

グリーンイノベーション基金事業

「次世代航空機の開発」プロジェクトに関する 研究開発・社会実装計画

令和3年7月16日

経済産業省

製造産業局

目次

1. 背景・目的.....	3
2. 目標.....	10
3. 研究開発項目と社会実装に向けた支援.....	14
4. 実施スケジュール.....	18
5. 予算.....	20

1. 背景・目的

- 航空機産業の重要性と課題解決の方向性
 - 我が国の航空機産業は、戦後 7 年間の空白期間を経て、自衛隊が運用する輸入機の修理や米国等からのライセンスに基づく国内生産、国産機の開発・量産等の防衛航空機分野の事業等を通じて技術を獲得、向上してきた。この間、民間航空機分野については、戦後初の国産旅客機 YS-11 の開発の後、主として、欧米メーカーとの機体構造、航空機エンジンの国際共同開発への参加を通じ、その事業規模を拡大してきた。完成機事業については、2008 年に YS-11 以来の約 50 年ぶりに MRJ（現：三菱スペースジェット）の開発が開始されたが、現在、開発活動は一旦立ち止まりがなされている。
 - 一方、防衛用の機体について、戦後、戦闘機の米国からのライセンスに基づく製造や、米国との国際共同開発、輸送機・哨戒機・救難機の国内開発・製造等が行われてきた。現在、将来戦闘機について、国際協力を視野に、我が国主導の開発が着手されている。
 - 航空機産業は、広い裾野産業を持ち、防衛用途の機体に係る産業基盤が共用され、航空機開発で開発、適用された最先端の技術が他の分野に波及する効果も期待される等、我が国産業全体において重要な役割を果たしている。
 - 現状、新型コロナウイルス感染症の拡大により、世界的に航空需要は大打撃を受けているものの、2024 年には 2019 年と同水準まで回復し、その後、新興国等の経済成長を背景に、約 3%/年程度の持続的な成長を遂げることが見込まれている¹。また、今後は更にハブアンドスポーク（拠点空港から放射状に目的地を結ぶ方式）よりもポイントトゥポイント（直接目的地間を結ぶ方式）へ需要が推移するとの見方もあり、航空需要の在り方が変化する可能性もある。
 - こうした航空分野の成長と並行して、急速に脱炭素化の要求が高まりつつある。航空関連の国際機関では「燃料効率の毎年 2%改善」、「2020 年以降総排出量を増加させない」というグローバル目標を掲げており²、2027 年以降、当該目標を達成できなかった場合、最大離陸重量 5,700kg 以上の全ての国際線運行者は、カーボンオフセット制度（CORSIA）を利用することが義務づけられている。目標達成に向けては、エアラインによる運航方式の改善、機体やエンジンの効率改良（新技術導入）、持続可能な航空燃料の導入³の活用等を総動員することが必要であるとされている。
 - 航空分野における脱炭素化の要請に基づくグリーン技術へのシフトを我が国産業の競争力を飛躍的に強化する機会として捉え、機体・エンジンメーカーやエアライン、燃料メーカー等が連

¹ 「Waypoint2050（IATA）」の central scenario を参照
(https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf)

² ICAO グローバル目標
(<https://www.icao.int/environmental-protection/pages/climate-change.aspx>)

³ ICAO（国際民間航空機関）が定めた、国際航空のためのカーボンオフセット及び削減スキーム

携を回りつつ、既存の技術や取組の延長を超えて、野心的なイノベーションの実現に取り組むことが期待される。他方で、新型コロナウイルスにより目下、経済的に甚大な影響を受けている航空機産業において、資金や人材面等のリソースを最大限効率化するべく、既存設備や技術の活用を含め、技術の変わり目においてサプライチェーン全体を慎重に検討することも必要である。

- 具体的には、①機体・エンジン側では軽量化や効率化、電動化率の向上、水素航空機関連技術の開発、②燃料側としてはバイオジェット燃料や合成燃料等の代替燃料を適切に供給することが可能な体制確立等が挙げられる。現時点では、一つの技術開発で課題が全て解決する万能の方策は存在していない。それぞれの方策には後述のとおり一長一短が存在し、技術の成熟度も異なっている。今後の技術開発については、世界の技術動向なども踏まえ、ステージゲートを設けつつ、我が国に優位性のある技術分野を中心に機体・エンジン側と燃料側の両面から、腰を据えて取り組んでいくことが必要である。本計画は、機体・エンジンの開発を対象とすることとし、代替燃料については、航空用途以外も含めて、「CO₂等を用いた燃料製造技術開発」プロジェクトにおいて取り扱う。
- 航空機の機体・エンジンの開発にあたって、以下のような特徴に留意する必要がある。
 - 既存機体の派生型を超えた新型の航空機の開発は、15～20年程度に1度の頻度にとどまり、その際、巨額の研究開発投資を要し、投資の回収はメンテナンスビジネスを含め長期間を要する。
 - その要素技術においても、高度な安全性要求から各種認証試験が存在する等、新技術開発にあたっては資金的、技術的ハードルが高い。
- こうした特徴を持つ航空機産業においては、欧米では政府の強力な支援の下、脱炭素化に資する新技術開発が急速に推進されている⁴。我が国航空機産業は、上述のとおり機体・エンジンの国際共同開発において約2-3割の参画比率を実現しているが、世界的にカーボンニュートラルを目指す動きを市場機会と捉えて、水素や素材等の我が国の要素技術の強みを最大限活用し、こうした参画比率をさらに高め、航空分野の脱炭素化に我が国としても貢献していくことが重要である。加えて、航空機産業は、グローバルに活躍可能な中小企業を含めた幅広い裾野産業を有しているとともに、防衛産業とも技術・生産の基盤を共にするなど、官民をあげて戦略的に取り組むべき領域である。
- 本プロジェクトは、カーボンニュートラル社会に不可欠となる次世代航空機の実現に必要な機体・エンジン関連の要素技術レベルのイノベーションを促進するとともに、欧米政府との連携強化や、将来技術における欧米メーカーと日本企業間の共同研究開発の促進、国際標準化活動とも組み合わせながら、我が国航空機産業の国際競争力の飛躍的強化を目指すものである。

