

わが国の液体水素の発展とその背景（Ⅱ）： 液体水素に関する種々の計画等

花田卓爾

テクノグランパ

〒113-0021 東京都 文京区 本駒込 2-14-6

The Developments of Liquid Hydrogen and its background in JAPAN
The Plans Concerning Liquid Hydrogen, etc.

Takuji HANADA

Technogranpa

2-14-6 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0021

Today, the total producing capacity of liquid hydrogen is about 17 T/day (metric) in Japan.
This chapter describes the development trace of the liquid hydrogen.

Keyword : liquid hydrogen, slush hydrogen, liquid hydrogen fuel car, flash loss, transportation,
storage

8. 日本の宇宙観光旅行計画

今回は夢のある話から始めよう。日本国内では余り知られていないが、液体水素を燃料とするロケットで宇宙旅行を真剣に検討していたグループがあった。

1994年9月から1998年1月までに、日本ロケット協会の中で準備・検討会を25回開催している。開発の中心は、東京大学宇宙科学研究所の長友信人先生で、先生は日本で初めての液体酸素/液体水素エンジンの開発にも関わって居られる。旅行計画は、アンケート調査に基づいて立案され、飛行機体は先生によって「観光丸」と名付けられた写真2のような直径22m、高さ18m、空虚質量50tonで、乗員4名、乗客50名で高度200kmを3時間で2周回するコースと24時間で16周回する2つのプランがあった [37-40]。

この計画について「会社にはどのように説明しているのか」との先生の質問に「仕事には自動車のハンドルと同じに、少しの遊び心のような余裕と夢と希望が必要と行ってあります」の返事に、「遊び心は宇宙に持って行ってもらって、今は本気で検討してもらわないと困る」と、先生には夢でなく本気のプランだった。このため現実的で実現可能な立案として、液体水素は安い海外からの輸

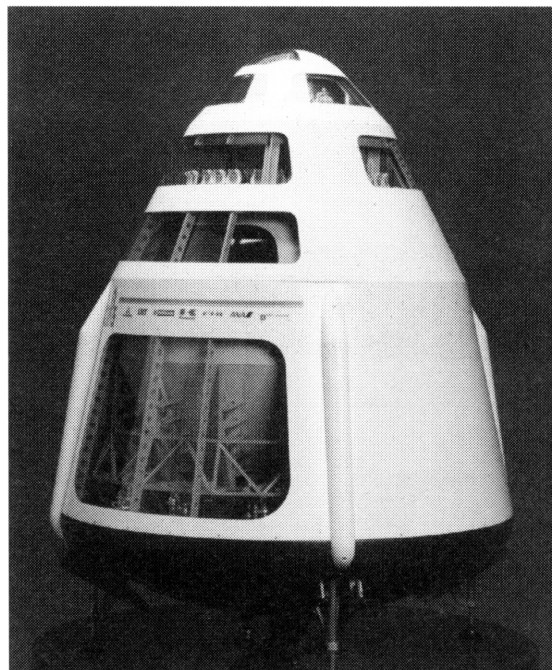


写真2. 宇宙観光旅行飛行体モデル

入とし、液の移し替えを最小にするラッシュ船による3,000m³のバージコンテナ・5基搭載で計画した。「観光丸」の2周回コースで1飛行当りの推進剤等の必要量は、液体水素70.7ton、液体酸素424tonと見積もられた。長友先生以下棚次亘弘先生、成尾芳博先生、パトリック・

コリンズ委員長、川崎重工（株）磯崎弘毅氏、等々のロケット専門家集団の集まりでは、概念仕様と概略設計を決め、宇宙旅行費用は、295 万円/人が見積られた。

1993 年には、マクドネル・ダグラス社の DC-X が、観光丸と同型の VTVL（垂直離陸垂直着陸）の試験飛行を成功させていたことも推進の力となったが、経済情勢の変化で、報告書をまとめ計画は一時休止した。この間にも 10 指に余る宇宙旅行計画が海外で発表されているが、紙面の都合で割愛する。

9. 液体水素を燃料とする航空機計画

液体水素を燃料とした最初の航空機のテスト飛行は、1956 年に NASA が双発の軍用機 B-57 の翼端に液体水素タンクを取り付けて、飛行中に片側の液体水素を燃料とするエンジンに切り替えて飛行している [41,42]。

また、1988 年には、ソ連の Tupolev's-154 を試験飛行用に改造した Tu-155 型で、3 基のエンジンの 1 基（中央上部）をテスト用として、液体水素の燃料で飛行した記録がある。この年の年末には、LNG を燃料としても飛行している [43]。写真 3、写真 4 に Tu-155 を示した。



写真 3. 水素燃料航空機 Tu-155

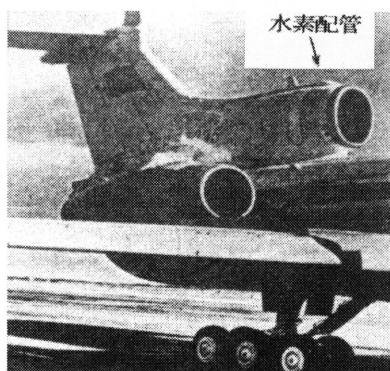


写真 4. Tu-155 のエンジン部分

1970 年から 1980 年前半にかけて、亜音速からマッハ 25 までの宇宙往還機やニュー・オリエント・エクスプレ

スと名付けたスーパーソニック、極超音速機（HST）、等の液体水素燃料の航空機計画案が、たびたび新聞を賑わした。写真 5 は マッハ 25 の X-30 を示した [44,45]。



写真 5. 1973 年 11 月 16 日 JAPAN TIMS

空港設備についても、サンフランシスコ国際空港 [46] やシカゴの O'Hare 空港の液体水素化 [47] など、現有空港改造報告書が 1976 年に相次いで NASA に提出されている。特に、参考文献 [46] の報告者 G.D.Brewer が要約版を作成したもの [48] は、広く関係者に読まれた。

このような海外の動きに対して、日本航空（株）の松尾芳郎氏や松岡増二氏、全日本空輸（株）の舟津良行氏は、社内報や航空関係誌、学会誌等で外国での検討を紹介し、日本の航空会社でも代替燃料について、液体水素を中心に検討していることが報告されている [49,51]。

航空機の代替燃料が必要との動きに対して、1979 年秋に国際的規模での意見の交換と集約を目的として、西ドイツの航空宇宙研究所がスポンサーとなって Stuttgart で「液体水素を航空機に使用する構想と展望」についてのシンポジウムが開催された。これには 14 国からエンジンメーカー、航空会社、空港管理当局、研究者、設計者等が一堂に会して、国際エネルギー機関を代表する人や政府関係者共々意見交換を図った。

