

運輸交通機関の水素エネルギーシステム化 による省石油とCO₂低減

平岡克英*、渡辺健次**、森下輝夫*、
野村雅宣*、菅 進*、井亀 優*、
千田哲也***

Energy Analysis and CO₂ Emission Evaluation of a Hydrogen Energy System for the Transportation System in Japan

K. Hiraoka, K. Watanabe, T. Morishita,
M. Nomura, M. Ikame, T. Senda

Abstract

A concept of hydrogen energy system for the transportation system in Japan is designed and analyzed in view of fossil fuel conservation and CO₂ emission suppression. It is assumed that all the fuel oil used by the transportation media, 69 million kiloliter a year, is replaced by 9.8 million ton/year of liquefied hydrogen (LH₂). The liquefied hydrogen is produced in the South Pacific Ocean with solar photovoltaic cells on a large number of rafts of which total area is about 6000 km². The hydrogen is transported to Japan by 270 LH₂ tankers of which capacity is 125000 m³.

All the elements of the hydrogen energy system are supposed to be manufactured or constructed with the conventional energies such as coal, oil and electricity. Therefore the hydrogen energy system requires some investment of the conventional energies to build itself although it produces 100 % of the hydrogen energy as the fuel for the transportation media. The largest part of the energy investment in the hydrogen energy system is the one in the hydrogen production subsystem. As the technologies progress, the energy investment in the hydrogen production subsystem may be improved to one fourth of the one at present. In this case the hydrogen energy system can save 78 % of the petroleum energy which the current transportation system would consume and can suppress 81 % of the CO₂ emission which the petroleum consumption by the transportation media would release.

* 機関動力部
** システム技術部

*** 材料加工部
原稿受付：平成2年3月5日

目次

1. はじめに
 2. 投入エネルギーとCO₂発生量の計算方法
 3. 水素供給システム
 - 3.1 水素供給システムの概要
 - 3.2 末端消費地の水素需要
 - 3.3 水素基地と蒸発損失
 - 3.4 鉄道タンク車およびタンクローリーによる輸送
 - 3.5 液化水素タンカーによる輸送
 4. 不要となる石油系諸設備
 - 4.1 石油精製設備
 - 4.2 外航石油タンカー
 - 4.3 国内輸送設備
 - 4.4 貯蔵タンク
 5. 液化水素製造システム
 - 5.1 液化水素製造筏の概念設計
 - 5.2 液化水素製造筏の投入エネルギーとCO₂発生量
 - 5.3 液化水素製造筏の評価
 6. 水素エネルギーシステムの評価
 7. むすび
 - 付録1. 液化水素タンカーによる水素輸送量
 - 付録2. 諸設備への投入エネルギーとCO₂発生量
 - 付録2.1 タンカー
 - 付録2.2 タンクローリー
 - 付録2.3 鉄道タンク車
 - 付録2.4 貯蔵タンク
 - (1)石油タンク
 - (2)大規模液化水素貯蔵タンク
 - (3)中小容量液化水素貯蔵タンク
- 参考文献

1. はじめに

現在世界で消費されているエネルギーの約90%は石油、天然ガスおよび石炭などの化石エネルギーであり、化石エネルギーのうち石油の消費が一番多く全消費エネルギーの38%を占める。わが国においては世界の石油エネルギー消費量の約7%と大量の石油エネルギーを消費している。しかし、近年、化石エネルギー、特に石油エネルギーの将来における枯渇や、地球規模的環境汚染、特に大気中CO₂濃度増加による地球温暖化が全世界で取り組むべき大きな問題となっている。また、わが国においては、国内石油エネルギー消費量

の約30%は運輸交通機関で使用しており、特に大都市においては自動車からの排気ガスによる大気汚染が大きな問題となっている。これら石油資源枯渇問題、地球規模あるいは地域的環境問題に対処するためには太陽エネルギー、水力、風力、波力などの環境を汚染する物質を排出しないエネルギーを利用することが重要である。わが国の運輸交通機関においても石油系燃料を再生可能なエネルギーで代替することができればその効果は非常に大きい。

再生可能なエネルギーは一般には電力に変換して利用される。しかし、運輸交通機関では、その動力源に利用するには、持ち運びできるエネルギー媒体に変換する必要がある。液化水素は、以下の理由によりこのエネルギー媒体の有力な候補となり得る。1) 水の電気分解により簡単に製造できる、2) 液化により輸送・貯蔵が容易になる、3) 水素と酸素の反応生成物は再び水になり、基本的には汚染物質を排出しない。

運輸交通機関の消費する石油系燃料を水素によって代替することができる水素エネルギーシステムを構成するためには水素の製造設備を始め、輸送、貯蔵、末端で利用するための各種設備を必要とする。これらの設備すべてを再生可能なエネルギーを利用して製造することが可能であれば石油資源枯渇問題や地球規模的環境問題は解決される。しかし、これは現状では不可能であるし、また現在の高度に発達した化石エネルギーシステムを利用しないで諸設備の製造を行うのは現実的ではない。そこで運輸交通機関の消費する燃料は太陽エネルギーを利用して製造する水素で代替するが、水素エネルギーシステムを構成する水素製造、輸送、貯蔵、末端利用の各種設備は従来の化石エネルギーを利用して製造することにする。この場合、太陽エネルギーから水素が製造されるとしても水素エネルギーシステムを構成するために多大の化石エネルギーを必要とし、従来の化石エネルギーシステムが消費していた化石エネルギーよりも多くの化石エネルギーを消費するシステムとなれば石油代替エネルギーシステムとしては意味をなさない。このような石油代替エネルギーシステムはそれを導入することによって正味いくらの石油代替がなされるのか明らかにする必要がある。また、石油燃料を水素に代替すれば直接のCO₂排出は抑制されるが、一方では水素エネルギーシステムの諸設備製造時に化石燃料を使用するためCO₂を排出することになる。また、諸設備製造のために投入されたエネルギー量が同じでも使用する化石燃料の種類によ

てCO₂発生量が異なる。したがって水素エネルギーシステムの導入により正味いくらのCO₂排出が抑制されるのかも評価の対象になる。

水素による化石エネルギー代替を目的とした水素エネルギーシステムの案としては、太田時男ら⁽¹⁾によって提案されたPORSHE計画がある。この水素エネルギーシステムは、太陽エネルギーの豊富な南太平洋上に筏を浮かべ、その上で太陽熱発電を行い、さらに海水から電気分解によって水素を製造するものである。また、船舶技術研究所においても、この案に基づき太陽エネルギーを利用した洋上水素製造と輸送計画について検討が行われた⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。これらの研究は、主として太陽熱発電に基礎をおいた水素エネルギーシステムに関したものである。太陽熱発電を筏上で行う場合、太陽エネルギーの変換効率が高いが高倍率の集光を行うため放物面鏡と受熱部の位置関係を高精度で保持する必要があり、そのため剛性の高い筏すなわち投入エネルギーの高い筏を必要とする。このため著者らの試算によれば現状技術では設備への投入エネルギー以上の水素エネルギーを製造することができない。一方、太陽光発電の場合はそれほど高い剛性の筏を必要としないこと、太陽電池は現状では効率が低い在今后効率向上が期待できること等により設備への投入エネルギーの低減が期待できる。

本報告では太陽光発電を利用した水素エネルギーシステムの概念設計を行いその石油代替効果とCO₂排出抑制効果を評価する。すなわち日本のエネルギー需要の一部門である運輸部門で消費される石油系燃料をすべて水素に代替することとして水素の需要量を推定する。ついで水素エネルギーシステムは太陽エネルギーの豊富な南太平洋上に筏群を浮かべ、その上で太陽光発電および液化水素の製造を行い、液化水素タンカーで日本に輸入し、液化水素の国内供給を府県レベルまで考慮したものとして、必要な諸設備量を計算する。

水素エネルギーシステムの正味の石油代替度を評価するために次式で表す代替度Sなる指標を導入する。

$$S = \{E_1 - (E_2 - E_3)\} / E_1$$

ここでE₁は代替される年間石油使用量の熱量換算値、E₂は水素エネルギーシステムを実現するのに必要な1年当りの投入エネルギーで、例えば水素製造設備、液化水素タンカー、水素貯蔵タンク製造等に投入されたエネルギー、E₃は不要となった石油エネルギーシステムの諸設備を生産するための年当りのエネルギーで、

例えば不必要となった精油設備、オイルタンカー、貯油設備の製造等に要したエネルギーである。

水素エネルギーシステムの正味のCO₂排出抑制効果を評価するためには、次式で示すCO₂排出抑制制度SCという指標を導入する。

$$SC = \{C_1 - (C_2 - C_3)\} / C_1$$

ここでC₁は代替された石油燃料の年当りCO₂発生量、C₂は代替に必要な設備増加にともなう年当りCO₂発生量、C₃は不要となった設備の年当りCO₂発生量である。これら2個の評価指標を計算するため、水素エネルギーシステムの諸設備と不要となる石油系設備への投入エネルギーとこれらのエネルギーから排出されるCO₂量を積算する。

本報告は太陽光発電・液化水素方式によるわが国の運輸交換機関の石油代替エネルギーシステムを提案し、上に述べたエネルギー解析を行い、システム実現に必要な技術開発課題とともに石油資源枯渇問題と地球環境問題への効用を明らかにした。

2. 投入エネルギーとCO₂発生量の計算方法

水素エネルギーシステムを導入する際に必要となる諸設備および不要になる石油系システムの諸設備に投入されるエネルギー量とエネルギー投入に際して排出されるCO₂量の計算方法を以下に述べる。

完成した機器や設備へ投入されたエネルギーには、素材や部品の製造エネルギー、組み立てあるいは建設時に投入されるエネルギー、輸送エネルギー、運転・維持等に消費するエネルギーを含んでいる。これらは複雑に絡み合っており、またデータが限られている現状では正確に全投入エネルギーを求めることは困難である。本報告では諸設備への投入エネルギーとCO₂排出量を計算するため、設備の概略の素材投入重量を推定し、素材への投入エネルギーを算出する。組み立て・建造に要する製造エネルギーはこの素材への投入エネルギーに比例すると仮定する。素材投入エネルギーと製造エネルギーの和を設備の投入エネルギーとする。素材単位当りの投入エネルギーは文献⁽⁷⁾⁻⁽⁸⁾のデータを参考にして決める。

素材製造に投入された素材単位当りの投入エネルギーをエネルギー原単位という。これにならって、素材単位当りに発生するCO₂量をCO₂発生原単位ということにする。CO₂の発生量は投入エネルギーの種類によって異なるので各種エネルギーの投入割合を考慮する

表 2.1 エネルギー源のCO₂発生原単位

	石 炭	石 油	L N G	電 力
発熱量	6200kcal/kg	9400kcal/l (11000kcal/kg)	13300kcal/kg	
炭素含有量(wt%)	62%	85%	75%	
CO ₂ 発生原単位	0.367g/kcal	0.283g/kcal	0.207g/kcal	0.345kg/kwh

表 2.2 電気事業発電電力量

単位 10⁹ kwh

年度	水力 (%)	火力 (%)	原子力 (%)	合計 (%)
85	81.2(13.4)	363.8(60.2)	159.0(26.3)	603.9(100)

表 2.3 電気事業発電用燃料消費量

年度	石炭湿炭 (10 ⁶ ton)	燃料油 (10 ⁶ kl)					L P G (10 ⁶ ton)	L N G (10 ⁶ ton)
		重油	原油	ナフサ	N G L	軽油		
85	22.6	21.4	12.8	0.4	0.3	0.2	0.6	21.6

(註) 熱量計算に使用した燃料の発熱量

石炭6200kcal/kg 重油9900kcal/l 原油9400kcal/l ナフサ8600kcal/l

N G L 8600kcal/l 軽油9200kcal/l L P G 12000kcal/kg L N G 13300kcal/kg

必要がある。しかし、ここでは計算を簡単にするために考慮するエネルギー源を電力、石油、石炭の3種類とする。表 2.1 に各種燃料の発熱量と炭素含有量の代表的な値、それから計算されるCO₂発生原単位を示す。電力のCO₂発生原単位は、電気事業による総発電量⁽⁹⁾(表 2.2)と発電用燃料消費量⁽⁹⁾(表 2.3)から計算されるCO₂発生量の比とした。ただし、CO₂発生量計算に際して投入される燃料の割合はエネルギー基準で石油45%、LNG37%、石炭18%とした。

表 2.4 に本報告で考慮した素材およびそのエネルギー原単位、エネルギー源投入割合、CO₂発生原単位を示す。なお、金属Si、Alは酸化物を炭素電極で還元する時、セメントはCaCO₃をCaOにする時CO₂を発生するので、これらの素材の単位重量当りに発生するCO₂発生量を分子モル比によって計算し、投入エネルギーによるCO₂発生量に加えたものをCO₂発生原単位とした。

(304)

建造・組み立て時に投入される製造エネルギーおよびその際発生するCO₂量は次のように計算する。組み立て産業において消費されるエネルギーはその18.9%が直接的に消費されるエネルギーで、残りは素材・部品等間接的に投入されるエネルギーとなっている⁽¹⁰⁾。そこで建造、組み立てに要する製造エネルギーを素材投入エネルギーの20%とする。また、そのエネルギー源投入割合を電気50%石油50%とする。自動車については、全投入エネルギーの60%が素材への投入エネルギーとなっている⁽¹⁰⁾。そこで自動車と鉄道タンク車の製造エネルギーは素材投入エネルギーの67%とし、そのエネルギー源投入割合は電気65%、石油35%とする。

