

# 液体水素の製造・貯蔵・輸送

花田卓爾

日本エア・リキード株式会社  
135-0062 東京都江東区東雲 1-9-1

## Hydrogen Liquefaction・Storage& Transportation

Takuji HANADA

AIR LIQUIDE JAPAN, Ltd.

1-9-1 Shinonome, Koutou-ku, Tokyo 135-0062

The special number issue entitled "Storage and Transportation of Hydrogen" explains in detail the production, storage, and transportation of liquid hydrogen. The article includes purification process to liquefying hydrogen, ortho-para conversion process, liquefaction process and a thermal insulation method to store liquid hydrogen at a cryogenic temperature, as well as various transportation systems in service in the world.

**Key words :** hydrogen liquefaction, hydrogen purification method, ortho-para conversion, liquid hydrogen storage, liquid hydrogen transportation equipment

### 1. 緒言

1884年ポーランドのロブレウスキーとオテチェウスキーによって初めてミスト状に液化された水素は、1898年英国のデュワーによって液化し保存にまで至った。

水素の工業的規模の液化は、米国では1950年代の後半に、宇宙開発用のロケットのエンジン燃料用として、大量の液体水素が必要となり、相次いで大型液化装置が建設された。これによって月に人を送り込むことに成功し、その後、一時液体水素の需要は減少したが、輸送効率の高い液体水素は、水素を必要とする工業分野に広く使用され、特に半導体工業の盛隆と共に、この分野で必要とする水素の純度が非常に高いことから、これに適した液体水素が使われるようになった。現在でも当時の水素液化装置は稼働中で、米国・カナダを合わせて約200ton/日の能力を有している。

また、ヨーロッパでも1966年に宇宙開発を主目的とした600L/h(1.02ton/日)の液化装置が建設され、その後、今日までに新しい液化装置がフランス、オランダ、ドイツに建設されて、宇宙開発用と共に水素を

必要とする工業分野にも広く供給され、ヨーロッパ全体で約20ton/日の能力を有している。

一方、日本では1978年に工業規模の水素液化装置が初めて兵庫県に建設され、その後、3ヶ所に4基の液化装置が建設されたが、現在では2ヶ所で2基の液化装置が稼働しているだけで、殆ど全てが宇宙開発用として使用されていて、日本全体の液化能力は2.7ton/日である。

ロシアや中国の液体水素の状況は判らないが、宇宙開発の実状から判断すると、液体水素がこの分野で大量に使用されているようには見られない。ただ、中国のロケット長征3Aの3段エンジンには液体水素が使用されることになっているため、研究用としての液体水素の製造は行われているものと想像される。

本稿では、水素液化のための原料水素の精製、液化プロセス、水素液化には欠かすことのできないオルソ-パラ変換、貯蔵設備、輸送機器、等の現状について報告する。

### 2. 原料水素の精製

水素を液化する時、原料となる水素中の不純物を不純物合計で1 vppm 以下位まで除去しておかなければならない。これは、ヘリウム以外の不純物として含まれるガスや水分は、液体水素の温度では固化して設備内で閉塞を引き起こし、また製品純度の低下の原因ともなる。

工業規模での液体水素の製造では、原料水素は、コークス炉ガス、石油精製やエチレンプラントのオフガス、苛性ソーダ工業の塩電解、等の副生水素が使われたり、メタノールや天然ガスの水蒸気改質で水素を製造したものが使用される。

これらの原料となる水素の純度は、およそ 50~99% 程度の純度であるため、精製装置で精製し純度を高めなければならない。精製方法には、含まれる不純物の種類と量や圧力、等によって最適なものを選択するが、一般的な工業規模の水素液化では、1) 予備精製と酸素除去と除湿、2) PSA 法による精製、3) 低温吸着法による精製、の順に精製し、原料水素純度を 99.9999% 以上まで高める。

### 2.1 予備精製と酸素除去と除湿

液体水素の製造に当たり、水素中に含まれる不純物の全てを除去しておかなければならない。水素源によっては、ガス中にダストやアルカリ・ミストを含むものもあり、このような場合は、水洗浄塔を設置し洗浄除去し、更に、フィルターで残存するミストやゴミを除去する。ガス中の酸素は、後段に設置する PSA では酸素に対する吸着能が低いので、パラジウム触媒を充填した脱酸塔でガス中に含まれる酸素を水素と反応させて水に変えて除去する。水洗浄塔を設置した場

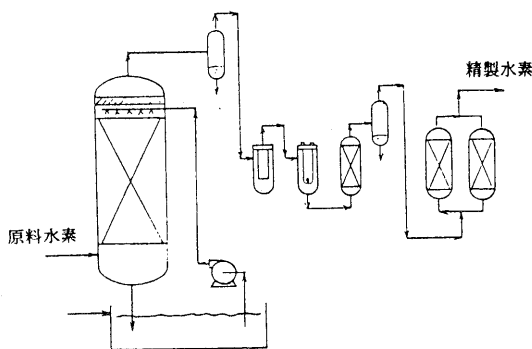


図1 原料水素の予備精製フローシート

合は、ガスの温度が常温となっているため、脱酸塔入口にヒターを設置して、反応を促進させるが、水洗浄塔を設置しない場合で、圧縮機出口ガスが直接脱酸塔に入るものでは、ガス温度を上げることが可能となるため、ヒターの設置を省略することもできる。

原料水素に含まれている水分は、アルミナゲル等を充填した乾燥器で吸着除去する。乾燥器は、2 塔設置し切り替え再生使用する。この乾燥器は、最終段の低温吸着器の前に設置する場合もあり、PSA 出口における水分含有量で判断して決める。水素の代表的な予備精製設備のフローシートを図-1 に示した。

