

燃料電池・太陽光発電・蓄電池を導入した戸建住宅における電力収支の詳細分析

ASSESSMENT OF POWER BALANCE IN A DETACHED HOUSE EQUIPPED WITH FUEL CELLS, PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION, AND STORAGE BATTERIES

高村研究室 17T5049H 日浦遼介

Takamura Lab. 17T5049H Ryosuke HIURA

キーワード:

燃料電池 太陽光発電システム 蓄電池 電力自給率 自家消費率

Keywords:

Fuel cells Solar power generation system storage battery

Electricity Self-Supply Rate In-house consumption rate

災害時の停電対策として、各住宅での電力自給が求められている。電力自給をするための設備として、家庭用燃料電池(FC)、太陽光発電システム(PVS)、蓄電池(BT)の導入が進められている。本研究では、FC、PVS、BTを設置した寒冷地に立地する戸建住宅における電力収支状況の分析を行い、電力自給率と自家消費率の実態把握を行った。また、BTの導入による余剰電力量とCO₂排出量の削減量を算出した。

1. はじめに

近年、日本では停電の恐れがある自然災害の発生件数が増加傾向にある¹⁾。最近では、2019年の台風19号により最大約52万戸で停電被害が発生した²⁾。このような災害時に、ライフラインが寸断された場合でも、建物に問題がない場合には必要最低限の生活ができるように、各住宅での電力自給が求められる。住宅で電力を自給するための設備として、家庭用燃料電池(以下FC)、太陽光発電システム(以下PVS)、蓄電池(以下BT)の導入が進められている。また、2019年から再生可能エネルギーの固定価格買い取り制度が終了する住宅が増加し、余剰電力の買い取り価格が低下するため、PVSによる発電量の余剰電力を売電するより自家消費することが主流になると考えられる。このため、PVS発電量の自家消費率を向上させるために、BTを導入する住宅が増加する可能性が考えられる。

これまで、西川ら³⁾は、PVS、BTの実測調査からPVSによる電力使用量削減と非常時における有効な電力使用方法についての検討を行った。胡内ら⁴⁾は、FC、PVS、BTを導入したモデル住宅における実測とシミュレーションによって、家族構成によって導入効果に変化することを明らかにした。長谷川ら⁵⁾は、FCとPVSを併用した6戸の住宅を対象に実測調査を行い、購入電力量の抑制効果や一次エネルギー消費量の削減効果を明らかにした。しかし、FC、PVS、BTが導入された戸建住宅で詳細なデータによる電力収支状況の分析を行った事例は少ない。そこで、本研究ではFC、PVS、BTを導入した寒冷地に立地する戸建住宅における電力収支を分析し、電力自給率と自家消費率の実態把握を行った。

2. 概要

2.1 システム概要

FC、PVS、BTのシステム概要を図1に示す。運転方法は、FCが電主熱従の自動運転をし、電力需要に対してFCの発電量が不足した場合、PVSから供給される。また、PVSが発電しない時間帯ではBTと系統からの購入電力から供給される。ただし、BTは残量が停電対応するためのメーカー推奨値である30%を下回らないように運転している。また、夕方から朝方にかけて常に系統から0.1kWh供給されているシステムとなっている。

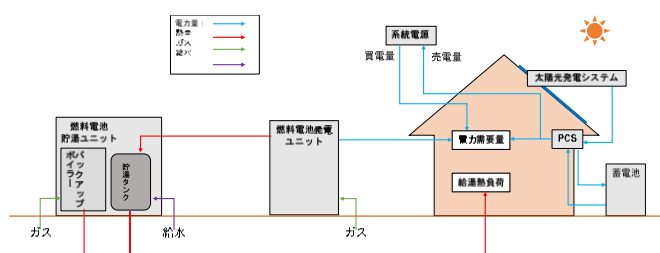


図1 システム概要

表1 対象住宅概要

立地場所	長野県長野市
構法、階数	木造軸組み構法、地上2階建て
延べ床面積[m ²]	126.5
家族構成	夫婦、子供1人
外皮平均熱貫流率(U _A 値)[W/m ² ・K]	0.51
相当隙間面積(C値)[cm ² ・m ²]	0.51
暖房設備	床暖房
	浴室暖房乾燥機
	ファンコンベクター(2階寝室)
換気設備	第1種熱交換換気システム

