



カーボンニュートラルに向けた日本の各産業の取り組み

次世代航空機の実現を目指して

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、各分野で温室効果ガスの排出削減の取り組みが進められている。航空機産業では航空需要の高まりに応えながら、次世代航空機の姿を模索している。

アジアとヨーロッパをつなぐ世界最大級の国際空港の一つ、イスタンブール国際空港(トルコ)。

航空需要の高まりとCO₂排出量削減

2019年からの新型コロナウイルス感染症の影響により、航空需要は世界的な打撃を被った。しかし2024年には2019年と同水準まで回復し、その後、新興国などの経済成長を背景に、年率約3%程度で成長することが見込まれている。これに伴いジェット旅客機の需要も増加するとみられ、2041年の運航機数は2021年比約1.7倍との予測が発表されている(図1)。

こうした成長の予測の一方で、カーボンニュートラルの実現に向けて脱炭素化の要求が高まっている。

国連の専門機関である国際民間航空機関(ICAO)は、2022年10月に、国際航空分野で2050年までにCO₂排出量を実質ゼロにする、という長期目標を採択した。

これを実現するためのアプローチとしては、運航方式の改善、持続可能な航空燃料の導入、市場メカニズムの活用、新技術の導入などがある。これらの要素を組み合わせ、CO₂排出量ゼロの目標を達成しようという取り組みが始まっている。このうち、導入が期待される新技術としては、構造材の軽量化や燃費改善などが挙げられる(図2)。

航空機に採用される金属材料

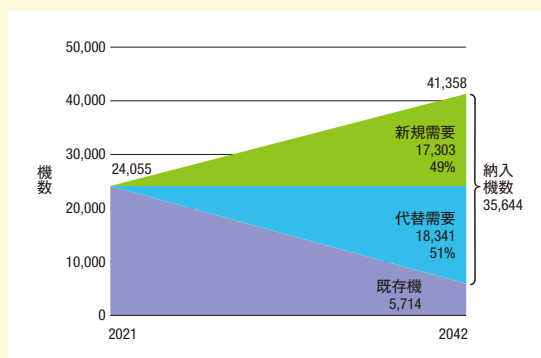
CO₂排出量を削減する方法の一つに、材料の軽量化がある。空を飛ぶ航空機にとって、機体の軽量化は永遠の課題と言われている。

航空機に使われる材料の種類と使用部位を表1に示す。このうち金属材料には、アルミニウム合金、チタン合金、合金鋼、耐熱合金などがある。金属材料のうち、比重が大きい鉄鋼材料などは軽量化にはあまり貢献しないが、材料特性を生かして適材適所で選択されてきた。

機体構造に以前から多く使われてきたのはアルミニウム合金である。1969年に初飛行したB747では、機体構造の約8割を、金属材料の中でも比強度・比剛性が高いアルミニウム合金が占めていた。1990年代以降は炭素繊維強化プラスチック(CFRP)などの複合材の使用量が増加し始め、例えばB787(2011年就航)では機体重量の50%以上を占めている(図3)。複合材料とともに使用量が伸びたのがチタン合金であり、B787の機体重量では、それまでの数%から十数%にまで増加した。

ジェットエンジンでは、燃焼ガスが高温であるほど高効率であるため、耐熱材料が使用されている。ジェットエンジンのうち比較的低温の部品にはチタン合金が使用され、燃焼室やタービンなどの高温部分にはニッケル基やコバルト基の超合金などが使われている。

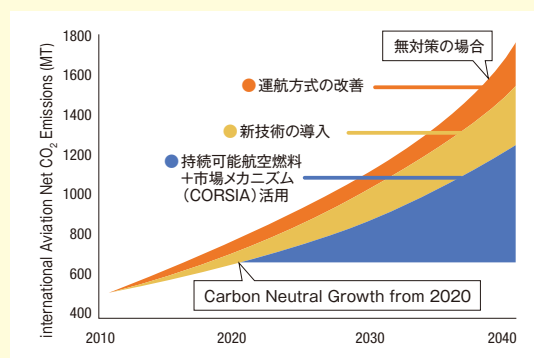
日本の航空機産業は、これまで欧米メーカーとの機体構造、航空機エンジンの共同開発に参加し、そのなかで材料開発を進めてきた。その結果、構造材やエンジン、その他の部品において、多くの日本企業の製品が使われている。航空機開発に適用された最先端の技術は、他の分野に波及する効果も期待されている。



