

2010年の自動車のエンジンは内燃機関方式 水素エンジン

山根 公高

武蔵工業大学工学部 水素エネルギー研究センター
158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1

Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines Will Work In Practice Even In 2010 Year

Kimitaka YAMANE

Musashi Institute of Technology, Hydrogen Energy Research Center
1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo 158-8557

A study has been carried out in view of the significance of vehicles for us to predict what sort of engines will be put into practice in 2010 year. However, the prediction cannot be made before predicting what sort of fuels will be used for vehicles in 2010. The consumption rate of fossil fuel will be getting slower for fair that the fossil fuel should be depleted and there should happen the serious global warming caused by burning fossil fuel at a seriously high speed. Instead of the fossil fuel, hydrogen produced from the sun and water will increase. In conjunction with the large amount of hydrogen production, vehicles will use hydrogen as the fuel. There has reached a conclusion that hydrogen fueled internal combustion engines with internal mixture formation will work in practice carrying liquid hydrogen on board with high pressure liquid hydrogen pumps.

Key words: forecast, hydrogen, fuel, vehicles, storage, requirements

1. まえがき

全世界のエネルギー消費は、石油換算で87.62億トンでありその約90%が化石エネルギーに頼っている[1]. 化石エネルギーは、エネルギー密度が高く、安価で、利便性が良いことから我々はそれに甘え急速に消費を続けてきた。その結果、化石燃料の枯渇化と地球環境の悪化という脅威にさらされてしまっている。更に、化石燃料を使い続ければ脅威ということではなく現実の問題となる。この脅威を同時に解消させることができる唯一の方法は、地球の誕生から地球に恵みを与えてきた太陽エネルギーと地球上に豊富にある水を利用して人工的に製造できる水素エネルギーである。現時点では、水素エネ

ルギーは化石燃料よりかなり高価なエネルギーであるが、少しずつ上記の脅威を解決するために使われ始めてきた。水素が安く手に入るようになれば今でも水素エネルギー社会を構築するための社会インフラの整備に民間投資家が資金を投入するようになり一気に水素エネルギー社会が展開されることになる。よって、2010年におけるエンジン予測はエンジンに使う燃料の予測そのものである。したがってその事ができないでエンジンの予測はできない。

2. 自動車の燃料

再生可能エネルギーとしてバイオガス燃料、豊富にあ

表1 各種燃料の燃焼で発生する二酸化炭素量

燃料	代表分子	発熱量 (kcal/kg)	CO ₂ (kg/Q)	ガソリン との比較
石炭	C	8100	3.53	1.56
ディーゼル軽油	C ₁₆ H ₃₄	10400	2.33	1.03
ガソリン	C ₈ H ₁₈	10600	2.27	1.00
メタノール	CH ₃ OH	4770	2.25	0.99
天然ガス	CH ₄	11900	1.80	0.79
水素	H ₂	28700	0	0

(注) Q=ガソリン1lの熱量(7800 kcal/l)

り二酸化炭素の放出の少ない天然ガスを原料としてGTL(ガスツーリーキッド)が将来の燃料として注目されているが、所詮炭化水素化合物である。従って、燃焼後二酸化炭素は、かなり多く放出される。表1に単位エネルギーを燃料から取得するために発生する二酸化炭素発生量を比較した。これから判ることは、石炭はガソリンの1.6倍、ディーゼル軽油、アルコールはガソリンとほぼ同じ量、天然ガス(ここではメタンとして考えた)は、0.8倍である。化石燃料を太陽エネルギーと水から製造した水素に置き換えることによって、ドラスティックに二酸化炭素の削減ができることがわかる。化石燃料を自動車の燃料として使いながら二酸化炭素の大気放出を削減するためには、自動車のエンジンの効率を更に良くしてゆく必要がある。しかし、それには限界がある。したがって運転条件によっては効率が内燃機関方式の2倍または3倍になる可能性のある燃料電池を利用した電気自動車が研究開発されている。