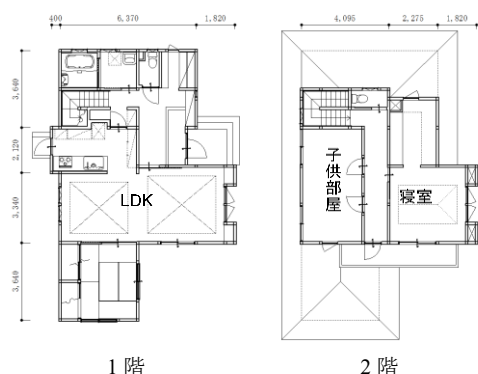


図2 対象住宅平面図

2.2 住宅概要及び計測概要

対象住宅の概要を表1、各階の平面図を図2に示す。対象住宅は、延床面積が126.5m²の木造2階建てで、U_A値が0.51W/(m²・K)である。また、対象住宅の発電設備の概要を表2に、計測概要を表3に示す。本論文における分析期間は2020年9月1日～12月31日とした。

3. 月別の実測結果

3.1 消費電力量の内訳

月別の消費電力量と月平均外気温を図3に示す。FC供給量、PVS供給量、BT供給量、購入電力量の合計が消費電力量である。図3より、消費電力量は9月から12月にかけて増加傾向にあった。9月は311.1kWh、12月は469.1kWhとなり、12月の消費電力量は9月の約1.5倍になった。また、9月から12月にかけて、FC供給量は36.3kWhから183.9kWhと発電量が約5倍になった。外気温の低下により給湯負荷が増加し、稼働している時間が長くなったためと考えられる。一方で、PVS供給量が9～11月に比べて12月が減少した。PVS発電量のうち、BTへの充電量と余剰電力として売電された量の割合が大きくなったためと考えられる。

3.2 PVS発電量の内訳

月別のPVS発電量と月平均日積算日射量を図4に示す。PVS供給量、BT充電量、売電量の合計がPVS発電量である。図4より、9月から12月にかけてPVS発電量は減少傾向にあった。9月は381.5kWh、12月は207.8kWhとなり、12月のPVS発電量は9月の約半分になっていた。また、9月は207.4kWh、12月は76.1kWhとなり、12月の売電量は9月の約4割まで減少していた。一方で、BT充電量とPVS供給量の変化は僅かであり、PVS発電量の減少による影響を売電量が最も強く受けていた。

3.3 BT残量の分布

月別のBT残量の箱ひげ図を図5に示す。9月から12月にかけて中央値が減少傾向にあり、12月のみ中央値が40%を下回った。また、9月は残量が100%付近と30%付近である頻度が多いことから、満充電の状態と30%まで放電している状態である時間が多かった。一方で、12月は残量が30%付近である頻度は多かったが、100%付近の状態が少なかった。

3.4 FC稼働率

月別のFC稼働日と稼働率を表4に示す。1日のうち、1時間でも稼働している日を稼働日とした。また、稼働率は式(1)により算出した。稼働日における時刻別の稼働率を図6に示す。表4より、FC稼働率は9月から12月にかけて増加傾向にあり12月は8割以上の時間で稼働していることが分かった。また、図6より、9月は稼働日であっても稼働率が50%であった。これは、9月は8:00から翌日3:00まで運転した後は、その日は全く発電しない運転日がほとんどであったためである。

$$R_{ope} = \frac{H_{ope}}{H_{mon}} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

R_{ope} : FC稼働率[%]

H_{ope} : FC稼働時間[h]

H_{mon} : 各月の総時間[h]

4. 電力自給率・自家消費率

電力自給率と自家消費率を以下により算出した。

$$P = \frac{E_{id} - E_{pur}}{E_{id}} \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

$$S = \frac{E_{pv} - E_{sur}}{E_{pv}} \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

表2 発電設備概要

PEFC	燃料	LPガス	
	発電出力[W]	250~700	
	タンク容量[L]	200	
	貯湯温度[°C]	60	
PVS	容量[kW]	4.08	
	太陽電池モジュール	変換効率[%]	6.8
	パワーコンディショナ	変換効率[%]	94
BT	種類	リチウムイオン	
	容量[kWh]	6.5	
	実効容量[kWh]	5.9	
	パワーコンディショナ	変換効率[%]	96

