

PEFC-CGSと温水式床暖房の併用効果に関する研究： 省エネルギー効果と室内温熱環境について

綾垣, 伸康
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

尾崎, 明仁
京都府立大学人間環境学部

黒木, 洋
大和ハウス工業株式会社

高口, 洋人
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

他

<https://doi.org/10.15017/19094>

出版情報：都市・建築学研究. 11, pp.127-136, 2007-01-15. 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：

PEFC-CGS と温水式床暖房の併用効果に関する研究 —省エネルギー効果と室内温熱環境について—

Study on Energy Consumption and Indoor Thermal Environment of
Floor Heating System using Exhausted Heat from PEFC-CGS

綾垣伸康*¹, 尾崎明仁*², 黒木 洋*³, 高口洋人*⁴, 渡辺俊行*⁴

Nobuyasu AYAGAKI*¹, Akihito OZAKI*², Hiroshi KUROKI*³,
Hiroto TAKAGUCHI*⁴ and Toshiyuki WATANABE*⁴

We have been developed the numerical simulation program to calculate the primary energy consumption of housing Polymer Electrolyte Fuel Cell Co-Generation System (PEFC-CGS) combined with floor heating of warm water type. In this program, the floor heating has been modeled with the piping pitch of warm water by using the fin efficiency. The indoor temperature has been controlled by Predicted Mean Vote (PMV) for over minus 0.5. As the results of this simulation, it is clarified that the floor heating has had effected the indoor by thermal radiation from floor surface and that the primary energy consumption has been reduced up to 5% in winter when PEFC-CGS is combined with the floor heating of warm water type.

Keywords :Housing polymer electrolyte fuel cell ,Floor heating of warm water type,
Co-generation system, Numerical simulation, Energy savings, Thermal environment

家庭用固体高分子形燃料電池, 温水式床暖房,
コージェネレーションシステム, 数値シミュレーション, 省エネルギー, 温熱環境

1. はじめに

2005年2月に京都議定書が発効され, 日本でも温室効果ガス排出量やエネルギー消費量の削減に向けて様々な対策が行われている。民生部門では, 建物の高断熱高気密化やトップランナー方式による高効率機器の導入が実施されているが, CO₂排出量は2004年時点で1990年と比較して31.5%増加しており, 現在も増加傾向にある。また, 石油の枯渇が加速しており, 石油を使用しないエネルギー供給システムの代替が急務とされている。

このような背景から, 住宅のエネルギー供給システムとして, ガスエンジンマイクロコージェネレーションシステム(コージェネレーションシステムを以下, CGS)やPEFC(固体高分子形燃料電池)-CGS, SOFC(固体酸化形燃料電池)-CGSといった家庭用個別分散型電熱源の大規模な普及と開発が進められている。これらは住宅の敷地内で発電し, 発電時に発生する排熱で熱供給するため, 電力と熱を合わせた総合効率で80%程度と高効

率な電熱供給システムである。これまでの研究では, 穴原ら¹⁾による家庭用燃料電池CGSとその他のエネルギー供給システムの比較検討や, 濱田ら²⁾による寒冷地に住宅用燃料電池CGSを導入した場合の最適設計に関する研究がある。これらの研究では, 燃料電池CGSの排熱利用が多い場合に導入効果が向上する結果となっており, 排熱利用を促進させる燃料電池CGSシステムの構築が急務である。

本研究は, 福岡市の冬季にPEFC-CGSと温水式床暖房を併用した場合(以下, 併用システム)の効果を明らかにするために, フィン効率を用いた温水式床暖房の床伝熱計算やPMV計算を導入した熱負荷計算と, 機器性能試験の実測データを基に作成したPEFC-CGS計算を連成し, 1次エネルギー消費量, 2次エネルギー消費量, 室内温湿度, PMVを算出する数値シミュレーションプログラムを作成した。本報では, 数値シミュレーションプログラムの概要を解説し, 作成したプログラムによる併用システムの省エネルギー効果, 温水式床暖房による室内温熱環境への影響について述べる。さらに, 室内の快適性に着目し, 温水式床暖房の設定条件及び制御方法を考慮した場合の併用システムの導入効果について報告する。

*¹ 空間システム専攻修士課程

*² 京都府立大学人間環境学部

*³ 大和ハウス工業

*⁴ 都市・建築学部門

2. 数値シミュレーションプログラム

2.1 併用システムの概要

図1に併用システムの概要を、表1にPEFC-CGSの機器仕様を示す。PEFC-CGSは、発電及び排熱回収を行うPEFCユニットと排熱回収後の温水を貯める貯湯タンクユニットで構成されている。発電は、改質器によって取り出した水素をPEFCユニットに供給して行う。家庭内で発生する電力負荷は、まずPEFC-CGSからの発電で賄い、不足分は系統電力によって賄う。家庭内で発生する給湯負荷は貯湯タンクから賄い、ミキシングユニットで出湯温度に調節される。貯湯タンク内の水温が出湯温度に満たない場合は、サブボイラーで追炊きされる。温水式床暖房を運転するときは、PEFCユニットで排熱回収した温水を直接利用して温水式床暖房の循環水を加熱し、排熱回収温水と循環水との熱の受け渡しは熱交換器で行う。排熱回収ポンプは、PEFCユニットの熱交換器の貯湯槽側出口温度が60℃になるように変流量制御される。温水式床暖房の循環水ポンプは、一定流量のOn-Off制御とした。また、PEFCユニットの熱交換器の貯湯槽側入口温度が55℃以上になると、55℃の温水になるように、ラジエータによって放熱する。なお今回は、発電時に発生する余剰電力は、逆潮流できないため、そのまま放電されるものとした。

2.2 PEFC-CGSの機器性能試験結果

今回検討を行ったPEFC-CGSは、起動時に改質器を改質可能温度まで昇温させるために、電気とガスによって加熱を行っている。このため、起動発令から実際に運転を始めるまでに予熱時間が必要となる。この予熱時間は、停止から再起動までの放置時間によって異なり、それに伴いエネルギー消費量も異なる。機器性能試験では、停止時刻と再起動時刻を設定し、停止後放置時刻から起動時のエネルギー消費量と立ち上がり時間を測定した。試験結果から得られた、PEFC-CGSの起動特性を図2に示す。

また、PEFC-CGSの発電方法は、余剰電力の発生を抑えるため、30%から100%まで7%刻みの11段階で発電出力を制御し、電力負荷に追従して運転（以下、電力負荷追従運転）する。機器性能試験では、各発電出力における発電効率の部分負荷特性を明らかにするため、300Wから1000Wまで70W刻みで電力負荷を発生させ、その時の発電効率と排熱利用効率を測定した。試験結果から得られたPEFC-CGSの部分負荷特性を図3に示す。

