

非常用電源としての水素燃料電池

恵原 貴志^{1,2}・高橋 洋香^{1*}、佐々木 太一^{1*}、平岩 悠文¹

Hydrogen Fuel Cell As an Emergency Electrical Power Source

Takashi EHARA^{1,2}, Hiroka TAKAHASHI^{1*}, Taichi SASAKI^{1*} and Hisafumi HIRAIWA¹

¹ *Department of Basic Science, Faculty of Science and Engineering,
Ishinomaki Senshu University*

² *Department of Human Culture, Faculty of Human Studies,
Ishinomaki Senshu University*

Abstract

In the present work, potential of hydrogen fuel cell as an electric power source in the disaster stricken situation have been examined. We adopted the proton exchange membrane fuel cell that works at room temperature as the emergency power source system. The system consist of the hydrogen fuel cell, a hydrogen gas cylinder with a flow controller, two lead batteries, a charge controller, and a DC-AC inverter, shows enough output electric power to use some electrical appliances needed in disaster stricken area, such as television, charging of handy phone and light illumination. The fuel cell power source system will only take up area of less than 1 m². Therefore, it is possible to install plural those fuel cell based emergency electrical power systems in our university. In addition, we do not have to consider the stocking of the hydrogen gas cylinders, because we can use them which being used in the experiment system when normal. The system works as long as there is hydrogen gas and they do not depend on the weather. Thus, it can be thought that the use of the fuel cell based system in addition to renewable energy based power generator system make possible to build an ideal emergency power generation system. However, there is a significant problem we must solve before the use of the fuel cell based system, it is flammability and explosiveness of hydrogen gas. In the disaster stricken situation, it is very difficult to install the hydrogen gas sensor that can reduce the risk of hydrogen. We have to make up idea to operate the hydrogen gas safely at disaster stricken situation.

1. 背景

東日本大震災は東日本の広い範囲で甚大な人的あるいは物的な損害をもたらしたばかりではなく、電気・ガス・水道・電話網・携帯電話電波網などのインフラをことごとく破壊した⁽¹⁾。これらの損害は時期が冬であったこともあり、著しい不便と苦痛を被災者にもたらした。特に電気エネルギー網の寸断は、電気暖房や医療機器の停止など各地で生命維持に直結する問題を発生させ、今後の災害対策としての緊急時用の発電システムの構築など早急な対応策を講ずる必要を認識させた。様々な災害で系統電源が遮断された状態において

も稼働する緊急用電源の設置は、避難所となる大学の地域に対する責任といった観点からも急務である。震災時、本学は近隣住民の避難所や公共機関の臨時施設として機能し、災害時における大学の果たすべき役割について、ひとつの形を示すことが出来たと確信しているが、電気エネルギーの供給という点ではいくつか問題が発生したことは否定できない。まずはじめに問題となったのは、災害発生直後の緊急用電源の使い勝手に類するものである。当時本学には内燃機関型の非常用電源が存在し、系統電源の停電後にこれが電源供給を行ったが、この非常用電源はその構造上、全学の

¹ 石巻専修大学理工学部基礎理学科

² 石巻専修大学人間学部人間文化学科

* 石巻専修大学理工学部基礎理学科 平成24年度卒

系統電源の電源網にそのまま電力供給を行うことが出来ず、延長コードを引き回すことによって必要部位に電源を供給することが出来るものであった。ゆえに学内にいた個人個人がこれを自らの情報機器などに地震発生後速やかに接続し、情報収集などに利用することは出来なかった。これは災害時の初期の情報収集の重要性を考えると何らかの改善を検討すべき問題である。もう一つ問題として挙げられるのは、内燃機関の燃料の枯渇による避難生活中の電力不足であり、この問題は学内での避難生活中に計画停電を行わざるを得ないという事態を招いた。今後、緊急用電源の検討を行うためには、明らかとなったこれらの問題を検証し緊急用電源が満たすべき条件をまずは明らかにすることが必要である。

