

航空科学技術に関する 研究開発課題の中間評価結果

令和元年 8 月
科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会

航空科学技術委員会委員

令和元年 6 月現在
敬称略、五十音順

(臨時委員)

◎ 李 家 賢 一 東京大学大学院工学系研究科教授

(専門委員)

○	高 辻 成 次	早稲田大学理工学術院基幹理工学部教授
	武 市 昇	一般社団法人日本航空宇宙工業会常務理事
	竹 内 健 藏	首都大学東京システムデザイン学部教授
	戸 井 康 弘	東京女子大学現代教養学部教授
	富 井 哲 雄	一般財団法人日本航空機開発協会常務理事
	難 波 章 子	株式会社日刊工業新聞社編集局科学技術部記者
	松 島 紀 佐	株式会社タンゴ・エア・サポート代表取締役
	山 内 純 子	富山大学大学院理工学研究部非常勤講師
	和 田 雅 子	株式会社ミクニ社外監査役
		一般社団法人日本女性航空協会理事

◎ : 主査

○ : 主査代理

「コアエンジン技術の研究開発」の概要

1. 課題実施期間

平成30年度～令和4年度

(中間評価 令和元年度、事後評価 令和5年度を予定)

2. 研究開発の概要・目的

2030年代に就航が予想される次世代航空機用エンジンの鍵技術として、環境適合性と経済性を大幅に改善するコアエンジン技術(燃焼器、タービン等)の研究開発をJAXAにおいて進める。実用化に向けて、産業界との緊密な連携を図るとともに、現在整備中の技術実証用国産エンジン(F7エンジン)によるシステムレベルの技術実証も見据えて研究開発を進め、その性能を要素実証する等、コアエンジン技術の確立を目指す。

3. 研究開発の必要性等

2030年代に就航が予想される次世代航空機用エンジンについては2025年以降に量産化に向けた国際共同開発の開始が見込まれている。当該国際共同開発において、未だ我が国が獲得できていない高圧系コンポーネントの開発シェアを獲得し、我が国の航空産業の発展につなげるためには高い国際競争力を持ったコアエンジン技術を確立する必要がある。一方で、国際民間航空機関(IAO)で窒素酸化物(NO_x)排出基準の厳格化が進むとともに、2017年7月に旅客機のCO₂排出量基準が国際標準として新たに規定されたことを受けた当該基準の国内基準化が見込まれる。そのため、次世代エンジンでは従来より格段の排出ガスの削減と燃費向上が求められる。

これまで、JAXAでは、希薄予混合燃焼技術(リーンバーン燃焼技術)を開発し、IAO基準の75%減(世界最高レベル)をTRL4の技術成熟度で達成するとともに、高圧タービン入口温度1600°Cの超高温タービン技術(小型エンジンとして世界最高レベル)の研究開発をTRL3の技術達成度で進められてきた。

本研究開発では、従来の研究成果及びエンジンメーカーや大学等との協力体制を活用しつつ、実用化・事業化を見据えたコアエンジン技術の研究開発を進める。具体的には、低NO_xリーンバーン燃焼器と高温高効率タービンについて、本事業終了後にパートナー企業によりエンジンシステムでの技術実証に結び付くよう要素技術を試験により実証する。

【コアエンジン技術の主要課題と目標】

低NO_x燃焼器技術

排出ガス低減の鍵技術であり、JAXAが有している世界最高レベルの低NO_xの希薄予混合燃焼(リーンバーン燃焼)技術をアニュラ燃焼器で実証(TRL5)。

高温高効率タービン技術

コアエンジン効率向上の鍵技術であり、JAXAが有している超高温タービン技術(小型エンジンとして世界最高レベル)による冷却空気削減技術を活用して、高負荷低損失タービンを回転タービン試験装置で実証(TRL4)。

4. 研究開発のロードマップ



5. 予算の変遷

年度	H30	R1	R2	R3	R4
予算額	4.2億	10.5億	—	—	—

中間評価票

(令和元年 7 月現在)

