

**令和 4 年度重要技術管理体制強化事業
（航空機エンジンサプライチェーンにおける
供給安定性及び競争優位性に関する調査）
調査報告書**

EYストラテジー・アンド・コンサルティング株式会社

令和5年2月28日

目次

1. 重要部材サプライチェーン調査	3
1.1 重要部材の特定	4
1.1.1 重要部材の考え方	5
1.1.2 電動推進方式と重要部材	7
1.1.3 CO2削減シナリオと重要部材	12
1.1.4 調査対象とする重要部材	14
1.2 重要部材の開発者の調査	15
1.2.1 重要部材の開発状況	16
1.3 重要部材のサプライチェーン及びその優位性／脆弱性	23
1.3.1 調査方法	24
1.3.2 調査結果	25
1.4 適切な支援・施策へ向けた示唆	29

2. 製造技術分析	31
2.1 エンジン関連技術	32
2.1.1 調査内容及び結果の概要	33
2.1.2 調査結果	35
2.2 製造技術	72
2.2.1 調査内容及び結果の概要	73
2.2.2 調査結果	75
3. 先端技術・素材の動向	84
3.1 超電導モーターの技術動向	85
3.1.1 調査方針及び調査方法	86
3.1.2 調査結果	88
3.2 その他の電動化関連技術・素材の動向	98

1

重要部材サプライチェーン調査

1.1

重要部材の特定

将来航空機の重要部材としてまず着目すべきは、モーター及びバッテリーである

■ 本調査の前提

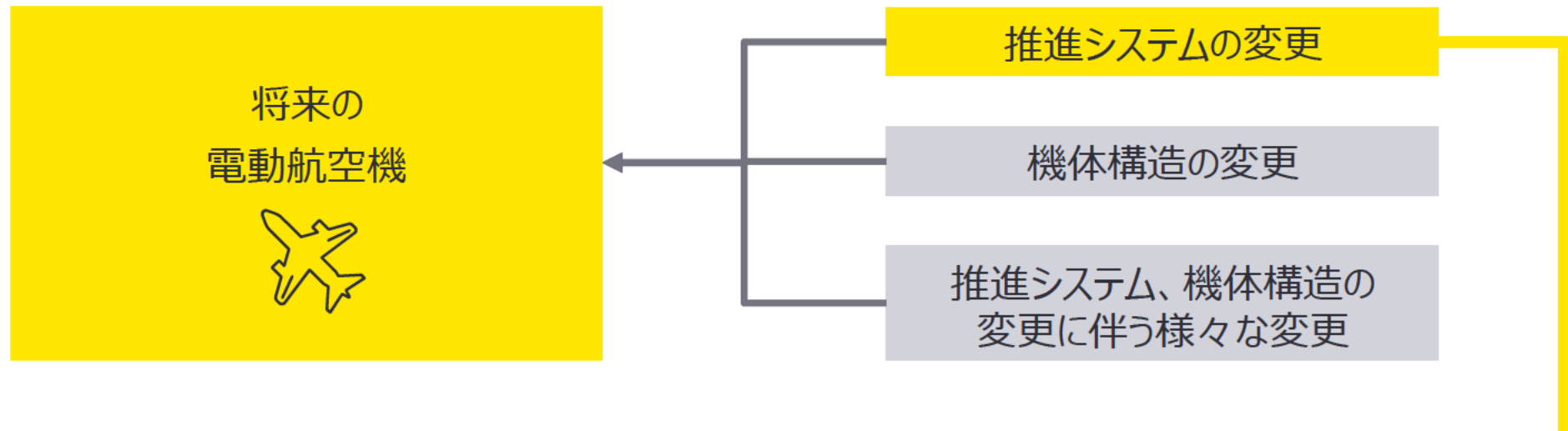
- 将来、航空機の動力が変更されることで、日本の航空機産業にどのような影響があるかを検討する、重要な基礎情報を得るため、本調査を実施する
- 対象とする将来航空機は、CO2削減に寄与する、電動航空機である
- 化石燃料から電力へ動力を変換することによりCO2削減を実現する技術を調査対象とする（SAF及び水素の直接燃焼等の従来燃焼系の燃料転換技術は本調査では対象外とする）



■ 調査対象とする重要部材の考え方

- 将来航空機サプライチェーンのうち、現状から変更される可能性が高いのは動力部分である
- 電動化された動力のサプライチェーンを対象とする
- 動力の電動化（水素燃料電池利用含む）は複数存在する
- 有望ないくつかのパターンで共通する部材として、モーター及びバッテリーが挙げられる
- 燃料電池及び水素タンクは電力供給源として重要だが、まずは電動推進を実現する技術を把握するため、本調査においては、モーター及びバッテリーに調査対象を絞る

将来の電動航空機がどのような推進方式を採用するかにより、部材へどのような機能・性能を要求をするかが変わり得る



- 電動航空機は、CO2削減に寄与するという目標を達成するため、推進システムが化石燃料を燃焼させる方式から、電動系へと転換する
- 電動系へ転換する際、技術的に複数の推進方式が選択可能
- 選択する方式により、必要な部材や、部材への機能・性能要求が変わり得る
- 機体構造では、ますますの軽量化が求められるだけでなく、電動の推進システムを採用することで翼の下にタービンを置く必要性がなくなるため、機体の形状そのものも変更可能となり、機体形状により、電動推進システムの部材に求められる機能・性能は変わり得る

10種類の電動推進方式と主要な開発要素（1/3）

方式	構成		推力
	構造	主要開発要素	
①Partially turboelectric		- ジェネレーター（G） - モーター（M） - ファン（モーター駆動）	- ジェットエンジン - ファン（モーター駆動）
②All turboelectric		- ジェネレーター - モーター - ファン（モーター駆動）	ファン（モーター駆動）
③Parallel Hybrid electric		- モーター - バッテリー	ジェットエンジン

10種類の電動推進方式と主要な開発要素（2/3）

方式	構成		推力
	構造	主要開発要素	
④Series/Parallel Partial Hybrid electric		- ジェネレーター - モーター - バッテリー - ファン（モーター駆動）	- ジェットエンジン - ファン（モーター駆動）
⑤Series Hybrid Electric		- ジェネレーター - モーター - バッテリー - ファン（モーター駆動）	ファン（モーター駆動）
⑥All Electric		- モーター - バッテリー	ファン（モーター駆動）

10種類の電動推進方式と主要な開発要素（3/3）

方式	構成		推力
	構造	主要開発要素	
⑦Parallel Hybrid electric		・ モーター ・ 燃料電池 ・ 水素タンク	・ ジェットエンジン
⑧Series/Parallel Partial Hybrid electric		・ ジェネレーター ・ モーター ・ 燃料電池 ・ 水素タンク ・ ファン（モーター駆動）	・ ジェットエンジン ・ ファン（モーター駆動）
⑨Series Hybrid Electric		・ ジェネレーター ・ モーター ・ 燃料電池 ・ 水素タンク ・ ファン（モーター駆動）	・ ファン（モーター駆動）
⑩All Electric		・ モーター ・ 燃料電池 ・ 水素タンク ・ ファン（モーター駆動）	・ ファン（モーター駆動）

10種類の電動推進方式は、3つの基本形とその電動アシスト型、及び完全電動型に整理できる

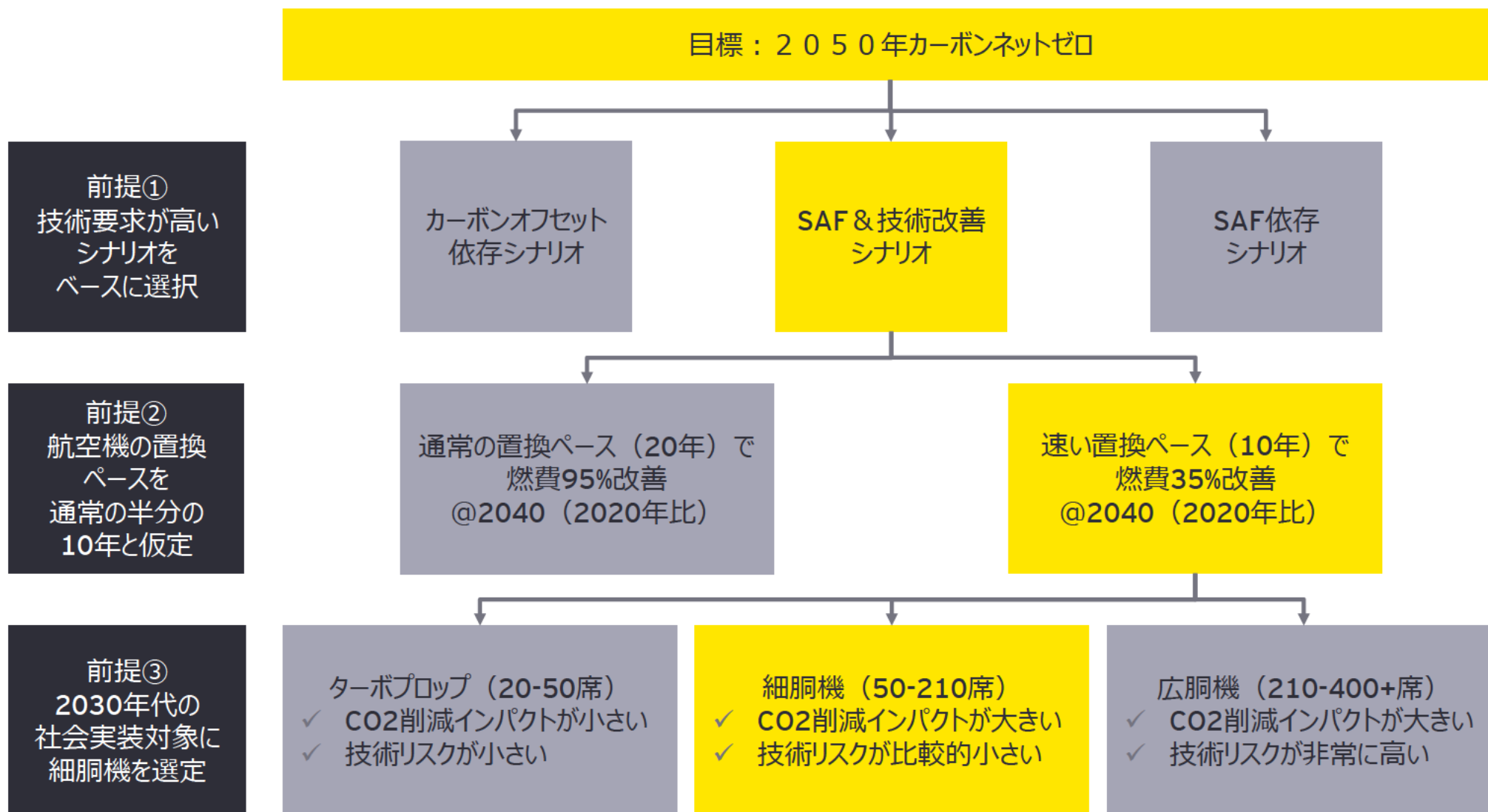
	方式	投入“燃料”	内部エネルギー変換構造	推力
基本形	①従来型	燃料	タービンの回転エネルギー	ジェットエンジン
	①Partially turboelectric	燃料	タービンの回転エネルギー → 電力 → ファンの回転エネルギー	ジェットエンジン + ファン
	②All turboelectric	燃料	タービンの回転エネルギー → 電力 → ファンの回転エネルギー	ファン
電動アシスト型	③Parallel Hybrid electric	燃料 + バッテリー	基本形と同様	
	④Series/Parallel Partial Hybrid electric	燃料 + バッテリー		
	⑤Series Hybrid Electric	燃料 + バッテリー		
完全電動型	⑥All Electric	バッテリー	ファンの回転エネルギー	ファン
水素／燃料電池型	⑦Parallel Hybrid electric	燃料 + 水素	電動アシスト／完全電動型と同様	
	⑧Series/Parallel Partial Hybrid electric	燃料 + 水素		
	⑨Series Hybrid Electric	燃料 + 水素		
	⑩All Electric	水素		

10種類の電動推進方式と主要な開発要素のまとめ

方式	ジェットエンジン	ジェネレーター	バッテリー	燃料電池と水素タンク	モーター	ファン	推力
①Partially turboelectric 入口	○	○					ジェットエンジン + ファン
②All turboelectric		○			○	○	ファン
③Parallel Hybrid electric	○		○		○		ジェットエンジン
④Series/Parallel Partial Hybrid electric	○	○	○		○	○	ジェットエンジン + ファン
⑤Series Hybrid Electric		○	○		○	○	ファン
⑥All Electric 理想形			○		○	○	ファン
⑦Parallel Hybrid electric	○			○	○		ジェットエンジン
⑧Series/Parallel Partial Hybrid electric	○	○		○	○	○	ジェットエンジン + ファン
⑨Series Hybrid Electric		○		○	○	○	ファン
⑩All Electric				○	○	○	ファン

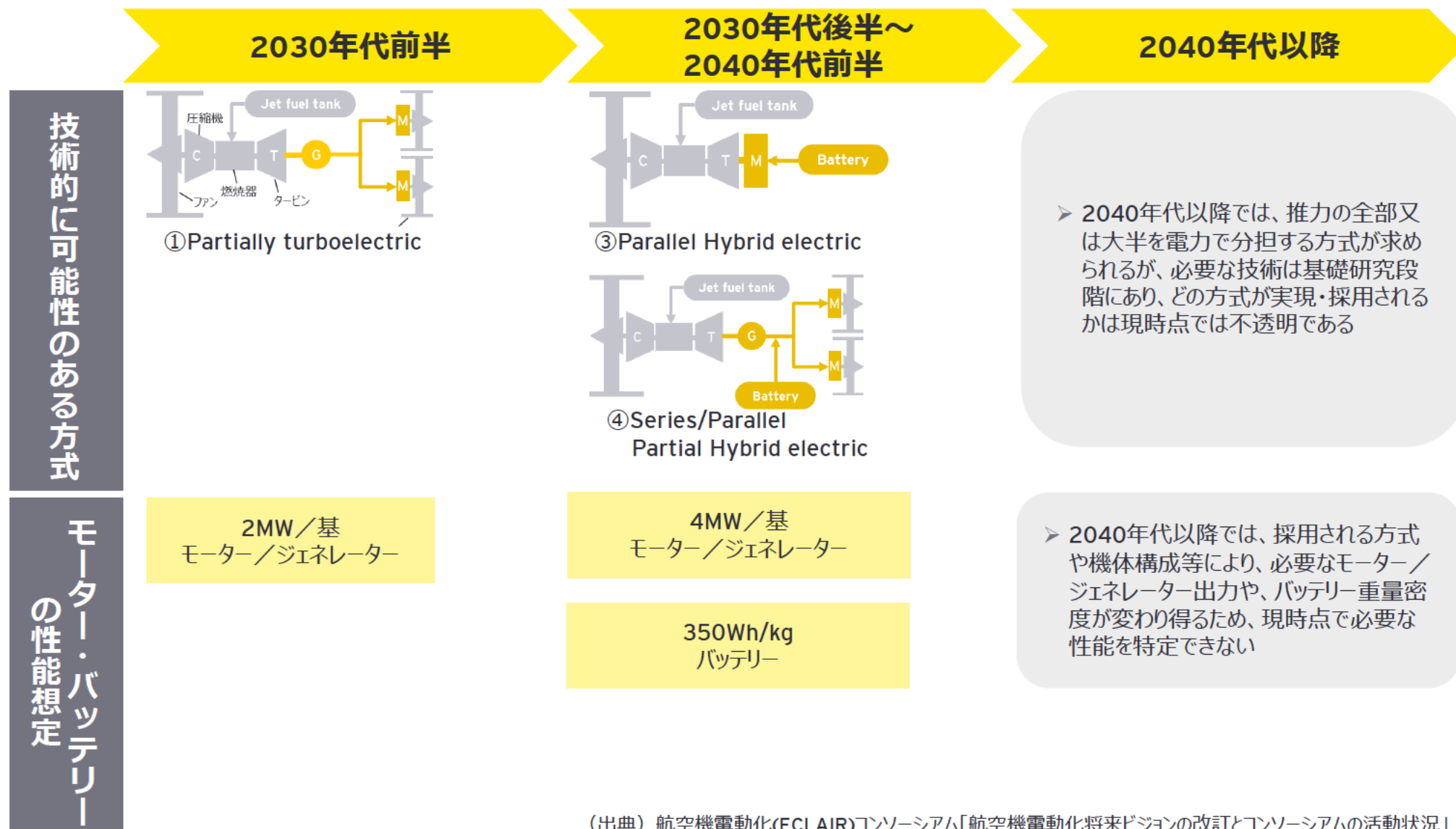
電動化率向上

本調査では、航空機電動化（ECLAIR）コンソーシアムのビジョンを前提とする



（出典）航空機電動化(ECLAIR)コンソーシアム「航空機電動化将来ビジョンの改訂とコンソーシアムの活動状況」

細胴機において、2030年代前半に、パーシャルターボエレクトリック方式が、2030年代後半から2040年代前半にパラレルハイブリッド方式が実現可能性がある



(出典) 航空機電動化(ECLAIR)コンソーシアム「航空機電動化将来ビジョンの改訂とコンソーシアムの活動状況」

MW級モーター及び350Wh/kg級のバッテリーを調査対象の重要部材とする

重要部材	採用時期・方式イメージ／求められる性能
モーター	➤ 2030年代前半のパーシャルターボエレクトリック方式／2MW ➤ 2030年代後半～2040年代前半の細胴機向けパラレルハイブリッド方式／4MW
バッテリー	➤ 2030年代後半～2040年代前半の細胴機向けパラレルハイブリッド方式／350Wh/kg

