

宇宙観光旅行
— 宇宙開発の新たな展開と液化水素産業 —

成尾芳博

宇宙科学研究所 相模原市吉野台 3-1-1

Space Tourism

— New Evolvement of Space Development and Liquid Hydrogen Industry —

Features of liquid hydrogen industry as a key industry to support an aircraft type of space transportation system to be operated for space tourism have been explained on the base of a prospective production model of the space vehicles and an operational concept of space tourism business.

1. はじめに

現時点における使い捨てロケットと衛星通信サービス分野の商業化は、スプートニク時代以来宇宙活動を独占して来た政府によって開発された宇宙技術に依存している。計画経済が自由経済にとって変わられたように、将来、現在の宇宙ビジネスとは異なる分野からの要求によって、新たな宇宙商業化の道が開ける可能性がある。そのようなビジネスの一つが、民間航空機と同じように運航できる言わば真の宇宙輸送システムによって支えられる宇宙観光旅行である。

真の宇宙輸送システムを構築できるかどうかは、飛行機のように運用できる再使用型宇宙船を建造できるかどうかにかかっている。スペースシャトルは国家的な輸送システムとして提案されたが、保守点検作業に時間と費用がかかりすぎることから再使用型機体による低コスト輸送のデモンストレーションには失敗してしまった。スペースシャトルの経験は、複雑な打ち上げ操作や、使い捨て部分の改善なしには「有翼機」で航空会社のような低コストオペレーションは出来ないことを示している。最近行われたDC-X（米マクダネルダグラス社で開発が進められている垂直離着陸型の再使用実験機）のデモンストレーションや関連技術の開発こそが、低コストオペレーションを可能とするSSTO(Single stage to orbit vehicle: 1段式で軌道に到達し、地球に帰還できる宇宙ロケット)を実現化してくれるように思える。

一方、現在のエアラインシステムは、既に航空輸送のための全世界的なインフラストラクチャを形成している。従って宇宙輸送システムも、この基盤を基本として設計すべきと考えられる。これにより、航空管制システムや旅客、貨物の空港サービスあるいは保守や運行のための地上設備は、多少なりとも宇宙輸送システムを支援できることになる。しかし、このシステムの支援に絶対的に必要となる膨大な量の液化水素を取り扱う施設は、現在の空港施設にはなく、全く新規に整備する必要がある¹⁾。本稿では、宇宙旅行ビジネスの概念とその規模、および宇宙旅行を支える主要産業としての液化水素産業の特徴について解説する。

2. 宇宙旅行の概念

宇宙旅行は一般大衆のための宇宙飛行と定義される。観光旅行においては客がめいめい

の料金を払えること、また、旅行者によるサービスが便利に受けられることが必要となる。したがって、宇宙旅行のための宇宙飛行は、厳しい基準の下で選ばれ、訓練を積んだ宇宙飛行士によって独占的に行われた過去の宇宙飛行とは全く異質のものとなる。最も異なるのは宇宙旅行に用いられる機体である。宇宙旅行は次のような要素によって特徴づけられる^{2,3,4)}。

1. 低コスト輸送：航空機の運航コストは燃料代の約3倍である。現行の宇宙輸送のコストを2桁軽減することが目標である。
2. 飛行機並の安全性：全ての飛行フェーズで安全に帰還する飛行中断機能を持つ。
3. 快適さ（乗り心地）：加速度と減速度は最高3G以内に抑える。
4. 観光：外を見るための窓、宇宙遊泳室、簡単な飲食設備とトイレを準備する。
5. 高運航頻度：機体の運航や保守の手順を標準化し、ターンアラウンドタイム（飛行前後の整備点検時間）が十分短くなるようにする。また、通常は整備工場を必要としない機体とする。

以上の特徴を満足する機体として現在最も実現性が高いと考えられているのは、1段式でLEO(Low Earth Orbit)に到達し、再び地球に戻ってくる垂直離着陸型の宇宙船である。エンジンの推進剤としては液化水素と液化酸素を用いる。燃料にプロパンやメタンと言った炭化水素を使うことも提案されている⁵⁾が、その種のエンジンはまだ実験室段階にあり、実機エンジンとしては開発されていない。宇宙船が航空機のように運航されることを考えると、環境汚染の少ない水素がやはり望ましいであろう。

