

水電解水素発生装置の作製とその適用

田中 武*・多田 覚*

(令和 4 年10月28日受付)

Creation of water electrolysis hydrogen generator and its application

Takeshi TANAKA and Satoru TADA

(Received Oct. 28, 2022)

Abstract

Global warming problems, local energy problems, etc. are expected to become serious problems as the aging society in Japan progresses. In this work, we investigated the papers related to the mechanism of water electrolysis, and studied the specifications and performance of the developed water electrolyzer. We also installed a hydrogen concentration measuring device on an IoT device and tried to display the data on a computer using Sigfox.

Key Words: hydrogen, oxygen, electrolysis of water component

1 はじめに

高齢化社会が進む日本では、地球温暖化問題や地域のエネルギー問題などが深刻な問題になることが予想される。水素は利用時に CO₂を排出せず、燃料電池などを活用することで、電気や熱を効率的に取り出すことができます。水素の製造段階に再生可能エネルギーを活用するなど、製造から利用までトータルで、脱炭素化にむけた活用が期待される。水素を身近なエネルギーとして活用する「水素社会」の実現と、脱炭素社会実現にむけ、水素の果たす役割は極めて大きく、様々な水素利活用への取り組みが進められている¹⁾。

以上のような背景の中で、筆者らは、太陽電池、リチウム電池、水の電気分解装置、水素タンク、燃料電池等からなる初歩的な自立式再生エネルギーシステムを構築した²⁾。

また、水素センサー、水の電気分解、燃料電池を利用した LED 点灯等の初歩的な教育システムを作り、水の電気分解量を制御することにより、水素を用いた燃料電池の制

御に関する初歩的な教育システムが構築できた³⁾。

さらに、大容量の水素発生装置を用いた研究を推進するために、本研究では、水素の資料、および水の電気分解のメカニズムの関連論文を調査（一部、本論文に掲載（引用）し、開発した水電気分解装置の仕様や、性能について検討した。また、水素濃度の測定装置を IoT デバイスに搭載し、Sigfox を用いてデータをコンピュータに表示することを試みた。

2 水素について⁴⁾

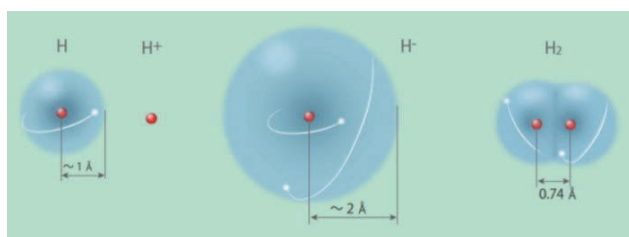
1766年、英国のヘンリー・キャベンディッシュが人類で初めて水素を取り出すことに成功した。金属片と強酸を反応させ、「燃える気体（※水素という名は1783年に命名）」を単離、その気体は空気よりもずっと軽く、激しく燃えるという性質を調べた。

重水素 (deuterium) とは、質量数 2 の水素の安定同位体。D あるいは ²H と表記される。化学では反応機構研究や分光学的研究に用いられる⁵⁾。1931年に Harold C. Urey ら（当時 Columbia University）によって発見された⁶⁾。

* 広島工業大学工学部



図1 ヘンリー・キャベンディッシュ (1731-1810)
英国の化学者・物理学者⁴⁾。



水素原子 (H)：陽子一個、電子一個 (左図)
 ※ボーア半径は、0.053nm。実際の電子は広がっているため、
 大きさの決め方はいろいろある。
 水素イオン (H⁺)：陽子一個 (中図)
 水素化物イオン、またはヒドリド (H⁻)：陽子一個、電子二個
 水素分子 (H₂) (右図)

図2 水素原子、分子の種類

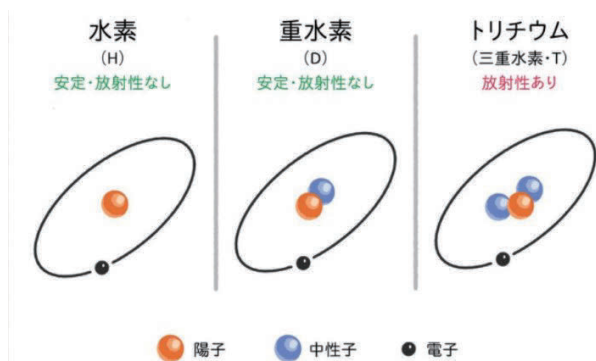


図3 水素、重水素、および、トリチウムの概略図⁷⁾

自然界に存在するほとんどの水素原子は、陽子1つと電子1つからなる軽水素（プロチウム、protium, ¹H）である（存在比99.98%、図3左）。安定同位体であり、放射性はない。質量は1.01u⁷⁾。

これに対して、重水素（デューテリウム、deuterium, ²H）は陽子1つと中性子1つ、電子1つから構成される（図3中央）。天然に存在する水素のうち、約0.02%は重水素である。重水素も安定同位体であり、放射性はない。質量は2.01u⁷⁾。

