



CMCコンソーシアム講演会

「NEDOの軽量耐熱複合材CMC技術開発について」

2018年5月18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

本日のアジェンダ



1. NEDOとは
2. 次世代構造部材創製・加工技術開発事業の紹介
3. CMC技術開発事業の成果紹介
4. 今後の展開とまとめ



1. NEDOとは

1-1 NEDOについて



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:New Energy and Industrial Technology Development Organization

- NEDOは経済産業行政の一翼を担い、「エネルギー・地球環境問題の解決」および「産業技術力の強化」の二つのミッションに取り組む、国立研究開発法人。
- 技術開発マネジメント機関として、産学官の技術力、研究力を最適に組み合わせ、リスクが高い技術開発、実証を推進し、社会実装に繋げることで、社会課題の解決や市場創出を目指す。

エネルギー・地球環境問題の解決

新エネルギーおよび省エネルギー技術の開発と実証試験等を積極的に展開し、新エネルギーの利用拡大とさらなる省エネルギーを推進する。さらに、国内事業で得られた知見を基に、海外における技術の実証等を推進し、エネルギーの安定供給と地球環境問題の解決に貢献する。

産業技術力の強化

産業技術力の強化を目指し、将来の産業において核となる技術シーズの発掘、産業競争力の基盤となるような中長期的プロジェクトおよび実用化開発における各段階の技術開発を、産学官の英知を結集して高度なマネジメント能力を発揮しつつ実施することにより、新技術の市場化を図る。

1-2 NEDOの役割



■ 研究開発マネジメント

- ①プロジェクトの企画・立案
- ②産学官の強みを活かした研究開発体制の構築
- ③プロジェクトの運営

➡ 研究開発成果の最大化



4

1-3 材料・ナノテクノロジー部の紹介



材料・ナノテクノロジー部は 4つの領域において材料開発を推進

軽量・高強度を特徴とする構造材料開発

バイオ材料を基とする生産技術開発

新規高機能を有する先端材料開発

化学品の省エネ製造を実現するプロセス技術開発

鉄、非鉄、化学をはじめとする我が国の材料産業は、世界的に高い技術力を有していて、製造業全体を支える重要な基幹産業となっている。

また、物質の構造をナノ領域（ 10^{-9}m ）で制御するナノテクノロジーの活用により、これまでになかった優れた機能・特性を持った新材料が登場するようになっている。

NEDOは、このナノテクノロジーを材料技術に活かしつつ、川上・川下産業、異分野異業種の連携を図り、革新的な材料を創出することで、我が国の産業技術力強化を目指す。

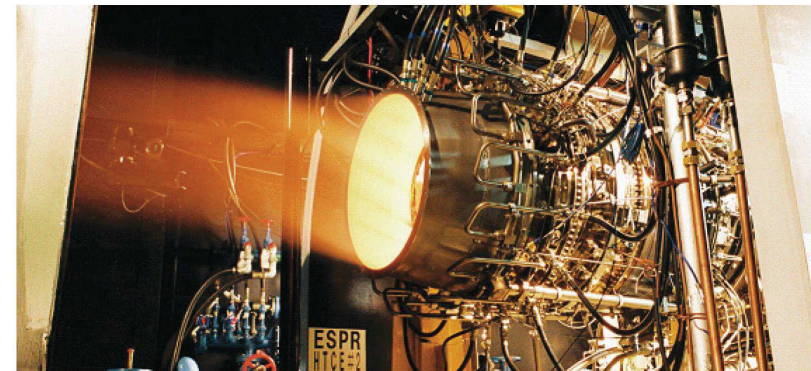
材料・ナノテクノロジー部では「**軽量・高強度を特徴とする構造材料開発**」「**バイオ材料を基とする生産技術開発**」「**新規高機能を有する先端材料開発**」「**化学品の省エネ製造を実現するプロセス技術開発**」の4つの領域を柱とし、材料開発のプロジェクトを推進する。

5

2. 次世代構造部材創製・加工技術開発 について



2-1 次世代構造部材創製・加工技術開発事業の概要



エンジン試験

次世代航空機の開発に貢献 高耐熱性エンジン部材と高耐久性ボディーの開発

エネルギー消費量削減やCO₂排出量削減は、国際的な重要課題である。今後20年間、年率約5%で成長が見込まれる民間航空機産業では、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ニーズがあり、国際的な産業競争が激化している。

本事業では、複合材料を始めとした日本が強みを持つ材料分野での技術革新を促進し、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、我が国の部材産業、加工・製造産業の国際競争力強化を目指す。

