



ISSN 1349-113X  
JAXA-SP-08-005

# 宇宙航空研究開発機構特別資料

JAXA Special Publication

---

## 水素燃料航空機の国内外検討調査

水素燃料航空機検討調査会

2008年9月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

## 目 次

1. はじめに	1
2. エアラインをとりまく環境と水素燃料航空機	3
2.1 概要～燃料価格の高騰と環境への取り組みに向けて～	3
2.2 水素燃料の航空機燃料としての特性と水素燃料航空機の一般的性質	3
2.3 水素燃料社会～自動車産業などの進展	5
2.4 JAXA 長期ビジョンにおける航空機の水素利用・環境適合性の位置づけ	6
2.5 航空機の排気の影響	7
2.6 初期の水素燃料航空機に関する研究	8
3. 水素燃料航空機の機体と運航を想定した技術的考察	9
3.1 概要	9
3.2 機体形状、構造および空気力学	11
3.3 複合材燃料タンク	12
3.4 推進・燃料供給系・補機類	14
3.5 環境に対する影響	15
3.6 運航（ターン・アラウンド）・空港整備	16
3.7 安全性	17
3.8 水素燃料の入手性	18
4. 水素燃料航空機実現に向けて解決すべき技術課題	19
4.1 燃料タンクの軽量性、繰り返し性能、OH 可能性の確保	19
4.2 水素燃料エンジンシステム	19
4.3 燃料供給系	19
4.4 巡航時の大気に与える影響の評価	19
5. さらなる環境適合性の革新に向けて	20
6. まとめ～エアラインの立場から～	22
7. 補遺 航空機翼胴結合部構造強度に関する考察	23
8. 参考文献	25

## 執筆担当一覧

下記に、本報告の各部担当執筆者をまとめる。一次案をとりまとめたあと、検討会全体での確認作業を行った。全体の整合性確認は岡井が担当した。

1. 西澤 啓 (JAXA)
- 2.1 橋本 安男 (日航財団)
- 2.2 岡井 敬一 (JAXA)
- 2.3 辻 智也 (日本大学)
- 2.4 岡井 敬一 (JAXA)
- 2.5 植木 好治 (JAL 地球環境部)
- 2.6 橋本 安男 (日航財団)
- 3.1 小林 宙 (JAXA)
- 3.2 小林 宙, 武田 真一 (JAXA)
- 3.3 横関 智弘 (東京大学)
- 3.4 野村 浩司 (日本大学)
- 3.5 津江 光洋 (東京大学)
- 3.6 近藤 哲哉 (JAL 技術部)
- 3.7 野村 浩司 (日本大学)
- 3.8 橋本 安男 (日航財団)
- 4.1 横関 智弘 (東京大学)
- 4.2 野村 浩司 (日本大学)
- 4.3 辻 智也 (日本大学)
- 4.4 津江 光洋 (東京大学)
5. 岡井 敬一 (JAXA)
6. 橋本 安男 (日航財団)
7. 中尾 純夫 (JAL 運航技術部)

# 水素燃料航空機の国内外検討調査

水素燃料航空機検討調査会

## Current Status of R & D on Hydrogen Fueled Aircraft: A Review

### Abstract

This article reports current progress on research and development on hydrogen fueled aircrafts in the world. Environmental concern on aviation, such as scanty of fissile fuels, stable supply of oil, and effect of exhaust gas on climate, is of great importance nowadays. From this background, to obtain information on the current status and subjects unsolved for hydrogen fueled aircraft, the “investigation committee on hydrogen fueled aircraft” was organized. One remarkable characteristic is attendance of airline group in this kind of activity. The investigation revealed the effect of introduction of this type of aircraft into market and potential of the energy, whereas subjects are also shown such as low fuel density, safety and operational issues. The report suggests the possibility of this type of aircraft as of one of the means of major transport.

**Keywords:** Hydrogen Fuel, Subsonic Aircraft, Fuel Management, Environmental Compatibility

### 概 要

本報告資料は、水素燃料航空機を開発するにあたっての課題や実現可能性を国内外の現状技術ならびに研究開発実績を反映してまとめるものである。化石燃料の枯渇問題や、石油燃料の安定供給に関わる問題、化石燃料を用いる輸送機関等の排出する排気の影響が近年関心を集めている。このような背景にあって、今後の水素燃料航空機の実現に向けた展望について調査を行う目的で、「水素燃料航空機検討調査会」が組織された。エアラインの立場に立った見解や、研究開発を行う立場との議論が行われている点が特徴的である。本調査の結果から、水素燃料を使うことによる環境に及ぼす影響やエネルギーの利用有効性について明らかとなったが、一方で、水素燃料の低密度、安全性確保、効率的な生成ならびに供給に関する課題があることも浮き彫りとなった。地上輸送機関などで水素燃料の利用に関する研究が活発になされる中、航空機への利用可能性について現時点での状況をまとめたものである。

### 1. はじめに

航空機の旅客ならびに貨物輸送に対する需要は、今後も継続して増大するものと考えられる。現在の航空機は化石燃料（灯油様 Jet 燃料）を使用しており、一度の飛行で多量の燃料を消費するだけでなく、燃料の確保も政情などに大きく影響される。また、各国政府研究機関、メ

ーカ、航空会社の不断の努力によってその環境適合性（騒音ならびに排気）は改善されているとは言え、航空機の需要増やその他自動車などの輸送機関における環境適合性の昨今の大幅な改善を鑑み、航空機においても現状に比べて飛躍的な環境適合性の向上が望まれるものである。人間諸活動による環境排気が大気環境に及ぼす影響については多くの研究が行われているものの確実な因果関係は明確化されていない。ただ、気候変動に関する政府間パネル IPCC は「地球温暖化と CO<sub>2</sub> 濃度増大の関連は否定しない」としており、地球環境保全に向けた取り組

---

\* 平成 20 年 7 月 2 日受付 (Received 2 July, 2008)

みのうち、CO<sub>2</sub>低減は大きな柱の一つとなっているのが現状である。水素燃料は、特異な性質を有しており、環境適合性を高めることおよび燃料の選択肢を広げるという観点から航空機の代替燃料として有望とされ過去にも実現可能性が盛んに議論されて来た。たとえば、東京ーロサンゼルス間をB747で飛行する際には150トン程度のCO<sub>2</sub>を排出する。単純に考えると、燃料を水素に変えることでこのCO<sub>2</sub>排出量をゼロにすることが出来るのである。我が国においても、たとえば、サンシャイン計画の一環として水素燃料航空機の可能性に関する調査検討がなされている([1][2]など参照)。興味深いことは、文献[2]においては、水素燃料航空機が実用化されるに際して生じるであろう航空機そのものに止まらない、空港設備、運航体系など広く社会・産業へ到る分野までの影響をアンケートも含めた総合的な調査として実施していることである。過去の水素燃料航空機関連調査の多くは、米国のNASAなどの検討結果の調査に基づくものであるが、ニューサンシャイン計画の画として行われた水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)計画[3]のように、水素燃料ガスタービンエンジンを製作試験したケース(航空用ではないが)もあり、将来の水素燃料航空機の実現に向けて非常に示唆に富むデータを提供している。さらに、JAXAは2007年11月、極超音速推進系として有望視される液体水素燃料予冷ターボエンジンの実証模型地上燃焼試験に成功しており、技術的ポテンシャルを高めつつある。

先に述べたように、水素燃料航空機に関する詳細な検討は、多くの場合NASA資金による検討、とりわけLockheed社によるものが参照とされており、これらの成果は、参考文献[4]にまとめられている。この文献によってまとめられた広範な検討結果から、水素燃料(ジェット)航空機は、技術的に大きな障害は見られないことが判る。なお、この文献にまとめられた情報は多く日本語で紹介されており、たとえば、文献[1][2][5][6]を参照されたい。

水素燃料には、後述のように重量あたりのエネルギーが極めて高く、燃焼による排気も主として水蒸気であるため、航空機の理想的な代替燃料と目されてきている。それにも関わらず、実用化に向けた計画、(水素燃料のみの)試作機の製作も例外を除いて見られないことは、一概に水素燃料航空機の導入が現状のJet燃料航空機に代わるに足るほど利点に富むとは言いきれないことを示している。最近では、Jet燃料航空機の2倍強(2.6倍)排出する水蒸気が飛行機雲となり地球温暖化に寄与するのではないかとという観測もあり、技術的側面だけでなく解決すべき課題が出てきている。一方で、文献[4]の出版後、NASA[7]およびEU[8]による新たな検討(CRYOPLANEプロジェクト：水素ジェットエンジン航空機に関する広範な検討)

などが提示されていることは興味深い。特に、文献[7][9]が水素燃料を用いた将来航空機の検討の組み合わせとして出版され、前者(水素ジェットエンジン航空機)が基本的に技術課題を克服した短中期に実現できる構想として、後者のより理想的ではあるが技術課題の多い燃料電池利用航空機と対比されていること、ならびにCRYOPLANEプロジェクトにおいて、水素燃料が現用の化石燃料と比較してコスト安になる時期を具体的に想定し、その時期を目した研究開発の積み重ねの必要性を説いているところが興味深い。こうした経緯を振り返ると、文献[4]の出版の時点で、少なくとも商用に供される亜音速航空機としての水素燃料航空機の技術的可能性は大方見出されたと見るべきだが、一方でその後の詳細な検討も含めて、既に述べたように一概に水素燃料航空機に強烈な利点があるわけでもないことが明らかになってきていると捉えられるべきである。

冒頭で述べたように、航空機を含む化石燃料を利用する輸送機関においては、原油価格の高騰、原油の安定供給に対する不安、環境適合性に対する関心の高まりを反映して、様々な代替燃料等に関する検討がなされてきている。また、米国においては、水素エネルギーを今世紀の重要なエネルギー開発目標として捉えるなど政策面でも水素利用に対する後押しが見られるようになってきた。このような背景から、実際に航空機を運用する立場に立つJALグループ(事務局：日航財団)、将来航空機に対する検討を行う宇宙航空研究開発機構ならびに大学の間で、「水素燃料航空機調査検討委員会」を組織し、水素燃料航空機の実現性に対し可能性の検討ならびに必要な技術課題の列挙を行ってきた[10]。本稿を通して、断りが無い限り水素燃料航空機とは商用亜音速航空機で液体水素を燃料とするジェットエンジン駆動のものとする。本報告は、表記調査会において内外の研究成果を調査するとともに、現時点において求められる研究開発課題についてまとめたものである。このような目的から、本報告では水素燃料航空機に関わる基本的な論点について、文献[4]を底本とし、さらに同文献の出版後に行われた検討に関する情報[7][8]などに関する成果について述べることにする。その際には、一貫した対象について比較検討することを目的として、機体規模について同等となるものを中心に議論することとする。加えて、JAXAなどで推進されている水素燃料極超音速ターボ推進系に関する研究開発状況、日本航空における環境調査に関する報告も紹介することとする。

## 2. エアラインをとりまく環境と水素燃料航空機

### 2.1 概要～燃料価格の高騰と環境への取り組みに向けて～

今世紀に入ってから航空燃料および原油価格は、図1に示されるようにガソリン価格に比して激しい変動を繰り返すとともに高止まりの傾向を示している[11]。その理由については必ずしも明確ではないが、資料[11]において触れられているように、「技術革新によりエネルギーの転換がすでに行われつつある自動車」の場合と異なり、燃油に代わる航空機の新たな燃料が開発されつつあるとの情報がなく、航空用燃料の高騰状況への危惧が拭えない原因の一つと推定される。また、現状では我が国輸送部門のうち航空用燃料のCO<sub>2</sub>排出に占める割合は4.2%ほど(2005年)[12]となっているが、今後自動車などが代替燃料、ハイブリッド自動車、電気自動車の導入などによって環境適合性を高めていくことが予想され、航空機においても環境適合性の飛躍の向上を進めていくことを強く迫られる状況となっている。また、航空機排気は、高層大気中の主要な地球温暖化ガス発生源となっており、この点でも一般の地上での排気とは別枠で論じる必要がある。次節に述べるように、水素燃料にはCO<sub>2</sub>など地球温暖化ガス発生の問題を大きく低減する可能性を秘めているといえ、その実現のための蓄積がなされるべきであると考えられる。なお、水素燃料航空機そのものの実現には相応の時間を要することから、代替燃料の選択肢として、原油でない植物由来の燃料に関する検討などもなされている。エンジンの運転試験という観点であれば、Snecmaが2007年に実施したエンジン運転試験[13]が挙げられる。これは、Boeing737-600/-700/-800/-900で使用されるCFM 56-7B(図2)に対して全く仕様変更なしに、植物由来のBiodieselメチルエステル30%とJetA 1-70%を混合した燃料を用いてエンジン運転試験を行ったものである。また、現状の航空機を前提にした燃料消費の低減に関する取り組みも行われている。例とし



図2 Biofuelでの試験を行ったエンジン(2007年パリエアショーにて)

て[14]を引くと、燃料消費特性、環境適合性の高い新規機種への順次換装、燃料消費の少ない飛行経路の選択努力、空港内における地上動力装置(GPU)による電力供給割合の増加などがある。また、欧州連合における最近の検討報告(Green paper on energy efficiency)[15]においては、航空機の燃料消費低減の策として、航空機の輸送形態の見直しによって待機などによる無駄を削減することが提言されている。

以上のように、現用燃料における航空機の性能改善、輸送方法などの見直し、植物由来の燃料導入などが試みられているが、現状の航空燃料のリスクを根本的に低減するような策はいまだ見出されていないのが現状である。また、植物由来の燃料が地球温暖化をかえって促進する可能性[16][17]も言及されている。また、そこで、繰り返し提言されつつもいまだ実現していない水素燃料航空機に改めて注目が集まっているといえる。

### 2.2 水素燃料の航空機燃料としての特性と水素燃料航空機の一般的性質

水素の燃料としての特性は多く紹介されており、燃焼特性については文献[18]に、液体水素のジェットエンジン燃料としての特性については文献[19]に詳しい。最近のガスタービン燃料としての水素物性調査については、例えば文献[20]が挙げられる。

水素燃料は、表1に示すように現用のJet A燃料と際立った違いを示している。水素燃料の大きな特徴は、その小さい分子量である。この事実と関連して、相反する、最大の利点および欠点は、大きな質量あたりのエネルギー、小さな体積あたりのエネルギーである。同一エネルギーと比較すると、質量にして、水素はケロシンの2.8分の1、体

航空燃料・原油・レギュラーガソリンの価格推移('00-'05)  
(2003年4月価格=指数100)

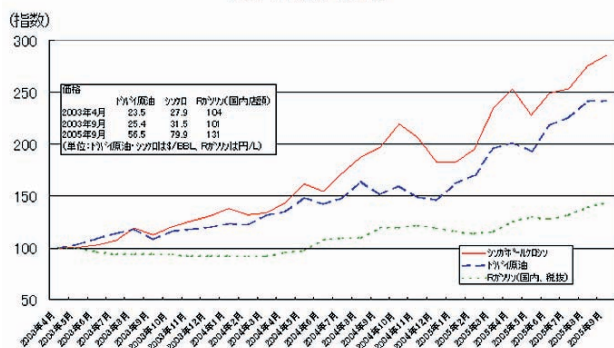


図1 近年の原油価格の推移[11]

表1 水素の物性表（航空用燃料との比較）

	(液体)	(気体)	Jet A (航空用燃料)	航空機構造等への影響 (Jet A との比較)
	水素			
組成	H <sub>2</sub>		CH <sub>1.93</sub>	・C を含まないことによる低 公害性
分子量	2.016		168	・漏洩可能性
低位発熱量 [kJ/g] (液体) [kJ/L]	120 8.5		42.8 34.6	・エンジン小型化、性能向上 ・騒音低減
密度 [kg/cm <sup>3</sup> ]	71	0.090	811	・タンク容積増大 (低揚抗 比、離陸時の翼面荷重の低 減)
比熱 [kJ/kg-K]	9.69	14.3	1.98	燃料によるエンジン冷却に有 効 (タービン入口温度と圧縮 比増大の余地、燃料消費率低 下、重量低減)
沸点 (大気圧) [K]	20.27		440-539	
融点 [K]	14.4		233	
蒸発熱 (大気圧) [J/g]	446		360	
冷却能 [kJ/g] (限界温度までの上限)	>16.9		0.39	・熱交換によるエンジン性能 向上、(極超音速機におい ては機体冷却の役割) →極低 温であることによって、絶縁 性要求、タンクと燃料供給系 の重量増大および複雑化、燃 料供給およびベントに関わる 安全要求、ボイロフ防止のた めの一定加圧要求
可燃範囲 [%] (理論混合比に対して)	14 - 250		52 - 400	・エンジン性能向上 (環境適 合性増大)

