としても適用可能であると確認できた。</p>	○		

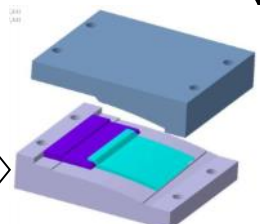
2. 研究開発成果 (2) 成果の詳細

プリフォーム設計・製造



連続製造

切断

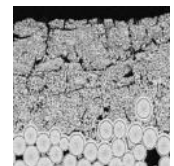
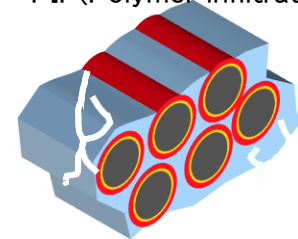


形状賦与

連続製織可能なパネル形状および織組織、製織技術を開発

マトリックス形成

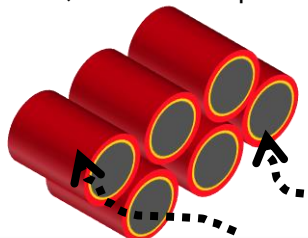
PIP(Polymer infiltration and Pyrolysis)



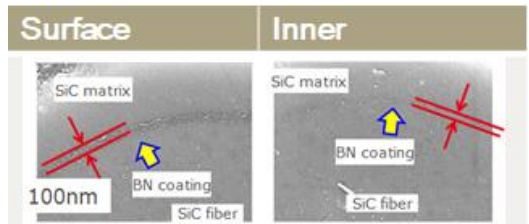
高密度、高熱伝導率を達成するマトリックス形成技術を開発

繊維界面コーティング

CVI(Chemical Vapor Infiltration)



BN, SiC gas

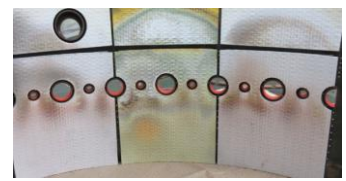


パネルプリフォームを対象に均一な繊維界面コーティングを行う技術を開発

燃焼器パネル向けCMC仕様



試験装置(JAXA)



中小型エンジン用燃焼器相当の温度・圧力条件で燃焼試験を行い、健全性を確認

⑤ 航空機用構造設計シミュレーション技術開発

東北大学

◆研究開発項目毎の目標と達成状況

⑤-1分野横断(空力・構造・強度)シームレス機体設計シミュレーターの開発

【最終目標】

- ① 2019年度までに検証と最適設計を実施
- ② 空力・構造設計パラメーターの収斂に必要な時間を50%、設計全体に必要な時間を25%低減する

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	川崎重工業にツールボックスを渡し、検証と最適設計を開始している。	○	-	-
②	ポテンシャルコードを実装し、計算時間の効率化を開始した。	○	-	-

## ⑤-2シミュレーション援用による認証プロセスの低コスト化

## 【最終目標】

2019年までに運用上最もクリティカルな衝撃損傷による複合材構造強度の低下量を10%の精度で算出可能とする。

認証プロセスにおける実験を15%削減することを最終目標とし、そのコスト削減効果を評価する。

成果		達成度	今後の課題	解決方針
①	2017FY 連続体要素を用いた拡張有限要素法(NLXP3D)を開発整備し、検証解析を実施した(上智大, 東北大)。衝撃損傷の大きさを推定する理論式を導出した(上智大)。内製コードを汎用コードのプリポストから利用できるようなシステムを構築した(上智大)。	○		
②	2017FY C型試験片を製作し(川重、東レ)、衝撃損傷を与え圧縮荷重を加える構造試験を実施し(川重)、損傷の大きさ、および圧縮強度を解析結果と比較した(上智大)。	○		
②	2018FY スキンスリンガー試験片を製作し(川重、東レ)、検証解析を実施する(上智大)。	○		
②	2019FY スキンスリンガーパネル試験片を製作し(川重、東レ)、検証解析を実施する(上智大)。	○		
③	2018FY 2019FY コスト低減効果の試算	○		

### ⑤-3複合材の特性を活かした機体構造設計シミュレーターの開発と実験的検証

#### 【最終目標】

複合材の特性を活かす製造方法を前提とした機体構造設計シミュレーターを開発する。

- 曲線繊維配向とトポロジーの最適化と実験的検証

曲線繊維積層板が直線繊維積層板に対して、同等以上の強度または剛性を有することを示す。

- 最適曲線繊維配向板の力学的特性の評価と破壊基準への反映

成 果			達成度	今後の課題	解決方針
①	2018FY	深層学習の導入により計算コストを削減した。	◎		
	2019FY	CFRPに適用可能なトポロジー最適化手法を構築			
②	2018FY	賦形可能範囲のマッピングに関するデータを拡充した。	○		
	2019FY	X線CTにより賦形による成形欠陥を評価			
③	2018FY	最適化曲線繊維配向の賦形を行い、成形性と力学的特性を評価した。	◎		
	2019FY	最終強度を予測する評価方法を導入し、その精度を評価した。			