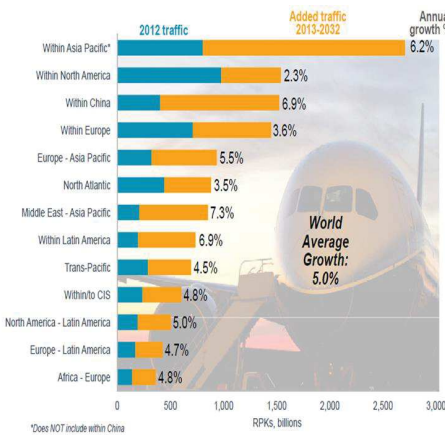
6

7

2-2 事業の背景① (市場予測)

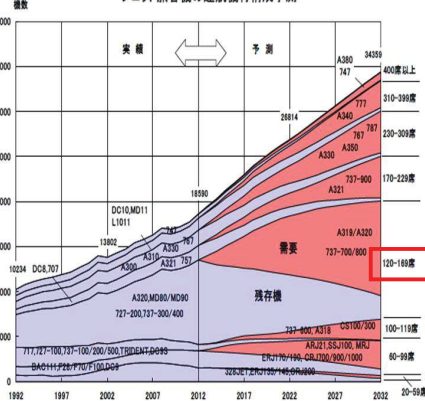
■世界の民間航空機市場は、**年率約5%で増加する旅客需要**を背景に、今後20年間の市場規模は、約3万機・4~5兆ドル程度（ほぼ倍増）となる見通し。最も旅客需要が伸びるのは**アジア太平洋地域**。最も機体需要が多いのは**150-200席級（B737、A320）**。

世界の旅客需要見通し



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)。

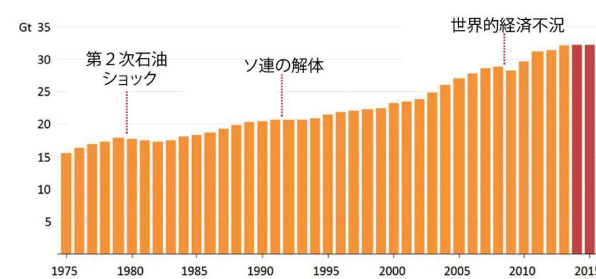
ジェット旅客機の運航機材構成予測



8

2-2 事業背景② (CO₂削減)

■世界の二酸化炭素排出量の推移は、2013年329億トン、2014年321億トン、2015年321億トン、2016年は暫定で334億トンで、ここ数年ほぼ横ばいの推移を占めているが、**エネルギー消費量削減やCO₂排出量削減は、国際的な重要課題**である。航空機産業は、ボーイングやエアバスに代表される寡占産業であり、本事業で開発した成果は、日本のみならず世界のCO₂排出量削減に寄与することになる。



世界の二酸化炭素排出量推移

○主要プレーヤー(OEM)

OEM	完成機	エンジン
	<ul style="list-style-type: none"> •BOEING •AIRBUS •EMBRAER •BOMBARDIER •三菱航空機 	<ul style="list-style-type: none"> •GE •Pratt & Whitney •Rolls-Royce

9

2-3 事業の目的

■航空機産業では、航空機の**燃費改善によるエネルギー消費量・CO₂排出量の削減、整備性向上、安全性向上**の市場ニーズがあり、軽量化のために複合材および軽金属等の高度な先進技術を航空機に適用することが求められている。本事業では、**航空機構造部材及びその加工技術、並びにエンジン部材の開発**により、上記課題の解決並びに我が国の産業の国際的競争力の強化を目指す。

- 部材の高機能化
- 構造診断技術
- 複合材積層技術
- 難削材加工技術
- シミュレーション技術

軽量化
低コスト化
信頼性向上
耐久性向上



10

2-4 平成30年度の実施内容

次世代構造部材創製・加工技術開発

①次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発

- 構造健全性診断システム
- 複合材構造の高生産性・低コスト生産技術
- 軽量化カーボンハニカムパネル
- 複合材特性を生かした軽量化パネル
- 航空機に適用可能なマグネシウム合金を開発する。

②航空機用複合材の複雑形状積層技術開発

複合材部材製造の高生産性・低コスト生産に对应可能な安価で汎用性・量産性を持った小型タイプ自動積層装置を開発する。

③航空機用難削材高速切削加工技術開発

- 炭素繊維複合材
- チタン合金
- アルミリチウム合金等の航空機用難削材材料を高速加工するための環境対応型加工技術を開発する。

④軽量耐熱複合材CMC技術開発

- 高い力学的特性と耐熱性を有するCMC (Ceramic Matrix Composites)を適用した航空エンジンの高温環境下で使用可能な部材
- さらに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。