表3 計測概要

計測項目	計測期間	計測項目	計測期間	
電力量 [kWh/h]	2020/8/10~	総発電量	電力	
		消費電力量		売電量
		PVS発電量	FC発電量	2020/8/29~
		BT充電量	FC消費電力量	2020/8/29~
		BT放電量	BT残量[%]	2020/8/10~
		購入電力量	日射量[W/m²]	2012/1/13~
		外気温[°C]	2012/1/13~	

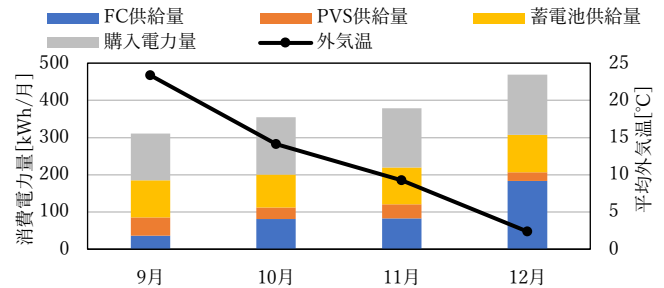


図3 消費電力量と平均外気温

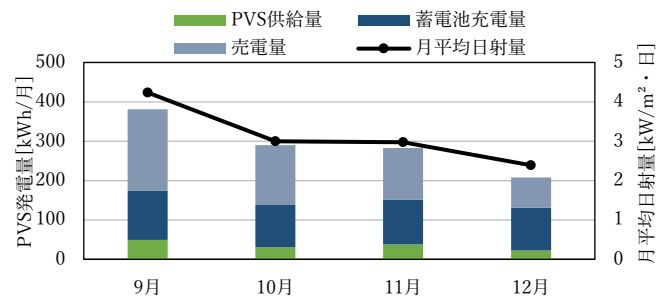


図4 PVS発電量と平均日射量

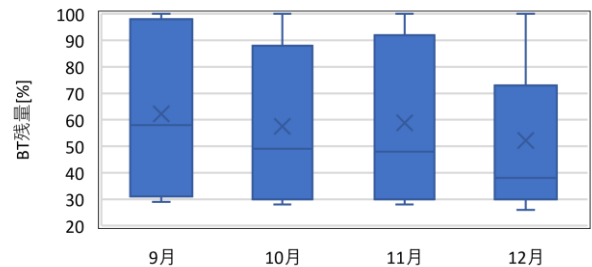


図5 BT残量箱ひげ図

表4 FC稼働日、稼働率

	9月	10月	11月	12月
稼働日[日]	15	20	18	28
稼働率[%]	19.4	40.7	43.2	83.6

ここで、

P：電力自給率[%]

E_{id} ：消費電力量[kWh]

E_{pur} ：購入電力量[kWh]

S：自家消費率[%]

E_{pv} ：PVS 発電量[kWh]

E_{sur} ：売電量[kWh]

月別の電力自給率、自家消費率を表 5 に、日別の電力自給率と自家消費率の分布を表 6 に示す。表 6 の数値は日数を表している。電力自給率が 70~80%、自家消費率が 40~50%である日数が最多となった。表 5 より、12月のみ電力自給率、自家消費率ともに 60%を超えていた。これは、12月の消費電力量の約 40%を FC が供給しているためであると考えられる。表 6 より、電力自給率が 50~80%である日が全体の 2/3 程度であった。また、自家消費率は 40~50%である日が最も多く、次いで 90~100%である日が 23 日間あった。

5 代表日の時刻別電力収支

5.1 一般日の時刻別電力収支

電力自給率が 70~80%であり、自家消費率が 40~50%である日を一般的な代表日とした。一般的な代表日とその前後日の電力収支の時刻別変動と BT 残量の推移を図 7 に示す。9 月 16 日の電力自給率は 72%、自家消費率は 48%であった。PVS が発電を開始した時に BT への充電が開始され、午前中には満充電となり、その後の余剰電力量は売電していた。そして、夕方のピーク時に昼間に充電した電力を放電することによって、電力負荷を賄っていた。BT 残量が 30%まで放電したのちの電力負荷は、主に系統から供給されていた。