1. 課題名 コアエンジン技術の研究開発

2. 研究開発計画との関係

施策目標：国家戦略上重要な基幹技術の推進

大目標（概要）：

産業競争力の強化、経済・社会的課題への対応に加えて、我が国の存立基盤を確固たるものとするものであり、更なる大きな価値を生みだす国家戦略上重要な科学技術として位置付けられるため、長期的視野に立って継続して強化していく。

中目標（概要）：

我が国産業の振興、国際競争力強化に資するため、社会からの要請に応える研究開発、次世代を切り開く先進技術の研究開発及び航空産業の持続的発展につながる基盤技術の研究開発を推進する。

重点的に推進すべき研究開発の取組（概要）：

社会からの要請に応える環境適合性・経済性向上技術の研究開発として、エンジンについては、国際競争力強化のため、ファン及び低圧タービンの軽量化、高効率化を進めるとともに、JAXA に実証用エンジンとして F7 エンジンを整備し、国内メーカーが次の国際共同研究開発においても設計分担を狙えるレベルまで技術成熟度を高める。また、次世代エンジンの鍵となるコアエンジン技術として、低騒音化技術、低排出燃焼器技術、耐熱材料技術等、将来産業界が分担率の拡大を狙える技術について実用性の高い技術開発を行う。

本課題が関係するアウトプット指標：

①航空科学技術の研究開発の達成状況（JAXAが実施している共同/委託/受託研究数の観点も含む）

本課題が関係するアウトカム指標：

①航空科学技術の研究開発における連携数（JAXA と企業等の共同/受託研究数）
②航空科学技術の研究開発の成果利用数（JAXA 保有の知的財産（特許、技術情報、プログラム/著作権）の供与数）
③航空分野の技術の国内外の標準化、基準の高度化等への貢献

3. 評価結果

(1) 課題の達成状況

<必要性>

本研究開発は、2030 年代に就航が予想される次世代航空機用エンジンの鍵技術として、環境適合性と経済性を大幅に改善するコアエンジン技術（燃焼器、タービン等）の研究開発を行うものである。技術移転後の実用化を見据え、産業界との緊密な連携を図るとともに、現在整備を進めている技術実証用国産エンジン（F7 エンジン）によるシステムレベルの技術実証につなげるため、コアエンジン技術の確立を目指すものである。

本研究開発は、以下を活動の柱として研究開発が進められている。

- 超低 NO_x リーンバーン燃焼器
- 高温高効率タービン

超低 NO_x リーンバーン燃焼器は、厳格化が進む国際民間航空機関（ICAO）^{※1}による NO_x 排出に関する国際基準に対応するとともに、海外研究機関の保有する技術に対しても優位性を有するものである。

各技術要素の研究開発は以下のとおり計画通り進捗している。

- ・リーンバーン燃焼器技術（高温高圧低 NO_x 技術、燃焼振動抑制レゾネータ技術及び燃料ノズル燃料流路断熱・冷却技術）については、シングルセクタ（ノズルが 1 つ）の試験環境での高温高圧条件で、NO_x 値の削減目標を十分なマージンをもって達成することが確認された。また、その際の圧力変動特性を反映したレゾネータについては設計性能評価を行う準備が整えられ、熱防御構造を持つ燃料ノズルの設計については構造の実現可能性が確認された。
- ・ライナ冷却空気削減技術（CMC 燃焼器冷却・構造技術及び CMC パネル対環境コーティング技術）については、熱構造解析による CMC パネルの冷却構造や締結方法の検討が進められ、燃焼試験に移行する準備が整った。
- ・燃焼器過渡応答技術については、試験装置の設計を実施し、過渡応答性能に関する予備試験が進められている。