ジェット旅客機需要は今後も増加傾向にあるとみられる。世界のエアラインによるジェット旅客機の運航機数は2021年に比べ2041年には約1.7倍に増加する。

出典：民間航空機に関する市場予測2022-2041、令和4年3月、一般財団法人日本航空機開発協会

図1 ジェット旅客機の需要予測



CO₂排出量を削減するためには、運航方式の改善、持続可能な航空燃料の導入、市場メカニズムの活用、新技術の導入を組み合わせる必要があると考えられている。

出典：経済産業省 第1回航空機の脱炭素化に向けた新技術官民協議会 資料4「グリーン成長戦略を踏まえた新技術の社会実装に向けた取組」p2 ICAO出典図を参考に作成

図2 国際航空からのCO₂排出量予測と排出削減目標のイメージ

水素による次世代推進システムの特徴

次世代の推進システムでは、水素エネルギーの活用が期待されている。水素は燃焼してもCO₂を排出しないクリーンエネルギーである。航空機に水素エネルギーを活用する方法としては、水素燃料電池航空機と水素燃焼エンジン航空機の2つが考えられている。

水素燃料電池航空機は、水素と酸素の化学反応でエネルギーを生み出す発電装置である水素燃料電池を機体に搭載するもので、発電した電気でファンを駆動させる。発電時に発生するのは水のみで、CO₂やNO_xなどは発生しない。しかし、高い推力を得るためには燃料電池を大きくする必要があるため、長距離飛行には向かないといわれている。例えば、航続距離が3,000マイル(約4,828 km)を超える場合、現在のジェットエンジンと同じ出力を達成するために必要な燃料電池の重量

は、最大離陸重量の80%に達するといわれる。そのため水素燃料電池は、乗客数が少なくフライト距離も比較的短い路線での採用が検討されている。

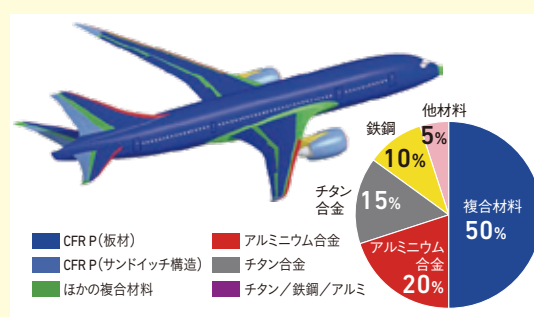
水素燃焼エンジン航空機は、現在のジェット機燃料を水素に置き換え、水素をエンジンで燃焼させて推力を得る技術である。水素燃焼エンジンは、燃焼時にCO₂は発生せず、また水素燃料電池とは異なり、燃料電池などの発電装置が不要であり、中小型機等への適用が期待されている。

しかし、技術的に解決すべき課題がある。それは液化水素燃料の貯蔵方法である。水素燃焼エンジン航空機では、高度10,000 mの上空を飛行しながら、-253℃という極低温の液化水素を貯蔵しなければならない。液化水素は体積エネルギー密度が低いため、既存のジェット燃料であるケロシンに比べ約4倍の体積を持つ貯蔵タンクが必要となり、タンク重量も重くなってしまう。このため、タンクの軽量化が大きな課題であり、加えて機体

	使用材料の種類	代表的な使用部位
金属材料	アルミ合金	機体構造—胴体&翼、降着システム
	チタン合金	エンジン、エンジン周辺機器、降着システム
	合金鋼 ・低合金鋼 ・ステンレス鋼	降着システム、操縦翼レール、各種結合部
	耐熱合金	エンジン
	その他(マグネシウム、ベリリウム)	降着システム、構造部材
非金属材料	複合材 ・ガラス繊維強化プラスチック ・炭素繊維強化プラスチック ・アラミド繊維強化プラスチック ・その他	機体構造— 胴体&翼、プロペラ、回転翼
	高分子材(ゴム、樹脂、塗料)	内装品、機内構造、塗装
	ガラス	風防

出典：NEDO資料より作成

表1 航空機材料の種類と使用部位



出典：Dominic Gates: "Boeing 787 wing flaw extends inside plane", The Seattle Times(newspaper), July 30, 2009

図3 B787に使われている素材の重量比

内でのタンクの最適配置の検討も必要である。

さらに極低温の液化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には、安全性の高い燃料供給システムが必要となる。このシステムには、水素燃料を供給するためのポンプや気化器、配管、部品類も含まれる。燃料供給システムには金属材料の採用も検討されているが、水素脆化の影響を受けやすいため、水素脆化の影響がなく、低温強度に優れた材料が必要となる。

水素燃焼エンジンでは、大気中に窒素が存在することから燃焼時にNO_xが発生することは避けられない。水素燃焼時は高温になることからNO_xの排出が増大するため、NO_x排出量をできるだけ抑制することも必要である。

