Q&A

PANA

著作権等の理由により画像を掲載することができません。

技術

Hydrogen-fuelled vehicles

水素自動車の意義と研究課題

Louis Schlapbach

Nature Vol. 460(809-811)/13 August

水素は、石油に代わる無公害の合成燃料として、特に輸送分野での利用が期待されている。その実用化には、特に、水素貯蔵材料を開発する必要があるが、いよいよ数年後には最初の水素自動車が市販されるかもしれない。

水素はなぜ輸送用燃料として優れているのか？

水素は周期表の中で最も軽い元素だ。それゆえ、水素分子の質量当たりのエネルギー密度はすべての化学物質の中で最大となる。燃料の重量を最小限に抑える必要があるロケットに、水素燃料が使われるのはそのためだ。水素は炭素を含まず、毒性がなく、酸素とともに熱的または電気化学的に燃焼すれば、エネルギーと水だけしか生じない。空気中で燃焼すると大気汚染物質である一酸化窒素 NO を生成することがあるが、それは制御可能な量にとどまる。もう 1 つ、水素の主要な供給源が水であり、水は基本的に無制限に存在する資源だという利点がある。

水素燃料の欠点は何か？

主な問題点は、水素が室温では気体の形で存在しているため、非常に大きなスペースを占めてしまうこと。これが輸送用燃料として実用化する際の問題点で、何らかの方法で気体を圧縮して、十分にコンパクトにしなければならない。これほど明白ではないが、もう 1 つ重要な問題は、水素はエネルギー担体であり、エネルギー源ではないことだ。太陽光、化石燃料、水力、原子力などの真のエネルギー源とは違い、自然界から十分な量を入手することはできない。そこで、水を水素と酸素に分解する方法で発生させなければならない。そのため、電気、光、熱、化学物質などの形のエネルギーが必要

になる。とはいえ、そのエネルギーの大半は、水素の燃焼によって回収される。

水素は爆発しやすく、危険なのではないか？

実際には、ガソリンと同程度。水素と聞くと、1937年に起きた飛行船ヒンデンブルク号の爆発炎上事故を思い浮かべて、燃えやすく危険なのではないかと心配する。しかし、あの事故の本当の原因は、浮揚ガスに水素を使っていたからではなく、外皮が非常に燃えやすい材料でできていたからだ。もちろん、水素と空気の混合物がかなり広い組成幅で燃焼するのは確か、水素の体積比が4～75%だと燃える（ガソリンと空気の場合、ガソリンの体積比が1～8%のときに燃える）。さらに、水素はガソリンよりも揮発性が高く、空気中を拡散するのも速い。燃料漏れが起きたときの安全性を比較するマイアミ大学の研究から、水素自動車はガソリン自動車に比べて明らかに火災のリスクが低いことが示されている。

水素燃料を普及させるためには何が必要か？

3つの重要なステップがある。第一に、大量の水素を経済的に生産する方法を開発しなければならない。ここで、再生可能なエネルギー源を利用することができれば理想的だ。電気と若干の熱をエネルギー源として利用する最先端の水分解技術は、エネルギー効率が非常に高く、将来的には採算が合うようになるだろう。第二に、水素の供給・貯蔵システムが必要である。都市や産業用地にある既存のガス供給網を利用して大量の水素を供給することは可能だが、水素を輸送用燃料として利用するためには、移動式の水素貯蔵車と供給ステーションが必要であることは明らかだ。既に名古屋の中部国際空港やベルリンでは試験的に水素ステーションが建設されて、水素バスに燃料を供給しているが、全国的な水素供給網はまだ建設されていない。なお、ドイツでは水素供給網を設計するためのツール（H2invest）が開発されている。第三のステップは、水素中に蓄えられた化学エネルギーを使いやすい形のエネルギーへと変換する技術と装置を開発することである。現時点では、水素内燃機関で熱エネルギーを生成するか、水素燃料電池（図1）で電気エネルギーを生成することができる。