諸設備の投入エネルギーとCO₂発生量の計算方法は付録2に示す。なお液化水素製造システムについては5章でのべる。

表 2.4 素材の投入エネルギー原単位とCO₂発生原単位

投入材料	エネルギー原単位 (kcal/kg)	投入エネルギー割合%			CO ₂ 発生原単位 (CO ₂ kg/kg)	素材比重 (t/m ³)
		電力	石油	石炭		
鉄鋼材	6670	11	6	83	2.25	7.8
特殊鋼材	12450	20		80	4.01	7.8
アルミ材	50680	93	7		9.86	2.7
シリコン基盤	612500	100			87.9	2.3
セメント	1100	24	4	72	0.85	—
コンクリート	170	24	4	72	0.13	2.3
板硝子	3300	15	85		0.87	2.7
ガラス繊維	10170	40	60		2.30	0.08
パーライト	3300	15	85		0.87	0.08
プラスチック	24860	25	75		6.15	1.4
ウレタン	24860	25	75		6.15	0.09
ゴム	24860	25	75		6.15	1.2

(註1) 電力の投入エネルギーは2450 kcal/kwhとして計算した。

(註2) コンクリートのエネルギー原単位はその重量の約15%がセメントである⁽³⁶⁾のでセメントの15%とした。パーライト⁽³⁷⁾(組成例、75% SiO₂、15% Al₂O₃)は板硝子と等しく、プラスチック、ウレタン、ゴムはエポキシ樹脂のエネルギー原単位と等しいと仮定した。

3. 水素供給システム

3.1 水素供給システムの概要

輸送機関が国内で消費する石油系燃料を水素に代替して供給する場合、石油製品が原油の精製を必要とするのに対し水素は石油精製のような2次加工の必要がないので製造地から末端消費基地までの供給システムが石油と水素では異なったものになると考えられる。しかし、本論ではとりあえず石油製品輸送に関する資料に基づいて供給システムを構成することにした。末端消費地における水素需要量は自動車、船舶、航空機各輸送機関が現在消費している石油系燃料使用量から推定する。ただし、鉄道については使用エネルギーが少ない上電化が進んでいるため除外する。製造地は南太平洋とし末端消費基地までの輸送は石油系燃料の輸送体系にならって、図3.1に示すようにする。すなわち、南太平洋から外航タンカーで輸入基地まで輸送しさらに移入基地へ内航タンカー、鉄道によって輸送する。輸入基地または移入基地から末端消費基地へはタンクローリーによって輸送する。

輸入基地は、現在石油製品を5万トン以上輸入している府県で125000 m³の外航水素タンカーに相当する石油タンカー(16万DWトン相当)または125000 m³

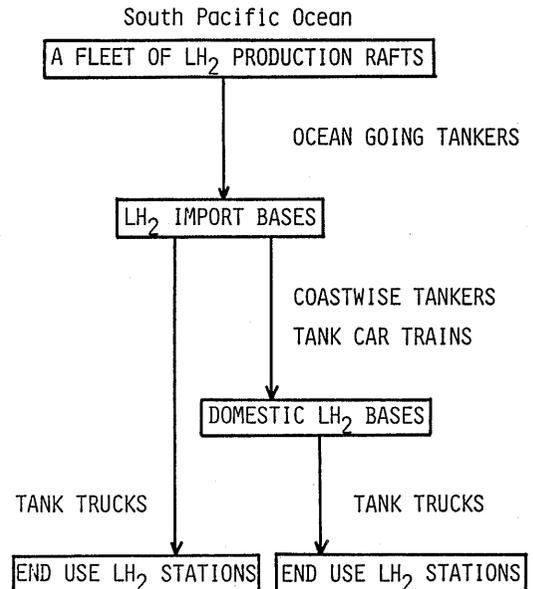


図 3.1 液化水素供給システム

表 3.1 輸入基地・移入基地及び移入手段

番号	県名	輸入基地	移入基地	移入先	移送手段
1	北海道	苫小牧			
2	青森		青盛	千宮	内航船
3	岩手		森岡	葉城	内航船
4	宮城	塩釜			
5	福島		小名浜	神奈川	内航船
6	山形		秋山	千宮	内航船
7	茨城	鹿島			
8	栃木		小高	神奈川	鉄道
9	群馬		高崎	神奈川	鉄道
10	千葉県	千葉			
11	東京都		東	神奈川	内航船
12	神奈川県	川崎			
13	埼玉県	新伏	*	神奈川	自動車
14	新潟県				
15	富山		七敦	岡山	内航船
16	石川		甲松	山神	内航船
17	福井			奈川	鉄道
18	山梨				
19	長野				
20	静岡県	清水			
21	愛知県	四日市	*	愛知	自動車
22	岐阜	下津			
23	三重	下津			
24	和歌山	下津			
25	大阪	泉			
26	滋賀		**	大	自自動
27	京都		**	大	自自動
28	奈良		**	大	自自動
29	兵庫県	姫路			
30	鳥取		境	山	内航船
31	島根		田	山	内航船
32	岡山	水島			
33	広島		尾道	山	内航船
34	山口	徳山下			
35	香川	徳下			
36	愛媛		松山	山	内航船
37	徳島		橘	大	内航船
38	高知		高知	山	内航船
39	福岡	北九州			
40	佐賀		伊万里	大	内航船
41	長崎		長崎	山	内航船
42	熊本		八代	山	内航船
43	大分				
44	宮崎		細島	山	内航船
45	鹿児島	喜入			
46	鹿兒	喜入			
47	沖縄	金城			

*印は自動車により直接移入することを示す。

LNGタンカー（10万総トン）の入港可能な港湾に1個所を設定する。同じ府県に該当する港湾が2個以上存在する場合には、入港能力の一番大きい港湾を輸入基地とする。石油製品の輸入が5万トン以下の府県には輸入基地を設けず、移入基地を1個所設ける。

府県間の輸送は、現在の石油製品の移入先府県のうち最も移入量の多い府県から、鉄道、内航タンカー、自動車の内で最も取り扱い量⁽¹¹⁾の多い手段で全ての需要量を輸送するものとする。すなわち、移入先と輸送手段は一通りとする。したがって、輸入港の水素輸入量は、その府県の需要量と移出先の需要量の和になる。移入基地の設定地は鉄道による移入県では県庁所在地または鉄道の要衝地とし、内航船による移入県では、入港可能な石油タンカーの載貨重量トン(DW)の最も大きな港とした。

輸入基地または移入基地から県内各地の末端消費基地へはすべてタンクローリーで輸送する。タンクローリーで移入される府県の場合には、移入基地を設けず、直接輸入基地から末端消費基地へ輸送するものとする。

以上の方法で定めた輸入基地、移入基地およびその輸送手段を表3.1に示す。本水素供給システムに必要な投入設備量、水素需要量の計算方法を次項以下で述べるが計算結果をまとめて表3.2、表3.3にそれぞれ示す。なお、水素製造システムについては5章で述べる。

表3.2 水素供給システムに必要な設備

必要な設備	必要数量
12.5万m ³ タンカー	270隻
5000m ³ タンカー	75隻
50m ³ タンク車	580両
10m ³ タンクローリー	30794台
12万m ³ タンク	21基
5000m ³ タンク	53基
500m ³ タンク	129基
10m ³ タンク	54161基

表3.3 液化水素必要製造量
(単位 千トン/年)

末端消費地需要	19724 (79.2%)
外航船燃料	2807 (11.3%)
蒸発損失	2357 (9.5%)
必要製造量(合計)	24888 (100%)

3.2 末端消費地の水素需要

輸送機関が現在使用している原動機の形式によって使用する燃料の種類が異なる。また、これらの原動機に水素を使用することができても熱効率が変化し同じ出力を得るために必要な熱量が変わることも考えられる。しかし、水素を燃料とする原動機は研究段階にあることを考慮し、必要な水素量は現在使用されている燃料と熱量換算で等価なものとする。換算には表3.4に示す低位発熱量を使用する。各輸送機関が国内で消費する燃料量と原油輸入量の推移を表3.5⁽¹²⁾に示す。1985年では輸送機関の燃料消費量は原油輸入量の約35%程度となっている。

末端消費地における水素需要量を府県別に推定する。しかし各輸送機関の燃料消費量を府県別に示す適当な統計データが無いので表3.5の1985年の全国消費量を使用して以下のように、府県別の石油系燃料消費量を推定し、これを水素需要に換算した。府県別ガソリン消費量は、統計1⁽¹³⁾の府県別揮発油販売量に比例するとした。軽油も同様に、統計1の府県別販売量に比例するとした。LPGは統計2⁽¹⁴⁾の府県別営業用乗用車保有数により比例配分した。船舶の消費する重油は、統計3⁽¹⁵⁾の府県別入港総トン数により比例配分した。航空機用ジェット燃料は、統計1の府県別ジェット燃

表3.4 石油系燃料の水素への換算

燃料種類	低位発熱量		比重	換算係数 水素t/石油kl
	kcal/kg	kcal/l		
ガソリン	10600	7314	0.69	0.256
軽油	10650	9532	0.895	0.333
ジェット	10220	8176	0.8	0.286
重油	9600	9600	1.0	0.336
LPG	11000	6960	0.54	0.223

表3.5 輸送機関のエネルギー消費量の推移

(単位 10⁶kl)

年 度	80	81	82	83	84	85
自動車						
ガソリン	35.3	35.1	35.1	34.9	34.2	34.2
軽油	16.5	17.1	17.6	18.3	19.3	20.3
LPG	2.9	2.9	2.8	2.9	2.8	2.9
海運(重油)						
内航	5.8	4.7	4.3	3.9	3.9	3.9
外航	9.6	8.8	6.4	4.2	4.5	4.0
ジェット燃料	3.3	3.2	3.2	3.1	3.4	3.5
合計	73.4	71.8	69.4	67.3	68.1	68.8
原油輸入量	249.2	230.2	207.4	212.8	212.9	197.3

表 3.6 府県別水素需要量と水素ステーション (HS) の基数

番号	県名	水素需要量 (千トン)				HS 基数 (基)
		自動車	船舶	航空	全需用	
1	北海道	1035	84	98	1217	2688
2	青森	238	23	9	270	821
3	岩手	220	11	1	232	788
4	宮城	345	31	25	401	1049
5	福島	319	8	<1	326	1218
6	秋田	183	3	2	187	687
7	山形	188	13	2	203	733
8	茨城	416	48	26	491	1744
9	栃木	298	0	<1	298	1239
10	群馬	298	0	0	298	1246
11	千葉	663	170	19	852	2064
12	東京都	1413	102	276	1792	3488
13	神奈川県	769	352	5	1126	1995
14	埼玉県	562	0	7	569	1908
15	新潟	384	20	5	408	1324
16	富山	176	10	2	189	534
17	石川	177	5	21	203	611
18	福井	135	5	0	140	479
19	山梨	113	0	0	113	639
20	長野	295	0	<1	296	1290
21	静岡県	550	49	9	609	2061
22	愛知県	1011	179	36	1226	2978
23	岐阜	292	0	2	294	1192
24	三重	261	59	6	326	974
25	和歌山	135	58	<1	193	654
26	大分	941	160	109	1210	2448
27	滋賀	153	3	0	156	489
28	京都	271	3	<1	274	872
29	奈良	99	0	0	99	413
30	兵庫県	600	269	<1	869	1770
31	鳥取	109	3	5	116	336
32	島根	109	5	1	115	461
33	岡山	295	84	<1	380	1047
34	広島	395	135	4	534	1255
35	山口	262	109	9	380	817
36	香川	152	66	2	219	572
37	愛媛	183	77	9	269	885
38	徳島	107	13	3	123	650
39	高知	115	17	4	136	615
40	福岡	636	132	93	861	1877
41	佐賀	108	9	<1	118	504
42	長崎	189	43	20	253	673
43	熊本	241	30	18	288	1193
44	大分	164	75	9	248	735
45	宮崎	166	7	25	199	806
46	鹿児島	254	69	44	367	1113
47	沖縄	137	36	78	251	226
	合計	16163	2573	988	19724	54161

料油の販売量に比例配分した。以上の方法により計算された府県別の水素需要量を表 3.6 に示す。末端消費基地としては、現在のガソリンスタンドに相当する水素ステーション (HSと記す) が考えられる。そこで現在のガソリンスタンドと同数の水素ステーションを設置することにしその数⁽¹³⁾も併せて表 3.6 に示す。

3.3 水素基地と蒸発損失

水素基地ではタンカーによって南太平洋から運ばれた水素を積み下ろし、需要に応じて各地へ移送する。そのため、タンカーの専用埠頭、荷役設備、貯蔵タンク、蒸発ガスの処理施設、移送するために内航船用埠頭、鉄道引き込み線及び内航船、鉄道車両、タンクローリーへの液化水素移送設備が必要となる。しかし本報告ではこうした設備の製造に要するエネルギーの見積りにおいては貯蔵タンクだけを考察の対象とした。

タンカーの入港する基地のタンク容量はタンカー1隻が一度に荷役できる容量とする。すなわち外航タンカーの入港する輸入基地は 12 万 m³、内航タンカーの入港する移入基地では 5000 m³のタンクとする。鉄道移入基地のタンクは、液体水素専用列車の容量を1編成 10 両、500 m³とし、貯蔵タンク容量をこれと同じ 500 m³とする。これらの貯蔵タンクの基数は、1基のタンクに対して荷役作業が1日1回できるものと仮定して求める。末端水素ステーションは、現在のガソリンスタンドと同じ場所に同じ数設置する。そのタンクの容量は、10 klとした。

水素貯蔵中および荷役中の蒸発ガスは損失となるが、貯蔵設備の大きな所では再液化の方が有利と考えられる。液化電力を 10 kWh/kg、発電に必要な熱量を 2450 kcal/kWh とすると水素の発熱量が 28570 kcal/kg であるから蒸発ガスの 46% を使用すれば残りの蒸発ガスが再液化されることになる。再液化は 500 m³以上のタンクを有する基地についてについて考慮した。

