九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

固体酸化物形燃料電池の導入方法に関する研究 : 浴槽を利用した排熱有効利用システムの省エネルギー効果

朝日, 啓史
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 : 修士課程

山本, 高広
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 : 博士後期課程

住吉, 大輔
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 : 准教授

梅原, 健
西部ガス株式会社

https://doi.org/10.15017/1931489

出版情報：都市・建築学研究. 33, pp.25-35, 2018-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

都市・建築学研究　九州大学大学院人間環境学研究院紀要　第33号，2018年1月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.33, pp.25～35, Jan. 2018

固体酸化物形燃料電池の導入方法に関する研究
—浴槽を利用した排熱有効利用システムの省エネルギー効果—

Effective introduction of Solid Oxide Fuel Cells to Apartment Houses
—Energy Saving Effect of Waste Heat Utilization Method Using a Bathtub—

朝日啓史*1，山本高広*2，住吉大輔*3，梅原　健*4
Keishi ASAHI, Takahiro YAMAMOTO,
Daisuke SUMIYOSHI, Takeshi UMEHARA

The SOFC released in recent years has been miniaturized and the installability has improved. However, the tank capacity is small, so it is impossible to fully utilize the exhaust heat. In order to effectively utilize the exhaust heat quantity of the SOFC and obtain a higher energy saving effect, it is necessary to change residents' behavior of using hot water and to discharge the hot water at an appropriate timing. Therefore, in this research, in order to more effectively utilize the exhaust heat quantity of SOFC and to improve the energy saving effect, we propose to storage the exhaust heat in the bathtub instead of the tank.

Keywords: *Solid Oxide Fuel Cell, Co-Generation System, Energy simulation, Hot water filling*
固体酸化物形燃料電池、コージェネレーション、エネルギーシミュレーション、湯張り

1.　はじめに

分散型電源の一つの形態として、家庭用燃料電池の普及が進んでおり、2009年から販売が開始された固体高分子形燃料電池(以下、PEFC)に続き、2011年から固体酸化物形燃料電池(以下、SOFC)の販売が開始された．しかし現在、家庭用燃料電池を導入している住宅のほとんどが、戸建て住宅であり、集合住宅への普及は進んでいないのが現実である．家庭用燃料電池のさらなる普及拡大のためには集合住宅への導入が欠かせない．そのため、近年の家庭用燃料電池は、省スペース化を目指した機器仕様となっている．最新型のSOFCの特徴を以下に示す．

- PEFCに比べ、発電効率が高い．
- 24時間連続運転を基本とし、非常に低い発電出力(ほぼ0W)まで対応可能である．
- PEFCに比べ、排熱回収効率が低い．
- タンク容量が28Lと小さく、省スペースである．
- 燃料電池ユニットとガスボイラが分離しており、設置の自由度が増し、既存のガスボイラへの後付けも可能である．
- タンク満蓄時は、ラジエーターでの放熱を行う．

以上の特徴から、SOFCは電力負荷が大きい世帯や、設置スペースの限られた集合住宅世帯への導入に適している．しかし設置性が向上し、集合住宅への導入がしやすくなった一方で、タンク容量が小さいため、タンクが満蓄になりやすく、ラジエーターによる強制放熱によって排熱の一部を捨てなければならないという問題点がある．そのため、さらにSOFCの排熱を有効利用し、より高い省エネルギー効果を得るためには、適したタイミングで出湯を行うことや、複数世帯による燃料電池の共有により給湯負荷・電力負荷を平準化すること、タンクの容量を拡大することなどの対策が考えられる．しかし燃料電池の共有やタンク容量の拡大は、運用性や設置性を考慮すると難しく、非現実的である．そこで本研究では、浴槽への湯張りを入浴直前ではなく、より早くから行うことで、SOFCの排熱を最大限有効利用する手法を検討する．なお、燃料電池の余剰排熱を浴槽に出湯して利用する手法については、既往研究[1)]にて検討がなされており、当時の機器仕様での省エネルギーの可能性が示されている．本研究は、機器仕様を最新の情報に更新したうえで、改めてシミュレーションモデルを構築し、より現実的な制御手法として、浴槽へ分割して出湯を行う方法を含めて、現状の機器の制御上の課題とその制約下での省エネルギー効果についても明らかにするものである．

*1 空間システム専攻修士課程
*2 空間システム専攻博士課程
*3 都市・建築学部門
*4 西部ガス株式会社

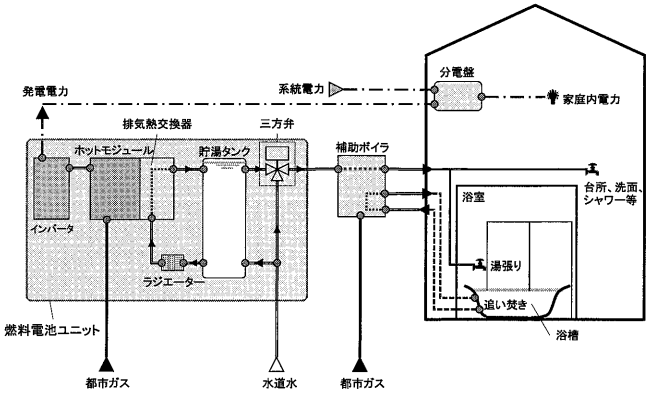


図 1 システム概念図

表 1 各ユニット設定値

ユニット	機器	項目	設定値
燃料電池ユニット	ホットモジュール	定格発電出力[W]	700
		定格発電効率[%](HHV)	47.0
		定格排熱回収効率[%](HHV)	30.9
		連続運転時間[day]	26
		停止時間[day]	1
		起動時間[hour]	0.5
		停止処理時間[hour]	0.5
	貯湯タンク	貯湯タンク容量[L]	28
		タンク底面積[m2]	0.1
		タンク熱貫流率[W/m2・K]	1.0
		貯湯温度設定値[℃]	65.0
	ラジエーター	ラジエーター作動温度[℃]	34.0
	三方弁	三方弁制御温度(最大)[℃]	33.0
補助ボイラ	潜熱回収型給湯器	効率(出湯)[%](HHV)	90.0
		効率(追い焚き)[%](HHV)	80.0
		給湯設定温度[℃]	40.0
浴室	浴槽	熱貫流率[W/㎡・K]	2.0
		満水容量[L]	264
		幅[m]	0.55
		奥行[m]	1.2
		高さ[m]	0.4
		湯張り温度[℃]	40.0
		追い焚き設定温度[℃]	40.0

2. シミュレーションモデルの構築

想定する SOFC のシステム概念図を**図 1** に、各ユニット設定値を**表 1** に、外気・浴室・市水の温度条件を**表 2** に示す．既往研究 [2)]で構築したモデルをベースに以降に述べる諸条件を反映させ、シミュレーションモデルの構築を行った．

2.1 モデル概要

シミュレーションの入力データと出力データを**表 2** に示す．プログラムは部分負荷特性を用いた計算手法により、Visual Basic を用いて構築し、1 分毎の計算を行っている．

2.2 部分負荷特性

図 2 に発電効率、排熱回収効率の部分負荷特性を示す．実測値をもとに設定し、定格発電時は発電効率が 47%、排熱回収効率が 30.9%である．発電負荷率が 40%以下の範囲では、発電負荷率の低下に伴う発電効率の低下が大きくなる．

表 2 各温度条件

項目	設定値
外気温度[℃] (冬期、中間期、夏期)	7.0、16.0、25.0
浴室内温度[℃] (冬期、中間期、夏期)	13.5、16.0、25.0
市水温度[℃] (冬期、中間期、夏期)	9.0、17.0、24.0

表 3 モデル入力出力データ

項目	データ概要	単位
入力データ	電力負荷	W
	給湯負荷	L/min
	外気温度	℃
	市水温度	℃
出力データ	発電量	W
	買電量	W
	FCガス使用量	W
	FC電気使用量	W
	BBガス使用量(給湯)	W
	BBガス使用量(追い焚き)	W
	BB電気使用量	W
	三方弁制御温度	℃
	タンク温度(8箇所)	℃
	ラジエーター放熱量	W
	タンク自然放熱量	W
	浴槽内湯温度	℃
	浴槽内湯量	L

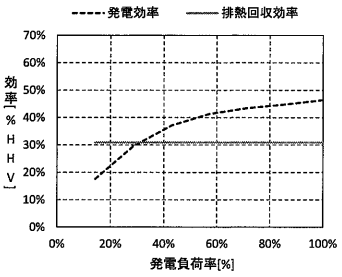


図 2 部分負荷特性

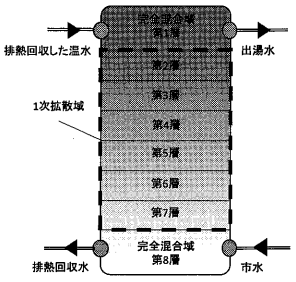


図 3 貯湯槽モデル概念図

2.3 貯湯タンク条件

貯湯タンクの計算モデルは、温度成層型貯湯槽モデルを導入した．**図 3** に温度成層型貯湯槽モデルの概念図を示す．貯湯タンクを 8 層に分割し、第 1 層、第 8 層を完全混合域として、第 2 層～第 7 層を 1 次拡散域として、各層の計算を行った．完全混合域及び 1 次拡散域の熱交換収支式を**式 (1)** 及び**式 (2)** に示す [3)]．