宇宙旅行ビジネスにおける液化水素産業の特徴を議論する前に、最も気になる宇宙旅行の料金と産業規模について検討してみる。表1に宇宙旅客機のコスト目標を示す⁶⁾。この表は、経済学者であるCollins氏が、将来の一段式宇宙旅客機と最新鋭の航空機（ボーイング747）を比較してみた結果である。あくまで一つのケーススタディではあるが、宇宙旅客機に課すべき要求事項が浮かび上がってくる。

このケーススタディでは年間飛行回数として、一機当たり300回が要求されている。保守のため、年間で20%の非運用期間を考えると、この数字はそれぞれの機体が毎日飛ぶことを仮定している。ワイドボディのジェットが、年間を通して1日2回飛行しているのに比べるとそれほど頻繁ではないが、年8回程度の打ち上げ頻度である現行のスペースシャトルと比較すると格段に大きな数字ではある。

毎回の飛行に要求される全体コストは、減価償却、燃料、その他の3つのカテゴリーに分割できる。これらのコストの合計は7,900万円である。経済的観点からすると旅客の数と料金がこれらのコストをカバーするよう決定されなければならない。ここに示した例では、50人の旅客が一人当たり160万円払えばよいことになる。昨年、3,000人の人々に対して行った宇宙旅行に関するアンケート調査によれば、宇宙旅行の費用として120万円から240万円の間を希望する人が最も多かったという⁷⁾。この金額は現在の宇宙輸送コストより2桁低いものである。実際の事業では機体の開

表1 宇宙旅客機のコスト目標

	B747	宇宙旅客機
生産機数	1,000	50
値段/機	400億円	1,000億円
年間飛行便数/機	720便	300便
寿命	20年	10年
減価償却/飛行(金利5%)	444万円	4,330万円
燃料費/飛行	200万円	1,600万円
雑費/飛行	200万円	2,000万円
一飛行当たりの総コスト	844万円	7,930万円
旅客数/飛行	300人	50人
旅客一人当たりの経費	~3万円	~160万円
年間旅客数	~2億人	~75万人
年間総売り上げ	6兆円	1兆2千億円

発に関する費用は量産に入ったときの製造費とは別々に扱うべきで、機体価格が1機1,000億円というのも高いかもしれない。しかしこの表は、「それでも大衆料金で運航できる」ことを示している。参考までに述べれば、使い捨てロケットであるH-IIの打上げ費用は1機当たり約190億円である。

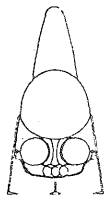
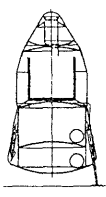
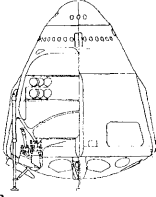
3. 機体のモデル

宇宙旅行用として既に幾つかの機体が提案されている^{8,9,10})。前述の表1には、旅客数と飛行毎の燃料コスト以外は、機体の特徴のほとんどが輸送システムの統計上のデータとして与えられている。これらの数字に基づいて液化水素の量的な需要量を仮定するためにいくつかの機体の設計データを用いることにする。実際には1600万円の燃料で50人の旅客を運ぶ能力を持つ機体の選択肢はほとんどない。

表2はSSTOとして概念設計された3つの機体の重量内訳(抜粋)である。JRS (Japanese Rocket Society: 日本ロケット協会)の機体のペイロードには50人の旅客と乗員、それに必要な収容設備を含んでいる。もしフェニックスのペイロードに同じ重量配分を当てはめたとすると、旅客は32人と計算される。それ故、旅客一人当たりの燃料質量はJRSよりフェニックスの方が大きい。しかしながら、フェニックスはパイロットモジュールを追加質量と考えており、保守的な質量予測を与えていると思われる。BETAはよく知られた機体であるが、旅客収容設備のための重量ブレイクダウンがなされていない。そこで、技術上の細かい点についても概念設計者に直接確認することが出来るJRSのモデルを標準機体として選定することにした。図1に機体の外観図を示す。図の左側が正面図、右側が機体底部から見た図である。また参考までに座席の配置と客室設備の例を図2に示す。座席は眺望を優先して円形に配置されている。また宇宙遊泳のために2層のデッキの一部を吹き抜けとし、トイレや飲食サービスは中央部に配置されている。この機体の総重量550トンはH-IIロケットの約2.1倍、ジャンボジェット機の約1.4倍である。

