

R2-1 水素燃料航空機の研究開発動向

1. はじめに

航空機の CO₂ 排出抑制をはじめとした環境適合性向上に向けた取組が加速する中で、2020 年初め頃から新型コロナウイルスの感染が世界に広がり、特に航空産業は大きな打撃を受けている。これまで、CO₂ 排出低減に向けた取組として、低炭素燃料（植物起因の低炭素燃料とされるバイオ燃料や水素・メタンなど実質的な低炭素燃料）導入や、推進系電動化など革新推進系・機体形状などが期待されていた（図 1 参照）¹⁾。それらの内、バイオ燃料の導入や推進電動化は特に実用化や実現に向けた取組が目立って活発化していたものの、水素を燃料とした航空機については数年前までは大きなプログラムとして認識されるものは見当たらなかった。いくつかの伏線はあるが、2020 年 9 月にエアバス社が発表した、「2035 年までに水素燃料航空機を飛行させる」という方針は、大きな注目を集め、水素燃料航空機やその関連技術の開発に向けた取組や検討が急激に活発化している。本報では、最近のエアバス社を中心とした欧州の水素燃料航空機への研究開発シフトの背景に触れ、現状ターゲットにしている水素燃料航空機技術の検討の経緯（明確には 2000 年初頭に遡る）、その後の技術進展などについてまとめる。

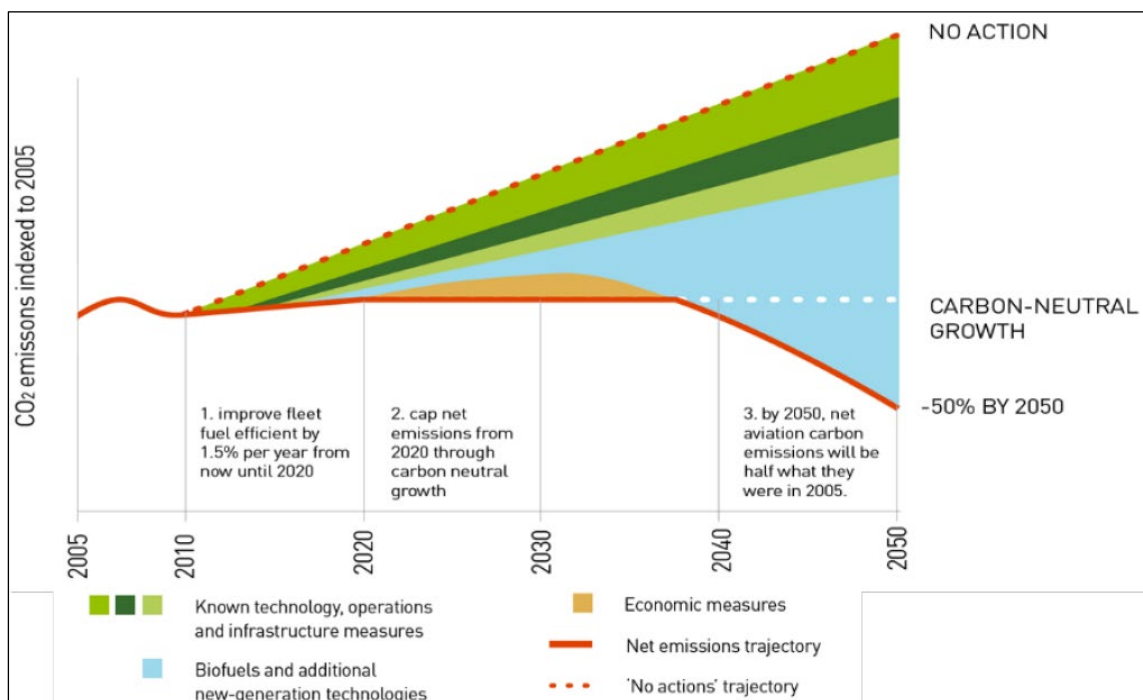


図 1 IATA 技術ロードマップ 2050 における CO₂ 排出低減ロードマップ図¹⁾

2. エアバス社の発表の経緯と周辺動向

2020 年初頭からの新型コロナウイルス拡大の影響により、航空輸送業界は大きなダメージを受けている。エアバス社・ボーイング社を筆頭に、全てのシステム・要素・運航に関わる事業者は経営に大きな制約を受けている。そのような中、エアバス社は E-Fan X プロジ

