

エネルギー問題と低温技術

大阪大学工学部 田村 英雄

1. はじめに

今日のエネルギー問題は、地球における貴重な埋蔵資源である石油や石炭のような化石燃料の、近い将来における涸渇の懸念と、これらエネルギー資源の地域的（国家的）偏在にあり、さらに加えてこうした燃料の大量、集中的な消費によって起きる大気汚染の如き環境問題が主体となっている。これらの対策としてわが国では、昭和49年度から「サンシャイン計画」を発足させて、資源の面での心配もなく、大気汚染もない新しいエネルギー技術の開発を、ナショナルプロジェクトとして推進することになった。勿論諸外国も国家将来の重要事項として、各々その国情に応じて将来のエネルギー計画を、何らかの形において確立する努力を進めている。

それらの基本的な考え方は何れも同一のものであり、まず貴重な資源を最も有効に活用することを第一とし、しかもエネルギーの高効率利用と省エネルギーを含めて、さらに環境汚染を防除することにある。

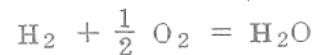
ところで、このようなエネルギー技術の改革を進める過程において、この特集が主題に掲げている低温技術が、どのような形、立場において貢献するものであろうか………？

これは一見無理な結び合わせのようにも見られるが、現実以下に述べるように大きな期待がかけられていて、決して看過することのできない重要な課題であることに注目されたい。

2. 水素燃料と低温技術

いま、期待される将来のクリーンフェエルと

して水素が注目されている。水素を空気中で燃焼させれば下記の反応で水が生成する。



この場合熱で水蒸気となるが、水蒸気は雲となり雨となって再び地上へ戻って来る。この水を分解^{*}すれば水素と酸素が得られ、その資源は無尽蔵であるといえることができる。しかも石油や石炭などの炭化水素燃料の燃焼のような、炭酸ガス、一酸化炭素ならびに不純物のイオウの燃焼ガスである亜硫酸ガスなどの汚染物の生成は全然ない。また燃焼法をうまく管理すれば窒素酸化物（NO_x）の生成も、水素の燃焼では極端に低く押えることも可能であることが、すでに認められている。

このように水素は資源的には無尽蔵で偏在もなく、汚染の心配もない理想的な燃料である。

さらに燃料としての各種の特性を比較したものを表1に示す。これによれば水素は他の燃料よりも軽く、エネルギー重量率（cal/g）の高い点も特徴的である。

ところで水素燃料を実際に使用する場合は考えるならば、その形態と容器が問題となる。一般には耐圧容器へ高圧で充填された水素ガスが常用されているが、例えば7m³（一気圧での量）の水素を充填した（充填圧150気圧）耐圧容器の重量は約60kgで、水素の重量の100倍となり、燃料貯槽としての経済性は極めて低いものである。しかしこれを液体水素とすれば耐圧容器は不要となり、その沸点であるところの-252.77℃以下の低温に保持できる保冷容器に貯蔵すればよい。この事は表2の数値にも明ら

*水を分解するには熱や電気などのエネルギーが必要である。この一次エネルギーを何によって得るかが問題になる。現在は原子力エネルギーが考えられているが、将来太陽エネルギー、地熱エネルギーなどの活用も研究されている。

表1. 各種燃料特性の比較

特 性	水 素	メタン	ガソリン
発火エネルギー (10^{-3} ジュール)	0.02	0.3	0.25
発火温度 (°C)	585	580	530
火炎温度 (°C)	2140	2,000	
火炎伝播速度 (cm/sec)	280	34	<30
爆発限界 (%)	4.1~74.2	5.3~14	1.5~7.6
密度 (g/cm ³) (liq.)	0.07078	0.425	0.74
エネルギー重量率 (cal/g) (")	29,000	15,983	11,500
エネルギー容積率 (cal/cm ³) (")	2,050	6,793	8,500

