

## 5. 研 究 論 文

運輸交通機関の水素エネルギーシステム

運輸省船舶技術研究所 渡 辺 健 次

### Systems Study of Solar - Hydrogen Supply for Domestic Transportation in Japan

by Kenji Watanabe

Ship Research Institute  
6-38-1, Shinkawa, Mitaka,  
Tokyo, Japan

#### Abstact

A plan on the hydrogen fuel system for domestic transportation (cars, ships,aircrafts) in Japan is investigated.

Hydrogen is produced with solar energy on huge rafts on the South Pacific Ocean and transported by liquefied hydrogen tankers or by metal hydride carriers. Futhermore,one example of domestic supply planning is proposed.

Finally,the quantities of facilities over total systems (numbers of rafts,tankers,storage tanks,offshore tankers,tank-rolllys) is summed up and outline of systems is obtained.

#### 1. は じ め に

水素エネルギーの実用化には、個々の水素利用機器たとえば水素自動車・水素航空機の設計・試験を通じてその実現をめざす行き方も重要であるが、これら利用機器のまわりの条件すなわち石油系燃料消費を前提として組み立てられている社会システムをどのようにして水素を利用するシステムに適合させてゆくか、という事も考えなければならない。そのために、水素の製造から輸送・貯蔵ひいては利用までの全システムの設計を試み、それを検討して、どこに克服すべき課題があるかを考察する

のも、ひとつの行き方である。

われわれは、上記のような考えのもとに、一例として自動車・船舶・航空機などの燃料を水素によっておきかえる場合をとりあげて検討してきたが、中間的段階ながらシステムのアウトラインが得られたので、ここに報告する。なお、鉄道はほとんど電化されているので、このシステムでの検討から除外した。

まず、国内運輸交通機関の燃料の種類別・地域別需要を調べ、必要水素量をみちびき出す。これを生産するために、いわゆるPORSHE計画を参考に、日射の多い南太平洋で太陽エネルギーを利用する。この水素を液化水素または金属水素化物の形態で国内に運ぶ。一方、国内輸送ネットワークを現状を考慮して定めると、生産から利用までの水素のフローが得られ、このシステムに投入すべき全施設の数量を計算でき、システムのアウトラインが得られる。以下にこれを詳述する。

## 2. 国内運輸交通機関の水素需要推定

まず、現在の運輸交通機関の燃料使用量を、府県別に下記の統計により求めた。本研究は可能性を追求するものであって、必ずしも正確な数値を必要としない。したがって、統計の年次の不一致は問題とせず、多くの仮定の下に推計をすすめた。

### 統計1 石油製品府県別販売量

「エネルギー生産需給統計年報」 1980年 通産省

### 統計2 輸送機関別国内エネルギー消費量

「運輸関係エネルギー要覧」 昭和59年3月 運輸省

### 統計3 入港船舶総数表

「港湾統計年報」 昭和57年 運輸省

### 統計4 府県別自動車保有数

「陸運統計年報」 昭和57年 運輸省

交通機関のエネルギー消費量は、全国の総量は得られるが、府県別のデータは得られなかった。そこで、府県別データの得られる販売量・保有台数を手がかりに配分することにより推定を行なった。

航空機については、統計1より府県別ジェット燃料油の販売量が得られるので、これを消費量と考えることにした。

自動車は、ガソリン・軽油およびLPGにおいて調べた。ガソリンは、統計1の揮発油の販売量を用いた。この値は、交通機関の消費に限定されているわけでないが、ほとんどは自動車用ガソリンと考えられるため、これを用いた。軽油は、統計2により、自動車で使用される総量が得られた。産業用も含めた府県別の販売量が統計1より得られるので、その比率で全国総量を比例配分して府県別の使用量とした。LPGは、統計2から得られた全国の自動車の消費の総量を、統計4の府県別営業用乗用車（ハイヤー、タクシー）保有数により比例配分して求めた。

船舶は、統計2より内航・外航それぞれの重油の消費の総量を求め、統計3の府県別入港総トン数

により比例配分して求めた。

以上の方法により求めた現在の石油系燃料消費量を水素に換算するのであるが、それには、エンジンの効率や走行効率など、未知のものを多く必要とするので、ここでは簡単に発熱量により換算した。石油燃料の発熱量は低位発熱量を用いた。換算に用いた数値を表-1に示す。

表-1 石油系燃料の水素への換算（発熱量による）

燃料	低位発熱量 kcal/kg	kcal/kl	比重	水素 ton/石油 kl
ガソリン	10600	7314000	0.69	0.256
軽油	10650	9532000	0.895	0.333
ジェット	10220	8176000	0.8	0.286
重油	9600	9600000	1.0	0.336
L P C	12000	6960000	0.58	0.243
水素	28600			

この結果の交通機関別・府県別推定水素需要（年間）を表-2に示す。

表-2 輸送部門における代替水素エネルギー需要の推定

単位 千トン

県名	自動車	船舶	航空	全交通機関	県名	自動車	船舶	航空	全交通機関
北海道	958	110	79	1147	和歌山	129	81	<1	210
青森	221	29	8	257	大阪	910	228	88	1225
岩手	206	15	1	222	大滋賀	145	4	0	149
宮城	326	41	20	387	京都	266	5	<1	270
福島	301	10	<1	311	奈良	96	0	0	96
秋田	173	4	1	178	兵庫	571	395	<1	967
山形	178	18	2	197	鳥取	102	4	4	110
茨城	392	72	21	486	島根	102	6	1	109
栃木	283	0	<1	283	岡山	278	119	1	397
群馬	284	0	0	284	広島	373	176	3	552
千葉	631	245	15	891	山口	244	141	7	392
東京	1377	143	223	1743	香川	143	83	1	228
神奈川	731	538	4	1272	愛媛	173	92	7	272
埼玉	539	0	6	545	徳島	103	16	3	121
新潟	358	25	4	387	高知	110	20	3	133
富山	165	15	2	182	福岡	609	183	75	867
石川	169	6	17	192	佐賀	103	11	<1	115
福井	128	6	0	134	長崎	180	52	16	249
山梨	109	0	0	109	熊本	231	35	14	280
長野	284	0	<1	284	大分	157	101	8	265
静岡	523	70	8	601	崎	159	9	21	189
愛知	963	269	29	1261	鹿児島	241	91	35	367
岐阜	280	0	2	282	沖縄	133	49	63	244
三重	246	82	5	333					
					合計	15383	3595	798	19776

