

# 燃料電池の疑問にお答えします

東京理科大学 理工学部 電気電子情報工学科 講師 かたやま のぼる  
片山 昇

燃料電池は燃料電池自動車や家庭用燃料電池などを耳にすることが多くなってきました。燃料電池は水素などの燃料と空気中の酸素で電気をつくり出すことができ、何となく環境にやさしく、未来の電池だという漠然としたイメージをほとんどの方がお持ちだと思えます。燃料電池は皆さんが普段使っている「電池」と何が違うのでしょうか？ 燃料電池は今なぜ注目されているのでしょうか？ 燃料電池の未来はどうなるのでしょうか？ さまざまな疑問にお答えし、少しでも燃料電池のことを知っていただければ幸いです。

## 燃料電池は充電することはできないの？

この質問はおそらく多くの方が持たれる疑問だと思います。充電できる電池といえば皆さんにとって身近なスマートフォンにも使われている電池で、リチウムイオン二次電池が現在の主流です。リチウムイオン二次電池は正極と負極の間でリチウムイオンが行ったり来たりすることで充電と放電を繰り返すことができます。一昔前は充電できる電池といえばニッケル・カドミウム蓄電池でしたが、有害物質が使われていることと、継ぎ足し充電をすると電池の容量が減ってしまうことからあまり使われなくなりました。他にも二次電池としては、ニッケル水素電池も活躍しています。

電池といえばアルカリ乾電池（正式にはア

ルカリマンガン乾電池）に代表される乾電池でしょう。アルカリ乾電池はご存じのように充電することができない一次電池に分類されます。無理に電流を流して充電しようとするとうガスが発生して非常に危険です。一次電池の中にはリチウム電池というリチウムイオン二次電池と名前が非常に紛らわしい電池もあります。リチウム電池は大きさの割に容量が大きいので、時計用などのボタン電池として使われ、大型のものは高出力が得られるためカメラのフラッシュなどに利用されています。

さて、燃料電池は一次電池と二次電池のどちらに分類されるのでしょうか？

実はどちらにも分類することはできません。燃料電池は水素と酸素を供給すると、負極では $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ という反応が起き水素イオンは電解質を通り正極に移動します。電子は外部回路を經由して正極に到達し、このときに電力を生み出します。正極では $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ という反応が起きて水を生成し、水は水蒸気となって排出されます（図1）。通常の電池と異なり水素と酸素は外から供給するため発電し続けられるという意味では再利用できる電池ですが、電流を逆流させて元通りに再生させることはできません（ただし電気分解に必要な高い電圧に耐える特殊な触媒を使い、発生した水素を回収できれば再生できますが……）。したがって充電できるかどうかという問いに対する答えはYESであ

りNOでもあります。

燃料電池は電気化学の原理を応用した電池という意味ではアルカリ乾電池やリチウムイオン二次電池の仲間であると言えますが、本当は「発電機」と言ってしまったほうが近いのです。発電機はガソリンなどの燃料をいれ、エンジンで発電する機械で、お祭りなど屋外のイベントや工事現場などの電源として使われています。簡単に言ってしまうと、燃料から電気をつくる装置です。そのような意味では燃料電池も原理がただで燃料から電気をつくる点では全く同じです。屋外のイベントに行くと筆者はついつい発電機に注目してしまうのですが、発電機は実はかなり騒音や振動を出しています。これを燃料電池に置き換えると格段に静かになります。

### 燃料電池はどんな良いことがあるの？

燃料電池は発電機だというお話をしましたが、例えば、出力1kW程度の発電機でガソリンから電気をつくり出す場合、ガソリンがもつエネルギーを100とすると取り出せる電気エネルギーは30程度です。すなわちエネルギー変換効率は約30%です。エネルギー変換効率は動作温度を上げることで高めることができるのですが、それでも50~60%程度が精一杯です。実は熱機関のエネルギー変換効率の上限はカルノー効率で理論的に熱源と環境の温度で決まってしまう。最新鋭の火力発電所はできるだけ高温で動作させている上に、実際の効率もカルノー効率にほとんど近く、今後どれだけ努力しても僅かな改善しかできません。それに対して燃料電池の理論効率は、燃料の種類や温度によりますが、80~90%に達します。

さらに燃料電池が優れているのが、システムの大きさに依らず高い効率で電気エネルギーをつくり出すことができることです。従来は高い効率で燃料から電気をつくるためには、巨大な火力発電所で発電する方法以外は

