

航空分野の CO₂ 削減に向けた 水素利用に関する提言 日本社会への提案

鈴木 真二

東京大学未来ビジョン研究センター 特任教授

中村 裕子

東京大学大学院工学系研究科 特任研究員

佐々木 一

東京大学未来ビジョン研究センター 特任准教授

李家 賢一

東京大学大学院工学系研究科 教授

城山 英明

東京大学公共政策大学院 教授



要約

国際航空分野では、ICAO が 2050 年までにカーボンニュートラルを達成する長期目標を掲げている。その達成には運航改善、機体設計変更、持続可能な航空機燃料（SAF）導入、カーボンオフセット利用など、多角的な手段が必要とされ、2024 年から段階的に進められている。その中で、水素技術は脱炭素化の鍵となる長期的技術として注目されているが、実現には製造から供給までのサプライチェーン構築やインフラ整備はもちろんのこと、安全確保の制度構築、そして社会受容性の向上が求められる。

本提言では、未来の航空分野が、環境負荷を大幅に低減し、社会全体に利益をもたらす持続可能な形へと進化するために、日本社会として航空分野における水素利用に貢献するため、次の 6 つの要件を提示する：

- (1) 航空分野での CO₂ 削減における水素利用の重要性を認識する；
2050 年までのカーボンニュートラル達成という航空分野での目標を実現するために、航空分野での水素利用は長期的なソリューションの 1 つとして重要視され、国内外にて関連技術の開発がスタートしている。この状況を日本社会として認識を広め、製造業のみならず、空港事業、運航／運送事業、水素関連事業においても総合的に航空分野での水素利用の重要性を認識する必要がある。
- (2) 小規模からの水素利用を優先的に進める；
航空分野で水素利用を進める上では、技術面、経済面はもちろんのこと、安全確保のための制度構築と社会受容性の課題が重要である。小規模な利用から開発を進めることで、安全性と制約の調整、社会受容性の向上を推進することが可能である。特に、地域空港をつなぐリージョナル機での水素活用を 1 つの有力なケースとして、空港での環境整備や、機体開発の対象としての検討を進めることが重要である。
- (3) 空港の水素利用を地域社会の水素ハブとして発展させる；
日本ではほとんどの水素が海外からの輸入に依存し、また航空分野だけでは水素の需要量が少なく採算が取れない可能性があるため、地域社会全体での水素利用を包括的に検討した上での、水素サプライチェーンの構築が必要である。その際に、その地域での他分野での水素利用を繋げる水素ハブとしての可能性の検討を早期に行い、空港を地域社会の水素ハブとして発展させることが必要である。
- (4) グリーン水素確保の重要性を再認識する；
水素航空機の環境負荷低減を最大化するためには、水素生成時の CO₂ 排出を抑えるグリーン水素の確保が必須である。グリーン水素は自然再生エネルギーを利用して製造されるが、インフラ整備の課題、製造コスト削減の必要性、CO₂ 価格政策の必要性などの政策的、技術的課題が存在する。航空分野における持続可能な水素利用の基盤を築くためにも、改めて、日本におけるグリーン水素導入を促進するための検討が必要である。
- (5) 他産業での水素利用の優位性を航空分野に応用する；
航空分野での水素利用という技術革新は、日本では宇宙産業や自動車産業において高い水素関連技術を保有している。このため、技術的リーダーシップを確立し、国際市場における競争優位の獲得が期待される。他産業との技術連携を深め、システムインテグレーションと国際的な標準化活動を進めるために、体制づくりと、該当分野での理解が重要である。

(6) 航空分野で水素利用を推進するためのグローバル人材を育成する；

水素航空機の開発と導入を実現するためには、技術開発だけでなく、国際的な基準策定や認証活動に携わる人材の育成が急務である。多国間プロジェクトへの参画を通じて、国際認証基準への理解と応用力を高め、大学・研究機関と産業界、官界が連携し次世代の人材を各分野で育成することで、航空分野でのカーボンニュートラル達成が可能となる。

上記の 6 つの要件を実現するために、日本の先進的な水素技術を結集して、水素リージョナル航空機を国際的な連携により開発し、水素サプライチェーンが構築できる地域での水素リージョナル航空ネットワークを構築し、こうした機体開発、インフラ整備、運航ネットワーク構築を連携して実施することを提言する。こうした早期の社会実装に挑戦することにより、水素利用における安全基準策定とその適合性証明方法開発を、国際機関ならびに国際標準化団体の活動を通してリードできる人材を産学官において養成することが可能となり、未来の航空分野が、環境負荷を大幅に低減し、社会全体に利益をもたらす持続可能な形へと進化することに日本社会が貢献できる。

目次

要約	1
目次	3
1. はじめに.....	5
1.1. 本社会提言のとりまとめ	5
1.2. 航空の国際的な状況	5
1.2.1. 国際航空輸送	5
1.2.2. 国際航空輸送による CO2 排出	6
1.2.3. ICAO による国際航空 CO2 削減目標.....	6
1.2.4. ICAO による国際航空 CO2 削減手段.....	7
1.3. 日本での国内航空 CO2 削減方針	8
1.4. CO2 削減のための航空機新技術	9
1.5. 水素航空機実現への課題	10
1.5.1. 水素航空機に必要な技術革新	10
1.5.2. 空港での水素航空機利用の環境整備	10
1.5.3. ライフサイクル視点での CO2 削減への課題	11
2. 航空分野での CO2 削減を達成する要件と社会提言.....	12
2.1. 航空分野での CO2 削減における水素利用の重要性を認識する	12
2.1.1. 航空における 2050 年カーボンニュートラルの目標.....	12
2.1.2. 航空分野での水素利用	13
2.2. 小規模からの水素利用を優先的に進める	14
2.3. 空港の水素利用を地域社会の水素ハブとして発展させる	15
2.4. グリーン水素確保の重要性を再認識する	15
2.4.1. インフラ整備の課題	15
2.4.2. 製造コスト削減の必要性	16
2.4.3. CO2 価格政策の必要性.....	16
2.5. 他産業での水素利用の優位性を航空分野に応用する	16
2.5.1. 技術的リーダーシップの確立	16

2.5.2.	認証と安全基準の確立.....	16
2.6.	航空分野で水素利用を推進するためのグローバル人材を育成する.....	17
2.7.	社会提言.....	17
3.	おわりに.....	17
4.	参考資料.....	18

1. はじめに

1.1. 本社会提言のとりまとめ

航空は高速遠距離輸送手段として人類の経済活動、国際交流の要として飛躍的な発達を遂げ、現代社会に欠かせないものとなっている。航空を担う航空産業（航空機製造と空輸サービス）は、世界的にみて、航空路に関する航空協定、空港インフラ、安全性、信頼性の認証、先端技術の開発、経済外交等の面で、政策的方針が重要な分野であり、近年は、地球温暖化防止に向けた国際的な政策、技術、経済の総合的な取り組みが急務とされる。「次世代スカイシステム研究ユニット」は、東京大学における総合的な次世代航空システム研究のハブとなることを目的に、東京大学未来ビジョン研究センターの前身となる政策ビジョン研究センターにおける「航空政策ユニット」から継続的に法学、経済学、工学等の学際的な研究を産業界、行政機関とも連携して推進している。

