

## ■ 展 望 ■

## 水素航空機の展望

Prospect of Hydrogen-fueled Aircraft

舟津良行\*  
Yoshiyuki Funatsu

## 1 地球の危機

我々の住む地球は、日一日と深刻な局面に近づきつつある。文明の発達した現在、深刻な危機感をおぼえる問題がいくつもあるということは、まことに奇異な感じがするが、我々が毎日、大きな恩恵をうけている文明そのものが地球の危機を引起している原因そのものであるということは皮肉なことである。

危機感をおぼえる大きな問題の双壁の一つは、石油などの化石資源がやがて——余り遠くない将来に——涸渇してしまうということと、もう一つは、地球の環境破壊が進んでおり、このままのペースが継続されると、近い将来に取りかえしのつかない破局に立到してしまうということと、両者とも、拱手傍観してはおれない共通の性格をもっている。

過去、数十年間にわたって、世界の経済がエネルギー源として大きく依存してきた石油の供給に暗い影がさして、代替エネルギーの問題が世界各国の最重要課題の一つとして取上げられるようになって既に10年近くになる。

石油の全世界生産量は、1990年から2000年にかけてピークを迎え、それ以後は次第に先細りになることは、多くの専門家の予測するところであり、この間に石油の価格が、どこまで高騰するか予想することもむずかしい。従って、石油が涸渇するより大分前に、世界の殆んどどの国々では、その国の経済を支えるための主要なエネルギー源として石油を考えることはできなくなってしまう。

加うるに、主な石油産出国をめぐる国際情勢はきわめて不安定で、いつ大規模な戦火が勃発して、石油の供給が途絶しても不思議ではないような現状である。現に、イランとイラクの間の戦争状態は1年以上も続いており、数十隻のタンカーは港外に敷設された機雷

のため、航行不能となっている。

一方、世界の人口は、年2%近くの割合で増加しつづけており、現在、約40億の人口は、控え目に見ても2000年には60億になり、この人口を養うための所要エネルギー量は、人口増加の割合をはるかに上回る割合で増加することが予測されている。

従って、省エネの努力の効果は決してすくなくないものの、代替エネルギー、代替燃料への転換の実現までの時間の余裕は殆んどないと考えられる。しかも、問題なのは時間だけでなく、世界の国々では、既に多額の資金を現在のエネルギーシステムに投資しており、早晚、不可避となるエネルギー転換に要する研究、開発費や実際に転換する場合に要する莫大な設備投資にまわす資金の調達も容易なことではない。

人類が今、直面しているもう一つの大きな問題は、一步一步、破局への道を進んでいる地球環境である。人の生活環境をおびやかす要因には色々なものがある。なかでも、騒音、有毒物質等の問題はよく知られており、それぞれ、対策がとられている。ところが、これまで余り問題にされなかったけれども、刻々と地球の環境を破局に近づけてきているものがある。それは、まだ野放しにされている地表の炭酸ガス濃度の増加である。

今年の元日の新聞の第一面のトップに、我が国の自然保護議員連盟が、米ソなどの主要国の首脳に、地球の危機を救おうという“地球防衛”要請の電報を打った事を報じていたのに気を留められた読者も決してすくなくないと思う。

このメッセージの一部を引用すると、「……森林破壊による砂漠化の拡大、炭酸ガス増大による気象変化などが、このまま続けば、21世紀には、地球の全生態系の2割に当たる約200万の種が絶滅にさらされる …」とある。

昔は、自然界の発生する炭酸ガスは、森林や海洋に

\* 全日本空輸機専務取締役総合安全推進委員会委員長

〒144 東京都大田区羽田空港 1-6-6

吸収され、その濃度は程よく均衡していたが、産業革命以後、工業化が進み、この自然の均衡は破れ、地表の炭酸ガスの濃度は増加しつづけている。1860年には約 290 ppm だった濃度は、現在では約 330 ppm となっており、年々、増加しつづけている。

人類の諸活動のたえまない拡大のため、炭酸ガスの発生のペースは、年に約 4.3% の割合で増加しつづけるといわれ、このままでは、2025~30 年頃には、炭酸ガスの濃度は現在の 2 倍に達してしまうであろう。

