経済産業省

資料６

次世代航空機に向けた研究開発・社会実装の方向性

2021年5月

製造産業局

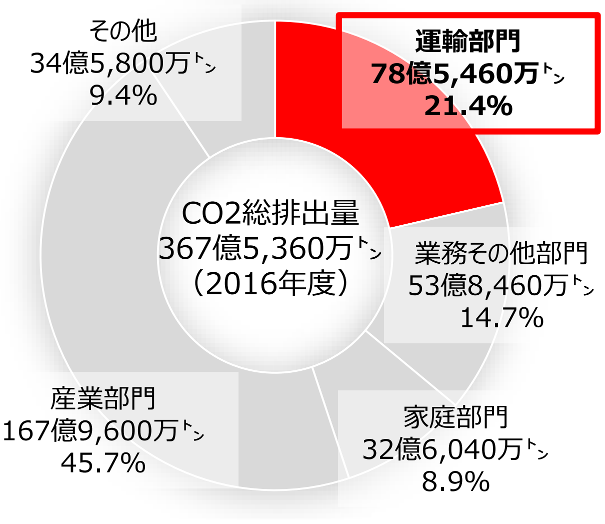
目次

- カーボンニュートラル社会の航空機産業の位置づけと社会実装モデル創出の意義
- プロジェクト：次世代航空機関連技術開発事業
  ①水素航空機
  ②複合材部品

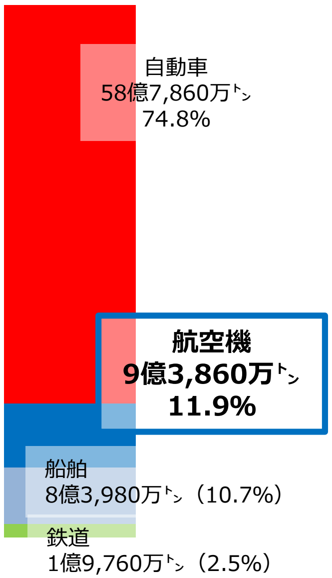
航空機分野のCO2排出量（世界・日本国内）

- 航空分野におけるCO2排出量は**世界全体で2.6%**。
  国内では運輸部門の中に位置づけられ、**全体の0.9%**。

＜国際＞

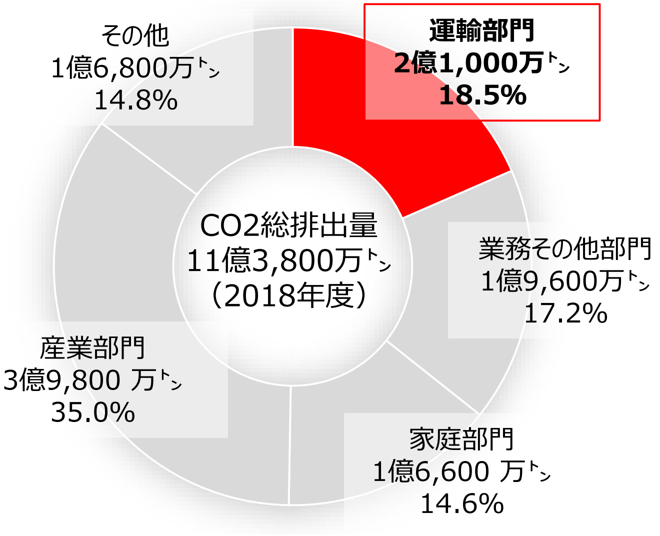


各部門におけるCO2排出量（世界）

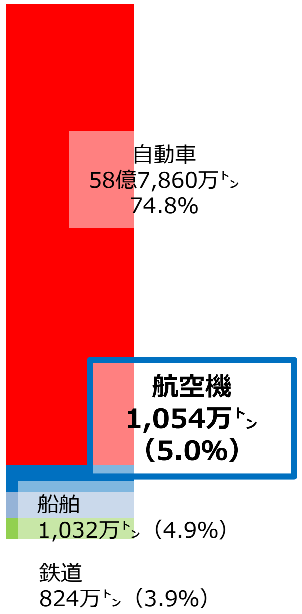


運輸部門におけるCO2排出量（世界）

＜国内＞



各部門におけるCO2排出量（日本）



運輸部門におけるCO2排出量（日本）

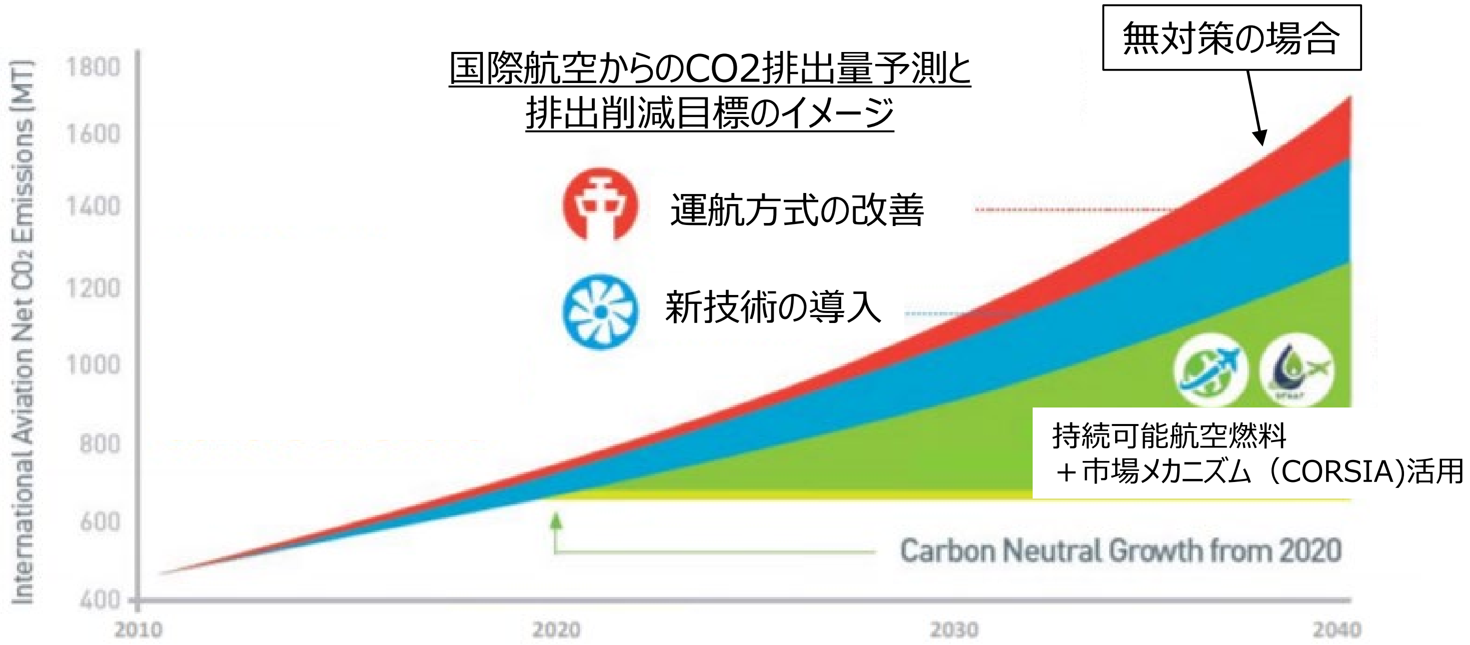
全世界でのCO2排出量：367億5360万トン
運輸部門：21.4%（うち 航空分野11.9%）

国内でのCO2排出量：11億3800万トン
運輸部門：18.5%（うち 航空分野5.0%）

出典：＜海外＞Climate Watch,the World Resources Institute(2020)より作成 https://www.wri.org/data/world-greenhouse-gas-emissions-2016
＜国内＞航空機運航分野におけるCO2削減に関する検討会（第１回：令和３年３月22日）より抜粋

航空分野におけるCO2削減に関する国際目標

- 航空分野では、既に温室効果ガス低減に関する国際的な合意目標が存在。
  - **2020年以降、国際航空における温室効果ガスの総量を増加させない**（国際民間航空機関（ICAO））
  - **2050年時点で2005年比半減させる**（国際運送協会（IATA））
- 目標実現には、①**運航方式の改善**、②**新技術導入（機体の軽量化、エンジン効率化、電動化、水素燃焼技術の導入等）**に加え、③**持続可能な航空燃料の導入**、④**市場メカニズムの活用**を組み合わせていく必要。