⑤航空機用構造設計シミュレーション技術開発

設計初期段階から空力と構造及び強度解析をシームレスに連成することで、高い次元での多目的最適設計が可能なシミュレーターを開発する。

事業名：次世代構造部材創製・加工技術開発
事業期間：平成27年度～平成31年度
平成30年度予算額：33.7億円

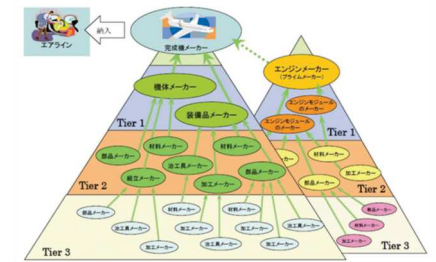
11

2-5 NEDO事業の意義

○航空機産業の特徴 1

■ピラミッド型の産業構造 (OEMからTier1、Tier2、Tier3へ)

航空機に使用される部品点数も多く、裾野が広い産業。また、他産業分野へ波及により、輸送機器等の分野で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、新たな産業創出に寄与できる。



出所：日本公庫総研レポート No. 2010-3 日本政策金融公庫総合研究所

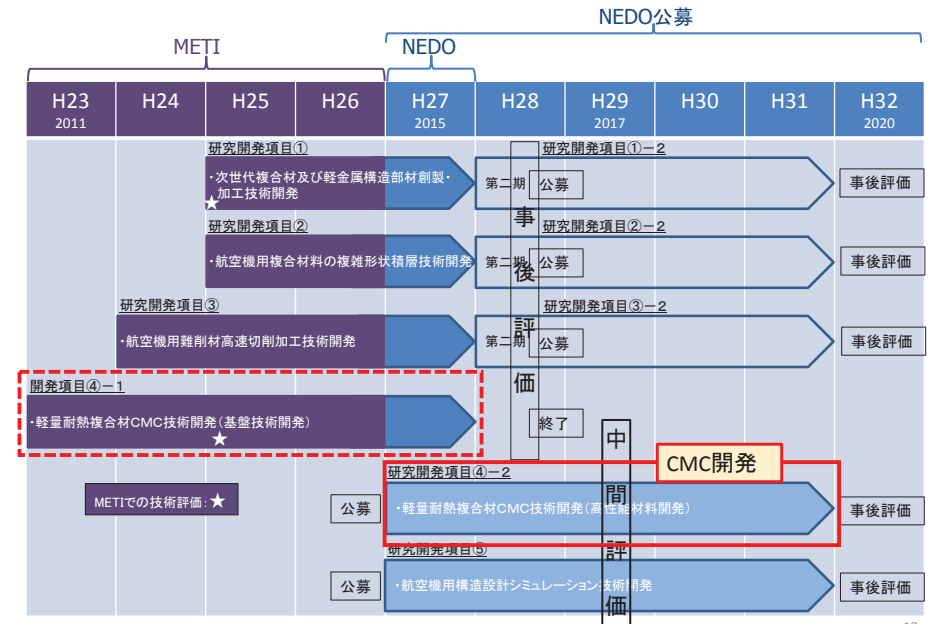
○航空機産業の特徴 2

■長期的な研究開発期間及び研究開発リスク

素材開発から材料、部材開発、実機適用、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厳しい国際的な産業競争に勝つ必要がある。

12

2-6 研究開発の期間



13

2-7 事業終了後のアウトカム

◆実施の効果 (費用対効果)

本プロジェクトの総費用	約130億円*1 (H23~H31)
CO ₂ 排出量削減 H37~H42年累積 (2025~2030年)	CO ₂ 排出削減量25万トン*2 9.6万キロリットルの原油削減 費用削減効果は33億円*3
市場創出効果 H42年想定 (2030年)	約1兆円/年*4

- * 1 H23~H26のMETI執行分を含む
- * 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 H42年 (2030年) の世界市場規模26兆円/年 (JADC統計)

14



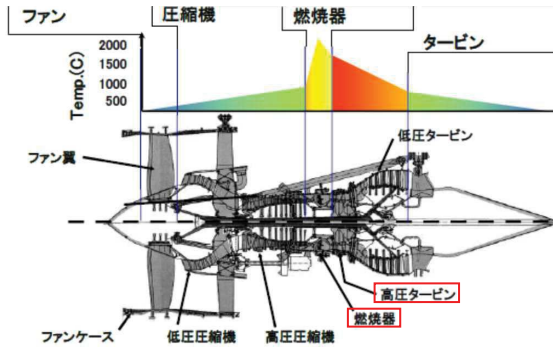
3. 事業の成果紹介について 軽量耐熱複合材CMC技術開発 (高性能材料開発)