1.2

重要部材の開発状況

モーターについては、各国で100kW～MW級の出力を目標性能として研究開発が行われている（1/3）

対象国	開発者	研究内容	支援概要（補助金対象のプログラムの場合）
日本	▶ 多摩川精機	▶ NEDOエネルギー・環境新技術先導研究プログラムにおけるコントローラー一体型の100kW級(数百kW前半まで)のモーターの研究開発 ▶ 材料・構造の基盤技術から検討しインバーターも含めた空冷方式として開発を実施	
日本	▶ シンフォニアテクノロジー	▶ NEDOエネルギー・環境新技術先導研究プログラムにおける小型機への適用を目標としたコントローラー一体型の出力密度5kW/kg級のモータの開発 ▶ 2021年までに、試作モータによる地上試験実証により、実用化のための基礎技術が得られた(TRL5)	
日本	▶ 東芝 ▶ JAXA	▶ JAXAイノベーションチャレンジのプログラムにおける重希土類フリー高磁力・高耐熱サマリウムコバルト磁石を用いた、電動航空機向け高出力密度永久磁石モーターの研究開発 ▶ 航空機運転条件での熱解析結果と磁石特性の温度依存性を考慮して東芝開発のSmCo磁石（サマリウムコバルト磁石）の適用可能性を検討	
日本	▶ IHI ▶ シンフォニアテクノロジー	▶ NEDO次世代電動推進システム研究開発プロジェクトにおけるテールコーン内部にエンジン軸直結で搭載できるエンジン内蔵型電動機（モーター・ジェネレーター一体型）の開発 ▶ 2020年までに地上実証実験を実施し、定格出力250kWを達成	
日本	▶ 九州大学	▶ NEDO次世代電動推進システム研究開発プロジェクトにおける高効率かつ高出力密度を特徴とする超電導電動推進システムの開発 ▶ ジェネレーター・ケーブル・インバーター・モーター・冷却システムまでのパッケージとしての完成を目標とした開発 ▶ 2021年までに250-500kW級超電導モーターの基本構造の設計を完了	

モーターについては、各国で100kW～MW級の出力を目標性能として研究開発が行われている（2/3）

対象国	開発者	研究内容	支援概要（補助金対象のプログラムの場合）
日本	▶ 東芝	▶ 出力2MWの超電導モーターの開発。サイズは外形φ500×全長700[mm] ▶ 出力2MWの軽量・小型の超電導モーター試作機を開発し、同一レベル出力のモーターと比較して10分の1以下の軽量・小型化を実現している	
米国	▶ NASA Glenn Research Center	▶ 出力1.4MW、出力密度16kW/kgの超電導モーターの開発(HEMM High-Efficiency Megawatt Motor) ▶ 燃料消費量を+3%削減させるため、目標効率を99%としている。 ▶ サイズは16"x42"であり、平均的な自動車エンジンのモーターよりも小さい	
米国	▶ Illinois university ▶ NASA Glenn Research Center	▶ 出力1MW、出力密度13kW/kgの永久磁石同期モーターの開発 ▶ 目標効率は96%である ▶ モーター駆動に使用できる可能性のあるインバーターについても併せて設計 ▶ 2021年にラボテストを実施し、出力密度15kW/kg、効率96%を達成	
米国	▶ Ohio university ▶ NASA Glenn Research Center	▶ 出力2.7MW、出力密度13kW/kgのリング誘導モーター（非同期モーター）の開発 ▶ 目標効率は96%である ▶ 熱伝導、電流密度を最大化するため、可変断面ウェットコイル（VCSWC）技術を適用し、テープ導体による直接流体冷却を利用する	
米国	▶ Raytheon Technologies research center	▶ 出力2.5MWの超電導モーターの開発 ▶ 米国エネルギー省高等研究計画局(ARPA-E)との契約を通じて、学術および商業パートナーのチームとともに追求しているプロジェクト ▶ 出力2.5 MW、5,000 rpm の超電導モーターと、電気航空機推進用の駆動装置の概念設計を実施している ▶ モーターの固定子、回転子、端子を超電導状態に冷却する熱管理システムの軽量化が課題であり開発を進めている	▶ 支援機関：ARPA-E

モーターについては、各国で100kW～MW級の出力を目標性能として研究開発が行われている（3/3）

対象国	開発者	研究内容	支援概要（補助金対象のプログラムの場合）
米国	▶ Wright Electric	▶ 出力MWクラスのモーターの開発 ▶ 出力500kwから4MWのシステムまで拡張できるように設計されている ▶ 出力2 MWモーターについては、航空業界で実証されている出力MW規模のモーターのサイズを2倍改善することを目標とし、様々なアプリケーション向けに500 kWから4 MWに拡張できるように開発している ▶ 目標出力密度は10 kW / kgであり、現在利用可能な航空機推進モーターと比較し2倍改善させる ▶ モーター、インバーターを統合した推進システムまで開発している	
フランス	▶ GROUPE DE RECHERCHE EN ENERGIE ELECTRIQUE DE NANCY (GREEN) (ロレーヌ大学の研究所)	▶ 出力500kW-1MWの超電導モーターの開発 ▶ 将来出力密度20kW/kgという目標を達成するための研究開発 ▶ 本プロジェクト（FROST）はRESUMプロジェクトの継続プロジェクトであり、RESUMプロジェクトで得られた結果は以下のとおり： ・電磁設計ツールの検証 ・高速5000rpmでの超電導モーターの実現 ・質量トルクの約30%の増加を可能にする独自のクライオスタット構造の研究 ・提案された機械構造を改善する方法に関する特許出願	▶ 支援機関：ANR（フランス国立研究機構） ▶ 補助金額：€499,212 ▶ 実施期間：2020/1/31-2023/1/31
英国	▶ Rolls-Royce	▶ 出力320kWのモーターの開発 ▶ パワーエレクトロニクスと制御部を内蔵したダイレクトドライブ、空冷式の構造 ▶ シングル、ツイン、クアッドエンジン航空機プラットフォーム向けの出力密度の高いコンパクトなモジュールおよび適応性設計としている ▶ EASA CS-23記載の安全基準を満足する特許取得済の構成としている	

バッテリーについては、各国で500Wh/kgの質量エネルギー密度を目標性能として研究開発が行われている（1/3）

対象国	開発者	研究内容	支援概要（補助金対象のプログラムの場合）
日本	▶ GSユアサ	▶ NEDO次世代電動推進システム研究開発プロジェクトにおいて、軽量蓄電池の実機適用レベルのエネルギー密度を実現する要素技術として電極、電解質などの構成要素や CMU(Cell Monitoring Unit)、BMU(Battery Management Unit)などの制御ユニット、モジュール構造、パック構造などの基本仕様を開発 ▶ 2023年度までに500Wh/kg級の蓄電池システムの製作と実証（TRL6の達成）を目標としている	
米国	▶ Giner, Inc.	▶ リチウム硫黄電池の開発(フェーズⅠ) ▶ 市販のリチウムイオン電池の最大5倍である理論質量エネルギー密度 2500Wh/kgを有しているリチウム硫黄(Li-S)電池の開発 ▶ リチウム硫黄電池は、NASAで進められている電動推進プログラム向けの次世代エネルギー貯蔵デバイスとして有望であるが、サイクル中のLi金属陽極の安定性の悪さによって部分的に引き起こされるサイクル寿命の悪さによって使用が制限されていた。本プロジェクトでは、Li-Sセルの安定した長期サイクルを達成する為にLi金属陽極を安定化させるための新しい技術開発を実施する	▶ 支援機関：NASA SBIR ▶ 補助金額：\$ 124,916 ▶ 実施期間：2019/08/19-2020/02/18
米国	▶ Giner, Inc.	▶ リチウム硫黄電池の開発(フェーズⅡ) ▶ 本プロジェクトでは、フェーズⅠの実現可能性実証に基づいて、プロトタイプのリチウム硫黄電池内のLi金属陽極を安定化させるための、新しいコーティング技術開発を実施する	▶ 支援機関：NASA SBIR ▶ 補助金額：\$ 749,997 ▶ 実施期間：2020/06/18-2022/06/17
英国	▶ Electroflight	▶ 高エネルギー出力密度バッテリーの開発 ▶ 本プロジェクトは①バッテリーパックの運用、規制、性能要件の設定、②プロトタイプのバッテリーパックを設計、③地上試験による性能検証から構成される	▶ 支援機関：ATI（航空宇宙技術研究所） ▶ 補助金額：£0.35M ▶ 実施期間：2021/01/01-2023/03/31

バッテリーについては、各国で500Wh/kgの質量エネルギー密度を目標性能として研究開発が行われている（2/3）

対象国	開発者	研究内容	支援概要（補助金対象のプログラムの場合）
米国	▶ Aegis Technology, Inc.	▶ 全固体リチウムイオン電池の開発 ▶ 本プロジェクトでは、独自の固体電解質と新しいセル構造設計に基づいて、新しいクラスの全固体リチウムイオン電池(ASSLiBs)を開発する ▶ 提案する電解質は、高いイオン伝導性だけでなく、広い動作温度範囲、および設計電極との良好な互換性を提供することができる。このクラスの電解質を適切に設計された高エネルギー電極と統合することにより、従来のASSLiBによく見られる界面抵抗の問題に効果的に対処することができ、エネルギー/電力密度の向上、サイクル性の向上、優れた安全性など、より望ましいバッテリー性能が得られる。さらに、提案するASSLiBは、工業的に成熟した積層セラミックコンデンサ(MLCC)処理技術を使用して処理することができ、費用対効果が高くスケラブルな方法で大量生産を可能にする。 ▶ フェーズIでは、材料設計、加工、プロトタイプング、特性評価を通じて、提案された技術の実現可能性実証に焦点を当て、小規模ASSLiBセルをプロトタイプ化して実証する。フェーズIIでは、スケールアップされた材料設計/加工と本格的なセル製造の両方について、さらなる最適化、スケールアップ、特性評価を実施する。	▶ 支援機関：NASA STTR ▶ 補助金額：\$ 125,000 ▶ 実施期間：2020/08/21-2021/09/30
米国	▶ NASA Glenn Research Center	▶ 全固体積層造形電池(SABERS)の開発（NASA CAS projectの一部） ▶ 本プロジェクトでは、固体電解質、活物質、導電材の組成比を最適化し、エネルギー密度500Wh/kgを実現する全固体積層造形バッテリーを開発する ▶ 特許取得済みの穴あきグラフェン構造により、カソード導電構造とバッテリー性能を向上させる ▶ 新しい硫黄とセレンの組み合わせにより、エネルギーと電力のバランスをとってパフォーマンスを最適化し、インピーダンスを減らし、より安定した放電プロファイルを作成する	

バッテリーについては、各国で500Wh/kgの質量エネルギー密度を目標性能として研究開発が行われている（3/3）

対象国	開発者	研究内容	支援概要（補助金対象のプログラムの場合）
ドイツ	▶ ブラウンシュヴァイク工科大学 (Technische Universität Braunschweig)	▶ リチウム硫黄電池の開発 ▶ 航空機用バッテリーのコンポーネントには、十分な比エネルギー(重量エネルギー密度)と高出力密度を可能するバッテリーシステム必要であり、これらの要件を満たすための最も有望な電池タイプである全固体リチウム硫黄電池を開発する ▶ 現在のリチウム硫黄電池のセルの性能は目標性能からかけ離れており、性能向上のためには有望な材料とその組み合わせを深く研究する必要がある ▶ 本プロジェクトでは、表面、電極、セルレベルでのマルチスケールの理解とその適用を達成することを目標とする。具体的な内容は以下のとおり： ・適切な(ハイブリッド)固体電解質と電極構造の同定 ・電極での反応及び不動態化プロセスの理解、電極を高活性に保つ方法の調査 ・固体電解質と活物質の表面での反応を理解し、可逆性の高い正極を開発 ・航空に関連する特性を持つ、加工可能で持続可能な電極構造と組成の特定	▶ 支援機関：DFG (ドイツ研究振興協会)

ジェネレーターについては、各国で kW～MW級の出力を目標性能として研究開発が行われている

対象国	開発者	研究内容	支援概要（補助金対象のプログラムの場合）
日本	▶ IHI ▶ シンフォニアテクノロジー	▶ NEDO次世代電動推進システム研究開発プロジェクトにおけるテールコーン内部にエンジン軸直結で搭載できるエンジン内蔵型電動機（モーター・ジェネレーター一体型）の開発 ▶ 2020年までに地上実証実験を実施し、定格出力250kWを達成	
米国	▶ GE	▶ ハイブリッド電気統合発電（MESTANGⅢ）の開発 ▶ 本プロジェクトでは、CLEENフェーズIIの下で実施された作業に基づいて、出力90kWのジェネレーターの成熟に焦点を当てる ▶ リージョナルジェット、ターボプロップ、およびビジネスジェットアプリケーションを対象としたプロトタイプジェネレーターの要件定義、設計、および製造を実施する ▶ 2020年までにシステムの地上試験を完了（TRL6）	▶ 支援機関：FAA ▶ 実施期間：2021/10/1-2023/3/31
英国	▶ Rolls-Royce	▶ 高効率、デュアル燃料対応タービン発電機システムの開発 ▶ 目標出力600kW-1MW、出力密度4kW/kgとしている ▶ 出力600kW～1MWのスケラブルな出力適応型として開発している ▶ SAF対応、H2のプロビジョンも可能である	

1.3

重要部材サプライチェーン 及びその優位性／脆弱性

サプライチェーン及び優位性／脆弱性の調査方法と考え方

- ▶ 日本において、電動航空機用のモーター、超電導モーター、ジェネレーター及びバッテリー開発者がそれぞれ存在している
- ▶ 電動航空機の重要部材は全て開発中であり、必ずしも研究中に購入している構成部品やそのサプライヤーが、将来の量産化段階のサプライチェーンに組み込まれるとは限らない
- ▶ そこで、我が国の企業が優位な部材や工程を把握するため、日本における重要部材開発者を対象に、現在把握できる範囲でのサプライチェーン及びその優位性、脆弱性を聞き取ることとし、インタビュー結果をもとに、現状想定可能なサプライチェーン、及びその優位性、脆弱性を整理した
- ▶ 本調査においては、全ての重要部材が開発中であることを考慮し、以下の考え方に沿い整理を行った
 - ✓ サプライチェーンについては、現時点で明示的に示せる範囲を対象に整理した
 - ✓ 優位性、脆弱性については、現時点での研究開発の進展状況をもとに「現時点での優位性／脆弱性」を判断するとともに、その優位性、脆弱性が、今後競合企業の台頭により変更を受けるかどうか、という観点から「優位性の安定性／脆弱性の継続性」についても整理を行った

整理項目	考え方
サプライチェーン	現時点で明示的に示せる範囲で整理
現時点での優位性／脆弱性	現在の開発状況から十分に優位性、脆弱性が判定できる範囲で整理
優位性の安定性／脆弱性の継続性	将来競合企業の台頭によりどの程度変化するかという観点から整理

As a result, the model is able to capture the complex relationships between the variables and provide a more accurate prediction of the outcome. The model is trained on a dataset of 10,000 samples, and the results show that the model is able to predict the outcome with a high degree of accuracy. The model is able to capture the complex relationships between the variables and provide a more accurate prediction of the outcome. The model is trained on a dataset of 10,000 samples, and the results show that the model is able to predict the outcome with a high degree of accuracy.

