

水素自動車の開発



A.M.技術部
栗原仙幸



A.M.技術部
横山達二



電子応用技術部
橋本茂喜



電子応用技術部
内山幹康

1. はじめに

昭和48年の石油危機によりエネルギー技術の重要性が見直された。その翌年、我国では初めてという20年以上に渡る長期の新エネルギー研究開発プロジェクトが“サンシャイン計画”というナショナルプロジェクトとしてスタートした。その中の一つに水素エネルギーの項目があり、その利用技術として“水素燃料エンジン”があった。我々は昭和56年よりその仕事に参加させていただき、エンジンとその関連制御システムの設計、製作を受注し、担当して來た。その結果、それ等は昨年、水素燃料自動車に搭載され、走行試験が進められているので、その概要を報告する。まずヤマハ担当分の日程は表1の如く進められた。このプロジェクトの作業分担は概略表2の如くであった。

1-1 水素燃料利用の歴史的経過及びトピックス

歴史的には、内燃機関の初めは主にガス機関であり、燃料ガス中には当然水素も含まれていた訳ですが、純粹に水素ガスのみを使おうとする試みもなされた。それは飛行船時代に本格的に研究されたが、飛行船が消えると共に忘れ去られてしまった⁽¹⁾。しかし、それから数十年を経て、水素は単位重量当りの発熱量が大きいので、まずロケット燃料として復活した。米国のマスキー法が出た時はクリーンエネルギーという見方から少しあは水素燃料エンジンも関心を呼んだが、何と言っても、第一次、第二次の石油危機を契機に、代替エネルギーの一つという見方から自動車エンジンにもそれを使おうとする研究が各国で再開された。それ等も昨今の石油需給の緩みから一時の退潮傾向はあるが、将来的には、エネルギー問題とは裏腹にある環境問題、即ち、酸性雨、大気中のCO₂濃

名 称	エンジン種類等	期 限	S 56年	57	58	59	60	61
1. 水素用試作エンジン	単気筒 使用(1)	56. 12. 22	■					
2. 水素用試作エンジンの改造	単気筒 使用(2)	57. 3. 20	■					
3. 試作エンジン	4気筒、ベンチ用	58. 3. 25	■	■				
4. 水素燃料エンジン改造部品	部品	59. 3. 25						
5. 試験用エンジンの改造	車載前提ベンチ用	60. 2. 28				■		
6. 水素流量自動制御装置の試作	同上制御装置	60. 3. 15				■		
7. 車載用エンジン部品の改良試作	車載用	60. 7. 1					■	
8. 車載用エンジン制御装置	同上制御装置	60. 7. 10					■	
9. 車載用エンジン及び その制御装置の改良	改良部品	61. 2. 28						■

表1 水素燃料エンジン開発スケジュール

工業技術院・機械技術研究所：

総括、試験・研究主体、契約主体

工業技術院・化学技術研究所：

水素吸収合金及び、そのタンクの研究

川崎重工業(株)鉄構機器事業部：

水素吸収合金タンク及び水素供給操作
パネルの設計、製作

(株)トヨペット サービス センター開発室：

車両搭載関係の設計・製作

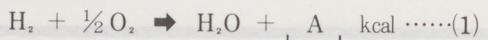
ヤマハ発動機(株) AM事業部：

水素燃料エンジン及び制御システムの
設計・製作

ヤマハ発動機(株) 電子応用技術部：

電子制御ユニット及びそのプログラム
の設計・製作

表2 役割分担



取り出せる熱量(モル発熱量)



分解に必要なエネルギー(モル反応熱)

水素を燃料に使う第一の利点は、反応式(1)中に表向き有害物質あるいは環境汚染物質を全く含まない点にある。第二の利点は逆反応式(2)が比較的簡単に得られる点にある。(但し、この場合エネルギーの経済性を度外視すればの話として、経済的にも成り立つようなプロセスが研究されている。) こうして第三の利点は、(1),(2)のプロセスがリサイクル可能な点にある。この点が化石燃料の枯渇という暗い未来予測に対する一筋の光明をともすヒントとなりうるわけです。こうした水素をエネルギー源に使う経済体系が“水素エネルギー経済”と呼ばれている。現有の化石燃料が枯渇した時、水素経済社会が来るという仮説は、ここから来ている。

さてこの反応からもう一つの哲学なり経済学を学ぶとすれば、燃料水素を作るにもエネルギーが必要で、化学反応はヘスの法則(総熱量不变の法則)から $A = B$ が結論できるが⁽⁵⁾、実際には、加えた熱量以内でしか、熱量を利用できることである($A > B$ とは絶対にできないこと)。工業的には効率を考慮する必要があるので、 $A < B$ の程度が問題となる。その場合加えた熱量より、取出せる熱量が少ないので、加える熱量をそのまま直接使った方が有効ということになるからです。しかし、いわゆる可搬型の燃料として、いつでもどこでも使えるようにすることにより、商品性が出てくるのなら、 $A < B$ でもかまわないわけです。それで経済的に成り立つかどうかの問題となります。従って不等式の意味するところは、工業的には“B”的もととして、安い熱源を使わないと経済的にはナンセンスということで、つまりは地球規模、宇宙時間規模で考えれば、Bとしては太陽

化の問題等の環境面からのニーズとあいまって、水素利用技術はこれから益々研究されることとなる。更に水素吸収合金と言う新材料の登場でその傾向は加速されよう。関連するトピックスとしては、昨年から今年にかけて、国内の他の二つの民間プロジェクトもその最新の成果を発表している。一つは武藏工大の古浜教授のグループの世界的有名になった熱面点火ディーゼルエンジンで、液体水素を利用して高压噴射である点が特徴である。今年は水素トラック武藏7号を完成した。⁽²⁾ もう一つは鹿児島の水素エネルギー開発研究所の水噴射水素ガスエンジンで、米国の鉄道会社ユニオン・パシフィック社の鉄道機関車用エンジンとしての利用を図るテストをしていくことを発表している。まさに全く新しい蒸気機関の誕生が期待されている⁽³⁾。彼等は昭和59年にロータリーエンジンを水素燃料用に改造して、乗用車を走らせている。⁽⁴⁾

2. 水素エネルギーの意義

水素を燃やせば水蒸気(水)になる。水を電気分解すれば水素と酸素に戻せる。この簡単な化学反応からも重要な概念をくみ取ることができる。

光しかなく、しかもそれが使えるエネルギーの最大限度であることを暗示しております。(但し、現実問題としては原子力あるいは核融合のエネルギーが現時点では一番あてにされている)