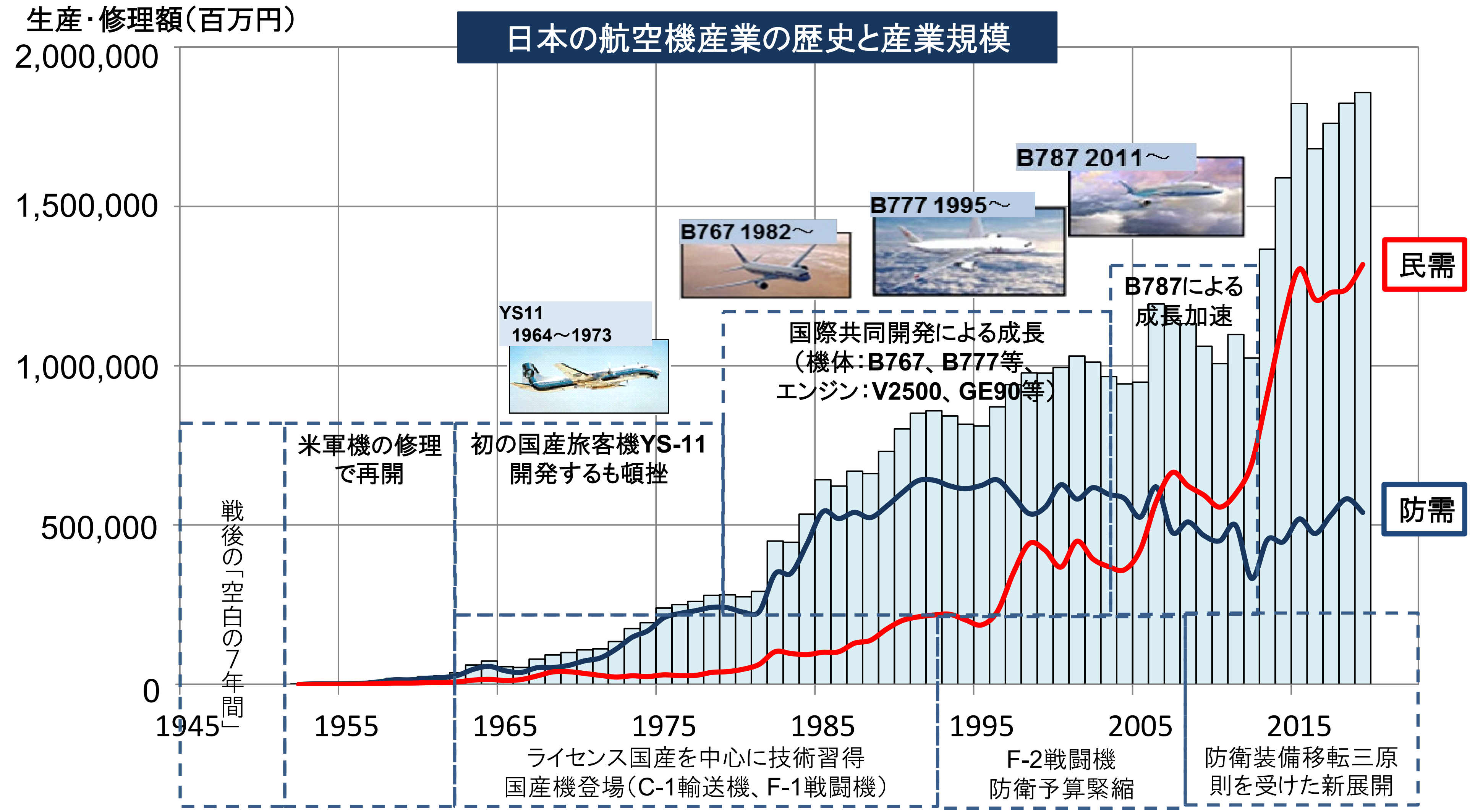
市場メカニズム（CORSIA制度）

- ✓ 2021年より、国際航空においてCO２排出を抑制する市場メカニズムが導入。
- ✓ 航空会社には**CO2排出量が一定の上限を超えた場合にオフセット義務（クレジット購入）が発生**。

出典：ICAO

我が国航空機産業の歴史

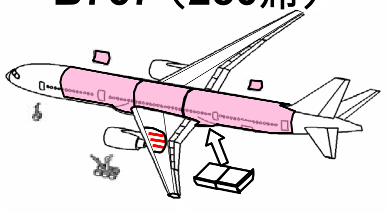
- 航空機産業の国内生産額は**約1.8兆円**。
- 主に機体やエンジンの**国際共同開発**に参加することで成長してきた。



【参考】国際共同開発について

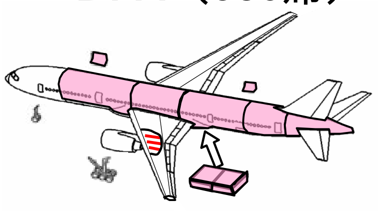
機体

B767（250席）



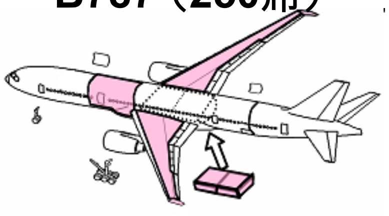
参加比率：15%

B777（380席）



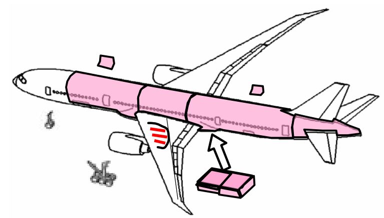
参加比率：21%

B787（250席）



参加比率：35%

B777X（400席）

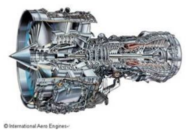


参加比率：21%

次世代航空機

エンジン

（A320）V2500



International Aero Engines

参加比率：23%

（B777）Trent800/ GE90

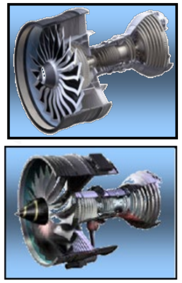
Rolls-Royce

参加比率：9～10%

（CRJ等）CF34-8/CF34-10

参加比率：30%

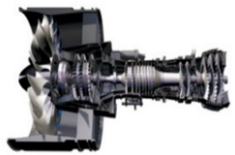
（B787）Trent1000/GenX



Rolls-Royce

参加比率：15%

（A320neo）PW1100GJM



International Aero Engines

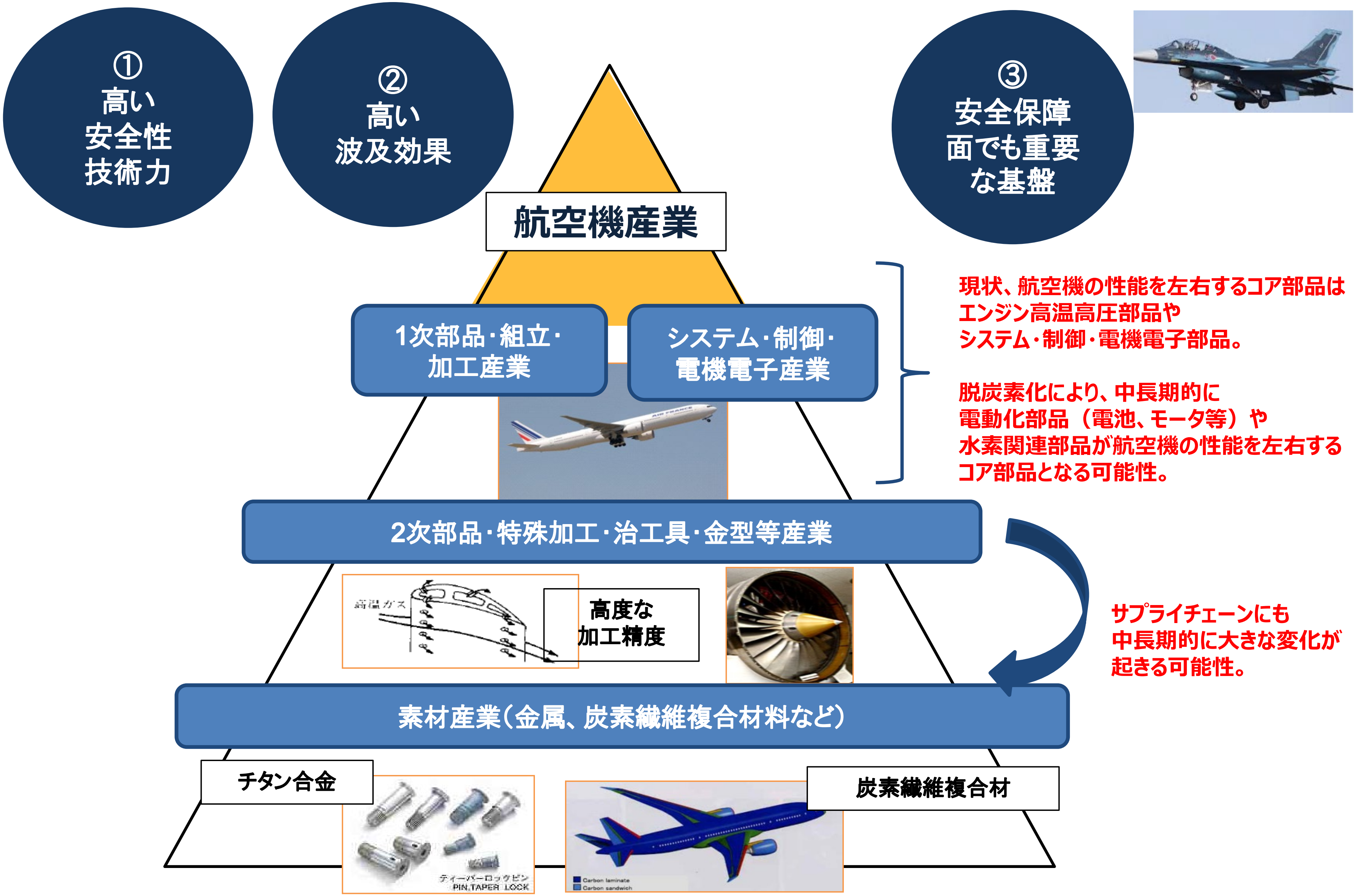
参加比率：23%

（B777X）GE9X

参加比率：10.5%

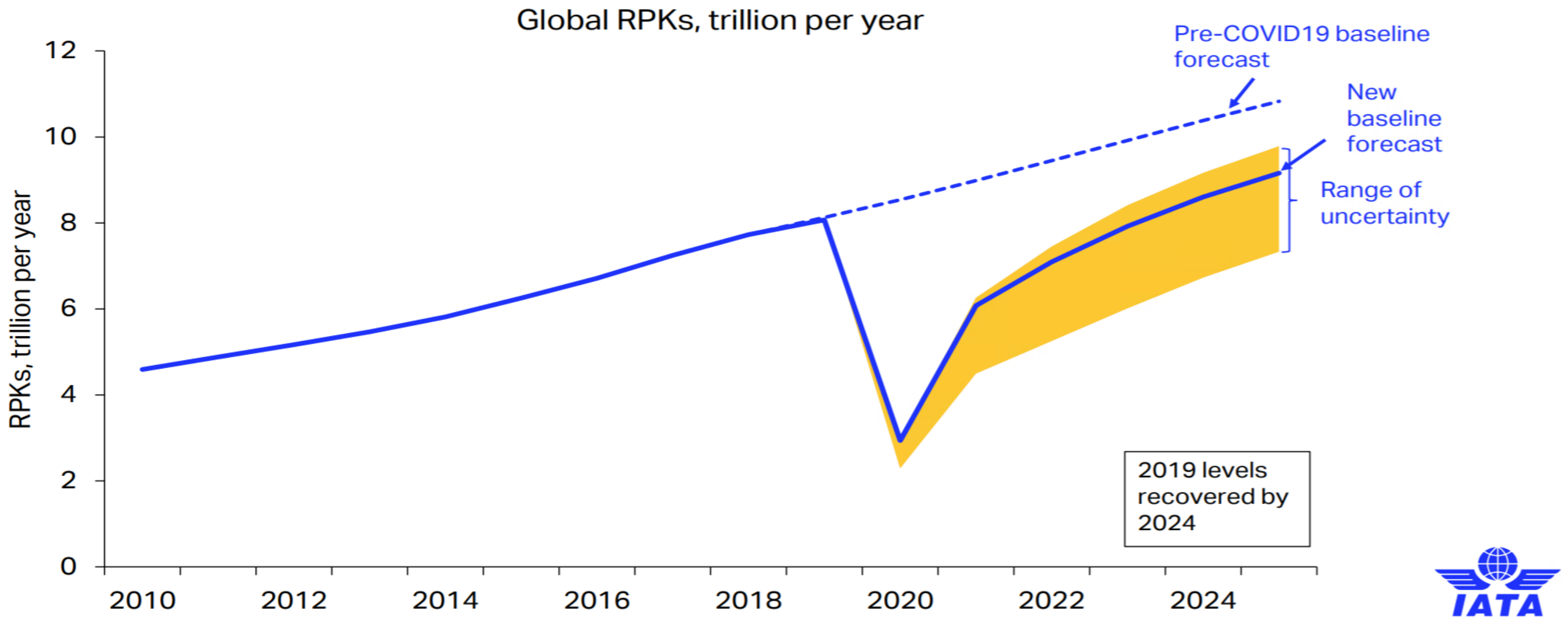
次世代エンジン

航空機産業のサプライチェーン構造、脱炭素化による変化



新型コロナウイルス感染症の拡大による航空業界への影響

- 新型コロナウイルス感染症の拡大前、アジア太平洋を中心に、世界の旅客需要は年率約5%で右肩上がりに拡大し、それに伴い旅客機は今後20年間で約3.5万機（約６兆ドル）の需要が見込まれていた。
- 新型コロナウイルス感染症の拡大による旅客需要が激減したことにより、LCCのみならず大手エアラインも倒産の危機。**旅客需要が2019年水準に回復するには2024年まで**かかるとの予測。
- その後は新興国等の経済成長を背景に**約3%程度の持続的な成長**を遂げると見込まれている。