完全混合域 $$\mathrm{VR}\frac{\partial\theta}{\partial t} = Q_{in}(\theta_{in} - \theta) \quad \cdots\text{式 (1)}$$

1 次拡散域 $$\frac{\partial\theta}{\partial t} = k_0\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} - U\frac{\partial\theta}{\partial z} \quad \cdots\text{式 (2)}$$

ここで、V : 貯湯槽容量[ℓ]、R : 完全混合域深さ[m]、Θ : 水温[℃]、t : 時間[h]、Q_{in} : 流入水量[m^3/h]、Θ_{in} : 流入水温[℃]、K_0 : 拡散係数[m^2/h]、Z : 層高さ[m]、U : 流速[m/h]

2.4　ラジエーター作動条件

SOFC はタンクのオーバーヒート対策として、タンク蓄熱量が一定値を超えると、燃料電池ユニット内のラジエーターで放熱を行う．シミュレーションでは実機に倣い、タンク最下層からの排熱回収水の温度が 34℃以上になると、ラジエーターでの放熱を行い、34℃以下にして、排熱回収水が排気熱交換器に流入するように設定した．

2.5　燃料電池ユニット内三方弁制御条件

現行の SOFC では燃料電池ユニット内の三方弁でタンクの湯と市水を混合して、33℃以下にして補助ボイラへ流入する．そのため、出湯時はガス給湯器が必ず燃焼し、給湯設定温度 40℃まで加熱する．三方弁での制御温度(以下、三方弁制御温度)は市水温度と給湯設定温度から決まるが、33℃以上にはならない．三方弁制御温度が高いほど市水温度の混合割合が低下するため、より多くタンクの蓄熱を利用できる．

2.6　補助ボイラ条件

補助ボイラは潜熱回収型給湯器を想定し、実験室実験での実測値をもとに、出湯時の効率は 90.0%、追い焚き時の循環回路の効率は 80.0%と設定した．また追い焚きに用いる循環経路は燃料電池ユニットのタンクとは別回路であり、追い焚きは補助ボイラのみで行う．

2.7　浴室・浴槽条件

簡易計算のために、浴室温度は**表 2** に示すような固定値とした．浴槽は高断熱浴槽を想定し、浴槽の性能として JIS A 5532[4]に規定される「高断熱浴槽」の性能を参考に熱貫流率を設定した．浴槽からの熱損失量は、浴室温度と浴槽水温の差に、湯の表面積と熱貫流率を乗じて求める．湯の表面積は底面積 0.66m^2(幅 0.55m×奥行き 1.2m×高さ 0.4m)の浴槽を想定し、湯量に応じて計算を行う．

2.8　精度検証

シミュレーションモデルの再現性を確認するために計算値と実測値との比較を行う．実測は**表 4** のような外気温度・外気湿度・市水温度一定の条件に保った試験室内で行っており、電力・給湯負荷は後述する M1 スタンダードモード[5]を模擬負荷装置によって与えた．シミュレーションモデルの入力データには、試験条件と同値の電力・給湯負荷、外気温度、市水温度を用いた．なお試験では、実際に湯張り時の出湯は浴槽に溜めていないため、追い焚きによるガス使用量の精度検証は行っていない．

実測と計算の冬期運転状況、中間期運転状況、夏期運転状況を**図 4**、**図 5**、**図 6** に、各季節の実測と計算の日積算一次エネルギー使用量・誤差率を**図 7** に示す．

SOFC の発電量に関して、**図 4**、**図 5**、**図 6** の(a)より、

表 4 試験諸条件

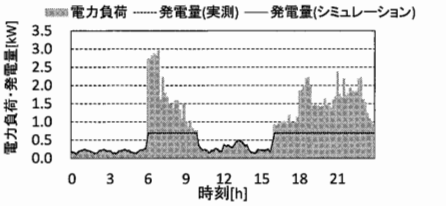
項目	条件
試験期間	6日間(各季節2日ずつ)
計測間隔[s]	2.0
電力・給湯負荷	M1スタンダードモード(平日(中)、平日(小))
外気温度[℃] (冬期、中間期、夏期)	7、16、25
外気湿度[%] (冬期、中間期、夏期)	50、60、65
市水温度[℃] (冬期、中間期、夏期)	9、17、24

いずれの季節においても、0 時～6 時の間の電力負荷の小さい部分負荷での運転時は、実測は電力負荷に対し、約 20W 程度低い出力で発電を行っている．計算では常に電力負荷に追従している．そのため、(b)の SOFC のガス使用量(以下、FC ガス使用量)は部分負荷での運転時に、計算の方が実測よりも、最大で 100W 程度大きくなるが、発電量・FC ガス使用量ともに実測の傾向はとらえている．また(c)のタンク蓄熱量は、20 時ごろの 100L/10min 程度の出湯の際に、計算の方が、実測よりも蓄熱量が減少しているが、それ以外の出湯時には傾向をとらえている．(d)の補助ボイラガス使用量(以下、BB ガス使用量)は実測と計算はほぼ同様の挙動を示し、どの時刻の出湯に対しても、高い精度を確認できた．**図 7** より、各日においても、計算の方が実測より、発電量が 4.4～6.0[MJ/日]程度大きいため、買電量がより減少する．しかし計算が実測よりも、FC ガス使用量が 3.8～5.4[MJ/日]程度大きくなり、買電量と FC ガス使用量を合わせた一次エネルギー使用量の総量は概ね同量となるため、一次エネルギー使用量の合計値の誤差は 0.3%～1.7%程度となり、全体的には高精度なモデルとなっている．

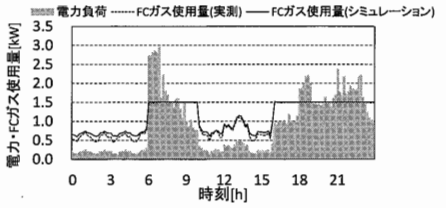
3.　シミュレーションの概要

3.1　基準負荷モデル

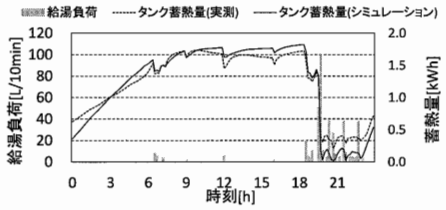
本研究では、様々な湯張り方法による省エネルギー効果を検討するため、基準とする負荷モデルとして、M1 スタンダードモード[5]の平日(大)を採用した．M1 スタンダードモードは主に家庭用燃料電池や、ヒートポンプ給湯器などの貯湯式給湯器の運転試験や評価に用いる電力・給湯負荷モデルで、6 つの代表日の組み合わせによる全 31 日からなる．各代表日の電力負荷、給湯負荷を**図 8** に示す．単身から 4 人世帯の負荷が設定されているが、本研究では 4 人世帯を採用した．また M1 スタンダードモードでは、追い焚き負荷(浴槽水の追い焚きにかかる負荷)もアンケートや実測に基づいて設定されているが、湯張り方法変更時に湯張りの時刻が変動するため、追い焚き負荷も M1 スタンダードモードとは異なる．そのため、M1 スタンダードモードで設定された追い焚き負荷は使用せず、本研究での追い焚き負荷は、居住者の入浴時に発生し、浴槽水温を 40℃まで再加熱するために必要な熱



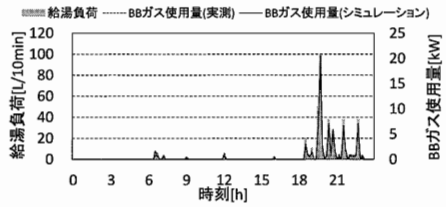
(a) 電力負荷及び発電量



(b) 電力負荷及び FC ガス使用量

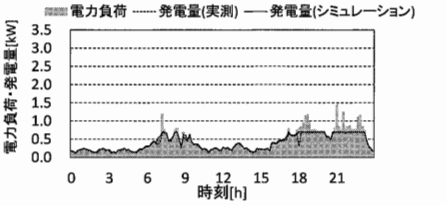


(c) 給湯負荷及びタンク蓄熱量

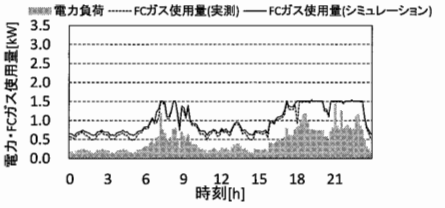


(d) 給湯負荷及び BB ガス使用量

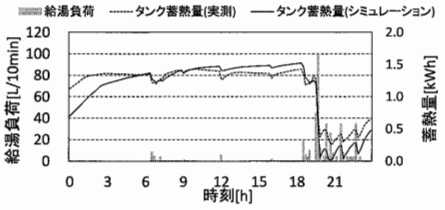
図 4 冬期運転状況(平日(中))



