

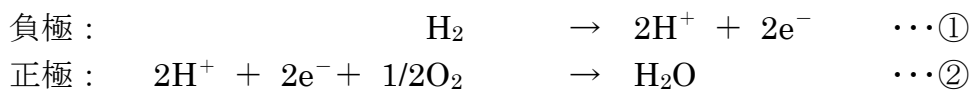
〔実験の目的〕

燃料電池とエネルギー利用効率についての基礎を学ぶ。

〔実験の原理〕

1) 燃料電池とは何か

燃料電池の原型は希硫酸に白金触媒を浸したものに水素と酸素を燃料として供給する構造になっている。①+②より $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ となり、結局水の電気分解の逆反応を起こすことで電子の流れを生み出している。



本実験の燃料電池は水素を燃料とし、電解質に陽子交換膜である高分子電解質膜 (PEM) を用いる。水素ガスが負極で水素イオンと電子に分かれると電子は導線を通じて正極側に流れ、水素イオンは PEM を透過して正極にたどり着く。正極に集まった水素イオンと電子、空気中の酸素が反応して水が生成する。

2) 燃料電池と化学電池

化学電池のひとつであるボルタ電池の全反応は $\text{Zn} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{H}_2$ で表される。この反応の右辺のエネルギーと左辺の化学エネルギーの差を電気エネルギーとして取り出すことができる。燃料電池も原理的にはこれと同じであるが、化学電池が電池自身の化学エネルギーを使い切った時点で電池の機能を失うのに対して、燃料電池は外部から燃料を導入するので連続的に電気エネルギーを生み出すことができる。

3) 燃料電池の効率

入力したエネルギーに対する得られたエネルギーの比を効率という。熱機関を含む発電方法では次の式で表されるカルノー効率を超えることができない。この値は現実的には 40~50% 程度が技術的な限界である。

$$\eta_c = 1 - T_l/T_h \quad (T_h : \text{高温熱源}, T_l : \text{低温熱源})$$

一方、燃料電池は熱機関を経由せず化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換するのでカルノー効率の制限を受けず、高効率を期待できる。エネルギー効率は次の式で表される。

$$\eta_{\text{energy}} = E_{\text{electric}} / E_{\text{hydrogen}}$$

〔実験〕

○実験器具

- ・ 実習キット
- ・ 蒸留水
- ・ 定電圧／定電流直流電源
- ・ 接続ボックス
- ・ 光源
- ・ デジタルマルチメーター× 2
- ・ ケーブル× 8
- ・ 抵抗ケーブル× 9
- ・ ストップウォッチ

<テーマ1：実習キットを用いて燃料電池の機能と動作原理を確認する>

○手順

- 1) 実習キットの3つのクランプが全て閉じていることを確認し、接続を外す。
 - 2) 水タンクに蒸留水を上のチューブが浸るまで加える。
 - 3) 水素タンクに蒸留水を10cm³のラインまで加え、上部クランプを開き電気分解素子に蒸留水が行き渡るようにして再びクランプを閉じる。
 - 4) 燃料電池の上下クランプを開く
 - 5) 水素タンクに蒸留水を「-A-」のラインまで加え、燃料電池素子全体が蒸留水で浸るようにして下部クランプを閉じる。
 - 6) 膨張シリンダーを取り付け、燃料電池素子の上部クランプを閉じる。
 - 7) 太陽電池と電気分解素子を接続し、光源を用いて電気分解を始める。
 - 8) 水素タンクに気体が15 cm³溜まったらその時間を記録した後、燃料電池素子の上部クランプを開き、続いて下部クランプを開いて燃料電池中の水を水素で置換し、下部クランプを閉じる。
 - 9) ファンと燃料電池を接続し、ファンが回ることを確認する。
- ☆) 全ての電氣的接続を外し、水素タンクや燃料電池素子中のガスを除いて水を補充した後、全てのクランプを閉じる。

○結果の整理と考察

- 1) レポート1枚目 [実験の原理] に記した

2)