出典：IATA/Tourism Economics ‘Air Passenger Forecasts’ October 2020　※2021年2月のレポートでは、さらに下方修正されている。

新型コロナウイルス感染症の拡大後の航空機産業の動向

- 航空需要の大幅減少に伴い、機体メーカ・エンジンメーカは減産や一時解雇等を発表。

＜機体メーカ＞　業界全体として35~50%の減収（2020年）

Boeing

- 2020年通期で**約120億米ドルの赤字**を計上。
- **16,000人の雇用削減**を発表。
- **787最終組立をチャールストン工場に集約**予定。

（2021年半ばにエバレット工場での組立は終了）

- 機体**月産レートの縮小**。

787：14機(従前) → 10機(20年2Q)→５機(２１年計画)、
777：5機(従前) →　4機(20年2Q)→２機(21年計画)。

Airbus

- 2020年通期で**約11.7億ユーロの赤字**を計上。
- **世界全体で15,000人の雇用削減**を発表。（政府支援により、実際は11,000人削減となる見込み）
- 機体**月産レートの縮小**。

A320：40機(20年2Q)(2021年には60機程度の従前予測)、
A350：9.5機(従前)→6機(20年2Q) →５機(20年3Q)

＜エンジンメーカ＞業界全体として約35%減収（2020年）

GE

- **航空機エンジン部門の従業員9000人削減**。
- 2020年通期の営業利益は**約21億米ドル（前年比-78%）**。

Pratt&Whitney

- **セグメントとしての2020年営業利益は約4.3億米ドル（前年比-78%）**

Rolls Royce

- 民間航空宇宙事業の2020年通期の営業利益は**約50.9億ポンド（前年比-37%）**

＜エアライン＞　業界全体として、約６０%減収（2020年）

- タイ航空、アビアンカ航空、ヴァージンオーストラリア航空など、**全世界で３０社以上の航空会社が破綻**。

ANA/JAL

- 航空機エンジン部門の**従業員17%の削減**を発表。
- コロナ禍直後は、旅客数は**国際線/国内線ともに90%前後の減少**。（国際線は引き続き約95%減、国内線は一時的に50%減まで回復したものの約75%減。）

各種報道資料から経済産業省作成

欧州の低炭素関連航空機産業支援策

- 昨今、欧州各国は、軽量化、代替燃料、電動化、水素航空機等の航空機の脱炭素化に関する技術開発を次々と発表。

仏政府

- 2020年9月 総額150億ユーロからなる航空機産業支援策を発表

カーボンニュートラル航空機の実現目標を2050年から2035年に前倒し。
カーボンニュートラルに向けた民間航空機の研究開発に15億ユーロ/3年間支援。

※エアバスは次世代機（2033-35年EIS）に向けた基礎研究として
①30%の燃費向上、②バイオ燃料、③水素技術を活用したゼロエミッションを柱としている

独政府

- 2020年6月、「国家水素戦略」を採択。総額90億ユーロの予算を確保。

一連の施策のうち、航空機支援としては、**燃料電池ハイブリッドシステム、水素発電機、水素燃焼エンジン等**の次世代航空機プログラムのため、2020から2024年まで計2,500万ユーロを支援するとしている。

英政府

- 2020年11月、「グリーン産業革命のための１０ポイント計画」を公表

1500万ポンドを投資し、2030年に就航する可能性のある**ゼロエミッション航空機の設計や開発**に取り組む

航空機産業の成長戦略「工程表」

●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

●具体化すべき政策手法： ①目標、②法制度（規制改革等）、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等

	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（2021年～2025年） → 技術実証（～2030年） → 技術搭載・採用拡大（～2040年～2050年）
- **推進系電動化（ハイブリッド電動）**の研究開発（2021年～2025年） → 技術実証（～2030年） → 技術搭載・採用拡大（～2040年～2050年）

※ 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（2021年～2030年頃） → **技術実証**（～2040年頃） → **技術搭載・導入拡大**（～2050年）

●軽量化 効率化

- **エンジン効率化**の研究開発（素材や設計等）（2021年～2025年） → 技術実証（～2030年） → 技術搭載・採用拡大（～2040年～2050年）
- 機体構造向け**炭素繊維複合材**の研究開発 → 技術実証（～2030年～2040年）／**技術搭載・採用拡大**（2021年～2040年） → **自立的拡大**（～2050年）

※ 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

●ジェット燃料

- **【バイオジェット燃料等】**安定した燃料製造技術の確立・低コスト化（2021年～2030年） → **バイオジェット燃料等の国際市場の動向**に応じて、競争力のあるバイオジェット燃料等の**供給拡大**（～2040年～2050年）
- **【合成燃料】**CO2から合成燃料までの一貫製造プロセスの確立（2021年～2030年） →

※ 藻類の培養によるバイオジェット燃料は、カーボンリサイクル産業の実行計画参照

航空機産業（グリーン成長戦略）

◆ 国際航空において急速に低炭素要求が強まりつつある中、ICAO（国際民間航空機関）は2019年比でCO2排出量を増加させないことを制度化。グリーンによる技術の変わり目を、我が国航空機産業の競争力を飛躍的に強化するチャンスと捉え、複合材、電動化、水素や代替燃料などの複数の要素における技術的優位性の確立を目指す。

	現状と課題	今後の取組
電動化	**装備品・推進系電動化には技術的課題有** • 装備品電動化は一部導入のみ（補助動力装置に使用されるリチウムイオンバッテリーについて搭載実績） • 電動化に不可欠な航空機向け電池(燃料電池含)、モータ、ジェネレータ、インバータについて、潜在能力はあるものの、航空機向けには性能向上が必要 • 日本企業の強みを売り込むことで、欧米メーカーとパートナーシップを強化 • 合わせて必要になる軽量化・効率化については、2010年以降、日本製炭素繊維複合材の活用が進んでおり、今後のシェア拡大が重要。また、素材や設計による更なるエンジン効率化が重要	**ハイブリッド電動化・全電動化への対応** • 2030年までに、機体のモデルチェンジに合わせ、装備品電動化に向けた技術、ハイブリッド電動化向け技術を確立 • 2050年に向け、装備品市場の拡大や、小型機（20人以下）における全電動化、リージョナル機（100人以下）以上のハイブリッド電動化に向けたコア技術の拡大、組み立て技術の確立を目指す • 世界の電動航空機・水素航空機の市場は拡大（2030-2050年で約2兆ドルを見込む） • 欧米メーカーとの連携強化とともに、産学官連携を通じて、**国際標準化**を推進し、海外市場を獲得 • **国際的な開発競争や制度の状況を踏まえつつ、国内の制度・仕組みを検討（航空機工業振興法）** • 並行して、複合材の軽量化・製造コストの更なる低減を実現、将来エンジンに向けた革新素材を開発し、将来機における市場拡大を目指す
水素航空機	**世界的に開発がスタートするも、技術開発要素は多数** • エアバスは、2035年に水素航空機の市場投入を目指すと公表。日本企業の取組が始動 • 日本企業が培った機体軽量化・エンジン効率化等の技術を活かせる可能性 • 軽量かつ安全性を担保した水素貯蔵タンク、水素燃焼に適したエンジン開発のほか、水素供給に関するインフラ、サプライチェーンの検討も要する	**水素への燃料転換のコアとなる技術を確立** • 2030年に向けて、欧米との連携を強化するとともにコア技術（水素貯蔵タンク、燃焼器等）の研究開発を促進 • 2035年以降の水素航空機の本格投入を見据え、コア技術の水素航空機への搭載を目指すとともに、水素供給に関するインフラ及びサプライチェーンを検討 • **国際的な開発競争や制度の状況を踏まえつつ、国内の制度・仕組みを検討（航空機工業振興法）** • 並行して、複合材の軽量化・製造コストの更なる低減を実現、将来エンジンに向けた革新素材を開発し、将来機における市場拡大を目指す