⁴ 仏政府は、2020年9月、航空機産業向けの支援策を公表（総額150億ユーロ）。特に脱炭素化技術開発については今後3年間で15億ユーロを投入するとしている。

- 本プロジェクトを取りまく現状と課題解決の具体的方策
 - 航空機の脱炭素化に向けた機体・エンジン側の開発としては、いくつかの方策が想定されるが、各技術の特徴を踏まえつつ、搭載可能重量や航続距離等に応じ、適切に使い分けられていくことが考えられる。具体的には、電動航空機は、電池やモータの性能に限界があることから、小型かつ短距離飛行(1,000km 程度)に適すると考えられている。水素航空機は、電動航空機よりも航続可能距離が伸張すると見られているが、水素燃料の体積エネルギー密度が小さく、同一エネルギーを得るためには体積が4倍程度必要になるため、長距離路線には対応ができないと考えられている(2,000km-3,000 km 程度までとの見方が多い)。また、燃料そのものを水素に代替する水素航空機は、後述のとおり、機体開発として技術的課題は多い。一方、電動技術や水素への対応でも補いきれない大型機かつ長距離飛行では燃料の改善(代替燃料の活用)が期待されている。代替燃料の活用については、機体・エンジン側の変更は小規模にとどまる一方で、長期的に、需要に対応する規模の燃料を確保するためには、水素をCO₂と混合して生成する合成燃料が期待されるが、依然として、コスト面等で技術課題が存在する(水素航空機の方が合成燃料を使用した航空機よりも1人あたりの運航料金が安くなるとの見方も存在)。
 - 今後、温室効果ガスを巡る規制・政策、技術開発、需要、インフラ整備の動向等を踏まえて、各技術が選択的かつ段階的に市場に投入されると考えられる。
 - 当面の見通しについて、2030 年前半に市場投入が見込まれる機体では、高い安全性を確立した上で、抜本的な脱炭素化に資する新技術の投入は現実的には困難であるため、機体やエンジンにおいて軽量化、効率化等の技術的改善が施されるとともに、バイオ燃料の活用が広がっていくものと考えられている。2035 年以降は、電池やモータ等の電動部品の技術が向上すると考えられることから、ハイブリッド電動化や水素燃料を利用した航空機が投入される等の推進系の大幅な変更が見込まれ、2040 年以降は、比較的小型や短距離の用途において全電動航空機が投入される可能性もあると考えられている。さらに、それ以降、中型・中距離以上の用途においても、水素を活用した水素航空機又は合成燃料の活用が期待される。
 - 世界に目を向けると、欧米 OEM メーカーを中心とした機体・エンジンの軽量化・効率化に係る技術開発や、電動航空機に係る開発事業が複数実施されているほか、2020 年 9 月にエアバス社が 2035 年に市場に水素燃料及び燃料電池を活用した“カーボンニュートラル航空機”を市場投入すると発表したことを受けて、水素航空機に向けた開発競争が激化している。
 - このように、航空機の脱炭素化に向けた取組としては様々な方策が考えられ、将来機においてどの技術が搭載されるかについて、不確実性が残る。こうした中で、欧米 OEM が掲げる技術の方向性(軽量化、代替燃料、電動化、水素等)を踏まえ、受け身に回ることなく、複数の有力技術に主体的・積極的に取り組み、我が国として選択余地を増やしつつ、技術開発における重要なパートナーとしての地位を目指し、柔軟に対応していくことが重要である。特に電動化等の技術は、主に電機関係の企業が地上モビリティ向けに培ってきた技術に期待ができるため、他業界からの参入も促していくことが重要となる。

- また、新技術導入に向けて、国際的にも新たな基準の策定や標準化の動きが進んでいくと考えられており、我が国においても、こうした基準策定等の動向を把握し、議論に参画していく。加えて、完成機事業で培った空力や複合材等の技術や、安全性に係る認証取得に向けたノウハウ等も、今後の将来技術の開発や新技術の認証プロセスに活かしていくことが重要である。
- 航空機エンジン燃焼器、炭素繊維複合材等の開発において我が国企業は既存機において高いシェアを有しており、さらに経済産業省の既存事業により加工性に優れた炭素繊維複合材や、航空機向け蓄電池等の電動化技術開発を推進している（詳細は既存事業の項目参照）。他方、エアバス社のカーボンニュートラル航空機の 2035 年への市場投入の発表を踏まえ、国内でも、これまで取り組んでいなかった水素航空機に関する開発にも本格的に着手する必要がある。水素航空機の実現に必要な部材は技術的難易度が高く、また、空港周辺のインフラ整備や新たな国際標準化活動等に中長期的に取り組む必要もある。
- 加えて、将来航空機における推進系統の変化に関わらず、脱炭素化に向けて確実に必要な機体の軽量化技術についても、我が国の技術的優位性を活かして、継続して取り組み、社会実装に繋げていくことが重要である。その際、炭素繊維複合材は破壊予測が難しいという技術課題を踏まえ、安全確保と軽量化の評価法や航空機の運行時も見据えた非破壊検査の確立にも対応していく必要がある。
- 具体的には、少なくとも以下 3 つの取組が必要であるが、本事業では①及び②を実施する。
 - ①水素航空機の実現、航空機構造の大幅な改良及び軽量化に向けた新技術開発
 - ②上記技術の評価・実証
 - ③水素航空機の実現に向けた空港周辺のインフラ整備 等
- こうした取組は、航空分野の脱炭素化に向けて必要不可欠である一方、十分な見通しを得られていない技術開発課題であり、さらに、国際的な規制動向や OEM メーカーの開発計画に大きな影響を受けるため市場の正確な予測が困難であり、民間企業が単独で実施することが困難であることから、国としても積極的な支援を講ずる必要がある。特に、国産の民間旅客機の開発・製造を行う国内企業が存在しない中で、社会実装のタイミングが海外 OEM メーカーの動向に大きく左右されることに伴う不確実性にも留意する必要がある。
- なお、水素航空機の実現に向けては、水素燃料の輸送・保管設備の新設、水素の利活用に向けた地上車両や空港内設備等の空港周辺インフラを整備する必要がある。本年度より、技術開発と並行して経済性、安全性、法規面から必要なインフラの検討を進めていく。

