

水素エネルギー社会の実現と燃料電池車普及に対する考察

南 繁行 (大阪市立大学 複合先端研究機構, minami@ocarina.osaka-cu.ac.jp)

On the reality of hydrogen societies and future spreads of fuel cell cars

Shigeyuki Minami (The OCU Advanced Research Institute for Natural Science and Technology, Osaka City University, Japan)

要約

水素のもつ化学エネルギーを、電気自動車の駆動に活用しようとする考え方が、燃料電池車を生んだ。最近、トヨタ自動車が発見した驚異的な低価格で、燃料電池車「ミライ」を市場に投入することになった。その普及が待たれるところであるが、本稿では、新しい時代に入った燃料電池車市販の段階で、水素とはどういう元素であるか、そして今後の燃料電池車使用に際し、どのように水素と付き合っていくらよいかについて、筆者の経験を紹介することによって述べる。後半では、過去の電気自動車や燃料電池車の普及における課題について述べ、燃料電池車の将来展望について、燃料電池車ビジネスの観点から考察する。

キーワード

電動車両, 水素, エネルギー, コスト, 燃料電池車

に追いつくハイブリッド技術を他社は開発できそうにない。

1. まえがき

電気自動車くらい、浮き沈みの多い製品は少ないだろう。過去100年の間、電気自動車を中心とする電動車両の開発者にとっては、期待と失望の日々ばかりであったと言える。大凡、物事の栄枯盛衰の歴史を学ぶことは、明日を知る上での貴重な糧となる。本稿では、前半は水素に関する筆者の経験を通して、今期待が再び高まっている燃料電池車において、その燃料となる水素とはどういうものであるかについての私見を述べ、水素は我々にとって身近なものであり、安全なものだということを示したい。燃料電池車 (Fuel Cell Vehicle: FCV) は、直接ユーザーが水素を扱い、その恩恵をこうむる代表格となるはずである。後半では、その技術的な課題と将来像について記載した。我が国産業発展の観点からみて、トヨタ自動車が成功したハイブリッド車との対比から、燃料電池車の未来と、自動車産業発展の観点でのカギとなる要素は何であるかについての考察を行う。

2. 電動車両の歴史から学ぶ

今から約10年前の2003年に、ロサンゼルス近郊で電動車両国際会議 (Electric Vehicle Symposium: EVS) が開催された。その出席当時のことを思い出すと、それは現在と対比して次のような特徴があった。

- ① 電池で走る電気自動車 (EV) は、将来を担う車としての価値はないという烙印が押されていた。つまり、EVは超小型や特殊な用途にだけ存在出来、普通の自動車として使う用途には、たとえバッテリーの劇的な改善があっても、使われることはもうありえない。
- ② 燃料電池車の開発こそが、今後の車社会をリードする交通手段となる。そのための周辺技術としてのEV技術は必要である。
- ③ トヨタ自動車のプリウスが米国でも大人気で、もうこれ

以上3つの既存概念を今になって振り返ると、次のことが明らかになる。

まず、①当時、電池と言えば、鉛電池がほとんどであり、ニッケル水素電池を使っても、世間の人々が持っているガソリン自動車並みの性能要求をみたすことは、価格や性能からみて、将来ともに不可能だ、という結論になっていた。その後、5年ほどして、リチウムイオン電池の高性能化が急速に始まり、再び電池搭載電気自動車が脚光を浴びるようになった。現在は、電力不足とガソリン安によって、ふたたびEVの魅力が低減しつつある。

②の燃料電池車に関しては、③のハイブリッド車と関連し、プリウスの完璧と言える性能を他のメーカーが開発する余地がない、というあきらめ感に業界が満ちていた。今もそうだが、当時のトヨタプリウスの米国での人気はすさまじいものであった。ガソリンの価格上昇を考えれば、米国でも燃費が重要なファクターである。その救世主であるハイブリッド車の技術がトヨタ自動車の独壇場になってしまったところに、欧米の悔しい思いが漂っていた。そこで、ガソリンはいずれ枯渇するし、電池だけのEVは性能が悪いから、燃料電池車を作ろうという機運が高まったのである (南, 2010)。