注) 「<1」は、需要があるが、その量が500トン未満であることを示している。

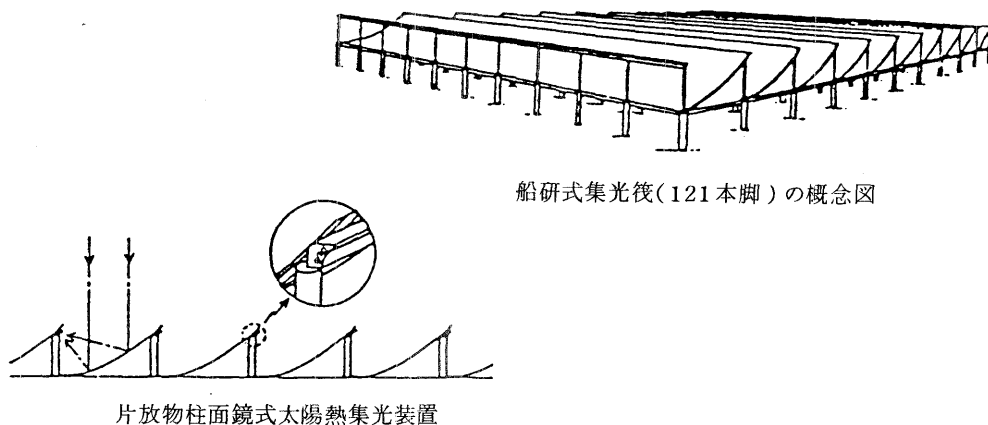
結論として、国内運輸交通機関の燃料として水素が年間約1970万トン必要ということになる。

### 3. 水素の生産

水素の生産はもっとも日射の多い南太平洋海域に筏を浮かべ、太陽エネルギーを利用しておこなう。日射強度からみて、筏は巨大かつ多数となるものとみられる。

#### 3-1 反射鏡集光式筏

反射鏡を使って太陽光を集める方式にもいろいろあるが、われわれは放物柱面を半分に分けた形の鏡を筏上に固定し、筏自体が太陽を追尾回転するという仕組みのものを設計し検討した。筏面の大きさは1Km×1Kmとし、安定性を保証するために、多数(121本)の円柱脚が浮力を保つ、いわゆるセミサブ方式を用いた。筏の概観を図-1に示す。



船研式集光筏(121本脚)の概念図

図-1 反射鏡集光式筏の概観

この場合、筏はほぼ完全に水平を保つことができる。

ここで直ちに問題となるのは、円柱脚が水の抵抗を受けるため、海流に抗しての位置保持や太陽追尾回転にエネルギーを要することである。検討結果では、約1ノットの海流の存在において、年間を通じれば太陽から得られる電力量の約10分の1をこれに費やすことになる。そして、位置保持に要するエネルギーの方が追尾回転に要するものよりも大きい。もし、筏が大きければ、追尾回転に要するエネルギーが急速に増大するので、この筏の大きさは適当と考えられる。

もうひとつの問題は、このシステムで、どの程度正確に太陽を追尾できるかということである。具体的な集光構造を考えて追尾誤差と集光量の関係を定め、一方、回転にともなう抗力をいれた運動方程式を数値的に解いて許容できる誤差範囲で追尾が可能であるとの結論を得た。

具体的に説明すると、筏は1Km×1Km四方で、その上に幅100m長さ1Kmの半切放物柱面鏡が10枚塔載されている。この構造は焦点に沿って設けられた集熱管の支持と鏡の支持が一体構造となる利点を持っている。筏は、日中に太陽を追尾してほぼ半回転し、夜間は停止して翌日に、

簡単な方位修正の後、ふたたび半回転する。太陽が天頂付近を通過するときには、特殊な追尾方法がある。熱媒体として水蒸気を用いれば、約 500℃になって、タービンをまわして発電する。日射は直達日射の約  $\frac{2}{3}$  が、この海域では利用できる。

入射から集熱部到達までのロス	15%
集熱管からの放射損失	10%
発電効率	35%
筏の位置保持、回転エネルギー	10%
液化水素製造電力	65 kWh / Kg H <sub>2</sub>

とすれば、筏1基あたり年間約 5000トンの液化水素が生産できる。この検討の詳細は別途報告(1)にゆずる。

### 3-2 太陽電池方式筏

太陽電池による直接発電は、エネルギーの変換効率こそ、前記の反射鏡集光熱機関式におとるものの、経済性はともかくとして、次のような利点を持っている。

- (1) 集光を必要としないため、構造物の剛性寸法精度のきびしさが要求されない。少ない材料で実現できる。
- (2) 太陽追尾の必要がないため、位置保持に対し抵抗の少ない形状をとれる。
- (3) 反射鏡式は直達日射のみ利用するが、太陽電池は全天日射を利用できる。

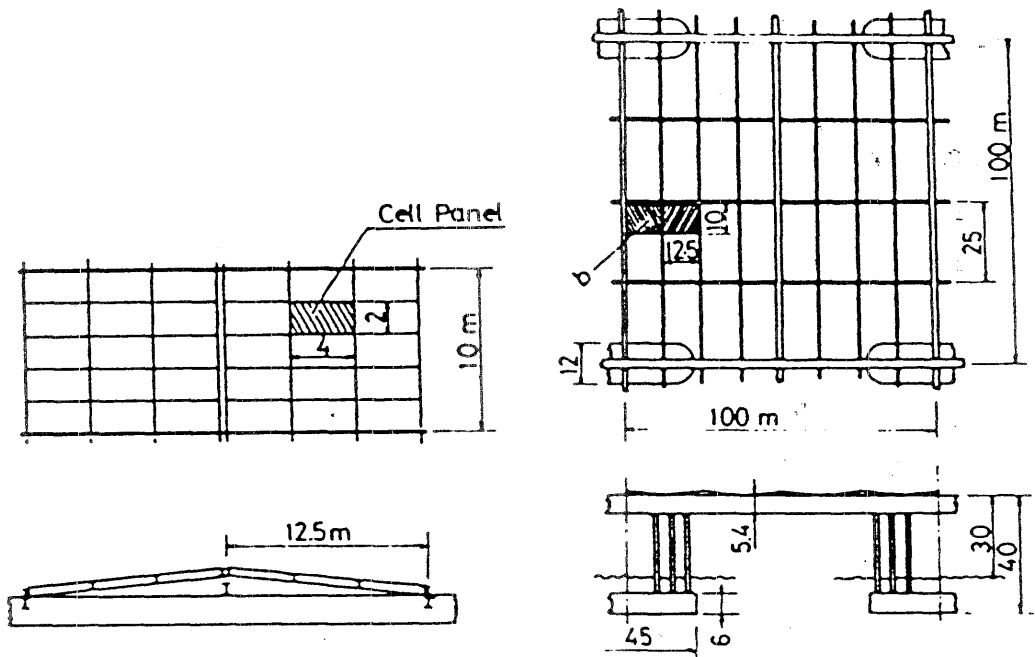
この利点を生かして、図-2のような筏を設計した。平面寸法は 620 m × 1620 m で、反射鏡式筏と同じ日射量になる。この筏の全重量を計算すると、約 33万トンとなり、反射鏡式筏の半分になる。また、位置保持エネルギーは約  $\frac{1}{5}$  になる。発電効率であるが、パネル効率に各種のロスを加えて、筏の表面積あたりの効率をみちびいて評価する。このようにして、もし、パネル効率を 12%とすると、液体水素が年間2200トン、15%だと2780トンというように、反射鏡方式の約半分の収量が得られる事がわかる。

