



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	自然エネルギーと燃料電池の複合利用を考慮した住宅用エネルギーシステムに関する研究
Author(s)	濱田, 靖弘; 窪田, 英樹; 中村, 真人 他
Description	第9回衛生工学シンポジウム (平成13年11月1日 (木) -2日 (金) 北海道大学学术交流会館) . 1 建築環境とエネルギー利用 . P1-5
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 9, 21-26
Issue Date	2001-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7137
Type	departmental bulletin paper
File Information	9-1-5_p21-26.pdf



自然エネルギーと燃料電池の複合利用を考慮した住宅用エネルギーシステムに関する研究

濱田 靖弘 (北海道大学)	窪田 英樹 (北海道大学)
中村 真人 (北海道大学)	○小杉 智紀 (北海道大学)
横山 真太郎 (北海道大学)	落藤 澄 (北海道大学)
中島 祐一 (北海道ガス)	新庄 博之 (北海道ガス)
村瀬 光則 (北海道ガス)	後藤 隆一郎 (北海道ガス)

はじめに

筆者らの研究室では、これまで自然エネルギー利用を中心に据えた戸建て住宅の実証実験と評価を実施し、従来型住宅に対して約90%の省エネルギー効果を達成してきた¹⁾。今後エネルギー自律型住宅の普及に向けては、自然エネルギーの利用基盤を段階的に強化することが不可欠であり、そのために燃料電池による熱電併給に代表される従来型エネルギーの新利用形態と自然エネルギーとの複合化を展開することが緊急の課題であると考えられる。本研究では、まず住宅用コージェネレーションと自然エネルギー利用を考慮した今後の住宅のエネルギーシステムのあり方について検討する。次いで、北海道大学構内の実験住宅への燃料電池導入計画を示す。さらに、燃料電池の省エネルギー性、自然エネルギーとの複合利用効果について予測計算を実施するものである。

1. 自然エネルギーおよび燃料電池の複合利用を考慮した住宅用エネルギーシステムの考え方

表-1に戸建て住宅におけるエネルギーシステムの考え方を示す。システムを従来型、従来型エネルギーの新利用形態、複合型、独立型の4種類に大別した。従来型エネルギーの新利用形態、複合型システムにおける燃料電池は、天然ガスの改質を前提としている。また、独立型システムは水素あるいは電力貯蔵装置を擁する完全自立型を考えている。筆者らの研究室における試算では、札幌における従来型の戸建て住宅のライフサイクルエネルギー消費量(LCE)およびライフサイクルCO₂(LCCO₂)は、それぞれ139 GJ/年、2498 kg-C/年である²⁾。しかし今後、大型の発電施設にエネルギー効率の良い設備が導入されれば、運用時の商用電源に起因する環境負荷は減少すると考えられる。

一方、従来型エネルギーの新利用形態として位置付けられる熱電併給型の燃料電池では、発電効率および排熱利用効率を含めた総合二次エネルギー効率は70~80%とされているものの、発電効率については30%前後であり、一次エネルギー効率・エクセルギー効率の観点から、燃料電池排熱の利用を適正に行わない限り、高い省エネルギー性を達成することは困難である。個別物件における現状の熱電併給の省エネルギー効果は20%程度の場合が多く、より大きな効果を創出するためには、自然エネルギーの積極的な導入が不可欠となる。

筆者らの研究室における実験住宅では、これまで太陽・風力エネルギー利用、地盤熱利用、また未利用エネルギーとしての生活排熱利用などの導入効果を明らかにしてきた¹⁾。太陽光発電、ソーラーコレクタ、地盤熱利用、排気熱回収を採用した場合のLCE, LCCO₂は、それぞれ68.1 GJ/年, 1069.7 GJ/年であり、従来型住宅の約2分の1であったが、ライフサイクルコスト(LCC)については14%増加するため、経済性の改善が求められている²⁾。

またエネルギーの有効利用のためには、貯蔵技術が不可欠である。貯蔵技術としては、熱貯蔵(蓄熱)・電力貯蔵・水素貯蔵などの形態が考えられる。長中期蓄熱に関しては、当研究室においても実績があり、比較的可能性の高い手法の一つであると言える³⁾が、電力貯蔵・水素貯蔵については、技術的に開発段階にある。

このようなことから、貯蔵技術の更なる研究開発を目指す一方で、当面は自然エネルギー、蓄熱サイクル、従来型エネルギーの新利用形態との適正な組合せを提示することが急務であると考えられる。