なお、三重水素（トリチウム、tritium, ³H）は陽子1つ

と中性子2つ、電子1つから構成される（図3右）。天然にはごくわずかしかな存在しない（存在比は0.000000000000000001%）。三重水素は放射性があり、半減期は約12年である。質量は3.02u⁷⁾。

水の電気分解は化石燃料の部分参加や水蒸気改質法とならんで工業的に確立された水素製造法である。水電解法は化学原料の水素を製造する方法として以前から工業的に行われてきた。我が国でも1960年代まではアンモニア製造の原料水素を生産するために大規模な水電解槽があちこちで稼働していた。しかし石油化学の勃興により炭化水素の水蒸気改質による水素製造が経済的に有利となり、そちらに移行してしまった。現在では世界的にみても水力発電による安価な電力の得られる特殊な地域を除いて、大規模な水電解は、あまり行われていない⁸⁾。

3. 水の電気分解

3.1 水の電気分解の歴史⁹⁾

1800年、カーライルとニコルソンは、初めて水の電気分解に成功した。

ロンドン大学解剖学教授のカーライルは、ボルタの報告を手にするると、早速自分でボルタの電堆を作ったが、そのとき、電堆の電極とそれをつなぐ導線との接触をよくするために、接点に水を1滴たらした。そのとき、水の中に小さな泡の発生を観察し、この泡について、物理学者のニコルソンとともに研究した。2人が、水を入れたビーカーに2本の白金導線を差し込んで、ボルタの電堆につないだところ、水中の両方の電極から泡が立った。水素と酸素であった。

3.2 水分子の構造¹⁰⁾

実際には我々は水分子も、酸素や水素の原子も目で見ることができないが、いろいろな実験および理論的な研究から、分子や原子の構造について知ることができ、現在では水分子を構成する原子がどのような配置で結合しているかがわかっている。例えば、O-Hの結合距離は平均0.958Å（オングストローム、10⁻¹⁰m）で、2個のO-H結合は直線状ではなく、平均104.5°の角度をなしている（図4(d)）。この折れ曲がった水分子の構造は、これから紹介する水の物性と深く関わっている。球状の原子同士がなぜ特定の順番で結合するのか、直線状などの他の形ではなく図に示した結合角度で結合するのは、考えてみると非常に不思議なことである。これらは後で述べる量子化学を通して理解されている。

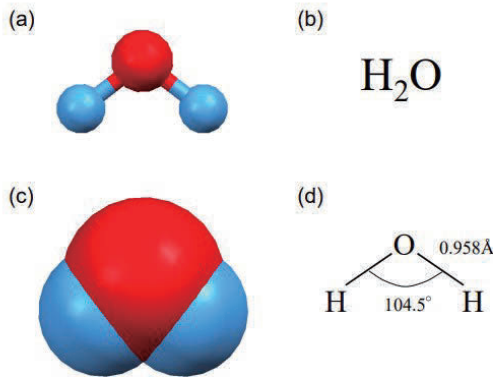


図4 水分子の様々な表現。(a) 球と棒の模型、(b) 組成式、(c) フィリング模型、(d) 構造式。

3.3 電解に必要な電気量⁸⁾

水に直流を印加して電解すると下記の反応が起こって水素と酸素に分解される。



水素イオンは一価なので、1モルの水素を生成するために、電子2molが関与する。これにより水素1molを生成するためには2Fの電気量が必要となる。ここにFは電子1molの電気量でファラデー定数とよばれ96485C/molである。標準状態の水素1m³は、44.6モルであるから、これを生成するのに必要な電気量は89.3ファラデーであり、実用的な単位に換算すると2393Ah/Nm³となる。水電解の電流効率は高いので普通2400Ahが水素1m³を製造するのに必要な電気量とされている。この値は特別に電流効率低い特殊な電解槽を除いて多くの液相の水電解槽で共通に適用される。

3.4 水電解法¹¹⁾

水素は石油精製、アンモニア合成など広範な分野で用いられている。かつては水を電気分解して水素を得る水電解 (water electrolysis) が重要な工業プロセスであったが、現在では、大部分石油、天然ガスなどの改質により作られている。特に電力コストの高い我国においては大規模なものはほとんどなくなった。しかし、世界的に見ると、カナダ、ブラジル、ザイルなどのように水力発電により安い電力の得られる箇所には大型新鋭電解槽が作られている。また、クリーンな二次エネルギーとして注目されている水素を水から作り出す、唯一の工業的に確立された方法として注目されている。さらに、二酸化炭素ガスによる地球レベルでの環境汚染の進行を考えると、原子力発電のロードレベリング用としての夜間の水電解、太陽エネルギーを電気に変えたのち、電解して水素として貯えるエネルギーシステムは今後重要性を増していると思われる。

水は電気分解によって水素ガスと酸素ガスに分かれる¹²⁾。



これを電極ごとの反応に置き換えてみると、液性が硫酸水溶液のような酸性電解質では、

カソード反応



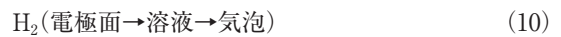
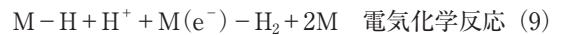
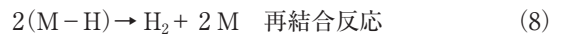
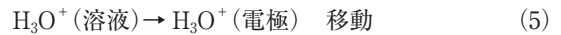
アノード反応