推進剤消費量に関するデータを表3にまとめた。表1に示したコスト要求に従えば、このモデルの424.4トンの液化酸素と70.7トンの液化水素のコストは1,600万円ではなくてはならない。必要量を容積に換算すると1飛行当たり液化水素で1,000kl、液化酸素で380klとなる。現在の液化水素の価格は、日本と米国で、それぞれ1ℓ当たり約400円と約20円、同様に液化酸素は1ℓ当たり約55円と約11円である。話を単純化するために、単位容積当たりの価格を液化水素と液化酸素で同じと仮定すると、両方の液体の目標価格はリッター11円となる。この価格は米国における液化水素の現在の価格のほぼ1/2に当たる。

表2 SSTO重量内訳対照表

BETA	フェニックスC	JRS Study
基本計画: $\Delta V = 9323\text{m/s}$ 平均比推力 = 458 s 質量比 = 7.970 初期加重 = 1.5g ミッション高度 = 200 km ペイロード = 4 ton 旅客 = 1人 打上時全重量 = 131.5 ton 推進剤重量 = 117.5 ton 推進剤混合比 = 5.5 - 8.0	基本計画: $\Delta V = 9145\text{m/s}$ 平均比推力 = 440 s 質量比 = 8.326 初期加重 = 1.4g ミッション高度 = 150 km ペイロード = 4.77 ton 旅客 = 32人 打上時全重量 = 206 ton 推進剤重量 = 183.8 ton 推進剤混合比 = 7 - 13	基本計画: $\Delta V = 9271\text{m/s}$ 平均比推力 = 434 s 質量比 = 7.904 初期加重 = 1.5g ミッション高度 = 200 km ペイロード = 7.51 ton 旅客 = 50人 打上時全重量 = 550 ton 推進剤重量 = 494.9 ton 推進剤混合比 = 6
		

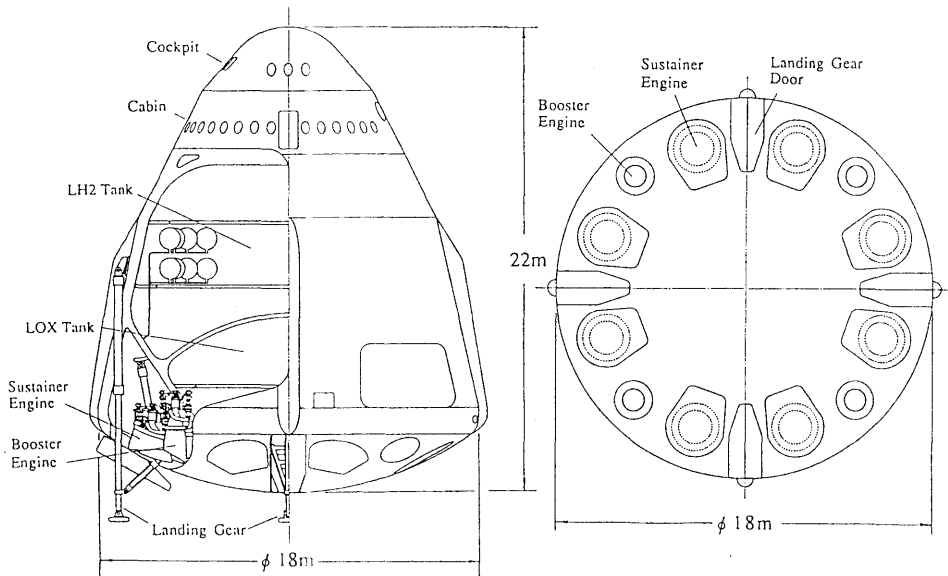


図1 標準機体外観図 (JRS Study)