◆研究開発項目毎の目標と達成状況

⑤-4層流化技術開発

【最終目標】

- 層流化に最適な翼面粗度（孤立粗度、分布粗度）を数値解析と理論的考察によって明らかにする
- 実機の主翼への応用に向けた翼面粗度の設計方針を提案する

成果			達成度	今後の課題	解決方針
①	2018FY	基本流となる圧縮性三次元境界層を計算し、DNSコードへ実装	◎		
	2019FY	領域分割によるDNSコードのMPI並列化 埋め込み境界法による壁面粗度のモデル化	◎		
②	2018FY	先行研究と類似の孤立粗度による層流化効果の確認 DNSコードと非線形安定性解析ツールの結果の比較検証 孤立粗度の配置や形状、飛行パラメータへの依存性調査	◎		
	2019FY	層流化に最適な壁面粗度とそのロバスト性を明らかにする	○		
③	2018FY	先行研究と類似な超微細ラフネスによる層流化効果の確認	◎		
	2019FY	層流化に最適な超微細ラフネスとロバスト性を明らかにする	○		



⑤-5複合材構造部材ライフサイクルシミュレーション

【最終目標】

複雑形状の含浸シミュレーション技術開発

複雑形状に適用可能な高速含浸解析およびフローメディアによる含浸品質の不具合検知し、含浸条件最適化技術の開発を達成

- 計算負荷の軽い2D要素を用いた面内方向含浸解析技術(2次元CV/FEM法)と、機械学習(Neural Network)板厚方向含浸予測を用いた高速3D含浸解析方法を構築する。
- 実機レベルの大規模な含浸解析が実施可能。樹脂未含浸等の品質の欠陥を検知できるようにする。

樹脂硬化収縮による変形・残留応力シミュレーション開発

VaRTM, OoAプリプレグによる異種材料ハイブリッド一体構造の変形予測技術開発を達成

- 異種樹脂を用いたハイブリッドコキュアの複雑形状の解析を実施し、変形量を求めNEDO RIMCOFによる試作と比較する。

成 果			達成度	今後の課題	解決方針
①	2016FY		—		
	2018FY	シェル要素による含浸解析手法構築と高速3D含浸解析手法の検討	○		
	2019FY	フローメディア配置による含浸品質不具合検知機能の開発	○		
②	2016FY		—		
	2018FY	VaRTM及びOoAプリプレグの単一樹脂での変形解析手法	○		
	2019FY	VaRTMとOoAプリプレグハイブリッドコキュアの変形解析技術目処付け	○		
			◎:超過達成 ○:達成 △:未達 ×:未着手		

**⑤-6エンジンー機体統合性能予測CFD技術の構築**

**【最終目標】**

ショートインレット／スリムナセル空力特性予測技術を達成

達成するための課題と手段:

- ・風洞試験データなどを用いてインレットCFD解析を検証。
- ・ディストーションを抑制するショートインレット空力形状を創出。

ファン性能影響予測評価技術を達成

達成するための課題と手段:

- ・迎角変化によるインレット上流の流れ場影響の予測。
- ・インレット＋ファンCFD解析による空力性能を評価。

エンジンー機体／主翼統合性能予測技術を達成

達成するための課題と手段:

- ・風洞試験データなどを用いた機体／主翼のCFD解析を検証。
- ・機体／主翼＋インレット／ファンCFD解析による迎角変化による流れ場現象の予測。
- ・飛行条件での機体／主翼＋インレット／ファンCFD解析による空力性能を評価。

成果		達成度	今後の課題	解決方針
①	2018FY 基準機体／ナセル形状データの調査・設定完了	○		
	2019FY 風洞試験データ／解析条件の調査・設定完了 インレット単体CFD解析(迎角影響評価) <電気通信大再委託>			
②	2018FY ファン形状、ファン作動条件の調査・提示	○		
	2019FY インレット＋ファンCFD解析の実施 インレット＋ファンCFD解析による迎角影響評価 <電気通信大再委託>			
③	2018FY 搭載位置範囲設定	○		
	2019FY 機体・主翼＋インレットCFD解析手法の調査 機体／主翼＋インレットCFD解析(飛行条件影響評価) <電気通信大再委託>			
		◎:超過達成 ○:達成 △:未達 ×:未着手		