1.2. 航空の国際的な状況

1.2.1. 国際航空輸送

1960年代以降、ジェット旅客機の普及により、国際航空輸送は飛躍的な成長を遂げ、国際戦争や世界的な感染症蔓延により一時的に成長率は停滞があり、特に2020年からの新型コロナウイルスの蔓延により国際航空輸送量は激減する大きな影響を受けたが、2024年には、2019年の輸送量のレベルに回復し、今後は、特にアジア太平洋地域を中心に、更なる拡大が予想されている（図1、出典：[1]）。

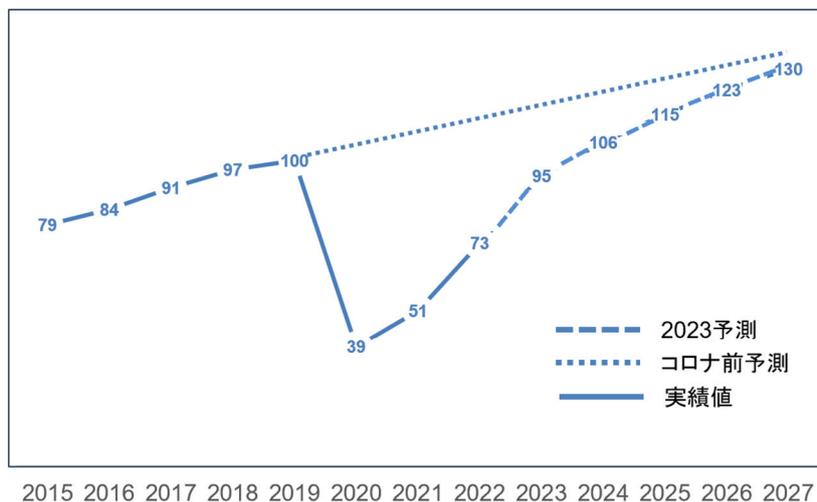


図1：国際航空輸送量の推移（2019年を100とした場合）（出典：[1]をもとに作成）

1.2.2. 国際航空輸送による CO2 排出

国際航空輸送による CO2 の排出が、人類の CO2 排出に対して 2%を占めることが、国連の気候変動政府間パネル（IPCC）が 2007 年に発表した第 4 次報告書において示されている（図 2）。2%という量はドイツが排出する CO2 排出量に匹敵し、しかも国際航空輸送量は年々増加することに注意する必要がある。

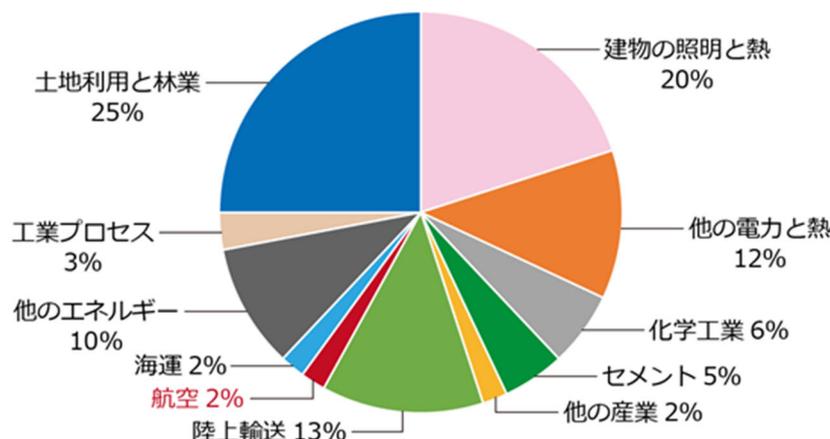


図 2：全世界の人類が排出する CO2 の割合（出典：[2]をもとに作成）

1.2.3. ICAO による国際航空 CO2 削減目標

1997 年開催の、第 3 回気候変動枠組条約締約国会議（COP3）において採択された京都議定書において、国ごとに CO2 削減率を定めることが決められた。しかし、国際航空と国際海運に関しては、国ごとでは定められないため、国際航空に関しては ICAO（国際民間航空機関）で削減計画を策定することが決まった[3]。

ICAO は、第 2 次世界大戦後に国際航空が発達することを見越し、戦時中ではあったものの、1944 年に国際航空の規則がシカゴ条約として締結され、この条約に基づき、1947 年に国連の専門機関として設立され、193 の国と地域が加盟している。日本は、1953 年 10 月に ICAO に加盟し、1956 年以降今日に至るまで連続して理事会メンバー国に選出されている[4]。

COP3 での決定以降、ICAO では国際航空の CO2 削減に関して議論が重ねられ、2010 年の第 37 回総会において、2020 年以降は CO2 排出を増加させないことが採択された(CNG2020、Carbon Neutral Growth 2020)。2016 年総会では、CNG2020 を実現するための国際スキーム（CORSIA、Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation）が採択された（1.2.4. で説明）[5]。2022 年総会では、2050 年までにカーボンニュートラルを達成する長期目標（LTAG、long-term aspirational goal）が採択された[6]。

図 3 は、2020 年 COVID19 の影響により、CNG2020 のベースラインは 2019 年排出量の 85%となったことと、そのベースラインが 2035 年まで続き、その後は 2050 年までにカーボンニュートラルを達成する長期目標 LTAG を示している[7]。

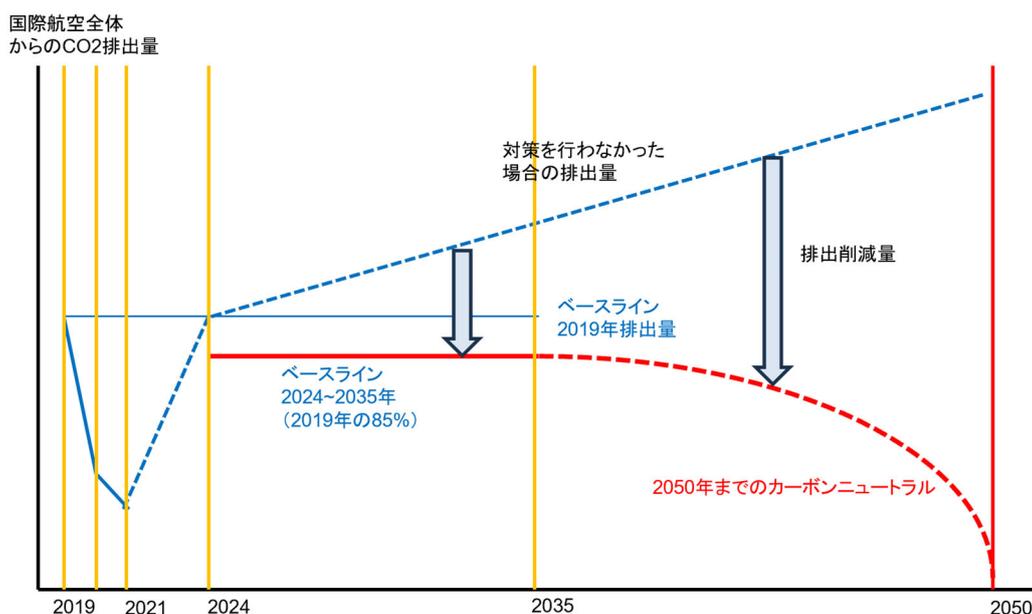


図 3 : ICAO による国際航空 CO2 削減目標 (出典 : [7]をもとに作成)