貯蔵中の蒸発率⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁷⁾は、容量 10 kl のタンクは 1% / 日、500 m³以上のものは 0.15% / 日とした。

移送時の蒸発損失は、配管クーリング、バージ、ポンピング等の過程で発生する。タンクローリーの場合、自己加圧方式で移送量の 6% が蒸発損失になるとされている⁽¹⁶⁾。そこでタンク車とタンクローリーの移送時蒸発率を 6% とした。タンカーのように大流量の移送時蒸発率はデータがないので、ポンプ仕事すべてが蒸発損失になるとして蒸発量を計算する。ポンピング圧力 P (kg/m²)、移送量 V (m³/h)、ポンプ効率 η、蒸

発潜熱 r (107 kcal/kg)、密度 ρ (71 kg/m³) とすると移送時蒸発量 ΔG (kg/s) は次式ようになる。

$$\Delta G = 6.51 \times 10^{-7} PV / \eta / r \quad (3.1)$$

従って移送時蒸発率 ε (%) は次式で与えられる。

$$\epsilon = \Delta G / \rho V = 3.08 \times 10^{-5} P / \eta \quad (3.2)$$

移送圧力を 40000 kg/m²、ポンプ効率 η = 0.6 とすれば ε = 2% となる。

3.4 鉄道タンク車およびタンクローリー車による輸送

鉄道タンク車またはタンクローリーの台数を N、タンクの容量を G_T、輸送距離を s、平均速度を v、荷の積み込み積み下ろしに要する時間をそれぞれ等しく T_L とすると、タンク車またはタンクローリーの単位時間当りの輸送量は単位時間当りの需要 q に等しいから次式が得られる。

$$q = NG_T / (2s/v + 2T_L) \quad (3.3)$$

自動車と鉄道は既存の道路または線路とその付帯設備を利用するから車の大きさや速度の決定にはほとんど自由度がない。従って、現状から次のように定数を定める。

タンクローリー車は、G_T = 700 kg、v = 15 km/h、T_L = 0.5 h。鉄道タンク車は、G_T = 50 m³、v = 40 km/h、T_L = 2.0 h。

鉄道タンク車の必要両数 N は以上の数値と表 3.7 の輸送距離を使用して式 (3.3) から計算される。表 3.7 に各移入県の必要タンク車両数および必要タンク基数を示す。

水素タンクローリーの輸送距離 s を、以下のように見積った。石油タンクローリーの品目別輸送統計⁽¹⁸⁾によれば、揮発油の平均輸送距離が 28.87 km、その他の石油製品の平均輸送距離が 26.44 km である。また、それぞれの輸送トン数が揮発油 10873 トン、その他の石油

表 3.7 鉄道タンク車両数とタンク基数

番号	県名	輸送距離 (km)	両数	タンク基数
3	岩手	170	106	21
7	山形	77	58	18
9	栃木	100	98	27
10	群馬	120	108	27
19	山梨	130	43	10
20	長野	230	167	26
	合計	—	580	129

表 3.8 タンクローリーの輸送距離と必要台数

番号	県名	輸送距離(km)	台数
1	北海道	76.6	4681
2	青森	25.9	413
3	岩手	33.6	438
4	宮城	23.3	566
5	福島	32.1	593
6	秋田	29.2	316
7	山形	26.4	316
8	茨城	21.3	649
9	栃木	21.9	403
10	群馬	21.8	401
11	千葉	19.5	1051
12	東京都	12.7	1649
13	神奈川県	21.5	2248
14	埼玉	*	*
15	新潟	30.1	704
16	富山	17.3	215
17	石川	17.7	234
18	福井	17.7	162
19	山梨	17.8	132
20	長野	31.3	527
21	静岡県	23.4	863
22	愛知県	33.5	2853
23	岐阜	*	*
24	三重	20.8	422
25	和歌山	18.8	233
26	大阪	32.6	3186
27	滋賀	*	*
28	京都	*	*
29	奈良	*	*
30	兵庫県	25.0	1290
31	鳥取	16.2	126
32	島根	22.3	157
33	岡山	23.0	531
34	広島	25.1	796
35	山口	21.3	500
36	香川	11.8	194
37	愛媛	20.6	346
38	徳島	17.6	142
39	高知	23.1	191
40	福岡	19.2	1050
41	佐賀	13.4	113
42	長崎	17.5	289
43	熊本	22.8	401
44	大分	21.3	327
45	宮崎	23.2	281
46	鹿児島	26.2	566
47	沖縄	13.4	238
	合計	-	30794

* 印は輸入県の距離に含まれる。

製品 146878 トンであるのでこの重みで平均すれば石油タンクローリーの平均輸送距離は 26.61 km となる。水素タンクローリーの各県内の輸送距離⁽⁵⁾は、各県の面積の 1/2 乗に比例するものとし、その比例定数は各県の需要量の重みで平均した結果が平均輸送距離 26.61 km となるように決める。尚、タンクローリーによる移出を行う輸入県の県内輸送距離は移入県の面積を輸入県のそれに含めて計算した。また、タンクローリーの必要台数の計算においては、タンクローリーが 1 日に稼働できる時間を 12 時間とし、(3.3)式から得られる必要台数の 2 倍とした。府県別の必要台数と県内輸送距離を表 3.8 に示す。

3.5 液化水素タンカーによる輸送

南太平洋の水素製造から日本国内の輸入基地までの輸送は外航液化水素タンカーによるが、液化水素輸送量とそれに要する隻数を以下の方法で求める。液化水素は沸点が -235°C の極低温の液体であるため輸送中の蒸発損失が避けられない。そこでこの蒸発ガスを液化水素タンカーの燃料として利用することにし、その蒸発量を主機関燃料必要量に等しくするという条件で液化水素タンカーによる輸送量を求める。液化水素タンカーによる水素輸送については、船型が現用の球形タンク型LNGタンカーと相以であるとして、すでに詳細に検討されている⁽⁶⁾。本報告では文献⁽⁶⁾の方法により、正味輸送量を計算する。なお、計算の詳細は付録 1 に示す。

LH_2 タンカーのタンク容量 V_T (m^3)、船速 v (kt)、主機関の熱効率 η を与え、またLNGタンカーの蒸発率 α (1/日)、防熱層厚さ δ (m)、タンク容積効率 η_T 、喫水比 d/D を与えると式 (3.4) と (3.5) から LH_2 タンカーのタンク容積効率 η_{TLH} が計算される。さらに式 (3.6) により主機関燃料必要量に相当する熱量 Q_f (kcal/h) が得られる。

$$\eta_{\text{TLH}} = \eta_{\text{TLNG}} / (1 + 4.5 \Delta\delta / d_{\text{TLNG}}) \quad (3.4)$$

$$\Delta\delta / \delta_{\text{LNG}} = 4.57 \times 10^5 \times \alpha_{\text{LNG}} (\eta V_T^{1/3} \eta_{\text{TLH}}^{2/3}) / \{v^3 (d/D)_{\text{LNG}}^{2/3}\} - 1 \quad (3.5)$$

$$Q_f = 1.45 V_T^{2/3} (d/\eta_T / D)_{\text{LH}}^{2/3} v^3 / \eta \quad (3.6)$$

ここで $\eta_T = V_T / \text{LBD}$ ：タンク容積効率、L：船の長さ (m)、B：船の幅 (m)、D：船の深さ (m)、d：喫水 (m)、 d_T ：タンク直径 (m)、 $\Delta\delta$ ： LH_2 タンカーのタンク防熱層厚さ増分 (m) である。航路の長さをSとすると、往復の燃料消費をさしひいて輸送できる液化水素量 G_N は次式で与えられる。

$$G_N = \rho_{LH} V_T - 2 Q_r S / v H_1 \quad (3.7)$$

ここで H_1 ：蒸発ガスの低位発熱量 (kcal/kg)、 ρ_{LH} ：液化ガスの密度 (kg/m³) である。

タンカーが荷役地において必要とする時間は、接岸作業やローディングアーム接続に要する時間 (離着機時間 T_a) とタンク容積とポンプ能力に関するタンカーに固有な荷役時間 T_L が考えられる。生産地における荷役は、各筏で生産される水素がある一定量に達したとき、タンカーが到着してその水素を積み込み、さらにタンク容量を満たすまで r 個の筏をまわるモデルを想定する。国内においては各輸入基地1個所で全量を荷おろしする。各輸入基地における需要量 q_i 、生産地からの距離 S_i とすれば必要な外航タンカー隻数 N_i は、次式で与えられる。

$$N_i = q_i \{ 2 S_i / v + (r+1) T_a + 2 T_L \} / G_N \quad (3.8)$$

現在のLNG船のデータを参考として計算した液化水素外航タンカーの必要隻数 N_i を輸送距離 S_i とともに表3.9に示す。計算に使用した各定数は以下の通りである。

液体水素タンカーのタンク容量 $V_T = 125000$ m³、船速 $v = 15$ kt、離着機時間 $T_a = 3.6$ h、荷役時間 $T_L = 3.6$

表3.9 外航タンカー隻数とタンク基数

番号	県名	輸送距離(km)	隻数	タンク
1	北海道	9800	16.0	1
4	宮城	9680	11.2	1
8	茨城	9690	6.4	1
11	千葉	9790	17.4	1
13	神奈川	9820	64.9	2
15	新潟	10260	5.7	1
16	富山	10430	2.7	1
21	静岡	9880	8.1	1
22	愛知	10060	20.6	1
24	三重	10030	4.4	1
25	和歌山	10210	4.6	1
26	大阪	10290	25.8	1
30	兵庫	10280	12.0	1
33	岡山	10320	8.2	1
35	山口	10560	33.1	1
36	香川	10300	3.1	1
40	福岡	10640	12.3	1
44	大分	10480	5.2	1
46	鹿児島	10570	5.2	1
47	沖縄	10570	3.6	1
	合計	—	270	21

h、主機関効率 $\eta = 0.35$ 、LNGタンカーの蒸発率 $\alpha_{LNG} = 0.25\%$ /日、タンク防熱層厚さ $\delta_{LNG} = 0.2$ m、喫水比 $(d/D)_{LNG} = 0.46$ 。荷役に立ち寄る筏数 r は、おおよそ筏の1月の液体水素生産能力が5000 m³であることから $r = 25$ とする。

内航タンカーによる輸送の場合は、容量5000 m³、船速10 ktとして必要隻数を求めた。基本的には液化水素輸入の項で述べた手順と同じであるが、以下の定数を与えた。離着機時間 $T_a = 1.8$ h、荷役時間 $T_L = 2$ h、喫水比 $(d/D)_{LNG} = 0.62$ 。表3.10に各航路の輸送距離、投入隻数、タンク基数を示す。なお、内航タンカーが使用する輸送用燃料はすでに国内需要の中に含まれているものとする。

表3.10 内航タンカー隻数とタンク基数

番号	県名	輸送距離(km)	隻数	タンク数
2	青森	1080	12.3	3
5	福島	360	5.5	3
6	秋田	1280	10.1	2
12	東京	20	6.2	16
17	石川	1190	10.2	2
18	福井	670	4.1	2
31	鳥取	440	2.3	2
32	島根	270	1.5	1
34	広島	180	5.2	5
37	愛媛	100	1.8	3
38	徳島	110	0.9	2
39	高知	200	1.4	2
41	佐賀	290	1.7	2
42	長崎	330	3.9	3
43	熊本	420	5.5	3
45	宮崎	200	2.1	2
	合計	—	75	53

4. 不要となる石油系諸設備

日本の運輸交通機関が使用している燃料を水素で代替することにより不要となる石油系燃料量は、年間約 69×10^6 klであり、これは日本の原油輸入量の約35%にあたる。そこで石油精製設備、外航石油タンカー、内航石油タンカー、鉄道タンク車、タンクローリー、貯蔵タンクの容量の35%が不必要になるとして、以下にそれぞれの不必要量を求める。

4.1 石油精製設備

石油精製のための投入エネルギーは、設備への投入エネルギーと精製中に消費する石油のエネルギー、原油と石油製品の輸送エネルギー分を含めた解析が行わ

れており、原油の発熱量の12%としている⁽¹⁹⁾。ただしこの輸送分にはタンカーなど輸送機関を製造するための投入エネルギーは含まれていない。運輸交通機関の水素化にともない $69 \times 10^6 \text{kl}$ の原油の輸入と精製が不要となるとすれば、その投入エネルギーは石油の発熱量を 9400kcal/l として $7.78 \times 10^{13} \text{kcal/y}$ となる。

4.2 外航石油タンカー

原油の輸入状況を表4.1に示す⁽²⁰⁾。中近東からの輸入が最も多いのでこの中から原油輸入量の35%が不要になるとする。日本の石油タンカーの保有状況をみると、石油タンカーの多くは24万DW(載貨重量トン)と7.5万DWクラスに集中している⁽²¹⁾。そこで中近東地域に就航している日本国籍タンカーの船腹数を9万

GT(総トン)以上とそれ以下の2クラスに分類し表4.2に示す⁽²⁰⁾。中近東からは24万DWクラスの大型タンカーによる輸入が主である。DWの約90%が積荷の重量と考えられるので、輸入した原油重量TをDW合計で割った値は年間の就航回数をほぼ表していることになり、就航回数は年約7回となる。一方、中近東までの距離を平均6500海里とし、速力15ktとすれば、往復だけで36日を要し、荷役時間を考慮して40日とすれば年間9回の就航が可能である。この差の原因は、整備に要する時間と油需給の不安定性の吸収のために余裕を取っていることによると考えられる。ここでは液化水素タンカーの取扱いと同じ条件にするため年間就航回数を9回とする。