エクトの中止を 2020 年 4 月に決定した²⁾。この中止は、経済的な視点だけではなく、技術的な成熟段階を見据えた判断としているが、現状を踏まえると、航空関連の技術開発の勢いに水を差しかねないものとも受け止められる。それから大きく遅れることなく、同年 9 月には、同じくエアバス社は、2035 年までに水素燃料航空機の旅客機をターゲットとして事業化を実現させる旨発表している（図 2 参照）³⁾。この発表は、航空機の低炭素化に向けた取組の急激な転換であり、唐突な発表にも見えるが、欧州の動向を見ると自然な流れのように見える。2020 年 6 月には、EU の取組として CleanSky2 等より、水素燃料航空機技術のローンチに関わるプレス発表がなされている⁴⁾。これは、ファクトベースの水素燃料航空機の可能性検討報告⁵⁾を引き合いに出しながら、水素燃料航空機の CO₂ 排出低減に占める効果や実現性について示したものである。水素燃料航空機のプレスリリースに先立って、EU では、欧州の水素燃料航空機に向けた戦略を提示している⁶⁾。欧州におけるエアラインの公的支援では、バイオ燃料の積極活用などの脱炭素に向けた取組を引換えに求められるケースもあり、「欧州グリーンディール」⁷⁾の一環であるとしてよさそうである。



図 2 エアバス社の発表した水素燃料航空機 ZEROe プロジェクト・コンセプト機体³⁾

後述するように、現時点での欧州における水素燃料航空機の取組背景として、技術やシナリオの観点では 2000 年初頭に欧州で実施された水素燃料航空機の導入に向けた概念検討（Cryoplane）⁹⁾の成果が基礎となり、新たに技術の実現に向けた欧州 Hoziron2020 の一環として実施されている ENABLING cryogENic Hydrogen based CO₂ free air transport (ENABLEH2) プロジェクトが挙げられる（図 3 参照）¹⁰⁾。

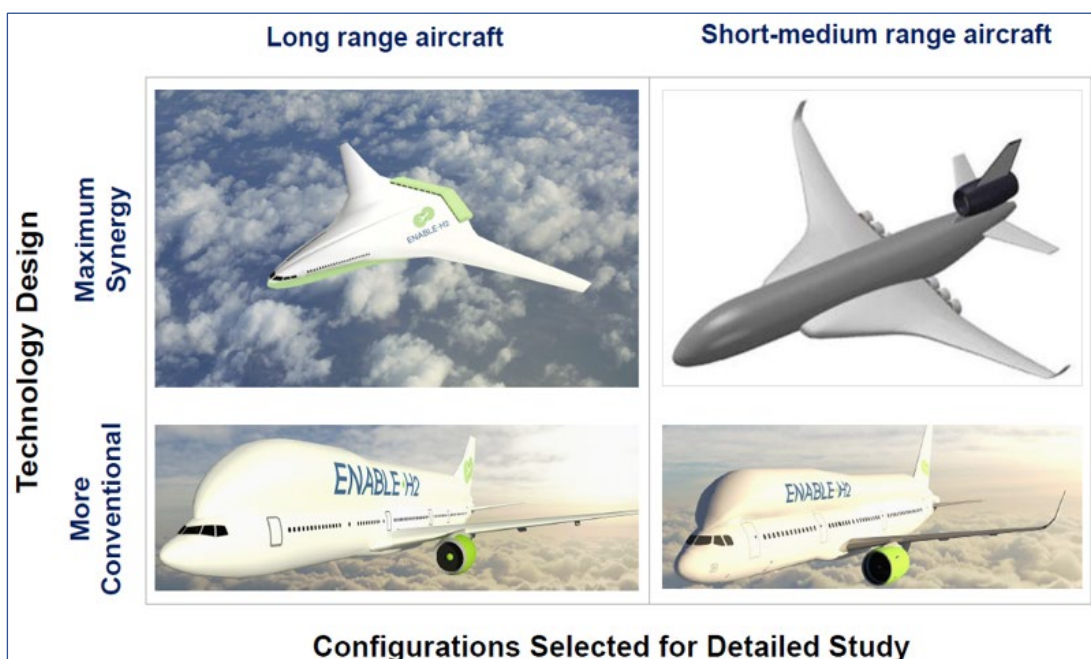


図3 ENABLEH2 プロジェクトのシステム検討対象機体形態⁸⁾

Cryoplane 成果まとめの段階からの情勢の変化として、以下が想定される：

- ①推進電動化を中心とした、新規システム導入に向けた機運の高まりに合わせ、関連基準策定（燃料電池利用を想定した水素に関する基準など）¹¹⁾¹²⁾等、水素燃料航空機が受け入れられやすくなってきた。
- ②水素燃料を化石燃料に依らず大量に安価に製造する道筋として、再生可能エネルギーによる水電気分解などのコスト成立性、インフラ拡充の可能性が高まってきた。
- ③温暖化抑制のための目標達成のために、推進電動化を実現する道筋が早期には見出しにくい、一方、より現実的な実現性として水素燃料ガスタービンによる航空機導入が再評価された。
- ④①に関連して、燃料電池など、水素と親和性のある機器類の技術成熟度が向上してきた。

