

水素燃料と水素エンジン

Hydrogen Fuel and Engine

柳 原 茂* ・ 浜 純**

Shigeru Yanagihara Jun Hama

1. ま え が き

水素は一般にエネルギー媒体または燃料としてよりも、化学原料としての役割が重要と思われる。しかし究極の燃料ともいわれ、メタノールなどアルコール類やメタンなどの低級炭化水素と共に再生可能な燃料であり、電気エネルギーに近い側面もある。本質的には酸化反応によって水分だけしか生じない可能性がありこの点が燃料としても大きな特徴であろう。

宇宙空間で用いる場合や海中などのような特殊環境における原動機の燃料としては大きな利点があるが、大気圏内で水素-空気の燃焼を前提とすると、メタンや石油系燃料に比較して有利とはいえ、不利な面も少くない。単なる燃料の質量当りの発熱量を比較すると水素は炭化水素系燃料よりも有利に見える。後述するように大型航空機の燃料としてはこうした点から実用的にも優れた一面が考えられる。

水素は気体としても密度が 0.0869 kg/m^3 (0°C , 760mmHg) と最も小さく、普通には体積が大きくなって取扱いは不便になる。液化することも臨界温度が -239.9°C と低く、ヘリウム程ではないが、メタンや空気などに比較して低温度であるため困難が多い。また液体としても密度が 0.0708 kg/l (-253°C , 1 atm) で LNG の約 0.426 kg/l に比べて $\frac{1}{6}$ 程度である。これらの点から、自動車、船舶など移動機械に用いる可搬燃料としては極めて不利な面をもっている。

水素は一般の炭化水素系燃料やアルコール等と比較して、電気エネルギーにやや近い特性をもつと考えるべきであろう。燃料電池を想定すれば、水素エネルギーの輸送や貯蔵は電力の輸送・貯蔵と同列になるかも知れない。電気エネルギーを動力として利用するとき60%以上90%程度までの高い変換効率が期待できるの

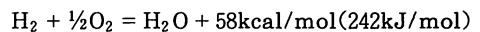
に対し、水素エネルギーを動力に直接利用するとき現在は単純な熱機関を用いてその熱効率に制約される場合が多い。一方において、電気は直接的に2次電池に簡単に貯蔵できるが、水素のように物質としての貯蔵ではないため不利である。水素も貯蔵に難点はあるが、電気に比較すれば有利な面がある。

水素エネルギーの動力への変換には普通の熱機関が最適とは考え難いが、実用的にはガスタービンや容積型の内燃機関が利用できる。水素-酸素燃焼から将来は70%程度の熱効率も期待できるが、現在はほぼ一般の内燃機関と同程度の効率しか期待できない。他の熱機関と同様に、材料の耐熱強度などによる制約や熱再生における制約などはあるが、反応生成物が水だけになる場合にはランキンサイクルとしての相変化を利用した複合サイクルが実現し易い。将来は水素-酸素を用いて高い熱効率のエンジンシステムが期待されよう。

ここでは、水素利用の一つの可能性として自動車用内燃機関への適用を指向した機械技術研究所の研究を中心として、従来方式に近い水素エンジンを主に解説する。

2. 水素の燃焼

水素はかつて飛行船ツェッペリン号の事故例のように燃え易い点が大なる特徴である。水素酸素の燃焼反応機構については殆んど解明されているようであるが、その詳細は別として全般的な燃焼式は次のようになる。



この発熱量は水素1kg当り低位発熱量で表わすと、 $28,670 \text{ kcal/kg}$ (120 MJ/kg) となる。石油系燃料の約3倍に近いが、容積は液体どうして比較しても同じ発熱量に対して約4倍を必要とする。

空気との混合による燃焼では、可燃範囲が空気中の体積で4~75%と極めて広く、理論混合比で水素が約29.6%の体積を占める。燃焼によって、モル数が減少する点も留意しておく必要がある。理論混合比におけ

