水素航空機の研究・開発計画（その1）*

舟 津 良 行**

1. 石油の展望と代替燃料候補

石油は、1925 年ごろから本格的に採掘されはじめ、年々その産出量は増加してきたが、1990 年から 2000 年にかけて、世界の年間産油量はピークを迎え、しだいに先細りになる。全体的に見ると、1960 年ごろから 2030 年ごろまでの約 70 年間に、全産出量の 80% が採掘されてしまうという。

このような背景で、航空燃料は、石油全産出量に対してどのくらいの割合を占め、将来はどのように変化してゆくであろうか。

マクロ的に見ると、航空燃料の需要量は、将来の旅客キロ数の伸びと航空機の燃料効率によって左右される。コメットのようなジェット機が民間輸送機としてはじめて就航したころは、燃料 1 ガロンの消費で提供できる座席キロ数は、ピストン機より劣っていたが、第 1 世代のバイパス・エンジンが採用されて、この関係は逆転し、広胴機時代になって高バイパス比の第 2 世代のファン・エンジンが導入され、普及するにつれて、この燃料効率はますますよくなってきている。在来機も、新型機も、年々、燃料効率は改善され、また、効率の悪いものから良いものへと機種更新も進むが、全世界の民間輸送機フリートの平均の燃料効率は、1995 年ごろまでは、今日の代表的な広胴機の水準に到達しないであろうと予想されている。

この効率を前提にし、全世界での年間平均旅客キロ数の伸び率を 4.5% と仮定すると、1980 年の航空用の石油需要は、年間約 300 億ガロン、1995 年には約 450 億ガロンと算定され、自由諸国の石油の総産出高に対する割合は、3.5% から 3.9% くらいに増加する。

しからば、今世紀の残りの約 20 年間で 21 世紀の初頭にかけての石油の全般的な需給関係はどのようなであろうか。石油産出量の頭打ちということからくるエネルギー需給の見通しのきびしさは、IEA すなわち、国際エネルギー機関の予測にはっきりと示され

ている。すなわち、自由諸国においては、1985 年には石油換算の総エネルギー需要が 1 日当たり 1 億 2,000 万バレルであるのに対して、石油は 1 日当たり 6,000 万バレルしか供給できず、総合すると 1 日当たり 330 万バレル分不足しはじめる。

また、1990 年ごろからは、供給石油量は、1 日 6,500 万バレルで頭打ちとなり、代替エネルギーの供給が徐々に増加するにもかかわらず、石油供給不足量は、1 日 950 万バレルとなり、2000 年には、この不足量は、2,800 万バレルにも達するだろうといわれている。

このような需給のアンバランス状態がしだいに顕在化するにつれて、石油の価格が急テンポで高くなってゆくことは想像するにたたくない。しかし、この間に、技術の発達、石油との価格競争力の逆転により、各種の代替エネルギー源の開発が進み、これらを利用した代替燃料が実用化され、天然石油の王座はゆるぎはじめる。

民生用、産業用の代替エネルギーがタイミングよく出現し、実用化されてくれば、21 世紀初頭には、石油枯渇によるパニックが未然に防止され、石油価格の昂騰はおさえられるであろうが、そのころは、人類の石油への依存度は減少し、石油の価格というものは、今日ほど深刻な影響力をもたなくなっているであろう。

以上のようなエネルギー需給のマクロ的な展望において、航空業界は、これからの航空燃料を具体的にどうするかという大きな課題をかかえている。

すなわち、しだいに供給が細くなり、価格が上昇する石油への依存を継続し、競争力の強い石油化学産業を相手に、石油確保に狂奔し、コストを運賃に転嫁し、航空輸送という事業の運命を、不安定な石油の需給という変動要因の制約にゆだねてしまうか、代替のエネルギーを開発して、将来、限りない発展の可能性を確保するかの大きな選択をせまられている。

世界人口の増加、南北対立の改善、これらを支えるのに必要な活発な経済活動という必然性を認識すれば、この経済活動を可能ならしめる航空輸送の維持、成長、発展が不可欠であることは論をまたないところで、好むと好まざるにかかわらず、航空業界は早晚、

* 昭和 55 年 12 月 16 日原稿受理 Research and Development Program for Hydrogen-Fueled Aircraft (Part 1)

** 全日本空輸(株) Yoshiyuki FUNATSU

代替燃料の開発、実用化に踏みきらざるをえないという宿命をもっている。

一般的な用途のための代替エネルギーとしては、すでに石炭、原子力、天然ガス、水力が使用されており、しだいにその供給量は増加しつつある。一方、石炭のガス化、液化も1980年代後半には工業化され、90年代には、地熱発電、太陽発電、風力発電、海洋温度差発電も実用化されてくるだろうといわれている。石炭のほか、オイル・シェールやタール・サンドも液化され、人工石油が合成されるようになるであろう。

代替エネルギーの開発は、その具体化までの時間的余裕がないことから、ややもすると、技術的容易さと開発費用の多寡を尺度として手がけられるおそれがあるが、究極的には、環境に対する影響や資源の有限性と遍在性の問題が今後しだいに重要視されるにつれて、石炭やオイル・シェールのような化石資源依存のエネルギーのシェアは、その他の、よりクリーンで恒久的なエネルギーによって侵食されてくるであろう。

