

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その194）
住宅版の設備の計算方法（家庭用燃料電池、蓄電池）

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST(Part 194)

Outline of Simulation Method of BEST-H MEP System (Household Fuel Cell, Rechargeable Battery)

正会員 〇二宮 博史（日建設計）

特別会員 村上 周三（建築環境・省エネルギー機構）

技術フェロー 石野 久彌（首都大学東京名誉教授）

正会員 佐藤 誠（佐藤エネルギーリサーチ）

正会員 芹川 真緒（佐藤エネルギーリサーチ）

正会員 二宮 誠英（東京ガス）

技術フェロー 長谷川 巖（日建設計）

正会員 飯田 玲香（日建設計）

Hiroshi NINOMIYA*¹ Shuzo MURAKAMI*² Hisaya ISHINO*³ Makoto SATOH*⁴

Mao SERIKAWA*⁴ Nobuhide NINOMIYA*⁵ Iwao HASEGAWA*¹ Reika IIDA*¹

*¹ Nikken Sekkei Ltd.

*² Institute for Building Environment and Energy Conservation

*³ Tokyo Metropolitan University *⁴ Satoh Energy Research, Co *⁵ Tokyo Gas Co.,Ltd.

In this paper, we introduce the calculation method and calculation example of the generation of household fuel cell developed for residential use BEST-H, and the use of hot water supply of waste heat, and calculation example combining photovoltaic power generation and rechargeable battery.

はじめに

住宅版の設備計算の概要については文献¹⁾にて報告している。ここでは住宅版向けに開発した家庭用燃料電池による発電と排熱の給湯利用の計算方法とその計算例、太陽光発電と蓄電池を組み合わせた計算例を紹介する。

1. 家庭用燃料電池のモデル化と計算例

住宅版では、家庭用燃料電池による発電と排熱の給湯利用の連成計算ができる。家庭用燃料電池として PEFC 型(固体高分子形燃料電池 polymer electrolyte fuel cell)と SOFC 型(固体酸化物形燃料電池 solid oxide fuel cell)の2種類の計算が可能である。

1.1 家庭用燃料電池のモデル化と計算方法

家庭用燃料電池モジュールのモデルを図1に示す。家庭用燃料電池は図1の燃料電池本体、貯湯槽、三方弁、循環排熱水ポンプ及び排熱循環配管を内蔵した一つのモジュールとしている。3 方弁の出口側の給湯器は給湯温度を維持するための補助的な運転を行うもので家庭用燃料電池モジュールとは別モジュールである。

補助給湯器へは給水と貯湯槽上部の温水とを3方弁で所定の出湯温度となるように混合して送る。

表1に発電と排熱回収に係る計算方法を示す。発電運転は別途外部のモジュールから需要電力の値を受け取り需要に応じた発電を行う。PEFC 型は1日最長 20 時間(時間変更可能)までの運転で需要がない場合は停止する。

SOFC 型は連続運転である。需要電力が最小発電電力を下回るときに発生する余剰電力は熱として循環水に加熱する計算を行う。PEFC 型では待機時の消費電力や起動から発電開始までの時間の燃料消費量を計算している。

発電効率と排熱回収効率の特性は、定格発電電力に対する需要電力の部分負荷率の式として内包しており、負荷率によって発電効率と排熱回収効率に変化する計算を行っている。排熱循環量は燃料電池本体の出口水温が所定の温度となるように排熱循環ポンプの流量を制御している。燃料電池本体の入口側と出口側の排熱循環配管および貯湯槽では、周囲温度とそれぞれの内部温度や熱容量などから損失熱量を計算している。