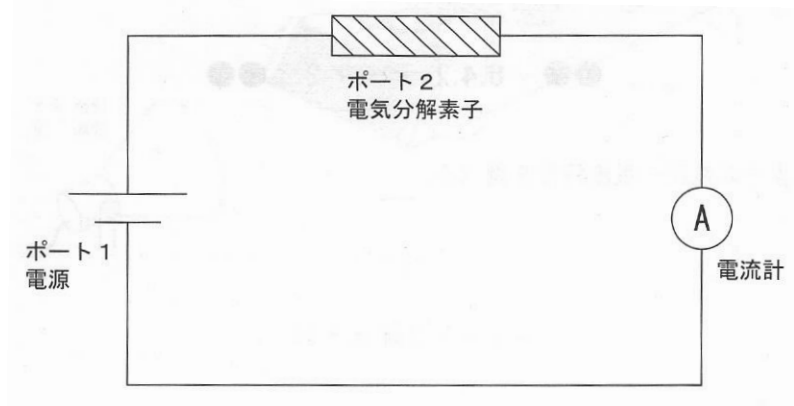
	リン酸型 (PAFC)	融解炭酸塩型 (MCFC)	固体酸化物型 (SOFC)
電解質	リン酸	融解炭酸塩	安定化ジルコニア
電荷担体	水素イオン	炭酸イオン	酸化物イオン
動作温度	150~220℃(要触媒)	600~700℃	900~1000℃
発電効率	~45%	~60%	~60%
主な材料	炭素材料	ニッケル、ステンレス	セラミクス
利用規模	中規模型	MW 級大規模集中型	MW 級大規模集中型

- 3) 利点
・ CO₂を排出しない
・ 発電効率が低い
・ 排熱利用可能
 - 問題点
・ 耐久性 (製品寿命)
・ 小型化、低価格化
・ 低温始動性
・ 燃料の供給
- 4) 燃料電池は化石燃料を燃焼させることなく、改質によって燃料を得られるので残り少ない資源を効率よく利用できる。また、太陽光発電によって生産された電力の貯蔵において効果を発揮すると考えられる。
 - 5) コージェネレーションとは発電の課程で発生する排熱を回収し、ボイラーや給湯に再利用するシステムである。これにより総合効率が80%程度まで高められる。
 - 6) 水素タンクに気体が15 cm³溜まるのに8分20秒かかったので、電気分解素子の気体発生速度は $v=15/500=0.03$ (cm³/s)

<テーマ2：PEM 電気分解素子の電圧－電流特性を調べる>

○手順

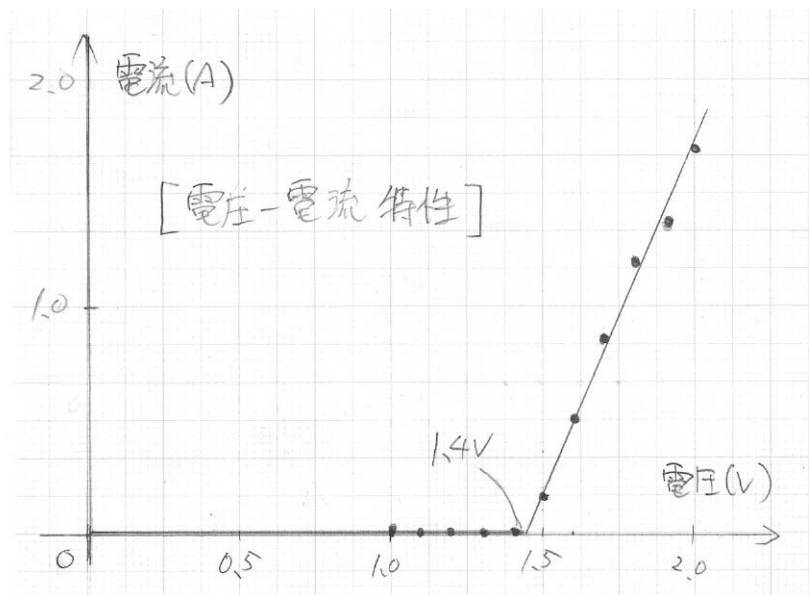
- 1) 電源装置の電源を入れ、電圧が 0V になっていることを確認する。
 - 2) 接続ボックスを用いて実習キット、電源装置、電流計を下図のように接続する。
 - 3) 電源装置の設定電圧を 0.1V 刻みで 1V から 2V まで上げていき、各電圧の時の電流値を記録する。
- ☆) 電源装置の出力を止めた後、膨張シリンダーに約 1cm の高さの分だけ蒸留水を加え、燃料電池素子の上下クランプを開放して水素タンク内の気体を全て除き再びクランプを閉じる。