一方、何からエネルギーがとり出されるにせよ、これをどんな形で工場や家庭や交通機関等が利用するかということが問題である。これをきめるのは、これら消費者の使用目的への適合性であることは論をまたない。この適合性評価の判断基準のおもなものは、エネルギーが使用される機器、装置の性能、総合費用、入手難易性、対環境性、安全性などである。

交通機関のうち、鉄道など一部のものは電力の形のエネルギーが使用でき、また、これが最適であるかもしれない。しかし、船や自動車や航空機のように2次元以上の空間を運動するものにあっては、将来も輸送性のよい（いわゆる燃料のような）形のエネルギー媒体を必要とする。

以上のような制約から、航空機用の代替燃料候補を絞ってくると、原子力エンジンや電池などは、安全性、重量効果などの理由から脱落し、現在、可能性のあるものとしてあげられているものには、メチルアルコール、合成石油、液体メタン、液体水素などがある。

これらのなかで、メチルアルコールは、われわれにはなじみ深く、製造方法も確立されているが、単位重量当りの発熱量が低く、航空機用としては一般的には不適当である。

次に比較的身近で、実現性の高いのは、合成石油である。より正確に言えば、合成ジェット燃料で、今日使用されているジェットA燃料に相当するものである。これは、天然石油にくらべるとまだ多量に埋蔵されている石炭やオイル・シェールなどから直接合成法

などにより作り出される。オイル・シェールを原料とする場合は、この原料から回収した原油を精製して得られる。このための設備投資は、後述する液体メタンや液体水素とくらべて、はるかに安価ですむ。

以上のような方法で得られる合成ジェットA燃料の価格は、今日の石炭やオイル・シェールの値段では、 10^6 BTU 当り5~8ドル（ガロン当り0.6~1.1ドル、1978年ドル、以下同じ）見当だといわれており、航空機用燃料の価格としては、すでに射程距離内にある。この燃料はまだ燃焼室内での炭化物生成とか凍結点が高いという技術的難点があるものの、現在の燃料と一般特性はほとんど同じであるので、燃料が変わったために航空機に大幅な改造も必要とはならない反面、航空機の性能が改善されることは望めない。

一方、この燃料の製造、使用および原材料である石炭、オイル・シェールの探掘、加工時の残渣の処理は、環境汚染をもたらす、地球上の炭酸ガス濃度の増大を促進するという欠点と、原材料の埋蔵されている地域が限定されており、長期的に見ると天然石油と同様に、入手難と価格の昂騰というパタンに陥る危険性をもっている。

次に有望だとされているものに液体メタンがある。メタンは石炭を部分的に酸化することによって製造されるが、価格は 10^6 BTU 当り7~9ドルといわれている。石炭の代りに天然ガスを使用すれば、この価格は若干安くなり、合成ジェットA燃料とほぼ等しくなる。この燃料もアルコールと同じく、単位重量当りの発熱量は高くなく（後述の液体水素の約40%）、燃焼時には炭酸ガスを発生するので環境保護上も満足とはいえない。

メタンは水素と同様、常温では気体であり、大きな容積を占めるから航空機としては、液化しておかなければならないので、このための設備に相当の費用がかかる。

最後の候補一最も革新的な特色をもつ一は液体水素である。水素という物質は、日常生活では、風船に浮力を与えるものとして知られているにすぎないが、宇宙開発計画の展開とともに宇宙船のロケット・エンジンの主要な燃料の一つとして実用化され、そのための技術が開発されている。製造方法のうち、航空機用として考えられている代表的な方式には次の三つがある。すなわち、石炭を部分的に酸化し、水素ガスを取り出し、空港まで送って液化する。この液化には、送られてきた水素の一部を液化装置の燃料として使用する方法と、原子力発電所等から供給される電力による方式とに分けられる。3番目の方式は、水を電力によって直接分解し、採り出された水素ガスを液化する方

第1図 燃料価格と直接運航費の比較
乗客数: 400 人, 航続距離: 10,190 km, 速度: マッハ 0.85

式である。

現在の技術水準で、これらの方式で製造される液体水素の価格を 10^6 BTU 当りで示すと、石炭を部分酸化し、液化プラントの燃料に水素を使用する場合は、約 15 ドル、このプラントを原子力発電所からの電力で動かす場合は、約 11~12 ドル、最後の電気分解方式の場合は、約 21 ドルといわれている。

この価格を見ると、同一発熱量に対して、液体水素はまだ高価である。この理由のおもなものは、液体水素の製造には龐大な設備投資が必要なためである。しかし、これらの価格は、原材料の将来の価格の変動や技術の躍進によって、差が縮まったり、逆転する可能性がある。また、航空機にとってとくに重要なことは、一定の任務（輸送量、輸送距離）を達成するのに、どの燃料だと、どのくらいの量、費用が必要となるかということである。換言すれば、提供座席 km 当り必要な燃料はいくらですむかということである。この点では、単位重量当りの発熱量の高い液体水素は、きわめて有利である。たとえば、亜音速の広胴機の場合の提供座席 km 当りの必要エネルギーの量は、合成石油の場合を 1 とすると、液体水素は 0.84 で間に合い、液体メタンは、ほぼこれらの中間の値となる。超音速機の場合で比較すると、液体水素はさらに有利となり、合成石油の場合の 0.72 くらいでよいといわれている。この意味からは、液体水素の値段は、現在でもあまり高くないといえることができる（第1図参照）。