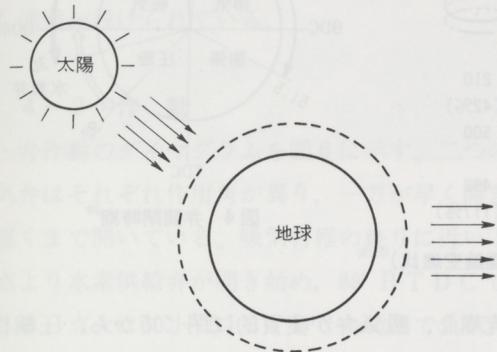


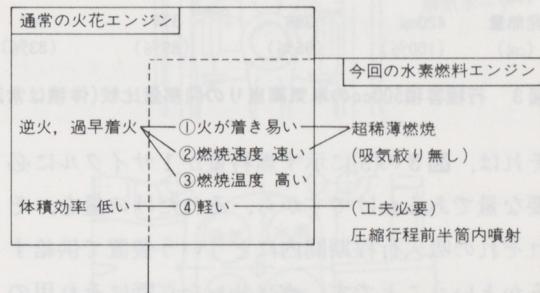
図1 地球エンジンの燃料は太陽光⁽⁶⁾

図1に示すようなグローバルなエネルギーの考え方で、現在の石油等の化石燃料資源の消費を考えますと、ジェレミー・リフキンの言うところの過去数億年の間に“地下に蓄積された太陽”的消費という考え方を理解できます。⁽⁷⁾その“地下の太陽”を使い尽せば、地球上にエネルギーの貯えは無くなり、時々刻々に降りそそぐ太陽光しか利用しえなくなることを暗示しています。過去数億年かかったエネルギーの貯えの大部分を、産業革命以降の数百年で使い尽さんばかりのエネルギー消費の勢いは、子孫の繁栄を考えるならば、もっと節約の方向に向うべきで、省エネルギーが叫ばれ、熱効率の高いエンジンが求められる由縁であります。当然、水素燃料エンジンにもそれが期待され、それを実現する所に、このプロジェクトの意味があると考えられます。

3. 水素ガスの特性とその利用(問題と対策)

内燃機関と関連して、水素ガスの主な特性を4つ上げると、①火がつき易い、②燃焼速度が速い、③燃焼温度が高い、④軽い、ことである。この結

果、それをエンジンに使用すると、不具合として、(1)逆火、(2)過早着火、(3)体積効率が低くなることによる出力不足を生じる。特に“逆火”は歴史的な問題であり、その解決に多くの努力が費やされた。それをやっと克服しても(2)番、(3)番の問題が待ちかまえている。これらの不具合は当然、水素ガスの特性に起因するものであるが、その利用も可能であり、その関係を図2に示す。



“火が着き易い”とは、着火エネルギーが小さく、可燃範囲が広いことをここでは意味する。

図2 水素燃料の欠点を別の視点で見る

火が着き易い①、燃焼速度が速い②という水素ガスの特性は、逆火(1)の原因となっており、非常に好ましからざる特性ではあるが、視点を変えて見ると、逆に非常に好ましい特性、つまり稀薄燃焼、しかも吸気絞り弁を無くしても良い程の稀薄燃焼の可能性を示唆していると見ることもできる。事実、今回のエンジンでは予混合併用ながら、空気過剩率 $\lambda = 5$ でも十分運転可能であった。

次の水素ガスが軽くて④、体積効率が低くなるという不利な点は、図3(4)に示すとおりである。この点は機構的に改善しなくてはならない。それが今回の“圧縮行程前半の筒内噴射”というアイデアである。これは図3(5)に示す如く空気をまず先に気筒一杯に満たし、その後、圧縮行程に入った所で、それに上乗せして水素ガスを充填しようというアイデアである。⁽⁸⁾ (そのバルブタイミングの一例を図4に示す。)

この点に関しては、このアイデアを具体化するために、更に、もう一つのアイデアが必要である。

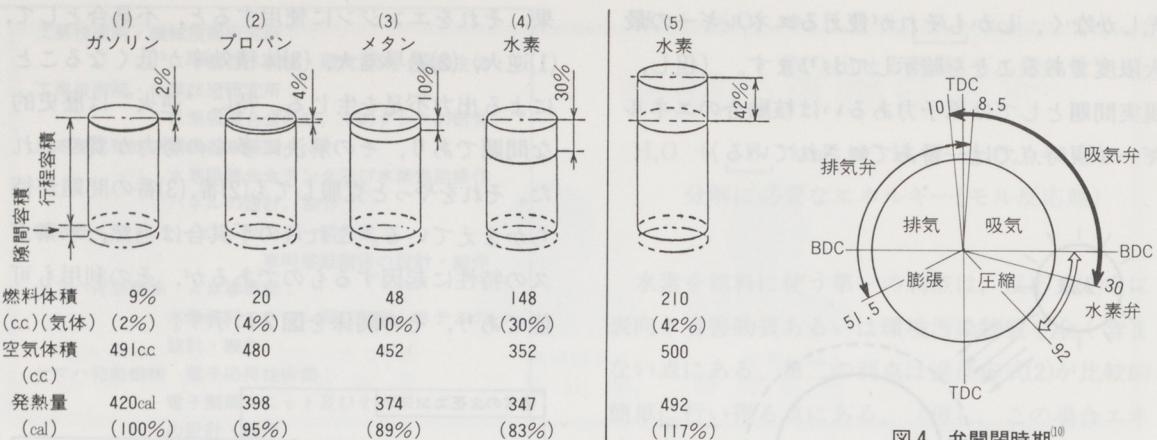


図3 行程容積500ccの単気筒当たりの発熱量比較(体積は常温大気圧、理論空燃比)⁽⁸⁾⁽⁹⁾

それは、図3の(5)に示す燃料量が1サイクルに必要な量であるわけですから、それだけの量を、それぞれの吸入行程期間内にどういう装置で供給するかということです。ガソリンなら既にそれ用のインジェクターが実用され、又筒内に直接噴射する必要も無く、吸気管内噴射で十分なことがわかっているわけですが、水素ガスでは、行程容積の30~40%もの体積のガスを、圧縮行程前半のわずか60°~90°C Aの間に筒内に直接噴射しなければならないのですから、しかもわずか3気圧程度の圧力で。使おうとしている3気圧ゲージでは、ガス体積を $\frac{1}{4}$ にするのみで、まだ体積がありすぎ、それでは筒内噴射を可能とする小型高速インジェクターは見つからない。電磁バルブでは大きくなればなる程、高速作動はできなくなる。そこで結局、機械式しかなくなり、実績ある方式として、一つはディーゼルの燃料噴射装置を選んで高圧噴射に進むか、もう一つの方法として、現用の吸、排気弁方式を踏しゅうして、何とか低圧噴射に止まるかの岐路となる。高圧噴射方式に迷い込むと次はポンプが必要となり、その駆動馬力の大きさに悩むこととなる。従って、吸・排気弁方式の水素供給弁をシリンダヘッドに設けることとなる。