5.2 電力自給率が高く、自家消費率が低い日の電力収支

電力自給率が最も高い日とその前後日の電力収支の時刻別変動と BT 残量の推移を図 8 に示す。電力自給率が高い日(10 月 26 日)の電力自給率は 81%、自家消費率は 19%であった。燃料電池が 1 日中発電しており、夕方以降の電力負荷も FC と BT からの供給により賄っているため、電力自給率が高くなったと考えられる。一方で、昼間の電力負荷のほとんどが FC によって供給されているため、PVS 発電量が BT への充電のみにしか利用されていない。したがって、PVS が発電している昼間は FC の発電量を抑制し、PVS から電力負荷に供給する運転方法にすることにより、電力自給率だけでなく自家消費率も上昇すると考えられる。また、夜中には購入電力によって BT に充電が行われていた。夜中の充電によって PVS 発電量による充電開始時には BT 残量が 60%程度であった。これより、BT 充電量も減少し、自家消費率が低下した。

5.3 電力自給率・自家消費率ともに高い日の電力収支

電力自給率・自家消費率がともに高い日とその前後日の電力収支の時刻別変動と BT 残量の推移を図 9 に示す。電力自給率、自家消費率ともに高い日(11 月 28 日)の電力自給率は 81%、自家消費率は 97%であった。図 9 より、昼間の電力負荷が大きいが、FC、PVS によって供給されていた。また、夕方以降の電力負荷も FC と BT から供給され、最低限の購入電力量に抑えていた。これより、電力自給率が高くなった。また、PVS 発電量は一般日と比較して 4.5kWh 小さかった。さらに、昼間の負荷に対して供給しながら BT へ充電していた。BT が満充電になった時刻は 14:00 であり、16:00 には供給を開始してい

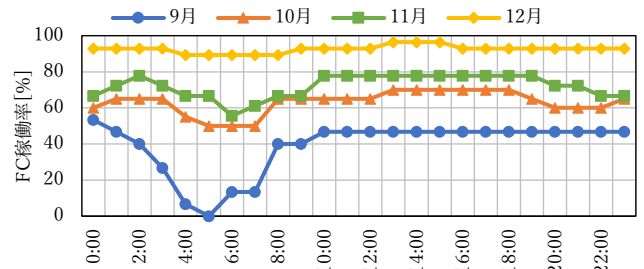


図 6 FC 時刻別稼働率(稼働日)

表 5 月別電力自給率、自家消費率

	9月	10月	11月	12月
電力自給率[%]	59.6	56.6	58.0	65.4
自家消費率[%]	45.6	47.6	53.5	63.4

表 6 電力自給率、自家消費率の分布(日)

		電力自給率[%]									
		10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100	計[日]
自家消費率 [%]	10~20	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	20~30	0	0	0	0	1	1	2	2	0	6
	30~40	0	0	0	0	5	8	2	1	0	16
	40~50	0	0	1	5	5	3	13	3	0	30
	50~60	0	0	2	6	1	2	5	3	0	19
	60~70	0	0	2	3	5	1	1	0	0	12
	70~80	0	0	2	2	0	3	1	1	0	9
	80~90	0	0	1	0	2	2	0	1	0	6
	90~100	2	3	2	1	7	4	3	1	0	23
	計[日]	2	3	10	17	26	24	27	13	0	122

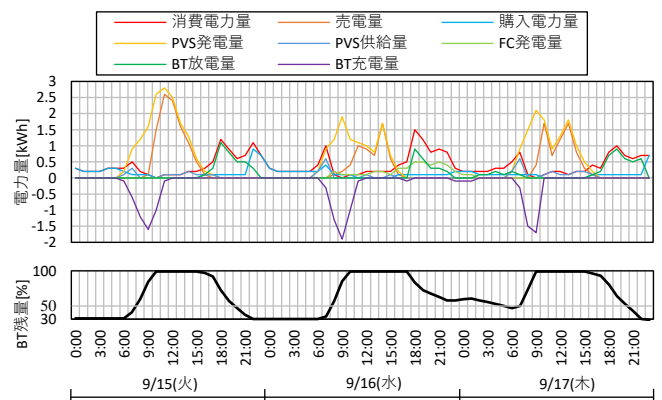


図 7 時刻別電力収支、BT 残量推移(一般日)

