

自然科学総合実験レポート

課題8「燃料電池」

[個人情報保護の観点から削除]

[個人情報保護の観点から削除]

表: 正規の授業を受講した

裏: 正規の授業を受講した

1 実験の目的

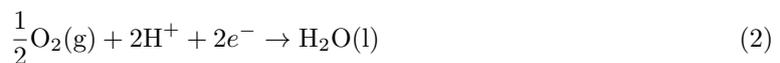
科学技術の発展に伴い、人類はより多くのエネルギーを必要とするようになった。しかし、世界のエネルギー消費量のうち化石燃料が占める割合は大きく、2018年では8割を超えている [1]。化石燃料の消費による二酸化炭素の排出は地球温暖化にかかわる、世界規模で解決されるべき問題である。燃料電池は、温室効果ガスの排出量を削減するために研究されている発電方法の1つである。30~70%という高い発電効率と、発電過程で窒素酸化物や硫黄酸化物を出さないということによって注目されている。

このような背景から、今回の実験課題では燃料電池の動作原理を学ぶとともに、電気分解と燃料電池のエネルギー効率の測定実験を行い、燃料電池を用いた発電システムのエネルギー効率について考察する。

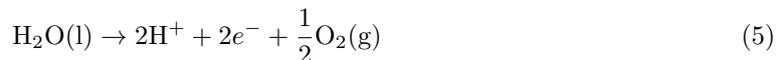
2 実験の原理

本実験では、上記の目的を達成するために、燃料電池実習キットを用いて実験を行った。今回使用した燃料電池は高分子電解膜 (PEM¹) を採用している。まずは、今回使用した燃料電池が発電する仕組みについて説明する。

負極では、燃料として供給された水素のイオン化反応 (式 1) が起きる。PEM は陽子のみを移動させる陽子交換膜の機能をもつため反応式 1 で生じた H⁺ (陽子) は PEM 内を通過して正極にたどり着き、電子は導線を通して負極から正極へと移動する。燃料電池は、このように電子が流れることで発電を行う。正極に移動した陽子と電子は、空気中の酸素²と反応して水を生成する (式 2)。式 1 と式 2 を足すと式 3 となり、これは燃料電池が水の電気分解の逆反応を起こして発電していることを意味する。



また、水の電気分解は式 4 と式 5 を足し合わせて式 6 で表される。



次に、電気分解のエネルギー効率と、燃料電池のエネルギー効率を求める方法について説明する。エネルギー効率 η_e は投入したエネルギー E_{in} に対する得られたエネルギー E_{out} の比として定義される (式 7)。電気分解の場合は電気エネルギー (E_{ele} とする) が E_{in} に、水素の化学エネルギー (E_{H_2} とする) が E_{out} にあたり、燃料電池では逆に E_{ele} が E_{out} に、 E_{H_2} が E_{in} にあたる。

$$\eta_e = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (7)$$

¹polymer electrolyte membrane

²ただし、本実験では水の電気分解によって生じた酸素を燃料電池に供給した。

E_{ele} は電圧 $V[V]$ 、電流 $I[A]$ 、時間 $t[s]$ の積で表される (式 8)。また、 E_{H_2} は発生 (投入) した水素の体積 $V_{H_2}[m^3]$ 、25 °C (298K) における理想気体 1mol の体積 $V_m[m^3/mol]$ 、水の標準生成エンタルピー $\Delta_f H^\circ(H_2O(l))[J/mol]$ を用いると式 9 で表される。

$$E_{ele} = VIt[J] \quad (8)$$

$$E_{H_2} = -\frac{V_{H_2}}{V_m} \Delta_f H^\circ(H_2O(l))[J] \quad (9)$$

本レポートでは、

$$\Delta_f H^\circ(H_2O(l)) = -286 \times 10^3 [J/mol] \quad (10)$$

$$V_m = 24.5 \times 10^{-3} [m^3] \quad (11)$$

$$F = 96485 \quad (12)$$

であるとして計算する (F はファラデー定数)。

3 実験方法

今回の実験課題では、3つの実験を行った。使用した実験道具は燃料電池実習キット、蒸留水、光源、定電圧直流電源、デジタルマルチメーター、接続ボックス、接続ケーブル、抵抗ケーブル (1 Ω 、0.33 Ω)、ストップウォッチである。また、燃料電池に水が入り込んで燃料電池が動かなくなることがあったため、空気を吹き込んで水を追い出すことで対処した。