しかし、会場の印象では、単に他の自動車メーカーがトヨタ自動車にはもう追いつけないから、という消極的な意味で燃料電池の開発、完成を急いでいる、というだけに止まっただけではなかった。1960年代ケネディ大統領が10年以内に人類を月に送ると宣言したことになぞらえ、これからの10年に燃料電池を完成し、実用化することは、会社の利益を越えた人類の幸福と永続のために、どうしても成し遂げなければならない技術者の使命なんだ、と言う意気込みが米国のいたるところで感じられた。

図1は、当日、会場で行われた一般公開試乗会の一コマである。長い待ち行列のできているのは、プリウス試乗希望者である。不思議なことに、自動車メーカーの燃料電池車への



図1：2003年カリフォルニアでのプリウスハイブリッド車試乗に列をなす人々

意気込みは高いにも関わらず、燃料電池車への一般の関心は薄く、試乗したい人は微々たる数であった。誰も希望者がいなかったため、筆者は燃料電池車を運転させてもらうことが出来た。

1997年にフロリダで行われたEVSでは、当時発売されたばかりのプリウスについて、会場でリーフレットが配られた。それには「Prius bound for US」のタイトルで、プリウスは215万円の価格だが、実際は1台毎に200万円損をしていると書かれてあった。それ以来、ダンピングだと言われるのを恐れて、トヨタ自動車の欧米でのプリウス販売が数年遅れる事になったのである。確かに、当時は日本でも、プリウスは売れば売ればほど損をしている、といわれたものであった。この時開発にかかった費用は相当なものであったと言われているから、一時的に損をしたかもしれないが、環境に貢献した会社として評判は上がるし、その時の先進的な技術開発への考え方が今のリーダーシップを築いたと言えよう。今回のトヨタ自動車「ミライ」に対し、営業的には苦しいことかもしれないが、企業の高い志が叶うように、海外での販売がスムーズに進むことを願いたい。

振り返って、このハイブリッド車の開発に成功した会社と、そうでなかった会社の分かれ目は、次の要素に拠ることを、筆者は指摘したい。

- ① 単に電動車両で環境に優しいことをしているフリだけをしたいのか？
- ② 大量普及によって、社会に実質的貢献をしたいのか？
- ③ 自動車産業が変化しつつあるなかで、内燃機関をどう生かしていくか、その位置づけを考えた結論か？
- ④ 企業のトップがEV開発に深い理解と潤沢な予算を提示しているか？
- ⑤ 技術者は最高性能を望みがちだが、それが価格も含め、本当にマーケットの求める妥当な製品なのか？

これらに対し、他社もやっているからと、とりあえず中途半端に取り組んだメーカーは、価値ある特許も取得できず、100年前のハイブリッド車にも劣るような商品しか販売できず、トヨタ自動車に大きく水を掛けられる結果になったこと

は教訓的である。それは単純にビジネスに対する先見の明というだけのものではない高邁な精神と企業の体力があったからだと言える。各社のハイブリッド車に対するCEOの述懐を比べると、おのずからその取組判断の軽重がわかってくる(Chan・南, 2009)。

ここに述べた①～⑤の要素を満たすことは、「事業成功への道」として、必要条件ではあるが、今回低価格で世界初として販売される燃料電池車「ミライ」でも、同じ成果があげられるかどうかは分からない。この点は、本稿の後半で考察する。

