

水素が地球を救う —身近になる燃料電池— 工業高校で実施可能な燃料電池の作製

東海大学 工学部 電気電子工学科教授 庄 善之

1. はじめに

(1) 燃料電池と宇宙開発

水素と酸素の電気化学反応で発電を行う燃料電池は、発電時の排出物が水のみであることから、次世代のクリーンなエネルギー源として期待されている。近年、燃料電池を用いた家庭用コジェネレーションシステムが販売され、燃料電池自動車も一般向けの販売が開始された。今後、燃料電池は身近な技術になると期待される。これまで燃料電池は宇宙開発の分野で主に用いられてきた。有人宇宙飛行と月面着陸に成功したアポロ計画では、燃料電池が電源として用いられた。燃料電池はエネルギー密度が高いため、宇宙飛行に必要な電力を確保する方法として最適である。また、発電時に燃料電池から排出される水は、宇宙飛行士たちの飲料水として用いることが出来る。1970年に起こったアポロ13号の事故は、機械船にある酸素タンクの爆発が原因である。そのため、燃料電池で十分な発電が出来なくなり、電力不足が問題となった。また、燃料電池で発電が出来ないことは、飲料水の確保が出来ないことを示しており、この事故で宇宙飛行士たちは電力と飲料水の不足に苦しめられることとなった。2011年に引退したス

ペースシャトルでは、船内の電力および飲料水は燃料電池を用いて確保している。スペースシャトルは135回の打ち上げが行われたが、それらのミッションで燃料電池に重大な不具合は発生しておらず、燃料電池の信頼性の高さが証明された。

(2) 燃料電池の家庭用コジェネレーションシステムへの応用

これまでは宇宙開発の分野で宇宙飛行士の命を支えてきた燃料電池が、今後はクリーンなエネルギー源として、温暖化が問題となっている地球を救う存在となりそうである。燃料電池を用いた家庭用コジェネレーションシステムは、「エネファーム」という名称で発売されている。エネファームの発電に用いる水素は本体に内蔵された改質装置を用いて天然ガスから作製され、その製造過程で二酸化炭素が排出される。また、燃料電池の発電効率は35%程度であり、その値のみでは最新鋭の火力発電所と比べて大きな優位性がない。しかし、発電に寄与されなかったエネルギーは熱となり、50%程度の効率で給湯に用いることが出来る。電気と温水を同時に作るため、コジェネレーションシステムである。家庭では、炊事や風呂などで温水を多く用いる。その温水を燃料電池で作れば、電気と給湯を合

わけて、85%程度の高いエネルギー利用効率となる。また、給湯のために火力発電所からの電力を使用する必要がなくなる。これらは、家庭に燃料電池を導入することで、これまでと同様に快適な生活を維持しながら、二酸化炭素の排出を削減できることを示している。

エネファームは2009年から販売が開始された。2014年9月には累積販売台数が10万台を超え、普及が進みつつある。現在は日本を中心とした販売であるが、今後はエネファームを海外にも普及させようとしている。燃料電池を用いた家庭用コジェネレーションシステムの技術は日本が先行していることから、日本はエネファームの世界的普及をとおして地球温暖化の防止に貢献できると考えられる。

エネファームは、天然ガスの供給のみで発電を行うことが出来る。このことは、エネファームの導入によって、電力会社からの電力供給が停止した場合（停電時）でも、家庭内では必要な電力を確保できることを示している。そのため、エネファームと電力系統（送電線）を切り離す仕組みやエネファームからの電力が不足するときにそれを補う他の電源（蓄電池など）と連系（接続）させる仕組みが必要である。現在販売中のエネファームでは、停電時に発電可能な電力が十分でなく、必ずしも利便性が高いとは言えない。しかし、今後本格的な水素社会が実現されれば、エネファームの普及と改良によって、安定して電力を確保できる社会が実現できると期待される。

(3) 燃料電池自動車の普及

2014年12月トヨタ自動車は、燃料電池自動車「MIRAI」の販売を開始した。MIRAIの車両価格は700万円を超えるが、政府等からの補助金制度を利用すれば500万円程度で購入することが可能である。2000年代初めに試作された燃料電池自動車は1台1億円以上だったと言わ

