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

Title	備長炭を空気極としたグルコース燃料電池の改良
Sub Title	Improvement of glucose fuel cell using bincho charcoal as air electrode
Author	福山, 勝也(Fukuyama, Katsuya) 大橋, 敦史(Ohashi, Atsushi) 大場, 茂(Ohba, Shigeru)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2008
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of the natural science). No.43 (2008.) ,p.63- 74
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，電池に関する実験を平成17年度から開始した。その過程で，文献を参考にしてグルコース燃料電池を組み立てたが，ソーラーモーターが回転しないという問題が生じた。そこで実験条件を検討したところ，白金箔電極の表面積が不足していること，また備長炭が濡れて短時間に失活するためであることがわかった。これらの問題は白金黒電極を用い，さらに備長炭をテフロンコーティング加工することで解決することができた。また備長炭が空気極として作用する仕組みについてもあわせて考察した。
Notes	創立150年記念号 : 実験科目の新しい試み = 155th anniversary number : new trials of student experiment classes
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20080331-0063

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. 43, 63–74（2008）

備長炭を空気極としたグルコース燃料電池の改良

福山勝也[†]・大橋淳史[‡]・大場茂[*‡]

Improvement of Glucose Fuel Cell Using *Bincho* Charcoal as Air Electrode

Katsuya Fukuyama, Atsushi Ohashi 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，電池に関する実験を平成17年度から開始した。その過程で，文献を参考にしてグルコース燃料電池を組み立てたが，ソーラーモーターが回転しないという問題が生じた。そこで実験条件を検討したところ，白金箔電極の表面積が不足していること，また備長炭が濡れて短時間に失活するためであることがわかった。これらの問題は白金黒電極を用い，さらに備長炭をテフロンコーティング加工することで解決することができた。また備長炭が空気極として作用する仕組みについてもあわせて考察した。

１．はじめに

最近の科学技術の発展，そしてエネルギー問題や環境問題の観点からみても燃料電池の実験は非常に魅力的なテーマの１つである。手軽に組み立てられるグルコース燃料電池の実験例が図書[1)]に紹介されていたので，それを参考にして器材を準備した。実際に電池を組み立ててみたところ，ソーラーモーターが思うようには回転しないという問題が生じた。電池の組み立て10分後に結線してもソーラーモーターがほとんど回転せず，組み立て直後でもまったく回転しない場合がみられた。起電圧は組み立て直後の約0.9V から10分後には0.75V 程度にまで低下

†慶應義塾大学日吉キャンパス特色 GP 非常勤研究員。明治学院大学教養教育センター（〒244–8539 横浜市戸塚区上倉田町1518）： Center for Liberal Arts, Meiji Gakuin University, 1518 Kamikurata, Totsuka-ku, Yokohama 244–8539, Japan.
‡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 Oct.31, 2007]

するが，これとの関連も不明であった。そこで，原因として考えられるいくつかの項目について調べ検証することにした。

2．グルコース燃料電池の構成と原理

今回実験を行った燃料電池の組み立て方は以下の通りである（図１）。素焼きの半円筒容器の中にグルコースアルカリ溶液（グルコース18g を１M NaOH あるいは KOH 100ml に溶解したもの）を入れる。次に白金箔電極を素焼き容器の中に差し込み，このグルコースアルカリ溶液に浸す。この素焼き容器を200ml ビーカーに入れ，そのビーカー内にもアルカリ液（１M NaOH あるいは KOH）を入れる。さらに，活性化処理を施した備長炭をビーカーの中に入れることで，電池が完成する（図２－図３）。

素焼き容器内には燃料としてのグルコースアルカリ溶液と白金電極が入っている（こちらを燃料極と呼ぶ)。他方，空気中の酸素を取り入れる側の電極（空気極）として備長炭を用いる。アルカリ溶液にこれら両極を浸けると，次のような反応が起こる。