(2) - (4) 反応式は、いずれも反応前と反応後の物質の変化とその収支を示すだけで、電極自体は表に出てこない。そのため電極は単なる電子のやり取りの媒体に過ぎないと見られがちであるが、中間の過程では反応に深い関わりを持っている。

3.4.1 カソード反応の中間過程¹²⁾

カソード反応では主に水素イオンの挙動に注目すればよい。中間過程はつぎのような幾つかのステップ (過程) に分けることができる (Mは電極を示す)。



(6) - (9) を一般に電極反応という。放電反応の後で(8)経路を通る場合と(9)経路を通る場合とがあるが、どちらを辿るかは電極の金属の種類や電解の条件による。例えば、白金電極では前者の経路を辿り、放電過程よりも再結合過程の方が遅い(律速過程)^{*1}。金電極の場合は(9)の経路を通りこれが律速過程となる。水銀電極は金電極と同じ経路を辿るが、律速過程は放電反応である。図5は反応過程(6) - (9)の図解である。

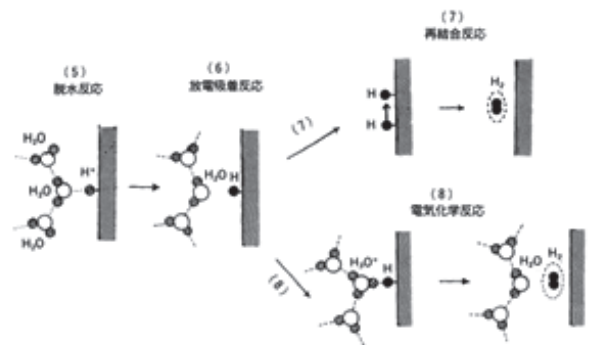


図5 水素イオンの放電と水素分子の生成経路。

さて、水の電気分解電圧 E^0 は分解反応 (1) のギブズの自由エネルギーの変化 ΔG^0 より求めることができる。す

なわち

$$E^0 = -\Delta G^0/nF \quad (11)$$

ΔG^0 は237.2kJ/molであるから、
 $E = 1.229V$ と計算される。この分解電圧は電解液の pH は無関係である。

上述の中間過程がすべて可逆的に進行すれば電気分解は、この電圧に微小電圧を加えただけで極めて円滑に進行するはずである。しかし現実には各過程に特有の抵抗があり不可逆的に進むので、EU よりも過剰な電圧（過電圧 η ）を加えなければ電気分解は進行しない。実際に加えるべき分解電圧 E は次式で表される。

$$E = E^0 + \Sigma\eta + iR \quad (12)$$

* 1 幾つかの過程が直列的に進行するとき、最も遅い過程の速度が全反応速度を支配する。この過程を律速過程という。

ここで、 $\Sigma\eta = \eta_c + \eta_a + \eta_{mt}$
 η_c と η_a はそれぞれカソードとアノード電極反応の抵抗に起因するもので活性化過電圧と呼ばれ η_{mt} は不可逆的な物質輸送による濃度過電圧、 R は液抵抗である。これらの過電圧は常に混在し全ての電流の増加とともに増大する。

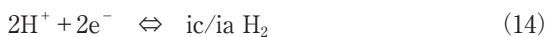
電気分解のエネルギー効率 ε は次式で示される。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\Delta H^0}{\Delta G^0 + \text{losses}} \\ &= \frac{\Delta H^0}{nF(E^0 + \Sigma\eta + iR)} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで ΔH^0 は反応 (1) のエンタルピー変化である。過電圧は電気分解のときのエネルギー損失の原因となる。過電圧を低くおさえるためには触媒活性の高い金属を電極に用い、電解液の電気伝導を高くする等の工夫が必要である。また電解液の攪拌は濃度過電圧が低くする効果がある。

3.4.2 カソード反応（水素電極反応）¹²⁾

水素電極が平衡にあるとき、



カソード電流 i_c とアノード電流 ia は等しくなるので、正味の電流 i がゼロとなる。

$$i = ic - ia = 0 \quad (15)$$

したがって、

$$|ic| = |ia| = 0 \quad (16)$$

このときの i_0 （交換電流密度）の値は水素電極反応に対する電極の触媒活性を示す一種の尺度である。白金の i_0 は $3.2 \times 10^{-3} A \cdot cm^{-2}$ で金属の中で最も大きい値を持ち、金は $4 \times 10^{-6} A \cdot cm^{-2}$ 、水銀は $5 \times 10^{-13} A \cdot cm^{-2}$ で最も小さい。白金と水銀では 10^{10} 倍ほどの開きがある。