両方式を比較すると、同じ入射表面積に対して、液化水素の収量は半分であるが、材料全重量も約半分であり、後述のように、材料重量を評価量とした本報告の中では、いずれの方式でもよいことになる。実際には、材料の質すなわち投入エネルギーないし経済性が優劣をきめる。

## 4. 生産および輸送システム

以上のようにして生産された水素を日本国内へ輸送するには、一度に大量に輸送できる、専用運搬船を用いる。もし、液化水素の形で運ぶとすれば、現用の LNGタンカーに似た液化水素タンカーといったものが考えられる。輸送形態には金属水素化物の形もあり、これには鉱石運搬船ないし、コンテナ船に似たものが考えられる。

ここで注意すべきは、これら専用船の主機関燃料は当然積荷の水素であり、輸送距離の長いことから積荷のかなりの部分を占めることである。したがって、この輸送システムを生産システムと一体と



b部詳細

a部詳細

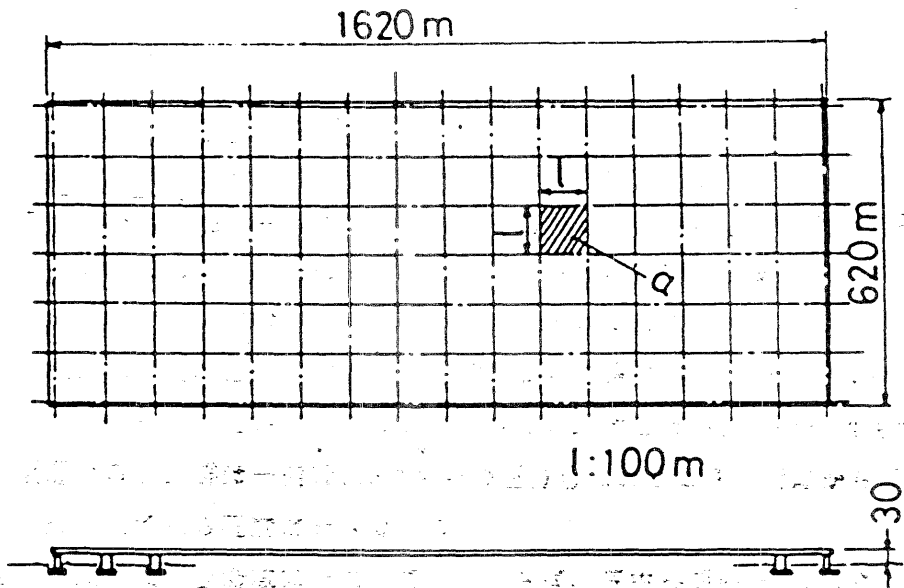


図-2 太陽電池式筏

して考えるほうがよいと思われる。

#### 4-1 液化水素タンカー

液化水素はLNGとくらべて密度が  $\frac{1}{6}$  であるので、きつ水がきわめて小さくなり、安定性や推進機の位置に影響し、船型を変えなければならないので、液化水素タンカーは厳密にLNGタンカーと相似にならない。しかし、ここでは簡単のため、相似のままの浅きつ水の実現と、バラストを積んできつ水も相似とした場合に分けて検討した。

タンク容量と船速をあたえると、LNGタンカーとの相似性から船型と機関出力が定まる。ただし、蒸発量と主機関燃料必要量をひとしくするためにタンク防熱層の厚さが変わり、タンク外径ひいては船の大きさの変化といった過程を通して、いく分かの修正がおこなわれる。主機関出力と効率から単位時間あたりの燃料消費量  $q$  を求めると、輸送可能液化水素量は

$$G_N = G_0 - 2Sq/v$$

となる。ただし、

$G_0$  : 満載積荷量,  $v$  : 船速,  $S$  ; 生産地から国内までの距離である。往復の燃料を考えて2倍してある。船速と機関効率をパラメータとしたタンク容量に対する輸送率  $G_N/G_0$  の変化を図-3に示す。