小型機実証に関しては、水素燃料電池を用いた実証機フライトは複数実現しており、2020年にはZeroAviaが小型機ながら旅客輸送クラスの水素燃料電池航空機の飛行まで実現している¹³⁾。

水素燃料ジェットエンジン（現状のターボファン・エンジン等の燃料変化に伴う換装）技術については、Cryoplaneの頃に比べていくつかの進歩は認められるものの、根本的にある技術の技術成熟度が上がった若しくは新しい成立性の高い技術・概念が提示されたものではない。Cryoplane 成果展開時期の水素燃料航空技術・研究動向については、文献¹⁴⁾¹⁵⁾などにまとめられている。一方、水素の利用技術として、国内メーカーは、直接航空用途ではないが、水素燃料技術の進歩に向けこの10年大きく歩を進めて来た。例として挙げられるのが、SIP（Strategic Innovation promotion Program：戦略的イノベーション創造プログ

ラム)における水素社会実現に向けた取組(エネルギー・キャリア)¹⁶⁾、燃料電池の普及である¹⁷⁾。

ガスタービン技術や燃料サプライチェーンなど、2020年に示された会社の計画として、水素の活用を前面に押したものもある。三菱重工業株式会社は2021年事業計画において開拓すべき分野としてカーボンニュートラル技術を掲げ、特に定置用の大型水素専焼ガスタービンの開発実証を掲げており¹⁸⁾、川崎重工業株式会社はこれまでの研究開発実績を踏まえて、グループビジョン2030において、2030年までに、航空エンジン燃焼器を対象とし、実証・デモンストレーションの達成を目指すとしている¹⁹⁾。

以下、ZEROeプロジェクトが掲げる2035年を実現時期とした水素ガスタービン・エンジンによる水素燃料航空機の技術開発動向と、極低温液体水素を利用した燃料電池や超電導技術を用いた旅客機クラスの航空機技術開発に向けた動向を紹介する。

3. 従来のガスタービン・エンジン

ジェットエンジン燃料を水素に換装した場合のメリット・デメリットと技術課題については、以下が挙げられる¹⁷⁾²⁰⁾²¹⁾：

【長所】

- P1：高い質量エネルギー密度（3倍）
- P2：CO₂排出ゼロ
- P3：NO_x低減の可能性
- P4：燃焼用燃料としての取扱いの容易さ

【主な短所】

- N1：体積当たりのエネルギー含有量が低い（1/4）
- N2：燃料の貯蔵と供給が困難
- N3：材料特性（脆性）

【その他の課題】

- N4：持続的な供給方法（環境適合性考慮）
- N5：従来と異なる空港などのインフラ設備
- N6：環境に及ぼす多量の水蒸気排気の評価と対策
- N7：燃料に対する一般の方の受容（社会受容性）

際立った長所に対して欠点・課題もあり、従来のジェット燃料を用いた航空機の単なる燃料の入替えという見方をとることは出来ず、極低温液体水素の管理等新規技術も必要である。欠点・課題の内、N3、N4、N7については、燃料電池自動車やインフラ整備に向けた航空機外産業分野と共通するものであり、わが国で進められている図4¹⁶⁾に示されるような水素社会実現に向けた取組がなされると、解決するものといえる。