⑤-7 非巡航時における高精度非定常流体解析

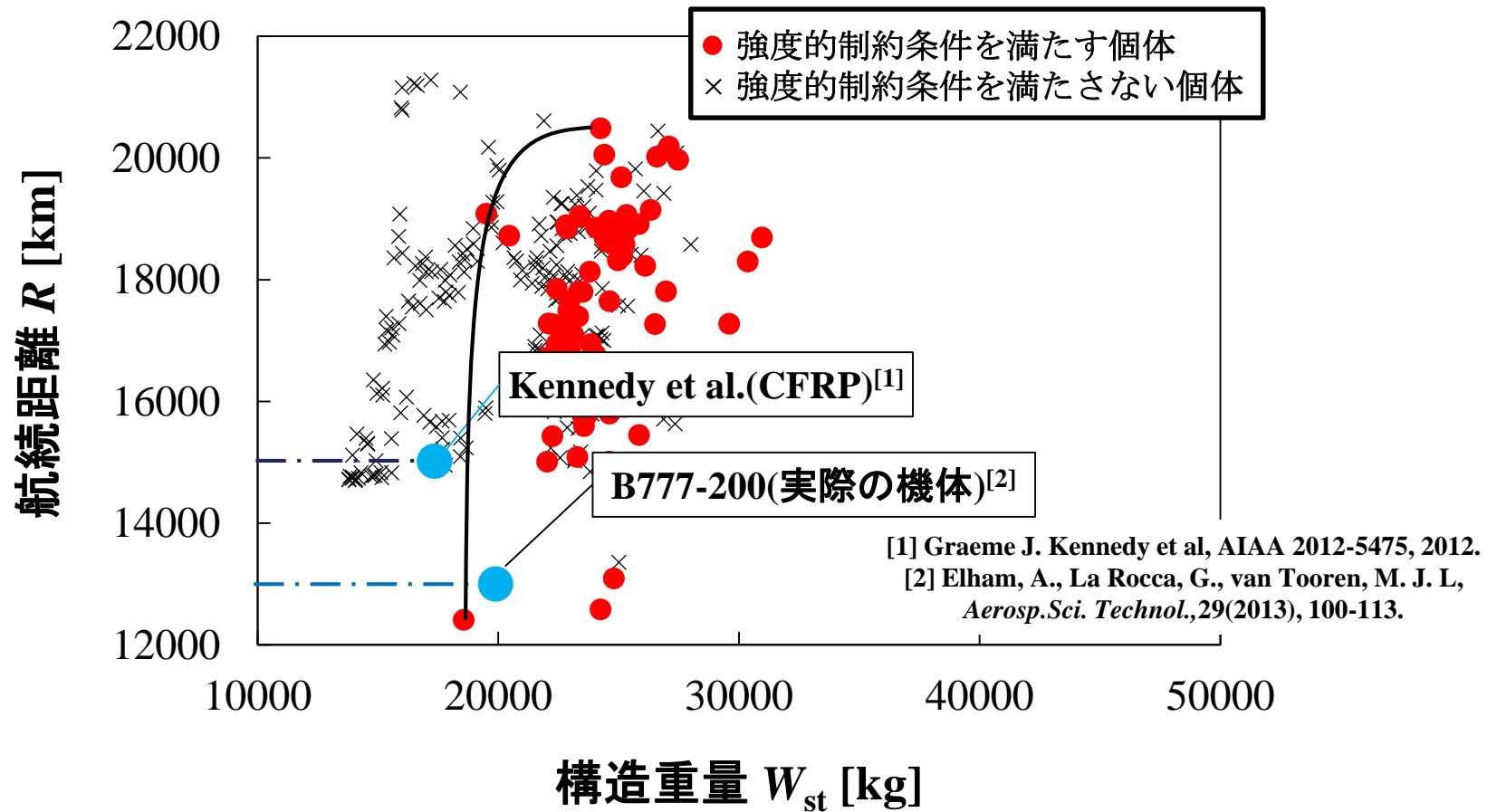
【最終目標】

- ①複雑形状解析手法と平衡壁面モデルLESを組み合わせる基盤技術を検討し、初期検証を実施する。
- ②実機スケール高レイノルズ数・高速飛行時の平板乱流境界層流れを対象に、解析精度および汎用性を評価する。
- ③高速飛行時の衝撃波-境界層干渉剥離流れの高精度データベースを準第一原理的大規模解析から構築する。
- ④高精度流体解析における安定・高精度な数値計算手法を検討し、評価する。

		成果	達成度	今後の課題	解決方針
川崎重工	①	2018FY 2019FY 平衡壁面モデルLESを既存の空力解析ツールで実現するための手法について検討および初期検証を行う。  実際の航空機設計における実用性を評価する。	○  ○		
	②	2018FY 2019FY 平板乱流境界層に対する壁面モデルLESの検証、課題抽出およびその対策を検討する。 衝撃波-境界層干渉流れに対する検証、課題抽出およびその対策を検討する。	○  ○		
東北大学	③	2018FY 2019FY 高速飛行時の剥離境界層流れの高精度データベースを構築する。 高精度データベースを基に、壁面モデルLESを検討し、検証を実施する。	○  ○		
	④	2018FY 2019FY 高精度流体解析を可能とする安定・高精度な数値計算手法を検討し、評価する。 開発した計算手法をハンギングノード付き非構造直交格子への拡張や安定化手法を検討する。	◎  ◎		

達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

研究開発項目⑤-1分野横断(空力・構造・強度)シームレス機体設計シミュレーターの開発



- 同様の航続距離を想定したKennedyら(CFRP)と比較しておおよそ一致した。  
→ 材料選択による軽量化と航続距離についての統一的な議論が可能。

## ◆ 成果の普及

	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			
2015 年度	0	0	11	0	0	0	0	0	0
2016 年度	3	0	23	1	0	0	3	0	1
2017 年度	5	0	44	1	0	0	3	1	2
2018 年度	5	0	53	3	0	1	3	1	3
2019 年度	9	0	58	3	2	1	3	1	1
合計	22	0	189	8	2	2	12	3	7

※2020年3月31日現在

## ◆ 知的財産権の確保に向けた取り組み

	特許出願		
	国内	外国	PCT出願*
2015年度	1	0	0
2016年度	0	0	2
2017年度	8	0	0
2018年度	13	8	5
2019年度	22	32	7
合計	<b>44</b>	<b>40</b>	<b>14</b>

