慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	水素燃料電池自動車模型H-racerの使い方とその性能
Sub Title	Adjustment and performance of the H-racer, a toy of hydrogen fuel cell car
Author	向井, 知大(Mukai, Tomohiro) 大場, 茂(Oba, Shigeru)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2011
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of the natural science). No.49 (2011. 3) ,p.19- 36
JaLC DOI	
Abstract	慶應義塾大学日吉キャンパスにおける文系学生を対象とした化学実験のテーマの1つとして, 燃料電池に関する実験を行っている。平成19年度から水素燃料電池自動車模型H-racerの使用を開始した。しかし, なかなか思うようには動かないため, 根本的な解決法を探していた。今回外部電源として, ACアダプターを試すことを契機として, 大幅に状況が改善された。その理由は, 燃料注入前の空気抜きの手順を修正し, また燃料注入量を十分に増やしたこと, ならびに乾電池の電力低下の問題が解消されたからであった。使用する電源(AC アダプター, 乾電池, ソーラーパネル)による水素発生速度の違いを明らかにするために, 水の電気分解器(水素ステーション)稼働時における電圧と電流を測定し比較した。また, 高分子形燃料電池セルの特性についてもあわせて考察した。
Notes	研究ノート
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20110331-0019

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

Hiyoshi Review of Natural Science
Keio University No. 49, 19-36（2011）

水素燃料電池自動車模型 H-racer の使い方とその性能

向井知大・大場　茂

Adjustment and performance of the H-racer, a toy of hydrogen fuel cell car

Tomohiro Mukai and Shigeru Ohba

概要

慶應義塾大学日吉キャンパスにおける文系学生を対象とした化学実験のテーマの１つとして，燃料電池に関する実験を行っている。平成19年度から水素燃料電池自動車模型 H-racer の使用を開始した。しかし，なかなか思うようには動かないため，根本的な解決法を探していた。今回外部電源として，AC アダプターを試すことを契機として，大幅に状況が改善された。その理由は，燃料注入前の空気抜きの手順を修正し，また燃料注入量を十分に増やしたこと，ならびに乾電池の電力低下の問題が解消されたからであった。使用する電源（AC アダプター，乾電池，ソーラーパネル）による水素発生速度の違いを明らかにするために，水の電気分解器（水素ステーション）稼働時における電圧と電流を測定し比較した。また，高分子形燃料電池セルの特性についてもあわせて考察した。

１．はじめに

石油などの化石燃料に代わるエネルギー源として，水素を用いた燃料電池の自動車への実用化は急務と思われる。水素を注入するだけで走る模型自動車を実際に走らせることにより，ガソリンに代わる新しい燃料として，実感することができる。しかし，ホライゾン社製の燃料電池自動車模型 H-racer を学生実験に導入してみたものの，前もって調整してもまったく動かないときもあった。今回，偶然にもその原因および対策がわかった。これをよい機会ととらえ，これまで疑問に思ってきたことについて実験をまじえて調べ，まとめることにした。

慶應義塾大学化学教室（〒 223-8521 横浜市港北区日吉 4-1-1）：Department of Chemistry, Keio University, Hiyoshi 4-1-1, Kohoku-ku, Yokohama 223-8521, Japan. ［Received Sep. 22, 2010］

2．自動車模型と水素ステーションの構造

2－1．自動車模型の構造

自動車模型 H-racer の構造を図 1 に示す。燃料電池のセルが車体の中央に置かれていて，車の上側の面が燃料極，下側が酸素極である。車に水素を補給する際，燃料注入口から入った水素は一旦セルの上側の電極部分を経由して水素タンク（風船）へ送られる。車体の底には穴があいていて，セルの下側の窓から外気（酸素）を取り込むようになっている。

2－2．水素ステーションの構造

水の電気分解器（水素ステーション）の配管の様子を図 2 に示す。正極側（図 2 b）では，水のタンクの下の穴 E から水を取り込み，セルの中で水が分解して酸素が発生し，タンクの途中の穴 H から水中へ放出される。また，それと同時に生じたプロトン H^+ は中央の高分子膜を通過して負極側（図 2 a）へ渡り，そこで電子を得て水素となる。バルブ D は通常閉じているので，長いチューブの先端 A から水素が流れ出る。反応式は次の通りである。

正極：$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$

負極：$4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$

水素ステーションの電気回路を簡略化して示すと図 3 のようになる。ステーション本体の底部に乾電池（単三 2 本）を入れて使うこともできるし，ソーラーパネルを使って外から電力を供給することもできる。つまり，太陽光による水の電気分解も可能だが，水素の発生速度が非常に遅いし，室内の実験には不向きなため，通常は乾電池を使用する。スイッチを入れると，警告灯（LED）が点滅する。これは，スイッチの切り忘れを防止している。取り扱い説明書には，水素ステーションを連続して20分以上使うと壊れる可能性があると書かれている。[2] スイッチを外部入力の方に入れても，乾電池の方に入れても，警告灯はセルに対して並列となり点灯するように回路が組まれている。

2－3．バルブの構造

チューブを接続するための継手には，オスとメスとがある（図 4）。バルブはメスの継ぎ手の中にあり，オスを接続すると開き，切り離すと閉じる仕組みになっている。メスにオスを差し込むときに，押して時計まわりに約90°回すが，そのときに，オスの先端の部分 C がメスの中心に入っている金属棒の先端 H を押すため，コマ K がおりて隙間が生じ，気体がメスとオスの間を移動することが可能となる。このとき，メスの中のスプリング S は縮んだ状態となっている。また，オスの先端の横についているツメ B がメスの溝 A にはまるので，はずれないように固定される。接続を切るときは，メスに対してオスを前と反対側（反時計回り）に約90°すばやく回す（これでツメ B が溝 A からはずれ，オスはメスから切り離される）。この回してはずすときに，オスを押してはならない。なぜならば，メスの中のコマ K をできるだけ