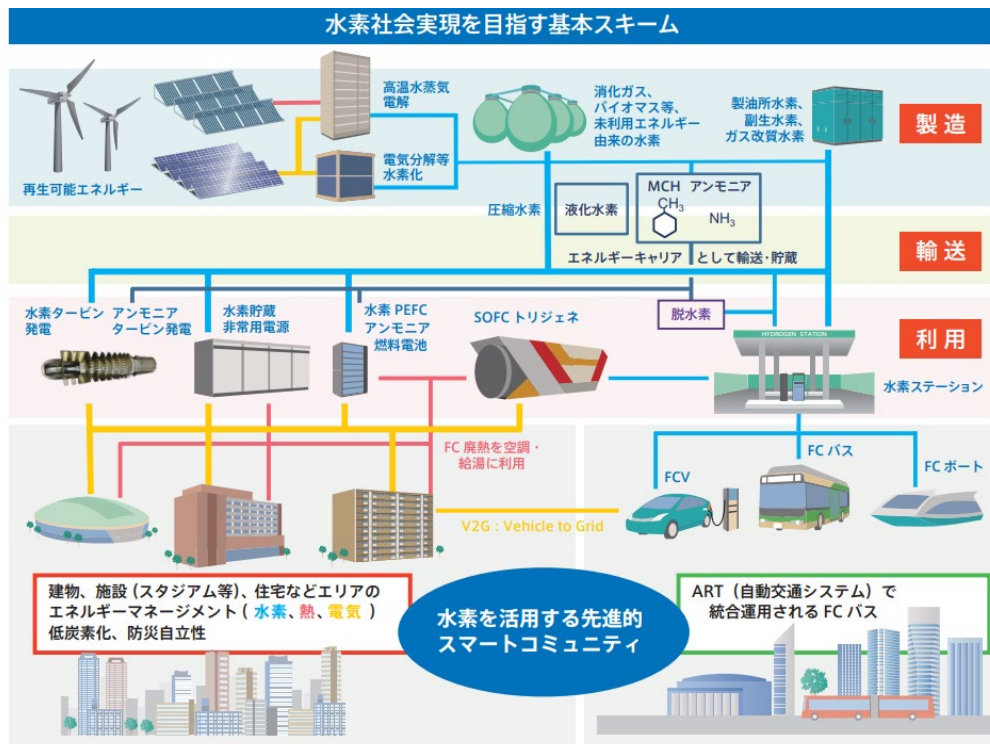


図 4 我が国における水素社会実現に向けた基本スキーム例¹⁶⁾

水素燃焼の利点として掲げられている水素の燃焼における NOx 低減の可能性であるが、従来の炭化水素燃焼器とは異なる設計の工夫が必要であり、Cryoplane や ENABLEH2 でも主要な課題となっており、活発な研究開発が行われている。燃焼技術については、わが国でも定置用の技術開発²²⁾が進んでおり、航空機に向けた適用も可能と考えられる。

こうした観点で、水素燃料航空機に向けた主要な技術課題は以下と考えられる。

- I1：低 NOx 燃焼技術
- I2：極低温燃料貯蔵（タンク）技術
- I3：極低温燃料供給技術
- I4：空港インフラ構築

なお、水素燃料航空機は CO₂ を排出しない観点で温暖化効果を抑制しようとする一方で、（工業活動に依らずとも多く大気中に存在する）水蒸気を従来航空機より多量に発生し、水蒸気や水蒸気に起因する飛行機雲の形成は懸念点であるが、温暖化効果の見積りに関する研究が行われているところであることに触れるにとどめる。

低 NOx 燃焼技術と極低温燃料管理技術は図 5 に示すように ENABLEH2 の主要な技術開発項目となっている。図 5 を見ると、水素燃料管理の用途として将来の電動推進システム（発電機・モータ/分散ファンの記載）も想定していることが分かる。Micromix は、Cryoplane プロジェクト⁹⁾の取組でも掲げられていた、低 NOx 技術である²³⁾。

極低温タンクは、現在も主要な課題の一つであり、宇宙輸送用ロケットの技術活用が想定されるが繰り返し運用回数など異なる技術要求があり、再利用宇宙往還機に適用される燃料タンクの技術と大きく関連する。JAXA では、再利用宇宙往還機や水素燃料航空機に向けた複合材技術の研究が行われている²⁴⁾。米国、欧州でも複合材燃料タンク技術は宇宙輸送、極超音速推進向けに研究開発が行われている²⁵⁾²⁶⁾。