負極（燃料極，白金）：グルコース R-CHO＋２OH^-→グルコン酸 R-COOH＋H_2O＋２e^-

正極（空気極，備長炭）：1/2 O_2＋H_2O＋２e^-→２OH^-

（ただし，詳しく書くと，1/2 O_2＋２e^-→O^{2-}　/　O^{2-}＋H^+→OH^-）

白金は活性な金属であり，グルコースを酸化する触媒として働く。それに伴い水酸化物イオン（OH^-）が消費され，水と電子が生じる。一方，備長炭は空気中から酸素を取り入れて，それ

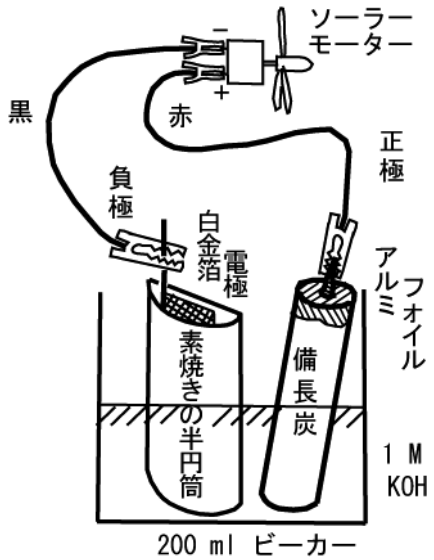

図１　グルコース燃料電池とモーターの結線

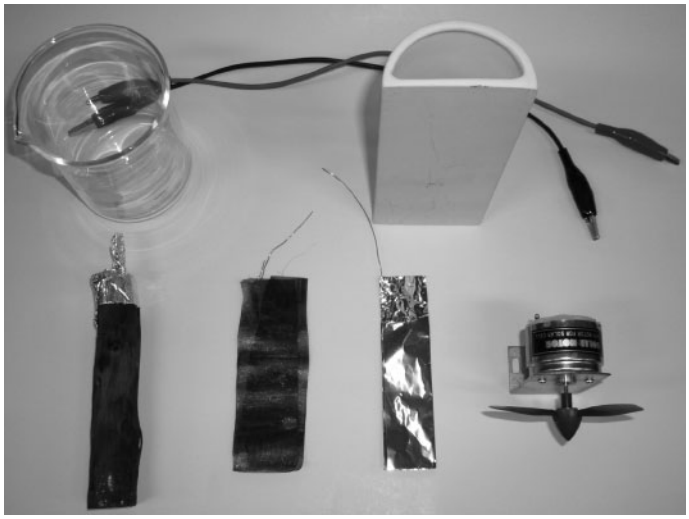

図２　燃料電池組み立て部品（写真上段は左側から200mlビーカー，リード線，半円筒素焼容器。下段は左側から，アルミホイルをつけた備長炭，白金黒電極，白金箔電極，ソーラーモーター）

図３　グルコース燃料電池（組み立て後）

を OH^- に変える。素焼きの容器にはミクロな穴が開いていて，グルコースなどの分子は通りにくいが，プロトン（H^+）は通り抜けることが可能である。したがって両極を導線で結ぶことにより，燃料極の中から H^+ が素焼きの容器の外へ通り抜け（これにより両極での OH^- 濃度が保たれる），これと引き換えに電子が負極から正極に流れることになる。

電池を組み立てた後の実験内容として参考図書[1)] には，起電圧を測定し，またプロペラ付きソーラーモーターに接続して回転を確認するということが書かれていた。起電圧が10分間に減