不要とする輸入量を年間Q、タンカーの積載量をV、

表4.1 日本の原油輸入状況

単位 10^3ton

輸入先	輸入量 (%)	内日本船の輸送量
近海	39689 (23.4)	24465
中近東	116420 (68.9)	55520
その他	12914 (7.7)	6013
合計	169203 (100.0)	85998

表4.2 簡略化した中近東地域就航船腹量

	隻数	DW	DW/隻	輸入量(T)	T/DW
1万~9万GT	6	857	137	—	—
9万GT以上	32	7644	243	—	—
合計	38	8501	—	55520	6.5

(DW、Tの単位は 10^3ton)

表4.3 各輸送設備の容量別保有統計および石油製品輸送割合

内航タンカー			タンクローリー			鉄道タンク車		
a) 保有数								
GT	隻数	ΣGT	kl	台数	Σkl	ton	台数	Σton
2000<	87	269621	10>	3366	—	25>	494	8685
1000~2000	80	128712	10~15	12111	—	30	2068	62040
500~1000	324	279036	15~20	111	—	35	3822	133770
200~500	497	217062	20<	58	—	35<	1098	46732
200>	869	111245	—	—	—	—	—	—
合計	1857	1005676	合計	15646	166331	合計	7482	251227
b) 輸送割合								
51.9%			43.1%			5.0%		
c) 石油種別輸送内訳								
白油	37.5%		71.1%			55.7%		
黒油	62.5%		28.9%			44.3%		

年間就航回数n回とすると不必要となるタンカー隻数は Q/Vn で与えられ、24万DW(12.7万GT)のタンカーの場合30隻不必要となる。

4.3 国内輸送設備

不要となる国内の石油系輸送設備を、内航タンカー、鉄道タンク車及びタンクローリー車とし、これらの数量を以下のようにして求める。これらの輸送設備による石油製品輸送実績にしたがってそれぞれの不要な輸送設備容量を算定する。この不要な輸送設備容量は階級別保有状況に従って配分し不要な数量を計算する。

表4.3(a)に各輸送設備の容量階級別保有統計⁽²²⁾⁽¹³⁾を示す。表4.3(b)に各輸送設備の石油製品輸送実績の割合を示し、その石油種類別内訳を表4.3(c)に示す。ただし種類としては白油(ガソリン、軽油、ジェット燃料)と黒油(重油)の2種類である。表4.3(b)および(c)から石油製品の輸送割合は黒油が47.1%、白油が52.9%と計算される。原油の輸入量の35%が不要になるのでこれと同じく石油製品輸送実績の35%が不要な輸送量になるとする。ただし、輸送機関が消費する燃料のうち船舶が消費する重油が約12%を占めるので不要になる輸送量35%分の内、黒油の輸送が4%分、白油の輸送が31%分を占める。従って黒油の輸送量の8.5%、白油の輸送量の58.6%が不要となり、各輸送設備の不要となる輸送容量の割合は表4.4に示すようになる。

不要となる輸送設備の数量を求めるため、内航タンカーではGT階級別の総トン数にしたがって不要な容量を配分し、それぞれ不要となる平均GTのタンカーの隻数を求める。不要になる内航タンカーの隻数を表4.5に示す。タンクローリーでは、14kl積みものが主流であり、鉄道タンク車の場合は35ton積みが主流な

表4.4 各輸送設備の不要となる輸送容量

不要設備	不要割合	不要容量	不要数量
内航タンカー	27.2%	273544GT	(表4.5)
タンクローリー	44.0%	73186kl	5228(14kl)
鉄道タンク車	36.6%	91949ton	2627(35ton)

表4.5 総トン数別不要となる内航タンカー隻数

GT	ΣGT	平均GT	不要隻数
2000<	73337	3100	24
1000~2000	35010	1600	22
500~1000	75898	860	88
200~500	59041	430	137
200>	30259	130	233

ので不要となるものをこれに限るとし、それぞれ5120台、2602両が不要とする。

4.4 貯蔵タンク

我国の貯油タンクの所在は、石油輸入基地、精油所、油槽所、ガソリンスタンドと各種製造業者と考えられる。油槽所は石油製品供給のための中継基地である。製造業者の貯油タンクは自家用と考えられるから考察の対象外とする。精油所の貯蔵タンクは、4.1節石油精製設備の投入エネルギーの中で考慮されているのでここでは除く。従って、ここでは石油輸入基地の原油タンク、油槽所における貯油タンクおよびガソリンスタンドの地下タンクを対象とする。

原油の貯油能力は、石油輸入基地で19.02%、精油所で80.98%となっている⁽²³⁾。石油輸入基地の原油タンクはすべて大型タンクと考えられ、この容量を10万klとする。その35%が不要になるとし、39基が不要と

表4.6 石油製品タンク容量別基数と不要となる油槽所貯蔵タンク

容量(kl)	基数	容量	油槽所容量	不要容量	不要基数	平均容量
20000<	360	10898785	—	—	—	—
10000~20000	299	3800881	828610	290013	19	15300
5000~10000	514	3382839	3382839	1183994	158	7490
1000~5000	647	1666169	1666169	583159	194	3000
500~1000	239	163560	163560	57246	76	750
500>	1360	158748	158748	55562	222	250
合計	—	20070982	6199926	2169974	—	—

なるとする。

精油所と油槽所と合わせた石油製品の貯蔵容量を、容量別に表 4.6⁽¹³⁾に示す。このうち、油槽所の貯油タンクは精油所のそれに比し小さいと考えられるから貯油容量の小さいタンクはすべて油槽所に属するものとする。油槽所の貯油容量は、石油製品の貯蔵容量の 30.89%となっている⁽²³⁾ので、これを表 4.6 の容量の小さい方のタンクに油槽所貯蔵容量として割当てた。この油槽所貯蔵容量の 35%が不要になるとして容量別に不要基数を表 4.6 に示した。

ガソリンスタンドは 54161 箇所あるがこれはすべて水素ステーションにおきかえる。貯蔵容量は 182959 klあり⁽¹³⁾、タンクの平均容量は 34 klとなる。しかし、消防法によればタンク 1 基容量は 10 kl以下であるので 10 klタンクが 182959 基不要になるとする。

5. 液化水素製造システム

5.1 液化水素製造筏の概念設計

現状技術をもとに太陽電池パネルを設置する筏を概念設計した。図 5.1 にその全体図及び部分構造図を示す。筏の平面寸法は 620 m×1620 m で、太陽電池パネル面積を筏の 96%、 $9.64 \times 10^5 \text{ m}^2$ とした。筏は一辺 100 m の正方形のブロック 96 個で構成し、構造部材は、すべて鋼材とし最大許容応力 10 kg/mm^2 、断面形状は I 形として計算した。このブロックは 4 隅を脚と浮体により海面上 25 m の高さに支持し、ブロック上には $12.5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ のパネル架台を 1/10 程度の勾配を付けて設置する。太陽電池パネルの重量は 14 kg/m^2 とし、パネル面には風速 60 m/s に相当する風圧 240 kg/m^2 が垂直にかかるとした。浮体は没水型とし潮流による

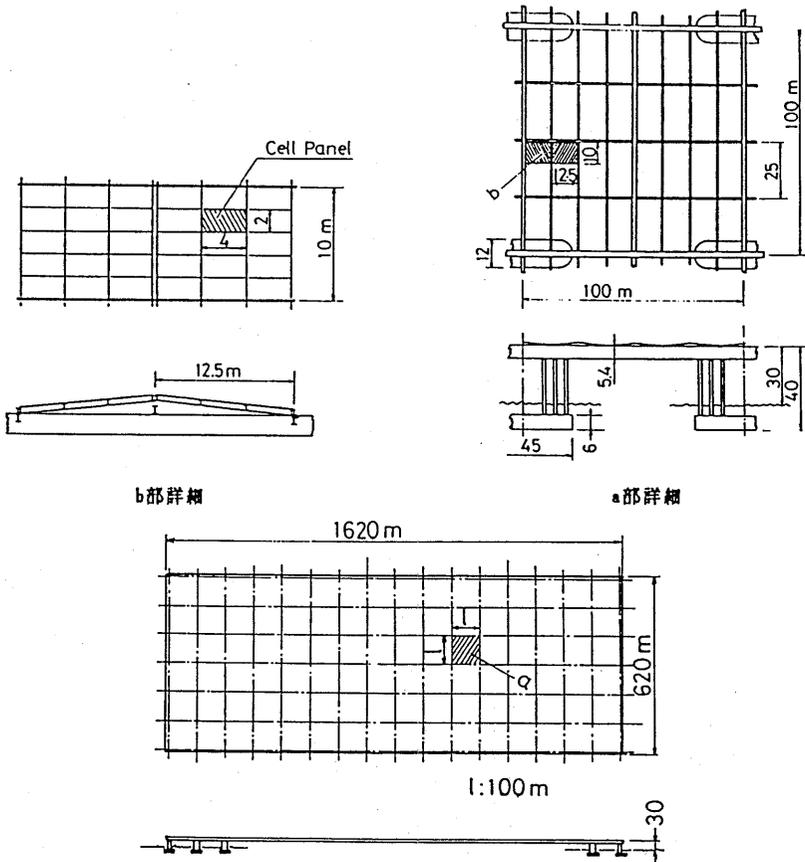


図 5.1 鋼製太陽電池筏の概念図

抵抗を少なくするように潮流の方向に長軸に向けた長楕円体とした。位置保持動力は、潮流速度 0.6 m/s、風速 6 m/s の時 1050 kW となる⁽⁴⁾。鋼材の総重量は 3.15×10^5 ton となる。今後この筏を鋼製筏と呼ぶ。

鋼製筏は後で述べるように投入エネルギーが非常に大きく、投入エネルギー以上の水素製造が現状では望めない。そこで筏構造の改善による材料使用量の減少、使用材料の変更など投入エネルギーの低減化が必要で

ある。このため、①高張力鋼の使用により鋼材使用量の低減、②脚間隔を 50 m に短縮して横桁の重量を軽減、③浮体はエネルギー原単位の小さいコンクリートを使用した筏の概念設計を行なった。これを今後コンクリート製筏と呼ぶことにし図 5.2 に示す。鋼材の総重量は 0.59×10^5 ton に減少するが、コンクリートが 1.46×10^5 ton 必要になる。また、筏の浮体数が増加するために位置保持動力は約 2 倍になる。

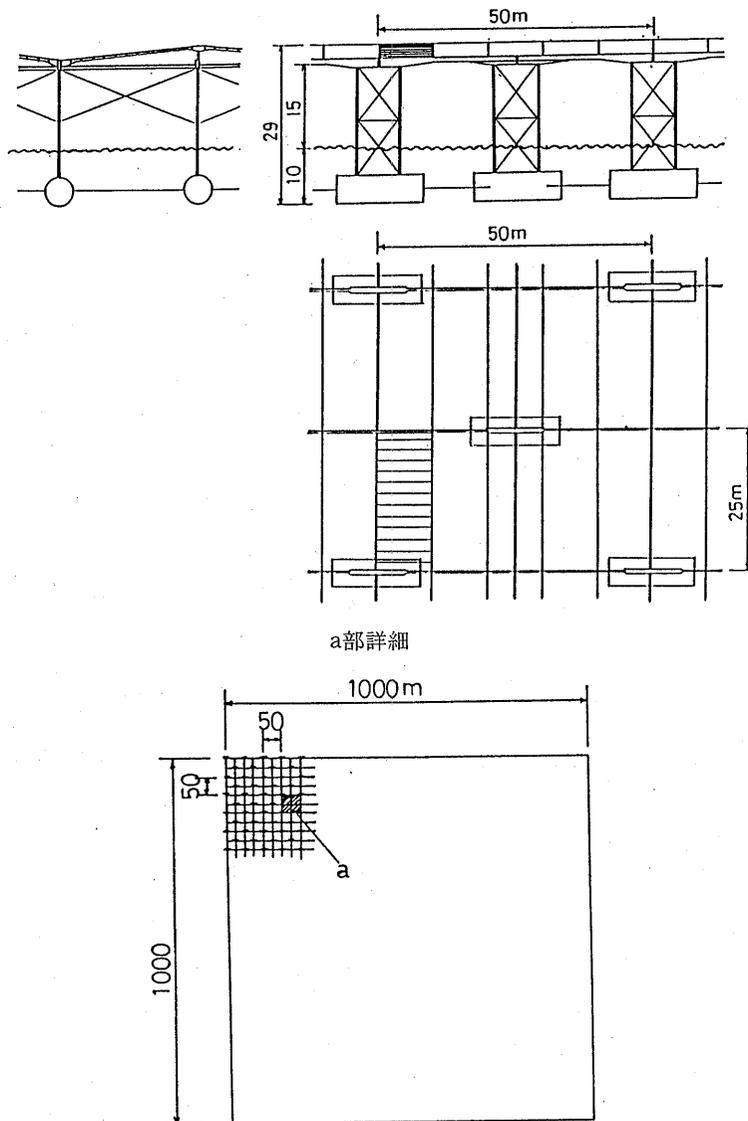


図 5.2 コンクリート製太陽電池筏の概念図

筏上に設置した太陽電池パネルによる発電電力は次式により計算する。

発電電力=全天日射量×太陽電池パネル面積

$$\times F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \times F_5 \times F_6 \quad (5.1)$$

ここで F_1 =太陽電池パネル変換効率(28℃)、 F_2 =電池素子温度補正率、 $F_3=1$ -表面汚れロス率、 $F_4=1$ -直流集電ロス率、 $F_5=1$ -運転時間ロス率、 $F_6=1$ -最適出力ロス率。

