

総論：自動車用燃料としての水素

渡邊 正五

一般財団法人 水素エネルギー製品研究試験センター
〒812-8577 福岡市博多区東公園7-7

Hydrogen as the Fuel for Automobiles

Shogo WATANABE

Hydrogen Energy Test and Research Center (HyTREc)
7-7 Higashikoen, Hakata-ku, Fukuoka 812-8577

Fuels for automobiles are such as gasoline, diesel, liquefied petroleum gas (LPG) and compressed natural gas (CNG). These fossil fuels are limited the deposits and emit carbon dioxide leading to the global warming issue. Hydrogen as the fuel for automobiles is an energy carrier produced by all kinds of primary energy sources including renewable energy. Fuel cell vehicles can use hydrogen with very high efficiency and without carbon dioxide emission. This paper gives an outline of energy pass of automobile fuels from a point of view of carbon free energy system, the methods of onboard hydrogen storage systems from a point of view of cost, compactness, light weight and convenience, and safety property of hydrogen.

Keywords: hydrogen, automobile, fuel cell vehicle, carbon dioxide, safety

1. はじめに

自動車の燃料はガソリン、軽油、LPG、天然ガスなど化石系炭化水素燃料で成立しており、内燃機関により熱エネルギーから駆動力へ変換している。従って、自動車は常に資源枯渇の問題と燃焼生成物（二酸化炭素、一酸化炭素、窒素酸化物、炭化水素、黒煙など）による環境問題が切離せない関係となっている。一方、自動車用内燃機関は燃焼制御、排ガス浄化、駆動系改良、ハイブリッド化など多くの高度な技術開発の集積により効率改善、環境適合を果たしてきているのも事実である。しかしながら資源エネルギー・環境問題の抜本的な解決には非化石系自動車用燃料の導入が必須であることは誰もが承知するところである。

水素は電気、バイオと並んで再生可能エネルギー資源の活用、二酸化炭素（CO₂）ゼロエミッションの可能性をもつ有力な燃料であり、一次エネルギーの多様化、大量製造、高効率利用など多くの魅力を備えた燃料といえる。また高エネルギー密度車載貯蔵、燃料補給の容易さ

といった要件を満たす可能性も高く、将来の自動車用燃料として有望である。

2. 自動車用燃料のエネルギーパス

図1は一次エネルギーから自動車用燃料を製造、使用するエネルギーパスを示したものである¹⁾。これまでの自動車用燃料は、石油、LPG、天然ガスからガソリン、軽油、LPG、CNGが製造され、これを内燃機関で燃焼させて自動車の駆動エネルギーに変換している。この際、最終使用過程で内燃機関の排ガスとして多量のCO₂が大気中に放出される。同じ内燃機関で使用するバイオ燃料（メタノール、エタノールなど）は化石燃料と同様に大気中にCO₂が放出されるが、一次エネルギーとしてのバイオマスは大気中からCO₂を吸収していることから、燃焼によって放出されるCO₂と相殺され全体としてCO₂中立とみなされる。この場合、原料バイオマスからバイオ燃料製造工程で費やされるエネルギーに相当するCO₂が排出されるので、燃料変換にエネルギー消費の少