表-1. 戸建て住宅のエネルギーシステム

住宅用エネルギーシステム	都市システムとの連系	照明・動力・他	給湯	暖房	冷房	省エネルギー性 環境保全性	経済性
従来型システム	商用電源, 灯油/都市ガス	商用電源	(灯油/ガス)ボイラ		冷暖エアコン	×	◎
従来型エネルギーの新利用形態	商用電源, 灯油/都市ガス	(ディーゼル/ガス)エンジン			冷暖エアコン	×	○
	商用電源, 都市ガス	燃料電池			冷暖エアコン	△	○
複合型システム (自然エネルギー+蓄熱+天然ガス+商用電源)	双方向型 (商用電源, 都市ガス)	太陽光発電+ソーラーコレクタ		地盤熱利用		○	△
		燃料電池		地盤熱利用		○	△
		燃料電池+ソーラーコレクタ		地盤熱利用		○	△
		太陽光発電+燃料電池		地盤熱利用		○	×
		太陽光発電+燃料電池+ソーラーコレクタ		地盤熱利用		○	×
独立型システム (水素・電力貯蔵)	完全独立	太陽光発電+燃料電池+ソーラーコレクタ		地盤熱利用		◎	×

表-2 実験住宅における導入要素の概要

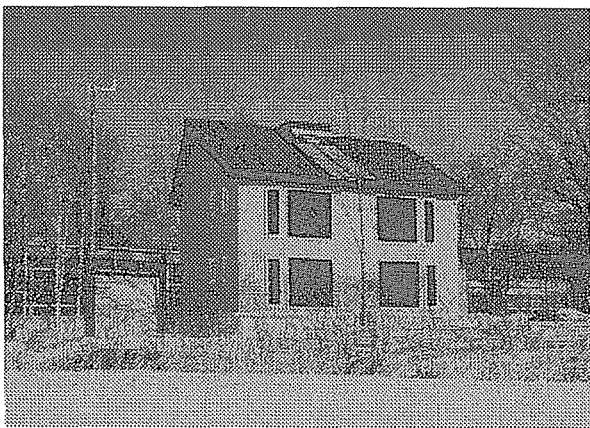


写真-1 実験住宅の外観

建築的(パッシブ)手法	
暖冷房	高断熱・高気密化による熱負荷の低減 開口部調節(冬期:日射のパッシブ利用・夜間断熱 夏期:日射遮蔽)
蓄熱	躯体および地下室の熱容量利用 躯体埋め込み型潜熱蓄熱材
換気	内外温度差による自然換気方式 アースチューブ(冬期:導入外気予熱、夏期:導入外気予冷)
設備的(アクティブ)手法	
電力	太陽光発電(系統連系方式) 燃料電池発電(系統連系方式)
給湯	ソーラーコレクタ 排気熱回収ヒートポンプ 燃料電池排熱利用
暖冷房	暖房:地盤熱源ヒートポンプ(垂直および水平埋設管方式) 冷房:地盤冷熱の直接利用
蓄熱	地盤蓄熱(垂直および水平埋設管方式による年間サイクル) 蓄熱槽(水槽方式による年間サイクル)

表-3 実験計画の概要

内容	
第一次	<p>■ 燃料電池の発電特性、排熱回収特性に関する基礎実験</p> <ol style="list-style-type: none"> 様々な部分負荷の条件下における運転特性の測定 (発電量、発電効率、排熱回収可能量、排熱回収温度、熱回収効率、総合効率) 様々な運転方式における発電特性、排熱回収特性の変化 (定負荷運転、電力負荷追従型、熱負荷追従型) 既往の熱電併給装置との性能比較 (各種燃料電池、ガスエンジン、マイクロガスタービンなど)
第二次以降	<p>■ 自然エネルギーおよび燃料電池の複合利用に関する応用実験と評価</p> <ol style="list-style-type: none"> 太陽・風力エネルギーとの併用効果、および適正な補助熱源のあり方 地盤熱利用による蓄熱効果の活用、および躯体蓄熱・潜熱蓄熱材との併用効果 太陽・風力エネルギーによる水素生成と水素貯蔵システムの試運転と評価

2. 燃料電池コージェネレーションシステムの導入計画

2.1 実験住宅の概要

写真-1に実験住宅の外観を示す。建築面積は64 m²で、季節間の蓄熱効果を高めるため建物は総地下方式としている。本住宅は、断熱パネル工法により建設された高断熱・高気密住宅であり、壁・屋根の断熱材として厚さ236 mmの発泡ポリスチレン板が使用されている。また暖房負荷の低減を目的として南面の窓面積はできるだけ大きくとり(面積約21 m²)、アルゴンガスを封入したLow-Eペアガラス(熱貫流率1.38 W/(m²・K))を使用している。本住宅の熱損失係数は、約0.97 W/(m²・K)である。