航空業界のサステナビリティを推進するグローバルな業界団体であるATAG (Air Transport Action Group)では、将来技術がどの時点で導入されるかを予想している(図4)。それによれば、持続可能な代替燃料SAFは2020年代から導入され、水素燃料電池航空機および水素エンジンは2025～2035年以降には段階的に導入されるとみられている。

次世代航空機の実現を目指すプロジェクト

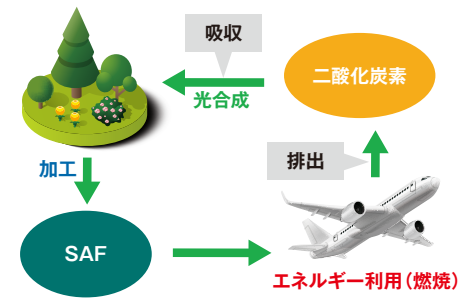
次世代航空機の技術は、大きく、従来型機材の形態を維持したままCO₂を削減する技術と、次世代機材によってCO₂を削減する技術に分けられる。

このうち、従来型機材の形態を維持した技術の例では、構

期待される航空燃料「SAF」

次世代航空機では、代替燃料SAFの導入も大きく期待されている。SAFとは「Sustainable Aviation Fuel (持続可能な航空燃料)」の略称で、循環型の原料で製造された航空燃料である。

現在、航空機に使われている航空燃料は、原油を精製して作られるため使用時にCO₂を多く排出する。一方SAFは、植物などバイオマス由来の原料や、飲食店などから排出される食用油などに含まれる炭素から主に製造される。原料となる植物は、光合成を行う際にCO₂を吸収するため、植物が光合成を行うことで炭素を循環させながら航空燃料を利用でき、その結果大気中のCO₂をほとんど増やさずに済む。



造材・システム、高効率エンジン、空気力学的な改善などが挙げられる。次世代機材による技術の例では、水素を含む推進系及び新たな構造コンセプト等の機体の革新的技術などが挙げられる。

こうした状況を踏まえ、次世代航空機の開発プロジェクトがス

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
コムーター機 ・9-50席 ・飛行時間60分以下 ・航空分野でのCO ₂ 排出量1%以内	SAF	蓄電池 水素燃料電池	蓄電池 水素燃料電池	蓄電池 水素燃料電池	蓄電池 水素燃料電池	蓄電池 水素燃料電池	蓄電池 水素燃料電池
リージョナル機 ・50-100席 ・飛行時間30-90分 ・航空分野でのCO ₂ 排出量3%以内	SAF	SAF	蓄電池 水素燃料電池	蓄電池 水素燃料電池	蓄電池 水素燃料電池	蓄電池 水素燃料電池	蓄電池 水素燃料電池
小型機 ・100-150席 ・飛行時間45-120分 ・航空分野でのCO ₂ 排出量24%以内	SAF	SAF	SAF	SAF 何らかの水素技術	水素燃焼エンジン SAF	水素燃焼エンジン SAF	水素燃焼エンジン SAF
中型機 ・100-250席 ・飛行時間60-150分 ・航空分野でのCO ₂ 排出量43%以内	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF 何らかの水素技術	SAF 何らかの水素技術	SAF 何らかの水素技術
大型機 ・250席以上 ・飛行時間150分以上 ・航空分野でのCO ₂ 排出量30%以内	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF

ATAGによる機体サイズ別に、将来技術がどの時点で導入されるかの予想。SAFは2020年代から航空機のサイズを問わず導入、水素燃料電池は2025年代以降に小型機に導入、水素エンジンは2035年以降に中型機に導入、とされている。

SAF = 持続可能な航空燃料

図4 将来技術導入のタイムライン 出典: AVIATION BENEFITS BEYOND BORDERS, Waypoint 2050 SECOND EDITION掲載図を参考に作成



次世代の航空機開発プロジェクトにおける研究開発テーマ（一部）

出典：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事業、事業戦略ビジョン（2022年8月）川崎重工業（株）資料を元に作成