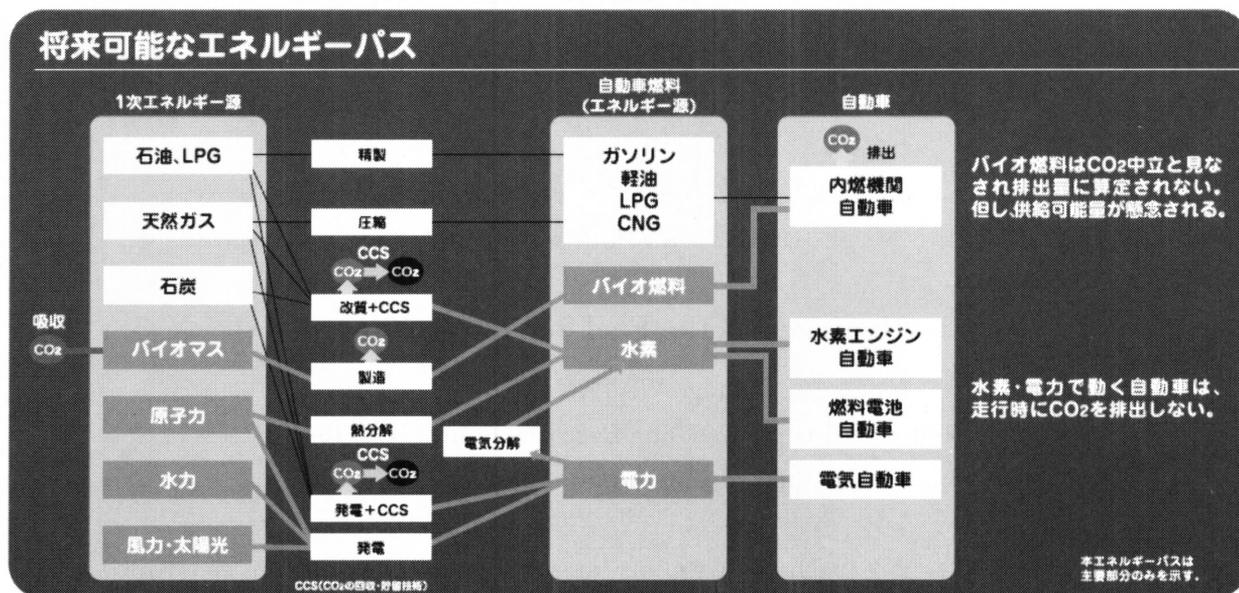


図1 将来可能な自動車用燃料のエネルギーパス¹⁾

ない一次バイオマス原料を用いることが重要である。サトウキビからのエタノールバイオ燃料製造はエネルギー消費は少ないが、トウモロコシからのエタノール燃料製造には多くのエネルギー消費が伴うとされている²⁾。原子力、水力、風力・太陽光はエネルギーパスの中でのCO₂発生は無く、原子力燃料製造やプラント建設時に消費されるエネルギー相当分のCO₂排出がなされるが製造するエネルギー（電力）に対する比率は小さく、LCA（Life Cycle Assessment）で評価したCO₂排出は少ないと見積もられる。

水素は、化石燃料からも改質によって製造することが可能で、短期的には経済性、製造量確保の観点では重要なエネルギーパスである。化石燃料からの改質では、改質プラントでCCS（Carbon Dioxide Capture and Storage）を織り込むことでCO₂フリーを実現することが可能であり、水素製造とCCSを一体化した技術開発が有効といえる。更にバイオマスからの改質にCCSを組込めばマイナスCO₂のエネルギーパスも実現できるが、燃料コストとのバランスを考慮することを忘れてはならない。原子力、再生可能エネルギーによる発電から水電解により水素製造するエネルギーパスはCO₂フリーであるとともに、電力負荷平準化、エネルギー供給の安定化バッファーとして有効であり将来有望な技術と考えられるが、水素コストの低減の為には一層の高効率化を進める必要がある。水素は燃料電池による発電で電気モータを駆動する燃料電池自動車と内燃機関で燃焼させる水素エンジン自動車の利用方法がある。総合効率では高効率な燃料電池自動車が有望といえるが、水素エンジン

車は既存の内燃機関の技術、生産設備が利用できることから低コスト化には有利である。逆にいえば燃料電池自動車では低コスト化が、水素エンジン自動車では高効率化が実用化には重要な課題といえる。

電気自動車も水素と同様あらゆる一次エネルギー源から電力を得ることが可能であり、ともに走行時にCO₂を排出しない。電気と水素の比較については、双方、今後の技術開発の進展に依存するところが大きいですが、最新のリチウムイオン電池と高圧水素貯蔵を比較すると車載エネルギー密度では水素貯蔵が一桁程度大きく、また燃料補給時にエネルギー変換（電気から化学変化）を伴うバッテリー充電に比べ、高圧水素充填の方が短時間補給が可能であり、自動車用燃料としての利便性において、ガソリン、軽油の代替燃料としては水素が勝ると判断される。