れており、MIRAIによって価格的には一般消費者が購入可能な燃料電池自動車を実現されたと考えられる。

燃料電池自動車を一般に普及させるために、MIRAIの開発では車両価格を下げることを重視した。そのため、MIRAIに搭載される燃料電池システムはトヨタ自動車が自社で開発している。その出力密度は3kW/Lであり世界トップレベルである。また、小型化にも成功し、MIRAIでは燃料電池を座席の下に配置することが可能になった。このことによって、優れた居住性を確保することにも成功している。また、高圧水素タンクも自社開発することで、世界トップレベルの貯蔵性能を実現し、搭載するタンクを2本に減らしている。さらに、一般的な燃料電池の発電時に必要な加湿器を不要とし、燃料電池の信頼性の向上、小型軽量化、低コスト化にも成功している。

MIRAIは車両価格を下げるために先進的な燃料電池の技術を多く取り入れるとともに、市販車で普及が進んでいるハイブリットシステムなどを採用することでも低価格化を実現している。燃料電池の出力電圧は約200Vであるのに対し、ハイブリット車用モータは650Vの高電圧を必要とし、それぞれの電圧が異なる。そのため、燃料電池をハイブリットシステムに直結することが出来ない。そこで、燃料電池と昇圧コンバータを組み合わせることで、ハイブリットシステムへの対応を行っている。トヨタ自動車はこれまでハイブリットシステム向けに昇圧コンバータなどのパワーエレクトロニクス関係の技術開発を積極的に行っており、その成果を燃料電池自動車の開発にも生かしている。

燃料電池用モータシステムの開発では、燃料電池の出力電圧（200V）に対応した専用モータを開発する、ハイブリットシステムに直結可能な高出力電圧（650V）の燃料電池を開発するなどの選択肢もあった。しかし、MIRAIの開発

では、総合的なコストを考え量産ハイブリットシステムと200V出力の燃料電池、昇圧コンバータの組み合わせを選んでいる。

燃料電池自動車の普及には、水素を車両に充填するための水素ステーションの整備も重要である。政府および業界団体ではその普及に力を入れており、2015年末までに国内で100か所程度の水素ステーションの整備を計画している。今後、燃料電池自動車の高性能化および低コスト化と水素ステーションの整備が共に進み、近い将来誰もが気軽に燃料電池自動車を運転できる時代が来ると思われる。

水素ステーションの整備が十分でない現在でも路線運行では燃料電池バスの使用が可能である。2013年には、新宿駅および東京エアターミナルと羽田空港の間で燃料電池バスを用いた営業運行が実証実験として行われた。実験に用いられたバスは、トヨタと日野自動車の共同開発車であり、90kW出力の燃料電池を2台搭載している。乗車定員は25名であり、最高時速は80km/hである。運賃は通常料金と同じ片道1200円であった。筆者は新宿駅と羽田空港の間の路線に乗車する機会を得ており、燃料電池バスは走行中の騒音が少なく、快適であることを実感した。



図1 2007年ごろ出光興産が秦野市内で運営していた水素ステーションとホンダ製燃料電池車(FCX)



図2 燃料電池バス。2013年に新宿駅および東京エアターミナルと羽田空港の間で営業運行を行った。

2. 工業高校での燃料電池作製のすすめ

クリーンエネルギー技術を理解させるためには、生徒たちに実際にそれらを作製させることが大変有効である。クリーンエネルギーとして代表的なシリコンを材料とした太陽電池の作製には、不純物拡散炉や真空蒸着機などの特殊で高価な実験機器が必要となり、一般的な工業高校では実施が困難であると考えられる。それに対し燃料電池の作製は、いくつか特殊な材料も必要とするが、工業高校でも比較的容易に実施することが出来る。そのため、著者らはいくつかの高校で実際に燃料電池を作製してもらう体験授業を行ってきた。本稿では、プラチナ触媒など特殊な材料の購入先も含めて、燃料電池の作製法を紹介する。本稿で燃料電池作製の基本を理解した後は、生徒のアイデアで自分たちオリジナルの燃料電池を作製することが可能になるであろう。

私の研究室では毎年卒業研究のテーマの1つとして、携帯電話などの電子機器を動作可能な燃料電池を手作りしている。学生たちは卒研開始の4月に燃料電池で駆動させる電子機器を決定し、その機器の駆動電圧と電力を測定する。その結果から作製する燃料電池の仕様を決定し、その仕様を実現する燃料電池の設計と試作を行