### 2.2 PSA 法 (Pressure Swing Adsorption)

モレキュラーシーブスを主な吸着材とする吸着式水素精製法で、細孔を有する吸着材に不純物の分子の吸着量が、被吸着物質の分圧によって変化することを利用して精製するもので、不純物が含まれる原料水素を 0.8~3MPa の圧力にして吸着塔に送り、不純物を吸着させ、圧力を大気圧またはそれ以下に下げて、吸着物を脱着し、繰返しこの操作を行なうことで連続的にガスの精製を行なう。水素の吸着材への吸着は非常に少なく、水素は吸着材を通過するが、不純物として含まれる窒素、一酸化炭素、メタン、二酸化炭素、水分等は細孔内に吸着する。

吸着材は、モレキュラーシーブスの他に、活性炭、活性アルミナ、シリカゲル、等原料水素中に含まれる不純物の種類や量、圧力、要求される純度、等によって最適なものを選定する。この操作で、PSA 精製器出口の水素純度は、99.99%~99.999% が得られるが、メタノール改質などで製造した水素のように、含まれる不純物の質や量が一定している場合などでは、99.9999% 以上の水素を得ている実績もある。

吸着塔は、一般的に 4 塔設置し、1 塔は吸着・均圧減圧・洗浄・均圧昇圧の四段階を 1 サイクルとして、4 塔が一工程づつずらして作動させることで、ガスを連続的に供給する。1 サイクルは、8~20 分で行われ、洗浄の際に再生用パージガスとして水素ガスを少量流す方法と、パージガスを流さずに真空ポンプで吸引して再生する方法がある。最近では真空ポンプで脱着再生しなくても再生できる吸着材が開発され、後者の方法を採用する設備は少なくなっている。図-2 に水素 PSA 精製器のフローシートを、図-3 に吸着材のガス別吸着

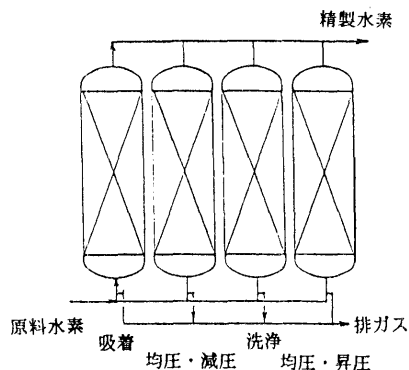


図2 水素 PSA 生成フローシート

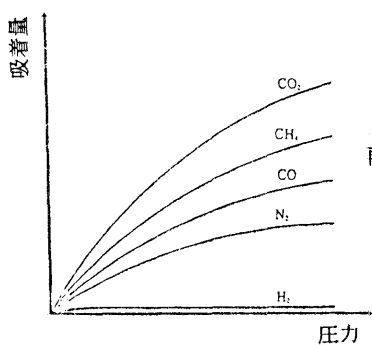


図3 吸着材のガス別吸着能概念図

能の概念図を示したが、圧力が高いほど吸着能は上がるが、切り替えの際のパージロスが増して、水素の回収率が低下する。PSA の水素回収率は 80~83%位である。

水素液化装置を安全に運転・維持するために、PSA のみの精製では完全でなく、更に低温吸着精製器を設置して、純度を確実に高めるようにする。

### 2.3 低温吸着精製法

PSA で精製された原料水素中には、まだ 1~50ppm に近い不純物が含まれているため、水素液化装置の安定した運転のためには、不純物を 1 ppm 以下まで下げる必要がある。不純物を吸着するモレキュラーシーブスや活性炭等を充填した吸着塔を液体窒素中に設置し、不純物を低温で吸着除去する。吸着現象は発熱型であるため、吸着操作は低温で行なうことが有利であり、単位吸着材当たりの吸着容量も大きくなる。

連続運転を継続するため吸着塔は 2 塔設置し、1 塔が吸着精製中に他の 1 塔を加温・脱着・再生し交互に

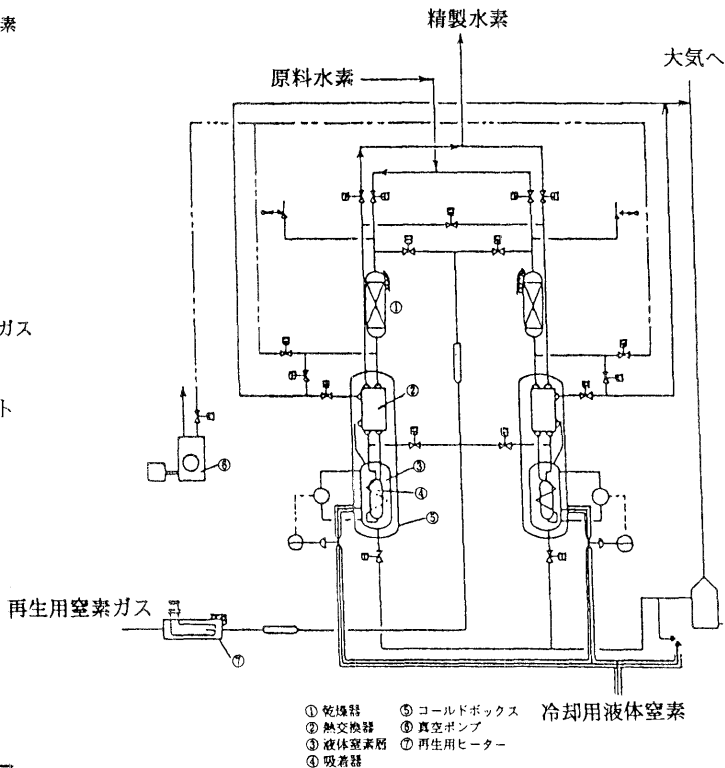


図4 低温吸着精製フローシート

使用する。吸着材の選択に当たっては、PSA と同様に、被吸着ガスの成分、量、原料ガスの圧力、吸着材の吸・脱着特性、圧力特性、対摩耗性等を考慮して決めるが、活性炭はモレキュラーシーブスと比較して、低温での吸着量が大きく、細孔分布が広いため多種類の不純物吸着に適している。