これから開発途上国の経済発展と世界の人口増加がますます大きくなることは間違えないだろう。その結果自動車の燃料使用量も現時点より大いに増えてくることが予想される。化石燃料をこのまま使い続ければ、そのうち化石燃料は枯渇化してしまう。そこで自動車の燃料として水素を利用すれば、枯渇化の問題も二酸化炭素による地球温暖化問題も解決する。かつもし安い水素が手に入るようになれば、内燃機関水素エンジン自動車に比べ高価で使用環境に対して脆弱な燃料電池を使った電気自動車をわざわざ採用して効率を上げる必要はなくなる。水素燃料の価格は、税込みのガソリン価格ぐらいまでにはなるであろうという予測もある[2],[3]

したがって、開発途上国の経済発展と世界の人口増加がますます大きくなることから、地球環境問題を優先に考えざる得なくなり将来の自動車燃料は水素に移行してゆくと思われる。

3. 自動車エンジンの必須具備要件

自動車は、我々の社会の中で無くてはならない物になってしまった。いつでもどこでも利用者の意思に従って忠実に利用者を運んでくれる。重たい荷物、取り扱いにくい荷物を door-to-door で運んでくれる。この代わりになる乗り物は、将来も生まれてこないであろう。

ここでこのように便利な自動車が必要とするエンジンの具備要件を考えてみたい。

(1) 軽量, コンパクト, 大出力

限られた空間の収納、運転時の安全確保、省エネルギーを迫られてゆくと、自動車は軽量、コンパクトで大出力を出せるエンジンが必要となる。軽量、コンパクト、大出力を持つエンジンを積んだ自動車は、乗車人数も多くできるし、大きな加速が得られ、いざ危険が迫った場合危険部位より早く離れることができる。加えて燃料消費量が少なくてすむ。

(2) 低燃費

少ない燃料で遠くまで行けることは省エネルギーから考えても当然である。特に、化石燃料を使う自動車は、省エネルギーと二酸化炭素削減のためには必須である。

(3) 低価格

同じ機能を持つ自動車であるならば安い価格の自動車のほうを購入することは当然で、安いに越したことはない。内燃機関は、最も安いエンジンを提供している。

(4) 高い安全性

自動車を運転していて安全に走れない、または運転に不安を感じるのでは乗らないほうがましである。特に強調しておきたいことは、高速道路などで支線から本線に入るときなどは、かなりの速度を保ちながらかつ加速をして本線に入ることがよくある。また、追い越し車線をとおり車を抜く場合でも早く抜いたほうが安全である。このように高速走行中に大きな加速ができるエンジンが必要である。併せ、若い人から年寄りまで幅広い人が安心して利用できることが必要である。

(5) 低維持費

車を買ったらそれで終わりにはならない。利用してゆくにはメンテナンスが安い、燃料費がかからない、故障が少ない等維持費が小さいことが望まれる。

(6) 低騒音, 低振動

車内で人と話す、音楽を聴く場合、走行中の騒音が大きく困ったことがある。車内は静かで振動が無いほう

がよい。

(7) 高信頼性, 高耐久性

自動車は世界商品である。したがっていろいろの環境で使われる。また、高価であるのでやたら壊れて使えなくなっても困る。前述したようにいつでもどこでも利用者の意思に従って忠実に動く必要がある。

(8) 低エミッション

化石燃料を使うことで地球上の大気はかなり汚染されそのため大気汚染公害が発生し社会問題となっている。これからの時代に使う自動車は、大気を汚染する物質を放出しながら走れない。

(9) 運転性が良いすなわち運転することが面白い

危険を回避して思いのまま運転ができることは自動車の魅力のひとつである。

このような要件を満たすことができ、初めて将来の自動車であるといえる。

4. 燃料電池式電気自動車か内燃機関式エンジン自動車か

燃料電池式電気自動車と内燃機関式エンジン自動車では前項で述べた自動車エンジンの必須具備要件を達成することが本質的に得意か得意でないかは、それらの仕組みから見えてくるので、改めて以下に仕組みを説明する。