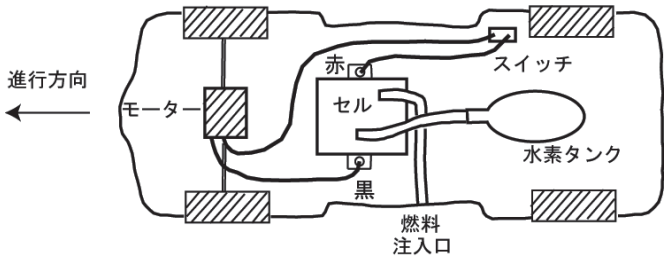
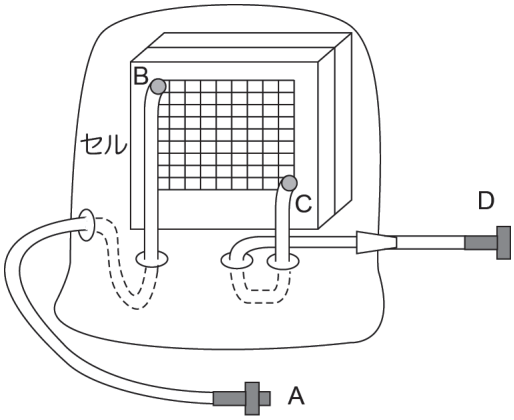
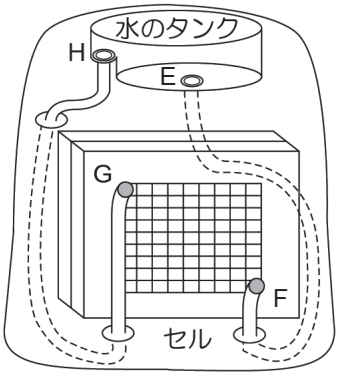


図１．燃料電池自動車模型の構造



(a)



(b)

図２．水素ステーションの配管，(a) 負極側と (b) 正極側。負極側のセルの出入口ＢとＣは，それぞれ長いチューブ（先端がオスの継ぎ手Ａ）と短いチューブ（先端がメスの継ぎ手Ｄ）につながっている。正極側のセルは，下の入口Ｆから水を取り込むために，水のタンクの底の穴Ｅとつながっている。水の電気分解によって発生した酸素は，セルの出口Ｇからあふれ出てタンクの横の穴Ｈから水中に放出され，気泡となって現れる。なお作図の都合上，水のタンクを実際よりも小さく浅く描いている。

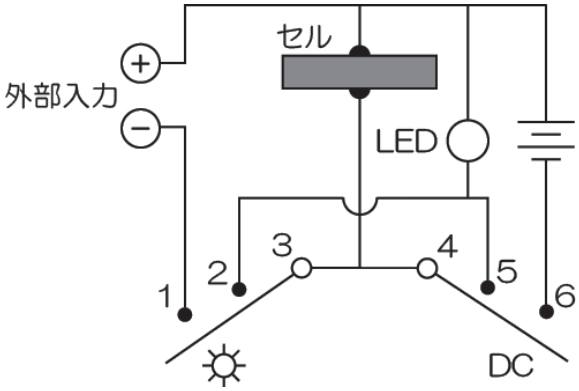


図３．水素ステーションの電気回路。図ではスイッチがOFFの状態を示している。スイッチを太陽マークの方に入れると，１,２,３が結線され，外部入力の電源が使用される。スイッチをDCの方に入れると，４,５,６が結線され，内蔵された乾電池が使われる。乾電池を取り去り，外部入力の電源もつながない状態でスイッチをどちら側に倒しても，セルとLEDだけの回路ができる。

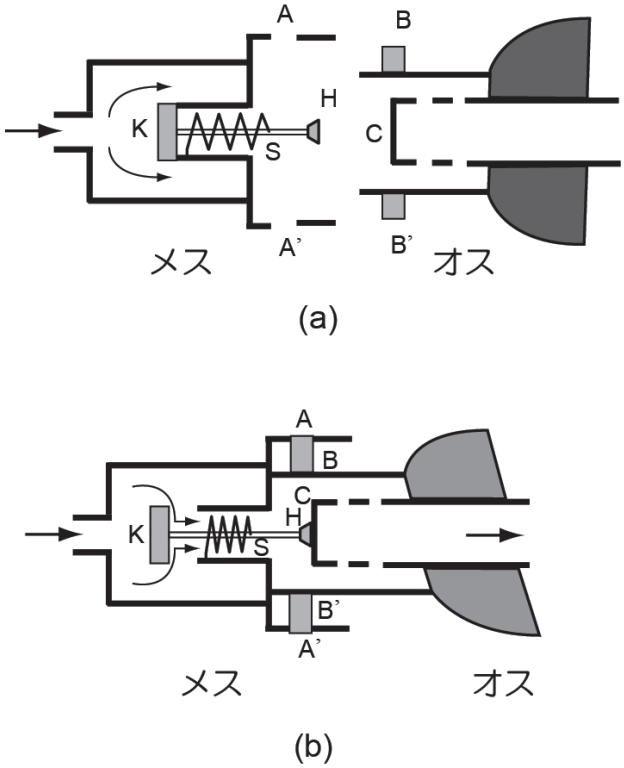


図４．バルブの構造，（a）継ぎ手のメスとオスの接続前と（b）接続後。オスを押しながら約90°時計回りに回転させると，ツメBが溝Aにはまって固定される。また，オスの先端Cがメスの心棒のヘッドHを押すので，コマKもそれに伴って動き，窓があくためメスとオス間での気体の流通が可能となる。接続していない状態では，スプリングSの力でコマKを引っ張っているため，バルブが閉じている。

速く閉じて，燃料などが漏れないようにしたいわけで，そのためにスプリング S の力で閉めようとしている。ところが，オスを押していると，コマ K のところの隙間が空いた状態ができてしまい，タンクの中の加圧された燃料が外に漏れてしまうことになる。

3．燃料電池自動車模型 H-racer の使い方

3－1．これまでの経過

平成19年に燃料自動車模型 H-racer を購入して，その年から学生実験に使用した。付属の水素ステーションは，太陽光パネルを接続して使うことも可能であったが，実際上不便であるので，乾電池を入れて室内で使うことにした。最初に購入したときの使用説明書[2] をもとに，次のような操作手順で実験することにした（これを手順 A とする）。

手順 A：①チューブつき注射器を車体側面の燃料注入口につなぎ，水素タンク（小さい風船）内の空気を吸い出して除去する。②水素ステーションの背面にあるスイッチを OFF から DC に変え，水を電気分解する。1 分程度，予備発生させてから（チューブ内の空気を水素で追い出してから），水素ステーションのチューブを燃料注入口につなぐ。水素タンクがふくらんで満タンになったら，注入をやめる。③直線距離を長くとれる場所で，車体の底のスイッチを入れて車を走らせ，何秒走ったか記録する。

この方法で，実験すると，走行時間は 7 ～59秒で，平均で25秒程度であった。複数のクラスで連続して使用していると，走行時間が平均で10秒程度という状態となってしまった。これは乾電池が弱まり，水素の発生速度が遅くなるためであった。また，タイヤのゴムがシャーシと接触していると，まったく回転しなくなること，また使用直前に H-racer のセルを活性化しておく必要があることがわかった（H-racer の活性化の方法については付録を参照）。しかし，それでもパワー不足であり，本質的な改善が必要だと感じていた。