非常用電源が最低限備えているべき性能として、災害時の物理的衝撃に対する耐久性、災害直後の混乱した環境で稼働できる操作性、ある程度の時間稼働し続けることができる発電性能、常時には邪魔にならない収納性などがあげられる。このうち、操作性の問題により災害直後の情報収集が不可能であるという事態が出来し、また発電性能の問題から燃料枯渇による計画停電という事態を招いたということになる。震災後本学には内燃機関式の発電機に加えて、容量 10 kW の大規模太陽光発電施設が設置され、また風力発電に関する研究も行われている⁽²⁾。この組み合わせは、燃料の補給を必要としない再生可能エネルギーと、燃料を必要とするが必要な時に発電を行うことが出来る内燃機関型発電機という好ましい組み合わせである。これは内燃機関式非常用電源と太陽光発電による電力供給を併用することにより、内燃機関の燃料枯渇という事態を先延ばしできるため、今回我々が経験した燃料枯渇という問題をある程度は緩和できると考えられる。しかし先に示した操作性の問題、災害直後から避難者が接続可能で、速やかな情報収集などへの応用を可能とするという点では問題は解決していない。内燃機関型も大規模太陽光発電施設も大型の設備であるがゆえに発電容量の改善については問題解決に寄与するが、災害直後の柔軟な運用が可能である機器ではない。こうした点を踏まえ、本研究では発電時に騒音や振動を発生せず、出力に比しての小型

化が容易であるという他の発電方法に比べての長所を有し、操作性に優れた水素燃料電池^(3,4)の非常用電源としての可能性について注目した。しかしながら一方で、水素燃料電池は内燃機関型発電装置と同様に燃料である水素ガスを備蓄しておかなければならないという欠点を有しており、これは非常時の利用のみならず、平常時の発電においても問題となっている。現在、ガス会社などが実用化している燃料電池発電システムは、都市ガスや液化石油ガスなどの炭化水素ガスを、改質器といわれる装置で水と反応させて水素と一酸化炭素に分解し、得られた水素を発電に使用するシステムを用いることによりこの問題を回避している。この解決法を応用して、災害時でも使用が可能な液化石油ガスの水素源への応用という点に燃料備蓄の問題の解決を求めることもできるが、液化石油ガスなどから水素を取り出す方法も、水と炭化水素燃料ガスの改質器での水素への分解反応で副生成物として発生する一酸化炭素と触媒との反応に起因する効率低下という困難な問題が存在する。また、改質器を含むシステムとすることにより、装置の特に配管系が複雑化し、結果として装置の耐久性を損なうことになれば、緊急時の電源としての必要条件を無たすことが出来なくなる。しかし、もし純粋な水素を供給することが出来るのであれば、この改質器に起因する問題は発生しない。本学においては、実験研究に用いるための水素ガスボンベが何本か常に存在しており、これらを緊急時に燃料電池に転用することにより、燃料備蓄の問題と改質器に起因する効率低下の問題を同時に解決することが出来ると考えられる。

本研究ではこれらの事実を踏まえ、水素ボンベを常備している「理工学部を有する大学」という特殊な施設における非常用電源としての水素燃料電池の可能性を検証する。併せて災害時に必要とされる情報機器の水素燃料電池非常用電源による稼働の可能性を検証する。

2. 燃料電池の原理

燃料電池の動作は基本的に水の電気分解の逆反応で、水素と酸素を反応させて水を作る反応の過程で電子を取り出し発電を行う仕組みである。図 1 に燃料電池の原理図を示す。基本的に燃料電池は

3層構造であり、水素ガスが供給される燃料極、水素イオンのみを透過させ、水素ガスや酸素ガスあるいは電子などを透過しない電解質層、酸素が供給される空気極の3層で構成される。これら3層の構造において水素を空気中の酸素と反応させることにより、以下のように電力が発生する。まず水素極（陰極）側から水素を供給すると白金触媒反応により、水素極側で電子と水素イオンが発生する。