表2. 水素貯蔵法の比較

相 対 値	相対的 ^{a)} 重 量	相対的 ^{a)} 容 積
水素ガス (136 気圧)	15.0	24.5
液体水素 (-252°C)	2.4	3.8
b) MgH ₂ (有孔率 40%)	4.6	4.0

a) ガソリンを1とし、同じエネルギー量を貯蔵するとした場合の数値

b) 金属マグネシウムに水素を吸蔵させ、金属水素化物として水素を貯蔵する場合

かな通りである。

即ち水素燃料を実用化するためには、-252°C という極低温の液体水素を取扱うための低温技術が重要な鍵となる。

3. 水素の液化

液体水素の特性は表3のとおりであるが、水素分子には二種の異性体が存在する。二つの原子核がパラレルスピンのオルソ水素とアンチパラレルスピンのパラ水素である。常温以上ではオルソ水素が75%で平衡しているが、液体水素の沸点では99.8%がパラ水素となっている。このオルソからパラへの転化には310 cal/mol (約1.1KW/g)のエネルギーが必要であり、これが水素液化のコストに影響を与えている。

表3. 液体水素の特性

融 色	13.8° K (-259.20°C)
沸 点	20.3° K (-252.77°C)
蒸発の潜熱	106.5 cal/g
臨 界 温 度	-239.9°C
臨 界 圧	12.80 atm
臨 界 密 度	31 g/l
液 体 密 度	71 g/l (-252.77°C)

表4. 水素の液化と液化天然ガスのコスト比較

	コスト比 (\$) L.H ₂ / L.NG.
液化装置価格	2.8
液化エネルギー	2.0
貯蔵タンク価格	4.8

液化の技術はある程度開発はされているが、オルソ-パラの転化速度を早やめるための触媒の開発が要望されている。現在では酸化第二鉄の水和物とカルテニウム、ケイ酸ニッケルなどが知られているが、さらにこの触媒に関しては多くの研究が行われている。

表5. 液体水素のコスト試算

	単 位 円	液体水素 0.5 t/日の生産		液体水素 1 t/日の生産	
		所要量	円/LH ₂ -l	所要量	円/LH ₂ -l
水 素	40 (Nm ³)	0.80 Nm ³	32.0	0.80 Nm ³	32.0
電 力	8 (KWH)	1.18 KWH	9.0	0.97 KWH	7.7
液 体 窒 素	40 (kg)	0.8 kg	32.0	0.72 kg	28.8
人 件 費			13.9		6.9
その他の経費			28.2		15.5
合計コスト			115.6		90.9

但、稼動時間を600時間/月とする。

アメリカではNASAでの技術開発によって水素の液化技術進歩はめざましく、液化機の価格も経済ベースに近づいている。しかしこれを液化天然ガスと比較すれば、表4の如くなお総てにおいて液化天然ガスの場合より数倍高価となっている。これは液体水素の応用が展開され、それに応じてこの分野の技術が発展することを期待する外はない。

なお著者の関係している大阪科学技術センターが運営している水素システム研究会で試算した液体水素のコストは、表5の通りである。この場合生成される液体水素は温度21.25°K、蒸気圧1.4kg/cm²(絶対圧)、オルソ・パラ転化率99.5%である。

4. 液体水素の貯蔵、運搬

極低温の液体である液体水素は、それを貯蔵、運搬するためには、特殊の保冷容器が必要である。NASAではすでに850,000 gal.(3,220Kl)容量の球形タンクが設置されているが、これは外部をパーライトの厚さ約1mの断熱層(真空)で被覆した超断熱容器である。その外運搬用または小口貯蔵用にはジュア-瓶や、アルミニウム薄膜を多層重ねた多層断熱容器が用いられている。このような容器に貯蔵する場合も液体水素の蒸発損失は防げないが、全部パラ形とした液体水素の蒸発損失は容積の1/3乗に逆比例することが知られており、前記3,220Klのタンクでは蒸発損失は1日当り0.05~0.1%、