15

3-1 CMC技術開発事業の背景・目的



- 航空機エンジンにおいても、環境面・経済面から、燃費改善が求められている。
- 燃費改善のためには、エンジン自体の軽量化が必要。→**材料の軽量化が必要**
- 熱効率改善のために、タービン入口温度の上昇が必要。→**耐熱性の向上が必要**
- 現在使用されているNi基合金と比べると、CMCは、比重が1/3で、1400℃まで耐えられる耐熱性を持ち、靱性も高い。→**CMCのエンジン部材適用への期待は大きい。**

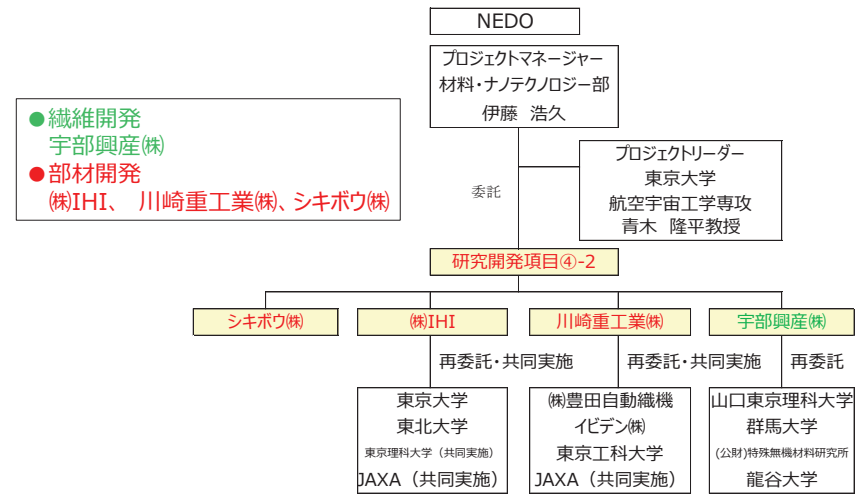


- 適用ターゲット
- ・高圧タービン (シュラウド、静翼、動翼)
 - ・燃焼器ライナ

ジェットエンジン模式図(出展: METI資料)

3-2 CMC技術開発の実施体制

- 軽量耐熱複合材CMC技術開発 (高性能材料開発)



3-4 CMC技術開発における主な実施者の役割



- SiC繊維からエンジン部材適用までの流れ



3-5 繊維開発の背景・目的 (宇部興産)



- 背景

- 低圧タービン向けCMC部材では、耐熱温度1100℃が達成されつつある。
- 高圧タービンへの適用には、**更に高い耐熱温度と力学的特性**が必要
- CMC部材の実用化、普及のためには**低コスト化**が必須であり、CMC材料であるSiC繊維を低コストに生産できることが求められる。
- また、応力負荷が大きく環境条件の厳しい高圧タービンの動翼等への適用のためには、**より高い力学的特性と高温クリープ特性**が必要。

- ①第3世代SiC繊維の生産技術開発
CMC材料のSiC繊維の低コスト生産技術の確立を実現
- ②高性能SiC繊維の開発
より高い力学的特性と高温クリープ特性に優れた繊維の開発

3-6 研究開発の成果 (宇部興産)

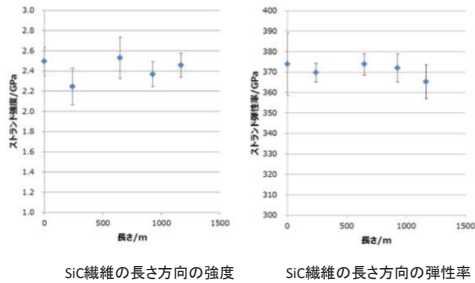
●SiC繊維の生産技術開発

○SAグレード製造における焼結機構の解明

- SiC繊維の強度安定化のためには表面欠陥と内部欠陥の低減が重要。
- それぞれ焼結温度と熱分解条件を最適化することで低減可能。
- バッチ式試作設備の詳細設計を行い、設備の設置及び繊維の試作を実施。

○SAグレードの低コスト量産プロセス開発

- バッチ焼結における重要パラメータを連続炉温度設定等に適用すれば、連続焼結法でバッチ焼結とほぼ同等のSiC繊維が得られることを確認。



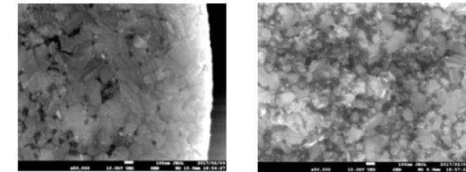
3-6 研究開発の成果 (宇部興産)