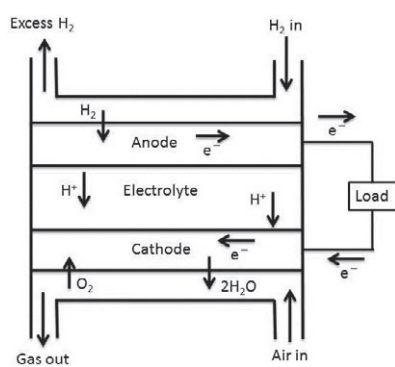


図1 燃料電池の構造

このうち水素イオンは中央の電解質層を透過して空気極（陽極）に至り、以下の反応により水を形成する⁽⁵⁾。



これに対して、電子は電解質層を透過できず外部回路を通過する。この時、両極間に電位が発生しこの系は電池として機能する。これが燃料電池の発電の原理である。ここで示した燃料電池の最小単位をセルと呼び、現実の燃料電池においてはこのセルが積層されて希望の電圧を発生させている。

燃料電池にはいくつか種類があるが、基本的には電解質の違いによって分類される。一般的な用途で使用され実用化がなされている燃料電池としては、固体高分子型、リン酸型、熔融炭酸塩型、固体酸化物型の4種類があるが、これらの名称は用いられている電解質の種類によっている。このうち300℃以下の低温で動作が可能なのは固体高分子型とリン酸型であり、高温で動作するのは熔融炭酸塩型と固体酸化物型である。本研究で

は、低温動作型のうち室温でも動作可能な固体高分子型である⁽⁵⁾、固体高分子型燃料電池（PMFC：Proton Exchange Membrane Fuel Cell、この他にも複数の名称と対応する略称があるが混乱を避けるため本稿では略称を使用しない）を使用した。固体高分子型燃料電池は電解質層として陽イオン交換膜を使用しており、その膜材料はフッ素置換された主鎖にエーテル結合を介してスルホ基が末端にある側鎖を結合した構造となっている。このスルホ基で構成される側鎖により膜中に親水性の高い部位が存在し、燃料極で発生した水素イオンはこの親水性の高い部位を数個の水分子と水素結合した形で移動し空気極に到達する。このため高分子で構成される電解質層は常に水分を含有している必要があり、逆に水が気化する高温では動作しない。その他の固体高分子型燃料電池の特徴としては、発電効率が高く高電流密度が実現できるため小型軽量化が可能である、電解質が固体高分子であるため乾燥を防げればメンテナンスが容易である、低温動作が可能であることから外部から加熱のためのエネルギーを供給する必要がなく起動時間が短くて済むなどが挙げられる。これらの特徴を生かして、固体高分子型燃料電池は家庭用定置電源などへの応用を前提として研究されており本研究での使用にも適しているといえる。

3. 実験

本研究で用いた固体高分子型燃料電池は、製品として販売されているものであり、ホライズン社⁽⁶⁾（シンガポール）のH-100燃料電池システムである。定格出力は100W、出力電圧13V、定格水素入力圧力は0.05MPaである。図2に本研究で用いた燃料電池本体と、ガス供給コントロールユニットの写真を示す。二つのユニットともサイズは各辺100mm程度と小型であり、軽量のため携帯性・収納性に優れている。また、固体高分子を電解質層に使用しているため、前節で示したように常温での動作が可能で起動に時間を要せず、乾燥を避けなければならないこと以外メンテナンスフリーであるなど操作性にも優れている。一方で、発電を行うためには動作が必須であるガス供給コントロールユニットを稼働させるために、発電装置とは独立した13Vの外部電源が

常に必要であるという、緊急用電源としては不適切な条件も有している。このガス供給コントロールユニット（図2右側の装置）は水素燃料電池へ外部の空気を送り込むためのファンに電源を供給するほか、発電電圧をモニタして水素供給バルブのフィードバックによる開閉を行い、水素ガスの流入量を制御するユニットである。



図2 燃料電池本体（左）とガス供給コントロールユニット（H-100 Fuel cell stack system, Horizon Fuel Cell Technologies, Singapore）