* 大阪金製作所研究部長

〒572 寝屋川市木田元宮1-1-1

** 工技院機械技術研究所基礎部燃焼工学課主任研究官

表1 燃料の燃焼特性¹⁾

燃料名	水素 ⁹⁾	イソオクタン	n-ヘプタン	ガソリン	
				73オクタン	100オクタン
分子量	2.016	114.22	100.21		
比重 (15°C/15°C)	0.06952	0.696	0.688		
沸点 (°C)	-252.8	99.2	98.4		
蒸発熱 (cal/g)	107	64.9	75.4		
燃焼熱 (kcal/g)	28.67	10.67	10.72	10.70	
理論混合比 (vol.%)	29.5	1.65	1.87	1.3	
可燃限界 (vol.%)	下限界	4.0	1.1	1.2	1.50
	上限界	75.0	6.0	6.7	7.6
最低自発火温度 (°C)	571	447	247	298	456
引火温度 (°C)		-13	-4.0		-38
燃焼速度 (cm/s)	310	38	42		38
	最大値混合比 (vol.%)	43.0	1.93	2.28	(φ=1.06)
断熱火炎温度 (°C)	2,130	1,960	1,940		
点火エネルギー (mJ)	最小値	0.019	0.28	0.24	0.25
	φ=1.0	0.020	0.29	1.15	
消炎距離 (cm)	最小値	0.057	0.18	0.18	0.25
	φ=1.0	0.057	0.20	0.38	

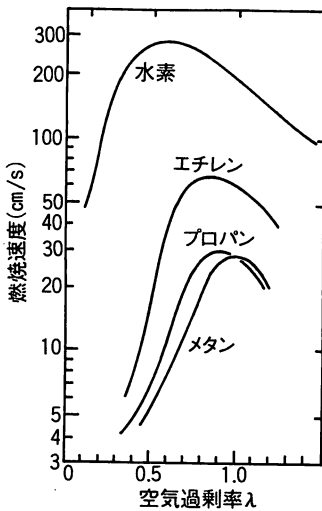


図-1 水素の燃焼速度

断熱火炎温度は2,114°Cで、石油系燃料に比して150～200°C程度高くなる。

大きな特徴はガソリンなどに比較して、点火エネルギーが1桁以上小さく、燃焼速度がほぼ1桁近く速い点である。実際の燃焼では例えば内燃機関などの場合にその層流火炎の燃焼速度が支配的に影響するとは限らないので、単なる燃焼速度の比較だけで判断できないが、火炎伝播はガソリン機関などより速くなり易いといえよう。空気との混合比によって燃焼速度は図-1のように変化し、λ=0.6程度の過濃減で最大となる。

水素の燃焼特をガソリンなどに比較して表1に示す¹⁾。

水素-酸素の燃焼では水以外に安定な燃焼生成物を生じないので、大気汚染問題を生じないだけでなく、水を凝縮して排出または利用できる可能性がある。膨張比の大きくできるタービンなどを利用すると共に、高圧燃焼、熱交換(熱再生)、液体加圧などの組合せにより内燃式で相変化を伴うサイクルも可能となる。

水素は燃焼性がよいことから、点火用や助燃用に利用することもでき、ガソリン機関ではこうした使用方法がむしろ実用的には効果が期待できる場合がある。

3. 航空機用水素エンジン

水素を燃料に用いるエンジンは、内燃式のガスタービン方式、外燃式の蒸気タービンまたはガスタービン、往復動またはロータリ方式の容積型内燃機関、さらにはスターリングエンジンなど各種の方式が可能である。

内燃式に限っても、速度型(ガスタービン)と容積型があり、後者には往復動とロータリー、四サイクルと二サイクル、燃料供給方式などによる各種の分類がある。

ガスタービンにも各種あるが、現在では水素を用いるには航空機用のジェットエンジンやファンエンジンに限られよう。ロケットの水素-酸素燃焼は、宇宙用として広く利用されているが、一応特殊な例としてここでの説明は省略する。航空機用燃料として石油代替の液体水素は最も将来性があり、貨物機には適している。

