

# パッシブ燃料電池を用いた IoT 向け電源システムの開発

代表研究者

秋元 祐太郎

筑波大学 システム情報系 助教

## 1 背景

近年、多くの IoT (Internet of Things) デバイスとそれに付随するアプリケーションが開発されている。例えば、運転者は IoT 技術を利用して交通状況を知ることができるといった利便性の向上が期待されている。また、IoT 技術の強化により、自動運転支援システムと連携して事故回避などの安全性を促進することも期待されている。その他のシステムとして、Yang らはヘルスケア向けのウェアラブルモニタリングシステムを開発した[1]。Pereira らは Raspberry Pi を用いた太陽光発電所監視のための IoT システムを提案した[2]。須磨らは、スマート農業のための多数のセンサを用いた監視システムを開発した[3]。共著者の飯島らは地震を検知するための IoT デバイスを開発している[4]。このデバイスは様々な建物での利用を想定しており、加速度センサを用いて振動を検出することで、局所的な震度マップを作成する。このマップデータは、地域の避難経路の誘導に利用される予定である。そのため、災害時にも IoT デバイスは稼働していなければならない。

IoT デバイスは、クラウド上のデータベースにアップロードするために「アクセスポイント」や「基地局」と呼ばれる端末が必要である。それらのデバイスや端末は、グリッドから電力を供給されており、災害時には機器への電力供給が一時的に停止する。災害時に稼働させるためには、非常用電源を利用して系統から独立している必要がある。IoT デバイスの非常用電源としては一般的には再生可能エネルギーや蓄電池が利用されている。これまでの研究では、Roumila らがアルジェリアに風力、太陽光、ディーゼル、蓄電池を利用したエネルギーシステムを開発している[5]。Bizon らは、再生可能エネルギーと燃料電池のハイブリッドシステムを提案し、シミュレーションを行った[6]。これらは大規模な非常用エネルギーシステムである。小規模なものでは、一般的に蓄電池が使用される。しかし、Franceschi らは、オフグリッドの太陽光発電を利用した行動支援を提案している[7]。Cetin らは、小規模な建物における太陽光発電と燃料電池のハイブリッドエネルギーシステムを分析している[8]。そのため、IoT デバイスや端末においても災害時に動作させるのに適した電源を見つける必要がある。

本研究では、IoT 機器への電源供給性能の向上を踏まえエネルギーシステムを評価した。IoT 機器や電話、キャンプ用品などに一般的に使用されているリチウムイオン (Li-ion) 電池と燃料電池を比較し、各電源の動作時間や出力を評価した。さらに、Raspberry Pi を用いた IoT デバイス向けの最適なエネルギーシステムを製作した。

## 2 IoT デバイスに適したエネルギーシステム

### 2-1 蓄電池

電池は、小規模な再生可能エネルギーシステムと電力網を統合するために重要なエネルギー貯蔵技術である[8]。電気を化学エネルギーに変換して蓄電することができるため、様々な種類の電池が開発されている。本研究ではリチウムイオン電池を用いた。一般的に、プラス極 (正極)、マイナス極 (負極)、電解液、セパレータの4つから構成されている。各部品に使用される主な材料は以下のようなものがある。

- ・正極：リチウム、金属を含有した酸化物
- ・負極：黒鉛
- ・電解液：有機溶媒にリチウム化合物を溶かしたもの
- ・セパレータ：ポリエチレンやポリプロピレン等の高分子化合物膜

原理としては、正極から負極に電子が移動するとともにプラスの電荷を持つリチウムイオンが電解液を介して、負極内に溜めこまれ、両極間に電位差が生じ、充電状態になる。正極と負極に負荷が接続されると、電

位差を解消する為に負極から正極に向かって電子が流れ、電流が発生して放電を開始する。これにより負極内にためられていたリチウムイオンが電解液を通して正極に移動し、正極内の電子と結合してリチウム酸化物に還元される。

リチウムイオン電池のエネルギー貯蔵効率は 100%に近く、他の電池よりもエネルギー密度が高い[9]。IoT デバイスの給電用 (cheero Canvas CHE-061 11.84Wh)、スマートフォンの充電用 (Buffalo 37.44Wh)、アウトドアキャンピングギアの給電用 (SmartTap PowerArQ 311Wh) として使用される出力の異なる 3 つの電池を用いる。

## 2-2 燃料電池

燃料極 (アノード) では、水素ガスが電極表面で水素イオンと電子に分かれる酸化反応が起こり、生成した電子は外部回路を通じて燃料極へ移動する。一方、空気極 (カソード) では、酸素分子が電解液中の水素イオンおよび燃料極から移動してきた電子と反応する還元反応が起こり、最終的に水が生成されます。燃料極で生成した電子は、正極へ移動する際、外部負荷で電気エネルギーとして利用される。