このシンポジウムの結論は、「液体水素は、運用上および費用面の問題を煮詰めて、安全性をわかりやすく立証すれば、航空機の代替燃料として最も有望なものとなる」というものであった。更に、国際的な理解と支援を促進するため、各界から選出した 7 名の特別委員会（Ad Hoc Executive Group）を設置した。筆者の知人 F.J.Plenard 氏もこの 1 人となり関係資料を速やかに得ることができた [52]。

この委員会の活動内容は、別の機会に譲るとして、1992 年に BMW 社と AIRBUS 社の依頼で、LINDE 社が作成した HUB 空港としての液体水素燃料の供給案「CRYOPLANE」は、資料 [46,47] とは異なるコンセ

プトで実現性を重要視して書かれている。この液体水素に関係する部分の概略を紹介する。

2005年を想定した液体水素燃料の航空機を180便/週、平均飛行距離1,000nm(nautical mile)、1機当たりの積載液体水素5ton(片道)とすると、往復で1,800ton/weekか257ton/Dとなる。飛行便数の季節による変動幅(夏季はmax.冬季はmin.)を25%とみると、193~321ton/Dとなり設備容量としては最大値を採るとして、水素圧縮機の最大可能量から、50~60ton/Dが液化装置1モジュール当たりの最大値となり、6モジュールで液化量は360ton/Dとしている。(WE-NETの1993年度報告で2,500ton/Dの必要量に対して250ton/D10基の想定とは考え方に大きな差がある)

更に、気化ロスや移送・移充填・冷却に必要な液体水素を正確に積算することは、配管長さ、移送技術、圧力の大きさ、冷却の必要回数、等で困難なため、液化能力の10~20%とみて20%を採用し、25ton/D2基の再液化装置を設置している。このような試算で、液体水素供給貯槽7,400m³(3,700m³2基)、再液化用貯槽800m³(400m³2基)、気化ガス用低温ガス貯槽3,700m³1基を設置している。また、安全弁が作動した際にこれを大気に放出すると、水素雲が空港周辺にできる危険を避けるため「Steam Power System」を設置して回収消費するなどしている。設備費の試算については、紙面の都合で省略した。この報告書には、これまで日本で検討された中にはない発想によるものが幾つかあり、参考となる[53]。

パリで開催される航空ショーでは、超音速機計画の発表が恒例化した感があるが、今年も6月に開催された会場では、パリ-東京間2時間半の航空機計画が発表された。Airbusの親会社EADSは、「Zero-Emission High Speed Transport」通称ZEHSTを発表。離着陸用ターボジェットエンジン2基、高度35,000mまでの上昇に使う液体酸素/液体水素ロケットエンジン2基、マッハ4での運航に使うラムジェットエンジン2基を搭載したハイブリット型で、2020年までに試作機を完成2050年頃に就航を目指し、乗客数は50~100人としている[54]。

10. スラッシュ水素

本稿の2章で日本初の水素液化装置でもスラッシュ水素が作られたことを紹介したが、液体水素中に固体水素

粒が混在する状態をスラッシュ水素と称している。製造法は、二つの方法があり、「Freeze Thaw Method」と称される大気圧下にある液体水素を真空ポンプで減圧する(約55Torr)と液体水素は沸騰し蒸発する。気化潜熱を奪うことで、温度は低下し、三重点に達すると液体水素の表面に固体水素が生成する。真空引き作業を中止すると固体水素の一部は溶けて液中に落下する。これを攪拌機で攪拌し、細粒化させて均一の固・液混合のスラッシュ水素にする。「Auger Type Method」は、液体ヘリウムと液体水素を熱交換させて、伝熱面に固体水素を生成させ、固体水素を掻き氷器のような刃物で液体水素中に削り落とす。この方法でも攪拌機による固・液の均一化は必要である。Freeze Thawが間歇運転で実験室向きなのに対して、Auger法は、液体水素を適正量供給し続けられれば連続して製造することができる。

固化率50%のスラッシュ水素は、大気圧における液体水素に比べて、密度が約15%増え、その分タンク容量も小さくできる[55]。このため1979年になって公表された資料[56]では、アポロ計画で長期間の貯蔵を必要とする液体酸素、液体水素のスラッシュ充填がテストされたことが報告されている。この他1990年には米国で、水平離着陸型単段式宇宙往還機(National Aerospace Plane)計画で、スクラムエンジンの燃料としてスラッシュ水素が検討されている。

日本では、1991年航空宇宙技術研究所(NAL)でAuger法によるスラッシュ水素が熊川彰長氏によって研究され、現在では、東北大学の平勝秀先生がスラッシュの研究をして居られる[57,58]。

11. 液体水素を燃料とする自動車

日本での水素を燃料とする自動車の開発は、1971年から武蔵工業大学の古浜庄一先生(当協会の6代目協会長)が始められ、1974年には開発1号車の「武蔵1号」が、白バイの先導で環状8号線を走っている。これはガス水素であったが、その後「武蔵2号」から燃料を液体水素に代えて、「武蔵10号」までが作られ活躍している。この発展の歴史は、後を引き継がれた山根公高先生が本協会誌にも報告されているので重複は避ける。

Los AlamosのW.F.Stewart氏が(1980年頃?)に発表した報告書[59]では、液体水素を燃料とする自動車6社(7台)(武蔵2号を含む)が搭載液体水素タンクを中

心に報告されている。その概要は、

- ①Perris (カリフォルニア) が 1960 年に、Ford Pick-up に円筒型、150L で気化ロス 2%/D、
- ②LASL (ロスアラモス、ニューメキシコ) が 1972 年に Dodge Pick-up に球型、190L で 3.3%/D
- ③Billings (ユタ) が 1973 年に、Chevrolet Monte Calro2 ドアセダンに横型円筒型、70L で気化ロス 4.9%/D
- ④UCLA (ロスアンジェルス) が 1974 年に Jeep 製郵便車の荷台に 190L の球型タンクを載せ、蒸発ロスは 5%/D だが、1975 年 8 月「公害と燃費を競うラリー」に参加するため、液体水素を満タンにして Jeep をトレーラーに登載して、輸送中にトレーラーがパンクし競技用車両は上を下にして横転した。しかし、タンクにも車両にも異常なく、競技に参加することができ、地元新聞は「液体水素自動車の安全が立証された」と報じた。
- ⑤武蔵 2 号は、このラリーに参加すべく日本から運ばれたダットサン B210 で、円筒型 230L を搭載し蒸発ロスは 2.5%/D である。ラリーでは 5 日間で 2,800km を走破した。
- ⑥DFVLR (シュツトガルト) は、120L と 150L の楕円型のタンクを開発し、蒸発ロスは 7.5%/D と 3.5%/D である。