3.1 実験 1 燃料電池を用いた発電システム

ケーブルはすべて、燃料実習キットの同じ色どうしを接続した。はじめに燃料電池の正極と負極から伸びているチューブを両方とも塞いだ³。次に太陽電池と電気分解素子、燃料電池とファンのそれぞれがケーブルで接続されていないことを確認した。水素タンク、酸素タンクの上側の水位線まで蒸留水を入れ、燃料電池の正極から伸びているチューブを少し開き⁴酸素タンクの水位が下がらなくなったから再びチューブを塞いだ。同様の操作⁵を燃料電池の負極から伸びているチューブに対しても行った。太陽電池のケーブルを電気分解素子に接続し、光源からの光を太陽電池に照射して電気分解を行った。この際、電気分解の電圧を電圧計で測定した (回路図は図 1 を参照)。電気分解を進めて、水素と酸素が 2:1 の割合で生成して水素タンク、酸素タンクに貯蔵されていることを確かめた。水素が 30cm³ まで溜まったらそのうち約 10cm³ の水素を燃料電池に流した。同様に、酸素も約 10cm³ だけ燃料電池に流した。燃料電池とファンをケーブルで接続し、燃料電池で発電してファンが回るかどうか確認した。その後、光源の電源を切り、太陽電池と電気分解素子、および燃料電池とファンの接続を外した。

³今回はクランプを使った

⁴クランプを少し緩めた

⁵「酸素」を「水素」と読み替えること

3.2 実験2 電気分解の効率を求める

はじめに電源の電圧が0Vに設定されていることを確認した。電気分解素子、定電圧直流電源、デジタルマルチメーター2台⁶を、図1の回路となるように接続した。燃料電池の負極側のチューブを開けて水素タンク内の水素を10cm³にした後、クランプを閉じた。電源の電圧を1.8Vに設定して電気分解素子に電圧をかけ、水素タンクに溜まった水素の体積が13, 16, 19cm³に達したときの時間⁷、電圧、電流を記録した。電源の出力を止め、再び燃料電池の負極側のチューブを開けて水素タンク内の水素を10cm³にした。その後、電源の電圧を2.0Vに設定して同様の記録を行った。記録が終わったら、電源を切った。

3.3 実験3 燃料電池の効率を求める

電気分解素子、燃料電池、電源、デジタルマルチメーター2台を図1の回路になるよう接続した。このとき、まだ抵抗は接続しなかった。電圧値を確認し、0.80V以上であり燃料電池で発電出来ていることを確認した。電気分解装置に電圧をかけ、水素を30cm³以上、cm³以上ため、たまったら電源を切った。回路に1.0Ωの抵抗を接続し、水素が30cm³になったときを0秒として水素の体積が27, 24, 21cm³の時の時間、電圧値、電流値を記録して抵抗を外した。次に抵抗を0.33Ωのものに変えて水素が19cm³となったときを0秒として水素の体積が16, 13, 10cm³の時の時間、電圧値、電流値を記録した。記録が終わったら抵抗を外し、実験に使用した器具を片付けた。

3.4 各実験で使用した回路

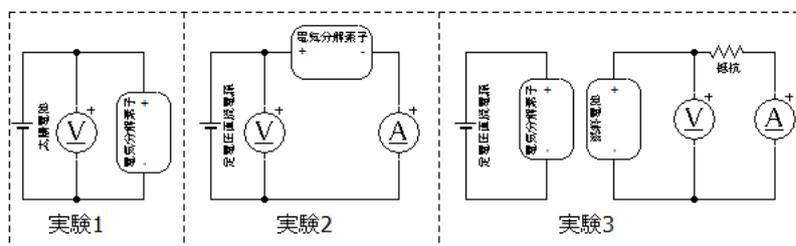


図1: 実験で使用した回路の回路図(今回は、電流計、電圧計にはデジタルマルチメーターを使用した。)