水素は、炭水化物を原料としなくても製造できる唯一の現実的な代替燃料であり、原材料の地域的遍在とか、供給の枯渇とかいう心配のいらぬ究極的な代替燃料の資格をもっている。

対環境性の点では、水素は最もクリーンな燃料といえる。水素の原材料に化石燃料を使っていれば、原材料の採掘から製造までの過程での環境汚染は、他の代

替燃料と大差ないとしても、航空機に使用されたときに出る排気ガスはほとんど水蒸気であり、窒素酸化物もすくなく、炭酸ガスはまったく発生しない。地球上の炭酸ガス濃度は、産業革命以来、不気味に増加し続けており、このまま増え続けられれば、遠からず世界の気象パタンの変化等とりかえしのつかない事態になることが予想されているので、将来の代替燃料としては、この特性は大きく評価されるべきであろう。また、後述するように、水素を燃料として使用する航空機は、他の燃料を使用する場合より、同一任務について全備重量を軽くすることができ、エンジンも小さくてすむから、超音速機の場合のソニック・ブームをふくむ飛行騒音を低くすることができるという利点がある。

水素の用途を新しい分野に展開するに際してはとくに公共輸送機関にあっては一その安全性を慎重に調査し、十分な安全対策を確立する必要があることはいうまでもないが、一般的には、現在のジェット A 燃料（合成ジェット A 燃料もほぼ同じ）よりは、液体メタンや液体水素のほうが安全性が高いと考えられている。たとえば、乗客の生死の運命の分かれるクラッシュ・ランディングの場合、水素航空機では、胴体内にとりつけられ、比較的耐圧力の高いタンクに液体水素が収容されているので、クラッシュ時に破損しやすい薄肉の主翼内のタンクに燃料を積んでいる通常の航空機より有利である。さらに、液体水素は、タンクから流出しても、気化して上空に飛び去ってしまうので、仮に引火しても燃焼持続時間は短く、焰の輻射熱もはるかに弱く、火災による危険区域も小さい。また、不完全燃焼状態での一酸化炭素のような有害な成分も発生しない。しかし、水素ガスは稀薄な空気混合比でも、わずかなエネルギーでも引火するから、燃料系統は十分な安全対策をとり入れ、慎重に設計されなければならないので、若干の重量ペナルティがともなうのはさけられない。

2. 水素航空機の特性

航空機メーカーのなかで水素航空機をふくむ代替燃料使用航空機の開発に最も熱心なのはロッキード社で、これまでに各種の代替燃料を使用した場合の航空機の概念設計を行ない、その特性を比較、検討してきた。その結果を亜音速機と超音速機について要約すると次のとおりである。

亜音速機としては、400人の乗客（有償荷重 40 トン）をのせ、マッハ 0.85 の巡航速度で 10,190 キロメートル（5,500 海里）まで飛べる 4 発広胴機を例にとり、1990 年代には実用化が可能と考えられる新技術、すなわち、新しい翼型、動翼荷重補償装置、複合

材料や新しいエンジン技術を取り入れたもので（第2図参照）特性を算出している。この結果を第1表に示す。

さらに、液体水素の場合、タンク内に貯蔵される燃料が極低温であることを利用して翼表面とか胴体外皮を冷却することにより、気流の境界層制御が実現できる可能性がある。この革新的技術が具体化されれば、水素航空機の特性はもっと魅力的なものとなる。たとえば、液体水素の極低温性を利用して境界層制御が実現すれば、第1表の数値のなかで、全備重量は 7.5%、所要区間燃料は 29%、直接運航費は 21%、それぞれ減少するという。

超音速機での検討の結果も、水素航空機の性能がき

第2図 亜音速水素航空機

乗客数：400人、航続距離：10,190 km (5,500 カイリ)、速度：マッハ 0.85

第1表 代替燃料航空機の性能比較（亜音速機）

(Comparison of Liquid-Hydrogen, Liquid-Methane, and Synjet Fueled Aircraft-Based on 400-Passenger, Mach 0.85, 5,500-nm-Range Transport)

		LH ₂	LCH ₄	Synjet
Gross WT	lb	372,200	501,000	511,600
Block fuel	lb	47,670	131,520	159,900
Oew	lb	227,750	258,400	236,700
Wing area	ft ²	3,195	4,175	4,093
Span	ft	170	194	192
Fuselage length	ft	215.6	201.3	197
SFC (cruise)	lb/hr/lb	0.202	0.493	0.603
$\frac{L}{D}$ (cruise)		17.4	19.09	19.13
Thrust per engine	lb	30,350	39,800	41,600
Price	\$million	43.39	48.44	44.53
Noise, sideline flyover	EPN dB	87.2	N.A.	87.8
	EPN dB	89.2	N.A.	94.2
Emissions		H ₂ O, NO _x	CO _x , SO _x , NO _x , HC, smoke, H ₂ O	CO _x , SO _x , NO _x , HC, smoke, H ₂ O