積にして4倍となっている。したがって、同一ミッションに対して必要燃料質量が小さくなり、その分、ペイロードを大きく出来る可能性を有している。水素の質量あたりのエネルギー含有量が多く同等ミッションでいえば必要燃料質量が小さく搭載量 (ペイロード) が大きくなり、離陸時の推力要求が小さい分エンジンが小さくなるといえる。しかし、この利点は、大きくなる燃料体積ならびにタンク容積、形状、燃料供給系によって相殺される可能性がある。水素燃料は同一エネルギーのケロシン燃料と比較して、分子量が小さいために燃料タンク容積を大きくする必要がある上に、燃料として貯蔵する方法は (極低温) 液体状態であることが期待されるため、極低温燃料を扱う特別な配慮ならびに付随する追加設備と使用要件が求められる。極低温タンクは、ボイロフ防止等のために球形あるいは円筒形になることが必要であり、従来のケロシン燃料航空機のように翼面内に燃料タンクを配置することは現実的でない。したがって、燃料タンクを胴体部に設けることが主に想定され、機体断面積、表面積が増大しがちである。従来機に比べ離陸重量が小さく (= 必要翼面積が小さい)、かつ大きな容積を占める燃料タンクが胴体部に集中するために (= 投影断面積が大きくなる)、揚抗比は一般に小さくなりがちである。このように、亜音速水素燃料航空機においては、水素燃料の

質量あたりのエネルギーが大きいことならびにその他の利点と、主に低密度、極低温燃料という特性から来る機体形状の制約による欠点との兼ね合いで適否が判断されるものである。極超音速機においては、液体水素の極低温という特性が、機体の空力加熱からの熱防御の観点から非常に重要視されるが、その意味において亜音速航空機における液体水素燃料利用は極超音速機の場合に比べて利点は減じるものといえる[4]。

水素燃料は、エンジンにとっては、熱交換器にまつわる困難さはあるが、総じて導入は容易であり、多くの利点を有する。まず、C (炭素) 分を含まないために、ケロシン燃料の場合の燃焼排気の主要な温室効果ガスである炭酸ガスを排出しない。また、極めて純度の高い燃料として供給されるため、ケロシン燃料に見られるS (硫黄) 分などによる酸化物生成がない。NO<sub>x</sub> の生成は除くことが出来ないが、水素の可燃範囲が広いため、図3に例示されるように、燃料希薄側での安定運転が可能で、NO<sub>x</sub> 低減を図ることが可能である (同図における当量比とは、燃料-空気比の両論混合比を基準とした値)。燃料が極低温液体であることは機体構成の上では不利になる面が多いが、圧縮機中段で空気-燃料間の熱交換を行う、中間冷却サイクルを構成することで、エンジンサイクルの熱効率向上を図るとともに、燃料温度の上昇が燃焼器での噴

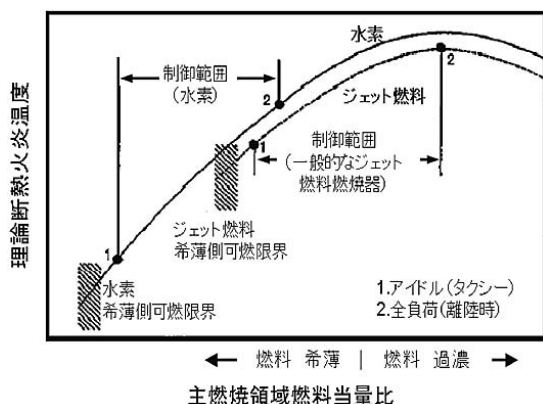


図3 水素燃料の広い燃焼範囲例 ([21])

射混合の促進に寄与することも期待される。極低温液体は、タービン冷却用の冷媒として、直接または間接的に寄与することも期待される。エンジンそのものの作動という意味で水素の利用に問題点は少なく、後に見るように実際の飛行実証例もある。水素の反応性の高さ・冷却能などのために、エンジン構造重量の低減、エンジン寿命の増大に寄与すると考えられる。

### 2.3 水素燃料社会～自動車産業などの進展[6][24]

ECによる水素燃料航空機プロジェクト CRYOPLANE の後は、具体的な水素燃料航空機に関する検討は行われていない。Boeing では、燃料電池利用小型機の開発や、APUへの燃料電池利用などを通じて徐々に水素利用の糸口を探ろうとしている[22]。同様にCRYOPLANEの後を受ける欧州も、水素燃料の航空機適用については燃料電池の利用を踏まえながら、水素を含む幅広い代替燃料の模索というかたちにシフトしているようである[23]。水素燃料航空機の実現に向けては、第一に水素燃料の価格を含む入手性が飛躍的に高まり、各種インフラが整備されていること、すなわち水素社会が到来していることが条件になる。序論にて述べた背景から、水素燃料の利用が地上輸送機関、発電設備など燃料電池利用を核として研究開発の対象となっており、水素燃料航空機の導入によって好ましい状況となることが予想される。このような社会的な状況については、水素燃料航空機の技術課題以前の問題ではあるが、現時点での水素エネルギー利用そのものに関する状況について本節で略述する。

#### 2.3.1 米国の状況

2001年11月のNational Hydrogen Vision Meetingを端緒として、米国では2050年に向けての水素エネルギーロードマップの作成に着手し、修正が加えられている状況である。総じていえば、米国のロードマップの特徴は以下の4点である。

- (1) 水素原料として国産資源を想定
- (2) 想定される再生可能エネルギーを全て考慮すると

もに、石炭・原子力・バイオマスを重要視

(3) 燃料電池車の商用化時期については慎重姿勢

(4) 水素利用機器として燃料電池のみでなく、水素内燃機関を重要視

ロードマップの骨格は国家のエネルギー政策に関わる事項だが、上記の内(4)は、輸送機関への適用、ひいては航空機への展望を描く上で重要である。Hydrogen Posture Planでは、2030年以降、2050年までの具体的なロードマップを提示している。フェーズは4つに区分されており、2015～2020年にかけて商用化の見極めをするとある。商用化の見通しが立った場合には、以降のロードマップは、水素エネルギー市場の拡大を行う計画となっており、水素社会の到来は2030年以降、2040～2050年頃としている。水素の大量生産の方法についてはいくつかのシナリオが描かれており、従来技術+大規模な二酸化炭素分離技術の開発または二酸化炭素の排出を伴わない水素製造技術の導入に分けられている。水素の輸送技術についても課題が多く、新しい有効な手段の開発が必要であるとしている。水素の貯蔵技術については現在活発に技術開発が行われている分野であり、この技術開発の成否が水素エネルギー社会の実現時期に大きく関わってくるといえる。水素を燃料としたエネルギー変換としては、エンジンおよびガスタービン、燃料電池およびコジェネレーションシステムなどがあるが、市場の拡大、耐久性などについて克服すべき課題は存在する。

米国の水素に対する戦略指針は絶えず修正が加えられている状況だが、総じていえば、水素エネルギー経済の主導権を米国が握るべきこと、官民一体の体制をとるべきこと、水素エネルギー社会の到来までにある程度の長期的展望が必要なために教育および啓蒙を重視すべきことが掲げられている。アラネート化合物の他カーボンナノチューブなどの新材料が米国において提案されたのも、基礎研究の立ち返った一つの表れである。一方で、こうした水素に対する前向きな見方に対する警鐘が鳴らされていることも触れる必要がある。そのような批判の例として、文献[25]がある。とりわけ水素の安定供給、環境負荷に関する事項については、明確な利点が結論付けられているわけではなく、航空機に対する有効性に関する評価とあいまって、客観的な理解と判断が重要であると考えられる。

#### 2.3.2 欧州の状況

欧州の水素エネルギーに関する政策については、2003年6月にHydrogen Energy and Fuel Cells A Vision of our futureが発表されており、欧州としての水素と燃料電池に関するロードマップが描かれている。欧州の枠組みとしての水素エネルギーの活用は、複数のエネルギー源を持つことにより他の単一のエネルギーに依るよりもその利用可能性やコストは安定化するものと期待され、ひいては欧州各地



域に適したエネルギー資源の利用を促進することに繋がるとみていることと関係している。欧州のロードマップは短・中・長期の3つのフェーズに分かれており、水素エネルギー社会の到来は2050年頃と、米国と似た予想をしている。2003年にAbraham長官が示唆しているように米国-欧州の重要性が強調されるようになったのも、方向性の一致によるものである。その特徴としては、2020年代半ばまでを基礎・応用研究や実証に充て、それ以降を市場が拡大する商業化時期と捉えている点である。水素の精製については、長期的には2050年ごろまでには再生可能エネルギーや原子力を利用して炭素起源のエネルギーを使用しなくすることを想定している。また、同時期までに燃料電池が輸送、分散型電源、マイクロ分野において主要技術になると想定している。航空機燃料としての水素利用も同時期に規定されている。水素供給インフラについては、オンボード改質、オフサイト製造による運搬両面で重要な課題として検討が進められる。また、水素貯蔵の問題については2002年に水素ハイドレートの発見が大きな話題となった。Maoら[26]によって発見された水素ハイドレートはこれまでにハイドレートを形成しないといわれる水のかご分子に数千気圧に加圧すれば水素もハイドレートを形成するというものである。早くもその2年後にはオランダDelft工科大学のPetersらの研究グループが米国、ニュージーランドChrist Church大学の研究グループとともにテトラヒドロフランハイドレートの空かごに水素が2ないし3分子を僅か7 MPa<sub>g</sub>で挿入できるというものであり、70 MPa 超高压ポンベの体積充填率を達成しうるものである[27]。欧州は新材料については米国と対照的な環境適応物質に着目しているのは興味深い。

### 2.3.3 日本の状況

日本では、「ニューサンシャイン計画」のもとでWE-NET第I期が再生エネルギー利用の観点から1993年より始まっており、引き継ぐ形で第II期では1999年より短中期的課題に取り組んでいる[3]。先に触れたように、WE-NET第I期では水分解による水素製造技術の確立、液体水素輸送技術、車載用水素吸蔵合金の開発、水素-酸素ガスタービンの実機製作試験が行われた。当時、水素-酸素ガスタービンは発電が主たる目標で、航空機への利用は想定されてはいなかったが、水素製造、水素貯蔵、安全対策を含めた調査研究が行われ、インフラを含めて起源となったことは注目に値する。具体的には大阪の天然ガス改質水素ステーション、四国の水電解型水素供給ステーション、鶴見オフサイトステーションなどが稼動している。1999年には、これを継承したWE-NET第II期が始まっている。大きな動向としては水素利用イコール燃料電池利用の方向性が明確化したことである。さらにWE-NET第II期において特徴的なのは、短中期的研究課題を

いくつかのワーキンググループ、タスク1～11に割り当てたことである。タスク4（動力発生技術）では単気筒100 kW級の水素ディーゼルエンジンの性能評価、タスク7（水素供給ステーション）ではオンサイトおよびオフサイト水素供給ステーション開発が主題目標に掲げられ、研究成果は航空機への適用において大いに参考になる結果が得られたのはいうまでもない。横浜大黒、横浜朝日のオンサイト、有明、川崎、千住オフサイトの水素ステーションが稼動したのもこの時期である。さらに2005年からは、WE-NET第II期は水素安全基盤研究となり、これまでと同様、今後の水素エネルギー政策についても経済産業省ならびにNEDOが主体となってロードマップを描いている。近年では、二酸化炭素排出規制に関連してロードマップにより具体的な内容が加えられる半面、実用化時期の再検討も行われているのも事実である。例えば、車載型燃料電池から定置型燃料電池の重要性の再認識が挙げられる[26]。日本における情報は、比較的入手が容易と考えられることから、今後のロードマップについては上述の米欧とのロードマップ比較について付記するに留める[6]。

1. 水素源としては、米国は国産資源である再生可能エネルギー、石炭、原子力を重視、EUが石炭を除外した再生可能エネルギーならびに原子力を重視（＝脱炭素化）しているのに対して、日本では必ずしも明示していないものの、化石燃料とバイオマス発酵、熱化学分解を候補として提示している。
2. 水素利用技術としては、日本とEUが定置用燃料電池、FCV（燃料電池車）を重視しているのに対し、米国はFCVに偏っている。
3. 水素スタンドの形態としては、日本とEUがオンサイト・オフサイト両面で検討しているのに対し、米国ではオンサイトをメインに据えている。

一般に日本は、市場化目標など米欧に比べて厳しめに設定している状況であり、水素・燃料電池導入に対する意思の強さが見受けられる。

### 2.4 JAXA 長期ビジョンにおける航空機の水素利用・環境適合性の位置づけ

JAXAでは、2005年3月、航空宇宙分野について明確な将来像を示し、今後20年後までの当該分野について望ましい姿として、JAXA長期ビジョンを発表した[28]。この長期ビジョンは、『世界最高の信頼性と競争力のあるロケットや人工衛星を開発し、安全で豊かな社会の実現に貢献する。また、トップサイエンスを推進するとともに、独自の有人宇宙活

動や月の利用への準備を進める。さらにマッハ5クラスの極超音速実験機の実証を行う。これらにより、宇宙航空の基幹産業化に貢献する』

と掲げられている。上記実現のために細分された5つのカテゴリーの1つに、

「航空産業の成長への貢献と将来航空輸送へのブレークスルーを目指す」

がある。このカテゴリーでは、航空産業の基幹産業化に向けた現状認識と極超音速機実証の役割が示されている。その中に、社会からの要請として航空機の環境適合性と安全性の向上が求められるとしており、環境適合性の向上の必要性が示されている。また、JAXAが先導的に技術開発すべき対象として極超音速機が掲げられており、マッハ5で飛行する極超音速機は液体水素を利用することで高いエネルギー効率で炭酸ガスを排出しない点、つまり水素燃料利用の利点が強調されている。こうした背景から、JAXAでは内外の関連研究者から構成される「極超音速機研究委員会」を組織し、極超音速機開発に向けた開発ロードマップを掲げている[29]。水素燃料航空機の技術課題については、極超音速機特有の問題もあるが、液体水素を利用することから、(極)超音速、亜音速機共通の技術的課題も多い。したがって、本稿が対象としている亜音速水素燃料航空機に関わる研究状況、技術課題を整理することは、亜音速航空機の実現に向けた今後の取り組みにとって有用で在るのみならず、先に述べた極超音速機の研究開発[29]に向けた取り組みとも相互に補完する関係を持つものと考えられる。なお、極超音速機実現に向けた主要な研究開発項目である液体水素燃料予冷ターボエンジンについては、実証エンジンの地上燃焼試験に2007年11月、世界で初めて成功している。この開発研究は、文部省宇宙科学研究所(現JAXA宇宙科学研究本部)において1988年に研究開発が開始されたATREX-500エンジン研究開発に端を発している[30,31]。これは推力500kgf級のエアターボラムジェットエンジンであり、日本初の液体水素ジェットエンジンである。2003年までの間に計14次にわたる総合地上燃焼実験を実施し、エンジンシステムの成立性を実証している。これら成果を踏まえ、今後水素を用いた環境適合型航空機に関する研究開発が加速することが期待される。

## 2.5 航空機の排気の影響

### 2.5.1 背景

地球温暖化問題は1997年にUNFCCC(国連気候変動枠組条約)締結国により京都議定書が採択され、世界的な地球温暖化対策へ向けた動きが本格化しており、世界的な取り組みが始まっている。航空における環境対策は、従来、空港周辺への大気汚染問題ならびに騒音問題に焦点

が絞られていたが、近年になり、地球温暖化問題が次第にクローズアップされてきた。航空の需要が今後も増加する中、航空機からの温室効果ガス排出量は今後とも増加が見込まれている。現在、航空輸送からのCO<sub>2</sub>のシェアは小さく、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の1999年の特別報告書によると「1992年の化石燃料からのCO<sub>2</sub>排出量全体に占める航空機からのCO<sub>2</sub>排出量は2.4%、人為排出量全体では2%」にすぎない。