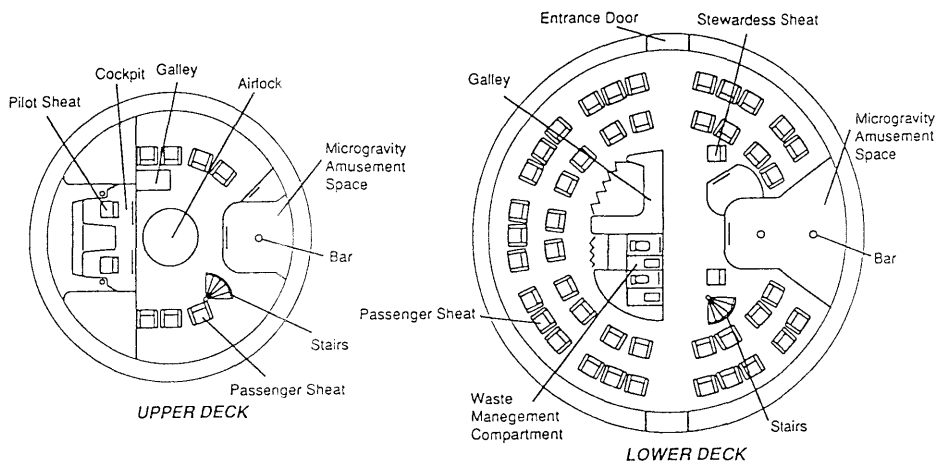


図2 標準機体の座席配置と客室設備 (JRS Study)

4. 地上支援設備

図3に旅客の搭乗や地上支援作業が行われる発着場を3つ持つ宇宙港の想像図を示す。一機の機体が一つのスポットの上に打上げの時と全く同じように正確に戻って来つつある。着陸と同時に次の打ち上げに向けた地上作業が開始される。

宇宙旅行のための発着場は、この想像図のように大きな空港に付属あるいはその一部として設置されることになる。これはロケットの安全性が十分なものであれば、従来のよう

表3 宇宙旅行用標準機体の推進剤消費量

一飛行当たりの推進剤	494.5 ton
液化酸素	424.2 ton
液化水素	70.7 ton
運航機数	50機
年間飛行頻度	年間300回
年間飛行便数の合計	15,000便
宇宙港の場所	世界中

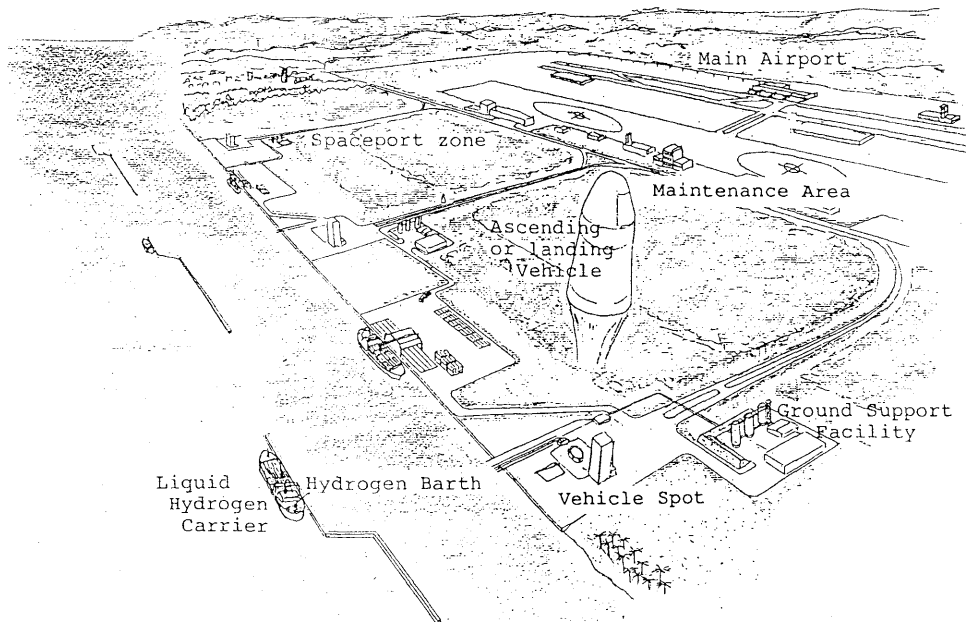


図3 大規模空港に併設された宇宙港の想像図

に発着場を僻地に作る必要はなく、むしろ大都市近傍の空港に併設して設置するのが旅客サービスの面からも望ましいと考えられるからである。

50機の宇宙旅客機が運用に入ったとき、それらの飛行を支えるには、全世界に約10カ所程度空港が必要になると思われる。50機の機体は10以上の運航会社によって所有されることになるだろう。