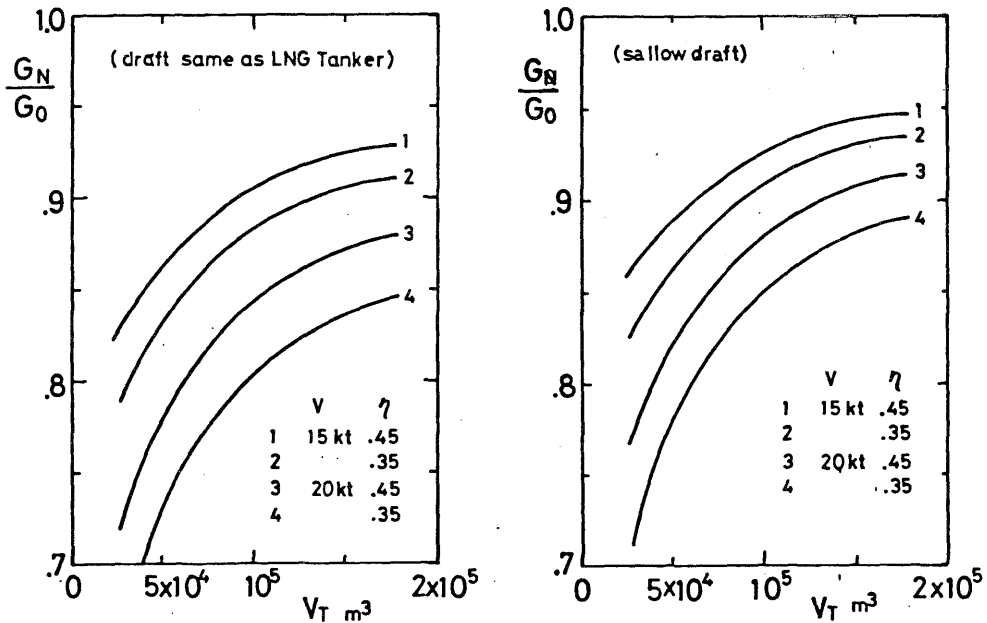


図-3 船速と機関効率をパラメータとしたタンク容量に対する輸送率の変化

#### 4-2 金属水素化物運搬船

これには二つの方式が考えられる。ひとつは、船内に固定したタンク内に金属水素化物を充填し、これに水素を導入、荷揚げ地でここから水素を放出させる方式である。もうひとつは、適当な大きさの容器に金属水素化物を詰めたものを運ぶコンテナ方式である。いずれの場合も、ベースとなる金属が大量に、往復とも船内に積まれた状態である。このような船の船型は丁度鉱石運搬専用船と同じ考え方で設計されるであろう。現用の鉱石運搬船の資料を整理すると、機関出力  $P$  (ps) と船速  $v$  (kn ot) および載貨重量 (ton) の関係をもとめると

$$P = 0.0156 G^{\frac{1}{2}} v^3$$

が得られる。水素化物の種類によって水素吸蔵量はことなり、 $G$  は水素化物の重量であって水素のそれではない。主機関効率を定めると燃料消費量が求められ、前節と同様にして輸送可能量あるいは輸送率が得られる。ただし、機関効率は、積荷の金属水素化物から燃料の水素を放出させるためのエネルギーを考慮して定める。

#### 4-3 液化水素タンカーによる荷役と輸送

水素の生産から国内までの輸送を一体のシステムとして考察すると前述した。研究のこの段階では、生産・輸送の過程は、定常な流れにのってすすむとしておく。筏で生産される水素が一定の量に達したとき、タンカーが到着してこれを積みこむ。このタンカーはさらに複数の筏 ( $m$ 基) をまわって積みこみをおこない満杯となる。到着間隔  $T$  とタンカーのタンク容量  $V_T$ 、筏一基あたり生産速度  $P$  とすると  $V_T = m p T$  となる。しかしながら、筏上には生産された液化水素をたくわえておく貯蔵タンクが必要である。このタンクの単位時間あたりのボイルオフ率を  $E$  とする。再液化も考慮すると、この到着間隔  $T$  のあいだにタンクの貯蔵量は

$$V = W_1 \left\{ 1 - \exp(-\varepsilon w_2 T / w_1) \right\} / \varepsilon w_2$$

となり、 $V_T = m V$  となる。すなわち生産速度は、 $V/T$  である。ここで  $W_1$  は単位時間あたり水素の電解液化にまわすことのできる電力量で、 $w_1$  は単位体積あたりの水素電解・液化、 $w_2$  は再液化のみに必要な電力である。これはボイルオフを再液化するために余分の電力ひいては余分の筏が必要なることを意味している。ここでさらに、タンカーへの荷役時ボイルオフも考慮する必要がある。

そこで、このシステムの中で重要な水素生産筏と液化水素タンカーの要目および数量を求める。筏は反射鏡式とし、その要目は前述のものにしておく。液化水素タンカーに対しては容量  $V_T$  と船速  $v$  が自由度として残っている。一隻のタンカーの輸送可能率は

$$V_N = V_T - (2S + 4S) q / \rho v$$



である。ここで $\rho$ は液化水素の密度である。また $\Delta S$ はタンカーの荷役の際の筏間移動距離で、多くの筏をまわるほど大きくなる。水素需要 $Q$ は、輸送路を流れる液化水素のフローにひとしくなければならない。そうするとタンカーのフローは単位時間あたり $Q/V_N$ 隻であらわされる。

一般にあるフローがあり、それを構成する単体がフローの中に滞留する時間があたえられれば、フローを構成する総数は

$$(\text{総数}) = (\text{フロー}) \times (\text{滞留時間})$$

であたえられる。液化水素タンカーの滞留時間は、輸送路上で $(2S + \Delta S)/v$ であり、荷役時間を $T_v$ 、筏への離着棧時間を $t_s$ とすると全体で

$$(2S + \Delta S)/v + T_v + mt_s$$

となる。ただし、全体システムとしては必要であるが、国内での積みおろし時間や船体の整備時間はここでは考えない。したがってタンカーの投入隻数は

$$N = \left\{ (2S + \Delta S)/v + T_v + mt_s \right\} Q/V_N$$

となる。筏全数を $M$ 基とすると、生産地全体は $MV/T$ の生産速度をもち、これはタンカーのフロー $Q/V_N$ にタンク容量 $V_T$ を乗じたものにひとしい。ゆえに

$$M = Q V_T T / V V_N = m Q T / V_N$$

となる。

ここで、この生産・荷役・輸送を一体としたシステムの最適化を考える。エネルギーを生産し輸送するためのシステムであるから、耐用年数を考慮にいた上でシステム実現のための投入エネルギーが最小であることがのぞましい。投入エネルギーはエネルギー原単位値などで調べてゆくことを予定しているが、いまのところは簡単に

「筏もタンカーも耐用年数は同じとし、投入エネルギーを代表するものとして、材料の全重量を考え、これを最小にする。」

という考え方をする。

反射鏡式筏の場合1基あたり約66万トンと見積ることができる。液化水素タンカーについてはLNG船の資料から

$$\text{重量(トン)} = 0.75 \times V_T (\text{m}^3)$$

の近似式を用いる。計算にあたっての各定数を次のようにとった。荷役時間・離着棧時間・荷役時ボイルオフはタンカーの大きさにかかわらず一定とした。

$$T_v = 12 \text{ hours}, \quad t_s = 3.6 \text{ hours}, \quad \epsilon = 0.07 \% / \text{day}, \quad w_2/w_1 = 0.25,$$

$$W_1/w_1 = 5,000 \text{ tons/year}, \quad Q = 19 \times 10^6 \text{ tons/year}, \quad V_B = 50 \text{ tons} \quad (\text{荷役時ボ}$$