筏を設置する南太平洋での全天日射量⁽²⁴⁾は150 kcal/cm² (17.44×10⁸kWh/km²y)である。太陽電池パネルのパネル変換効率(28℃)は現状では12%を越えたところである。電池素子温度補正率は電池素子の表面温度を55℃とみて0.86とした。表面汚れロス率、直流集電ロス率、運転時間ロス率、最適出力ロス率は国内の1000kWプラント(西条発電所、1985年建設)の設計にならい、それぞれ3%、2%、3%、5%をとった⁽²⁵⁾。太陽電池の出力は日射量の変動にしたがって変化するのでそれを制御するために蓄電池、インバータ等の制御用電気設備を必要とする。これらの電気設備への投入エネルギーは太陽電池の最大出力に比例することにし、最大出力は発電電力の6倍とする。

液体水素製造に必要な電力は65kWh/kgLH₂(電気分解45kWh⁽²⁶⁾、水素液化10kWh⁽²⁷⁾、その他10kWh)とする。筏の補機や生活用電力はその他の10kWhに含むものとした。製造された液化水素はタンカーに引き渡すまで5000m³のタンクで貯蔵する。貯蔵期間および移送時の蒸発ガスは再液化する。その電力は10kWh/kgLH₂とする。

タンカーに引渡しできる液化水素量を液化水素製造量と呼ぶことにする。太陽電池の発電電力 E_0 (kW)、筏の位置保持動力 E_p (kW)、液化水素製造電力 w_L (kWh/kg)、再液化電力 w_r (kWh/kg)、貯蔵時の蒸発量 B_s (kg/h)、移送時の蒸発量 B_t (kg/h)とすれば、単位時間当りの液化水素製造量 p (kg/h)は、次式で得られる。

$$p = \{E_0 - E_p - (B_s + B_t) w_r\} / w_L \quad (5.2)$$

なお、貯蔵時の蒸発量 B_s 、移送時の蒸発量 B_t は次式で与える。

$$B_s = \alpha p V_s \quad (5.3)$$

$$B_t = \varepsilon p \quad (5.4)$$

ただし、 V_s はタンク容量(m³)、 α は蒸発率(=0.15%/

(316)

日)、 ρ は液化水素比重量(kg/m³)、 ε は移送時蒸発率(=2%)である。

必要な筏基数 M は、単位時間にタンカーに引き渡す液化水素の量を q (kgLH₂/h)とすれば次式で表される。

$$M = q(1 + \varepsilon w_r / w_L) / \{ (E_0 - E_p) / w_L - B_s w_r / w_L \} \quad (5.5)$$

図5.3に筏1基当りの液化水素製造量と水素需要(表3.2)に対して必要な筏基数を示す。なお図中の開発度 D については5.3節で述べる。

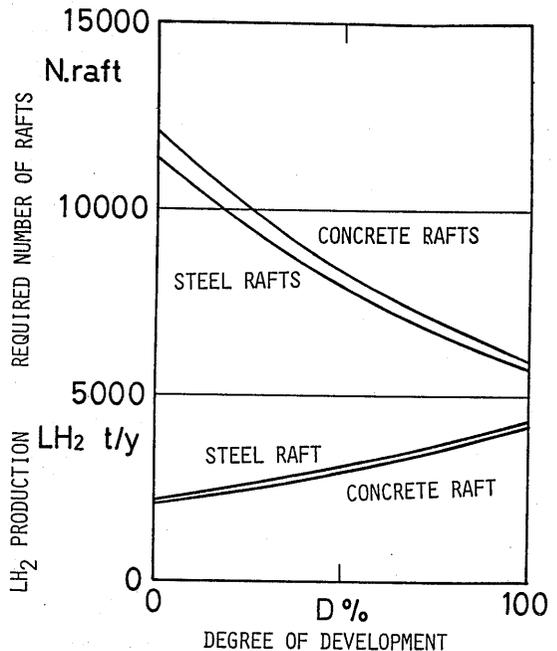


図5.3 筏の液化水素製造容量と必要な基数

5.2 液化水素製造筏の投入エネルギーとCO₂発生量

液化水素製造筏への投入エネルギーは筏本体、太陽電池パネル、出力制御用電気設備、貯蔵用タンクへの投入エネルギーの和とする。筏本体への投入エネルギーは本体建造に使用された鉄鋼材料とコンクリート材料への投入エネルギーと筏製造に使用したエネルギーの和とする。なお、筏本体の製造エネルギーは材料への投入エネルギーの20%とする。

太陽電池パネルへの投入材料重量を現用の太陽電池パネルの例(1216×447×36mm、7.3kg)⁽²⁸⁾を参考にし

て次のように求めた。フレームはアルミニウムとし、電池部は3mm厚さのガラス、シリコン基盤厚さ400 μ m、プラスチック充填材厚さ2.5mmと仮定し、シリコン基盤の歩留まりを50%とする⁽²⁹⁾。以上の仮定より得られたパネルへの投入材料重量を表5.1に示す。パネルの製造に要するエネルギーはアルミニウム、ガラス、プラスチック材への投入エネルギーの20%として計算した。パネルのエネルギー原単位と併せて、太陽電池の出力を制御するための蓄電池、インバータ等の電気設備のエネルギー原単位⁽³⁰⁾を表5.2に示す。電気設備のCO₂発生原単位を計算する際に、投入エネルギーの内訳を電気50%、石油50%とした。

表5.1 太陽電池パネルの投入材料

投入材料	投入重量 kg/m ²
シリコン基盤	1.8
アルミニウム	2.1
ガラス	6.5
プラスチック	4.1

5000 m³貯蔵タンクの投入エネルギーは付録2で計算される500 m³パーライト真空タンクの投入エネルギーの10基分として計算する。以上より得られる液化水素製造筏1基の製造に要するエネルギーと製造にともなって発生するCO₂量を表5.3に示す。

表5.3 水素製造筏の投入エネルギーとCO₂発生量

諸設備	投入エネルギー	CO ₂ 発生量
鋼製筏本体	26.3 x 10 ¹¹ kcal	8.33 x 10 ⁸ kg
鉄鋼	21.9 x 10 ¹¹ kcal	7.4 x 10 ⁸ kg
製造エネルギー	4.38 x 10 ¹¹ kcal	0.93 x 10 ⁸ kg
コンクリート製筏本体	5.0 x 10 ¹¹ kcal	1.69 x 10 ⁸ kg
鉄鋼	3.92 x 10 ¹¹ kcal	1.32 x 10 ⁸ kg
コンクリート	0.25 x 10 ¹¹ kcal	0.19 x 10 ⁸ kg
製造エネルギー	0.83 x 10 ¹¹ kcal	0.18 x 10 ⁸ kg
電気設備	16.0 x 10 ¹¹ kcal	2.56 x 10 ⁸ kg
太陽電池パネル	13.3 x 10 ¹¹ kcal	1.99 x 10 ⁸ kg
蓄電池	1.62 x 10 ¹¹ kcal	0.34 x 10 ⁸ kg
制御機器	1.10 x 10 ¹¹ kcal	0.23 x 10 ⁸ kg
貯蔵タンク	0.11 x 10 ¹¹ kcal	0.03 x 10 ⁸ kg

表5.2 太陽電池設備のエネルギー原単位

電気設備	投入エネルギー	CO ₂ 発生量
太陽電池パネル	1.38 x 10 ⁶ kcal/m ²	206 kg/m ²
蓄電池(耐用年数5年)	0.26 x 10 ⁹ kcal/MWp	5.5 x 10 ⁴ kg/MWp
インバータ他	1.06 x 10 ⁹ kcal/MWp	2.25 x 10 ⁵ kg/MWp

(註) Wpは電気設備の最大出力容量を意味する。

5.3 液化水素製造筏の評価

液化水素製造の評価は、太陽エネルギーを利用するため投入された在来化石エネルギー量に対し得られる水素エネルギー量がどれだけあるかで評価できる。そのため筏の稼働期間中に生産される液体水素量をW、水素を生産するため設備の建設、維持等に投入されるエネルギーをQとし、エネルギー収支比ERを次のように定義する。

$$ER = W \cdot H / Q \quad (5.6)$$

ここで、Hは液化水素を等価の石油エネルギーに換算

する係数で、ここでは水素の低位発熱量 28600 kcal/kgとする。また、筏の稼働年数は30年とする。

現状技術を基に設計した鋼製液化水素製造筏とコンクリート製液化水素製造筏のエネルギー収支比ERは、それぞれ0.44、0.83となりエネルギー収支上からは水素生産システムは成立しない。

水素生産システムがエネルギー収支上成り立つためには、水素生産量の増加及び投入エネルギーの大幅な減少が必要である。そこで、現状の技術進歩の推移をもとに発電設備、液化水素製造設備の性能向上と投入エネルギーの低減のための開発目標値について検討し

た。太陽電池の効率は年1%程度の改善が得られており⁽²⁵⁾今後18%まで効率改善が可能とした。太陽電池への投入エネルギーの内最も大きな割合を占めるのは、原料シリコンの製造である。その投入エネルギーはシリコン薄膜の実用化により大幅に減少する。太陽電池の製造単価は図5.4に示すように現状の1200円/Wから400円/W、さらに100円/Wへと低減が期待されている⁽²⁵⁾。エネルギーアナリシスにおいては製品製造で消費されるエネルギー、言い換えれば製造のための投入エネルギーは一般に製品コストに比例するとされているので太陽電池基盤のエネルギー原単位を1/10に減ずることができると考えた。電気関係設備の投入エネルギーは太陽電池利用技術の進歩にともなって1/2に軽減されるとした。液化水素製造電力は65 kWh/kgLH₂から50 kWh/kgLH₂に改善されるとした。表5.4に検討した項目とその開発目標をまとめ

て示す。

表5.4に示す開発目標と現状技術の開きを100としたときにそれぞれの開発目標が同時に同程度達成されたものを今後開発度Dと呼ぶことにする。すなわち現状技術はD=0%、すべての開発目標が同時に達成された場合はD=100%である。図5.5に鋼製液化水素製造筏とコンクリート製液化水素製造筏の現状技術および開発目標達成時の投入エネルギーを示す。鋼製筏本体の鉄鋼材料への投入エネルギーが非常に大きい。開発度100%のコンクリート製液化水素製造筏は現状技術の鋼製筏のその約1/4になる。開発度Dに対する液化水素製造筏のエネルギー収支比の変化を図5.6に示す。開発度が進めば両方の筏とも収支比が1を越えエネルギー収支上からは水素生産システムが成立するようになる。

表5.4 発電および液化水素製造設備の開発目標

開発項目	現状技術	開発目標
電池パネルの効率	12%	18%
シリコン基盤	$1.10 \times 10^6 \text{ kcal/m}^2$	$1.10 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2$
蓄電池	$0.26 \times 10^9 \text{ kcal/MWp}$	$0.13 \times 10^9 \text{ kcal/MWp}$
制御機器	$1.09 \times 10^9 \text{ kcal/MWp}$	$0.55 \times 10^9 \text{ kcal/MWp}$
液化水素製造電力	65 kWh/kgLH ₂	50 kWh/kgLH ₂

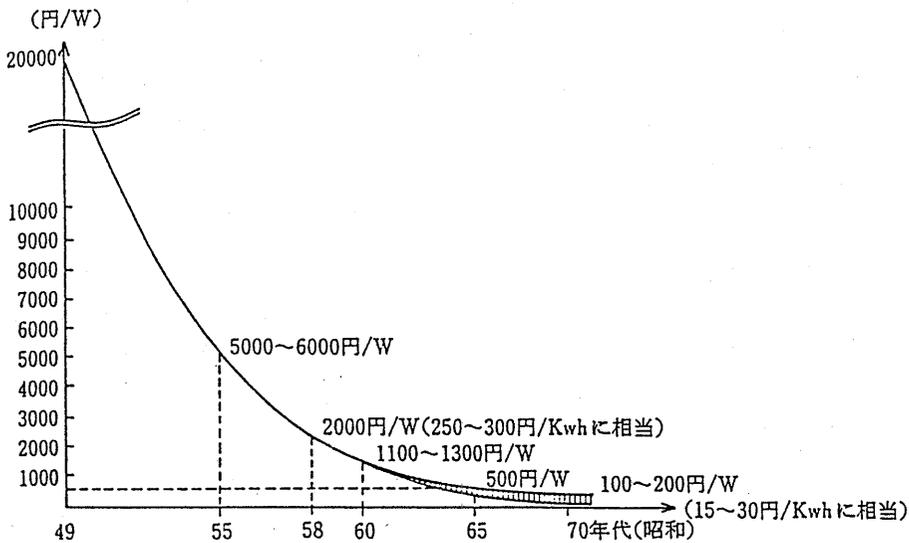


図5.4 太陽電池の製造コストの推移および今後の目標

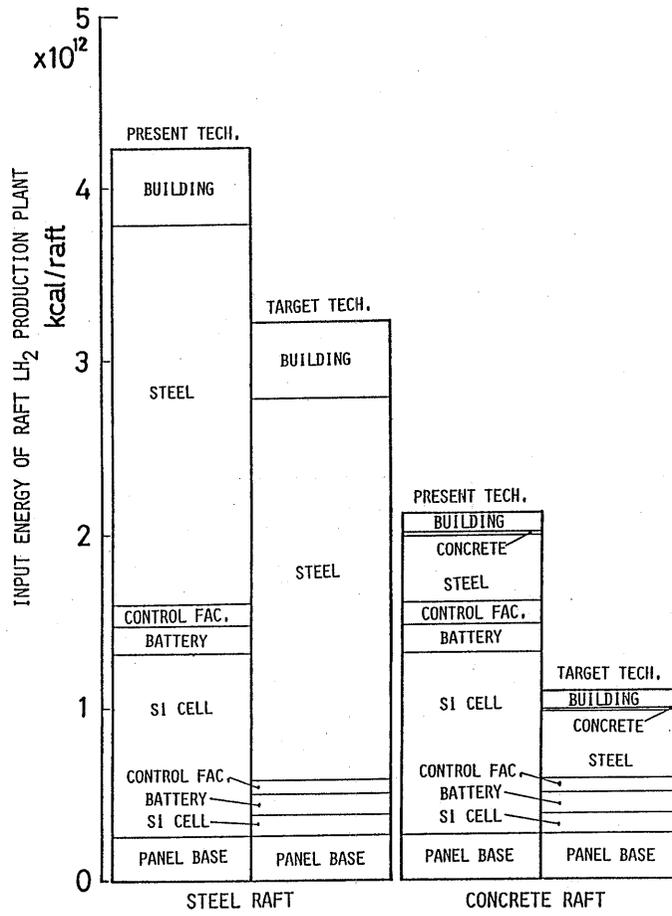


図 5.5 液化水素製造筏の投入エネルギー

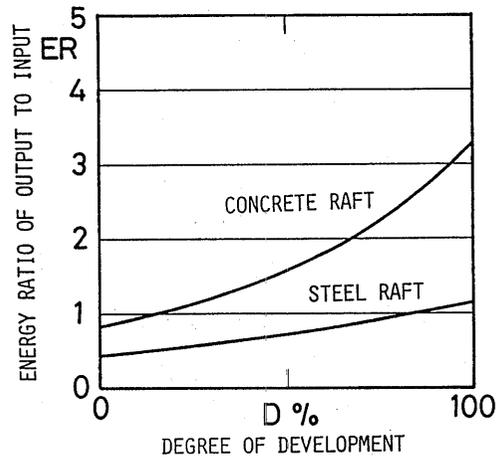


図 5.6 液化水素製造筏のエネルギー収支比

6. 水素エネルギーシステムの評価

水素エネルギーシステムの液化水素製造筏を除いたその他の諸設備および不要になる石油系諸設備への投入エネルギーとCO₂発生量を表6.1に示す。これらの計算方法の詳細は付録2に示す。また、表6.1には1年当りの投入エネルギーを計算する際に使用する諸設備の耐用年数を示す。