表 2 亜音速機の各種燃料による比較²⁾

	LH ₂		SYNJET	LCH ₄	
	ロッキード(米)	CTDC(日)			
全備重量	(lb)	372,200	269,840	511,600	497,300
燃料重量	(lb)	47,670	32,630	159,900	130,030
空虚重量	(lb)	227,750	192,460	236,700	256,100
ペイロード	(lb)	88,000		88,000	同左
乗客数	(人)	400	240	400	同左
全長	(ft)	215.6	213.3	197	201.3
全幅	(ft)	170	154.2	192	193.1
主翼面積	(ft ²)	3,195		4,093	4,144
巡航速度	(Mach)	0.85	0.76	0.85	同左
航続距離	(NM)	5,500	2,000	5,500	同左
SFC	(lb/h/lb)	0.202		0.603	0.494
揚抗比	(巡航)	17.4		19.13	19.21
エンジン1基の推力	(lb)	30,350	27,000	41,600	39,800
価格(\$.million)		43.39		44.53	48.10
エネルギー効率(Btu/Seat.NM)		1,118		1,334	1,271
騒音(サイド)(EPNdB)		87.2		87.8	
(フライオーバー)		89.2		94.2	
排気ガス		H ₂ O, NO _x	同左	CO _x , SO _x , NO _x HC, Smoke, H ₂ O	同左

重量当りの発熱量が大きいことや燃焼性がよいことに加えて、低公害性として排気と騒音の両面からも期待されている。

水素燃料とするジェットエンジンは、燃料供給管を設計変更するだけで、本体はそのまま使用することが可能とされている。液体水素の加熱が必要で、これによる冷却を利用することも潤滑油その他各種可能である。とくに航空機では翼表面の層流境界層制御のために液体水素の低温性を利用した冷却が試みられている。

航空機における液体水素燃料の利用は、空港における液体水素燃料供給システム、燃料タンクのための大幅な機体構成の変更、安全性の問題などがあるが、21世紀には実用の可能性があるといわれ、ロッキード社などはデモンストレーションの具体的構想を提示している。

表2に亜音速機の場合の各種燃料の場合の比較を示す。またロッキード社がL-1011(トライスター)を改造して水素燃料貨物機の計画を図-2、表3のように提案している²⁾。安全性の点で難点が考えられない訳ではないが、航空機用には水素燃料エンジンが将来は有望視されている。

4. 自動車用水素エンジン

自動車用の石油代替燃料には、メタノールや天然ガ

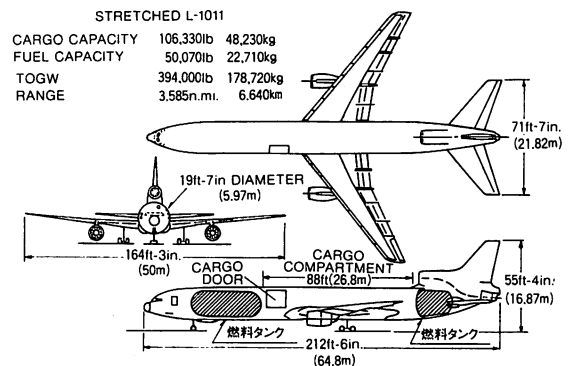


図-2 L-1011型水素貨物機²⁾

スが有望視されていて、水素を代替燃料と考えることは少ない。単なる重量の比較ではなく、装置を含めた重量や容積などを考えると、水素は液体、高圧ガス、金属水素化物のいずれにしても非常に不利である。しかし燃料電池の電気自動車や2次電池の普通の電気自動車と比較して、排出物も一応水分だけの可能性があり、容積や重量と出力、総エネルギー消費の点で有利になる面も考えられる。単に自動車用だけでなく、広く原動機の将来燃料の一つとして水素が有力になる条件もあり得る。

水素を燃料とするとき、液体水素、高圧ポンベ水素の他に金属水素化物(メタルハイドライド)としての

表3 L-1011型水素貨物機の特性²⁾

項目	仕様	
Payload weight	48,230kg	106,330 Ib
Range	6,640km	3,585 n.mi
Gross weight	178,720kg	394,000 Ib
Block fuel weight	18,275kg	40,290 Ib
Operating empty weight	107,780kg	237,600 Ib
Thrust per engine (Takeoff, sea level static)	186,820 N	42,000 Ib
Wing area	329m ²	3,541 ft ²
Wing span	50.1 m	164.3 ft
Fuselage length	64.8 m	212.5 ft
Lift/Drag (cruise)	16.78	16.78
Specific Fuel Consumption (cruise)	0.236 $\frac{kg}{hr}$ /daN	0.231 $\frac{kg}{Ib}$ /hr