● 関連基金プロジェクトと既存事業

- 関連基金プロジェクト
 - 航空機産業に関連する基金事業として、代替航空燃料や航空用途以外にも活用可能な合成燃料の製造技術開発（CO₂等を用いた燃料製造技術開発プロジェクト）を検討中。
- 既存事業

- 以下の予算事業を通じて、航空機の軽量化と製造の効率化の双方を実現することが期待されている熱可塑性炭素繊維複合材料の開発や、エンジンの効率化が期待されている CMC（セラミック・マトリックス・コンポジット）の開発を実施している。また、航空機の装備品や推進系の電動化に向けて、必要な重量エネルギー密度や安全性能を満たす蓄電池、必要な出力エネルギー密度や安全性を満たすモータの開発等を推進している。
- 加えて、水素の燃焼特性により生じる逆火や燃焼振動、NOx 値の上昇への対策を行いつつ、天然ガス焚きガスタービンと同等の発電効率を実現するための水素ガスタービンにかかる燃焼器（混焼、専焼）の技術開発を実施している。
- 本基金事業では、既存事業の成果を効率的に活用しつつ、2035 年以降に市場に投入される予定の次世代航空機に必要な技術を確立する。具体的には、水素航空機向けのコア技術（燃焼器、貯蔵タンク、水素燃料供給システム）及び飛躍的な軽量化を可能にする構造部材の製造技術を確立し、その社会実装を図ることを目指す。

【予算事業】

- 次世代複合材創製・成形技術開発（2020～2024 年度予定、2021 年度予算額 13.5 億円）：機体構造向け炭素繊維複合材、エンジン高温部位向け CMC の開発を実施。
(https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100171.html)
- 次世代電動航空機に関する技術開発事業（2019～2023 年度予定、2021 年度予算額：19.0 億円）：航空機向け蓄電池、超電導モータ等の開発を実施。
(https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100104.html)
- NEDO 先導研究プログラム（エネルギー・環境新技術先導研究プログラム）
 - ・高出力（数百 kW 以上）と高密度を同時達成する磁気回路または磁石配列や冷却システムを高度化する航空機向け常電導大型電気モータ技術開発（2019～2021 年度）
 - ・航空機用高安全長寿命バッテリーの研究開発（2020～2021 年度）
 - ・水素を活用した航空機関連技術開発（2021～2022 年度予定）：実現可能性の検証が必要なタンク用素材、燃料電池システムの開発等を実施。
- 未利用エネルギーを活用した水素サプライチェーン構築実証事業（2015～2022 年度、2021 年度予算額 47.5 億円）：水素の燃焼特性に合わせたガスタービンの燃焼器開発を含む、海外の未利用エネルギーからの水素製造、輸送・貯蔵、利用に至るサプライチェーン構築に関する研究開発・実証等を実施。
(https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100096.html)

- グリーン成長戦略の実行計画における記載（抜粋）

- (10) 航空機産業

- ① 装備品・推進系の電動化

<現状と課題>

航空機の電動化について、現在は、補助動力用や地上滞在時における電力供給用の蓄電池搭載など用途範囲は限定的であるが、今後は、飛行時の動力や内部システムの作動に係る用途へと拡大していくことが期待される。これを実現していくためには、電池やモーター等の飛躍的な性能向上が必要である。

昨今、欧米の機体・エンジンメーカーを中心に電動化技術の獲得や実証機の開発に向け競争が活発化している。日本企業は電池やモーター等の関連分野での要素技術に潜在的な競争力があるが、航空機の装備品等への現在の採用実績は一部にとどまっている。

なお、2019年にボーイング社と経済産業省で締結した「将来技術に関する協力覚書」において、航空機の電動化は、具体的な協力分野の一つとして位置付けられている。

<今後の取組>

航空機の電動化技術の確立のため、引き続き、（国研）宇宙航空研究開発機構（JAXA）等の国立研究開発法人における知見を活用しながら、航空機関連メーカーと電機関連メーカーが連携して行う研究開発を推進し、将来機における搭載技術が選定されるタイミングまでに、国内メーカーが必要な技術レベルを満たすことを目指す。具体的には、航空機向け電池や、モーター、インバーター等、航空機の動力としてのコア技術については、2030年以降段階的に技術搭載することを目指し、グリーンイノベーション基金等の活用も検討しながら研究開発を加速する。その際、航空機を製造する海外企業との連携の枠組みを活用・強化して、開発された技術の将来機への搭載を目指す。加えて、国内の産学官連携を通じて国際標準化を推進していく。