固体高分子形燃料電池 (PEMFC) は、電解質に高分子のイオン交換膜を用いており、高分子膜の両面に燃料極、空気極をそれぞれ重ね、カーボン製のセパレータで挟み込んだ構造となっている。他の燃料電池と比較し、動作温度が低く、起動時間が短く、出力密度が高いことから、小規模な再生可能エネルギー用途に利用されている[8]。しかし、発電時には熱が発生し、イオン交換膜を使用しているため膜内の水分が不足してしまうとイオン伝導度は著しく低下することから冷却が必要である。このため、一般的な PEMFC は空冷もしくは水冷の冷却システムを有している。パッシブ型燃料電池は、冷却機構として自然の空気循環による冷却に依存しており、これまで数ワット程度の出力しか得られない。しかし、空気を供給するためのポンプや冷却ファンなどの補助装置を必要とせず、また、可動部がないため、非常用電源として適している。

本研究では、Raspberry Pi を用いた IoT デバイスの動作を想定して、2 つの空冷式燃料電池 (HPFCRD0610: 10W、HPFCRD0820: 20W) をパッシブ型に変換した。PEMFC スタックを図 1 に示す。

## 3 実験方法

図 2 にシステム装置を示す。IoT デバイスとして Raspberry Pi を搭載し、図 2 に示すように、計測したデータをサーバにアップロードした。バッテリーと燃料電池は、電力監視ツール (ESP-PowerMonitor) を介して IoT デバイスに接続した。このツールでは、IoT デバイスの電圧、電流、電力を測定し、Microsoft Azure にデータをアップロードした。アノードはデットエンド状態で、加湿せずに水素吸蔵合金から水素を供給した。カソードには PEMFC の周囲の乾燥した空気を供給した。セル電圧はデータロガー (GRAPHTEC: GL 240) を用いて測定した。運転中はパーズなどの制御は行っていない。

また、燃料電池負荷特性実験の際には、各電流負荷に対する出力を計測するために、IoT デバイスではなく、電子負荷装置を接続している。

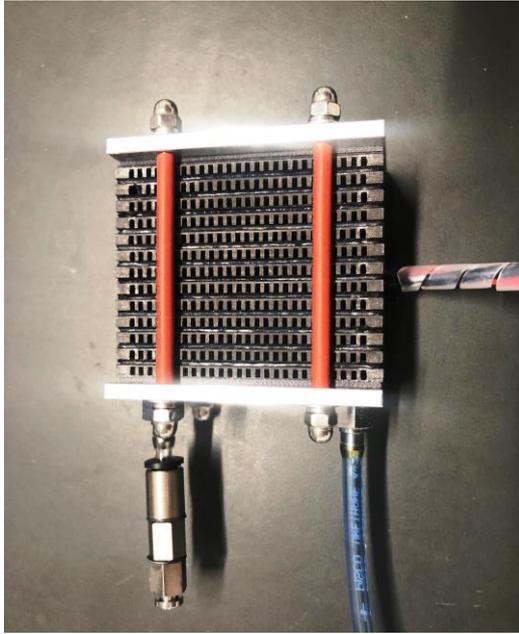


図1 パッシブ燃料電池スタック

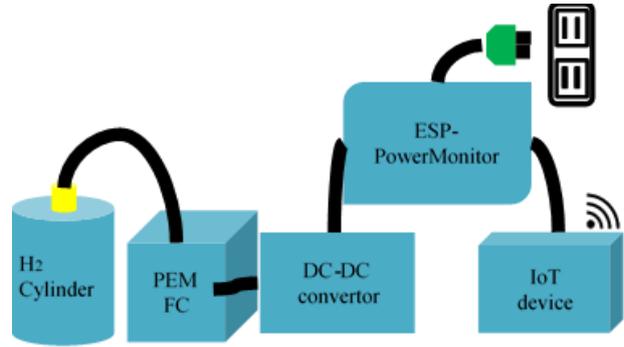


図2 システム概要

## 4 結果

### 4-1 IoT デバイスの出力特性

図3は311 Whのバッテリーを使用したRaspberry Piの出力特性を示している。このデバイスはUSBコネクタから電圧を入力しているため、 $V_{bus}$ は一定である。出力電流はサーバとの通信状態によって変化する。表1に各電源における出力電流の平均値、最大値、中央値、標準偏差、1秒間の最大変化を示す。311 Whの電池での動作時の平均電流は396 mA、最大電流は969 mAであった。これらの値は他の電源よりも大きくなっている。これは、311 Whのリチウムイオン蓄電池の動作時間が最も長かったため、発熱により上昇したことが推定される。また、1秒あたりの最大電流変化量は597.6mAであった。このため、電池とPEMFCが変化に追従するか、コンデンサで構成された制御回路を介して変化に追従する必要がある。今回の検討ではコンデンサなどの制御回路を含めていない。

10 W、20 W燃料電池共に20 Lの水素吸蔵合金ポンプを用いて測定を行ったところ、図4のように20 W燃料電池は異常も無く目標の3時間の駆動を完遂することが出来た。しかし、10 W燃料電池は測定から1時間経過後に、Raspberry Pi3に異常が発生したため実験を中断した。図5(b)に示すように電流が3378 s辺りから急低下し、直後に回復するといった現象が繰り返しまられた。Raspberry Piのログデータから、出力電力が低下するとRaspberry Piは停止し、その後出力電力が回復したため、出力電力の低下により電源を切った後、再び電源が入った。これは燃料電池の電解質膜内の水分量が時間経過につれ増加し、電極へのガス供給を妨げた(フラッディング)と燃料電池の温度上昇に伴い電解質膜内が乾燥し出力が低下した(ドライアウト)の2つの要因が関係しているのではないかと考えられる。