3.4.3 水素の析出電位¹²⁾

水素平衡電位*²⁾よりも卑の電位、すなわち過電圧を加えると H^+ が放電し H_2 が発生する。

これを Over-Potential Deposition（略して OPD）という。

これに対して水素平衡電位よりも貴の電位で水素イオンが放電析出するとき、

Under-Potential Deposition（略して UPD）という。白金電極では UPD がよく進行し析出した水素原子は白金原子と化学吸着し電極表面は単層の水素原子で覆われる。OPD 状態ではすでに吸着水素で完全に覆われているので前述の水素再結合経路 (8) を辿るといわれている。これに対して金や水銀は水素を吸着する能力が低く、水素の UPD が極めて少ない。OPD でも吸着水素は微量なので (8) 過程を辿るのが困難、やむを得ず高い過電圧が要求される電気化学反応過程 (9) を通ることになる。

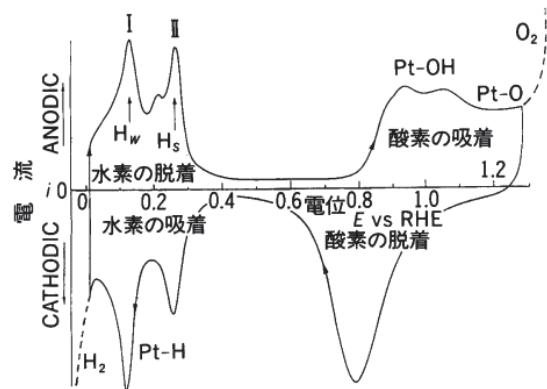


図6 白金電極の水素と酸素の UPD を示す。
 Voltammetry curve.

図6は白金電極を、酸素や水素を含まない $0.5 mol dm^{-3}$ 硫酸水溶液の中で電位 +0.05V から +1.5V vs RHE の間で電位掃引（電極の電位を一定速度で変化させる）を繰り返したときの水素と酸素の UPD を示す典型的な電位—電流曲線（voltammetry curve、以下略して VC と記す）である。

* 2 1 気圧の水素で飽和された与えられた電解液中で可逆平衡状態にある電極の電位。この電位を基準 (OV) にして測った電位 E を EV vs RHE と書く。RHE は同一溶液内で電位を比較するときに用いられる。1 気圧の水素で飽和された水素イオン濃度（正しくは活量） $1 mol/l$ の電解液中で可逆平衡

状態にある電極を標準水素電極といい、これを基準にして測った電位 E は EV vs SHE と記す。これは異なった電極系の電位を比較するときに用いられる。

酸素の吸着と脱着の電位が一致しないが、水素の場合は一致している。これは酸素の UPD は不可逆的であり、水素の UPD は可逆的であることを示している。水素の UPD 領域内で VC は二つの電流ピークを示している。これは吸着力の異なった2種類の吸着水素によるもので、ピーク I は弱い吸着状態の水素 Hw、ピーク II は強い吸着状態の水素 H に対応している。

水素は表面白金原子と 1 : 1 の割合で化学吸着するが、その吸着力は相手の白金原子がどのような結晶格子を組んでいるかによって異なってくると考えられている。通常の白金電極の表面は細かい多結晶で構成されているが、ごく大まかには、4 隣接的な原子配列部分と 6 隣接的な原子配列部分に分類することができる。H は前者の部分に、Hw は後者の部分に吸着された水素と見なされている。

3. 4. 4 UPD の水素原子の再結合速度¹²⁾

(8) 過程で H_2 を形成するためには吸着水素原子が相互に吸着面に沿って移動し接触する必要があるから、吸着力に違いがある H、と Hw では表面移動の確率や再結合速度にも差が出てくるものと考えられる。

水素の UPD 電位領域内で、電位を一定に保持すると微小な定常カソード電流が観測される。この定常電流の大きさは吸着水素原子の表面移動・接近による再結合速度を示している。保持電位を変え（吸着水素の被覆率が変わる）それぞれの定常電流を測定し、被覆率と定常電流のデータをもとに吸着水素相互の接近確率と再結合係数を理論的に計算すると、Hw は Hs に対して、再結合係数では 4 倍強、移動率では 24 倍大きいという結果が得られる。即ち緩く結合した Hw のほうが強く吸着した Hs よりもはるかに分子を形成しやすい。しかしその分子形成量はごくわずかである（被覆率 90% で定常電流は $0.8 \times 10^{-6} A \cdot cm^{-2}$ ）。被覆率 100% のときの定常電流を外挿計算すると $10^{-6} A \cdot cm^{-2}$ を越えない結果が得られる。即ち水素の再結合速度は無視できるほど小さいことになる。しかし実際は被覆率 90% から電流は急速に増加し、平衡電位（被覆 100%）越えると日に見えて水素ガスの発生が観測されるようになるが、この急速な電流の上昇は吸着水素の表面移動説だけでは説明することができない。新しい機構による水素発生を考える必要がある。

3. 4. 5 電極近傍の水素分子の過飽和現象¹²⁾

電解電流を遮断すると活性化過電圧はただちに消滅するが濃度過電圧の方は時間とともに比較的ゆっくり減少するので電流遮断法によって両者の過電圧を分離測定することができる。図 7 はこの濃度過電圧定から求めた平滑白金電極近傍の水素分子濃度で、カソード電流の上昇とともに増大するが、ほぼ $0.4 A \cdot cm^{-2}$ で限界値に達する。