電動航空機用超電導モーターのサプライチェーン及び優位性／脆弱性

現在想定可能なサプライチェーン		想定される供給者	優位性		脆弱性	
			現時点での優位性	優位性の安定性	現時点の脆弱性	脆弱性の継続性
超電導モーター本体						
		超電導線材				
		超電導コイル形成				
		冷却システム				
		ケーシング				

電動航空機用ジェネレーターのサプライチェーン及び優位性／脆弱性

現在想定可能なサプライチェーン		想定される供給者	優位性		脆弱性	
			現時点での優位性	優位性の安定性	現時点の脆弱性	脆弱性の継続性
ジェネレーター本体						
		磁石				
		軟磁性体				
		パワー半導体				
		耐熱絶縁被膜				

電動航空機用バッテリーのサプライチェーン及び優位性／脆弱性

現在想定可能なサプライチェーン	想定される供給者	優位性		脆弱性	
		現時点での優位性	優位性の安定性	現時点の脆弱性	脆弱性の継続性
Li-Sバッテリー本体					
	正極				
	負極				
	硫黄				
	カーボン材料				
	金属リチウム				
	被膜				
	電解液				
	セパレータ				

1.4

適切な支援・施策へ
向けた示唆

調査を通じ、重要部材開発へ向けた必要な支援のほか、重要部材開発の波及効果、他産業との技術の共通性について、有用な示唆が得られた

求められている支援について	➤ 現在開発中の技術が航空機に採用されるための、資金援助、認証支援に加え、日本の優れたエレクトロニクス技術、素材技術を有する企業の、航空機業界への参入が求められていることが分かった
電動航空機の重要部材開発の波及効果について	➤ 将来、電動航空機のニーズが低下したり、現在開発中の技術が航空機に採用されなかったとしても、最先端の電動化技術は“空飛ぶクルマ”等、他分野への技術的波及効果を有していることが分かった
他産業との技術の共通性について	➤ “空飛ぶクルマ”との親和性については、参入が検討できるという意見のほか、特に耐空性の面からの要求性能、業界構造の違いがあり、空飛ぶクルマで採用された実績が、そのまま電動航空機の重要部材で求められる実績として機能しない可能性があることが分かった

2

製造技術分析

2.1

エンジン関連技術

調査内容一覧

No	調査対象国	調査項目
1	ロシア	①航空機への活用を目的としたCMC研究開発の支援 ②CMC設備投資の支援 ③SiC素材をはじめとしたCMC素材の研究開発の支援
2	アメリカ	
3	イギリス	
4	フランス	
5	ドイツ	
6	EU	
7	中国	上記の①～③＋ ・ 西安市・天水市の開発支援について ・ 中国科学技術大学への政府資金投入について

調査結果の概要

No	調査対象国	調査結果		
		CMC研究開発の支援プロジェクト数	CMC設備投資の補助件数	CMC素材研究開発の支援プロジェクト数
1	ロシア	2	0	0
2	アメリカ	31	4	1
3	イギリス	15	0	1
4	フランス	6	0	1
5	ドイツ	14	1	1
6	EU	1	0	0
7	中国	7	3	0

CMC設備投資

- 米国の4件は、全てGE関連
- ドイツの1件は、元は航空宇宙センターの一部であった高性能酸化物セラミック複合材料を製造する企業に対する、独立のための投資
- 中国の3件は、国有企業である「Xi'an Xinyao Ceramic Composite Material Co., Ltd.」関連の2件と天水市政府による1件

CMC素材の研究

- 米仏が、大学におけるSiC繊維研究
- イギリス、ドイツはパワー半導体用SiCの研究

※ 10件以上 : 黄
5件以上 : 薄黄
5件未満 : 青
0件 : 灰

ロシアのCMC研究開発への補助金

国

ロシア

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額	研究タイトル	研究内容
1	ロシア科学基金	全ロシア航空材料研究所 ※国立研究センター「クルチャフ研究所」の従属組織	2018-2020	記載なし	機械的挙動の非線形性を制御した新規高分子繊維複合材料の開発と、それをを用いたターボファンエンジンの要素設計手法	- 航空機エンジンの開発においては、金属合金を複合材料に置き換えることが現代のトレンドである。このトレンドに従って、ファンの設計に複合材料を取り入れるためには、新しい構成の繊維複合材料の開発が必要である。 - また、開発された材料の性能を計測するために、材料の性能を計算するモデルの開発も必要である。 - そこで、本プログラムでは、これらの課題の解決に寄与することを目指す。
2	—	サンクトペテルブルク工科大学	—	—	不規則形状および球状SiC粉末を使用したAM技術（Binder Jetting）によるSiC/SiC複合材（炭化ケイ素繊維強化炭化ケイ素マトリックス複合材料）の製造	※外部からの資金提供は受けていない - 航空宇宙及びエネルギー産業向けCMC部品の需要は増加している一方で、従来のCMCの製造方法（LSI, CVI, PIP）では、複雑な形状の部品を製造できず、また、CMCの機械加工は費用が高い。また、AM技術は様々な材料から複雑形状を生成する可能性を持っているが、CMCのAM技術は発展途上である。 - そこで本プロジェクトでは、不規則および球状SiC粉末を使用したAM技術によるSiCf / SiC複合材の製造プロセスを調査する。 - また、AM 用途向けの球状炭化ケイ素粉末を製造するための、ミリング、噴霧乾燥および熱プラズマ処理プロセスの実現可能性についても調査を行う。

アメリカのCMC研究開発への補助金①

国

アメリカ

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
1	米国空軍	アリゾナ州立 大学	2018- 2022	805,699	スケール依存変 動の最適定量 化を含むセラミ ックマトリックス複 合材料の確率 的フレームワーク	- 目標は、複雑な熱機械負荷下での材料の挙動、システムレベルの応答、およびセラミックマトリックス複合材料(CMC)の損傷に関する基本的な理解を深めること。 - 目標の実現のために、材料の特性評価、最適な不確実性の定量化、およびマルチフィジックスモデルの研究を行う。
2	米国空軍	ECOLE NORMALE SUPERIEU RE ※フランスの 研究大学の 組織	2018- 2019	11,615	非比例多軸荷 重に対するCMC の構成モデリング	- CMCは、高温での優れた特定の機械的特性により、航空宇宙産業にとって有望な材料であるが、脆いマトリックスと繊維を組み合わせると複雑な挙動になり、材料の構造や深条件によって延性が生じる。これが部品の破損につながってしまう恐れがあることから物理的に健全なモデルとそれを検証する実験的テストが重要になる。 - 本プロジェクトでは、この物理的に健全なモデルの構築とその実験的テストの手法を確立することを目指す。
3	米国空軍	ノースカロライ ナ州立大学	2018- 2021	576,663	セラミック材料複 合体(CMC) ベースの構造に おける材料変化 の検出と評価の 方法	以下の研究を行う。 (1)材料変質応力を受けるセラミック材料複合材料(CMC)の非破壊モデル評価技術の開発 (2)確率システムのモデル比較およびモデル差異評価手法
4	米国空軍	ワシントン大 学	2019- 2021	257,572	人間と人間のよ うな知能の共通 モデルのテスト	- これまで体系的なテストが行われてこなかった認知アーキテクチャという人口知能のモデリングツールにおける、テスト体系と実行するソフトウェアの開発を目指す。 - この研究によって生み出されたツールは、CMCの実現可能性を検証するために利用される。

アメリカのCMC研究開発への補助金②

国

アメリカ

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
5	米国空軍	・パデュー大 学 ・ロールスロ イス	記載な し	記載なし	ラマン分光法を用いたSiC/SiCセラミックマトリックス複合材料に対する熱処理の影響の測定	この研究は、別の研究にてラマン分光法を用いて測定された、ホウ素活性化現象への洞察を深めるために、熱処理によるSiC/SiC CMCの内部で見られる残留応力の進化をラマン顕微分光法を用いて調査した。
6	米国空軍	リバプール大 学	2017- 2018	150,361	セラミックマトリックス複合材料の微細構造損傷の特性評価/シミュレーションから得た情報豊富なデータフィールドの定量的比較	プロジェクトの目的は、連続繊維強化CMCの損傷の特性評価、シミュレーションに関するAFRL研究で取得したデータの分析を通じて、変位場とひずみ場の分解に関する理解を進めること。
7	米国空軍	リバプール大 学	2020- 2023	191,000	繊維強化複合材料の微細構造と損傷評価	- No.6の研究の続編に位置づけられる。 - プロジェクトの目的は、連続繊維強化CMCの損傷の特性評価、シミュレーションに関するAFRL研究で取得したデータの分析を通じて、変位場とひずみ場の分解に関する理解を進めること。
8	米国空軍	バーミングハム 大学	2017- 2018	10,000	超高温セラミックス: 極限環境用材料 IV	本プロジェクトでは、超高温セラミック (UHTC) 化合物の特性をCMCの概念と組み合わせることで、超高温CMC (UHTCMC) という新しい種類の材料を開発することを目指す。

アメリカのCMC研究開発への補助金③

国 アメリカ

対象 CMC研究開発
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
9	米国空軍	フロリダ農業 機械大学	2017- 2020	333,022	超高温ポリマー 由来セラミックス からなる導電性 セラミック複合材 料の電磁特性	本プロジェクトでは、高温環境で用いる導電性CMCの研究開発を目指す。
10	米国空軍	・クイーンメア リー&ウェスト フィールド大学 ・ロンドン大学	2017- 2020	274,308	電流を使用した 異種材料の接 合: フラッシュア プローチ	高融点金属とCMCを接合する最先端の技術は成熟しておらず、利用可能な接合方法がないか、処理する材料に損傷を与えてしまうというのが現状である。この課題を解決することが、プロジェクトの目的である。
11	米国空軍	ノースカロライ ナ州立大学	2020- 2021	223,100	超高温セラミック (UHTC) 強化 セラミック複合材 料の周波数依 存性および温度 依存性電磁気 特性に対する熱 分解温度とドー パントの影響	本プロジェクトでは、超高温セラミック (UHTC) 強化CMCの周波数依存性や温度依存性誘電率に対する熱分解温度とドーパントの影響を研究し、幅広い用途での活用が可能になることを目指す。
12	米国空軍	テキサス大学	2021- 2024	150,000	HF合金の反応 性湿潤による B4C充填層への 溶け込みを利用 したセラミック複 合材料の形成	(Hf, Ti, Nb, Ta)B₂-(Hf, Ti, Nb, Ta)C 複合材料を形成するための B₄C による Hf-Ti-Nb-Ta 合金溶融物の反応性湿潤を調査する。 - 研究の最終的な目標は、超高温セラミック複合材 (UHTCC) の耐酸化性を大幅に向上すること。

アメリカのCMC研究開発への補助金④

国

アメリカ

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
13	米国空軍	マサチューセツ大学	2021-2024	149,952	高温高強度複合材料のための物理ベースのプロセスモデリング	- 研究の目的は、実験的に検証されたプロセスモデリングを通じて、高温および高強度用途向けの複合材料の製造中の残留応力形成および熱分解による微小亀裂の基本的なメカニズムを理解すること。 - 研究によって実験的に検証された新しい CMC のプロセス モデリング機能をもたらし、プロセス パラメータ、微細構造、および複合材の性能の間の相関関係を確立されることが期待されている。
14	米国海軍	ブラウン大学	2016	300,000	ガスタービンエンジン用セラミックコーティングの敵対的環境劣化とその緩和に関する研究	- TBC（遮熱コーティング）のCMAS（Calcium-Magnesium-Aluminosilicate）劣化に関する研究は進められているものの十分ではない。そこでCMASとT/EBC間の相互作用の科学的側面に対処するために、物理化学、微細構造の進化、反応速度論、および熱/機械特性の概念を使用して、さまざまなT/EBC材料の包括的な研究を行う。 - 研究の最終的なゴールは、T/EBCsとCMASの相互作用を予測できるようにすることと、CMC向けの次世代のT/EBCsの設計や実証に示唆を与えることである。
15	米国海軍	ヴァージニア大学	2016	240,554	SiCベースのセラミックマトリックス複合材料の高温腐食の続き	- 本プロジェクトでは、SiC/BN/SiCの、高温腐食に対する挙動を明らかにする。 - 加えて、関連する繊維及びマトリックス材料の更なる高温腐食に関する研究を行うことで、高温腐食の耐性がある素材を明らかにすることを目的としている。

アメリカのCMC研究開発への補助金⑤

国

アメリカ

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
16	米国海軍	エンジニアリングカンファレンスインターナショナル	2017-2018	5,000	材料の科学と技術、設計、アプリケーション、性能、および統合に関する会議	※研究を促進するために開かれるカンファレンスを支援するプロジェクト - 開催されるカンファレンスについては以下の通り。 - 材料開発からタービン部品としての応用までCMCのすべての研究開発と応用の側面が対象。 - ガスタービンへの利用と、その実現のためのコーディングは重要なテーマのひとつ。
17	米国海軍	バージニア大学	2018-2021	394,630	希土類ケイ酸塩環境バリアコーティングの高温腐食	研究の目的は、利用されるSiCベースのCMCをタービンエンジンの高温部で使用するために必要な、最先端のコーディングである希土類ケイ酸塩EBCにおいてコーディングを安定させる手段を明らかにすること。
18	米国海軍	アクロン大学	2018-2021	375,000	電気抵抗を利用した非酸化物高温複合材料および構造のヘルスマonitoring戦略	- 非酸化物CMCの利用する上で必要な、劣化と耐用期間についての理解を深めるために、劣化のメカニズムを明らかにする必要がある。電気抵抗による劣化が与える構造変化の考察がアプローチである。 - 研究成果は、航空エンジン用途向けのSiC/SiC複合材料の更なる調査に利用されることを想定している。

アメリカのCMC研究開発への補助金⑥

国 アメリカ

対象 CMC研究開発
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
19	米国海軍	旧ドミニオン 大学研究財団	2021- 2024	560,000	混合希土類ジルコニア、ジルコン酸塩、ケイ酸塩の放射バリアコーティングの合成と特性評価	- CMCをガスタービンエンジンの高圧タービンで利用される超合金及びシリコンベース遮熱コーティング（TBC）と耐環境コーティング（EBC）は近赤外波長放射に対して、遮断性がないため専用のコーティングが必要である。 - 本プロジェクトでは、そのコーティングを実現するために、コーティング素材の候補として挙げられている、混合希土類ジルコニア、ジルコン酸塩、ケイ酸塩の合成について特性の評価を行う。
20	米国海軍	ジョンズ・ホプ キンス大学	2021- 2024	612,914	RFアパーチャ複 合材料用の高 度なセラミックファイバー	- 高度なセラミック繊維ベースのCMCは、繊維材料とその構造によって機能的性能に制限がかかっている。 - 本プロジェクトでは、制限を取り払ったうえで、より高度な機能や熱耐性をもったCMCを実現するために、CMCの新たな材料を発見することを目指す。
21	米国海軍	AMERICAN LIGHTWEIGHT MATERIALS MANUFACTU RING INNOVATION INSUTITUTE	2021- 2023	3,613,236	ALMMII - 極 超音速熱管理 研究 - フェーズ 2	- 極超音速機に適した新しい材料と関連する接合技術の開発を目的として、新たな高度金属合金、セラミック、CMCの研究を行う。 - 研究にあたっては、ICME (Integrated Computational Materials Engineering) モデルを使用した仮想/シミュレーション環境を用いる。