3－2．AC アダプターの利用

水素発生速度が H-racer の走行持続時間に効いてくる。水素ステーションに新しい乾電池を入れても，使用した翌日には水素の発生スピードが遅くなってしまう。H-racer には AC アダプターは付属されていなかったが，ドイツの h-tec 社製の燃料電池実験器用 AC アダプター（5 V）は持っていた。そのセルの大きさならびに電気分解器としての規格は，水素ステーションとほとんど同じと推定された。この AC アダプターの先端には小さいバナナチップがついていて，ちょうど水素ステーションの外部入力用端子にはまる大きさであった。そこでこのアダプターを電源として使ってみたところ，あきらかに水素発生スピードが上がった。また，H-racer の走行時間は 3 ～64秒（平均29秒）で，やや性能が向上した。

その後，実験に使用するために自動車模型の試運転をしていたところ，燃料タンクの風船がこれまでに見たこともない位にふくらんだ（図 5 ）。しかもタイヤの回転が驚く位に勢いがよくなった。風船を入れてある円筒形のプラスチック容器の内側に密着するほど，風船がふくら

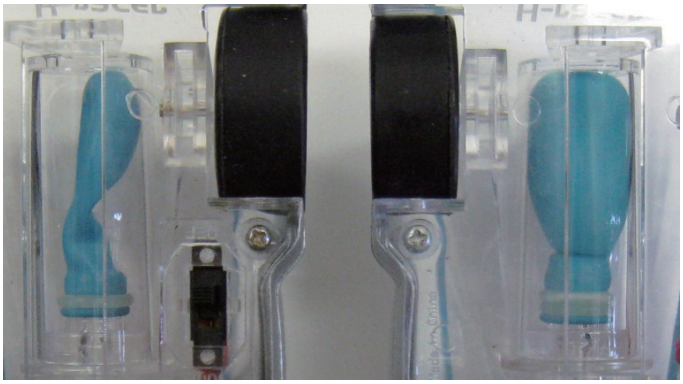


図５．（左）水素注入前と，（右）注入後の風船。中央に黒く見えているのはタイヤである。

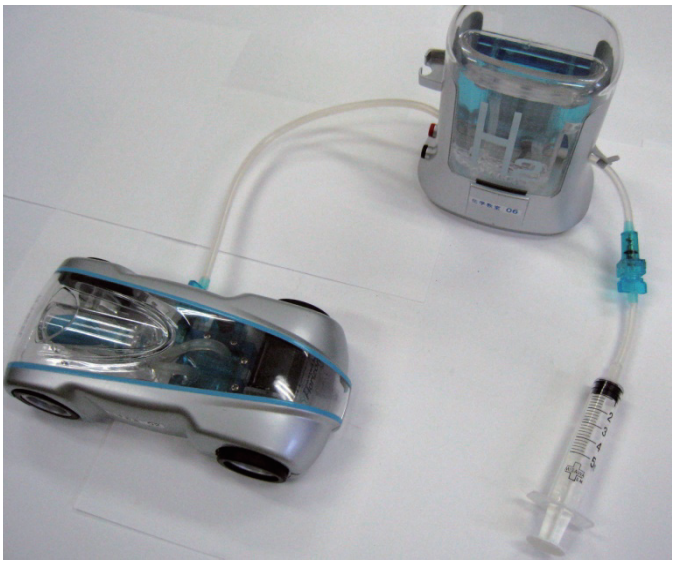


図６．手順Ｂでの空気の抜き方

んでいたが，このような使い方をして問題がないか不安であったので，使用説明書を読み直した。そして思いがけず，燃料注入の手順が根本的に間違っていたことに気付いた。また，風船はプラスチック容器内で十分膨らませて使うように初めから設計されていたことがわかった。なぜこのような間違いが起こったのか検討したところ，最初に H-racer を購入したとき，操作手順が簡略化されたマニュアル（操作手順 A を記載）[2] が同封されていたからであった。後から教材として５台を追加購入したが，その使用説明書[3] にはまったく別の操作手順（これを手順 B とする）および使用上の注意が詳しく書かれていた。

手順Ｂ：水素ステーションの横についている小さい灰色のふたをあけ，小さいノズルにバルブつきの短いチューブを差し込む（図６）。①水素ステーションの長い方のチューブを，車体

側面の燃料注入口につなぐ。②水素ステーションの短い方のチューブに，チューブ付き注射器をつなぎ，水素タンク（小さい風船）内の空気を吸い出して完全に除去した状態のまま注射器を切り離す。③水素ステーションの背面にあるスイッチを OFF から太陽マーク（あるいは DC）に変え，水を電気分解する。風船がふくらんで，外側の円筒プラスチックの形にほぼなったら，水素ステーションの電源を切り，車からチューブをはずす。④直線距離を長くとれる場所で，車体の底のスイッチを入れて車を走らせ，何秒走ったか記録する。

この手順 B で実験を行ったところ，あきらかに車輪の動きに勢いがあり，走行時間36〜211秒（平均118秒）と大幅に改善された。手順 A と B の違いは，燃料注入前の空気抜きの方法にある。図 2（a）を見るとわかるように，手順 B では H-racer の燃料タンクだけでなく，水素ステーションの負極（水素発生側）のセルの内部まで，空気を除去している。手順 A では，水素を予備発生させるとしても，水素ステーションやチューブの中の空気がどうしても燃料の中にある程度混入してしまう。風船に水素が十分あるのに車が動かないときは，説明書[3] によると，「燃料注入口のバルブを指で軽く押すとよい。水素中に混入していた窒素がセルから除去され，車が動くようになる」と書かれている。しかし，バルブによっては燃料が一気に外に出てしまい，うまくいかないこともある。

4．実験

4−1．AC アダプターによる水の電気分解

水素ステーションについて，外部電源を使う場合には2.5 V 以上にしてはいけないと使用説明書に書かれていた。[3] 燃料電池実験器用のアダプターには「INPUT 交流100–240 V，0.2 A，50–60 Hz；OUTPUT 直流5.0 V，400–800 mA」と書かれていたが，しかしそれに貼ってあるシールには，「h-tec 社製電気分解器用電源，供給電圧0–2.0 V および0–4.0 V」と表示されていた。実際にこの AC アダプターを使って，水素ステーションを作動させることができたが，本当に問題がないか確認する必要があった。そこで，電源として AC アダプターを用い，ディーケード（可変）抵抗器を水素ステーションと並列につなぎ，その抵抗値を順次切り替えて，水素ステーションにかかる電圧を変化させ，電流を測定した（ディーケード抵抗器の使い方については付録を参照）。抵抗を徐々に上げていき最終的に∞にして，水素ステーションにかかる電圧を上げていっても，1.95 V 止まりであり，制限値2.5 V を越えないことがわかった。横軸に電圧，縦軸に電流をとり，データをプロットして電流の立ち上がり位置（水の分解電圧）を求めたところ，1.50 V となった（図 7）。ちなみに，水の分解電圧の理論値は1.23 V であるが，実際にはエネルギーロスがあるため，理論値よりも測定値の方が高くなることが知られている。図 7 を見るとわかるように，セルにかかる電圧が1.5 V を越えないとほとんど電流は 0 であり，1.5 V を越えると水の電気分解が可能となり，電流が電圧の増加と共に直線的に上昇していく。