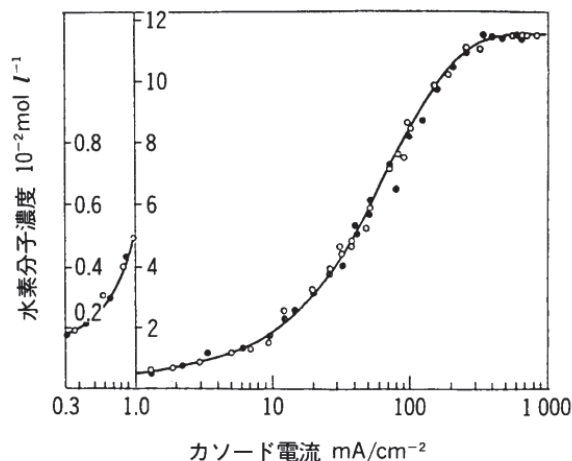


図 7 カソード電流と電極近傍の水素分子濃度

このときの濃度は 1 気圧の水素飽和濃度の 165 倍、にもなる。限界値は白金黒付白金電極では 120 倍、エメリーで荒く削った電極では 23 倍と低くなる。このように水素の過飽和濃度はミクロな表面結晶構造よりも、むしろマクロな表面状態に大きく依存する。この過飽和は水素分子の生成にその気泡化が追いついてゆけないために起こる現象である。

アノードで発生する酸素についても同程度の過飽和濃度を示す結果が得られている。

3. 4. 6 OPD での水素吸着量¹²⁾

OPD のときに表面に吸着する水素量は高速アノード電流パルス法によって測定することができる。その結果によれば OPD では電極面はすでに単原子層の吸着飽和量を越え、その量はカソード電流に正比例して増大するが、ほぼ単原子層の 1.5 倍を越すと、電流と吸着量の自乗の間に比例関係が成立するようになり、カソード電流 $0.6 mA \cdot cm^{-2}$ では単原子層 3 倍に相当する量にもなる。したがって OPD では多重層の吸着水素原子からの急速な水素分子の形成機構を考える必要がある。たとえば図 8 に示すモデルが考えられる。

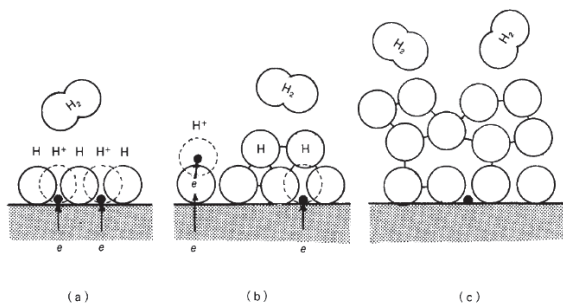
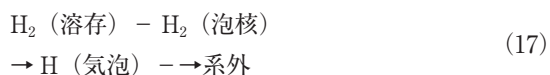


図8 水素の多重吸着層での分子形成モデル

すなわち、平衡電位 0V ですでに電極面は単原子層の水素で飽和吸着状態にあるので、その吸着水素原子の間隙に過電圧状態で有効に作用する特異吸着サイトに先ず脱水プロトンが吸着 (図8 (a)) 引き続き電極から電子の供給をうけ点線で示した水素原子に変わる。そのとき隣接したHwまたはHと強く重なり、分子を形成して電極表面から離脱する。空いた吸着サイトは後続のプロトン放電によって占められる。このように考えると、OPDにおける水素発生速度は特異吸着サイトを占める吸着水素量に比例することになる。すなわち単原子層を越える吸着量とカソード電流の間には比例関係が成立する。この機構による水素発生は定常電流の異常増加が見られる+0.1V から始まると考えられる。

更に高電流密度では図8 (b) に示したように、特異吸着以外に電気化学過程 (9) 類似の機構で吸着水素原子を通して電子とHの結合が起こり生成した水素原子は多重吸着の形態をとる ((図8 (c))). そのとき多重層の水素原子間で再結合反応が起きるとすれば吸着水素原子について二次反応になるので、カソード電流と吸着量の2乗の間に比例関係が成立する。

生成した水素分子はいったん溶液に溶け電極近傍は過飽和状態になる。この溶存水素は気泡を形成して系外に拡散してゆく。



泡核は平滑面よりも尖った場所で形成されやすい。そのため粗い表面では、過飽和濃度が平滑面よりも低くなる。カットは電極表面上の泡形成と泡近傍の水素濃度分布を示したものである。

3.4.7 むすび¹²⁾

水素に関する電極反応は最も古くから行われている研究の一つで、一般電極反応の基礎理論がこの研究から生まれたといっても過言ではない。また、数年前、常温核融合問題で世界を驚かせたパラジウム電極のように水素電極にはまだまだ未知の現象が隠されている可能性がある。

