

2023-1 水素航空機導入に関する運用面からの考察

1. はじめに

第41回 ICAO（国際民間航空機関）総会（2022年10月開催）では国際民間航空による温室効果ガスの排出に関する目標を、「総排出量増加の抑制」から、「排出量の削減」に変更することが決議された。更に CORSIA（Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation：国際民間航空のためのカーボン・オフセット及び削減スキーム）において2024年からの排出枠のベースラインを2019年排出量の100%から85%へ変更することが合意された。また、新技術の導入、運航方式の改善、SAFの活用、市場メカニズムという4つの領域にこれまで重点がおかれていたが、その取組を業界全体として今後さらに促進することが確認された¹⁾。

我が国では、電動化、水素航空機等に関して企業が持つ優れた環境新技術を社会実装することやそれらに対する安全基準等の策定を目的として「航空機の脱炭素化に向けた新技術官民協議会」が2022年6月に立ち上がり議論が進められている²⁾。

水素関連技術を得意とする企業が多いこともあり、我が国において水素を航空領域へ今後活用していく意向は強く、我が国のグリーン成長戦略³⁾にあげられている航空機産業の成長戦略「工程表」にも水素航空機向けコア技術の研究開発を2030年までに実施することが明記されている。また、脱炭素、エネルギー安定供給、経済成長の3つを同時に実現することを目的として、「GX（グリーントランスフォーメーション）実現に向けた基本方針」が2023年2月に閣議決定された⁴⁾。さらに、2023年6月に、我が国の水素基本戦略が改定され、国内外の情勢を踏まえつつ、2050年カーボンニュートラルを達成するための課題認識や取組方針などが示された⁵⁾。

これらを背景として本稿では、航空燃料が現行のケロシンから水素に置き換わる際に検討が必要となる項目について、機体運用と空港施設の両面から説明を行う。なお、本稿は、文献⁶⁾として執筆された内容を再構成するとともに、最近の状況を加筆したものである。

2. 運用面から見た水素航空機

既存機との相違点において、運用上の検討が必要になるとされる幾つかの項目について以下に説明する。

2.1 搭載量の確認

運航乗務員は出発前及び運航中は不測の事態を想定しながら常に燃料の搭載量を確認しており、燃料の想定外の減少や、タンク間の搭載量差などの事態に陥った際には出発停止、所定の手順、または代替空港への着陸等の措置を取ることになるため、正確な搭載量や残量の計測・表示が求められる。航空機の燃料が液体水素に代わったとしても同様の確認が必要となるため、安全な搭載手順、及び搭載量の測定方法や表示方法の標準化が求められる。

また、液体水素の物性として、沸点が -253°C と極低温のため、運航への必要量を計算して搭載した液体水素をボイルオフガス（タンク外部からの入熱により気化するガス）として機外に排出することを極力最小化することが求められる。

さらに、離着陸時、旋回時、または乱気流遭遇時に、機体の姿勢変化に伴い、タンク内

が揺動することでタンク内の温度分布の変化に伴う影響についても検討する必要がある。

2.2 空港選択

ICAO Annex 14 には、空港の救急消防能力（RFFS⁷⁾, Rescue and Fire Fighting Services) として、空港を利用する航空機の全長と胴体幅によりカテゴリーが定められ、カテゴリーに応じた消火剤、救助用器材の必要最低数、及び救助用器材が任意の救助地点に到着するまでの時間等が記載されている。ただし、現行の RFFS は水素に対応する内容にはなっていないため、代替空港を含めた、水素航空機が乗り入れる空港においては、新たに水素に対応する安全基準を考慮して RFFS を改定し、カテゴリーに応じた空港を選択する必要がある。

2.3 ペイロードと航続距離

航空会社が機材を選定する際に確認が必要な基本的パラメーターであるペイロード及び航続距離について考察する。

表 1 に示すように水素航空機にケロシンと同量のエネルギー量を確保するとなると燃料タンク容量は約 4 倍となる⁸⁾。従って、主翼内部に搭載するだけでは燃料が不足し、機内もしくは機外に燃料タンクを追加するか、タンクの搭載位置を胴体内として胴体長を伸ばすなどの対応が必要となる。