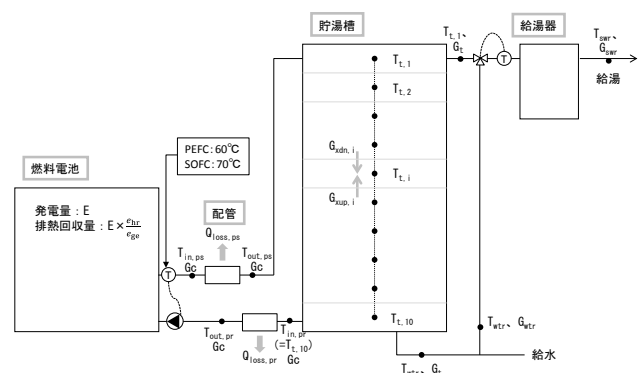


図1 家庭用燃料電池のモデル

表2に貯湯槽の計算方法を示す。貯湯槽は上下に10層に分割して水温の変化を計算している。負荷側からの給水量と排熱循環側の排熱水の出入り流量は変流量の計算となる。燃料電池の貯湯槽部分は後退法で計算を行う。

SOFCは需要電力に追従する電主熱従運転、PEFCは電力と給湯負荷の実績値をもとに運転計画（発電開始および終了時刻の設定）を立案しそれに従った運転を行う。表3にPEFCの運転計画の立案の方法について示す。電力と給湯の7日分の実測値から48時間分の需要予測値を設定し、ピーク給湯負荷が発生する時刻を基準に必要な貯湯量を満たすに足る排熱量を得るよう発電開始時刻を決め、発電終了から再開までの給湯負荷を賄うための残貯湯量を確保するよう終了時刻を決定する。

表1 家庭用燃料電池の発電および排熱回収の計算方法

回収排熱、発電電力の計算は以下による。

$$T_{in,ps} = T_{out,ps} + \frac{E \cdot e_{hr} + E_s}{e_{ge} \cdot c \cdot \rho \cdot Gc} \dots (1)$$

$$E = \min(\max(E_d, E_{min}), E_{max}) \dots (2)$$

$$E_s = \max(E_{min} - E_d, 0) \dots (3)$$

$T_{in,ps}$: 行き配管入口温度 [°C]

$T_{out,pr}$: 還り配管出口温度 [°C]

e_{ge} : 発電効率 [-], e_{hr} : 熱回収効率 [-]

c : 水の比熱 [kJ/kgK], ρ : 水の密度 [kg/m³]

Gc : 循環流量 [kg/s]

E : 発電電力 [kW], E_d : 電力需要 [kW],

E_s : 余剰電力 [kW]

E_{min}, E_{max} : 最小、最大発電電力 [kW]

電力需要が最小発電電力を下回る発電時間帯については最小発電電力で発電を行い、式(3)の余剰電力が発生する。この余剰電力は排熱循環水の加熱に使用する。

表2 燃料電池の貯湯槽の計算方法

貯湯槽内の水温は上限に10分割を行い、(4)式の熱収支式をもとに各分割層の水温変化を計算する。

$$M_i \frac{dT_{i,i}}{dt} = c \cdot Gwin_i \cdot (Twin_i - T_{i,i}) + UA_i \cdot (Tamb - T_{i,i}) + c \cdot Gxup_i \cdot (T_{i,i+1} - T_{i,i}) + c \cdot Gxdn_i \cdot (T_{i,i-1} - T_{i,i}) \dots (4)$$

M_i : i 層目の熱容量 [J/K]

$T_{i,i}$: i 層目の温度 [°C] t : 時間 [秒] (計算時間間隔)

c : 水の比熱 [kJ/kgK]

$Gwin$: i 層への流入流量 [kg/s]

$Twin$: i 層への流入温度 [°C]

UA_i : i 層目の熱損失係数 [W/K]

$Gxup, i$: 下層より i 層目に流入する移動流量 [kg/s]

$Gxdn, i$: 上層より i 層目に流入する移動流量 [kg/s]

上層より順に、 i 層目 ($i=1, 2, \dots, 10$) とする

表3 PEFCの運転計画の立案の方法

□需要予測値の算定

・電力・給湯の需要予測値は過去7日間の実績値の平均値とする。そのため、電力・給湯の実績値を平日と休日に分けそれぞれ24時間×7日間分記録する。

・運転計画の立案には、現在時刻の1時間後から48時間分の予測値(曜日に応じた予測値を結合)を用いる。

□運転計画立案の前提条件(各時間は変更可能)