酸素が発生するアノード反応では、電極自体が酸化されたり溶解したりする副反応が活発に進行するので取り扱いがなかなか厄介である。

4. 本研究に用いた水電解装置

本研究で用いた、WAC製の水電解装置 (TED-CUBE) の写真を図9に示す。使用方法は、コンセントにケーブルを差し込み、装置後部のプレーカーを入れ、装置前面の操作スイッチを入れるだけである。

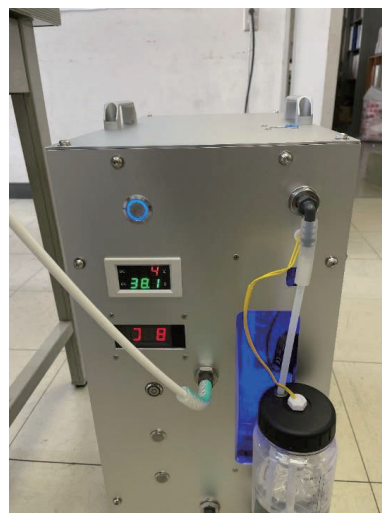


図9 水電解装置 (TED-CUBE)

装置の仕様

定格電圧 AC100V

定格周波数 50Hz/60Hz

消費電力 (最大) 600W (最大648W)

製品寸法 W:300×H:500×D:650mm

本体重量 (最大) 16kg (最大18kg)

ガス発生量 600cc/min~7000cc/min

ガス濃度 水素67% 酸素33%

連続運転 可能

である。

実際、装置を運転し、水素を発生させ、水上置換法を用いて、水素の流量を測定した。具体的には、500ccのビーカーの水素置換の時間を測定したところ、11秒である。この値を1 m³に換算すると6.1時間である。

今回の水電解装置の消費電力の初歩的な考察のため、オゾン濃度測定装置として測定実績¹³⁾のあるBluetoothワットチェッカーRS-BTWATTCH2¹⁴⁾(ラトックシステム株式会社製)を用いた (図10参照)。



図10 Bluetoothワットチェッカー RS-BTWATTCH2

Bluetooth ワットチェッカーRS-BTWATTCH2の表示は933Wであった。

上記のことから、 1 m^3 の水素を作るのに、 $933\text{W} \times 6.1$ 時間は $=6.5\text{kWh}$ となる。この値は、6.5kWhは、株式会社神鋼環境ソリューションの水電解式高純度水素（酸素）発生装置の消費電力（ $6.5\text{kWh}/\text{Nm}^3 \cdot \text{H}_2$ ）¹⁵⁾と同程度であった。

5. 水素センサーを搭載したIoT機器の製作

水素センサーを搭載したIoT機器は、オゾンセンサーを搭載したIoT機器のセンサー部¹³⁾を、オゾンセンサーモジュールから、水素センサーモジュールに変えて製作した。

ここでは、水素センサー（MQ-8）の写真や、仕様等を、図11から図16に示した。



図11 水素センサーMQ-8の写真¹⁶⁾

表1 MQ-8の技術的仕様¹⁶⁾

Model		MQ-8	
Sensor Type		Semiconductor	
Standard Encapsulation		Bakelite, Metal cap	
Target Gas		Hydrogen	
Detection range		100~1000ppm(H ₂ gas)	
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V _c	≤24V DC
	Heater Voltage	V _H	5.0V±0.1V AC or DC
	Load Resistance	R _L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R _H	29Ω±3Ω(room tem.)
	Heater consumption	P _H	≤900mW
	Sensitivity	S	R _s (in air)/R _s (in 1000ppm H ₂)≥5
	Output Voltage	V _s	2.5V~4.0V (in 1000ppm H ₂)
	Concentration Slope	α	≤0.6(R _{1000ppm} /R _{400ppm} H ₂)
Standard test conditions	Tem. Humidity	20°C±2°C; 55%±5%RH	
	Standard test circuit	V _c :5.0V±0.1V; V _H :5.0V±0.1V	
	Preheat time	Over 48 hours	

NOTE: Output voltage (V_s) is V_{RL} in test environment.