燃料として用いた水素ガスは純度7Nのガスで、容量10リューベのボンベから供給した。ボンベに二つの圧力計を持つ調整器を接続し、テフロン樹脂製のパイプをこれに接続して燃料電池本体に供給した。この調整器の二次圧側の圧力計で流入する水素の圧力を計測した。ガス流量に関しては、前述の水素ガスの供給量コントロールユニットが流量制御式ではなくバルブの開閉式であったので測定は行わなかった。未反応の水素ガスを含む排気ガスは負圧状態のドラフト内に排気した。水素流通中は燃料電池本体上方に水素リークチェッカ（JKC-HY、ジコー）を設置しガス漏れのモニタを行った。本研究では、水素燃料電池を中核とする電源システムを構成したが、これは燃料電池本体とガス供給コントロールユニットの他にバッテリーを二つ、DC-AC変換用インバータ、チャージコントローラを用いて構成した。この電源システムに用いたバッテリーは電圧13V、充電容量20Ahrのディープサイクル鉛蓄電池を用いた。災害時での使用を想定し、転落などによる液漏れなどを回避するためバッテリーはシールド型とした。本研究で用いたインバータは出力500Wの正弦波出力型、チャージコント

ローラは電圧制御はパルス幅変調方式、最大対応可能発電電力300Wの太陽電池用を流用した。水素燃料電池本体の出力電圧の測定に当たって使用したダミーロードは、10Ωについてはリボン抵抗を、100Ω、1kΩについては、セメント抵抗を複数並列直列に接続して設定抵抗値とし、かつ予想される電流を許容するものを使用した。

4. 結果

水素燃料電池を用いた非常用電源システムを構築する前に、まず水素燃料電池単体の性能について検証した。緊急用電源としての運用を前提とした場合、検証すべき点としては、水素の供給量が減少した場合の性能低下、すなわち発電電圧の低下をまず挙げる事が出来る。本研究で用いた水素燃料電池は水素ガスの供給を流量のコントロールではなく水素供給バルブの開閉で行っており、発電電圧の水素流量依存性という観点での測定は不可能であるため、ガス供給圧力の依存性という形で検証した。図3に負荷抵抗を10Ω、100Ω、1kΩ、開放の場合の発電電圧の入力ガス圧力依存性を示す。水素燃料電池の定格入力圧力である0.05MPa以下の入力圧力の領域で電圧の低下が観測されているが、緊急用電源の出力として必要となる13Vを下回る電圧は0.02MPaの圧力でも観測されていない。一方で、0.02MPa以下のガス圧力は、調整期の圧力計では測定することが出来ないのもので、正確な定格電圧供給可能限界ガス圧力は決定できなかった。