AC アダプターの電力特性をみるために，ディーケード抵抗器だけを回路につなぎ，抵抗値を変えて電流と電圧を測定した。抵抗が∞のときは電圧が 5 V であったが，抵抗が小さくなる

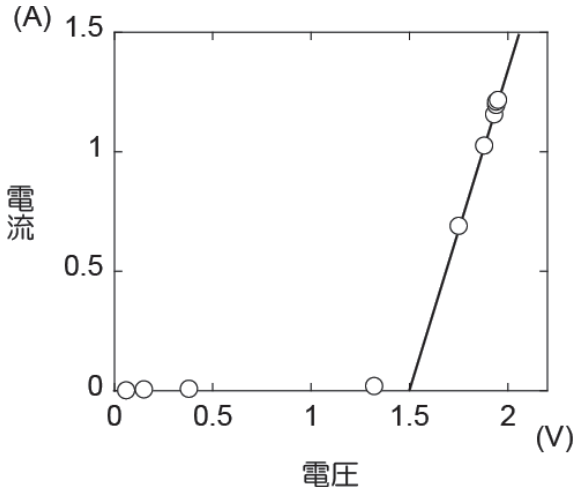


図７．水素ステーション（No. 4）の電流－電圧曲線。ディーケード抵抗器および電源としてACアダプター（5 V）を使用した。

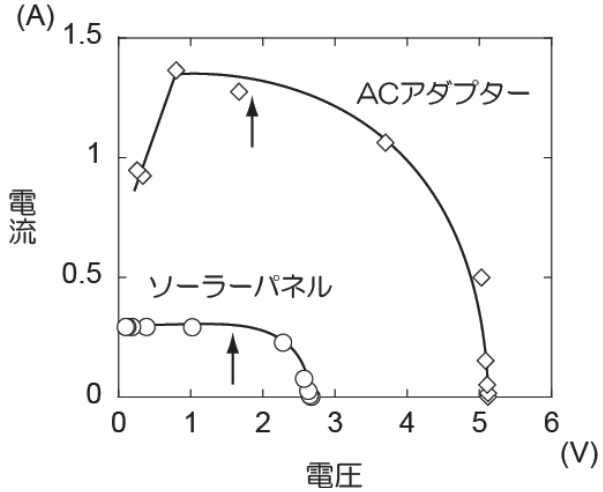


図８．ACアダプター（5 V）とソーラーパネル（夏の昼）を用いたときの電圧と電流の関係。矢印は水素ステーション稼働時（ソーラーパネルが1.6 V，ACアダプターが1.9 V）の電流の大きさの違いを示している。

と同時に電圧が下がり，電流が増加していった（図８）。ただし，抵抗を０にしても，電流が流れすぎることはなく，逆に電流が低下した。これはショートに対する保護対策が，アダプターの中に組み込まれているためと推定される。

表１．水素ステーション（No. 4）にかかる電圧と電流（AC アダプター 5 V）*1)

抵抗（Ω）*2)	電圧（V）	電流（A）	抵抗（Ω）	電圧（V）	電流（A）
0	0.06	0.002	10	1.88	1.026
0.1	0.15	0.005	33	1.93	1.156
0.33	0.38	0.008*3)	100	1.94	1.196
1.0	1.32	0.019	330	1.94	1.210
3.3	1.75	0.690*4)	∞	1.95	1.217

*1）AC アダプターの無負荷電圧は5.06 V であったが，水素ステーションを結線したときの負荷電圧は，1.95 V である（制限値2.5 V は超えていない）。
*2）水素ステーションと並列につないだ抵抗の大きさ。
*3）電気分解がまだ始まっていないのに電流が約0.01 A 流れているのは，水素ステーションに組み込まれた警告灯が点灯するためと思われる。
*4）水素の発生が始まったが，やや弱い。

表２．水素ステーションの電源の違いによる電気分解速度の違い

水素ステーション	AC アダプター（5 V）		ソーラーパネル（夏の昼）	
	電圧(V),電流(A) *1)	水素10 ml *2)	電圧(V),電流(A)	水素10 ml
No. 1	1.90　1.220	1 分 3 秒	1.55　0.287	4 分42秒
No. 2	1.94　1.216	1 分 4 秒	1.58　0.292	4 分36秒
No. 3	1.89　1.226	1 分 8 秒	1.57　0.292	5 分00秒
No. 4	1.95　1.217	1 分 5 秒	1.58　0.289	4 分48秒
No. 5	2.22　1.192	1 分 9 秒	1.58　0.290	4 分38秒
No. 6	（3 V 以上）	——	1.56　0.288	4 分30秒

*1）電気分解をしている状態での水素ステーションの電圧と電流。
*2）水素10 ml を発生させるのに必要な時間。

水素ステーションの個別の違いを調べるために，ディーケード抵抗器を用いて，図 7 のような電流－電圧の変化を測定したところ，6 台中 4 台はほぼ同じ結果となった。つまり，AC アダプターに水素ステーションを結線したときの電圧は1.89–1.95 V で，電流は1.22–1.23 A となった（表２）。しかし，残り 2 台中 1 台は電圧が2.2 V にもなり，もう 1 台は3.0 V 以上にもなってしまうことがわかった。電気分解器がうまく働かない場合，電流値があがらず，そのかわり電圧が高くなってしまう。そこで，この 2 台については，今後，AC アダプターの使用は避けることにした。

水素ステーションによる水の分解能力を調べるために，一定量の水素を発生させるのにかかる時間を測定した。h-tec 社製燃料電池実験器のタンクに水を満たし，水素ステーションから出ているチューブをタンクのチューブに接続することで，発生した水素の体積をタンクの水面

の目盛りの変化から読み取った。AC アダプターを使用して，水素を10 ml 生成するのに要した時間は，４台（No. 1 ～No. 4 ）平均で65秒であった（表２）。