表-2に実験住宅における導入要素の概要を示す。電気設備としては、太陽光発電および導入予定の燃料電池によって、住宅内の電力消費を賄うシステムとする。給湯設備としては、太陽熱集熱器(ソーラーコレクタ)および燃料電池からの排熱を利用して貯湯槽内の水を加温するシステムである。暖冷房設備としては、地盤熱源ヒートポンプ(垂直埋設管・水平埋設管)および排気熱回収ヒートポンプ(生活排熱)の活用を考慮している。換気方式には吹き抜けを排気塔として利用する手法を採用しており、さらにアースチューブによる積極的な導入外気の予熱・予冷も行っている。

2.2 実験計画

表-3に実験計画の概要を示す。北海道大学の敷地内にある実験住宅(ローエネルギーハウス)に燃料電池を導入し、2001

年度より、燃料電池に関する基礎的な実験、さらにその基礎実験を踏まえて各自然エネルギーとの複合利用に関する応用実験へと展開していく予定である。第一次計画では、燃料電池の発電特性、排熱回収特性に関する基礎的な実験を行う。燃料電池の部分負荷を変化させた運転、電力あるいは熱負荷に合わせた運転などを行い、燃料電池の発電量、発電効率、排熱回収可能量、熱回収効率、総合効率などを明らかにする。第二次計画以降の実験方針としては、基礎実験からのデータを基に自然エネルギーと燃料電池を複合的に組み合わせた応用実験を行い、最終的には、太陽・風力エネルギーによる水素生成と水素貯蔵システムの導入効果の検証を含めた研究を進めていく予定である。

図-1に燃料電池システムの系統図を示す。実験住宅屋外に機械室を併設し、その中に燃料電池、計測機器などを設置する。燃料電池により発電された電力は分電盤を通じて住宅内の各負荷へと適用され、また商用電源との系統連系システムを採用することによって、余剰電力が生じた場合には売電することも可能である。燃料電池からの排熱は、熱交換器を介して実験住宅内に設置している給湯用貯湯槽(容量0.3 m³)内の水の昇温に用いられる。

実験に用いる燃料電池は、日本製の天然ガス改質型の高分子電解質型燃料電池(Polymer Electrolyte Fuel Cell:PEFC、または、Proton Exchange Membrane Fuel Cell:PEMFC)で、定格出力は1.0 kW程度である。

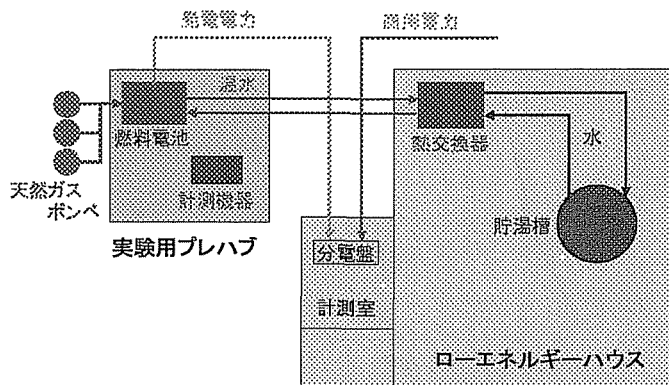


図-1 燃料電池システムの系統図

表-4 検討対象と計算条件

対象住宅	地域	住宅の種類	延床面積
	札幌	実験住宅	約128 m ²
延床面積あたり年間エネルギー需要量 [MJ/(m ² ・年)]	照明他		給湯
	107.8		126.6
換算係数	商用電力	天然ガス	灯油
一次エネルギー換算係数(高位)	10.258 MJ/kWh	46.055 MJ/m ³	37.263 MJ/L
CO ₂ 排出量換算係数	0.139 kg-C/kWh	0.647 kg-C/m ³	0.706 kg-C/L