このように炭酸ガスの濃度が急ピッチで増大すると、炭酸ガスの温室効果というものにより、地表近くの大気温度は上昇する。炭酸ガスの濃度が現在の 2 倍になると、地表の平均大気温度は 2℃ 前後、北極や南極のように緯度の高い地域では 7℃ 以上も暖かくなるという。

こうなると世界中の気象のパターンは大巾に変化し、農業、漁業、水利システムなどが根本的にぐらつき、極の氷冠がとけて、海面の水位が上がり、世界の殆どどの主要都市は海没してしまう。

また、炭酸ガスの濃度が増大すると、動植物や人工施設などに有害な酸性雨が多くなるというおまけまでつく。

このような重大な影響を及ぼす炭酸ガス濃度の増大はどのようなプロセスで行われているのであろうか？

人類の殆どどの活動はエネルギーを消費する(勿論、厳密に言えば、エネルギーは仕事をする能力が低下するだけで決して増減することはないが、ここでは慣習的な表現に従う)が、このエネルギーの抽出、輸送及び使用の段階(燃料を燃焼する時)などで各種の排気ガスと共に炭酸ガスを排出する。化石資源以外の物質から合成した燃料でも、分子の構成元素に炭素をもつものは、燃焼の過程で炭酸ガスを発生する。

一方、自然界で炭酸ガスは海洋や森林によって吸収されているが、森林は焼畑農耕や乱開発のおかげで、毎分 10ヘクタールの割合で失われ、2000 年には砂漠が 20% も拡大すると予測されている。従って、自然界が炭酸ガスを吸収する力も弱ってきているので、これらが両々相俟って炭酸ガス濃度増大に拍車をかけているわけである。

これらの二つの頭のいたい問題は一朝一夕に解決できるものではないが、前述の破局が刻々と迫っていることを考えると、少くとも今世紀の人類が賢明にしてタイムリーな解決の段取りをはっきり打出すことが要請される。

## 2 水素社会

前述のような危機を背景に、人類はどんな対応をしようとしているのであろうか？石油の涸渇という宿命に対しては、まだまだ無盡蔵と思われる程、多量に埋蔵されている石炭やオイルシェールなどの利用がまず考えられるであろう。しかし、これらは結局、石油と同様に有限であり、その埋蔵されている地域も偏在しており、環境に与える悪環境も大きく、早晚、石油と同じ運命を辿ることは明らかである。従って、これらは過渡期的には利用されることになるとしても、究極的には、無盡蔵か更生可能な資源、もしくはこれに近いもので、対環境性のよいものが必要となってくる。この条件で、石油、石炭のような 1 次エネルギーに代りうるものには、水力電気や核反応による電力や熱などがある。これらのほか、太陽エネルギーや地熱や風力や潮力も利用できる。

これらの 1 次エネルギーがどのような形の媒体を通じて各種の用途に使用されるかということは、代替エネルギーのシナリオでの第 2 の問題である。エネルギー媒体は、それぞれの用途にとって最も効率的なものでなければならない。また、これらの使用が環境に悪影響を与えるものであってはならない。

このようなことから、将来のエネルギー媒体は、電力と水素が理想的であるという考えがある。この構想によれば、無盡蔵か、それに近い資源から 1 次エネルギーをとり出し、これを石炭のガス化、水の電気分解、光合成、熱化学反応などにより水素をつくり、これをそれぞれの用途に応じてガスのまま、高圧ガス状、又は液化してそれぞれの使用者のもとに運搬する。使用者が電力を必要とする場合は、これを燃料電池により水素からとり出すことができる。

かくすることにより、その製造過程においても、使用段階においても、環境に与える悪影響を最少限にすることができる。このようなエネルギー社会を水素社会と呼ぶ。

水素というものは、これまでのところ、一般には馴染みのすくない物質であるが、特殊な分野では可成り昔から使用され、基本的な技術は既に確立されているといえる。華々しい宇宙開発のほか、肥料の製造や石油の精製などにも使われてきている。交通機関としては、第 1 次世界大戦前後に飛行船に浮揚力を与えるために使用されたことはあるが、燃料としては、アメリカや西ドイツで小さなスケールで、水素化物という形