4.1 燃料電池の仕組み

燃料電池では、外部から燃料電池に送られた1モルの水素ガスは陰極とカーボン担持触媒間の水素ガス濃度差によりカーボン担持触媒へ移動する。そこで水素ガスは、2次元平面に担持された白金触媒により2モルの水素イオン(プロトン)と2モルの電子に分解され、水素イオンは電解膜を通り抜け陽極側のカーボン担持触媒に到達する。一方電子は、電解膜を通過できないので陰極電極を通り外部の負荷を通過して陽極へ移動する。その後陽極の導電膜を通り陽極のカーボン担持触媒に到達する。陽極側では、外部より送付された空気中の酸素が濃度差により陽極側導電膜を通りカーボン担持触媒に到達する。そこで水素イオン、電子および酸素がカーボン担持触媒白金を介して80~90℃の低温で2次元平面上で反応し水を発生する。電気エネルギーは、外部の負荷に電子が通過するとき外部に仕事をする。ここでの物質移動はすべて濃度差移動であるため、遅い反応となる。また、反応面が2次元平面であるため3次元のそれに比べる

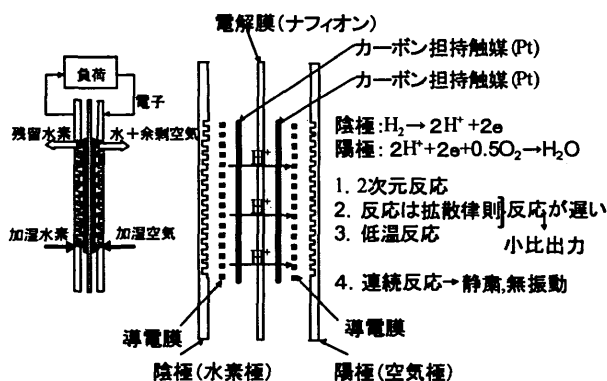


図1 燃料電池の仕組み

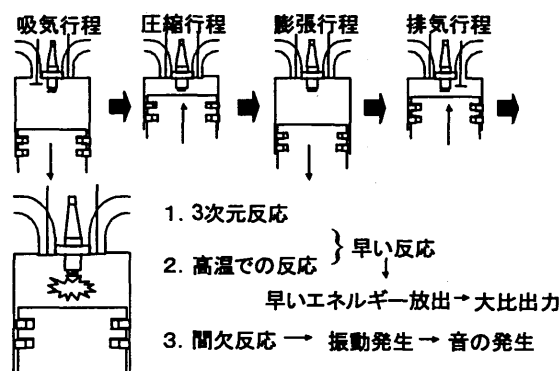


図2 内燃機関の仕組み

と時間当たりのエネルギー放出は小さい。図1に燃料電池の仕組みを示す。

4.2 内燃機関の仕組み

内燃機関では、空気と燃料である水素ガスをエンジン燃焼室内に吸気行程で導入し、それを圧縮行程で圧縮して点火栓で着火燃焼させその燃焼ガスが膨張行程で膨張しピストンに仕事を与える。その仕事をエンジンの出力軸より動力として取り出している。その後排気行程で排気ガスを排気する。燃焼は3次元空間で行われ、かつその反応は高温で行われるので、単位時間当たりのエネルギー放出は大きい。しかし、反応は間欠反応のため振動や音の発生を伴う。図2に内燃機関の仕組みと特徴を示す。