第3図 超音速水素航空機

乗客数: 234 人, 航続距離: 7,780 km (4,200 カイリ), 速度: マッハ 2.7

第2表 超音速機の性能比較 (Comparison of Liquid-Hydrogen and Jet a Fueled Supersonic Aircraft-Based on 234-Passenger, Mach 2.7, 4,200-nm-Range Transport)

		LH ₂	JET A	Ratio JET A LH ₂
Gross weight	lb	394,900	762,200	1.93
Operating empty weight	lb	245,200	317,400	1.29
Block fuel weight	lb	85,390	330,590	3.88
Thrust per engine	lb	52,820	86,890	1.64
Wing area	ft ²	7,952	11,094	1.39
Span	ft	113	133.5	1.18
Fuselage length	ft	340.2	297	0.87
Field length required	ft	7,800	9,490	1.22
Lift/draze (cruise)	—	7.42	8.65	1.17
Specific fuel consumption (cruise)	lb/hr/lb	0.575	1.501	2.61
Aircraft price	\$10 ⁶	45.5	61.5	1.35
Energy utilization	BTU seat nm	4,483	6,189	1.38
Noise: sideline	EPNdB	104.0	108.0	—
flyover	EPNdB	102.2	108.0	—
Sonic boom overpressure	lb/ft ²	1.32	1.87	1.41

わめてよくなることが知られている。比較に用いられた概念設計 (第3図および第2表参照) の超音速機は4発で234人の乗客をのせ、7,780 キロメートル (4,200 海里) をマッハ2.7くらいの巡航速度で飛ぶもので、そのおもな特性を第2表に示す。

この表を見てまず気がつくのは、同一任務を達成するのに、水素航空機の全備重量は、合成ジェットA燃料を使う場合の約半分で足りるということである。燃料消費率も所要区間燃料もかなりすくないことから、直接運航費も水素航空機のほうが有利であることがわ

かる。また、超音速機の泣きどころのソニック・ブームを含む飛行騒音は、水素航空機の場合は、大幅に低くなっている。

この特性は、いわゆる超々音速機にも当てはまる。超々音速機は、スピードが超音速機の倍以上であるばかりでなく、いまの超音速機よりはるかに高い巡航高度を飛ぶことにより、ソニック・ブームの影響が大幅に緩和され、現在の超音速機より自由な空域で効率的な高速飛行が可能になるという期待もある。

超音速機や超々音速機にあっては、高速飛行の際に

空気との摩擦によって、多量の摩擦熱が発生し、機体構造の強度、機能や乗客、乗員への影響が大きな問題となっているが、前述の液体水素の極低温性を利用すれば、機体表面を効率的に冷却することも夢ではなくなる。

以上のような特性を評価すると、液体水素が航空機用の代替燃料として最も有望な候補であるといえる。

3. 水素航空機実現への道

航空機用燃料の切換えの必要性が認識され、各種代替燃料の候補が出揃い、その特性もわかってくると、次にどういう段取りでこの切換えを実現するかということが最大の関心事となってくる。このことは、ねずみが猫の首に鈴をつけようとするのと同様、いちばんの難事業であり、まだ一般に認知された具体的な展開計画は見当たらない。これは、天然石油を含む化石燃料資源の価格、供給見通しなどが必ずしも明らかでないことと、使用者である航空会社、航空機メーカー等の合意がまだないことなどが大きな原因であり、加うるに国によって事情もことなり、関係する諸機関のおもわく、切迫感の相違もこの背景となっているように思われる。

いずれにせよ、航空業界全体での真剣な検討と思想統一が必要であり、また、その時機も熟しつつあると考えられる。

このような状況のもとに、あえて展開計画のためのガイドラインをあげてみれば次のようなものとなるであろう。

これから当分の間、航空輸送の中心を占めるのは、いわゆる狭胴機と広胴機とであるが、狭胴機は、比較的短距離を飛ぶことと、液体水素タンクを収容するには胴体が細すぎるため、燃料切換えが必要となってから当分は合成ジェットA燃料を使用せざるをえないで

あろう。現在の狭胴機の消費する燃料の割合は、全体の3/4近くを占めているが、1995年ごろには、逆転して全体の1/4に減少すると予想されるので、将来の航空輸送に占める狭胴機の燃料問題の比重は小さなものになる。また、狭胴機のための寄航する多数の空港に水素液化設備を設けることも現実的ではない。

一方、これからますます占有率の増大する広胴機、とくに長距離用のものは、なるべく早い切換えが望ましく、1995～2000年ごろからの就航開始、20～30年間をかけて全体の入れかえを目指して、1985年ごろから、いわゆるサービス・テストを開始するくらいのテンポが妥当ではないかと思われる(第4,5図参照)。この間には、既存の空港施設、航空機を最大限に利用するために合成ジェットA燃料が過渡的な代替燃料として30～40年間、使用されるであろう。