これらの試験結果から求めた表2の回帰式を、作成したPEFC-CGSプログラムに導入した。

2.3 成層型貯湯槽モデル

PEFC-CGSの導入効果は、給湯需要量に大きく依存することが分かっている。今回検討した併用システムでは、温水式床暖房を運転している間にも、貯湯槽内の温水に

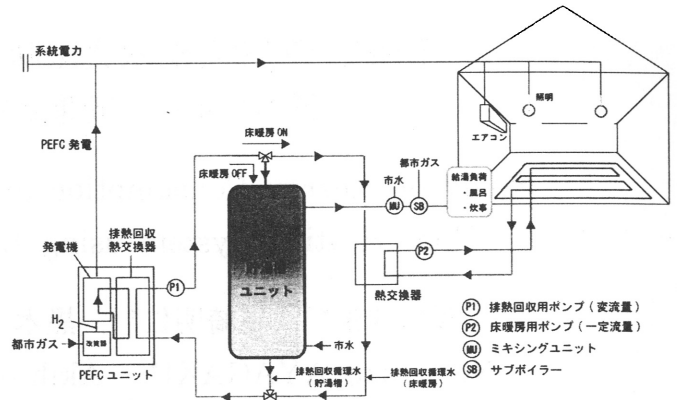
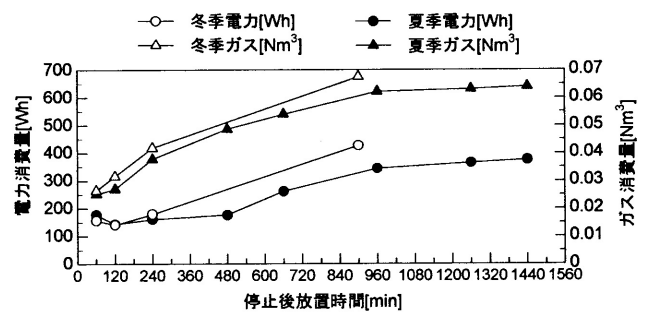


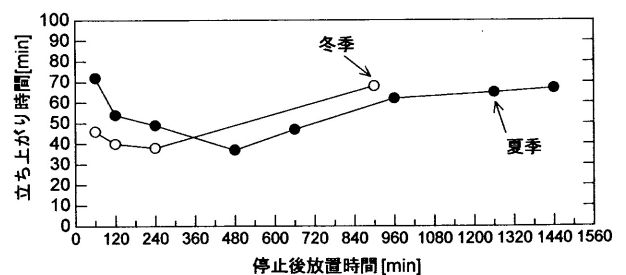
図1 併用システムの概要

表1 PEFC-CGSの機器仕様

定格発電効率	31.5%
定格排熱利用効率	51.5%
定格発電出力	1kW
定格熱出力	1.63kW
貯湯温度	60℃
貯湯タンク容量	200L
原料	都市ガス13A



(a) 起動時エネルギー消費量



(b) 立ち上がり時間

図2 PEFC-CGS 起動特性

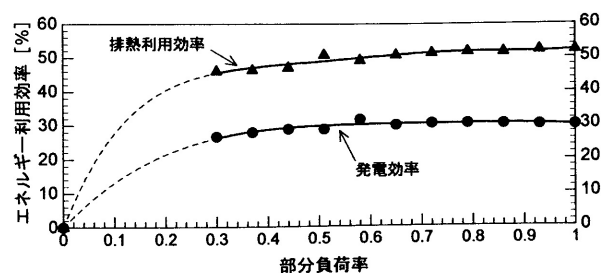


図3 PEFC-CGS 部分負荷特性

よって家内で発生する給湯需要を賅わなくてはならない。このことから貯湯槽内の水温と流量がある程度確保され、貯湯槽から安定して給湯需要を賅っているか検討する必要がある。そこで、貯湯槽の計算は、貯湯槽を5層に分割し、水の移流と熱伝導による熱移動と槽表面からの熱損失を考慮した温度成層型一次元モデル³⁾とした。図4に貯湯槽モデルを示す。貯湯槽に入出湯する水量は、PEFC-CGSからの排熱回収量と給湯需要量の差によって決まり、貯湯槽の第一層で入出湯が行われる。入出湯時の熱収支バランスは、第一層の入出湯量と移流の向きに応じて、貯湯槽の最下層から市水を供給して調節する。表3に示す偏微分方程式を差分化して、貯湯槽内の各層の温度分布を求める。なお、貯湯槽の熱損失係数は、機器性能試験結果で求めた0.8 [W/m²K]とした。

2.4 熱交換器

今回検討した併用システムは、排熱回収温水と温水式床暖房の循環水との熱の受け渡しを、熱交換器によって行う。排熱回収温水は、PEFC-CGSの排熱から60°Cの温水を回収するために、ポンプの流量が変化する。このことから、流量の変化により熱交換器の熱交換効率が変化することが考えられる。そこで、熱交換器の計算は、水の流量変化を考慮するために、対数平均温度差の概念⁴⁾を用いた。今回の検討では、温水式床暖房の循環水を流量1.5 [L/min]一定とし、熱交換効率は平均して約70%となった。

2.5 熱負荷計算

建物の熱負荷計算は、熱負荷計算プログラム THERB⁵⁾を用いた。今回の検討では、温水式床暖房の配管設置部分を考慮するため、フィン効率を用いた床伝熱計算⁶⁾を導入した。また、床表面からの放熱効果を考慮した快適

性を検討するために、PMV 計算を導入した。なお、今回検討した快適性には、床表面から人体への熱伝導は考慮していない。

2.6 数値シミュレーションフロー

併用システムは、PEFC-CGSの排熱回収温水を温水式床暖房の加熱源として直接利用するため、排熱回収される水量によって温水式床暖房への加熱量が変わってくる。そこで、建物の熱負荷計算とPEFC-CGSの計算を連成した数値シミュレーションプログラムを作成した。図5に

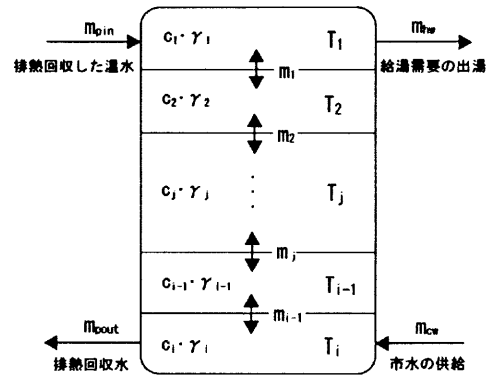


図4 貯湯槽モデルの概要

表3 成層型貯湯槽モデル

<p>質量流量バランス</p> $m_1 = m_{pin} - m_{hw}$ $m_{j-1} = m_j$ $m_{i-1} = m_{cw} - m_{pout}$ <p>水の移流量</p> $Q_i = -c \cdot m_i \cdot T_i$ $Q_j = -c \cdot m_{j-1} \cdot T_{j-1} + c \cdot m_j \cdot T_j \quad (j=2,3,\dots,i-1)$ $Q_i = -c \cdot m_{i-1} \cdot T_{i-1}$ $Q_i = c \cdot m_i \cdot T_i$ $Q_j = -c \cdot m_{j-1} \cdot T_{j-1} + c \cdot m_j \cdot T_j \quad (j=2,3,\dots,i-1)$ $Q_i = -c \cdot m_{i-1} \cdot T_{i-1}$ <p>熱収支式</p> <p>(a) 第一層</p> $c \cdot \gamma \cdot V \frac{dT}{dt} = c \cdot m_{pin} \cdot T_{pin} - c \cdot m_{hw} \cdot T_{hw} - Q_1 - \frac{\lambda \cdot S}{x} \cdot \frac{dT}{dx} - Q_h$ <p>(b) 第二層から第 i-1 層</p> $c \cdot \gamma \cdot V \frac{dT}{dt} = -Q_j - \frac{\lambda \cdot S}{x} \cdot \frac{dT}{dx} - Q_h \quad (j=2,3,\dots,i-1)$ <p>(c) 最下層</p> $c \cdot \gamma \cdot V \frac{dT}{dt} = c \cdot m_{cw} \cdot T_{cw} - c \cdot m_{pout} \cdot T_{pout} - Q_i + \frac{\lambda \cdot S}{x} \cdot \frac{dT}{dx} - Q_h$ <p>(d) 各層の熱損失量</p> $Q_h = K \cdot (T_i - T_{air}) \cdot A \quad (j=1,2,\dots,i)$ <p>記号 c: 水の比熱 (J/kgK) γ: 水の比重量 (kg/m³) λ: 水の熱伝導率 (W/mK) V: 各層の体積 (m³) S: 各層の表面積 (m²) A: 各層の水面面積 (m²) x: 各層の高さ (m) m: 質量流量 (kg/h) T: 水温 (°C) Q: 移流による熱量 (J/h) Q_h: 熱損失量 (Wh) K: 貯湯槽の熱損失係数 0.8 (W/m²K) 添字 i: 貯湯槽分割数 j: 貯湯槽分割点 hw: 給湯需要 cw: 市水 air: 外気 pin: PEFC-CGSの排熱 $pout$: PEFC-CGS排熱回収水</p>