イルオフ),  $\eta$  (主機関効率) = 0.35。

図-4 液化水素タンカーと筏の全材料重量

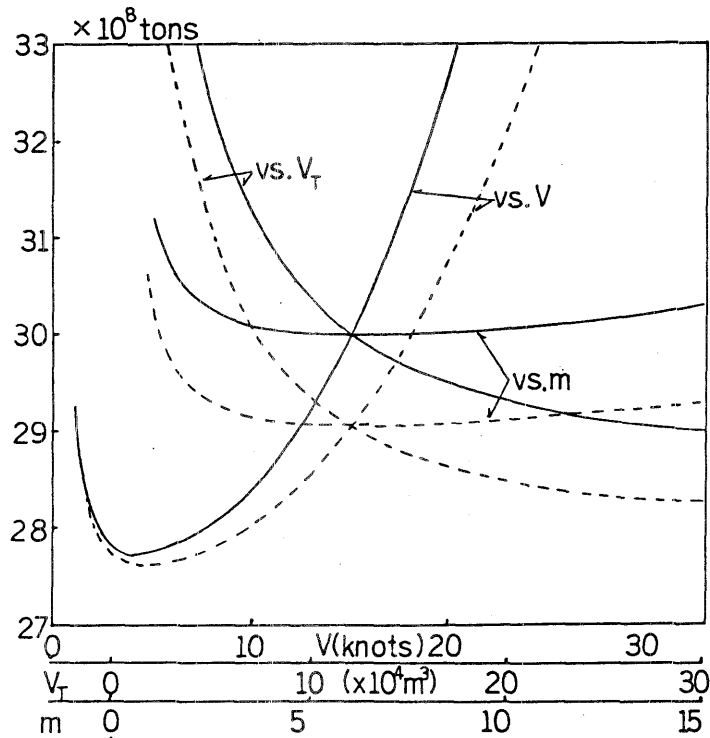


図-4は、 $V_T = 120,000 \text{ m}^3$ 、 $v = 15 \text{ knot}$ 、 $m = 6$  を基準にして、各パラメータの変化に対する筏+タンカーの全材料重量の変化をえがいたものである。液化水素タンカーでは、きつ水をバラストを積んで、相似なLNGタンカーと同じにしたもの（実線）とそうでなくきつ水の浅いもの（破線）を考えた。浅い方が抵抗が小であるから、全システムとしては有利な方向にある。図から、

- (1) 荷役の回数 $m$ の変化の効果はあまりない。
- (2) 容量が大きいほどよい。推進抵抗は容量の $2/3$ 乗になるので、容量が大きいほど全燃料消費がすくなく、筏の必要数が減少するからである。
- (3) 速度 $v$ はどちらかといえば小の方がよい。これも推進抵抗との関係で説明できる。

しかし、全材料重量そのものは、最小値とくらべて数%しかちがわないう範囲が相当に広く、現段階でこの最小値に固執する必要はなからう。そこで、現在のLNGタンカーに近いもの、すなわち $120,000 \text{ m}^3$   $15 \text{ knot}$  のものと最小値に対応する低速大容量の $300,000 \text{ m}^3$   $10 \text{ knot}$  の二種類をえらんで検討の対象にする。このえらび方に対応して、諸数値を表-3にまとめておく。

表-3 生産筏・液化水素タンカーの諸数値

容量 $V_T$	120000 $m^3$		300000 $m^3$	
船速 $v$	15 knot		10 knot	
	同きっ水	浅きっ水	同きっ水	浅きっ水
筏数 $M$	4520	4380	4180	4130
隻数 $N$	218	211	123	121
$m$	6	6	15	15
機関出力 ( $ps$ )	20000	15000	11000	8000

#### 4-4 金属水素化物運搬船による荷役と輸送

このシステムの場合もほぼ前節と平行してとりあつかうことになるが、いくつかの点で大きな違いがある。

- (1) 水素を液化するためのエネルギーは不要となるが、吸蔵・放出に要するエネルギーがかわりに必要である。したがって生産から輸送・利用まで、なるべく吸蔵・放出の回数をすくなくする必要はある。
- (2) ボイロフは考える必要がなく、再液化も不要である。

金属水素化物運搬船の二つの型、船上タンク式とコンテナ式とに対応して、生産筏上での貯蔵と荷役の方法を考える。

船上タンク式で用いる水素化物の種類としては、放出のさいに要する高温の熱源を荷揚げ地で期待できないので、比較的密度の大きい水素化物のひとつである  $LaNi_5H_6$  をえらぶ。一方、コンテナ式で用いる水素化物の種類は、密度の小さい  $MgH_2$  をえらぶとする。

吸蔵・放出の回数を最小にするには、次の2通りの荷役方法があろう。

- (1) 筏上で生産された水素をコンテナ内の金属に吸蔵させて、コンテナを集積しておきこれと到着したコンテナ船の水素をふくまないコンテナとの積替えをおこなう。
- (2) 運搬船上のタンクまたはコンテナに生産された水素を直接導入し、満載状態になるまで船は係留されている。

(1)の方式はコンテナ方式であり、(2)の方式はタンク方式とコンテナ方式の2通り、計3通りある。それぞれの場合について全材料重量の計算をおこなう。計算上の仮定として、コンテナ積替えの時間は、液化水素タンカーの荷役時間と同じとした。また、主機関効率は0.3とした。運搬船への投入材料重量は、つねに水素吸蔵合金を積んでいる状態なので満載排水量をとった。ただ、液化水素タンカーとの比較においては、材料の違いを無視することになるから、本来は投入エネルギーを積算すべきである。