○結果の整理と考察

1)

電圧(V)	電流(A)
1.00	0.00
1.10	0.00
1.20	0.00
1.30	0.00
1.40	0.01
1.50	0.16
1.60	0.51
1.70	0.87
1.80	1.23
1.90	1.34
2.00	1.70



- 2) 電圧を大きくしてもある電圧に達するまでは全く電流が流れないが、それに達すると急激に電流が流れるようになる。
- 3) 電気分解により発生する H_2 が電極の表面を覆って分極（水素が逆にイオンになる反応）が起こり、その起電力が外部から加えた電圧に対して反対に作用するため、理論値より高い電圧が必要となる。分極は減極剤として適当な酸化剤を存在させることで防ぐことができる。

<テーマ3：PEM 電気分解素子のエネルギー利用効率、ファラデー効率を調べる>

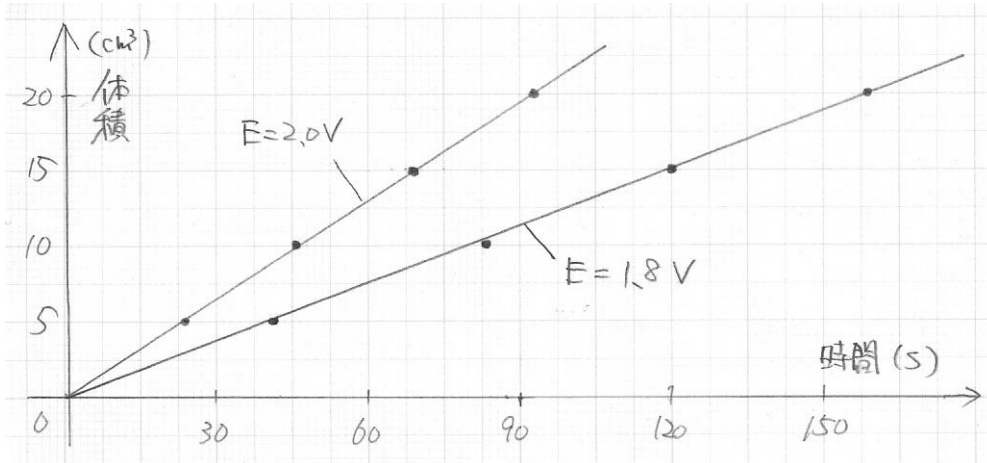
○手順

- 1) 電源装置の出力を 1.6V~2.0V の任意の電圧にセットする。
 - 2) 電気分解素子に電圧をかけ、発生した水素ガスの体積が 0,5,10,15,20cm³ に達したときの時間と電流を記録する。
 - 3) 電源を切り、燃料電池素子の上下クランプを開放して水素タンク中の気体を除く。
 - 4) 1回目と異なる電圧でもう一度行う（水素ガスは次の実験で用いるので除かない）。
- ☆) 全ての電氣的接続を外す

○結果の整理と考察

1)

V (cm ³)	1回目				2回目			
	t (s)	E (V)	I (A)	P (W)	t (s)	E (V)	I (A)	P (W)
0	0.00	1.8	1.02	1.836	0.00	2.0	1.69	3.380
5	42.60	1.8	1.01	1.818	23.89	2.0	1.68	3.360
10	83.07	1.8	1.00	1.800	46.26	2.0	1.68	3.360
15	120.60	1.8	1.00	1.800	68.89	2.0	1.68	3.360
20	159.45	1.8	1.00	1.800	93.04	2.0	1.68	3.360