表2 機器性能試験結果による回帰式

<p>起動時エネルギー消費量</p> <p>(a) 冬季</p> $iE = -0.6 \cdot 10^{-7} \cdot ST^2 + 0.1 \cdot 10^{-3} \cdot ST + 0.02 \quad (60 < ST \leq 900)$ $iGV = 0.37 \cdot ST + 94.95 \quad (60 < ST \leq 900)$ <p>(b) 夏季</p> $iE = -0.3 \cdot 10^{-7} \cdot ST^2 + 0.7 \cdot 10^{-4} + 0.02 \quad (60 < ST \leq 1440)$ $iGV = -0.57 \cdot ST + 212 \quad (60 < ST \leq 120)$ $iGV = 0.09 \cdot ST + 136 \quad (120 < ST \leq 480)$ $iGV = 0.3 \cdot 10^{-6} \cdot ST^3 - 0.01 \cdot ST^2 + 1.4 \cdot ST - 288.8 \quad (480 < ST \leq 1440)$ <p>立ち上がり時間</p> <p>(a) 冬季</p> $it = 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot ST^2 - 0.15 \cdot ST + 49.94 \quad (ST \leq 208)$ $it = -0.4 \cdot 10^{-2} \cdot ST + 29.1 \quad (208 < ST \leq 909)$ $it = 0.2 \cdot 10^{-3} \cdot ST + 66.54 \quad (909 < ST \leq 5280)$ <p>(b) 夏季</p> $it = 0.3 \cdot ST + 75.9 \quad (ST \leq 73)$ $it = -0.05 \cdot ST + 57.76 \quad (73 < ST \leq 433)$ $it = 0.2 \cdot 10^{-9} \cdot ST + 75.75 \quad (433 < ST \leq 1394)$ <p>iE: 電力消費量 [Wh] iGV: ガス消費量 [Nm³] it: 立ち上がり時間 [min] ST: 停止後放置時間 [min]</p>

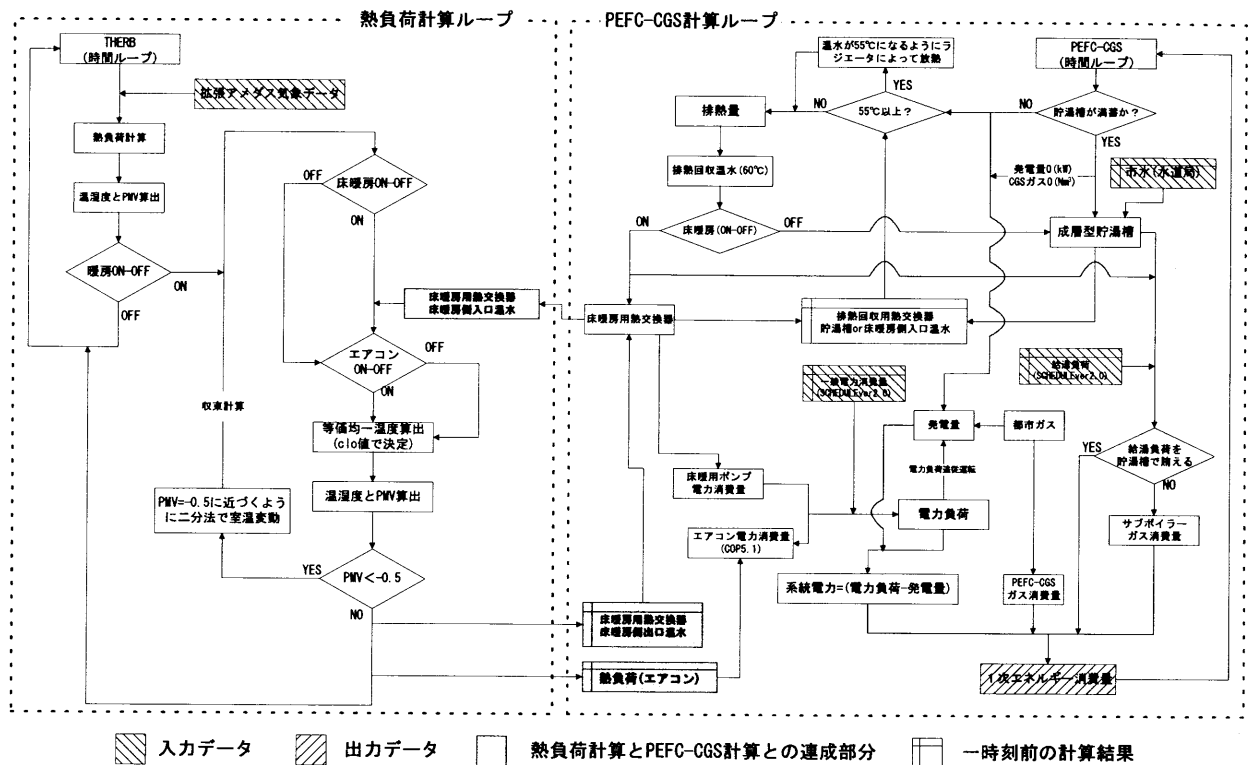


図5 数値シミュレーションの計算フロー

作成した数値シミュレーションプログラムの計算フローを示す。入力データは、福岡市（中央区）の拡張アメダス気象データ、生活スケジュール自動生成プログラム SCHEDULEver2.0⁷⁾ によって算出した冬季の一般電力負荷と給湯量、福岡市水道局の市水温度とした。熱負荷計算 THERB と PEFC-CGS 計算との連成部分は、温水式床暖房の出入口水温と流量、建物の熱負荷である。

このフローを基に計算を行い、併用システムの効果について検討した。

3. 計算条件

併用システムの効果を明らかにするために、温水式床暖房を併用しない PEFC-CGS 導入システムと、電力負荷及び給湯負荷をそれぞれ系統電力と都市ガスで賄う従来システムを比較対象として検討した。計算期間は、冬季の12月から3月までとし、計算間隔は30分間隔とした。以下に入力負荷データ、温水式床暖房の設定条件、暖房スケジュールと室内制御方法、PEFC-CGS の運転方法について示す。

3.1 入力負荷データ

入力負荷データは、4人世帯共働きで平日の生活パターンを想定し、SCHEDULEver2.0 によって算出した一般電力負荷と給湯量とした。一般電力負荷は、暖房機器を除く家電製品の電力消費量である。また、給湯量は、出湯温度 40℃とした。図6に1日の負荷データを示す。