\*Patent Cooperation Treaty:特許協力条約

※2020年度3月30日現在

## IV. 成果の実用化

---

◆本プロジェクトにおける「実用化・事業化」の考え方

基礎基盤PJの場合は「実用化・事業化」ではなく「実用化」

本事業における「実用化」の考え方

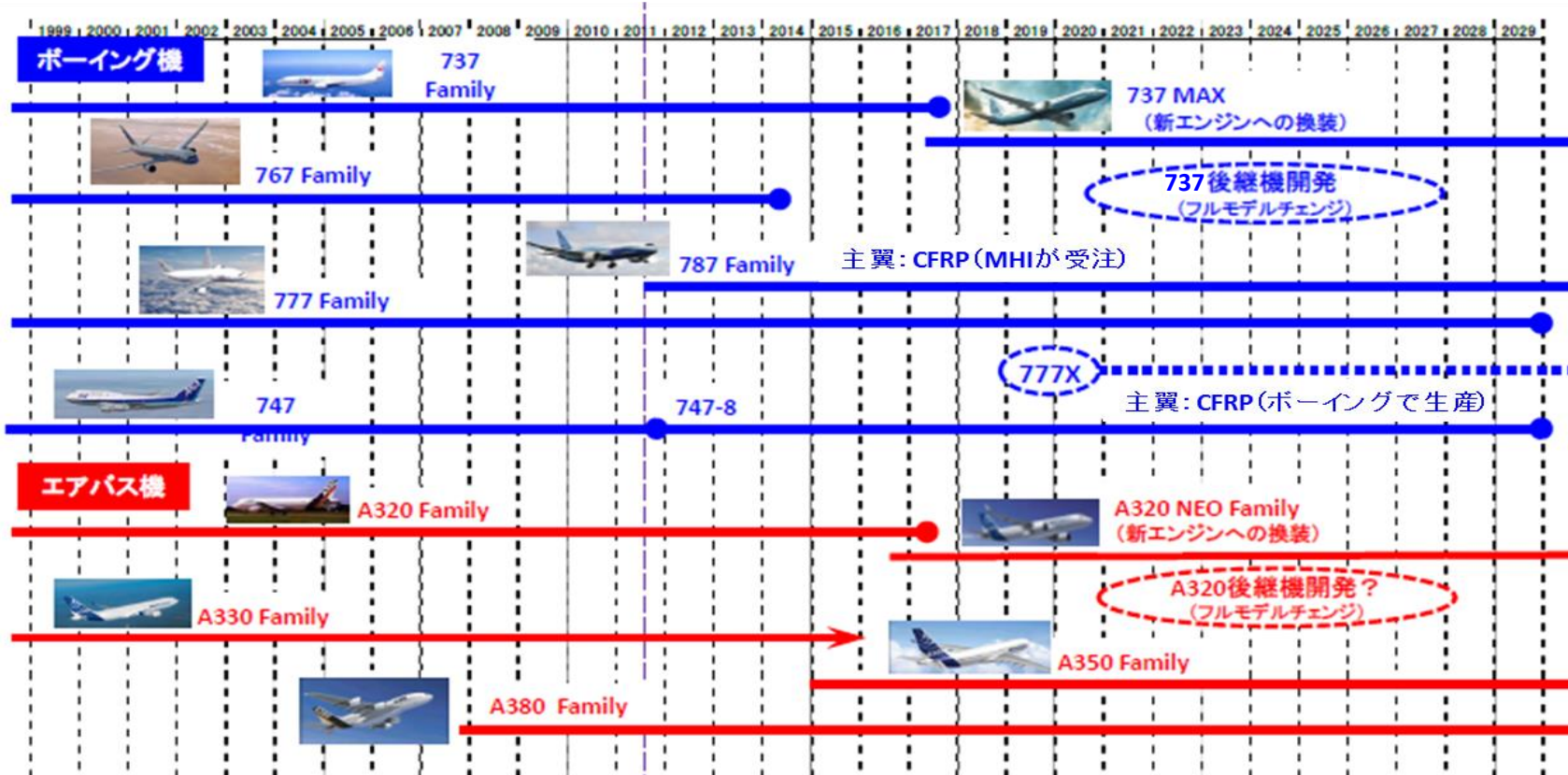
当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用  
(顧客への提供等) が開始されることをいう。



## IV. 成果の実用化 (1) 成果の実用化に向けた戦略

本事業は、海外主要OEMの次期量産機の開発計画にリンクさせて、各テーマの技術開発を推進することが極めて重要である。

**次期量産機のEIS（運航開始）は2030年代と予想されている。**  
開発計画に合わせた技術開発と製造プロセスの認証取得を目指していくこととする。



①—2 次世代複合材及び軽金属構造部  
材創製・加工技術開発(第二期)