3. 電力・給湯システム評価シミュレータの概要

図-2に燃料電池，太陽光発電，ソーラーコレクタの複合利用の解析を行う電力・給湯システム評価シミュレータの概要を示す。入力データとして，気象データ（全天日射量，外気温度，市給水温度）と住宅内電力消費量がある。ソーラーコレクタ解析ブロックでは，日射量，外気温度，熱媒温度から集熱量を計算する。ここで得られた集熱量を用いて，貯湯槽内の水温計算を行う。太陽光発電解析ブロックにおいては，日射量，外気温度から太陽電池による発電量を計算する。太陽光発電量のうち，住宅内で消費されない余剰電力量は売電するものとした。燃料電池解析ブロックにおいては，太陽光発電では賄いきれない電力需要を燃料電池により補う運転（電主熱従運転），あるいはソーラーコレクタによる給湯の不足を燃料電池により補う運転（熱主電従運転）が考えられる。それぞれの運転パターンについて計算を行い，燃料電池発電量，燃料電池排熱量，天然ガス消費量などを計算する。電主熱従運転の補助加熱解析ブロックでは，ソーラーコレクタおよび燃料電池排熱量の和が，給湯需要量に満たない場合に，補助ボイラを使用するものとした。熱主電従運転の電力解析ブロックでは，太陽光発電量および燃料電池発電量の和が，電力需要量に満たない場合に，商用電源を使用するものとした。

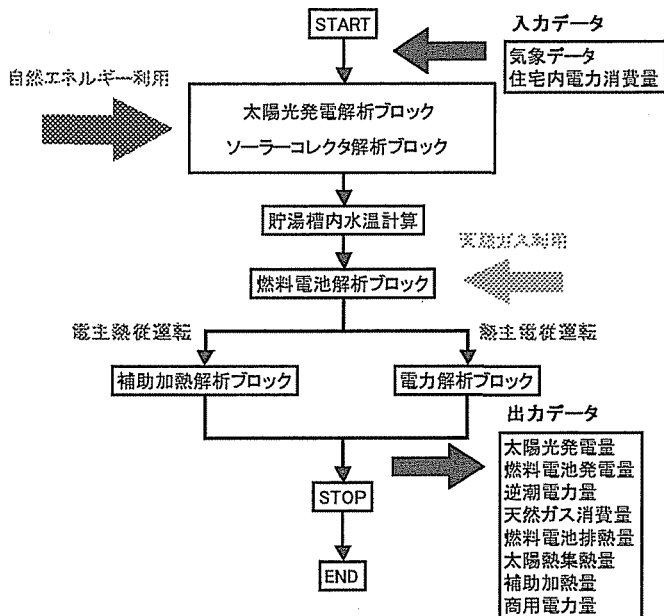


図-2 評価シミュレータの概要

表-5 計算種類

計算種類	電力	給湯
RUN1	太陽光発電+商用電源	ボイラ
RUN2	商用電源	ソーラーコレクタ+補助熱源
RUN3.1	燃料電池+補助熱源(電主熱従型)	
RUN3.2	燃料電池+商用電源(熱主電従型)	
RUN4	太陽光発電+商用電源	ソーラーコレクタ+補助熱源
RUN5	太陽光発電+燃料電池+補助熱源	
RUN6	ソーラーコレクタ+燃料電池+補助熱源	
RUN7	太陽光発電+ソーラーコレクタ+燃料電池+補助熱源	

4. 導入効果の予測計算

4.1 検討対象と計算条件

表-4に検討対象と計算条件を示す。計算対象は，実験住宅であり，延床面積は128 m²である。延床面積あたりの年間エネルギー需要量は，電力107.8 MJ/(m²・年)，給湯126.6 MJ/(m²・年)である。電力については，既報¹⁾における4人家族の電力消費パターンを適用するものとした。給湯については，貯湯槽内の水を，設定温度まで上昇させるのに必要な熱量を給湯需要量とした。天然ガスの換算係数については，成分が近い都市ガス(13A)の値を用いた。

表-5に計算種類を示す。RUN3.1, RUN4~RUN7の燃料電池の運転方式は電主熱従運転とし，RUN3.2は熱主電従運転とした。RUN1, RUN4, RUN5, RUN7には，太陽光発電の利用を考慮しており，単結晶シリコン型太陽電池(24 m²)を設置するものとした。RUN2, RUN4, RUN6, RUN7で用いたソーラーコレクタの面積は8 m²とした。