1.2.4. ICAO による国際航空 CO2 削減手段

前述の CO2 削減目標を達成する手段として、ICAO では以下の 4 つの方法を CORSIA として掲げている。

- (1) 運航の改善
- (2) 航空機設計製造における新技術の採用
- (3) 持続可能な航空機燃料 SAF (Sustainable Aviation Fuels) と呼ばれるバイオジェット燃料などの CO2 削減効果のある航空燃料の利用
- (4) 国際航空におけるカーボンオフセットの導入

上記の(1)、(2)の方法は航空機の燃料消費を改善するためにすでに取り組みられている方法であり、(3)、(4)が新たな取り組みといえる。バイオジェット燃料は空気中の CO2 を吸収して成長する植物類からジェット燃料を製造することでジェットエンジンから排出される CO2 を循環的に削減することを可能としている。ただし、利用する植物類の特性や、製造や輸送段階での CO2 排出があるので、どの程度 CO2 を削減できるかを定量化する必要がある。ICAO では、CO2 削減効果とともに環境への影響、人権・労働権、食料安全保障などの要件を勘案した認証制度 CEF (CORSIA Eligible Fuels) を発足させている[8]。

ICAO の取り組みを批准した加盟国は、自国の国際運航に関して(3)による CO2 削減効果を取り入れて CO2 排出量を算出し、ベースライン (2035 年までは 2019 年の CO2 排出量の 85%) を超えた量に関しては、ICAO が認定したカーボンクレジット[9]を購入してオフセットすることが求められる。こうした取り組みは、2024 年から段階的に導入することとされている。

ICAO が発行した LTAG レポート[10]では、カーボンオフセットを除いた CO2 削減の 3 つのシナリオを表 1 のように示している。最も削減量が大きシナリオ 3 においてもオフセットが必要な点は注目すべきである。LTAG レポートでは水素の本格利用は 2050 年以降の長期的な CO2 削減手段とされている。

表 1 : ICAO の示した 2050 年における CO2 削減シナリオ (出典 : [10]をもとに作成)

	シナリオ 1	シナリオ 2	シナリオ 3
CO2削減後のCO2排出量(2019年排出量との比較)	160%	80%	35%
削減量の内訳	技術20%	技術21%	技術21%
	運航4%	運航6%	運航11%
	燃料15%	燃料41%	燃料51%

1.3. 日本での国内航空 CO2 削減方針

ICAO の動きに呼応する形で、日本国内でも航空分野のカーボンニュートラル達成に向けた取り組みが加速している。2020 年、内閣総理大臣による 2050 年カーボンニュートラルの宣言を契機に、以下のような政策やプロジェクトが進められている。

- (1) 2021 年 : 「航空機運航分野における CO2 削減に関する検討会」の設置
- (2) 2022 年 : 「航空機の脱炭素化に向けた新技術官民協議会 (新技術官民協議会)」の設置
- (3) 経済産業省の支援 : 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) によるグリーンイノベーション基金を活用した技術開発支援 (例 : 図 4[11])

国内航空の削減目標に関しては、ICAO の国際航空における目標を受けて、国土交通省は航空脱炭素化推進基本方針 (令和 4 年 12 月 1 日告示) において、2030 年における国内航空および空港の削減目標を示し、2050 年には両者ともにカーボンニュートラルを目指すことを示した[12]。

具体的な国内目標達成に向けて、新技術官民協議会は、次の目標を掲げている。

- (1) 日本企業が持つ優れた環境新技術の社会実装を促進
- (2) ICAO や欧米航空当局 (FAA、EASA) 、国際標準化団体 (SAE International、ASTM International 等) と連携し、国際標準の策定を主導
- (3) 日本の航空分野におけるプレゼンス向上

2023 年 3 月に新技術官民協議会から提示された「航空脱炭素化のロードマップ」では、水素技術が電動化や軽量化と並び、次世代航空機の柱として位置づけられている[13]。

日本において水素技術の社会実装を成功させるためには、グリーン水素の安定供給、空港インフラ整備、さらには国際社会における競争力向上を図る必要がある。その一環として、日本は ICAO や国際標準化団体との連携を強化し、技術革新を世界に発信する重要な役割を担っている。

【1】水素燃料電池電動推進システム技術開発

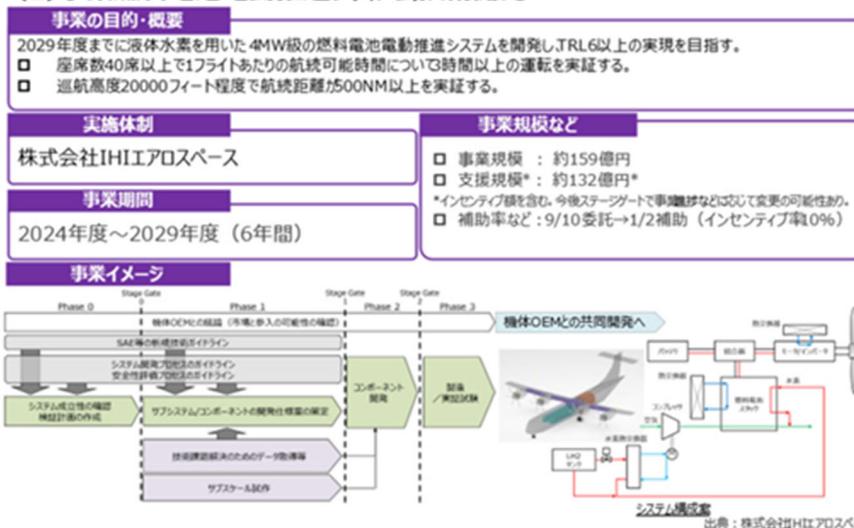


図4：水素燃料電池電動推進システム技術開発(グリーンイノベーション基金の一例、出典：[11])