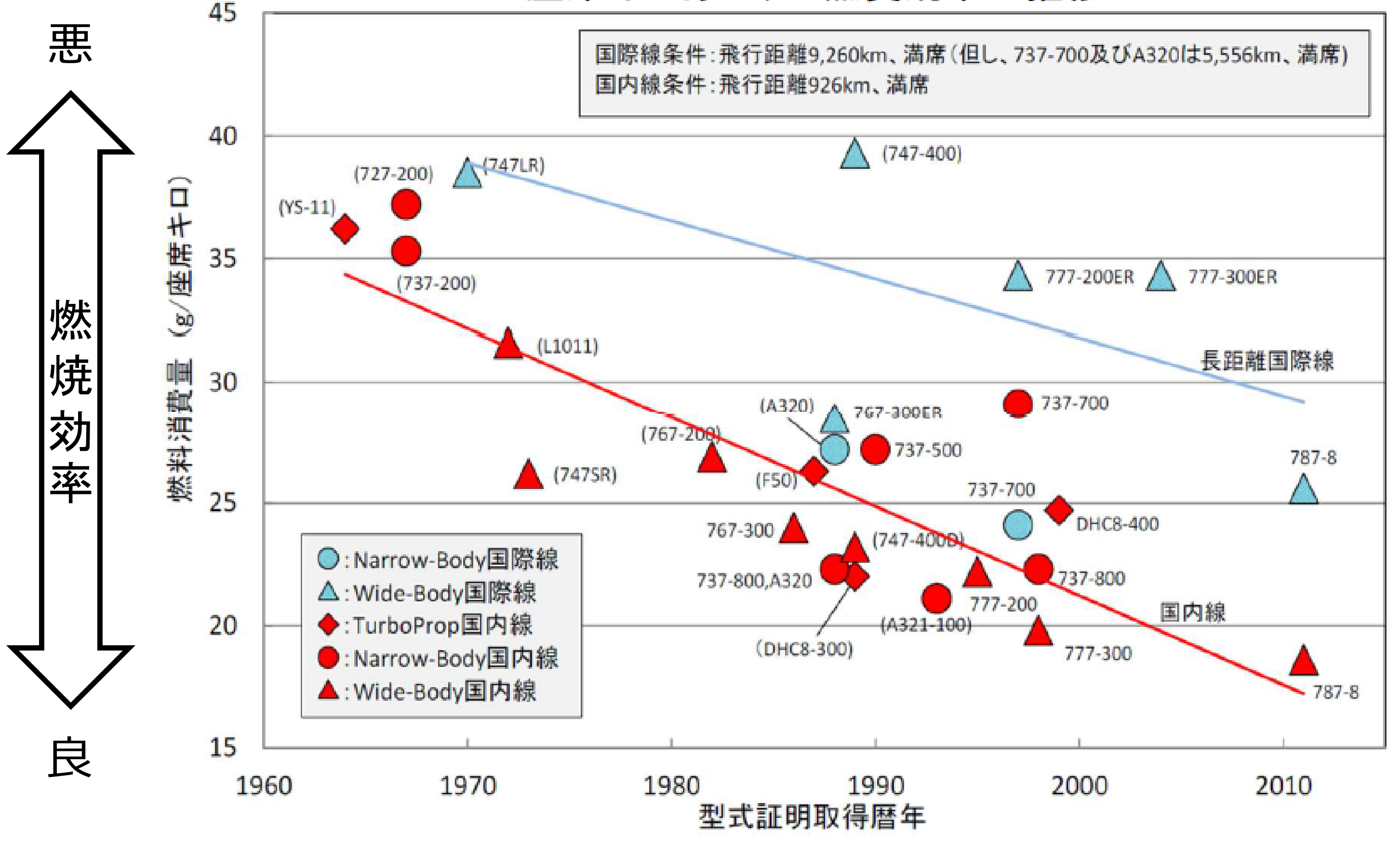
		現状と課題	今後の取組（イメージ）
ジェット燃料	バイオジェット燃料等（※1）	**安定供給・高コスト克服のための大規模化が課題** • 要素技術の開発が進展し、実証開始。ガス化FT合成（※3）は、様々な原料の品質の均一化、ATJ（※4）は、触媒反応の制御技術の確立が必要。	**大規模実証を通じたコスト低減、供給拡大** • コスト目標は、2030年に既存燃料と同価格（100円台/L）を目指す。（※ICAOの制度が来年から導入。バイオジェット燃料の市場は拡大（2030年時点：国内航空会社（国際線）だけでも1,900億円）。） • 大規模実証を実施し、コストを既製品と同等まで低減。他国に先駆けて2030年頃には実用化。バイオジェット燃料の国際市場の動向に応じて、競争力のあるバイオジェット燃料等の供給拡大。
	合成燃料（※2）	**合成燃料の低価格化と製造技術・体制の確立** • 商用化に向けた一貫製造プロセスが未確立。	**合成燃料の大規模化・技術開発支援** • 2050年にガソリン価格以下のコストを実現することを目指す。 • 革新的新規技術・プロセスの開発、商用化に向けた一貫製造プロセス確立のための応用研究を実施する。

（※1）藻類の培養によるバイオジェット燃料は、カーボンリサイクル産業の実行計画を参照。
（※2）発電所や工場等から回収したCO_2と水素を合成して作られる液体燃料。
（※3）木くず等の有機物を蒸し焼き（ガス化）し、触媒により液化する工程によりバイオジェット燃料を製造する技術（Fischer-Tropsch process（フィッシャー・トロプシュ法））。
（※4）Alcohol to jet の略。バイオエタノールを触媒等を用いてバイオジェットに改質する技術。

技術革新による機体の燃費向上

- これまで、機体構造の軽量化やエンジンの効率化等の技術革新により、飛躍的に航空機の燃費は向上してきた。

座席キロあたりの燃費効率の推移

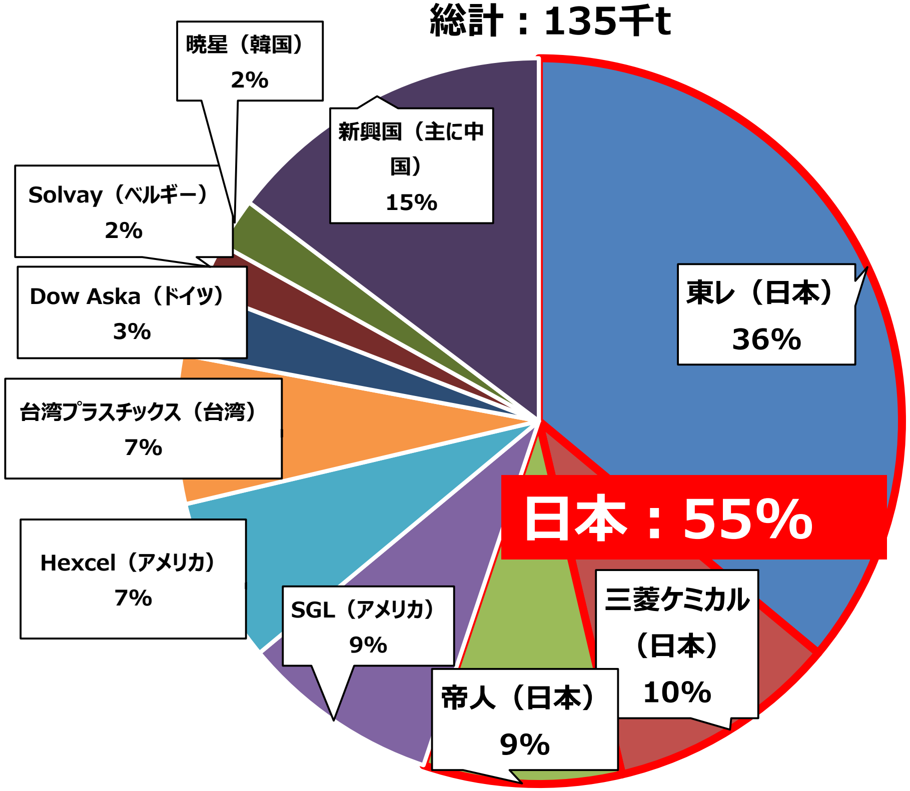


出典：（一財）日本航空機開発協会

【参考】日本における炭素繊維の優位性

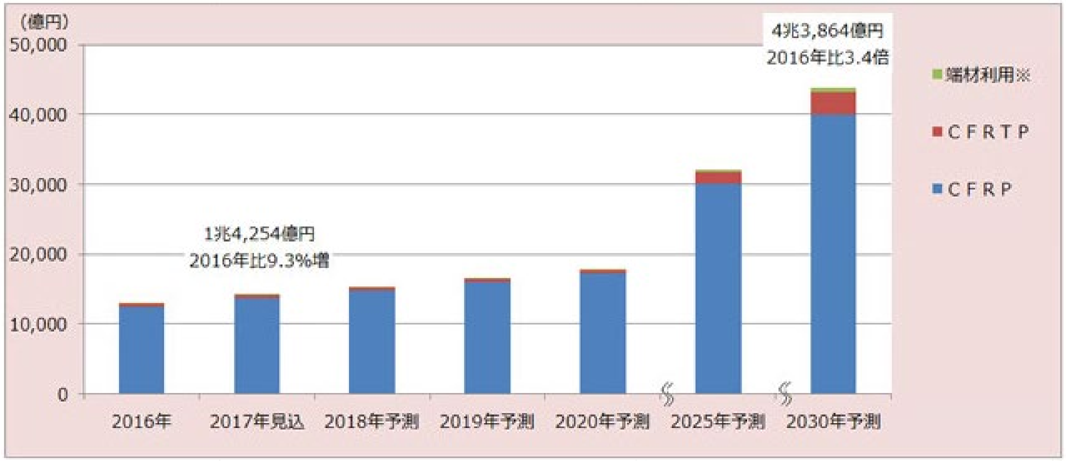
- **炭素繊維**は、東レ、三菱ケミカル、帝人の**日系3社で世界市場の半分以上**のシェアを占める。
- 比強度・比剛性に優れた炭素繊維複合材（CFRP)は航空機の機体にも利用される。

2018年　PAN系炭素繊維生産能力
（企業、国籍別）
総計：135千t



出典：日本化学繊維協会炭素繊維協会委員会
「第32回複合材料セミナー」資料
※東邦テナックス（当時）は帝人（現社名）で記載
※各社の生産能力値には子会社も含む

PAN系炭素繊維複合材料
（CFRP/CFRTP）の世界市場



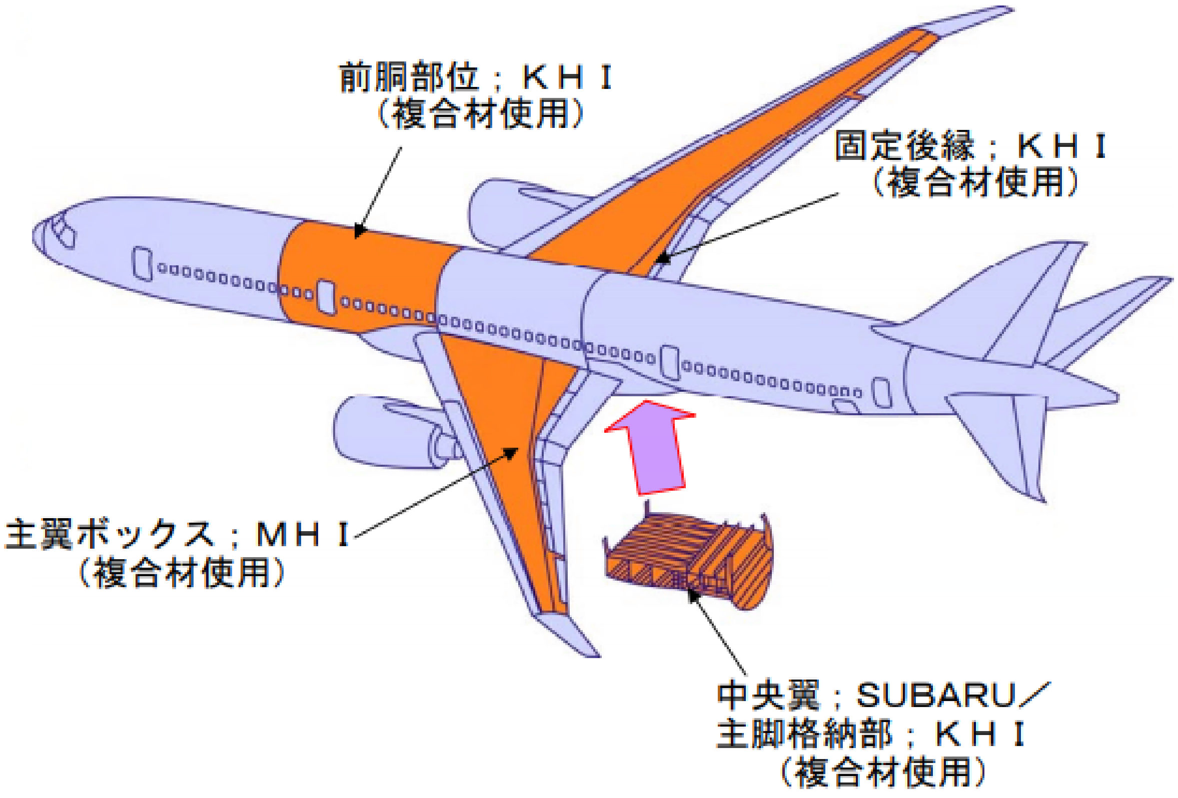
比強度・比剛性に優れることから航空宇宙、自動車産業に活用されるCFRP（炭素繊維と樹脂の複合材）の市場は右肩上がりの成長が見込まれる。