うのである。

2013年にはスマートフォンを動作可能な燃料電池の作製に成功した。作製した燃料電池は、6個の燃料電池を一体（スタック）化することで、電圧4V、最大電力10W程度の出力を有している。台車に水素と酸素ポンプ、そして作製した燃料電池を載せて発電を行い、電池パックを外した学生自らのスマートフォンに電力を供給することで、自作燃料電池でスマートフォンを野外で動作させることにも成功した。その様子は、研究室の同僚によって撮影、編集がなされ、3分の記録動画として残されている。その動画をお見せしたいが、NHKの人気番組プロジェクトXを完全にパクった動画であるため、一般向けには公開できないのが大変残念である。なお、実験の終盤、自作燃料電池でスマ

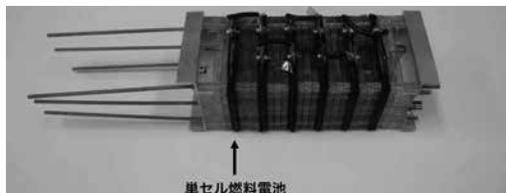


図3 卒業研究で作製した6セル燃料電池。

黒い部分が単セル燃料電池であり、6セルが電線で直列に接続されている。これらを固定するステンレス製長ねじは、今後燃料電池のスタック数を増やすときのために、未だ切断されていない。

ートフォンを動かしているときに、電力供給が過剰となり、この卒研テーマを担当した学生のスマートフォンが壊れてしまった。自作燃料電池で電子機器を駆動させる場合には十分な注意が必要である。



図4 卒研で作製した燃料電池を用いてスマートフォンを野外で動作させている様子。

研究室の同僚がその実験の様子を動画撮影している。

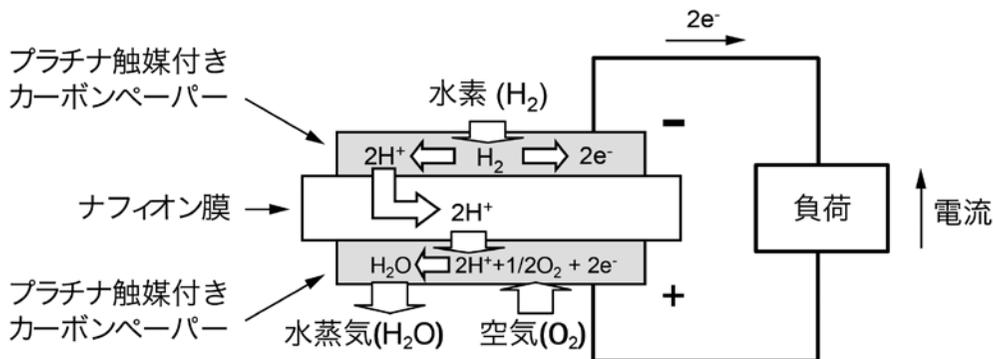


図5 燃料電池の発電原理図

3. 燃料電池の発電原理と膜電極接合体 (MEA)

燃料電池は、水素と酸素ガスの電気化学反応で発電が行われる。この電気化学反応は、2枚のカーボンペーパーとナフィオン膜で構成された膜電極接合体 (MEA) 内で行われる (図5)。ナフィオン膜はカーボンペーパーに挟まれており、ナフィオン膜に接するカーボンペーパーの表面には、電気化学反応を促進するためにプラチナ (Pt) 触媒が塗布されている。対向する2枚のカーボンペーパーにそれぞれ水素および酸素ガスを供給すると発電を開始する。水素ガスを供給した面では、プラチナ触媒によって、水素分子 (H_2) が2つのプロトン (イオン化した水素 2H^+) と2つの電子 (2e^-) に分解される。電子は、燃料電池に接続された電線を伝わり、負荷を流れて、酸素が供給されているカーボンペーパーに移動する。すなわち、燃料電池で発電が行われ、負荷で電力が消費されることになる。一方、プロトンは、ナフィオン膜を透過することが出来るため、MEAの対極側によって移動する。移動したプロトンは酸素原子と結合し、水が形成される。酸素および電子はナフィオン膜を透過することが出来ないため、MEA内部での電荷の移動は一方向となる (図5では、プラスの電荷を持つプロトンが上から下に移動する)。

以上の電気化学反応では、水素ガスを供給した面は電圧がマイナスとなり、反対がプラスとなる。燃料電池の開放状態での電圧は0.8V程度である。なお、実際の燃料電池の作製では、カーボンペーパーに電線等を繋ぐために集電極 (セパレータ) が必要となる。