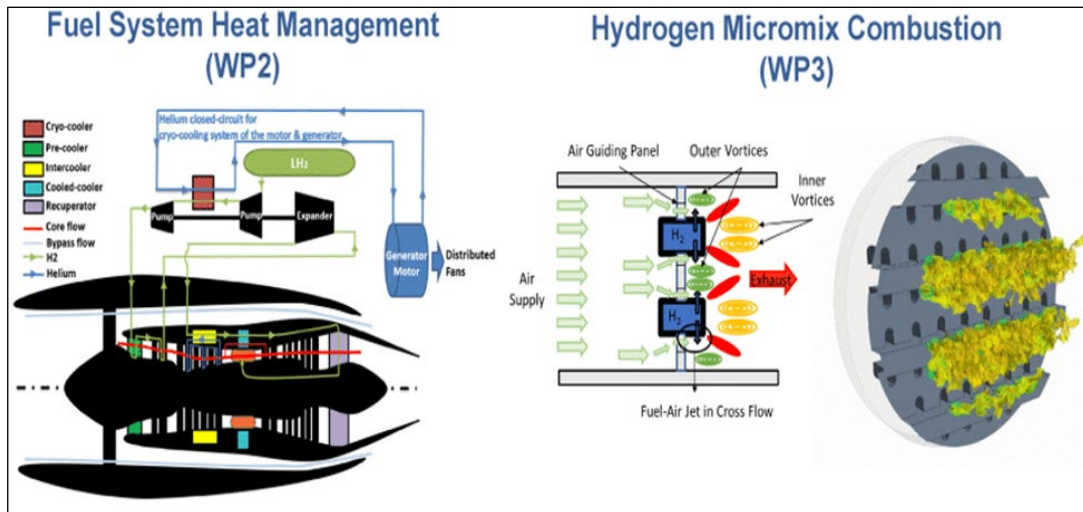


図5 ENABLEH2プロジェクトにおける燃料システム熱マネジメントと水素 Micromix 燃焼技術⁸⁾

燃料供給には、液体水素タンクから燃焼器に供給する際の相変化の扱いの問題、2相流としてキャビテーション防止などが必要であり、超臨界流としての供給などが課題である。基盤的な研究は各国で行われているものの、システムとしての技術実証が行われることが重要であり、JAXA において行われている水素燃料極超音速ターボジェット・エンジンの研究開発の一環として行われている極低温燃料供給系技術¹⁷⁾²¹⁾²⁷⁾は直接亜音速の水素燃料航空機にも適用可能(図6²¹⁾)である。

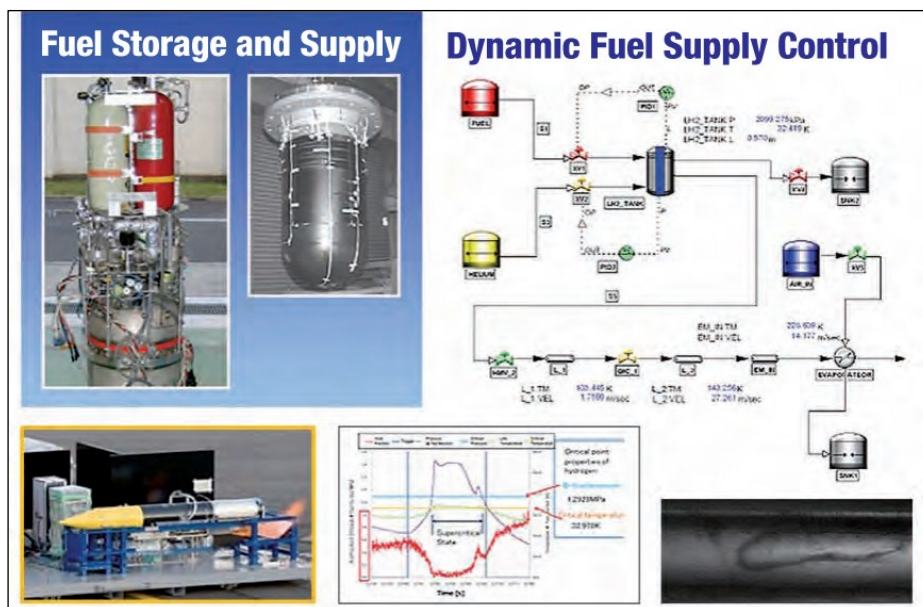


図6 水素燃料供給管理技術検討例²¹⁾

空港における水素インフラ技術は、運航方法の策定も含めた多くの課題を抱えるが、中部国際空港における水素利用の取組等の水素燃料導入成果自体は、重要な基盤になると考えられる。

以上のように、従来のジェットエンジン（燃焼）による水素燃焼航空機については利点と課題は明確化しており、ある程度の技術蓄積は欧米や日本にあるといえる。特に、定置用における水素燃焼技術、水素社会を目指した水素の関連技術は、我が国が世界に向けて先行しているものが多く、水素燃料航空機の実現に向けて我が国産業界（航空分野以外も含む）の貢献し得る可能性は大きいと考えられる。図 2 に示されるエアバス社の提示するコンセプト機体は 100 席以下（航続距離 1,000 海里超）のターボプロップ機、200 席以下（航続距離 2,000 海里超）のターボファン・エンジン機（従来機体形状）、翼胴機体（Blended Wing Body）の 3 種が示されているが、プレス発表時のライブ会見の質疑やその他情報においても、それぞれの仕様の詳細は明らかにされておらず、3 種のコンセプト機は優先順位を定めずに進めると言及されている（²⁸ならびに発表時会見）。E-Fan X 等の電動航空機技術開発で得られた知見を活用するとされるものの、水素燃料の直接燃焼によるエンジン技術を基軸に据えた点で、今後、従来（のガスタービン）技術を用いた水素燃料航空機開発が加速すると考えられ、電動化に依らない水素燃料航空機技術を比較的短期間に実用レベルにまで開発することが重要といえる。