出典：富士経済グループ
「炭素繊維複合材料（CFRP/CFRTP）関連技術・用途市場の展望 2018」
※端材利用：端材利用CFRP/CFRTP。加工時に発生する端材を利用したリサイクルPAN系炭素繊維複合材料

【参考】日本における炭素繊維複合材（CFRP）の優位性

- 炭素繊維において優位性を持つ我が国は、炭素繊維（強化材）と樹脂（母材）を組み合わせた**炭素繊維複合材（CFRP）にも強みを持つ**。
- 例えばB787の機体構造では、**35%**の部位を日本企業が複合材を使用して製造している。

B787の機体製造における参画日本企業



出典：一般財団法人日本航空機開発協会「令和元年度版民間航空機関連データ集」

脱炭素化に向けた方策（燃料、電動化、水素等の比較）

- **バイオジェット燃料**は、現在の**原料供給量に限界があり**、今後の需要増に即時に対応できない可能性。**CO2削減量に限界**。その分を他の技術（電動化、水素等）で補う必要がある。
- **電動化（バッテリー）**は**小型機・短距離（1,000km以下）**では活用可能。
他方、**大型・長距離**にはバッテリーでは性能的に耐えられず、**水素の活用**が期待される。

Comparison vs. kerosene	Biofuels	Synfuels	Battery-electric	Hydrogen
Commuter <19 PAX	No limitation of range	No limitation of range	Maximum ranges up to 500-1,000 km due to lower battery density	No limitation of range
Regional 20-80 PAX				
Short-range 81-165 PAX				
Medium-range 166-250 PAX			Not applicable	Revolutionary aircraft designs as efficient option for ranges above 10,000 km
Long-range >250 PAX				
Main advantage ✓	Drop-in fuel – no change to aircraft or infrastructure	Drop-in fuel – no change to aircraft or infrastructure	No climate impact in flight	High reduction potential of climate impact
Main disadvantage ✕	Limited reduction of non-CO_2 effects	Limited reduction of non-CO_2 effects	Change to infrastructure due to fast charging or battery exchange systems	Change to infrastructure

<バイオ燃料、合成燃料>
○基本的に積載量・距離ともに制限無し

<電動化>
△小型・短距離(1,000km以下)では活用可能である一方、それ以上の積載・距離は実現不可能

<水素航空機>
○電動化よりも積載量・距離ともに伸長

<バイオ燃料>
△原料供給量に限界。CO2削減量に限界。また、CO2以外の環境影響低減も限界。

<電動化・水素航空機>
△ 新たに空港インフラの整備が必要

（出典）Clean Sky 2, FCH2 “Hydrogen-powered aviation”

将来技術導入のタイムライン

- **SAF(持続可能な航空燃料)** は**2020年代から**導入（機体サイズや航続距離に制限無し）。
- **電動化**は**2020年、コミューター機（9-50席、~60分以下のフライト）やリージョナル機（50-100席、30~90分のフライト）を中心に2020年代後半以降**に導入されていく。
- **燃料電池**は**2030年代以降**、リージョナル機(50-100席、30~90分のフライト)を中心に、**水素燃焼技術**は**2040年以降**に中小型機(100-250席、45~150分のフライト)中心に導入。

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Commuter » 9-50 seats » < 60 minute flights » <1% of industry CO_2	SAF	Electric and/or SAF	Electric and/or SAF	Electric and/or SAF	Electric and/or SAF	Electric and/or SAF	Electric and/or SAF
Regional » 50-100 seats » 30-90 minute flights » ~3% of industry CO_2	SAF	SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF
Short haul » 100-150 seats » 45-120 minute flights » ~24% of industry CO_2	SAF	SAF	SAF	SAF	Electric or Hydrogen combustion and/or SAF	Electric or Hydrogen combustion and/or SAF	Electric or Hydrogen combustion and/or SAF
Medium haul » 100-250 seats » 60-150 minute flights » ~43% of industry CO_2	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF potentially some Hydrogen
Long haul » 250+ seats » 150 minute + flights » ~30% of industry CO_2	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF

小型旅客機CO2排出量
約70%

そのうち、電動化/水素技術で
アプローチ可能な
航続距離2,00km以下の
旅客機のCO2排出量は
約40%

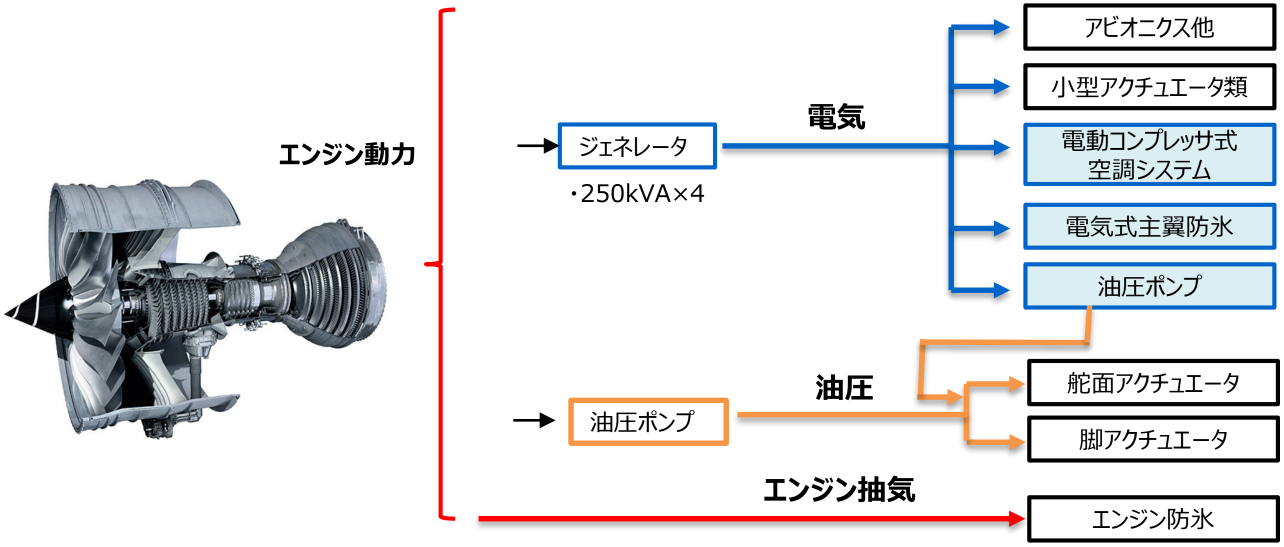
（出典）:"Waypoint2050"（https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf）

航空機装備品・システム技術の変化 ～電動化～

- 機体重量の軽減による燃費効率向上と運航コスト削減を目的に、**動力系統の電動化（More Electric）**が進む。

現在

787ではエンジン抽気動力を電気に大きく変更。電動システムの増加により十分な出力を有する発電機が登場



2030年以降

次世代機では、更に様々な技術を総動員し、電動化が進む可能性。
バイオジェット燃料の導入　／　**推進系・装備品の電動化**　／　**水素燃料**の導入　　等

（出典）（公財）航空機国際共同開発促進基金（http://www.iadf.or.jp/document/pdf/24-1.pdf）を改編

世界における電動航空機の開発、エアライン各社の動き

- 欧米メーカーを中心に、複数の航空機電動化プロジェクトが推進されている。
- また、各国政府・エアライン各社も、電動化等の新技術を導入した機体の調達を進める動き。

<Project 804>

- プラット・アンド・ホイットニー社とコリンズ・エアロスペース社との連携により、２MW級の推進システムを搭載したハイブリッド航空機(ターボプロップ機)の開発を実施中。
- 当該システムにより、既存機に比べて30%の効率向上が可能。（2022年試験飛行予定）

<STARC-ABL>

- NASAが考案した150席級の旅客機。
- 両翼に搭載したエンジンにより、尾翼に取り付けた電動ファンを回転させ、摩擦抵抗を軽減することで効率的に推進力を得ることを可能にした構造。

<Zero Avia>

- ゼロアビア社は2020年9月、6人乗りの電動航空機（燃料電池）で数分間のフライトを完了。
- 当社は2023年までに20席サイズの航空機で500マイルの飛行を予定。

ノルウェー政府

2040年までにノルウェー国内を発着する航空機をすべて電動航空機に切り替えると発表。

UNITED

2021年2月、スタートアップ企業であるArcher社から200機のeVTOL（電動垂直離着陸機）を購入すると発表。Archer社は2024年に当該機体を市場投入するとしている。

FINNAIR

2021年、スウェーデンのスタートアップ企業であるHeart Aerospace社との間で、
19席、飛行距離400kmの電動航空機を20機購入するとのLOI（Letter Of Interest）を締結。
Heart Aerospace社は2026年までに当該航空機を市場投入するとしている

出典：E-FANX　Airbus　https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/electric-flight/e-fan-x.html
Project804　SAEinternational https://www.sae.org/news/2019/04/utc%E2%80%99s-project-804-hybrid-electric-demonstrator-may-increase-regional-jet-efficiency-by-30-percent
STARC-ABL　NASA　https://sacd.larc.nasa.gov/asab/asab-projects-2/starc-abl/　等

欧米政府・企業との連携策

- 経済産業省と欧米政府・企業との協力枠組を活用し、マッチングや共同技術開発支援を通じて日本企業と海外企業の連携を強化。
- 海外企業は、日本企業のもつ複合材、電動化等の低炭素化に必要な技術に注目。