・起動は1回/日とし、1回の最長発電時間は20時間(起動時間除く)、再起動間隔は4時間以上とする。

・運転計画立案は1回/日とし、停止から4時間経過時に行う。その日起動済みの場合は日付変更後に行う。

□運転計画の立案

・運転計画は、熱需要ピーク時刻(ピーク時刻が複数ある場合は最も早い時刻)を起点として、発電開始からピーク時刻正時までにピーク熱需要量を賄えるだけの熱量を、またピーク時刻後から発電終了までに翌日発電開始時刻までの熱需要量を賄えるだけの熱量を蓄熱できるように立案する。

・熱需要がない場合には運転は行わない。

□電力・給湯の予測値から各時刻の運転した場合の貯湯量を推定する。

発電量=MIN(MAX(電力需要予測値, E_{min}), E_{max})

排熱回収量=発電量×排熱回収効率/発電効率

貯湯量=排熱回収量-熱需要予測値

□運転しなかった場合の運転計画立案のピーク時刻残蓄量と貯湯可能量を、現在の貯湯槽平均温度、最高貯湯温度、給水温度および貯湯容量から推定する。

現在時刻残蓄量=比熱×貯湯容量

×(判定時貯湯槽温度-給水温度)

ピーク時刻残蓄量=MAX(現在時刻残蓄量

- \sum 現在時刻からピーク時刻正時まで熱需要予測値, 0)

貯湯可能量

=比熱×貯湯容量×(最高貯湯温度-給水温度)

□発電開始予定時刻の決定: ピーク時刻前

・ピーク時刻正時における目標貯湯量をピーク熱需要量と貯湯可能量のいずれか小さい方とする。

・発電開始予定時刻をピーク時刻正時から、貯湯量または排熱回収量の累積値が目標貯湯量を超えない最も早い時刻まで、あるいは設定された最長発電時間まで遡る。

・貯湯量または排熱回収量の累積値について、ピーク時刻残蓄量が0となる時刻より後の時間帯については、貯湯量の累積値とする。

・残蓄量が0となる時刻以前まで遡る場合は、残蓄量が0となる時刻以前については、貯湯量ではなく排熱回収量の累積とする。

□発電終了予定時刻の決定: ピーク時刻後

・発電終了時における目標貯湯量をピーク時刻正時の1時間後から発電開始予定時刻の24時間後までの熱需要の合計とする。

・発電終了予定時刻をピーク時刻正時から排熱回収量の累積値が目標貯湯量を超える時刻まで、または最長発電時間まで延長する。

1.2 家庭用燃料電池の計算例

表4に示す家庭用燃料電池の機器仕様にて計算を行った。図2にSOFC、図3にPEFCの2月の2日分の計算結果を示す。1段目は給湯、補給水、FC部出入口水温と外気温度、2段目は貯湯槽周りの温度、3段目は給湯補給水の水量、4段目は燃料電池の発電、回収排熱、ガス消費量、最下段は補助給湯器のガス消費を示す。

SOFCは電力負荷に追従した連続運転であり、定格発電電力の700Wを上限値、夜間の182Wを下限值とする範囲で電力負荷に応じた発電を行っている。1日目の17時から20時にかけてFC部入口温度が40℃を超えないようラジエータが起動し放熱を行っている。このラジエータによる放熱は夏期においては毎日発生しその時間も冬期に比べて長くなることを確認している。給湯負荷がピークとなる21時に貯湯槽の湯が一気に消費されて設定出口給湯温度43℃を確保できない時間が生じている。この場合は補助給湯器により所定の43℃まで加熱する計算となり、補助給湯器のガス消費が発生する。

PEFCはピーク給湯負荷の時刻に合わせて貯湯槽へ排熱を蓄熱するよう運転計画を立案して発電運転を行っている。このケースでは冬期は10時から12時に発電開始し5時から7時の間で発電終了となる運転計画が立案されていた。PEFCでは21時のピーク給湯負荷時刻に加え午前の停止時間中にも設定出口給湯温度43℃を確保できない時間が生じ、補助給湯機による加熱が行われている。冬期の1日の発電運転時間は18~20時間ほど、夏期はその半分程度であった。再起動から50分間は発電せず所定の起動時の燃料が消費されている。起動時の電力消費についても設定通りであることを別途確認している。