1.4. CO2削減のための航空機新技術

航空機の新技术としては、機体の軽量化、ジェットエンジン等の推進システムの改良、空気抵抗の軽減策など、既存機体の改善から、電動推進や水素燃料利用などの革新的技術まで多様であるが、航空機の設計、製造、運航には、安全確保のための厳しい基準が設けられるとともに、革新的技術の導入には開発期間を要することもあり、段階的な適用が求められる。例えば資料[14]では、2035年までに50～100人乗りの電動、または水素燃料航空機、またはその両者を用いた機体が、そして2040年までに100～150人乗りの水素燃料航空機が開発されるとの予測を示している。

純粋なバッテリーによる電動航空機は、現状では2人乗りのPipstrel社Velis Electraが欧州のLSA(Light Sports Aircraft)型式証明を取得済みのほか[15]、2～3人乗りのDiamond Aircraft社eDA40や9人乗りのEviation Aircraft社Aliceが試験飛行を行い欧米の型式証明を取得予定と公表している[16,17]。こうした小型機以上の機体サイズになると、現状のバッテリー技術では重量当たりの出力が不足すると認識され、水素燃料の燃料電池が期待されている。英国のHyFlyer Projectでは、19人乗りのZero Avia社Do228による水素燃料電池による試験飛行に成功している[18]。さらに100人乗り以上の旅客機になるとジェットエンジンを水素で燃焼させる方式が想定されるが、液体水素燃料はジェット燃料のケロシンよりも比重が4～3分の1ほど小さく、150人乗り以上では液体燃料タンクの容積が増すため非現実的と[14]では指摘されている。そのため、150人乗り以上の機体サイズでは、SAFによるCO2削減策が主流となると考えられる。実際にはICAOのLTAGレポート[10]での予想のようにSAFの供給量も限界があるため、50～150人乗り以下のサイズの航空機では、水素利用がCO2削減に求められると考えられる。

こうした視点から、本社会提言では、航空機の水素利用に関して纏めることとした。

1.5. 水素航空機実現への課題

1.5.1. 水素航空機に必要な技術革新

航空分野での水素利用を実現するためには、複数の技術的革新が不可欠である。英国航空技術研究所（ATI）の「FlyZero プロジェクト」[19]では、1年にわたる研究の中で以下の6つの分野が特に重要であると特定された：

- (1) 空気力学／構造：タンクの直径が大きくなり機体の空気抵抗が増加する可能性、また主翼構造にタンクが組み込まれないことの影響などへの対応が必要。
- (2) 熱管理：熱管理システムの配置は空気抵抗に影響し、またシステムの重量が燃料電池ソリューション全体の出力密度を低下させぬよう対応が必要。
- (3) 極低温水素燃料システムと貯蔵：目標となる総重量効率、タンクの重量効率、整備間隔に対して指標を設定した上で、その実現に向けた認定と基準の設定、試験方法、素材や製造技術の開発などさまざまな対応が必要。
- (4) 水素ジェットエンジンと推力発生：水素ジェットエンジンは、ジェット燃料 Jet A-1 や SAF を燃料とする同等のジェットエンジンよりも効率がが高く、NO_x の発生量が少ない可能性があるが、実用的な検証も必要。
- (5) 電気推進システム：燃料電池及び電気モーターで複数のプロペラを駆動する電気推進システムについての検討が必要。
- (6) 燃料電池：現在の低温（LT）プロトン交換膜（PEM）燃料電池と将来の技術（160度以上の高温 PEM）双方の検討が必要。

さらに、FlyZero プロジェクトでは、これらの技術開発に加えて以下を一例とする分野横断的な要素も強調している（詳しくは[20]）：

- (1) 高度な素材と製造技術
- (2) システム統合の技術
- (3) デジタル設計・シミュレーションツールの活用

これらの技術革新を要素として進めるだけでなく、航空機としての成立性を鑑みて検討していくことが、水素航空機の実現に向けた重要なステップとなる。

1.5.2. 空港での水素航空機利用の環境整備

航空における水素利用は、その目的から、水素航空機を開発するだけでなく、空港内で水素が安定供給され、ライフサイクル全体で低炭素化が達成されることが重要である。液体水素の利用が想定され、航空機に搭載するには、空港運営の大幅な変更が求められる。具体的には、空港のインフラ、資本投資、運用手順、そして安全基準の見直しが必要となる。

液体水素供給のためのサプライチェーンには、いくつかの選択肢がある（図5）。

- (1) 空港近隣で水素を生成し、空港内で液化
- (2) 従来の燃料輸送方法（パイプライン、トラック、鉄道）を用いて液体水素を空港内に輸送し、従来の燃料と同様にパイプライン、トラック等で空港内を輸送

初期段階では、異なる場所で精製された液体水素をトラックで空港に輸送する方法が一般的であるが、使用量が増加すれば、空港周辺の交通量やインフラへの負担が増大する。現在、一部の中規模空港でも Jet A-1 燃料の全量がトラックで輸送されているが、水素は同じエネルギー量を輸送するために、Jet A-1 燃料よりも 4 倍のトラックが必要になる。また、必要な量によって最適なサプライチェーンは異なる。

空港に土地の余裕があるかどうか、インフラ選択肢に影響を与える。また、必要となる面積は、水電解装置、液化装置、貯蔵タンクで使われる技術によっても変わってくる。さらに、液体水素を空港に搬入する場合は、貯蔵タンクのみが必要となるが、それでも、従来の航空燃料やこれから導入が検討されている SAF 用とは別に建造する必要が出てくる[21]。

空港での水素利用については、そのほか、給油の際のオペレーションも重要である。駐機場でのオペレーションについて、水素ガスが溜まらないようにするため、燃料補給時には漏れ・こぼれ対策が最重要となる。2024 年 11 月には国際標準化団体 SAE International と EUROCAE が世界で初めての空港での水素燃料補給に関するガイドライン AIR 8466/ ER034[22]を発行したが、安全な空港でのオペレーションに向けた手順の開発の初期的段階であり継続的な発展が求められる。

また、空港における一般的な救命および消火活動について、水素火災の可能性を見据えて見直しと調整を行っていく必要もある。水素火災は短時間で終息するため、消防士が現場に到着したときにはすべての燃料が燃え尽きている可能性があり、インシデントや事故への対応で現在とは異なる対応が求められる可能性がある。

水素の利用を推進するためには、技術的な進展だけでなく、安全性を確保するための新たな規制や業界全体でのエコシステムの構築、及び各ステークホルダー間での協力と調整が不可欠となる。