しかしながら、今後、このCO<sub>2</sub>排出量は急速に伸びることが予想されている。IPCCによると、国際旅客航空輸送量は1990年から2015年の間で、年5%程度、ICAO(国際民間航空機関)のCAEP(航空環境保全委員会)では、2000年から2020年に年平均4.3%増加すると予想されている。燃費向上を考慮したとしても、航空機の使用燃料量はIPCCによると1990年から2015年の間に年率で3%増加し、2050年までの中期シナリオでは、航空機からのCO<sub>2</sub>排出は人為排出量全体の3%に達すると予想されている。

上記状況を踏まえ、国内国際の航空は以下の通りの対応を行っている。

### 2.5.2 国内航空の対応

2005年の京都議定書の発効を受けて、我国については、温室効果ガスの6%削減が法的拘束力のある約束として定められており、京都議定書目標達成計画が策定された。国内航空輸送事業は京都議定書目標達成計画において、2010年度までに1995年度対比原単位(有償旅客キロ)あたり15%削減を数値目標としている。また、日本経団連においては、業種ごとにCO<sub>2</sub>排出量などの目標を設定した環境自主行動計画を策定しているが、航空業界として2010年度で1990年度比原単位(有効座席キロ)あたり12%削減を目標にしている。

### 2.5.3 国際航空の対応

国際航空及び国際海運分野については、京都議定書において法的拘束力のある数値目標は定められず、UNFCCC締約国はそれぞれICAO及びIMO(国際海事機関)を通じて作業することにより、航空機用燃料からの温室効果ガスの排出の抑制又は削減を検討することとされた。(京都議定書第2条第2項)このような状況を受け、ICAOは1998年にCAEPの内部にETTF(Emission Trading Task Force)を設置し、規制的手法に比べ、より低コストで柔軟に目的を達成することができると期待される経済的手法によって、温室効果ガスの排出削減・抑制を図る方策として、主に排出権取引制度(Emission Trading Scheme)の手法について検討を進めてきた。経済的手法とは、経済的インセンティブやディスインセンティブを与えることにより、市場原理が機能して目的が達成されることを目指している。

2007年第36回ICAO総会において、国際航空分野の排出権取引制度導入については「当該締約国間の相互合意」を原則としたガイダンスが承認された。今後2009年末までに国際航空分野の燃料消費効率ベースのグローバルな目標設定等を目指して「ICAO行動プログラム」を策定する予定である。一方、欧州連合は上記ICAO対応に対して、欧州委員会が2006年12月に欧州発着便に対して欧州排出権取引制度を一方的に適用する内容の指令案を公表した。

その後、2007年11月に議会、12月に理事会がそれぞれ異なる内容を提案しており、今後それぞれの案の調整を諮り、調整後、欧州各国で法制化される見込みである。

#### 2.5.4 内外エアライン等の施策

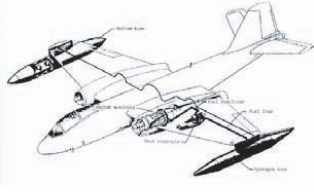
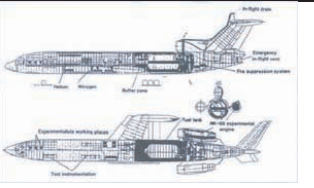

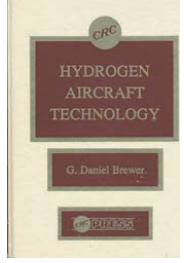

これらの動向を踏まえ、国の施策として、新規機材導入支援、航空管制・着陸装置の高度化、エコエアポート

の推進等を行っており、また航空業界として、機材更新、搭載燃料の最適化、飛行方法の改善、シミュレーター・GPU（地上動力装置）の利用促進、搭載品の軽量化、エンジン洗浄等を行っている。また、航空機メーカーではCO<sub>2</sub>排出の少ない、言い換えれば燃費の良い航空機の開発により一層力を注いでいる。

#### 2.6 初期の水素燃料航空機に関する研究

水素は、基礎的な研究対象として捉えられてきた上に、環境適合性の高さにおいて注目されており、水素の航空機利用については、大学等の研究成果発表も非常に数多く出版されている。実航空機への適用を検討した、あるいは規模の大きな研究開発については、文献[4]にまとめられている。主なものは表2に掲げられる通りである。

表2 水素燃料を利用した航空機試験飛行・システム検討の例（写真出典[4],[22],[8]）

時期 (年)	エンジン/機体	内容	備考
1937	エンジン	初期のジェットエンジンは扱いの容易さから燃料に水素を用いていた	
1956-1958	エンジン	Pratt&Whitney 社による J57 の水素燃料リグ試験実施	
1957	機体	B-57 のエンジン（1機）飛行時運転実証	
1970s	検討	NASA における多くの検討	
1988	機体	Tu-154 実験機におけるエンジン（1機）飛行実証（LNG との切り替え可）	
1988	機体	Conrad 氏による小型機の単独液体水素燃料改造機飛行実証	
1990	検討	NASA 成果のまとめ出版（Brewer）	
2000-2002	検討	EC による CRYPLANE プロジェクト実施	

初期の実機レベルでの検討，研究開発は米国空軍ならびにNACA，NASAの研究が主体である．高速偵察機への適用を目指して開発が進められたCL-400は，水素燃料の適用性は示すに至ったものの従来燃料機に比べた際立った優秀性が見出せなかったこと，偵察機としての戦略性に水素燃料が適合しなかったために計画は取りやめになっている．引き継ぐ形で実現した機体がロッキードSR-71/YF-12であり，また開発研究が行われたエンジン技術は，アポロ計画で使用されたサターンVロケットの二段，三段推進系として開発されたJ2ロケットに利用された．表に示されるように，1970年代に主にNASAの資金によるロッキード社の詳細な概念検討が進められており，それら成果は1980年代に活発化した極超音速機検討に活用された．これらロッキード社中心の検討は，文献[4]としてまとめられ1990年に出版されている．1988年には，ロシア（当時ソヴィエト連邦）においてTu-154によるLNGと水素利用エンジンによる飛行実証[33]が成功している．これは，Tu-154の改造機として試験され，エンジンはHK-82 yターボファンを原型としたHK-88（水素用）とHK-89（LNG/ケロシン切替）が試験された．当時のソヴィエト連邦としては，豊富に産出するLNGの方に重点を置いたようだが，水素エンジン試験は以後の欧州との共同研究に繋がっている[32]．また同年1988年には，米国において個人による小形航空機の水素エンジンのみによる飛行実証（機体：Grumman-American“Cheetah”，エンジン：Lycoming 0320-E 2 D）が成功している[4]．

Brewerの文献出版後は，この成果を土台にした，EC資金によるCRYOPLANEプロジェクト検討[8]ならびにNASAにおける水素燃料航空機検討[7]などが行われている．大規模な製作実証については亜音速航空機については行われていない．初期の検討についての詳細は，文献[4]を参照されたい．以上から，次節以降では，文献[4]の記述ならびに以降に行われた検討の内，CRYOPLANEに関わる検討ならびにNASAの検討[7]を主に参照してまとめていくこととする．

### 3. 水素燃料航空機の機体と運航を想定した技術的考察

#### 3.1 概要

比較的最近の検討として，文献[4]における検討をた

き台とし，その後の検討において議論評価された事項を加え，本章において個々の技術課題を明らかにする．両者の結論を予め述べると，Brewer[4]においては既存のケロシン燃料航空機より若干の性能改善が予想され，一方でCRYOPLANEによる結果では，若干の性能悪化が予想されている．これらの検討で最も詳細な要素にわたり検討がなされているものはBrewer[4]といえるが，以降に検討されたCRYOPLANEなどはBrewer[4]の結果も参照にしておき，全般的な性能についてはより新しい検討とみることが出来る．本章においては，まず本節においてこれまで行われた検討の主要な性能比較を通じて，水素燃料を導入することによるケロシン燃料機と比較した場合の功罪について述べ，続く各節において各要素や重視すべき項目についての課題やそれら検討結果について述べることにする．なお，Brewer[4]やCRYOPLANEでは，いくつもの規模（小型機から大型機まで）を対象にして比較検討を行っているが，簡潔のために，断りのない限り，以下の規模を中心に議論を行う．すなわち，

「パイロード（乗客）規模：B-767程度，航続距離：3500 NM程度（機体規模：B-777程度）」

を考察の中心に据えることとする．前節までに述べたように，水素燃料航空機は，燃料タンクを胴体内に置くことが想定される（翼に燃料タンクを配する案もあるが現実的ではない）ため，機体胴体の大きさが大きく，翼面積が小さくなる傾向がある．現時点では，新規開発の航空機はA-380のような大型機の例はあるが，総じて上記程度の中型機で燃料消費を極力低減する努力をする機体開発がなされる傾向がある．参照にされる3つの文献における機体は，表3のようになる．Brewer[4]では，通常の機体形状であり，図4に示されるようにNASA[7]ではオーバーウィングが採用されている．CRYOPLANE[8]の初期検討ではNASAと同様のオーバーウィングであったが，この形状であれば小径の翼上面燃料タンクを配置できるメリットがあるが空気力学的性能の悪化があり見合わないとして，結局翼部には燃料タンクを配置しない構成に変更している（図5参照）．NASAの検討においては，環境適合性の向上に重点が置かれており，オーバーウィングおよび翼上面へのエンジン配置による騒音低減を図っている．

水素燃料航空機の評価のためには，まずエンジンの性能に対する比較が重要である．表4には，各検討におけるエ

表3 3機体の前提条件の比較

		航続距離 [NM]
Brewer[4]	200	3000
NASA[7]	225	3500
Cryoplane[8]	185/218	3300/4000

エンジンの性能（ケロシン燃料との比較）を示す。指標として、燃料消費率とエネルギー消費率を用いた[33]。Brewerには、ベースラインとなる初期検討（表中ではA）とそれを元にした検討（表中ではB）があり、機体の本節での比較はここでのBに相当する。表を見てわかるのは、時系列に縦にならんでいるデータの絶対値が次第に増大する傾向（性能悪化）である。これは、対象とするエンジンの違いもあるが、検討を詳細にするにつれ厳しく評価する項目が増え性能が悪化する傾向と考えられる。それでも、燃料消費率における水素のケロシン燃料に対する優位性は明らかである。表中にあるように、水素燃料エンジンは、ケロシ

ン燃料の場合に比べ65%程度少ない燃料消費率となっている。これは、先にも触れたようにケロシンに比べ水素のエネルギー密度が大きいことから来ている。エネルギーの観点からみるエネルギー消費率では水素燃料エンジンとケロシン燃料エンジンはほぼ同等であり、離陸時に水素の方が若干性能が良く、巡航時はほとんど変わらない結果が出ている。いずれの指標も、新しいデータは過去のデータより、評価を詳細に行っている分、性能悪化を示していることに注意が必要である。水素燃料のエネルギー消費率で見た若干の性能改善は、燃焼時の物性変化に起因する[33]。また、指標には現れないが、水素燃焼によりタービン入口温度を下げる事が可能なので、エンジンの長寿命化、整備コスト削減が可能である。

以上のように、燃料消費の観点からは水素燃料エンジンはケロシン燃料エンジンより優れていることがわかる。ところが、液体水素の密度はケロシンより一桁以上小さいため、同一のエネルギーに対して4倍の容積が必要になる（体積あたりの発熱量を比較）。また、極低温燃料である液体水素燃料は、ケロシン燃料では必要とならなかった断熱システムなどが必要となり、ボイルオフを防ぐため、表面積の小さい円筒形タンクが必要となる。これらの特性が、水素燃料航空機の機体設計において主要な検討項目となる。タンク形状の要求から、従来の航空機のように翼内に燃料タンクを設けることは現実的でなく、

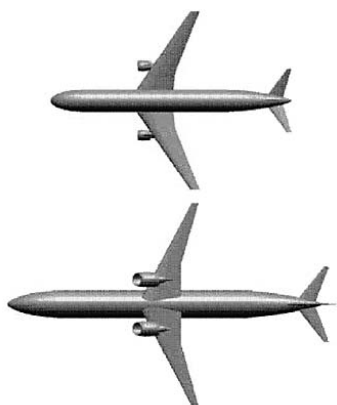


図4 NASA 検討水素燃料中規模機機体構成（ベースラインケロシン燃料機（上）との比較）

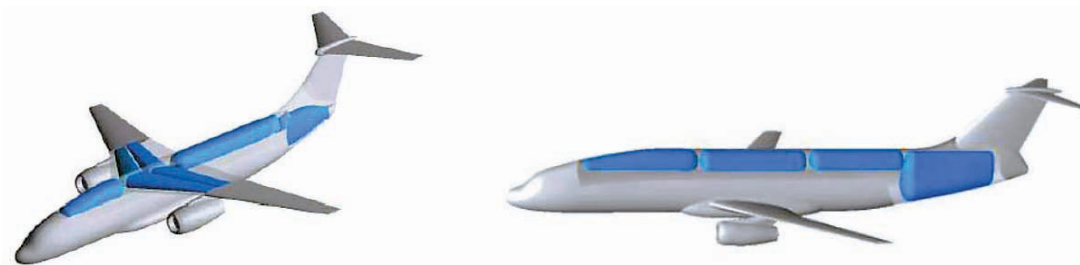


図5 CRYOPLANE 中規模機（左：初期設計、右：改善設計）[8]

表4 水素燃料エンジンの燃料消費ならびにエネルギー消費に関する検討比較

Take off	SFC [g/kN/s]		$\frac{SFC_{CH} - SFC_{H_2}}{SFC_{CH}}$ [%]	SEC [kJ/kN/s]		$\frac{SEC_{CH} - SEC_{H_2}}{SEC_{CH}}$ [%]
	Kerosene	Hydrogen		Kerosene	Hydrogen	
Brewer (A)	7.96	2.66	66.55	340.66	319.51	6.21
Brewer (B)	-	2.90	-	-	348.40	-
Cryoplane (A)	9.90	3.51	64.55	423.72	421.20	0.59
Cryoplane (B)	11.23	3.98	64.70	482.48	477.48	1.04
Cruise						
Brewer (A)	16.46	5.64	65.75	704.35	676.40	3.97
Brewer (B)	17.02	5.69	66.56	728.60	683.20	6.23
NASA	16.60	5.98	63.99	710.41	717.19	-0.95
Cryoplane (A)	16.82	6.03	64.14	720.15	723.96	-0.53
Cryoplane (B)	17.91	6.37	64.46	766.55	763.8	0.36

Brewer(A)は文献内3章記載の初期検討結果、(B)は4章記載分。Cryoplane(A)(B)はそれぞれ異なる文献より引用

胴体に燃料タンクを配することとなる。同一ミッションで比較した場合に、ケロシン燃料機に比べ胴体が非常に大きくなり、翼面積が同等または小さくなる水素燃料機においては、相対的に翼面に対する胴体の濡れ面積が大きくなる。そのことの帰結が、揚抗比 (L/D) の低下である。極低温燃料を扱う際に付加的に要求される断熱システムやタンク構造によって重量も増大する。このことが、付加的な (L/D) の低下と機体の空虚重量率 (EWF) の増大をもたらす。そのような欠点ももたすが、液体水素燃料の密度が小さいために、最大離陸重量 (MTOW) の低減に寄与することが可能である。表5にそれらの比較結果を示す (ケロシン燃料機との比較)。表中では、NASA 検討のみ MTOW の増大をもたらしているが、これは、騒音低減を主目的に機体構造をベースライン機体から変更しているためであると考えられる。EWF は水素燃料航空機の場合大きくならざるを得ないが、MTOW を小さくすることが可能なため、少なくとも離陸および飛行初期段階では機体重量に対して抵抗を小さくすることは可能である。いずれにせよ、液体水素燃料の機体設計においては、これらの利点と欠点のトレードオフの関係を考慮し如何に効率のよい設計をするかに関わってくる。

水素燃料航空機は環境適合性が高いとされる。確かに、炭素・硫黄由来の排出物がなく、NO<sub>x</sub> も低減可能であるが、主要な排出物の水蒸気の量が従来機に比べ2倍強と多いため、その環境に与える影響に注意する必要がある。環境に与える影響として考慮すべきは、空港付近と巡航高度であるが、前者については、元来の湿度が比較的高いため、水蒸気発生については考慮する必要がない。一方で、巡航高度においては、温室効果ガスのひとつと考えられるため、慎重に功罪を見極める必要がある。水蒸気の巡航高度での環境に及ぼす影響については、NASA 検討に若干の、Cryoplane に詳細な記述がある。NASA 検討においては、飛行機雲の発生しにくいとされる高度ま