3. 水素にまつわる研究から見た水素とは何か

地球上の全ての分子のうち、おおよそ3分の2は水素と結合しているほど、水素(H₂)は身近なものであり、宇宙の創世記に最初に作られた元素と言われている。地球上は元素としての水素に満ち溢れている(図2)。しかし、大気中で水素だけでは極めて不安定であり、単独で存在する量は少ない。逆に水素と結合した物質は安定である。その代表格である水(H₂O)から水素を取り出そうとすると、水にエネルギーを与える必要がある。その一番手軽で効率の良い方法が、電気分解である。他にも多くの水素発生法があるにもかかわらず、水素発生効率からすると電解は優れている。(Chan・南, 2009) 水素は酸化等の化学反応によって、ミリ秒の間にエネルギーを放出できる一方で、数年以上の長期間に亘りエネルギーを水素という形で保存することが出来る。エネルギー放出と貯蔵の両面で、電池とは一味違った優れた能力を持っていると言える。



図2：水は水素と酸素で出来ており、地球上を覆っている。

宇宙空間はプラズマ化した水素ガスで満たされているとあってよいが、特に恒星は水素を主体とした核融合反応で光や粒子をエネルギーとして放出している。イオン化した水素(H⁺)はプロトンあるいは陽子と呼ばれ、太陽からは秒速500 kmほどの速度で太陽系全体を満たしている。これを太陽風と呼ぶが、一般の星では恒星風という。また、宇宙で塵が集まり高温になって、今まさに星となろうとしている領域では、水素分子が多量にあり、周りに対して超音速の流れを作っている。我々の太陽は、あと約100億年は核融合反応の寿命があるが、太陽風を外部に噴き出すことも、同じ程度の年月は継続出来る。ちなみに太陽の重量は、10の30乗kgである。

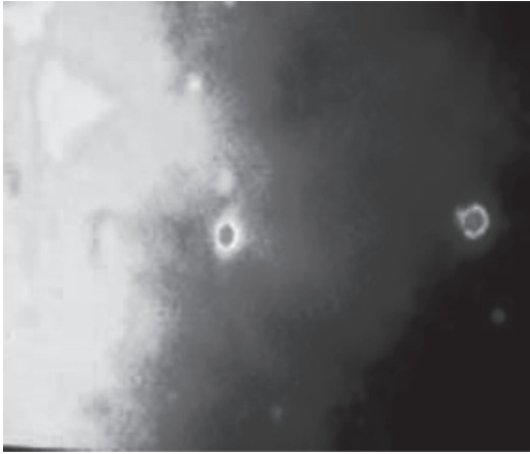


図3：オリオン座LL星(中央の星)の作る衝撃波構造

注：写真左から噴き出してくる水素分子流が、超高速で水素を放出している星に作用し、巨大なパラボラ状の水素発光をしている。

若い星の集まりであるオリオン星雲におけるオリオン座LL星は、約1,000万年で寿命を終えるほど大量の恒星風を、周りの超音速水素分子流に対して吹き出している。図3に筆者が20年前に撮影したオリオン座LL星周りの衝撃波構造を示す。宇宙の可視化された水素の構造を表している。

ここでは、水素はどのように身近なものなのかを、筆者の経験を通して述べる。筆者が水素を最初に扱ったのは、学生の時である。先に述べたように、太陽からは太陽風というプラズマ状態の水素(プロトン)がマッハ10程度の超音速で四方に噴き出している。米国に遅れること10余年、これを我が国宇宙探査機で測定しようという計画のための、初めての高速イオン測定器開発が研究テーマであった。直径50 cm程度の真空容器(チャンバー)があり、その裏側に水素を放電する装置があった。ところが、水素ボンベから放電させるための石英製容器までの間にバルブがなかった。

どのようにして、水素を導入するかというと、放電容器とつながったアルミニウム隔壁をヒーターで温めるのである。そうすると、水素は分子が小さいので、アルミニウムの結晶の間をすり抜けて通過できるのである。水素や容器に入れていても、それをすり抜けて出ていくことを初めて知った。水素分子は小さいため、水素を保存するには適切な容器が必要になる。これが、筆者の水素との最初の出会いであったが、初めはボンベのバルブを開けるのが怖かった。そのうち、都市ガスが使えるなら水素も似たものだ、危険性について思えるようになった。万全の気配りはするが、今では特別なためらいなく、バルブを開くことができる。燃料電池車についても、水素にはガソリンやLPG車と同じ程度の危険は付きまわっているのだ。要は、水素に親しむかどうかということになる。