最も理想的な液体水素という代替燃料をタイミングよく導入するためには、航空業界その他の関係者の合意をひろく求めなければならないが、そのためにはすべての関係者に水素航空機や空港施設等の安全性、信頼性、耐久性、整備性や経済性が期待どおりのものであることをわかりやすく実証してみせる必要がある。

第4図 航空用燃料の変遷
斜線部は合成ジェット燃料(合成石油と液体水素)が共用される期間を示す

第5図 新輸送機ライフサイクルと石油供給量との関係

4. 研究・開発計画の提案

前述の代替燃料の具体化をすすめるため、水素航空機や空港施設や製造施設の安全性等の実証についての計画が昨年の7月に提起されているので、その趣旨と内容を以下解説しよう。

この開発計画の提案をのべるまえに、この計画がまとめられ、推進されるに至った背景をまず説明する。

第2次オイルショック以来、石油の枯渇と価格の暴騰への危惧が急速に増大し、代替エネルギー開発が世界的に本格化されるなかで、民間輸送を中心とする航空はどんな代替燃料に、どのようにして転換すべきかという点に関心が高まってきた。このような環境下で、各種の代替燃料候補につきいろいろな機関で調査、研究が行なわれ、その結果として、液体水素が有望であるという声がしばしば聞かれるようになり、液体水素を航空燃料として使用する構想につき、国際的規模で意見交換を行ない、関連分野の展望を総合、集約すべきだという要望が強くなってきた。この要請をうけて、1979年秋、西ドイツの航空宇宙研究所がスポンサーとなり、スツットガルトにおいて液体水素を航空機に使用する構想と展望に関するシンポジウムを開催した。

このシンポジウムには、14カ国の航空機、エンジンメーカー、航空会社、空港管理当局、設計者および研究所を代表する人々が出席し、多くの政府および国際エネルギー機関の代表者とともに、情報を交換し、将来への展望を論議し合った。このシンポジウムが到達した結論は、運用上および費用面の問題をさらに煮詰め、安全性をわかりやすく立証することができれば、液体水素こそ、これからの航空機の代替燃料として最も有望なものとなるということであった。

以上の結論が得られたので、閉会に当たり、当該シンポジウムは、各国がこれからエネルギー危機を乗り切るのにどうするかを検討し、航空輸送業界がどの代替燃料をえらぶかを考慮するとき、液体水素が最も有望な候補であることを示すための研究、開発計画を策定し、国際的な理解、支援を促進するために特別委員会 (Ad Hoc Executive Group, 略して AHEG) を設置した (第3表参照)。

この特別委員会は、第3表に見るとおり、政府機関、大学、研究所、航空機メーカー、航空会社、液化ガス会社の関係者で構成されて、当面、年2回くらいの頻度で会合をもち、委員会設置の趣旨をすすめることになった。

具体的に作業を進めるため、この特別委員会は、アメリカ、カナダ、フランスからの7名の専門家よりな

第3表 特別委員会メンバー (Membership of the "Hydrogen in Air Transportation" Ad Hoc Executive Group)

W. M. HAWKINS, Chairman	Lockheed Corporation, USA
Mohamed Baker AMIN	University of Petroleum & Minerals, Saudi Arabia
E. E. ECKLUND	Department of Energy, USA
Yosiyuki FUNATSU	All Nippon Airways, Japan
Neil GORE	Department of Transport, Canada
F. J. PLENARD	L'Air Liquide, France
E. SIMON	Lufthansa, West Germany
A. S. STRUB	Commission of the European Communities, Belgium
K. WILKINSON	British Airways, England
C. J. WINTER	DFVLR (Stuttgart), West Germany

G. G. KAYTEN, NASA headquarters, USA was a charter member of the group and participated in early considerations of the program but resigned in April 1980.

る作業部会を編成し、水素航空機の実現にまず必要な技術の研究、開発の計画案を作成してもらい、昨年の4月までに数回にわたって検討を重ねて、この研究、開発計画の最終版をとりまとめた。この計画は、水素を航空機に使用するための技術の開発に関するものであり、その完遂には、約3カ年の日月と、合計約7,400万ドルの費用がかかるものと推定されている (第6図参照)。この段階の計画には実験航空会社による試験運航計画はふくまれていないが、この第2段階の試験運航計画の要件は、前述の第1段階の研究、開発の計画が展開されるなかで具体化されるとしている。

特別委員会によってまとめられ、提案されているこの計画は、シンポジウムに出席した代表や特別委員会の委員の所属する国により公式に承認されたものではなく、当該委員会の委員が、本計画にもられた研究、開発業務のいくつかを実施する能力と意欲のある国の組織、機関と検討をすすめるための基礎を提供することを意図したものである。この検討を通じて、諸国での関心をたかめ、計画推進の支援を確保することが期待されている。もし、諸国の関心と支援が得られるようになったならば、データの交換を円滑にし、関与する国々の研究、開発計画を調整するために、経済協力開発機構 (Organization of Economic Cooperation and Development: OECD) の国際エネルギー機関 (International Energy Agency: IEA) の後援を期待する。しかし、この後援は絶対的なものではなく、公式な国際的な調整機構の力をかりなくても、研究、開発計画は、各国が独自に行なうこともできるし、数カ国が共同して行なうこともできるので、本計画の提示は有意義なものと考えられる。