表5 ケロシン燃料機を基準とした比較対象水素燃料機の特長変化(200人規模の中距離機を対象)

	EWF	L/D	MTOW
Brewer	+23.9%	-3.5%	-2.7%
NASA	+38.4%	-7.0%	+10.21%
Cryoplane	+21.5%	-10.0%	-17.2%

で飛行高度を下げて飛行させると直接的な検証なしに述べられている。後者については、詳細な環境影響についての報告があるので、節を変えて述べることにする。エンジン騒音については、水素燃料エンジンで低減することは可能であるが、抜本的な改善には繋がらない。ただし、離陸重量の低減に伴うエンジン要求の軽減化によって、騒音を抑制する効果は期待できる。騒音の低減に向けては機体形状、エンジン配置などで工夫する必要があるが、この件については、NASA 検討[7]にて水素燃料航空機を対象に調べられていることに触れるにとどめる。

先に述べたタンク容積に関する要求から、CRYOPLANEでは、図6に示されるように翼胴機体 (BWB= Blended wing body) についても検討が行われた[8]。しかし、BWBについては、機体形状そのものの成立性について不透明な点があること、円筒形状の燃料タンクを配するとした場合に必ずしも容積効率 (機体断面に対するタンクの充足率) が高いわけではないこと、緊急時避難要求など現行の民間機基準に照らして問題があることから、現時点では水素燃料航空機機体としては不適合とされている。ただ、構造を含む関連研究が内外で活発におこなわれていることおよび緊急時避難経路も中型機以下の規模では解決可能と考えられることから、依然として有望な概念であると考えられる。以下の小節において、各要素または検討項目について触れることとする。なお、以下各節では、本節のように機体規模を限ることはしない。

### 3.2 機体形状、構造および空気力学

機体形状としては、燃料タンクを如何に配置するかによって大きく変わる傾向にある。燃料を胴体部に配し、タンク形状を球形又は円筒状にする、燃料量の変化に合わせた重心変化を避けるといった目的から、タンクを最低2個、胴体の前後に配置することが望ましいとされる。CRYOPLANEにおいては[8]、乗務員室と客室を引き離すことによる安全面などの不安から、出来る限り両者の行き来を可能にすべきとし、こうした方針が、中型機での燃料タンク配置 (図5) に反映されている。同じく、CRYOPLANEでの大型機検討では、相対的なタンク断面積の増大から、タンクの側方に一人一人通ることが出来るスペースを確保できるとしているが、構造的な可否など

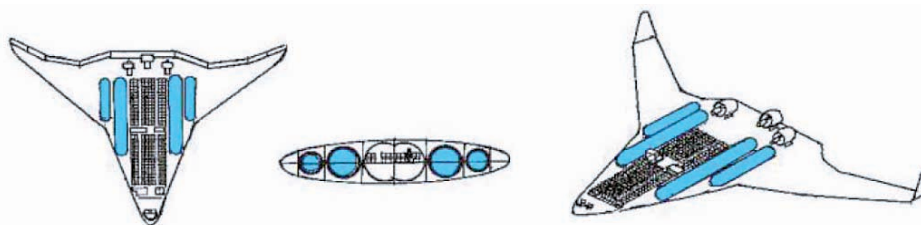


図6 BWBによる機体概念[8]

検討されておらず、現実的な案とは言えない。ここで、タンクの形態に対して検討した Boeing の例[22]を示す。図7には、タンクの断面位置について種々の方法を並べたものである。これまでの Jet 燃料機体と異なり、燃料タンクの占める体積が重要になることがわかる。図8では、客室とタンクの相対位置について特に比較している。乗務員室と客室の往来を考慮すると、(a) (b) のようになるが、投影断面積が大きくなることは明らかである。そこで、(c) のように乗務員室と客室を分断することになるが、この分断は安全確保の上で問題とされてきた。皮肉にも、2001年の米国テロによって、逆に乗務員室と客室の分断が好ましいという見解も生じてはいる。先に示した図5の検討は、これらを総合的に考慮した結果として、中型機に適したタンク配置として選定されたものである。先に述べたように、離陸重量の低下による翼面積の減少と、翼内に燃料タンクを配置できないことにより、従来機では利用出来た翼内での燃料重量による飛行時の翼構造への負荷の低減を利用することが出来ないため、翼構造については従来機とは異なる設計基準・構造を用いることが必要な場合もある。そのため、タンク構造は勿論であるが、水素燃料航空機の実設計に当っては、

空気力学的形状と、翼桁等構造の設計に関する連成が従来にも増して重要と成る。BWB 機体の成立性が明確でないことも、この空気力学的な最適形状と構造的な適切さ、成立性の関係がまだはっきりしていないことに原因がある。以上のように、軽量化構造設計は、機体成立性を定める重要な要素になるといえる。構造的な課題については、空気力学的な問題に比べて直感的に把握することが容易ではないため、補遺として、簡単な例を示しながら若干の説明を示したので参照されたい。構造的な重量および配置については、例えば離陸重量が軽減される場合に脚構造の軽量化が図られるなど、詳細検討に当っては多くの副次的な効果があることも留意する必要がある。

水素燃料航空機について空気力学的特性との関係で言えば、極低温翼壁面冷却による翼面境界層制御である。この有効性は調べられている[34]が、実用性・信頼性・保守性などから検証されねばならない。

### 3.3 複合材燃料タンク

先に述べたように、水素燃料航空機にとってタンクの設計は、技術的課題が大きく、最も注意を要するものである。その技術課題は、図9に示すようになる[22]。また、

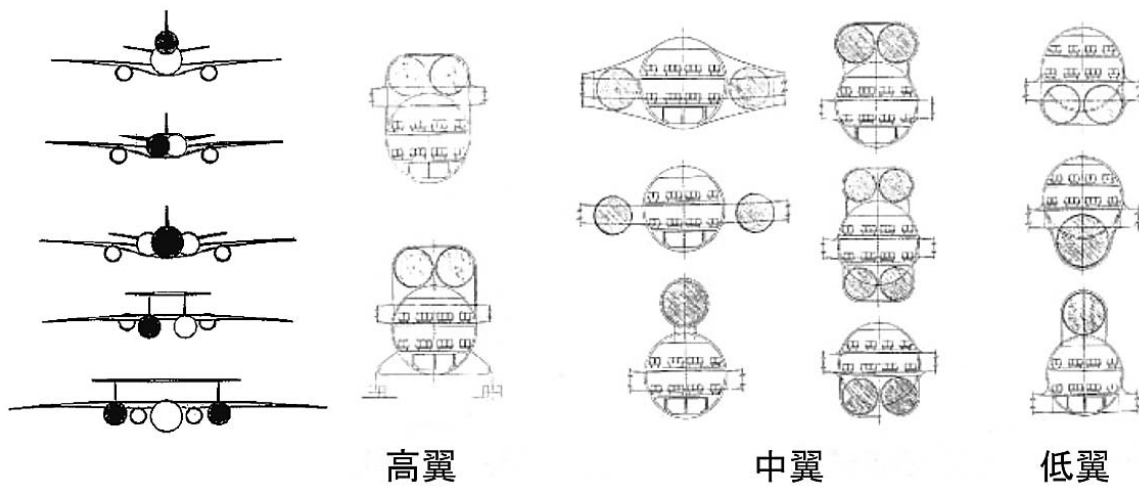


図7 タンク配置の検討例(1)[22]

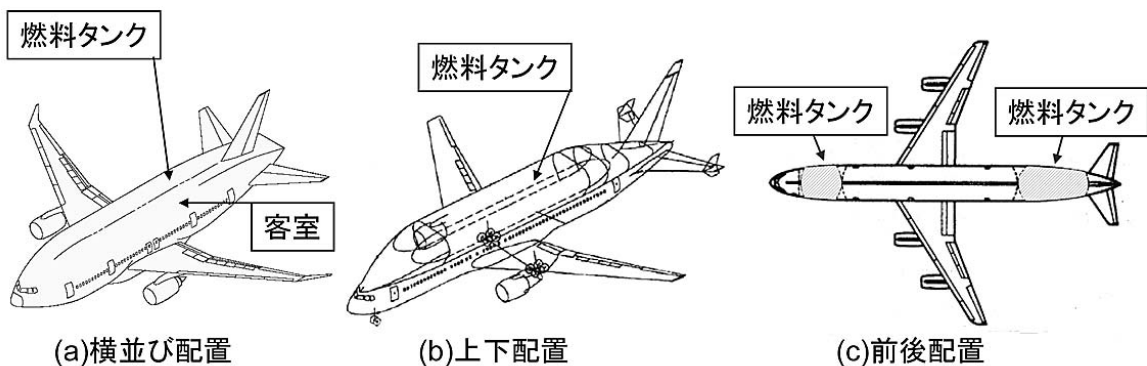


図8 タンク配置の検討例(2)[22]

極低温水素燃料タンクという範疇では、液体燃料ロケットで実用化されているが、ロケットと航空機では、表6に示すように大きく要求が異なる[35]ことがわかる。ロケットにおける経験を反映しつつ、航空機適用独自の問題について対処していく必要がある。タンクの形状については、一体型（インテグラル）タンクか、非インテグラルタンクかという議論がなされているが、現実に実用化される場合には、円筒状の管理と運用に重点を置いた設計が好ましいと考えられる。非インテグラルタンクを採用する場合には、軽量で体積使用率及び保守性を確保した上で、支持を適切に行いうる構成とすることが必要である。燃料タンクの軽量化は必須の課題であり複合材の適用が求められるが高圧ガスタンクで用いられる複合材+金属ライナの構造は両者の熱膨張差が大きく、極低温環境下での使用については実現性が低いと考えられる。そのため、全複合材タンクにするか、複合材+樹脂ライナにするかの選択肢があるが、技術成熟に合わせて検討すべきことである。これまで、日欧米等で、主に再使用宇宙往還機への適用を目指して複合材タンクの研究開発が進められているが、実用に供する形での実証はなされていないのが現実である。再使用宇宙往還機への適用時

の極低温燃料タンクの問題点は、高圧環境と極低温環境という厳しい荷重条件において、使用中に樹脂割れを起こさない高靱性のCFRP（炭素複合材）を実現することの困難さである。たとえば、熱残留応力の低減を狙って成形温度の低い高性能CFRP成形法の適用や、非加熱成形（電子線硬化、紫外線硬化、可視光硬化など）が検討されている。全複合材タンクにするか、複合材+樹脂ライナにするかについては、複合材のみで可能であれば、単独での積層構成や形状の最適設計を行うことが重要であり、一方でライナを適用する場合には、樹脂割れを許容しても使用可能な構造とする必要がある。その際、極低温でも使用可能なライナ材料の選定が課題となる。タンク形状については、通常は球形や円筒形状が強度や断熱性能を考えると効率が良いとされるが、水素燃料航空機の場合は内圧が比較的低く、燃料タンク形状は機体形状や性能に大きく影響を及ぼすファクタである。そのため、機体性能、重量、断熱効率などを総合的に判断し、タンク形状や配置については広い視野での最適化が要求されると考えられる。上述のように、宇宙機用タンクでは、高圧力という条件が漏洩防止を難しくしていた要因であったが、航空機用の検討では例えば2気圧程度[4]の比較的低い圧力と燃料供給ポンプの適切な組み合わせが可能とされている。しかし、小型高性能長寿命のポンプの開発は、いくつかの技術的課題を抱えている。したがって、航空機用に検討するに際しては、比較的低くない圧力要件に対して、適切な設計・製造・保守の方法を調べることで、漏洩に関する与えられた条件での基礎データを得ることが、航空機用燃料タンクの実現性を示す上で重要であると考えられる。航空機用には、繰り返し使用回数が従来の宇宙機と比べ飛躍的に多いので、漏洩試験を含む安全性評価基準や運用中の検査・修理法などの損傷許容性をどのように設定・確立するかという課題も出てくる。タンクのみならず、燃料の地上における供給なら

Fuel tank design will be a challenge

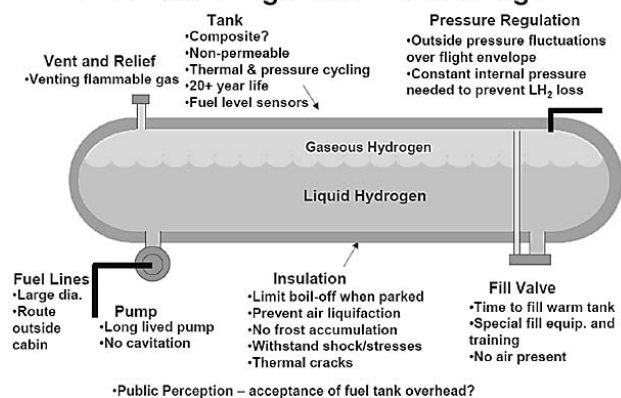


図9 水素燃料タンクに関わる技術課題[22]

表6 燃料タンクに関連する宇宙機と民間航空機の相違点 ([35]を元に作成)

特性/要求	宇宙機		民間航空機
	打ち上げロケット	宇宙船	
ミッション時間	<1時間	>24時間	<13時間
飛行経路	若干の変化	固定	多様な変化
寿命 総計 O/H	100 ミッション 1 ミッション	1 ミッション なし	50000 時間 + 3000 時間
サイクル	単発 限定された再始動 限定された推力変化	単発 限られた期間の 推進	多数回の始動/停止 推力の大きな変動
ターンアラウンド	>1日	なし	<1時間



びに、タンクから推進系等へ向かう供給配管等も、航空機として必要なレベルでの基準が求められるが、客室安全性・事故時安全性など、プラント並みの設計検討を、限られた容積と重量の中で行わなければならない。

加えて表6に示されるように、航空機においては、飛行時の環境変化、特に内外圧変化が厳しい条件[36]となるが、これは従来のJet燃料機にはない課題である。それは、Jet燃料では、燃料の気化とパージを許容しており、同じことは水素燃料では出来ないためである。液体水素を燃料とするロケットの燃料タンクに類似する課題として、液面の揺動（スロッシング）により、タンク構造の安定性や燃料の安定供給の確保が挙げられる。タンク内部の熱流動に関しては、大振幅スロッシングに伴う枯渇（ディプリーション）誤検知やポンプガス噛みの問題については、ロケットの場合ほど顕在化しないだろう。しかし小振幅であっても、スロッシングに伴って気液間熱伝達が促進されると、冷却に伴って収縮した加圧ガスの体積分を補填しなくてはならず、タンク内圧の維持は容易ではない。加圧源をヘリウム気蓄器とするか、熱交換器下流の抽水水素（自己加圧）とするのか、その選択に際しては、タンク内熱流動を十分に考慮する必要がある。また、タンク内部と外部の伝熱に関しては、熱断熱の確保とそのため部材重量の最適設計も重要である。また、タンク内圧を保つ必要性から、上昇軌道中も下降軌道中も燃料をボイルオフによって失うことになり、こうした事象も踏まえた管理技術の確立が必須である。以上のように燃料タンクの設定にあたっては構造設計のみならず、運航期間にわたる適切な極低温燃料液面管理も極めて重要であり、航空機の運航条件を設定した上での検討・検証が具体的に必要とされる必要がある。

### 3.4 推進・燃料供給系・補機類

一般に、水素燃料航空機を実現するに当たって、推進系に困難な技術課題が最も多いと思われる傾向があるが、水素ジェットエンジンを用いる場合はこの限りではない。表2に示されるように、最初のジェットエンジン実証が燃料の扱いやすさから水素を用いられたことからわかるとおり、水素燃料自身はジェットエンジン燃料として相性がとても良いといえる。ただ、多くの場合燃料として気体の水素を想定しており、水素燃料航空機としてエンジンシステムを構成する際には、液体水素燃料タンクから燃料を配管を通じて供給し、熱交換器で気化した上で燃料をエンジンに導入することが求められる。エンジン本体への技術的な困難さは多くないが、燃料供給に関わるポンプと熱交換器は、長寿命・高信頼性を確保するために特別な注意を払って導入されなければならない。少流量かつ低密度の水素を数MPa程度まで昇圧する燃料ポ