容器からの水素漏れについての余談だが、戦時中9,000個におよぶいわゆる気球(風船)爆弾が、日本から米国本土に向けて放たれたことが知られている。米国にはその10%程度が落ちたとされているが、この被害は米国で当時恐怖心を巻き起こしたので、事件としては秘匿されたという。この気球爆弾は、精密な気球観測結果を用い、高度10 kmを圧力計で自

動的に維持しながら、偏西風に乗せて-50℃の環境下で滞空し、100時間を経て到着した。この気球は、水素漏れを防ぐため、こんにやく糊で張り合わせた和紙で出来ており、ゴム膜よりも優れていたことも確かめられている。水素発生には、水の電気分解法と苛性ソーダ、ケイ素、水による方法が陸海軍で使われた(Wikipedia, 2014)。水素というと、ヒンデンブルク飛行船の事故によって、爆発の危険性を心配する方が多い。実際は、その事故も静電気による放電で外皮塗料が燃えたため、水素が燃焼しただけであり、ヘリウム気球であっても外皮破損で落下した筈とされている。

そもそも「燃焼」とは、火種から順次燃えていく現象だが、「爆発」はその限界を超える条件になった時、燎原の火があちこちで一斉に燃え上がるように、瞬時に全体が発火することを言う。水素の場合でも、燃焼速度は2.5 m/s程度であり、音速(空気で約300 m/s)よりはるかに遅い。ちなみに爆発速度は1,500から3,500 m/sで超音速であるが、特殊条件でしか起きない。空気中での爆燃燃焼限界は4~75%である。内燃機関もノッキングを除き、ガソリン等の燃料はシリンダー内では爆発ではなく、燃焼しているのである。火炎伝搬速度は0.2~0.4 m/sである。水素内燃機関エンジンの場合は逆に、いかにこの速度を上げて、希薄な状態で安定した駆動をさせるかが重要なテーマである。

水素での高速プラズマ発生装置について述べる。地球付近での太陽風は1 cm³あたり数個程度であり、1 W程度の高周波放電でそれを作ることが出来た。1980年頃から本格的に高密度のプロトン流を発生させるプラズマガンという装置を製作した。地球磁界が太陽風プラズマ流によって方向を曲げられて、地球周りのオーロラ現象などを引き起こすことを、実験的に再現するためであった。真空容器の中に水素ガスを入れて、それを20 kV、100 kA程度の電力で放電させると、10万分の1秒程度ではあるが、実に100万kWを超える電磁力が発生し、秒速100 km程度のプラズマ流を発生させることが出来た。この実験のために、100マイクロ秒程度で開く高速電磁弁を使い、水素をパルス的に投入した。この加速装置は当時大阪市立大学とロシア宇宙科学研究所、およびカリフォルニア大学にだけあって、種々の形を製作した。図4は筆者が実験に使用した、カリフォルニア大学の装置の写真である。1985年に滞在した際は、ハレー彗星が地球に接近したことに因み、なぜ彗星に尾が現れるのかを明らかにするための実験