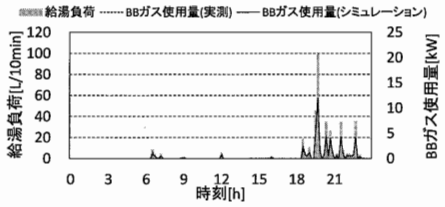
(a) 電力負荷及び発電量



(b) 電力負荷及び FC ガス使用量

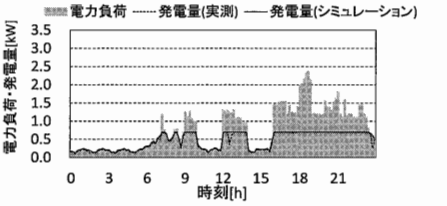


(c) 給湯負荷及びタンク蓄熱量

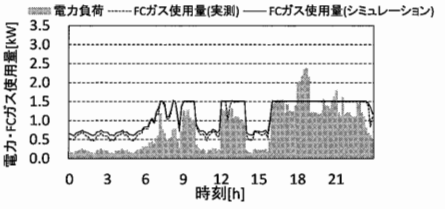


(d) 給湯負荷及び BB ガス使用量

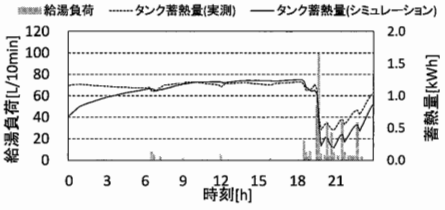
図 5 中間期運転状況(平日(中))



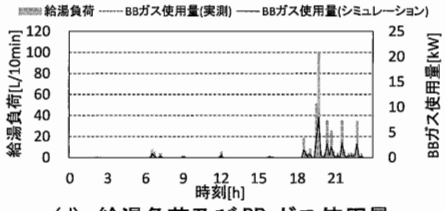
(a) 電力負荷及び発電量



(b) 電力負荷及び FC ガス使用量



(c) 給湯負荷及びタンク蓄熱量



(d) 給湯負荷及び BB ガス使用量

図 6 夏期運転状況(平日(中))

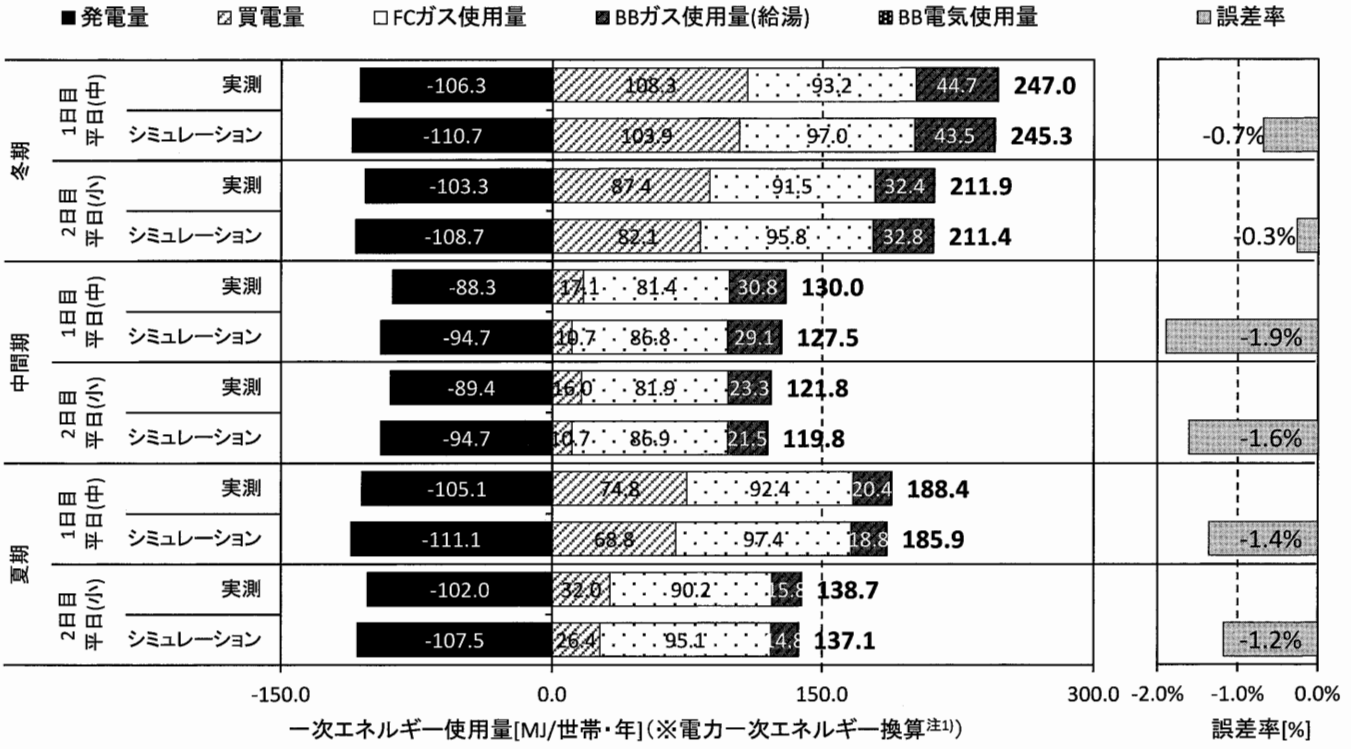
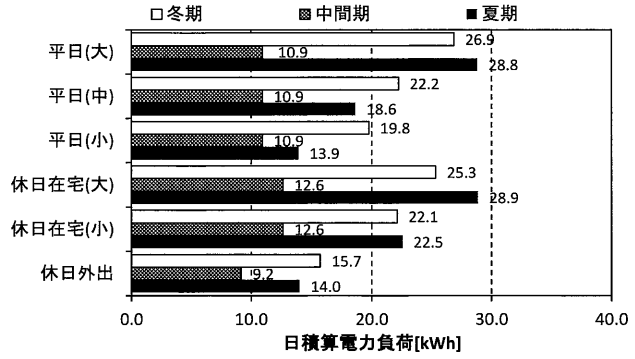
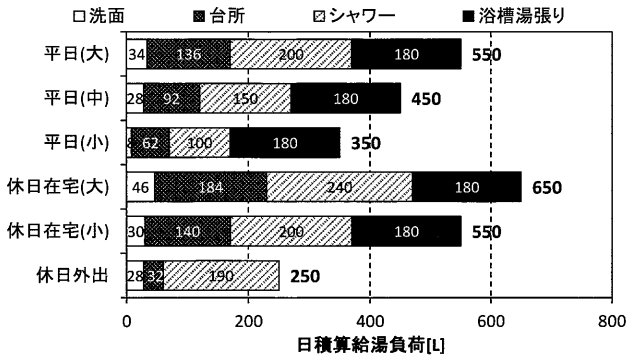


図 7 日積算一次エネルギー使用量と誤差率



(a) 日積算電力負荷



(b) 日積算給湯負荷

図 8 M1 スタンダードモード日積算負荷

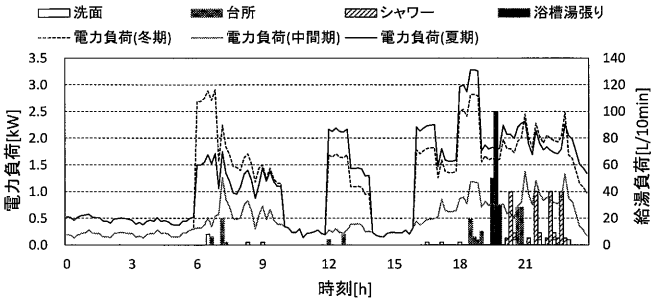


図 9 時刻別電力・給湯負荷(平日(大))

量とした.

基準負荷とした平日(大)の時刻別の電力・給湯負荷を**図 9** に示す. 給湯負荷は 18 時以降の夜間に集中しており、19 時 35 分から 10L/min で 18 分間浴槽湯張りによる給湯負荷が発生し、その後 20 時以降に 4 回、入浴によるシャワーの給湯負荷が発生する.

3.2 湯張り分割

タンク容量の小さい SOFC の排熱を有効に活用するため、湯張りを入浴直前に行うのではなく、何回かに分割して行うことが考えられる. 湯張り分割による効果が最も向上する湯張りの分割数、出湯時刻を明らかにするため、湯張り変更ケースを設定し、**表 5** に示すケースをすべて計算して、効果が高いものを抽出する. 通常ケースから変更するのは、浴槽湯張りの回数と時刻のみで、湯張りの流量(10L/min)や総量(180L)は変更しない.