ンプの形式としては、比速度 ( $N_s$ ) の小さい遠心型を選択するのが一般には有利である。しかし、ポンプ形式および駆動方式（ターボポンプ/コア軸動力）の選択にあたっては、小型化に伴うポンプ効率低下や、回転数の高速化に伴う信頼性なども十分に考慮されるべきである。熱交換器は、亜音速機についてはサイクル選定によるが、例えばTu-155においてはエンジンノズル部の排熱を利用するためにノズル部に熱交換器が配置されていた。JAXAが開発を進めている極超音速機推進系である極超音速ターボエンジン実証モデルでは、極超音速飛行環境でのジェットエンジン（コアエンジン）作動に対応するためにエンジン流路内に熱交換器を導入するという、より技術的に困難な構成をしているものの、すでに地上システム燃焼試験を成功させており、熱交換システムを含めた水素燃料エンジン構成は、技術的に困難という状況にはないといえる。熱交換器の存在はエンジン重量の点ではペナルティであり、熱交換性能向上と圧力損失低減を両立してコンパクト化を目指すことは重要な技術課題である。そのため、液体ロケット推力室の再生冷却に関するJAXA内外の研究開発グループとも連携しながら、超臨界圧水素の流動特性および伝熱特性の予測技術確立にも取り組むべきである。燃料タンクからの燃料供給という面では、燃料の状態管理、着霜防止などの課題はあるが、このことも同じく極超音速ターボエンジンにおけるエンジン飛行環境実証の開発研究に併せて技術蓄積が行われている状況である。むしろ、比較的難度が高い技術課題は、燃料制御バルブなど補機類である。液体水素燃料は供給圧力や温度によって密度など熱物性値が大きく変化するため、密度変化の小さいジェット燃料に比べて、燃料の安定供給が難しい。また、ロケットは流量調整を行わないので、水素燃料航空機に適用するにはロケット技術の単純な延長とは捕らえにくい。スロットルを行う再使用ロケットであっても30～100%程度の範囲のスロットルに対して[37]、10以下～100%の範囲が必要であり、高々度再着火を行うにはさらに微細な制御が必要である。極低温に対応し、(地上交通機関に比べて)大容量でレンジアビリティの広い流量調節バルブの開発が課題である。燃料流量制御の困難さを回避する手段としては、先のATREX-500などが採用するエキスパンダーサイクルATRの採用も考えられる。

以上から、推進系の技術蓄積・実証に関して言えば、我が国で進む(液体水素燃料)極超音速ターボエンジンの技術開発における技術蓄積を援用することで必要な技術を確保することが可能であるととともに、補機類の開発などに併せて留意すべきことと言える。

### 3.5 環境に対する影響

水素燃料航空機では、その排出ガス中のCO<sub>2</sub>の存在がゼロであることから、CO<sub>2</sub>の側面では地球温暖化防止への寄与が期待されているが、最近の研究ではその地球温暖化防止効果について更なる研究が必要とされている。その理由は、水素燃料航空機がJet燃料航空機に比して2倍強（2.6倍）の水蒸気を発生し、これが飛行機雲となって地球温暖化効果として作用するのではないかという懸念が生じたためである。CRYOPLANEの中では、水素燃料航空機が排気する多量の水蒸気が環境に及ぼす影響に関する検討に重きを置いている。その検討の代表は2項目あり、一つは大気循環に関わる環境シミュレーションを用いた検討、いま一つは、簡単な排気の地球温暖化効果指標を用いた、温暖化効果をもたらすにくい水素航空機の飛行方法に関する解析的検討である。

前者の環境シミュレーションは、主にDLR（ドイツ航空宇宙センター）が担った[38]。この検討によって報告された中で興味深いこととして、以下のようなことが挙げられる。緯度・高度・季節によって大気循環構造が変わるために水蒸気排気の影響も異なる。水素燃料航空機の排気には、Jet燃料が排出するすす中間体のような飛行機雲の形成を促す核となる粒子が存在しないため、たとえ多量の水蒸気が排出されても、飛行機雲として形成される確率は低い。一方で生成される飛行機雲の氷結晶はエアロゾル由来のものであり、一旦氷結晶が生成されると数は少ないが個々は大きくなる。はっきりしてはいないが、飛行機雲中の氷結晶の質量は、Jet燃料を用いる従来航空機と水素燃料航空機では大差ないと考えられる。すなわち、水蒸気量が増えても、飛行機雲として環境影響に与える影響はさして増えないのではないかということである。CO<sub>2</sub>など従来から指摘されている滞留時間の長い地球温暖化物質に関して、排気が抑制されても地球温暖化の抑制効果を見るためには長い期間（5年規模）待たなければ成らないようで、特に特定成分の寄与を計るのは容易ではない。最新のシミュレーションの結果（2050年までの予測計算）からは、水素燃料航空機の導入によっ

て地球温暖化抑制結果が見られた。用いたモデルの信憑性の問題から、この結果を持って直ちに水素燃料航空機の導入による環境保全効果があるとは言い切れないが、少なくとも環境を悪化させることはない、と結論することが出来る。ただ、いずれにしても関連する基礎データが少ないため、気象影響に関する実験データを含む基礎的な知見の蓄積が求められる。また、水素燃料航空機由来の巻雲が環境に与える影響が新たに懸念されるが、関連するデータは不足しているのが現状である。

以上のように、最新の環境シミュレーションの予測からは、水素燃料航空機の導入によって地球環境の保全は図られる可能性があり、少なくとも状況を悪化させることはないという結論が出されている。いずれにしても基礎データ不足であることは強調されるべきである。このように、環境評価に関して十分な基礎的知見が得られているとはいいがたい状況ではあるが、Cryoplneの今ひとつ調べられた水蒸気に係る環境影響の調査として、飛行経路の影響に関する調査[39]がある。これは、排気成分の地球温暖化効果に高度依存性があることに着目し、この効果を高度毎に簡易に定める手法を用いて、航空機同一規模ミッションに対して巡航高度を変えた場合の排気成分の地球温暖化効果の変化について示したものである。図10には、採用した高度に対する地球温暖化効果係数（GWP：CO<sub>2</sub>を基準にした、地球温暖化効果の指標）と代表的なJet燃料機、水素燃料航空機のGWP飛行高度依存性をプロットしたものである。図左のモデルからは、NO<sub>x</sub>の影響が成層圏・対流圏の境界付近でピークを持つこと、水蒸気の影響が成層圏ではある程度見られるが対流圏では相対的に小さくなるが見て取れる。容易に予想されるように、基準であるCO<sub>2</sub>の影響は高度によって変化せず、CO<sub>2</sub>の排出量、すなわち温暖化効果はJet燃料機の場合飛行高度が下がるにつれて顕著になるため、高度を下げることは地球温暖化抑止の面でJet燃料航空機に益はない。これに対して、水素燃料航空機の場合、CO<sub>2</sub>排気の影響は全く無視できる。また、NO<sub>x</sub>排気量もJet燃料航空機に比べ大幅に低減することが出来、H<sub>2</sub>Oは高高

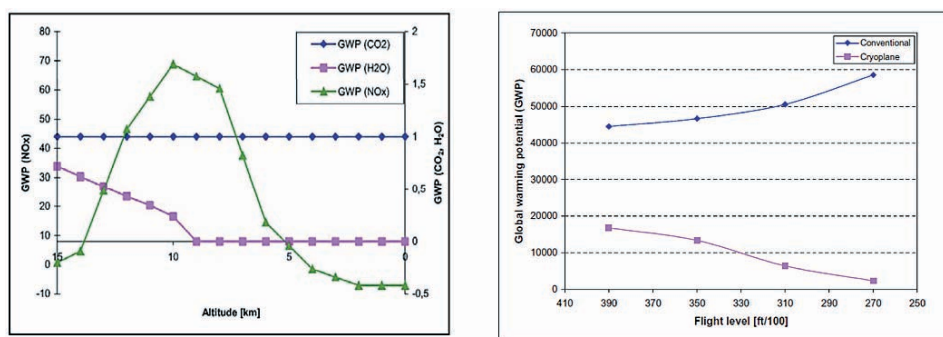


図10 地球温暖化指数（GWP単位質量あたり）高度変化（採用モデル）と航空機排気の地球温暖化に及ぼす影響の飛行高度依存性（総計比較）[39]

度で影響が増えてくるものの、高度を下げるとその効果は非常に小さい。このことから、水素燃料航空機の場合はJet燃料航空機の場合と逆に、高度を下げると排気の温室効果指標である地球温暖化効果係数を下げることが可能である。いずれの燃料航空機についても、飛行高度を下げると大気密度の増大のために、燃料消費は悪化する。水素燃料航空機の場合には、燃料消費の多少の犠牲を払うことになるが飛行高度を低下させることで地球温暖化効果の抑制に寄与することが示唆されている。ここに、解析の対象とされたのは、3.1に示されたCRYOPLANE中型機であるため、既述の飛行性能と併せて環境適合性を評価することが出来る。このように、飛行における地球温暖化効果の評価は飛行機性能の一つと位置づけて評価すべき項目であるといえる。以上のような簡易モデルでの評価がなされているが、ここに、簡易モデルの適用として水蒸気の直接影響のみが評価されていること、高度依存という高度に対する1次元的な評価に留まっていることから、あくまで簡易解析の結果と受け止める必要があることに注意しなければならない。上に述べたように、水蒸気の直接的な地球温暖化に及ぼす影響は対流圏においてはCO<sub>2</sub>の場合に比べ無視できる程度に小さいが、飛行機雲生成という間接的な過程で地球温暖化に作用する可能性があり、この影響はまだ明確に理解されていないわけではない。水蒸気、飛行機雲いずれにしても対流圏内においては滞留時間が比較的短く（～10日のオーダー）地球温暖化効果は非常に小さいとする意見もあるものの、慎重な調査が必要な事項であることは疑いない。

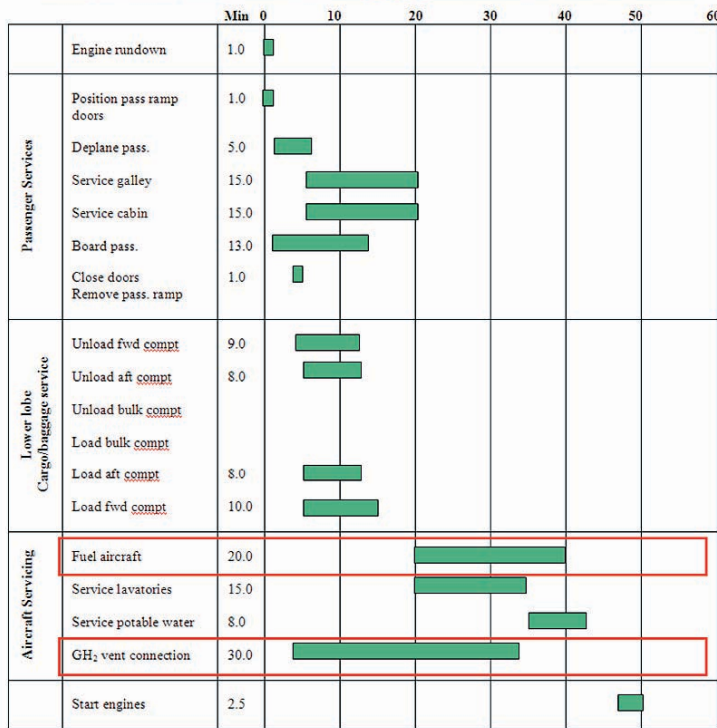
最近、Jet燃料航空機が排出する水蒸気により生成される飛行機雲について対策に係る提案がNoppel-Singhにより提示されている[40][41]。これによれば、現状でのJet燃料航空機でも排出する水蒸気が生成する飛行機雲は深刻な温暖化効果をもたらす、CO<sub>2</sub>よりもその効果が高い可能性があるとし、対策の必要性を説いている。具体的には、エンジン内での水凝縮、(Jet燃料航空機の場合の核となる)すす生成抑制、先の文献[39]にあるような高度調整、そもそもの排気の温暖化効果放射特性の制御などを提案している。水素燃料に限らず、現状のJet燃料航空機でも水蒸気による飛行機雲の温暖化に与える影響が指摘されるのは最近のことであり、関連分野の研究の進展が期待されるものである。最近の資料としては[42]がある。これによれば、航空による線状の飛行機雲の放射強制力（気候に影響をもたらす因子の変化に対する地球—大気システムに及ぼす影響の尺度）の寄与は0.01 [+0.003～+0.03] W/m<sup>2</sup>と先の3次報告報告書推計値よりも小さい値を示している。新しい研究ならびに観測事実により飛行機雲による温暖化効果は危惧されるよりも抑制的なものになる可能性もある。

### 3.6 運航（ターン・アラウンド）・空港整備

燃料供給を始め、旅客機として水素燃料航空機を用いる場合には、安全を確保しつつ経済的に運航計画を立て実施する必要がある。CRYOPLANEでは、この運航に係る検討も重要な項目として調査された[43]。ここでは、実際の運航・ターンアラウンドの調査を元に、水素燃料航空機の導入に際して掛かるであろう時間や必要な対処について調査している。機体整備は、飛行前点検・定期点検とに大別され、とりわけ旅客機の「飛行前点検」の中でもターンアラウンド時に実施する整備に掛かる時間を最小化することが、運航の経済性を規定する上で極めて重要である。ここで留意すべきは、最大負荷（空港担当部署における機数・作業総量）においても対処できる準備が必要であること、水素燃料航空機に対する作業では、関連作業に係る人員に対して極低温燃料に対する特別の訓練を行う必要性があることである。

実際のターンアラウンドにおける作業はいくつもの平行作業として行われるが、現実にはいくつかのクリティカルパスが存在する。現状では清掃作業がそうであり、水素燃料航空機においては、まず燃料供給に関する作業ではないかと想定される。以上のような背景を元に、ターンアラウンドに係る作業と水素燃料使用との関連について以下略述する。まず、着陸時のパーキングとドッキングであるが、牽引車両自体は従来のものを適用することが可能だが、燃料充填時には安全距離に離す必要がある。関連輸送作業機については従来と同様、エンジンについて火花点火の影響を排除するためにディーゼル機関とする。将来的には、自動誘導システムの導入なども検討されるべき事項である。続く乗客や荷物降ろし・点検整備に関して、前項と同じく動力源の火花点火の影響を排除すること、配置上乗客経路と燃料供給口を出来るだけ離す必要がある。清掃作業そのものに変化はないが、緊急時の手続きと対応の訓練が別途必要である。続いて燃料供給に際しては、資格と知識を持った人員が作業をすることが勿論であるが、無色・無臭の燃料である（ガス）水素漏洩の防止や、液体水素燃料の極低温性に対する配慮、安全で適切な配管ドレーン・パージ、ボイルオフ等防止のための圧力変動の防止などに注意する必要がある。一般に着陸から次の離陸に向けての作業では、空でない燃料タンクに燃料を補充することになるが、空の状態からの燃料供給をする場合には、特別な場所で実施すること（配管・気体水素の損失を防ぐため、液化/供給設備の直近で行うことが望ましい）、その場所が希ガスでのパージ・予冷に関する十分な設備として整備されることが重要である。図11には、水素燃料航空機のターンアラウンドタイム検討例[44]を示す。この図からも、燃料供給が最大の焦点となることがわかる。併せて、車両な

水素燃料航空機の場合の**想定ターンアラウンドタイム**



燃料供給に係る時間が重要

図 11 水素燃料航空機のターンアラウンドタイム検討例[42]

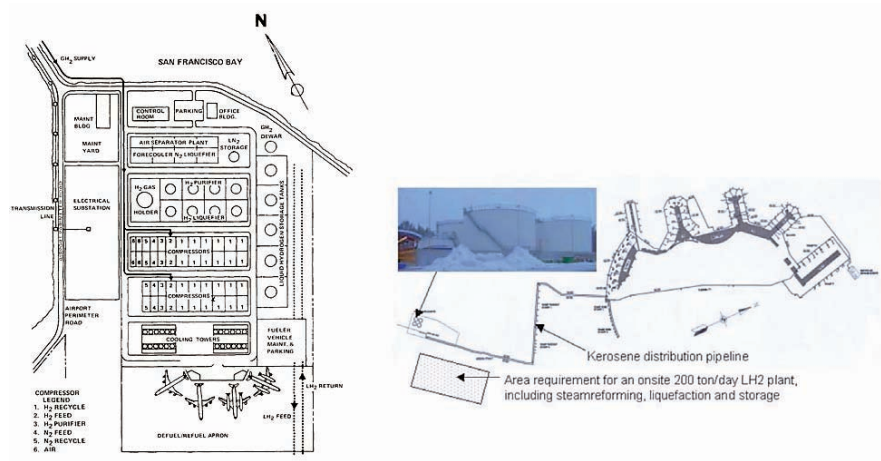


図 12 空港設備検討例 (サンフランシスコ国際線[22]ならびにスウェーデン国内線[45])