なお、電動航空機は、推進系統を電動システムに置き換えていくことによる大幅な騒音削減が期待されており、エンジン内の燃焼器やタービンに由来する騒音が解消されることに加え、既存エンジンと比較して排気速度が低下するために排気騒音が低減する可能性が高い。実際に、昨今、海外における小型電動航空機の開発では2～3割程度の騒音低減が確認されている。我が国でも、蓄電池や電動モーター等に係る技術開発において積極的に騒音低減を目指していき、2050年には、空港周辺住民や乗客にとって、例えば夜間であっても許容性の高い、低騒音の電動旅客機の実現に向けて貢献していく。

② 水素航空機

<現状と課題>

航空機分野の低炭素化を実現させるためには、電動化技術の搭載に加えて、水素燃料の活用も期待される。水素航空機の実現に向けては、軽量かつ安全性を担保した水素貯蔵タンク、燃焼して使用する場合には新たなエンジン部品の開発等、多数の技術的課題が存在している。加えて、周辺インフラや水素供給サプライチェーンの実現可能性についても、安全性やコスト面等の観点から検討を行っていくことが必要である。

なお、2020年9月、エアバス社が2035年に水素航空機を市場投入すると発表した。現状、我が国企業においても、水素航空機に関する具体的な取組が始動しており、今後、研究開発や具体的検討を加速していく必要がある。

<今後の取組>

水素航空機の実現に向けて、必要となる要素技術の開発を推進する。その際、開発初期の段階から海外メーカーとの連携を模索するとともに、実用化につながる課題を特定し、重点的に取り組んでいく。例えば、燃料タンクやエンジン燃焼器等の製造技術は、水素航空機が成立するために必要不可欠なコア技術である一方、軽量化と安全性・信頼性の両立が困難といった観点で、極めて技術的ハードルが高く、中長期にわたる巨額の研究開発費用が必要となる。そのため、グリーンイノベーション基金等の活用も検討しながらコア技術の開発を推進していく。また、水素燃料の保管、輸送、利用のための空港の民間設備等の検討を、2021年6月以降、政府や航空機メーカー、その他関連企業や学術関係者が連携しつつ、「水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会（仮称）」において進めていく。

③ 機体・エンジンの軽量化・効率化

<現状と課題>

航空機・エンジン材料については、軽量化、耐熱性向上等に資する新材料の導入が進んでいる。航空機構造（胴体や主翼等）や内装品（ギャレー等）では、アルミ合金から炭素繊維複合材への転換が進み、航空機エンジンでは、軽量で強度に優れた炭素繊維複合材のファン部品への適用、高温に耐える素材として有望視されているセラミックス基複合材料のタービン部品への適用が始まっている。

低炭素化要求の強まりに伴い、更なる軽量化・効率化につながる素材の適用ニーズは、今後も継続していくことが見込まれる。現状、我が国企業は素材分野での技術的優位性があるが、今後、更なる性能向上やコスト低減要求に対応していくことが重要である。

<今後の取組>

国内素材メーカー、航空機・エンジンメーカー、JAXA等の国立研究開発法人の連携の下、先端材料に係るデータベース整備や生産技術も含めた必要な技術開発を進め、将来機における搭載技術が選定されるタイミングまでに、国内メーカーが必要な技術レベルを満たすことを目指す。その際、航空機を製造する海外企業との連携の枠組みを活用・強化して、開発された技術の将来機への搭載を目指す。

また、炭素繊維複合材は、軽量化という観点から運航時における省エネ効果は従来の金属よりも高い一方で、製造時においては金属よりもエネルギー消費が多い。したがって、製造サイクル全体としての排出削減効果を高めるべく、中長期的なりサイクル技術の確立について、自動車等の他分野とも連携を図りながら推進していく。

2. 目標

● アウトプット

➤ 研究開発の目標

1. 事業終了までに水素航空機向けエンジン燃焼器、液化水素燃料貯蔵タンク等の水素航空機の成立に不可欠なコア技術について TRL6 以上（NASA が設定する技術レベル。システムモデルあるいはプロトタイプの相当環境での実証を実施（注：IEA の TRL6 以上相当））を確立する。

また、各技術において以下の目標値を達成することを目安とする。なお、当該数値目標は今後の国際的な規制動向に応じて適宜見直していく。

- エンジン燃焼器：NOx 排出量：CAEP/8 比 54%の低減
（CAEP/8：ICAO が設置した航空環境保全委員会(Committee on Aviation Environmental Protection)で定められた排出ガス規制値）
 - 水素燃料貯蔵タンク：貯蔵水素燃料の 2 倍以下の重量達成
 - 機体設計：風洞試験により、2,000-3,000km の航続性能を有する水素航空機の機体構想を確認
2. 2035 年以降に投入される特に中小型航空機の主翼等の重要構造部材について、事業終了までに①既存の部材（金属合金）から約 30%の軽量化（既存の複合材部材と比較すると約 10%の軽量化）、②更なる燃費向上に向けた複雑形状・一体成型に対応するための強度向上（設計許容値を 1.1 倍～1.2 倍）を両立した上で、③ TRL6 以上（NASA が設定する技術レベル。注：IEA の TRL6 以上相当）を確立する。