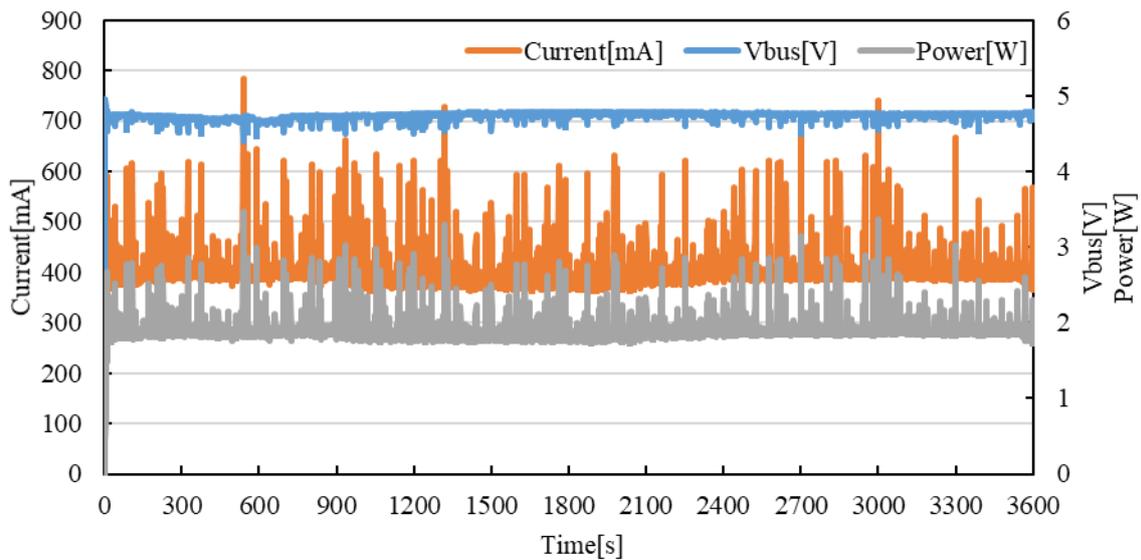


図 3 311 Wh バッテリーを用いた Raspberry Pi モニタ推移 (稼働開始 1 時間)