4.3 自動車エンジンの必須要件からの比較

前3項で自動車エンジンの9の必須具備要件を述べた。上記に述べた燃料電池および内燃機関の仕組みからそれらの必須具備要件においてどちらが優れているか考察してみる。

(1) 軽量, コンパクト, 大出力

燃料電池は2次元反応であり、かつ物質移動は濃度差

による拡散エネルギーにより移動するため反応が遅い。単位時間当たりの放出エネルギーは内燃機関のように3次元高温反応である燃焼で得る単位時間当たりの放出エネルギーよりはかなり小さい。したがって、同じ量の出力を得るためには、燃料電池方式のほうが、重量および容積で大きくなる。従って、この点では内燃機関のほうが優れている。

(2) 低燃費

市街走行のような頻繁に止まったり走ったりすることが多い低負荷運転では、燃料電池は瞬時に大きな出力を放出する必要はない。また、燃料電池に流す水素燃料も少なく、スペースロシティーが小さくてすむことから水素燃料の利用効率が上がり燃費は良い。いつでも冷却損失、摩擦損失および排気損失として水素燃料の持つ化学エネルギーの多くを消費している内燃機関は、効率が悪い。燃料電池方式電気自動車は、電気自動車の回生ブレーキシステムを利用できるメリットも加わって更に低燃費になる。この点では、燃料電池が優れている。

(3) 低価格

燃料電池は、それを構成している材料、特に白金触媒、電解膜、大きなエネルギーを使い焼き固めそれを精密に加工したカーボン製電極が非常に高価である。それをいくつも重ね合わせて作るため燃料電池単セルの性能ばらつきを一定範囲に抑える必要があり高性能化するためには費用が更にかさむ。自動車のエンジンは、安い材料を使って精度もそこそこで高い性能を発揮できる仕組みになっているので安価に作ることができる。この点では、内燃機関が優れている。

(4) 高い安全性

どちらの方式でも、燃料として水素を利用する限りにおいて優劣はない。

(5) 低維持費

燃料電池は、化学プラントのごとくとてもデリケートな装置である。たとえば、水素燃料の純度を考えても内燃機関は、水素が30%であり残りが一酸化炭素であっても燃えて動力にしてくれる。燃料電池方式電気自動車は、始動時および加速時に補助電源として2次電池を搭載している。2次電池は2から3年で寿命がきってしまうので車検ごとに20~30万円する2次電池を交換する必要がある。一方、内燃機関方式エンジン自動車では、購入して廃車するまでボンネットを開けたことがないユーザーもいるぐらいで、燃料、オイル交換、フィルターお

よびバッテリーの交換ぐらいで済み、かつ安価である。この点では、内燃機関が優れている。

(6) 低騒音、低振動

燃料電池では、空気供給用のコンプレッサー（オイルレス、コンタミネーションレス）、冷却水循環ポンプ、冷却水冷却ファン等が補機として必要である。よって騒音と振動が皆無ではないが内燃機関のように燃焼音は出ないので静かである。この点では、燃料電池が優れている。

(7) 低エミッション

燃料電池は、水素を低温80~90℃で反応させているので、内燃機関と同じように酸化剤として空気を使っても、排気は未反応の空気中の窒素と水のみである。いたって排気はきれいで完全にゼロエミッションである。水素を燃料とする内燃機関は、出力を出すためおよび高効率で運転するために、燃焼温度をできるだけ高温にする。その場合は、燃料電池と同じように空気中の酸素ガスと水素が燃焼して水が出てくるが、高温で燃焼させるため窒素酸化物も同時に発生する。排気処理でほとんどの窒素酸化物は除去できるが完全にゼロにすることはできない。その点で燃料電池が有利である。