計算の結果を図-5, 6, 7に示す。全材料重量の値をみると、液化水素タンカーによるシステ

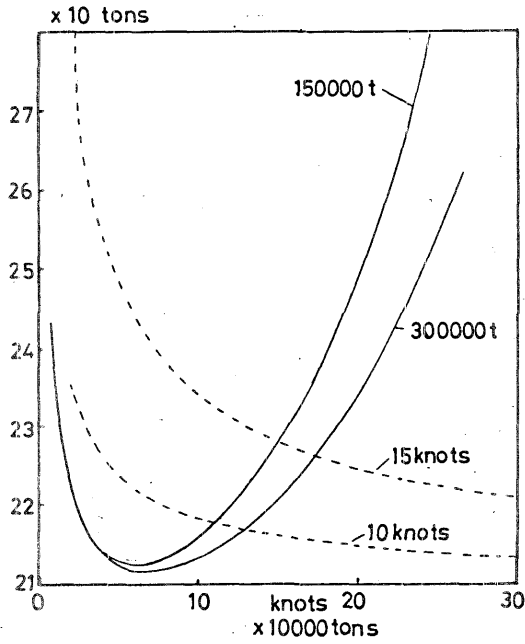


図-5 MH運搬船と筏の全材料重量  
；コンテナ積替え方式  $MgH_2$

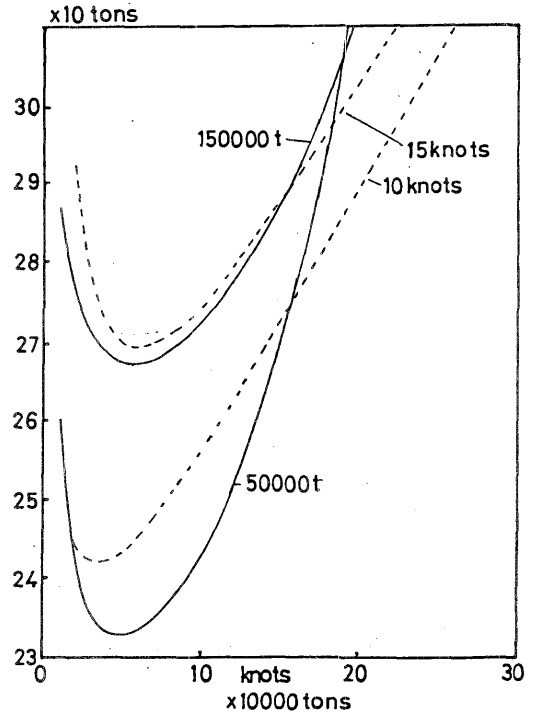


図-6 MH運搬船と筏の全材料重量  
；直接導入方式  $MgH_2$

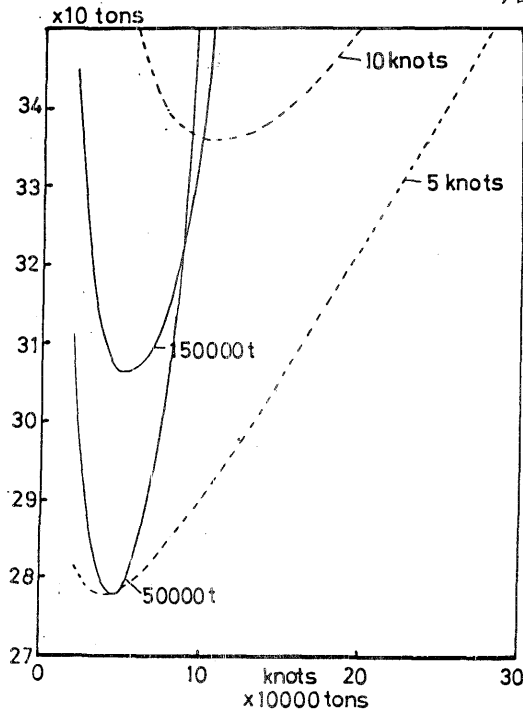


図-7 MH運搬船と筏の全材料重量  
；直接導入方式  $LaNi_5H_6$

ムと充分競合できるようにみえる。これは次のような理由による。

- (1) ボイルオフがないことは利点であり、そのために、余分の生産用筏がよりすくない。
- (2) 国内荷揚げ地から先の流通を切り離して論じたため、そこでの吸蔵・放出ロスが抜けている。

液化ガスについても同じであるが、ボイルオフを再液化するエネルギーは総体として金属水素化物の吸蔵・放出エネルギーより小さいと考えられる。

金属水素化物運搬船としては、次のような要目のものをえらび得るであろう。

- (1)  $Mg H_2$  コンテナ積み替え方式 300,000 tons 10 knot で 118隻、筏は 3170基
- (2)  $La Ni_5 H_6$  直接導入方式で 50,000 tons 5knot で 9822隻、筏は 3350基

## 5. 国内輸送と供給

現在の段階ではまだ、細かい輸送と供給のシステムを組み上げる必要はない。そこで、府県単位での必要水素量を、どのようにして荷揚げ地から輸送するかの骨組みのみを考える。輸送手段は石油と同じように内航タンカー、鉄道タンク車、タンクローリーがある。また、液化水素の形態による輸送・貯蔵を考える。ただ、そのパターンは、石油と液化水素の性質のちがいがら同じとならない。すなわち、液化水素はボイルオフがあって、その再液化設備が必要であるから、なるべく備蓄は少なくし、輸送距離を最短にすると共に、石油システムにおけるような二次基地のたぐいはなるべくない方がよい。また、輸送中ボイルオフはできるだけエンジン燃料とする。一方、精製設備は不要となり、コンビナートがなく、陸揚げ基地の規模は割に小となる。さらに、同一発熱量の液化水素の体積は、石油の約4倍となるから同一容積の輸送機関たとえばタンクローリー車の数が4倍必要となる。容積を大きくするならば、むしろ船舶の方が実現容易であり、そうすれば海上輸送の比重が高まる。

しかしながら、以上のことを全面的に考慮して最適なパターンを決定するということは後にゆずり、ここでは現状にもとずくと共に上記の考慮を加えたパターンの一例を示すにとどめた。

### 5-1 供給・輸送ルート

まず、国内の荷揚げ基地をどこにするかであるが、一応、石油を輸入している県に1基地を設定する。水素は精製を必要としないが港湾および付帯施設ひとつとりあげても、大量の液化水素を荷揚げする場所として、石油輸入基地はよい立地条件を持っているといえよう。

荷揚げ基地から各府県への輸送は、詳細は別に<sup>(2)</sup>ゆずるが、現状での石油輸送のマトリックスを参考にし、1輸送路1輸送手段として構成した。各府県内での供給末端までの輸送はタンクローリー車をもちいるものとした。表-4にその概要を示す。輸入港とは、生産地から直接輸送して荷揚げする場所を示し、移入地とは、そこからさらに内航船等を用いて輸送される他県内の場所である。移入地である県の輸入港の欄には、移送元の港が記入してある。また、移送の方法と移送元移入地間の距離をも示す。各府県内の輸送は、700Kgの液化水素タンクローリー車を用いるとしてその平均走行距離と回数および総走行距離を求めて表に記入した。