2) 電気分解素子のエネルギー効率

$$\eta_{\text{energy}} = E_{\text{hydrogen}} / E_{\text{electric}}$$

$$E_{\text{hydrogen}} = -V_{\text{hydrogen}} \cdot \Delta H^{\circ}_f(\text{H}_2\text{O}) / V_m$$

$$\Delta H^{\circ}_f(\text{H}_2\text{O}) = -285.8 \text{ (kJ/mol)} \quad \dots \text{水の標準生成エンタルピー}$$

$$V_m = 22.414 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{/mol)} \quad \dots \text{理想気体のモル体積}$$

i) E=1.8V のとき

$$\begin{aligned} \eta_{\text{energy}} &= 2.0 \times 10^{-5} \times 285.8 \times 10^3 / (1.811 \times 159.45 \times 22.414 \times 10^{-3}) \\ &= 0.8832 \end{aligned}$$

ii) E=2.0V のとき

$$\begin{aligned} \eta_{\text{energy}} &= 2.0 \times 10^{-5} \times 285.8 \times 10^3 / (3.364 \times 93.04 \times 22.414 \times 10^{-3}) \\ &= 0.8148 \end{aligned}$$

- 3) 電気分解素子の消費電力は時間によって変化しないことが上の表より読み取れる。
 4) 水素の生成速度は時間によって変化しないことが上のグラフ(直線)よりわかる。

グラフの傾きより $E=1.8$ のとき $1.22 \text{ (cm}^3\text{/s)}$

$E=2.0$ のとき $2.15 \text{ (cm}^3\text{/s)}$

- 5) 電気分解素子のファラデー効率

$$\eta_{\text{Faraday}} = V_{\text{hydrogen}}(\text{実験値}) / V_{\text{hydrogen}}(\text{理論値})$$

- i) $E=1.8\text{V}$ のとき

水素の物質質量

$$M_{\text{hydrogen}}(\text{理論値}) = I \cdot t / 2F = 1.01 \times 159.45 / 2 \times 96485 = 8.31 \times 10^{-4}$$

理想気体の状態方程式より

$$V_{\text{hydrogen}}(\text{理論値}) = nRT/p = 8.31 \times 10^{-4} \times 8.3144 \times 300 \times 10^{-5} = 2.07 \times 10^{-5}$$

$$\therefore \eta_{\text{Faraday}} = 2.00 \times 10^{-5} / 2.07 \times 10^{-5} = 0.9646$$

- ii) $E=2.0\text{V}$ のとき

同様に計算し、 $\eta_{\text{Faraday}} = 0.9887$

- 6) 発生した水素が素子やチューブに残っていたりするので正確な体積を測ることができないため、実験値と理論値に違いが生じる。

- 7) 太陽電池の起電力 (光源との距離: 30cm)