今回の解析は，燃料電池の定格出力を4.5 kWとし，燃料電池一つに対して，実験住宅3棟を想定して計算を行った。

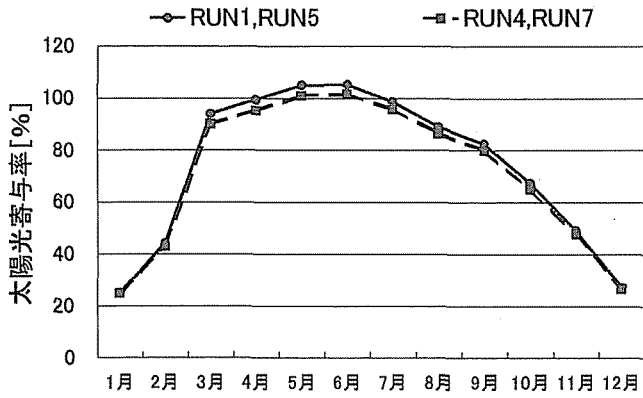


図-3 月別太陽光寄与率

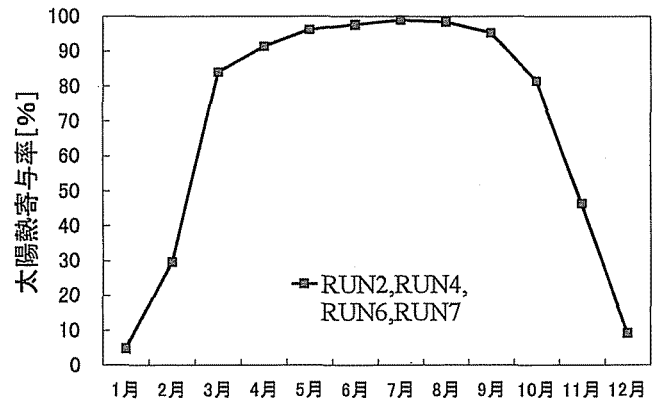


図-5 月別太陽熱寄与率

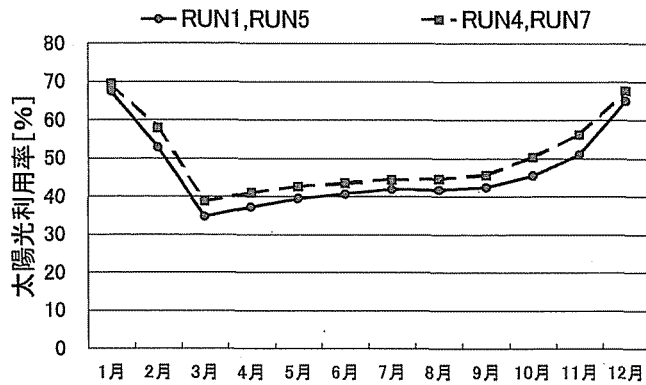


図-4 月別太陽光利用率

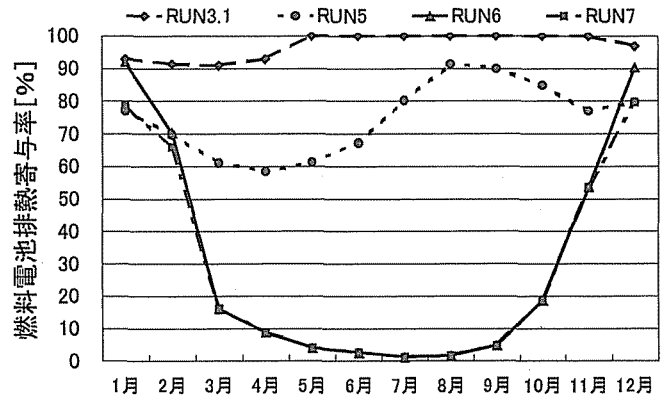


図-6 月別燃料電池排熱寄与率

4. 2 計算結果と考察

(1) 月別運転実績

図-3 に月別太陽光寄与率 [=月積算太陽光発電量/電力需要量×100] を示す。5~6月にかけて太陽光寄与率は100%を超え、太陽光発電だけで電力需要量が賅える計算となった。RUN1, RUN5 と RUN4, RUN7 を比較すると、ソーラーコレクタの搬送ポンプ動力を要する RUN4, RUN7 の方が、寄与率は若干低くなる結果となった。年積算太陽光発電量は 88.3 MJ/(m²・年)、年平均太陽光寄与率は RUN1, RUN5 で 74.0%, RUN4, RUN7 で 71.8%となった。

図-4 に月別太陽光利用率 [=月積算太陽光発電利用量/月積算太陽光発電量×100] を示す。3~9月は他の月に比べて逆潮電力量が大きいため、利用率は40%程度であった。RUN1, RUN5 と RUN4, RUN7 を比較すると、ソーラーコレクタの搬送ポンプ動力を要する RUN4, RUN7 の方が、利用率は若干高くなる結果となった。年積算逆潮電力量は RUN1, RUN5 で 45.3 MJ/(m²・年)、RUN4, RUN7 で 42.7 MJ/(m²・年)、年平均太陽光利用率は RUN1, RUN5 で 42.9%, RUN4, RUN7 で 46.3%となった。