少する様子を示したグラフも載せている。また，グルコースアルカリ溶液の代わりに，メタノールアルカリ溶液を使用する例も紹介されていた。

3．実験条件の検討

3－1．ソーラーモーターの規格

低電力でも回転するモーターについては，曇り空でも対応が可能なように開発されたソーラーモーターが市販されている（表1）。太陽電池は内部抵抗が大きいため，電流が流れると電圧降下が顕著に起こる。そのため，ソーラーモーターは通常のモーターに比べて内部抵抗を高くし，同じ消費電力でも小さい電流で済むように設計されている。タイプが異なる2種類のソーラーモーターH151とH158を，実際に本実験の燃料電池に使用してみたところ，H158の方が回転させやすかったので以降これを用いることとした。このH158は定格電圧（モーター使用時の適正電圧）の範囲が広いので妥当な結果といえる。なお，燃料電池の電圧が十分であってもモーターが回転しない場合は，電流量が不足している。一般に，モーター始動時には定格電流（定常運転時の電流量の上限）を大幅に超えた電流が流れることが知られており，電池の出力がそれに満たないとモーターは始動しない。ただし，電池に結線したときにモーターが回転しなくても，プロペラを軽く指で動かしてやると回転し始めることがあり，これと電池の作動不良による「まったくモーターが回転しない」という状況とは区別する必要がある。

3－2．素焼き容器の湿潤と備長炭の形状

燃料極が入っている素焼きの容器は実験の使用前には乾燥している状態であるが，組み立て直後では容器の濡れ具合が不十分であるため，うまく機能していない可能性も考えられた。そこで，素焼きの容器をあらかじめ水に浸したときと，実験直前まで乾燥していたときとで比較した。乾燥容器の場合（表2，エントリー a_1），組み立て10分後にモーターに接続したが回転せず，40分浸漬した容器（エントリー a_2）では組み立て直後にモーターに接続したが，プロペラを手で押してやると10秒ほど回転して停止した。しかし，60分浸漬した容器（エントリー

表1　ソーラーモーター

メーカー等	シータスク	シータスク	ウチダ
型	H151	H158	SM-0425
定格電圧[1)]	0.4V	0.4～1.5V	0.4V
定格電流[2)]	16mA/ 0.4V	16mA/0.4V～20mA/1.5V	27mA
回転速度[3)]	300rpm	300～1300rpm	250 rpm

(注)

1）モーター運転時の適正電圧。この電圧で使用することを前提に製造されている。

2）通常運転時（始動時を除く）の電流値の上限。これ以上の過剰電流が流れ続けると，モーターの焼損をまねく。

3）モーターにプロペラなどの負荷がかかっていない状態での，1分間あたりの回転数。

表 2　グルコース燃料電池の組み立て条件とその性能

エントリー	電解質液	燃料極側	空気極（備長炭）側		電池としての性能			
		白金電極	備長炭	電解質 (ml)	無負荷電圧（V）			モーター（H158）の回転
					組立直後	5 分後	10分後	
a_1	1 M NaOH	箔（50×100）　1 枚[1)]	テフロン加工なし	100	0.89	-	0.76	組立10分後，回転せず
a_2	〃	〃	〃	〃	-	-	-	組立直後，ゆっくりと約10秒
a_3	〃	〃	〃	〃	-	-	-	組立直後，回転せず
a_4	〃	〃	テフロン加工なし，割[6)]	〃	-	-	-	組立直後，1 分
b	1 M KOH	箔（50×100）　1 枚	テフロン加工なし	100	-	-	-	組立直後，1 分20秒
c	〃	〃	〃	20	1.20	-	0.96	組立10分後，回転せず
d	〃	〃	〃	50	1.06	0.96	-	組立 5 分後，1 分
e	〃	100×100 mm[2)]	〃	〃	1.04	0.94	-	組立 5 分後，1 分
f_1	〃	50×100+100×100 mm[3)]	〃	〃	1.08	0.92	-	組立 5 分後，2 分45秒
f_2	〃	〃	〃	〃	1.07	0.96	-	組立 5 分後，2 分15秒
g_1	1 M KOH	50×100+100×100 mm	テフロン加工(未使用)[7)]	50	0.91	0.99	-	組立 5 分後，1 分30秒
g_2	〃	〃	テフロン加工(2 回目)[7)]	〃	0.91	0.96	-	組立 5 分後，1 分40秒
g_3	〃	〃	テフロン加工(3 回目)[7)]	〃	0.86	0.90	-	組立 5 分後，1 分
h	〃	白金黒[4)]	テフロン加工（未使用）	〃	-	-	-	組立直後，約10分[8)]
i	1 M KOH	箔（50×100）　2 枚[5)]	テフロン加工（未使用）	50	-	-	-	組立直後，約 3 分