(8) 運転性が良いすなわち運転することが面白い

高出力のエンジンを積んだ軽量な車は走りが良い。しっかりとアクセルに追従して体についてくる。燃料電池方式電気自動車は、電気自動車である。その特性は、低速トルクが大きいため発進時、内燃機関に負けない加速感が得られる。しかし、高速で走っている時の加速および登坂時の加速は、トルクが低くなっているため加速が弱い。一方、内燃機関では、高回転になればなるほど出力は大きくなる特性があるので、燃料電池と違って高速でも加速感を大いに感じられる。すなわち出力密度を大きくできるのはその仕組みから内燃機関方式エンジン自動車である。この点で、内燃機関は燃料電池より優れている。自動車エンジンの必須要件からの比較を燃料電池方式電気自動車および内燃機関方式エンジン自動車について行ってみたが、要件の多くで有利なのは内燃機関方式エンジン自動車であることがわかる。したがって、2010年の水素燃料を使う自動車の多くは、内燃機関方式エンジン自動車であると予測される。

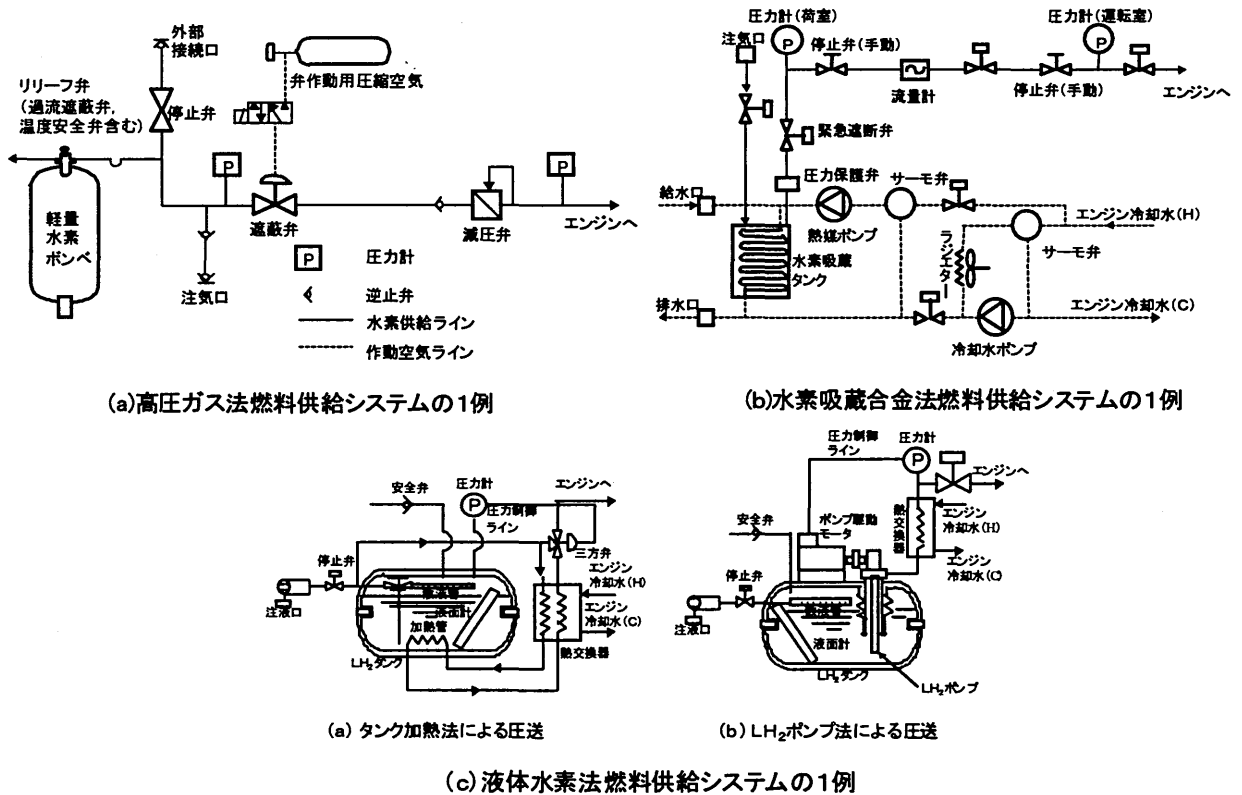


図3 3大水素貯蔵法

5. 燃料の搭載方法

厄介なのが水素燃料をどのような形態で車載するかが今でも問題になっている。図3に3大水素車載システムを示す。

繊維強化樹脂軽量タンクを用いて現在充填圧力70MPaでの実用試験を実施している。ただし、充填圧力を70MPaにするためには、それ以上の圧力で充填する必要があり、そのために必要な動力は、水素を液体水素にする動力とそんなに変わらないといわれている。図3(a)に高圧ガス法燃料供給システムの例を示す。