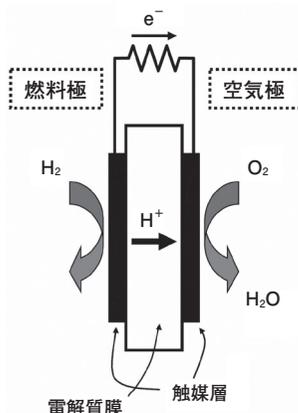


図1 燃料電池の基本原理

ありませんでした。火力発電所は都市部から離れた場所にしか建設できないため発電して作った電気を送電線で延々と運ぶ必要があり、送電線のロスが5%程度と無視できません。さらに火力発電所は一時的に発電を止める場合でも自動車エンジンのアイドル運転のように待機状態にする必要があります。火力発電所の代わりに燃料電池を電気が必要な場所に分散して設置して発電すれば、送電のロスを最小にできますし、燃料電池の排熱も利用できる可能性があります。比較的小型な固体高分子形燃料電池は起動停止が簡単にできるので、必要なときだけ使うことができ無駄がさらに減ります。現在は家庭用燃料電池システムが一部実用化されている他、データセンター用の電源にも使われ始めています。

### 燃料電池の燃料はどこから取ってくるの？

燃料電池の燃料といえばやはり水素です。全宇宙の構成元素の99.9%は水素だと考えられていますが、地球上では水素は水や有機物の状態で存在していることがほとんどで、水素ガスの状態で得ることはできません。しかしこの水素はどこにいけば入手できるのでしょうか？

水素を作る方法として一番に思いつくのが

水の電気分解でしょう。地球上には水が大量にあります。これを分解すれば純粋な水素（と酸素）が取り出せます。実際に水を電気分解して一旦水素を作って貯えておき、燃料電池で発電するシステムが研究されています。これは一種の蓄電装置で、例えば太陽光発電や風力発電でつくった電気エネルギーを水素の化学エネルギーの形で蓄えておくことができます。二次電池で大量に電気エネルギーを蓄えようとする、そのぶん二次電池そのもののコストが無視できませんし、劣化の影響も考慮しなければいけません。水素を蓄えるためには容器があればそれで済むので、高圧ガスボンベが使えますし、極端な話、丈夫な風船でもよく、大容量のエネルギーを極めて低コストで蓄えられると期待されています。もちろん、電気分解のために消費された以上の電気エネルギーを取り出すことはできませんので、新たにエネルギーを生み出せるわけではありません。

水の電気分解以外にも水素を得る方法はさまざまあります。化石燃料を使う方法としては天然ガスの水蒸気改質です。天然ガスの主成分はメタンです。メタンは炭素の周りに4個の水素が結合しています。メタンと水蒸気を混合して、適当な触媒の存在下で反応させると、 $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$  といった反応で水素が得られます。結局は化石燃料を使っているじゃないか！と言われてしまいそうですが、先程紹介したように、熱機関で燃焼して電気を作るよりも、燃料電池は効率的に電力をつくることができます。

水素は他にも製鉄所で生成されています。鉄は鉄鉱石から製造されますが、鉄鉱石は酸化鉄ですので、石炭を使って還元します。石炭は不純物を多く含むため、 $1,200^\circ\text{C}$  の高温で蒸し焼きにされ、コークスというものに変換されます。この過程で大量の水素が発生します。もともと副成物として発生する水素ですので非常に安価に流通し、利用できます。

近年ではバイオマスを使った水素生成が実証段階に入っています。バイオマスとは農林業や畜産の廃棄物のことを指します。従来は燃焼して廃棄していましたが、適切に処理すれば燃料に変換することができます。バイオエタノールなどの言葉を耳にしたこともあるかもしれませんが、東京理科大学理工学部経営工学科の堂脇清志研究室では水素をつくるのが研究されており、燃料電池に供給すれば電気をつくり出すことができます。バイオマスは元を辿れば空気中にあった二酸化炭素を吸収しているのです。カーボンニュートラルという考え方からバイオマスを利用して発生した二酸化炭素は排出量としてカウントしません。バイオマス由来の水素の問題点としては多くの種類の不純物が含まれてしまっていることで、現在、堂脇研究室と筆者の研究室では、水素吸蔵合金をもちいて水素を高純度化する共同研究を進めています。

実は燃料電池は水素以外にも種々の燃料を使って発電することができます。水素の次に最も研究論文が発表されているものはメタノールです。メタノールを空気中で燃料させると  $\text{CH}_3\text{OH} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  という反応を示しますが、メタノールと空気中の酸素を燃料電池に供給すると、負極では  $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$ 、正極では  $3/2\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$  という反応を経由して発電します。メタノールは常温常圧で液体ですので、水素と比べると同じ体積でエネルギー量を大きくできるため、携帯用機器などへの搭載が期待されています。お酒の中に含まれているエタノールでも発電が可能です。焼酎などの蒸留酒は不純物が比較的小さいため、燃料電池にそのまま使うこともできますが、性能が低いので実用化はまだ先でしょう。