●高性能SiC繊維の開発

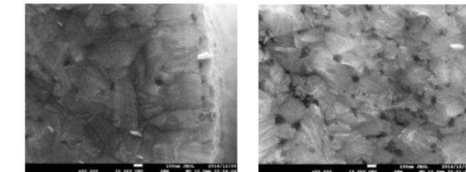
(3)新規な高性能SiC繊維用ポリマーの開発

- 結晶界面の空孔が強度、耐クリープ特性に悪影響を及ぼしているものと思われるため、組成を最適化することで通常の組成と比較して空孔のほとんどない良好な焼結構造を実現し、強度、耐クリープ特性の改善を行った。
- 現在、本最適組成SiC繊維の焼結条件等を検討中だが、少量スケールでは3GPa程度の強度を有するSiC繊維が得られた。

通常組成で試作したSiC繊維の焼結構造 (左:繊維表面付近、右:繊維中心部)



改良組成で試作したSiC繊維の焼結構造 (左:繊維表面付近、右:繊維中心部)

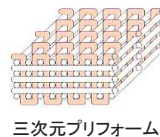


3-7 プリフォーム開発の背景・目的 (シキボウ)



○背景

- CMCの力学的特性は繊維の方向で決まるため、プリフォームの構成は非常に重要だが、CMC材料は加工が困難なため、可能な限りネットシェイプ成形が望ましい。
- 厚み方向にも繊維が構成され、異形状のプリフォームが製作可能なSiC繊維の 三次元プリフォームが必要。



①繊維の脆性特性を補う繊維補強方法の研究開発

脆くて織りにくいSiC繊維による三次元プリフォームの製織を効率的に行うためにサイジング剤およびサイジング及びデサイズ方法の開発

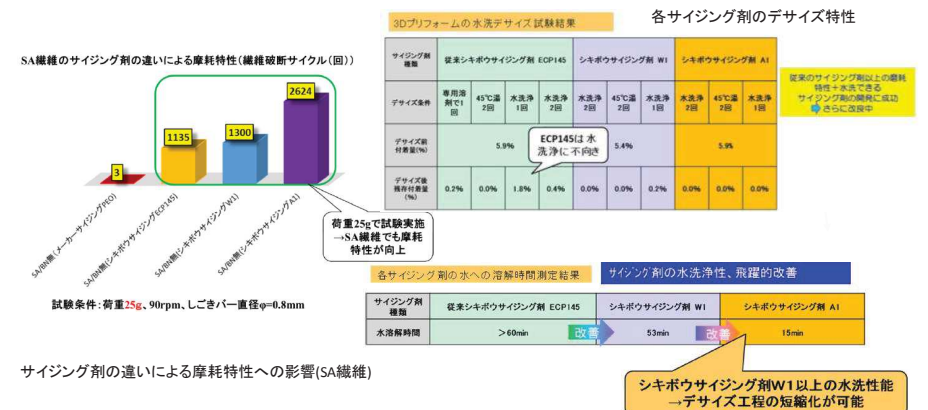
②三次元プリフォーム製造方法の研究開発

厚み方向への繊維の挿入方法や繊維補強方法等のプロセス最適化による三次元プリフォームの試作。

3-8 研究開発の成果 (シキボウ)

○サイジング剤・デサイズ方法の開発

- 昨年度、第3世代SiC繊維用に従来のサイジング剤と同等の性能かつ水洗のみで完全除去が可能なサイジング剤(ECP-W1)を開発。
- 今年度は水溶解時間が約1/3とデサイズ特性が向上したサイジング剤(ECP-A1)を開発。
- サイジング剤ECP-A1は、従来のサイジング剤(ECP-W1)の2倍以上の破断回数となり、摩耗特性の向上も見込まれる。



3-8 研究開発の成果 (シキボウ)

○三次元プリフォーム製造方法の検討

- 第3世代SiC繊維を用いて、シキボウ独自のプロセスをベースに三次元プリフォームの試作・改善を行い、繊維体積含有率 (Vf) 30%以上のものを作製。

○三次元プリフォーム製造方法の検討

- プリフォーム開発においては、Z系の挿入方法、繊維補強方法等のパラメータを変えて各種試作を行うとともに、専用織機をさらに改良することで第3世代SiC繊維による複雑織物の製織方法を検討し、改良の結果、第3世代SiC繊維においても繊維束切断なく製織することが可能となった。



第3世代SiC繊維による3次元プリフォームの外観

3-9 CMC部材開発の背景・目的 (IHI)



○背景

- 低圧タービン向けCMC部材では、耐熱温度1100℃達成されつつある。
- 高圧タービンへの適用には、更に高い耐熱温度と力学的特性が必要
- SiC繊維の特性だけでなく、高圧タービン向けのCMC部材に使用するコーティング材料やマトリクスの開発が求められる。
- 世界的に開発競争は激化していて、要素 技術開発のみならず、試作、エンジン環境を模擬した試験評価を含めた部材開発を行う必要がある。