これらは液体水素を内燃機関の燃料としているが、BMW も水素を内燃機関燃料として 1978 年から開発に着手し、第 6 世代の車として完成した「745hL」や「750hL」は、液体水素でもガソリンでも走行可能なバイ燃料型を採用し、液体水素が何処でも充填できる状況にない現状の解決法としている。2001 年にドバイから開始した「Clean Energy World Tour 2001」では世界の 5 都市を巡り、5 月 31 日にはつくばの自動車研究所のテストコースで試乗走行をした。2007 年 7 月には日本科学未来館で展示試乗会を開催し、その後国内 8 都市で巡回試乗会を開催し話題となった。「750hL」の概要は、V 型 12 気筒 DOHC、総排気量 5,972cc、最高出力 192kW、最高速度 230km/hr、液体水素タンク 140L、蒸発ロスを初期のものと比較したかったが、タンク一杯の水が溶けるまでに 13 年掛るとの概略表示しか資料がなかった。水素で 200km、ガソリンで 500km 走行できる[60,62]。量産体制で作られた「750hL」、フルオートマチックの液体水素充填設備、気化水素の燃料電池への供給と触媒で水に転換して水素の大気への放出はない、等々完成度

は高い。

この他、都市バスの MAN は、570L の液体水素タンクを搭載し、Erlangen と Munich で運行しているし、ダイムラー・クライスラーは「NECAR4」[63]、GM/OPEL は「HYDROGEN3」、アウディは「A2」に 50L のタンクに液体水素を搭載し、水素を燃料電池に供給しているが、これらは液体水素の供給が容易な欧州に限られている。

液体水素供給ステーションは、ベルリン、ミュンヘン等 LINDE 社が持つ移動式を含めて数か所、米国にはカリフォルニア等に 2 か所、日本では有明に液体水素貯槽を持つが、液体水素の充填は行っていない。尚、液体水素の充填設備は、1997 年に WE-NET の検討の一部として「Liquid Hydrogen Refueling Systems for Vehicles」でドイツ SWB 社が報告している。[64]

余り広く知られていない「BMW H2R」を紹介してこの章を終わろう。「750hL」と同じエンジンだが、液体水素のみで走行する水素直噴のエンジンを搭載した車が開発され、2004 年 9 月 4 日、南フランスミラマスにある BMW 専用の極秘テストコース、で写真 6. に示す「BMW H2R」が、最高速度 302.4km/hr 等、9 つの世界記録を樹立した。

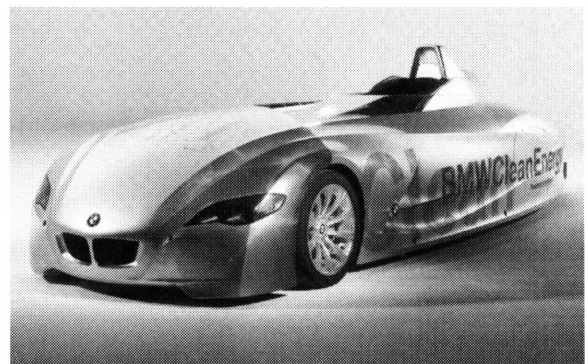


写真 6. 9 つの世界記録を樹立した BMW H2R[65]

12. 液体水素の海外からの導入調査

液体水素をエネルギー源の一つとして、海外からの導入がどの地域から可能かを調査した資料がある。

(社)資源協会に「液化水素資源テクノロジー調査会」を設けて、1991 年～1994 年に亘って調査された。
①1991 年「北アメリカ地域」[66]、②1992 年「南アジア及びオセアニア地域」[67]、③1993 年「南アメリカ地域」[68]、④1994 年「国内離島地域」[69]で、部内資料

として報告されている。

①は、カナダ Quebec 州の Quebec 市と Sept-Iles 市からの招請で調査された。欧州と共同の液体水素輸出計画「EQHHPP」の規模の拡大の可能性を探ったものであった。②は、この地域の未利用水力の利用の可能性を中心としたもので、③は、1989年にブラジル、アルゼンチンが共同市場として統合・協力開発に調印した条約「Mercosur」(Mercado Comu'n del Cono -Sur) を生かす方策として、豊富な水資源が利用できないかの調査であった。④は、屋久島の水資源を利用して液体水素を作り、大量消費地の種子島へ輸送した場合の試算を行った。

この他、1969年11月に始まったアラスカ産LNGの日本への輸出の陰り(1973年よりブルネイ産が輸入されはじめた)、日本-欧州間の直行便が増え、アンカレッジ経由航空便の減少等、を控えたアラスカ州政府の経済活性化打開策として、1992年液体水素の日本への輸出の可能性が州政府の招請で検討されている。

13. 液体水素の輸送と移送

13.1. 日本で初めての液体水素の輸送

1975年、将来必要となる液体水素の公道での安全な輸送を確立するために、宇宙開発事業団から「液体水素輸送システム」の調査依頼を岩谷産業(株)、大同酸素(株)、帝国酸素(株)の3社で受けた。公道の輸送は、今ではタンクローリで主に行われているが、初回と2回目は、小型のデュワーで、3回目はタンクで行われた。

第1回目は、1976年2月にLGC(小型液体水素用移動容器)に150Lの液体水素を充填し、尼崎から千葉まで輸送した。当時のUCLAの公道輸送マニュアルには、「警察のバイクによる先導」が記されていたため警察と相談したが、輸送が幾つかの府県に跨るため実現困難とのことで、小型トラックの前後を先導車と支援車で守っての輸送となった。また、通過各県に最低1か所の緊急避難場所を設定して、輸送は無事に終わった。第2回目は、1976年9月に500L容器2基を8トン車に積んで尼崎-田代約1400kmを2日間かけて輸送した。第3回目は、大同酸素(株)製の横型10,000Lのタンクに、角田(NAL)の40L/hrの液化機で冷却を含めて20日間近くかけて充填し、角田から田代まで無事輸送した[70]。

この実績を基に、輸送マニュアル等を整備し、1978

年秋から2,000Lコンテナ、9,900Lタンクローリ(いずれも実充填量)の運行が本格化した。

13.2. タンクローリ・コンテナによる陸上輸送

陸上を輸送できる最大容量は、その国の道路事情によって変わるから一概に良否の判定はできない。

日本ではシャーシに固定されたタンクを搭載している車(タンクローリ)では、転倒角の規程があるため、道路交通法とは別に道路運送車両法の制限が付くが、コンテナではこの規程外となる。現在運行されている最大のタンクローリは、米国で約65,000L、欧州で約60,000L、日本で21,870L(いずれもタンク容量)でコンテナは42,140Lである。

タンクローリの充填には、高圧ガス保安法で10%のガススペースを残して充填することに定められているが、輸送中にガス圧力が上昇し、温度の変化で液密度が変わり、嵩が増える。安全弁の吹き出し圧力作動開始時に10%のガススペースが必要との拡大解釈が持ち込まれ、これまで出荷時に75%しか充填できなかったが最近これが改善された。因みに米国では98%充填でガススペースは2%である。写真7.に米国最大のタンクローリ、写真8.に日本の陸上コンテナを示した。