元に戻って、逆火も“圧縮行程前半の筒内噴射”的アイデアで同時に対策できることを書いておかなければならぬ。つまり吸入行程で筒内に空気

を充填し、吸気弁が実質的に閉じてから、圧縮行程に入った時に水素を筒内に充填するので、筒内にもしホットスポットがあっても、吸入空気で冷やされており、ましてや排気系とは完全に遮断されているので、筒内に火種はなく、点火栓で着火されるまでは火の着きようが無いのである。かくして、水素ガスの持つ特性が生かされ、逆火も無く、体積効率の大きな低下も無い。低圧噴射の水素燃料エンジンが“吸気絞り無し超稀薄燃焼”的おまけ付きで、アイデア上は達成されるのである。(図4参照)⁽¹⁰⁾

4. 水素燃料エンジン

4-1 構造

エンジンの概略構造を図5に示す。バルブ配置は片側に吸気弁2個、その反対側に排気弁1個と水素供給弁1個の合計4弁の配置となっている。弁駆動はDOHC方式で、吸気弁を一本のカムシャフトで、排気弁と水素供給弁をもう一本のカムシャフトで駆動している。点火栓位置は、ほぼシリンダー中心である。吸気通路は、いわゆるYICS-II方式で、一気筒当たり2本の吸気通路がサージタンクまで伸びており、片側に吸気制御弁を設け、その下流で両吸気通路は連通口でつながっている。排気通路は通常エンジンと同じである。

水素供給通路はシリンダー上面に出て、水素マニホールドにより、ヘッドカバー内をシリンダヘッド後面に導かれている。水素供給弁とそのガイド部にはガスシールが設けられており、ガスシールとオイルシールの間より吸気系につながるリーク逃し通路が設けられている。

4-2 作動

弁作動のダイヤグラムを図6に示す。二つの吸気弁はそれぞれ作用角が異り、一方が早く開き、遅くまで開いている。吸気行程の終りに近い下死点より水素供給弁が開き始め、88° B T D Cで閉じる。点火は60°～5° B T D Cの範囲で負荷に応じて変る。排気行程は通常エンジンと同様である。

4-3 設計上のポイント

本方式の隘路は吸気弁時間開度面積に制約が集中している点にあり、それをどう広げて、全体の調和を保つかにある。つまり、吸気弁の大きさは、水素供給弁が増えただけ小さくしなければならず、その開度で言えば、開き側は、逆火の防止のため排気弁とのオーバーラップはつめる方向であり、閉じ側は、水素供給弁とのオーバーラップで、これ又つめる方向である。この対策としては、今回はボア径は変えられなかったので、吸気弁を2弁として、まずその弁リフトに対する開度面積をかせぎ、更にその一方の弁の作用角を開げて、少しでも時間、開度面積を大きくする方法をとった。

水素供給弁については、水素ガスの必要流量を流せる最小弁径を選択しないと、3 kg/cm²Gのガス圧がかかるため、バルブスプリングの設計が難しくなる。

4-4 安全対策

水素ガスを扱う上で忘れてはならない注意事項が二つある。一つは可燃範囲が広く、着火エネルギーが小さいことも含めて、非常に火が着き易いこと、二つめは、リーク量が思いのほか多く速い

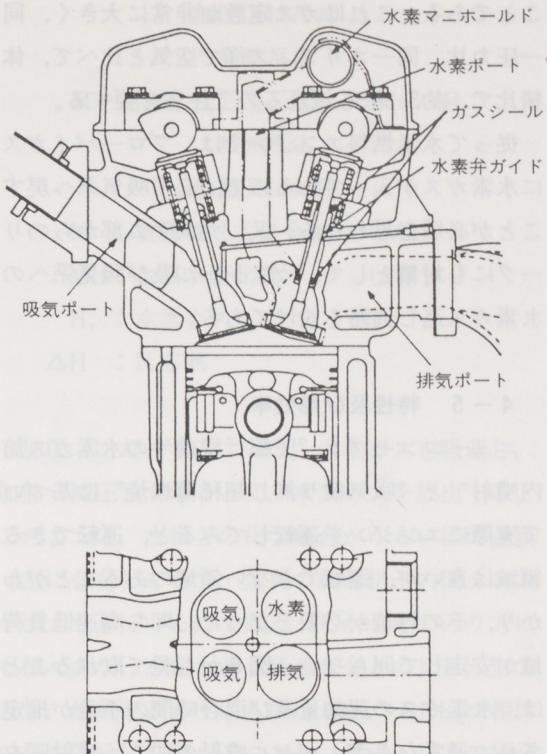


図5 試作機関⁽¹⁾

形 式	水冷四サイクル火花点火機関
シリンダ配列	直列4気筒
内径×行程	88.5×80mm
排 気 量	1,968cm ³
燃 焼 室 形 状	ペントルーフ
動弁機構	D O H C
圧縮比	8.5
吸排気方式	クロスフロー
弁 数	4個/気筒 (吸気2, 排気1, 水素1)

表3 基本諸元⁽¹⁾

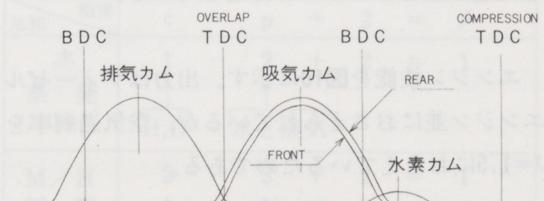


図6 カム ダイヤ グラム

ことである。これはガス定数が非常に大きく、同一圧力比、同一オリフィス径で空気と比べて、体積比で、約3.8倍も流れるので注意を要する。

従って水素燃料エンジンでは、ブローバイガスに水素ガスが入ってくるので、必ず吸気系へ戻すことが必須と思われる。又、弁システム部からのリークにも対策として、ガスシール及び吸気系への水素ガス逃し通路を設けてある。