3.3 検討ケース

検討ケースを**表 6** に示す. Case0、Case1 は通常の湯張りを行い、Case2、Case3 では湯張り分割を行う. Case0、Case2 は三方弁制御温度が最大 33℃となる現状の機器制御を再現するケースである. 湯張り分割出湯時でも必ず補助ボイラは燃焼する. この制御方法を変更し、補助ボイラの燃焼を抑えるケースが、Case1、Case3、Case4 である. Case1、Case3 は三方弁制御温度を 40℃に固定したケースである. Case4 はタンクが満蓄に近づき、ラジエーターでの放熱が始まる際に放熱の代わりに少しずつ浴槽に湯張りを行う運転(以下、満蓄出湯運転)を行う. 満蓄出湯運転では、本来放熱される余剰熱で 40℃の湯を作り、浴槽に出湯する. 満蓄出湯運転時以外は、現状の三方弁制御のままとする. 入浴時刻になって、浴槽が満水(180L)に達していない場合は、貯湯タンクから出湯して不足分を補う. また近年 SOFC を常時定格発電させ、余剰電力を逆潮流する運転方法も見られ、その際には排熱量が増加することから、常時定格発電を行う Case0'～Case4'の検討も行う. 各ケースを、季節ごとに一日ずつ計算し、季節別の日積算一次エネルギー削減効果を算出する.

表 5 湯張り変更ケースの湯張り方法

分割回数	湯張り時刻 [時]	検討数 [ケース]	負荷名
1括	0時～20時(2時間刻み)で1時刻 (10L/min、18分間)	10	1括(T_1)
2分割	0時～20時(2時間刻み)で2時刻 (10L/min、各9分間)	45	2分割(T_1,T_2)
3分割	0時～20時(2時間刻み)で3時刻 (10L/min、各6分間)	120	3分割(T_1,T_2,T_3)
4分割	0時～20時(2時間刻み)で4時刻 (10L/min、各4.5分間)	210	4分割(T_1,T_2,T_3,T_4)

(注)T_n : n回目の出湯時刻

表 6 検討ケース

ケース名	湯張り方法	SOFC制御条件	
		三方弁制御温度	発電方式
Case0	通常	最高33℃	負荷追従発電
Case1	通常	40℃固定	負荷追従発電
Case2	湯張り変更	最高33℃	負荷追従発電
Case3	湯張り変更	40℃固定	負荷追従発電
Case4	満蓄出湯運転	満蓄出湯時は三方弁を介さず、別回路より出湯. 満蓄出湯時以外は最高33℃	負荷追従発電
Case0'	通常	最高33℃	常時定格発電 (余剰電力は系統へ逆潮流)
Case1'	通常	40℃固定	常時定格発電 (余剰電力は系統へ逆潮流)
Case2'	湯張り変更	最高33℃	常時定格発電 (余剰電力は系統へ逆潮流)
Case3'	湯張り変更	40℃固定	常時定格発電 (余剰電力は系統へ逆潮流)
Case4'	満蓄出湯運転	満蓄出湯時は三方弁を介さず、別回路より出湯. 満蓄出湯時以外は最高33℃	常時定格発電 (余剰電力は系統へ逆潮流)

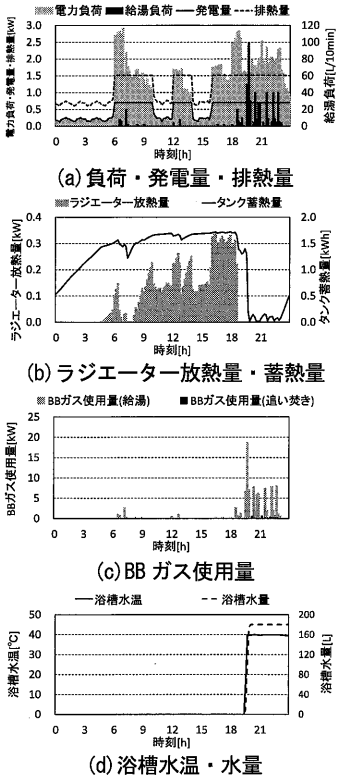


図 10 Case0 運転状況

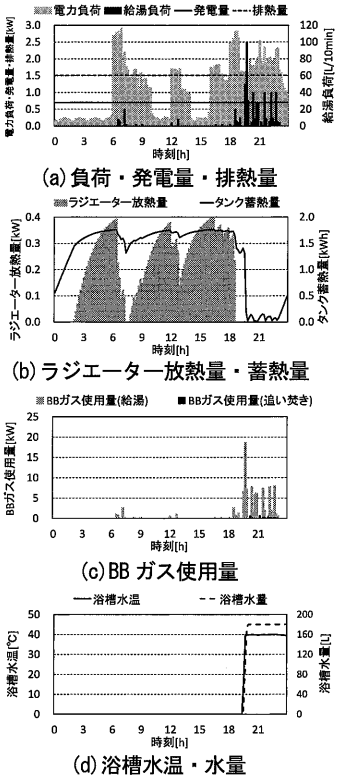


図 11 Case0' 運転状況

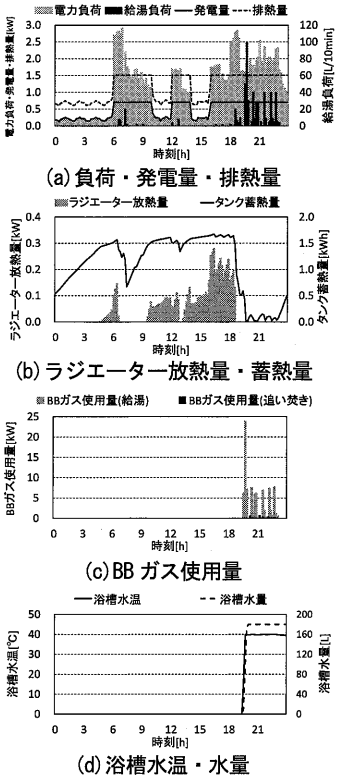


図 12 Case1 運転状況

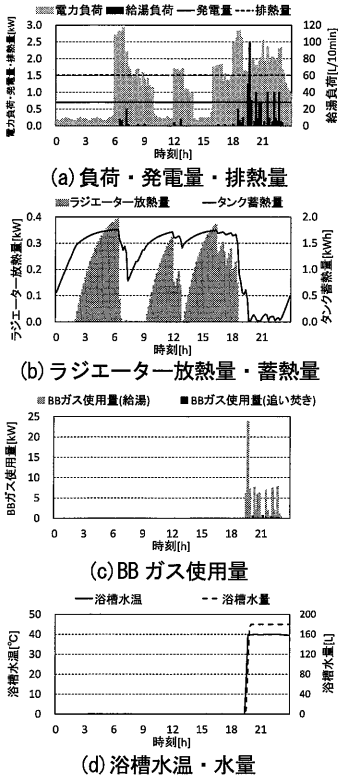


図 13 Case1' 運転状況

4. 計算結果

4.1 通常ケース計算結果

基準負荷モデルを導入した Case0、Case0'、Case1、Case1' の冬期運転状況を図 10～図 13 に、各季節の日積算値一次エネルギー使用量・削減率を図 14 に示す.

【Case0(図 10)】

タンク蓄熱量は最大で約 1.7kWh であり、タンク蓄熱量が約 1.4kWh 以上になるとラジエーターが作動している. 3 時～18 時まで常にラジエーターでの放熱が発生し、最大で約 0.34kW である(図 10(b)). タンク蓄熱量が大きい 6 時～13 時の間の出湯時でも、BB ガス使用量が発生している(図 10(c)). 三方弁制御温度が最高 33℃であり、40℃まで加熱するのに補助ボイラで加熱していることが理由である. 19 時 35 分からの湯張りで、タンク蓄熱量がほぼ 0kWh になり、19 時半以降の出湯時は BB ガス使用量(給湯)が大きく、ほとんどを補助ボイラで賄っていることが分かる(図 10(c)). また湯張りから最初の入浴まで、30 分程度のため、浴槽水温はあまり低下しておらず、BB ガス使用量(追い焚き)が小さい(図 10(c), (d)).

【Case0' (図 11)】

常時 0.7kW で定格発電を行うことから、排熱量が常時約 1.5kW 発生し、Case0 よりタンク蓄熱量が増加しやすくなる(図 11(a), (b)). しかし Case0 と比較すると、ラジエーター放熱量も増加して、最大で約 0.4kW の発生がある(図 11(b)). 給湯負荷が夜間に集中していること、三方弁制御温度が 33℃であることから、増加した排熱量を有効的に利用できないことが理由である. そのため、BB ガス使用量(給湯)は Case0 とほぼ変わらない (図 11(c)) .