図-5 に月別太陽熱寄与率 [=月積算ソーラーコレクタ集熱量/給湯需要量×100] を示す。4~9月にかけて太陽熱寄与率は90%を超え、ソーラーコレクタだけで給湯需要量のほとんどを賅える計算となった。年積算集熱量は 84.4 MJ/(m²・年)、年平均太陽熱寄与率は 66.1%となった。

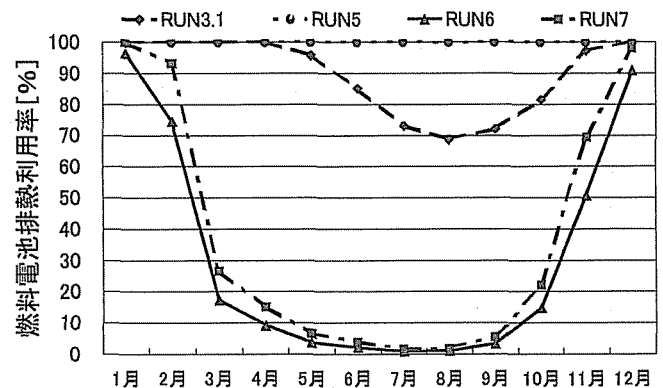


図-7 月別燃料電池排熱利用率

図-6 に月別燃料電池排熱寄与率 [=月積算燃料電池排熱利用量/給湯需要量×100] を示す。RUN3.1 は燃料電池排熱のみを導入しており、ほとんどの給湯需要量を賅っているが、RUN5, RUN6, RUN7 では稼働率は小さい。特に RUN6, RUN7 はソーラーコレクタを併用しているため、夏季に寄与率が著しく低下する結果となった。

図-7 に月別燃料電池排熱利用率 [=月積算燃料電池排熱利用量/月積算燃料電池排熱量×100] を示す。RUN3.1 は利用率が100%であり、排熱を全て給湯に利用していることが分かる。RUN5 は6~10月にかけて利用率が低下しているが、これは市給水温の上昇に伴って給湯需要量が減少するためである。RUN6, RUN7 は寄与率と同様、夏季に利用率が低下する結果となった。