4-5 特性及び熱効率

ニューコンセプト“圧縮行程前半の水素ガス筒内噴射”と“吸気絞り無し超稀薄燃焼”に基づいて実際にエンジンを運転してみると、運転できる領域は良いが、運転できない領域のあることがわかり、その対策が必要となった。即ち高速低負荷域が安定して回らない。図8から見て取れることは、水素ガスの運動量及び混合時間の不足が推定され、通常ならディーゼル噴射の如く、噴射圧を上げて、慣通力を上げる方向の対策が取られる所ですが、このエンジンの場合は水素吸収合金を使用する前提があるのでそれはできない。だいたい燃料ポンプが無いので上げられる巾は大きくできない。そこで窮余の一策として、水素ガスの一部を予混合することとした。幸いにも薄いA/Fの予混合気体と水素ガス筒内噴射の組合せでは、逆火は起らず、しかも高速低負荷域でも、なんなく運転できることがわかり、これで全域運転可能となつた。

吸気絞り無し超稀薄燃焼に於る熱効率については図9に示す。自動車のように部分負荷を多用する用途にはこのエンジンは適している。

エンジン性能を図10に示す。出力はディーゼルエンジン並におさえられているが、空気過剰率を $\lambda=1.5$ におさえているためである。

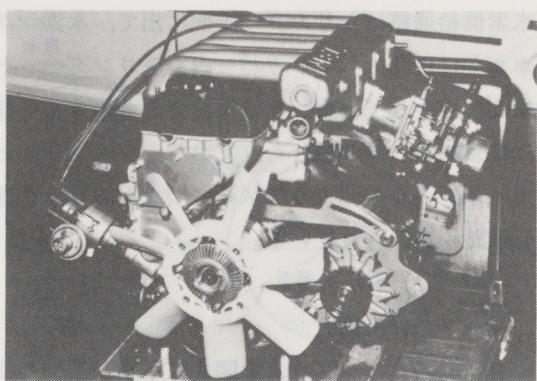


写真1 車載用燃料エンジン

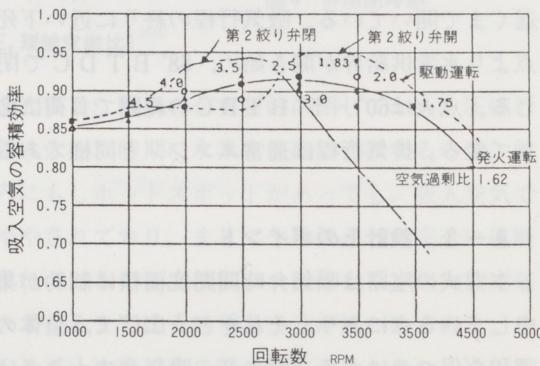


図7 吸入空気の容積効率⁽¹⁾

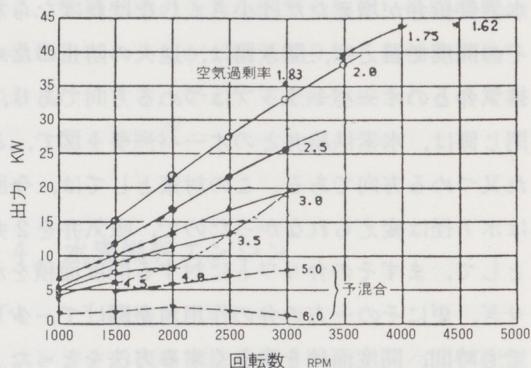


図8 出力特性⁽¹⁾

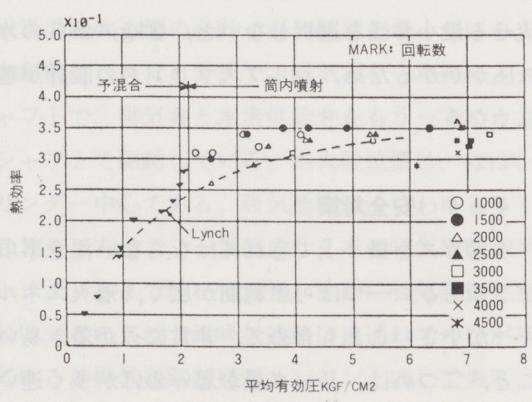


図9 熱効率⁽¹⁾

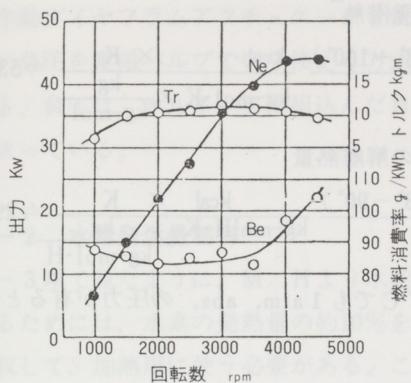


図10 エンジン性能^[1]

5. 水素吸蔵合金とそのタンク

5-1 燃料ポンプのかわり

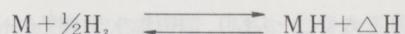
今度の水素燃料自動車には燃料ポンプが付いていない。しかし、圧縮行程の前半とは言え、筒内に水素を供給しようとすれば、少なくとも2.5~3気圧程度の圧力が必要である。従って、その圧力には水素吸蔵合金の平衡解離圧の特性（温度を上げれば平衡解離圧も上る）を利用していている。即ち、エンジンの排気ガスの熱（排熱）を利用して、温水を作り、それで水素吸蔵合金を加熱し、水素を放出させ、タンク内圧を上げているのである。つまり、水素吸蔵合金とそのタンク自体で、機械的可動部分の全く無いスタティック・コンプレッサーを構成しているのである。当然この場合、タンクとは言っても、水素吸蔵合金と水素ガスの単なる容器ではなく、熱交換器の機能を有する所に技術がある。

5-2 水素吸蔵合金

水素吸蔵合金は金属の水素化物（メタルハイドライド、以下M/Hと略す）で、下図の如く水素の吸蔵・放出のできる金属である。つまり、それは

加圧又は冷却

発熱反応



吸熱反応

加熱又は減圧

M：金属種（主に合金）、(α相)