4－2. ソーラーパネルによる水の電気分解

８月のある快晴の日の昼に，H-racer に付属していたソーラーパネルの性能試験を行った。パネル６枚について，太陽光をあてて無負荷電圧をくりかえし２回ずつ測ったところ，2.56～2.89 V であった。雲などのために太陽光の強度が変動したわけではなく，パネルによって性能の違いが多少あることがわかった。パネルの表面に貼り付けてあるテープ状の金属線を見比べたところ，パネルによってその形や長さが同一ではなかった。そこで，これ以降の実験には，発生する電圧が一番高いパネル１枚だけを使うことにした。

電源としてソーラーパネルを用い，その電力特性を調べた（図８）。また，水素ステーション６台それぞれについて，それにかかる電圧と電流をモニターしながら，水素10 ml を発生させるのに必要な時間を測定した（表２）。その結果，６台平均で４分47秒であり，AC アダプターと比べて時間が4.3倍かかった。これは，電流の大きさの違いが反映している。ソーラーパネルの稼働中の電流は平均0.29 A であるのに，AC アダプターを使ったときは1.22 A（4.2倍）となっている。この２種類の電源のパワーの違いは，図８の矢印で示した（水素ステーション稼働中の電圧における）電流の大きさを比較すると明らかである。

4－3. 乾電池による水の電気分解

新品のアルカリ乾電池を２本使用し，それを６台の水素ステーションに順番に入れて，水素10 ml を発生させるのにかかる時間をくりかえし測定した（表３）。その結果，乾電池は予想以上の速さで消耗していくことがわかった（図９）。水素ステーション６台について３セット（発生させた水素180 ml）が終わった時点で，水素の発生速度が最初の1/2，７セット（水素420 ml）が終わった時点で，発生速度が最初の1/3となった。乾電池は電圧が２本で2.2 V に下がっても，まだ水素を発生させることができた。これは，水の分解電圧が1.5 V であるため，セルは弱いながらも水を分解しうることを示している。乾電池が弱ってきたら，途中で突然に水素が発生できなくなるのではなく，水素の発生は続くが急速に遅くなっていくのである。

水素ステーションの電気回路を簡略化して図３に示しているが，実際にはダイオードなどが入れてあり，乾電池の電圧がすべてセルにかかっているわけではない。そこで，乾電池を水素ステーションに内蔵させ，セルにつながっている赤と黒のリード線を切り離し，（その回路全体を単一の電源とみなして）ディーケード抵抗器につないで電圧と電流の関係を測定した。乾電池が新品のときと使用中のものとを比較して，図10に示した。乾電池は電力の消費に伴い，電流値が下がっている。この電源を別の水素ステーションの外部入力端子につなぎ，電気分解時における電圧を測定したところ，新品の乾電池の場合1.85 V，使用途中の場合1.67 V であった（図10の矢印の位置）。この電流値の違いが，水素発生速度に反映する。

表３．電気分解での使用に伴う乾電池の劣化。乾電池（２本分）の無負荷電圧ならびに水素10 ml を発生させるのに必要な時間を６台の水素ステーションについてくりかえし13回測定した。*

水素ステーション	１回目	２回目	３回目	４回目
No. 1	3.26 V,　40秒	2.88 V,　50秒	2.76 V, 1 分 2 秒	2.68 V, 1 分17秒
No. 2	3.10 V,　48秒	2.84 V,　59秒	2.74 V, 1 分12秒	2.66 V, 1 分21秒
No. 3	3.00 V,　40秒	2.80 V,　53秒	2.72 V, 1 分02秒	2.64 V, 1 分16秒
No. 4	2.96 V,　51秒	2.80 V, 1 分 4 秒	2.72 V, 1 分17秒	2.64 V, 1 分38秒
No. 5	2.92 V,　56秒	2.78 V, 1 分 8 秒	2.70 V, 1 分15秒	2.64 V, 1 分29秒
No. 6	2.88 V, 1 分44秒	2.76 V, 1 分53秒	2.68 V, 1 分58秒	2.62 V, 2 分 8 秒

*この表にはくり返し４回までのデータしか載せていないが，水素ステーション（No. 1 ）についてのデータは図９に全部示している。

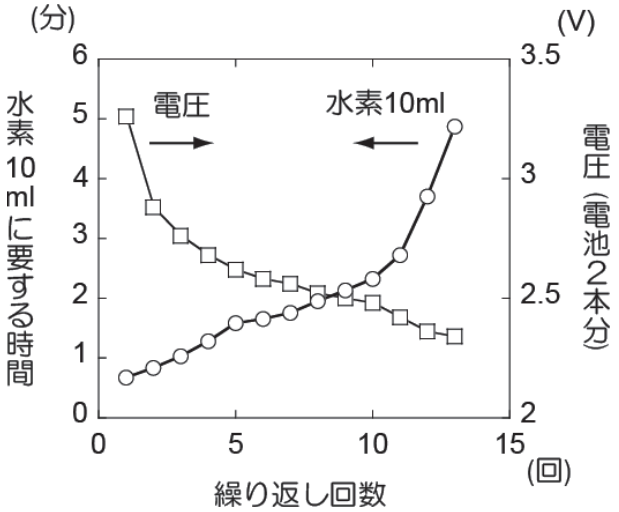


図９．水素ステーションのくりかえし使用に伴う，乾電池の無負荷電圧と水素10 ml生成にかかる時間の変化。表３の水素ステーション（No. 1 ）についてのデータをプロットしている。

4－4. H-racer の性能試験

H-racer の個別の性能がどの程度違うか調べるために，くりかえし走行試験を行ってみた。H-racer のセルの活性化（付録参照）を行ってから，６台について順番に燃料を満タンにし，走行距離と走行時間を３回ずつ測定した。距離を測定する都合上，コンクリートの廊下で片道10 m の折り返し運転とした。車のスイッチを入れても最初から動かない場合もあるので，補助として，スイッチを入れ直す，車を後ろから押す，アイドリングをする（スイッチを入れてタイヤをしばらく空回りさせる）などをしてもよいこととし，何をしても走れなくなったときを終了とした（ほとんどの場合，燃料タンクの風船が完全にしぼむ）。ロスタイムを除いた積