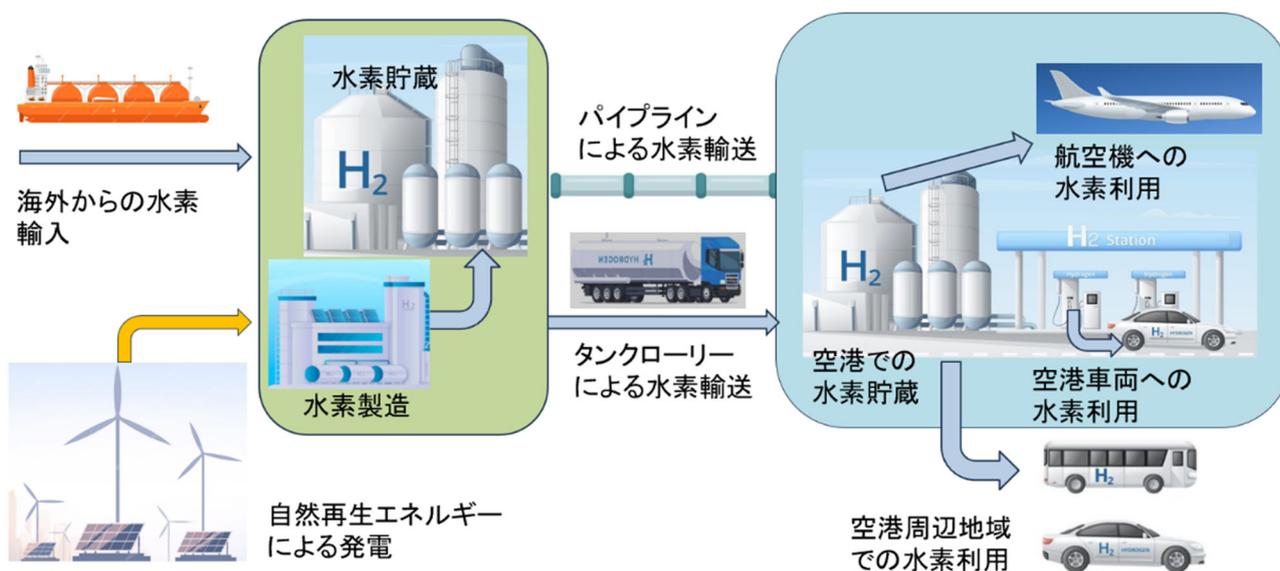


図 5：空港での水素利用のサプライチェーンのイメージ

1.5.3. ライフサイクル視点での CO2 削減への課題

航空における水素利用の最大の課題の 1 つは、そのライフサイクル全体での CO2 削減の実現である。水素の製造過程や、航空機運航時に発生する飛行機雲などによる環境影響を十分に考慮しなければならない。

まず、水素の製造時における CO₂ 排出が問題となる。水素は生成方法によって名称を分けることがある。「グリーン水素」は 100%再生可能エネルギーを用いて製造され、CO₂ 排出が極めて少ないとされている。一方「ブルー水素」は主に天然ガスの水蒸気改質法 (SMR) を用い、その過程で発生する CO₂ を回収して隔離する技術 (CCS) を使うが、それでも一定の CO₂ 排出が発生する。

各種水素、そしてライフサイクル上での CO₂ 排出低減を目指した合成燃料 E-kerosene のライフサイクル上での CO₂ 削減の可能性を検討した Mukhopadhaya and Rutherford [23]の報告によると、グリーン水素や同じくライフサイクル上での CO₂ 排出低減を目指した合成燃料 E-kerosene のライフサイクル排出量はグリーン水素とほぼ同等であるとされた (図 6)。ただし、エネルギー効率の面では、E-kerosene を製造するためにはグリーン水素よりも 20%多くのエネルギーを必要とするとの結果も示されている。

また、航空機の運航時に排出される水蒸気が飛行機雲を形成し、その温暖化効果が気候に与える影響も無視できない。氷過飽和領域を回避すれば、飛行機雲から発生する絹雲の形成を減らすことができるなど、飛行機雲の発生を回避するための現象の理解が進められているが、未だ十分な結論には至っていないのが実情である。そのため、飛行機雲が与える正味の温暖化効果を低減させるための研究と技術開発がさらに必要である。

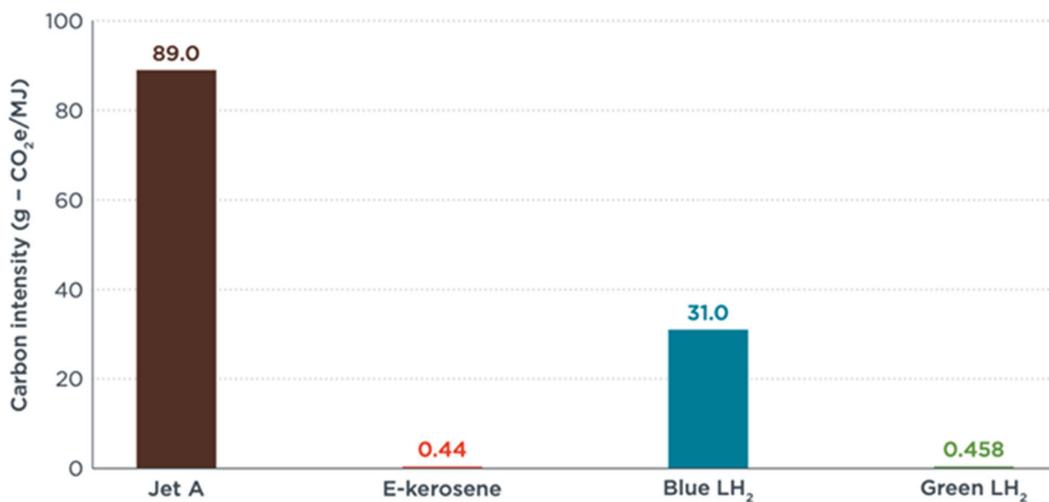


Figure 1. Carbon intensity of fuels investigated

図 6：各種燃料によるライフサイクル上の CO₂ 排出比較 (出典：[23])

2. 航空分野での CO₂ 削減を達成する要件と社会提言

前述までの状況を勘案し、未来の航空分野が、環境負荷を大幅に低減し、社会全体に利益をもたらす持続可能な形へと進化するために、日本社会として航空分野における水素利用に貢献するため、次の 6 つの要件を提示し、最後に日本社会への提言を示す。

2.1. 航空分野での CO₂ 削減における水素利用の重要性を認識する

2.1.1. 航空における 2050 年カーボンニュートラルの目標

地球温暖化防止に向けて国際航空に関しては、国連の専門機関 ICAO において、CO₂ 削減目標とその達成手段が議論され、達成目標に関しては、2010 年総会において、2020 年以降国際航空の CO₂ 排出量を増加させないことが CNG2020 として合意され、2022 年の総会においては、2050 年にカーボンニュートラルを目指すことが合意された。

この ICAO での CO₂ 削減目標を達成する国際的なスキーム CORSIA が 2016 年総会において、(1) 運航の改善、(2) 航空機設計製造における新技術の採用、(3) SAF と呼ばれるバイオジェット燃料などの CO₂ 削減効果のある航空燃料の利用、(4) 国際航空におけるカーボンオフセットの導入が合意された。実際には新型コロナウイルスの世界的な蔓延による影響で、CORSIA スキームの開始は、2024 年からとなり CO₂ 排出基準のベースラインも変更となったが、ICAO の取り組みはすでに開始されている。