（目標設定の考え方）

1. 通常、航空機開発には 10 年以上の技術開発に加え、5 年間程度、実環境での飛行実証等の実用化に向けた OEM メーカーとの共同開発が必要である。現在（2021 年 5 月現在）、エアバス社は 2035 年に水素航空機を市場に投入するという目標を掲げており⁵、当該機体への技術搭載を可能にするためには遅くとも 2030 年までに OEM との共同開発に持ち込むことが可能な技術レベルに達する必要がある。従って、2030 年までに当該技術レベル（TRL 6 以上）を達成するとともに、軽量化、NOx 目標等において高い目標を掲げ、将来機における技術的競争力を高める。
2. 国際的な CO₂ 削減目標達成のためには、2030 年代後半に市場投入される航空機

⁵ エアバスは 2020 年 9 月、「ゼロエミッション航空機」として水素を活用した航空機を市場投入する計画を発表。
(<https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html>)

は推進系の工夫（電動化、水素航空機等）や燃料の工夫（代替燃料等）だけでなく、合わせて機体側の飛躍的な軽量化も必要不可欠。従来、大型機において複合材を大幅に採用することにより20%程度（B767⇒B787）の重量低減を達成⁶してきたが、今後、特に需要が増加し、全運航機体の約7割以上を占めると予測されている単通路機⁷についても重量の大幅削減が必須。従って、今後需要の大幅な増加が見込まれる単通路機に向けた重要部材について、2030年までにTRL6を確立し、既存の部材（アルミ合金）と比較して約30%の飛躍的な軽量化を達成することとする（大型機は10%）。加えて、更なる燃費向上には水素航空機におけるタンク配置や、高アスペクト比（縦横比）等の複雑形状への対応が重要であり、こうした形状に対応可能な強度確立が必要になる。

（目標達成の評価方法についての考え方）

提案者の柔軟性を確保する観点から、各目標の評価方法については、現時点で特定せず、その方法についての考え方のみ示すにとどめ、今後案件の採択時により具体的に決定することとする。

1. TRLは当該事業内で作成した実機及びプロトタイプに関する各種試験の結果を鑑みて判断する。加えて、上記の通り、重量及びNOx排出量等も評価の目安とする。
2. TRL、重量及び設計許容歪等について、当該事業内で作成した実機及びプロトタイプに関する各種試験の結果を鑑み、総合的に判断する。

（目標の困難性）

1. 現状、世界において商業的に確立する水素航空機の開発は達成されていない。地上水素ガスタービン設備との技術的差分は、具体的には①空力学的機体設計を考慮した上で、②航空機に対応可能なレベルにまで飛躍的な軽量化を達成し、③高度10,000mの上空という環境下において安全性・信頼性要求を満たすこと等であり、既存地上設備から材料・性能を大きく変更する必要がある。なお、上記目標は、水素航空機に関する研究開発は世界でも現状数多くないものの、欧州が公表している計画⁸と比較しても、社会実装まで描いているという点でも先行した目標・時期であるとともにエアバス社の水素航空機の開発スケジュールにも合致している。
2. これまで、大型機を中心に金属から複合材への適用を進めることで軽量化・燃費向上を果たしてきた。今後更に需要増大が見込まれる中小型機は、昨今、格安航空会社（LCC）に頻繁に使われていること等から機体価格のコストダウン要求が強く、これまで

⁶ https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html

⁷ BoeingForecast(https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/market/assets/downloads/2020_CMO_PDF_Download.pdf)

⁸ Horizon2020 下で実施されている ENABLEH2(<https://www.enableh2.eu/project-structure/>)

金属よりも高価格になる複合材は適用されてこなかった。他方で、今後は、高まる環境要求に応えるため、中小型機においても更なる軽量化を果たす飛躍的な技術革新が必要である。こうした中小型機における市場環境に対応した生産技術の確立と大型機で達成してきた軽量化率よりも飛躍的に高い軽量化を両立させるには高いハードルが存在する（詳細は研究開発内容にて後述）。

また、水素航空機等の新技術搭載や、更なる燃費向上のためには中長期的に航空機構造自体を大きく変える必要があり⁹、そのためには製造技術だけではなく、設計許容値を向上させる必要があると考えられている。

● アウトカム

航空機産業の中長期的な成長予測を踏まえた上で、期待される世界のCO₂削減効果、および予想される世界の市場規模について、以下の前提に基づき機械的に算出した。日本企業の国際競争力の状況も意識しつつ、世界市場の付加価値の相当程度の割合を我が国に還流させ、世界及び日本の脱炭素化に貢献することを目指す。

➤ CO₂削減効果（ポテンシャル推計）

本事業で扱う技術は2035年以降の実用化を見据えたものであり、2030年時点では実用化されていないため、2050年時点のみ算出した。

○ 約3.9億トン/年（2050年）

【算定の考え方】

運航機数のうち、中小型かつ国内線のうち半数が電動化、半数が水素航空機に代替すると仮定した。また、国際線及び大型機を含めた機体に軽量化技術が導入されると仮定した（代替燃料や電動化による効果は考慮していない）。

【利用したパラメータ】

- ① 水素航空機の排出原単位：0gCO₂/kWh（燃費向上効果100%）
- ② 2050年のジェット燃料によるCO₂排出量（国際線+国内線）：18.0億CO₂t/年¹⁰
- ③ 水素航空機の普及率：各国の国内線（全体の40%）の半分（残りは電動化）
- ④ 軽量化による燃費向上効果：2%

⁹ Airbusの公表したBWB機体（<https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/02/airbus-reveals-its-blended-wing-aircraft-demonstrator.html>）、Boeingが公表したTTBW機体（<https://www.boeing.com/features/innovation-quarterly/aug2017/feature-technical-sugar.page>）

¹⁰ Waypoint2050（<https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/>）

$$\text{計算式} : \textcircled{1} \times \textcircled{2} \times \textcircled{3} + \textcircled{2} \times (1 - \textcircled{3}) \times \textcircled{4}$$