3.2 温水式床暖房の設定条件

温水式床暖房の設置場所を図7に示す。温水式床暖房の設置場所は、標準住宅モデルの居間・食堂(図7(a))とした。併用システムは、PEFC-CGSの排熱回収熱量に応じて供給水温が変わるため、供給水温の設定を成行きとした。また、PEFC-CGSを運転しない場合は、供給水温の設定を60℃一定とし、循環水をサブボイラーで加熱した。循環水の流量は、1.5 [L/min]一定とした。なお、

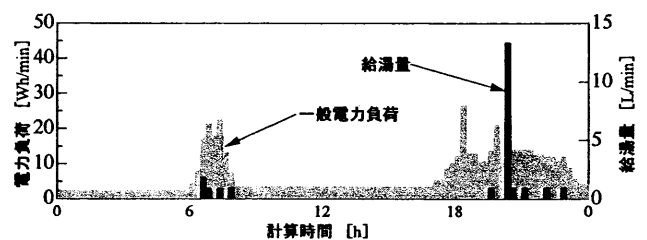
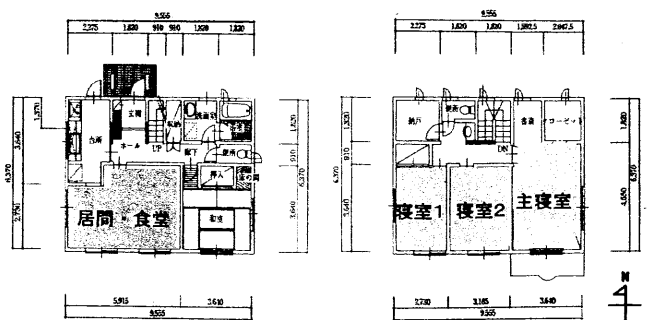


図6 入力負荷データ



(a) 1階 (b) 2階
図7 建物モデルの平面 (単位: mm)

居間・食堂は、床暖房とエアコンを併用して暖房を行い、その他の暖房室（図7(b)、主寝室、寝室1、寝室2）は、エアコンのみで暖房した。

3.3 暖房スケジュールと室内制御方法

暖房スケジュールを表4に示す。温水式床暖房を設置した居間・食堂は、エアコンと併用して暖房を行い、その他の暖房室はエアコンのみで暖房を行う。エアコンのCOPは5.1とした。暖房は居住者在室時に行い、エアコンによって室内空気温度を調節した。居間・食堂は、PMVが-0.5となるように、その他の暖房室は、室温が22℃になるように調節した。温水式床暖房は、暖房スケジュールに合わせてOn-Off制御した。

3.4 PEFC-CGSの運転方法

PEFC-CGSの運転方法は、発電出力を電力負荷追従運転とした。PEFC-CGSの運転制御は、貯湯槽にこれ以上熱が貯まらなくなる状態になると停止し、貯湯槽内の熱量がある値を下回ると再起動する貯湯槽満蓄制御とした。今回の検討では、貯湯槽の最下層の水温が58℃になる満蓄と見なして停止し、最下層の水温が55℃になると再起動する。

4. 計算結果

併用システムの省エネルギー効果と、温水式床暖房による室内温熱環境への影響について、電力及び給湯負荷を系統電力と都市ガスで賄う従来システムと、温水式床暖房を併用しないPEFC-CGS導入システムを比較対象として検討した。以下にそれぞれの検討結果を示す。

4.1 省エネルギー効果

図8にPEFC-CGS運転時の日変動結果、図9に月別の

系統電力依存率とPEFC-CGSの総合効率を示す。温水式床暖房を併用しない場合は、PEFC-CGSの排熱利用が少ないため、貯湯槽満蓄制御によりPEFC-CGSの運転が停止する。併用システムは、PEFC-CGSの排熱を温水式床暖房の加熱源に利用するため、貯湯槽が満蓄にならず、PEFC-CGSが終日運転される。また、温水式床暖房の運転により床表面温度が上昇することから、エアコンで処理される熱負荷（以下、エアコン負荷）が減少している。しかし、貯湯槽内に給湯需要を賄える温水が貯まらないため、浴槽への湯張りといった給湯量の多い時間帯で、追炊き用サブボイラーが稼働している。PEFC-CGSの総合効率は寒い月に高く、暖かくなるに連れ低くなる。この原因は、暖かくなると、市水温度の上昇により排熱回収量が増加することや、外気温度の上昇により貯湯槽の熱損失が減少することから、貯湯槽が満蓄状態になりやすくなるためである。また、外気温度の上昇によりエアコン負荷が減少し、PEFC-CGSの部分負荷率が低くなることから、PEFC-CGSの実質発電効率が低下したことも考えられる。併用システムはPEFC-CGSを長時間運転でき、排熱も多く利用されるため、温水式床暖房を併用しない場合と比較して総合効率が各月で約9.6%向上し、1月で最大79%となった。さらに、併用システムはPEFC-CGSの長時間運転による発電量の増加と、床表面からの放熱

表4 暖房スケジュール

対象室	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
居間・食堂																									
主寝室																									
寝室1																									
寝室2																									

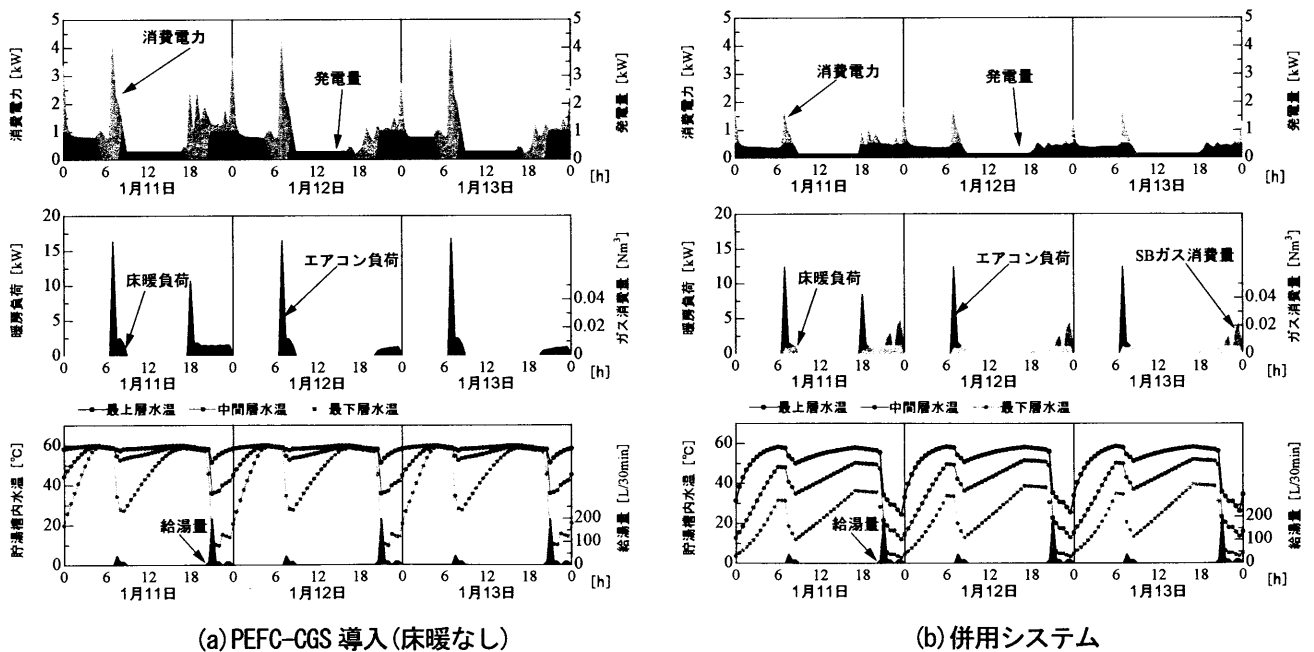


図8 PEFC-CGS 運転時の日変動結果

効果により、温水式床暖房を設置しない場合と比較して、系統電力依存率が平均で約37%低下した。各月の系統電力依存率で見ると、12月の依存率が最も低下し、約22%となった。併用システムは、PEFC-CGSを高い効率で長時間運転でき、PEFC-CGSの発電で電力需要を賄う割合が高くなる。