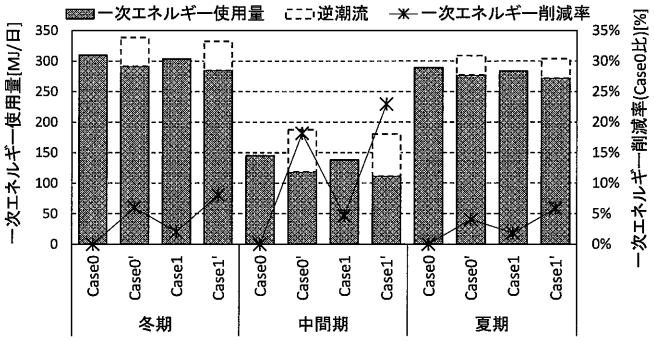


図 14 通常ケース一次エネルギー使用量・削減率

【Case1(図 12)】

Case0 と比較して、出湯時のタンク蓄熱量の減少量が大きく、ラジエーター放熱量も減少している(図 12(b)). 三方弁制御温度が 40℃であり、出湯時にタンク蓄熱量をより利用できるためである. したがって、BB ガス使用量(給湯)が 18 時まで発生せず、タンク蓄熱量のみで、出湯を賄えている. しかし Case0 よりもタンク蓄熱量を多く利用するため、19 時頃のタンク蓄熱量が約 0.5kWh 程度と Case0 よりも小さく、19 時 35 分からの湯張りによる BB ガス使用量(給湯)が Case0 よりも大きい(図 12(c)). そのため、Case1 の制御方法では、湯張りの出湯タイミングを変更することがより重要となる.

【Case1' (図 13)】

Case0'同様、排熱量が増加し、タンク蓄熱量が増加しやすい. しかし給湯負荷が夜間に集中しており、増加した

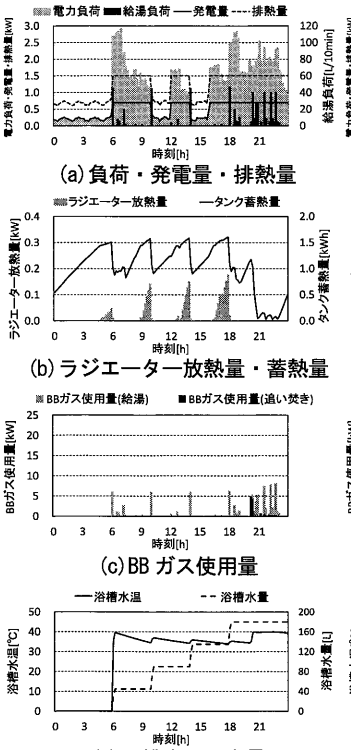


図 15 Case2 運転状況

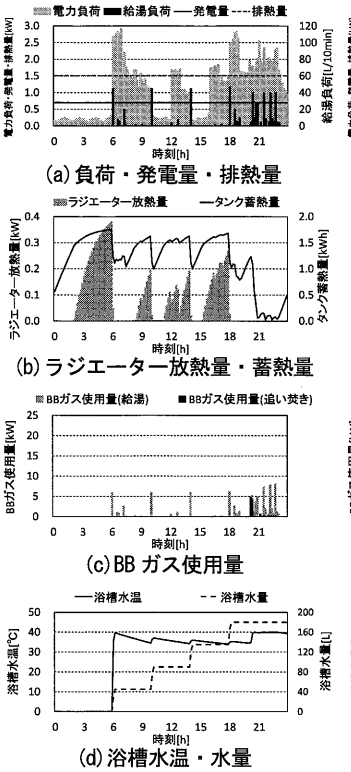


図 16 Case2' 運転状況

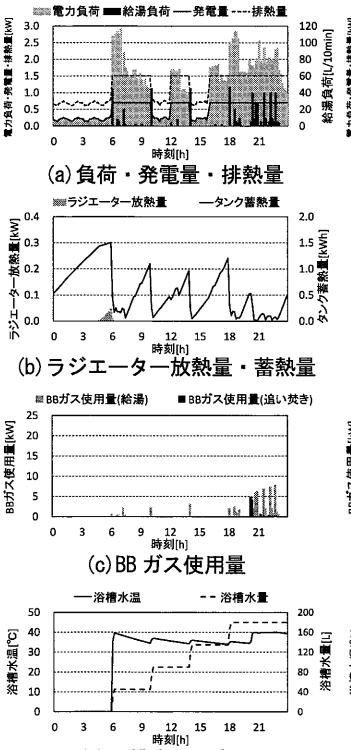


図 17 Case3 運転状況

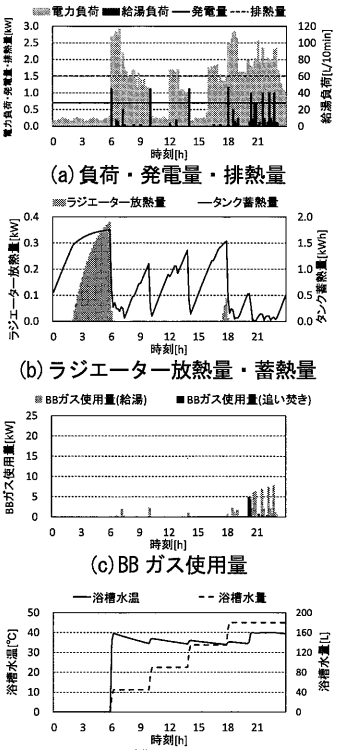


図 18 Case3' 運転状況

排熱量を有効利用できないため、BB ガス使用量(給湯)は Case1 とほぼ同量発生している．(図 13(b), (c))

【各ケース日積算値(図 14)】

図 14 より、Case0'、Case1、Case1'は SOFC の制御条件が Case0 と異なるため、一次エネルギー使用量が Case0 よりも小さくなる．そのため Case2、Case2'、Case3、Case3'、Case4、Case4'で湯張り方法変更による効果のみを評価するためには、同じ制御条件のケースとの比較をする必要がある．そのため、以降の計算結果では、Case2 と Case4 は Case0 に対して、Case2'と Case4'は Case0'に対して、Case3 は Case1 に対して、Case3'は Case1'に対しての一次エネルギー削減効果を算出した．

4.2 湯張り分割の効果

湯張り変更時の計算結果の代表として、4 分割(6,10,14,18 時)を導入した際の Case2、Case2'、Case3、Case3'の冬期運転状況を図 15～図 18 に、各季節の湯張り分割による一次エネルギー削減効果を図 19 に示す．なお、ここで取り上げる 4 分割(6,10,14,18 時)は必ずしも各ケースで最も省エネルギーとなったケースではない．計算結果の比較を容易にするために同一の分割ケースを取り出している．

【Case2(図 15)】

Case0 と比較すると、湯張りを分割することによって、ラジエーター放熱量が小さくなっており、排熱量をより利用できたことが分かる(図 15(b))．湯張りを分割したことで、Case0 より 19 時以降の BB ガス使用量は小さくなる．三方弁制御温度が最高 33℃であるため、6,10,14,18 時の各湯張り時にそれぞれ約 6kW の BB ガス使用量(給湯)が発生する．また 6 時から湯張りを行うことで、最初の入浴時の 20 時半頃には約 34℃まで低下し、Case0 よりも BB ガス使用量(追い焚き)が増加している(図 15(c), (d))．

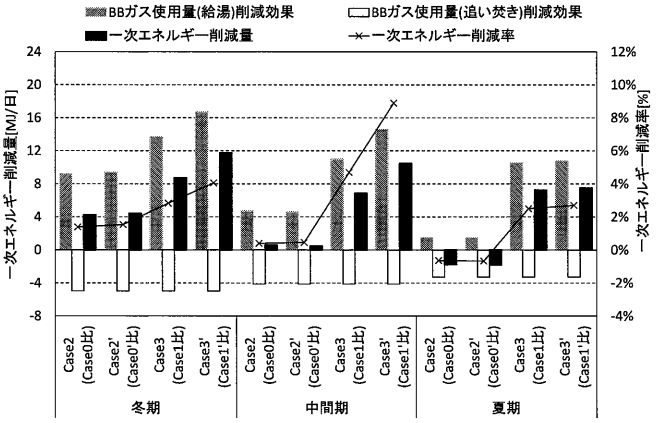


図 19 湯張り変更による一次エネルギー削減効果
(4 分割(6, 10, 14, 18 時)の場合)

【Case2' (図 16)】

Case2 と比較して、BB ガス使用量(給湯)はほとんど変わらない(図 16(b), (c))．定格発電により排熱量が増加しても、三方弁制御温度が最高 33℃であることで、一度に利用できるタンク蓄熱量が限られるため、排熱を利用しきれておらず、ラジエーターから放熱されている．

【Case3(図 17)】

ラジエーターでの放熱量が 6 時以降に全く発生せず、

無駄なく排熱を利用している(図 17(c)). 三方弁制御温度が 40℃であり、6,10,14,18 時の各湯張り時にタンク蓄熱量を使い切れているためである. したがって、6,10,14,18 時の各湯張り時の BB ガス使用量(給湯)が、Case2 よりも大きく減少している (図 17(c)) .

【Case3' (図 18)】

Case3 よりも排熱量が増加するため、6,10,14,18 時の各湯張り時刻前までに溜まっているタンク蓄熱量がより大きい(図 18(b)). したがって、湯張り時に Case3 よりも多くタンク蓄熱量を利用でき、BB ガス使用量(給湯)が小さくなる(図 18(c)).