で実験的に自動車に使われている程度である。

しかしながら、水素はこれまでの調査、研究、実用経験から用途によっては安全性、コストを含めて将来の主要エネルギー媒体としての資格が充分あることが確認されている。

水素社会が今後、どんな過程をへて実現されるかということは、まだ断定的にのべることはむずかしいが、国によっては水素社会実現のための代替エネルギー転換のシナリオを具体的に描き出しているところがある。

最近、カナダ議会の下院の超党派の代替エネルギー委員会がとりまとめた大部の報告書がこの一例である。用途、地域特性により色々なエネルギー資源、エネルギー媒体のミックスが継続することを認めながら、新しい時代の主要なエネルギー源は、公害が殆んどなく、どの地域でも無盡蔵にある資源を利用し、各種のプロセスで水素を製造し、これをそれぞれの用途に応じて利用しやすい形のエネルギー媒体に転換するという構想で、このための方策、勧告などをまとめたものである。

カナダは、石油等の化石燃料、水力、森林のようなエネルギー資源については非常に恵まれた国であるのに、他国にさきがけて何故このような革新的な代替エネルギー転換シナリオを国会の機関というレベルでとりまとめたのであろうか？

その理由は、第一に、次の世紀にはおそるべき公害問題をひきおこす可能性のあるエネルギーサイクル——特に石炭が主要な代替エネルギー源とされた場合——をたちきり、第二に、まだ残っている化石資源を石油化学製品のような非エネルギー用途のためにできるだけ長く保存しようというものである。また、無視してはならない動機は、世界の代替エネルギーの行方が

まだ混沌としている間に、他の国々より水素社会実現の技術において10年から20年のリードをとり、新しいエネルギー社会での主導権を握ろうという狙いである。

### 3 水素航空機

究極的に水素社会が実現するまでの過程では、石炭等を液化してつくる合成燃料が使われることが予想される。この種の燃料で航空機用のものは通常、合成ジェットA燃料と呼ばれ、その特性は現在、使われているケロシン系のジェット燃料と殆んど変わらない。従って、飛行機そのものや給油施設を新たに開発し、巨大な投資をする必要はなく、転換は容易である。そのかわり、燃料が替ったといっても、飛行機の性能は変わらない。現在でも航空輸送事業で総経費のうち燃料の占める割合は30%にもなっており、代替燃料がかりに従来通りの価格で入手できても航空輸送の生産性が変わらないければ、航空輸送業界の将来はすこしも明るくならない。

しかし、水素を航空機の燃料とすると、性能が画期的によくなり、生産性が大巾に改善される。これは主として水素の単位重量当たりの発熱量が現在のジェット燃料の3倍近いためである。

水素航空機の研究、開発には過去9年間、NASA(米国航空宇宙局)が力を入れてきたが、民間のメーカーのなかでは、ロッキード社が熱心で、これまでに各種の代替燃料を使用する航空機の概念設計を行い、その特性を比較、検討してきた。この検討結果のなかから、亜音速の大型輸送機の代表としてマッハ0.85の巡航速度で400人の乗客のをせ、約1万キロメートル、輸送する程度の大きさの4発広胴機をとって性能を比較す