図10と図11に、比較したシステムの冬季積算熱負荷、及び冬季積算1次エネルギー消費量を示す。温水式床暖房を設置したシステムは、床表面からの放熱によりエアコン負荷が減少する。しかし、冬季積算熱負荷の合計は、温水式床暖房に供給される熱負荷（以下、床暖房負荷）が大きいため、温水式床暖房を設置するシステムが高くなる。冬季積算1次エネルギー消費量で見ると、PEFC-CGS導入システムはPEFC-CGSからの発電によって電力需要を賄うため、系統から賄われる電力（系統電力）の1次エネルギー消費量が低い。また、貯湯槽で給湯量をすべて賄っているため、給湯用ガスの1次エネルギー消費量が発生しない。併用システムはPEFC-CGSの発電量の増加と床暖房効果により、系統電力の1次エネルギー消費量がさらに低くなる。また、床暖房負荷をPEFC-CGSの排熱で賄うため、床暖房用ガスの1次エネルギー消費量は発生しない。しかし、CGSガスの1次エネルギー消費量は、PEFC-CGSの運転時間が長くなるため増加する。冬季積算1次エネルギー消費量の合計は併用システムが最も低く、温水式床暖房を併用しないPEFC-CGS導入システムと比較して約5%削減された。さらに従来システム比較して、温水式床暖房を運転しない場合で約15%、温水式床暖房を運転した場合で約24%削減した。各月の月積算1次エネルギー消費量を図12に示す。月積算1次エネルギー削減率が最も高い月は、計算期間で最も寒い1月となり、温水式床暖房を併用しないPEFC-CGS導入システムと比較して約5.6%削減された。併用システムは、温水式床暖房を設置することにより熱負荷は増加するが、1次エネルギーは比較対象としたシステムの中で最も低く、さらに気候が寒いほど省エネルギー効果が高くなる。

4.2 室内温熱環境

温水式床暖房による室内温熱環境への影響について検討するために、エアコンのみの暖房方法と比較した。図13に、比較した暖房方法の各室内空気温度、床表面温度、窓平均表面温度、PMVの日変動を示す。温水式床暖房を運転した場合、床表面温度の上昇により、エアコンのみの暖房方法と比較して窓平均表面温度が高い。また、天井や壁表面も窓表面温度と同様に高く、室内の平均放射温度が高くなるため、エアコンのみの暖房と比較して、室内空気温が低い環境下でPMV-0.5を満たす時間帯が発生した。温水式床暖房を長時間運転する時間帯は、PMVが-0.5以上となりエアコンが停止する。しかし、温水式

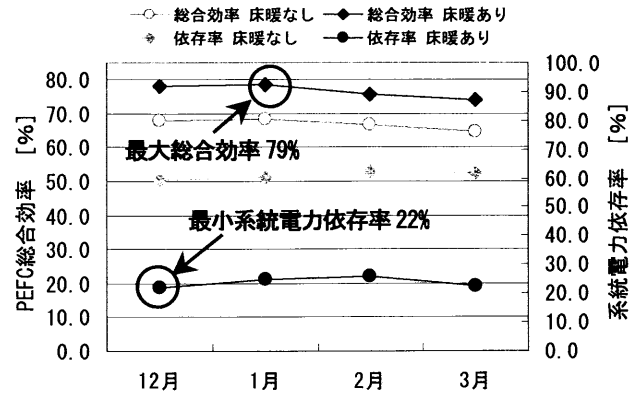


図9 総合効率と系統電力依存率

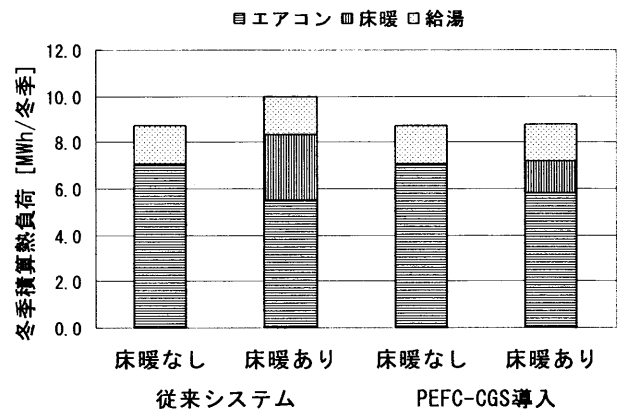


図10 冬季積算熱負荷

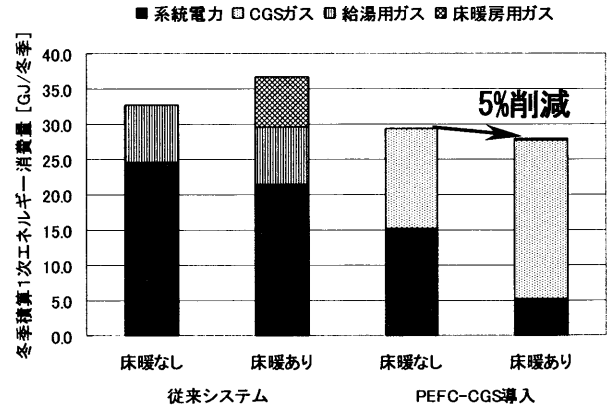


図11 冬季積算1次エネルギー消費量

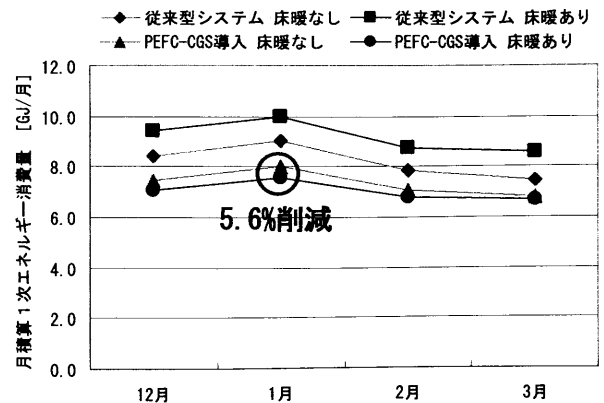


図12 月積算1次エネルギー消費量

床暖房は制御を行っていないため、床表面を加熱し続ける。その結果、PMVの快適域の上限値である0.5を超え、暑いと感じる室内温熱環境となる時間帯が発生する。図14に、比較した暖房方法の各室内温度、床表面温度、PMVの相関図を示す。PMVと室内空気温度の相関図では、室内空気温度が25℃以上になるとPMVが0.5以上となる。また、PMVと床表面温度の相関図では、床表面温度が32℃以上になるとPMVが0.5以上となる。併用システムは、床表面からの放熱効果により室内空気温度が低い環境下でPMV-0.5を満たす。しかし、温水式床暖房を長時間運転すると床が過剰に加熱され、PMVの快適域の上限値である0.5以上になる時間帯が発生した。このことから、室内温熱環境の快適性を考慮するためには、温水式床暖房の制御と運転方法を検討する必要がある。