3. 水素の車載貯蔵

1990年代の後半に、燃料電池自動車への水素供給にメタノール、ガソリンなどの炭化水素燃料の車上改質を行う研究が盛んになされた時期があった。これは水素に比べて、燃料インフラ整備、燃料一充填の走行距離の確保が容易と見られたことによるが、一方、改質器の小型化、始動性、応答性、耐久性、改質ガスを燃料とした場合の燃料電池の耐久性、総合エネルギー効率の低下など多くの技術課題を抱えその克服が容易ではないことが明らかになった。結局、脱石油、脱炭素の観点から、将来燃料と位置付けられていた水素を当初から燃料電池自動

車用燃料とすることの方が、開発をより効率化し、早期の実用化につながると判断された。

水素の車載貯蔵には、初期の段階では水素吸蔵合金タンクの適用が試みられた。これは水素吸蔵合金の適切な選定により、タンク内圧力が高压ガス保安法の対象とならない1MPa-G以下の圧力で貯蔵できることや、高い体積エネルギー密度（タンクの小型化）などが自動車用燃料貯蔵タンクとして適していると考えられたことによる。しかしながら、水素ステーションでの充填時に冷却水を流す必要があることや、極寒から酷暑まで幅広い温度範囲で適切な放出圧力を示す合金選定が困難なこと、質量エネルギー密度が小さく実用的な航続距離を確保するには数100kgのタンクを搭載する必要があることなどが問題となり主流技術とはならなかった。液体水素の車載貯蔵は体積エネルギー密度、質量エネルギー密度とも高いレベルが達成でき、またタンク構成材料が他の水素貯蔵方法に比べて安価であり、量産時のコスト低減には有利であるが、水素の液化に要するエネルギー消費が大きいこと、外部からの熱侵入により車載サイズの液体水素タンクではボイルオフガスの発生が避けられないことなどの短所もあり、液体水素を車載貯蔵に採用する車両は限定的となっている。

現在の水素車載貯蔵は高压に圧縮貯蔵する方法が主流となっている。圧縮貯蔵は水素の充填、貯蔵、放出において、改質器、水素吸蔵合金、液体水素それぞれにみられる短所が無く、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）による複合容器の採用で鋼製容器に比べ格段の軽量化が可能となったことが大きな要因と考えられる。また自動車用ガス燃料は天然ガス自動車で世界的にも実績がありベースとなる規格、基準の整備も進んでいる。国内では高压ガス保安法「圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準：JARI-S001」と道路運送車両法「圧縮水素を燃料とする自動車の燃料装置」が2005年に施行され水素を燃料とする自動車の量産化対応が図られている。しかしながら体積エネルギー密度の小さい水素を高密度に貯蔵し、燃料一充填での航続距離を確保するには35MPaの高压化が必要になる。それでもなお実用的な航続距離500km以上を達成するには、容器の大容量化（ホンダ：クラリティ：171L）や更なる高压化（トヨタ：FCHV-adv：70MPa）が必要となる。圧縮貯蔵圧力については35MPa、70MPaの規格・基準策定が進んでおり海外では105MPaの規格も検討されている。水素の高压化圧縮貯蔵の課題として炭素繊維使用量の増加に伴う

容器のコスト増、重量増、有効容積（外寸に対する内寸）の低下、高压化圧縮に要するエネルギー消費の増大、高压充填水素ステーションのコスト増加など様々な問題が挙げられる。図2は圧縮水素容器に充填する水素の充填速度を変えた時の容器内ガスの温度上昇の様子を容器種別（Type3：アルミニウム合金ライナー+CFRP、Type4：プラスチックライナー+CFRP）と容器容積をパラメータに試験した結果を示している³⁾。水素の充填速度を上げると容器内温度の上昇が著しくなり、Type4容器の場合では温度上昇が100°C近くにもなり、夏場の外気温が高い状況で急速充填をおこなうと、容器内温度が非常に高温になることが推定される。このことは二つの大きな問題があることを示しており、そのひとつは最大圧力まで充填しても、充填後放置すると自然放冷によりガス温度が下がり容器内圧力が低下し有効充填量が低下することである。二つめは容器の使用可能温度範囲（-40~+85°C）を超え、容器材料の機械的、化学的特性を損じ、容器の耐久性、安全性の問題を引起す可能性が高くなるという問題である。急速充填時の容器内ガス温度上昇を抑制するには充填速度を遅くする、あるいはプレクール（充填する水素ガスの予冷）による温度上昇抑制が必要になる。これは充填にかかる時間が長くなり、あるいは水素ステーションのプレクール設備追加によるコスト増、エネルギー消費増につながるという新たな課題も発生する。さらには、超高压領域では水素が理想気体状態から外れ、実在気体の振舞いをするようになり、水素充填量の設計には圧縮係数の考慮が必要になってくる。図3は圧力（横軸）と圧縮係数（縦軸： pVm/RT ）の関係を温度をパラメータとして算出したものである⁴⁾。理想気体の場合は圧縮係数は温度、圧力に関係なく1であるが、実在気体では圧力が高いほど大きく、温度が高いほうが小さい値となる。温度300Kのとき圧力