(注)

1）白金箔 50 × 100 mm（厚さ 0.01 mm）をプラスチック板（2 × 30 × 160 mm）に両面テープで固定したもの。

2）プラスチック板に固定していない白金箔 100 × 100 mm。

3）プラスチック板に固定した白金箔 50 × 100 mm と固定していない 100 × 100 mm 白金箔を両方使用した。

4）白金網（100 × 100 mm）に白金の微粉末をメッキしたもの。

5）白金箔にリード線として白金線（0.5 mm ϕ）をスポット溶接したもので，プラスチック板は使わない。

6）表面にクラックが入っている備長炭。

7）「未使用」とは，活性処理後テフロンコーティング加工を施してから一度も使用していないものである。
また「2 回目」とは，一度実験に使用したものを水洗いした後すぐ 2 回目に使用した，という意味である。

a_3）では，モーターは回転しなかった。結論として，素焼き容器を事前に湿らせても，電池としての性能が改善されることはないことがわかった。

一度実験に使用した備長炭は（後に述べるテフロン加工をしない限り）再活性化が必要となる。備長炭は特注してサイズを大体そろえてあるが（詳細は付録を参照），その形状や割れ具合（クラックの入り方）などは，当然ながら１本ごとに異なる。それゆえ，どの備長炭を使用するかによって結果に差が生じるのではないかと思われた。そこで，比較的表面が粗雑で，かつマクロなクラックが入った備長炭を選別して何度か実験を行なったところ，いずれも１分ほどモーターが回転した（エントリー a_4）。これにより，備長炭のマクロな意味での表面積が電池としての性能に利いていることが示唆された。

３－３．備長炭と電解質溶液との接触

参考にした図書[1)] では，電解質溶液は１M KOH となっていたが，それを実験室に常備してある NaOH で代用していた。そこで，電解質溶液を KOH に変えてみたところ，モーターは１分20秒回転した（エントリー b)。この結果を受けて，これ以降はアルカリ液として KOH を用いることとした。

ここで実験中に次のような事実に気がついた。組み立てた後に空気極である備長炭を上下に動かしたところ，アルカリ液に浅く浸けるほど電圧が上がり，深く浸けるほど逆に電圧が下がったのである。そこで，200ml ビーカー中の KOH 溶液の量を100ml（深さはビーカーの８分目）から20ml（深さは１cm 程度）にしたところ，初期起電圧が1.20V，10分後には0.96V となった（エントリー c)。ところが電圧が高いにもかかわらず，モーターは回転しなかった。テスターで電流を測定したところ，12mA しかなかった。このことから，液量が少ないと起電圧は上昇するものの，電流は規定値に達しないことがわかった。液面が高いほど電圧は下がるが，逆に電流は増えるはずであり，両者の兼ね合いが重要である。そこで，KOH 溶液の量を50ml（備長炭の長さ11cm の半分が浸かる程度）にしたところ，組み立て直後の起電圧が1.06V，５分後には0.96V を示し，モーターも１分ほど回転した（エントリー d)。したがってこれ以降，ビーカーに入れる KOH 溶液の量を50ml とすることにした。また，これまで電池の組み立て後に起電圧の変化を10分間計測していたが，それでは電池の性能が劣化してしまうので，これ以後は起電圧変化の測定を５分間に短縮することにした。