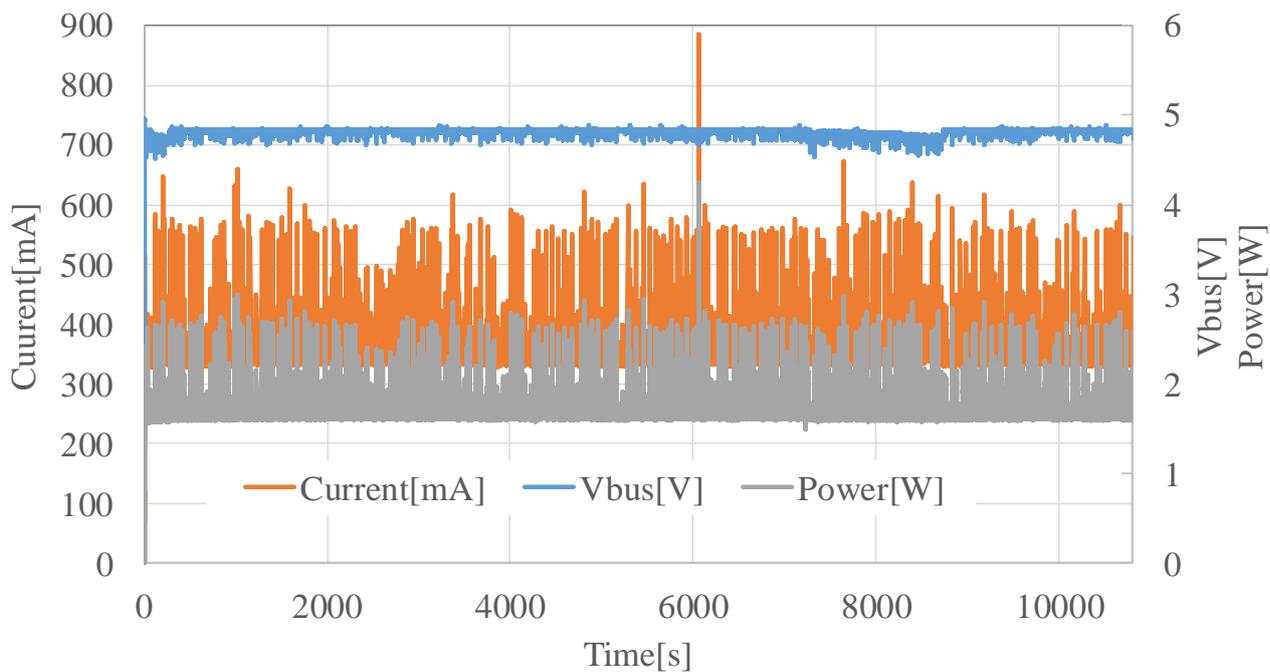
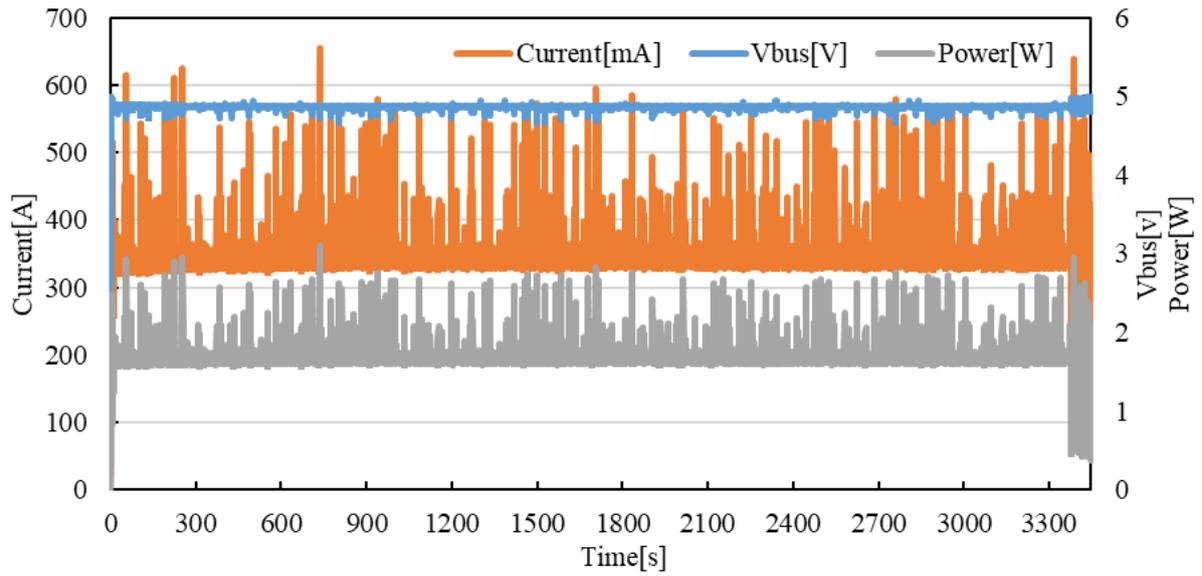
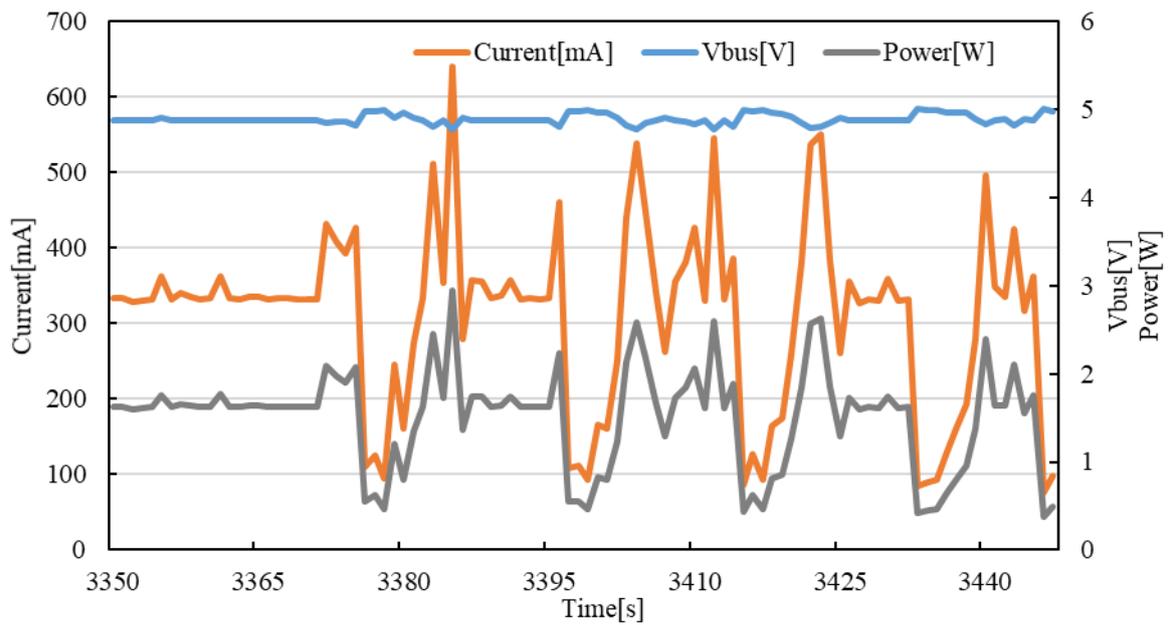


図 4 20 W 燃料電池を用いた Raspberry Pi モニタ推移 (全期間)