1,900Klの容器で約0.2%/日、150l程度の小型容器で1~1.5%/日程度に押えられる技術が開発されている。これらの容器はトレーラーや車輻に搭載されて、液体水素の運搬に利用されているが、極めて安全なものであることはハイウェーでこのトレーラーが衝突、転落などの交通事故に数度あっているが、未だ発火した事もなく、死者の出た事もない事実が証明している。

水素エネルギーシステムでは、自動車に水素エンジンを搭載して、自動車の無公害化を計画しているが、この場合の燃料としての水素の取扱いが問題になっている。一つの案として液体水素を用いることが検討されている。ガソリンで20gal(76l)のタンクを持つ自動車で、液体水素に切り換えるとすると、同一走行距離を維持するためには50gal(189l)の液体水素タンクが必要とされる。自動車の衝突事故にも耐える安全なタンクの製造は可能であるが、1974年現在でその1個の価格は2500\$(約75万円)と極めて高価であるが、量産によって750\$(約22万5千円)以下になるといわれている。このタンクでは内部で約10%が蒸発して、内圧が3.5kg/cm²(ゲージ圧)に保たれて、エンジンへの水素ガスの供給を円滑にするようヒーターが着けられている。この条件で液体水素の蒸発損失が1.5%/日である。図1はタンクとこれに液体水素を充填する場合の配管などの概略を示す。