PROGRAM TASKS	Calendar Year			Level-of-Effort Funding \$Million
	1981	1982	1983	
A. Aircraft and Engine Studies				
1. Adv. LH ₂ Eng. Design Study				0.30
2. LH ₂ Use Initiation Study				0.25
3. Societal Impact Study				0.25
4. Airport Requirements				0.40
a. GSE and Ramp Ops.				0.075
b. Airport Power Gen. Study				0.100
c. Hanger Design for Safety				0.050
d. Model Air Terminal Design				0.175
5. Crash Safety and Hazard Anal.				0.20
6. Materials Investigation				0.10
Subtotals (\$ Million)	0.79	0.34	0.37	1.50
B. Aircraft and Engine Development				
1. LFC by Wall Cooling				0.30
2. Tank Insulation Cover Develop.				0.25
3. Aircraft Tank Fabrication and Test				4.00
4. Pump Development				3.00
5. Engine Fuel System Develop.				1.00
6. Aircraft Subsystem Develop.				1.00
7. Engine Technology Develop.				18.00
a. Heat Exchangers				2.00
b. Combustor experiments				1.50
c. Cooled turbine component develop.				3.00
d. Fuel Control System develop.				1.50
e. Engine Conversion				10.00
8. Aircraft Fuel System Tests				1.50
9. Crash Safety and Fire Hazard Tests				2.30
a. Passenger hazard in cabin				0.30
b. Characteristics of Fuel Fires				0.50
c. Surplus aircraft crash tests				1.50
Subtotals (\$ Million)	3.87	15.54	11.94	31.35
C. Hydrogen Production and Ground Facilities				
1. H ₂ Production Process Evaluations				0.25
2. Alternate Fuel Comparisons				0.75
3. Pilot Plant Development				25.00*
4. Liquefaction Process Develop.				12.00
5. Air Terminal Component Develop.				2.75
a. Pumps				1.50
b. Valves				0.75
c. Sensors				0.30
d. Flow control system				0.20
Subtotals (\$ Million)	4.25	18.38	18.12	40.75
Totals (\$ Million)	8.91	34.26	30.43	73.6

第6図 研究開発計画のスケジュールと費用概算

提案された計画の個々のテーマにはいるまえに、これらテーマの性格についてのべてみたい。テーマの大半においては、これらの研究、開発によって得られるデータは、代替燃料として使用する液体水素の有用性をさらに効率的にするばかりでなく、航空機および関連施設の設計に対して実用的な資料を提供する。また、いくつかのテーマは、新技術の開発における技術者の独善に対する大衆の不信を打破するために、技術的成果を現実的な環境で実証して見せるということを目的としている。したがって、この計画には、航空機が万一墜落した場合の液体水素タンクがどうなるかという大規模な実験や水素の製造と液化のプロセスを実証するパイロット・プラントの運用がふくまれており、一般の不信感解消と同時に多くの技術的問題の解決や費用の見通しが得られるものと期待されている。

以上のほか、実証という見地から、大きな意義をもつものとしては、飛行用のタンクと燃料系統の構成要素を取り入れた運転可能な動力装置を含む完全な航空機燃料系統の静的（地上）試験がある。

この計画の各テーマは次の三つの大項目に分類することができる。

- A. 航空機とエンジンの研究
- B. 航空機とエンジンの技術開発
- C. 水素製造および地上施設の技術開発

以下、各テーマごとに、テーマとしてとりあげる理由やスケジュールや費用概算を記載する。各テーマの費用は、研究が1カ所で行なわれる場合のもので、数カ国が別々に同一テーマの研究が行なわれる場合は、それぞれの場所で行なわれる同一の研究にほぼ同額の費用が発生するものと考えられる。

A. 航空機とエンジンの研究

A 1. 新しい液体水素エンジンの設計研究 (30 万ドル, 12 カ月) このテーマでは、いままでより、より総合的な設計研究を行なって、従来より広い範囲にわたり、より深く水素エンジンの設計の可能性を調査することが提案されている。この研究の目的とするところは次のとおりである。

- 考慮されている飛行機の設計要件に合致する新しい、静かな、無公害の液体水素エンジンの設計法、性能特性を確立する。サイズ、重量、サイクル特性、性能、推定コストおよび縮尺効果等を明らかにする。この調査は、比較のため、同等の技術水準でジェット A 燃料を使用するエンジンの特性も調査する。
- 主要な構成要素、すなわち、高圧ポンプ、熱交換器、燃焼器、騒音抑制装置、エンジン制御装置、圧縮機、ファン、タービンおよび冷却系統の基本的な設計要件を確立し、材料を選定する。
- エンジン技術開発計画（後出）に必要なデータを集める。
- 現用エンジンを水素エンジンに改造するための現実的な改造設計要領を確立する。
- 水素エンジンの型式証明のための特別要件を決定する。
- 2 種類の燃料をエンジンに供給できる機能が必要かどうか、またこの場合には性能上、どんな制約ができるかを明らかにする。この調査の目的は、水素航空機が水素を供給する設備のない空港に不時着を余儀なくされた場合への配慮である。