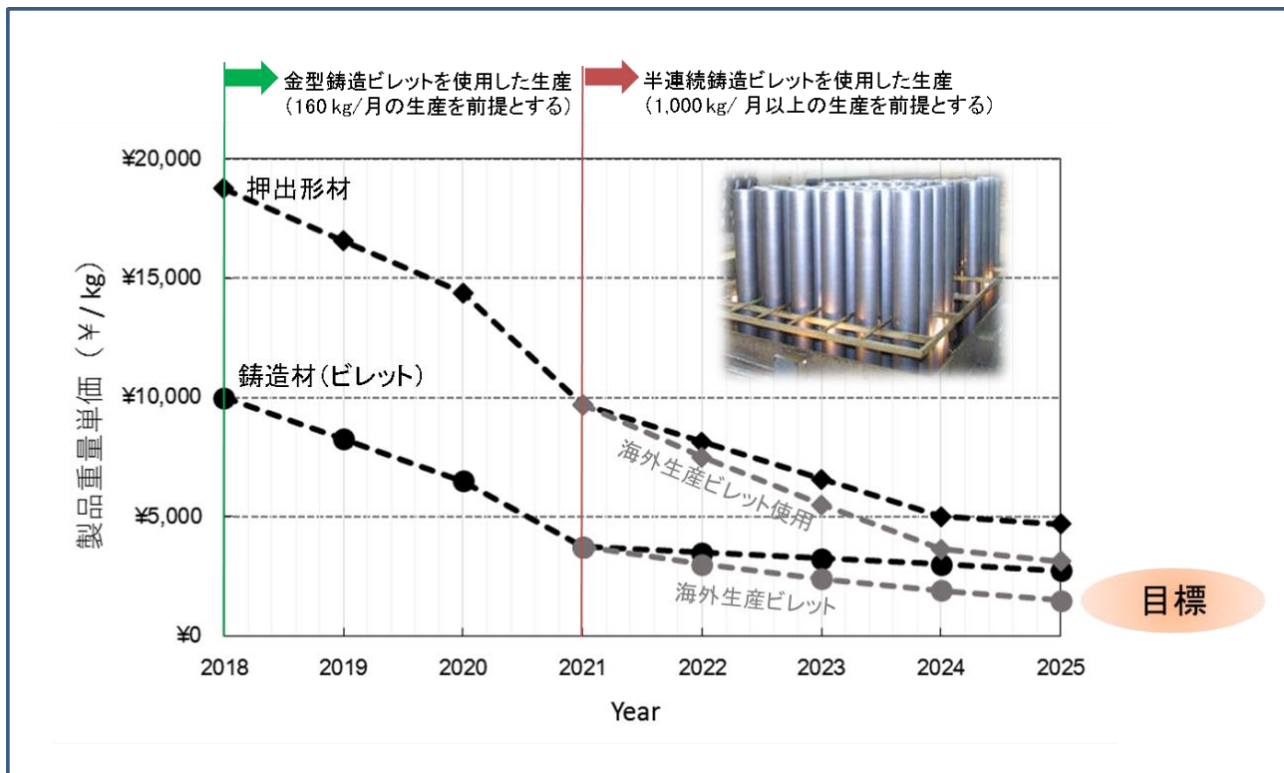
RIMCOF技術研究組合

## ◆ 実用化の見通し

実用化への課題:

KUMADAI 鋳造不燃マグネシウム合金は現用アルミ合金との競合となることから、**材料製造コストの低減が必須**。(現用アルミ合金単価 1,000~3,000円/kg 目標)

- 押出用のビレットを金型鋳造から**半連続鋳造法**にする等により低減可能。
- **アルミの量産設備を活用**することで、設備投資額の削減が可能。

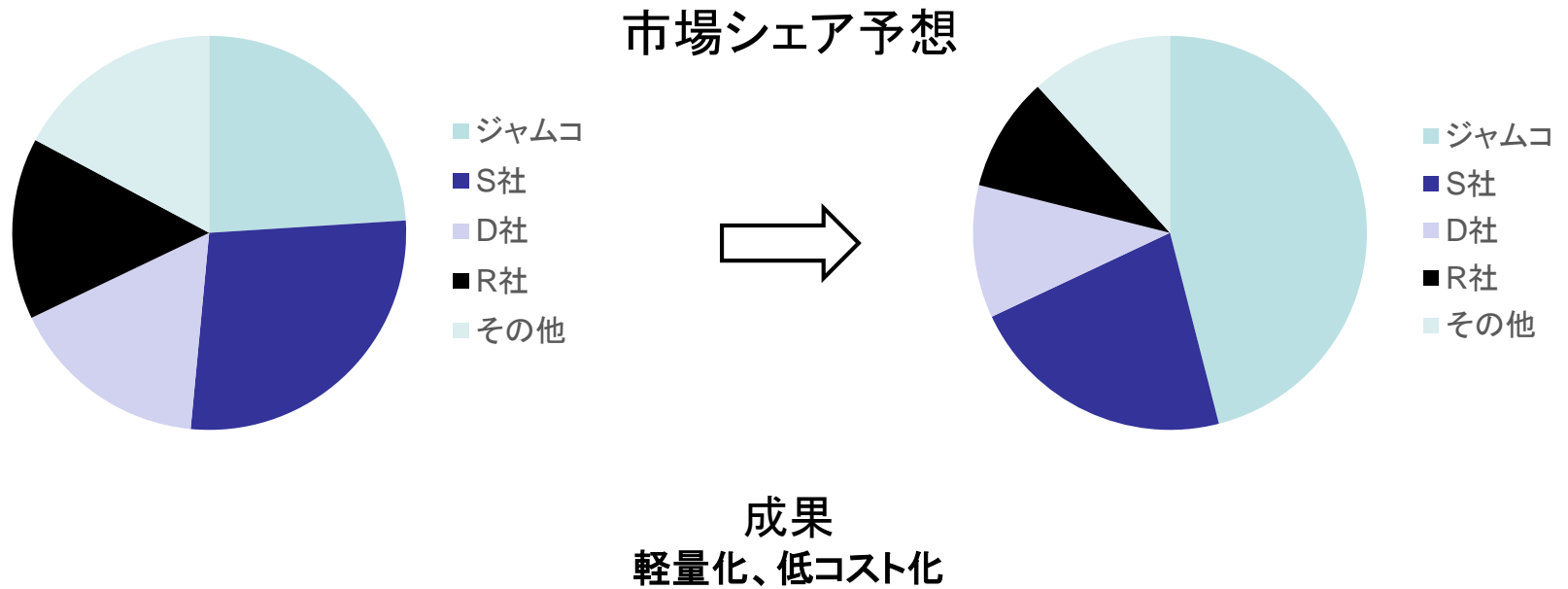


①ー2 次世代複合材及び軽金属構造部  
材創製・加工技術開発(第二期)