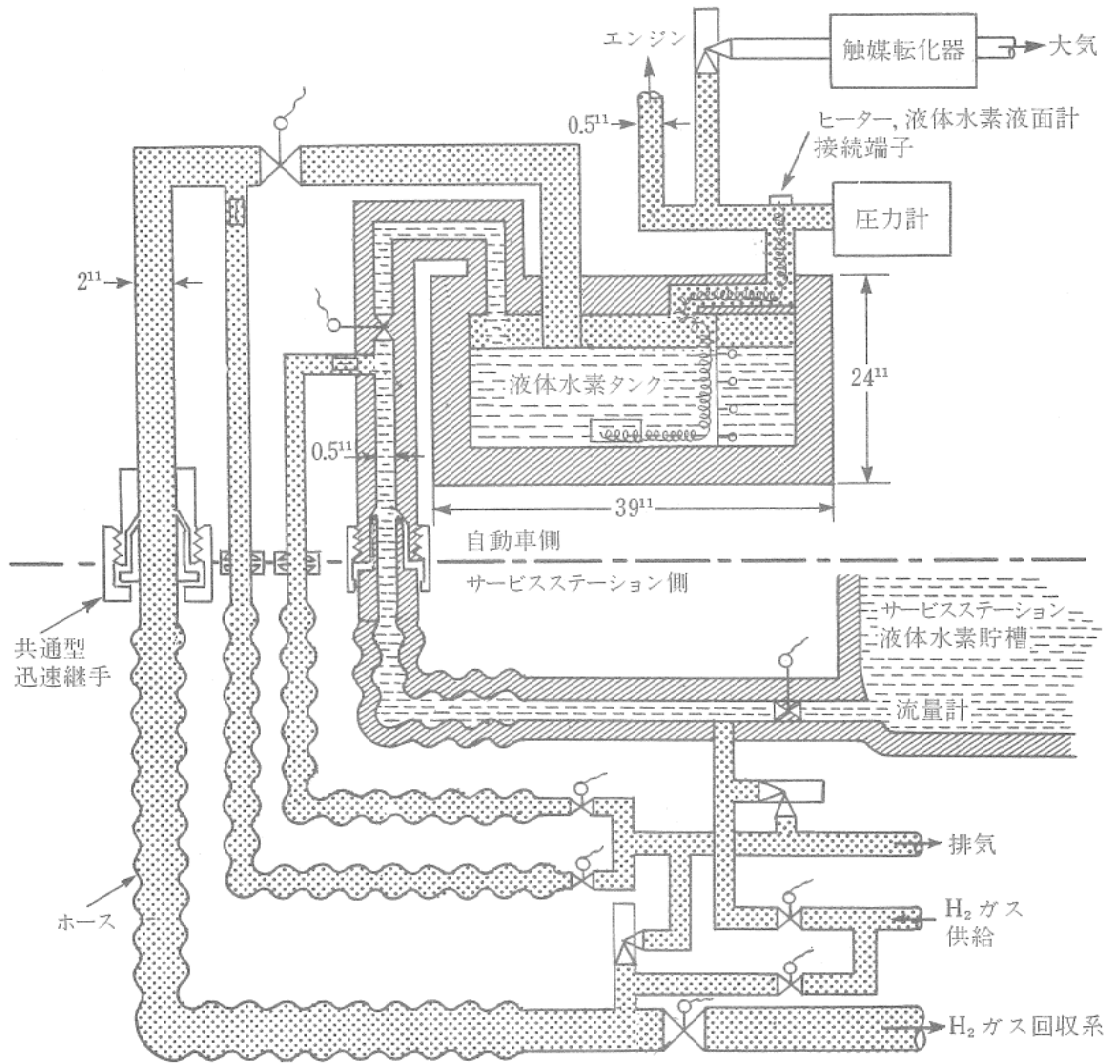


図1. 自動車用液体水素タンクと液体水素充填系

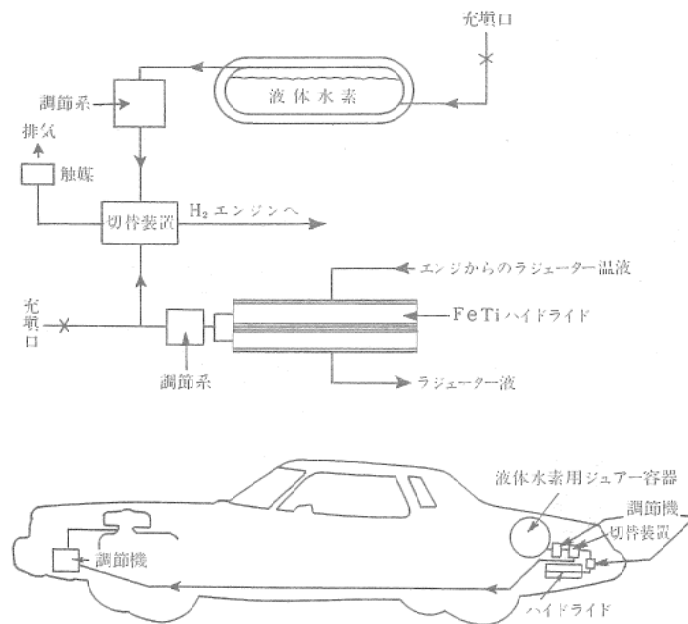


図2. 水素自動車の燃料系統図

タンクの搭載場所および配管系の一例を図2に示す。但しこの図は水素の一部を金属水素化合物として用いる例である。

5. 液体水素のエンジン

水素は重量当りの燃焼エネルギーが、一般のジェット燃の $2\frac{3}{4}$ 倍に相当することから、航空機用燃料としても注目されているが、さらに比熱の大きいこと（定圧比熱 C_p $3.4 \text{ cal/}^\circ\text{C}$ (25°C)、定容比熱 C_v $2.4 \text{ cal/}^\circ\text{C}$ (25°C)、空気の C_p : $0.24 \text{ cal/}^\circ\text{C}$ (25°C)、メタンの C_p : $0.59 \text{ cal/}^\circ\text{C}$ (25°C))が、ジェットタービンやロケットエンジンの推進剤として非常に魅力的である。即ちこの特性によりジェットやロケットのエンジン重量を大きく軽減することができる。特に液体水素を燃料として使用すれば、その低温と気化による高度の冷却作用により、潤滑剤に対する重要な配慮も必要なく摩擦熱を取り去るので、液体水素エンジンはアメリカの宇宙開発で極めて重要な技術とされた。