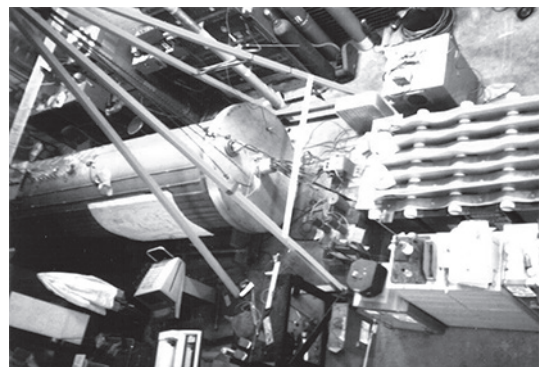


図4：プラズマガン装置とコンデンサ及びプラズマ風洞の写真

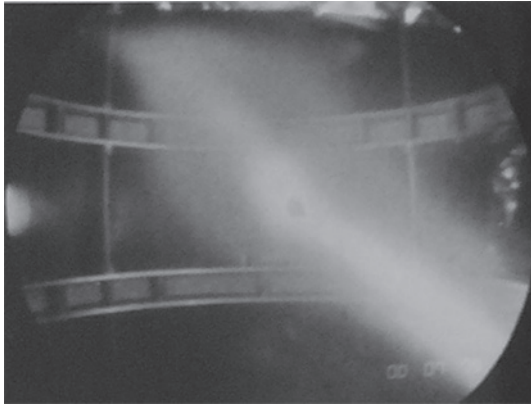


図5：太陽風が星間プラズマと接触してできる衝撃波構造のシミュレーション写真

にも使用した。太陽風が、太陽地球間距離の200倍程度離れているところで、銀河のプラズマと接触し、境界が作られるとされており、この形状がどうなっているかを明らかにする実験も大阪市立大学で行った（図5）。中央から先端まで実際には約300億kmもある。これを長さ数mの容器内で再現し話題になった。雑誌Natureでは、瓶の中の太陽圏(Heliosphere in a bottle)として掲載された。

これらの実験を通じ、水素に対する違和感が全くなかったと言える。余談だが、ロシア宇宙科学研究所の研究者とは、未だに研究仲間としてお付き合いさせていただいているが、カリフォルニア大学の装置は1990年になって解体されてしまった。図6に、1テスラ程度の電磁石によるダイポール磁場に、この高速プロトン流を衝突させて発生した、地球周りの様子を撮影した写真を示す。太陽からのプロトン流によって、磁力線が曲げられ、緯度70度付近にオーロラ粒子が光っていることがわかる。

宇宙工学の面での水素に関する経験について述べる。まず、1990年代に計画された金星探査機において、金星に軟着陸させるための気球に使う水素を、水素吸蔵合金を使って運ぶことの可能性について調べた。水素吸蔵合金は2質量%程