MH：金属水素化物 (β相)

H₂：水素ガス

△H：反応熱

加圧（冷却）することで、水素ガスを吸蔵し、加熱（減圧）することで、水素ガスを放出する。このように、水素との化学結合がゆるい固体金属（主に合金）なので、金属の結晶格子の間を水素が出入りしているのである。しかしその入り方にも種々あり、水素とその吸蔵合金との比H/Mで表し、組成を表わすにも用いるが、Gibbsの相律の相の区分にも使う。つまり、組成n_i以下の場合は、水素は単に金属に固溶している状態であり、n_iは \sqrt{P} に比例するというジーベルトの法則の適用範囲である。^[1]n_iはβ相と呼ばれ、金属水素化物の組成を表わす。n_iとn_jの間がα相とβ相の混合領域で、プラトーと呼ばれる平衡状態の存する領域であり、使おうとしている領域である。プラトー領域では、理想状態ではPはn_iには無関係でTのみにより決まる。この平衡状態は、水の蒸発の平衡状態に似ており、気・液二相の存する限り、わかり易く書け

$$\text{Gibbsの相律: } f = c - p + 2$$

f：自由度

c：成分数

p：相の数

比較	相律	c	-	p	+	2	=	f
水蒸発		1	-	2	+	2	=	1
M/H解離 (水素放出)		2	-	3	+	2	=	1

\uparrow \uparrow
 H_2O 水と蒸気

\uparrow \uparrow
 $M \text{ と } H_2$ α相, β相, H₂ガス

ば、水が全部蒸発してしまうまでは、P一定なら、T一定、逆にT一定なら、P一定で互に独立変数ではありえない。つまり、相律の自由度が一の状態である。水素吸蔵合金のプラント一領域も自由度が一の状態で、水素が n_1 まで放出されるまでは、T一定ならP一定である。(図11) 従って圧力を上げるには温度を上げれば良い。 $\ln P \propto 1/T$ の関係が熱力学的に求められる。¹¹⁾

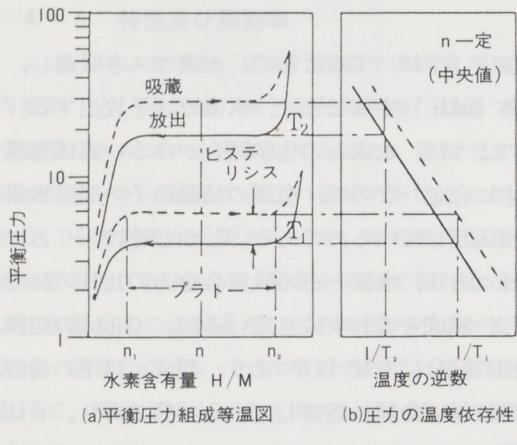


図11 MHの特性曲線^{12), 13)}

水の蒸発潜熱¹⁵⁾

$$\frac{26(273 + 100^\circ)}{18} \frac{\text{kcal}}{\text{kg}\cdot\text{mol}\cdot\text{K}} \times \frac{\text{K}}{\text{kg}} \div 539 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

M/Hの解離熱量

$$\frac{16(273 - 90^\circ)}{1} \frac{\text{kcal}}{\text{kg}\cdot\text{mol}\cdot\text{H}\cdot\text{K}} \times \frac{\text{K}}{\text{kg}} \div 2900 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

(-90°Cでも1atm, abs, の圧力が有ると仮定)

6. 制御システム

6-1

水素燃料自動車の水素関係制御システムを下図により概説する。

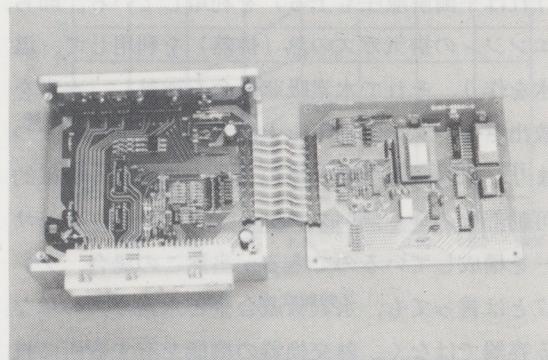
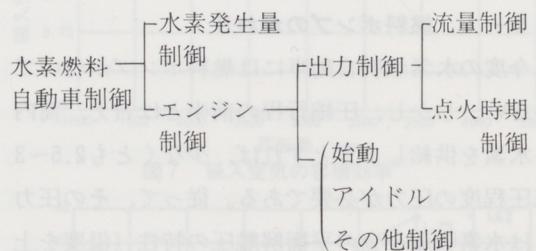


写真2 コントロール ユニット

水素関係の全ての制御にマイクロコンピュータがかかわっており、そのシステムブロック図を図13に示す。試作試験車両であることを考慮して、液晶表示パネルを設け、車速、エンジン状態、システムエラーメッセージ、及び制御データが表示されるようになっている。制御プログラムの高速作動も良好である。なお、蝶弁の作動には

5-3 M/H加熱用の熱量は排熱で足りるか？
水を沸騰蒸発させるには加熱が必要だが、M/Hから水素を放出させるにも加熱が必要である。その時の水のモル蒸発エントロピーは、1気圧の時、26 kcal/kg·mol·Kであり、M/Hの水素放出時（1気圧）のモルエントロピー変化量は16 kcal/kg·mol(H)·Kである。従って水の蒸発潜熱は539 kcal/kgであり、水素の解離熱量は2900 kcal/kgである。水素を放出させるには大きな熱量がいるように思えるが、水素の低位発熱量は28,700 kcal/kgであるので、その10%である。排熱としては、発熱量の30~40%が捨てられるので、熱勘定としては、まかなえる範囲である。使用されたM/Hはランタンリッチ・ニッケル・アルミニウム合金(LR)Ni_{5.0} Al_{0.1}で解離熱は、2900 kcal/kgである。^{13), 14)}

負圧作動ダイヤフラムアクチュエータを使用しており、負圧を電磁バルブで切り換える方式をとっている。負圧は、オルネータに組込んだ負圧ポンプに依っている。

6-2 水素発生量制御

5-3項で見たように、M/Hより水素を発生させるためには、水素の発熱量の約10%を排熱より回収して、加熱用に使う必要がある。この熱量はエンジン冷却水より回収してもよいが、今回は初めての試作車両であるため、次の理由も考慮して、排ガス中の排熱を回収する方式が取られた。