写真7. 米国最大の液体水素タンクローリ[71]



写真8. 日本の液体水素コンテナ[72]

13.3. 航空機による輸送

1978年から宇宙開発を本格化したソ連で、バイコヌール宇宙基地にロケット「エネルギー」の燃料とする液体水素等を輸送するために開発され、1982年に就航した

VM-4 がある (写真-9) [73]。

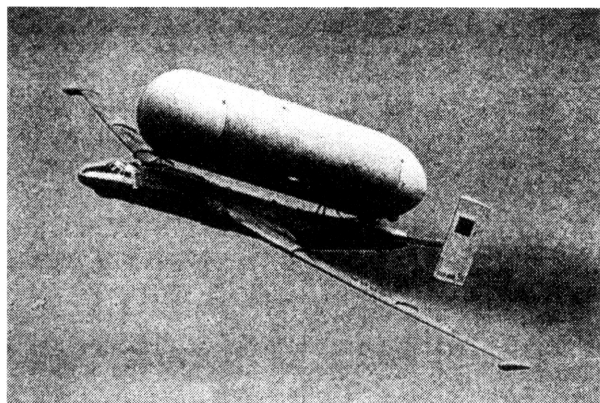


写真 9. 液体水素を輸送した航空機 VM-4

機体は、ミヤンチェフ M-4 戦略爆撃機に機外機器を搭載したもので、機体を見た多くの人が「飛行できるのか？」との懸念を抱いたが、無事に機外搭載輸送機の役目を果たし、1989年に後継機の An-225 に無事引き継がれた。(一部資料には、ドイツとの共同開発の記載もある)

また、1991年、NEDOがWE-NETタスク9で検討を計画していた「航空機による液体水素の輸送用タンクの開発」に対して、Liquid Air CANADAが液体ヘリウムの航空機輸送タンクの製作実績を基に、計画書を提出したが、実現せずに終わった。

13.4. 鉄道貨車による輸送

アポロ計画で大量の液体水素輸送を行うため、容量137kLの鉄道貨車16両が米国で建設された。鉄道貨車で輸送しているのは米国だけである (写真10.) [74]。

日本では、鉄道総研の中内正彦氏、他が「鉄道貨車による輸送の概要」を検討した報告書 [75]がある。

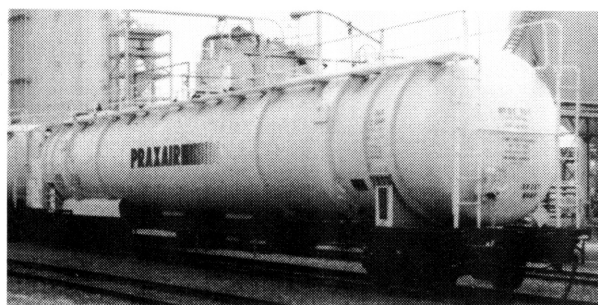


写真 10. 鉄道貨車による液体水素の輸送

13.5. バージによる 河川輸送

アポロサターンVエンジンの開発をしていたNASAのMississippi Test Facility (MTF) に約70km離れた

APCIのNew Orleans 液化工場から液体水素、液体酸素をこのバージでミシシッピ川を輸送していた。液体水素用は、1,022kLのタンクを搭載したバージがCBIによって3隻建造された。MTFのドックに係留された液体水素用と液体酸素用の写真11.と運行中の写真12.を示した。

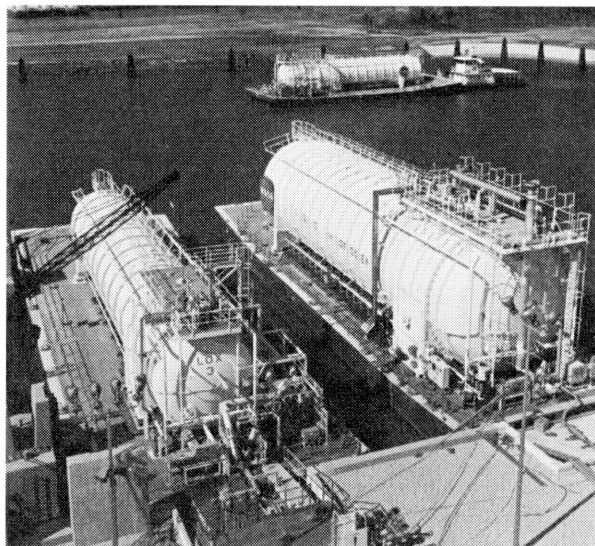
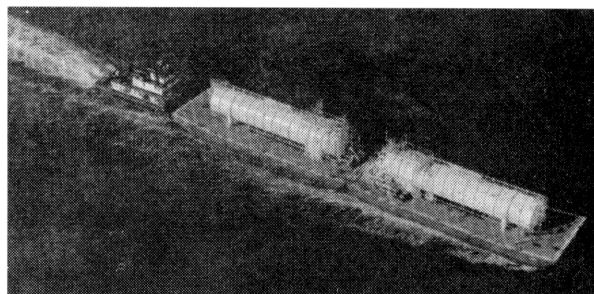


写真 11. MTF ドックに係留されたバージ [76]



HYDROGEN AND OXYGEN for moon rocket ground tests in the United States are transported via lake, intercoastal waters and river in barge-mounted double wall cryogenic storage and transfer systems designed, fabricated and constructed by CB&I.

写真 12. 液体酸素・液体水素バージの運行 [77]

この写真12.は、タンクを建設したChicago bridge Iron CO.の広告だが、酸素と水素のバージが繋がって運行されている写真は日本人の目にはめずらしい。

13.6. 国際規格コンテナによる輸送と輸入

液体水素の海上輸送には、ISO規格の40'のコンテナが使われている。液体ヘリウムの輸送用に開発され、液体水素用、液体ヘリウム/液体水素コンバーチブルの3種類があり、30日間保持できる液体窒素のシールド付である。20'型もあるが最近ほとんど使われていない。

1990年にギアナのアリアン打ち上げ基地に水素液化装置が設置されるまで、フランス北部のLe Havre 港か

らギアナの Kourou 基地まで、このコンテナで Air Liquide が輸送していた。輸送開始当初は、輸送中にコンテナが波の衝撃で破損した場合を考えて、艦上偵察水上機を飛ばす「カタパルト」の上に積んでいた。漏れたら海に投げ捨てるためのものである。1970年代後半になるとコンテナ輸送専用船の定期運行が始まり、米国→フランスに工業用水素としてコンテナで200基を超える輸送も行われている [78]。