アメリカのCMC研究開発への補助金⑦

国

アメリカ

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
22	米国海軍	HRL LABORAT ORIES	2022- 2024	456,212	ポリマー由来セラ ミックスと AM 用 の工学的補強 材との階層的統 合 (HIPER)	本プロジェクトの目的は、防衛装備に利用することを前提に高靱な CMC を迅速に製造するためのフレームワークを提供すること。
23	米国海軍	マサチューセツ 工科大学	2022- 2025	450,000	極端な靱性、強 度、および多機 能性のためのバ ルクセラミックスの 長いナノファイ バー補強	- 本プロジェクトでは、現在可能な範囲をはるかに超える極端な体積分率とナノファイバー長かつ強靱なナノファイバー強化バルク セラミックスを作成するために、新しいプラットフォームを確立することを目指す。 - 最終的に、次世代の強靱なナノファイバー強化軽量CMCを開発するためのプラットフォーム技術となることが期待されている。
24	米国海軍	ケンブリッジ大 学	2022- 2025	420,665	高温腐食におけ る熱化学機械 結合をモデル化 する新しいアプ ローチ	本プロジェクトでは、SiCベースのCMCの保護する環境コーディング（EBC）と遮熱コーディング（TBC）の耐久性を高めるために、熱機械的な相互作用を明らかにする。

アメリカのCMC研究開発への補助金⑧

国

アメリカ

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
25	米国陸軍	テキサス工学 実験ステー ション	2018- 2021	393,720	炭化ケイ素構造 を生成するた めのナノ充填ポリ カルボシランの高 速 RF ベース硬 化	本プロジェクトの目的は、軽量複合材料、半導体、およびレーダーまたは電源管理用の硬質基板として、幅広い防衛および航空宇宙のニーズを満たすために頻繁に利用されているSiCベースのCMCの元となる、SiCへの理解を深めること。
26	米国陸軍	ISTEC CNR ISTITUTO DI SCIENZA E TECNOLOG IA DEI MATERIALI CERAMICI ※イタリアの研究機関	2021- 2024	452,492	C繊維強化超 高温セラミック複 合材料の液相 焼結 (INFINITE)	本プロジェクトの目的は、防衛装備品に利用する場合、遮熱コーティングや耐熱コーティングが必要になる既存のCMCに対して、これらが必要ない強化超高温セラミック複合材料（UHTCMC）を生み出す手法として、液晶焼結への理解を進めること。
27	米国空軍	ケンブリッジ大 学	2017- 2020	224,524	ナノ構造の強く て強靱な鋼	本プロジェクトの目的は、高強度鋼の結晶粒構造の成長と進化の理解を深め、定量モデルに表し、鋳造および/または鍛造ルートによって製造できる靱性を強化するために設計された微細構造を備えた合金を可能にすること。

アメリカのCMC研究開発への補助金⑨

国 アメリカ

対象 CMC研究開発
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
28	米国海軍	MICROMECHANICS & COMPOSITES LLC,	2014-2015	150,000	セラミックマトリックス複合材料のマルチフィジックスプロセスにおけるマイクロメカニカルモデリングとシミュレーション	- このプロジェクトの目的は、物理ベースの計算ツールを開発して、新しいCMCの製造プロセスや構造のテストのコストを最適化し、削減することである。 - 具体的な内容としては以下が挙げられる ① シリンダーのランダムベッドからなる多孔質媒体への浸透の線形および非線形マイクロメカニカルモデルの開発 ② 粒子充填樹脂の含浸成形のための物理学に基づくモデルの提案 ③ 周囲のギャップ内の繊維など、2つの異なるスケールの細孔を含むデュアルスケールの多孔質媒体の開発 ④ 局所的な確率的残留応力と有効破壊包絡線の両方の推定による、凝固モデルの開発 ⑤ 利用可能な CMC モデルとの比較による検証 ⑥ 材料技術者が容易にアクセスできるソフトウェアでの、新しいモデルの実装
29	科学局 (DOE SC)	Free Form Fibers	2020-2022	1,300,000	超薄型 3D セラミック マトリックス 複合クラッド	- CMCは核燃料コンポーネントに用いることが期待されているが、まだ性能的な課題がある。具体的には以下の通り - 製造に起因する損傷による強度と熱伝導率の低下 - 各環境における材料の環境応答 - これらの課題を解決するために、マイクロトレリスと呼ばれる不織デザインを用いて、安全で効率的な燃料設計を実現する。 - 不織構造は残留気孔率が大幅に減少することで、製造に起因する欠陥大きく削減できる。 - このマイクロトレリスの開発は、原子力のみならず、航空、宇宙、ガスタービンなど幅広いアプリケーションにおける革新を引き起こすことが期待されており、CMC製造コストを大きく削減する可能性がある。

アメリカのCMC研究開発への補助金⑩

国

アメリカ

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
30	科学局	Free Form Fibres	2021- 2022	206,500	炭化ケイ素繊維 強化炭化ケイ素 マトリックス複合 材料の均一接 合	- このプロジェクトの目的は、均質な結合の機械的特性の評価である。この均質な結合は、原子力発電所での活用を念頭に置いており、部品同士の密閉接合を経済的に実現するためのアプローチである。素材として、炭化ケイ素を用いる。 - この調査の目標が成功すれば、事故に強い燃料被覆管を実現でき、公衆に大きな利益をもたらすと考えられる。
31	DOE	オークリッジ国 立研究所	記載な し	記載なし	ジルコニウム、ニ ホウ化ケイ素炭 化物複合材料 レビュー	- ニホウ化ジルコニウム及び炭化ケイ素複合材料はニホウ化ジルコニウムが観察されて以来、長い間関心が寄せられてきたが、焼結温度の違いや、熱力学的安定性の違いのために加工が困難なことが課題であった。 - そこで本研究では、それぞれの製造方法の長所と短所の評価を行う。

アメリカのCMC設備投資への補助金

国 アメリカ

対象 CMC設備投資
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	支援に関する情報
1	ノースカロライナ 州商務省	GE Aviation	記載なし	558,700	▶ CMC関連の設備拡張への利用かについては記載がないが、ノースカロライナ州での施設拡張に対して、ノースカロライナ州商務省からの支援が行われた。 ▶ 支援にあたっては、ノースカロライナ州経済開発パートナーシップ「One North Carolina Fund」の枠組みが利用された。
2	①ハンツビル市 ②ハンツビル産業開発委員会 ③マディソン郡 ④ライムストーン群	GE aviation	2015	※投資元機関と投資金額が紐づいている ①1,000,000 ②1,500,000 ③500,000 ④150,000	▶ アラバマ州のハンツビルに2億円投資して、CMCを製造するための炭化ケイ素材料を生産する2つの工場を建設する際に、ハンツビル市から100万ドル、ハンツビル産業開発委員会から150万ドル、マディソン郡から50万ドル、ライムストーン群から15万ドルの支援を受けている。 ▶ その他にも工場のアクセスを改善するために橋の建設の助成なども受ける予定である。
3	アッシュビルバン コム群の経済 開発連合	GE aviation	2013 -2018	875,000	▶ ノースカロライナ州アッシュビルに、CMCを用いたエンジン開発のための2つの工場を設立する際、1億2600万ドルを企業として投資したが、これに対して、経済開発連合からの支援を受けた。 ▶ 工場のうち一つは、CMC製造用である。
4	経済開発調整 評議会	Advanced Ceramic Coatings	2016	250,000	▶ GEが製造するCMC部材用の高度なコーディングを実現するための製造施設をサウスカロライナ州ダンカンに立ち上げた際に、経済開発調整評議会から支援を受けた。

アメリカのCMC素材研究開発への補助金

国

アメリカ

対象

CMC素材研究
開発への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
1	米国空軍	ニューサウス ウェールズ大 学	2020- 2023	100,000	プレセラミックポリ マー、中間相、 および最終セラ ミックスの原子ス ケール構造の理 解：極限環境 向けの調整可能 な SiC ベースの 複合材料に向け て	目的は、高度な航空宇宙用途向けのプレセラミックポリマーに由来するセラミックごとの材料の構造、特性の関係を明らかにし、極限環境向けのSiCベースのCMCの研究開発を促進すること。

イギリスのCMC研究開発への補助金①

国

イギリス

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ポンド)	研究タイトル	研究内容
1	Innova te UK	・Nccオペレーション ・シェフィールド大学 ・製造技術センター	2021 - 2022	671,968	CMC 開発、製 造可能性、およ び修理可能性 (CERCOMP U K)	材料サプライ チェーン、低コストの代替手段、材料処理、性能ベンチ マーク、機械加工、検査、製造施設の要件、および修理作業を対象 として、CMCに関連する研究を実施する。
2	Innova te UK	・ロールスロイス ・スウォンジー大学 ・インペリアル・カレッ ジ・ロンドン	2014 - 2017	6,302,733	プロジェクト 19、 CMC および高 温技術	- 民間航空宇宙ガスタービンの競争力は、より高温のコアターボ機械と より高温でのパフォーマンスを実現するかに依存している。 - そこでこのプロジェクトでは、新しい高温タービン機能の開発に焦点を 当てて、コアタービンへのCMCの適用の可能性を調査する。合わせて 新しい合金科学やコーティングの開発などの技術も合わせて研究する。
3	EPSRC	バーミンガム大学	2009 - 2012	424,953	エネルギー生成 ガスタービン用途 向けの高度なセ ラミックマトリッ クス複合材料	- より高温での動作を可能にし、エンジン効率を高めるために、発電用 ガスタービン用途に使用する高温酸化物/酸化物セラミックマトリックス 複合材 (CMC) を開発する必要がある。 - そこでプロジェクトでは、CMCの材料、その故障/劣化メカニズム、最適 化された製造プロセス、NDE の寿命と修理の問題についての基本的 な理解を進めることを目的として研究を行う。
4	EPSRC	・ロールスロイス ・スウォンジー大学 ・アドバンスコンポジッ トグループ	2009 - 2012	254,217	エネルギー生成 ガスタービン用途 向けの高度なセ ラミックマトリッ クス複合材料	※研究タイトル、内容は同一だがNo.3とは別プロジェクト - より高温での動作を可能にし、エンジン効率を高めるために、発電用 ガスタービン用途に使用する高温酸化物/酸化物セラミックマトリックス 複合材 (CMC) を開発する必要がある。 - そこでプロジェクトでは、CMCの材料、その故障/劣化メカニズム、最適 化された製造プロセス、NDE の寿命と修理の問題についての基本的 な理解を進めることを目的として研究を行う。

イギリスのCMC研究開発への補助金②

国

イギリス

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ポンド)	研究タイトル	研究内容
5	Innova te UK	・ロールスロイス ・スウォンジー大学 ・バーミンガム大学 ・Cytec Industrial Materials (Derby) Limited	2008 - 2012	395,596	エネルギー生成 ガスタービン用途 向けの高度なセラミックマトリックス複合材料	・ 目的は、ガスタービン用途における酸化物/酸化物セラミックマトリックス複合材 (CMC) の実装に必要な技術を開発すること。 ・ CMCは英国外で開発されているが、これらの材料は高価であり、材料およびその実装に必要な実現技術の大部分には輸出規制または競争障壁が存在しているという背景があり、高温CMCの製造と実装の技術を保有することは英国内のハイテク産業にとって大きな利益がある。 ・ プロジェクト内では、CMCの開発の他に、以下の研究も行う。 ①CMC用の熱/摩耗性コーティングの開発 ②物理的および機械的特性と故障/劣化メカニズムに関する材料の特性評価 ③ラミネートとサブエレメントを検査するための非破壊評価 (NDE) 技術の評価 ④酸化物/酸化物CMCのライフリング方法論の開発 ⑤CMC とそのコーティングの潜在的な修復技術のレビュー ⑥プログラム中に確立された製造プロセス、設計コンセプト、およびライフ方法の有効性を証明するためのサブ要素検証テスト
6	EPSRC	・スウォンジー大学 ・ロールスロイス	2018 - 2022	記載なし	CMC における 局所的な応力 による環境誘起 損傷伝播	・ このプログラムでは、CMC の劣化メカニズム耐用期間を延ばすことに寄与することを目指す。具体的には以下の通り。 1. 水蒸気環境における冷却孔の応力上昇機能の影響の定量化/定量化 2. 蒸気疲労試験片の詳細なフラクтураフィ特性評価 3. X-CT などの高度な特性評価技術や蒸気環境での損傷モニタリング方法の調査 4. 応力集中時の環境損傷に対する環境バリア コーティング (EBC) の影響の把握

イギリスのCMC研究開発への補助金③

国

イギリス

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ポンド)	研究タイトル	研究内容
7	EPSRC	・マンチェスター大学 ・カルフォルニア大学 ・Hitco Carbon Composites ・Goodrich ・ロールスロイス ・Rockwell International ・Alstom ・ロールスロイス	2007 - 2010	290,846	ひずみ誘起損傷、熱特性の劣化、およびセラミックマトリックス複合材料の応力-ひずみ応答の結合	・ 製造中の気孔率/損傷、歪みによる損傷、熱特性の劣化、織られたセラミックマトリックス複合材料 (CMC) の応力 - 歪み応答の間の結合のモデリングを研究する。
8	EPSRC	・Martin Bache ・Steven Jordan	2017 - 2020	記載なし	Environmental degradation of SiC/SiC	・ 湿気の多い環境や海洋環境におけるSiC/SiC素材のCMCの安定性と、その安定性が機械的性能にどのように影響するかを調査する。具体的には以下の通り。 1. 環境暴露が単調構成性能にどのように影響するかを定量化/定量化する。 2. ひずみ (損傷) の発生が環境暴露の影響を受けるかどうかを確認する。 3. 疲労負荷体制全体を通して、酸化/環境暴露の影響下での損傷の進行を監視する。 4. 環境への曝露による破壊形態の特性を明らかにし、最終的な機械的性能と関連させる。

イギリスのCMC研究開発への補助金④

国

イギリス

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ポンド)	研究タイトル	研究内容
9	EPSRC	・ブリストル大学 ・ロールスロイス ・オックスフォード大学 ・カラム核融合研究センター ・ウェスティンハウスエレクトリック ・バークリー国立研究所 ・バーミンガム大学 ・ヘンリーロイス	2020 - 2023	277,789	極限条件下でのセラミックマトリックス複合材料の損傷と破壊の機構的理解	・ガスタービンエンジンコアに利用することで、動作温度を上昇させ、空冷の必要性を減少させることで、優れた燃料効率を実現するCMCは、損傷および故障メカニズムの進化と、それらが極限条件下での固有の処理 - 微細構造 - プロパティの関係にどのように関連するかが正しく理解されていないことが課題である。 ・そこで本プロジェクトでは、独自の段階的に変化するリアルタイム 3D イメージング手法を使用して、潜在的な使用条件を代表する超高温 (1000°C から 1800°C) でのCMCの変形と破壊を捉えることを目指す。
10	EPSRC	・スウォンジー大学 ・ロールスロイス	2019 - 2023	記載なし	セラミックマトリックス複合材料の状態評価と損傷モニタリング	・プロジェクトの目的は、ガスタービンエンジン内の高温部に利用されているCMCについて、さらなる商用利用に向けてCMCの状態評価と損傷監視に適用できる技術を調査すること。 ・マイクロ波誘電分光法、動的弾性率損失などの方法が候補として挙げられている。
11	EPSRC	ブリストル大学	2021 - 2025	記載なし	連続体損傷と疲労破壊応答の複合シミュレーション	・プロジェクトでは、Ox/Ox CMC特性に基づいた適切な疲労モデリングの開発を目的に、ONERAによる公開された疲労モデリング作業のレビュー/評価や、指示された CDM とダウンセレクトを含むスミアド クラック連続体損傷モデルの比較を行う。
12	EPSRC	・ブリストル大学 ・オックスフォード大学 ・ロールスロイス	2017 - 2021	記載なし	セラミックマトリックス複合材料の進行性損傷のマイクروسケール分析	・プロジェクトの目的は、CMCを次世代航空宇宙産業の推進力に利用するために、耐荷重要素の設計を行う際に重要になる稼働中の機械的特性を明らかにすること。 ・このプロジェクトでは、単一繊維レベルからフルスケールのラミネートまで、マルチスケールでアプローチする。