推進剤供給を考える限りでは、宇宙旅行の初期フェーズにおいても、一カ所の宇宙港で1日4～5回の飛行が見積られる。この場合でも、液化水素4,000kl(280ton)、液化酸素は1,500kl(1,700ton)を、毎日ロケットに充填できる推進剤供給設備が必要となる。わが国における現行の液化水素年間生産量は、約7,000kl(1992年ベースの数量、1993年は約4,000kl)生産能力は22,000klで、これは日産60klに相当する。この値は、表3に示した1機の機体の運航に必要な量の約6%に当たる。

5. 燃料供給のシナリオ

第二次世界大戦の終了間際、日本でも「秋水」という名で作られたドイツのロケット機Me163は、その生産台数を決めるのに、当時のドイツに使える燃料が何機分あるかで決めたと言う。表1のケーススタディが現実のものとなるかは実に燃料供給体制を確立できるかどうかにかかっていると見える。従って液化水素の供給こそはスペースポートを特徴づける機能的なものであると言って過言ではない。

液化水素と酸素の消費者は、前述の大きな空港の宇宙旅客機発着場を使って宇宙輸送システムを運航する民間会社である。宇宙旅行用の先進的な機体は保守手順が単純化され、すべての手順が一日を基本とした単位で繰り返されるよう設計されている。しかし、予冷の開始、推進剤の充填といった打上げ操作の最終段階では、現在のスペースシャトルとさほど変わらない時間を要すると思われる。しかしそれでも先進的な旅客機体は、燃料供給が1時間以内(現在のシャトルは約2時間)に終わるよう設計されるだろう。これは、液化水素と液化酸素の送液速度を、スペースシャトルに対するものよりも若干増さなくてはならないことを意味する。

5.1 フェーズ分け

現在の液化水素の生産能力は、米国、欧州、日本でそれぞれ200、20、50トン/日である。宇宙旅行産業が必要とする液化水素の量は、現在の生産量からするとあまりに膨大であり、魅力的ではあるがリスクも大きい。そこで段階的に生産量を増やして行くことが望ましいと思われる。花田氏提案による液化水素供給計画の一例¹⁾は次のような8段階で示される。

1. 機体の開発、
 2. 試験飛行、
 3. 年3回飛行、
 4. 年10回飛行、
 5. 年20回飛行、
 6. 年36回飛行、
 7. 年70回飛行、
 8. 年300回飛行
- 1飛行当たり70.7トンの液化水素を必要とする場合、各フェーズで年間に機体に充填する液化水素の総量を計算した結果を表4に示す。

表4 各フェーズ毎の液化水素供給量

フェーズ	液化水素正味必要量		
	(ton/year)	(ton/day)	(1000 kl/h)
1	*	*	*
2	*	*	*
3	220	0.6	0.36
4	710	1.95	1.17
5	1420	3.90	2.35
6	2545	6.98	4.19
7	4950	13.56	8.13
8	21210	70.70	42.42

*このフェーズにおける要求は現状の生産能力以内である。

5.2 機体開発期間中の液化水素の需要

機体が民間航空機のようにラインで製造されると仮定すれば、設計のような工学的作業、サブシステムの試験、組立、試験飛行は、製造モデルの認定が完了する前に行わなければならない。従って、前述の各フェーズの液化水素の量を考えると、上で述べたシナリオは機体の開発

活動に適用することができる。この開発期間は液化水素の需要と供給の関係を確立するために、機体製造産業と液化水素産業の双方にとって特に重要な期間である。この期間中の経験は大規模な液化水素供給システムの立案に役立つとともに、機体の認定作業を通じて、大規模な水素設備を必要とする将来の飛行運用の成功を保証することになる。

液化水素供給シナリオに関して各フェーズの長さを詳細に述べることはできないが、液化水素産業側からすれば、製造能力の様な増加が望ましいであろう。一方、液化水素の需要を決定する機体開発のタイムスケジュールに関しては、他からの要求がある。仮に、シナリオに沿った形で、つまり、液化水素供給量の増加と需要がバランスしながら増加す