現在世界で稼働しているこの ISO 規格のコンテナのほとんどは米国の Gardner Cryogenics 社の製品で、最高使用圧力 64psig 型と 90psig があり、64psig 型でシールド用液体窒素を充填した時の侵入熱は 40Btu/hr、で 98 日間、液体窒素無しで 98Btu/hr で 80 日間安全弁を作動させずに輸送できる。ISO 規格であるが、DOT の認証を得たコンテナでないとも米国内やコンテナ船に登載することはできない [79]。

川崎重工業 (株) が、20' の液体水素コンテナ 15,000 L を開発している [80] が、DOT の認証を得たとの記述はなくコンテナ船への登載には認証を得る必要がある。

・日本への輸入

1983 年から研究を開始した LE-7 エンジンの開発では、大量の液体水素の消費が見込まれたために、生産能力一杯の液体水素の確保が宇宙開発事業団には必要であった。

また、1950 年代から開発研究がはじまった半導体素材の単結晶シリコンやシリコンウエハーの基となる多結晶シリコンには、キャリアガスの水素を中心として高純度を求める声が大きくなった。限られた製造能力の中では、宇宙開発以外の分野への液体水素の供給は困難で、これを補うためにカナダ東海岸にある液化工場から 4 日間かけて米国大陸を横断し、サンフランシスコの Orkland 港から 12 日間をかけて大井ふ頭まで、液体水素をコンテナ専用船で輸入した実績がある。危険物としての液体水素の輸出可能港は、当時は米国で 4 か所しかなかった。船の搭載場所は当然のことながら、On deck で液体水素コンテナの両隣と上部は VOID スペースとして空けておくためコンテナ 6 基分の費用が掛り、輸送から出航まで多くの制約があった。

日本で荷揚げする港でも場所により条件が大きく変わり、東京港では、係員 2 名が高圧ガス蔵置場所で圧力計と液面計の確認が済むまで動かせない。週末に入荷すると最悪 7 日間位蔵置のままとなり、シールド用の液体窒素が無くなって、急遽補充したこともある。神戸港は日

の出から日没までの間なら即持ち出せ、大阪港は内容分析確認が済むまでは持ち出せなかった。荷揚げ港の条件をまとめた報告書 [81] がある。

1993 年 2 月から 1997 年 4 月まで合計 10 回の輸入をしたが、2 回目の輸入でカナダの規則に従って 3% のガススペースで充填されたコンテナは、充填量が多いと書類審査で輸入が認められず、サンフランシスコで液体水素を放出廃棄する事態となり、国によつての規則の違いを強く認識させられた。写真 13. に輸入に使用されたコンテナを示した [82]。



写真 13. 液体水素輸入に使用されたコンテナ

I 社も 2 回輸入されたように聞くが、公表された資料がなく不明である。

13.7. 大型船による輸送

電力が安く供給できる地域から大量の液体水素を輸送して輸入する計画はいくつか発表され WE-NET でも検討され報告されている。

比重の軽い液体水素は、輸送船の喫水を下げるためにバラスト水を大量に積む必要が生じる。このため外国の検討資料 [83] では、双胴船や LNG 船を改造したものなどの報告もある。WE-NET での検討結果では、地上の受入れタンクに移し替える計画になっているが、短時間に大量に発生する気化水素ガスの処置に対する検討はされていない。LNG では気化ガスは都市ガス配管が大きなキャパシティの役割を果たすが、水素にはこれに代わるものはない。液体水素の大型輸送船を港に長時間係留すると、係留費用が高み実現にはこれらの解決策が必要である。

このような幾つかの難点を解決する案が、カナダ→ヨーロッパ間の輸送で計画された「EQHHPP」で提案されている。タンク容量 3,000m³ をバージに載せ、5 基を 1 隻の LASH 船 (バラストタンクに水を取り込み LASH 船を沈め、バージタンクを引き込み排水してバージタン

クを積む)に搭載して運ぶ案だ。液化装置から直接タンクに充填し、必要箇所にサテライトタンクとして卸し、空タンクを積みこんで戻る。移し替えのフラッシュロスも発生せず、輸送と貯蔵タンクが兼用できる。ラッシュ船とバージを図2.に示した。

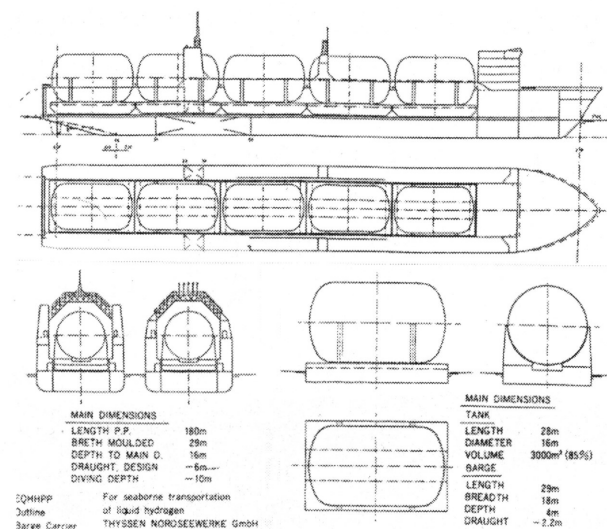


図2. LASH 船とバージタンク[84]

運輸省船舶研究所機関動力部森下輝夫氏の「水素タンカーの建造へ」[85]の中に密度がLNGの1/6になる液体水素は、進路安定性の不安と推進効率の良い大直径・低回転プロペラが使えないとの指摘や、船舶機関の水素利用の評価報告がある。また、同船舶研究所の1987年報告書では、内航船の輸送まで含めた水素設備の投入エネルギーでの評価をした報告がある[86]。

13.8. 配管による輸送

液体水素の配管による長距離輸送の実績はないが、現在建設が進んでいる欧州の「ITER」では長距離の液体ヘリウム配管があり、この実績が液体水素配管の参考になろう。連続的かつ定期的な液体水素の輸送としては配管による輸送が適しているが、固定配管では幾つかの問題がある[87]。

・配管のクールダウンと輸送

配管に液体水素を流し始める前に低温の水素ガスで予冷した後液体水素を流す。配管の口径が大きいと二層流となって配管の下部を液体が流れ、上部は温度の高い水素ガスが流れることとなり、この状態が続くと上下に温度差が生じて配管を歪ませる原因となる。また、部分的な熱収縮が起こり、配管が弓なりに反るボウイング現象を起こす原因ともなる。

・内管と外管の温度差

-253°Cに冷やされる内管と常温のままの外管との間に熱収縮の差による変形が生じる。この変形をベローズで吸収することとなるが、内外管の間は 1×10^{-5} Torrに近い真空であり、ベローズ前後にはサポートが要る。

・部分的に生ずる高い熱侵入

液体水素輸送用の積層多層巻真空断熱を施した二重配管は、工場で輸送可能な最大長さに加工されて現地に持ち込まれる。これは最長でも20m程度と予測され、20m毎に接続部があり、他の部分より侵入熱が大きくなることは否めない。この差が大きくなるとベーパーロックを起こして定常的な流れを阻害する心配がある。