4. 新規技術

エアバス社による水素燃料航空機開発計画の発表までは、低炭素化に向けた主要な新規技術はバイオ燃料や再生可能エネルギーによる合成燃料、推進電動化や新規機体形態（Blended Wing Body 機体など）であったり。これらの技術開発、実用化は今後も進むと考えられる。水素燃料航空機は、運航に伴う CO₂ 排出はゼロであり、燃料消費率低減の観点でも従来ジェット燃料に比べ改善が期待されるが、エネルギー消費の観点（燃料消費×エネルギー密度は同等）では、軽量化や燃焼の改善などで若干の改善は見込まれるが、大きな改善は期待できず、長期的には電動航空機の導入が期待される。電動航空機（電動推進による航空機）は、従来のジェット燃料を用いたガスタービン発電機やバッテリーとモーターを組み合わせた形態が基本であるが、水素燃料の極低温特性を利用した超電導回転機（発電機／モーター）利用や水素燃料電池も有望視されており最近活発に研究されている。代表的なものとしては、図 7 に示すように JAXA が進めるエミッション・フリー航空機と米国イリノイ大学中心に NASA の ULI(University Leadership Initiative)の一環として実施されている技術開発 CHEETA(Center for High-Efficiency Electrical Technologies for Aircraft)が挙げられる。

JAXA のハイブリッド推進システム ²⁹は、水素燃料に限定しないものの固体酸化物燃料電池 (SOFC) とガスタービンのハイブリッド発電機と分散電動ファンの組合せを対象に検討しており、水素を利用する場合の燃料タンクや周辺構成についても検討が進められている。基礎試験においては、ガスタービンと燃料電池の組合せ、燃料電池に水素燃料が供給さ

れた³¹⁾。CHEETA においては、水素燃料電池の利用を念頭に幅広く概念検討・モーター等電気要素の技術開発が行われている。また、JAXA では次世代ジェットエンジンの設計・解析技術開発 (DANTE) の一環として、超電導モーター・発電機の初期設計ツールを用いた³²⁾、ベースラインとなるターボファン・エンジンからの派生としてハイブリッド・アシスト、単一のファンの条件におけるターボ電動推進の設計検討が行われている³³⁾。

欧州においては、2020 年 10 月、ドイツ航空宇宙センター (DLR) とドイツ航空宇宙工業会 (BDLI) が白書「Zero Emission Aviation」を作成し、(ドイツの) 連邦経済エネルギー省 (BMWi) に提出している³⁴⁾。ここでは、CO₂ 排出低減に向けた取組として現在なされ



(a) JAXA ハイブリッド推進システム²⁹⁾

(b)NASA-ULI による CHEETA³⁰⁾

図 7 液体水素・燃料電池利用を想定した航空機検討構想例

ている航空用代替燃料 (バイオ燃料等継ぎ足し燃料) の導入拡大に加え、水素燃料航空機開発、電動航空機開発と言った包括的な技術研究をまとめている。2050 年までの CO₂ 排出ゼロとなる航空機導入に向けて、欧州全域レベルでの政府レベルの研究開発が必要であるとされた。関連して、DLR は 13 か国の機関等からなる 'Zero Emission Aviation' (ZEMA) Group を立ち上げ、直接水素燃料に関わらないものも含むが低炭素化に向けた関連技術開発を推進する意向を表明している³⁵⁾。

5. 今後の展開について —まとめにかえて—

エアバス社による水素燃料航空機の開発構想発表を受け、改めて水素燃料航空機に注目が集まっている。振り返ってみると、現在考えられる機体構成や技術課題は 2000 年代初頭に行われた欧州の Cryoplane に代表される検討で概ね明らかになっており、本文中に示した新しい現状認識を踏まえた上での、本格的な機体開発に向けた取組着手とみることが出来る。

しかし、継ぎ足し (ドロップイン) 燃料であるバイオ燃料等認証済代替燃料と異なり、旅客輸送向けの水素燃料航空機の実現には多くの技術課題が存在する。本稿では過去の検討等を振り返りながら (燃焼を利用したジェットエンジンによる) 水素燃料航空機実現の課題と研究開発状況を概説した。また、水素燃料航空機実現に向けた我が国のもつ技術ポテンシャルもいくつか掲げた。