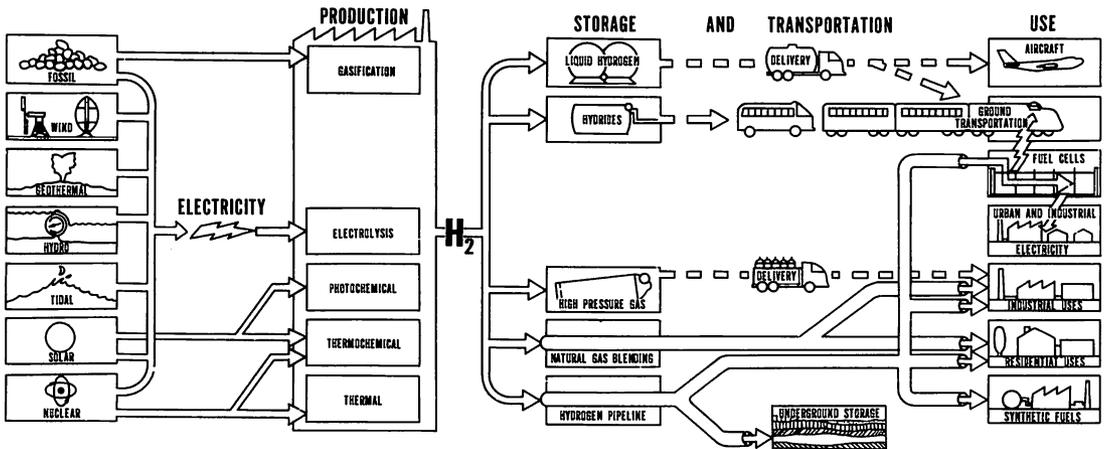


図-1 水素社会での水素サイクル (カナダ下院代替エネルギー委員会報告書より)

ると、従来の同程度の飛行機とくらべると、全備重量もエンジン推力も $\frac{1}{4}$ 以上、小さくてすみ、騒音も低下し、排出ガスも比較にならないほどクリーンになる。

超音速機の場合は、この効果は更に顕著である。現在、飛んでいる超音速機、コンコードは古い設計であり、今の技術からみれば、今でも更に改善の余地があるが、それにしても、水素を燃料とした超音速機では同じ任務を遂行するのに全備重量が半分ですむということは、如何に性能向上が画期的であるかがわかる。

水素航空機では、前述の通り、性能は大巾に改善され、対環境性も理想的になるが、飛行機では水素を極低温（ $-252^{\circ}\text{C}$ ）の液体として機内に貯蔵しなければならないので、従来のジェット燃料とは余くことなる概念のタンク及び燃料系統が必要となる。

液体水素を常時、極低温に保つためにタンクの断熱性を効果的に——重量、スペースの増加を最少限に——するため、従来の飛行機のように翼内にタンクを設置するわけにはゆかず、太い胴体の前部及び後部にそれぞれ1個、球形に近い形のタンクをとりつけることになる。

水素は、エンジンに供給されるとき気化されるので、エンジン自体は余り大巾な改造を必要としない。

また、液体水素の極低温性を利用して、翼や胴体の表面を流れる空気の境界層制御を実現して空気抵抗を減少し、エンジンのタービンブレードや軸受のような高温部分や超音速機の機体表面が空気との摩擦によって高温になるのを冷却すれば、飛行機の性能を更に改善することが可能である。

一方、水素航空機の安全性も従来の燃料より高いこ

表1 水素航空機の性能（亜音速）

この表は、400人乗り、巡航速度マッハ0.85、航続距離約1万kmの任務を遂行する液体水素、液体メタンと合成ジェットAをそれぞれ燃料とする航空機の性能の比較を示す。

		LH <sub>2</sub>	LCH <sub>4</sub>	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 <sup>2</sup>	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
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	EPNdB	87.2	N.A.	87.8
FLYOVER	EPNdB	89.2	N.A.	94.2
EMISSIONS		H <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub>	CO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , HC, SMOKE, H <sub>2</sub> O	CO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , HC, SMOKE, H <sub>2</sub> O

表2 水素航空機の性能（超音速）

234人乗り、巡航速度マッハ2.7、航続距離約7,800 Kmの任務を遂行する液体水素と現在使用しているジェットAをそれぞれ燃料とする超音機の性能の比較を示す。

		LH <sub>2</sub>	JET A	RATIO JET A LH <sub>2</sub>
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	66,890	1.64
WING AREA	FT <sup>2</sup>	7952	11,094	1.39
SPAN	FT	113	133.5	1.18
FUSELAGE LENGTH	FT	340.2	297	0.87
FIELD LENGTH REQUIRED	FT	7800	9490	1.22
LIFT/DRAG (CRUISE)	—	7.42	8.65	1.17
SPECIFIC FUEL CONSUMPTION (CRUISE)	LB/HR	0.575	1.501	2.61
AIRCRAFT PRICE	\$10 <sup>6</sup>	45.5	61.5	1.35
ENERGY UTILIZATION	BTU	4483	6189	1.38
SEAT NM				
NOISE: SIDELINE	EPNdB	104.0	108.0	—
FLYOVER	EPNdB	102.2	108.0	—
SONIC BOOM OVERPRESSURE	LB/FT <sup>2</sup>	1.32	1.87	1.41