4 結果

4.1 実験1

燃料電池とファンをケーブルで接続したところ、ファンが回った。そのため燃料電池で発電できることが確認できた。このときタンク内の水素の体積が減ったため、式1と式2の反応によって発電さ

⁶電圧計と電流計としてそれぞれ1台ずつ使用した。電圧計の測定レンジは直流のV単位、電流計も測定レンジはA単位にした。

⁷電圧をかけ始めたときを0秒とした

れていることが確認できた。電気分解の電圧は、電気分解をはじめた直後はおよそ 1.670V であったが、時間が経つにつれて徐々に電圧が下がり、11 分経過したときにはおよそ 1.663V まで下がった。

4.2 実験 2

電気分解装置に電圧をかけ、水素の体積が 13, 16, 19cm³ に達したときの時間、電圧、電流を記録した結果と、データをもとに計算した電力 (有効数字 2 桁) をを表 1 にまとめた。また、図 2 は横軸を時間 t 、縦軸をタンク内の水素の体積としてプロットした結果 (問題 1 への回答) である。実線と点線は得られたデータを最小二乗法で線形回帰して得たものである。線形回帰できることから、タンク内の水素の体積は電気分解した時間の 1 次関数とみなせると分かる。

表 1: 蒸留水を電気分解したときの、タンク内の水素の体積、電気分解の電圧、流れた電流、消費された電力

$V_{\text{H}_2(\text{tank})}/\text{cm}^3$	1 回目 (電源電圧 1.8V)				2 回目 (電源電圧 2.0V)			
	t/s	V/V	I/A	P/W	t/s	V/V	I/A	P/W
10	0	1.80	0.24	0.43	0	1.990	0.42	0.84
13	94	1.805	0.24	0.43	60	1.990	0.42	0.84
16	200	1.805	0.24	0.43	112	1.991	0.41	0.82
19	301	1.805	0.24	0.43	176	1.992	0.40	0.80

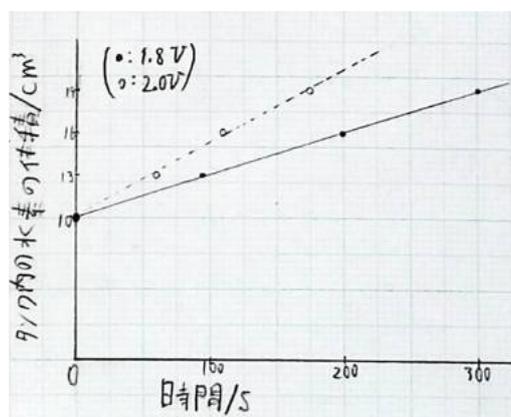


図 2: タンク内の水素の体積と電気分解した時間の関係 実線と点線は得られたデータを最小二乗法で線形回帰して得たものである。

4.3 実験 3

回路に抵抗を接続し、水素の体積が 27, 24, 21cm³ になった時の時間、電圧値、電流値と、水素の体積が 16, 13, 10cm³ になった時の時間、電圧値、電流値、またそのとき接続されていた抵抗の値とこれらのデータから計算される電力 (有効数字 2 桁) を表 2 にまとめた。

表 2: 燃料電池で発電したときの、タンク内の水素の体積、経過した時間、燃料電池の電圧、流れた電流、消費した電力

抵抗が 1.0 Ω のとき					抵抗が 0.33 Ω のとき				
$V_{\text{H}_2(\text{tank})}/\text{cm}^3$	t/s	V/V	I/A	P/W	$V_{\text{H}_2(\text{tank})}/\text{cm}^3$	t/s	V/V	I/A	P/W
30	0	0.550	0.39	0.21	19	0	0.481	0.44	0.21
27	67	0.539	0.38	0.20	16	50	0.456	0.45	0.20
24	126	0.531	0.38	0.20	13	105	0.448	0.44	0.20
21	189	0.522	0.37	0.19	10	157	0.439	0.43	0.19
平均値		0.5355	0.38	0.20	平均値		0.456	0.44	0.20

5 考察 (設問への回答)