どの内燃機関については、発火のリスクの低減を図るために安全基準策定、作業員に対する追加の訓練と問題発生時の基準策定などが課題になることが特筆される。

空港整備を行うに際して、燃料製造・輸送も併せた総合的な視点から安全性・経済性を高める必要がある。空港整備検討例として、図 12 に、国際線（サンフランシスコ[22]）と国内線（スウェーデン[39]）の例を示す。液化についてオンサイトとするかオフサイトとするかなどの検討例もあるが、規模や位置（製造設備からの距離）にも依存するようである[4]。ここで重要なのは、国内・国際線いずれにしても、発着両地点での水素燃料供給設備の

整備が必要であり、一定の基準や投資が必要となる。これには、空港の施設設備のみでなく、燃料供給会社が設置負担する供給・輸送用車両や加圧ポンプを装備した車両など広範囲に及ぶことに留意する必要がある。新たな機種導入による設備改修の事例としては、最近行われているエアバス A 380 就航のための空港の改修事例が参照になる。日本としてどのような規模で水素燃料航空機を導入することになるかは今後の判断を待つことになるが、文献[45]で小規模航空利用としてスウェーデンの国内線を事例に検討する中で、比較的大量輸送検討に供する状況として、エアバス A 380 規模の水素燃料航空機機体を用いた

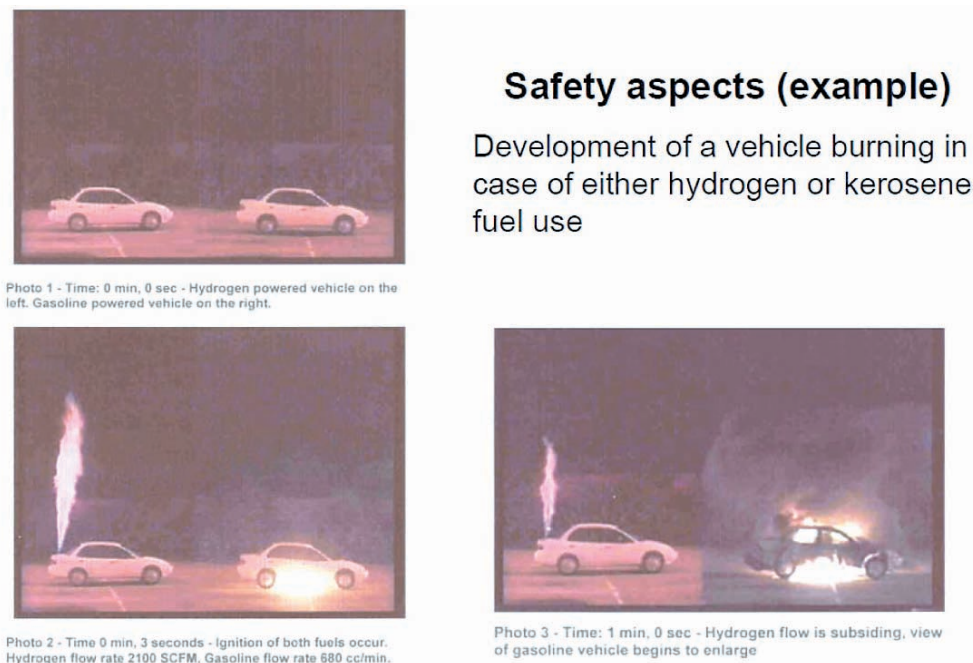


図13 水素燃料の安全性に関する実験結果写真 ([22])

日本の国内線導入に関するインフラ検討を好ましい事例として挙げている事は興味深いことである。

### 3.7 安全性

液体水素燃料の導入に際して障壁となりうるのが、利用者（旅客）の水素に対する認識である。ヒンデンプルク号事故（水素飛行船事故）以来、水素は危険であるという必ずしも正しくない意識（この事故の直接の原因として水素があるわけではないという推定がなされている）が多くの一般的な認識である。図13には、水素燃料の相対的安全性を示すために、自動車での火災試験結果が写真で示されている（各写真の内、左が水素自動車、右がガソリン自動車）。ガソリンは、地面に溜まるとプール状となり広く燃え広がるが、比較すると水素は容易に気化し、高い拡散性・燃焼特性を有することから速やかに拡散し火炎も細く上方に伸びていることが判る。管理上課題となるのは液体燃料の極低温性であるが、燃焼並びに燃料の滞留という観点からは、水素燃料は安全であることが見て取れる。ただ、液体水素燃料を扱うに際しては、保安管理技術の整備が必須である。液体水素燃料を単独で保持する飛翔体の保安は、酸化剤を備えるロケットとは異なる。TNT換算がかなり小さくなるという実験結果はある[45]が、基準として採用するにはデータ量が不十分である。現に、JAXAの保安基準としても採用されていない[46]。また、オープンエアにおける水素は上述のように一般に考えられるよりも安全であるが、滞留構造においては非常に危険であることは改めて注意すべき事項である。さらに、極低温燃料である液体水素が及ぶ範囲には、

材料特性などに注意を払う必要がある。たとえば、脚関連部品は水素脆性の影響を受けやすい高張力鋼が利用されているが、水素漏洩の可能性については検討すべきである。

以上から、専門的に研究調査した立場の者からは、正しい扱い方をすれば水素は安全に運用できることはすでに明らかになっているが、このことを如何に一般の利用者となる人に周知するかということは、航空業界に限らない、水素燃料を扱う全ての産業界共通の課題であり、関係部門で協調して取り組むべき課題といえる。併せて、適切な保安基準作りも必須の事項である。

### 3.8 水素燃料の入手性

主に航空機の特徴、運航（ターンアラウンド）の立場から水素燃料航空機の経済性について言及してきたが、実際に産業として成り立つためには継続的に入手する必要がある燃料の価格が好ましいレベルまで下がる必要がある。いずれ化石燃料の入手が困難になることは明らかとしても、水素社会の到来を期して従来のJet燃料と同程度以下に水素燃料がなる時期はいつごろか、という問題は関心の高い問題である。仮定の立て方によるが、図14に示されるように、CRYOPLANEでは2040年ごろがその価格逆転期であると見ている。これは欧米が水素社会の到来と位置づけている時期と概ね一致している。少なくとも、この時期には水素燃料航空機が実用化されることを目指して、必要な取り組みを行っていくべきであろう。



図 14 水素燃料の入手性 (8)

#### 4. 水素燃料航空機実現に向けて解決すべき技術課題

以上のように、水素燃料航空機に関する検討は、いずれも初期の検討の方針を大きく変化させることなく、その精度を上げ、あらたな問題点を洗い出し検証する過程を経てきたといえる。水素燃料そのものの精製行程についての言及はここでは避け、水素燃料を比較的効率よく安価に得ることが出来るという状況を想定した上で、今後解決すべき技術課題についてここにまとめることとする。

##### 4.1 燃料タンクの軽量化、繰り返し性能、OH 可能性の確保

これまでに繰り返し述べたように、水素燃料航空機において技術的に解決すべき課題が多いのは、燃料タンクの軽量化を中心とした構造関連の技術である。燃料タンクの軽量化に関する指針についてはこれまでの再使用型宇宙往還機に関する基礎的研究の成果が参考になるが、宇宙機と航空機では、使用環境や寿命設定などが大きく異なることに留意する必要がある。さらに、長時間使用では不慮の過荷重や事故などによるダメージの発生・蓄積が避けられず、それを検査し、安全性を確保できるように修理する方法を確立する必要がある。それに加え、オーバーホールの着実な実施を比較的簡便に行うことが要求される。以上の点で有用な指針を得るためには、これまで再使用型宇宙往還機やロケットを対象に行われてきた燃料タンク開発研究や燃料液面管理に関する知見及び宇宙機・航空機での豊富な複合材料の研究や使用実績を援用して、航空機の燃料タンクに求められる条件を設定した上で設計指針を得ることが重要である。

##### 4.2 水素燃料エンジンシステム

JAXA における極超音速ターボエンジンの研究や、EU で行われている液体水素燃料極超音速空気吸い込み式エンジンの研究に見られるように、極超音速空気吸い込み

式エンジンの研究開発では、熱交換器を搭載したターボエンジンが主な対象となっている。これらの研究開発の成果は、亜音速推進系に直接役立てられるのみならず、実用レベルの機体としては亜音速機の方が極超音速機より早く実現することが十分期待できる。極超音速機に限らない、液体水素燃料航空機エンジンにて最も留意すべきは、機体内の燃料供給系である。燃料ポンプの適切な設計や保守技術については現時点で未知数である。キャビテーションによる性能劣化のモニタリングや定期整備について、どの場所でどの程度の頻度とすべきかといったことが、エンジンシステムを検討する上で比較的大きな比重を占めると考えられる。これらを配慮した上で、エンジンシステムそのものとしては、新たに単独で研究開発を始める必要は必ずしもなく、極超音速エンジン研究開発の成果を利用して実エンジンシステムの開発に繋げることが現実的である。

##### 4.3 燃料供給系

地上燃料供給系については、最も参考になるのが液体水素を用いたロケットの射場における実施例である。現時点では打ち上げ回数の制限から、旅客機運航に求められるような定常的な燃料供給・管理の体制にはなっていない。空港における水素運用・管理という意味では水素社会に向けた試験的な取り組みとしてドイツのミュンヘン空港の地上設備が水素で運用されるという実績を有しており、参照になる。地上輸送機関の水素対応については、水素技術に積極的に取り組む日本をはじめとする各国が水素ステーションを配置して供給方法に関する実証・検証を行っている。水素の利用について航空宇宙分野ではロケットの運用が他の分野に先行して実用化されているとはいえ、航空機運航に適用するという観点では、広く地上輸送等の分野の水素利用技術普及と歩調を合わせる事が重要である。さらに、人を乗せるという観点では、安全性の確保ならびにその適正管理に対する利用者への啓蒙という意味でも、地上輸送機関に掛かる開発動向と連携することが極めて重要である。航空機の運航管理という意味では、ターンアラウンドと保守点検に関して、効率的に運用する手法を提示することが重要であるが、これまでに述べたような水素燃料の特徴を踏まえた検討がなされるべきである。

##### 4.4 巡航時の大気を与える影響の評価

水素燃料航空機の環境に与える影響については、これまで温暖化防止に向けた好ましい側面が強調されていた (Brewer には、超音速機がその飛行高度が高いために滞留時間が長くオゾン層に影響を与えやすいとして注意が促されていたが亜音速機については特段の記述がない) [4]

が、最近では、従来機の2倍強の水蒸気を排気するため水蒸気が生成する飛行機雲が温室効果を持つとの懸念も出されて来ている。CRYOPLANEにおいては、水素燃料航空機の水蒸気発生に関わる影響調査と、水蒸気など温暖化効果を低減する飛行方法に関する検討が重点的に行われた。最近では、Cranfield大学のグループが水蒸気の影響排除に関する検討を行っている。実際のところ、水素航空機が定常的に高層大気を飛行する実績がない上に、現実的なモデルで水素航空機の水蒸気排気が大気・環境に及ぼす影響については明快には判っていない。したがって、今後水素燃料航空機が生成する飛行機雲の量を推定する手法の確立及び、それらの飛行機雲が環境に与える影響を評価する手法の確立が必要である。その上で、水素燃料航空機において水蒸気に由来する温暖化効果を抑制する方法の確立が、水素燃料航空機の実用化に向けて必要である。

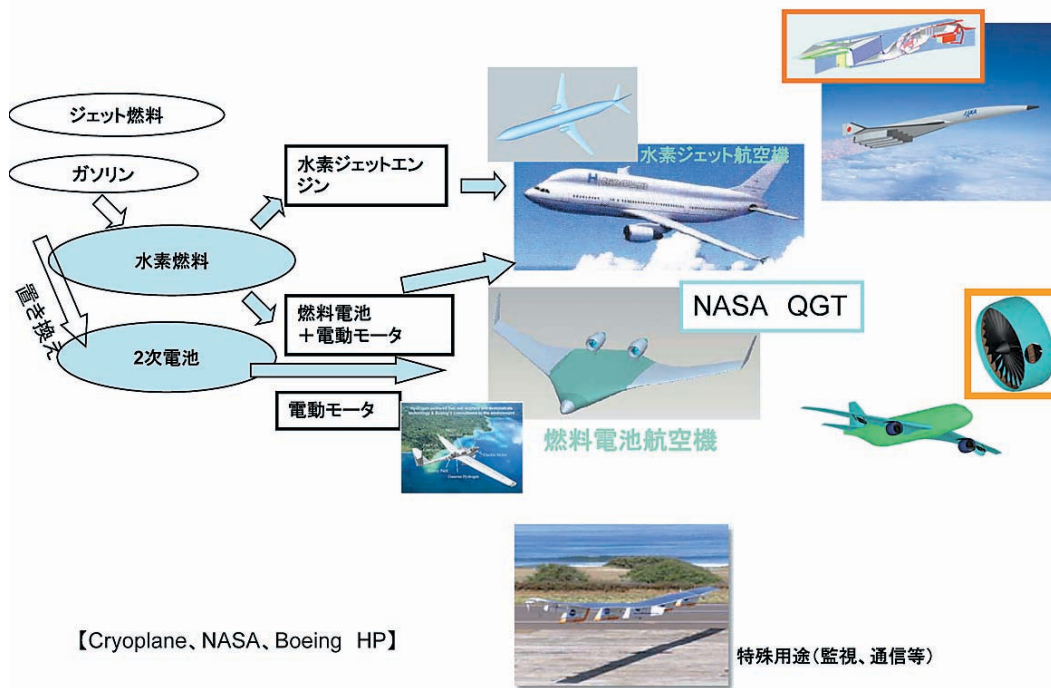
以上の課題の内、改めて基礎的な情報が必要と考えられるのは、第2項推進系を除く3点である。本稿での調査を受け、第2項に係る点について極超音速推進系に関する研究開発成果を踏まえながら、残る3点に重点を置いて、具体的な機体飛行条件（諸元、経路など）を設定した上で基礎的知見を得ることが、速やかな実用化に向けた取り組みに先立って必要なことであると考えられる。

5. さらなる環境適合性の革新に向けて

現状技術の延長としての水素燃料航空機についてこれ

までまとめてきた。水素燃料の利用に当っては、長期的な視野に立つとその製造過程やコストに見合った革新的な技術が求められる。序章で述べたように、NASAの検討に当たっても、水素燃料を利用した将来航空機は、第一に水素ジェット航空機[7]、最終的には水素燃料電池航空機[9]として規定されている。本章では、水素の利用、関連技術革新がなされたとした場合に想定される将来像について述べることとする。図15には、水素燃料航空機の発展シナリオを模式的に示す。現状の航空機は、一方で電池航空機への針路がありうるが、基本的には、水素ジェットエンジン航空機、水素利用燃料電池航空機が目標となると考えられる。NASAが示したように、水素ジェットエンジン航空機は、燃料電池航空機に比べて技術的に実現可能性が高く、前者が中期的視野に立った航空機、後者が長期的視野に立った航空機として、環境適合性を主題とした場合に語られている。現状の技術レベルでは、燃料電池のエネルギー高密度化など燃料電池航空機の課題は多く、概念検討・基礎実証レベルである。しかし、水素を利用する上での推進系を除く課題は、水素ジェットエンジン航空機、水素利用燃料電池航空機で共通しており、水素ジェットエンジンを実用化することは、さらにそれ以上の環境適合性の向上を望む上でも好ましいことであるといえる。もちろん、亜音速水素ジェット航空機の実現は、JAXAが提案し研究開発を行っている極超音速機（極超音速予冷ターボジェット推進系利用）の実現に向けても追い風となる。