Basic Circuit

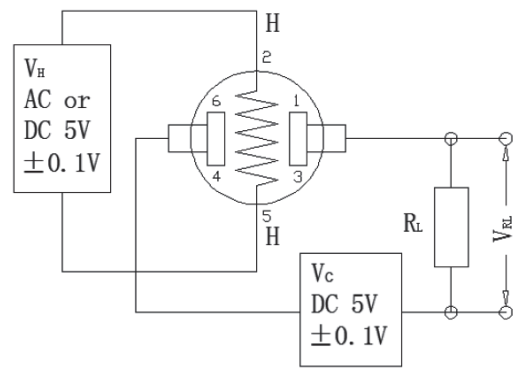


図12 MQ-8のテスト回路¹⁶⁾

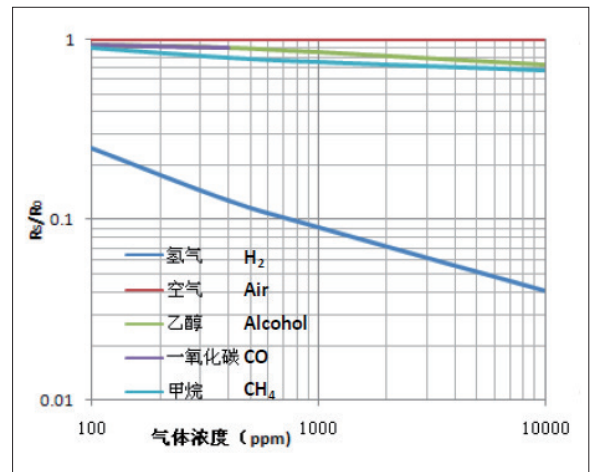


図13 MQ-8の典型的な感度曲線¹⁶⁾

水素の感度曲線を、下記の式に近似して用いた。

$$\text{Log}(R_s/R_0) = -0.39795 \cdot \text{log}(\text{気体濃度 ppm}) + 0.44634$$

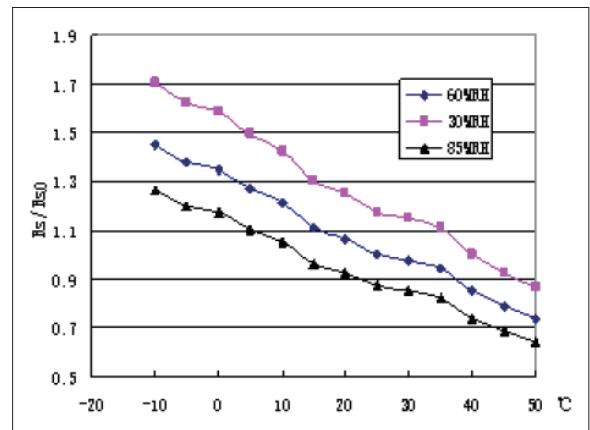


図14 MQ-8の典型的な温度／湿度曲線¹⁶⁾

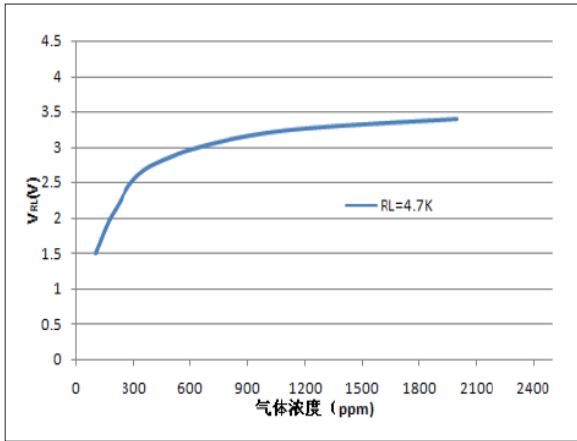


図15 MQ-8の典型的な感度曲線¹⁶⁾

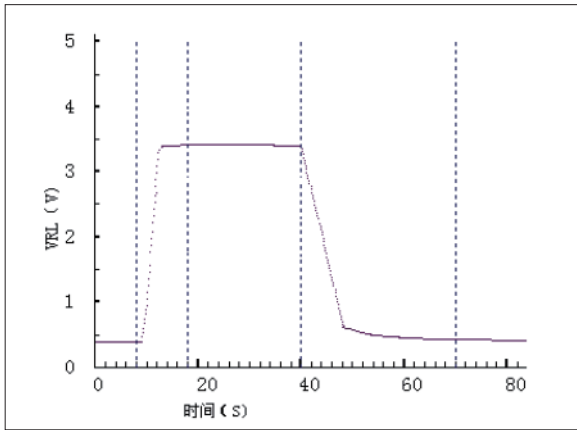


図16 MQ-8の立ち上がり、および立下り時間¹⁶⁾

次に、水素を発生させる水電解装置を設置する部屋の安全を確保するために、作製した水素センサーの濃度測定精度を調べた。部屋に水素を30cc/minで流し、部屋中の水素濃度 (ppm)、温度、湿度、気圧等を15分ごとにモニターした水素濃度を図18に示す。図中の点間隔は15分なので、45分で15ppmになる。

また、空気中の水素濃度が4 vol% (40000ppm) を超えると着火や爆発の危険がある¹⁷⁾ことが報告されている。

実験室は、横3.17m、縦7.45m、高さ2.6mで体積が61.4 m³である。部屋に流れ込んだ水素量は、30cc/min、45分で1350ccです。均一にH₂が分布すると約22ppmと可燃ガスであり、爆発の危険がある濃度40000ppmの約1/2000と安全である。実測値は15ppmと、試作した水素センサーは、H₂濃度の目安を与える可能性が示唆された。



図17 水素センサーを用いて、部屋中の水素濃度 (ppm)、温度、湿度、気圧等を15分ごとにモニター中の写真 (場所 新1号館408号室)