ただし、これはシステムのアウトラインを得るという意味で一例としてあげたものであって、最

表-4 国内輸送ルートと諸数値

県名	輸入港	移入地	方法	移入距離 (Km)	需要 (千ton)	平均走行 距離(Km)	ローリー 回数(千回)	総走行距離 (万 Km)
北海道	苫小牧	←			1147	77.18	1639	126498
青森	青森	←			257	26.13	368	9607
岩手	大船渡	←			222	33.84	317	10725
宮城	塩釜	←			387	23.51	553	12997
福島	小名浜	←			311	32.34	445	14381
秋田	秋田	←			178	29.45	254	7491
山形	塩釜	山形	鉄道	77	197	26.60	282	7495
茨城	鹿島	←			486	21.49	694	14913
栃木	横濱	小山	鉄道	110	283	22.06	404	8917
群馬	馬場	高崎	鉄道	140	284	21.96	406	8909
千葉	千葉	←			891	19.63	1272	24978
東京	東京	←			1743	12.75	2490	31734
神奈川	横浜	←			1817	21.66	2596	56232
埼玉	玉野	←	自動車	*	*	*	*	*
新潟	新潟	←			387	30.31	553	16771
富山	伏木	富山	←		182	17.46	260	4534
石川	水島	金沢	内航船	950	192	17.84	274	4882
福井	徳山下	福井	内航船	700	134	17.83	191	3408
山梨	横濱	甲府	鉄道	140	109	17.97	155	2787
長野	野	松本	鉄道	240	284	31.54	406	12798
静岡	清水	←			601	23.57	859	20247
愛知	名古屋	←			1543	33.76	2204	74407
岐阜	岐阜	←	自動車	*	*	*	*	*
三重	四日市	←			333	20.92	476	9963
和歌山	和歌山下	津	←		210	18.92	300	5682
大阪	堺	泉北	←		1741	32.79	2487	81555
滋賀	彦根	←	自動車	*	*	*	*	*
京都	都	←	自動車	*	*	*	*	*
奈良	都	←	自動車	*	*	*	*	*
兵庫	姫路	←			967	25.16	1381	34735
鳥取	徳山下	境	内航船	440	110	16.28	157	2552
島根	根	浜田	内航船	270	109	22.42	156	3507
岡山	水島	←			397	23.18	567	13150
広島	徳山下	広島	内航船	110	552	25.31	789	19977
山口	徳山下	←			392	21.49	560	12033
香川	川	←			228	11.90	325	3872
愛媛	松山	←			272	20.72	389	8060
徳島	堺泉北	今切	内航船	100	121	17.73	173	3075
高知	和歌山下	高知	内航船	200	133	23.22	190	4407
福岡	北九州	←			867	19.32	1238	23914
佐賀	唐津	←			115	13.52	164	2215
長崎	長崎	←			249	17.63	355	6261
熊本	徳山下	八代	内航船	420	280	22.95	399	9166
大分	大分	←			265	21.42	379	8117
宮崎	徳山下	油津	内航船	290	189	23.36	269	6295
鹿児島	喜入	←			367	26.34	525	13820
沖縄	那覇	←			244	13.46	349	4696

LORRY : 700kg (LH)

\* 自動車による移入県は、移出県と同一県と考えて県内輸送距離を計算した。すなわち、埼玉県は神奈川県に、岐阜県は愛知県に、滋賀県、京都府、奈良県は大阪府に含まれている。

適なシステムというわけでない。実際には、貯蔵および輸送設備への投入材料それから投入エネルギーや荷役・貯蔵・輸送・荷役にともなう損失を最小にするという方向でシステムを最適化する必要がある。

## 5-2 輸入基地への配船

表にあるとおり、各輸入港の水素需要はさまざまであり、港は日本列島の沿岸にばらまかれて存在している。生産地から液化水素を輸送してきたタンカーを、それぞれ各港へ何隻ずつ割当てるか、あるいは1隻で複数の港をまわって積みおろしをおこなうか、などの問題がある。これをきめれば、各輸入港での荷役等設備の見積りが可能となる。

タンカーの容量と船速は、第4章の生産および輸送システムによって定められるとする。そうすると、各港の必要水素量と港間の距離がきまっていて、配船および荷役にともなう液化水素のロスおよび荷役設備等とこの配船にともなうタンカー数の増分への投入エネルギーを最小にするような配船計画をもとめることになる。液化水素のロスは生産筏の増加したがって投入エネルギーの増加につながる。この問題の独立変数は、1隻のタンカーが複数の港をまわる組合せの仕方になる。

結論として、120,000 m<sup>3</sup> タンカーの場合は1隻1港、300,000 m<sup>3</sup> タンカーの場合、いく組かのグループ分けした複数個の港（例えば、日本海側の港および瀬戸内のいくつか等）を1隻のタンカーが受け持つのがよいということになる。余分の筏とタンカーの数は、120,000 m<sup>3</sup> で、 $\Delta M=42$ 、 $\Delta N=15$ 、300,000 m<sup>3</sup> で  $\Delta M=21$ 、 $\Delta N=8$ （いずれも同きっ水）という数値になる。

## 5-3 輸送手段別投入設備の数量

輸送手段は、内航液化水素タンカー、鉄道タンク車、タンクローリー車の3種を考えた。

液化水素タンカーについては、外航船より小型というだけで、取扱いは同じとしてよからう。すなわち、内航タンカーおよび輸送等にともなうロスをおぎなう生産筏の増加分の全材料重量を最小にするように、内航タンカーの容量と船速をきめる。計算結果によれば船速の影響はほとんどなく、一方では容量大であるほどよい、ということになる。容量は内航船ということで制約があるので、5,000 m<sup>3</sup> 10knot 型と 20,000 m<sup>3</sup> 15knot 型の2種類をえらぶことにした。

鉄道タンク車およびタンクローリー車については、あまり自由度はない。それは、鉄道および道路の現状によって制約されている。容量については100 m<sup>3</sup> および700 Kgを採用する。速度は、40 km/h と 15 km/h とする。自動車輸送は道路交通の流れによって制約されている。なお、積みこみ積み出しに要する時間をそれぞれ 2.0 h、0.5 h とする。

単位時間あたり需要をQとすれば、投入台数は

$$Q ( 2 d / v + 2 t_o + t_e ) / q$$

となる。qは容量、dは輸送距離、vは速度、t<sub>o</sub>は荷役時間、t<sub>e</sub>は整備あるいは待機時間である。この式は、フローと滞留時間、必要台数の関係を表わしている。これは三つの部分にわかれる。