ICAO の CO₂ 削減の取り組み自体は国際航空であるが、国内の航空輸送に関しては、国土交通省は航空脱炭素化推進基本方針（令和 4 年 12 月 1 日告示）において、2030 年における国内航空および空港の削減目標を示し、2050 年には両者ともにカーボンニュートラルを目指すことが示された[12]。

2.1.2. 航空分野での水素利用

水素は、カーボンニュートラルを実現するうえで、重要な技術として認識されている。それは石油や石炭と異なり燃焼による CO₂ 排出がないためである。ICAO で作成されたレポート LTAG においても、2050 年までは SAF が航空輸送の CO₂ 削減に大きな影響を与えるが、2050 年以降は、水素の役割が拡大するとされている[10]。さらに水素自体は発電したエネルギーを貯蔵する役割のほか、バイオ燃料などから生成したガスとの FT 合成から SAF を精製する材料として使用される（図 7）。その中には、大気中の CO₂ を回収し SAF を精製する DAC (Direct Air Capture) と呼ばれる野心的な技術も存在する[24]。ただし、本社会提言では、水素を燃料とする推進技術を対象とする。

水素燃料による推進技術は、CO₂ の直接的な排出はないものの、水蒸気を排出することになる。水蒸気は地球温暖化効果が指摘されているが、大気中にはもともと水蒸気が存在するため航空機による影響は多くないとの報告[25]もあり、今後の科学的解明が必要な点は指摘したい。

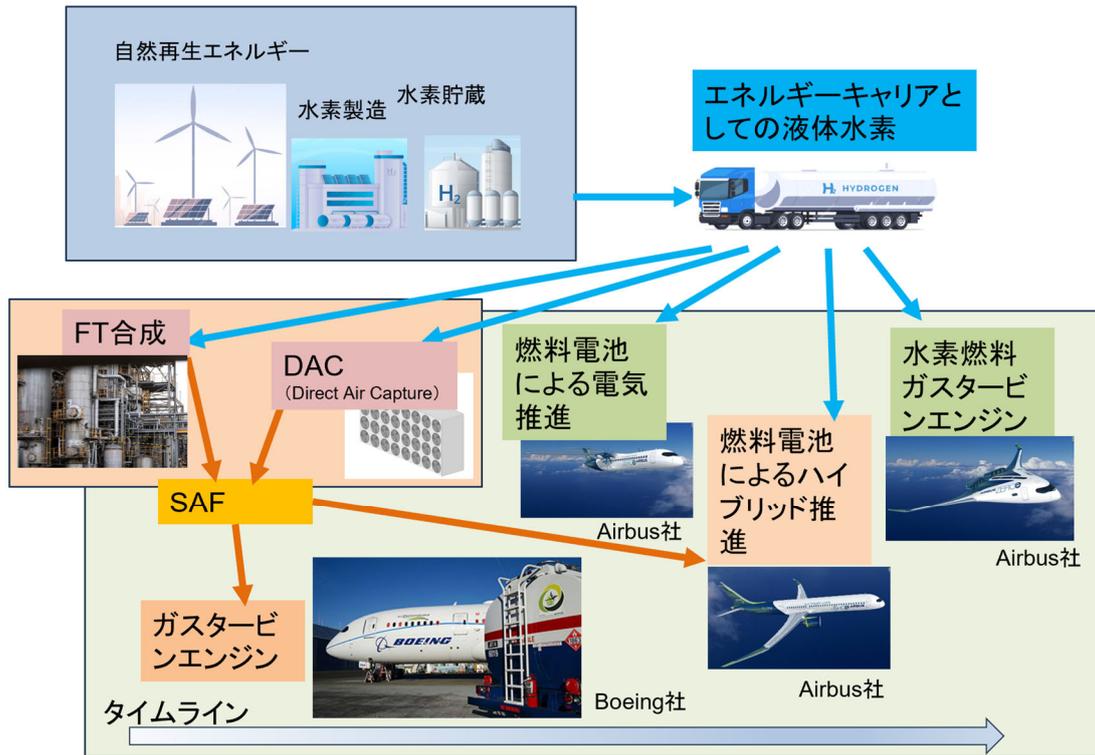


図 7：航空における水素利用のイメージ

2.2. 小規模からの水素利用を優先的に進める

航空分野では技術面、経済面はもちろんのこと、安全確保のための制度構築と社会受容性の課題が重要である。小規模な利用から開発を進めることで、安全性と制約の調整、社会受容性の向上を推進することが可能であると期待される。

例えばカナダ・エドモントン空港のプロジェクトでは、小規模で始めることで制度と安全に関する調整を行い、初期段階で複数の消費者を確保する実証例がすでに取り組みられている。技術が整っている分野ということで、まずはトヨタの水素自動車（MIRAI）を導入し、水素利用の安全性におけるイメージ向上のために、空港での水素取り扱いを始めた[26]。現在、さらに滑走路エリア（エアサイド）での車両への水素利用などへと範囲を広げているという。日本の場合も、早期にこのようなモデルを構築し、小規模から始めることが推奨される。

また、小規模にリージョナル機から水素化を始めることも検討したい。航空機の市場の中で、100人乗り以下の機体は、2030年以降で市場に出ると予想される機数の10%程度と言われている。一方、ナローボディと言われる単通路機体のセグメントは62%で、それぞれが2050年に排出するCO₂は4%と52%と見積もられている。市場への影響を考えれば、ナローボディ機からの水素化が合理的とも考えられるが、航空機メーカーと航空会社の双方にとってリスクも高いとも考えられ、リージョナルファーストという戦略がイギリスのFlyZeroプロジェクトで提案されている[27]。水素技術を開発・実証する道筋として、従来のターボプロップ機やリージョナルジェット機に対して競争力のある、ターボプロップ機同等の水素燃料電池航空機をリージョナル市場に最初に導入することで、これらのリスクを軽減できるのではと考えられている。日本の市場を見ても、空港での水素の確保、水素利用への理解、そして国内の人口動向や、今後の国内線の利用者数の動向を見ると、地域空港をつなぐリージョナル機での水素活用を1つの有力なケースとして、空港での環境整備や、機体開発の対象としての検討を進めることが重要と考える。

2.3. 空港の水素利用を地域社会の水素ハブとして発展させる

日本ではほとんどの水素が海外からの輸入に依存し、また航空分野だけでは水素の需要量が少なく採算が取れない可能性があるため、地域社会全体での水素利用を包括的に検討した上で、水素サプライチェーンをどう築くかの検討が必要である。Komikadoらの研究[28]によると、以下のケースが日本では水素航空機の運航の実現可能性が高いと見られている。

(1) 大規模水素受入拠点

海外から輸入した水素を受け入れる拠点の近傍空港では、比較的リーズナブルな価格で水素が入手でき、水素航空機が電動航空機やSAF等と比べて競争力を持つことができる可能性が高い。