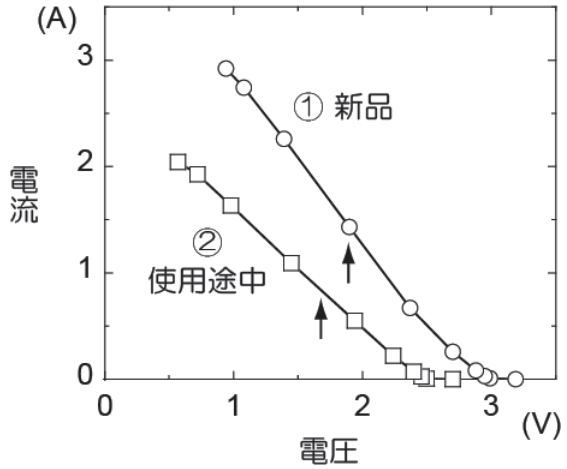


図10. 乾電池（２本）を用いたときの電圧と電流の関係。①は新品のアルカリ乾電池（無負荷電圧は２本で3.2 V），②は水素を180 ml発生させた後（無負荷電圧2.7 V）。矢印は水素ステーション稼働時（①が1.9 V，②が1.7 V）の電流の大きさの違いを示している。

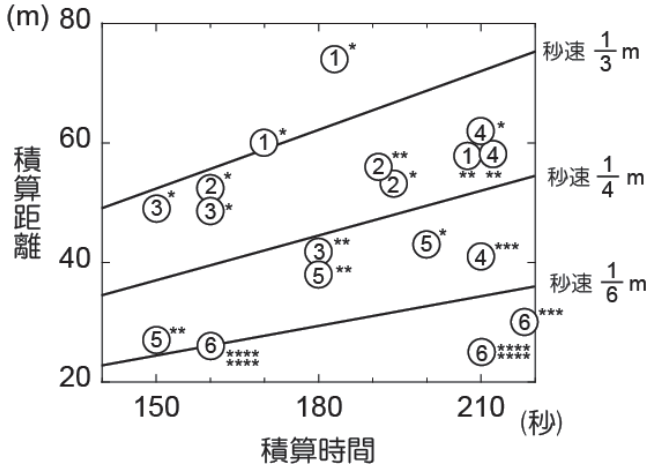


図11. H-racerの走行積算時間と積算距離。○の中の数字はH-racerの番号で，補助した回数を星印の個数で示している。H-racer 6 台につき，３回ずつ測定している。グラフ中の直線は上から順に秒速1/3 m，1/4 m，1/6 mのときの時間と距離の関係を示している。

算時間と積算距離の結果を図11に示す。まず，H-racer（No. 6 ）は補助８回が２度と他に比べて多く，しかも走行距離が30 m 弱と少ないことから，性能が悪いといえる。それとは対照的に, H-racer（No. 1 ）は補助１回だけが２度で，しかも走行距離が60〜70 m と長い。つまり，H-racer の性能の違いは単に走行時間だけからは判定できず，速度も重要な要素である。そこで，図11には秒速1/3 m，1/4 m，1/6 m の補助線も書き加えた。これらのラインから上に行けば行くほど，H-racer の走行性が高いといえる。

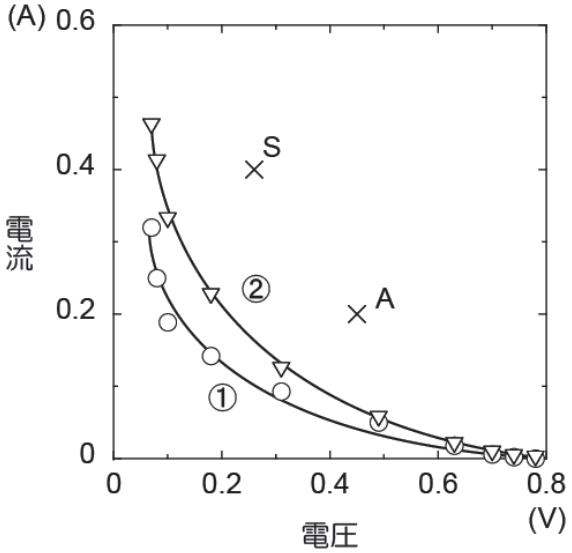


図12. H-racer（No. 2）の燃料電池セルの電圧－電流曲線。①が1回目，②が2回目の測定結果であり，使っていくうちに出力が上がることがわかる。AとSはそれぞれアイドリング時とタイヤ停止時の電圧と電流であり，アイドリング中でも停止中でも消費電力はほぼ同じである（約0.1 W）。

H-racer の燃料電池セルの出力を，ディーケード抵抗器を用いてくり返し測定した。そして電圧－電流曲線は，1回目の測定に比べて2回目は明らかに出力が上がることがわかった（図12）。これは，セルの活性化をしないと，H-racer が全く動かないことと対応する。3回目の測定もやってみたが，2回目とほとんど変わらなかった。走行性が高かった H-racer（No. 1）と性能が悪いもの（No. 6）との電圧－電流曲線には，目立った違いは見られなかった。しかし，アイドリング（タイヤの空回し）状態での電力を測ったところ，H-racer の No. 1 と No. 2 では（0.40～0.45 V，0.20 A）0.08～0.09 W であったのに対し，No. 6 では（0.40 V，0.16 A）0.06 W であり，やや低いことがわかった。これが恐らく走行性の悪さに関係していると思われる。なお，スイッチを入れてタイヤが動かなくても，電流が流れていることに気がついた。タイヤ停止中のとき H-racer No. 2 は（0.26 V，0.40 A で）0.10 W，No. 6 は（0.32 V，0.25 A で）0.08 W であり，タイヤが回っていても回っていなくても同程度に電力を消費している。スイッチを一旦切ると電流が止まり，電圧が開回路電圧0.78 V まで戻る。スイッチを一旦切ってまた入れる操作は，電池の放電を止めてモーターを始動させるきっかけを作るので，走行の補助手段として有効と思われる。

h-tec 社製燃料電池実験器は可逆性のセルであり，水を電気分解して水素と酸素をそれぞれタンクにため，その後に今度はそれを使って燃料電池として使えるようになっている。その燃料電池としての開回路電圧は1.35V 程度であり，それに比べると H-racer の電圧が0.78 V と低い。これは，空気中の酸素の分圧が低いためである。[6)]

4－5．新しい自動車模型 H2GO の試運転

H-racer の改良版として H-racer2が作られたが，これはリモコンに電池を使用しているため，純粋な燃料電池自動車模型とはいえない。最近，さらなる改良版として，H2GO が販売された。これは，スーパーキャパシタを搭載して，始動時の出力を確保する仕組みが備わっているハイブリッド車である。スーパーキャパシタとは，静電容量の大きい，電気二重層コンデンサーのことで，高出力密度のため，電気自動車を加速するのに優れている。[4)]