イギリスのCMC研究開発への補助金⑤

国

イギリス

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ポンド)	研究タイトル	研究内容
13	EPSRC	・カーディフ大学 ・エアバス ・スタンフォード大学 ・ポリッシュ科学学院	2021 - 2024	366,230	CyberSHM に 向けて: 運用中 の複合構造の自 律的な音響超 音波ヘルス モニ タリング	- このプロジェクトの目的は、次世代の航空宇宙やエネルギーインフラなどに用いる複合構造の課題を解決すること。 - 具体的には、構造物が利用される製品の多くが微細な損傷すら故障につながる精密なものであるため、損傷を以下に感知するかが重要な課題である。
14	EPSRC	カーディフ大学	2017 - 2021	記載なし	損傷の自己監 視機能を備えた グラフェン/セラミ ック複合材料の開 発	- プロジェクトの目的は、航空機のブレードをはじめ様々な機器で用いられる新しいグラフェン/セラミック複合材料において、損傷感知機能を備えた新たな素材を開発すること。 - 実現すれば、予期せぬトラブルによる機器の利用停止コストを削減することが期待されている。
15	EPSRC	マンチェスター大学	2016 - 2020	記載なし	航空宇宙用途 向け複合材料の 損傷評価のため の分散ピエゾ光 学アクティブ セン シング	- プロジェクトの目的は、航空宇宙用途の複合構造における損傷表のための分散ピエゾ光学アクティブセンシングを開発すること。 - 材料性能の構造健全性モニタリング（SHIM）は、安全で効率的で経済的に実現可能な運用を継続するための重要な技術である。

イギリスのCMC素材研究開発への補助金

国	イギリス
対象	CMC素材研究 開発への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ユーロ)	研究タイトル	研究内容
1	Innovate UK	・ロールスロイス ・Compound Semiconductor Applications ・Semelab ・ダーラム大学	2019- 2020	322,879	航空宇宙向けの炭化ケイ素技術 (SiCTAA)	・本研究では、航空宇宙における落雷保護およびパワーエレクトロニクスアプリケーションで使用するための新しい炭化ケイ素ジャンクションゲート電界効果トランジスタデバイスのサプライチェーンを開発する。 ・実現すれば、より多くの電動エンジンを易化するために、より高温の耐性と耐放射線性の電子機器を提供する。

フランスのCMC研究開発への補助金①

国

フランス

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ユーロ)	研究タイトル	研究内容
1	ANR	・LCTS熱構造複合材料研究所 ・IRCERセラミックス研究所 ・Sceサフランセラミックス	2022 - 2024	290,736	PIP-CVI ハイブリッド プロセスを考慮した高温用途向けの微結晶 SiC/Si3N4 マトリックス複合材 – MATRIX	- 次世代航空機において重要な脱炭素化を実現するために、機体の軽量化やエンジンの効率化の実現のためにCMCは重要である。 - 本研究は、そのCMCの開発の中でも、熱機械特性と 1450°C (~ 2700 F) での長時間の使用に適合する寿命を提供する三元シリコン-炭素-窒素 (Si-CN) システムに基づく組成の CMC の開発に焦点を当てる。
2	ANR	・LCTS熱構造複合材料研究所 ・FAMA数値研究所 ・SCヘラクレス	2017 - 2021	456,448	航空推進用の仮想自己修復複合材料 – ViSCAP	- 自己修復性CMCは熱的、機械的、化学的要求が厳しい環境においても長い寿命を誇り、民間航空機のエンジン部分への貢献が期待されている。ただし、利用するためには、耐用期間を正確に把握する必要がある一方で、腐食の過程などを把握できていないために耐用期間の把握が難しい。 - そこで、本研究では、理解をより深めるために、自己修復性CMCを数学的にモデリングすることを目指す。
3	ANR	・CIRMAT材料研究センター ・MATEIS材料科学研究所 ・CETIM材料産業研究センター ・LTDSトライボロジーシステムダイナミクス研究室	2021 - 2024	533,693	トライボロジー用多機能グラフェン強化セラミックベース複合材料 – GReC	- 機械システムの摩擦、摩耗に関連する現象を制御することは環境配慮の観点で重要な課題であり、適切な素材を用いることはこの解決に寄与する。これに加えて、環境にやさしい水性潤滑剤との適合性を持った素材を用いることも重要である。 - そこで、本研究では、グラフェンで強化されたシリコンベースのCMCの開発を目指す。

フランスのCMC研究開発への補助金②

国

フランス

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ユーロ)	研究タイトル	研究内容
4	ANR	・CORIAエアロサー モケミストリー研究室	2020 - 2023	235,116	効率的な材料を用いた壁近傍エネルギープロセス - WALL-EE	- 次世代航空機エンジンにCMCを用いるためには、熱管理が技術的な課題として挙げられる。 - そこで、本研究では、最先端の研究設備を用いて、CMCの熱管理をより容易にするために、CMCの熱負荷メカニズムと冷却性能の調査を行う。
5	ANR	・アルケマ ・PIMM (CNRS 等の共同研究ユニット) ・エアバス ・Institut Pprime (CNRS 研究所のひとつ)	2015 - 2019	541,722	PEKKの機械的性能と負荷および環境に耐える能力の調査	- 繊維強化熱硬化性複合材料が航空用途の要求を実現すれば、リサイクル性が高いため、環境貢献度の高い材料である。 - 本プロジェクトは、「高温」部品用の連続炭素繊維で強化された熱可塑性マトリックスなどの有機マトリックス複合材料の使用を扱う。具体的には、約180°C、つまり熱可塑性マトリックスのガラス転移温度を超える温度での構造用途に新世代の C/PEKK 複合材を使用することを指す。 - この研究の革新的で野心的な側面は、これらの温度レベルでの長期的な要請に対するこれらの複合材料の熱機械的挙動を予測することを目的としたモデルとシミュレーションツールの開発である。
6	ANR	・LFP Perrin研 究所 ・パリ凝縮物質科学 研究所 ・UCCS (フランス の研究所) ・SPCTS (フラン ス最大のセラミック 研究所)	2013 - 2017	594,775	コア/シエルの設計: ZrC/SiC ナノコンポジット	- 本プロジェクトでは、新しいコアシェル ZrC/SiC ナノコンポジットの開発を扱う。非酸化物系の開発は、合成アプローチを考慮すると難しいものであり、原子力および航空分野または鉄鋼産業における構造材料の使用に強い関心を示す可能性がある。 - 本プロジェクトでは、合成プロセスの各段階で、微細構造解析と組み合わせた密度汎関数理論 (DFT) を使用して、表面現象の理論的アプローチが行われる。

フランスのCMC素材研究開発への補助金

国

フランス

対象

CMC素材研究
開発への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ユーロ)	研究タイトル	研究内容
1	ANR	・IEM（欧州の研究 所のひとつ） ・CME（ドイツ・バイ ロイト大学の研究 室） ・	2015 - 2018	228,960	有機金属化合物で修飾されたポリシラザンからの機能性炭窒化ケイ素ベースの新しいクラスのセラミック繊維 - 炭素繊維	・ 本プロジェクトの目的は、実験的および理論的なアプローチを通じて、非酸化セラミック繊維について、従来の炭化ケイ素繊維（SiC）と比較して、問題点を明らかにすること。 ・ このプロジェクトが実現することで、コストの削減と高い機能を両立することが期待されている。

ドイツのCMC研究開発への補助金①

国	ドイツ
対象	CMC研究開発への補助金

No	投資元機関	投資先企業/機関	投資年	投資金額(ユーロ)	研究タイトル	研究内容
1	ドイツ研究財団 (DFG)	・ケムニッツ大学 ・バイロイト大学	2017-2020	記載なし	多層コーティングされた SiC 繊維と水ベースのスリップに基づくセラミック マトリックス 複合材料	- 航空宇宙、エンジンコンポーネント等の金属合金やその他の材料が耐えられない高い熱機械的負荷がかかる環境、ブレーキディスク、エレベータシステムのブレーキ等安全関連コンポーネント、その他軽量かつ強度が求められるコンポーネントなどでの利用を想定して、CMCの中で最も重要な繊維強化セラミックスの開発を行う。 - マトリックスの繊維強化は2つの材料を組み合わせることで、セラミック特有の性能（低密度、高温耐性、腐食および耐摩耗性等）を実現するものである。 - 本プロジェクトでは、このマトリックスにおいて、高密度でシリコンを含まない耐酸化性や耐腐食性をもったSiC/SiC複合材料の実現を目指す。
2	ドイツ研究財団 (DFG)	バイロイト大学	2021-2024	記載なし	付加的に製造された熱可塑性樹脂ベースの短繊維および連続繊維強化 C/C-SiC 複合セラミックの開発と特性評価	- 本プロジェクトの目的は、複合セラミックスの応用可能性を高めるために、CFRP生産におけるCファイバーの付加的で自動化された負荷指向の配置を実現すること。 - 実現すれば、C/SiC材料の熱物理特性をこれまで以上に変更できるようになり、活用先が広がることが期待されている。
3	ドイツ研究財団 (DFG)	アウグスブルク大学	2005-2011	記載なし	高温における繊維複合セラミックスの機械的挙動のモデル化	- 本プロジェクトの目的は、損傷力学の既存の法則と可塑性の理論を拡張し、強化セラミックスの挙動を包括的にモデリングすること。 - 本プロジェクトでは、前プロジェクトで開発されたセラミック繊維複合材料の機械的挙動を定量的に説明できる材料モデルの基礎を活用する。

ドイツのCMC研究開発への補助金②

国 ドイツ

対象 CMC研究開発
への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ユーロ)	研究タイトル	研究内容
4	ドイツ研究財団 (DFG)	ドイツ航空宇宙 センター	2003- 2004	記載なし	セラミック繊維織物の表面機能化とコーティングによるLSIプロセスにおける繊維強化SiCセラミックスの微細構造設計	- 本プロジェクトの目的は、炭素ベースの繊維コーティングの仕様と、コーティングされた繊維の標的表面機能化によって液体シリコン処理プロセスを使用して製造された CMC 材料の破壊靱性と損傷耐性を高めること。 - 本プロジェクトでは、革新的なアプローチが用いられており、繊維セラミックスの微細構造にコーティングとその後の組織表面の機能化に影響を与えることを目指す。
5	ドイツ研究財団 (DFG)	アーヘン工科大学	2019-	記載なし	SiC-SiC セラミックマトリックス複合材料の研削の平滑粒子流体力学 (SPH) モデリング	- 本プロジェクトでは、炭化ケイ素繊維で強化された炭化ケイ素セラミックス (SiC-SiC) の研削時のチップング及び損傷メカニズムを Smooth Particle Hydrodynamic (SPH) 法で調査する - 実現した際には、熱安定性が高いSiC-SiCを航空や発電のタービンに活用できるようになる。現状では、SiC-SiCを研削する際の機械加工および損傷メカニズムは十分に知られていないため、プロセス結果を予測することはまだ不可能であり、したがって実際の製品への活用には制限がある。
6	ドイツ研究財団 (DFG)	ハンブルク工科大学	2009- 2014	記載なし	酸化物セラミックマトリックス複合材料の低コストで信頼性の高い製造	- 高度なCMCの場合、商業利用を成功させるためには、経済的な製造方法が重要な要素である。これは特に複雑な階層構造を持ち、機械的性能と信頼性が同時に要求される複合材料、FRCMC（繊維強化セラミック複合材料）に当てはまる。高温対応、軽量化、優れた耐食性、適切な損傷耐性を誇るが、コストと性能を両立できる製造方法はない。 - そこで本プロジェクトでは、TUHH（反応結合焼結）とUFSC（AI上記浸透によるバイオテンプレートアルミナ）のコンセプトの実現などを通じて、高度な性能と低生産コストを同時に実現する方法を開発する

ドイツのCMC研究開発への補助金③

国

ドイツ

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ユーロ)	研究タイトル	研究内容
7	BMW i	フランフォーファー 研究所	2015- 2021	記載なし	繊維強化材料 システム (FaRo)	- プロジェクトの目的は、前プロジェクト「Compound Pipes」で発見された、セラミックファイバージャケットと金属ベースパイプから成る複合材料を使用して内圧を受けるパイプの経時的な変形を減らすアプローチについて、実用を妨げる課題を解消すること。 - このコーディング方法は、銅管の耐用期間を延ばすことが期待されている。
8	BMW i	フランフォーファー 研究所	記載なし	記載なし	中間温度製品 向けの低コスト CMC	- プロジェクトの目的は、中間温度(300℃~800℃)での使用を念頭に置いた通常よりも低コストなCMCを実現すること。 - 本プロジェクトでは、通常のCMCは高温(1000℃)での活用が念頭に置かれているため、セラミックや炭素繊維が用いられるが、これを玄武岩、ガラス繊維に変更することで、より低コストでの製造が可能になることを目指す。
9	記載なし	フランフォーファー 研究所	記載なし	記載なし	セラミックマトリックス 複合材料- 困難な建設作 業の代替	※公的機関からの支援を受けたかについては、記載なし - 本プロジェクトは、高靱性と耐熱性の両立が期待されたCMCの製造過程において、新たな製造方法を模索するものである。 - 本プロジェクトでは、現在、作業の難易度が高く、コストが大きい工程をセラミック繊維を利用することで代替することを目指す。
10	Clean Sky ※EUの 航空開 発コン ソーシア ム	・フランフォー ファー研究所 ・MTU Aero Engines/DE	記載なし	記載なし	酸化物セラミック マトリックス複 合材料-製造。機 械加工、特性 及び産業用途	- 熱的耐性と耐損傷性を有する高温プロセスでの用途に適したO-CMC 材料は、金属部品を 代替することで、軽量化、熱/エネルギー効率の向上、耐用年数の延長が期待されている。具体的には、フレームチューブ、リフト ゲート、充電ラックなどのO-CMC コンポーネントなどの様々な工業用高温アプリケーションでその可能性が実証されている。 - 本プロジェクトでは、ガスタービン用の O-CMC 部品の開発およびテストを行う。

ドイツのCMC研究開発への補助金④

国

ドイツ

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ユーロ)	研究タイトル	研究内容
11	記載なし	・ドイツ航空宇宙センター ・フランフォーファー研究所 ・Walter EC Pritzkow Spezialkeramik	記載なし	記載なし	市販の含浸布からの酸化物セラミックマトリックス複合材料の製造と特性評価	※公的機関からの支援を受けたかについては、記載なし プロジェクトの目的は、プリプレグを用いた多孔質マトリックスを使用した、酸化物CMCにおいて、プリプレグの種類と製造プロセスが酸化物CMCが与える影響を明らかにすること。
12	記載なし	フランフォーファー研究所	記載なし	記載なし	各種セラミックスマトリックスの高温ガス安定性	※公的機関からの支援を受けたかについては、記載なし - 本プロジェクトでは、酸化物および非酸化物CMCの高温ガス安定性を調査する。 - 高温ガス試験後の表面やバルク材料の微細構造は、試験が行われる以前の材料と比較して高温ガスからどのような影響を受けたのかを調査する。
13	記載なし	フランフォーファー研究所	記載なし	記載なし	SiC/SiCコンポジット-最高要求の実現	※公的機関からの支援を受けたかについては、記載なし 本プロジェクトでは、準延性や損傷許容性も有するゆえに航空機タービンなどの安全関連での利用が期待されるCMCにおいて、高密度のEBC保護コーディングによるコーディングでどのような特性を有するかを調査する。
14	記載なし	フランフォーファー研究所	記載なし	記載なし	レーザー技術によるセラミック繊維複合材のシーリング	※公的機関からの支援を受けたかについては、記載なし - プロジェクトの目的は、酸化物CMCに用いる新たな化子ーdhngを開発すること。 - プロジェクトでは、部品を加熱することなく、高温耐性コーディング材料を局所的に加熱及び溶融するアプローチをとる。

ドイツのCMC設備投資への補助金

国

ドイツ

対象

CMC設備投資
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額	支援に関する情報
1	High Tech Gruenderfo nds (HTGF)	WPX Faserkerami k	2012- 2014	記載なし	元はドイツ国立航空宇宙研究センター（DLR）の材料研究所であったが、高性能酸化物セラミック複合材料（OCMC）を製造する企業として、HTGFからの資金提供を基に、材料や製品の開発と流通インフラの確立し、独立した。