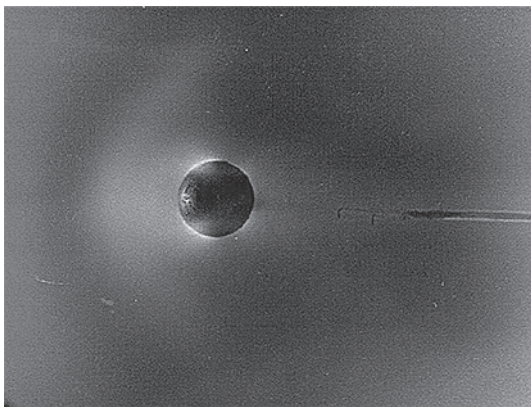


図6：太陽からのプラズマと地球磁場の相互作用の模擬実験の写真

注：左から超高速プロトン流を発生させ、地磁気に見立てた約1テスラのダイポール磁場に当てる。

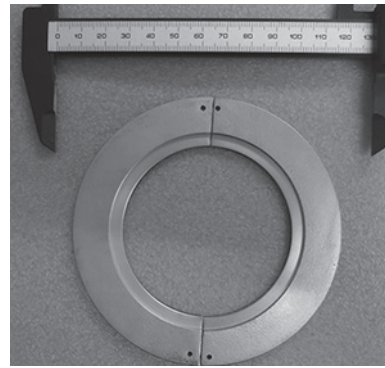


図7：水素を吸蔵した純チタンの写真

度のエネルギー密度であり、最新の「ミライ」燃料電池車タンクの5.7質量%である。水素吸蔵合金は、水素を比較的安全に貯蔵できる方法として研究されている。筆者は、プラズマガンに投入する水素を電磁弁の開閉で制御していたが、チタンに水素を吸蔵させ、放電の熱で自動的に水素を放電部分に供給できるようにした装置を作った。その際、純チタン1モルが水素1モルを吸蔵できることを知った。チタン表面を清浄にした後、真空中にて700℃程度に加熱し、水素を導入すると吸蔵が始まった。その結果、チタンの約100gの重さが2g程度増加したことに感激したことを覚えている。その際のチタンの写真を図7に示す。メタンガスに水素を混ぜて放電し、ダイヤモンド薄膜を作ったのもなつかしい思い出。

この水素吸蔵方式で大成功した例は、ニッケル水素電池である。充電時に発生する水素を、内蔵した吸蔵合金で吸収して、密閉型の電池として普及させることがなされている。筆者も初期のロケット実験で、装置をロケットから飛び出させる機構を加熱するために、真空でも使えるこの密閉型の電池を使用することができた。

ユニークな水素の利用法として、筆者が開発した直流用ヒューズへの適用がある。ヒューズに水素吸蔵した金属を入れ、ヒューズが発火すると、その熱で発生し遊離した水素によるプラズマが、その強い電子親和力でアーク放電中の電子を捕獲し、放電を短期に止めることができるのである。電気自動車などで使われる直流システムは、もし放電アークが発生すると遮断が極めて難しい。その対策として有効であることが分かった。図8は特性の例である。

ニッケル水素電池に使われる水素吸蔵合金は、水素が合金結晶の中に入り込むので、体積増減を繰り返す、その内結晶が破壊されて寿命となる。水素吸蔵合金は、水素吸収後に大気中に晒しても、暗赤色になるだけで、燃え上がることはなく安全であるが、繰り返しに対する耐久性が劣ると、高価で合金自体の重量がボンベに匹敵する重さを持つことが今のところ普及を妨げている。先のヒューズの場合は、使用しない場合は何10年も金属中に水素があり、一度溶解で高温になった時に気体になればよいので、優れた活用方法だといえる。

宇宙科学研究所は20年にわたりレールガン装置を運用しており、秒速6km程度で重さ約1gのプロジェクタイトル(弾)を発射可能である。1989年頃に、常温核融合の研究が流行した際、筆者はプロジェクタイトルに重水素を吸蔵させた0.5g程度

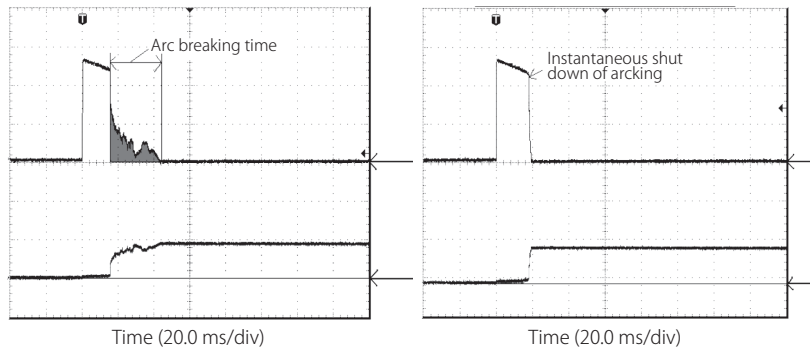


図8：水素吸蔵合金ヒューズによるアークの高速遮断の例

注：(左)水素なし(右)水素吸蔵ヒューズ。約1msでアークが遮断されていることがわかる(直流500A, 100V印加した場合の例)。

のパラジウムの弾を入れ、ターゲットに衝突した際に発生する衝撃で、核融合が起きないかどうか実験した。結果は、中性子は出なかったが、普通のクレータ形状ではなり2重穴が出来ることがわかった。これは雪に炭素粒が混ぜられた彗星核が月面等で作る可能性がある2重クレータ発生について研究するために役立った。