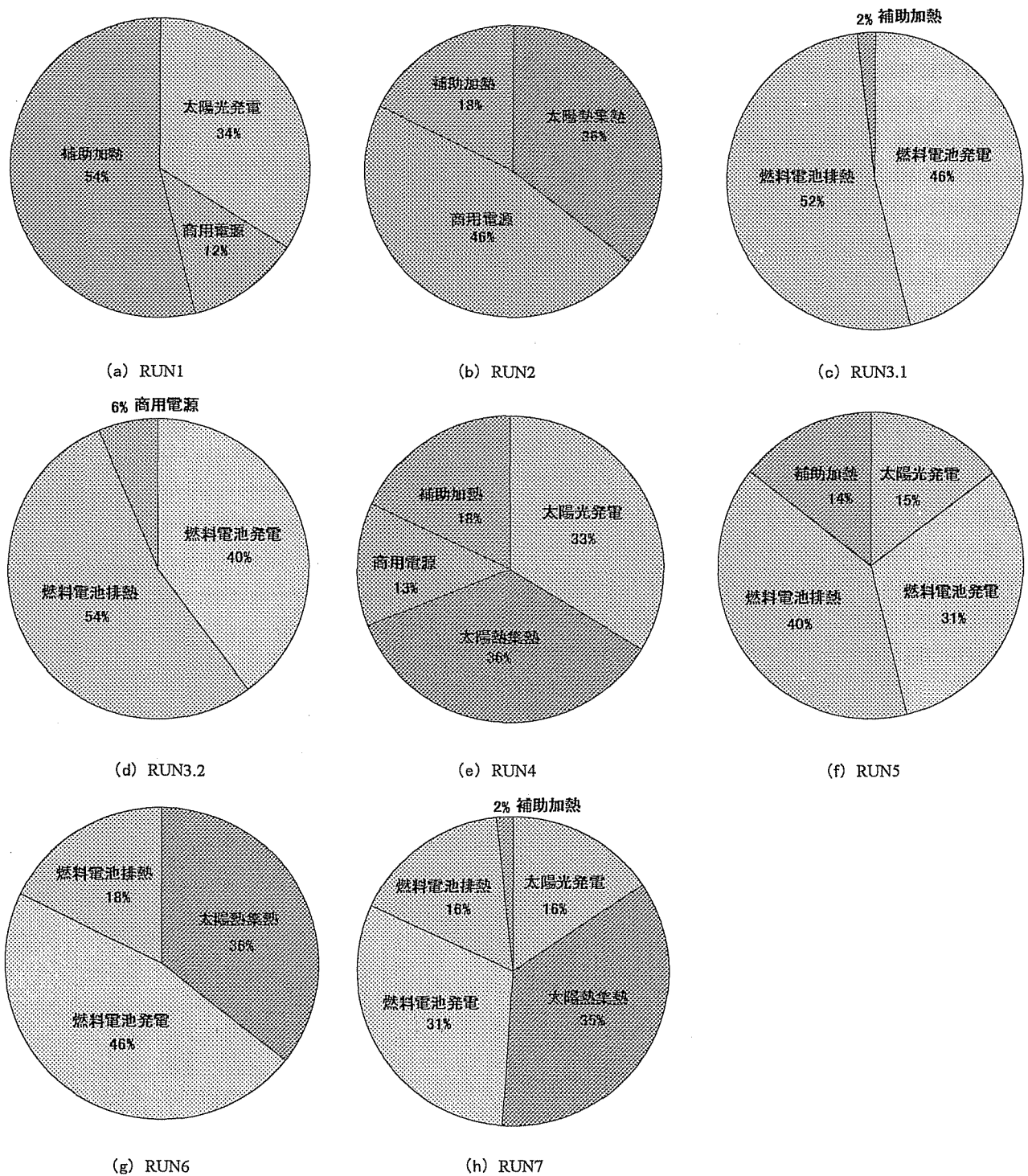


図-8 各種計算条件における年間エネルギー種別利用量の内訳

(2) 年間エネルギー収支

図-8 に各種計算条件における年間エネルギー種別利用量の内訳を示す。年間電力需要量は実験住宅延床面積当たり $107.8 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ (RUN2, 4, 6, 7 は集熱用搬送動力 $3.1 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ が加わるため、年間電力需要量は $110.9 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ となる) であり、太陽光発電、燃料電池発電、商用電源の各組み合わせによって電力が供給される。年間給湯需要量は実験住宅延床面積当たり $126.6 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ であり、太陽熱集熱、燃料電池排熱、補助加熱 (灯油ボイラ) の各組み合わせによって熱が供給される。太陽光発電は商用電源との系統連系システム

を考慮しており、逆潮流電力量分を商用電源の年間使用量から差し引いている。

RUN3.1 における燃料電池による発電量、排熱熱回収量は、それぞれ 46%、52% という結果になった。RUN5、RUN6 は太陽光発電、ソーラーコレクタとの組み合わせであり、燃料電池による熱電併給の占める割合は、それぞれ 71%、64% となった。また、太陽光発電、ソーラーコレクタ、燃料電池の全てを導入した場合の計算 (RUN7) では、太陽エネルギーと燃料電池の占める割合がほぼ等しい結果となった。

(3) 省エネルギー性および環境保全性

図-9 に従来型エネルギーの新利用形態として燃料電池のみを用いた場合の運転種類別の一次エネルギー消費量を示す。電主熱従型 (RUN3.1) の一次エネルギー消費量は、天然ガス 0.378 GJ/(m²・年)、灯油 0.0058 GJ/(m²・年)、一次エネルギー削減率は 19.3%であった。熱主電従型 (RUN3.2) では、天然ガス 0.350 GJ/(m²・年)、商用電源 0.043 GJ/(m²・年)、一次エネルギー削減率は 17.3%であった。

図-10 に計算種類による一次エネルギー削減率の比較を示す。太陽光発電を利用した RUN1, RUN4, RUN5, RUN7 は逆潮電力のため、削減率は高くなる結果となった。特に、RUN7 では、69.6%と最も高い削減率となった。ソーラーコレクタを用いた RUN6 では、夏季に燃料電池排熱の利用率が低下するため、削減率は燃料電池単体の RUN3.1, RUN3.2 と同程度であり、太陽光発電の 40%程度にとどまった。

図-11 に計算種類による CO₂ 削減率の比較を示す。一次エネルギー削減率と同様に、太陽光発電を利用した RUN1, RUN4, RUN5, RUN7 で削減率が高くなる結果となった。最も削減率が高かったのは RUN7 で、その値は 71.0%であった。