ドイツのCMC素材研究開発への補助金

国

ドイツ

対象

CMC素材研究
開発への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ユーロ)	研究タイトル	研究内容
1	ドイツ研 究財団 (DFG)	・アルベルト・ルート ヴィヒ大学 ・チューリッヒ高度 シミュレーション研 究所	2018 - 2022	記載なし	高純度SiCの転 位挙動の定量 的評価と予測	- 本プロジェクトの目標は、基礎研究に加えて、産業用半導体アプリケーションにおいても大きな可能性を秘めている、六法格子構造を持つ半導体の転移モデルの改善。 - プロジェクトのアプローチは、結晶成長、2Dと3Dでの実験的キャラクタリゼーション、新しい転移ダイナミクスシミュレーションの緊密な連携である。 - この物理ベースのモデリングを実現することで、冷却プロセスの最適化や成長及びプロセスパラメータの転移数を削減することが出来るようになることが期待されている。 - 本研究では、モデル材料として、SiCを扱う

EUのCMC研究開発への補助金

国	EU
対象	CMC研究開発 への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ユーロ)	研究タイトル	研究内容
1	EU	・アーヘン工科大学 ・シュンクカーボンテクノロジー ※どちらもドイツ	2015- 2020	307,259,506	航空エンジン用全 酸化物タービダク トの開発・製造	- 本プロジェクトでは、航空機エンジンのタービダクト用酸化物系CMCの開発と製造を行う。具体的には以下の通り。 - 要求仕様を満たすCMCの開発 - 性能シミュレーション - 試験用部品の製造

中国のCMC研究開発への補助金①

国

中国

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (元)	研究タイトル	研究内容
1	中国国 立自然 科学基 金会 (NSFC)	プロセス工学研 究所	2012- 2014	40,000	炭化ケイ素繊維 強化セラミックス 基複合材料の 構造制御と性能 に関する研究	- 本研究では、航空宇宙機のエンジンでの高性能複合材料としてのの応用を目的とし、化学気相法による BN 界面層の研磨と性能の研究を進める。 - 界面層の構成要素、構造、および応力状態の影響に関する詳細な研究により、界面層の構造制御は、材料力学特性との間の結合機構と結合し、分子相互溶解したポリ塩化ビニルとポリ塩化ビニルが相であることが示された前回のプロジェクトの続編である。
2	中国国 立自然 科学基 金会 (NSFC)	青島理工大 学	2018- 2021	89,000	新規セラミックス 基複合材のベ ン膜孔のレー ザー高温化合 物加工技術に 関する研究	- 本プロジェクトの目的は、複合セラミックスの応用可能性を高めるために、CFRP生産におけるCファイバーの付加的で自動化された負荷指向の配置を実現すること。 - 実現すれば、C/SiC材料の熱物理特性をこれまで以上に変更できるようになり、活用先が広がることが期待されている。
3	中国国 立自然 科学基 金会 (NSFC)	・先端セラミック 繊維及び複合 材料に関する科 学技術研究所 ・国防衛技 術大学	記載な し	記載なし	SiCf/SiC複合 材料の調製に 関する研究の進展	本研究では、これまでの製造方法では解決できない固有の問題を解決するために、近年研究開発が進んでいるSiC/SiC複合材について、性能向上を目的として、製造技術の研究の状況を整理する。

中国のCMC研究開発への補助金②

国	中国
対象	CMC研究開発への補助金

No	投資元機関	投資先企業/機関	投資年	投資金額(元)	研究タイトル	研究内容
4	・中国国立自然科学基金会 (NSFC) ・山東科学技術局 ・中国科学院	・国家重点研究所 ・上海陶磁器研究所 ・中国科学院 ・構造セラミックスおよび複合材料工学研究センター ・上海陶磁器研究所 ・無機材料分析試験センター 上海工科大学	2017	記載なし	熱処理中のSiCf/SiC複合材料の残留応力変化とその機械的挙動への影響	- CMCの機械的特性には、熱膨張の不一致に起因する残留応力が作用する。したがって、CMCの機械的特性を管理するために残留応力の正しい解析は重要な取り組みである。 - そこで、本研究では、連続SiC繊維協会SiCマトリックス (SiCf/SiC) 複合材料をナノ浸透および過渡共晶相 (NITE) 法によって製造し、高温ラマン分光計を使用して複合材料の残留応力を調査する。
5	・中国国立自然科学基金会 (NSFC) ・山東自然科学基金	・済南材料科学工科大学 ・山東省重点研究所	記載なし	記載なし	短いジルコニア繊維をドーブした炭化ケイ素ベースのセラミックスの加工と機械的特性	- CMCは航空分野でも使用されているが、低い曲げ強度及び破壊靱性によって用途が制限されている。 - そこで、本研究では、曲げ強度と破壊靱性の向上を目的とし、ZrO₂の短繊維をドーブして製造したZr₂/SiC複合材の機械特性を明らかにする。

中国のCMC研究開発への補助金③

国

中国

対象

CMC研究開発
への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (元)	研究タイトル	研究内容
6	中国政府	Xi'an Xinyao Ceramic Composite Material Co., Ltd.	記載なし	50,000,000	ブレーキおよび航空エンジンにおける高性能 SiC セラミック マトリックス複合材料の工業化および技術研究	※具体的なプロジェクトの内容については、明らかになっていない。また、詳細は、後述の個別事例の調査結果を参照
7	中国政府	Xi'an Xinyao Ceramic Composite Material Co., Ltd.	記載なし	50,000,000	耐熱構造分野における超高温セラミック マトリックス複合材の実施計画	※具体的なプロジェクトの内容については、明らかになっていない。また、詳細は、後述の個別事例の調査結果を参照

中国のCMC設備投資への補助金

国

中国

対象

CMC設備投資
への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額（元）	支援に関する情報
1	Xi'an Xinyao Ceramic Composite Material Co., Ltd.	記載なし	2012-2014	2,000,000,000	※詳細は、次々頁以降の個別事例の調査結果を参照 「西安鑫垚陶瓷复合材料有限公司（= Xi'an Xinyao Ceramic Composite Material Co., Ltd.）」は、20億元を投資してCMC製造の工業団地開発を行った。 - CMC製造の工業団地が形成された場所は、西安航空基地という金属材料、炭素繊維材料、複合材料を扱う航空材料産業クラスターである。この西安航空基地では、CMC製造のための工業団地の他に、先端航空部品インテリジェント相互接続製造基地などがあり、製造コストや製造サイクルの縮小、材料適用の保証能力を向上させることを目的として、関連企業を集めている。
2	中国政府	Xi'an Xinyao Ceramic Composite Material Co., Ltd.	2013	29,000,000	※詳細は、次々頁以降の個別事例の調査結果を参照 「CMC製造技術国家工学研究センター」の建設に際して、総額13億元の投資に対して、国から2900万元の支援を受けた。
3	甘肅省天水市清水県政府	記載なし	2022	2,000,000,000	※詳細は、次々頁以降の個別事例の調査結果を参照 - 甘肅省天水市清水県政府が20億元を投資して、「Shandong Huamao Holding Group」と共同で、高性能SiC複合材料工業団地プロジェクトを実施。 - 現段階では、建設予定の土地を視察している段階であり、今後土地の取得、建設と進んでいくと思われる。 - 建設が完了すれば、中国最大のSiC CMC工場になる予定。 - これまで政府としてCMCに注力してきた実績はなく、CMC重要拠点への第一歩と思われる。

中国のCMC素材研究開発への補助金

国	中国
対象	CMC素材研究 開発への補助金

- ▶ 具体的なCMC素材の研究開発への投資は見つかっていないが、中国で航空機への活用が行われている・目指されている素材は明らかになった。結果は以下の通り。

No	素材	活用先に関する情報	実現状況に関する情報
1	炭化ケイ素繊維強化炭化ケイ素セラミックマトリックス (SiCf / SiC)	▶ 現在、市場で応用需要が高いCMCの一つ ▶ 現状の航空エンジンから大幅に性能が向上した、将来航空エンジンへの活用期待されている	—
2	炭素繊維強化炭化ケイ素セラミックマトリックス (Cf / SiC) 複合材料	▶ 現在、市場での応用需要が高いものの、航空機への活用の予定はない	—
3	炭化ケイ素、酸化アルミニウム、窒化ケイ素、窒化ホウ素、窒化ケイ素窒化ホウ素	▶ 航空エンジンの高温部品への適用を目指している	▶ 現状の性能では実現が難しく、ブレークスルーが求められている

中国・西安市でのCMC研究開発支援

国	中国
対象	西安市の 開発支援

- ▶ 西安市でのCMC製造の協業団地開発について
 - ▶ 20億元を投資してCMC製造の工業団地開発を行っていたのは、「Xi'an Xinyao Ceramic Composite Material Co., Ltd.（＝西安鑫垚陶瓷复合材料有限公司）」。
 - ▶ CMC製造の工業団地が形成された場所は、西安航空基地という金属材料、炭素繊維材料、複合材料を扱う航空材料産業クラスターである。この西安航空基地では、CMC製造のための工業団地の他に、先端航空部品インテリジェント相互接続製造基地などがあり、製造コストや製造サイクルの縮小、材料適用の保証能力を向上させることを目的として、関連企業を集めている。
- ▶ 「Xi'an Xinyao Ceramic Composite Material Co., Ltd.」について
 - ▶ 「Xi'an Xinyao Ceramic Composite Material Co., Ltd.」は、中国最大の国営投資持ち株会社「SDIC」の保有企業の一つである。したがって、国有会社に位置づけられる。
 - ▶ CMC製造技術のための「国家工程研究中心（＝国立工学研究センター）」のひとつである。
 - ▶ これまでに、「CMC製造技術国家工学研究センター」の建設に対する2900万元の助成金や、「ブレーキおよび航空エンジンにおける高性能 SiC セラミック マトリックス複合材料の工業化および技術研究」や、「耐熱構造分野における超高温セラミックマトリックス複合材の実施計画」に対するそれぞれ5000万元の助成金など、国から様々な支援を受けている。

中国・天水市でのCMC研究開発支援

国	中国
対象	天水市の 開発支援

- ▶ 天水市政府による高性能CMCのR&Dセンターや工場の設立について
 - ▶ 甘粛省天水市清水県政府が20億元を投資して、「Shandong Huamao Holding Group」と共同で、高性能SiC複合材料工業団地プロジェクトを実施。
 - ▶ 現段階では、建設予定の土地を視察している段階であり、今後土地の取得、建設と進んでいくと思われる。
 - ▶ 建設が完了すれば、中国最大のSiC CMC工場になる予定。
 - ▶ これまで政府としてCMCに注力してきた実績はなく、CMC重要拠点への第一歩と思われる。
- ▶ 「Shandong Huamao Holding Group」について
 - ▶ 国際貿易、工業製造、不動産建設、文化観光、ホテルを統合する企業グループ。

中国・中国科学技術大学の資金元

国	中国
対象	西安市の 開発支援

- ▶ 中国科学技術大学の資金元について
 - ▶ 以下の論文に記載されている通り、「各大学の詳細な財務情報は公開されていない」という実態が明らかになった。そこで、中国科学技術大学そのものの政府資金の調達方法を明らかにすることは難しいと考え、中国科学技術大学を含む「985工程」の資金調達方法を調査・分析した以下の論文の内容を整理した。この内容は、2005年と若干古く中国科学技術大学の実態と全く同じとはいかないまでも、大きく異なることはないのではないかと考えている。
 - ▶ 陳 武元「中国における大学政策と研究大学の資金調達 -X大学の事例から-」
<https://www.niad.ac.jp/media/001/201802/nf002012.pdf>
- ▶ 一般的な中国の高等教育機関への資金配分について
 - ▶ 具体的な項目別の調達方法は以下の通り。
 - ▶ 事務や教育の経費：運営経費
 - ▶ 研究費：運営経費 + 科学研究費や外部資金（占める割合：外部資金 > 科学研究費 > 運営経費）
- ▶ 科学研究費について
 - ▶ 全般的に、競争的な配分形式になっている
 - ▶ 「縦向経費」（政府部門からのルート）と「横向経費」（企業などからのルート）に分けられる
 - ▶ 科研費は社会科学系と自然科学系に分けて行われる
 - ▶ 自然科学系は国レベルの国家自然科学基金、中央科技部レベルの「973計画」（≡「国家重点基礎研究発展計画」。基礎研究の能力を高めるのが目的）と「863計画」（世界の新しい技術革命とハイテク競争の挑戦を迎え、中国のハイテク及び産業発展を加速するための資金）、教育部レベルの科技事業費、各省レベルの自然科学基金がある

2.2

製造技術

調査内容一覧

No	調査対象国	調査項目
1	ロシア	①大型鍛造関連技術の研究開発への支援 ②大型鍛造設備投資への支援動向
2	アメリカ	
3	フランス	
4	中国	上記の①、② + ・ 五カ年計画に基づく宝鶏市、発改委による大型鍛造への支援

調査結果の概要

No	調査対象国	調査結果	
		大型鍛造研究開発の支援プロジェクト数	大型鍛造設備投資の補助件数
1	ロシア	2	0
2	アメリカ	5	1
3	フランス	4	0
4	中国	0	1

研究開発プロジェクト

- 米ロは大学での研究
- フランスは企業を交えた研究が見られた

設備投資

- 米国はGEの1件。投資目的は不明だが、設備拡張用の投資が発見された
- 中国は詳細不明だが、大型鍛造用とみられる投資が発見された

ロシアの大型鍛造研究開発への補助金

国

ロシア

対象

大型鍛造研究
開発への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額	研究タイトル	研究内容
1	ロシア科学基金	国立研究技術大学「MISiS」	2017-2019	記載なし	複合型構造の超微細粒「マグナル」の強度と高速彫塑性向上	- 既存のAl-Mg-Sc-Ar系の合金は、既存の超塑性アルミニウム合金が抱える室温での強度の低さや、整形速度の遅さを解決する一方で、成形後の製品の機械的特性の低下や原料となるスカンジウムが希少であるという課題がある。そこで安定した微粒子を形成する方法を実装することを目指す。 - この方法を実装することで、新たな合金の有望な組成とその加工モードを特定することが可能になる。 - また、急激な変形を含む、高性能かつ技術的特性を備えた高強度のアルミニウムマグネシウム合金鍛造技術の開発に貢献する。（アルミニウムマグネシウム合金に加える候補としてニッケルが挙げられている） - プロジェクトによって生み出された成果は、その後の更なる基礎研究のインプットとなる。特に、航空、ロケット、宇宙産業において、重要度の高い高強度軽合金の開発に資することを期待した、高性能、技術的特性、高強度などの特性を備えたアルミニウム合金およびその他の合金の開発に役立てられる。
2	ロシア科学基金	国立研究技術大学「MISiS」	2020-2022	記載なし	複合型構造の超微細粒「マグナル」の強度と高速彫塑性向上	※No.1のプロジェクトの続編 - No.1のプロジェクトの結果に基づいて、新たな合金のブランクを製造するために、オールラウンドな鍛造方法の使用を目指す。 - 具体的には合金の変形挙動を解析し、数学的、シミュレーションモデリング手法を使用することで、検証済みのモデルを開発することに取り組む。

アメリカの大型鍛造研究開発への補助金①

国

アメリカ

対象

大型鍛造研究
開発への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
1	米国空 軍	ケンブリッジ大学	2017 - 2020	224,524	ナノ構造の強くて 強靱な鋼	本研究の目的は、高強度鋼の結晶粒構造の成長と進化の理解を深め、定量モデルに表し、鑄造および/または鍛造ルートによって製造できる靱性を強化するために設計された微細構造を備えた合金を可能にすること。
2	米国空 軍	クランフィールド 大学	2019 - 2020	175,122	一次金属要素 への WirePlus Arc Additive Manufacture の適用	- 大型構造物を製造するための費用対効果の高い手段を提供する可能性を秘めており、鍛造に関連する高価で長いリードタイムを排除できる方法として、金属付加製造 (AM) がある。 - 本プロジェクトでは、この製造法の Wire+Arc Additive Manufacture (WAAM) というプロセスが既製の溶接装置に依存している状況を脱するために新たな手法を確立することを目指す。
3	国防長 官室	ミシSSIP大学	2020 - 2021	1,059,488	ミシSSIP州、ミシ SSIP大学 - フェーズ II	- 経済調整局が資金を提供した助成金プロジェクトであるMS フォージの成功に基づいて、ミシSSIP大学のヘイリー バーバー センター フォーマニユファクチャリング エクセレンスは、さらなる展開を目指す。具体的には、DoDが資金提供する製造機関との新たなパートナーシップを通じて、防衛産業への貢献を目指す。 - 関与する研究開発の一部に鍛造関連の技術を扱うものがある。
4	国防長 官室	Catalyst Connection	2020 - 2023	5,000,000	AIM高等コン ソーシウム ※防衛SCの拡 大を目指すコン ソーシウム	※研究開発への投資ではないが、防衛産業を支援するコンソーシアムの運営費に充てられる コンソーシアムの目的は防衛のための製造業の強化であり、研究やイノベーションを促進する戦略の実施や防衛SCないの企業への技術支援の提供、人材育成の支援などを行う。