先に示したように、この水素燃料電池の出力は

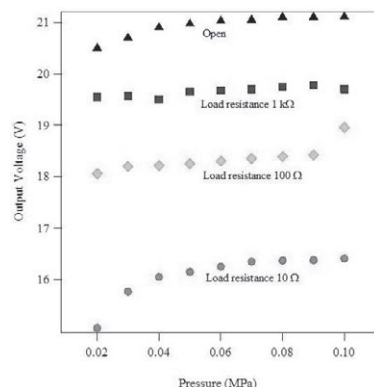


図3 水素入力圧力と出力電圧

13 V 直流であるため、系統電源の代替電源として単体でそのまま動作させることは不可能である。この対策として、緊急時には平常使用している交流電源に対応した電気機器を使用せず、直流電源に対応した別個の電気機器を緊急用に用意するという考え方もあるが、平常時長期間にわたってこれら別個の緊急用機器を使用しないことによる動作不良発生リスクと、生活空間における平常時の緊急時用電気機器の専有スペースの問題を考え、通常使用している機器を緊急時にも同様に使用するという選択を今回の運用実験では採るものとした。このため緊急用電源システムとして水素燃料電池を使用するには、水素燃料電池の出力である直流を系統電源と同じ交流に変換するインバータを接続する必要がある。このインバータを正常に動作させるためには、燃料電池の出力電圧をインバータ入力に必要とされる一定の電圧に変化させる機器が必要である。図 3 に示したように出力電圧はガス圧力などに依存して変化するが、これをインバータの入力に必要とされる電圧に調整し、かつ負荷で使用されない余剰電力を充電するために系統を分岐する機能を持つ機器として、本緊急用電源では太陽電池発電システムに用いられる充電コントローラを流用し、さらに余剰電力を充電するためのバッテリーも電源システムに接続した。ここで用いたバッテリーは、水素燃料電池のコントロールユニットを稼働させる電源としてのバッテリーと同一規格のものとし、二つのバッテリーを交換して使用することにより、ガス供給コントロールユニット用電源の電力払底による動作停止を避けることを想定した。以上示した機器を組み合わせて形成した緊急用電源システムのブロック図を図 4 に示す。負荷として用いる電気機器の選択に関しては、後述するアンケートの結果からテレビ受像機とした。テレビ受像機のうちで、多人数での試聴とデータ放送の文字表示を高齢者でも読解し得るだけの画面のサイズを有し、かつ電力消費が小さいものとして画面サイズ 19 インチの液晶テレビ、消費電力 53 W の機種を選択した。この液晶テレビまでを含む緊急用電源システム全体の写真を図 5 に示す。水素ボンベ以外の装置全体が小型の机上に収まるサイズ、具体的には 1 m^2 以下であることがわかる。また写真で

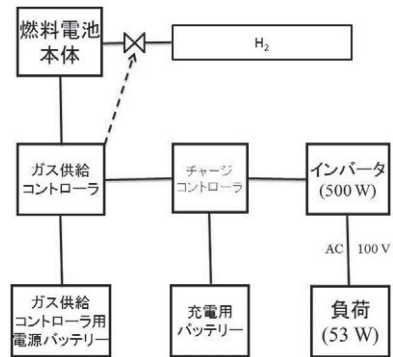


図 4 インバータを用いた AC100 V の緊急用電源の構成図



図 5 本研究で作成した緊急用電源の実体写真

示されているようにテレビ受像機の稼働は十分可能であり、5 時間の試験稼働中、テレビの動作に問題が発生することはなかった。また、水素ガスボンベ圧力の変化は 13.5 MPa から 0.6 MPa 程度の変化であった。この結果から推定するとテレビ受像機を動作させることのみを目的とすると仮定すれば 100 時間以上の動作が可能であると推定できるが、現時点では長時間の試験稼働を行って稼働時間の測定を行うことは、未反応の水素ガスの危険性を鑑みて行っていない。また水素ガスの消費速度は動作温度やテレビ受像機の動作状態などによって変化することが予想でき、さらに、実際の運用においてはバッテリーを接続するため、その容量や稼働条件、周辺回路の性能に依存して稼働試験が著しく変化することが考えられるので正確な稼働可能時間の予測は大変困難である。こうした問題のため、今回は動作可能時間の具体的な数値の算定は断念した。しかし図 3 に示した結果

は、充填時の圧力が 14.7 MPa の水素ボンベの内圧が 0.02 MPa になるまで理論上は使用できることを示しており、ボンベ内の水素ガスが枯渇する寸前まで発電が可能であることを示唆している。