住宅版では入力を容易にするという方針のため、家庭用燃料電池の入力項目は、燃料電池の種類(SOFCかPEFC)、定格発電出力、最小発電出力と貯湯槽容量の4項目と少ない。開発した家庭用燃料電池モジュールは表4に示す項目をすべて入力可能であり、いろいろな条件で計算が可能である。ただ、発電効率と熱回収効率の特性はモジュール内で固定式となっている。ユーザーが特性を入力可能なようにモジュールの改良が望まれる。

2. 太陽光発電+蓄電池の計算例

太陽光発電と蓄電池を組み合わせたシステムの計算が住宅版においても可能としている。太陽光発電の入力項目を表5に、蓄電池の入力項目を表6に示す。家庭用燃料電池と同様に入力を容易とする方針に従い、住宅版での入力項目は太陽電池が6項目、蓄電池は3項目と少ないが、モジュールでは表5および表6に示す項目の検討が可能である。蓄電池の充放電制御として新たに負荷追従制御を蓄電池制御モジュールに追加した。

負荷追従制御は、太陽光発電などの発電電力とその時の負荷とを比較し、発電の方が負荷より大きい場合には

表4 家庭用燃料電池の計算例の機器仕様

		PEFC	SOFC
発電範囲		200~750 W	50~700 W
貯湯槽	容量	147 L	90 L
	熱損失	2.1 W/K	1.8 W/K
消費電力	起動時	500 W×50分	—(連続運転)
	待機時	18 W	—※1)
起動時燃料消費量		500 W×50分	—
排温水温度		60℃	70℃
配管線熱通過率		0.21 W/mK	0.21 W/mK
給湯補助熱源		潜熱回収型	潜熱回収型

※1) SOFCのFC入口温度が40℃を超えないようラジエータで放熱する。2) 発電時の消費電力は発電量と相殺し0Wとする。

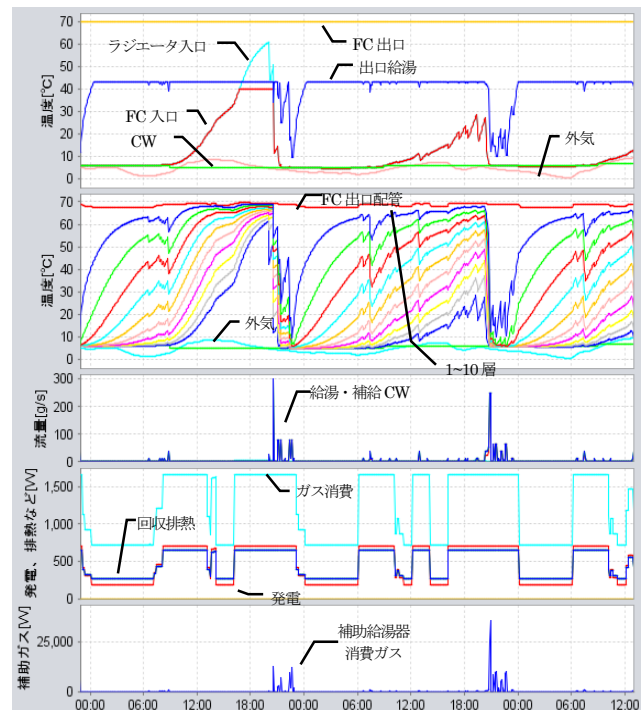


図2 SOFCの計算例(2月19日~21日)