水素吸蔵合金による水素吸蔵合金法燃料供給システムは、日本では有望視され長い間研究開発が行われてきたが、いくら水素を多く吸蔵する合金を開発しても、水素の吸蔵放出は、吸蔵合金を貯蔵した熱交換器に冷媒を流して行う運命にあること、および、水素を吸蔵すると吸蔵合金の体積が大きく増加するので体積が増えても熱交換器が壊れない構造とするため、吸蔵合金の充填率を小さくしている。その結果、充填密度が大きく低下し、吸蔵合金単体で3重量%の吸蔵能力のある合金であっても、図3(b)に示す貯蔵システムにすると吸蔵能力は1重量%ぐらいまで低下してしまう。

一方、図3(c)に示す液体水素法燃料供給システムは、この3大貯蔵システムのうち最もコンパクトで軽量であるが、液体水素の極低温性、エンジン停止時に避けられない蒸発損失および液化エネルギーが馬鹿にならぬほど大きいことから敬遠されている。しかし、蒸発ロスの軽減対策としてリンデ社は、最近液体水素利用時に乾燥空気をエンジンで消費する為に送る液体水素で冷却して液化しその液体空気により外部から進入する熱流入をシールドするシステムを開発し、15日間蒸発ロスゼロを達することができることを報告している[4]。小生はかつてから日本で使う水素は自然エネルギーが豊富な海外からの輸入に頼ることになると思っており、かつ液化はその場の安い電力で行われる。その場合は、液化天然ガスのように液化した水素を船で運ぶことになる。したがって、水素液化のエネルギーは問題とはならないと思っている。また、液体水素貯蔵システムの蒸発ゼロ化もコンパクトで軽量の冷凍機を開発できれば実現性がある。蒸発ロスした分だけ液体水素を補給する価格と蒸発しないようにタンク内に取り付けられた冷凍装置に電気エネルギーを使って再液化する電気代との比較を行った結果、電気代のほうが安い結果が出ている[5]。

図4に今までに検討されてきた著名な車載水素貯蔵シ

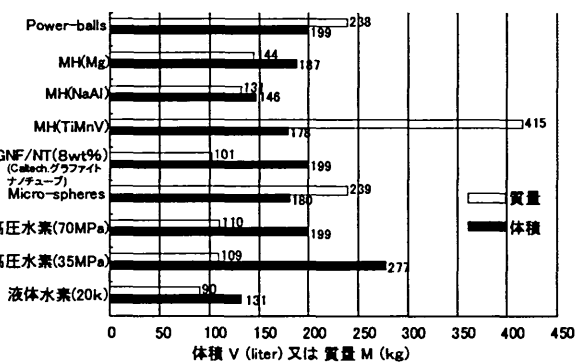


図4 水素貯蔵法による実体貯蔵システムの体積と質量比較(水素貯蔵量: 5kg)

システムの比較を整理して示した。この図で大事なことは5kgの水素を車載する貯蔵システムに必要なシステム重量と体積を比較していることにある。図3でも判るように、どんな貯蔵システムであれ水素を車載するためにはいろいろな補機が必要でありその重量および体積は馬鹿にならない。この図でも最も合理的な車載貯蔵システムは、液体水素システムであることがわかる。