実験 1 の結果について考察する。時間が経つにつれて徐々に電圧が下がっていったのは、水素を消費して水の生成が遅くなっていったためであると考えられる。

実験 2 の結果について考察する。水の電気分解の反応式 (式 4、式 5) によると、生成する水素の物質量は電源の電圧ではなく通った電気量に依存する。そこで表 1 のデータから通った電気量を計算⁸し、その結果をプロットして表 3 と図 3 を得た。したがって、実験 2 の結果からは通った電気量 Q と

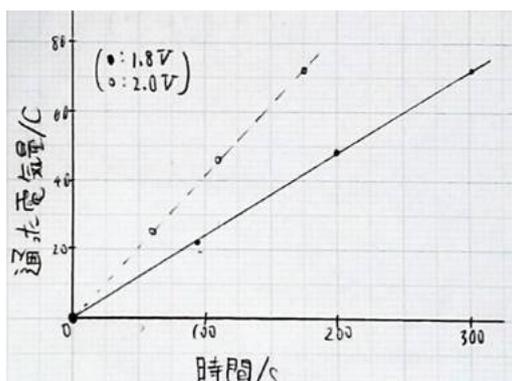


表 3: 通った電気量を計算した結果 (Q は通った電気量 [C] とする)

	電源電圧が 1.8V のとき			電源電圧が 2.0V のとき				
t/s	0	94	200	301	0	60	112	176
Q/C	0	22.56	48.00	72.24	0	25.20	46.78	72.70

図 3: 電気分解した時間と通った電気量の関係 実線と点線は得られた結果を最小二乗法で線形回帰して得たものである。

タンク内の水素の体積 $V_{\text{H}_2(\text{tank})}$ が両方とも時間 t の 1 次関数とみなせることがわかる。よって $V_{\text{H}_2(\text{tank})}$ は Q の 1 次関数とみなすことができ、このことは式 4 と式 5 に合っている。そのため、この実験で得られたデータは妥当なものであると考えることができる。

また、実験で得られたデータをもとに電気分解のエネルギー効率を求める⁹(有効数字 2 桁) と、式 7、8、9 と式 10、11 から電圧が 1.8V の場合は

$$\eta_e^{\text{EL}} = \frac{-\frac{(19-10) \times 10^{-6}}{2.45 \times 10^{-3}} \times (-286 \times 10^3)}{1.805 \times 0.24 \times 301} \approx 0.81 \quad (13)$$

⁸電流を時間で積分した結果を、台形の面積の和として近似して求めた

⁹数値はタンク内の水素の体積が 19cm^3 のときのものを用いた

となり、電圧が 2.0V の場合は

$$\eta_e^{EL} = \frac{-\frac{(19-10) \times 10^{-6}}{2.45 \times 10^{-3}} \times (-286 \times 10^3)}{1.992 \times 0.40 \times 176} \approx 0.75 \quad (14)$$

となる。この結果を比べると、電源の電圧が高いほうが、電気分解のエネルギー効率が低くなるということがわかる。この原因としては、たとえば電源の内部抵抗で消費されるエネルギーが増えるということが考えられる。また、ファラデー効率 (有効数字 3 桁) を計算すると、式 12 にあるファラデー定数の値を用いて、電圧が 1.8V のときは

$$\frac{\frac{(19-10) \times 10^{-6}}{24.5 \times 10^{-3}} \times 2 \times 96485}{72.24} \approx 0.981 \quad (15)$$

電圧が 2.0V のときは

$$\frac{\frac{(19-10) \times 10^{-6}}{24.5 \times 10^{-3}} \times 2 \times 96485}{72.70} \approx 0.975 \quad (16)$$

となり、電源の電圧が高いほうがファラデー効率が低くなるということ、つまり水の電気分解に使われる電子の割合が小さくなるということがわかる。その原因としては、たとえば水の電気分解ではない何らかの反応に電子が使われていることが考えられる。

次に実験 3 の結果について考察する。実験で得られたデータをもとに燃料電池のエネルギー効率を求める¹⁰と、式 7、8、9 と式 10、11 から抵抗が 1.0Ω の場合は

$$\eta_e^{FC} = \frac{0.5355 \times 0.38 \times 189}{-\frac{(30-21) \times 10^{-6}}{2.45 \times 10^{-3}} \times (-286 \times 10^3)} \approx 0.37 \quad (17)$$