(a) 全期間



(b) 不具合時

(c) 図 5 10 W 燃料電池を用いた Raspberry Pi モニタ推移

(d) 表 1 各電源における Raspberry Pi モニタ電流

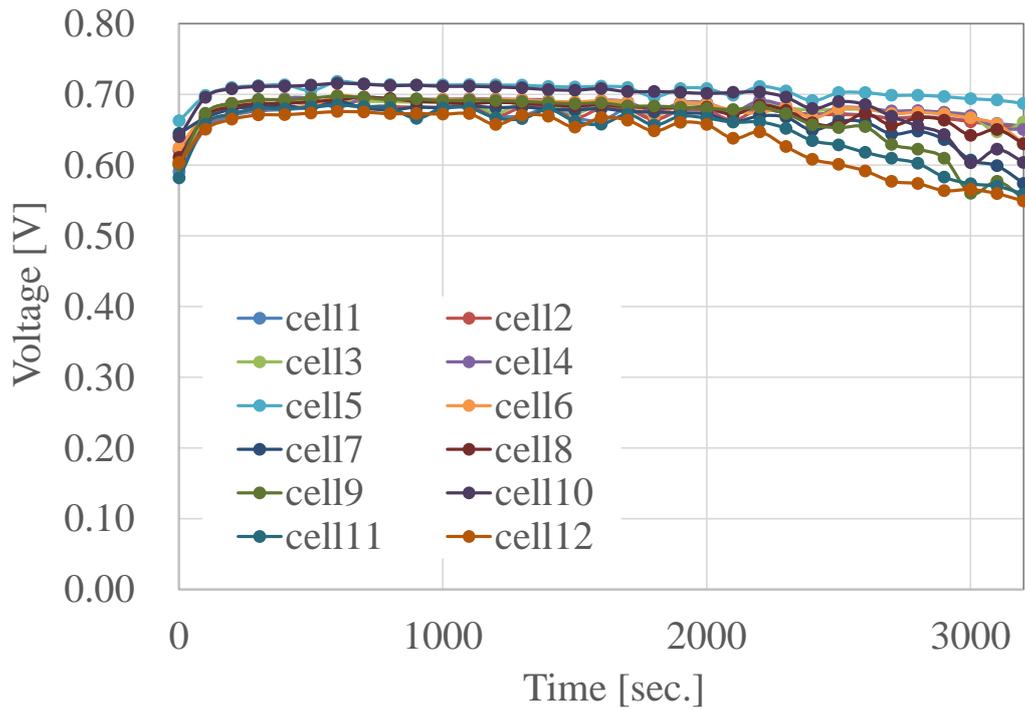
[mA]	Battery			Fuel cell	
Rated Power	37.44 Wh	11.84 Wh	311 Wh	10 W	20 W
Average	351.05	351.82	396.45	345.07	349.67
Maximum	915.3	901.9	968.5	654.9	884.6
Median	339	340.1	387.2	332.8	337.6
SD	38.9	38.8	37.7	46.8	39.5
Maximum change per sec.	580.5	562.4	597.6	360.6	550.8