- 1) エンジン始動後、エンジン水温より、排ガス温度の分が立上りが早く、それだけ早くM/Hを加熱できる。（水素発生開始の応答性）
- 2) エンジン冷却と独立にM/Hの試験ができる。
- 3) 冷却水中の廃熱量より、排ガス中の排熱量の方が多いとの推測。

構成としては、排気管をフロントパイプ部で二本に分け、各々に排気切換弁を設け、片方に、熱交換器を挿入して、その後流でもう一度一本にしている。（図13参照）温水回路として、水ポンプを介して、熱交換器とM/Hタンクを循環する回路が構成されている。制御としては、M/Hタンク内圧が設定値より下ると熱交換器側の切換弁が開き（その後、反対側の弁は閉じる）、排ガスが熱交換器を通り、温水を加熱し、それがM/Hタンクに循環して、M/Hを加熱し、水素を設定圧になるまで放出させる。設定圧を越えると排気切

換弁が切り替り、M/Hの加熱は止まる。このサイクルの例を図12に示す。（Pt：M/Hタンク内圧、M_{mh}：発生水素流量、M_{en}：消費水素流量）

6-3 流量制御

4-5項で述べた如く、水素は予混合系と直噴系に分けて供給している。予混合系は調圧器で大気圧に減圧調整し、燃料カットバルブを通して、混合器（LPG用キャブレター改造）を通して、吸気系へ供給されている。流量として、空気過剰率で概略 $\lambda=5$ に相当する量を自動的に流している。従って、出力コントロール用にアクセルに連動して流量コントロールできるのは、直噴系のみで、構成としては、電子ガバナー機能の代用の流量リミッター（流量比例制御弁）とその下流に、アクセル連動の機械式流量制御弁を設け、その下流に直噴系の燃料シャットオフバルブを設けている。制御としては、流量リミッターは、各回転速度に於る最大流量を制限するように、コンピューターのメモリに二次元マップを持っている。このような簡単な流量制御システムで、吸気絞り無し超稀薄燃焼を実現している。

6-4 点火時期制御

前項の流量制御システムの各回転速度と水素流量に対して適切な点火時期を得るために、構成としては、機械式流量制御弁にスロットル開度センサーを設け、コンピュータのメモリーに各回転速度と各スロットル開度に対する点火時期の要求値の三次元マップを持っている。

6-5 始動、アイドル、その他制御

① 始動

始動は水素燃料エンジンでは、最も難かしいものの一つである。それは吸気系、排気系にリーク等で溜った水素ガスに、イグニッションキーをスタートにしたとたんに火が着くため、吸・排気管内で爆発が起るためである。これを避けるため、