【各ケースの一次エネルギー削減効果(図 19)】

Case2 と Case2'の一次エネルギー削減量はほぼ同量で、冬期は約 4.0[MJ/日]であるが、中間期、夏期は冬期に比べ小さく、それぞれ約 0.8[MJ/日] 、約-1.8[MJ/日]である. 三方弁制御温度が最高 33℃であるため、一度に利用できるタンク蓄熱量が限られることと、夏期、中間期は冬期に比べ、市水温度が高く、タンク蓄熱量が溜まりやすいことが原因である. Case3、Case3'は各季節で一次エネルギー削減量が 6.8[MJ/日]を越えており、Case3'の方がより高い効果を得られた. 三方弁制御温度を 40℃に固定すると、一度に利用できるタンク蓄熱量が多くなり、湯張り分割の効果がより高くなる. また、三方弁制御温度を 40℃に固定した場合であれば、常時定格発電を行い、排熱量を増加させることでさらに効果が高まることが分かった.

4.3 最適湯張り分割の検討

Case2、Case3、Case2'、Case3'における湯張り分割の違いによる一次エネルギー削減効果の違いについて分析する. はじめに Case2、Case3、Case2'、Case3'おける 1 括から 4 分割までの各湯張り分割回数について初期湯張り時刻(湯張り分割時の最初の出湯時刻)ごとの BB ガス使用量(追い焚き)の増加量の分布を図 20 に示す. これらのケースでは湯張りを早く行うため、浴槽からの熱損失が増加し、BB ガス使用量(追い焚き)は原則として増加する. また湯張り量は分割回数で決まり湯張り温度は 40℃であるため、図 20 は Case2、Case3、Case2'、Case3' のいずれのケースにも共通する結果である. 図 20 より、初期湯張り時刻が早いほど、BB ガス使用量(追い焚き) の増加量が大きく、最大では冬期に 8MJ/日程度となっている.

次に、図 21～図 23 に Case2、図 24～図 26 に Case2'、図 27～図 29 に Case3、図 30～図 32 に Case3'の初期湯張り時刻ごとの BB ガス使用量(給湯)の削減効果と一次エネルギー削減量の分布を示す. 図 24～図 32 の(b)図中の右上に各ケースで最も一次エネルギー削減量が大きかった出湯時刻を記した.

【Case2(図 21、22、23)】

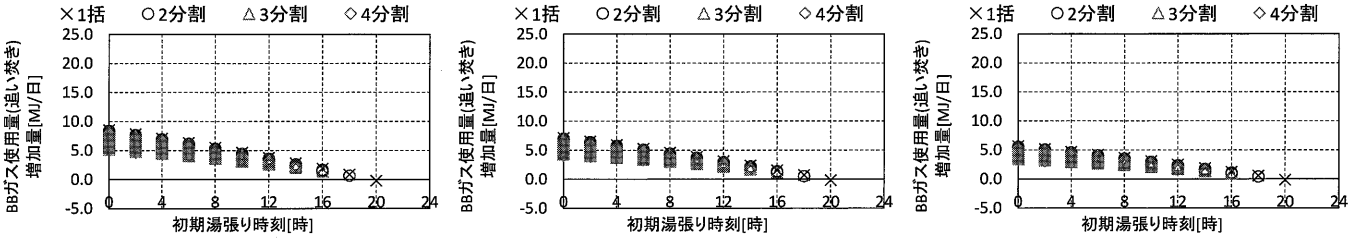
図 21 の冬期では、初期湯張り時刻が 10～20 時までは、時刻が早いほど、BB ガス使用量(給湯)の削減効果が高い. しかし初期湯張り時刻が 10 時より早くなると、BB ガス使用量(給湯)の削減効果の最大値が約 10.0[MJ/日]を上限に、横ばいとなる. Case2 では三方弁制御温度が最高 33℃であり、湯張り分割出湯時に使用できるタンク蓄熱量が小さいために、短時間で湯張り時の出湯熱量分をタンクに再度蓄熱することができる. そのため、1 回の出湯量を抑え、最後の出湯から入浴までの間にも蓄熱できる 4 分割(10,12,14,16 時)の一次エネルギー削減量が最も大きくなり、約 6.0[MJ/日]であった. 図 22、図 23 の中間期、夏期の BB ガス使用量(給湯)削減効果に関しても、冬期と同様の特徴が見られ、中間期では最大で約 5.0[MJ/日]、夏期では約 2.5[MJ/日]の削減効果が見られた.

【Case2' (図 24、25、26)】

Case2 とほぼ同様の傾向を示す. 常時定格発電によって、排熱量が増加しても、三方弁制御温度が 33℃であり、排熱量を有効に利用できていないためである.

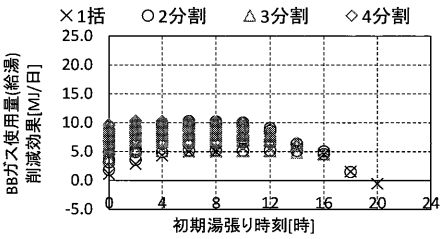
【Case3(図 27、28、29)】

Case2 の結果と比較して、各季節ともより高い BB ガス使用量(給湯)の削減効果が得られるパターンも見られ、初期湯張り時刻が早いほど、BB ガス使用量(給湯)の削減効果が増加する傾向にある. 冬期の一次エネルギー削減量は 4 分割(4,10,14,18 時)が最大となり、Case2 よりも初期湯張り時刻が早く、湯張りの間隔が長いケースの効果が最も高くなった. Case3 は三方弁制御温度が 40℃であり、一度の湯張りで Case2 よりも多くのタンク蓄熱量を出湯するため、タンクに再度蓄熱するのに時間がかかることが要因である. 中間期においても同様の傾向が見られた. 夏期においては、冬期よりも初期湯張り時刻が遅く、湯張り間隔も短い 4 分割(8,10,14,16 時)が最も効果が高くなった. 夏期は冬期、中間期より、市水温度が高く、タンクに蓄熱するのにかかる時間が短いためである.

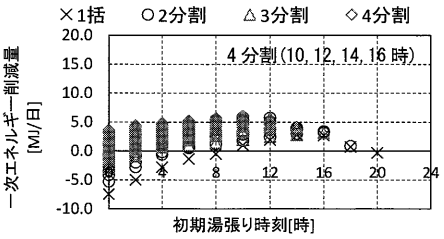


(a) 冬期　(b) 中間期　(c) 夏期

図 20 各季節 BB ガス使用量(追い焚き)増加量(Case0 比)

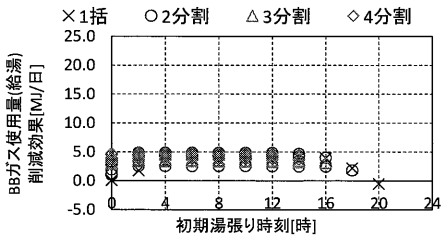


(a) BB ガス使用量(給湯)削減効果

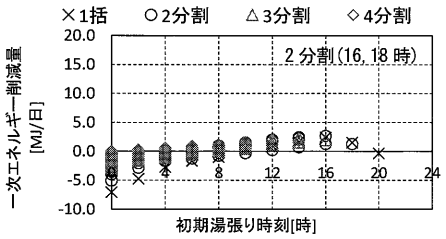


(b) 一次エネルギー削減量

図 21 Case2 冬期結果(Case0 比)

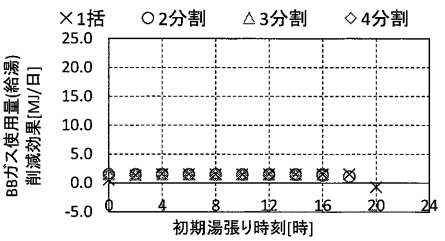


(a) BB ガス使用量(給湯)削減効果

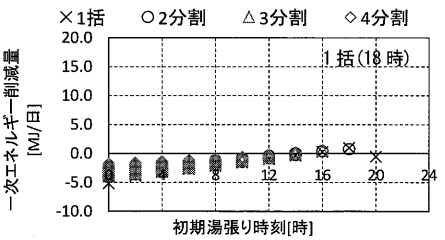


(b) 一次エネルギー削減量

図 22 Case2 中間期結果(Case0 比)

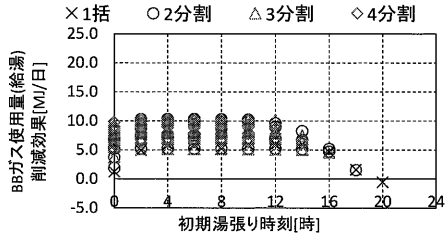


(a) BB ガス使用量(給湯)削減効果

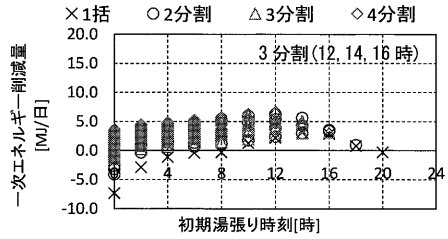


(b) 一次エネルギー削減量

図 23 Case2 夏期結果(Case0 比)