#### 4-2 燃料電池の出力特性および性能評価

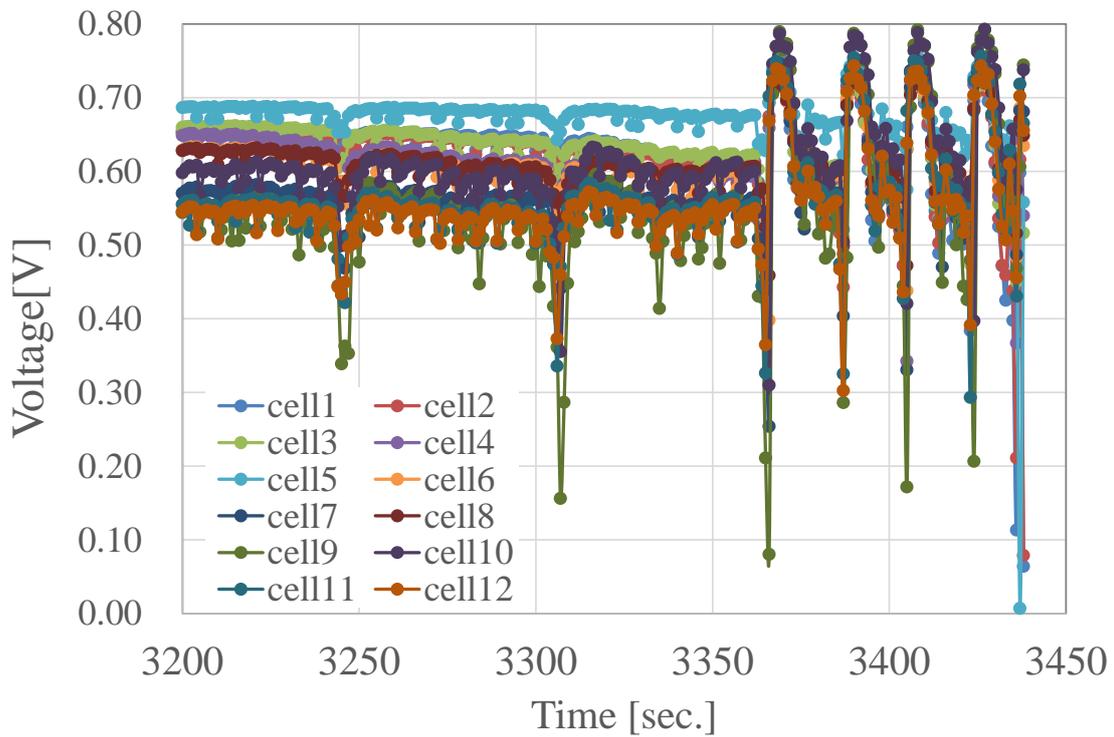
各電源の性能評価を表 2 に示す。蓄電池は、内蔵されている制御回路によって異なる放電限界電圧に達した際に出力が止まった時間である。仕様値より計算された動作時間は最大電流を用いているため、実測値は約 2 倍となった。PEMFC の運転は 3 時間行う予定であった。しかし、10 W の燃料電池は 57 分しか稼働しなかった。図 7 に運転中のセル電圧を示す。図 6 (a) に示すように、約 2000 秒後に電圧が変化しているが、これは動作温度と燃料供給量の変化が関係している。図 8 に 10 W 燃料電池の入り口から出口にかけての動作温度分布を示す。入口 (T1)、出口 (T4) の温度が中央部 (T2, T3) よりも低くなっており、これは周辺環境の温度や燃料電池のエンドプレートに金属を使用しているためであると推測される。水素はデットエンドで供給されているため、入り口側のセル 1 から供給され、出口は閉塞している。そのため、出口側の水素濃度は低く、発生した水を排出するなどの制御機構を実装する必要がある。実用化されている燃料電池の多くでは生成水をパージしているが、パージ時に水素が流出するため、本実験では省エネルギーの観点からパージしていない。

図 6 (b) は 3380 秒後にセル電圧の低下と上昇が 4 回繰り返されていることを示しており、図 6 (b) と一致する。また、Raspberry Pi のログデータから、出力電力が低下すると Raspberry Pi は停止し、その後出力電力が回復したため、出力電力の低下により電源を切った後、再び電源が入った。この結果から、10 W のパッシブ型燃料電池による連続運転は制御なしには困難であることがわかった。一方で、20 W の燃料電池は問題なく 3 時間エネルギーを供給した。PEMFC の連続運転時間は水素吸蔵合金内部の水素量に依存するため、水素残量次第で長期運転が可能である。

図 9 に 10 W, 20 W パッシブ燃料電池の負荷特性曲線を示す。パッシブ化によりどちらも定格値である 10, 20 W から低減している。どちらも 0.9 A 時に電圧低下が顕著になっている。しかし、セル数の違いにより、出力に余裕が出ていることや体積当たりの出力が低く、熱の放出により 20 W 燃料電池のパッシブ化では今回のように安定運転ができたと考えられる。