既存のエンジンを改造して水素燃料で動かせないのか？

少々改造でできるが、長期的にみると、持続可能な解決法とはいえない。なぜなら、内燃機関で、化学エネルギーを熱エネルギーを経て機械的エネルギーへと変換する効率は低いからである。一般的な交通状況で、典型的なガソリン自動車のエネルギー変換効率は10%をわずかに上回る程度でしかない。水素燃料電池と電動モーターを組み合わせた伝動装置の効率は、これよりはるかに高くなると考えられている。し

図1 水素燃料電池。燃料電池の中では、水素を電気化学的に燃焼させてエネルギーを発生させる。(a) 電池の負極に水素を供給し、その水素分子が水素原子へと分解される。(b) 負極を裏打ちしている触媒は、この水素原子を水素イオン (H^+) と電子に分解する。水素イオンは負極と正極の間のポリマー電解質膜を通過するが、電子は外部の回路を通過して正極に到達しなければならないので、電流が流れる。(c) 正極には酸素が供給されて電子や水素イオンと反応し、唯一の副産物である水を作る。水は電池から流れ出る。

かし、経済的な伝動装置の開発は、予想よりはるかに難しいこともわかってきている。

その伝動装置の開発に関して、何が問題になっているのか？

おもな問題は3つある。第1はコストで、一般的な燃料電池が必要とする触媒には、希少で高価な元素が含まれていることだ。第2の問題は燃料電池の寿命の短さである。しかし、いくつかの企業は、こうした問題を克服し、輸送に使える可能性のある水素燃料電池の開発に成功している。それゆえ、現時点で残っている大きな問題は、室温に近い温度と大気圧より少し高い程度の圧力で水素ガスを燃料電池に送り込むことのできる、軽量でコンパクトな水素貯蔵システムを開発することだけである。米国エネルギー省が設定している現在の研究開発目標値は、2015年までに水素重量貯蔵密度を5.5%にすることだ。

水素自動車はどのくらいの水素を貯蔵する必要があるか？

現代の技術で5人乗り自動車を製作すると、重量は1.2～1.5トンになる。ここに30～35リットルのガソリンまたは軽油を入れたら、燃料とタンクを合わせた重量は80キログラムになり、500キロメートルは走行できる。同じ車体に水素燃料電池と電動モーターを組み合わせた伝動装置を取り付けた場合、同じ距離を走るには約5キログラムの水素

が必要になる（水素内燃機関の場合なら 10 キログラム以上必要）。問題は、5 キログラムの水素が、室温・室圧では約 5 万 6000 リットルものスペースを占めることだ。これは、直径 4.8 メートルの風船に相当する。ゆえに、この体積を 1000 分の 1 にする技術開発が不可欠となる。

圧縮あるいは液化して体積を減らせないのか？

できなくはないが、自動車の水素貯蔵システムとしては実用的でない。まず、水素が理想気体のように振る舞うなら、体積を 1000 分の 1 に圧縮するには、大気圧の 1000 倍にあたる 100 メガパスカル（100MPa）の圧力をかけなければならない。しかし、水素が理想気体のように振る舞うのは約 10MPa までである。極めて高圧のガスを貯蔵するとすると、安全面の懸念も大きくなる。ゆえに、水素ガスを 100MPa 以上に圧縮するのは名案とはいいがたい。一方、宇宙工学分野で用いられている液体水素は、エネルギー密度は非常に高いものの、温度を -250°C 以下にする必要がある。一般のガソリンスタンドにこうした低温貯蔵施設を整備するのは、不可能ではないが非常に困難だ。また、水素ガスの化学エネルギーの約 30% が、液化の過程で失われてしまうという問題もある。

では、どんな方法で水素の体積を減らせばよいのか？

ある種の固体材料に水素を可逆的に吸収させたり、その表面に吸着させたりすることで、水素の体積を大幅に低減することができる。水素を吸着した固体材料を加熱したり、水素ガス分圧を低下させたりすることで、水素ガスを放出させることができる。水素貯蔵材料は、吸着の機構により、主に 2 種類に分けられる。1 つは物理吸着であり、水素分子は材料によってわずかに吸着されるが、化学的に反応することはない。もう 1 つは化学吸着であり、水素分子は材料の表面と反応して水素原子へと分かれ、これが物質内部に吸収されて、材料との間で金属結合、共有結合あるいはイオン結合を形成する（図 2）。