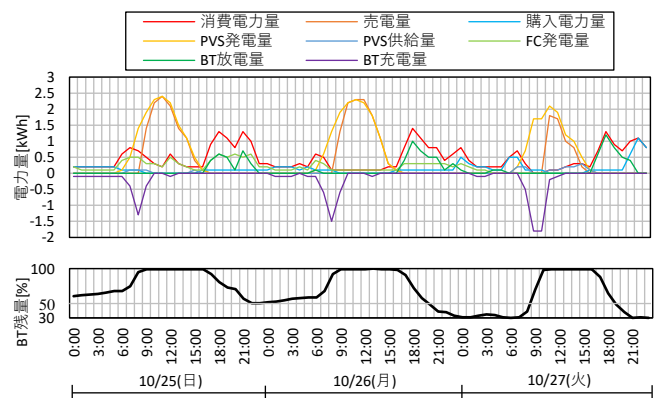


図 8 時刻別電力収支、BT 残量推移(電力自給率が高い日)

たため、自家消費率も高かった。PVS 発電量は 15:00 に僅か 0.1kWh 売電され、他の時刻では自家消費されていた。

6. 電力自給率・自家消費率を変化させる要因

FC 発電量と電力自給率の相関関係を図 10 に、PVS 発電量と電力自給率の相関関係を図 11 に示す。図 10、11 より電力自給率と PVS 発電量の相関係数は 0.19 であった。また、電力自給率と FC 発電量の相関係数は 0.47 であった。これより、電力自給率は PVS 発電量より FC 発電量との相関が強いことが分かった。これは、主に電力を購入する時間帯は夜中であるため、この時間帯に発電可能な FC との相関がより強くなったと考えられる。また、消費電力量と自家消費率の相関関係を図 12 に、FC 発電量と自家消費率の相関関係を図 13 に示す。自家消費率は消費電力量と弱い相関があり、FC 発電量と自家消費率には相関がなかった。これは、消費電力量が大きい日は昼間の消費電力量が大きいため、PVS 発電量が電力負荷へ供給され、余剰電力量が減少したためであると考えられる。

7. BT の導入による余剰電力量、CO₂削減効果

BT の導入前と導入後の PVS 発電量の内訳を図 14 に、自家消費率と CO₂削減量を表 7 に示す。CO₂削減量は式(4)より算出した。CO₂排出原単位はマージナル電源である火力発電の値⁹⁾を用いた。導入前は、9月から12月までのPVS発電量897kWhのうち、721kWhが売電されていた。一方で、導入後は9月から12月までのPVS発電量1,162kWhのうち、売電量は567kWhであった。PVS発電量はBT導入後のほうが大きい、売電量は導入後のほうが小さかった。BTの導入により自家消費率はBT導入前の約2.5倍となった。また、BTの導入により、全ての月で導入後のCO₂削減量が導入前の削減量を大きく上回り、CO₂削減量が4カ月平均約60kg-CO₂増加した。このことから、BTを導入することはCO₂排出量の削減に有効であると考えられる。

$$C = (E_{sup,pv} + E_{sup,sb}) \times C_e \dots \dots \dots (4)$$

ここで、

C : CO₂削減量[kg-CO₂]

E_{sup,pv} : PVS 供給量[kWh]

E_{sup,sb} : BT 供給量[kWh]

C_e : CO₂排出原単位(0.69)[kg-CO₂/kWh]

8. まとめ

本研究では、FC、PVS、BTを導入した戸建住宅における電力収支を分析し、電力自給率と自家消費率の実態を把握した。得られた知見を以下に示す。

- (1)12月のFC稼働率が80%であり、消費電力量に対するFC供給量の割合が上昇したため、12月の消費電力量が計測期間の4か月間で最大であったが、電力自給率も65.4%で最大となった。
- (2)PVS発電量は9月から12月にかけて減少傾向にあったが、PVS発電量の減少によって売電量が最も減少したため、自家消費率は増加傾向にあった。
- (3)BTを導入したことにより、自家消費率はBT導入前と比較して平均約30%上昇した。また、CO₂削減量はBT導入前と比較して、4か月間で合計約210kg-CO₂増加した。