(a) 0-3200 秒



(b) 3200-3438 秒

図 6 10 W 燃料電池のセル電圧推移

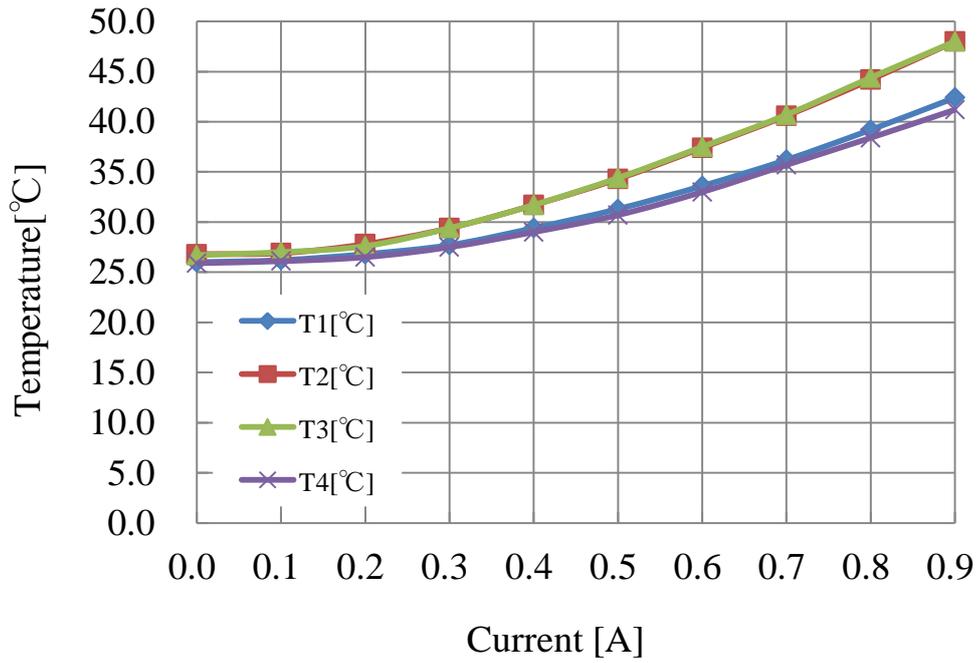
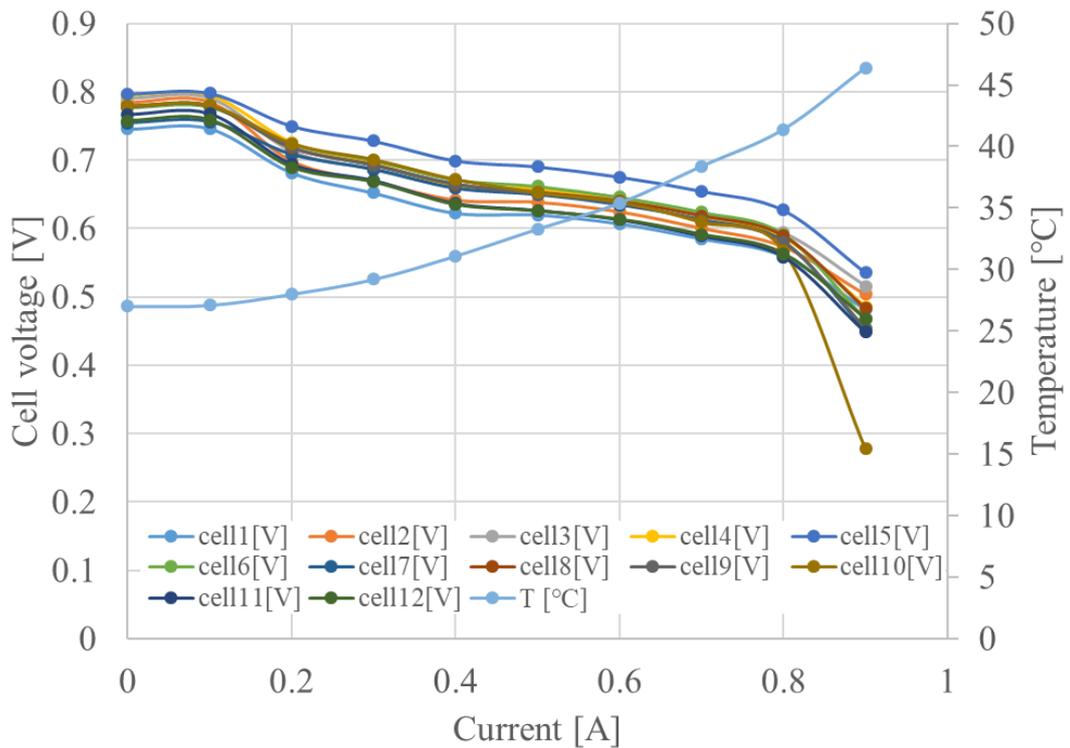
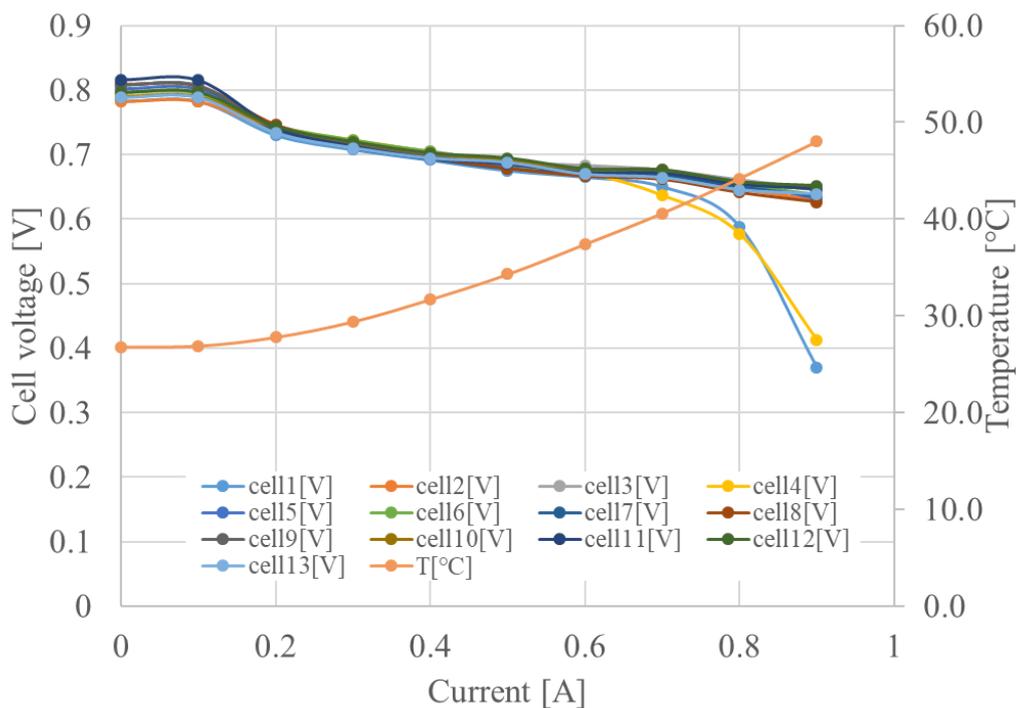