３－４．白金箔と燃料溶液との接触面積

実験を行なうにあたって参考にした図書[1)] では，プラスチック板（幅20 × 長さ100mm）に白金箔を両面テープで貼りつけ，白金箔電極（幅50 × 長さ200mm）を作ると記述されていた。ただし，燃料液の深さは約110mm であり，白金箔電極をあまり長くする必要はない。そこで，素焼き容器に入れるのに適する大きさのプラスチック板（２ × 30 × 160mm）を用意し，それに白金箔（0.01 × 50 × 100mm）を両面テープで貼りつけて使用していた。しかし再度，その参考図書に掲載されている燃料電池の写真を見たところ，素焼き容器よりもプラスチック板の

方が長いことに気がついた。素焼きの半円筒容器には同じものを使用していることから，その図書の中で用いられているプラスチック板のサイズは，実際には幅約45 × 長さ200mm 程度（本に記載されていた幅と長さに比べてそれぞれ約 2 倍）であり，それに0.0006 × 100 × 200mm の白金箔を貼りつけているものと推定された。そこでグルコースアルカリ溶液に浸かっている部分の白金の表面積を見積もってみたところ，今回我々が試作した電極に比べて3.4倍大きいことが判明した。そこで，燃料極の電極に白金箔を追加して実験したところ，面積 2 倍（エントリー e）ではあまり効果は上がらなかったが，3 倍（エントリー f_1, f_2）にするとモーターの回転時間が明らかに長くなった。実際，低速ではあるが 2 分30秒程度回転する。このことは 2 回実験して，再現性があることを確認した。

4．実験の改良

4－1．備長炭のテフロンコーティング

これまでの実験結果から，電池の組み立て直後から徐々に起電圧が低下する原因は備長炭の“濡れ”の問題であると推定された。[2] すなわち，多孔質である備長炭の内部に電解液が浸透し，細孔中の空気を追い出すために空気極としての作用面積が減少する。それゆえ，一度使用した備長炭をすぐにまた使用することができず，再利用するためには備長炭を再活性化させる操作が必要であった。そこで，備長炭の表面を撥水性にし，濡れ性に対する影響を軽減させることを期待して，テフロンコーティング加工を試みた（詳細は付録を参照）。

テフロンコーティングした備長炭を用いて実験を行ったところ（エントリー g_1），電圧は組み立て直後に0.91V を示し，5 分後には0.99V に上昇するというこれまでにない現象がみられた。組み立て 5 分後にソーラーモーターに接続したところ，1 分30秒回転した。テフロンコーティング加工を施しても，電極としての機能を十分有していることはこの結果から明らかであるが，回転時間はこれまでよりも短いことから，テフロンコーティングによって電池の性能が向上することはないことがわかった。ここで使用した備長炭を水洗いした後，軽くふき取っただけで 2 度目の実験を行ったところ（エントリー g_2），組み立て 5 分後に作動させたモーターの回転は 1 分40秒であった。さらに同様に 3 度目の実験に用いたところ（エントリー g_3），組み立て 5 分後にモーターが 1 分間回転した。以上のことから，備長炭をテフロンコーティング加工することにより，再活性化操作なしでの再利用が可能とはなったが，それでも 2 回程度に留めておくのが無難であろうと思われる。

4－2．白金黒電極

白金箔の面積を大きくすると電池としての性能が向上することがわかった。そこで，表面積をさらに増大させるために，白金箔電極のかわりに白金黒電極を試すことにした。白金黒電極は，白金電極上に白金の微粉末を電析させたものである。[3] 今回は，白金メッキの土台としてより表面積を大きくするために白金箔ではなく白金メッシュ（細い糸で編んだ網）を用いた。

このようにして作成した白金黒電極およびテフロンコーティング加工の備長炭をそれぞれの電極に用いたところ（エントリー h），ソーラーモーターは約10分間回転した。ただし，これは冬期に実験した結果であり，後に夏期に行った実験では30分経過しても回転は止まらず，１時間以上も回り続けた。それは再現性を有する実験事実である。このことは，冬期に比べて室温が高くなる夏期では，モーターの潤滑油の粘性が低くなり，それゆえに回転が止まりにくくなるためと推定される。