低温吸着精製装置で、含有不純物を 0.1ppm 以下までに精製することができる。図-4 にフローシートを示した。

### 3 水素液化プロセス

現在、世界中で稼動している工業規模の水素液化装置は十数基で、規模はおおよそ 1~30ton/日である。水素を大気圧における液化温度の 20K に下げるためには、一般の気体の温度を下げる方法と同じに、1)冷媒を使用して水素の温度を下げる法、2)水素を圧縮し、断熱膨張機を使用した等エントロピー膨張効果を利用する法、3)水素を圧縮し膨張弁を通して膨張させ、等

エンタルピー効果を利用する法、の三つの方法を組み合わせで行なっているが、水素は常温では等エンタルピー膨張で温度が上昇するため、逆転温度の 204K 以下の温度に冷やさないと 3) の効果は得られない。

水素の液化に当たっては、オルソ・パラ変換は重要な部分を占めるため、これについて記述し、これまでに世界で建設された水素液化装置の中から、現在日本で稼動している特徴ある 2 基の液化プロセスについて説明する。

### 3.1 オルソ・パラ変換

2 原子分子である水素は、2 個の陽子をもっていて、その陽子はスピン自由度をもち、そのスピンの向きが同一のものをオルソ水素、逆のものをパラ水素と言う。常温で平衡状態にある水素は、パラ 25%、オルソ 75% で、これを特にノーマル水素と呼んでいる。図-5 に示すように平衡なオルソ水素とパラ水素の割合は、温度の関数となっていて、液体水素の沸点ではほとんどがパラ水素となる。

常温のノーマル水素をそのまま液化した液体水素は、オルソ水素からパラ水素への自発変換が非常に遅いため、常温のときとほとんど変わらないオルソ・パラ濃度で液化する。

パラ水素への変換は徐々に進んで多量の液体水素が蒸発する。このオルソからパラに変換する際に、沸点で 523J/g の転換熱を放出するが、同じ温度の蒸発潜熱 446J/g より大きいため多量の液体水素が蒸発してしまい、折角液化した水素がこのままでは失われてしまうこととなる。

そこで、これを避けるため、液化の過程でパラ濃度をその温度に見合った濃度まで酸化鉄や酸化クロム等の触媒の中を通して、パラ変換を強制的に促進させ、パラ濃度を高める。

オルソからパラ水素への変換熱は、温度が低くなるほど大きくなるため、変換を行なう触媒の温度レベルと段数によって液化に必要な仕事量は変わる。段数が増せば必要仕事量は減る。理論的には、冷却過程でその温度のパラ濃度となるように、連続的に行なった場合、最も液化動力は小さくなる。

因みに水素液化のための理論的最小仕事量  $W_{\min}$  は、原料水素供給温度を 293K とすると、

$$W_{\min} = 3.20 \text{ KWhr/kg} \quad \text{または} \quad 6.46 \text{ KWhr/mol}$$

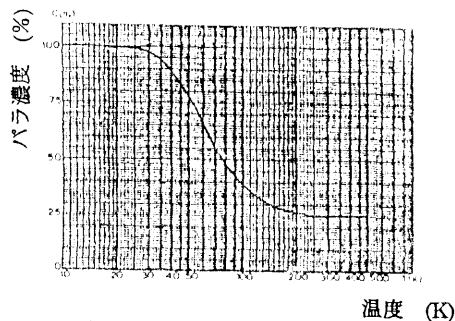


図5 温度とパラ水素濃度

である。

### 3.2 ヘリウム・ブレイトン水素液化プロセス

1978 年兵庫県に建設され現在も稼動を続けている水素液化装置に採用されたプロセスで、80K 近くまでは液体窒素を外部より供給して冷却するが、冷却ラインの冷却ガスにヘリウム・ガスを使用している。このプロセスの特徴は、高速で回転する断熱膨張タービンが、不活性のヘリウムガスで作動してヘリウムの冷媒で水素を冷却するため、水素ガスの圧縮は、原料水素として液化する水素のみを約 0.5MPa まで圧縮すればよく、可燃性ガスの水素圧縮量も、圧力も、最小で済み、安全性の高いプロセスと言える。また、水素より沸点の低いヘリウムガスで冷却するため、運転方法によっては過冷却の液体水素を得ることも可能である。しかし、make-up 用としての補充ヘリウムが必要なことや、動力原単位では水素膨張による冷却プロセスよりやや劣ることとなる。図-6 にフローシートを示したが、オルソ・パラ変換用の触媒充填塔は、4 段あって変換と冷却を繰返していることが判る。

### 3.3 連続オルソ・パラ変換を行なう水素ロード式水素液化プロセス

1987 年大分県に建設され現在も稼動している水素液化装置に採用されたプロセスで、図-7 に示したように液化される原料水素ラインと原料水素を冷却する冷却ラインより構成されている。80K 近くまでは外部から供給される液体窒素の寒冷を利用して冷却されるが、水素による冷却ラインは、循環水素を圧縮機で 5MPa 位まで圧縮し、断熱膨張タービンで膨張して温度を下げ、一部は熱交換しながら循環圧縮機の間段に戻る。残りのガスは更に温度を下げ、膨張弁で膨張し圧力