水素の供給がある。固定動力源として用いるときは、電力や都市ガスと同様なライン供給も可能である。これらのうち、航空機用の場合には液体水素にはほぼ限定されるのに対し、自動車用としては液体水素の他にもメタルハイドライド (MH) が使用できる可能性がある。ごく短距離の走行を対象とすればポンベ水素が最も簡単で、実用面でもそれ程不利ではない。MHの場合、容積的には高圧ポンベより小さくできるが、重量としては水素はほぼ1%程度しか実用できないので、ポンベに比較して格段に有利になる訳ではない。しかし、MHは水素の貯蔵や輸送の新しい手法として注目され、水素の吸蔵が発熱反応でエネルギー的には比較の有利になるといえる。

水素を燃料とする小型内燃機関としては、現用の火花点火機関を一部改良したものが多い。最も簡単な方法としては吸気管にほぼ連続的に水素を噴射する方法から、高圧筒内噴射まで各種ある。その主な方法を紹介する。図-3に示す方法は気化器を改良して、水と水素と空気を予混合し、吸気管を経てシリンダに供給する³⁾。こうした単純な予混合方式では、部分負荷運転で空気過剰率λが1.5よりも大きい範囲においてしか

運転できない。希薄側はλ=4.8程度の超希薄領域でも正常な運転が可能であり、通常は無負荷範囲まで吸気絞りをなしで運転できる。高負荷になってλが1.5以下になると、吸気管への逆火が生じて運転不能となる。希薄領域における運転では、例えば各サイクルの最高圧力の変動率なども比較的小さく、一般のガソリン機関で生じ易い運転のラフネス (いわゆるサージングなどに対応する) は起り難い。点火時期を遅らせるこの圧力変動率も大きくなり、運転は荒くなる。

空気過剰率と動力性能の関係は図-4³⁾のようにな

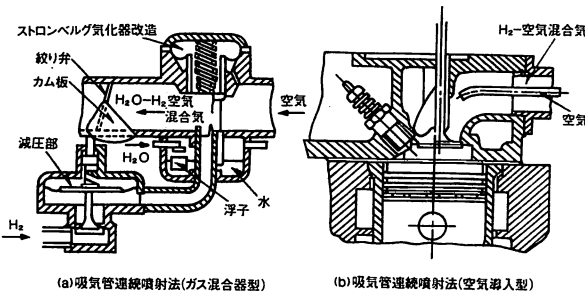


図-3 水素の吸気管連続噴射エンジンの例³⁾

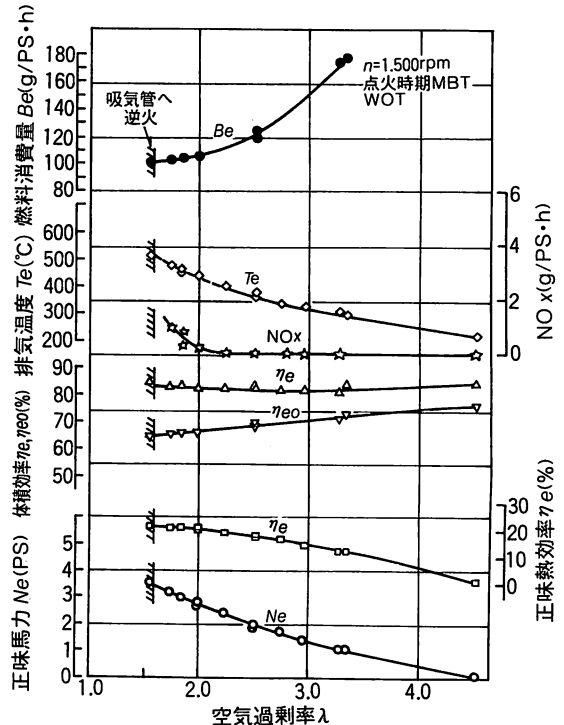


図-4 動力性能への空気過剰の影響¹⁾

るが、窒素酸化物NO_xの排出は $\lambda > 2$ 以上ではほぼ無視でき、 λ が小さくなると点火時期などにもよるがかなり増加する。

吸気管への連続水素噴射における逆火対策の一つとして、吸気弁が開いている時期だけ水素を吸気弁近傍に噴射する方法が考えられ、図-5のような構造での実験を行った⁴⁾。噴射圧力は2.6kg·f/cm²(Gange)以下で、電磁弁による噴射時間はほぼ10ms以上の範囲で運転した。この場合は逆火の生じる限界の λ はほぼ理論混合比に近く、点火時期などの影響もあるがかなり高負荷領域まで正常な運転が可能となる。図-6⁴⁾に示すように、連続供給に比べてこの間欠噴射では出力