５．考察

５－１．空気極の作用原理

備長炭の中で酸素分子（O_2）は電子を受け取り，解離して O^{2-} になる。これが H^+ と結合し，OH^- となる。では，備長炭のどのような部分でこの酸素の還元反応が起こっているのであろうか。備長炭に限らず炭素材料の電極としての活性についてはいまなお不明な点が多く，現在も研究がさかんに行われている段階ではあるが，[4,5] ここでは備長炭の内部構造をもとに考えてみたい。木材などの有機物は加熱処理により炭化して炭素材料となる。木材を炭化させるときの処理温度を700℃から1000℃へ上げると，生成した木炭の電気伝導性は向上する。炭素材料はさらに，2000℃以上の高温処理を施すことにより黒鉛化が進行する。[6] 黒鉛は炭素六角網目状シートが積層した構造を有しており，その電極活性は，六角網目状シート平面に比べてエッジ面（シートの端が並んだ部分）のほうが高いことが知られている。[4] これはエッジ部分では炭素原子間の結合が不完全になっているためと考えられる。

備長炭は1200℃程度の温度で熱処理されているため，黒鉛構造は十分には発達していないものの，炭化処理によって，黒鉛様微結晶子が密集したような構造を有しているために電気伝導性が高くなっている。また備長炭は多孔質な物質であり，黒鉛様微結晶子のエッジ面が細孔の表面に露出しやすく，そのためそこが電極反応の活性点になっているものと推定される。さらに，備長炭など生物由来の炭素材料には灰分，すなわち金属あるいは金属酸化物が含まれているため，それらの成分が触媒のような働きをしている可能性もある。実際に，鉄などの非貴金属元素を人工的に炭素電極表面に結合させることにより，燃料電池の正極としての活性を向上させる研究がなされている。[5]

５－２．電解質の種類

本実験では電解質としてアルカリ溶液を使用している。これは燃料のグルコースがアルカリ条件下で酸化されやすくなるということと関連している。では，同じ１M でも NaOH を KOH に変えると，電池の性能がわずかではあるが向上したのはなぜであろうか。これには KOH の電気伝導率が NaOH 水溶液よりもわずかに高いことが関係しているものと思われる。１M NaOH および KOH 溶液のモル伝導率（25℃）はそれぞれ181と210（$\Omega^{-1}cm^2\ mol^{-1}$）である。[7] 電解質の電気伝導率が高いほど，抵抗過電圧による起電力の低下が抑えられることになる。[2]

6．学生実験への対応

6－1．白金箔電極の組み換え

学生実験では燃料電池の組み立て後に，起電圧の変化を10分間追跡させていたが，これは備長炭の“濡れ”による劣化を示すだけの意味しかなかった。また前述の通り，備長炭の表面をテフロンコーティングした後では，まったく電圧降下は起こらないことが今回明らかとなった。そこで，組み立て直後の起電圧を測定し，すぐにソーラーモーターに接続することにした。

当初は白金箔（0.01 × 50 × 100mm）をプラスチック板に巻き，両面テープで固定していた。しかし，これでは表面積が不足していた。確実にソーラーモーターを回転させるためには，白金の表面積を 3 倍以上に増やす必要がある。この問題を完全に解決するには白金黒電極が有効であるが，非常に高価であるため多数を用意しにくい。そこで，既に使用している白金箔を組み替えて，それを利用しながら様子をみることにした。またこれまで白金箔を固定するためにプラスチック板を使用していたが，それに接している白金箔の片面が電極として作用しにくく，その分面積的なロスが生じていたと思われる。そこでプラスチック板を使わずに白金箔そのままを用い（100 × 50mm，2 枚），さらにその全てをグルコースアルカリ溶液に浸漬できるようにするため，白金箔にリード線として白金ワイヤーを取りつけた。このリード線付き白金箔電極を用いて燃料電池を組み立てたところ，ソーラーモーターは約 3 分間回転した（エントリー i）。これで確実にモーターが回転する状況になった。