ハイブリッド自動車模型 H2GO とはどのようなものかを知るために，１台購入して試運転を行ってみた。まず，H-racer に比べて車体が大きい。H-racer は全長約15 cm であるのに，H2GO は22 cm もあり，それに応じて燃料タンクの風船もかなり大きい。水素ステーションもスケールアップしている。太陽光パネルには充電機能が備わっており，それとは別に，今度は AC アダプター（３V）が付属品としてついている。車とリモコンに前もって，アダプターを使用して充電する。水素ステーションにもこのアダプターを用いて水を電気分解させ，太いシリンダー状のタンクに一旦貯蔵し，それを車に一気に注入する手順となっている。確かに H2GO は確実に力強く走るし，そして飽きる位に走行が持続する。しかし，車の構造が複雑であり，また電気も使っている分，水素燃料電池車としての仕組みがわかりにくくなっている。

５．考察

5－1．H-racer の走行性が向上した理由

今回，H-racer の走行性が大幅に向上し，燃料電池自動車模型としての本来の性能が発揮できるようになった。その第一の理由は，燃料タンクの風船をこれまで十分に膨らませていなかったことがあげられる。乾電池による水の電気分解での水素発生スピードは不十分であり，時間をかけても風船を押し広げるだけの圧力が生じなかった。AC アダプターの使用によって，水素注入の圧力が増し，風船を最大限に膨らませることが可能となった。これにより走行時間が明らかに長くなった。一度大きくふくらませた風船は，その後は乾電池でも大きく膨らむようになった。初め硬かった風船が一度ふくらませたことにより，柔らかくなったためと思われる。

H-racer の風船にどれくらいの体積の気体が入るのか，シリンダーを用いて燃料注入口から空気を入れて調べてみた。これまでの風船のふくらませの程度では，約５ml であり，燃料タンク（円筒形にそって）ほぼ満タンでは10 ml 程度であった。また，H-racer の風船を満タンにするまでに要する時間を，水素ステーション（No. １）を用いて測定したところ，新品の乾電池では40秒であり，使用途中の乾電池（無負荷電圧2.7 V）では１分30秒であり，表３の水素10 ml 発生にかかった時間とほぼ一致した。

性能が向上した第二の理由は，手順 A から手順 B に変えたことで，チューブや水素ステーション内の空気をできるだけ除去し，より純粋な水素をタンクに貯めたことである。しかし，それでも毎回順調に走り出すとは限らない。セルの燃料極側に窒素が入っていると，モーター

が動かない。その一方，酸素極の方は，単に窓があけてあって，空気に接しているだけである。つまり，酸素極の方は窒素が存在していてもそれほど影響がないことがわかる。それはなぜだろうか。

実は，燃料極も酸素極も共に，電極板の表面には触媒として白金の微粒子がちりばめられている。[5), 6), 7)] ただし，これは純粋な水素を燃料とすることを前提にしているからであり，天然ガスを改質して製造した水素燃料には一酸化炭素が微量ではあるが含まれていて，これが白金に優先的に結合してじゃまするので，その場合には白金ルテニウム合金が触媒として使われる。[7), 8)] セルの構造として，水素側も酸素側も，気体が電極の入口から入りそして出口から流れ出るフロータイプの場合，不活性ガスである窒素が混入していても，セルの活性はあまり下がらない。[9)] しかし，今回の H-racer の燃料極のように，水素が電極に入るがその先は行き止まりの場合，電極に窒素がたまるため活性が落ちてしまう。その対策として，電極に水素を吹きかけて洗浄する（これをパージするという）必要がある。[10)] H-racer の燃料補給口のバルブを押すことは，まさにこのパージをすることに対応する。新しい自動車模型 H2GO では，毎回の燃料補給の前に，まず車の燃料タンクに一定量の水素を入れ，それを使って電極をパージする手順を採用している。なお，実際の水素燃料電池自動車の燃料としては，エネルギー変換効率を上げるために高純度の水素が要求される。定められたガイドラインにおいて，窒素の許容濃度は体積比で100 ppm とされている。これは燃料ガスを循環させて再利用するためであり，不活性ガスが含まれていると，次第にその濃度が高くなってしまうからである。[11)]

5－2. 水素ステーション

水素ステーションの性能を調べるために，乾電池を入れたり抜いたりして実験しているうちに，乾電池を内蔵させていなくてもスイッチを DC に入れると警告灯が点滅を始めることに気が付いた。外部電源の方も，何も結線しなくてもスイッチを入れると同様に警告灯が光り出す。これは，水素ステーションのセルが燃料電池として働くからであった。図 3 を見るとわかるように，乾電池が入っていなくてもスイッチを DC に入れると，セルと LED が回線で結ばれるため点灯する。そこで，スイッチを外部入力端子の方に入れ，端子間の電圧を測ったところ，1.40 V であった。また，この外部入力端子にソーラーモーターをつないだところ，しばらくの間，勢い良く回転し続けた。水素ステーションを電気分解に使用した直後は，セル内に水素と酸素が残っているため，逆反応が起こり，短時間ではあるが燃料電池として働くことがわかった。h-tec 社製の燃料電池実験器も可逆性のセルであり，水を電気分解させながら水素と酸素をタンクにため，その直後から燃料電池として使えるのと原理は同じである。

水素ステーションで水を電気分解するが，セルの負極側での水の消費はどの程度だろうか。１回の補給に水素を（ロスする分も含めて）20 ml 必要と仮定すると，それを生じさせるのに，分解される水の量は次のように計算できる。気体 1 モルの体積が22.4 l であることから，$18\times20/(22.4\times10^{3})=1.6\times10^{-2}$(g) である。水の密度が約 1 g/cm^{3}なので，体積は0.016 ml であり，セルを最初に濡らしたときの，そのほんの一部が消費されるだけに過ぎない。水素ステーショ

ンの水のタンクを満タンにする理由は，水圧を利用してセルの表面を濡らすことと，酸素の気泡をそのタンクの中に放出することで，水素発生スピードを可視化することにある。

水素は可燃性の気体であることを，常に気にとめておく必要がある。水素の爆発範囲（爆発が起こりうる空気中の体積比）は4.1〜74.2% である。[12] 今，1辺が6 m の正方形の部屋を考えてみよう。床から天井まで高さを4 m とすると，容積は144 m^3となる。この部屋の中で AC アダプター（5 V）を使って，誤って水素ステーションを稼働し続けた場合，爆発範囲つまり4.1% に達してしまうにはどの程度の時間がかかるだろうか。65秒で水素を10 ml 生成することから，

$$65\times144\times10^6\times0.041/10=3.84\times10^7\text{（秒）}=444\text{（日）}$$

つまり，1年以上かかる。そのようなことはあり得ないから，実験室で水素ステーションを少し使う分には（近くで火を使わなければ）ほとんど危険性はないといえる。

水素燃料電池自動車の実用化にとって，燃料の水素に関わる安全対策は避けて通れない。それへの対策は進んでおり，火災や銃弾による貫通でも爆発しないような高圧水素容器が開発されている。[13] 水素ステーションの整備や低価格化などのため，燃料電池自動車の普及にはまだ時間がかかるとは思われるが，2007年9月に大阪－東京間を途中での水素補給なしに走破したことは，技術開発が確実に進んでいることを物語っている。[8]