4. 水素社会の実現コストについて

長年電気自動車の開発を行ってきた筆者にとって、燃料電池車(FCV)との表立っての関わりは、京都で開催された「気候変動枠組条約」第3回締結国会議(略称COP3)に連系して、ドイツからダイムラーベンツ社副社長が来日し、京都でダイムラーベンツセミナー「燃料電池車」が開催されたことによる。このセミナーでは筆者がコーディネーターとして未来の燃料電池車について語り合った。その際、水素タンクを屋根に積んだNECAR2(New Car2の意味)に乗ることが出来た。

一般に工業製品の値打を決めるのは次の3つの要素である。すなわち、①性能、②安全性、③低価格である。種々の要素のうち、現時点での性能以外に、耐久性があつてこそ、高性能であるといえる。燃料電池にとって、①、②については、10年前も既に確立されていたといえる。水素を入れると燃料電池は、1分も待たずに電気を発生させてくれ、50%の効率をほぼ出力全域でもっていた。小さい燃料電池車から作っていこうと考え購入すると、性能は補償するが、きっと1,000時間で壊れるとメーカーに言われた。長らく燃料電池の問題点は、その高価さにあつた。なお、燃料電池は面白いことに、重水素だけでも発電する。

トヨタ自動車は、RAV4のFC車を販売していたが、これは1億円の値段に相当すると言われていて、月のリース代が80万円であった。今年発売の「ミライ」FC車は定価が7~800万円であるから、いかに劇的な価格改善が図られたかは想像を絶するものがある。

もちろん、価格だけではなく、長年に亘る厳しい振動や高熱・寒冷環境試験等で、信頼性が高まったからこそ、市販が可能になったのである。「ミライ」が販売普及すれば、それは、プリウスハイブリッドに次ぐ、人類の文明にとってトヨタ自動車の偉大なる業績となることは間違いない。

電気自動車の製作ハンドブック(南, 2011)を発刊した際、

自動車は実際にオーナーになって使ってみなければ、その良さも欠点もわからない点を特に強調した。燃料電池車も、試乗やカーシェアリングで乗っただけでは、思い入れを除けば、単なる自動車に過ぎないと感じるだけだ。実際に自らの経済力で所有しない限り、いくらそのような試乗記が1,000人によって語られても、それは表層を見つめただけでしかない。その意味で、FC車の販売が進み、良くも悪しくも未来をオーナーとして体験出来てこそ、今後の自動車文明を読み解くことが出来るのである。

水素の充填ステーションが少ないために、当面、水を電気分解してコンプレッサーで加圧して充填する方式も長年考えられてきた(図9)。一旦電気を水素に替えると、燃料電池で電気に変換するとき約50%のロスが発生するので、エネルギー的には賢明ではないが、充填ステーションが近くにない普及段階としては、このような方法も便宜的にあり得る。



図9：一つの小型ユニットに電解装置とコンプレッサーを入れた10年前の水素発生器の写真(Stuart Energy Systems社)

燃料電池と言えば、効率が良いシステムに思えるが、電気自動車は80%、燃料電池車は50%、エンジン車は20%というのが、大よその効率である。従って、出力50kWで走行中すると、同じだけの排熱を発生する。今度発売されたトヨタ「ミライ」が、不恰好に大きな空気取り入れ口をつけているのは、大量の熱が燃料電池から発生することに起因する(図10)(コンセプトカートヨタFCV2013)。