最近では固定配管でなくフレキシブルな断熱3重配管も開発され使用されるようになった。資料[46]には16km 迄は、貨車やタンクローリ輸送より配管による輸送が有利との記述もある。

13.8. 移充填によるフラッシュロス

大きなエネルギーを使って製造・液化した液体水素を輸送容器→貯槽と移送する場合、多くは圧力差によって移し替えている。

移送を開始する前に、接続ホースにある空気を水素に置換してから行うが、水素ガスによるパーズを10回以上行う必要がある。(真空置換は空気を取り込む可能性があり行わない)欧米では、このパーズ作業を不要とする、先端部に逆止弁を設置したものを採用しはじめています。

日本では、移動用容器(タンクローリ)は、1か所に2時間以上の停車が認められていないため、このパーズ作業を省略して短くし、圧力差を大きくして時間を短くしなければ2時間以内で40,000L近い(40'コンテナの容量は約40,000L)液体水素を移し替えることは困難で、これは2つの重要な問題を含んでいる。

第一に、パーズが十分に行われなかったために、液体水素貯槽に空気成分(特に酸素分は危険)が持ち込まれこれが固体となって貯槽内に蓄積していく。液体水素の消費量が気化水素量より少ない場合は、全てが蓄積していく。

第二に、圧力差を大きくすることによるフラッシュロスが図3.に示すように水素は、他の工業ガスに比べて大きい。パーズが不要の先端部に逆止弁を付ければ、抵抗が増し移充填時間が増す。安全を考えた2時間規制が逆に液体水素貯槽内の酸素の濃縮を増長し、ロスを増す結果となっている。高速道路のSAでの規制の2時間とは別の考えで規則を考えることが絶対必要である。

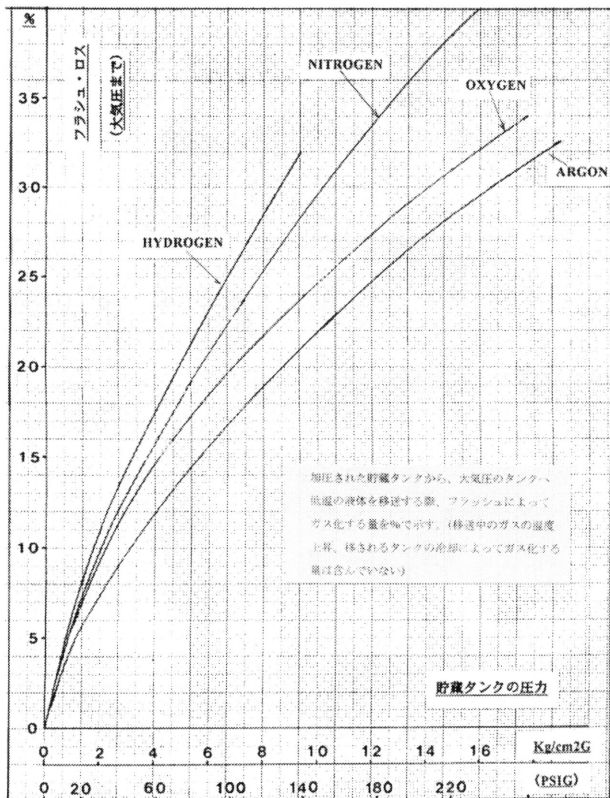


図3. 圧力差によるフラッシュロス

13.10. 輸送と貯蔵を兼ねたタンク

アリアン打ち上げ基地 KOUROU の液体水素タンクは、この移し替えによるフラッシュロスを軽減するため、液化装置の貯槽をロケット機側まで移動して移充填回数を一回少なくしている。限られた基地内とはいえ液体水素 360,000L のタンク 6 台を移動して供給している (写真 14.) [88]。

日本で貯蔵と輸送容器を兼用するためには、タンクローリは容器則、設備は特定則に従って製作され、容器の肉厚計算式が異なるため、この点についての検討が必要である。

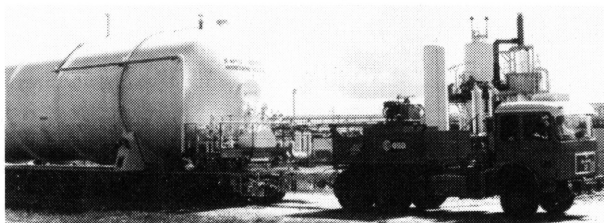


写真 14. 貯槽と輸送を兼ねる 360m³容器

14. 液体水素の貯蔵

世界最大の液体水素貯槽は、ケーブルケネディの球型

3,217,000L で、日本の最大は、種子島宇宙センターの球型 550,000L、3 基である。いずれもロケット打ち上げ用で、断熱方法はパーライト充填真空断熱法を採用している。

一般工業用の消費先に設置されるタンクやコールドエバポレーターは、現在の大半は円筒型だが、1970 年～1980 年頃の米国は殆どが横型であった。縦型は、据付面積も少なく、払い出しのための加圧面積も少なくて済む。タンク頂部の温度は、液体水素充填状態でも -200℃ 近くまで達することもあり、この点からも縦型が有利と見られる。当初の米国が横型だったのは、輸送時のサポート構造の問題からと思われる。

14.1. 消費先タンクの液体水素純度

水素液化装置に付属する貯槽中の液体水素の純度は、不純物総量で 40～50ppb vol. の資料がある。しかし、充填ホースをガスパージしている場合は、消費先タンクの液体水素純度は、充填回数が増すと不純物量が桁外れに増えるとの報告もあり、充填回数によってタンク内の液体水素を全量パージし、加温することを規定して管理しているところもある。このパージを行っている間は、水素の供給はできないため、タンクを 2 基併設して供給を管理する。

供給液体水素の純度を過信せず、常にタンク内の液体水素の正しい状態を把握し、管理することが必要である。

14.2. アポロの生命維持用タンク

液体水素の貯蔵タンクは、宇宙開発用や一般工業用は写真、構造図面、周辺フローシートなど数多く報告されているので、めずらしいアポロ登載の生命維持用タンクについて紹介しよう [89]。

Cryogenic Gas Storage System (CGSS) と称する乗務員の生命維持用と燃料電池燃料用タンクが開発された。最初のミッション用は、液体水素 2 基、液体酸素 2 基、液体窒素 1 基で、球型タンクは共通の設計で、次のミッションから酸素、水素は夫々 3 基にされた。仕様は、

	充填率	使用可能量	最高圧力	最低圧力
液体水素用	98.0%	75lb	400psi	250psi
液体酸素用	97.0%	1200lb	95psi	85psi
液体窒素用	97.2%	850lb	95psi	85psi