高温高効率タービンは、小型エンジンとしては初めてタービン入口温度 1600°C を可能にすることで、燃費向上に大きく貢献するものである。

各技術要素の研究開発は以下のとおり計画通り進捗している。

- ・CMC^{※2} 静翼設計技術については、解析結果を踏まえた試作品により織物構造、三次元形状及び冷却構造の成立性を確認し、強度評価についても進められている。
- ・高効率メタル動翼技術については、解析によって空力性能・冷却性能の改善量を見積もり、所期の成果を確認した。また、この結果を確認するための試験についても今後実施を予定している。

※ 1 : 国際民間航空機関 (ICAO: International Civil Aviation Organization)

(2) 各観点の再評価

<必要性>

(事前評価結果)

評価項目 :

- ・社会的・経済的意義
- ・科学的・技術的意義
- ・国費を用いた研究開発としての意義

評価基準 :

社会からの要請に応える研究開発として、我が国産業の振興・国際競争力の強化に資するか

世界の航空機産業は約 25 兆円規模であり、今後約 20 年で約 2 倍に成長することが予測されている。一方、我が国の航空機産業は、世界シェア約 4 %にとどまり、自動車産業（世界シェア 23%）等と比較するとまだ規模が小さい状況にある。我が国においては、近年は民需が急激に伸び、航空機産業の市場規模は平成 23 年度までは 1 兆円前後で推移していたが、平成 27 年度は約 1.8 兆円にまで成長している。このような状況において、我が国の航空機産業が世界市場の伸びを大幅に上回る「超成長産業」を目指すため取り組む必要がある。

特に、2030 年代（平成 42 年以降）に就航が予想される次世代航空機用エンジンについては、平成 37 年以降量産化に向けた国際共同開発の開始が見込まれており、現在は国内メーカーが獲得できていない高圧系コンポーネントの設計・開発段階からの分担獲得のためには、コアエンジン技術の早期獲得が必要となる。また、国際民間航空機関（ICAO）で窒素酸化物（NOx）の排出基準の厳格化が進み（※）、次世代エンジンは現行よりも厳しい環境基準を満たすことが必要となる。ICAO は二酸化炭素（CO2）排出削減に係る燃料効率改善目標を決定しており、次世代エンジンでは更なる燃費向上も必要である。以上を踏まえると、次世代航空機用エンジンの鍵技術として、環境適合性と経済性を大幅に改善する高圧系のコアエンジン技術（燃焼器、タービン）の研究開発は、科学的・技術的意義のみならず、社会的・経済的意義が高いものである。

一方で、航空機産業は、多額の開発費を要することに加え、開発期間及び商品サイクルが長く、民間だけでは参入が困難な産業分野である。航空機開発において成功を収めている諸外国（米国、仏、独など）では、航空機開発を重要戦略分野と見なし、公的機関と民間企業とが共同して技術開発を進めている。このような状況を踏まえ、JAXA においても、我が国の航空機技術の研究開発を牽引する公的機関として、先進的技術の研究開発を重点的に実施し、我が国の航空機産業の基盤技術の底上げを進めていくことが必要である。

今回鍵技術としてとらえている高圧系のコアエンジン技術は、国内メーカーが将来的にエンジン開発の中心的役割を果たすために必須の技術であり、本研究開発の意義は非常に高いと判断される。

本研究開発の実施にあたっては、2030 年代（平成 42 年以降）に就航が予想される次世代航空機用エンジンは、技術実証用として整備予定の F7 エンジンと推力規模が異なることから、次世代エンジンに対して有効に本技術が活用されるように、先を見通した研究開発を行っていくことが重要である。

以上より、JAXA が実施するコアエンジン技術開発については、社会からの要請に応える研究開発であり、我が国産業の振興・国際競争力強化に資するものである。

※ ICAO の NO_x の排出基準は、1990 年代以降（平成 2 年以降）段階的に厳しくなっている。例えば、V2500 クラスのエンジンにおいて、最新の CAEP8 基準（平成 26 年）は、直前の CAEP6 基準（平成 20 年）から 15%、その前の CAEP4 基準（平成 16 年）から約 25% 強化されている。
(CAEP:Committee on Aviation Environmental Protection, ICAO 下に設立された航空環境保全委員会)