株式会社ジャムコ

◆実用化の見通し

● ハニカムパネルの技術革新による軽量化及び低コスト化で優位性を高め、特にエアバス社向け内装品及び短通路機市場でのシェア拡大を図る。



上記数値はCovid-19の影響を考慮していない

②-2 航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発(第二期)

川崎重工業株式会社

## ◆実用化の見通し

### 研究開発項目②-2

#### 「航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発」

- 本研究開発事業で開発した複雑形状積層装置・技術は、目標仕様を満足することを部材試作を通じて確認しており、主要複合材製造装置として国際競争力を有すると考える。



実用化に向け詳細検討・試作を実施中。

- 今後の課題
  - ・実用化に向け、必要な積層条件等の設定

③—2 航空機用難削材高速切削加工技術開発(第二期)

東京大学



## ◆実用化の見通し

研究開発項目	実用化の見通し
①炭素繊維複合材の高速高品質切削加工技術の開発	航空機産業、自動車産業、工具・工作機械産業、金型産業、切削油材産業の20社程度に技術移転を行い、実用される予定。
②先進アルミ合金の高速高品質切削加工技術の開発	<p>1. 従来手法ではAl-Li合金の機械加工後の歪んだ部材は熟練技能による形状修正が行われているが、自動化は難しく余分なコストの高い工程となっている。本技術開発によって切削加工後の歪みを低減することにより、後工程(歪み矯正工程)を省略でき、製造コストの大幅な削減が可能である。</p> <p>2. 新たな機械設備の投資が不要であり、実用化が比較的容易となる。手仕上げ工程の大幅な削減が可能となったことから、今後進むと考えられる自動化への対応に寄与できる。また、開発要素技術を適用した高能率化実証を最終目標として達成していることから、実用化に向けた企業判断は比較的容易に進めることが可能である。</p>
③チタン合金の高速高品質切削加工技術の開発	中央翼等 難削材、厚板等の構造組立では、従来加工よりも数10%のコスト削減が見込めるので、工具製造コスト削減、繰り返し穿孔実験により孔品質、疲労寿命を維持した上での穿孔時間の短縮が必要。
④ロボット切削システムによる高速切削加工技術の開発	現行のケミカルミリングと比較し1/4程度に省エネとなる。切削で製作する際に大型5軸マシニングセンターを採用するよりも、数分の1のイニシャルコストで済み、消費電力や設置自由度の点でも有利である。人の手で行っていた板厚測定作業をオンマシンで行うことにより、加工から測定準備、測定、データ記録までを自動化でき、省人化が可能となる。
⑤切削—金属ディポジション複合化技術の開発	従来、航空機のアルミ合金構造材料とCFRPの接触部にステンレス鋼製のブッシュ部品を使用していたが、本技術により構造材料との一体造形が可能となり機体の軽量化や燃費向上に貢献できる。

④－2 輕量耐熱性複合材CMC技術開發  
(高性能材料開發)

宇部興産株式会社

### ◆実用化の見通し

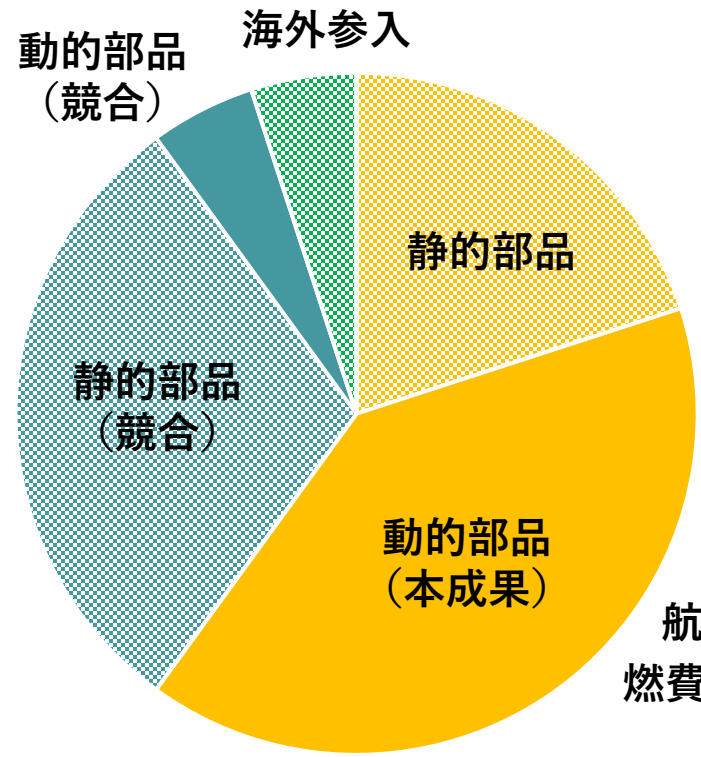
● 航空機エンジンのCMC化が期待されるホットセクション部品は、静的部品（シュラウド、ベーン、燃焼器ライナー等）と動的部品（タービンブレード等）に大別される。動的部品には、第三世代のSiC繊維では特性が不十分なため強化繊維として用いることができず、新たな高性能なSiC繊維が要求されている。