6. 合理的な水素エンジンシステム

以上をまとめて将来の水素エンジンシステムは、どのようなようになるかを予想してみたい。

動力源は、その必須具備要件を多く満足させることができる内燃機関方式となる。水素燃料の車載方法は、液体水素である。エンジンの燃料供給方式には、内部混合方式と外部混合方式があるが、外部混合方式は、簡単であるが高出力を得るためには大きい排気量のエンジンが必要であり、出力あたりの重量が大きくなってしまふ。そこで内部混合方式エンジンが理想的である。内部混合方式にすれば、空気のみをエンジンに取り込んでおき吸気バルブが閉じた後に、高圧水素を噴射弁より筒内噴射することによって小さな排気量であっても高出力が得られる。排気触媒を設けずに窒素酸化物をゼロにするためには、吸気バルブが閉じた直後に筒内噴射し混合時間を多く稼ぎ混合気を均一化することがNOx低減のために大事である。超希薄化均一混合気運転で大出力を得るためには大過給が必要になる。もう一つは、内部混合気方式を採用し上死点近傍でエンジン内部に高圧噴射を行い着火燃焼させる方法である。しかし、この方法でできた混合気は層状混合気になるため高温で燃焼する部分が必ず発生する。よって、NOxは排気中に放出

されてしまう。最近、ガソリン筒内噴射のエンジン排気のNOxを除去するNOx吸蔵三元触媒が開発された。その触媒を水素エンジンに利用することができれば、高出力高圧水素筒内噴射エンジン排気中のNOxを約90%除去できることが期待できる。少ないエネルギーで車上で高圧ガスを作る必要があるが、液体水素搭載車であるので小型液体水素ポンプをタンク内に取り付け液体水素を加圧することにより簡単に高圧ガスを得ることができる。また、蒸発ゼロ化のために小型冷凍機を液体水素タンクに備え、エンジンが停止して水素燃料が必要でないときには、外部から得た電気エネルギーを使いタンク内で蒸発した水素ガスを再液化するシステムが合理的なエンジンシステムとなると思う。

7. まとめ

はじめにも述べたが2010年のエンジン予想は、2010年にどのような燃料が使われるかにかかっている。化石燃料は諸般の事情からだんだん使われなくなってゆく、水素ではなかなか作れない化学合成の原料として大事に使ってゆくののが大道であると思う。太陽エネルギーは全世界消費エネルギー量の1万倍も地球に降り注ぎ、水素の原料である水も地球上では無限にある。しかし、水素は2次エネルギーであることも知っておく必要がある。人工的に作らなければならない。かつ基盤エネルギーとなるので安く作る必要がある。単純に考えれば水素を作る総合システム効率が0.01%であっても現時点の世界に必要なエネルギーはまかなえる。よって、効率よりもコストを意識した水素製造方法の研究開発が待たれる。

参考文献

1. BP statistical review of world energy June 2002; <http://www.bp.com/index.asp>
2. C.E.G. Padro and V. Putsche, "Survey of the Economics of Hydrogen Technologies", September 1999, NREL/TP-570-27079, <http://www.energyideas.org>
3. Stuart Energy System Corporation, "FAQ's- Fuel for Thought", http://www.stuartenergy.com/technology/tech_faqs.html

4. “New liquid hydrogen tank increases holding time by a factor of 4” , HyWeb 2000-12-19 issued by The News letter of HyWeb and the German Hydrogen Association(DWV) · 4th Quarter 2000 year
5. K. Yamane, J. Suzuki, Y. Hiresaki, Y. Takagi, “A Conceptual Study on LH2 Tank System with No Relief of Boil-off Gas into the Atmosphere”, The International Association of Hydrogen Energy (IAHE), Hydrogen Energy Progress 9, The Proceedings of the 14th World Hydrogen Energy Conference, Montreal, Canada, 9-13 June, 2002, CD-ROM Produced and Distributed by Gestion Micro-Intel Inc. ISBN: 2-9214505-60-1