となり、抵抗が 0.33Ω の場合は

$$\eta_e^{FC} = \frac{0.456 \times 0.44 \times 157}{-\frac{(19-10) \times 10^{-6}}{2.45 \times 10^{-3}} \times (-286 \times 10^3)} \approx 0.30 \quad (18)$$

となる。この結果を比べると、抵抗が 0.33Ω の場合よりも抵抗が 1.0Ω の場合のほうが燃料電池のエネルギー効率が高くなるということがわかる。また、本実験で得られたデータ (表 2) にある電力の値は、補足資料 [2] にある電流-電力特性の図にあるものよりも低い値になっている。この原因としては、燃料電池から水を追い出すために空気を吹き込んだあとに、チューブを開けたまましばらく水の電気分解を行って空気を追い出す工程で、空気の追い出しが不十分であったことが考えられる。ここで、式 12 にあるファラデー定数の値を用いて水が生成するときに使われた電子のうち抵抗と電流計を通ったものの割合 (有効数字 2 桁) を求めると、抵抗が 1.0Ω の場合は

$$\frac{0.38 \times 189}{\frac{(30-21) \times 10^{-6}}{24.5 \times 10^{-3}} \times 2 \times 96485} \approx 1.0 \quad (19)$$

抵抗が 0.33Ω の場合は

$$\frac{0.44 \times 157}{\frac{(30-21) \times 10^{-6}}{24.5 \times 10^{-3}} \times 2 \times 96485} \approx 0.98 \quad (20)$$

となる。この実験では燃料電池以外に電源をつないでいないことを考えると、この割合が 1 を超えることはない¹¹ため抵抗が 0.33Ω の場合については測定ミスなど実験に不備があったことが考えられる

¹⁰電圧、電流は平均値を用いた

¹¹小数第 3 位は 1 であった

が、抵抗が 1.0Ω の場合のほうが水の生成に使われた電子のうち仕事を行ったものの割合が大きいと考えられる。 0.33Ω のときの計算結果が出た原因には、たとえばストップウォッチや電圧計などを見た時刻とタンクの水素の体積を見た時刻の差が影響したことや、電流計などの読み間違いが考えられる。これらを防ぐには、たとえば計器の置き方を工夫して、写真や動画を撮って複数のデータを同時に記録するという方法が考えられる。

ここまでは実験の結果について考察してきた。ここからは、燃料電池を用いた発電システムに適した実際の運用法や他のエネルギー蓄積・発電システムと比較したときの特徴について実験結果やそれについての考察をもとにして考察する。実験1では、太陽電池を用いて水を電気分解して発生した水素を使い、発電ができることを確認した。これはつまり太陽光のエネルギーを水素という形で貯蔵し、燃料電池を用いて取り出すことができるということだ。水素の工業的な製造法には水蒸気改質法、電気分解法、製鉄やソーダ工業での副生がある [3] が、もちろんこれらは熱や電気という形でエネルギーを投入している。「実験の目的」にも書いたように、燃料電池は温室効果ガスの排出量を削減するために研究されている発電方法である。そのため、水素を生産する際にも温室効果ガスの排出が少ないような方法でエネルギーを供給するべきであると考えられる。また、燃料電池は他のエネルギー蓄積・発電システムと比較すると、振動や騒音が少ないためビルの内部や市街地にも設置可能である、資源が確保しやすい、排熱も利用することでさらにエネルギー効率が高められる¹²、小規模であってもある程度のエネルギー効率を達成できるという利点がある [4][5][6]。また、他のエネルギー蓄積・発電システムと比較した不利点には水を電気分解して水素にして貯蔵し、その水素を再び電気として使用する場合のエネルギー損失が蓄電池の充放電よりも大きくなることが懸念されているという点や、海外から水素を輸入する場合は運搬に大量のエネルギーが必要になるという点、低コスト化や電池寿命の延伸、信頼性の向上などの課題があるという点がある [4][6]。これらの点を考えると、燃料電池を用いた発電システムを運用する際は、環境展望台のウェブサイト [5] にもあるように燃料電池は水素の貯蔵性の高さを活かして局所的な、非常時に備えた電源として利用し、ほかの電源と使い分けるのが適当であると考えられる。その際には、温室効果ガスの排出量が少ない発電方法で生産した電力を用いて、水素を製造するのが望ましいと考えられる。