水素エネルギーシステムの輸送設備、貯蔵設備の必要数量は3章で、不要になる石油の精製設備の投入エネルギー、輸送および貯蔵設備の数量は4章です。

得られている。液化水素製造筏の必要基数および筏の投入エネルギーとCO₂発生量は5章で述べた。これらの数値と表6.1の諸数値から水素エネルギーシステムの代替度SとCO₂排出抑制制度SCが計算できる。代替度SとCO₂排出抑制制度SCの開発度Dに対する変化を図6.1と図6.2に示す。図6.1から本水素エネルギーシステムは現状技術では運輸交通機関が現在使用している石油系燃料をすべて水素に代替すると現状の石油系エネルギーシステムより多い化石エネルギーを必要とすることがわかる。開発が100%達成された場合、コンクリート製液化水素製造筏を使用すれば現在消費し

表6.1 諸設備の投入エネルギーとCO₂発生量

	耐用年数	投入エネルギー (kcal/設備)	CO ₂ 発生量 (kg/設備)
水素供給システムに必要な設備			
12,500 m ³ タンカー	20	4.80・10 ¹¹	1.29・10 ⁸
5000 m ³ タンカー	20	4.69・10 ¹⁰	1.26・10 ⁷
50 m ³ タンク車	20	4.43・10 ⁸	1.04・10 ⁵
10 m ³ タンクローリー	7	1.80・10 ⁸	4.65・10 ⁴
12万 m ³ タンク	30	1.33・10 ¹¹	4.44・10 ⁷
5000 m ³ タンク	30	1.07・10 ¹⁰	3.03・10 ⁶
500 m ³ タンク	30	1.07・10 ⁹	3.03・10 ⁵
10 m ³ タンク	30	1.27・10 ⁸	3.31・10 ⁴
不要な石油設備			
24万DWタンカー 内航タンカー	20	3.07・10 ¹¹	9.69・10 ⁷
3100 GT	20	1.89・10 ¹⁰	5.98・10 ⁶
1600 GT	20	1.10・10 ¹⁰	3.48・10 ⁶
860 GT	20	7.00・10 ⁹	2.21・10 ⁶
430 GT	20	4.16・10 ⁹	1.31・10 ⁶
130 GT	20	1.70・10 ⁹	5.36・10 ⁵
35 tタンク車	20	2.22・10 ⁸	6.14・10 ⁴
14 k lタンクローリー	7	1.32・10 ⁸	3.36・10 ⁴
10万 m ³ タンク 油槽所	30	2.05・10 ¹⁰	6.60・10 ⁶
15300 m ³	30	2.87・10 ⁹	1.51・10 ⁶
7490 m ³	30	2.81・10 ⁹	9.37・10 ⁵
3000 m ³	30	1.53・10 ⁹	5.09・10 ⁵
750 m ³	30	6.06・10 ⁸	2.02・10 ⁵
250 m ³	30	2.91・10 ⁸	9.70・10 ⁴
10 k l ガソリンスタンド	30	1.94・10 ⁷	9.28・10 ³

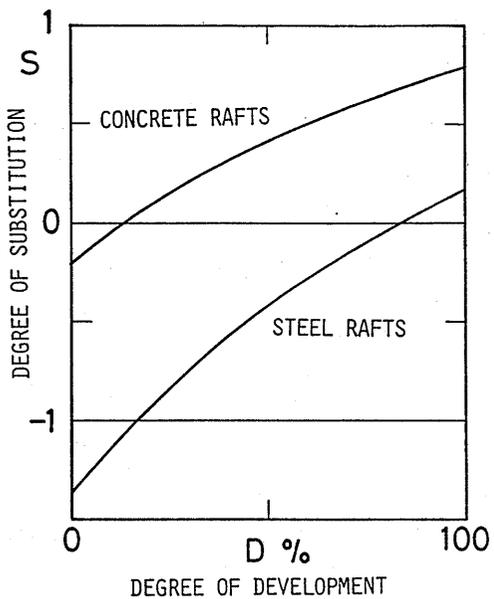


図 6.1 水素エネルギーシステムの代替度

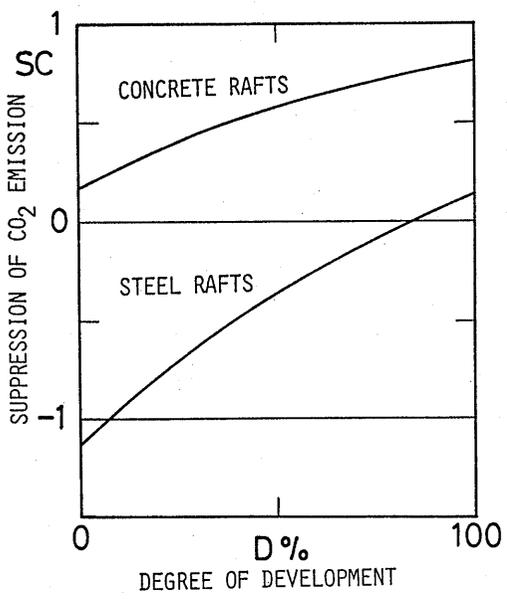


図 6.2 水素エネルギーシステムのCO₂排出抑制度

ている在来燃料の78%が節約できる。図6.2からコンクリート製筏の場合現状技術でもCO₂発生量を17%低減し、開発度100%では81%低減が可能なることがわかる。これはCO₂発生量の多い鋼材を使用するよりもCO₂発生量の少ないコンクリートを使用することの効果であるが、CO₂発生抑制を最も重要視するのであれば本水素エネルギーシステムが十分成り立つことを示すものである。

図6.3に水素エネルギーシステムの液化水素製造筏およびその他の輸送・貯蔵設備ならびに不要となる石油系設備の1年間に投入されるエネルギーを開発度Dに対して示す。表6.2には開発度100%のコンクリート製液化水素製造筏を使用した場合の水素エネルギー

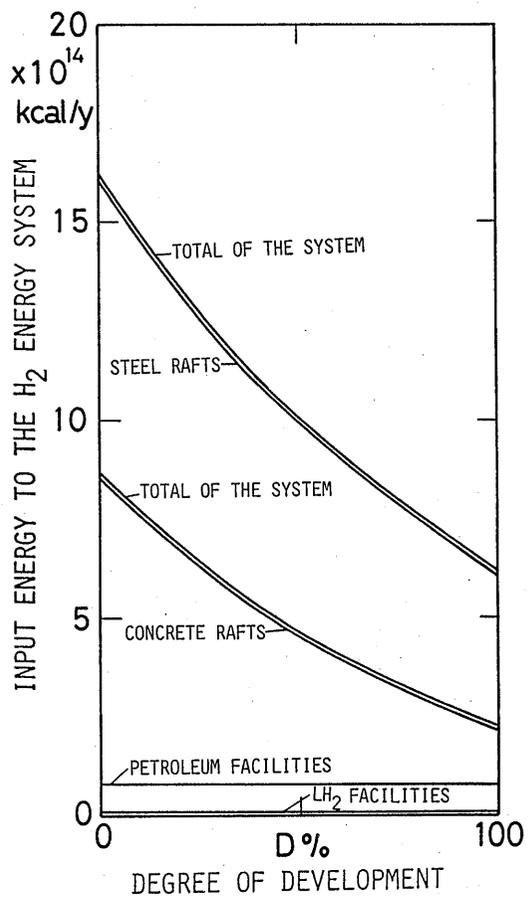


図 6.3 水素エネルギーシステムの1年当りの投入エネルギー

表 6.2 諸設備の1年間に投入されるエネルギー

諸 設 備	投入エネルギー(kcal/y)
水素製造筏	2. 1 6 · 1 0 ¹⁴
輸送設備	7. 4 6 · 1 0 ¹²
貯蔵設備	3. 4 6 · 1 0 ¹¹
水素システム合計	2. 2 4 · 1 0 ¹⁴
石油精製	7. 7 8 · 1 0 ¹³
輸送設備	7. 0 5 · 1 0 ¹¹
貯蔵設備	1. 8 7 · 1 0 ¹¹
不要設備合計	7. 8 7 · 1 0 ¹³

一システムおよび輸送、貯蔵設備に1年間に投入されるエネルギーを示す。液化水素製造筏への投入エネルギーが水素エネルギーシステムへの投入エネルギーのほとんどを占める。不要となる石油システム諸設備への投入エネルギーの中では、精製設備へのそれが圧倒的に大きい水素生産設備に要するエネルギーの約3分の1である。

水素エネルギーシステムへの投入エネルギーを低減するためには液化水素製造筏への投入エネルギーが大きいので、筏の投入エネルギーの低減が効果的であるが、同時に水素需要量そのものを減らし結果的に必要な筏数を減らす事も重要である。移送時の蒸発はかなり多いので移しかえの回数の少ない全体システムの構成を検討する一方、移しかえ時の蒸発量を減少させる技術の開発が必要である。特に小容量の移送時は再液化の方法を含めて改善が必要である。水素の生産地から輸送するタンカーの燃料消費が全生産の約10%を占める。推進抵抗の低減および機関効率の向上による燃料消費の改善が必要であり、船型の改良とともに浅喫水での安定性を保証することによって抵抗を減らすなどの技術課題がある。

7. むすび

わが国の運輸交通機関が現在使用している燃料をすべて水素で代替することによる石油の保存およびCO₂発生量の低減を目的とした水素エネルギーシステムの提案とその評価を行った。

このシステムは水素を供給する諸プラントの製造に化石エネルギーを使用するため、現状の技術水準では、

(322)

現在の石油系エネルギーシステムより多くの化石エネルギーを必要とする。

水素による石油代替エネルギーシステムがエネルギー収支上成立するためには、筏本体や液化水素製造プラント等の製造に必要なエネルギーを大幅に低減する必要がある。そのためにはかなり高度な技術開発目標が達成されなければならない。

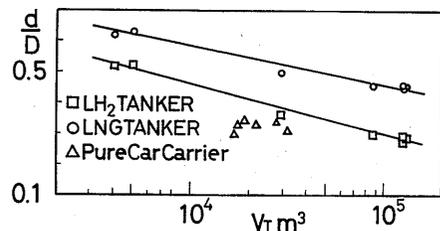
技術開発目標が100%達成された場合、システムの概要は以下のようになる。現在運輸交通機関が使用している石油燃料のすべて約69×10⁶k l/yを2.49×10⁷ton/yの液化水素で代替する。液化水素は南太平洋上に総面積約6000 km²の筏群を浮かべそこで太陽光発電を行い、その電力で製造する。液化水素は270隻の12.5万m³液化水素タンカーで日本に輸送する。

このシステムにより、運輸交通機関の消費する全石油燃料を水素化し、かつ水素燃料の製造・輸送・貯蔵の各過程を含めても現状より石油の消費量を78%削減でき、CO₂発生量も81%低減できる。なお、CO₂発生量はコンクリートを筏製造に使用することにより現状技術においても低減できる。

付 録

付録1. 液化水素タンカーによる水素輸送量

液化水素タンカーによる水素輸送量を、液化水素タンカーの船型が現用の球形タンク型LNGタンカーと相以であるとして計算する。液化水素タンカーの特徴の一つは液化水素の密度がLNGの約1/6であるため喫水が極めて小さくなることである(付図1)⁽⁶⁾。喫水が小さいと安定性やプロペラの設計に影響するが、本報告では、バラストにより現用LNGタンカーと同喫水になるとする。付表1に液化水素と液化メタンの物性値を示す。液化水素は極低温の液体であるため輸送中の蒸発損失は避けられないのでこの蒸発ガスを液化水素タンカーの燃料として利用する。低温液化ガスを収納するタンクの防熱には固体防熱法と真空防熱法が