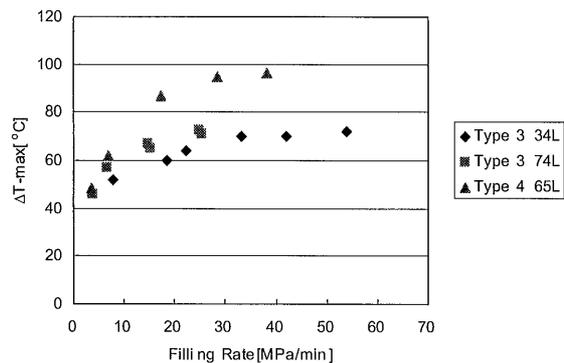


図2 水素急速充填時の圧縮容器内のガス温度上昇³⁾

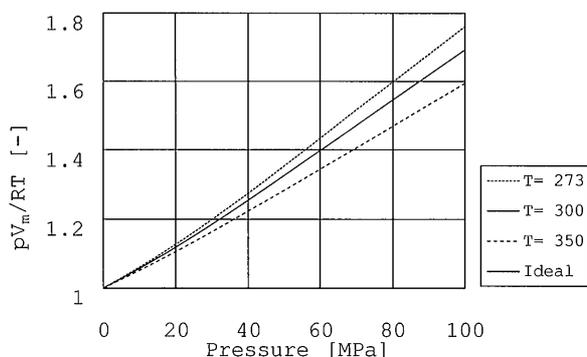


図3 水素の圧縮係数の温度・圧力依存性⁴⁾

35MPaで1.22、圧力70MPaでは1.47となっている。圧縮係数がこのように大きくなっていくと、圧力を上げて、充填量は比例的には増加しないことになり、圧縮の割には充填量アップの効果が得られないということになる。そこで圧縮圧力上昇による充填水素量アップの効果と、容器コスト、重量、充填エネルギー増大のバランスを取るため、最適充填圧力についての議論も必要になってくる。

水素の車載貯蔵についてはまだまだ課題が多く残され、高密度貯蔵が可能な水素吸蔵材料の開発や、水素吸蔵合金タンクを高圧容器内に組込んだハイブリッドタンクと呼ばれる新しい方式の貯蔵システムの開発なども継続的になされていく必要がある。