仮に、機体外形を変更せず、機内に燃料タンクを配置する場合、ペイロードを現状維持とすると航続距離が減少し、航続距離を現状維持とするとペイロードが減少する。

表 1 燃料タンク容量と燃料重量の概算 (737-800 クラス)⁸⁾

| | 液体水素 | ケロシン | 液体水素/ケロシン |
|--------------|--------|--------|-----------|
| 発熱量(kcal/kg) | 27.700 | 10.300 | 2.68 |
| 密度(kg/l) | 0.0708 | 0.8090 | 1/11.4 |

また、例えば、現行 737-800 が運航している航続距離は、設計上の最大航続距離の 2~3 割の範囲にピークが存在するが (図 1 中の 600nm~900nm 近辺)、7 割のあたり (図 1 中の 2,000nm 近辺) の航続距離を飛行しているルートも多数存在している⁹⁾。

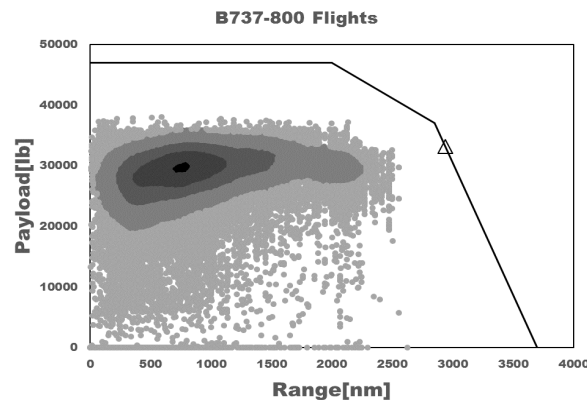


図 1 ペイロード・レンジダイアグラム⁹⁾
B737-800 の飛行データ及び設計ポイント (△印)

つまり、航空会社においては、短距離と長距離のルートを組み合わせて運航しているため、燃料タンク容量の減少に伴い航続距離が減少することは、運航の柔軟性を毀損し、収益性を低下させる可能性がある。また、柔軟な運航ルートを策定出来なくなることで旅客利便性も低下することになる。水素航空機の設計においては、ペイロードと航続距離といった需要側の要求を十分に理解する必要がある。

2.4 機体サイズと駐機場

様々なサイズの航空機が空港では離発着するが、旅客と貨物の搭降載や燃料搭載の実施場所として使用される駐機スポットにも、この航空機のサイズに応じたスポットが設定されている。航空機のサイズについて、ICAO¹⁰⁾では主翼スパン長によりAからFに分類され、各空港の駐機スポットはどのサイズまで適用できるかが決められている（表2）。

表2 航空機のサイズによる分類¹⁰⁾

| Code | Wingspan (m) |
|------|-----------------|
| A | 15 m 未満 |
| B | 15 m 以上 24 m 未満 |
| C | 24 m 以上 36 m 未満 |
| D | 36 m 以上 52 m 未満 |
| E | 52 m 以上 65 m 未満 |
| F | 65 m 以上 80 m 未満 |

前述の通り、タンク容量の増加に伴い、機体が大型化する可能性があり、大型化するにつれて駐機スポットの利用制約がより厳しくなる。そこで、小型機のみ適用可能な空港への就航を想定している場合は、水素航空機の設計の段階から機体サイズについて留意する必要がある。

2.5 燃料放出

燃料放出は、飛行高度を維持するため、あるいは着陸可能な重量を実現するために、機体の重量を低減する必要があるときに実施される。この目的のために、燃料放出システムを装備する必要がある。耐空性審査要領に、機体の離陸、進入及び着陸復行性能により具体的な内容が記載されている。

燃料放出実施の際には、飛行高度や他機との間隔などが定められている。また、実施するエリアについても管制からの指示に従わねばならない¹¹⁾。

水素航空機では、水素が軽量であることから燃料放出による重量低減効果が少ないと考えられ、燃料放出自体が不要となる事も想定される。ただし、実施する必要に備えて、水素放出による影響を考慮して安全基準を定める必要がある。

3. 水素航空機運航に必要とされる空港施設等

空港の関連施設や給油作業手順、安全ルールなどは、現在ケロシン燃料を前提として定められている。本節では、燃料が液体水素に変更された場合に検証やルールメイキングが必要となる項目について考察する。