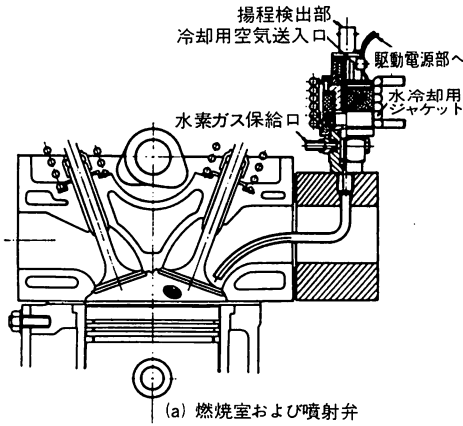


図-5 電磁噴射弁による吸気管間欠噴射⁴⁾

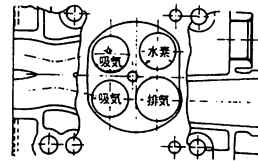
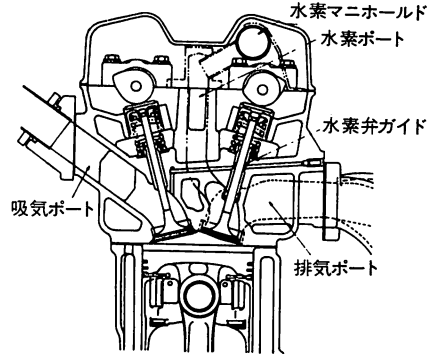


図-7 低圧機械式筒内噴射機関⁶⁾
(機械技術研究所試作機関)

も増して温度も上昇し体積効率も減少する。 $\lambda < 2.5$ ではNO_xが増加し、かなり高レベルまで達し得る。

この方式でも $\lambda < 1.02$ では逆火を生じて、正常運転が不可能になるが、これは燃焼室内で点火プラグや排気弁などが着火源となり吸気管内の混合気にまで逆火することが多いようである。

水素燃料を直接シリンダ内に噴射する方式には図-7⁶⁾に示す水素弁を機械式駆動する方法をはじめ、電磁式や油圧式、さらにはCVCCエンジンのような副室を設けてここに水素弁を設ける方式など各種ある。水素の噴射圧により低圧噴射と高圧噴射に分けることもある。水素燃料では容積比率が大きいために燃料噴射の時期や圧力は圧縮仕事などにも影響する。また高圧噴射は、燃料が液体で加圧できることが望ましく、燃料供給源が何になるか重要である。5 kgf/cm²以下の低圧噴射では噴射期間がシリンダ内圧力の低い範囲に限られることになるが、燃料のシールなどの問題も多少条件が緩和される。

シリンダ内低圧噴射の場合、燃焼室形状、点火プラグ位置などにも影響されるが、噴射時期も関係して、出力、熱効率、運転の荒さ(サイクル変動)が空燃比に応じて変化する。回転数も微妙に影響を示すことがある。図-8⁵⁾はこれらの影響を示す例である。