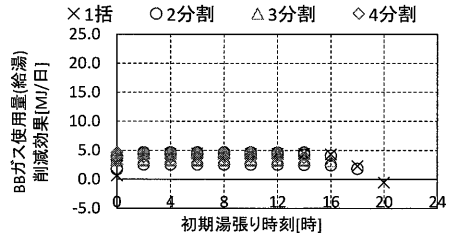


(a) BB ガス使用量(給湯)削減効果

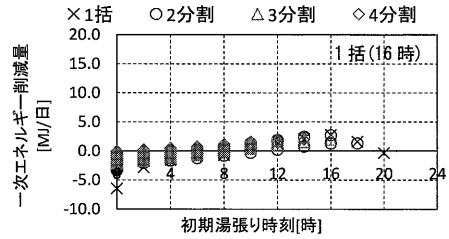


(b) 一次エネルギー削減量

図 24 Case2' 冬期結果(Case0' 比)

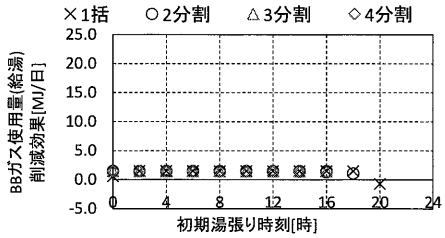


(a) BB ガス使用量(給湯)削減効果

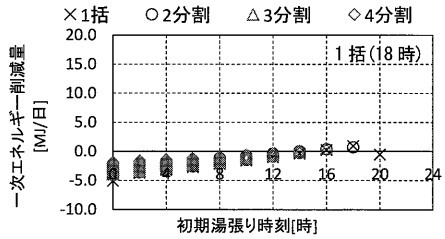


(b) 一次エネルギー削減量

図 25 Case2' 中間期結果(Case0' 比)

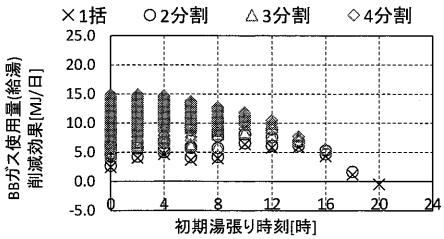


(a) BB ガス使用量(給湯)削減効果

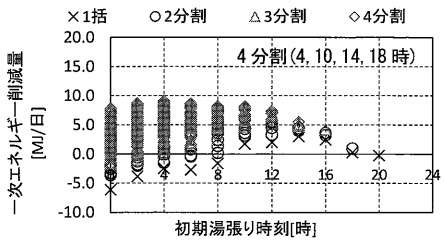


(b) 一次エネルギー削減量

図 26 Case2' 夏期結果(Case0' 比)

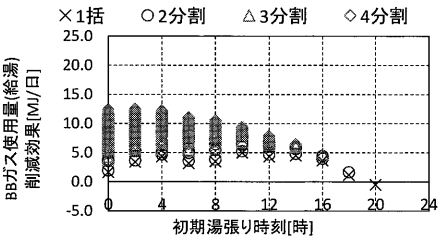


(a) BB ガス使用量(給湯)削減効果

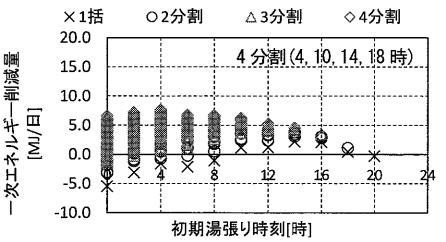


(b) 一次エネルギー削減量

図 27 Case3 冬期結果(Case1 比)

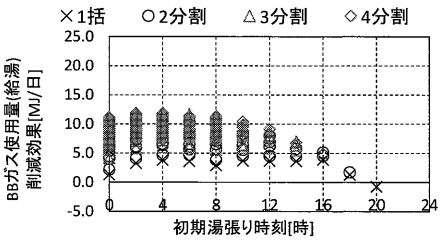


(a) BB ガス使用量(給湯)削減効果

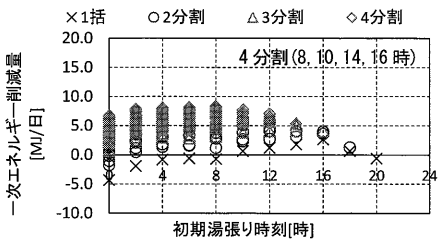


(b) 一次エネルギー削減量

図 28 Case3 中間期結果(Case1 比)



(a) BB ガス使用量(給湯)削減効果



(b) 一次エネルギー削減量

図 29 Case3 夏期結果(Case1 比)

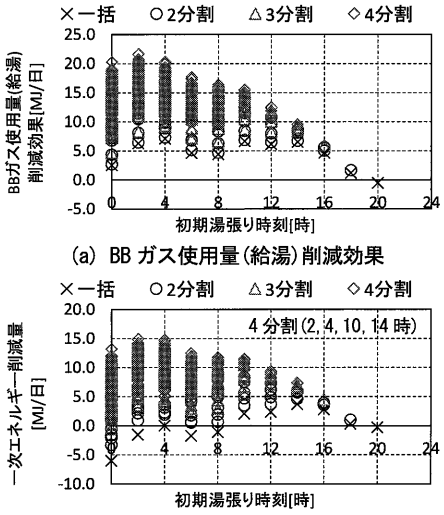


図 30 Case3' 冬期結果(Case1' 比)

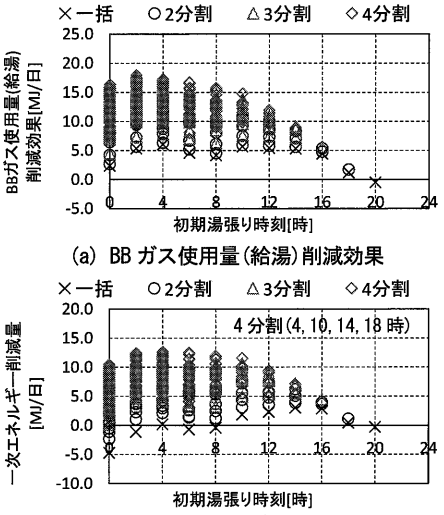


図 31 Case3' 中間期結果(Case1' 比)

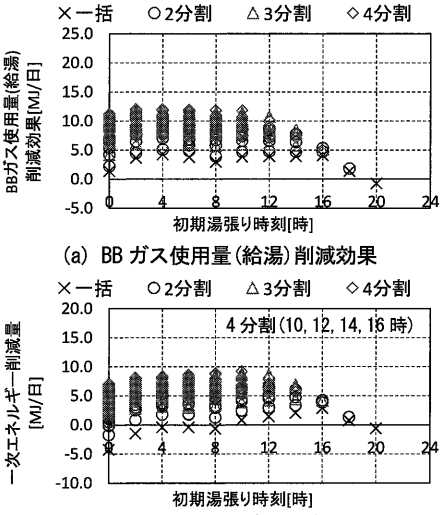


図 32 Case3' 夏期結果(Case1' 比)

【Case3' (図 30、31、32)】

Case3 の結果と比較して、BB ガス使用量(給湯)の削減効果の最大値が冬期は約 7.0[MJ/日]、中間期は約 5.0[MJ/日] 程度大きく、夏期はほぼ同量であった. 冬期や中間期においては、定格発電により増加した排熱量を湯張り分割によって、より利用できるためである. 一次エネルギー削減量は冬期では 4 分割(2,4,10,14 時)が、中間期では 4 分割(4,10,14,18 時)が、夏期では 4 分割(10,12,14,16 時)が最大となり、それぞれ約 14.9[MJ/日]、約 12.7[MJ/日]、約 9.2[MJ/日]となった.

以上の結果より、各ケース・各季節で、最適な湯張りの分割数・タイミングが異なる結果となった. そのため、外気温度や市水温度を考慮して、タンク蓄熱量が設定量を超過すると、一定量の湯張りを行うなど、湯張り分割の方法には改良の余地がある.

4.4 満蓄出湯運転の効果

Case4、Case4'の冬期の運転状況を図 33、図 34 に、各季節の満蓄出湯運転による一次エネルギー削減効果を図 35 に示す.

【Case4 (図 33)】

一日を通して、ラジエーター放熱が発生しておらず、ラジエーター放熱分の湯を浴槽へ出湯しており、19 時 35 分の湯張り開始時までにすでに、約 60L、約 31.5℃の湯が溜まっている(図 33 (b), (d)). そのため、湯張り時の BB ガス使用量(給湯)が Case0(図 10 (c))よりも小さい. しかし、ラジエーター放熱分を早く浴槽に貯めたことによって、Case0 よりも浴槽水温が下がるため、BB ガス使用量(追い焚き)は増加している.