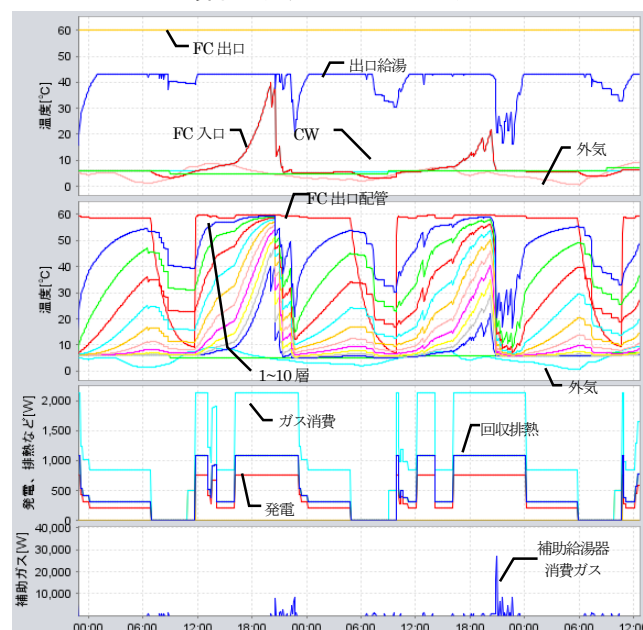


図3 PEFCの計算例(2月19日~21日)

余剰発電分を充電し、逆に発電より負荷の方が大きい場合は不足分を放電する。余剰発電の充電において蓄電池の充足率が上限に近づき充電できずに余った発電は売電とせず廃棄されるものとする。蓄電池の充足率が下限に近付き不足分を蓄電池からの放電だけで満たせない場合はその不足分を買電で対応する。図4は表7のケース⑤の2月の太陽光発電と蓄電池充放電および買電の状況を示す。早朝は充電率=0のため8時まで買電が発生している。太陽光発電が負荷を上回り余剰発電の蓄電池への充電が行われるが14時頃に蓄電池が満充電となり充電できずに廃棄される未活用発電電力が発生している。

太陽光発電と蓄電池の組み合わせとして表7に示すケースで計算を行った。①から③は太陽光発電のみ、④から⑨が蓄電池との組み合わせケースである。表7の買電最大値と買電発生時間は計算結果の値である。今回の住宅モデルでは冬期の早朝に突出したピーク負荷があるため、発電量や蓄電池容量を大きくしても買電のピーク値の削減量は小さいが、買電の発生時間は大きく減少している。各ケースについて年間の発電量と買電量および未活用電力量(売電しないので廃棄される余剰電力量)を図5に示す。蓄電池のないケースでは、発電と負荷の発生タイミングの違いにより廃棄される余剰発電の未活用電力量が大きく、蓄電池を導入したケースでは改善されていることがわかる。

表5 太陽光発電の計算例の機器仕様

太陽電池アレイの発電量[W]=3500、5000、10000
 太陽電池の種類=結晶系(その他)、
 アレイ設置方式=屋根置き型(架台設置型、その他)
 アレイの方位角[度]=0、アレイの傾斜角[度]=30
 パワーコンディショナーの効率[-]=0.93
 *住宅版の入力項目は上記の6項目、以下の項目は固定値あるいは上記入力値により自動設定としている。
 日陰補正係数[-]=1.0 経時変化補正係数[-]=0.96
 アレイの最大出力温度係数[°C]=-0.0041
 設置面における風速[m/s]=1.5
 設置方式に応じて求まる係数fA[-]=50、係数fB[-]=0.38
 標準状態の太陽電池モジュール温度[°C]=25
 アレイ負荷整合補正係数[-]=0.94、回路補正係数[-]=0.97
 インバータ回路補正係数[-]=0.902

表6 蓄電池の計算例の機器仕様

定格蓄電容量[kWh]=5、10、15
 定格入力電力[kW]=3、6、9、定格放電電力[kW]=2、4、6
 *住宅版の入力項目は上記の3項目、以下の項目は固定値あるいは上記入力値により自動設定としている。
 初期蓄電容量[Ws]=定格蓄電容量[kWh]→Ws
 容量保持率[-]=0.8、ベース放電電力[W]=定格放電電力[W]
 放電停止下限充足率[-]=0、充電停止上限充足率[-]=1
 充電時間率[-]=1.66(=定格蓄電容量/定格入力電力)
 充電特性[-]=0_リチウムイオン電池、
 PCS 充電時の効率[-]=0.95、PCS 放電時の効率[-]=0.95
 蓄電池本体の効率[-]=0.95、その他補機等の効率[-]=1.0
 待機時の効率[-]=1.0、熱損失係数[-]=1
 充放電制御方法は負荷追従制御