図4 機体開発期間中の液化水素の需要と供給の伸び

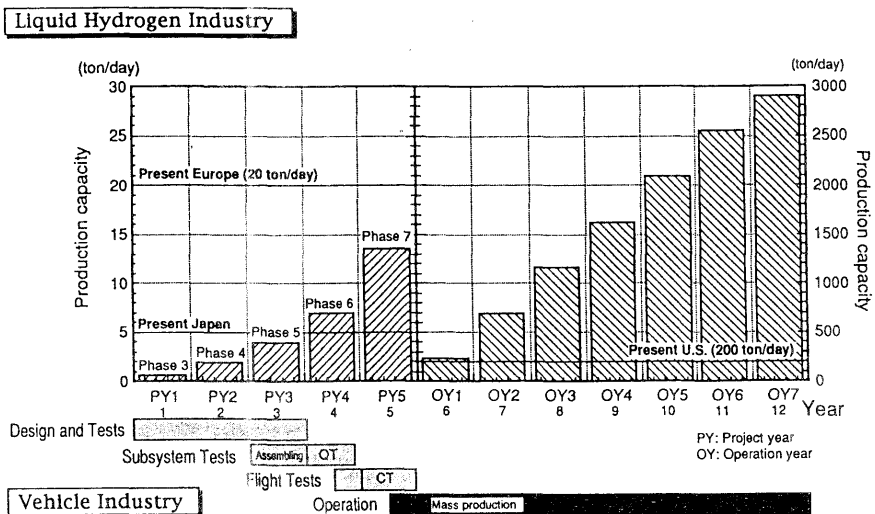


表5 宇宙旅行ビジネスにおける液化水素需要の伸び（実用機体生産のケーススタディ）

		Design & Tests					Mass Production									
		Subsystem Tests		assy.	QT	Flight Tests		CT		Operation						
Liquid Hydrogen Demand		PY 1	PY 2	PY 3	PY 4	PY 5	OY 1	OY 2	OY 3	OY 4	OY 5	OY 6	OY 7			
Year		Development phase					Operational phase (mass production)									
Number of Vehicles (worldwide)		1	1	2	3	3	4	12	20	28	36	44	50			
Frequency of flights (flights/year/vehicle)		3	10	20	36	70	300	300	300	300	300	300	300			
Phase		3	4	5	6	7	8									
Worldwide total		0.6	1.9	3.9	7.0	13.6	232	697	1162	1627	2092	2557	2905			
Flight Test Facility		0.6	1.9	3.9	7.0	13.6										
Net loading quantity of liquid hydrogen (ton/day)	Spaceport A (Asia)						116	174	232	271	261	320	363			
	Spaceport B (US1)						116	174	232	271	261	320	363			
	Spaceport C (US2)							174	232	271	261	320	363			
	Spaceport D (US3)								232	271	261	320	363			
	Spaceport E (EU1)							174	232	271	261	320	363			
	Spaceport F (EU2)										261	320	363			
	Spaceport G (Russia)									271	261	320	363			
	Spaceport H (Oceania)										261	320	363			

PY: Project year
OY: Operation year

るように機体開発スケジュールを定めたとなると、液化水素の需要と供給の伸びは図4のようになる。図の横軸は機体開発スケジュール、縦軸は液化水素の正味充填量を表している。棒グラフで示された液化水素供給量の増加量は、この場合、対数的に一定である。しかしながら実際のケースでは、後に決定される認定飛行要求に大きく依存することになると考えられる。

5.3 運用段階での液化水素需要の予想

一度大量生産が始まれば、液化水素の需要は機体の飛行回数に比例して急激に増加する。表5に実用機体生産のケーススタディの結果を示す。この研究によれば、50機の機体は7年以内に生産されると仮定している。すなわち毎月0.6機が生産され、世界中にそれぞれの拠点を持って展開している運航各社に引き渡される。7年間の生産の終わり頃には全世界の液化水素供給能力は1日当たり3,535トン（この値は機体への正味充填量であり、損失分を考えると1日当たりの供給能力は4,000トンから5,000トン）となっているであろう。

表5に示したケーススタディでは、世界の3つの地域（東アジアとオセアニア、南北アメリカ、ヨーロッパとアフリカ）に8つの宇宙港を展開すると仮定している。

6. 液化水素産業の展望

ケーススタディによって示された予想にも関わらず、米国とカナダは機体運航会社にとって最初の運航基地として最適であると考えられる。というのは、液化水素の価格が日本や欧州と比較して格段に安く、目標とするコストに非常に近いからである。価格が高く、生産量が少ないというのが日本の液化水素産業の特色だが、これは電気代が高いこと、及び輸送と貯蔵に対して不必要に厳しい規制があるためである。もし、液化水素がLNG運搬船のように目的にあった特別仕様の大型容器で運搬することができれば、現在でさえ液化水素燃料の必要量を商業的に世界に供給することができるのである。実際、あるメーカーは厳しい規制の枠内でカナダから液化水素を輸入しているが、運賃から保険料すべてを支払っても、十分ペイしているとのことである。しかしその量は年間160kl程度である。