で、内タンクは外径 39' で材質はインコネル 718、破壊圧力 2040psi、2 つの輻射シールドはアルミニウム 6061 で表面は銀で覆われ、内側のシールドは気化ガスで冷却され、全体空重量は約 375lb である。この設備で 56 日間の宇宙滞在が可能としている (写真 15、図 4)。

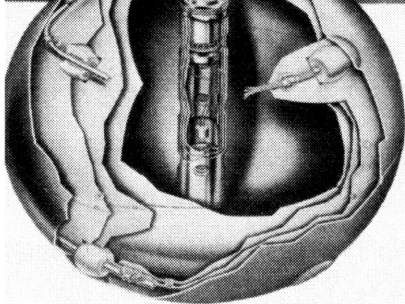
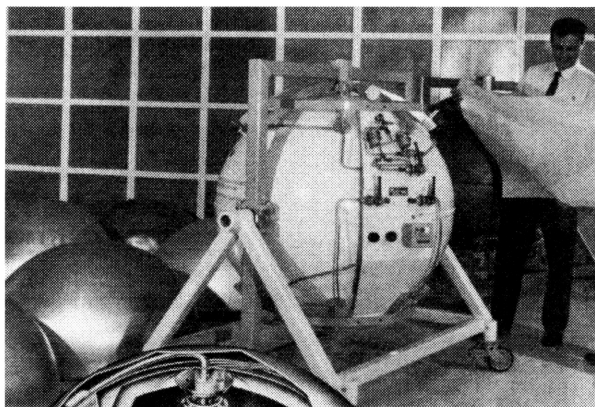


写真 15. アポロの「生命維持タンク」と内部構造図

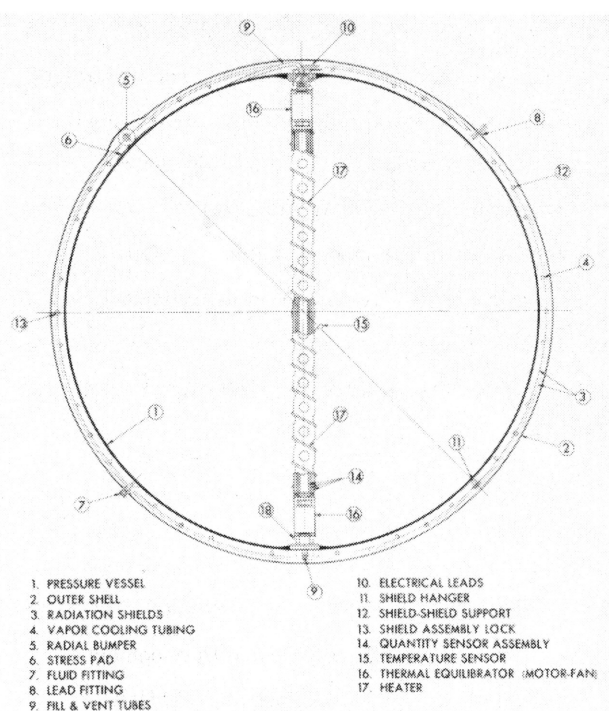


図 4. アポロ CGSS の断面構造図

本年 8 月 3 日付夕刊各紙が写真入りで報じた「テキサス州の干上がった Nacogdches 湖から見つかった 2003 年 2 月 1 日帰還途上で爆発したコロンビアのもの」と NASA が認めた 1.2m^φ球型タンクの破片がある。これには燃料が入っていたと見られるとの記事だが、サイズも同じであり、ここに紹介したアポロ計画で開発されたタ

ンクとほぼ同じものがスペースシャトルコロンビアに登載されていた「生命維持用タンク」と同型のものとするのは誤りであろうか。

15. これからの液体水素の利用

本年 9 月 14 日付け日本経済新聞によると、岩谷産業（株）と（株）トクヤマが共同で山口県周南市に 3,000L/hr の水素液化装置を 2012 年秋に移働させると発表した。

これが完成すれば、日本の液体水素の総供給可能量は、2012 年末には約 22T/D となり、関東（千葉）、関西（大阪）、中国（山口）、九州（大分）と供給拠点も北海道、東北を除いて整うこととなる。これを背景として、今後の液体水素を展望してみる。

・工業用水素

日本の水素の概算消費量は、150～200 億 Nm³/年と見られ、1.25～1.40 億 Nm³/年が工業用（工業用ガスの計量単位は Sm³（1 atm、35℃）で公表されるので Nm³に換算）として、2.5～3.5 百万 Nm³/年が液体水素で宇宙開発用として消費されていると思われる。これら工業用ガスの大半が圧縮水素の形で輸送され供給されていることから、輸送効率の良い液体水素にとって代わる可能性がある。残りの約 99%の発生場所の石油精製用や鉄鋼の COG からの水素は燃料等として消費されているため、液化される可能性は低い。

・自動車燃料

ゼロエミッションとして固体高分子型の車載燃料電池が注目を集めたが、リチウムイオン電池の進歩もあって、プラグインハイブリッド車が実用化されつつある。これには長距離の連続走行と短時間充填に難点があり、燃料電池車も 35MPa や 70MPa の高圧圧縮水素がテストの中心となっている。

これは液化動力と 70MPa の圧縮動力に差がないこと、液体水素のインフラが整っていないこと、気化ガスの処理方法が解決されていないこと、等によるものと思われる。気化ガスは BMW750hL（本稿 11 章参照）のようにして解決し、インフラはほぼ整ったとみれば液体水素登載の燃料電池車や内燃機関燃焼型の車両の走行可能性も高まるのではと期待できる。

・超伝導現象応用機器の冷媒として使用

超伝導材料の冷却冷媒として液体水素の利用の可能性

を指摘された荻野治氏や元 KEK 名誉教授平林洋美先生の報告書、等 [90-92] がある。

100 年前の 1911 年に H.Kamerlingh Onnes によって発見された超伝導現象は、超伝導体が「ある温度以下」「ある電流密度以下」「ある磁場の強さ以下」の 3 つの条件が満足されたときに電気抵抗がゼロになる。超伝導材料の Nb₃Sn や NbTi は、液体ヘリウム温度で実用化された。現在では、液体窒素温度で超伝導となる高温超伝導材料も幾つか発見されている。これら高温超伝導が 3 つの条件を満足して実用化されると、液体水素による冷却では、電氣的には絶縁し、熱的には間接冷却にしても液体水素温度で高い電流密度が得られる可能性がある。

液体水素冷却による電力貯蔵設備 (SMES) と気化水素の燃料電池の組合せの可能性について平林先生は試算し、その可能性を指摘して居られる。

16. おわりに

2 巻に亘って液体水素に関連する事象を書き連ねましたが、貴重な資料を提供下さった KEK の高橋先生、JAXA 種子島宇宙センターの坂爪所長、京都大学の吉野先生、都市大学の山根先生はじめ多くの方々にお礼を申し上げます。