（再評価）

我が国の航空産業の市場は事前評価時点の規模が維持されているが、政府としては関係省庁会議に決定された航空機産業ビジョン（平成 27 年 12 月 11 日）に掲げられた我が国航空機産業の売上高を 2020 年に 2 兆円、2030 年に 3 兆円とする目標に対し、完成機、エンジン、装備品等様々な分野で国産化比率を高め、自動車に次ぐ我が国の中幹製造業として発展させるための取組を進めているところである。

このような中、2030 年代に次世代航空機用エンジンを搭載した機体が就航するという想定や世界における主要なメーカーのシェアや我が国メーカーの国際プロジェクトへの参入状況等は現時点で大きく変わっていない。そのため、複雑形状部品で構成され、我が国の得意とする精密な加工技術への需要が高い航空機用エンジンは、引き続き付加価値の高い産業領域と言える。

また、2017 年 7 月に ICAO により旅客機の CO₂ 排出量基準が国際標準として新たに規定されたことを受けて、我が国でも当該基準が導入されることが見込まれることから、エンジンの燃費改善の社会的 requirement が高くなることが想定される。以上から、本研究開発によるコアエンジン技術の科学的・技術的意義、社会的・経済的意義、国費を用いた研究開発としての意義は引き続き高い。

一方で、民間企業との連携のもと研究開発を進めていくなかで、技術移転後の民間企業主体の開発におけるリスクが過大にならないよう、より実証度の高い計画にする必要があることが判明した。具体的には、個別に要素技術実証を行うまでの計画であった「燃

料ノズル流路断熱・冷却技術」、「燃焼器過渡応答技術」、「CMC 燃焼器冷却・構造技術」及び「CMC パネル耐環境コーティング技術」について、これらの結果を踏まえた設計情報の環状燃焼器設計への反映を行い、「高温高圧低 NO_x 技術」、「燃焼振動抑制レゾネータ技術」と統合して環状燃焼器実証試験を実施すること並びに CMC タービン静翼については強度や加工性に加え高温高圧下での健全性（耐久性）まで実証することが必要である。

当該変更は国（JAXA）で行うべき研究開発の範囲の見直しであり、メーカーによる製品化までの期間が変わるものではない。よって、本研究開発の科学的・技術的意義、社会的・経済的意義を損なうものではない。また、技術移転後の民間企業主体の開発におけるリスクを適正にするものであり国費を用いた研究開発としての意義を高めると言える。そのため、本研究開発の実施内容及び期間の見直しを図るべきである。

＜有効性＞

（事前評価結果）

評価項目：

実用化・事業化への貢献

評価基準：

他国よりも優位な技術を早急に獲得するものであり、我が国の産業の振興、国際競争力強化に資するか

次世代エンジン開発の鍵となる環境適合性と経済性の向上について、JAXAにおいては、技術成熟度（TRL）（※）の考え方に基づいて、我が国が優位性を有する以下の技術の研究開発をこれまでに実施している。

① 低 NO_x 燃焼器技術

NO_x は高い温度での燃焼反応で生成されるため、温度不均一を少なくして局所的に高温となる箇所をなくす技術が低 NO_x 燃焼器開発の鍵である。燃焼前に燃料と空気を良く混ぜて燃料が濃い部分をなくす希薄予混合燃焼（リーンバーン）は、燃料が薄い中での燃焼であるため、不安定な燃焼が生じやすい等の技術課題がある。これまでに JAXA では、ICAO CAEP6 基準と比べて 75%以上の NO_x 削減（世界最高レベル）が可能なリーンバーン燃焼器の技術開発に成功している（TRL4）。