➤ 経済波及効果（世界市場規模推計）

○ 約 1.2 兆円/年（2050 年）

【算定の考え方】

2050 年時点の新規航空需要のうち約 80%が単通路機、約 20%が双通路機であると仮定した。また、単通路機の半分（全体の 40%）が水素航空機、残りの半分が電動航空機であると仮定した。既存機における各技術のシェア率等を踏まえ、水素航空機の機体・エンジン全体の 20%、その他すべての航空機の 5%に本事業により確立された技術が搭載されると仮定して推計した。

3. 研究開発項目と社会実装に向けた支援

- 【研究開発項目 1】水素航空機向けコア技術開発

- 目標：事業終了時までには TRL6 以上を実現する。

また、各事業において以下の目標値を達成することを目安とする。なお、当該数値目標は今後の国際的な規制動向に応じて適宜見直していくこととする。

- エンジン燃焼器：NOx 排出量：CAEP/8 比 54%の低減
(CAEP/8：ICAO が設置した航空環境保全委員会(Committee on Aviation Environmental Protection)で定められた排出ガス規制値。)
- 水素燃料貯蔵タンク：貯蔵水素燃料の 2 倍以下の重量達成
- 機体設計：風洞試験により、2,000-3,000km の航続性能を有する水素航空機の機体構想を確認

- 研究開発内容¹¹：

- ① 水素航空機向けエンジン燃焼器・システム技術開発

【(9/10 委託→1/2 補助) + (1/10 インセンティブ)】

水素燃料の燃焼のためには、既存航空エンジンから特に燃焼器部分の技術改良が必要である。水素を安全かつ安定的に燃焼させつつ、NOx 排出量を低減させるとともに、航空エンジンに必要な軽量化・安全性・信頼性要求を満たしていくことが重要である。NOx 排出量はタービン入口温度に比例して増大するため、地上用水素ガスタービンと比較しても 100℃以上高温となるとみられている水素航空機エンジンにおいては、排出量が増大すると考えられる。他方、本事業においては革新的な技術開発に取り組むべく、既存エンジンと同様の NOx 排出量まで低減させることを目標とする。

また、エンジンだけではなく、水素燃料に対応した気化器等の付随部品が必要であるが、こうした部品も航空機設計に適した地上水素ガスタービンと比較して約 100 分の 1 以下の飛躍的な軽量化や、信頼性要求への対応が必要。耐久性・強度を確立しつつ、より軽量素材や設計上の工夫等を実施していく。さらに、液化水素が極低温であることから生じる課題への対応も必要であり、システム全体としての熱マネジメントについての検討も実施していく。

本プロジェクトでは上記のような課題を達成し、水素燃焼に適した航空エンジン燃焼器の開発を進め（現状 1-2 である TRL を事業終了時点で NASA の TRL6 以上（IEA の TRL で 6 以上相当）を達成）、NOx についても既存エンジンにおける ICAO が定めた目標である CAEP/8 比 54%の低減し、海外メーカーの開発プロジェクトへの参画、連携を推進していく。また、当該技術に関連する国際標準化活動への参加、及び認証取得に向けた安全性を示すためのロジック・方針の検討も技術開発と並

¹¹ 「2. 目標」の「研究開発の目標」の達成に向けては、様々な方法が考えられるため、具体的な達成方法は提案者の創意工夫に委ねる。

行して本事業内で進める。

ただし、水素航空機エンジンにおける NOx 規制値は今後 ICAO 等の場で検討されていくため、今後の国際議論の動向に応じて目標を柔軟に変更する。

② 液化水素燃料貯蔵タンク開発

【 (9/10 委託→1/2 補助) + (1/10 インセンティブ) 】

航空機向け水素貯蔵タンクの実現には、①軽量化、②耐久性、③信頼性の側面から大きなハードルが存在する。

水素燃料は、既存燃料と比較して重量エネルギー密度は約 3 倍である一方、体積エネルギー密度は既存燃料の約 1/4 である。従って、既存燃料と同等のエネルギー量を満たす水素燃料を搭載した場合、重量は軽減できても、体積としては約 4 倍の燃料を搭載することが求められるため、貯蔵タンク重量が増大してしまう。航空機において成立させるためには水素重量の約 2 倍のタンク重量まで軽減する必要がある。極低温水素燃料タンクが既に実用化されている例として、宇宙ロケットにおける燃料貯蔵タンクの技術を活用することが想定される。他方で、宇宙ロケット用と比べ、航空機用は使用回数が多く、飛行時間も圧倒的に長いため、耐久性等、航空機特有の技術課題への対応が必要である。加えて、航空機特有の加速度環境において、タンク内のスロッシング（液面揺動）による重心移動及びタンク圧力の変化を抑制するとともに、気密性を確保する等、乗客を乗せて飛行するという航空機性能を果たす信頼性確保が必要である。さらに、液化水素が極低温であることから生じる課題への対応も必要であり、システム全体としての熱マネジメントについての検討も実施していく。

本プロジェクトでは、水素航空機向けの水素燃料貯蔵タンクの開発を進め（事業終了時点で TRL6(上記同様)を達成）、海外 OEM メーカーの開発プロジェクトへの参画、連携を推進していく。また、当該技術に関連する国際標準化活動への参加、認証取得に向けた安全性を示すためのロジック・方針の検討も技術開発と並行して本事業内で進める。