3.1 給油作業

航空機にケロシン燃料を給油する現状では、航空法や消防法等の適用を受ける。一方で液体水素は圧力が 0.2MPa 以上の場合には高圧ガスに分類¹²⁾され、取り扱いが高圧ガス保安法等により規定されている。しかしながら、液体水素を航空機に搭載する想定はされていない。そこで、安全を十分に確保するために従うべき諸基準や規則を確認するとともに、必要に応じて新たな安全基準を整備することになる。

現在、航空機への給油作業と並行して、貨物の搭降載などの作業も輻輳して行われている。その際には補助動力装置、地上電源装置及び地上空調装置などの機器が使用される。ケロシン燃料の給油時に燃料漏れが発生すると、それらの機器は直ちに停止され、安全確保の措置が実施される。一方、水素の場合は漏洩するとすぐに気化してしまう。更に、水素は無色・無臭であり漏洩を発見することが難しいと考えられる。そこで、例えばこれら機器を並行して使用する際には、同時作業を制限するといった基準、水素が漏洩した際の作業手順や安全基準などを新たに定める必要がある。また、給油作業用装置や機体に対して、気化した水素が滞留しない構造やシステム化の検討も必要になる可能性がある。

また、現行航空機への燃料搭載は空港の地下埋め込み式燃料タンク（ハイドラント）あるいは燃料給油車から実施されている。一方で、液体水素が燃料として使用される場合には、これらの給油装置は従来のものとは異なる仕様となることが想定される。よって、作業員に対する新たな訓練や安全確保のルールが必要となる。

作業性の観点からは、航空機への液体水素の搭載時に使用するホースなどは断熱が必要であり、重量が増えるとともに使い勝手の悪化が想定される。しかもケロシンに比べて液体水素は体積密度が低いため、作業にこれまで以上に時間がかかり、航空機の地上停留時間が増すことが想定される。LCC などの航空会社は、多頻度運航などを実施しているが、その際、地上停留時間を極小化することで利益を確保している。しかし、水素燃料の使用によって航空機の地上停留時間が延長されることとなり、これによって機材の稼働頻度が低下し収益悪化を招く原因となり得る。更には、地上停留時間の延長は、混雑空港における駐機スポットの占有時間の延長に繋がる。このことにより、駐機スポットが不足したり発着便数が減少してしまうことが懸念される。そのため、現在でも大型機などでは燃料を多量に搭載する際には左右の主翼 2 箇所から給油しているが、水素航空機の場合は 3 箇所、4 箇所といった搭載箇所を増加させるオプションの検討が必要な可能性もある。

3.2 水素インフラ・貯蔵インフラ

水素を輸送したり貯蔵する際には、通常は圧縮もしくは液化されている。水素を航空機に搭載するとすると、水素が気体で貯蔵されているケースでは搭載前に液化する必要がある。現時点では水素燃料の機体への搭載方法については確立されていないが、空港における液化設備の設置が新たに必要となる。

水素航空機が実際に運用され始めると、当初は、長距離飛行する航空機はケロシン、中距離飛行以下の航空機では水素が燃料として使用される事が想定される。その場合、二種の燃料に対応した施設や設備を当面の間維持する必要がある¹³⁾。

世界において、さまざまな団体が水素インフラに関する検討を進めている。ACI (Airports Council International : 国際空港評議会) は空港管理者の団体であるが、欧州地域を管轄している ACI Europe は 55 か国 500 以上の空港を代表し、空港間や航空業界に

関連する多くの組織と緊密な関係を保っている¹⁴⁾。また、2022年6月、欧州委員会は、水素及び電動航空機の運航開始に向けた航空エコシステムの構築を目指す AZEA (Alliance for Zero Emissions Aviation) を発足させ、小さな団体やスタートアップ企業に対しても支援を行うとしている¹⁵⁾。

3.3 欧州における空港の対応～Groupe ADP における活動～

同様に、空港のライフサイクルを考えて戦略的な空港計画及び技術コンサルティングを行っている、フランスに本拠を置く Groupe ADP¹⁶⁾ (正式名称は **Aéroport de Paris S.A.**) を訪問する機会を得たので、その聞き取り内容をもとにして、以下にその活動状況についてまとめる。