この研究は、主導的立場にあるエンジン・メーカーによって実施されることが望ましいが、徹底を期するには、数力所で同時にこの研究がすすめられることがのぞましい。

A 2. 液体水素導入の戦略 (25 万ドル, 24 カ月)

この研究は、液体水素をいかに航空業界に導入するかということを取り扱う。この転換には長い年月を要し、液体水素が導入されてからも、旧式機は長期間にわたり、引き続いてジェット A 燃料または合成石油を使用することになり、燃料切換え期間中は、多くの空港では 2 種類の燃料を供給しなければならないと考えられる。このような展望のなかで問題となることは、このような変革をもたらすのに経済的にも、運用上からも最も受け入れやすい方法とはどんなものかということである。

空港ごとに配慮しなければならない要因は次のようなものである。

- 航空会社の接続と路線構造
- 輸送需要
- 当該空港を使用する航空機の大きさと航続距離
- 初期に液体水素に転換する見通しのある国々への国際線接続

この研究から期待される成果としては、次のようなものがある：

- 各国の空港に液化水素の施設を展開するための現実的な計画
- 各国の主要な空港での燃料所要量、コストおよび考えられる資金調達の方法
- 解決を要する主要な問題

この研究は、“シンク・タンク”的な機関によって実施されるのが最も妥当であろう。研究を受託した機関は、IATA や ICAO のような国際民間航空機関や開発参加国の民間航空の各組織の協力を必要とする。

A 3. 社会的影響の研究 (25 万ドル, 18 カ月) 液体水素の使用から得られる多くの恩恵にもかかわらず、民間航空輸送業界の多くの分野は、現在のところ、従来の石油系燃料体系から水素燃料体系へ移行するには、桁外れに大きな困難が予想されるので水素航空機の導入には消極的である。事実、現在の燃料供給体制を消滅させ、旧式となる多数の飛行機を引退させ、まったく新しい燃料流通の内部構造を作り上げるための苦しみと経済的負担がきわめて大きいので、航空業界は、しばしば漸減する石油の供給に対して、航空は最高の優先権が認められるべきと訴え、しだいに悪化の一途をたどる石油供給情勢に対応している。しかしながら、不幸にして、ほとんどすべての航空以外の業界も同じ意見をもっている。他の業界のあるものは、伝統的により高い優先権をもっているか、より高い投資収益性をもっており、石油製品をより高い価格で購入することができるので、航空業界の主張は弱いといわざるをえない。したがって、航空業界が燃料の切換えの決断をすべき時期は目前に迫っている。

しかしながら、この決断に必要な水素航空機の実現性に対する技術的理解は、これまでの理論的解析と小規模な実験によって深まりつつある一方、経済的、社会的、制度的な過程を含む転換の動的影響は、せいぜい直観的な水準でしか理解されていない。

したがって、航空業界が最新の、総合的な情報にもとづいて、燃料切換えという重大な決断が下せるように、水素への転換についての現実的なシナリオをまとめることが必要である。このシナリオでは、経済的影響、制度的障壁および下記のものをふくむすべての主要な関係者のグループの総合的メリット、デメリットを考慮に入れてできるだけ多くの恩恵と便宜が得られる

ように配慮すべきである。

- 航空会社
- 航空機, エンジン・メーカー
- 燃料供給業者
- 作業者
- 空港管理者
- 旅客
- 影響をうける一般住民

この研究の成果の一つとして前述のシナリオがまとめられれば、水素導入についてそれぞれの分野で決断を行なう人々は、水素導入から得られる恩恵やその他の関連する利害を評価する場合の具体的な、共通の出发点をもつことになる。

このテーマの取組み方は、各種の刊行物などから利害関係者のかかえる問題、考え方および態度を認識し、さらにこれら関係者のグループで決断を下すのに影響力のある人々と直接面接し、この認識を深め、これをもとに技術的データを折り込んで、各関係者への影響、役割りを明瞭に記述した燃料切換えのシナリオの草稿を作り出すことになる。この草稿ができあがったならば、各関係者に配布して、反応をたしかめ、シナリオの決定版を作成することになる。

この研究は、テーマA2の場合と同様に、真摯で偏見のない“シンクタンク”的な機関に委託して行なうことが望ましい。

A 4. 空港の必要要件 (40万ドル, 18カ月) これまでにすでに主要な空港が水素航空機に適切なサービシングを行なうための基本的な必要要件を確立するための研究が行なわれている。これらの研究——一つはロッキードのもの、もう一つはボーイングのもの——では、解決すべき多くの問題を提起しているが、次にかかげるものは、優先的に検討される価値のある項目である：