4. 燃料電池の作製法

前章までに紹介した固体高分子形燃料電池の作製法を記述する。しかしながら、本文では紙面が限られているため、燃料電池の設計図や詳細な作製法は東海大学電気電子工学科の特設ホームページ (<http://www.ei.u-tokai.ac.jp/fcfub>)

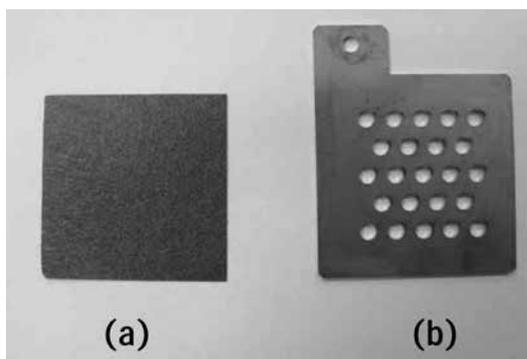


図6 燃料電池の作製に用いられる(a)カーボンペーパーと(b)集電極。カーボンペーパーは、炭素繊維によって出来た板であり、ガスが透過する性質を有する。集電極は、ステンレス板であり、水素または酸素ガスをMEAに供給するための穴が開いている。

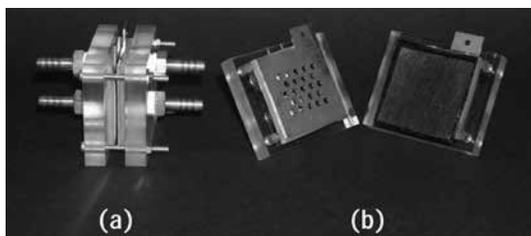


図7 (a)本研究室で作製した燃料電池 (b)燃料電池の内部を参照してほしい。

(1) プラチナ触媒付きカーボンペーパーの作製

燃料電池用プラチナ触媒（田中貴金属製）24mg, 純水0.2ml, ナフィオン液（5%ナフィオン分散液（和光純薬））0.2mlを化学実験で用いる時計皿の上で細い筆を用いてよく混ぜる。よく混ぜた液をカーボンペーパー（東レ製 TGP-H-120, 大きさ40×40mm）の片面に均一に塗り, 乾燥させる。これを2枚作製する。

(2) ナフィオン膜の用意

ナフィオン膜（デュポン製 N117）を45×45mmの大きさに切る。ナフィオン膜の代わりにセロファン紙などを電解質膜として用いることも可能である。一方, ビニールシートは, プロトン透過しないため発電しない。また, 金網などは2枚のカーボンペーパーが電氣的に短絡するので, 発生した電力を外部に取り出すことが出来ない。色々な材料を試し, 出力を比較することは生徒にとって良い研究テーマとなるであろう。

(3) その他の部品

プラチナ触媒付きカーボンペーパー2枚とナフィオン膜があれば原理的に発電が可能であるが, 実際に燃料電池として組み立てるためには, 発生した電力を外部に取り出すための集電極, これらを押しえて固定するためのエンドプレートおよびねじ等が必要である。これらを組み立てると, 図7の燃料電池が完成する。

(4) 燃料電池の発電

作製した燃料電池のエンドプレート（透明アクリル板）にはガス導入口を付けられている（図7ではホースニップル）。そこに水素を注入すると発電が開始される。簡易的には, 水素ガスが充填されたスプレー缶（ケニス）を用いると良い。適当な負荷（抵抗器）を燃料電池に接続し, 電圧, 電流を測定することで, 発電特性の評価が可能である。また, 太陽電池用のモータ（ケニス 光電池モーター H158など）を接続して, モータを回すことで発電を確認しても良い。

(5) 膜電極接合体（MEA）の作製

簡易的には2枚のカーボンペーパーとナフィオン膜を重ねるだけで, 燃料電池が作製可能である。しかし, 実際の燃料電池では, これらを熱圧着させることで膜電極接合体（MEA）を形成し, 発電効率を高めている。工業高校でも洋服用のアイロン等を用いて熱圧着する実験を行うと良いであろう。

5. まとめ

前述のように燃料電池は工業高校の設備を用いても作製可能な発電素子である。また, 今後, クリーンエネルギー技術としてますます注目されると考えられる。本稿および特設ホームページ（<http://www.ei.u-tokai.ac.jp/fcfub>）を参考にしながら, 工業高校で燃料電池の作製に挑戦し, 生徒たちに燃料電池およびクリーンエネルギーに対する理解を深めさせてほしいと思っている。