② 高温高効率タービン技術

タービンの高温高効率化により燃費が向上し、その結果 CO₂ も削減される。高温高効率化の鍵技術は、耐熱性の向上である。燃焼ガスから出力を取り出す高圧タービンには、高温での使用に耐えられる冷却技術が重要である。JAXA では、耐熱複合材（CMC）の適用や冷却空気を用いたタービン翼冷却構造の開発など、1,600°Cの超高温タービン技術（小型エンジンで世界最高レベル）の研究開発を進めている（TRL3）。

次世代航空機用エンジンについては、平成 37 年以降に量産化に向けた国際共同開発の開始が見込まれており、設計・開発段階から参画するためには、環境適合性向上と経済性向上に関して我が国が優位性を持つ鍵技術の技術成熟度を早急に向上させる（低 NO_x 燃焼器技術は TRL4 から 5、高温高効率タービン技術は TRL3 から 4）ことが有効で

ある。平成 37 年以降に至るまでの研究開発のロードマップも示されており、その中での本研究開発の立ち位置も明確にされていると評価できる。

以上より、我が国が優位性を持つ環境適合性向上と経済性向上の鍵技術について、実用化に向けて TRL を上げることは、エンジン国際共同開発における分担率の向上につながり、我が国の産業の振興、国際競争力の強化に資するものである。

※TRL: Technology Readiness Level。TRL3-5 は要素実証、TRL6 がエンジンシステム実証、TRL9 が運用状態。

(再評価)

海外研究機関における現時点の研究開発状況等に鑑みると、環境適合性と経済性の向上の観点で、本研究開発に係る技術が他国の技術に対して有する優位性は変わらない。

本研究開発を取り巻く環境を考慮すると、燃焼器に関する各要素技術の統合実証や CMC タービン静翼に関する高温高圧ガス下での健全性実証等を実施し実証レベルの高い技術を民間企業に提供することで、民間企業における開発リスクを低減し、国際競争力を高めることができることが判明した。よって、実用化・事業化への貢献の観点から、本研究開発の実施内容及び期間を見直すべきである。

＜効率性＞

(事前評価結果)

評価項目 :

計画・実施体制の妥当性

評価基準 :

- ・技術レベルの向上計画・目標が適切か
- ・研究実施体制及び役割分担は適切か

本研究開発では、コアエンジンに関する各技術（低 NO_x 燃焼器技術及び高温高効率タービン技術）について、次世代エンジン開発のスケジュールを見据えて、技術ごとに目指す実証レベルを定めている。

具体的には、低 NO_x 燃焼器技術については、本研究開発期間終了時（平成 34 年）までに要素技術として最も高い実証レベル（TRL5）に到達する見込み。高温高効率タービン技術では、本研究開発期間終了時（平成 34 年）までに TRL4（単段タービンでの実証）に到達し、平成 35 年以降に実機多段タービンの設計・製作（TRL5）を行う見込み。両者について、平成 35 年以降に開始するエンジン実証（TRL6）を経て、平成 37 年頃を中途に開始する次世代エンジン開発への成果展開を目指す。

このように技術成熟度を活用した技術実証アプローチによって、JAXA が既に有している世界最高レベルの技術をもとに、JAXA において実用化を着実に進める計画・目標、実施体制は妥当である。

本研究開発は、産業界（エンジンメーカーなど）や大学等と連携して推進する。役割分担は以下の通り。

- ・JAXA は、次世代航空エンジンの要求性能を見据えた先進的なコアエンジン技術の開発や大規模試験設備による技術実証を担当
- ・民間企業は、JAXA との共同研究により、エンジン製品化要求仕様を見据えて、実用化に必要となる技術的知見を提供すると共に、共同で技術実証を実施
- ・大学等は、JAXA が行う評価や解析に関し、JAXA との共同研究等により、評価・解析技術の高度化や研究開発に取り組む

また、本研究開発では、JAXA において研究リソースを本研究開発に重点化して取り組むとしている。また、最終的に産業化を目指す産業界が、研究開発のフェーズに合わせて、共同研究等により一定のリソースを負担することを原則とするとともに、大学等とも連携することで産官学の強みを生かした体制を構築し、最大限の効果が発揮できるようとする。