水素エンジンにおいては逆火などを防ぎ、低出力から高出力までの広い運転領域で、熱効率や静しゅく性等の性能を確保するためには、適切な燃焼室構成と燃

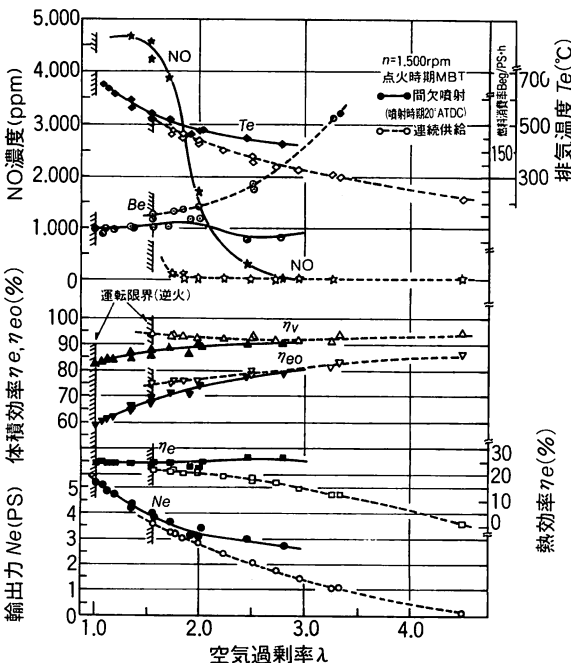


図-6 空気過剰率による出力および排気特性への影響⁴⁾

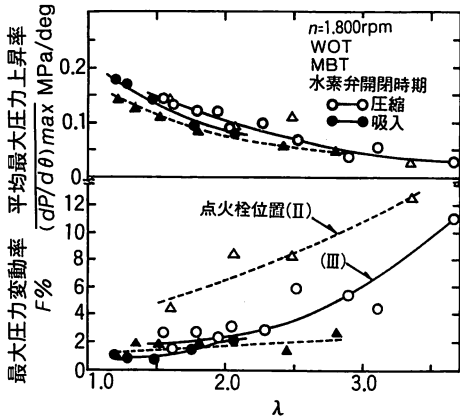


図-8 低圧筒内噴射（機械式）における空気過剰率λと燃焼特性⁵⁾

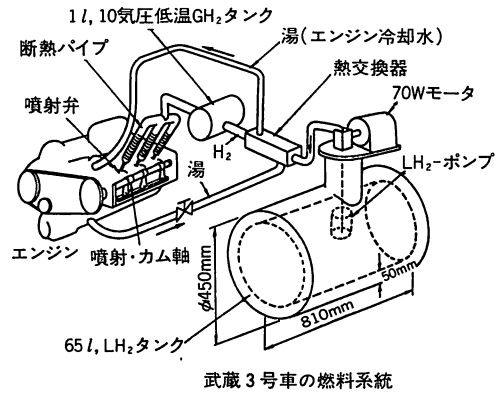


図-9 武蔵工業大学の水素自動車の燃料系統の例⁷⁾

料のシリンダ内噴射が必要である。NO_xの排出量は、希薄混合比では小さいが理論混合比近くでは急増する。機械技術研究所では機械的に駆動される低圧水素噴射弁を備えた2L級の四サイクル4シリンダOHC水素エンジンを試作し、最大出力70ps程度、部分負荷でも高い熱効率が確保できる段階に達している⁶⁾。これは後述のメタルハイドライドと組合せて運転するように開発されたものである。

5. 水素燃料タンクとエンジンシステム

水素は質量当りの発熱量が大きいことから、長距離航空機の場合には石油系のジェット燃料より有効積載質量が有利になる可能性がある。しかし、その場合は液体水素としてタンクを含めた質量の比較である。気体で高圧容器に充てんする場合は、一般には容器の質量が水素の100倍を超える程度となり、石油系燃料で液化したものよりタンクを含む質量は遥かに大きくなる。水素はMHとして比較的低圧力のタンクに吸蔵させることが可能であり、自動車用などの場合にこの方式が試みられている。この場合も質量として水素を1.5%以上利用し得るようになることは容易でないが、容積やタンクへの充てん、長時間放置などの点では、水素5kg程度以下の小容量タンクの場合に相当といえるかも知れない。

液体水素を自動車に利用する方式は、武蔵工大で古浜教授によって研究・試作が行われ、図-9のようなシステムが用いられている⁷⁾。液体水素が供給できる場合には、1回の充てんで800km以上の走行も不可能ではない。液体水素に用いるポンプなどに工夫を要する点も多かったようであるが、水素の供給圧力を高く

設定し得る訳で、高圧噴射が容易であろう。

MHには多くの種類があるが、一般的には常温近傍で水素平衡圧力の高いミッシュメタル系(Mm)のMHは質量当りの水素吸蔵量がやや小さく、Mg系など水素吸蔵量の大きいMHは高温で15kcal/mol以上の解離熱を加えて水素放出を行わせる必要がある。始動時等のことを考慮すると、常温近傍でも平衡圧力が大気圧よりMHを少くとも一部には必要とする。また、金属の微粉も使用上留意を要する点である。