4. 水素の安全性

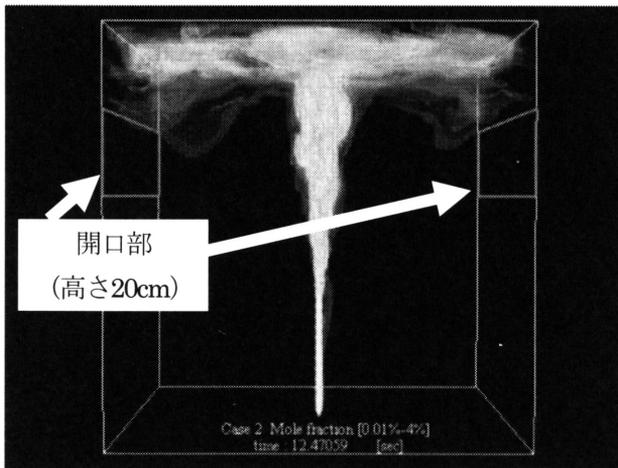
分子が小さく、低粘性の水素は漏れやすく、最小発火エネルギーは0.02mJとメタンやプロパンの約0.3mJと比較して1/10以下と着火しやすい。空気との可燃混合範囲は4～75%とこれもメタン(5～15%)、プロパン(2.1～9.5%)よりはるかに広い。混合濃度が15.5～64.1%の範囲では急激な圧力上昇による爆轟現象の発生の可能性もあり、この爆轟範囲の混合域もメタン:8.3～11.8%、プロパン:2.5～8.5%と比べると広い範囲となっている。また消炎距離は0.062cmとメタン、プロパンの約0.2cmに比べ小さく、わずかな隙間からでも火炎が侵入する。さらに金属材料への影響として水素が亀裂先端や金属格子欠陥に侵入し機械的特性を損ねる「水素脆化」を引き起こすことも広く知られている。このようなことから水素は他の可燃性ガスと比べて極めて危険なガスとして見られており、慎重な取扱いが必要なものとされている⁵⁾。

しかしながら、最小発火エネルギーに関しては、例え

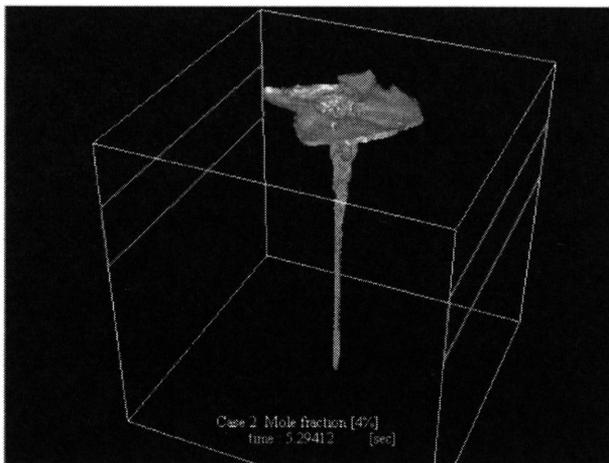
ば人体に生じる静電気放電は数mJ程度あり、このレベルでは水素に限らず、他の可燃性ガスを着火させる現象としては同等である。セルフ方式のガソリンスタンドでの給油中の発火事故は良く知られており、静電気除去の対策が講じられている。また空気中に漏えいした水素は気流や浮力によって速やかに拡散希釈され、着火したとしても、その燃焼割合は漏えいした総量に比べて少なく、開放空間では圧力上昇も小さいことから周辺へ大きな被害をもたらすこともない。トンネルや地下駐車場などは半閉鎖空間と言われることがあるが、一般に自動車が行き交う場所は良好な換気がなされており、車両からの水素漏えいに対しては開放空間と考えるのが妥当である。金属の水素脆化の問題も、脆化を起こしにくい材料や、使用応力範囲の適正化により抑制することが可能である。要は水素の特性や水素が引起す現象に対して正しい理解をし、問題に対する十分な対策を講じ、また事故時に想定される現象への対応を準備し、それらを共通の認識とし実行することが水素を有効に利用する上での重要なポイントであり、これは我々がこれまで利用してきたガソリン、LPG、天然ガスと同じ考え方である。

図4(a)は空気中での水素の漏えい・拡散挙動をコンピュータシミュレーションで求めた一例である。1m立方の空間底部中央から放出された水素は上方に浮上し天井部で滞留したのち開口部から外部へ散逸する。図4(b)は燃焼範囲である4%以上の水素濃度の部分を示しており漏えいした水素のごく一部に限定されている。底部からの水素放出を継続してもこの濃度分布はほぼ同じ状態を維持しており、適切な開口部がある空間への水素放出では爆発の危険性は小さいと推定される⁶⁾。