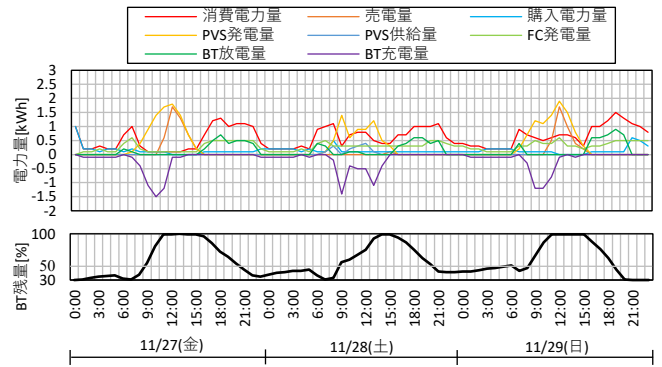


図9 時刻別電力収支、BT残量推移

(電力自給率、自家消費率ともに高い日)

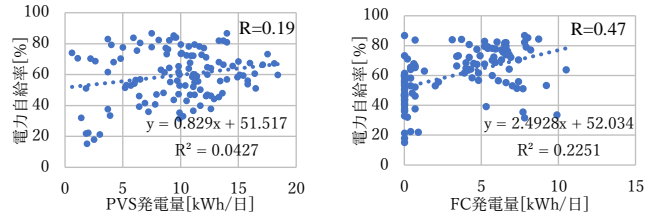


図10 PVS 発電量と電力自給率

図11 FC 発電量と電力自給率

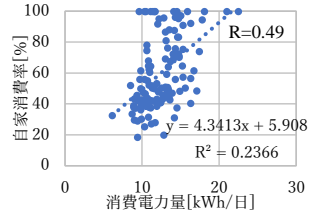


図12 消費電力量と自家消費率

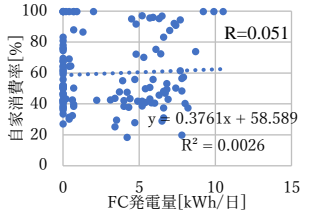


図13 FC 発電量と自家消費率

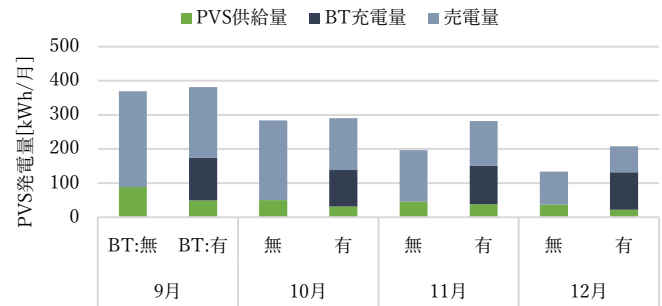


図14 BT導入前後のPVS発電量内訳比較

表7 各月の自家消費率、CO₂削減量

	9月	10月	11月	12月	
自家消費率 [%]	BT:無	24.1	17.8	23.2	27.4
	BT:有	45.6	47.6	53.5	63.4
CO ₂ 削減量 [kg-CO ₂]	BT:無	61.4	34.9	31.5	25.4
	BT:有	102.7	82.6	94.8	84.9

参考文献

- 1)経済産業省資源エネルギー庁:平成 30 年エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2019),2019
- 2)経済産業省:令和元年に発生した災害の概要と対応
- 3)西川豊宏ほか:太陽光発電・蓄電システム導入による中規模事務所の電力使用量の実測調査,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,pp193-196,2015.9
- 4)胡内裕翔ほか:電源安定化に寄与するエネルギー循環型住宅の検討(その3)蓄電池・燃料電池・太陽光発電を備えたモデル住宅による実測と導入効果の試算,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,pp301-304,2017.9
- 5)長谷川昌美ほか:戸建住宅における W 発電システムの省エネルギー効果,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,2012.9,pp.1323-1326
- 6)都市ガス事業における地球温暖化対策の取組み,一般社団法人 日本ガス協会