日政府×ボーイング

2019年1月
〇**電気推進に必要な電動化技術、複合材製造技術**、自動化技術等について協力合意

日政府×仏政府

2013年6月
〇民間航空機産業における協力覚書を締結

日×エアバス

2017年3月
〇材料や航空システム、製造技術等について協力合意。
〇2019年の日エアバスWGは**電動化、複合材リサイクル**に特化して実施

日×サフラン

2019年6月
〇**航空機の電動化、**AIなどの革新的技術等について協力合意

経済産業省の既存事業での取り組み

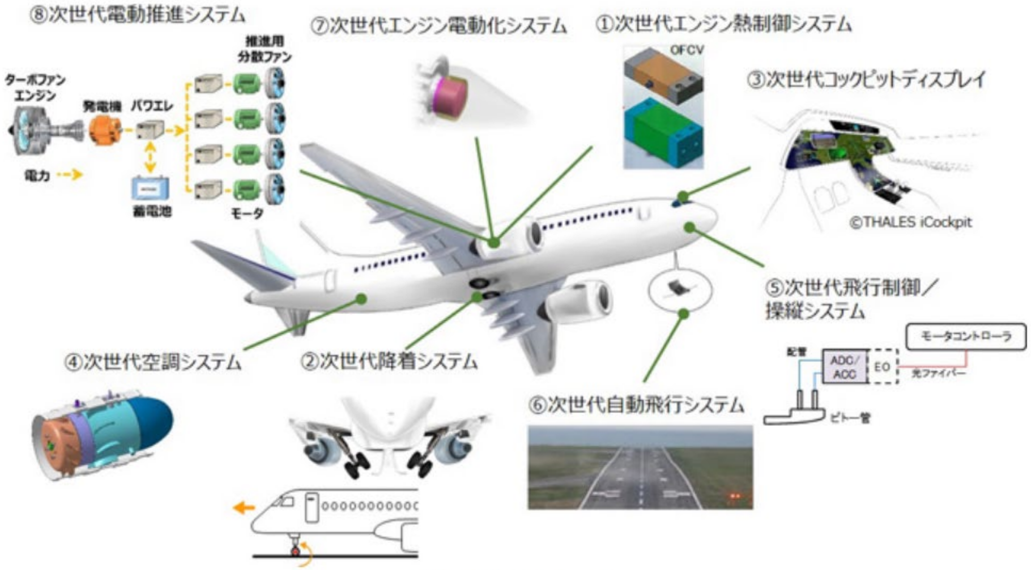
● 経済産業省では現在、NEDO事業を通じて、加工性に優れた炭素繊維複合材や、エンジンの効率化、航空機向け蓄電池等の電動化に関する技術開発を推進している。

2020年度～2024年度（予定）
「次世代複合材創成技術開発事業」

航空機構造向け複合材の加工性向上やエンジンの効率性向上に向けた技術開発を推進

・熱可塑性複合材の大型部材製造技術開発
・セラミック複合材の製造技術開発　等

図　プロジェクト概要



成果適用のイメージ

2015年度～2023年度（予定）
「航空機用先進システム実用化プロジェクト」

装備品や推進系に用いる電動化関連技術の開発を推進

・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

目次

- カーボンニュートラル社会の航空機産業の位置づけと社会実装モデル創出の意義

- プロジェクト：次世代航空機関連技術開発事業
  ①水素航空機
  ②複合材部品

本事業の目標等と関連する研究開発内容について

- 水素航空機の実現に必要な技術として、①極低温(－253℃)に耐え得る小型軽量な液化水素貯蔵タンク、②水素の安定燃焼、低NOxを両立するエンジン燃焼器、③大幅に変更が必要な機体設計に係る技術開発を実施(目標①)。また、次々世代機以降(2035年以降)の航空機構造の飛躍的な軽量化を目指す(目標②)。これらを目的として以下の目標、研究開発内容を設定。
- 現状、技術が未確立、かつ商用化まで15年以上の革新的な技術は委託で開始することを想定。

研究開発目標とその考え方等

- 目標①：**事業終了まで**に液化水素燃料貯蔵タンク、エンジン燃焼器、機体設計等の**水素航空機の成立に不可欠なコア技術の確立（TRL6以上*）等**　*NASAが設定する技術レベル。IEAの「TRL6以上」相当
  → 航空機特有の飛躍的な軽量化、安全性・信頼性要求に対応することが必要でハードルが高い。
- 目標②：**2035年以降に投入される航空機**への技術搭載を目指し、主翼等の重要構造部材に関して、既存部品材料（アルミ合金）と比較して**約30%の軽量化、TRL6以上**を達成する。
  → 低燃費・推進系の変更による設計の大幅変更等、航空分野の脱炭素化には必要不可欠。

目標①
- 内容①：水素航空機向けエンジン燃焼器技術開発（委託→1/2補助）
- 内容②：液化水素燃料貯蔵タンク技術開発（委託→1/2補助）
- 内容③：水素航空機機体構造検討（委託→1/2補助）

目標②
- 内容①：航空機主要構造部品の飛躍的軽量化に向けた技術開発（1/2補助）

次世代航空機の開発事業

直接コントロールできる部分

経済・社会等の変化
（誰が／何が、どう変化することを目指しているか）

（インプット）

予算
[2021−
2030年]
（単位：億円）

（アクティビティ）

①水素航空機に関するコア技術の研究開発
[予算： 億円]

②複合材主要構造部品の複雑形状・飛躍的軽量化への対応
[予算： 億円]

③航空機関連の部材技術に関する国際標準化、空港周辺のインフラ整備検討
④国際標準化

（アウトプット）

水素航空機を実現するためのコア技術確立(TRL6以上)
[測定指標]TRL
[2030見込]
技術確立（TRL6以上）

機体の軽量化・複雑形状製造へ対応可能な技術確立(TRL6以上)
[測定指標]TRL
[2030見込]
技術確立（TRL6以上）
複雑形状への対応（設計許容値1.1~1.2倍）、軽量化（既存複合材部品-10%）

機体・エンジンの技術開発とあわせて海外と連携しつつ、検討・整備
国際標準化議論への参画促進

（短期アウトカム）

2030年CO2削減効果
[測定指標]
CO2削減量試算値
[2030年見込]
−

2030年経済波及効果
[測定指標]
世界市場規模推算値
[2030年見込]
−

（中長期アウトカム）

2050年CO2削減効果
[測定指標]
CO2削減量試算値
[2030年見込]
3.9億トン

2050年経済波及効果
[測定指標]
世界市場規模推算値
[2030年見込]
1.2兆円

（インパクト）

2050年カーボンニュートラル達成

経済効果190兆円

<u>アウトプットの達成が、アウトカムの発現につながることを示すエビデンス</u>

- 将来航空機の導入時期は各OEMメーカーから明確には示されていないが、各種レポート(※)において、推進系の電動化技術の搭載、水素燃料の活用が開始されるのは2035年、2040年頃に市場投入される航空機からと示されている。航空機開発においては、市場投入の約5年前にシステム/サブシステムモデルやプロトタイプモデルが、実環境と類似の環境において実証（TRL6）され、OEMとの共同開発を進めることが必要とされており、将来機に日本の技術が搭載されるためには2030年頃に当該技術レベルの達成が必須。

（※）Waypoint2050（https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf）
destination2050（https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/03/Destination2050_Report.pdf
EU HYDOROGEN-POWERED AVIATION(https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200720_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web.pdf)

エアバスの公表したゼロエミッション航空機

- 2020年９月、エアバスは、2035年に世界初の「ゼロエミッション航空機」の実用化を目指すとして、**３種類のコンセプト航空機（ZEROe）を公表**。2020年代後半までにこれらのプロトタイプを完成させる計画。
  ※　仏政府は、６月COVIDからの復興を目的に、総額150億ユーロからなる航空産業支援策を発表。
  このうち、15億ユーロを航空産業のカーボンニュートラルに向けた研究開発に充当しており、当該計画に呼応する形。

- ３つのコンセプトはいずれも、**液体水素を燃料として燃焼させる改良型ガスタービンエンジン**とガスタービンを補完する**水素燃料電池**から構成されるハイブリッド型の推進システム。

ターボファン

２つのハイブリッド水素ターボファンエンジンにより推進。120-200席を想定。3700km以上の後続距離を持ち、大陸間飛行が可能。
燃料となる液体水素は後部圧隔壁に貯蔵。

ターボプロップ

ターボファンの代わりにターボプロップエンジン（ガスタービンエンジンの1形態で出力の大部分をプロペラの回転に当てる）を推進源として用いる。
定員は最大100席。航続距離は1850キロで近距離飛行向け。

ブレンデッド・ウィング・ボディ

翼と機体が一体化した「ブレンディッド・ウイング・ボディ」デザイン。水素ターボファンエンジンにより推進。
定員は最大200席。航続距離は3700キロ。胴体が広いため、水素の貯蔵や供給方法については多様な選択肢が可能。

（出典）: https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html

水素航空機の実現に向けた空港周辺のインフラ整備

- 水素航空機の実現には、機体・エンジン側の技術開発だけではなく、空港インフラ側の開発も必要。**水素燃料の輸送、貯蔵、供給設備やオペレーションの変更等**が必要。また、搭載必要量と合わせて水素燃料価格も、既存ケロシン燃料やSAF等とも比較して検討していく必要。
- フランスでは、パリ周辺地域の空港を運営するADPグループ、エールフランス-KLM、エアバス等が、空港における水素燃料の利活用のためのエコシステム構築に向けて世界規模でパートナーの公募を開始する等、欧州が先行する形で検討が開始されている。

Overview of fuel supply chain for LH_2 and Synfuels

✓ Always applicable
(✓) Sometimes applicable

	Descrip-tion	Energy	H_2 pro-duction	CO_2 cap-ture + fuel synthesis	H_2 lique-faction	Shipping	Distribution	H_2 lique-faction	Storage	Refueling
Main H_2 pathways	Off-site + truck	✓	✓		✓	(✓)	✓		✓	✓
	Off-site + pipeline	✓	✓				✓	✓	✓	✓
	On-site	✓	✓					✓	✓	✓

生成 ←→ (Energy ～ H_2 liquefaction)　輸送 ←→ (Shipping ～ Distribution)　貯蔵 ←→ (Storage ～ Refueling)

（出典）Clean Sky 2, FCH2 “Hydrogen-powered aviation”

水素航空機の実現に向けたタイムライン

- エアバスは前述のとおり、2035年に水素燃焼や燃料電池技術を搭載した「ゼロエミッション航空機」を市場投入すると公表。
- 機体サイズや飛行可能距離に応じて、順次導入されるとの分析も存在。

~2030年市場投入

コミューター機
（20人弱乗り、飛行可能距離500km）

2035年～市場投入

中小型機
（約165人乗り、飛行可能距離2,000km）

2030年

2035年

2030~2035年市場投入

リージョナル機
（約80人乗り、飛行可能距離1,000km）

Airbusは2035年にゼロエミッション航空機を市場投入すると公表

Clean Sky 2, FCH2 “Hydrogen-powered aviation”等を参考に経済産業省作成

水素航空機の実現に必要な主な技術

- 航空機においては、地上設備等と比較して、**軽量化・省スペース化・低NOX化の要請に応えつつ、低圧環境下での極めて高度な安全性・信頼性の確保**が求められる。
- 宇宙分野やエネルギー分野で培った技術を活用しつつ、水素航空機向けの技術開発を推進していく。