### 民間航空機エンジンへのCMC搭載シェア予想



シェア予想  
→

成果  
高温強度 & 耐ク  
リープ特性を両  
立する超高性  
SiC繊維



航空機エンジン  
燃費改善：10%減

(2040年予想)

④-2 轻量耐热性複合材CMC技術開発  
(高性能材料開発)

株式会社IHI

# ◆実用化の見通し

- GE社は2016年度より民間航空エンジンへCMCシュラウドを適用開始。
- P&WやR.R.もCMCの製造・開発拠点を急ピッチで立ち上げ中。CMCの適用は市場のニーズに合致。
- 本プロジェクトで開発した1400°C級CMCは、従来の他社1300°C級CMCと比較し、+100°Cの大幅な耐熱性の向上を可能としている。航空機用エンジンの燃費向上に有効な技術であり、実機への適用が見込める。

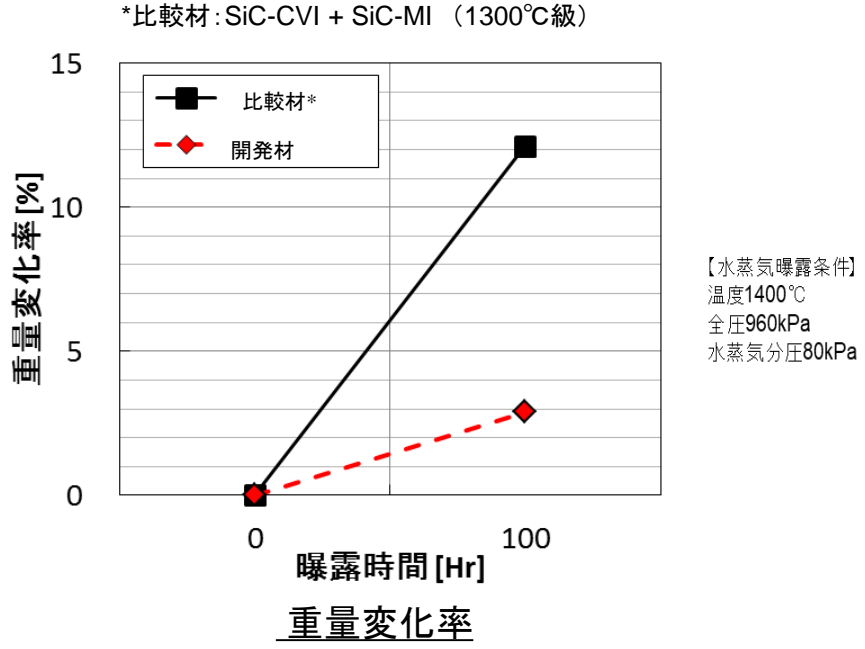


図 開発材の1400°C加圧水蒸気中での安定性

④－2 軽量耐熱性複合材CMC技術開発  
(高性能材料開発)

シキボウ株式会社

## ◆実用化の見通し

- ◆航空機・エンジン市場では燃費改善、環境適合性に対する市場ニーズが高まっており、航空機エンジンにおいては、耐熱性に優れ、金属材料よりも軽量な部材としてCMC(Ceramic Matrix Composites)の実用化が望まれている。
- ◆特に長繊維強化SiC/SiC複合材料(SiC繊維とSiCマトリックスからなる複合材料)は、高い力学的特性と耐熱性を有することから、航空機エンジン部材への適用研究が進められ、耐熱温度1100°C級のCMC部材が実用化されつつある。
- ◆本事業にて高性能SiC繊維での三次元プリフォーム製造技術を確立する事ができた。今後の課題としては低コスト化、ひいては実際の用途・形状を明確にした開発を行う必要がある。

④-2 轻量耐熱性複合材CMC技術開発  
(高性能材料開発)