以上より、次世代エンジン開発のスケジュールを見据えた研究計画となっており、研究体制においては、役割分担が明確で、適切な連携体制になっていると考えられる。

（再評価）

本研究開発が順調に進捗していることから、実施計画及び民間企業や大学との役割分担、費用負担を含む実施体制は、現時点で妥当であると判断できる。

一方で、技術移転後の民間企業主体の開発におけるリスク、本研究開発を取り巻く環境を考慮すると、燃焼器に関する各要素技術の統合に関する環状燃焼器での実証やCM Cタービン静翼に関する高温高圧ガス下での健全性実証等、当初からのターゲットである次世代エンジンの開発への成果展開に向けて、本研究開発においてより高い技術レベルを獲得する計画にすべきであることが判明した。なお、現在までの進捗状況及びこれに応じた試験方法の合理化や試験回数の絞り込みによる供試体数の減等による研究コストの精査によって、1年間の計画延長によりこれらの研究開発要素を取り込んだとしても研究資金は当初の計画内に収まる見込みとなっている。また、当該変更によりメーカーによる製品化までの期間が変わるものではなく、むしろ技術移転後の民間企業における開発効率の向上が見込まれる。以上から、本研究開発の実施内容及び期間の見直しは本研究開発の成果展開や研究実施のリソースの観点から適切である。

(3) 科学技術基本計画等への貢献状況

航空科学技術については、研究開発計画において重点的に推進すべき研究開発の取組として、我が国産業の振興、国際競争力強化に資するため、社会からの要請に応える研究開発の推進が掲げられている。

本研究開発は、燃焼器に関する希薄予混合燃焼技術や高圧タービン静翼へのCMCの適用等の次世代エンジンの鍵となる革新的なコアエンジン技術により航空機の環境適合性・経済性向上を可能とするものである。また、JAXAに整備中の実証用エンジン(F7エンジン)を活用するなどによって、国内メーカーが2030年代に就航が予想される次世代航空機用エンジンの国際共同研究開発においても設計分担を狙えるレベルまで技術成熟度を高めることとしている。

以上から、本研究開発は科学技術基本計画に基づく研究開発計画に掲げられる取組の推進を通じて、我が国の航空科学技術の発展に大きく貢献するものであると言える。

(4) 今後の研究開発の方向性

本課題は「継続」、「中止」、「方向転換」する（いずれかに丸をつける）。

理由：本研究開発は、次世代エンジンの鍵となるコアエンジン技術により航空機の環境適合性・経済性を向上させることで、我が国の産業の振興、国際競争力強化に貢献するものである。現時点で、航空産業の構造には大きな変化はなく、環境適合性と経済性の向上の観点での本研究開発の優位性が保たれているとともに、進捗状況も良好である。

一方で、燃焼器に関する各要素技術の統合（両立）やCMCタービン静翼に関する高温高圧ガス下での健全性実証等を実施するための1年間の研究開発期間延長による技術の実証度の向上が、本研究開発の成果の価値を飛躍的に向上させ技術移転後の民間企業主体の開発におけるリスクを適正化するために不可欠であることが判明した。以上から、本研究開発は、上記の内容を追加するとともに研究開発の期間を1年間延長して「継続」することが適当であると判断する。

(5) その他

- ・エンジンの実用化までには長期間必要となるものであり、今後の次世代エンジンの開発スケジュールや国内外の動向、費用対効果を鑑みた予算の妥当性等十分に留意し進めることが重要である。
- ・このコアエンジン技術開発を通じ、ポスト次世代エンジン技術構想に資する情報や知識の獲得や積み上げを行なっていくとともに、若手研究者の育成を始め、高度な専門的知識と技術センスを持った航空人材の育成、人的基盤の強化を図ることが重要であり、これらに留意して進めることが求められる。