アメリカの大型鍛造研究開発への補助金②

国

アメリカ

対象

大型鍛造研究
開発への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ドル)	研究タイトル	研究内容
5	米国海 軍	コロラ大学	2015	140,350	チタン酸塩及び 関連材料の フィールドアシスト 焼結	- 本プロジェクトでは以下の内容を実施する。 ①フラッシュ焼結鍛造実験を通じて、フラッシュ状態でのひずみ挙動や結晶粒の発達への影響を明らかにする。 ②シンクロトロンの実験を通じて、フィールド誘起相がチタン酸バリウムに現れるかどうかを明らかにする。

アメリカの大型鍛造設備投資への補助金

国

アメリカ

対象

大型鍛造設備
投資への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (ドル)	支援に関する情報
1	ノースカロライナ 州商務省	GE Aviation	記載なし	558,700	※「アメリカのCMC設備投資への補助金」のNo.1の再掲 ・ 大型鍛造関連の設備拡張への利用かについては記載がないが、ノースカロライナ州での施設拡張に対して、ノースカロライナ州商務省からの支援が行われた ・ 支援にあたっては、ノースカロライナ州経済開発パートナーシップ「One North Carolina Fund」の枠組みが利用された

フランスの大型鍛造研究開発への補助金①

国	フランス
対象	大型鍛造研究 開発への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ユーロ)	研究タイトル	研究内容
1	ANR	・Insutitut P (CNRS研究 所のひとつ) ・アルミネス (研 究用官民パート ナーシップ)	2019 - 2023	700,000	未来のエアロ ジェット エンジン の多結晶ニッケ ル基超合金の微 細構造と機械的 特性 - TOPAZE	- サフランはフランスが世界に誇る超合金の冶金および加工のリーダーである。フランスは自国の産業を守るために、この立場を守る必要がある。 - 次世代ターボジェットエンジンの高温部で使用するガンマガンマ超合金は要件を満たす唯一の超合金である一方で、現状ではガンマガンマ超合金の加工技術が不十分である。 - 本プロジェクトでは、この課題を解決するために、鍛造後に得られる微細構造を制御する物理的メカニズムと動力学、熱処理に対するこの微細構造の応答、関連する機械的特性、および使用中のそれらの進化を正確に説明することを目指す。
2	ANR	・Insutitut P (CNRS研究 所のひとつ) ・CEMEF (CNRS研究 所のひとつ)	2014 - 2018	899,912	微細構造の調 整によるニッケ ル基超合金の機 械的特性の最 適化 - OPALÉ	- サフランはフランスが世界に誇る超合金の冶金および加工のリーダーである。フランスは自国の産業を守るために、この立場を守る必要がある。 - このプロジェクトでは、鍛造品の微細構造を調整することでニッケル基超合金の機械的特性を、ターボジェットエンジンへの活用に合わせて最適化することを目指す。
3	ANR	・アルミネス (研 究用官民パート ナーシップ) ・AUBERT & DUVAL ・Insutitut P (CNRS研究 所のひとつ)	2015 - 2019	796,416	航空部品のフ ライス加工プロ セスのメカニ カル シミュ レーション - SIMP-Aero	- 航空機構造部品の設計は、軽量化と製造コストの最小化に伴う機械的強度の要件を満たす必要がある一方で、予備成形部品から始めて、材料の 80 ~ 90% がフライス加工によって除去され、コストと製造時間が増加します。そこで、このプロセスを適切に管理することは、操作を簡素化し、関連する金属の量を制御することにより、コストを削減することにつながる。 - そこで、本プロジェクトでは、機械加工プロセスを最適化し、幾何学的定義を検証または修正するために、フライス加工作業中の積層部品、鍛造部品、または予備成形部品の変形を予測するシミュレーションソフトウェアを開発することを目指す。

フランスの大型鍛造研究開発への補助金②

国

フランス

対象

大型鍛造研究
開発への補助金

No	投資元 機関	投資先企業 /機関	投資 年	投資金額 (ユーロ)	研究タイトル	研究内容
4	ANR	・アルミネス（研究用官民パートナーシップ） ・ADJ	2012 - 2016	921,942	鍛造部品の疲労挙動に対する欠陥と表面の完全性の影響のモデル化 – DEFISURF	本プロジェクトの主な目的は、機械的特性をより正確に予測し、可能な限り最良の設計を行うために、鍛造部品の疲労損傷メカニズムに対する表面欠陥と微細構造の不均一性の影響を注意深く研究すること。

中国の大型鍛造設備投資への補助金調査結果

国

中国

対象

大型鍛造設備
投資への補助金

No	投資元機関	投資先企業 /機関	投資年	投資金額 (元)	支援に関する情報
1	宝鶏市政府	航空機素材関連企業	2021 (計画 発表)	1,200,000,000	※詳細は、次頁の宝鶏市の投資支援に記載 - 宝鶏立興チタン及びチタン合金航空新素材工業団地を12億円を投資して設立する計画が2021年に発表された。 - 工業団地には、オフィス、寮、研究開発棟のほかに、10の生産施設が建設される予定。 - 完成すれば年間生産量1万トンのチタン及びチタン合金ビレットと航空特殊恵贈部品を生産し、年間生産額は30億を超えることが想定されている。

中国宝鶏市政府による第14次五カ年計画に基づく合金航空新素材工業団地プロジェクトについて

国	中国
対象	宝鶏市の航空素材工業団地

- ▶ 第14次五カ年計画について
 - ▶ 航空エンジンとガスタービンが「製造業のコアコンピタンス」としての強化対象に挙げられている。
- ▶ 宝鶏市について
 - ▶ チタン産業発祥の地であり、新素材の研究開発・生産の国家拠点。
 - ▶ 2014年に、チタン谷東工業団地のプロジェクトが立ち上がり、それ以降投資を行ってきた。2022年9月時点では、チタン以外のプロジェクトを含む11のプロジェクトに162億元の投資。（チタン関連のプロジェクトへの投資額は記載なし）
 - ▶ チタン谷東工業団地プロジェクトとは別に、チタン立興産業及びチタン合金航空新素材工業団地建設に総額12億の投資することを2021年に発表。工業団地には、オフィス、寮、研究開発棟のほかに、10の生産施設が建設される予定。完成後は年間生産量1万トンのチタン及びチタン合金ビレットと航空特殊形状部品を生産し、年間生産額は30億を超えることが想定されている。現時点では、既に1億円投資されている。

発改委による第11次五カ年計画に基づく大型鍛造能力開発プロジェクトについて

国	中国
対象	発改委の大型鍛造能力開発

- ▶ プロジェクトについて、得られた情報は以下の通り。
 - ▶ 2011年に投資の結果が認められ、検収に合格している。これは、大型鑄造・鍛造の技術と産業に向けてブレイクスルーを果たしたことを意味している。
 - ▶ 鍛造関連の技術については、11次計画の前から投資を受けていたようで、10年間にわたるサポート、10億元を超える研究資金、多くの科学技術計画のサポートを受けて実現した。
- ▶ 調査状況は以下の通り。
 - ▶ 国家発展改革委員会のHPからプロジェクトについての詳細情報の取得を試みたが、詳細な情報は得られなかった。
 - ▶ 第11次五カ年計画についても、2006年から2010年の計画とかなり古いこともあり、詳細な情報を得ることが出来なかった。

3

先端素材・技術の動向

3.1 超電導モーターの 技術動向

その他の先端素材・技術の動向調査として、超電導モーターの研究開発に関する調査を実施した

- ▶ 将来の航空機エンジンに使われ得る先端技術として、将来の電動航空機の理想形（「航空機電動化将来ビジョンの改訂とコンソーシアムの活動状況（<https://www.aero.jaxa.jp/news/event/pdf/event211102/program03.pdf>）」）で採用される技術として有望なものの一つである超電導モーターについて、日米欧の研究開発状況の調査を行った。
- ▶ 特に政府の支援事業として開発が実施されているものについて、参画企業や団体についても合わせて調査した。

- 
- ▶ 全17件の研究開発情報が得られた。
 - ▶ 研究開発情報について、①研究対象および②研究技術の2つの観点で整理した。

① 研究対象

将来の電動航空機の理想形のエンジンとしての超電導モーターを直接の研究目的とするかどうかによって、研究機関/企業の開発目標を分類することとする

② 研究技術

将来の電動航空機の理想形のエンジンとして想定される超電導モーターの軽量かつ大出力であるというメリットを活用するためには、直流・交流両方について完全超電導とすることが有効であると考えられている。よって、交流対応の超電導性に関する研究有無を研究技術の高度さと仮定した上で、「交流対応」研究であるか、「交流対応明記なし」の研究であるかという分類を行うこととする

日米欧における超電導モーターの研究開発状況を調査し、一覧に取りまとめた



航空機向け超電導モーターを対象に、交流対応の研究を行っているのは日本のみであった

- ▶ 日米欧の研究開発情報を踏まえ、研究対象および研究技術の2つの観点からマッピングを行った
- ▶ 航空機向け超電導モーターの研究は日米欧で行われているが、特に交流対応を明記している研究は日本でのみ見られた

		研究技術	
		交流対応	交流対応明記なし
研究対象	航空機モーター関連	日本 ◆ 九州大学/産総研	日本 ◆ 東芝 アメリカ ◆ NASA Glenn Research Center イギリス ◆ University of Strathclyde ◆ University of Cambridge ◆ Newcastle University フランス ◆ CRISMAT Laboratoire de Cristalographie et Sciences des Matériau ◆ JE JEUMONT ELECTRIC/INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE/CNRS ◆ ABSOLUT SYSTEM/SAFRAN/GROUPE DE RECHERCHE EN ENERGIE ELECTRIQUE DE NANCY
	航空機モーター関連以外	アメリカ ◆ Raytheon Technologies イギリス ◆ University of Bath ◆ University of Cambridge ◆ University of Strathclyde	アメリカ ◆ University of Illinois at Urbana-Champaign イギリス ◆ University of Southampton ◆ Newcastle University ◆ University of Edinburgh

3 先端素材・技術の動向 > 3.1 超電導モーターの技術動向 > 3.1.2 調査結果

①超電導モーター関連技術の研究開発情報リスト（1/1）

No.	国/地域	投資元機関	投資先機関/企業	投資年	投資金額	研究タイトル	研究概要
1	日本	NEDO	- 九州大学 - 産総研	—	—	航空機用超電導推進システム要素技術開発/航空機用超電導推進システム機器機能検証	➤ 研究目的 - CO2削減のための航空機の電動化にあたって、燃費が良く出力密度の高い、直流・交流両対応の完全な超電導モーターを開発する ➤ 研究内容 - 大電流を流すことで鉄心を使わずにコイルだけで大きな磁場を作り出せるモーターの軽量化を可能にした。 - また、直流に対しては電気抵抗ゼロであるが、交流に対しては磁場の向きが変わるごとにわずかに発熱して超電導状態を壊しやすいという超電導の欠点について、数マイクロメートルの厚さの超電導膜に切り込みを入れることにより、線材のエネルギー損失を従来の数十分の一に減らすことに成功した。

3 先端素材・技術の動向 > 3.1 超電導モーターの技術動向 > 3.1.2 調査結果

②超電導モーター関連技術の研究開発情報リスト（1/2）

No.	国/地域	投資元機関	投資先機関/企業	投資年	投資金額	研究タイトル	研究概要
1	アメリカ	ARPA-E (米国エネルギー省 高等研究計画局)	• Raytheon Technologies (レイセオンテクノロジー)	—	—	超電導体：持続可能な飛行への道	➤ 研究目的 - 最小限の経済的コストで商用航空旅行に関する増大した環境負荷を軽減することを目的に、モーターを冷却するための熱管理システムを開発する。 ➤ 研究内容 - ヘリウムを冷凍することで、モーターの固定子、回転子、端子を超電導状態になる極低温まで冷却する熱管理システムを設計している。 - 当プロジェクトが成功すれば、完全な超電導モーターを構築することができるが、極低温の達成と維持のためのクライオクーラーが非常に重いため飛行機に大きな重量を加えることが必要となる。このため、チームは超軽量な高度磁気熱量適応クライオクーラーの開発を検討している。
2	イギリス	UKRI	• University of Bath (バース大学)	2016-2018	£100,952	完全超電導機向けの高効率高温超電導交流巻線の開発	➤ 研究目的 - 超電導体が交流電流を流す際にそれだけの熱放散（AC損失）が生じるか正確に推定し、この損失を減らすための戦略を特定する。 ➤ 研究内容 - 当プロジェクトでは、超電導機の交流損失を推定するための新しい実験・数値解析ツールの開発を行う - 実験データによって検証される新しいFEMモデルを開発し、完全超電導機の交流損失を効率的に推定する。また、このモデルを用いて最新の超電導技術に用いて、完全超電導機の交流損失を提言し、効率を向上させるための戦略を特定する

3 先端素材・技術の動向 > 3.1 超電導モーターの技術動向 > 3.1.2 調査結果

②超電導モーター関連技術の研究開発情報リスト (2/2)

No.	国/地域	投資元機関	投資先機関/企業	投資年	投資金額	研究タイトル	研究概要
3	イギリス	UKRI	University of Cambridge (ケンブリッジ大学)	2010-2013	£285,593	交流励磁超電導コイルのエネルギー損失研究	➤ 研究目的 - 超電導コイルに使用する超電導テープに生じるAC損失は固定子巻線用のACコイルの設計に対し制約を課している - 実際のアプリケーションにおける、コイルのAC、DCの磁界、輸送電流がモーターや発電機に与える影響について測定し、研究する ➤ 研究内容 - 特定の実際の磁場と電流の構成でコイルを研究することで、モデリングよりも信頼性の高い研究を行う - 液体窒素ボイルオフと電気技術の両方を用いて超電導コイルを実験的に研究し、その結果を利用してコイルを記述する数値モデルを検証する - これにより、①テープの関連パラメータとコイルの特性間の知識、②コイルのエネルギー損失を測定するための実験技術、③大規模電気機械の設計と製造のために必要なコイルに関するデータを得る
4	イギリス	UKRI	University of Strathclyde (ストラスクライド大学)	2018-2019	£25,907	完全超電導機向けの高効率高温超電導交流巻線の開発	➤ 研究目的 - 超電導体が交流電流を流す際にそれだけの熱放散（AC損失）が生じるか正確に推定し、この損失を減らすための戦略を特定する。 ➤ 研究内容 - 当プロジェクトでは、超電導機の交流損失を推定するための新しい実験・数値解析ツールの開発を行う - 実験データによって検証される新しいFEMモデルを開発し、完全超電導機の交流損失を効率的に推定する。また、このモデルを用いて最新の超電導技術に用いて、完全超電導機の交流損失を提言し、効率を向上させるための戦略を特定する

3 先端素材・技術の動向 > 3.1 超電導モーターの技術動向 > 3.1.2 調査結果

③超電導モーター関連技術の研究開発情報リスト (1/4)