一方、電動航空機技術も併せて研究開発が行われており、長期的には電動航空機の実現も

環境適合性の向上に向けて重要である。電動航空機には燃料電池や超電導など水素燃料と親和性の高い技術も多く、ジェットエンジンによる水素燃料航空機技術の開発の急速な進展はこうした新たな技術開発の促進・波及にもつながると期待される。

参考文献

- 1) Aircraft Technology Roadmap to 2050,
<https://www.iata.org/en/programs/environment/technology-roadmap/>
<2020年11月15日閲覧>
- 2) Airbus E-Fan X,
<https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/electric-flight/e-fan-x.html>
<2020年11月15日閲覧>
- 3) 2020年9月21日、エアバス社プレスリリース、
Airbus reveals new zero-emission concept aircraft,
<https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html>
<2020年11月15日閲覧>
- 4) Clean Sky 2 Joint Undertaking and FCH JU Joint Undertaking,
Press release, Hydrogen-powered aviation: Preparing for takeoff, 2020.6.22 online,
<https://www.fch.europa.eu/press-releases/press-release-hydrogen-powered-aviation-preparing-take><2020年11月15日閲覧>
- 5) Hydrogen-powered aviation, A fact-based study of hydrogen technology, economic and climate impact by 2050,
https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200720_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web.pdf. <2020年11月15日閲覧>
- 6) EUROPEAN COMMISSION, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION to the EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, 2020.8.7,
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf.
<2020年11月15日閲覧>
- 7) 脱炭素と経済成長の両立を図る「欧州グリーンディール」 2020年2月18日 EU MAG Vol. 77 (2020年01・02月号)
<https://eumag.jp/behind/d0220/><2020年11月15日閲覧>
- 8) [ENABLEH2 H2020 project](https://www.enableh2.eu/), <https://www.enableh2.eu/><2020年11月15日閲覧>
- 9) CRYOPLANE, FINAL TECHNICAL REPORT (PUBLISHABLE VERSION),
https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2004_02_26_Cryoplane.pdf
<2020年11月15日閲覧>
- 10) EnableH2, <https://www.enableh2.eu/><2020年11月15日閲覧>
- 11) Ambroise, R., Electrified Propulsion Aircraft - Standardization Challenges, presentation at Electrification Challenge for AIRcraft (ECLAIR) Consortium, 2018.11,
<https://www.aero.jaxa.jp/news/event/pdf/event191128/03clair.pdf>
<2020年11月15日閲覧>
- 12) 岡井敬一、内藤均、「平成30年度革新センター技術動向調査研究、全固体電池、燃料電池、有機ラジカル電池の航空機への適用可能性調査に関する報告、特集、SJAC革新航空機技術開発センター平成30年度調査事業成果報告」、日本航空宇宙工業会会報「航空と宇宙」平成31年4月第784号(2019)
<https://www.sjac.or.jp/common/pdf/kaihou/201904/20190402.pdf>
<2020年11月15日閲覧>
- 13) 2020年9月25日プレスリリース、ZeroAvia Completes World First Hydrogen-Electric Passenger Plane Flight,
<https://www.zeroavia.com/press-release-25-09-2020> <2020年11月15日閲覧>