次に燃料電池のエネルギー効率を高めるためには高分子電解質膜 (PEM) をどう改良すればよいか考える。PEM は基本部分にテフロン構造を持ち、化学的・熱的に安定で、さらに酸素が溶け込みやすいという特徴を持ち [7]、PEM としては主にスルホン基をもつフッ素樹脂系イオン交換体が用いられている [8]。ほとんどの PEM は湿潤状態でのみ高いプロトン導電率を示すため、簡便な水分管理法の確立は重要な課題である [8]。また、燃料電池の中では PEM と電極が接合されていて、電極の表面には水の生成を促す触媒がついている [9]。使用されている触媒は主に白金である [9]。また、燃料電池のエネルギー損失の原因には、電子の移動に伴う様々なものが存在する [11]。そのため、電子を移動しやすくすることはエネルギー効率の向上につながると考えられる。このことを考えると、PEM のプロトン導電率を向上させれば、電子が燃料電池を電氣的に中性に保つために移動しやすくなってエネルギー効率が上がると考えられる。

¹²ただし、今回使用したような高分子電解質型燃料電池の場合は、温度が低く排熱の利用価値が少ない [10]

6 結論

本実験課題の目的は、動作原理を学ぶとともに、電気分解と燃料電池のエネルギー効率の測定実験を行い、燃料電池を用いた発電システムのエネルギー効率について考察することであった。電気分解と燃料電池のエネルギー効率を測定する実験を行い、燃料電池を用いた発電システムのエネルギー効率について考察することができた。実験1の結果、燃料電池を用いて発電ができることが確認できた。実験2の結果、蒸留水を定電圧直流電源で電気分解した際のエネルギー効率を求められたほかに、発生する水素の体積は電気分解した時間の1次関数とみなせることが確認できた。実験3の結果、燃料電池で発電した際の電圧、電流を測定することができ、エネルギー効率を求めることができた。これらの結果から、水の電気分解の反応式と照らし合わせることで実験2で得られたデータは妥当であること、電源の電圧が高いと水の電気分解以外の反応に電子が使われること、ありえないはずの値が出た原因は何なのかということ、燃料電池の利点と不利点は何なのかということ、適した運用方法は何なのかということ、高分子電解質膜をどのように改良すれば燃料電池のエネルギー効率が上がるのかということについて考察することができた。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁「エネルギー需給の概要」 閲覧:2021/10/21
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/2-2-1.html>
- [2] 自然科学総合実験の Google Classroom に掲載されている資料
「2021 前期_課題 8_補足事項.pdf」 6 ページ目 閲覧:2021/11/01
- [3] 日本原子力開発機構「様々な水素製造法」 閲覧:2021/11/01
https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/faq/h2_product.html
- [4] 環境展望台「環境技術解説 燃料電池」 閲覧:2021/11/01
<https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=4>
- [5] 水素・燃料電池実証プロジェクト「燃料電池 (FC) とは」 閲覧:2021/11/01
http://www.jari.or.jp/portals/0/jhfc/beginner/about_fc/index.html
- [6] 中国電力「燃料電池のしくみ・特徴」 閲覧:2021/11/01
<https://www.energia.co.jp/energy/general/newene/newene3.html>
- [7] 東芝「個体高分子型燃料電池の開発」 閲覧:2021/11/01
<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2000/01/tech.pdf>
- [8] 内田裕之、渡辺政廣「固体高分子形燃料電池の概要」 閲覧:2021/11/01
https://www.jstage.jst.go.jp/article/membrane1976/28/1/28_1_2/_pdf
- [9] 秀和システム「これだけ! 燃料電池」 110~111 ページ

- [10] 河原和生、長野進「解説・展望 高分子電解質型燃料電池」閲覧:2021/11/01
https://www.tytlabs.com/japanese/review/rev294pdf/294_013_kawahara.pdf
- [11] 津島将司、平井秀一郎「解説 燃料電池の原理と特徴」閲覧:2021/11/01
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jhts/35/5/35_224/_pdf