$Q(2d/v)/q$  は輸送路途中にある台数である。 $2t_0Q/q$  は荷役をおこなっている台数である。 $t_eQ/q$  は整備中あるいは車庫に待機している台数である。後の二つは、一方において、必要な荷役設備と整備工場あるいは車庫の数量を表現しているわけである。

これらを使って、表-5にあるように輸送手段別の必要設備数量を求めた。 $t_e$ の値を知ることは困難であるので、タンクローリー車は1日12時間稼動、他はフル稼動とした。

表-5 国内輸送手段に関する諸数値

水素基地	移入港	輸送量 (tons/year)	輸送距離 (Km)	貯蔵量 (m <sup>3</sup> )	出入港回数	投入隻数
岡山	石川	191537	950	4870	554	9
山口	福井	133809	700	4910	384	5
山口	鳥取	109745	440	4940	313	3
山口	鳥根	109471	270	4960	311	3
山口	広島	552410	110	4990	1560	8
山口	宮崎	188581	290	4960	535	4
山口	熊本	279625	420	4940	797	7
大阪	徳島	121393	100	4990	343	2
和歌山	高知	132867	200	4970	376	3

基地	移入地	需要 (tons/year)	距離(Km)	投入台数	$Qt_0/q$
秋田	山形	197242	77	25	6.3
神奈川	栃木	282961	110	44	9.1
神奈川	群馬	283978	140	51	9.1
神奈川	山梨	108603	140	20	3.5
神奈川	長野	284060	240	74	9.1

神奈川  $\Sigma Qt_0/q = 30.9$

府県名	投入台数	$Qt_0/q$	府県名	投入台数	$Qt_0/q$
北海道	4225	187.1	三重	412	54.4
青森	377	42.0	和歌山	242	34.3
岩手	399	36.2	大阪	3050	283.9
宮城	522	63.1	兵庫	1373	157.6
福島	540	50.8	鳥取	114	17.9
秋田	287	29.0	鳥根	143	17.9
山形	293	32.2	岡山	530	64.8
茨城	613	79.2	広島	789	90.1
栃木	364	46.1	山口	495	63.9
群馬	364	46.3	香川	193	37.1
千葉	1051	145.3	愛媛	335	44.4
東京	1535	284.2	徳島	134	19.8
神奈川	2305	296.4	高知	178	21.7
新潟	637	63.2	福岡	1011	141.3
富山	198	29.6	佐賀	105	18.7
石川	212	31.2	長崎	272	40.5
福井	148	21.8	熊本	371	45.6
山梨	121	17.7	大分	334	43.3
長野	483	46.3	宮崎	254	30.8
静岡	813	98.1	鹿児島	541	59.9
愛知	2769	251.6	沖縄	223	39.8



## 6. むすびと考察

以上のようにして、水素の生産から各府県の末端供給施設への輸送までのシステムを、いくつかの選択肢を残して構成した。この中から選択肢を適当にえらんで、このシステムへの投入設備量をまとめると、表-6のようになる。こうしてシステムのアウトラインが明らかになったのであるが、さら

表-6 全システム投入設備の一例

筏数			4631基
外航タンカー	120,000 m <sup>3</sup>	15 knot	233隻
内航タンカー	5,000 m <sup>3</sup>	1.0 knot	44隻
鉄道タンク車	100 m <sup>3</sup>	40 Km/h	214台
タンクローリ車	10 m <sup>3</sup>	15 Km/h	29,357台
貯蔵タンク	20,000 m <sup>3</sup>		174基
貯蔵タンク	5,000 m <sup>3</sup>		19基
敷地面積			1,790,000 m <sup>2</sup>
鉄道タンク車 荷役施設			74台分
タンクローリ出荷場			3,224台分
内航輸送用施設			35隻分

に残された問題点を考察しながら、今後の研究の方向を述べておく。

- (1) 末端供給施設および利用施設（水素航空機・水素自動車等）について、さらにくわしい検討が必要である。投入材料ないし投入エネルギーを問題にしながら、システム設計を進めたのは、石油を水素に代替することの経済性を、ある一面からではあるにせよ、議論するためである。末端供給施設および利用施設への材料ないしエネルギー投入量も、概略把握する必要がある。
- (2) 生産・輸送の流れが定常とみなされている。生産の変動は備蓄で対応するが、直接には貯蔵設備、間接には輸送設備の増加へとはねかえってくる。輸送は需要変動によっても変動するし、輸送それ自体にも待機あるいは整備の時間のくりいれ、あるいは輸送速度の変動（事故もふくめて）など考える必要がある。これらには、いずれも余分の設備の保有という形で対応することになる。すなわち、システムへの投入エネルギーは増大する。

したがって、こういった変動がどのようなものか、現状の調査とその検討によって推定する必要がある。

- (3) 最適化は、投入全材料重量を評価関数として、しかも部分的におこなっただけである。

エネルギー原単位値を用いて、各種設備への投入エネルギーを定め、これらを用いて輸送手段や輸送ルートの構成までふくめて全システムの最適化を考えてゆく。

(4) 全システムを最適化したとしても、石油代替自体の得失いかん、という問題がある。

このためにはやはり、投入エネルギーの比較をおこなうのがよいと思われる。問題は、システムを構成する水素生産筏、液化水素タンカーなどを生産するためのエネルギーは、やはり従来どおりの石油等の化石燃料によるということである。交通機関燃料の石油を水素に代替して石油を節約しても、そのシステム実現により多くの石油等化石燃料を使用するのでは意味がない。一方、このシステムが実現すれば、従来のシステムでの精油所、石油タンカーなど一部が不要となり、その分だけ投入エネルギーが減少する。こういったことを勘案して、石油代替の得失を量的に表現できるであろう。たとえば

$$\text{石油代替度} = (A - B) / C$$

を定義する。ただし、Cは運輸交通機関の石油消費量で、Aはそのうち水素に代替された石油量、Bは前述の投入エネルギーの増加分と減少分の差の石油換算量である。

このようなことを念頭において、今後、エネルギーアナリシスをすすめてゆくことにする。

## 参 考 文 献

- (1) 太陽光利用洋上水素製造・輸送計画の調査研究 第1報～第4報；渡辺ほか；船舶技術研究所報告 Vol. 19. No. 4 昭和57年7月および Vol. 20. No. 2 昭和58年3月
- (2) 運輸交通の水素エネルギーシステム中間報告書 昭和61年3月 船研内部資料