を下げて一部が液化する。この液体水素は、熱交換器で液化する水素を冷却しながら温度を上げて、循環圧縮機の吸入側に戻り、これを繰り返す。

一方液化される原料水素は、冷媒クーラーで予冷され、更に液体窒素、冷却ラインの冷却ガスで冷却され、膨張弁で膨張し一部が液化する。原料水素ラインには、3.1 項で述べたオルソ-パラ変換用の触媒が、熱交換器中に充填されていて、無段階で連続・強制的に温度と平衡状態に近いパラ濃度まで変換されて液化する。この方式は触媒充填段数を無限段数に近づけ効率を高めたことになる。また、触媒充填塔のスペース、配管長さ、圧力損失、侵入熱量、等の点で有利となり、この新しい方式を採用した液化装置は、フランス、カナダ、ギアナ、日本の4カ国で4基が稼動している。

#### 4 液体水素の貯蔵と輸送

液体水素の大気圧における沸点は 20.4K と低く、この貯蔵や輸送用容器には、断熱効果の高い断熱方法を採用しなければならない。また、液体水素は他の低温ガスに比べて、移充填の際に発生するいわゆるフラッシュ・ロスの発生が多いため、それに対する配慮もある。輸送用機器は、各国の道路事情によって輸送出来る大きさや積載重量などの規制が異なり、その手段も異なる。

##### 4.1 容器の断熱

大気の温度を 293K とすると、液体水素との間に

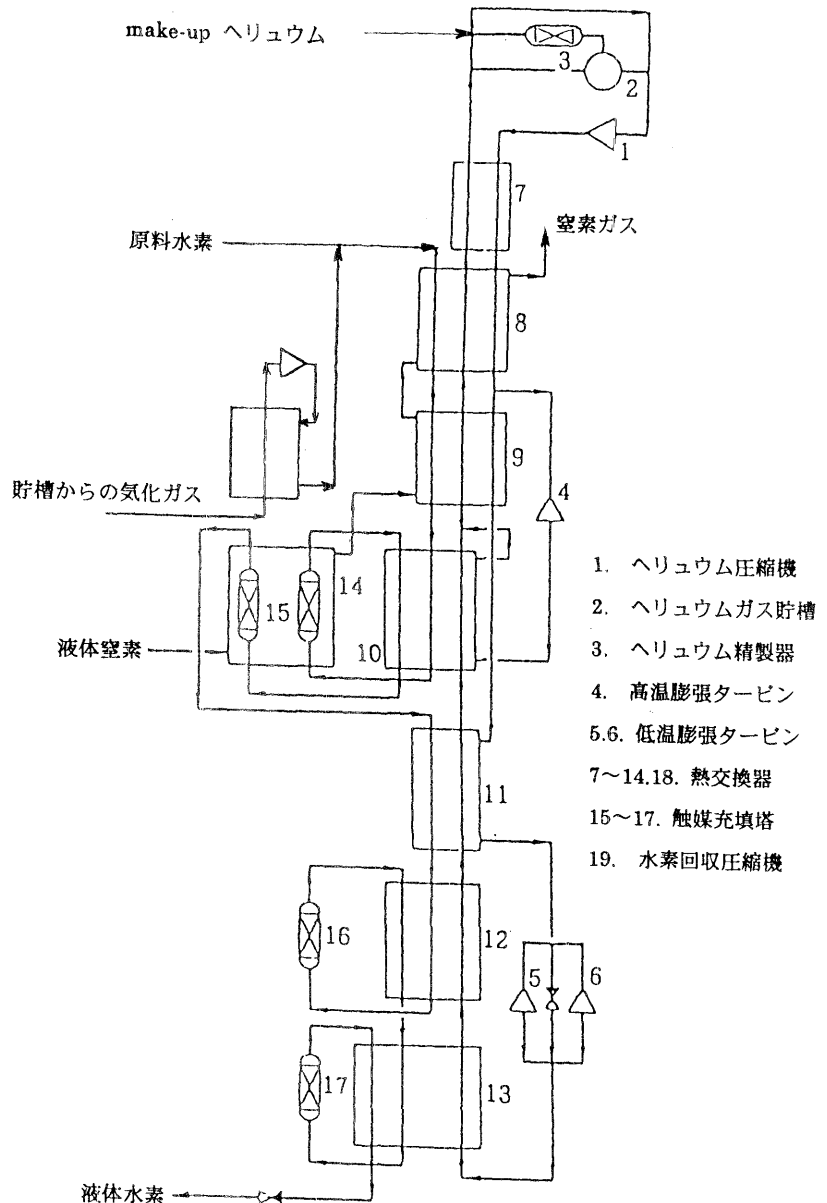


図6 ヘリウム・プラチウム水素液化サイクル

は 273K の温度差があり、断熱を施さない容器に入れた液体水素は、7.56kcal/L の潜熱で気化し、短時間で気化してしまう。液体酸素のそれが 58.1kcal/L であるから、液体酸素 1L が気化する熱量で液体水素は 7.68L も気化することになる。液体水素を貯蔵・輸送する容器には外部からの熱を極力遮断する断熱方法を採らなければならない。

熱の伝わり方は、金属などの固体の中を通して伝

わる伝導、気体の流れによって伝わる対流、電磁波のような形で伝わる放射(輻射)、の三つがありこれを遮断する対策をとる。

液体水素を入れる容器は、貯蔵用も輸送用も熱の侵入を防ぐため二重構造とし、内部容器と外部容器の間に断熱を施す。

伝導は、内容器のサポート、配管、液面計や圧力計・温度計等の計器類、等の低温部と常温部を繋いでいる材料を通しての熱の侵入量となるため、熱伝導率の低い材料の選択、断面積を小さくし、長さを長くすることによって熱の侵入量を少なくする。

対流は、内容器と外容器の間にあるガスの対流、内容器に充填されて

いる液体水素、上部にあるガス水素の対流がある。

内外容器間の対流を少なくするため、内外間のガスを排気して真空にすることによって、主な対流による熱の侵入を防止する。真空槽の圧力が0.1Pa以下になると、対流による侵入熱量は、圧力と温度差に比例して減少するから、極力圧力を下げることが望ましい。