燃料制御（逆火、NOx生成）

水素燃料は逆火が起こりやすく、また、既存ジェット燃料よりも燃焼温度が高いため、NOxが生成されやすい。
→　これらの課題を解決した**エンジン燃焼器**の開発が必要。

水素燃料貯蔵

水素燃料に代替した場合、既存ジェット燃料の４倍の体積が必要となると言われている。
→　**軽量かつ、極低温液体水素を適切に貯蔵することが可能なタンク**の開発が必要。
→　合わせて、**適切に機体設計を見直す**ことが求められる。

安全性確保

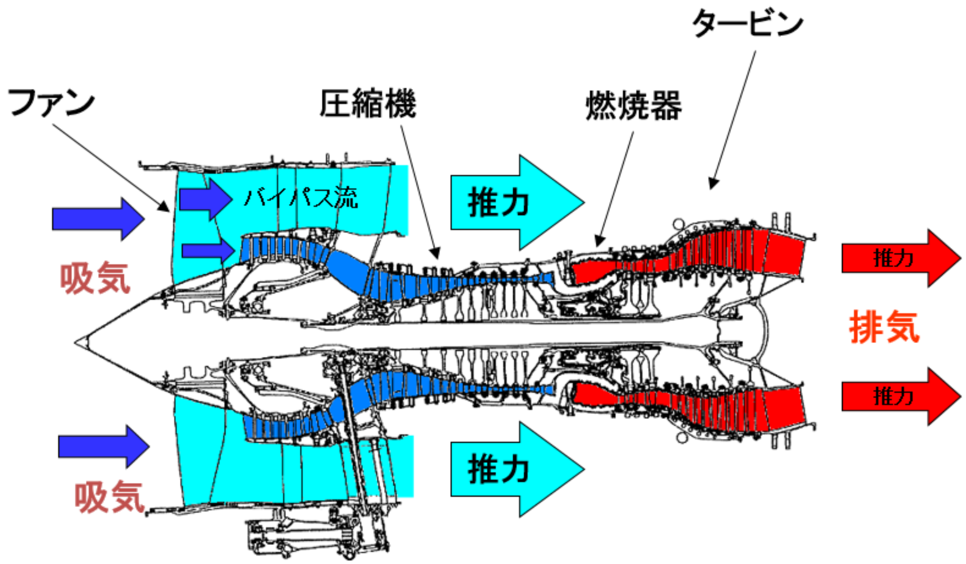
航空機を構成する部品、特に飛行に重要な影響を与える部品（10のマイナス9乗分の１しか故障を許容しない）は高度な安全性が求められる。
→　**安全の高い貯蔵タンクからエンジンまでの一連の貯蔵・供給システム**の開発が必要。

水素燃焼向けエンジン燃焼器開発

- 水素燃料特有の**逆火やNOx排出量等**の課題に対応する必要がある。特に航空機エンジンは、**既存ジェット燃料の燃焼時や地上水素ガスタービンと比較して、燃焼器入口温度が高温となる**ため、NOx排出量の低減が重要。

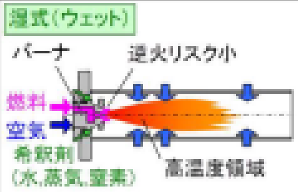
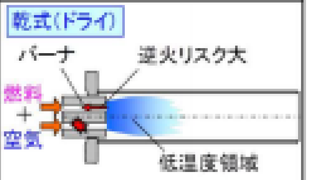
航空機エンジンの仕組み

- ファンで取り入れた空気を圧縮機で圧縮、圧縮された空気に燃焼器で燃料を混合して燃焼し、タービンを通過した後に勢い良く排気するとともに、ファンから取り入れた空気をそのまま後方へ噴出させることで効率よく推力を得ている。
- 水素航空機の場合、エンジンの構造は既存航空機と変わらず、水素燃焼に対応する燃焼器周辺の改良が必要。



技術的課題・水素燃焼方式

- 燃焼速度が速いほど逆火が起こりやすく、燃焼器の破損につながる。また、高温になるほどNOX排出量は増加。
- 上記のような課題に対応するため、地上ガスタービンにおける開発で得た知見を水素航空機でも活用していくことが期待される。

		拡散燃焼方式	予混合燃焼方式
構造			
特徴	長所	逆火リスク低	低NOx、高効率化
	短所	プラント効率の低下 （NOx低減の希釈剤投入のため）	逆火リスク高
NOx低減		湿式（ウェット） （希釈剤の投入必要）	乾式（ドライ） （希釈剤の投入不要）
対応燃料		天然ガス、水素リッチガス、 低カロリーガス	天然ガス

出典：公益社団法人自動車技術会
「JSAE Engine Review SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018」

水素燃料貯蔵タンク、機材構造の検討

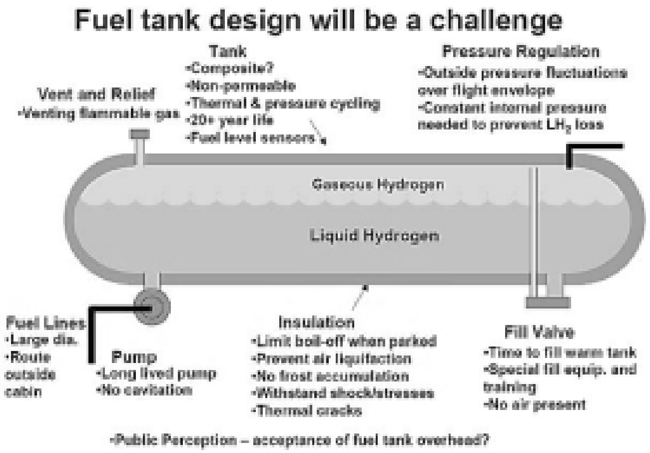
- 水素燃料を航空機で使用する場合、軽量化の観点から、低圧で高密度になる液体状態での搭載が現実的。液化水素を搭載する場合、**既存燃料の約4倍**の体積が必要となり、機体全体の構造検討が必要。
- また、タンクは**軽量かつ安全、極低温に対応**することが求められるほか、**水素燃料を貯蔵タンクからエンジンまで安定供給するための燃料供給システム**の開発が必要。

水素燃料貯蔵タンク

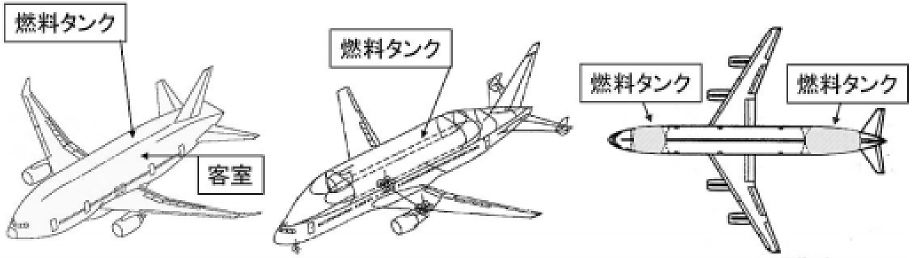
- 液化水素タンクはロケットでは実用化されているが、航空機においては、要求特性が異なることから実用化には至っていない。
- 航空機向けには、軽量、耐久性、気密性等を両立させる必要。
- また、ベント管、リリーフ弁、ポンプ、供給バルブ等も航空機への搭載に適した技術開発が必要。

燃料供給システム

- ジェット燃料は主翼に搭載されている一方、液化水素を搭載する場合体積が約４倍となるため、タンク配置等を抜本的に見直す必要。
- 加えて、極低温の水素燃料を貯蔵タンクからエンジンまで運搬するための供給システムの開発も必要である。



例：燃料タンク配置の検討例



出典：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）「水素燃料航空機の国内外検討調査」

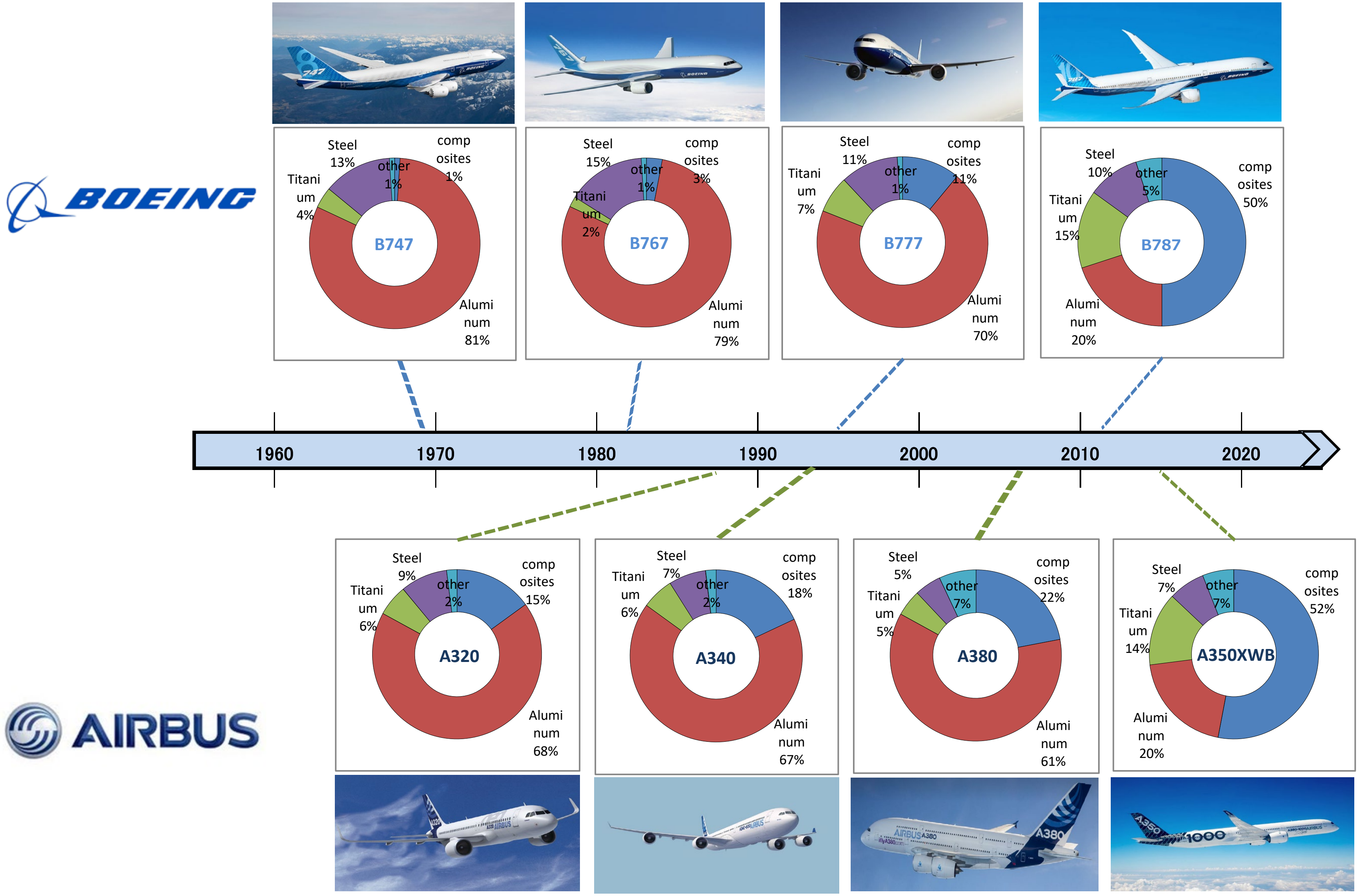
目次

- カーボンニュートラル社会の航空機産業の位置づけと社会実装モデル創出の意義

- プロジェクト：次世代航空機関連技術開発事業
  - ①水素航空機
  - ②複合材部品

航空機構造材料の変遷　～軽量化～

- 軽量な機体のため、比強度・比剛性に優れた**炭素繊維複合材（CFRP）**の活用が進展。それに応じて素材技術、加工技術、成形技術、品証技術、サプライチェーンなども大きく変化。