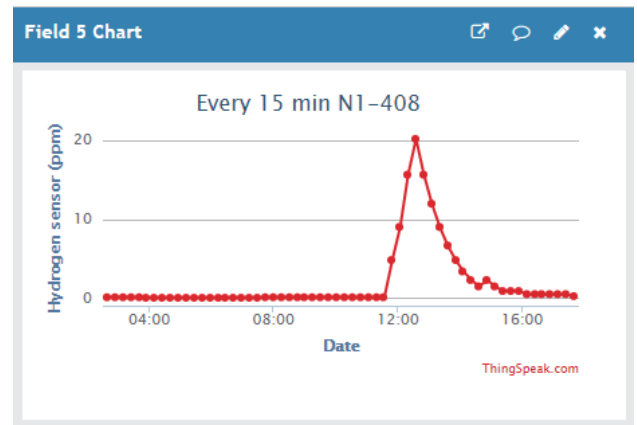


図18 図17のセンサーでモニターした水素濃度 (ppm)

さらに、水素濃度が10ppm以上になると、Twitterで知らせるシステムを構築し、知らせた内容を図19に示す。以上のことから、部屋内の水素濃度をモニターしておくことにより、安全に教育研究を実施できることが明らかになった。

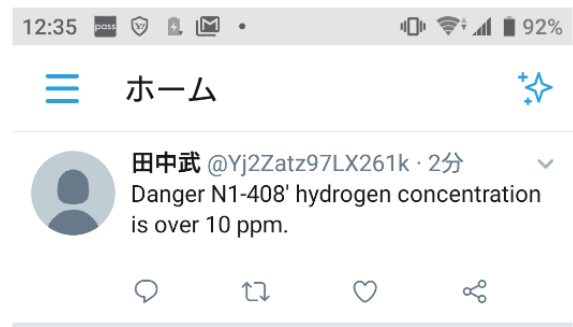


図19 Twitterでお知らせしたスマートフォンの画面

6. まとめ

高齢化社会が進む日本では、地球温暖化問題や地域のエネルギー問題などが深刻な問題になることが予想される。水素は利用時に CO₂を排出せず、燃料電池などを活用することで、電気や熱を効率的に取り出すことができる。水素の製造段階に再生可能エネルギーを活用するなど、製造から利用までトータルで、脱炭素化にむけた活用が期待される。水素を身近なエネルギーとして活用する「水素社会」の実現と、脱炭素社会実現にむけ、水素の果たす役割は極めて大きく、様々な水素利活用への取り組みが進められている。

大容量の水素発生装置を用いた研究を推進するために、水の電気分解のメカニズムの関連論文を調査し、開発した水電気分解装置の仕様や、性能について検討した結果、市販品と同程度の単位電力当たりの水素発生量が得られた。また、水素濃度の測定装置をIoTデバイスに搭載し、Sigfoxを用いてデータをコンピュータに表示でき、H₂濃度の目安を与える可能性が示唆された。

謝辞

本研究を実施するにあたり、協力して頂いた広島工業大学工学部電子情報工学科田中研究室の院生・学生に謝意を表します。

【文 献】

- 1) https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/A4_suiso_pamphlet_N2021.pdf
- 2) 田中 武、甲斐 健、山崎 勇、織田 浩二、岡光 序治、田中 秀治、初歩的な自立式再生エネルギーシステムの構築、広島工業大学紀要 研究編、52巻 pp.77-85 (2018)
- 3) 田中 武、岡光 序治、水素を用いた燃料電池に関する

初歩的な教育システムの構築、広島工業大学紀要 教育編、19巻、pp.53-60 (2020)

- 4) <https://www.kek.jp/ja/newsroom/2016/01/28/1730/>
- 5) 標準化学用語辞典 (第二版、日本化学会編纂、丸善)
- 6) Ferdinand G. Brickwedde, Harold Urey and the discovery of deuterium. *Physics Today* 1982, 35, 34. DOI: 10.1063/1.2915259
- 7) <https://deut-switch.pharm.kyoto-u.ac.jp/glossary/358.html>
- 8) 阿部 勲夫、“水電解法による水素製造とそのコスト”、水素エネルギーシステム Vol.33, No.1, 19-26 (2008)
- 9) 木原 壯林、Review of Polarography, Vol.60, pp.121-134 (2014)
- 10) <http://e.sci.osaka-cu.ac.jp/yoshino/edu/water/chapter02.pdf>
- 11) <https://edu.yz.yamagata-u.ac.jp/Public/54299/2017/tcf52058/genden/genden.asp>
- 12) 柴田茂雄、水の電気分解—水素発生メカニズム—、*化学と教育* 42巻1号、30-34 (1994)
- 13) 田中 武、岡光 序治、中本 正彦、オゾンセンサーを内蔵するIoTの作成とその応用、広島工業大学紀要 研究編、55巻、pp.31-19 (2021)
- 14) https://www.ratocsystems.com/products/subpage/bt_wattch2.html
- 15) https://www.kobelco-eco.co.jp/product/pdf/hhog/hhog_catalog.pdf
- 16) Flammable Gas Sensor (Model: MQ-8) Manual Version: 1. 4, Valid from:20150310, Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd.
- 17) <https://www.hokkaido-awi.co.jp/industry/gas/sds/pdf/hydrogen.pdf>