こうした技術が現在超音速商業機の開発に転用され、1980年頃には SST 旅客機のテスト飛行も実現する計画が発表されている。ここではエンジンの詳細は省略するが、同機的设计案の概略は図3の通りで従来の JP 機より、搭載燃料の重量がかなり低減することが示されている。

この水素ジェット機が発着する空港では、供給する液体水素の貯蔵、補給などに関する大規模な設備が必要となり、前述の水素自動車の水素スタンドも含めて、将来こうした分野での低温技術の開発、普及が重要な課題となる。

6. エネルギーの輸送と低温技術

水素は余剰電力を利用して、水の電気分解を行って製造し、ピーク時には水素エンジンや水素・酸素燃料電池その他で発電すれば、従来問題となっていた電気エネルギーの効率の良い貯蔵が可能となる、と評価されている。さらに電力の輸送と水素のパイプ輸送によるエネルギー輸送コストの比較をすれば、表6の通りで水素

表6. 各種エネルギー輸送方式によるコストの比較（輸送距離 100 マイル）

エネルギーの輸送方式	輸送コスト
メタンのパイプ輸送	0.030 ($\$/10^6 \text{BIU}$)
水素(気体)のパイプ輸送	0.033 (//)
ガソリンのタンカー輸送	0.10 (//)
高圧線による送電	0.21 (//)