5. 設定条件変更による効果

4.2の検討結果から、温水式床暖房への供給熱量を抑

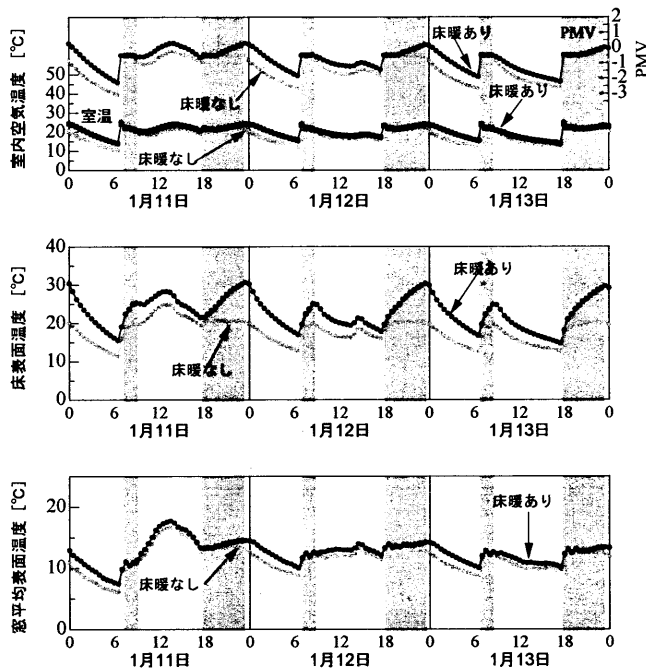


図13 室内環境の日変動

えることにより、室内温熱環境をPMVの快適域に制御できると考えられる。そこで、温水式床暖房を制御し、流量を低くした場合の室内温熱環境について検討した。さらに、温水式床暖房の運転方法の違いがPEFC-CGSに及ぼす影響と省エネルギー効果についても検討した。表5に検討した温水式床暖房の設定条件を示す。CASE1は、4.の併用システムの計算結果とし、CASE1を比較対象として検討した。

5.1 室内温熱環境への影響

図15にCASE1とCASE2の室内空気温度、床表面温度、窓平均表面温度を示す。温水式床暖房を制御した

表5 温水式床暖房の設定条件

	床暖流量 (L/min)	運転方法	制御方法
CASE1	1.5	在室時運転	制御なし
CASE2	1.5	在室時運転	流量On-Off制御
CASE3	0.5	在室時運転	停止 : 床温が25℃以上
CASE4	0.5	終日運転	再起動 : 床温が24℃以下

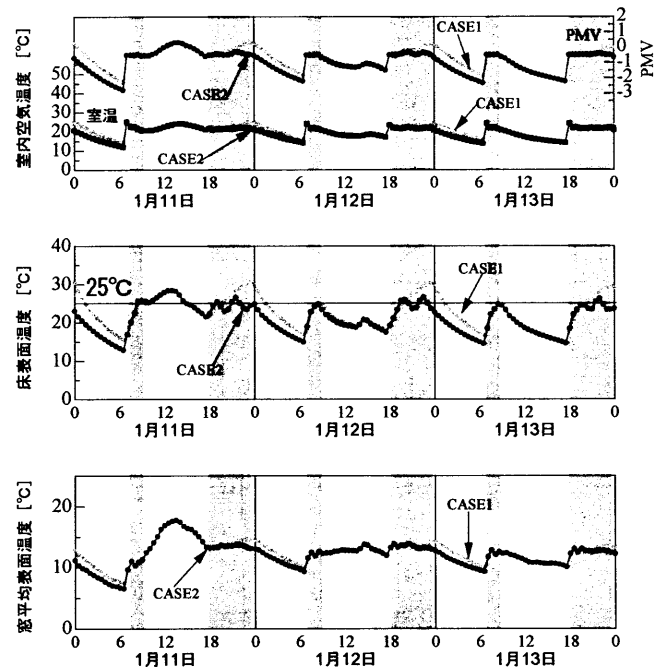
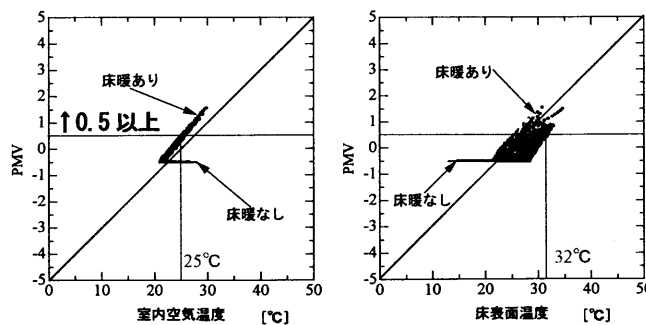


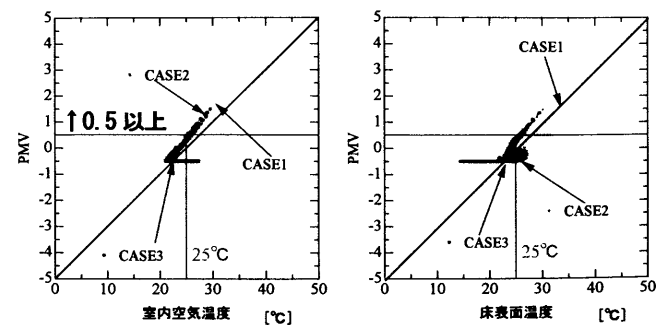
図15 室内環境の日変動 (CASE1とCASE2)



(a) 室温とPMV

(b) 床温とPMV

図14 相関図



(a) 室温とPMV

(b) 床温とPMV

図16 相関図 (床暖制御)

CASE2は、居住者の在室時に床表面温度が25℃前後となり、温水式床暖房への供給熱量を抑えている。このことから、温水式床暖房を長時間運転しても室内空気温度は22℃でほぼ一定となり、PMVを-0.5に制御している。さらに、室内の平均放射温度が高くなることから、エアコンのみの暖房と比較して室内空気温度が低い環境下でPMV-0.5を満たす時間帯が発生した。図16にCASE1, CASE2, CASE3の室内暖房時のPMV, 室内空気温度, 床表面温度の相関図を示す。温水式床暖房の制御により室内空気温度の過剰な加熱が緩和されたため、室内空気温度が25℃以上となる時間帯が減少した。さらに、流量を0.5 [L/min]にすることにより、PMVが0.5以上となる時間帯が減少した。床表面温度は25℃前後に集中し、30℃以上となる時間帯が発生しない。今回検討した制御方法は温水式床暖房への供給熱量を抑え、さらに流量を低くすることにより室内温熱環境をPMVの快適域に制御できた。

5.2 PEFC-CGSに及ぼす影響と省エネルギー効果

図17にCASE3(在室時運転)とCASE4(終日運転)のPEFC-CGS日変動結果、図18に各ケース月別の系統電力依存率とPEFC-CGSの総合効率を示す。温水式床暖房を制御することにより、温水式床暖房の運転が停止する時間帯が発生し、床表面からの放熱量が減少するため、PMVが0.5以上となるように常にエアコン稼働した。また、CASE4は非在室時も温水式床暖房を運転するため、エアコンによる室内暖房時の立ち上がり負荷が減少された。CASE3はCASE1と比較して温水式床暖房の運転時間が減少するため、貯湯槽満蓄制御によりPEFC-CGSが停止する時間帯が発生した。このことからPEFC-CGSの実質発電効率が低下するため、CASE1と比較してPEFC