6－2．実験準備上の注意

この燃料電池に関する学生実験を継続して数年実施する過程で，以下のことが明らかとなった。

①四つ折りにして角を圧着した白金箔電極は，濡れたまま使用すると電流降下をもたらす。これは，折りたたまれた内側のすき間にグルコースアルカリ溶液が浸透しにくくなるためと考えられる。使用前に白金箔電極を乾燥させることによりこれが回避できる。

②白金箔電極表面にグルコースアルカリ溶液が付着していると，グルコースの膜が形成されてしまうため，使用後は速やかに水で洗浄して表面を清浄に保つ必要がある。またその際，折りたたまれている白金箔の間をピンセットで広げて，中のグルコースを十分に洗い流しておく。

③テフロンコーティング加工した備長炭は濡れたまま再使用しても問題はない。ただし，再活性化処理を繰り返すことによりコーティングの効果が徐々に薄れてくるものと思われる（電池の組み立て後に起電圧の降下がみられる）。

④白金黒電極の活性は数年経過しても保たれている。また電池の組み立て直後に比べて，ソーラーモーターの回転の勢いは徐々に衰えるものの，1 時間以上は回転し続ける。おそらくグルコース燃料がある限りソーラーモーターは回り続けるものと推測される。

⑤電池を組み立てた直後にソーラーモーターが回らない場合，通常は備長炭側には問題がなく，

白金箔電極を別のものに取り替えるか，あるいは白金黒電極を使用することで解決する。つまり，表面の汚れなどが原因で白金箔電極が不活性になっている可能性が高い。

6－3．実験指導上の注意

①この燃料電池は組み立ててから放置すると，性能が急速に劣化する。したがって，組み立ててから時間をおかずに，それに関する実験をしなければならない。

②備長炭とリード線とをつなぐためにアルミ箔を用いているが，その周囲を輪ゴムで縛るなどして備長炭とアルミ箔とを密着させる必要がある。なお，備長炭に巻きつけたアルミ箔が大きすぎてそれがビーカー内のアルカリ液に浸かると，電圧が負になってしまう。これは，アルミニウムが電極として働いてしまうためである。

③白金箔のエッジで指をけがしやすい。電極を作成する際には，それを防止するために白金箔の角をスポット溶接により圧着した。しかし，それを知らずに学生が力ずくで開こうとすると白金箔が破れるおそれがある。

6－4．燃料電池実験の再検討

今回の実験は白金と炭という素材を用いて燃料電池を作成するという点に特徴があった。ただし，燃料電池というと一般には，水素を燃料としたものが主流である。そこで，燃料電池に関する実験について再度調査したところ，固体高分子形燃料電池の実験器具が最近入手可能であることがわかった。その中でドイツの h-tec 社製の燃料電池実験器を選び，これを学生実験に導入することにした。これは太陽光をソーラーパネルにあて，可逆性のセルを用いて水を電気分解し，それで生じた酸素と水素を使って燃料電池として作動させる仕組みである。燃料電池の性能および実験のわかりやすさは，グルコース燃料電池よりも優れている。ただし，完成した電極セルを使うだけであるため，実験操作自体は失敗しないものの，そのかわりに肝心な部分がブラックボックスになっている感はいなめない。

謝辞

燃料電池の実験全般，白金黒電極ならびにテフロンコーティング加工について，慶應義塾大学理工学部化学科の伊藤正時教授にご指導いただいた。また，ここで報告した燃料電池実験の改良は，慶應義塾大学部門内調整費および文部科学省「特色ある大学教育支援プログラム（平成17年度採択）文系学生への実験を重視した自然科学教育」からの助成金を用いて行われた。