3. まとめ

住宅版 BEST の家庭用燃料電池と太陽光発電と蓄電池の計算例を紹介した。家庭用燃料電池については新機種の特性や制御方法の調査を行いモジュールの更新と住宅版への組み込みがなされる予定である。蓄電池へは家庭用燃料電池の発電も接続可能となっている。いろいろな条件設定で計算し活用していただければ幸いである。

【謝辞】本報は、(一財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BEST コンソーシアム」・「企画開発委員会(村上周三委員長)」および専門版開発委員会(石野久彌委員長)、住宅版開発WG(長谷川巖主査)の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表するものである。BEST 住宅版開発WG 名簿(順不同) 主査:長谷川巖(日建設計)、幹事:小林弘造(日建設計)、委員:古賀修(関西電力)、品川浩一(日本設計)、近田智也(積水ハウス)、二宮誠英(東京ガス)、二宮博史、飯田玲香(日建設計)、オブザーバー:長井達夫(東京理科大 教授)、佐藤誠、芹川真緒(佐藤エネルギーリサーチ)、田岡知博(コンパス)、事務局:生稲清久、石田真理(建築環境・省エネルギー機構)

【参考文献】1) 飯田・長谷川・小林・二宮・村上: 建築エネルギー・環境シミュレーションツールBESTの開発 第73報 BEST住宅版の計算方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集2017年

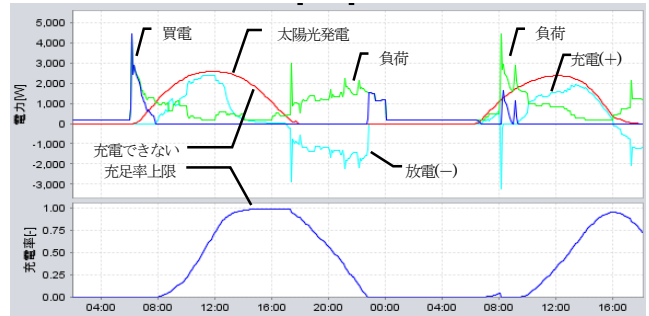
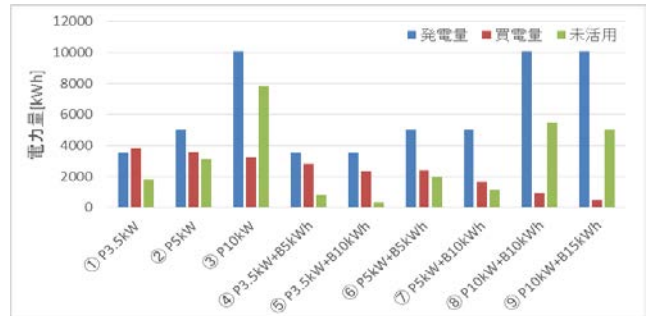


図4 太陽光発電と蓄電池と負荷の状況



※太陽光発電、蓄電池の導入がない時の電力量は5545kWh

図5 発電、買電と未活用電力の状況

表7 太陽光発電+蓄電池の計算ケース

ケース	アレイ 発電量 [kW]	蓄電池 容量 [kWh]	買電 最大値 [W]	買電発 生時間 [h]
①	P3.5kW	—	6715	6440
②	P5kW	—	6569	6029
③	P10kW	—	6229	5428
④	P3.5kW+B5kWh	5	6715	5028
⑤	P3.5kW+B10kWh	10	6715	4348
⑥	P5kW+B5kWh	5	6569	4468
⑦	P5kW+B10kWh	10	6569	3259
⑧	P10kW+B10kWh	10	6229	1930
⑨	P10kW+B15kWh	15	6185	779