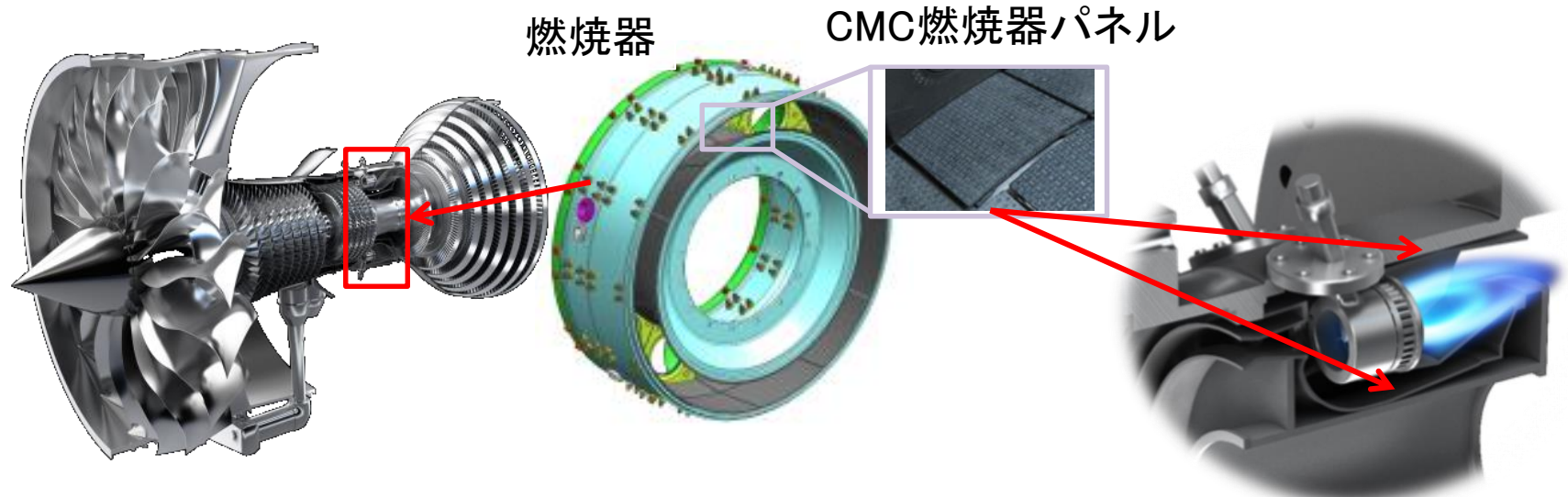
川崎重工業株式会社



◆実用化の見通し

対象製品

エンジンで最も高温となる燃焼器(ドーナツ型)の内張り(パネル)をCMC製にする  
 →CMC燃焼器パネル



CMC燃焼器パネルのメリット(金属製との比較)

- ① 高耐熱性による耐久性向上
- ② 冷却空気量削減によるNOx削減  
 (高効率化を目的とした高圧力比化、高温化によるNOx増加への対応)
- ③ 軽量化

想定ケース	金属	CMC
冷却空気: 金属並み	○/○*	◎/○*
冷却空気: ex.30%減	×	○/◎*

\*耐久性/NOxの評価

燃焼器パネル用としてのCMC材料特性(強度、熱物性)は達成。  
 製造性の改善・製造コストの低減、航空用部品としての設計・検証を行う。

⑤ 航空機用構造設計シミュレーション技術開発

東北大学

## ◆実用化の見通し

### 実用化イメージ

- 航空機メーカーが航空機設計に使用し、主要設計パラメーターの効率的な特定を支援するツール
- B737クラスの次世代機を想定した航空機開発

### 研究開発時の取組

- 企業ニーズに基づくツール開発
- 企業での検証・社内業務への取り込み

### 今後の取組

- NEDO CAEプロジェクト第2期が採択
  - ✓ NEDO CAEプロジェクト第1期の各研究開発項目で得られたツールを統合する機体設計シミュレーターの構築
  - ✓ 信頼性を確保するため実際の機体設計において想定される様々な形状や飛行条件に対する検証
- 全機解析を行う場合、計算コストの観点から頻繁に解析を行うことは困難なため、計算コスト削減が課題
- ツールの本格的な検証作業は、今後の実際の航空機開発プロジェクトでも必須

## 參考資料

---

# プロジェクト名：次世代複合材創製・成形技術開発



## 研究開発の目的

- ・世界の航空機市場は今後20年間で機数の倍増が予想される成長産業である。航空機産業は我が国の長期的な成長を実現する重要な分野である一方、需要の増加に伴い増大するエネルギー消費への対応が必要不可欠である。
- ・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。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CO<sub>2</sub>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。

## プロジェクトの規模

- ・総事業費(NEDO負担分):94.5億円(予定)  
(委託、助成)
- ・2020年度政府予算額:14.5億円(需給)
- ・実施期間 2020～2024年度(5年間)

## 研究開発の内容

- 研究開発項目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」**
  - ・熱可塑性CFRPの特質を活かし、熱硬化CFRPを上回る軽量高強度機体(「複合材料時代の理想の機体」)をアルミニウム機体と同等以上の生産レートで製造するための基盤となる構造設計技術を開発する。
- 研究開発項目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」**
  - ・超高速自動積層では、従来の熱硬化性CFRPと比較し生産性向上、同等以上の軽量化、同等以上の自動積層速度を達成する。
  - ・熱硬化性CFRPでは達成できない高度な一体成形、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。
  - ・積層造形技術を活用した複雑な複合材-金属一体成形技術等を開発するとともに、成形の自動化を達成する。
- 研究開発項目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」**
  - ・大型部品同士のファスナーレス組立技術等、熱硬化性CFRPや他材料も含んだ高強度高速接合組立技術を開発する。
- 研究開発項目④「更なる高性能SiC繊維の品質安定性向上に向けた開発」**
  - ・高温での強度、耐クリープ性を備え、かつ、複雑形状の製織に対応したSiC繊維を開発し、特性ばらつきを抑制する製造技術を確立する。
- 研究開発項目⑤「1400℃級CMC材料の実用化研究開発」**
  - ・具体的な部品を想定して、繊維コーティング法、マトリックス形成法の最適化、強度を最大にする繊維とマトリックスの界面設計を行う。
- 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」**
  - ・1400℃級CMC部材について、現行と比較して生産レート向上を可能とする材料およびプロセス技術を開発する。

## 成果適用のイメージ

- ・熱可塑性用シミュレーション
- ・高速複合材積層技術
- ・機体部材成形の高レート化
- ・高強度複合材接合技術
- ・CMC実用化技術

航空機への  
最適応用

航空機



軽量化  
高強度化  
高信頼性化  
高耐久性化

省エネ

環境  
負荷  
低減

安定  
運航

産業  
競争力  
強化

・航空機の燃費改善によるエネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量の削減

・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