- 14) 水素燃料航空機検討調査会、水素燃料航空機の国内外検討調査、宇宙航空研究開発機構特別資料、JAXA-SP-08-005, 2008.9,
https://jaxa.repo.nii.ac.jp/index.php?active_action=repository_view_main_item_detail&page_id=13&block_id=21&item_id=5485&item_no=1
<2020年11月15日閲覧>
- 15) Khandewal, B., Karakurt, A., Sekaran, R., Sethi, V., Singh, R., Hydrogen powered aircraft: The future of air transport, Progress in Aerospace Sciences 60 (2013) 45-59.
- 16) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) エネルギーキャリア、
https://www.jst.go.jp/sip/pdf/SIP_energycarriers2016.pdf
<2020年11月15日閲覧>
- 17) 水素社会に向けた航空機に関する研究会、水素社会に適応する航空機の検討、宇宙航空研究開発機構特別資料、JAXA-SP-16-006, 2016.12.
https://jaxa.repo.nii.ac.jp/index.php?active_action=repository_view_main_item_detail&page_id=13&block_id=21&item_id=3506&item_no=1
<2020年11月15日閲覧>
- 18) 2021 事業計画 (FY2021~2023)、2020年10月30日、三菱重工株式会社、
https://www.mhi.com/jp/finance/library/plan/pdf/201030presentation_summary.pdf
<2020年11月15日閲覧>
- 19) グループビジョン 2030 事業方針説明、川崎重工株式会社、2020年11月2日、
https://www.khi.co.jp/ir/pdf/etc_201102-1j.pdf <2020年11月15日閲覧>
- 20) 水素社会に向けた航空機に関する研究会、水素社会に向けた航空機に関する研究会報告書、宇宙航空研究開発機構特別資料、JAXA-SP-16-006, 2016.12.
https://jaxa.repo.nii.ac.jp/index.php?active_action=repository_view_main_item_detail&page_id=13&block_id=21&item_id=3506&item_no=1
<2020年11月15日閲覧>
- 21) Okai, K., Long Term Potential of Hydrogen As Aviation Fuel, ICAO Environment Report 2010, pp. 164-166,
<https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/EnvReport10.aspx>
<2020年11月15日閲覧>
- 22) ガスタービンの水素燃焼技術の確立、- 来るべき水素社会に向けた先行研究の今 -Kawasaki Technical Review No.175 March 2015,
<https://www.khi.co.jp/rd/magazine/pdf/175/n17510.pdf>
<2020年11月15日閲覧>
- 23) Dahl, G., Suttrop, F., Engine Control and Low-NOx Combustion for Hydrogen Fuelled Aircraft Gas Turbines, International Journal of Hydrogen Energy 23 (1998) 695-704.
- 24) 極低温燃料タンク用複合材料、JAXA 航空技術部門、
<https://www.aero.jaxa.jp/research/basic/structure-composite/cryogenic/>
<2020年11月15日閲覧>
- 25) Composite Cryogenic Technologies and Demonstration Project, NASA,
https://www.nasa.gov/offices/oct/game_changing_technology/game_changing_development/composite-cryotank.html <2020年11月15日閲覧>
- 26) Cryogenic Hypersonic Advanced Tank Technologies (CHATT), EU,
<https://trimis.ec.europa.eu/project/cryogenic-hypersonic-advanced-tank-technologies> <2020年11月15日閲覧>
- 27) 極低温燃料供給系技術、JAXA 航空技術部門、
<https://www.aero.jaxa.jp/research/basic/propulsion/low-temperature/>
<2020年11月15日閲覧>
- 28) セントレアの水素活用、中部国際空港、
<https://www.centrair.jp/corporate/csr/environment/consideration/operation/warming/hydrogen.html> <2020年11月15日閲覧>
- 29) ハイブリッド推進システム、エミッション・フリー航空機技術の研究開発、JAXA 航空技術部門、<https://www.aero.jaxa.jp/research/frontier/feather/>
<2020年11月15日閲覧>
- 30) Center for High-Efficiency Electrical Technologies for Aircraft (CHEETA)、

- Transformative Aeronautics Concepts Program, NASA,
<https://techport.nasa.gov/view/96122> <2020年11月15日閲覧>
- 31) 小島孝之、小林宙、田頭剛、飯嶋竜司、西山万里、岡井敬一、西沢啓、
「航空機用複合サイクルエンジンの研究」、
航空機電動化(ECLAIR) コンソーシアム第2回オープンフォーラム、2019。
<https://www.aero.jaxa.jp/news/event/pdf/event191128/07eclair.pdf>
<2020年11月15日閲覧>
 - 32) Terao, Y., Ishida, Y., Ohsaki H., Heideman, D., Okai, K., Taguchi, H.,
Electromagnetic Analysis of Fully Superconducting Synchronous Machines for
Future Turbo Electric Propulsion Systems, AIAA-2020-3550, AIAA/IEEE Electric
Aircraft Technologies Symposium (2020)
 - 33) 田口秀之、西田俊介、岡井敬一、「次世代ジェットエンジンの性能・重量評価」,
A22, 第48回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, 2020.10
 - 34) 2020年10月14日、DLR, News release、 DLR and BDLI present white paper on
zero-emission aviation、Germany on course for climate-neutral flying、
https://www.dlr.de/content/en/articles/news/2020/04/20201014_germany-on-course-for-climate-neutral-flying.html <2020年11月29日閲覧>
 - 35) 2020年11月24日、DLR, News release、Zero Emission Aviation- Research initiative
pioneers sustainable flight,
https://www.dlr.de/content/en/articles/news/2020/04/20201124_research-initiative-pioneers-sustainable-flight.html <2020年11月29日閲覧>