出典：一般社団法人日本鍛造協会
「航空機におけるアルミニウム
合金の利用の概況と今後」

航空機構造の大幅な変更への対応

- 2035年以降に投入される予定の水素航空機や、更なる燃費向上を目指す機体を開発するためには、機体構造の大幅な変更が必要になる可能性。こうした構造に対応するため、構造材料の大幅な強度向上が求められる。

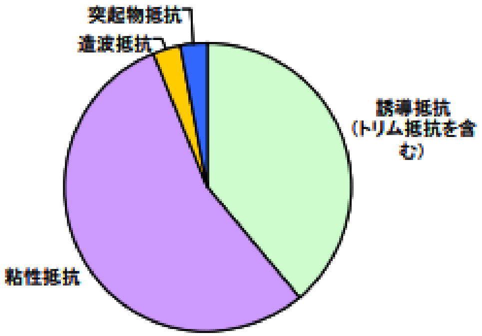
Airbusが公表しているBlended Wing Body

- 現状は機体形状の成立性等の課題が多くあるものの、水素燃料航空機体として翼胴機体（BWB、Blended Wing Body）の研究が各国で行われている。

Boeingが公表しているTransonic Truss-Braced Wing

- 旅客機の巡航時の空力抵抗のうち、粘性抵抗（表面摩擦抵抗等）と誘導抵抗（揚力の発生に伴う抵抗）が9割を占め、両者の低減が効果的。

例：B787は主翼のアスペクト比を増大することで従来の機体と比べて空力抵抗を低減した。



出典：公益財団法人航空機国際共同開発促進基金「エコな航空機を実現するための空力技術」

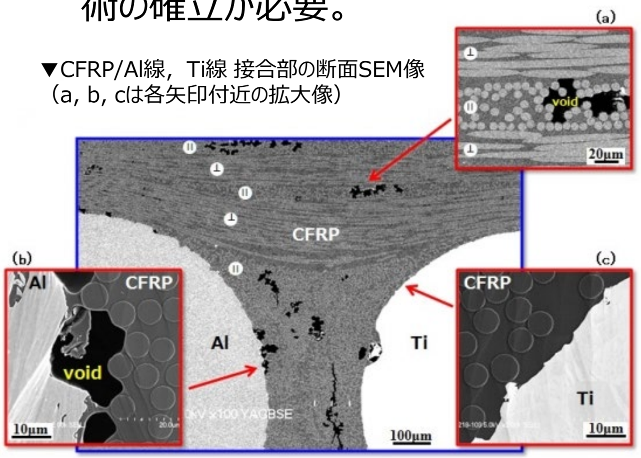
強度向上・軽量化に向けた技術開発

- 航空機構造の大幅な変化に対応するため、**強度向上**を図る必要。**ボイドやリンクルの低減**に向けた技術を確立することが必要である。加えて、**大幅な軽量化**に向け、信頼性を維持した上で結合部の**ファスナの低減**が必要。
- こうした技術開発を、需要に対応した生産レート・コストと両立させていくことが重要。

ボイドレス

- 樹脂中の水分や空気等が原因となり、ボイド（空洞）が生じることがある。
- ボイドはCFRPの強度特性を低下させるため、可能な限り低減させる成形技術の確立が必要。

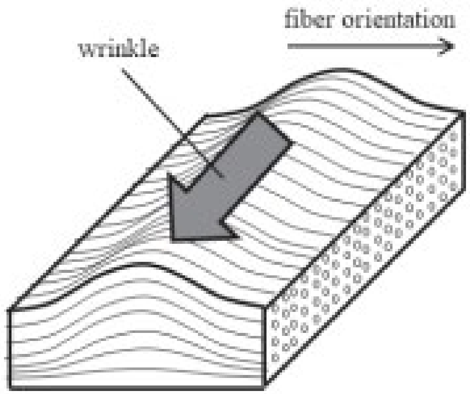
▼CFRP/Al線，Ti線 接合部の断面SEM像
（a, b, cは各矢印付近の拡大像）



出典：株式会社日東分析センターウェブサイト

リンクルレス

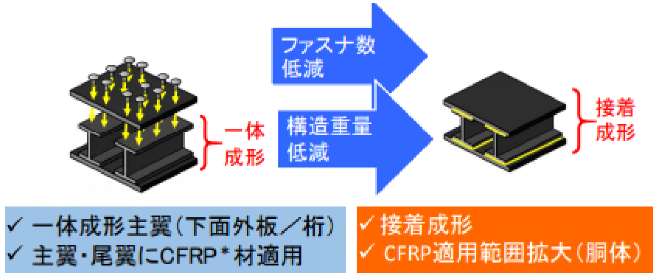
- 特に厚肉のCFRPの成形過程においてリンクル（しわ）が生じることがある。
- リンクルは剛性、強度不足につながることから、可能な限り低減させる成形技術の確立が必要。



出典：大阪大学、新明和工業株式会社
「炭素繊維強化複合材料の成形時におけるリンクル発生限界に関する研究」

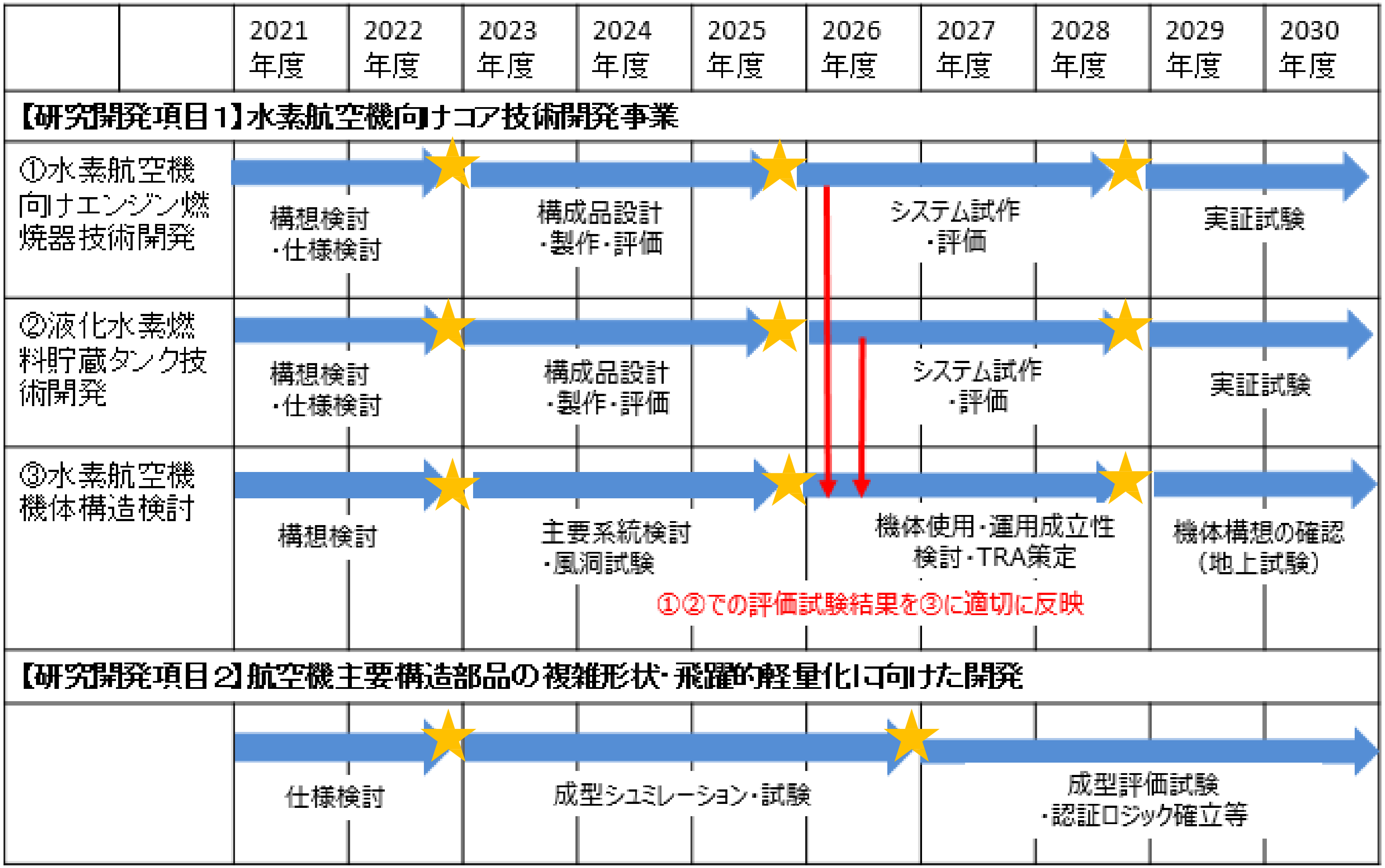
ファスナレス

- 接合部の締結にファスナ（ボルト、ナット類）を使うと、その分の重量やコストがかさむ。
- 軽量化のためには、接合部の信頼性を維持した上でファスナを使用しない接合技術の確立が必要。



出典：防衛装備庁「機体構造軽量化技術の研究　外部評価報告書」

実施スケジュール（一例）

- 具体的な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、想定される一例は以下のとおり。また、ステージゲートを設定し、事業進捗を見て、継続可否を判断。

★：ステージゲート