水素を物理吸着する材料にはどのようなものがあるか？

一部の黒鉛系材料や多孔性化合物など、単位質量当たりの表面積が大きい材料がある。水素重量貯蔵密度は最大で約 8% に達する。問題は、平坦な表面では物理吸着が弱いことである。そのため、実用的な量の水素を吸着させるためには、液体窒素の温度に近い -200°C よりも低い温度にする必要があることが多い。強い物理吸着がみられるのは、小さくて曲線的な孔をもち、その表面が水素を引きつけるような原子で修飾されている材料である。ゼオライト（アルミノケイ酸塩）や金属-有機構造体（金属イオンと剛直な有機分子からなる錯体）は、これらの特徴をもちうる可能性があり、いつの日か室温での水素の物理吸着を可能にすることが期待されている。

水素を化学吸着する材料にはどのようなものがあるか？

水素は多くの材料（金属や合金が多いが、それ以外の化合物のこともある）と化学反応して水素化物をつくり、これらは水素貯蔵媒体として利用できる。しばしば $20 \sim 100^{\circ}\text{C}$ という現実的な温度で高速かつ可逆的な反応を起こし、大量の水素を吸収したり、放出したりすることができる。水素貯蔵のために広範に研究されている材料には、元素状金属（マグネシウム、パラジウム、トリウム）の水素化物、 AB_5 （通常は A も B も金属元素）の形で表される化合物の水素化物（ランタン-ニッケル水素化物 LaNi_5H_6 など）のほか、いわゆる「複合水素化物」（マグネシウム-ニッケル水素化物 Mg_2NiH_4 やバリウム-ロジウム水素化物 BaRhH_9 など）がある。

水素化物を利用した水素貯蔵システムの性能は？

水素化物における水素体積貯蔵密度は液体水素よりもはるかに高く、数万回も再充電することができる。しかし、ホスト材料が軽いとはいいがたいため、水素重量貯蔵密度は 4% 以上にはなっていない。現時点では、これらの化合物の大半は、水素重量貯蔵密度が低すぎるか、貯蔵した水素を放出させるのに必要な温度が高すぎるため、移動式水素貯蔵システムに応用できるとは考えられない。しかし、その水素体積貯蔵密度の高さと安全性は魅力的である。

これまでの水素化物研究が実を結んでいないということか？

そんなことはない。この分野からは多くの有用な発見があった。金属水素化物は現在、市販のハイブリッドカーなどのバッテリーの電極として利用されている。これらのバッテリーは安全で、コンパクトで、急速再充電が可能である。金属水素化物は航空機のある種の温度センサーの基礎にもなり、将来的には、窓の透明度を制御するインテリジェント・コーティングにも利用されるようになるかもしれない。さらに、金属水素化物研究の過程で発見された水素粉碎技術は、現在、永久磁石の製造に用いられている。

最新の水素貯蔵材料にはどのようなものがあるか？

近年の研究では、軽い元素の複合水素化物を利用した固体貯蔵か、このような材料を満たした高圧（35MPa）のタンクに注目が集まっている。こうした複合水素化物には、 AlH_4^- イオンを含むアルミニウム水素化物、 BH_4^- イオンを含むホウ素水素化物、リチウムと窒素と水素を含むアミド・水素化物、あるいはこれらの組み合わせがある。その魅力は水素重量貯蔵密度が 8 ~ 20% と高いことにある。これらの材料の水素化物の生成と分解は、複数の段階を経て、中間化合物を形成しながら進んでいく。研究者たちは、実験とモデル化を通じて、これらの反応を微調整し、水素の放出速度を上げる触媒の発見をめざしている。この取り組みから、20 ~

図2 水素貯蔵材料における吸着の機構。a. 多孔性の材料は物理吸着によって水素を貯蔵する。ここで、気体分子は材料の表面に蓄積するが、化学的に反応することはない。b-d. ある種の金属、合金およびその他の化合物は、化学吸着により水素を貯蔵する。ここで、水素分子は材料の表面と反応し (b)、ばらばらの原子に分かれる。その水素原子は、当初は宿主材料中のランダムな場所に入る (c)。これらはしだいに金属原子との間で金属結合、共有結合あるいはイオン結合を形成し、水素原子が規則的に配列した水素化合物を形成する (d)。