### 燃料電池は実用化されているの？

燃料電池はすでに1800年代には発明されており、最初の燃料電池は希硫酸と白金の電極



写真1 (上) スペースシャトル・エンデバー号, (左下) 搭載されていた燃料電池, (右下) 燃料電池 (FC) のガスバージのためのポート

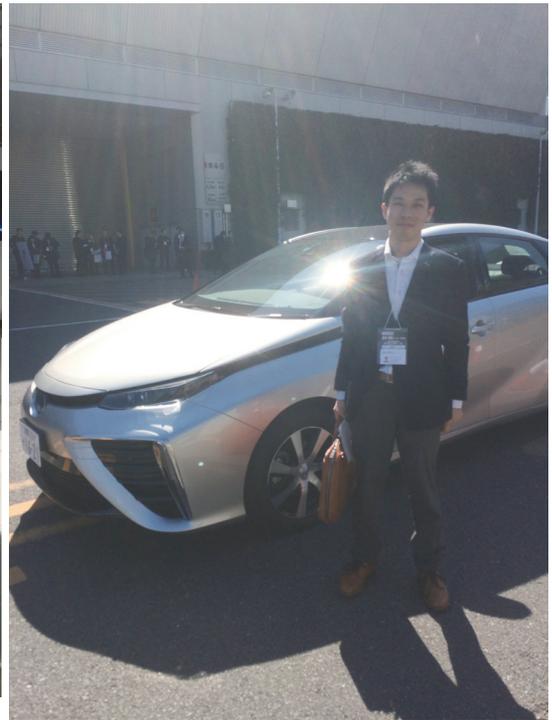


写真2 燃料電池自動車に試乗してみました 素晴らしい乗り心地でした。

を用いたものでした。まだ、現在のような出力も得られず、電解質は液体で扱いづらかったため、しばらく応用例がないまま時が過ぎました。1950年代になりイオン交換膜が開発され、液体の電解質の代わりとして使えるようになり、白金の電極も工夫が重ねられ、ようやく発電機として使える形となりました。ちょうどそのころ宇宙開発が盛んになり、当時アメリカ航空宇宙局で進められていたジェミニ宇宙計画に採用され、燃料電池の世界初の実用例となりました。

宇宙には空気がないためロケットエンジンには水素と酸素が用いられます。燃料電池はちょうど水素と酸素で発電ができ、バッテリーと比べて格段に軽いこと、反応した水は宇宙飛行士が飲み水として使うことができることなどから宇宙での利用としては最適でした。そのとき使用された燃料電池は固体高分子形燃料電池と呼ばれ、材料の改良はあるものの全く同じ原理のものが現在も使われてい

ます。写真1はカリフォルニア・サイエンス・センターで展示されている燃料電池で、実際にスペースシャトル・エンデバー号に使用されたものです。国際会議に出席した際に合間の時間を縫って見学にいきました。

現在実用化が始まっているものとして、最も身近な燃料電池は家庭用燃料電池でしょう。家庭用燃料電池は都市ガスから水蒸気改質で水素を取り出して、発電をします。発電と同時に出てくる排熱を用いれば給湯などにも利用でき、80%程度の高いエネルギー効率を実現できます。

燃料電池自動車も2014年末から一般向けに販売が始まりました。燃料電池で作った電気でもーターを駆動して自動車を走らせます。当然、有害な排気ガスは発生せず、出てくるのは水だけです。バッテリーを積んだ電気自動車と比べると航続距離が長いことが特徴です。さらには非常時に燃料電池自動車が発電した電気を家電などに使うことができます。



写真3 米国カリフォルニア州の水素ステーションと水素供給口相当頑丈にできていました。

筆者も試乗してみましたが、エンジン車と比べると格段に静かで、電気自動車特有の加速感があり楽しめました（写真2）。

まだガソリン車と比べると車体の価格が高いことや、水素を補給する水素ステーションが少ないことから普及が進んでいません。いずれも燃料電池自動車の普及が進めば改善されることなのですが、車体が安くなり水素ステーションが増えない限り燃料電池自動車の普及が進まないといったジレンマを抱えています。いずれにせよ排気ガスが出ない自動車は大変魅力的です。米国カリフォルニア州では燃料電池自動車をはじめとするゼロ・エミッション車を普及させるための規制を設けており、徐々に水素ステーションの設置も進んでいます（写真3）。

我が国でも2009年より再生可能エネルギー等で発電した余剰電力の固定買取制度（FIT）が開始され、太陽電池を住宅の屋根につけたり、余っている土地で発電所を運用したりする例が増えてきました。太陽光発電の最も大きな課題としては発電量が天候まかせだということです。当然のことながら曇が多い日は発電量が落ちますし、夜は全く発電しません。快晴の日もそれはそれで問題で、電力系統の電力が余ってしまうため、発電所の出力を下げるか、太陽光発電に遠慮してもら