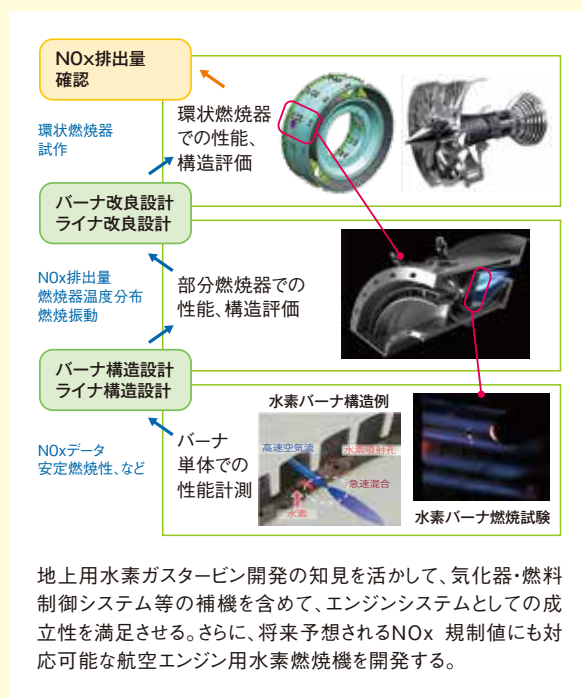


図5 水素航空機向け燃焼器の開発

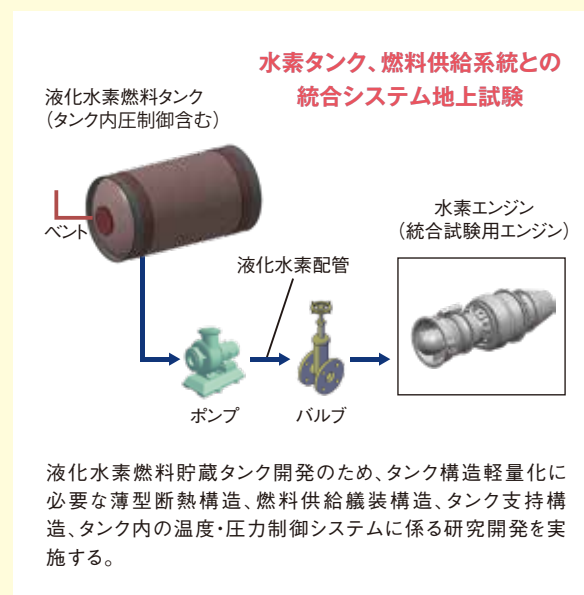


図6 液化水素燃料貯蔵タンク開発

ターゲットした。「2050年カーボンニュートラル」の実現を目指し、NEDOは次世代航空機の開発として、水素航空機向けコア技術や航空機主要構造部品の飛躍的軽量化に関する4テーマの研究開発事業に着手した（2021～2030年度予定）。この事業はグリーンイノベーション基金事業の一環で実施するのである^{*1}。

2023年9月現在の研究開発テーマは以下のとおりである。

1. 水素航空機向けコア技術開発

〔1〕水素航空機向けエンジン燃焼器・システム技術開発（図5）

水素燃焼に適した航空エンジン燃焼器の開発を進める。NOxについても既存エンジンでICAOが定めた目標であるCAEP／8^{*2}比54%の低減を実現する。

〔2〕液化水素燃料貯蔵タンク開発（図6）

水素航空機向けの水素燃料貯蔵タンクの開発を進め、貯蔵水素燃料の2倍以下のタンク重量を達成する。

〔3〕水素航空機機体構造検討

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。風洞試験によ

り、2,000～3,000 kmの航続性能を有する水素航空機の機体構想を確認する。

2. 航空機主要構造部品の複雑形状・飛躍的軽量化開発

2035年以降に投入される航空機への搭載を目指し、主翼などの重要構造部材に関して、既存の金属部材から約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）を達成する。

このうち、エンジン燃焼器・システムや液化水素燃料貯蔵タンクでは、ステンレス鋼などの金属材料が検討される可能性もある。鉄鋼材料は軽量化への貢献は小さいが、他材料にはない特性を生かして採用されることが期待される。とくに極低温の水素システムにおいては、耐水素脆性や低温強度に優れた金属材料として検討されることも期待される。

すでに海外でも次世代航空機の開発に取り組んでおり、例えばエアバス社は、水素タンク、水素燃焼エンジン、燃料供給システムなどの各技術の実証を進めている。水素燃焼エンジンや水素燃料電池技術を搭載した「ゼロエミッション航空機」は2035年に市場投入すると発表している。

世界的に高まるカーボンニュートラルの機運。日本発の次世代航空機技術の研究開発が大きな成果を上げることに期待したい。

●取材協力 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO） ●文 杉山香里

^{*1} グリーンイノベーション基金事業ではグリーン成長戦略において実行計画を策定している重点分野を支援対象としている。航空機産業は広い裾野産業を有し、適用技術が他の分野に波及する効果が期待されることから重点分野の一つに選ばれている。

^{*2} 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