6．学生実験への対応

6－1．水素ステーションの取り扱い

電流電圧の測定により，水素ステーションには AC アダプターとの組み合わせに適合するものと，不適合のものとがあることがわかったので，ラベルを貼って今後の使用に備えることにした。なお，使用説明書には「水素ステーションを連続20分以上使用すると故障する可能性がある」と書かれているが，おそらくこれは水素ステーションのスイッチを入れたまま放置し，長時間稼働し続けることを防止するための警告と思われる。

6－2．自動車模型 H-racer と H2GO の利用

水素燃料電池としての仕組みが単純でわかりやすいので，学生実験にはこれまで通り H-racer を使うことにする。また，燃料があるのに動かない場合，燃料注入口を指で軽く押すと（燃料の水素が噴射して）窒素がセルから除去されることで車が動き出す可能性があるが，燃料が一気に放出され調整しにくい。確実な補助手段として，車を後ろから押す，スイッチを一旦切って入れ直す，あるいはアイドリングする（タイヤをしばらく空回りさせる）方法を，実験テキストにも加えることにした。H2GO については，H-racer の弱々しい走りに物足りなさを感じる学生で，ハイブリッド車など最新技術に興味がある人に使わせるといいかもしれない。

謝辞

ここで報告した水素燃料電池自動車模型に関する実験の改良は，慶應義塾大学調整費からの助成金を用いて行われた。

参考文献

（1）福山勝也，大橋敦史，大場茂「備長炭を空気極としたグルコース燃料電池の改良」慶應義塾大学日吉紀要，自然科学 No.43, p.63–74（2008年）。
（2）“H-racer owner’s guide,” ライゾン日本総代理店，Outride Brandship Builder Inc.
（3）“H-racer user manual,” Horison.
（4）「新エネルギー技術」（菅原和士著，日本理工出版会，2009年）p.264–268。
（5）「燃料電池と高分子」（高分子学会燃料電池材料研究会編著，共立出版，2005年）p.19–21。
（6）「燃料電池システム」（Larminie, J., Dicks, A. 著，槌屋治紀訳，オーム社，2004年）p.90–94, 140。
（7）「固体高分子形燃料電池のすべて」（田村英雄監修，エヌ・ティー・エス，2003年）p.96–110。
（8）「燃料電池の技術」（西川尚男著，東京電機大学出版局，2010年）p.84–90，196–198。
（9）Lee, J.-Y., Joo, J., Lee, J.K., Uhm, S., Lee, E.S., Jang, J.H., Kim, N.-K., Lee, Y.-C. & Lee, J. (2010). “Effect of hydrogen partial pressure on a polymer electrolyte fuel cell performance,” Korean J. Chem. Eng., 27, 843–847.
(10) Müller, E.A., Kolb, F., Guzzella, L., Stefanopoulou, A.G. & McKay, D.A. (2010). “Correlating nitrogen accumulation with temporal fuel cell performance,” J. Fuel Cell Sci. Tech. 7, 021013–(1–11).
(11) Papadias, D.D., Ahmed, S., Kumar, R. & Joseck, F. (2009).“Hydrogen quality for fuel cell vehicles – A modeling study of bthe sensitivity of impurity content in hydrogen to the process variables in the SMR-PSA pathway,”International J. Hydrogen Energy., 34, 6021–6035.
(12)「新版　化学を楽しくする 5 分間」（日本化学会編，化学同人，1986年）p.171。
(13)「図解　燃料電池のすべて」（本間琢也監修，工業調査会，2003年）p.157–159。
(14) Voigt, C., Hoeller, S. & Kueter, U. (2005). “Fuel cell technology for classroom instruction,” h-tec, Luebeck, Germany.

参考

（1）電気分解器の電圧と電流の測定[14)]

ディーケード抵抗器（図13）の抵抗を0の位置にしておく。Port 1に電気分解器を結線し，電圧計（テスター）と電流計を所定の端子につなぐ。Port 2に電源（ACアダプター）をつなぎ，抵抗器を小さい方から大きい方へ段々に切りかえて，それぞれの電圧と電流を記録する。初めは抵抗器の抵抗を小さくしているので，こちらの方に電流が流れ，それと並列につないだ電気分解器には電流が流れない。抵抗器の抵抗を徐々に増やしていき，電気分解器にかかる電圧がある一定値（約1.5 V）を越えると電気分解器が作動して電流が流れ，また水素や酸素の生成が開始する。表1および図7が水素ステーションについての測定例である。

（2）電源の電流電圧特性の測定[14)]

ディーケード抵抗器の抵抗を∞の位置にしておく。電圧計と電流計を所定の端子につなぐ(Port 2には何もつながない)。Port 1に電源をつなぐ。R＝∞から始めて，ディーケード抵抗器を大きい値から小さい値へと切りかえて，各抵抗のときの電圧と電流を測定する。負荷抵抗を大きい方から順番に下げていくと，電圧は下がるが電流は徐々に上がっていく。図8は，ACアダプターとソーラーパネルについての測定例である。R＝∞のときの電圧は，無負荷電圧に対応する。

（3）H-racerの活性化

H-racerは使用前に活性化しておく必要がある。車体をひっくり返した状態で，まず脱気および水素注入を正式なマニュアル通り（手順B）に2回繰り返す。次にある程度燃料タンクが膨れた段階で，水素を注入しながら車のスイッチを入れ，タイヤを1分間程度回し続ける。車を裏返しているので，タイヤは空回りする（スイッチを入れてもタイヤが回転しない場合は，指で助けてやると動き出す)。学生実験に使う前に，このようにセルを活性化しておかねばならない。前日に活性化を行ったとしても，当日の使用直前にも活性化しておかないとうまく動かない。おそらくそれは，セルを長い時間放置しておくと，燃料極に空気（窒素）が入りこんでしまうためと推定される。

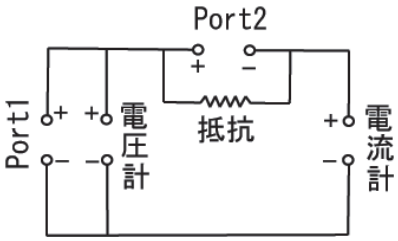


図13. ディーケード抵抗器