(2) 水素地産が可能な地域空港

自然再生エネルギー（風力・太陽光）を活用して現地ですでに水素を生成が始まっている地域の空港では、新たに整備する必要のあるインフラがそれほど多くなく、水素航空機の運航をスタートさせやすい。

こうした空港にて、航空機や空港用車両だけでなく、空港を出入りするトラック、後者であればその地域の各種交通の水素化と水素ステーションの共通化を進めることでインフラ整備の効率化やコスト削減のもとでの社会全体のサステナビリティ向上に寄与することが期待できる。実現可能性の高いこうしたケースにて、具体的に水素サプライチェーン及び各ステークホルダーの連携構築を早期にスタートさせることを本社会提言も支持したい。

2.4. グリーン水素確保の重要性を再認識する

水素航空機の環境負荷低減を最大化するためには、水素生成時のCO₂排出を抑えるグリーン水素の確保が必須である。グリーン水素は自然再生エネルギーを利用して製造されるが、経済的・技術的な課題が残されている。

2.4.1. インフラ整備の課題

水素輸送には、既存の天然ガスパイプラインの利用が検討されているが、一定量を超えるとパイプラインの改修が必要となる。また、必ずしも、天然ガスの需要地と水素需要地が同じではなく、その場合、従来のガスパイプラインの利用が最適ではないことも重要な課題である。

2.4.2. 製造コスト削減の必要性

ウクライナ危機以降、化石燃料価格の高騰により、グリーン水素のコスト競争力が高まったものの、依然としてグリーン水素は高コストである。将来的には、以下の取り組みが鍵となると考えられている[29]:

- (1) 電解装置の性能向上と製造自動化
- (2) 再生可能エネルギーの低コスト調達
- (3) 政府による補助金やインセンティブの強化

また、製造コスト削減に向けては、標準化の促進も必要というのが **European Clean Hydrogen Alliance** の意見[29]であり、本社会提言が支持することでもある。水素の製造、輸送、貯蔵、利用がスケールアップする中で、品質保証やトレーサビリティの確立は市場の信頼性向上に不可欠であり、全てのステークホルダーを巻き込み、国際的な枠組みの整理と議論を進める必要がある。

2.4.3. CO2 価格政策の必要性

航空業界がグリーン水素を選択するためには、CO2 排出への価格付けが欠かせない。Mukhopadhyaya and Rutherford らの試算[23]によれば、2035 年までに米国にてグリーン液体水素が Jet A-1 燃料と同等のコスト競争力を持つためには、250 ドル/トン-CO2 の炭素価格が必要と試算された。2050 年には、技術革新やコスト削減により 100 ドル/トン-CO2 程度に下がる見通しも指摘されている。水素の経済性を確保し、航空分野における持続可能な水素利用の基盤を築くため、日本においてもグリーン水素導入を促進するためのカーボンプライシングや政策支援の強化が求められる。

2.5. 他産業での水素利用の優位性を航空分野に応用する

日本は、宇宙産業や自動車産業において高い水素関連技術を保有しており、その知見を航空分野へ応用することで、航空機の水素化推進における競争力強化が可能と考えられる。具体的には、液体水素のハンドリング技術や自動車用の燃料電池システムの開発で蓄積されたノウハウが、航空機の水素化推進において大きな役割を果たすと期待される。

2.5.1. 技術的リーダーシップの確立

FlyZero プロジェクトでは、日本は液体水素航空機実現に必要な 6 つの技術領域のうち 5 つで世界をリードする能力があると評価された[20]。これらの技術（例：温度管理システム、極低温貯蔵技術、燃料電池システムなど）は、既存産業の知見と研究開発が基盤となっている。これらを航空分野へ転用・最適化することで、日本は技術的リーダーシップを確立し、国際市場における競争優位を獲得できることが期待される。

2.5.2. 認証と安全基準の確立

水素航空機の実用化には、安全性の基準策定と基準に対応する適合性証明方法（MOC）の確立が重要である。他産業での標準化経験や認証プロセスの知見を航空分野に応用することで、開発サイクルの短縮が可能となる可能性がある。例として、自動車産業の水素燃料電池車での安全基準の確立や、宇宙産業の極低温水素技術のノウハウは、航空分野でのシステム安全性確保に有効と考えられる。

他産業との技術連携を深め、システムインテグレーションと標準化活動を進めることで、航空分野における水素利用の早期実現が期待される。これは、新技術官民協議会でも支持されており[13]、積極的な体制づくりとともに、該当分野の連携が重要と考える。

2.6. 航空分野で水素利用を推進するためのグローバル人材を育成する

水素航空機の開発と導入を実現するためには、技術開発だけでなく、国際的な基準策定や認証活動に携わる人材の育成が急務である。航空分野では、ICAO シカゴ条約の下で、安全・環境基準の策定が各国航空局に求められ、これを満たすための MOC を国際規格や業界団体による規格を各国航空局が引用する Performance Based と言われるアプローチが導入されつつある[30]。例えば、SAE International では、水素燃料の給油方法や安全管理規格の策定や、燃料電池に関する標準化などを進めており、日本はこうした国際的な規格策定プロセスに積極的に参画し、技術標準の主導権を握ることが重要である。

水素航空機の開発には、複数の技術領域（機体設計、温度管理、推進システムなど）と国際的な協働が必要であり、技術者や研究者がグローバルに活動できる能力が求められる。そのためには、

- (1) 多国間プロジェクトへの参画を通じて、国際認証基準への理解と応用力を高める。
- (2) 大学・研究機関と産業界が連携し、水素技術専門教育プログラムを構築することで、次世代の人材を育成する。

などが有効と考えられる。また、オンラインの会議が増えたが、国際会議の時間帯は日本では深夜に開かれることもあり、所属する企業が、社員のこのような活動への参加の環境を積極的に整備することも、こうした人材の育成に必要である。

日本は水素技術で先行する知見を活かし、国際的な議論の場で提言活動を強化すべきと考える。特に安全規格や認証システムの策定では、日本の高い技術力と実績を示し、国際的な信頼を構築することで、グローバルな水素航空機市場でのリーダーシップを確立することが期待される。

国際標準に対応し、グローバルに活動できる技術者・政策立案者の育成を通じて、日本の航空産業は持続可能な発展を実現し、世界的な課題解決に貢献できると考えられる。

2.7. 社会提言

2.1~2.6. に示した、航空での CO2 削減を達成する 6つの要件を実現するために、日本の先進的な水素技術を結集して、水素リージョナル航空機を国際的な連携により開発し、水素サプライチェーンが構築できる地域での水素リージョナル航空ネットワークを構築し、こうした機体開発、インフラ整備、運航ネットワーク構築を連携して実施することを提言する。こうした早期の社会実装に挑戦することにより、水素利用における安全基準策定とその適合性証明方法開発を、国際機関ならびに国際標準化団体の活動を通してリードできる人材を産学官において養成することが可能になり、未来の航空分野が、環境負荷を大幅に低減し、社会全体に利益をもたらす持続可能な形へと進化することに日本社会が貢献できる。