(1) Groupe ADP の紹介

Groupe ADP は、空港運営会社の世界的なリーダーとして空港のインフラと運営に関する専門知識を持ち、2021年2月、エアバス社、エールフランス・KLM オランダ航空、イル・ド・フランス地方航空局とともに、パリ地方航空局 (Choose Paris Region) の支援のもと、「H2 ハブ空港 (H2 HUB AIRPORT)」を立ち上げた。航空輸送を脱炭素化する手段として、水素を新エネルギーとして使用する水素空港エコシステムの導入に取り組んでいる¹⁷⁾。

(2) Hydrogen Airport 社設立の背景

2023年6月、Groupe ADP は水素に関する専門知識を持つ Air Liquide 社との合弁会社として Hydrogen Airport 社を設立した¹⁸⁾。Air Liquide 社の持つ水素の製造、液化、輸送、保管技術と Groupe ADP の持つ空港のオペレーションに関する豊富なノウハウ、関連当局 (IATA、ICAO、EASA など) との関係性を活用し、技術面及び運用面での課題や事業性の検証に取り組んでいる。また、航空機メーカーと水素空港を評価するための提携を結び、水素航空機の仕様などの情報を得ることで、空港に必要な水素の需要量をより正確に算出し、2035年の水素航空機の運航開始に向けて、まずはパリを中心とした水素供給のためのサプライチェーンを作り、そこで得たノウハウを世界の空港へ展開することを目的としている。

(3) マイルストーン

a. Opportunity & Pre-Feasibility Study (1年間程度) : 初期検証フェーズ

空港にグリーン水素 (需要量により水素ガスもしくは液体水素) を輸送すること、及び空港でグリーン水素を製造することの両面を検討する。

Step1 (2か月間程度) : 空港への水素の需要量や供給手段を評価する。

Step2 (2か月間程度) : 液体水素の製造から機体への供給に関するインフラに必要なシナリオ (具体的な大きさや設置候補場所) を定義する。

Step3 (5か月間程度) : 初期的な事業性検証や安全面での分析を行う。

前述の通り、このパリでのサプライチェーン作りが成功すれば、水素インフラ建設用の土地の確保、関連当局や供給会社との調整を開始する。

b. Detailed Engineering Studies (3年間程度) : 詳細検証フェーズ

水素インフラ (製造、液化、貯蔵、輸送) に関する詳細な技術評価、事業性検証及びマスタープランの策定を行う。

c. Assistance in Construction (5年間程度) : 実施フェーズ

水素インフラの建設及び実運用開始へのアシストを行う。水素インフラの建設に必要なデータを得るために10年くらいはかかると想定しており、今から準備を始めないといけないと考えている。上記は、2035年以降のある程度大きな需要が見込まれるフェーズに向けての準備スケジュールであるが、ZeroAvia社は2027年¹⁹⁾に、Universal Hydrogen社は2025年²⁰⁾に、既存の機体のターボプロップエンジンを水素燃料電池のパワートレインに改造する計画があるため、少量の需要にも対応できるように並行して準備を進めていく予定とのことである。

(4) 今後想定される参加企業

水素インフラ建設のための土地の使用が許可されれば、ピラミッドのように関連当局や供給会社に広がっていく。

(5) 財務管理

国家レベル、及び欧州レベルで資金集めを考えているが、現時点では具体的な計画は無い。この重要なプロジェクトを推進するため、太陽光、水素や航空の業界とも緊密に協力している。

(6) 水素使用の安全基準や運用面の教育

Air Liquide社が保有する専門知識や教育施設を活用する予定である。

(7) 社会的受容性

技術開発と並行して行う。空港近辺の住民の理解を得るため、ステップバイステップで行っていくことが重要である。まずは、水素ガス車用へのチャージングステーションを住民に展開し、空港のGSE（Ground Support Equipment：地上支援装置）にも広げていく。少ない量で地上でのチャージングステーションを運用していく。次に、液体水素の少量の使用から始めていくことを考えている。

4. おわりに

水素航空機の導入には、使用される技術や安全基準に関して、国際的な法制度や政策の変化に対応することが求められる。同時に、水素インフラへの考察も欠かせないものとなる。