5. 考察

本研究で用いた水素燃料電池非常用電源システムは、小型軽量であるため、堅牢で持ち運びに適した容器に格納しておくことが可能である。これにより災害時の物理的ダメージに対する耐久性に加え、収納性・携帯性が実現できる。また、実験のため水素ガスボンベを緊急時の燃料として流用するばかりでなく、水素ボンベを常設している複数の研究室に燃料電池発電システムを装備することにより、学内に非常用電源を分散して設置することも可能である。こうすることにより、災害直後から学内の数か所で緊急用電源を使用することが可能となる。これらの点を考慮すると水素燃料電池システムを用いた非常用電源は、現在の大学の非常用電源システムの欠点を補うものであることがわかる。しかしながら水素燃料電池非常用電源はその構造上いくつか問題があり、その最も重要なものは水素ガスの危険性である。水素ガスはアセチレンに次いで広い爆発限界を有し、空気との混合比率 4.1~74.2 パーセントという広い濃度に範囲に及ぶ⁽⁷⁾。これは排気される水素の多くの部分が反応して水となっても、残余の水素により容易に爆発性の雰囲気をもたらすことを意味する。また、前述したように、災害の状況下では水素を検知するセンサを作動させることも、安全性の高い排気システムを作動させることも不可能である。緊急事態での動作時における安全性という問題を解決できれば、水素燃料電池の緊急用電源としての利用は大きく現実性を増すと期待される。もう一つの大きな問題として考えられるのは水素燃料電池非常用電源が、現存する内燃機関型発電機や太陽電池発電施設に比べて発電電力で著しく劣る点である。これは発電装置のサイズが小さいことに起因するので問題と言い切れないものでもあり、一方で非常用電源はどれほどの発電量が必要となるのかについて検証することなしにこの問題は議論することは無意味である。この問題を議論する手がかりの一つとして、災害直後の停

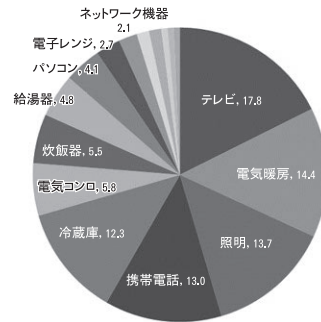


図6 停電中の被災生活で必要を感じた電気製品（石巻専修大学学生のアンケート結果）

電時に稼働しないことにより不便をこうむった電化製品は何かについて、災害後に本学学生を対象として行ったアンケートの結果を図6に示す。年齢層に著しい偏りがあるため、全住民のデータとして扱うことは不可能であるが、ある傾向を見出すことができた。アンケートにおいて得られた優先順位はテレビ、暖房、照明、携帯電話の充電、冷蔵庫、電気コンロの順であるが、このうち電気暖房と電気コンロについては、震災以降必要性が強く再認識された石油ストーブなど旧型の化石燃料機器による代替が可能であると考えられる。これを除いて考えると、冷蔵庫、電気コンロ、炊飯器、給湯器など飲食に関するものよりも上位に情報機器であるテレビや携帯電話が挙げられており、災害時の情報の重要性がこのアンケートからもうかがい知ることが出来る。本研究では緊急用電源の負荷として液晶テレビを用いたのは、得られたアンケートで最も災害時に必要であると指摘された電気機器がテレビであったからであるが、3位の照明、4位の携帯電話の充電における消費電力がテレビよりも小さいものであることも考慮したためである。この結果から考えると、災害時の情報の把握という目的で使用するための緊急用電源という観点で水素燃料電池式の緊急用電源をとらえるのであれば、100 W 程度の出力電圧は十分なものであると考えることが出来る。しかし、その後の長期にわたる被災生活での電力源としては本研究のサイズの機器では不十分である。本稿の結論としては、あくまで水素燃料電池は災害初期の状況把握に用いるための情報機器用の電力源であり、その後の被災生活の電力としては内燃機

関型発電機や大規模太陽光発電を用いるべきである
としたい。

文献

- (1) 東日本大震災 石巻専修大学報告書 2012 年
- (2) 「災害時を想定した風力発電の運用実験」 惠原貴志
2012 年 8 月、日本エネルギー学会第 21 回年次大会
- (3) W. R. Grove, Phil. Mag., 14, 127 (1839).
- (4) M. L. Perry, T. F. Fuller, J. Electrochem. Soc.,
149, S59 (2002).
- (5) 新エネルギーの展望 固体高分子型燃料電池 2001
年 3 月、財団法人 エネルギー総合工学研究所
- (6) <http://www.horizonfuelcell.com/>
- (7) 「水素の爆発危険性についての研究」 柳生昭三、松
井英憲、松田東栄、安本 弘、産業安全研究所報告、
RIIS-RR-18-1, 1 (1969).