①CMC材料の開発

1400℃の耐熱性を持つマトリクス含浸方法の開発や、第3世代SiC繊維へのBN界面コーティングや耐環境コーティングの実現

②エンジン部品の試作・評価

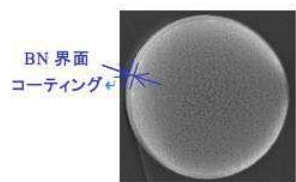
高圧タービン向けのエンジン部材を試作し、エンジン環境を模擬した試験による評価の実施。

3-10 研究開発の成果 (IHI)

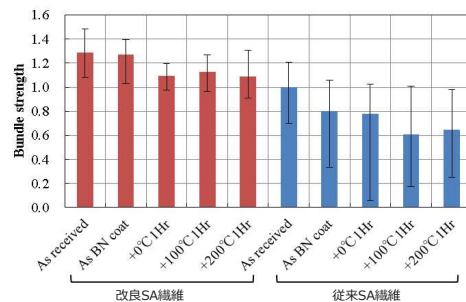
●CMC材料の開発

○BN界面コーティングの成膜条件の設定

- 宇部興産で開発した改良SA繊維を用いて、熱処理による繊維束強度の変化の測定を実施し、従来SA繊維と比較。
- 改良SA繊維は、従来SA繊維と比較して、繊維束強度は3割程度高く、BN成膜による強度の低下がほとんどなく、強度のばらつきが小さいことが分かった。
- 改良SA繊維は、熱処理によって僅かに強度が低下するものの、従来品よりも高い強度を維持していることが分かった。



SA繊維に成膜されたBN界面コーティング



各工程によるSA繊維束の引張強度の変化

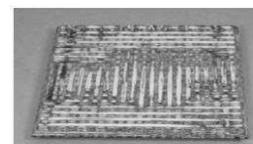
3-10 研究開発の成果 (IHI)

○マトリクス候補材の絞り込み

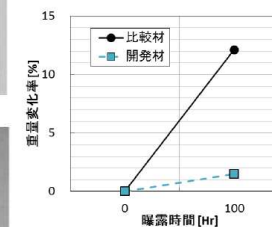
- エンジン部材に適用されるCMCのマトリクスに求められる高温での対酸化性・耐水蒸気性を評価するため、エンジン環境を模擬した1400℃加圧水蒸気中への曝露試験と曝露後の残存強度試験を行った。
- 開発材の曝露後の重量増加は数%で、比較材の1割程度と低く、優れた耐水蒸気性を有することが分かった。また、曝露前後での曲げ強度の低下は、16%に抑えられた。



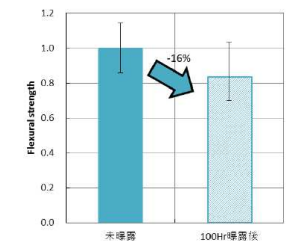
(a) 外観(曝露前)



(b) 外観(曝露後)



(c) 重量



(d) 曲げ強度

1400℃加圧水蒸気中への100Hr曝露による所得性の変化

1400℃加圧水蒸気中への100Hr曝露による諸特性の変化

3-11 CMC部材開発の背景・目的 (川崎重工業)



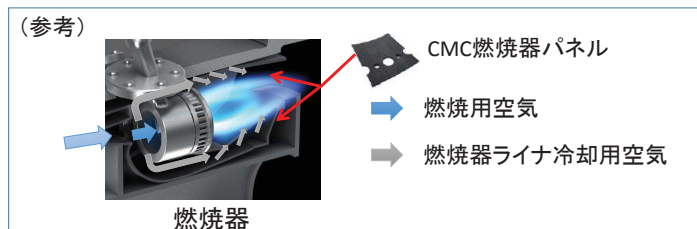
○背景

- エンジン効率改善のためには、タービン入口温度向上時に増加するNOxの環境規制対応が課題となる。
- 従来の燃焼器ライナに使用されているNi基合金では、燃焼用空気のほか冷却用空気を必要とし、結果的に、NOxを多く排出しているが、CMC適用によって耐熱温度が向上することで、冷却用空気を減らし、低NOx化が可能。



①高レート・低コスト化を実現するCMC部材の開発

交換可能なパネル化した燃焼器ライナのプリフォームの設計、製造技術の開発及びマトリクス形成プロセスやコーティング技術の開発並びにCMC部材の試作・評価。



28

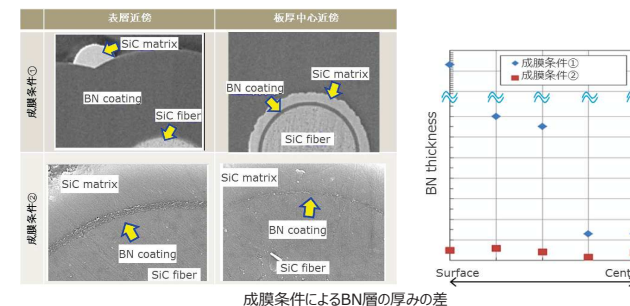
3-12 研究開発の成果 (川崎重工業)