付図1 液化ガスタンカーの喫水・深さ比

付表1 液化水素および液化メタンの物性値

	液化水素	液化メタン
分子式	H ₂	CH ₄
沸点*	-253	-162
液体密度	71	425
蒸発熱*	107	122
低位発熱量	28570	11950

(註) *印は1atmの値

ある。真空防熱法が防熱効果においてはるかに優れているが、本報告の液化水素タンカーの場合のように極めて大容量のタンクでは大型化によって蒸発率が低減すること、主機関用燃料としてかなりの蒸発量が必要なこと等により固体防熱法で十分な場合がある。同時に大型真空断熱タンクの製作の困難さや真空維持動力のための経費増などの理由により大型の液化水素タンクの防熱には現用のLNGタンカーと類似な固体防熱方式が採用される可能性が大きい。ここでは防熱材を硬質ウレタンフォームとし、タンク防熱に関しては現用のLNGタンカーの実績を基に検討する。

(1)タンク容積V_T

LNGタンカーではタンク容積V_T(m³)と長さ×幅×深さ(L×B×D m)との比をタンク容積効率η_Tという。すなわち

$$\eta_T = V_T / LBD \quad (付1)$$

LNGタンカーのタンク防熱層厚さをδとし、同一内容積をもつLH₂タンク防熱層厚さをδ+Δδ(m)とする。またLNGタンク直径をd_T(m)とすると、現用のV_Tが29000m³から128600m³まで5種類の球形タンカーの要目の平均値をとると以下の値が得られる。

$$L/nd_T = 1.5 \pm 0.15$$

$$B/d_T = 1.2 \pm 0.045$$

$$D/d_T = 0.69 \pm 0.035$$

ここでnはタンク個数。これらの値からLNGタンカーとLH₂タンカーの容積効率は次式で関係づけられる。

$$\eta_{TLH} = \eta_{TLNG} / (1 + 4.5 \Delta\delta / d_{TLNG}) \quad (付2)$$

(2)主機関必要燃料量

船の排水量、速度とプロペラへ伝達された伝達馬力を関係づける係数をアドミラルティ係数というが、本報告では検討の便利のためにアドミラルティ係数C_Aを次のように定義する。

$$C_A = P / (LBd)^{2/3} / v^3 \quad (付3)$$

ここでP：主機関出力(PS)、d：喫水(m)、v：船速(kt)。現用LNGタンカーのC_Aを付図2に示す。タンク容積V_Tの大きさによらずほぼ一定値を示すので、液化水素タンカーにおいても同じ一定値としC_A=0.0023とする。機関出力Pを得るのに必要な燃料の全熱発生量Q_f(kcal/h)は次式で与えられる。

$$Q_f = 632.5 P / \eta$$

$$= K_1 V_T^{2/3} (d / \eta_T / D)_{LH}^{2/3} v^3 / \eta \quad (付4)$$

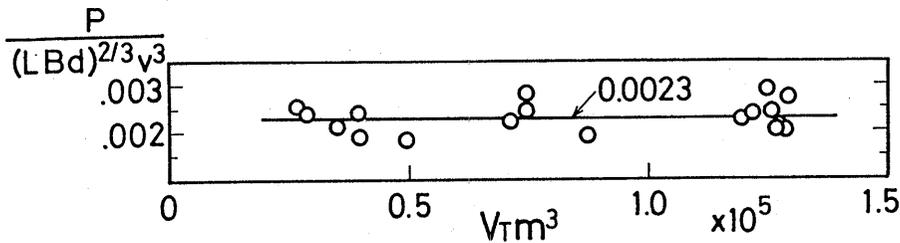
ここでK₁=632.5・C_A=1.45、η：主機関熱効率=0.35。

(3)液化水素蒸発量と防熱層厚さ

積荷の全重量に対する1日当りの蒸発量の比(蒸発率)をα(1/日)とすると、蒸発ガスの燃焼によって発生する熱量Q_{IBO}(kcal/h)は

$$Q_{IBO} = H_1 (\alpha / 24) \rho V_T \quad (付5)$$

ここでH₁：蒸発ガスの低位発熱量(kcal/kg)



付図2 LNGタンカーのアドミラルティ係数

ρ : 液化ガスの密度 (kg/m^3)

$Q_f = Q_{fBO}$ において整理すると水素の蒸発率 α_{LH} は次のように表すことができる。

$$\alpha_{LH} = K_2 (v^3 / \eta V_T^{1/3}) (d / \eta_T D)^{2/3}_{LH} \quad (\text{付 6})$$

ここで $K_2 = 24 \cdot K_1 / (H_1 \rho)_{LH} = 1.72 \times 10^{-5}$ 。
LNGタンカーとLH₂タンカーの喫水が等しい場合はおおよそ

$$(d/D)_{LH} \sim (d/D)_{LNG} \quad (\text{付 7})$$

とおける。

同一容積のLNGタンクとLH₂タンクのタンク防熱層厚さと蒸発率はタンクへの入熱量と液化ガスの蒸発熱が等しいことから次式で関係づけられる。

$$\{(\lambda/\delta)\Delta T\}_{LNG} / \{(\lambda/(\delta+\Delta\delta))\Delta T\}_{LH} = \{\alpha\rho r\}_{LNG} / \{\alpha\rho r\}_{LH} \quad (\text{付 8})$$

ここで λ : 防熱材の熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$)
 ΔT : 周囲温度と液化ガスの温度差 ($^\circ\text{C}$)
 r : 液化ガスの蒸発熱 (kcal/kg)。

これを整理すると

$$\Delta\delta / \delta_{LNG} = (\alpha_{LNG} / \alpha_{LH}) (\lambda_{LH} / \lambda_{LNG}) (\Delta T_{LH} / \Delta T_{LNG}) (\rho_{LNG} / \rho_{LH}) (r_{LNG} / r_{LH}) - 1 \quad (\text{付 9})$$

(3.7) 式を (3.10) 式に代入して整理すると防熱層の

追加厚さ $\Delta\delta$ は次式で求まる。

$$\Delta\delta / \delta_{LNG} = K_3 \alpha_{LNG} (\eta V_T^{1/3} \eta_{TLH}^{2/3}) / \{v^3 (d/D)_{LNG}^{2/3}\} - 1 \quad (\text{付 10})$$

ここで

$$K_3 = (\lambda_{LH} / \lambda_{LNG}) (\Delta T_{LH} / \Delta T_{LNG}) (\rho_{LNG} / \rho_{LH}) \times (r_{LNG} / r_{LH}) / K_2 = 4.57 \times 10^5$$

ただし周囲温度 25°C 、 $\lambda_{LH} = 0.0175 \text{ kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$ 、 $\lambda_{LNG} = 0.022 \text{ kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$ とする。

(4) 輸送できる液化水素量

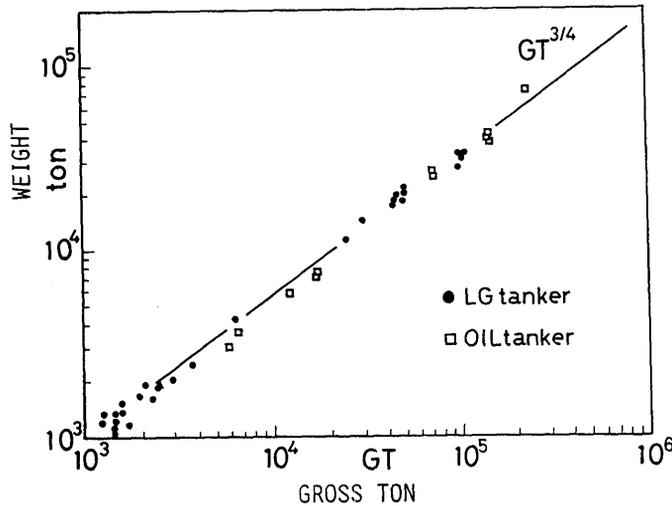
現用のLNGタンカーの例から $\delta_{LNG} = 0.2 \text{ m}$ 、 $\alpha_{LNG} = 0.25\% / \text{日}$ とし、 $(d/D)_{LNG}$ を付図1の様に与える。またLH₂タンカーのタンク容量 V_T (タンク直径 $d_{TLH} = d_{TLNG}$)、船速 v 、主機関熱効率 η を与えると式 (付2) と式 (付10) からタンク容積効率 η_{TLH} が求められる。この容積効率と式 (付4) から主機関燃料必要量に相当する熱量 Q_f が得られる。航路の長さを S とすると、往復の燃料消費をさしひいて輸送できる液化水素量 G_N は次式で与えられる。

$$G_N = \rho_{LH} V_T - 2 Q_f S / v H_1 \quad (\text{付 11})$$

付録2. 諸設備への投入エネルギーとCO₂発生量

付録2.1 タンカー

原油ならびに液化ガスタンカーの総トン数GTと重量W (ton) の関係⁽²¹⁾は付図3に示すように次式であら



付図3 タンカーの総トン数と重量の関係

わされる。

$$W=5.7(GT)^{3/4} \quad (\text{付 } 12)$$

ここで、この重量がすべて鉄鋼材からなると仮定する。また、船舶建造への投入エネルギーを素材への投入エネルギーの20%と仮定する。以上より1隻当りのタンカーの投入エネルギーEI (kcal/隻)とCO₂発生量CE (kg/隻)が総トン数を用いて次式で表される。

$$EI=4.56 \cdot 10^7(GT)^{3/4} \quad (\text{付 } 13)$$

$$CE=1.44 \cdot 10^4(GT)^{3/4} \quad (\text{付 } 13)$$

液化水素タンカーは低温の液化ガスタンクの存在が石油タンカーとは大きく異なる。設計例⁽⁹⁾によれば125000 m³LNGタンカー(10万GT)と相似で同容量の液化水素タンカーの場合は、防熱材の厚さが大きくなり、船型が大きくなるため総トン数は21%増加する。また、液化水素タンカーのタンクや防熱材のエネルギー原単位は鉄鋼材料のそれよりも高いため同一重量の石油タンカーに比して素材投入エネルギーが増大する。125000 m³液化水素タンカーの場合、アルミニウム製のタンクを5個使用し、タンク厚さを40mmとし、防熱材は硬質ポリウレタン、厚さを1.6mとすると同一重量の石油タンカーに比し素材の投入エネルギーが1.62倍、素材のCO₂発生量が1.34倍になる。従って液化水素タンカーの1隻当りの投入エネルギーEI (kcal/隻)とCO₂発生量CE (kg/隻)は次式で表される。

$$EI=7.40 \cdot 10^7(GT)^{3/4} \quad (\text{付 } 15)$$

$$CE=1.99 \cdot 10^4(GT)^{3/4} \quad (\text{付 } 16)$$

付録2.2 タンクローリー

トラック1台の平均素材投入量は文献⁽¹⁰⁾によると付表2の様になっている。タンクローリーの素材投入量は、シャシーに付表2の割合で素材が投入され、車体とシャシーの重量差はタンクに投入されたものとして推定する。また、付表2の非鉄金属はすべてアルミ材、非金属はプラスチックと仮定して投入エネルギーを計算する。14kl石油タンクローリーは車体重量7.8ton、シャシー重量5.9ton⁽³²⁾となっている。タンクは鋼製とし、製造エネルギーを素材投入エネルギーの67%とすると投入エネルギーEI=1.29・10⁸kcal/台、CO₂発生量CE=3.29・10⁴kg/台となる。

液化水素タンクローリーの主要目を付表3に示す⁽¹⁷⁾。スーパーインシュレーションは断熱層を厚さ10μmのアルミ箔と約150μmのグラスウールを交互に

付表2 トラック1台の投入材料

投入材料	重量	投入割合
鉄鋼材	9 1 7 k g	6 0 %
特殊鋼	3 8 9 k g	2 6 %
非鉄金属	4 2 k g	3 %
非金属	1 6 8 k g	1 1 %
合計	1 5 1 6 k g	1 0 0 %

付表3 液化水素タンクローリーの仕様例

タンク容積	1 1 k l
充填容積	9 . 9 k l
空車重量	9 2 0 0 k g
シャシー重量	6 2 6 0 k g
タンク内槽	SUS 1 . 5 5 φ x 6 . 1 m
耐圧試験	8 . 4 k g / c m ²
タンク外槽	S S 材 1 . 7 5 φ x 6 . 6 m
断熱方式	スーパーインシュレーション方式
蒸発率	1 % / 日以下

10~20層/cm巻き付けて構成し真空10⁻⁴mmHg以下に保つ。断熱層のアルミニウムとグラスウールの投入重量比は7対3となる。タンクの投入材料は、タンク肉厚を7mmと推定すれば、内層(特殊鋼)40%、外層(鋼材)50%、スーパーインシュレーション10%となる。石油タンクローリーと同様に計算して投入エネルギーEI=1.80・10⁸kcal/台、CO₂発生量CE=4.65・10⁴kg/台となる。

付録2.3 鉄道タンク車

荷重35tonの鉄道石油タンク車の自重は16~19tonである⁽³³⁾⁽³⁴⁾。この自重を17.5tonとし、そのうち85%を鋼材、15%を特殊鋼とする。製造エネルギーを素材投入エネルギーの67%とすると、投入エネルギーEI=2.20・10⁸kcal/台、CO₂発生量CE=6.08・10⁴kg/台となる。

鉄道液化水素タンク車はLNGタンク車⁽³⁴⁾(付表4)を参考にして投入材料を求める。LNGタンク車の台車と外槽は同じとし内槽と防熱材の寸法と材質および重量を付表4の様に仮定する。台車の重量の内85%を鋼材、15%を特殊鋼とし、製造エネルギーを素材投入エネルギーの67%とすると、投入エネルギーEI=4.43・10⁸kcal/台、CO₂発生量CE=10.4・10⁴kg/台とな