-CGSの総合効率が平均で11%低下した。CASE4は温水式床暖房の運転時間が増加するため、PEFC-CGSが終日運転した。しかし、貯湯槽に給湯需要を賄える熱が貯まらないため、サブボイラーで加熱して給湯需要を賄っている。サブボイラーの稼働率が増加しPEFC-CGSの排熱利用効率が低下するため、総合効率が平均で約5%低下した。各月の総合効率で見ると、CASE3は比較的暖かい3月で最大14%低下した。この原因は、貯湯槽満蓄制御によりPEFC-CGSが停止するためである。また、CASE4は最も寒い1月で最大5.5%低下した。これは、外気温度及び市水温度の低下により、貯湯槽に熱が貯まりにくく建物の熱負荷も増加することから、サブボイラーの稼働率が増加するためである。CASE3の系統電力依存率は、PEFC-CGSの発電量の減少とエアコン負荷の増加から、平均して約10%増加した。CASE4では、PEFC-CGSの長時間運転と室内暖房時の立ち上がり負荷の削減により、平均して約4%削減された。各月の系統電力依存率で見ると、CASE4が最も依存率が低く、3月で最小依存率が16%となった。温水式床暖房の運転方法の違いがPEFC-CGSに及ぼす影響について検討した結果、在室時運転ではPEFC-CGSが貯湯槽満蓄制御によって停止するため、PEFC-CGSの総合効率が低下し系統電力依存率が増加した。終日運転では貯湯槽に給湯需要を賄える熱量が貯まらず、サブボイラー稼働率が増加するため総合効率が低下するが、PEFC-CGSの長時間運転と暖房時の立ち上がり負荷の削減により、系統電力依存率が低下した。

図19と図20に、各ケースの冬季積算熱負荷、冬季積算1次エネルギー消費量を示す。CASE3は温水式床暖房を制御し流量を低くしたため、床暖房負荷が減少しエアコン負荷が増加する。CASE4はエアコンによる室内暖房

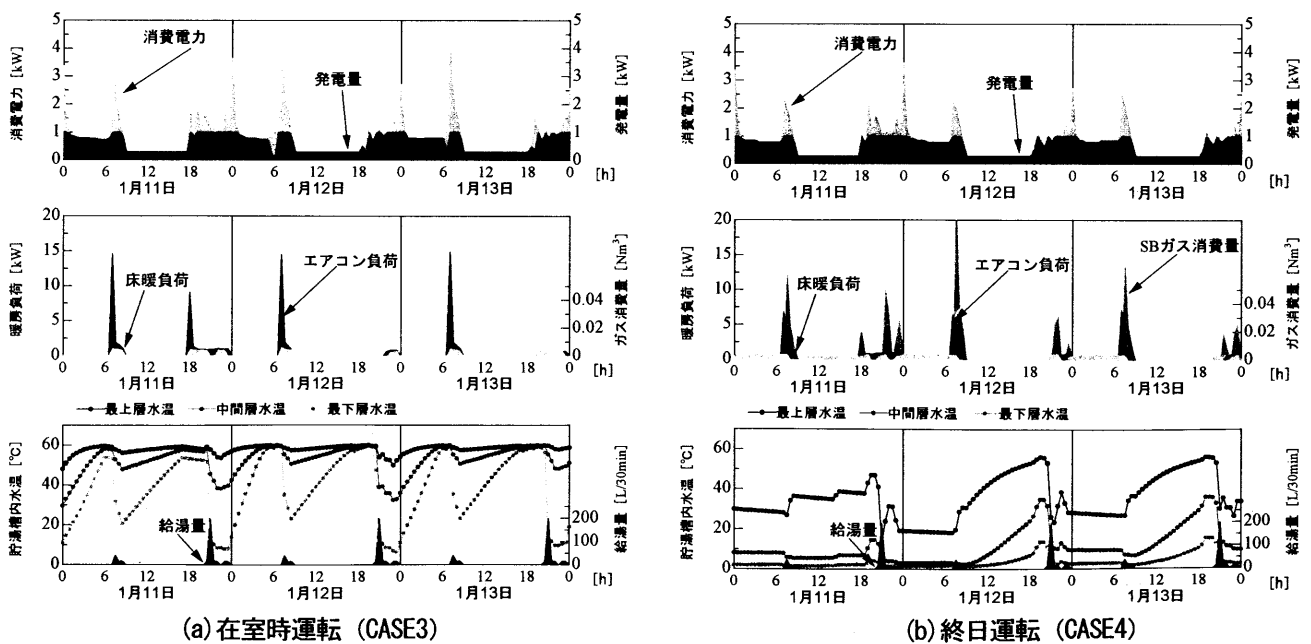


図17 比較ケースのPEFC-CGS日変動結果

時の立ち上がり負荷を削減するため、エアコン負荷が最も低い。また、温水式床暖房を終日運転するため、床暖房の熱供給を抑えた設定条件の中で床暖房負荷が最も大きい。冬季積算熱負荷の合計は、エアコンによる室内暖房時の立ち上がり負荷の削減が大きいCASE4が最も小さい。冬季積算1次エネルギー消費量で見ると、CASE2とCASE3は床暖房の熱供給を抑えることによりエアコン負荷が増加し、さらに貯湯槽満蓄制御によりPEFC-CGSが停止する時間帯が発生することから、CASE1と比較して系統電力の1次エネルギー消費量が増加した。冬季積算1次エネルギー消費量の合計は、CASE1と比較してCASE2で約3.5%、CASE3で約5.4%増加した。CASE4はエアコン負荷が最も小さくPEFC-CGSの運転時間が長いため、系統電力の1次エネルギー消費量は最も小さくなるが、給湯用ガス消費量が増加するため、CASE1と比較して冬季積算1次エネルギー消費量の合計が約1.8%増加した。しかし、温水式床暖房を併用しないPEFC-CGS導入システム(図20, 床暖なし)との比較では、約3%削減された。図21に各ケースの月積算1次エネルギー消費量を示す。在室時運転としたCASE2とCASE3は、各月でCASE1よりも月積算1次エネルギー消費量が増加した。終日運転としたCASE4は寒い月で月積算1次エネルギー消費量が増加するが、暖かくなるに連れて減少し、最も暖かい3月で約1%削減された。温水式床暖房の制御方法及び運転方法を変更することにより、CASE1と比較して冬季積算2次エネルギー消費量は減少したが、冬季積算1次エネルギー消費量は増加した。温水式床暖房を終日運転した場合、比較的暖かい月で増加率が低下し、3月では月積算1次エネルギー消費量が削減された。温水式床暖房を併用しない場合と比較して、冬季積算1次エネルギー消費量は約3%削減された。温水式床暖房の供給熱量を抑えて終日運転した場合、室内温熱環境をPMVの快適域に制御され、省エネルギー効果も高い。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) PEFC-CGSと温水式床暖房を併用した場合の室内温熱環境及び省エネルギー効果を検証するために、数値シミュレーションプログラムを作成した。
- (2) 併用システムは、PEFC-CGSの運転時間が増加するため、総合効率が1月で最大79%となった。
- (3) 併用システムではPEFC-CGSからの発電量の増加と床表面温度が上昇するため、系統電力依存率が最小の22%となった。
- (4) 併用システムは、温水式床暖房を併用しないPEFC-CGS導入システムと比較して、冬季積算1次エネルギー消費量が約5%削減された。