充填されている液体水素や上部の水素ガスの対流は致し方ないが、内外容器間の温度差を小さくすることで液体やガスの対流が少なくなるから、気化ガスによるシールド板や液体窒素のシールド板を設けることもある。

容器の製作に当たっては、この真空部分は封じ切りにするため、金属材料表面からの脱ガスによる真空の経年劣化を防止するために、真空槽の内容容器に接する形で吸着材を設置し、低温で吸着能が増すよ

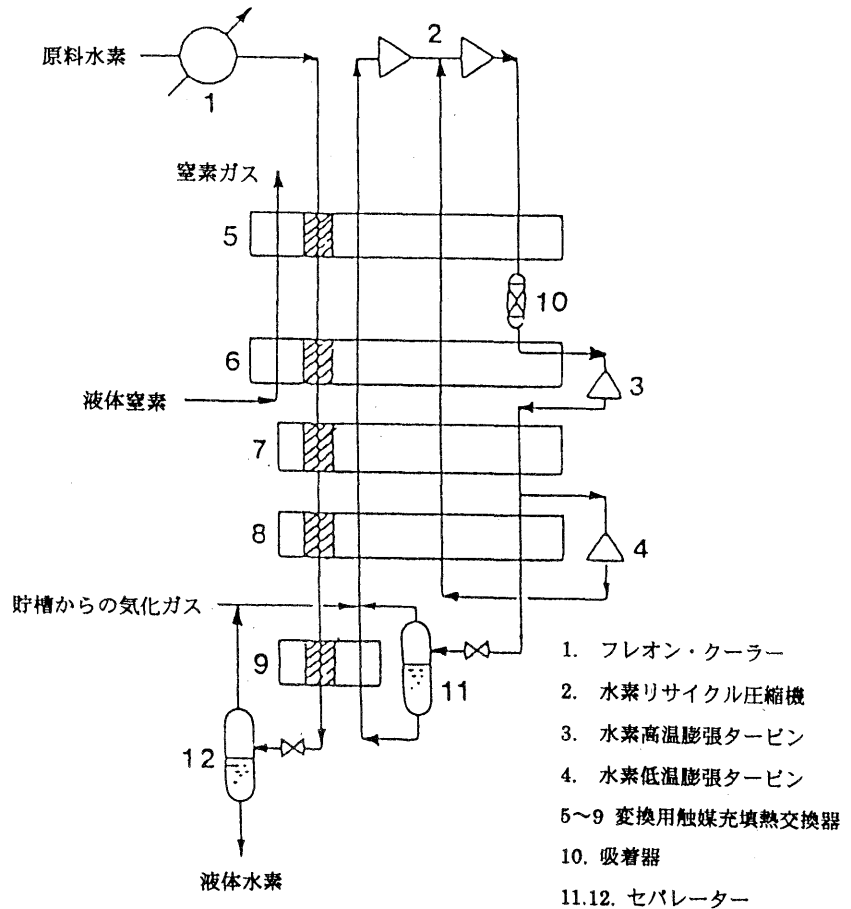


図7 連続オルソーパラ変換を行う水素クロード・サイクル

うにして、脱ガスを吸着させる。

放射は、熱が内外容器間の真空槽内面の温度の高い外容器の内面から、温度の低い内容器外面に向かって、熱エネルギーが空間を電磁波の形で移動するから、表面積を小さくし、使用温度での全輻射率の小さい材料を使用することが望ましい。この放射を減らすために、真空槽に多孔質粉末のパーライトを充填したパーライト真空断熱法や、多層の積層シールド板を挿入する多層巻き積層真空断熱法で、散乱させ吸収する方法を採る。

多層巻き積層真空断熱法では、反射率の高いアルミの薄い膜やアルミを蒸着した薄膜等を、熱の伝達する方向と直交するように張り、反射膜相互の接触による熱的な短絡を防ぐために、熱伝導度の低い薄膜をスペーサーとして交互に挿入して断熱材として巻き付ける。

金属反射膜とスペーサーを交互に巻いた状態では、真空層に露出している表面積が大きく、排気のパスが長くなって真空排気の時間が長くなるため、膜に約 30mm 角に 1ヶ所の割合で 2 mm 程の孔を開け、排気時間を短くする。また、多層膜の層密度や巻き数、シールド膜の端末部の処理、膜の皺の寄せ方、等が断熱性能に大きな影響を与えるため、施工に当たっては十分な配慮と経験がいる。

#### 4.2 貯蔵用容器

貯蔵用容器・貯槽としては、特殊用途用、液化基地用、消費先用(コールド・エバポレーター)、受入基地用に分けることができる。

特殊用途用には、研究室で使用される小型容器から、大型実験装置用のものまで製作されている。古い小型容器では、外部からの侵入熱を少なくするために、液体窒素の熱シールド板を付けたものもあったが、現在は製作されていない。

液化基地用の貯槽は、貯槽から気化したガスをそのまま再度液化できるため、費用の掛る多層巻き積層真空断熱にせず、パーライト真空断熱で製作されることが多い。形状は、貯蔵容量にもよるが、蒸発ロス面では表面積が最小となる球形が好ましく、製作の容易さ、移充填のし易さ、据え付け面積、貯蔵量、等を考慮して決める。日本では、100m<sup>3</sup>、150m<sup>3</sup>、200m<sup>3</sup>の堅型・パーライト真空断熱の貯槽が製作・使用されている。

消費先用のタンクとしては、NASA で使用されている世界最大の 3,220m<sup>3</sup> の球形タンク(図-8)は別格として、一般には 3~100m<sup>3</sup>、圧力 1.2MPa、円筒型、多層巻き積層真空断熱で製作されている。液体水素が工業規模で使用され始めた当初は、米国では円筒横型が主流であったが、現在では、加圧の容