図 7 10 W 燃料電池の温度分布



(a) 10 W 燃料電池



(b) 20 W 燃料電池  
 図 8 電流電圧特性曲線

表 2 各電源の長時間運転仕様値、計測値

	Battery			Fuel cell	
Rated Power	37.44 Wh	11.84 Wh	311 Wh	10 W	20 W
Calculation	9.08 h	2.87 h	3 day 3.45 h	3.0 h	3.0 h
Measurement	17.52 h	5.76 h	6 day 3.82 h	57.45 min	3.02 h

#### 4-3 コストおよび出力密度の比較評価

各電源のコストと仕様を表 3 に示す。蓄電池は量産品のため安価に手に入れることが可能である。これに対し、PEMFC は研究用として用いられているため比較的高価である。近年、PEMFC はコストが低下しており、2050 年には 10 分の 1 になると予想されている[5]。

異なる電力系統と運転時間を比較するために、電力密度  $P_D$  という指標を用いた。この計算は、電池と燃料電池本体の仕様値を用いている。制御回路や水素吸蔵合金は計算に考慮していない。

$$P_D = \frac{I_m \times V \times T}{D}$$

- Im : 平均電流[A]
- V: 出力電圧 [V]
- T: 測定時間 [h]
- D: 電源の寸法[cm<sup>3</sup>]

電力密度では、20 W の燃料電池が最も高い値を示した。この指標では水素吸蔵合金や制御回路は考慮されていないが、燃料電池の出力電力密度が高いことを示している。また、電池は充電が必要であり、充電に時間がかかる。PEMFC は水素を供給することで発電できるため、予期できる残量にあわせて蓄電合金を交換することで持続的な連続運転が可能である。

表 3 各電源の価格、仕様比較

	Battery			Fuel cell	
Rated Power	37.44 Wh	11.84 Wh	311 Wh	10 W	20 W
Purchase price [Yen]	3,564	2,500	29,700	55,080	77,760
Dimension [mm]	92 x 60 x 22	50 x 85 x 16	193 x 230 x 195	50 x 40 x 30	50 x 55 x 30
$P_D$ [Wh/cm <sup>3</sup> ]	0.25	0.15	0.03	0.03	0.70

## 5 まとめ

IoT デバイスへの応用として 2 つのエネルギー源を評価し、コストと性能仕様を評価・比較した。PEMFC をパッシブ型燃料電池とすることで出力は低下したものの、冷却・パーズ制御なしで連続運転が可能であることを確認しました。これにより、IoT 機器の非常用電源として PEMFC を利用できる可能性を示した。

図 9 に、研究成果として製作した 20 W PEMFC スタック、DC-DC コンバータ (CC10-1205SF-E)、ESP PowerMonitor を収納したスタンドアロン型 FC システムを示す。銀色の筐体内にこれらの機器が収納されており、水素配管と Raspberry Pi 接続ケーブルが出ている。このシステムを用いて筑波大学共同研究棟にて実証試験を行い、外部環境においても長時間の連続運転を可能となった。



図 9 スタンドアロン型パッシブ燃料電池システム

## 【参考文献】

1. Z. Yang, Q. Zhou, L. Lei, K. Zheng, W. Xiang, J. Med. Syst., 40, 12, 2016.
2. R. I. S. Pereira, I. M. Dupont, P. C. M. Carvalho, S. C. S. Jucá, Meas. J. Int. Meas. Confed., 2018.
3. N. Suma, S. R. Samson, S. Saranya, G. Shanmugapriya, and R. Subhashri, Int. J. Recent Innov. Trends Comput. Commun., 5, 2, 2017.
4. 山本輝弥, 飯島洋祐, 大学コンソーシアムとちぎ第 16 回学生企業研究発表会, 2019
5. Z. Roumila, D. Rekioua, T. Rekioua, Int. J. Hydrogen Energy, 42, 30, 2017.
6. N. Bizon, M. Oproescu, M. Raceanu, Energy Convers. Manag., 90, 15, 2015.
7. J. Franceschi, J. Rothkop, G. Miller, Procedia Engineering, 78, 2014.
8. E. Cetin, A. Yilanci, Y. Oner, M. Colak, I. Kasikci, H. K. Ozturk, Energy Build., 41, 2009.
9. N. K. C. Nair, N. Garimella, Energy Build., 42, 11, 2010.
10. P.J. Hall, E.J. Bain, Energy Policy, 36, 12, 2008
11. International Energy Agency, Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, 2015.

## 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Comparative Analysis of Fuel Cell and Battery Energy Systems for IoT devices	E3S Web of Conferences (Proceedings of 5th International Conference on Sustainable and Renewable Energy Engineering)	採択済み
Raspberry Pi を用いた IoT 機器のためのエネルギーシステム評価	電気学会全国大会 Vol.3, 75, pp. 108	2020 年 3 月