③ 水素航空機機体構造検討

【 (9/10 委託→1/2 補助) + (1/10 インセンティブ) 】

上述の通り、水素航空機は既存航空機と比較して体積が 4 倍程度のタンクや極低温燃料に適合した構成品が必要になる等、機体構想全体を再考しなくてはならない。

①②の各要素技術の確立と同時に、機体全体の成立性を考案し、最適な設計を検討することが必要である。当該事業では水素航空機の成立性を考慮したベース機体（TRA: Technical Reference Aircraft）を策定する。

(委託・補助の考え方)

- 現時点で水素航空機が市場に投入されるのは 2035 年以降（事業化まで 15 年）と見込まれ、基礎的な技術開発から長期間にわたって取り組む必要がある。また、2030 年以降の将来航空機に搭載される技術は海外 OEM メーカーの選定により左右されるため、高リスクの研究開発投資となるため、民間企業が単独で実施することが困難である。従って、国としても中長期的な支援を行う必要が高く、事業開始段階は委託事業とする。
- なお、研究開発内容①②③ともに研究開発の進捗や、海外 OEM メーカーの動向等を総合的に判断した上で、実証段階では補助事業に切り替えていく。
- 実施主体については、①②③それぞれ異なる企業となることも可能。ただし、技術的に相互補完的に検討必要な部分（特に③のベース機体策定においては①②の評価結果を反映する必要）等においては、必要に応じて連携することを求める。

● 【研究開発項目 2】航空機主要構造部品の複雑形状・飛躍的軽量化開発

- 目標：2035 年以降に投入される特に中小型航空機の主翼等の重要構造部材につき、①既存の部材（金属合金）から約 30%の軽量化（既存の複合材部材と比較すると約 10%の軽量化）、②更なる燃費向上に向けた複雑形状・一体成型に対応するための強度向上（設計許容歪を 1.1 倍~1.2 倍）を両立した上で、③TRL6 以上（NASA が設定する技術レベル。注：IEA の TRL6 以上相当）を確立する。
- 研究開発内容：

【（1/2 補助） + （1/10 インセンティブ）】

航空分野の脱炭素化のためには、電動化や燃料の改善に加え、機体重量の削減による燃費向上も重要である。これらは、必要燃料の低減だけでなく、航空機電動化や水素航空機の実現には欠かせない技術である。

今後、特に需要が増加し、全運航機数の 7 割以上を占めると予測されている単通路機について、過去に大型機で実現してきた軽量化率を大きく上回る軽量化を達成することが求められる。具体的には、現状航空機構造に大量に使われているボルトやナット等の接合部品の低減に向けた接着面の信頼性向上等により、金属部品の約 30%、複合材部品の約 10%の飛躍的な軽量化を達成させることが重要。加えて、今後の飛躍的な燃費向上に向けた主翼の高アスペクト比（縦横比）の実現や水素航空機構造の実現等、航空機構造を大幅に変更する必要がある。そのため、現状複合材積層内部に発生しているリンクル（しわ）の低減等の材料成型技術の高度化によって部材強度の大幅な向上（設計許容歪を 1.1 倍~1.2 倍）を図る。複合材の破壊予測や解析等にも取り組むほか、新たな構造に関する認証取得に向けた活動も実施する。各要素によって異なるものの現状の TRL は 2-3 程度であり、本事業では、事業終了時まで TRL6 以上を達成しつつこれらを両立させる複合材製造技術を確立する。また、認証取得に向けた安全性を示すためのロジック・方針の検討も技術開発と並行して本事業内で進める。

(委託・補助の考え方)

- 航空機構造部品としての炭素繊維複合材自体は既に社会実装を遂げており、研究開発項目 1 と比べて事業リスクは大きくない。他方で、更なる軽量化や将来機に向けた複雑形状への対応は、世界の OEM メーカーが 2035 年以降の将来機に向けて必要であると昨今公表しているものの¹²、実際の複合材料・製造技術については確立されておらず、既存機における複合材料構造部品で培った技術を応用していくものとみられている。他方で、こうした構造部品の更なる軽量化や複雑形状への対応は航空機の低炭素化に必要な不可欠な技術である一方、既存の経済産業省が実施してきた事業においては複合材の加工性向上や製造自動化等が中心でこうした中長期的な脱炭素化に必要な開発は実施してきていない。2050 年までの脱炭素化を実現するためには、2035 年頃の水素航空機等の社会実装に間に合うように目標に掲げた軽量化等の達成が必要であることから、民間企業等によるこうした課題への取組を加速化させるべく、補助率 1/2 の補助事業として実施する。

- 社会実装に向けたその他の取り組み

水素航空機に必要なコア部品（タンク、供給システム、エンジン燃焼器等）の安全性・信頼性基準等について、新技術開発に伴う国際標準化活動支援を実施。

¹² Boeing の発表 (<https://www.boeing.com/features/2019/01/spreading-our-wings-01-19.page>)

Airbus の発表 (<https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/02/airbus-reveals-its-blended-wing-aircraft-demonstrator.html>)

4. 実施スケジュール

● プロジェクト期間

【研究開発項目 1】水素航空機向けコア技術開発

水素航空機の成立に不可欠なコアとなる技術について、2021 年度から 2030 年度までの最大 10 年を想定している。①、②、③について、主に部品の連結部分での技術的連携が必須であることから、特に①②での各部品における評価結果を③に反映する形での一体的な 2030 年の目標達成を求める。なお、以下のスケジュールは、あくまで一例であり、事業者の提案において、早期の目標達成のために最適なスケジュールを組むことは妨げない。