のパイプ輸送の有利性が明らかである。

これに対して未来の送電法として、超伝導材料の電線による送電に、液体水素冷却を導入し

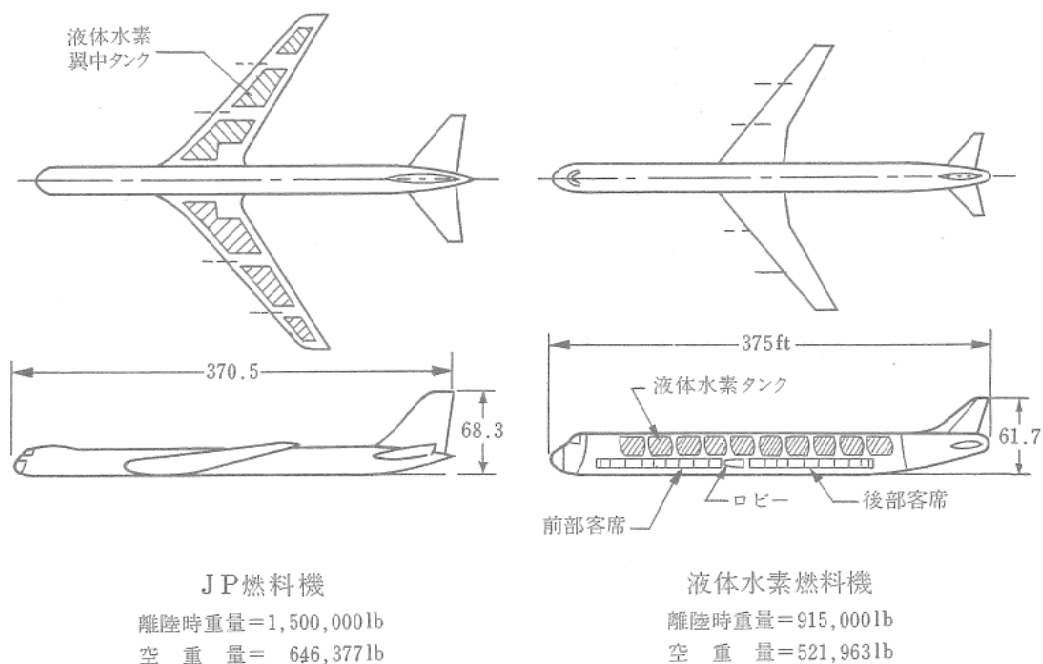


図3. 液体水素機とJP機の比較

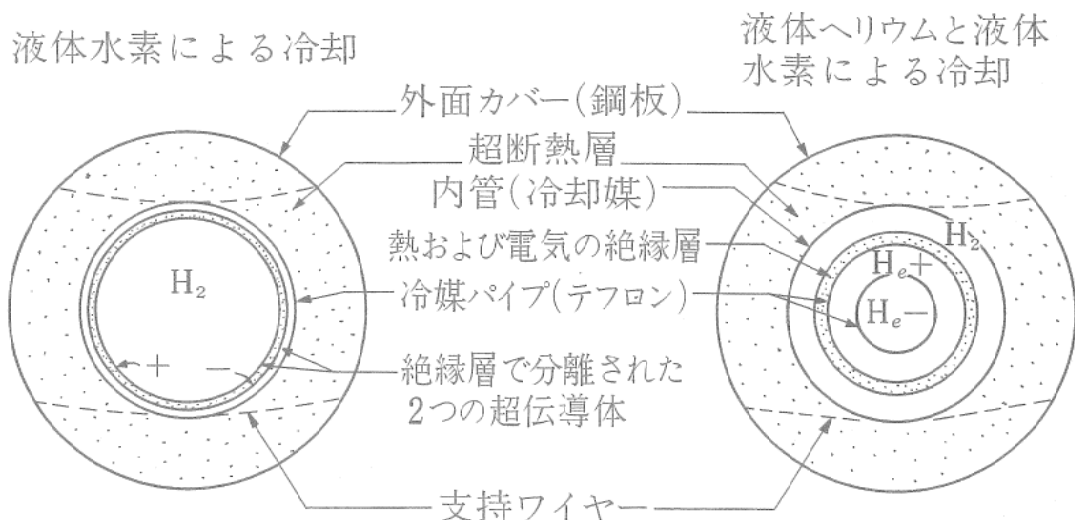


図4. 超伝導送電線の構造

表7. 各種超伝導合金の特性

合金	転移温度(°K)	合金	転移温度(°K)
Nb _{0.8} Sn _{0.2}	18.5	Nb	9.17
Nb ₃ Sn	18.05	Ti _{0.5} V _{0.5}	6.7
AlNb ₃	18.0	BaBi ₃	5.69
SiV ₃	17.0	V	5.3
Nb ₃ Sn ₂	16.6	Nb ₂ Ti	9.3
Al _{0.5} Nb ₃ Sn _{0.5}	16.3	SbTi	5.8
		BiPb	8.8

て、電力輸送と水素輸送を同時に行って、非常に効率の高いエネルギー輸送を可能とする研究が行われている。図4は直流を送電する場合の二つの型式を示したものである。

これらの場合に利用される超伝導体は表7に示す物で、転移温度が10°K以下の合金は、液体ヘリウムと液体水素の二重冷却の方式で、温度1.0~4.5°Kに、20°K以下の物は液体水素のみの冷却で14~16°Kに保持する方式で使用されると報告されている。なお外層の超断熱材は前述した貯蔵容器と同じパーライトが使用され、このパーライト使用によってこの断熱方式が成功したとのことである。この方式では液体水素を流しているのので、送電経路の途中へ冷凍装置を設置する必要は無いだろうと推察される。

7. おわりに

エネルギー問題と低温技術の関連を、水素シ

ステムにしぼって述べたが、水素システムが将来の課題であり、実際的な問題点も未知なものが多い。したがって低温技術がどのような形でシステムに参与するかを、具体的に述べることを避けた記述となり、内容が物足りない感みもある。しかし日本の低温技術も今後の課題であるだけに、こうした問題点を広く討議し、研究して、水素システムの具体化に協力頂きたいと願うこと切なるものがある。

〔後記〕

本稿の記述の多くは、第6回、第7回、第8回の Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, The Hydrogen Economy Miami Energy Conference 1974, 同1975の報告並びに大阪科学技術センター；水素システム研究会の資料などから引用させて頂きました。