MHはH₂を吸蔵するときH₂の1モル当り6~18kcal/molの発熱があり、H₂を解離させるときはそれに相当する加熱を必要とする。しかもMHは極端な熱の不良導体で断熱材と考えてもよい。このために熱交換器としての構成が重要となる。図-10³⁾にその例を

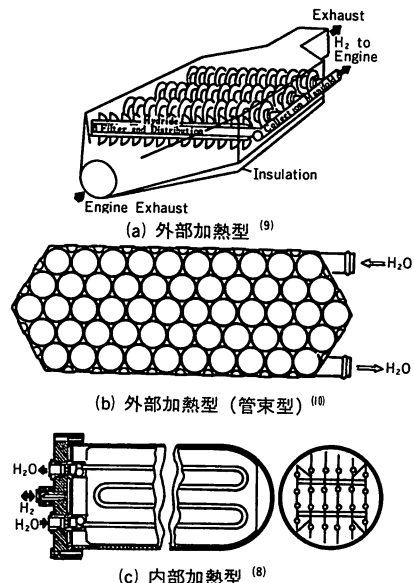


図-10 金属水素化物タンクの熱交換形態³⁾

示す。

MHに Mg_2Ni のように水素の割合が重量で1.5%以上のものが有利のように見えるが、解離時の温度が $300^{\circ}C$ 以上でしかも吸熱量が水素の発熱量の30%程度と大きいことが難点になる。ハイブリッド電池のように異なる特性のものとの組合せる方法も考えられる。

重量当りのエネルギー量は多くのMHでは200~300 Wh/kgでエンジンの熱効率を30%と仮定しても60~90 Wh/kgの値となる。鉛バッテリーよりは2倍程度大きい値ではあるが、自動車用動力源としてはなおエネルギー密度は不十分である。車両型式にもよるが1充電150km~200km程度の走行が想定される。

現在のMH自動車は、性能的にディーゼル車程度の比出力と高性能鉛バッテリーの電気自動車の2倍程度の1充電走行距離を実現できると考えてよからう。

6. む す び

水素はエネルギーの一つの形態といえるが、電気と天然ガス間に位置づけられよう。燃料としては難点もあるが、炭化水素類にはない大きな長所がある。現在は単に石油代替のような形で利用するだけでなく、水素の特性に最適な本格的な動力変換システムを検討すべき段階に達しているかも知れない。ここでは、従来の内燃機関をベースとした水素エンジンについてだけ概説したが、基本的にはエンジン本体には大きな難点はなく、ガソリン機関とほぼ同程度の特性が得られるといえる。

水素燃料を可搬性容器に貯蔵することは大きな問題

である。長距離航空機のように水素燃料の優位性が明らかで、しかも運航システムとして大規模空港間に限定されて施設面での投資効果が期待できる場合でも、システムが実現するにはなお時間を要すると思われる。

自動車その他小容量の可搬動力源としては、2次電池とモータの場合よりも、MH-内燃機関が有利になり得ると考えられる。水素貯蔵に液体水素タンクが許容できる条件では液化炭化水素-内燃機関に近い特性も可能であろう。

空気との燃焼では NO_x の発生が難点になる場合も起り得るが、一般的にはその優れた燃焼性から広い条件で静しゅくで排気汚染物の問題の少ない原動機が可能であり、エネルギー効率の点でも石油系燃料と比較して優るとも劣らないと期待できる。

文 献

- 1) 浜 純 他；水素燃料原動機の研究 (I)，機械技術研究所所報，Vol.34, No.2, 1980-March, p.43
- 2) 日本航空宇宙工業会；革新航空機技術に関する研究調査，No.516-1, 1981年3月
- 3) 浜 純；金属水素化合物使用エンジンの開発動向，自動車技術，Vol.37, No.9, 1983, p.979
- 4) 浜 純 他；水素燃料原動機の研究 (II)，機械技術研究所所報，Vol.34, No.2, 1980-March, p.56
- 5) 浜 純；水素燃料原動機の研究 (III)，機械技術研究所所報，Vol.36, No.6, 1982-Nov., p.242
- 6) 機械技術研究所；低圧水素ガス筒内噴射形4気筒機関の試作，機械研ニュース1984, No.4
- 7) 古浜庄一監修；電気自動車，新形原動機，3.2.水素エンジン，山海堂，昭55年10月