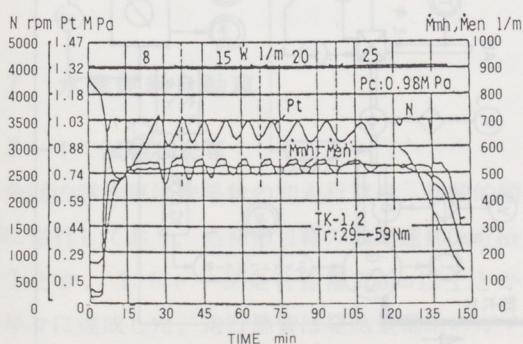


図12 1/2負荷定常運転時の水素流量特性¹⁴

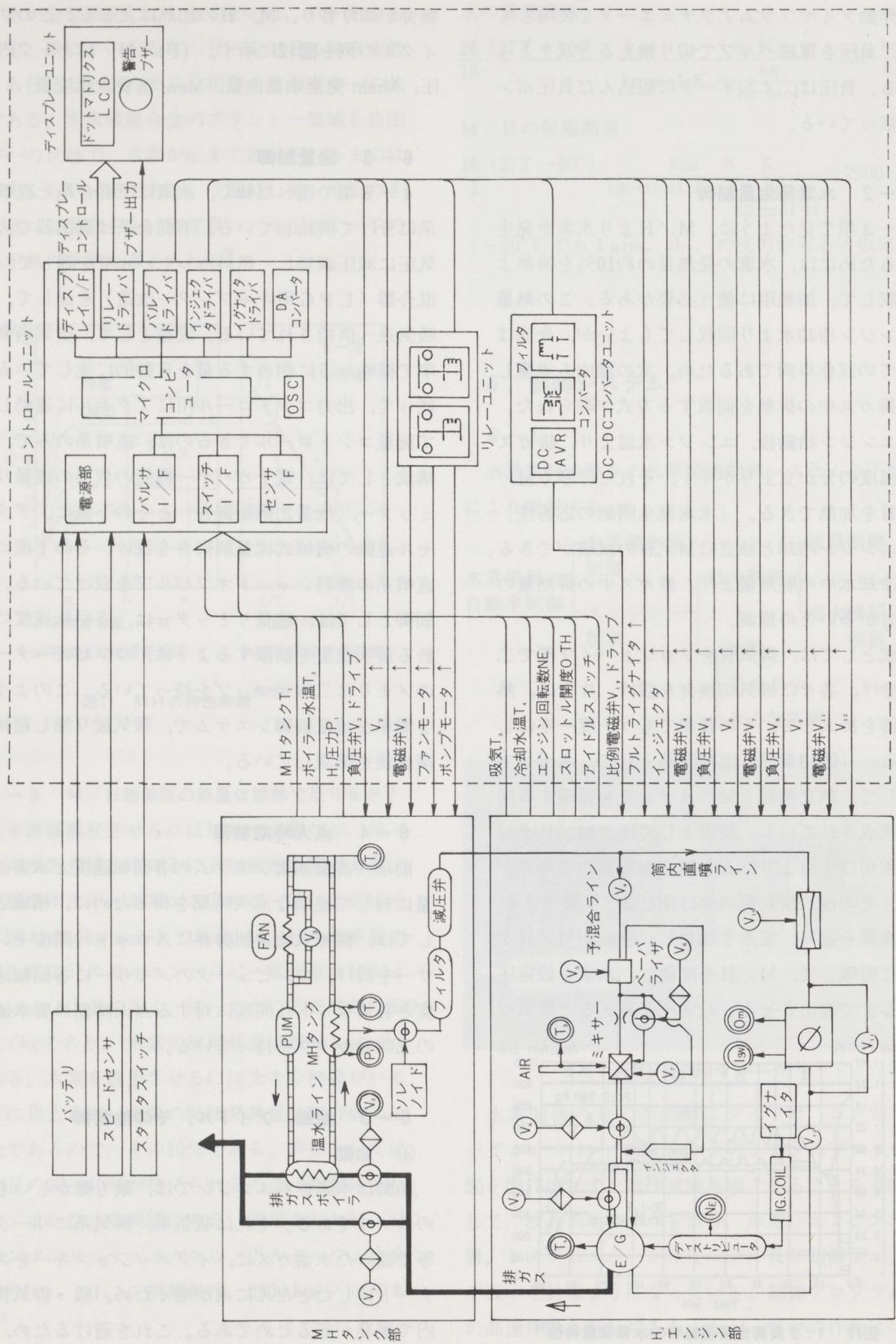


図13 水素燃料自動車制御システム

点火までの順序を次のようにする。先ずクランクで、吸気系の水素ガスを追い出す。続いて、点火系を働かせる。その後に燃料シャットオフバルブを開いて、水素ガスを流す。これで安全に、始動が完了する。特に逆火を起しやすいエンスト直後の再始動も良好である。

② アイドル

アイドルの燃料通路は4つあり、先ずベンチュリーから、その補助としての燃料増量通路、アイドルスピードコントロール（ISC）用の水素ガスインジェクターと、その補助としての機械式アジャスト・スクリューである。ISCはフィードバックコントロールで、コンピュータのメモリに各エンジン水温に対する、目標回転速度が記憶されている。噴射圧は0.3気圧程度である。

③ 吸気制御弁

4-1項で述べた吸気制御弁が、吸気通路の片側に付いており、低回転速度域では“閉”としてそこでの体積効率の改善を図っている。（図7参照）

④ 減速デバイス

試作車両は総重量が重いため、減速時のエンジンブレーキの能力を上げるため、設定回転速度以上の減速ではフェーエル・カット及び吸気のカット（減速時絞り弁）を実施している。

7. 水素燃料自動車

7-1 試験状況等

今回の試作車は昨年秋の初走行以来、比較的順調に走行しており、当初の目標の最高速100km/hr以上とか、1チャージ走行距離200km以上とかは早々に達成した。走行燃費は発熱量基準のガソリン換算で11km/l at 60km/hrである¹⁰。



写真3 水素燃料自動車

7-2 構造・仕様

車両としては、約700kgのM/Hタンクを搭載することから、ワンボックスのバンが選ばれ、エンジンを水素燃料エンジンに換装、車両中央にM/Hタンクを搭載する改造がほどこされた。又床下に排気の熱交換器等も装着された。改造後の主な仕様を表4に示す。

車種	ライトバン（5ドア）				
車両寸法	L4690×W1690×H1925mm				
車体総重量	2450kg				
定員	6名				
変速機	4段マニアル・コラムシフト				
変速比	1 4.452	2 2.398	3 1.414	4 1.000	R 4.472
減速機	ハイポイド歯車形式				
減速比	5.286				
蓄電池	NX200-10				
タイヤ	前輪 185R14-6PR LT	後輪 185R14-8PR LT			

表4 試作自動車の仕様

7-3 キーポイント 2題

この試作車には全く新しい出力制御系が採用されている。その定常的な機能が良く働くのも必要条件ではあるが、その将来性、実用性をうらなう意味では、重大関心事は、いろいろな過渡的運

転状態での不具合の有無にある。水素燃料エンジンという言葉からはどうしても、一抹の“不安”というか、ある種の警戒心が起るので、何としても通常の車と比較して違和感の無いことが要求される。水素燃料自動車を扱った本では、逆火の大きな音が回りの人に脅威を与えることがエピソードとしてのっている。そういう逆火は始動時とか、過渡的運転状態で起るとされ、何ごとも急激な操作を避けるというのが常識のようであった。今やそんなことで、逆火が起るようなら、乗り心地を重視する現在では、実用に程遠いと言える。この試作車に関するかぎり、過渡状態での運転も、おむね良好である。

もう一つのポイントは専ら技術的興味にあるのだが、熱効率改善のため採用したノンスロットル（吸気絞り無し）方式が圧縮比8.5ではエンジンブレーキ不足で減速時に、減速不良の違和感を感じないかどうかにある。ディーゼル車では同じノンスロットルとは言っても、圧縮比が20以上と高いため、減速時燃料カット時のポンピング仕事が大きいので問題にならないようだが。試験の結果は、6-5-①項の減速時絞り弁による吸気のカットは効果があることがわかった。

8. 安全対策と安全性

8-1 安全対策

安全対策としては基本をまず守るのが原則で、水素ガスそのものに対して、次の如く考えている。

- 1) リークを無くす。
- 2) もし、リークしたらすぐ検知できるようにし、直ちに元栓を閉められるようにする。
- 3) もし検知器が不具合でも、又元栓が閉められなくても、リークした水素が、空間的に特定場所に溜らないように逃道をつくる。（水素ガスそのものは軽く、拡散が速いので、上部に吹き抜けを作れば良い。）

この原則に基づき、1) 項に対しては、定期的リークチェックをする。上記2) 項に対しては、テストベンチにも、車両室内にも、水素ガス検知器を備え、水素ガスの遮断弁をもうけている。車の場合は、イグニッションキーを切れば電磁弁が働き水素ガスの流れを止められるが、それとは別に、運転席にマニュアルで遮断弁が閉じられるレバーを設けている。この機構は電気的にも働く。上記3) 項に対しては、テストベンチは天井部に吹き抜けが設けられており、車両に於てもM/Hタンク室は通風筒が設けられ、通風がはかられている。

8-2 安全性

新らしく採用した、出力制御系については、今しばらく実績を作らねばならないが、今の所逆火の不具合は起きておらず、安全性上も問題を起していない。これはM/Hを使ったシステムに基本的にそなわったメリットと思われる所以、そういう観点から見直して見る。

水素そのものを移動用燃料として使う場合、通常次の3つの型式がある。

- 1) M/Hタンク：低圧(10気圧程度)，常温
- 2) 水素ガスピンベ：高圧(150気圧max)，常温
- 3) 液体水素容器：低圧，極低温(-273°C)