3. おわりに

航空分野における 2050 年カーボンニュートラルの達成は、複数の技術革新と、それらを社会に実装するための制度改革を同時に進める必要があり、非常に大きな挑戦である。本提言では、長期的なソリューションとして注目されている水素利用に焦点を当て、日本が国際的なリーダーシップを発揮し、技術開発や政策策定の面で世界の航空分野における持続可能な未来の構築に貢献するため、また、カーボンニュートラルの達成に向けて水素利用を促進するための、6 つの要件とそれを実現するための提案を示した。

航空分野における水素利用の推進は、航空機の推進システムの脱炭素化を意味するだけでなく、地域を巻き込んだ水素ハブの形成など、分野を横断しての社会的なイノベーションとしてポテンシャルを秘めている。また、グリーン水素の確保や標準化活動、社会受容性の向上など、産業界だけでなく行政や地域、研究機関、そして国際的な連携が航空分野におけるカーボンニュートラル達成の鍵となる。

本提言が、日本が次世代の航空技術を主導する一助となり、より持続可能な社会の実現に寄与するための具体的な指針となることを願っている。また、本分野の発展には、今後の技術革新や社会情勢の変化に応じた柔軟な政策の見直しと、多様なステークホルダーとの協働が不可欠である。そのため、各界の意見や新たな研究成果を取り入れながら、継続的に議論を深めていくことが重要と考える。未来の航空分野が、環境負荷を大幅に低減し、社会全体に利益をもたらす持続可能な形へと進化するために、本ユニットがそうした議論のプラットフォームとして機能できるように努めたい。

4. 参考資料

- [1] Airports Council International(ACI) (2024), The Thrusted Source for Air Travel Demand Updates, <https://aci.aero/2024/02/13/the-trusted-source-for-air-travel-demand-updates/>
- [2] IATA (2013), Technology Roadmap, 4th Edition, June, p.6
- [3] 日原勝也, 岡野まさ子, 鈴木真二 (2009), 国際民間航空と地球環境問題～ICAO における最近の議論と今後について～, 日本航空宇宙学会誌 No.11, pp. 309-312
- [4] 中村裕子, 鈴木真二 (2011), 「航空と地球環境問題」世界の取り組み俯瞰、日本航空宇宙学会誌 59(684) pp.2-7
- [5] 中村裕子, 鈴木真二 (2018), ICAO の航空機 CO2 排出基準、日本航空宇宙学会誌, 66(5), pp.130-134
- [6] 鈴木真二 (2023), CO2 排出量の算出と削減事例：第 5 章、第 14 節「航空分野における脱炭素化にむけた技術開発と政策動向」, 技術情報協会
- [7] 国土交通省 (2022), 第 41 回 ICAO 総会における環境関係の決定概要 https://www.mlit.go.jp/koku/content/ICAO_CN.pdf
- [8] ICAO (2019), CORSIA Supporting Document, CORSIA Eligible Fuels-Life Cycle Assessment Methodology, https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Supporting%20Document_CORSIA%20Eligible%20Fuels_LCA%20Methodology.pdf
- [9] ICAO (2024), CORSIA Eligible Emissions Units, <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Emissions-Units.aspx>
- [10] ICAO (2022), LTAG Repot, <https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Pages/LTAGreport.aspx>
- [11] NEDO (2024), “別紙 2” 事業概要資料, グリーンイノベーション基金事業「次世代航空機の開発」 https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101735.html

- [12] 国土交通省 (2024)、空のカーボンニュートラル
https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk8_000007.html
- [13] 国土交通省、経済産業省 (2023)、航空機の脱炭素化に向けた新技術ロードマップ (案) の策定等について、第2回航空機の脱炭素化に向けた新技術官民協議会
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/kokuki_datsutanso/pdf/002_01_00.pdf
- [14] IATA (2021), Net-Zero Carbon Emissions by 2050
<https://www.iata.org/en/pressroom/pressroom-archive/2021-releases/2021-10-04-03/>
- [15] PISTREL (2024), Velis Electro
<https://www.pipistrel-aircraft.com/products/velis-electro/>
- [16] Diamond Aircraft (2024), eAircraft Electric Flying
<https://www.diamondaircraft.com/en/private-owners/electric-aircraft/>
- [17] Eviation (2024), Fly the Future
<https://www.eviation.com/>
- [18] EMEC (the European Marine Energy Center LTD) (2024), Hyflyer Project
<https://www.emec.org.uk/projects/hydrogen-projects/hyflyer/>
- [19] Aerospace Technology Institute (2024), FlyZero
<https://www.ati.org.uk/flyzero/>
- [20] 中村裕子、鈴木真二 (2024), イギリス FlyZero プロジェクトと航空機の脱炭素化、航空宇宙技術、23 巻 pp.1-5, <https://doi.org/10.2322/astj.23.1>
- [21] Airport Council International (2021), Integration of Hydrogen Aircraft into the Air Transport System,
<https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2021/08/aci-ati-hydrogen-report-1.pdf>
- [22] Jesse Schneider et al (2024), SAE International AIR8466 & EUROCAE ER034 release “Hydrogen Fueling Stations for Airports, in Both Gaseous and Liquid Form, a first step for defining hydrogen for aircraft, SAE Blog,
<https://www.sae.org/blog/air8466-guest-post>
- [23] Jayant Mukhopadhyaya and Dan Rutherford (2022), Performance Analysis of Evolutionary Hydrogen-Powered Aircraft, ICCT
- [24] https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/what_is_gosei_nenryo.html
- [25] (公財) 航空機国際共同開発促進基金 (2007), 航空機の地球大気環境へ与える影響：研究の回顧と今後の課題、解説概要 19-1
<https://www.iadf.or.jp/document/pdf/19-1.pdf>
- [26] Edmonton International Airport (2024), Toyota Mirai
<https://flyeia.com/corporate/esg/environmental-sustainability/hydrogen/toyota-mirai/>
- [27] Aerospace Technology Institute (2022), Market Forecasts & Strategy, FZO-CST-REP-0043.
- [28] Kazuma Komikado et al. (2024) CO2 emissions reduction activities in the aviation sector, 27th ATRS World Conference Lisbon, Portugal (July 1st-July 4th)
- [29] European Clean Hydrogen Alliance (2023), Roadmap on Hydrogen Standardization,
https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/News/Press%20Releases/2023/20230301_ech2a_roadmaphydrogenstandardisation.pdf
- [30] 東京大学未来ビジョン研究センター (2020), 航空安全認証制度と技術標準化に関する提言、2020.03.06、政策提言 No.3、
<https://ifi.u-tokyo.ac.jp/news/5950/>