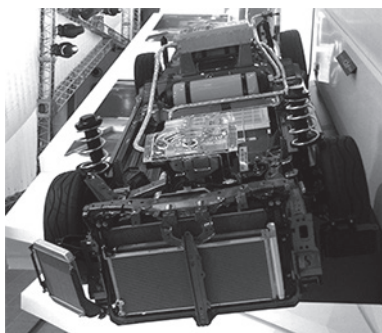


図10：トヨタ自動車コンセプトカー FCV (2013) の大面積ラジエータ部の写真



図12：製作した圧縮水素を用いた小型燃料電池車の例

水素を700気圧のガスとして自動車に搭載するには、ガスの価格以外にコンプレッサの電気代も無視できない。最近の最新鋭の水素圧縮機(Linde製IC90)では、900気圧までの水素圧縮を50気圧から行う場合、2.7 kWh/kg-H₂となっており、40%の改善がなされたとある(図11)。10年前の日本の水素プロジェクトでも、3~5 kWh/kg-H₂となっており、これは最もよかった値ではないかと思われる。Linde社の圧縮機でも、約10円/Nm³の圧縮電気代金が発生するから、輸送費も含め、水素が無料で手に入ったとしても、それ以下の値段に水素になることは当面ないことを心得る必要がある。

Ionic compressor 90MPa "IC90"

THE LINDE GROUP

Performance

- Ionic compressor for H₂
- 5-stage compression
- Stage compression ratio: 1:2.8
- Max. delivery rate: 370Nm³/h ~ 33.6kg/h
- Min. input: 5bara
- Max. output: 1,000bar
- Power consumption at 5bara inlet pressure: 75kW
- Stroke frequency: 5,8Hz
- Specific energy consumption: 2.7kWh/kg H₂ (= energy saving of around 40%)¹⁾

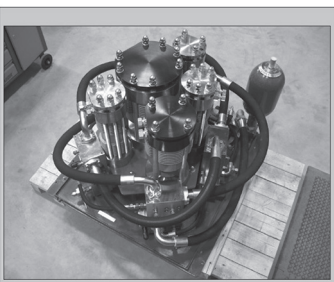


図11：Linde社のコンプレッサの写真

注：Linde社によると、2.7 kWh/kgH₂と記載され、約900気圧にするために約0.27 kWh/Nm³の電気代が必要である。
出典：The Linde Group (2014). From prototype to serial production manufacturing hydrogen fuelling stations.

5. 燃料電池車の将来像

筆者は1995年から電気自動車の製作を始めた。将来、新しい部品を入手することが困難になった時を想定して、既存の中古部品から電気自動車を作り、オーナーになって初めてわかるその利点欠点を体験してきた。その際、燃料電池に着目し、燃料電池で動く乗り物である小型電気自動車(図12)や燃料電池船(図13)を作った。この結果をもとに、河川や湖で使用できる観光用の燃料電池船について実験的に検討した結果、20m長さの双胴船では、速度6km/hを5kWのパワーで運行可能であり、8時間航行には30Nm³の水素が必要であることを明らかにした。



図13：大阪観光船設計のために試作した水素ボンベ搭載燃料電池船の例

今後、水素をエネルギー源とした自動車や船の開発が進むと考えられ、それが新たな産業を生むことになるだろう。日本では船の実用化はまだこれからの段階にある。

6. 結論

本稿では、その前半で、水素を使った筆者の経験を通じて、水素の魅力的な特徴と、その身近さについて触れ、水素は他のエネルギー源である都市ガス(メタンガス)やガソリン等と同じ程度の配慮をすれば、安全に扱えることを示した。後半では、燃料電池車「ミライ」の発売に際し、その開発に対するメーカーの高い志について述べ、今後の水素社会の普及に向けて産業界の考えるべき、基本的な理念について考察した。

引用文献

- Chan, C.C.・南繁行(2009). 電気自動車の実像—EV・HEV・FCVの最新技術とその将来展望—. ユニオンプレス.
- 南繁行(2010). 電気自動車ブームの本質. R&D News Kansai, Vol. 455, 1.
- 南繁行(2011). 普及に向けた電気自動車製作技術 改訂版. ユニオンプレス.
- Wikipedia(2014). <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%A2%A8%E8%88%B9%E7%88%86%E5%BC%BE>.

(受稿：2014年11月10日 受理：2014年12月8日)