水素発生速度は電力に比例すると考えられるので、 $v=kP$ とおける。

テーマ3の結果より k を求める。

$E=1.8\text{V}$ のとき $v=0.122$ 、 $P=1.811$ より $k_1=0.06731$

$E=2.0\text{V}$ のとき $v=0.215$ 、 $P=3.364$ より $k_2=0.06378$

以下、 $k=(k_1+k_2)/2=0.06554$ として扱う。

テーマ1での電気分解素子の水素発生速度は $v=0.03(\text{cm}^3\text{/s})$ であるから、

$v=kP$ の関係より $P=0.4577(\text{W})$

テーマ2の表より、 1.5V のとき $P=0.16(\text{W})$ 、 1.6V のとき $P=0.51(\text{W})$

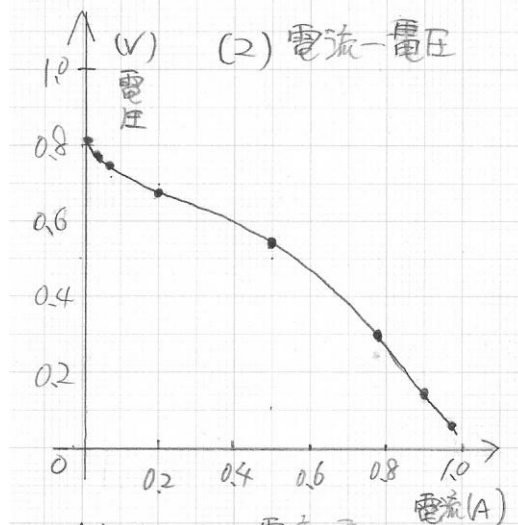
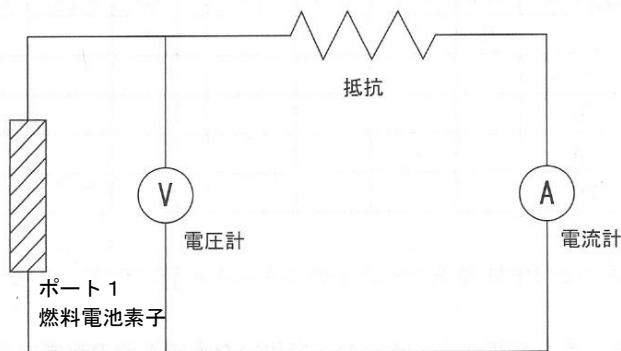
\therefore 太陽電池の起電力は 1.5V と 1.6V の間にあると推定できる。

<テーマ4 : PEM 燃料電池の出力特性を調べる>

○手順

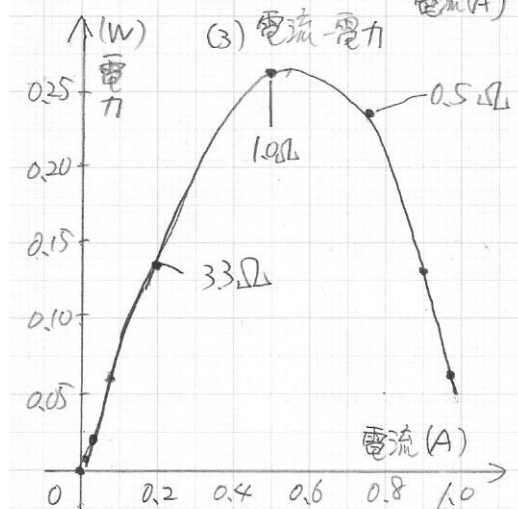
- 1) 電源装置と電気分解素子を接続する。
- 2) 接続ボックスを用いて実習キット、電圧計、電流計、抵抗を下図のように接続する。
- 3) 燃料電池素子の上下クランプを開いて水素ガスを充填し、下部クランプを閉じる。
- 4) $\infty \Omega$ (抵抗を接続しない状態) から順に 330、100、33、10、3.3、1、0.5、0.33、0 と抵抗を変えてそれぞれの電流、電圧を測定する。

☆) 燃料電池の下部クランクを開けて水を除き、電気分解素子に電圧をかけて水素ガスを 20cm^3 まで溜める。



○結果の整理と考察

R (Ω)	E (V)	I (A)	P (W)
∞	0.833	0.00	0.000
330.00	0.820	0.01	0.008
100.00	0.805	0.01	0.008
33.00	0.782	0.03	0.023
10.00	0.744	0.08	0.060
3.30	0.678	0.20	0.136
1.00	0.528	0.49	0.259
0.50	0.297	0.77	0.229
0.33	0.142	0.91	0.129
0.00	0.063	0.98	0.062



4) グラフより 1.0Ω 前後の抵抗で最大の出力となる。

<テーマ5：PEM 燃料電池素子のエネルギー利用効率、ファラデー効率を調べる>

○手順

- 1) 接続ボックスに 1.0Ω の抵抗を接続して電流、電圧を測定し、計時を開始する。
- 2) 水素の体積が 15、10(cm³)になったときの時間、電流、電圧を測定する。

○結果の整理と考察

1)

V _{H2} (cm ³)	t (s)	E (V)	I (A)	P (W)
20	0.00	0.538	0.50	0.269
15	84.33	0.506	0.47	0.238
10	165.77	0.491	0.46	0.226
平均		0.512	0.48	0.244

2) 燃料電池素子のエネルギー効率とファラデー効率

$$\eta_{\text{energy}} = E_{\text{electric}} / E_{\text{hydrogen}} = 0.3175$$

$$\eta_{\text{Faraday}} = V_{\text{hydrogen}}(\text{計算値}) / V_{\text{hydrogen}}(\text{消費量}) = 0.8980$$