○CMC用プリフォームの設計技術開発

- CMC製燃焼器パネルを試作、燃焼試験を実施し、支持構造部の強度評価、耐熱性評価を行った結果、短時間の耐久性を確認。今後、長時間の耐久性評価を進める。
- 複数の織構造で熱伝導率測定を実施し、測定方向の繊維量の変化以上に熱伝導率が変化することを確認。繊維組織による内部の空孔配置の制御が効果的に機能していると考えられる。

○SiC繊維への界面コーティング技術の開発

- プリフォーム単位での製織を実施し、SA繊維を用いた平織織物の積層材を対象に均一に成膜できる条件を確立。
- 新規に導入したCVD/CVI装置を使用し、スケールアップによる成膜検証を実施。



29

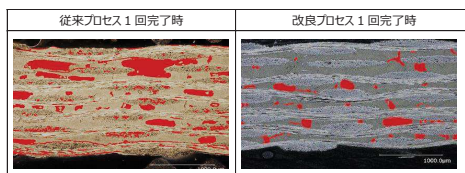
3-12 研究開発の成果 (川崎重工業)



○CMCマトリクス形成プロセスの最適化

- 従来PIP回数を増やすことでしか達成できていなかったような高密度CMCを少ない回数で工業的に達成できるような手法の開発を実施、平板においては効果があることを確認。
- 燃焼器パネルに重要な熱伝導率向上に向けて、各種プロセス条件を検討し、数倍以上の熱伝導率の向上を実現した。

※PIP : Polymer Impregnation and Pyrolysis (液相含浸法)



プロセスの改善による空孔率変化 (図中の赤色部が空孔)

○CMC材料の検査・健全性評価技術の開発

- 部材中にクラックや層間剥離が存在する場合には、部材自体の熱変形が異なるために、部材の三次元的な熱変形を調べることで、SiC/SiC内の損傷状態を検出可能。
- デジタルカメラ、光源、加熱装置を最適に組み合わせて部材に温度変化を与えた場合の形状変化を計測するための実験システム及び解析ソフトについて検討。

30

4. 今後の展望とまとめ

31

4-1 CMC開発の実用化に向けて（宇部興産、シキボウ）



○プロジェクト最終目標（平成31年度）【宇部興産】

- SiC繊維の低コスト量産プロセス確立
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。
- 高性能SiC繊維の評価用試料の供給
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部材評価用試料を他の実施者に供給。

○プロジェクト最終目標（平成31年度）【シキボウ】

- 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。

- ➡
- プロジェクト終了後、高圧タービンシュラウド・静翼向けのCMC部材に必要な繊維、プリフォームの量産を目指す。
 - より高性能な第4世代SiC繊維を用いたCMC部材開発に必要な繊維を供給できるようにする。

32

4-2 CMC開発の実用化に向けて（IHI、川崎重工業）



○プロジェクト最終目標（平成31年度）【IHI】

- 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。
- 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。

- ➡
- 次世代エンジンへの適用を目指して、高圧タービンのシュラウド・静翼向けのCMC部材を開発し、エンジン環境の試験・評価を行う。

○プロジェクト最終目標（平成31年度）【川崎重工業】

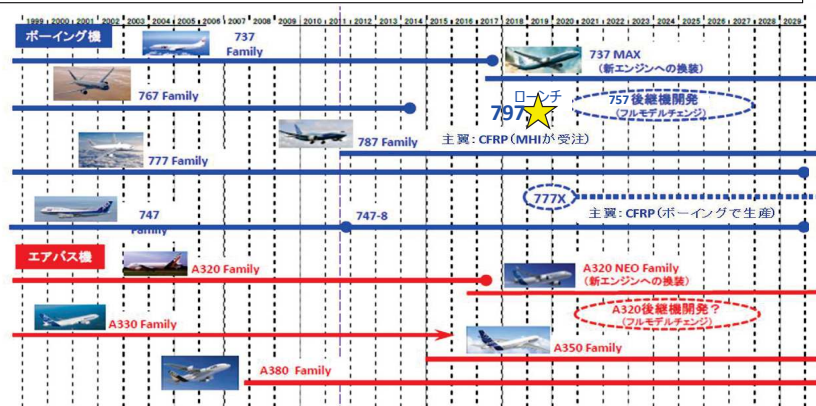
- 室温引張強度200MPa以上、1400℃×400Hr曝露後強度低下20%以下を満足するCMC材料を開発する。
- 開発したSiC繊維が、CMC材料に適用可能であることを確認する。