【Case4' (図 34)】

常時定格発電により、排熱量が増加しても、ラジエーター放熱が発生せず、Case4 よりも多く浴槽への出湯が

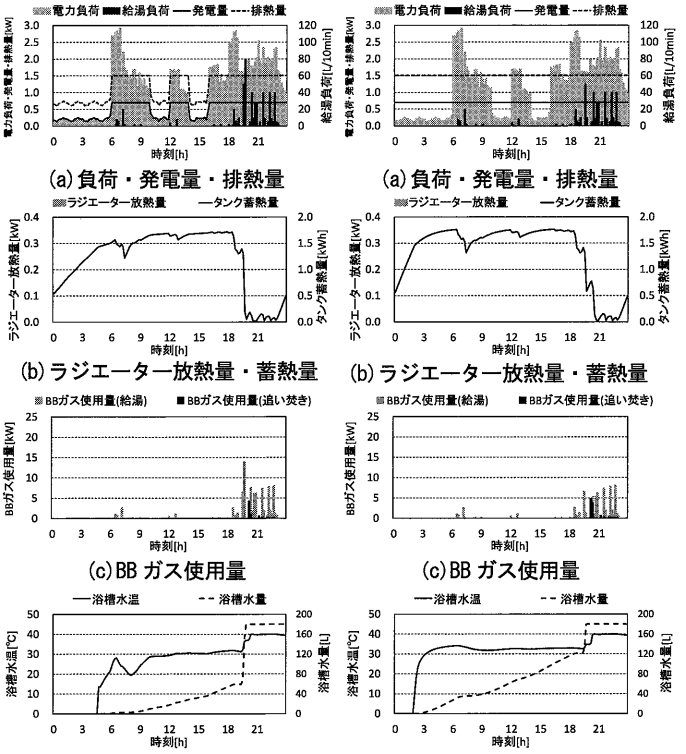


図 33 Case4 運転状況　図 34 Case4' 運転状況

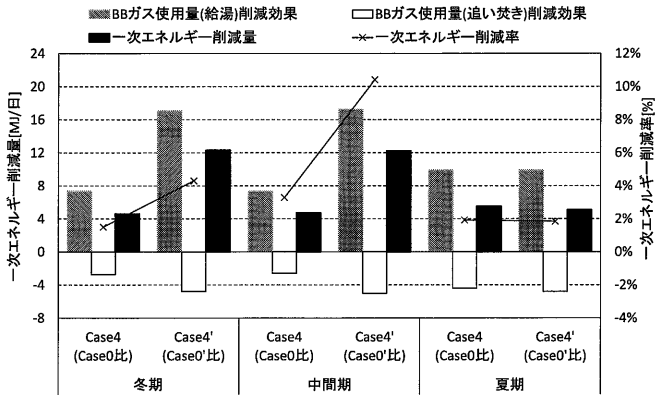


図 35 満蓄出湯運転による一次エネルギー削減効果

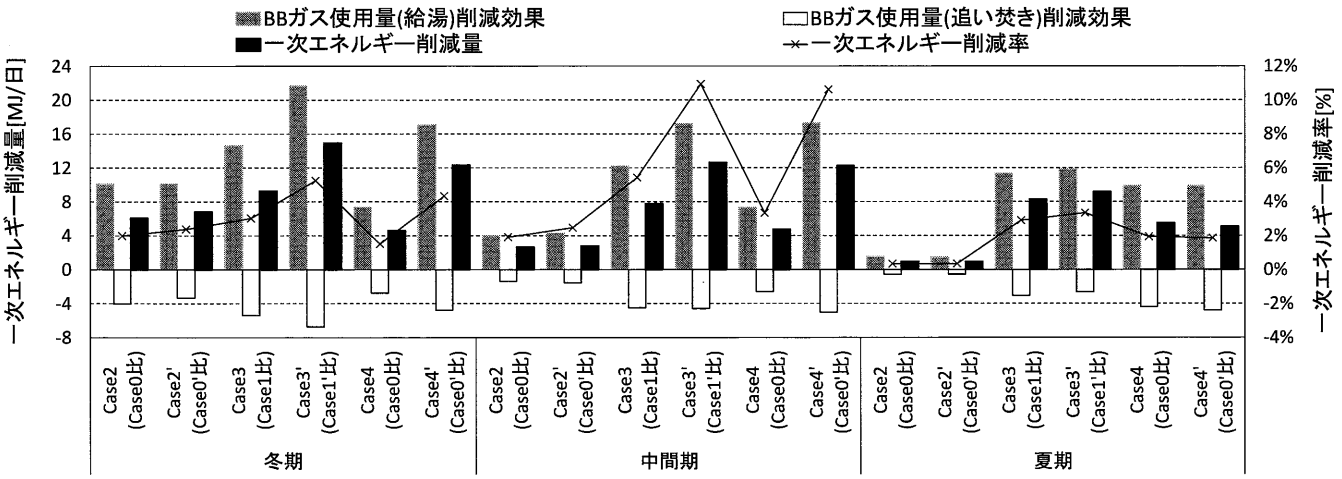


図 36 湯張り方法変更による一次エネルギー削減効果

行われた. 19 時 35 分の湯張り開始時には約 120L、約 33℃の湯が溜まっている(図 34(b), (d)). そのため、Case4 よりも、湯張り時の BB ガス使用量(給湯)が減少した. Case4 より早い時間に多くの湯を浴槽へ貯めるため、BB ガス使用量(追い焚き)は Case4 よりやや大きい. (図 34(c)).

【各ケースの一次エネルギー削減効果(図 35)】

Case4 の一次エネルギー削減量は冬期、中間期では約 4.6[MJ/日]、夏期では約 5.6[MJ/日]である. Case4'の BB ガス使用量(給湯)削減効果は冬期、中間期では Case4 より約 7.8[MJ/日]大きく、夏期は Case4 より約 0.4[MJ/日] 小さくなる結果となった. 冬期、中間期においては、Case4'の方が Case4 よりも排熱量が増加したことで、満蓄出湯運転での出湯量が増加し、BB ガス使用量(給湯)が減少したため、Case4'の方が Case4 よりも一次エネルギー削減効果が高い. 一方、夏期においては、両ケースとも、満蓄出湯によって、180L まで溜めることができ、湯張りによる BB ガス使用量(給湯)削減効果が同量であることと、排熱量が大きい Case4'の方が早く溜め終わり、追い焚きにかかる負荷が増加するため、一次エネルギー削減効果が小さくなった.

4.5 各ケース日積算値比較

Case2、Case2'、Case3、Case3'、Case4、Case4'の湯張り方法変更による一次エネルギー削減効果を図 36 に示す. Case2、Case2'、Case3、Case3'については、最も一次エネルギー削減効果が高い分割方法の計算結果である.

いずれの季節においても、Case3'が最も一次エネルギー削減量・削減率が高く、冬期は 14.9[MJ/日]・5.3%、中間期は 12.7[MJ/日]・10.9%、夏期は 9.2[MJ/日]・3.3%となった. 次いで効果が高いのは冬期・中間期では Case4'、夏期では Case3 となった. Case2 と Case2'はいずれの季節においても、他のケースと比べ、低い結果となり、現行の SOFC の三方弁制御温度では湯張り分割による効果があまり得られないことが分かった.

5. おわりに

本研究では、SOFC の排熱を有効利用し、省エネルギー効果を高めるために、湯張りを分割し、複数回行う手法やタンクが満蓄に近づいた際にラジエーター放熱を行わずに、浴槽に湯張りを行う満蓄出湯運転を提案し、その効果の検討を行った. その結果、現状の SOFC の制御条件(三方弁制御温度 33℃、負荷追従運転)での湯張りの分割による省エネルギー効果は低いが、三方弁制御温度 40℃、常時定格発電という条件下であれば、湯張り分割や、満蓄出湯運転を行うことで、省エネルギー効果が得られることを明らかにした. 本研究で提案した湯張り手法を採用した場合、通常の湯張りを行う場合に比べ、冬期には最大 5.3%、中間期には最大 10.9%、夏期には最大 3.3%の省エネルギー効果が得られることを示した.

注

注1) 電力の一次エネルギー換算：本研究の計算では、電力の一次エネルギー換算係数として 9.8[MJ/kWh] を用いる.

参考文献

1) 住吉大輔、 奥田有規、赤司泰義、尾崎明仁、渡辺俊行:集合住宅における固体酸化物形燃料電池の最適仕様の検討と浴槽を利用した貯湯槽小容量化の提案、日本建築学会環境系論文集、No.711、pp441-450、 2015. 5
2) 山本高広、朝日啓史、住吉大輔、重松佑亮：家庭用燃料電池の集合住宅への導入方法に関する研究-その1 SOFCモデルの構築-、日本建築学会九州支部研究報告、No.55、pp.177-180、2017.3
3) 丹羽英治、関本芳孝、相良和伸、猪岡達夫：温度成層型蓄熱槽の蓄熱性能最適化に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、N0.56、pp.57-68、1994.10
4) 財団法人日本規格協会：JIS A 5532、2006、浴槽、2006.3
5) 国土交通省 国土技術政策総合研究所、独立行政法人 建築研究所：自立循環型住宅設計技術資料-評価法および要素技術の設計手法に関する研究成果-、pp192-246、2012.7

(受理：平成29年11月 6 日)