我が国においては、航空法のみならず、高圧ガス保安法など他の関連法についても十分な理解を持つことが必要である。また、様々なステークホルダーとの協力や連携が不可欠であり、共通の目標に向けて推進していくことが求められる。これにより、将来、法的要件に基づいた水素航空機の導入を実現することができるものと思われる。

参考文献

- 1) ICAO：第41回総会プレスリリース（2022年10月7日付）、
<https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-netzero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>
- 2) 国土交通省：航空機運航分野における脱炭素化の取組について、2022年9月。
<https://www.mlit.go.jp/koku/content/001510269.pdf>
- 3) 内閣官房他：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略、2021年6月、
<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf>

- 4) 経済産業省：「GX 実現に向けた基方針が閣議決定されました」（2023 年 2 月 10 日付）
<https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html>
- 5) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議(2023 年 6 月 6 日付) chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisai_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy_kaitei.pdf
- 6) 小今井隆、平井慎吾、李家賢一、運用面から見た水素航空機に関する考察、日本航空宇宙学会誌、Vol.71, No.7, 2023 年 7 月, pp.169-176.
- 7) ICAO Annex 14. Aerodromes, Vol. I Aerodromes Design and Operations, 9.2 Rescue and firefighting, 7th Edition, (2016 年 7 月付)
chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/.https://www.iacm.gov.mz/app/uploads/2018/12/an_14_v1_Aerodromes_8ed._2018_rev.14_01.07.18.pdf
- 8) (財)日本航空宇宙工業会 水素エンジン調査委員会 「水素航空機について」 7 巻 305 号 (昭和 54 年 1 月 25 日原稿受理 Hydrogen Fueled Transport Aircraft)
chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsass1969/27/305/27_305_275/_pdf
- 9) 森田舜、李家賢一：運航上望まれる機体の設計とそれに係る機体パラメータの遺伝的プログラミングを用いた考察、第 55 回飛行機シンポジウム、1E01、2017 年
- 10) ICAO Annex 14. Aerodromes, Vol. I Aerodromes Design and Operations, 1.6 Aerodrome reference code, 7th Edition, (2016 年 7 月付)
chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.iacm.gov.mz/app/uploads/2018/12/an_14_v1_Aerodromes_8ed._2018_rev.14_01.07.18.pdf
- 11) Federal Aviation Administration: Air Traffic Control Document Information, FAA Order 7110.65Z, (2021 年 5 月 5 日付)
https://www.faa.gov/regulations_policies/orders_notices/index.cfm/go/document.current/documentnumber/7110.65
- 12) 高圧ガス保安法：定義、第 1 章第 2 条、昭和二十六年法律第二百四号
- 13) Clean Sky 2 JU and Fuel Cells and Hydrogen 2 JU: Hydrogen Powered Aviation, 2020 年 5 月,
- 14) ACI (Airports Council International ; 国際空港評議会)
chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.aci-europe.org/component/attachments/attachments.html?task=view&id=2130
- 15) European Commission,
chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://defence-industry-space.ec.europa.eu/system/files/2023-06/Progress%20report%20v.1.0.pdf
- 16) Groupe ADP, https://fr.wikipedia.org/wiki/Groupe_ADP
- 17) Groupe ADP Press Release,
PARIS REGION, CHOOSE PARIS REGION, GROUPE ADP, AIR FRANCE-KLM AND AIRBUS REVEALS THE WINNERS OF THE WORLDWIDE CALL FOR

← 解説記事一覧に戻る

この解説記事に対するアンケートにご協力ください。

▶ アンケート開始

EXPRESSIONS OF INTEREST REGARDING THE SETUP OF AN HYDROGEN BRANCH IN AIRPORTS, dated May 27th 2021

<https://presse.groupeadp.fr/h2hubairport-results/?lang=en;>

- 18) Air Liquide Press Release, Air Liquide and Groupe ADP announce the creation of "Hydrogen Airport", the first joint-venture to support the development of hydrogen infrastructure in airports, dated JUN 16th, 2023

<https://www.airliquide.com/group/press-releases-news/2023-06-16/air-liquide-and-groupe-adp-announce-creation-hydrogen-airport-first-joint-venture-support>

- 19) ZeroAvia Home Page, <https://zeroavia.com/za2000/>

- 20) Universal Hydrogen Home Page, <https://hydrogen.aero/product/>