100℃の温度で水素を吸着・放出する材料が開発されるはずである (ちなみに、現時点では 300℃以上の温度が必要)。しかし、これらの材料が実用化されるまでには、かなりの時間がかかるだろう。注目の水素貯蔵法はもう1つある。それは、液化炭化水素を水素ガスの供給源とする方法であり、以前にも研究されていたが、性能の低さから、いちどは断念された方法である。この過程では副産物として脱水素された炭化水素が生じるため、リサイクルセンターで再び水素化して、さらなる燃料をつくりだすことができる。

水素自動車はいつ頃市販されるのだろうか？

ドイツと日本の水素燃料バスは既に成功している。また、これまでに約 50 台の水素自動車 (内燃機関式のものと同燃料電池式のもの両方) が試作され、良好な結果を出している。したがって、5 年後くらいに水素燃料電池と電動モーターを組み合わせた水素自動車が市販されるようになって不思議ではない。

自動車の燃料には、ほかにどのような選択肢があるか？

今日のガソリン自動車の普及ぶりを考えれば、今後もしばらくは石油系燃料が主流であり続けることは明らかである。ただし、石油系燃料は供給に不確実性があるため、将来的には使われなくなるだろう。安全性の高いリチウム電池やリチウム-空気電池、容量の大きい金属水素化合物電池など、新しいタイプの充電可能なバッテリーは、市街地走行向けの純電気自動車やハイブリッドカーの市場を生み出す可能性がある。とはいえ、ガソリン自動車の所有者の大半が純電気自動車に乗るようになったら、多くの国では発電量を2倍にする必要があることに注意しなければならない。水素を生産するためにも電気などのエネルギーが必要になることも忘れてはならない。

今後、ほかの燃料との競争はどのように展開していくか？

これは、自動車デザインの流行と水素技術の費用対効果に

よって変わってくる。水素自動車は既に技術的には可能になっているが、これが普及するためには、ほかの燃料を使用するタイプの自動車と張り合えるだけの経済性を備えていなければならない。重量1トン程度の比較的小型の自動車については、数年以内にそれが実現するかもしれない。比較的小型の自動車が好まれるようになれば、新しい市場にはずみがつくことになるだろう。この10年間、自動車メーカーは軽量で高強度の材料を使用するようになっているが、その一方で、車体を大型化して、馬力や快適さや安全性を高めようとしているため、自動車の平均総重量は増加傾向にあるのだ。

水素燃料は、今後、どうなっていくのか？

自動車の購入者が小型車を好む傾向は、弱いながらも確実に存在している。今後、自動車の価格や燃費が重視されるようになるにつれ、この傾向は強まっていくだろう。運転者に警告を発するだけでなく、自動車本体に直接作用する新しい安全装置は、事故が発生する確率を低下させ、車両を嚴重に保護する必要性を軽減するだろう。これにより、車両の軽量化と、水素自動車の普及への道が切り開かれるだろう。ゆえに、長期的な輸送戦略において水素が一定の役割を果たすことは明らかだ。しかし、これを確実に成功させるためには、適切な目標を設定し、最高の科学者と技術者を長期的に支援していくことが必要である。(三枝小夜子 訳)

Louis Schlapbach、スイス連邦材料科学技術研究所と日本の物質・材料研究機構 (つくば)

1. Leon, A. (ed.) *Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications* (Springer, 2008).
2. Züttel, A., Borgschulte, A. & Schlapbach, L. (eds) *Hydrogen as a Future Energy Carrier* (Wiley-VCH, 2008).
3. Crabtree, G. W. & Dresselhaus, M. S. The hydrogen fuel alternative. *Mater. Res. Soc. Bull.* 33, 421-428 (2008).
4. Oumellal, Y., Rougier, A., Nazri, G. A., Tarascon, J.-M. & Aymard, L. Metal hydrides for lithium-ion batteries. *Nature Mater.* 7, 916-921 (2008).
5. Harris, I. R., Book, D., Anderson, P. A. & Edwards, P. P. Hydrogen storage: the grand challenge. *Fuel Cell Rev.* 1, 17-23 (2004).
6. Hydrogen and fuel cells. <http://www.netinform.de/h2>