現在研究中の大規模な水素利用の主要分野は、大規模な地球規模の炭化燃料利用に取っ

て代わるクリーンエネルギーの分野である。しかしながら、クリーンエネルギーとしての水素の需要は人類の将来の事柄であって、それが大規模な液化水素供給システムのための技術開発を動機づける力となるにはあまりに一般的すぎると思われる。一方、宇宙旅行のためのロケット推進剤の需要、特に要求されるコストと量は明確である。しかも、宇宙旅行のお客は、クリーンエネルギーとして非炭素系材料から作られる水素の取り扱いに習熟している必要はない。宇宙旅客機の運行会社は全世界に展開することになるから、液化水素産業にとって世界的な供給ネットワークを考えるためのよい機会となると思われる。一度水素大規模利用のための技術が確立すれば、宇宙旅行はクリーンエネルギーである水素物質の開発に貢献することにもなる。

8. むすび

1人当たり160万円で、年間75万人宇宙に行って、年間総売上げ1兆2千億円。これはアメリカのNASAの宇宙予算に相当する。現状は、国民から集めた税金でやっと何十人かの宇宙飛行士をお祭り騒ぎで宇宙に送り出している、と言うののである。商業ベースでやれば75万人が宇宙に行けて、しかもその人達が料金として支払う金額は、宇宙開発の国家予算と同じ、というのは極めて興味深い結果である。

他方、液化水素は、宇宙旅行用の宇宙輸送システムには欠かせない重要な問題である。大衆宇宙輸送の初期のフェーズと液化水素の製造と輸送の現状技術を考えると、低価格と大量輸送によって特徴づけられる宇宙旅行は技術的には可能であろうと思われる。液化水素ビジネスの将来はこの顧客によって開かれ、その結果人類の新しいエネルギー源となりうると思われる。本稿は、今年5月に横浜で開催された宇宙技術と科学の国際シンポジウムISTS-94にて発表した論文¹⁾を骨子として用いました。論文の共著者である宇宙研の長友信人教授、テイサンの花田卓爾氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) T. Hanada, M. Nagatomo and Y. Naruo, Liquid Hydrogen Industry: A Key for Space Tourism, 19th ISTS, Yokohama, ISTS94-g-24p, 1994
- 2) 長瀬徹也、一般の宇宙旅行をミッションとする単段式ロケットの設計に関する考察、東京大学大学院修士論文、1994年2月
- 3) 長友信人他、ロケット談議(1)~(12)、ロケットニュースNo.336~347、日本ロケット協会、1993.8~1994.7
- 4) 成尾芳博、橋本保成、完全再使用型ロケットの推進システムに関する一検討、平成5年度宇宙輸送シンポジウム講演集、宇宙科学研究所、pp43-48
- 5) R. Beichel, Advanced Technologies - The Key to Affordable Access to Space, 19th ISTS, Yokohama, ISTS94-a-15v, 1994
- 6) P. Collins, Towards Commercial Space Travel, JSTS Vol.9, No.1, pp8-12, 1993
- 7) P. Collins, Y. Iwasaki, H. Kanayama and M. Ohnuki, Commercial Implications of Market Research on Space Tourism, 19th ISTS, Yokohama, ISTS94-g-21p, 1994
- 8) D. E. Koelle, BETA, A single-stage Re-usable Ballistic Space Shuttle Concept, Proc. of the 21st IAF Congress, North-Holland, 1971
- 9) G. C. Hadson, PHOENIX: A Commercial, Reusable Single-stage Launch Vehicle, Pacific American Launch Systems, Inc. 1985
- 10) K. Isozaki, A. Taniuchi, K. Yonemoto, H. Kikukawa, T. Maruyama, T. Asai and K. Murakami, Vehicle Design for Space Tourism, 19th ISTS, Yokohama, ISTS94-g-22p, 1994