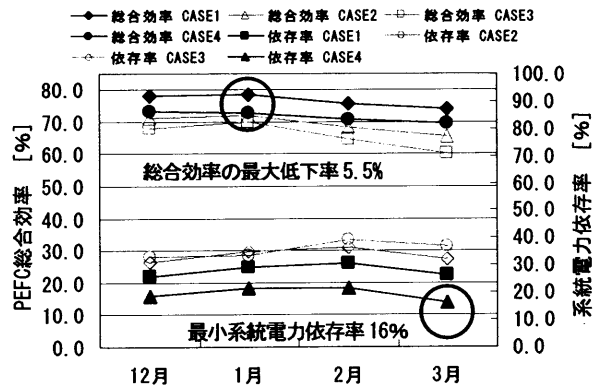


図18 各ケースの総合効率と系統電力依存率

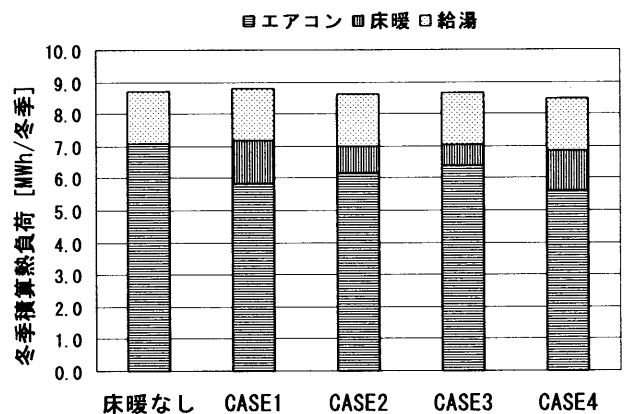


図19 各ケースの冬季積算熱負荷

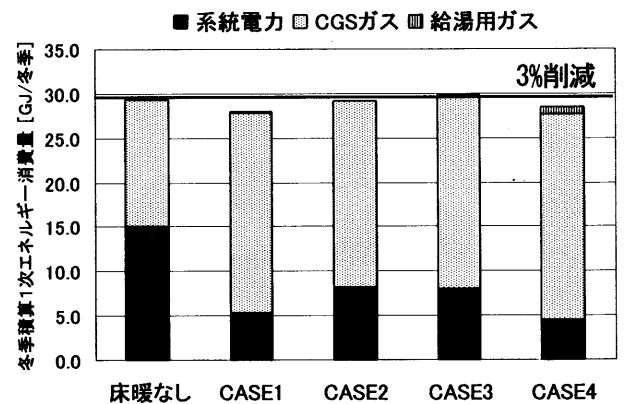


図20 各ケースの冬季積算1次エネルギー消費量

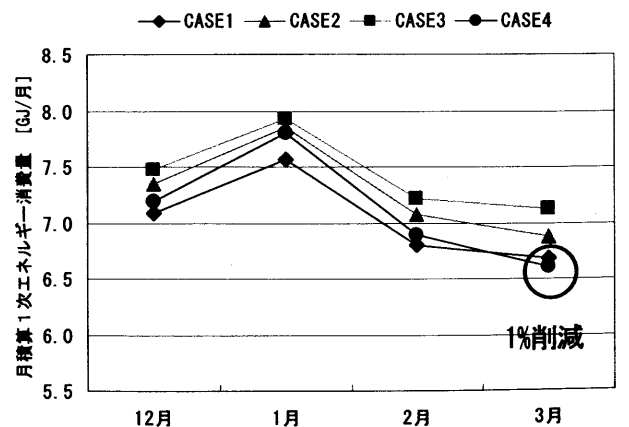


図21 各ケースの月積算1次エネルギー消費量

- (5) 併用システムは、冬季積算1次エネルギー消費量が従来システムと比較して、温水式床暖房を運転しない場合で約15%、温水式床暖房を運転した場合で約24%削減した。
- (6) PEFC-CGSの総合効率、系統電力依存率、1次エネルギー消費量は、外界気象に大きく影響される。
- (7) 併用システムは、寒い1月で1次エネルギー消費量の削減率が最も高く、約5.6%となった。
- (8) 温水式床暖房を床表面で制御し流量を低下させることにより、室内温熱環境がPMVの快適域に制御された。
- (9) 温水式床暖房の制御方法及び運転方法がPEFC-CGSに及ぼす影響は大きい。
- (10) 温水式床暖房を在室時運転で床表面温度を制御した場合、温水式床暖房を制御しない場合と比較して総合効率が平均で11%低下し、系統電力依存率が平均で10%増加した。また、温水式床暖房を終日運転とした場合、総合効率が平均で5%低下し、系統電力依存率が平均で4%低下した。
- (11) 温水式床暖房を終日運転した場合、比較的暖かい3月で系統電力依存率が最も低く、約16%となった。
- (12) 温水式床暖房の制御方法及び運転方法の違いによる省エネルギー効果について検討した結果、温水式床暖房を終日運転とし床表面温度で制御を行い、流量を0.5 [L/min]とした場合で、温水式床暖房を併用しないPEFC-CGS導入システムと比較して冬季積算1次エネルギー消費量を約3%削減され、さらに室内温熱環境を快適に制御できた。

今後は、PEFC-CGSの運転方法及び機器の設定条件や温水式床暖房の設置面積等を変更してケーススタディを行い、併用システムの最適運転方法を明らかにしたい。また、PEFC-CGSに代えてSOFC-CGSと併用した場合の検討も行う予定である。

【謝辞】

本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C)「家庭用分散型電熱源のエネルギー利用効率向上と省エネライフスタイル」研究代表：渡辺俊行、21世紀COEプログラム「循環型住空間システムの構築」拠点リーダー：川瀬博(九州大学大学院教授)、および西部ガス株式会社によるものである。記して、謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 穴原靖夫, 須永修通: 戸建住宅への燃料電池導入効果の検討 - 既存エネルギーシステムとの比較 -, 日本建築学会大会学術講演概要集, 環境工学II, pp.1365-1366, 2004.8.
- 2) 濱田靖弘, 中村真人, 窪田英樹, 落藤 澄: 寒冷地における住宅用燃料電池コージェネレーションシステムの最適設計に関する研究, 日本建築学会大会学術講演概要集, 環境工学II, pp.1367-1368, 2004.8.
- 3) 横山良平, 清水 猛, 竹村和久, 伊東弘一: CO₂ヒートポンプ給湯システムの数値シミュレーションによる性能分析 (第2報, 貯湯槽のモデル化とシステムの分析), 日本機化学会論文集 (B編), 71巻712号, pp.151-158, 2005.12.
- 4) 千輝淳二: 伝熱計算法, 工学図書, pp.232-240, 1984.5.
- 5) Ozaki A, Watanabe T. and Takase S.: Simulation Software of the Hydro Thermal Environment of Building Based on Detailed Thermodynamic Models, eSim 2004 of the Canadian Conference on Building Energy Simulation, pp.45-54, 2004
- 6) 宇田川光弘: パソコンによる空気調和計算法, オーム社, pp.169-175, 1986.12.
- 7) 空気調和・衛生工学会: シンポジウム「住宅における生活スケジュールとエネルギー消費」テキストと付属プログラム「SCHEDULE Ver2.0」, 2000.

(受理: 平成18年12月7日)