No.	国/地域	投資元機関	投資先機関/企業	投資年	投資金額	研究タイトル	研究概要
1	日本	—	・ 東芝	—	—	モビリティ向け軽量・小型で大出力の超電導モーター試作機を開発	▶ 研究目的 - 航空機等の大型モビリティ向けの超電導モーターを開発し、計量・高出力密度、高速回転を実現する。 ▶ 研究内容 - 高速回転機の製造技術と超電導技術を用いて、最高出力2MWの小型高速超電導モーター試作機を開発した。当試作機は一般的な同レベルのモーターと比べて10分の1以下の軽量化と小型化を実現した。
2	アメリカ	NASA	・ NASA Glenn Research Center (NASA グレン研究センター)	—	—	高効率メガワットモーター (HEMM)	▶ 研究目的 - 電動航空機推進のニーズを満たすような4MW高効率メガワットモーター (HEMM)を設計する - HEMMの目標性能は、16kW/kg、効率99%であり、現在の航空機モーターや発電機と比べると、損失と重量が1/3になる ▶ 研究内容 - 必要な極低温を維持しつつ、モーターが質量あたりの電力を多く生成できるようにするために、回転音響極低温冷却器、超電導ローターコイル、および高性能ステータの製造およびテストを行う。
3	イギリス	UKRI	・ University of Strathclyde (ストラスクライド大学)	2022-2026	奨学金	大型民間航空機用のモジュール式超電導軸流束電機	▶ 研究目的 - モジュラー設計が航空機のモーター定格のスケールアップにどのように役立つかを研究する。 ▶ 研究内容 - ソフトウェアを使用して、軸流束超電導モーターのローターとステーターディスクの数のシミュレーションを行う。また、高温超電導体を用いて、超電導ローターと超電導ステーターの両方を研究し、固定定格モジュラーの設計方法論を開発することで、機械定格をスケールアップする可能性を探る。

3 先端素材・技術の動向 > 3.1 超電導モーターの技術動向 > 3.1.2 調査結果

③超電導モーター関連技術の研究開発情報リスト (2/4)

No.	国/地域	投資元機関	投資先機関/企業	投資年	投資金額	研究タイトル	研究概要
4	イギリス	UKRI	University of Cambridge (ケンブリッジ大学)	2016-2020	£509,515	同期電動機用超電導複合永久磁石の開発：未来の電動航空機技術の実現	➤ 研究目的 - ガスタービンのみを使用した航空機の推力改善は、航空による環境への悪影響を抑制するには十分でないことから、超電導モーターを利用したハイブリッド電気推進システムの構築を行う ➤ 研究内容 - コイルの代わりにローターに磁束超電導複合永久磁石(SCPM)を使用することで、ギャップフィールドが拡大し、高い電力密度が実現する。当プロジェクトでは、これらのSCPMを最新の商用の3mmおよび20mm幅の高温超電導テープの形で開発す、モーターに適した形状の磁場生成について調査を行う。 - また、ローターに生じる可能性のある振動によるSCPMへの消磁効果を詳細に研究し、開発に許容できるレベルまで低減させる方法を実験的に調査する。
5	イギリス	UKRI	Newcastle University (ニューカッスル大学)	2020-2024	奨学金	電動航空機の将来のモーター技術のための冷却システム	➤ 研究目的 - 東芝が開発中のモーター技術の活用を可能にするような高度な冷却技術の検討を行う。 ➤ 研究内容 - 当プロジェクトでは、東芝が航空宇宙推進用途で研究設計を進めているモーター技術に合わせて、既存の冷却方法の性能、能力、実行可能性の評価を行う - また、既存の空冷・水冷・油冷のような冷却方法とは別に、超電導巻線とそれに関する冷却方法、電気機械でのヒートパイプの使用、相変化冷却などの冷却技術について研究を行う（具体的にどの冷却技術が主な焦点となるかは決定していない）。 - 冷却システムの有効性の分析方法としては、様々な数値モデリングや実験手法、「数値流体力学」などの非常に複雑な計算ソフトウェアを使用する可能性がある。

3 先端素材・技術の動向 > 3.1 超電導モーターの技術動向 > 3.1.2 調査結果

③超電導モーター関連技術の研究開発情報リスト (3/4)

No.	国/地域	投資元機関	投資先機関/企業	投資年	投資金額	研究タイトル	研究概要
6	フランス	ANR	CRISMAT Laboratoire de Cristallographie et Sciences des Matériaux (クリストマツ結晶学・材料科学研究室)	2014-2016	€299,520	超電導モーターの実現	➤ 研究目的 - 航空機の高効率エンジンの製造を目的として、新たな超電導機械構造の開発および既存の超電導機械構造の最適化を目指す ➤ 研究内容 - 当研究では、YBCO（イットリウム系超電導体）、BSCCO（ビスマス系超電導体）、MgB2（二ホウ化マグネシウム）の3つの超電導材料を超電導スクリーンと超電導コイルの両方に使用することによって、超電導スクリーンの実現を目指す
7	フランス	ANR	- JE JEUMONT ELECTRIC（ジュモン電器） - INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE（ロレーヌ国立工科大学） - CNRS（フランス国立科学研究センター）	—	€559,965	超電導機インダクターの実現	➤ 研究目的 - 高質量および体積のパワーとトルクを得るために、航空機の超電導モーターとオルタネーターの新しい超電導構造の発見と既存の構造の最適化を目指す ➤ 研究内容 - 事前にサイズ・仕様を規定した電気モーターに超電導素子を使用することを目的とした研究と、これらの結果を踏まえてより大きなデバイスで活用することを目指す研究の2つのアプローチで構成される - 高出力超電導モーターおよびオルタネーターの実現可能性を検証し、実際に使用する場所での実証も可能とするような、10~100kWで動作する実験装置/産業用デモンストレータの研究を行う。 - デモンストレータの製造にあたって、①インダクタの銅巻線を超電導線材に変更することで輸送電流容量を向上させる、②超電導磁石を使用することでより大きな磁場を作り出すという2つの方法を用いてインダクタの性能を比較する

3 先端素材・技術の動向 > 3.1 超電導モーターの技術動向 > 3.1.2 調査結果

③超電導モーター関連技術の研究開発情報リスト (4/4)

No.	国/地域	投資元機関	投資先機関/企業	投資年	投資金額	研究タイトル	研究概要
8	フランス	ANR	- ABSOLUT SYSTEM (アブソートシステム) - SAFRAN (サフラン) - GROUPE DE RECHERCHE EN ENERGIE ELECTRIQUE DE NANCY (ナランヌ大学電気エネルギー研究グループ)	2020-2022	€499,212	航空用超電導エンジン	➤ 研究目的 - 航空用超電導モーターにより、コスト、騒音、温室効果ガス、汚染物質排出量の十分な削減を目指す ➤ 研究内容 - 航空システムの最も重要なパラメータは、貯蔵システムの質量エネルギー(Wh / kg)と電動アクチュエータまたは電力変換器の質量電力(kW / kg)である。超電導体などの材料を使用すると、モーターや発電機のこれらの出力密度が大幅に向上する可能性がある

3 先端素材・技術の動向 > 3.1 超電導モーターの技術動向 > 3.1.2 調査結果

④超電導モーター関連技術の研究開発情報リスト (1/2)

No.	国/地域	投資元機関	投資先機関/企業	投資年	投資金額	研究タイトル	研究概要
1	アメリカ	NSF	University of Illinois at Urbana-Champaign (イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校)	2016-2018	\$340,000	超大型風力タービン用の高磁場完全超電導「空芯」発電機	➤ 研究目的 - 直流・交流の両方に対応した完全超電導機を利用することで、洋上風力発電からの電力コストを削減するのに役立つ軽量なダイレクトドライブ発電機の設計を行う。 ➤ 研究内容 - 超電導機に交流電流を流す際に交流磁場中で熱が放射されることにより生じるAC損失を推定するための新たな実験・数値解析ツールの開発を目指す。また、その実験データを用いてAC損失の効果的な測定を目指す。
2	イギリス	UKRI	University of Southampton (サウサンプトン大学)	2006-2009	£597,330	コアレスローターを備えた高温超電導デモンストラーション同期発電機:設計、構築、テスト	➤ 研究目的 - 海軍用途における電気モーターおよび発電機への高温超電導の応用を行っており、コアレスモーターの設計および構築により高温超電導テープ技術の劇的な改善を目指す。 ➤ 研究内容 - モーターのコアレス設計により、ローターの重量の少なくとも60%の削減するが、従来のモーターと同様に液体窒素または空冷により極低温効率を維持することを見込んでいる
3	イギリス	UKRI	University of Edinburgh (エディンバラ大学)	2016-2019	奨学金	大型風車用超電導発電機	➤ 研究目的 - 超大型風力タービンの配備における課題は、関連部品が非常に重いことであるため、最大30MWの電力を生成できるような水陸両用次世代タービンの軽量化アプローチを検討する。 ➤ 研究内容 - これまでの研究でも超電導体の利用により、重量の15%削減が可能であることが証明されているが、さらなる改良のために超電導巻線や極低温冷却システムなどの検討を行う。 - さらに、新たな軽量発電機の実現可能性を証明するために、15kWのプロトタイプの実現性検証を行う。

④超電導モーター関連技術の研究開発情報リスト（2/2）

No.	国/地域	投資元機関	投資先機関/企業	投資年	投資金額	研究タイトル	研究概要
4	イギリス	UKRI	• University of Cambridge (ケンブリッジ大学)	2011-2013	£183,977	プログラマブル超電導交流マシン (PSAM)	➤ 研究目的 • 完全に超電導実現技術の開発リスクを低減するために、標準の電磁網と構造を用いてエアギャップ磁束密度を三倍にするようなデモンストレーターの設計を行う ➤ 研究内容 • 電磁回路デモンストレータで使用するのに最適な従来の電磁網の選択と材料の最適化を行うことで、超電導機器の利点を最大限に引き出す。

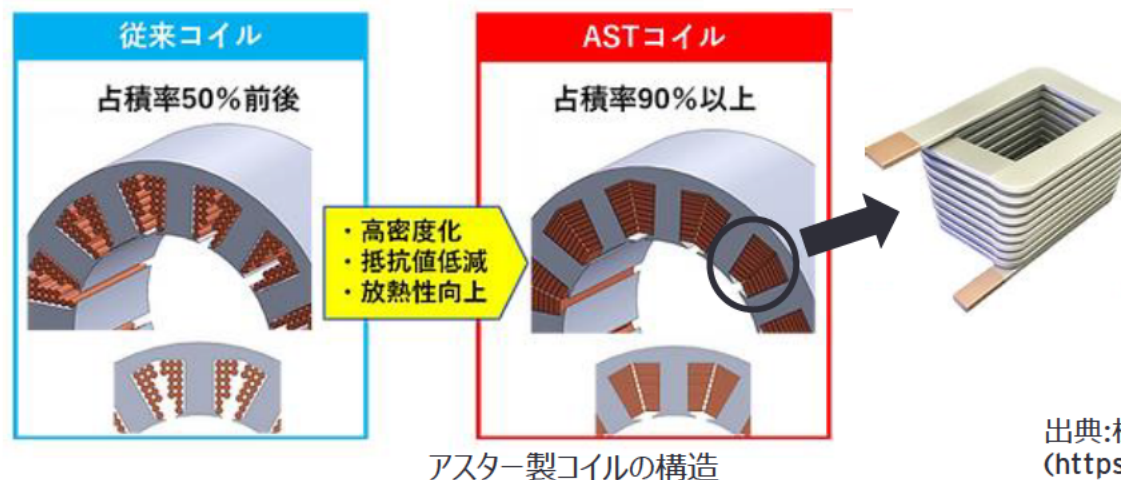
3.2 その他の電動化関連 技術・素材の動向

本調査を通じて得られた、従来の延長上にはない、電動化関連技術・素材についてご報告する

- ▶ 本調査を通じ、細胴機サイズの電動化航空機を目指して開発が行われているわけではないが、従来の延長上にはない、新規な電動化技術・素材の情報が得られた
- ▶ 以下 3 点についてご報告する
 - 1. アルミニウムを用いたコイル及び軽量モーターの開発事例
 - 2. 小型電動航空機向け高出力密度モーターの開発事例
 - 3. サマリウムコバルトのマイクロ磁石膜の開発事例

アルミニウムを用いたコイル及び軽量モーターの開発（株式会社アスター）

開発対象	▶ アルミニウムを用いたアスターコイル及び軽量・高出力密度モーター
開発概要	▶ NEDO戦略的省エネルギー技術革新プログラムにて開発を実施。 ▶ アスターコイルは、コイル各層断面を最適化（丸形→矩形）し占積率を高めたコイルであり、占有率を従来の50%から90%とすることに成功。端子部を銅とし、その他のコイル部分をアルミとすることで軽量化を実現。 ▶ アルミ製アスターコイルを用いたモーターは、コイルの特殊構造によりコイルの放熱性と抵抗値の改善もでき、従来の一般的なコイルのモーターに比べ小型軽量化、高出力密度化、高効率化、密閉構造化が可能となる。 ▶ アスターコイルの表面積は従来コイルの半分以下とし、絶縁被膜の量を少なくすることが可能であるため、金属素材の90%以上をリサイクルすることが可能となる。 ▶ アスターコイルは、他メーカーの電動航空機用電動機の開発でも使用されている。
想定適用先	▶ ドローン用～大型航空機用の電動モーター・発電機への適用が期待できる。



出典:株式会社アスターHP
(<https://www.ast-aster.biz/ast-motor>)

小型電動航空機向け高出力密度モーターの開発（株式会社デンソー）

開発対象	▶ 電動航空機向けモーター
開発概要	▶ 株式会社デンソーとHoneywell International.Inc.との共同開発。 ▶ 現在開発が進められているeVTOLに搭載されているモーターの出力はトップクラスでも1k～2kW/kgレベルであるにもかかわらず、本モーターの出力密度は計算上25kW/kgとなる。 ▶ 冷却方式として空冷方式を選定することで冷却機構を簡素化し、軽量化を実現している。 ▶ 2022年5月にドイツのベンチャー企業Lilium N.V.(リリウム)が開発を進めるeVTOL機（リリウムジェット）への採用が発表された。機体1機あたり30基のモーターが搭載される。
想定適用先	▶ eVTOL～貨物機などの都市型エアモビリティ分野向け電動モーターへの応用に注力している。

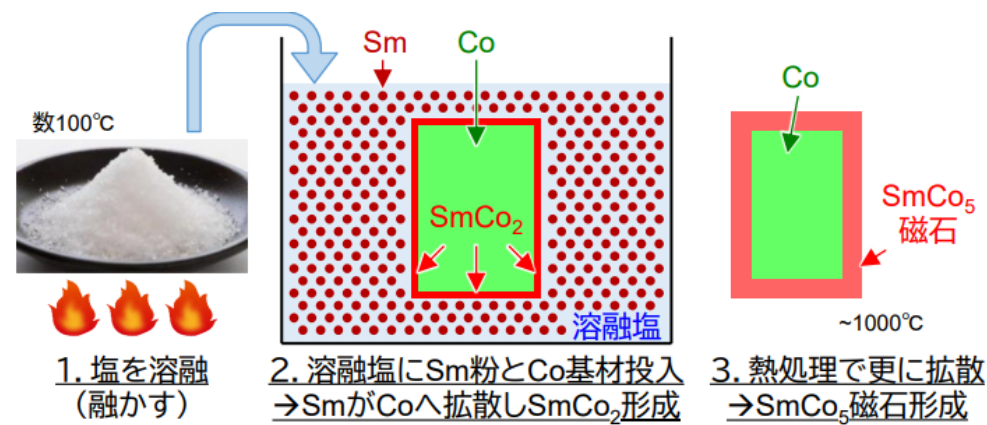


開発したプロトタイプモーター（左：ローター、右：ステーター）

出典：株式会社デンソーHP（<https://www.denso.com/jp/ja/news/newsroom/2022/20220524-01/>）

サマリウムコバルトのマイクロ磁石の開発（TDK株式会社）

開発対象	▶ サマリウムコバルト磁石
開発概要	▶ コバルトにサマリウムを高温で拡散させる技術を用いた、特殊な成膜方法を適用したマイクロ磁石の開発。 ▶ これまで製造が不可能であった、厚さ約100μmの“磁石膜”であり、任意の形状の基材表面に形成が可能である。 ▶ 本磁石膜を使用することでモーターの小型化へつながる。
想定適用先	▶ モーター、発電機、センサ等への適用が期待できる。 ※現在応用先を模索中であり製品開発を一緒に行うパートナーを募集している



磁石の製造方法

出典：Nanotech2023展 パンフレット