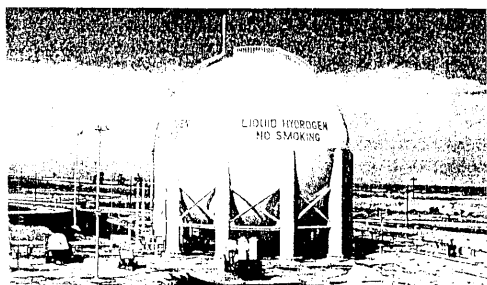


図8 世界最大の液体水素貯蔵タンク

易さ、据え付け面積が少ないこと、内容物の吊り構造が容易なこと、等の多くの優れた点から円筒型が主流となって、世界中で製作されている。ただ、種子島宇宙センターの液体水素受入れタンクは、550m<sup>3</sup>、球型、パーライト真空断熱で製作されている。

消費を伴わない受入基地用は、海外から大量の液体水素を輸送船で持ち込んだときの大型貯槽が WE-NET 計画等で検討されたが、未だ製作されていない。

図-9 に 20m<sup>3</sup> のコールド・エバポレーターの写真を、図-10 に標準型コールド・エバポレーターのフローシートを示した。

#### 4.3 フラッシュ・ロス

液体水素を貯蔵容器から輸送容器に、輸送容器から消費のための受入タンクに移し替える際にガス化して発生するいわゆるフラッシュ・ロスは、液体水素は他の低温液化ガスに比べて多い。このため移し替えに際しては、フラッシュ・ロスが少なくなるような配慮をしながら行なうことが肝要である。このため、移し替える回数を少なくする方法として、貯蔵タンクと輸送タンクを併用するものや、輸送タン



図9 20m<sup>3</sup>、1.2Mpa のコールド・エバポレーター

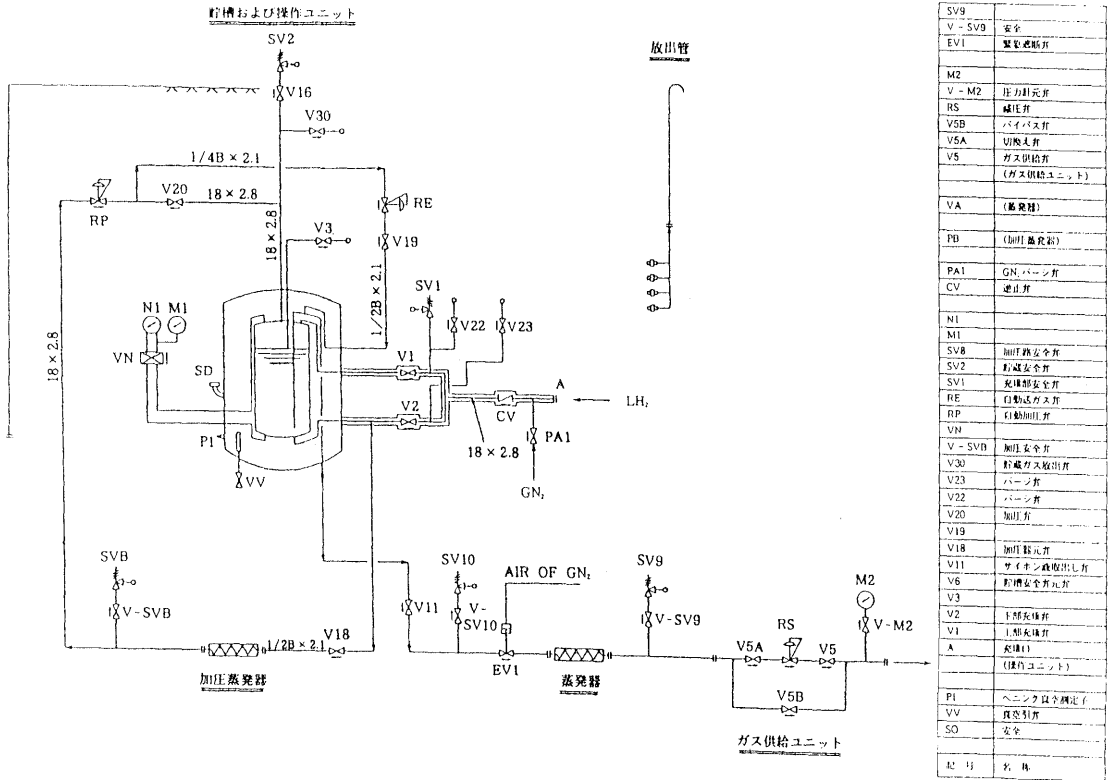


図 10 標準型コールド・エバポレーター・フローシート

クを消費場所に留置いて使用する方法が最近では採られるようになってきている。図-11 に大気圧までフラッシュさせたときに発生するガスの量を他の低温液化ガスと比較して示した。

#### 4.4 輸送用機器

液体水素を輸送する機器には、公道を利用して運ぶタンクローリーやコンテナ、鉄道を利用する貨車、海や河川を利用するバージ、外洋を運行する専用船等があり、ISO 規格 40 フィート型のコンテナでは公道・鉄道・コンテナ船による海上輸送のいずれにも使用されている。

公道を輸送できる輸送用機器は、夫々の国の道路状況によって異なる基準があり、日本では道路運送車両法で、幅 2.5m、高さ 3.8m、長さ 12m、総重量 25 トンと定められている。また、可燃性液化ガスの輸送重量が 3 トン（液体水素の場合は 42,313L）を超える場合は、届け出が義務づけられている。現在、日本で運行されているタンクローリーの最大のものは、積載量が 19,680L で、コンテナは 38,310L