図16には、Cranfield大学で検討がなされている将来航



【Cryoplane, NASA, Boeing HP】

特殊用途(監視、通信等)

図15 脱化石燃料（水素）燃料航空機進展シナリオ



図16 Cranfield大によるBWB機体検討例 ([47])

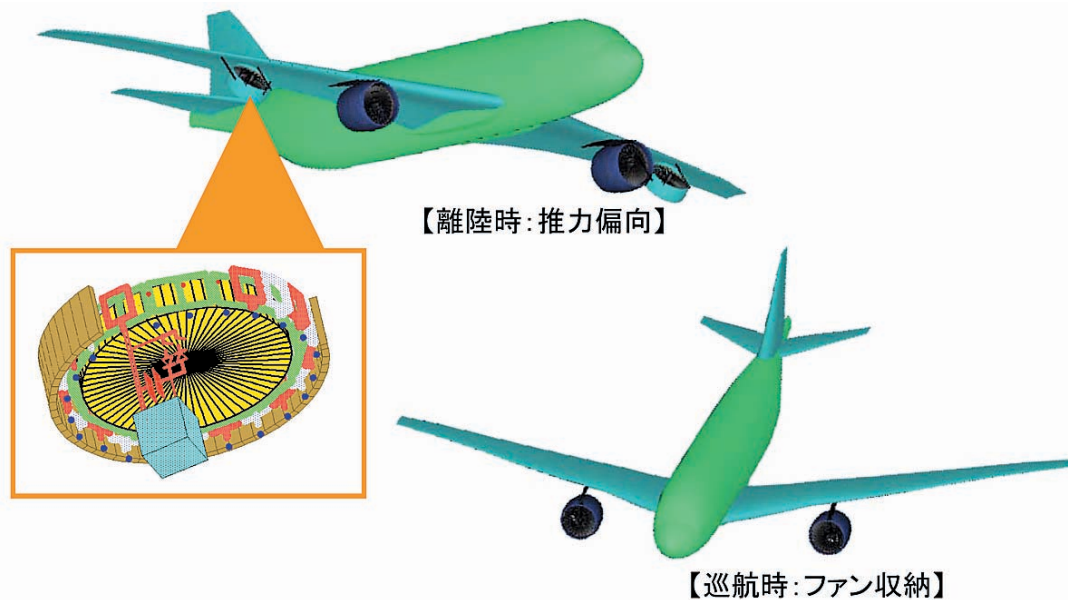


図17 JAXAにおける水素燃料電動航空機検討例 ([48])

空機としての翼胴機体概念[47]である。この機体構成の利点を生かすには、電動その他の、翼面上に推進器を配置することが重要であるといえる。このための方策として、高効率エンジン候補に図左のチップタービンファン、右の燃料電池ファンエンジンを挙げている。燃料電池と大型電動ファンとの組み合わせは、このようにNASA[9]でもCranfield[46]でも好ましい選択とされているが、現状技術の延長では、軽量大口径の電動ファンを実現することは困難である。このような背景と問題意識にかんがみ、JAXAでは、図17に示すように将来の燃料電池利用を想定した電動ファンの軽量化・大口径化に寄与するファン概念を提案し検討を行っている[48]。

本稿を通じて、水素燃料を用いた航空機構成の課題として、相対的な燃料タンクの体積比率の大きさを挙げていた。一つの逆説的な発想としての解決策として、BoeingのMcMasters氏の提案するSuper Clipperを最後に紹介する。氏は、元来の乗客の利便性・快適性を求める将来航空機のあり方は何か、という観点に立ち、エアバス



図18 Boeingにおける超大型水素燃料電動ファン航空機検討例 ([49])



A 380 を超える超大型機を従来機より低い飛行速度で飛行させ、十分な居住性と Ballroom のような快適性を提供することを視座におき、図 18 に示すような、超大型航空機 の概念を提供している[49]。この場合、中心部の胴体の側面左右に B 747 の胴体を配置し、その一部分に燃料タンクを配置する。そして推進は具体的な機構は提示していないものの電動ファンとして搭載するというものである。この発想は、JAXA が進める「より速く」、という観点とは逆の発想であるが、従来の航空機の形態に縛られない形で、より環境適合性を向上させる案を提示することの可能性を示しているものとして興味深い。

## 6. まとめ～エアラインの立場から～

水素燃料航空機に関する本研究調査は、日航財団から JAXA に、その実施が提唱されたものであるが、その背景には二つの大きな動機づけがあった。一つ目には、JAL グループは従来から航空機による大気観測プロジェクト（日航財団が事務局）で貢献してきており、その延長として JAL グループとして更なる地球温暖化防止への取り組みが望まれるという点であった。二つ目には、欧米で、過去半世紀以上に亘り、水素燃料航空機に関し多くの研究と実験が、研究機関、大学、航空機メーカー等が主体となって、なされて来たが、これまでエアラインの参加というものが見られず、温室効果ガスである二酸化炭素の排出をゼロとできるこの研究にエアライン自らが積極的に参加することに意義があると考えた点であった。幸いにも JAXA の賛同が得られ共同研究体制が成立し、さらには東京大学、日本大学の参加、また JAL グループ技術陣のコアの参加が得られ、結果として日本において望み得る最高レベルの布陣による研究調査体制が実現した。

研究調査では、水素燃料航空機に関するこれまでの研究、開発の実績、現状の把握を行うと共に、課題の抽出を行うことが、主要なテーマのひとつであった。予想されたこととは言え、前章までに述べられているように、水素燃料航空機については多くの課題があることが確認された。第一に、水素燃料の特性として、軽くて高エネルギーである半面で比重が小さく従来のケロシン燃料タンクの 4 倍の容積のタンクが必要となり、航空機のデザインを難しくすると共に、前面面積、濡れ面積を増やし空気抵抗が大きくなるという点があり、航空機デザイン上の課題となっている。次に、マイナス 253 度 C と極低温の液体水素を格納する燃料タンクの開発という課題である。ロケットのように 1 回の使用に供するのではなく繰り返し連続して運航に供されるに足る疲労強度を有し、かつ整備員による整備作業の便にも配慮した燃料タンクを開発することの技術的ハードルの高さが確認された。

更に、燃料タンクに関連しては、翼に燃料タンクがなく疲労強度に悪影響があることから、翼デザインに特別の配慮が必要である点が JAL グループから指摘された。また、航空機だけでなく、空港という基本インフラを水素燃料対応に大改造することも大きな課題である。

民間航空機の世界は、空中において高速で旅客を輸送するという、地上に比べて厳しい環境下で行われるため、新たなテクノロジーの導入に対しては、極めてコンサーバティブである。地上におけるテクノロジーが成熟し確実性と安全性が十分確認されるまでは、なかなか導入されない。また、導入される場合には、大掛かりな耐空性/安全性の確認プロセスが大前提となる。例えば、デジタル技術によるグラス・コックピットの第 4 世代のジェット旅客機の登場も、1980 年代まで待つ必要があった。水素の場合は、空港という基本インフラの大改造も伴うため、航空での開発と導入は、10 年、20 年単位で行われる長期的かつ国際間の協調体制を含む非常に大掛かりなものとなるであろう。

一方、二酸化炭素を発生しないという水素燃料の環境問題への貢献が本調査プロジェクトの大きな動機付けとなっていたのではあるが、水素燃焼で発生する多量の水蒸気とそれに伴って発生しうる巻雲の温暖化に対する影響の評価が定まっていないため、現時点では「水素燃料航空機の導入によって温室効果ガス発生観点で改善が期待されつつも少なくとも現状より悪くはならないという予測」に止まっている。今後、大気中の水蒸気の影響に対する研究と評価が大きな課題となっている。本文に示したように、最新の IPCC 4 次報告においては、線状飛行機雲の温暖化にもたらす寄与についてやや楽観視しうるデータを提供している。いずれにせよ、JAL グループが進める大気観測を含め、環境影響の理解が重要であることは言を待たないことである。

上述のような多くの課題を概観した場合、やや悲観的なシナリオとしては、「航空機は、化石燃料であればバイオ合成燃料であれば、炭化水素系燃料に最後まで執着する輸送手段となる可能性がある」ということになる。とりわけ、貨物搭載のためのスペース容量の大きさが生命の貨物機においては、よりその可能性がある。しかしながら、逆のシナリオを考えると、地上において水素経済、水素社会が具現化された暁には、エアラインと航空機メーカーは、必ずや「何故航空の水素化がなされないのか」という社会からの厳しい問いかけと要求を突きつけられることになるであろう。また、何より、「資源」という観点に立てば、将来的に化石燃料の枯渇は不可避の事象であり、またバイオ代替燃料に量的な限界がある以上、長期的に大量に使用可能な代替燃料として水素以外には考え難いのも、また事実である。言い換えると、航空輸送という

人類にとってもはや不可欠の交通手段を、将来に亘って確保し堅持するためには、その水素化は避けては通れない道程であると考えられる。水素燃料航空機の実現は、人類として、多くの困難な課題を克服し実現すべきテーマであるとすら感じる。その意味で、今回の研究調査会において諸々の課題を提示したことが、今後の実現に向けて一石を投じる役割を果たしたことを期待したい。

最後になるが、今回の研究調査において議論され、検討された内容もさることながら、調査会で JAXA（研究機関）、大学、エアラインというフォーメーションによって研究調査体制が成立し機能したこと自体に大きな意義があったと感じている。これらの3者は、立場も物事へのアプローチの仕方も、大きな違いを持っているが、それぞれの持つ知見とノウハウを持ち寄り円滑に調査を進めることができた。エアライン/研究機関/大学の連携が機能しうることの証左であり、将来本格的に実現に向け検討し開発する際には、ひとつの雛形として大いに参考にされ得るものである。今回の研究調査会での課題提示を含む検討結果が、後世に引き継がれ、今後10年、20年の単位でなされるであろう水素燃料航空機の本格研究と開発において、若干でも役立つことを切に望むものである。

## 謝 辞

本調査検討に関連し、多くの方のご助言をいただきました。JAXA 研究開発本部ジェットエンジン技術研究センター高速推進システムセクションの皆様、JAXA 水野洋客員、堀之内茂客員、東京大学准教授姫野武洋先生には原稿の査読をいただきました。全体校正の関係上、いただいたコメントの全てを反映することは出来ませんでした。非常に有益なご助言をいただき感謝申し上げます。

また、調査の過程でプロマネ Westenberger 氏をはじめとする Cryoplane 関係者各位、Boeing の McMasters 氏には直接ご助言をいただきました。記して謝意を表します。

## 7. 補遺 航空機翼胴結合部構造強度に関する考察

### 補遺 航空機翼胴結合部構造強度に関する考察

#### (1) 航空機) 燃料タンク概要

航空機の翼は航空機重量を保持するために揚力を発生させる必要がある。この揚力は翼付け根部において最大となる曲げモーメントを生じさせる。従ってこの翼付け根部分の強度によって決まる運用上の最大重量があり、これを MAXIMUM ZERO FUEL WEIGHT（最大無燃料重量）と称している。

この制限重量をできるだけ大きくするため航空機は燃料タンクを翼の中に設置し、燃料重量により、翼が発生する揚力をできるだけ相殺できるように工夫をしている。図 A-1 に 767-300 の燃料タンクの配置およびその容量を示す。約 70 % の燃料が WING タンクに搭載されている。

#### (2) 現状

図 A-2 CURRENT により現在の一般的な航空機の場合で、飛行中の翼付け根の曲げモーメントの変動について説明する。燃料の搭載は始めに WING タンクに入れてこれが一杯になると CENTER タンクに入れていく。また、消費はこの逆となる。図に示すように燃料が WING タンクのみに入る場合、燃料による航空機重量の増分に対応し、翼の揚力を増加させる必要があるが、これは WING タンクの燃料により相殺

Fuel Tank Locations 767-300 / GE ENGINE

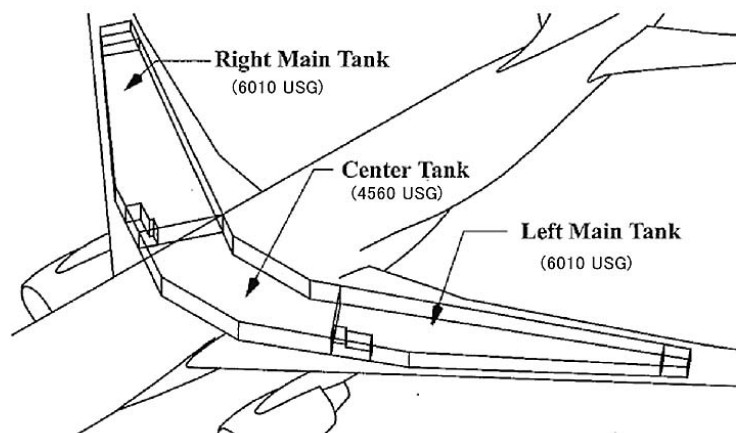


図 A-1 航空機燃料タンク概要

されるので翼付け根の曲げモーメントは殆ど増加しない。一方、CENTER タンクに燃料を搭載するようになる则由翼付け根の曲げモーメントの軽減効果がないので曲げモーメントは増加していく。容量一杯の燃料を搭載した時の翼付け根の曲げモーメントが最大となり、これを構造強度上の最大値以下にする必要がある。この状態から燃料によるモーメントの増分を戻した重量がMAXIMUM ZERO FUEL WEIGHT (最大無燃料重量) となる。

(3) 水素燃料航空機の場合

水素燃料航空機は燃料の特性上、燃料タンクの配置に制約があり、WING タンクが設置できず、胴体内のタンクのみとなる。現在の航空機でCENTER タンクのみの場合と同様である。WING タンクがないこ

とによる航空機の運用上の制約について考察する。但し、本考察ではタンクの形状による機体の形状変化やタンクの冷却機能による重量増などについては考慮していない。

- a. 最大燃料搭載量および翼付け根の曲げモーメントの強度限界を変えない場合 (図 A-2 PLAN 1 参照)  
図に示すように WING タンクの燃料による曲げモーメントの軽減効果がないことから MAXIMUM ZERO FUEL WEIGHT を大幅に切り下げる必要がある。
- b. MAXIMUM ZERO FUEL WEIGHT および翼付け根の曲げモーメントの強度限界を変えない場合 (図 A-2 PLAN 2 参照)

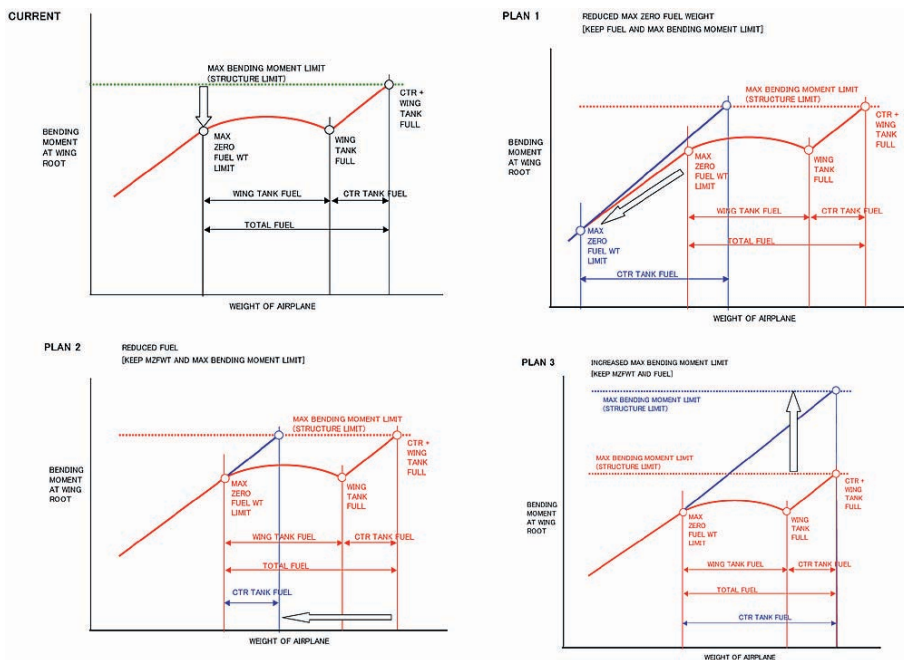


図 A-2 現状と仮定する3つのケースにおける翼根曲げモーメント分布

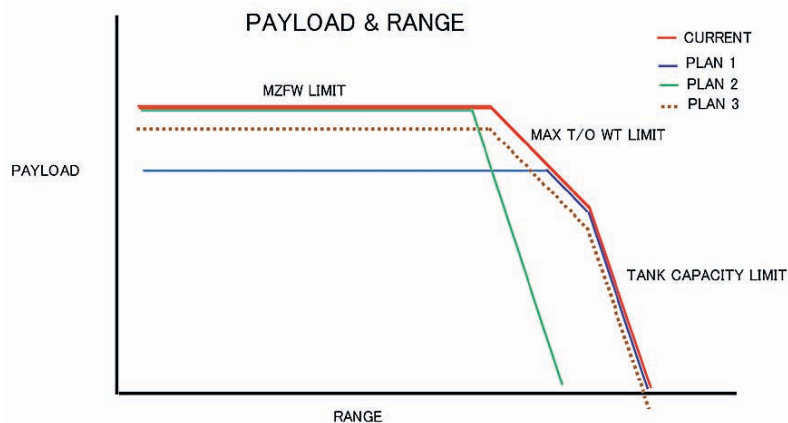


図 A-3 Payload-Range グラフ

WING タンクの燃料分が搭載できないので最大燃料搭載量を大幅に切り下げる必要がある。

- c. 最大燃料搭載量および MAXIMUM ZERO FUEL WEIGHT を変えない場合 (図 A-2 PLAN 3 参照)  
CENTER タンクの容量を大幅に増加させる必要があり、これに伴い翼付け根の曲げモーメントの強度限界を引き上げる必要がある。