参考文献

（1）「もっと化学を楽しくする 5 分間」p.142–148.（化学同人，2003年）。

その中に引用されている次の文献を特に参考にした。

峯岸常之「活性炭および備長炭を正極に用いた有機燃料燃料電池」化学と教育，47巻

566–567（1999年）。
谷川直也「グルコース，メタノールを用いた簡易な燃料電池」化学と教育，48巻
542–543（2000年）。
（2）「燃料電池」第2版（高橋武彦著，共立出版，1992年）p.12, 31。
（3）「電気化学測定法（上）」（藤嶋昭，相澤益男，井上徹著，技報堂出版，1984年）p.92。
（4）尾崎純一（2005），炭素（炭素材料学会誌）No.218, 178–184。
（5）丸山純，安部郁夫（2005），炭素（炭素材料学会誌）No.218, 163–172。
（6）「新・炭素材料入門」（炭素材料学会編，リアライズ社，1996年）p.24–31。
（7）「化学便覧」改訂5版基礎編Ⅱ（丸善，2004年）p.557。

参考

（1）備長炭の活性化

備長炭は，ウバメガシを原料として外径2～2.5cmφ，長さ11cmのサイズに合わせて作成した特注品を用いる（紀州炭素（株））。これを活性化するために，前処理として希水酸化ナトリウム溶液に一晩浸け，次に希硫酸に一晩浸け，さらに水洗い後に蒸留水中で30分程度煮沸し，そして乾燥させる（200℃で1時間）。一度使用した備長炭は活性が落ちるので，再活性化が必要である（蒸留水中で煮沸後に乾燥させる）。なお，再処理として高温乾燥しか行なわない場合，備長炭は再活性化しない。また，備長炭は繰り返し使用しているうちに，少しの衝撃を与えただけで簡単に折れやすくなってしまう。

（2）備長炭のテフロンコーティング

市販のテフロン水溶液PTFE30は容器中で固形分が下に澱むので，ビンを回して均一な液にしてから使用する。テフロン液1：蒸留水4の割合で希釈し，その液に活性化処理した備長炭を一晩浸漬する。使用する容器はガラス製ビーカーでよい。次に150℃で加熱して乾燥させる（ここで温度を上げすぎると，テフロンが分解し有毒ガスが発生するので，注意を要する）。

（3）白金黒電極の作成

まず白金網（10×10cm）のリード線として，白金ワイヤー（0.5mmφ，長さ8cm）を編みこむような格好でスポット溶接する。ビーカー内で濃硫酸中にこの白金網を浸して，ビーカーごとホットプレート上で70℃，10分間加熱して白金網を洗浄する。加熱処理後，白金網を取り出し，硫酸分がなくなるまで（洗液を$NaHCO_3$で中和して気体が発生しなくなるまで）水で洗浄する。200mlビーカーにヘキサクロロ白金（IV）酸六水和物2gを約60mlの水に溶かし，これに10mgの酢酸鉛を添加する。この溶液が入ったビーカーに白金網を浸す。次に白金網に接触しないように，ガラス管に通した白金ワイヤーをこのビーカー中に入れる。さらに両者が接触して通電しないようにプラスチックのピンセットを両者間に差し入れる。白金網側を負極，ガラス管に通した白金ワイヤーを正極として，直流電源装置に接続して通電する。この際，気体（水素）が発生しない程度に電圧，電流を調節しながら通電する。なお，単位面積あたりの電流量は参考図書[3)]では$30mAcm^{-2}$となっているが，すきまの多い網であるため，10×10=$100cm^2$では面積の見積りが過剰である。したがって面積$100cm^2$で電流3Aのところ，下げて1A程度とする。15分ほど経過して（ヘキサクロロ白金酸溶液の色が薄くなって）から，白金が付着して黒く変色した網を蒸留水で軽く洗い，さらに鉛分を除去するため，0.1M H_2SO_4中でもう一度5分間通電し，その後水洗する。