車載用圧縮水素容器の安全基準は国内では高圧ガス保安法の例示基準が策定されており、海外では圧縮天然ガス容器の基準を参考として安全性の確保がなされている。高圧ガス保安法例示基準JARI-S001では、破裂圧力が最高使用圧力の2.25倍以上、常温圧力サイクル11,250回での漏えい無し、環境温度-40～85℃での圧力サイクル試験、高さ1.8mからの落下試験、火炎暴露試験などが課せられており、自動車使用で想定される条件での安全性確認がなされている。海外では更にライフル弾による貫通試験も求められている。図5は高圧ガス保安法の例示基準で定められる圧縮水素容器の火炎暴露試験の事例である。火炎暴露により温度作動式の金属溶栓が作動し、容器内部の水素が放出され、容器の強度低下による破裂を防止する機能が確認されている⁶⁾。



(a) 水素濃度：0.01%以上の領域



(b) 濃度4%以上の領域

図4 空気中における水素の拡散挙動コンピュータシミュレーション (水素漏洩量: 10L/min.、空間寸法: 1m×1m×1m)

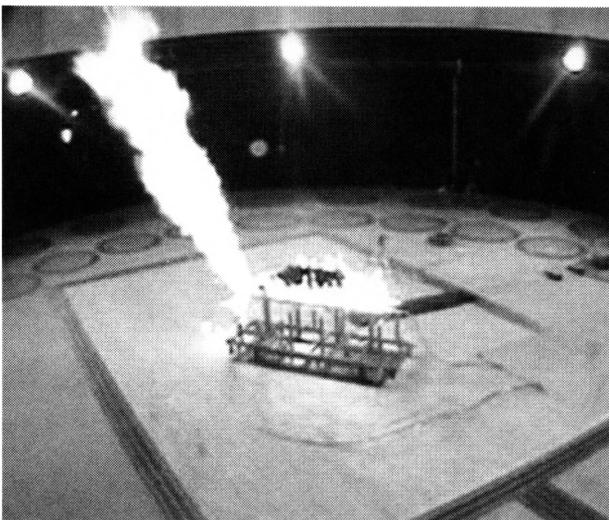


図5 圧縮水素容器の火炎暴露試験の事例⁶⁾

5. おわりに

日本国内の発電電力量の電源構成に占める石油の割合は1973年の第一次オイルショック時の73%から2005年実績で9%、都市ガスの原料構成については同じく46%から6%といずれも劇的な低減を実現している⁷⁾。一方、この間、自動車用燃料は98%以上を石油資源に依存したままであり、2008年の原油価格の異常高騰の影響をまともに受けてしまった。またエネルギー利用にともなう運輸部門の二酸化炭素排出量は京都議定書の目標値ベースとなる1990年の2億1721万トンから2003年には2億6019万トンと13%の増加となっている⁸⁾。この値は、削減率目標のプラス15.1% (削減ではなく増加を抑制する目標値として設定) を下回るものの、車単体の効率改善が保有台数の増加、走行距離の伸長、大型車シフトなどの増加要因に間に合っていないことを示している。オイルショック以降、「高効率化」という観点での改善対応をしてきたことは日本の自動車技術を世界のトップに押し上げる実績を果たしたものの、21世紀将来の自動車用燃料を考えるにあたっては「脱石油」「脱化石」に加え「脱炭素」を想定した技術導入を推進する必要がある、水素はその最有力候補の一つとして継続した技術開発、政策支援が重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 水素・燃料電池 (自動車) 実証プロジェクト
http://www.jhfc.jp/data/pdf/pamphlet_stake.pdf
- 2) 瀧本正民「サステナブル・モビリティ実現に向けたトヨタの取り組み」トヨタ環境フォーラム、2008年6月
- 3) 広谷ら「Thermal Behavior in Hydrogen Storage Tank for Fuel Cell Vehicle on Fast Filling」WHEC16, 2006
- 4) 木枝ら「自動車用圧縮水素容器の急速充填シミュレーション—実在気体の影響—」自動車研究、Vol.30, No.6, 2008.6
- 5) 「水素の有効利用ガイドブック」NEDO、2008年3月
- 6) 渡辺「水素・燃料電池自動車の安全性」日本化学会第89春季年会、アドバンスト・テクノロジー・プログラム、2009年3月
- 7) 資源エネルギー庁 エネルギー白書 わかりやすい「エネルギー白書」の解説 <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/enehaku-kaisetu/kaisetu/03.htm>
- 8) 資源エネルギー庁 エネルギー白書2006