付表4 LNGタンク車と液化水素タンク車の仕様

	L N G タ ン ク 車	液 化 水 素 タ ン ク 車
荷 重	16 トン	3.5 トン (50 m ³)
自 重	35 トン	28 トン
内 槽	1. 8φ x 15.4 m t6	2. 1φ x 15.4 m t7 sus (6 トン)
外 槽	2. 3φ x 16.3 m t6	2. 3φ x 16.3 m t9 ss (9 トン)
防熱材	パーライト真空	スーパーインシュレーション(1 トン)

(註) 液化水素タンク車の仕様は仮定した値である。

る。

付録2. 4貯蔵タンク

(1) 石油タンク

大型タンクへの投入エネルギーは、投入材料が容量の2/3乗に比例するとして求める。基準とするタンクの容量は10万klとし、その仮定した要目を付表5に示す。材料は鉄鋼材2470 ton、コンクリート3600 tonとなる。建造に要するエネルギーを材料に投入したエネルギーの20%とすると、容量V (kl) のタンク1基あたりの投入エネルギーEI (kcal/基) とCO₂発生量CE (kg/基) は次式のようになる。

$$EI = 9.48 \cdot 10^6 V^{2/3} \quad (\text{付17})$$

$$CE = 3.05 \cdot 10^3 V^{2/3} \quad (\text{付18})$$

ガソリンスタンドの地下タンクへの投入エネルギー

付表5 10万kl貯蔵タンクの要目

内径	81.5 m
高さ	22.6 m
液深	19.2 m
屋根	
高さ	内径の21%
肉厚	4.5 mm
底板	
鉄板厚さ	12 mm
コンクリート厚さ	30 cm
アニュラープレート	
幅	1600 mm
肉厚	21 mm
側板厚さ	
上端	4.5 mm
最下部	30 mm
デッキ肉厚	4.5 mm

は容量10klのもので見積る。その構造は、直径1.75m、長さ4.7mの円筒型で、厚さ6mmの鋼製タンクをコンクリートの箱(幅2.55×長さ5.5×高さ3.05m、厚さ30cm)の中に横置したものとす。建設エネルギーを材料の投入エネルギーの20%とすると1基あたりの投入エネルギーはEI=1.94・10⁷kcal/基、CO₂発生量CE=9.28・10³kg/基となる。

(2)大規模液化水素貯蔵タンク

現用LNG貯蔵タンクのデータをもとにして、水素基地などの大型貯蔵タンクの建設に要するエネルギーを見積る。現用LNGタンクの趨勢は安全上の配慮も含めて専ら地下式に移行しつつあるので液化水素についてもこれに限ることとする。地下式タンクの構造概念⁽³⁵⁾を付図4に示す。タンクの構造はステンレスのメンブレンを内槽壁とし、その外側に防熱材をおき、全体を鉄筋コンクリートの躯体におさめて、鋼性屋根でおおったものである。底部コンクリート板を非常に厚くした底部強度板型のものが多い。

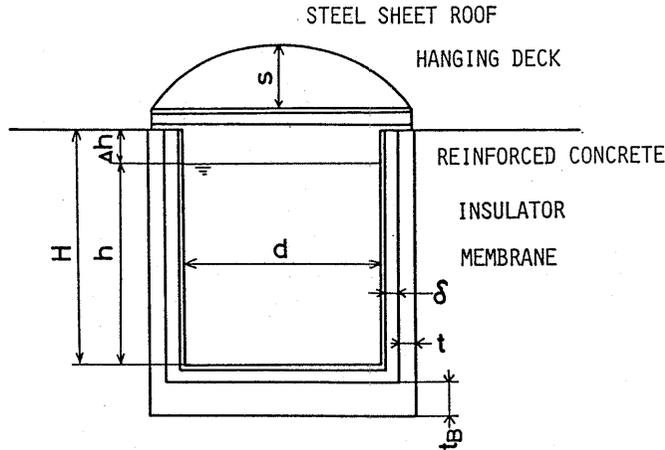
タンクへの投入材料重量をタンク容量V (m³) の関数として以下のように定式化する。現用LNGタンクの最近の傾向から内槽直径d (m) と液深h (m) の比をd/h=1.5とし、タンク高さH (m) と液深hとの差Δh=0.05hと仮定すると、d、h、Hは次式のように求められる。

$$d = 1.24 V^{1/3} \quad (\text{付19})$$

$$h = 0.827 V^{1/3} \quad (\text{付20})$$

$$H = 0.868 V^{1/3} \quad (\text{付21})$$

さらに次の仮定をすると各投入材料重量は付表6に示すように求められる。メンブレンは板厚2mmのステンレスとし、熱膨張の逃げ対策に表面にしわをつけるため表面積が1.2倍になるとする。屋根鋼板は厚さ9mm、屋根高さs=0.12dとする。屋根の下に保冷材をはりつけた吊りデッキがあるが、厚さ5mmのアルミニウムと



付図4 液化水素地下タンクの構造概念図

付表6 タンクの投入材料重量

投入材料	投入材料重量(トン)
メンブレン(ステンレス)	$0.0859V^{2/3}$
屋根鋼板(鉄鋼)	$0.354V^{2/3}$
吊りデッキ(アルミ)	$0.0163V^{2/3}$
鉄筋重量(鉄鋼)	$1.89V^{2/3} + 1.79\delta V^{1/3}$
コンクリート	$40.3V^{2/3} + 38.1\delta V^{1/3}$
防熱材(ポリウレタン)	$0.522\delta V^{2/3}$

(註) Vは容量(m³)、δは防熱材厚さ(m)である。

する。鉄筋コンクリート躯体は、底部強度板の厚さ7.5m、側壁を平均厚さ2.5mとする。また、60000m³タンクの例から鉄筋とコンクリートの重量比を0.054とする。防熱材は硬質ポリウレタンとしその厚さをδ(m)とする。防熱材厚さδは、蒸発量がタンク表面積に比例し、防熱材厚さに反比例することから決定できる。現用の130000m³LNGタンクでは、防熱材厚さが0.15~0.2mで蒸発率は0.1~0.2%/日である。液化水素タンクの蒸発率をLNGタンクと同じ0.15%/日とするためには防熱材厚さを1.62mとする必要がある。従って容量V(m³)、蒸発率0.15%/日の液化水素タンクの防熱材厚さδ(m)は次式で表される。

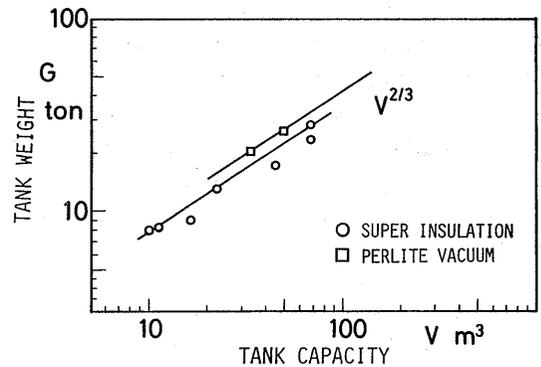
$$\delta = 80.7 / V^{1/3} \quad (\text{付22})$$

付表6から得られる投入材料の重量と表2.4のエネルギー原単位とCO₂発生原単位からタンクに投入された素材への投入エネルギーとそれから発生するCO₂量が

計算できる。貯蔵タンクの製造エネルギーは素材の投入エネルギーの20%とする。

(3) 中小容量液化水素貯蔵タンク

現在のガソリンスタンドの役目を果たす水素ステーションのような小規模の貯蔵タンクや小規模な水素基地に設置される中規模の液化水素タンクへの投入エネルギーを見積る。すでに実用に供されているスーパーインシュレーション方式およびパーライト充填真空断熱方式の液化水素タンクの容量Vと重量Gの関係⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾を付図5に示す。重量GはおおよそV^{2/3}に比例している。スーパーインシュレーションはその防熱性能は高いが高真空の維持、内槽の固定等技術的な問題があり大型化は難しい。パーライト真空は大きいものでは容



付図5 液化水素用真空断熱タンクの容量と重量の関係

付表7 液化水素タンクの仕様例

容量	10kl	50kl
自重	8トン	26.5トン
設計圧力	4.1kg/cm ²	3.5kg/cm ²
内槽	2.0φ×3.9m s s (2.4トン)	2.7φ×10.1m s s (6.6トン)
外槽	2.5φ×5.7m s s (4.4トン)	3.8φ×11.5m s s (13トン)
防熱材	スーパーインシュレーション(1.2トン)	パーライト充填真空(6.6トン)
蒸発率	0.5%/日	1.0%/日

(註) ()内は投入エネルギー計算に使用した重量。

量 1000 m³のバージ船の例がある⁽¹⁶⁾。従って水素ステーションで使用する 10 klタンクはスーパーインシュレーションとし水素基地の 500 m³と 5000 m³のタンクはパーライト真空とする。10 klタンクの投入エネルギーは付表 7⁽¹⁷⁾に示す仕様から推定した素材重量から計算する。500 m³のパーライト充填真空タンクの投入材料重量がV^{2/3}に比例するとして計算する。タンクの製造エネルギーは素材の投入エネルギーの 20%とする。容量 5000 m³のタンクの投入エネルギーは、500 m³タンク 10 基分として計算する。

参考文献

- 1) 太田時男:「海洋水素エネルギーのためのポルシェコンピナート計画」, (株)アイピーシー, 昭和56年7月
- 2) 遠藤久芳, 渡辺健次他4名:「太陽光利用洋上水素製造・輸送計画の調査研究(第1報:筏の構造と流力特性)」, 船舶技術研究所報告, vol.19, No.4, (1982.7), p13
- 3) 浜島金司, 渡辺健次:「太陽光利用洋上水素製造・輸送計画の調査研究(第2報:太陽追尾と光学系)」, 船舶技術研究所報告, vol.19, No.4, (1982.7), p41
- 4) 山川賢次, 渡辺健次他2名:「太陽光利用洋上水素製造・輸送計画の調査研究(第3報:筏の位置と方向の保持)」, 船舶技術研究所報告, vol.20, No.2, (1983.3), p25
- 5) 渡辺健次他3名:「太陽光利用洋上水素製造・輸送計画の調査研究(第4報:技術的可能性と環境問題)」, 船舶技術研究所報告, vol.20, No.2, (1983.3), p45
- 6) 浜島金司, 渡辺健次:「太陽光利用洋上水素製造・輸送計画の調査研究(第5報:他の集光方式の研究)」, 船舶技術研究所報告, vol.21, No.4, (1984.7), p17
- 7)「産業部門におけるエネルギーの用途別消費構造の

- 研究」, 日本エネルギー経済研究所研究調査報告 86-3, (1986.5)
- 8)「エネルギー収支からみた自然エネルギー利用技術の評価手法に関する調査報告」, 科学技術庁資源調査会報告, No.88, (1982.11)
- 9) 日本統計年鑑, 総務庁統計局編, 昭和63年
- 10) 茅陽一編著:「エネルギー・アナリシス」, 電力新報社, (1981.1)
- 11)「貨物地域流動調査(昭和57年度)」, 運輸省大臣官房情報管理部
- 12)「運輸関係エネルギー要覧」, 運輸省運輸政策局情報管理部, 昭和63年3月
- 13) 通産省:「エネルギー・生産需給統計年報」, 1980年
- 14) 運輸省:「都道府県別バス・乗用自動車保有車両数」, 陸運統計年報, 昭和57年
- 15) 運輸省:「入港船舶総数表」, 港湾統計年報, 昭和57年
- 16) 花田卓爾:「液体水素の現状と将来」, 高圧ガス, vol.15, No.6(1978), p18
- 17) 花田卓爾他:「液体水素の貯蔵と輸送」, 低温工学, Vol.14, No.1 (1979), p11
- 18)「陸運統計要覧」, 昭和57年, pp23~24
- 19)「衣食住のライフサイクルエネルギー」, 科学技術庁資源調査会編, (1980.10)
- 20)「海上輸送の現況(外航輸送実績年報)」, 海事産業研究所, 1985
- 21)「本邦輸送船資料」, 日本タンカー協会, (1987.4)
- 22) 石油学会編:「新石油事典」, 朝倉書店, (1982.11)
- 23) 日本石油編:「石油便覧」, 石油春秋社, (1977.7)
- 24) ソ連科学アカデミー海洋研究所:「太平洋の気象」, ラテイス社(1970)
- 25) 太陽光発電システムシンポジウム資料, 日本能率協会, 昭和62年3月

- 26) 中西洋志:「水素エネルギー技術の現状と将来」, 圧力技術, 第19巻第1号 (1981)
- 27) C. R. Baker: "Efficiency and Economics of Large Scale Hydrogen Liquefaction", SAE Paper 751094, (1975)
- 28) 京セラカタログ: 多結晶太陽電池モジュール
- 29) 浜川圭弘: 「太陽光発電入門」, オーム社, 昭和56年
- 30) "Comparative Analysis of Energy Balance of Satellite Power Systems (SPS) and Other Energy Systems", DOE/ER-0056, (Apr., 1980)
- 31) 「日本船舶明細書 (Register of Shipping)」, 日本海運集会所
- 32) 「自動車諸元表」, 自動車技術協会, 1983年
- 33) 伊藤威信: 「現代のタンク車」, とれいん, No. 111, (1984.4), p 8
- 34) 岡田直昭他: 「新版国鉄客車・貨車ガイドブック」, 誠文堂新光社, 昭和54.4
- 35) 山形俊介: 「地下式LNG貯槽」, 冷凍, 第57巻第652号, 昭和57年2月, p 55
- 36) 伊藤茂富: 「新編コンクリート工学」, 森北出版, (1977.8)
- 37) 西岡顕: 「超低温容器等の経過概要と進歩」, 高圧ガス, vol.15, No. 7, (1978)