古い資料の読み間違いや、記憶の誤り、思い違いがあるかもしれません。ご指摘いただければ幸いです。

参考文献は、全て手元にあります。ご希望があればご利用ください。

これまで日本では液体水素の事故は、筆者の知る限りでは皆無です。これからもこの記録が関係者の努力によって継続され、新しいエネルギーの利用の一翼を担うことを期待します。

紙面の都合もあって、コスト試算した資料や数多く手元にあるマニュアルや規格・基準・規程等についての報告ができなかったことをお詫び致します。

最後に、1766 年にイギリスのキャベンディッシュによって発見され、1783 年にフランスのラヴォアジエによって hydrogene と命名され、日本語を「水素」と命名したのは江戸時代の蘭学者宇田川榕菴 (1798~1846) によるとの 2011 年 10 月 9 日の日経新聞の記事を紹介して液体水素の発展経過の紹介を終わります。

編集ご担当の高垣先生にはご多忙の中を大変お世話になりました。ありがとうございました。

参考文献

- [37] 五代富文：「宇宙観光旅行をめぐる」機械の研究 第 48 巻第 1 号 (1996)
- [38] 宇宙旅行事業化研究報告 日本ロケット協会 (1998)
- [39] 全上別冊付録 「見えてきた宇宙旅行実現のゴールとハードル」
- [40] Makoto, NAGATOMO：「On the JRS Space Tourism Study Program」
- [41] N.J.D.Escher: Fuel Background Payoff and Cryogenic Engineering Challenge
- [42] 松岡増二：「石油に代わる水素燃料輸送機」日本航空社内報
- [43] U.Schmidtchen 他：「Hydrogen Aircraft and Airport Safety」(1995)
- [44] 新聞記事切り抜き資料多数 1973 年 11 月 16 日付 Japan Tims 他
- [45] SCIENCE PEDIA 2 (OMUNI 別冊) 旺文社
- [46] G.D.BREWER:LH2 Airport Requirements Study NASA Contractor Report CR-2700 (1976)
- [47] An Exporatory Study to Determine The Integrated Technological Air Transportation System Ground Requirements of Liquid Hydrogen-Fueled Sub-Sonic Long-Haul Civil Air Transports NASA Contractor Report CR-2699 (1976)
- [48] G.D.Brewer：「Hydrogen Aircraft Technology」CRC Press
- [49] 松尾芳郎：「新しい航空燃料-液体水素」(1) (2), 航空技報 (1975-12) (1976-1)
- [50] 舟津良行：「代替燃料への転換で試作機も」資源テクノロジー-NO.234 (1989)
- [51] 舟津良行：「水素航空機の研究・開発計画」(その 1) (その 2) 日本航空宇宙学会誌 第 29 巻第 331・332 号 (1981)
- [52] 「An International Research and Development Program For LH2-Fueled Aircraft」AD HOC Executive Group (1980)
- [53] M. Bracha：「CRYOPLANE」LINDE (1992)
- [54] インターネット「2011 パリ航空ショー」
- [55] G.A.Cook,R.F.Dwyer 「Fluid Hydrogen Slush-A Review」Advances in Cryogenic Engineering Vol.11 (1965)
- [56] 「Producing Slush Oxygen with an Auger and Measuring the Storage Characteristics of Slush

- Hydrogen NBS PB-298 555 (1979)
- [57] 熊川彰長:「スラッシュ水素」燃料協会誌
- [58] 大平勝秀:「液体水素およびスラッシュ水素技術の現状と応用」低温工学第68巻第2号(1989)
- [59] N.F.Stewart:「Liquid Hydrogen As An Automotive Fuel」
- [60] 納家弘樹:「BMW ハイドロジェン7」低温ジャーナル Vol.2 低温工学協会 他BMW関連資料
- [61] 日本科学未来館 2007年7月資料
- [62] 日本経済新聞 2007年12月26日 BMW 広告記事
- [63] Bavarian Hydrogen Demonstration Projects
Daimler-Benz Aerospace AG (1997)
- [64] Liquid Hydrogen Refuelling Systems for Vehicles SWB
- [65] ミヒヤエル・シュトックリン: BMW H2R 世界最速記録を塗り替えた水素自動車の可能性
- [66] 北アメリカ地域からの液化水素導入調査報告書 液化水素資源テクノロジー調査会 (1991)
- [67] 南アジア及びオセアニア地域からの液化水素導入調査報告書 液化水素資源テクノロジー調査会 (1992)
- [68] 南アメリカ地域からの液化水素導入調査報告書 液化水素資源調査報告書 (1993)
- [69] 国内離島地域からの液化水素導入報告書 液化水素資源調査報告書 (1994)
- [70] 花田卓爾、岡崎治、岡本宏:「液体水素の貯蔵と輸送」低温工学 Vol.14 NO.1 (1979)
- [71] Liquid Air カタログ
- [72] 太平洋液化水素㈱カタログ
- [73] VM-T インターネット
- [74] PRAXAIR カタログ
- [75] 中内正彦、岩松勝:「水素利用の規制緩和と鉄道による水素輸送に関する基礎的検討」鉄道総研報告 Vol.22, No.2 (2008)
- [76] Cryogenic Engineering 1968 9月表紙
- [77] Cryogenic Industrial gases 1969 6月広告
- [78] Baltimore 港の PR 誌 1987年7月版
- [79] Gardner Cryogenics 仕様書
- [80] 神谷祥二:「液体水素コンテナの開発」圧力技術 第42巻3号(2004)
- [81] 液化水素海外調達に係る諸課題の調査(要約) (社)資源協会 (1994)
- [82] 日本エア・リキード部内資料
- [83] G.Giacomazzi:「Prospects for Intercontinental Seaborne Transportation of Hydrogen」
- [84] E.Q.H.H.P.P 関連資料
- [85] 森下輝夫:出典不明:「水素タンカーの建造へ」
- [86] 運輸省船舶研究所報告書 運輸交通の水素エネルギーシステム 液化水素体系 (1987)
- [87] 花田卓爾:液体水素形態での輸送・貯蔵技術の現状と今後の課題 JATEC セミナー予講習 (1993)
- [88] Air Liquide DTA カタログ
- [89] A.E,O'Banion:「Cryogenic life support system for Apollo Cryogenic engineering (1969-4)」
- [90] 平林洋美:「液体水素と超伝導応用」低温工学 Vo.40 巻7号 (2005)
- [91] 槇田康博、新富考和:「水素エネルギー応用と超伝導技術の収斂」小島・平林記念機械工学・超電導低温シンポジウム第10回高エネ研メカワークショップ報告集(2009)
- [92] 荻野治:「超電導への利用の可能性」資源テクノロジー No.234 (1989)