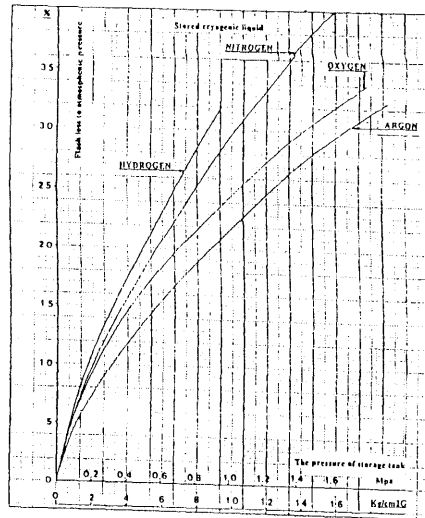


図 11 大気圧までフラッシュさせたときの気化量

である。図-12 にタンクローリーの写真を、図-13 に ISO40 フィートコンテナの写真を示した。

これに対して米国では、タンクローリーは 49,000L (図-14) のものが、ヨーロッパでは約 60,000L (図-15) のものが夫々運行している。コンテナは、米



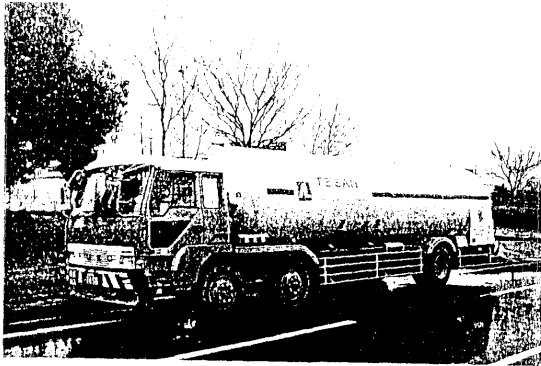


図 12 日本最大の液体水素タンク・ローリー



図 15 ヨーロッパ最大の液体水素タンク・ローリー

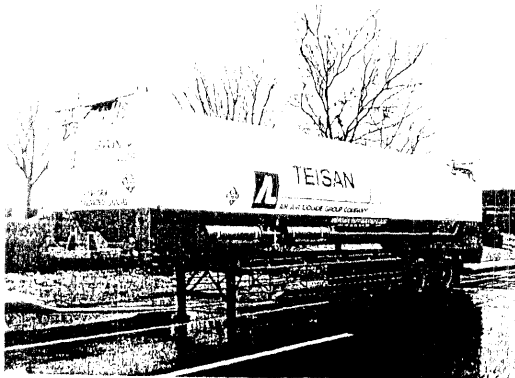


図 13 ISO40 フィート型 LHe/LH<sub>2</sub> 兼用型コンテナ

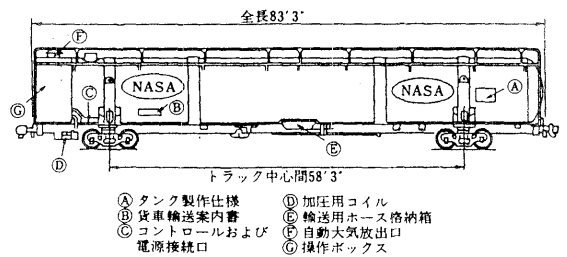


図 16 米国で運行されている液体水素貨車

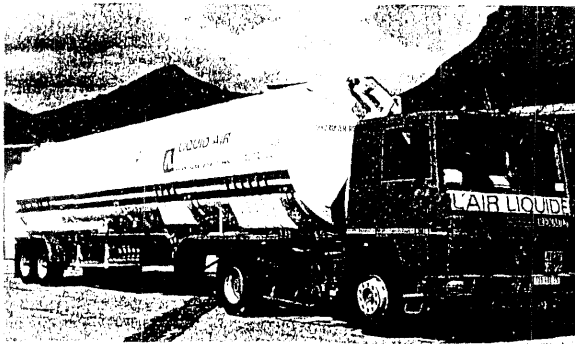


図 14 米国最大の液体水素タンク・ローリー

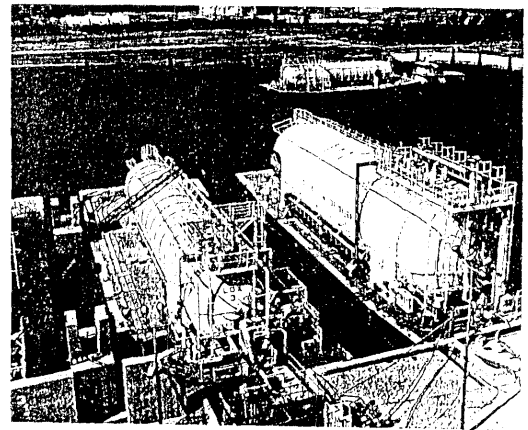


図 17 米国で運行されている液体水素バージ(右は液体酸素用)

国・ヨーロッパ共我が国と同じ ISO 規格の 40 フィート、11,000US ガロン (41,635L) のものが運行しているが、同じ容量でもタンクローリーやコンテナの最大充填可能量に各国で差があり、フランス・日本が 10%のガススペースを採らなければならないのに対して、カナダでは 6%・米国では 5%でよい。

ISO40 フィートのコンテナでは、液体窒素のシールドが付いているため、液体窒素を補充し続けると、180 日間液体水素の安全弁を動作させずに貯蔵することができる。また、コンテナは液体ヘリウムと兼用のものも運行されている。