とが確認されている。液体水素はエネルギー密度の高い燃料であり、従来の燃料と違った慎重な取扱いが必要であるが、飛行機の生存可能な墜落事故の解析及び実験によれば、現在のジェット燃料や合成ジェットA燃料より、搭乗者及び墜落現場の附近に及ぼす危険がすくないことがわかっている。これは液体水素がタンクから洩れても蒸発、上空への飛散がはやく、燃焼速度もはやく、放射熱も弱いからである。

更に、墜落時に搭乗者が運動機能をそこなって、動けなくなり死亡に至る大きな原因の一つである一酸化炭素も全く発生しない。これらの特性を総合すると、燃料としての液体水素は、従来の燃料と安全性ではすぐれているといえる。

水素航空機の性能、安全性など、共に関係者にとって大きな関心の的は価格である。NASAの研究によると、アメリカでは1990年頃の技術で可能になる単位発生エネルギー当たりの価格は石炭を原料とする合成ジェットA燃料においては、100万BTU（約106万KJ）当たり、8.47ドル（1980年ドル）、液体水素は11.01ドルで、オイルシェールを原料とする場合、合成ジェットA燃料の価格は、6.53ドルになるといわれ、単位発生エネルギー当たりでは明らかに合成ジェットA燃料の方が有利である。しかし、前述のような水素航空機の特性上、航空機の生産性、即ち、提供座席キロメートル当たりでくらべると、この経済性の差は消滅してしまう。水素製造、液化等の技術は将来、更に発展する余地がのこされている一方、化石資源の価格は益々、高騰することはさげられないことを考えれば、水素の価格は

他のエネルギー媒体にくらべて決してひけをとらなくなる。殊に、飛行機のように、燃料を水素に転換することによって、性能が画期的に改善される分野では、非常に魅力的なものとなる。

水素航空機の優利性は、大型、長距離のものが飛び抜けて大きい。130人乗り、航続距離1500カイリ程度の小型機でも全備重量は6%程度、軽くなる。従って、非常に小型、短距離の飛行機を除外すれば、殆どどの飛行機で液体水素を燃料として使用する方が従来のもの（合成ジェットA燃料を含む）とくらべて有利である。

#### 4 水素航空機実現への道

将来のエネルギー媒体として電力と並んで水素が我々の社会に最も好ましく、又、飛行機の燃料としても理想的であることがわかって、如何に円滑に、タイミングよく、この転換を行うかということはきわめてむずかしい問題であり、まだ一般的に認知された具体的な展開のシナリオは見当たらない。

前述のカナダ議会の代替エネルギーに関する報告書は、この問題に対する総論としての一つの見解であるが、現実的なシナリオとしては、それぞれの分野、用途毎に、どのような段階をへて、どのように具体的に代替エネルギーへの転換を進めてゆくかという段取りの展望を明らかにするなかで、飛行機の燃料を水素とすることの位置づけを明確にすることが必要である。この過程において、飛行機以外でも水素を代替燃料として選択する分野も決してすくなくないであろうという予想から、将来のトータルの水素所要量も見当がつき、そのコストもより現実性の高い推定ができるようになる。

いずれにせよ、代替燃料の選択と転換のシナリオについて、航空業界全体での真剣な検討と思想統一が必要であり、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で、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、現用の、いわゆる狭胴機と広胴機であるが、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、燃料切換えがはじまってからも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。全世界の現在の狭胴機の消費する燃料の割合は輸送機全体の $\frac{1}{4}$ 近くを占めているが、1995年