- ➡
- 次世代エンジンへの適用を目指して、燃焼器ライナ向けのCMC部材を開発し、エンジン環境の試験・評価を行う。

33

4-3 成果の実用化に向けた戦略①

- 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。
次期量産機のローンチは、2019年(B797(仮))、2025年(B737、A320後継)と予想されている。ローンチ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。



出典：我が国航空機産業の現状と課題 NEDO一部改稿

34

4-3 成果の実用化に向けた戦略②

(1) 実用化に向けた戦略

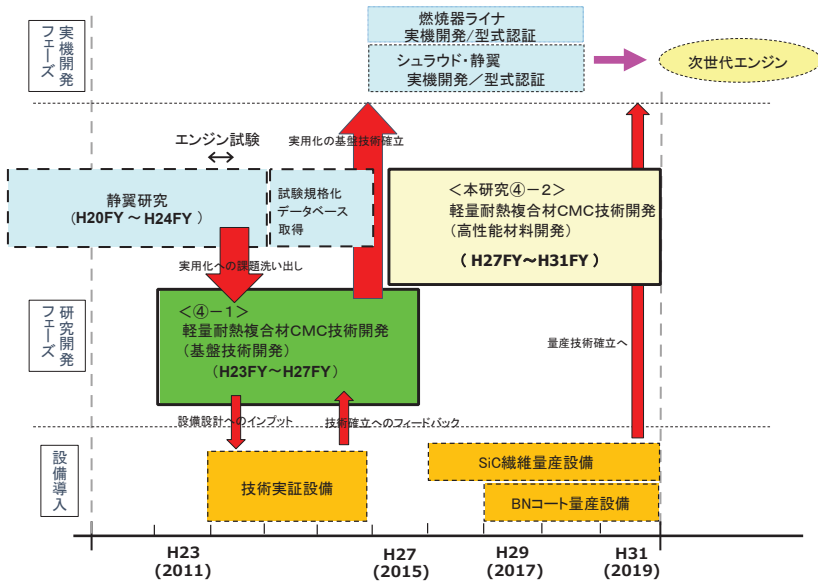
- SiC繊維：特性バラツキが少なく、かつ低コスト・供給安定性で優位に立つ。
- CMC部材：要素技術で優位に立つ。

(2) 実用化の見通し

- エアラインからの燃費削減圧力は増している。耐熱性に優れ、金属材料よりも軽量のCMC部材の実用化は非常に重要である。本プロジェクトでは、競争をしのぐ低コストの第3世代SA繊維が開発され、高圧タービン部材及び燃焼器ライナ部材としての評価も進んでいる。先行する1社とも伍している状況であり、他エンジンメーカーでの部材採用に大いに期待できる。
- 高圧タービンの動翼等大きな応力のかかる部材において使用可能な高い力学的特性と高温クリープ特性を有する第4世代SiC繊維の開発も進んでいる。先行する1社を凌駕する状況であり、大きな応力のかかる部材においても、部材採用は大いに期待できる。

35

4-4 CMC部材開発の実用化に向けて

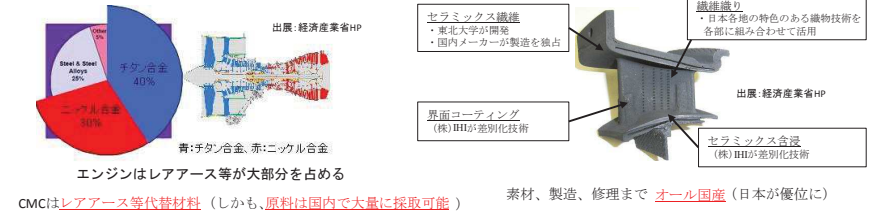


4-6 CMC技術開発事業の波及効果

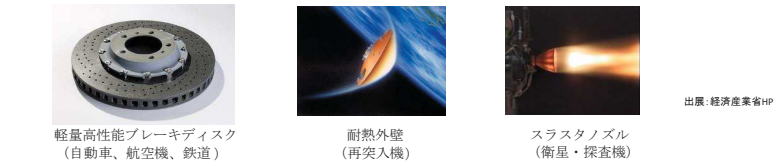
◆波及効果

我が国産業の競争力強化等への貢献

航空産業では、ボーイング787などの炭素繊維複合材の利用拡大において、日本の航空機メーカーの競争力強化に貢献しており、現在自動車業界等へ展開されつつある。同様に複合材としてCMCがそれに続く日本競争力強化に繋がることが期待される。また、技術波及が可能な輸送（自動車、鉄道、ロケット等）、エネルギー機器（ガスタービン、工業炉等）の分野において、耐熱性の高いCMCを活用することによる日本の競争力強化が見込まれる。



技術波及



終