この中で、取扱い上一番安全なのは、高圧でも極低温でもないM/Hタンクを使う方式である。しかし、その方式を使うためには低圧で筒内噴射できるエンジンを必要として来たわけだが、それを初めて可能にしたのが、今回の低圧噴射水素燃料エンジンである。従来のディーゼルエンジンの高圧噴射の考え方ではどうしても燃料ポンプが必要とし、それがシステムの重要な部品であり、技術的にも難しく、安全上のネックとなりえるものなのだが、M/Hタンク方式の場合は、温度制御でガス圧を制御できるので、燃料ポンプは無くすことができ、そのことが、システムの安全性を高

めている。特に事故の場合、水素雰囲気内に火花を散らす恐れの有る可動部分が全く無いことは、実際上安全であり、そのことが、この試作車を運転する人の精神的緊張を大いにほぐしている。つまり、無いものは故障のしようがなく、それによる事故の起りようがないということである。

更に、M/H加熱に温水を使用している点も、排ガス直接加熱に比べると安心できる点である。

(写真4) M/Hタンク及び操作パネル

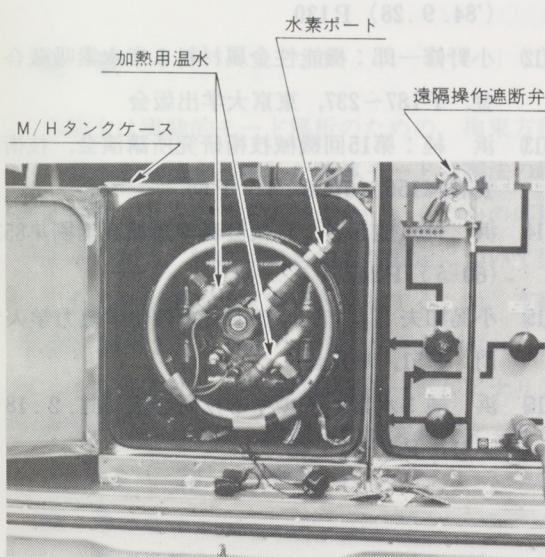


写真4 M/Hタンク及び操作パネル

9. 結 論

今度の水素燃料エンジン及び同自動車のプロジェクトに協力して、次の成果及び結論が得られた。

1. 速度100km/hrで連続走行できる水素燃料自動車の試作に協力できた。
2. 水素ガス低圧筒内噴射型のガスエンジンが、試作・改造ながら実現でき、ノンスロットル超稀薄運転を可能とし、高い熱効率を実証した。
3. 水素燃料発生量制御+出力制御の全く新らしい一つのトータル制御システムが開発できた。

4. 上記制御システムは、実車に於ても、新開発のプログラマブル電子制御装置により、プログラムを含め、良好に制御できることを実証した。

5. 定常走行は勿論、始動、アイドル、加速減速、再始動等の全ての運転状態で燃料流量制御は、おおむね良好で、逆火も生じないことを実証できた。

6. 低圧でも短時間に大流量の水素ガスを流せる弁機構の実用性を実証できた。

10. あとがき

この仕事は「リフト1mm、作用角60°のカムを作つて欲しい」との要請により始まった。しかも「カムができるなら、エンジンも作つて欲しい」という順序で。こうなるには、それなりの理由があるわけで、その理由とは1000 l/minものガスを流せる小型インジェクターは電磁弁で出来るあてはなく、苦肉の策として吸気弁と同じ方式ならできるのではないか、というアイデアに基づいて、持込まれた話のようであった。水素供給弁ができるかどうかが、この仕事のキーポイントで、エンジンはそれに付いて来たわけである。そういう解決策を考え出され、ヤマハに白羽の矢を立てていただいた工業技術院、機械技術研究所、エネルギー機械部の故鈴木部長、内山課長、浜主任研究官に感謝致します。又、4バルブエンジンの利用というアイデアと共に、この仕事を指名によりまかせていただいた、山下重役にも感謝しなければなりません。

仕事を始めてからは、失敗話しも有り、成功話しも有り、又それぞれの部品についても同様な事の繰返しで、實に多くの方々のお世話をなった。これ等、仕事上の協力については全て割愛させていただくとしても、燃料系部品の設計、改造、製作を担当していただいた愛三工業の技術課植村係長、それから制御システムの初回試験のため車両

貸出し等の便宜を計っていたトヨペットサービスセンター開発室の竹内課長にはお礼を言わなければならない。更に、電子コントロールユニットの組立て、調整、試験を担当してくれて、今は特機技術部に移った小沢さんにも感謝したい。

又全く別の所では、この仕事のため航空機器部の仕事に対しては、たぶんに期待に反し関係者には少なからず御迷惑をかけたこともあったのではないかと思いますが、何とか両立できたのは、それにもかかわらずの御協力があったためと感謝して、本稿の終りとしたいと思います。

(本項・栗原記)

参考文献

- (1) Ricardo, H.R., Report of the Empire Motor Fuels Committee Vol. XVIII, Part 1, 1923-4
- (2) 日刊自動車新聞, S 61. 6. 10
- (3) 渡辺賢式: トリガー, S 61年 7月号, P15
- (4) ガストピア21, P11, 廣済堂情報出版
- (5) 好尾学: エネルギーと乱雑さ, P 30, 講談社
- (6) 桜井邦明: 光と物質, P 124, 東京教学社
- (7) 吉田直哉: 21世紀は警告する第6巻, P 19, 日本放送出版協会
- (8) 古浜庄一: 水素エンジン, 自動車工学全書8, P 174, 山海堂
- (9) 城塚正, 須藤雅夫: エネルギー化学工学, P 23, 昭晃堂
- (10) 浜 純: ペトロテック, 7巻2号(1984) P 32
- (11) 浜 純, 内山芳忠: 機学会日立地方講演会('84. 9. 28) P 130
- (12) 小野修一郎: 機能性金属材料6章水素吸蔵合金, P 187~237, 東京大学出版会
- (13) 浜 純: 第15回機械技術研究所講演会, 技術資料No.156 (61. 6. 4) P 66
- (14) 浜 純, 他5名: 自技会春季講演会前刷集851 (60-5) P 247
- (15) 小島和夫: エンジニアのための化学熱力学入門, P 51, 培風館
- (16) 浜 純: 水素エネルギー技術会議 (61. 2. 18~21, P 4-41~48)