ごろには、逆転して全体の $\frac{1}{4}$ 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。また狭胴機をのみ寄航する多数の空港に水素液化、貯蔵設備を設けることも現実的ではない。

一方、これから益々、占有率の増大する広胴機、特に長距離用のものは、なるべく早い切換えが望ましい。

水素航空機の就航開始時期の標定はむずかしいが、現在でも既に燃料費が航空会社の経営を圧迫していることとまだ必要とされる研究、技術開発の完了までに要する期間を考慮すれば、就航開始は、1995年から2000年とするのがのぞましく就航開始後、20~30年で全体の入替えが行われるようなペースと考えられる。従って、このためには、1980年代後半から、いわゆる実用試験を開始するぐらいのテンポが妥当ではないかと思われる。

この間は、既に巨大な投資をした既存の飛行機、空港施設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、使用されることになろう。

航空輸送にとって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、その他の関係者の理解、合意をひろくもと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、経済性などが期待通りであることをわかりやすく実証してみせる必要がある。

代替エネルギーへの転換の成否は、現在の巨大な石油依存のインフラストラクチャーの惰性を如何に方向転換させるかにかかっている。このためには、単に技術的な研究、開発だけでなく、社会的な影響をよく調査し、転換の際の苦痛、損害を最小限にするような配慮が必要である。

#### 5 残された課題

前述の通り、水素に関する研究、技術開発は可成り以前から多くの国々により行われ、基本的な技術は既に確立している。しかし、航空機の燃料として水素を使用するために必要な技術は必ずしも確立されているとはいえない。水素航空機を実現するために今後、必要とされる研究、技術開発を総合的にとりまとめたものとしては、国際水素航空機特別委員会（1979年、西ドイツの航空宇宙研究所等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の燃料として

使用する構想と、その展望について開かれたシンポジウムにより設立された)が一昨年、発表したものがある。

この計画は、水素航空機や空港施設や水素製造施設の生産性、安全性、経済性や社会に対する影響などについて必要と考えられる研究、技術開発の項目、内容を示している。計画には約20のテーマがあり、これらは次の三つの大項目に分類されている。

- (1) 航空機とエンジンの研究
- (2) 航空機とエンジンの技術開発
- (3) 水素製造及び地上施設の技術開発

これらは、完成するのに3ケ年の年月と約7400万ドルの費用がかかると見込まれている。約20のテーマは更に細かく分けられているが、詳細については日本航空宇宙学会誌第29巻の第331号及び第332号に掲載した筆者の解説「水素航空機の研究、開発計画」をご参考とされたい。

この研究、技術開発につづく第2段階のだめ押しとして、実機で貨物輸送を行って水素航空機の技術を実証すると共に、商業ベースで実用に耐えることを示す実験航空会社構想が発表されている。

この計画で提案されている内容は、現在飛んでいるトライスター機を貨物専用の水素航空機に改造し、これを4機使用して世界の4つの空港間に約2ケ年間、定期運航させるというものである。

この目的に使用する水素航空機の製造には約4ケ年かかると推定されており、この間に水素の製造施設、空港施設等も並行して完成させる。

前述の4機と予備部品などには約6億4700万ドルかかると見込まれ、水素製造施設や空港施設などは、1空港当たり約1億8400万ドルかかると考えられているので、これを4空港分として単純に4倍すれば、地上施設はしめて約7億3600万ドルとなる。従って、これに航空機の費用を加えれば、約13億8300万ドルかかるということである。

## 6 結 語

好むと好まざるにかかわらず、代替エネルギーへの転換は必至である。転換の実現には多くの困難と苦痛は避けられないが、現代に生きる我々は、人類の将来に明るい展望をもたらす転換のシナリオを大胆に、タイムリーに策定し、社会全体が秩序正しく転換の具体化に邁進することが望まれる。

## 参 考 文 献

- 1) 舟津, 「水素航空機の研究, 開発計画」, 日本航空宇宙学会誌第29巻第331号及び第332号 (1981)
- 2) カナダ下院代替エネルギー委員会 "Energy Alternatives" Report (1981)