【研究開発項目 2】航空機主要構造部品の複雑形状・飛躍的軽量化開発

2035 年以降の次世代航空機の重要構造の部品供給に向けて、飛躍的な軽量化及び将来機における複雑形状・一体成型へ対応するため、材料技術や設計手法、接着面の性能向上等の基盤技術から抜本的に見直すことが必要である。従って、研究開発期間は最大 10 年を想定し、2030 年までに OEM メーカーへの提案に必要な技術レベル（TRL6 以上）を達成する。なお、以下のスケジュールは、あくまで一例であり、事業者の提案において、早期の目標達成のために最適なスケジュールを組むことは妨げない。

● ステージゲート設定

研究開発目標の達成には、様々なアプローチが考えられることから、具体的な達成方法・スケジュールは提案者の創意工夫に委ねることを原則とするが、以下の通り、事業化段階の切れ目において、ステージゲートを設定し、事業の進捗、社会実装の見込みを踏まえて、継続可否を判断する。

➤ 【研究開発項目 1】水素航空機向けコア技術開発

- 各技術の仕様決定（下表の例では 2022 年度末頃に事業継続判断）
- 各技術の構成品（燃焼器、タンク構造、供給部品）としての単体性能確認試験了（下表の例では 2025 年度末頃に事業継続判断）
- 各技術部品としての試験評価において TRL6 を達成、NOx や軽量化等の参考目標値も確認（下表の例では 2028 年度末頃に事業継続判断）

➤ 【研究開発項目 2】航空機主要構造部品の複雑形状・飛躍的軽量化開発

- 各技術の仕様（材料、部品形状設計）決定（下表の例では 2022 年度末頃に事業継続判断）
- 各技術の試験データ取得完了（設計確立に向けた基礎データ取得完了）（下表の例では 2026 年度末頃に事業継続判断）

表1：プロジェクトの想定スケジュール（例）

	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2030年度	
【研究開発項目1】水素航空機向けコア技術開発事業											
①水素航空機向けエンジン燃焼器技術開発	構想検討・仕様検討		構成品設計・製作・評価			システム試作・評価			実証試験		
②液化水素燃料貯蔵タンク技術開発	構想検討・仕様検討		構成品設計・製作・評価			システム試作・評価			実証試験		
③水素航空機機体構造検討	構想検討		主要システム検討・風洞試験			機体使用・運用成立性検討・TRA策定			機体構想の確認（地上試験）		
①②での評価試験結果を③に適切に反映											
【研究開発項目2】航空機主要構造部品の複雑形状・飛躍的軽量化開発											
航空機主要構造部品の飛躍的軽量化に向けた技術開発	仕様検討		成型シミュレーション・試験				成型評価試験・認証ロジック確立等				

表2：社会実装スケジュール

●導入フェーズ： 1. 開発フェーズ → 2. 実証フェーズ → 3. 導入拡大・コスト低減フェーズ → 4. 自立商用フェーズ

	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	～2030年	～2040年	～2050年
輸送	★規制 国際航空に関し、ICAOにより2019年比でCO2排出量を増加させないことを制度化（2021～2035年）							★目標 2050年時点でCO2排出量を2005年比半減（IATA目標）
●電動化	装備品電動化の研究開発					技術実証	技術搭載・採用拡大	
	推進系電動化（ハイブリッド電動）の研究開発					技術実証	技術搭載・採用拡大	
	※ 電動化技術は小型機から順次搭載可能性（2020年代後半～）							
●水素航空機向け技術開発	水素航空機向けコア技術の研究開発					技術実証	技術搭載・導入拡大	
●軽量化効率化	エンジン効率化の研究開発（素材や設計等）					技術実証	技術搭載・採用拡大	
	機体構造向け炭素繊維複合材の研究開発					技術実証		自立的拡大
	※ エンジン、電動化、水素関連技術は一部補完関係あり							
上記項目での欧米との国際連携を強化								

5. 予算

- プロジェクト総額（国費負担額のみ。インセンティブ分を含む額）：上限210.8億円
 - 【研究開発項目1】水素航空機向けコア技術開発
 - （研究開発内容①）水素航空機向けエンジン燃焼器・システム技術開発
 - 予算額：上限116.3億円
 - 予算根拠：エンジン燃焼器の開発・実証には、過去事業（NEDO「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」（10年間））と同程度の開発費用が必要であることに加えて、水素燃料供給に必要な試験設備の価格（国の研究機関より聴取）等を参考に算出。
 - （研究開発内容②）液化水素燃料貯蔵タンク開発
 - 予算額：上限48.5億円
 - 予算根拠：主な開発内容は軽量で耐久性、信頼性を持つタンク構造の開発となることから、既存事業（NEDO「次世代複合材創製・成形技術開発プロジェクト」（5年間））の想定開発費用を基本として、水素供給システムの開発費用（国の研究機関より聴取）等を加算して算出。
 - （研究開発内容③）水素航空機機体構造検討
 - 予算額：上限10.2億円
 - 予算根拠：機体概念設計や風洞試験を実施した過去の類似調査事業と同規模の工数が必要となると見込んで、同事業と同規模の予算額を設定。
 - 【研究開発項目2】航空機主要構造部品の複雑形状・飛躍的軽量化開発
 - 予算額：上限35.8億円
 - 予算根拠：航空機等における炭素繊維複合材の適用拡大を図るため、成形技術等を開発した過去事業（経済産業省「エネルギー使用合理化先進的技術開発費補助金（炭素繊維複合材成形技術開発）」）の開発費用を参考にし、必要な国費負担割合・補助率等を加味して必要な予算額を算出。
- 取組状況が不十分な場合の国費負担額の返還率：返還が決定した時点における目標達成度を考慮し、WGにおいて「10%、30%、50%」の3段階で評価

（参考）改訂履歴

- ・2021年7月 制定