まとめ

- 1) 戸建て住宅におけるエネルギーシステムとして、従来型、従来型エネルギーの新利用形態、複合型、独立型の 4 種類に分類した。独立型システムを構築する前段階として、従来型エネルギーの新利用形態として位置付けられる燃料電池、自然エネルギー、蓄熱サイクルとの適正な組合せを提示することが急務である。
- 2) 実験住宅における燃料電池の導入計画について示した。第一次計画では、燃料電池の発電効率、排熱回収特性に関する基礎的な実験を行い、第二次計画以降の実験方針としては、自然エネルギーと燃料電池を複合的に組み合わせた応用実験とその評価を行う予定である。
- 3) 自然エネルギーと燃料電池の複合利用を考慮した電力・給湯評価シミュレータを作成した。燃料電池のみを導入した場合の一次エネルギー削減率は、電主熱従型、熱主電従型で、それぞれ 19.3%、17.3%となった。戸建て住宅における燃料電池導入の一次エネルギー削減効果は、ソーラーコレクタとほぼ同等であったが、太陽光発電の 40%程度にとどまっている。今後、これらの手法の適正な組合せに関する検討を実施する必要がある。

本研究の一部は、科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業における“環境低負荷型の社会システム”研究領域 [研究統括：茅 陽一教授 (慶應義塾大学)] の公募研究“自立型都市を目指した都市代謝システムの開発” [研究代表者：柏木孝夫教授 (東京農工大学)] によった。

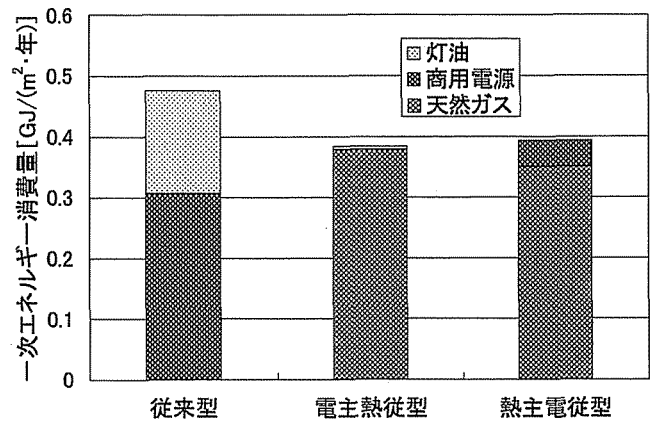


図-9 運転種類による一次エネルギー消費量

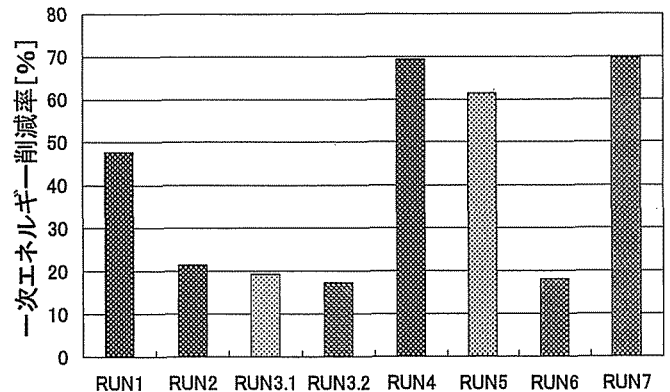


図-10 一次エネルギー削減率の比較

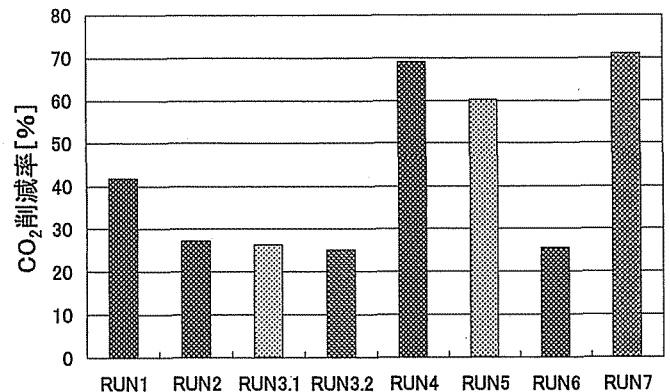


図-11 CO₂ 削減率の比較

参考文献

- 1) 濱田靖弘・横山真太郎・中村真人・落藤 澄・長野克則: 自然エネルギーをハイブリッドに活用したエネルギー自律型住宅に関する研究 (第 2 報-実験住宅における運転実績とその評価), 空気調和・衛生工学会論文集, 76 (2000-1), pp.59~67
- 2) 濱田靖弘・落藤 澄・中村真人・土師範子・阿部琢哉: 北海道におけるローエネルギーハウスのライフサイクル分析とその導入可能性評価, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2000-9), pp.1553~1556
- 3) K. Ochiuji, Y. Hamada and M. Nakamura: Thermal Energy Storage in Japan, Proceedings of 8th International Conference on Thermal Energy Storage-TERRASTOCK 2000 (Aug, 2000), pp.61~67