#### (4) 航続性能への影響

上記の様な設計条件の変更が行われた場合の航続性能 (PAYLOADRANGE) への影響を考察する。(図 A-3 参照)

- a. の場合は MAXIMUM ZERO FUEL WEIGHT LIMIT 領域の PAYLOAD が影響を受けるため、殆どの RANGE で PAYLOAD が切り下がる。  
b. の場合は TANK CAPACITY LIMIT 領域の PAYLOAD が影響を受けるため、LONG RANGE で PAYLOAD が切り下がる。  
c. の場合は構造強化による自重 (Empty Weight) 増のため全領域に対して PAYLOAD が若干切り下がる。

## 8. 参考文献

- [1] 日本航空宇宙工業会, 昭和 49 年度サンシャイン計画委託研究開発成果報告書, 「水素利用サブシステムの総合的検討と周辺技術に関する研究」—航空機用水素エンジンに関する調査—, 1975 年 5 月.
- [2] 日本産業技術振興協会, 水素燃料航空機システムに関するテクノロジーアセスメント, 1981 年 3 月.
- [3] <http://www.ena.or.jp/WE-NET/>
- [4] Brewer, G. D., Hydrogen Aircraft Technology, CRC Press, 1991 年.
- [5] 太田時男監修, 水素エネルギー最先端技術, NTS, 1995 年.
- [6] 水素・燃料電池ハンドブック編集委員会編, 水素燃料電池ハンドブック, オーム社, 2006 年.
- [7] Guynn, M. D. and Olson, E. D., Evaluation of an Aircraft Concept with Over-Wing, Hydrogen-Fueled Engines for Reduced Noise and Emissions, NASA/TM-2002-211926, 2002 年 9 月.
- [8] Westenberger, A., “Hydrogen Fuelled Aircraft,” AIAA 2003-2880, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, 2003 年 7 月. ならびに, Final Technical Report CRYOPLANE Systems Analysis (Publishable version).
- [9] Guynn, M. D., Freeh, J. E. and Olson, E. D., Evaluation of a Hydrogen Fuel Cell Powered Blended-Wing-Body Aircraft Concept for Reduced Noise and Emissions, NASA/TM-2004-212989, 2004 年 2 月.
- [10] 橋本安男, 岡井敬一, 水素燃料航空機の動向について, 1 A 8, 第 43 回飛行機シンポジウム, 名古屋国際会議場, 2005 年 10 月.
- [11] 航空輸送産業に与える燃油価格高騰の構造的な影響について 4. 原油精製製品における航空燃油の独歩高傾向と高止まり見通し, <http://www.jal.com/ja/corporate/claim/key12/index5.html>, 2005 年 11 月.
- [12] 国土交通省ホームページ, 運輸部門の地球温暖化対策について, 2. 運輸部門からの二酸化炭素の排出量の現状, <http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/kankyuu/ondanka1.htm>
- [13] Successful Initial Test of 30% Biofuel Blend in Commercial Jet Engine, [http://www.greencarcongress.com/2007/06/successful\\_init.html](http://www.greencarcongress.com/2007/06/successful_init.html), 2007 年 6 月 18 日
- [14] <http://www.jal.com/ja/environment/conservation/conservation02.html>
- [15] GREEN PAPER on Energy Efficiency or Doing More With Less, [http://ec.europa.eu/energy/efficiency/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/efficiency/index_en.htm)
- [16] Rosenthal, E., Biofuels Deemed a Greenhouse Threat, The New York Times (電子版), 2008 年 2 月 8 日.
- [17] Corbyn, Z., Biofuels could boost global warming, finds study, Chemistry World, RSC, 2007 年 9 月 21 日.
- [18] Drell, I. L. and Belles, F. E., Survey of Hydrogen Combustion Properties, NACA RM E 57 D 24, 1957 年.
- [19] Silverstein, A. and Hall, E. W., Liquid Hydrogen as a Jet Fuel for High-Altitude Aircraft, NACA RM E 55 C 28 a, 1955 年 4 月.
- [20] 第 20, 21 期技術情報センター運営委員会, (社) 日本ガスタービン学会技術情報センター運営委員会調査報告書, 水素燃焼ガスタービンにおける水素利用に関連した物性値の調査, 1997 年 6 月.
- [21] Ziemann, J., Mayr, A., Anagnostou, A., Suttrop, F., Lowe, M., Bagheri, S. A. and Nitsche, T., Potential use of hydrogen in air propulsion, EQHHPP, Phase 0-3, Final Report, EC, 1998 年.
- [22] Daggett, D., Commercial Airplanes Hydrogen Fueled Airplanes, Presented to Hydrogen Production and NW Transportation, Seattle, WA, USA, 2003 年 6 月.
- [23] Westenberger, A., 私信.
- [24] 水素利用技術集成, Vol.3-加速する実用化技術開発, NTS, 2007 年 6 月.
- [25] Romm, J. J., The Hype about Hydrogen—Fact and Fiction

- in the Race to Save the Climate—, Island Press, 2005 年.
- [26] Mao *et al.*, Science, 297, 2247 (2002)
- [27] Florusse *et al.*, Science, 306, 469 (2004)
- [28] JAXA 長期ビジョン 2025, 宇宙航空研究開発機構, 2005 年.
- [29] 宇宙航空研究開発機構航空プログラムグループ極超音速機研究委員会, 極超音速機の研究開発構想, 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP-06-025, 2007 年 3 月.
- [30] Tanatsugu, N., Development Study on Expander Cycle Air Turbo-Ramjet with Intake Air Cooler for Space Plane, SAE Technical Paper Series 901064, 1990.
- [31] Sato, T., Kobayashi, H., Tanatsugu, N. and Tomike, J., Development Study of the Precooler of the ATREX Engine, AIAA Paper 2003-6985, 2003.
- [32] Sosounov, V. and Orlov, V., Experimental Turbofan Using Liquid Hydrogen and Liquid Natural Gas as Fuel, AIAA 90-2421, AIAA/SAE/ASME/ASEE 26<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference, Orland, FL, USA, 1990 年 7 月.
- [33] Corchero, G. and Montañés, An approach to the use of hydrogen for commercial aircraft engines, Journal of Aerospace Engineering, ImechE, Vol. 219 Part G, pp. 35-44, 2005 年.
- [34] Reshotko, E., Drag Reduction by Cooling in Hydrogen Fueled Aircraft, 11<sup>th</sup> ICAS Congress, Lisbon, Portugal, 1978 年 9 月.
- [35] Momenthy, A. M., Fuel Subsystem Characteristics for LH 2 Aircraft, 5 C-87-102, Proceedings of First World Hydrogen Energy Conference, Vol. 3 pp. 16, 1976 年.
- [36] Chandler, F., Lozano, M. and Glasser, S., Aircraft Cryogenic Fuel System Design Issues, AIAA 93-2567, AIAA/SAE/ASME/ASEE 29<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference, Monterey, CA, USA, 1993 年 6 月.
- [37] 再使用観測ロケット提案書, 再使用ロケットワーキンググループ, 2006 年 3 月.
- [38] Ponater, M., Pechtl, S., Sausen, R., Schumann, U. and Hüttig, G., Potential of the CRYOPLANE technology to reduce aircraft climate impact: A state-of-the-art assessment, Atmospheric Environment Vol. 40 pp. 6928-6944, 2006 年.
- [39] Svensson, F., Hasselrot, A. and Moldanova, J., Reduced environmental impact by lowered cruise altitude for liquid hydrogen-fuelled aircraft, Aerospace Science and Technology 8 307-320, 2004 年.
- [40] Noppel, F. and Singh, R., On the Tradeoff between CO<sub>2</sub> and Contrails, ISABE-2007-1149, 18<sup>th</sup> International Symposium on Air-breathing Engine Conference, Beijing, China, 2007 年 9 月.
- [41] Noppel, F. and Singh, R., The Avoidance of Contrails by Advanced Technical Means, ISABE-2007-1150, 18<sup>th</sup> International Symposium on Air-breathing Engine Conference, Beijing, China, 2007 年 9 月.
- [42] 気象庁 HP, IPCC 第 4 次評価報告書第 1 作業部会報告書技術要約, [http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc\\_ar4\\_wg1\\_ts\\_Jpn.pdf](http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc_ar4_wg1_ts_Jpn.pdf), 2008 年 3 月.
- [43] Jones, R., Final Report: Definition of facilities requiring change for LH<sub>2</sub> operations, Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft—System Analysis CRYOPLANE, Task Technical Report 7-6-2, 2001 年 2 月.
- [44] Svensson, F. and Hasselrot, A., Introduction of Liquid Hydrogen-fuelled Aircraft into the Swedish Domestic Air Traffic, FOI-R-0743-SE, 2003 年 3 月.
- [45] 推進薬の威力に関する技術調査及び評価/検討 (その 6), 平成 6 年宇宙開発事業団委託業務成果報告書, 財団法人総合安全工学研究所, 平成 7 年 3 月.
- [46] 推進薬を使用した地上試験時の保安距離標準算定基準の策定について, H 17.7.11 安全審査委員会, 審議資料.
- [47] [sv.uknow.or.jp/be/science/seminar/aircraft/Riti\\_Singh\\_2.pdf](http://sv.uknow.or.jp/be/science/seminar/aircraft/Riti_Singh_2.pdf)
- [48] 岡井敬一, 野村浩司, 田頭剛, 柳良二, 航空機推進用外周駆動ファンに関する実験および解析, 日本航空宇宙学会誌論文集, Vol. 56, No. 650, pp. 131-142, 2008 年 3 月.
- [49] McMasters, J. H. and Muncy, D. L., “Smart Wings“ as an Enabler of Future Highly Efficient Subsonic Aircraft and Technical Workforce Development, AIAA 2007-1049, 2007 年 1 月.

**検討調査会開催経緯**

## 水素燃料航空機第1回検討調査会

日時：2005年6月22日（水）10:00-12:00

場所：JALビル14FS1474会議室

参加：JAXA（4名）大学（東大，日大2名）

JAL（技術部／清水副部長，運航技術部／斎藤部長，地球環境部／植木，日航財団／橋本）

## Agenda：

プレゼン1／水素燃料航空機研究の歴史と動向 日航財団 橋本

プレゼン2／現状調査状況報告 JAXA 岡井

## 水素燃料航空機第2回検討調査会

日時：2005年8月4日（木）15:00-17:00

場所：JALビル14FS1473会議室

参加：JAXA（3名）大学（東大，日大 野村）

JAL（技術部／清水副部長，運航技術部／斎藤部長，地球環境部／植木，日航財団／橋本）

## Agenda：

1. 東京大学 津江：地球大気環境に及ぼす航空機排出ガスの影響
2. 日本大学 野村：自動車用燃料電池の現状と将来
3. JAL地球環境部：JALの航空機改善の取組みとCO<sub>2</sub>排出に係るRegulation設定の世界的動向
4. JAXA 岡井：現状調査状況報告
5. 日航財団：欧州委員会FinalReportの補足

## 水素燃料航空機第3回検討調査会

日時：2005年10月17日（月）10:00-12:00

場所：JALビル14FS1473会議室

参加：JAXA（3名）大学（東大1名，日大2名）

JAL（技術部／清水副部長，運航技術部／斎藤部長，地球環境部／植木，日航財団／橋本）

## Agenda：

1. 日本大学 辻：水素インフラと貯蔵について
2. JAXA 横関：液体水素燃料タンク（複合材製）について
3. JAL地球環境部植木：EUの動向を含む等排出権取引の現況
4. JAXA 岡井：現状調査状況報告
5. 日航財団橋本：飛行機シンポジウム（10／12）講演の実施報告

## 水素燃料航空機第4回研究調査会

日時：2006年9月12日（火）10:00-11:30

場所：JALビル14FS1472会議室

参加：JAXA（4名）大学（東大1名，日大2名）

JAL（運航技術部／中尾，地球環境部／植木，日航財団／橋本）

## Agenda：

1. これまでのReview（JAXA，日航財団）
2. 水素燃料航空機の飛行解析の進め方（JAXA 岡井）
3. 4者の役割分担の確認 JAXA 岡井
4. IATAでの環境関連トピックス（JAL地球環境部）
5. 欧州調査について JAXA 岡井

## 水素燃料航空機第5回研究調査会

日時：2007年5月17日（木）10:00-12:00

場所：JALビル14FN1463会議室

参加：JAXA（4名）大学（東大1名，日大1名 辻）

JAL（技術部／近藤室長，運航技術部／中尾，地球環境部／吉田部長，植木，日航財団／橋本）

## Agenda：

1. 水素燃料航空機の飛行解析 JAXA 岡井 第一次解析結果（JAXA 西沢）
2. 航空機の折り返し時の地上作業（JAL 技術部 近藤）
3. ICAO, EU等の環境に関する国際状況（排出権取引等）（JAL 地球環境部植木）
4. 欧州調査について JAXA 岡井

## 水素燃料航空機第6回研究調査会

日時：2007年10月17日（水）15:30-17:15

場所：JALビル 25F S25B 会議室

参加：JAXA（1名）大学（東大1名，日大1名 辻）

JAL（技術部／近藤副部長，運航技術部／中尾，地球環境部／吉田部長，日航財団／橋本）

## Agenda：

1. 現状調査状況報告 JAXA 岡井
2. 翼胴結合部の構造強度について（JAL 運航技術部 中尾）
3. ボーイング社バイオフェュエル評価試験について（JAL 地球環境部 吉田）

## 水素燃料航空機検討委員会・構成員（敬称略・順不同）

津江 光洋 東京大学大学院工学系研究科 教授  
 野村 浩司 日本大学生産工学研究科 教授  
 辻 智也 日本大学生産工学研究科 教授  
 横関 智弘 東京大学大学院工学系研究科 講師  
 橋本 安男 （元）日航財団 研究開発センター（現）日本航空協会 部長／桜美林大学客員教授  
 中村 忠男 日航財団常務理事  
 酒井 道久 日航財団事務局長  
 齊藤 隆 （元）日本航空運航技術部部長（現）同社整備本部 副本部長執行役員  
 中尾 純夫 日本航空運航技術部マネジャー  
 清水 邦夫 （元）日本航空技術部技術企画室室長（現）同社米州技術・品質保証部部長  
 近藤 哲哉 日本航空技術部技術企画室室長  
 松本 泰志 （元）日本航空地球環境部部長（現）同社羽田整備事業部事業部長  
 吉田 修 （元）日本航空地球環境部部長（現）日本エアコミューター社長付部長  
 植木 好治 日本航空地球環境部マネジャー  
 西澤 啓 JAXA 評価・監査室 主査  
 岡井 敬一 JAXA 航空プログラムグループ 事業推進部 主任  
 武田 真一 JAXA 研究開発本部材料グループ 研究員  
 小林 宙 JAXA 研究開発本部流体グループ 研究員