最近 ISO40 フィート型で、液体窒素シールドの付いて無い 53,000L、1.2MPa 型のコンテナがヨー

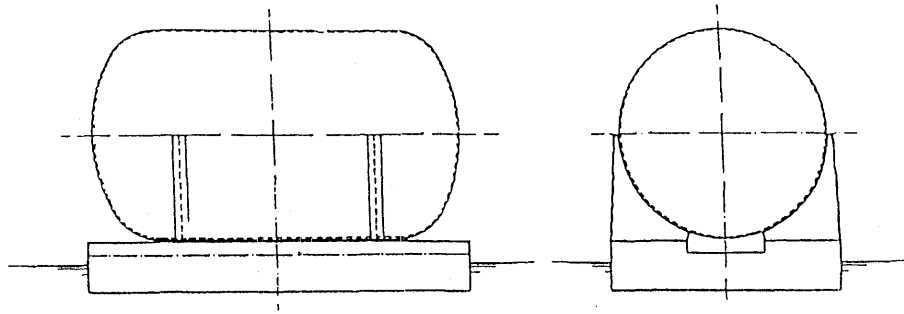


図 18 大量輸送用に計画されたバージ

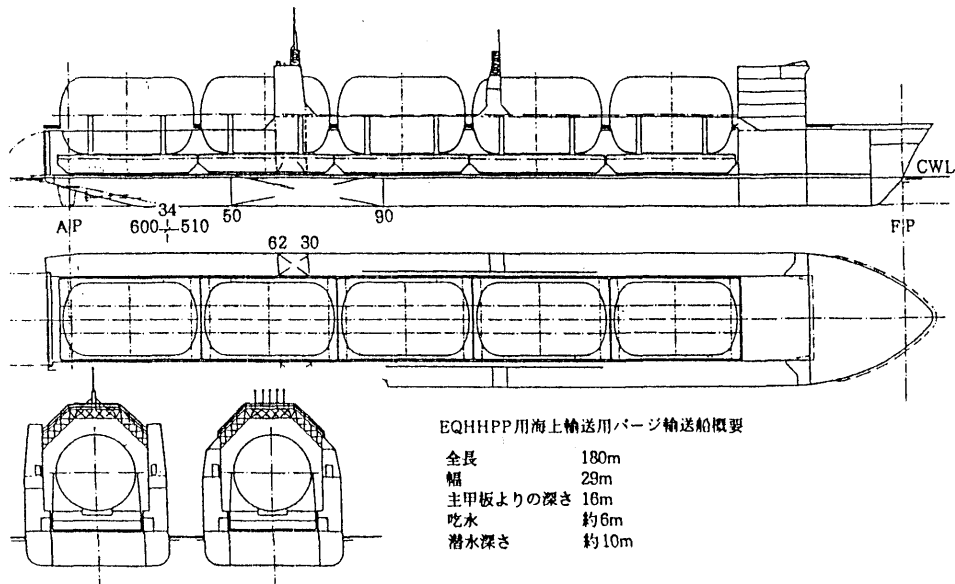


図 19 バージ輸送用のラッシュ船

ロッパで稼働し始めた。液体水素が広く使用されていない日本では、テストや研究用として少量の需要のために、180L、500L、600L、2,500L、3,500L等の比較的小さいコンテナも使用されている。

鉄道用貨車による輸送は、米国だけで行われていて137m<sup>3</sup>の貨車が製作されている。図-16に外観図を示した。

バージによる輸送も米国だけで行われていて、1,000m<sup>3</sup>のバージがミシシッピー川を運行して、宇宙開発用に大量に消費される液体水素を輸送している。図-17に写真を示した。

大量の液体水素を輸送するために、大型の専用船がWE-NET計画で検討されたが、未だ実現していない。この専用船は、港で大型受入貯槽に液体水素

を移し替えるように計画されているため、液体水素を移し替えるときに、4.3項で説明したフラッシュ・ロスとして大量の低温気化ガスが発生し、この処理についても解決しなければならない。

大型専用船による計画は実現していないが、カナダからヨーロッパに液体水素を運ぶ計画Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Projectの中で発表されたものはユニークなアイデアのものである。タンクは円筒横型で内容積3,000m<sup>3</sup>、直径16m、長さ28mで、長さ29m、幅18m、深さ4m、吃水2.2mのバージに固定されている(図-18)。このバージ5基を積み込むラッシュ船は、長さ180m、幅29mで、積み込む際に水を取り込んで吃水を10mまで下げ、バージを引き込んで固定した後排水して吃

水を 6m まで上げて航行する。(図・19)。

この方式の採用によって、液化基地の貯槽、輸送用タンク、受入貯槽の三種類のタンク・貯槽を一つで兼ねることができるうえに、移し替えが不用で発生するフラッシュ・ロスも無くなり、積み下ろしの港湾設備も不用で設備投資費用も大幅に削減できる、等の有利な点が多い。液体水素の使用先に一基ずつ降ろして使用できる反面、使用先が河川や海に面していないと使用できないことや、外洋型ラッシュ船の建造の可能性についても検討しなければならない。

## 5. まとめ

近年検討されたり製作された液体水素に関連する設備では、経済性や高効率、安全性、等に配慮した工夫が多くされていて、興味あるものが多い。バージによるラッシュ船による輸送計画、連続パラ変換を行なう水素液化装置、アリアンヌ・ロケット打上

げ基地における液化装置で液化した液体水素を、360m<sup>3</sup>の百足のような車軸を付けた移動用のタンクに直接入れて、トラクターでロケット機側まで移動してロケットに充填する方法、等々あり、これから自動車燃料を始めとして、液体水素を利用する機会が増えて、ユニークなアイデアによる機器や設備が生まれてくることを期待したい。

## 参考文献

- 1) 理科年表 丸善(株) 1996
- 2) 水素エネルギー最先端技術 (株)NTS1995
- 3) 住友精化(株) PSA カタログ
- 4) Gas Encycropedia L'AIR LIQUIDE 1976
- 5) 低温技術の進歩 高圧ガス保安協会 1980
- 6) E.Q.H.H.P.P 関係 パンフレット
- 7) Cryogenic engineering NEWS 1968
- 8) CB&I 広告
- 9) 超伝導・低温工学ハンドブック(株)オーム社 1993