うかの選択になります。

一般的には発電所の出力は数時間単位でしか制御できないため急に出力を下げることは難しく、電力が必要になったときに出力を上げるのにも時間がかかります。その場合、どうしても太陽光発電の出力を下げる太陽光発電の運用者に要請することになってしまうのですが、運用者の収入が減ってしまい、太陽光発電への投資を回収できなくなる恐れがでてきます。

そこで、もし燃料電池が電力系統にそれなりの割合で接続されていれば、電力が余る時間帯には燃料電池はすぐに出力を落とすことができますし、逆に電力が不足するときには燃料電池から電力を供給することができます。したがって燃料電池は再生可能エネルギーの普及にも貢献することができます。

### 燃料電池の普及のキは？

燃料電池は少しずつ普及してきていますが、まだ実証段階であるというのが現状です。当研究室では燃料電池を普及させるためのさまざまな研究に取り組んでいます。この場をお借りして紹介させていただきたいと思っています。

一つ目は燃料電池そのもののコスト削減です。まだ生産台数が少ないため組み立てコストが多くを占めていますが、大量生産が開始された場合には、全体の製造コストで最も多くを占めるのが触媒に使われる白金で、およそ40%に相当します。当研究室では触媒の表面積を少しでも拡大する取り組みを行っています。固体高分子形燃料電池は電解質膜の両側に触媒を塗布されている構造をとっています。通常は触媒を塗布するためにエアスプレー等を用いますが、当研究室では静電噴霧法と呼ばれる方法を用いることを検討していま

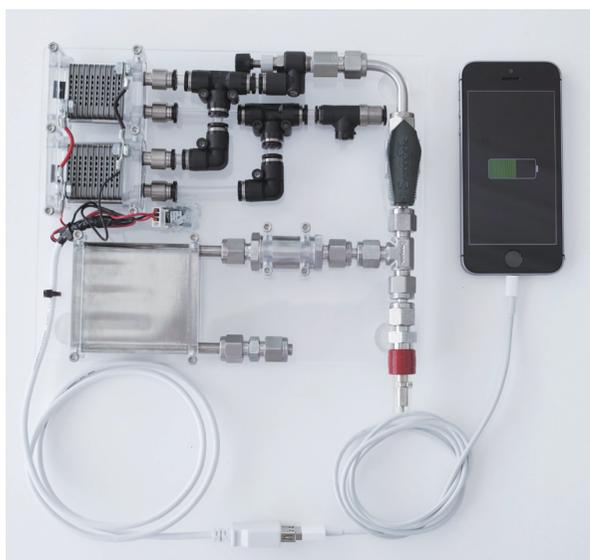


写真4 水素吸蔵合金と燃料電池でスマートフォンを充電するデモンストレーション

す(写真5)。静電噴霧法は極めて緻密に触媒を塗布することができ、触媒の利用効率が高くなり、コスト削減に貢献できると期待されています。

次は水素吸蔵合金による水素の高純度化の研究です。水素吸蔵合金は自身の1,000倍の体積の水素を自身に取り込むことができます。これを高圧ガスボンベで同じことを実現しようとするると1,000気圧が必要となり、現在の技術では大変むずかしいです。しかも水素吸蔵合金は水素のみを吸収するため、不純物を含む水素であっても一度水素吸蔵合金に吸収させた後に、放出することで、不純物濃度を10ppm以下に低減できます。この研究が実現すれば、多種類の不純物を多く含むバイオマス由来の水素が貯められる水素カートリッジに応用できます。写真4は水素吸蔵合金から水素を供給し燃料電池で発電し、スマートフォンを充電するデモンストレーションです。

最後に紹介するのが燃料電池のエネルギーマネジメントの研究です。燃料電池の問題点の一つとして、他の電池と比べると急激に発電出力を変化させることが難しいことが挙げ



写真5 静電噴霧法による固体高分子形燃料電池の触媒層の形成

られています。燃料電池は電気化学反応で発電をしており、反応そのものがあまり速くないことと、発電に必要な水素や酸素はポンプで供給しているため、急に発電出力が必要になってもすぐにそれらのガスを供給できないことが直接的な理由です。また、燃料電池は発電出力を頻繁に変動させると、触媒に使用されている白金が劣化することが知られています。当研究室では、燃料電池にスーパーキャパシタと呼ばれる頻繁に充電してもほとんど劣化がない二次電池をハイブリッド化することで、燃料電池システムの応答の高速化や長寿命化を実現しています。

当研究室では他にもエネルギー技術に関するさまざまな研究を行っています。興味のある方は是非気軽にお越しいただければ幸いです。