A 4 a) 地上支援器材とランプ作業の解析 このテーマは、水素航空機に対する地上支援器械の必要要件とランプ作業についての詳細な研究であるが、機体のまわりでの支援器材の移動軌跡や固定式エプロン・サービス用結合ポイントや乗客およびギャレー用車両の必要要件やそれらの停止位置や運用上の問題点の明確化がふくまれる。また、燃料補給と同時に実施できる他のサービシング作業も明確にされるであろう。

A 4 b) 空港動力発生装置の研究 外部からの電力供給にたよらないで、空港敷地内で、自給自足の能力によって水素液化装置を運転することができるかどうかを研究する。この研究では、空港を一つの独立したあるいは孤立した体系としてとらえ、水素ガスを一般の空港施設の動力として使用する 場合の検討を含

め、空港および燃料系統全体のエネルギー所要量や供給系統の最適化を考慮する。

A 4 c) 格納庫等の安全設計 このテーマでは、航空機の整備場の建物 (格納庫, ショップ等) の必要要件、とくに安全対策の解析が行なわれる。このなかで、新しい燃料と空港建物規則とのかかわり合いなども解析される。

A 4 d) 空港ターミナルのモデル設計 新燃料を使用する輸送機のターミナルにおける運用の最適化を追求するため、何種類かの新しい空港設計の研究を行なう。これまでに行なわれた研究によれば、現在の空港で採用されている手順や要領は手直しすれば水素航空機にも応用することが可能であるが、最大限の効率を確保するためには、水素航空機の地上取扱いは、まったく新しい視野から確立することが望ましい。

この研究は、航空会社が給油ゲートを専用で使用しないで、他社と共用することから得られる費用節減効果の調査を含む。

前述のA 4 a) は、航空会社が液体水素の特性に関する知識に乏しいコンサルタントの支援をうけて行ない、A 4 b), A 4 c), A 4 d) は、必要に応じて水素液化会社の支援をうけて、空港設計/建設会社が行なうのが妥当であろう。

A 5. 墜落時の安全と危険性の研究 (20万ドル, 12カ月) 典型的な水素航空機の設計において、a) 設計改善を行なうべき分野、b) 補償機能、警報系統、危険回避装置、緊急脱出の考え方および燃料が漏れた場合の対策などを確立するための総合的な安全特性の解析を行なう。

液体水素と現用のジェットA燃料を使う同じ大きさの代表的な輸送機の飛行間および地上において考えられる故障の様態を解析する。必要に応じて事故例の解析を行なって研究の補足を行なう。これらの研究の目的は次のとおりである：

- 飛行間および地上でのさまざまな事故の可能性を解析することにより前述の2種類の燃料を使う輸送機で予想される故障の様態およびその影響を調査する。たとえば、静電気による火災の可能性を明らかにし、この危険を排除する方法の効果を検討する。
- 耐空性監督官庁と協力して水素航空機の型式証明に必要な安全性または危険度の立証方法を確立する。
- 事故に付随する火災などの危険にかかわる試験方法を確立するためのデータを提供する。

NASA のルイス研究所は、前述の目的を達成するための研究の委託先としてすでにアメリカの航空機メ

ーカー2社を選定している。

A 6. 材料の調査 (10万ドル, 12カ月) 水素と、これと偶然または設計に従って接触することのある材料の共存性は、空中にあるときおよび地上にあるときのすべての構成要素と構成装置について確認されなければならない。航空機の各系統とそのサービシング装置について、水素は種々の材料との間に一般的には適切な共存性があることが知られているが、新しい材料やまだ十分解明されていない水素の運用範囲についての応用研究が必要となろう。この項の研究では、金属と非金属材料の両分野の広範囲の温度領域、すなわ

ち、水素のおかれている状態に応じて極低温と外気温度と高温域における研究が必要となる。

この研究では、とくに極低温における特性および水素脆性特性についての材料設計データの更新のために系統的、継続的努力が必要となる。

極低温と水素脆性の金属学的研究に経験の深い機関がこの研究を受託することが望ましい。また極低温まで冷却された翼構造の疲労解析について適切な設計上の情報を確保するためには、主要な機体メーカーがこの研究に参画することが必要であろう。

(つづく)

===== 告 =====

国際会議のお知らせ

1. 6th IFAC SYMPOSIUM ON IDENTIFICATION & SYSTEM PARAMETER ESTIMATION

日時: 1982年6月7日～11日

場所: Washington, D. C. USA

2. FIRST ANNOUNCEMENT AND CALL FOR PAPERS IFAC SYMPOSIUM ON COMPUTER AIDED DESIGN OF MULTIVARIABLE TECHNOLOGICAL SYSTEMS

日時: 1982年9月15日～17日

場所: Purdue University West Lafayette, Indiana

(USA)

アブストラクト締切日: 1981年12月1日

3. IFAC/IFIP/IFORS/IEA CONFERENCE ON ANALYSIS, DESIGN, AND EVALUATION OF MAN-MACHINE SYSTEMS

日時: 1982年9月27日～29日

場所: Baden-Baden, Fed. Rep. of Germany.

アブストラクト締切日: 1981年10月15日

上記3件の問い合わせ先: 日本航空宇宙学会

〒105 東京都港区新橋 1-18-2 航空会館分館

TEL (03) 501-0463